

愛媛大学社会連携推進機構
研究成 果 報 告 書

第2号

平成20年
(2008)

目 次

成果報告書第2号の発刊にあたって

愛媛大学社会連携推進機構長

樋口 富壯

研究成果報告

環境資本主義の研究とビジネスへの応用 ----- 1

愛媛大学法文学部教授
日本環境プラント株式会社

水口 和壽
越智 英俊

交流磁場誘導焼灼療法のための磁性体針の開発 ----- 10

愛媛大学理工学研究科講師
株式会社アドメテック

前原 常弘
八木 泉

四国西部地域に分布する火山灰の研究 ----- 12

愛媛大学理工学研究科教授
株式会社四国総合研究所土木技術部

榎原 正幸
池田 倫治

生活習慣病関連遺伝子多型の臨床的評価 ----- 13

愛媛大学大学院医学系研究科教授
愛媛大学大学院医学系研究科講師
株式会社ハプロファーマ代表取締役社長

三木 哲郎
田原 康玄
根本 靖久

「認知症鑑別診断支援システム」開発のための研究 ----- 17

愛媛大学大学院医学系研究科教授
愛媛大学大学院医学系研究科講師
愛媛大学附属病院診療科老年科専攻医
株式会社大栄電機工業代表取締役
株式会社大栄電機工業技術責任者
株式会社大栄電機工業主任開発者
株式会社大栄電機工業技術開発者
株式会社大栄電機工業涉外担当者

三木 哲郎
田原 康玄
田口 敬子
大野 栄一
大森 順二
田野岡 直人
時任 史人
筒井 孝志

テストチップの製作とその解析に基づく製造容易化設計のための
新故障モデルとそのテスト・故障診断に関する研究

19

愛媛大学大学院理工学研究科教授
愛媛大学大学院理工学研究科准教授
愛媛大学大学院理工学研究科准教授
明治大学コミュニケーション学部准教授
明治大学理工学部専任講師
徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授
徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部准教授
半導体理物理学研究センター技監

高松 雄三
高橋 寛
樋上 喜信
山崎 浩二
堤 利幸
橋爪 正樹
四柳 浩之
半宮 俊介

フライアッシュ造粒砂を使用したコンクリートの諸性質について

24

愛媛大学大学院理工学研究科教授
愛媛大学大学院理工学研究科助教
愛媛大学大学院理工学研究科
株式会社相原組碎石部

氏家 獻
岡崎 慎一郎
木下 雄司
相原 達志

P S 灰を活用した造粒物のコンクリート骨材への
適用に関する基礎的研究

34

愛媛大学大学院理工学研究科助教
愛媛大学工学部等技術部機械・環境建設系技術班
株式会社予州興業環境部主任
株式会社予州興業専務取締役

木下 尚樹
川口 隆
松尾 曜
三好 正忠

多孔質セラミックの熱特性に関する研究

49

愛媛大学大学院理工学研究科助教
愛媛大学工学部等技術部機械・環境建設系技術班
株式会社ミユキ・エマイム代表取締役

木下 尚樹
川口 隆
山内 美雪

ホログラフィックストレージの信号処理に関する研究

83

愛媛大学社会連携推進機構特命教授
愛媛大学理工学研究科准教授
愛媛大学理工学研究科助教
愛媛大学大学院博士前期課程
愛媛大学大学院博士前期課程
富士ゼロックス株式会社研究本部先端技術研究所
富士ゼロックス株式会社研究本部先端技術研究所
富士ゼロックス株式会社研究本部先端技術研究所
富士フィルム株式会社記録メディア事業部
記録メディア研究所主任研究員

大澤 壽
岡本 好弘
仲村 泰明
河上 直紀
的場 正貴
河野 克典
三鍋 治郎
小笠原 康裕
安田 晋
北原 淑行

癌の誘導焼灼療法に用いる金属磁性体針の発熱特性とシミュレーション ----- 90

愛媛大学大学院理工学研究科准教授
愛媛大学大学院理工学研究科准教授
愛媛大学大学院理工学研究科講師
株式会社アドメテック主任エンジニア

猶原 隆
青野 宏通
前原 常弘
八木 泉

水性ガスシフト反応におけるCu/Al₂O₃触媒へのFeO_xの添加効果 ----- 93

愛媛大学大学院理工学研究科教授
三菱重工株式会社技術本部広島研究所

八尋 秀典
安武 聰信

液中プラズマを利用したCVD新技術に関する研究 ----- 96

愛媛大学大学院理工学研究科教授
愛媛大学大学院理工学研究科准教授
愛媛大学大学院理工学研究科准教授
愛媛大学大学院理工学研究科助教
株式会社豊田自動織機研究開発センター
株式会社豊田自動織機研究開発センター
株式会社豊田自動織機研究開発センター

野村 信福
豊田 洋通
山下 浩忍
向笠 久俊
下 勉也
奥田 真也
村瀬 仁俊

電解研磨に関わる研究 ----- 101

愛媛大学大学院理工学研究科准教授
愛媛大学大学院理工学研究科教授
株式会社イズミフードマシナリ製造部主任技師
株式会社イズミフードマシナリ製造部生産技術G

豊田 洋通
野村 信福
井上 清貴
立石 裕貴

石かご水制の水理機能並びに周辺環境に与える環境に関する研究 ----- 103

愛媛大学大学院理工学研究科教授
愛媛大学大学院理工学研究科准教授
株式会社親和技術コンサルタント
瀬戸内金網商工株式会社

鈴木 幸一
門田 章宏
村岡 一志
伏見 津隆

高纖維配合率かつ不連続状の炭素纖維強化プラスチックの
流動シミュレーションツールの開発 ----- 111

愛媛大学大学院理工学研究科助教
愛媛大学大学院理工学研究科教授
愛媛大学大学院理工学研究科助教
Societe des Fibres de Carbone S.A.
東レ株式会社複合材料研究所
東レ株式会社複合材料研究所
東レ株式会社複合材料研究所所長

岩本 幸治
黄木 景二
矢代 茂樹
和田 原英輔
武田 一朗
佐藤 成道
北野 彰彦

磁気光学磁束観察用 YIG 膜の磁気的評価 ----- 116

愛媛大学大学院理工学研究科准教授
超伝導工学研究所
超伝導工学研究所
超伝導工学研究所

平岡 耕一
町 敬人
中尾 公一
田辺 圭一

3 波長光ディスク用波長板の設計 ----- 117

愛媛大学大学院理工学研究科准教授

市川 裕之

家畜飼料用ダイオキシン類蓄積抑制添加剤の開発 ----- 118

愛媛大学農学部附属環境先端技術センター副センター長
独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構

本田 克久
Keerthi S. Guruge

食品加工残さから調整したペレットの特性 ----- 122

愛媛大学農学部准教授
新興工機株式会社
新興工機株式会社

枝重 有祐
佐野 善徳
田所 研

河川・海洋堆積物中からのフミン酸抽出物代謝菌の探索 ----- 128

愛媛大学農学部 4 回生
愛媛大学沿岸環境科学研究センター教授
東京海洋大学海洋科学部教授
高知大学海洋コア研究センター教授

乾 祥子
鈴木 聰
今田 千秋
安田 尚登

無細胞タンパク質合成系を活用した牛妊娠認識物質の
合成等に関する研究 ----- 136

愛媛大学無細胞生命科学工学研究センター教授
愛媛県農林水産研究所・畜産研究センター

戸澤 譲
木下 政健

環境資本主義の研究とビジネスへの応用

愛媛大学法文学部教授 水口和壽

日本環境プラント株式会社 越智英俊

1. 研究の概要

本研究は、愛媛大学法文学部水口研究室と、日本環境プラント㈱で二年に亘り行った共同研究の成果である。

- (1) 研究課題 環境資本主義の研究とビジネスへの応用。
- (2) 研究目的 現在の環境技術の事例と研究を行い、環境問題を解決する糸口を探す。
また「環境」と「経済」の役割を考え、その成果を新ビジネスとして具現化する。
- (3) 研究内容 各環境関連施設への視察取材を行い、研究室にて教授、ゼミ生と研究レポートを作成する。

2. 研究の意義

21世紀になり経済状況も大きく様変わりしている。過度な金融経済による行き詰まり、20世紀に眠っていた環境問題という「トラ」のしっぽを踏んで起こし、これから産業のあり方も変貌を遂げようとしている。

この時期に、様々な環境への課題を研究し、新たな永続性のある事業を模索するのは、大いに意義のある事だと言える。

3. 研究活動

以下のような研究活動を行った。

- ① 「不都合な真実」(アルゴア)鑑賞(ゼミ生と)
- ② 松山南クリーンセンターの視察(ゼミ生と)
- ③ 帝松サービスの視察(ゼミ生と)
- ④ 超臨界プラントの取材
- ⑤ 亜臨界プラントの視察
- ⑥ アメリカ視察(水口教授と共に)
ニューヨーク・フィラデルフィア・ランカスター地方
- ⑦ 水処理メーカーとの折衝など

4. 研究成果

研究の過程において様々な問題に気付いた。これもひとつの成果と言えるのではないか。

- ① 環境をテーマに学ぶという事は「人間も生態系の一部、自然の一部である」という認識を持って、何よりも自然の中で「生かされている」という点に気付き謙虚になる事を忘れてはならない。

- ② 石化燃料を燃やせば、石油や石炭の中に封じ込められていた地球太古の二酸化炭素まで大気中に放出される。
- ③ 現在考えられる究極のリサイクルとは、元素・分子レベルでのリサイクルである。
- ④ また一番身近なリサイクルは「水」であり、これは人間の命にもかかわるという事。
- ⑤ 今までの産業形態では、物があふれ余裕を失いつつある現代人が増え、まさに「物で榮えて心で減ぶ」という状態になりつつある。
今後企業は、適正規模・適正生産・適正在庫・適正利益を追求する必要がある。
- ⑥ アメリカのアーミッシュの人達は、伝統に押し付けられた価値観にしばられていると感じたのと同時に、“迷ったら基本に帰る”という言葉を思い出した。
世界各地に住む先住民は「必要最小限と調和」という自然のルールに従って生きてきたと聞く。日本にはアイヌの人達がいる。彼らは「自然には神が宿り、自然是神からの授かり物である」とした価値観を持っているそうだ。
今、このような先住民族の人達の価値観が見直されている。
- ⑦ 特に環境産業に携わる企業は、コンプライアンスなどの「CSR=企業の社会的責任」はもちろん、今後はそれからもう一步踏み出して「CSC」とも言うべき様々な形での「企業の社会的貢献」を考える必要があると思う。
- ⑧ 二年間、環境と経済をテーマに共に学んだゼミ生も4回生になり、マスコミ関係・銀行・市役所・また大学院へと、各々が目標を持ち進んだ事も大いなる成果だと言えるのではないか。

5. 研究成果物として

- ① 研究レポートプロセスの一部を要約して、後に付けております。ぜひご一読ください。
将来本にしてまとめ出版する予定です。
- ② 昨年上場企業の協力により、浄水プラントなどの浄水ビジネスを立ち上げて、現在展開中です。
- ③ 総合研究棟3F水口研究室に、空気中の飽和水蒸気（湿気）から輸血用の水よりも純度の高い純水を作る、超純水浄水器を試験的に置かせて頂いております。一度ご覧になってください。
水道水 80ppm～ 超純水 2～3 ppm

今後、アメリカなどの国が環境への姿勢を変える事により、本格的な環境資本主義の時代の到来が予測され、学問としての「環境経済学」も更に活発になるものと考えます。

今「環境」と「経済」のバランスを考えて「環境に負荷をかけない生き方」と「真の豊かさとは何か」「本当の幸せとは何か」を考えるチャンスではないでしょうか。

最後に、本研究をご指導頂きました水口和壽教授、共に学んだゼミ生、ご協力を頂きました全ての方々に心より深く感謝申し上げます。ありがとうございます。

『我々にはまだチャンスがある。しかしここれまでと同じ過ちを繰り返す時間はない』

1992年ブラジル地球サミット、モーリス・ストロング事務局長の言葉より

(以上 越智 記)

(付記)

日本環境プラント（株）の越智英俊社長が、「これからビジネスは環境と調和していくなければ、生きられない。改めて学生と一緒に、『環境資本主義』に関する人文・社会科学系の勉強をしたい」と言って、私の研究室にこられたのは、2007年の春先であった。2007年度に私の研究室は、修士論文作成中の大学院生3人と4年のゼミ学生7人、3年のゼミ学生5人がおり、加えて2年生のフィールド・ワークを担当していた。大学院生のうち1人はネパール人、もう1人は中国人、残る1人は社会人であり、ネパール人留学生はネパールの観光産業について、中国人留学生は中国企業のサプライ・チェーン・マネジメント（SCM）について、研究していた。3年生のゼミ生は環境問題について関心があり、2年生の後期に既に、ポール・ホーケン、L. ハンター・ロビンズ、エイモリ・B. ロビンズ『自然資本の経済—「成長の限界を突破する新産業革命」—』を読了し、各人が取り組むべき環境問題のテーマを決定しようとしていた。新2年生のフィールド・ワーク（FW）は前期のみの担当であったが、環境問題について、班ごとに調査することにしていた。

越智氏は、2007年度に愛媛大学社会連携推進機構に対して、水口研究室との共同研究の実施を正式に申し入れされ、以後毎週原則火曜日に、私の研究室やFWの現場に顔を見せ、大学院生やゼミ学生、またFW学生との研究交流に、気長に付き合ってくれた。とくに3年ゼミ生に対しては、予定していた報告者が就活のため無断欠席することがあっても、決して怒ることなく、最後まで暖かく見守り、学生の就活を応援してくれたことは、感謝に耐えない。その当時の3年ゼミ生4人〈残念ながら1人は留年〉が、この3月にめでたく卒業する。彼らは、それぞれが希望するところに就職することができ、予定通り環境問題に関する卒業論文を作成し、良い報告をした。彼らの1人は環境問題についての社会科学的研究をライフワークにしたいと決意を述べた。また中国人留学生は中国の環境問題に真摯に取り組むため大学院に進学するつもりだと述べた。

越智氏は、環境事業を経営する現役の社長として、環境問題に関心を持つ学生に対して、適切なアドバイスや問題提起をしてくれ、私自身が良く知らない環境ビジネスに関わる技術的・経済的問題について、学生を指導してくれた。また、FWの現場には、いつも自分の車を出して、学生たちを運んでくれた。院生や学生たちの中には、私以上に越智氏から、いろんな有益なことを学んだ者がいると思う。越智氏と水口研究室の2年間に亘る共同研究の活動と成果は、上記報告書の3. 4. 5. に記載している通りである。成果物としては未完成ではあるが、この2年間の共同研究を通して、私や私の学生や院生の得たものは大きく、また越智氏自身も学生や院生との研究交流を通じて、何がしかのものを学び得たのではないかと、確信している。現役の第一線経営者が、学生や院生とともに学びあうことで、得られる共有知（=共感知）が、地域経済活性化の強力なプラットホームをつくることになると確信する。その意味で、越智氏と水口研究室との共同研究は、「地域プラット・ホーム人材育成モデル」として、一定の成果をあげることができたと、評価できるのではなかろうか。

最後に、2008年3月7日～3月12日の間、越智氏と水口の2人は思い立ったように、アメリカ合衆国ペンシルベニア州のアーミッシュ居住地とニューヨーク州の旧トレーディング・センタービル（9. 11）跡地の視察に出かけた。その視察旅行の印象を、ここに簡単に記しておこう。アーミッシュ居留地は現在もなお産業革命以前の生活を守り通している人々が住んでいる

集落であり、旧ニューヨーク・トレーディング・センタービル跡地は、言うまでもなく 2001.9.11 のアメリカ同時多発テロ事件の現場（グランド・ゼロ地点）であって、世界の金融市場（ウォール・ストリート）の中心地にある。全く異なる価値観を持つ人々が暮らす 2 つの地点に立つことによって、今後の環境問題対策と我々 1 人 1 人の生き方を考える何がしかのヒントを得られるのではないか、という漠然とした思いが 2 人の頭を過ぎた。幸いにも、越智氏にはアーミッシュ居留地に友人がいたので、その友人を介して、アーミッシュの人々の禁欲的な生活ぶりを紹介してもらうことができた。20世紀は科学技術の発展によって人類の生活は飛躍的に豊かになったが、環境問題は非可逆的に深刻化した。アーミッシュの人々は、20世紀型文明を拒絶して、19世紀型文明をかたくなに守り、清貧かつ質素に暮らすことを信条にしている。一方、多くのニューヨーカーたちは世界の金融市場の中心地にてマネー・トレーディングで暮らすことを理想としている。9.11 のテロリストが標的にしたもののはいったい何だったのだろうか。グランド・ゼロ地点に立って、しばし、考え込む 2 人であった。最近、菊川征司『9.11 テロの超不都合な真実—闇の世界金融が仕組んだ世紀の大犯罪—』（5 次元文庫）と言う書物が日本でも出版されたが、我々がニューヨークで乗ったタクシーの運転手はすでにその事実を知っていた。9.11 事件をきっかけにテロとの戦いを謳ってイラク攻撃に踏み切ったブッシュ大統領は退陣し、2009.1.20 にアメリカ合衆国第 44 代大統領に黒人初のバラク・オバマ氏が就任した。オバマ大統領はブッシュ前大統領と違って、環境政策（グリーン・ニューディール）に力を入れることを表明している。日本の優れた環境技術が世界の環境エネルギー問題の解決と地球温暖化防止をリードすることができるよう、祈って止まない。それぞれの立場で、その方向性を見誤らないように監視することの重要性を学んだことも、この共同研究の成果であると言えよう。〈以上 水口記〉

環境資本主義の研究

自然環境保全とリサイクルからビジネスへの応用

日本環境プラント株式会社 越智英俊

1. はじめに

地球が誕生して 46 億年が経つと言われる現代、実に様々な環境問題が発生している。

本研究はそれらの問題をふまえて、その真因の追究とリサイクルの研究を通じて改善策を模索しながら、成果をビジネス化するまでのプロセスを検証・提言する。(一部要約・抜粋)

2. 地球環境の実態は、一般に知られているより はるかに深刻である。

現在取り沙汰されているのは、まず地球温暖化・オゾン層の破壊・酸性雨・森林の減少と砂漠化・海洋汚染・生物種の減少・人口の増加・不足する資源エネルギー、また発展途上国での著しい大気汚染や水質の汚濁および環境ホルモンなど、問題が山積している。

特に、二酸化炭素などの増加による地球温暖化問題は、これら地球規模での環境問題の中でもっとも深刻な課題である。

※ 石油化学製品を燃やすと、なぜ二酸化炭素やダイオキシンなどの有害物質が出るのか。

原始の大気は 95%以上が二酸化炭素であった。

地球創世記である 46 億年前の地球は水蒸気が殆どで、次に二酸化炭素が多くたと考えられているが酸素は存在しなかった。

※ 原始大気中の二酸化炭素は、原始の海洋と生物によって取り除かれていったと考えられている。

何億年も前の二酸化炭素が、今日石灰石のような炭素塩岩となって堆積しており、大気中の二酸化炭素は科学的経過により除かれていた。

原始の海が形成されると海は容易に二酸化炭素を溶解し、大気中の濃度は急激に下がったと考えられる。

一方、光合成を行う植物プランクトンなどの微生物は、高濃度の二酸化炭素の中では生産性が高く、大気中や海から二酸化炭素を除去していったと考えられる。

植物性プランクトンは、死んで分解すると二酸化炭素を放出するが、分解しないまま海底への堆積物として埋積すれば二酸化炭素は固定される。

主にこのプランクトンによって、二酸化炭素を固定化して封印された物が石油や石炭などの石化燃料である。

※ パンドラの箱を開けてしまった人類。

近代に入った 18 世紀にベルギーにて起こり、その後イギリスにもたらされた「産業革命」以来、人類は石化燃料を使い始めた。

その事はすなわち、地球創世記以来固定化されて地中や海底で石油や石炭の中に封印されていた太古の二酸化炭素を、現代の大気中に放出する事になったと考えられている。この事がわかつても石化燃料の使用を止められず、今日も人類はパンドラの箱を開け続いている事になる。

