ISSN 1882-7144

九州共立大学総合研究所紀要

2011年3月
Journal of Kyushu Kyoritsu University Research Center
第4号

目　次

九州共立大学総合研究所
（九州共立大学 九州女子大学 九州女子短期大学）

【審査付き論文】九州共立大学総合研究所紀要 第4号 2011年3月
Journal of Kyushu Kyoritsu University Research Center No.4 March 2011

中国上場会社における会計不正行為の研究

九州共立大学経済学部 准教授 徐 陽

Accounting fraud in public listed companies: the Case of China

Yang Xu

Abstract

This paper discusses the future trend of accounting fraud by analyzing the psychological factors involved in the process and summarizing the means and theories of such accounting misbehavior in various countries in literature. Based on these insights, I then investigate the cause of the accounting fraud and the accounting misbehavior of Chinese listed companies based on four accounting fraud theories. Through these thorough analyses, a systematic understanding is formed to serve as a solid foundation for future studies in this area.

Keywords: *accounting fraud, public listed company*

1. はじめに

近年、会計不正行為による被害は、各国の社会的な重大問題となっており、世界的な課題として注目され、各国の政治・法律においては根治できない難題となっている。

欧米諸国の中、大国であるアメリカにおいてさえも、2001年以後、一連の会計不正事件が発生した。エンロン事件[1]、ワールドコム事件[2]、ゼロックス事件、グローバル・クロッシング事件[3]、マック事件など、踵を接して表面化している。アメリカのWEISI格付会社は、7,000社以上の上場会社に対して調査を行った。その結果、三分の一ほどの上場会社に利益の粉飾問題があると報告されている[4]。

一方、中国においても、1990年以降、上場会社の粉飾決算が続発した。例えば、銀広夏事件[5]、瓊民源事件[6]、紅光実業事件[7]などの上場会社の会計不正事件がそれである。それらが公表されたとき、学者たちは氷山の一角として看過しているが、一般投資家は大きな衝撃を受けた。これらの会計不正事件は、資本市場の秩序を撹乱し、投資家の合法的な権利に損害を与えた。

2000年に入っても、会計および監査業界の業務執行において、「五假」(5つの偽り[8]) 問題が依然として発生している[9]。政府の関連部門は、それらの偽造問題を何度も禁止しようと試みたが、結果的には止められなかった[10]。そのため、会計および監査業界への信頼度[11]と評価に関して、ますます一般投資家の不信感を募らせた。

2001年の国家監査省(日本の金融省に相当)の検査結果[12]で明らかとなったことは、会計士事務所の監査品質問題は主に故意と過失の二つの側面である。すなわち、故意の問題については、会計士事務所が上場会社の財務情報の虚偽問題を知りながら、隠蔽して開示しなかったことである[13]。もう一方の過失の問題については、会計士事務所が上場会社における財務情報の虚偽、重大事項の遺漏の存在について分からなかったことである[14]。

本稿は、まず、諸外国の先行研究である会計不正理論について概観したうえ、中国上場会社の会計粉飾・会計不正行為の原因について考察する、そして、よく見られる会計不正行為の手段を要約し、会計不正行為者の心理要因を分析することにより、会計不正行為の特徴を把握し、課題と今後の動向を展望することにある。

2. 上場会社における会計不正行為の理論研究

上場会社の会計不正行為は、中国独自に有するものではなく、歴史的に長く、その影響は広範かつ深刻で、国際的な問題である。例えば、17世紀末から18世紀初頭にかけての南海会社事件[15]があり、当時の影響としては、直接的に二つの結果を引き起こした。一つは、1719年のバブル会社禁止法[16]の制定であり、もう一つは公認会計士を自ら主体とする民間監査の出現である。

そこから会計不正に対する法規と民間監査との連携が始まった。ところが、民間監査体制下での資本市場は、時代とともに変遷してきたにもかかわらず、会計不正が常時に発生し、企業統治の重大な難題になっている。各国の研究者の会計不正に対する研究は多種多様であり、以下のように要約することができる。

会計不正は不正行為の範疇に帰属するため、諸外国における代表的な不正行為に関する研究は、会計不正の動因分析に用いることができ、会計不正に関する研究の支柱となり得る。以下、諸外国における代表的な下記の 4 つの会計不正の動因理論[17]を援用して、会計不正を分析することとする。

2−1　会計不正の氷山理論（二要因論）

氷山理論は、会計粉飾・会計不正行為を海面上の氷山にたとえ、表面に現れているのは氷山の一角であり、さらに膨大なリスクが海面下に隠れているという比喩を用いる考え方である[18]。仕組みと行為の側面から会計不正を考察すると、海面上の部分は仕組みであり、海面下の部分は行為の部分である。仕組みの内容は、組織の内部的管理の側面であり、これは客観的に存在するため、識別しやすい。不正行為の内容は、主観的、個性的であり、容易に隠蔽することができる。

氷山理論の説明は、一つの会社が会計不正行為を行う可能性があるか否かが、その内部統制の制度の健全性と厳密性によって決定されるだけでなく、最も重要なことは、当該会社に資金繰りの圧力が存在するか否かであり、潜在的に道徳に反する存在の可能性があるか否かで決められる。

この理論で強調されたのは、会計不正のリスク要因のなかには、個性的な行為要因が最も危険であり、一層の注意を要する必要があるとの説である。したがって、公認会計士が監査を行うとき、仕組みの側面に注目するのみならず、内部統制、内部管理の内容に対して評価を行い、個別の行為の側面に注意すべきであり、職務上の判断により分析し、人的側面の不正リスクを発掘することに一層の注意を払うべきとする。

2−2　会計不正の三角形理論（三要因論）

最も早く会計の不正要因の学説を唱えたのは、アメリカの「内部監査の父」と呼ばれる Lawrence B・Sawyer 教授であるといわれる[19]。1950 年代に、彼は粉飾決算が生じるには三つの条件が必要であると主張した[20]。すなわち、その行為が会社にとって非常に重要であること、チャンスがあること、および対外的に理にかなう説明がつくという三つの条件が揃わないと、粉飾決算が生じない。この説は以降の会計不正理論の発展のための基礎を築いた。

アメリカの監査協会の創始者である Albrecht 博士[21]（1995）は、さらに会計不正の理論を発展させた。博士は、会計不正行為が生じるには、圧力、機会と口実の三つが共通的に機能すると主張した。この圧力には、経済的な圧力、特殊な悪による圧力、および仕事関連からの圧力、その他の圧力という四つの類型が包含される。統計によると、前の二種類の圧力が全体の約95%を占めている。また、機会には主に次の六項目が含まれる。すなわち、不正行為を発見できるような内部統制の欠缺、仕事・作業の品質を判定する方法の欠如、違反に対する懲罰措置の欠缺、情報の非対称性、無知・能力の欠如、監査制度の不備である。会計不正の発生の有無または多少は、以下の要因によって作用する。すなわち、不正行為を規律する法律システム、当該職位が属する業界の性質、およびその組織系統における重要程度、当該領域に関わる各種の力の強弱である。

不正行為者がよく使う口実には、法律条文自身があいまいであるため、曲解して利用できること、他人がそうしたから自分もしないと損だということ、やむを得なく、仕方がなかったということ、一時の困難を乗り越えるためであるということ、誰もこれによって迷惑をかけたりしないということ、自己の働きがもっと多くの報酬を得るべきであるということ、自己の着眼点（動機）はあくまでも改善のためであるということなどが挙げられる。したがって、会計不正行為を管理と防止するには、内部統制を強化することによって、不正の機会を取り除くのみならず、圧力と口実を取り除くことを通して、不正を抑制する必要がある。

2−3　会計不正の GONE 理論（四要因論）

これは、Bologna 氏[22]を含む数人が 1993 年に主張し始めた理論である。この説の焦点は、会計不正が四つの要因、すなわち貪欲（Greed：G）、機会（Opportunity：O）、要求（Need：N）、暴露（Expo・sure：E）から成り立っていると考え、これら四要素は相互に機能し、密接に関連し、ともに不正の程度およびリスクを決定するというものである。

この説は、会計不正が生じる四つの要件を示している。すなわち不正行為者は、貪欲の心理を有し、かつ、充分な金銭財産を必要とするときに、チャンスさえあれば、事後にうまく隠せば見つからないだろうという心理で、会計不正を実行すると解釈する。また、貪欲と要求が行為者の個人と関連し、機会と暴露は多くの組織環境と一層密接に関連していると解釈する。この点は、二要因論と類似している。三要因論と比べてみると、四要因論は、不正の「動機」を「要求」として解釈し、「道徳の価値観」を「貪欲」に解釈しており、

さらに「暴露」という要因を加えている。会計不正が発見・暴露される可能性の程度、および発見・暴露された後の処罰の程度は、会計不正行為者が不正行為を実施するか否かに影響を与えると主張している。

2−4 会計不正のリスク要因理論

これは、Bologna 氏らが上記の GONE 理論の上に発展・形成されたものである[23]。現在では会計不正の動因に関して最も完成に近い理論であるといわれる。このリスク要因理論では、粉飾リスク要因を個別リスク要因と一般リスク要因に区分する。個別リスク要因とは、人により異なり、組織のコントロール範囲以外の要因を指しており、道徳・品質および動機などの要因を含んでいる。一般リスク要因とは、組織または組織自体のコントロールにより要因を抑制していることを指す。つまり、会計不正の機会、不正が発見される確率、および発見された後の不正行為者に対する処罰などの性質および程度の要因を含んでいる。一般リスク要因と個別リスク要因が混合し、かつ、不正行為者にとって利益があると思われるとき、会計不正が生じうるとする。

1999 年に Howe 氏[24]は、会計不正により大幅に収益を向上させることができるが、「一般に公正妥当と認められる会計原則」(GAAP)[25]による会計方針に反しているため、満足できる効果は得られない。したがって管理層は、様々な方法で試行錯誤しても手の打ちようがないとき、リスクを犯しても無謀な財務報告の不正を選ぶことになる。

3. 会計不正行為の要因研究

前章では、代表的な会計不正の理論の概要を述べたが、本章では中国における会計不正に関する研究と照合しながら、会計不正の要因に対する比較、分析の結果に重点を置くことにする。

中国の監査基準に関して、現行の『中国注冊会計師監査準則第 1141 号—財務報告監査において会計不正に対する考慮』の第 12 条には、会計不正の発生の要因を、①動機または圧力、②機会(チャンス)、③口実、の三つに要約している。したがって、この会計不正の要因に基づいて、会計不正行為を研究する場合、不正行為者の基本的な特徴、行為者の動機およびその所属環境と結びついて系統的な分析を行う必要があると考える。つまり、中国の監査基準は三要因理論に類似していると考えることができる。

三要因理論に関して、1980 年に M.Romney, W.S.Albrecht and D.J.Cherrington は、不正を助長する要因を、①環境圧力(Situational Pressures)②機会(Opportunity)③個人の品格(道徳)[Personal Characterristics (Ethics)]に要約している。[26]

なお、中国においては、2002 年に深圳天健信徳会計士事務所が公表した「会社詐欺と監査対策」においては、会計不正を生じる原因は、①動機、②機会、③忠実性の欠缺という三つの要因から生じたものであると指摘している。その中での任意の一つ、または二つの要因の逓増可能性があるとき、会計不正のリスクが増加する。もし、三つの要因とも逓増する可能性があるとき、会計不正の発生は確実に生じるであろうとしている。[27]

3−1 不正行為者の基本的特徴

不正行為者の基本的特徴として、1998 年に D.Ginaker 氏[28]は、下記の三つの典型的な特徴があるとしている。

(1) 管理層の不正は、通常、内部統制メカニズムの拘束を受けない。

(2) 不正は、常に財務報告を手段として会社の健全性と繁栄の表面だけを偽装する。

(3) もし資産の横領に関わる場合、不正はしばしば複雑な業務取引のどんぶり勘定によって包み隠され、かつ、第三者に影響を及ぼす。

3−2 不正行為者の動機

人の行為は動機により推進されて発生し、会計不正行為の根源も動機により発生する。中国の上場会社の会計不正の動機は、主に以下の側面に現れていると要約できる。

(1) 融資(圏銭)。ある企業は、融資または増資の目的を達するため、虚偽の財務諸表を作成し、資金提供者を説得した。また、上場会社の会計不正は現行の証券募集体制とも関連がある。つまり、①中国証券監督管理委員会は、会社を上場するために、上場前 3 年間の年度利益を計上することを要求している、②上場会社の純資産利益率が 6%以上の場合、追加割当を可能とする、③上場会社の新たな新株発行は、それを引き受ける会社と発行会社との相談により発行価額が決められる。この 3 点は、上場会社の不正行為を招く要因となる可能性がある。

(2) 取引市場での価格操作。企業が株式を上場すれば、株価の維持または予期価額に達するように、企業管理層はしばしば虚偽の会計報告書を作成して、その目的を達する。株価の動きの予想をもって、一時的に株価を下落させ、操作行為者に安い価格で株価を購入させ、多大な支配権または利益を取得しようとする。

(3) その他の考慮。中国の上場会社が虚偽の財務諸表を作成するもう一つの目的は、"T" を付けられることを避けるためである。"T" というのは "ST"[29] と "PT"

[30]の意味である。STとPTの次は上場廃止となるため、"T"を付けられるような会社は、損失を利益に転じさせる強い欲求を表しており、上記のSTおよびPTポストから抜け出す目的を達するために会計の粉飾を行う。この他、会社の管理層は予算の目標を達するため、それによって成功した経営者を演じたり、または成果に対する報酬・奨励金を追求したりするため、虚偽の財務諸表を作る可能性が高い。

ある学者は、非国有持株上場会社に比べて、国有持株の上場会社は、①上場資格の獲得、②利益補償、③職務上の昇格などの会計不正の動機に特殊性を有するとしている。

3−3 不正行為者の所属環境

D.Ginaker氏[31]は不正行為者が所属する職場において、容易に会計不正が発生する環境について、以下の四つの側面から分析を行っている。

(1) 管理の特徴からの分析

管理者は、強行的な集権と、企業管理の改善意識が不足している環境、財務職員が経験不足または支配者に単独指導を受けている環境、企業内部に、強力的かつ信頼しうる、操作可能な管理制度がない環境などの場合である。

(2) 内部統制からの分析

有効な内部統制制度の欠缺、特に充分な職務と責任の分離および監査との調和システムがない環境、企業管理者に財務知識がなく、企業資産を保護する適切な措置がないなどの場合である。

(3) 経営状況と財務状況からの分析

収益性が欠ける資産の運営、完成品と在庫品の積み増しが多く、欠損が持続的に増加、原価コストの制御不能な膨張などの場合である。

(4) 外部業界からの圧力の分析

投資銀行、株主、債権者などが企業の企業業務活動に対して信頼しているか否かによって生ずる圧力、会社が不景気時において、損失または市場のシェアーの減少、製品あるいはサービスが時代遅れになっている場合の圧力である。

会計不正行為者が属する環境には内部環境と外部環境がある。上場会社にとって外部環境とは、主として経済、社会、文化、法律および政治の環境などを指す。例えば、企業統治の構成が不合理、過大な税金の圧力、外部監督の不足および関連する法律の不整備などは、会計不正行為の発生を招く可能性がある。内部環境は、内在的動因と呼ばれ、前述した不正の動機と内容が類似しているので省略する。

上記から、不正行為者が属する環境が、彼らに不正の動機を芽生えさせれば、会計不正行為を発生させる可能性があり、その結果が多大な被害をもたらすことになる。

4. 会計不正行為の手法の研究

4−1 アメリカにおける会計不正の手法

アメリカの財務調査官協会（Association Of Fraud Examiners, ACFEと略す）は、よく発生する会計不正の手法として、以下の三つに分類している。①財務報告の不正、②腐敗（例えば、賄賂、非合法贈与、利益衝突、経済的にゆすりなど）、③非合法的な財産横領（例えば、現金、在庫品、費消、設備および情報取引などの濫用）、である。

財務調査官協会は会計不正事件に対して研究を行う際、会計不正事件において使用されていた不正な方法に関して統計調査を行った。その結果、財務諸表報告の粉飾が5％、会社経営の腐敗が10%、違法的な財産横領が85%を占めていることが判明したとする。

4−2 中国監査基準における会計不正の手法の分類

「中国公認会計士監査基準第1141号—財務報告監査において会計不正に対する考慮」[32]において、第10条と第11条とも企業管理層の主な粉飾手段に対して、以下のような分類を示している。

(1)経営管理層が統制制度の上位にいる立場を通じて、財務情報を粉飾する際によく使用する手段は、以下のとおりである。①虚偽の会計記録を作成し、特に会計期末に近づくに際して頻繁に行われる。②会計方針を濫用または任意に変更する。③会計上の引当金の見積の根拠とする前提を人為的に操作する。④会計記録を故意に遺漏し、会計報告期間内に発生した取引または事項を、人為的に期間調整し、早期に計上または遅延して計上する。⑤財務報告に影響する可能性がある事実を隠蔽する。⑥複雑な取引を故意に作成し、財政状態または経営成績を歪曲する。⑦重大なまたは異常な取引に関連する会計記録と、取引条項を改竄する。

(2) 会社財産を横領する際には、主に以下の手段が使われる。①売上などの収入金額を着服する。②現金預金、実物資産（現物）または無形資産を盗用する。③被監査企業に虚偽の商品または虚偽のサービスに対して金銭の支払いをする。④被監査企業の資産を私用にまわして使い込む。

中国では、上場会社の管理層における不正事件は、度々発生する。その不正の手段は、相当に複雑で厳密に計画されている。会計不正行為者が採とっている手段は、時には法律と倫理道徳を喪失した違法者の手段とは大きな区別がなく、思いついた手段で実行する。

つまり、不正な目的を達成するためには、いかなる手段をも選ぶと言えよう。

4−3 中国の会計実務における不正行為の手法

会計不正事件の手段・方法をまとめると、以下のようになる。

(1) 関与先・関係者間の不正取引

関連企業間の業務関係を通じて、欠損をごまかし、虚偽の利益、脱税などの目的のために虚偽の会計報告を作成するという不正な方法である。すなわち、注記のなかに規定違反、不適な開示、不実な会計情報を表示する一種の不正な方法である。その形式は主には、①関連企業の売買による不正、②受託経営管理者の不正、③資金取引による不正、④費用割当の不正などがある。

(2) 資産の不正な組入れ

これは上場会社が、資産の組み換え、合併、債務の組み直しなどを通じて、一定の利益が生じ、かつ関連企業の間での債務の組み直しにおいて、違法行為を行うことを指す。その主な形式は、①不正な合併、②不正な債務組み直し、③不正な資産の置き換えなどである。

(3) 地方政府による不正の協力

上場会社の属する地方政府が、政治の業績、地方のイメージまたは地方の財政、税収の確保などのため、地方に属する有名な上場会社の粉飾報告、利益操作などに協力することを指す。その主な形式は、①税収上の優遇を与え、②財政上の補助を与えることなどである。

(4) 不適切な会計方針と会計評価の使用

これは会計データの改竄、利益操作などの目的のため、関連性のある会計方針および会計上の見積を選択する場合に、企業会計準則、企業会計制度および補充規定などを遵守せず、会計報告のなかの重要な財務データに虚偽をもたらす場合である。主に以下の側面において、不当な方法を用いる。①費用の計算、②不当な投資計算、③不当な金額計上、④不当な減価償却、⑤不当な収入、費用の計上などの方法である。

(5) 取引または事実の隠蔽

これは会計報告においての関連項目、または注記において重要な取引または事実を隠蔽し、あるいは不充分な情報開示による一種の詐欺の方法を指す。その主な形式は、故意に不充分な開示をし、さらにまったく開示しない場合である。

5. 会計不正行為の主体および心理分析

5−1 会計不正行為の主体分析

会計不正の主体とは、それを画策、組織、指揮、参加する具体的な実行者を指す。実務的に、粉飾決算は会計担当職員が作成する。しかし総合的な知識、不正手法、度胸、適時な環境などが必要であるため、一般的に一人で実行することは不可能である。会計不正行為の主体を適確に把握することは、その責任の追及、不正行為の防止のためにも重要である。

そのため、会計不正の主体は、不正の過程において、役割の違いによって、提案者、意思決定者、操作者、協同者など共謀者が含まれることになる。提案者とは、会計不正に入れ知恵をする者を指す。提案者は通常企業の財務経理部門の責任者である。意思決定者とは、意思決定する権利を有する者が実施した会計不正の各層経営者を指す。彼らは、不正の画策者、決定者、支持者であると同時に、最大の受益者でもある。操作者は、職務の利点を有し、直接会計証憑、帳簿、財務諸表などの資料に接し、自ら不正な会計を実行するものを指す。協同者は、ある側面から不正の実施者に協力し、不正者に利点を提供し、事後に不正者のために隠したり、情報を提供したり、偽証をしたりする者を指す。異なる事件において、不正主体の者が異なるが、不正過程においては、不正を担う職責と発揮する役割が異なる。

会計不正の主体が属する地位の違いによって、主導的行為者と受動的行為者に分けることができる。主導的行為者は、行為者が意識的に、積極的に自ら不正に参加し、その中で重要な役割を発揮する行為者を指す。一般的には、会計不正の提案者と意思決定者は、主導的行為者であり、直接の受益者または利害関係者でもある。彼らは不正活動の内情を知っている者であり、不正事件の内部者である。受動的行為者は、本意からではなく、他人に脅迫、強要、命令または利益に釣られて、不正に参加する行為者を指す。例えば、ある会計職員は、様々な原因で経営者の指示を実行するだけである。受動的行為者は、一般的には内情を知らないか、まったく真実を知らない場合が多い。主導的行為と受動的行為とは、互いに転化することもある。ある参加者は、最初は受動的であるが不正行為の系列に入ると主導的に変わる。

上述した分析から、会計不正の主体は、会計不正行為のなかでの役割に取って代わることができない。会計不正の主体がいないということは、現実に会計不正が行われないということだからである。

5−2 会計不正行為の心理分析

会計不正を行う心理とは、不正行為者の内心活動および不正に対する態度、観点と見方を指す。会計不正

は一種の目的ある行為であり、したがって会計不正活動の背後に見えざる手が指揮、操縦している。これは、会計不正の需要、意識と動機、すなわち心理である。会計不正行為者の心理の特徴としては、不正行為が実施される前から心理準備を始め、不正活動に対して充分な計画、設計、選択、分析などの思考活動を行っている。会計不正の心理は、行為者の世界観、人生観、価値観、道徳観に基づき、周囲の物事に対する認識を源とし、周囲環境の影響と感応、経験と生活業務の積み重ねから、その正直さと生まれながら持っている良識を源としている。異なる不正の主題は異なる環境、異なる経済活動において表れた心理状況が違う。よく見受けられる心理状況は以下のようなものである[33]。

(1) 利益追求の心理

これは、不正行為者に最も大きく内在する駆動力である。不正行為者の利益を追求する心理は、彼らが金銭を得ることを渇望し、財産と富のある生活を羨望するからである。このタイプの人間は、昇進に対する期待・欲望が抜きんでて大きい。これらが正常なルートを通じて得られなかったとき、偽造帳簿を頼りに実現しなければならないと考える。

(2) 冒険の心理

不正行為者は、粉飾を通じて利益を得るため、監督・検査を免れ、ある程度のリスクを背負うことは知っているが、この冒険の心理は、次第に、冒険後に豊かになった喜びと安心、または、その場をごまかしてやり過ごした後の安息に変わる。それによって、冒険の行動をとることができる。

(3) よい機会の心理

不正行為者の多くは、職務の利点を利用し、一旦その機会が逃せば再び来ないと思い込み、機会が来たときに私欲が膨らむ。すなわち、急いでその機会を使って不正をし、利益を奪い取る行動にでる。

(4) 関わりあいながら比べる

不正行為者、特に画策者は、他人が粉飾を通じて多くの利益を得ていると勘違いしている。この正常でない心理状態は、意思の弱い者に誘発と刺激を与え、非合法的利益を盲目的に追求し、仕事の環境、福利厚生の待遇などの側面において、他人と比べる傾向がある。

(5) みんながやるから自分もやるという心理

不正行為者は、今の社会において粉飾が氾濫していると考え、発見される可能性が小さく、発見されても制裁を加えられる者が少ないと考え、法律はすべての違法者を処罰することができないと考える心理である。

(6) 僥倖の心理

不正行為者は、自らの手段が卓越しており、見つからないと考えている。または、検査に対処する方法も把握していると考える。さらに、自己に強い後ろ盾がおり、問題があってもリスクはないと考える。

(7) 対抗心理

各方面の監督検査に対して、協力しないという画策をとる。事実証拠を提供しない。真実を説明しない。ひいては、偽証、証拠の廃棄をし、共謀して互いにかばい合う。または、知っていても認めない。または他人に罪をなすりつけ、責任を逃れようとする。

(8)「合理」心理

多くの不正行為者は、金銭を直接自分のポケットに入れなければ、また、大衆の支持を得ることができれば、あるいは、業績を高めれば、団体で決定したことであれば、この粉飾がいわゆる「合理」的であると考える。

以上をまとめると、会計不正の主体は、その曲げられた心理に、随時に不正を行う動機を芽生えさせる可能性がある。このような心理は、適当な時になると、迅速に不正の実践に移り始め、帳簿の不正として現れるということになる。主体、心理、環境という三つの要因の結合によって、会計不正は潜在的な可能性から顕在化する。したがって、会計不正を根本から正すには、総合的なコントロールが必要となる。

6. 会計不正行為による被害の実態

6−1 会計不正事件に対する調査結果

中国証券監督管理委員会（アメリカのSECに相当する）が、近年、虚偽の会計情報を開示した会社に対して、行政処罰を行ったが、その情況は次の通りである。各年度処罰を受けた会社数が、2002年6件、2003年14件、2004年23件、2005年13件、2006年10件(9月14日まで半年間の統計)となっている。また、2005年に中国証券監督管理委員会が調査立案した上場企業は51社の内、期限内改善命令を受けたのが48社あった。概算統計によると、中国証券監督管理委員会に処罰された会社の内、2004年に利益の水増し額が5.676億元あったが、2006年には4.44億元となっている[34]。

また中国財政部は、1999年から中国会計法に基づき、各地方財政監査専門官事務所に前会計年度の会計情報の品質検査を要求し、その検査結果を財政部公告の形式で公表している。2001年度からの公告は下表の通りである。

6−2 調査結果に関する分析

4年連続の検査の結果から、以下のことが判明できる。

①品質検査の企業数は年々下がっていることから、

資産不実の比率が5%以上の企業の割合は、18.75%から15.13%になり、3.62%下がった。

②検査する企業数が減ったにもかかわらず、資産不実金額および株主持分不実金額は増加した。

（表）会計情報の品質検査に関する一覧表

公告の日付	2001年12月3日	2003年1月16日	2004年1月8日	2005年7月28日
検査年度	2000年度	2001年度	2002年度	2004年度
検査企業数	320社(事業企業を含む)	192社	152社	55社
資産不実金額	75億元	115億元	85.88億元	注:今回の検査公告には具体的なデータがなかった。公告には検査結果として10社の上場会社に業績の粉飾があった、問題のある企業が全体に占める割合は18.18%であった。関連企業との取引を利用して利益の水増し、などの不正行為があった。
資産不実比率割合	不実比率が1%以上の企業の割合：50%	不実比率が5%以上の企業の割合：18.75%(36社)	不実比率が5%以上の企業の割合：15.13(23社)	
株主持分不実金額	—	24.2億元	41.38億元	
利益不実金額	35.11億元	24.3億元	28.72億元	
事実上の黒字企業	—	8	6	
事実上の赤字企業	32社(10%)	19社(9.896%)	5社(3.29%)	
利益不実比率が10%以上の企業の割合	57%(183社)	53.6%(103社)	53.95%(82社)	
簿外取引ありの企業	12社(3.75%)	22社(11.46%)	16社(10.53%)	

（出所）中国財政部の会計情報の品質検査の結果公告に基づき作成。 http://www.zhonghuacaijing.com.

③利益不実金額は低減し、黒字と公表しながら、実際には赤字あるいはそれと相反する人為的利益操作を行った企業の比率は、検査企業の数とともに下がっている。この利益不実比率が10%以上の企業の割合は低下しているが数値は大きく、変動した形勢を示している。つまり検査された企業には、3年連続して、利益10%以上が真実でない企業の数が半数以上であり、すでに会計準則が定めた重大な会計錯誤標準に達している。

④簿外取引がある企業の検出数の割合は、2000年度3.75%だったが、2001年度および2002年度は10%以上にものぼっている。ここで注意を要するのは、2000年度、検査した82社の中の12社が医薬品企業の数であったことである。これを基数にして計算するならば、その割合は14.63%（12/82）となる。2004年度の検査結果をも一緒に考慮するならば、2000年から2004年まで、毎年に検査された企業には、10%以上は財務諸表の虚偽問題が存在することになる。上場企業の状況はもっと深刻である。その他、一部の企業は何度も不正行為の名簿に記載され、何度も同じ問題があると強調されており、その根源となる要因を深く考えざるを得ない。

以上のデータは中国財政部の抽出したサンプル検査であり、一部の企業からの検査結果に過ぎない。しかし数々の事実から、会計情報の不正問題に関して、甘く見ることができないと考えざるを得ない。

6−3 会計不正行為による悪影響

会計不正行為が証券市場に与える巨大な影響は、主として以下のような側面がある。

第1は、証券市場の秩序に深刻な撹乱と破壊をもたらすことである。証券市場の歴史が浅い中国にとって、証券市場制度は初歩的時期にあり、徐々に整備していく段階にあることから、多くの難題を抱えている。会計不正行為が頻発する中国証券市場においては、これによって、一般投資家を非公正的な投資環境に置かせ、投資の機会も不公平となった。そのため、市場の「公開」「公正」「公平」という三原則が崩壊の危機にさらされる。結果として、証券市場の秩序も乱れてしまい、違法な取引が出現した。早急に有効な措置をもって規制しなければ、証券市場はますます悪循環に陥ることになる。

第2は、会計不正は、一般投資家の意欲を失わせ、証券市場の発展を一層阻害することになる。会計不正行為は市場に対する負の側面の影響が大きい。例えば、瓊民源事件、紅光事件などは、すべて当時の株式市場に大きな打撃を与え、一般投資家に不信感を与えた。事実上、当時の一連の会計不正事件は、投資家の意欲に大きな打撃を与え、市場も弱体傾向を示し、大量な虚偽情報が市場の正常な投資ムードの形成に被害を与えた。

株式公開発行会社の信用の欠陥は、影響が悪辣である。株式上場に影響するだけではなく、さらに上場後の会社の経営管理、資産の配置、資金の運用、利益分配、情報開示などの様々な側面に影響を与え、また、銀行の信頼度にも悪影響を及ぼした。株式会社自身、一般投資家、国家に重大な損失をもたらし、証券市場に悪辣な負の影響をもたらした。

第3は、投資家、特に中小規模の投資家の合法的な

権利に損害をもたらした。証券管理立法の目的は、投資家の利益を保護するという趣旨にある。会計不正行為の存在は、証券市場の情報にアンバランスをもたらし、人為的に情報の開示を支配し、一般投資家に合理的な意思決定を行わせず、経済的な損失を被らせた。このような経済的な損失と精神的な苦痛を受けている投資家には、証券管理立法の趣旨と相反する行為の犠牲者となっている。

第4は、公認会計士の証券市場における信用に傷をつけ、信用危機を招いた。本来、監査の検証は株式公開発行会社の財務報告の真実性、合法性を保証する最後の砦であり、公認会計士の社会的な機能は、独立した検証業務を提供する社会的経済警察、市場経済の警備の役割を果たすべきものである。しかし、中国の証券市場で生じた実情は、公認会計士の信用度を疑わざるを得ない。例えば、銀広夏事件を例として、中天勤会計士事務所の長年の監査実務経験にもかかわらず、銀広夏会社の 7.45 億元の巨額な粉飾利益を見抜けず、無限定適正意見の監査報告書を提出した。銀広夏会社の監査においては、銀行の残高照合通知書と、税関報告書に対する調査の際、公認会計士が直接調査を行わず、会社に調査証明を取りに行かせた。公認会計士が甚だしい会社の偽造を見逃してしまうのは、公認会計士の監査報告が信用できないということを投資家に印象付けたことになる。

独立的、公正的というのは公認会計士の基本である。独立性が失われた場合、公正性も必然的に欠缺してしまう。いくつかの会計士事務所の職業道徳の喪失は、監査業務全体に対して大きな影響を与えた。一般投資家の前に形成されるのが、公認会計士業界全体のイメージであり、いくつかの虚偽の監査報告によりもたらされた反響は計り知れず、公認会計士業界全体の信用に暗い影を落とし、社会的な地位を揺らがせた。銀広夏事件以降、各メディアが会計士事務所に様々な質疑を示し、公認会計士の信用力に関する議論を巻き起こし、公認会計士業界が、厳しい信用危機に面することになった。

7. 中国企業の経営管理における潜在的な課題

会計情報の粉飾問題は各国に存在し、その原因もまちまちである。しかし、中国における会計不正の問題発生の原因は、各国に比べてもっと複雑である。以下その主たる原因を分析して行く。

7−1　経済転換期における上場企業の現況

中国の上場企業の大部分は、もともと国有企業の改造、改制から成立した企業である。改造、改制する前に、計画経済から市場経済へと転換する過程において、多くの企業は市場に直面する経験が不足しており、いかにして経営管理を行うのかが分からなかった。すなわち、国が資金の供給から生産、販売まですべて行っていた環境下で、突然中国企業は、市場化を推し進められ、独立させたられて困惑したのである。多くの国有企業は市場経済化の対応に間に合わず、慌ただしく転換したが、結局経営状態が急速に悪化し、業績や収益が苦境に陥った。

その後、企業の制度改革を終えて上場した国有企業は、資本市場から大量の資金を募集し始めた。これらの資金は中国における資本市場発展の初期の十年間における、まさにご馳走とも言えるものであった。それは、上場企業の株式発行で得た資金には、ほとんどコストがかからず、また、大部分の上場企業が当時証券取引所で公表した利益配分案には「分配しない、増資しない」とあった。「証券之星」[35]で提供された上場企業の利益配分案を調査した結果、1996 年から 1999 年までの 4 年間、配当金なしの上場企業の割合は 75.71%、76.96%、76.41%、73.15%であった。

7−2　経営者支配による不正行為

国有企業から転換した中国の株式会社は、経営体制の不備が深刻な要因であった。財産の所有権は有名無実であり、特に国有株式主権の行使者が不明確な問題と、中小投資家の投資における投機行為の問題は深刻である。その結果、株主の経営管理者への監視監督の機能が発揮できていない。

その原因の一つは、中国の上場企業の「内部者による統制」[36]現象が一般化したことである。この点に関し、厦門大学の陳少華教授は次のように指摘している。「株式の約 65%を占める国有株および国有法人株の実質所有者が、中国の全国民とされているが、このように抽象的な主体では、責任を有する法人格の代表としては欠けており、残りの約 35%の流通株式は中小株主のところに分布している。このような株式の所有者は、形だけあって本質に達しない…国有株に偏っている」[37]ということであり、まさに現在の中国における内部人による統制の問題が深刻化している。

内部統制が健全ではなく、外部にも有効な監督・管理が不足する現在の情況のもと、かなりの多くの企業が、資本市場から募った資金を有効的、合理的に使用し、生産活動に運用されていない。設備の更新、生産の拡大、経営条件の改善、先進技術の導入などの正常な生産活動に運用すべき資金を他に転用し、さらに悪質な例としては、規則に違反して証券市場で自社株を含む株式売買を行って、そこから個人の不当な利益を

図っていることである。

また、企業によっては、虚偽の会計情報によって上場資格を取得している。これらの上場企業は、総資産利益率を維持向上させることができなくなるばかりか、財務危機に陥ることにも繋がる。その結果、株式発行で最初に獲得した資金が浪費され、なくなった後、再び新株発行で資本市場から資金調達をする。

これらの原因は法規の不備と関連がある。中国の法律で、上場企業が株式分配の方法で資本を拡大するには、いくつかの条件を備えなければならないと規定している。それは、①企業が直近3年内連続して利益を出し、株主に配当金の支払ができること。②企業の予想総資産利益率が同時期の銀行の預金利子率に上まわること。③企業が上場してから三会計年度を経過し、直近3年度の平均純資産利益率が10%以上であること（この比率は1999年に直近3年平均10%以上、直近の1年度でも6%を下回らないことと調整した。2001年に再び、直近3会計年度の加重平均純資産利益率を6%以上と調整した）。上述のような様々な原因から、彼らは偽の良好な経営成績および財政状態を作成して、投資者、証券管理部門を欺き、再び資本市場から「お金を騙し取る」ことを図ったのである。

7−3　社会規範における「誠信危機」

中国の市場経済には、ニセ商品から、ニセ証憑、ニセ広告、さらにニセの官僚（金を使って官僚になること）まで横行している。中国の著名な経済学者の茅于軾氏は「観念の変化は、社会構造の変遷より遅れていて、社会が計画経済から市場経済へと移行する時期に、道徳観念は即時に適応できず、そこから前例のない混乱が生じている」[38]と指摘している。また、虚偽の会計情報は、ただ「全体の社会経済環境の中で普遍的な現象の1つの影、縮図」[39]に過ぎないと述べている。

その要因として、表面上は経済モデルの転換期における1つの導火線に過ぎずともいえるが、それより更に深層な原因が存在する。その中で最も重要なのは、政治・社会および文化における原因である[40]。後者は前者に対して深い影響を持っている。文化大革命以後、計画経済体制から市場経済体制に転換し始めてから現在に至るまで、中国は倫理規範のシステムが崩壊していた。10年間の「文化大革命」を経験した人々は、倫理とはなにか、道徳は何なのか、誠実や信用がどんなものなのかを市場経済の進化とともに忘却のかなたにある。

上場会社においては、従来にないモラールハザード（中国語では「誠信危機」）と呼ばれる大きな会計不正事件が度々発生し、企業倫理が欠如している。その倫理感を象徴する基本的な理念として、「誠信（integrity）」という言葉がよく使われる。つまり誠信経営[41]を提唱している。誠信経営とは、広義には、企業がその各種利害関係者に対し誠実と信用を理念として行動するという意味であり、いわゆる関係領域への対処に際して求められる価値理念である。狭義には、企業が自主的に倫理規範を策定し、その倫理・行動規範を順守することである。

近年、世界中で発生している一連の監査失敗の事例が、公認会計士業界に対して社会的な「誠信危機」を引き起こしている。中国公認会計士協会の秘書長である陳毓圭氏は、公認会計士業界の状況に対して、全面的な分析と研究を行い、業界の「誠信建設」を主な手がかりとして展開していく構想を確立し、かつ、『業界誠信建設綱要』を制定し、公布した。これにより、業界の「誠信建設」に関して、指導のイデオロギー、目標、主な任務、および一連の実施対策が打ち出された。

「誠信危機」という問題点をうけて、2006年3月4日に全国政治協商委員会第10期全国委員会第4回会議において、国家主席である胡錦涛氏が八栄八恥という倫理観、道徳観の改善のために以下のような内容を提唱した。

①祖国を熱愛することは栄光／祖国に危害を与えることは恥辱、②人民に奉仕することは栄光／人民に背くことは恥辱、③科学を尊重することは栄光／無知蒙昧は恥辱、④労働にいそしむことは栄光／労働を嫌悪することは恥辱、⑤団結と互助は栄光／個人を傷つける利己主義は恥辱、⑥誠実さと信義を守ることは栄光／利により義を忘れることは恥辱、⑦ルール遵守は栄光／法と紀律の違反は恥辱、⑧苦労をしのび奮闘することは栄光／奢侈と安逸に溺れることは恥辱

この倫理観、道徳観の内容には特に目新しいものではないが、「政治家や官僚の腐敗」「拝金主義」「企業の不正行為」等が依然として大きな社会問題となっていることは明らかである。そして、国家主席が改めて倫理観、道徳観を提唱したことが注目された。儒教主義に基づいた中国人の生活慣行は、かつての文化大革命と最近の市場経済化によって崩壊しつつあり、上記の指摘をしなければならないほど、中国の「恥辱」が蔓延しているだろう。

日本では、企業不祥事を防止するための具体的な方法として、たとえば「内部告発」といった制度の導入が効果的と言われるが、それは中国にも効果があると考えられる。もっとも、この制度は「告げ口」や「チクリ」の奨励ともなる。あまり気持ちのよいものではないが、不祥事の防止を優先させるなら、こういうこ

とも考慮されなければならないであろう。

8. おわりに

中国の国家による内部統制における統制環境の問題は、数千年もの封建的な専制制度の根源にまで遡り、権力の所有者自身が統制を無視し、制限を越えた結果であるといえる。封建専制の一つの重要な特徴は、独裁者の個人意志を中心にすること、つまり権力の位置づけが法以上にあることである。封建社会から新中国に代わっても、古い観念が未だに人々の頭脳を占拠しているため、一部の政府官僚の規則無視、会計不正行為からもたらされる影響は、もはや劣悪という言葉では形容することができない。

規則の不備と国民の規則意識の欠如との間に因果関係が存在している。規則の不備は、国民の規則意識の欠如を招き、不正行為にチャンスを与える。逆に国民の規則に対する意識の欠如もまた、規則の制定と整備を制約する。有名なAlbrecht博士の不正三角形理論によって、中国の不正な会計情報の原因を要約することができる。すなわち、機会と圧力が共存する場合、不正行為発生の可能性は大いに増加する。「誠実さの低下が不正行為を更に合理化し、受け入れられることを招く」[42]。現在の中国の現状は、まさにこの言葉を具現化したものである。すなわち、市場経済体制の中の激しい競争は、潜在的に弱い中国企業に莫大な圧力をかけ、「国家内部統制」の不健全性、不完全性が不正行為に多くのチャンスを与えた。誠実と信用を含んだ社会道徳観念の欠如は、不正行為を行う最適な温床を提供したのである。

会計不正の問題に対処するのは、法律、政治、文化、道徳など多方面からの総合的な対策が必要であり、それによって根源的な病理現象を根絶する以外に方策がない。これはきわめて困難な作業であり、時間を要するであろう。会計不正行為の問題をなくすには、何世代もの人々の努力が必要であり、その道のりは、はるかに遠く困難なものであろう。しかし、困難は不可能ということではない。

また、公認会計士の監査業務は、被監査企業の会計資料を前提とするものであり、被監査企業が故意に財務諸表を粉飾し、作成した場合、その不実が著しいのであれば、当然に監査報告の真実性および適法性に必然的な影響を及ぼすことととなる。公認会計士が会計不正事件に巻き込まれ、または加担する原因に対する研究は必要不可欠であるが、この点に関しては別稿に譲りたい。

注記

---

[1] エンロン事件とは、世界最大手のエネルギー販売会社だったエンロンが海外事業に失敗して経営不振に陥り、総額160億ドルを超える巨額の負債を抱えて倒産した事件である。エンロンは実際には経営状況が悪化しているにもかかわらず、CFO（最高財務責任者）の指示で不正な会計処理をして偽の財務報告をしていた。さらに監査するべき会計監査法人がエンロンの簿外取引や巨額債務を見逃し、不正に手を貸していた。2001年12月エンロンは裁判所に破産申告をして倒産した。

[2] ワールドコム事件とは、全米第2位の長距離通信会社だったワールドコム（Worldcom）が2002年7月に倒産した事件である。その負債総額はエンロンを上回る約410億ドルで、米史上最大の倒産劇となった。ワールドコムは本来営業費用に計上すべき回線接続料などの費用を設備投資として資産計上するという単純な手法で、経営状況の悪化を粉飾決算によってごまかしていた。会社の倒産と同時に、米国の司法当局によって経営陣の刑事責任の追及が行われた。CEOだったエバース氏は証券詐欺や米証券取引委員会(SEC)に対する虚偽の財務諸表の提出などの罪に問われ、2005年7月ニューヨーク連邦地裁より禁固25年の実刑判決を受けた。
ワールドコムとは、アメリカにあった大手通信会社である。2002年7月21日にニューヨーク連邦破産裁判所に対して、米連邦破産法11条（日本の会社更生法に相当する）適用を申請した。負債総額は410億ドル（約4兆7000億円）、資産総額は連結ベースで1070億ドル（約12兆4000億円）にのぼり、2001年12月2日に破たんしたエンロンを大きく超えたアメリカ史上最大の経営破綻となった。

[3] 2002年1月28日に、光ファイバーの構築・運営会社大手のグローバル・クロッシング（本社英領バミューダ）は、破産法11条（会社更生法に相当）の適用を申請した。負債総額は124億ドルで、米国企業の経営破綻では史上4番目、通信会社の破産としては世界最大の規模である。「米AT&Tは最初の海底電話ケーブルを設計・敷設するのに、30年の歳月を要した。片や16万kmの光ファイバー網を世界中に敷設したグローバル・クロッシングは、会社を設立して巨額の資金を集め、敷設作業を行い、今年1月末に経営破綻するまで、5年もかからなかった。」と英エコノミスト誌は書いている。(Survival of the slowest The Economist (February 2, 2002))

[4] 李学兵「華尓街信用瀕臨破産　全球資本市場迷失方向」、『中国経営報』1999年7月6日。

[5] 銀広夏事件とは、銀広夏実業株式会社は①財務関連の文書、証憑、資料の偽造および隠蔽行為を行い、②出資契約に関する係争とその敗訴事実をいっさい開示せず、会社に重大な事象が起こった場合に義務付けられる臨時報告も行わなかったこと、③新株発行で調達した資金の一部を募集の際に示したプロジェクトに投入せずに取締役会経費などの名目で流用したこと、④架空の売上高を水増しして計上し、かつ費用を実際の費用より過小計上し、架空の利益をでっち上げたこと、など不正行為で粉飾決算を行った事件である。

[6] 瓊民源会社事件とは、海南瓊民源現代農業発展有限株式会社が起こした事件である。当該会社は、年度報告において利益が5.4億元、資本剰余金が6.57億元増加したと発表した。これを受けて、株価は急騰。しかし、国務院証券委員会、会計検査院、中国人民銀行、中国証券取引監督委員会らの合同調査により、これらの発表はいずれも虚偽であることが判明し、一般投資家は大きな損失を受けることになった。

[7] 紅光実業事とは、紅光実業が年度報告を発表する際に、欠損額1.98億元を計上し、投資家を驚愕させた事件である。過去の年度報告において、順調に黒字推移していた税引後純利益が、如何にして約2億元もの赤字に転落したのか。中国証券監督委員会によるその後の調査で、それが判明した。結論から言えば、当該会社は株式上場申請の際、また、中間決算等において、しばしば法律に違反し、本来計上されるべき数字を偽造している。

[8] 5つの偽りとは、中国語では「假凭証」、「假帳」、「假表」、「假審」、「假評估」の問題である。つまり偽りの証憑、偽りの帳簿、偽りの財務諸表、偽りの監査、偽りの評価を指す。

[9] 中国財政省は2000年12月に「一部業種の2000年度の会計情報の品質に対する調査結果」を公表した。2000年度の会計情報品質に対する検査結果から、5つの偽りの問題が軽視できないと結論付けた。

今回の調査対象は、医療、繊維、航空、金属、石油などの業種の320社の企業と行政部門、およびこれらの企業の監査を担当する125の会計士事務所である。サンプル調査企業において、資産の不実が73.75億人民元であり、利益の不実が35.11億人民元である。それぞれの割合は、被監査企業の50%と57%を占めている。この調査で分かったのは、人為的に利益の調整（実質上の損失を利益に見せかける）した企業は32社あり、被調査企業の10%を占めている。

[10] 国有の中堅企業の違法金額が大きい。2000年の国家監査省は、監査対象である1290社の国有企業の中に、会計財務諸表の不実の割合が68%に上り、各種類の違法金額より大きく、1000億人民元以上に達した。

[11] 公認会計士の監査業務の信頼度をはかるため、2001年、国家監査省は16社の会計士事務所の監査業務の品質に対して検査を行い、結果としては監査報告が著しく不実であった。検査結果においては、会計士事務所に提出した32部の監査報告の中、21部の監査報告、および上場会社に対するサンプル調査で、14社の会計士事務所が23部の著しく不実な監査報告を提出した。会計情報の粉飾71.43億元を作り上げ、41名の公認会計士が関わった。

[12] 2001年の国家監査省は、16社の会計士事務所、32部の監査報告のサンプル調査を実施した。

[13] 品質の故意の問題については、例えば、国家監査署は7社の会計士事務所における10項目の監査報告書に対して検査結果としては、上場会社の財務諸表における粉飾額は、資産5.91億元、負債2.56億元、損失4.66億元、その他18.98億元、合計して32.11億元を隠蔽し、開示していなかった。

[14] 過失の問題については、例えば、国家監査署は、11社の会計士事務所における18項目の監査報告書に対して検査した結果としては、上場会社の財務諸表における粉飾額、資産5.43億元、負債0.57億元、損失3.97億元、その他29.35億元、合計して39.32億元の金額を発見したにもかかわらず、会計士事務所は見つけ出すことができなかったことである。

[15] 17世紀末葉以降に出現した投機ブームは、18世紀の第1四半期に最高潮に達し、そのなかで、投機ブームの頂点は1711年に勅許をうけた南海会社を中心とする南海バブルであった。この南アメリカの海岸において貿易その他の事業をしていたのが南海会社であった。当初の資本金は1,000万ポンドとしてスタートし、1719年に同様の資本調達の拡張をした。そこで、南海会社は自分にとって有利な転換を行うべく、株価の吊り上げを画策、投機熱をあおった。そのため、株価は高騰しつづけ、最高潮に達した。議会は投機を抑制する立法措置を講じさせ、1719年にバブル会社禁止法が制定された。南海バブルはやがてはじけた。1720年の8月にはいって、下がりはじめた株価の動向を憂慮した南海会社は、株価を引き上げるべく行動をおこした。合法性に疑問のある4社（海南会社を含む）に対し、議会は規制するための告知を裁判所に請求した。この告知は4社の株価を急落させ、南海会社は株価の暴落を招いた。

[16] The Bubble Act 1719, 正式名称は An Act for batter securing certain Powers and Privileges intended to be granted by His Majesty by Two Charters for Assurance of Ships and Merchandizes at Sea, and for lending Money upon Bottomry; and for restraining several extravagant and unwarrantable Practices therein mentioned, 6 Geo.1, c.18.

[17] 泰江萍「上市公司会計舞弊：国外相関研究総述与啓示」『会計研究』2005年6月にも紹介された。

[18] アメリカのG.Jack Bologna とカナダのLindquist Robert J.が提案したものである。

[19] http://shenji.stc.sh.cn/node2/node9/node33/ula7397.html に参照。

[20] ここでの三つの条件とは圧力（Pressure）、機会（Opportunity）、合理化（Rationalization）である。

[21] Albrecht W. S, Wernz G. W & Williams T. L. 1995. Fraud: Bring the Light to the Dark Side of Business. New York Irwin Inc. 15~52.

[22] Bologna G. Jack, Lindquist Robert J and Wells Joseph T. 1993. The Accountant's Handbook of Fraud and Commercial Crime [M], John Wiley & Sons Inc, 20~31.

[23] Bologna G. Jack and Lindquist Robert J. 1995. Fraud Auditing and Forensic Accounting: New Tools and Techniques, John Wiley & Sons Inc.

[24] Howe,M.A..Management Fraud and Earnings Management:Fraud Versus GAAP as A means to Increase Reported Income,Ph.D.Dissertation of Connecticut,1999.

[25] GAAPとは、Generally Accepted Accounting Prinplesの略である。企業の財務会計の作成と報告を行うルールとして定められた、一般に公正妥当と認められる会計原則のことである。

[26] M.Romney, W.S.Albrecht and D.J.Cherrington.Auditors and the Detection of Fraud.Journal of Accountancy.May, 1980.

[27] 深圳天健信徳会計士事務所「公司詐欺与監査対策」、『中国注冊会計師』、2002年6月。

[28] R.Ginaker.980.Discussant's Response to a look at the Record Detection of Management Fraud.Proceedings of the 1980 Touch Ross University of Kansas Symposium on Auditing problems.

[29] STとは、二年連続赤字となった銘柄、または株価が著しく下がり一株当りの純資産が額面に表示された額を下回った銘柄は、特別処理（Special Treatment）と名付け、一日の株価変動幅は上下とも5%に限定され、3年以内で、黒字に転換しないと株式市場における取引を停止させることである（上海証券取引所業務規則第38条・深圳証券取引所業務規則第145条、取引所の上場規則第9章「上場会社状況異常期間の特別処理」を参照）。日本の証券市場における上場会社の株式の監理ポストに相当する。

[30] PTとは：ST銘柄とされてから次のポジションはPT銘柄である。PT銘柄は、三年連続欠損を計上した銘柄は、特別譲渡（Particular Transfer）と名付け、証券取引所から取引の一時停止を命じられる。PT銘柄とされる株式は、特別譲渡期間として金曜日のみの取引（＝特別譲渡）を認める。一日の株価変動幅に下限はないが上限は5%と決まっている。PT銘柄と名付けられてから、さらに1年間欠損を出した場合は市場取引を停止させる。日本の株式市場の整理ポストに相当する。

[31] R.Ginaker.980.Discussant's Response to a look at the Record Detection of Management Fraud.Proceedings of the 1980 Touch Ross University of Kansas Symposium on Auditing problems.

[32] 中国語では、中国注冊会計師審計準則第1141号—財務報告審計中対舞弊的考慮。

[33] 当該心理学的分析においては、2002年11月号の『財務与会計』の「財務会計改革と管理の論壇」において株洲工学院大学の仇俊林教授、李宇飛教授による調査を通じてまとめられたものである。その心理分析に関しては、様々な事件を通じて、筆者も賛同の立場をとっている。

[34] 中国証券監督管理委員会の調査公告に基づいたものである。

[35] http://www.zhengquanzhixing .com/zaimu.html。中国企業の配当についての調査結果。

[36]「内部人による統制」とは、日本でいうワンマン経営の意味に近い。

[37] 陳少華、『防範企業会計信息舞弊的総合対策研究』、P98、中国財政経済出版社、2003年11月。

[38] 楊有紅、前掲書、31頁。

[39] 陳少華、『防範企業会計信息舞弊的総合対策研究』、中国財政経済出版社、2003年11月、162頁。

[40] シュンペーターは資本主義の没落を導く要因として、四つの柱を提示している。すなわち、経済における「企業者機能の無用化」、政治における「擁護階層の壊滅」、社会における「制度的骨組みの破壊」、そして文化における「増大する敵対」である。Joseph A. Schumpeter , *Capitalism, Socialism and Democracy*, 1942, XII ,XIII, HARPER TORCHBOOKS.

[41] 誠信経営とは、広義には、企業がその各種利害関係者に対し誠実と信用を理念として行動することの意味であり、いわゆる関係領域への対処に際して求められる価値理念である。狭義には、企業が自主的に倫理規範を策定し、その倫理・行動規範を順守することである。

[42] W.Steve Albrecht、李爽、呉溪等訳、前掲書、34頁。

(2010年10月29日原稿受付, 2010年12月13日採用決定)

溶融塩ブランケットにおける水素同位体の挙動

胡　静波* 宮入　嘉夫** 深田　智***

* 九州共立大学大学院工学研究科（現 三菱重工環境・化学エンジニアリング㈱）
** 九州共立大学大学院工学研究科機械システム工学専攻
*** 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

Behavior of hydrogen isotopes in molten salt blanket

Seiha Ko*† Yoshio Miyairi* Satoshi Fukada**

Abstract

Experiments on permeability of hydrogen were performed using a mixed molten salt of FLiNaK, which is promising as a blanket of nuclear fusion reactor. FLiNaK was composed of LiF(46.5%), NaF(11.5%), KF(42.0%), and was charged in a cylindrical vessel supported by a Ni plate. The experimental data were obtained within 500－700℃, supposed to actual operation temperature of blanket. Diffusivity, solubility and permeability were determined functionally with temperature in relation to a conceptual design of a nuclear fusion system. The behavior of hydrogen permeability was expressed in terms of analytical equations derived from diffusion and dissolution, and it was clarified to be mainly controlled by the rate of diffusion. Since hydrogen permeation flux depended linearly on dissoving pressure, Henry's law was applicable to hydrogen solubility in FLiNaK.

Key words: hydrogen, fusion reactor, mixed molten salt, FLiNaK, dissociation

1. 緒　言

1.1 研究背景

産業革命以降，人類の主なエネルギー源は化石燃料である石炭，石油，天然ガスなどであった．現在では，世界のエネルギー源の 3/4 以上は化石燃料でまかなっている，しかし，現在，すでに地球上の石油埋蔵量の半分は消費されたといわれており，このまま使い続けると 21 世紀中になくなってしまう可能性がある．将来的に人類のエネルギー問題を解決する手段として，核融合炉が注目されている．

1.2 核融合エネルギーの特徴

核融合炉では重水素(D)同士あるいは重水素(D)とトリチウム(T)をプラズマ状態で燃焼させエネルギーを得る[1]．

$$^{2}D+^{3}T\rightarrow ^{4}He+^{1}n+17.6MeV$$
$$^{2}D+^{2}D\rightarrow ^{3}T+^{1}H+4.03MeV$$
$$^{2}D+^{2}D\rightarrow ^{3}He+^{1}n+3.23MeV$$
$$(1MeV=1.6\times10^{-13}Joule)$$

重水素同士をプラズマ状態で核融合燃焼させるには数億度まで加熱する必要があるが，重水素とトリチウムの混合物の方がより低温で核融合反応する．したがって，最初に実現される自給型核融合炉はD-T核融合炉と考えられる[2]．

1.3 溶融塩ブランケットについて

D-T 核融合において，燃料となる重水素は天然に多く存在し，水素同位体中に約 150ppm 程度存在する．しかし，もう一方の燃料であるトリチウムは天然にはほとんど存在しないため，人工的に生産する必要がある．そこで，ブランケットに含まれるリチウム化合物（天然物）に中性子を照射して，トリチウムを生産する方法が考えられている．そのときのブランケット内のリチウムと中性子の反応は，次式で示される．

$$^{6}Li+n\rightarrow ^{4}He+T+4.8MeV$$
$$^{7}Li+n\rightarrow ^{4}He+T+n'-2.5MeV$$

この反応によりトリチウムが生成され，それをブランケットから回収して利用する．Fig.1 は核融合炉システム中のブランケットの役割を示す．

核融合炉システムにおける炉内では，燃料として大量のトリチウムが必要となる．このトリチウムをブランケットから回収して利用するが，ブランケットには現在固体と液体のいくつかの種類が提案されており，本研究では液体ブランケットである FLiNaK(LiF46.5mol%-NaF11.5mol%-KF42.0mol% の混合溶融塩)に注目した．

FLiNaK は液体ブランケットで，固体ブランケットに比べて研究が進んでおらず，今後の研究が必要な

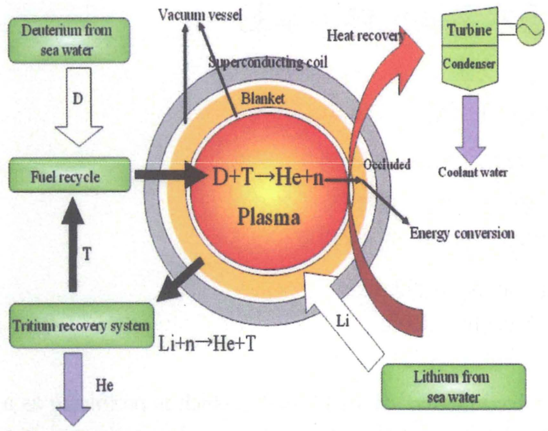


Fig. 1 核融合炉でのブランケットの役割

候補材である．液体金属に比べて電気抵抗がはるかに大きいので磁気外乱となる MHD 効果の低減が期待でき，比較的安定な物質なので漏出時の化学的反応性が低い，などの特徴を持っている．また，トリチウムの溶解度が低いためにトリチウム回収が容易である．FLiNaK には構造材の酸化腐食の問題はあるが，液体なので冷却材としての役目も兼ねて，流動により中性子の照射部の更新ができ，損傷が少なく，連続操作が可能といった特徴を持っている．また，トリチウム溶解度が低いためにトリチウム回収が容易である反面，トリチウム漏洩の危険性が生じ，回収系の設計が重要となる[3]．これらの問題が解決できれば，FLiNaK は有力なブランケット候補材となるのではないかと考えられる．トリチウムの環境への漏洩を防ぐためにも，ブランケットにおける水素同位体の挙動を把握することは非常に重要であり，本研究では，FLiNaK における水素透過実験を行い，FLiNaK 中の水素同位体挙動について調べる．

2. 実　験

Fig. 2 に実験装置の概略図を示す．電気炉の中に Ni 製の，円筒状の容器を設置する．容器の中心部分には厚さ 2mm，直径 54.7mm の Ni 円板を溶接し，その板の上に LiF と NaF と KF の混合粉末を，厚み 20mm または 40mm となるように調節して充填した．その後，実験前段階として，アルゴンを用いてガスクロマトグラフで検出される水素濃度が数 ppm 程度以下になるまでパージを続け，充填容器内に水素が実質的に存在しないことを確認した．

パージした後，FLiNaK の上側に 99.99%の水素ガ

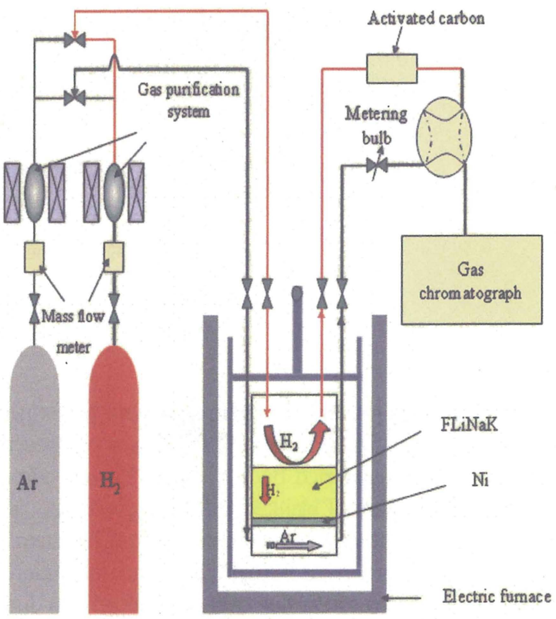


Fig. 2 FLiNaK の水素透過装置概略図

スを，Ni 円板の下側に 99.99%のアルゴンガスをそれぞれ 5cc/min で流した．FLiNaK の上側に流した水素は FLiNaK 層と Ni 円板を透過して下側に出てくる．下側のアルゴンガス中の水素濃度をガスクロマトグラフにより逐次測定し，水素濃度が定常値になるまで実験を続けた．FLiNaK を入れてある容器の，実験透過経路ではない側面部分からの水素の混入を防ぐために，電気炉内に常にアルゴンガスを流し続けることで側面から透過してきた水素を大気中に排気するようにした．溶融塩ブランケットの使用温度は 600℃前後と予想されるため，500～700℃の一定温度下で測定し，解析式から得られる曲線と実験データとのフィッティングから FLiNaK 中の水素拡散係数，溶解度定数，および透過係数を求めた．FLiNaK 中の水素拡散の解析式を以下に示す．

拡散方程式： $\dfrac{\partial C}{\partial t} = D_{FLiNaK-H_2}\dfrac{\partial^2 C}{\partial x^2}$

初期条件： $t = 0;\quad C = 0$

境界条件：

$$t>0;\quad x=0\quad P_{H_2,up} = -K_{H_2}\cdot AD_{FLiNaK-H_2}\cdot\frac{P_0}{W_{up}}\cdot\frac{\partial C}{\partial x}\Big|_{x=0}$$

$$t>0;\quad x=L\quad P_{H_2,down} = -K_{H_2}\cdot AD_{FLiNaK-H_2}\cdot\frac{P_0}{W_{down}}\cdot\frac{\partial C}{\partial x}\Big|_{x=L}$$

FLiNaK 中の拡散が律速で，下流側の水素濃度が上流側に比べて十分小さいとき，境界条件は簡単になる．

$$t=0: C=C_0;\ x=L: C=0$$

$$\frac{c}{c_0}=\frac{L-x}{L}+\frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{n}\sin(\frac{n\pi x}{L})\exp(-\frac{D_{FLiNaK-H_2}n^2\pi^2 t}{L^2})$$

フラックスＪの時間変化は次のように表される.

$$\frac{J_{H_2}L}{D_{FLiNaK\text{-}H_2}K_{H_2}(p_{H_2,up}-p_{H_2,down})}=1+2\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n\exp(-\frac{D_{FLiNaK\text{-}H_2}n^2\pi^2 t}{L})$$

あるいはｔが小さいとき，漸近展開法を用いることによって次のように表される.

$$\frac{J_{H_2}L}{D_{FLiNaK-H_2}K_{H_2}C_{FLiNaK}(p_{H_2,up}-p_{H_2,down})}$$
$$=2\sqrt{\frac{L^2}{\pi D_{FLiNaK-H_2}t}}\left(e^{\frac{-L^2}{4D_{FLiNaK-H_2}t}}+e^{\frac{-9L^2}{4D_{FLiNaK-H_2}t}}+e^{\frac{-25L^2}{4D_{FLiNaK-H_2}t}}+\cdots\right)$$

および

$$P_{FLiNaK-H_2}=C_{FLiNaK}\cdot D_{FLiNaK-H_2}\cdot K_{H_2}$$

本節で使用された記号は以下のとおりである.

