

九州共立大学総合研究所紀要

2009年4月

Journal of Kyushu Kyoritsu University Research Center

第2号

目 次

【 審査付論文 】

気まぐれ因子を付加したPSOの提案とそのチューニングに関する基礎的研究	三原徹治、許 佳芸、沈 曉鵬	1
非クリティカル作業の分割を導入したプロジェクト管理における資源需要平滑化へのGAの適用に関する基礎的研究	三原徹治、王 克成、範 国輝	11
グリーン・ツーリズム施設とパークマネジメントに関する研究（上海およびタイの調査を中心として）	八島雄士	21
Nb ₂ O ₅ 添加による水素吸蔵合金の水素吸収速度に及ぼす影響	林 信孝、宮入嘉夫、深田 智、牧原義一	29
高温化学ヒートポンプと核熱利用による水素の効果的製造	深田 智	35
開端杭の先端閉塞特性に関する研究	狩山 裕、前田良刀、山田益司	43
室壁面の乱反射率を導入した幾何音響シミュレーション	中野国隆、古澤 眸、江渕克志、古屋 浩、黒木荘一郎	47
オーディトリウム空間の幾何的対称性と音場特性に関する研究	古澤 眸、片野坂好子、古屋 浩	57
サルシノクリシスの抗菌作用	西尾恵里子、榎 節子、山口裕司、竹中裕行、富田純史	71

【 研究論文 】

わが国「中小企業の会計に関する指針」の課題と展望	岡部勝成	75
Einstein-Friedmann 方程式における非線形ダイナミックスの研究	田中洋介、首藤武史、吉永鐵太郎、生地文也	81
Relationship between Sensitivity Enhancement and Adsorption of Surfactant-Methylene Blue Complex on filter paper on Spectrophotometric Rapid Determination Method of Anionic Surfactants	Tetsutaro YOSHINAGA, Chiaki TARARA, Yoshiyuki MICHIAKI, Takuro YOSHIIHRO, Masaaki KOGA, and Toshifumi TANIMURA	87
酸素ガス雰囲気内で電子ビーム蒸着法で形成したチタン酸化薄膜の研究（結晶学性質と光触媒効果）	能智紀台、生地文也	95
メタンイオンビームによるSi(100)基板上ダイヤモンド薄膜成長に関する研究 I（実験装置とその特性）	生地文也	99
LSAを用いた英語教育支援システムの提案～学生のやる気と学ぶ楽しさを支援するために～	森元史朗、徳留由佳、沈 曉、三原徹治、金丸千雪	105
博多湾におけるGISを用いた沿岸域環境データベースの構築と環境変化に関する一考察	原 喜則、小島 治幸、李 云鵬	115
側方移動を発生した軟弱粘土地盤および橋台基礎の変形特性について	荒巻真二、山田益司、鳥野 清、前田良刀、狩山裕	121
生石灰を用いた環境に優しい廃棄物処理の研究	中村英嗣、古賀道生、波多祐史	125
洞海湾に自生する絶滅危惧植物の調査保護活動	成富 勝、安田 繁、亀田 伸裕	129
洞海湾周辺の塩生植物(シバナ)の環境調査に関する研究	徳留大地、安田繁、亀田伸裕、楊菲、田中邦博、林賢矢	133
図書館情報リテラシー教育の新たな試み —経済学部「キャリア基礎演習」の授業支援をめぐって—	矢崎美香、上井由美子、大松真弓、松田高史	137
図書館情報（リテラシー）教育への取り組みとその効果について —中期アクションプランをきっかけに—	矢崎美香、上井由美子、大松真弓、成富 勝	143
黒潮影響下における潮位変化の可視化と特徴的パターンの抽出	緒方純俊、桐本賢太、川上高弘	149

気まぐれ因子を付加した PSO の提案とそのチューニングに関する基礎的研究

九州共立大学大学院工学研究科電子情報工学専攻
三原 徹治, 許 佳芸, 沈 曉鵠

A study on the PSO added fancy effect and its tuning up by Real Coded Genetic Algorithm
Tetsuji MIHARA, Jiayi XU and Xiaoqing SHEN

J. Kennedy and R. Eberhart have proposed the Particle Swarm Optimization (PSO) in 1995. PSO is a meta-heuristic optimum technique based on the swarm intelligence. Because of the simple operations and high quality of searching optimal solution, PSO has been used as the optimization tool for many continuous optimal problems.

This paper presents an improvement for original PSO. The original PSO has a weak point that is the search area is limited in the searching process. Overcoming this weak point, the PSO added fancy effect (fancy PSO, fPSO) is proposed. The characteristics of fPSO are investigated by two numerical examples. Moreover, the tuning up the calculation parameters of fPSO is attempted by using the Real Coded Genetic Algorithm.

Key words: Particle Swarm Optimization, Fancy effect, Real Coded Genetic Algorithm

1 はじめに

生物や物理現象を元に構成された最適化手法はメタヒューリスティック Meta-heuristics と総称されるが、そのひとつに群知能 Swarm Intelligence を利用した探索手法がある。群知能とは単純な知能を持つ個体が集団となることで創発してくる知能のことである[1]。1995年に J. Kennedy and R. Eberhart は鳥の群れや魚の群泳など群れをなして移動する生物の行動パターンを数理モデル化し、最適化に応用した Particle Swarm Optimization (PSO) を提案した。単純なオペレーションでありながら高い最適解探索能力を発揮することから PSO はさまざまな最適化問題に適用されてきた。しかし、後述するように Kennedy らが示したオリジナルな PSO には、ある条件下では粒子の移動範囲が限定される状態（本研究では偏移動状態と呼ぶ）が生じるという問題点が指摘される。

本研究は、この問題点を改善するひとつの方策として気まぐれ因子 *fancy* を付加した PSO (fPSO) の提案を柱とし、fPSO の解法特性および計算パラメータのチューニングに関する検討結果を報告するものである。その構成は次のようである。

まず、Kennedy らが示したオリジナルな PSO を概説するとともに偏移動状態について説明する。次に、この問題点を解決し、さらに最適解探索能力を向上させる一つの方法として、気まぐれ因子 *fancy* を付加した fPSO を提案し、その解法特性を2つの多峰性関数の最大化問題（ベンチマーク NAK と KAT）に対する数値実験に

より検討する。さらに、独自に開発した実数型遺伝子を組込んだ遺伝的アルゴリズム Real Coded Genetic Algorithm (RscGA と名付けたが、その詳細については附録参照) を用いて fPSO の計算パラメータをチューニングする手法とその結果について報告する。

2 PSO 概説

2.1 オリジナルな PSO の基本概念

Kennedy らが示したオリジナルな PSO の基本的概念は以下のものである[2,3]。

- ◇ 多次元の解空間を粒子 Particle が群れをなして動き廻り、その移動の過程で最適な位置(評価関数 $f(\mathbf{X})$ の最大化問題の場合には、全域的に最も評価関数値が高い点、最適解)を見つける。
- ◇ それぞれの粒子は多次元空間の点として扱われる。それぞれの粒子の移動は自己の移動軌跡および他粒子の移動軌跡によって定まる。
- ◇ 粒子 m は時刻 k までの自己の移動軌跡における最良点 Personal best position \mathbf{P}_m^k (評価関数値 $f(\mathbf{P}_m^k)$ が過去に位置した場所の評価関数値の最高値)を記憶している。また自己も含めた全粒子の時刻 k までの移動軌跡における最良点 Group best position \mathbf{G}^k も記憶している。
- ◇ ある粒子 m が次に移動する方向は以下の3つの方向ベクトルの和とする(図-1参照)。
 - (a) 直前の移動方向(慣性方向)。
 - (b) Personal best position \mathbf{P}_m^k への方向。

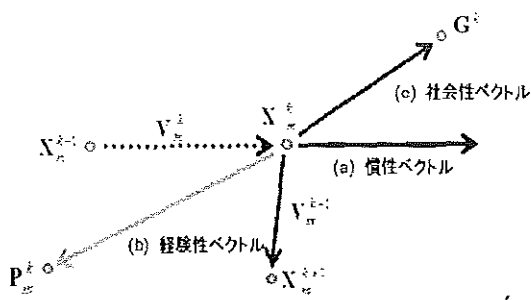


図-1 PSOの基本的概念図

2.2 オリジナルな PSO の基本的な解法アルゴリズム
基本的概念に基づく解法アルゴリズム (処理手順) は以下のようである。

Step0 次元数 N , 粒子数 M , 最大繰返し回数 K , 初期粒子位置決定のための変数ベクトル \mathbf{X} の上・下限値ベクトル $\mathbf{X}_{\max}, \mathbf{X}_{\min}$, 慣性係数 w , 認知的係数 c_1 , 社会的係数 c_2 , 変化方向速度の限界値比率 V_{\lim} を設定する。

Step1 初期($k=0$)の粒子位置, 速度の決定: N 次元の解空間内に全 M 個の粒子位置 $\mathbf{X}_m^0 (m=1,2,\dots,M)$ を $\mathbf{X}_{\min} \leq \mathbf{X}_m^0 \leq \mathbf{X}_{\max}$ を考慮してランダムに決める。同時に速度 \mathbf{V}_m^0 もランダムに与える。

Step2 粒子 m の時刻 k における位置 \mathbf{X}_m^k での評価関数値 $f(\mathbf{X}_m^k)$ を算出する。

Step3 時刻 k までの各粒子の Personal best position \mathbf{P}_m^k を更新する。すなわち, $f(\mathbf{X}_m^k) \leq f(\mathbf{P}_m^{k-1})$ ならば $\mathbf{P}_m^k = \mathbf{X}_m^k$, そうでないときには $\mathbf{P}_m^k = \mathbf{P}_m^{k-1}$ 。

Step4 \mathbf{P}_m^k の更新と同様に, 時刻 k までの Group best position \mathbf{G}^k を更新する。

Step5 時刻 k における各粒子の移動速度 \mathbf{V}_m^{k+1} の算出: r_1 と r_2 を一様乱数 $u(0,1)$ として式(1)で \mathbf{V}_m^{k+1} を算出する。

$$\mathbf{V}_m^{k+1} = w\mathbf{V}_m^k + c_1 r_1 \frac{(\mathbf{P}_m^k - \mathbf{X}_m^k)}{\Delta t} + c_2 r_2 \frac{(\mathbf{G}^k - \mathbf{X}_m^k)}{\Delta t} \quad (1)$$

式(1)で算出された \mathbf{V}_m^{k+1} が変化方向速度の限界値 $V_{\lim} (\mathbf{X}_{\max} - \mathbf{X}_{\min})$ より大きい場合には移動量が大きすぎると判断し, 式(2)で修正する。

$$\mathbf{V}_m^{k+1} = V_{\lim} (\mathbf{X}_{\max} - \mathbf{X}_{\min}) \quad (2)$$

なお, 式(2)において Δt は時間刻みであり, 常に $\Delta t = 1$ とする。また, V_{\lim} は変化方向速度の限界値比率であり, $V_{\lim} = 0.5 \sim 0.75$ 程度の定数である。

Step6 時刻 $k+1$ における各粒子の位置の決定: 粒子 m の時刻 $k+1$ における位置 \mathbf{X}_m^{k+1} は式(3)で決定される。

$$\mathbf{X}_m^{k+1} = \mathbf{X}_m^k + \mathbf{V}_m^{k+1} \Delta t \quad (3)$$

Step7 終了判定: $k \leftarrow k+1$ と置換し, $k > K$ であれば, その時点の \mathbf{G}^k を最良解として計算を終了する。そうでないとき新たな位置への移動のために Step2 へ戻る。

2.3 オリジナルな PSO の問題点

PSO では式(1)によって移動速度 \mathbf{V}_m^{k+1} が算出される。このため $\mathbf{X}_m^{k-1} \rightarrow \mathbf{X}_m^k$ の移動方向 \mathbf{V}_m^k ベクトルを中心に考えたとき, \mathbf{P}_m^k と \mathbf{G}^k が同じサイドに存在する場合には \mathbf{X}_m^{k+1} はそのサイドにしか現れない状態, つまり偏移動状態が生じる。図-2 に $c_1 = c_2 = 1.00$ のときの \mathbf{X}_m^{k+1} の移動可能範囲を領域で示す。

このサイドに全域最適解が存在する場合には, 最適解探索に関して問題はない。しかし, 逆サイドに全域最適解がある場合には, その解に近づくことが極めて困難になるという問題点が発生する。

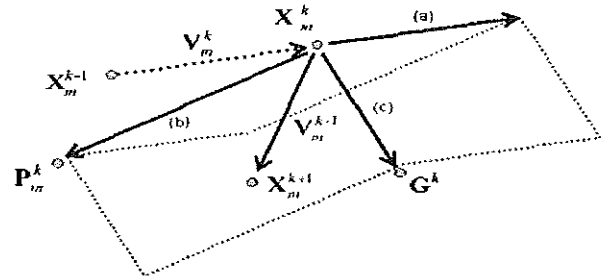


図-2 $c_1 = c_2 = 1.00$ のときの \mathbf{X}_m^{k+1} の移動可能範囲

3 fPSO の提案とベンチマークテスト

3.1 気まぐれ因子 fan の付加

この偏移動状態が生じる問題点を解決する一つの方法として, 気まぐれ因子 fan を付加した fPSO を提案する。つまり, ①他の計算パラメータの付与と同時に気まぐれ指数 fan を与える。②式(1)による移動速度 \mathbf{V}_m^{k+1} の算出時に気まぐれ指数 fan の割合でランダムに認知的係数 c_1 および社会的係数 c_2 の符号+を-に変更する。

この操作によって偏移動状態にある粒子でも時として \mathbf{P}_m^k と \mathbf{G}^k が位置するサイドではないサイドへの移動が可能になり, スムーズな最適化の妨げとなる偏移動状態を解消することができる。

この気まぐれ因子 fan の付加を, PSO と同じメタヒューリスティックである遺伝的アルゴリズム Genetic Algorithm, GA との比較の観点から検討する。PSO は, 時間の経過に従ってなるべく多くの粒子のそれぞれがなるべく良好な評価を得ることを行動目的としている解法と解釈することができ, 集団山登り法という異名を持つ GA との類似点である。つまり, PSO の移動速度 \mathbf{V}_m^{k+1} の算出は GA の交叉オペレーションに相当する。

しかし交叉オペレーションのほかに突然変異オペレーションが組込まれているGAに対してPSOでは突然変異オペレーションに相当するものが存在しない。この点において気まぐれ因子 *fan* の付加は、GAの突然変異オペレーションに相当するものと位置づけることができる。

3.2 ベンチマーク NAK[2]

ベンチマーク NAK は、式(4) に示す関数 $f(x, y)$ の最大化問題である。

$$f(x, y) = e^{-2 \log(2) \left(\frac{x-0.1}{0.8}\right)^2} \cdot \sin(5\pi x) + e^{-2 \log(2) \left(\frac{y-0.1}{0.8}\right)^2} \cdot \sin(5\pi y) \quad (4)$$

実変数 x と y の定義域を $0.0 \leq x \leq 1.0$, $0.0 \leq y \leq 1.0$ とすると、式(4)の関数 $f(x, y)$ は表-1に示す9つのピーク値をもつ。その等高線図を図-3に示す。このような1つの最適解の周辺に複数の準最適解(最適値に近い値を持つ局所的最適解)を持つ関数は多峰性関数といい、騙し関数とも呼ばれる。

表-1 NAKのピーク値

峰番号	x	y	$f(x, y)$
①	0.1	0.1	2.000
②	0.5	0.1	1.861
③	0.1	0.5	1.861
④	0.5	0.5	1.721
⑤	0.1	0.9	1.548
⑥	0.9	0.1	1.548
⑦	0.9	0.5	1.408
⑧	0.5	0.9	1.408
⑨	0.9	0.9	1.095

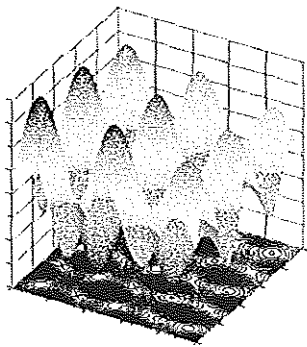


図-3 NAKの等高線図

3.3 ベンチマーク KAT[3]

ベンチマーク KAT は、式(5) に示す関数 $f(x, y)$ の最大化問題である。

$$f(x, y) = -\frac{3}{2} \left\{ \begin{aligned} &(x^4 - 24x^3 + 193x^2 - 570x + 400) \\ &+ (y^4 - 21y^3 + 151y^2 - 411y + 280) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

実変数 x と y の定義域を $0.0 \leq x \leq 12.0$, $0.0 \leq$

$y \leq 12.0$ とすると、式(5)の関数 $f(x, y)$ は表-2に示す4つのピーク値をもち、図-4のような等高線図である。ベンチマーク KAT も NAK と同様に騙し関数である。

表-2 KATのピーク値

峰番号	x	y	$f(x, y)$
①	2.43	2.31	373.5
②	2.43	7.57	238.6
③	9.18	2.31	190.7
④	9.18	7.57	55.8

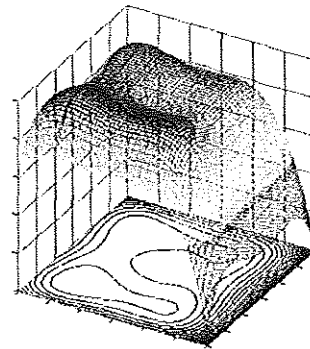


図-4 KATの等高線図

3.4 NAKを对象とした数値実験結果

ベンチマーク NAK を対象として慣性係数 $w=1.0$, 認知的係数 $c_1=2.0$, 社会的係数 $c_2=2.0$ という一般的な値を設定し、変化方向速度の限界値比率 V_{lim} を 0.40, 0.45, ..., 0.70, 気まぐれ指数 $fan = 0.00, 0.05, \dots, 0.30$ とパラメトリックに与えて数値実験を行った。その結果の一部として、表-3には粒子数 $M=20$, $fan=0.00, 0.05, 0.10, 0.15$ の場合を、表-4には粒子数 $M=5$, $fan=0.00, 0.20, 0.25, 0.30$ の場合をそれぞれ示す。

なお、数値実験には擬似乱数を用い、その核は常に一定とする。したがって、粒子数が同じ場合には粒子の初期配置は同じである。

また、表-3 および 4 に示す最良解出現時刻は、それぞれの最適化計算結果として得られた最良解が初めて出現した時刻を、最適化計算過程を遡って調べたものである。

粒子数 $M=20$ では $fan=0.00$ の気まぐれ因子の付加がないオリジナルな PSO でもすべてのケースで最適解が得られており、粒子数を大きく設定すれば NAK のような騙し問題に対しても問題なく最適解を探索することができることを確認した。 $fan=0.00$ 以外の pPSO

もほとんどのケースで最適解が得られており、最適解を発見する時刻も含めて $M=20$ では気まぐれ因子 fan の効果を確認することができなかった。

表-3 NAK：粒子数 $M=20$ のときの数値実験結果

fan	V_{lim}	*	$f(x,y)$	判定
0.00	0.50	56	1.9991081	Optimum
	0.55	44	1.9988954	Optimum
	0.60	93	1.9999957	Optimum
	0.65	84	1.9980664	Optimum
	0.70	79	1.9999935	Optimum
0.05	0.50	99	1.9993130	Optimum
	0.55	31	1.9980625	Optimum
	0.60	98	1.9993388	Optimum
	0.65	84	1.9999487	Optimum
	0.70	14	1.9841579	Semi-Optimum
0.10	0.50	92	1.9999698	Optimum
	0.55	99	1.9999808	Optimum
	0.60	18	1.9983749	Optimum
	0.65	47	1.9996605	Optimum
	0.70	67	1.9951273	Optimum
0.15	0.50	68	1.9991354	Optimum
	0.55	21	1.9999585	Optimum
	0.60	78	1.9954938	Optimum
	0.65	77	1.9993727	Optimum
	0.70	83	1.9783577	Optimum

*=最良解出現時刻, Optimum=最適解,
Semi-Optimum=準最適解

表-4 NAK：粒子数 $M=5$ のときの数値実験結果

fan	V_{lim}	*	$f(x,y)$	判定
0.00	0.50	41	1.7197833	峰④に騙された解
	0.55	78	1.9730836	
	0.60	64	1.9435191	
	0.65	95	1.8114021	峰②に騙された解
	0.70	99	1.9361567	
0.20	0.50	85	1.9901076	Optimum
	0.55	77	1.9864871	Semi-Optimum
	0.60	52	1.9800174	Semi-Optimum
	0.65	82	1.9252402	
	0.70	78	1.9984377	Optimum
0.25	0.50	82	1.9941047	Optimum
	0.55	94	1.9990303	Optimum
	0.60	85	1.9929962	Optimum
	0.65	37	1.9885348	Semi-Optimum
	0.70	76	1.9868910	Semi-Optimum
0.30	0.50	82	1.7926209	峰③に騙された解
	0.55	85	1.9345893	
	0.60	70	1.8568971	峰②に騙された解
	0.65	53	1.9748348	
	0.70	67	1.9963113	Optimum

*=最良解出現時刻, Optimum=最適解,
Semi-Optimum=準最適解

しかし、表-4に示す $M=5$ のときには $fan=0.00$ のオリジナルな PSO では最適解はおろか準最適解すら発見できず、 $V_{lim}=0.50$ と 0.65 のケースでは峰④または峰②に騙された解が出現している。小さな粒子数では、おのずと探索する領域が限られ最適解を発見する確率が下がるであろうことは事前に予想していたが、予想以上に劣悪な結果である。峰④や峰②に騙される場合もある

ことから、群れとしてのルールに拘束され、偏移動状態から抜け出すことができないことが原因と考えられる。

表-4には示していないが、 $fan=0.05, 0.10, 0.15$ の場合も $fan=0.00$ とほぼ同様の結果であった。fPSOでも fan 値が小さい場合にはオリジナルな PSO と同程度の最適解探索能力しかないのである。

これに対し $fan=0.20, 0.25$ ではほとんどのケースで最適解もしくは準最適解が得られている。気まぐれ効果が発揮され偏移動状態から抜け出すことができ、結果的に探索する領域が広がり、より良好な解を発見する確率が上がったためと考えられる。

ただし、 $fan=0.30$ とすると最適解発見率が極端に低下する。これは、 fan 値が大きすぎるとランダム探索に近い状態になることが原因と考えられる。

以上の観察から、粒子数が小さい場合のベンチマーク NAK では安定的に良好な解を得るための推奨値は $fan=0.20\sim 0.25$ であることが認められた。

3.5 KATを対象とした数値実験結果

ベンチマーク KATを対象として慣性係数 $w=1.0$ 、認知的係数 $c_1=2.0$ 、社会的係数 $c_2=2.0$ という一般的な値を設定し、変化方向速度の限界値比率 V_{lim} を $0.40, 0.45, \dots, 0.75$ 、気まぐれ指数 $fan=0.00, 0.05, \dots, 0.30$ とパラメトリックに与えて粒子数 $M=5$ における数値実験を行った。その数値実験結果を表-5に示す。

すべてのケースにおいて最適解である峰①以外の峰を指向する解は得られていない。ベンチマーク KATでは峰の数が4しかなく、騙し問題としての程度がベンチマーク NAKに比較して低いと思われる。つまり、本例ではfPSOの最適解である峰①への収束能力を検討したことになる。

しかし、表-4に示すベンチマーク NAKの場合に比較すると最適解および準最適解を発見する比率がかなり小さい。これは、ベンチマーク KATの最適解である峰①の近傍が比較的なだらかなために、峰①の領域には容易にたどり着くが、その領域内でより良好な解へ移動しにくいと考えられる。

$fan=0.00$ でも最適解および準最適解がそれぞれ1Caseずつ得られているが、 $fan=0.25$ では最適解が1Case、準最適解が2Case得られており、わずかな差ではあるが気まぐれ因子の付加効果を確認することができた。

最適解および準最適解が最も多く得られた $fan=0.25$ は、ベンチマーク NAKにおける推奨値 $fan=0.20\sim 0.25$ の範囲内である。

表5 KAT：粒子数 $M=5$ のときの数値実験結果

fan	V_{lim}	*	$f(x, y)$	判定
0.00	0.50	80	341.62981	Semi-Optimum Optimum
	0.55	91	327.59592	
	0.60	93	372.23425	
	0.65	40	373.34021	
	0.70	29	320.84862	
0.05	0.50	57	372.42381	Semi-Optimum
	0.55	99	367.43030	Optimum
	0.60	65	348.26676	
	0.65	93	373.06129	
	0.70	18	369.19905	
0.10	0.50	76	372.72347	
	0.55	47	368.37516	Semi-Optimum
	0.60	45	372.14344	
	0.65	45	363.11591	
	0.70	65	363.08133	
0.15	0.50	77	371.20272	
	0.55	7	369.77293	Optimum
	0.60	37	363.85287	
	0.65	57	361.86157	
	0.70	51	371.29188	
0.20	0.50	62	373.30868	
	0.55	43	372.56168	Optimum
	0.60	87	368.52882	
	0.65	51	369.67329	
	0.70	99	368.72777	
0.25	0.50	36	371.91488	
	0.55	84	373.24107	Optimum
	0.60	28	372.04701	
	0.65	76	369.59260	
	0.70	31	360.71094	
0.30	0.50	51	369.78491	
	0.55	83	362.65903	
	0.60	14	371.36192	
	0.65	5	357.11739	
	0.70	45	372.97925	

*=最良解出現時刻, Optimum=最適解,
Semi-Optimum=準最適解

4 RscsGA による fPSO のチューニング

4.1 チューニング対象

fPSO において設定すべきパラメータは次の3種類に分類することができる。

カテゴリ【1】(対象問題に依存するパラメータ)：

次元数 N , 初期粒子位置決定のための変数ベクトル \mathbf{X} の上・下限値ベクトル $\mathbf{X}_{max}, \mathbf{X}_{min}$

カテゴリ【2】(大きな値を設定すれば最適解が得られやすくなるが、同時に計算量が大きくなるパラメータ)：

粒子数 M , 最大繰返し回数 K

カテゴリ【3】(最適化計算に大きな影響を及ぼすことは明白だが、設定値の指針が曖昧なパラメータ)：

慣性係数 w , 認知係数 c_1 , 社会係数 c_2 , 変化方向速度の限界値比率 V_{lim} , 気まぐれ因子 fan

カテゴリ【1】および【2】のパラメータは fPSO のチューニングとは無関係なパラメータであるので、カテゴリ【3】のパラメータの適切化=fPSO のチューニングである。

まず、式(1)による時刻 k における各粒子の移動速度 V_m^{k+1} の算出において互いに相対的な関係にある慣性係数 w , 認知係数 c_1 , 社会係数 c_2 では、いずれかを基準とすることができる。ここでは式(1)においてランダム性のない慣性係数 w を基準に選び、 $w=1.0$ と固定する。式(1)において認知係数 c_1 , 社会係数 c_2 にはそれぞれ r_1 と r_2 が乗じられる。 r_1 と r_2 は一様乱数 $u(0,1)$ でそれぞれの期待値は 0.5 であり、認知性と社会性の重みが慣性と同程度になるように設定する場合には認知係数 c_1 , 社会係数 c_2 の中心値は 2.0 となる。よって、ここでは認知係数 c_1 および社会係数 c_2 をチューニング対象に選び、そのチューニング範囲は表4 のように与える。

次に、式(2)に現れる変化方向速度の限界値比率 V_{lim} は各粒子の移動量に大きな影響を及ぼすパラメータである。しかし fPSO による最適化に必須のパラメータではなく、チューニング対象というよりは最適化計算の効率化のための計算パラメータという性格が強い。よってここでも $V_{lim}=0.50, 0.51, \dots, 0.75$ と 26 通りの値を設定し、チューニング評価のための計算パラメータとする。

最後に、従来の PSO と fPSO との最大かつ唯一の相違点である気まぐれ因子 fan をチューニングの対象外とすることはできない。そのチューニング範囲の下限値は、従来の PSO と同じ意味をもつ $fan=0.0$ である。上限値を fan^U と表記すると、チューニング範囲は表6 に示すように与えることができる。

表6 チューニング範囲

チューニング対象	下限値	上限値
認知係数 c_1	$c_1^L (\leq 2.0)$	$c_1^U (\geq 2.0)$
社会係数 c_2	$c_2^L (\leq 2.0)$	$c_2^U (\geq 2.0)$
気まぐれ因子 fan	0.0	fan^U

4.2 最適性規準と最適化ツール

3種類のチューニング対象はすべて明確な上・下限値を有する連続変数である。「最適チューニング状態」は、これら3種類の連続変数値の組合せのうちで「最も優れた組合せ」である。「最も優れている」の判断規準(=最適性規準)として、たとえば「最も小さな繰返し回数で最適解を得る組合せ」なども考えられるが、fPSO の適用性を視野に「最も安定的に最適解を探索できる組合せ」を「最適チューニング状態」と評価することは極めて自然である。

したがって、ある計算パラメータの下で最適解が得られた場合にはかなり高い Score (以後の数値実験では 15 点) を、準最適解が得られた場合には比較的高い Score

(以後の数値実験では5点)をそれぞれ与え、その合計 Score 値の大きいものほど良好と判定する最適性規準を採用する。なお、計算パラメータには前述したように変化方向速度の限界値比率 $V_{lim} = 0.50, 0.51, \dots, 0.75$ (26通り)を用いる。

定式化された最適化問題は、すべての変数が明確な上・下限値を有する連続変数である最適化問題であるので、その解法には RscsGA (実数型遺伝子を組込んだ scsGA, 附録参照) を最適化ツールとして用いることができる。

4.3 ベンチマーク NAK を対象とした数値実験

$c_1^L, c_1^U, c_2^L, c_2^U$ および fan^U を表-7 のように Run A~E と5通り設定し、RscsGAによる最適化計算を行う。RscsGAにより確実に最適解が得られるよう計算パラメータとして十分に大きな人口数=100 (交配個体数=10,11,...,20) と計算世代数=100 を設定する。その他の計算パラメータは突然変異発生確率=0.3, ブレンド交叉の拡張係数=0.5, 実数遺伝子の突然変異における

値域幅変動係数=0.5 である。RscsGAによるチューニング結果を表-7に示す。

Run A はすべての上・下限値制約を実質的にフリーとしたものであり、最も基本的な Run である。チューニング前に予想していた解は $c_1 \approx 2.00, c_2 \approx 2.00, fan \approx 0.200$ であったが、チューニング結果は $c_1 \approx 1.88, c_2 \approx 1.90, fan \approx 0.0765$ という意外な組合せであった。しかし、その Score=380 で、たった1Caseで準最適解であるほかはすべて最適解が探索されており、Scoreの満点=360とほぼ同じScoreである。このような c_1, c_2 および fan 値の組合せが存在することを予想していなかったため、RscsGAの最適解探索能力の高さとIPSOの奥深さを再確認させられた。

そこで c_1 と c_2 の上・下限値の幅を狭め Run B としたが、 $fan \approx 0.0762$ は Run A とほぼ同じであった。Run A と比較すると Score 値は若干小さいが、27Case中26Caseで最適解もしくは準最適解が得られており、十分なチューニングができています。

表-7 NAK:チューニング結果

Run	c_1^L	c_1^U	c_2^L	c_2^U	fan^U	c_1	c_2	fan	*	Optimal	Semi Opt
A	1.8	2.2	1.8	2.2	0.3	1.880480	1.901459	0.0765	380	25	1
B	1.9	2.1	1.9	2.1	0.3	1.900002	1.922924	0.0762	355	23	2
C	2.0	2.0	2.0	2.0	0.3	2.0	2.0	0.1903	240	15	3
D	1.8	2.2	1.8	2.2	0.0	1.841695	1.802687	0.0	255	17	0
E	1.9	2.1	1.9	2.1	0.0	1.939380	2.087652	0.0	215	14	1

*: Score, Optimal: 最適解が得られた Case 数, Semi Opt: 準最適解が得られた Case 数

表-8 NAK: センシティブリティ検討結果

Run	c_1	c_2	fan	*	Optimal	Semi Opt
A	1.880480	1.901459	0.0765	380	25	1
Af1	1.880480	1.901459	0.077	380	25	1
Af2	1.880480	1.901459	0.08	155	9	4
Ac	1.88048	1.90146	0.0765	365	24	1

*: Score, Optimal: 最適解が得られた Case 数, Semi Opt: 準最適解が得られた Case 数

表-9 KAT:チューニング結果

Run	c_1^L	c_1^U	c_2^L	c_2^U	fan^U	c_1	c_2	fan	*	Optimal	Semi Opt
A	1.8	2.2	1.8	2.2	0.3	2.200000	1.837421	0.2918	320	19	7
B	1.9	2.1	1.9	2.1	0.3	2.097870	2.100000	0.2790	310	18	8
C	2.0	2.0	2.0	2.0	0.3	2.0	2.0	0.0365	200	10	10
D	1.8	2.2	1.8	2.2	0.0	2.191605	1.948964	0.0	220	14	2
E	1.9	2.1	1.9	2.1	0.0	1.941521	1.913161	0.0	170	11	1

*: Score, Optimal: 最適解が得られた Case 数, Semi Opt: 準最適解が得られた Case 数

さらに c_1 と c_2 の上・下限値の幅を狭める意味で $c_1 = c_2 = 2.00$ と固定し、Run C とした。 $fan \approx 0.19$ となり、チューニング前に予想した解に近い値が得られた。しかし、その Score 値は 240 しかなく、Run A や Run B に比較するとかなり低い。

次に、 $fan^U = 0.0$ に設定して従来の PSO のチューニングに相当する Run D を実行した。その結果、 $c_1 \approx 1.84, c_2 \approx 1.80$ が得られている。この値は従来の PSO による数値計算に多用されてきた値と近い。しかし、その Score=255 と最適解が得られた Case 数=17 は Run A

よりかなり小さい。これは、気まぐれ因子を導入しない従来のPSOではチューニングしても約65%程度の最適解探索率が限界であることを意味している。 c_1 と c_2 の上・下限値の幅をさらに狭めたRun Eでは、Run Dとも異なる c_1 、 c_2 値が得られ、そのScore値はさらに劣化した。

fan 、 c_1 および c_2 値のセンシティブリティを検討するためにRun Aの結果から表8のように c_1 、 c_2 および fan 値を設定し、それぞれの場合のScoreを算出した。Run Af1およびAf2は fan 値の感度を、Run Acは c_1 および c_2 値の感度を検討したものである。

Run Af1のScoreがRun Aと同じことから fan 値の感度は比較的鈍いことがわかる。しかし、Run Af2から fan 値には有効桁数3程度が必要ということもわかる。これに対して c_1 および c_2 値の感度はかなり高い。Run Aでは有効桁数が7であるが、有効桁数を6としたRun AcのScore値はRun Aより劣化している。 c_1 および c_2 値の感度が予想を超えて高いことが判明したが、これもチューニングツールにRscsGAを用いたからである。すなわち、このように比較的大きな有効桁数を必要とする実数型変数の最適化においても、RscsGAはほぼ問題なく対応することができており、RscsGAの新たな威力を確認することができた。

4.4 ベンチマークKATを対象とした数値実験

NAKとまったく同じ c_1^L 、 c_1^U 、 c_2^L 、 c_2^U 、 fan^U 値およびRscsGAの計算パラメータを用いてベンチマークKATを対象とした数値実験を行った。その結果を表9に示す。

Run A~Cの fan 値の最適化を含むfPSOのチューニングでは、Run A,B,Cの順に得られた fan 値が小さくなるというNAKの場合とまったく逆の傾向を示した。得られたScore値もNAKの場合より全般に小さく、最適解近傍がなだらかであるというKATの最適化問題としての厄介さの影響が現れている。

$fan^U=0.0$ の従来のPSOのチューニングに相当するRun D,Eで得られた c_1 、 c_2 値はNAKの場合と近いものであるが、Score値はかなり小さい。

4.5 数値実験結果に対する考察

2つのベンチマークテストで得られたそれぞれ5 Runの結果を単純にScore値の降順に並べるとRun A→D→C→B→Eとなり、いずれも同じ並びである。この観察だけに注目すれば、fPSOのチューニングに関して何らかの規則性が得られそうであるが、2つのベンチマークで得られた c_1 、 c_2 および fan 値には関連性が

ほとんど見られず、一般に対象問題によって最適な c_1 、 c_2 および fan 値が大きく異なると解釈せざるを得ない。

しかし、対象問題によらず安定的に最適解を探索するfPSOのパラメータの組合せは存在するはずであり、今回使用したチューニング方法に改善余地があることがわかる。つまり、今回使用したチューニングのための最適化問題はあくまでも最適な c_1 、 c_2 および fan 値の組合せを求めるものであり、最適化計算に使用したRscsGAの性能の高さもあいまって、ベンチマークNAKのRun Aのようにほぼ満点のScore値を探索しているRunに代表されるようになりかなり極端な解が得られている。「対象問題によらずfPSOによって安定的に最適解を探索する」の「安定的」とは必ずしも満点に近いScore値を期待するものではなく、たとえば満点の85%程度のScore値でも十分である。換言すれば、対象問題によってパラメータ値を変更しなければならないfPSOよりは、どのような問題に対しても「安定的」に最適解を探索できるパラメータ値が設定されたfPSOのほうが適用性に優れる。この観点からチューニング方法の改善は今後の研究課題である。

5 おわりに

PSOは極めて簡単な近似最適化アルゴリズムであり、利用する情報量がとても少ないという優れた特徴をもつが、スムーズな最適化の妨げとなる偏移動状態が存在する場合が生じるという欠点も指摘される。

本研究では、この問題点を解決する一つの方法として、気まぐれ因子 fan を付加したfPSOを提案した。この単純な操作によって偏移動状態にある粒子でも時として偏移動状態を解消することを確認することができ、ベンチマークテストでも高い最適解探索能力を検証することができた。さらにそのチューニングについても検討した。

得られた結果をまとめると以下ようになる。

- ① 気まぐれ因子 fan を付与したfPSOの有効性は粒子数が少ないときに発揮される。
- ② fan 値は最適解探索能力に大きな影響を及ぼすが、対象問題によってその最適値が大きく異なることがある。
- ③ 安定的なfPSOによる最適解探索のためにはチューニング手法を改善する必要がある。

提案したfPSOは従来のPSOにわずかな改善策を講じただけのものであるが、予想以上の有効性を示した。このような本研究の成果は、今までの群知能に関する研究になかった種々のアイデアがこれからの群知能の

応用研究に大きなインパクトを与える可能性を示唆するものとする。

謝 辞

本研究にあたって九州共立大学工学部土木工学科平成19年度卒業生・前原三邦君からはfPSOの数値実験結果のデータ整理において、同・藤森雅崇君からはRscsGAの開発・ベンチマークテストにおいて、それぞれ多大なる助力を得た。

また、九州共立大学工学部情報学科准教授・鄭俊如先生からは平成20年7月に開催された九州共立大学大学院工学研究科前期課程電子情報工学専攻中間発表会での著者の一人(許佳芸)のプレゼンテーションにおいてfPSOのチューニングの必要性について貴重なサジェスチョンを賜った。

記して深い謝意を表す。

参考文献

- [1] Eric Bonabeau, Guy Theraulaz: 群れが生み出す知能, 月刊日経サイエンス 2000年7月号.
- [2] 中村秀明, 江本久雄, 河村圭, 宮本文穂: Particle Swarm Optimizationによる多峰性関数の最大値探索, 第9回設計工学に関するシンポジウム講演論文集, pp.159-162, 2005.12.
- [3] 坊原尚記, 作田健, 香月智: PSOに対するランダム探索機能付加効果に関する考察, 第9回設計工学に関するシンポジウム講演論文集, pp.163-168, 2005.12.

(2009年4月13日採用決定)

【附録】RscsGA (実数型遺伝子を組込んだ scsGA)

1 scsGA の概要

遺伝的アルゴリズム Genetic Algorithm, GA は進化的最適化手法の一種であり, 生物の進化過程における繁殖・淘汰・交叉・突然変異という基礎的オペレーターによって再現される。しかし生殖・繁殖・交叉といった一連のオペレーションが用いられているのにもかかわらず, 一般的な GA で用いられる個体には雄・雌の区別がない。個体に雄雌の概念を導入し, より実際の生態系に近いアルゴリズムを構築することで GA の性能向上を図るものが scsGA である[A1]。

scsGA における雄雌は, 交配個体, 被交配個体の 2 種類で表される。交配個体は適応度の高いものの上位の少数であり, 被交配個体はその残りの個体である。これは, 多くの同性の中から競争しなければ交配できない性と交配相手を選ぶときに比較的自由度の高い性という観点から性差を表したものであり, このような例は自然界に多く見られる。

この性差を導入した scsGA は次のような特長を示す。

- ① GA の基本形である単純 GA では世代交代に伴って時として最良解の劣化が見られるが, scsGA ではそういう現象がない。
- ② ルーレット戦略を用いる GA では適応度の低い個体の遺伝子が次世代に残る確率は当然のことながら小さいが, 2 つのルーレットを持つ scsGA ではルーレットが 1 つしかない単純 GA に比較して低適応度個体の遺伝子が次世代に残る確率が高い。
- ③ 一般に GA では進化世代数が大きくなるにしたがって類似の遺伝子が増殖し, 多様性の目安となる情報エントロピー値も急速に小さくなる傾向がある。これに対し scsGA では進化世代数が進んでも情報エントロピー値が急速に小さくなることはなく, 遺伝子の多様性が保持される。

(1) scsGA の基本オペレーション

GA で一般的に用いられるビット線列を遺伝子とする場合の scsGA の基本オペレーションは以下のようなものである。

◇ 生殖 (淘汰・繁殖)

一般に GA では繁殖と淘汰は生殖という一つの作業で表される。生殖は個体を次世代に残すか残さないか決定する作業であり, 残す場合を繁殖, 削除する場合を淘汰という。生殖は適応度によって繁殖する確率が定められており, 適応度の高いものが繁殖する確率が高くなるように設定してある。

scsGA では一部の適応度の高いものを交配個体群,

それ以外を被交配個体群として区別し, それぞれの群から 1 個ずつ選択された個体による確実な交配を行う。選択にあたってルーレット戦略を用いるが, 交配個体群と被交配個体群にはそれぞれ別々のルーレットを設定する。

◇ 交叉

交叉は 2 つの線列を同じ箇所まで分割し, 分割箇所以降の遺伝子を交換することをいう。

scsGA では切断する箇所が 1 ヶ所だけの 1 点交叉を用いる。

◇ 突然変異

遺伝子を一定の割合で変化させることをいう。具体的には, 設置された突然変異の発生確率に従い, ビット線列のランダムに選ばれたひとつの遺伝子を 1 ならば 0, 0 ならば 1 に変化させる。

scsGA では交配によって生成された個体のみを突然変異の対象とする。

(2) scsGA のアルゴリズム

Step0 計算パラメータとして, 人口数 N_p , 交配個体数 N_s , 突然変異発生確率 P_m , 計算世代数 N_G を設定する。

Step1 人口数 N_p の初期世代線列 (個体) をランダムに設定する。

Step2 全個体の適応度を計算し, 有効な少数 (N_s 個) の個体を交配個体群に, 残りの ($N_p - N_s$) 個の個体を被交配個体群に分ける。

Step3 交配個体群から 1 個, 被交配個体群から 1 個の個体をそれぞれの個体群のルーレットからルーレット戦略で選び出し, 確実な交配を行い次世代個体とする。

この際, N_s 個の交配個体群の個体はそのまま次世代に受継がれるので, 新たな次世代個体の数は ($N_p - N_s$) 個である。

Step4 交配により新たに生成された ($N_p - N_s$) 個の個体に対して突然変異発生確率 P_m に応じた突然変異を行う。

Step5 進化世代数が計算世代数 N_G に達したら計算を終了する。そうでないとき Step2 へ戻る。

2 RscsGA の概要

遺伝子にビット線列ではなく実数型線列を用いる GA は Real Coded GA, RCGA と総称される。独自に開発した scsGA の枠組みに実数型遺伝子を組込んだ GA を RscsGA と名付けた[A2]。

ここでは RscsGA の交叉方法と突然変異方法を紹介する。

(1) 交叉方法

RscsGA ではブレンド交叉と呼ばれる交叉方法[A3]を採用している。ブレンド交叉 BLX- α は Eshelman によって考案された実数型遺伝子の交叉方法であり、2個の親個体から2個の子個体を生成する点において scsGA の枠組みとの馴染みがつきやすい方法である。その具体的な方法は以下のようなものである。

2個の親個体を

$$P_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n}), P_2 = (p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2n})$$

ブレンド交叉によって生成される2個の子個体を

$$C_1 = (c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1n}), C_2 = (c_{21}, c_{22}, \dots, c_{2n})$$

とする。変数 X_i に関して、2個の親個体の X_i 値で構成される区間（その距離 d_i ）を αd_i だけ両側に拡張した区間に対して一様乱数に従って2個の子個体を式(A-1)により生成する。

$$c_{1i}, c_{2i} = u(\min(p_{1i}, p_{2i}) - \alpha d_i, \max(p_{1i}, p_{2i}) + \alpha d_i) \quad (A-1)$$

ただし、 $d_i = |p_{1i} - p_{2i}|$ 、 $u(x, y)$ は区間 $[x, y]$ の一様乱数を示し、 α は拡張係数（=0.25~0.50）である。

(2) 突然変異方法

ある交叉方法に対してその交叉方法に適した突然変異方法があることが望ましいが、一般に交叉方法と突然変異方法とがリンクされることは少ない。交叉方法にブレンド交叉を用いる場合にも同時に用いる突然変異方法は指定されていない。したがってここでは、以下のような大林らが提案している突然変異の方法[A4,A5]を採用する。

被交配個体群の個体を対象として、突然変異発生確率 P_m により各個体の突然変異発生を判定し、突然変異発生個体のある1つの実変数 X_n をランダムに選択し、その値 R_n を式(A-2)により更新する。

$$R_n \leftarrow R_n + u(-1, 1) \beta W_n \quad (A-2)$$

ここに、 W_n は実変数 X_n の定義値域幅であり、 β は値域幅変動係数（ ≈ 0.5 ）である。

ただし、突然変異後の実変数 X_n の値 R_n がその上限値（下限値）より大きい（小さい）場合には、交叉オペレーションと同様に

$$R_n = \text{上限値 (下限値)} \quad (A-3)$$

とする。

参考文献

[A1] T. Mihara, H. Chijiwa and T. Ohta: On the Efficiency of GA with Selecting the Crossing

Strings for the Discrete Optimal Problems, CD-ROM Proceedings of the International Symposium on Optimization and Innovative Design, #105, 1997.

[A2] 藤森雅崇, 三原徹治, 許佳芸, 千々岩浩巳: ブレンド交叉を組込んだ実数型交配個体選択 GA の解法特性, 平成 19 年度土木学会西部支部研究発表会, 2008.3
[A3] 福永隆宏: 実数値遺伝的アルゴリズムにおける計算モデルの検討, 同志社大学工学部知識工学科卒業論文, 2002.3.
[A4] 大林茂, 塚原孝則: 進化アルゴリズムによる空力最適化 I, 数値流体力学, 6(2), pp.59-73, 1998.
[A5] 大林茂, 塚原孝則: 進化アルゴリズムによる空力最適化 II, 数値流体力学, 6(3), pp.83-97, 1998.

非クリティカル作業の分割を導入した プロジェクト管理における資源需要平滑化へのGAの適用に関する基礎的研究

九州共立大学大学院工学研究科電子情報工学専攻
三原 徹治, 王 克成, 範 国輝

A demand leveling method on the project management considered with
separating the uncritical events by using Genetic Algorithm
Tetsuji MIHARA, Kecheng WANG and Guohui FAN

CPM/PERT is the famous method for the project management. Only the critical events are taken notice in CPM/PERT, the demand of each period is not considered. From the view point of effective utilization of resources, the demand leveling is a very important problem.

This paper presents a demand leveling method on the project management by using Genetic Algorithm (GA). At first, the uncritical event start time control method by using GA is proposed. Next, the original function $nT(u)$ which can find the u -th bit string of n unit "1" is developed. Introducing $nT(u)$, the extension method when uncritical events are able to separate is shown. The efficiency of proposed method is confirmed with the numerical examples.

Key words: CPM/PERT, Demand leveling method, Genetic Algorithm

1 はじめに

建設工事などのプロジェクトには多くの作業があり、ある作業が完了しないと別の作業に着手できないという順序関係が複雑に絡み合っている。そのような状況においてプロジェクト開始から完了までの期間を最短にするには、それぞれの作業の着手時期や完了時期を管理する必要がある。工程管理（または作業管理）手法として PERT (Program Evaluation and Review Technique)法がよく知られている。各作業を最も早く開始できる時刻（最早開始時刻 Earliest Start Time; ES ）と、遅くともこの時刻に完了していなければならない時刻（最遅完了時刻 Latest Finish Time; LF ）が求められる。PERT とほぼ同時期に独立して CPM (Critical Path Method)が開発されたが、ともにグラフを用いてプロジェクトのスケジューリングを行うことから、一般に併せて PERT/CPM と呼ばれる[1-4]。

PERT/CPMによるプロジェクト管理においては、どの作業がクリティカルになるかが重点である。PERT/CPM ではプロジェクトの完了時刻はクリティカルパスを求めることにより得られ、クリティカルパス上の作業は余裕がなく遅らせてはならないためクリティカル作業と呼ばれる。クリティカル作業が遅延するとプロジェクト全体の完了時刻を遅らせてしまう。一方、クリティカルパス上にない作業を非クリティカル作業といい、このような作業はその ES と LF との間に実施されればプロジェクト全体のスケジュールに影響し

ない。

しかし、非クリティカル作業の実施時刻の違いにより単位作業時間あたりの資源（人員、電力、設備など）需要量は一般に変化し、特に大きな変動が発生する場合には資源の有効利用の観点から問題とされている。この問題点に対しては種々の対処法が考えられるが、対象とする資源が事業所における電力のようなものであるときには契約電力量を小さくすることができるというメリットから需要平滑化も有力な対処法である。図-1(a)はあるプロジェクトにおいて、すべての非クリティカル作業を分割不能としたうえでその作業開始時刻 TS をそれぞれの ES で計画した場合の資源需要量 $r(t)$ の変動のイメージであり、図-1(b)は需要量の変動幅が最小となるように TS を最適化して需要平滑化を図った場合の需要変動のイメージである。

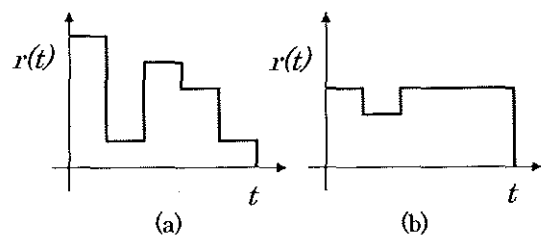


図-1 (a) $TS=ES$ での資源需要量 (b)平滑化した資源需要量

著者らは、資源需要を需要平滑化によってコントロールする立場から、非クリティカル作業の TS を決定するグラフモデルを導出し、その最適化アルゴリズムを構成

した[5]. このアルゴリズムは必ず終了し, このアルゴリズムによって最初に求められた実行可能解は必ず最適解になるという利点を有するが, 非クリティカル作業の数が大きくなると必要計算量も増大し, 非クリティカル作業の分割配置に対応できないものであった. そこで本論文では, 組合せ最適化問題の有力な解法とされる遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA, 【附録】参照)を最適化ツールとして非クリティカル作業をその全余裕(Total Float: TF)を利用して適切に配置する手法を提示する.

以下2節では, PERT/CPMによる資源需要解析と需要平滑化のための最適性規準の定式化について述べる. 3節では GA による非クリティカル作業の TS をその TF の範囲内で調整する方法について, GA のための遺伝子線列構成, 先行作業条件を考慮した Decoding 方法を示し, 簡単な数値計算例により提示手法の有効性を検証する. さらに非クリティカル作業の分割配置を効率的に表現する遺伝子線列構成のための $nT(u)$ 関数を4節で提示し, その成果を用いて5節では, 非クリティカル作業が分割可能な場合の適切配置を求める方法への拡張を示し, 数値計算例により提示手法の解法特性を検討する. 6節では本論文のまとめと今後の課題について述べる.

2 資源需要量解析と最適性規準

2.1 PERT/CPMによる資源需要量解析

PERT/CPMは, プロジェクト計画でのスケジュール立案や進捗管理に広く利用され, 実際に役立っている. またクリティカルパスの概念は, プロジェクト進行に伴う業務を管理する上で非常に重要である. 現在, PERT/CPMの専用ソフトウェアが多く開発され, 容易に利用できる. その基本的な処理過程を用いた資源需要量解析手順は次のようである.

- ◇ プロジェクトの各作業を明確にし, 各作業の所要時間と所要資源を見積もる.
- ◇ 作業の実行順序・作業同士の前後関係を明確にし, 有向グラフを作成する.
- ◇ 各作業の最早開始時刻 ES , 最遅完了時刻 LF および全余裕 TF を求め, プロジェクト全体の所要時間を算出し, 完了時期を明らかにする.
- ◇ 非クリティカル作業の開始時刻 TS を決め, プロジェクト全期間について単位作業時間あたりの資源需要量を算出する.

2.2 資源需要平滑化のための最適性規準

資源需要平滑化の指標として, 式(1)に示す単位作業時間あたり資源需要量の偏差平方和 s^2 の最小化を採用する.

$$\text{Minimize} \left[s^2 = \sum_{t=1}^T v(t) = \sum_{t=1}^T (r(t) - r^*)^2 \right] \quad (1)$$

ここに, $r(t)$ = 第 t 作業時刻の資源需要量, r^* = 資源需要量の平均値, T = プロジェクト期間である.

3 TS 最適化

3.1 TS の調整

すべての非クリティカル作業 k の作業内容が「連続的に行わなければならない」場合には作業時間 D_k は分割して配置することができないので, 作業開始時刻 TS_k のみが最適化の対象となる. ここに, TS_k の調整範囲は非クリティカル作業 k の全余裕 TF_k を越えてはならないので, 作業開始時刻 TS_k は式(2)に示すように最早開始時刻 ES_k に $\alpha_k = 0, 1, \dots, TF_k$ なる α_k を加えたものとなる.

$$TS_k = ES_k + \alpha_k, \quad \alpha_k = 0, 1, \dots, TF_k \quad (2)$$

ところが, 一般的なプロジェクトでは作業同士に前後関係が存在することが多く, 後述する数値計算例で示すように先行作業条件を考慮しなければならない場合が生じる. 作業 k の全先行作業の作業終了時刻のうち最大のものを β_k とすると, 図-2 に模式的に示すように β_k と ES_k との大小関係によって次のように異なる調整方法を用いる必要がある.

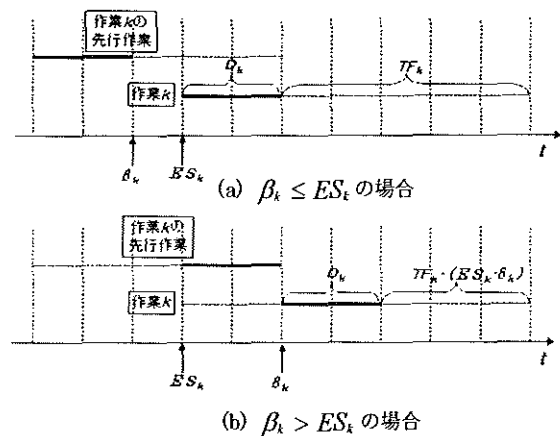


図-2 先行作業条件の説明 (模式図)

- $\beta_k \leq ES_k$ の場合には, 作業 k の全先行作業は作業 k の最早開始時刻 ES_k より前に終了しているの

従来と同様に式(2)によって作業開始時刻 TS_k を決定する。

- $\beta_k > ES_k$ の場合には、作業 k を本来の最早開始時刻 ES_k に開始した場合などには先行作業条件が満足されなくなるので、作業開始時刻 TS_k は式(3)に示すように β_k に α_k を加えたものとして決定される。

$$TS_k = \beta_k + \alpha_k, \\ \alpha_k = 0, 1, \dots, TF_k - (\beta_k - ES_k) \quad (3)$$

なお、McComick branch $[\bullet]$ (if $\bullet \geq 0$ then $[\bullet] = \bullet$ else then $[\bullet] = 0$) による表記を用いれば、式(2),(3)はひとつの式(4)に統合表現される。

$$TS_k = ES_k + [\beta_k - ES_k] + \alpha_k, \\ \alpha_k = 0, 1, \dots, TF_k - [\beta_k - ES_k] \quad (4)$$

3.2 遺伝子線列の構成と Decoding 方法

ダミー作業および資源需要量=0の作業を除く非クリティカル作業 k の全余裕 TF_k を表現できる最小の2進数線列を、最適化対象の非クリティカル作業の数だけ並べた線列を GA による最適化計算の遺伝子線列として用いる。

このとき TF_k が2のべき乗以外の値をとることもあり、式(4)に示すように α_k がとり得る値の上限が TF_k より小さい場合もある。Decoding では、これらへの対策として式(5)によって α_k を q/p の剰余として算出する。

$$\alpha_k = \text{mod}_p q \quad (5)$$

ここに、 $p = TF_k - [\beta_k - ES_k]$ 、 $q = 2$ 進数線列から変換された10進数値である。

3.3 TS 最適化の数値計算例

提案手法の有効性を検証するために、ノード数=5、作業数=6の小さなプロジェクト 0506 モデルを対象として数値計算を行う。

表-1に0506モデルのグラフおよびCPM解析結果を示す。表中、 r_k は単位作業時間あたりの資源需要量である。 $TF_k=0$ のクリティカル作業は①④⑥の3つであり、プロジェクト期間 $T=10$ 、資源需要量の総計=30より平滑化の基準となる平均値 $r^* = 30/10 = 3$ である。

表-1 0506モデルのグラフとCPM解析結果

k	先行作業	始点	終点	D_k	r_k	ES_k	LF_k	TF_k
①	ナシ	①	②	3	4	0	3	0
②	ナシ	①	③	2	1	0	6	4

③	①	②	③	2	1	3	6	1
④	①	②	④	6	1	3	9	0
⑤	②	③	⑤	4	1	5	10	1
⑥	④	⑤	⑥	1	4	9	10	0

表-2 0506モデル：全作業の $TS_k = ES_k$ と仮定した場合の資源需要分布

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	計
$r(t)$	5	5	4	2	2	2	2	2	2	4	30
$v(t)$	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	16

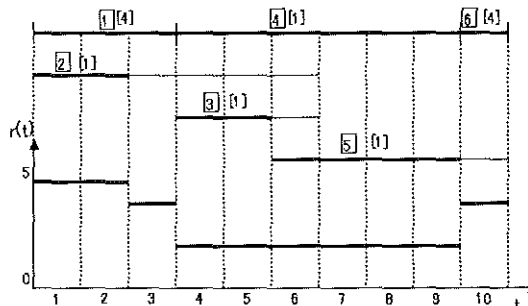


図-3 0506モデル：全作業の $TS_k = ES_k$ と仮定した場合の資源需要分布

表-2および図-3に全作業の $TS_k = ES_k$ と仮定した場合の資源需要分布を示す。図-3では、時刻 t を横軸とし、各作業の実施時刻と、第 t 作業時刻の資源需要量 $r(t)$ を示している。資源需要量作業 k (作業番号の右には $[\]$ 書きでその作業の単位作業時間あたりの資源需要量を表示) の ES_k から LF_k を破線で示し、作業時間 D_k を実線で表示している。破線部分は TF_k を示すことになり、 $TF_k=0$ のクリティカル作業については破線部分がないので最上段にクリティカル作業①④⑥の3つを連続表示し、非クリティカル作業②③⑤の3つについてはそれぞれ1段を用いて表示している。図-3よりプロジェクト初期と末期に大きな資源需要が発生し、全体的に大きな変動が認められる。表-2に示すように偏差平方和 $s^2 = 16$ である。

非クリティカル作業は②③⑤の3つであり、いずれもダミー作業および資源需要量=0の作業ではないためすべてが調整対象作業に該当する。それぞれの TF_k 値より表-3に示すように離散値データとそれを表現する2進数線列のサイズが得られ、結局5bitの遺伝子線列がGAによる最適化の対象となる。極めて小さい組合せ最適化問題でありGAを用いる必要性は疑問であるが、提案手法の解説の意味から著者らが過去に開発した交配個体選択GA (scsGA, 【附録】参照) による最適化計算を行った。用いたscsGAパラメータは、全個体数=10、交配個体数=2,3、突然変異発生確率=0.3、計算世代数=10である。

交配個体数=2で図-4に示すような $s^2=8$ の最適解が得られた。作業②の開始時刻を $ES_2=0$ から3だけ遅らせ、作業③、⑤についてはそれぞれ ES_3 、 ES_5 を開始時刻とする解である。図-3の全作業の $TS_k=ES_k$ と仮定した場合の資源需要分布と比較すると図-4の解は資源需要分布の変動が小さく、平滑化されていることが認められる。

表-3 0506モデル: TS 最適化における調整対象作業とそれぞれの離散値データ

調整対象の作業番号	離散値データ
②	0,1,2,3,4 (5個→3bit)
③	0,1 (2個→1bit)
⑤	0,1 (2個→1bit)

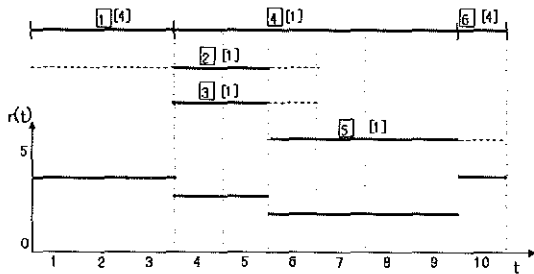


図-4 0506モデル: TS 最適化の資源需要分布

ちなみに、先行作業条件を考慮せずに同様の最適化を行うと、図-4に示す解のほかに図-5に示すような解も得られた。図-5の解は $s^2=8$ と図-4の解と同じ s^2 値であり、一見妥当な解のように思われる。しかし、 $t=6$ で作業③と⑤が並行実施されており、「③が⑤の先行作業」という条件を満たしていないことがわかる。

これらより先行作業条件を考慮する必要性が確認され、先行作業条件を考慮した TS 最適化の妥当性を検証することができた。

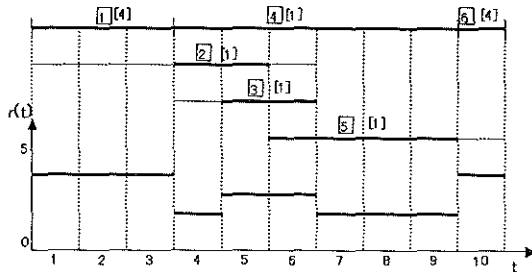


図-5 0506モデル: 先行作業条件を考慮しない場合の TS 最適化の資源需要分布

4 ${}_nT(u)$ 関数

非クリティカル作業 k の作業内容が「必ずしも連続的に行う必要がない」場合には、作業時間 D_k を分割配置することも可能である。このような作業 k において

‘作業しない時刻/作業する時刻’に‘0/1’を対応させると、作業時間 D_k +全余裕 TF_k の大きさの線列に D_k 個の‘1’を任意に配置し、残りのビットを‘0’で埋めれば、作業時間 D_k の分割配置が表現される。しかし、単に‘0/1’を与えた D_k+TF_k の大きさの線列をGAの遺伝子線列とする方法ではGAの交叉オペレーションにより‘1’の個数が D_k 個ではない致死遺伝子が多く生成される危険性が高い。この問題の対策として以下に示す ${}_nT(u)$ 関数を準備する。

4.1 ${}_nT(u)$ 関数の定義と性質

${}_nT(u)$ の定義: ‘1’の個数= n の場合の0/1組合せを2進数数列と解釈し、その値を昇順に並べたとき u 番目の0/1組合せが表現する10進数値を ${}_nT(u)$ 値と呼ぶ。

いま‘1’の個数= n 、 m bitの0/1線列を考える。そのような線列のバリエーションの一部を、 $n=1,2,3$ の場合について表4~6に示す。

$n=1$ の場合には、ある m について1通りの組合せしかなく、 m の昇順に順序数 u を与えると $m=u$ である。 m が大きくなると ${}_1T(u)$ は大きくなり、その値は次式のように算出される。

$$\text{性質 1: } {}_1T(u) = 2^{u-1} \quad (6)$$

$n=2$ の場合に $m=1$ はない。これは m が $n \leq m$ でなければ所望の組合せが物理的にありえないからである。ここでも $n=1$ の場合と同様に ${}_2T(u)$ が昇順に並ぶように順序数 u を与えることができる。このように並べたとき、 m の値ごとに $n=1$ の場合の線列が□で囲っているように現れていることが観察される。

表-4 $n=1$ の場合の線列のバリエーションの一部

m	64	32	16	8	4	2	1	${}_1T(u)$	u
1							1	1	1
2						1	0	2	2
3					1	0	0	4	3
4				1	0	0	0	8	4
5			1	0	0	0	0	16	5
6		1	0	0	0	0	0	32	6
7	1	0	0	0	0	0	0	64	7

表-5 $n=2$ の場合の線列のバリエーションの一部

m	16	8	4	2	1	${}_2T(u)$	u
2				1	1	3	1
3			1	0	1	5	2
			1	1	0	6	3
4		1	0	0	1	9	4
		1	0	1	0	10	5
		1	1	0	0	12	6

5	1	0	0	0	1	17	7
	1	0	0	1	0	18	8
	1	0	1	0	0	20	9
	1	1	0	0	0	24	10

表-6 $n=3$ の場合の線列のバリエーションの一部

m	32	16	8	4	2	1	${}_3T(u)$	u
3				1	1	1	7	1
4			1	0	1	1	11	2
			1	1	0	1	13	3
			1	1	1	0	14	4
5		1	0	0	1	1	19	5
		1	0	1	0	1	21	6
		1	0	1	1	0	22	7
		1	1	0	0	1	25	8
		1	1	0	1	0	26	9
		1	1	1	0	0	28	10
	6	1	0	0	0	1	1	35
1		0	0	1	0	1	37	12
1		0	0	1	1	0	38	13
1		0	1	0	0	1	41	14
1		0	1	0	1	0	42	15
1		0	1	1	0	0	44	16
1		1	0	0	0	1	49	17
1		1	0	0	1	0	50	18
1		1	0	1	0	0	52	19
1		1	1	0	0	0	56	20

同様に、 $n=3$ の場合の線列のバリエーションには、その一部に $n=2$ の線列が現れる。この性質は一般的であるので、 ${}_nT(u)$ の一般形として次の関係が得られる。

$$\text{性質 2: } {}_nT(u) = 2^{m-1} + {}_{n-1}T(u - {}_{m-1}C_n) \\ \text{where } m \in {}_{m-1}C_n < u \leq {}_mC_n \quad (7)$$

4.2 ${}_nT(u)$ 値の算出手順

式(6),(7)に示す ${}_nT(u)$ の性質 1,2 から ${}_nT(u)$ 値は次の手順で算出することができる。

- ① 求める ${}_nT(u)$ の n, u を与え、 $v = 0$ とおく。
- ② $m \in {}_{m-1}C_n \leq u \leq {}_mC_n$ の関係を満たす m を求め、 $v \leftarrow v + 2^{m-1}$ 。
- ③ $u \leftarrow u - {}_{m-1}C_n$ 、 $n \leftarrow n - 1$ 。
- ④ $n > 1$ ならば②へ戻る。 $n = 1$ ならば⑤へ進む。
- ⑤ $v \leftarrow v + 2^{u-1}$ 、求める ${}_nT(u) = v$ として終了。

この算出手順は2つの問題点を有する。その第一は、手順②、③を $(n-1)$ 回繰返さなければならないことである。これに対する有効な対処法は、算出手順のベースが ${}_nT(u)$ の性質 2 であるため見当たらない。もうひとつの問題点は、手順②において m を求める場合に試行錯

誤が必要なことである。これに対しては次のような「比較的効率的に m を求める方法」を導入して計算量の軽減を図る。

■ $m \in {}_{m-1}C_n < u \leq {}_mC_n$ の m を比較的効率的に求める方法：

ある u に対して

$$u = {}_mC_n = \frac{\prod_{i=1}^n (m+1-i)}{\prod_i i} = \frac{\prod_{i=1}^n (m+1-i)}{n!}$$

つまり

$$u \cdot n! = \prod_{i=1}^n (m+1-i)$$

となるような m が整数として得られる場合はまれであるが、第2式の右辺に相加平均・相乗平均関係を適用すると m に関する不等式が次のように導かれる。

$$\sqrt[n]{u \cdot n!} + \frac{n-1}{2} \leq m \quad (8)$$

【●】をガウス記号として式(8)を整数関係に直すと式(9)が得られる。

$$\left\lceil \sqrt[n]{u \cdot n!} + \frac{n-1}{2} \right\rceil + 1 \leq m \quad (9)$$

n と m との物理的条件 $n \leq m$ を用いる場合に比較して式(9)の条件を用いれば検討数が軽減される。ただし、 $n=1$ のときには ${}_nT(u)$ の性質 1 より求める m を $m = u$ と一意に特定できるので、試行錯誤的な検討を必要としない。

■ 算出例：

ここでは、 $n=4$ 、 $u=53$ のときの ${}_4T(53)=178$ と対応する 0/1 線列の算出例を示す。

- ① ${}_7C_4 = 35 \leq 53 \leq 70 = {}_8C_4 \Rightarrow m = 8$
 $\Rightarrow 53 - {}_7C_4 = 53 - 35 = 18$
 $\Rightarrow {}_4T(53) = 2^{8-1} + {}_3T(18)$
- ② ${}_5C_3 = 10 \leq 18 \leq 20 = {}_6C_3 \Rightarrow m = 6$
 $\Rightarrow 18 - {}_5C_3 = 18 - 10 = 8$
 $\Rightarrow {}_3T(18) = 2^{6-1} + {}_2T(8)$
- ③ ${}_4C_2 = 6 \leq 8 \leq 10 = {}_5C_2 \Rightarrow m = 5$
 $\Rightarrow 8 - {}_4C_2 = 8 - 6 = 2$
 $\Rightarrow {}_2T(8) = 2^{5-1} + {}_1T(2) = 2^{5-1} + 2^{2-1}$
 $\therefore {}_4T(53) = 2^{8-1} + 2^{6-1} + 2^{5-1} + 2^{2-1}$

$$=128+32+16+2=178$$

$${}_4T(53)=178 \text{ に対応する } 0/1 \text{ 線列} = 10110010$$

5 TF 最適化

資源需要平滑化の対象である非クリティカル作業のすべての作業内容が「連続的に行わなければならない」場合には作業時間を分割配置することができないので、3節に示したTS最適化によって資源需要平滑化が実現できる。これに対して「必ずしも連続的に行う必要がない」作業内容の非クリティカル作業が含まれる場合には、その作業時間を分割配置することも可能である。作業時間の分割配置を含む最適化手法は、TS最適化に比較して解空間の自由度を上げることになり、資源需要平滑化に対しても効果的であることが期待される。

本節では、TS最適化を拡張し、作業時間の分割配置をも取扱うことができる手法について述べる。拡張した手法をTF最適化と呼ぶことにする

5.1 分割可能作業の作業配置の表現

非クリティカル作業 k が分割配置可能作業であるとき、その作業時間 D_k の分割配置を表現する最も単純な方法は、作業しない時刻/作業する時刻に '0/1' を対応させ「作業時間 D_k + 全余裕 TF_k の大きさの線列に D_k 個の '1' を任意のビットに配置するとともに、残りのビットに '0' を配置する」方法である。ただし、ここでも先行作業条件を考慮する必要があるので、3.1 TS の調整と同様に、作業 k の全先行作業の作業終了時刻のうち最大のもを β_k として β_k と ES_k との大小関係によって次のように準備する線列のサイズおよび配置する '0' の個数を適切に調整する必要がある

- $\beta_k \leq ES_k$ の場合には、作業 k の全先行作業は作業 k の最早開始時刻 ES_k より前に終了しているため、作業時間 D_k + 全余裕 TF_k の大きさの線列に D_k 個の '1' と TF_k 個の '0' とを任意に配置する。
- $\beta_k > ES_k$ の場合には、作業 k を本来の最早開始時刻 ES_k に開始した場合などには先行作業条件が満足されなくなるので、作業時間 D_k + 全余裕 $TF_k - (\beta_k - ES_k)$ の大きさの線列に D_k 個の '1' と $TF_k - (\beta_k - ES_k)$ 個の '0' とを任意に配置する。

5.2 TF 最適化の遺伝子線列構成

4節に示した ${}_nT(u)$ 関数を用いれば、 $n = D_k$ とし任意の u を与えた ${}_nT(u)$ は作業時間 D_k の任意の分割配置を示す '0/1' 線列を表現する。その線列の必要サイズの最大値は $D_k + TF_k$ であるから、 u が取り得る最大値は ${}_pC_\eta$ (ただし、 $\gamma = D_k + TF_k$, $\eta = D_k$) である。したがって、10進数 u を表現することができる2進数

線列をGAによる最適化の遺伝子線列に用いれば、致死遺伝子の発生を完全に排除するとともに遺伝子線列の必要サイズを小さくすることができる。その遺伝子線列サイズは式(10)で算出される。

$$\lceil \log_2({}_pC_\eta - 1) \rceil + 1 \quad (10)$$

Decoding では2進数線列から変換された10進数 q に1を加えた整数が u に相当するが、得られる整数が u の取り得る値より大きくなる場合もある。その対策として $\eta = D_k$, $\gamma = D_k + TF_k - [\beta_k - ES_k]$, $p = {}_\gamma C_\eta$ として式(11)によって u を算出する。

$$u = \text{mod}_p q + 1 \quad (11)$$

5.3 TF 最適化の数値計算例

(1) 0506 モデル

まずTS最適化の数値計算例に用いた0506モデルを対象としたTF最適化の解法特性について述べる。グラフなどのデータはまったく同じであるが、最適化の対象である非クリティカル作業が分割可能な場合の離散値データが新たに必要となる。表7に分割不能な場合と併記して示す。

表7 0506モデル: TF最適化における調整対象作業とそれぞれの離散値データ

調整対象の作業番号	分割不能な場合の離散値データ	分割可能な場合の離散値データ
2	0,1,2,3,4 (5個→3bit)	${}_6C_2=15 \rightarrow 4\text{bit}$
3	0,1 (2個→1bit)	${}_3C_2=3 \rightarrow 2\text{bit}$
5	0,1 (2個→1bit)	${}_5C_1=5 \rightarrow 3\text{bit}$

すべての調整対象作業を分割可能とした場合にも資源需要分布の偏差平方和の最適解は $s^2=8$ であり、TS最適化の最適解より優れた解は存在しなかった。そこで表8に示すように、分割不能・可能の組合せにより Case A~H ごとに、scsGA の全個体数 N_p を8から1ずつ増やし、はじめて $s^2=8$ の解が得られる全個体数を調べた。分割可能作業が増えると解の自由度は上がるが、それが得られる解や最適化に必要な計算量に与える影響を調べるためである。なお、全個体数 N_p 以外の scsGA のパラメータは、突然変異発生確率=0.3、計算世代数=10とし、交配個体数 N_s には全個体数 N_p が15以下の場合には $N_s=2,3$ を、 N_p が16以上の場合には $N_s=2,3,4$ を用いた。

表8において、通常字体数字の解は分割不能の場合の解(式(4)の α_k 値)であり、ボールド字体数字の解は分割可能な場合の解 ($n = D_k$ とした ${}_nT(u)$ の u 値とそれに対応する '0/1' 線列) である。Case A は TS 最適化に相当する。

すべての Case において分割不能/可能に関らず同じ意味の解が最適解として得られていることがわかり、分割可能作業を導入した TF 最適化の妥当性を検証することができた。分割可能作業を導入した場合にも最適解が比較的小さな全個体数 N_p で得られることが認められる。ただし、分割可能な作業数が多くなると最適解が得られる最小全個体数が大きくなる傾向があり、分割不

能を設定する場合に較べて必要な線列長が大きくなる影響と考えられる。特に、作業 5 を分割可能とした場合にその傾向が強い。作業 5 が先行作業条件の影響を強く受ける作業であることが原因と考えられる。計算効率のためには TF 最適化の分割可能作業の設定に留意が必要であることが示唆されている。

表-8 0506 モデル：分割不能・可能の組合せごとの最適解が得られた最小全個体数 N_p

Case	2	3	5	線列長	N_p	2の解	3の解	5の解
A	不能	不能	不能	5 = 3+1+1	9	3	0	0
B	可能	不能	不能	6 = 4+1+1	12	2 000110	0	0
C	不能	可能	不能	6 = 3+2+1	8	3	2 110	0
D	不能	不能	可能	7 = 3+1+3	9	3	0	4 11110
E	可能	可能	不能	7 = 4+2+1	9	2 000110	2 110	0
F	可能	不能	可能	8 = 4+1+3	19	2 000110	0	4 11110
G	不能	可能	可能	8 = 3+2+3	17	3	2 110	4 11110
H	可能	可能	可能	9 = 4+2+3	28	2 000110	2 110	4 11110

(2) 0607 モデル

0506 モデルを対象とした数値計算例では TF 最適化のメリットが明確に示されなかったため、ここではノード数=6、作業数=7のプロジェクト 0607 モデルを対象として数値計算を行う。

表-9 に 0607 モデルのグラフおよび CPM 解析結果を示す。

表-9 0607 モデルのグラフと CPM 解析結果

k	先行作業	始点	終点	D_k	r_k	ES_k	LF_k	TF_k
1	なし	①	②	3	3	0	3	0
2	なし	①	③	2	2	0	7	5
3	1	②	③	1	2	3	7	3
4	1	②	④	4	1	3	7	0
5	2, 3	③	⑥	4	2	4	11	3
6	4	④	⑤	1	3	7	8	0
7	6	⑤	⑥	3	1	8	11	0

$TF_k=0$ のクリティカル作業は 1, 4, 6, 7 の 4 つであり、プロジェクト期間 $T=11$ 、資源需要量の総計 = 33 より平滑化の基準となる平均値 $r^*=3$ である。

表-10 および図-6 に全作業の $TS_k=ES_k$ と仮定した場合の資源需要分布を示す。図-6 よりプロジェクト全般に資源需要量分布の大きな変動が認められ、表-10 に示すように偏差平方和 $s^2=24$ と大きな値である。

表-10 0607 モデル：全作業の $TS_k=ES_k$ と仮定した場合の資源需要分布

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	計
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	---

$r(t)$	5	5	3	3	3	3	3	5	1	1	1	33
$v(t)$	4	4	0	0	0	0	0	4	4	4	4	24

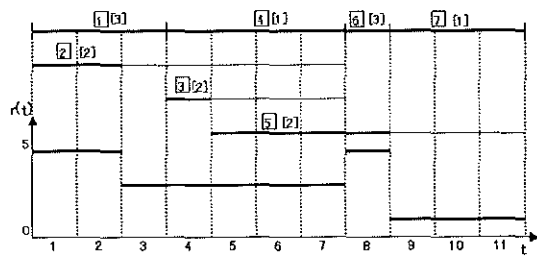


図-6 0607 モデル：全作業の $TS_k=ES_k$ と仮定した場合の資源需要分布

非クリティカル作業は 2, 3, 5 の 3 つであり、いずれもダミー作業および資源需要量=0 の作業ではないためすべてが調整対象作業に該当し、分割不能/可能に応じて表-11 に示すように離散値データとそれを表現する 2 進数線列のサイズが算出される。ここに、作業 3 が分割可能な場合の離散値データは、本来なら ${}_4C_1=4 \rightarrow 2\text{bit}$ であるが、作業 3 の作業時間 $D_k=1$ は分割しようがないので、分割可能と設定されても分割不能作業として取扱う。

表-11 0607 モデル：TF 最適化における調整対象作業とそれぞれの離散値データ

調整対象の作業番号	分割不能な場合の離散値データ	分割可能な場合の離散値データ
2	0,1,2,3,4,5(6個 → 3bit)	${}_7C_2=21 \rightarrow 5\text{bit}$
3	0,1,2,3 (4個 → 2bit)
5	0,1,2,3 (4個 → 2bit)	${}_7C_1=35 \rightarrow 6\text{bit}$

最適化計算に用いた scsGA パラメータは、全個体数=10, 交配個体数=2,3, 突然変異発生確率=0.3, 計算世代数=10 である。

まず、すべての調整対象作業を分割不能と設定し、 TS 最適化に相当する解を求める。遺伝子線列のサイズは 7bit しか必要としない。調整対象作業 2 の作業開始時刻 TS_2 は $ES_2 + 3$, 調整対象作業 3, 5 では $TS_3 = ES_3 + 2$, $TS_5 = ES_5 + 3$ の解が得られた。資源需要量分布は図-7 に示すように得られ、資源需要量分布の偏差平方和 $s^2=8$ は全作業の $TS_k = ES_k$ と仮定した場合の $s^2=24$ に比較して大幅に改善されている。しかし、この TS 最適化に相当する設定では $t=7,8$ の変動に対応することができないことも明らかである。

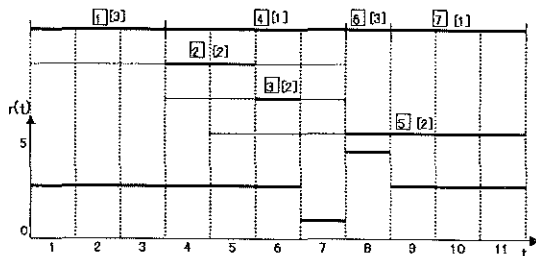


図-7 0607 モデル:全調整対象作業を分割不能とした TF 最適解 (TS 最適解に相当) の資源需要分布

そこで、調整対象作業 5 のみを分割可能と設定し TF 最適化する。遺伝子線列のサイズは 11bit 必要とし、全調整対象作業を分割不能と設定したときより大きくなるが、同じ scsGA パラメータで最適解を得ることができた。

最適解では、調整対象作業 2, 3 に関して $TS_2 = ES_2 + 3$, $TS_3 = ES_3 + 2$ であった。調整対象作業 5 に関しては、先行作業条件から 5bit の 2 進数線列に 4 つの '1' と 1 つの '0' を配置する解として 10111 が得られた。その資源需要量分布は図-8 に示すように得られ、資源需要量分布の偏差平方和 s^2 は完全な資源需要平滑化を意味する $s^2=0$ である。図-7 において $t=7,8$ の変動に対応することができない TS 最適化の難点を克服することができており、 TF 最適化の有用性を確認することができた。

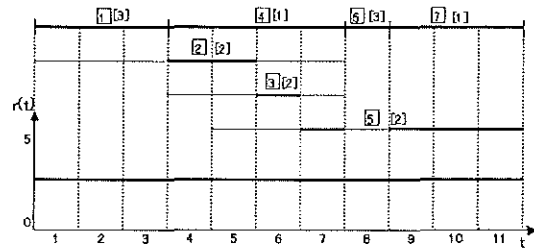


図-8 0607 モデル:調整対象作業 5 のみを分割可能と設定した TF 最適解の資源需要分布

6 おわりに

PERT/CPM をベースとしたプロジェクト管理において非クリティカル作業の適正配置によって資源需要量分布をコントロールすることは、資源の有効利用面からの重要な課題のひとつである。本論文では、その課題を克服するひとつの方法として資源需要分布の平滑化に焦点を当て、遺伝的アルゴリズム GA による解法を示した。得られた成果を列挙すると以下のようである。

- (1) 非クリティカル作業 k の作業開始時刻 TS_k を、単位作業時間あたり資源需要量の偏差平方和 s^2 を最小化するように最適化する TS 最適化を提示し、数値計算例によってその有効性を検証することができた。
- (2) 非クリティカル作業 k の作業時間 D_k の分割配置を視野に、GA の交叉オペレーションによって致死遺伝子を発生させない遺伝子線列を構成するための準備として ${}_nT(u)$ 関数を提案し、その算定手順を確立することができた。
- (3) ${}_nT(u)$ 関数を利用して非クリティカル作業 k の作業時間 D_k を分割配置する TF 最適化を提示し、数値計算例によってその有用性を検証することができた。

本論文では、ある一種の資源の資源需要分布の平滑化に言及範囲を限定し、手法の確立を優先したため TF 最適化の適用例もその検証に留まったが、次のような新たな取組みを今後の課題として挙げるができる。

- (1) TF 最適化の多様なモデルへの適用性の検討。
- (2) ある一種の資源に限らず、多種資源を同時に取扱う場合への拡張。
- (3) 資源需要分布の平滑化に限らず、新たな最適性規準の導入や多目的最適化への拡張。
- (4) 非クリティカル作業 k の作業時間 D_k の分割配置のみならず、単位作業時間の資源需要量が低減されるような作業時間の延長を考慮する場合への拡張。

張.

ただし、本論文で最適化手法として用いた GA は、
組合せ最適化問題全般の解法として有力であることから、
このような新たな取組みに対しても比較的容易に
対処できるものと考えられる。

参考文献

- [1] R.D. Archibala and R.L. Villoria: *Network based management systems (PERT/CPM)*, (Springer, New York, 1967).
- [2] E. Minieka: *Optimization algorithms for networks and graphs*, (Marcel Dekker, Inc., 1978).
- [3] F.D. Robinson: The background of the PERT algorithm, *The computer Journal* 5, (1963), 297-300.
- [4] J.D. Wiest and F.K. Levy: *A management guide to PERT/CPM with GERT/PDM/DCPM and other Networks*, (Prentice-Hall, Inc., 1977).
- [5] 王瑞剛, 趙華安, 三原徹治: PERT における資源需要の均衡化を求めるアルゴリズム, 第 5 回情報科学技術フォーラム(FIT2006)講演論文集, (2006), 53-56.