3. リサイクルと現在の最先端処理技術の研究

① リサイクルという資源の有効利用

リサイクルによる再資源化が現在ひとつの産業となりつつある。

例えば、ペットボトルを学生服やユニホームに作り変える、二次加工とも言うべき「マテリアルリサイクル」から、車や貴金属などの「分離型リサイクル」そして合成木材などの「複合型リサイクル」油化リサイクルなどの「循環型リサイクル＝ケミカルリサイクル」に大きく分類できる。

またバイオマスとして薪を燃やしたり、動物の糞を燃料にするといった伝統的なものから「コンポスト化」や近年行われているサトウキビなどをエタノールにして車のバイオエタノール燃料として使ったり、生ゴミで発電する「サーマルリサイクル」など進歩を続ける様々な技術がある。

進歩の速度は日進月歩であるため、現在のリサイクル技術がベストかどうかが問われると同時に、当然リサイクルにも資源と費用、その上労力もかかるので費用対効果を疑問視する声が出てきている。

またリサイクルをする事により、二酸化炭素を余分に発生させるケースもあり、対象となる素材個々への対応と選別が重要となって来る。

② 現在の最先端処理技術

※ 亜臨界技術

亜臨界技術とは臨界点 374°C 22.1Mpa (メガヘクトパスカル) より温度と圧力の低い熱水を亜臨界水と言い、優れた成分抽出作業と共に激しい加水分解作用を起こす。

高温・高圧での処理装置内では、飽和蒸気温度 200°C 以上の高温に達し、バイオマスの加水分解反応が激しく行われ、バイオマスの分子結合の成分組織を持つ有機物が作り出される。

ここで行われる加水分解反応をわかりやすく説明すると、みかんをジュースにした残りの絞りカス 1000kg を、加水分解処理すると 160kg 程度になり実に 6 分の 1 の減容になる計算である。また、それは堆肥として使える。

食品廃棄物や汚泥・廃プラスチック類・紙くず・線維くず・木くず・動物性残渣・医療系廃棄物などの特殊廃棄物等々、特に医療廃棄物の細菌ウイルス・ガン細胞などは高温にて滅菌死滅するため、病院での注射針や点滴介護施設から出る大量のオムツなどにも対応ができる。

この亜臨界での処理は「燃やす事」がないので、焼却・乾燥・脱水・水処理などの処理方法と比べ、有機物の加水分解には溶媒として「水」を使用するためダイオキシンや NOX の発生もなく、環境にやさしい処理技術である。

亜臨界加水分解プラントは現在実用化されており、幾つものプラントが稼動中である。

※ 超臨界技術

超臨界状態とは、水の温度 374°C 以上圧力を 22.1Mpa 以上に上げると、液体でもない気体でも、もちろん固体でもない超臨界水気流体となる。

超臨界水流体とは臨界点より高温、かつ高圧の状態にある気体を呼ぶ。

超臨界状態にある物質は、気体に近い状態から液体に近い状態まで、圧力を変える事により、密度を連続的に変化させる事ができる。特に、臨界点近くでその変化は劇的に起こる。

そのため、物質の特性を利用し抽出溶媒や反応溶媒などへの応用が研究されている。

一例として、食品有機物残渣を超臨界処理装置で処理すると、食品有機物の固体が超臨界水の中で分解され、有機物の分子同士が激しくぶつかり合って反応し「水」になって出てくるのである。

また超臨界 CO_2 によって、原料から成分を抽出する事もでき、これからの応用と更なる可能性を秘めた技術である。

③ 元素分子レベルでの究極リサイクルの提案

亜臨界技術、そして超臨界技術と分解処理技術は、ここ数年すさまじい速度で進歩しており、またバイオ関連技術の研究開発も活発に行われている。

私は以前よりここまで来た技術を使い、リサイクルを元素・分子レベルからの抽出ができないものかと考えていた。

その技術が確立すれば化学原料に分解して行うケミカルリサイクルよりも、「エレメンタリーリサイクル」とも言うべき方法ができるのではないかと考えている。

例えば、車のシュレッダーダストなど多くの産業廃棄物から、元素・分子レベルでの抽出が行われ再利用される事になると廃棄物が資源となり、ほぼ完全に近い「超循環型リサイクル」が実現する可能性が秘められている。

現在の環境技術レベルは、その一步手前まで来ていると思われる。

太古の地球上に 95% 以上あった二酸化炭素を海中に閉じ込める技術や、現在の濃度までにしたバイオなど微細生物・プランクトン、また広葉樹よりも光合成を行い酸素を出していると言われている海草や藻などを使い、バイオメディエーション技術を駆使して、二酸化炭素を減らす、新しい技術の確立も可能であると考えられる。· · · · ·

※ 万物の根源は水である

水は地球上にある 14 億 km^3 の内、海水が 97% 淡水が 3% でその内北極や南極の氷として存在している部分を除くと、我々が使える淡水はわずか 0.01% である。

しかも水は循環している。

2007年6月2日第1回ネパール友好協議会設立総会の、国際フォーラムの後の懇親会に

て「ネパールの人達の平均寿命はなぜ 50 才なのか 環境がよいのに・・・」という話になった。そう言えばアルピニストの野口健さんにお会いした時に「ネパールは水事情が悪く 50.³ 才の平均寿命だ」と聞いたのを思い出した。

また「子供達の就学率が低いのは、毎日 1 時間以上をかけて水汲みに行くのが日課だから」とも言っていた。

香川大学の方からも「日本も戦後井戸水（地下水）から上水道に整備が進み、医学の進歩よりも飲用水の水質の浄化が平均寿命をぐっと押し上げたのだ」との話を聞いた。

その事から、私は体内環境も広い意味での環境問題であると真剣に考えるようになった。そしてその水は命に係わるものだと・・・

約 10 年近く前になるが、愛媛大学医学部との共同研究を行っていた頃、泌尿器科の先生が「腎臓結石や尿管結石ができた患者さんは大変な苦しみようで、見ているだけでもいたまれない気持ちになる。夜も眠れない七転八倒の苦しみを、医師として何とかできないものかと思う。結石の原因はウィルスである。ウィルスがシュウ酸カルシウムを集めるからだという事まではわかった。またある地域に風土病のように異常に多い」と言われていた。そこは聞くところによると日本の名水 100 選に選ばれている地域で、そこの住民は生水（地下水）をよい水だと思い込み、そのまま飲んでいるとの事。おそらくそのウィルスはその地域に自生しているものと思われる。

シュウ酸がほうれん草に多く含まれる事は周知の通りだが、かつお節か小魚と一緒に食べると中和されると言う。

ほうれん草にはかつお節、知ってか知らずか昔の人の知恵は大したものである。

“所変われば水変わる” “水が合わない” などという言葉があるが、ミネラルたっぷりの美味しい水と、体によい安全な水とは違うのだ！

•

•

※ ビジネスへの応用

この話をしたところ、以前から取引のある上場会社から水に関する事業の話があり、数ヶ月の打ち合わせの後、事業譲渡を受ける事となった。

•

•

この浄水システムによると、イオン化した重金属やトリハロメタンはもちろん、ダイオキシンなど、殆どの不純物を除去して純粋な H₂O だけが作り出される。

また塩素でも死なない、シスト・鉛・バクテリア・ウィルスなども完璧に除去する。

これは元々アメリカで海水を真水にするため開発された技術で、NASA のスペースシャトルにおいても人体から出る水分を含む全ての水をリサイクルして還元する装置として採用され、2008 年 11 月 17 日スペースシャトル “エンデバー” が国際宇宙ステーションに運び取り付けた装置と原理は全く同じである・・・

結石のみならず、胃がんや脳血栓他の病気、鳥インフルエンザやエイズなどもウィルスが原因である事もわかつってきた。

まさに人類の進化の歴史はウィルスとの戦いの歴史と言っても過言ではない。

•
•

※ 総合政策として

日本は世界をリードする、クリーンエネルギー技術やバイオマスなどの、すぐれたバイオエコロジー技術を持っている。今後環境技術に特化し環境産業を育成する事により、環境立国として新たな成長期を迎える事ができると信じている。

最近またマスコミなどで、日米同盟という言葉をよく耳にするが、日米が協力して「グリーン・ニューディール政策」を推進する事も、環境問題に新時代が到来するのではないでしようか。

日本も今後、ドイツの緑の党の様な環境とエコロジーを政策の柱とする環境新党がでてきてもよい頃に来ていると思う。その事により環境=平和に繋がっていく事を心から願い期待したい。

“今こそ人類の英知は試されようとしている”

交流磁場誘導焼灼療法のための磁性体針の開発

愛媛大学理工学研究科講師 前原常弘
株式会社アドメテック 八木泉

磁性体を体内腫瘍部に留置し、外部から交流磁場を印加することで、磁性体の発熱を促し、腫瘍を焼灼する治療法の研究開発に取り組んでいる。表層用小型アプリケータ式磁場発生装置の開発については、ほぼ開発済みであり、発熱針について開発を進めた。

<術式>

1. 発熱体として針状に加工した磁性体を子宮頸部に穿刺。
2. 経膣的にアプリケータを挿入、交流磁場を印加。
3. 針の温度を 60°Cまで上昇させ、約 10 分保持。
4. 腫瘍を壊死させる。

図 2 はこれまでに使用していた子宮頸癌用発熱針の概念図である。生体適合性のよいチタンによって磁性体(鉄)を被覆している。子宮頸癌のように面を焼灼する場合、一回の治療に要する針の本数が多くなることが明らかとなり、2 本一対の形状に変更を試みた。これにより、治療に要する針の本数は半減できるが、形状が複雑化するため、逆にコストがあがることがわかった。より簡単化した構造が求められたため、様々な材料を試みた結果、SUS420J2 のみで製作することが最適であることがわかった。図 3 に概念図を示すが、基本的には SUS420J2 のブロックに同じ材料の針を圧入する。SUS420J2 はマルテンサイト系ステンレス鋼であるため、強磁性を有しており、交流磁場中で十分な発熱をみせる。さらに、SUS420J2 は生体適合性を満足するばかりでなく、メスなどへの使用からも明らかなように、刃物鋼であり、針として最適である。

ブロック（以下、基台部と記す）が十分な体積を持っているため、高い発熱効率が得られるだけでなく、形状磁気異方性（磁力線との角度に対する発熱量の依存性）の緩和にも役立つ。図 3 のような概念図に対し、その大きさや針のピッチを決定するため、数種類のサイズを試作し、評価した。図 4 に示すように、基台部には切れ込みを入れ、コップヘルによ

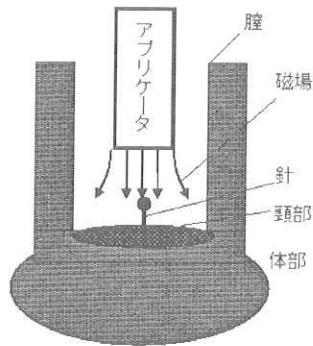


図1 原理図

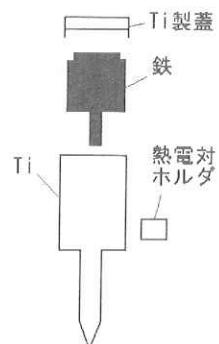


図2 H18 年度型

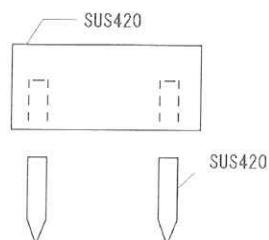


図3 SUS420J2

って確実に固定できるようになっている。記載の針ピッチ x と長さ h 、基台部の高さ y が変数である。は x によって決まる。

図5のようなアクリル製保温槽に鶏肉を入れ、肉の温度が体温近くに保持された状態で、実験を行う。アクリル内の水温は 37°C である。鶏肉の温度が一定となった時点で、加熱を開始する（このとき、鶏肉の温度は表面から深さ 3mm の位置で、約 30°C である）。制御に要する温度情報は熱電対を使用して得た。

今回の実験では 2 対の針を向かい合わせる形で、その温度上昇と肉の焼け方（白変の深さ）を観測する。上面から見た図を図6に示す。鶏肉に対して、2 対の針を向かい合わせ、距離 d をあけて、平行に刺し入れる。その後、アプリケータを近づけ、交流磁場を 10 分印加する。2 本の針の平均温度が 60°C となるよう磁場強度を制御している。平均温度は 1 分以内に 60°C まで達し、制御状態となる。10 分の磁場印加後、鶏肉を半分に切り（図6に示す切断面）、「焼け方」と「深さ」を評価する。

肉の焼け方としては図7に示すように、白変領域が均等な深さとなることが望ましい。 d が大きすぎたり、小さすぎたりする場合は均一な深さに焼くことが出来ない。子宮頸部への治療では表層から基底膜までの深さが 3mm 程度であり、十分な深さに熱を加えるためには 7mm 程度の深さが好ましい。様々な試作品を評価した結果、 $x=d=7mm$ が好ましいことが明らかとなった。また、このとき、 $y=3mm$ であった。

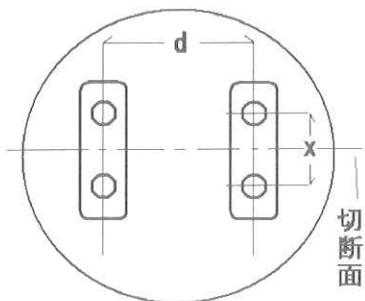


図6 実験時の針の位置(上面図)

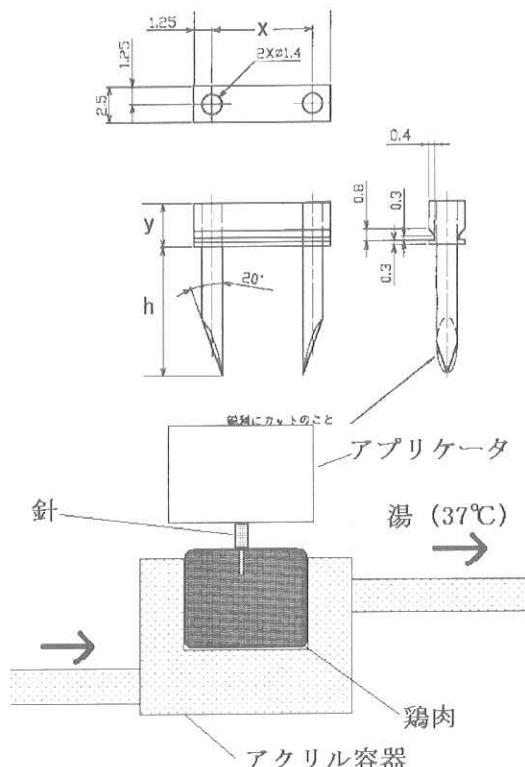


図5 保温槽

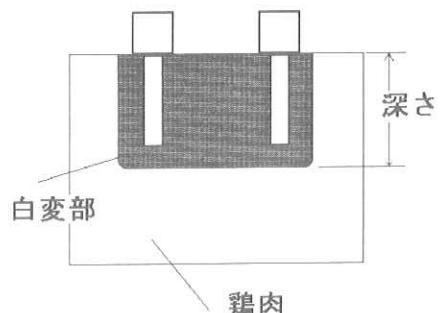


図7 白変領域の概念図

四国西部地域に分布する火山灰の研究

愛媛大学理工学研究科教授

榎 原 正 幸

株式会社四国総合研究所土木技術部

池 田 倫 治

愛媛県西部は九州の給源火山と地理的に隣接していることから、多数の第四系テフラが降灰している。愛媛県西部の第四系に挟在されるテフラ層の給源およびその年代を解明することは、第四紀の九州地域の火山活動サイクルおよびそれらの噴火規模を検討する上で重要なデータベース構築することになる。本研究では、愛媛県内の沖積平野・盆地周辺の第四系に挟在されるテフラ層について岩石学的に検討し、それらの給源および年代について検討した。昨年度および本年度の研究成果は以下の通りである。

(1) 大洲市富士山東部に分布する更新世テフラ

本研究の野外調査によって、大洲市富士山東部の露頭から発見された2層のテフラ層（富士山Iテフラおよび富士山IIテフラ）が発見された。それらは、FT年代値（富士山Iテフラ： 1.5 ± 0.3 Ma, 富士山IIテフラ： 1.4 ± 0.3 Ma）および斑晶組合せが異なり、さらに火山ガラスおよび斑晶鉱物中ガラス包有物の主要元素組成が若干異なる（富士山Iテフラの方が $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ に富み, $\text{FeO} \cdot \text{CaO}$ に乏しい）。富士山Iテフラは、九州北部の大分市南部に分布する敷戸火砕流堆積物（1.1–1.7 Ma），富士山IIテフラは大分県別府湾北部に分布する酒野凝灰岩（ 1.1 ± 0.3 Ma）と類似している。富士山IIテフラと酒野凝灰岩は、九州・中国地方の前期更新世テフラでは珍しいカミングトン閃石を含むことから、対比される可能性が非常に高いことが明らかになった。

(2) 松山市北部の第四系最上部のテフラ層

愛媛大学キャンパス内における縄文時代後期～古墳時代（約 6000～2500 年前）の堆積物から、テフラ起源の火山ガラスおよび斑晶鉱物を見出した。火山ガラスの化学組成・屈折率および斑晶鉱物の化学組成に基づくと、今回検討した火山ガラスおよび斑晶は、少なくとも再堆積した鬼界アカホヤテフラ（約 7300 年前）および姶良 Tn テフラ（約 2.8 万年前）を起源としており、それら以外に、従来発見されていなかった由布・鶴見火山群起源と考えられるテフラも混在していることが明らかになった。

生活習慣病関連遺伝子多型の臨床的評価

愛媛大学大学院医学系研究科教授

三木 哲郎

愛媛大学大学院医学系研究科講師

田原 康玄

株式会社ハプロファーマ代表取締役社長

根本 靖久

【要旨】

C反応性蛋白(CRP)の血中濃度の軽度上昇がアテローム性動脈硬化や心血管疾患のポテンシャルリスクの予測物質となることが示されている。CRP遺伝子には血中濃度と相関する遺伝子多型がいくつか報告されているが、その臨床的意義については十分なエビデンスが得られていない。本研究では、CRP遺伝子上の4つの遺伝子多型(rs3091244, rs1800947, rs1130864, rs1205)について、大規模一般地域住民を対象に血中CRP濃度、ならびにメタボリックシンドロームとの相関を検討した。

対象は、愛媛県下の一般地域住民1,845例とした。一般臨床情報は住民健診時の成績を利用した。高感度CRPは保存血清を用いて定法により測定した。遺伝子多型は末梢血より抽出したDNAを用いてTaqMan法で解析した。

対象者(62±13歳)の平均CRP濃度は0.076±0.086mg/dlであった。CRP濃度はメタボリックシンドロームの各リスク因子(腹部肥満、高血糖、血圧上昇、高中性脂肪、低HDLコレステロール)の重積に伴って有意に増加し、メタボリックシンドローム群では非メタボリックシンドローム群に比して約2倍の高値を示した。解析した遺伝子多型のうち、rs3091244多型とrs1205多型とが血中CRP濃度と有意に相関した。しかし、CRP高値を示すアレルのキャリアでは、逆にメタボリックシンドロームの頻度が有意に低く、この結果は関連する共変量を調整した多変量解析でも確認された。