J_{H2}	: 水素拡散流束[mol-H_2/m^2s]
L	: FLiNaK 層の厚み[m]
$D_{FLiNaK\text{-}H2}$	: 水素拡散係数[m^2/s]
K_{H2}	: 水素溶解度定数[1/Pa]
$P_{FLiNaK\text{-}H2}$	: 水素透過係数[mol-H_2/msPa]
$C_{FLiNaK\text{-}H2}$	: FLiNaK モル密度[mol/m^3]
$p_{H2,up}$	: 上流側水素分圧[Pa]
$p_{H2,down}$	: 下流側水素分圧[Pa]
t	: 経過時間[s]
W	: モル流量[mol-H_2/m^3s]
K_{Ni}	: Ni の水素透過係数[mol-H_2/msPa$^{0.5}$]
R	: 水素の気体定数[kJ/molK]
T	: 温度[K]

水素の FLiNaK 層-Ni 板中の透過は以下の段階を経て順次に行われる. (Fig.3 参照).

(1) FLiNaK 表面へ水素分子吸着
(2) 水素分子の FLiNaK 層中への溶解
(3) 水素分子の FLiNaK 層中拡散
(4) Ni 表面への水素分子吸着
(5) 水素分子の解離
(6) 水素原子の Ni 板中への溶解
(7) 水素原子の Ni 板中拡散
(8) 水素原子の再結合反応
(9) Ni 表面から脱離

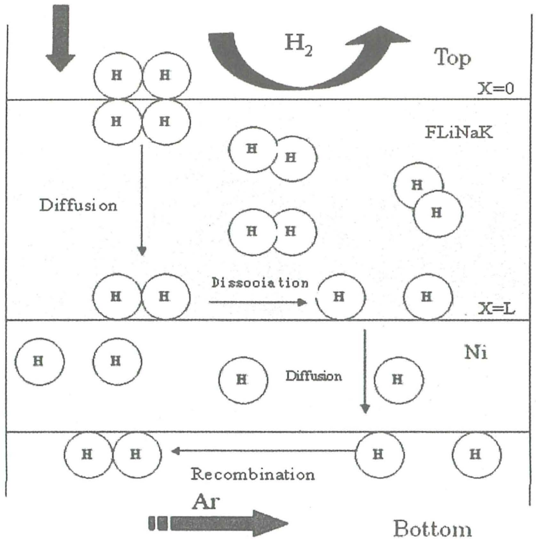


Fig.3 水素透過モデル

3. 実験結果および考察

まず，試料 FLiNaK を充填する前に，Ni 板の水素透過係数を 200～700℃の範囲で測定した. その実測結果を Fig.4 に示す. 実線は本実験による実験値で，点線は Wayne によって求められたものであり [4]，Wayne とほとんど同等の結果が得られたと考えられる.

本実験で得られた Ni の水素透過係数を以下に示す.

$$K_{Ni}=7.12\times 10^{-6}\exp(-\frac{54500}{RT})$$

なお，Wayne の結果は次式で与えられている.

$$K_{Ni}=3.38\times 10^{-7}\exp(-\frac{59000}{RT})$$

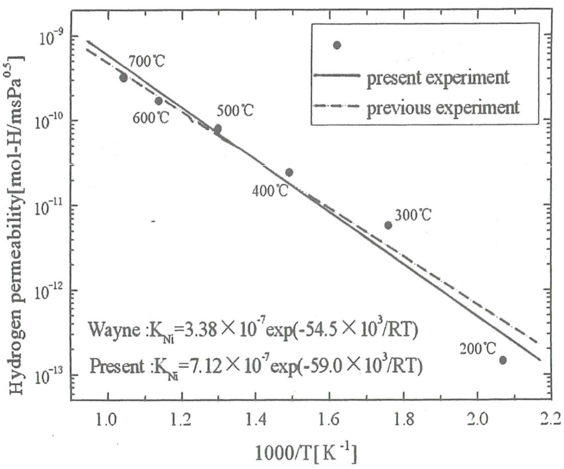


Fig.4 Niの水素透過係数

次に，試料のFLiNaKを充填して，FLiNaK層-Ni板についての水素の透過実験を行った．**Fig. 5** に実験で得られた水素濃度の経時変化を示す．

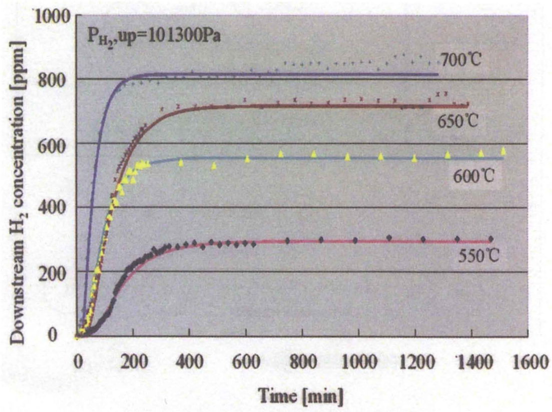


Fig. 5　水素濃度の経時変化

ここで，縦軸は p_{H_2} を全圧(101.3kPa)で除したもので，ppmで表現している．プロットした点は実測値であり，実線は解析式から得られるフィッティングカーブである．温度上昇に伴い定常状態時での水素透過速度は増大して行くことが分かった．FLiNaK層とNi板の境界部分でマイクロバブルが発生する恐れがあると考えていたが，その発生を考慮していない解析線と無理のない程度でのフィッティングができたことで，マイクロバブルの発生はないものと考えることができる．フィッティングにより得られた拡散係数と溶解度定数について，温度 T [K]の逆数でプロットしたものをそれぞれFig. 6とFig. 7に示す．

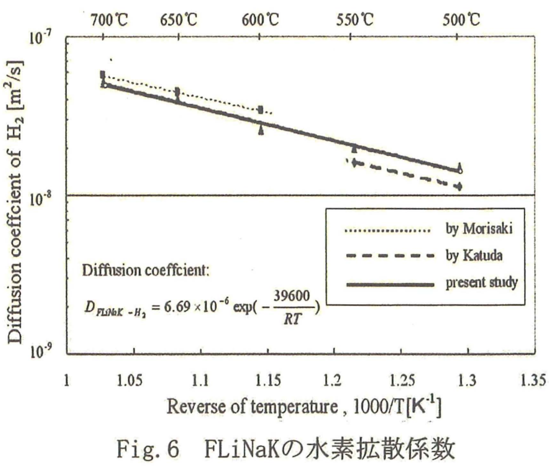


Fig. 6　FLiNaKの水素拡散係数

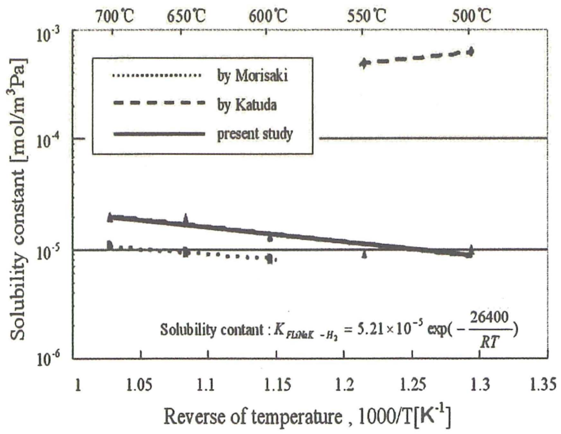


Fig. 7　FLiNaKの水素溶解度定数

Fig. 6とFig. 7のいずれのグラフにおいても，勝田や森崎によって求められたものを併記した(4)．勝田のデータは500℃付近から550℃付近までの測定であり，森崎のデータは高温(600～700℃)付近の測定で，双方のデータ間に連続性は見られない．今回の実験では，500℃から700℃までの広範囲を測定した．グラフから分かるように，拡散係数かるように，水素の拡散係数については勝田と森崎のデータを外挿した値と近くなった．活性化エネルギーの傾向も同様であった．

水素の溶解度定数については，今回の実験データの低温付近(500～550℃)を見ると，勝田のデータと似た傾向を示したが，高温付近のデータを含めた活性化エネルギーの値は森崎の値に近い結果となった．勝田と森崎の実験の差についての原因は定かでないが，本実験により，500～700℃の間では，水素拡散係数，溶解度定数とも連続性を持った相関性のあることが明らかになったと考えている．

Fig. 6に示すFLiNaK中の水素拡散の活性化エネルギーは39.6kJと算定された．FLiNaK中で水素は H_2 の形で拡散し，Li^+-F^-，Na^+-F^-，K^+-F^- らのイオン対からの影響をあまり受けないと考えらる．水素同位体の分子が大きくなる重水素やトリチウムでは，イオン対からの影響は受やすくなることから，透過係数の絶対値が H_2 より小さくなり，活性化エネルギーが大きくなると予測できる．

Fig. 8に，NiとFLiNaKの水素透過係数の比較を示す．このグラフからも分かるように，Niにおける水素透過は，FLiNaKに比べて 10^4 倍程度も速く進むので，本研究の水素透過実験において，Ni板の水素透

過抵抗は無視できるほど小さく，透過抵抗(拡散抵抗)はFLiNaK層のみと考えられる.

Fig. 9には, FLiNaK層-Ni板の水素透過において，使用した水素分圧に対する水素透過流束(単位時間, 単位面積あたり FLiNaK 層-Ni 板を透過する水素量)の変化を両対数表示したものである. これより，水素透過流束の対数が水素分圧の対数に対してほぼ勾配1の直線になることから，FLiNaK 中の水素濃度がHenryの法則に従うことが確認できた.

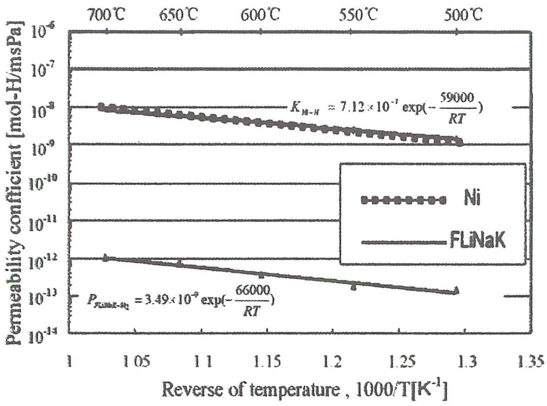


Fig. 8 NiとFLiNaKの水素透過係数の比較

Fig. 10 には FLiNaK の厚みと水素透過流束の関係を示す. グラフによって FLiNaK の厚みを 20mm から 40mm へ2倍にしたことによって，実験で得られた水素透過流束は 1/2 になり，水素透過係数は厚みに逆比例しており，溶解抵抗が極めて小さく，本実験の水素透過過程では FLiNaK 中の拡散抵抗が支配的であることも分かった. FLiNaK 中の水素透過流束は以

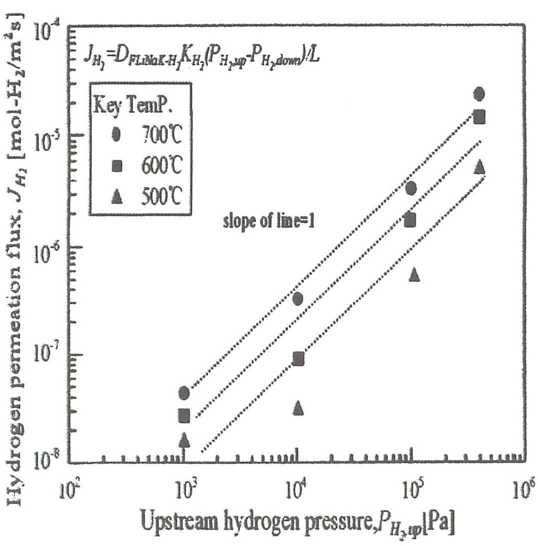


Fig. 9 水素分圧と水素透過流束の関係

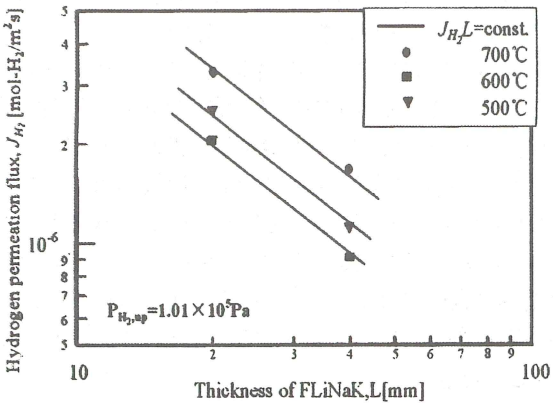


Fig. 10 FLiNaK厚みと水素透過流束の関係

下の式で整理できる.

$$J_{H_2} = \frac{P_{FLiNaK-H_2}\left(P_{H_2,up} - P_{H_2,down}\right)}{L}$$

Fig. 6 と Fig. 7 により, FLiNaK 中の水素拡散係数, 溶解度定数, 透過係数は以下となった.

$$D_{FLiNaK-H_2} = 6.69 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{39600}{RT}\right)$$

$$K_{FLiNaK-H_2} = 5.21 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{26400}{RT}\right)$$

$$P_{FLiNaK-H_2} = 3.49 \times 10^{-9} \exp\left(-\frac{66000}{RT}\right)$$

核融合システムで使用される溶融塩 FLiNaK を透過する水素の特性値を500〜800℃の実用温度範囲で求めることができた.

4. 結　論

ニッケル板で保持された円筒容器内の FLiNaK 溶融塩層で水素透過実験を行い，以下の結果を得た.

(1) 水素ガスとFLiNaK間の溶解・放散，およびFLiNaK 層内の水素の拡散といった水素の物質移動を決定する主要な因子である，水素の溶解度係数，拡散係数，並びに透過係数を実用温度域の500〜800℃で，温度の関数として求めることができた.

(2) ブランケットが固定層である本実験では，溶解抵抗に比べ拡散抵抗が極めて大きく，水素の透過は拡散律速であることが分かった. また，ニッケ

ル金属内の水素移動抵抗は FLiNaK 層内の抵抗に比べ無視できるほど小さいことも分かった.

以上のように，本実験で溶融塩ブランケットである FLiNaK での水素拡散係数，溶解度定数，透過係数が求まり，FLiNaK 中の水素挙動を把握することができた. これらの物質移動に関する物性値は，トリチウム回収系設計に対し活用して行くことができる.

一方，FLiNaK 溶融塩ブランケットでは HF が発生，腐食の問題が懸念される. HF が発生しないように酸化還元制御することについては今後の課題として検討して行きたい.

参考文献：

(1)深田智：“水素吸蔵合金による水素同位体の分離技術”，(エヌ・ティー・エス，2000)
(2)日本原子力産業会議“原子力ポケットブック”，(2002)
(3)S. Fukada et al. Journal of Plasma and Fusion Research Vol.79, No.7(2003)
(4)A. Morisaki, Master thesis, Kyushu Univ. (2007)

(2010年9月29日原稿受付，2010年12月15日採用決定)

側方移動を起こした橋台を有する橋梁の耐震性評価

（鋼単純桁橋を対象にした非線形動的解析による耐震性評価）

山田益司*、荒巻真二**、前田良刀***、烏野 清****
*(社)九州建設技術管理協会 **西日本高速道路エンジニアリング九州(株)
***西日本高速道路(株) ****九州共立大学大工学部

Earthquake resistant design of bridge considering lateral movement
(Seismic performance evaluation for simple steel-girder bridge using nonlinear dynamic analysis)

Masuji Yamada、Shinji Aramaki、Yoshito Maeda、Kiyoshi Uno

Abstract
In this study, the stress and deformation of superstructure and abutment under lateral movement is examined and adequate analytic model of these states are considered in the dynamic analysis of the whole bridge system. The improvement of the bridge's seismic performance is inspected based on the analytic results. In this case, the input seismic wave is set as a level 2 earthquake, and two types were used. Type I (plate boundary type) has numerous repetitions at an acceleration of about 400 gal, while Type II (In land direct strike type) has fewer reputations, but a stronger acceleration at 800 gal.
Keywords: Earthquake resistant design,seismic dezign,lateral movement,pile foundation,soft clay

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（この構造物の移動する現象を側方移動、地盤の場合は側方流動と呼称）ことが古くから知られている。そこで、（財）高速道路調査会[1)、2)、3)]や建設省土木研究所[4)]の研究成果のもと、現在では地盤の側方流動の可能性を判定する基準F値[5)]および橋台の側方移動の可能性を判定する基準I値[6)]の判定に基づく設計が行われている。しかし、近年、昭和40年代に建設された橋梁を中心に、側方移動にともなう橋台支承部、伸縮継手および橋台パラペットの破損・破壊、あるいは橋台との接触による上部構造の変形・損傷・破壊などが報告されており、補修工事に莫大な経費が注ぎ込まれている。

一方、地震国である我が国では、橋梁に対してレベル2地震動という巨大地震に対する設計をする必要がある。その中で、近年、橋台背面の盛土は橋梁の振動抑制に寄与していることが判明し、現在、背面土の効果を見込んだ設計が行なわれるようになっている[7)]。同様に、側方移動を生じた橋梁は、可動側橋台の遊間が消滅し上部構造と直接、接するため背面盛土の効果が受け易くなり、耐震性が向上すると言われている。

このように、橋台の側方移動は橋梁構造に対し、良い効果と悪い効果の両方を与えることになる。

本研究は、上記の耐震性の向上に着目し、側方移動を生じた橋梁に対して、非線形動的解析を実施し、耐震性向上の効果を解析にて明らかにしようとするものである。

2. 解析手順

解析手順を図-1に示す。最初に、地盤の側方流動量を求めるために2次元有効応力解析を実施し、次に、その側方流動量を用いて静的解析（応答変位法）を行い、各部位の変位・断面力および上部構造とパラペットの接触状態を確認する。その後、死荷重（自重）による変位・断面力を初期値とした非線形動的解析を実施し、その結果から側方流動を受けた橋梁の耐震性について考察する。

3. 2次元有効応力解析

側方流動量は、地盤のみの2次元有効応力解析により求めた。

3.1 解析に用いる地盤定数

解析に用いる地盤定数は、盛土および砂地盤As層について一般的な数値を採用したが、軟弱粘土Ac層については国土地盤情報検索サイトの福岡県および佐賀県内の地盤情報のうち、筑後川流域の福岡県内27本および佐賀県内41本の計68本の海成粘土の土質調査結果を採用した。異常値

を棄却するため、±1σ（σ：標準偏差）の範囲を有効データとし、その平均値を採用した。

表-1 に解析に用いた地盤定数の一覧表を示す。

3.2 地盤構成

解析に用いる地盤構成は、表-2 に示すように、I 値およびF値による判定結果、側方流動の生じる可能性の高いとされる、盛土高 H=10m、軟弱粘土地盤 Ac 層厚 D=10m の地盤を対象とした。また Ac 層の下層は砂地盤としている。

3.3 解析モデル

解析モデルを図-2 に示す。地盤モデルの X 方向幅は側方境界の影響を受けないように盛土のり肩より前面方向に 75m、背面方向に 90m とし、盛土勾配は 1 : 1.2 とした。拘束条件は底面節点は Y 方向固定、側面節点は X 方向固定とした。排水条件は、底面、地表面および盛土・As 層の全節点は排水、その他の節点では非排水としている。

土の応力―ひずみ関係は Ac 層では弾粘塑性モデル(関口・太田モデル)、その他の地盤では弾性モデルとした。解析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、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。解析ソフトには GeoFem((財)沿岸開発技術センター)を用いた。

3.4 施工工程

施工工程を図-3 に示す。軟弱粘土上での施工であるため、軟弱地盤対策工指針[8]に示されている、軟弱粘土地盤を対象とした 3 cm/day を参考に、施工速度は 2.5 cm/day とした。

3.5 解析方法

本検討においては、地表面から粘性土が分布する地盤モデルとしていることから、地表面の初期応力が小さくなるため、圧密沈下量 1mを考慮して 20kN/m^2 のサーチャージをかけた後、400 日の

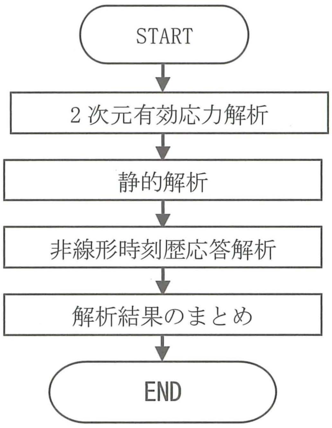


図-1 解析手順

表-2 判定結果

	計算値	判 定
I 値	2.3	判定値 1.5 以上のため側方移動の可能性がある。
F 値	1.1	判定値 4 以下のため側方移動の可能性がある。

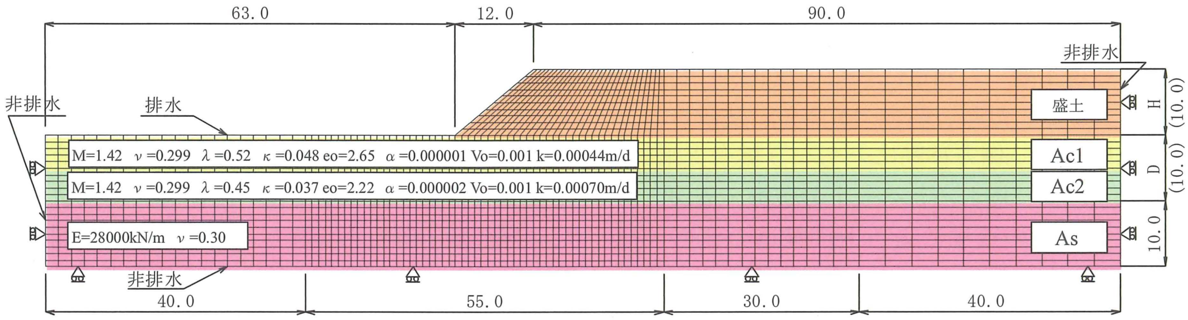


図-2 解析モデル

表-1 解析地盤定数

		単位体積重量	自然含水比	圧密降伏応力	単位圧縮係数	圧密係数	塑性指数	せん断弾性係数	粘着力	透水係数	圧縮指数	膨潤指数	基準間隙比
		t (kN/m^3)	W (%)	Pc (kN/m^2)	Mv (m^2/kN)	Cv (cm^2/d)	IP (%)	G (kN/m^2)	C (kN/m^2)	K (m/day)	Cc	Cs	eo
盛土		19.0	-	-	-	-	-	5384	0.0	-	-	-	-
Ac	0～5	14.1	107	55.1	0.00061	163	49.6	774	16.1	0.000088	1.19	0.11	2.65
(m)	5～10	14.9	85	78.8	0.00044	261	38.9	975	23.3	0.000141	1.05	0.08	2.22
As		18.6	-	0.3	-	-	-	10769	0.0	-	-	-	-
支持層		19.6	-	0.17	-	-	-	43077	100	-	-	-	-

施工期間を 400 分割で解析した。また、放置期間は盛土施工完了後、180 日後、1 年後、3 年後、10 年（最終）について解析を行なった。

3.6 解析結果

(1) 側方流動量

図-4 にのり尻位置の盛土完了時（400 日）、盛土完了後 6 ヶ月（580 日）、盛土完了後 1 年（780 日）、盛土完了後 3 年（1480 日）、盛土完了後 10 年（4000 日）における側方流動量の深度分布を示す。盛土完了以降も圧密沈下の進行にともなって側方流動量は増加するが、その流動量はかなり小さくなっている。なお、地表面付近で側方流動量が減少しているのは圧密沈下による影響を受けているためと思われる。

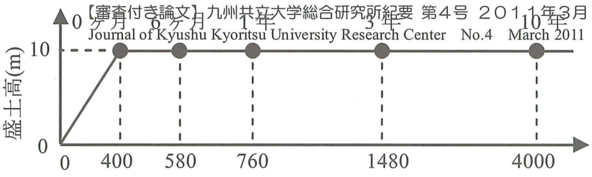


図-3 施工工程

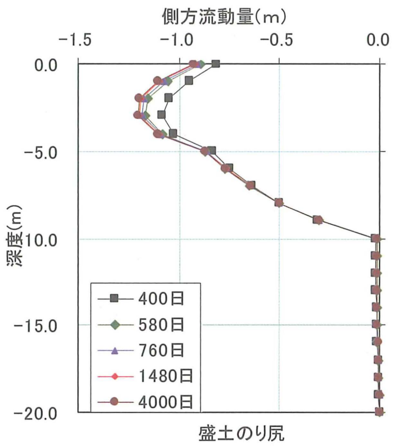


図-4 側方流動量の深度分布

4. 解析に用いる橋梁

4.1 対象橋梁

橋梁は橋種、径間数等の組み合わせによっては多種多様にあるが、本研究は、側方流動を受けた旧設計法で建設された橋台の耐震性に着目している。そこで、解析の簡便さから単純桁を基本に、軟弱地盤上に建設される橋梁として一般的な鋼単純 I 桁橋を採用した。また、基礎は構造物の規模から鋼管杭基礎とし、橋台が設計された当時の旧設計法である震度法を用いて断面等を決定した。

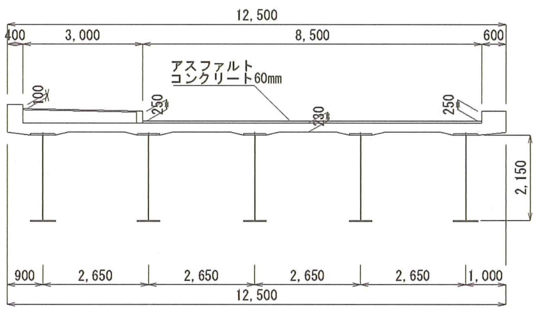


図-6 上部工断面

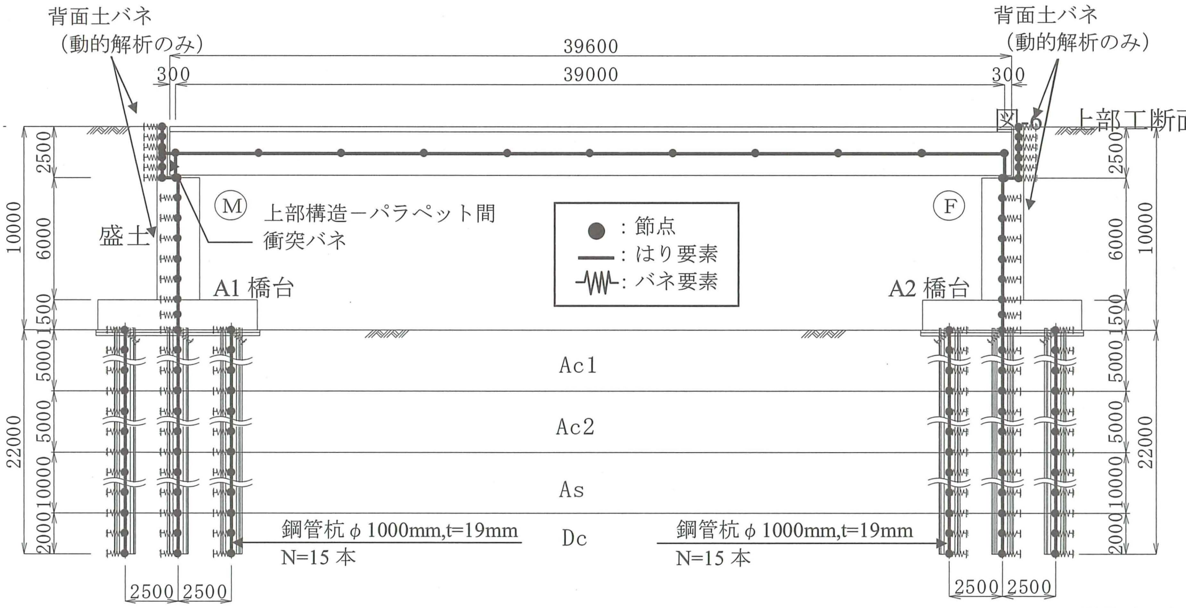


図-5 橋梁諸元およびモデル図

4.2 橋梁諸元

上部構造の鋼 I 桁は土木構造物標準設計 [9] を引用し、下部構造は道路橋示方書 [6] に準拠して設計を行い、橋梁諸元を決定している。

図-5 に橋梁諸元、図-6 に上部工断面を示す。

(1) 上部構造

形式　　：単純鋼I桁橋
支間　　：39.00m
幅員　　：12.50m
活荷重　：B活荷重
使用材料：鋼（SM490Y）、コンクリート $24N/mm^2$、鉄筋SD295

(2) 下部構造
橋台　　：逆T式橋台（直角方向幅12.5m）
基礎　　：杭基礎（鋼管 ϕ 1000mm、t=19mm、3列15本）
使用材料：コンクリート $21N/mm^2$、鉄筋SD295、鋼管杭（SM490Y）
重要度区分：B種
地域区分　：C地域

(3) 耐震設計上の地盤種別：Ⅲ種地盤

4.3 地盤定数

静的解析、動的解析に用いる地盤定数を表-3に示す。対象地盤は3.2と同じである。

5. 応答変位法による静的解析

5.1 解析モデル

(1) 解析モデル

側方流動が橋梁に与える影響は主に橋軸方向であるため、解析モデルは橋軸方向のみを対象とした2次元骨組構造モデルとした。

静的解析モデルでは図-5の橋梁諸元およびモデル図のうち、パラペットおよび堅壁の背面にある背面土の抵抗バネは考慮していない。

(2) 部材のモデル化

上部構造、パラペット、堅壁およびフーチング、杭本体は弾性体とした。また、A1橋台側には、図-7に示す衝突バネを配置した。上部構造とパラペットの相対変位が遊間に相当する100mm以上縮んだ場合、剛なバネが機能するようにした。

5.2 地盤バネ

図-8に地盤バネの非線形特性を示す。杭軸直角方向の地盤バネは水平地盤反力係数 k_H を初期勾配とし、常時の受動土圧強度を上限値とするバイリニア型とした。また、杭軸方向の地盤バネは、杭の軸方向バネ定数 k_V を初期勾配とし、極限支持力、極限引抜き支持力を上限値とするバイリニア型とした。

5.3 解析に考慮する荷重

応答変位法による解析で考慮した荷重は、死荷重（自重、背面土砂重量）、活荷重、橋台に作用する土圧および杭体に作用する側方流動力である。側方流動力は3の2次元有効応力解析結果を用いた。検討に用いた流動力は杭の施工開始時期により異なることから、杭の施工開始時期を次の3ケースとした。杭体に作用させる側方流動量の大きさは、盛土完了10年後の側方流動量からそれぞれの杭施工開始時期の側方流動量を差し引いた値である。

①盛土開始時
②盛土完成時
③盛土完成6ヶ月後

表-3　解析用地盤定数（静的、動的解析）

地盤の種類	層厚	平均N値	単位体積重量		粘着力	せん断抵抗角	変形係数	動的ポアソン比	せん断弾性波速度	動的変形係数
	(m)		γ (kN/m^3)	γ' (kN/m^3)	c (kN/m^2)	ϕ °	$\alpha \cdot$Eo (kN/m^2)	ν_D	Vsi (m/s)	ED (kN/m^2)
盛土	H=10	5	19.0	9.2	0	30	14,000	—	—	14,000
Ac1	D=5.0	1	14.1	4.3	16.1	0	8,000	0.5	100.0	27,624
Ac2	D=5.0	1	14.9	5.1	23.3	0	10,000	0.5	100.0	29,194
As	10.0	10	18.6	8.8	0	30	28,000	0.5	172.4	108,252
Dc	—	40	19.6	9.8	100.0	35	112,000	0.4	273.6	268,280

厳密には各杭位置の側方流動量を用いる必要があるが、その差が小さいので、のり尻位置の値を全杭に作用させた。

5.4 解析結果

表-4に静的解析結果のうち、各解析ケースの衝突バネの変位δxと反力Rxおよび上部構造とパラペットの接触状況を示す。

盛土開始時（杭施工時期①）および盛土完了時点で杭施工する場合（杭施工時期②）は、側方流動量が大きく、桁とパラペットが接触する状態となる。盛土完了6ヶ月時点で杭施工する場合（杭施工時期③）は接触しない結果となった。

6. 動的応答解析

動的解析は直接積分法による非線形時刻歴応答解析とし、Newmarkβ法（β=1/4）を用いた。なお、積分時間間隔は1／100秒とし、解析プログラムはFRAME3D（FORUM8社）を使用している。

6.1 解析モデル

(1) 解析モデル

解析モデルを図-5に示す。静的解析と同様に、橋軸方向のみを対象とした2次元骨組構造モデルとした。

(2) 部材のモデル化

上部構造、パラペット、竪壁、フーチングおよび杭本体は弾性体とした。ただし、パラペット、竪壁の各部材下端から塑性ヒンジ領域の範囲（躯体幅/2）はM-ϕ非線形モデルとした。パラペット、竪壁の配筋状況を表-5に示す。

また、上部構造とパラペット間には衝突バネ、パラペットおよび竪壁背面は非線形バネ、杭・地盤バネは線形バネを採用した。

6.2 バネ特性

表-6にバネ特性値の一覧表を示す。ただし、背面土バネ、杭軸直角方向バネ値は深度1m当たりの値となっている。

(1) 橋台背面のバネ特性

図-9に橋台背面土のバネ特性を示す。バネは圧縮側のみ考慮し、バネ定数は地盤反力係数から算出した。バネの反力の上限値は受動土圧に相当する値とする。地盤反力係数は、既設橋梁の耐震設計法[9]を参考に、道路橋示方書[6]のケーソン基礎により算出した。

(2) 上部構造とパラペット間の衝突バネ特性

上部構造端部と橋台との間は図-7に示すような初期ギャップを有する衝突バネを設け、地震時の変位により上部構造端部と橋台が接触して軸力を伝達する過程を再現する。地盤バネの初期ギ

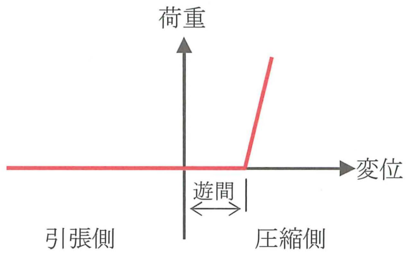


図-7 衝突バネ特性

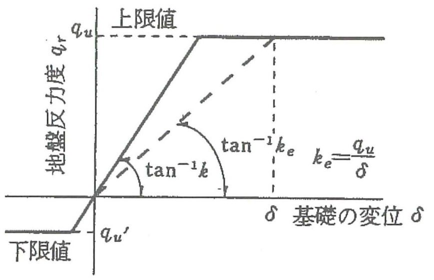


図-8 地盤バネ特性

表-4 解析結果

荷重ケース	δx	Rx	接触の有無
	mm	kN	
常時	-16.6	0.0	無
常時+杭施工時期①	-100.0	6676.5	有
常時+杭施工時期②	-100.0	776.7	有
常時+杭施工時期③	-70.8	0.0	無
常時+活荷重	-21.0	0.0	無
常時（活荷重有）+杭施工時期①	-100.0	-7000.3	有
常時（活荷重有）+杭施工時期②	-100.0	1111.5	有
常時（活荷重有）+杭施工時期③	-76.0	0.0	無

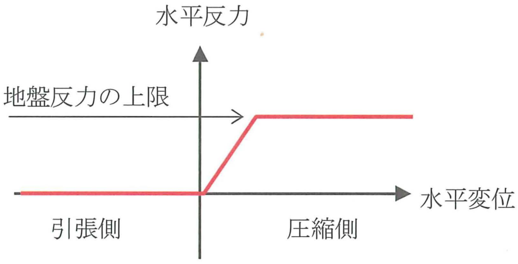


図-9 背面土の地盤反力バネ特性

ャップは桁遊間の値を用いた。

衝突バネ定数は下記式より算出した。

$$k = \frac{E\ A_m}{(L/n)} \tag{1}$$

ここに、E･A_m：上部構造の軸方向剛性の平均値（kN)、L：桁長（m)、n：上部構造の要素数

(3) 杭のバネ定数

杭の軸直角方向の抵抗特性は動的変形係数[10]より算出した水平地盤反力係数k_{HE}を初期勾配とした弾性バネとした。

杭の軸方向の抵抗特性は、地震時保有水平耐力法[10]に用いる杭の軸方向バネ定数K_{VE}を初期勾配とし、押込み支持力の上限値P_{NU}および引抜き支持力P_{TU}を上限値とするバイリニア型とした。

6.3 解析ケース

解析ケースは静的解析結果より次の 2 ケースとした。

ケース 1：上部工とパラペット間に遊間 100mm が確保されている場合、

ケース 2：上部工とパラペット間の遊間 0mm で、桁とパラペットが接触している場合

6.4 減衰特性

応答計算に Rayleigh 減衰を用いることから、固有値解析を行った。解析結果の 1 例として、ケース 1 の面内方向の固有値解析結果を表-8、振動モードを図-10 に示す。1 次の振動モードは上部構造の上下振動が卓越するモードで、2 次、3 次モードは A2、A1 橋台のそれぞれの水平変位が卓越するモードとなっている。

Rayleigh 減衰を計算するにあたって必要な質量マトリックス係数（α）および剛性マトリックス係数（β）は、解析の対象としている橋軸方向振動モードのうち、刺激係数上位である 2 次（刺激係数 33.61）と 3 次（刺激係数 24.29）の固有値と表-7 に示す各部材の減数定数を用いて算出した。その結果、α=1.763、β=0.00515 が得られた。

これらの値と各次数の固有値から得られたモード減衰を表-8 に示す。橋台の振動する次数では基礎も振動することから 0.1 に近い値となっている。

6.5 入力地震波

入力地震波は、道路橋示方書に準じてレベル 2 地震動を対象とした。地盤種別はⅢ種地盤とし、地域別補正係数 (0.7) を乗じた地震動を採用した。表-9 に使用した入力地震波を示す。

表-5 配筋状況

位置			配筋		
A1	パラペット	前面	D19ctc250	帯鉄筋	D16 ctc300
		背面	D19ctc125		
	竪壁	前面	D22ctc250	帯鉄筋	D16 ctc150
		背面	D22ctc125		
A2	パラペット	前面	D19ctc250	帯鉄筋	D16 ctc300
		背面	D19ctc125		
	竪壁	前面	D25ctc250	帯鉄筋	D16 ctc150
		背面	D25ctc125		

表-6 バネ特性値（全幅当たり）

部 位		k(kN/m)
背面土バネ		77,348
衝突バネ		14,600,000
杭軸直角方向バネ	Ac1	111,061
	Ac2	117,362
	As	435,213
	Dc	1,078,586
杭軸方向バネ		2,736,160

表-7 各部材の減衰定数

部材		減衰定数
上部工		0.02
下部工	弾性	0.05
	非線形	0.02
基礎		0.20

表-8 固有値解析結果（ケース 1）

次数	振動数 (Hz)	刺激係数		モード減衰定数
		橋軸	鉛直	
1	1.841	-6.26	-21.34	0.022
2	2.698	33.61	-4.29	0.096
3	4.376	24.29	0.15	0.103
4	6.590	1.95	0.18	0.022
5	9.962	13.26	0.54	0.092

6.6 解析結果

(1) 変位の最大値

入力地震波タイプⅠとタイプⅡで振動方向別の最大変位がほぼ同じ傾向を示していた。そこで、入力地震波タイプⅠの 3 波について、6.3 に示す解析ケース別に最大変位について考察する。

表-9 入力地震波

地震波のタイプ	地震名	記録場所	地震動のﾀｲﾌﾟ	最大加速度(gal)
タイプI	1983 日本海中部地震	津軽大橋 TR	T1-3-1	303.4
		津軽大橋 LG	T1-3-2	296.8
	1994 年北海道東方沖地震	釧路川堤防 LG	TI-3-3	307.0
タイプII	1995 年兵庫県南部地震	東神戸大橋 N12W	T2-3-1	413.7
		神戸ﾎﾟｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞ N-S	T2-3-2	390.2
		神戸ﾎﾟｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞ E-W	T2-3-3	433.4

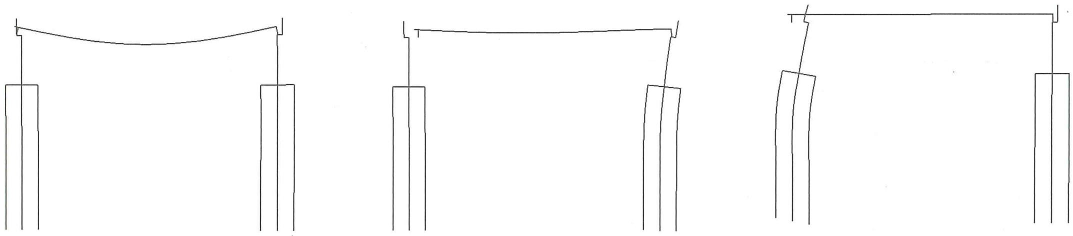


図-10 固有振動モード図

(a) 上部構造

図-11 に上部構造の最大変位を示す。図中における正の変位は初期の状態から固定支承のある A2 橋台方向に変形したことを示している。上部構造は A2 橋台に固定されていることから、この方向に振動する場合、上部構造の大きな慣性力を A2 橋台背面の地盤が抵抗することになり、各ケースに関係なく最大変位が小さくなっている。

一方、逆方向に変形（図中の負の変位）した場合は A1 橋台側の背面地盤が抵抗することになる。ケース 1 では遊間に十分余裕があるため、上部構造は可動支承上を滑り、A1 橋台に外力を加えることなく、A2 橋台は地盤と共に自由に振動できることから変位が大きくなっている。

ケース 2 では遊間がないため上部構造から A1 橋台に力が伝わり、A1 橋台背面の地盤抵抗を受け最大変位が小さくなっている。

このことから、桁とパラペットが接触（ケース 2）する場合には A1 および A2 橋台背面の地盤が抵抗することになり、上部構造の変位を減少させたものと思われる。特に、可動支承側に変形する振動方向でこの傾向が大きい。

(b) パラペット天端

図-12 に A1 橋台、図-13 に A2 橋台パラペット天端の最大変位を示す。A1 から A2 橋台方向に変形した場合、両橋台とも各ケースでの差がほとんど見られない。A1 橋台が上部構造を押す力は上部構造の慣性力に比べて小さいものと思われる。逆方向の変形においては、ケース 2 の場合はケース 1 に比べ、上部構造に押された分だけ変位が大きくなっている。A2 橋台のパラペットでは橋台上で上部構造が固定支承で結合されていることから、パラペット部の変形により図-12 に示す上部構造よりも変位が大きくなっているが、ほぼ同じ傾向を示している。

以上の結果から、桁とパラペットの接触により、変形する側の橋台背面地盤が抵抗することになる。特に、固定支承側の橋台において、耐震効果が大きい。

(c) 竪壁下端

図-14 に A1 橋台、図-15 に A2 橋台竪壁下端の変位を示す。A1 橋台では各ケースによる違いがほとんどないが、A2 橋台側では可動支承に変形する方向でケース 2 が小さくなっている。

以上の結果から、A2 橋台竪壁下端では耐震効果があることを示している。

(2) 各部位毎の応答結果

(a) 上部構造

図-16 にタイプ I における上部構造に作用する最大軸力を示す。遊間のないケース 2 の軸力が小さくなっており、桁とパラペットの接触は上部構造の耐震性は軸力から判断しても向上していると言える。

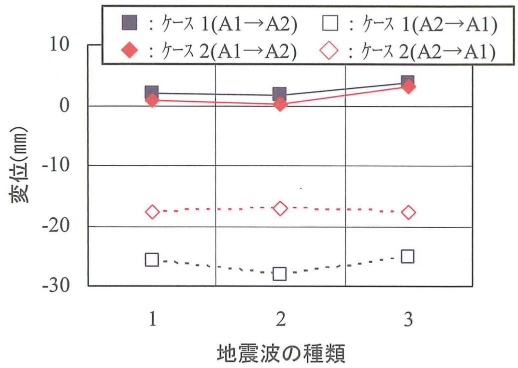


図-11 最大応答変位（上部構造：ﾀｲﾌﾟ Ⅰ）

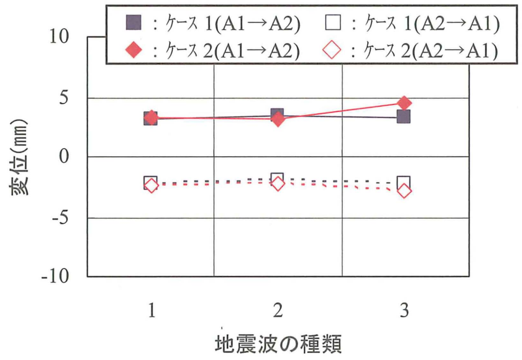


図-14 最大応答変位（A1 竪壁下端：ﾀｲﾌﾟ Ⅰ）

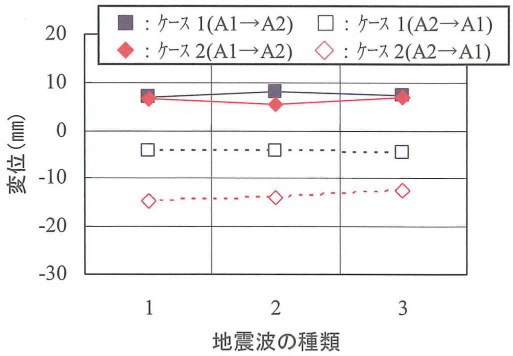


図-12 最大応答変位（A1 ﾊﾟﾗﾍﾟｯﾄ天端：ﾀｲﾌﾟ Ⅰ）

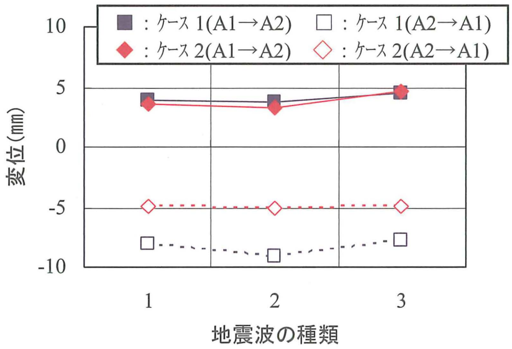


図-15 最大応答変位（A2 竪壁下端：ﾀｲﾌﾟ Ⅰ）

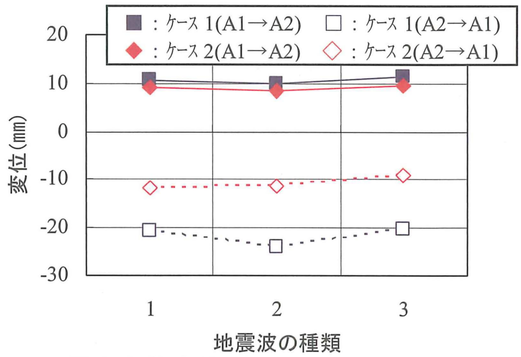


図-13 最大応答変位（A2 ﾊﾟﾗﾍﾟｯﾄ天端：ﾀｲﾌﾟ Ⅰ）

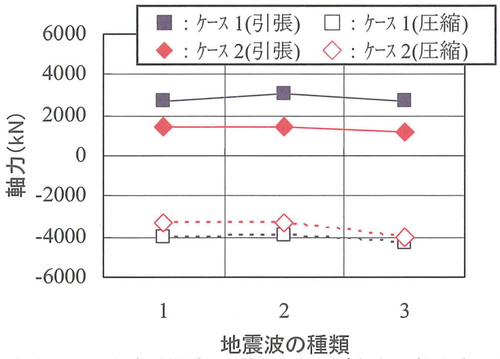


図-16 上部構造に作用する軸力（ﾀｲﾌﾟ Ⅰ）

(b) パラペット下端

図-17 に A1 橋台、図-18 に A2 橋台におけるパラペット下端の M-φ 曲線を示す。対象とした地震波は T1-3-1 である。図-17 のケース 1 では弾性範囲であるが、ケース 2 では降伏限界を超えており、図-18 においても同じ傾向となっている。

これらの結果より、パラペットについては桁とパラペットの接触により、変位を小さくする代わりに、パラペットに過重の外力が作用し、パラペット本体の耐震性が損なわれることになる。

(c) 竪壁下端

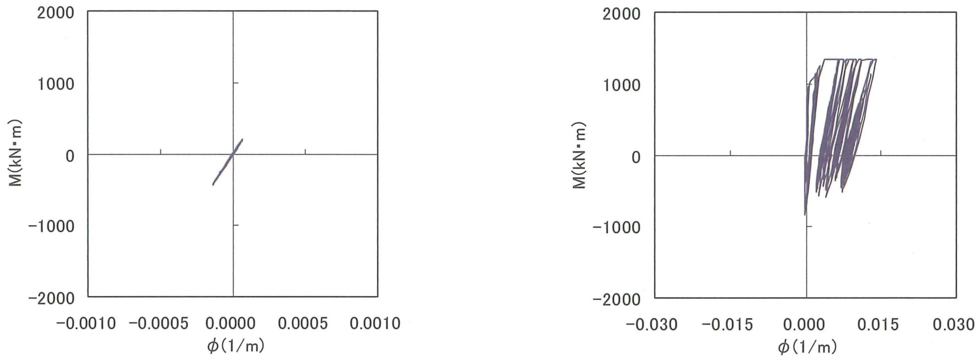
図-19 に A1 橋台、図-20 に A2 橋台における竪壁下端の M-φ 曲線を示す。図-19 ではケース 1、2 ともに弾性範囲内となっている。一方、図-20 のケース 1 では降伏限界を大きく超えている。

なお、履歴を繰り返す度に勾配が変化しているのは骨格曲線に武田モデルを使用しているからである。

以上の結果より、桁とパラペットの接触により、背面側〔＋側〕は曲げモーメントが小さく、地震によっては耐震性が向上していることが分かる。

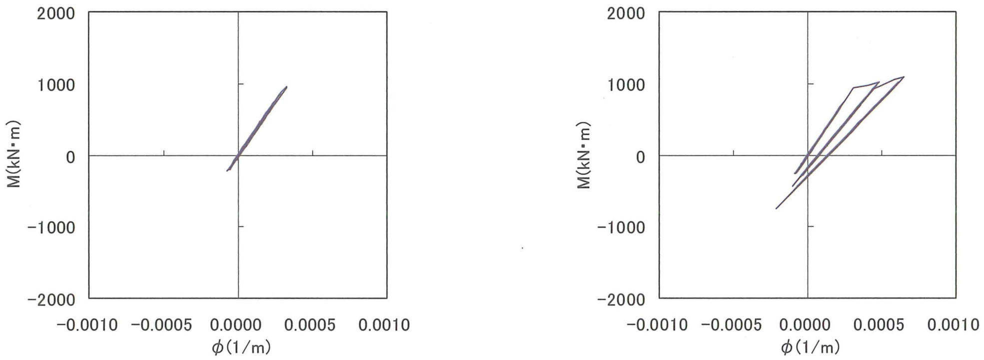
(3) 時刻歴応答結果

図-21 はケース 1、図-22 はケース 2 の地震波 T1-3-1 における A1 橋台パラペットの変位波形である。図-22 からわかるように、時間が経過するにしたがってケース 1 に比べてケース 2 が一側で大きくなり残留変位が発生している。これは、パラペットが降伏していることを示している。



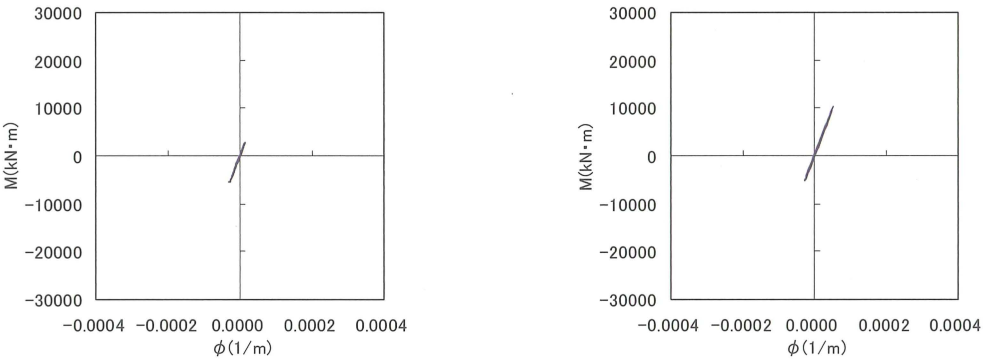
（ケース１）　（ケース２）

図-17　A1 橋台　パラペット下端の M-φ 曲線（タイプⅠ－１）



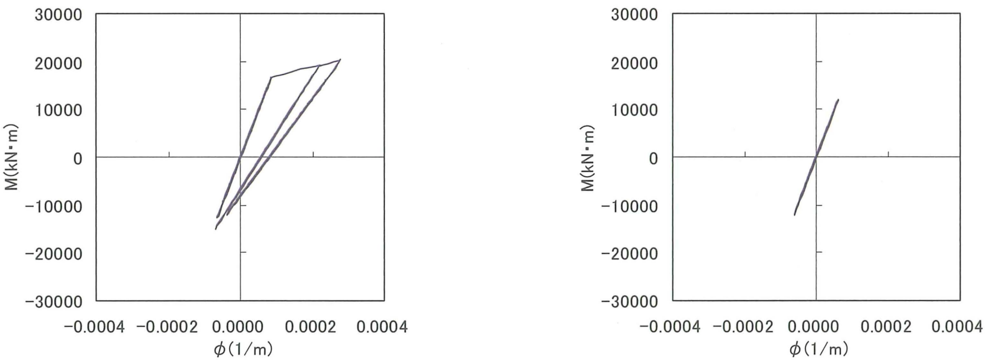
（ケース１）　（ケース２）

図-18　A2 橋台　パラペット下端の M-φ 曲線（タイプⅠ－１）



（ケース１）　（ケース２）

図-19　A1 橋台　竪壁下端の M-φ 曲線（タイプⅠ－１）



（ケース１）　（ケース２）

図-20　A2 橋台　竪壁下端の M-φ 曲線（タイプⅠ－１）

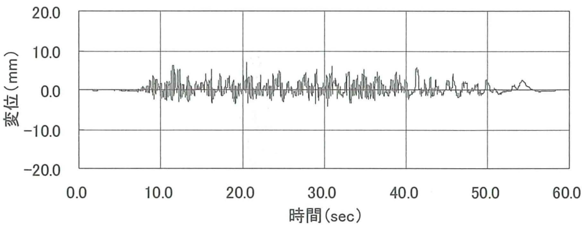


図-21 応答変位（A1 パラペット：ケース 1）

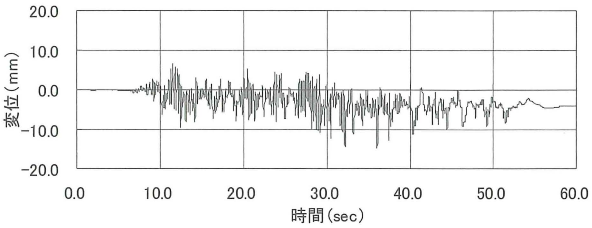


図-22 応答変位（A1 パラペット：ケース 2）

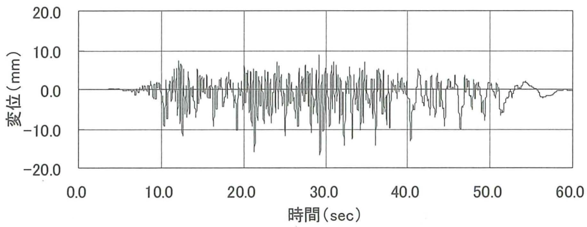


図-23 応答変位（A2 竪壁：ケース 1）

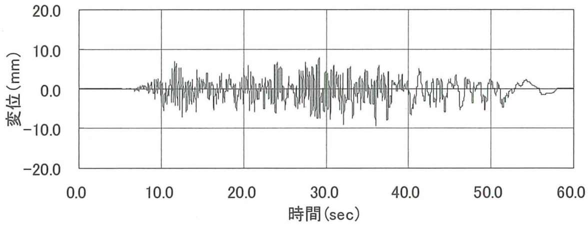


図-24 応答変位（A2 竪壁：ケース 2）

図-23 はケース 1、図-24 はケース 2 の地震波 T1-3-1 における A2 橋台竪壁下端の変位波形である。ケース 1 に比べてケース 2 の変位が小さくなっているのは桁とパラペットの接触効果によることを示している。

7. 結論

1) 静的解析結果、橋台の施工時期により、桁とパラペットの接触状況が異なっていた。本解析モデルでは盛土完了 6 か月後に橋台を施工した場合、桁とパラペットは接触しない結果となった。このことから、橋台の施工時期が橋台の側方移動に与える影響は大きいと言える。
2) 上部構造の変位は桁とパラペットが接触することにより減少する効果がある。上部構造（桁）に作用する軸力についても遊間がない場合が最も小さく、上部構造に対しては耐震性が向上するものと思われる。
3) パラペットにおいては桁とパラペットの接触により、固定支承側の橋台の変位を小さくする代わりに、パラペットに過重の外力が作用し、パラペット本体の耐震性が損なわれることになる。
4) 桁とパラペットが接触により、竪壁下端の背面側は曲げモーメントが小さく、地震によっては耐震性が向上することになる。

参考文献

1) (財)高速道路調査会 基礎構造研究委員会 軟弱地盤上の橋台基礎班：軟弱地盤上の橋台基礎に関する調査研究報告書、1979
2) (財)高速道路調査会 基礎構造研究委員会 軟弱地盤上の橋台基礎研究班：軟弱地盤上の橋台基礎に関する調査研究報告書（その 2）、1980
3) (財)高速道路調査会 基礎構造研究委員会 軟弱地盤上の橋台基礎研究班：軟弱地盤上の橋台基礎に関する調査研究報告書（その 3）、1981
4) 建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室：土木研究所資料第 1804 号、橋台の側方移動に関する研究、1981。
5) 西日本高速道路株式会社：設計要領第二集橋梁建設編、2008.8
6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編、2002.3
7) (財)海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工法事例集、平成 17 年 4 月
8) 日本道路協会：道路土工軟弱地盤対策工指針、1986.11
9) (社)全日本建設技術協会：土木構造物標準設計第 23～27 巻解説書（単純プレートガーダー橋）、平成 6 年 4 月
10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ｖ耐震設計編、2002.3

(2010 年 10 月 7 日原稿受付, 2010 年 12 月 15 日採用決定)

DCメタンプラズマ中における球状炭素微粒子の成長機構 [1)]

長井達三 [a] 馮宗宝 [b] 河野昭彦 [c] 生地文也 [d]
[a] 九州共立大学総合研究所 [b] 大阪府立大学 [c] 金沢工業大学 [d] 九州共立大学工学部

Growth Mechanism for Spherical Carbon Particles in a DC Methane Plasma [1)]

Tatsuzo NAGAI, Zongbao FENG, Akihiko KONO, and Fumiya SHOJI

Abstract

The growth mechanism for highly spherical carbon particles of micron sizes observed in a vertically excited CH4/Ar columnar plasma [F. Shoji, Z. Feng, A. Kono, and T. Nagai, Appl. Phys. Lett. **89**, 171504 (2006)] is investigated theoretically based on the following model. The particles are negatively charged in the plasma sheath region and grow staying there by capturing graphite onions with a diameter of ca. 10 nm and a positive charge. A balance between upward electric force due to the sheath and downward gravitational force on the particle keeps the particles in the sheath region during their growth. It is found that the particle radius initially increases linearly with time and then approaches a saturation radius, and that the center of gravity of the particle executes a simple harmonic oscillation about its balance position.