(2009 年 4 月 13 日採用決定)

【附録】交配個体選択 GA (scsGA) の概要

遺伝的アルゴリズム Genetic Algorithm, GA は進化的最適化手法の一種であり, 生物の進化過程における繁殖・淘汰・交叉・突然変異という基礎的オペレーターによって再現される。しかし生殖・繁殖・交叉といった一連のオペレーションが用いられているのにもかかわらず, 一般的な GA で用いられる個体には雄・雌の区別がない。個体に雄雌の概念を導入し, より実際の生態系に近いアルゴリズムを構築することで GA の性能向上を図るものが交配個体選択 GA (scsGA) である [A1]。

scsGA における雄雌は, 交配個体, 被交配個体の 2 種類で表される。交配個体は適応度の高いものの上位の少数であり, 被交配個体はその残りの個体である。これは, 多くの同性の中から競争しなければ交配できない性と交配相手を選ぶときに比較的自由度の高い性という観点から性差を表したものであり, このような例は自然界に多く見られる。

この性差を導入した scsGA は次のような特長を示す。

- ① GA の基本形である単純 GA では世代交代に伴って時として最良解の劣化が見られるが, scsGA ではそういう現象がない。
- ② ルーレット戦略を用いる GA では適応度の低い個体の遺伝子が次世代に残る確率は当然のことながら小さいが, 2つのルーレットを持つ scsGA ではルーレットが 1つしかない単純 GA に比較して低適応度個体の遺伝子が次世代に残る確率が高い。
- ③ 一般に GA では進化世代数が大きくなるにしたがって類似の遺伝子が増殖し, 多様性の目安となる情報エントロピー値も急速に小さくなる傾向がある。これに対し scsGA では進化世代数が進んでも情報エントロピー値が急速に小さくなることはなく, 遺伝子の多様性が保持される。

(1) scsGA の基本オペレーション

GA で一般的に用いられるビット線列を遺伝子とする場合の scsGA の基本オペレーションは以下のようなものである。

◇ 生殖 (淘汰・繁殖)

一般に GA では繁殖と淘汰は生殖という一つの作業で表される。生殖は個体を次世代に残すか残さないか決定する作業であり, 残す場合を繁殖, 削除する場合を淘汰という。生殖は適応度によって繁殖する確率が定められており, 適応度の高いものが繁殖する確率が高くなるように設定してある。

scsGA では一部の適応度の高いものを交配個体

群, それ以外を被交配個体群として区別し, それぞれの群から 1 個ずつ選択された個体による確実な交配を行う。選択にあたってルーレット戦略を用いるが, 交配個体群と被交配個体群にはそれぞれ別々のルーレットを設定する。

◇ 交叉

交叉は 2 つの線列を同じ箇所 で分割し, 分割箇所以降の遺伝子を交換することをいう。

scsGA では切断する箇所が 1ヶ所だけの 1 点交叉を用いる。

◇ 突然変異

遺伝子を一定の割合で変化させることをいう。具体的には, 設置された突然変異の発生確率に従い, ビット線列のランダムに選ばれたひとつの遺伝子を 1 ならば 0, 0 ならば 1 に変化させる。

scsGA では交配によって生成された個体のみを突然変異の対象とする。

(2) scsGA のアルゴリズム

Step0 計算パラメータとして, 人口数 N_p , 交配個体数 N_s , 突然変異発生確率 P_m , 計算世代数 N_G を設定する。

Step1 人口数 N_p の初期世代線列 (個体) をランダムに設定する。

Step2 全個体の適応度を計算し, 有効な少数 (N_s 個) の個体を交配個体群に, 残りの ($N_p - N_s$) 個の個体を被交配個体群に分ける。

Step3 交配個体群から 1 個, 被交配個体群から 1 個の個体をそれぞれの個体群のルーレットからルーレット戦略で選び出し, 確実な交配を行い次世代個体とする。

この際, N_s 個の交配個体群の個体はそのまま次世代に受継がれるので, 新たな次世代個体の数は ($N_p - N_s$) 個である。

Step4 交配により新たに生成された ($N_p - N_s$) 個の個体に対して突然変異発生確率 P_m に応じた突然変異を行う。

Step5 進化世代数が計算世代数 N_G に達したら計算を終了する。そうでないとき Step2 へ戻る。

参考文献

- [A1] T. Mihara, H. Chijiwa and T. Ohta: On the Efficiency of GA with Selecting the Crossing Strings for the Discrete Optimal Problems, CD-ROM Proceedings of the International Symposium on Optimization and Innovative Design, #105, 1997.

グリーン・ツーリズム施設とパークマネジメントに関する研究

上海およびタイの調査を中心として

八島雄士（九州共立大学経済学部）、細野賢治（広島大学大学院生物圏科学研究科）、
徐涛（中村学園大学流通科学部）

A study of park management and facilities of green tourism.

Researches in Shanghai and Thailand

Yuji YASHIMA, Kenji HOSONO, Tao XU

Abstract

Social needs around the park and green space is more diverse, and complicated. We have conducted a survey of green tourism facilities in Shanghai and Thailand. We would like to propose suggestions to the development of park management from this survey. As the analysis results, we have two suggestions. The first proposal, decision making, performance evaluation, the established mechanism is the basic requirement for success. The second proposal, it is important to continue to send mission made from the customer's perspective outside and inside the organization.

Keywords: park management, facilities of green tourism, SWOT analysis

1. はじめに

本研究は、上海およびタイにおける4つのグリーン・ツーリズム施設の調査をもとに、それぞれの施設を現状分析し、わが国のパークマネジメントへの示唆を検討することを目的とする。

ここに、グリーン・ツーリズム(Green Tourism: GT)とは、農林水産省の定義によれば、「農山漁村地域において自然、文化、人々との交流を楽しむ滞在型の余暇活動をいう」。近年では、都市農村交流や食育などの視点から注目されている。

一方、パークマネジメント(Park Management: PM)とは、公園や緑地の管理運営である。しかし、近年の公園や緑地をめぐるニーズの多様化を反映した形で、所管官庁である国土交通省は、平成21年度予算の基本方針として、「良好な景観と緑豊かな都市環境の形成を推進するため、景観緑三法の的確な推進、都市公園事業や緑地保全事業等の一体的実施や、民間事業者が行う緑化等との協働等により、総合的・効率的・効果的に緑とオープンスペースの確保と良好な景観の形成を図るとともに、我が国固有の歴史的風致の維持向上を目的とした歴史まちづくり法に基づく歴史・文化資産を保全活用したまちづくりの支援による地域の活性化を図る観点」から施策を作成している。

本研究では、社会的余剰の最大化や公共サービス改革を念頭におき、上述した所轄官庁の枠を超えたパークマネジメントのあり方を検討したいと考えている。調査した上海やタイでは、グリー

ン・ツーリズムが自国の主幹産業である農業分野の人的・物的資源を活用した「アグロツーリズム」と呼ばれる観光政策として推進されており、観光部門の大きな柱の一つとされている。観光という側面で見れば、わが国でも、①諸外国への発信力強化、②縦割りを廃した政府をあげての取り組み強化、③地域・国民へのワンストップサービスの実施を主旨として、2008年10月に国土交通省の外局として観光庁が発足し、今後の推進体制が整備されたところである。

我々は、2008年8月にタイの2つの施設、2009年2月に上海の2つの施設で、管理者および経営者にインタビューを実施した。細野・八島・T. ラッパイサン(2009)では、タイでの調査をもとにアグロツーリズムの現状を検討した。これは、経済政策的側面からのアプローチであり、その現場の状況から今後の推進のための課題を明らかにしている。一方、本研究は、施設や空間のマネジメントという側面からアプローチし、それをパークマネジメントに適用するところに特徴がある。また、4つの施設の選定理由としては、タイにおいては、公的施設と民間施設の比較を意識し、かつ、先行事例である施設を選定した。一方、上海では、新旧の施設比較を意識し、特徴があり、かつ、先行事例である施設を選定した。

以下、2では、グリーン・ツーリズム施設とパークマネジメントとの関係を述べる。次に、3では、タイのチャンタブリ園芸研究センターについ

て、強み(strength)、弱み(weakness)、機会(opportunity)、脅威(threat)のマトリクス(SWOT分析という)により整理し、現状分析する。以下、同様に、4では、タイの Nongnooch Tropical Botanical Garden、5では、上海孫橋現代農業園区、6では、上海金山(廊下)現代農業園区について、SWOT分析により整理し、現状分析する。また、7では、マネジメントの視点から4つの施設を比較検討し、特徴を明らかにする。最後に、8では、これらの特徴がわが国のパークマネジメントに与える示唆を考察する。

2. グリーン・ツーリズム施設とパークマネジメントとの関係

わが国の都市公園は、都市公園法の規定の枠内で管理運営されているため、禁止されている行為が明らかである(都市公園法第11条)。一方、上述したように、公園や緑地への社会のニーズが多様化・複雑化しているなかで、学術研究の立場からは、①地域社会論、②システム論、③公園本質論、④公園経営論、⑤職能論(資格論)、⑥プログラム開発論、⑦マネジメント評価論の論点が示されている⁽¹⁾。今後の社会ニーズの変化に対応したパークマネジメントを実施するために、学術的には、所轄官庁の枠を超えてできることの可能性を検討しておくことが有用であると考え。また、現実に公園や緑地の管理のみならず、まちづくりの視点から、都市農村交流や観光を要素として加

えざるを得ない状況もおきている。

本研究では、グリーン・ツーリズム施設とパークマネジメントとの関係を三つの層で理解した上で、現状分析を試みたい。第一は、パーソナルコンピュータにたとえれば、ハードウェアとしての施設や空間である。公園施設やグリーン・ツーリズム施設などがあてはまる。第二は、プラットフォーム(またはオペレーション・システム)としてのマネジメントである。施設や空間の経営者および管理者、さらに、意思決定や業績評価のための経営スキルなどがあてはまる。第三は、アプリケーションとしての利用目的である。公園施設を利用したレクリエーション、観光農園を利用したグリーン・ツーリズムなどがあてはまる。

我々のインタビューは、各施設の経営者や管理者がプラットフォームの役割を果たすために、ハードウェアやアプリケーションの強みや弱みをどのように把握し、組織が直面しているチャンスやリスクにどう立ち向かっているのかを中心的な内容としている。これらの内容を整理するために、以下で、タイおよび上海の各施設のSWOT分析のマトリクスを作成する。

3. チャンタブリ園芸研究センターの現状分析

チャンタブリ園芸研究センターはタイ東部(チャンタブリ県クルン郡)に位置している。チャンタブリ県の基幹的作物である熱帯果樹作物を中心に品種開発および改良を主目的とした公設の

図表1. チャンタブリ園芸研究センターのSWOT分析(筆者作成)

	機会(opportunity)	脅威(threat)
(ビジョン) アグロツーリズムを普及・啓蒙し、農家の収入を安定させる	(1) 第10次農業開発計画の主要戦略の1つである (2) 研究機関やチャンタブリ県以外の生産者、学生の見学ニーズがある	(1) 予算の権限がない (2) 社会的な価値観が育っていないため、新たな見学ニーズは見込めない (3) 農家の考え方がよめない
強み(strength)	①見学ニーズに応えるコンテンツ(見学コース、ツーリズムセンター機能、物販、宿泊施設等)が充実し、リピートする可能性がある ②アグリツーリズムのモデルとなる可能性がある	①物販などをきっかけに、生産者の意識変革ができる ②ツーリズムエリア、研究エリアのゾーニングで、多様な見学者ニーズに対応できる ③予算がないなかで、自律的な活動として、農家を巻き込んで継続できる可能性がある
弱み(weakness)	①見学ニーズをいかし、予算の申請が可能である ②10次計画の具体的な実現策をだせば、マンパワーを使える可能性がある	①予算の継続性がなく、管理者の考え方が代わり、継続が困難になる ②マンパワー不足、新たな見学ニーズが開拓できず、尻すぼみになる ③受ける側の農家の意識が育たないため、継続できない

農業試験研究機関である(2)。インタビューしたのは、transfer technology section managerとアグリツーリズム広報担当を兼務する方(管理者に該当する)である。その内容をもとに、SWOT分析のマトリクスを作成した(図表1)。

公施設であるため、ビジョンは国の基幹政策である農業の振興にある。つまり、アグリツーリズムを普及・啓蒙し、農家の収入安定に寄与することである。そのための戦略として、一つめに機会と強みをいかせば飛躍的な成果をおさめることができる。すなわち、もともとの施設がある程度整備され、また、それを活用する意識もあるので、見学ニーズに応えるコンテンツを十分に用意することができる。さらに、農家も満足するほどではないが、協力する姿勢をもっており、うまくいけば、アグリツーリズムのモデルとなることができる。

二つめに、予算、社会的な価値観の醸成、農家の意識に課題はあるが、それを強みでクリアしようとする戦略である。つまり、農家の協力的な姿勢をいかし、意識を向上させ、収入増を経験させれば、自立的な活動に変えることができる。ツーリズムエリアや研究エリアなど見学者ニーズにあった整備をしているので、見学者の増加にともない評判があがり、ブームをつくることもできる。それを継続させれば、価値観としてのスタイルをつくることもできる。

三つめに、管理者の意識面の継続性、予算不足、マンパワー不足という内部的な弱みを、機会をいかすことで克服する戦略である。これは国の政策への提言である。見学者ニーズをいかして存在価値を示すこと、レベルの高いアグリツーリズム企画を示し、その実現のためのマンパワーを訴えること、この2つを根拠に予算承認のために説得することである。

四つめに危惧されるのは、予算、マンパワー、農家の意識を育てられないことによる継続の問題である。

4. Nongnooch Tropical Botanical Gardenの現状分析

Nongnooch Tropical Botanical Gardenは、チョンブリ県パタヤの郊外に所在するリゾートとガーデンを融合させた民間施設である(3)。インタビューしたのは、sell and marketing managerである。その内容をもとに、SWOT分析のマトリクスを作成した(図表2)。

創設者であるPisit Tansacha氏は映画監督の感覚とその妻であるNongnooch Tansacha氏のリゾートとガーデンの融合というアイデアがいかされた施設となっている点に特徴がある。現在は創設者子息のKampon Tansacha氏が社長をつとめている。民間施設で農的要素をいかしている事例となるため、ビジョンは入場料収入や同施設

図表2. Nongnooch Tropical Botanical GardenのSWOT分析(筆者作成)

	機会(opportunity)	脅威(threat)
(ビジョン) 入場収入や物販収入が増加する	(1) 観光ニーズがある(欧米人、中国人、韓国人) (2) 観光振興政策がある (3) 生産物の外部販売ニーズ(ゴルフ場、観光地) (4) ツーリズムアワードの受賞(TAT主催)	(1) 外来性の植物の病気 (2) 日本人によるパタヤの認知度
強み(strength)	①国の観光政策と一致し、売りになるショーがある ②外部販売ニーズおよび技術力をいかして、植物等の生産・販売を強化できる ③観光ニーズや生産・販売ニーズがあり、安定した雇用を提供し、かつ、能力開発ができる。	①バンコクのエージェンシーが増えており、PR次第では日本人を勧誘できる ②職員のサービス能力向上により、入場者のリピートができる ③技術をいかして、外来性の植物の病気を予防できる
弱み(weakness)	①観光ニーズをいかして、新たなコンセプトや企画が生まれる可能性がある ②外部販売ニーズを生かして、事業拡大の可能性があ	①事業継承ができず、ショーなどの質がおち、評判がさがりうる可能性がある

内に所在する Nongnooch Landscape Garden Design の物販収入を向上させることである。

そのための戦略として、一つめに機会と強みをいかした飛躍的な成果について、タイの伝統芸能や象のショーがわが国でも知られている。また、従業員も地元雇用で、かつ、福利厚生もしっかりしているため、意識が高い。国の観光政策とタイアップして広報すれば、入場料収入を伸ばすことができる。また、Landscape 会社は観葉植物をホテルやゴルフ場に納品しているため、観光が活況になれば、よい影響をうけることが予測できる。

二つめに、日本での認知度が低いこと、外来性の植物の病気対策を強みでクリアするためには、バンコクの旅行エージェントを介した PR が有効である。「ほほえみの国」といったキャッチコピーでタイへの印象は悪くないので、バンコクを基点とした観光ルートが確立されれば入場者増を見込むことはできる。他方、植物の病気対策は海外からの技術者も勤務しており、その技術力を生かすことにより克服することができる。

三つめに、事情継承の課題について、観光政策をいかすことによってクリアするために、ショーの評判を落とすことなく、sell and marketing 部門の有能な人材をいかして新たなツーリズムを開発することができれば、創設者の強みをさらに増すことができるものと予測できる。調査した経験からすると、前述のアグリツーリズムとの融

合が考えられる。特に、レストラン施設のコンセプトに工夫の余地はあるように思われた。食育など日本や欧米で評判になりやすいコンセプトを前面にだして PR することも可能である。

四つめに危惧されるのは、事業継承の課題をクリアできず、従業員の意識が希薄となり、ショーやガーデンコンセプトといった強みの継続性が断たれることである。

以上、タイにおけるグリーン・ツーリズム施設の現状分析の特徴として、第一に、国の政策（農業振興、観光）との関連が強いわりには、政策の連携がとれていない。つまり、公施設と民間施設の連携をみることができない⁽⁴⁾。第二に、現存するコンテンツを入場者や見学者のターゲット別、期間別コンセプトにきりわけること（つまり、多品種少量生産的な商品開発）ができれば、常時安定した入場者や見学者が見込むことができる。

5. 上海孫橋現代農業園区の現状分析

上海においてグリーン・ツーリズムが推進されている背景について、楊他(2007)では、人口急増に対する耕地面積の減少、市内農地の利用・転用システム未整備、農家の経営規模が小さいこと、生産コストの上昇、生産技術の遅れ、優秀な農業人材の不足などの現状を克服する一つの方策として、①農業産業化を推進するために、12の現代農業園区を形成したこと、②江南水郷を景観・

図表3. 上海孫橋現代農業園区のSWOT分析（筆者作成）

	機会 (opportunity)	脅威 (threat)
(ビジョン) ハイテク農業を産業化し、 ブランドとして育てる	(1) 大学との連携 (2) 大手企業との連携 (3) 外国の商品を導入する (4) 不動産業と連携し直売所増 (5) 集約的な生産基地の拡大 (6) 輸出 (7) 安全性が売れる	(1) 現代農業園区が100以上ある (2) 流通は開発途上 (3) 大学目的と企業目的の相違
強み (strength) (1) 技術 (ハイテク農業、 経験的積み重ね) (2) 資金 (3) 人材 (3つのチーム) (4) マーケット (5) 市場アクセス (6) 全自動温室システム	①大学や大手企業、不動産などと連携し、先進的な技術により技術力を発展させ、中国全体に情報発信ができる ②外国企業との連携により、人材を確保し、安全性のある生産物を提供することができる	①経験的な積み重ねを生かして、国家発展に寄与する産業を創造し、さらなるサポートをえることができる ②連携により受け入れた人材をいかして、流通問題をクリアする
弱み (weakness) (1) 土地不足 (2) 労働資源コスト (3) 気候リスク (4) 流通コスト高 (5) 流通技術不足	①連携を推進、外国商品の導入などを梃子に、集約的な生産基地を増やすことで、土地不足、労働資源コスト、気候リスクに対応できる	①WIN-WINの関係構築ができず、連携が不調である ②流通問題で生産基地拡大に支障をきたす

文化へと追求したこと、③無公害・有機農産物、健康な伝統食品の増加などをあげている。

上海孫橋現代農業園区は1994年に建設された中国初の農業園区である。インタビューは設立当初から技術者として関わっている現在の社長(5代目)に実施することができた。その内容をもとに、SWOT分析のマトリクスを作成した(図表3)。

国からの継続的な投資が最大の目標で、そのために、ハイテク農業を産業化し、「孫橋」のブランド力を向上させることがビジョンとなる。

そのための戦略として、一つめに機会と強みをいかした飛躍的な成果について、さまざまな連携を拡大し、先進的な技術を国内外から導入することができれば、中国全体に情報発信ができる。連携による研究成果や取引をセンター化し、統合する計画である。また、生産物の安全性が注目を集めており、創設当初からのオランダとの人的な連携を進め、この機会をいかすことができる。

二つめに、国の政策により現代農業園区は増えている。競争に勝つために、これまでの経験や技術力、人材力をいかし、政策にあった企画を開発する。また、流通問題についても優秀な人材の受け入れにより技術等を導入し解決ができる。

三つめに、上海の土地不足や労働コスト上昇、気候リスクの解決のために、四川省や内モンゴル、海南島に集約的な生産基地をつくり、技術、サービス、産出物を投入している。地域や上海、国外

への孫橋ブランド発信につながる可能性がある。

四つめに危惧されるのは、連携におけるWIN-WIN関係構築および維持、流通問題である。

6. 上海金山(廊下)現代農業園区の現状分析

上海金山(廊下)現代農業園区は2006年に建設された農業園区である。インタビューは設立当初から現在まで就任している社長に実施することができた。その内容をもとに、SWOT分析のマトリクスを作成した(図表4)。

金山区から集中的な投資を受け、2006年の1年間で急速に整備された大規模開発型の農業園区である。巨大園区の強みをいかして観光農業としてブランド化することがビジョンである。

戦略として、一つめに機会と強みをいかした飛躍的な成果について、観光農業としてのアクセスに投資の最中であるからこれをいかして、回遊ルートなどをターゲットニーズにあわせて提供することができれば、大規模施設の売りを生かすことになる。また、国外企業との取引があるので、そのブランドを活用することも認知度をあげることにつながる。

二つめに、推進者の交代をはじめとして、園区内外でのコミュニケーションに課題がある。まずは大規模開発の特長を改めて再認識し、次に、創造的な観光農業モデルを構築することができれば、特長がいくてくる。

図表4. 上海金山(廊下)現代農業園区のSWOT分析(筆者作成)

	機会(opportunity)	脅威(threat)
(ビジョン) 大規模整備の農村を生かし、観光農業としてブランド化する	(1) アクセスについて鎮からの投資がある (2) 国外企業との取引がある (3) 企業グループからの投資 (4) テレビ等での広報機会	(1) 金山廊下書記長をはじめとして設立推進者が交代している (2) 官僚との考え方の相違 (3) 資金力が落ちている (4) 農民とのコミュニケーション
強み(strength)	① 広報やアクセスの改善により、大規模施設が売りとなって観光農業として認知される ② 大規模農業をいかした国外企業との取引増	① 大規模開発および大規模施設の特長を発見し、関係者のコミュニケーションが改善される
弱み(weakness)	① アクセス改善、国外企業ブランドおよび投資を活用して、観光農業として広報し、ブランドを認知してもらうとともに、園区内の求心力をだす	① 方向転換によるコミュニケーション問題 ② ブランドPR不足による資金不足

三つめに、内部的な競争など園区内の弱みについては、外からの意識改革が有効である。つまり、国外ブランドの活用により園区内の意識のベクトルを統一にしむける。また、園区内競争に方向性を与え、必要な競争に質を転換する。

四つめに危惧されるのは、コミュニケーション問題が解決できずに、資金不足に陥ることである。

以上、上海におけるグリーン・ツーリズム施設の現状分析の特徴として、第一に、国や上海政府の政策により大きく影響を受けることである。そのため、政策に合致した農業の産業化を構築することが課題であることは共通している。第二に、最も古い園区と比較的新しい園区を縁あって調査することになったのであるが、開発モデルが対照的であった。孫橋はオランダの施設型農業を発展させたものであり、一方、金山廊下はアメリカ型の大規模農村開発である。

7. 各調査対象施設の比較分析

3～6の現状分析を踏まえて、マネジメントの

視点から比較分析してみたい。つまり、2で述べた三層で理解する方法の第一のハードウェアと第二のプラットフォーム（またはオペレーション・システム）との接点について考察する。具体的には、次の4つの視点を比較する。第一に、意思決定の視点、マネジメントとはヒト、モノ、カネ、情報という経営資源を事業の継続性のために有効活用できるように意思決定することであるとの考えについて比較する。第二に、業績評価の視点、事業リスクを減少させるために、モニタリングし、改善しているのかを比較する。責任と権限のバランスの問題ともいえる。第三に、仕組みの視点、意思決定および業績評価を行うために有用な経営情報を迅速に入手できるのか、また、情報を使ってコミュニケーションが円滑か、比較する。第四に、顧客の視点、組織に収入をもたらす、ブランドや評判を形成する役割をもつ顧客への配慮を比較する。第一から第三の論点は組織内部について、第四の論点は組織と外部との接点について考察するものである。以下、図表5にしたが

図表5. マネジメントの視点からの比較分析（筆者作成）

	チャントプリ園芸研究センター	Nongnooch Tropical Botanical Garden (NTBGという)	上海孫橋現代農業園区（上海孫橋という）	上海金山（廊下）現代農業園区（上海金山廊下という）
(1)意思決定の視点				
経営資源	①ヒト(△), ②モノ(◎), ③カネ(×), ④情報(△)	①ヒト(◎), ②モノ(◎), ③カネ(△), ④情報(△)	①ヒト(◎), ②モノ(◎), ③カネ(○), ④情報(△)	①ヒト(△), ②モノ(○), ③カネ(△), ④情報(△)
事業の継続性	予算が心配 ヒトと情報は改善できる	○ 情報は改善できる	○ 情報は改善できる	予算とコミュニケーションの改善が心配 情報は改善できる
(2)業績評価の視点				
事業リスク予測	○	○	◎	○
モニタリング	○	○	◎	コミュニケーションが心配
責任と権限	兼務しており、不明確なところがある	○	◎	鎮や企業がバラバラにツーリズムを企画しており、心配
(3)仕組みの視点				
経営情報システム	未調査	未調査	○	構築中、完成すれば◎
情報の有用性	○	○	○	心配
情報の迅速性	○	○	○	心配
コミュニケーション	○	○	○	心配
(4)顧客の視点				
収入とのつながり	政策との関係が最重要、予算が少なくなっている	○	政策との関係が最重要、採算は優先順位が高くない	政策との関係が最重要、採算は優先順位が高くない
ブランド構築	○	◎	○	○
評判の形成	○	○ 日本向けには改善の余地あり	○	メディアを活用しているが、鎮政府や農民との関係が心配

って考察する。図表中の印は、◎が優れている、○が問題ない、△が確認不足または改善余地あり、×が心配であることを意味している。

(1) 意思決定の視点では、経営資源について、①ヒト、②モノ、③カネ、④情報にわけてマークしている。事業の継続性も含めて考察すると、チャントブリ園芸研究センターは、予算が継続されていない点と担当者が兼務していることからヒトの面が心配である。NTBGは、カネの情報確認が不足しており、△としている。上海孫橋は問題ない。上海金山廊下は予算、ヒトの側面が心配で、特に現場とのコミュニケーションがうまくいっているのかについて特に心配を感じた。共通しているのは、情報の側面の改善である。つまり、組織内のみならず、組織外への広報をいかに行うかが課題である。これは(4)の顧客の視点にもつながる。

(2) 業績評価の視点では、チャントブリ園芸研究センターの兼務が基本となっており、責任と権限が不明確である。上海金山廊下は鎮や企業がバラバラにツーリズムを企画しているため、現場のモニタリングができていないか不安であるし、責任と権限も明確でないように思われる。

(3) 仕組みの視点では、上海金山廊下が創設から間もないこともあり、経営情報システムを含めたシステムを構築中であった。その点で他の項目にも不安が残る。

(4) 顧客の視点では、それぞれに特徴が見られる。チャントブリ園芸研究センターは、公設施設であり、政策との関係が最重要課題である。一方で、研究センターとしてのブランドや評判はすでに確立されているため、グリーン・ツーリズム施設としても活用しやすい状況にある。NTBGは、これまでの実績から問題ない。日本向けでいえば、ブーケットが人気であるため、バンコクとの兼ね合いでどこまでブランドをいかすかを企画する余地がある。上海孫橋および上海金山廊下はいずれも公設施設であり、政策との関係が最優先され、採算は度外視の印象であった。また、上海金山廊下はメディアを活用してはいるが、コミュニケーションの問題をどう改善するかによってブランドや評判は変わるように思われる。

8. パークマネジメントの発展への示唆

最後に、以上の4つの施設の現状分析および比較がわが国のパークマネジメントに与える示唆

を検討したい。これは2で述べた三層で理解する方法の第二のプラットフォーム(またはオペレーション・システム)と第三のアプリケーションとしての利用目的との接点についての検討を意味する。具体的には、図表5の4つの視点ごとに検討する。

(1) 意思決定の視点では、公園施設とグリーン・ツーリズム施設との違いはなく、また、公的施設と民間施設との違いもない。4つの施設に共通するのは情報の側面に関する改善である。具体的には、利用のプロセスを組織内外にどのように広報し続けるのかが課題であると思われる。広報の継続性の源泉は、事業の継続性と組織のビジョンやミッションをいい続けることであると考えられる。結果として、その組織や施設の存在価値が理解され、事業の継続性につながる。わが国のパークマネジメントについても同様のことがいえる。各施設のミッションと価値観を公表し、その中でさまざまな事業を展開し、広報することが重要であると考えられる。

(2) 業績評価の視点では、事業リスクを予測するために、責任と権限を明確にして、その遂行をモニタリングすることは、施設の目的の相違とは関係がない基本的な要件である。やはり、兼務をしていれば、責任と権限が不明確になりがちであるし、モニタリングの基礎として、組織内のコミュニケーションをしっかりとつづけておくことが必要と思われる。わが国では、所轄官庁の違いや多様な利害関係者ニーズのために、責任と権限が不明確になる可能性が大きい。そのため、プロジェクト型の組織で、かつ、専従の経営管理者をおき、責任と権限を明確にすることが重要である。

(3) 仕組みの視点では、意思決定や業績評価を支えるための経営情報システムを用意しておく必要がある。ITを駆使することまでは要件としなくとも、コミュニケーションの確立と情報の有用性、迅速性は確保したい。この点で目的の相違とは関係がない基本的な要件であると考えられる。わが国では、総務省がInformation and Communication Technology(ICT)を課題解決に活用する施策として、u-Japan構想を推進している。その成果の蓄積を活用することによって、プロジェクト型組織における基本コミュニケーションツールとして、ICTを使ったプラットフォームを用意することを視野に仕組みを構築できる可能性がある。

(4)顧客の視点では、施設の目的や公的施設か、民間施設かによって異なる点がある。すなわち、第一に、収入とのつながりにおいて、民間施設であれば収支バランスが最も重要視されるが、公設であれば、収支バランスに公共性を加味することが必要である。第二に、ブランド構築および評判については、経験が重視される。つまり、一朝一夕にできるものではないので、上述したように、組織のビジョンやミッションを言い続けること、そして、結果として顧客の理解が進むことが必要となる。都市公園においては、そのミッションを明確にしやすい公園とそうでない公園が存在する。NTBGのような特色があれば、それを発信しつづけることである。もし、特色をだしにくいのであれば、つくればよい。上海金山廊下のように、後発の場合には、目立つことをすごいスピードで実現することによって、ブランドを確立できる。結果として、コミュニケーションに問題はあるが、継続して発信しつづければ関係者の認識に変化を与えることができる。わが国のパークマネジメントでは最も弱い点と考えられる。つまり、これまで行政が主体的に施策を実行してきたため、多様な利害関係者において、マネジメントの発想や知識、経験が不足していると思われる。この点について、今回調査した4つの施設は、それぞれ問題点はあるが、既存施設の有効活用、経営者の多彩な才能を生かすこと、技術を活かした経営、驚異的な開発スピードなど、多くの学ぶ点がある。

以上、パークマネジメントに与える示唆をまとめると、第一に、意思決定や業績評価、確立された仕組みは成功のための基本的要件である。つまり、公的施設、民間施設の違いや施設の目的の相違に関わらず、マネジメントがプラットフォームやオペレーション・システムとして機能しなければならない。これにICTを付与すれば、新たな使い方を提案することもできる。

第二に、予算をえるためには、顧客の視点にたったミッションを組織の内外へ発信しつづけることが重要である。そのためのアイデアとして、ミッションを伝え、理解する場を、現実と仮想とを織り交ぜて構築することができれば、推進力を生むことができる。

本研究では、公的施設、民間施設、新、旧とりまぜたバラエティに富んだ調査ができた。しかしながら、パークマネジメントは個々の公園の状況によって異なるため、高いところから眺めた大枠

の仕組みとして今回の成果を位置づけたい。他方、ローカルな部分では、大枠の仕組みをいかしながら、個々の問題に対応するための方法と工夫が必要と思われる。

[付記]

本論文は、北九州市の平成20年度学術・研究振興事業調査研究助成金「アジアにおけるグリーン・ツーリズム政策と農を活かした観光施設の現状と課題—中国・タイを中心として—」を活用して行った研究調査に基づいて作成した。本論文を作成するに当たっては、調査先等で数多くの方々から多大なるご支援とご協力を賜った。この場をお借りして感謝申し上げる次第である。

[注]

- (1) 金子(2006)p.269
- (2) 詳細は細野・八島・ラッパイサン(2009)pp.78-82を参照。
- (3) 詳細は前掲稿 pp.82-86を参照。
- (4) 前掲稿 pp.87-88でも政策的な側面から同様の課題を指摘している。

[参考文献]

- [1]. 金子忠一(2006),「総合化・複合化する公園管理とランドスケープ・マネジメント技術」『ランドスケープ研究』69(4), pp.266-269, 日本造園学会, 2006.
- [2]. 細野賢治, 八島雄士, トーヴォン ラッパイサン(2009),「タイにおけるアグロツーリズムに関する一考察—チャントブリ県の公的施設とチョンブリ県の民間施設を事例に一」『九州共立大学経済学部紀要』第115号, pp.73-89, 2009年1月.
- [3]. 楊丹妮, 顧海英, 俞菊生, 藤田武弘(2007),「中国におけるグリーン・ツーリズムの進展と観光農業の展開」2007年度日本農業市場学会・個別報告
(2009年4月13日採用決定)

Nb₂O₅添加による水素吸蔵合金の水素吸収速度に及ぼす影響

Effect of hydrogen sorption kinetics of metal alloys
for hydrogen storage using Nb₂O₅ as catalyst

林 信孝* 宮入 嘉夫* 深田 智** 牧原 義一***

* 九州共立大学大学院工学研究科機械生産システム工学専攻

** 九州大学大学院総合理工学研究科先端エネルギー理工学専攻

*** 三重大学教育学部理科教育講座

Abstract

In recent years substitute energy resources for fossil fuels have been strongly demanded. Hydrogen is one of the promising materials. However, hydrogen has serious problems in its transportation and storage. Three methods of compression, liquefaction and absorption are nominated for the techniques to solve the problem. We paid our attention to a metallic alloyed material for hydrogen storage by the absorption method because it has the advantage of a high contraction ratio of hydrogen with 1/1,000. On the other hand, it also has disadvantages such as its heaviness in weight, high temperature in absorbing/desorbing operation, and low reaction rate, and so on. Thus, we have been trying to improve these disadvantages by adopting composite materials of Mg-ZrTiMn with or without Nb₂O₅ as catalyst.

Keywords: hydrogen, Mg hydride, Laves phase, reactive mechanical milling, niobium oxide

1. はじめに

石油など化石資源を中心とした近年のエネルギーシステムは、化石資源の偏在、枯渇化、地球環境の破壊、というさまざまな問題を引き起こしている。特に日本は化石資源に乏しい国であるために、これらに代わる新しいエネルギー源の開発および発展が必要不可欠である。その新しいエネルギーに求められる条件は上記の問題解決は元より以下の3つが挙げられる。

- ① 単位質量当たりの燃焼カロリーが高いこと(高カロリーである)
- ② 燃焼カロリーあたりのコストが低いこと(経済的である)
- ③ 排出ガスによって自然の体系を乱さないこと(エコロジーである)

これらの観点から、水素エネルギーは期待に沿うことが可能なエネルギーといわれている。その理由は水素エネルギーが持つ以下の2つの特性にある。

- ① 水素は1 Nm³ 燃焼すると約 11.7MJ の熱量を発生させることができる。気体の水素は軽いため他の化石燃料に比べて質量あたりの熱量が非常に大きくなる。
- ② 無尽蔵とも言える太陽光エネルギーによって発電し、地球上に豊富に存在する水を電気分解することによって、水素は、製造され、エネルギーとして活用され、また水に戻る。このサイクルが速いために自然界に影響を及ぼすことがなく、原材料が水であるがために化石燃料を使うときに発生するCO₂やSO_xを排出することがない。

しかし、水素エネルギー実用化の課題は水素貯蔵能力、コスト、水素エネルギーの変換技術、安全性、輸送システムの確立、などがある。現在、

水素の貯蔵は主に高圧ガスボンベによるもので、その貯蔵体積を1/350にすることができるが、他に液体貯蔵法では1/800に、水素吸蔵合金では金属水素化物という形で水素の体積を1/1000にまで収縮可能である。本研究では、その中でも特に体積当たりの貯蔵率が高く、水素を貯蔵、保存、運搬するための材料として水素吸蔵合金に注目した。そして実用化のための水素吸蔵合金に要求されうる条件は以下の通りである。

- ① 水素吸蔵量・放出量が大さい。
- ② 吸蔵・放出間での平衡水素圧の差(ヒステリシス)が小さい。
- ③ 常温、低圧力中で水素を吸蔵、放出させることができる。
- ④ 水素の吸蔵・放出速度が速い。
- ⑤ 水素の吸蔵・放出サイクルによる性能の劣化がない。
- ⑥ 水素化物生成熱(反応熱)が小さい。
- ⑦ 安価である。
- ⑧ 安全性が高い。

水素吸蔵合金では、一般に、実用化の目標値として水素吸蔵・放出温度は100℃前後、水素吸蔵量は5mass%という設定がなされている。LaNi系合金(1~2mass%) Ti金属(4mass%)、TiFe系合金(2mass%)、Mg系合金や軽金属アミド・イミド系物質など多くの研究・開発が行われている。()内の数値は現状のおおよその水素吸蔵レベルを示す。Mgは多量の水素を吸蔵し(7.6mass%)比較的安価な金属であるため、有望な水素貯蔵材料として注目されている。しかし、Mgと水素との反応は非常に遅く、水素の吸蔵・放出には0.1MPaの水素雰囲気中で300℃以上の高温を必要とする。このようなMgの水素貯蔵特性を改善するために、Mgを含む金属化合物の作製¹⁻³⁾や、

表面積をあげることで水素と反応する部分を増やし水素吸蔵能力の向上を試みたメカニカル・ミリングによる微細化^{4,6)}、およびMgと他の水素吸蔵合金とのメカニカル・ミリングによる複合化⁷⁾などが行われている。また、近年ではMgにNb₂O₅を添加することによって水素吸収・放出速度が飛躍的に向上する^{10,14)}という研究結果が報告されている。

そこで、著者らはこのNb₂O₅に注目した。これまでの研究で、水素吸蔵量が多いが水素放出温度は高いMgと、水素吸蔵量は少ないが水素放出温度の低いZrTiMn系合金とを機械的に粉碎、微細化、混合すること、いわゆるメカニカル・ミリングによる複合化によって、界面境界上にある弾性的相互作用による協現象を利用し、水素吸蔵量を一定量保持したまま、水素放出温度を下げる事が可能であることが判明した⁷⁾。

本研究では、水素吸蔵量が少ないが放出温度が比較的低温で六方晶ラーベス相構造を持つ、Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5}合金を母合金とし、多量の水素吸蔵量を持つが水素放出温度の高いMgとのメカニカル・ミリングにさらにNb₂O₅を1mol%添加することによって、水素吸収速度の改善を狙った。

2. 実験方法

試料の作製には、市販されているMg、Nb₂O₅(純度99.9%、100メッシュ)とZr、Ti、Mn(いずれも、純度99.99%、バルク状)を用いた。まず、Arガス雰囲気中でアーク溶解法を用いてZrTiMn合金(バルク状)を作製する。作製したZrTiMn合金をArガス雰囲気(1気圧)で1100℃、160時間の熱処理(アニーリング)を行うことで、結晶状態を整えた。作製したZrTiMn合金をArガスで置換したグローブボックス内で、乳鉢を用いて250μm以下の粒度に粉碎した。そして、MgとZrTiMn合金をそれぞれ0.5gずつとNb₂O₅を1mol%(0.009g)秤量し、20個のクロム鋼製ボール(φ7.0mm)とともに、Fig.1に示す容積30mLのクロム鋼製ミリング容器に封入した。ミリング容器内を6.7×10⁻⁵Paの真空下で12時間以上真空引きした後、容器内に水素(純度99.9999%)を1.0MPa充填した。この容器を遊星型ボールミル装置(Fritsch-P7)にセットし、公転400rpm(公転半径135mm)、自転800rpm(自転半径15mm)の条件下で1時間かけてメカニカル・ミリングを行いMg-50mass%(Zr_{0.2}Ti_{0.8})Mn_{1.5}複合合金(Mg複合化水素化物)を作製した。このように、水素雰囲気中でのミリングにより、水素化物を作製する方法を「反応性メカニカル・ミリング法(Reactive Mechanical Milling (RMM) Method)」と呼ぶ。RMM終了後、室温において容器内に1.1MPaの水素を充填し、0.9MPaまでの減圧時間を測定し再び1.1MPa水素を充填する。この測定を容器内の圧力が1.1MPaの平衡圧

になるまで行った。その後室温にて6.7×10⁻⁵Paになるまで真空引きを行い、脱水素化処理を行った。その後再び水素を同様の条件で充填しこれらの工程を3回行うことでこれらの減圧量から状態方程式(PV=nRT)を用いて吸蔵水素量を算出し、その吸蔵時間と水素吸収量ならびに水素吸収速度の測定を行った。

また、作製した合金、水素化物および脱水素化後の試料について粉末X線回折実験(XRD)を行うことによってそれぞれの生成物とその結晶構造を調べた。

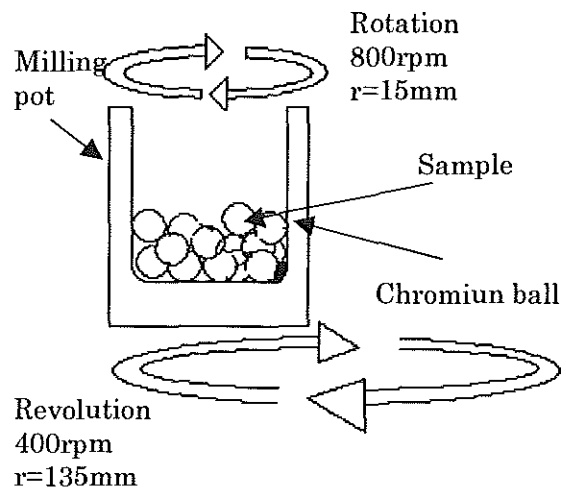


Fig.1 Illustration of mechanical milling pot

3. 実験結果および考察

3-1 水素吸収量

Fig.2はMg複合化物の1回目、2回目、3回目の水素吸収量測定結果を示す。常温での脱水素化処理が完全ではなかったために、吸蔵水素量の飽和値を1回目の放出量と等しいものとして、残留水素量を2回目以降に加算している。1回目の平衡圧に達するまでの時間は1200分となった。また、常温では水素を完全に放出することが無く、回数を重ねるごとに残留水素量が増加し、水素平衡圧力まで達する時間が短くなっている。これにより、Mgは水素を放出させるには400℃以上の高温を必要としているために常温では水素を放出しにくく、2回目以降の水素化時間が短いのは残留水素が残っているために水素充填時間が短縮されているものと示唆される。

Fig.3はNb₂O₅を1mol%添加した場合の1回目、2回目、3回目の水素吸収量測定結果を示す。こちらも常温での脱水素化処理が完全ではなかったために吸蔵水素量の飽和値を1回目の放出量と等しいものとして、残留水素を2回目以降の結果に加算している。1回目の平衡圧に達するまでの時間は1000分となり、Nb₂O₅未添加時と同様に回数を重ねることによる残留水素量は多くなっているが、残留水素ならびに残留水素の増加

量が少なく、2回目以降の測定では同じ曲線を描いている。また、水素吸蔵量は Nb_2O_5 を添加することによって、0.1wt%ほど増加している。

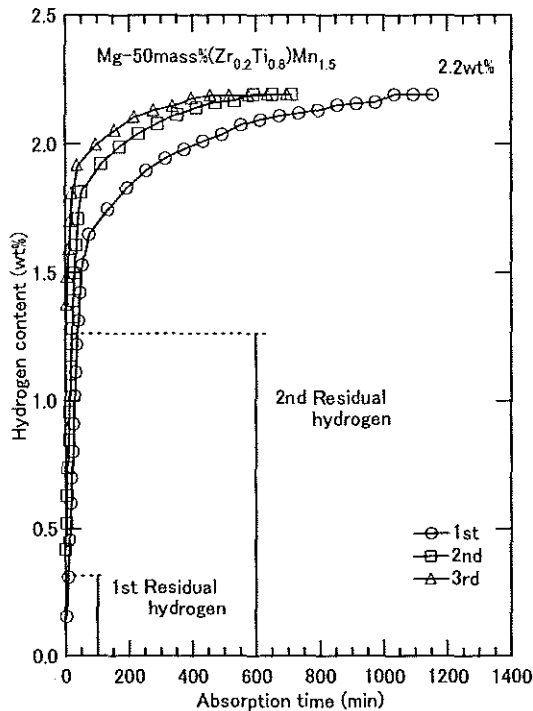


Fig.2 Absorbed hydrogen weight of Mg-50mass% $\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{Mn}_{1.5}$ composite alloy without catalyst for three times runs.

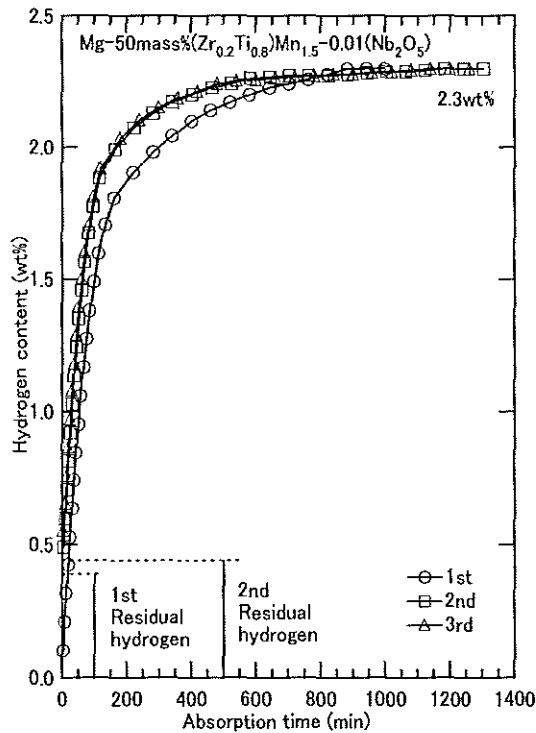


Fig.3 Absorbed hydrogen weight of Mg-50mass% $\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{Mn}_{1.5}$ composite alloy with Nb_2O_5 catalyst for three times runs.

Fig.3 Absorbed hydrogen weight of Mg-50mass% ($\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{Mn}_{1.5}$) composite alloy with Nb_2O_5 catalyst for three times runs.

安定性が未添加時に比べて低くなり、常温での水素放出に寄与するものと考えられる。

また、硬い酸化物の添加によって、メカニカル・ミリング処理中に複合化物がさらに微粒子へと変化し、それによって水素吸蔵量が増加したのではないかと考えられる。

3-2 水素吸収速度

Fig.4はFig.2の実験結果から得られたMg複合化物の1回目、2回目、3回目の水素吸収速度測定結果を示す。この場合、横軸(経過時間)を水素吸収速度がほぼ一定になるまでの100分までとした。2回目の水素吸収速度が向上し、3回目のものでは吸収速度が低下している。また、2回目のものが最も水素吸収速度が速くなり、20分までに波形を示している。これは2回目の測定時に残留水素量が比較的少なく、残留水素を加味していないために水素吸収速度が向上し、波形が乱れているのは測定時の誤差と考えている。

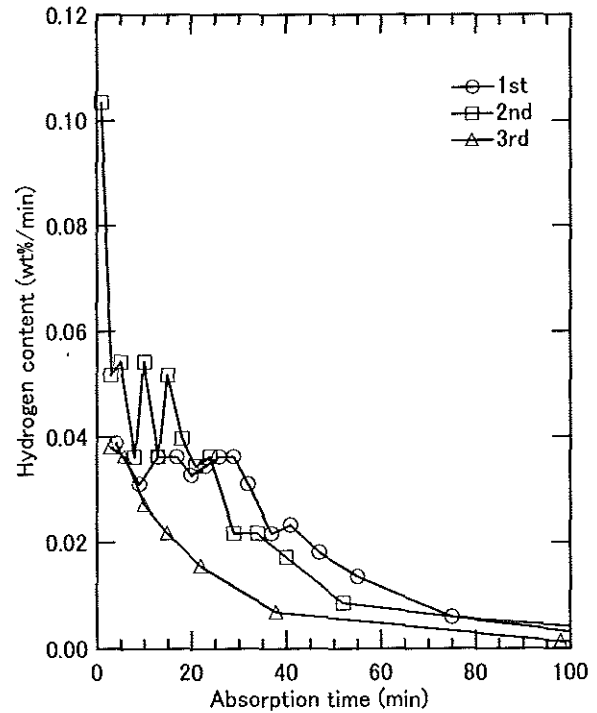


Fig.4 Hydrogen absorption rates of Mg-50mass% $\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{Mn}_{1.5}$ composite alloy for three times runs.

Fig.5は Nb_2O_5 を1 mol%添加した場合の1回目、2回目、3回目の水素吸収速度測定結果を示す。この場合、横軸を水素吸収速度がほぼ一定になるまでの200分までとした。 Nb_2O_5 未添加時と比較して水素吸収速度は遅くなり、水素吸収速度がフラットになるまでの時間も2倍に増加している。1回目に対し2回目の水素吸収速度は遅くなる傾向を示したが、3回目はほとんど変化は見られなかった。Mg単体に Nb_2O_5 を添加する既往の研究では、急激な水素吸収速度の向上が認められているが^{10, 14)}、本実験で扱ったMg-ZrTiMn

系複合金への Nb_2O_5 の添加では、水素吸収速度は遅くなり、逆の効果を示していることが分かった。

Fig.6 は Mg 複合物の最終的な水素吸収量を 100%とした場合の 3 回の測定結果から水素吸収率と水素吸収速度を比較した結果を示す。

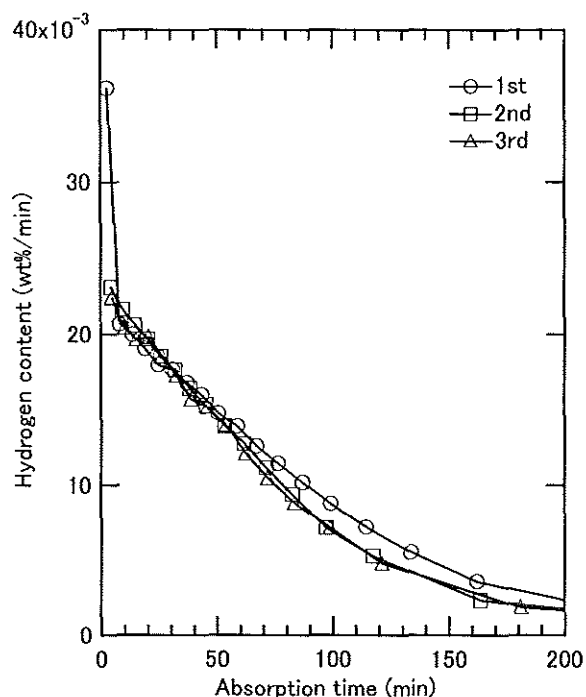


Fig.5 Hydrogen adsorption rates of composite alloy with Nb_2O_5 for three times runs.

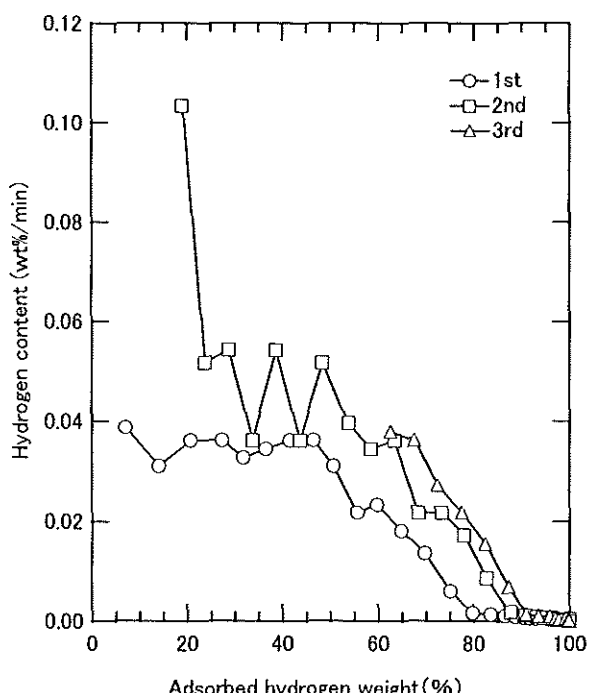


Fig.6 Comparison among hydrogen adsorption rates of Mg-50mass% $Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5}$ composite alloy for three times runs.

これにより水素吸収率と比較した場合、水素吸収速度は 2 回目以降から速くなっていることが分かる。これは、水素吸収・放出を行うことによって、水素の吸収が容易になるためと考えられる。3 回目のものは多くの残留水素が残っているが、吸収率が低い場合の吸収速度は向上しているためと考えられる。

Fig.7 は Nb_2O_5 添加時の最終的な水素吸収量を 100%とした場合の 3 回の測定結果から水素吸収率と水素吸収速度を比較した結果を示す。 Nb_2O_5 未添加時と比較すると吸収速度は吸収率と比較して 1 回目の吸収率が低いものが最も速く、未添加時と同様に 2 回目以降の吸収速度が向上している。また、2 回目以降からは同一の吸収率に対応する吸収速度が同じ曲線を描いている。これによって、 Nb_2O_5 を添加することによって、水素吸収速度は Mg 複合物よりも低下し、水素吸収速度特性は母合金となった合金の特性に左右されることが考えられる。

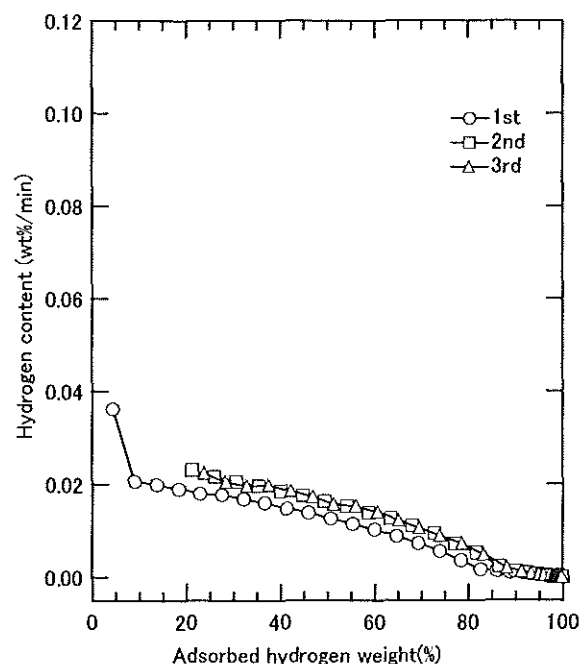


Fig.7 Comparison among hydrogen adsorption rates of Mg-50mass% $Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5}$ composite alloy with Nb_2O_5 catalyst for three times runs.

3-3 結晶構造

Fig.8 は Mg 複合物の複合化前、水素化後および 3 回の測定後に水素を常温で真空引きすることによって水素を放出させた場合の X 線回折結果を示す。図中の ● は MgH_2 、○ は Mg、▽ は $Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5}$ 、▼ は $Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5}H_x$ の各組成に対応するピークを示している。これにより、Mg は完全に水素化してはおらず Mg 水素化物と Mg が混在していることが分かる。また、 $ZrTiMn$ は格子間に水素が侵入することによって格子が広がり、ピーク位置が低角側にシフトしている。常温での水素放出後も Mg は完全に水素を放出

しておらず、同様に ZrTiMn のピーク位置が完全に元に戻っていないことから水素を完全には放出しておらず、両組成において残留水素が確認された。

Fig.9 は Nb₂O₅ を 1 mol% 添加した時の複合化前ならびに 3 回の測定後に Mg 複合化物と同様に水素を常温で真空引きすることによって水素を放出させた場合の X 線回折結果を示す。

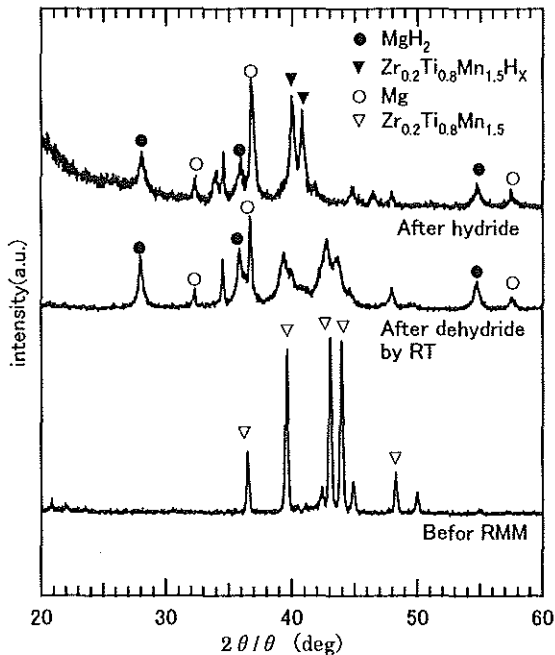


Fig.8 XRD pattern of three kinds of constituent Materials for Mg-50mass%(Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5}) composite materials without catalyst.

図中の●は MgH₂, ○は Mg, ▽は Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5} の各組成に対応するピークを示している。これによって、Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5} のピーク位置が元の位置に戻っていることから Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5} では水素を完全に放出していることが分かる。

しかし、Mg 水素化物の相は依然残っており、残留水素が確認されたこれによって、Nb₂O₅ を添加することにより、常温での水素の放出は Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5} に強く作用されており、Mg に対しての影響が弱められていると考えられる。

今後、これらの複合化物を SEM もしくは光学顕微鏡による測定を予定している。これによって、酸化物を添加したことによる粒径の変化にともなう水素吸収・放出に及ぼす影響を測定することができる。また、Nb₂O₅ の添加量を変化させることによる Nb₂O₅ の影響や、ZrTiMn 系合金への Nb₂O₅ の添加による水素吸収・放出速度ならびに水素吸収量への影響を測定し、この母合金へ及ぼす Nb₂O₅ の影響を測定するとともに、これらの変化を定量的に測定するために、(Zr_{1-x}Ti_x)Mn_y と Mg-50mass% (Zr_{1-x}Ti_x)Mn_y (X=0~1, Y=

1.5~2)への Nb₂O₅ 添加の影響を調べることによって、Nb₂O₅ の影響が Mg 複合化物においてどのように作用しているのかを測定する必要がある。

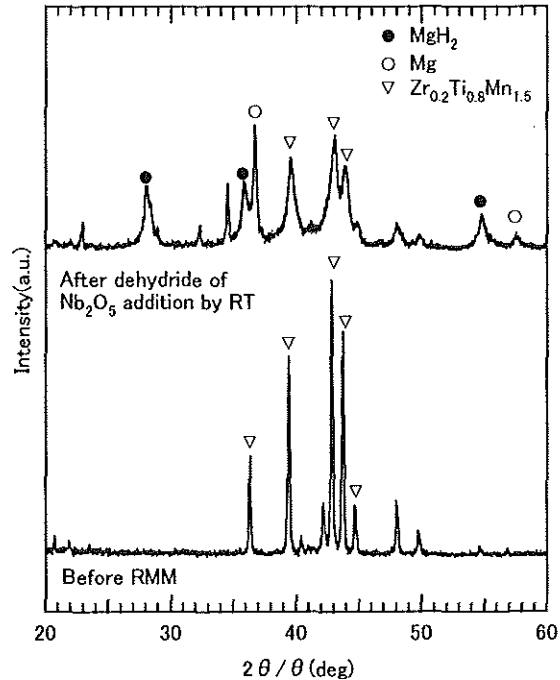


Fig.9 XRD pattern of of two kinds of constituent materials for Mg-50mass%Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5} composite material with Nb₂O₅ catalyst.

4. 結論

本研究ではこれまで行ってきた Mg と Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5} との複合化物に新たに Nb₂O₅ を 1 mol% 添加することによって Mg-50mass%Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5} · 0.01 (Nb₂O₅) 複合物質を作製し、この複合物質の水素吸収速度の改善を狙い、以下の結論を得た。

- (1) Nb₂O₅ を Mg 複合化物に 1mol% 添加することによって、水素吸収量は約 0.1wt% 増加した。これは酸化物を添加することによって微粉化が促進され、複合化物の表面積が増加し、水素との反応が顕著に行われていると考えられる。
- (2) Nb₂O₅ を添加することによって常温での水素放出を容易にすることが可能となる。
- (3) 結晶構造解析結果から、Nb₂O₅ の添加は Mg の水素化物より Zr_{0.2}Ti_{0.8}Mn_{1.5} 合金のそのの水素放出に強く影響するものと考えられる。
- (4) Nb₂O₅ を添加することによって、水素吸収速度は低下し、吸収曲線は緩やかなものとなった。この結果は、既往の報告とは異なる結果となった。

文献

- 1) J.J.Relly and R.H. Wiswall : Inorg. Chem. 7 (1968) 2254 - 2256.
- 2) N.Terashita, K.Kobayashi, T.Sasai and E. Akiba : J. Alloys Comp. 327 (2001) 275-280

- 3) K.Aono, S.Orimo and H. Fujii: J. Alloys Comp. **309** (2000) L1 -L4
- 4) J.Huot, G.Liang, S.Boily, A.van Neste and R. Schulz : J. Alloys Comp. **293-295** (1999) 495-500
- 5) N.Hanada, T.Ichikawa, S.Orimo and H.Fujii : J. Alloys Comp. **366** (2004) 269-273
- 6) S.Orimo, H.Fujii, K.Ikeda and Y.kaitano : J. Japan Inst. Metals. **60** (1996) 685-692
- 7) K..Umeda, Y.Miyairi and Y.Makihara : J. Japan Inst. Metals. **70** (2006) 14-19
- 8) K..Higauchi, K..Yamamoto, H.Kajioka, T.Toiyama, S.Orimo and H.fujii : J. Alloys Comp.**330-332** (2002) 526-530
- 9) G.barkhordarain, T.Klassen, R.Bormann : Scripta Materialia **49**(2003)213-217
- 10) N.Hanada, T.Ichikawa, S.Hino, H.Fujii: J. Alloys Comp. **420** (2006) 46-49
- 11) NTS : 水素利用技術集成 Vol.3(2003)380-385
- 12)O.Friedrichs,J.C.Sanchez-Lopez,C.Lopez-C artes,T.Klassen, R.Bormann, A.Fernandez : J.Phys.Chem. B 2006, **110**, 7845-7850
- 13)O.Friedrichs, T.Klassen, J.C.Sanchez-Lopez, R.Bormann,A.Fernandez : Scripta Materialia **54** (2006) 1293-1297
- 14) N.Hanada, T.Ichikawa, H.Fujii : J. Alloys Comp.**404-406** (2005) 716-719
- 15) J.Huot, J.F.pellerier, L.B.Lurio, M.Sutton, R. Schulz: J. Alloys Comp.**348** (2003) 319-324

高温化学ヒートポンプと核熱利用による水素の効果的製造

深田 智

九州大学大学院総合理工学研究院エネルギー理工学部門

Effective hydrogen production by use of chemical heat pump and high-temperature nuclear heat
Satoshi FUKADA

Abstract:

A chemical heat-pump system using two hydrogen-absorbing alloys is proposed to utilize heat exhausted from a high-temperature source such as High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR, which is designed to produce H₂ more efficiently. The overall system proposed here consists of HTGR, He gas turbines, chemical heat pumps and reaction vessels corresponding to the three-step decomposition reactions comprising the I-S process. A fundamental research is performed experimentally on heat generation in a single bed packed with a hydrogen-absorbing alloy that may work at the H₂ production temperature. The hydrogen-absorbing alloy of Zr(V_{1-x}Fe_x)₂ is selected as a material that has a proper plateau pressure for the heat-pump system operated between the input and output temperatures of HTGR. Temperature jump due to heat generated when the alloy absorbs H₂ proves that the alloy-H₂ system can heat up the exhaust gas even at 600°C without any external mechanical force.

Keywords: Hydrogen, Production, Hydrogen-absorbing alloy, High-temperature heat, Nuclear reactor, Thermo-chemical decomposition of water, Chemical heat pump

1. 緒言、研究の背景

(i)世界のエネルギー関連事情

昨年起こった原油価格暴騰、リーマンショック、急激な株価下落、そして世界的規模の経済活動停滞が世界を襲っている。活力あるグローバル経済活動は同時に経済活動の広域化を伴い、世界のどこかで経済不況が始まると、その影響は世界中に伝播する。現在の世界同時経済不況は、直接的には、不良債権処理に伴うものと考えられているが、その根は、かなり以前よりいろいろなパスを通じて予見されていた。これほど広く顕在化したのは、世界は現在石油を中心に、あるいは世界の資金の流れそのものとして出回っているからと見て間違いない。原油価格の急上昇と急下降は、世界経済をゆすぶり、惑わし、混乱させる。グローバル経済化の両刃の剣のどちらが人と社会に向けられるかで世界の状況は一変する。

世界のエネルギー資源埋蔵量に着目すると、現在石油の可採年数は約40年、天然ガス67年、石炭164年、ウラン85年である。可採年数は、新たな埋蔵資源発見により年々延びるとしても、現在のエネルギー需給が可採年数のそれほど長くない石油に依存し、採掘地域が局在化し、投機資金が流れ込みやす

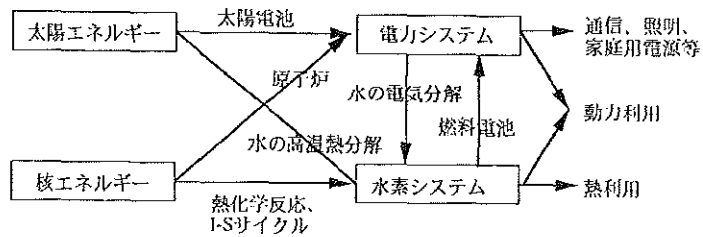


図1 水素エネルギーネットワーク①

い状況では、原油価格変動の影響が増幅され、その影響は世界を席卷し、世界同時不況の影響がもたらす効果が大きくなる。原子力発電は安定な電力源と言われているが、原油価格高騰の影響は、ウラン

世界の高温ガス炉と水素製造

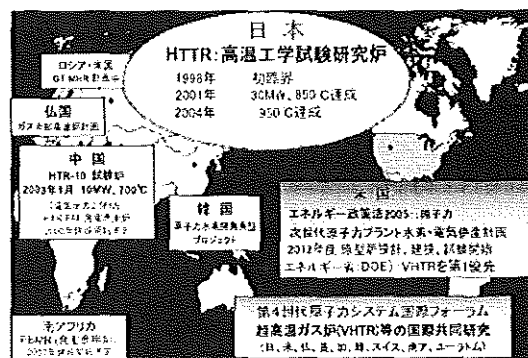


図2 世界の高温ガス炉計画②

のスポット価格の上昇にも及び、1970年代の第一次オイルショックとその後のスリーマイル事故以外のかかなり長い間、約10米ドル/ポンド U_3O_8 換算で推移してきたウラン価格が、昨年のオイル価格の急激な上昇により、一時期10倍以上の最高136ドル/ポンド U_3O_8 換算に上昇し、現在は、またもとの価格に戻りつつある。この価格推移は、直接電気料金にも影響する。要は、安定供給でき、地域局在化せず、安価なエネルギー源の確保は、経済活動の安定化にも直接関連すると見るのが通常の見方である。

(2) 水素エネルギー転換事情

地球温暖化の視点も重要である。大気中の二酸化炭素濃度を低減させるためには、化石燃料への依存度を下げ、代替エネルギーへの転換を進める必要がある。水素燃料自動車普及の観点から見れば、一時期2010、2020年にそれぞれ5万台、500万台導入の数字が掲げられたが、(i)燃料電池コスト低減化がいまのところ難しい、(ii)燃料電池耐久性に課題、(iii)安価水素燃料の確保が難しい、(iv)水素充填スタンドのインフラ未整備等の状況から、当面その目標達成は困難である。現状では、電気自動車やハイブリッド車の普及が先行すると考えられる。しかし長期的なエネルギー転換の観点から、将来の一次エネルギー源として太陽エネルギーと原子力エネルギー（高速増殖炉、核融合炉）の併用が必要であり、二次エネルギーの利用形態として、電気と水素の併用が効果的かつ持続的であると考えられている。

図1は、太田時男氏が35年前に *Science* 誌に掲載した水素エネルギーネットワーク図である。長期的エネルギー戦略の観点から見れば、このネットワーク構築の重要性はいささかも変わらないと考えられるが、

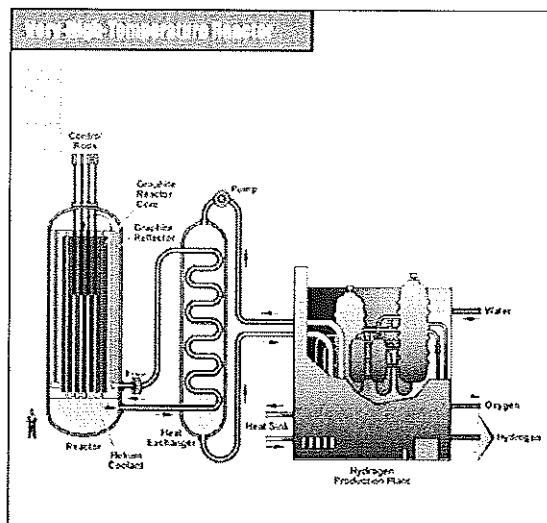


図3 Generation-IVのVHTRと水素製造システム

表1 主な熱化学サイクル

国内			
Mg-I サイクル (化技研) $\eta = 43\%$			
$6MgO + 6 I_2$	$\xrightarrow{100\sim 160^\circ C}$	$Mg (IO)_2 + 5MgI_2$	(1)
$Mg (IO)_2$	$\xrightarrow{600^\circ C}$	$MgO + I_2 + 5/2 O_2$	(2)
$5MgI_2 + 5H_2O$	$\xrightarrow{400^\circ C}$	$5MgO + 10HI$	(3)
$10HI$	$\xrightarrow{300\sim 700^\circ C}$	$5H_2 + 5I_2$	(4)
Mg-S-1 サイクル (化技研)			
$I_2 + SO_2 + 2H_2O$	$\xrightarrow{25^\circ C}$	$H_2SO_4 (aq) + 2HI (aq)$	(1-1)
$2MgO + H_2SO_4 (aq) + 2HI (aq)$	$\xrightarrow{70^\circ C}$	$MgSO_4 + MgI_2 (aq)$	(1-2)
$MgI_2 (aq)$	$\xrightarrow{400^\circ C}$	$MgO + 2HI + nH_2O$	(2)
$MgSO_4$	$\xrightarrow{995^\circ C}$	$MgO + SO_2$	(3-1)
SO_2	$\xrightarrow{995^\circ C}$	$SO_2 + 1/2 O_2$	(3-2)
$2HI$	$\xrightarrow{995^\circ C}$	$H_2 + I_2$	
Fe-S-Br サイクル (大工試) $\eta = 40\%$			
$3FeBr_2 + 4H_2O$	$\xrightarrow{660^\circ C}$	$Fe_3O_4 + 6HBr + H_2$	(1)
$Fe_3O_4 + 8HBr$	$\xrightarrow{200^\circ C}$	$3FeBr_2 + 4H_2O + Br_2$	(2)
$SO_2 + Br_2 + 2H_2O$	$\xrightarrow{80^\circ C}$	$H_2SO_4 + 2HBr$	(3)
H_2SO_4	$\xrightarrow{850^\circ C}$	$H_2O + SO_2 + 1/2 O_2$	(4)
ヨコハマ・マーク5 (機国大)			
$2FeSO_4 + I_2 + H_2SO_4$	$\xrightarrow{\quad}$	$Fe_2(SO_4)_3 + 2HI$	太陽光 (1)
$2HI$	$\xrightarrow{\quad}$	$H_2 + I_2$	電解 (2)
$Fe_2(SO_4)_3 + H_2O$	$\xrightarrow{\quad}$	$2FeSO_4 + H_2SO_4 + 1/2 O_2$	電解 (3)
UT-3 サイクル (東大) $\eta = 40\%$			
$CaBr_2 + H_2O$	$\xrightarrow{700\sim 750^\circ C}$	$CaO + 2HBr$	(1)
$CaO + Br_2$	$\xrightarrow{550\sim 600^\circ C}$	$CaBr_2 + 1/2 O_2$	(2)
$Fe_3O_4 + 8HBr$	$\xrightarrow{200\sim 300^\circ C}$	$3FeBr_2 + 4H_2O + Br_2$	(3)
$3FeBr_2 + 4H_2O$	$\xrightarrow{570\sim 620^\circ C}$	$Fe_3O_4 + 6HBr + H_2$	(4)
NIS サイクル (原研) $\eta = 39\%$			
$2H_2O + I_2 + SO_2$	$\xrightarrow{40^\circ C}$	$2HI + H_2SO_4$	(1)
$2HI + H_2SO_4 + 2Ni$	$\xrightarrow{60^\circ C}$	$NiI_2 + NiSO_4 + 2H_2$	(2)
NiI_2	$\xrightarrow{700^\circ C}$	$Ni + I_2$	(3)
$NiSO_4$	$\xrightarrow{800^\circ C}$	$NiO + SO_2$	(4)
SO_2	$\xrightarrow{880^\circ C}$	$SO_2 + 1/2 O_2$	(5)
$NiO + H_2$	$\xrightarrow{600^\circ C}$	$Ni + H_2O$	(6)
国外			
Mark 13 サイクル (イスラ研) $\eta = 37.3\%$			
$Br_2 + SO_2 + 2H_2O$	$\xrightarrow{47\sim 97^\circ C}$	$H_2SO_4 + 2HBr$	(1)
$2HBr$	$\xrightarrow{130^\circ C}$	$Br_2 + H_2$	(2)
H_2SO_4	$\xrightarrow{810^\circ C}$	$H_2O + SO_2 + 1/2 O_2$	(3)
GA サイクル $\eta = 47\%$ (原研のIS サイクル)			
$xI_2 + SO_2 + 2H_2O$	$\xrightarrow{95^\circ C}$	$H_2SO_4 + 2HI_x$	(1)
$2HI_x$	$\xrightarrow{120^\circ C}$	$H_2 + xI_2$	(2)
H_2SO_4	$\xrightarrow{870^\circ C}$	$H_2O + SO_2 + 1/2 O_2$	(3)
Westinghouse サイクル $\eta = 41.7\%$			
$SO_2 + 2H_2O$	$\xrightarrow{90^\circ C}$	$H_2SO_4 + H_2$ 電解	(1)
H_2SO_4	$\xrightarrow{810^\circ C}$	$H_2O + SO_2 + 1/2 O_2$	(2)

21世紀も8年を既に経過した現在、まだ道初めである。本稿では、水素ネットワーク構築を遠くに見つめ、直接的には、水素エネルギーネットワークの効率化、特にエネルギー効率を上昇させることを目的に、私たちのヒートポンプの実験的試みについて紹介したい。

(3)原子炉有効熱利用システム

研究紹介の前に、世界の原子力水素製造の最近の動向を紹介する。図2は現在世界各国で計画されている原子力による水素製造研究の概要である²⁾。日本では、高温工学試験研究炉 (HTTR) が平成16年出口温度950℃を達成し、高温ガス炉 (HTGR) で水分解による水素製造が可能である事を明らかにした。また米国を中心に第4世代原子炉 (Generation IV) 計画で、ガス冷却高速炉、鉛合金冷却高速炉、熔融塩炉、ナトリウム冷却高速炉、超臨界圧軽水冷却炉、超高温ガス炉 (Very High Temperature Reactor) の研究が進められ、その一つとして、原子力水素製造のためのヘリウム冷却の VHTR 計画が図3のようになされている。その他、熔融塩を冷却材にする炉の化学的実験研究も我々は行っており^{3,4,5,6)}、また九州共立大学宮入研究室の胡さんの研究もその一部に入る。しかし、ここではヘリウム冷却材を使った水素製造ループに着目する。

太陽電池での発電は、エネルギー密度が低く、家庭用別電力供給には向いているが、大規模集約的に電力を必要とするところでは、原子炉あるいは将来的に核融合に依存することになる。水素は軽く、地球系外に放散しやすいので、資源としてその形では天然にほとんど存在せず、空気中に1ppm以下で、天然ガス中にわずかに存在するのみである。

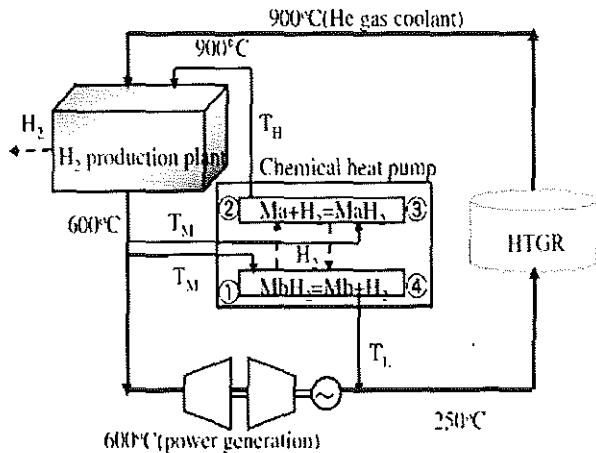


図4 原子炉による水素製造とヒートポンプによる増熱を加えた発電ネットワーク

水の高熱分解反応： $2H_2O=2H_2+O_2$ を直接右方向に移行させ、水素を製造するには、熱力学的に考えれば、4000℃程度の分解温度が必要である。触媒として作用する化学物質を途中に加えると、分解温度が低下する。過去多くの水分解サイクルが表1のように提案された。表中のすべての反応は、次の二種類に分けられる⁷⁾。一つは、主に Cl, Br, I のハロゲン元素が仲介する還元法であり、もう一つは、Fe, Mg, SO₂等が仲介する酸化法である。反応途中に、物質Aが酸化される場合、次の化学式に簡略化できる。

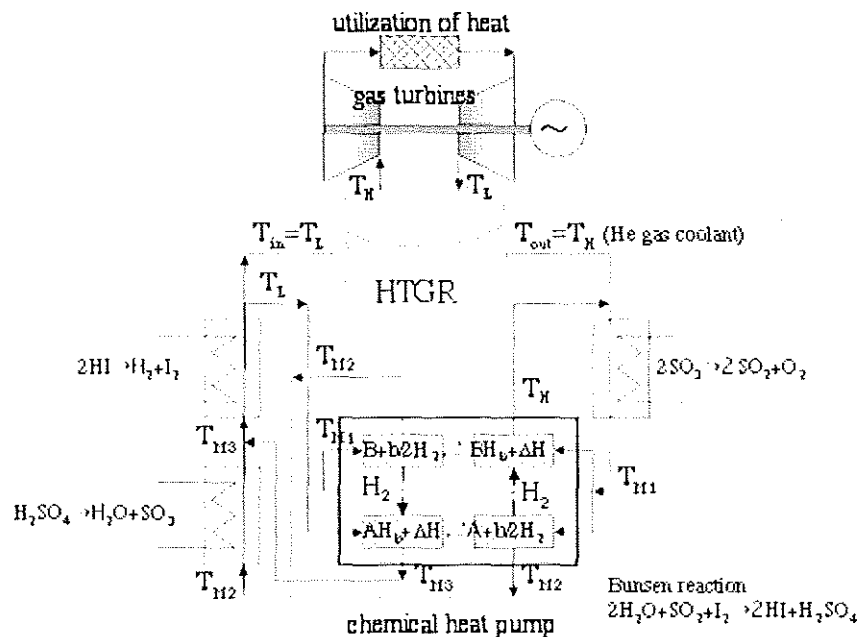
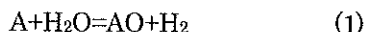
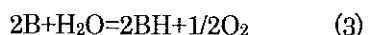


Fig. 1 A schematic diagram of a chemical heat pump using hydrogen-absorbing alloys operating
図5 原子炉熱利用ヒートポンプとI-Sサイクル併用効率的な水素製造利用システム



水との反応で途中で物質 B が還元される場合、



の反応で H₂O が分解される。

代表的なものが、分解反応補助物質に I₂ と SO₂ を使用する I-S サイクルである。反応は、まず H₂O, I₂, SO₂ から常温付近で硫酸 H₂SO₄ とヨウ化水素 HI を合成し、このうち HI 分解反応は 500°C 付近で達成され、硫酸分解反応は 900°C が必要である。現在は、43% 程度の水から水素への熱-水素転換効率が得られている。

2. 原子炉熱利用水素製造サイクル

前章で述べた状況で、原子炉熱の新たな有効利用のための水素製造と熱利用サイクルを考えた。図4と図5は HTGR に水素製造装置を敷設し⁹⁾、さらに熱効率を向上させるため、高温化学ヒートポンプを加えた冷却材ループの流れ概念図である。

炉出口温度は T_H であり、水素製造温度 (I-S サイクルでは、硫酸分解温度の $T_H=900^\circ\text{C}$) に設定される。硫酸分解熱に利用した後、一度 T_M ($=600^\circ\text{C}$ 程度) まで低下したヘリウム冷却材温度を、化学ヒートポンプを利用して炉出口温度の T_H まで増熱し、水素製造に再利用する。化学ヒートポンプを長時間運転すると、水素吸収容量に限界があるので、増熱が終わる。そこであらかじめ2組用意しておき、増熱能力が減少すると、もう一組に流路を転換する。吸収飽和した充填塔は、脱離サイクルに入る。その再生には外部からの熱供給が必要であるが、これに T_M まで温度低下した冷却材熱を用いる。 T_M のヘリウムガスは、タービンを運転するには効率は低い、まだ熱余力はある。この熱を化学ヒートポンプの再生 (脱着熱) に利用する訳である。脱離に利用した結果、温度は T_L まで低下する。以上、炉出口温度 T_H から炉への入口温度 T_L までヘリウム冷却材の持っている顕熱を、ヒートポンプ中での水素の吸収脱離の潜熱に転換される。このループに並列に配置されているのは通常のガスタービンと発電機で、電力が発生される。

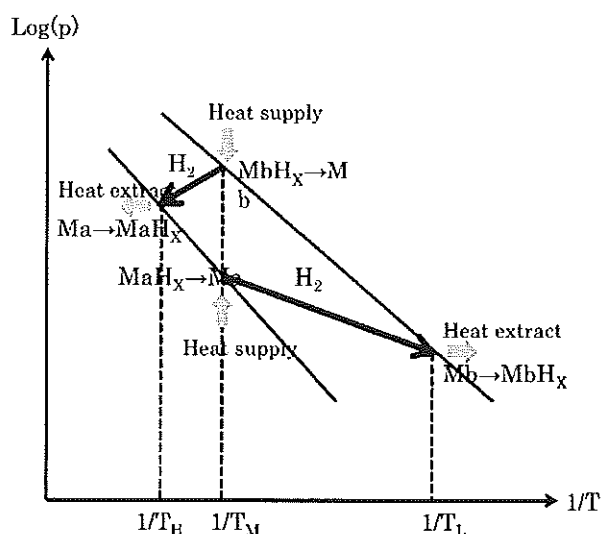


図6 昇温ヒートポンプサイクル図

固定層側からみれば、吸着発熱状態と、脱着吸熱状態を繰り返す、一つのサイクルを構成する。そのサイクル達成のためには、二種類の水素吸蔵合金 (Ma と Mb) が必要で、 T_M で熱供給し、MbH_x 充填層から脱離した水素を Ma 充填層に送り、 T_H で水素吸収させ、MaH_x まで水素化し発熱する状態と、 T_M で熱供給し、MaH_x から水素を脱離させ、出てきた水素を Mb 層に送り、 T_L で吸収させる状態が必要である。これが図6に示される。図6中には、 T_H , T_M , T_L の他に中間温度として T_{M1} , T_{M2} , T_{M3} の三つの温度も記載している。この温度は、充填層の発熱と急熱後の温度変化を記述する温度であり、I-S にサイクルに適合するために導入されている。詳細は、論文⁹⁾を参考にされたい。