臨床マーカーとして高感度CRPの意義を正確に理解する上で、CRP遺伝子多型情報を用いる必要性を示した貴重な成績といえる。

【目的】

肥満や高血圧、糖尿病、脂質代謝異常にに関する感受性候補遺伝子多型について、日本人における医学的意義を明らかにすることで遺伝子診断/個別化医療への知見を集約することを目的に、本年度は高感度CRP遺伝子多型と血中CRP濃度、ならびにメタボリックシンドロームとの相関を検討した。

C反応性蛋白(CRP)は急性相反応物質のひとつであり、長い間、感染や炎症の症例のモニターに使用されてきた。最近の研究では、軽度の血中濃度の上昇(高感度C反応性蛋白(hsCRP))がアテローム性動脈硬化や心血管疾患のポテンシャルリスクの予測物質となることが示されている。CRP遺伝子には血中濃度と相関する遺伝子多型がいくつか報告されており、これまでに心血管系イベントへの影響等も重ねて検討してきた。しかし、両者の相関についてはポジティブな成績(Association of polymorphisms in the CRP gene with circulating C-reactive protein levels and cardiovascular events. JAMA. 2006 Dec 13;296(22):2703.)と、ネガティブ成績(C-reactive protein gene haplotypes and risk of coronary heart disease: the Rotterdam Study. Eur Heart J. 2006;27:1331)とが混在しており、一定の見解は得られていない。加えて遺伝子多型と血中CRP濃度との相関についても、

これまでの報告は比較的小さなスケールでの検討が殆どであり、十分なエビデンスが得られていない。そこで本研究では、CRP 遺伝子上で血中濃度との相関が報告されている 4 つの遺伝子多型 (rs3091244, rs1800947, rs1130864, rs1205) について、大規模一般地域住民を対象に血中 CRP 濃度、ならびにメタボリックシンдро́мとの相関を検討した。

【対象と方法】

対象は、愛媛県下の一般地域住民 1,845 例とした。対象者の一般臨床情報は住民健診時の成績を利用した。高感度 CRP およびインスリン値は、健診時に採血した血液サンプルを用いて定法により測定した。インスリン抵抗性の指標である HOMA 指数は、空腹時血糖×インスリン÷405 で求めた。

遺伝子多型は末梢血より抽出した DNA を用いて TaqMan 法で解析した。rs1800947, rs1130864, rs1205 多型の解析は、アプライドバイオシステムズ社で市販されているプライマー/プローブセット（それぞれ C_177490_10, C_7479332_10, C_7479334_10）を用いた。rs3091244 はトリアレル (C/A/T) 多型であるため、TaqMan 法による分析を 2 回行い、補正した蛍光強度を 3 次元的に可視化することで多型を決定した。rs3091244 多型の分析に用いたプライマー/プローブセットを表 1 に示す。また、実際の 3 次元プロットを図 1 に示す。

表 1 rs3091244 多型の解析用いたプライマーとプローブの塩基配列

A アレル用	FAM-AGATGGCCACTCGTTA-MGB VIC-AGATGGCCACTAGTTA-MGB GTTGGAGAGGCAGCTACCA TCCTGCGAAAATAATGGGAAATGGT
T アレル用	FAM-TTAAACGAGTGGCCATC-MGB VIC-CATATTAAACAAGTGGCCATC-MGB GTTGGAGAGGCAGCTACCA TCCTGCGAAAATAATGGGAAATGGT

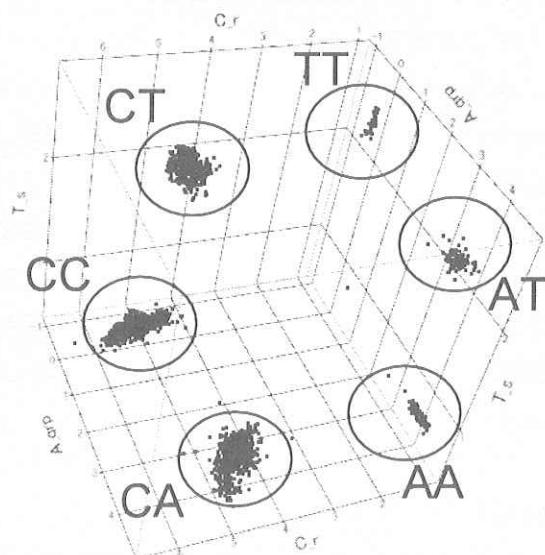


図 1 rs3091244 多型の解析結果

【結果】

対象者の平均年齢は 62 ± 13 歳であり、男性が 43% であった。高感度 CRP の平均値は 0.076 ± 0.086 mg/dl であり、男性で高値を示した (0.084 ± 0.094 , 0.067 ± 0.079 mg/dl, $p < 0.001$)。対数変換後の単相関では、年齢 ($r = 0.141$, $p < 0.001$)、Body mass index ($r = 0.341$, $p < 0.001$)、収縮期血圧 ($r = 0.129$, $p < 0.001$)、中性脂肪 ($r = 0.140$, $p < 0.001$)、血糖 ($r = 0.164$, $p < 0.001$)、HOMA 指数 ($r = 0.247$, $p < 0.001$) と有意な正の相関を、HDL コレステロール ($r = -0.235$, $p < 0.001$) と負の相関を認めた。いずれもメタボリックシンдро́мとの相関を示唆する所見であったことから、国際糖尿病連合 (IDF) のアジア人基準に従って対象を層別化し、高感度 CRP との相関を検討した。IDF アジア人基準では腹囲（男性 ≥ 90 cm、女性 ≥ 80 cm）を必須とし、中性脂肪（150 mg/dl 以上）、HDL コレステロール（男性 < 40 mg/dl、女性 < 50 mg/dl）、血圧（収縮期 ≥ 130 mmHg、かつ/または拡張期 ≥ 85 mmHg）、空腹時血糖（ ≥ 110 mg/dl）

のうち2つ以上があてはまればメタボリックシンドロームと定義される。本研究では、対象者の腹囲を測定していないため、日本肥満学会の基準 ($BMI \geq 25 \text{ kg/m}^2$) で代用した。その結果（表2）、メタボリックシンドロームの各リスク因子の重積に伴って、男女とも高感度CRP値は有意に増加し、メタボリックシンドローム群では非メタボリックシンドローム群に比して約2倍のCRP高値を示した。

表2 メタボリックシンドロームと高感度CRP

重積数	男性			女性		
	人数	平均±SD	p 値	人数	平均±SD	p 値
0	128	0.064±0.075	<0.001	225	0.048±0.071	<0.001
1	277	0.072±0.082		413	0.056±0.068	
2	245	0.091±0.097		252	0.075±0.076	
3	90	0.111±0.118		118	0.093±0.083	
4	41	0.123±0.108		43	0.133±0.128	
5	6	0.126±0.135		7	0.220±0.146	
0/1/2	650	0.078±0.087	<0.001	890	0.059±0.072	<0.001
3つ以上	137	0.115±0.115		168	0.108±0.103	

解析した遺伝子多型と血中高感度CRPとの相関を図2と表3に示す。rs3091244多型では、野生型であるCC多型に比し、TまたはAアレルいずれもCRP高値を示し有意差を認めた。rs1205多型もCRP濃度と有意な相関を示したが、白人を中心として相関が報告されてきたrs1800947とrs1130864については日本人において再現性は確認されなかった。これらの成績は男女別の検討でも同様であった。

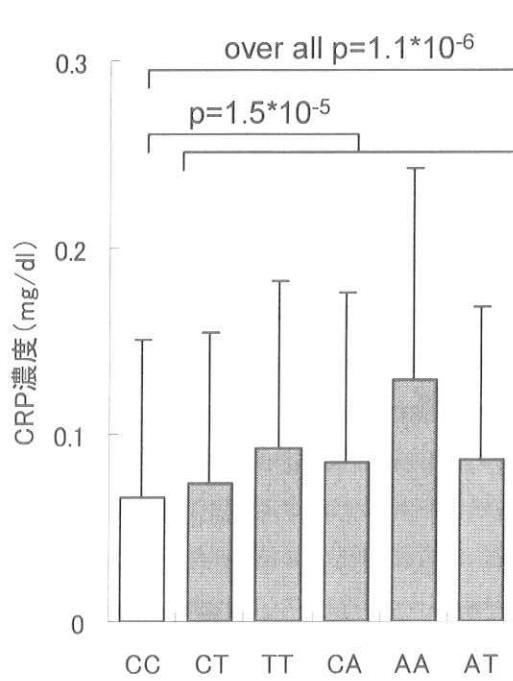


図2 rs3091244多型と血中CRP濃度

表3 CRP遺伝子多型と血中濃度

rs1800947		
GG	-	0.407
GC	0.067±0.082	
CC	0.075±0.086	
rs1130864		
GG	0.074±0.088	0.582
GA	0.075±0.079	
AA	0.094±0.093	
rs1205		
TT	0.063±0.080	<0.001
TC	0.079±0.084	
CC	0.098±0.106	

そこで次に、これら有意性を示した遺伝子多型のうち、rs3091244 多型が高感度 CRP とメタボリックシンドロームとの相関関係に与える影響について検討した（図 2）。対象者を高感度 CRP 濃度で男女別に 3 分割し、各 3 分位におけるメタボリックシンドロームの頻度を多型別に検討した。その結果、CRP 濃度の増加に比例してメタボリックシンドロームの頻度は有意に増加した。しかし、遺伝子多型別の検討では、CRP 高値を示す A/T アレルキャリアで逆にメタボリックシンドロームの頻度が低値であった（図 2）。同様のことは、メタボリックシンドロームに対するロジスティック回帰分析でも認められ、高感度 CRP がメタボリックシンドロームと正相関するのに対し、CRP 高値を示す A/T アレルはメタボリックシンドロームの有意な負の因子（予防的因子）として抽出された（表 4）。一連の成績は rs1205 多型についても同様であった。

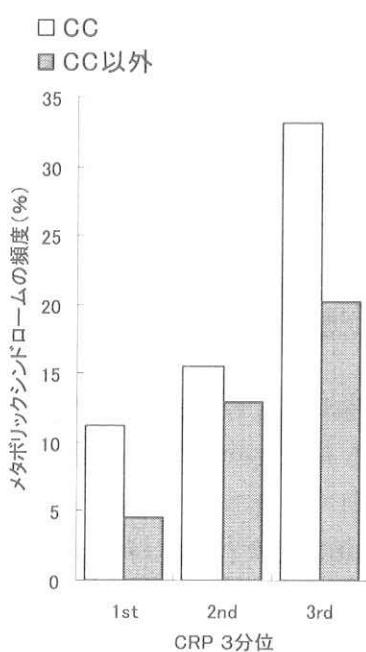


図2 メタボリックシンドロームに対する血中 CRP 濃度と rs3091244 多型との交互作用

表4 メタボリックシンドロームに対するロジスティック回帰分析

	odds (95% C. I.)	p
年齢（歳）	1. 009 (0. 998–1. 021)	0. 120
性別（男性）	1. 319 (0. 986–1. 764)	0. 062
HOMA 指数 (log)	68. 1 (38. 12–121. 7)	<0. 001
hsCRP (log)	2. 391 (1. 683–3. 397)	<0. 001
rs3091244 多型 (CC 以外)	0. 582 (0. 433–0. 781)	<0. 001

【考察】

本研究における大規模一般地域在住を対象とした検討から、CRP 遺伝子の rs3091244 多型と rs1205 多型とが、日本人において血中高感度 CRP 濃度と強く相関することが明らかとなった。これまで、CRP 遺伝子多型と血中高感度 CRP 濃度との相関をみた大規模な検討はなく、日本人におけるエビデンスを大規模サンプルを対象とした検討から提示した点で本研究の意義は大きい。一方、白人を対象に血中濃度との相関が繰り返し報告されてきた rs1800947 多型と rs1130864 多型については日本人で相関を認めなかった。このことも日本人独自のエビデンスを示した本研究の意義を裏付ける知見といえよう。

一方、臨床的には、炎症性マーカーとしての高感度 CRP の意義を正しく理解する上で、遺伝情報を用いる必要性が提示された。すなわち、遺伝的に CRP 高値を示すケース（rs3091244 多型の A/T キャリアなど）では、血中 CRP 値を臨床指標として用いた場合、本来の病態を過大評価することが示された。この傾向は、特に血中 CRP 濃度が高値になるほど顕著であったことからも、CRP を臨床マーカーとして用いる上で遺伝子情報の利用が必要不可欠といえよう。

「認知症鑑別診断支援システム」開発のための研究

愛媛大学大学院医学系研究科教授	三木 哲郎
愛媛大学大学院医学系研究科講師	田原 康玄
愛媛大学附属病院診療科老年科専攻医	田口 敬子
株式会社大栄電機工業代表取締役	大野 栄一
株式会社大栄電機工業技術責任者	大森 順二
株式会社大栄電機工業主任開発者	田野岡 直人
株式会社大栄電機工業技術開発者	時任 史人
株式会社大栄電機工業専門担当者	筒井 孝志

【目的】

認知症の原因疾患は多岐にわたり、主な疾患として、アルツハイマー型認知症、脳血管性認知症、レビー小体型認知症、前頭側頭型認知症などが挙げられる。認知症の早期診断・早期治療、進行度の判定等は適切かつ効率的な医療を実践する上で不可欠である。そこで本共同研究では、認知症の鑑別診断、進行度判定を支援するプログラム「認知症鑑別診断支援ソフト」を開発するための基礎研究を行っている。

【方法と結果】

これまでの学術報告や自験データをもとに、認知症診断プログラムのプロトタイプを作成した。プロトタイプのブラッシュアップ並びに構成概念妥当性、外的基準妥当性、感度・特異度を検証する目的で、松山市及び松山市周辺の医療機関の協力を得て、データを収集した。長谷川式簡易知能評価スケールなどの既知の評価スケールと共にデータを収集し、解析を行った。解析結果を元に、独自の認知症診断プログラムを作成した。今後、かかりつけ医と専門医が診療情報を共有できるようなソフトの開発を予定している。

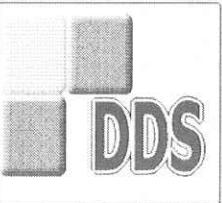
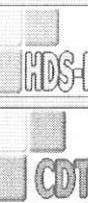
われわれが共同研究をしているスウェーデンのウメオ大学でも、認知症診断プログラムの作成を行っている。ウメオ大学ではTV電話を用いた遠隔医療を行っており、今後遠隔医療の現場で、認知症診断のツールとして認知症診断プログラムの利用を予定している。日本で「認知症鑑別診断支援ソフト」が完成すれば、離島や山間地域を多く有する愛媛でも非常に有用であると思われる。

認知症の早期診断及び鑑別診断支援ツールとして有用性の高いシステム構築を目指している。

DDS 画像 :

自 DDS

基本登録 *

使用者 三木 哲郎	日付 2009/02/19
患者選択 氏名 大森 順二 生年月日 明治33年01月01日 性別 男性 同意 有り 都道府県 愛媛県	
    	
患者ID 35340000-0F00-3534-74BF-59064095710	
<ul style="list-style-type: none"> * 患者情報 * 関連機関 * 各種診断スケール - 認知症 <ul style="list-style-type: none"> ピック病(PICK) パーキンソン病(PD) アルツハイマー病(AD) レビー小体型認知症(DLB) 前頭側頭型認知症(FTD) 筋萎縮性側索硬化症(ALS) クロイツフェルト・ヤコブ病(CJD) 脳血管性認知症(CVAD) 正常圧水頭症(NPH) もの忘れ(MI) 慢性硬膜下血腫(OSH) 脊髄小脳変性症(SCD) 	

●地域包括支援センター

コード	名称	都道府県	件数
38201	松山市地域包括支援センター久谷	U:	
38201	松山市地域包括支援センター東・拓南	U:	
38201	松山市地域包括支援センター中島	U:	
38201	松山市地域包括支援センター石井	U:	
38201	松山市地域包括支援センター久米	U:	
38201	松山市地域包括支援センター桑原	U:	
38201	松山市地域包括支援センター西	U:	
38201	松山市地域包括支援センター三津浜	U:	
38201	松山市地域包括支援センターうちみや	U:	
38201	松山市地域包括支援センター道後	U:	
38201	松山市地域包括支援センター勝山	U:	
38201	松山市地域包括支援センター城西	U:	
38201	松山市地域包括支援センター北条	U:	
38202	今治市中央地域包括支援センター	U:	
38202	今治市玉川地域包括支援センター	U:	
38202	今治市伯方地域包括支援センター	U:	
38203	宇和島市地域包括支援センター	U:	
38204	八幡浜市地域包括支援センター	U:	
38205	新居浜市地域包括支援センター	U:	
38206	西条市地域包括支援センター	U:	
38207	サブセンター大洲中央	U:	
38207	サブセンター大洲西	U:	
38207	サブセンター大洲東	U:	
38207	大洲市地域包括支援センター	U:	
38210	伊予市地域包括支援センター	U:	
38213	四国中央市地域包括支援センター	U:	
38213	四国中央市地域包括支援センター川之江新宮支所	U:	
38213	地域包括支援センター川之江新宮支所	U:	
38213	四国中央市地域包括支援センター土居支所	U:	
38214	市子市地域包括支援センター大洲	U:	

テストチップの製作とその解析に基づく製造容易化設計のための新故障モデルとそのテスト・故障診断に関する研究

愛媛大学大学院理工学研究科教授

高 松 雄 三

愛媛大学大学院理工学研究科准教授

高 橋 寛

愛媛大学大学院理工学研究科准教授

樋 上 喜 信

明治大学コミュニケーション学部准教授

山 崎 浩 二

明治大学理工学部専任講師

堤 利 幸

徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授

橋 爪 正 樹

徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部准教授

四 柳 浩 之

半導体理工学研究センター技監

宮 本 俊 介

1. はじめに

近年の半導体微細化技術の進展とともに、製品の品質確保と早期歩留まり確保が必要不可欠となっている。そのため、テストと故障診断の結果から得られる情報を用いて、欠陥の箇所、欠陥の原因、および欠陥の統計的な振る舞いを解析・フィードバックすることで、製品全体の高い品質保証（製品のライフタイム内の歩留まり目標達成）および適切なテストコスト実現が必要である。最近の動向として、次世代チップに対するDFM技術（Design For Manufacturability：製造容易化設計）の開発が望まれている。これら技術は、製品の設計および製造プロセスの調整を短期間にを行うための極めて重要な技術である。DFM技術を開発するためには、次世代チップに対するDFY（Design For Yield：歩留まり向上設計）のためのテスト、故障診断およびDFD（Design For Debug or Diagnosis：診断容易化設計）技術の研究が必要不可欠であると言われている。

さらに、次世代チップにおいては、配線の微細化、長距離化、および銅配線の導入等によって、スクラッチ、ボイド等の欠陥が、配線間の短絡（ショート）、配線およびビアの断線（オープン）からなる故障として顕在化する。それらの故障は、チップの品質および性能に大きな影響を与えると報告されている。また、微細加工によるリソグラフィの困難化で、マスク転写に起因するショートやオープンが顕在化し、その故障がシステム不良の原因となる。次世代チップで顕在化する故障は、従来の单一縮退故障モデルだけでは不十分であり、次世代チップにおいて考慮しなければならない物理現象を的確に表す故障モデルを新たに構築することが必要不可欠である。