Keywords: *Carbon particle, Methane plasma, Plasma sheath, Graphite onion*

1. 序論

球状炭素微粒子の合成に関する実験

低圧・低温の円柱状メタンプラズマ直下に設された熱Si(100)基板上で、直径が数μmの高い真球度をもつ炭素微粒子が観測された。[2)] そこで得られたSEM写真をFig. 1に示す。SEM、EDS及びTEM観察から、その炭素微粒子は直径約10nmのグラファイトオニオンの集合体であることが報告された。更に、基板上で観測される、この球状炭素微粒子の分布密度とそれらのサイズは、CH_4-Ar比、基板温度及びプラズマ照射時間によって制御できることが見出された。[3)]

プラズマCVD法による薄膜作製技術において、プラズマ中で発生するサブミクロンサイズの微粒子は膜質及び製品の歩留まりを悪化させる要因として、これまで、その発生抑止の観点から多くの研究がなされてきた。しかしながら、その微粒子の形態及び性質の解明を目的とした研究は少ない。プラズマ中で炭素微粒子の成長を観測したという報告はあるが、上述のような球状で大きな炭素微粒子が材料ガス中で自己組織化的に成長する、という報告はない。[4-9)]

プラズマ中における微粒子の形成

RFシラン (SiH_4) プラズマ中のSi微粒子の成長については詳しい実験的研究がなされ、それを説明するモデルが提出された。[9-11)] このモデルによると、微粒子は プラズマシース領域 (Fig. 2 参照) でその核ができ次の3つのステージを経て成長する。

(1) 初期成長期：シース-プラズマ境界領域において、多数生成される短寿命ラジカル種の反応およびそれら相互の衝突凝集によって直径が10nm程度の初期微粒子が形成される。

(2) 急速成長期：前ステージで形成された初期微粒子の中の中性種は、シース-プラズマ境界領域に存在する高エネルギー電子の衝突を受けて電離し正電荷をもつ。その結果、このステージの初期では、中性微粒子、正帯電微粒子と周囲の電子付着による負帯電微粒子が、シース-プラズマ境界領域に集中して存在することになる。正負帯電微粒子はクーロン力により急速に凝集してさらに成長する。成長した微粒子（これを成長微粒子と呼ぶ）は周囲からの急速な電子付着により負に帯電する。[12)] 負帯電の成長微粒子は周囲の正帯電微粒子を捕集して更に大きく成長する。

(3) 成長飽和期：前ステージの微粒子成長が進むと、成長微粒子周囲の正帯電微粒子密度が減少して成長は緩慢になり、直径が約100nm近傍で飽和する。

グラファイトオニオン

一方、先に述べた球状炭素微粒子を構成する直径約10nmのグラファイトオニオンは、ダイアモンドの核

生成へのルートとして注目された。[13] 多面体グラファイトナノ粒子を高温で電子ビームにより照射すると、照射により生成された欠陥が格子間原子の熱運動によりアニールされ、完全な殻構造（オニオン様構造）を生み出す。この殻構造は高い機械的安定性を示す。また、その層間隔は殻中心に向かって減少する。彼らは、その殻構造と中心に向かう圧縮は、電子線照射によるナノ粒子表面層からの連続的原子喪失が生み出す表面張力が原因である、と結論した。この論文のFig. 2(b)は、700℃で照射して得られた結果のTEM写真を示す。そこには半径約10nmの完全なオニオン構造と中心に向かう層間隔の減少が見られる。この温度約1000Kと粒子のサイズ10nmは、本論文で問題にする、プラズマ下で真球状の炭素微粒子が得られた実験条件と一致しているのは興味深い。次節以下で展開する、球状炭素微粒子の成長理論でこのグラファイトオニオンは重要な役割を演じる。

炭素系工業材料としての球状炭素微粒子

高温の炭素電極放電によるカーボンナノチューブの創生以来、グラファイト構造のナノ粒子は、その優れた機械的電気的特性の故に、いろいろな分野における先端的研究の主題となってきた。[14] 最近、新しい炭素系物質のグループ（フラーレン、ナノチューブ、グラファイトオニオン）がナノ技術における新材料として注目を集めている。上述の球状炭素微粒子はこのグループの新しい一員として加えられ、新しい応用分野が開かれるものと 期待される。

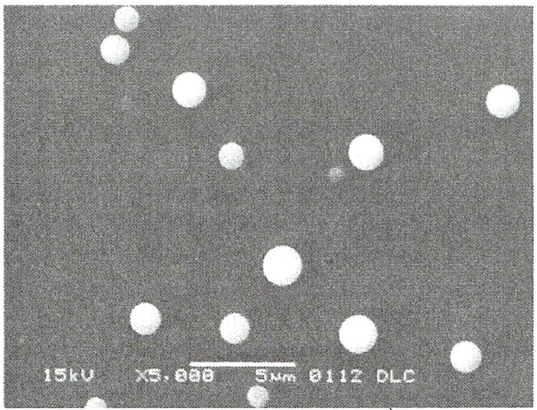
この論文では、前述の実験で観測された球状炭素微粒子の成長メカニズムについて力学的理論を提出する。

2. 微粒子成長のモデル

前節で説明したRFシランプラズマにおけるSi微粒子成長の研究結果 [9-11] と我々の実験結果から、DC柱状メタンプラズマにおける炭素微粒子成長のメカニズムを以下のように考える。

ラジカル種（CH_X）の反応と衝突凝集によって生成された多数の直径約10nmのグラファイトオニオンが、シース-プラズマ境界に集積する。ここでは、イオンと電子の他に中性及び正負に帯電した、3種のグラファイトオニオン（以下、オニオンという）が共存している。負帯電オニオンはその周囲に存在する電子の付着によってつくられる。一方、正帯電オニオンは、中性オニオンが基板から放射される高エネルギー電子の衝突を受けて電離したものである。これらの中で、正負帯電オニオンはクーロン力により急速に凝集して成長する。一定の大きさ（約100nm）に成長した微粒子は、

Fig. 1 Si(100)基板表面のSEM顕微鏡写真。自己組織化過程で成長した球状炭素微粒子が見える。温度は、2時間のプラズマ照射の



間、一定値1114Kに保たれた。[1,2]

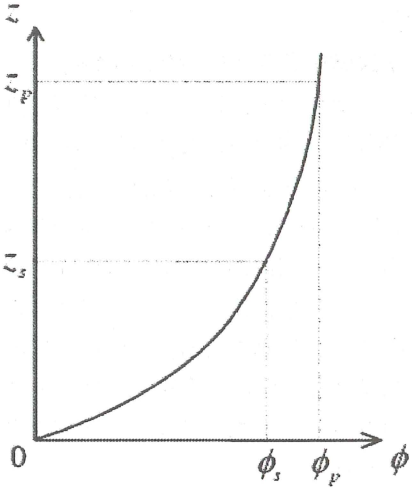


Fig. 2 プラズマシース領域における電位の概略図。z-座標軸は基板を原点に鉛直上向きにとる。横軸ϕは電位である。シース端とプラズマ端の位置座標及び電位を、それぞれ、z_Sとz_P及びϕ_Sとϕ_P、とする。$0<z<z_S$がシース、$z_S<z<z_P$がプレシースそして$z_P<z$がプラズマである。

周囲にある電子の急速な付着によって負帯電状態を定常的に保つようになる。[9,12] この成長した微粒子は正帯電オニオンを捕集して更に大きくなる。成長する微粒子は正電荷を得ることになるが、周囲の電子の急速な付着により再び負に帯電して定常的に一定の負電荷を有する。このとき、正帯電オニオンの捕集と電子付着の過程は微粒子の成長過程

に比べて充分速い速度で進行するものと考える。

このような成長をする微粒子は、プレシースからシース端近傍が最も多く、基板に近付くにつれて少なくなると考えられる。しかしながら、以下の節ではこの違いは考慮せず、単にシース領域とよぶことにする。また、微粒子の密度は充分小さく微粒子間の相互作用は無視できるものとする。すなわち、微粒子は一様に分布する、イオンと電子及び3種類のグラファイトオニオンの気体中に浮かんでいるものとする。

3. 微粒子重心の運動方程式

シース領域における、質量m、半径r、電荷$-q$の球状炭素微粒子の運動方程式は、微粒子の速度を$\vec{v}$とすると、次のように書くことができる。

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} - q[\vec{E} + \vec{v}\times\vec{B}] - \eta\vec{v} \tag{1}$$

ただし、$\vec{g}$は重力の加速度、$\vec{E}$は電場、$\vec{B}$は磁束密度、ηは抵抗係数$\eta = 6\pi\eta_0 r$（η_0粘性係数）である。式(1)の右辺第1項は微粒子に働く重力、第2項は微粒子に働くローレンツ力、第3項は微粒子を取巻くイオン、電子及びオニオンによる粘性抵抗を表す。

水平に置かれた基板に対して垂直方向に柱状プラズマが鉛直に照射されているものとする。今基板を原点としてz軸を鉛直上向きにとり、微粒子の速度のz成分をv、電場のz成分を$-E(E>0)$とする。図2に示すように、一般に電場はシース領域で変化するが、ここでは、Eはシース領域の平均的電場に等しい一定値をとるものとする。実験条件を考慮して磁場の項及び粘性抵抗は無視すると、式(1)は次のようになる。

$$m\frac{dv}{dt} = -mg + qE \tag{2}$$

式(2)に現われる、m及びqは微粒子の半径を通じて時間に依存する。これらの時間変化はシース領域における微粒子の成長機構によって決まる。これは次節で論じる。一方、微粒子（直径数μmのオーダー）重心の運動は重力とシース電場による。後の節で評価するが、問題にしている実験条件を考慮すると、微粒子の成長は微粒子の重心運動に比較して十分ゆっくりとしていて、式(2)のm及びqは微粒子重心の運動を論じるときは定数と見なすことができる。

われわれの実験条件下では、式(2)右辺の重力と電気力がほぼ釣合っていると考えられる。微粒子の半径を$r = 1.0\,\mu$m、グラファイトの密度を$\rho = 2.25\times10^3$ $\mathrm{kg\,m^{-3}}$とすると、微粒子の質量は$m = (4\pi/3)r^3\rho = 9.4\times10^{-15}$ kgとなる。我々の実験条件は、シース厚さ$z_s = 2.0$ mm、プラズマ電位（基板電位を0とする）$\phi_p = 1.0\times10^2$ Vである。これを$mg = qE$に代入して、微粒子への電子付着数$N_e = q/e$を求めると次の結果を得る。

$$N_e = \frac{mg}{eE} = 12 \tag{3}$$

この値はRFシランプラズマにおける微粒子の研究から得られている結果とオーダー的に一致する。[9]（文献9のFig. 1で微粒子密度/イオン密度が$n_p/n_i \approx 0.05$の場合に相当する）

4. 微粒子の成長

オニオンの運動方程式

シース領域で、負電荷をもつ微粒子は正帯電オニオン（以下、p-オニオンと呼ぶ）を捕集して直径数μmまで成長する。

p-オニオンは半径r_o（≈10nm）の球状とすると、その質量m_oは次式で与えられる。

$$m_o = \frac{4\pi}{3}r_o^{\,3}\rho \tag{4}$$

ただし、ρはグラファイトの密度である。このp-オニオンが微粒子の表面に近づくと、微粒子の電場σ/ε_0を受ける。ここで、ε_0は真空の誘電率、σは次式で与えられる微粒子の表面電荷密度である。

$$\sigma = -\frac{q}{4\pi r^2} \tag{5}$$

いま、y軸を微粒子表面に垂直で外向きにとり、p-オニオンの速度のy成分をu_yとすると、その運動方程式は

$$m_o\frac{du_y}{dt} = \frac{q_o\sigma}{\varepsilon_0} + m_o g_y \tag{6}$$

ただし、q_o（>0）はp-オニオンの電荷で、g_yは重力加速度のy成分である。この式において、重力$m_o g_y$は電気力$q_o\sigma/\varepsilon_0$に対し無視できる。即ち、重力/電気力を評価すると、

$$\frac{m_o g}{q_o|\sigma|/\varepsilon_0} \cong 3.5\times10^{-5} \ll 1 \tag{7}$$

ここで、$r_o \cong 10\,\mathrm{nm}$，$q_o \cong e = 1.6\times10^{-19}\,\mathrm{C}$，$N_e \cong 12$ とした。

従って式(6)で $m_o g_y$ を無視すると、

$$\frac{du_Y}{dt} \cong -a_o \tag{8}$$

ただし、$a_o \equiv q_o|\sigma|/(m_o\varepsilon_0)$ は、p-オニオンが微粒子表面へ捕集される加速度である。我々の実験条件で、この加速度は $a_o \cong 2.8\times10^5\ \mathrm{ms}^{-2}$ となり、これは重力加速度の 10^4 倍にあたる。

もし微粒子表面の電荷密度 σ が時間に依存せず定数か、又はp-オニオンの運動に比べて充分ゆっくり変化するものとすれば、p-オニオンは等加速度で微粒子表面に落下する。微粒子がp-オニオンを捕集する有効距離を b とすると、p-オニオンが微粒子表面に到達するときの速度は次式で与えられる。

$$u_o = \sqrt{2a_o b} \tag{9}$$

微粒子表面へのオニオンの堆積

微粒子は充分希薄で、各微粒子はそれぞれ、そのテリトリーをもち、そこからp-オニオンを捕集して成長するものとする。テリトリー内のp-オニオン密度を $n_{o,ter}$ とすると、微粒子質量の増加率はp-オニオンの単位時間当たりの微粒子表面への吸着量に等しい。従って次式が成り立つ。

$$\rho\frac{dr}{dt} = m_o n_{o,ter} u_o \tag{10}$$

p-オニオン密度 $n_{o,ter}$ が定数ならば、式(10)から微粒子半径の時間依存性が次のように得られる。

$$r(t) = \frac{m_o n_{o,ter}}{\rho} u_o t \tag{11}$$

上式において、初期半径はp-オニオンの半径 $r_o \cong 10$ nm程度として無視した。

ここで、p-オニオンが微粒子表面に到達するときの速度 u_o 及び微粒子がp-オニオンを捕集する有効距離 b を評価する。我々の前論文[2)]のFIG. 4 は微粒子の直径がプラズマ照射時間と共に増加することを示している。これを直線で近似して、式(11)と等置すると次式を得る。

$$n_{o,ter} u_o = 1.44\times10^{13}\ [\mathrm{m}^{-2}\mathrm{s}^{-1}] \tag{12}$$

ここで、 m_o 及び ρ は前述の値を使った。式(12)は微粒子の表面に捕集されるp-オニオンの流束を与える。p-オニオン密度を $n_{o,ter} \approx 1\times10^{14}\ \mathrm{m}^{-3}$ と仮定すると、[3)] p-オニオンが微粒子表面に到達するときの速度は $u_o \approx 0.1\mathrm{ms}^{-1}$ となる。更に、式(9)と前述の a_o の計算値を使うと、微粒子がp-オニオンを捕集する有効距離 $b \approx 0.04\,\mu\mathrm{m}$ を得る。

テリトリ領域におけるオニオン数の変化

1個の微粒子のテリトリ内にあるp-オニオン数を $N_{o,ter}$ とすると、その時間変化は次のように表される。

$$\frac{dN_{o,ter}}{dt} = -\beta(N_{o,ter} - N^0_{o,ter}) - \frac{dN_o}{dt} \tag{13}$$

この式で β は正定数、$N^0_{o,ter}$ は $N_{o,ter}$ の平衡値、 N_o は微粒子に含まれるp-オニオン数である。右辺第1項はこのテリトリの外側とのやり取りによる緩和を表し、第2項は微粒子がp-オニオンを捕集することによる減少を表す。

式(13)で最後の項を無視することができる場合は（$dN_o/dt \cong 0$）、式(13)の解は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} N_{o,ter}(t) = (N_{o,ter}(t_0) - N^0_{o,ter})\times \\ \exp(-\beta(t-t_0)) + N^0_{o,ter} \end{aligned} \tag{14}$$

この式で t_0 は任意の時刻である。式(14)はテリトリ領域のp-オニオン数が時間に関して指数関数的に平衡値 $N^0_{o,ter}$ に緩和することを示す。 β^{-1} はその緩和時間である。

式(13)で最後の項を無視することができない場合は（$dN_o/dt \neq 0$）、式(13)の解は次のようになる。

$$\begin{aligned} N_{o,ter}(t) &= N^0_{o,ter} - N_o(t) \\ &+ \beta\int_0^t dt' N_o(t')\exp(-\beta(t-t')) \end{aligned} \tag{15}$$

ただし、初期 $t=0$ にテリトリ領域と微粒子に含まれるp-オニオンの総数を $N^0_{o,ter} = N_{o,ter}(0) + N_o(0)$ とした。

微粒子半径の時間変化

以下では、注目するテリトリとその外部との間で、p-オニオンのやり取りは無視できるほど小さい場合を考える。即ち式(13)で $\beta = 0$ とする。そうすると、式(15)で右辺第3項を落とすことができるので、このテリトリにおけるp-オニオン密度 $n_{o,ter}(t) = N_{o,ter}(t)/V_{ter}$（ V_{ter} テリトリの体積）は次式で与えられる。

$$n_{o,ter}(t) = n^0_{o,ter}\left[1-\left(\frac{r(t)}{r_s}\right)^3\right] \tag{16}$$

ここで、$r_s \equiv (N^0_{o,ter})^{1/3} r_o$ は飽和半径である。
式(16)を式(10)に代入して次式を得る。

$$\frac{dr(t)}{dt} = u_o\left(\frac{r_s}{r_{ter}}\right)^3\left[1-\left(\frac{r(t)}{r_s}\right)^3\right] \tag{17}$$

ここで、$r_{ter} \equiv (3/(4\pi)V_{ter})^{1/3}$ はテリトリ半径である。
無次元量 $x \equiv r/r_s$ を使うと式(17)は

$$\frac{dx}{dt} = \gamma(1-x^3) \tag{18}$$

ここで、$\gamma \equiv (r_s/r_{ter})^3 u_o/r_s$ は特徴的な時間の逆数である。式(18)を積分すると次式をえる。

$$\gamma t = \frac{1}{6}\ln\left[\left(\frac{1-x(0)}{1-x}\right)^3\left(\frac{1-x^3}{1-x(0)^3}\right)\right] + \frac{1}{\sqrt{3}}\left[\tan^{-1}\left(\frac{1+2x}{\sqrt{3}}\right)-\tan^{-1}\left(\frac{1+2x(0)}{\sqrt{3}}\right)\right] \tag{19}$$

初期半径$r(0)$が飽和半径r_sに比べて十分小さいとき（$x(0) << 1$）、式(19)から次の近似解が得られる：

$$\begin{aligned} r(t) &\cong r_s\gamma t + r(0) \quad \text{for } t << \gamma^{-1} \\ &\cong r_s\left\{1-\sqrt{3}\exp(\pi/(2\sqrt{3}))\exp(-3\gamma t - 3x(0))\right\} \\ &\qquad \text{for } t >> \gamma^{-1} \end{aligned} \tag{20}$$

式(20)から、微粒子の半径は成長初期は時間に関し線形で増加し、成長後期は指数関数で飽和半径に漸近する、ことが分かる。最終的に飽和半径r_sに漸近するのは、この微粒子のテリトリ内にあるオニオン粒子が少なくなっていることを意味する。テリトリ外からオニオン粒子が供給されれば、微粒子は成長を続けることができる。

Fig.3に式(19)から得られる微粒子の半径$r(t)$を時間tに対してプロットした。横軸は時間tをこの系の特徴的な時間γ^{-1}で割った無次元時間、縦軸は微粒子の半径を飽和半径r_s割った無次元半径である。我々の実験結果を白丸、白4角及び黒丸で示す。[2] これらのデータは基板温度が、それぞれ、1110K、1130K及び1146Kで、メタン-アルゴン体積比が同じ$CH_4/A_r = 0.17$の条件下で得られた。このフィッティングから、我々の実験系における特徴的時間は$\gamma^{-1}_{\exp} = 6.2\mathrm{h}$ 及び飽和半径は$r_{s,\exp} = 2.5\mu\mathrm{m}$ という値が得られた。

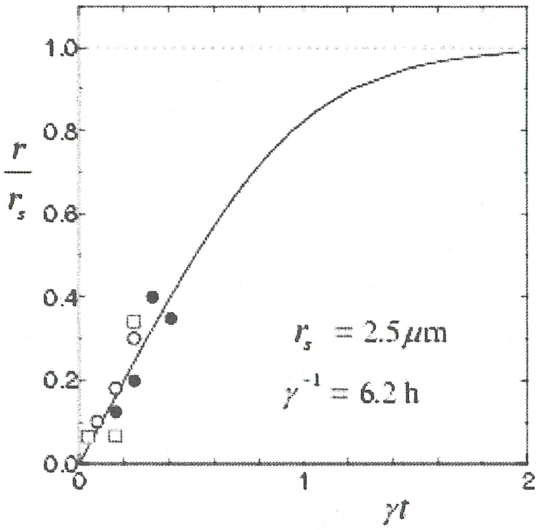


Fig. 3 微粒子半径の時間依存性。実線は式(19)から得られた理論曲線。白丸、白4角及び黒丸は我々の実験結果で基板温度がそれぞれ、1110K、1130K 及び 1146Kである。それらのメタン-アルゴン体積比は同じ0. 17である。[2]

5. 成長する微粒子の重心の運動

前節で得られた微粒子半径の時間依存性を使って、微粒子のシース領域における運動を調べる。運動方程式(2)を次のように書き直す。

$$\frac{dv(t)}{dt} = -g + \alpha(t)E \tag{21}$$

ただし、$\alpha(t) = q(t)/m(t)$ は微粒子半径を通じて時間に依存する。微粒子の電荷は微粒子の表面積に比例するものと仮定すると、式(21)のαは次の式で表される。

$$\alpha(t) = \frac{3|\sigma|}{\rho r(t)} \tag{22}$$

ここで、σは微粒子表面の電荷密度（負）で定数と仮定する。またρはグラファイトの密度である。式(22)は電気力と重力の比、$\alpha E/g$ の時間依存性を与える。この比は、微粒子成長の初期は半径$r(t)$が小さいので1より大きい。微粒子の成長が進むにつれて、この比は小さくなり、ある時間で1になる。即ち、電気力と重力

が釣合うことになる。この時間t_bは式(19)より次式で与えられる。

$$\gamma t_b = \frac{1}{6}\ln\left[\left(\frac{1-x(0)}{1-p}\right)^3\left(\frac{1-p^3}{1-x(0)^3}\right)\right] + \frac{1}{\sqrt{3}}\left[\tan^{-1}\left(\frac{1+2p}{\sqrt{3}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1+2x(0)}{\sqrt{3}}\right)\right] \tag{23}$$

ここで、$x(0)=r(0)/r_s$そして$p \equiv r(t_b)/r_s = 3|\sigma|E/(\rho r_s g)\ (<1)$は釣合い時点での微粒子半径の飽和半径に対する比である。式(23)から次の近似式が得られる。ただし、$x(0) \approx 0$とする。

$$\begin{aligned} t_b &\cong \gamma^{-1} p \quad \text{for } p << 1 \\ &\cong \frac{\gamma^{-1}}{3}\ln\left(\frac{4.29}{1-p}\right) \quad \text{for } p \approx 1 \end{aligned} \tag{24}$$

ミクロンオーダーの真球状微粒子が、シース領域で成長するのにこの電気力と重力の釣り合いが基本的に重要であることを指摘したい。この釣合いは、微粒子に働く電気力$q(t)E$が$r(t)^2$に比例し、重力$m(t)g$が$r(t)^3$に比例することに起因する。微粒子が微小な核（数10 nm）から成長を始めて十分大きな微粒子（数μm）になる間に、微粒子に働く力は電気力が優勢である状態から重力が優勢である状態へ移る。すなわち、上述の釣合い時点 t_bを通過する。現実のシース電場は、Fig.2 に示すように、シース端からプレシースにかけて減少し、プラズマ領域で消失すると考えられる。そうすると、この釣合いにある微粒子は、成長初期でプレシース付近にあり、成長と共にシース端を経てシース内へと降下してくるはずである。微粒子はこの釣合い状態にある間に、周囲のオニオン粒子を捕集することにより大きくなるものと考えられる。

6. 微粒子重心の振動運動

前節で、微粒子はシース領域に、重力とシース電場の釣合いによって長く留まることができ、周囲のオニオン粒子を捕獲して成長する、と述べた。そのとき、微粒子がそこで静止状態から成長して、成長期間中に他のどんな力も作用しないものと仮定した。しかしながら、シース領域に長く滞在して成長する微粒子は、時々他の微粒子の衝突を受け、有限の鉛直方向の速度をもつと考えられる。この節では、ある程度大きくなった微粒子が、そのような力を受けてz方向の初速度を持った場合、微粒子はどのような運動を行うかを考える。

シース領域にある微粒子は、重力とシース電場の作用を受けるので、次の式で表される全ポテンシャルエネルギー$u(z)$をもつ。

$$u(z) = mgz - q\phi(z) \tag{25}$$

前節までは$\phi(z)=(E)z=(\phi_p/z_p)z$（$z_p \approx z_s$，$z_s$シース端の座標(Fig.2 参照)）として、$u(z)=(mg-qE)z$を仮定した。一般に、シース電位$\phi(z)$はFig.2のように、基盤からほぼ直線的に増加し、シース端近傍から傾きが小さくなり、そのままプラズマ電位ϕ_pに漸近するものと考えられる。そうすると、$(d\phi/dz)_{z=0} > mg/q$の場合は、式(25)で与えられる$u(z)$は1個の極小をもつことになる。それを$u(z_b)$として、$u(z)$を$z=z_b$の周りに展開すると

$$u(z) \cong u(z_b) + (\kappa/2)(z-z_b)^2 \tag{26}$$

ここで、$\kappa \equiv -q(d^2\phi/dz^2)_{z=z_b}$は正とする。式(26)から、微粒子の重心は$z=z_b$を中心にして振動数$\nu=\sqrt{\kappa/m}/(2\pi)$の単振動を行うことが分かる。振動の中心$z_b$は次式の解として得られる。

$$\left(\frac{d\phi}{dz}\right)_{z=z_b} = \frac{mg}{q} \tag{27}$$

振動数は電場のポテンシャルの曲率の平方根に比例する。従って、微粒子重心の振動数は、中心z_bがシース端近傍にあるとき最大になり、シース内を降下するにつれて減少することになる。この振動運動の性格を与える、振動数ν及び振動中心z_bは微粒子の状態を比電荷q/mの形で含んでいることに注意したい。

我々の実験条件下で、微粒子重心の振動運動の振動数を具体的に評価するために、Liu-Dougalモデルから導出されたシース電位に関する次の表式をわれわれの問題に適用する。[15)]

$$\phi(z) = \phi_s A\left[1-\left(1-B\frac{z}{z_s}\right)^{4/3}\right] \tag{28}$$

ここで、$\phi_s = \phi_p - k_B T_e/(2e)$はシース端におけるポテンシャル（$T_e$電子温度）、$A \equiv 1+K$、$B \equiv 1-(K/(1+K))^{3/4}$、$K \equiv k_B T_e/(2e\phi_s)$である。$K$は

シースの構造を決めるパラメタで、イオンシース形成の条件は$K \le (\phi_p - \phi_s)/\phi_s$で与えられる。式(28)を使うと、微粒子重心の振動運動の振動数は次のように求まる。

$$\nu = f_1\left(\frac{q}{m}\right)^{3/2} \tag{29}$$

ただし、f_1はプラズマシースのパラメタのみで決まる定数で次式で与えられる。

$$f_1 \equiv \frac{4B^2(A\phi_s)^{3/2}}{9\pi g z_s^2} \tag{30}$$

式(29)を見ると、振動数は微粒子の比電荷q/mを通して、微粒子の成長と共に変化することが分かる。従って、負に帯電した微粒子の重心振動を観測すれば、微粒子の大きさを知ることができる。

微粒子重心の振動運動の中心z_bがシース内にある条件$z_s > z_b > 0$は次の式で与えられる。

$$\frac{3(1-B)}{4KB}\frac{gz_s}{\phi_s} > \frac{q}{m} > \frac{3(1-B)^{4/3}}{4KB}\frac{gz_s}{\phi_s} \tag{31}$$

式(31)は、微粒子の比電荷q/mと、重力と電場の平均的強さの比$g/(\phi_s/z_s)$の間の関係を与える。この式から微粒子重心の振動数の存在範囲は次式で与えられる。

$$\nu_{\max} > \nu > \nu_{\min} \tag{32}$$

ここで、上限$\nu_{\max}$と下限$\nu_{\min}$は

$$\nu_{\max} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{Bg}{3(1-B)z_s}\right)^{1/2} \tag{33}$$

$$\nu_{\min} = \left(\frac{K}{1+K}\right)^{3/8}\nu_{\max} \tag{34}$$

我々の実験条件を使って上式を評価すると、$\nu_{\max} = 20\,\mathrm{H_z}$及び$\nu_{\min} = 6\,\mathrm{H_z}$を得る。これらの振動数は、微粒子の電荷$q$及び質量$m$の個々の数値を使わず、プラズマパラメタのみを使って得られたことを注意したい。

7. 議論と結論

われわれはDC柱状メタンプラズマ中における球状炭素微粒子の成長についてモデルを提出し、このモデルから導かれる微粒子の成長則及びその重心の運動を理論的に明らかにした。以下では、前節までに得られた結果を基礎にしていくつかの考察を行いまとめをする。

(1) 微粒子成長モデル

微粒子はシース領域(プレシースを含む)で次のような過程を経て成長する。先ず、プラズマ-シース境界領域に3種のグラファイトオニオン(電気的に、中性、正、負；直径約10nm)が集積する。この中の正と負のグラファイトオニオンがクーロン力で凝集して微粒子の核ができ、それに周囲の電子が付着して負に帯電する。これが一定の大きさになると周囲の正帯電グラファイトオニオンを捕集してゆっくりと安定した成長をするようになる。

そのような安定成長は、負帯電微粒子に作用するシース電場（鉛直上向き）と重力（鉛直下向き）の均衡が微粒子をシース領域に長時間留めることによって実現されている。微粒子密度が小さい場合は、各微粒子は正帯電グラファイトオニオンが等方的で一様に分布する、それ自身の安定したテリトリの中で球状に成長する。

微粒子が成長して、それに働く重力がシース電場の上限を超えるとき微粒子は基板に落下する。或いはプラズマの電源が切られるとき微粒子は基板に落下する。

(2) 微粒子半径の時間依存性と微粒子重心の運動

微粒子の半径は成長初期では時間の1乗で増大し成長後期では指数関数で飽和半径に漸近する。実験結果は、この実験が成長初期の微粒子を観測したこと、を示している。微粒子の成長はその重心運動に比電荷$q(t)/m(t)$の形で影響を与える。

われわれは、この論文において、微粒子の成長と微粒子の重心運動を分離して取り扱った。これが可能である為には2つの運動の特徴的時間の大きさのオーダーに十分な違いがなければならない。我々の実験条件では、微粒子成長の特徴的時間は$\gamma^{-1} \approx 1\mathrm{h}$、微粒子重心の運動の特徴的時間は（振動の周期）$\nu^{-1} \approx 0.1\mathrm{s}$と評価できる。即ち、微粒子は重心運動に比べて十分ゆっくりと成長する。この結果は、我々が十分な精度で2つの運動を分離して扱うことが出来ることを保障している。

微粒子が成長していき、それに働く重力とシース電場の平均的力$q\bar{E}$が均衡する時間t_bの表式を導出した。それは無次元パラメタ$p = q_s\bar{E}/(m_s g)$で決まる。この式でq_sとm_sは、それぞれ、飽和半径r_sをもつ微粒子の電荷と質量である。従って、pは飽和半径をもつ微粒子に働く平均的電気力と重力の比である。この時間t_bは微粒子がシース領域で成長したあと落下を

始めるまでの、プラズマ励起の瞬間から測った時間と考えることができる。この均衡時間t_bは次のように振舞う：pが1より十分小さいときt_bはpに比例し、pが1に近付くときt_bは対数関数で発散する。

(3) 微粒子重心の振動

微粒子は電気力と重力の均衡位置を中心として、比電荷の3/2乗に比例する振動数で振動運動を行う。すなわち、振動数は$\nu = f_1(q/m)^{3/2}$（f_1はプラズマパラメタのみで決まる）で与えられる。我々の実験条件下ではνは6 Hz ～20 Hz の範囲にある。この式は、微粒子重心の振動運動の振動数を測定すれば微粒子の比電荷を知ることができることを示している。

参考文献

1) T. Nagai, Z. Feng, A. Kono, and F. Shoji, Phys. Plasmas **15**, 050702(2008).
2) F. Shoji, Z. Feng, A. Kono, and T. Nagai, Appl. Phys. Lett. **89**, 171504(2006).
3) Z. Feng, A. Kono, T. Nagai, and F. Shoji, Appl. Phys. Lett. **90**, 221503(2007).
4) Y. Hayashi and K. Tachibana, Jpn. J. Appl. Phys. Part2 **33**, L804(1994).
5) Y. Hayashi and K. Tachibana, J. Appl. Phys. Part1 **33**, 4208(1994).
6) P. D. Haaland, A. Garscadden, B. Ganguly, S. Ibrani, and J. Williams, Plasma Sources Sci. Technol. **3**, 381(1994).
7) C. K. Yeon and K. W. Whang, J. Vac. Sci. Technol. A **13**, 2044(1995).
8) D. Samsonov and J. Goree, J. Vac. Sci. Technol. A **17**, 2835(1999).
9) Review: Y. Watanabe, J. Phys. D: Appl. Phys. **39**, R329 (2006).
10) M. Shiratani, H. Kawasaki, T. Fukuzawa, T. Yoshioka, Y. Ueda, S. Singh, and Y. Watanabe, J. Appl. Phys. **79**, 104(1996).
11) Y. Watanabe, M. Shiratani, T. Fukuzawa, H. Kawasaki, Y. Ueda, S. Singh, and H. Ohkura, J. Vac. Sci. Technol. **A14**, 995(1996).
12) E. Thomas, Jr. and M. Watson, Phys. Plasmas **7**, 3194 (2000).
13) F. Banhart, T. Füller, Ph. Redlich, and P. M. Ajayan, Chem. Phys. Lett. **269**, 349(1997).
14) S. Iijima, Nature **354**, 56(1991).
15) S. Liu, and R. Dougal, J. Appl. Phys. **78**, 5919 (1995).

（原稿受付　2010年12月6日）

極低エネルギーAgイオンビーム蒸着によるSi表面構造変化

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 surface structures induced by the low-energy Ag ion beam deposition on Si(100)-2x1

Fumiya Shoji

Abstract
Using a low-energy ion beam deposition system, we have investigated how the surfaces of Si (100)-2x1 and Si (111) are modified by the deposition process of energetic Ag ions having an energy in the range of 10-500eV. Low energy ion scattering spectrometry (LEIS) and low energy electron diffraction (LEED) techniques have been employed for analyzing the surfaces with or without the ion deposition. LEIS intensity curve reflecting deposited Ag ions was found to show a broad maximum where the Ag ion energy was near 100eV. When the lowest ion energy of 10eV was examined for the modification of Si (100), the LEED spots disappeared just after the 1ML deposition of the ion, and then, the (1×1) LEED spots appeared when its surface was annealed at the temperature of about 570K. On the Si (111), the amorphous LEED pattern obtained after the deposition recovered as a ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$) LEED pattern by annealing the surface at 570K.

Keywords: *ion beam deposition, Si(100), Ag ion beam*

1. はじめに

入射イオンのエネルギーが 0.1～100eV 程度の超低エネルギー領域では、イオンと固体との相互作用は原子核と原子核との衝突現象が主であり、衝突断面積は非常に大きくなる．このため、このような超低エネルギー領域では、入射イオンは固体の表面最外層から数原子層内の原子とのみ相互作用する．また、入射イオンによるスパッタリング率は極めて小さいため、入射イオンは固体表面上に薄膜として堆積、すなわちイオン蒸着が可能となる．[1,2]

極低エネルギー（0.1～100eV）領域のイオン蒸着では、イオンは室温の熱エネルギー（0.03eV 程度）に比べ、数 10～数万倍以上のエネルギーを持っているため、薄膜形成初期においては凝縮核生成、核成長や核の凝集が促進され、さらに核密度が増加するなどが期待されている．また、イオンが有する電荷のため、薄膜成長初期の極初期における層状成長やミスフィットの大きい場合のエピタキシャル結晶成長の促進などが期待されている．[3] しかし、極低エネルギーイオン蒸着におけるこのような特長について，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調べた例は極めて少ない．[4,5]

本研究では、Ag をイオン化することで電気的に加速し、高いエネルギー状態にして Si 表面上にイオン蒸着させた場合について、薄膜成長の極初期段階の表面構造変化を調べることとした．これまで真空蒸着法による膨大な数の研究報告が Si 表面における Ag 薄膜成長についてなされている．[6] それによれば、Si(111)表面では 1 原子層だけが先ず表面に成長し、その上に 3 次元単結晶粒子が成長するという Stransky-Krastanov(SK)成長様式を取ることが知られている．この SK 成長では、最初に$\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 構造（以後、$\sqrt{3}$ 構造と呼ぶ）の 2 次元相が形成される．また、この$\sqrt{3}$ 構造の原子配列構造については、走査トンネル顕微鏡（STM）などによる観察結果も加わって明らかになっている．さらに、その被覆率についても一応の見解が示されている．一方、Si(100)表面では、ほとんどの場合、SK 成長ではなく、最初から 3 次元の結晶粒子が成長する Volmer-Weber(VW)成長様式を取ることが知られている．これから分るように、Si(100)表面および Si(111)上の Ag 薄膜の初期成長について、真空蒸着法に関してはほぼ明らかにされたといえる状態にある．[7] したがって、Si(100)あるいは Si(111)清浄表面上に低エネルギーAg イオン蒸着させることによって形成される表面と、その構造を解析すれば、極低エネルギーイオン蒸着と真空蒸着法との違いを明確にできる、また同時に Si(100)上での Ag 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．さらに，Ag 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規の表面相がテンプレートとなってフラットな Ag 薄膜成長が促進されるような現象が見つかる可能性もある．

本稿では、低エネルギーAg^+イオンを高精度に計測．制御して Si(100)および Si(111)清浄表面上へ供給して得られる表面構造変化を低速イオン散乱分光法(LEIS)と低速電子回折法(LEED)によって調べた結果について述べる．

2. 実験装置および実験方法

本実験に使った装置の構成と性能については総研紀要[5]に詳しく述べている．したがって，ここでは本実験に関係する低エネルギーAg イオンビーム蒸着に関わる事項についてのみ述べることにする．低エネルギーイオンビーム蒸着（LEIBD）ラインのイオン源を使って純度 99.999%の高純度 Ag を加熱蒸発させ、その蒸発 Ag 原子を電子衝撃によってイオン化した後、Ag イオンを加速電圧 1000Ｖで引き出した．図 2.1 にイオン源に 1000V 印加して引き出した Ag イオンのスペクトルを示すが、これは LEIBD ラインに設置している質量分離器を使って測定した結果である．これからAg^+イオンの強度が最も強いことが分る．

図 2.1 の結果に基づいて、本研究ではAg^+イオンを超高真空室中(2×10^{-7}Pa 以下)に設置している減速レンズ系を通して基板表面に蒸着した．このとき、基板表面に予め阻止電圧を印加して，Ag^+イオンが最終的に所望の蒸着エネルギーとなるようにした．この Ag イオンは円形スリットを通過し Si 基板表面に照射された．図２.２に本実験においてに主に使用した Si(100)基板の清浄表面構造および、Li イオンによる LEIS 解析条件を示す．イオン蒸着では、全ての実験において蒸着領域が同一に保たれれるようにした．また、LEED および LEIS による“その場”表面構造解析においては､イオン蒸着した表面と蒸着しない表面の両方が試料マニピュレータによって調べられるようにした．さらにマニピュレータの操作により、Ag^+イオン蒸着は基板表面に対して任意の角度で行えるようになっている．基板バイアス電圧によってAg^+イオンのエネルギーは任意に設定できるが、ここでは 10～600eV の範囲とした．

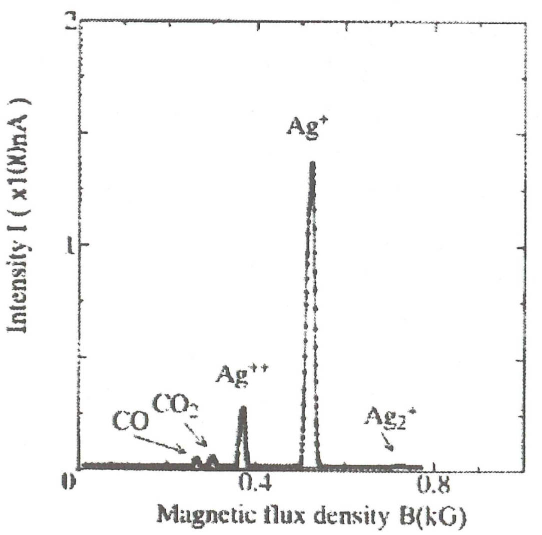


図 2.1 加速電圧を 1000Ｖにしてイオン源から引き出された Ag イオンの質量スペクトル．

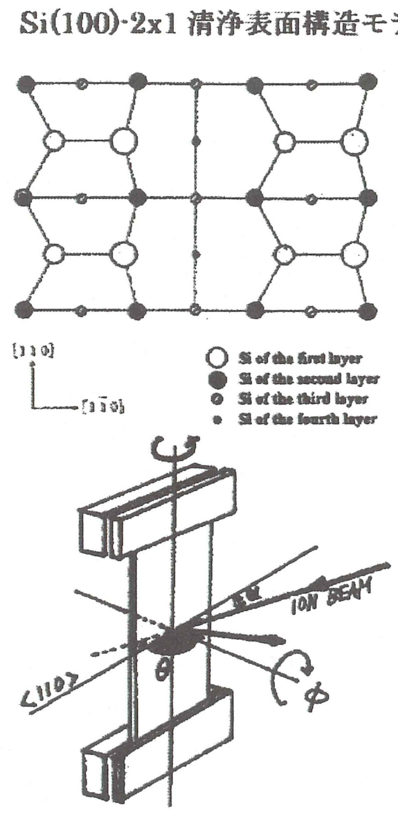


図 2.2 Si(100)-2×1 表面の原子配列モデルおよび、Si(100)ウエハー基板表面を LEIS によって測定する際のプローブイオン(Li^+)の入射条件．

基板としてSi(100)およびSi(111)ウェハー（厚さ0.5mm）を選び，その表面にAg^+イオン蒸着をおこなった．イオン蒸着に先立って，通電加熱法によって表面酸化層を除去して清浄表面を用意した．また、高温基板表面へのイオン蒸着では、通電電流値によって決まる基板温度を表面温度とみなした．実際には，基板電流と基板温度との関係を予め調べておいた校正曲線を使って表面温度を決めた．

基板表面上におけるAg^+イオン蒸着量は，蒸着イオンが全て表面に付着するとして、基板に流れたイオン電流を電流積分器を使って計測して求めた．

3.結果および考察

3.1 Si(100)-2×1表面 にイオン蒸着した場合

先ず、イオンエネルギーを変えて蒸着した場合の蒸着AgのSi(100)-2×1表面における被覆率をイオン散乱法で調べた．イオン照射量を1ML（6.79×10^{14} atoms/cm^2）の一定値にして、室温のSi(100)-2×1表面に、イオンエネルギーを変えて照射した場合の結果を図3.1に示す．

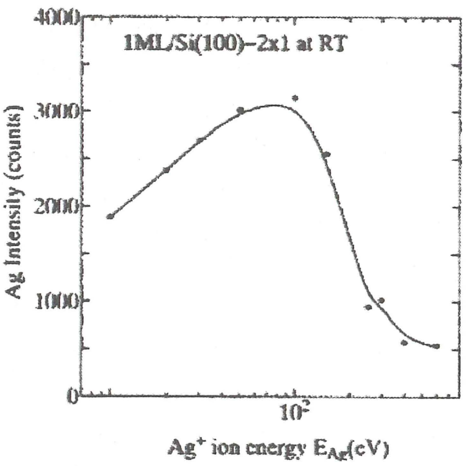


図 3.1 エネルギーの異なるAg^+イオンを1ML照射したSi(100)表面のAg原子からのLEIS強度．

図から、イオンエネルギー依存が顕著であり、表面被覆に関しては100ｅＶ付近になだらかなピークがみられることが分る．プローブとして使った150eVのリチウム（Ｌｉ）イオンの特性を考慮すると、プロービング深さは表面数原子層であり、得られた結果はイオン蒸着されたＡｇ原子の表面数原子層内の被覆率を示していると考えられる．したがって、100eV以下のエネルギーで被覆率が下がるのは、蒸着Agが表面2次元あるいは3次元の島状となって分布しているためであり、また、100eV以上のエネルギーで被覆率が下がるのは蒸着Agが表面数層よりも深いところまで進入したためといえる．

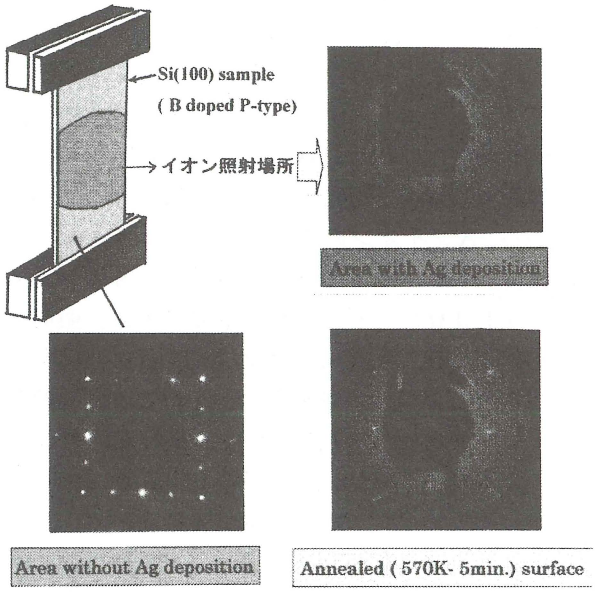


図 3.2 Si(100)-2×1 清浄表面に10eVのAg^+イオンを1ML照射した場合のLEEDによる観察結果．

図3.1で示したイオンエネルギー依存の結果に基づいて、Si(100)-2×1表面でのイオン蒸着による表面構造変化を10eVのイオンエネルギーについて調べた．図3.2はAgイオンを1ML照射した場合の結果である．これから、図の回折像（area with Ag deposition）に示すように、Ag蒸着直後の表面では回折スポットは消えて見えなることがわかる．しかし、この表面を570Kで5分間熱処理をおこなうと、(1×1) 回折像（ａｎｎｅａｌｅｄ surface)が現れることが分る．この（1×1）回折スポットは強度に関しては弱いが、すでに確認済みのビスマス（Ｂｉ）イオン蒸着の場合によく似ていることが分った．しかし、Ｂｉ イオンでは、図3.1に相当する表面被覆率の結果においては、20eVと非常にエネルギーの低いところにピークが見出されているなど、相違点があることも分った．以上の結果を踏まえると、Ａｇイオン蒸着後の表面がアニールによって(1×1)ＬＥＥＤパターンに変わることについては次のように考えられる．

Ag イオンが有するポテンシャルエネルギー(7.576eV：Ag 原子のイオン化エネルギー）のため、イオンが表面に近づく過程で電子移行がある.［8］ その場合、Si ダイマー結合に寄与している電子がイオンに移行し、イオンは中性に戻り、同時に Si ダイマー結合は切断されると考えられる．したがって、ダイマー結合が切断された表面では（２×１）構造は消え、LEED 像からは図 3.2 に示すような（２×１）スポットは弱くなり、むしろ（１×1）スポットが現れると考えるのが妥当である．しかし、すでに示したように実際には LEED 像からは（２×1）も（１×１）スポットもほぼ完全に消滅するという結果であった．このことから、Ａｇイオンのポテンシャルエネルギーに加えて、運動エネルギーによる効果が推測される.

Si（１００）-2×１表面の希ガスイオン照射による構造変化に関する以前の実験[9]において、イオンの質量効果が明瞭に現れ、同じイオン照射量ではＨｅイオン照射の場合に照射後のアニールによって（1×１）構造が最も現れ易いことを突き止めている． ２体弾性衝突においてエネルギーと運動量の保存則を適用すると，衝突前の入射イオン（質量 M_1、エネルギー E_0）が静止している表面原子（質量 M_2）と衝突した場合では、入射イオンの衝突後のエネルギー E_1 は次式のように表すことができる.

$$E_1 = \left[\frac{M_1 \cos\theta \pm \left(M_2^2 - M_1^2 \sin^2\theta\right)^{1/2}}{M_1 + M_2} \right]^2 E_0 \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

ここに，$M_1 < M_2$ であれば+符号のみが，また，$M_1 > M_2$ の場合は±符号が有効である.

一方，静止原子が衝突によって得たエネルギー E_2 は次式で与えられる.

$$E_2 = \left[\frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cos^2\phi \right] E_0 \quad \cdots\cdots (2)$$

これから，E_2 が最大となるエネルギー $E_{2(max)}$ は

$$E_{2(max)} = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} E_0 \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

となることが分る．ここで、式(3)にしたがえば，表面原子が衝突によって変位するために必要な最低のエネルギー値は次式で与えられる.

$$E_{0(min)} = \frac{(M_1 + M_2)^2}{4M_1M_2} E_d \cdots\cdots\cdots (4)$$

ここに，E_d は表面原子を変位させるためのエネルギーである．結局，入射イオンのエネルギーが $E_0 < E_{0(min)}$ であれば入射イオンは表面下の格子原子間に侵入できずに止まり，フレンケル欠陥が生じないことが分る．ここで、Ag イオンが静止している Si(100)表面原子と衝突した場合について計算すると、$E_{0(min)} = 1.5\,E_d$ となる．Si-Si 結合エネルギーは 2.3eV であることから、Ag イオンが表面 Si 原子を変位させる最低エネルギーは 3.5eV であることが分る．この値から、10eV の Ag イオン蒸着では衝突によって表面Ｓｉ原子を変位させることができるといえる．しかし、その変位は非常に小さいといえる．結局、10eV の Ag イオンは中性原子となって衝突し、Si 原子を変位させて表面欠陥を作ると同時に、表面を動き回り別の表面欠陥に捉えられると考えられる．このように表面にランダムに形成された表面欠陥に Ag 原子がトラップされる結果、Ag イオン蒸着直後では、Si 表面では(1×１） LEED スポットも消えると考えられる．一方、570K に熱処理した場合に出現する(1×１） LEED スポットは、その周期が Bi イオン蒸着の場合と同様に Si(100)－１×１周期と同じであることから、蒸着した Ag 原子の再配列による(1×1)構造かどうかについては検討が必要である.

そこで、LEIS による Ag イオン蒸着表面の解析結果について述べる．図 3.3 はイオン蒸着直後の表面（as deposited）と５７０Ｋで５分間アニールした表面（as annealed）からの LEIS スペクトルである．この測定では、プローブイオンを Si(100)の<110>方位から照射角 28° で入射させ、散乱角 156° で散乱イオンを検出した．図 3.3 の結果から、蒸着直後とアニール後ではＳｉからのピーク強度に明らかな違いが現れていることがわかる．アニール後ではＳｉからの強度が２倍以上に高くなっている．照射角 28° は、Si(100)-2×1 清浄表面におけるαスキャン強度曲線において散乱強度がピーク示す角度であり、[9] また、表面最外層の Si 原子列の完全性を判断する目安となる角度でもある．このことから、アニー

ル処理によってＳｉ原子配列構造がより完全なものに移行したか、あるいはＳｉ原子からの散乱を邪魔していたＡｇ原子がアニールによって凝集したためと考えられる．しかし、Ａｇイオンの衝突エネルギーが小さいことを考慮すると、むしろ後者のプロセスによると思われる．

次に蒸着直後の表面について Ag 原子からの散乱ピークの積分強度をプローブイオンの照射角 α を変え、プローブイオン入射方位を<110>、散乱角を156° にして調べた結果を図 3.4 に示す．図から、強度曲線は複数個のピークを示していることがわかる．このことから、アニール後の Ag 原子は 2 次元というよりはむしろ、3次元の島状となって表面に分布している可能性が高いといえる．

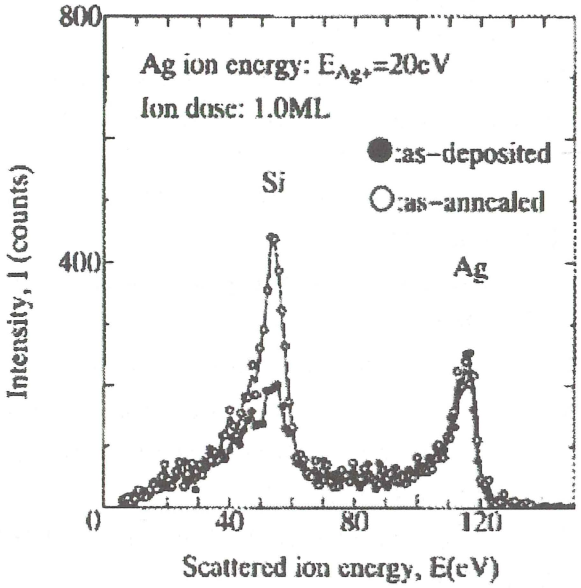


図 3.3 室温の Si(100)-２×１表面に 1.0ML に相当する Ag イオンを 20eV のエネルギーで照射した場合の LEIS スペクトルの蒸着直後（as-deposited）とアニール後（as-annealed）の結果．

このようなLEISの結果とLEED観察結果を踏まえると、イオン蒸着後のアニールによって発現して（１×1）LEED パターンの起源として、次のように考えるのが妥当であろう．すなわち、イオン蒸着によって2次元あるいは3次元の島状として広く分布した Ag 原子がアニールによってさらに 3 次元の島状へと凝集した結果、Si(100)表面はバルクの(1×１)構造が露出

3.2 Si(111)-7×7 表面 にイオン蒸着した場合

Si(111)-7×7 清浄表面をフラッシュ．アニール法により LEED で確認した後、その表面を室温に保って Ag イオン蒸着をした．Si(100)表面の場合と同様、蒸着イオンのエネルギーの関数として Ag の表面被覆率を調べた．その結果やはり、エネルギーが 100eV 付近に被覆率が最大となることが分った．この事実を踏まえて Ag イオンのエネルギーを 20ｅＶにし、1～3ＭＬの蒸着を行った場合についての表面構造変化を調べた．

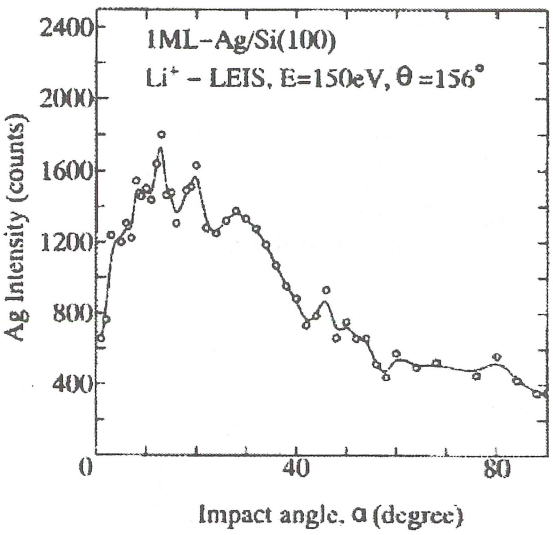


図 3.4 イオン蒸着直後の Si(100)表面からの散乱 Ag ピークの積分強度を入射方位を<110>、散乱角を 156° にして照射角 α の関数としてプロットした結果．

ＬＥＥＤ観察の結果、蒸着直後は常に回折スポットは見えなくなること、また、この表面を550℃でアニールすると（1×1）構造を経て鮮明な√3 構造が現れることが分った．

次に、LEIS によって蒸着直後とアニール後の Ag 原子からの散乱ピーク強度を調べた．その結果の一例を図 3.5 に示す．これはイオンエネルギーを 600eV にして蒸着した場合である．図 3.1 の結果を参照すれば、600eV では蒸着 Ag イオンは表面の深い位置まで打ち込まれていると考えなければならないことは明らかである．このことを踏まえて図 3.5 を見ると、先ず、Ag からの散乱強度は蒸着直後の表面では弱いが、表面をアニールすると強くなっていることが分る．これはまさに、深く打ち込まれた Ag がアニールによって表面に拡散していることを裏付けていると云える．さらに、アニールによって√３構造が現れる

ことも考慮すると、アニールによって表面に拡散した Ag 原子は規則的に再配列していると云える．同じような√3 構造は、イオンエネルギーを 100eV 以下に下げて蒸着した表面をアニールした場合にも現れることが確認された．

4. まとめ

超低エネルギーイオン蒸着法が半導体表面ヘテロエピタキシー制御のための有力な手段となりうるかどうかを系統的に調べることを目的として、Si(100)および Si(111)表面に極低エネルギーAg イオン蒸着を

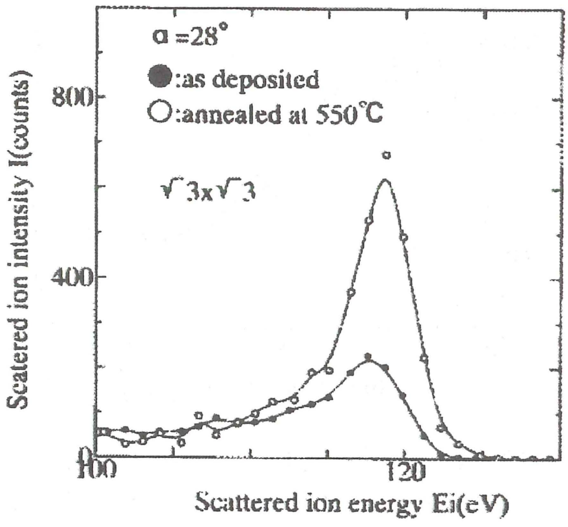


図3.5 Agイオンのエネルギーを600eVにして蒸着したSi(111)表面の蒸着直後 as-deposited)とアニール後(annealed)における LEIS スペクトル．

おこなった。イオン蒸着極初期の表面構造変化を LEED および LEIS を使って調べた結果は以下のようにまとめることができる．

両表面で入射イオンのエネルギーが 200eV を超えると、イオンは表面最外層に留まらず急速に内部に打ち込まれる。また、入射イオンエネルギーに拘わらず、蒸着表面は周期構造を示さない。しかし、その表面は570Kでのアニールによって Si(100)では(1×1)が、また Si(111)表面では 823 Kのアニールによって(√3×√3)構造が出現する。

イオン蒸着後のアニールによって発現した Si(100)上での（1×1）LEED パターンの起源として、現段階ではイオン蒸着によって２次元あるいは３次元状に分布した Ag 原子がアニールによってさらに 3 次元の島状へと凝集したためであると考えた。しかし、その周期がバルクの Si(100)表面の周期と同じと見なせることから、今後、蒸着した Ag 原子の再配列による新たな Si(100)-(1×1)Ag 構造の可能性も有ることから、更なる研究が望まれる。

参考文献

[1] D.G.Armour, Nucl. Instr.& Methods in Physics Research B, 89(1-4) (1994) 325.

[2] A.R.González-Elipe, F.Yuero, and J.M.Sanz, *Low Energy Ion Assisted Film Growth*, (Imperial College-Press,2003).pp.

[3] 高木俊宣、*イオンビーム工学*(電気学会大学講座、オーム社、1995) pp. 213-216.

[4] G.E.Thomas, L.J. Beckers, J.J.Vrakking, B.R. De Koning, Journal of Crystal Growth, 56 (3) (1982)557.

[5] 生地文也,九州共立大学総合研究所紀要, 第 **2** 号(2009)99,

[6] M.Hanbuecken, G.Le Lay,Surf. Science, 168 (1-3) (1986) 122.

[7] 柴田晃秀、高柳邦夫、表面科学、15(1994)74

[8] M.Kaminsky, *Atomic and Ionic Impact Phenomena on Metal Surfaces,*(Springer-Verlag, New York,1965)pp.263-6-290.

[9] F.Shoji, Nucl.Instrum.Methods B, B164-165 (2000) 671-676

（原稿受付 2010 年 12 月 18 日）

吸着冷凍機の性能実験とその評価

堀端栄善* 堀江亮介** 宮入嘉夫***
* 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（現 ㈱FILWEL）
** 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（現 三菱自動車エンジニアリング㈱）
*** 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

Experimental evaluation of adsorption refrigerator

Shigeyoshi Horibata* Ryousuke Horie** Yoshio Miyairi

Abstract
The adsorption refrigerator, which is possible to utilize low-level thermal energies, has been noticed as an air-conditioner and a chilled water manufacturing device. In this study, some adsorption elements packed with grainy adsorbent were made experimentally and the research in order to improve the performance of heat transfer and minimize the adsorption refrigerator was performed. In addition, it was experimented that the influence of the height of operating water on the performance of the evaporator.