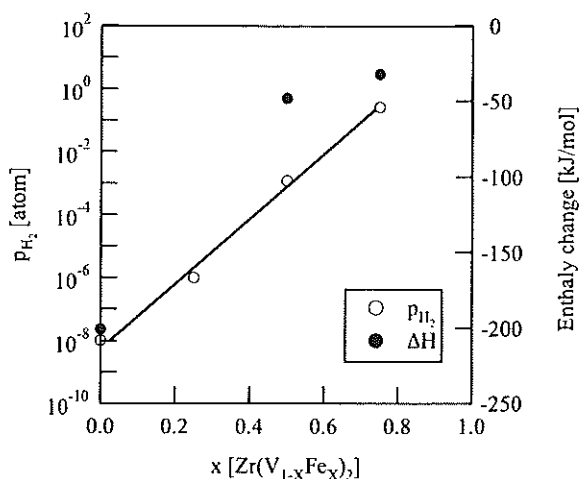
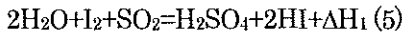
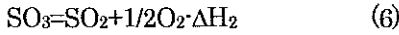


図7 Zr(V_{1-x}Fe_x)₂ のプラトー圧力

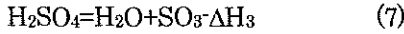
図5のヒートポンプサイクルは、まず常温付近で、Bunsen 反応（発熱反応）で硫酸とヨウ化水素を合成する。



三つの温度条件で構成されるヒートサイクルの T_H では、次の SO_3 分解吸熱反応が進行する。



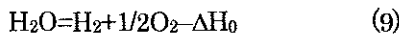
T_M では、次の硫酸分解吸熱反応が進行する。



T_L では、次のヨウ化水素分解吸熱反応が生じ、すべてを加えると、水の熱分解が達成される。



(5)式から(8)式を加えると、次の水分解反応となる。



水から水素への分解熱 ΔH_0 が次の様にいくつかの分解熱に分けられる。



3. 高温ヒートポンプに関する実験的検討

最初の問題は、I-S サイクルに適合する化学ヒートポンプ水素吸収材料が見つかるかどうかであるが、過去の論文⁹⁾を調査した結果、ラーベス相合金である ZrV_2 が水素溶解時のエンタルピー変化が、あらゆる合金中で最も大きく、また V の一部を Fe に置き換えることにより、自由にプラトー圧力を変化させることができることが分かった。図7がその結果を示したものであり、V の一部を Fe に置換することにより、合金水素化物の吸収のエンタルピー変化が、 ZrV_2 の $\Delta H = 200\text{kJ/mol}$ から最終的に ZrFe_2 の $\Delta H = 0\text{kJ/mol}$ まで滑らかに変化する。合金水素化のエンタルピー変化はどの合金でもほとんど一定なので、 ΔH の変化に伴って、プラトー圧力の対数も同じような直線で変化する。

次の課題として、選択した $\text{Zr}(\text{V}_{1-x}\text{Fe}_x)_2$ 合金が高温ヒートポンプに実際に適用可能な合金であるか、すなわち水の熱化学分解反応の温度で十分速い速度で水素吸収脱離可能であるか、熱が十分早く回収されるかを実証する必要がある。そのため、図8の実験装置を作り、水素吸収脱離時の反応速度と反応器の温度変化を調べた。結果を簡単に以下に示すが、詳しい内容は参考論文^(10,11,12)を参照されたい。

まず $\text{ZrV}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}$ 合金をイオンビーム溶解炉で合成

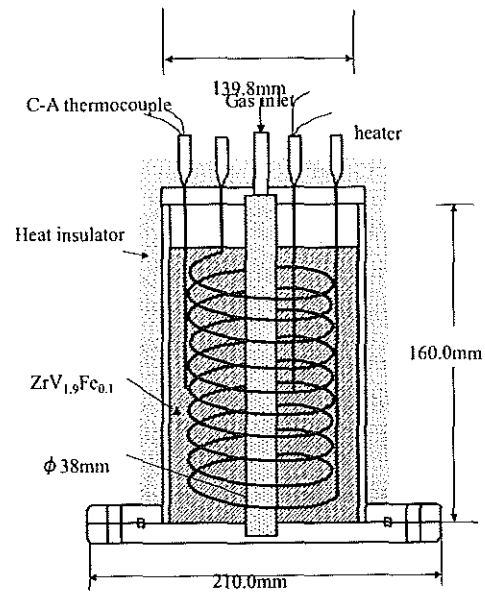


図8 水素吸蔵合金発熱実験装置

した。合成には、Zr, V, Fe の金属粉末をその合金組成になるように混合し、真空雰囲気、銅製反応器に載せ、反応器を水で冷却しながらイオンビームを合金粉末にあて、溶解した。合金の均一性を高めるため、数回粉碎と溶解を繰り返し、X線解析でもとの金属相が現れず、単一の Laves 合金相が現れるのを確認した。粉碎後、12mesh から 32mesh の間でふるい分け、5.01kg をステンレス反応器に充填し、真空排気後、一定温度 T_0 に維持した。合金層内に4カ所熱電対を挿入しヒーター出力を調整して均一温度に制御した。平衡状態になったのを確認し、ヒ-

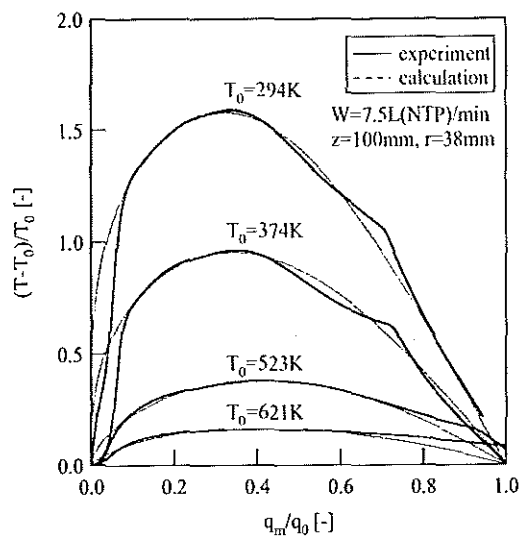


図9 充填層内温度変化

ターの電源を切り、同時に一定水素流量 W で合金層上部より水素を供給した。水素供給のため挿入したチューブに縦方向に等間隔に小さな穴を開け、水素が縦方向から横方向に均一に流れるようにしている。

図9はある合金位置で、ある水素供給開始からの時間経過に伴う水素吸収量 q の変化を最終の全水素吸収量 q_0 で規格化した値を横軸に、縦軸に初期温度 T_0 からその時間での温度 T との差を T_0 で規格化した値を示している。初期温度が低いほど、水素吸収後の温度上昇が高いものの、初期温度が高くなっても温度上昇が続いていることが分かる。図の破線は、水素吸収速度を、物質移動係数を用いて解析した結果であり、すべての実験条件で比較的良好な結果を再現できている。

図10は規格化した最大温度上昇 $T_{max}-T_0$ を初期温度 T_0 の関数として表した結果である。図から分かるように、水素流量 W がある一定値以上になると（この実験では $W>5\text{L/min}$ ）、合金粒子層内部の温度上昇は流量によらず一定値となる。これは合金の水素化に伴う、反応熱の発生率が、それより低い温度の供給水素ガスの加熱と粒子層からの放熱の合計と釣り合うからである。いずれにしても $T_0=600\text{K}$ で水素を供給しても充填層がさらに 100K 以上加熱されることが分かった。本実験では、カオウールで粒子充填層容器の周りを包み、外部への熱放出を削減したが、それが十分でなかったのか目標の 900K までの温度上昇は達成できなかったが、装置の大型化と断熱を十分に施すことにより可能と思われる。

図11は温度 T_0 で水素化した粒子充填層を一定昇温率で加熱したときに脱離した水素流量の時間変化である。流量について外部制御しないにも関わらず、脱離水素流量はほぼ一定に維持されることが明らかになった。これより本合金粒子層は安定な水素脱離が可能であることが分かった。

熱効率の点からみれば、製造した水素の温度は十分に高いので、水素を製造した後、温度が高いまま水素を利用することで、熱効率あるいは水素利用効率をさらに上昇させることができる。

最後に少し、この実験と関連した私たちの関連

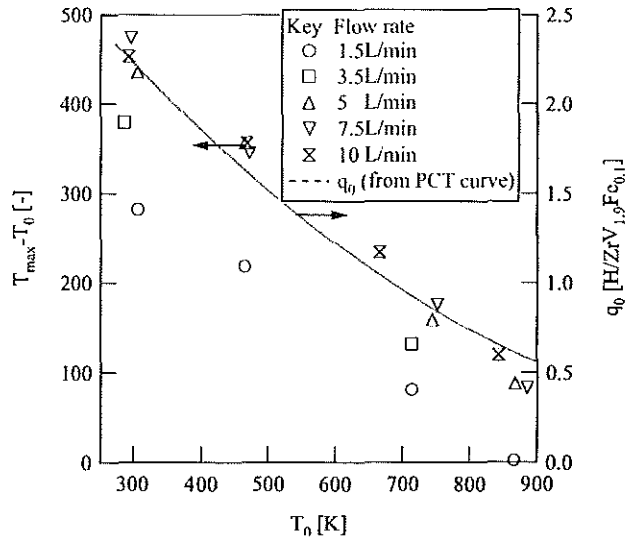


図10 ZrV_{1.9}Fe_{0.1}合金粒子層を一定温度 T_0 に維持し、熱供給を止め、一定水素ガス流量で供給したときの粒子層の温度上昇 $T_{max}-T_0$ と T_0 と関係

研究を紹介する。図12は、私たちが考える高温水素発生と利用のためのシステムの概略図である¹³⁾。高温ガス炉へリウム冷却材の炉熱を使い、これまで記述した熱化学分解とヒートポンプシステム、あるいは CH_4 の水蒸気改質反応¹⁴⁾、プロトン導電性酸化物を使って CH_4 の水蒸気気質と電力発生を同時に一つのセル内で生み出す直接発電装置¹⁵⁾、固体電解質多孔質膜の発電装置¹⁶⁾などを組み合わせることにより、さらに効率よいシステムの構築が可能と考

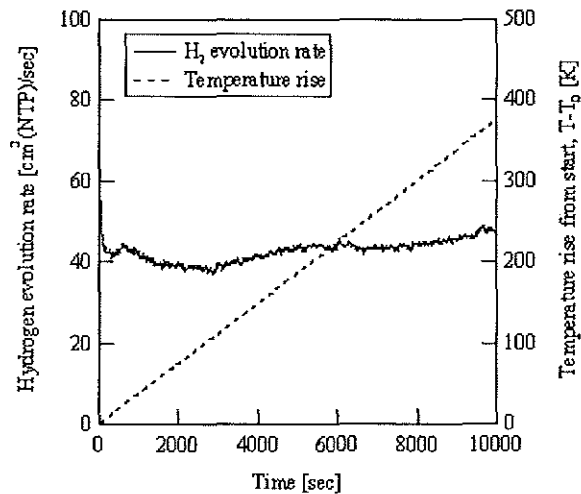


図11 ZrV_{1.9}Fe_{0.1} 充填層を温度 T_0 で十分水素化した後、外部から熱供給し昇温したときの、温度と水素脱離流量の時間変化

えられる。

4. 結論

長期的なエネルギー源として、原子力を使い、高温ガス炉ヘリウム冷却材熱を利用して熱化学水素製造の三つの反応温度に適した高温化学ヒートポンプを提案した。さらにその運転条件に適した $Zr(V_{1-x}Fe_x)_2$ 合金粒子充填層の水素吸収脱離時の発熱と吸熱温度変化と水素吸収脱離速度を測定し、運転に適した性能のあることが認められた。さらに水素の効果的利用のためには、水素製造効率をよく高め、高温での利用を考える必要があることが確認された。

参考文献

- (1) 太田時男, "水素によるクリーンエネルギーシステム", サイエンス, 3 (1974) 68-80.
- (2) 稲垣嘉之, "高温ガス炉と水素製造", 九州大学水素利用技術研究センター・福岡水素エネルギー戦略会議「高効率水素製造研究分科会」資料, 2007年8月.
- (3) S. Fukada, Y. Edao, S. Yamaguchi, A. Sagara, "Hydrogen diffusion and hydrogen isotopic exchange on molten salts of mixed fluorides, Flibe ($LiF+BeF_2$) or Flinak ($LiF+KF+NaF$)", Proceedings of 2008 Joint Symposium on Molten Salts, (2008) 875-880.
- (4) S. Fukada, K. Katayama, T. Terai, A. Sagara, "Recovery of tritium from Flibe blanket in fusion reactor", Fusion Science and Technology, 52 (2007) 677-681.
- (5) S. Fukada, M. F. Simpson, R. A. Anderl, J. P. Sharpe, K. Katayama, G. R. Smolik, Y. Oya, T. Terai, K. Okuno, Y. Hatano, D. A. Petti, S. Tanaka, D. K. Sze, A. Sagara, "Reaction rate of beryllium with fluorine ion for Flibe redox control", Journal of Nuclear Materials, 367-370 (2007) 1190-1196.
- (6) S. Fukada, A. Morisaki, "Hydrogen permeability through a mixed molten salt of LiF, NaF and KF (Flinak) as a heat-transfer fluid", Journal of Nuclear Materials, 358 (2006) 235-242.

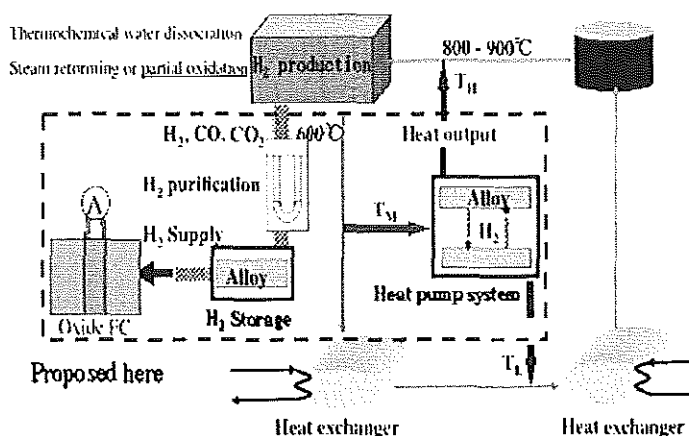


図12 高温水素利用システム

- (7) 西川正史, 深田智, 渡辺幸信他, "水素、将来のエネルギーを目指して", 養賢堂, (2006).
- (8) S. Fukada, Y. Edao, M. Terashita, "Chemical heat pump system working at exhaust temperature of high-temperature-gas-cooled reactor", International Journal of Hydrogen Energy, 34 (2009) 540-546.
- (9) 大角泰章, "水素吸蔵合金—その物性と応用—", アグネ技術センター, (1993).
- (10) S. Fukada, N. Shimoozaki, S. Morimitsu, M. Nishikawa, "Absorption and evolution of hydrogen in/from $ZrV_{1.9}Fe_{0.1}$ particle bed at hydrogen production temperature", International Journal of Hydrogen Energy, 30 (2005) 861-866.
- (11) S. Fukada, S. Morimitsu, N. Shimoozaki, M. Nishikawa, "Profiles of hydrogen molar fraction and temperature in $ZrV_{1.9}Fe_{0.1}$ alloy bed for hydrogen absorption", Journal of Alloys and Compounds, 381 (2004) 258-265.
- (12) S. Fukada, S. Morimitsu, N. Shimoozaki, "Heat and mass transfer in a concentric-annular-tube bed packed with $ZrV_{1.9}Fe_{0.1}$ particles", Journal of Alloys and Compounds, 375 (2004) 305-312.
- (13) S. Fukada, S. Suemori, K. Onoda, "Direct Energy Conversion by Proton-Conducting Ceramic Fuel Cell Supplied with CH_4 and H_2O at 600 – 800°C", Nuclear Science, Nuclear Production of Hydrogen, Third Information Exchange Meeting, Oarai, Ibaragi, 5-7 Oct. 2005, OECD Publishing, Nuclear Energy Agency (2006) 345-353.
- (14) S. Fukada, S. Ono, "Partial oxidation of methane in a Ni permeable membrane tube for effective hydrogen

production”, Separation Science and Technology, 42 (2007) 73-87.

(15) S. Fukada, S. Suemori, K. Onoda, “Rate-determining step of hydrogen transfer in a fuel cell of $\text{SrZr}_{0.9}\text{Yb}_{0.1}\text{O}_{3-a}$ supplied with $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ”, Energy Conversion and Management, 50 (2009) 1249-1255.

(16) S. Hatakenaka, H. Takata, N. Mizuno, M. Nishikawa, S. Fukada, “Adsorption of water vapor on a polymer electrode membrane”, International Journal of Hydrogen Energy, 33 (2008) 3368-3372.

謝辞

現在、九州共立大学大学院宮入研究室と共同研究を行っており、同大学院学生の林信孝君、胡静波君は、高温水素利用のための実験解析研究を行っており、研究成果の発展に寄与しています。ここに謝意を表します。

(付録) エネルギー効率の観点からの考察

簡単な計算であるが、水素の製造にエネルギー効率がいかに重要であるかについて、二つの場合を例に挙げ簡単に説明する。最初は、化石燃料をそのまま燃焼し、タービンで電気を発生させる場合である。もう一つは、化石燃料から水素を作り、水素を直接エネルギー源として使用するか、さらに電気に転換するかである。水素は、現在工業的に石炭や石油、天然ガスの部分酸化反応あるいは水蒸気改質反応で製造される。水素製造とエネルギー効率の関係を定量的に見るためにエネルギー変換効率を問題にする。いま1モルの CH_4 が手にあるときの、実際に利用できるエネルギーは、

(1) CH_4 燃焼後、ガスタービンで電気に転換するとき、

CH_4 を酸素（あるいは空気）中で完全燃焼させ、 $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ の燃焼熱を、マイクロガスタービンを利用して電気に転換する。現在得られている効率50%を適用すると、電気110Whに相当する。

(2) 水蒸気改質により水素製造後、水素利用

CH_4 を水蒸気改質反応（ $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$ ）を利用して H_2 を製造する。吸熱反応なのでこのとき200kJの熱を供給する必要がある。さらに発生した水素を水素燃焼タービンあるいは燃料電池で発電する事を考える。これらはいずれも試作段階で基礎

研究の段階であり、仮に効率50%が達成されたとすると電気エネルギーは106Whとなる。

いずれの操作においても、原料物質 CH_4 1モルから得られる電気エネルギーはほとんど等しく、エネルギー効率の上昇が鍵になっている事が見て取れる。
(2009年4月13日採用決定)

開端杭の先端閉塞特性に関する研究

狩山 裕*、前田 良刀*、山田 益司**

*九州共立大学 工学部 環境土木工学科

**社団法人 九州建設技術管理協会

A Study on the characteristics of end bearing plug effect using open end steel tube piles

Hiroshi Kariyama*, Yoshito Maeda*, Masuji Yamada**

On the ordinary driving method of open end steel tube pile, at the bearing stratum of comparatively single grain size distribution, the cases that the end plug effect doesn't appear easily are reported.

Conventional various attempts for the end bearing improvement to this kind of pile have been studying.

However, those attempts have not obtained useful result yet. In this study, model piles that have various internal shapes were penetrated into aluminum rods test ground. As a result, it was confirmed that the end bearing about internal tapered piles of the small angle were more effective than that of ordinary method.

Keywords : open end steel tube pile, end plug, tapered open end pile, aluminum rods test ground

1. はじめに

開端鋼管杭の打込み施工において、粒径が比較的単粒で粒度分布の悪い砂質地盤を支持層とする場合に、先端が容易に閉塞せず期待する先端支持力が発現しない事例が報告されている。¹⁾ 本研究は、模型杭をアルミ棒を積層した粒状体とみなせる試験地盤に貫入して、開端杭の先端閉塞の基本的な特性を検討することにより、杭の内面形状を変化させ、その形状が先端閉塞に与える効果を調べたものである。

2. 研究の背景

図-1、図-2 に強風化砂岩の粒径加積曲線とその場所での打込み記録の一例を示す。¹⁾ 支持層はN値50以上の鳥尻層砂岩であるが、狭い粒径範囲に土粒子の大部分が分布する地盤である。

このような単粒の地盤に開端鋼管杭を打込みにより施工した結果、十分な先端閉塞がなく設計支持力が得られなかった事例は他にも多い。²⁾

このような地盤に対して、杭の先端内部に一文字や十字リブまたは円弧リブを設置して先端閉塞を増加させ、支持力を得ようとする試みが種々なされている。(写真-1) しかし、その効果については十分とはいえないようである。今回、新たな考え方により内部形状を変えた模型杭を2次元アルミ棒積層地盤に貫入して、先端閉塞におよぼす効果を検討したものである。

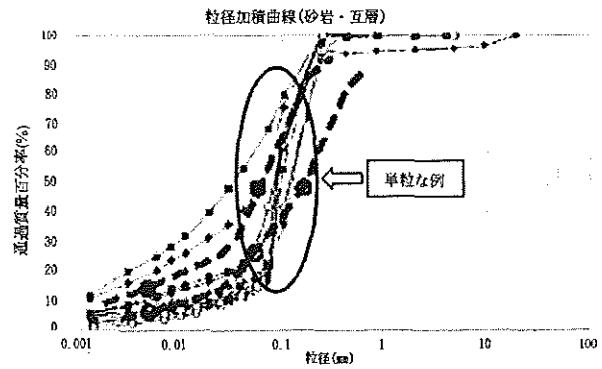


図-1 粒径加積曲線の事例¹⁾

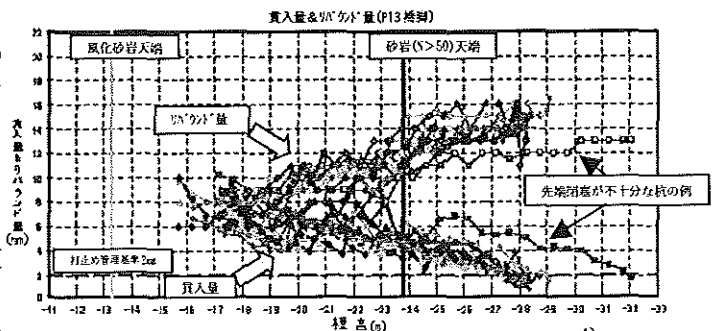
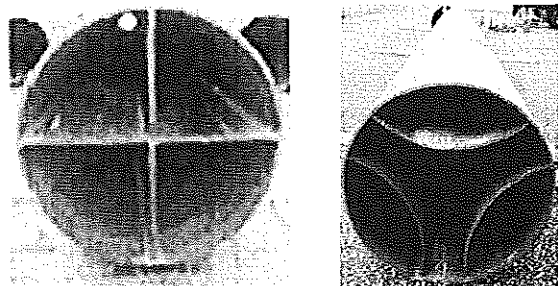


図-2 伊良部大橋打込みの記録(P13橋脚)¹⁾



十字リブの設置例

円弧リブの設置例

写真-1 鋼管杭の先端加工の事例

3. 試験概要

3.1 試験装置の概要

試験装置を写真-2に示す。载荷枠の幅は1,100mm、高さは2,350mmである。装置の背後に滑らかなパネル板を取り付け摩擦を減少させている。模型杭の貫入は、手でハンドルを回し、ギアボックスを介して杭の後部に取付けたラックギアで行う。最大1000mm貫入させることができる。模型杭とラックギアの間にロードセルを取付け、杭に作用する貫入抵抗力を測定する。

载荷枠にワイヤ式変位計を取付け、杭の貫入量を測定する。(写真-3) 模型杭は長さ $L=1100$ mm、奥行 $W=50$ mm、先端部の厚さ5mmの鋼板製で、外径 $D=50, 100, 150, 200$ mmの4種類とし、外端距離が等間隔の滑らかな平板状(Type-A)、内側に 1° 程度の角度を付けたもの(Type-B)、および内側に厚さの漸増する鋼板を貼り付けて概ね 1° 程度の角度を付けたもの(Type-C)の3つのTypeとした。(図-3) このようにした力学的根拠は、これまで当研究室で研究を重ねて来ている超緩傾斜のテーパコーンでも、その幾何学的効果により、貫入時に地盤を押し拡げるため、地盤に作用する拘束圧が増加し、その摩擦抵抗が増大する結果が得られているからである。³⁾ なお、模型杭の貫入中に杭の変形を防止するため杭の前面の数箇所にアルミ板を取付けている。試験地盤に用いるアルミ棒は、長さ50mmで直径1.6mmおよび3mmである。

これらを重量比で3:2の割合で混合しており、平均粒径1.82mm、単位体積重量 $\gamma_d=19.7$ kN/m³、せん断試験から $\phi=21^\circ$ が得られている。⁴⁾

3.2 地盤の作製と試験方法

十分混合し清掃したアルミ棒を積層し模型地盤を作製する。模型杭を中心に5cm間隔の格子状のマーキングを施す。貫入荷重を測定するロードセルと貫入量を測定する変位計をデータロガーに接続する。次に、手でハンドルを回し、模型杭を約3.3cm/minの一定速度で地盤に貫入させる。写真撮影は、試験装置の正面にデジタルカメラを固定し、貫入量5cmごとに撮影した。

4. 試験結果および考察

4.1 貫入抵抗力の発現特性

図-4、5、6は模型杭のType別に、貫入量 L と貫入抵抗力 P の関係を示したものである。

Type-Aについては、外径によらず貫入抵抗力の発現過程は同じ傾向であるが、杭径50mm、100mmの貫入抵抗力に対して径の大きな150mm、200

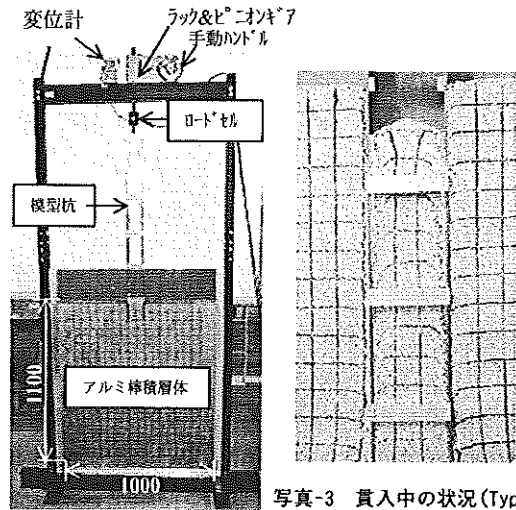
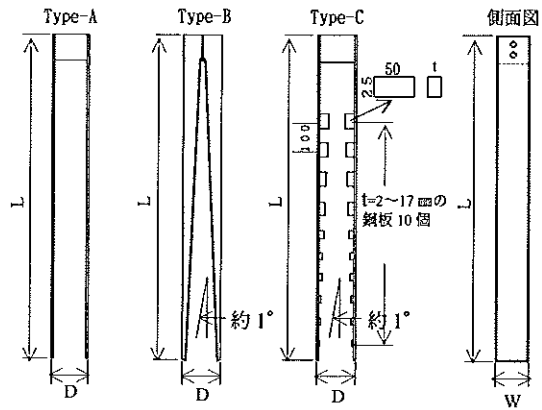


写真-2 貫入試験装置

写真-3 貫入中の状況(Type-C)



Type	仕様	記号	寸法・仕様
A	滑らかな平板状、等間隔	D	50, 100, 150, 200mm
B	内側は約 1° の角度付き	L	1,100mm
C	内側に 1° 程度の角度が付くように厚さの異なる鋼板を貼付けたもの	W	50mm

図-3 模型杭の形状

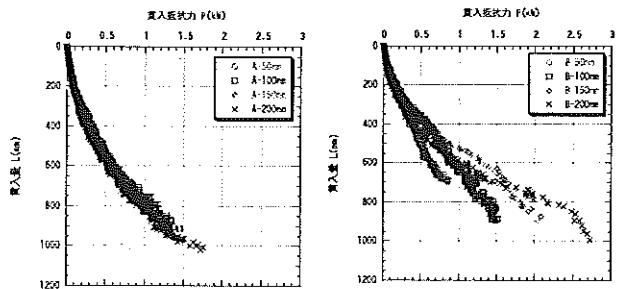


図-4 貫入抵抗力 P と貫入量 L の関係(Type-A)

図-5 貫入抵抗力 P と貫入量 L の関係(Type-B)

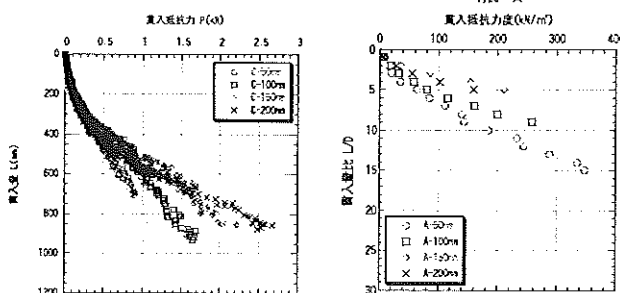


図-6 貫入抵抗力 P と貫入量 L の関係(Type-C)

図-7 貫入抵抗力度と貫入量比 (L/D) の関係(Type-A)

mmの貫入抵抗力は下回っている。これは、杭の内面が等間隔で平滑な場合では、杭径が拡大するにつれて先端が閉塞せず先端支持力が発現しないためである。Type-B、Cについては、杭径が拡大する程、貫入抵抗力が増加している。Type-Cについて、Type-Bの同径と比較して、同じ貫入量での貫入抵抗力はやや増加している。先端閉塞により見かけ上抵抗投影面積の大きな杭へと変化することになる。すなわち、杭の内側に角度を付けることにより、幾何学的な効果により杭内面に生じる垂直応力(拘束圧)が増加し、先端閉塞効果の発現を助けるものと考えられる。

4.2 貫入抵抗力度と貫入量比について

図-7、8、9は模型杭のType別に、貫入抵抗力を杭の外端距離に対する先端投影面積で除した貫入抵抗力度と、貫入量を杭径で除して正規化した貫入量比(L/D)の関係を示したものである。杭径50mmでは各Typeの貫入抵抗力度に顕著な差はみられないが、杭径が拡大するにつれてType-Aと比較して、Type-B、Cでは同じ貫入量比で貫入抵抗力度が1.5~2倍程度増加している。

また、Type-BよりType-Cの方がやや貫入抵抗力度が大きい。これは、杭の内面の角度が滑らかに変化するType-Bより、杭の内面の突起の高さが変化するType-Cの方が周面摩擦抵抗の他に突起部の底面の抵抗も併せて発現することによると考えられる。

4.3 貫入抵抗力度比と貫入量比について

図-10、11、12、13は外径が同じ杭に対する内部形状の効果を示したものである。ここで、横軸は各段階での貫入抵抗力度Pを同じ外径を有するType-Aの正規化貫入量L/D=5のときの貫入抵抗力度P₀で除して正規化したものである。道路橋示方書では根入れ比(L/D)5以上で地盤の極限支持力度を満足するとしている。⁵⁾

Type-B、Cでは、(L/D)が3~4で貫入抵抗力度比がType-Aと比較して1を超えているため、大きな支持力が発現していることがわかる。すなわち、Type-B、Cでは、従来型のType-Aと比較して、先端支持力が増加しており、L/D=3程度でType-AのL/D=5の時と同じ支持力を得ることができる。

4.4 先端閉塞の発現過程について

図-14は試験中に模型杭内部のアルミ棒地盤が杭と一体的に下がり始めた時の貫入量比を目視で確認した結果を示している。Type-Aでは、先端閉塞が始まるまでL/D≧6の貫入量が必要であるが、

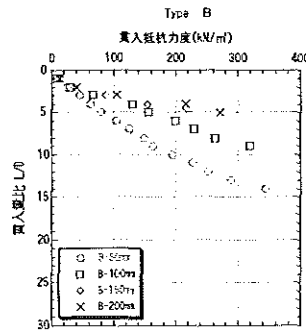


図-8 貫入抵抗力度と貫入量比(L/D)の関係(Type-B)

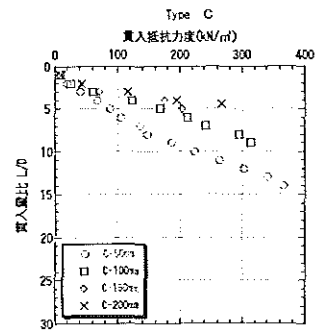


図-9 貫入抵抗力度と貫入量比(L/D)の関係(Type-C)

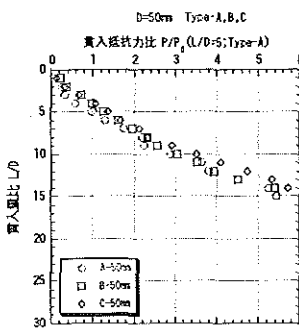


図-10 貫入抵抗力度比と(L/D)の関係(D=50mm)

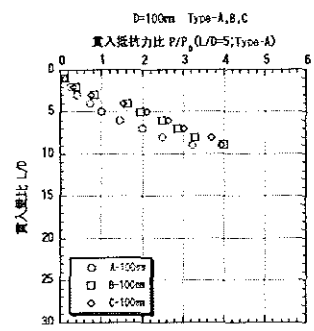


図-11 貫入抵抗力度比と(L/D)の関係(D=100mm)

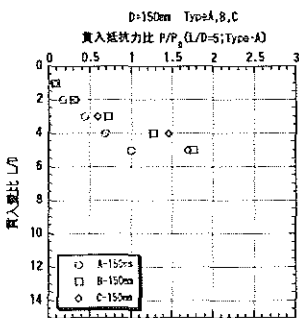


図-12 貫入抵抗力度比と(L/D)の関係(D=150mm)

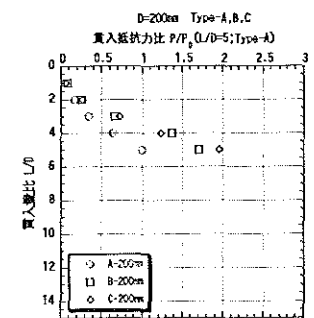


図-13 貫入抵抗力度比と(L/D)の関係(D=200mm)

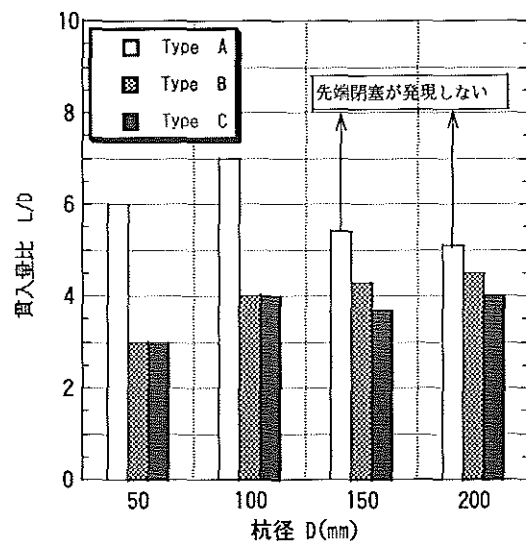


図-14 杭の形状と先端閉塞の発現深度の関係

Type-B、C では $L/D > (3 \sim 5)$ で始まるのがわかる。このことは、貫入抵抗力ー貫入量の荷重・沈下量関係から得られる支持力特性と同じである。また、写真-4.1～6.4 は各 Type の杭を貫入中の状況を示したものである。先端閉塞に伴って、杭内の地盤が杭と一緒に沈下する様子を視覚的に確認することができる。

5. まとめ

- 1) 砂地盤のような粒状体地盤では、従来型のストレートな開端杭では先端閉塞効果が十分発現しないことが、今回のアルミ棒を用いた室内実験でも確認された。すなわち、単粒の地盤では密度の増加(締固め)が容易でないことによる。
- 2) 模型杭の内部に約 1° 程度の角度を付ければアルミ棒地盤の拘束圧が増加し、比較的少ない貫入量で先端閉塞が生じやすくなり、杭の先端支持力が増加することがわかった。

この方法を採用すれば、杭の打込み作業が従来の方法と比較して困難とならず、しかも、支持地盤に悪影響を与えることを避けることができると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、沖縄県宮古支庁土木建築課：伊良部大橋基礎工検討委員会報告、H19.12
- 2) 例えば、日本道路公団、狩野他：成田砂層における大径鋼管杭の支持力機構と打ち止め管理式の一例、全地連技術フォーラム '96
- 3) 谷村他：テーパ形状を有する貫入体の地盤抵抗特性(その2)、九州共立大学卒業論文、2007.3
- 4) 北林他：2次元積層体モデルによるテーパ付き杭の鉛直支持力特性、土木学会西部支部講演概要集、2001.3
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編 H14.3

(2009年4月13日採用決定)



写真-4.1 Type-A(D=50mm)
閉塞開始深度 0.30m

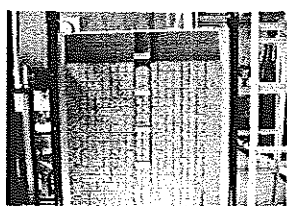


写真-4.2 Type-A(D=100mm)
閉塞開始深度 0.70m

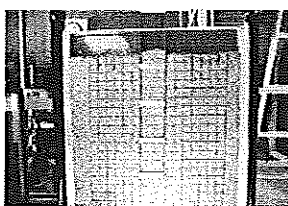


写真-4.3 Type-A(D=150mm)
閉塞なし



写真-4.4 Type-A(D=200mm)
閉塞なし



写真-5.1 Type-B(D=50mm)
閉塞開始深度 0.15m

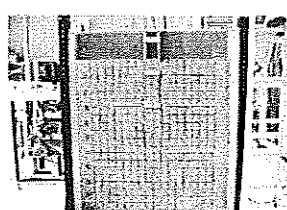


写真-5.2 Type-B(D=100mm)
閉塞開始深度 0.40m

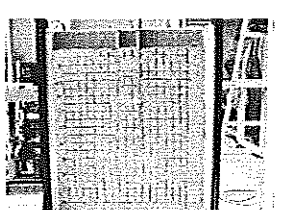


写真-5.3 Type-B(D=150mm)
閉塞開始深度 0.65m

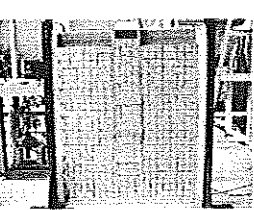


写真-5.4 Type-B(D=200mm)
閉塞開始深度 0.90m

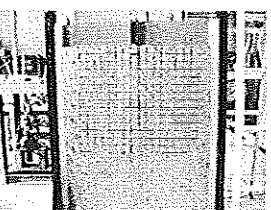


写真-6.1 Type-C(D=50mm)
閉塞開始深度 0.15m

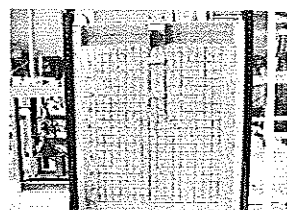


写真-6.2 Type-C(D=100mm)
閉塞開始深度 0.40m

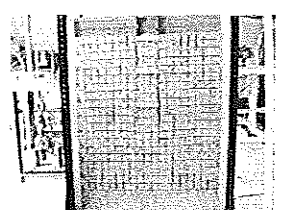


写真-6.3 Type-C(D=150mm)
閉塞開始深度 0.55m

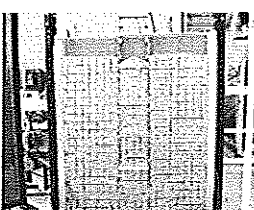


写真-6.4 Type-C(D=200mm)
閉塞開始深度 0.80m

室壁面の乱反射率を導入した幾何音響シミュレーション

中野国隆¹ 古澤 眸² 江渕克志² 古屋 浩³ 黒木荘一郎⁴

¹ 北九州市立大学大学院国際環境工学研究科環境工学専攻

² 九州共立大学大学院工学研究科都市システム工学専攻

³ 九州共立大学工学部建築学科

⁴ 北九州市立大学国際環境工学部建築デザイン学科

Geometrical acoustic prediction method of sound fields with scattering coefficients for room boundary

Kunitaka Nakano, Hitomi Furusawa, Katsushi Ebuchi, Hiroshi Furuya and Soichiro Kuroki

Sound diffusion on room boundaries can play a key role in determining the sound field within an enclosed space. This study deals with the problems of the scattering coefficients that should be assigned to a wall in the geometrical acoustic prediction, and a fundamental property of the method that may be used to model the diffuse reflections. Acoustic simulations in hybrid image/ray tracing model with scattering coefficients are performed for two kinds of sound fields. Firstly, the distributions of reflected energy from a single wall and the directivity characteristics are investigated in both the specular and non-specular areas. Secondly, room acoustic parameters are analyzed for three types of hall models. Physical scale model experiments are also conducted in order to verify the practical approach applying scattering coefficients to geometrical prediction. The behaviors of the predicted results affected by diffuse reflections are discussed.

Keywords: Room acoustics, Surface diffusion, Scattering coefficient, Prediction method, Scale model measurement

1. はじめに

室境界面における音響散乱現象は、音場の拡散性や残響感^[1]、拡がり感(Spatial Impression)^{[2][3][4]}等の物理的並びに心理的音場性能を決定する重要な要因の一つである。近年、空間素材としての拡散体など、室の大きさに比べて比較的寸法の小さい局所的部位の反射・散乱特性に関しては、波動数値解析による予測が可能であり、波動数値解析による予測手法^[5]が実用レベルで検討されてきている。しかしながら、これらはいずれも、空間を構成する壁面素材の単体性能に関する研究成果であり、壁面の散乱性能と音場の拡散性の関係など、音響散乱の影響を考慮に入れた音場全体の予測方法や空間性能の評価については、依然重要な課題として残されている。

一方、室内音響設計においては、初期反射音のレベルや到来方向特性といった低次の反射音構造を把握するために、従来から幾何音響シミュレーションが簡便かつ実用的手法として利用されている^[6]。特に、初期反射音の到来方向情報に関しては、空間的な音の拡がり感といった聴取者の心理的評価に大きな影響を与えるため、適用範囲を限定した上で利用すれば強い説得力を有してくる^[7]。ただし、波動の伝搬を単なる鏡面反射音線によるエネルギーの伝搬として扱うという原理

上の性質から、壁面反射を繰り返せば繰り返すほど、すなわち後期時間領域になるほど現実の音場の性質を捉えることが難しくなるのは周知のとおりである^[8]。

そこで近年、壁面の散乱性能に関する物理指標として Scattering coefficient^{[9][10]}(乱反射率)を導入することにより、境界面における反射エネルギーを鏡面反射成分と散乱反射成分に分けて伝送し、より現実に近い音響伝搬をシミュレートしようとする試みも幾つか進められてきている^{[11][12]}。しかしながら、音場性能の予測評価について、系統的な検討を行った研究は未だ少なく、解析精度の検証や実用性の点などでまだまだ不明な点が多く、また、そのために必要となる種々の形状・材料に対する乱反射率の測定法並びに散乱特性データの蓄積についても、その整備が急がれている現状にある^{[13][14]}。

本研究は、従来の幾何音響理論に基づくコンピュータシミュレーション手法をベースに、壁面の散乱性能である乱反射率を導入することによって、より精度の高い実用的な室内音場予測法について明らかにすることを目的とする。本論文では、第一に、2次元単一壁モデルによる反射音場を対象として、乱反射率の適用によるシミュレーションを実施し、幾何音響解析における音響散乱

の取り扱い方並びにその基本的な性質について明らかにする。同時に、音響縮尺模型実験を実施し、解析値との比較から幾何音響解析に乱反射率を取り入れることの有用性について示す。第二に、対象を3次元空間モデルに拡張し、ホール音場解析並びに音響縮尺模型実験を実施する。その結果から乱反射率の設定条件が室内音響物理指標に与える影響について考察し、幾何音響解析に有効な乱反射率の周波数特性について明らかにする。

2. 幾何音響解析

2.1 解析方法

解析には、虚像法と音線法のハイブリッド手法である Cone Beam Method^[15]を使用した。一般に、幾何音響解析における音響散乱は統計的な考え方に基づくエネルギー量の伝搬として取り扱われることが多い。本解析アルゴリズムでは、音粒子(音線)の境界面への各衝突点(反射点)が2次音源となり、設定した乱反射率に対応する確率で散乱エネルギーを観測点へ伝送する。また、観測点へのエネルギー量はランベルトの余弦則(Lambert's law^[16])に従う重みを付けて放射される。

壁面の乱反射率 s_θ は、壁面の全反射エネルギーに対する鏡面反射成分以外のエネルギーの割合として(1)式により定義される。

$$s_\theta = 1 - \frac{E_{\text{specular}}}{E_{\text{total}}} = \frac{\alpha_{\text{specular}} - \alpha}{1 - \alpha} \quad (1)$$

ここで、 α は壁面の吸音率、 α_{specular} は鏡面反射成分のみを反射エネルギーとみなした場合の見かけの吸音率である。 s_θ の具体的な値については、現状では実測データ等が少なく未だ不明確である。そこで本論文では、 s_θ の音場への影響を検討するために、 $s_\theta = 0.1, 0.2, 0.5, 1.0$ (全周波数)、並びに散乱を考慮しない場合の5条件を設定した。ただし、検討(II)の空間モデル(後述)における客席床面についてのみ $s_\theta = 0.7$ ^[17]とした。音源からの放射音線数は999,999本(音線放射後300ms後における音線1本あたりの受聴領域半径0.2m)、反射次数は9次、また周波数範囲は250~2kHz(1/1オクターブバンド幅)である。

2.2 解析条件

検討は、(I)2次元単一壁モデルによる反射音場、並びに(II)ホール音場を想定した3次元空間モデルの2段階に分けて実施した。

まず、検討(I)は、Fig.1, Fig.2に示すように、(I)a: 鏡面反射領域および非鏡面反射領域を含む単一反射音場の解析、並びに(I)b: 壁面の反射指向特性の解析、の2項目について行った。対象とする反射壁面は、いずれの場合も15m×15mの(a)平壁および(b)山形拡散壁(3mピッチ×5、傾斜角10°)とし、吸音率はコンクリート壁を想定した。音源は、検討(I)aにおいて2個(S_A : 壁面への入射角 $\theta = 60^\circ$, S_B : $\theta = 30^\circ$)、検討(I)bにおいて3個(S_1 : $\theta = 0^\circ$, S_2 : $\theta = 30^\circ$, S_3 : $\theta = 60^\circ$)の無指向性音源を各々設定した。観測点は、いずれも35点((I)a: 2mピッチ, (I)b: 5°ピッチ)とし、鉛直面内における2次元評価とした。ここで、項目(I)aの場合、観測点35点のうち鏡面反射波が到来する観測点(鏡面反射領域)は、各音源に対して S_A : 16点(P16-P31), S_B : 15点(P4-P18)であり、他の観測点は非鏡面反射領域となる。

次に、検討(II)は、(II)a: 単純形状モデル(壁面は全てフラット)、並びに(II)b: 拡散形状モデル(山型拡散壁3mピッチ、傾斜角10°)の2つのモデルについて行った。平面形状については、Fig.3に示すように代表的なホール平面形である(a)逆

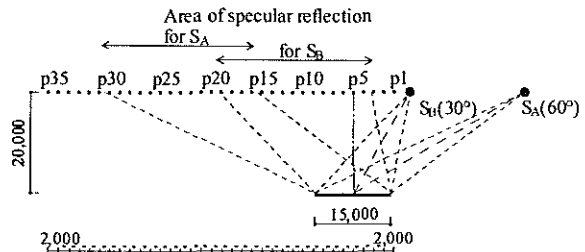


Fig. 1 Illustration of the condition in study model (I)a for the sound field with a single reflection. The observing points are located at 2-meter intervals parallel to the surface of a wall. A specular reflection from the wall reaches at the points Nos.16-31 for the source S_A , and the points Nos.4-18 for S_B .

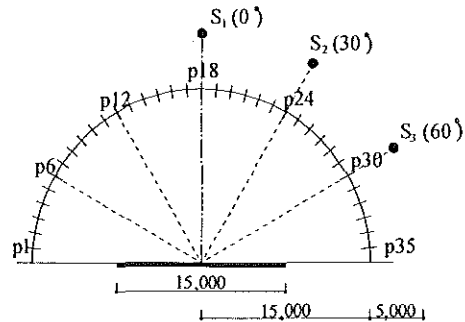


Fig. 2 Illustration of the condition in study model (I)b for the directivity of reflections of the wall. The observing points are located at 5-degree intervals in a semicircle around the wall.

扇形, (b)扇形, (c)シューボックス形の3形状を対象とした。音源は、舞台上に2点の無指向性音源(S_A, S_B)を設定し、観測点は客席の全域に24~30点を設けた。床面積(900 m^2)および天井高(18m)は全モデルで一定である。解析モデルの音響諸元をTable 1に示す。

2.3 解析物理量

検討(I)においては、各観測点で得られたインパルス応答から、直接音エネルギーおよび単一壁面から到来する反射エネルギー(鏡面反射成分, 散乱成分)を抽出した。

検討(II)においては、ホール内の客席観測点における応答から、Strength G , 初期反射音レベル $G80$ ($t=0-80$ ms), 後期反射音レベル GL ($t=80-\infty$ ms), 初期/後期反射エネルギー比 $C80$, 明瞭度指標 $D50$, 初期残響時間 EDT および時間重心 Ts の7つの室内音響物理指標を解析した。

3. 音響縮尺模型実験

幾何音響解析の結果を比較検証するために1/20縮尺音響模型実験を併せて実施した。測定項目および条件は、2.2, 2.3と同様である。

実験は、簡易無響室内にて、スパーク放電パルスを音源とし1/4in.無指向性マイクロフォンによりインパルス応答を観測した。また、検討(I)においては、壁面からの反射波を精度良く抽出するために壁面を設置しない場合の応答も併せて観測した。信号の取り込みは、サンプリング周波数128 kHzにて128回の同期加算を行った。得られたインパルス応答に5k~40kHz(1/1オクターブバンド, 実物換算250~2kHz, 以下同様)のフィルタリング処理を行った後、周波数ごとの時間応答に対して媒質による音響吸収の影響をANSIの計算法^[18]を用いて補正した。測定装置の概要をFig.4に示す。

また、検討(I)における平壁および山形拡散壁の仕様は、合板5.5mm, クリアラッカー仕上げ(コンクリート壁を想定)とした。検討(II)における室の内装面は、客席床と後方壁を吸音性(フェルト厚さ4mm), その他は反射性とした。すなわち、平壁は検討(I)と同仕様、拡散壁は塩ビ板(ボード壁を想定)とした。得られた時間応答波形から、検討(I)では、直接波および対象壁面からの反射波を切り出し各々のエネルギー値を、検討(II)では、前述の7つの室内音響物理指標を算出した。

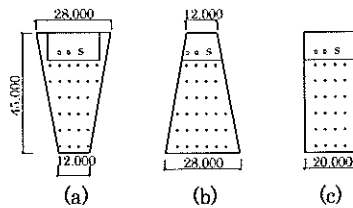


Fig. 3 Three kinds of floor plan for room models in study model (II); Type(a), reversed fan-shape; Type(b), fan-shape; Type(c), shoe-box.

Table 1 Outline of room models.

Model	Floor Type	$V(m^3)$	$S_T(m^2)^{1/4}$	$V/S(m)$	$RT_{60}(s)^{1/2}$	$\bar{\alpha}^2$	N^{*3}
Flat-surface model	a	16,000		3.82	2.51	0.20	28
	b	16,062	900	3.87	2.41	0.22	30
	c	16,000		3.88	2.37	0.22	24
Diffusion model	a	15,835		3.73	2.42	0.21	28
	b	15,882	900	3.77	2.35	0.22	30
	c	15,819		3.79	2.37	0.22	24

*1 the floor area

*2 averaged over the four octave bands from 250 to 2k Hz

*3 the number of observation points in the seating area

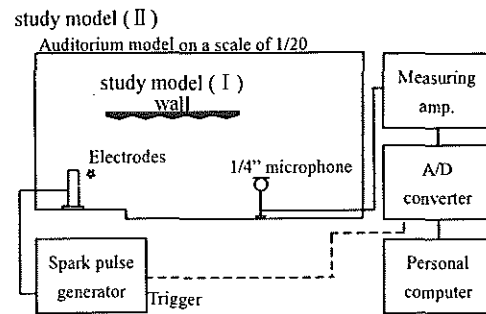


Fig. 4 Block diagram of scale model measurement.

4. 単一壁モデルの反射音場解析(検討I)

音響散乱を加味した幾何音響解析法の基本的な性質を把握するために、まず単一壁モデルによる反射特性について検討した。

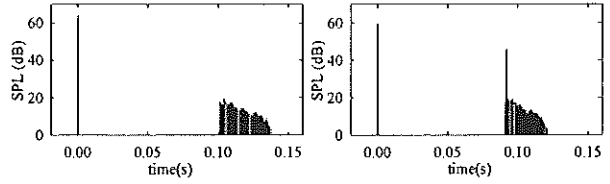
4.1 単一反射音場の解析:(I)a

時間応答波形の解析例をFig.5(拡散壁の場合)に示す。Fig.5(a)は、非鏡面反射領域(観測点P2), Fig.5(b)は鏡面反射領域(観測点P4)における各々時間応答波形である。これらの時間応答波形より、鏡面反射成分および散乱成分を算出した結果(0dB:鏡面反射エネルギーの最大値)をFig.6(平壁), Fig.7(拡散壁)に示す。図中には、散乱を考慮しない場合についても示しているが、この場合の散乱レベルは $-\infty$ dBとなる。これより、散乱成分は、余弦則に対応した分布を示しているのが分かる。鏡面反射音レベルと比較すると、平壁の場合で約15~25dB, 拡散壁の場合で10~20dB低い値を示す。また、 s_0 の違いにより約7dBの散乱レベル

の差異が認められるが、これは各々の乱反射率の比に相当する。

次に、全反射エネルギー(鏡面反射成分と散乱成分の和)の解析値を模型実験による測定値と比較して Fig.8 (平壁)並びに Fig.9 (拡散壁)に各々示す。ここで、反射音レベルの基準(0dB)は各観測点における直接音エネルギーである。また、解析値と実験値の相関係数を Table 2 にまとめる。まず、平壁について見てみると、音源位置により差が認められるものの全体の傾向は概ね捉えられている(相関係数 $r = 0.73 \sim 0.92$)。 s_θ については、0.1の場合に最も相関が高い。しかしながら、特に音源 S_A の場合の分布をみると分かるが、鏡面反射

領域の両端部において実験値との差が大きい。これは、壁面の周辺エッジによる回折の影響が現れているものと考えられ、その影響度合いは音波の壁面への入射角度の違いにより異なる。すなわ



(a) Without specular reflection. (b) With specular reflection.

Fig. 5 Examples of impulse response calculated by geometrical acoustic simulation with sound scattering in study model (I): $s_\theta = 0.20$.

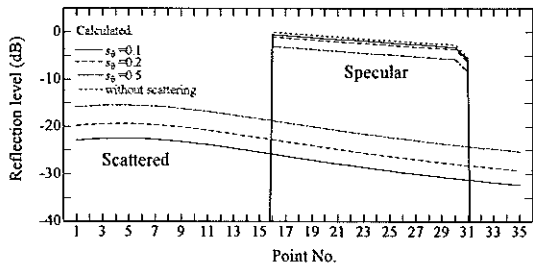


Fig. 6 The analysis result of specular reflection energy and scattering energy on the plane wall (S_B); 0dB= maximum value of specular energy component.

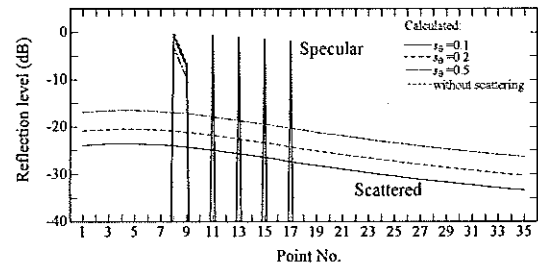


Fig. 7 The analysis result of specular reflection energy and scattering energy on the diffusion wall (S_A); 0dB= maximum value of specular energy component.

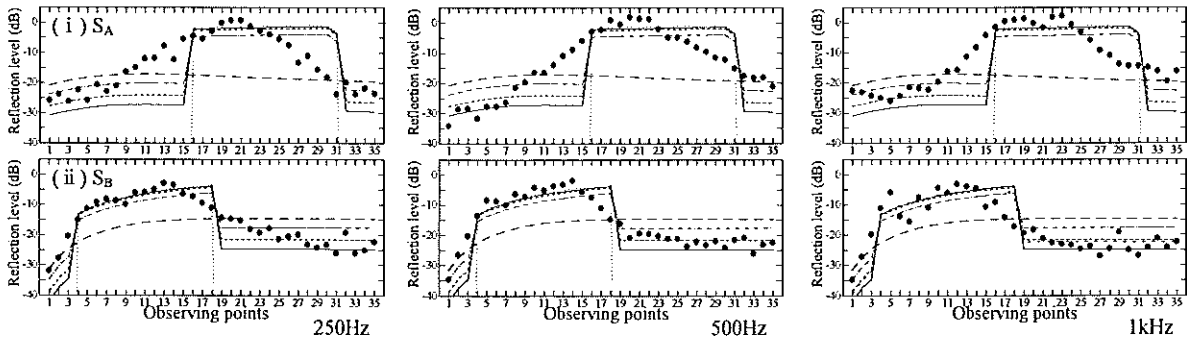


Fig. 8 Reflection levels for the plane walls; 0dB = direct sound energy at each observing point; calculated values: dotted line, (a) without scattering; solid line, (b) $s_\theta = 0.10$; broken line, (c) $s_\theta = 0.20$; dot-dash line, (d) $s_\theta = 0.50$; long broken line, (e) $s_\theta = 1.00$; ●, measured values.

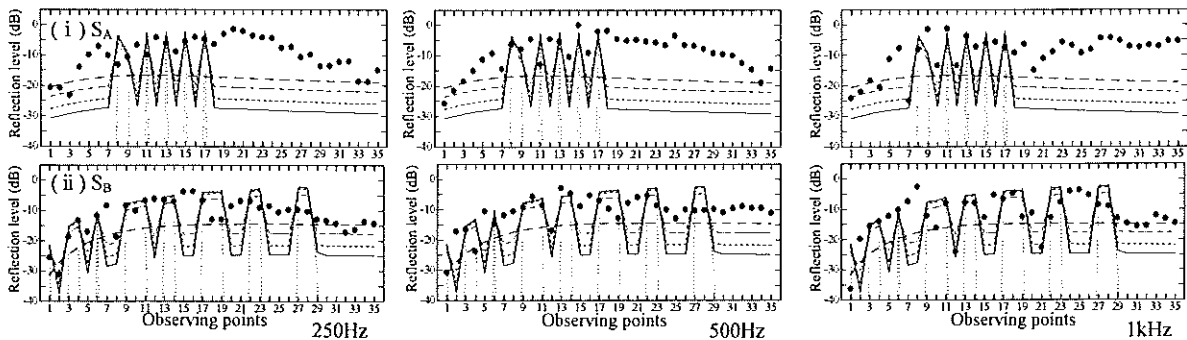


Fig. 9 Reflection levels for the diffusion walls; 0dB = direct sound energy at each observing point; calculated values: dotted line, (a) without scattering; solid line, (b) $s_\theta = 0.10$; broken line, (c) $s_\theta = 0.20$; dot-dash line, (d) $s_\theta = 0.50$; long broken line, (e) $s_\theta = 1.00$; ●, measured values.

ち、実験値との差異は、入射角の大きい音源 $S_A(60^\circ)$ の場合に大きく、入射角の小さい音源 $S_B(30^\circ)$ の場合は小さい。これらの傾向は拡散壁についても同様であり、エッジを多数有することによる影響が非鏡面反射領域における測定値との不一致として現れている。

4.2 壁面の反射指向特性：(I)b

次に、単一反射壁面の反射指向特性について検討した。平壁および山形拡散壁の解析値を実験値と比較して Fig.10 (平壁), Fig.11 (拡散壁) に示す。また、解析値と実験値の相関係数 r を Table 3 にまとめる。

まず、平壁について見てみる。いずれの音源位置に対しても、解析値は概ね実験値の傾向を捉えている。しかしながら、鏡面反射領域と非鏡面反射領域の境界近傍に着目すると、周波数が低いほ

ど、また入射角が大きいほど実験値との差は大きくなる。例えば、音源 $S_3(60^\circ)$ の場合、 $15^\circ \sim 30^\circ$ の観測点における 250Hz と 2kHz を比較すると、後者の解析値がより実験値と一致していることが分かる。これらの傾向は、前節同様、壁面エッジによる回折の影響であると考えられる。両値の相関を見ると、 $s_\theta=1.0$ の場合を除き総じて相関は高いが、中でも $s_\theta=0.1$ の場合に $r=0.83 \sim 0.95$ と最も高い。

拡散壁についてもほぼ同様の傾向である。例えば、 $S_3(60^\circ)$ の場合或いは 500Hz 以下では、非鏡面反射領域において解析値と実験値の差が大きいものの、 $S_1(0^\circ)$ に対する 1kHz, 2kHz の結果を見ると、

Table 3 Correlation coefficients between calculated and measured values in study model (I)b.

Object	Sound source	s_θ	Frequency(Hz)			
			250	500	1k	2k
Plane wall	S_1	0.1	0.91	0.92	0.95	0.95
		0.2	0.90	0.92	0.95	0.95
		0.5	0.89	0.92	0.94	0.94
		1.0	-0.97	-0.97	-0.97	-0.95
		1.0	0.88	0.90	0.83	0.84
Plane wall	S_2	0.1	0.88	0.89	0.83	0.84
		0.2	0.88	0.89	0.83	0.84
		0.5	0.86	0.88	0.82	0.84
		1.0	-0.87	-0.85	-0.76	-0.70
		1.0	0.86	0.90	0.87	0.84
Plane wall	S_3	0.1	0.85	0.90	0.87	0.84
		0.2	0.85	0.90	0.87	0.84
		0.5	0.82	0.87	0.85	0.84
		1.0	-0.73	-0.65	-0.48	-0.29
		1.0	0.60	0.55	0.74	0.70
Diffusion wall	S_1	0.1	0.61	0.56	0.74	0.70
		0.2	0.61	0.56	0.74	0.70
		0.5	0.64	0.58	0.75	0.71
		1.0	0.42	0.39	0.25	0.28
		1.0	0.33	0.37	0.49	0.62
	S_2	0.1	0.33	0.38	0.48	0.61
		0.2	0.33	0.38	0.48	0.61
		0.5	0.32	0.37	0.44	0.58
		1.0	-0.06	-0.10	-0.14	-0.06
		1.0	0.43	0.33	0.44	0.51
	S_3	0.1	0.41	0.31	0.42	0.49
		0.2	0.41	0.31	0.42	0.49
		0.5	0.34	0.24	0.36	0.45
		1.0	-0.44	-0.48	-0.54	-0.40
		1.0	0.34	0.24	0.36	0.45

Table 2 Correlation coefficients between calculated and measured values in study model (I) a.

Object	Sound source	s_θ	Frequency(Hz)			
			250	500	1k	2k
Plane wall	S_A	0.1	0.69	0.79	0.78	0.77
		0.2	0.69	0.79	0.78	0.77
		0.5	0.70	0.80	0.78	0.77
		1.0	0.49	0.38	0.27	0.37
		1.0	0.91	0.92	0.87	0.80
Plane wall	S_B	0.1	0.91	0.91	0.86	0.77
		0.2	0.90	0.91	0.86	0.77
		0.5	0.85	0.85	0.79	0.69
		1.0	0.26	0.22	0.16	0.04
		1.0	0.20	0.35	0.36	0.50
Diffusion wall	S_A	0.1	0.21	0.37	0.36	0.51
		0.2	0.21	0.37	0.36	0.51
		0.5	0.24	0.39	0.36	0.52
		1.0	0.73	0.73	0.37	0.79
		1.0	0.40	0.23	0.25	0.02
Diffusion wall	S_B	0.1	0.45	0.29	0.29	0.07
		0.2	0.45	0.29	0.29	0.07
		0.5	0.56	0.44	0.39	0.18
		1.0	0.72	0.79	0.57	0.49
		1.0	0.72	0.79	0.57	0.49

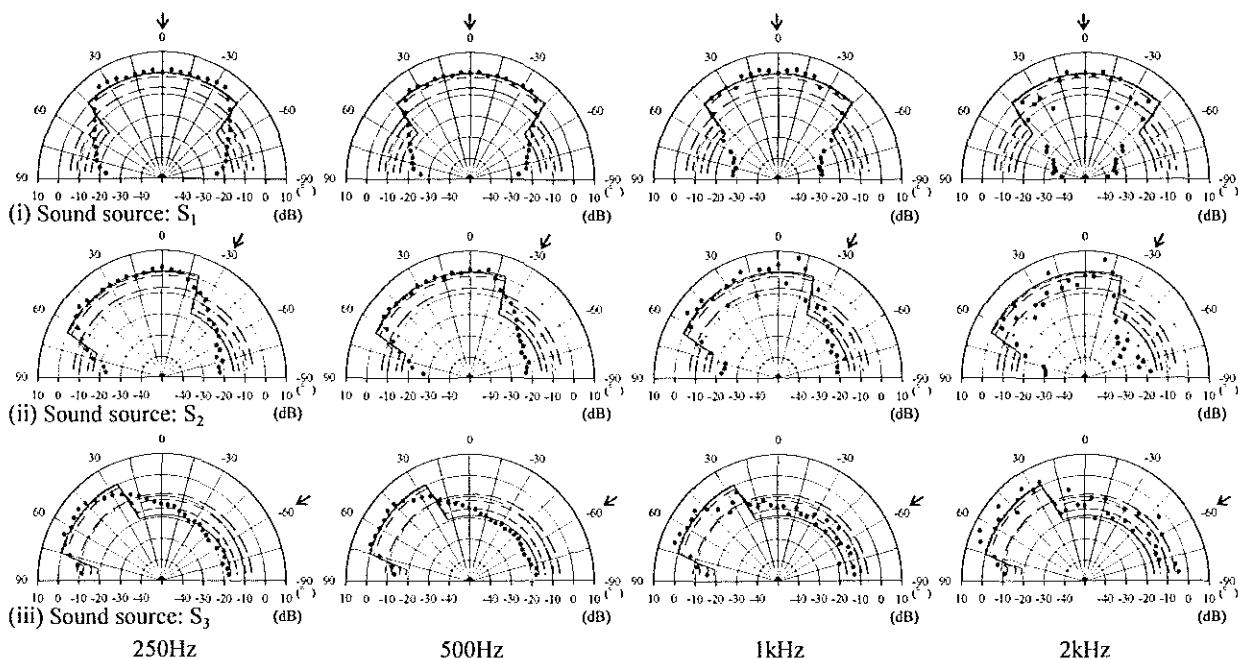


Fig. 10 Directivity of reflection levels for the plane wall; calculated values: dotted line, (a) without scattering; with scattering: solid line, (b) $s_\theta=0.10$; broken line, (c) $s_\theta=0.20$; dot-dash line, (d) $s_\theta=0.50$; long broken line, (e) $s_\theta=1.00$; ●, measured values; the arrow indicates the incident direction of sound.

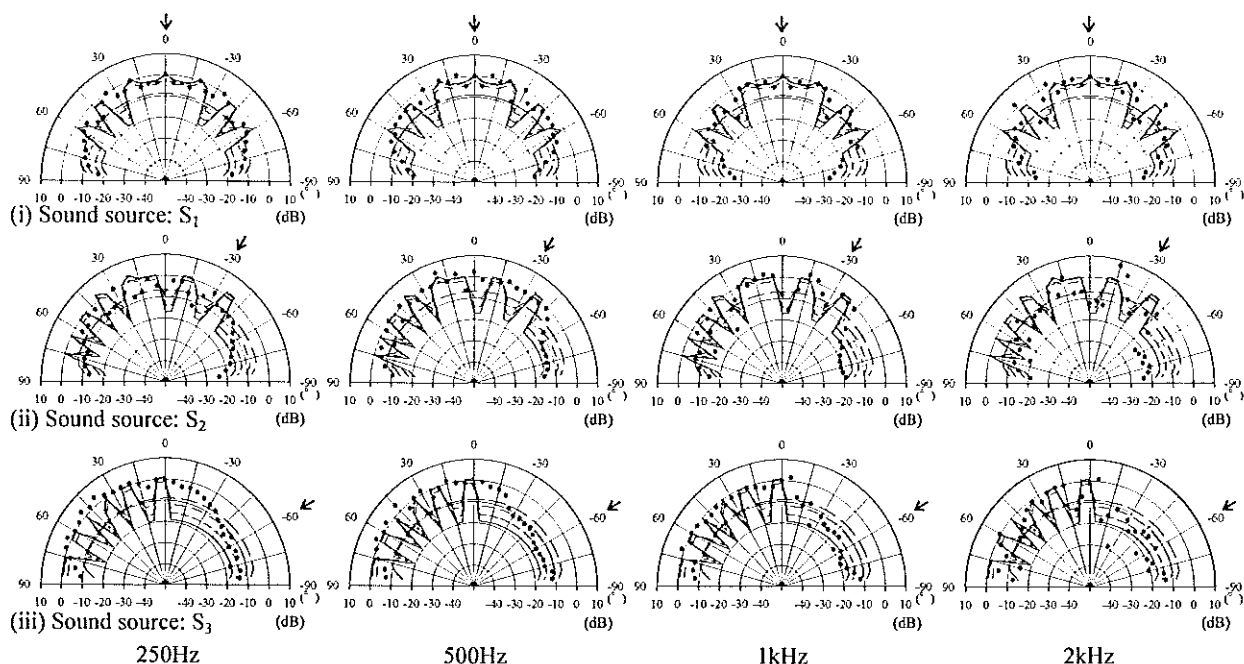


Fig. 11 Directivity of reflection levels for the diffusion wall; calculated values: dotted line, (a) without scattering; with scattering; solid line, (b) $s_\theta = 0.10$; broken line, (c) $s_\theta = 0.20$; dot-dash line, (d) $s_\theta = 0.50$; long broken line, (e) $s_\theta = 1.00$; ●, measured values; the arrow indicates the incident direction of sound.

指向分布のピークディップの傾向が比較的良く捉えられているのが分かる。両値の相関を見ると、 $S_1(0^\circ)$ の場合に最も高く、 $S_3(60^\circ)$ の場合に最も低い。また、高周波数ほど相関は高い。 s_θ については、 $S_1(0^\circ) : s_\theta = 0.5$ のとき、 $S_2(30^\circ) : s_\theta = 0.1 \sim 0.2$ のとき、 $S_3(60^\circ) : s_\theta = 0.1$ のときに各々最も相関が高く、 s_θ が音波の入射角に依存する性質を示している。

4.3 壁面の指向拡散度

さらに、壁面の反射指向特性の均一性を見るために(2)式で定義される Diffusion Coefficient^[19](指向拡散度)を算出した。

$$d_\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n E_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n E_i^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (2)$$

ここで、 E_i は各方向における反射エネルギー、 n は方向分割数である。 d_θ は完全鏡面反射のとき 0、完全拡散反射のとき 1 となる。指向拡散度 d_θ の算出結果を Fig.12 に示す。

幾何音響解析の結果については、乱反射率 s_θ を全周波数で一定としているため、 d_θ は周波数に依存せず、 s_θ が大きいほど高い値を示す。また、入射角 θ ($^\circ$) が大きくなるほど値は低下し、この傾向は実験値とも一致している。平壁の d_θ を見ると、実験値に対して全体的に値が高いが、これは非鏡面反射領域における散乱レベルの両者間の

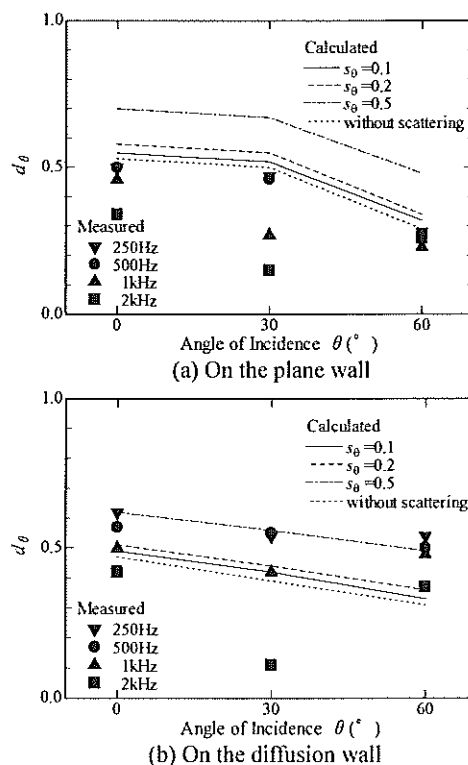


Fig. 12 Diffusion coefficients d_θ versus incident angle of sound in study model (I)b.

差に起因している。拡散壁の d_θ について見てみると、500Hzの実験値が、前述したように回折の影響によりピークディップの少ない特性となっていることから、 $s_\theta = 0.5$ の場合の解析値と一致し

ている。また、1kHzについては、 $s_\theta=0.1$ の解析値とほぼ対応が取れていることが分かる。これらの結果は、乱反射率 s_θ の周波数特性について示唆するものである。

5. 空間モデルの音場解析(検討II)

研究の第2段階として、対象を3次元空間モデルに拡張した音場解析並びに音響縮尺模型実験を実施し、乱反射率の設定条件が室内音響物理指標に与える影響について検討した。

5.1 室内音響物理量の空間分布

単純形状モデルにおける室内音響物理指標の解析値(乱反射率 $s_\theta=0.0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0$)を実験値と比較して Fig.13 (音源 S_A)に示す。また、両値の相関係数 r (平面形状タイプ(b))を Table 4 に示す。

まず、G, G80, GL について見てみる。いずれの周波数においても解析値は実験値の傾向を概ね捉えている。後期反射音レベル GL(250Hz)に関して、実験値との間に若干の差が認められこの影響が Strength G の結果にも現れているが、両値の r はいずれの乱反射率に対しても 0.80 以上と高く、場内分布の傾向は捉えられているといえる。

次に、C80, D50, Ts について見てみる。平面形状 Type(a)の一部を除き概ね r は高い値を示しており、解析値は実験値の場内分布の傾向を捉えている。ただし、いずれの物理指標においても 250Hz では解析値と実験値の間に有意な差(平均偏差/C80: 3dB, D50: 13%, Ts: 123ms)が認められ、解析値は実験値に比べて C80, D50 は大きく、Ts は逆に小さく見積もられている。これは、前述の GL の結果と整合するものである。すなわち後期反射音エネルギーが幾何音響解析において小さめに見積もられている結果であると考えられる。また、例えば C80 の結果より低音域では s_θ の設定値が低いほど、逆に高音域では、 s_θ が高いほど実験値との対応が良いことが分かる(250 Hz : $s_\theta=0.0$, 2kHz : $s_\theta=0.5$)。

EDT については、解析値と実験値の間に相関関係は認められず場内分布の傾向については対応がとれていないが、両値間の差は小さい。

さらに、拡散形状モデルにおける G, G80, GL の解析値($s_\theta=0.0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0$)を実験値と比較して Fig.14 (音源 S_A)に示す。単純形状モデルの場合(Fig.13)と比較すると、ほぼ同様の傾向であるが、250Hz の低音域においては、解析値が実験値の傾向をより捉えていることが分かる。これは、

Table 4 Correlation coefficients of acoustical parameters between calculated and measured in the flat-surface and diffusion models with floor type (b) (sound source S_A).

Parameter	s_θ	Flat-surface model				Diffusion model			
		Frequency(Hz)				Frequency(Hz)			
		250	500	1k	2k	250	500	1k	2k
G	0.0	0.92	0.96	0.94	0.92	0.95	0.92	0.92	0.93
	0.1	0.95	0.95	0.95	0.92	0.96	0.91	0.92	0.93
	0.2	0.95	0.95	0.95	0.92	0.96	0.92	0.92	0.93
	0.5	0.95	0.95	0.96	0.91	0.97	0.92	0.93	0.93
	1.0	0.95	0.94	0.95	0.91	0.97	0.93	0.93	0.93
G80	0.0	0.88	0.91	0.95	0.85	0.89	0.86	0.88	0.86
	0.1	0.89	0.92	0.95	0.87	0.91	0.88	0.90	0.88
	0.2	0.89	0.93	0.95	0.88	0.91	0.89	0.91	0.89
	0.5	0.87	0.95	0.96	0.90	0.91	0.92	0.92	0.91
	1.0	0.86	0.96	0.95	0.90	0.92	0.93	0.93	0.92
GL	0.0	0.83	0.92	0.92	0.90	0.87	0.87	0.91	0.89
	0.1	0.85	0.93	0.92	0.90	0.87	0.88	0.91	0.89
	0.2	0.85	0.94	0.92	0.90	0.88	0.87	0.92	0.90
	0.5	0.85	0.94	0.90	0.89	0.88	0.88	0.92	0.90
	1.0	0.78	0.90	0.83	0.83	0.82	0.86	0.89	0.86
C80	0.0	0.82	0.60	0.89	0.58	0.77	0.70	0.79	0.71
	0.1	0.85	0.60	0.89	0.59	0.82	0.70	0.80	0.70
	0.2	0.84	0.62	0.89	0.58	0.83	0.70	0.80	0.69
	0.5	0.81	0.71	0.86	0.69	0.86	0.75	0.83	0.71
	1.0	0.70	0.78	0.64	0.84	0.80	0.89	0.87	0.86
D50	0.0	0.92	0.73	0.88	0.63	0.84	0.89	0.87	0.79
	0.1	0.93	0.73	0.89	0.64	0.87	0.90	0.87	0.78
	0.2	0.92	0.75	0.89	0.64	0.87	0.90	0.88	0.77
	0.5	0.89	0.81	0.87	0.71	0.87	0.90	0.88	0.76
	1.0	0.83	0.88	0.75	0.86	0.89	0.93	0.87	0.86
EDT	0.0	-0.03	0.10	-0.36	0.30	0.16	0.83	0.44	-0.03
	0.1	-0.06	0.11	-0.37	0.34	0.34	0.82	0.40	0.02
	0.2	-0.06	0.23	-0.25	0.45	0.30	0.74	0.33	0.05
	0.5	-0.19	0.36	0.18	0.57	0.35	0.56	0.35	-0.10
	1.0	-0.26	0.31	-0.05	0.59	0.44	0.60	0.49	-0.10
Ts	0.0	0.57	0.32	0.63	0.07	0.56	0.36	0.56	0.39
	0.1	0.77	0.53	0.76	0.28	0.81	0.57	0.71	0.54
	0.2	0.79	0.57	0.84	0.47	0.86	0.68	0.80	0.63
	0.5	0.68	0.87	0.83	0.78	0.88	0.83	0.90	0.77
	1.0	0.62	0.85	0.74	0.87	0.82	0.90	0.91	0.87

拡散性壁面の設置により音場の拡散性が増した結果であると考えられる。以上の傾向は、音源 S_B の場合においても同様である。

5.2 乱反射率の周波数特性

乱反射率 s_θ の設定条件が室内音響物理指標に与える影響を明らかにするため、解析値と実験値の平均偏差 RMS を算出した。RMS と s_θ の関係を単純形状モデルの場合について Fig.15 に示す。

まず、初期反射音レベル G80 については、いずれの周波数においても s_θ の違いによる影響が 1dB 程度と小さい。しかしながら、後期反射音レベル GL については、 s_θ の設定値の影響を大きく受けていることが分かる。すなわち、 s_θ の 0.0~1.0 の変化に対して、250Hz:7.5dB, 500Hz:6.8dB, 1kHz:3.8 dB, 2kHz:6.9dB の変化幅となっている。また、250Hz, 500Hz では $s_\theta=0.0$ のときに、1kHz では $s_\theta=0.1$ のときに、2kHz では $s_\theta=0.5$ のときに各々 RMS 値は 1~2dB で最小値をとる。

C80 についても、後期反射音エネルギーの影響を受けるため、GL と同様に s_θ の設定値により大きな差異を生じている。これらの結果は、他の物理指標並びに拡散形状モデルにおいても同様である。

そこで次に、解析値と実験値の平均偏差 RMS を最小にする乱反射率 s_m を求めた。物理指標ごとに算出した s_m の周波数特性を Fig.16(単純形状モデル)に示す。

これより、G80 を除くいずれの物理指標においても、右上がりの周波数特性を示しているのが分かる。すなわち、 s_m は低音域ほど低く、高音域は

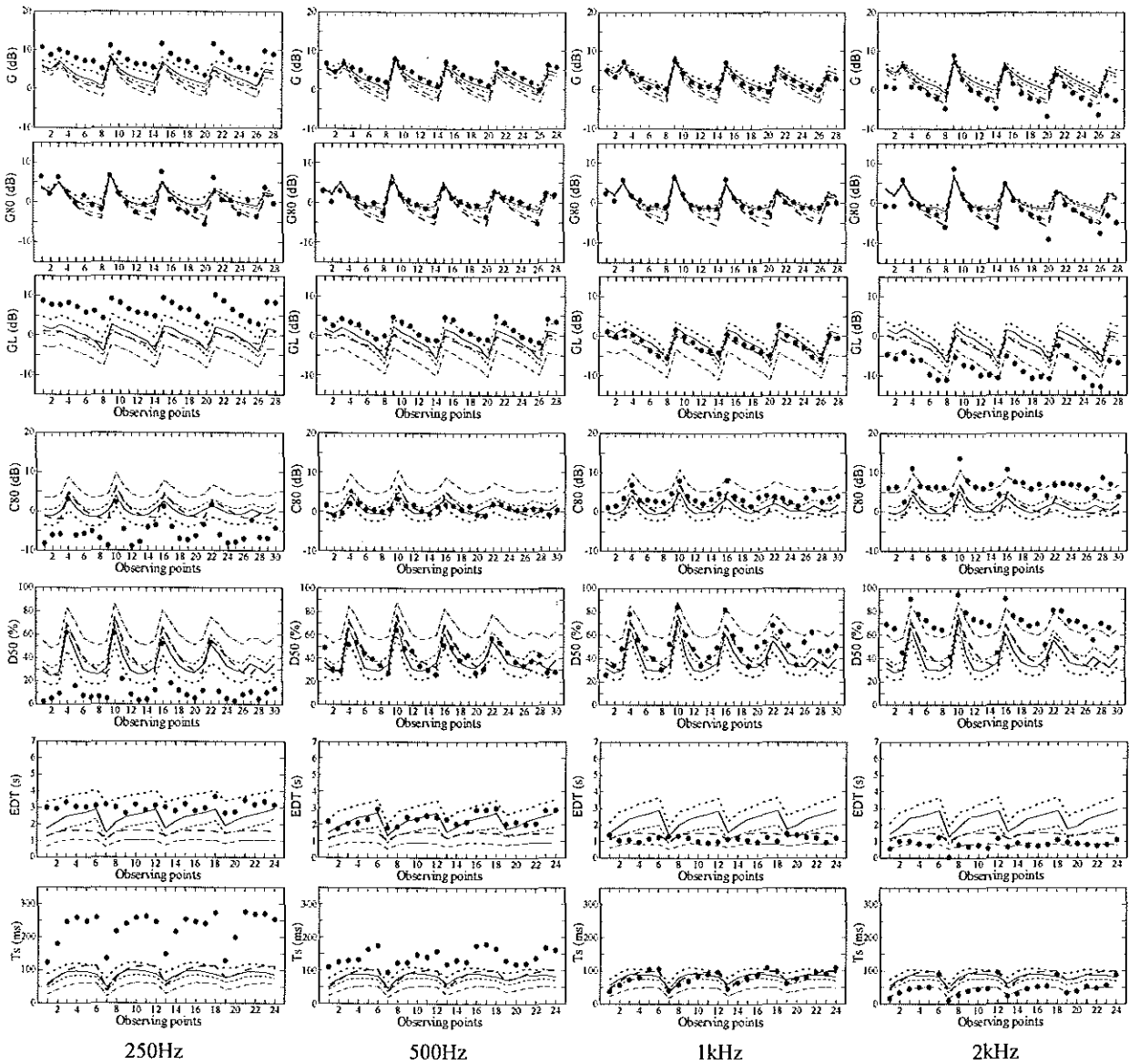


Fig.13 Comparison between calculated and measured acoustical parameters in the flat-surface models; G, G80 and GL in the floor type (a), C80 and D50 in type (b), EDT and Ts in type (c); calculated values: dotted line, (i) without scattering; solid line, (ii) $s_0=0.10$; broken line, (iii) $s_0=0.20$; dot-dash line, (iv) $s_0=0.50$; long broken line, (v) $s_0=1.00$; ●, measured values.