本研究の目的は、1) 意図的に故障を挿入したテストチップ（TEG）を設計・製作し、特に、オープン故障を実故障に近いレベルでモデル化すること、および2) その新しい故障モデルに対するテスト・故障診断法に関する研究である。提案する新しい故障のモデルに基づくテスト・故障診断法は、次世代チップに対する最適なコストでのテスト・故障診断を行うための技術に関する研究である。本研究は、今後ますます重要となる製品の品質確保と早期歩留まり確保を実現する技術の基礎となる。

2. 研究内容

研究は、以下の計画に従って進めている。

計画1：次世代チップ向きのオープン故障モデルの提案

次世代チップにおける欠陥を的確に表現できるオープン故障モデルを提案する。この故障モデルは、回路のレイアウトデータをはじめとする各種のパラメータを利用し、故障信号線における電圧値を隣接信号線の影響で表現するものである。言い換えると、図1に示すような故障信号線における論理値が、その故障信号線に隣接する信号線の論理値に依存して決定される故障モデルである。

計画2：モデル化された故障を挿入したテストチップ（TEG）を設計・製作、および故障影響の測定

モデル化した故障を挿入したTEGを設計、製作、および測定し、実故障に近い形でオープン故障モデルを提案する。TEGは、90ナノプロセスによって製作する。

計画3：新しいオープン故障モデルに基づくテスト評価法並びに適応テスト生成法の提案

新しい故障モデルに基づいて、縮退故障テスト集

合のオープン故障検出率を評価する。既存のテスト集合ではオープン故障の検出率が不十分であると判定された回路に対して、適応テストを生成する手法を提案する。

計画4：新しいオープン故障モデルに基づく故障診断法の提案

レイアウト情報を含む回路パラメータを利用した故障診断法を提案する。隣接信号線に影響を受けるオープン故障モデルに基づいて、隣接信号線の影響を考慮した故障の励起条件を明確にし、その条件を考慮した故障候補の絞込み法を提案する。

3. 研究の進捗および成果

上記の計画に対して以下のような進捗状況および成果を得ている。

計画1に関しては、電子回路シミュレータ (*HSpice* シミュレーション) およびアンソフ社の電磁界シミュレータ *Eminence* を利用して、微細化加工の配線構造における電位の変化を2次元、3次元的に解析した。シミュレーション結果から、隣接信号線の電位の変動によって故障信号線の電位が変動することが示された。そこで、故障信号線における論理値が、その故障信号線に隣接する信号線の論理値に依存して決定されるオープン故障モデルを提案する^{1),2),4),5)}。

図2を利用して、提案するオープン故障モデルの例を示す。いま、ある入力パターンにおいて故障信号線 v の論理値 $Val_v = 0$ とする。 v に隣接する信号線 a_i の論理値は、それぞれ、 $Val_{a1} = 0$, $Val_{a2} = 1$, および $Val_{a3} = 1$ とする。この場合、提案する故障モデルにおいては、隣接信号線の影響によって故障信号線 v の論理値 Val_v は、故障値1となる。この入力パターンによって故障信号線 v のオープン故障が励起する。

更に、隣接信号線の信号変化によってオープン故障をもつ信号線に故障が励起する故障モデルを提案し、2007年8月に、発明名称：「隣接信号線の動的干渉を考慮した故障モデルとそれを用いた故障検査プログラム」(特願2007-216141)を特許出願した^{6),7)}。

計画2に関しては、隣接配線がオープン故障に及ぼす影響を解析するためにテストチップ (TEG) を90ナノプロセスで設計した。TEG設計のために、(1)オープン故障の作り込み、(2)隣接配線の影響の作り込み、および(3)オープン故障のモデル化のためのTEGの工夫とその計測に関して研究を行った。故障の作り込みでは、隣接配線との影響をTEG上に反映するために、物理的にほぼ等価な故障として実現することが望ましい。このため、サイズ効果を考慮

することによって、ほぼ等価な物理故障を実現する方法により設計した。また、ISCASベンチマーク回路に対して、トランスマッショングートを利用した擬似オープン故障を作りこんだ回路を設計した。

表1に設計したTEGの概要を示す。設計したTEGは、物理故障を解析するための配線構造TEGとオープン故障を挿入したISCASベンチマーク回路のTEGからなる。配線構造TEの面積は200um×30um、マクロ回路TEの面積は200um×30um、ベンチマーク回路TEの面積は200um×60umあるいは200um×90umである。8ビットのTE選択信号によって選択されたTEのオープン故障の電気的影響が測定されるように設計されている。

TEGチップのレイアウトを図3に示す。152個の配線構造TEと26個のマクロ回路・ベンチマーク回路TEが、図3のようにレイアウトされている。

次に、製作したオープン故障研究用TEGを測定するために簡易LSIテストボードを設計・製作した。図4には、製作した簡易LSIテストボードの構成図を示す。簡易LSIテストはFPGAボードを介してDUTボード上のチップをコンピュータ(PC)から制御することによってデジタル測定を行う。また、計測器を接続することによってさらにアナログ測定也可能となる^{9),11)}。

TEGに様々なオープン故障配線のテストエレメント(TE)が組み込まれている。図5は、横9本に並んだ配線(中央のIN4がオープン故障)のオープン故障TEである。このTEを簡易LSIテストによって測定した際に、TEGのチップ端子電圧をオシロスコープで確認したものが図6である。オープン故障配線IN4の両隣IN3とIN5がハイレベルのときのみ、オープン故障配線IN4はハイレベルになり、オープン故障配線IN4に接続する出力端子OUT4はハイレベルになっている。観測結果から隣接配線の電圧変化(論理値)によってオープン故障をもつ信号線に故障が励起することが示された。

これらのことから、まず、電子回路シミュレーションおよび電磁界シミュレーションの結果に基づいて、隣接信号線を入力変数とする多数決関数に基づくオープン故障モデルを提案した^{1),3),4),5)}。次に、TEGの計測結果に基づいて隣接信号線を入力変数とする閾値関数に基づくオープン故障モデルを提案した^{2),8),9),10),11),12)}。

計画3に関しては、縮退故障テストを利用した多数決関数に基づくオープン故障モデルに対するテスト生成^{3),4)}および遷移遅延故障テストを利用した動的なオープン故障に対するテスト生成法⁷⁾をそれぞ

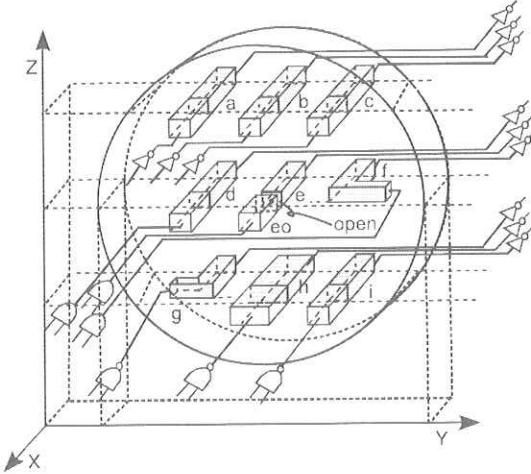


図 1: 隣接信号線を考慮したオープン故障モデル

れ提案した。提案したテスト生成法のプロトタイプを作成し、ISCAS ベンチマーク回路に適用した評価実験を行った。評価実験結果から、提案手法によって高いオープン故障検出率をもつテスト集合が生成できることを示した。さらに、閾値関数に基づくオープン故障モデルに対するテスト生成法を提案し、ISCAS ベンチマーク回路に適用した評価実験を行った¹²⁾。評価実験結果から、提案手法によって高いオープン故障検出率をもつテスト集合が生成できることを示した。

計画 4 に関しては、多数決関数に基づくオープン故障モデルを利用した故障診断法のプロトタイプを作成し、評価実験を行った^{1),5)}。また、閾値関数に基づくオープン故障モデルを利用した故障診断法のプロトタイプを作成し、評価実験を行った^{2),10)}。評価実験結果から、提案手法をベンチマーク回路に適用し、多くの故障回路において故障箇所を一か所に指摘できることがわかった。また、オープン故障箇所を信号線の 25% の範囲に指摘できることもわかった。

更に、動的なオープン故障モデルに基づく故障診断法の中間報告を発表した⁶⁾。

4. まとめ

本研究では、目的 1) 意図的に故障を挿入したテストチップ (TEG) を設計・製作し、特に、オープン故障を実故障に近いレベルでモデル化すること、および目的 2) その新しい故障モデルに対するテ

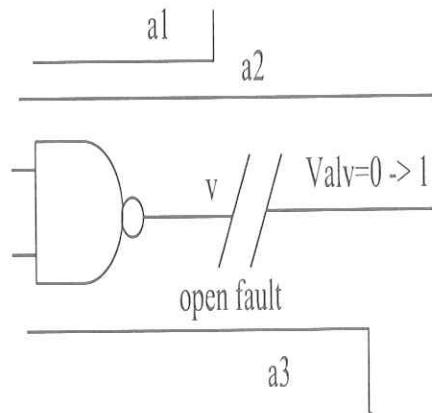


図 2: 新しいオープン故障モデル

ト・故障診断法を開発することを目的としている。

具体的には、以下の成果を得た。

成果 1) 次世代チップ向きのオープン故障モデルとして、隣接信号線の多数決関数に基づくオープン故障モデルおよび隣接信号線の閾値関数に基づくオープン故障モデルを提案した。

成果 2) モデル化された故障を挿入したテストチップ (TEG) を設計・製作し、オープン故障における隣接信号線故障の影響を測定した。

成果 3) 新しいオープン故障モデルに基づくテスト評価法並びに適応テスト生成法の提案し、ベンチマーク回路に対する評価実験を行った。

成果 4) 新しいオープン故障モデルに基づく故障診断法の提案し、ベンチマーク回路に対する評価実験を行った。

主な関連発表

1) 高橋 寛, 樋上喜信, 高松雄三, 山崎浩二, 堤 利幸, 橋爪正樹, 四柳浩之, “オープン故障に対する一故障モデルの提案とその故障診断,” LSI テスティングシンポジウム, pp. 181-186, 2006.

2) 山崎浩二, 堤 利幸, 高橋 寛, 樋上喜信, 高松雄三,, 橋爪正樹, 四柳浩之, “隣接信号線を考慮したオープン故

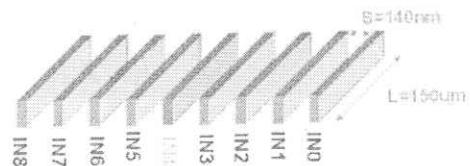


図 5: 配線 TEG

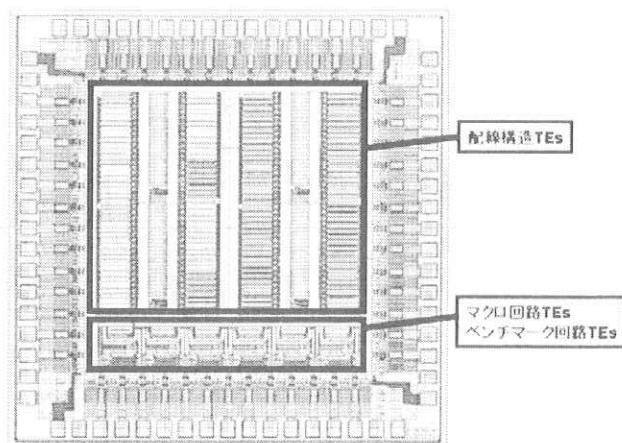


図 3: TEG チップのレイアウト

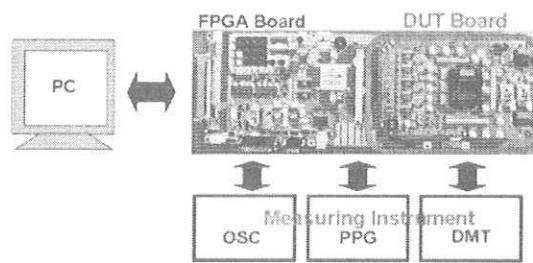
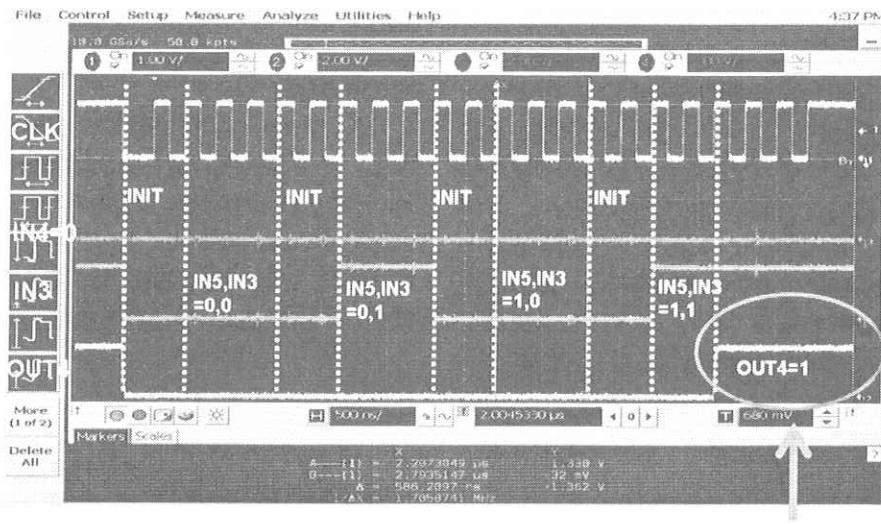


図 4: 簡易 LSI テスタボード



画面上が1のとき
故障出力が1になる

図 6: 測定結果

表 1: TEG チップ仕様の概要

プロセス概要	CMOS 90nm 1-poly 6-metal 電源電圧：通常トランジスタ：1.0V 高耐圧トランジスタ：2.5V 容量: 1-5Metal を用いた MIM Well: Triple Well (Deep N-Well オプションを利用)
チップ寸法	2.5mm 角
IO パッド数	68 ピン (電源込)
パッケージ	80 ピン QFP
テストエレメント	配線構造 TE : 152 個 ベンチマーク回路 TE : 26 個

障の一診断法,” LSI テスティングシンポジウム, pp.187-192, 2006.

3) 高橋 寛, 樋上喜信, 吉川達, 清水 祐紀, 相京 隆, 高松雄三, “縮退故障テストを利用したオープン故障のテスト生成法,” 電子情報通信学会総合大会, 2007.

4) H. Takahashi, Y. Higami, T. Kikkawa, T. Aikyo, Y. Takamatsu, K. Yamazaki, T. Tsutsumi, H. Yotsuyanagi, and M. Hashizume, “Test Generation and Diagnostic Test Generation for Open Faults with Considering Adjacent Lines,” Proc. IEEE Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems Symposium, pp.243-251, 2007.

5) H. Takahashi, Y. Higami, S. Kadoyama, T. Aikyo, Y. Takamatsu, K. Yamazaki, T. Tsutsumi, H. Yotsuyanagi, and M. Hashizume, “Clues for Modeling and Diagnosing Open Faults with Considering Adjacent Lines,” Proc. IEEE Sixteenth Asian Test Symposium, pp.39-44, 2007.

6) 高橋 寛, 樋上喜信, 相京 隆, 門山周平, 渡部哲也, 高松雄三, 堤 利幸, 山崎浩二, 橋爪正樹, 四柳浩之, “隣接信号線を考慮した動的なオープン故障に対する故障診断法,” 信学技報, DC2007-68, 2008.

7) 高橋 寛, 樋上喜信, 渡部哲也, 相京 隆, 高松雄三, “動的なオープン故障に対するテストパターン生成法,” 電子情報通信学会総合大会, 2008.

8) M. Hashizume, Y. Yamada, H. Yotsuyanagi, T. Tsutsumi, K. Yamazaki, Y. Higami, H. Takahashi, Y. Takamatsu, “Fault Analysis of Interconnect Opens in 90nm CMOS ICs with Device,” Proc. the 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, pp.249-252, 2008.

9) 堤 利幸, 刈谷泰由紀, 山崎浩二, 橋爪正樹, 四柳浩

之, 高橋 寛, 樋上喜信, 高松雄三, “TEG チップを用いたオープン故障の解析,” 信学技報, DC2008-31, 2008.

10) K. Yamazaki, T. Tsutsumi, H. Takahashi, H. Higami, T. Aikyo, Y. Takamatsu, H. Yotsuyanagi, M. Hashizume, “A Novel Approach for Improving the Quality of Open Fault Diagnosis,” Proc. IEEE the 22nd International Conference on VLSI Design, pp.85-90, 2009.

11) H. Yotsuyanagi, M. Hashizume, T. Tsutsumi, K. Yamazaki, T. Aikyo, Y. Higami, H. Takahashi, Y. Takamatsu, “Fault Effect of Open Faults Considering Adjacent Signal Lines in a 90 nm IC,” Proc. IEEE the 22nd International Conference on VLSI Design, pp.91-96, 2009.

12) 渡部哲也, 高橋 寛, 樋上 喜信, 山崎浩二, 堤 利幸, 橋爪正樹, 四柳浩之, 高松雄三 “隣接信号線を考慮したオープン故障のテストパターンについて,” 信学技報, DC2008-74, 2008.