Key words: *Adsorption Refrigerator, Adsorption Element, Evaporator, Adsorbent*

1. 緒 言

現代社会の維持・発展のためには，新エネルギーの開発と省エネルギーに加えて，低レベルの熱利用の推進は必須条件である．コジェネレーション(熱電併給)採用の工場や設備においても100℃以下の低温排熱は，暖房や給湯に利用される以外には余り有効に使われていない．近年では，低レベル熱エネルギーを利用する空調や冷水製造装置として，吸着冷凍機が注目されている．吸着冷凍機は，水などを冷媒として冷熱を造るノンフロンシステムで，圧縮機がないため電力消費は非常に少なく，騒音・排ガス・振動も発生しないなどの利点を有している．

著者らはその心臓部である吸着エレメントの試作を通して吸着冷凍機の高性能化に取り組んできた．本報では，これらをはじめ蒸発器の性能向上に及ぼす冷媒である作動水の高さの影響についても実験および評価を行ったので併せて報告する．

2. 吸着冷凍機の概要

熱利用冷凍機として吸収冷凍機が大型ビルや地域内の電熱併給用として多くの実用実績を有しているが，低レベル熱源には適用が難しく，100℃以下の大量にある未利用排熱の活用に対し，吸着冷凍機が注目されて久しい[1,2,7]．吸着冷凍機は気－固系の熱と物質の同時移動を伴うため，熱応答性が不十分で装置が大型化しコンパクト化が難しく、多くの研究者がR&Dに取り組んでいるが[2]，汎用的な実用化には至っていない．

実験内容に入る前に，吸着冷凍機の原理と概要を記述する．水は 100℃で沸騰蒸発や凝縮液化すると考えているが，これは大気圧下のことである．10mmHg の減圧下では9.2℃で，40mmHg では34℃で沸騰蒸発や凝縮液化が起こる．10mmHg，9.2℃沸騰蒸発させ、その水蒸気を40mmHg，34℃で凝縮液化させると，沸騰・蒸発部では蒸発潜熱の供給が必要でこの熱を供給した流体は冷されることになる．この現象を活用したものが吸着冷凍機で，その概念図をFig. 1に示す．吸着剤を内蔵した吸着カラム，水を沸騰蒸発させる蒸発器，水を凝縮液化する凝縮器で構成される．図は吸着運転状態で，吸着カラムでは吸着剤が蒸発器から沸騰・蒸発してくる水蒸気を吸着し発生する吸着熱は冷却水で除去される．蒸発器では水の蒸発潜熱を供給することで冷水が製造される．吸着剤に所定量の水蒸気が吸着されるとバルブを切り替え吸着エレメント内に温水を流し脱着を行い水を凝縮器に戻す．このとき，吸着カラムでは脱着用の熱が温水により供給され，凝縮器では発生する水蒸気の凝縮熱が冷却水により除去される．吸着カラムを２基設置し交互に切り替えることで冷水が連続的に製造される．

実用装置としてはFig. 2に示すように２種のタイプが考えられる．(a)は吸着カラムに蒸発器兼凝縮器

を内蔵した一体型吸着冷凍機で構造が簡単で減圧装置に適しているが，機器の兼用で熱効率が低くなり小型向きである．(b)は構成機器が独立しているため各機器を連結する配管部が長く水蒸気移動による圧力損失の低減に配慮する必要があるが，汎用的で大型向きである．

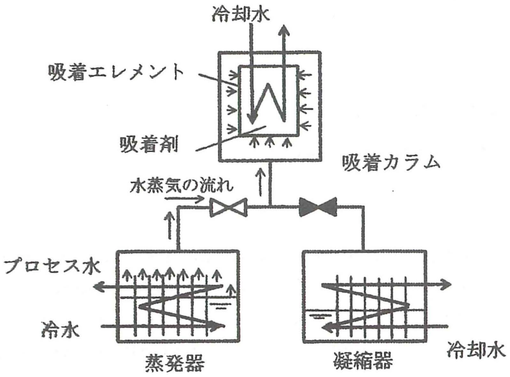
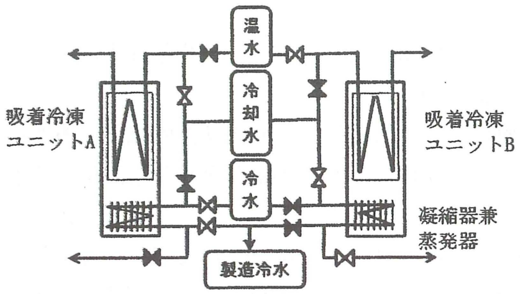
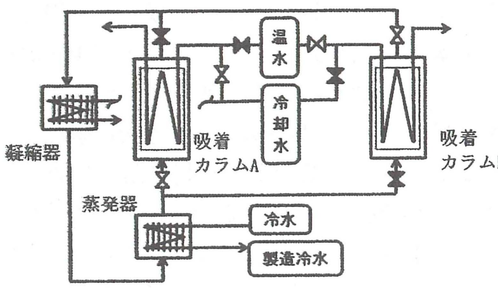


Fig. 1 吸着冷凍機の概念図



(a) 各機器一体型吸着冷凍機

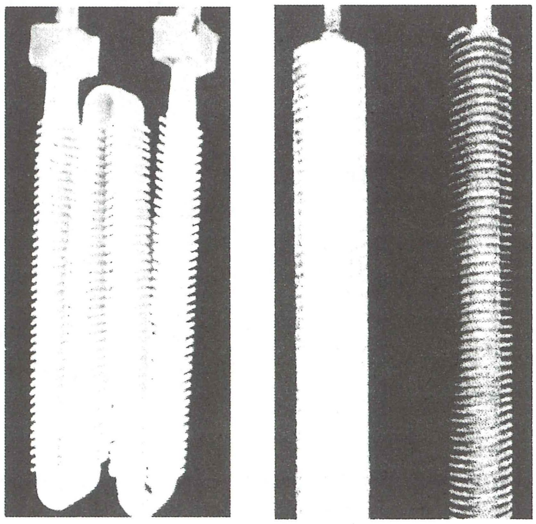


(b) 各機器独立型冷凍機

Fig. 2 実用機の吸着冷凍システム

3. 研究の経緯

1990年に吸着冷凍機の調査研究に着手し，試作初号機を通して冷水の製造をはじめ装置化および運転技術を習得した．吸着冷凍機の中で最も大きな課題と考えられる装置のコンパクト化，すなわち吸着エレメントの伝熱性能向上に着目し，吸着剤(シリカゲル)に２～４％程度の高分子系接着剤を水とともに混ぜ合わせて伝熱面に吹き付けたり塗りつけたりす



(a)スカイブフィン型
一体化後(４パス)

(b)ヘリカルフィン型
一体化後とコート前

Fig. 3 吸着エレメント

る方法でシリカゲルはもとより伝熱面との一体化に取り組み所期の成果を得た．

一体化しやすい構造で伝熱性に配慮した吸着エレメントとして，スカイブフィン型，それからヘリカルフィン型の熱交換器(ともに昭和アルミ製)を採用し，試作および実験を通して有効性を確認した．Fig. ３に両フィンの写真を示す．

スカイブフィンはアルミ製の板状矩形管で，フィンはアルミ管を切り起こしたもので，ヘリカルフィンは銅管の外側にアルミを転造させアルミ部を切削しフィンにしたものである．

その後，実用化の観点から加工性と充填性の簡便さを考慮してフィンチューブ型吸着エレメントについても実験に取り組んできた．本報では，ヘリカルフィン型とフィンチューブ型の吸着エレメントの実験を中心に議論を進める．

4. 実験装置の概要

実験装置の概略をFig. 4に示す．この装置は上部に４パスのアルミ製ヘリカルフィンにシリカゲルをコートした吸着エレメントを，下部には凝縮器兼用の蒸発器が内蔵する一体型の吸着冷凍機である．吸着カラムはアクリル製で内径180mm，高さ1000mmの円筒容器である。他に付帯設備である冷却水/温水供給ユニットとプロセス水供給装置からなっている．なお，本研究では吸着剤として有望と考えられるシリカゲル JIS A 型(フジシリシア製：比表面積700m^2/g, 粒度 30～60 メッシュ/0.250～0.595m, 破砕

状)を使用している．吸着エレメントは水エマルジョン系高分子接着剤(住友ベークライト製エチレン系酢酸ビニル水溶性エマルション接着剤)を吸着剤重量に対して２～４％用いてシリカゲルを塗布することにより一体化して，熱伝導性の向上を図っている[2,5]．水蒸気の吸着および脱着時に大量の発熱および吸熱を伴うので，この熱の吸着および除去の迅速化を可能としている．

上述のヘリカルフィン型の他にフィンチューブ型の吸着エレメントも使用している．

吸着実験では，乾燥(脱着)状態にある吸着エレメントに冷却水を流し，プロセス水からの熱供給を受けて蒸発器から蒸発してくる水蒸気を吸着するときに発生する吸着熱を除去する．脱着実験では所定の吸着状態に達した吸着エレメントに温水を流し，熱供給を受けて脱着された水蒸気は，凝縮器で冷却水により熱を奪われ凝縮液化する．

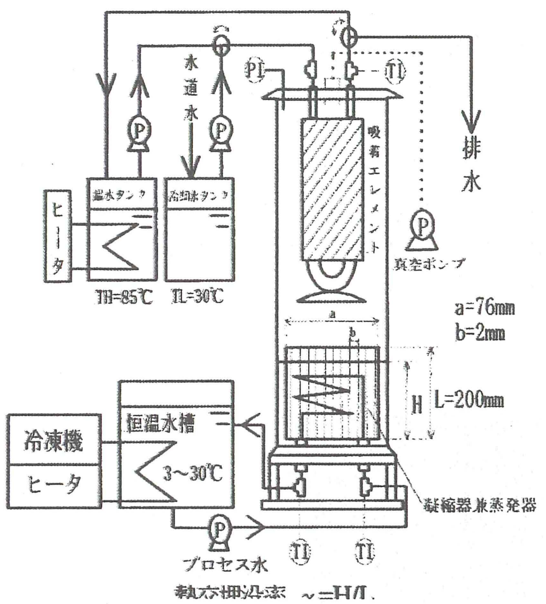


Fig. 4 可視化モデルの概要

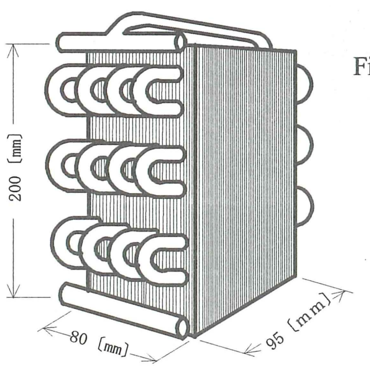


Fig. 5 凝縮器兼用の蒸発器

(汎用型ﾌｨﾝﾁｭｰﾌﾞ型熱交換器)

ﾌｨﾝ枚数：４８

ﾌｨﾝﾋﾟｯﾁ：2mm

この凝縮器兼用の蒸発器はFig. 5に概略を示すフィンチューブ型の汎用熱交換器で、フィン部の寸法は幅 80mm×奥行き 95mm×高さ 200mm である．

5. フィンチューブ型蒸発器の特性検討

(1) 従来の２パス吸着エレメント実験では，吸着部抵抗が蒸発部抵抗に比べ大きく，蒸発部性能の影響が，全体の冷凍性能に出現しにくい状況にあった．今回は４パスエレメントにして吸着部抵抗を半減させて，実験を行った．

(2) 本実験では，装置の制約もあって，蒸発器兼凝縮器の入口温度(プロセス水温度)は同じ温度として，連続した吸脱着サイクル運転を行い，データを解析した．なお、凝縮器兼用の蒸発器はフィンチューブ型の熱交換器でボトム水の流動性を考慮して波状のフィンは垂直に配置した．プロセス水温度は 3～30℃の各種一定値に設定し，作動水である吸着ユニットのボトム部充填水量(ボトム水量)を変更(蒸発部伝熱フィンの液埋没率 χ を変更)させて吸脱着実験を行った．

(3) サイクル実験の一例をFig. 6に示す．図中記載の条件で実験を行い，冷凍性能 Q_R は温度信号をパソコンに取り込み算出した．

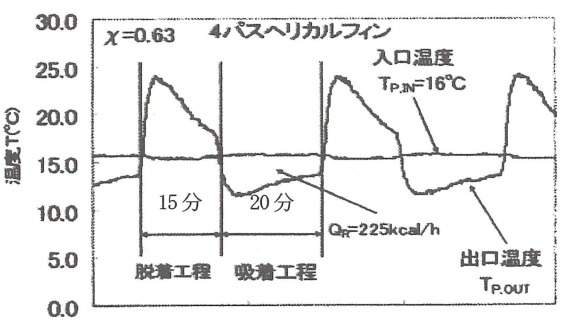


Fig. 6 冷水(ﾌﾟﾛｾｽ水)の出入口の温度変化

Fig. 7は，プロセス水温度 16℃のときの，ボトム水量(熱交埋没率 χ=0. 35～0. 85)による冷凍性能の変化を示したものである．

おこの結果より χ=0. 35 では性能が良く，χ が大きくなると低下し，χ=0. 85 ではまた向上する傾向を示した．この傾向について検討を行った図をFig. 8に示す．

本実験のように減圧下ではボトム水圧は水深により大きく影響を受け、水面から深くなるほど高くなり水の沸点は大きく上昇する．例えば水温 11℃とすると，χ=0. 85 では，フィンの底部での沸点は 13℃高くなって 24℃となる．実験でも水の沸点は液の

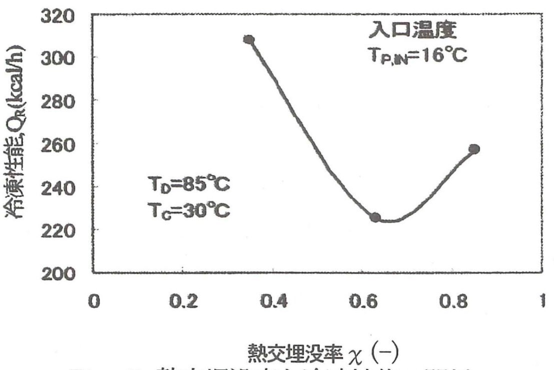


Fig. 7 熱交埋没率と冷凍性能の関係

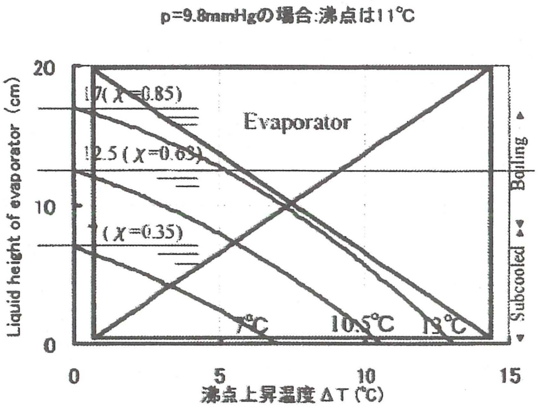


Fig. 8 熱交埋没率による沸点の変化

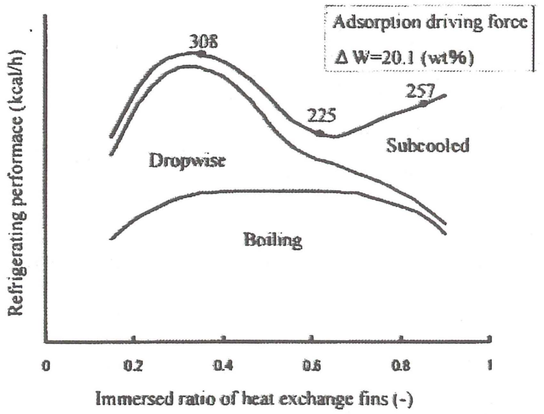


Fig. 9 熱交埋没率と伝熱現象

上部すなわち液面近傍で起こり，下部では起こりにくいことが観察された.

一方，χが大きいほど下部は沸騰蒸発が起こらない領域が多くなり液の沸騰撹乱による冷却効果がなくなる傾向にあるが，サーモサイホン効果(温度差による自然対流効果)で水の上昇流による伝熱促進が期待できるようになる．水面より上側のフィンは沸騰によってスプラッシュされた水滴の滴状蒸発が起こる．以上のことを定性的に表現したものをFig. 9に示す．冷凍性能に寄与する効果は，フィンの下部から上部へ行くに従い，subcool 部(過冷却部)の流動現象，水面近傍の沸騰現象，水面より上部ではスプラッシュした水の滴状流動現象，の各領域が存在していると予想される.

これらの現象は熱交埋没率χによって影響力が異なり，これらが組み合わさったもので伝熱速度(冷凍性能)が決定されているものと考えられる.

すなわち，χ=0.4 近傍で冷凍性能が高いのは，液面近くの沸騰現象と液面上部フィンでの液の滴状流動現象が効果を発揮し，これらが組み合わさったものと考えることができ，χ=0.6 以上で伝熱性能が高くなる傾向を示すのは，下部のサーもサイフォン現象による液の流動効果が有効に作用しているものと考えられる.

6. FIN TUBE 型吸着エレメントの検討

蒸発器については前項で記述したようにフィンチューブ型の熱交換器を使用してフィンに対する水の適切な熱交埋没率χを選定する上での有効な知見を得ることができた．吸着エレメントについては，実用化に向け工業化の観点からヘリカルフィン型の熱交換器より安価で入手しやすいFIN TUBE型エレメントの採用を試みた.

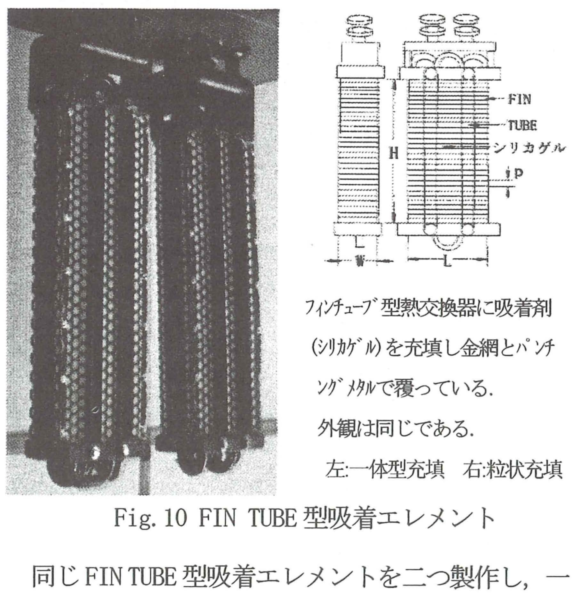


Fig. 10 FIN TUBE 型吸着エレメント

同じFIN TUBE型吸着エレメントを二つ製作し，一体化の有効性確認も含め，粒状充填および一体化充填の 2 つの充填形態のものを順次，交換して冷凍性能評価実験を行った．これら吸着エレメントの仕様

と外観をTable 1とFig. 10に示す.

Table 1 FIN TUBE型吸着エレメントの仕様

吸着エレメント	①粒状充填	②一体化充填
充填内容	シリカゲルのみ	バインダー付 シリカゲル
列段数	4列2段 (8パス)	
フィン寸法(厚み)	L×W 132mm×76mm (0.11mm)	
有効長	H 450mm	
フィン断面積	0.0057mm2	
銅チューブ	17mmφ×8パス	
吸脱着面面積	187.200mm2	
フィン枚数(ピッチ)	121枚(3.63mm:P3.63)	
設計容積	3.55ℓ	
設計充填量	2.60kg	
推定充填量	2.68kg	2.37kg
充填率	100%	88%
バインダー量	―	2wt%
推定バインダー量	―	47.4g (52.0g)

6.1 実験結果および冷凍性能の解析

実験データをFig. 11に示す. 今までの実験と同様に, 一条件につき5回の吸・脱着のサイクル運転を行い, 吸着および脱着工程の性能(冷凍および凝縮性能)がほぼ一定で安定していることを確認し3~5サイクルの平均値を性能値として採用した.

ヘリカルフィン型カラムの実験では, 粒状充填から一体化充填に変更することで性能が向上していたが, 今回は逆の結果が得られた. このことについて検討を行ってみる.

まず, 粒状と一体化充填の特性を比較したものをFig. 12に示す. 両者を比較すると, 冷凍性能にはあまり差が出なかったが, 高性能が期待される一体化充填の予想値に比べ10%程度低めであった. しかし, 吸着工程から脱着への切り替え直後の温度上昇勾配は一体化充填の方が急になっており切り替え直後の伝熱性は優れていることがわかる. したがって, 一体化充填ではフィン近傍での伝熱性は向上しているが, フィンから離れたシリカゲル内部に亀裂や空洞が発生しているものと予想される. 出来上がったフィンチューブの狭い隙間にシリカゲルを塗り込んでいる現状の一体化手法では限界があり, フィンチューブエレメントの製作過程で一体化手法を取り入れる必要がある.

6.2 伝熱および流動有効長の概念導入

ヘリカルフィン型やフィンチューブ型などのいろんな形状の吸着カラムに対し, その性能予測や評価をするために, 伝熱有効長(L_H)および流動有効長(L_F)なる概念を取り入れて検討してみた. Fig. 13は伝熱有効長および流動有効長に関する概念を示したも

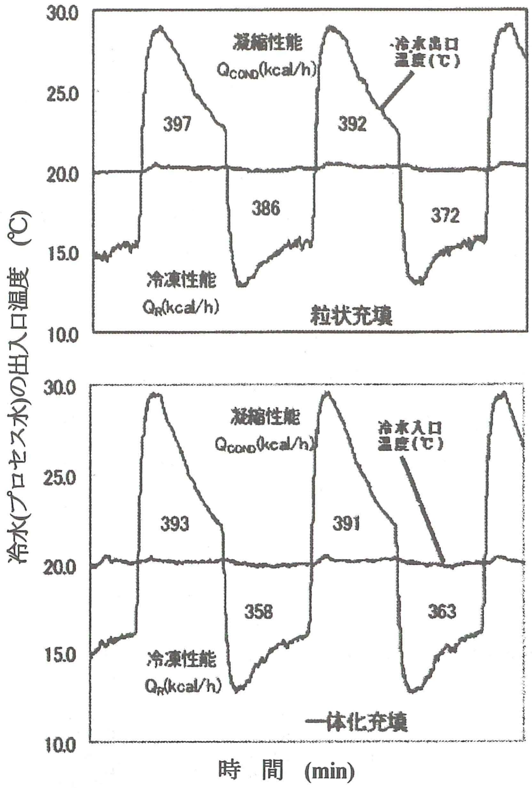


Fig.11 冷水(プロセス水)出口の温度変化と冷凍性能
吸着時間:20分 脱着時間:20分

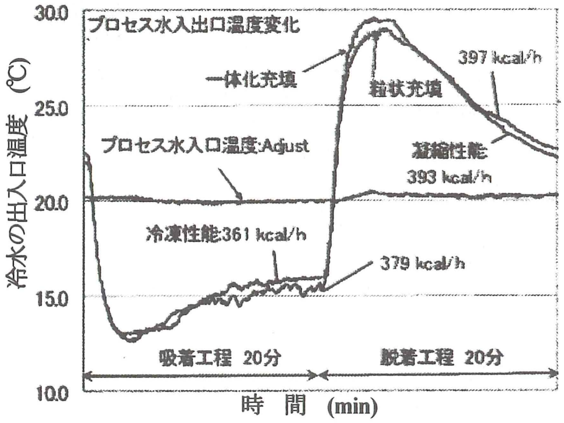


Fig.12 粒状充填と一体化充填の特性比較

のである。これは、化学工学で使用される相当直径の概念を応用したもので、複雑な形状を有するフィン中の物質と熱の移動を円管内の現象として捉え, それらの数値で表現される有効長が大きいほど移動しにくいことを示すものである。

定義より伝熱有効長が小さいほど伝熱性の良い構造であり, 流動有効長が小さいほど水蒸気の移動教

理が短く吸着や脱着されやすい構造をしていることになる．性能向上のためには，一方だけを小さくするのではなく，両者をバランスよく小さくする必要がある．Table 2に各吸着エレメントに対し算出したL_HとL_Fを示す．ヘリカルフィンに比べFIN TUBE型エレメントの方がL_Hは小さくL_Fは大きいので，熱移動性はよいが水蒸気の移動性は劣ることになる．

今回のエレメント形状を比較すると伝熱有効長はFIN TUBE型エレメントの方が優れていると考えることができる．

すなわち，ヘリカルフィン型エレメントに比べてFIN TUBE型エレメントは，水蒸気の移動はしにくいが，熱移動はしやすい構造になっている。水蒸気の物質移動抵抗が大きいため吸着速度ひいては冷凍能力を低下させていると思われる．

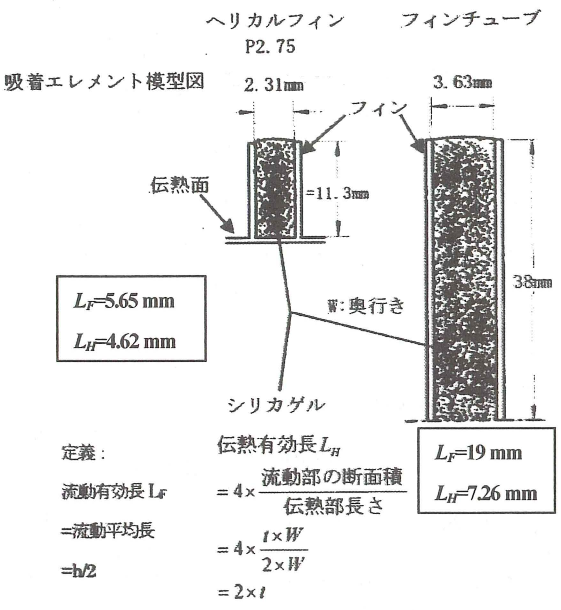


Fig. 13 流動有効長と伝熱有効長

6.3 冷凍性能予測式の提案

FIN TUBU型吸着カラムは，これまでR&Dを行ってきたヘリカルフィン型のものとはかなり異なる形状をしているため製作に当たっての性能予測は容易にはできない．

そこで，ヘリカルフィン型吸着カラムでの2パスと4パスエレメントを用いたTable 2に示す冷凍性能実験データをベースに次元解析手法による汎用的な冷凍性能予測式の作成を試みた．

基本的考え方は以下のとおりである．

①吸着冷凍性能は吸着エレメント部と蒸発器部の伝熱抵抗によって決まり，物質移動の抵抗は考慮しないと仮定する。

$$Q_R = U \cdot A \cdot \Delta T = U_{0A} \cdot \Delta T \qquad (1)$$

$$R = 1/U_{A0} = 1/U_A + 1/U_E \qquad (2)$$

Rは吸着冷凍性能に関すつ全抵抗，U_Aは記号の複雑さを避けるため便宜上伝熱面積Aを含めた変形総括伝熱係数（総括熱移動係数）と考えて頂きたい．（$1/U_A$）は吸着エレメント部の伝熱抵抗，（$1/U_E$）は蒸発器部の伝熱抵抗である．

②性能を表示するパラメータとしては，表に示すもの，すなわち既に定義したL_FやL_Hをはじめ，吸着剤量，吸着速度（蒸発速度），断面積比等を用いる．

③予測式は無次元式表示とし，そのべき数を実験で求めた冷凍性能（実験番号 No. 1～4）に極力適合するように決定する．

④具体的には，まず実験No.1と実験No.2に着目した．その違いは吸着エレメントが2パスと4パスであるので，$2 \times U_{A1} = U_{A3}$とし，蒸発器側は$U_{E3}/U_{E1} = (Q_3/Q_1)^{0.5}$が$= (Q_{R3}/Q_{R1})^{0.5}$成立するとした．は実験の冷凍性能を採用すると，$\alpha\ (= U_{A1}/U_{E1})$の値が得られる．　式（2）より，$\beta\ (= U_{A01}/U_{A1})$および$\gamma$（$U_{A04}/U_{A1}$）の値が得られる．他の吸着エレメントの実験に対しても，無次元べき数を適切に設定することにより，後述のTable 3に示すように各種吸着エレメントに対する汎用的な伝熱係数を求めることができた．

この予測方法に従ってFIN TUBE型吸着カラムを採用した場合の性能予測した．その結果を表中に記載した．同一の吸着カラム内でエレメントをヘリカルフィンからフィンチューブに変えることで，吸着剤充填量を3～3.5倍大きくでき1.7～2.7倍の冷凍能力の向上が期待できる．

6.4 冷凍性能予測式の評価

FIN TUBE型吸着カラムを採用した場合の冷凍性能実験結果をTable 3に示す。流動有効長が5.65から19に大きく変化しているため，有効長比に対するべき数を適切に選定することで実験 No. 5の粒状充填に対する予測値も実験値に合わせることができ，データ不足は否めないが，本予測式の妥当性は得られたと考えている．

ただし，一体化充填では実測値が約5%低めとなり，粒状充填より劣る結果となった．これは今までの経験からは考えられないことであった．

Table 2 冷凍性能予測に用いた実験データ

実験 No.	吸着エレメント エレメント形状	充填方式	吸着剤量 (kg)	冷凍性能 実測値 Q_R (kcal/h)	断面積比 全断面/流路 r_A (−)	流動 有効長 L_F (mm)	伝熱 有効長 L_H (mm)
1	ヘリカルフィン P5.4/2パス	一体化	0.76	205	3.29	5.65	10.2
2	ヘリカルフィン P5.4/2パス	粒 状	0.76	140	3.29	5.65	10.2
3	ヘリカルフィン P5.4/4パス	一体化	1.5	300	3.29	5.65	10.2
4	ヘリカルフィン P2.75/2パス	一体化	0.76	250	3.29	5.65	4.62
5	フィンチューブ P3.63/8パス	粒 状	2.68	380*	5.52	19	7.26
6	フィンチューブ P3.63/8パス	一体化	2.37	392*	5.52	19	7.26

＊実験 No. 1 ～ 4 のデータを用いて得た予測式よる推定値.

フィンチューブ型エレメントは，フィン間隔が狭く一体化の場合入口から奥部まで練り込ませているためシリカゲルが全空間に行き渡りにくく，伝熱を阻害するようなマクロな空洞や乾燥時の亀裂などが発生し，シリカゲル間の接着性に不十分さがあったのではないかと考えている.

フィンチューブの狭い間隙に吸着剤を手探りの状態で練りこんで行く一体化の操作から考え，上記の可能性は十分考えられる．フィンチューブの組み立て工程から吸着剤の練りつけを行うことで改善は可能と考えている.

6.5 吸着カラム部と蒸発部の伝熱抵抗

Table 3には 5.3 項で記述した性能予測式を用いることにより求めたエレメント部と蒸発部の熱移動係数(逆数が伝熱抵抗)および総括の熱移動係数も示した。これらの逆数は伝熱抵抗である．これを図にしたものがFig. 14 であり，両部の伝熱抵抗を定量的に評価できるようになった．ここで，U_{A1} は実験 No. 1におけるエレメント側の熱移動係数とし他の熱移動係数は U_{A1} に対する比率で表示した.

FIN TUBE 型吸着カラムを採用によりエレメント側の熱抵抗が小さくなり，蒸発器部の1/2～1/4 になっていることが分かる。FIN TUBE 型吸着カラムに見合った蒸発器の改良が必要である。表の実験 No. 6 のデータより同等の熱抵抗まで改良されれば 2.26 倍の冷凍性能が期待できよう.

7. まとめ

(1) 冷熱製造部であるフィンチューブ型蒸発器の伝熱現象をフィンの液埋没率 χ との関連を実験データより推定した.

(2) 吸着エレメントとしてヘリカルフィン型に加えフィンチューブ型熱交換器を採用し，その有効性を確認した.

(3) 冷凍性能を予測する伝熱モデルを提案し，タイプの異なるヘリカルフィン型およびフィンチューブ型吸着エレメントに対し汎用的に応用できる可能性を見出した.

(4) 伝熱モデルから吸着エレメント部と蒸発器部の伝熱抵抗が定量的に評価でき，何れの部分が律速か判断できるようになった.

［謝辞］本研究の推進に当たっては昭和鉄工(株)のご支援，ご協力を頂いた．感謝の意を表します.

Table 3 冷凍性能の実測値と熱移動係数の解析値

実験 No.	吸着エレメント エレメント形状	充填方式	冷凍性能 予測値 Q_R (kcal/h)	エレメント側 熱移動係数 U_A (kcal/h・K)	蒸発器側 熱移動係数 U_E (kcal/h・K)	総括 熱移動係数 U_{OA} (kcal/h・K)
1	ヘリカルフィン P5.4/2パス	一体化	205	U_{A1}	$0.77U_{A1}$	$0.44U_{A1}$
2	ヘリカルフィン P5.4/2パス	粒 状	140	$0.56U_{A1}$	$0.64U_{A1}$	$0.30U_{A1}$
3	ヘリカルフィン P5.4/4パス	一体化	300	$2.00U_{A1}$	$0.93U_{A1}$	$0.63U_{A1}$
4	ヘリカルフィン P2.75/2パス	一体化	250	$1.41U_{A1}$	$0.85U_{A1}$	$0.53U_{A1}$
5	フィンチューブ P3.63/8パス	粒 状	380 380*	$2.19U_{A1}$	$0.96U_{A1}$	$0.66U_{A1}$
6	フィンチューブ P3.63/8パス	一体化	392 360*	$4.32U_{A1}$ $3.26U_{A1}$	$1.06U_{A1}$ $0.99U_{A1}$	$0.85U_{A1}$ $0.76U_{A1}$

＊実測値．実験 No.1～4 の実測値は予測値と一致.

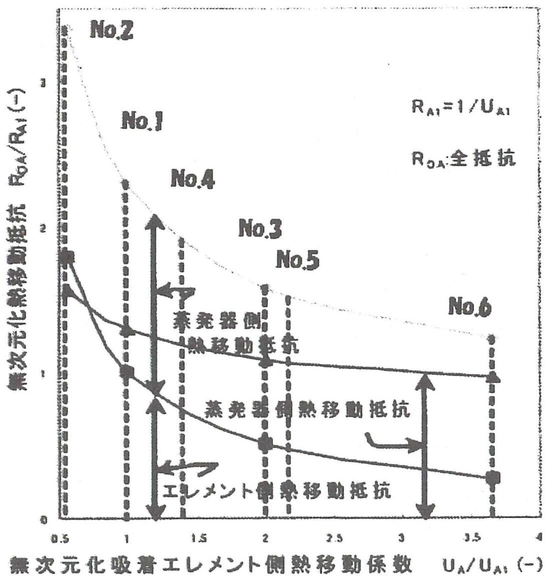


Fig. 14 モデル機の伝熱特性

使用記号

A：伝熱面積 [m²]

：フィン部の幅 [mm, m]

A_F：流れ方向の全断面積 [mm, m]

A_T：流路断面積 [mm, m]

B :フィン間隔 [mm, m]
H :フィン有効長, フィン部の高さ [mm, m]
:ボトム水埋没フィン高さ [mm, m]
L :蒸発器のフィン長さ(=200), フィン長さ [mm, m]
L_F :流動有効長 [mm, m]
L_H :伝熱有効長 [mm, m]
P :フィンピッチ, P5.4はﾌｨﾝﾋﾟｯﾁ5.4を表す [mm, m]
P :ポンプ
PI :圧力計
P :圧力 [mmHg, Pa]
Q, Q_R :冷凍性能, 伝熱性能 [kcal/h, J/s]
Q_{R1}, Q_{R3} : 実験No.1および3の冷凍性能 [kcal/h, J/s]
Q_{COND} :凝縮器性能 [kcal/h, J/s]
Q_1, Q_3: 実験No.1および3の蒸発流量 [kg/s]
$Q_1/Q_3=Q_{R1}/Q_{R3}$としている
R, R_{0A} :伝熱の全抵抗 [h℃/kcal, K/W]
$=1/U_{0A}=1/U_A+1/U_E$
R_{A1} :実験No.1のｴﾚﾒﾝﾄ側熱抵抗 [h℃/kcal, K/W]
r_A :断面積比, =流れ方向の全断面積/流路断面積 [−]
T_O, T_L :吸着用冷却水の入口温度 [℃, K]
T_H, T_D :吸着用冷却水の入口温度 [℃, K]
$T_{P,IN}$:プロセス水(冷水)の入口温度 [℃, K]
$T_{P,OUT}$:プロセス水(冷水)の出口温度 [℃, K]
ΔT :沸点上昇温度, 温度差 [℃, K]
TI :温度計
T :フィン間の隙間 [mm, m]
U :総括伝熱係数(総括熱移動係数) [kcal/m2h℃, W/m2K]
U_{0A} :伝熱面積を含めた(変形)総括伝熱係数 [kcal/h℃, W/K]
U_A :吸着ｴﾚﾒﾝﾄ部の(変形)熱移動係数 [kcal/h℃, W/K]
U_{A1} :実験No.1のU_A [kcal/h℃, W/K]
U_E :蒸発部の(変形)伝熱係数 [kcal/h℃, W/K]
U_{E1}, U_{E2} :実験No.1および2のU_E [kcal/h℃, W/K]
W :フィンの幅[mm, m]
ΔW :吸着剤の吸着能力 [wt%]
α : 吸着カラムと蒸発器の熱移動係数の比 [−]
$=U_{A1}/U_{E1}$
β, γ :総括伝熱係数の比 [−]
$=U_{A01}/U_{A1}$, U_{A04}/U_{A1}
χ :熱交埋没率(=H/L) [−]

参考文献

1) 迫田, 鈴木:東大生産研究, Vol.36, 1-10(1984)
2) 伊藤, 渡辺, 架谷:化学工学論文集, Vol.22, No.1, 163-170(1996)
3) 服部, 宮入:化学工学会 61 年会発表講演要集, 218(1996)
4) 稲葉:Jour. HTSJ, Vol.40, No.164, 16-19(2001)
5) 宮入, 谷口ほか:化学工学会 67 年会発表講演要集, 305(2002)
6) 宮入, 堀端ほか:化学工学会沖縄大会発表講演要旨集, 127(2004)
7) 下岡,大島ほか:Jour. HTSJ, Vol.45, No.190, 8-13 (2006)
8) 渡辺, 窪田:Jour. HTSJ, Vol.45, No.190, 278-32 (2006)

(原稿受付 2010年11月30日)

【研究論文】九州共立大学総合研究所紀要 第4号 2011年3月
Journal of Kyushu Kyoritsu University Research Center No.4March 2011

羽根車を有する高速走行車両用ホイールの開発

第１報：羽根車入口負圧を利用したダウンフォースの発生

川嶋竜之介、宮入嘉夫
九州共立大学工学部メカエレクトロニクス学科

Development of the blades-installed wheel for a high-speed vehicle
1st report: Generation of down force by use of the negative pressure at impeller inlet

Ryunosuke Kawashima, Yoshio Miyairi

Abstract

Authors have been proposed the unique wheel for a high-speed vehicle, which has the impeller like a turbomachinery, in order to generate the down force acting on the vehicle under body by utilizing the negative pressure at the impeller inlet. The impeller is installed to the wheel as spokes, namely the cross-sectional shape of the spoke forms blade shape. In this paper, the effects of the blade shape on the pressure distribution at the under body of the scale model automotive vehicle are investigated experimentally and numerically.

Key words: Turbomachinery, High-speed vehicle, Lift force, Wheel design, Impeller

1. 緒言

車両の走行安定性を確保することは，内燃機関，電気モータなどの動力源を問わず自動車全般の安全性に関わる重要な問題である．特に高速走行時においては車両に作用する揚力が大きくなるため，横風の影響を受けやすくなり，車体の直進安定性が悪化する事はよく知られている．一部の車種には，これを抑制するためにスポーイラーやウイングといった空力パーツが追加装備され，いわゆるダウンフォースを得ることで直進安定性の向上に努めている．しかし，新たに空力パーツを装着することで車体に作用する抗力が増加するため，燃費性能の観点から好ましくない．

上記背景に鑑み，著者らは走行中に回転する自動車用ホイールを一種のターボ機械とみなし，ホイールスポーク部をターボ機械設計手法に則り設計・製作した羽根付ホイールを提案する．羽根付ホイールはターボ機械として機能するため，①羽根車（ホイール）入口での負圧を利用してダウンフォースを得られる．②インホイールモータ、ブレーキの冷却機器として利用できる可能性がある．

そこで，本報告では主に車体下部と路面間の圧力場変化，すなわちダウンフォースに及ぼす羽根車形状の影響について実験および定常数値計算の両面から検討した結果について報告する．

2. モデルホイール

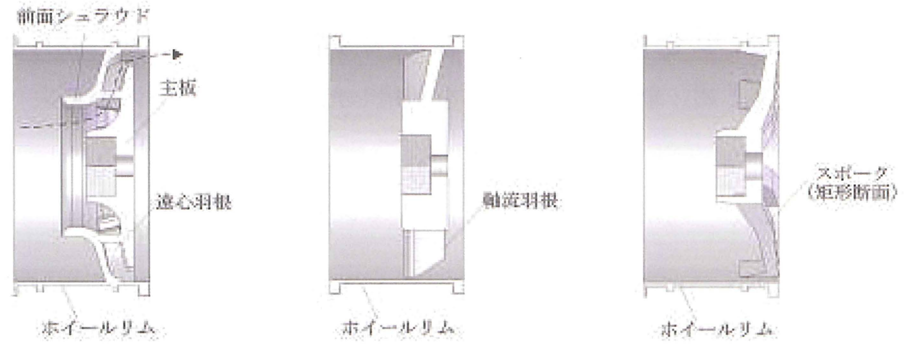
試作したモデルホイールの設計諸元および概略図を表1および図1，2に示す．図3に示すように，電動模型自動車（1/10 スケール）を利用して風洞実験を行ったため，ホイール外径は模型自動車のそれと同一寸法とした．羽根形状は遠心羽根（クローズド）と軸流羽根の2つを採用し，ホイールを通過する流れは，車体下部から車外に流出するように設計した．設計の手順としては，ホイール直径(出口直径)および入口直径を模型自動車寸法に合わせて決定し，実験

3. 風洞試験装置

図3に実験で使用した風洞試験装置の概略図を示す．風洞直径は400mmであり，その中に路面を模した長さ800mm，幅340mmのテーブルを水平に置いている．テーブル上に設置された模型自動車(幅

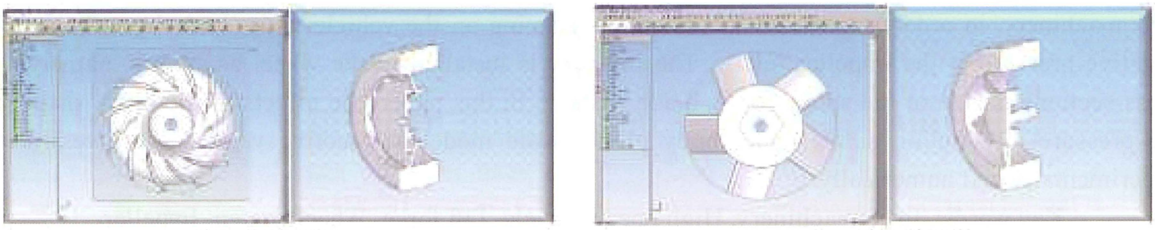
表1　羽根付ホイールの設計諸元

		遠心羽根	軸流羽根
設計流量 Q_n	m3/min	0.03	0.2
圧力上昇 P_n	Pa	14.7	7.8
翼枚数 Z	-	12	5
出口半径 D_2	m	0.046	0.046
入口半径 D_1	m	0.026	0.046
設計回転数 N	min-1	2375	1800
比速度 ns	-	326	952
翼形状	-	二次元一円弧	円弧翼（ひねり無し）



(1) 遠心羽根　　(2) 軸流羽根　　(3) 矩形断面

図1　モデルホイール断面図



(1) 遠心羽根　　(2) 軸流羽根

図2　羽根付ホイールの詳細図

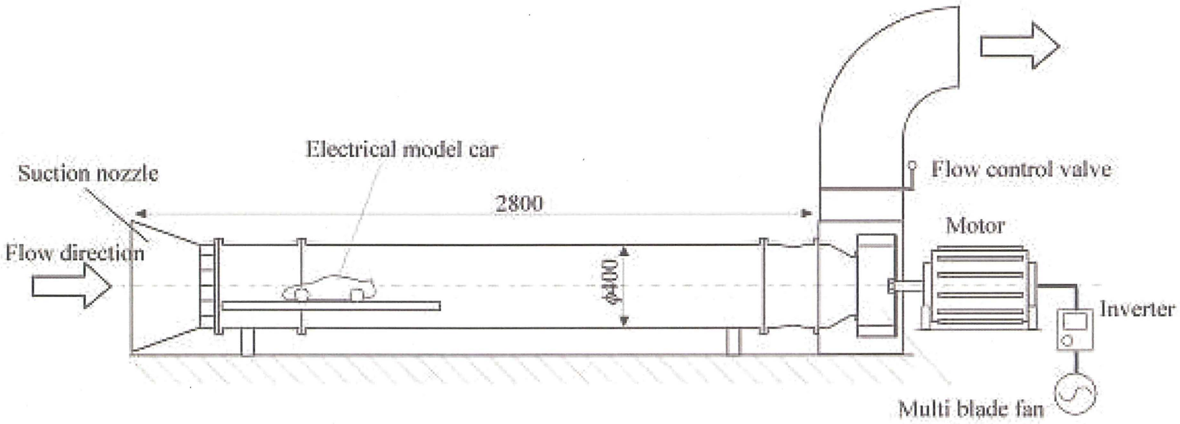


図3　風洞試験装置

0.187mm，長さ0.444mm)のタイヤとテーブル間の隙間が約1mmとなるように模型自動車は4本の支柱(直径3mm)で水平に支えられており，模型自動車の走行状態が再現できるようにした．車体下部に作用する接地力を算出するために，図4に示すように，テーブル上に取圧孔を車幅方向5点，車両長手方向7点，計35点設け，導圧管を通じて微差圧センサ（COPAL ELECTRONICS製 PA-100-100W, -1~1kPa）にて圧力計測を行った。ホイール回転数1700min^{-1}，風洞内流速5.7m/sの下，得られた路面圧力データはA/D変換器を通じてコンピュータに収集した。同時に電動模型自動車内部のモータ消費電流および電圧を電流計、電圧計で計測した。実験では，試作した

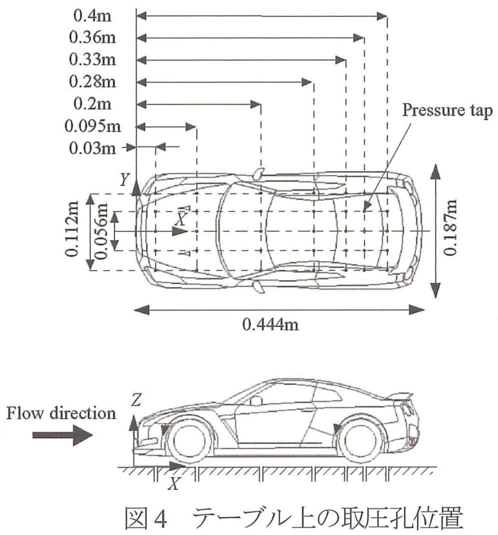


図4　テーブル上の取圧孔位置

遠心，軸流羽根付ホイール２種類に加え，比較のために市販車に使用されている純正ホイール（スポーク断面形状が矩形．）の 1/10 スケールのものを用意し，３種類のホイールについて実験を行った．

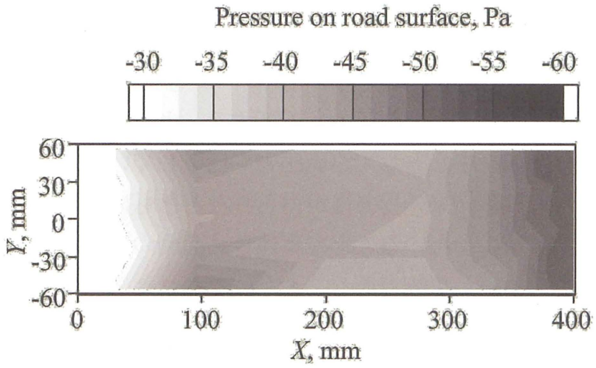
4. 路面圧力分布

図５に各ホイールを用いた場合の路面平均圧力分布を示す．縦軸，横軸はそれぞれ車体幅方向および長手方向位置を示す．路面圧力はカラーバーに従って示されている．車両のフロント部(X=30~90mm)の圧力はホイール形状を問わず，他の領域と比べ高い．フロントバンパーから車体下部にかけての車体-路面間の隙間は徐々に減少しているため，流入した流れが車体に衝突し，近傍の圧力が高まったと考えられる．

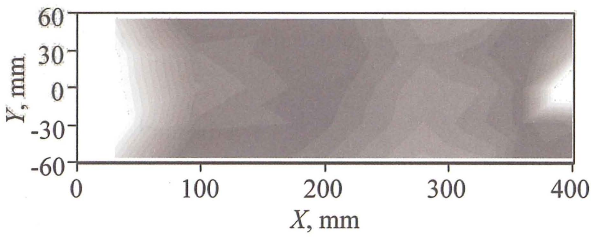
純正ホイールを使用した場合，フロントタイヤ(X=95mm)およびリアタイヤ(X=360mm)近傍での圧力は-45Pa 程度であった．図 4(2)に示すように，遠心羽根付ホイールを使用した場合，フロントホイール近傍で圧力は-50Pa 程度に低下しが，リアホイール近傍では-45Pa 程度の低圧部が広範囲にわたっている．ホイール近傍で圧力が低下していることから，ホイールに流れが流入する際，入口速度ヘッドの上昇に対応して，路面圧力が低下したものと考えられる．軸流羽根付ホイールを使用した場合もほぼ同様の傾向を示しているが，遠心羽根付ホイールと比べると圧力低下の領域は限られている．図６に示す車体に作用する接地力は，路面圧力データを積分して得た．ただし，車体を支持する支柱の影響を排除するため，X=30 および 400mm の圧力データは考慮していない．羽根付ホイールを使用した場合，車体に作用する吸着力は最大で 6%増加し，すなわちダウンフォースが発生している．よって羽根付ホイールをは車両安定性に寄与できることが確認された．

5. ホイール周りの流れ

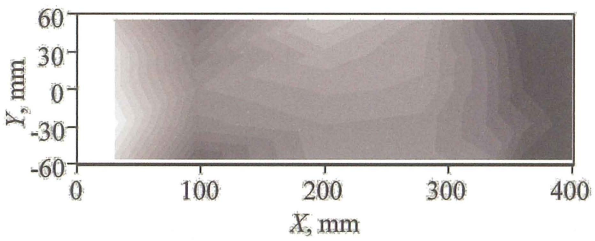
一般的なターボ機械と異なり，羽根付ホイールには吸込管，吐出管もしくはケーシングを備えていないため，ホイール周りの流れは複雑なものとなる．そこで，ホイール周りの流れを把握するために，Cradle SCRYU/Tetra を用いて定常数値計算を行った．図７に示すように，解析空間は，ホイール，タイヤ（回転領域）と車体下部およびフェンダーを模擬した静止壁面および周囲の空間とした．格子数は約 100



(1)　純正ホイールを使用した場合



(2)　遠心羽根付ホイールを使用した場合



(3)　軸流羽根付ホイールを使用した場合

図５　路面圧力分布

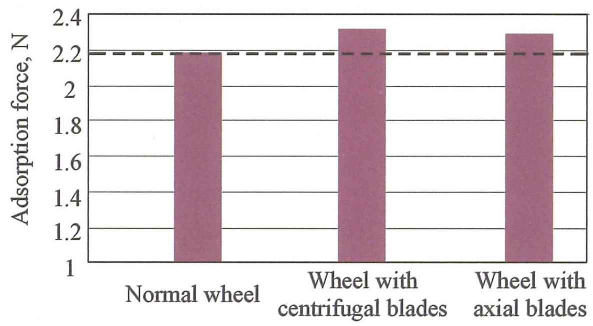


図６　車体に作用する吸着力の比較

万点で，ホイール，タイヤを含む回転領域で約 60 万点，静止領域は 40 万点である．境界条件は入口流速 5.7m/s，出口静圧 0Pa とし，ホイール回転数は $1700\mathrm{min}^{-1}$ とした．

図8にY-Z断面（ホイール回転軸に対するメリディアン断面）での圧力分布を示す．純正ホイールに比べ遠心羽根，軸流羽根付ホイールを使用した場合，ホイール入口での圧力は低下する．ホイール入口の負圧部を中心として路面圧力が低下していることから，実験結果の妥当性が得られたとともに，羽根付ホイールを用いることで車体と路面間の圧力を低下させる事が可能であることが確認された．次に，同一断面でのY方向速度成分を示したものを図9に示す．遠心羽根付ホイールを用いた場合，ホイール内部の流れは羽根入口から出口にかけて，すなわち車体下部側から車外側へ流出しているのに対し，軸流羽根付ホイールを用いた場合，翼先端で逆流している領域が存在している事がわかる．図10はホイール内部における羽根入口流れの速度ベクトルを示したものである．図10に示すように，羽根入口において

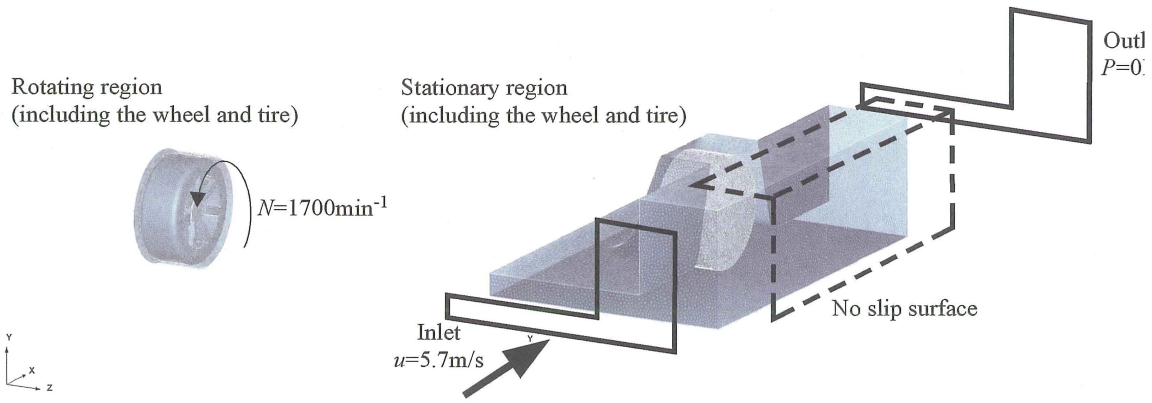
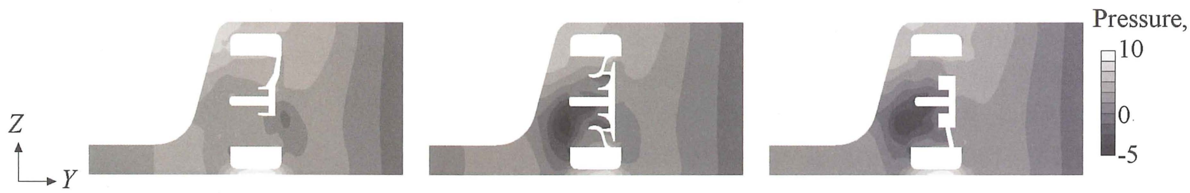
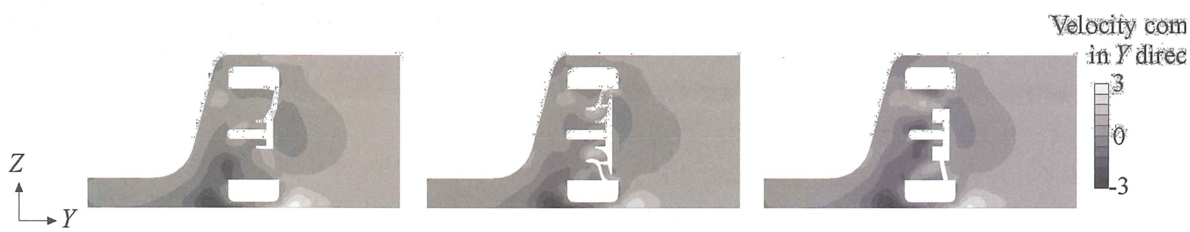


図7　解析空間と境界条件(左：回転領域，右：静止領域)



(1) 純正ホイール　(2) 遠心羽根付ホイール　(3) 軸流羽根付ホイール
図8　Y-Z断面圧力分布



(1) 純正ホイール　(2) 遠心羽根付ホイール　(3) 軸流羽根付ホイール
図9　Y方向速度成分

流れは回転方向に旋回しているため，回転速度の遅いハブ側と比べ，翼先端では剥離が容易に起きると考えられる．また，遠心羽根付ホイールは前面シュラウドおよび主板で覆われているため，その影響を受けにくい．なお，旋回流れが生じる主な原因はホイールリム壁面の回転により生じた強制渦流れとホイール周囲の流れがフェンダーと干渉して生じた旋回流れによるものであることを数値解析の結果より推察する。

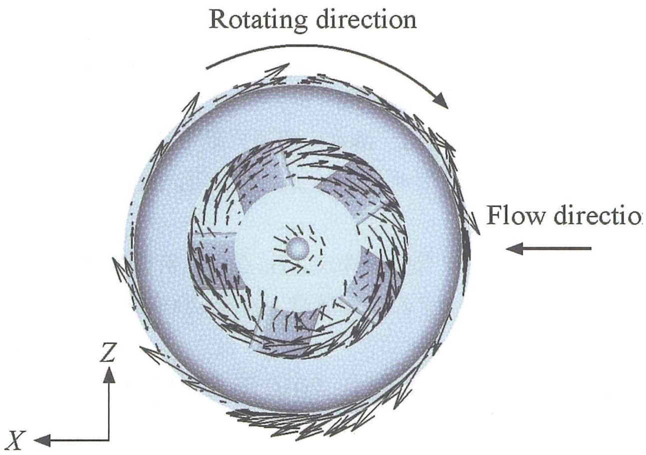


図 10 羽根入口での絶対速度分布

6. ホイール回転に要する電力

図 11 にホイール回転に要するモータ消費電力の変化を示す．本実験では，車体を浮かせタイヤが接地していない状態でホイールを回転させているため，ここで示す消費電力はホイール回転時の機械損失および流体摩擦および空気動力である．羽根付ホイールを使用した場合，消費電力は最大で 4%増加した．ただし，実車での運転状態を考えた場合，質量換算で 100 倍以上ある車体を移動させるのに要する動力と比べるとホイール回転に要する動力は極めて小さいため，実車における動力増加は無視できる程度と考える．

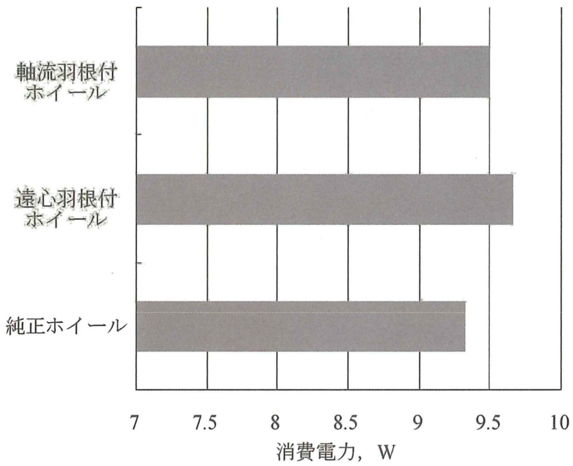


図 11 消費電力の比較

7. 結言

ターボ機械技術の利用範囲拡大を目的とし，自動車用軽合金ホイールのスポーク部をターボ機械設計手法に則って製作した羽根付ホイールを提案した．実験，数値計算を通じて以下の事が明らかとなった．

(1) 羽根付ホイールを採用することで，車体と路面間の圧力は低下した．車体に作用　　　する接地力は最大で 6%増加し，車体の直進安定性に寄与できることがわかった．これは主に入口負圧による効果が大きい．

(2) 羽根の有無に関わらず，ホイール入口の流れは強い旋回を持っている．

(3) 羽根付ホイールの回転に要する消費電力は 4%増加した．

8. 謝辞

本研究の一部は，北九州産業技術保存継承センターで行われたエンジニアリングカレッジ(平成 20，21 年度)の一環として実施した．同センター前所長酒井英考氏および同センター前職員開田一博氏，ならびに九州工業大学大学院１年生布谷達郎君，九州共立大学４年生森健亮君のご協力を得て実施したことをここに記し，謝意を表わす．

参考文献

1. 大徳，堀口，西尾，川崎，矢野，ハイブリッド車・電気自動車・燃料電池自動車，自動車技術，第64巻第8号(2010)，pp85-93
2. 江本，河上，吉田，清水，電気自動車「Eliica」のデザイン開発，デザイン学研究作品集，12(12), 2-5(2007)
3. 例えば，トヨタ自動車株式会社，公開特許公報(A) インホイールモータの冷却構造，特開 2009-292184 など

（原稿受付 2010年12月18日）

【研究論文】九州共立大学総合研究所紀要 第4号 2011年3月
Journal of Kyushu Kyoritsu University Research Center No.4March 2011

羽根車を有する高速走行車両用ホイールの開発

第２報：冷却機器としての利用および内部流れについて

川嶋竜之介、宮入嘉夫
九州共立大学工学部メカエレクトロニクス学科

Development of the blades-installed wheel for a high-speed vehicle
2nd report: Flow rate and internal flow at normal operating condition

Ryunosuke Kawashima, Yoshio Miyairi

Abstract

Authors have been proposed the unique wheel for a high-speed vehicle, which has impeller like a turbomachinery, in order to cool the brake system or the in-wheel motor of the EV for higher reliability. The flow rate, which discharges from the impeller, strongly affects the cooling performance of the proposed wheel. In this paper, the internal flow conditions of the impeller are investigated numerically to make clear the effects of the blade shape on the flow rate. The wheel with centrifugal type blade shows the highest flow rate when the impeller inlet sets in internal side of the vehicle under body.