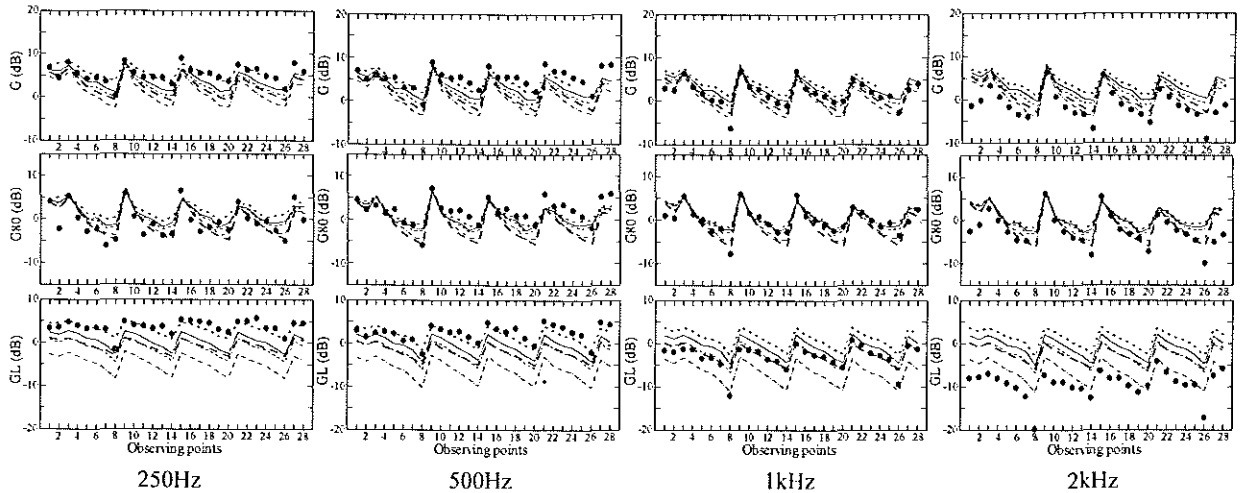


Fig.14 Comparison between calculated and measured values of G, G80 and GL in the diffusion model with floor type (a); calculated values: dotted line, (i) without scattering; solid line, (ii) $s_0=0.10$; broken line, (iii) $s_0=0.20$; dot-dash line, (iv) $s_0=0.50$; long broken line, (v) $s_0=1.00$; ●, measured values.

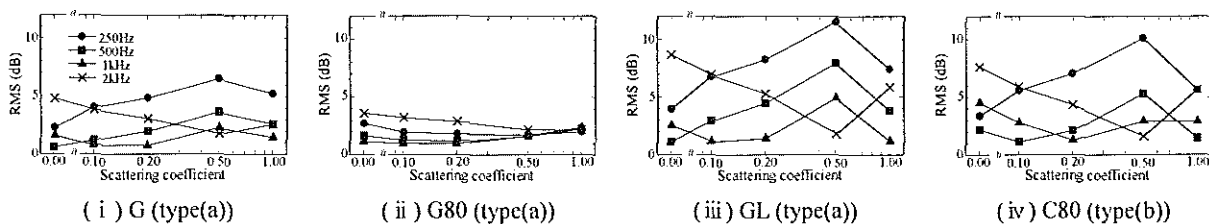


Fig.15 Root-mean-square deviations between calculated and measured acoustical parameters versus scattering coefficients in the flat-surface models (sound source S_A).

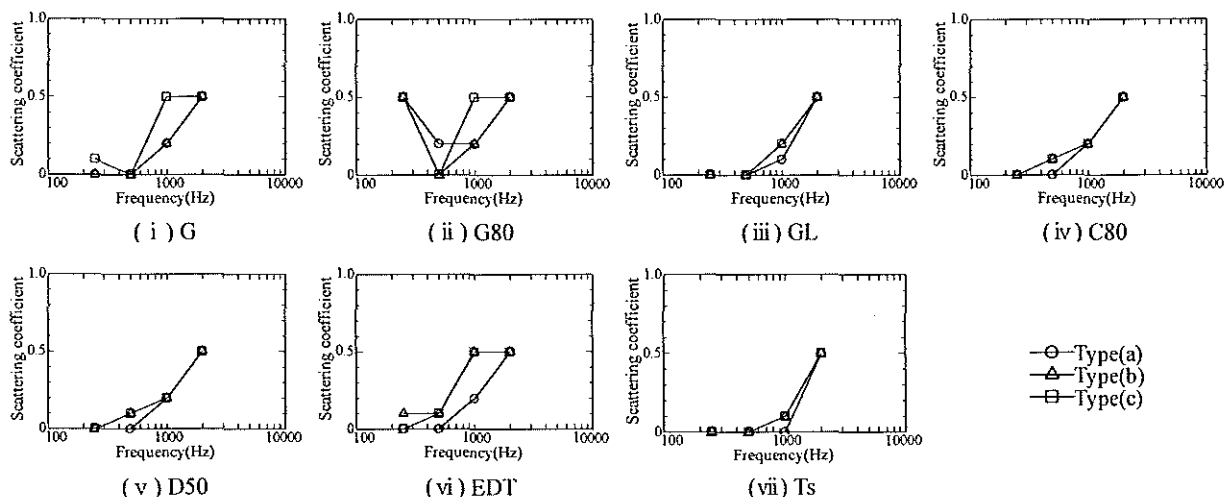


Fig.16 Frequency characteristics of scattering coefficients s_m that minimize the root-mean-square deviations between calculated and measured acoustical parameters in the flat-surface models (sound source S_A).

ど高くなっているといえる(250Hz:0.0~0.1, 500 Hz:0.0~0.2, 1kHz:0.1~0.5, 2kHz:0.5). なお, G80 の場合, 他の物理指標と異なる傾向が得られているものの($s_m(250\text{Hz})=0.5$), s_θ が 0.5 と 0.2 の場合における RMS 値の差は 0.05dB と小さく, 他の物理指標とほぼ同様の結果とみることができる. また拡散形状モデルについても同様の結果である.

以上の結果は, 反射壁の有する乱反射率周波数特性の一般的な傾向と一致するものであり, 幾何音響解析における乱反射率の取り扱い方について有用な示唆を与えるものであると考えられる.

6. まとめ

幾何音響理論に基づくコンピュータシミュレーション手法に, 壁面の散乱性能である乱反射率を導入することによって, より精度の高い実用的な室内音場予測法について検討した.

第一に, 2次元単一壁モデルによる反射音場を対象として乱反射率を変化させたシミュレーションを実施し, 幾何音響解析における音響散乱の取り扱い方並びにその基本的な性質について考察した. 鏡面反射領域および非鏡面反射領域を含む単一反射音場並びに壁面の反射指向特性の解

析結果から, 周波数に応じた適切な乱反射率を設定することにより, 解析値は実験値の傾向をほぼ捉えられることを明らかにした. また, 鏡面反射領域と非鏡面反射領域の境界近傍においては, 壁面の周辺エッジによる回折の影響により, 低周波数ほど, また音波の入射角が大きいほど両値の差異が大きくなることを示した.

第二に, 対象を単一壁から3次元空間モデルに拡張したホール音場について, 乱反射率の設定条件と室内音場特性の関係を考察した. 扇形, 逆扇形, シューボックス形の3種の代表的な平面形態に対して単純形状および拡散形状モデルを設定し, 7個の主要な室内音響物理指標の分布特性を解析した. 解析値と実験値の相関分析の結果から, 両値間の相関係数は 0.80 以上と高く, 解析値は場内分布の傾向を良く捉えられることを示した.

最後に, 解析値と実験値の偏差分析を行い, 両値の差異を最小とする乱反射率の周波数特性 s_m を算出した. その結果から, いずれの物理指標においても, 高音域になるほど s_m は高くなる特性を有しており, 250Hz:0.0~0.1, 500Hz:0.0~0.2, 1kHz:0.1~0.5, 2kHz:0.5であることを示した. これら

の結果は、反射壁の有する乱反射率周波数特性の一般的な傾向と符合するものであり、幾何音響理論解析における乱反射率の設定方法並びにその精度について有用な知見を与えるものである。

今後は、壁面の周辺端部についてのみ異なる乱反射率を与えるなど、壁面エッジによる回折の影響の取り込み方等についてさらに詳細な検討を行う必要があるとともに、実際のコンサートホール空間を対象とする音場解析並びに乱反射率の実測データの整備等についても検討を進めていかなければならないと考える。

謝辞

解析およびデータ整理には、矢野英樹(2007年度九州共立大学卒業生)、吉永智哉、江藤友紀(九州共立大学学部生)各君の協力を得た。ここに記して感謝します。

参考文献

- [1] H.Kuttruff: *Room Acoustics* (Fourth edition), Chap. 7, Taylor & Francis (London and New York), 2000.
- [2] A.H.Marshall and M.Barron, Spatial responsiveness in concert halls and the origins of spatial impression, *Applied Acoustics*, **62**(2), 91-108, 2001.
- [3] H.Furuya, K.Fujimoto, Y.J.Choi and N.Higa, Arrival direction of late sound and listener envelopment, *Applied Acoustics*, **62**(2), 125-136, 2001.
- [4] H.Furuya, K.Fujimoto and A.Wakuda, Psychological experiments on listener envelopment when both the early-to-late sound level and directional late energy ratios are varied, and consideration of predicted LEV in actual halls, *Applied Acoustics*, **69**(11), 1085-1095, 2008.
- [5] Y.Kosaka and T.Sakuma, Numerical examination on scattering coefficients of architectural surfaces using the boundary element method, *Acoustical Science and Technology*, **26**(2), 136-144, 2005.
- [6] 室内音場予測手法－理論と応用－, 日本建築学会編, 2001.
- [7] 古屋浩, 富士田隆志, 川上福司, 浜松市勤労会

館ホールの音響設計－コンピュータシミュレーションによる設計例－, 日本音響学会講演論文集(秋季), 1984. など

- [8] 坂本慎一, 幾何音響の新しい流れ, 音響技術, No.129, 2005.
- [9] M.Vorlander and E.Mommertz, Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients, *Applied Acoustics*, **60**, 187-199, 2000.
- [10] E.Mommertz, Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces, *Applied Acoustics*, **60**, 201-203, 2000.
- [11] L.M.Wang, J.Rathsam and S.R.Ryherd, Interactions of model detail level and scattering coefficients in room acoustic computer simulation, *Proc. Int. Symp. RADS 2004*, **40**, 1-8, 2004.
- [12] Y.W.Lam, Modelling room acoustics in non-concert hall settings, *Proc. Int. Symp. RADS 2004*, A01, 1-8, 2004.
- [13] 佐久間哲哉, 壁面形状の拡散性解析, 音響技術, No. 139, 2007.
- [14] ISO/FDIS 17497-1, Acoustics – Measurement of the sound scattering properties of surfaces, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, 2003.
- [15] E.D.Geest and C.F.McCulloch, Numerical modeling in geometrical acoustics using the conical beam method with applications in architecture, Industry and the environment, *Proc. EURO-NOISE 92*, Book 3, 965-975, 1992.
- [16] H.Kuttruff: *Room Acoustics* (Fourth edition), Chap. 4, Taylor & Francis (London and New York), 2000.
- [17] Y.W.Lam, A comparison of three diffuse reflection modeling methods used in room acoustics computer models, *J. Acoust. Soc. Am.*, **100**(4), 2181-2192, 1996.
- [18] Standards Secretariat Acoustical Society of America, American national standard method for calculation of the absorption of sound by the atmosphere, *ANSI S1.26-1978* (ASA 23-1978).
- [19] T.J.Hargreaves, T.J.Cox, Y.W.Lam and P.D'Antonio, Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free-field measures, *J. Acoust. Soc. Am.* **108**(4), 1710-1720, 2000.

(2009年4月13日採用決定)

オーディトリウム空間の幾何的対称性と音場特性に関する研究

古澤 眸¹ 片野坂好子² 古屋 浩³

¹ 九州共立大学大学院工学研究科都市システム工学専攻

² 平和総合サービス株式会社

³ 九州共立大学工学部建築学科

A study on acoustic quality of concert auditoria from the point of view of symmetrical features of room shape

Hitomi Furusawa, Yoshiko Katanosaka and Hiroshi Furuya

The purpose of this study is to investigate the relation between acoustic characteristics of sound field and the fundamental room shape of auditoria from the point of view of symmetrical features of the space, and to make clear the acoustical validity of asymmetric room shape in acoustic design. In this paper, the spatial distributions of some acoustic measures are investigated for four kinds of geometrical acoustic models, whose planar shapes are systematically varied from symmetry to asymmetry. From the results, it is found that there is a significant difference in the attenuation of reflected energy due to the source-receiver distance between symmetric and asymmetric models. Furthermore, the higher the index δ , representing the degree of space-asymmetry, is, the smaller the attenuation coefficient m for GL becomes. Additionally the scale model experiments give close agreement with the calculations.

Keywords: Acoustic design, Concert auditoria, Asymmetric room shape, Sound level parameter, Acoustic simulation

1. はじめに

空間の幾何的特性である室の形状は、音場の性質を決定する最も基本的かつ重要な要因である。オーディトリウムの計画において、特に室の平面形は、経済性、使い勝手(例えば演者による室中央の視認性など)および動線計画上の観点等から、線対称形(以下、対称形と呼ぶ)を前提に検討されることが多い。すなわち、非対称或いは不整形の形状を有するオーディトリウムは、そのユニークな形で有名な Liederhalle Grossersaal hall^[1](Stuttgart, Germany)などの数例に見られるだけでその数は多くない(Fig. 1)。

一方、音響設計の立場からは、極端な不整形を除き非対称形状を否定する理由は見あらず、むしろ定性的には音響拡散等の観点から非常に興味深い形態であるといえる。しかしながら、これまでオーディトリウム等の大規模空間の計画においては、室全体の基本形状や有効な反射音の確保を意図した局所的な反射壁や拡散壁に関して、空間の非対称性を積極的に意識して設計された実例は少なく、また空間の対称性に着目し室形状と音場

特性の関連について系統的な検討を行った研究例も見あたらぬ。

本研究は、オーディトリウムの音場特性を空間の幾何的対称性との関連という視点から分析し、非対称ホール空間の音響的可能性について明らかにすることを目的とする。

本論文では、まず研究の第一段階として、ホールの基本形態と音場特性の基本的な関係を調べるため、ホール内装壁を全て平壁にて構成した単純形状モデルを用い幾何音響解析を実施する(検討Ⅰ)。すなわち、ホール平面の基本形状を対称形から非対称形に系統的に変化させることにより、基本形状の変化と室内音響諸量の空間分布特性の関係について考察する。また、ここでは一般的なホール吸音力を有する後壁吸音性モデルを対象とするとともに、吸音面配置の影響を除外し室形のみ影響要因を分析するため、床面以外の内装面を全て反射性とした反射性モデルについても検討を加える。その結果から、室形状の対称性と幾何反射波の生起の関連について考察する。

次に、研究の第二段階として、より現実のホール空間に近い音場について検討するため、側壁および天井に凹凸のある拡散形状モデルを用い幾何音響解析を実施する(検討Ⅱ)。その結果から、反射音レベル分布を含む室内音響特性と室形状の関連について考察し、単純形状モデルにより得られた結果を検証する。

さらに、研究の第三段階として、従来の幾何音響解析モデルに乱反射率を導入することにより、

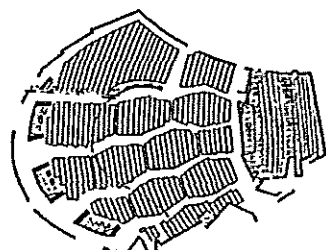


Fig. 1 A sample of auditorium with asymmetric plan.

壁面の散乱を考慮した音響散乱モデルを対象に幾何音響解析を実施する(検討Ⅲ)。その結果から、乱反射率の変化による音圧分布特性への影響並びに室の基本形状との関連について考察し、非対称平面形状の有する音響的特徴について明らかにする。

最後に、単純形状モデル並びに拡散形状モデルを対象に音響縮尺模型実験を実施し、幾何音響解析結果を実験的に検証する。

2. 幾何音響解析

2.1 解析方法

音線法と虚像法のハイブリッド手法である Cone Beam Method^[2](放射音線本数: 52,502 本, 音線の追跡打ち切り時間: 400ms, 反射次数: 9 次)を用いてホールモデル内の観測点におけるインパルス応答を求めた。得られたインパルス応答から、初期/後期反射音エネルギー比 C_{80} 、初期残響時間 EDT、側方反射音エネルギー率 LF、並びに Strength G、初期音レベル G_{80} 、後期音レベル GL を算出した。音源は舞台全域に 8 個(s1~s8)および代表点位置に 1 個(s0)の無指向性音源を設定し、観測点は客席内全域に 2m×2m の格子状に 153~199 点を設けた。周波数範囲は中高音域(250~2k Hz, 1/1 オクターブバンド幅)を対象とした。

2.2 基準形状モデル

収容人員 1500 名規模のコンサートホールを想定し、Table 1 に示すようにシューボックス型平面形状を基準にホール両側壁(傾斜角: θ_L , θ_R)を -30° ~ $+20^\circ$ の範囲で傾斜させた計 17 タイプの 3 次元モデルを対象とした。また、対称/非対称の違いを表現するパラメータとして $\delta = |\theta_L + \theta_R|$ ($\delta = 0^\circ$: 対称形, $\delta \neq 0^\circ$: 非対称形)を、両側壁の相対開き角度を $\theta_{LR} = \theta_L - \theta_R$ ($\theta_{LR} > 0^\circ$: 扇形, $\theta_{LR} < 0^\circ$: 逆扇形)により各々定義した。例えば、Type 9, 3, 16 は、 θ_{LR} を -20° で、Type 12, 7, 1 は 0° で、Type 14, 10, 17 は $+20^\circ$ で各々一定に保ちながら δ を変化(対称→非対称)させた形状群となる。

3. 単純形状モデルによる検討(検討Ⅰ)

3.1 形状モデル

まず検討Ⅰ(a)では、現実のホール吸音力を想定し、室内の内装面は、客席床と客席後方壁を吸音性、その他を全て反射性とし、全モデルとも残響時間がほぼ一定($RT_{60} = 2.3 \sim 2.5s$, 室内平均吸音率 $\bar{\alpha} = 0.22$)になるように設定した。対象モデルの音響諸量を Table 2 に示す。

次に検討Ⅰ(b)では、吸音面配置の影響を除外し室形のみの影響要因を分析するため、床面以外の全ての内装壁面を反射性とした。残響時間 RT_{60} は $2.73 \sim 2.99s$ ($\bar{\alpha} = 0.19$) でほぼ一定である。

3.2 C_{80} , LF および EDT の解析結果(検討Ⅰ(a))

形状 Type 1, 2, 3, 4, 5((a)逆扇形シリーズ)、形状

Table 1 Seventeen room models of floor plan. Type nos. 5, 9, 12(shoebox), 14 and 15 are symmetric models. The others are asymmetric models. Subscript figure indicates the values of θ_L and θ_R . δ is defined as a parameter for representing the degree of asymmetrical feature ($\delta = |\theta_L + \theta_R|$).

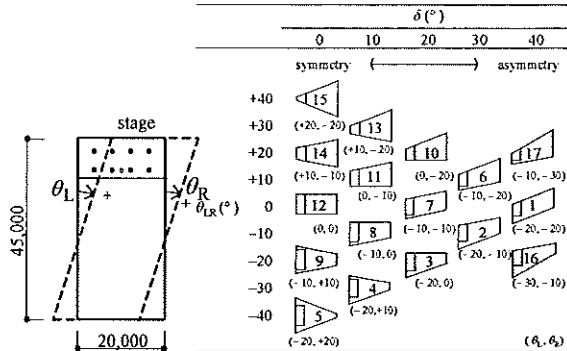


Table 2 Outline of room models in the study model I(a).

Type	V(m ³)	S _f (m ²) ¹⁾	V/S(m)	RT ₆₀ (s) ²⁾	$\bar{\alpha}$ ²⁾	N ³⁾
1			3.77	2.30		181 (218)
2			3.80	2.34		172 (217)
3			3.82	2.31		156 (206)
4			3.79	2.33		160 (215)
5			3.75	2.29		159 (214)
6			3.80	2.35		182 (219)
7			3.84	2.39		174 (219)
8			3.85	2.41		158 (208)
9	16,000	900	3.82	2.27	0.22	161 (216)
10			3.83	2.42		178 (210)
11			3.87	2.48		169 (209)
12			3.88	2.43		153 (198)
13			3.82	2.41		193 (220)
14			3.86	2.48		185 (220)
15			3.78	2.36		199 (218)
16			3.74	2.33		170 (215)
17			3.74	2.28		188 (217)

¹⁾ the floor area

²⁾ averaged over the four octave bands from 250 to 2k Hz

³⁾ the number of observation points in the seating area (including those on stage)

Type 1, 6, 10, 13, 15((b) 扇形シリーズ)並びに Type 12(シューボックス型)における LF の客席内分布を Fig. 2(音源 s0, 500Hz)に示す。このうち、Type 5, 15, 12($\delta = 0^\circ$)は対称形で、その他の形状は非対称形である。

まず、(a)逆扇形シリーズについて試みる。いわゆる、逆扇形型の側方反射音増強効果により Type 5 に近づくにつれて 35% を超えるエリアが増加しているのがわかるが、同時に場内分布の一樣性が悪くなっていく様子もうかがえる。

(b)扇形シリーズについて試みる。Type 15 に近づくにつれて(a)シリーズとは逆に 20% を下回るエリアが増加しているのがわかる。一方 Type 1 は、場内のばらつきは少なく、LF の値も全体的に 20% 以上となっておりシューボックスモデル Type 12 と比べると値はむしろ大きい。周波数の違い(250~2kHz)による大きな傾向の差は認められなかった。

以上の結果から、側壁の傾斜による室の基本形状の変化が音場に与える影響の一例を確認することができた。そこで、音響諸量の場内一樣な分布

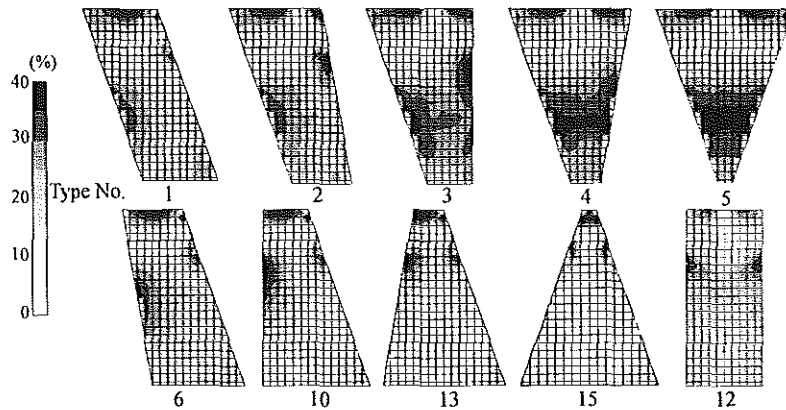


Fig. 2 Spatial distribution of LF for sound source s0 at 500 Hz.

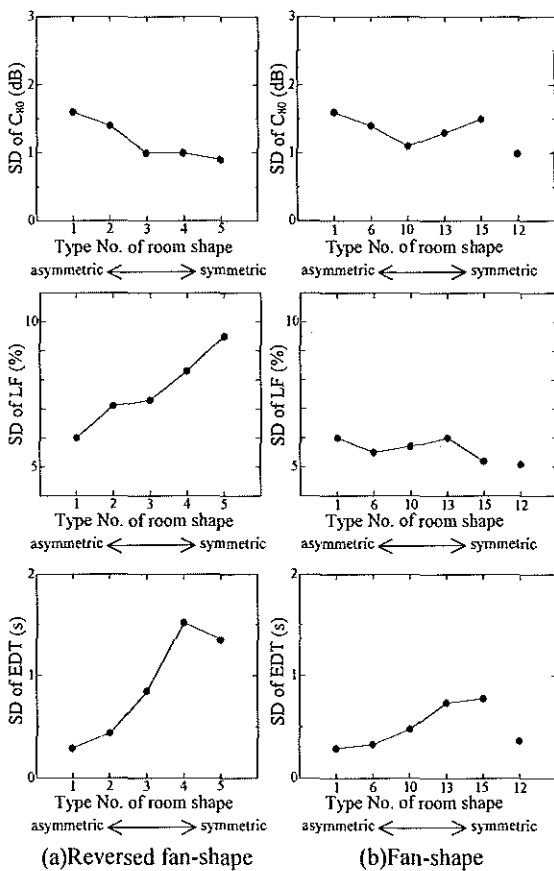


Fig. 3 Standard deviation of acoustical parameters at 500Hz corresponding to the change of room shape from Type no. 1 of asymmetric model to (a) Type no. 5 and (b) Type no. 15 of symmetric model.

を確保することが音響計画における一つの重要な視点であることから、以下では、各物理量の客席内偏差を算出し、シューボックスモデル並びに扇形モデルを基準にした平面形の対称性という観点から、音場分布への影響について考察する。ここで、音源位置と空間形状の幾何学的関係が形状タイプごとに異なるため、また舞台エリア全体を音源として空間分布特性を把握する目的で、音源s1~s8による平均値を算出した。(a)逆扇形シリーズ、並

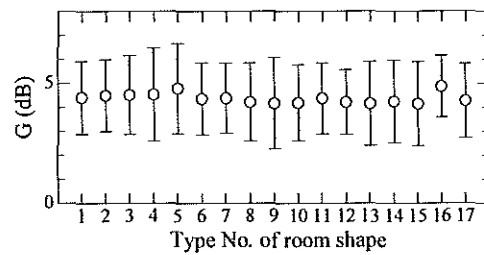


Fig. 4 Means and standard deviations of G at 500 Hz in the study model I(a).

びに(b)扇形シリーズの各物理量の標準偏差(SD)の算出結果を Fig. 3 に示す。

C_{80} についてみる。(a),(b)シリーズのいずれにおいても、SDの値は 1.3 ± 0.3 dB である。形状の変化による影響としては、0.6dB程度であり、特に顕著な傾向は認められない。

次に LF についてみる。(a)シリーズにおいて、Type 1 から Type 5 へと変化するにつれて SD の値が大きくなっていることがわかる。すなわち、Type 5 において SD の値は 9.5% と最も大きく場内分布の一様性が低下している。(b)シリーズにおいては形状の変化による値の変化はほとんど認められない。

EDT についてみる。(a),(b)シリーズのいずれの比較においても、Type 1 から Type 5、或いは Type 15 へと変化するにつれて明らかにばらつきが大きくなっているのがわかる。すなわち、SD の値は Type 1 で 0.29s であるのに対し、Type 5(逆扇形)、Type 15(扇形)において顕著に増加しており、場内分布の一様性の低下を示している。比較のため図中には、シューボックスモデルの Type 12 を併せて示すが、これと比較してみると空間分布の一様性において Type 1 や Type 6 がシューボックスモデルに匹敵する特性を示しているといえる。

3.3 反射音レベルの空間分布特性

G の場内平均値および標準偏差を Fig. 4 に示す(500Hz: 以下同様, s1~s8 の平均)。場内平均値で見ると、4~5dB (標準偏差: 1.3~1.9dB) で形状間に

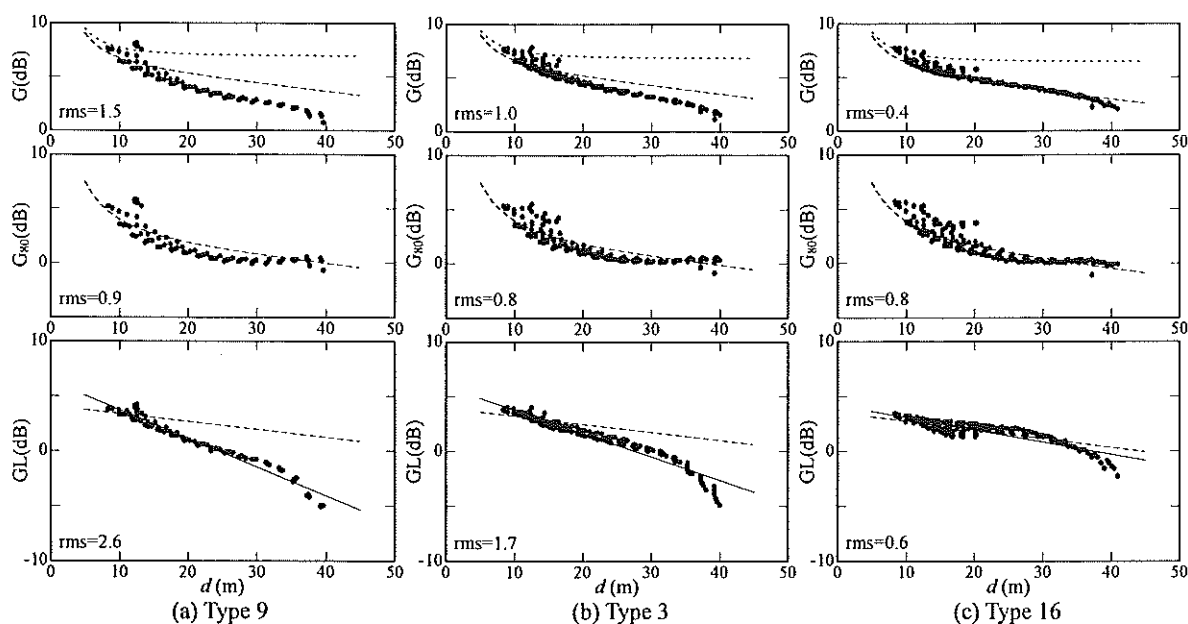


Fig. 5 G , G_{80} and GL values versus source-receiver distance for $\theta_{LR}=20^\circ$ in the simple models with absorbing rear wall (averaged over eight sources at 500Hz): broken lines, predictions using Barron's revised theory; dotted lines for G traditional theory; solid lines, least-squares fit lines.

顕著な差は認められず、各形状の特徴を捉えることはできない。他の周波数についても同様の傾向である。

そこで次に、空間形状との関連を調べるために G , G_{80} , GL の距離減衰特性について考察する。形状 Type 9 ($\delta=0^\circ$: 対称形), Type 3 ($\delta=20^\circ$), Type 16 ($\delta=40^\circ$) における距離減衰特性を比較して Fig. 5 に示す。ここで、これらの3つの形状は、 θ_{LR} を一定 (-20°) に保ちながら δ を変化 (対称→非対称) させた形状である。また、反射音レベル分布の形状間比較を容易にするための基準として、Barron's revised theory^[3] による計算値 (以下 BRT 値と呼ぶ) を図中に併せて示す。

まず、 G_{80} についてみる。音源からの距離 d が 10~20m のエリアで観測点間のばらつき具合に若干の差はみられるものの、いずれの形状も概ね BRT 値に対応しており、差は小さい (平均偏差 $rms=0.8-0.9$ dB)。次に GL についてみると、形状間で顕著な差が認められる。すなわち、Type 9 においては、距離 d が増加するにつれて BRT 値から下方への逸脱が大きくなり、最後部の観測点 ($d=40m$) では約 6dB の差が生じている ($rms=2.6$ dB)。しかしながら、Type 3, Type 16 では、Type 9 に比べ明らかにレベルの低下が少なく、Type 16 においては BRT 値にはほぼ一致した減衰特性を示している ($rms=0.6$ dB)。 G の減衰特性は、この後期音レベル GL の影響が現れた結果であり、BRT 値との平均偏差は Type 9, 3, 16 で各々 1.5, 1.0, 0.4dB である。参考までに、完全拡散を仮定した従来式による G の計算値を図中 (点線) に示すが、平均 2dB ($-10\ln(1-\bar{\alpha})$ 相当) の過大評価となる。

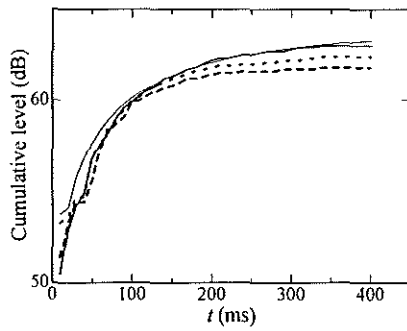
3.4 累積反射エネルギー特性

以上の傾向は、Type 14, 10, 17 ($\theta_{LR}=20^\circ$: 扇形) 並びに Type 12, 7, 1 ($\theta_{LR}=0^\circ$) の各シリーズにおいても同様に認められた。そこで、これらの傾向の原因を調べるために、得られたインパルス応答から累積エネルギー曲線 (時間幅 10ms) を算出した。 $d=30, 40m$ の観測点における算出例を、形状 Type 9, 3, 16 を比較して Fig. 6 に示す。初期部分における形状間の差はほとんど認められないが、 $t=150-300ms$ において顕著な差が生じている様子がわかる。すなわち、形状間における GL の空間分布特性の差は 150ms 以降に到来する反射音の増減に起因している傾向を示している。また、同一の吸音条件下にも拘わらず反射次数 4-6 次の反射音が Type 9 で最も少なく、Type 3, 16 になると増加することが確認された。これらのことより、 GL の距離減衰特性における差は、平面形の違い ($\delta=0-40^\circ$, θ_{LR} =一定) による反射音の増減に起因しているものと推測される。

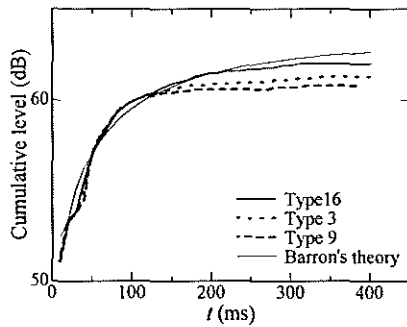
3.5 GL の距離減衰率

前述した GL の距離減衰特性と対称/非対称条件の関係を把握するために、 GL の 1 次回帰 (Fig. 5, 相関係数 $|r|=0.89-0.98$) から減衰率 m (dB/10m) を算出した。 m と δ の関係を Fig. 7 に示す。値は 8 音源の平均値および標準偏差を表す。また、BRT による計算値を破線で示す。

一般に、ライブな音場ほど m は小さくなる。Fig. 7 をみると、全体としては θ_{LR} に依らず δ の増加とともに m が小さくなるのがわかる。すなわち、対称形状群 ($\delta=0^\circ$) では、Type 5 で 2.9dB と最も大きく、Type 12 を除くと約 2~3dB の範囲に



(a) at 30m-points



(b) at 40m-points

Fig. 6 Cumulative reflection levels in Type nos. 9, 3 and 16, compared with predictions using the revised theory.

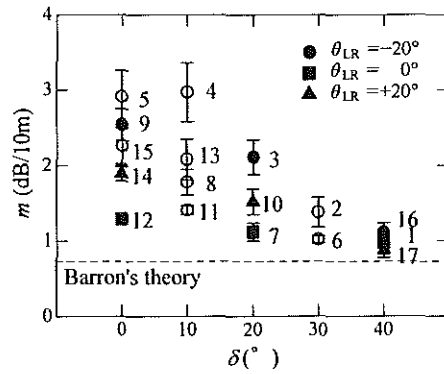


Fig. 7 Level attenuation coefficients m for GL versus δ in the study model I(a) (simple models with absorbing rear wall). Labels are the type-number of room models: broken line, prediction using the revised theory (0.73).

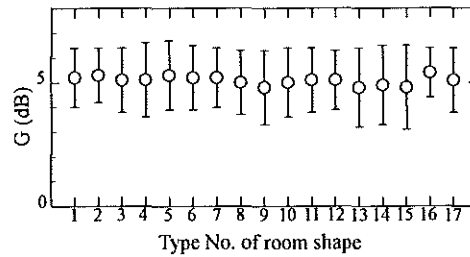


Fig. 8 Means and standard deviations of G at 500 Hz in the study model I(b).

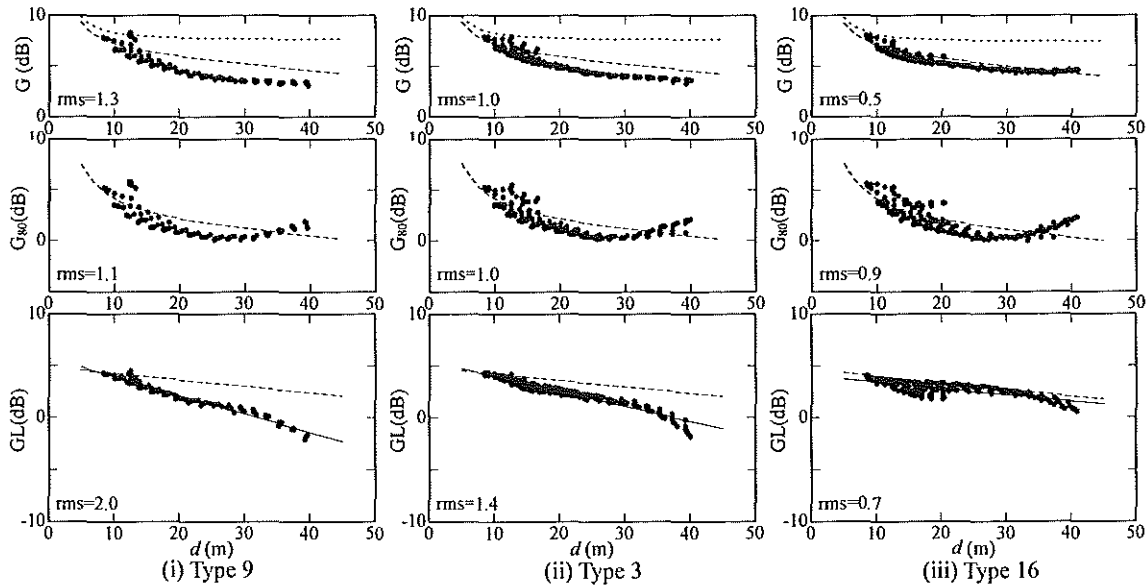


Fig. 9 G , G_{80} and GL values versus source-receiver distance for $\theta_{LR} = -20^\circ$ in the simple models with reflective rear wall (averaged over eight sources at 500 Hz): broken lines, predictions using Barron's revised theory; dotted lines for G , traditional theory; solid lines, least-squares fit lines.

ある。一方、非対称形になると m は小さくなり、Type 1, 16, 17 ($\delta=40^\circ$) で 1dB 前後と最も小さく、BRT 値(0.73)に近づく。なお、対称形状群の中で Type 12(シューボックス型)だけが値が小さいのは興味深い。

以上の結果より、平面形の対称性の違いによる音場への影響を、反射音エネルギーの空間分布特性の差として捉えることができた。

3.6 後壁反射性モデルを用いた考察(検討 I(b))

後壁反射性モデルにおける G の場内平均値および標準偏差を Fig. 8 に示す(500Hz: 以下同様, s1~s8 の平均)。場内平均値で見ると、5~6dB (標準偏差: 1.0~1.7dB) であり後壁吸音モデルの場合(検討 I(a)) と比べ吸音力減少分に相当する約 1dB 程度の増加となっている。形状間には顕著な差は認められず、各形状の特徴を捉えることはできない。

そこで次に、3.3と同様に、 θ_{LR} が一定(-20°)の場合における G , G_{80} , GL の距離減衰特性を比較してFig. 9に示す。

まず、Type 9, 3, 16($\theta_{LR}=-20^\circ$:逆扇形)のシリーズについてみる。 G_{80} については、客席後壁を反射性にした影響により後方部におけるレベル上昇が見られるが、いずれの形状も概ねBRT値に対応しており(平均偏差rms=0.9-1.1dB)、形状間の差は小さい。次にGLについてみると、形状間で顕著な差が認められる。すなわち、Type 9(対称形)においては、距離 d が増加するにつれてBRT値から下方への逸脱が大きくなり、最後部の観測点($d=40m$)ではおよそ6dBの差がみられる(rms=2.0dB)。しかしながら、Type 3, Type 16(非対称形)では、Type 9に比べ明らかにレベルの低下が少なく、Type 16においてはBRT値にほぼ一致した減衰特性を示している(rms=0.7dB)。これらの G_{80} とGLの和である G の減衰特性をみると、非対称形のType 16における音圧レベルの空間分布特性が対称形のType 9に比べ好ましい状態にある様子がわかる。すなわち、 G の減衰特性はGLの影響が現れた結果、Type 3, Type 16が、Type 9に比べ全体的に値が大きくなっており、rms値はType 9, 3, 16で各々1.3, 1.0, 0.5dBである。

さらに、GLの減衰率 m (dB/10m)と δ の関係をFig. 10に示す。値は8音源の平均および標準偏差を表す。これより θ_{LR} に依らず δ の増加とともに m が小さくなるのがわかり、その傾向は、後壁吸音モデルと同様である。

以上の結果は、客席後壁廻りを吸音性に設定した形状モデルにおける結果と符合するものであり、形状の幾何的対称性の影響とみることができる。

3.7 幾何反射音数

次に、GLの距離減衰特性における形状による差の要因を調べるために、各観測点における幾何反射音数を算出した。まず、場内の観測エリアごとに形状間比較を行ったところ、音源観測点間の距離 d が20m未満の観測点では形状条件による差はほとんど認められなかったものの、 $d \geq 30m$ の観測エリアにおいて幾何反射音数に差が生じていることがわかった。Type 9, 3, 16($\theta_{LR}=-20^\circ$:逆扇形)およびType 14, 10, 17($\theta_{LR}=20^\circ$:扇形)における累積幾何反射音数 N_c (時間幅10ms, $d \geq 30m$ 観測点平均)の算出結果をFig. 11に示す。参考までに図中にはCremerによる矩形室の有効虚音源数^[4]を併せて示す。

$\theta_{LR}=-20^\circ$ (逆扇形)の場合についてみる。初期部分($t=0-150$ ms)における形状間の差はほとんど認められないが、 $t=150$ ms以降において大きな差となっている様子がわかる。すなわち、全反射モデルという条件下にも拘わらずType 9(対称形)における N_c が最も少なく、Type 3, 16(非対称形)になると増加していることが確認できる。また、

時刻の増加にとともに徐々に差が顕著になっている。 $\theta_{LR}=+20^\circ$ (扇形)の場合においても同様の傾向である。これらの傾向は音源の違いによる差異は認められなかった。

以上の結果より、GLの距離減衰特性における差は、平面の対称性の違い($\delta=0-40^\circ$, θ_{LR} =一定)による幾何反射音数の増減に起因していることが示された。

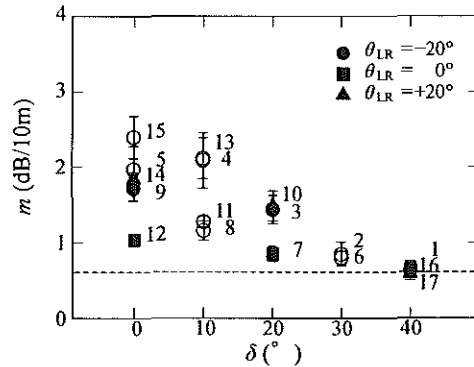


Fig. 10 Level attenuation coefficients m for GL versus δ in the study model I(b) (simple models with reflective rear wall). Labels are the type-number of room models; broken line, prediction using the revised theory (0.63).

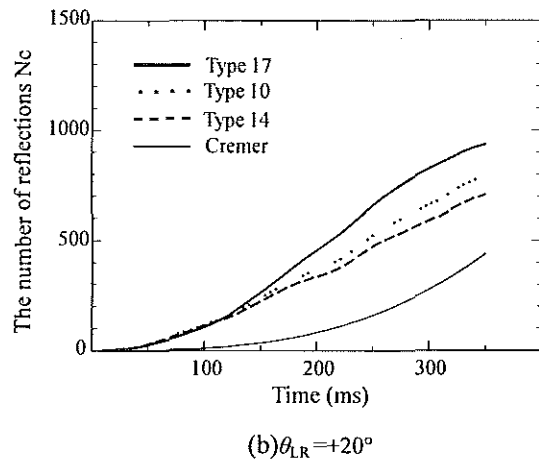
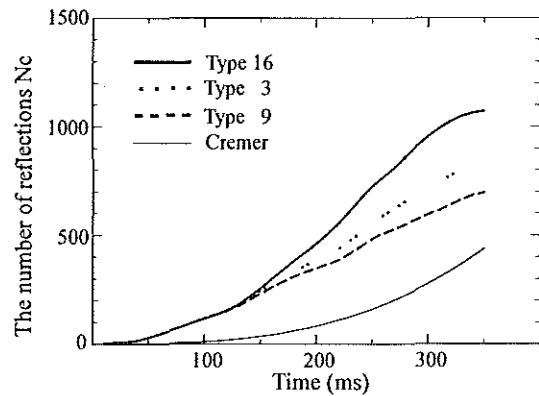


Fig. 11 Cumulative number of reflections for the models of $\theta_{LR}=-20^\circ$ and $+20^\circ$ (averaged over eight sources); thin solid lines, Cremer's formula for rectangular rooms.

4. 拡散形状モデルによる検討(検討Ⅱ)

4.1 形状モデル

より現実のホール空間に近い音場について検討するため、側壁および天井面を、全て折れ壁とした拡散形状モデルを設定した。折れ壁の仕様は、拡散壁 A(ピッチ 3m, 傾斜 5°), 拡散壁 B(ピッチ 3m, 傾斜 10°)の 2 種類とした。床面積(900m²)および天井高(18m)は全モデルで一定であり、室の平均吸音率は 0.20~0.22 で一定とした。対象モデルの音響諸元を Table 3 に示す。

4.2 C₈₀, LF および GL の解析結果

拡散形状モデル A(5°)の全 17 形状における C₈₀, LF, GL の空間分布特性を Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14(音源 s1-s8 の平均, 500Hz) に各々示す。

まず、C₈₀ についてみる。場内平均値 Ave は、対称平面形状(Type 5,9,12,14,15)において-1.9~-0.2dB, 非対称平面形状(12 形状)において-1.7~-0.2dB の範囲に各々あり、両形状間に顕著な差は認められない。また、場内のばらつき(標準偏差 SD)についても、対称形状において 0.8~1.5dB, 非対称形状において 0.9~1.7dB であり、大きな差は認められない。全体として、扇形/逆扇形の形状の違いによる差は大きいものの (Type 5: Ave = -1.9dB, SD = 0.8dB, Type 15: Ave = 0.2dB, SD = 1.5dB), 対称/非対称の形状による影響はほとんどみられない。

次に、LF についてみる。対称/非対称の違いを表現する δ に着目して見てみると、 δ の増加に伴い LF の値も増加していることがわかる。例えば、Type 9,3,16 ($\theta_{LR} = -20^\circ$: 逆扇形)の比較において、非対称形状(Type 16)になるにつれて 30%以上のエリアが増加している。同様に Type 12,7,1 ($\theta_{LR} = 0^\circ$)では、20%以上のエリアが増加し 15%以下のエリアが減少する傾向がみられる。Type 14, 10,17($\theta_{LR} = +20^\circ$)の比較では、Type 14 において扇形ホール特有の側方反射音を得にくいエリアが生じ

Table 3 Outline of the 5°-diffusion models in the study model II.

Type	V(m ³)	S _f (m ²) ¹⁾	V/S(m)	RT ₆₀ (s) ²⁾	$\bar{\alpha}$ ²⁾	N ³⁾
1	16011.6		3.75	2.29	0.22	181(218)
2	15986.6		3.78	2.26	0.22	172(217)
3	15955.1		3.79	2.42	0.21	156(206)
4	15959.4		3.76	2.49	0.20	160(215)
5	15962.0		3.73	2.42	0.21	159(214)
6	16009.0		3.79	2.28	0.22	182(219)
7	15973.4		3.82	2.31	0.22	174(219)
8	15956.0		3.82	2.33	0.22	158(208)
9	15956.8	900	3.80	2.45	0.21	161(216)
10	16007.9		3.82	2.32	0.22	178(210)
11	15972.4		3.85	2.38	0.22	169(209)
12	15941.1		3.85	2.36	0.22	153(198)
13	16039.7		3.81	2.32	0.22	193(220)
14	16004.1		3.84	2.37	0.22	185(220)
15	16075.6		3.78	2.30	0.22	199(218)
16	15987.8		3.72	2.27	0.22	170(215)
17	16043.7		3.73	2.26	0.22	188(217)

¹⁾ the floor area

²⁾ averaged over the four octave bands from 250 to 2k Hz

³⁾ the number of observation points in the seating area (including those on stage)

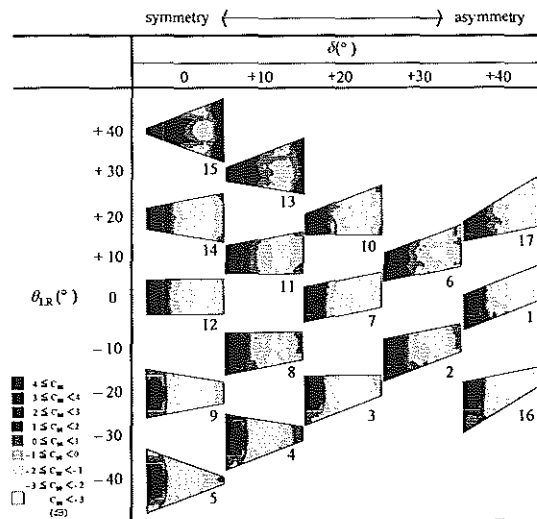


Fig. 12 Spatial distribution of C₈₀ in the 5°-diffusion models of the study model II (averaged over eight sound sources).

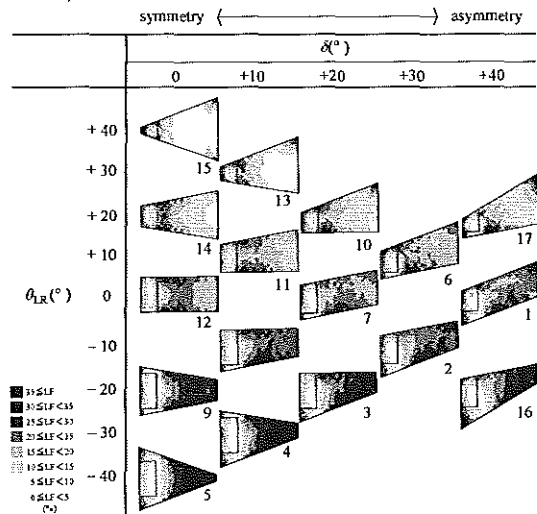


Fig. 13 Spatial distribution of LF in the 5°-diffusion models of the study model II (averaged over eight sound sources).

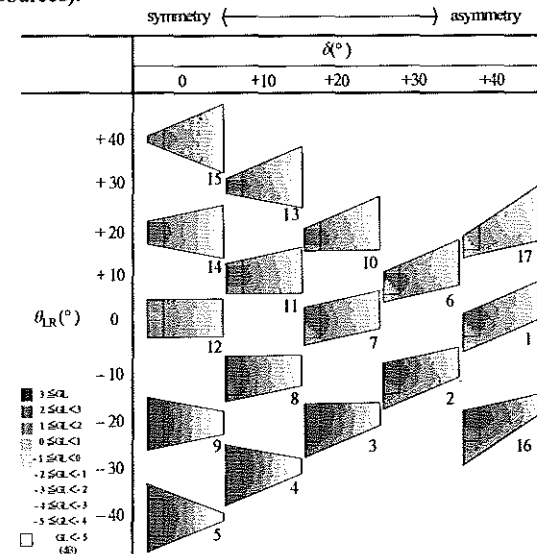


Fig. 14 Spatial distribution of GL in the 5°-diffusion models of the study model II (averaged over eight sound sources).

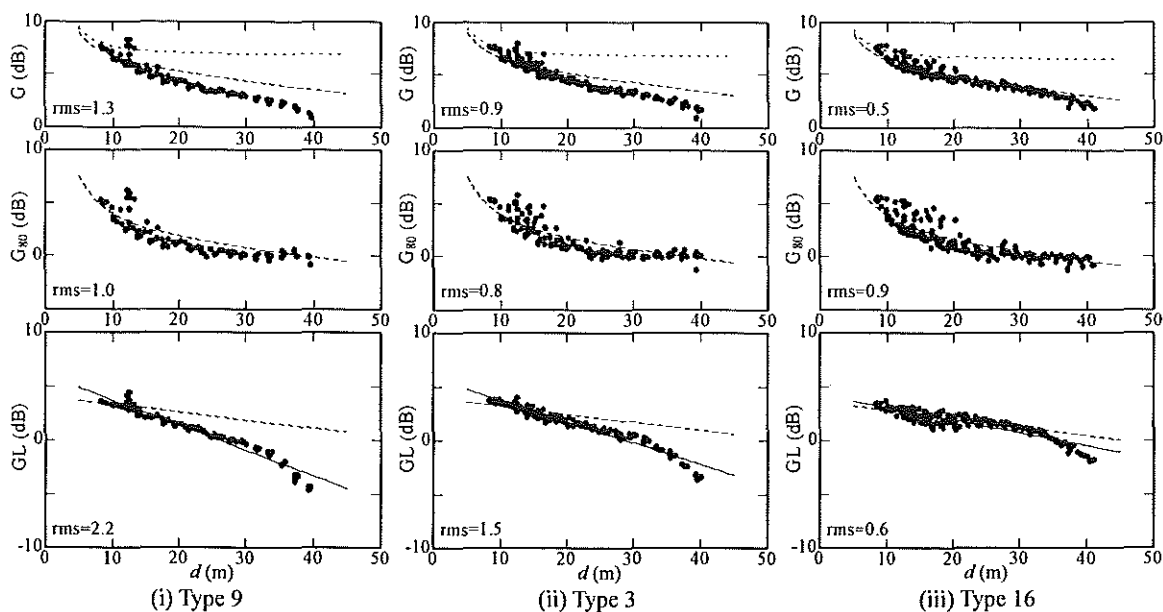


Fig. 15 G , G_{80} and GL values versus source-receiver distance for $\theta_{LR}=-20^\circ$ in the 5° -diffusion models. (averaged over eight sources at 500Hz): broken lines, predictions using Barron's revised theory; dotted lines for G traditional theory; solid lines, least-squares fit lines.

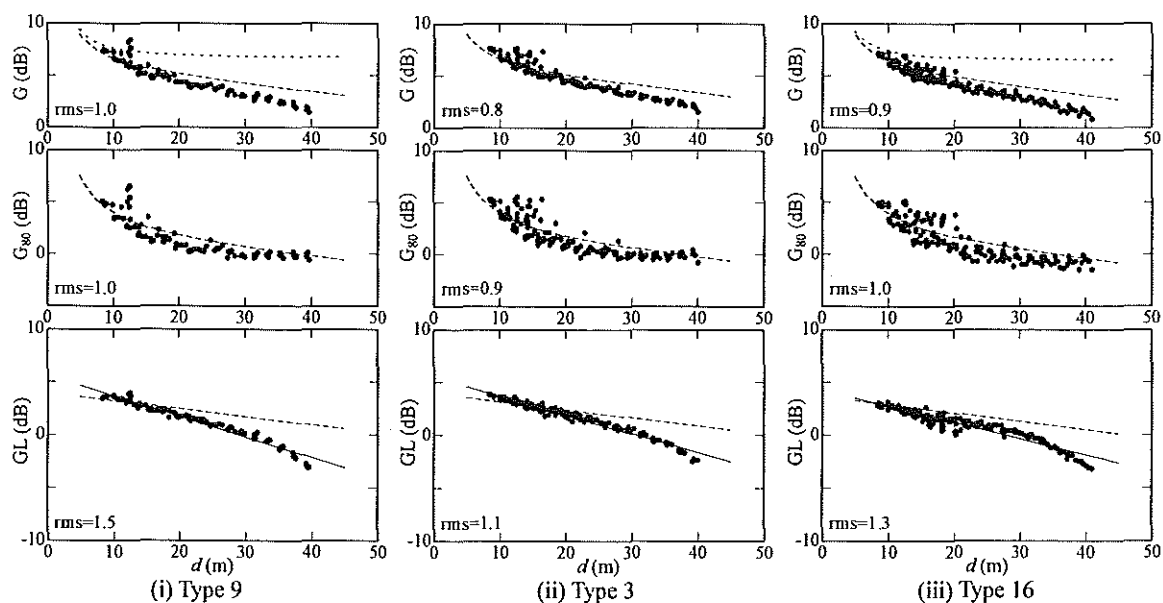


Fig. 16 G , G_{80} and GL values versus source-receiver distance for $\theta_{LR}=-20^\circ$ in the 10° -diffusion models. (averaged over eight sources at 500Hz): broken lines, predictions using Barron's revised theory; dotted lines for G traditional theory; solid lines, least-squares fit lines.

ているが、 δ の増加とともに改善され、Type17においては最大値で約10%の増加がみられる。

GLについてみる。 δ の増加に伴い、場内分布の一様性が増加していることが顕著に認められる。 $\delta=0^\circ$ の場合、値の低いエリアが客席後方に広範囲に渡っているが、 δ が増加するとともにこのエリアは無くなっている。例えば、Type9,3,16 ($\theta_{LR}=-20^\circ$)で比較すると、Type9 ($\delta=0^\circ$)の Ave が 0.9dB, SD が 2.2dB であるのに対し、Type16 ($\delta=40^\circ$)では Ave : 1.7dB, SD : 1.1dB と、GLの値および分布の一様性が増し、非対称形状ほど音圧

分布特性が改善されている。

4.3 反射音レベルの空間分布特性

次に、 G , G_{80} , GL の距離減衰特性について考察する。 $\theta_{LR}=-20^\circ$ が一定で $\delta=0, 20, 40^\circ$ の場合における距離減衰特性を比較して Fig. 15 (拡散形状モデル A, Fig. 16 (拡散形状モデル B) に各々示す。

まず、拡散形状モデル A についてみる。 G_{80} は観測点間のばらつき具合が、非対称形になるにつれて大きくなる傾向にあるが、これは側壁および天井の凹凸形状が初期反射音の場内分布に影響したためと考えられる。しかし、いずれの形

状も BRT 値に対応しており(平均偏差 rms=0.8~1.0dB), 差は小さい. 次に GL についてみると, 形状間で顕著な差が認められる. すなわち, Type 9(対称形)においては, 音源受音点間の距離 d が増加するにつれて BRT 値から下方への逸脱が大きくなり, 最後部ではおよそ 6dB の差がみられる(rms=2.2 dB). 一方, Type 3,16(非対称形)では, Type 9に比べ明らかにレベルの低下が少なく, Type 16においては BRT 値にほぼ一致した減衰特性を示している (rms=0.6dB). 拡散形状モデル B (Fig. 16) の場合, モデル A と比べて, 対称/非対称の違いによる差が若干小さくなっているもののほぼ同様の結果である.

4.4 GL の距離減衰率

検討 I と同様に, GL の距離減衰特性と対称/非対称条件の関係を把握するために, GL の 1 次回帰(Fig. 15,16, 相関係数 $|r|=0.88\sim0.98$)から減衰率 m (dB/10m)を算出した. m と δ の関係を Fig. 17 に示す. 値は 8 音源の平均値および標準偏差を表す. また, BRT による計算値を破線で示す.

Fig. 17 をみると, 全体としては θ_{LR} に依らず δ の増加とともに m が小さくなるのがわかる. すなわち, 対称形状群($\delta=0^\circ$)では, Type 5 で 2.6 と最も大きく, Type 12(シューボックス型)を除くと 1.6~2.6 の範囲にある. 一方, 非対称形になると m の平均値と標準偏差は小さくなり, Type 1,17 ($\delta=40^\circ$)で $m=1.0$ 前後と最も小さく, BRT 値の 0.75 に近い値を示している. また, 単純形状の場合における m の値(最小値, 最大値)を図中に併せて示すが, 両者の傾向は一致している.

以上の結果は, 単純形状モデル(検討 I)における結果と符合するものであり, 側壁および天井に

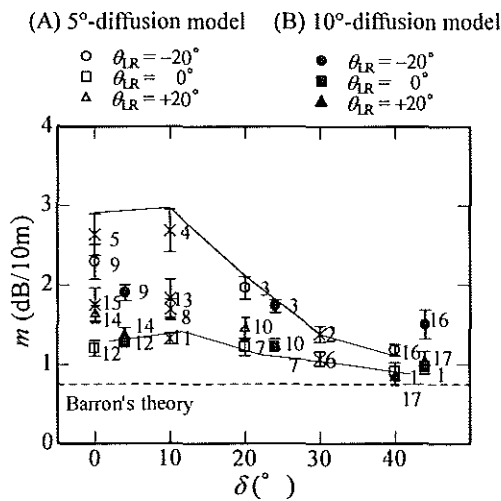


Fig. 17 Level attenuation coefficients m for GL versus δ in the study model II (diffusion model without scattering). Labels are the type-number of room models: solid lines, maximum and minimum values for m in the simple models with flat surface; broken line, prediction using the revised theory (0.75).

凹凸のある場合においても非対称形状による音圧分布の改善効果が確認された.

5. 音響散乱モデルによる検討(検討III)

解析は, (a)散乱を考慮しない場合と(b)考慮した場合の各条件で行った. 壁面の乱反射率 s については, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.00(客席床を除く全壁面)の 5 段階に設定した.

5.1 鏡面反射成分と散乱反射成分の寄与

G, G_{80}, GL の場合平均値を算出した結果を Fig. 18 に示す($s_0, 500\text{Hz}$). いずれの乱反射率においても, 形状間の差は, $G: 0.9\text{dB}, G_{80}: 0.8\text{dB}, GL: 1.1\text{dB}$ 程度であり顕著な差は認められない. 乱反射率の設定条件による影響について見てみると, G, G_{80}, GL のいずれも散乱を考慮しない場合に値は最も高く(各々 4.5dB, 1.4dB, 1.4dB), また, G, GL では $s=0.5$ の場合に, G_{80} では $s=1.0$ の場合に最も低い値となっている(各々 0.2dB, -1.4dB, -6.7dB).

次に, G_{80}, GL と乱反射率の関係について, 鏡面反射エネルギー成分と散乱反射エネルギー成分の各々の寄与をみるために, 両者を分離して算出した. 結果を Fig. 19($\theta_{LR}=-20^\circ$: Type 9, 3, 16)に示す. これより, 乱反射率 $s=0.0\sim0.5$ に対する鏡面反射成分の変化を見てみると, G_{80} では -3dB であるのに対して GL では -12dB と大きい. すなわち, 後期音領域においては, 乱反射率の増加とともに鏡面反射成分が急激に小さくなるとともに, 散乱成分は $s=0.5$ を超えると逆に急激に大きくなるのがわかる.

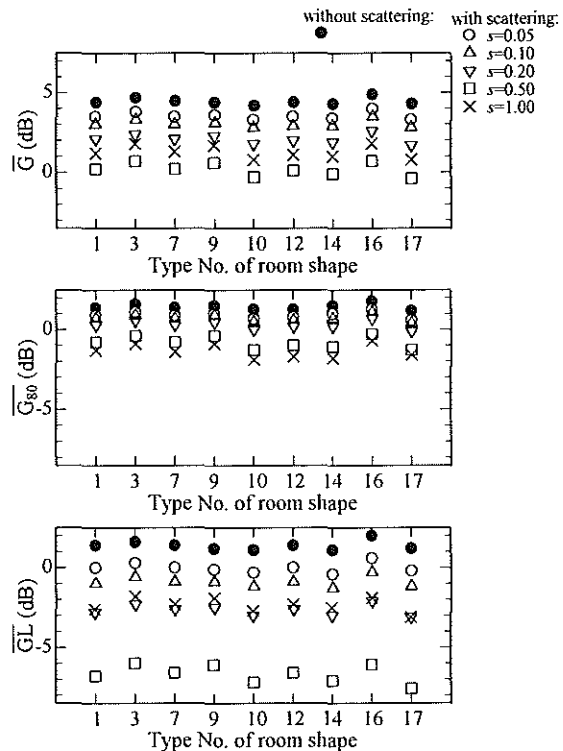


Fig. 18 Means of sound level parameters at 500Hz in the study model III.

5.2 反射音レベルの空間分布特性

(a)散乱を考慮しない場合と(b)考慮した場合 ($s=0.10$)の GL の距離減衰特性を比較した一例 ($\theta_{LR}=-20^\circ$)を Fig. 20 に示す. (a)(b)いずれの場合においても形状間で顕著な差が認められる. すなわち, Type 9 においては, 距離 d が増加するにつれて BRT 値から下方への逸脱が大きくなる. 一方, Type 16 が, 3 形状の中で最も BRT 値に近い分布を示している. 図中に rms 値(BRT 値との平均偏差)を併せて示すが, 散乱を考慮した場合の rms 値は, Type 9, 3, 16 で各々 4.1dB, 3.4dB, 2.4dB である. Type 3, 16 では, Type 9 に比べ明らかに

客席後方部におけるレベルの低下が少なく, これらの傾向は散乱を考慮しない場合も同様である.

5.3 GL の距離減衰率

GL の距離減衰特性の 1 次回帰(相関係数 $r=0.868\sim 0.997$)から距離減衰率 $m(\text{dB}/10\text{m})$ を算出した. m と δ の関係を Fig. 21 に示す. 散乱を考慮しない場合および $s=0.05, 0.10, 0.20$ の場合, m と δ の相関係数は $-0.73\sim -0.69$ であり θ_{LR} に依らず δ の増加とともに m が小さくなる. すなわち, $\delta=0\sim 40^\circ$ に対応する m の変化幅は, 散乱を考慮しない場合 1.6, $s=0.05$ のとき 1.6, $s=0.10$ のとき 1.5, $s=0.20$ のとき 1.3 であり, 形状間に顕著な差が認められる. しかしながら, $s=0.50, 1.00$ の場合は, δ による影響はほとんど見られない, これらの傾向を捉えるために, さらに距離減衰率 m と乱反射率 s の関係を Fig. 22 に示す. m の最大値と最小値の差は, 散乱を考慮しない場合に 1.6 であるのに対して, $s=1.00$ の場合は 0.2 となり, 乱反射率が大きくなるにつれて一定値に近づく様子がわかる. これは, 壁面の乱反射率が大きくなると鏡面反射成分が減少することから, 室の基本形状による音圧分布特性への影響が小さくなることを示している.

以上の結果より, 散乱を考慮しない場合と同様に非対称形状による音圧分布特性の改善効果を明らかにした. また, 乱反射率の値が大きくなると(室内平均乱反射率 0.54 以上), 室の基本形状の違いによる分布特性の差異は小さくなり, 形状固有の音場改善効果が徐々に見えなくなることを示した.

6. 音響縮尺模型実験による検証

6.1 実験方法

1/20 縮尺のホール模型内にて, スパーク放電パルスを音源とし, 1/4in.無指向性マイクロフォン

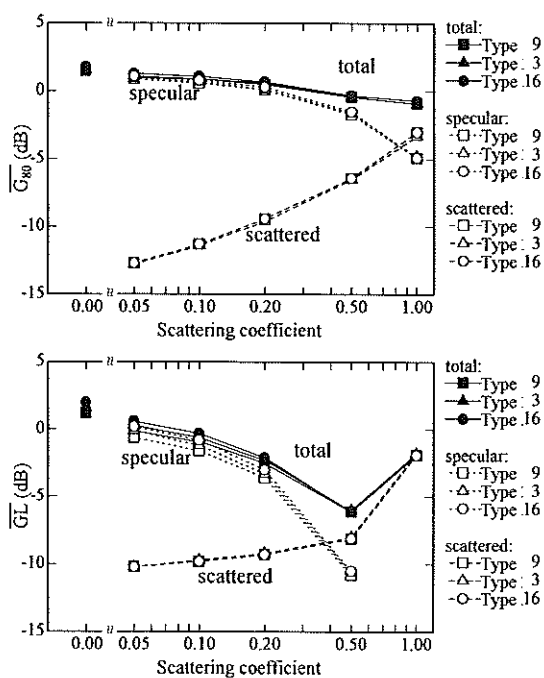


Fig. 19 Specular and scattered reflection energy in G_{80} and GL versus scattering coefficients.

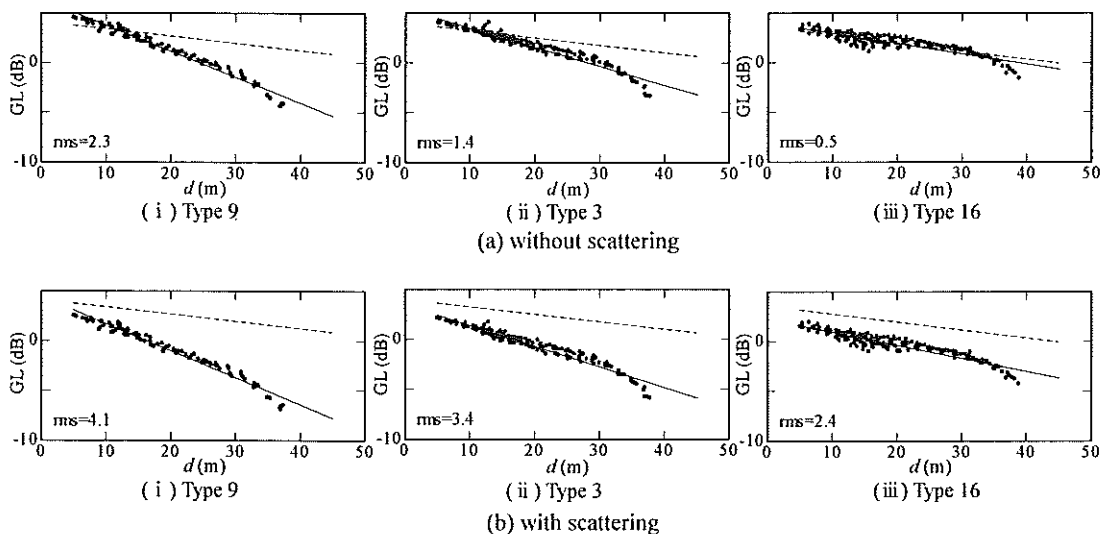


Fig. 20 Comparison of GL values for $\theta_{LR}=-20^\circ$ between (a) without and (b) with scattered reflections ($s=0.10$, at 500 Hz): broken lines, predictions using Barron's revised theory; solid lines, least-squares fit lines.

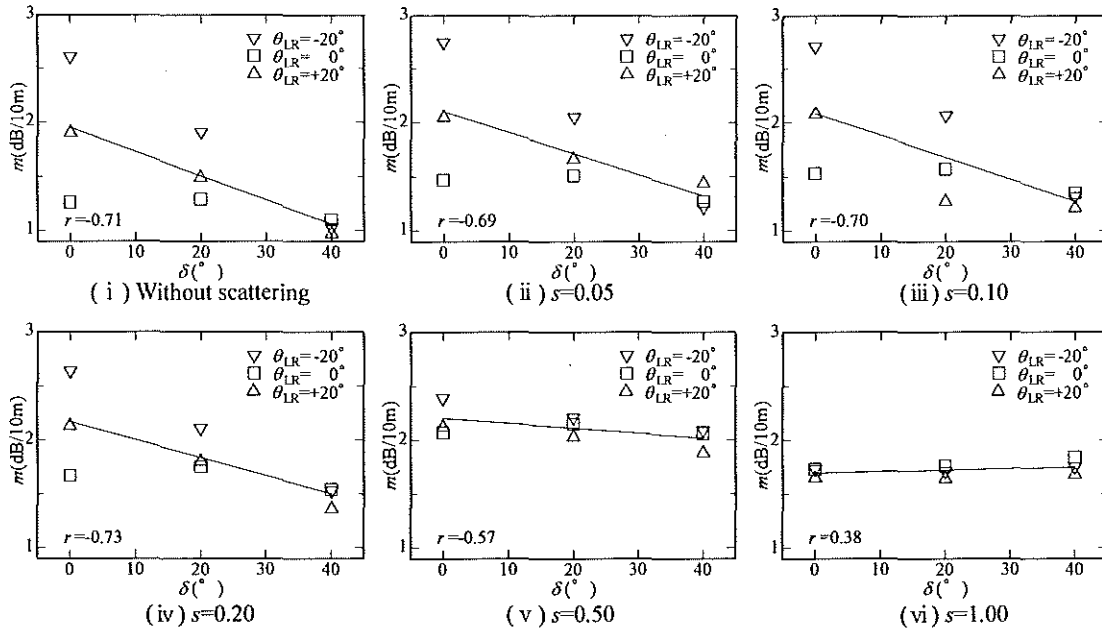


Fig. 21 Level attenuation coefficients m for GL versus δ in each condition of sound scattering.

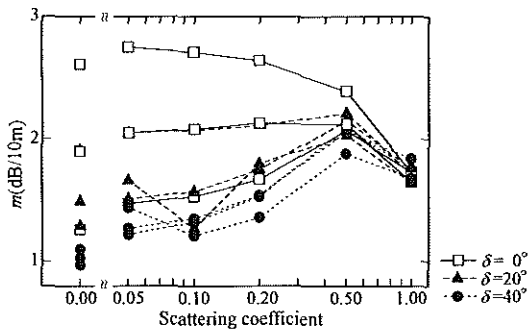


Fig. 22 Level attenuation coefficients m for GL versus scattering coefficient in the study model III.

によりインパルス応答を測定した(サンプリング周波数 128kHz, 同期加算 128 回). 得られたインパルス応答に 5k~40kHz(オクターブバンド, 実物換算 250~2kHz)のフィルタリング処理を行った後, 媒質による音響吸収の影響を空気減衰率の計算法^[5]を用いて補正した. 解析は, 得られた時間応答波形から残響時間 RT(Schroeder 法^[6]による), Strength G, 初期音レベル $G_{80}(t=0-80ms)$, 後期音レベル GL($t=80-\infty ms$)を算出した. 観測点は 24~32 点である. 測定装置の概要および観測点を Fig. 23, Fig. 24 に各々示す.

6.2 形状モデル

ホール内壁を平壁にて構成した単純形状モデル並びに側壁と天井に凹凸のある拡散形状モデルを対象とした. また, ホールの平面形は, 9 タイプのモデルとした(Type 14, 10, 17, 12, 7, 1, 9, 3, 16). すなわち Type 14, 12, 9 は対称平面を, 残りの 6 形状は非対称平面を各々有するモデルである. 室の内装は, 相似則^[7]を考慮し, 合板厚 5.5mm,

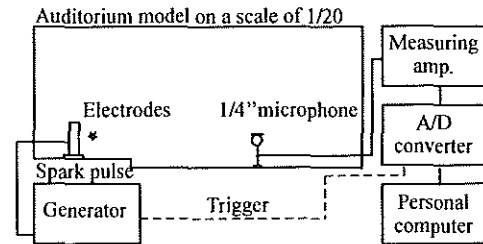


Fig. 23 Block diagram of scale model measurement.

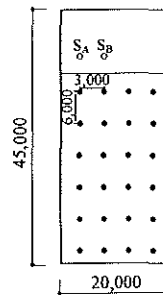


Fig. 24 Location of sound sources and observation points.

クリアラッカー仕上げ(反射面, 実際のコンクリート壁に相当)およびフェルト厚 4mm(吸音面)を使用し, 残響時間および平均吸音率がほぼ一定になるように調整した.

6.3 平均音圧レベル

G , G_{80} , GL の場内平均値と標準偏差(SD)を Fig. 25 に示す(500Hz). 場内平均値における形状間の差は, 単純形状モデル, 拡散形状モデルともに, G , G_{80} , GL 各々 2dB (SD: 1~4dB)程度の差がある. これは, 幾何音響解析より得られた結果(G , G_{80} ,

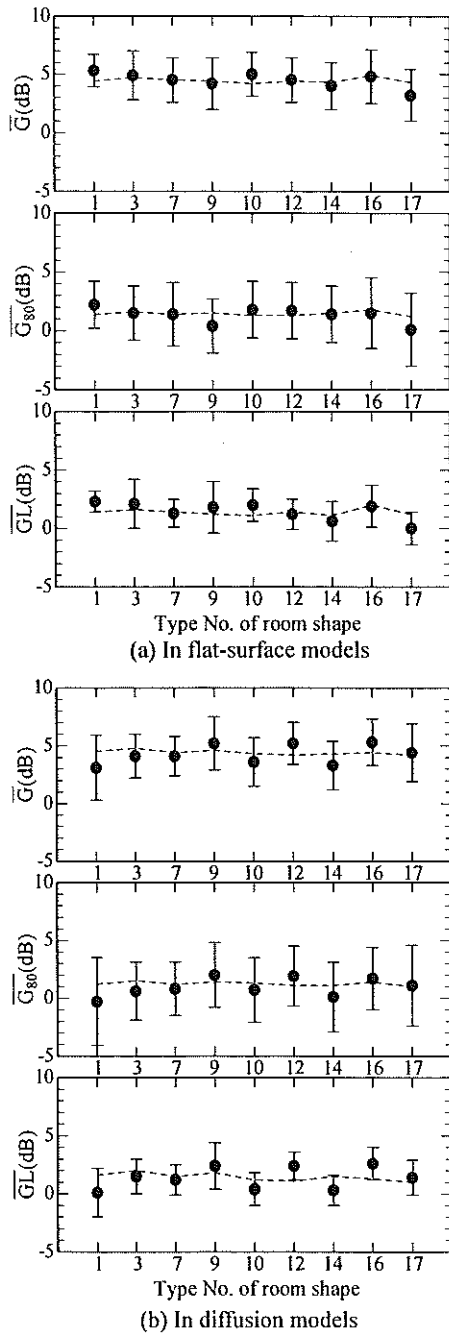


Fig. 25 Means and standard deviations of measured G , G_{80} and GL : broken lines, calculated means (at 500 Hz).

GL 各々 1dB 以下; SD: 1~2 dB) に比べると若干高い値となっている。しかしながら、いずれの指標においても場内平均レベルでみる限り、これまでの解析結果と同様に形状の対称性との間に明確な傾向は認められない。

6.4 反射音レベルの空間分布特性

G , G_{80} , GL の距離減衰特性(500Hz)を Fig. 26 (単純形状モデル)に示す。図中には、幾何音響解析によって得られた結果(観測点数 153~199 点による回帰線)を併せて示す。

単純形状 Type 9, 3, 16($\theta_{LR}=-20^\circ$:逆扇形)のシ

リーズについてみる。実験値が解析値の回帰線に沿うように分布していることが見てとれる。このときの相関係数は G , G_{80} , GL に関してそれぞれ 0.80~0.97, 0.81~0.96, 0.73~0.96 と高く解析値と対応がとれている。他の $\theta_{LR}=0^\circ$ (シューボックス形シリーズ), $\theta_{LR}=+20^\circ$ (扇形シリーズ)においても同様に高い相関を示している。拡散形状の場合についても、相関係数は G , G_{80} , GL に関してそれぞれ 0.83~0.98, 0.82~0.97, 0.80~0.92 と高く、単純形状の場合と同様に実験値と解析値の対応はとれている。

さらに、実験値と解析値の相関係数(9 形状の平均)を周波数特性として Fig. 27 に示す。概ね相関係数は 0.8 程度以上と高い値を示している。ただし、 G , G_{80} (単純形状モデル:0.83~0.93, 拡散モデル:0.83~0.93)に比べて後期音レベル GL の相関係数(単純形状モデル:0.59~0.83, 拡散モデル:0.77~0.88)が低いこと、また 250Hz においては他の周波数に比べ若干値が低いことがわかる。これらの傾向は、幾何音響解析の原理的性質に起因しているものと考えられる。

6.5 GL の距離減衰率

解析と同様に GL の距離減衰率 m (dB/10m)と δ の関係を Fig. 28 に示す。図中には、幾何音響解析による結果(形状数 17)を併せて示す。

まず、単純形状についてみる。 δ の増加に伴う m の変化量は $\theta_{LR}=-20^\circ$ のとき 1.6, $\theta_{LR}=0^\circ$ のとき 0.6dB, $\theta_{LR}=+20^\circ$ のとき 1.1dB となっている。また、対称形状($\delta=0^\circ$)において最大値は 3.1dB であり非対称形になると m は減少し、 $\delta=40^\circ$ の場合、最大値が 1.2dB と小さい。拡散形状については、 δ の変化に伴う m の変化幅は小さく、解析値の傾向と概ね一致している。

以上より、いずれの形状モデルにおいても実験値は幾何音響解析による解析値と同様の結果を示しており、非対称形状による音圧分布特性の改善効果が実験的にも検証された。

7. むすび

オーディトリウム空間の幾何的対称性という視点から、室の基本形状と音場特性の関連について、一連の幾何音響解析並びに音響縮尺模型実験手法を用い検討した。

第一に、ホール内壁を平壁にて構成する単純形状モデルを対象として幾何音響解析を実施した。その結果、非対称形状では対称形状に比べ反射音レベルの距離減衰量が小さく、特に音圧レベルの物理指標である Strength G 並びに後期音レベル GL の空間分布特性が改善される効果を示した。また、吸音壁面の影響を除外し室形のみ影響要因を調べるため、床面以外の内装面を全て反射性とした形状モデルについて考察した。その結果、形状間における音圧レベルの空間分布特性の差異

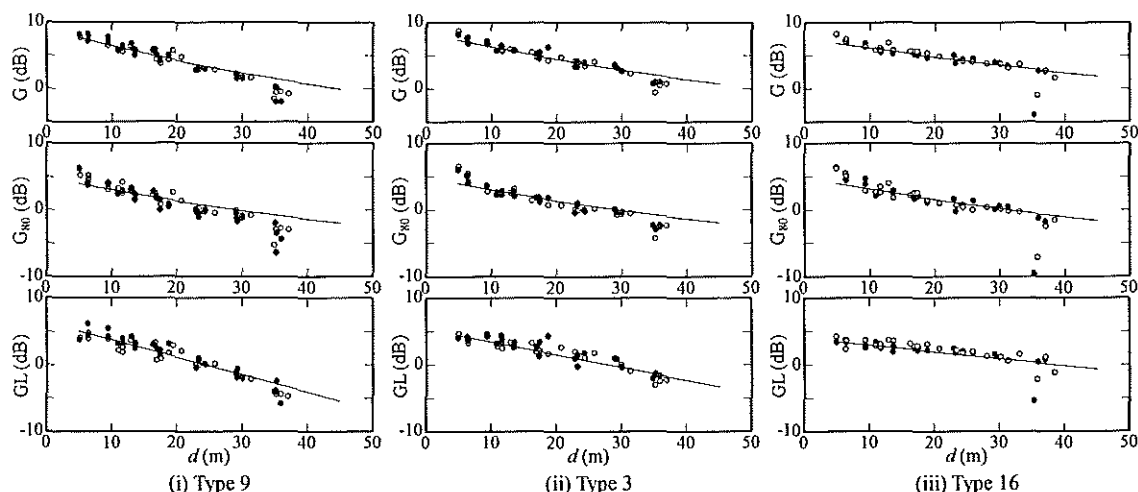


Fig. 26 Measured values of G , G_{80} and GL versus source-receiver distance for $\theta_{LR} = -20^\circ$ in the flat-surface models: solid lines, least-squares fit lines of calculated values (at 500 Hz); \bullet , sound source S_A ; \circ , S_B .

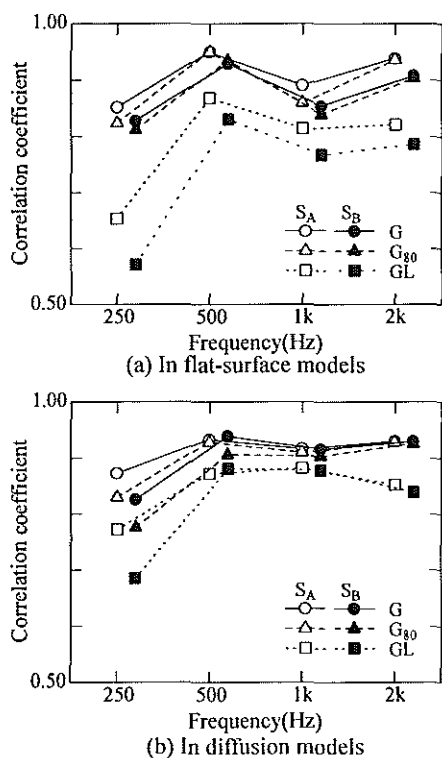


Fig. 27 Frequency characteristics of correlation coefficients for G , G_{80} and GL between calculated and measured values (averaged over nine models).

は、概ね 150ms 以降に到来する反射音数の増減に起因していることを明らかにした。

第二に、側壁および天井面に凹凸のある拡散形状モデルを対象に検討した。その結果から、単純形状モデルの場合と同様に、非対称形状による音圧分布特性の改善効果を示した。

第三に、壁面における散乱を考慮した音響散乱モデルを対象に、乱反射率の変化による音圧分布特性への影響並びに室の基本形状との関連について考察した。その結果から、乱反射率 s の値が大

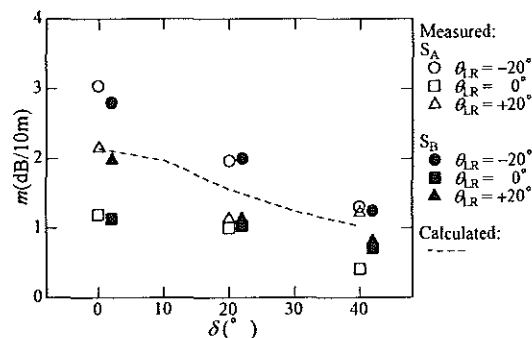


Fig. 28 Level attenuation coefficients m for GL versus δ in the scale model measurement (flat-surface models).