フライアッシュ造粒砂を使用したコンクリートの諸性質について

愛媛大学大学院理工学研究科教授 氏 家 獻

愛媛大学大学院理工学研究科助教 間 崎 慎一郎

愛媛大学大学院理工学研究科 木 下 雄 司

株式会社相原組碎石部 相 原 達 志

1. はじめに¹⁾

コンクリートは、社会基盤施設を構築するために欠かせない重要な構造材料の一つであり、適切な設計及び施工を行えば、安全で耐久性のある構造物を構築できるという特徴を有している。

コンクリート細骨材に関して、当初用いられていた川砂の枯渇による採取禁止から海砂の使用へと移行していった。しかし、海砂の過剰採取による潮流の変化や生態系への悪影響等の環境問題が危惧されるようになつた。これらの理由により海砂の採取規制、または採取禁止となつた。そこで安定生産が見込まれる碎砂が、コンクリート細骨材の主へと推移している。

従来の海砂・川砂は角がとれて丸みを帯びておりコンクリート用細骨材として適しているが、碎砂は形状が角張るため、使用すると同一スランプ量を得る単位水量が増えるという欠点がある。そのため碎砂は、川砂や海砂の代替細骨材として十分であると言がたい。

現在、石炭燃焼による発電が地球温暖化に影響することは懸念される材料ではある。だが、石炭が資源として豊富なこと、供給が比較的安定していること、燃焼技術、排煙に対する環境対策が進んでいること等から、今後とも我が国における石炭火力発電所は重要な電力源である。発電所の運転に伴い、定常に年間 1000 万トン程度のフライアッシュが副産される。一方、副産物をリサイクルすることが法的に規制されるようになってきた。フライアッシュを活用することは、循環型社会形成に貢献する観点から、有効利用の促進が望まれている。フライアッシュは副産物であるが故、その有効利用が環境負荷評価低減に資することは明らかである。

既往の研究成果により、フライアッシュのコンクリートにおける利用については、フライアッシュセメント、コンクリート混和材などの方法で利用され、球形微細粒子のため流動性の改善などが確認されているが、フライアッシュの造粒を行い、川砂や海砂の代替細骨材として利用するという検討、研究については不十分である。

そこで本研究において、フレッシュコンクリートと硬化後のコンクリートにおいて検討、研究した。

まず、フライアッシュ造粒砂の基本的性質を調べるた

めに、吸水率試験、比重試験を行い、碎砂と海砂を比較した。また、モルタル、コンクリートの配合に必要な表面乾燥飽和状態の判定方法を 3 種類行い、それらの結果を参考にして、モルタル、コンクリートを作成し、特にフレッシュ時の性能を従来使用されている碎砂と比較検討した。モルタルでは、時間経過に伴うフロー値の測定を行い、コンクリートでは、時間経過に伴うスランプ値と空気量の測定を行つた。これらの試験を行い、碎骨材としてフライアッシュ造粒砂を使用した場合の流動性改善を確認した。

さらに、細骨材としてフライアッシュ造粒砂を使用した細骨材としてフライアッシュ造粒砂、碎砂をそれぞれ使用した供試体を作製し、凍結融解試験、中性化促進試験、乾燥収縮試験、透気試験、塩化物イオンに対する実効拡散係数の試験を行い、フライアッシュ造粒砂を用いたコンクリートの耐久性能の比較検討を行い、フライアッシュ造粒砂の利用価値を評価することを試みた。

2. 実験概要

2.1 モルタルおよびフレッシュコンクリートについて

1) 電気抵抗値測定による吸水率判定法²⁾

一般に細骨材の電気抵抗値は、含水状態によって変化する。細骨材粒子の表面に表面水が存在している場合、電気抵抗値は非常に小さな値になり、表面水が存在しない場合は、非常に大きな値になる。これは、通電の経路が粒子表面や粒子間に存在する水分であるということを示している。電気抵抗値が非常に小さな値から非常に大きな値に変化する状態は、表面水が失われた状態であり、電気抵抗値が急変したときの含水率が吸水率である。本研究では、電気抵抗値の変化をより明確に判定するため、電解質である NaCl を添加する。

電気抵抗値測定には、LCR メーターを使用した。絶対乾燥状態の細骨材を用意する。その質量に対して水を加えて含水率を 5~50% の間で変化させ、含水率が 3~5% 増加させるごとに電気抵抗値を測定する。NaCl を入れ 1 分間振とう攪拌し、3 分静置した後、測定容器に試料を 3 層に分けて、各層をモルタル供試体成形用突き棒で 15 回突き固めて充填した。そして、LCR メーターをつなぎ、

電気抵抗値がほぼ安定したときの値を測定値とした。

吸水率を決定するために、電気抵抗値を常用対数値で表示し、データをグラフより高含水率域と低含水率域の2組にわけ、それぞれを最小2乗法で直線近似し、2直線の交点を表乾状態とし、そのときの含水率が吸水率とした。

2) フローコーンを用いた通常の表乾判定

比重試験はJIS A 1134の規定に従い行った。細骨材の表面にまだいくぶんの表面水があると思われるとき細骨材をフローコーンに緩く詰める。突き棒で25回軽く突き、フローコーンを鉛直に引き上げる。このとき突き棒を砂の上面にのせ、突き棒の自重のみで突く。この方法を繰り返し、フローコーンを引き上げたとき細骨材のコーンが初めて崩れたときを表面乾燥飽和状態とする。

3) フローコーンを用いた軽量骨材用表乾判定

細骨材の表面にまだいくぶんの表面水があると思われるとき細骨材をフローコーンに緩く詰める。突き棒の先端でフローコーンの約1/3の高さの位置を四方から10回ずつ軽く叩く。このときフローコーンの表面より約10mm離れた位置から突き棒の先端で軽く叩く。10回叩くのに要する時間は5秒程度とする。上面をならし、フローコーンを鉛直に静かに引き上げる。この方法を繰り返し、フローコーンを引き上げたときに、細骨材のコーンが初めて崩れたときを表面乾燥飽和状態とする。

4) 圧縮強度試験、フロー試験用のモルタルの配合

・圧縮強度試験³⁾

圧縮強度試験はJIS A 1108の規定に従い行った。圧縮強度試験、フロー試験用モルタルの配合を表2-1、表2-2に示す。単位水量を300kgで固定し、水セメント比を50%で実験を行った。ただし、碎砂、3種のフライッシュ造粒砂(FA₁, FA₂, FA₃)は密度が異なるため(密度は表2-3、表2-4に示す)、質量で置き換えるのではなく、体積でそれぞれの砂を置き換える。その他の配合や使用材料は全て一致させ、フロー試験及び圧縮強度試験を行った。

表2-3 粒度調整の有無によるフロー値、密度、吸水率の比較

		粒度調整なし	粒度調整あり
FA ₁	フロー値(mm)	184	177
	密度(g/cm ³)	1.7	1.7
	吸水率(%)	40.3	38.4
FA ₂	フロー値(mm)	197	145
	密度(g/cm ³)	1.73	1.74
	吸水率(%)	37.3	36.5
FA ₃	フロー値(mm)	174	181
	密度(g/cm ³)	1.73	1.76
	吸水率(%)	40.3	34.6
碎砂	フロー値(mm)	156	
	密度(g/cm ³)	2.53	
	吸水率(%)	2.29	

表2-4 表乾判定法の違いによるフロー値、密度、吸水率の比較

		通常	軽量骨材用
FA ₁	フロー値(mm)	184	223
	比重(g/cm ³)	1.7	1.67
	吸水率(%)	40.3	42.6
FA ₂	フロー値(mm)	197	228
	比重(g/cm ³)	1.73	1.67
	吸水率(%)	37.3	43.3
FA ₃	フロー値(mm)	174	211
	比重(g/cm ³)	1.73	1.71
	吸水率(%)	40.3	41.3
碎砂	フロー値(mm)	156	
	比重(g/cm ³)	2.53	
	吸水率(%)	2.29	

表2-1 モルタルの示方配合(通常の表乾判定、粒度調整後)

水セメント比(%)	水(kg)	セメント(kg)	碎砂(kg)	FA ₁ (kg)	FA ₂ (kg)	FA ₃ (kg)
50	300	600	0	880.6	0	0
			0	0	850	0
			0	0	0	870.4

表2-2 モルタルの示方配合(軽量骨材用表乾判定法、粒度調整なし)

水セメント比(%)	水(kg)	セメント(kg)	碎砂(kg)	FA ₁ (kg)	FA ₂ (kg)	FA ₃ (kg)
50	300	600	1308	0	0	0
			0	865.3	0	0
			0	0	879.6	0
			0	0	0	882.6

表 2-5 モルタルの示方配合(時間経過に伴うフロー値測定)

水セメント比(%)	水(kg)	セメント(kg)	フライアッシュ造粒砂(kg)	砕砂(kg)	川砂(kg)	フロー値(mm)
50	270	540	931.9	0	0	200±10
	345	690	0	1118.7	0	
	320	640	0	0	1219	

表 2-6 コンクリートの示方配合(時間経過に伴うスランプ及空気量測定用)

セメント水比(%)	碎骨材率(%)	単位量(kg/m ³)					AE減水材(%)	AE材(%)	スランプ(cm)	空気量(%)
		水	セメント	砕砂	フライアッシュ造粒砂	碎石				
2	47	158	316	297	365	967	0.3	0.7	10±2	4±0.5
		187	374	791	0	902	0.3	0		

・時間経過に伴うフロー値測定用モルタルの配合

時間経過に伴うフロー値測定用モルタルの配合を表 2-5 に示す。水セメント比は 50%である。配合はフロー値を 200±10 (mm) でコンシスティンシーを同一にした場合の単位水量を求めたものである。細骨材として使用した砕砂は通常の表乾判定方法でフライアッシュ造粒砂は軽量骨材用表乾判定方法で表面乾燥飽和状態を判定する。本研究での細骨材は次の 4 種類である。以下表面乾燥飽和状態のことを表乾と呼ぶ。

- ① 砕砂
- ② フライアッシュ造粒砂
- ③ 十分水分を加えた湿潤状態のフライアッシュ造粒砂
- ④ 川砂

これらの細骨材を使用したモルタルを作製した。

・モルタルフロー試験

フロー試験もスランプ試験と同様にまだ固まらないモルタルのコンシスティンシーについて評価する方法である。本研究では、フライアッシュ造粒砂を細骨材としたときのコンシスティンシーを評価するために、スランプ試験とフロー試験を行った。モルタルフロー試験は JIS A 1116 の規定に従い行った。あらかじめ、湿布でフローテーブル、突き棒、フローコーンの内側を拭き、フローテーブルの中央の位置に正しくフローコーンを置き、コーンに練り混ぜたモルタルを 2 層に分けてつめる。このとき各層は、全面に渡って各々 15 回付き、最後に不足分を補い表面をへらでならす。直ちにフローコーンを鉛直上方向に引き上げ、ハンドルを回し 15 秒に 15 回の落下運動を与え、広がったモルタルの最大と認める直径とそれに垂直な方向の直径を測定する。その平均値を mm 単位で表す。また同じ材料、配合でモルタルを作製し試験を行い、その平均値をフロー値とする。

・混合砂を用いたコンクリートの配合

時間経過に伴うスランプ値と空気量の測定用のコンクリートの配合を表 2-6 に示す。

5) 吸水率判定法

本研究で使用したフライアッシュ造粒砂は従来使用されている砕砂等に比べ吸水率が高く、粒子の形状が極端に球形に近いため JIS A 1109 (細骨材の比重及び吸水率試験方法) に規定されているフローコーンによる方法では表乾飽和状態の測定が困難であり、吸水率の測定値は測定者による個人誤差が大きいという問題が指摘されている。

そこで、本研究では、細骨材の粒子表面の有無を電気抵抗地を計測することにより判定する実験を行った。その他に通常行われるフローコーンを使用した判定法とフローコーンを使用した軽量骨材用判定法で表面乾燥飽和状態を判定したのち吸水率を測定する 3 種類の方法で比較した。

6) 硬化後のコンクリートについて

本研究では代替骨材として砕砂の 65%をフライアッシュ造粒砂に置換したコンクリート(以下、FA コンクリート)の供試体を作製した。環境負荷低減型のコンクリートとして利用するために、実用可能な強度を有するコンクリートを目指した。試験結果より、目標強度を上回ることができた。つまり、強度的には鉄筋コンクリートに使用できる。その示方配合を表 2-7 に示す。

同程度の強度を有する普通コンクリートを比較対象として作製した。その示方配合を表 2-8 に示す。

7) 凍結融解試験

凍結融解試験は熱サイクル試験装置を用いて、一定の温度条件(凍結: 温度 -18°C, 融解: 温度 5°C)で凍結融解の繰り返しを行う。28 日養生後、各供試体の超音波伝播時間を超音波伝播時間測定装置により測定する。その超音波伝播時間測定装置を図 2-1 に示す。直方体の供試体の 10×10cm の面に振動子(発信子、受信子)を直接密着させて、振動子間の超音波伝播時間をデジタル表示から読み取る。振動子を接触するときに、少量のグリースをつけて密着度を良くした。測定の終わったそれぞれの供試体をゴム製の容器に入れ、供試体が十分浸る程度の水を注ぎ、熱サイクル試験装置に設置した。1 回の

表 2-7 FA コンクリートの示方配合

水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)					スランプ(cm)	空気量(%)
		水	セメント	フライアッシュ造粒砂	碎砂	碎石		
50	47	158	316	365	297	967	6.5	5.4

表 2-8 普通コンクリートの示方配合

水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)					スランプ(cm)	空気量(%)
		水	セメント	フライアッシュ造粒砂	碎砂	碎石		
65	50	170	252	0	896	907	7.1	4.7

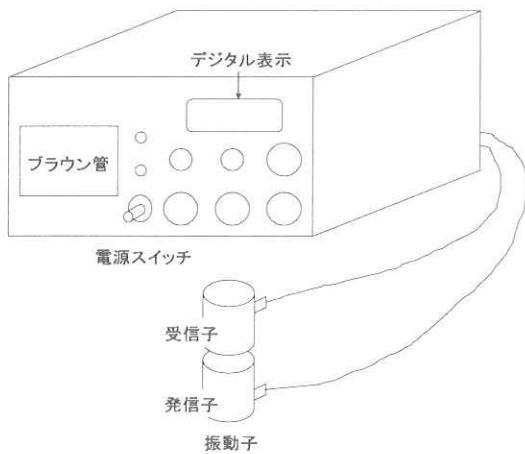


図 2-1 超音波伝播時間測定装置概略図

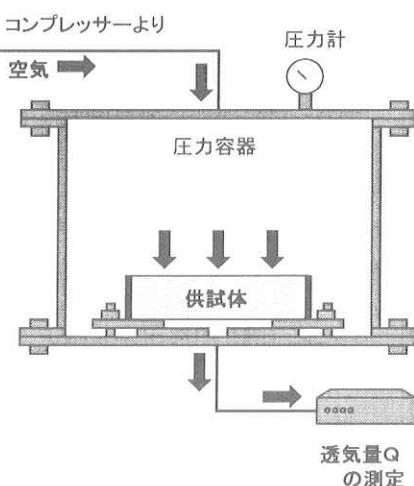


図 2-2 透気試験器概略図

凍結融解を 1 サイクルとし、約 30 サイクルごとに供試体を取り出し、超音波伝播速度と重量を測定した。これを 300 サイクルか、相対動弾性係数 60% 以下になるサイクル数まで繰り返し行う。

超音波伝播速度を求め、動弾性係数を求める。その算出式を次に示す。

$$V = L / S \quad (1)$$

ここに、

V : 伝播速度 (cm/s)

L : 供試体側長 (cm)

S : 伝播時間 (s)

$$E = \frac{V^2 \rho (1 + \sigma) (1 - 2 \sigma)}{g (1 - \sigma)} \quad (2)$$

ここに、

E : 弹性係数 (kg/cm²)

ρ : 供試体の密度 (kg/cm³)

σ : 供試体のボアソン比

g : 重力加速度 (cm/s²)

なお、式 (3) によって求める動弾性係数は SI 単位に変換し、 E (kN/mm²) とした。

8) 中性化促進試験

測定面は、供試体の長さ方向と直角に供試体を端部から約 16cm の位置で割裂した面とし、試薬は JISK 8006 で規定されている 1% フェノールフタレイン溶液(水量約 15%) を用いる。試薬の作り方は、95% のエタノールで 90cm³ にフェノールフタレイン 1g を溶解した後、純水を加えて 100cm³ とする。測定方法は供試体の測定面からコンクリート片や粉でプロア一等を用いて取り除いた後、試薬をスプレーで液がしたらない程度の噴射後コンクリート表面から赤着色部までの距離をノギスで計測する。計測個所は 1 側面につき 6 等分した 5 個所とする。中性化深さは、3 個の供試体の各 2 面、合計 6 面の 30 個所の中性化深さの平均値とし、小数点以下 1 桁まで mm 単位で求める。一般的に中性化深さとかぶりの関係は、

$$C = \gamma \sqrt{t} \quad (3)$$

ここに,

C :かぶり (mm)

t :材齢 (週)

y :中性化速度係数

中性化速度係数と炭酸ガス濃度の関係は,

$$y = ax^{0.5} \quad (4)$$

ここに,

y :中性化速度係数

a :係数

x :炭酸ガス濃度 (%)

材令を週から年に換算すると,

$$C = y\sqrt{t}$$

$$C = y\sqrt{52t}$$

となり,

$$C = 7.21 \times y\sqrt{t} \quad (5)$$

ここに,

C :かぶり (mm)

t :材齢 (年)

y :中性化速度係数

9)乾燥収縮

乾燥収縮は、間隙水が水蒸気として空中に逸散することによりコンクリートが収縮する現象である。そのため重量現象を伴う。蒸発はコンクリートの表面から内部に向かって進むので、断面内では一様ではなく、大型部材になると乾燥収縮は表面だけに影響する要因となる。乾燥収縮に使用する直方体の供試体の2側面(10×40cm)にコンタクトチップ(標点)を1面につき2個取り付け、その標点間距離を測定した。また、標点間距離は250mmと設定した。コンタクトチップを取り付ける2面を選択し、40cmの辺と水平に中心を通る線上に取り付けた。収縮ひずみの大きさ及び進行速度に大きな影響を与える環境の湿度を考慮して、供試体は湿度63%で20°Cの恒温実験室に保管した。

乾燥収縮によって求めた収縮ひずみと普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを対象として収縮ひずみを予測する計算式によって算出した収縮ひずみを比較・検討した。その予測式を次に示す。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \cdot \varepsilon'_{sh} \quad (6)$$

ここに,

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \ln W - 5[\ln(V/S)/10]^2$$

ε'_{sh} :収縮ひずみの最終値($\times 10^{-5}$)

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$:コンクリートの材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ($\times 10^{-5}$)

RH:相対湿度 (%)

W:単位水量(kg/m³) ($130 \text{ kg/m}^3 \leq W \leq 230 \text{ kg/m}^3$)

V:体積(mm³)

S:外気に接する表面積(mm²)

V/S:体積表面積比(mm) ($100 \text{ mm} \leq V/S \leq 300 \text{ mm}$)

10)透気試験

透気試験は定圧方法を用いた。定圧方法は透気の解析が容易且つ合理的で、透水試験のアウトプット法と同様に、一定圧力の空気を供試体に作用させ、空気の流れが定常となった後に透気量を測定し、Darcy則より透気係数を求める方法である。透水試験と比べると、空気は水よりもコンクリートを透過しやすいため、作用させる圧力は低く、また定常状態に達する時間も2時間程度と早い。

供試体は、粘着テープをはがした後にエポキシ樹脂系接着剤で透気面以外の4側面を気密処理すると同時に、13×13 cmの正方形の穴を開いた透気試験用の鉄板に穴をふさぐように貼り付けた。これは、空気が供試体中を一次元方向にのみ流れるようにするためである。

このような準備を行った後、図2-2に示す透気試験装置を用いて透気試験を実施した。コンプレッサーより圧力容器内に空気を流して0.2N/mm²の空気圧を与え、供試体を透過した空気の透気量を測定した。なお、空気圧を与えて間もなくは透気量が不安定なため、安定する2時間後に測定した。測定された透気量が明らかに多い場合、供試体と鉄板の間にすき間がないか確認し、すき間があった場合は、再度エポキシ樹脂系接着剤で空気が漏れないよう気密処理を行った。

透気係数は今回の試験で測定された透気量から次式に示すDarcy則より算出した。

$$K_a = \frac{2LP_2}{P_1^2 - P_2^2} \frac{Q}{A} \quad (7)$$

ここに,

K :透気係数(cm⁴/N·s)

L :供試体高さ(cm)

P_1 :載荷圧力(N/cm²)

P_2 :流出側圧力(N/cm²)

Q :透気量(cm³/s)

A :透気面積(cm²)

であり、流出側圧力は大気圧0.1N/mm²とした。

11)塩化物イオンに対する実効拡散係数の試験⁴⁾

電気泳動試験装置の概要は図2-3に示すようであり、供試体を挟んで左右に約10の陰極セルと陽極セルを有

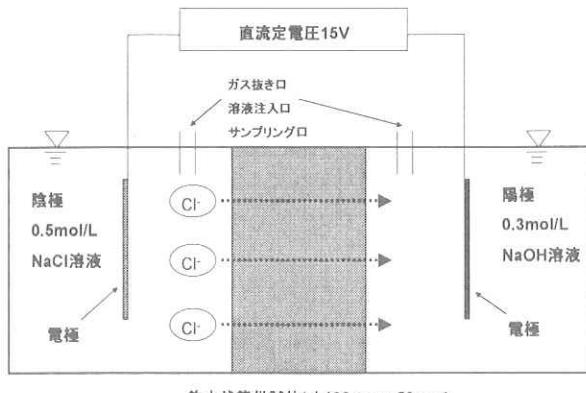


図 2-3 塩化物イオンに対する実効拡散係数の試験装置概要図

し、それぞれのセルに電極と 0.5mol/l の塩化ナトリウム水溶液および 0.3mol/l の水酸化ナトリウム水溶液が入っている。

供試体は直径約 10cm 円形とし、厚さは約 5cm とする。供試体の前処理として、湿度 60±5%，温度 20±2°C の室内で 4 時間程度乾燥させた後、その円周面をエポキシ樹脂で被覆する。そして、被覆したエポキシ樹脂が硬化するまで湿度 60±5%，温度 20±2°C の室内で 4 日間以上放置する。このとき、被覆していないコンクリート表面は、乾燥させないように注意する。次に、コンクリートを水で飽和させるために真空飽和処理を行う。