Key words: Turbomachinery, High-speed vehicle, Lift force, Wheel design, Impeller

1. 緒言

自動車，列車，航空機など高速移動する輸送機の安全性の観点からブレーキ機器の信頼性を確保することは極めて重要な位置を占める．ブレーキ機器に関連したトラブルはブレーキ部での発熱によってブレーキフルードが沸騰する，いわゆるヴェイパーロック現象やブレーキパッドの異常摩耗などを引き起こす．また，電気自動車の駆動方式の一つにインホイールモータを４輪に配置するものがあるが，車両内でモータ（発熱源）が分散して配置しているため，これらの冷却システムも分散せざるを得ない．

上記背景に鑑み，著者らは走行中に回転する自動車用ホイールを一種のターボ機械とみなし，ホイールスポーク部をターボ機械設計手法に則り設計・製作した羽根付ホイールを提案する．羽根付ホイールはターボ機械として機能するため，①羽根車（ホイール）入口での負圧を利用してダウンフォースを得られる．②インホイールモータ、ブレーキの冷却機器として利用できる可能性がある．

そこで，本報告では羽根付ホイールを送風機として利用することを想定し，羽根車を通過する流量およびホイール内部流れについて数値計算を通じて検討を行った．

また，既報（第１報）では羽根車入口の負圧を利用してダウンフォースを得ることを目的としていたため，羽根車入口が車体内側を向く，すなわち車体下部の空気を車外に流出させるようホイールに羽根車が組み込まれた．しかし，送風機として利用する場合，ブレーキもしくはインホイールモータ周囲を通過する流量が冷却に寄与するため，空気の流入，流出方向を考慮する必要はない．よって，ここでは空気を車体下部から車外に流出する場合および車外から車体下部に空気が流入する場合について，矩形断面形状のスポークを持ったGTR 純正ホイールおよび遠心羽根車，軸流羽根車を持った 2 つの羽根付ホイールの通過流量について調べた．

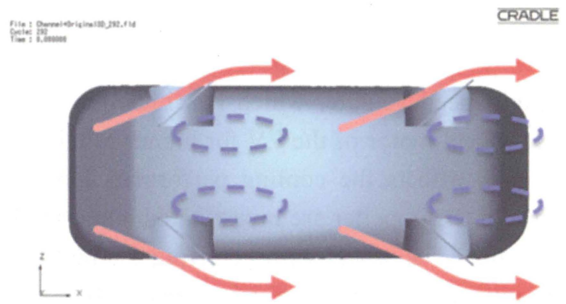
2. モデルホイール

試作したモデルホイールの設計諸元および概略図は既報（第 1 報）に示したものと同一であるため省略する．

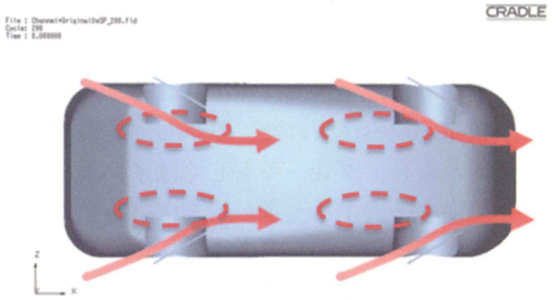
3. 流入/流出方向が通過流量に及ぼす影響

はじめに，空気の流入/流出方向が運転流量に及ぼす影響を明らかにするために，図 1 に示すような車体モデル周りの数値計算を行った．なお，車体および回転する 4 つのホイール周りの流れを計算するには，膨大な計算時間がかかる．そこで，計算間を短縮するために，回転するホイールの代わりに，流入/流出方向を車体下部から車外もし

図 1　平板を持った車体モデル



(a) 車体下部から車外に流出する場合



(b) 車外から車体下部に流入する場合

図 2　車体モデル下部の流れ

くは車外から車体下部に向くよう流れ方向に対して傾けて配置した平板を数値モデルに組み込み，羽根車の回転によって生ずる流れの変化を簡略して計算した．図 2 は平板の傾き方向を変化させた場合の車体下部の流れ方向変化を矢印で示したものである．

図 3 に境界条件および図 4 に格子モデルを示す．入口境界条件は速度一定（流速 U=5.7m/s），出口は静圧一定とした．路面および車体表面は滑り無しとし，それ以外の壁面は滑り有りとしている．計算は汎用流体解析コード SCRYU/Tetra ver7 を用いて定常計算（200-400 ステップの範囲で収束）を行った．乱流モデルは k- モデルを使用し，全体

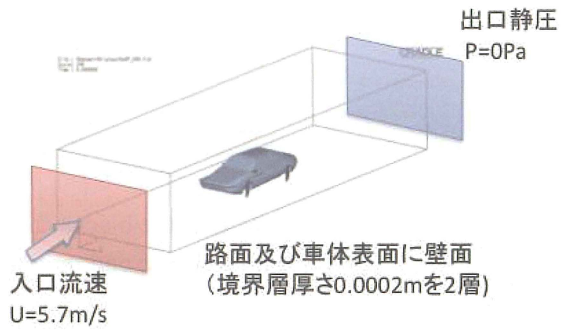


図 3　計算領域

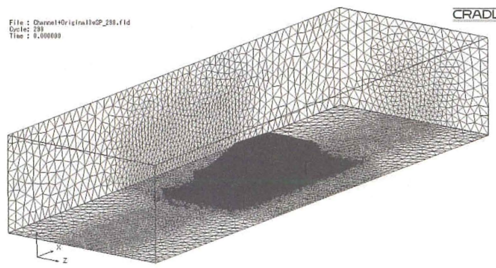
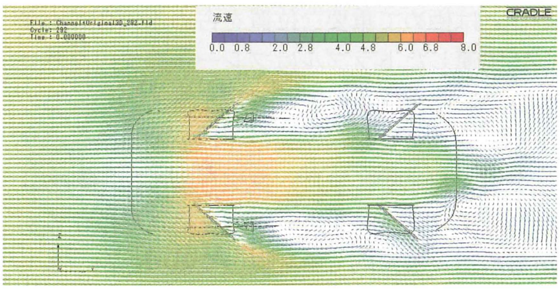
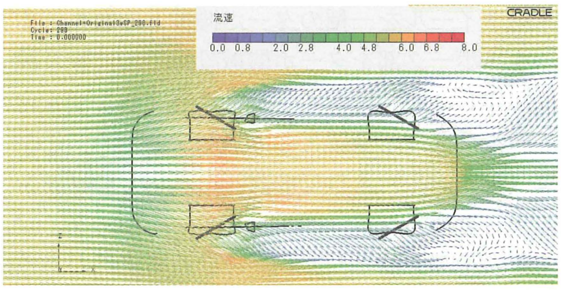


図 4　計算格子の分布



(a) 車体下部から車外に流出する場合



(b) 車外から車体下部に流入する場合

図 5　車体下部の流れ解析

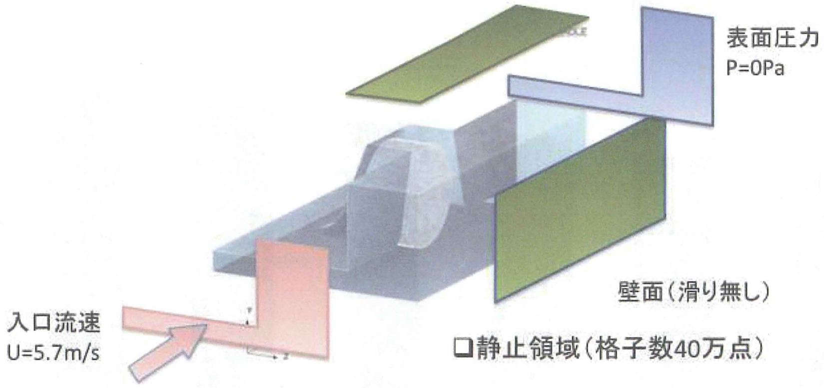


図 6　ホイール周囲の流れの数値計算モデル

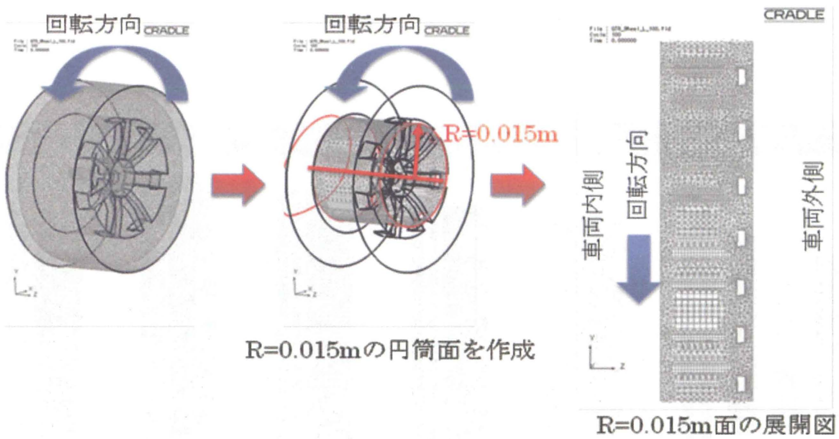


図 7　ホイール円筒面および展開図

の格子数は約 80 万点である．

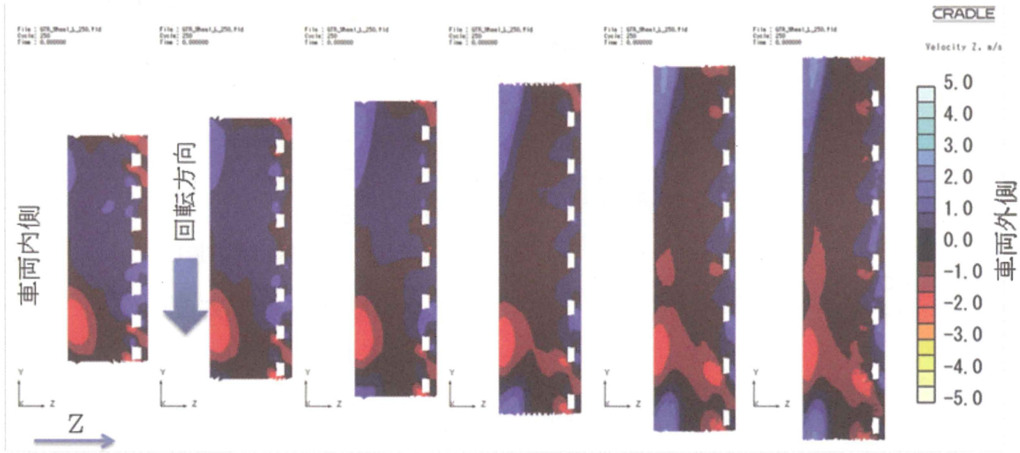
図 5 は車体下部の流れ解析の一例を示す．平板に沿って，流れ方向が変化している様子がわかる．いずれの条件においても平板周囲の流れは 5-6m/s であることから，平板の傾き方向による流速の差異，すなわち流量の差は明確には現れないと言える．

4. 内部流れ

ホイール内部の流れをより詳細に把握するために，図 6 に示すようなホイールおよび周囲のフェンダーを含む空間を対象として計算を行った．解析条件は既報（第 1 報）と同一であるため省略する．また，羽根車からの流入/流出方向も変化させて計算した．計算結果は図 7 に示すように任意のホイール半径 R の円筒断面を展開し，羽根形状および流入/流出方向が Z 方向速度（軸流速度）分布に与える影響を調査した．

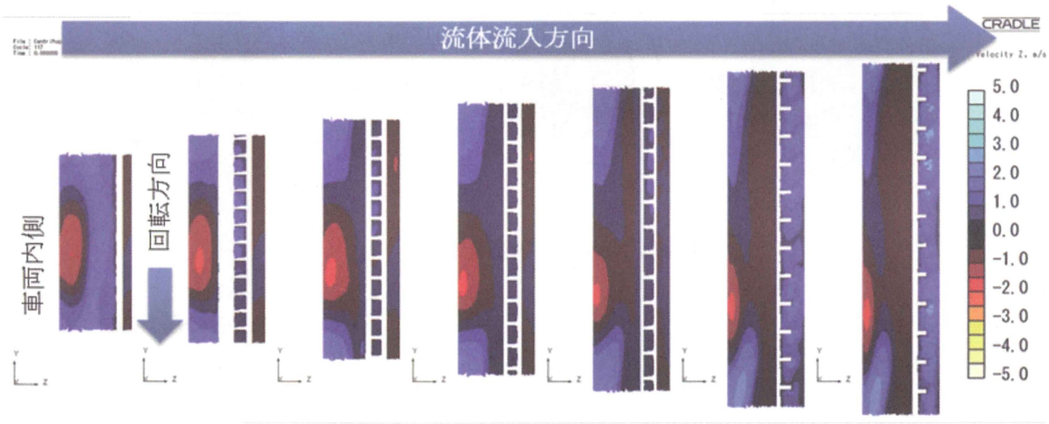
図 8 は矩形断面スポーク（GTR 純正ホイール）および遠心羽根車，軸流羽根車を持ったホイール内部流れの展開図を示したものである．なお，図中では展開図の左側が車体下部側，右側は車外側となる．Z 方向速度が正の場合は右向き（車外側に向いた流れ）を示し，負の場合は速度ベクトルが左向きであることを意味している．

純正ホイールを使用した場合，全ての半径Rにおいて車体側に速度ベクトルが向いていることがわかる．ただし，矩形断面のスポークが流れの変化に寄与している様子はなく，むしろスポーク周



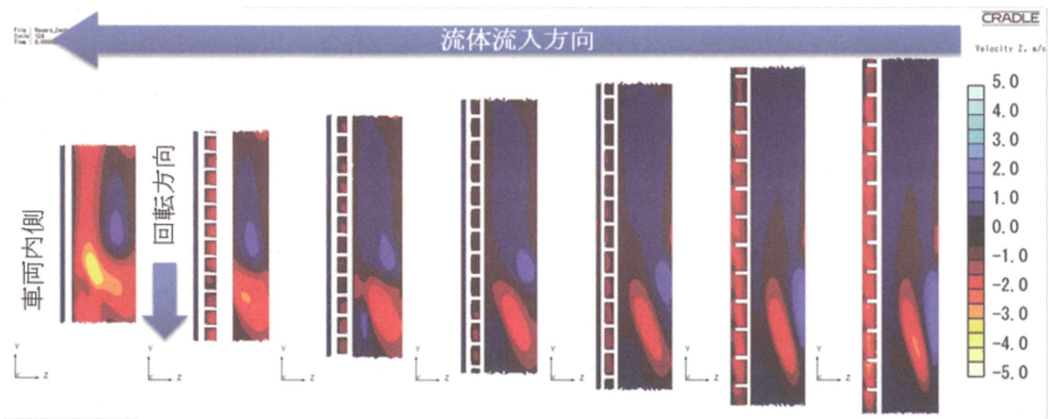
R=0.013m R=0.015m R=0.017m R=0.019m R=0.021m R=0.022m

(a)　GTR ホイールを通過する流れ

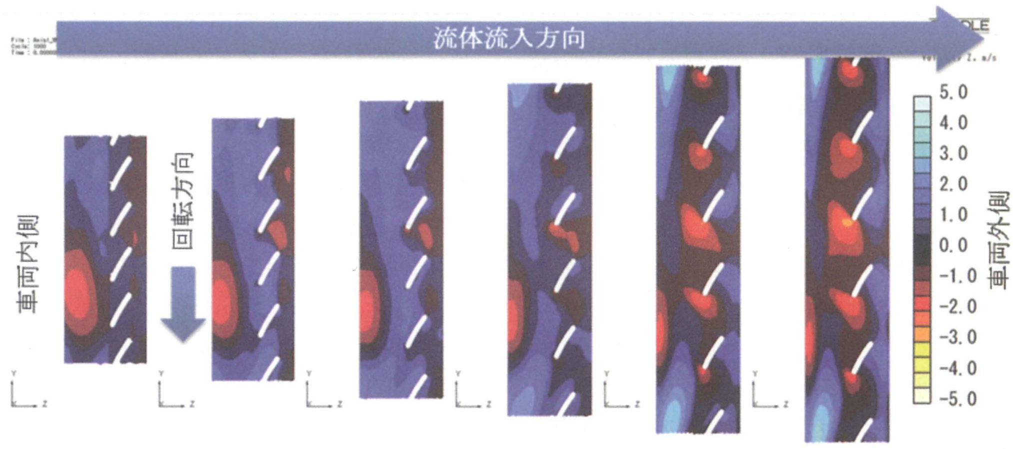


R=0.010m R=0.013m R=0.015m R=0.017m R=0.019m R=0.021m R=0.022m

(b)　遠心羽根付ホイールを通過する流れ(車体下部から車外へ流出する場合)

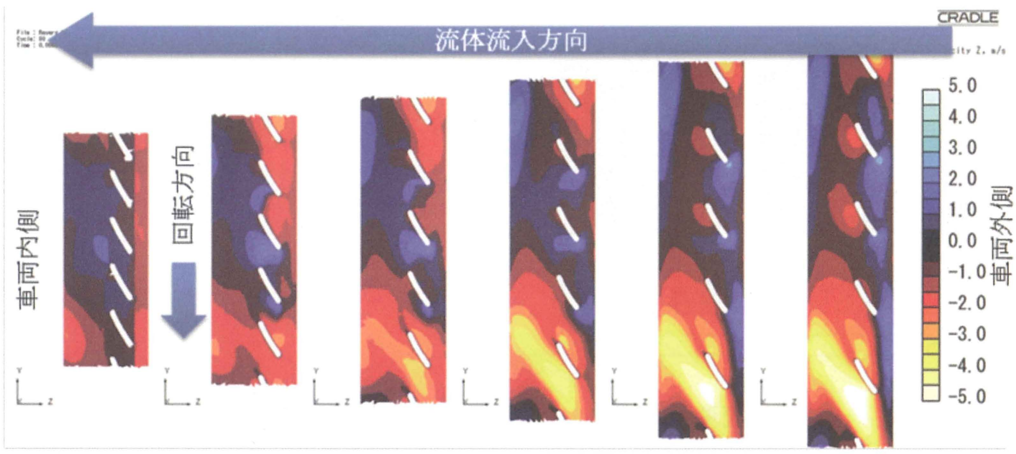


囲では速度ベクトルが車外側に向いており，ターボ機械としてみた場合，ほとんど仕事を成していないと言える．次に，遠心羽根車を組み込んだホイールを使用した場合のホイール内速度分布を図8(b)，(c)に示す．図中の白抜きの領域は，羽根および前面および後面シュラウド（隔壁）である．また，空気の流入/流出方向を各図の上部に示す．流入/流出方向を変化させる，すなわち羽根車の入口と出口を逆転させると，これに対応して羽根車内部の流れ方向も変化した．羽根車以外の領域では，Z方向速度が逆転している領域も見られるが，羽根車内部では，流れの逆転は見られない．これは，シュラウドによって，周囲の流れと羽根車内の流れが遮断されているためである．また，羽根車の入口近傍（R=0.01m）においても，その速度分布はほぼ均一であるため，偏流の影響も現れていない．次に軸流羽根車を用いた場合のホイール内部流れを図 8(d)，(e)に示す．いずれの流入/流出条件においても，半径Rが小さい領域では羽根の上流側（羽根前縁近傍）では図中上部に示した流体流入方向と一致した流れとなっているが，Rが大きくなるにつて，羽根前縁では逆向きの速度ベクトルを示している．さらに，Rが大きい領域では羽根下流側（後縁）で，流体流入方向と一致する流れとなった．これは，流体流入方向と一致した流れは，羽根車入口ではRの小さい領域（ハブ側）を通過しつつ，半径方向に流れ，Rが大きい領域（チップ側）に伝播していることが推測できる．このような流れ場はいわゆる失速状態における速度分布とよく一致しており，一般的には理



R=0.013m R=0.015m R=0.017m R=0.019m R=0.021m R=0.022m

(d) 軸流型ホイールを通過する流れ(車体下部から車外へ流出する場合)



R=0.013m R=0.015m R=0.017m R=0.019m R=0.021m R=0.022m

(e) 軸流型ホイールを通過する流れ(車外から車体下部へ流出する場合)

想的な流れとは言い難い．その主たる原因は供試軸流羽根にはひねりを与えていないこと，および第1報で示したように，ホイール入口での偏流と旋回流れに起因するものと考えられる．また，ホイール入口での偏流は，フェンダーとの干渉によるものであるため，これを回避するのは難しいが，入口旋回流れの周速度を今回の結果から把握出来たので，これを設計に考慮して羽根入口角度を決定すればより好適な羽根車形状が設計可能である．

5. 運転流量

図9に羽根車出口を通過する流量をまとめたものを示す．ただし，羽根車出口において逆流を伴っている場合，これを差し引いた値を流量とした．グラフ上には羽根形状および流量/流出条件を記載している．吐出/吸込とは流体流出方向が車外/車体下部方向であることを意味している．最も流量が大きいのは遠心羽根を組み込んだホイールを車体下部から車外に流出させた場合であることがわかった．

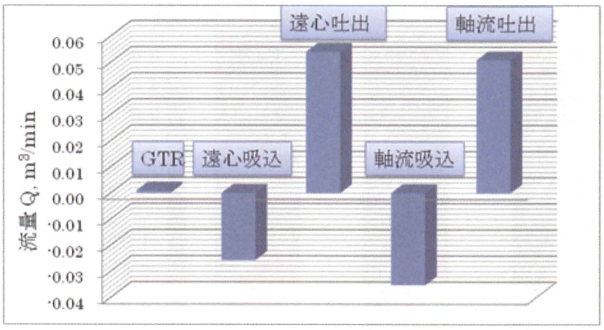


図9　ホイール通過流量の比較

6. 結言

高速走行車両ホイールのスポーク部をターボ機械設計手法に則って製作した羽根付ホイールを提案した．数値計算を通じて以下のことが明らかとなった．

(1) 羽根付ホイールを送風機として利用することで，ブレーキ，インホイールモータの冷却に寄与できることが確認された．

(2) 遠心羽根を組み込んだホイールを用いた場合，羽根間の流れはほぼ均一であった．しかし，軸流羽根を組み込んだホイール内部流れは失速状態にある．

(3)遠心羽根付ホイールを用いて，空気を車体下部から車外に流出させた場合，流量は最も大きくなった．

(4)上述(3)で示す条件は，第1報で示したダウンフォースの発生条件と一致した．よって，車体下部の空気を車外に流出させることは冷却性能と走行安定性に寄与することが明らかとなった．

参考文献

1. 大徳，堀口，西尾，川崎，矢野，ハイブリッド車・電気自動車・燃料電池自動車，自動車技術，第64巻第8号(2010)，pp85-93
2. 江本，河上，吉田，清水，電気自動車「Eliica」のデザイン開発，デザイン学研究作品集，12(12)，2-5(2007)
3. 例えば，トヨタ自動車株式会社，公開特許公報(A)インホイールモータの冷却構造，特開2009-292184など

（原稿受付　2010年12月18日）

安価なラピッドプロトタイピングに関する研究

- 国内版 CupcakeCNC の開発 -

水井 雅彦
九州共立大学工学研メカエレクトロニクス学科

Study of low-price Rapid prototyping
- Development of Japanese version CupcakeCNC -

Masahiko MIZUI

Abstract

A low-price rapid prototyping is researched. Test product is important process of design and development. Efficiency of test product can reduce cost and time. Rapid prototyping is widespread to make quickly of test product. Low-price rapid prototyping device is developed all over the world by sharing information. RepRap and MakerBot Industries are famous. It introduces CupcakeCNC of a Japanese version.

Keywords: *Rapid Prototyping, CupcakeCNC, Sharing Information, Japanese version*

1. 緒言

近年，ＣＡＤ（Computer Aided Design）へ搭載された材料強度や流体シミュレーション機能や操作性の向上により，コンピュータ内での設計割合がより高くなっている．これにより試作品数の製作回数を減らせる事は,開発時間短縮とコストダウンに大きく貢献する．しかし，モニタ上で部品の組立て・部品のはめ合い確認・部品間の稼動範囲・締結部品（ネジ・ボルト）の位置関係・等を立体的に把握・検討することは困難であり，失敗の原因にも挙げられる．試作は開発にとって，重要な工程であることは変わらない．

本研究では，公開された技術情報「オープンソース」を基に，世界中で開発が進む安価な樹脂造形手法を紹介する．Fig.1 は Hotproceed 社と共同開発を進める国産版「CupcakeCNC」である．これは金型を用いず，樹脂部品を造形する工作機械である．迅速に立体を造形手法「ラピッドプロトタイピング」や，CupcakeCNC の導入・造形について報告する．

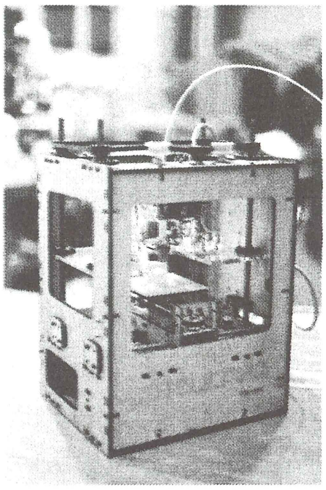


Fig.1 CupcakeCNC

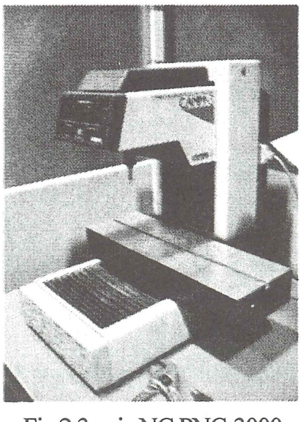


Fig.2 3 axis-NC PNC-3000

2. デジタル情報による試作

ＣＡＤ上で設計した部品のデジタル情報を，ＣＡＭ（Computer Aided Manufacturing）ソフトによりＮＣ（Numerical Control）工作機械の制御プログラムに変換することで，モニタ上と同じ部品を自動で作ることができる．ＮＣ工作機械は切削等の工具や被加工物（ワーク）を内蔵されたサーボモータで送り（移動）し，

自動加工する工作機械である．手加工の手間を省き作業者の技術による品質や作業時間のバラつきを抑制するため，試作でも多く利用されている．ＮＣ工作機械は切削，研削，板金，等の加工に応用されている．

本研究室ではFig.2に示すローランドDG社 3軸切削ＮＣ「PNC-3000」を用い，アルミ材や樹脂ブロックを切削することで試作を行ってきた．切削方法をFig.3に示す．ワークを刃物工具で削り出し，立体を造形する手法である．この手法の問題点は，削りカスが出る事と，作業時間が比較的長くコストが高い点である．より迅速且つ安価な試作手法として「ラピッドプロトタイピング」への要求は年々高まっている．

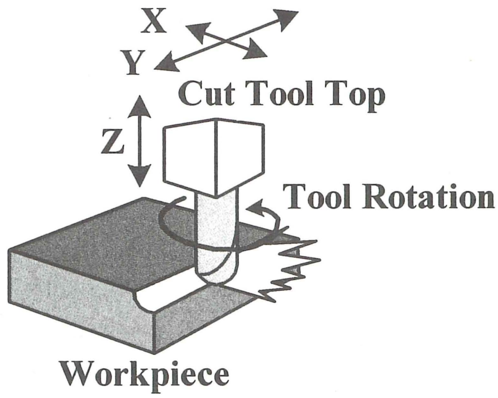


Fig.3 Cutting

3. ラピッドプロトタイピング

ラピッドプロトタイピングとは，ラピッド（迅速に）＋プロトタイピング（試作）から作られた言葉であり，立体部品の試作方法として注目されている．プラスチックに代表される樹脂部品の多くは，金型により成形される．しかし，金型の設計製造には高い技術とコストが必要なため，大量生産に適する．

ラピッドプロトタイピングでは３次元ＣＡＤデータをＣＴスキャンの様に輪切りに分割し，下から１層毎に薄板状に形状に素材を積み重ねることで立体を造形する「積層造形法」が多く用いられる．素材には，樹脂・紙・薄い鋼鈑・紛体が用いられる．

Fig.4に光造形を示す．紫外線硬化樹脂へ紫外線レーザを任意の箇所に照射することで硬化させ，各層を積み重ねることで立体を造形する．この手法は材料となる液体の管理が難しく，機器が高価である．また部品も比較的脆弱な点に注意が必要となる．

また粉末の素材へレーザを照射し各層を直接焼結することで作る「粉末焼結式積層法」や，液化した材料を噴射して積層させるため色づけが可能な「インクジェット法」も実用化されている．部品表面も滑らかで，試作品の完成度も高いのが特徴である．しかし，部品強度は比較的脆弱であるため，機構部品として用いるのは難しい．これらの機器導入には数，千万円～数百万円が必要である．試作装置への要求は高い．導入しやすい価格と性能を持つ機器により，潜在的な市場開拓が見込める．

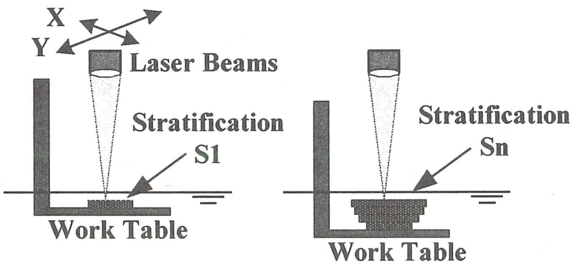


Fig.4 Stereolithography

4. CupcakeCNC の加工原理

本研究で採用した積層造形法ではABS/PLAを樹脂材料とし，機構部品としても十分な強度を持つ試作を目指した．Fig.5にCupcakeCNCの加工原理を示す．ABS/PLA樹脂は約220～260℃で融解し，常温に戻る過程で凝固する．この特性を応用し線径φ2mmの材料を歯車モータでヒータ部へ圧送する．溶解したABS樹脂は，φ0.5mmノズルから押出される．この工具先端部を，数値制御（ＮＣ）によるX,Y,Z送り機構で制御し，一筆書きの要領で各層を構成し，積み上げることで立体を造形する．

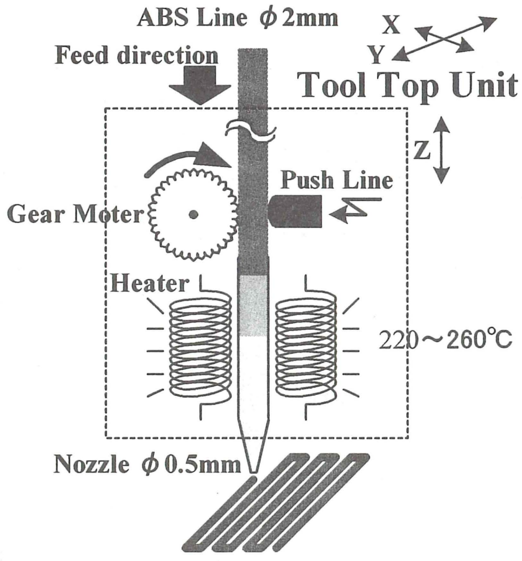


Fig.5 CupcakeCNC

5. オープンソースによる開発

「オープンソース」とは著者の権利を守りつつ，ソ

ースコードや技術ノウハウの公開を行うことである．コンピュータソフトにて使われ始めた言葉だが，様々な分野の技術情報を公開する際に広く使われている．

インターネットを介し同じ目的を持つ世界中の人々から，問題定義・改善内容や新たな試み等の情報公開が続いている．しかし，公開された情報を元に開発した技術を非公開にし，市場を独占することも考えられる．そこで，General Public License（GPL）により，派生著作物に技術情報の公開を前提とし，再配布を認める動きが広まっている．

本研究では，英国 BATH 大学 Adrian Bowyer と Vik Olliver が 2008 年に開発した３Dプリンタ「RepRap」と，米国 MakerBot Industries が 2009 年に発売した「CupcakeCNC」のオープンソースを元に，日本国内版として３次元造形機の開発を行っている．

「RepRap」の web サイトには, Fig.6 に示す３Dプリンタ「Mendel」の技術公開されており，本体の製作方法・本体のＣＡＤデータ・本体組立て方法・制御ソフト公開や造形方法が公開されている．この情報を元に世界中で Mendel の製造が行われ, 不具合の報告や対応策の検討がインターネットを介して行われている．問題点に対して解決への速度が速く，多くの意見や対応結果が提示される．そこで，情報を検索する能力と，信憑性を計る能力が必要となる．

MakerBot Industries では組立てキットとして，Fig.7 に示す３Dプリンタ「Thing-O-Matic」を$1,225-で市販している. 説明書に従い組立てれば完成できる点は, 普及に大きく影響すると考えられる．また，補修部品や材料等をワンストップで入手できる点は便利である．

6. 国内版 CupcakeCNC 開発の背景

軽量かつ強度ある樹脂製部品への要求は高いが，本研究室でのＮＣ工作機械による加工では製作時間とコストがかかる. MakerBot Industries から組立てキットの販売が開始された事を知り，輸入したのが研究の始まりである．

キットの組立ては，Web 上のマニアルを参考に行うことができる．電子基盤の半田付けに苦労したが，現在では完成版の電子基盤が出荷され，配線作業のみである．本体制御ソフトは各ＯＳに対応し，最新版をダウンロードすることで利用できる．

造形方法に関する基本情報も，web 公開された最新マニュアルを参考に造形できる．また，工作に関する情報サイト「Thingiverse」には，世界中から公開されてモデルデータや注意点を得ることができるので，幾つかのサンプルを造形した．Fig.8 に造形中の歯車を示す．歯車の形状を直接作り出すため，切削加工で生じる切クズは発生しない．また，刃物を使わないので安全である．直径 80mm の平歯車を，約 80 分で造形した．中心軸を通すためのボール盤での穴あけ加工のみで，機構部品として利用できる．

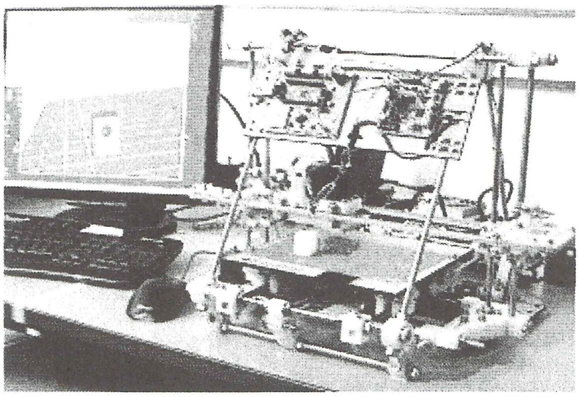


Fig.6 Mendel

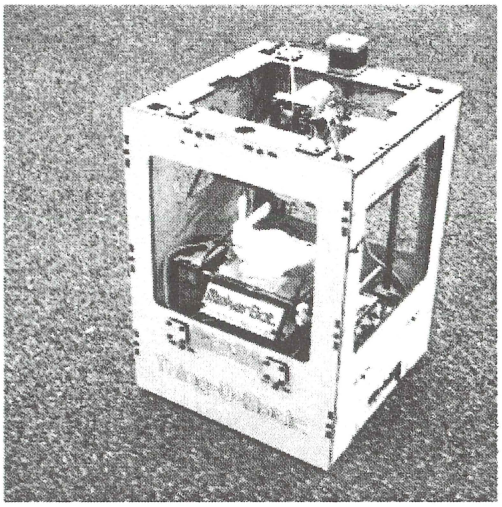


Fig.7 Thing-O-Matic

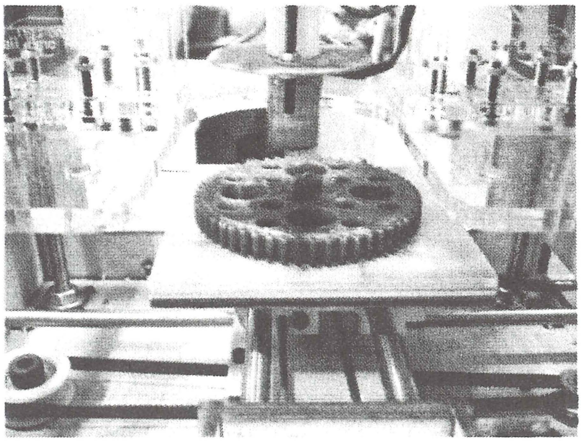


Fig. 8 Gear

海外からの輸入には，多くの手間と輸送費や関税が

必要である．また，生産国で流通する部品が，日本国内で入手困難な例も多い．公開された情報を元にCupcakeCNC を製作する場合，国内で流通する部品への置き換えや設計変更が必要となる．これらの問題を解決し共同研究者の「Hotproceed」から，¥157,500-で国内版 CupcakeCNC の組立てキットを販売し，日本語化したマニュアルや注意点を公開している．Fig.9 に組立て部品を示す．

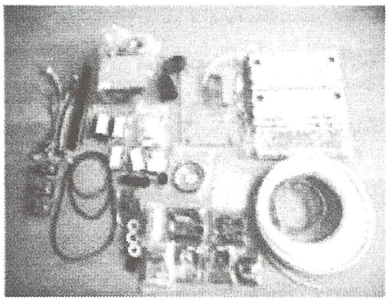


Fig.9 CupcakeCNC Parts

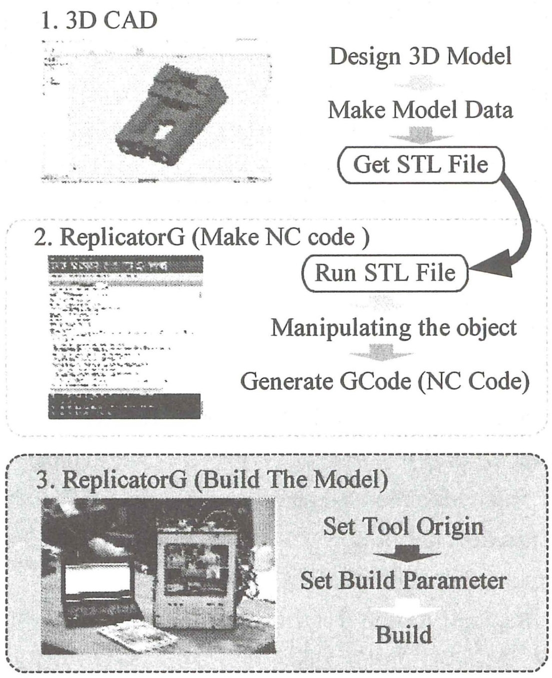


Fig.10 How to Build

7. 立体造形までの手順

3次元CADで設計した部品データから，CupcakeCNC で立体を造形する手法をFig.10 に示す．造形可能サイズは，縦100mm，横100mm，高さ100mm である．3次元CADは，STL形式を出力できるものが必要だが，フリーソフトでも十分な造形が可能である．

CupcakeCNC は一般的なOS搭載パソコンとUSBケーブルで接続し，「ReplicatorG」と呼ばれるフリーの制御ソフトにて，NCコード生成と本体のコントロールを行う．制御ソフトへ3次元CADで作られたSTLファイルを読込み，形状を確認する．CupcakeCNC では，造形テーブル中央が作業原点となる．そこで，読込んだ形状データを制御ソフト内で操作し，造形を進める方向（立体の底面）と，造形の中心を指定する必要がある．この後，CupcakeCNC の制御命令であるGコードを生成する．

最後に，Gコードから CupcakeCNC を制御し，立体造形の作業準備を行う．工具内のヒータ温度を加工温度まで上昇させ，材料送りモータを正回転し工具先端から樹脂が排出されることを確認する．次に，工具先端を造形テーブルの中央且つ高さ「0」の作業開始位置へ操作し調整する．再度，作業準備状況を確認し，ReplicatorG の「Build」ボタンを押すことで造形を開始する．

8. 結論

導入費用とランニングコスト共に安価な樹脂部品の試作ができる事により，製品開発の効率は大きく向上する．この環境を支えているのは，オープンソースとして公開された技術情報やフリーソフトであり，個々のノウハウの共有である．

本研究は広く知られた既存技術の組合わせにより，樹脂部品の造形を実現している．

安価なラピッドプロトタイピングの開発により，アイデアを形にする手段が身近になることを報告した．

参考文献

[1]. RepRap wiki,
http://reprap.org/wiki/Main_Page
[2]. MakerBot Industries wiki,
http://wiki.makerbot.com/
[3]. Hotproceed wiki,
http://hotproceed.com/Wikii

（原稿受付　2010 年 12 月 18 日）

グローバル照度に基づいて全天空照度と直射照度を推定するモデル

岩田 朋子　　松本 達也
九州共立大学大学院工学研究科都市システム工学専攻

A Model for Estimating Diffuse and Direct Illuminance Based on Global Illuminance

Tomoko IWATA, Tatsuya MATSUMOTO

Abstract

This paper presents an accurate model for estimating diffuse illuminance and direct illuminance based on global illuminance for daylight design in building interiors. The insolation conditions are parameterized using two functions of the sky condition data. The coefficients of the model are derived statistically from wide climatic experimental data. Validation results are presented where diffuse illuminance and direct illuminance estimated by this model can be more accurate when compared to existing models.

Keywords: *daylight, global illuminance, diffuse illuminance, direct illuminance, sky index*

1. 序

昼光を利用した空間の照明計画において、グローバル照度の天空および直射成分を得ることは、各成分が照明環境に与える影響の様相が根本的に異なるため重要である。グローバル照度の実測値はその拡散および直射成分に比べて、測定機器が安価でありまたその取り扱いが容易なため比較的簡単に得られる。したがって、昼光を利用した空間の照明計画において、このデータを効率的に活用するためには、グローバル照度からその2つの成分を精度良く推定する適切なモデルが必要である。本論文では、天空状態を表す新しいパラメーターを用いて、グローバル照度から全天空照度と直射照度を推定するモデルを示す。

2. 実測データ

使用した実測データは、九州共立大学工学部深耕館屋上（福岡県北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8, 北緯 33.9°，東経 130.7°）において、2000年4月から2004年3月、および2007年4月から2007年9月の間に連続的に収集されたグローバル照度、直射照度、全天日射量、天空日射量および直達日射量である。このうち、CIE(国際照明委員会)の昼光測定ガイド[1]による品質管理テストを合格したデータの総数は67469である。同場所では他年度に前述の5つの項目に全天空照度を加えた実測が行われている。著者らは、この6項目の実測データや他地域で収集された実測データ[2]と本研究で使用した実測データを比較するなどして、その質の信頼性について十分に確認している。

3. 天空指数

井川は天空輝度および天空放射輝度の分布モデルにおいて、天空状態を2つの関数を用いて表すことを提案した[3]。それらの関数は、全天日射量と天空または直達日射量から得られる。本研究では、この概念を照度において展開するために、次の2つの天空指数を定義した。

(a) 収録時刻および地点から得られる太陽水平角とグローバル照度、および晴天空のグローバル照度から得られる全天透過指数 (Kcv)

(b) 太陽水平角とクラウドレイショ、晴天空のクラウドレイショから得られる直射透過指数 ($Clev$)

全天透過指数 (Kcv) は、次式より得られる。

$$Kcv = Evg / Sevg \qquad (1)$$

Kcv: 全天透過指数 [-]
Evg: グローバル照度 [lx]
$Sevg$: 晴天空のグローバル照度 [lx]

晴天空とは、一般的に、大気の混濁度を表す照度混濁因子 TvL[4,5]が約1.5から3.0のときの天空状態をいう。図1に、照度混濁因子 TvL が1.5から3.0まで0.5間隔における太陽水平角とグローバル照度の実測値の関係を示す。ここでは、極限の晴天空におけるグローバル照度を次式で表わし、これを晴天空のグローバル照度 ($Sevg$) と呼ぶ。

$$Sevg = 1.047321 \cdot Evo / m \cdot exp(-0.079605 \cdot m) \tag{2}$$

$Sevg$:晴天空のグローバル照度 [lx]

m: 大気路程 [-]

$$m = 1 / \{ sin\, \gamma_s + 0.50572 \cdot (6.07995 + sin\, \gamma_s) \}^{-1.6364} \quad (3)^{[6]}$$

γ_s: 太陽水平角 [rad]

Evo: 大気圏外法線面照度 [lx] (ここでは、133,800 [lx][1] とする)

図1の実線は、式(2)より得られた値を示す。

直射透過指数 ($Clev$) は、次式より得られる。

$$Clev = (1 - Cv)/(1 - Cvs) \tag{4}$$

$Clev$: 直射透過指数 [-]

Cv: クラウドレイショ [-]

$$Cv = Evd / Evg \tag{5}$$

Evd: 全天空照度 [lx]

Cvs: 晴天空のクラウドレイショ [-]

図2に、照度混濁因子 TvL が1.5から3.0まで0.5間隔における太陽水平角と実測値から得たクラウドレイショの値の関係を示す。前述と同様、ここでは、極限の晴天空におけるクラウドレイショを次式で表わし、これを晴天空のクラウドレイショ(Cvs)と呼ぶ。

$$Cvs = 0.007906 + 0.0832 \cdot m - 0.0026705 \cdot m^2 + 0.00003 \cdot m^3 + 0.00000002 \cdot m^4 \tag{6}$$

図2の実線は、式(6)より得られた値を示す

4. モデル

図3に、実測値から得た Kcv と $Clev$ の関係を点で示す。本研究のモデル（A モデル）を以下に示す。

ⅰ) $0 \leqq Kcv < 0.25$

$$Clev = 0.0014 + 0.0063 \cdot Kcv \tag{7}$$

ⅱ) $0.25 \leqq Kcv < 0.855$

$$Clev = -0.1173 + 1.726 \cdot Kcv - 8.5637 \cdot Kcv^2 + 16.522 \cdot Kcv^3 - 8.74786 \cdot Kcv^4 \tag{8}$$

ⅲ) $0.855 \leqq Kcv \leqq 1$

$$Clev = 0.75 \tag{9}$$

図3の実線は、これらの式を統合した値を示す。

全天空照度と直射照度は、次式より得られる。

$$Evd = \{ 1 - Clev \cdot (1 - Cvs) \} \cdot Evg \tag{10}$$

$$Evs = (Evg - Evd) / sin\, \gamma_s \tag{11}$$

Evd: 全天空照度 [lx]

Evs: 直射照度 [lx]

5. 既往モデルとの比較

本研究では、稲沼によるモデル[7] と飯沼によるモデル[8] を検討対象とした。これらの式を以下に示す。

(1) 稲沼モデル（B モデル）

ⅰ) $0 \leqq K_{Te} < 0.312$

$$S_{Re} = 0.0 \tag{12}$$

ⅱ) $0.312 < K_{Te} \leqq 0.899$

$$S_{Re} = -0.082719 + 1.6766 \cdot K_{Te} - 9.259 \cdot K_{Te}^2 + 18.345 \cdot K_{Te}^3 - 10.155 \cdot K_{Te}^4 \tag{13}$$

ⅲ) $0.899 < K_{Te} \leqq 1.0$

$$S_{Re} = 0.63727 \tag{14}$$

K_{Te}: 昼光の晴天指数 [-]

$$K_{Te} = Evg / (Evo \cdot sin\ \gamma_s) \tag{15}$$

S_{Re}: 昼光のクリアスカイレイショ [-]

$$S_{Re} = Evs \cdot sin\ \gamma_s / Evg \tag{16}$$

(2) 飯沼モデル（C モデル）

$$Evd = (0.0039 \cdot K^4 + 2.5856 \cdot K^3 - 1.8094 \cdot K^2 + 0.8956 \cdot K + 0.9476) \cdot Eeg \tag{17}$$

K: $Eeg / (1367 \cdot sin\ \gamma_s)$

Eeg: 全天日射量 [W/m^2]

本研究のモデル（*A* モデル）と既往モデル（*B* モデル、*C* モデル）による全天空照度と直射照度の推定値と実測値の *RMSE* (Root Mean Square of Errors) および *MBE* (Mean Bias of Errors) を次式より求めた。

$$RMSE = \sqrt{\{ \Sigma_i (C_i - M_i)^2 / N\}} / M_{ave} \quad (18)$$

$$MBE = \{ (C_i - M_i) / N \} / M_{ave} \quad (19)$$

C_i: 推定値 [*lx*]
M_i: 実測値 [*lx*]
M_{ave}: 全実測値の平均値 [*lx*]
N: データ数

図4から図7に、本研究のモデルによる全天空照度と直射照度の *Kcv* 別の *RMSE* と *MBE* をそれぞれ示す。いずれの値も小さく、実用上問題はない。図8から図11に、本研究のモデルと既往モデルによる、全天空照度と直射照度の太陽高度別および全実測値の *RMSE* と *MBE* をそれぞれ示す。いずれも全体的に見て本研究のモデルの値は既往モデルより小さくなった。

6. 結

本論文では、グローバル照度に基づいて全天空照度と直射照度を推定するモデルを示した。このモデルにより、グローバル照度の2つの成分を既往モデルより精度良く推定することが可能である。

参考文献

[1] CIE, Technical Report : Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement, CIE 108-1994 (1994)
[2] 松本達也, 岩田朋子：水平面グローバル照度に基づいて全天空照度と直射照度を推定する方法, 日本建築学会九州支部研究報告第 49 号・2（環境系）, pp.85-88, 2010 年
[3] Igawa, N., Iwata(Matsuzawa), T. et al : Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution, Solar Energy, 77, pp.137-157, 2004
[4] Navvab, M. et al : Analysis of atmospheric turbidity for daylight calculations, Energy and Buildings, Vol.6, pp.293-303, 1984
[5] CIE, Technical Report : Spatial Distribution of Daylight – Luminance Distributions of Various Reference Skies, CIE-110-1994, 1994
[6] Kasten, F., Young, A.T. : Revised optical air mass tables and approximation formula, Applied Optics, 28(22), pp.4735-4738, 1989
[7] 稲沼實, 武田仁：長期観測データに基づく昼光の直散分離に関する実証的研究, 日本建築学会環境系論文集, No.590, pp.37-42, 2005
[8] 飯沼清明：スカイスキャナ実測値を用いた昼光・日射の直散分離に関する研究, 大阪市立大学修士論文梗概集, 2005

（原稿受付　2011.年 12 月 6 日）

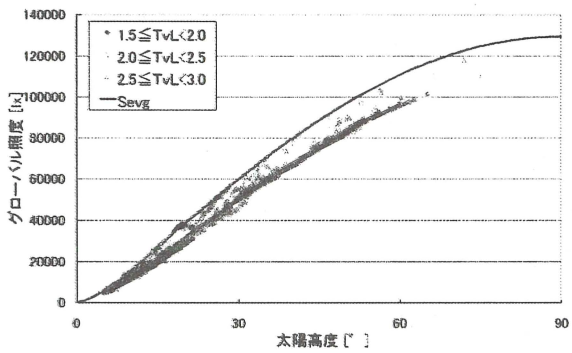


図1　晴天空のグローバル照度

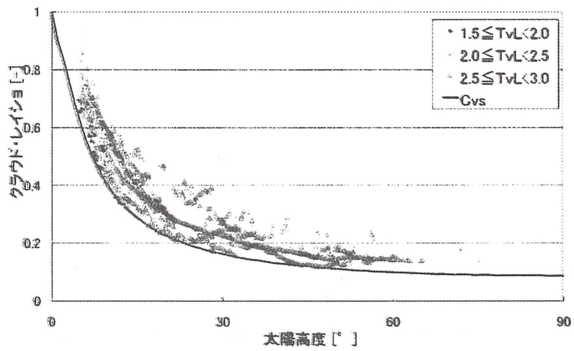


図2　晴天空のクラウドレイショ

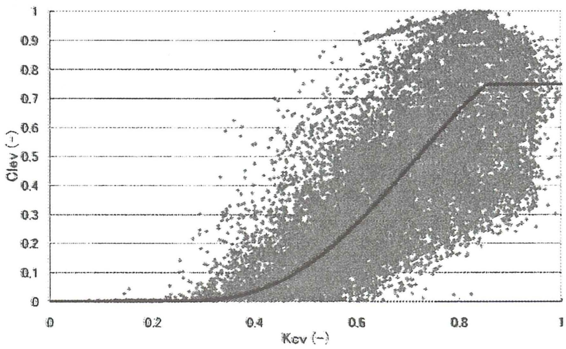


図3　全天透過指数（*Kcv*）と直射透過指数（*Clev*）

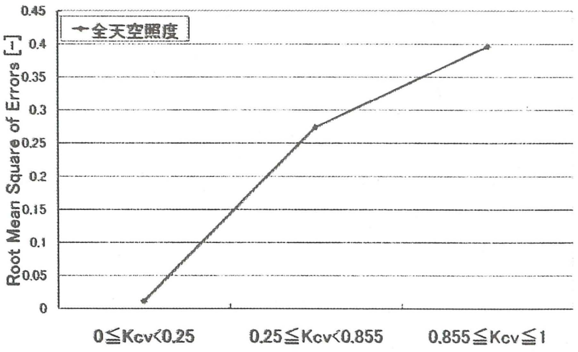


図4 全天空照度の *Kcv* 別 *RMSE*

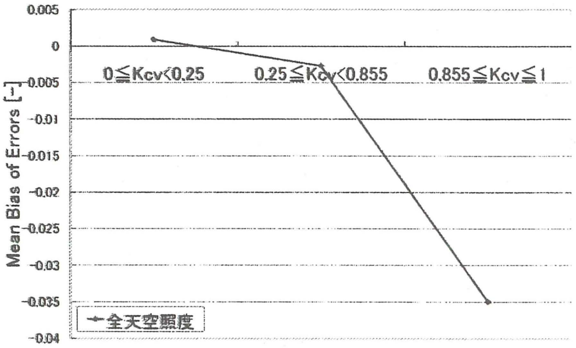


図5 全天空照度の *Kcv* 別 *MBE*

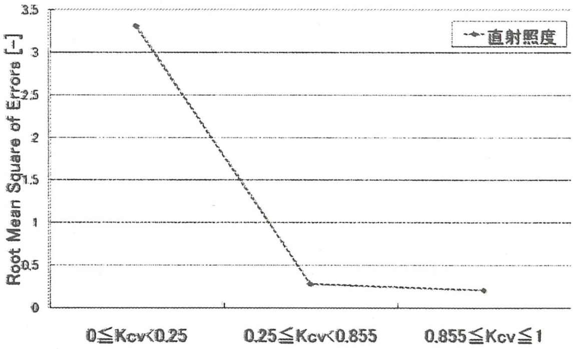


図6 直射照度の *Kcv* 別 *RMSE*

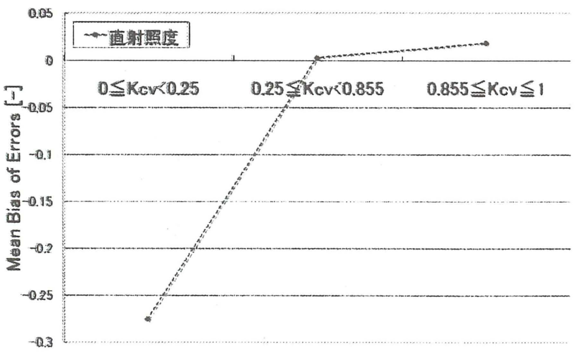


図7 直射照度の *Kcv* 別 *MBE*

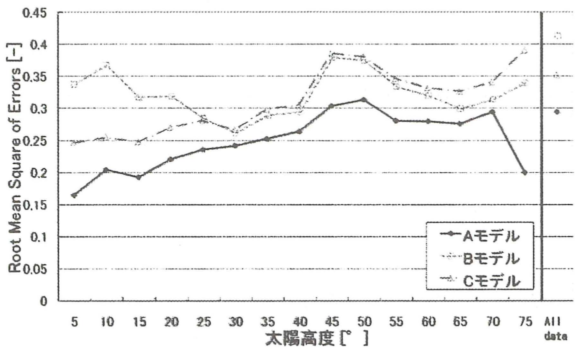


図8 全天空照度の *RMSE*

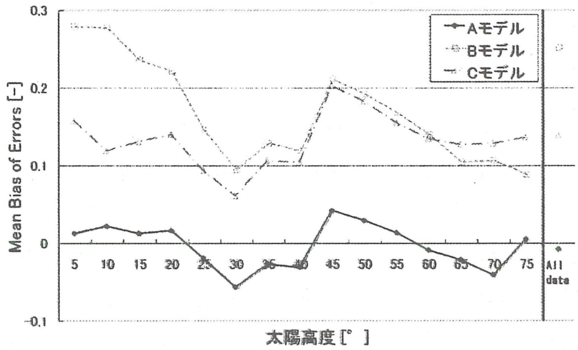


図9 全天空照度の *MBE*

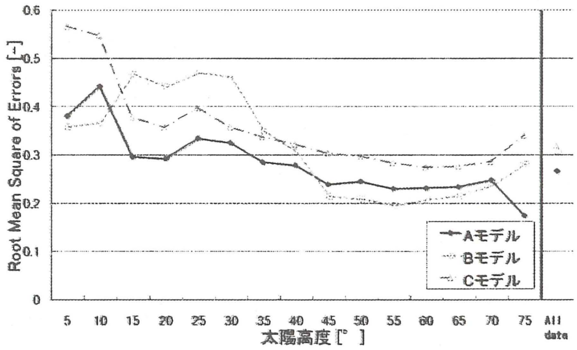


図10 直射照度の *RMSE*

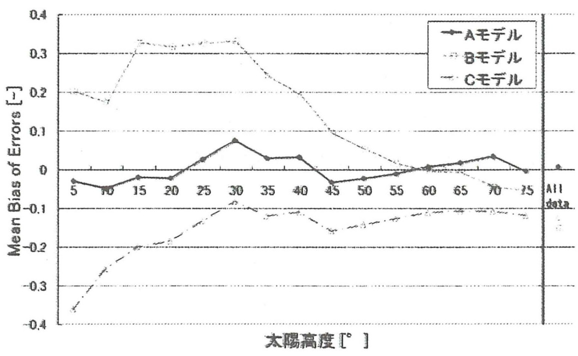


図11 直射照度の *MBE*

乳酸菌産生物質（ＰＳ-Ｂ１）の非肥満Ⅱ型糖尿病モデルラットに対する血糖上昇抑制効果

石橋 源次*、本多 英俊**、榊原 隆三***
*九州女子大学家政学部、**バイオジェノミクス、***長崎国際大学薬学部

Beneficial Effect of ＰＳ-Ｂ１on Blood Glucose Level and Serum Lipid Concentrations in Spontaneously Nom-Insulin-Dependent Diabetic Rats（SNIDD）

Genji Ishibashi,Hidetoshi Honda and Ryuzou Sakakibara

Abstract

ＰＳ-Ｂ１ was evaluated for benefical effect on blood glucose level and serum lipid concentrations in an experiment with SHR rats used as model animals for spontaneously non-insulin-dependent diabetes mellitus.

The results obtained from the rats given a diet containing ＰＳ-Ｂ１*ad libitum* were compared with those from control rats. .During the feeding period of 48d, body weigh of the SNIDD rats receiving the ＰＳ-Ｂ１ was significantly lower than that of the control rats from the 1th to the 48 days. Though food intakes of the rats receiving ＰＳ-Ｂ１were significantly lower in the and control rats. The fasting blood glucose levels were significantly lower in the SNIDD rats receiving the 3%ＰＳ-Ｂ１than the rats receiving the control on the 48th day .Compared with the control group, the amounts or cholesterol and bile acid in the feces of the SNIDD rats in the ＰＳ-Ｂ１group were significantly higher, and the cholesterol excretion was significantlv higher on the in the ＰＳ-Ｂ１rats. The liver weight, the level of total lipids in liver, and the concentrations of triglyceride and total cholesterol in liver and serum or the SNIDD rats on the 48th day were significantly lower in the ＰＳ-Ｂ１ than those of the control group. These results indicate that ＰＳ-Ｂ１has beneficial effects on blood glucose level and serum lipid concentrations in spontaneously non-insulin-dependent d iabetic rats.