きくなるほど音圧レベルは低下し $s=0.50$ のときに最小となること、また室内平均乱反射率が 0.54 以上になると室の基本形状の違いによる音圧分布特性の差は小さくなり、形状固有の音場改善効果が徐々に見えなくなることを示した。

最後に、単純形状モデル並びに拡散形状モデルを対象に音響縮尺模型実験を実施し、幾何音響解析によって得られた非対称平面形の効果が同様に得られるかどうかについて検討した。その結果、実験値においても解析値と同様の結果が得られることを確認した。すなわち、非対称形状は対称形状に比べ反射音レベルの距離減衰量が小さく音圧分布特性が改善される効果を有していることを検証した。

以上の結果は、非対称平面形を視野に入れたコンサートホールの形状設計が音場分布改善のために有効であることを示すものである。

謝辞

解析およびデータ整理には、大田仁志、森田拓哉(九州共立大学卒業生)、森淳基(九州共立大学学生)各君の協力を得た。本研究は、日本学術振興会科学研究費(No.18560584, 研究代表者:古屋浩)によるものである。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- [1] L.L.Beranek, *Music, Acoustics and Architecture*, John Wiley & Sons, Inc., 1962.
- [2] E.D.Geest and C.F.McCulloch, Numerical modeling in geometrical acoustics using the conical beam method with applications in architecture, industry and the environment, *Proc. of EURO-NOISE 92*, Book 3, 965-975, 1992.
- [3] M.Barron and L-J.Lee, Energy relations in concert auditoriums. I, *J. Acoust. Soc. Am.*, **84**(2), 618-628, 1988.
- [4] L.Cremer and H.A.Muller, *Principles and Applications of Room Acoustics*, 1, Barking, England, Applied Science Publishers, 1982.
- [5] Standards Secretariat Acoustical Society of America, American national standard method for calculation of the absorption of sound by the atmosphere, *ANSI S1.26-1978*, ASA 23-1978.
- [6] M.R.Shroeder, New method of measuring reverberation time, *J. Acoust. Soc. Am.*, **37**, 409-412, 1965.
- [7] 橋秀樹,石井聖光, 音響模型実験のための内装材・吸音特性のシミュレーション, 日本音響学会誌, **28**(4), 169-175, 1972.
(2009年4月13日採用決定)

Sarcinochrysis sp.の抗菌作用

西尾恵里子¹, 榎 節子², 山口裕司², 竹中裕行², 富田純史³

¹九州共立大学工学部生命物質化学科, ²マイクロアルジェコーポレーション(株)MAC総合研究所,
³九州共立大学スポーツ学部スポーツ学科

Antibacterial activity of *Sarcinochrysis* sp.

Eriko Nishio, Setsuko Sakaki, Yuji Yamaguchi, Hiroyuki Takenaka, and Yoshifumi Tomita

Novel functional substances have been found in microalgae, a group of widely spreading organisms, survived under various severe circumstances. This paper reports that the 50% ethanol extracts from a microalga, *Sarcinochrysis* sp. (*Pelagophyceae Sarcinochrysidales*) showed the suppressive effect on the growth of *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Candida albicans*. Further experiments are needed to clarify the active substance(s) and the action mechanism.

Key words : microalgae, antibacterial activity

1. 緒言

近年,ほとんどの抗生物質に対して耐性を持つ病原菌は,世界的な問題になっている.薬剤耐性菌の代表ともいえるメチシリン耐性黄色ブドウ球菌(MRSA)による感染で,米国とイギリスにおける2005年の死者は2万人以上であると推計されている^{1,2)}.この問題解決策は,目新しい抗菌化合物の発見である.中でもマイクロアルジェ(微細藻類)に含まれる成分に,抗菌作用の可能性がある.なぜならば,マイクロアルジェは細菌などの微生物が多く繁殖している環境に生息しており,限られたスペースと資源を確保するために細菌と生存競争をしなければならないからである.また,マイクロアルジェは病原菌に対して自分自身を防御する必要があるからである.

マイクロアルジェは様々な有効成分が研究されているが,抗菌化合物の研究についてはまだあまり行われていない.その中で,珪藻 *Phaeodactylum tricornutum* 由来の多価不飽和脂肪酸であるエイコサペンタエン酸は,真菌の増殖を抑制しなかったが,グラム陽性菌,グラム陰性菌の増殖を抑制し,さらにマイクロモル濃度で多剤耐性黄色ブドウ球菌(MRSA)に対して抗菌作用を示すことが報告されている³⁾.

化粧品原料としても天然物由来の抗菌活性剤であれば副作用も少ないと考えられる.また,合成の抗生物質などの抗菌活性剤は耐性菌を作り易いのに対し,天然物由来の抗菌活性剤はその可能性が低い.そこで今回我々は,マイクロアルジ

ェ由来抗菌活性物質の化粧品原料としての実用性に関する基礎データを得る目的で,検討を行った.マイクロアルジェには藍藻,緑藻,紅藻などがあり,*Chromophyta*(黄色植物門)*Pelagophyceae*(ペラゴ藻綱)*Sarcinochrysidales*(サルシノクリシス目)*Sarcinochrysis* sp.(サルシノクリシス)もそれに含まれる.化粧品の抗菌力試験法に基づき,*Escherichia coli*(*E. coli*,大腸菌),*Staphylococcus aureus*(*S. aureus*,黄色ブドウ球菌),*Aspergillus niger*(*A. niger*,黒コウジカビ)および*Candida albicans*(*C. albicans*,カンジダ)に対する*Sarcinochrysis* sp.の抗菌試験を行った.

2. 材料と方法

2-1. *Sarcinochrysis* sp.の50%エタノール抽出物の調製

Sarcinochrysis sp.は,1996年,沖縄県糸満市米須海岸で採取した.採取後,単離して無菌化で純粋培養した.その*Sarcinochrysis* sp.乾燥体120gを50%エタノール(和光純薬工業㈱)1,200mlと混ぜ,90℃以上で約3時間還流抽出した.次に3,000rpmで10分間遠心分離(卓上多本架遠心機LC-200,㈱トミー精工)し吸引ろ過した.その後エバポレーター(ロータリーエバポレーターNAJ-100,東京理化工機㈱)を用いてエタノールを除去した後,凍結乾燥(凍結乾燥機FD-1型,東京理化工機㈱)して*Sarcinochrysis* sp.の50%エタノール抽出物を得た.収率は,6.04%であった.

2-2. 細菌液の調製

−80℃で冷凍保存（超低温フリーザー MDF-192, 三洋電機株式会社）していた *E. coli* (ATCC8739) と *S. aureus* (ATCC6538) を各々 Soybean-Casein Digest Agar with Lecithin & Polysorbate 80 DAIGO (SCDLP) (日本製薬株式会社) 平板培地に1μlの白金耳（アズワン株式会社）で菌を3〜4回塗抹し、30℃（プロコン低温恒温器 IL72, ヤマト科学株式会社）で18〜24時間培養した。培養した各々の細菌を10μl白金耳（アズワン株式会社）でかき取り、15mlの滅菌生理食塩水で懸濁して約 10^9 cfu/mlの菌液を調製した。

2-3. 真菌液の調製

−80℃で冷凍保存していた *A. niger* (ATCC16404) と *C. albicans* (ATCC10231) を各々ねじ口試験管（アズワン株式会社）の Difco™ Potato Dextrose Agar (PDA) 斜面培地に1μlの白金耳で3〜4回塗抹し、25℃（プロコン低温恒温器 IL72, ヤマト科学株式会社）で一週間培養した。0.05% tween80 (Polyoxyethylene (20) Sorbitan Monooleate) (和光純薬工業株式会社) を添加した滅菌生理食塩水を約10mlねじ口試験管に入れ蓋をし、斜面培地上を数回洗い流して胞子を洗った。その後、その滅菌生理食塩水をピペットで取り、ガラスウール (Quartz Wool, 東ソー株式会社) でろ過をして、約 10^7 ~ 10^8 cfu/mlの菌液を調製した。

2-4. 検体液の調製

① 0.2%パラベン（陽性対照）：パラベン（パラオキシ安息香酸メチル）（上野製薬株式会社）0.08gに1,3-ブタンジオール（和光純薬工業株式会社）2.4gを加え、約80℃の湯浴（ウォーターバス, アドバンテック東洋株式会社）に浸け溶解させ、冷ました後に滅菌水37.52mlを加え調製した。

② 0.01% *Sarcinichrysis*, 0.001% *Sarcinichrysis*, 0.0001% *Sarcinichrysis*, 0.00001% *Sarcinichrysis* : 50%エタノール抽出物0.020gに滅菌水19.98mlを加えて混ぜた。この溶液を滅菌水で希釈して各々40mlずつ調製した。

③ 50%DMSO2.5%*Sarcinichrysis* : 50%エタノール抽出物1gにジメチルスルホキシド（DMSO）（和光純薬工業株式会社）20gを加え溶解後、滅菌水20mlを加え調製した。

①〜③各々に、上記の2-2で調製した細菌の菌液は約 10^8 cfu/mlに希釈したものを、上記の2-3で調製した真菌は希釈せず原液を1.6mlずつ加え検体液とした。

2-5. 抗菌試験

2-4の各検体液を25℃（プロコン低温恒温器 IL72, ヤマト科学株式会社）で保存し、検体液調製後0日目、1日目、3日目、7日目、10日目、14日目、21日目および28日目に試験を行った。

細菌を添加した検体液については、希釈した検体液1mlをシャーレに分注し、0.5mgの2,3,5-Triphenyl-2H-tetrazolium Chloride (TTC) (和光純薬工業株式会社) を含んだSCDLP培地約20mlを加えて混濁した。培地が乾いたら裏返しにして30℃で2日間培養し、コロニー数を計測した。

一方、真菌を添加した検体液については、1.0mgのクロラムフェニコール（和光純薬工業株式会社）を含んだ約20mlのPDA平板培地に希釈した検体液0.1mlを接種し、コンラージ棒（アズワン株式会社）で均一に塗抹した後、25℃で培養した。*A. niger* に関しては菌が広がり計測が困難になるため、培養2日目にコロニー数を計測した。*C. albicans* に関しては7日目にコロニー数を計測した。なお、1濃度に対して3枚のシャーレを使い、コロニー計測可能な2〜3濃度の平均を結果とした。

3. 結果

E. coli, *S. aureus*, *A. niger* および *C. albicans* に対する *Sarcinichrysis* sp.の抗菌作用の実験結果を図1, 2, 3および4に示す。

*E. coli*で行った結果、0.2%パラベンでは培養0日目には 4.1×10^6 個/mlであったが1日目には 2.2×10^2 個/mlであり、約1万分の1まで減少した。その後、3日目にはコロニーを形成しなかった。0.01%*Sarcinichrysis* では0日目には 3.7×10^6 個/mlであり、1〜28日目まで 1.4×10^7 個/ml〜 2.3×10^7 個/ml の間のコロニー数でほとんど変化はなかった。0.0001%*Sarcinichrysis* では0日目には 3.1×10^6 個/mlであったが、経時的に菌数が減少して、7日目には 2.3×10^3 個/mlと約1千分の1まで減少して、21日目にはほとんどコロニーを形成しなかった。50%DMSO2.5%*Sarcinichrysis* については、0日目からコロニーを形成しなかった。

*S. aureus*で行った結果、0.2%パラベンでは培養0日目には 3.4×10^6 個/mlであったが、1日目からコロニーを形成しなかった。0.01%*Sarcinichrysis* では培養0日目からコロニーを形成しなかった。0.001%*Sarcinichrysis* では培

養0日目には 3.2×10^5 個/mlであったが、1日目にはほとんどコロニーを形成しておらず、3日目以降はコロニーを形成しなかった。
0.0001%*Sarcinochrysis*では培養0日目には 4.4×10^6 個/mlであったが、1日目には 1.1×10^1 個/mlと約10万分の1まで減少して、3日目以降はコロニーを形成しなかった。
0.00001%*Sarcinochrysis*では培養0日目には 6.7×10^6 個/mlであったが、1日目には 9.0×10^4 個/mlと約100分の1まで減少して、3日目にはコロニーを形成しなかった。
50%DMSO2.5%*Sarcinochrysis*では培養0日目からコロニーを形成しなかった。

*A. niger*で行った結果、0.2%パラベンでは培養0日目には 3.0×10^4 個/mlであったが、3日目には 8.5×10^3 個/ml、28日目には67個/mlと時間の経過しているものの少しずつ減少した。
0.01%*Sarcinochrysis*では0日目は 1.2×10^5 個/mlであり、1~28日目まで 8.5×10^3 個/ml~ 1.3×10^5 個/mlの間のコロニー数でほとんど変化はなかった。
0.0001%*Sarcinochrysis*では、0日目は 9.4×10^4 個/mlであり、1~28日目まで 1.5×10^4 個/ml~ 1.5×10^5 個/mlの間のコロニー数でほとんど変化はなかった。

*C. albicans*で行った結果、0.2%パラベンでは培養0日目には 2.2×10^6 個/mlであったが、3日目には 2.4×10^4 個/mlと減少して7日目にはコロニーを形成しなかった。
0.01%*Sarcinochrysis*では0日目 2.4×10^6 個/mlであり、1~28日目まで 1.1×10^6 個/ml~ 2.4×10^6 個/mlの間のコロニー数でほとんど変化はなかった。
0.0001%*Sarcinochrysis*では0日目は 2.8×10^6 個/mlであり、1~28日目まで 1.4×10^6 個/ml~ 3.0×10^6 個/mlの間のコロニー数でほとんど変化はなかった。
50%DMSO2.5%*Sarcinochrysis*は0日目からコロニーを形成しなかった。

4. 考察

ペーパーディスク法で *S. aureus* に対する *Sarcinochrysis* sp.の抗菌スクリーニングを行った結果、50%エタノール抽出物 0.00001%~0.01%水溶液の濃度で抗菌活性を示した(データ未掲載)。そこで、本研究ではこの濃度での抗菌作用を検討した。この濃度は化粧品の防腐剤として一般的に使用されているパラベンよりも低い。

S. aureus に対しては、*Sarcinochrysis* sp.の抗菌作用が見られた。*E. coli* に対しては、0.0001%

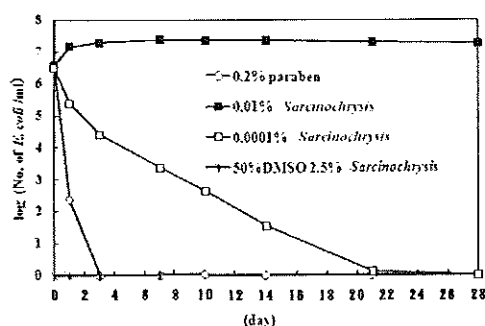


図1 *E. coli*に対する *Sarcinochrysis* sp. の抗菌作用

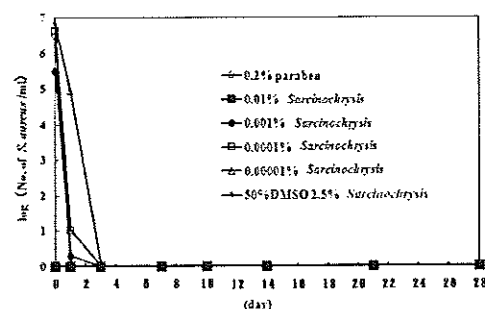


図2 *S. aureus*に対する *Sarcinochrysis* sp.の抗菌作用

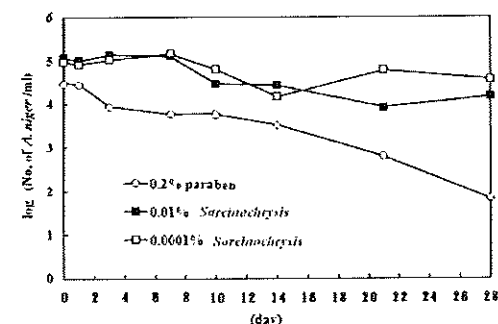


図3 *A. niger*に対する *Sarcinochrysis* sp.の抗菌作用

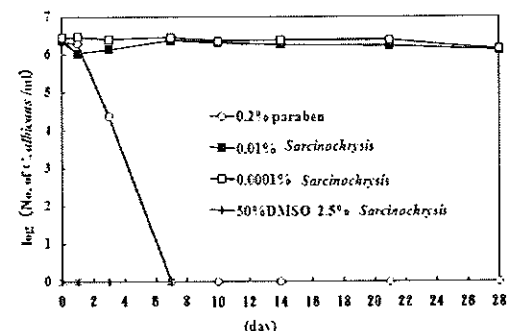


図4 *C. albicans*に対する *Sarcinochrysis* sp.の抗菌作用

Sarcinochrysis の場合菌が減少したので、この濃度で抗菌作用があった。今回行った真菌に対してはこの濃度では抗菌作用がなかった。0.01%*Sarcinochrysis* では *E. coli* と真菌の菌数は減少せず、この濃度では抗菌作用がなかった。理由として、0.01%*Sarcinochrysis* 50%エタノール抽出物が、凝集を起こし菌体に作用し得なかったことも一因ではないかと考えられる。0.2%パラベンについては、いずれの細菌と真菌に対して抗菌作用を示した。50%DMSO2.5%*Sarcinochrysis* について、*A. niger* 以外は0日目からコロニーを形成しなかったため、細菌と真菌に対して抗菌作用があるものと考えられる。なお、検体液の調製に50%DMSOを用いたが、使用した細菌および真菌の増殖に影響がないことを確認した(データ未掲載)。

Sarcinochrysis sp.の抽出方法には熱水抽出や100%エタノール抽出、エタノール以外の溶媒での抽出などがあるが、熱水抽出では *S. aureus* に対しては抗菌作用がなく(データ未掲載)、他の抽出方法では、抗菌作用があったとしても化粧品原料としての添加が難しいため、今回は50%エタノール抽出での抗菌作用の有無について実験を行った。

また化粧品原料として添加する場合、パッチテストと皮膚アレルギーテストを行わなければならない。今後実用化が可能な場合、パッチテストと皮膚アレルギーテストを実施する予定である。

マイクロアルジェの有効成分として *Dunaliella salina* に含まれるβ-カロテン、*Spirulina plantensis* に含まれるフィコシアニンなどが既に報告されている^{4,5)}。*Phaeodactylum tricornerutum* 由来のエイコサペンタエン酸は、多剤耐性黄色ブドウ球菌(MRSA)に対して抗菌作用を示すことが報告されている³⁾。一方、*Sarcinochrysis* sp.に含まれる成分は、まだ分かっていない。

海産物のきむらやは、市販品もずくが *E. coli* に対して抗菌作用があることを報告している⁶⁾。また、藻類以外で抗菌作用を持つものとして茶のカテキンがある。ウーロン茶と紅茶等に、*S. aureus* に対して抗菌作用があることが報告されている⁷⁾。

50%エタノール抽出物が水より50%DMSOで溶解した場合に強い抗菌作用を示したことにより、作用本体は極性の低いものであろうと推定した。今後は、極性によって数画分に分画し、各画

分について抗菌作用を検討していく予定である。

5. まとめ

マイクロアルジェの一つである *Sarcinochrysis* sp.の50%エタノール抽出物は、*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* および *Candida albicans* に対して抗菌作用を示した。抽出物が水より50%DMSOで溶解した場合に強い抗菌作用を示したことにより、今後は、極性によって抗菌作用を検討していく予定である。

参考文献

- 1) Klevens RM, Morrison MA, Nadle J, Petit S, Gershman K, Ray S, Harrison LH, Lynfield R, Dumyati G, Townes JM, Craig AS, Zell ER, Fosheim GE, McDougal LK, Carey RB, Fridkin SK, "Invasive methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* infections in the United States", *JAMA*, No.298, pp. 1763 - 1771, 2007.
- 2) Office for National Statistics, "Report: deaths involving MRSA: England and Wales, 2001-2005", *Health Stat Q*, No.33, pp. 76-81, 2007.
- 3) Desbois AP, Mearns-Spragg A, Smith VJ, "A fatty acid from the diatom *Phaeodactylum tricornerutum* is antibacterial against diverse bacteria including multi-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA)", *Mar Biotechnol*, No.11 (1), pp. 45-52, 2009.
- 4) Singh S, Kate BN, Banerjee UC, "Bioactive compounds from cyanobacteria and microalgae: an overview", *Crit Rev Biotechnol*, No.25 (3), pp. 73-95, 2005.
- 5) 竹中裕行, 生命の源マイクロアルジェ, 成山堂書店, 東京, 2004.
- 6) 株式会社 海産物のきむらや, "大腸菌 O-157 に対する天然海藻多糖類食品の抗菌性に関する研究報告書", 1997.
- 7) 大野智子, 塚田三香子, "茶の抗菌作用の観察を食品衛生学実験に取り入れる試み", 聖霊女子短期大学紀要, No.28, pp. 69-77, 2000.

謝辞

本実験に際し、御協力頂きました九州共立大学工学部生命物質化学科4年生、上釜友樹君、植田潤君および國崎大輝君に感謝致します。

(2009年4月13日採用決定)

わが国「中小企業の会計に関する指針」の課題と展望

岡部 勝成

九州共立大学総合研究所客員研究員

The Problem and The Trend of Small and Medium -sized Enterprises Accounting Guideline

Katsuyoshi Okabe

Abstract

At a present, it is clear that there is a problem in the reliability of the financial statements which small and medium sized enterprises continue to submit. Therefore, in this article, the problem of the single standard theory and the double standard theory, the cost base and the current value basis, the profit cost-approach and the asset debt approach, among others, are addressed. Specifically, the regulation of the company rule in the individual explanatory note table in the single standard theory and the double standard theory and the improvement of the reliability of the financial statements using the "Small and Medium sized Enterprises Accounting Guideline", are explained in detail.

Keywords: double standard theory, reliability of the financial statement, small and medium-sized enterprises

1. はじめに

本稿は、2005年以降、学会や実務界より制度と実態の乖離をなくすべく、役割や有用性が増している中小企業会計基準の「中小企業の会計に関する指針」の背景や実態に焦点をあてる。その中で先行研究を概観しつつシングル・スタンダード論とダブル・スタンダード論、原価主義と時価主義、収益費用アプローチと資産負債アプローチなどの問題点を取りあげる。特に、シングル・スタンダード論とダブル・スタンダード論では、個別注記表の会社計算規則の規定を考察するとともに、「中小企業の会計に関する指針」における財務諸表の信頼性の向上の課題や展望を私見とともに詳述する。

2. 問題意識と目的

わが国の経済基盤の一翼を担う企業のうち9割以上を占める中小企業において、財務諸表のなかで資産負債観の重要性が増し、貸借対照表の借入金勘定のなかには、代表者からの借入金が含まれている場合があり、短期もしくは長期借入金勘定、さらには代表者勘定を設け処理されている。しかしながら、附属明細書にはその事項が記載されているものの、個別注記表には記載されていない場合がある。会計監査人設置会社以外の公開会社の個別注記表では要求されている項目となっているが、「中小企業の会計に関する指針」のNo.82に、会計監査人設置会社以外の株式会社(公開会社を除く)の「貸借対照表に関する注記」は要求され

ない項目とされていることが要因であると考えられる。では、なぜそのようなことが起こりうるのか本稿で明らかにする。

3. 「中小企業の会計に関する指針」の策定の意義

「中小企業の会計に関する指針」は、中小企業の会計の基本的な処理方針を明らかにし、中小企業の作成する財務諸表の質を担保することに、大きな意義があるといえる(平野・西川[2008]27頁)。

わが国では2005年8月に、日本公認会計士協会・日本税理士会連合会・日本商工会議所・企業会計基準委員会(関係四団体)が「中小企業の会計に関する指針」を公表し、毎年改訂している。

平野・西川は、『中小企業の会計に関する指針』の普及には、特に税理士の役割が大きいと考えられる。税理士意識調査アンケートでは、『中小企業の会計』をクライアントに勧めているとの回答は46.0%、今後勧めたいが40.9%と前向きな姿勢が多くみられるが、なお一層の努力を期待したい(平野・西川「2008」27頁)と、その重要性や役割を述べている。

また、「中小企業の会計に関する指針」のNo.84では、役員と会社間の取引について以下のような注記事項の必要性が記載されている(図表1参照)。

役員個人の信用が重視される中小企業の特質を考慮して、役員と会社間との取引についても注記事項として開示することが望ましい。

ステーク・ホルダー(利害関係者)ⁱからすれば、中小企業は同族企業(経営=資本)が多く、事業実態を把握し、経営意思決定を行うためには、代表者勘定の範囲という概念の問題もあるが、個別注記表に代表者勘定を記載するという「中小企業の会計に関する指針」の改訂も必要性があると考えられる。

図表1 会社計算規則の規定

番号	項目	①	②
(1)	継続企業の前提に関する注記	×	×
(2)	重要な会計方針に係る事項に関する事項	○	○
(3)	貸借対照表に関する注記	×	○
(4)	損益計算書に関する注記	×	○
(5)	株主資本等変動計算書に関する注記	○	○
(6)	税効果会計に関する注記	×	○
(7)	リースにより使用する固定資産に関する注記	×	○
(8)	関連当事者との取引に関する注記	×	○
(9)	一株当たり情報に関する注記	×	○
(10)	重要な後発事象に関する注記	×	○
(11)	連結配当規制適用会社に関する注記	×	×
(12)	その他の注記	○	○

(注) ①は会計監査人設置会社以外の株式会社(公開会社を除く)の個別注記表ならびに、②は会計監査人設置会社以外の公開会社の個別注記表を表す。
○は注記を要求される項目ならびに、×は注記を要求されない項目を表す。

(出典)『中小企業の会計に関する指針(平成20年度版)』(No.82)

(<http://www.jcci.or.jp/chushokaikai/080502kohyo/honbun.pdf>, 2008年10月25日現在)。

4. 「中小企業の会計に関する指針」の策定の背景

武田は、2005年8月の「中小企業の会計に関する指針」の発表時に「コロンブスの卵」という言葉が想起されたと述べている(武田隆二編著[2006]1頁)。「中小企業の会計に関する指針」が統一されることの諸環境は整っていたが、3つある報告書を統一することは水と油を混ぜるようなものであり、長時間の歳月を要するとのコメントもあった。

中小企業の会計に関しては、かつての商法という「公正ナル会計慣行」とは何かが必ずしも明確ではなく、税法に基づいた会計処理を行ってきた。また、株式会社は商法で義務付けられていた計算書類の官報や日刊紙への公告についてもまったく実施されていなかった。2002年4月から計算書類の電子開示が認可されるなか、会計ビッグバンによる上場会社向けの会計基準が次々と導入され、中小企業を巡る金融環境が厳しさを増してきたため、中小企業庁が2002年3月に「中小企業の会計に関する研究会」を発足させ、2002年6月に、その報告書のなかで「中小企業の会計」を公表したⁱⁱ。

同時期に、日本税理士会連合会も、2002年3月に「中小会社会計基準委員会」を設置し、2002年9月に「中小会社会計基準草案」を公表し、各税理士会と税理士会員に意見を求めたうえで、2002年12月に「中小会社会計基準」を公表したⁱⁱⁱ。さらに、日本公認会計士協会は、2002年2月に中小会社の会計の検討を開始し、2002年6月に「中小会社の会計のあり方に関する研究報告」を発表した^{iv}。

上記の3つの会計指針の併存がわかりづらいつらいつらと関与先より指摘をうけ、会社法における会計参与制度の導入の実現可能性が高まったのを機に、日本税理士会連合会主導による中小企業(会社)の会計指針の統一化の流れへとなっていった。

ついに、2005年3月に「『中小企業の会計』の統合に向けた検討委員会」が設置され、その委員には、関係四団体の代表と学識経験者2人の合計6人。さらに法務省、金融庁、中小企業庁

の行政もオブザーバーとして参加した。

2005年8月に、「中小企業の会計に関する指針」が確定し、関係四団体の連名で公表に至ったのである。

5. 先行研究

5-1 シングル・スタンダード論とダブル・スタンダード論

先行研究では平野・西川が、「中小企業の会計に関する指針」の全体的な問題点として、シングル・スタンダード論とダブル・スタンダード論、原価主義と時価主義、収益費用アプローチと資産負債アプローチについての同指針の基本的な考え方を検討している(平野・西川[2008]7-12頁参照)。

「中小企業の会計に関する指針」の最大の問題点は、シングル・スタンダード論に基づいていることである。

企業の提供する会計情報には、本来投資家の意思決定を支援する役割と利害関係者の利害調整に資する役割を果たすことが期待されている。

「中小企業の会計に関する指針」には、「企業の規模に関係なく会計基準が適用されるべき」根拠としては、「取引の経済実態が同じなら会計処理も同じになるよう」という以外のことは記していない。

日本公認会計士協会報告³⁾は、不特定多数の株主を有する上場大企業と同族経営の中小会社とでは、規模の違いが質の違いにもなっている現実をほとんど無視している。株式が広範に分散して専門経営者の率いる上場大企業とオーナー経営者の中小会社とでは、株主・経営者のインセンティブのあり方もエイジェンシー問題の現れ方も全く異なる。日本公認会計士協会のような論拠が罷り通るならば、会社法で株式会社を幾つかの類型に分けて規制することに意味がないことにもなりかねない。もし、企業の質の違いまでもが会計基準に「反映されるべきものではない」ことになれば、銀行や保険会社が一般産業企業と異なる会計をしていることも、電力会社が固定性配列法を用いていることも誤りになってしまうだろう。そして、「同一の取引及び経済事象」であっても、「会社の規模の違い」で、後述する手形の取引、特に不渡りの場合のように、その経営的な実態や企業への影響は大きく異なることもある(平野・西川[2008]8頁)。

株主の限られている中小会社と、株式が上場されている大企業との「同じレベル」での比較が、どれだけ現実的な問題となるのかも疑問である。「証券市場ではその内部で取引される有価証券について、会計原則ないし会計ルールの統一それ自体重要な価値を有する」(上村・金児[2007]232-233頁)が、上場企業と閉鎖的な中小会社とを同じ土俵で直接比較するケースはそう多くはない。「証券取引法の目的が投資家保護から市場の公正な価格形成とか市場機能の確保、といったところに向かえば、会計理論も証券市場と正面から向き合わなければならない」(上村・金児[2007]227頁)からとって、そのための企業会計基準を、非上場企業に押しつける理由は見当たらないのである。

「中小企業の会計に関する指針」は、会計の2大機能といわれる投資意思決定支援機能および利害調整機能について、「これらの役割が会計情報に求められることに変わりはない」(関係四団体『中小企業の会計に関する指針(平成20年度版)』No.6(2008年5月)、4頁)と主張している。しかし、上場大企業と閉鎖的な中小会社とでは、両機能に対する重点が異なることはいうまでもないであろう。上場大企業の会計では、「国際資本市場をベースにした投資家のための会計(投資判断会計)をますます強めている今日、会計のいわば原点ともいえる利害調整機能との乖離が進んでいる」(石川[2006]58頁)。一方、中小会社では、「中小企業の会計に関する指針」自身が指摘するように、「配当制限や課税所得計算など、利害調整の役立ちに、より大きな役割が求められる」(関係四団体、前掲書、4頁)のである。

「中小企業の会計に関する指針」は、「中小会社の基点に立った会計処理基準が組み立てられなければならないという基本姿勢を失ったまま、大会社会計基準に飲み込まれた」(武田隆二編著[2006]11頁)ことで、間違いがあるというような方向付けを与えられる結果になっている。

5-2 原価評価と時価評価

ここでは、時価か原価かの評価問題と、収益費用か資産負債かのアプローチ問題とを、場合によっては理論の必要上、分けて論じている。

会計ビッグバンで導入された企業会計基準は、資産負債アプローチと公正価値評価(時価評価)を主張する近年のFASBやIASBの諸基準に倣っ

たものとなっている。近年では、かつては貨幣項目に限定されていた割引現在価値(DCF)を実物資産や非貨幣項目にまで適用する公正価値会計が台頭し、原価主義会計が後退しているといわれる(角ヶ谷[2006]、25頁参照)公正価値会計は、国際的な証券投資やM&A(合併・買収)の仲介を大きな収益源とする短期利益志向の投資銀行やヘッジ・ファンドへの意思決定情報の提供には適的な会計である。

「中小企業の会計に関する指針」では、原価か時価かという評価基準について、指針全体での一般の方針を明記することはせず、金銭債権、有価証券、棚卸資産といった個別項目ごとに評価基準を記している。そして、市場価格のある金銭債権、売買目的有価証券、および市場価格のあるその他有価証券に時価評価を規定している以外は、一部に低価評価を伴った取得原価主義となっている。

しかし、「中小企業の会計に関する指針」はシングル・スタンダード論を基調としているので、今後、ASBJと国際会計・財務報告基準(IFRS/IAS)とのコンバージェンスの進展によって、公正価値評価が大幅に導入されるかも知れないという懸念を払拭できない(平野・西川[2008]10頁参照)。

ところで、原価と時価とを論じるに当たって確認しておきたいことは、低価主義すなわち、原価と時価とを比較していずれか低い方の価額を選択する評価方法では、時価を利用しても、「その本質は取得原価主義会計のフレームワークの中」(広瀬[2007]169頁)にあることである。時価会計では、継続的に時価評価を行い、評価損ばかりでなく未実現の評価益も計上するが、低価主義では、取得価額が資産評価の上限をなし、評価損が発生したときにだけ簿価を切り下げるのである。減損会計も固定資産への低価主義の適用と考えることができ、減損の認識は、取得原価の修正であり、落した価額を新たな取得原価とする手続と解釈できる。

低価主義は、資産の過大計上や未実現利益を排除することで、金融機関(銀行、信用金庫等)の与信判断に有用性が大きく、また、中小企業経営者にとっても放漫経営の防止に役立つと考えられる。しかし、低価主義を適用するには、原価と比較する時価を算定せねばならず、監査を受けない中小会社では、市場価格のない資産の時価の算定

から恣意性を排除することは困難であろう。さらに、会計能力における人的経営資源の不足した中小企業には、時価の算定が負担を強いられる(平野・西川[2008]11頁参照)。

5-3 収益費用アプローチと資産負債アプローチ

収益費用アプローチは、生産・流通に密着した日常的な会計処理とそれに基づく財務諸表の作成に適合性があることから、産業(製造業・商業等)企業に適している。一方、貸出債権の健全性や保有する有価証券の価値が重要で、自己資本比率が大きな意味を持つ金融業の企業には、資産負債アプローチの有用性が高いと考えられる。アメリカで資産負債アプローチに傾斜した経営環境的背景として、国際的M&Aの仲介を大きな収益源とする投資銀行が勢力を増し、巨大多国籍企業自体が豊富な自己資金の蓄積で投資ファンド的性格を持つようになってきたことを指摘できるであろう(西川[2008]12頁参照)。

会計史において、貸借対照表と損益計算書のどちらを重視するかは、議論され続けた問題である。「中小企業の会計に関する指針」は、どちらのアプローチに立脚しているのかを明らかにしてはいないが、損益計算に関する指針が少なく、また、資産負債アプローチの色彩の濃い企業会計基準等に添って改正が行われている(平野・西川[2008]11頁)。

制度設計においては、学者の理論構築とは異なって、論理的首尾一貫性よりも現実の有用性が重視されるべきであろう。それゆえ、どちらかに一方的に傾かない方が良いとも考えられるが、「配当制限や課税所得計算など、利害調整の役立ち」や「適切な経営管理に資すること」に会計の重点を置くのであれば、収益費用アプローチが妥当ということになろう。しかし、「銀行などの間接金融に依存しており、直接金融のルートによる資金調達ほとんど利用されていない」(数阪[2007]283頁)中小会社にとっては、オーナー経営者である株主を除けば、中小企業の最も重要なステーク・ホルダーは金融機関(銀行、信用金庫等)である。中小企業の資金調達の円滑化のために、会計情報利用者である金融機関にとっての有用性を重視するならば、資産負債アプローチが望ましいということになろう(平野・西川[2008]12頁)。

今後、重要性の観点から損益計算書と貸借対照

表とのバランスに検討余地が残ると考えられる。

6. 課題と展望

日本税理士会連合会では、中小企業の計算書類について、「中小企業の会計に関する指針」の適用状況を確認するための書類として、「中小企業の会計に関する指針の適用に関するチェックリスト^{vi)}」を作成し、公表している^{vii)}。

現在、多くの金融機関において、このチェックリストを活用した融資商品が取り扱われている。また、各都道府県の信用保証協会においても、保証料率の割引の際の必要書類として利用されている^{viii)}。

それではわが国が大きな影響を受けている国際的な中小企業の会計基準はどのようになっているのか、現状や動向を概説する。

現在、IASB^{ix)}を中心とした会計基準のコンバージェンスが盛んに議論されている。わが国においても、2007年8月にIASBとASBJの間において東京合意がなされ、2011年6月にコンバージェンスの期限とすることを確認した(島崎[2008]2頁参照)。一方、上場企業のみに限らず中小企業においても議論が活発化されてきており、会計基準のシングル・スタンダード論からダブル・スタンダード論へと変遷を辿っている^{x)}。

2007年2月、IFRS for SMEsの公開草案の紹介として、IASB議長であるDavid Tweedie 卿は、「我々の目標は、作成会社の負担を減らしながら、完全版IFRSsに匹敵する、小規模の、非上場の企業が使用する基準を提供することにある^{xi)}」とダブル・スタンダード論の必要性を述べている。

中小企業向けIFRSsを適用するか否かは、それぞれの国又は適用する地域が決定する事項である。たとえば、EUでは、上場企業はIFRSsを遵守しなければならないが、中小企業についてはどの基準を遵守しなければならないかは、加盟国の判断に委ねられている。IASBは、小規模であっても上場企業であれば、中小企業向けIFRSの利用が適格となるものではないことを提案している。

中小企業においては、人・物・金・情報をどこまで必要でありかつ活用できるのか、経営資源の限界、さらには教育体制の制度化などの問題におよぶ。このことが永遠の課題ではないだろうか。

IASBにおいてはSME基準^{xii)}が、2009年初旬に

も公表される予定で準備が進められており、簡便法を中心に導入をするかどうかは、国や地域の判断に委ねられている。たとえばキャッシュ・フロー計算書の作成では、直接法と間接法の選択肢をIFRSsやSFAS、およびASBJ等は認めているが、SME基準では簡便法ともいわれる間接法のみで作成となっているようである。これは実際、上場企業でさえも9割以上を間接法にて作成している実態・実務に沿った内容と関連していると考えられる。

今後中小企業を取り巻く環境の変化は、このような実現可能性を前提とした国際化がますます増加してくるであろう。

7. おわりに

「中小企業の会計に関する指針」は、中小企業の会計の基本的な処理方針を明らかにし、中小企業の作成する財務諸表の質を担保することに、大きな意義があるということはすでに述べた。さらに中小企業の作成する財務諸表の信頼性に問題があるといわれ続けている実態がある。どのようにしたら、その信頼性が確保されるかが一層問われてこよう。たとえば財務会計と税務会計などに関連したトライアングル体制や「利益は意見、キャッシュは真実」の言葉に隠された問題を取り上げると本誌面では論述できないため次回以降に譲りたい。

昨今、監査制度という意味合いもある会計参与制度の役割や有用性がクローズアップされてきている現状において、会計参与制度導入企業だけに限らず、中小企業に影響力のある行政・金融機関・日本税理士会連合会などの指導やバックアップが徐々にではあるが浸透する傾向にある。時間を要することは明白ではあるが、少しでも多くの中小企業に「中小企業の会計に関する指針」の導入・遵守が図られれば、中小企業の財務諸表の信頼性の向上に効果が表れることを期待して止まない。

尚、本稿の意見にわたる部分は私見であり、ありべき誤りは筆者の責任である。

【注】

- ⁱ 金融機関(銀行、信託銀行、信用金庫等)、仕入先等の取引先のことをさす。
- ⁱⁱ 中小企業庁ホームページ
(<http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0002888>, 2008年12月14日現在)
- ⁱⁱⁱ 日本税理士会連合会ホームページ
(<http://www.nichizeiren.or.jp>, 2008年12月14日現在)
- ^{iv} 日本公認会計士協会ホームページ
(<http://www.jicpa.or.jp>, 2008年12月14日現在)
- ^v 日本公認会計士協会『中小会社の会計のあり方に関する研究報告』(会計制度委員会研究報告第8号)、2003年6月、4頁。
- ^{vi} 日本税理士会連合会ホームページ
(<http://www.nichizeiren.or.jp/taxpayer/chusyo.html>, 2008年12月14日現在)
- ^{vii} 2008年5月1日付けで「中小企業の会計に関する指針」が改訂されたため、2008年5月22日付けにて、本チェックリストを改訂した。
- ^{viii} 日本税理士会連合会調べによると、2008年4月12日現在、116機関において本チェックリストが活用されており、実務において、計算書類に添付することによる信頼性の向上に有用性を発揮している。
- ^{ix} IASBは、現在100カ国以上の国と地域で使われている会計基準を公表しており、グローバル・スタンダード化の中心的役割を担っている。IASBは、ロンドンに本拠を置き、2001年に活動を開始し、IASC財団の評議員会によって集められる拠出金で運営されている。この拠出金は、世界中の主要会計事務所、民間金融機関及び事業会社、中央銀行及び開発銀行、ならびにその他の国際的専門団体からのものである。現在の14人の審議会メンバー(うち12人は常勤)は、9か国から選ばれ、幅広い職務上の経歴を有している。IASBは、公共の利益のため、一般目的の財務諸表において透明で比較可能な情報を要求する、高品質かつ世界的な会計基準の単一のセットを開発することを公約している。この目的を追求するため、IASBは、全世界の会計基準の収斂を達成するために各国の会計基準設定主体と協力している。
- ^x シングル・スタンダード論とは、大企業(上場企業)と中小企業の区別なく会計基準を一本化するものである。一方ダブル・スタンダード論とは、大企業(上場企業)と中小企業はそれぞれ特徴・特質があり、会計基準を二本立てで行うという議論。
- ^{xi} IASBホームページ
(<http://www.asb.or.jp/html/iasb/press>, 2008年12月

14日現在)

^{xii} Small and Medium sized Enterprises Standardの略であり、IASBが公表する中小会社の会計基準である。

【参考文献】

- [1]. Ross, Stephen A., Randolph W. Westerfield and Jeffrey F. Jaffe "Corporate Finance" 7th ed. McGraw-Hill Co. Inc., 2005.
- [2]. 石川純治『変わる会社、変わる会計』日本評論社、2006年。部
- [3]. 上村達男・金児昭『株式会社はどこへ行くのか』日本経済新聞社、2007年。
- [4]. 数阪孝志「リレバンの成果と中小企業金融の課題」『商経論集』神奈川大学経済学会(2007年5月)。
- [5]. 関係四団体『中小企業の会計に関する指針(平成20年度版)』No.6(2008年5月)。
- [6]. 島崎憲明「会計基準の国際的な統一化への我が国の対応について——加速する国際会計基準の流れの中で——」『会計・監査ジャーナル』第20巻第11号(2008年11月)。
- [7]. 武田隆二編著『中小会社の会計指針』中央経済社、2006年。
- [8]. 武田隆二編著『新会社法と中小会社会計』中央経済社、2006年。
- [9]. 角ヶ谷典幸「現在価値の転換——公正価値会計の台頭とその影響——」『会計』森山書店、第170巻第4号(2006年10月)。
- [10]. 津守常弘『会計基準形成の理論』森山書店、2002年。
- [11]. 中小企業庁ホームページ
(<http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0002888>, 2008年12月14日現在)
- [12]. 西川登「誰が為に金は成る——カジノ資本主義に於る会計——」『経済貿易研究』第34号(2008年3月)。
- [13]. 日本公認会計士協会『中小会社の会計のあり方に関する研究報告』(会計制度委員会研究報告第8号)、2003年6月。
- [14]. 日本公認会計士協会ホームページ
(<http://www.jicpa.or.jp>, 2008年12月14日現在)
- [15]. 日本税理士会連合会ホームページ
(<http://www.nichizeiren.or.jp>, 2008年12月14日現在)
- [16]. 平野光利・西川登『「中小企業の会計に関する指針」の意義と課題』『神奈川大学商経論集』第43巻第3・4合併号(2008年3月)。

Einstein-Friedmann 方程式における非線形ダイナミックスの研究

田中 洋介^{a)}, 首藤 武史^{b)}, 吉永 鐵太郎^{c)}, 生地 文也^{d)}

^{a)}工学部物理、^{b)}工学部数学、^{c)}大学院工学研究科環境システム学専攻 ^{d)}大学院工学研究科電子情報工学専攻

A study of nonlinear dynamics in the Einstein-Friedmann eq.
Yosuke Tanaka, Takefumi Shudo, Tetsutaro Yosinaga, Fumiya Shoji

Abstract

本論文では、バイファーケーション理論に基づいて Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1] の非線形ダイナミックスを調べ、次の結果を得た。

- (i) $\zeta = -1$ かつ $\lambda = \kappa p$ のとき、ピッチフォーク、バイファーケーションが発生する。
- (ii) $\zeta = -1$ かつ $\lambda < \kappa p$ のとき、ホモクリニック、バイファーケーションが発生する。
- (iii) 上記二つのバイファーケーションにおいて、曲率 ζ と宇宙定数 λ が重要な役割を果たす。

以上 (i) と (ii) の結果により、Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1] は、カオス解存在の必要条件を満たすことが、論証された。

Keywords: Einstein-Friedmann 方程式, 非線形ダイナミックス, ピッチフォーク, バイファーケーション, ホモクリニック, バイファーケーション, カオス解

1. 序論

最近、一般相対性理論と非線形ダイナミックスにより、宇宙の時空的性質が研究されている [1-7]。特に、El Naschie は、Eguchi-Hanson メトリックを用いて重力場のソリトン解を研究している [1]。また、Rugh は、拡張した Robertson-Walker メトリックにより Einstein 方程式におけるカオス解を調べている [3]。我々は、コンパクトな Robertson-Walker メトリックにより Einstein-Friedmann 方程式を解析している [4-7]。文献 [4, 7] では、理論解析により重力場における振動解の性質を調べた。また、文献 [5, 6] では、数値解析により重力場におけるカオスの様相を示した。本論文では、バイファーケーション理論により、Einstein-Friedmann 方程式における非線形ダイナミックスを検討し、次の結果を得た。

- (i) $\zeta = -1$ かつ $\lambda = \kappa p$ のとき、ピッチフォーク、バイファーケーションが発生する。従って、相対論的重力場における W 型ポテンシャルが導かれる。
- (ii) $\zeta = -1$ かつ $\lambda < \kappa p$ のとき、ホモクリニック、バイファーケーションが発生する。従って、馬蹄写像に関する定理により、カオスの様相が示唆される。
- (iii) 上記二つのバイファーケーションにおいて、曲率 ζ と宇宙定数 λ が重要な役割を果たす。

以上、(i) と (ii) の結果により、Einstein-Friedmann

方程式 [Case 1] は、カオス解存在の必要条件を満たすことが論証された。

§ 2 では、非強制型振動方程式の一般的考察を行なう。§ 3 では、Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1] の非線形ダイナミックスをバイファーケーション理論により調べる。結論は、§ 4 で述べる。

2. 一般的考察

ここでは、“非強制型”微分方程式におけるカオス解について要点を述べる。“非強制型”微分方程式における最も単純なカオスのモデルは、次式によって記述される。

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x, y, z) \\ \dot{y} = G(x, y, z) \\ \dot{z} = H(x, y, z) \end{cases}$$

但し、記号 F, G, H は、ダイミナル、システムによって与えられる解析関数である。

- (1) 位相空間 (xyz 空間) における体積変化率は、次式によって与えられる。

$$\frac{\dot{V}}{V} = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z}$$

$\dot{V}/V < 0$ の場合は、方程式におけるパラメータの設定によりカオスが発生する。例

例えば, Lorenz カオス, Rössler カオスは,
この“三次元モデル”の好例である。

(2) 位相空間 (xyz 空間) における固定点は,
方程式

$$\dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = 0$$

から求まる。これらの固定点において, 各種のバイファーケーションが発生する。

Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1] における固定点は, 次章 (§ 3) で述べる。

3. Einstein-Friedmann 方程式と非線形ダイナミクス
ここでは, バイファーケーション理論に基づいて, Einstein-Friedmann 方程式の解の振舞いについて述べる。

3.1. Einstein-Friedmann 方程式の概要

まず, Einstein のテキスト[8]に従い,
Einstein-Friedmann 方程式の要点を述べる。

3.1.1. Einstein-Friedmann 方程式の一般形

周知のように, 1922 年に Friedmann は, 宇宙の
一様等方なモデルを提起した。そのメトリックは,
次式で与えられる。

$$ds^2 = (dx^4)^2 - G^2 A^2 \left\{ (dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2 \right\}$$

$$A = \frac{1}{1 + \frac{\zeta}{4} r^2}, \quad (\zeta = -1, 0, +1)$$

関数 $G = G(t)$ は, 次式を満たす。

$$\frac{1}{G^2} \left\{ \zeta + (\dot{G})^2 + 2G\ddot{G} \right\} + \kappa p - \lambda = 0$$

および

$$-\frac{3}{G^2} \left\{ \zeta + (\dot{G})^2 \right\} + \kappa \rho + \lambda = 0$$

ここで, 記号が κ と λ は, それぞれ, 重力定数と
宇宙定数を示す [9]。また, 記号 p と ρ は, それ
ぞれ, 圧力と密度を表わす。上記の方程式は, それ
ぞれ, Einstein 方程式の空間成分と時間成分で
ある。定数 λ, ζ を消去すれば, 次の方程式を得る。

$$\frac{\ddot{G}}{G} - \left(\frac{\dot{G}}{G} \right)^2 - \frac{\zeta}{G^2} + \frac{\kappa}{2} (p + \rho) = 0$$

および

$$\frac{\ddot{G}}{G} + \frac{\kappa}{6} (3p + \rho) - \frac{\lambda}{3} = 0$$

ここで, 変数 G のかわりに $x = 1/G$ を用いれば,
時間成分を除いて, 三つの方程式は, 次のように
書くことができる。

$$\ddot{x} + a \frac{(\dot{x})^2}{x} + bx + cx^3 = d \cdot F(p, \rho, x)$$

ここで, 関数 $F = F(p, \rho, x)$ は, 次のように定
義される。

$$F(p, \rho, x) = \begin{cases} px & ; [\text{Case 1}] \\ (p + \rho)x & ; [\text{Case 2}] \\ (3p + \rho)x & ; [\text{Case 3}] \end{cases}$$

係数 a, b, c, d は, 文献 [4, 5] に与えられている。
上記の x に関する方程式を, この論文では,
“Einstein-Friedmann 方程式の一般形” と呼ぶ。

3.1.2. Einstein-Friedmann 方程式の標準形

ここでは, Einstein-Friedmann 方程式における
カオス的性質を調べるために, [I] 四次元モデル
と [II] 三次元モデルについて述べる。

[I] 四次元モデル

Einstein-Friedmann 方程式においては, 二つの
独立な方程式 (空間成分と時間成分) があり, 三
つの未知数 (x, p, ρ) が存在する。Einstein 方程式
の空間成分を用いれば, 次の“四次元モデル”を
得る。

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -a \frac{y^2}{x} - bx - cx^3 + d \cdot F(x, p, \rho) \\ \dot{\rho} = 3 \frac{y}{x} (p + \rho) \\ \dot{p} = f(\rho, \dot{\rho}) \end{cases}$$

上記のモデル方程式では、Einstein 方程式の“時間成分”を用いるかわりに、“保存法則” $(\dot{\rho} = 3(y/x)(p + \rho))$ を用いた。関数 $f(\rho, \dot{\rho})$ は、現時点では、決まっていない。位相空間の体積変化率は、次式で与えられる。

$$\frac{\dot{V}}{V} = (3 - 2a) \frac{\dot{x}}{x}$$

係数 a は負である ($a = -5/2$ [Case 1], $a = -1$ [Case 2], $a = -2$ [Case 3]) から、 $\dot{x}/x < 0$ のときに、カオスの様相が発生する。筆者らは、 $p = \text{一定} (\dot{p} = 0)$ のとき、数値解析により、次の結果を得た [5, 6]。

- (i) $x - \dot{x}$ 平面および $x - \rho$ 平面において、“自己相似”な軌跡が存在する。
- (ii) $x - \dot{x}$ 平面および $x - \rho$ 平面における軌跡は、“有界な閉領域”に存在する。
- (iii) 数値解は、パラメータ (a, b, c, d) の変化に対して、“鋭敏性”を示す。

これらの性質は、カオスの一般の性質である。

[II] 三次元モデル

上記の“四次元モデル”において、圧力 p に関する仮定を導入すれば、次の“三次元モデル”を得る。

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -a \frac{y^2}{x} - bx - cx^3 + d \cdot F(x, p, \rho) \\ \dot{\rho} = 3 \frac{y}{x} (p + \rho) \end{cases}$$

圧力 p に関して“ ρ^n モデル”が考えられる。

$$p = p_0 \rho^n, (n = 0, 1, 2, \dots)$$

- (i) $n = 0$ のときは、 $p = \text{一定}$ となり、一つのモデルを提起する (“ $p = \text{一定}$ モデル”)。既に述べたように、我々は、文献 [5, 6] でこのモデルにより、Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1] の数値解を求めている ($p = 0.28, 0.30, 0.32, 0.34$)。
- (ii) $n = 1$ のときは、 ρ の方程式は、可積分となる。 x の方程式は、一般に非可積分である。
- (iii) $n = 2$ のときは、 ρ の方程式も x の方程式も、非可積分である。星に関する次元解析を行えば、 $n = 2$ が求まる。

カオスが存在する条件として、方程式の“非可積分性”は重要であるが、Einstein-Friedmann 方程式の“非可積分性”の議論に関しては、本稿では割愛する。

3.2. Einstein-Friedmann 方程式とバイファーケーション

ここでは、Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1] をバイファーケーション理論 [10] に基づいて調べる。

$\zeta = -1$ かつ $\lambda < \kappa p$ のとき、 $xy\rho$ 空間 ($x \geq 0$) において二つの固定点 F_{0+} が存在する： $F_0(0, 0, \rho_0)$ と $F_+(\sqrt{(\lambda - \kappa p)/\zeta}, 0, \rho_0)$ 。ここで、記号 ρ_0 は、密度 ρ の初期値である。 F_0 はサドルであり、 F_+ はシンクである。 $F_-(\sqrt{(\lambda - \kappa p)/\zeta}, 0, \rho_0)$ もシンクであるが、 x の条件 ($x \geq 0$) により、除外している。以下で検討するように、 $\zeta = -1$ かつ $\lambda = \kappa p$ のとき、ピッチフォーク、バイファーケーションが発生する。一方、 $\zeta = -1$ かつ $\lambda < \kappa p$ のときは、ホモクリニック、バイファーケーションが発生する。

3.2.1. ピッチフォーク、バイファーケーション

我々、既に、Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1] を積分することにより、相対論的重力場の有効なポテンシャル

$$U(x) = \frac{1}{4}(\lambda - \kappa p)x^2 - \frac{\zeta}{8}x^4$$

を得ている [7]。但し、 $p =$ 一定と仮定している (“ $p =$ 一定モデル”)。 $\zeta = -1$ かつ $\lambda < \kappa p$ の場合は、このポテンシャルは W 型であり、ピッチフォーク、バイファーケーションを導く。実際に、 $\lambda > \kappa p$ のとき “one-center 型” であり、 $\lambda < \kappa p$ のときは、“two-center 型” となる ($\zeta = -1$)。但し、 x は、正、負、零の値をとると仮定している。同様のピッチフォーク、バイファーケーションの議論は、Duffing 振動に対しても行われている [10]。

ピッチフォーク、バイファーケーションの条件 ($\lambda < \kappa p$) と Einstein の関数式 ($\lambda = 1/R^2$) から、次の式を得る。

$$0 \leq \frac{1}{R^2} = \lambda < \kappa p$$

但し、記号 R は、宇宙の半径である [9]。この関係式から Einstein-Friedmann における “カオス存在領域のダイアグラム” ($p - \lambda$ 平面) を得る。一方、数値解析により、カオス存在条件として、我々は次の式の関係を得ている [5, 6]。

$$p_{\min} \leq p \leq p_{\max}$$

これらの関係は、図 1 に示している。但し、数値解析により得られた点は、掛印 (x) が表示している。

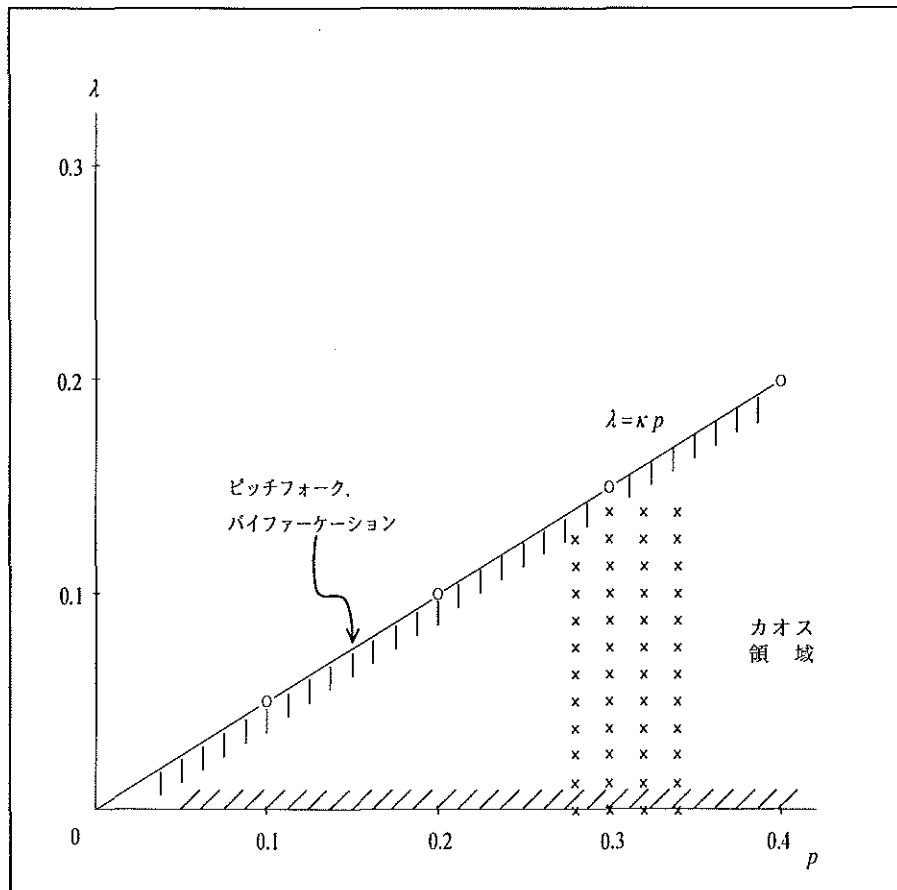


図 1. Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1]における “カオス解の存在領域ダイアグラム”。カオス解の存在領域は、不等式 $0 \leq \lambda < \kappa p$ で与えられる (図の斜線部分)。白丸 (o) は、ピッチフォーク、バイファーケーションを示し、掛印 (x) は、コンピュータ解析によって得られた点を示す ($\zeta = -1, \kappa = 0.5$) [5, 6]。

3.2.2. ホモクリニック・バイファーケーション

我々は、既に、 $x-\dot{x}$ 平面上における Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1] の近似解として、次式を得ている[6, 7]。

$$\frac{1}{2}(\dot{x})^2 - \frac{\zeta}{8} \left\{ x^2 + \left(\frac{\kappa p - \lambda}{\zeta} \right) \right\}^2 = \text{const.} - \frac{\zeta}{8} \left(\frac{\kappa p - \lambda}{\zeta} \right)^2$$

但し、 $p = \text{一定}$ と仮定している。また、減衰項 $\int a[(\dot{x})^3/x]dt$ は、振動解の場合、小さいとして省略した。 $\zeta = -1$ 、 $\lambda < \kappa p$ かつ $\text{const.} \approx \text{Small}$ のとき、上式は、 $x-\dot{x}$ 平面上でサドル $(0, 0)$ を通過する閉曲線を描く。即ち、このとき、ホモクリニック・バイファーケーションが発生する。同様のホモクリニック・バイファーケーションに関する議論は、Duffing 振動に対しても行われている [10]。

一般に、ホモクリニック軌道を有する非線形微分方程式に対しては、“馬蹄写像”に関する定理により、カオスの様相の存在が示唆される [10]。従って、この場合、“カオス誘導チャート”が得られる。結果は、図2に示している。

4. 結論

本論文では、バイファーケーション理論に基づいて、Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1]における非線形ダイナミクスを調べた。その結果、次のことが判明した。

- (i) $\zeta = -1$ かつ $\lambda = \kappa p$ のとき、ピッチフォーク・バイファーケーションが発生する。このことは、相対論的重力場における W 型ポテンシャル $[U(x) = (1/4)(\lambda - \kappa p)x^2 - (\zeta/8)x^4]$ から導かれる。これにより、 $\lambda - p$ 平面で“カオス解の存在領域”ダイアグラムを得ることができる (図1)。
- (ii) $\zeta = -1$ かつ $\lambda < \kappa p$ のとき、ホモクリニック・バイファーケーションが発生する。このことは、上記の W 型ポテンシャルからも理解できるし、 $x-\dot{x}$ 平面上の軌跡から導くこともできる。従って、“馬蹄写像”に関する定理により、Einstein-Friedmann 方程式 [Case 1]におけるカオスの様相が示唆される。一般に、ホモクリニック・バイファーケーションが発生するとき、“ホモクリニック軌道-馬蹄写像-カオス”に関するチャートが導かれる (図2)。

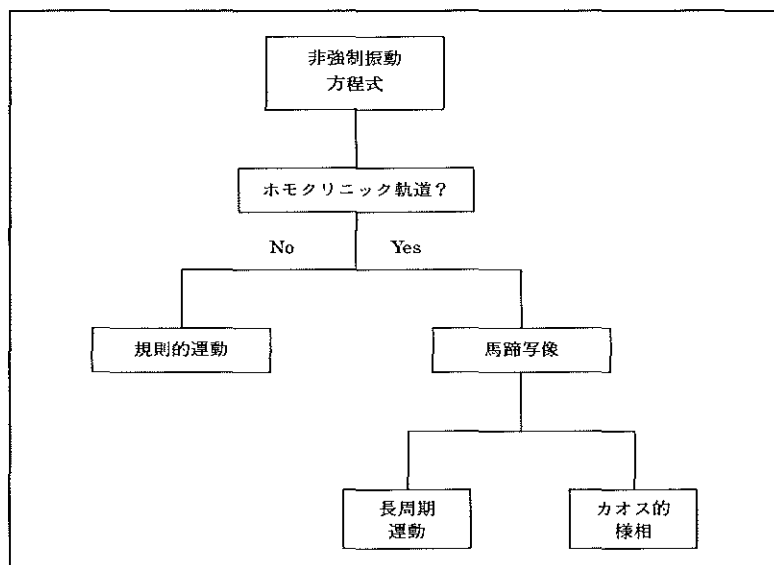


図2. 非強制振動方程式における“カオス誘導チャート”。この“チャート”は、非強制振動方程式における“ホモクリニック軌道”、“馬蹄写像”、“カオスの様相”の関係を示す。

(iii) 上記二つのバイファーケーションにおいて、曲率 ζ と宇宙定数 λ が重要な役割を果たす。

以上 (i) と (ii) の結果より、

Einstein-Friedmann 方程式[Case 1] は、カオス解存在の必要条件を満たすことが、論証された。

本論文では、上述のように、“バイファーケーション理論”に基づいて“相対論的重力場の方程式”を解析した。バイファーケーション理論は、物理学のみならず生物学、化学、工学などの“複雑系における非線形方程式”の解析に対して極めて有用である。機会があれば、“バイファーケーション理論”の“工学的応用”を検討したい。

謝辞

この論文のワープロ浄書に関しては、城下ひろみ氏に御尽力頂いた。茲に、謝意を表する次第である。

参考文献

- [1] El Naschie MS. *Chaos, Solitons & Fractals* **20** (2004) 917-923.
- [2] 't Hooft G. *Nucl Phys. B* **315** (1989) 512-527.
- [3] Rugh SE. *Quantum mechanics diffusion and chaotic fractals*. Oxford, Pergamon Press, 1995, P. 161-182.
- [4] Tanaka Y. *Chaos, Solitons, & Fractals* **23** (2005) 33-41.
- [5] Tanaka Y, Mizuno Y, Kado T. *Chaos, Solitons & Fractals* **24** (2005) 407-422.
- [6] Tanaka Y, Mizuno Y, Kado T, Zhao HA. *Chaos, Solitons & Fractals* **31** (2007) 1054-1075.
- [7] Tanaka Y, Shudo T, Yosinaga T, Kimura H. *Chaos, Solitons & Fractals* **37** (2008) 941-949.
- [8] Einstein A. *The meaning of relativity*. New Jersey: Princeton University Press, 1995, Appendix.
- [9] Einstein A. *The principle of relativity*. New York, Dover Publications, 1952, P.175-188.
- [10] Guckenheimer J, Holmes P. *Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcations of vector fields*. New York, Springer-Verlag, 1983.

Relationship between Sensitivity Enhancement and Adsorption of Surfactant–Methylene Blue Complex on filter paper on Spectrophotometric Rapid Determination Method of Anionic Surfactants

Tetsutaro YOSHINAGA,^{***†} Chiaki TAHARA,^{*} Yoshiyuki MICHIAKI,^{**}

Takuro YOSHIHIRO,^{**} Masaaki KOGA,^{***} and Toshifumi TANIMURA^{****}

^{*}Faculty of Engineering, Kyushu Kyoritsu University, ^{**}Department of Applied Chemistry, Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology, ^{***}Kitakyushu Life Science Center, ^{****}Yamaguchi Prefectural Research Institute of Health,

Abstract

The simple and rapid spectrophotometric determination method for anionic surfactant using methylene blue (MB) which we have previously proposed utilizes absorbance of the organic phase which is separated from the separating funnel, anionic surfactant (AS) in sample solution being transformed as AS-MB complex and moved to the organic phase. When the organic phase is separated by the filtration, chloroform has been used as eluent to prevent complex's adsorption to the filter paper. But when this eluent was exchanged to alcohol, the sensitivity markedly increased. It was also found that the kind of the filter paper greatly influenced the sensitivity or the slopes of the calibration curves. As a result, it was found that the key factor which has an influence on the sensitivity was the adsorption of AS-MB complex to the filter paper.

Keywords : Anionic surfactants, spectrophotometric method, methylene blue complex, adsorption

Introduction

Nowadays, surface active agents or surfactants (SA) are becoming indispensable to our life. The consumption of SA reaches enormous quantities including the amount of consumption for the industry and our daily life (1.50×10^7 ton/year in the world)^{1,2}. But on the other hand, the large amount of SA consumption causes water pollution of river water, seawater, water supply etc., and sometimes SA has a negative influence on the ecosystem. However, because of the usability, above all, the amount of consumption of the anionic surfactants (AS here after) is markedly large and reaches ca., 65% of the total surfactant quantity in Europe.² All the production of the SA in Japan is 1.01×10^6 annual tons (2005) and the ratio of AS to all SA production reaches about 40% (4.01×10^5 ton/year).³ The sulfonate type AS is most often used in AS. It accounts for about 42% (about 1.70×10^5 ton/year) of all AS.³ Of the sulfonate type, the production of the linear-alkylbenzene sulfonate type (LAS here after) accounts for about 27% of all AS.

Analysis methods for AS are mainly divided into three ways; spectrophotometric methods,^{2,4-11} chromatographical methods,¹²⁻¹⁹ and other methods.^{20, 21} But the chromatographical methods (HPLC) are

becoming the dominant official method of Japan.^{22,23} However, the HPLC method is applicable to the analysis of individual similar ingredient (LAS), but is not suitable for the analysis of whole groups of AS. Concerning the change from the spectrophotometric methods into HPLC methods a wide range of criticism was presented from the spectrophotometry users. One of the main reasons that the AS analysis method by the spectrophotometry using AS-MB (methylene blue) complex formation was changed into HPLC method is thought to be that spectrophotometric method uses a relatively large amount of chloroform (CHCl_3).^{24,25}

We have developed a simple and rapid determination method (hereafter called the SR method) for AS determination by the spectrophotometry using MB.⁴ This SR method uses small amounts of chloroform, and the method gives the same accuracy and precision compared to that of the official method. This method determines the AS concentration by measuring the absorbance of the organic phase which is separated after the distribution equilibrium was achieved using a separating funnel. To prevent the adsorption of sodium dodecylbenzenesulfonate and methylene blue chelate (hereafter DBS-MB complex) on to the filter

paper, CHCl_3 was used which is the same as the organic phase solvent. This time we have tried to use several alcohols and acetone as eluting solvents instead of CHCl_3 , and it was found that the sensitivities (or the slopes of calibration curves) remarkably increased compared to the CHCl_3 . The results were as follows; acetone 1.4, MeOH 1.9, ethyl alcohol 1.8, 1-Propanol 1.9, ethylene Glycol 1.9 times as large as CHCl_3 [1.0 as standard value for relative sensitivity when qualitative filter paper was used]. It was also found that the sensitivity depended on the kinds of filter paper. In this work, we will report on the effect of different kinds of filter papers and solvents to the sensitivities (slopes of calibration curves).

Principle

A principle of measurement of AS was shown in the previous work,⁴ and it is briefly shown schematically in Fig.1. AS and MB forms AS-MB complex, both in water or in organic solvent, and the equilibrium is greatly biased to the right side. When the water phase and the organic phase are mixed, the AS-MB complex in the water phase moves to the organic phase. By measuring the absorbance of the AS-MB complex in the organic phase, AS concentration is easily determined.

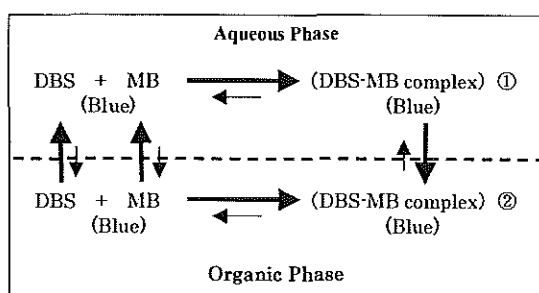


Fig.1 Equilibrium scheme of DBS, MB, and DBS-MB complex in water and organic (chloroform) phases

Experimental

Reagents and chemicals

In this experiment, as a typical AS, a linear sodium dodecyl benzene sulfonate (often called LAS) ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{Na}$ =348.48; purity 99.0%, hereafter

DBS), and MB ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCL} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (Methylene blue) = 319.85 + 54.05; purity 98.5+%) were obtained from Wako Pure Chemical Industries Ltd., and used without refining. The other reagents obtained are guaranteed reagents and used without refining.

(1) (10.00 mg L^{-1}) DBS standard solution. 1.000 g of DBS was dissolved in the appropriate amount of extra pure water. To this, extra pure water was added to the line of 1.000 L volumetric flask, and this was stored as 1000 mg L^{-1} stock solution. Next, 10.0 mL of this AS standard stock solution was sampled out and extra pure water was added to the mark of 1.000 L volumetric flask, and this AS solution is called 10.00 mg L^{-1} standard solution. When measuring the AS, this standard solution is used for the fixed concentration by dilution using extra pure water.

(2) Acidic MB standard solution. 0.35 g of MB is dissolved into ca., 500 mL of extra pure water. Then, 6.5 mL of concentrated sulfuric acid is added and after stirring, extra pure water is added to the line of 1.000 L using a graduated flask.

(3) Other materials. Filter papers used are both qualitative and quantitative ones. No.2 (qualitative) and No. 5A (quantitative) chosen as the representative of filter paper after preliminary experiments were obtained from Advantech Co., Ltd. ($\phi=9$ cm).

Apparatus

UV-Visible spectrophotometer (U-3210; Hitachi, Ltd.) was used for the measurement of absorbance of sample solution. The optical cell length was 10 mm.

Soxhlet extractor used for the removal of DBS-MB complex adsorbed on the filter paper was commercially obtained from Sibata Scientific Technology, Ltd (type 4312-01).

Procedure

(1) AS determination method

Simple and Rapid determination method for AS determination was shown in the previous report.⁴ Procedure for AS analysis by spectrophotometric method using MB is briefly explained below. DBS standard solution is diluted in the range of 0-0.6

mg L⁻¹, for making a calibration curve. Each standard solution was accurately sampled out (50 mL) into a separatory funnel. Then 5.0 mL of acidic MB standard solution and 5.0 mL of CHCl₃ was added and shaken for 1 minute to reach the distribution equilibrium. The organic phase (organic phase before filtration) contains DBS-MB complex. Absorbance of organic phase (after filtration) was then measured using spectrophotometer at the wavelength of 654 nm. In practical experiment, we used 1.0 mL of eluting solvent with syringe to prevent the adsorption of the DBS-MB complex on the filter paper just before the filtration in a constant manner (rotating spirally). Previously, we have used chloroform as eluting solvent, and this time we tried other eluting solvents, such as methanol (MeOH), ethyl alcohol, 1-propanol, ethylene glycol, and acetone. We also examined the influence of the kind of filter paper. As a result of the preliminary experiments, alcohols have given relatively higher sensitivities, compared with CHCl₃. This time, MeOH and CHCl₃ were chosen as representatives of eluent for comparison. In the same way, it was found that the kind of filter paper influences the sensitivities, and we have chosen two kinds of filter papers, No.2(qualitative) and No.5 A(quantitative).

(2) Adsorption quantity of DBS-MB complex on filter paper

As shown in section (1), to prevent the adsorption of DBS-MB complex on filter paper during filtration several eluting solvents were examined, and the kinds of filter paper also were examined to determine how the adsorption quantity or the slope of calibration curve varies. Therefore, it was considered that to determine the accurate quantity of the adsorbed DBS-MB complex on filter paper after filtration is very important. The procedure to obtain the exact quantity of adsorbed DBS-MB complex on the filter paper is shown below.

After the filter paper which was separated from the funnel was air-dried at room temperature, the filter paper was cut off in longitudinal-direction in 1-mm width. Then we put them into cylindrical filter paper for Soxhlet extractor (to raise the accuracy and reproducibility, three pieces of filter paper were introduced in one cylindrical filter paper). A 250

mL of MeOH was used as elution solvent and reflux was continued until the blue color due to the DBS-MB complex completely disappeared from the filter paper. After the extraction through Soxhlet, the extracted solution was condensed and transferred to the 50.0 mL graduated flask, and MeOH was added to the marked line. Finally, the absorbance of this solution was measured at the wavelength of 654nm. Using this value, the total quantity of the DBS-MB complex adsorbed on the filter paper was determined. The arithmetic equations (1) - (2) are shown as follows;

From the Lambert-Beers' law

$$A^\lambda = \epsilon^\lambda C \ell$$

$$\rightarrow C = A^\lambda (\epsilon^\lambda \ell)^{-1} [\text{mol L}^{-1}] \quad (1)'$$

$$m(\text{ads}) = CV_0 [\text{mol}] \quad (2)$$

Where A^λ is absorbance at the wavelength of λ nm [$\lambda=654$], ℓ is cell length [$\ell=1.0$ cm], C is a solution concentration of the DBS-MB complex [mol L^{-1}], $m(\text{ads})$ is the mass [mol unit] of the DBS-MB complex adsorbed on the filter paper, V_0 is the volume of the measuring flask ($=0.050$ L), and the molar absorption coefficient of the DBS-MB complex at the wavelength of 654nm, ϵ^λ ($\lambda=654$ nm) = 97300 [solvent : MeOH].

Results and Discussion

Influence of filter paper and solvents on the sensitivity

At first, qualitative filter paper No.2 was used for the separation of an organic phase (before filtration). CHCl₃ and MeOH were used as eluents, and the absorbance of the organic solution (after filtration) was measured. Calibration curves obtained are shown in Fig.2. As seen from the figure, the slope (sensitivity) of the curve obtained from MeOH as eluting agent is greater than that of CHCl₃, and the relative value of the slope is around 2 times larger than that of the latter one. When the calibration curve with CHCl₃ and the calibration curve without CHCl₃ was compared, it was found that both slopes are approximately equal. In other words, CHCl₃ has no effective power to desorb the DBS-MB complex on filter paper. When it is examined in more detail, the slope of the calibration

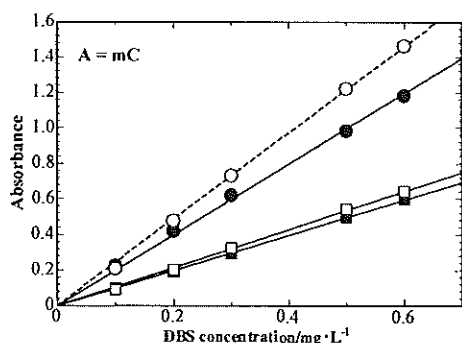


Fig.2 Relationship between calibration curves and filtration condition

(○) Without Filtration $m=2.441$, $|r|=0.999$; (●) eluting solvent MeOH, $m=1.991$, $|r|=0.998$; (□) solvent-less $m=1.070$, $|r|=0.999$; (■) eluting solvent CHCl_3 , $m=0.989$, $|r|=0.999$. There is no dilution correction for calibration curves. (Kind of filter paper used is qualitative filter paper No.2)

curve with CHCl_3 is slightly lower than that of calibration curve without CHCl_3 by about 6%. This small difference will be due to the dilution effect. Because, in this experiment, a small amount of eluting solvent (1.0 mL) is added rotating spirally into the filter paper using syringe just before the filtration begins. From the repeated experimental results, it was estimated that about 0.25mL of eluate is transferred to the organic phase (after filtration) from the wetted filter paper. Next, filter paper was changed to No. 5A and similar experiments were carried out. Results are shown in Fig.3. When filter paper No. 5A was used, the sensitivities (slopes of calibration curves) were markedly increased compared with those of No.2 filter paper. From these results, adsorption ability of No. 5A to the DBS-MB complex seems significantly weaker when compared with that of No.2 filter paper. Especially, when MeOH was used as an eluent with combination of filter paper No. 5A, the sensitivity (slope of calibration curve) became highest and is approximately the same slope of calibration curve to as that of calibration curve without filtration. If the dilution effect of ca., 6% is corrected, both values of slopes almost agree with each other..

To estimate the adsorption quantity of DBS-MB

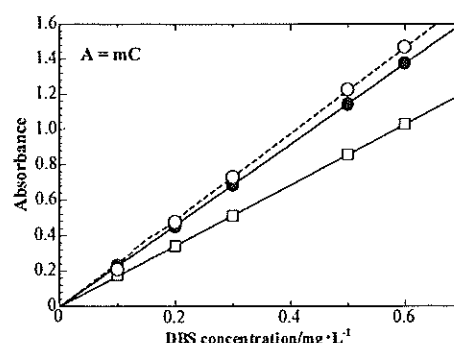


Fig.3 Relationship between calibration curves and filtration condition

(○) Without Filtration $m=2.441$, $|r|=0.999$; (●) eluting solvent MeOH, $m=2.289$, $|r|=0.999$; (□) solvent-less, $m=1.714$, $|r|=0.999$. There is no dilution correction for calibration curves. (Kind of filter paper used is quantitative filter paper No.5A)

complex on the filter paper exactly, we have determined the adsorbed amount of the DBS-MB complex experimentally according to the procedure (2).

Filtration conditions and adsorbed amount of DBS-MB complex on the filter paper

After filtration conditions were varied, adsorbed DBS-MB complex on filter papers were analyzed according to the procedure (2). The masses of adsorbed DBS-MB complex on the filter paper were determined using the value of absorbance of organic phase (CHCl_3). Schematic figure to understand the mass balance among the DBS-MB complex in organic phases(A and B) and DBS-MB complex adsorbed on filtration paper is shown in Fig.4. The result of the analysis was shown in Fig. 5. It shows how the varied filtration conditions influenced an adsorbed amount of DBS-MB complex onto the filter paper, or the amount of DBS-MB complex which is contained in the organic phase. The total sum of amount (mole percent) of adsorbed DBS-MB complex on filter paper and the amount (mole percent) of DBS-MB complex in organic phase (CHCl_3) after filtration is approximately 100%(mole percent base) although those two kinds of data were obtained separately with different experiments, when the quantity of DBS-MB complex in organic phase

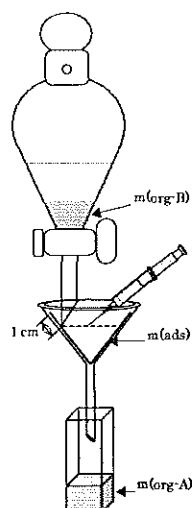


Fig. 4 Relationship among the amount of DBS-MB complexes in solutions (B and A) and on filter paper

$m(\text{org-B})$: Mass of DBS-MB complex in organic phase (before filtration), $m(\text{ads})$: Mass of DBS-MB complex adsorbed on filter paper, $m(\text{org-A})$: Mass of DBS-MB complex in organic phase (after filtration). The leg position of the separatory funnel is in the 1-cm position from the upper end of the filter paper and eluting solvent (1.0mL) is injected rotating spirally.

before the filtration was presumed to be 100% (mole percent base). Where this value corresponds to the percent extraction (or yield) of $87.36\% \pm 0.19\%$ (DS: $n = 6$) which was obtained from the absorbance of DBS-MB complex in the organic phase without filtration to the sampling quantity of DBS weighed by analytical balance. It was found that the desorption of the DBS-MB complex from the filter paper was approximately complete using the Soxhlet extraction method. The slope (sensitivity) of calibration curve depended on the kind of eluting solvents and the kind of filter papers, and it was proved that the main reason why the sensitivity changes was due to the DBS-MB complex adsorption on the filter paper. Now, the calculated values which were obtained from the experiment on Fig.5 were not corrected for dilution effect. When MeOH was used as eluting solvent, abundance of the DBS-MB complex becomes apparently around 103% if the dilution effect is corrected. Furthermore, when the adsorbed amount of 9.3% DBS-MB complex from filter paper

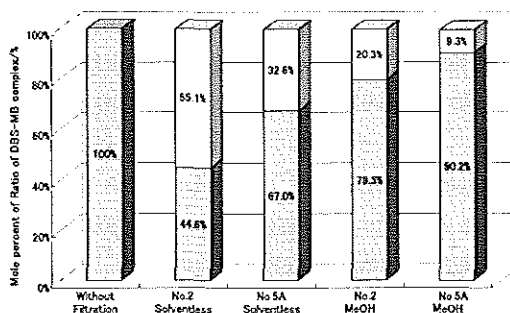


Fig. 5 Relationship between filtration conditions and molar percentages of DBS-MB complex in solution and on the filter papers

■: Molar percentage of DBS-MB complex in organic phase (after filtration) ($n = 6$), □: Molar percentage of DBS-MB complex adsorbed on filter paper ($n = 6$), ■+□: Molar percentage of DBS-MB complex in organic phase (before filtration) □ Without filtration(100%): Values are shown with relative errors (parentheses).

No.2(Solventless) $55.1(\pm 0.33)\% + 44.6(\pm 0.35)\%$;

No.5A (Solvent less) $32.6(\pm 0.91)\% + 67.0(\pm 0.90)\%$;

No.2 (MeOH) $20.3(\pm 1.42)\% + 79.3(\pm 1.70)\%$;

No.5A (MeOH) $9.3(\pm 0.49)\% + 90.2(\pm 0.19)\%$

was added, the total amount of DBS-MB complex become about 112%. What reasons will explain these results ?

The properties of the MB depend on the nature of the solvent, and it is well known that the MB form monomer, dimer, trimer and other oligomers in water solution. The higher the DBS-MB complex concentration in solution, the more rates of oligomer exist. Especially, in water, most of oligomer are known as dimer.^{5,26} Usual calibration curves obtained will be prepared by the composition of mixed solutions of monomer (main) and dimer. It is clear that one molar dimer complex corresponds to two molar monomer complexes. According to Kakeda and Kambara⁵, ethanol or methanol have a property to make an oligomer of DBS-MB complex into a monomer state of DBS-MB complex, although most of the oligomers will be in the state of dimer, and when θ (volumetric percentage ratio of methanol to the total amount of volume) = $100 \times V(\text{MeOH}) / [V(\text{MeOH}) + V(\text{CHCl}_3)] = 10.0\%$, relative absorbance of the DBS-MB complex solution (in mixed solution) increase in 25% compared with that of the

DBS-MB complex solution(in chloroform). About 19% of increase in absorbance is obtained from their report if $\theta=6\%$ (which is calculated by dilution effect) is used. That is, the net increase in relative absorbance is calculated as 12% due to dimer to monomer change including the dilution effect. These data approximately agree with the data obtained from the calibration curves. For strict discussion, we should discuss more about the monomer-dimer effects and dilution effects for both adsorbed DBS-MB complex on filter paper and DBS-MB complex in solutions before and after filtration, but owing to an experimental error, we must be content with this approximate agreement.

Conclusions

On the determination of anionic surfactants by spectrophotometry using methylene blue, the kinds of filter papers and eluting solvents used are very important to obtain the accurate values of AS concentrations. It was found that among several eluting solvents, alcohols (especially, methanol and ethanol) gave the best ability to desorb the DBS-MB complex from the filter paper during the filtration. It was also found that qualitative filter paper (No. 2) strongly adsorbed the DBS-MB complex, while quantitative filter paper (No. 5A) adsorbed weakly during the filtration. When MeOH (or ethanol) is used as eluting solvent to prevent the adsorption of the DBS-MB complex on filter paper and quantitative filter paper of No. 5A is used, the highest sensitivity or the highest slope of calibration curve will be obtained.

Acknowledgements

The authors would like to thank Mr. Y. Sakurai, Miss A. Nakamura, and Mr. Y. Toyose in the Kyushu Institute of Technology for their valuable help in the development of the present study.