試験は 20°C 恒温室で供試体を電気泳動セルにセットし、直流安定電源で直流定電圧 15V を電極間に印加する。陽極側の塩化物イオン濃度の増加割合が一定になる定常状態まで継続する。電気泳動試験中は、所定の間隔で電流値、供試体面の電位差および陰極側、陽極側の塩化物イオン濃度を測定する。本研究では、24 時間の間隔で測定するようにした。また、陽極側溶液中の塩化物イオン濃度が継時的に変化し、継時変化が一定の傾きをもつて変化している状態を定常状態と仮定する。

定常状態のときの濃度勾配から塩化物イオンの流束 J_{cl} ならびに実効拡散係数 D_e を計算する。その算出式を次に示す。

$$J_{cl} = \frac{V^{\text{II}}}{A} \frac{\Delta C_{cl}^{\text{II}}}{\Delta t} \quad (8)$$

ここで、

J_{cl} : 塩化物イオンの定常状態における流束 (mol/(cm²・年))

V^{II} : 陽極側の溶液体積 (L)

A : 供試体断面積 (cm²)

$\Delta C_{cl}^{\text{II}}$: 陽極側塩化物イオンの増加割合 ((mol/L)/年)

$$D_e = \frac{J_{cl} RTL}{|Z_{cl}|F_{cl}C_{cl}(\Delta E - E_e)} \quad (9)$$

ここで、

D_e : 実効拡散係数 (cm²/年)

R : 気体定数 (8.31J/(mol·K))

T : 絶対温度測定値 (K)

Z_{cl} : 塩化物イオンの電化 (= -1)

F : フラーデー定数 (96500C/mol)

C_{cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値 (mol/L)

$\Delta E - \Delta E_e$: 供試体表面間の測定電位差 (V)

3. 実験結果

3.1 モルタルおよびフレッシュコンクリートについて

1) 圧縮強度試験

養生期間 7, 28 日の圧縮強度の結果を図 3-1 に示す。7 日圧縮強度は、表乾判定の違いによる強度の差はほとんどない。これは高吸水率を有するフライアッシュ造粒砂にとって、含水率の 2% の誤差はほとんど影響を及ぼさないということである。28 日圧縮強度は、吸水率の高い軽量骨材用表乾判定法で判定したフライアッシュ造粒砂を使用したコンクリートの方が強い。この理由は、軽量骨材用表乾判定法で判定したフライアッシュ造粒砂を使用したモルタルは見掛け上、通常の表乾判定法で判定したフライアッシュ造粒砂より水分量が多いため、ブリーディングが起きたと考えられる。

2) 混合砂を用いたコンクリートの単位水量

表 3-1 は碎砂、混合砂を使用したそれぞれのコンクリートのスランプ値を同一にしたときの示方配合を示している。

碎砂を細骨材として使用した場合の単位水量は 187(kg) であるのに対して、混合砂の単位水量は 158(kg) であった。この結果により、細骨材としてフライアッシュ造粒砂を使用したとき、流動性が改善されている。こ

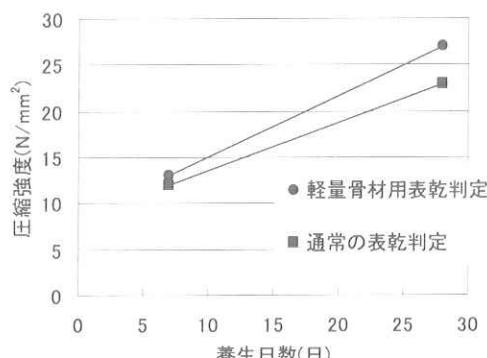


図 3-1 FA 1100% のモルタル 7, 28 日圧縮強度

表 3-1 モルタルの示方配合(時間経過に伴うフロー値測定)

水セメント比(%)	水(kg)	セメント(kg)	フライアッシュ造粒砂(kg)	碎砂(kg)	川砂(kg)	フロー値(mm)
50	270	540	931.9	0	0	200±10
	345	690	0	1118.7	0	
	320	640	0	0	1219	

れは、フライアッシュ造粒砂の流形が丸いことに起因していると考えられる。

スランプ値の変化について、細骨材に碎砂を 100% 使用したコンクリートは経過時間が 30 分で大幅に低下し、その後は緩やかに変化している。細骨材が混合砂のコンクリートは経過時間 30 分で大幅にスランプ値が低下し、それ以上測定不能となった。経過時間 30 分のスランプ値の低下率は碎砂 100% の場合約 40% 混合砂の場合 60% であり、混合砂の方がより大幅にスランプ値が低下している。この理由は軽量骨材用表乾判定法で表乾状態であると判定したはずのフライアッシュ造粒砂がさらに吸水したためである。さらに単位水量が著しく少ないとためにセメントの水和反応に影響を及ぼしたためであると考えられる。

3) 時間経過に伴うコンクリートのコンシステンシー

細骨材として碎砂に 65% の割合でフライアッシュ造粒砂を混ぜ合わせた混合砂を用いたコンクリートの細骨材として碎砂 100% 用いたコンクリートの時間経過に伴うスランプ値と空気量の変化をそれぞれ図 3-2、図 3-3 に示す。

スランプ値の変化について、細骨材に碎砂を 100% 使用したコンクリートは経過時間が 30 分で大幅に低下し、その後は緩やかに変化している。細骨材が混合砂のコンクリートは経過時間 30 分で大幅にスランプ値が低下し、それ以上測定不能となった。経過時間 30 分のスランプ値の低下率は碎砂 100% の場合約 40% 混合砂の場合 60% であり、混合砂の方がより大幅にスランプ値が低下している。この理由は軽量骨材用表乾判定法で表乾状態であると判定したはずのフライアッシュ造粒砂がさらに吸水したためである。さらに単位水量が著しく少ないとためにセメントの水和反応に影響を及ぼしたためであると考えられる。

また、空気量の変化について、経過時間 30 分で混合砂を用いたコンクリートの空気量が大幅に増加したのは、スランプ値が著しく小さいため、エアメーターの容器に詰める際、余計な空隙が入ってしまったためである。

4) 時間経過に伴うモルタルのコンシステンシー

混合砂を用いたコンクリートのスランプ値が碎砂に比べ著しく下がった原因を調べるために細骨材として、フライアッシュ造粒砂 (FA_1 , FA_1 (pre wetting)), 碎砂,

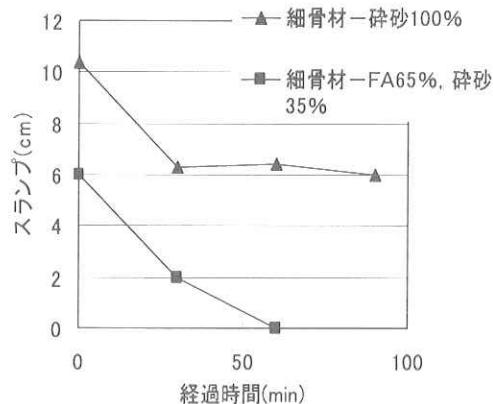


図 3-2 時間経過に伴うコンクリートのスランプ変化

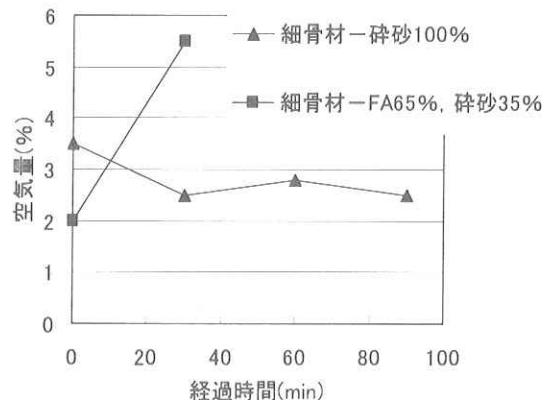


図 3-3 時間経過に伴うコンクリートの空気量変化

川砂を使用したモルタルのフロー試験を行った。あらかじめフロー値を同一にするために、表 3-1 のように単位水量を調整している。24 時間吸水させたフライアッシュ造粒砂 FA_1 (pre wetting) を使用するのは、表乾状態であると判定したはずのフライアッシュ造粒砂がさらに吸水したということがスランプ値の大幅低下の原因の一つであると考えたためである。この実験結果を図 3-4 に示す。経過時間 0(min) のとき、細骨材として FA_1 (pre wetting) を使用したモルタルのフロー値は FA_1 と比べて小さな値を示している。 FA_1 (pre wetting) と FA_1 を用いたモルタルは、同じ水分量を加えたにも関わらず、このような結果がでたのは、表乾状態であると判定されたはずのフライアッシュ造粒砂がさらに吸水したためと考えられる。また、コンクリートと同様に時間経過に伴い、細骨材としてフライアッシュ造粒砂 (FA_1 ,

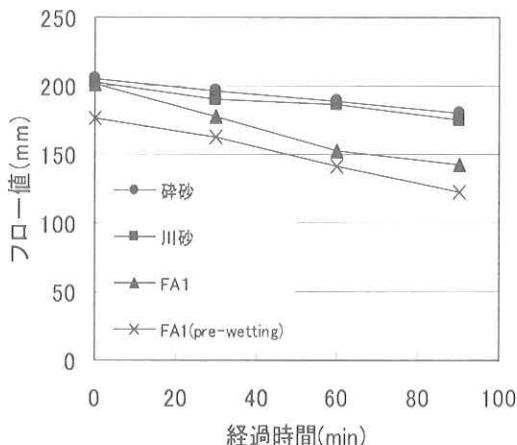


図 3-4 時間経過に伴うモルタルフローの変化

FA₁ (pre wetting) を用いたモルタルは、細骨材として川砂、砕砂を用いたモルタルと比べてどちらも大幅フロー値が低下している。この原因として、あらかじめ吸水させた FA₁ (pre wetting) と表乾状態の FA₁ を使用したモルタルフロー値はどちらの低下率もほぼ等しいので、フライアッシュ造粒砂が軽量骨材用表乾判定法した表乾状態より、さらに吸水したためとは言えない。表乾状態フライアッシュ造粒砂のさらなる吸水以外の原因として、単位水量が著しく少ないとためにセメントの水和反応に影響を及ぼしたためであると考えられるが、同一スランプ値及びフロー値にするのにフライアッシュ造粒砂ほど単位水量を減少させる細骨材がないので、比較することが現段階で、できなかった。

3.2 硬化後のコンクリートについて

1) 凍結融解試験による性能評価

凍結融解の繰り返し作用に対する抵抗性を耐凍害性という。寒冷地ではコンクリートが凍結融解の繰り返し作用により、ひび割れの発生やポップアウトやスケーリングなどの表層部の部分的な剥離などが生じ、表層に近い部分から次第に破裂し劣化していく。この劣化メカニズムは水圧説によると、毛細管空隙内の自由水は温度低下に伴い、大きい空隙部分により順に凍結する。水が氷になると体積が 1.09 倍に増加するので、未氷結の水は毛細管空隙内に押し出され水圧が発生する。この水圧がセメントペーストの局部的な破壊を引き起こす。以上のことから、AE 剤などで空気を運行し水圧の発生を緩和すると、耐凍害性の改善に極めて有効的である。

凍結融解試験により凍結融解を繰り返し行い、波動法により動弾性係数を測定した。凍結融解の回数(サイクル)と測定した動弾性係数を相対動弾性係数(%)で表したもののが図 3-5 に示す。相対動弾性係数が 60% を下回っていないので FA コンクリートはコンクリートの

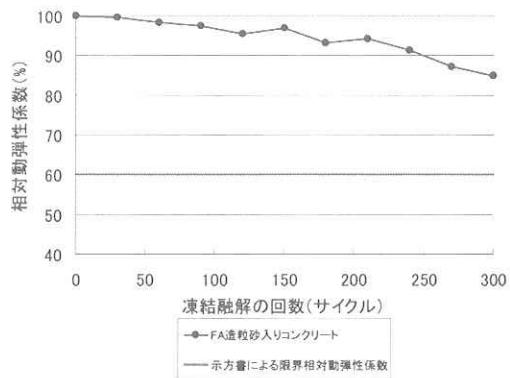


図 3-5 凍結融解の回数と相対動弾性係数の関係

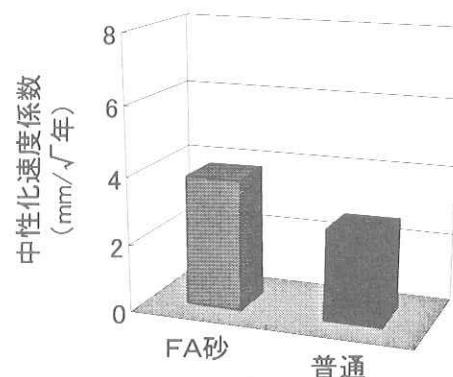


図 3-6 中性化速度係数の比較

耐凍害性の評価に用いる「凍結融解試験方法(JIS)」を満たす性能があることがわかる。

さらに、重量減少は全体の約 3%程度であり問題ない。しかし、相対動弾性係数は評価を満たす性能があったものの実験を終えた供試体を見ると表面はひどく劣化していた。劣化の進行は動弾性係数に関わらず進行していたため、凍害に対し、耐久性能を満足しているとは言いたいが、表層に近い部分から次第に劣化していくが、密実性に欠けるフライアッシュ造粒砂を用いているため表面の劣化が顕著に表れたと考えられる。つまり、凍結融解試験に対して、FA コンクリートは凍害に対し、耐久性能が低いと考えられる。

2) 中性化促進試験による性能評価

中性化速度係数の比較を図 3-6 に示す。FA コンクリートの一般的な環境下の炭酸ガス(CO₂)濃度である 0.035% の環境下でのかぶりは、普通コンクリートと比べ、同じ材齢で比較した場合、中性化速度係数は 3 倍強必要ということがわかった。したがって、空隙の多いフライアッシュ造粒砂を用いる場合には、普通コンクリートより、かぶりを厚くするか、中性化を抑制する塗料などを用いて表面をコーティングするといった工夫が必要で

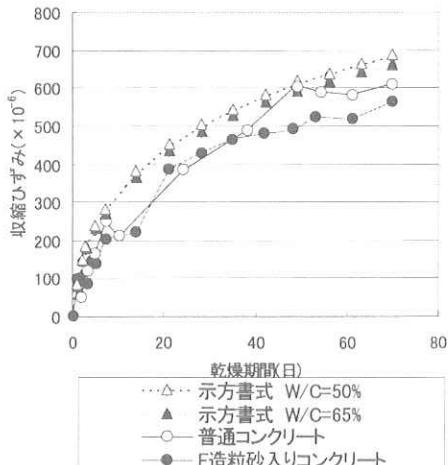


図 3-7 収縮ひずみと乾燥期間の関係

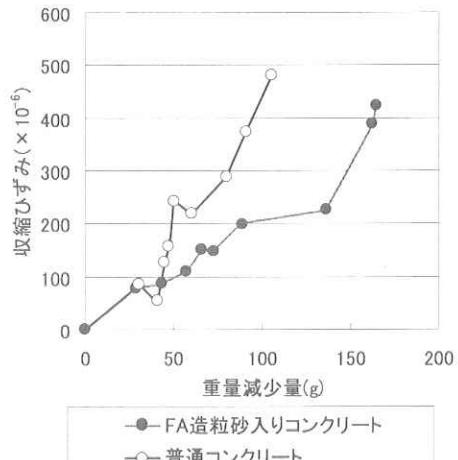


図 3-8 収縮ひずみと重量減少量の関係

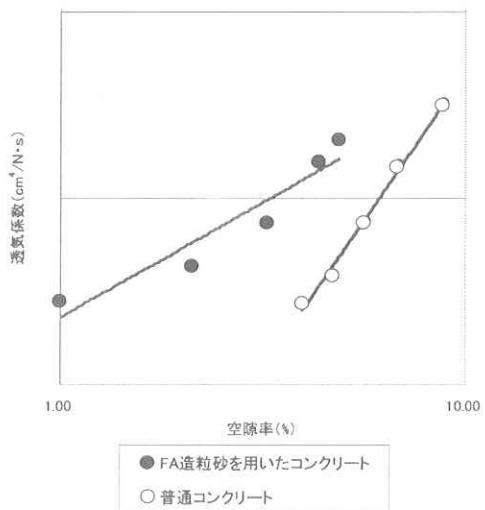


図 3-9 透気係数と空隙率の関係

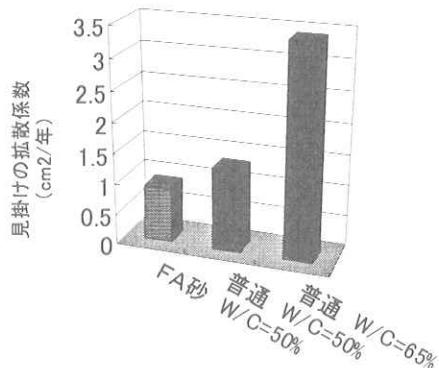


図 3-10 それぞれの見かけの拡散係数の比較

ある。

3) 乾燥収縮による性能評価

乾燥収縮によって得られた乾燥材齢と収縮ひずみの関係を図 3-7 に示す。それぞれ予測式により求めた収縮ひずみの値と比較した。FA コンクリートと普通コンクリートの結果は両者とも予測式に近い値をとっている。ここで、乾燥材齢とそれぞれの重量変化の関係を図 3-8 に示す。単位水量の少ない FA コンクリートのほうが普通コンクリートよりも重量変化が大きいことがわかる。この理由として考えられることは、フライアッシュ造粒砂の吸水率が大きいため、単位水量は普通コンクリートのほうが大きいものの、FA コンクリートのほうが実際の水分量が大きくなるのだと考えられる。そのため重量変化が大きくなつた。次に重量減少量と収縮ひずみの関係において、これを見ると同じ重量減少量で比較したとき、FA コンクリートのほうが、収縮ひずみが小さいことがわかる。これは吸水率の大きなフライアッシュ造粒砂を使用しているため、吸水した分の水分が抜けても体積に変

化がないため、収縮ひずみにはさほど影響がでなかつたためと考えられる。

今回使用した供試体に関しては式 (6) の予測式を適用することができる。よって、65%をフライアッシュ造粒砂に置換したコンクリートは普通コンクリートと同様に乾燥収縮に関する示方書の式を用いて性能評価することができる。

4) 透気試験による性能評価

コンクリートの透気係数は内部にあるすべての空隙ではなく、ある一定以上の大きさの空隙であり、さらに乾燥によって水分が逸散した空隙が関係し、さらにコンクリートの含水状態によっても透気係数に関与する空隙は変化する。

透気試験ではシリカゲルにより乾燥していき、得られた透気量から、式 (7) を用いて透気係数を算出した。空隙率と透気係数の関係を図 3-9 に示す。同じ空隙率のとき、FA コンクリートのほうが普通コンクリートよりも透気係数が大きくなつた。これは粉体であるフライア