Keywords: *Lactobcillus Productive Substance,Blood Glucose,Non-innsulin-dependent Diabete Rats*

1. 緒言

糖尿病は代表的な生活習慣病であり，日本では予備を含めると約1，370万人に達すると推定されている。糖尿病はインスリンの作用不足によって慢性の高血糖や代謝異常にもとづく網膜症，腎症，動脈硬化などの血管に関わる合併症を伴う場合が多く，糖尿病の治療とその合併症の予防が研究課題となっている。

糖尿病の進展あるいは合併症の発症・進展を防ぐためには，長期にわたり良好な血糖コントロールを維持することが有効であり[1)]，その治療は食事療法，運動療法，さらには薬物療法により行われている。これまでに，ある種の食物繊維が食後の血糖上昇やインスリン分泌を抑制することが見いだされており，食事療法において血糖をコントロールし，合併症を予防するためには食物繊維を多く含む食品の摂取が有効であると考えられる[2)] [3)]。また，抗酸化作用のある食品も糖尿病の進展や合併症の発症・進展防止に好影響を与えるものと考えられる。

糖質代謝に及ぼす影響についても、水溶性食物繊維が食後の血糖上昇やインスリン分泌を抑制することが見いだされて以来、これらは糖尿病の予防と治療に一定の効果を有するという数多くの研究報告がなされてきた[4)] [5)]。その作用機序は、食物繊維の有する粘性により、栄養素の消化吸収を遅延させることによるものと推察されている。しかし、近年では、食物繊維が消化管ホルモン分泌を抑制することにより、あるいは消化酵素を阻害することにより、糖質代謝に影響を及ぼしている可能性も示唆されている[6)]。

発酵乳や乳酸菌含有飲料水の継続的な摂取は，代謝機能増進，感染防御，腸内フローラの改善，脂質代謝，有害・発ガン物質の分解と排泄促進，血圧や血糖のコントロール等に影響を及ばし，ヒトの健康維持に有効であるとの多くの報告がある．発酵乳の有効性は，発酵によって産生された成分に基づくものや有用菌である乳酸菌等の腸管内での増殖により有害菌の減少及び菌体を構成する成分によると考えられている．

牛乳を原料として製造される発酵乳の生理作用については，多くの研究がなされているが，しかし，チーズや発酵乳製造時の副産物である乳清に関しての報告は，乳清たんぱく質を酵素処理して得られる分解物の血圧上昇抑制作用や*L. casei*と*S. thermophilus*で発酵したものに血清中性脂肪と動脈硬化指数を低下させるなど限られたものである．

ＰＳ-Ｂ１には、原料の大豆、発酵に用いた菌の成分および菌類が産生する成分が含まれているために糖質代謝に影響を及ぼすことが予測される。ＰＳ-Ｂ１を用いて非肥満２型糖尿病モデルラットに対する糖質代謝への影響を中心に検討した。

2. 実験方法

１）乳酸菌生産物質（ＰＳ-Ｂ１）の調製

豆乳を培地とし、ヒト由来の乳酸菌群を中心に、

*Lactobacillus*属（*acidophilus, casei, bulgaricus, pracasei, delbrueckii, gasseri, brevis*）, *Bifidobacterium*属（*longum, bifidum, adolescentis*）等、21株の菌を一定条件下で複合（共棲）培養し、濾過精製後得られた発酵液をバイオジェノミクスＫ・Ｋより提供をうけた。

乳酸菌生産物質（ＰＳ-Ｂ１）原液を常法に従って凍結乾燥すると、100mＬから4.4ｇの黄色粉末が得られ、この粉末を実験試料として用いた。

１）実験動物

実験動物は、日本チャールス・リバー製（GK／Ｊｃｌ－ＮＩDDM)、ウイスター雄ラットを九動動物飼育所（熊本）より入手し、１週間の予備飼育後１群7匹（体重120ｇ内外）を実験に供した。このラットは、非肥満II型糖尿病モデル動物として有用である。
飼料および飲料水は自由に摂取させ、飼育期間は48日間とし、飼育条件は室温22±2℃、湿度は調整せず明暗は12時間周期（8:00-20:00）とした。飼育終了後、一昼夜絶食させネンブタール麻酔下で、腹部大動脈より採血し血清を分離した。同時に、臓器を摘出し分析に供するまで−80℃に冷凍保存した。

２）飼料の調製

対照群の飼料組成は、α-コーンスターチ15%、乳カゼイン18%、ラード4%、大豆油4%、ＡＩＮ-９６配合ミネラル混合3.5%、ＡＩＮ-９６配合ビタミン混合1%、セルロースパウダー3%、酒石酸コリン0.15%、ＤＬ-メチオニン0.15%としスクロースで100%になるように調製した。ＰＳ-Ｂ１群は凍結乾燥して得られたものを３%添加し（スクロースで100%になるように調製した。

３）血清成分の分析

血清総コレステロール（T-chol）と遊離コレステロール(F-chol)はオキシダーゼ・フェノール法、リン脂質(PL)はコリンオキシダーゼ・フェノール法、HDL－コレステロール(HDL-chol)はマンガンを用いHDLを分離した後、cholをオキシダーゼ・フェノール法で定量した。トリアシルグリセロール(TG)はフェノール法、ヘモグロビンはシアンメトヘモグロビン法、総たんぱく質はビウレット法、アルブミンはBCG法で、尿酸、クレアチニンはいずれも市販のキット（和光純薬製テストワコー）を用いて測定した。アディポネクチンは酵素免疫測定法（ＥＬＩＳＡ法）で市販のラット/マウスアディポネクチンキット（大塚製薬製）で、レプチンは、酵素免疫測定法(ＥＩＡサンドイッチ法)で市販のレプチン測定キット（森永生科学研究所製）を用いて測定した。

４）肝臓成分の分析

肝臓総脂質量は、肝臓１ｇを精秤しクロロホルム：メタノル＝２：１（Ｖ／Ｖ）の溶媒を用いるFolch法で抽出し、重量法で測定した。
抽出した全脂質をイソプロピルアルコール10mＬに溶解したものを検液とし、血清の場合と同様にT-chol、F-chol、ＴＧ及びＰＬを市販のキットで測定した。

５）糞中及び盲腸内容物中の中性ステロールと胆汁酸の分析

糞は１匹のラットが３日間に排泄した総量を70℃で３時間通風乾燥した後、粉末にした。糞100mｇを10mＬのエチルアルコールで抽出した後、１Ｎ水酸化ナトリウムで１気圧121℃、5時間加水分解した。加水分解した溶液からエチルエーテルで中性ステロールを抽出し、中性ステロールは市販のキット（コレステロールテストワコー和光純薬製）で測定した。胆汁酸の定量は抽出残液を中和した後、市販のキット（胆汁酸テストワコー和光純薬製）で測定した。

６）血糖の経時的測定

実験飼料投与開始より、１週間に１度（水曜日）に午前８時から１０時の間に、無麻酔下で尾静脈より採血した。血糖値の測定は小型血糖測定器グルテストセンサー（三和化学研究所）を用いて行った。

７）糖負荷試験

空腹時に２ｇ／Ｋｇ・ラットのグルコースを生理的食塩水に溶解したものを経口投与した後、30分、60分及び120分後の血糖値を測定した。対照には生理的食塩水を投与した。

８）小腸粘膜二糖類分解酵素の阻害活性測定

マレイン酸緩衝溶液（ｐH6.0）に溶解した150mMのスクロースとマルトース溶液0.5mＬに炭酸水素ナトリウムで中和したＰＳ-Ｂ１0.2mＬを加えた後、ＳＩＧＭＡ製ラット小腸アセトン粉末を50mｇ／３mＬの生理的食塩水に溶解したものを0.2mＬ加え37℃で10分間酵素反応した。沸騰水中で正確に２分間入れて酵素反応を停止後、3000ｒｐｍで10分間遠心分離し、上清液を市販のグルコーステストワコーを用いてグルコースの定量を測定しＰＳ-Ｂ１を入れないものを100%消化とした。

スクラーゼ阻害活性は基質にスクロースをマルタゼーゼ阻害活性は基質にマルトースを用いた。

９）結果の処理

分析結果は平均値±標準偏差で表し、分散分析を行いDunnett’ｓの多重検定法により各群間の有意差検定を行い$p<0.01$をもって有意とした。

3. 実験結果

１）体重・臓器重量及び飼料摂取量

ＰＳ-Ｂ１を添加した飼料をラットに投与した動物実験における体重増加量、飼料摂取量、飼料効率及び臓器重量を表

1に示した。

体重増加量は対照群233±10g，PS−B1群213±10gとなり 40 日間の飼育期間中いずれの試験群も体重の増加量に有意差は認められなかった。また、飼料摂取量は基本食群が、糖尿病ラットよりも摂取量が多くなったが、対照群とPS−B1群の飼料摂取量に差異はなかった。肝臓、腎臓重量及び皮下脂肪重量は、対照群と比較しPS−B1群で低い重量と体重比となった。

2）血糖値の推移

飼育開始より飼育終了までの、3週目、6週目及び9週目における血糖値の推移を図1に示した。スクロースとPS−B1 を同時投与し、30 分、60 分及び 120 分後の血糖値の変化を,図2に示した。

3） 血清脂質濃度

血清の脂質濃度に及ぼすPH−B1の影響は表2に示すような結果となった。

非肥満性糖尿病ラットにPH−B1を添加して 40 日間飼育すると、血清T−chol, HDL−chol 濃度は基本群、対照群及びPH−B1群で差異はなかった。血清TG濃度は、基本群に比べ対照群とPH−B1群で有意に低濃度となり、PH−B1群は対照群よりも低いTG濃度であった。一方、血清PL濃度はTG濃度と異なり、基本群の場合、最も低い濃度となり、PH−B1群で高濃度となった。

4）血清たんぱく質濃度

表3には、血清たんぱく質、尿素窒素、酵素及びアディポネクチンとレプチン濃度を示した。また、血清アデポネクチンとレプチン濃度を図3に示した。

栄養状態を表す総たんぱく質、アルブミン濃度は基本群、対照群及びPH−B1群でほぼ同様な濃度で、有意な差異は認められなかった。

表1　飼料摂取量、体重増加量及び臓器重量

	基本群	対照群	PS-B1 群
飼料摂取量（g）	1179±41	993±41a)	966±10a)
体重（g）			
初体重（g）	128±6	102±5	104±6
終体重（g）	423±37	336±11a)	325±15a
増加量（g）	283±41	233±10a)	223±10a)
肝臓			
肝臓重量（g）	17.2±1.7	14.3±1.8a)	11.8±0.9a)b)
肝臓/体重（%）	4.1±0.1	4.3±0.1	4.0±0.1b)
皮下脂肪組織			
皮下脂肪重量（g）	11.3±3.6	5,7±1.7a)	3.9±0.4a)b)

a）　基本群に対して有意差あり、p<0.01. b)対照群に対して有意差あり、p<0.01.

臓器機能の状況を示すGOT，GPT活性は、各試験群で有意な活性の違いはなかった。また、筋肉におけるエネルギー

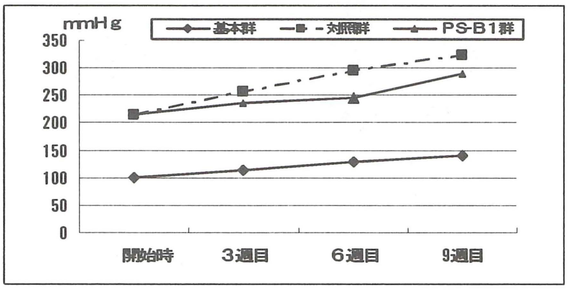


図2　飼育期間中の血糖値の推移

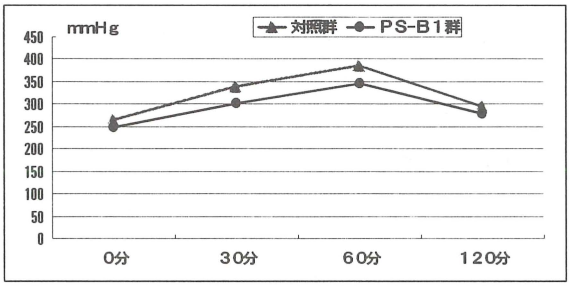


図2　PS−B1と糖負荷による血糖値の推移

表2　血清脂質濃度

	基本群	対照群	PS-B1 群
コレステロール	77±10	90±10	88±10
トリグリセリド	127±22	97±12a)	69±6a)b)
リン脂質	117±23	144±25a)	166±16a)b)
HDL−コレステロール	40±6	50±10	44±5
過酸化脂質	7.9±0.8	9.8±0.7	6.4±0.4b)

a）基本群に対して有意差あり、p<0.01.
b）対照群に対して有意差あり、p<0.01,

表3　血清たんぱく質、尿素窒素及び酵素活性

	基本群	対照群	PS-B1 群
総たんぱく質*	8.1±0.3	7.2±0.2	7.4±0.5
アルブミン*	4.1±0.1	4.2±0.2	4.0±0.3
GPT	70±10	67±11	63±11
GOT	58±7	62±6	63±9
尿酸**	3.7±0.2	4.0±0.3	3.5±0.2
尿素窒素**	22±4	17±1	16±7
クレアチニン**	2.4±0.5	2.6±0.3	2.2±0.1

*g／dL　**mg／dL　***ng／dL GOT，GPT国際単位

a）基本群に対して有意差あり、p<0.01.
b）対照群に対して有意差あり、p<0.01,

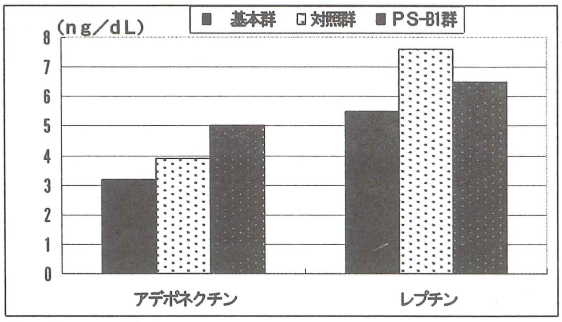


図3 血清アディポネクチンとレプチン濃度

代謝を表すクレアチニン濃度、たんぱく質の異化と腎臓機能を表す尿素窒素濃度、細胞と核酸代謝及び腎臓機能を示す尿酸はたんぱく質量と同様に各試験群において差異は認められなかった。
脂肪組織細胞より分泌されるアディポサイトカインであるアディポネクチンとレプチン濃度は、PH-B1投与により、分泌量が有意に増加した。

5）肝臓脂質濃度

肝臓の脂質濃度は、表4に示すような結果となった。

表4 肝臓脂質

	基本群	対照群	PS-B1 群
総脂質	31±1	60±6 a)	62±3 a)
トリグリセリド	20±6	26±2	22±4
コレステロール	3.1±0.9	3.7±0.7	3.5±0.4
リン脂質	11±2	12±2	12±1

(単位は、mg／g)

a）基本群に対して有意差あり、p<0.01.

糖尿病ラットの場合の肝臓総脂質量が高濃度となっているが、TG，PL及びT-chol 濃度のいずれも、基本群、対照群及びPH-B1群とも同様の濃度となり差異はなかった。

6）排世糞中ステロール及び胆汁酸量

排世糞量、胆汁酸及びコレステロールの排世量は表5に示すようになった。

排世糞中の中性ステロール及び胆汁酸量は、それぞれ、基本群 18mg/日、45mg/日、対照群5mg／日、48mg／日、PH-B1群25mg／日、42mg／日となり、糖尿病ラットの場合、排世胆汁酸とコレステロール量がPH-B1を投与すると多くなった。

表5 排世ステロール及び胆汁酸量

	基本群	対照群	PS-B1 群
コレステロール	18±6	5±3 a)	25±3 b)
胆汁酸	45±12	48±12	42±10

a）基本群に対して有意差あり、p<0.01.
b）対照群に対して有意差あり、p<0.01,

7）PS-B1のスクラーゼ及びマルターゼ活性阻害

小腸におけるPS-B1の消化酵素に対する影響を検討するためにラットの小腸粘膜中に存在する二糖類消化酵素スクラーゼ及びマラターゼ活性を測定した。

図4は、基質としてスクロース及びマルトースを用いた場合の消化率を示した。対照の消化率を 100%とするとPS-B1ではスクロースの消化率 56.1%、マルトースの消化率67.1%となりいずれもPS-B1によって消化が阻害された。

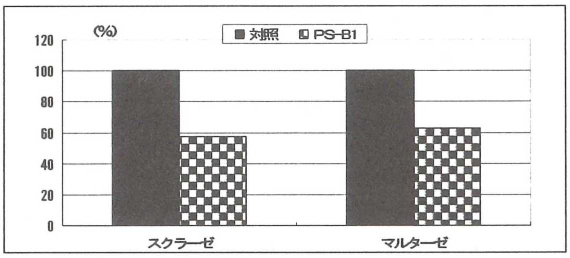


図4 PS-B1のスクラーゼ・マルターゼに対する消化率

4.考 察

糖尿病は、耐糖能が低下する機序によってⅠ型糖尿病とⅡ型糖尿病に分けられる。Ⅰ型糖尿病はインスリン依存型糖尿病ともいい、膵臓のランゲルハンス島のβ-細胞の死滅する病態である。血中に膵臓細胞を攻撃する自己抗体があるものを「ⅠA型(自己免疫性)」、ないものを「ⅠB型（突発性）」という。Ⅱ型糖尿病はインスリン非依存型糖尿病ともいい、インスリン分泌低下とインスリン感受性低下（インスルン受容体）の二つを原因とするものである。糖尿病に有効な食品として、ニガウリ、サイリウム、キクイモ、マンネンタケ、ニンニク等があり、その有効成分として、β-キシラン、β-グルカン、ペクチン、グアーガムなどの食物繊維が報告されている。これら食物繊維は物理的な粘性により糖質の消化吸収を遅延させることが知られている[2)]

さらに、難消化性デキストリンが糖質の消化酵素阻害作用を有することも報告されており，食物繊維が糖質の消化吸収を阻害することで糖代謝に影響を及ぼすと考えられる。PS-B1摂取による血糖値および耐糖能の改善は，PS-B1中に糖質吸収の遅延または阻害作用を有する成分の存在を示唆していると考えられる。

糖尿病ではしばしば血清脂質の増加がみられ，病状の進展に伴い動脈硬化症を合併するごとが多い。PS-B1投与により血清脂質は対照群より低値を示す傾向がみら，特にトリアシルグリセロールは対照群より有意に低下した。PS-B1摂取による血清中性脂肪の改

善は、大豆中に含まれるプペチドやステロールの作用によると考えられるがペプチドによる作用だけではなくその他の成分の関与が示唆されたが，作用メカニズムを含め今後のさらなる検討が必要である。

また、高血糖の持続は酸化ストレスの増加を引き起こし，酸化ストレスが糖尿病の病態の進展，あるいは合併症の発症・進展に関与すると考えられている。そこで酸化ストレスの指標として血清過酸化脂質を測定したところ，対照群の血清過酸化脂質はＰＳ−Ｂ１群より有意に高値を示したのに対し，ＰＳ−Ｂ１群はその上昇が有意に抑制された。これはＰＳ−Ｂ１摂取により血糖値および耐糖能が改善された結果，過酸化脂質の産生が有意に抑制されたと考えられる。しかし，本研究では血清過酸化脂質しか測定していないため，ＰＳ−Ｂ１摂取によって酸化ストレスが抑制されたとは断定し難く，さらに詳細に検討することが必要である。

近年、国際的に注目されて、広く認められている研究成果に、アデポネクチンをはじめとするサイトカインネットワークの異常を原因とするものや、あるいは炎症を原因と考えるⅡ型糖尿病もある。

ＰＳ−Ｂ１投与による血清中のアディポネクチン濃度は糖尿病ラット及び正常ラットに比べ有意に上昇し、また、レプチン濃度は糖尿病ラットと比較し有意に低濃度となり、皮下脂肪から分泌されるたんぱく質に影響を及ぼした。

ＰＳ−Ｂ１摂取により血糖値，耐糖能，血清中性脂質が改善され，ＰＳ−Ｂ１に糖尿病病態改善作用が認められた。しかし，ＰＳ−Ｂ１の血糖値および耐糖能の改善は投与末期に現れたことから，ＰＨ−Ｂ１により有意に改善されるためにはさらに長期間の投与が必要だったのではないかと推察される。 血糖値を下げる方法は，グルコースへの分解あるいは消化・吸収を阻害することによって血糖値の上昇を抑える方法の２種類に大別できる。前者の例としては，インスリン製剤のほか，スルフォニルウレア系などの経口血糖降下剤があげられる，後者はインスリンのような劇的な血糖降下作用はないものの，食事による急激な血糖値の上昇を抑えることから，低血糖発作の危険がほとんどなく，糖尿病初期あるいは軽度の者にはきわめて有用な治療法とされている。 食物繊維はその物理化学的性質に基づいて種々の腸疾患や代謝性疾患の予防に有効であることが知られている。糖質代謝に及ぼす影響についても，水溶性食物繊維が食後の血糖上昇やインスリン分泌を抑制することが見いだされて以来，これらは糖尿病の予防と治療に一定の効果を有するという数多くの研究報告がなされてきた。その作用機序は，食物繊維の有する粘性により，栄養素の消化吸収を遅延させることによるものと推察されている[7]。しかし、近年では，食物繊維が消化管ホルモン分泌を抑制することにより，あるいは消化酵素を阻害することにより糖質代謝に影響を及ぼしている可能性も示唆されている[6]。

PS−Ｂ１はスクロース同時投与後の血糖上昇を有意に抑制する傾向を示した。糖尿病は初期段階として食後高血糖が観察され，慢性的な食後高血糖を経て空腹時血糖値の上昇へと進展すると考えられている。また，食後の血糖上昇に伴うインスリン分泌増加は内臓脂肪蓄積を促し，肥満さらには糖尿病の発症および進展を促進することが知られている。一方，PS−Ｂ１はスクロース同時投与後においても血糖上昇を有意に抑制したことから，PS−Ｂ１はグルコース吸収抑制作用を有することが示されたしたがって，PS−Ｂ１による食後血糖上昇抑制作用は消化酵素阻害作用およびグルコース吸収抑制作用に由来したと考えられる[8) 9)]。

これまでに植物由来のポリフェノール類が糖質消化酵素阻害作用を介して食後血糖上昇を抑制することが報告されている。 一方，水溶性食物繊維は物理的なグルコースの拡散遅延に基づくグルコース吸収抑制作用を示すことが報告されている。PS−Ｂ１の成分が、摂取されたでんぷん等の糖質に吸着し消化酵素の作用を遅延させるとも考えられる。また，緑茶ポリフェノールが小腸粘膜上皮細胞の glucose transporter 阻害作用を有することが報告されており[10)]，PS−Ｂ１のグルコース吸収抑制作用機序についても今後のさらなる検討が必要である。

PS−Ｂ１のラットにおける食後血糖上昇抑制作用が認められ，その作用は糖質の消化酵素阻害および吸収抑制作用が関与することが示唆された。

参考文献

1)Health and Welfare Statistics Association. Journal of Health and Welfare Statistics, Vol 53, p84−88. Kosaido, Tokyo (in Japanese) (2006).

2)老原清、桐山修八：食物繊維の物理・化学的性質と生理機能、日本食品工業学会誌、37,916-930(1990)

3)somaa B. 2003. A major health hazard : the metabolic Syndrome. *Life Sci* 73：2395−2411.

4)Jnkins DJA,Leeds AR,Wolever TMS: Unabsorble carbohydrates and diabetes,*Lance.,* 2,172-174 (1976)

5)Jenkins DJA,WoleverTMS,Nineham R, Guar crispbread in the diabetic diet, *Br. Med. J.*, 2, 1744-1746 (1973)

6) Morgan LM, Goulder TJ, Tisolakis D, :The effect of Unabsorbable carbohydrate on gut hormones *Diabetologia*, 17, 85-89 (1979)

7) Jenkins DJA, Leeds AR, WoleverTMS: Dietary fibres, fibre analogue and glucose tolerance, *Br. Med. J.*, 1, 1392-1394 (1978)

8) 小高裕之、三木七美、池田 衡、松雄隆夫：二糖類水解酵素阻害剤のラットにおける食後高血糖抑制作用、栄食誌、5, 27-31 (1992)

9) Horii S:Valialamine and its N-substituted derivatives, α-D-glucosidase inhibitors, J. Takeda ., *Res Lab.*, 52, 1-26 (1993)

10) 田淵美保子、田村朝子、山田則子：ウコギ葉投与が新生児期のストレプトゾトシン投与による２型糖尿病ラットの耐糖能に及ぼす影響、栄養誌、56, 243-246 (2003)

(原稿受付 2010年11月29日)

乳酸酸生産物質（ＰＳ−Ｈ１）の血圧上昇抑制作用

石橋　源次*、廣戸美絵*、本多　英俊**、榊原隆三***
*九州女子大学家政学部、**バイオジェノミクス、***長崎国際大学薬学部

Effects of PS-H1 on blood pressure and lipid metabolism in spontaneously hypertensive rats

*Genji Ishibashi Yoshie Hiroto **Hidetoshi Honda *** Ryuzo Sakakibara

Abstract

The effects of PS-H1 on blood pressure and lipid metabolism were studied using spontaneously hypertensive rats (SHR). The animals, aged 5weeks, were fed 3% PS-H1,fellowed by a 8 week. Body weight, blood pressure and serum lipid levels were measured. The average body weight was greater than that of PS-H1 group. Blood pressure in the PS-H1 group was significantly lower than that in the control group. Serum lipid levels, including total lipids, total cholesterol, triglyceride and free fatty acid of PS-H1 diet rats were clearly lower than in the control group.

These parameters for the for the PS-H1 group diet rats were also lower, but were not significantly different, except triglyceride. The serum triglyceride level in the PS-H1 group rats was significantly lower than control group rats.

Keywords: *Lactobcillus Productive Substance,Blood Pressure,Serum lipids*

1. 緒言

WHO／ISH (1999) および日本高血圧学会 (2000) による高血圧治療ガイドラインでは，血圧の正常範囲を，130mmHg／85mmHg 未満，至適血圧を 120mmHg／80mmHg 未満と定義している。高血圧は脳出血と脳梗塞に共通した最大の危険因子であるとともに、心不全や腎臓病などの合併症を引き起こす原因となっている[1) 2)]。

近年，機能性を有する食品が注目され，その中に降圧作用を有する食品素材の研究も数多く報告されている。乳酸菌を用い脱脂乳を含むスターターを用いて発酵させて得られた酸乳に高血圧自然発症ラットに対して降圧作用があること、さらに，酸乳中から，血圧の重要な調節系の一つであるアンジオテンシンⅠ変換酵素 (ACE) 阻害物質として２種類のトリペプチド (Val−Pro−Pro, Ile−Pro−Pro) の単離・同定もされている。その他に、食品を原料とするものなどが報告されており、一部は特定保健用食品として血圧のコントロールに利用されている[2)-5)]。

本研究の材料である乳酸菌生産物質 (PS-H1) には有機酸、アミノ体窒素及びγ-アミノ酪酸が含有されており、血圧に対しても生理的に有効な作用をすることが期待できるために、自然発症高血圧ラット (SHR) に PS-H1 を投与し、血圧降下作用について検討した。

2. 実験方法

１）乳清発酵産物の調製

Lactobacillus 属 (*acidophilus, casei, bulgaricus, cellobiosus*)、*Bifidobacterium* 属 (*infantis, bifidum*)、*Lactococus* 属 (*cremoris, lactis*)、*Streptococus* 属 (*thermophilus, salivarius*)、*Leuconostoc* 属 (*mesenteroides*)、*Acetobacter* 属 (*aceti*)、*Saccharomyces* 属 (*delduekii*) の前培養菌を、水を加えて 15%にした牛乳のホエー液に 3%添加し，21℃で 24 時間培養後，95℃，30 秒間殺菌し遠心分離で得られる上清液を PS-H1 原液とし、常法に従って凍結乾燥すると 100mＬから 10.5ｇの淡黄色粉末が得られる(粉末PS-H1)。

２）PS-H1 の ACE 活性阻害

PS-H1 中のアンギオテンシン変換酵素 (ACE) 活性阻害成分を検索するために、PS-H1 原液をセロハン膜で透析し、透析内液、透析外液を用いて実施した。

ACE 阻害活性の測定は Lieberman の測定方法を改良した山本らの方法に準じて測定した。すなわち，1M 塩化ナトリウムを含むホウ酸緩衝液（ｐH8.3）に溶解した合成基質 Hippuryl-L-histidyl-L-leucine（(株) ペプチド研究所製）12.5mM 溶液 100μＬに，ウサギ肺アセトンパウダー（(株) シグマ製）から 0．1M ホウ酸緩衝液（ｐH8.3）で抽出した ACE 溶液 (25mU／mL) 100μＬを添加し，37℃で 60 分間反応させ，0．5N 塩酸を 250μＬ加えて反応を停止した。生成した馬尿酸を酢酸エチル 1.5mL にて抽出し，228nm の吸光度を測定した。ACE 阻害率は，試料液を加えたときの吸光度を A，試料液の代わりに蒸留水を加えたときの値を B，あらかじ

め反応停止液である 0.5N 塩酸を加えて反応させたときの値をＣとして次式により求めた（ACE 阻害率（%）＝（(B－A) ／ (B－C)) ×100〉。

３）動物実験

実験動物には４適齢の雄日本チャールス・リバー製（SHR／NCrlCrlj)、SPF／VAF ラット（自然発症高血圧モデルラット）を１週間予備飼育した後、各群８匹として対照群と PS-H1 群に分けた。対照群には AIN-93 組成に従って調製し、PS-H1 群は凍結乾燥３％を対照群飼料に添加し、添加分はコーンスターチで調整し，全量を 100%とした。飼料は飲水（水道水）とともに自由摂取とした。試験開始より７週間を試験期間とした。

飼育は各群とも１ケージあたり２匹で，室温22±2℃，12 時間の明暗切り替え（明期は午前８時から午後８時、暗期は午後８時から午前８時）で飼育した。

実験期間中，２日ごとに体重測定および飼料摂取量の測定を行った。また，血圧測定は tail-cuff 法（加温型非観血式自動血圧測定装置 BP－98A，ソフトロン）によりAM8:00－9:00 の間で実験開始より週１回測定した。6 週間の実験終了後 9:00 から 11:00 にかけて，絶食せずにネンブタール（ベントパルビタールナトリウム，大日本製薬）の腹腔内投与（40mg／kg 体重）による麻酔下で腹部大動脈より全血採血し，室温にて１時間放置後，遠心分離（3，000rpm，15 分間）により血清を分離した。臓器は摘出し，重量を測定した後、分析に供するまでー８０℃に保存した。

４）血清成分の分析

血清中の総コレステロール，リン脂質およびトリグリセライドの測定は市販の酵素法によるキット（コレステロールE－テストワコー，リン脂質Ｃ－テストワコー，トリグリセライドＥ－テストワコー，和光純薬工業）にて行った。

５）血清及び組織中の ACE 活性の測定

血液は，室温で１時間放置後，遠心分離（3,000rpm，10min）により血清画分を得，各組織は生理食塩水とともにテフロン製ホモゲナイザーを用いて懸濁し，遠心分離（3,000rpm，10min）後，その上清を組織の ACE 楷酵素液とした。得られ血清画分および粗酵素液 100μL に 12.5mM Hippuryl-L-histidyl-L-leucine 溶液 100μL を加え，37℃で 10 分間反応させ，0.5N 塩酸 250μL を加えて反応を停止した。ACE 活性の 1mU は 1nmol の基質を分解する酵素量として，血清画分の場合は１mL あたり，その他組織については Lowry 法にて測定した粗酵素液のタンパク質あたりの活性で示した。

実施は九州女子大学「動物実験に関する指針」に従って行なった。

3. 実験結果

１）PS-H1 の ACE 活性阻害

PS-H1 原液及びそれぞれの透析内液と透析外液の ACE 活性阻害は表１に示すような結果となった。

表１．S-H1 の ACE 阻害率（%）

	ＰＳ-Ｈ１
原液	２１．９
透析内液	７．２
透析外液	１４．０

２）動物実験

体重及び臓器重量

飼育開始より終了時における体重の増加と臓器重量は表２に示した。

初体重 75g 前後のラットを用い、７週間飼育した。体重増加量は、基本群 244g、PS-H1 群 231g、対照群 217g となり、高血圧ラットで基本群と比較して体重増加量は低くなったが、PS-H1 投与により体重増加量は基本群に比べやや低い増加量であったが差異は認められなかった。

表２　体重及び臓器重量

	基本群	対照群	PS-H１群
体重増加量	247±12	217±11*	225±12
肝臓重量	13.0±1.7	13.1±0.7	13.6±1.2
心臓重量	1.2±0.1	1.2±0.0	1.4±0.1

単位はｇ

*基本群に対して有意差あり、Ｐ＜0.01

３）ＰＳ-Ｈ１の自然発症高血圧ラットに及ぼす影響

飼育開始時より、１週間に一度測定した収縮期の血圧の推移を表３に示した。

飼育開始時の収縮期血圧は、基本群 98mmHg、対照群 125mmHg、PS-H1 群 127mmHg であった。

PS-H1 投与群の収縮期血圧は対照群と比較して低値を示した。３週目は対照群の 175±7mmHg に対し、PS-H1 投与群は 152±12mmHg と低値傾向を示し、実験終了時における収縮期血圧は基本群 152±5mmHg、対照群 230±8mmHg、PS-H1 群 221±7mmHg であった。飼育期間中における収縮期血圧の増加は、基本群 53±７mmHｇ、対照群 105±9mmHｇ、PS-H1 群 90±7mmHｇであった。

約２月ケ間 PS-H1 投与を投与すると、収縮期血圧の上昇が対照群と比較して有意に抑制された。

表3 収縮期血圧の推移

	対照群	PS-H1 群
開始時	125±3	127±4
2週目	148±14	150±16
3週目	175±7	152±12
4週目	187±6	186±10
5週目	206±4	203±8
6週目	220±5	215±7
7週目	230±8	213±7*
増 加	105±9	90±7*

単位は mmHg
*対照群に対して有意差あり、p<0.05.

表4は自然発症高血圧ラットにPS-H1を3%添加した飼料で2ケ月間飼育後の血清脂質濃度と ACE 活性を示した。

総コレステロール濃度は、基本群に比べ対照群、PS-H1群で低濃度であったが、対照群とPS-H1群に差異は認められなかった。トリアシルグリセロール濃度は、基本群と対照群に比べて、有意にPS-H1群で低い濃度となった。リン脂質及び遊離脂肪酸濃度は基本群、対照群及びPS-H1群において有意な差異は認められなかった。

表4 血清脂質濃度及びACE活性

	基本群	対照群	PS-H1 群
コレステロール	87±10	57±10*	52±5*
トリグリセリド	93±11	88±8	66±8*
遊離脂肪酸	0.4±0.1	0.4±0.1	0.6±0.1
リン脂質	128±5	115±4*	110±11*
ACE活性 (%)	17.5±0.1	20.1±0.2	16.9±0.1

血清ACE活性 (%) は、基本群 17.5±0.11、対照群 20.1±0.21、PS-H1 群 16.9±0.1 となり、アンギオテンシン変換酵素の活性は対照群に比べ PS-H1 群で低くなった。

肝臓の脂質濃度は表5に示すような結果となった。肝臓の総脂質及びトリグリセリドは各試験間群での濃度はほぼ同様な値となり、有意差は認められなかった。しかし、肝臓の総コレステロール濃度は、対照群に比べ PS-H1 投与で幾分低濃度となった。

4. 考察

SHR ラットへ PS-H1 の7週間続投与した場合, PS-H1 投与群で降圧作用が観察された。

近年, 機能性を有する食品が注目され, その中に降圧

表5 肝臓脂質濃度

	基本群	対照群	PS-H1 群
総脂質	39±7	41±3	41±2
コレステロール	2.1±0.2	2.2±0.3	1.8±0.1
トリグリセリド	6.4±1.2	7.4±0.2	7.8±0.8

単位：mg／g肝臓

作用を有する食品素材の研究も数多く報告されている。乳酸菌を用い脱脂乳を含むスターターを用いて発酵させて得られた酸乳に高血圧自然発症ラットに対して降圧作用があること、さらに, 酸乳中から, 血圧の重要な調節系の一つであるアンジオテンシンI変換酵素 (ACE) 阻害物質として2種類のトリペプチドの単離・同定もされている[4)5)]。その他に、食品を原料とするものとしてイワシ、カツオ節、マグロ肉、カゼイン、ダイズ、ワカメ、ノリ、乳清あるいはローヤルゼリー由来のペプチドが報告されており、一部は特定保健用食品として血圧のコントロールに利用されている。また、黒酢中には、血流改善成分として、米由来のヒスチジンから微生物の脱炭酸作用により生じるヒスタミン (アミノ酸誘導体) などがある[6)-13)]。

一方, 血管内皮細胞において、L-アルギニンを基質として、内皮依存性弛緩因子 (EDRF) として生成された一酸化窒素 (NO) は、抵抗血管の拡張を介し、降圧に寄与することが明らかにされている。このことは、NO 生成が減少すると、NO による血管拡張が阻害され、血管が収縮すると考えられている。各種抗酸化成分の降圧効果に関し、血液中のビタミン C、フラボノイド類などが動脈弛緩作用を有することなど知られている。

ラットにて海苔の降圧作用を確認し, その作用機序を硫酸多糖によるナトリウムの吸着および排出促進によるものと考察した報告もある。

また, ミネラルに関しては, カルシウム, カリウム, マグネシウムの摂取量と血圧値が負の関係を示すことが指摘されている。PS-H1 中には、アミノ体窒素、ペプチド、γ-アミノ酪酸、ミネラル (カリウム、マグネシウム) 及び有機酸類 (乳酸) が多く含まれており、これらが互いに作用して血圧を下げたものと考えられる。

参考文献

1) Hansson L (1999) The hypertension optimal treatment study and the importance of lowering blood pressure. *J Hypertents Suppl*, 17, S9-13.
2) 日本高血圧学会高血圧治療ガイドライン作成委員会 (2000) 高血圧治療ガイドライン2000年版, p.

25, 日本高血圧学会, 東京.

3)Maruyama S, Nakagomi K, Tomizuka N, Suzuki H (1985) Angiotensin I－converting enzyme inhibitor derived from an enzymatic hydrolysate of casein. Ⅱ、Isolation and Bradykinin－potentiating Activity on the uterus and the ileum of rats. *Agric Biol Chem* 49, 1405-1409.

4) Nakamura Y, Yamamoto N, Sakai K, Okubo A, Yamazaki S, Takano T (1995) Purifcation and characterization of angiotensin Ⅰ-converting enzyme inhibitors from sour milk. *J Dairy Sci* 78, 777－783.

5) Nakamura Y, Yamamoto N, Sakai K, Takano T 1995) Antihypertensive effect of sour milk and peptides isolated from it that are inhibitors to angiotensin I-converting enzyme. *J Dairy Sci,* 78, 1253－1257.

6)関 英治,川崎晃一,吉田真弓,茂島克裕,玉屋 圭,松井利郎, 蔑島 豊 (1999) イワシタンパク質由来ペプチドならびにValyl-Tyrosineの降圧作用. 栄食誌 52, 271-7.

7)松井利郎, 川崎晃一 (2000) 食品タンパク質由来機能性ペプチドによる血圧降下作用. 栄食誌 53, 77－85.

8)Yokoyama K, Chiba H, Yoshikawa M (1992) Peptide inhibitors for angiotensin Ⅰ－converting enzyme from thermolysin digest of dried Bonito. *Biosci Biotechnol Biochem* 56, 1541-1545.

9)Fujita H, Yoshikawa M (1999) LKPNM:aprodrug-type ACE-inhibitory peptide derived from fish protein. *Immunopharmacology* 44, 123-127.

10)Kohama Y, Matsumoto S, Oka H, Teramoto T, Okabe M, Mimura T (1988) Isolation of angiotensin －converting enzyme inhibitor from tuna muscle. *Biochem Biophys Res Commum* 155, 323-327.

11)SuetsunaK (1991) Effects of oral administration of tripeptides derived from sardine muscle, soybean and pig plasma on blood pressures in hypertensive rats , and angiotensin I -converting enzyme inhibitors. *Clin Rep* 155 249-265.

12) Sato M, Oba T, Yamaguchi T, Nakano T, Kahara T, Funayama K, Kobayashi A, Nakano T (2002) Antihypertensive effects of hydrolysates of Wakame and their angiotensin I-converting enzyme inhibitory activity. *Ann Nutr Metab* 46, 259－67.

13) Tokunaga K, Yoshida C, Suzuki K, Maruyama H, Futamura Y, Araki Y, Mishima S (2004) Anti－hypertensive effect of peptides from royal jelly in spontaneously Hypertensive Rats. *Biol Pharm Bull* 27, 189-192.

(原稿受付 2010年11月29日)

Resveratrolの高血圧ラットの血圧と血清脂質に与える影響

廣戸　美絵*、石橋源次*
九州女子大学家政学部栄養学科

Effects of Resveratrol on blood pressure and lipid metabolism in spontaneously hypertensive rats.

Yoshie HIROTO, Genji ISHIBASHI

The effects of Resveratrol on blood pressure and lipid metabolism were studied using spontaneously hypertensive rats (SHR).The animals, aged 5 weeks, were fed 20mg/kg/day Resveratrol, fellowed by 7 weeks, body weight, blood pressure and serum lipid levels were measured. Blood pressure in the Resveratrol group was significantly lower than that in the control group. Serum lipid levels, including HDL-Cho, triglyceride of Resveratrol diet rats were clearly lower than in the control group. In conclusion, our results suggest that Resveratrol, at least in part, play a role in suppression of ACE activity of SHR, and that the modulation might be associated with the attenuation of hypertension. Our study show that Resveratrol exert ACE inhibitory activity, which may contribute to the prevention of hypertention.

Keywords: *Resveratrol, blood pressure, spontaneously hypertensive rats, Angiotensin I -Converting Enzyme*

1. はじめに

今日の高齢化社会では、寝たきりや認知障害になることなく健康でかつ日常生活活動ができる“健康寿命”の延伸が求められている。特に、健康寿命と関連が深い高血圧は、動脈硬化が原因とされる冠動脈疾患や脳血管障害などの重要な危険因子である。これらの予防のために、栄養、運動、喫煙などの生活習慣の改善が極めて重要である。それゆえ、高血圧を食事成分の摂取で予防することが可能になれば、その恩恵は計りしれない。

生体内の血圧調整系にはレニン - アンギオテンシン系（昇圧系）とカリクレイン - キニン系（降圧系）があり、この両方の系に作用する酵素に肺血管内皮細胞から分泌されるアンギオテンシンⅠ変換酵素（ACE）がある。このACEの活性は血圧の調整に深く関与しており、ACE活性が阻害されれば血圧上昇作用をもつアンギオテンシンⅡの生成が阻害されると同時に、降圧作用をもつブラジキニンを代表とするキニンの分泌も阻害され、血圧上昇を予防すると考えられる。

近年、CatechinやQuercetinなど抗酸化能を有するポリフェノールが自然発症高血圧ラットの血圧上昇を抑えることが報告されている[1]。本研究の材料であるResveratrol (4,3',5'-trihydroxystilbene)は、赤ワイン中の主要なポリフェノールである。フランスのように高脂肪食にもかかわらず赤ワイン消費量の高い国では、冠動脈疾患 (CHD) による死亡数が少ないことの鍵を握る成分として注目され、抗動脈硬化成分として広く認知されている[2,3]。そのほかに、抗炎症作用、抗酸化作用が報告されている[2,4]。血圧に対しても生理的に有効な作用を示すことが期待できるために、自然発症高血圧ラットにResveratrolを投与し、血圧上昇を抑制する作用があるかどうか、ならびにその作用機序について検討した。

2. 実験方法

本研究はすべて「九州女子大学動物実験に関する指針」に従って行った。

2.1　材料

Resveratrol (4,3',5'-trihydroxystilbene) はSigmaから購入した。その他の試薬は全て分析用を用いた。

2.2　動物実験

実験動物には4週齢の雄SHR/Izmラット（自然発症高血圧ラット）を使用した。1週間予備飼育した後、各群7匹として対照群とResveratrol群（Resv群）に分けた。対照群の飼料はAIN-93組成に従って調整し、Resv群は対照群飼料にResveratrolを20 mg/kg/day添加して調整した。飼料は飲水（水道水）とともに自由摂取とした。試験開始より7週間を試験期間とした。

飼育は各群とも1ケージあたり2匹で、室温22±2℃、12時間の明暗切り替え（明期は午前8時から午

後8時、暗期は午後8時から午前8時）で飼育した。

実験期間中、2 日ごとに体重測定及び飼料摂取量の測定を行った。また、血圧測定は tail-cuff 法（加温型非観血式自動血圧測定装置 BP-98A、ソフトロン）により午前8時から9時の間で実験開始より週1回測定した。7週間の実験終了後、9時から11時にかけて絶食せずにネンブタール（ペントパルビタールナトリウム、大日本製薬）の腹腔内投与（40 mg/kg 体重）による麻酔下で腹部大動脈より全血採取し、室温にて1時間放置後、遠心分離（3000rpm、15 分間）により血清を分離した。臓器は摘出し、重量を測定した。

2.3 血清成分の分析

血清中のトリグリセライド、総コレステロール、HDL コレステロール及びリン脂質の測定は市販のキット（トリグリセライドE-テストワコー、コレステロール E-テストワコー、HDL-コレステロール E-テストワコー、リン脂質 C-テストワコー、和光純薬工業）を用いて実施した。アディポネクチン測定はマウス/ラットアディポネクチン ELISA キット（大塚製薬株式会社）を使用して測定した。

2.4 ACE 阻害活性測定

ACE Kit-WST（同仁化学研究所）を使用して ACE 阻害活性を測定した。

2.5 統計処理

実験データは平均値±標準偏差で表した。有意差の検定には Student's *t*-test を用いた。

3 実験結果

3.1 Resveratrol の自然発症高血圧ラットの体重及び臓器重量に及ぼす影響

体重の推移に各群間における差は認められなかった（図1）。実験終了時の体重は対照群 296±11 g、Resv 群 296±14 g であり、体重増加量は対照群 146±13 g、Resv 群 143±9 g であった（表1）。心臓重量、肝重量及び体重あたりの各臓器重量（%）も群間における差は認められなかった。飼育期間中における各群間の飼料摂取量に有意な差は認められなかった。

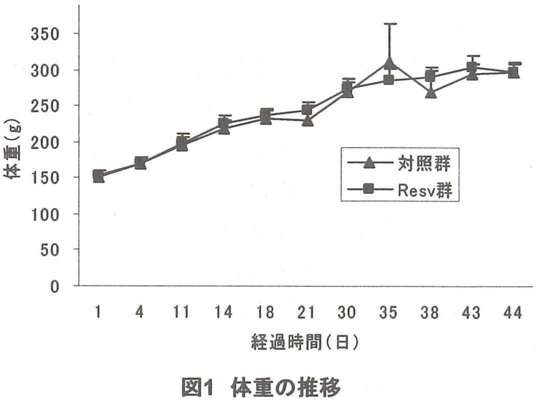


図1 体重の推移

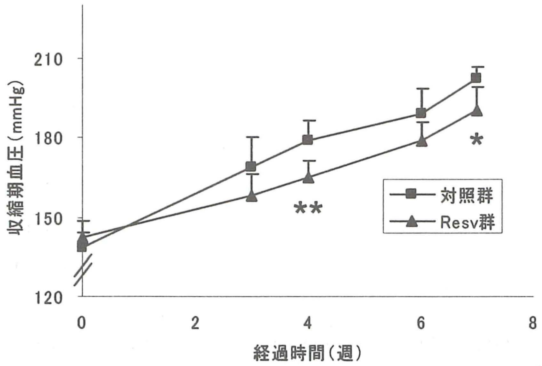


図2 収縮期血圧の推移

Significantly different from control group by Student's *t* test. (*:$p<0.05$, **:$p<0.01$)

	対照群	Resveratrol群
体重		
初体重(g)	150±6	152±7
終体重(g)	296±11	296±14
増加重(g)	146±13	143±9
肝臓		
重量(g)	14.32	13.94
重量/体重(%)	4.83	4.71
心臓		
重量(g)	1.42	1.33
重量/体重(%)	0.0047	0.0045

表1 体重増加量及び臓器重量

3.2 Resveratrol の自然発症高血圧ラットの収縮期血圧に及ぼす影響

収縮期血圧の推移を図2に示した。飼育開始時の収縮期血圧は、対照群 138±6 mmHg、Resv 群 142±7 mmHg であった。4 週目には対照群の 179±8 mmHg に対し Resv 群 165±6 mmHg と有意な低下を示し、実験終了時における収縮期血圧は、対照群 202±5 mmHg、Resv 群 190±9 mmHg であった。飼育期間中における収縮期血圧の増加は、対照群 63±3 mmHg、Resv 群 48±11 mmHg であった。約2ヶ月間 Resveratrol を投与すると、収縮期血圧の上昇が対象群と比較して有意に抑制された。

3.3 Resveratrol の血液生化学的検査値に及ぼす影響

表2にトリグリセライド、総コレステロール、HDL コ

レステロール、リン脂質、アディポネクチン、尿素窒素及び尿酸値を示した。トリグリセライドはResveratrol 投与により有意な低下を示した。総コレステロール、リン脂質及びアディポネクチンは各群間で差はなかったが、HDL コレステロールは Resveratrol 投与により有意に上昇した。尿素窒素及び尿酸値は対照群に比べて、有意に Resv 群で低い結果となった。

	対照群	Resveratrol群
TG (mg/dL)	65.5±8.0	51.9±6.3 **
T-cho (mg/dL)	74.5±7.3	68.6±8.4
HDL-cho (mg/dL)	49.7±3.7	58.9±6.8 *
PL (mg/dL)	118.7±9.6	122.3±12.2
Adiponectin (ng/dL)	120.1±15.8	120.3±11.7
BUN (mg/dL)	23.3±1.4	21.4±1.3 *
UA (mg/dL)	4.3±0.3	3.5±0.2 **

表2 Resveratrolの血液生化学的検査値に及ぼす影響
Significantly different from control group by Student's *t* test.
(*:p<0.05, **:p<0.01)

3.4 in vitro における Resveratrol の ACE 阻害活性

Resveratrol が ACE 阻害活性を有するか検討した（表3)。Resveratrol の ACE 阻害活性は 10 nM で 13.1±0.2 % であった。一方、ACE 阻害薬の 1 つである Captopril は同濃度で 96.1±1.3% であった。このことから、Resveratrol は Captopril のように強力ではないが ACE 阻害活性を有することが考えられた。

	ACE阻害活性(%)
10 nM Resveratrol	13.1±0.2
10 nM Captopril	96.1±1.3

表3 ResveratrolのACE阻害活性

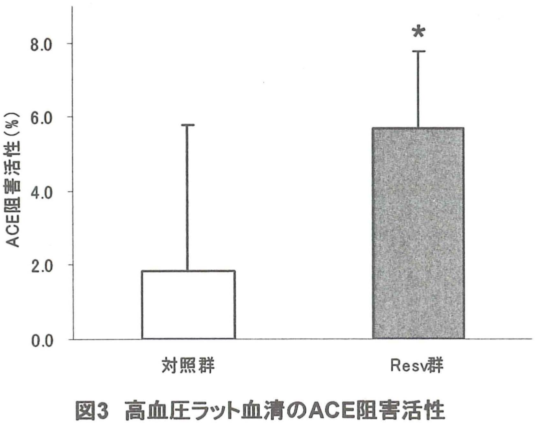


図3 高血圧ラット血清のACE阻害活性

Significantly different from control group by Student's *t* test.
(*:p<0.05)

3.5 Resveratrol 投与が自然発症高血圧ラットの血清 ACE 阻害活性に及ぼす影響

血清を使用し、血清の ACE 阻害活性（%）を測定した（図3)。ACE 阻害活性（%）は対照群 1.8±3.9%、Resv 群 5.7±2.1%であり、Resveratrol 投与により血清の ACE 阻害活性が有意に上昇した。

4. 考察

Resveratrol はブドウの果皮に含まれ、赤ワイン中の主要なポリフェノールである [5]。今回、Resveratrol 20 mg/kg/day を自然発症高血圧ラットに 7 週間経口投与し、血圧上昇に対する抑制作用を収縮期血圧の変動を指標に検討した。

その結果、対照群の収縮期血圧は、投与開始前に 138±6 mmHg を示したが、その後上昇し、投与 7 週目には 202±5 mmHg を示した。Resveratrol 投与群では、投与 4 週目及び 7 週目に対照群と比較して有意な低下が認められ、Resveratrol 投与 7 週目におよそ 15 mmHg の血圧上昇が抑制された（図2)。このことは、Resveratrol に血圧上昇抑制作用があることを示している。

一般に、血液中にトリグリセライドや総コレステロールが多く貯留することにより高脂血症となり、動脈硬化や高血圧を誘発する。HDL コレステロールは余剰のコレステロールを末梢組織から肝臓に運搬する役割を担っており、血中コレステロールを減少し、血管抵抗性を減少すると推測される。Resveratrol 投与による高血圧ラットの総コレステロール値に変化は認められなかったが、HDL コレステロールが有意に上昇した。また、腎機能低下の指標となる尿素窒素と尿酸値が対照群に比べ有意に低かった。このことから、Resveratrol は高血圧ラットの血管抵抗性を改善し、さらに腎機能の低下を防御したことが示唆された。

Resveratrol の血圧降下作用が示されたことから、この作用機序を明らかにするため、in vitro、in vivo での ACE 阻害活性の測定を行った。ACE は血圧上昇に働く重要な酵素で、アンギオテンシンⅠに作用し、血圧上昇物質であるアンギオテンシンⅡを生成すると同時に、血管拡張作用を持ち血圧を低下させるブラジキニンを分解することが知られている。Resveratrol はアンギオテンシンⅠからアンギオテンシンⅡへの変換を 10 μM で 10%阻害することが報告されており、同じポリフェノールの Kaempferol でもこの作用が認められている [6]。本実験では、10 nM Resveratrol で 13.1±0.2 % の ACE 阻害活性を認めた（表3)。さらに、自然発症高血圧ラットに Resveratrol を 7 週間投与したところ、その血清の ACE 阻害活性が対照群に比べ有意に高いこ

とを認めた。

Resveratrolの作用として、血液中のLDLコレステロールの酸化を抑制すること[7]、血小板凝集を抑制することが報告されている[8]。さらに、生体反応を担う主要分子のスーパーオキシドを消去するスーパーオキシドジスムターゼの発現を上昇させることが報告されており、抗酸化作用を有することが知られている[9]。一方、血管内皮細胞において一酸化窒素（NO）は、抵抗血管の拡張を介し、降圧に寄与することが明らかにされている。スーパーオキシドは、このNOを失活させ高血圧を惹起させることから、活性酸素を消去する抗酸化物質は血圧上昇を抑える作用を示すことが期待されている。従って、Resveratrolによる自然発症高血圧ラットの血圧上昇抑制作用機序として、HDLコレステロールの上昇による血管抵抗性の改善及びResveratrolのACE阻害活性以外に、Resveratrolの抗酸化作用も関与していることが推察される。

5. 参考文献

1. Duarte J, Perez-Palencia R, Vargas F, Ocete MA, Perez-Vizcaino F, Zarzuelo A, Tamargo J: Antihypertensive effects of the flavonoid quercetin in spontaneously hypertensive rats. *Br J Pharmacol* 2001, 133(1):117-124.
2. Das DK, Maulik N: Resveratrol in cardioprotection: a therapeutic promise of alternative medicine. *Mol Interv* 2006, 6(1):36-47.
3. Renaud S, de Lorgeril M: Wine, alcohol, platelets, and the French paradox for coronary heart disease. *Lancet* 1992, 339(8808):1523-1526.
4. Pervaiz S, Holme AL: Resveratrol: its biologic targets and functional activity. *Antioxid Redox Signal* 2009, **11**(11):2851-2897.
5. Goldberg DM, Tsang E, Karumanchiri A, Diamandis E, Soleas G, Ng E: Method to assay the concentrations of phenolic constituents of biological interest in wines. *Anal Chem* 1996, 68(10):1688-1694.
6. Olszanecki R, Bujak-Gizycka B, Madej J, Suski M, Wolkow PP, Jawien J, Korbut R: Kaempferol, but not resveratrol inhibits angiotensin converting enzyme. *J Physiol Pharmacol* 2008, 59(2):387-392.
7. Frankel EN, Waterhouse AL, Kinsella JE: Inhibition of human LDL oxidation by resveratrol. *Lancet* 1993, 341(8852):1103-1104.
8. Bertelli AA, Giovannini L, Giannessi D, Migliori M, Bernini W, Fregoni M, Bertelli A: Antiplatelet activity of synthetic and natural resveratrol in red wine. *Int J Tissue React* 1995, **17**(1):1-3.
9. Zheng Y, Liu Y, Ge J, Wang X, Liu L, Bu Z, Liu P: Resveratrol protects human lens epithelial cells against H2O2-induced oxidative stress by increasing catalase, SOD-1, and HO-1 expression. *Mol Vis* 2010, 16:1467-1474.

（原稿受付 2010年11月30日）

総体脂肪量と体脂肪分布に及ぼす最大下負荷強度による長時間自転車エルゴメーター運動の影響

渡名喜菜美*1、小宮秀一*2
*1 九州女子大学 *2 九州共立大学

Effect of prolonged sub-maximal ergometer exercise on total body fat mass and body fat distribution

Natsumi TONAKI*1and Shuichi KOMIYA*2

Abstract

The objective of this study was to examine the effects of prolonged sub-maximal ergometer exercise on total body fat loss and changes in body fat distribution. The exercise intervention consisted of at least 40 minutes ergometer exercise of moderate intensity (72.2 – 76.7 %HRmax) 3 d/wk for 2 months. Two-month data were available for 7 men and 11 women. Women showed slightly difference from baseline to 2-month changes in body weight (-0.4 kg), subcutaneous fat (-0.19 kg), and %internal fat (-1.5%), but not in the men subjects. Although a positive correlation was obtained between the decrement of internal fat mass and total cholesterol or LDL-cholesterol in women. In conclusion, this moderate-intensity exercise intervention not produced significant differences in baseline to 2-month changes in total body fat mass.

Keywords *: prolonged sub-maximal ergometer exercise , body fat distribution, internal fat , total cholesterol, LDL-cholesterol*

1. 緒言

近年，食の欧米化や外食産業の発展に伴う食生活の乱れ，加えて機械文明の発達に伴う日常生活の省力化などがもたらす相対的過食状態から肥満者が増加し，肥満が原因となる生活習慣病の罹患者や予備軍の増加が問題視されている．生活習慣病の三大要素（高血圧・糖代謝異常・脂質代謝異常）はインシュリン抵抗性を基盤に心血管疾患を引き起こすことが報告されており [1]，日本では心血管疾患・脳血管疾患による死因順位は1951年より常に上位となっている [2]．1989年，Kaplanは生活習慣病の三大要素に上半身肥満（内臓脂肪型肥満）を加えて「死の四重奏」と命名した [3]．その後，WHO（世界保健機関）が「メタボリック症候群」という名称で診断基準を発表した事により，「内臓脂肪」や「メタボリックシンドローム」に国民の意識が高揚したことは周知の事実である．その結果，国民の多くは食生活を始め運動習慣の重要性を認識し始めた [4,5]．

厚生労働省は，平成20年4月から40歳～79歳までの健康保険加入者を対象に特定健康検診を義務づけた．この特定健康検診は内臓脂肪型肥満に着目したもので，検診の結果，腹囲（臍上位）が男性85cm以上，女性90cm以上の者，または腹囲が男性85cm未満，女性90cm未満の者でBMIが25kg/m^2 以上の者のうち，血糖（空腹時血糖が100mg/dl以上，HbA1cが5.2%以上），脂質（中性脂肪150mg/dl以上，HDLコレステロール40mg/dl以下），血圧（収縮期 130mmHg 以上，拡張期85mmHg以上）のうち２項目に該当する者を対象に特定保健指導が行われるものである．

現在，肥満は，日本肥満学会の診断基準であるBMI 25 kg/m^2 以上とされている．BMIは身長と体重から肥満度を判定するものであり，体脂肪量と除脂肪量を測定し肥満を判定するものではない．

肥満には皮下脂肪型肥満と内臓脂肪型肥満があり，皮下脂肪型肥満は，皮膚と筋肉の間に存在する脂肪が多い肥満で臀部大腿部肥満とも呼ばれ，女性に多くみられる．内臓脂肪型肥満は主に腸間膜や大網に脂肪が多く蓄積する肥満で，男性に多くみられる．この内臓脂肪は，CTやMRIなどの精密機器でしか測定できない．そこで，体脂肪分布の指標であるウエスト/ヒップ比（WHR）を用いて腹部内臓脂肪の蓄積状態を評価している．これは，腹囲（臍上部囲）を臀囲で除した値で，内臓脂肪型肥満は皮下脂肪型肥満に比べてこの値が高値を示す．このWHRが高値であると，動脈硬化や高血圧などの疾病を誘発するriskが高いことも明らかにされている [6]．

相対的な過食状態から体脂肪が異常に蓄積している単純性肥満の治療は，摂取エネルギーを抑え，消費エネルギーを増やすことで体脂肪を減らすこ

とが重要である．そのためには，食事療法のみでなく運動療法を併用して体脂肪を減量する必要がある[7]．

肥満者に対する食事療法は健康に障害を与えず行うことが前提であり，食事療法だけによる急激な減量は，筋肉などの除脂肪量も減少させ，身体活動量の低下に繋がりやすい．

肥満者に対する運動療法は，運動によるエネルギー代謝の亢進，筋肉量の増加に伴う基礎代謝量の向上による消費エネルギーの増大が期待できる．そのための運動としては，有酸素性運動が効果的である．無酸素性運動は酸素を必要としない激しい運動で，エネルギーの供給源は筋肉中のグリコーゲンが主体である．しかし，有酸素性運動は酸素を必要とする運動であり，運動開始直後は筋グリコーゲンをエネルギー供給源として利用するが，運動開始 20 分以降は脂質を主なエネルギーの供給源とする．従って，有酸素性運動を長時間持続して行うことは体内脂肪を効率的に燃焼させることになる．また，無酸素性運動は脂肪燃焼を阻害する乳酸が蓄積するため，肥満の原因となる体脂肪を燃焼させるには有酸素性運動の方が効果的である．運動療法を長時間継続させるためには，無理のない運動強度で長時間持続可能な運動を行うことが重要であり，脂肪燃焼に最も効率的な運動は，最大下の 50～70％$\dot{V}o_2max$ の運動強度で最低20分以上の運動を1日置きに定期的に行うことである[8]．

有酸素性運動により体脂肪の減量，体脂肪分布の変容，血中脂質成分への影響については多くの報告がなされている[9,10]．しかし，その多くは食事療法との併用によるものが多く，運動療法のみの報告は少ない[11]．

そこで，本研究は，一般成人男女を対象とした運動教室を開講し，長時間の最大下の運動介入による形態，身体組成，血中脂質成分の変容を検討することを目的としている．

2. 方法

2．1被験者

被験者は，重篤な疾患を有していない20歳から67歳までの男女18名（男7名、女11名）で構成された．全被験者は，運動教室の介入内容と安全性について十分に説明を受け，参加の同意を書面により提出した．

2．2実験プロトコール

体脂肪量の減量，体脂肪分布の変容，及び血中コレステロール値の低下を目的とした運動教室は，2009 年 5 月から 7 月までの 2 ヶ月間，大学内の実験室で 17：00～20：00 の間に行った．運動介入は被験者 18 名を 3 グループに分け，運動前後のストレッチ，自転車エルゴメーターを用いた 40 分間の最大下有酸素性運動，及び低負荷の筋力トレーニングとしてバランスボール・エクササイズとゴムバンド・エクササイズを取り入れ週 3 回（月・水・金，総回数 21 回）行った．欠席者は，後日一週間以内に補充のトレーニングを行った．

2．3メディカルチェック

メディカルチェックは，運動実施可能の有無と運動の効果等の判定を目的として，運動教室開始前と 2 ヵ月後の運動教室終了時の 2 回実施した．測定項目は以下のとおりであり，問診，安静時医学検査（安静時血圧・安静時心電図・血液検査・尿検査），身体測定（身長・体重・胸囲・腹囲・臀囲・皮下脂肪厚・インピーダンス法による身体組成），運動負荷試験の 4 項目を実施した．

2．3．1安静時血圧測定と血液生化学分析

被験者は，測定前日の 22 時以降は絶食とし，お茶・水のみ摂取可能とした．メディカルチェック当日の早朝，収縮期血圧と拡張期血圧を測定し，早朝空腹時に採尿と採血を行い，血液生化学分析は総コレステロール，HDL－コレステロール，LDL－コレステロール，中性脂肪，血糖，HbA1c を W 臨床検査施設で分析し，Atherogenic Index（AI）は，AI＝（総コレステロール－HDL コレステロール）/ HDL コレステロールによって求めた．尿検査は尿糖，尿蛋白，潜血を試験紙法で行った．

2．3．2形態測定

身体計測は，身長，体重，胸囲，腹囲（臍上部位）と臀囲（最大囲）5 項目の測定を行った．

身長は，標準的なスタンド型身長計を用い 0.1cm 単位，体重はデジタル精密体重計を用い 0.05kg 単位，胸囲，腹囲（臍上部位），臀囲（最大囲）はスチール製メジャーを用い 0.1cm 単位で測定した．腹囲（臍上部位），臀囲（最大囲）の測定値よりウエスト/ヒップ比（WHR）を算出した．

2．3．3皮下脂肪厚の測定

皮下脂肪厚の測定は，キャリパー法により皮

下脂肪厚12部位(頬骨下縁,舌骨部,胸部:chest1,側胸部:Chest2,腹部,腰部,上腕背側部,肩甲骨下部,膝蓋部,大腿前部:Thigh1,大腿後部:thigh2,下腿部)を、キャリパーの接点に $10g/mm^2$ の一定圧がかかるようキャリブレーションされたHarpendenキャリパーを用い,0.2mm単位で行った.皮下脂肪厚は同一部位を3回測定し,3回の平均を測定値とした.