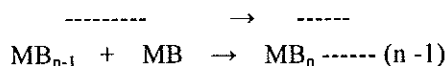
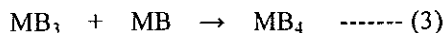
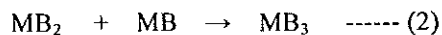
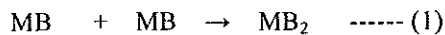
References

1. D. R. Karsa, *Chem. Ind.*, 1998, 17, 685.
2. A. Pedraza, M.D. Sicilia, S. Rubio, and D. Perez-Bendio, *Anal. Chim. Acta.*, 2007, 588, 252.
3. (a) The Chemical Daily Co., Ltd. ed., "15107 no Kagaku Shouhin", 2007, The Chemical Daily Co., Ltd.; (b) Saiwai Shobo ed. "Yushi", 2007, Vol.60, 134; (c) Kagaku Kougyo Toukei Geppou (The chemical industry statistics monthly report (the statistics of the 2005 annual total), in Japanese), Compilation prepared by Ministry of Economy, Trade and Industry, <http://www.meti.go.jp/statistics/downloadfiles/h2d4la5j.xls>
4. M. Koga, Y. Yamamichi, Y. Nomoto, M. Irie, T. Tanimura, and T. Yoshinaga, *Anal. Sci.*, 1999, 15, 563.
5. Y. Kakeda, T. Kambara, *Bunseki Kagaku*, 1965, 14, 641.
6. E. Nakamura, N. Tsuyuzaki, and H. Namiki, *Kogyo Yosui*, 1993, 421 21.
7. K. Fytianos, D. Vasilakakis, and N. Raikos, *J. of Environ. Sci. Health*, 1997, A32 (4), 953.
8. A. Pal, and M. Bandyopadhyay, *Indian J. of Chemical Technology*, 2000, 7(3), 105.
9. S. Taguchi, K. Takahashi, N. Hata, and I. Kasahara, *Analyst (Cambridge, U K)*, 2001, 126(11), 2078.
10. M. Kamaya, Y. Tomizawa, and K. Nagashima, *Anal. Chim. Acta.*, 1998, 362, 157.
11. E. Jurado, M. Fernandez-Serrano, J. Nunez-Olea, G. Luzon, and M. Lechuga, *Chemosphere*, 2006, 65, 278.
12. C.E. Hoeft, and R.L. Zollars, *J. of Liquid Chromatography*, 1994, 17(12), 2691.
13. D. Farnara, S. Lago, and V. Porta, World Surfactants Congress, 5th, Firenze, Italy, May 29-June 2, 2000, 2000, 472-481.
14. L.H. Levine, J.E. Judkins, and J.L. Garland, *J. of Chromatogr.*, 2000, A874(2), 207.
15. Y. Miyamae, K. Yoshizawa, and J. Tsuchiya, *Bunseki Kagaku*, 2001, 50(1), 61.
16. H. Kitami, T. Watanabe, T. Kitahara, Y. Ishihara, and J. Takano, *Bunseki Kagaku*, 2004, 53(8), 857-861.
17. L.H. Levine, J.L. Garland, and J.V. Johnson, *J. of Chromatogr.*, 2005, A1062(2), 217.
18. P.A. Lara-Martin, A. Gomez-Parra, and E. Gonzalez-Mazo, *J. of Chromatogr.*, 2006, A1137(2), 188.

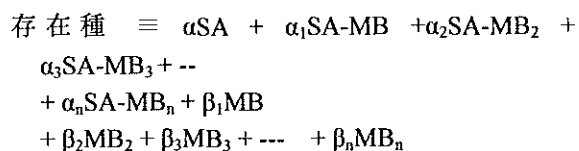
19. Y. Hirayama, H. Ikegami, M. Machida, and H. Tatsumoto, *J. of Health Science*, 2006, 52(3), 228
20. R. John, and D. Lord, *J. of Chem Edu*, 1999, 76(9), 1256.
21. M. Barco, C. Planas, O. Palacios, F. Ventura, J. Rivera, and J. Caixach, *Anal. Chem.*, 2003, 75(19), 5129.
22. JIS K-0101. "Testing methods for industrial water", 1998(Confirmed in 2003), Japanese Industrial Standards Committee, Tokyo.
23. Josui Shiken Houhou "Official Analytical Methods for Tap Water, in Japanese", 1993, Nihon Suido, Kyoukai Committee, Tokyo
24. Kouseiroudousho Kokuji dai 261 gou (Ministerial announcements No.261), Compilation prepared by Ministry of Health, Labour and Welfare, <http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/dl/koku030722-1.pdf>
25. Suishitsu Kijyun no Minaoshi tou ni suite (On the revision of water quality standard, in Japanese), Compilation prepared by Ministry of Health, Labour and Welfare, <http://www.mhlw.go.jp/shingi/2003/04/s0428-7d.html>
26. T. Hinoue, Y. Yokoyama, and T. Ozeki, *Bunseki Kagaku*, 1994, 43, 443

Appendix:

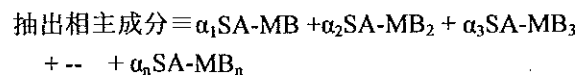
Methyleneblue(MB)の会合体は、次のように書くことができる。



SA と MB (および MB の会合体) との錯形成体及び他の存在種は、以下のように書くことができる。



ここで、モル比で考えて、 $[SA] \text{mol} \ll [MB] \text{mol}$ のとき、free の SA は無視できる。また、水相からクロロフォルムなどの溶媒で抽出された成分には、free の MB (およびその会合体) も除去されているので、抽出相中の成分は、



となっている筈である。実際には、会合体の安定性などから、一般には、高位会合体ほど存在割合は少ないと考えられるので、実質的には、抽出相主成分 $\equiv \alpha_1 SA-MB + \alpha_2 SA-MB_2 + \alpha_3 SA-MB_3$

と考えれば十分であり、第一近似では、抽出相主成分 $\equiv \alpha_1 SA-MB + \alpha_2 SA-MB_2$

と考えて良い。もちろん、 $(\alpha_1 > \alpha_2)$ である。

酸素ガス雰囲気内で電子ビーム蒸着法で形成したチタン酸化薄膜の研究

(結晶学的性質と光触媒効果)

著者：能智 紀台, 生地 文也

九州共立大学工学部

Characteristics of Ti oxide films deposited by electron beam equipment in the atmosphere of oxygen gas

(Crystal structure and Photocatalytic effect)

Norimoto Nouchi, Fumiya Shoji

We have investigated the relationship between the fundamental properties and the deposition conditions, which are adopted to make titanium oxide films. The films used for our studies are prepared by using the electron beam equipment to make the titanium compounds vaporize in vacuum system introducing the oxygen gas as the partial pressure. As the experimental results, it is noted that with increasing the substrate temperature to be more than 200 degrees celsius, the titanium dioxide films of anatase structure are prepared under the reasonable partial pressure of oxygen.

Keywords: electron beam equipment, photocatalytic effect, titanium dioxide, anatase structure

1. 緒言

アナターゼ構造の二酸化チタン TiO_2 は、化学的な安定性及び価格などの観点からみて、光触媒材料として注目されている*^{1), 2)}。光触媒効果は、バンドギャップに相当した光エネルギーの吸収で生成した電子及び正孔による還元及び酸化反応である。しかし、光触媒反応は半導体表面での反応であるために、バインダー中に二酸化チタン粒子を分散させた市販品(塗布型と呼ぶ)では、大気側に露呈している一部の二酸化チタン粒子の表面しか反応に寄与しない。またスパッタ法*³⁾では、塗布型と比べ反応に寄与する表面積が大幅に増加しているが、生産性すなわち成膜速度に課題をかかえている。これらの課題を解決する策として、真空蒸着法による二酸化チタン薄膜の成膜があげられる。

当研究室では、加熱源として電子ビームを備えた真空蒸着装置を用い、酸素ガスとの反応性蒸着によるチタンの酸化薄膜を調べている。本論文では蒸発材として金属のTi、酸化チタンTiO及び二酸化チタンTiO₂を選び、主に酸素ガスの分圧と基板温度に伴う薄膜の結晶学的性質と光触媒効果の挙動について報告する。

2. 実験装置および実験方法

真空蒸着装置の真空度を $5\sim 10\times 10^{-4}$ Paまで排気した後、酸素ガス(O₂)を導入し、蒸発源から飛来した蒸発原子や分子との反応性蒸着を行な

って成膜した。加熱源として電子ビーム装置(日電アネルバ製のEGP-101)を適用し、フィラメントに加えた電圧を6 kV、エミッション電流を100~300 mAとして、ハース(炉)内に充填した金属のTi、酸化チタンTiO及び二酸化チタンTiO₂を溶解し蒸発させた。基板としてはソーダガラスを使用し、基板温度をR. T(強制的に基板を加熱していない状態)から380℃の範囲で変化させ、酸素分圧を0(強制的に酸素ガスを加えていない状態)から 7×10^{-2} Paの範囲で変化させて成膜を行った。成膜した後、CuK α_1 線を適用してX線回折(X-ray Diffraction. 略してXRD)を行い、結晶構造を解析した。光触媒反応の効果を調べるために、純水の滴下による接触角の測定やESCAによるC_{1s}スペクトルの解析を行なった。

3. 実験結果および考察

3-1 蒸発材が金属Ti

図1及び図2は、強制的に酸素ガスを導入しない状態で、蒸発材としての金属Tiをハース内に充填して成膜した薄膜に関する。

図1は、基板温度を200℃とし、エミッション電流を変化させて成膜した薄膜のXRDパターンを示している。膜厚は $0.3\mu m$ である。160, 250, 300mAのエミッション電流に対応して得られた堆積速度は各々10, 30, 50 Å/sである。堆積速度の増加に伴い、38°の 2θ 付近にピーク即ち(002)面のピーク強度が増加していることがわかる。純度の

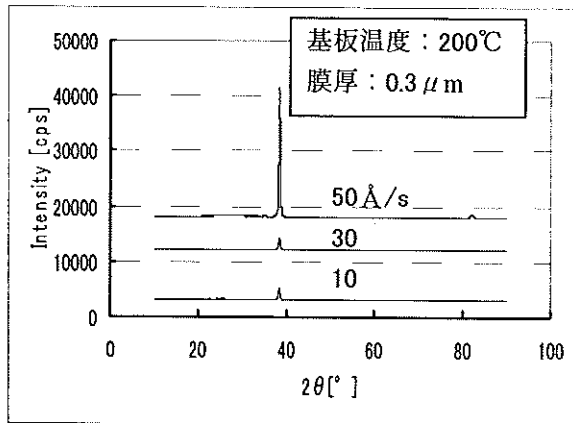


図1 チタン薄膜の成膜における堆積速度の結晶性に及ぼす影響

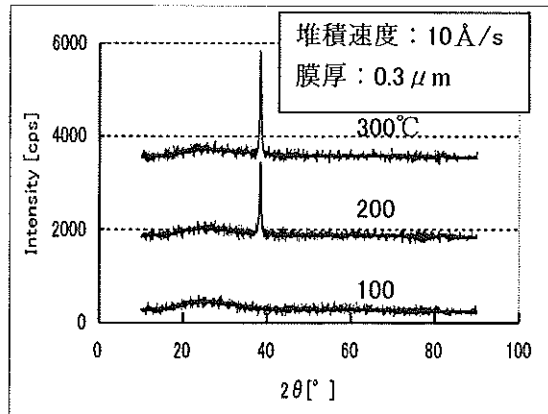


図2 チタン薄膜の成膜における基板温度の結晶性に及ぼす影響

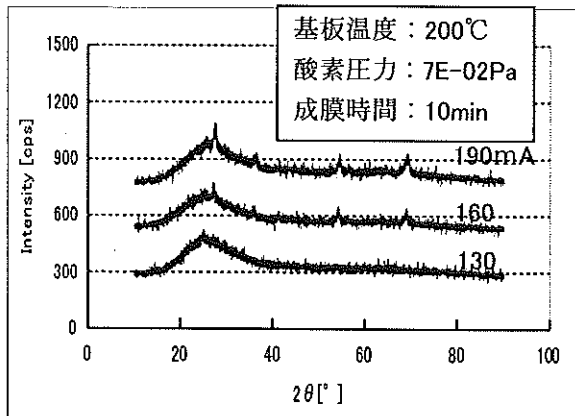


図3 酸素雰囲気中のチタンの溶解・蒸発による酸化チタン膜の成膜法でエミッション電流の結晶性に及ぼす影響

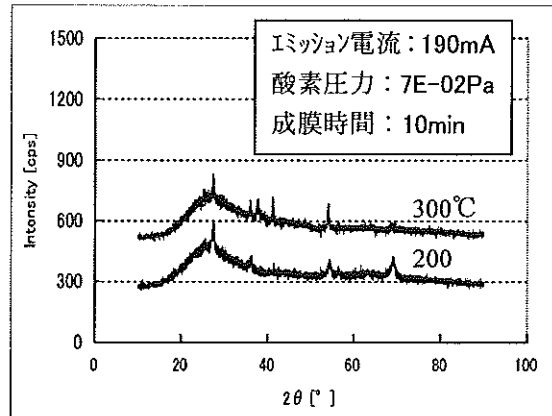


図4 酸素雰囲気中のチタンの溶解・蒸発による酸化チタン膜の成膜法で基板温度の結晶性に及ぼす影響

高いメタルのTi薄膜の形成にあたっては、速い堆積速度がのぞましいことをも示している。しかし、後述の酸素ガスとの反応による酸化膜の形成においては、同じ酸化度を得るためには堆積速度の増加は酸素ガスによる圧力の増加を導き、電氣的に高圧状態である電子ビームの発生箇所には放電などの不安定な状態を生む。従って、現行の真空蒸着装置では、30Å/s以下（エミッション電流が250mA以下）での堆積速度を選択することにした。

図2は、基板温度を100~300°Cの範囲で変化させて成膜した薄膜のXRDパターンを示している。堆積速度は10Å/sであり、膜厚は0.3μmである。基板温度の増加に伴って(002)面のピーク強度が増加していることがわかる。

図3及び図4は、酸素ガスの雰囲気内で、

蒸発材としてのメタルTiをハース内に充填して成膜した薄膜に関する。

図3は、酸素ガスの分圧を 7×10^{-2} Paとし、基板温度を200°Cとして、エミッション電流を130~190mAの範囲で変化させて成膜した薄膜のXRDパターンを示す。成膜時間は10minである。160mA以上のエミッション電流を適用すると、25°付近にアナターゼ構造の(101)面が存在することがわかる。

図4は、酸素ガスの分圧を 7×10^{-2} Pa、エミッション電流を190mAとして、基板温度を200~300°Cの範囲で変化させて成膜した薄膜のXRDパターンを示す。200°C以上の基板温度で、25°付近にアナターゼ構造の(101)面が存在することがわかる。

3-2 蒸発材が酸化チタンTiO

図5及び図6は、酸素ガスの雰囲気内で、蒸発材としての酸化チタンTiOをハース内に充填

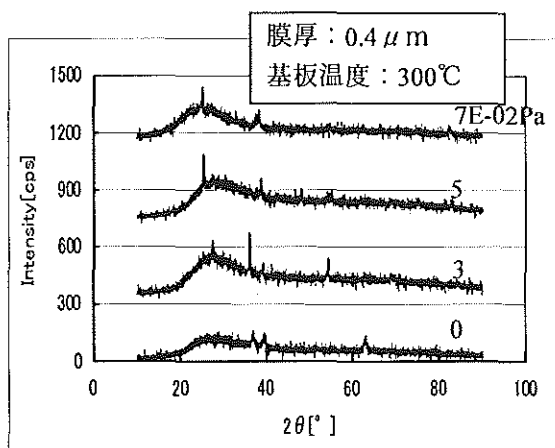


図5 酸素雰囲気中のTiO₂の溶解・蒸発による酸化チタン膜の成膜で酸素分圧の膜結晶性に及ぼす影響

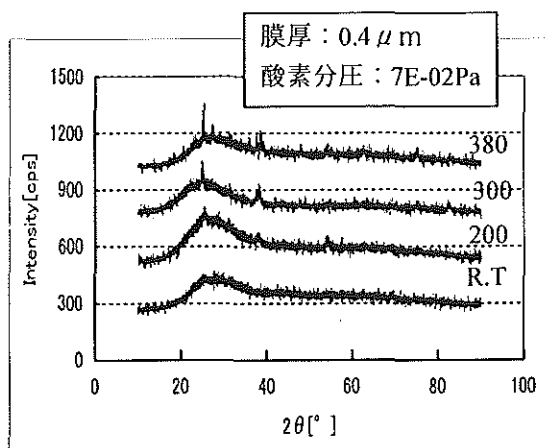


図6 酸素雰囲気中のTiO₂の溶解・蒸発による酸化チタン膜の成膜で基板温度の膜結晶性に及ぼす影響

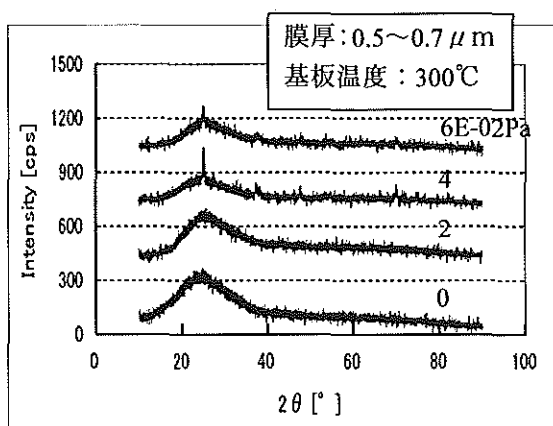


図7 酸素雰囲気中のTiO₂粒子の溶解・蒸発による酸化チタン膜の成膜で酸素分圧の膜結晶性に及ぼす影響

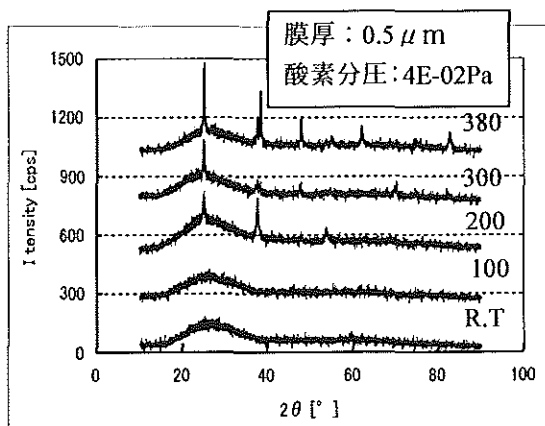


図8 酸素雰囲気中のTiO₂粒子の溶解・蒸発による酸化チタン膜の成膜で基板温度の膜結晶性に及ぼす影響

して成膜した薄膜に関する。

図5は、基板温度を300℃、膜厚を0.4 μmとして、酸素分圧を0~7×10⁻² Paの範囲で変化させて成膜した薄膜のXRDパターンを示している。Anatase構造の二酸化チタンTiO₂は、5×10⁻² Pa以上の酸素分圧で得られること、これよりも小さい3×10⁻² Paでは27°付近にピークをもつRutile構造の二酸化チタンTiO₂が得られる事がわかった。0 Paで成膜した薄膜は、このXRDパターンのみでは断定出来ないが、Brookite構造のTiO₂である可能性がある。

図6は、酸素ガスの分圧は7×10⁻² Pa、膜厚を0.4 μmとして、基板温度をR. T~380℃の範囲で変化させて成膜した薄膜のXRDパターンを示している。200~300℃の範囲でアナターゼ構造が支配的であること、25°付近にピーク位置があるアナターゼ構造の(101)面のピーク強度が

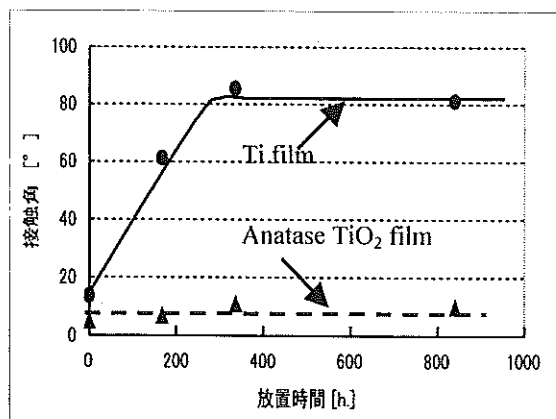
基板温度の増加とともに大きくなっていること、高温の380℃ではアナターゼ構造とともに27°付近にピークをもつルチル構造が含まれていることがわかる。

3-3 蒸発材が二酸化チタンTiO₂

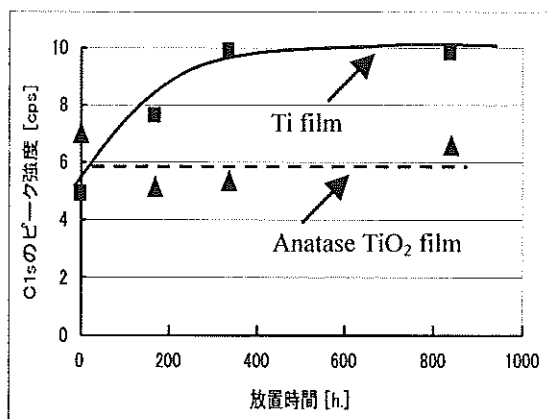
図7及び図8は、酸素ガスの雰囲気内で、蒸発材としての二酸化チタンTiO₂をハース内に充填して成膜した薄膜に関する。

図7は、基板温度を300℃、膜厚を0.5~0.7 μmとし、酸素分圧を0~6×10⁻² Paの範囲で変化させて成膜した薄膜のXRDパターンを示す。成膜時間は一定の30minである。Anatase構造の二酸化チタンTiO₂は4×10⁻² Pa以上の酸素分圧で得られることがわかる。

図8は、酸素分圧を4×10⁻² Pa、膜厚を0.5 μmとして、基板温度をR. T~380℃の範囲で変化させて成膜した薄膜のX線回折パタ



a) 接触角による解析



b) ESCAによる解析

図9 実験室環境への放置に伴う試料表面の挙動

ーンを示している。200℃以上の基板温度で、25°付近にアナターゼ構造の(101)面が存在することがわかる。詳述を省くが、200℃および380℃の基板温度では、ルチル構造の結晶構造が一部含まれる。

3-4 二酸化チタンTiO₂薄膜の光触媒効果

図9は、通常の実験室環境への放置に伴う試料表面の挙動を示している。a)は接触角、b)はESCAで解析したC_{1s}スペクトルのピーク強度の挙動を示している。同図中の二酸化チタンTiO₂薄膜は、蒸発材として二酸化チタンTiO₂を選択し、基板温度を300℃とし、酸素分圧を4×10⁻²Paとして成膜しAnatase構造を呈した薄膜である。チタンTi薄膜は、強制的に酸素ガスを導入しない状態で蒸発材としてメタルTiを選択し、基板温度を200℃として、50Å/sの堆積速度で成膜した薄膜である。Anatase構造の二酸化チタンTiO₂薄膜は接触角及びC_{1s}スペクトルのピーク強度が800時間の放置中において一定の値を保持していること、メタルのTi薄膜は、接触角及びC_{1s}スペクトルのピーク強度が増加し一定の値に飽和していることがわかる。即ちAnatase構造の二酸化チタンTiO₂薄膜は、実験室環境に存在し二酸化チタン薄膜の表面に吸着した有機系ガスを光触媒反応で分解しているが、メタルのTi薄膜では、吸着した有機系ガスが分解されずに堆積化していることを表している。

4. 結論

酸素ガス雰囲気内で、蒸発材の加熱源として電子ビーム装置を用い、Ti、TiO及びTiO₂をハース内に充填して、反応性蒸着によるチタンの酸化膜を検討した。その結果、いずれの蒸発材においても、基板温度を200℃以上に設定し酸素分圧に適正化を図れば、Anatase構造を呈した二酸化チタンTiO₂薄膜を得ることがわかった。

謝辞

本研究は、平成19年度財団法人福岡県産業・科学技術振興財団の研究FS事業及び平成20年度財団法人飯塚研究開発機構の実用化研究開発事業の一環として行われたものである。

参考文献

- [1]. 竹内浩士, 村澤貞夫編著: "光触媒の世界", 工業調査会, 1998
- [2]. K.Hashimoto, H.Irie and A.Fujishima, Jpn.J.Appl.Phys.44(2005)8269
- [3]. 能智, 尾久田, 生地, 野澤, 北九医工誌, Vol.16,pp.1-4(2005)

メタンイオンビームによる Si(100)基板上ダイヤモンド薄膜成長に関する研究 I (実験装置とその特性)

生地文也

九州共立大学大学院工学研究科 機械電子システム工学専攻

A study of diamond film growth on Si(100) surface by a low-energy CH_4^+ ion beam technique
(Experimental apparatus and its performance)

Fumiya Shoji

A low-energy ion beam deposition system has been developed for studying the heteroepitaxial diamond film growth on the Si(100) surface. The system consists of an ultrahigh vacuum chamber of which two beam lines for the low energy ion scattering spectrometry (LEIS) and for the ion depositions are attached. The ultrahigh vacuum chamber contains both the electrostatic energy analyzer and the LEED optics to analyze the sample surface. The LEISS allows us to use both the He^+ ion beam and the Li^+ ion beam for analyzing the surface. The ion deposition line is equipped with both an electron bombardment type ion gun and a sector type mass analyzer. Using the ion deposition line, we can select a desired ion beam extracted from the ion gun and apply the beam to the Si(100) surface.

Keywords: diamond thin film, CH_4^+ ion, ion beam deposition

1 はじめに

次世代の半導体基板として結晶学的にフラットな大面積のダイヤモンド単結晶薄膜層を成長させたハイブリッド型シリコンウエハが期待されている。このため、その実現を目指した研究がECRプラズマCVD法に代表される様々な低圧合成法によって国内外で精力的に進められている[1]。しかし、未だ実用に耐え得る高品質なダイヤモンド層の付いたハイブリッド型シリコンウエハは実現していない。

本研究ではSi(100)清浄表面にメタンイオンビームを衝突反応させることによって表面に形成される構造および物質を解析し、シリコン表面上におけるダイヤモンドヘテロエピタキシャル成長を促進させるために必要な表面構造および供給メタンイオンに付与すべき条件を調べることを目的とした。

原子状あるいは分子状のイオンビーム蒸着ではイオンのエネルギーを数eVから数百eVの範囲に選ぶと、イオンの基板表面上でのマイグレーションや凝縮効果によって核形成が顕著になること、また、イオンが基板表面不純物原子の脱離を助長すること等が一般に知られている[1, 2]。しかし、Si(100)表面とメタンイオンビームの組み合わせにおいて、イオンの運動エネルギーやポテンシャルエネルギーのダイヤモンド薄膜形成に及ぼす影響を、規定された実験条件の下で、表面・界面の物理として系統的に研究した例は皆無である。超高真空内で処理して作ったシリコン清浄表

面上に低エネルギーメタンイオンを衝突させることにより形成される表面と形成物質を解析することによって、これまで見逃されていたようなダイヤモンドヘテロエピタキシーに繋がるような新たな知見が得られる可能性がある。また、メタンイオンがSi(100)表面原子と衝突反応することによって形成される新たな表面相がテンプレートとなってフラットなダイヤモンド薄膜の核形成が促進されるような現象が見つかるかもしれない。さらに、そのような現象がメタンイオンビーム/Si(100)系で発見されれば、従来法とは異なる視点からのダイヤモンド薄膜形成・制御、また、新規のナノ物質創成技術にも繋がると期待される。

低エネルギーイオンを高精度に計測・制御してSi(100)清浄表面上へ供給し、さらにその表面を原子レベルで解析できる機能を備えた超高真空装置はまだ開発されていない。そこで、本研究を遂行するにあたって低速イオン散乱分光法(LEIS)および低速電子回折法(LEED)によって表面解析の可能な機能と、低エネルギーメタンイオンビーム照射機能を備えた超高真空装置を設計・製作した。

本稿では制作した装置の構成およびその特性を、これまでの実績[3, 4]を踏まえて述べる。

2 実験装置の構成と特性

2.1 装置の構成

(1) メタンイオン源

ガスイオン源には種々のタイプがある[5]。本研究では小型の簡易型イオン源でありながらイオンの初速度分布が小さい図1(a)に示すような電子衝撃イオン源を考案した。図に示すように、イオン源はグリッドとフィラメントから構成され、イオンビームをイオン化室から取り出す方式となっている。また、イオン化とイオン加速のために必要な電位配分を図1(b)に示すが、イオン加速はイオン源全体に加速電圧を印加することによって行う方式となっている。また、グリッド電圧を最も原料ガスのイオン化に適した150Vに固定し、電子電流を30~40mAの範囲で可変可能としている。

(2) メタンイオンビーム輸送部

前項で述べたイオン源を図2に示すレンズ系と排気系を備えたイオンビーム輸送部に取り付けた。図2のイオン輸送部では、イオン源のすぐ後に8°偏向型静電偏向器が付いており、イオン以外の中性エネルギー粒子を排除できるようになっている。また、静電偏向器の後にはセクター型質量分離器が接続され、所望のイオン種のみを選別できるようになっている。さらに、この質量分析器を通過したイオンは一組の円筒静電レンズと図3に示すエネルギー減速レンズを経て、所望のエネルギーイオンとして試料表面に供給されるようになっている。

イオン輸送部は、250 l/sのターボ分子ポンプとロータリーポンプから構成される差動排気系により、ベーキング処理後、 5×10^{-9} Torr以下に保持できるようになっている。結局、イオン輸送部を使うことによって、イオン源からイオンを一定の加速電圧のもとで引き出し、そして目的とするイオン種のみを質量分離しエネルギーの揃ったイオンビームとして超高真空チャンバー内の試料表面に供給できるようにしている。

(3) メタンイオンビーム蒸着・表面解析装置

図4は本研究に使用した装置全体の構成である。この装置は、イオン源によって作られたメタンイオンをイオン輸送部によってエネルギーの揃ったビームとし、これを超高真空チャンバー内に用意されたSi(100)清浄表面に照射できる機能と、その照射表面を低速イオン散乱法(LEIS)および低速電子回折(LEED)によって“その場”解析できる機能を備えている。LEISでは、Ar, Ne, Heの

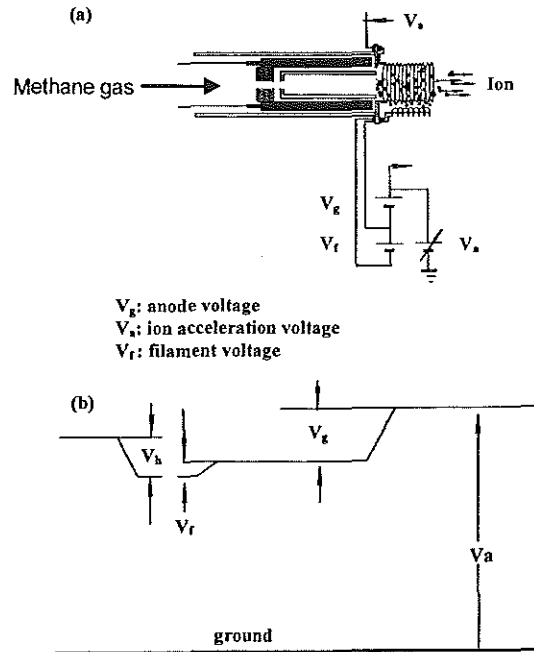


図1 イオン源の構造とイオン源におけるイオン生成とイオン加速のための電位配分。

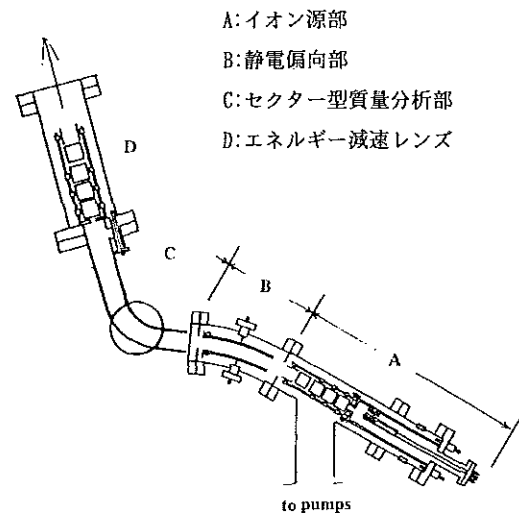


図2 イオン輸送部

希ガスイオン以外にLi, Naなどのアルカリイオンによっても表面が解析可能になっている。散乱イオンの分光には静電アナライザー(エネルギー分解能 $\Delta E/E=100$)を使用している、また、散乱角 θ は $0 < \theta < 150$ の範囲で可変可能であり、その角度分解能は 0.5° である、一方、LEEDのための光学系はLEIS系と異なる解析ステージ

に用意されており、試料のステージへの移動はマニプレータによって可能となっている、

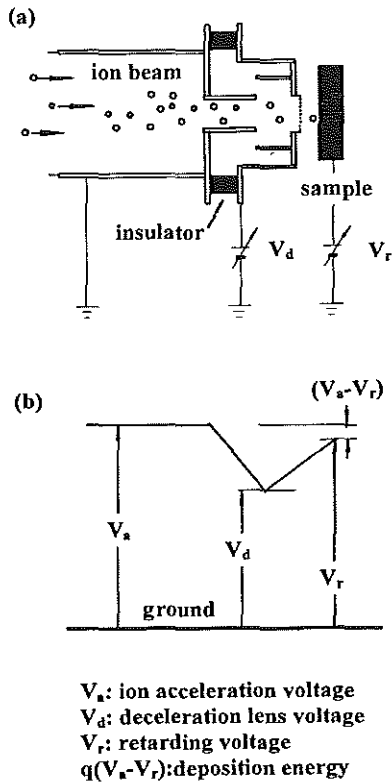


図3 減速レンズ系の構成 (a) とそのための電位配分 (b)

2.2 装置の特性

(1) イオン源から引き出されるイオンの初速度分布

本研究では、イオン源においてメタン原料ガスをイオン化し、加速電圧 1000V でイオンを加速した後、このイオンを最終的には所望の極低エネルギーにまで下げてチャンバー内の Si(100) 試料表面上に照射するが、このような行程に必要なイオンの加速と減速を図 5 に示すような電位配分で行なった。図 5(B) に示すビーム経路に沿った電位配分から、照射イオンの最終的なエネルギーは加速電圧 V_a と試料に印加する阻止電圧 V_b から、 $E_i = q(V_a - V_b)$ で決定されるようになっていることが分かる。

実際のイオン照射においては、エネルギー E_i のイオンビームがどのような初速度分布特性を持っているか重要である。ここでは、メタンの代わりに Ar ガスを使い、Ar イオンビームの初速度分布を調べた結果について示す。

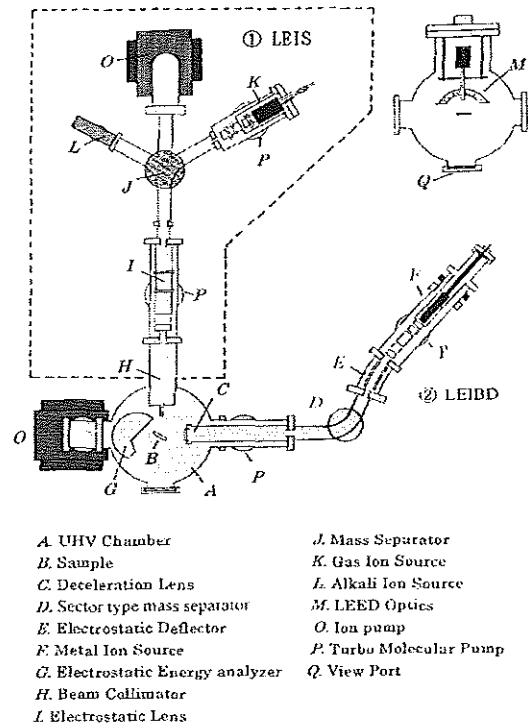


図4 低エネルギーイオン照射表面解析装置の概略

まず、一価の Ar イオンを様々な加速電圧で加速し、そのエネルギー分布を静電アナライザーを使って調べた。図 6 は加速電圧 800V で加速した場合の Ar イオンのエネルギー分布である。

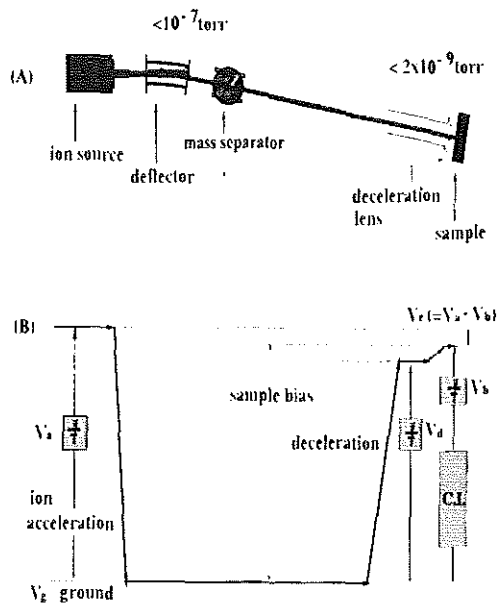


図5 イオンビーム制御系の概略

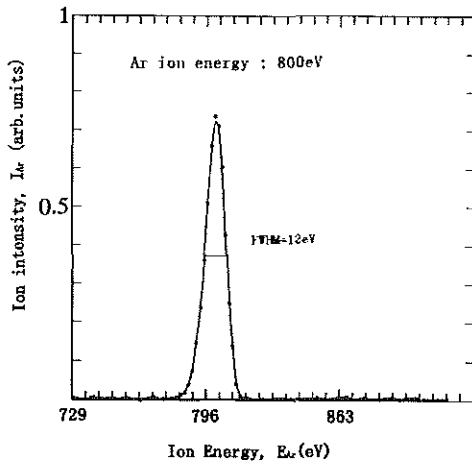


図6 800eVで加速されたArイオンのエネルギー分布

このエネルギー分布からピークの半値幅は12eVであることが判る。このような半値幅を使うと、ビームの初速度分布は次式より求められることが知られている[6]。

$$\Delta E_M^2 = \Delta E_A^2 + \Delta E_1^2 \quad \dots (1)$$

ここに、 ΔE_M は観測されるエネルギー分布(半値幅)、 ΔE_A が求めたいイオンの初速度分布、また ΔE_1 は、 $\Delta E_1^2 = \Delta E_p^2 (\omega/R_0)^2$ で表される項である。ここに、 ΔE_p はイオンの加速エネルギーである。式(1)から、様々の加速イオンビームについて観測されるピークの半値幅 ΔE_M を加速エネルギーに対して調べると ΔE_A が求まり、結局、イオンビームの初速度分布(半値幅)を知ることができる。この方法を使って4種類の加速電圧で加速したArイオンビームについて ΔE_M^2 を ΔE_p^2 の関数でプロットした結果が図7である。この結果から、式(1)を使ってイオンビームの半値幅を計算すると、 ΔE_A として1.8eVが求まった。このことより、Arイオンの初速度分布(半値幅)は1.8eVであると結論できる。

(2) メタンイオンビームの特性

図8はメタンガスを原料ガスとして使い、イオン源でイオン化し引き出した場合のイオン種である。これから、 C^+ 、 CH^+ 、 CH_2^+ 、 CH_3^+ 、 CH_4^+ 、 CH_5^+ などがイオン種として利用できることがわかる。

(3) 試料表面へのイオン照射量の決定

Si(100)表面にメタンイオンビーム蒸着を行うに際して、その蒸着量を精密に制御することが必要不可欠である。そこで、従来の水晶式膜厚計で

はモニターすることが困難な1ML以下を正確に計測するために、次のような方法を採用した。

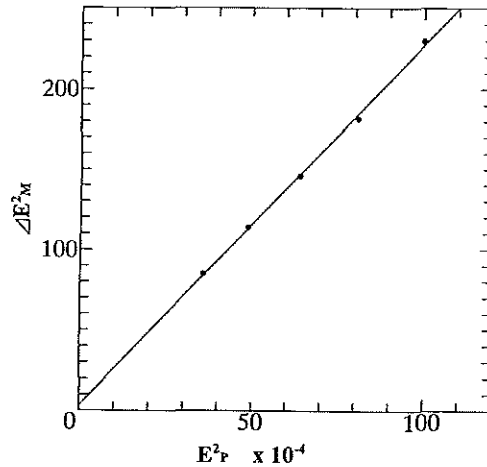


図7 テキストの(1)式にしたがって、Arイオンビームにおける初速度分布を調べた結果。

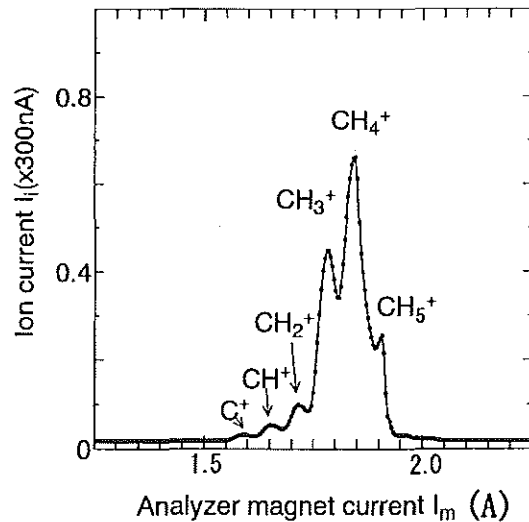


図8 CH_4 ガスを使ったイオン源から引き出されたイオン種。

採用した蒸着量決定法のブロックダイアグラムを図9に示す。測定対象がイオンであることから、デジタル電流積分器と試料への阻止電圧電源を組み合わせた回路を用いた。図のようにデジタル電流積分器を電源のアース側に接続することで、高精度なイオン電流モニターが可能となった。

CH_4^+ イオンの場合、1000Vに加速した後、100eVのエネルギーに下げてSi(100)試料表面上に照射した場合に1ML/30min程度の供給量が得られることが分かった。

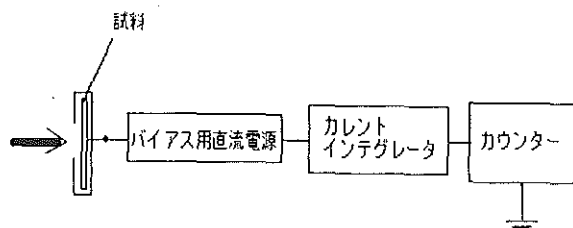


図9 イオン蒸着量を決定するために用いたシステムのブロックダイアグラム。

2.3 低速電子回折 (LEED) および低エネルギーイオン散乱法 (LEIS) による Si(100) 清浄表面の解析

5軸の自由度 (x, y, z 軸方向移動、照射角 α および方位角 ϕ) を有するマニピュレータにセットされた Si(100) ウエハー ($5 \times 25 \times 0.5 \text{ mm}^3$) 試料表面を用いて LEED および LEIS の動作と Si(100) 清浄表面の解析を行なった。LEED および LEIS 観察では、マニピュレータの z 軸移動機構により試料ホルダーをそれぞれのステージまで移動させた。

Si(100) 試料表面は $2 \times 10^{-9} \text{ Torr}$ 以下の真空中でフラッシュ・アニール法により清浄化処理した。図10に清浄化処理後の Si(100) 表面の LEED 像を示す。この結果から、Si(100) 清浄表面の典型である鮮明な 2×1 パターンが現れていることがわかる。したがって LEED は正常に動作していること、また Si(100) 表面は清浄になっていることがわかる。

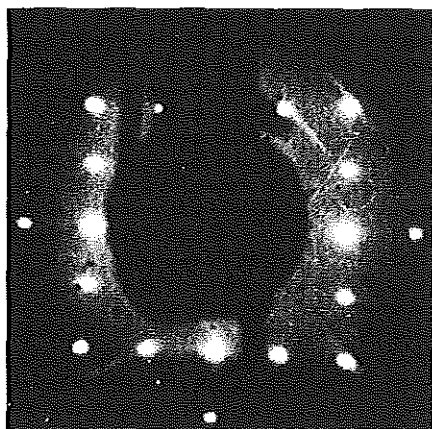


図10 フラッシュ・アニール法によって Si(100) 表面を清浄化処理した後の LEED 観察結果。電圧は 80 V

一方、メタンイオンビーム蒸着初期に形成される炭素物質の解析では、LEED による表面周期構造に加えて表面組成をイオン散乱法で調べる

必要がある。そこで、低ドーズで表面破壊を押さえ、かつ表面最外層の解析のできる Li イオンビームをプローブとして選び、その性能を調べた結果を図11に示す。図11は Si(100) 清浄表面からの Li イオン散乱スペクトルを散乱角 156° の場合について示している。図から、入射イオンビームのエネルギーを 500 eV から次第に低くすると、Si 原子からのピークの半値幅が狭くなり、表面第一層原子からの散乱が支配的となることが分かる。逆に、高エネルギーでは、ピークの低エネルギー側にも緩やかな散乱強度分布が見られ、表面第2層以下の深い層の寄与が観測される。また、これら一連の測定に際して用いた Li イオンビーム径は 2 mm、また照射イオン電流は 200 pA 前後であった。この照射量は、仮に Li イオン一個当たり一個の Si 原子を変位させるとすると、1 ML の Si 原子を変位させるに要する時間が、ほぼ 6 時間であることを意味する。すなわち、このような Li イオンをプローブとして、Si 表面を解析する限り、通常の解析時間内 (約 1 時間) ではプローブによる表面ダメージは無視できるといえる。

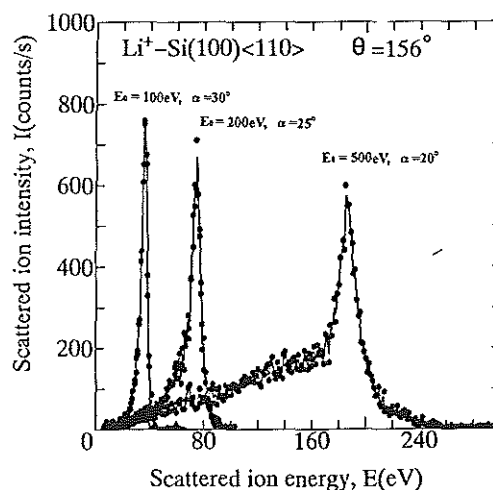


図11 Si(100)- 2×1 清浄表面からの Li イオン散乱スペクトルの入射イオンエネルギー依存

さらに、表面構造解析に重要な散乱イオン強度の照射角依存について、Si(100)- 2×1 表面の $\langle 110 \rangle$ 方位で調べた結果を図12に示す。これは LEED 像を見て表面方位と照射角を合わせ、散乱角 156° 固定で観察したスペクトルの積分強度をイオン散乱強度としてプロットしたものである。また、照射角はステップモータにより正

確に制御した。図12の①は清浄化直後の測定結果であり、②は清浄化後10時間経過した後の測定結果である。これから、明かに2つの特徴的なピークが、照射角 25° 付近と 75° 付近に見られる。これらのピークは、いわゆる一次元の等間隔の並ぶ原子列と入射イオンとの散乱で見られるフォーカシング効果によるものである、すなわち、 $\alpha=25^\circ$ 付近のピークは最外層のSi原子から、また $\alpha=76^\circ$ 付近のピークは最外層のSi原子と2層目のSi原子との間でのフォーカシング効果に因るとして説明可能である。このように、照射角依存曲線が明瞭に測定できることから、シュミレーションとあわせて表面の構造解析が十分おこなえるといえる。

また、清浄化後10時間真空中に放置した後でも明瞭な二つのピークが見える事から、表面は表面清浄処理後の実験に十分に絶え得るといえる。

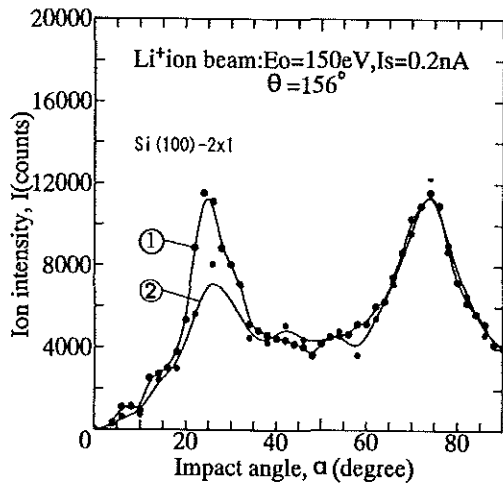


図12 Si(100)- 2×1 清浄表面の $\langle 110 \rangle$ 方位におけるイオン散乱強度の照射角 α 依存。①は清浄化直後の表面、②は清浄化後10時間経過した表面。

3 まとめ

低エネルギーメタンイオンビーム蒸着機能と低速イオン散乱分光法(LEIS)および低速電子回折(LEED)による表面解析機能を備え、超高真空中に用意されたSi(100)清浄表面でのメタンイオンビーム蒸着とそれに伴う表面構造変化を調べることができる装置を完成させた。メタンイオンビームは100 eVまでエネルギーを下げ、1ML/30minの速度で蒸着可能である。イオン源からの引き出されたイオンの初速度分布はArイオンで1.8eVである。100eVのLiイオン散乱法に

よって、Si(100)清浄表面の最外層の原子配列についての知見を得ることができる。

謝辞

研究を遂行するにあたって科学研究費補助金(研究課題番号 07650039 および 12650033)を受けた。

参考文献

- [1]. K.Kobashi, *Diamond Films*, (Elsevier, Amsterdam, 2005)
- [2]. A.K.Dua, *Diamond Thin Films*, (ttp Trans Tech Publications LTD, Switerland, 2004)
- [3]. F.Shoji, *Vacuum* 53 (1999) 459.
- [4]. F.Shoji, *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. B* 164-165 (2000) 671.
- [5]. *The Physics and Technology of Ion Sources*, Edited by L.G. Brown, (John Wiley & Sons, New York, 1989)
- [6]. F.Shoji and T.Hanawa, *J. Phys. E.* 14(1981)90

LSA を用いた英語教育支援システムの提案

～学生のやる気と学ぶ楽しさを支援するために～

森元史朗*, 徳留由佳*, 沈 曉鵬**, 三原徹治**, 金丸千雪***

* 九州共立大学工学部情報学科

** 九州共立大学大学院工学研究科電子情報工学専攻

*** 九州共立大学スポーツ学部スポーツ学科

A Supporting System of English Education with Latent Semantic Analysis (LSA)

～ Supporting system for more motivation and interest of students ～

Fumio Morimoto, Yuka Tokudome, Xiaoqing Shen, Tetuji Mihara and Chiyuki Kanamaru

Abstract

This report suggests a supporting system of English education for college students with Latent Semantic Analysis (LSA). The followings are the processes of this system with LSA: 1) analysis of Japanese-English parallel corpus, 2) calculating the similarity between a Japanese sentence to be requested and every Japanese sentence in the corpus, and outputting several pairs of Japanese and English sentences which are similar in Japanese to the requested sentence. Supporting the motivation and interest of students, this corpus can be constructed from comics, lyrics, or literary works.

Keywords: Latent Semantic Analysis (LSA), English education, translation into English

1 はじめに

今日の英語教育において「やる気」と「学ぶ楽しさ」を教材の中に盛り込むことは重要であり、単なる英単語や英文法を無味乾燥なまま覚えさせることは「やる気」等に逆効果である。そこで、具体策として漫才、人形劇、紙芝居や最近の流行歌などを英語で学生に演じさせ、あるいは見せることが考えられる。

ここで重要なことは、学習者の英語力である。日本語で漫才等の文章を考えることができても、それを英語に翻訳することはかなり困難であり、いきおい、ウェブ上で提供されている日英翻訳サービスを頼ることになる。現行の日英翻訳サービスは検索に重点をおいて、日本語の単語を全て英単語に置き換えるものであるため、たとえば「ことばが足りない部分をあやまる」は「Words take the wrong insufficient part」のように「正確に」翻訳されてしまう。正確さを重視するために、結果として逆に不自然な表現となるという齟齬である。しかし、正しく翻訳されていると信じていけば、その間違いに気付くことすらできず、英語力の向上も期待できない。このような事例が積み重なると「楽しい」はずはなく、結果的に「やる気」までも喪失してしまう。

英語力の向上には「気付き」が重要である。そのための効果的な方法のひとつに「構文構造は保証するが、必ずしも正しく翻訳されるとは限らない」翻訳システムを使うことがあげられ

る。翻訳したい日本語文に対して類似の日本語文を検索し、検索された日本語文の英語翻訳文を提示する方法である。翻訳したい日本語文と類似の日本語文との違いを探し、提示された英文を必要に応じて修正することにより英語力の向上が期待される。また、以下で述べるコーパス構築において、漫才、流行歌、優れた文学作品などからの文章の収集が技術的に可能であり、これも「やる気」と「学ぶ楽しさ」を出させ、英語力の向上につながるであろう。

そこで、報告者らは、学習者の「やる気」と「学ぶ楽しさ」を支援し、英語力の向上を目指すために、Latent Semantic Analysis(LSA,潜在意味検索)[1]を援用した日英対訳例文集の検索システム(JtoEver.1)を構築した。本報告では、このJtoEver.1を紹介し、教育現場(特に英作文などの演習)で利用することを提案し、最後に今後の研究展望を述べる。

2 LSAによる文章検索

例えば「私は、生物学を学び、将来は医者になりたい。」という文を例文集(コーパス)の中から検索する場合を考える。コーパスとして将来の夢や希望に関する文章を多く集めていけば、これと類似する文章がその中に存在する可能性は高くなる。つまり「私は、生物学を学び、将来は歯科医になりたい。」「私は、生物に関する学問を学び、将来は看護師になりたい。」「私は生物学を学び、将来は薬剤師になりたい。」などの

文章が多く存在することが予想される。もちろん、「私は経済学を学び、将来は税理士になりたい。」などの文章も多く存在するであろう、しかし、「私は今、経済学を学んでいるが、将来は医者になりたい。」という文はコーパス内に存在しないか、または存在してもごく少数である。このように、「医師」や「看護師」「薬剤師」などの単語は「生物学」「病院」などの単語と同じ文章で使われることは多いが、「経済学」や「文学」と同じ文章で使われることは少ない。つまり、ある単語の意味を推定するためには、それが他のどのような単語と併用される傾向があるか調べればよい。また、文章の意味を推定するには、その文の中にどのような意味の単語がいくつ使われているか数えればよい。この考え方にもとづいて、我々が日常使っている文章を多く集め、その中で単語の使われかたを分析することで、従来のキーワード検索とは異なり、文章の意味を検索することが可能となる。検索者は、「医者」という単語を含む文章を検索システムに与えることで、「医師」「看護師」「薬剤師」などのキーワードは与えなくても、求める文と関係の深い文章を検索できる。なお、ここでの「関係の深い」単語とは「医師」「お医者さん」「看護師」「薬剤師」などのように同義語や類義語だけでなく同じ文脈の中で使われる可能性の高い単語を表す。同じ文で使われる傾向の高い単語は共起語と呼ばれる。なお、「私は今、経済学を学んでいるので、将来、医者にはならないだろう。」という文は自然な表現であり、コーパス内に存在する可能性はあり、さらに、コーパスの収集分野によっては「医者」と「経済学」が否定文の中で共起しやすいかもしれないが、これは「医者」と「経済学」が否定的な表現において深く関係していることを重視してデータに反映した結果であり、このような関係が必要であれば問題ないが、多くの場合「医者」と「経済学」は関係せず、ゆえに、このような問題に対処するため、コーパスとしてさまざまな分野から多数の文章を採集して、不適切な偏りを抑制する必要がある。

以上の説明から明らかなように、文章ごとの単語の個数を行列で表し(単語～文章行列)、その行列を解析することで、「文章の中に潜在する意味」をベクトルで近似的に表し数値的に取り扱うことが可能となる。なお、ここでの「意

味」とは、通常我々が考える「意味」とは異なり、その表現力をコンピュータで扱うに十分な程度まで狭めたものである。このような分析方法の1つとして、Latent Semantic Analysis (LSA,潜在意味検索)[1]がある。当初、LSAは英語の文章の検索や要約のために開発されたが、日本語の新聞記事についても、その文章を単語に分解(形態素解析)することでLSAの利用が可能であるとの報告がされた[2]。本報告でも、対訳例文集(対訳コーパス)のLSAによる検索を説明するので、LSAの概要をもう少し詳しく以下に記す。ただし、以下の説明では、学習者が日本語の文章 D_q をコンピュータに入力し、これを英訳するにあたり参考となる対訳例文集から検索しようと試みていると仮定する。

2.1 コーパス

自然言語処理の分野では、多数の文章を集めコンピュータ上で利用できるような1つにまとめたものをコーパスと呼ぶ。特に、日本語と英語など複数言語の対訳形式のコーパスを対訳コーパスと呼ぶ。以下、対訳コーパスを単にコーパスと呼ぶことにする。

2.2 形態素と形態素解析

形態素(morpheme)[3]とは、文章において意味を持つ最小の単位である。形態素と単語はよく似た概念だが、単語を接頭辞や接尾辞に分解できるなどの例から明らかのように、両者は完全に同じものではない。しかし本報告では特に必要でない限り両者を同一のものとして記す。

自然言語処理においては、文章を形態素に分解し、場合によっては各形態素の品詞や活用形を調べる必要がある。これらの処理は総称して形態素解析(morphological analysis) [3]と呼ばれる。日本語の文章では、複数の形態素が連続して記述されるので、その形態素解析は特に複雑だが、その技術は十分実用化されており[3]、通常はこれを省略しない。

2.3 単語ベクトルと単語～文章行列

LSAによる検索システムを利用して検索者が文章 D_q をシステムに与えたとき、システムは D_q に含まれる各単語の数を一定の順序で並べ、ベクトルとして扱う必要がある。このベクトルを本報告では「文章 D_q の単語ベクトル」と呼び、これを a_q と表す。また、コーパス中の日本語の各文章 D_{ci} の単語ベクトルを「文章 D_{ci} の単語ベクトル」と呼び、これを a_{ci} と表す。

コーパス内の各文章の単語の個数を記した行列は、一般に、単語～文章行列と呼ばれる。これは、文章数を N 文、単語数を M 語とするとき、 0 以上の整数を成分とする $M \times N$ 型の行列である。明らかなように、コーパス内の各文章の単語ベクトルを列ベクトルとして得て、これらを1つの行列にまとめるとき単語～文章行列が得られる。

2.4 単語の重み付け

LSAを用いる場合、単語の重要度を考慮した重み付けを行う必要がある。その代表的な手法はTF*IDF法と呼ばれる[4]。Term Frequency(TF)は、文章 D_i 中の単語 w_j の頻度 f_{ij} を表す。Inverse Document Frequency (IDF)は、全文章数 N を、 w_j を含む文章数 N_j で割った値の対数をとったもの、つまり $\log(N/N_j)$ である。TF*IDF法とは文章 D_i 中の単語 w_j の重みを式(1)とすることである。

$$f_{ij} \log(N/N_j) \quad (1)$$

TF*IDF法は、個々の単語がどの程度その文章に特徴的に現れているかを、文章全体の単語の分布からデータに反映させることに相当する。

LSAでは、文章 D_q の単語ベクトル a_q と、コーパス内の日本語の各文章 $D_{c1}, D_{c2}, \dots, D_{cN}$ の単語ベクトル $a_{c1}, a_{c2}, \dots, a_{cN}$ を求め、それらをTF*IDF法により重み付けする必要がある。

2.5 単語～文章行列の特異値分解とその近似解

以下の説明では、 N 文、 M 語のコーパスから得られる単語～文章行列にTF*IDF法による重み付けを行った結果を行列 A とする。 A は下記の3つの行列 U, S, V を用いて式(2)のように分解できる。

$$A = U S V^T \quad (2)$$

U は $M \times r$ 型、 V は $N \times r$ 型で、いずれも正規直交行列、 S は $r \times r$ 型の対角行列とする。ただし、 r は A のランクである。 S の対角成分は特異値と呼ばれ、行列 A から定まる値である。上付きの T はそれが転置行列であることを意味する。式(2)の左辺から右辺のような3つの行列 U, S, V の積に分解することは特異値分解[5]と呼ばれる。 A の特異値分解では、その性質から必ず 0 以上の実数のみが特異値となる。 U は、コーパス内の個々の単語がどのような内容の文章の中で使われる傾向があるかを表す。 V は、コーパス内の個々の文章がどのような内容のものをどの程度含んでいるかを表す。 S は、コ

ーパス内に存在するさまざまな意味についての出現頻度を表す。

S の特異値を、大きいものから k 番目までとり、それら k 個の特異値を対角成分として並べた新たな対角行列を S_k とし、 S から特異値を抽出するときと同じ行のみを U, V から抽出して作った行列を U_k, V_k とすると、式(3)は特異値分解の近似解を与えている。

$$A \approx U_k S_k V_k^T \quad (3)$$

$k \ll r$ なので、式(3)は式(2)の一種の情報圧縮である。このように行列の次元を縮約することによる情報圧縮は次元縮約と呼ばれる。以下で述べる計算では、特異値分解の近似解である U_k, S_k, V_k を使用するが、その際の k は経験的に $50 \sim 100$ 程度と予想される[1]。

2.6 意味ベクトルと類似度

一般に、文章の内容を数値のみで正確に記述することはできないが、適切な計算方法により、単語ベクトルから文章の内容とほぼ一対一の対応関係のベクトルを求めることができる。ただし、2つの文章がほぼ同じ内容であれば、それらのベクトルもほぼ同じ方向となる必要がある。このようなベクトルは文章の内容(意味)を表現しているとみなせるので、これを本報告では意味ベクトルと呼ぶ。

コーパスの単語～文章行列から式(3)に記した近似的な特異値分解を行い、その解 U_k, S_k, V_k を用いることで以下の意味ベクトルを計算できる。ここで、文章 D_q の単語ベクトルを a_q 、その文章の意味ベクトルを v_q 、文章 D_{ci} ($i=1, 2, \dots, N$) の単語ベクトルを a_{ci} 、その文章の意味ベクトルを v_{ci} とする。すると、これらの意味ベクトルは次の計算で求まる。

$$v_q = a_q^T U_k S_k^{-1} \quad (4)$$

$$v_{ci} = a_{ci}^T U_k S_k^{-1} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

文章 D_q と D_{ci} の類似度は、両者の意味ベクトルがどの程度並行に近いかで評価できるが、これは v_q と v_{ci} のなす角 θ の余弦、つまり、式(6)で計算できる。

$$\cos \theta = (v_q, v_{ci}) / \{ \|v_q\| \|v_{ci}\| \} \quad (6)$$

ただし、式(6)の右辺の分子は両ベクトルの内積を表し、分母は各ベクトルのノルムを表す。

2.7 LSA 検索の一般的な手順

LSAを用いた文章検索では、通常は前処理と本検索に分けて以下の順手で計算される。

《前処理》コーパスとして N 文(各文を D_{ci} ,

D_{c2}, \dots, D_{cN} とする)があるとき, このコーパスから単語~文章行列と, その特異値分解の近似解を求め, 各文の意味ベクトル $v_{c1}, v_{c2}, \dots, v_{cN}$ を求めておく.

《本検索》文章 D_q の意味ベクトル v_q を U_k , S_k から計算し, v_q と v_{ci} ($i=1, 2, \dots, N$) のなす角の余弦($\cos \theta$)を求め, この値の降順に, 指定された個数だけ対応するコーパス内の対訳例文を結果として表示する.

2.8 pLSA の概要

近年, Probabilistic Latent Semantic Analysis (pLSA) と呼ばれる手法が開発された[6]. これは, 従来の LSA よりも高い検索性能を実現しうること, 次元縮約と単語のクラスタリングを同時に行うので TF*IDF 法による単語の重み付けを必要としないことが報告されている. ただし, pLSA を使用する場合, 前処理で極めて多くのメモリーを必要とするためコーパスの規模によっては通常のパソコンでは利用できない可能性がある.

3 JtoEver.1 の概要

今回作成した JtoEver.1 と, そこで用いたコーパスの概要を以下に示す.

3.1 コーパス

JtoEver.1 ではコーパスの規模が数千文程度であっても何ら問題なく使用できるような設計としたが, 今回は動作検証のため, コーパスを日英ともに 47 文とし, 日本語の単語数は 130 語とした. このコーパスを付録に示す.

3.2 形態素解析, 単語~文章行列と重み付け

形態素解析を行うソフトは多数存在するが, その 1 つである JUMAN[3] は比較的広く使われており, 無償配布のソフトであるため, これを使用した. JUMAN による形態素解析の結果の例(ここでは上記コーパスの解析の一部)を図 1 に示す. 図から, 動詞や形容詞などの用言はその終止形が自動的に得られていること, 活用形などの情報が自動的に得られていることが確認できる. しかし, ここでは体言をそのまま, 用言は終止形にしたものを利用するので, これ

```
私 わたくし 私 名詞 6 普通名詞 1 * 0 * 0 "漢字読み:訓 代表表記:私"
@ 私 わたし 私 名詞 6 普通名詞 1 * 0 * 0 "代表表記:私"
の の の 助詞 9 接続助詞 3 * 0 * 0 NIL
名前 なまえ 名前 名詞 6 普通名詞 1 * 0 * 0 "代表表記:名前"
は は は 助詞 9 副助詞 2 * 0 * 0 NIL
トム とむ トム 名詞 6 人名 5 * 0 * 0 NIL
. . . 特殊 1 記号 5 * 0 * 0 NIL
ブラウン ブラウン ブラウン 未定義語 15 カタカナ 2 * 0 * 0 NIL
です です だ 判定詞 4 * 0 判定詞 25 デス列基本形 24 NIL
. . . 特殊 1 句点 1 * 0 * 0 NIL
私 わたくし 私 名詞 6 普通名詞 1 * 0 * 0 "漢字読み:訓 代表表記:私"
@ 私 わたし 私 名詞 6 普通名詞 1 * 0 * 0 "代表表記:私"
の の の 助詞 9 接続助詞 3 * 0 * 0 NIL
名前 なまえ 名前 名詞 6 普通名詞 1 * 0 * 0 "代表表記:名前"
は は は 助詞 9 副助詞 2 * 0 * 0 NIL
花子 はなこ 花子 名詞 6 人名 5 * 0 * 0 NIL
です です だ 判定詞 4 * 0 判定詞 25 デス列基本形 24 NIL
```

図 1 形態素解析の結果

```
私
の
名前
は
トム
.
ブラウン
だ
。
私
の
名前
は
花子
だ
。
```

図 2 単語の抜粋結果

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
私	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
の	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1
名前	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
は	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
トム	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
・	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ブラウン	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
だ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
。	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
花子	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
これ	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
本	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
あれ	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
家	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図3 単語～文章行列（一部のみの抜粋）

らの必要な情報のみ抽出した結果を図2に示す。このコーパスから得られた単語～文章行列を図3に示す。図で最上列は文番号を示す。単語の重み付けとしてはTF*IDF法を用いた。

3.3 単語～文章行列の特異値分解

単語～文章行列の近似的な特異値分解におけるkの値は、ソフトが確実に動作して次元縮約されていることを確認するため、45とした。

3.4 実行結果の表示形式

文章 D_q に対し式(6)を計算し、類似度の高い対訳例文を指定された数だけコーパス内から選び、類似度の順に表示させた。表示させる対訳例文の数は1以上、コーパスの長さN以下の範囲で利用者が自由に設定できるような設計とした。また、表示される英文を緑色、日本語を青色とし、この条件にあうようなHTMLファイルを出力し、結果はWebブラウザで閲覧できるようにした。コーパス内の文番号や類似度は、学習者には特に重要でないため目立たないよう薄い灰色とした。

3.5 動作環境

このJtoEver.1.0の動作環境を次に示す。

メモリー：8Gbyte

CPU：Intel Core2 Duo E8500,3.16GHz

ハードディスク：日立 T7K500 (7200RPM)

4 JtoEver.1の検証例

今回作成したJtoEver.1の動作を確認するため、3つの検証を行った。いずれの検証でも、日本語の文章 D_q を英訳するために参考となる例文を探しているものと想定し、 D_q を入力して、コーパス内の全文に対して類似度を求め、最も類似する対訳例文を3文まで表示させた。実行時間はいずれも1秒以内であった。これらの検索結果を以下に示す。

4.1 検証例1

文章 D_q : 「私は将来、福岡で働きます。」

この検証例における結果を図4に示す。図4(a)は検索結果として表示された画面である。ここで、まず入力された文章 D_q がそのまま表示され、それに続いて類似度の高い対訳例文から順に表示されていることが確認できる。ただし、コーパスが小規模なため、類似度の低い文章も表示された。個々の対訳例文においては、まず文番号と類似度が表示され、それに続けて英文、和文の順で表示された。求める文章 D_q は「福岡」を含んでいるが、この単語はコーパスにはないため、第1例文として「～北九州で働いています」という内容の例文が表示された。第2例文では単語「私」「将来」が共通の単語であり、「働く」と「仕事」が共起語であるた

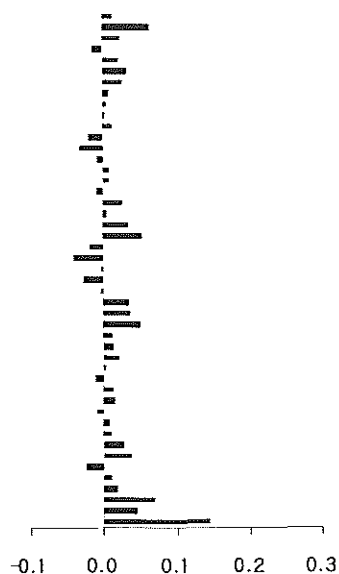
私は将来、福岡で働きます。

46 0.144
I am working in Kitakyushu.
私は北九州で働いています。

44 0.069
I will get a job in the medical field in the future.
私は将来、医療の分野の仕事に就くでしょう。

1 0.063
I am Hanako.
私の名前は花子です。

(a) 検索結果



(b) コーパス内の各文の類似度

図4 検証例1

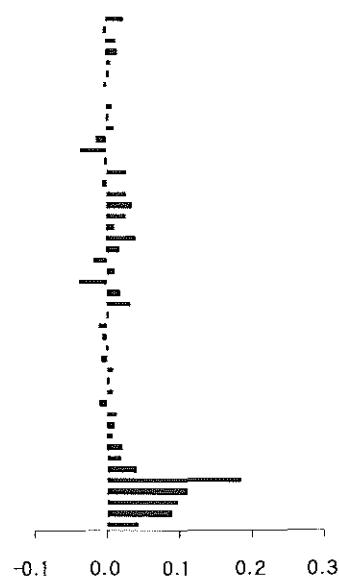
私は現在、化学と生物学を学んでいますが、将来は医療の分野の仕事をします。

42 0.184
I am learning chemistry and biology now.
私は現在、化学と生物学を学んでいます。

43 0.110
I will learn chemistry in the university in the future.
私は将来、大学で化学を学ぶでしょう。

44 0.098
I will get a job in the medical field in the future.
私は将来、医療の分野の仕事に就くでしょう。

(a) 検索結果

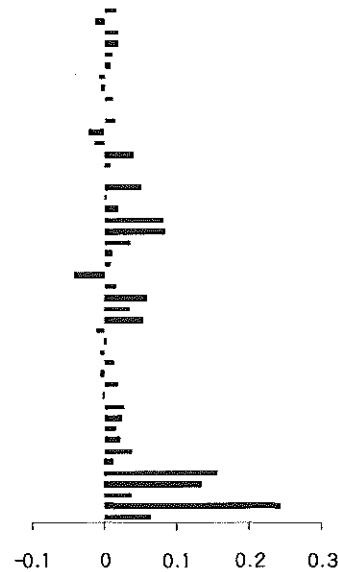


(b) コーパス内の各文の類似度

図5 検証例2

私は現在、化学と生物学を学んでいます、将来は医療の分野で、難病の子供たちを助ける仕事をしようと考えています。
45 0.244 Help children with intractable disease. 難病の子供たちを助けてください。
42 0.158 I am learning chemistry and biology now. 私は現在、化学と生物学を学んでいます。
43 0.135 I will learn chemistry in the university in the future. 私は将来、大学で化学を学ぶでしょう。

(a) 検索結果



(b) コーパス内の各文の類似度

図6 検証例3

めに候補となりやすかったと考えられる。第3例文については、「私」「です」が共通だが、コーパスが小規模であり、類似する文が他にないため候補として表示されたものと考えられる。

類似度は計算の中間出力としてテキストファイルで生成されるが、これらの値を図4(b)に示す。図で横軸は類似度とし、この値をコーパス内の最初の文から順に棒グラフで表示した。図で特に類似度の高いものが選択され、図4(a)の検索結果として表示されている。

4.2 検証例2

文章 D_q : 「私は現在、化学と生物学を学んでいます、将来は医療の分野の仕事を行います。」

この検証例における結果を図5に示す。文章 D_q はやや長い文章であるため、結果として、あたかも D_q を自動的に前半と後半に分けて各々を検索したかのような結果となった。つまり、第1例文と第2例文は D_q の前半に類似し、第3例文は D_q の後半に類似した文章である。

4.3 検証例3

文章 D_q : 「私は現在、化学と生物学を学んでいます、将来は医療の分野で、難病の子供たちを助ける仕事をしようと考えています。」

この検証例における結果を図6に示す。文章 D_q は、検証例2の場合と類似した文章であるた

め、結果もほぼ同じ例文が表示されている。しかし、検証例3では「難病」という単語がコーパス内では特徴的であったため、第1例文に「難病」を含むものが候補となり、第2例文以下と順位が入れ替わっていることが確認できる。

5 まとめと替えて（今後の研究展望）

本報告では、LSAによる日英対訳コーパスの検索ソフト JtoEver.1 を作成し、その機能、すなわち、学習者が日本語の文章を入力したとき、参考となる日英対訳例文が数例ほど自動的に表示されることを示した。求められる文章が複数の内容を含んでいるときも、それに対応できることを示した。LSAの説明から明らかなように、この検索結果は通常の翻訳ソフト（不自然な文章に翻訳されてしまうことが多い）とは異なり、原理的に誤訳を表示することはありえない（ただし、教員側はコーパスとして正しい対訳例文を用意する必要がある）。また、学習者が求めている文章と完全に一致した文章がコーパス内に存在する可能性は極めて低く、ゆえに表示された対訳例文の中のいくつかの単語を学習者が自ら変更すること（例えば、検証例1の"Kitakyushu"を"Fukuoka"に変更する場合など）が必要となる。例えば英作文において、

学習者は、ただ単に正解を写すのではなく、表示された日英両文を見比べながら、自分の求めているものを作成することになる。また、コーパスとして漫才や落語、歌謡曲の歌詞、その他、学習者の好みそうな分野の文章を収集することで学習意欲がさらに高められるであろう。コーパスを優れた英文学作品とその和訳から構築することでも、英文法の学習のための無味乾燥な文章ではなく、文学的に優れた文章を読む機会が与えられるので、これも語学教育において重要である。また、演習などで学生に漫才や人形劇を英語でさせる（そこで必要な英文は学生に考えさせる）のであれば、JtoEver.1を特に有効活用できるかもしれない。このように、JtoEver.1を英語教育に利用することで「やる気」と「学ぶ楽しさ」を学生に提供し、ゆえに、高い教育効果が得られるものと期待されるが、実際に使用したときの学習効果を確認していない。また、使用するコーパスの規模や内容についての具体案、巨大コーパスを用いる際の技術的な改善策についても検討する必要がある。

最後に、JtoEver.1をさらに改良するために必要と考えられる作業を以下に述べる。

① ユーザーインターフェースの拡充

現在、JtoEver.1はコマンドラインからの実行のみ可能である。そこで、適切なアイコンをマウスで操作して使用できるように改良すべきである。

② Windows への移植

現在、JtoEver.1はLinux版のみ作成されているが、特に本学ではWindowsの利用者が多いので、Windows上への移植が必要である。

③ JtoEver.1を利用する際の教育効果の評価

現在、JtoEver.1を利用した授業について本学の英語教員と検討中である。また、この利用による教育効果を測定し、別に報告する予定である。なお、LSA、pLSAは米国特許であるから、この利用に際して、特許使用料の支払い義務などを確認する必要がある。

④ コーパスの拡充

JtoEver.1を実用的なものとして利用する場合、その教育の難易度にもよるが、せめて中学生の1~2年生で学習する必修単語がコーパスの中にごく自然なかたちで含まれている必要があると予想される。そのためには、コーパスを少なくとも数千文は用意する必要があると

予想される。また、本学の英語教材となりうるような、英文小説が多数インターネット上で公開され、著作権法上の自由な利用が可能なものも多い(著作権が時効により消滅した場合など)しかし、自由に利用できる日本語訳の入手が困難である。CD-ROM版で日本語版、英語版の両者が市販されている小説等も技術的には利用可能だが、これを教室で利用する場合も、著作権法上の問題(公衆送信権など)を確認する必要がある。

⑤ 巨大疎行列の特異値分解の高効率化

巨大コーパスを用いる場合、巨大疎行列の特異値分解を行う必要があるが、これを効率的に行うフリーソフトSVDPACK[7]が公開されているため、その利用を検討する必要がある。

⑥ 検索の高速化

JtoEver.1では、類似度の計算において、学習者が与えた文章 D_q とコーパス内の全ての文章 D_{ci} を比較するため、数万文以上の巨大コーパスを用いる場合、長い計算時間を必要とするため実用性に欠けているかもしれない。そこで、前処理および本番検索に次の操作を加えて効率的に検索できるよう改良する必要がある。

《前処理》:コーパス内の全ての文を、その意味ベクトルによりクラスタリングしておく(このときのクラスタを C_1, C_2, \dots, C_K とし、クラスタ数 K はコーパス長 N の1/100程度を想定)。また、与えた文章 D_q がどのクラスタに属するかをパターン認識により識別するための機能を用意しておく。

《本検索》:文章 D_q の意味ベクトル v_q から、それがどのクラスタに属するかを上記のパターン認識により予測する。その結果、予測されたクラスタ内の文章に対する類似度のみを計算することで、計算効率は大幅に改善される。なお、この方法は「コーパス内の全てを調べるのではなく、およその見当をつけて、そこを重点的に調べる」ということに相当する。

⑦ pLSAプログラムの作成

JtoEver.1のLSAをpLSAに置き換えて検索性能の向上を試みる必要がある。

参考文献

- [1] S. Deerwester, S.T. Dumais, G.W. Furnas, T.K. Landauer and R. Harshman, Indexing by Latent Semantic Analysis. Journal of

- the Society for Information Science, 41(7), 391-407, 1990.
- [2] 石岡恒憲, 統計的手法を用いた自然言語データベースからの意味的検索および自動分類, 情報サービス産業協会会報, 67,93-102,2002.
- [3] Sadao Kurohashi, Toshihisa Nakamura, Yuji Matsumoto and Makoto Nagao, Improvements of Japanese Morphological Analyzer JUMAN, In Proceedings of The International Workshop on Sharable Natural Language Resources, 22-28,1994.
- [4] K.Sparck Jones, A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval, Journal of Documentation, 28(1), 11- 21, 1972.
- [5] 柳井晴夫, 竹内啓, 射影行列・一般逆行列・特異値分解(UP 応用数学選書 10), 東京大学出版会, 1983.
- [6] T. Hofmann, Probabilistic Latent Semantic Analysis. Proc. Uncertainty in Artificial Intelligence, 1999.
- [7] M.W.Berry, Large scale singular value computations, International Journal of Supercomputer Applications, 6(1),13-49, 1992.

付録 使用したコーパス 以下に今回使用したコーパスを示す.

#com 0	これは新しい車です	私の父は先生です。	#com 16
#e	か?	#com 11	#e
My name is Tom	#com 6	#e	You speak Japanese
Brown.	#e	She's a student.	well.
#j	This is not Jane's	#j	#j
私の名前はトム・ブ	camera.	彼女は学生です。	あなたは日本語を上
ラウンです。	#j	#com 12	手に話します。
#com 1	これはジェーンのカ	#e	#com 17
#e	メラではありません。	Is he from Canada?	#e
I am Hanako.	#com 7	#j	I plya the piano.
#j	#e	彼はカナダから来た	#j
私の名前は花子です。	This isn't my bike.	のですか?	私はピアノを弾きま
#com 2	#j	#com 13	す。
#e	これは私の自転車で	#e	#com 18
This is my book.	はありません。	Who are those boys?	#e
#j	#com 8	#j	I have a good
これは私の本です。	#e	あれらの少年達は誰	friends in this class.
#com 3	What is that?	ですか?	#j
#e	#j	#com 14	私はこのクラスに仲
That is my house.	あれは何ですか?	#e	のよい友達があります。
#j	#com 9	I'm from America.	#com 19
あれは私の家です。	#e	#j	#e
#com 4	What's your name?	私はアメリカ出身で	Do you know that
#e	#j	す。	song?
That's a school.	あなたの名前は何で	#com 15	#j
#j	すか?	#e	あなたはあの歌を知
あれは学校です。	#com 10	Are you an English	っていますか?
#com 5	#e	teacher?	#com 20
#e	My father is a	#j	#e
Is this a new car?	teacher.	あなたは英語の先生	Do they eat lunch in
#j	#j	ですか?	the classroom?

#j
彼らは教室で昼食を
食べますか？
#com 21
#e
I don't have any
friends.
#j
私には友達がいませ
ん。
#com 22
#e
Do you like fish or
meat?
#j
あなたは魚と肉のど
ちらが好きですか？
#com 23
#e
What do you have in
this box?
#j
箱の中にはなにがあ
りますか？
#com 24
#e
What time is it now?
#j
今何時ですか？
#com 25
#e
Where are you
from?
#j
あなたはの出身はど
こですか？
#com 26
#e
I have some books.
#j
私は何冊かの本をも
っています。
#com 27
#e
I have a lot of pens.

#j
私はたくさんのペン
を持っています。
#com 28
#e
These are my
parents.
#j
この人達は私の両親
です。
#com 29
#e
Whose watch is
this?
#j
これは誰の時計です
か？
#com 30
#e
It's her.
#j
それは彼女のです。
#com 31
#e
Which is your desk?
#j
あなたの机はどっち
ですか？
#com 32
#e
Which is an orange,
this or that?
#j
これとあれとはどち
らがオレンジです
か？
#com 33
#e
This is an orange.
#j
これがオレンジです。
#com 34
#e
How many brothers
do you have?

#j
あなたは兄弟が何人
いますか？
#com 35
#e
How is the weather
today?
#j
今日の天気はどうで
すか？
#com 36
#e
How long do you
watch TV.
#j
あなたはどのくらい
テレビを見ますか？
#com 37
#e
How much is this
pen?
#j
このペンはいくらで
すか？
#com 38
#e
Where do you live?
#j
あなたはどこに住ん
でいますか？
#com 39
#e
I live in Fukuoka.
#j
私は福岡に住んでい
ます。
#com 40
#e
When do you
usually play tennis?
#j
あなたは普通いつテ
ニスをしますか？
#com 41
#e

Every Sunday.
#j
毎週日曜日です。
#com 42
#e
I am learning
chemistry and
biology now.
#j
私は現在、化学と生
物学を学んでいます。
#com 43
#e
I will learn
chemistry in the
university in the
future.
#j
私は将来、大学で化
学を学ぶでしょう。
#com 44
#e
I will get a job in the
medical field in the
future.
#j
私は将来、医療の分
野の仕事に就くでし
ょう。
#com 45
#e
Help children with
intractable disease.
#j
難病の子供たちを助
けてください。
#com 46
#e
I am working in
Kitakyushu.
#j
私は北九州で働いて
います。
#com 47
[end of file]

博多湾における GIS を用いた沿岸域環境データベースの構築と 環境変化に関する一考察

著者：原 喜則*，小島 治幸*，李 云鵬**

*九州共立大学工学部環境土木工学科，**九州共立大学大学院都市システム専攻

A study on environmental changes in the Hakata bay by using GIS based

Yoshinori HARA, Haruyuki KOJIMA and Yunpeng Li

In the recent years various problems occur about natural environments of coastal zones, including loss of tidal flats, water quality deterioration, decline of inshore fishery catches, and so forth. In the Hakata bay, because of construction of a large-scale artificial island, natural environmental changes around the island have been issued, and extensive observations on the water quality, bottom sediment quality, and benthic organism have been conducted. The purpose of this study is to identify environmental changes taking place around the island by using the Geographic Information System (GIS) based database. Improvement of water quality, especially total phosphorous (T-P) concentration, in the Hakata bay has been observing, mainly because of water quality improvement of the river discharge.