ッシュを造粒して砂にしてあるため、碎砂に比べ空隙が多いいためと考えられる。

5) 塩化物イオンに対する実効拡散係数の試験による性能評価

検出側溶液中の塩化物イオン濃度の経時変化が一定の傾きをもって変化している状態を定常状態と仮定する。このときの経過時間と塩化物イオン濃度の関係を図3-10に示す。そのときの濃度勾配から実効拡散係数を計算する。さらにこの値をから見掛けの拡散係数を算出する。さらにコンクリート標準示方書のコンクリートの拡散係数の予測式により予測値を出し、比較する。するとFAコンクリートの見掛けの拡散係数と水セメント50%で計算した拡散係数の値は近い値を示した。

この理由として考えられることは、塩化物イオンに対する実効拡散係数の試験は他の試験と比べ、供試体を蒸留水で飽和させて実験したため他の実験と比べて、フライアッシュ造粒砂の弱点である空隙が、ポゾラン反応により実験少なくなったと考えられる。その結果、普通コンクリートと同程度の値が出た。

今回使用した供試体に関してはコンクリート標準示方書のコンクリートの拡散係数の予測式を適用することができる。水セメント比が同じであるとき、塩害に対して普通コンクリートと同様に評価ができる。

4.まとめ

本研究の結果をまとめると次のようである。

- ① 7日圧縮強度は、表乾判定の違いによる強度の差はほとんどない。28日圧縮強度は、吸水率の高い軽量骨材用表乾判定法で判定したフライアッシュ造粒砂を使用したコンクリートの方が強い。
- ② 細骨材としてフライアッシュ造粒砂を使用したとき、流動性が改善されている。
- ③ 細骨材が混合砂のコンクリートは経過時間30分で大幅にスランプ値が低下し、それ以上測定不能となった。空気量の変化について、経過時間30分で混合砂を用いたコンクリートの空気量が大幅に増加した。
- ④ 経過時間0(min)のとき、細骨材としてFA₁(pre wetting)

wetting)を使用したモルタルのフロー値はFA₁と比べて小さな値を示している。コンクリート同様時間経過に伴い、細骨材としてフライアッシュ造粒砂(FA₁, FA₁(pre wetting))を用いたモルタルは、細骨材として川砂、碎砂を用いたモルタルと比べてどちらも大幅フロー値が低下している。

- ⑤ FAコンクリートと普通コンクリートの凍結融解による劣化速度はほぼ同じものだった。つまり凍結融解による性能評価は満足いく結果が得られた。しかし、密実性に欠けるフライアッシュ造粒砂を用いでいるため表面の劣化が顕著に表れた。
- ⑥ 中性化促進試験によりFAコンクリートの一般的な環境下の炭酸ガス(CO₂)濃度である0.035%の環境下での中性化速度係数は、普通コンクリートと比べ、同じ材齢比較したとき3倍強必要ということがわかった。
- ⑦ FAコンクリートは、乾燥収縮に関する示方書の式での性能評価方法に適応できることができた。
- ⑧ 同じ空隙率のとき、FAコンクリートのほうが普通コンクリートよりも透気係数が大きくなることがわかった。
- ⑨ 65%をフライアッシュ造粒砂に置換したコンクリートに塩化物イオンに対する実効拡散係数の試験に関する示方書の式での性能評価方法を適応することができるとわかった。

参考文献

- 1) 前川 宏一:コンクリートの現状 丸善出版
- 2) 田澤 栄一:エースコンクリート工学 p 87~98, 朝倉書店
- 3) 武若 耕司 杉山 隆文:電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)(JSCE-G571-2003)」の制定, 土木学会論文集, No.767/V-64, 1-9, 2004.8
- 4) 上野 敦・国府 勝郎・大賀 宏行:電気抵抗値による細骨材の吸水率決定方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.613/V-42, 137 - 146, 1999, 2

PS灰を活用した造粒物のコンクリート骨材への適用に関する基礎的研究

愛媛大学大学院理工学研究科助教

木下尚樹

愛媛大学工学部等技術部機械・環境建設系技術班

川口隆

株式会社予州興業環境部主任

松尾暁

株式会社予州興業専務取締役

三好正忠

1. 研究背景および目的

愛媛県の平成 17 年度における一般廃棄物の排出量は約 57.6 万 t であり、産業廃棄物の排出量は約 950 万 t である。一般廃棄物に対する産業廃棄物の排出割合は約 16.5 倍で、全国平均は約 8 倍であることから、愛媛県は産業廃棄物の占める割合が非常に高い。さらに産業廃棄物における汚泥の排出割合は全国平均で約 45% であるが、愛媛県の排出割合は約 69% であった。このことから、愛媛県における産業廃棄物の排出割合が高い理由として汚泥の排出量が多いことが挙げられる。その汚泥が大量に発生している原因として、愛媛県東予地方（四国中央市）の基幹産業として製紙業が盛んであり、水分を多量に含む製紙汚泥が年間約 426 万 t 発生している。製紙汚泥は製紙工場の古紙再生利用にともない排出される有機性の汚泥である。その汚泥を脱水処理後に腐敗防止のための安定化と減量化のために焼却し、製紙汚泥が持っている熱エネルギーを発電用蒸気として回収した後に残った燃殻を製紙汚泥焼却灰（以下、PS 灰）と呼んでいる。PS 灰はセメント材料として一部有効利用されてきたが、そのほとんどは廃棄物として埋め立て処分してきた。現在は未利用資源であった PS 灰を造粒加工することによって地盤材料として用いている。ただし、今後はさらに PS 灰を資源として普及させるためにその適用範囲を広げ、新たな利用方法の確立が必要である。

一方、コンクリートに用いられる骨材は、愛媛県では瀬戸内海の海砂利採取によって供給されてきたが、近年は乱掘による潮流変化や生態系に与える影響等の環境問題が提議され、他の沿岸部各県と同様に平成 18 年度 4 月より採取禁止が施行された。現在、その代替材として碎砂および碎石が使用されているが、いずれにしても天然資源を大量消費するため環境負荷の低減を強く求められている。

これらの背景から、愛媛県特有の産業廃棄物である PS 灰によるコンクリート用骨材の開発を行うことを目的として、骨材の造粒方法、コンクリートを製造する際に必要な基本的な検討項目である骨材試験および配合設計方法、フレッシュコンクリートの性状および硬化コンクリートの強度・変形特性について評価を行った。

2. PS 灰造粒骨材の使用材料および製造方法

2.1 使用材料

PS 灰造粒骨材は、主材として PS 灰、石炭灰、添加材として高炉セメント B 種および石灰、さらに混合攪拌およびセメントとの水和反応に必要な練混ぜ水を用いた。PS 灰以外の材料を用いた理由として、石炭灰は製紙工場内の火力発電所から PS 灰同様に排出されるものを有効利用するために使用し、石灰は PS 灰からフッ素が溶出されるのを抑制するために用いた。

2.2 PS 灰および石炭灰の化学成分

PS 灰、石炭灰およびセメントの成分について表 2-1 に示す。ただし、PS 灰、石炭灰は分析結果であり、セメントは文献から引用したものである。PS 灰の主成分は SiO_2 , Al_2O_3 , CaO であり、採取した時期によって成分比および未燃カーボンの含有に変動があることがわかった。このことから PS 灰の成分は基本的には同様な傾向を示すが、焼却前の製紙汚泥成分や焼却ボイラーの型式による違い等によって異なった成分値となることがわかった。 CaO , MgO の含有は製紙汚泥に含まれている顔料が影響している。また、 Al_2O_3 は製紙工場において行われている濁水処理の工程で沈殿槽に添加された凝集剤（通称 PAC：ポリ塩化アルミニウム）の成分が含まれたものによる。さらに PS 灰とセメントの主成分を比較したが SiO_2 と CaO が多く含まれていた。石炭灰の主成分は約 70% 含まれている SiO_2 と次いで 14% 程度含まれている Al_2O_3 である。その他の成分についてはいずれも微量であった。

PS 灰は未燃カーボンの含有の有無があったが、一般に石炭灰に含まれる未燃カーボンは AE 減水剤等の混和剤を吸着するため、フレッシュコンクリートの性状が悪化する恐れがあることが報告されており、今後は PS 灰および石炭灰の未燃カーボンの含有による影響については検討する必要があると考えられる。

表2-1 使用材料の化学的性質

分析項目	PS 灰① (%)	PS 灰② (%)	石炭灰 (%)	セメント (%)
SiO_2	26.2	34.2	69.9	21.9
Al_2O_3	17.0	22.8	14.4	5.2
Fe_2O_3	2.4	1.43	2.54	3.0
CaO	47.4	32.4	0.88	63.9
MgO	1.9	3.17	0.75	1.6
SO_3	2.4	1.43	0.15	2.0
未燃カーボン	-	4.0	7.1	-

ただし、PS 灰①は平成 19 年 2 月に採取し、田中石灰工業㈱による分析結果

PS 灰②は平成 19 年 7 月に採取し、住鉱テクノリサーチ㈱による分析結果

2.3 密 度

製紙工場から排出される PS 灰は、使用する原料および古紙の再生割合等の違いによって製紙汚泥の状態が変化し、汚泥の燃焼量の変動によっても影響を受けることが予測され、灰そのものの密度も変化し

ているものと考えられる。PS灰を造粒し品質の安定したコンクリート用骨材を製造するためには、配合設計時に原料となるPS灰の密度測定が必要であり、上述の影響による密度の変動を調査・検討する必要がある。

調査方法として、PS灰の運搬車両の重量を計測することとした。ただし、積載容積に対し充填度はほぼ一定であると仮定し、重量差に対する区間を設け、重量の計測頻度を求ることによって、運搬車両の容積に対しての密度を求ることとした。

追跡調査した結果より、図2-1にPS灰の車両重量と重量区間の頻度を示し、図2-2に石炭灰の車両重量と重量区間の頻度を示す。PS灰の重量分布は16.5t～17.0tの区間に2つのピークが存在している。また、石炭灰と比較すると重量の変動が大きいことがわかった。石炭灰は、18.0t～19.0tの区間で頻度が多く、ほぼ正規分布していた。表2-2の変動係数の差からもPS灰は石炭灰と比べ車両重量の変動が大きいことがわかった。

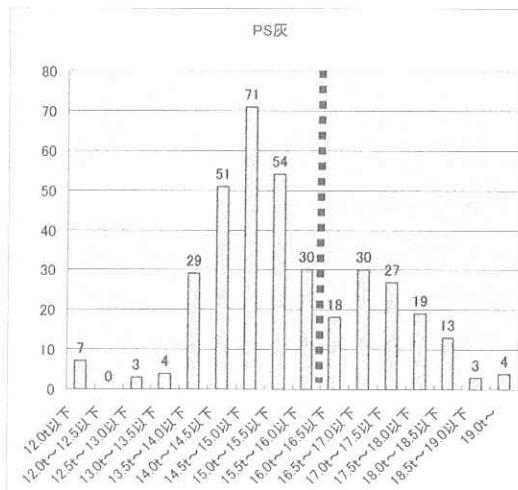


図2-1 PS灰の車両重量とその頻度

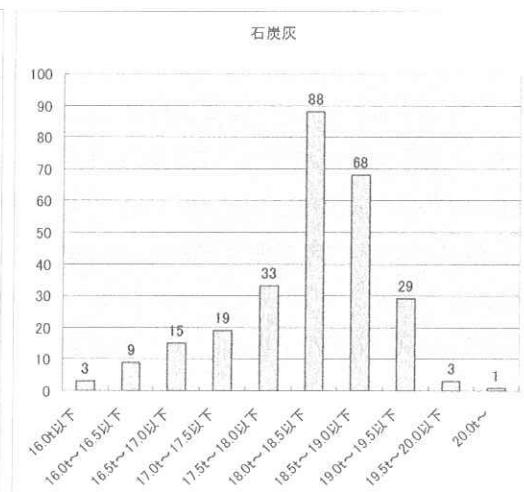


図2-2 石炭灰の車両重量とその頻度

表2-2 運搬車両の車両重量の変動

	PS灰	石炭灰
平均値(t)	15.41	18.20
標準偏差	1.607	0.804
変動係数(%)	10.43	4.42

車両重量とPS灰および石炭灰の密度との相関性について検討するため、車両重量を計測した後に灰を採取し密度を測定した。それぞれの車両重量と密度の関係を表した結果を図2-3および図2-4に示す。PS灰および石炭灰ともに重量が大きくなれば密度も大きくなり、両者には正の相関性があることがわかった。これにより、運搬車両の重量から密度を推定し、一次関数の近似式を求めることによって頻度による重みを考慮した密度を算出した。PS灰の密度は、図2-1の頻度分布において2つのピークが存在したことから0.65g/cm³と0.90g/cm³の2つに区分した。また、石炭灰の密度は、ほぼ正規分布していたので0.87g/cm³とした。

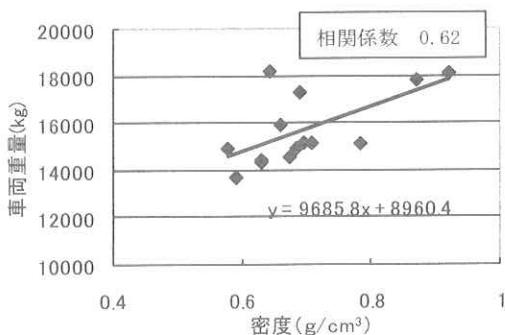


図2-3 PS灰の車両重量と密度との関係

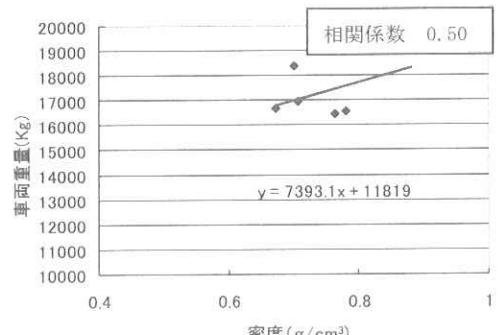


図2-4 石炭灰の車両重量と密度との関係

2.4 粒度分布およびPS灰と石炭灰の混合比による粒度調整

PS灰および石炭灰の粒度分布を図2-5および図2-6に示す。PS灰の62%は砂分(75μm以上)で占められている。また、石炭灰の94%は細粒分(75μm以下)で占められていることからPS灰は石炭灰に比べ粗粒であった。

PS灰造粒骨材は、主材としてPS灰、石炭灰、添加材として高炉セメントB種および石灰を使用し、さらに練混ぜ水をミキサー内に投入後、混合・攪拌・造粒工程を経て得られる人工骨材である。現在地盤材として用いられている配合は、PS灰と石炭灰の混合比を1:1としているが、コンクリート用骨材として用いる場合は、骨材粒の強度が要求されるため両粉体の混合比を調整し、大小様々な粒径が混在している粉体の粒度分布を均質にすることで骨材粒の強度に与える影響を検討した。以下にその粒度調整方法について述べる。混合比を変化させることにより粉体の粒度分布を調整するため D_{60} (60%粒径)と D_{10} (10%粒径)の比である均等係数 U_c を求めた。ただし、PS灰の密度は前述求めた2種類の密度から小さい方の0.65g/cm³とし、石炭灰は0.87g/cm³として求めた。均等係数は値が小さいほど粒径が揃い単粒であることを示し、大きいほど粒度分布が良いことを示す。この均等係数が最大になる混合比を検討した結果を図2-7に示す。混合比PS灰:石炭灰の2.5~6.5:1でほぼ定常状態となることが分かった。粒度分布状況を確認するため混合比PS灰:石炭灰の1:1、2.5:1、6.5:1の結果を図2-8、図2-9、図2-10に示す。以上の結果からも、前述の均等係数から大きいほど粒度分布が均質になることがわかった。

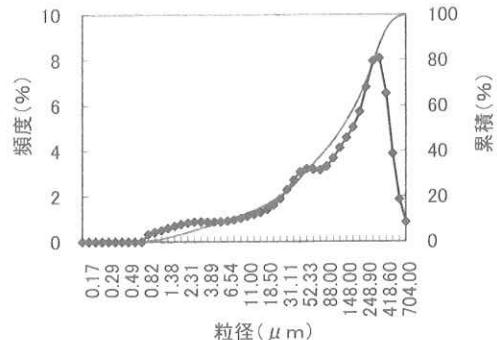


図2-5 PS灰の粒度分布

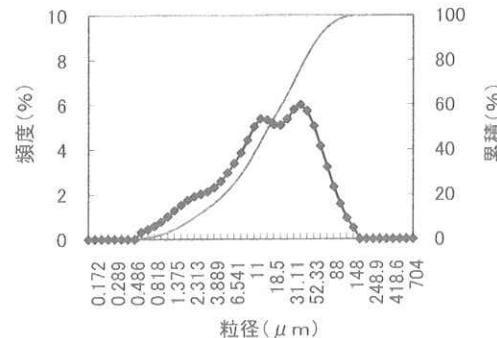


図2-6 石炭灰の粒度分布

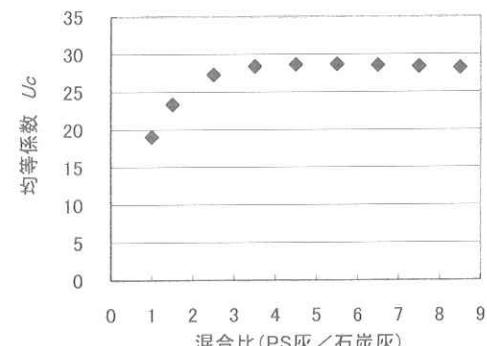


図2-7 混合比と均等係数の関係

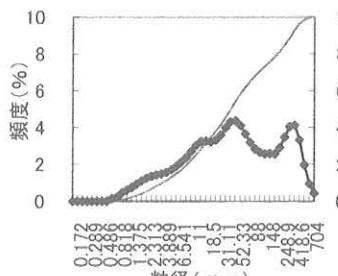


図2-8 PS灰:石炭灰=1:1

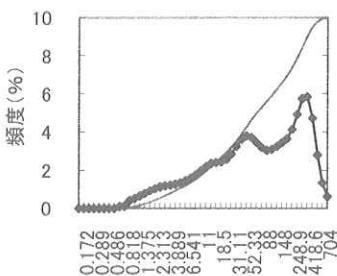


図2-9 PS灰:石炭灰=2.5:1

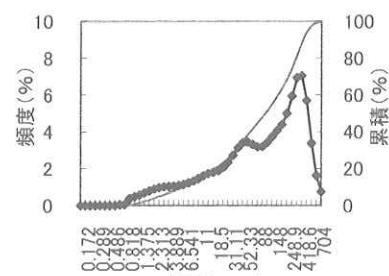


図2-10 PS灰:石炭灰=6.5:1

以上の観点からPS灰等の粉体を造粒しコンクリート用骨材を製造することを考えれば、粉体の粒度が単一の粒径のもので造粒することに比べ、粒度分布の均質な場合は粉体粒子間の空隙少なくすることにより団粒構造となり実績率が増加することによって粉体粒子間の接触表面積も増加し、造粒物の緻密さがより増すものと考えられる。

2.5 混合比等を変化させた骨材の硬度および強度の推定

PS灰および石炭灰の混合比等を変化させ造粒した骨材の配合条件を表2-2に示す。No.1はPS灰:石炭灰が2.5:1、No.2は1:1、No.3は石炭灰のみ、No.4はPS灰のみで、No.5およびNo.6は1:1の混合比でセメントの混入割合を2%ずつ加算したものである。混合・攪拌・造粒に必要な水量および石灰の混入量はPS灰、石炭灰の質量和に対して一定割合とした。