体幹皮下脂肪厚和/四肢皮下脂肪厚和は,体幹5部位(胸部,側胸部,腹部,腰部,肩甲骨下部)と四肢5部位(上腕背側部,膝蓋部,大腿前部,大腿後部,下腿部)の比として算出した.

2.3.4身体組成の測定(インピーダンス法)

身体組成はインピーダンス法によって求めた.インピーダンス測定器(電圧 $10V_{p\text{-}p}$,周波数50kHz,500μAの定電流を発するTP-202K)を用い,体脂肪量・体脂肪率・除脂肪量・総体水分量を推定した.

(1) 身体組成値の算出

皮下脂肪量(SFM)は,12部位の平均皮下脂肪厚値を2で除し,体表面積(cm^2),皮膚重量(g),脂肪比重を考慮したKomiyaら[12)]の次式を用いて算出した.

SFM(g)=(12部位の皮下脂肪厚の平均値(cm)÷2)×体表面積(cm^2)×0.9(g/cm^3)−皮膚重量

ここで,体表面積(cm^2)は藤本ら[13)]の推定式,BSA=身長(cm)$^{0.663}$×体重(kg)$^{0.444}$×88.83,皮膚重量(g)は佐竹と尾崎[14)]による推定式,SW=0.04357×体重(g)+638.3から算出し,脂肪比重=0.9(g/cm^3)とした.

体内深部脂肪量(IFM)は,インピーダンス法によって測定した総体脂肪量から皮下脂肪量を引いた値とした.すなわち,IFM(kg)=総体脂肪量(kg)−SFM(kg)である.

BMIは体重を身長(m)の二乗で除して算出した.

(2) 脂肪量指数:FMI,除脂肪量指数:FFMI

FMIとFFMIは,BMIと概念が同じであるため,BMIと同様に下記の式によって算出した.

脂肪量指数(FMI)=総体脂肪量(kg)/身長(m^2)

除脂肪量指数(FFMI)=除脂肪量(kg)/身長(m^2)

(3) ウエスト・ヒップ比(WHR)

臍上腹囲を最大臀囲で除して算出した.(WHR=腹囲/臀囲)

2.3.5運動負荷試験と最大酸素摂取量の推定

モナーク社製の自転車エルゴメーターを用い,1負荷3分間の3段階負荷斬増法によって運動負荷試験を行った.

(1) 最大酸素摂取量($\dot{V}o_2max$)の算出

各被験者のHRmaxを求め,運動負荷試験時の負荷強度(kp)と各負荷3分目の心拍数(HR)から導いた回帰式を用いHRmax時のkp(HRmax-kp)を算出,HRmax-kpを自転車エルゴメーター効率式y=536.810x+325.000のxに代入し最大酸素摂取量y=(ml/kg/min)を推定した.

(2) 運動負荷強度の決定

上記の $\dot{V}o_2max$ 測定時における負荷(kp)と各負荷終了時の心拍数(HR)との回帰式から,運動処方強度は,その回帰式に各被験者の65%から80%HRmaxまでに相当する心拍数を代入し,その時の運動強度kpを体力レベル($\dot{V}o_2max$)に応じて決定した.

統計的分析法

測定値は,全て平均(Mean)±標準偏差(SD)で示し,平均値間の有意差検定はStatView for Windows Version 4.5を用いて分散分析によって行い,有意水準は5%未満とした.

3.結果

図1は,40分間の自転車エルゴメータ運動における平均心拍数の推移を示している。男性の平均負荷強度は2.0kp,72.2%HRmaxに相当し、平均心拍数は122拍/分であった。女性のそれらは,それぞれ,1.5kp,76.7%HRmax,133拍/分に相当した.全被験者のトレーニング実施率は91.8%(全21回)であった.

表1は,被験者の年齢と身体計測値を平均値と標準偏差で示し,平均値間の性差と運動教室前後における平均値間の差を検定した結果である.年齢と介入後の臀囲を除いて人体計測値の平均値間には全て有意な性差が認められた.運動介入によって男性の体重とBMIを除いて男女共に全ての項目で減少したが,いずれも統計的に有

意な差ではなかった。

表 2 は，12 部位の皮下脂肪厚測定値について，表 1 と同様に比較したものである．男女共に介入前後における皮下脂肪厚の変化は大きくはないが，体幹 5 部位の皮下脂肪厚の和の減少が大きく，男性で-2.3mm，女性で-3.4mm であった．

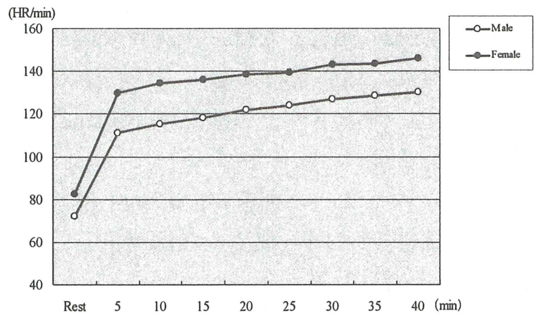


Fig.1 Average heart rates during 40-min bicycle exercise

Table1. The physical characteristics at pre and post training of male and female subjects

	Males (n=7)		*difference*	Females (n=11)		*difference*	*gender difference*	*gender difference*
	Mean±SD		*p*	Mean±SD		*p*	*p*	*p*
	Pre	Post		Pre	Post		*Pre*	*Post*
Age,yr	50 ± 17	50±17	*ns*	38±15	38±15	*ns*	*ns*	*ns*
Height,cm	167.8 ± 6.1	167.8±6.1	*ns*	156.3±4.1	156.3±4.1	*ns*	$p<0.001$	$p<0.001$
Weight,kg	66.64 ± 8.14	66.69±8.67	*ns*	52.43±5.32	52.03±5.03	*ns*	$p<0.001$	$p<0.001$
Body mass index,kg/m^2	23.60 ± 2.15	23.61±2.23	*ns*	21.46±1.88	21.29±1.77	*ns*	$p<0.05$	$p<0.05$
Chest Girth,cm	92.4 ± 3.9	91.4±3.8	*ns*	83.5±4.4	82.6±4.9	*ns*	$p<0.001$	$p<0.01$
Waist Girth,cm	80.7 ± 8.4	79.3±7.9	*ns*	69.9±6.1	69.9±6.6	*ns*	$p<0.01$	$p<0.05$
Hip Girth,cm	95.1 ± 4.1	93.4±5.4	*ns*	89.3±4.1	89.3±4.2	*ns*	$p<0.01$	*ns*
Waist to hip ratio	0.847 ± 0.063	0.847±0.041	*ns*	0.782 ±0.042	0.782±0.051	*ns*	$p<0.05$	$p<0.05$

Table2. Characteristics of the skinfold thickness at pre and post training

	Males (n=7)		*difference*	Females (n=11)		*difference*	*gender difference*	*gender difference*
	Mean±SD		*p*	Mean±SD		*p*	*p*	*p*
	Pre	Post		Pre	Post		*Pre*	*Post*
Cheek,mm	13.2 ±1.5	12.9 ± 1.5	*ns*	15.1 ± 1.7	15.2 ±1.7	*ns*	$p<0.05$	$p<0.05$
Chin,mm	4.7 ±1.5	4.8 ± 1.4	*ns*	7.0 ± 1.7	6.8 ±1.6	*ns*	$p<0.01$	$p<0.05$
Chest1,mm	14.9 ±3.0	14.6 ± 2.2	*ns*	13.1 ± 4.4	13.1 ±3.6	*ns*	*ns*	*ns*
Chest2,mm	12.2 ±2.1	11.8 ± 2.6	*ns*	13.3 ± 3.6	13.6 ±3.9	*ns*	*ns*	*ns*
Abdomen,mm	15.4 ±3.7	15.0 ± 3.5	*ns*	20.8 ± 4.4	19.6 ±3.7	*ns*	$p<0.05$	$p<0.05$
Suprailliac,mm	13.1 ±4.9	12.3 ± 5.0	*ns*	18.6 ± 5.9	16.8 ±5.0	*ns*	*ns*	*ns*
Triceps,mm	11.6 ±4.2	11.7 ± 4.0	*ns*	16.5 ± 3.6	16.3 ±3.5	*ns*	$p<0.05$	$p<0.05$
Subscapular,mm	16.5 ±3.8	16.3 ± 3.7	*ns*	16.9 ± 5.3	16.4 ±5.1	*ns*	*ns*	*ns*
Knee,mm	7.5 ±1.9	7.8 ± 1.9	*ns*	13.4 ± 4.4	13.4 ±4.3	*ns*	$p<0.01$	$p<0.01$
Thigh1,mm	11.4 ±3.8	11.4 ± 3.5	*ns*	22.4 ± 4.1	22.4 ±4.1	*ns*	$p<0.001$	$p<0.001$
Thigh2,mm	10.7 ±4.2	10.6 ± 3.7	*ns*	19.8 ± 5.4	20.4 ±5.0	*ns*	$p<0.01$	$p<0.001$
Calf,mm	6.5 ±3.5	6.6 ± 3.2	*ns*	13.8 ± 4.2	13.9 ±4.4	*ns*	$p<0.01$	$p<0.01$
Average of skinfolds thickness,mm	11.5 ±2.4	11.3 ± 2.3	*ns*	15.9 ± 3.1	15.7 ±2.9	*ns*	$p<0.01$	$p<0.01$
Sum of 5 trunk skinfolds thickness,mm	72.2 ±14.3	69.9 ± 13.8	*ns*	82.8 ± 19.7	79.4 ±18.0	*ns*	*ns*	*ns*
Sum of 5 extremity skinfolds thickness,mm	47.8 ±15.9	48.0 ± 14.5	*ns*	85.9 ± 16.9	86.5 ±16.4	*ns*	$p<0.001$	$p<0.001$
Ratio of trunk to extremity skinfolds,mm/mm	1.6 ±0.3	1.5 ± 0.3	*ns*	1.0 ± 0.1	0.9 ±0.1	*ns*	$p<0.001$	$p<0.001$

Chest1 : diagonal fold just superior and lateral to the nipple,Chest2 : vertical fold on the midaxillary line at the level of the xiphoid prosess,Thigh1 : vertical fold on the anterior aspect of the thigh widway between the superior aspect of the patella and anterior superior iliac spine,Thigh2 : vertical fold on the posterior aspect of the thigh,trunk : chest＋chest2＋abdomen＋Suprailliac＋Subscapular,extremity : Triceps＋Knee＋Thigh1＋Thigh2＋Calf,

中でも腰部の皮下脂肪厚の減少が男女共に大きくそれぞれ-0.8mm と-1.8mm であった．しかし，四肢 5 部位の皮下脂肪厚和は男女共に減少しなかった．

図 2 は 12 部位の皮下脂肪厚の運動介入における変化率を平均値で示したものである．男女共に腰部における減少が大きく，Pre 値に対して男性-6.1%，女性-9.7%の低下で特に女性の減少が大きかった．女性では腹部の減少も大きく，男女間で比較すると女性が-1.2mm(-5.8%)，男性が-0.4mm(-2.4%)と女性は男性の約 3 倍の減少を示した．

表 3 は，身体組成の介入前後における平均値と標準偏差を示している．男女共通して大きな

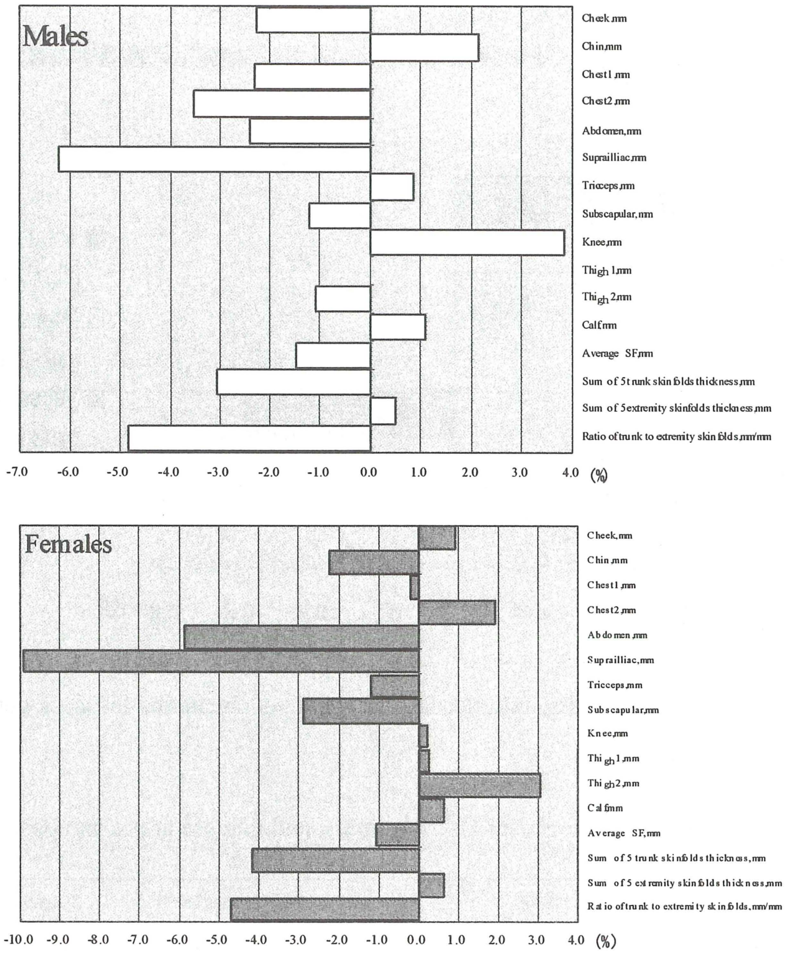


Fig.2 Changing ratio in skinfold thickness at post training

Table3. Characteristics of adiposity indices at pre and post training

	Males (n=7)		*difference*	Females (n=11)		*difference*	*gender difference*	*gender difference*
	Mean±SD		*p*	Mean±SD		*p*	*p*	*p*
	Pre	Post		Pre	Post		*Pre*	*Post*
Total body fat mass,kg	11.9 ± 4.2	12.6 ±4.3	*ns*	13.7±4.1	13.0±3.8	*ns*	*ns*	*ns*
Fat-free mass,kg	54.7 ± 5.3	54.2 ±5.9	*ns*	38.8±2.2	39.0±2.5	*ns*	*p*<0.001	*p*<0.001
Subcutaneous fat mass,kg	5.38 ± 1.98	5.23 ±1.90	*ns*	7.65±2.29	7.46±2.13	*ns*	*p*<0.05	*p*<0.05
Internal fat mass,kg	6.56 ± 2.56	7.28 ±2.98	*ns*	6.02±2.27	5.59±2.35	*ns*	*ns*	*ns*
Fat mass index,kg/m2	4.22 ± 1.42	4.43 ±1.48	*ns*	5.58±1.57	5.32±1.48	*ns*	*ns*	*ns*
Fat-free mass index,kg/m2	19.38 ± 1.20	19.18 ±1.15	*ns*	15.88±0.82	15.97±0.98	*ns*	*p*<0.001	*p*<0.001
Percent of body fat,%	17.6 ± 4.6	18.5 ±4.7	*ns*	25.7±5.4	24.7±5.3	*ns*	*p*<0.01	*p*<0.05
Percent subcutaneous fat, %	45.2 ± 8.6	42.5 ±10.8	*ns*	56.2±7.7	57.7±10.1	*ns*	*p*<0.05	*p*<0.01
Percent internal fat, %	54.8 ± 8.6	57.5 ±10.8	*ns*	43.8±7.7	42.3±10.1	*ns*	*p*<0.05	*p*<0.01

変化はみられなかったが，男性では，皮下脂肪量の割合が-2.7%低下し，女性では体内深部脂肪量の占める割合が-1.5%低くなった．

図3は，総体脂肪量（TBFM）を皮下脂肪量（SFM）と体内深部脂肪量（IFM）に分割し，運動介入前後の変化量をみたものである．女性の体脂肪は運動介入前後で体内深部脂肪量の差が約-0.4kgと皮下脂肪量の差が約-0.2kgの減少で，総体脂肪量は約-0.7kgの減少であった．しかし，男性はSFMが-0.15kg減少したにも関わらず，IFMが0.72kgと大きく増加したため，TBFMは0.57kgの増加になった．

表4は，運動介入前後における血圧と血液成分の平均値と標準偏差を示している．介入前で

は，女性の中性脂肪と血糖値が男性より有意に低く，血糖値は介入後でも，有意に低い値を示した．運動介入前の総コレステロール（T-ch），LDL-コレステロール（LDL-ch）は，男女共通して平均値は正常値の範囲内にあったが全体として高い傾向を示し，男性3名，女性4名に異常値がみられた．

図4は運動介入前後における SFM と IFM の

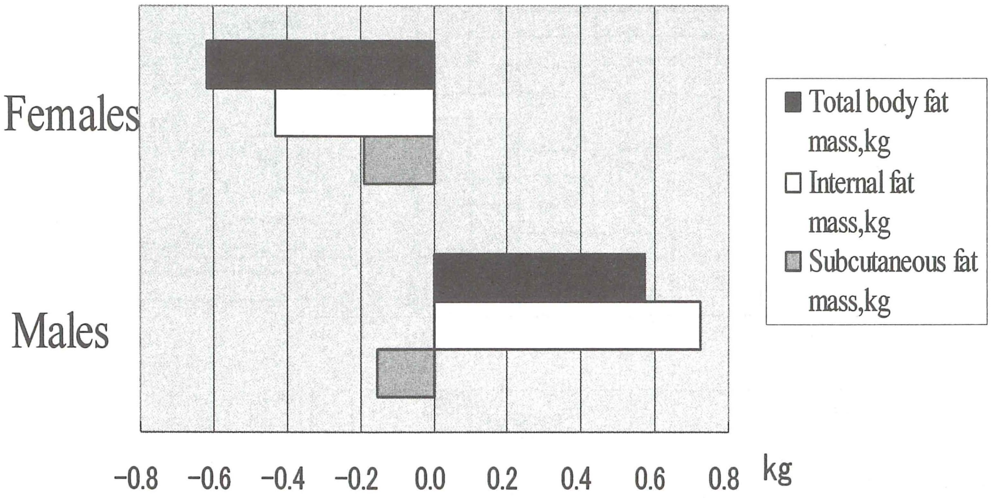


Fig.3 Differences in total body fat mass, internal fat mass and subcutaneous fat mass between pre and post training

Table4.　Changes in blood pressure, serum lipids, and glucose at pre and post training

	Males (n=7) Mean±SD		*difference* p	Females (n=11) Mean±SD		*difference* p	*gender difference* p	*gender difference* p
	Pre	Post		Pre	Post		*Pre*	*Post*
Systolic blood pressure,mmHg	122 ± 8	118 ± 15	*ns*	114 ± 11	108 ± 9	*ns*	*ns*	*ns*
Diastolic blood pressure,mmHg	79 ± 11	83 ± 16	*ns*	74 ± 10	74 ± 9	*ns*	*ns*	*ns*
Total cholesterol,mg/dl	215 ± 36	201 ± 32	*ns*	213 ± 26	200 ± 27	*ns*	*ns*	*ns*
HDL-cholesterol,mg/dl	60 ± 11	60 ± 12	*ns*	68 ± 10	65 ± 8	*ns*	*ns*	*ns*
LDL-cholesterol,mg/dl	139 ± 40	117 ± 33	*ns*	134 ± 22	116 ± 23	*ns*	*ns*	*ns*
Triglyceride,mg/dl	75 ± 12	81 ± 39	*ns*	58 ± 19	58 ± 13	*ns*	$p<0.05$	*ns*
Fasting blood glucose,mg/dl	93 ± 7	94 ± 8	*ns*	86 ± 7	84 ± 5	*ns*	$p<0.05$	$p<0.01$
Hemoglobin A1c ,%	5.3 ± 0.3	5.3 ± 0.3	*ns*	5.0 ± 0.5	5.0 ± 0.4	*ns*	*ns*	*ns*
Atherogenic Index	2.73 ± 1.10	2.49 ± 0.87	*ns*	2.17 ± 0.42	2.10 ± 0.43	*ns*	*ns*	*ns*

変化量と T-ch，LDL-ch，HDL-ch の変化量を示している。男女共に T-ch と LDL-ch は若干低下傾向にあったが，HDL-ch にほとんど変化はみられなかった．しかし，女性の T-ch と LDL-ch の低下は IFM の低下に連動する傾向にあった．

4. 考察

本研究は，一般成人男女を対象に長時間の最大下負荷による有酸素性運動を行うことによって，形態，身体組成，体脂肪分布，血中脂質成分の変容を検討することを目的とした．その結果，運動介入による体重と体脂肪の減少はわずかであったが，体幹5部位の皮下脂肪厚和は大きな減少がみられ，特に女性の腹部と腰部における皮下脂肪厚の減少は男性に比べて大きく，腹部で3.0倍，腰部で2.3倍の減少であった．

また，男女ともに皮下脂肪量に男性で-0.15kg，女性で-0.19kg の減少がみられた．女性では，総体脂肪量と体内深部脂肪の減少もみられ，総体脂肪量は-0.7kg，体内深部脂肪は-0.43kg，総体脂肪量中に占める体内深部脂肪の割合は43.8%から42.3%へと-1.5%の低下を示した．

増田ら[11]は，肥満女性を対象に，40分間以上の歩行運動を92日間，毎日行った結果，総体脂肪量で-4.9kg，皮下脂肪量で-3.0kg，体内深部脂肪量で-1.8kg の減少を認め，有酸素性運動に

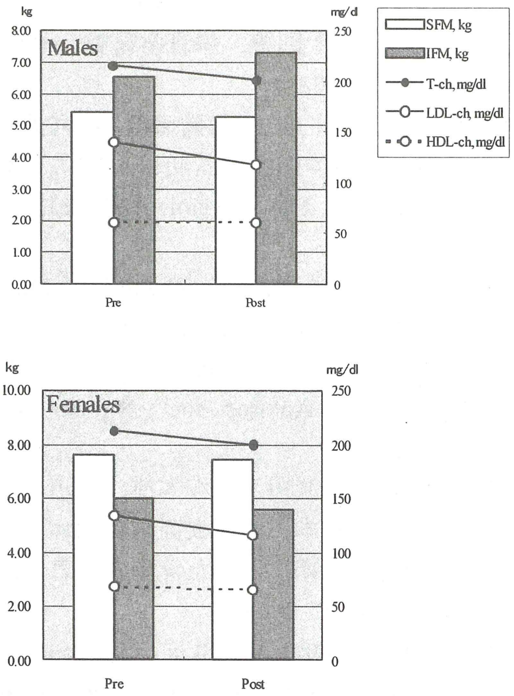


Fig.4 Changes in SFM, IFM and serum cholesterol at pre and post in exercise intervention subjects

よる総体脂肪量と体内深部脂肪量の減少間に有意な相関関係があることを報告している．また，田中ら[15]は男女各8名を対象に週6日のウォーキングと週3日の自転車運動を12週間継続して行い，体脂肪分布の変化を検討した結果，皮下脂肪量は男女共に-0.9kg，体内深部脂肪量は男性で-1.6kg，女性で-1.7kg減少し，皮下脂肪量より体内深部脂肪量の減少の方が大きかったことを報告している．本研究でも，体重減少や総体脂肪量に大きな減少はみられなかったが，女性では皮下脂肪量より体内深部脂肪量の減少の方が大きいという結果がみられ，これまでの研究報告と一致した．これにより，77%HRmaxに相当する負荷強度による長時間運動が女性の体内深部脂肪の減少に影響を及ぼすことが確認できた．

体脂肪量減少に効果がある有酸素性運動と基礎代謝量の維持，増進に効果のある筋力運動を併用することで，血清コレステロール値を低下させることは可能である．前田ら[16]は，肥満中年女性を対象に，自転車エルゴメーターを用いた45分間の有酸素性運動とトレーニングマシンやゴムバンドを使用した筋力運動を週5回，10週間行い，その間，1日の食事は1800kcalになるように，自己管理させた結果，体脂肪量が-2.0kg，総コレステロールは平均-14.8mg/dl，LDL-コレステロールは平均-9.5mg/dl低下したと報告している．本研究では，7週間，週3回の有酸素性運動と筋力運動を行った結果，総コレステロールが男性-14mg/dl，女性-13 mg/dl，LDLコレステロールは男性-22mg/dl，女性-18mg/dlという低下がみられた．また，動脈硬化の危険因子である総コレステロールが220mg/dl以上，LDLコレステロール120mg/dl以上[17]に該当する者が運動介入前で7名だったのが介入後は3名に減少した。

これらのことから，長時間の最大下負荷による有酸素性運動を行うと，総コレステロールとLDLコレステロールが低下することが確認できた．男女共に，総体脂肪量の変化と血中コレステロールの変化との間に有意な相関はみられなかったが，女性では，総コレステロールとLDLコレステロールの低下が，体内深部脂肪量の減少と連動することが認められた．

増田ら[11]や，田中ら[16]の報告は，本研究より体内脂肪量の減少が大きく，体重も大きな減少を示してもいる．これは，増田ら[11]，田中ら[15]の研究が週6日～毎日の運動を12週以上実施しているのに対して本研究では運動介入が1日おきの週3回，7週間と実施回数が少なく，短期間であったため体重や体脂肪量の減少が小さかったものと考えられる．また、今回の実験で男性の運動介入前後の変化が女性ほどみられなかったのは，男性の負荷強度が低かったこと，また，体脂肪率の初期値が女性より低かったことなども考えられる．

本研究は，運動介入のみによる検討であったが，今後は，長時間の最大下負荷の有酸素性運動と適切な食事療法を併用することにより体脂肪分布や体組成及び血清脂質への影響も検討する必要がある．

謝辞

本研究を終えるにあたり，被験者として実験に参加していただいた18名の皆様に心よりお礼を申し上げます．また，本研究は，九州共立大学スポーツ学部小宮研究室との共同研究であり，石原勇次郎，岩田祥孝，河村瑞姫，陶山俊介各君に被験者の募集から運動負荷の設定、及び測定で多大なる協力を得ました．ここに記して深甚なる謝意を表します．

参考文献

[1] Reaven GM. Role of insulin resistance in human disease. Diabetes, 37: 1595–1607, 1988

[2] 厚生労働省発，心疾患ー脳血管疾患死亡統計の概況人口動態統計特殊報告．2006

[3] Kaplan NM. The deadly quartet, Upper-body obesity, glucose intolerance, hyper-triglyceridemia, and hypertension. Arch Intern Med, 149 : 1514–1520, 1989

[4] 厚生労働省．平成16年国民健康・栄養調査報告．第一出版，179，2006

[5] 厚生労働省．平成18年国民健康・栄養調査報告．第一出版，214，2008

[6] Lapidus L, Bengtsson C, Larsson B, et al. Distribution of adipose tissue and risk of cardiovascular disease and death: a 12 year follow up of participants in the population study of women in Gothenburg, Sweden. Br Med J, 289 : 1257-1261, 1984

[7] 魏丞完，田中喜代次，中田由夫，李東俊，大河原一憲，藤村透子．食事療法と運動療法の併用が肥満女性の内臓脂肪に及ぼす効果：VO_2maxの増加度からみた検討．体力科学，53(3)：311-319，2004

[8] 小宮秀一．からだにたまる脂肪の不思議ーたまるは易くへらすは難しー．不昧堂出版，1998

[9] 笹井浩行，片山靖富，沼尾成晴，中田由夫，田中喜代次．中年肥満男性における運動実践が内臓脂肪に及ぼす影響：食事改善との比較．体力科学 57(1), 89-99, 2008

[10] 大藏倫博，重松良祐，中田由夫，坂井智明，李東俊，中田喜代次．減量食品を使用した低エネルギー食療法と有酸素運動が内臓脂肪型肥満女性の体組成，脂肪分布，体力に及ぼす影響．体育学研究，48(3)：269-279，2003

[11] 増田隆，今井克己，村岡康博，小宮秀一．肥満女性の体内深部脂肪に及ぼす有酸素運動の効果．Ann. physiol. Anthrop12 (1)：25-30，1992

[12] Komiya S, Muraoka Y, Zhang F-S, Masuda T. Age-related changes in body fat distribution in middle-aged and elderly Japanese. J Anthrop soc Nippon 100 : 161-169

[13] 藤本薫喜，渡辺孟，坂本淳，湯川幸一，森本和枝．日本人の体表面積に関する研究 第18編 三期まとめた算出式．日衛誌，23：443-450，1968

[14] Satake T. Ozaki T. Skin and subcutaneous adipose tissue weight in older Japanese determined by cadaver dissection . Am J Hum Biol, 9 : 371-376

[15] 田中茂穂，戸部秀之，甲田道子．有酸素運動の継続による体脂肪分布の変化．体力科学，42(6)：686， 1993

[16] 前田有美，横山典子，久野譜也．肥満女性における複合トレーニングの実施が身体的および精神的要素に及ぼす効果．女性心身医学，12(3)：481-491，2007

[17] 嶋津孝，下田妙子．臨床栄養学ー疾病編ー．化学同人，111，2004

（原稿受付 2010年12月4日）

幼児の数・量・図形感覚を高める活動，及び家庭のかかわりの基礎的調査研究

藤渕　明宏
九州女子短期大学・初等教育科

The fundamental investigation research to ask the activities to raise a sense of a number and quantity and the figure of infants, and the relations of the family to that .

Akihiro FUJIBUCHI,

Abstract
A purpose of the studies is to find activity to make the sense of "a number and quantity and the figure"better for an infant in the home.What is the important factor? As a result, "a custom of basic life" in the home is important. In addition, for an infant, I understood that much play was important..

Keywords: *A n infant,The sense to a number and quantity and the figure,A factor, A custom of basic life, Play, Activity*

1. 研究の目的と方法

1. 1 研究の動機

幼児期は，心情，意欲，態度，基本的生活習慣など，生涯にわたる人間形成の基礎が培われる極めて大切な時期であり，この時期の教育は，子どもの心身の健やかな成長を促す上で極めて重要なものである。

そのような中で，算数・数学の向上が叫ばれているが，その基礎は，就学前の幼児の時期が重要であると考えている。本研究は，幼児がどのように「数」というものを認識するかをみるために，附属幼稚園における就学前の幼児を観察もしてきた。

また，ベネッセによる調査によると，国語・文字の学習に加え最近では，図 1-1 のように，家庭における「数や算数の学習をする」割合が増加している傾向があるとのことである[1]。

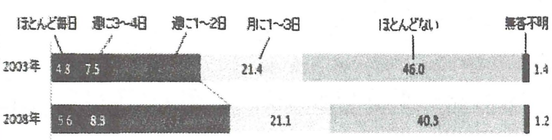


図 1-1 数や算数の学習をする（経年比較）　(%)

しかし，本研究は，そのような枠組みによる”教え”でなく，普段の生活行動の中で数・量・図形の感覚が小学校就学に応じられるまでに自然体でつくられていくものと考える。

たしかに熊本市城南町において，ある大学と連携研究において小学校入学前後の接続期の幼児対象に「かずの遊びから楽しい算数へ」へのなめらかな接続をすすめるための教育内容を研究している例がある[2]。

1. 2 研究の目的

本研究の目的は，家庭における幼児にとって，数・量・図形感覚を高める活動を見出し，その活動の重要な因子は何か。潜在的な因子抽出などを試み，今後の家庭教育に資したく，以下の課題を設定する。

【課題 1】

幼児の家庭を中心とした日常生活で行っている数・量・図形かかわる活動内容をあげ，それらの中で，どのような項目・因子が，成長発達段階に応じて数・量・図形感覚育成に効果的に作用しているかを調べる。

【課題 2】

課題 1 であげた活動と幼児の日常の朝食摂取等の基本的な生活習慣の項目・因子を見出し，数・量・図形感覚育成とのかかわりを探る。

【課題 3】

家庭における数・量・図形感覚育成への在り方を検討する。

1. 3 研究の方法

上記の課題に対して，以下の方法をとる。

【方法 1】

家庭での基本的な生活習慣にかかわる項目を洗い出す。また小学校学習指導要領[3]における小学校低学年

の「数と計算」,「量と測定」,「図形」,「数量関係」の４領域の内容から検討した素地経験と家庭における日常生活において考えられる数・量・図形感覚にかかわる幼児の活動をあげる。それをもとに質問項目を設定(表2-1参照)し,保護者対象にアンケート調査を行う。

【方法2】

その保護者アンケート実施のデータをもとに，幼児の発達段階をも取り入れた因子分析及び数量化Ⅲ類によって分析を行う。

それは次のような要領で行う。

・保護者アンケートのデータから，幼児の年齢を月数(以下，月年齢と称する)に換算して全数及び4段階にわけ，それぞれ因子分析手法で因子を抽出し，それらを一つの表にまとめて考察を進める。

・上記の保護者アンケートのデータから，全データの数量化Ⅲ類の分析を行い，その結果と先の因子分析の結果とを参照しながらまとめる。

1.4 研究の意義

本研究では，幼児が与えられた「体験」をできる・できないは問題でないと考える。ここで，その「体験」に対して，正解・不正解を問題にすると，早期教育となってしまう。

本研究の目指すは，あくまでも数・量・図形等の感覚を高める家庭教育での様々な活動の中から，小学校以降の算数・数学学習の素地経験となるものを見出すことである。その背景には，子どもを支える何らかの家庭の配慮があるものと考える。それは何の因子か，その抽出の見出しにも本研究の意義を持ちたい。

2. 調査用紙設定及び実施

2.1 保護者アンケートの内容

本研究で報告する「保護者アンケート」は以下の内容を項目内容としている。

ｉ）フェイスシート（何歳何月・・月年齢，性別）

ⅱ）基本的習慣から

- 朝食摂取
- 褒める構え
- ＴＶ・ゲーム時間
- 自分朝起床
- 洗顔
- 自分着替え可
- 欲求制御可
- 読み聞かせ可
- 自分後片付け

ⅲ）小学校算数科４領域から

その中のⅱ）は，教育力向上福岡県民会議の「子どもの現状等に関するデータ」[4]を参考にしている。

ⅲ）は，尾崎[5]を参考にし，質問項目を，小学校学習指導要領から４領域において,「数と計算」を「数」,「量と測定」と「数量関係」の領域を「量」と括り,そして「図形」３つに分け，表2-1において，それぞれに対応するように表示している。やや「数」領域に偏りが見られるようだが,今後研究を進めていきたい。

表2-1 基本的生活習慣・算数科各領域等一覧

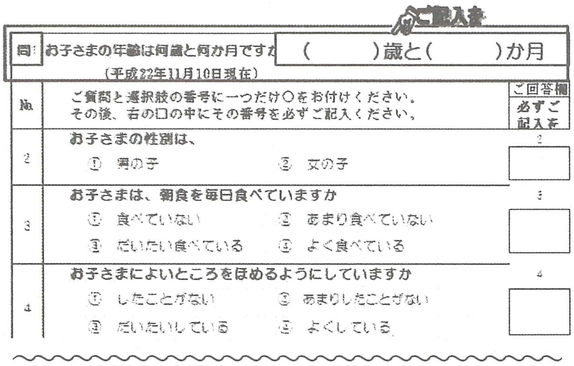
	生活	数	量	図形
1何歳何月	＼	＼	＼	＼
2性別	＼	＼	＼	＼
3毎日朝食摂取	○			
4良い褒める構え	○			
5園帰宅後TV等時間	○			
6朝起床自らか	○			
7朝自分で洗顔歯磨き	○			
8自分で着替え可能	○			
9欲しいもの我慢可能	○			
10絵本の登場するものへ大小称				○
11風呂で数称するか		○		
12家で読み聞かせ聞くこと可か	○	○	○	○
13おやつなど公平に分けること可か		○	○	○
14階段上り下りで数称するか		○		
15絵本のイラストなど数称しているか		○		○
16共に料理をした経験は		○	○	○
17家で砂遊びしているか		○	○	○
18家で水遊びしているか		○	○	
19家で折り紙することが				○
20ジグソーパズル経験				○
21メダカ・犬などのペット世話経験		○	○	○
22ブロック・積木遊びしているか		○	○	○
23葉っぱ・花弁など収集・飾り経験は		○		○
24粘土遊びの経験			○	○
25絵本を読んだり,見たりしているか		○	○	○
26しりとり遊び経験は		○		
27トランプ・すごろく遊びしているか		○		
28ままごと・買物遊びしているか		○	○	○
29指で自分の歳を示して		○		
30家でアナログ時計を見ることは		○		○
31自分で代金払う買物させているか		○	○	
32家でお絵描き遊びしているか		○		○
33お家の人と歌唱しているか		○		
34鋏・糊等使用の紙工作しているか		○		○
35家でかくれんぼ・鬼ごっこ遊びは		○		
36数称はいくつまで		○		
37お菓子5個から3個とるとの計算可		○		
38ブランコで数称したことあるか		○		
39柱にしるし付けの背比べは		○	○	
40自分から後片付けは	○			
41数字はいくつまで書けるか		○		
42お絵描き中に丸・□形・△形を描くか				○
[illegible]	9	27	12	18

なお，質問紙は図2-1のように，月年齢，性別以外は，４選択肢，また表 2-1「基本的生活習慣・算数科各領域一覧」のように項目42で構成している。

2.2 アンケートの実施

次に保護者アンケートの実施対象は，今回は予備調

査を兼ねていることもあり，九州女子大学附属の２幼


ご記入を

問1	お子さまの年齢は何歳と何か月ですか（平成22年11月10日現在）	(　　)歳と(　　)か月
№	ご質問と選択肢の番号に一つだけ○をお付けください。その後、右の□の中にその番号を必ずご記入ください。	ご回答欄 必ずご記入を
2	お子さまの性別は、 ① 男の子 ② 女の子	2
3	お子さまは、朝食を毎日食べていますか ① 食べていない ② あまり食べていない ③ だいたい食べている ④ よく食べている	3
4	お子さまによいところをほめるようにしていますか ① したことがない ② あまりしたことがない ③ だいたいしている ④ よくしている	4

図2-1 保護者アンケート項目の一部

稚園（自由ヶ丘・折尾）の保護者計326名を対象に無記名で園児を通して配布・回収を行った。なお同保護者に複数の園児の場合は，上年齢の園児を対象にした。

その回収率は，76.7%であった。

そのデータには２歳児前後の保育児も含まれていたが，度数が10名と少なく分析には無理があると判断し，今回は対象外とした。

表2-2 月年齢の度数分布表

1 年齢	（数量）		
カテゴリ	件数	（全体）%	（除不）%
29～36	7	2.8	2.8
36～43	3	1.2	1.2
43～50	27	10.8	10.8
50～57	34	13.6	13.6
57～64	56	22.4	22.4
64～71	53	21.2	21.2
71 以上	70	28	28
不明	0	0	
サンプル数（%ベース）	250	100	250

また，表2-1の項目１「月年齢」で欠損値１があり，それも排除した。ケース240で分析に臨んだ。

本研究では，幼児の年齢を歳・月を記入方式の数量によるデータであったが，表2-3のように240名を９か月ごとの度数分布で１～４の４選択肢に変換し，他の質問項目（４選択肢）と同等に扱い処理を進めた。

さらに，性別は，男子を１，女子を３として月年齢と同様にデータとして取り入れた。

表2-3 本研究分析対象「月年齢」件数表

№	カテゴリ	件数	（全体）%	（除不）%
1	43～52月	39	16.3	16.3
2	52～61月	54	22.5	22.5
3	61～70月	69	28.7	28.7
4	70～79月	78	32.5	32.5
	不明	0	0.0	
	サンプル数（%ベース）	240	100.0	240

3. アンケート分析

3.1　全度数による因子分析

3.1.1　因子抽出項目決定

まず，全度数の記述統計量を算出した。その結果において，全体的に値が右に偏り，42 質問項目のうち，床効果は，1 項目のみであったが，しかし，多くの天井効果をみた（表 3-1）。それは，多くの項目が，保護者の行き届いた幼児への教育が営まわれていることと解釈でき，肯定的に保護者は回答したものと考える。これでは，プラス方向に偏った項目であるため，これらは分析には不適だが，一般的には平均＋標準偏差が４以上を削除するところ，本研究では4.1より大きい項目を抜いて，表3-2のように26項目で分析を進めることにした。

表3-1 全度数での天井・床効果判定表

	度数	最小値	最大値	平均値	標準偏差	M-SD	M+SD	削除
1何歳何月	240	1	4	2.78	1.07	1.70	3.85	1
2性別	240	1	3	2.01	1.00	1.01	3.01	2
3毎日朝食摂取	240	1	4	3.59	0.65	2.94	4.23	3
4良い褒める構え	240	1	4	3.48	0.55	2.93	4.03	4
5園帰宅後TV等時間	240	1	4	2.58	0.95	1.63	3.53	5
6朝起床自らか	240	1	4	2.66	0.90	1.76	3.56	6
7朝自分で洗顔歯磨き	240	1	4	3.03	0.92	2.11	3.95	7
8自分で着替え可能	240	1	4	3.30	0.79	2.50	4.09	8
9欲しいもの我慢可能	240	1	4	2.93	0.76	2.18	3.69	9
10絵本の登場するものへ大小称	237	1	4	2.92	0.92	2.01	3.84	10
11風呂で数称するか	240	1	4	3.58	0.74	2.83	4.32	11
12家で読み聞かせ聞くこと可か	240	1	4	3.45	0.72	2.74	4.17	12
13おやつなど公平に分けること可か	240	1	4	3.07	0.71	2.36	3.78	13
14階段上り下りで数称するか	240	1	4	2.41	0.96	1.45	3.37	14
15絵本のイラストなど数称しているか	239	1	4	2.96	0.87	2.09	3.83	15
16共に料理をした経験は	240	1	4	2.20	0.79	1.41	2.99	16
17家で砂遊びしているか	239	1	4	2.04	0.94	1.10	2.98	17
18家で水遊びしているか	240	1	4	3.50	0.70	2.81	4.20	18
19家で折り紙することが	239	1	4	3.05	0.94	2.11	3.99	19
20ジグソーパズル経験	240	1	4	3.23	0.91	2.32	4.14	20
21メダカ・犬などのペット世話経験	239	1	4	1.73	0.99	0.74	2.73	21
22ブロック・積木遊びしているか	240	1	4	3.32	0.83	2.49	4.14	22
23葉っぱ・花弁など収集・飾り経験は	239	1	4	3.25	0.84	2.41	4.09	23
24粘土遊びの経験	240	1	4	2.63	0.90	1.72	3.53	24
25絵本を読んだり、見たりしているか	240	1	4	3.58	0.68	2.89	4.26	25
26しりとり遊び経験は	240	1	4	3.20	1.00	2.20	4.20	26
27トランプ・すごろく遊びしているか	240	1	4	2.70	1.10	1.60	3.80	27
28ままごと・買物遊びしているか	240	1	4	3.28	0.87	2.40	4.15	28
29指で自分の歳を示して	239	1	4	3.53	0.83	2.70	4.36	29
30家でアナログ時計を見ることは	239	1	4	3.30	0.93	2.37	4.23	30
31自分で代金払う買物させているか	240	1	4	2.58	0.93	1.65	3.51	31
32家でお絵描き遊びしているか	240	1	4	3.58	0.67	2.92	4.25	32
33お家の人と歌唱しているか	240	1	4	3.68	0.56	3.13	4.24	33
34鋏・糊等使用の紙工作しているか	240	1	4	3.63	0.68	2.94	4.31	34
35家でかくれんぼ・鬼ごっこ遊びは	240	1	4	3.19	0.92	2.27	4.11	35
36数称はいくつまで	240	2	4	3.33	0.76	2.57	4.08	36
37お菓子5個から3個とるとの計算可	239	1	4	2.93	0.96	1.97	3.89	37
38ブランコで数称したことあるか	240	1	4	2.10	0.91	1.20	3.01	38
39柱にしるし付けの背比べは	240	1	4	2.10	1.09	1.01	3.18	39
40自分から後片付けは	240	1	4	2.73	0.81	1.92	3.54	40
41数字はいくつまで書けるか	240	1	4	2.87	1.17	1.70	4.04	41
42お絵描き中に丸・ロ形・△形を描くか	240	1	4	3.21	0.85	2.36	4.06	42
	232	←有効なケースの数（リストごと）					変数計	26

表 3-2 全度数での天井・床効果削除後の項目一覧表

	生活	数	量	図形
1何歳何月				
2性別				
4良い褒める構え	○			
5園帰宅後TV等時間	○			
6朝起床自らか	○			
7朝自分で洗顔歯磨き	○			
8自分で着替え可能	○			
9欲しいもの我慢可能	○			
10絵本の登場するものへ大小称				○
13おやつなど公平に分けること可か		○	○	○
14階段上り下りで数称するか		○		
15絵本のイラストなど数称しているか		○		○
16共に料理をした経験は		○	○	○
17家で砂遊びしているか		○	○	○
19家で折り紙することが				○
23葉っぱ・花弁など収集・飾り経験は		○		○
24粘土遊びの経験			○	○
27トランプ・すごろく遊びしているか		○		
31自分で代金払う買物させているか		○	○	
36数称はいくつまで		○		
37お菓子5個から3個とるとの計算可		○		
38ブランコで数称したことあるか		○		
39柱にしるし付けの背比べは		○	○	
40自分から後片付けは	○			
41数字はいくつまで書けるか		○		
42お絵描き中に丸・ロ形・△形を描くか				○
[illegible]	7	13	6	9

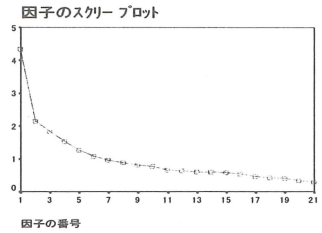


図 3-1 全度数でのスクリープロット

表 3-4 全度数での因子相関行列

因子相関行列						
因子	1	2	3	4	5	6
1	1.000	0.269	0.294	0.213	0.195	0.098
2	0.269	1.000	0.393	0.304	0.463	−0.184
3	0.294	0.393	1.000	0.477	0.328	0.032
4	0.213	0.304	0.477	1.000	0.187	−0.073
5	0.195	0.463	0.328	0.187	1.000	−0.123
6	0.098	−0.184	0.032	−0.073	−0.123	1.000
因子抽出法: 主因子法　回転法: Kaiser の正規化を伴うプロマックス法						

3.1.2　因子数決定と因子の析出

図3-1及び固有値から判断し，因子分析を進め表3-3のように6因子が析出された。

表 3-3　全度数による因子分析の結果

	因子					
	1	2	3	4	5	6
1何歳何月	0.821	−0.131	−0.088	0.074	0.008	−0.067
41数字はいくつまで書けるか	0.759	−0.037	0.080	−0.010	0.161	−0.094
37お菓子5個から3個とるとの計算可	0.720	0.052	0.031	0.001	0.058	0.008
36数称はいくつまで	0.709	−0.049	0.104	−0.035	−0.092	−0.097
27トランプ・すごろく遊びしているか	0.451	0.250	−0.153	0.109	−0.082	0.149
31自分で代金払う買物させているか	0.280	0.096	0.076	−0.203	0.192	0.041
19家で折り紙することが	0.117	0.726	0.120	−0.067	−0.113	0.045
23葉っぱ・花弁など収集・飾り経験は	−0.002	0.629	−0.027	−0.059	−0.014	0.077
24粘土遊びの経験	−0.006	0.551	−0.159	0.117	−0.077	0.120
17家で砂遊びしているか	−0.110	0.443	0.085	−0.172	−0.051	0.128
42お絵描き中に丸・ロ形・△形を描くか	0.163	0.269	−0.054	0.054	0.191	0.120
13おやつなど公平に分けること可か	0.102	0.088	0.609	−0.032	−0.110	0.103
9欲しいもの我慢可能	0.015	−0.001	0.578	0.099	−0.180	0.024
40自分から後片付けは	−0.080	−0.133	0.568	0.143	0.194	0.032
8自分で着替え可能	0.071	−0.077	0.064	0.877	−0.101	0.113
7朝自分で洗顔歯磨き	−0.024	−0.024	0.118	0.510	0.061	−0.013
14階段上り下りで数称するか	−0.057	−0.204	−0.016	−0.021	0.659	0.312
38ブランコで数称したことあるか	0.120	0.021	−0.101	−0.023	0.578	−0.025
15絵本のイラストなど数称しているか	−0.024	0.201	0.048	0.069	0.302	0.589
2性別	−0.139	0.409	0.020	0.156	0.196	−0.464
10絵本の登場するものへ大小称	−0.133	0.206	0.085	0.080	0.042	0.413
因子抽出法: 主因子法　回転法: Kaiser の正規化を伴うプロマックス法						

1　因子抽出法‥主因子法
2　因子数6決定基準‥固有値1.0以上
3　回転法‥プロマックス法
4　削除項目数‥21
5　項目削除基準‥各項目の共通性1.1以下

3.1.3　因子の命名

第1因子は，「月年齢」に応じて「数称」「数字書き」「簡単な計算」「買物」などを期待する「数感覚発達」因子と命名した。

また，第2因子は，「折り紙」「飾り物作り」「粘土遊び」「砂遊び」「形づくり」などから「形作り遊び」因子と命名した。

第3因子は「公平さ」「我慢」「後片付け」から「自律忍耐力」因子とした。

さらに第4因子は，「自律行動力」因子。第5因子は「遊び数称」因子。第6因子は「絵本数称」因子と命名した。

これらの相互の解釈は，第4章等において行う。

なお，それらのクロンバックα係数（各因子の信頼性係数）は，0.8以上が好ましいが，第2～4因子は，その許容範囲と見なした。第5・6因子も本研究の数感覚等にかかわる因子として残した（表3-5）。

表 3-5 全度数因子分析のα係

第1因子「数感覚発達」は、0.83
第2因子「形作り遊び」は、0.65
第3因子「自律忍耐力」は、0.67
第4因子「自律行動力」は、0.67
第5因子「遊び数称」は、0.42
第6因子「絵本数称」は、0.47

3.2　月年齢第１段階(43～52 か月)の因子分析

3.2.1　因子抽出項目決定

度数は，４段階の中で 39 と最も少ない。不安定な分析になるが全体的な解釈を進めるためにも進めた。

この段階も全数と同じようにまず全項目の天井・床効果を算出し 4.1 以上と 0.9 以下の項目を除いた。

その後の１回目の因子分析の各項目の共通性の 1.0 以下はなくそのまま分析を進めた。

3.2.2　因子数決定

固有値が 1.3 以上の因子が８個（表 3-6 及び図 3-2 参照）と多くを数えたが，各因子の項目数が１個程度と少なく６因子に決定した。

表 3-6　月年齢第１段階の固

因子	初期の固有値 合計	分散の %	累積 %
1	6.382	22.009	22.009
2	2.623	9.045	31.054
3	2.513	8.664	39.718
4	2.271	7.832	47.549
5	1.908	6.579	54.128
6	1.616	5.573	59.701
7	1.493	5.149	64.850

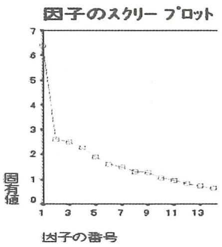


図 3-2

・相関行列は省略した。

表 3-7 月年齢第１段階因子分析表

パターン行列(年齢1段階)

	因子 1	2	3	4	5	6
19家で折り紙することが	0.791	−0.068	0.091	−0.074	0.031	−0.027
31自分で代金払う買物させているか	0.656	−0.060	−0.287	−0.108	0.008	0.029
2性別	0.611	0.227	0.043	−0.056	−0.193	0.025
16共に料理をした経験は	0.583	0.241	−0.087	−0.256	0.106	−0.106
17家で砂遊びしているか	0.570	0.142	0.145	−0.366	−0.146	−0.046
42お絵描き中に丸・口形・△形を描くか	0.567	−0.017	0.093	−0.021	−0.087	−0.078
23葉っぱ・花弁など収集・飾り経験は	0.518	−0.060	0.075	−0.113	0.090	0.241
37お菓子5個から3個とるとの計算可	0.464	0.222	0.048	0.037	0.211	0.393
39柱にしるし付けの背比べは	0.450	−0.184	0.035	0.422	−0.073	0.393
13おやつなど公平に分けること可か	0.436	−0.195	0.025	0.350	0.158	−0.154
24粘土遊びの経験	−0.065	0.769	−0.406	0.346	−0.097	0.137
8自分で着替え可能	−0.083	0.764	0.364	0.097	−0.066	0.219
27トランプ・すごろく遊びしているか	0.322	0.456	−0.073	0.144	−0.278	−0.124
26しりとり遊び経験は	0.096	0.446	0.236	−0.166	0.110	−0.042
41数字はいくつまで書けるか	0.393	0.404	0.101	0.037	−0.012	−0.059
36数称はいくつまで	0.023	0.043	0.639	−0.040	−0.054	−0.036
40自分から後片付けは	0.290	−0.064	0.565	0.314	−0.170	−0.213
7朝自分で洗顔歯磨き	0.093	0.360	0.527	−0.003	0.069	0.004
9欲しいもの我慢可能	−0.067	−0.017	0.502	0.136	0.340	0.032
10絵本の登場するものへ大小称	−0.223	0.144	−0.196	0.817	0.140	−0.125
15絵本のイラストなど数称しているか	−0.198	0.364	0.218	0.568	0.019	−0.074
14階段上り下りで数称するか	−0.186	0.079	0.200	0.503	0.009	−0.172
30家でアナログ時計を見ることは	−0.141	−0.186	0.063	0.044	0.804	0.089
5園帰宅後TV等時間	0.175	0.124	−0.065	0.190	0.693	−0.142
6朝起床自らか	−0.278	−0.077	0.289	−0.177	0.336	0.008
38ブランコで数称したことあるか	0.190	0.209	0.176	0.216	0.301	0.059
20ジグソーパズル経験	0.272	0.048	−0.225	−0.096	0.106	0.507

因子抽出法: 主因子法　回転法: Kaiser の正規化を伴うプロマックス法

1　因子抽出法‥主因子法
2　因子数６決定基準‥固有値 1.6 以上
3　回転法‥プロマックス法
4　削除項目数‥15
5　項目削除基準‥各項目の共通性 1.1 以下

3.2.3　因子の命名

第１因子は，「折り紙」「買物」「料理」「砂遊び」など多様な遊び・活動に関するものが多いので，「多様な遊び」因子と命名した。

第２因子も，同様に遊びが多い。やや第１因子に比して因子負荷量が低いので，「これまた遊び」因子と名付けた。

第３因子は，「後片付け」「我慢」「洗顔」という自己の意志の強さを意味しているので「意志忍耐力」因子とした。

第４因子は，低年齢の頃の様子が見えるので「数・形称え」因子とした。

第５因子は，「時計」「ＴＶ時間」「朝起床」などから保護者の教え・導きが見える「時間規律」因子とした。

第６因子は１項目のため除外した。

表 3-8 月年齢第１段階のα係数

第１因子「多様な遊び」は、0.83
第２因子「これまた遊び」は、0.65
第３因子「意志忍耐力」は、0.67
第４因子「数・形称え」は、0.67
第５因子「時間規律」は、0.42

3.3　月年齢２段階(52～61 か月)の因子分析

3.3.1　因子抽出項目決定

度数 54，記述統計量から天井・床効果を算出し，天井効果は 4.1 より大，床効果は，0.9 未満の項目を除いた（表 3-9）。

その項目は，3, 11, 18, 20, 21, 25, 29, 30, 32, 33, 34, 39 の 13 項目。

表 3-9 月年齢第２段階の記述統計量の一部

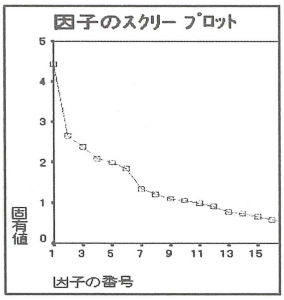
記述統計量(年齢2段階)	度数	最小値	最大値	平均値	標準偏差	M-SD	M+SD
2性別	54	1	3	1.778	0.984	0.794	2.762
3毎日朝食摂取	54	1	4	3.667	0.644	3.022	4.311
4良い褒める構え	54	2	4	3.481	0.574	2.907	4.056
5園帰宅後TV等時間	54	1	4	2.685	0.820	1.865	3.505
6朝起床自らか	54	1	4	2.741	0.851	1.890	3.592
7朝自分で洗顔歯磨き	54	1	4	2.889	0.945	1.944	3.834
8自分で着替え可能	54	1	4	3.259	0.828	2.431	4.088

3.3.2　因子数決定

その後の因子分析で各項目の共通性 1.0 以下を基準にして，因子分析を行った。それでは因子数が，固有値 1.0 以上 10 個と多く抽出されたが，図 3-3 の因子のスクリープロットを参考に６個と決め，更に因子分析を進めた結果が表 3-10 である。

図3-3 第2段階

スクリープロット



1 因子抽出法‥主因子法
2 因子数6決定基準‥固有値1.8以上 (図○からも判断)
3 回転法‥プロマックス法
4 削除項目数‥17
5 項目削除基準‥各項目の共通性1.1以下

表3-10 第2段階 因子分析表

パターン行列(2回で終了)	年齢2段階					
	因子					
	1	2	3	4	5	6
27トランプ・すごろく遊びしているか	0.660	−0.090	−0.168	0.002	0.009	0.060
16共に料理をした経験は	0.658	0.050	0.084	−0.021	−0.253	0.285
26しりとり遊び経験は	0.643	0.075	0.069	0.116	−0.043	0.133
36数称はいくつまで	0.554	0.142	−0.180	0.309	0.074	−0.073
28ままごと・買物遊びしているか	0.544	0.109	0.258	−0.102	−0.068	−0.138
40自分から後片付けは	−0.113	0.740	0.131	−0.007	−0.109	0.154
13おやつなど公平に分けること可か	0.357	0.699	−0.087	−0.029	−0.130	0.004
9欲しいもの我慢可能	0.042	0.545	−0.085	0.104	0.133	−0.258
8自分で着替え可能	−0.180	0.442	−0.062	−0.206	0.312	0.001
12家で読み聞かせ聞くこと可か	−0.119	0.235	0.878	0.003	−0.278	−0.058
4良い褒める構え	−0.276	−0.125	0.498	0.078	0.213	0.303
5園帰宅後TV等時間	−0.216	0.128	0.428	0.316	−0.013	−0.222
17家で砂遊びしているか	0.127	−0.059	0.426	0.070	−0.039	−0.013
23葉っぱ・花弁など収集・飾り経験は	0.329	−0.291	0.382	−0.228	0.149	0.072
24粘土遊びの経験	0.178	−0.217	0.346	0.089	0.211	0.006
41数字はいくつまで書けるか	0.240	0.317	−0.014	0.439	0.131	0.033
37お菓子5個から3個とるとの計算可	0.063	−0.009	0.090	0.382	0.109	0.190
31自分で代金払う買物させているか	0.146	0.112	0.206	0.378	−0.214	0.349
42お絵描き中に丸・口形・△形を描くか	−0.106	0.010	−0.116	−0.110	0.830	0.051
19家で折り紙することが	0.248	−0.019	0.245	0.306	0.563	−0.125
15絵本のイラストなど数称しているか	−0.083	0.269	−0.053	0.143	0.507	0.465
14階段上り下りで数称するか	0.027	0.183	−0.074	−0.049	0.030	0.660
38ブランコで数称したことあるか	0.082	−0.243	0.032	0.190	−0.027	0.503
22ブロック・積木遊びしているか	0.207	−0.112	−0.138	−0.271	0.047	0.327
35家でかくれんぼ・鬼ごっこ遊びは	0.250	−0.060	0.002	−0.007	0.071	0.307
因子抽出法: 主因子法 回転法: Kaiserの正規化を伴うプロマックス法						

3.3.3 因子の命名

第1因子は,「トランプ」「料理」「しりとり」「ままごと」などの遊びに関する項目が多いことから「多様な遊び」因子と命名した。

第2因子は,「後片付け」「公平さ」「我慢」「着替え」などから生活を制御する力と考え「生活規律」因子と命名した。

第3因子は,「読み聞かせ聞くこと可」「褒めの構え」などから「家庭融和遊び」因子と命名した。

第4因子は「計算」「数字書き」「買物」から計算や数の操作に関心が高まっている様子が見えることから「計算への関心」因子と名付けた。

第5因子は,「折り紙」「○,□形描き」「イラスト」から図形への関心が高まっていると判断し「図形への関心」因子とした。

第6因子は,「階段数称」「ブランコ数称」などから「数称の高まり」因子した。

なお,各因子の信頼性係数は表3-11の通りだが第5・6因子が弱い。

表3-11 第2段階α係数

第1因子「多様な遊び」は、0.61
第2因子「生活規律」は、0.67
第3因子「家庭融和遊び」は、0.52
第4因子「計算への関心」は、0.67
第5因子「図形への関心」は、0.54
第6因子「数称の高まり」は、0.38