Keywords: Geographic Information System, database, water quality, bottom sediment, benthic organism

1. 緒言

近年、沿岸域の自然環境に関して様々な問題が生じている。その原因解明のために、水質や底質など様々な調査が多数実施され、多くのデータが蓄積されてきた。しかし、それらすべての情報が十分に活用されているとは言い難い状況にあり、沿岸域の環境変化の実態を把握することを困難にする一因であると思われる。これを解決するひとつの手法として、地理情報システム (Geographic Information System, GIS) を用いてデータベースを構築することが考えられる。これにより、各種形式のデータを同一プラットフォーム上で一元的に管理することが可能となるとともに GIS が有する各種解析手法を利用することが可能となる。近年、沿岸域を対象として GIS を用いた研究が活発に行われている。例えば、沿岸域の自然環境関係では GIS を用いた有明海水環境データベースの構築と環境変化の一考察¹⁾や新北九州空港島周辺海域と曾根干潟を対象とした研究^{2), 3)}などがある。また、防災関係では、周防灘沿岸域における海面上昇による浸水ポテンシャルの推算⁴⁾などあり、港湾施設の維持管理では GIS を利用した海岸保全施設データベースの開発⁵⁾など多種多様な研究が行われている。

本研究の目的は、博多湾における各種観測調査から得られたデータをもとに地理情報システム (GIS) を用いて、沿岸域における自然環境データベースの構築を行い、環境変化の実態を明らかにすることである。それにより、これまで蓄積され

てきたデータを効率的に管理・使用していくことが可能となり、多様な分析や時空間的解析によってさらに詳しいデータ解析が可能となる。

2. 調査地域と研究の方法

2.1 調査地域とその概要

対象とした沿岸域は、福岡県北西部にある博多湾である。博多湾は東西に約 20km、南北に約 10km、面積約 134km² に対して湾口幅は 7.7km で湾口部が狭いため閉鎖性が高く、湾内の波は湾外の玄界灘と比較すると穏やかである。水深は平均 10m、最大水深 23m、大潮時の潮位差は 2m になる。東部湾奥に和白干潟があり、その前面に総面積 401.3ha の福岡アイランドシティの人工島 (図-1) が建設中である。1994(H6)年に工事が着工し、2001(H13)年に外周護岸がほぼ完成した。

2.2 研究方法

本研究では、GIS を用いて自然環境データベース

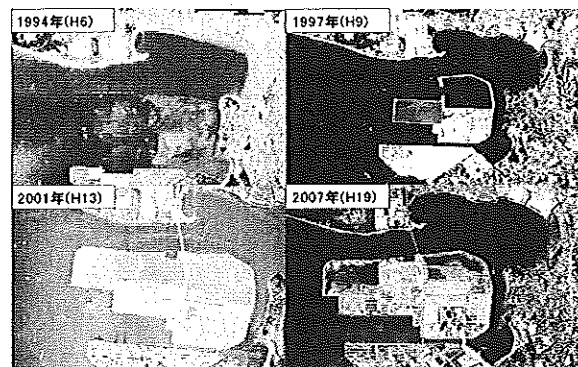


図-1 人工島進捗状況

の構築を行っていく。GISは、地図とデータベースがリンク(連携)され、検索や計算、分析等の処理が容易に行えるシステムである。

GISを用いてデータベース化することによって、

- (1) 大量データの迅速な可視化が可能になる
- (2) 高度な空間解析手法を容易に導入できる
- (3) 統一的なデータの管理の下で Web 上での公開が可能になる、などの利点が考えられる。

今回作成したデータベースは、図-2に示すように、地図データ、自然環境要素データの3つにより構成されている。地図データは、国土地理院や独自に作成したものをを用いており、自然環境要素データは、表-1^{6),7)}に示すものとした。図-3は、水深および水質、底質測点を示し、湾口部・中央部・湾奥部と3つに区分して、各測点の季節・経年変化を分析した。GISでデータ解析する際に、検索機能を用いて、水質や底質等のデータを整理・加工し、時空間的なデータ解析を行った。

3. 結果と考察

3.1 海域における水質と底質の季節変動

図-4は、測点(H-1)の水質におけるCOD, DO, 全燐(T-P),クロロフィル a の季節変動を表している。1993年から2006年までの各月における平均値を求め、○が上層の平均値、●が下層の平均値を表し、縦直線で各測点の上層,下層の最大値と最小値を表している。CODの上・下層ともに春から夏にかけて値が上昇し、夏で平均値が最大になる。5月から9月の間は、海域水質基準B類型の3mg/Lを上まわっている。DOは、冬からゆるやかに減少し、夏で最低になる。夏になるほど、上層と下層の値の違いが表れる。全燐の上層と下層は、ほぼ同じ値で、春から夏にかけて上昇している。クロロフィル a も上層と下層の平均値は、ほぼ同じで、春から夏にかけて上昇している。

図-5は、測点(T-1~T-7)の底質におけるCOD, 硫化物の季節変動を表している。1993年から2001年までの夏と冬における平均値を求め、柱形が平均値を表し、縦直線で各測点の最大値と最小値を表している。底質CODに関して多数の測点で、夏より冬に平均値が高くなっているが、測点T-3とT-4は逆に冬の平均値が小さい。湾奥部の干潟に近い測点T-1とT-2では、他の測点に比べCODが半分以下と低い値になっている。硫化

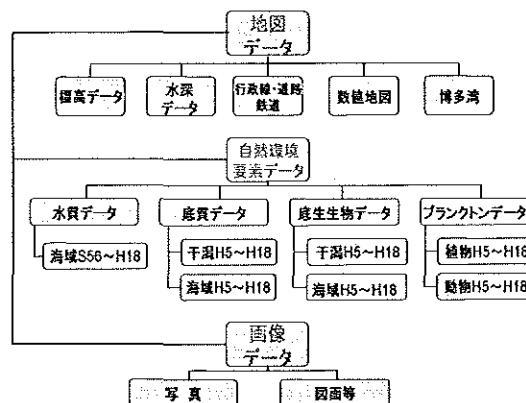


図-2 データベースの構造と内容

表-1 自然環境の調査項目

アイランドシティ整備事業環境監視結果 ⁶⁾ ・環境GIS ⁷⁾ 福岡市港湾局・環境省		
年度	水質(W-1~W-7, H-1~H-7)	(E-2, E-6, C-1, C-4, C-10, W-3, W-6, W-7)
1981(S56) ↓ 2006(H18)	(1)COD (2)DO (3)T-N (4)T-P (5)塩化物イオン (6)クロロフィルa (7)水温 (8)pH (9)透明度 (10)濁度 (11)SS (12)VSS	(13)TN-TP (14)POM-P (15)DIN (16)DON-OP (17)NO3-N (18)NO2-N (19)NH4-N
年度	底質(T-1~T-7)	底生生物(T-1~T-7)
1993(G6)~ 2006(G18)	(1)COD (2)硫化物 (3)強熱減量 (4)粘度(粘土,シルト,砂,礫)	(1)種数 (2)個体数
年度	植物プランクトン(P-1~P-5)	動物プランクトン(P-1~P-5)
1993(G6)~ 2006(G18)	(1)種数 (2)個体数	(1)種数 (2)個体数

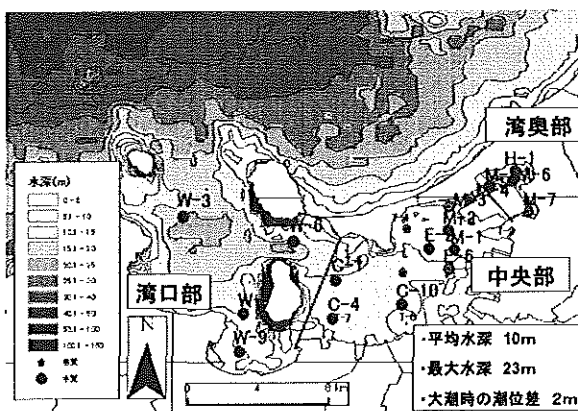


図-3 海域部の水深と水質、底質測点

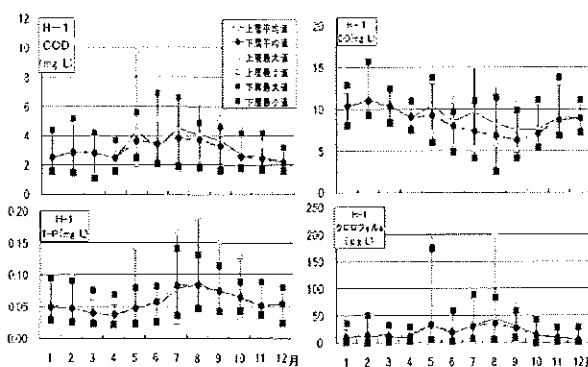


図-4 海域における水質各種の季節変動

物では多数の測点で冬より夏の平均値が高くなっており、特に T-3~T-5 でその傾向が高い。

3.2 海域における水質と底質の経年変化

図-6は、各測点の水質(上層)における COD の経年変化を表している。黒線は測定値を上述した各月の平均値で差引いた差分値、点線が11ヶ月の移動平均、太線が回帰直線を表している。CODの移動平均は、90年代前半に上昇、90年代後半に減少しており、近年はほぼ横ばい傾向になっている。調査期間全体を見ると、ほとんどの測点でやや減少傾向が見られる。紙面の関係上、図は示せないが、DO、T-NもCODと同様な傾向を示している。図-7は、水質 T-P の上層(上図)と下層(下図)となっている。上層、下層ともに全体的に顕著な減少傾向になっている。同様に顕著傾向が見られたのは、濁度の減少と透明度の増大である。つまり海水の濁りが少なくなっていることを示している。また、クロロフィルaも、多くの測点で減少傾向が見られた。これは、リン含有合成洗剤追放と下水処理高度化の効果により湾への T-P 負荷量が減少し、植物プランクトンの栄養が減少したためであると考えられる。これらを総合的にみると博多湾の水質は改善傾向にあると考えられる。

図-8は、各測点の底質における COD の経年変化を表し、黒線が差分値、点線が移動平均、太線が回帰直線を表している。T-1とT-3以外は、

03年で観測が打ち切られ、それ以降のデータはない。T-2とT-3以外のCODは点線の移動平均をみると分かるように、01年ごろまで増加傾向であったが、近年は減少傾向である。しかし、今回の解析結果だけで判断すると湾中央部などの底質は悪化傾向であると考えられる。T-2とT-3のCODは、98年ごろまで増加し、その後減少に転じている。T-2においては硫化物や強熱減量も同様な傾向を示している。この底質の改善は、97年から05年まで行われたシーブルー事業の覆砂や作濡の効果であると考えられる。

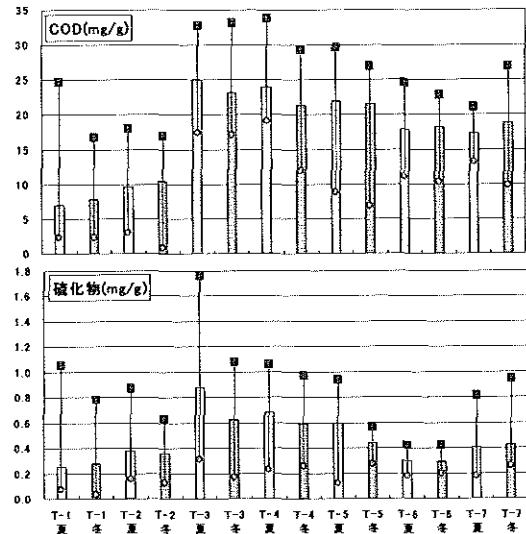


図-5 海域の底質 COD, 硫化物の季節変動

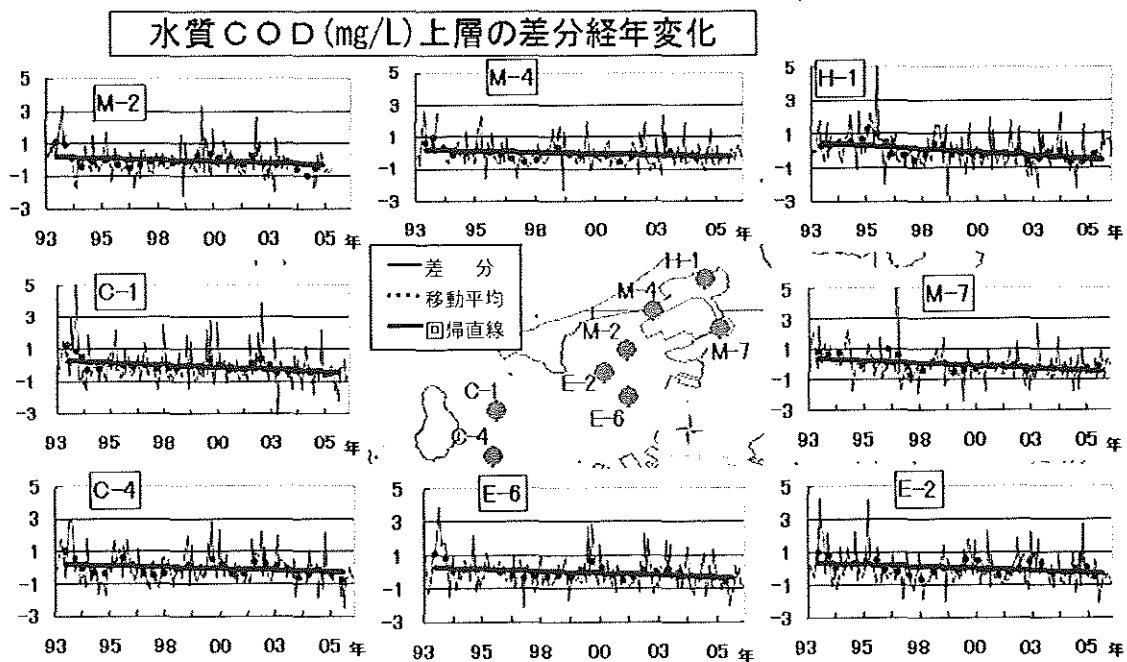


図-6 海域の水質(上層)CODの経年変化

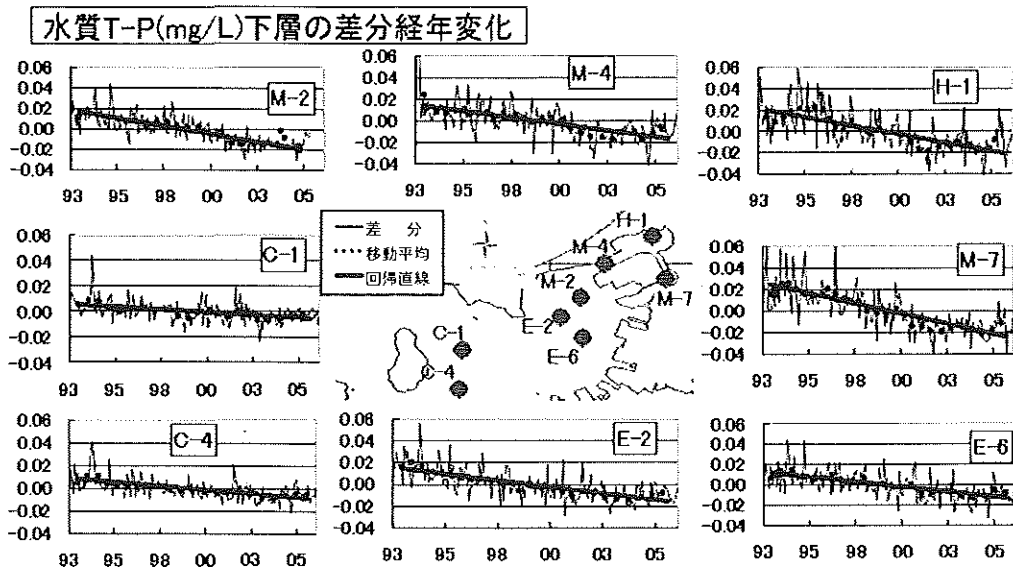
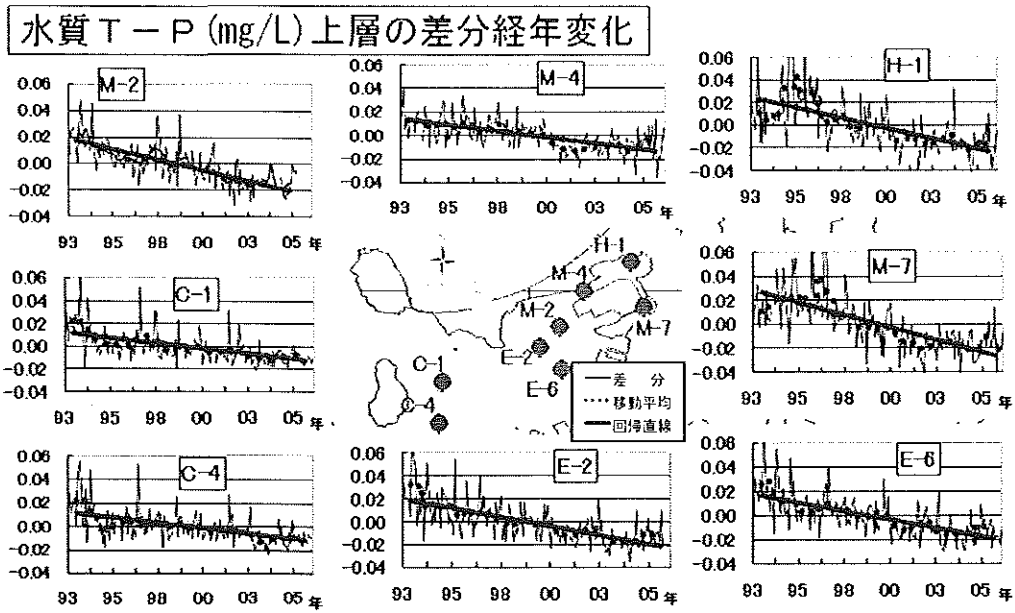


図-7 海域の水質(上層, 下層)T-Pの経年変化

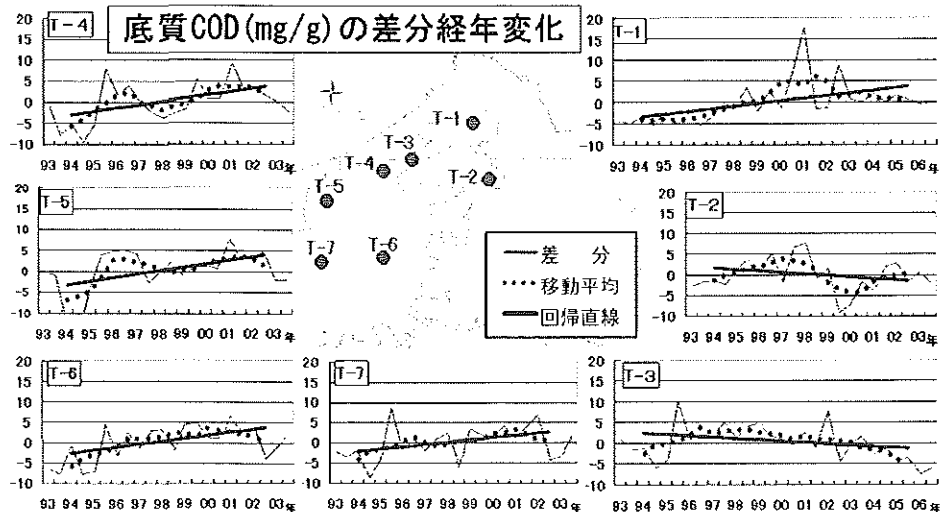


図-8 海域の底質CODの経年変化

3.3 干潟域における底質，底生動物の季節変動

図-9は，和白干潟における低・中・高潮帯の観測点(H-7~H-10)の位置を表している。図-10は，低，中，高潮帯における底質 COD の季節変動を表している。1993年から2006年までの各月における平均値を求め，柱形が平均値を表し，縦直線で各測点の最大値と最小値を表している。低・中潮帯の平均値を見ると，すべての測点で冬より夏の濃度が高くなっている。高潮帯は，H-7で夏に高く，H-8は逆に冬で高く，H-9，H-10はほぼ同じ結果となった。

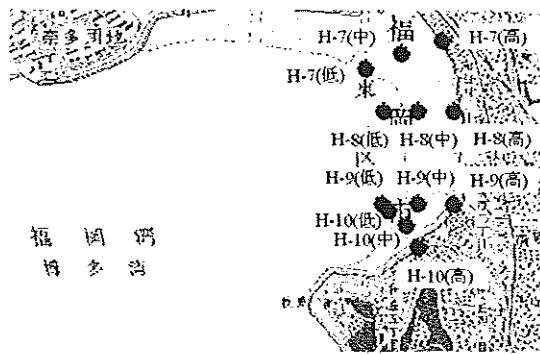


図-9 干潟の観測点の位置(H-7~H-10)

図-11は，同様に底生動物(種類数)の季節変動を表している。低，中潮帯の多くの測点の平均値は春から夏・秋にかけて種類数が減少して，冬に若干上昇している。高潮帯は，冬に種類数が少なく，春に多い傾向がある。

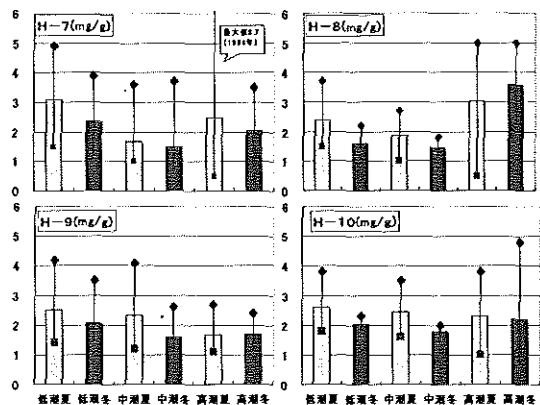


図-10 和白干潟の底質 COD の季節変動

3.4 干潟域における底質，底生動物の経年変化

図-12は，和白干潟の中潮帯における底質 COD(左図)と底生動物種類数(右図)の経年変化を表している。黒線は測定値を上述した各月の平均値で差引いた差分値，点線が移動平均，太線が回帰直線を表している。底質 COD の各測点は，1993年から2000年にかけて同期的に増減を繰り返し，H-10以外は緩やかに減少している。底生動物の種類数も同期的に増減をしながら，H-10以外は増加傾向が見られる。

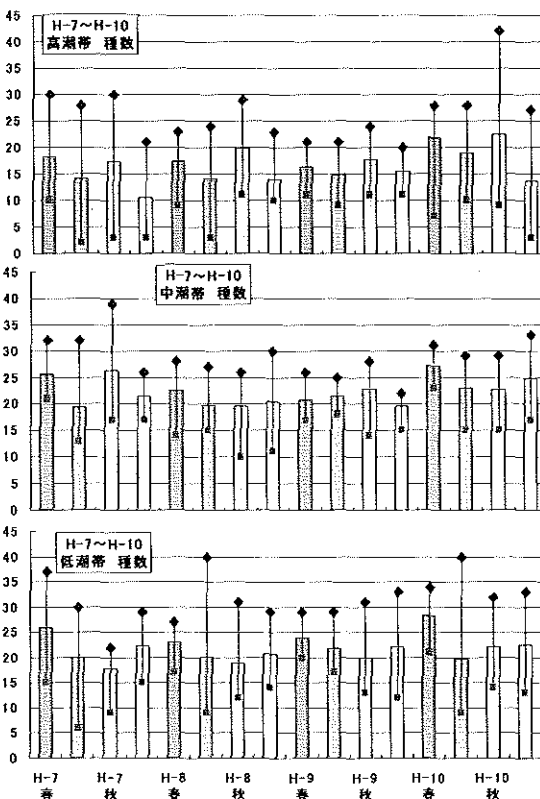


図-11 和白干潟の底生動物(種類数)の季節変動

3.5 干潟域における底質 COD の平面分布

図-13は，底質 COD の1999年の夏(上図)，冬(下図)の平面分布図を示す。大まかにみると干潟の沖の方が高く，陸に近い方が低い傾向にあるのがよくわかるが，冬の場合は干潟北側の高潮帯で濃度が高くなっている。また，最も沖合のH-6低潮帯は年間を通じて高い値を示している。H-6測線上でCODが高くなる要因は今のところ不明である。

4. まとめ

博多湾を対象として，GISを用いたデータベースを構築した。それを利用することで時空間的な解析が容易にできることが確認できた。解析結果から以下のことが明らかになった。

- (1) 博多湾中央部と湾奥部の水質は，人工島の建設以降，改善の傾向を示し，特に下水処理高度化等の効果による全磷の顕著な減少傾向，それに伴うクロロフィルaの減少および透明度と濁度の改善が見られる。人

工島建設による影響よりも、流入河川の水質改善効果が顕著に表れていると考えられる。

- (2) 海域の底質の各要素は、増加傾向であったが、近年減少傾向に転じた。湾奥部(T-2)の底質は、シーブルー事業の覆砂や作濡によって98年ごろから改善された。
- (3) 和白干潟の底質において、CODと硫化物は1993年から2000年にかけて周期的に増減を繰り返しているが、H-10以外はゆるやかな減少傾向である。逆に、底生動物の種類数は増加傾向が見られる。このことから、干潟域においても、調査期間内では人工島建設による自然環境への悪影響は見られない。現在、一部の調査で観測が打ち切られた測点があるが、今後の博多湾の自然環境を把握するために継続的な調査が必要であると考えられることから、観測が再開されること節に願う。

謝辞

貴重な資料を快く提供してくれた福岡市に心からの感謝の意を表す。本研究は、科学研究費基盤研究(C)(No.19560520, 研究代表者:小島治幸)の助成を受けたことを付記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 矢野真一郎, 田井明, 宮下祥子, 斎田倫範: GISを用いた有明海水環境データベースの構築と環境変化の一考察, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.537-542, 2007
- 2) 原喜則, 小島治幸, 野曙光: 北九州空港島周辺の沿岸環境データベース(GIS)を用いた環境変化に関する一考察, 九州共立大学総合研究所紀要, 第1号, pp.79~84, 2008
- 3) 原喜則, 小島治幸, 野曙光: 北九州空港島周辺の沿岸環境データベースを用いた自然環境評価に関する一考察, 日本沿岸域学会論文集, 印刷中
- 4) 土持章, 小島治幸: 周防灘沿岸域における海面上昇による浸水ポテンシャルの推算, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.677-682, 2004
- 5) 見上敏文, 小宮山佳世, 小玉篤, 加藤隆, 渡邊敏人: GISを利用した海岸保全施設データベースの開発, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.51-56, 2007
- 6) 福岡市港湾局: アイランドシティ整備事業環

境監視結果 (1993~2006)

7) 環境省: <http://www-gis.nies.go.jp/>

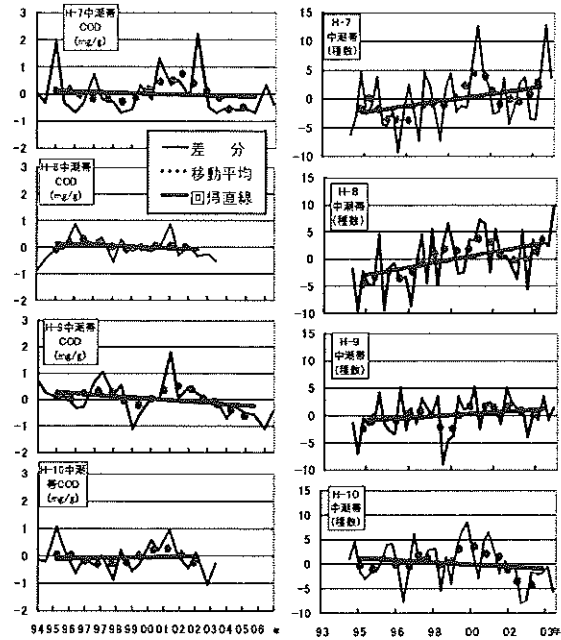


図-12 干潟における底質, 底生動物の経年変化

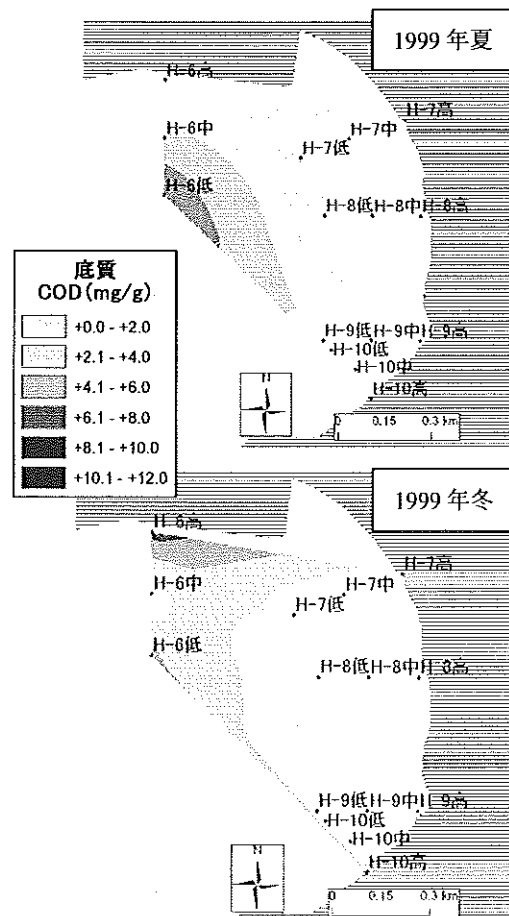


図-13 干潟における底質 COD の平面分布

側方移動を発生した軟弱粘土地盤および橋台基礎の変形特性について

荒巻真二* 山田益司** 烏野清*** 前田良刀*** 狩山裕***

*西日本高速道路エンジニアリング九州(株) ** (社)九州建設技術管理協会 ***九州共立大学工学部

The deformation characteristics of soft clay ground and abutment foundation subjected to lateral movement

Shinji Aramaki, Masuji Yamada, Kiyoshi Uno, Yoshito Maeda and Hiroshi Kariyama

Abstract

In this study, the long-term deformation of soft clay ground subjected to lateral movement caused by filled-soil behind a bridge abutment is investigated, and its influence on pile foundation for abutment is examined. First, the amount of lateral flow in soft clay ground is computed by an effective stress analysis. Using the obtained result, then, the influence of flow on the pile foundation for abutment is presented through a response displacement method. Finally, the relation between lateral displacement of pile head and the I-value is discussed.

Keywords: Soft ground, effective stress analysis, response displacement method, bridge abutment

1. はじめに

軟弱地盤上に建設された橋台は、背後の盛土荷重によって地盤が変形し前方（橋梁上部構造側）へ押され傾斜する（現在ではこの現象を側方移動と呼称）ことが古くから知られており F 値（旧日本道路公団）及び I 値（旧土木研究所）による判断のもと設計が行われてきた。近年、側方移動に伴う橋台支承部の損傷・破壊、伸縮継ぎ手の損傷・破壊、橋台パラペットの破損・破壊あるいは橋台の接触による上部構造の変形・損傷・破壊などが報告され、補修工事に莫大な経費を注ぎ込んでいる。一方、側方移動を生じた場合、橋梁は土圧を受ける橋台により拘束されることになるため耐震性が向上するというプラス面も指摘されている。

本研究では、側方移動が発生する軟弱粘土地盤において、長期的な地盤の変形挙動を把握し、それが橋台にどのような影響を与えるか検討を行なった。

図-1に解析対象を示す。橋台高は5.0m、フーチング幅は4.0m×12.0mである。杭基礎は鋼管杭（ $\phi 800\text{mm}$, $t=12\text{mm}$, $n=12$ 本）である。地層構成は地表面から Ac、As、支持層の水平な3層から構成される。この内、Ac層の層厚(D)をパラメータとし、5m、10m、15mの3ケースで検討を行なった。

解析手順はまず、地盤だけの有効応力解析を行ない、地盤の流動量を算出する。その後、応答変位法により基礎の影響について検討する。

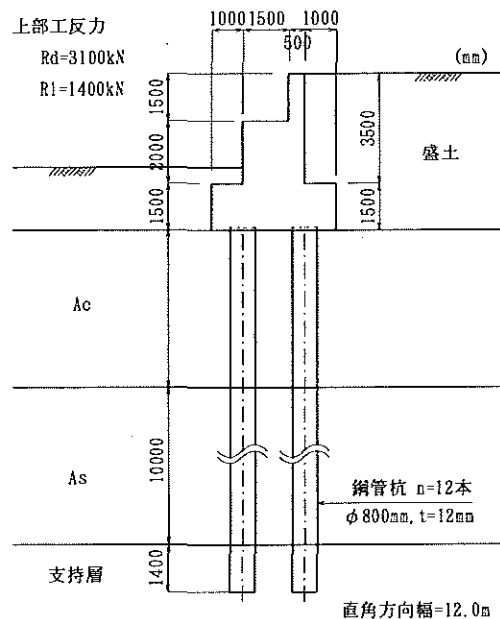


図-1 解析対象

2. 有効応力解析による流動量の算出

2.1 解析モデル

図-2に解析モデルの一例としてD=10mの場合を示す。また、地盤定数は表-1に示す。

地盤は盛土、Ac、Asをモデル化した。X方向幅は側方境界の影響を受けないように橋台位置より前面方向に58.0m、背面方向100mとした。橋台は単純なL型形状と、橋台と地盤との接触面にはジョイント要素を配置し、また単位体積重量 $\gamma=0\text{kN/m}^3$ として橋台の影響が無いようにした。拘束条件は、底面節点はXY方向とも固定、

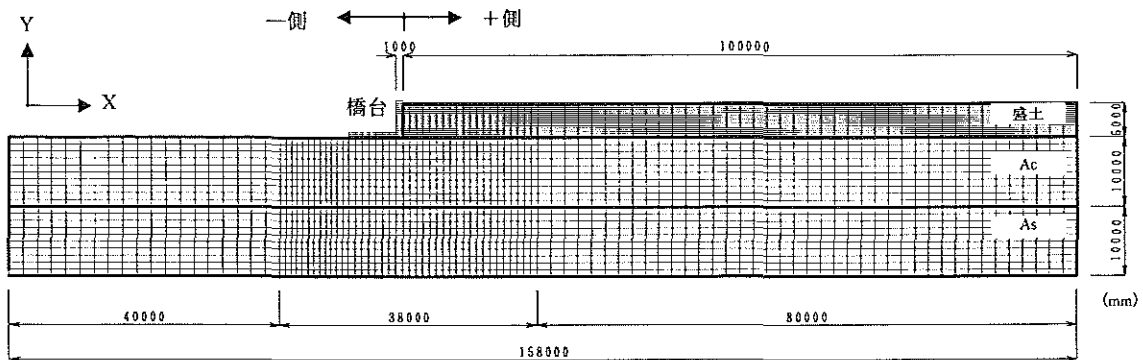


図-2 解析モデル

表-1 地盤定数一覧

	弾性係数	ポアソン比	単位体積重量	粘着力	せん断抵抗角	破壊応力比	初期地盤土圧係数	透水係数	圧縮指数	膨潤指数	基準間隙比
	G (kN/m ²)	ν	γt (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (度)	M	Ki	Kx (m/day)	Cc	Cs	eo
盛土	5380	0.3	19.00	10	35	—	0.5	0.864	—	—	—
Ac	564	0.33	15.0	—	—	1.4180	0.5	0.0000864	1.0	0.1	2.5
As	2700	0.3	20.0	0	30	—	0.5	—	—	—	—
橋台	8974359	0.17	0.01	12000	0	—	0.5	—	—	—	—

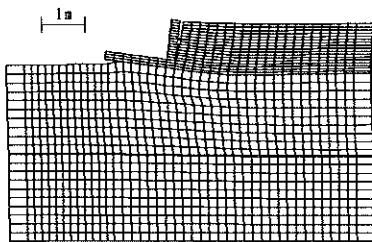


図-3 変形図 (102日)

側面節点はY方向を固定とした。排水条件としては、底面、地表面および盛土部分の節点は排水、その他の節点は非排水とした。

Ac層の土の応力-ひずみ関係は $e \sim \log P$ 非線形弾性モデル、その他は弾性モデルとした。解析では全施工過程を盛土施工と放置期間の2段階とした。また、盛土施工速度は5cm/dとし、解析上は盛土要素の単位体積重量が時間に対して直線的に増加するようにしている。解析ソフトはALIDC (ALID研究会)を使用した。

2. 2 解析結果 (D=10mの場合)

図-3に盛土施工完了時点(102日後)での橋台周辺地盤の変形状況を示す。変形が明確に分かるように変形量を5倍にして図化した。橋台が背面側に倒れ込む形で変形していることが分かる。

図-4は地表面の沈下量の経時変化を示したものである。橋台からの距離は前面方向を“-”、

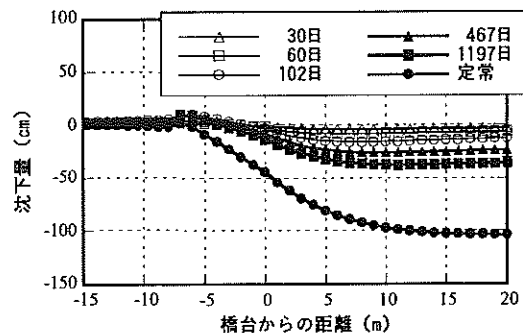


図-4 地表面沈下量の経時変化

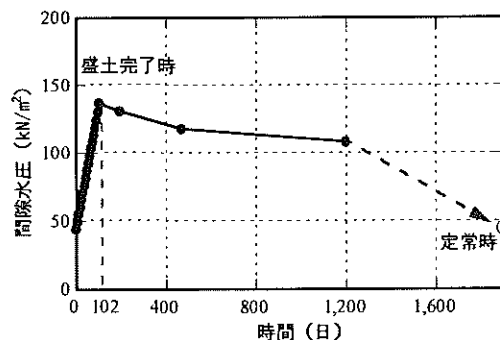


図-5 間隙水圧の経時変化

背面方向を“+”として表した。盛土荷重の影響範囲は前面方向では8m程度である。橋台から+15m位置において、盛土完成時(102日後)で約13cmの沈下が生じている。放置時間が長くなるに従って沈下量も増え、定常時には約103cm

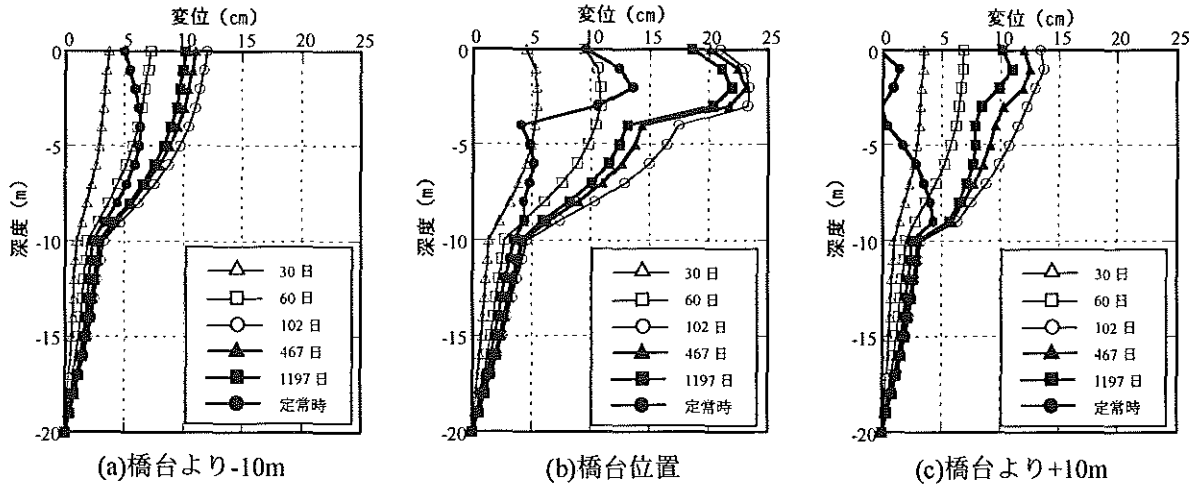


図-6 水平変位の深度分布

の沈下量となる。

図-5は盛土+10m位置の深度5mのAc層における間隙水圧の経時変化を示したものである。間隙水圧は盛土の盛り立てに伴って次第に大きくなり、盛土完成時(102日)に最大となる。その後放置期間の経過に伴って次第に小さくなり、定常時には完全に消散している。

図-6に水平変位の深度分布を示す。橋台から-10m位置では、地表面に近づくに従って水平変位は大きくなる分布形状となる。一方、橋台位置では、背面盛土の影響によりAc層の上部4m範囲で大きくなる。また、図から分かるように間隙水圧が最大となる盛土完了時に水平変位は最大値となり、間隙水圧の消散に伴って水平変位は減少する。定常時には最大時の約1/2の変位が残る。

これまで、D=10mのケースについて述べてきたが、D=5m、D=15mの場合についても同様の傾向を示している。

3. 応答変位法による橋台基礎の検討

3.1 解析モデル

応答変位法では、基礎に作用させる流動力は地盤流動量 δ_g を地盤バネ k を介して基礎に作用させ、地盤と基礎の相対変位($\delta_g - \delta_p$)に相当する流動力を作用させる解析法である。

図-7に解析モデルを示す。杭基礎を多質点骨組みでモデル化し、各節点は杭軸直角方向の地盤バネによって支持されている。ここで、地盤の最大流動量の発生時は盛土完了時であるため、地盤強度は表-1に示している初期値を用いた。

図-8に有効応力法で算出した地盤流動の深

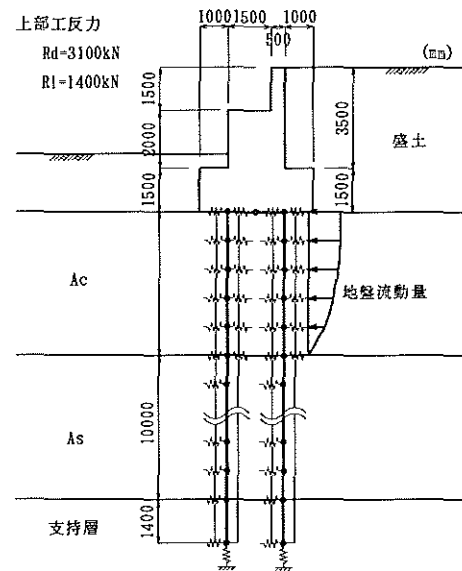


図-7 解析モデル

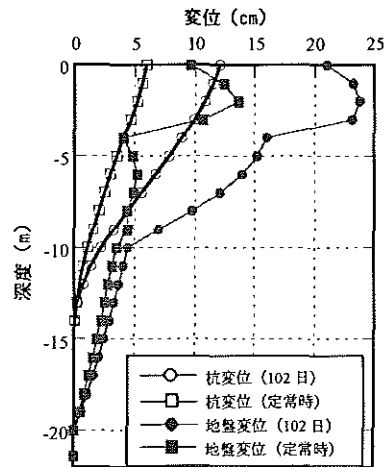


図-8 変位深度分布

度分布を示す。作用させる外力は「常時(死荷重+常時土圧+活荷重)+流動力」とした。

表-2 検討結果一覧

			常時			常時+流動量(102日)		
			D=5m	D=10m	D=15m	D=5m	D=10m	D=15m
杭長	L	m	16.4	21.4	26.4	16.4	21.4	26.4
特性値	1/β	m	6.02	6.94	6.94	6.02	6.94	6.94
最大地盤変位	δ _G	mm	—	—	—	181.0	238.0	322.0
杭頭変位	δ	mm	10	15	15	76.4	121.0	156.6
曲げモーメント	M	kNm	197.6	224.8	221.2	1135.1	766.3	621.6
杭反力	P _{max}	kN	853	880	877	1784	1416	1271
	P _{min}	kN	617	589	593	314	54	199
許容支持力	P _{amax}	kN	1267	1392	1518	1267	1392	1518
	P _{amin}	kN	-131	-194	-256	-131	-194	-256
応力度	σ _{smax}	N/mm ²	52	69	68	257	181	151
許容応力度	σ _{sa}	N/mm ²	180	180	180	180	180	180

3. 2 検討結果

表-2に基礎の検討結果を示す。表中の着色部は支持力、応力度の許容値を満足していない箇所を示している。流動量の影響により“常時+活荷重”に対して、D=5mでは、杭反力は5.7倍、曲げモーメントで2.1倍大きくなっている。D=15mでは杭反力は2.8倍、曲げモーメントで1.4倍になっている。軟弱層厚が薄くなるに従って地盤の変位量は小さくなるが、杭体の断面力への影響は大きくなる。

橋台部における側方移動の可能性を判定する基準I値は下記式より算出される。

$$I = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \frac{\gamma \cdot h}{c}$$

μ₁: 軟弱層厚に関する補正係数 (= D / L)
 μ₂: 基礎の抵抗幅に関する補正係数 (= b / B)
 μ₃: 橋台の長さに関する補正係数 (= D / A)
 γ: 盛土材料の単位重量(kN/m³), H: 盛土高(m),
 c: 軟弱層の粘着力の平均値(kN/m²), D: 軟弱層の厚さ(m), A: 橋台長(m), B: 橋台幅(m), b: 基礎根入れ幅の総和(m), L: 基礎根入れ長(m)

図-9に杭頭変位とI値の関係を示す。今回の検討条件での杭頭変位とI値は比例関係にあることが分かる。

I値は、1.2以下では側方移動の可能性は無いとされ、この条件に当てはまるのはD=5mの場合である。ここで遊間150mmと仮定し、橋台変位=杭頭変位(76mm)と考えれば、変位面では問題は無いと判断される。しかし、表-2に示したように支持力、応力は許容値を越えている。

4. まとめ

側方移動が発生する軟弱粘土地盤において、長期的な地盤の変形挙動を把握し、橋台への影

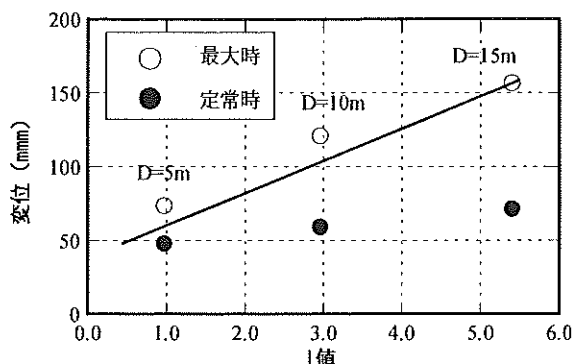


図-9 杭頭変位とI値の関係

響について検討を行なった。その結果、地盤流動量は間隙水圧が最大となる盛土完了時に最大値となり、間隙水圧の消散に伴って水平変位は減少することが分かった。また、今回の条件では側方移動の可能性を判定する基準I値と杭頭変位とは比例関係にあり、1.2以下でも側方移動の影響が大きい場合もあった。

参考文献

- [1]. 軟弱地盤の側方変形予測に関する研究, (財) 高速道路調査会, 1989.3
- [2]. 軟弱地盤上の橋台基礎に関する調査研究報告書, (財) 高速道路調査会, 1979.2
- [3]. 軟弱地盤上の橋台基礎に関する調査研究報告書(その2), (財) 高速道路調査会, 1980.3
- [4]. 軟弱地盤上の橋台基礎に関する調査研究報告書(その3), (財) 高速道路調査会, 1981.3
- [5]. 橋台の側方移動に関する研究, 土木研究所試料第1804号, 1981.12

生石灰を用いた環境に優しい廃棄物処理の研究

中村 英嗣 九州共立大学総合研究所、古賀 道生 九州産業大学工学部
波多 祐史 シラニックス株式会社

Environmentally Friendly Waste Treatment by Calcium oxide

Hidetsugu Nakamura, Michio Koga and Hiroshi Hata

Environmental friendly industrial waste treatment is studied using calcium oxide which exists in large amount in the earth. The environmental friendly waste treatment by calcium oxide is based on its high reactivity with water to generate a large heat and to form insoluble reaction products if water glass or silicon oxide added to calcium oxide.

The reaction of calcium oxide with water releases a large heat of reaction to form calcium hydroxide. So, the mixture of calcium oxide and an organic substance are added with water, it can be expected that the decomposition of the latter is caused by heat and basic characteristics of reaction products. When calcium oxide, PCB and water were mixed under mixing, this large heat release caused to decompose PCB to the harmless level, and dioxin was also decomposed under same treatment. Moreover, waste water which contains a heavy metal was treated by calcium oxide with water glass, a heavy metal dissolution considerably decreased in its effluent test.

Keyword; Waste treatment, Environmental friendly, Calcium oxide, PCB and

Dioxin destruction, Heavy metal removal

廃棄物処理, 低環境負荷, 生石灰, PCB とダイオキシン除去, 重金属除去

1. 緒言

酸化カルシウム(生石灰、CaO)は、水と反応させることにより水酸化カルシウムを生成し、その生成過程で多量の熱を発生する性質を持っている。数年前からダイオキシンや PCB は、人体に影響がある物質として注目されていた。ダイオキシンは、物質の不完全燃焼によって生成され、処理方法としては、高温で完全焼却する方法しかなかった。しかし、この方法ではコストが非常に高かると考えられ低コストに抑えるような処理方法を確立する必要がある。よって酸化カルシウムの性質を利用することでし尿、下水汚濁、食品廃棄物、油脂汚濁、その他の産業廃棄物を処理できる可能性を有する。本実験では、酸化カルシウムを用いた環境負荷の少ない廃棄物処理法を確立するため、有機性および無機性の廃棄物の酸化カルシウム処理について検討した。

2 酸化カルシウムによる廃棄物処理の原理

2.1 酸化カルシウム(生石灰)と水の反応

酸化カルシウムは自身は塩基性で、水と反応して多量の熱を発生する性質を持つ。この高塩基性と発熱性が廃棄物処理に利用できる。また、酸化カルシウムは空気中の水分を吸収して反応するので、粒状化した粉末を特殊油脂でコーティングすると、適度な反応速度を持ち、さらに長期保存も可能でできる。このようにして調整

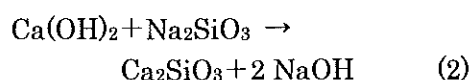
した酸化カルシウムを水分を含ませた処理対象物に添加し、攪拌・混合させると、酸化カルシウムと水が反応して次の(1)式の反応が起こり、消石灰(Ca(OH)₂)を生成し、多量の熱を発生する。



発熱して温度が上昇すれば、表面のコーティング皮膜は一段と破れやすくなり、発熱量は加速度的に増大し、温度は上昇する。この反応熱で処理対象物中の有機物を熱分解する。水和反応の発熱量および温度上昇は、シラニックスと水の量および混合比率による。例として、酸化カルシウム 50g と水 50g を 200ml ビーカー中で保温しないで反応させると、最高 200℃程度に到達する。

2.2 水酸化カルシウム(消石灰)とケイ酸ナトリウム(水ガラス、Na₂SiO₃)の反応

上記の反応で生成した水酸化カルシウムは、セメント成分のもう一つの成分であるケイ酸ナトリウムと次の式で反応して、ケイ酸カルシウム(Ca₂SiO₃)を生成する。



一般的に、Na⁺や K⁺の一価の金属イオンのケイ酸塩は水溶性であるが、Ca²⁺や Mg²⁺の二価の金属イオンのケイ酸塩は不溶性で、沈殿を生じる。このような条件で生成したケイ酸カルシウムは 1g 当たり 600m²の比表面積を持った

めに、活性炭やシリカゲルのように大きな吸着効果があり、臭気性物質の臭気抑制効果が期待できる。水酸化カルシウムは嫌気発酵における硫酸塩還元菌の増殖を阻害する。これとアンモニウムイオン補足剤とケイ酸ナトリウム等の効果で、硫化水素やメルカプタン等の臭気の生成を防止する。処理後のpHは12.5~13.0となる。

2.3 重金属イオンとケイ酸ナトリウムとの反応

環境中へ排出が規制される金属はほとんどが二価以上の重金属イオンである。処理対象物に二価以上の重金属イオンが含まれている場合は、次の(3)式(金属イオンが二価の場合)によりケイ酸ナトリウムとの反応が起こり、不溶性の重金属のケイ酸塩の沈殿を生じる。

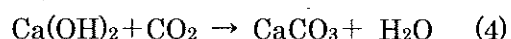


従って、酸化カルシウムと処理対象物を反応させた場合には、多量の水酸化カルシウムと少量の重金属のケイ酸塩が生成する。この第三の反応により重金属イオンの溶出が抑制される。水酸化カルシウム、ケイ酸質および水が共存するとセメント化反応(ポゾラン反応)により硬化し、処理物を固化する。

多量に生成した水酸化カルシウムや重金属のケイ酸塩は不溶性である。処理残留物の主成分の水酸化カルシウムは、長時間の放置では炭酸ガスと反応して鉱物成分の一種である難溶性の炭酸カルシウムを生成し、固形化する。このため長期に亘る土質保持効果が期待できる。処理残留物はカルシウムイオンのために塩基性であるが、処理直後のpH13.0程度から徐々に中和され、中性へと変化する。

2.4 重金属の溶出しない理由

処理対象物をシリカ処理した場合の反応は、以上の(1)~(3)式の反応が同時に進行していると考えてよい。生成する水酸化カルシウムや重金属のケイ酸塩は不溶性であり、処理生成物から重金属が溶出することはない。また、主生成物である水酸化カルシウムは、土中の炭酸や二酸化炭素と(4)式の反応により炭酸塩化し、鉱物化する。このため炭酸カルシウム化が進むにつれ固結化が促進され、処理対象物が安定化される。



処理後の残留物は、放置中には表面では炭酸化により炭酸カルシウム層が生成する。その内部は、水分、汚泥分解性生物、重金属ケイ酸塩

などが消石灰に融合された形になる。表面の炭酸カルシウム層が疎水性を有するために、溶出防止の皮膜として作用する。メチルメルカプタン、トリメチルアミン、硫化水素などの酸性の臭気物質は中和されるために脱臭される。アンモニアなどのアルカリ性の臭気物質は初期の処理中に消失する。

3 実験

3.1 試料

酸化カルシウム(CaO)は、和光純薬(株)製(以下、サンプル1と略記)とシラニックス(株)製工業品(以下、サンプル2)を用いた。サンプル2は、水との反応の速度を調整するために酸化カルシウムの表面を有機物で表面処理されている。その他の試薬は市販試薬を用いた。

酸化カルシウムと水の2成分系では、サンプル1-H₂O、サンプル2-H₂Oを75:25(wt%)で混合した。3成分系では、サンプル2-H₂O-*o*-クロロフェノール、サンプル2-H₂O-ジフェニルエーテル、サンプル2-H₂O-ビフェニルを60:20:20(wt%)で混合した。

3.2 実験方法

(1) 示差走査熱分析は、理学電機(株)製の示差走査熱量分析装置(TAS-200)を用い、SUS製密封容器を用いて、2成分測定時は、試料量9mg、H₂O 3mg、空気雰囲気下、昇温速度10°C/min.で600°Cまで加熱した。3成分測定時は、試料量3mg、H₂O 1mg、ダイオキシンモデル物質1mg、空気雰囲気下、昇温速度10°C/min.で600°Cまで加熱し測定を行った。

(2) 反応発熱量測定は、東京理工(株)製マルチマイクロカロリーメーターMMC-5112-Iを用い、恒温槽温度25°C、攪拌子回転速度112rpm、測定範囲0.5mV、測定時間3時間で試料量CaO 0.1g、H₂O 20mgで発熱量を測定した。

(3) ダイオキシンやPCBの定性・定量分析は、日本電子(株)製ガスクロマトグラフ質量分析装置SX-102Aを用い、厚生省環境整備課より示された「廃棄物処理におけるダイオキシン類標準測定分析マニュアル」を基にしてダイオキシン類の定性・定量分析を行った。

4 結果及び考察

4.1 CaO-H₂O系の反応

酸化カルシウム-H₂O系の熱分析の結果を

Fig.1に示す。サンプル2の熱分析の結果より、35℃付近からCa(OH)₂生成による発熱反応、480℃付近からCa(OH)₂の分解による吸熱反応が起きる。

Table1.Heat of reaction of CaO with H₂O

水量(ml)	発熱量(J/g)	
	サンプル1	サンプル2
20	1141	970

酸化カルシウム・H₂O系の発熱量の測定結果をTable 1に示す。反応発熱量の測定結果より、サンプル2の発熱量がサンプル1に比べ小さいのは、CaOの表面を有機物でコーティングしているためだと考えられる。また、Ca(OH)₂の生成過程は(1)式で、CaO+H₂O=Ca(OH)₂+65kJ (15.2Kcal)であり、CaOの1gあたりの発熱量は、1135Jであるため、理論値とほぼ一致した。

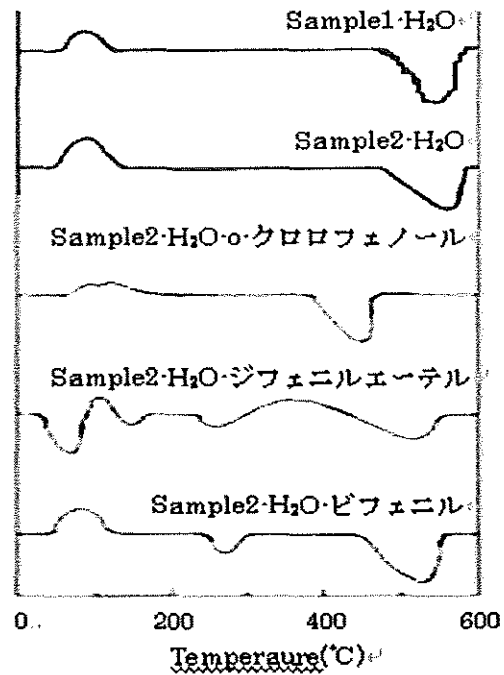


Fig.1 SC-DSC curves of CaO/H₂O

Table 2 Dioxin destruction by CaO and H₂O treatment

		Before treatment (Dioxin containing ash)	After treatment (Dioxin containing ash)	After treatment (Wash out solution of ash after treatment)
Measured concentration(ng/g(dry waste))				
Dioxin	T4CDDs	11	7.3	0.0073
	P5CDDs	53	23	0.0094
	H6CDDs	210	77	0.011
	H7CDDs	500	190	0.02
	O8CDDs	1800	440	0.051
	Total PCDDs	2600	740	0.099

4.2 CaOによるダイオキシン類及びPCBの分解処理

ダイオキシン類を酸化カルシウムで分解処理した結果をTable 3に示す。ダイオキシン類の試料を処理する前には、ダイオキシン類濃度が3700ng/gであったが、サンプル2を用いて処理した後では、1100ng/gまで減少していた。また、処理した試料の溶出試験では、0.32ng/gまでダイオキシン類濃度は減少した。サンプル2はダイオキシン類を一部分解し、処理後の試料は不溶化することができる。

Table 3 Dioxin destruction by CaO-H₂O

	処理前	処理後 (灰類)	溶出試験 (水類)
実測濃度 (ng/g)	3700	1100	0.39

CaO-H₂O・モデル廃棄物混合物の熱分析の結果の一例をFig.1に示す。PCBのモデル物質3

成分系のピフェニルは、50℃付近で $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ の発熱反応が、270℃および 450℃付近で吸熱反応が認められた。反応終了後の試料中の塩素量は反応前の量と変化なかった。従って、ダイオキシン類の酸化カルシウムによる処理では、ダイオキシン類は分解して塩素を含む化合物に変化すると推定される。

Table 2 に、焼却炉から生じた飛灰中の PCB を酸化カルシウムによる処理の結果を示す。試料を処理する前には、全ダイオキシン類濃度が 2600ng/g であったが、サンプル 2 を用いて処理した後では、740ng/g まで減少していた。また、処理した試料の溶出試験では、0.099ng/g までダイオキシン類の溶出濃度は減少した。

4.3 CaO による重金属含有む廃棄物の処理

重金属を含む固形物のモデル廃棄物混合物 100g に、酸化カルシウム 50g、水 50g、酸化ケイ素 25g を添加して処理し、処理後の生成物の溶出試験の結果を Table 4 に示す。処理後の溶出量は著しく減少した。

Table 4 Elusion test of waste containing heavy metals after CaO treatment

Metal	Initial amount	Amount eluted
Hg ;	20.0 mg/kg(sol.)	2.0 mg/kg (sol.)
Pb ;	29200 mg/kg(sol.)	974 mg/kg (sol.)
Cr ;	74.0 mg/kg(sol.)	0.5 mg/kg (sol.)

5 結言

酸化カルシウムは、水と反応させることにより、多量の熱を発生する。このため酸化カルシウムとダイオキシン類や PCB 類と混ぜて水を加えて処理することによりダイオキシン類等を一部分解し、不溶化することが確認された。重金属を含む固形物のモデル廃棄物混合物に、酸化カルシウム、水 50g 及び酸化ケイ素を添加して処理し、処理後の生成物の溶出試験では重金属の溶出量は著しく減少した。従って、酸化カルシウムおよび水による処理は有機性や無機性の有害物を含む土壌や廃棄物の無害化に効果があると確認された。

洞海湾に自生する絶滅危惧植物の調査保護活動

共著：成富 勝、安田 繁、亀田 伸裕
九州共立大学工学部 環境サイエンス学科

Work on the investigation and protection of the endangered plant in the Gulf of DOKAI

Authors : Masaru NARITOMI, Shigeru YASUDA, Nobuhiro KAMEDA
Kyushu-Kyoritsu University Department of Regional Environment Engineering

Abstract : In the cleaning activity of the Gulf of DOKAI, which went in November 2004, an endangered plant "SHIBANA" was discovered. We participated in maintenance activity such as the cleaning of the tideland where SHIBANA inhabited since SHIBANA discovery positively. We established " TEAM DOKAIWAN of Kyushu-Kyoritsu University" in April 2008. We enlarged the range of the activity in the Gulf of DOKAI whole. We report those results.

Keywords: The Gulf of DOKAI, SHIBANA, endangered plant, cleaning, investigation, education
キーワード：洞海湾、シバナ、絶滅危惧植物、清掃、調査、教育

1. はじめに

2004年11月(平成16年度)、北九州で活動するNPO北九州ビオトープ・ネットワーク研究会が行った洞海湾の清掃活動において、絶滅危惧植物である『シバナ』が発見された。

九州共立大学工学部環境サイエンス学科では、シバナ発見以来、シバナが生育する干潟の清掃等の保全活動に積極的に参加してきた。2008年4月(平成20年度)には『九州共立大学・TEAM 洞海湾』を設立し、シバナに限らず洞海湾全体の植生調査に範囲を広げて、洞海湾に自生する絶滅危惧植物の調査保護活動を行った。

本報では、本学科で行われた洞海湾におけるシバナ保全活動および絶滅危惧植物の調査保護活動について報告する。

2. 洞海湾略歴

洞海湾は北九州市における環境問題のシンボルとしてよく取り上げられている。

1901年の官営製鉄所開業以来、この地では急速な重化学工業の発展と進出によって、洞海湾周辺には多数の工場等が設置され、それらの工場から排出される煤煙や排水によって大気汚染や水質汚濁が進行した結果、北九州市の環境は急速に悪化した。漁業資源が豊富だった洞海湾は1920年代には漁獲量が急速に減少し、1942年にはついに漁獲量は0となり、漁業権を放棄するまでになった。

1950年代、洞海湾に浮かぶ船のプロペラが溶

け落ちるほどに汚染が進み、生物が棲めなくなったことから『死の海』と称されるようになった。これらの公害問題を解決するために市民・企業・行政が一体となって公害対策に取り組み、今では多くの生物が生育できるほどに改善した。

『洞海湾ほど北九州の歴史に密着した海はない』とまで称されるほどであり、その対策については多くのことを学ぶことができる。

本学科ではシバナ保全活動を通じ、洞海湾における汚染と回復の歴史を学ぶと共に、環境問題への関心を高めるべく、実習等にシバナ保全活動等を盛り込んだ。

3. シバナおよびその生育地の様子

シバナは漢字では『塩場菜』とあてて書き、その名のとおり塩性湿地に生育する植物である。



図1 シバナ

地下茎は太くはり、ヒゲ根を出し、葉は緑色の線形をなし、6月～10月ごろに黄味をおびた白色の花をつける。このシバナ群落は、適当に淡水がまざり満潮時には水没し、干潮時には干潟となるような場所で生育する。

分布地域は北海道から九州まで広範囲であるが、生育条件に限られるので瀬戸内海地域では広島県の宮島と兵庫県相生市のみで大変稀少価値のある植物のひとつである。そのほかには山口県の萩市、福岡県北九州市などで確認されている。

図2に、その干潟の場所と、シバナが生育地を示す。

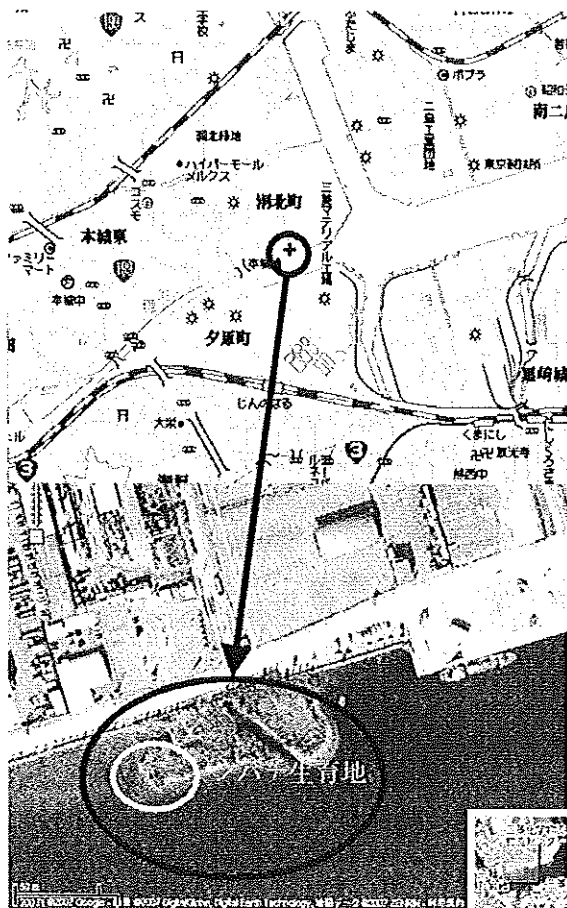


図2 シバナ生育地

シバナの生育が確認されたのは、八幡西区洞北町の本城橋下流側にある干潟である。この干潟の発生については詳しい資料がない。

この地は非常にごつごつとした岩場に、上流部の堀川から流れてきた土砂が堆積したものと思われる。この地は、その岩の形状を見る限り、天然の岩石ではなく、スラグのようである。おそらく、スラグが投棄された物ではないかと推測されるが、その詳細については不明である。

シバナが生育しているのは、上流部に面した干潟の一部であり、全体が生育地になっているわけではない。

図3に清掃活動の様子を示す。

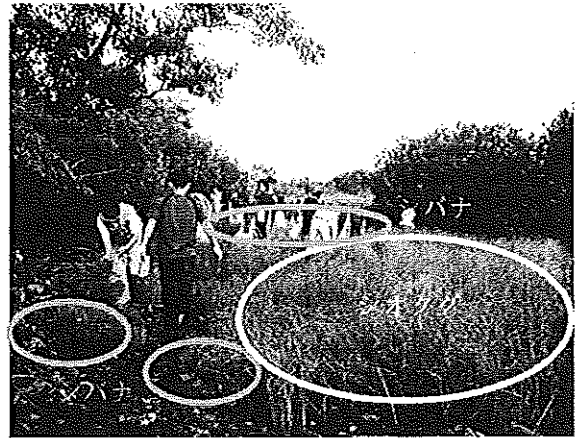


図3 シバナ保全活動の様子(清掃作業)

シバナの生育が確認された干潟は上流部に向かって開けた場所になっている。この立地条件のため、上流部から流れてくるゴミがたまりやすく、そのゴミがシバナの生育に影響を与えていると考えられる。

図4にシバナ生育状況を示す。

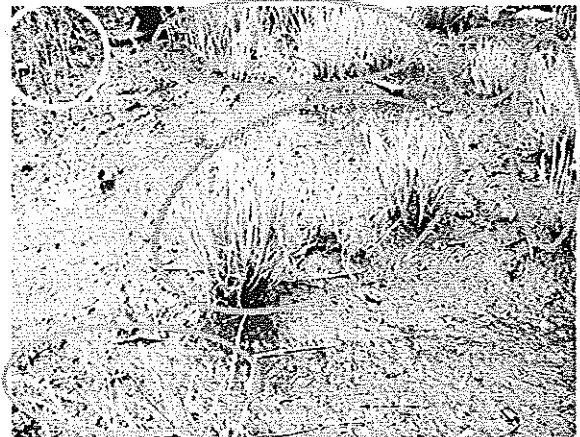


図4 シバナ生育状況

洞海湾の生育地では、図4のように小さな株ごとに分かれて干潟に生育している。これが集まって群落になる場合もあるが、北九州の洞海湾ではまとまった大きな群落は確認されていない。ここではシオクグという植物の周辺部に多く見られ、よく観察しないと見分けにくい。

シバナは波の強い外洋性の海には生育することができず、波の穏やかな内海に育つ。この地で

は、シオクグ群落があったことによって波の影響を避けることが可能となり、波に弱いシバナが根付いたのではないかと考えられる。

4. これまでの取り組み

前述のとおり、2004年11月（平成16年度）に発見され、翌年度の平成17年度以降は、北九州市の『みなとや海辺の活動支援』を受け、シバナ保全活動および調査を行っている。

2005年11月（平成17年度）に第1回の清掃活動が行われた。このとき、テレビ局による取材も行われ、一般市民にも広く知れ渡るきっかけとなった。

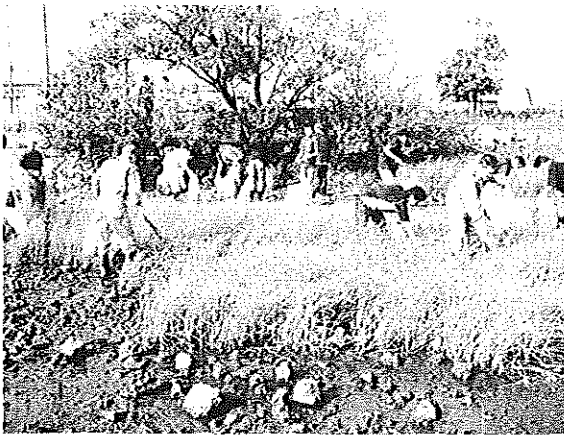


図5 シバナ保全活動（2005年11月）

平成18年度からはシバナの保全活動を環境サイエンス学科の体験型学習科目（環境フィールドワーク）に取り入れて定期的な活動を行うと共に、永続的な保全手法について学生を交えて検討を重ねた。

さらにこの年はシバナの繁殖を目指して移植等の措置も行ったが、このときはうまくいかなかった。

平成18年度の活動においては、新たに洞海湾シンポジウムを開催し、他県でシバナ保全活動をしてられる先生と有益な意見交換を行い、交流を深めた。この洞海湾シンポジウムは以降毎年開催され、H20年度は第3回を開催した。参加者は年々多様化しており、多くの有識者が参加するシンポジウムとなっている。

平成19年度は、シバナ保全活動がさらに市民に広がった年と言える。

定期的な活動以外にも、本学の地元でもある折尾地区のまち美化運動の一環として『堀川まちお

こし実行委員会行』が主催する『堀川いっせい清掃』の最下流部に位置づけられ、10月7日に清掃活動を同日開催した。その様子は翌日の読売新聞に掲載された。



図6 第1回洞海湾シンポジウム



図7 まち美化参加の新聞記事



図8 遠賀高校との活動

11月21日には、遠賀高校が本年度より新設された授業「自然環境基礎」の学習の一環として、洞海湾のシバナの観察および保全活動を行いたいと申し出があり、共に活動を行った。

2月27日には、洞北地区まち美化講演会が近隣の企業に対して行われた。

八幡西区洞北町は企業団地であり、あまり人がないため不法投棄が多い場所である。その現状を見かねた周辺企業が町美化清掃を定期的に行うようになった。また、海岸には希少植物のシバナが生育しているため、本学を中心としたグループが以前から保護活動と清掃を行っていることを知った企業から、「シバナについて知識がないので、海岸清掃のときに傷つけないように教えてほしい。」という声が寄せられた。

これらのグループを環境に対する共通の関心で結びつけ環境保護活動を支援するとともに、洞北地区企業の間にもち美化の連携を作り出す契機とするために開催したものである。

参加者数は18企業34人と盛況であり、洞海湾における美化運動や希少生物保護に対する意識の高さがみられた。

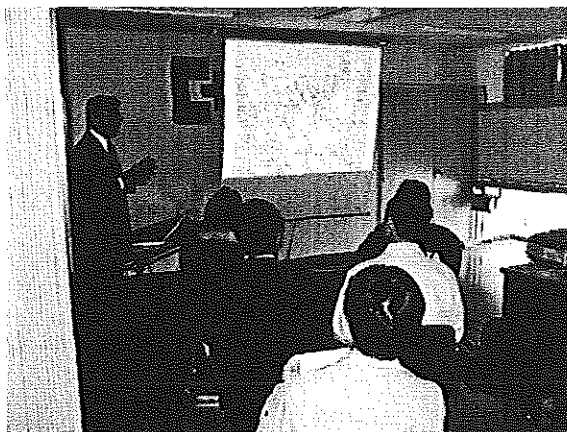


図9 洞北地区まち美化説明会の様子

洞海湾における絶滅危惧植物の保全活動に関する関心の高まりは年々大きくなっている。

平成20年度は、『九州共立大学・TEAM 洞海湾』を立ち上げ、さらなる活動の発展を目指した。

今年度の大きな出来事としては、4年生となった学生が卒業論文のテーマとして洞海湾の環境調査を行ったことである。これまでの授業等の教育によって、環境問題への興味を起こすことができた結果であるといえる。

この研究では、シバナ生育地を測量して3次元解析を行うことで、潮汐とシバナ生育地の関連について考察すると共に、洞海湾全体の植生調査を行った。その結果、シバナの生育環境と周辺の植生についての知識を深めることができた。

さらに、TEAM 洞海湾における独自の研究として、シバナおよびハマボウ（シバナと同じ干潟に生育する湿地性植物で県によっては絶滅危惧

種とされている）の繁殖を行うことを目的とし、冬に種を採種した。一部は早期にバケツでの播種実験を行ったところ、発芽までは順調に経過した。3月にはパレットに播種を行い、ある程度大きくなったら干潟に移植する計画である。

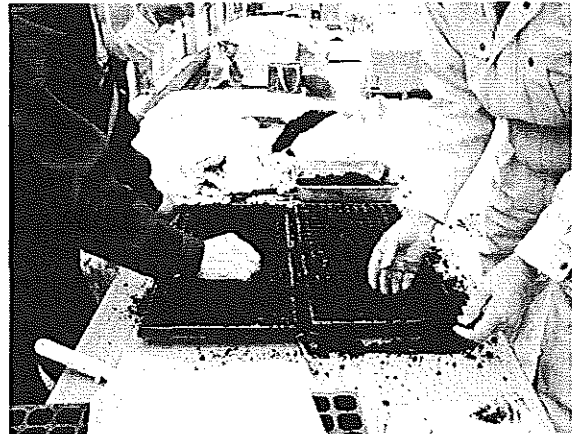


図10 シバナとハマボウの播種の様子

5. おわりに

シバナの発見から4年以上が経過した。当初は単独の清掃活動が主体であったが、近年はシバナ保全活動も様々なメディアに取り上げられたこと、活動する姿が市民の目についたことから広まり、多くの団体との共同作業や、我々以外の活動団体が増えた。現在では地域住民と行う街づくりの一環として定着してきたと感じる。

今後は卒業研究や独自の研究へと活動を広げていき、従来行ってきた保全だけではなく絶滅危惧種を救う活動にステップアップしていく予定であり、今後とも積極的に活動を続けていきたい。

6. 謝辞

本調査保護活動は、北九州市『みなとや海辺の活動支援』の助成を受けて実施された。

本活動の実施にあたり、様々なご協力をいただいた北九州市および(株)エヌエスウィンドパワーひびき、ならびに本学関係各位にこの場を借りて謝意を表す。

参考文献

- [1]. 安田 繁、他、洞海湾における歴史的変遷と森造りによる環境保全の取り組みについて、土木史研究 講演集 Vol.28 2008年
- [2]. 徳留 大地、塩生植物(シバナ)周辺の環境調査、九州共立大学 平成20年度 卒業論文

洞海湾周辺の塩生植物(シバナ)の環境調査に関する研究

徳留大地*、安田繁*、亀田伸裕*、楊菲**、田中邦博***、林賢矢***

*九州共立大学工学部環境サイエンス学科 **大学院環境システム学専攻

***九州共立大学工学部都市システム工学科

Studies on environmental surveillance of halophyte (shibana) around DOKAI gulf

Daichi TOKUDOME, Shigeru YASUDA, Nobuhiro KAMEDA, Fei YANG,
Kunihiko TANAKA, Kenya HAYASI

In the present study, it aims to make 3D model by executing the measurement that combines handy GPS and TS (Total Station) as part of the site investigation of the cave gulf tidal flat, comparing with the height data and the tide data around the Shibana colony in a donjon bridge near tidal flat, and using GIS and to understand the ambient surrounding.

Keywords: DOKAI gulf, Halophyte, shibana, GIS, Handy GPS

1. はじめに

近年、多くの植物が発見されているなか、絶滅の危険に面している植物も多く存在している。海辺生物の生育場所である干潟では、人口の増加に伴う生活場所の拡大、開発工場建設や河川工事などにより干潟面積の減少が見られ、塩生植物の生息地が激減している。

北九州のほぼ中央部に位置する洞海湾は漁業資源が豊富な海であったが、1950年代の高度経済成長に伴う環境汚染によって『死の海』と呼ばれるようになった。

今日における洞海湾は蘇り、生物が集まる豊かな海となっている。洞海湾への関心をあげるため北九州市での取り組みや洞海湾周辺の地域では、数多くのNPO団体活動が行われている。

本学では、平成20年4月に「九州共立大学・TEAM 洞海湾」を設立して絶滅危惧植物の調査及び保護をするため、定期的に干潟の清掃活動を学生・地域住民・行政スタッフと行い、絶滅危惧植物の生育調査やシバナの移植などの保護手法を行ってきた。さらに、洞海湾シンポジウムを開催し、地域住民・学生に対する環境への啓蒙活動にも取り組んでいる。

本研究では、洞海湾干潟の現地調査の一環として、簡易GPSとTS(トータルステーション)を組み合わせた測量を実施し、本城橋付近干潟のシバナ群落周辺の高さデータと、潮汐データと照らし合わせ、GIS(地理情報システム)を用いて3Dモデルを作成して、周辺環境を把握す

ることを目的とする。

2. 洞海湾の塩生植物

2.1 塩生植物とは

塩生植物とは、熱帯で生育するマングローブや、砂漠あるいは海岸地方にみられるように、高濃度の塩分環境に適応して生育している。内海に注ぐ河口や入り江の奥などには、干潮時には陸地になり、満潮時には海水や汽水に浸かる沼地に生育している植物である。近年干潟環境が住宅地の拡大、生活習慣の変化により干潟面積の減少がみられる。そのため、塩生植物数も減少している(図-1参照)。

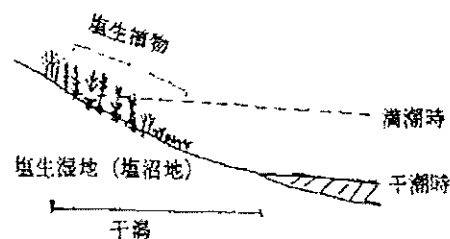


図-1 塩生湿地

2.2 シバナ(塩場菜)とは

シバナ(写真-1)は単子葉の多年草である。波を強く受ける外洋性の砂浜には生育できず、内湾性の波の静かな波打ち際に群落をつくる。北海道か

ら九州まで見られるが、南にいくほど少なくなる。高度成長期の埋め立てや護岸工事などで生育が減り、現在は環境省のレッドデータブックで準絶滅危惧種に分類されている。

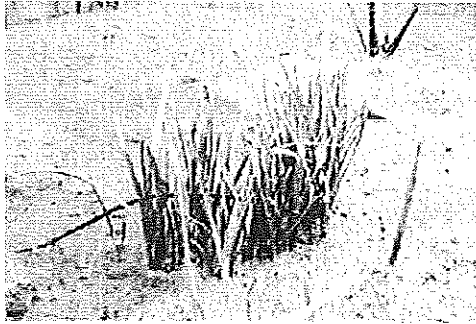


写真-1 シバナ

2.3 洞海湾干潟（本城橋付近）

洞海湾の奥地の本城橋付近に干潟がある。周辺環境は、住宅地や工場地帯と隣接している。干潟付近でよく見られる動物は、ホシハジロやカモ類である。また、ゴミの漂流物が多く定期的に周辺企業や住民の協力で清掃活動が行われている。植生は、準絶滅危惧種に登録されているシバナをはじめ、ハマボウ、シオググなどが生育している。シバナは、春から秋にかけて活性化するため、調査を行った冬の時期では、枯れており確認することが難しかった。

3. 干潟の環境調査測量

3.1 調査概要

日時：2009年1月15日(木曜日)

午前7時～午前9時

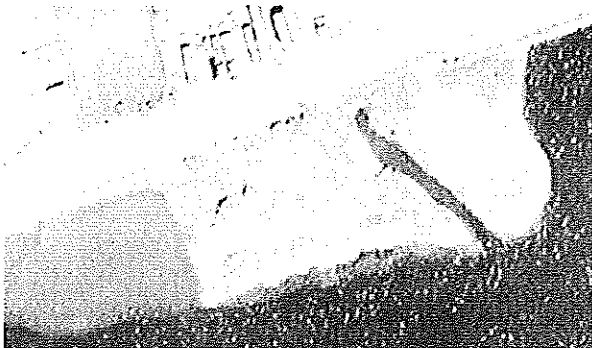


図-2 本城橋付近干潟

場所：八幡西区本城橋付近干潟（図-2）

測量種類：TS(トータルステーション)と簡易GPSを併用(図-3～図-4)

測量内容：干潟の地形をモデル化するため

検討内容：満潮時、干潮時の水位の変化に着目して、シバナの生育環境を調査
測点の座標は、簡易GPS(GARMIN製 Geko201)を用いて得たデータを利用した。

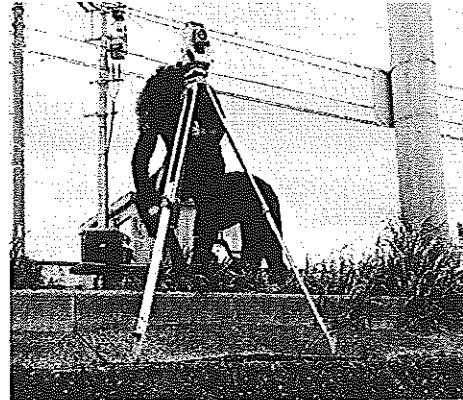


図-3 TS機器

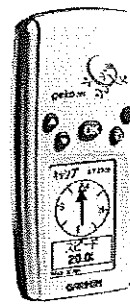


図-4 簡易GPS

3.2 測量方法

3.2.1 TSとハンディGPSによる測量

本研究では、測量を干潮時に行うため、時間に制限があり、測点は3～6m間隔で行った。水際を干潟から本城橋方面にむけて測量を行い、水際と湾側面、その2つの中間点のデータを取得した。

シバナ生息地では、手前から奥地にかけて測量を行った。TSで測量した場所では簡易GPSでもデータを取り、TSと簡易GPS両方のデータを用いて、地形の再現性について考察した。

3.2.2 地形図の作成

観測した簡易GPSの座標データは国土地理院測地部の変換プログラムを用いて、平面直角座標系に変換し、ArcGISで処理してモデルを作成した。図-5は、TSと簡易GPSで測量した点を航空写真と重ね合わせたものである。図より両者のデータはほぼ一致しており、ほぼ同じ形をしていること

が確認できる。

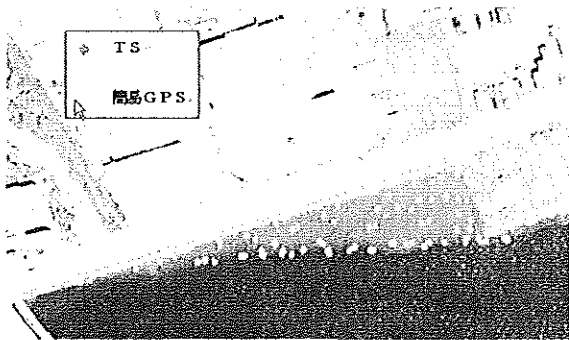


図-5 測点の比較

3.2.3 潮汐曲線と標高データの組み合わせ

座標データと潮汐データを組み合わせ、満潮時と干潮時の3DモデルをArcGISを用いて作成し、水没時間の割り出し等を考察する。解析手順を図-6に示す。シバナ群落の標高値データは、簡易GPSにより取得したTS機械高を元に算出した。潮汐曲線は、北九州市八幡地区のデータを用いた。

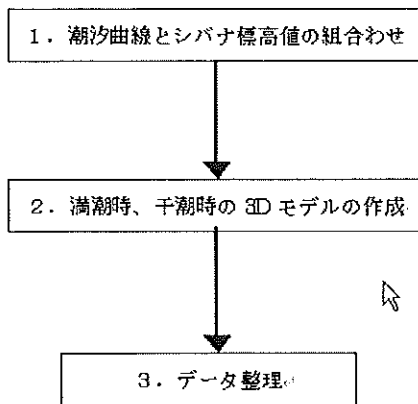


図-6 解析手順

4. 解析結果

4.1 3次元表示

1) TSモデル

図-7は、TSデータを用いて作成した3Dモデルで、0.5mごとに標高で色分けしている。標高は、最低で約7.3m、最高で約9.1m（機械点除く）の測定結果になった。実際の地形に近いモデルになっている。

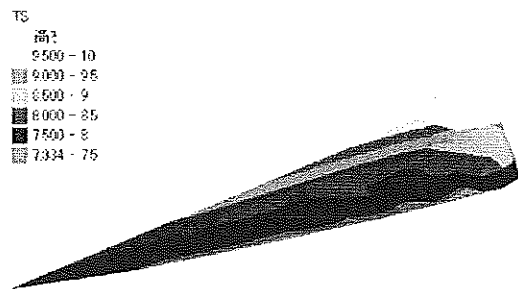


図-7 TSモデルの3次元表示

2) 簡易GPSモデル

図-8は簡易GPSを用いて作成したもので、TSと同じ形になっているもの、標高値データに大きな誤差が出て、全体的に干潟の地形の凹凸が激しいことが分かる。すなわちこのモデルでは最低高さで約-0.8m、最高高さで約14.3mという結果になった。前者のTSモデルと比較するため、最低点の7.3m以下は灰色、2.3m以下は黒色で表示している。さらに10m以上は水色で表示している。

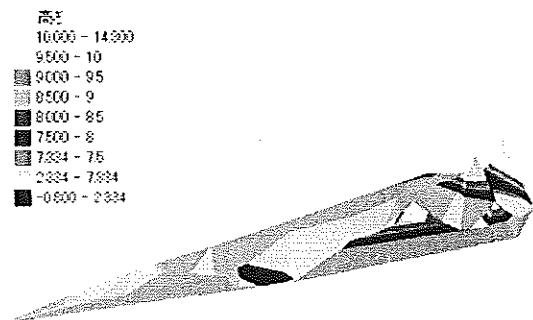


図-8 簡易GPSモデルの3次元表示

4.2 標高データと潮汐データの組み合わせ解析

次に、TSの3Dモデルの標高データと海上保安庁海洋情報のWEBより取得した2009年1月15日の潮汐データとの組み合わせた解析結果を示す。

図-9は、1月15日の満潮時午前0時のモデルで、シバナ生育地手前まで水没していることが分かる。潮汐曲線データと比較すると、シバナ生息地の水没時間は約30分である。

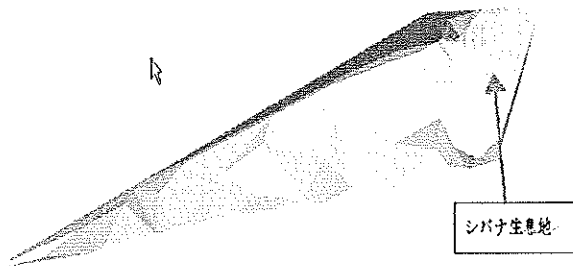


図-9 1月15日 満潮時モデル

図-10は、1月15日の干潮時午前7時のモデルで、広範囲にわたり干潟がでていることが分かる。



図-10 1月15日 干潮時モデル

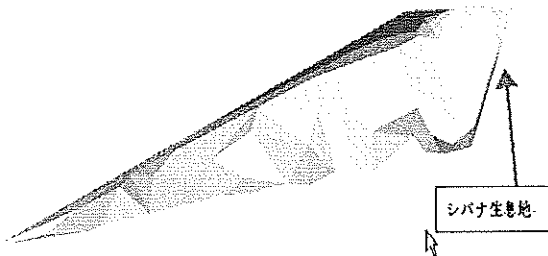


図-11 8月2日 満潮時モデル

図-11は、8月2日の満潮時午前10時のモデルで、この日は一年で最も満潮の水位が高くなる時期で、潮汐曲線データ(図-12)と比較して、シバナの水没時間は約7時間30分であることが分かった。

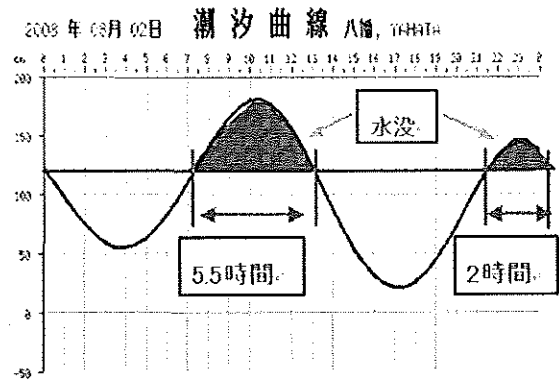


図-12 潮汐曲線

5. まとめ

洞海湾周辺干潟現地調査において、本城橋付近干潟では、ハマボウ群落が多く植生していることが分かった。シバナだけではなく、ハマボウやシオクグ群落と全体を通して保護を行うことが必要である。

TSと簡易GPSを用いた測量結果の高さデータより、干潟に生息しているシバナ群落ほどの高さの土の堆積が見られれば、シバナ生育地の拡大する可能性は高いと考えられる。また、GISを用いた3Dモデルを使った解析を行うことによって、シバナが水没する時間が推定できる。また、干潟にゴミなどの漂流物がどれ位の量で残留するか、モデルと現場を比較することで、清掃の対策など計画を立てる際の参考になると考えられる。

さらに、洞海湾ではゴミの浮遊物がシバナなどの稀少植物に覆いかぶさる問題があるが、近隣の竹林を使った防止ネットを作成するなど、対策工法の検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 安田繁・畑岡寛・亀田伸裕・田中邦博、
ハンディ GPS を用いた導入教育と応用例、応用測量論文集、Vol.19,2008
- 2) 安田繁・亀田伸裕・田中邦博・畑岡寛
洞海湾における歴史的変遷と森造りによる環境保全の取り組みについて、土木学会土木史研究講演集、Vol.28,2008

図書館情報リテラシー教育の新たな試み

—経済学部「キャリア基礎演習」の授業支援をめぐって—

矢崎美香¹⁾ 上井由美子¹⁾ 大松真弓¹⁾ 松田高史²⁾

1)九州共立大学附属図書館 2)九州共立大学経済学部(総合教養教育センター)

A new trial of the library information literacy education :
Over class support of the department of economics "Basic Seminar in Career Education"

Mika YAZAKI¹⁾ Yumiko UWAI¹⁾ Mayumi OMATSU¹⁾ Takafumi MATSUDA²⁾

1)Kyushu Kyoritsu University Library

2)Kyushu Kyoritsu University Faculty of Economics

We performed class support of the department of economics "Basic Seminar in Career Education" as a new trial of the library information literacy education this year. We report the consideration in this bulletin.

Keyword : Literacy education, information education, library literacy, Presentation.

1. はじめに

図書館では、平成18年度以来「新入生ゼミ」の授業支援を続けているが、今年度(平成20年)は新たな試みとして、経済学部の「キャリア基礎演習」と連携した「プレゼンテーションとは？」の授業支援を実施した。この取り組みは、表1に示した図書館プログラム〈図書館での新入生に対する情報リテラシー教育の実施〉の一環ではあるが、より発展的な展開を模索したものと位置づけられる。

プログラム名	図書館での新入生に対する情報リテラシー教育の実施
事業方針	教育機能の充実
部 類	学習サポートの充実
概 要	学生の図書館利用の促進を図ると共に学習を支援し、学生の教育での活発な活用を目指す。

(表1)

2. 目的

a. 図書館

図書館では、これまでの「新入生ゼミ」において、図書館情報リテラシー教育の基本部分としての〈蔵書検索〉〈情報検索〉学習を支援して

きた。これは、図書館利用が図書の単なる貸出・返却に終わることなく、〈検索〉の実践をとおして図書館の機能・役割を理解させ、大学生らしい図書館利用スキルを身につけさせることを目標としている。

今回の授業支援「プレゼンテーションとは？」は、図書館情報リテラシー教育のステップアップとして、〈蔵書・情報検索〉とそれによって得られた〈図書情報〉を有機的に結びつけようとするものである。すなわち、図書館の情報機器を利用することで、論文・レポート作成のための情報検索から発表資料の作成までを、図書館で連続的に作業できること、また必要な資料についての(図書館に蔵書しないものも含めて)レファレンス・サービスを容易に受けられるという図書館ならではの利点を、新入生に知ってもらうことが第一義的な目標である。「プレゼンテーション」はそのための最適な教材であり、その作成演習をとおして、「図書館は使える」ことを実感してもらえることも、あわせて期待される。

なお、図書館の授業支援は、図書館の導入教育であるとともに、大学カリキュラムの一部として実施されるものである。授業担当教員との打ち合せ、授業内容との連携が不可欠である。図書館としては、論文作成・報告までの過程、特に学術報告におけるプレゼンテーションのあり方を知るといことも、この新たな授業支援試みの大きな目的であった。

b. 経済学部

経済学部では、平成20年度の新1年生から、初年次教育として「キャリア基礎演習」を導入した。新入生全員が10数人のクラス(ゼミ)に分かれ、ゼミ担任の指導のもとに同時進行で同じ内容の授業を受けた。

初年次教育は、一言すれば「学習・生活の両面において、高校生を大学生へ円滑に移行させる」ためのものである。「大学と高校はどう違うのか」という問いかけから始めて、大学での学びのスタイル、学習スキルの習得をめざす。また、タイムマネジメントなど健全な生活のあり方を知り、大学生としてのキャリア構築の第一歩を踏み出す。

「キャリア基礎演習」で肝要なのは、教員が教えることではなく、学生が「自主的な学び」を喜びとして感じることである。この「自主的な学び」は、学生自身が実際に作業をおこなうことで、より強く意識することができる。「キャリア基礎演習」は、小論文作成を授業の最終目標とし、その達成のために必要な手順を実践することを、授業の柱とした。図書館の授業支援演習「プレゼンテーションとは?」は、その実践の一部としてカリキュラムに組み込まれた。

現実には、20を超えるゼミの担当者が同一のスキルを持って演習をおこなうことは、困難である。その点で、図書館が共通授業の場としての役割を担うことは、理にかなっている。また、図書館での実践学習は、昨今の学生一般が図書館に抱いている「敷居の高さ」意識を払拭するにも、有効と思われる。

3. 講義の実施内容

授業をおこなうにあたり担当教員とのあいだで、当該授業の目的およびキャリア基礎演習全体の中での位置づけを確認し、図書館として何を講義するかを打ち合わせた。その結果、下記のように、まずはプレゼンテーションそれ自体の説明、その後に演習という2部構成とした。

I. プレゼンテーションについて

1. プレゼンテーションとは?
2. スライドの作成と構成
3. 自分の論文を発表用スライドに

II. プレゼンテーション演習

1. 例題論文のスライド提示
2. 発表用原稿・レジュメ作成、配布資料

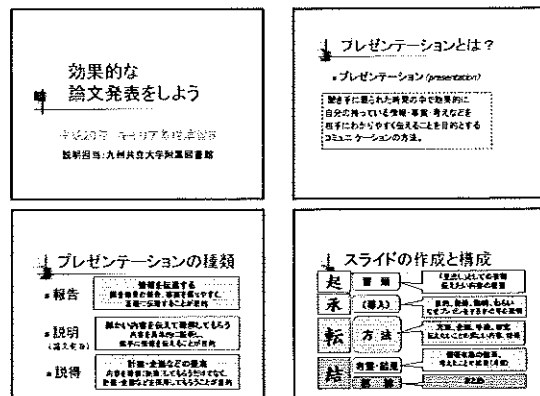
3. スライド作成時の注意点

4. PowerPointによるスライド作成演習

以下に、この構成の中で、特に図書館側で資料を準備し、図書館情報リテラシー授業であることを意識して説明した内容を記す。なお、授業は図書館のマルチメディア教室でおこなった。

(1) プレゼンテーションの意味 (教材1)

まずは「I. プレゼンテーションについて」において、「プレゼンテーション」が、論文発表に限らず、あらゆるシチュエーションで必須となる報告・説明・説得手段であること、ただし報告主題・内容によりプレゼンテーションの方法は変わることの説明した。この段階では、プレゼンテーションの有用性・必要性の理解を講義目標とした。



(教材1)

(2) 論文からスライドへ (教材2)

次に、研究論文の場合のプレゼンテーションの特徴、特に論文内容をどのようにスライド化していくかの説明を、「II. プレゼンテーション演習」の始めにおこなった。その際、図書館側が用意した例題論文「現代日本語経済論」を用いて、スライド作成時に留意すべき点をまず示した(教材2 スライド1)。その後、発表スライド例(教材2 スライド2以降)を示して、スライドの構成について解説した。

ここでの主目標は、効果的なスライド構成(並べ方)の理解である。論文でもっとも伝えたい内容をどのようにスライド表現し、それをスライド全体のどこに置くか。プレゼンテーションは、短時間で自分の伝えたいことを示して、聴衆に納得・理解してもらうことが肝要であるので、そのために論文の筋立てとは異なる組み立ての

スライド構成にすることもあることを説明した。そのほかにスライドの枚数など、スライド作成時に注意すべき事項は一通り解説した。(教材2スライド7)

(教材2)

イドをそのまま印刷したものを使うケースもあること、スライドの映写順は発表用原稿の筋立てに沿ってつくるべきことを確認した。また、発表の本筋に直接にはかかわらない内容は別資料として作成し、スライド構成はできるだけ簡潔にするよう指導した。

(教材3)

(4) 演習 (教材4)

本講義の最後に、学生各自が設定している小論文テーマに沿ったスライドを、Microsoft®のPowerPoint®で実際に作る演習をおこなった。ただし、この時点でまだテーマが決まっていない、あるいは自分なりに内容を具体化できていない学生もいたので、授業時には適宜担当教員に学生への個別指導を仰いだ。

(教材4)

また、プレゼンテーションにおけるスライドは、あくまでも補助的な手段であり、主体は口頭での説明であることも、理解させなければならない。口頭発表のなかで、聴衆の反応を確かめながら適切にスライドを使うことができるか否か。その点で、プレゼンテーションは発表者のコミュニケーション能力が問われる場でもある。そのためにも、スライドを作って終わりではなく、必ずリハーサルを実施すべきことも、あわせて講義した。

(3) 資料作成 (教材3)

プレゼンテーションは多くの場合、スライドとは別に、レジュメや配布資料が必要になる。さらに、論文とは別に発表用原稿も用意しなければならない。これらの詳細については、通常のキャリア基礎演習のなかで講義されるので、今回の授業支援では、これらの違いを確認するとどめた。その際、配布資料として発表スラ

ここで目標は、学生が実際にスライドを作成する中で抱いた疑問や質問に対応しながら、スライド作成スキル、およびPowerPoint®使用スキルの平均化を図ることである。

この段階で気づいたことは、自分の論文内容をどのようにスライド化するか、その書き出しがなかなか分からない学生が多いことであった。スライド作成の様子を見ると、1枚目のタイトルスライドを作成後、2枚目のスライドを作成するまでかなりの時間を要していた。これは、この時点で、論文本文の構成(骨子)がまだ固まっていなかったからと思われる。また、学生により小論文作成の進捗度にかかなりの差があり、スキルの平均化もそれほど容易ではなかった。この辺の問題をどう解決するかは、こうした授業支援を通常の授業の中に組み込む際の課題であろう。

一方で、2枚目のスライドを作成すれば3枚

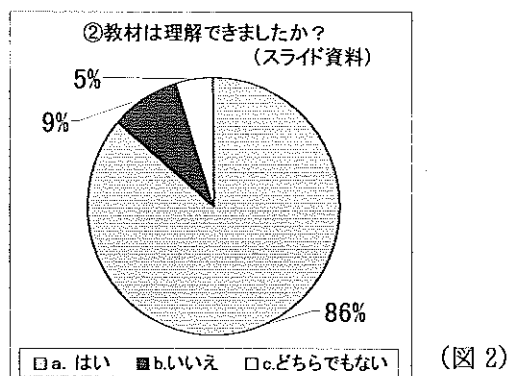
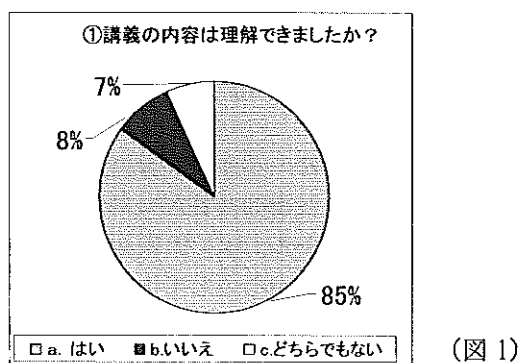
目、4枚目と悩むことなくスライドを作成していくのも、特徴的であった。論文本体にしろ、スライド作成にしろ、全体の構成がよく見えていることが大事であることを、学生とともに再確認した。

このスライド作成演習においては、色やデザイン、字体や字の大きさ・飾り文字の使用、また画像やアニメーションを入れることなどについて、特に論文発表であることを念頭において考慮すべき点を説明した。一方で、グラフなどは口頭発表の大きな助けになることを、実例で示した。

4. 授業支援アンケート結果

講義終了後、学生に記入してもらったアンケートにより、図書館として初めておこなったこの講義の評価を試みた。

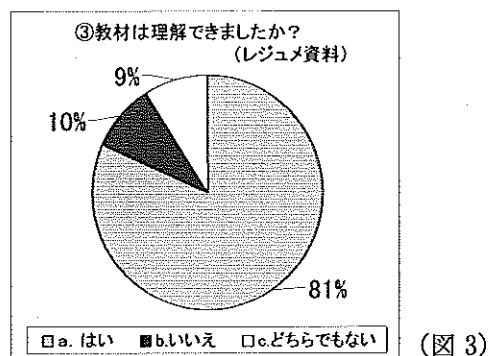
まずは、講義内容がどのくらい理解できたかである。この質問は、こうした授業支援の有用性をはかるために重要であり、さらに今後の図書館利用にも連動してくる項目である。結果としては、85%の学生が理解したと回答した。(図1)



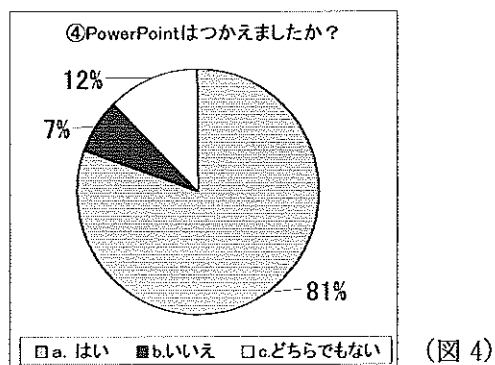
また、講義中に使用した教材についても、どの

程度理解したかを尋ねた。アンケートの結果を見ると、「②教材は理解できましたか? (スライド資料)」(図2)および「③教材は理解できましたか? (レジュメ資料)」(図3)ともに、約80%を超える学生が理解したと答えている。

したがって、講義内容についての理解度は①、②、③のアンケート結果からは、かなり高いものであると判断できる。



次に、実際学生が自分でPowerPoint®のソフトを使っておこなった演習で、どの程度スキルアップしたかを検証した。これは、質問項目「④PowerPoint®は使えましたか?」(図4)の回答で判断できた。



アンケートの結果では81%の学生が「PowerPoint®が使えた」と思っており、高い数値を出している。しかし、この結果は本人が使えたと認識した数値であり、最終的な発表をみて担当教員が評価したものではない。そこにズレが生じている可能性はあるが、この点は、是非とも出来あがったスライドを図書館側でも検証できるように、担当教員と協議したいところである。これにより、授業効果の確認および今後の改善が期待できるからである。

いずれにしても上記のアンケート結果は、今

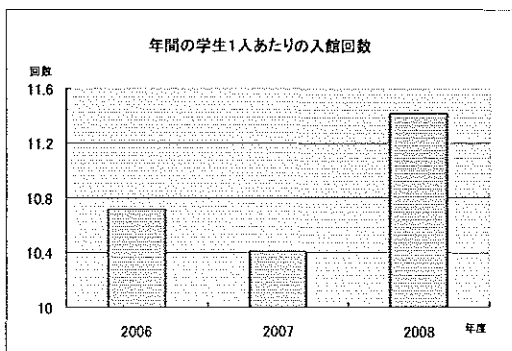
回の授業時点で PowerPoint®をすでに使いこなせる学生と、まったく初めての学生が混在していたなかでのものである。そのことは、まったくの初心者でも、この授業支援により、一応の操作ができるようになったことを示しているのではないかと、この点を加味して考えれば、質問項目「④PowerPoint®は使えましたか？」のアンケート結果は、発表用ツールの有用性を学生がまがりなりにも理解したことを示しているといえよう。

4. 利用の動向変化

講義内容のアンケート結果についてはかなり高い数字を示したが、この講義の結果がどのくらい図書館利用に効果を示しているかを調査しなければならない。実際講義を受けた学生がどの程度図書館を利用しているか、また前年度の学生との差もみたい。

今年度の1年生は「新入生ゼミ」という図書館情報（リテラシー）教育を受講しており、図書館の利用方法等については習熟している。その上に「キャリア基礎演習」をおこなうことにより、図書館の利用促進により高い効果をもたらしているのではないかと推察される。

その効果の程度を、下記の図5,6に示した図書館利用動向から分析してみた。



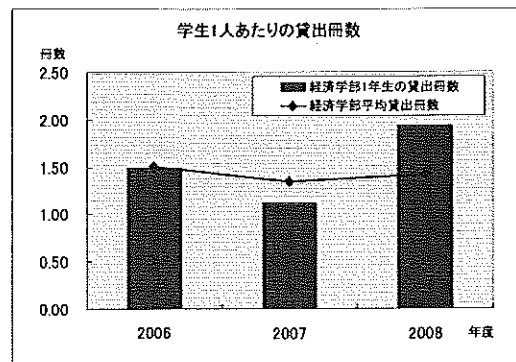
(図5)

まず、年間の学生1人あたりの入館回数である(図5)。図書館の現況では、学部別学年別の入館者数を採取してないため、今回のように経済学部の1年生を対象とした授業の効果に絞ってみることはできないが、全体として2008年度の図書館入館者数は増加している。今後、何らかの形で入館者の学部・学年の把握ができるようになれば、支援授業の直接的な効果を見ること

ができると考える。図書館としても、ぜひともそうした方向で利用者統計をとれるようにしたいところである。

次に、今年度の貸出冊数についてである。図6のとおり、経済学部全体の1人あたり貸出冊数より、経済学部1年生の貸出冊数の方が多いことがわかる。過去3年間の数字と比較しても、1年生の貸出冊数が上向きなことがわかる。

このことは、図書館がおこなっている「新入生ゼミ」、「キャリア基礎演習」、「図書館情報（リテラシー）教育」などの一連の授業支援の効果が出ていると考えて良いであろう。ただ、講義のあとで、どのように図書館を学習・研究目的として実際に活用しているかをさらに詳しく見るためには、貸出冊数を月別に把握した数値をも加味して検証すべきであろう。



(図6)

最後に、今回の講義については、学生がゼミでの実際の小論文作成において、「プレゼンテーションとは？」の授業支援で学んだことを活用できたか否か(=有用と実感できたか否か)が、なによりも問われねばならない。ただ、この調査は授業担当者の協力を仰がなければならず、今回は実施できなかった。この点も、来年度以降の課題としたい。

5. 今後の展望

今年度は、新たな試みとして経済学部の授業「キャリア基礎演習」と連携して図書館職員が「プレゼンテーションとは？」の講義をおこなった。講義にあたり、担当教員とは綿密な打ち合わせをおこない、教員側の意向も反映しながら資料等を図書館側で作成した。

しかしながら、小論文作成という具体的な目

標をもった講義内容に、図書館側が十分な対応ができたかどうか、プレゼンテーションという題材を、図書館の機能と結びつけて説明することができたかなどなど、図書館としても反省すべき点は多い。来年度は、担当教員との打ち合わせ等をさらに綿密におこなうとともに、授業目標の理解と担当者のスキルアップを一層はかり、この講義をより有効なものとしてステップアップさせたい。

今回の「プレゼンテーションとは？」の講義をとおして、特に大学の初年次教育において図書館の果たす役割は決して小さくないことが実感できた。また、講義内容を検討する過程で、教員側との立場の違いを改めて認識するとともに、そのなかで図書館の考え方を打ち出すことができたのは、大きな収穫であった。

図書館としては、講義が授業の一部に組み込まれることの効用はたしかに大きく、これまでとは違った形で、図書館の利用促進につながるものが期待できる。その反面、学生や教員のニーズに応えることが急がれる。そのためにも講義をいかし、ニーズの調査・分析をおこない、学習支援の構築を進めていきたい。

【参考文献】

- [1]. 太田潔, 「初年次教育」にかかわる大学図書館の役割についての一考察 —最近の動き. 図書館雑誌, 102(2), pp.94-99, 2007
- [2]. 大谷朱美, 教員との連携による情報リテラシー教育支援. 現代の図書館, 45(4), pp. 213-225, 2007
- [3]. 上岡真紀子, 市古みどり, 書館員による情報リテラシー教育 ～現在・過去・未来. 現代の図書館, 45(4), pp. 226-233, 2007
- [4]. 野末俊比古, 情報リテラシー教育と大学図書館 —「利用者教育」から「指導サービス」へ—. 図書館雑誌, 102(11), pp. 762-763, 2008
- [5]. 忽那一代, 京都大学図書館・情報リテラシー教育の現状 —全学共通科目「情報探索入門」の11年—. 図書館雑誌, 102(11), pp. 778-780, 2008
- [6]. 広沢絵里子, 図書館の教育力, 大学時報, 56(315), pp.42-45, 2007
- [7]. 長澤多代, 情報リテラシー教育を担当す

る図書館員に求められる専門能力の一考察:米国のウエイン州立大学の図書館情報学プログラムが開講する「図書館員のための教育方法論」の例をもとに, 大学図書館研究, (80), 79-91, 2007

- [8]. 大城善盛, 情報リテラシーと図書館サービス, 現代の図書館, 45(4), pp.183-189, 2007
- [9]. 実教出版編集部 30時間でマスター プレゼンテーション PowerPoint2003, 実教出版, 2005.4
- [10]. 矢島隆, コドス, 成功するフルカラープレゼンテーション作成テクニック, エクスメディア, 2005.3

図書館情報（リテラシー）教育への取り組みとその効果について

—中期アクションプランをきっかけにして—

矢崎美香¹⁾ 上井由美子¹⁾ 大松真弓¹⁾ 成富勝¹⁾²⁾
1)九州共立大学附属図書館 2)九州共立大学工学部

The action to the library information (literacy) education and the effect
: Triggered by a Middle action plan

Mika YAZAKI¹⁾ Yumiko UWAI¹⁾ Mayumi OMATSU¹⁾ Masaru NARITOMI²⁾
1) Library, Kyushu Kyoritsu University
2) Faculty of Engineering, Kyushu Kyoritsu University

In the Kyushu Kyoritsu University library, various services are promoted. We performed new developments based on "The Middle plan (action plan)" of the university. Concerning the learning support for the students, we performed library information (literacy) education. We compiled the result that investigated an educational effect by the learning support and the trend of the library. In addition, this article is assumed an interim report of "The Middle plan".

Keyword : Literacy education, information education, library literacy

1. はじめに

図書館では、大学の学生支援に伴う中期計画（アクションプラン）に基づき、平成18～20年度の新入生に対しては「新入生ゼミ」を在学生に対しては「図書館情報活用」などのプランを構築して推進してきた。その効果をここで考察してみたい。

また新入生に対しての「図書館情報（リテラシー）教育」および「図書館活用」などの学習方法等の支援は表1のような内容で行った。

2. 目的

図書館としては貸出・返却などの図書館利用だけではなく、学生生活の中で、有意義な図書館利用及び活用をめざし、初年時教育として「新入生ゼミ」を行い、卒業学年に至るまでに資料検索及び情報検索、情報活用をいかに習得させるかを目的とした。

まずその計画の初期段階では、図書館の目的を新入生対象としたゼミの中で、図書館の情報教育を試み、学習支援の一環として次の①～③の点に重点をおいた。

- ①簡単なパソコンの使い方を習得させる。
- ②図書館での蔵書検索方法を習得させる。
- ③レポート作成時の資料収集方法を習得させる。

しかし、年度を経るごとに高校までの情報教育の充実にともないパソコンの使い方についての項目をはずし、蔵書検索の際の検索語（キ

ーワード）についての説明を加え、キーワードを導く思考ができることを目的とした。

表1 中期計画アクションプラン(図書館)

【事業方針】	教育支援機能の充実
【部類】	学習教育サポートの充実
【概要】	学生の図書館利用の促進を図ると共に学習を支援し、学生の教育及び研究の活発な活用を目指す。それと共に社会にでて必要とされる情報知識を習得させるものとする。
【プログラム名】	図書館における学習支援 アクションプラン3期計画
【プログラム内容】	① 新入生に対する図書館利用スキル および情報収集の方法に伴うパソコン操作の教育支援 (H16-17)
	② 在学生に対する図書館利用スキルの向上および情報収集の方法に伴うパソコン操作の教育支援 [一段階] (H18-19) [二段階] (H20-21)
	③ 教員との連携による講義時間の図書館利用と総合活用方法の習得 (H18-20)
	④ 図書館活用外の学生ニーズに伴う教育支援 (単発)

また、大学で習得した情報収集のスキルを卒業後の実社会で活用できれば、以上の目的を十分に果たしたと考えられる。

現在は、この目的に基づき様々な形の図書館利用の促進を図り、広がりを見せている。それぞれの目的については、表2に示すように「Step」別に展開している。

3. 実施内容の説明

「図書館情報（リテラシー）教育」を実施するにあたり、事前に講義を担当する教員との打ち合わせを行い、講義の目的及び学生への指導方法について説明を受けた。

その上で、図書館として学生に指導したい内容と教員の目的との双方の内容を盛り込んだ表2を作成し、講義を行った。

企画当初は新生ゼミの項目は無く初年時教育と言うことでStep0として段階を組み込み行うようになった。

表2 図書館情報教育支援指導内容

【Step0】	新生を対象に図書館の利用方法および館内案内、図書所蔵検索、事項検索。
【Step1】	新生（大学1～2年生）を対象に基本的な図書館の使い方及びパソコン操作の習得。
【Step2】	「Step1」で習得した図書館利用のスキルを大学3～4年、大学院生でさらに向上させ、より迅速に情報収集が行えるようにパソコン操作ができ、情報の取捨選択ができるスキルを習得させる。
【Step3】	教員との連携により講義時間に図書館の利用方法及び総合活用を個別に教育的サポートする。あわせて図書館員が講義の補助として教員をもサポートする。
【Step4】	学習・研究目的とは違う図書館活用の学生に対するニーズをその都度探りそのための支援を行う。

初年度はまだ初年時教育の導入ということもあり、図書館ツアーやパソコンの初歩的な使い方の説明などを新生ゼミの中に取り入れていた。

しかし、新生の動向をみると高校生までの間に情報教育の習得がかなりされているため、パソコンの基礎的な使い方を講義内容から除き、

検索の際のキーポイントなるキーワードの導き方、発想などの思考方法について、講義の中に盛り込むこととした。これらは、検索時間及び検索結果に大きな影響を与えるものであり、現在の講義の中ではかなりのウェイトをして占めている。

4. 図書館利用についてアンケートの結果

図書館情報（リテラシー）教育の講義の後、図書館に対しての意識の変化及び利用の動向は、アンケートを行ってその効果を検討した。

アンケートの結果をみると図書館が行う講義の理解度も併せて調べることができた。

最初の設問「①高校生の時に図書室を利用していましたか？」（図1）では、約40%の学生は「b.いいえ」と回答をしており、図書館を利用していなかった。その学生が「②今日の説明を聞いて図書館を利用しようと思いましたか？」（図2）では「a.はい」という回答の学生が約60%いたことが分かり、講義終了後から図書館を利用しようと思う学生がいることが分かる。

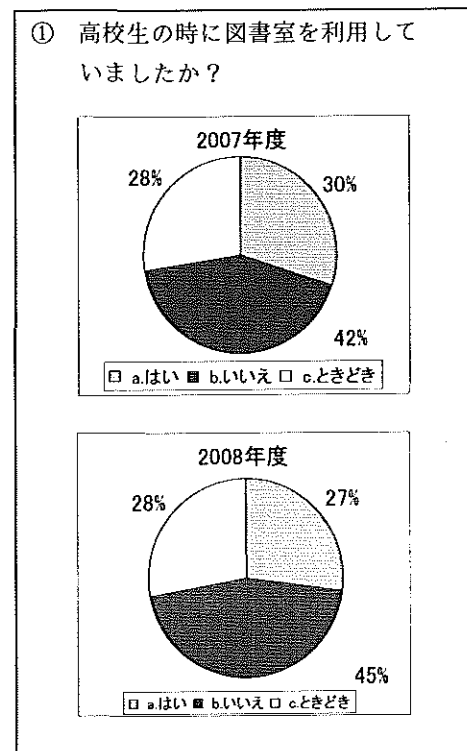


図1 図書館利用アンケート 1

この意識変化は、高校生の時にはあまり図書館を利用していない学生においても、大学生と

なり学習意欲が高まっている。この時期に図書館の情報（リテラシー）教育を取り入れることはより学生の学習効果を高めるものであり、その意識向上がアンケート結果、図1、図2に現れている。

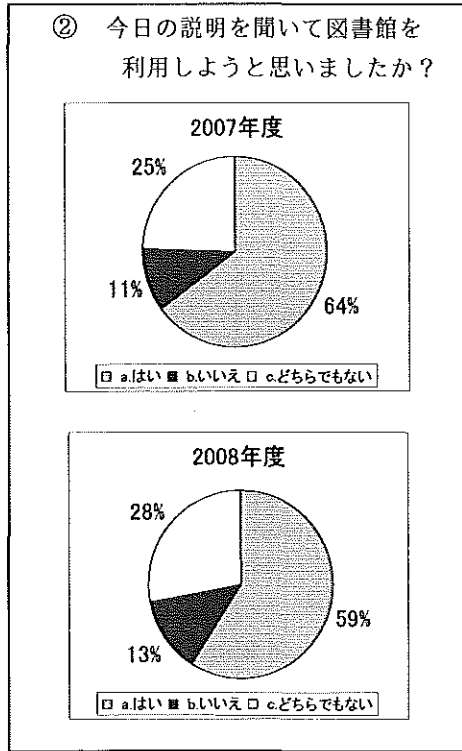


図2 図書館利用アンケート 2

また、実際の講義の理解度及び学習意欲についてのアンケート結果は、図3、図4、図5に示す。

図3の「①蔵書検索（本のタイトル・書いた人の名前・調べたい単語からパソコンを使えましたか?）」という設問に対し、「a. はい」という回答の学生が約80%いたことから図書館の蔵書検索およびキーワードの使い方などは理解したとみた。

図4の「② 検索結果の見方はわかりましたか?」という設問では約80%以上の学生が「a. はい」という回答だった。ただ、ここで図3の結果より図4の「a. はい」という回答が多いのは気になるところである。あくまでも推測ではあるが、蔵書検索のパソコン操作はできるが、検索するためのキーワードの使い方が悪いため、自分が求めている結果が出てこないのではないかと考えられる。それに対し、検索結果については画面表示の見方のみのため誰もが理解できたのだとみた。

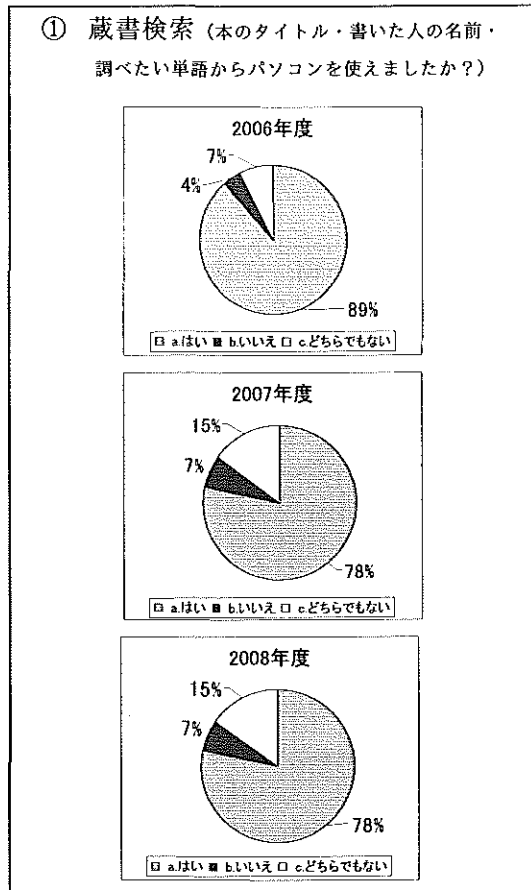


図3 講義理解度についてのアンケート 1

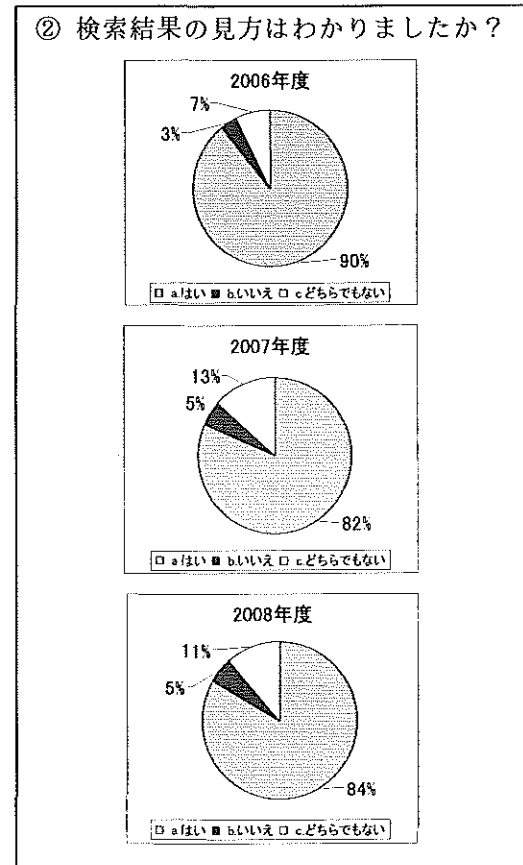


図4 講義理解度についてのアンケート 2

図5の「③ 書架（本棚）の間から本を探せますか？」という設問では図3、図4とは少し回答率が下がり、約70%の学生が「a. はい」という回答だった。以上のアンケート結果からは、講義内容の習熟度がみてとれる。

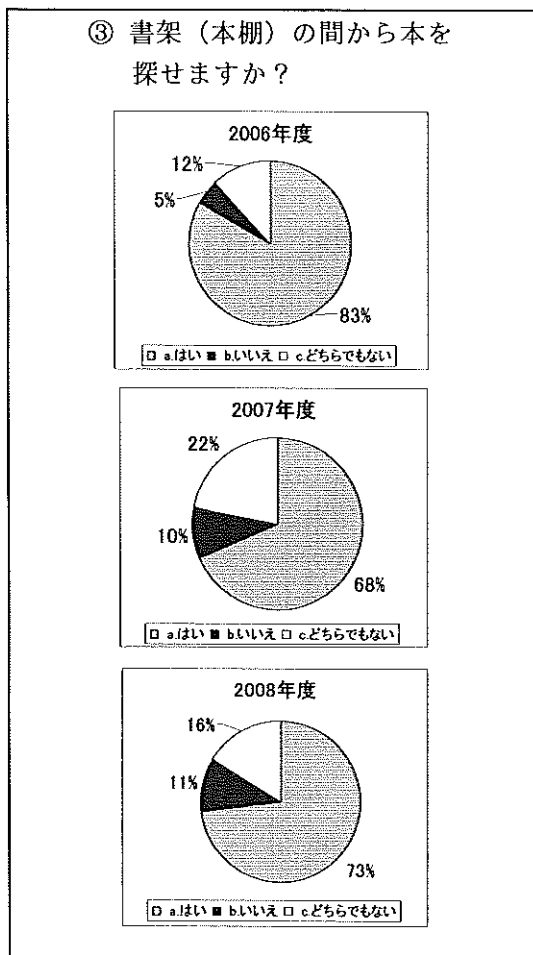


図5 講義理解度についてのアンケート 3

講義中のパソコンを使って行う蔵書検索においては図3、図4のように理解を示しているが、図5のように実際に蔵書検索の結果から、自分の欲しい本を書架（本棚）の間から探すとなるとなかなか探し出せないということも分かった。実際、図3から図5までのプロセスを行い、本を探し出してもらうことまでを講義の内容としている。

このことは、「図書館情報（リテラシー）教育」後、学生の図書館利用の変化には、図書館の利用回数や貸出冊数とその数字を顕著に示すためである。また図書館利用の動向にも結びつくこととなる。

5. 図書館利用の動向変化

講義内容のアンケート結果についてはかなり高い数字を示したが、実際に学生が図書館をどの程度利用しているかを調査する必要がある。

図書館の利用率を調査するには年間の利用者数（入館者数）を調べなくてはならない。図6に示す過去3年間の推移をみると、開館日数の差から入館者数にかなりの減少傾向がみられる。そのため月別1日あたりの利用者数を図7に示す。

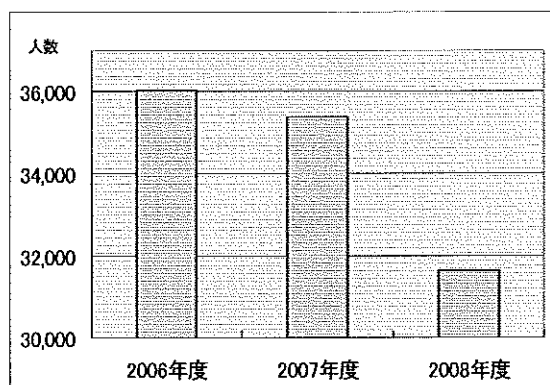


図6 年度別入館者数

図6では年間利用者数は減少しているが、図7では月別1日あたりの入館者数は、全体的に減少しているとは限らず増加している月もある。特に図書館情報（リテラシー）教育の実施期間についてはかなり顕著にその傾向を示していることがわかる。

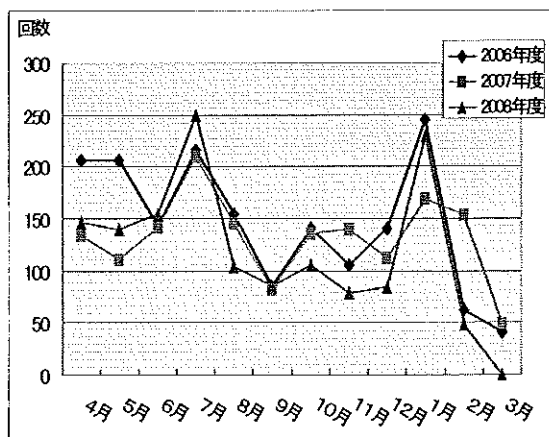


図7 1日あたりの入館者数

また図8の学生1人あたりの入館回数をみるとその回数は増加している。

貸出冊数においても同様であり、図9の過去

3年間の数字と比較してもわずかながらも貸出冊数の数字は伸びている。

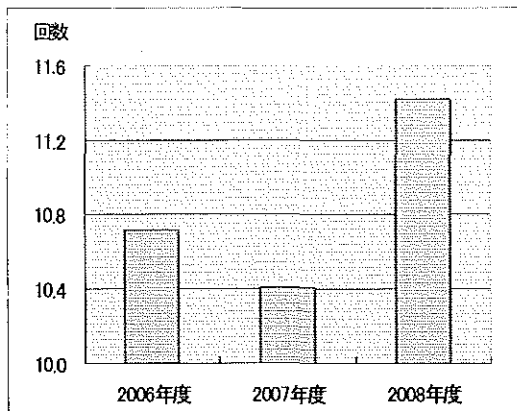


図8 年間の学生1人あたりの入館回数

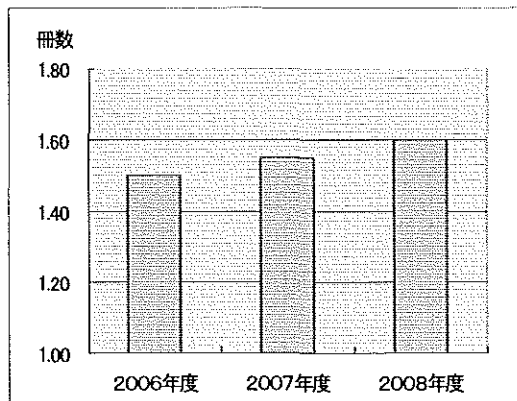


図9 年間学生1人あたりの貸出冊数

以上のように、図書館が行っている「新入生ゼミ」及び「キャリア基礎演習」などの「図書館情報（リテラシー）教育」により、教育的な効果が充分あったと考えられる。

6. 図書館への役割の変化

図書館情報（リテラシー）教育（新入生ゼミ）の申込みについては、平成18年度は教員別に申込みがあったが、平成19年度になると講義・教科単位や学部単位とある程度のまとまりをもった申込みに変化してきた。

平成20年度は、3年目に入り、申込み方法は図10に示すとおり、学部単位となり講義の中の一部として組み込まれる形となった。

その結果から「Step」ごとの申込みにも変化がでており、年々ステップアップした申込みが増えている。このことは学部の体制の変化と学内的認識度の変化、図書館の役割が定着し

てきている表われである。

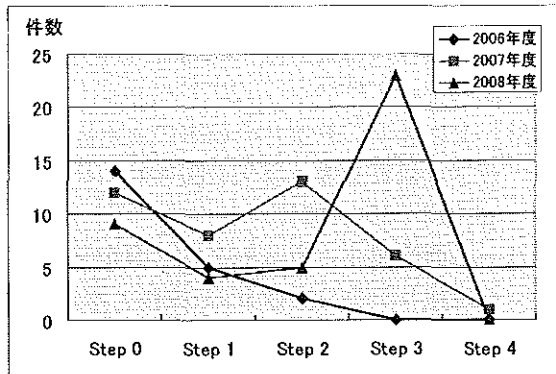


図10 図書館情報（リテラシー）教育申込件数

7. おわりに

今後の課題と展開として、「図書館情報（リテラシー）教育」は、図書館の学生への学習支援に対し、より密接なものとなり、学生への学習効果を高める一端を担うこととなると考えたい。またこのことから新たな図書館の役割やニーズを模索することにより図書館の次への道を切り開くのではないかと考えている。

あわせて大学のアクションプランは、中期の3年から6年へと期間が延長されたため、今回のこの報告は中間報告とし、6年経過した時点で再度最終報告としてこの計画の報告を行いたい。

【参考文献】

- [1]. 文部科学省平成18年度「学術情報基盤実態調査（旧大学図書館実態調査）」の結果報告。
http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/001/index20/08032421/001.pdf
- [2]. 納谷廣美：「教育の場」としての図書館の積極的活用 -図書館の持つ教育力を教育に活かす-、2007
<http://www.lib.meiji.ac.jp/about/gp/index.html>
- [3]. 広沢絵里子，図書館の教育力，大学時報，56(315)，pp.42-45，2007
- [4]. 長澤多代，情報リテラシー教育を担当する図書館員に求められる専門能力の一考察：米国のウェイン州立大学の図書館情報学プログラムが開講する「図書館員のための

- 教育方法論」の例をもとに、大学図書館研究, (80), pp.79-91, 2007
- [5]. 大城善盛, 情報リテラシーと図書館サービス, 現代の図書館, 45(4), pp.183-189, 2007
- [6]. 大谷朱美, 教員との連携による情報リテラシー教育支援, 現代の図書館, 45(4), pp.213-225, 2007
- [7]. 上岡真紀子, 市古みどり, 図書館員による情報リテラシー教育 ～現在・過去・未来. 現代の図書館, 45(4), pp.226-233, 2007
- [8]. 太田潔, 「初年次教育」にかかわる大学図書館の役割についての一考察—最近の動き—. 図書館雑誌, 102(2), pp.94-99, 2007
- [9]. 野末俊比古, 情報リテラシー教育と大学図書館—「利用者教育」から「指導サービス」へ—, 図書館雑誌, 102(11), pp.762-763, 2008
- [10]. 忽那一代, 京都大学図書館・情報リテラシー教育の現状—全学共通科目「情報探索入門」の11年—, 図書館雑誌, 102(11), pp.778-78, 2008
- [11]. 太田潔, 「初年次教育」にかかわる大学図書館の役割についての一考察—最近の動き—, 図書館雑誌, 102(2), pp.94-99, 2007

黒潮影響下における潮位変化の可視化と特徴的パターンの抽出

緒方純俊（九州共立大学総合研究所） 桐本賢太（北九州高専） 川上高弘（(株) きんでん）

Sumitoshi Ogata(KKU) Kenta Kirimoto(KTC) Takahiro Kawakami(Kinden Co)

Abstract

This study aims to clarify the tidal motion at the tip of the Kii peninsula where Kuroshio influences on it. We analyze here hourly based tide level data acquired at the Kushimoto observation station using FFT, short time Fourier transform(STFT), wavelet transform(WT) and conventional methods for chaos analysis. STFT and WT analyses visually reveal that there are a semi-diurnal tide influenced by the synodic month and a diurnal tide influenced by the sidereal month while the Kuroshio's winding effect hardly appears on these results.

Keywords: winding of Kuroshio, time-spatial analysis, pattern extraction

1. はじめに

日本列島周辺水域の潮位変動は1日に2回の干満があり、また、その周期は比較的安定したものであることが知られている。筆者らは、鹿児島県の錦江湾から東京湾に至る太平洋側5内湾の潮位変化をウェーブレットで解析し、さらに、潮位パワーの変動を画像化することによって湾形状の違い(湾口～湾奥までの距離と深さ)によらず、ほとんど同じリズムで12時間と24時間のパワーの周期が繰り返されることを認めた。また、これらの二つのパワーの位相が冬至と夏至で一致し、春分の日と秋分の日で最も位相のずれが大きくなることを確認している[1], [2]。

この研究と並行して、筆者らは同様の手法を紀伊半島先端における潮位解析に適用した[3]。ここでの潮位は黒潮の影響を受け、黒潮が蛇行する場合には潮位が数センチメートル低下する。このことによって、沿岸漁業や船舶の運航に大きな影響が生じる。すなわち、黒潮の蛇行によってもたらされる正負の経済効果は無視できず、蛇行予測手法の開発が求められている。

黒潮は日本の南西諸島から房総半島沖に向かう暖海流で、周期的に流路を変えることが知られている。紀伊半島から大きく離岸する場合は蛇行とよび、短い場合は数ヵ月、長い場合は2～3年間蛇行が続くと言われている。また、蛇行の規模と周期は一定でなく、小蛇行の消長は一

般に短い。一説には、大蛇行は4-5年の周期で繰り返されると言われる。

季節によらず、黒潮軸流の表層水温は周辺水域の水温と比べて数度高い。この原理を利用して、気象観測衛星 NOAA の熱映像センサ(AVHRR)で黒潮の流路を観測する方法が確立されている。最も新しい蛇行は、平成16年6月末から7月初めの時期に始まる大蛇行である[4]。

本研究では、まず、黒潮の影響を大きく受ける串本潮位観測所(紀伊半島先端)において取得された潮位データを用い、蛇行状態と非蛇行状態、及びそれぞれへの移行状態について考察する。次いで、潮位解析の結果を可視化し、潮位パワーの変動、すなわちパワーの12時間周期と24時間周期の位相関係について考察する。

解析にはFFTを用いるほか、短時間フーリエ変換(STFT)およびウェーブレット変換(WT)を用いて時間-周波数解析を行う。さらに、潮位変化のカオス的挙動を観察する手段として、ポアンカレ・リターンマップを用いて特徴的なパターンの抽出を行う。

2 解析対象データ

2.1 黒潮の流路と蛇行

Fig.1に示すように黒潮の流路は大きく分けて3つある。ここでは、南偏型を蛇行、そのほかを非蛇行とする。そして、黒潮からの影響を大きく受ける串本潮位観測所で取得された潮位データを用いる[5]。

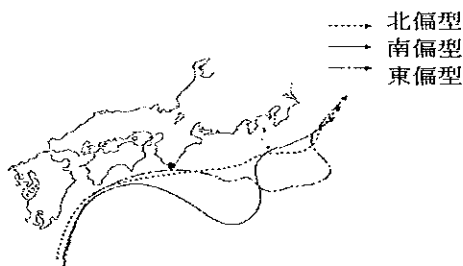


Fig.1 Flow path of Kuroshio

実際の潮汐現象は、地球と月との引力の他に、水深や陸地の形状等が複雑に関与しており、その動力学的特徴はカオス的である。

Fig.2 に潮位変動の一例を示す。ここで、包絡線がいったいに膨らんだところが大潮 (spring tide)、最もくびれたところが小潮 (neap tide) である。後述のポアンカレリターンマップ作成には、この包絡線を構成する原曲線の最小値を用いる。

ここで、潮位データから蛇行と非蛇行を判別する方法について説明する。判別には黒潮の影響を直接受ける活水域にある串本とほとんど影響を受けない死水域にある浦神の2つの潮位データを用いる。黒潮が蛇行していないとき

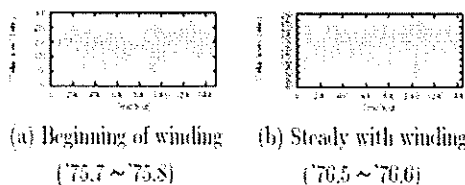


Fig.2 Tidal motion under Kushimoto's influence.

の串本は黒潮から大きな影響を受け潮位が高くなる。このため浦神との潮位差が広がる。

蛇行しているときの串本は黒潮からの影響が少なく、したがって浦神との潮位差も小さくなる。すなわち、潮位差が大きいときが非蛇行、小さいときが蛇行である。串本と浦神の潮位差の一例を Fig.3 に示す。

Fig.3 に見られるように、観測開始後、およそ170日辺りを境にして蛇行状態から非蛇行状態に移行している。このようにして1906年4月から1990年11月まで蛇行状態を判別した結果を Table 1 に示す [5]。

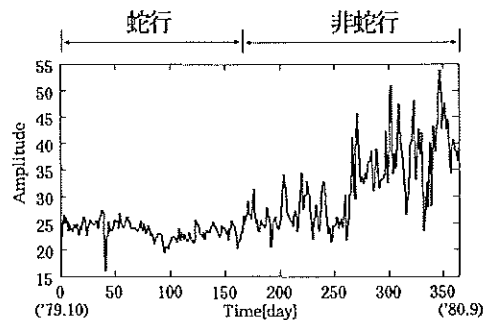


Fig.3 Tidal level difference between Kushimoto and Uragami

Table 1 Duration of Kuroshio's winding

1906年4月～1912年9月(6年5ヵ月)
1917年2月～1922年3月(5年1ヵ月)
1934年3月～1944年前半(10年程度)
1953年7月～1955年12月(2年5ヵ月)
1959年5月～1963年5月(4年)
1975年8月～1980年3月(4年7ヵ月)
1981年10月～1984年4月(2年10ヶ月)
1986年11月～1988年6月(1年7ヶ月)
1989年10月～1990年11月(1年1ヶ月)

ここでは下線をつけてある1975年8月から1980年3月の蛇行について解析を行う。この期間のデータには欠損が少なく、補間等の補正を行う必要がない。この蛇行期間を中心に蛇行状態、非蛇行状態及び各状態への過渡状態の4つを解析対象とする。Table 2 にその詳細を示す。

Table 2 Flow conditions of Kuroshio

流路	代表年月	データ数
過渡状態 (非蛇行→蛇行)	'75.7→' 75.8	1488
定常蛇行状態	'76.5→' 76.6	1440
過渡状態 (蛇行→非蛇行)	'80.3→' 80.4	1464
定常非蛇行状態	'81.6→' 81.7	1464

2.2 最近のデータで見る蛇行開始時の流路パターン

黒潮は、平成17年2月現在の時点で安定蛇行期にある。第五管区海上保安本部の流況観測によれば、非蛇行から蛇行への遷移は同年7月27日から8月9日の間の2週間内に起こっている。

遷移の様子を Fig. 4 に示す [4].

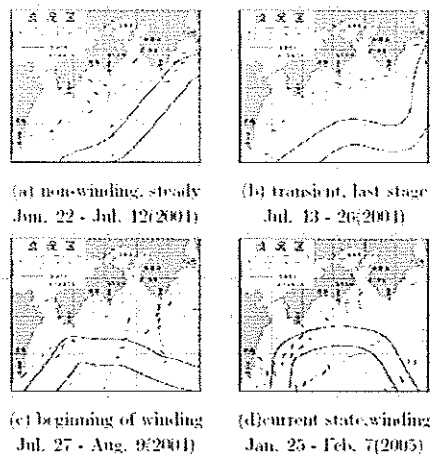


Fig.4 Transient state from non-winding to winding

3 解析方法

各データのパワーと周波数の検出には FFT を用いる. STFT は FFT に窓関数をかけたもので, 時間軸にそった周波数の変化を解析するのに用いる. WT は各周波数にあった窓幅で時間周波数解析を行うものであり, STFT と同様に時間軸にそった周波数の変化を解析を行うために用いる [6]. ここで, 本研究で用いた STFT と WT について説明する.

3.1 STFT

STFT は WT と比べて周波数分解能に優れている. ここでは, 基底関数 e^{-it} に適用する窓関数 $w(t)$ として Gabor 関数を用いる. $w(t)$ は

$$w(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

σ : 時間窓幅

この $w(t)$ を用いた信号 $f(t)$ の短時間フーリエ変換 $f(\omega, b)$ は次式で定義される.

$$f(\omega, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-b)^2}{2\sigma^2}} e^{-i\omega t} f(t) dt \quad (2)$$

- $f(t)$: 時刻 t における潮位の信号値
- $f(\omega, b)$: 短時間フーリエ変換
- ω : 周波数
- b : シフトパラメータ

3.2 WT

STFT では $w(t)$ は一定, すなわち時間幅は一定である. しかし, 低周波には広い時間窓, 高周波には狭い時間窓を用いるのが理想的である. WT では $w(t)$ の窓幅を周波数に応じて変化させる基底関数を用いる. したがって, WT では周期成分の著しい変化や不連続点の検出が容易になる.

関数 ϕ が (3) 式の条件を満たすとき, ウェーブレット $\phi^{(a,b)}(t)$ を (4) 式のようにおく [6].

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\phi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3)$$

$$\phi^{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

a は拡大縮小の相似変換を表し, b は時間軸上での平行移動を表す. ここでもウェーブレットとして Gabor ウェーブレットを用いる. Gabor ウェーブレットは STFT における窓関数 $w(t)$ と同様のものであり, 周波数の概念をもっとも忠実にあらわしたウェーブレットである. ウェーブレットにフーリエ基底 e^{-it} をかけた関数 $\phi(t)$ を Eq. (5) で定義する.

$$\phi(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} e^{-it} \quad (5)$$

この $\phi(t)$ を基底として解析を行う. ここで, WT は (6) 式のように定義される [6], [7].

$$f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-b)^2}{2\sigma^2}} e^{-i\frac{t-b}{a}} f(t) dt \quad (6)$$

4 解析結果

4.1 FFT

FFT による解析結果を Fig. 5 に示す. 潮位変動には 4 つの周期, 12.0 時間 (S2 tide), 12.5 時間 (M2 tide), 23.8 時間 (K1 tide), 25.6 時間 (O1 tide) があることが分かる (後出の Table 3). すなわち, 潮位の変化は約半日を周期としているものと約 1 日を周期としているものがあり, さらにそれぞれが少しずつ異なった 2 つの周期から構成されている. 半日を周期とするものを半日周潮 (semi-diurnal), 1 日を周期とするものを日周潮 (diurnal) と呼ぶ [8].

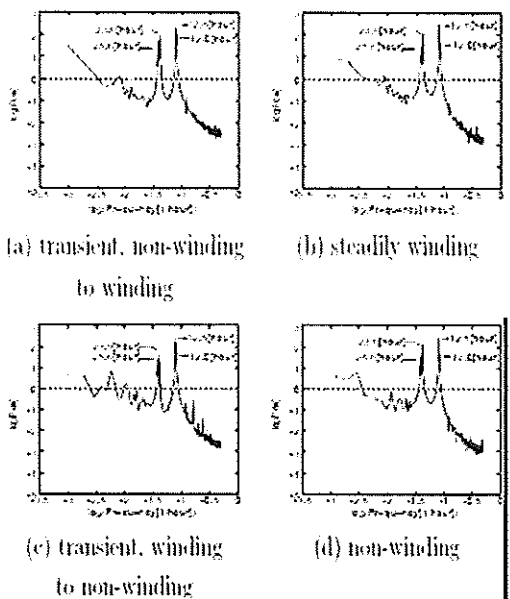


Fig.5 Results by FFT

Fig. 5(a)~(d)のいずれも見掛け上は顕著な差異が無い.すなわち,FFT には蛇行の影響が現れにくいことを示している.

4.2 STFT

FFTと異なりSTFTでは時間軸に沿った周波数の解析を行うことができる.この利点を生かしてSTFTを行った結果を時間-周波数の2次元面で画像化する.このとき,パワーの大きさを256階調の濃淡レベルで表す.パワーの最小0を黒,最大255を白とし,濃度を線形変換して画像化した結果をFig.6に示す.

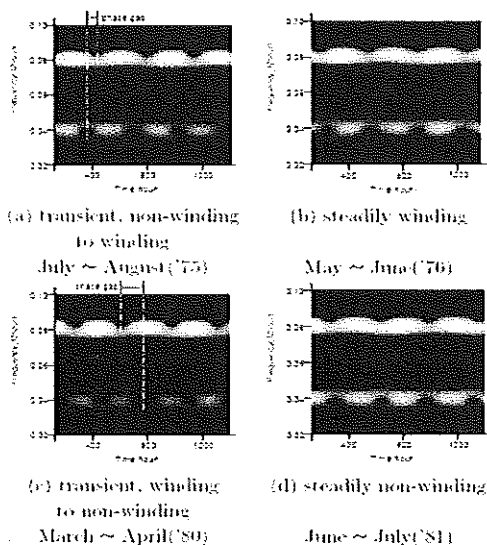


Fig.6 Results by STFT

これらの画像から,半日周潮及び日周潮のパワースペクトルが周期的に強弱を繰り返していることが分かる.さらに,安定状態((b),(d))では,半日周潮と日周潮のパワーの周期がほぼ同期している.いっぽう,過渡状態((a),(c))では半日周潮と日周潮の同期にずれが生じている.後述するように,内湾での位相解析から得られた結果とは少し違っている[1],[2].

また,FFT においてみられた4つの周期がSTFTでも確認できる.すなわち,Fig.7(a)の矩形実線で囲まれた枠内には半日周潮と日周潮の強いパワーの他に,それぞれと対になる2つのサブ周波数成分(12.0 hoursと25.6 hours)が見られる(細い破線の枠内参照).

いっぽう,矩形枠の部分以外では主要な半日周潮と日周潮のパワーが大きくなり,2つのメ

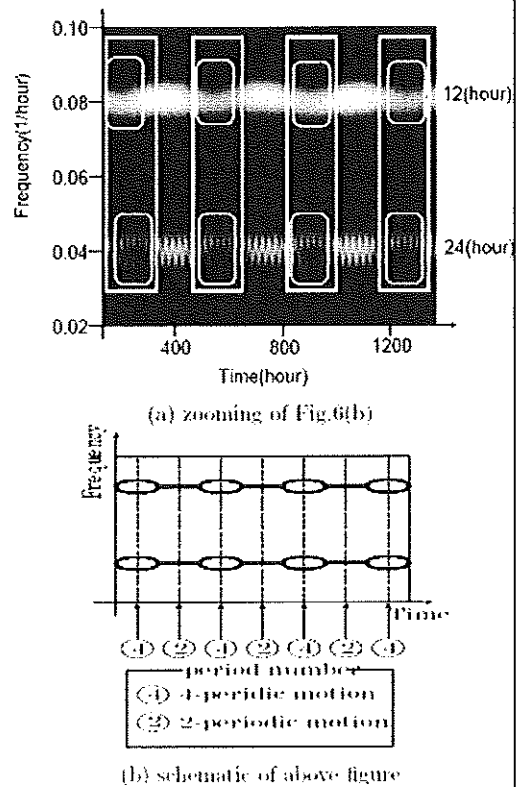


Fig.7 Two dominant frequencies with individually associated frequencies

イン周波数成分(12.6 hours, 23.9 hours)だけがあるかのように見える.これは,主要な周波数成分のパワーが大きくなることで実際には近くにあるサブ周波数(12.0 hours, 25.5 hours)が区別できなくなるからであろう.Fig.7(a)を簡単に模式化した図をFig.7(b)に示す.

4.3 WT

WTの結果を Fig. 8 に示す. STFT と比べて時間分解能がよい. しかし, 周波数分解能では前出の STFT の方がよい. したがって, WT では Fig. 7(a) で見られた 4 つの周期が識別できない.

しかし, Fig. 8 では, 半日周潮および日周潮ともにパワーのピークがはっきり分かる.

また, STFT の場合と同様, 過渡状態では半日周潮と日周潮のパワーの間にずれがみられる. さらに, 時間分解能が向上したことにより, 半日周潮と日周潮のパワーの周期の違いがより明瞭に現れている.

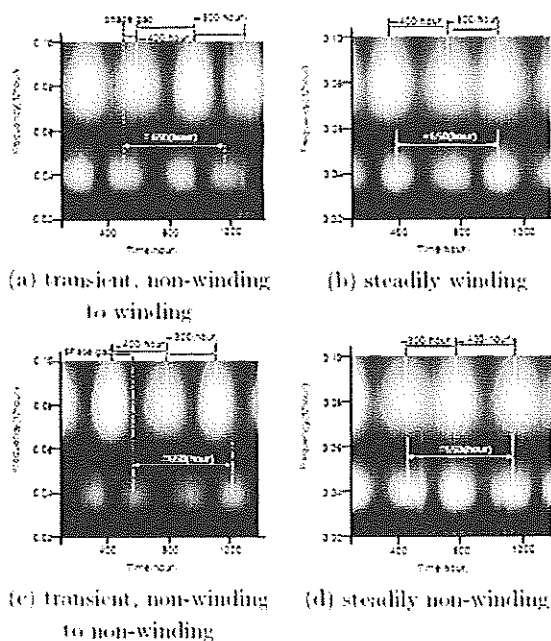


Fig. 8 Results by WT

WT の結果から, 潮位パワーの周期は半日周潮で約 700 時間(約 29 日), 日周潮で約 650 時間(約 27 日)である. また, 蛇行状態および非蛇行状態で, 12 [hour] と 24 [hour] の周期は約 400 [hour] おきに規則的に増減を繰り返すことが分かる. これは, 前出の Fig. 2 で見られた包絡線の腹に相当する大潮(spring tide)と包絡線の節に相当する小潮(neap tide)の影響によるものと考えられる. 蛇行過渡状態ではこの周期がやや短くなり, 300 [hour] の周期が現われている. また, 12 [hour] 周期成分と 24 [hour] 周期成分の不連続点にわずかな位相のずれが確認された.

半日周潮と日周潮の周期の間のずれが推移

する様子を Fig. 9 に示す. 横軸の時間は 1 月 1 日を始点としている. 図の白枠で囲まれた部分において, 半日周潮と日周潮の周期のずれが最大になる. これは 3 月と 9 月, すなわち春と秋に起こっており地球の公転が関係していることが分かる [1].

さらに, Table 1 で見られたように, 周期のずれが最大となる時期の前後で非蛇行期から蛇行期, あるいは蛇行期から非蛇行期への移行が起こっている. ただし, ここでの結果が一般性を有する事実であるかどうかは判然としない.

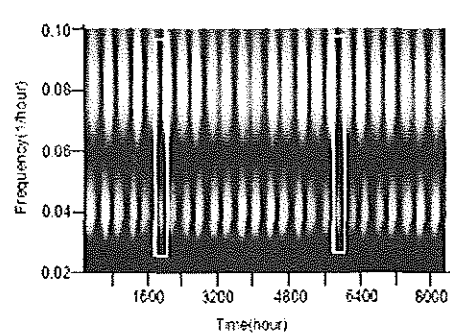


Fig. 9 Relationship between half day period and full day period over whole year (1975)

潮位パワーの周期変動は, 主に月の運航と密接に関連しているようである. 地球から見て, 新月と満月を生じる状態を Fig. 10 に, 月の最北, 最南の状態を Fig. 11 に示す. 月の公転面は赤道面に対して 28.5° 傾いているので, Fig. 11 のように, 地球に対する月の位置には最北と最南が生じる [1], [8].

有明海における筆者らの潮位解析から, 半日周潮のパワーが強まる時, 月は常に新月か満月のいずれかの状態にある. いっぽう, 1 日周潮のパワーが強まる時は, 月は常に最北か最南のいずれかにある [1], [2], [8]

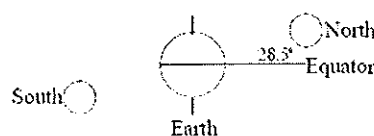


Fig. 10 New moon and full moon

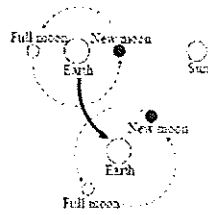


Fig.11 Position of moon and earth

5 潮位変動のカオスの挙動

5.1 位相面軌道

二次元での位相面軌道の例をを Fig. 12 に示す。

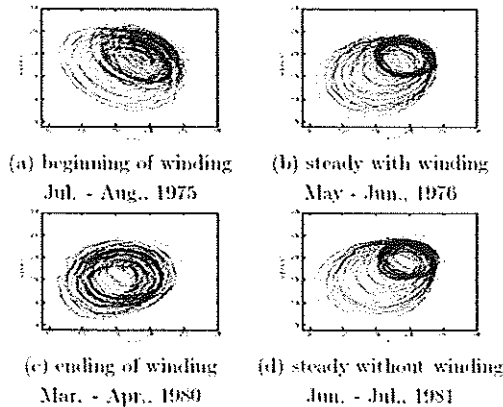


Fig.12 Phase trajectories of tidal level motion

非蛇行安定状態(b)と蛇行安定状態(d)が螺旋状の楕円形軌道を示すのに対して、蛇行が始まる遷移期の(a)および蛇行が終息する(c)では独特のパターンを描く。

5.2 ポアンカレ・リターンマップ

約半日毎に現れる潮位の最小値(干潮時)に着目してリターンマップを求めた。すなわち、連続した最小値の2点を x-y 座標に繰り返してプロットすることによって Fig. 12 の流動状態に対応したポアンカレ・リターンマップが得られる (Fig. 13)。

位相面軌道では判然としなかった蛇行の影響が遷移期(a), (c)に現れている。とくに蛇行開始時の(a)において顕著である。また、月、太陽、地球の運航状態(方位)がリターンマップに反映され、季節毎に特徴的なパターンが出現するのがわかる。ここで特徴的に現れたパターンについては次項で詳しく述べる。

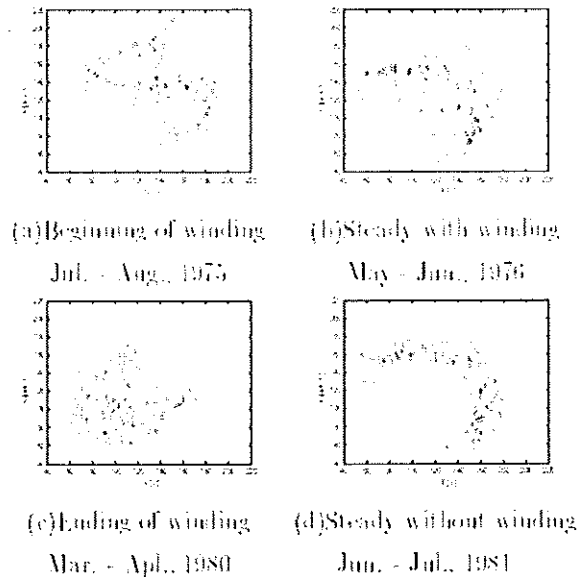


Fig.13 Poincaré return maps of tidal level

6 考察

ここでは FFT 解析で現れたパワーのピークとリターンマップに現れた黒潮蛇行の影響について考察する。月と太陽の作用によって生じる潮位の4つの周期を Table 3 に示す [9]。

Table 3 Four periods of tide caused by interaction of sun and moon

	Moon	Sun
Half day period (semidiurnal tide)	M2 tide 12.4 hours	S2 tide 12.0 hours
Full day period (diurnal tide)	O1 tide 25.5 hours	K1 tide 23.9 hours

前節の FFT 解析で得られた4つの周期は文献値とはほぼ一致している。

Fig. 14 は有明海湾奥の大浦観測所で観測したデータをリターンマップで描いたものである。データ数はいずれも 1024 個で、データの中心は春分の日、夏至、秋分の日、冬至である。これらの日の 24 個のデータと前後の各 500 個のデータを併せてた 1024 データによってリターンマップを作成している。大別して2種類のパターンに分けられる。なお、東京湾、伊勢湾、大阪湾および錦江湾でも同様のパターンが確認されている [1], [2]。

いずれも水平から 45 度の直線を回転軸とする順 U 字形(春、秋)、または逆 U 字形(夏、冬)の

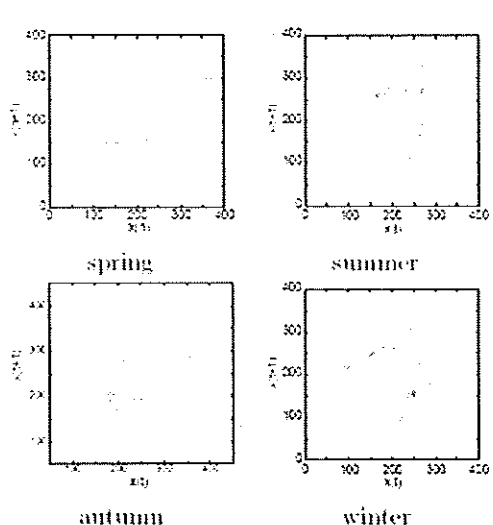


Fig.14 Return maps of Ariake Bay

軸対称パターンである。ここで、U字の腕の長さが湾内潮汐の共振強度を表し、U字のノード(ボトム)が安定点に対応している。

春分の日および秋分の日を中心とする春季と秋季のデータでは、潮位の最小ボトム値が安定点となり、夏至および冬至を中心とする夏季と冬季のデータは、最大ボトム値が安定点となる。また、周年のリターンマップは、水平から45度の傾斜軸に対してU字羽根を開閉する結果、位相面軌道(アトラクタ)に近似し、45度傾斜軸に軸対称の円形ないし8字形を描く[7]。

黒潮が蛇行していない場合は、有明海その他の内湾で観測されたリターンマップの形状がここでも再現されると見なされる。たしかに、Fig13(b)は逆U字型(夏至-冬至パターン)であり、春分の日から夏至にかかる時期としては大きな矛盾はない。いっぽう、Fig.13(a)は完全な夏至パターンであるはずであるにもかかわらず、45度傾斜軸を対称軸とする二つの円、すなわち8字形のように見える。蛇行していない場合の夏至パターン Fig13(c)と比較すれば、この違いが良く分かる。すなわち、Fig13(a)には蛇行の影響が明らかに認められる。

7 まとめ

黒潮の蛇行が始まる時期から終息するまでの潮位データを解析し次ぎの結論を得た。

1. FFT パワー解析から、半日周潮と日周潮の主要な二つのピーク(12.5 hours, 23.8 hours)の他に、それぞれのサブピーク(12.0 hours,

25.6 hours)があることを確認した。

2. 短時間フーリエ変換(STFT)による時間-周波数解析から、FFT解析の結果に現れた4つのピークが小潮時(neap tide)において顕著に見られることを示した。

3. ウェーブレット解析(WT)から、地球に対する月の公転周期が関係する約650時間と約700時間の周期が存在することを認めた。また、半日周潮の周期と日周潮の周期が推移する過程を可視化し、冬至と夏至で両位相が一致し、春分の日と秋分の日に最大の位相差を生じることを示した。

4. 黒潮蛇行の影響は、カオス解析手法を用いることによって確認できることを示した。とくに、ポアンカレ・リターンマップに蛇行の影響が明瞭に現れる。

半日周潮と日周潮の周期のずれが黒潮の蛇行、あるいは蛇行から非蛇行への移行の時期と重なるのは偶然とは考え難く、その機構の解明が今後の課題である。

謝辞

本研究に参加した九州工業大学情報工学部制御システム専攻修士学生 湯上晋一君に感謝します。

参考文献

- [1] 緒方純俊, 桐本賢太, 計測自動制御学会九州支部大会, (2004)
- [2] K. Kirimoto, S. Sakata, K. Nagatsu, S. Ogata, SICE2002, MP03-2, p210-213(2002)
- [3] K. Kirimoto, S. Ogata, SICE2002, MP03-3, p213-217(2002)
- [4] <http://www.kaiho.mlist.go.jp/KAN5/kaiyo/sokuhoid.html>, 第5管区海上保安本部, 平成17年2月7日
- [5] 日本海洋データセンター http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/tide_data.jp
- [6] Charles K. Chui, ウェーブレット入門, 東京電機大学出版(1993)
- [7] 川上 高広, 修士論文, 九州工業大学情報工学部(1999)
- [8] 能沢源右衛門, 新しい海洋科学, 成山堂書店, pp.183-210(1992)
- [9] 理科年表, 国立天文台編, 丸善, pp.600(2004)

九州共立大学総合研究所紀要投稿規程

1. 投稿論文の内容は、福原学園の教員・職員（九州共立大学総合研究所客員研究員を含む）及び大学院教員の指導のもとで学生が行った研究、活動、並びに福原学園に反映される研究、教育、活動に関するものとする。
2. 投稿者は、福原学園の教員・職員（九州共立大学総合研究所客員研究員を含む）、及び福原学園に属する大学・短大の大学院生、学生、並びに教員が紹介した者、および共同で研究を行った者とする。
3. 論文の種類は、査読論文、研究論文、研究報告、技術報告、解説、レビュー、研究応用および実用化の紹介、教育運営および管理に関する実践事例の紹介、その他とする。
4. 原稿は九州共立大学総合研究所企画室に提出するものとする。
5. 論文の採否は、九州共立大学総合研究所紀要編集委員会が決定する。
6. 投稿論文の長さは、原則として10頁までとする。これを超過する場合は、九州共立大学総合研究所紀要編集委員会の承認を必要とするものとする。
7. 投稿論文の受理年月日は九州共立大学総合研究所企画室が受理した日とする。
8. 原稿の作成は「原稿作成要領」に従って行うものとする。
9. 掲載された論文の著作権（著作権第27条及び第28条に規定する権利を含む）は九州共立大学に帰属する。また、著作者は論文に係る著作者人格権を行使しないものとする。ただし、著作者自身が自分の論文の全部または一部を複製、翻訳、翻案などの形で利用する場合、九州共立大学の許諾を求めると必要はない。また、第三者から、論文の複製、転載などに関する許諾の要請があり、九州共立大学が必要と認めた場合は当該著作権の利用を許諾することがある。
10. この規程に定めるもののほか、投稿に関し必要な事項は九州共立大学総合研究所紀要編集委員会において決定する。

附 記

1. この規程は、平成20年6月1日から実施する。
2. この規程は、平成21年2月2日から実施する。

紀要発行に関する事

1. 九州共立大学総合研究所紀要は年1回発行する。
2. 紀要編集委員会は必要に応じ開催する。
3. 紀要編集委員会委員長は九州共立大学総合研究所長とする。
4. 紀要編集委員会の事務は総合研究所企画室において処理する。

九州共立大学総合研究所紀要 審査付論文の査読要領

1. 九州共立大学総合研究所紀要編集委員会（以下、紀要編集委員会）委員長は、紀要編集委員会を開催し、投稿された原稿に関連する査読者を割り当てる。査読者は、原則、原稿1編につき2名とする。
2. 査読者による査読は、原稿の内容、及び、新規性・発展性・独創性・実用性・信頼性のいずれかについて行うものとする。
3. 査読者は査読を行った原稿に対し「無条件採用」、「修正要求（コメント）あり」、あるいは「不採用」のいずれかを決定し、査読報告書の所定欄に記入する。「修正要求（コメント）あり」の場合はコメント等を記入する。「不採用」の場合は、その理由を記入する。なお、査読報告書の査読者は、無記名とする。
4. 査読者は、別に定める査読報告締め切り日までに紀要編集委員会に査読報告書と査読を行った原稿を提出する。
5. 紀要編集委員会委員長は、査読報告書と査読を行った投稿原稿のコピーを投稿者に渡す。
6. 投稿者は別に定める日までに、修正した最終原稿（Word file と pdf file）と査読報告書に対する対応報告書を紀要編集委員会に提出する。
7. 紀要編集委員会は、論文の採否を決定する。

附 記

1. この規程は、平成21年2月2日から実施する。

九州共立大学総合研究所紀要編集委員会名簿

委員長 宮入嘉夫（総合研究所長）
生地文也（大学院工学研究科長）
市瀬洋子（経済学部長）
小島治幸（工学部長）
堀内担志（スポーツ学部長）
能智紀台（総合研究所地域支援部門長）
尾道建二（総合研究所企画室長）

九州共立大学総合研究所紀要 第2号

平成21年4月27日発行

発行者 九州共立大学総合研究所
〒807-8585 北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8
TEL&FAX 093(693)3222
E-mail souken@kyukyo-u.ac.jp

印刷所 株式会社 大成

Contents

Refereed Paper

A study on the PSO added fancy effect and its tuning up by Real Coded Genetic Algorithm	Tetsuji MIHARA, Jiayi XU and Xiaoqing SHEN	1
A demand leveling method on the project management considered with separating the uncritical events by using Genetic Algorithm	Tetsuji MIHARA, Kecheng WANG and Guohui FAN	11
A study of park management and facilities of green tourism. Researches in Shanghai and Thailand	Yuji YASHIMA, Kenji HOSONO, Tao XU	21
Effect of hydrogen sorption kinetics of metal alloys for hydrogen storage using Nb ₂ O ₅ as catalyst	Nobutaka HAYASHI, Yoshio MIYAIRI, Satoshi HUKADA, Yoshikazu MAKIHARA	29
Effective hydrogen production by use of chemical heat pump and high-temperature nuclear heat	Satoshi FUKADA	35
A Study on the characteristics of end bearing plug effect using open end steel tube piles	Hiroshi KARIYAMA, Yoshito MAEDA, Masuji YAMADA	43
Geometrical acoustic prediction method of sound fields with scattering coefficients for room boundary	Kunitaka NAKANO, Hitomi FURUSAWA, Katsushi EBUCHI, Hiroshi FURUYA and Soichiro KUROKI	47
A study on acoustic quality of concert auditoria from the point of view of symmetrical features of room shape	Hitomi FURUSAWA, Yoshiko KATANOSAKA and Hiroshi FURUYA	57
Antibacterial activity of <i>Sarcinocrystis</i> sp.	Eriko NISHIO, Setsuko SAKAKI, Yuji YMAGUCHI, Hiroyuki TAKENAKA, and Yoshifumi TOMITA	71

Research Paper

The Problem and The Trend of Small and Medium -sized Enterprises Accounting Guideline	Katsuyoshi OKABE	75
A study of nonlinear dynamics in the Einstein-Friedmann eq.	Yosuke TANAKA, Takefumi SHUDO, Tetsutaro YOSHINAGA, Fumiya SHOJI	81
Relationship between Sensitivity Enhancement and Adsorption of Surfactant-Methylene Blue Complex on filter paper on Spectrophotometric Rapid Determination Method of Anionic Surfactants	Tetsutaro YOSHINAGA, Chiaki TAHARA, Yoshiyuki MICHIAKI, Takuro YOSHIHIRO, Masaaki KOGA, and Toshifumi TANIMURA	87
Characteristics of Ti oxide films deposited by electron beam equipment in the atmosphere of oxygen gas (Crystal structure and Photocatalytic effect)	Norimoto NOUCHI, Fumiya SHOJI	95
A study of diamond film growth on Si (100) surface by a low-energy CH ₄ ⁺ ion beam technique (Experimental apparatus and its performance)	Fumiya SHOJI	99
A Supporting System of English Education with Latent Semantic Analysis (LSA) ~ Supporting system for more motivation and interest of students ~	Fumio MORIMOTO, Yuka TOKUDOME, Xiaoqing SHEN, Tetsuji MIHARA and Chiyuki KANAMARU	105
A study on environmental changes in the Hakata bay by using GIS based	Yoshinori HARA, Haruyuki KOJIMA and Yunpeng Li	115
The deformation characteristics of soft clay ground and abutment foundation subjected to lateral movement	Shinji ARAMAKI, Masuji YAMADA, Kiyoshi UNO, Yoshito MAEDA and Hiroshi KARIYAMA	121
Environmentally Friendly Waste Treatment by Calcium oxide	Hidetsugu NAKAMURA, Michio KOGA and Hiroshi HATA	125
Work on the investigation and protection of the endangered plant in the Gulf of DOKAI	Masaru NARITOMI, Shigeru YASUDA, Nobuhiro KAMEDA	129
Studies on environmental surveillance of halophyte (shibana) around DOKAI gulf	Daichi TOKUDOME, Shigeru YASUDA, Nobuhiro KAMEDA, Fei YANG, Kunihiko TANAKA, Kenya HAYASI	133
A new trial of the library information literacy education : Over class support of the department of economics "Basic Seminar in Career Education"	Mika YAZAKI, Yumiko UWAI, Mayumi OMATSU, Takafumi MATSUDA	137
The action to the library information (literacy) education and the effect : Triggered by a Middle	Mika YAZAKI, Yumiko UWAI, Mayumi OMATSU, Masaru NARITOMI,	143
This study aims to clarify the tidal motion at the tip of the Kii peninsula where Kuroshio influences on it	Sumitoshi OGATA, Kenta KIRIMOTO, Takahiro KAWAKAMI	149