3.4 月年齢3段階(61~70か月)の因子分析

3.4.1 因子抽出項目決定

度数69,記述統計量から天井・床効果を算出し,天井効果は4.1より大,床効果は,0.9未満の項目を除いた(表3-12)。その項目は,3,8,11,12,18,20,21,22,23,25,26,28,29,30,32,33,3435,69の18項目。

表3-12 第3段階 天井・床効果表の一部

記述統計量	度数	最小値	最大値	平均値	標準偏差	M-SD	M+SD
2性別	69	1	3	2.159	0.994	1.165	3.154
3毎日朝食摂取	69	2	4	3.652	0.538	3.115	4.190
4良い褒める構え	69	3	4	3.522	0.503	3.019	4.025
5園帰宅後TV等時間	69	1	4	2.623	1.030	1.593	3.654
6朝起床自らか	69	1	4	2.681	0.866	1.815	3.547
7朝自分で洗顔歯磨き	69	1	4	3.058	0.906	2.152	3.964

3.4.2 因子数決定

その後の因子分析で各項目の共通性1.0以下を基準にして,因子分析を行った。それでは因子数が8個(固有値1.0以上)と多く抽出されたが,図3-4の因子のスクリープロットなどを参考に5個と決め,更に各項目の共通性1.0以上に留意しながら,因子分析を進めた結果が,表3-13である。

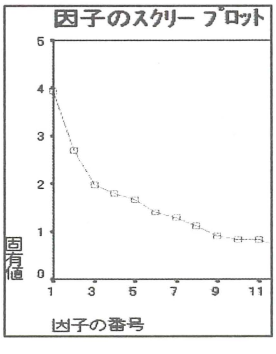


図3-4 第3段階

表3-13 月年齢第3段階因子分析表

	因子					
	1	2	3	4	5	6
15絵本のイラストなど数称しているか	0.727	−0.081	0.188	−0.034	−0.104	−0.085
4良い褒める構え	0.537	0.009	−0.014	−0.088	0.221	0.081
10絵本の登場するものへ大小称	0.527	−0.001	0.070	−0.174	0.171	−0.049
17家で砂遊びしているか	0.504	0.180	−0.311	−0.154	0.320	−0.026
19家で折り紙することが	0.493	−0.036	0.149	0.483	0.098	0.192
42お絵描き中に丸・ロ形・△形を描くか	0.464	−0.271	−0.044	0.290	−0.143	0.007
37お菓子5個から3個とるとの計算可	0.255	0.213	−0.057	0.202	−0.092	0.234
31自分で代金払う買物させているか	0.073	0.718	−0.059	−0.217	−0.285	0.015
16共に料理をした経験は	−0.324	0.698	0.085	0.001	0.299	0.202
41数字はいくつまで書けるか	−0.047	0.550	0.177	0.240	−0.259	0.129
21メダカ・犬などのペット世話経験	0.017	0.422	−0.045	−0.028	0.044	−0.137
13おやつなど公平に分けること可か	0.078	0.342	0.722	−0.112	−0.019	0.041
38ブランコで数称したことあるか	0.015	0.273	−0.606	0.339	−0.090	−0.025
9欲しいもの我慢可能	0.121	−0.007	0.556	0.053	0.119	−0.025
14階段上り下りで数称するか	0.300	0.243	−0.366	−0.112	−0.169	−0.087
2性別	−0.271	−0.098	−0.177	1.072	0.034	−0.182
24粘土遊びの経験	0.135	0.132	−0.003	0.296	0.254	0.247
6朝起床自らか	0.069	−0.266	0.255	0.000	0.635	0.039
7朝自分で洗顔歯磨き	0.058	0.025	0.150	0.096	0.534	−0.076
5園帰宅後TV等時間	0.145	−0.064	−0.036	−0.034	0.400	−0.043
39柱にしるし付けの背比べは	0.020	0.195	−0.340	0.087	0.372	−0.185
40自分から後片付けは	0.124	0.339	0.331	0.153	0.100	−0.735
27トランプ・すごろく遊びしているか	0.013	0.104	0.150	−0.060	−0.055	0.555

1 因子抽出法‥主因子法
2 因子数6決定基準‥固有値1.8以上（図○からも判断）
3 回転法‥プロマックス法
4 削除項目数‥19
5 項目削除基準‥各項目の共通性1.1以下

3.4.3 因子の命名

第1因子は,「イラスト」「大小」「砂遊び」「折り紙」「○,△描」「計算」「褒め」などから「算数と家族交流」因子と名付けた。

第2因子は,「買物」「料理」「世話」から「家族からの学び」因子と名付けた。

第3因子は,「公平」「ブランコ数称」「我慢」などから「ふれあい数称」因子とした。

第4因子は，意外にも女の子のほうが活発に粘土遊びをしている（危険率P<0.01）ことから「女子粘土遊び」因子とした。

第5因子は,「朝起床」「歯磨き」「TV」から「生活規律」因子とした。

第6因子は，信頼性指数が0.0(表3-14)と乏しく，棄却した。

表3-14 第3段階α係数

第1因子「算数と家族交流」は、0.70
第2因子「家族からの学び」は、0.59
第3因子「ふれあい数称」は、0.30
第4因子「女子粘土遊び」は、0.46
第5因子「生活規律」は、0.54
第6因子は、α係数0.0、よって棄却

3.5 月年齢4段階(70～79か月)の因子分析

3.5.1 因子抽出項目決定

度数78，記述統計量から天井・床効果を算出し，天井効果は4.1より大，床効果は，0.9未満の項目を除いた。その項目は，3, 8, 11, 12, 18, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 37, 41, 42の20項目にのぼる。

3.5.2 因子数決定

その後，各項目の共通性1.0以下を基準にして，因子分析を行った。因子は，各固有値1.0以上8個と抽出されたが,図3-5の因子のスクリープロットを参考に6個と決め，各項目の共通性1.0以上も確かめつつ，因子分析を進めた。

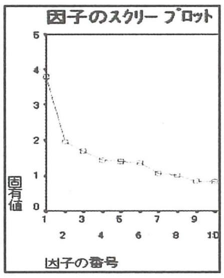


図3-5 第4段階

その因子分析の最終結果が表3-15である。

3.5.3 因子の命名

第1因子は,「階段数称」「イラスト数称」「料理」「ブランコ数称」「大小」から就学直前の「算数への構え」因子とした。

第2因子は,「背比べ」「公平」「我慢」「褒め」「粘土」から「家族とのかかわり」因子とした。

表3-15 月年齢第4段階の因子分析表

	因子					
	1	2	3	4	5	6
14階段上り下りで数称するか	0.722	−0.463	−0.060	0.102	0.107	0.222
15絵本のイラストなど数称しているか	0.613	−0.006	−0.138	−0.133	0.089	0.019
16共に料理をした経験は	0.553	0.207	0.108	0.106	0.072	0.219
38ブランコで数称したことあるか	0.540	0.049	0.155	−0.044	−0.261	0.303
10絵本の登場するものへ大小称	0.377	0.307	−0.263	−0.075	−0.240	−0.127
39柱にしるし付けの背比べは	−0.087	0.617	0.006	−0.094	−0.008	0.120
13おやつなど公平に分けること可か	−0.040	0.565	−0.002	0.057	0.195	0.254
9欲しいもの我慢可能	0.004	0.478	0.064	0.376	−0.211	−0.109
4良い褒める構え	−0.006	0.390	0.082	−0.089	0.126	−0.114
24粘土遊びの経験	−0.070	0.385	0.028	0.081	0.352	0.074
2性別	−0.128	0.067	0.972	0.122	−0.075	0.000
28ままごと・買物遊びしているか	0.469	−0.072	0.478	−0.173	0.050	−0.147
7朝自分で洗顔歯磨き	−0.205	−0.051	0.082	0.701	0.124	0.031
5園帰宅後TV等時間	0.117	−0.332	0.051	0.482	−0.002	−0.387
40自分から後片付けは	0.258	0.202	0.147	0.389	0.101	−0.057
21メダカ・犬などのペット世話経験	0.169	0.193	−0.307	0.373	0.132	0.012
27トランプ・すごろく遊びしているか	−0.040	−0.024	−0.123	0.226	0.515	−0.066
17家で砂遊びしているか	0.176	0.123	0.030	−0.079	0.467	0.164
31自分で代金払う買物させているか	0.243	0.108	−0.026	−0.083	0.068	0.534
35家でかくれんぼ・鬼ごっこ遊びは	0.123	0.298	0.046	−0.150	0.269	−0.373
因子抽出法: 主因子法 回転法: Kaiser の正規化を伴うプロマックス法						

1 因子抽出法‥主因子法
2 因子数6決定基準‥固有値1.3以上（図○からも判断）
3 回転法‥プロマックス法
4 削除項目数‥19

表3-16 第4段階α係数

第1因子「算数への構え」α係数0.55
第2因子「家族とのかかわり」α係数0.44
第3因子「女子のごっこ遊び」α係数0.65
第4因子「生活規律」α係数0.36
第5因子「家での遊び」α係数0.15
第6因子「家族とのふれあい」α係数0.27

第3因子は，「性別」「ままごと」（クロス：女子＞男子 P<.001）から「女子のごっこ遊び」因子とした。

第4因子は，「生活規律」とした。

第5因子は，「トランプ」「砂遊び」から「家での遊び」因子とした。

第6因子は，「買物」「鬼ごっこ」から「家族とのふれあい」因子とした。

α係数は，第5・6因子がやや弱い(表3-16)。

4. 各段階の因子分析まとめと考察

表4-1 各月年齢での因子の命名一覧表

月年齢	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子	第5因子	第6因子
43~52	多様な遊び	これまた遊び	意志忍耐力	数・形称え	時間規律	
52~61	多様な遊び	生活規律	家族との融和遊び	計算への関心	図形への関心	数称の高まり
61~70	算数と家族交流	家族からの学び	ふれあい数称	生活規律	女子粘土遊び	
70~79	算数への構え	家族とのかかわり	女子のごっこ遊び	生活規律	家での遊び	家族とのふれあい
全段階	数感覚発達	形づくり遊び	自律忍耐力	自律行動力	遊び数称	絵本数称

これまで5つの因子分析で抽出された因子名を月年齢の小から大へと順に並べて，表4-1のように整理してみた。生活・心情にかかわるセルに網掛けを施している。

その中で，月年齢が小の場合は「遊び」の意味合いの因子が前に並び，中から大へと「家族とのふれあい」「温かい雰囲気」などが重みを増しているようにとれる。注目されるのは70～79カ月の段階になると小学校就学前への構えからか算数的な要素が子どもの周りに増えていることがうかがえた。

すべてのケース(有効232度数)をトータルした因子分析では「数感覚発達」と「形づくり遊び」が前の因子となり，それらを支えるかのように「自律忍耐力」「自律行動力」が続く。この2つの因子は，各月年齢段階の総称的な意味合いもあり，そして子どもたちが数・量・図形感覚を高めていく柱にもなっていることがうかがえた。それらは各段階の因子名が「ふれあい」「生活規律」「家族とのかかわり」などの意味合いを含んでいて，これらが核となって豊かな数・量・図形感覚の育ちへの力になっていることがうかがえた。

このことは次の数量化Ⅲ類の分析をまって最終考察を行いたい。

5. 数量化Ⅲ類による分析

5.1 数量化Ⅲ類への準備

まず，データは，因子分析で用いた天井効果・床効果を除いた232のデータを，次のように変換した。

各項目4選択肢であった1と2を0，3と4を1と変換し，すべてを1/0データとした。

5.2 数量化Ⅲ類の出力

2軸を出力するよう設定したところ表5-1のようになり，第1軸と第2軸の固有値(表 5-2)から，分析が許容されると判断した。

表5-1 数量化Ⅲ類出力カテゴリ数量表

数量化Ⅲ類 カテゴリ数量（天井・床効果項目除く）		
カテゴリ	第1軸	第2軸
2性別	3.646	−0.842
6朝自分で起きますか	1.441	0.714
14階段上りで数えるか	0.878	0.146
4よいところをほめているか	0.602	−0.008
10絵本の登場ものを大小を言うか	0.536	0.686
5お家でゲーム・TVの時間は	0.314	0.885
42○△口を取り入れて描いているか	0.273	0.185
8自分で着替えできるか	0.195	0.041
13お菓子などを公平にわけることができるか	0.151	−0.024
9ほしいものを我慢できるか	0.108	0.339
7朝、自分で洗面ができるか	0.087	0.291
36数をいくつまで数えるか	0.065	−0.631
15絵本のイラストを数えるか	0.045	0.221
17お家で砂遊びをしているか	−0.023	5.187
31代金を払う買い物をさせているか	−0.093	−0.789
40自分から後片付けをしているか	−0.250	0.209
23葉っぱ・花弁を集め・飾ったりは	−0.257	0.577
1年齢	−0.346	−1.830
37 5個から3個取ると2個という計算が	−0.405	−1.343
41いくつまでの数字を書くことができるか	−0.493	−1.485
27トランプ・すごろくをしているか	−0.525	−0.937
24粘土遊びはしていたか	−0.564	1.323
19折り紙をするか	−0.707	0.775
39柱などでの背比べをしているか	−1.208	−0.608
38お子様はブランコのとき数えているか	−3.281	−0.573
16お子様と料理をするか	−3.295	1.164

まず，第1軸と第2軸を交差させてみるとき，それぞれの軸の特長を感じることができるようである。

表5-2 数量化Ⅲ類 固有値など

	固有値	寄与率	累積寄与率	相関係数
第1軸	0.0639	9.85%	9.85%	0.2527
第2軸	0.0562	8.67%	18.53%	0.2371

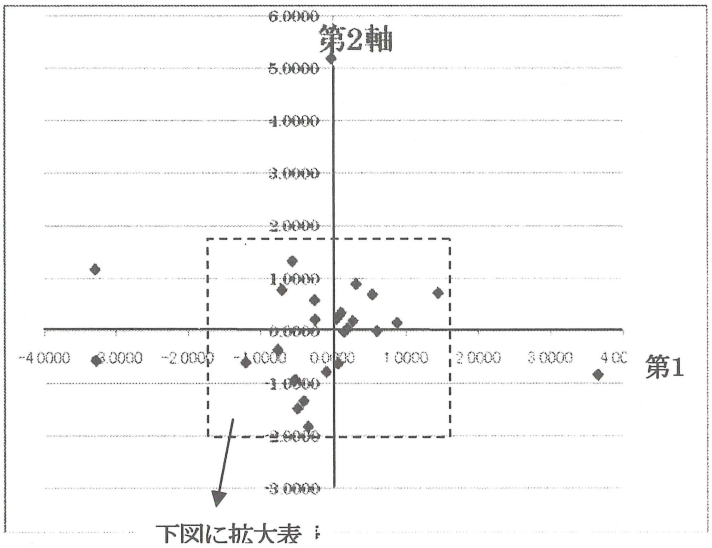


図 5-1 数量化Ⅲ類第1・2軸の点グ

しかし,図5-1のように,各項目のプロットが,原点近くに集まったので，点線内の分を拡大表示した図5-2がある。そこでは，離れたカテゴリ数量の項目のプロットを周囲に配置している。

第1軸は「性別」と「料理」が大きく右，左に振れていることから性別に反比例して女の子の方が男子より料理やブランコ時に数称することがいえそうである。たしかに両項目のクロス処理を施

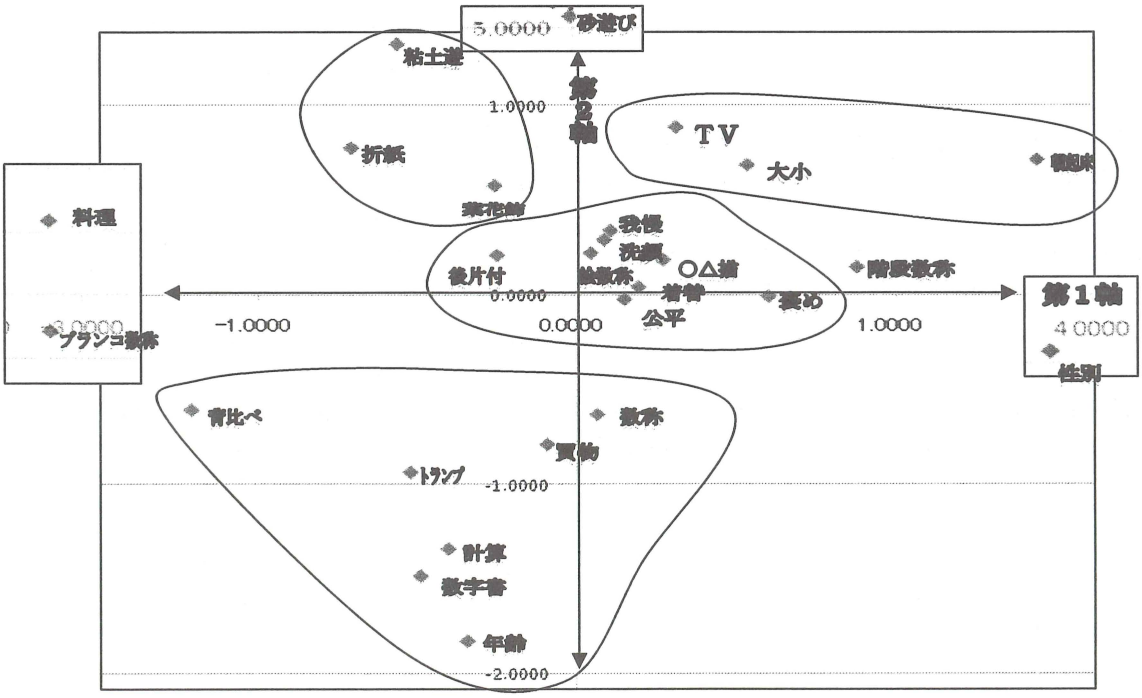


図 5-2 全度数数量化Ⅲ類一部拡大点グラフ化とグループ表示

すと１％未満の危険率で男子と女子の差がある。これらのことからも第１軸を「性別にかかわる軸」命名した。

第２軸は，図 5-2 で縦軸方向に見ると月年齢が高くなるとともに頻度が増す「数字書き」「簡単な計算」「トランプ」「買物」などと月年齢にかかわる項目が集まっている。更に，上部には「粘土遊び」「砂遊び」など低月年齢が位置しているようだ。よって縦の第２軸を「月年齢にかかわる軸」と命名した。

このようなことから，本研究において，幼児の数・量・図形感覚の発達の大きな軸は「年齢」と「性別」ということがいえそうである。

さらに，第１・２軸を直角に交わらせて作成した図 5-2 の「点グラフ」（本研究で称する）において，原点付近に「我慢」「後片付け」「洗顔」「着替」「褒め」「公平」などから「生活規律」因子と名付けたい。そうするとこの「生活規律」因子を中心にして周りに様々な遊びとともに「ＴＶ」や「朝起き」「計算」「粘土遊び」が囲み，あたかも「生活規律」がそれらの柱に位置しているともとれる。

こうしたことから，表 4-1「因子分析の命名一覧」からもその「生活規律」が重要な柱と位置付けたい。

6. 基本的生活習慣と数・量・図形感覚とのクロス

これまでの分析の終わりに，基本的生活習慣の７項目と「数・量・図形感覚」23 項目とのクロス処理を行った。その中で表 6-1 のように「自ら着替え」「ほしい物我慢」「自ら後片付け」３項目はとくに多くの相関をみた（＊：５%，＊＊：１%危険率で判定）。

この３項目は，これまでの因子分析で抽出されてきた「生活規律」に相当し，また数量化Ⅲ類の中央に位置していた生活規律の因子(図 5-2)にもほぼ該当する。

本研究では，幼児の基本的生活習慣との関係を見てきたが，その中でも特に，「生活規律」が重要なポイントであると分析した。

また，数・量・図形感覚の項目は各月年齢段階の因子分析でも見たように互いにまとまっている。

その中でも「折り紙」「ジグソーパズル」「読み聞かせを聞く」「数称」「計算」「大小」「公平に分ける」などが互いに強い相関関係にある。

それらは，先の「生活規律」因子と相関しているようだ。これらの相互の関係は，更に多くの度数を多層に，多くの地域より入手して分析する必要があると考えている。

表 6-1　生活規律３項目と数・量・図形に関する項目との無相関検定結果表

[判定(＊:5% ＊＊:1%)]			
基本的生活習慣と「数・量・図形感覚」項目との「相関の検定」	8自分で着替えできるか	9ほしいものを我慢できるか	40自分から後片付けをしているか
10絵本の登場ものを大小を言うか	＊＊		＊
12読み聞かせを聞けるか	＊	＊＊	＊＊
13お菓子などを公平にわけることができるか	＊	＊＊	＊＊
14階段上りで数えるか			＊
15絵本のイラストを数えるか		＊	＊＊
16お子様と料理をするか			＊＊
17お家で砂遊びをしているか			
19折り紙をするか		＊＊	＊＊
20ジグソーパズルをしたことは	＊	＊	＊
22ブロック・積木遊びをしているか			
23葉っぱ・花弁を集め・飾ったりは		＊	
24粘土遊びはしていたか	＊		
26「しりとり」遊びはしたことは	＊	＊	
27トランプ・すごろくをしているか			
28ままごと・買い物ごっこをしているか	＊	＊	＊
31代金を払う買い物をさせているか			
35お家でかくれんぼ・鬼ごっこをして			
36数をいくつまで数えるか	＊＊	＊＊	＊＊
37 5個から3個取ると2個という計算が		＊	＊
38お子様はブランコのとき数えているか			＊
39柱などでの背比べをしているか			
41いくつまでの数字を書くことができるか			＊
42○△□を取り入れて描いているか	＊＊		

7. まとめと今後の課題

幼児たちの発達段階からの分析から，「生活規律」と「数・量・図形感覚」との関係があり，また多様な「遊び」を通して数・量・図形感覚が培われていく様子をみることができた。

今後，保育・数学教育学会等で発表しつつ，さらに基本的生活習慣の項目と数・量・図形にかかわる項目を再検討・再構成し，全国各地で調査を行い，「数・量・図形感覚」を高めるマニュアル作成へとつなぎたい。

参考文献

[1]. Benesse 教育研究開発センター，“高まるしつけや教育への関心”，ベネッセコーポーレーション，2009.

[2]. 城南町立隈庄幼稚園，“大学と連携した接続期の研究”，城南町教育委員会報告書，2009.

[3]. 文部科学省，小学校学習指導要領解説 算数編，東洋館出版，2009.

[4]. 教育力向上福岡県県民会議，“子どもの現状等に関するデータ”，福岡県教育委員会，pp.15-25　2008.

[5]. 尾崎さやか，“幼稚園教育における数・量・形感覚の指導に関する研究”，鳥取大学数学教育研究室，vol.10.no.9，pp.36-51，2008.

[6]. 小塩真司，SPSS と Amos による心理・調査データ分析，東京図書，2004.

（原稿受付　2010 年 12 月 3 日）

学生主体型授業の研究

川野 司
九州女子短期大学 養護教育科

Learner-centered Teachings : A Case Study

Tsukasa KAWANO

Abstract

University class teachers in general, impart knowledge to the classroom students. Students are inter ested in participating in programs to adopt effective teaching methods. They will acquire the ability t o learn independently on their own. I have wrestle with these difficult issues by working on interacti ve teaching from 2009. In active learning, I expected the students to learn interactive lessons, rather than passive teaching and to prepare the lessons with their participation motivation. The following co ntent is what this active learning will grapple.

Keywords: *Learner-centered Teachings, Active-learning ,Students Participate in class*

1. 研究目的

現在の大学は、学生の学ぶ意欲を育てる授業が求められている。平成 20 年 12 月の「学士課程教育の構築に向けて」の答申以来、学士力の質保証の問題が議論され出した。

教育の質問題の１つに教育内容の問題が考えられ、これは授業に直結した問題である。授業は伝統的な講義を中心としているが、大学がユニバーサル化し、多様な学生が入学している実態を考えると、授業は教員主体から学生主体にシフトする必要がある。

そこで本研究は、学生が積極的に授業に参画し、教員と学生が共に授業を創り上げる参加型・双方向型の学生主体の授業の在り方を考察するものである。多様な学生への対応が求められている現在、学生主体型授業を構築することは、基礎力、意欲、コミュニケーション力など、卒業時に社会が要求する資質能力の修得につながるものと考えている。

2. 授業改善の取り組み

平成 21 年４月から、本学で学生を教育する機会が与えられた。学生の教育ができる喜びとは裏腹に、授業をどのように進めたらよいのかについて不安があった。書店に行くと、『授業を変えれば大学は変わる』のタイトルが目についたので購入した。その本を読んで大学の様子がおぼろげに把握でき、大学でも分かる授業や授業評価が進められていることを知った 1）。

また浅野誠の『大学の授業を変える 16 章』を参考にして、下の「担当科目の授業の進め方について」を作成し、第１回目の授業の心構えと資料の準備を進めた 2）。

表 1

担当科目の授業の進め方について

川野 司

1 授業のねらい
- この科目をなぜ学ばなければならないのか。
- この修得が現在や将来の自分にどのように役に立つのか。
- 授業で自らが何をしていったらよいのか。
- 皆さん自身の学習や討論を通して、友との協力関係を培い、友やクラスの善さを感じながら活発な授業の展開につなげたい。
- 人間性の一面である好き嫌いや利害損得の世界から離れ、お互いに励まし合い、限りある大学生活を有意義に過ごして欲しい。
- 生き方を模索する皆さんの役に立ちたい。

2 授業の特質

①楽しい
- 心と頭を使って自ら参画するから。
- 友達と一緒にやるから。
- 人間としての生き方在り方をやるから。
- 学校現場の生の話しを聞けるから。
- 教員の楽しさや難しさが分かるから。
- 自分が教員になったつもりになれるから。

・自分が生徒になったつもりでやるから。
②難しい
・各自が多くの科目を受講しているから。
・卒業や修了時期と重なっているから。
・実習や就活をやっているから。
・教員採用試験(7月)や他の試験が近いから。
・やるべき作業が多いから。
・不可をとると資格が取れないから。
③学習方法
・学生の皆さんの主体性や創造性が基本です。
・多様な学習（発表・討論）を取り入れたい。
・学生の皆さんの協同作業が基本です。
・不明な点は後で調べて報告します。
④　授業改善の方向
・講義拝聴から積極的な参加討論型の授業へ。
・問題を論じるだけでなく、問題の分析や解決をするグループ討議の方向へ。
・教員中心の授業から学生参画型の学習へ。
・自律した学習者になるように、皆さんのニーズに重点を置く学び方学習へ。
3　評価の仕方
・積極的に意欲的な自ら学ぶ姿勢を大切にしたい(出席,発言や発表,質問,協同作業,レポート,試験等)。

授業では、教える内容を充実することは当然だが、事前の「授業レジュメ」と「板書事項のまとめ」の作成に多くの時間を費やした。　　一方、学生が授業内容を自ら学習するには、レポートを要求することも必要であると考えた。しかし、学生にとって本当に役立つ学習は、授業に関わる内容を自分で学習することである。大学設置基準の科目履修では、１単位の講義に対して３時間の自学が要求される。こうしたことを考慮すると、毎回の授業内容を学生が自分の言葉でまとめ、それを自学の記録として残すことが必要であると思った。学習のまとめは、学生の自己学習の記録であり、ポートフォリオといえる。後で振り返った時、自己の学習内容が形として残り、自分でもやれたという自信につながる。そこで下記の「授業のまとめシート」を作成して、次時の授業開始前に提出させるようにした。

表２

授　業　の　ま　と　め　シ　ー　ト
提出日 平成21年（　）月（　）日
氏名（　　　　）
科目名：（　　　　）　　担当教員：川野　司
第１回の授業テーマ：「オリエンテーション」
平成21年　（　）月（　）日
◆　本日の授業のまとめ（800字程度）
◆　質問・疑問点（200字程度）
◆　感想・意見・要望等（200字程度）

学生は真面目に毎回の「授業のまとめシート」を提出している。特に、「感想・意見・要望等」を見ることは、授業を進めるうえで参考になり、学生が書いている内容を知ることは自らの励みになった。また「質問・疑問点」に書いてあることは、個人的な質問ではあるが、他の学生も同様な質問を持っているのではないか、他の学生の質問を知ることは学習で役立つのではないだろうか、などの思いに至った。そこで、次の「Ｑ＆Ａ」を作成し学生に配布することにした。

表３　教育法規６回目授業テーマ「教科書と補助教材」のＱ＆Ａ

Question	Answer
Que. 1　義務教育期間の公立学校は教科書は無償だが、なぜ価格があるのか？	Ans. 1　教科書は市販されています。また国が教科書会社に代金を支払いますから定価は必要です。
Que. 2　教科書を使用しない授業をしない方がよい…となっていますが、教科によっては教科書を使用しないで、すべてプリント使用の授業もありますが大丈夫なのですか？	Ans. 2　大丈夫ではありません。教科書を使用しない授業はよくありません。教師は教科書を使用する義務があります。仮にプリント学習が中心でも(プリント学習が常態では望ましくありません) 教科書を使わなければなりません。生徒や保護者に不安を与えないために、管理職は日頃の授業の実態を把握し、必要と思えば教師を指導することが大切です。
Que. 3　教科書を必要としていますが、教科書を使わない授業もあります。よいのでしょうか？	Ans. 3　よくありません。教科書は主たる教材ですから、教科書を使用する授業をしていくことが必要です。 Ｑ２の回答と同じです。

Que. 4 選考された教科書は実際に使われるようになるけど、教科書の検定は各都道府県ごとで行うのですか？それとも国の機関で各都道府県に検定結果を通知するのですか。	Ans. 4 教科書検定は国(文部科学省) が行います。検定に合格した教科書の中から、各都道府県教育委員会が規則に従って使用する教科書を決めていきます。教科書として使用できるか否かの検定結果は教科書会社に連絡されます。（以下　略）

一方、提出された「授業のまとめシート」を見ていくなかで、「授業のまとめシート」や「授業レジュメ」を電子データとして、学生が利用できないものかと考えた。そこで、情報処理教育研究センターの担当者に相談に行った。すぐには電子データ化は出来ないが、なんとか実現できる方法を考えてみようという回答であった。６月下旬にテストケースの「Webクラス」ができあがった。そのために必要なデータは、科目を受講している学生の「学籍番号と氏名」「科目名と曜日及び時限」「科目のシラバス」「科目の授業レジュメ」「授業のまとめシート」「授業の板書事項」などであった。学生に電子データの取り扱いを説明するために、情報処理教育研究センターの担当者からパソコン室で、「Webクラス」の使用について解説してもらった。授業に関わる資料を電子データで取り扱う方法は、多様な授業方法が求められる現在、e-learningとして大切な授業スキルである。

大学の授業は、講義、演習、実験、実習、ゼミ形式など様々な形態で進められるが、その大半は講義による授業が行われている。一般的に講義では、教員が本時の授業テーマについてレジュメや関係資料を準備し、それに従って授業を進めている。パワーポイントやＯＨＰを活用したり、パソコン教室でパソコンを使いながら、視覚に訴える方法の授業も取り入れられている。いずれの授業においても、そのねらいは学
生に分かりやすい、楽しい授業を進めることである。ところが多くの授業では、学習の主体である学生自身が受け身の姿勢になっている現実がある。

換言すれば、教員が学生に対して何か一定の知識を授ける授業形式になっている。学生自身は教員からの一方通行の伝達内容を聴いているだけである。学生は講義の要点をノートに書き写したり、関係プリントを見ながら、その授業内容を把握している。板書事項や話したことをノートに書いている学生はよいにしても、なかには私語をしたり携帯電話を見たり、机にうつ伏せている者もいる。あまり態度が良くない学生は注意を受けるが、注意もされずに黙認される場合もある。このような授業スタイルが定着し、教員も学生も違和感を感じてないようだ。双方ともに、こうした授業形態を当たり前と思っている。そして、こうした授業を改善する動きは少ない。教員自身には授業を何とかしたい気持ちはあるものの、そのことが見えにくい。

大学では小中学校で見られる研究授業や、その後の研究協議会を通してお互い同士が自分の授業を見直す取り組みは行われていない。平成20年度から大学のＦＤ義務化にともない、お互いの授業を見せ合う必要性と授業研究の認識は出始めてはいるが3)、実際の授業場面での取り組みはほとんど出来ていない。

一昔前までは、教員が講義ノートを中心に一方的に喋り、計画的ではない板書を学生がただ黙って書き写す風景が見られていた。それが大学の講義であり大学の授業と考えられていた。双方ともそれが当たり前であり、大学とはそうしたものであると認識されていた。大学では90分間の授業が通常行われている。小学校が45分、中高校が50分の授業時間に比べると、学生には90分はかなり長い時間帯である。

そこで、どのような授業形態をとれば、学生が積極的に参加意欲を持ち、自ら考え自ら主体的に学ぶ力が身に付くのだろうか。「授業のまとめシート」のことはすでに述べたが、グループ学習や学生が課題を発表することを一部取り入れて授業を進めた。また学生が参加するの授業をイメージしたが、実際の授業では毎日の授業準備に追われて余裕がなくなり、教師主導の一方通行の授業になってしまった。教員が事前に授業内容を準備することは大切だが、講義ノート中心の授業は、学生には受け身の授業であり、興味がもてる授業と言えない。授業では、教員の専門性を生かした研究や課題などの情報提供も必要である。教員が現在取り組んでいる研究に関する話題に、学生は知的好奇心をくすぐられるかも知れない。そのためにも教員自身が、教育と同時に研究の実績を積み重ねることが求められる。

3. 学生が参加する授業への転換

そこで、平成21年度前期の授業が講義中心であった反省を踏まえ、21年度後期授業では、学生が参加

する双方向型授業を目指すことにした。後期の第1回授業オリエンテーションでは、各授業のシラバスの説明のなかで、学生が参加する授業について、次のプリントを配布して授業を進めていく話をした。さらに大学における授業は、学生の出口を視野に入れたアウトカムを保証することが大切である。

表4

双方向型の授業について（専攻科1年）

川野　司

1　目的

授業を受け身で受講するのでなく、参画意欲を持ち、自ら考え自ら学ぶ姿勢を醸成する。

2　学生が参加する授業が目指すもの

① 教壇からの「一方通行型」の「知識伝達型」授業から脱し、学生と教員とが共に「知を創造」する。
② 学生が日常的に学習ができる環境づくりに努める。授業は学期末の単位履修の試験勉強ではない。
③ 学生が予習や復習を行い、自分で考える力と習慣を身に付ける。
④ 自らが授業に参画している実感を抱かせ、知の創造や学習の喜び及び充実感を味合わせる。
⑤ 学生も教員も共に楽しい授業づくりを目指す。

3　授業の具体的な進め方

① 各グループ（2名）が、13のテーマの中から発表のテーマを1つ選択する。
② 発表のテーマは、シラバスのテーマ（教科書の頁）中から選択する。なお、発表テーマが競合した場合は、ジャンケンで勝った方が好きなテーマを選択する。
③ 各テーマの発表グループには、13回の授業日を当てる。
④ 1回の授業時間で、グループが選択した1テーマについて発表し、その後、発表テーマについて集団討論をする。
⑤ 各発表グループ（木の1限目）は、発表レジュメ（資料があればそれも）を前日の水曜日までに川野に提出する。
また発表当日までに全員分のレジュメ（資料があればそれも）を事務室でコピーし発表当日に配布する。なお発表レジュメは、次のアかイのいずれかを選択して自分でまとめる。
ア　教科書の頁内容をまとめる。
イ　教科書の頁内容の疑問点や問題点を提起し、自分の考えや意見を述べる。
⑥ 発表時間は各グループ20分、その後の質疑応答及び討論は40分とする。
⑦ 発表における司会進行及び計時は、次回の発表グループが担当する。
⑧ 毎回の発表当日には、全員が事前に教科書の発表内容の頁を読んでの考察を中心にまとめた予習レポートを提出する（手書き不可・フォント12・字数は制限しないがＡ４サイズ1枚）。予習レポートは授業開始前に回収する。当日発表グループは予習レポートは提出しなくてよい。
⑨ 発表方法は各グループが自由に考える。レジュメ以外の資料があってもよい。また発表のために使用する機材（パワーポイント、ＯＨＰ、スライド、模造紙等）は事前に川野に連絡すれば事務室と協議して準備したい。
⑩ 発表グループは、発表後の協議会（質疑応答や討論）の内容をまとめ、まとめたプリントを次回の授業で全員に配布する。
⑪ 参加者から発表に対する3項目評価（レジュメ、発表、質疑応答）と自己評価を行う。

4　単位認定の評価

① 学期末の論述式テスト（2題：解答用紙の字数はＢ４裏表程度）60%
② 出席、発表毎の予習レポート（12回分）、発表、質疑応答など 40%

【3項目評価表】

発表テーマ

	よい	普通	よくない	
レジュメの評価	3	2	1	（理由：　　　　　）
発表の評価	3	2	1	（理由：　　　　　）
質疑応答の評価	3	2	1	（理由：　　　　　）
評価の合計点	（　　　）点			
発表に対する一言				
自己評価（満足度）	3	2	1	（理由：　　　　　）

既存の知識や技術を伝えることも大切だが、学生の卒業後の社会生活を視野に入れた教育が必要である。学生が創造的に物事を考え、仕事をしていくなかで課題や問題を解決できる論理的な思考力を習得させることが重要である。教育界のキーワード「生きる力」を中心にし、「全人的な力」と「課題探求の力」を身に付けさせることである。自ら課題を見つけ、自ら学び、自ら考えて判断し、主体的に行動できる力を学生に習得させたい。そのためには、教員自身が常に生きる力を追い求めることが大切であり、そのことを授業のなかで実践する姿勢を持ち続ける必要がある。理論よりも先ずは実践と実行とである。

4. 学生が参加する授業実践

学生が参加する授業は、平成21年度後期授業から取り組んでいる。学生が参加する授業では学生が授業を受け身の姿勢ではなく、自ら参画意欲を持ち、授業の予習をしておくことを期待した。そのために事前に学習課題を準備し、その課題をレポートにまとめて提出させるとともに、担当者が課題発表を行い、発表に関わる問題を討議する学習形態を取った。前述の「授業のまとめシート」は、学生の復習に重きを置いたレポートであったが、21年度後期では予習に重きをおいたレポート様式を考えた。
たとえば教育学概論の授業では、人間科学部の人間発達学科と人間文化学科の約90名の学生がいた。授業の進め方の説明では、前述の学生が参加する授業が目指す5点を説明した。　授業の具体的な進め方は、4人の26グループをつくり、発表のためにグループで研究をするように取り決めて予習課題を与えた。予習内容は、①教科書の範囲内容をまとめる、②科書の範囲内容の疑問点や問題点について自分の考えを述べる、の2つのどちらかを選択して、考えを述べる、の2つのどちらかを選択して、下の様式で授業レポートを提出させた。

表5

教育学概論　第2週テーマ 「人間の形成と教育の本質」の予習レポート 提出日（　）月（　）日 （　）科（　）年　氏名（　　　）
1　考察（感想・意見・考えなど） 2　質問・疑問・要望など

予習レポートは、本来、授業における積極的な予習を勧め、学生が自ら主体的に学ぶ姿勢を習慣づけることを意図したものであった。予習をして授業に臨めば、自ずと授業で質問が出たり、話し合いや協議会が活発になると予想していた。しかしながら実際には、授業があまり活性化せず、質問もわずかしか出ないので、教員から質問をすることが多くなった。授業の様子も最初にイメージしたものと違って

表6

教育学概論　第5回テーマ「生涯学習」の予習レポートの課題 下から課題を1つ選択して予習レポートを提出する。予習レポートで「考察」と記載していたのを「課題○」（○は課題番号）と書き、課題内容を転記してから、課題に対する自己の見解を述べる。　課題は協議会の協議題です。事前に自分の考えをまとめておけば、協議会に積極的に臨めます。 予習レポートは、2部準備する。一部は授業前に提出し、他の一部は協議会で書き込みをしながら使用する。なお、予習レポートのコピペ（コピーして貼り付ける）はやめましょう。自分で教科書を読んで、自分の意見や考えを書くことが重要です。 課題1　あなたは、生涯教育や生涯学習という言葉を聞いて、どのようなことを思いますか。また あなた自身はそれにどのように対処していこうと考えますか。 課題2　現在、「生涯学習」との言葉は社会的な認知ができています。しかし、いったん学校を卒業して就職した場合、自己の職務上の知識・能力や技能のスキルアップを図りたいと考えた時、再び大学等に入学して自己の専門性が高められる社会状況や制度システムになっているだろうか。また、そうした社会的な認知ができているだろうか。 課題3　初等中等教育（小中高校）や高等教育（大学・専修学校）で学んで習得した知識や技能は すぐに古くなり、社会に出たときには、役立たないものなのだろうか。 課題4　現在の学校教育では、「知るための学習」と「するための学習」が中心になっています。一方、「ともに生きるための学習」と「存在するための学習」も学校　教育では大切です。今後、この二者を学校教育の中で進めていくためには、どのような取り組みをすればいいかについて、あなたはどのように考えますか。 課題5　「自己決定学習」が社会的に認知され、インフォーマル学習が行いやすい社会になるには、どのような制度的しくみやシステムが必要になってくるか、あなた　の考えを述べなさい。

きた。協議会も思うように活性化できなくなり、司会者は参加学生を指名して、指名された学生は予習レポートを読むことがパターン化していった。そこで今までのレポート形式を改め、協議会を活性化するために５つの協議課題を事前に課することにした。その課題から１つ選択して予習レポートを提出することに変更した。次のものは、変更した予習レポート書き方とその内容の説明である。下線部は特に強調して説明した内容である。なお、課題１について、筆者自身による具体的なレポート記述例を提示した。

5. 学生が参加する授業の評価

学生が参加する授業を行った結果、学生自身が授業をどのように思っているかを第 14 回の授業で調査した。調査項目は、学生が参加する授業の目的と目指す５点の結課を問う視点で作成した。アンケート内容は次のものである。なお学生が参加する授業の評価について、73 名の学生が回答した結果の概要は次のものであった（下記の授業評価アンケート概要参照）。

表７

２１年度後期授業についてのアンケート：科目名（　　　　　　）

授業の始めに、「双方型の授業について」の説明をしました。授業について、率直な意見をお願いします。□に番号を書いてください。

Ｑ１　あなたは、参画意欲が持てましたか。 ････････････････････････････　□
①　あまあできた　②どちらとも言えない　③あまりできていない

Ｑ２　あなたは、自ら考え、自ら学ぶ姿勢ができましたか。･･････････････････　□
①　あまあできた　②どちらとも言えない　③あまりできていない

Ｑ３　あなたは、日常的に学習ができる環境づくりに努めましたか。･･････････　□
①　あまあできた　②どちらとも言えない　③あまりできなかった

Ｑ４　あなたは予習や復習を行いましたか。　･･････････････････････ ････　□
①　あまあできた　②どちらとも言えない　③あまりできなかった

Ｑ５　あなたは、自分で考える力や習慣が身に付きましたか。･･････････････････　□
①　あまあ付いた　②どちらとも言えない　③あまり付いていない

Ｑ６　あなたは、自らが授業に参画している実感がもてましたか。　････････････　□
①　まあまあもてた　②どちらとも言えない　③あまりもてなかった

Ｑ７　あなたは、この授業が楽しいと思いましたか。　････････････････････････　□
①　あまあ思う　　②どちらとも言えない　③あまり思わない

Ｑ８　発表する時間の長さはどうでしたか。　･････････････････････････････････　□
①　分である　　　②足りない　　③長すぎる

Ｑ９　協議する時間の長さはどうでしたか。 ････････････････････････････････　□
①　分である　　　②足りない　　③長すぎる

Q10　あなたは、協議に積極的に参加しましたか。････････････････････････････　□
①　る程度参加した　②どちらともいえない　③あまり参加しなかった

Q11　レポートの内容はどうでしたか。　････････････････････････････････････　□
①　しかった　②どちらとも言えない　③やさしかった

Q12　レポートの記述はどのようにしましたか。･･････････････････････････････　□
①　科書など読んだり、他に自分で調べて自分の考えを書いた
②ネット検索などをして、コピーして貼り付けたことが多かった
③だいたい自分の意見を書いたことが多かった

Q13　協議会を活発にするためのあなたの考えを率直に書いてください。

Q14　こうした授業の進め方について、あなたの意見を聞かせてください。

Q15　双方向型の授業を改善していくために、参考になることを書いてくだい。

問１の「あなたは参画意欲がもてましたか」では、「まあまあ持てた」が 35.5%、「どちらとも言えないが 49.3%、「あまり持てなかった」は 15.1%であった。「参画意欲が持てなかった学生」と回答している学生が１～２割近くいることは、授業のやり方を工夫する必要がある。一方、専攻科２年１３名の授業では、参画意欲が持てなかったとの回答が無かったことは、授業の人数にも関係していることが示唆される。

問２の「自ら考え自ら学ぶ姿勢ができましたか」

では、「まあまできた」が42.5%、「どちらとも言えない」が41.1%、「あまりできていない」が16.4%であった。

問3の「日常的に学習ができる環境に努めましたか」では、「どちらとも言えない」を含めると、学習への取り組む姿勢は持っていたことがうかがわれる。

問4の「予習や復習を行いましたか」では、「どちらとも言えない」を含めると予習や復習をしていたと思える学生が8割以上いたことになる。

問5の「自分で考える力や習慣が身に付きましたか」では、半数近くの学生が積極的な回答をしている。

問6の「授業に参画している実感がもてましたか」では、参画を実感している学生が2割程度しかいないことは今後の課題である。

問7の「この授業が楽しいと思いますか」は、「まあまあ思う」が16.4%、「どちらとも言えない」が46.6%、「あまり思わない」が37%となっている。どちらとも言えないを消極的に解すれば、2割程度しか授業を楽しいと思っていないことになす。楽しいと思う中味の検討は必要だが、授業を楽しくないと思う学生が多いことは授業のやり方の工夫が求められる。

問8の「発表の時間の長さはどうでしたか」では、8割近くが十分であると応えている。発表時間は、1グループにつき約15分与えたが、学生はその時間帯での発表がふさわしいと感じてているようだ。

問9の「協議する時間の長さはどうでしたか」については、7割近くが十分であるとしているのに、2割以上が長すぎると応えている。実際には質問を含めて1グループ当たり20分を割り当てていたが、協議が活発でなかったことも影響していると思われる。

問10の「協議に積極的に参加しましたか」では、半数以上の学生が積極的でなかった。これは教員自身が感じていたことと一致した結果である。学生に積極的になれなかった理由を尋ねると、協議会で自分の意見を発表することに抵抗があるとのことあった。担当グループが発表した後で、グループ内で発表内容について話し合う時間を設けて欲しかったと言う。学生は予習をしているから、発表についてグループ内での話し合いの時間を取る必要はないと判断していた。しかし協議を活発にするには、そうした時間が必要であった。

問11の「レポートの内容はどうでしたか」では、「難しかった」と思っている学生が4割程度いた。

問12では、7割以上の学生が、教科書を読んでまとめたり、自分の意見を記載しているが、3割近くの者は安易なレポート作成をしていることが分かった。

6. まとめと今後の課題

学生が参加する授業は、学部1年生と専攻科1・2年生で試みたが、学部生と専攻科生とには、大きな違いがあった。例えば、問2の「自ら考え自ら学ぶ姿勢ができましたか」では、学部生は、「あまりできていない」は16.4%いたが、専攻科生はいなかった。問12のレポート作成についても、安易なレポート作成（コピペなどの貼り付け）は、専攻科生には見られなかった。こうしたことは、他の問に対しても見られる傾向であった。

その原因の1つは、授業における学生数が関係していると考えられる。90名ほどの学部生に対して、専攻科生は13名～20名である。学部1年生の班編制は、互いによく知り合っていないので、協力して発表はしているものの、何かぎこちなさが感じられる反面、専攻科生では、授業中の発表や質問および協議など、協力してスムーズに行われていた。

授業後には、毎回、3項目評価表を使用し、発表者に対してはレジュメ・発表・質疑応答の視点から、自分に対しては満足度の視点から、簡単な3段階評価を各学生に行った。これによると、学部生と専攻科生との違いは見られなかった。発表に対する一言も「レジュメが分かりやすくまとめてあって、とてもよかったと思います」「今回は難しい章であったが、よくまとめられていた」など好意的な記述が多かった。自己評価（満足度）でも1と回答している学生は少なかった。

学生が参加する授業では、清水亮・橋本勝・松本奈美編著「学生と変える大学授業」5）を参考にし、そのなかの「橋本メソッド」を模倣しながら授業を組み立てた。 学生が参加する授業を試行してみて、体験的に次の3点が明らかになった。1点目は、学生は発表資料を作成することに時間をかけ、自ら学びながら、独自の発表準備をしていた。授業テーマの要約やまとめが効果的に行われた。パワーポイントを使用してプレゼンテーションを行うなど、発表における機器使用のスキル面での向上が見られた。2点目は、発表後の議論の深まりや質問が限られ、表面的な協議で時間が経過したことである。その原因としては、協議会の司会運営のやり方が十分に学

生に浸透していなかったこと、予習レポートを提出させているから質問がいろいろ出て、協議会も活発になるという教員の思い込みがあったことなどが考えられる。３点目は、教員が準備したレジュメや資料の説明時間がとれなかったことである。教員の解説が十分でなかったり、学生の意見や考えを引き出せないままに終わってしまった。

一方、問14の「こうした授業の進め方について、あなたの意見を聞かせてください」の回答では、「事前に予習してこれる課題があってすごくいいと思った」「自分たちで自ら調べて発表し協議を深めていくのは、将来的に必要となってくると思うので、いいと思う」「新鮮で学ぶ上では良いことだと思う」「正直、最初はめんどうだと思っていましたが、この授業は３、４年生になった時や、先生になった時に、絶対役立つものだと思います」と肯定的に受け止めている学生が多かった。

学生が参加する授業は、発表者に積極的な学びの姿勢が感じられたが、参加者の受け身の姿勢が拭い去れなかった。まだ改善すべき問題はあるものの、体験的には学生の学びを育てる視点では、効果的な授業法の１つである。

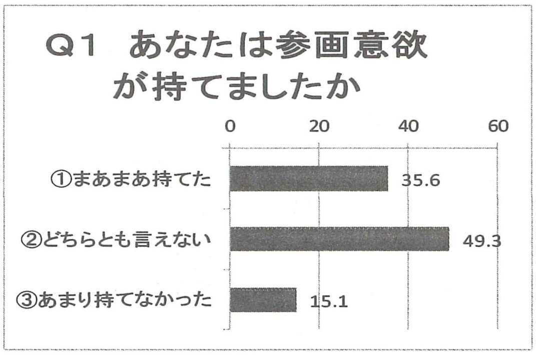
21年度後期授業では、授業改善の取り組みを実践してきたので、今後とも学生が授業に積極的に参画でき、学生の学びが深まる授業を継続していきたい。学生が参加する授業は、その成果が授業内容・方法との関連が深いものである。そして授業改善は、学部・学科カリキュラムと学生のラーニング・アウトカムとの関係で論じられる問題である。このことは、教員個人による授業方法を改善することだけで片付く問題ではない。学生の学びを育てる授業は、学士力の質保証の視点から学部・学科が一体となり、組織体のシステムとしてカリキュウラムの在り方そのものを根本から見直していくべき大きな課題と言える。またこれは、大学の使命とは何かという現代的課題に直結する問題でもある。

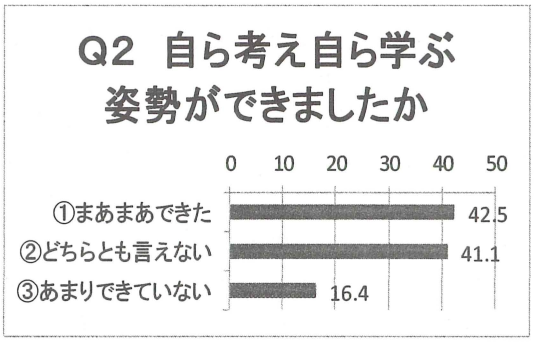
注

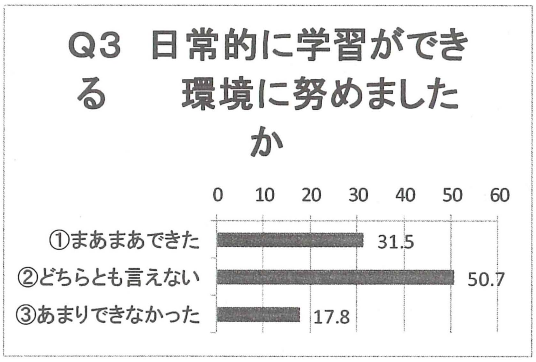
1) 安岡高志・滝本喬・三田誠広・生駒俊明『授業を変えれば大学は変わる』 プレジデント社　56-64頁　1999年11月
2) 淺野誠『大学授業を変える16章』 大月書店　1994年1月　22-25頁
3) 京都大学高等教育教授システムセンター編『開かれた大学授業をめざして』 玉川大学 出版部 79-80頁　1997年9月
4) 北野秋男『日本のティチング・アシスタント制度』東信堂　123-139頁　2006年6月
5) 清水亮・橋本勝・松本奈美編著『学生と変える大学授業』ナカニシヤ出版　109-135頁 2009年２月

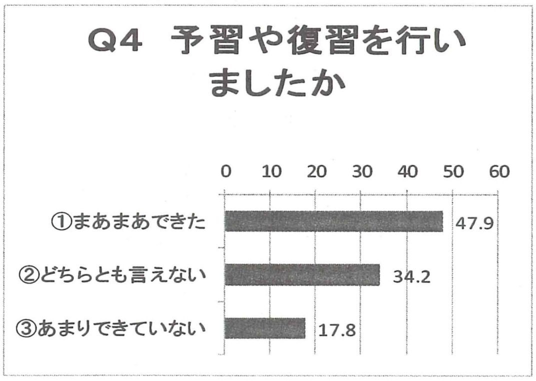
（原稿受付　2010年11月30日）

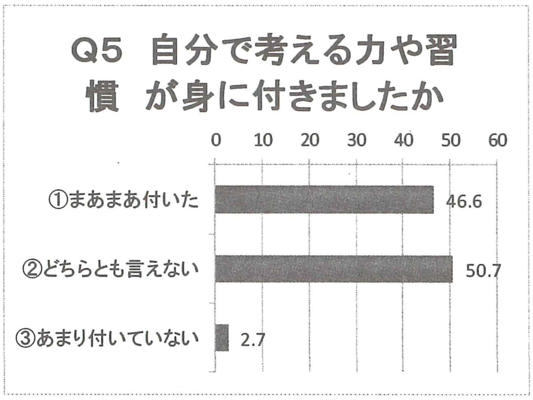
授業評価アンケート結果概要

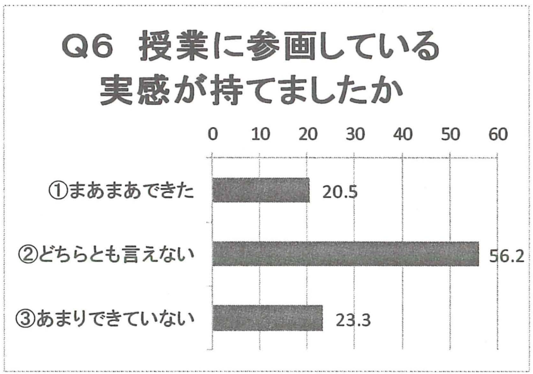


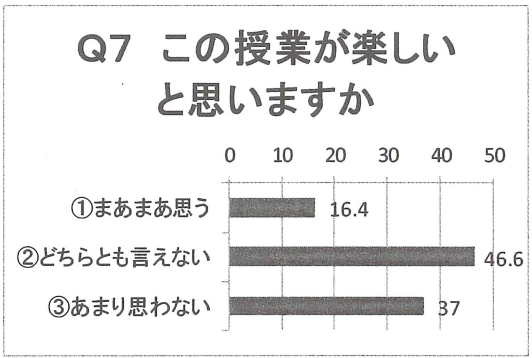


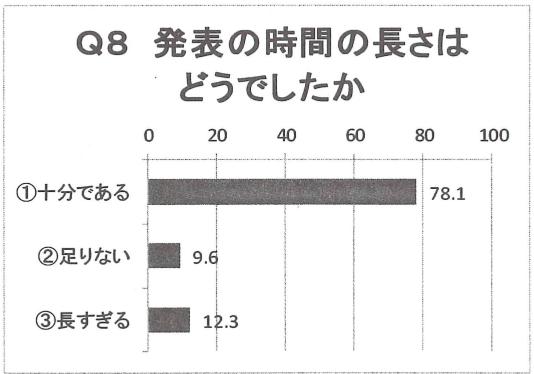


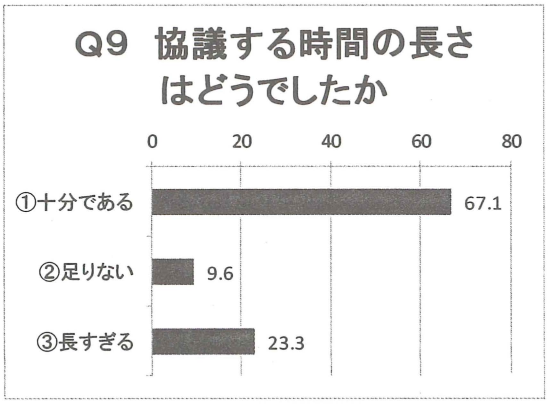


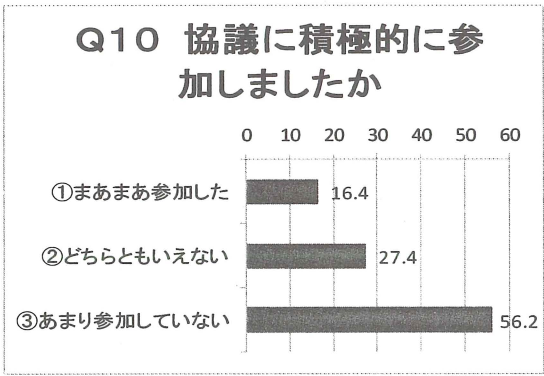

Q5 自分で考える力や習慣 が身に付きましたか
0 10 20 30 40 50 60
①まあまあ付いた 46.6
②どちらとも言えない 50.7
③あまり付いていない 2.7

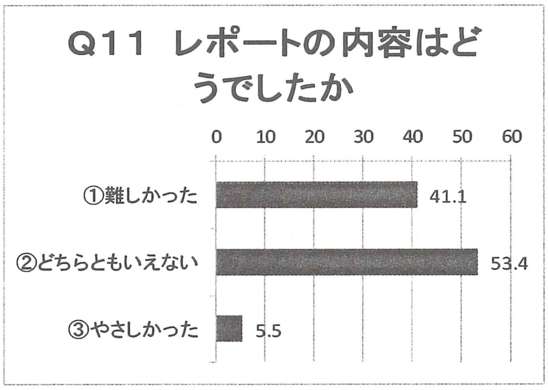

Q6 授業に参画している実感が持てましたか
0 10 20 30 40 50 60
①まあまあできた 20.5
②どちらとも言えない 56.2
③あまりできていない 23.3

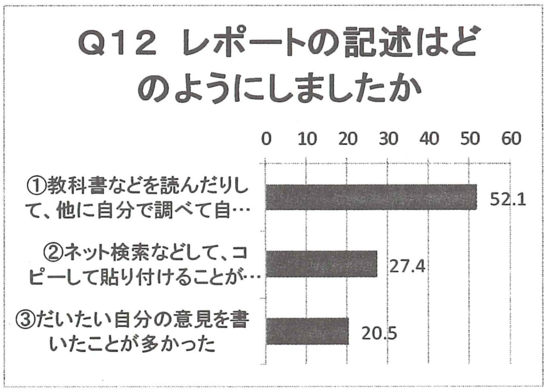

Q7 この授業が楽しいと思いますか
0 10 20 30 40 50
①まあまあ思う 16.4
②どちらとも言えない 46.6
③あまり思わない 37


Q8 発表の時間の長さはどうでしたか
0 20 40 60 80 100
①十分である 78.1
②足りない 9.6
③長すぎる 12.3


Q9 協議する時間の長さはどうでしたか
0 20 40 60 80
①十分である 67.1
②足りない 9.6
③長すぎる 23.3


Q10 協議に積極的に参加しましたか
0 10 20 30 40 50 60
①まあまあ参加した 16.4
②どちらともいえない 27.4
③あまり参加していない 56.2


Q11 レポートの内容はどうでしたか
0 10 20 30 40 50 60
①難しかった 41.1
②どちらともいえない 53.4
③やさしかった 5.5


Q12 レポートの記述はどのようにしましたか
0 10 20 30 40 50 60
①教科書などを読んだりして、他に自分で調べて自…
52.1
②ネット検索などして、コピーして貼り付けることが…
27.4
③だいたい自分の意見を書いたことが多かった
20.5

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（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．原稿の採否は、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、１０頁までとする。
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２１年６月３０日から実施する。
2．九州共立大学総合研究所紀要投稿規程（平成21年2月2日制定）は廃止する。

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、この規程は、平成 21 年 3 月 12 日から実施する。

2．九州共立大学総合研究所紀要 審査付論文の査読要領（平成21年2月2日）は廃止する。

九州共立大学総合研究所紀要編集委員会名簿

九州共立大学総合研究所紀要　第4号

平成23年3月1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　有限会社　秀文社印刷

Journal of Kyushu Kyoritsu University Research Center

No.4 March 2011

Contents

Kyushu Kyoritsu University Research Center
Kyushu Kyoritsu University
Kyushu Women's University
Kyushu Women's Junior College