表2-2 造粒骨材の配合

材料名・配合番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6			
PS灰(kg)	1000	700	0	1400	700	700			
石炭灰(kg)	400	700	1400	0	700	700			
高炉セメントB種(kg,%)	98(7)			126(9)					
水(kg,%)	613(43.8)								
石灰(kg,%)	42(3)								

造粒した骨材の養生条件は屋根付きのヤード内に1日放置後、25°Cに保たれた室内にて自然乾燥状態(以下、Dry)のものと水浸し湿潤状態を保ったもの(以下、Wet)2種類とした。硬度を測定するために実施した点載荷試験における材齢は7, 14, 21, 28日とした。

硬さを表す指標として土質工学会で示されている点載荷強度と圧縮強度の関係から圧縮強度を推定し評価することとした。以下にその関係式を示す

$$\text{点載荷強度 } Is \quad Is=P/De^2$$

$$\text{ただし, } De^2=4*A/\pi \quad A: \text{面積}$$

ここで、点載荷強度から圧縮強度を推定するには $Is(50)$ の20~25倍が圧縮強度に対応することから今回は20倍として算出した。

$$\text{修正点載荷強度 } Is(50) \quad Is(50)=F*Is$$

$$\text{ただし, } F=(De/50)^{0.45}$$

以上の関係式から求めた各配合における圧縮強度を図2-11および図2-12に示す。

No.3はDryおよびWetの状態のいずれも指圧するだけで破壊が生じていたため材齢14日までとした。DryではNo.1がどの材齢期間においても最も強度が高かった。さらに石炭灰よりもPS灰を多く用いた配合で粒度調整し造粒した骨材のNo.1とNo.4は材齢と強度の関係に正の相関性が見られ、セメントの混入割合を多くしているものよりも強度が高い傾向であった。Wetはいずれの配合でも28日後の圧縮強度が $10\sim16\text{N/mm}^2$ の範囲でDryほどの強度差はなかった。さらにセメントの混入割合が多いNo.5およびNo.6はDryよりもWetの方が強度は高くなっていた。これは、セメントの水和反応に必要な水が湿潤状態を保つことによって補完されていたことに起因するものと考えられる。

以上の結果から、配合においては、セメントの混入割合を増加することによって圧縮強度を高める効果よりもPS灰および石炭灰の混合比においてPS灰を多く使用する配合の方が強度は高くなることがわかった。今回は養生条件でDryとWetのものを用いたが、実際のプラントでの製造工程を考えると多量な骨材を湿潤状態に保つこと難しいことからDryの状態で強度の高かったNo.1の配合を採用し以降の実験で使用した。

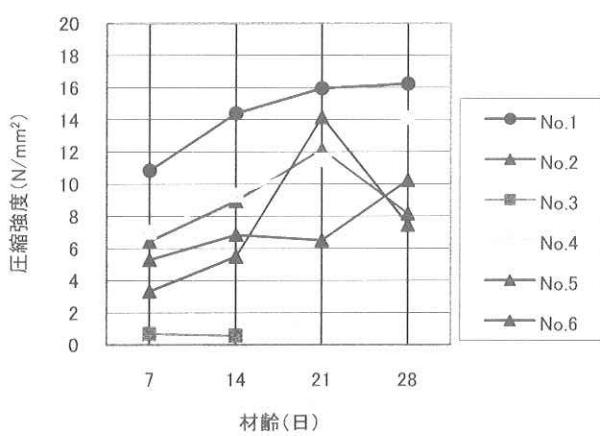


図2-11 圧縮強度(dry)

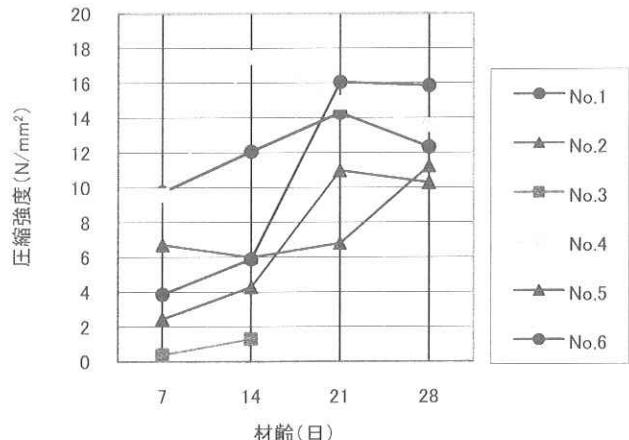


図2-12 圧縮強度(wet)

3. PS 灰造粒骨材の骨材試験

3.1 細骨材のふるいわけ試験

PS 灰造粒細骨材の粒度分布を把握するため JIS A 1102 ふるいわけ試験を行った。一般的な細骨材は試料質量 500g で測定を行うが PS 灰造粒骨材はかさ高であることから質量 300g で実施した。得られた粒度曲線を図 3-1 に示す。粒度の標準範囲である上限値と下限値を破線で示しているが、これは一般的なコンクリートを打設する際にこの標準範囲に骨材の粒度が入っている場合は、大小の骨材粒が適度に混合され粒子間の空隙が減少することによって、単位水量、単位セメント量の少ないコンクリートをつくることができる。この標準範囲と比較すると PS 灰造粒細骨材は、骨材が約 27% 含まれており、2.5mm 未満の粒径のものが割合として少ないとから、標準範囲の下限値を下回っていた。また、粗粒率(F.M.)を算出した結果 2.95 であった。ここで、一般的なコンクリートに用いられる細骨材の粗粒率(F.M.)は 2.3~3.1 の範囲が好ましいとされている。粗粒率を判断した場合、2.3~3.1 の範囲に入ってはいるが、粒度曲線の標準範囲において下限値を下回っていることから粒度調整を行った。

3.2 細骨材の粒度分布の調整

粒度調整の方法は、前述のふるいわけ試験の結果から 2.5mm 以上の粒径の骨材が占める割合が多かったことから、PS 灰造粒細骨材をふるいの呼び寸法で 1.2m~5.0mm と 1.2mm 以下で分級した。分級した骨材の質量比で 2.5mm~5mm : 2.5mm 以下を 1:9 の割合で調整した粒度分布を調整後とし、調整前の粒度分布と併せて図 3-2 に示す。試料の粒度曲線は、粒度標準の上限と下限の中に入っていたり、コンクリート用骨材として適している粒度範囲内に調整することができた。また、PS 灰造粒細骨材の粗粒率(F.M.)は調整前の 2.95 から 1.2mm 以上の粗粒なものを減じたことから調整後は 2.74 となった。

3.3 表乾密度および吸水率

骨材の含水状態は、図 3-3 に示す絶対乾燥状態、空气中乾燥状態、表面乾燥飽水状態、湿潤状態の 4 つの状態に分けられる。コンクリート用骨材として配合設計に必要な表面乾燥飽水状態の密度を求めるが（以下、表乾）、PS 灰造粒骨材は灰を造粒した骨材であることから吸水作用の大きなポーラスな構造であることが予測される。

骨材の表乾状態を判定する際は、JIS A 1109 に従ってフ

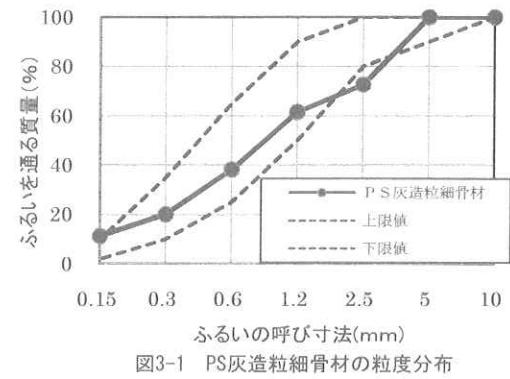


図3-1 PS灰造粒細骨材の粒度分布

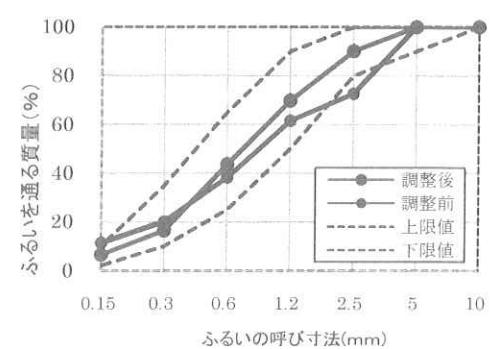


図3-2 粒度調整後のPS灰造粒骨細骨材

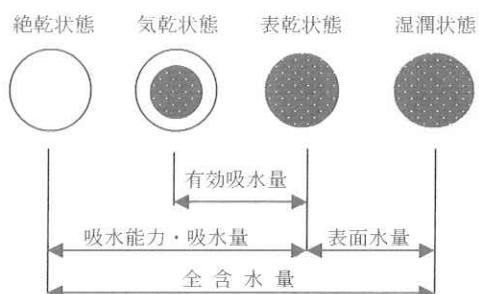


図3-3 骨材の含水状態

ローコーンおよび突き棒を使用し、フローコーンを鉛直に引き上げて、はじめてくずれるときの状態を表乾としている。PS 灰造粒骨材は、同じ砂を同様に行っても表乾判定とされる砂の乾燥状態に差があり判定が困難であった。また、表乾と判定される状態においても、手で触れて状態をつぶさに観察したが、他の試料とは異なり、表乾よりは乾燥している気乾状態に近いと推察された。よって、乾燥状態の違いによる流動性を評価するため PS 灰造粒骨材の表乾判定は、一般的な JIS A 1109 によるものと JIS A 1134 構造用軽量骨材の密度および吸水率試験方法によって試験を実施した。

表 3-1 に PS 灰造粒細骨材の表乾判定方法の違い

による表乾密度および吸水率と比較のため行った海砂および碎砂の結果を示す。JIS A 1109 の方法では、表乾密度 1.73g/cm^3 、吸水率 35.7% であったが JIS A 1134 では 1.65g/cm^3 、48.6% と表乾密度は低下し、吸水率は高くなかった。この結果から JIS A 1109 では表乾と判定される骨材の含水状態は JIS A 1134 では気乾状態であったことがわかった。海砂および碎砂の表乾密度それぞれ 2.55 g/cm^3 、 2.54 g/cm^3 で吸水率は 2% 台であることから、PS 灰造粒細骨材は天然の骨材と比較し、軽量で極めて吸水率の高い性質を持っていることがわかった。ここで JIS 規格には規定されていないがこの吸水性について検討を行った。実験方法として PS 灰造粒骨材の吸水性を検討するため、 $0.5\sim5\text{mm}$ に分級し絶乾状態とした試料を 0.5mm メッシュのナイロン製袋に投入後、水槽内に設置し水中質量の経時変化を測定した。その結果を図 3-4 に示す。水中質量と経過時間の関係から、ほぼ 30 秒後には水中質量が一定となり、その後の変化もないことから、PS 灰造粒骨材は吸水作用時間が短いことがわかった。

表 3-1 表乾密度および吸水率

細骨材	表乾判定	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)
PS 灰造粒細骨材	JIS A 1109	1.73	35.7
PS 灰造粒細骨材	JIS A 1134	1.65	48.6
海 砂	JIS A 1109	2.55	2.44
碎 砂	JIS A 1109	2.54	2.21

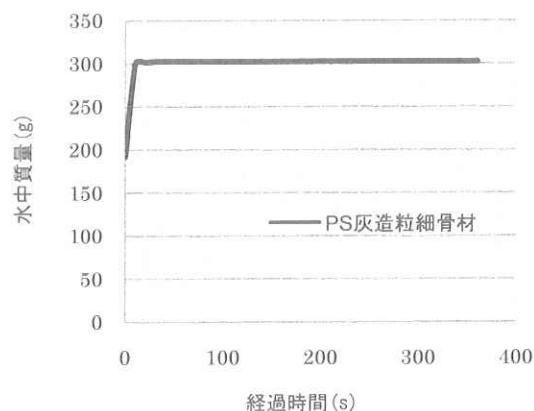


図 3-4 吸水作用する時間

3.4 粗骨材の密度および吸水率

粗骨材の密度および吸水率試験 (JIS A 1110) を行った結果、表乾密度 1.65g/cm^3 、吸水率 44.9% を得られた。粗骨材も細骨材同様に軽量で吸水率が高かった。

3.5 骨材の単位容積質量および実績率試験

PS 灰造粒細骨材および粗骨材の試験結果と比較として用いた碎砂および碎石の試験結果を表 3-2 に示す。表乾密度において軽量であった PS 灰造粒骨材の単位容積質量は碎砂および碎石より約半分で、また、実績率も約 10% 低かった。実績率とは、単位容積中の骨材の絶対容積の割合を百分率で表したものであるが、骨材の粒形が

球形に近いほど骨材間の空隙も小さくなることを利用して求めた数値であることから、この数値が大き

表 3-2 単位容積質量および実績率

骨 材 名	単位容積質量 (kg/L)	実績率 (%)
PS 灰造粒細骨材	0.86	50.3
PS 灰造粒粗骨材	0.83	50.1
碎砂 (細骨材)	1.62	60.5
碎石 (粗骨材)	1.53	61.0

いほど骨材粒形が球形に近いこととなり、フレッシュコンクリートのときに、流動抵抗性が少なくなり、ワーカビリティーが良くなるとされている。しかし、PS 灰造粒骨材は砕砂および砕石と比べて粒形が球状であったが実績率は低かった。これは吸水率が高いことから骨材粒の空隙率も高いことが予測され実績率が低いことにつながっているものと考えられる。

4. PS 灰造粒骨材のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの性状

4.1 フレッシュモルタルの流動性

PS 灰造粒細骨材によるフレッシュモルタルの流動性を評価するためにモルタルフロー試験 (JIS R 5201) を実施した。モルタルフローの様子を図 4-1 に示す。PS 灰造粒細骨材の比較として海砂および碎砂を用いた。その骨材物性とモルタルフロー値を表 4-1 に示す。PS 灰造粒細骨材のモルタルフロー値は、205mm であり海砂と同程度の広がりであった。

一般にフレッシュモルタルの流動性は粒度分布と骨材粒子の形状の違いによって大きく影響を受ける。用いた PS 灰造粒骨材の粒度分布については理想とされる適用範囲内に粒度調整していたことから、骨材粒子の形状の違いを観察した。

PS 灰造粒骨材と碎砂の形状を比較した写真を図 4-2 および図 4-3 に示す。粒径が 2.5mm 以上のものほど分かり易いが、碎砂は角張っている形状の骨材が多数視認でき、PS 灰造粒骨材は球状の骨材が多く存在していた。このことから、PS 灰造粒骨材は流动抵抗性が緩和され、同じように球状な粒形の多い海砂と同程度のモルタルフロー値が得られていたものと考えられる。

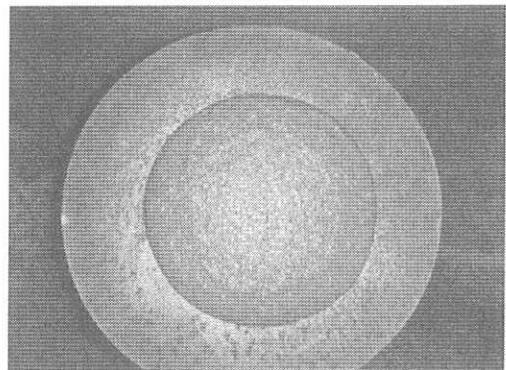


図 4-1 PS 灰造粒細骨材のモルタルフロー

表 4-1 細骨材の違いによるモルタルフロー試験結果

細骨材名称	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (F. M.)	単位容積質量 (kg/l)	実績率 (%)	モルタル フロー値
PS 灰造粒細骨材	1.65	48.6	2.74	0.86	50.3	205
海砂	2.55	2.44	2.84	1.56	64.2	202
碎砂	2.54	2.21	2.96	1.62	60.5	190

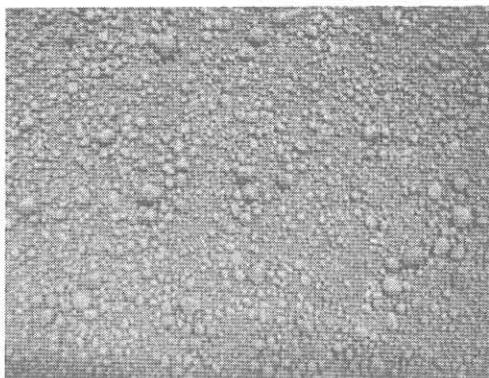


図 4-2 PS 灰造粒細骨材

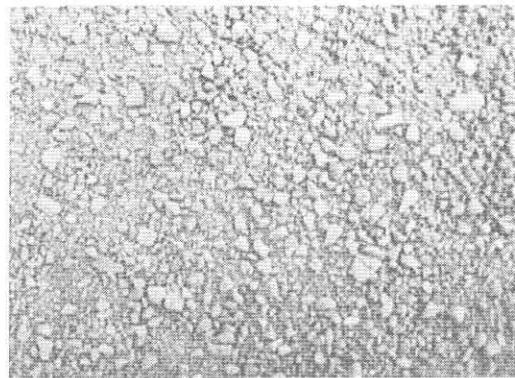


図 4-3 碎砂

4.2 フレッシュコンクリートの流動性および空気連行性

PS 灰造粒骨材と碎砂および碎石を用いたフレッシュコンクリートの性状を比較するために行ったスランプ試験および空気量試験の結果と用いた配合を表 4-2 に示す。ここで、配合名 PS 細・粗は細骨材と粗骨材に対して PS 灰造粒骨材を全量用いたものであり、PS 細・碎石は細骨材に PS 灰造粒骨材、粗骨材に碎石を使用したものである。さらに、配合名碎砂・碎石は表記名どおり碎砂および碎石を用いた一般

的なコンクリートである。配合条件は、粗骨材最大寸法 20mm, W/C50%, 1 バッチ 50L とし、目標スランプ 10 ± 2 cm, 空気量 $3\pm 1\%$ の範囲で AE 減水剤の使用量はいずれの配合においてもセメント質量に対して一定の 0.3%で使用した。

表 4-2 フレッシュコンクリートの性状評価での配合表

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	AE 減水剤 [*]		
PS 細・粗	50	55	165	330	631	516	990	9.0	2.7
PS 細・碎石		55	170	340	624	804	1020	9.0	2.1
碎砂・碎石		47	187	374	797	909	1122	11.0	3.8

*単位量(g/m³)

試験結果の一例を図 4-4 に示す。それぞれの所定のスランプが得られるための単位水量に注目した場合、PS 細・粗、PS 細・碎石、碎砂・碎石の順に単位水量が増加していることがわかった。これはモルタルによる流動性の評価結果と同様に骨材の粒形が PS 灰造粒骨材は球状であったことからスランプが得やすくなり、単位水量を減じることができていた。一般に単位水量は、硬化後の圧縮強度や耐久性に影響を及ぼすことから国土交通省より、平成 15 年に「レディーミクストコンクリートの品質確保について」が通知され、単位水量の低減が求められている。このことを踏まえると PS 灰造粒骨材は単位水量を減じる効果はあると云える。ただし、PS 灰造粒骨材を使用した配合においては細骨材率が高めの 55%であったが空気量はいずれも 2%台であった。このことから AE 剤の使用による空気連行性の作用効果が少なかったと云える。この要因として PS 灰および石炭灰に含まれていた未燃カーボンによって空気連行性が阻害されたものと考えられる。既往の文献等で未燃カーボンには混和剤を吸着する作用があり、空気量の減少によってフレッシュコンクリートの性状が悪化し、混和剤の量が増大する傾向があると云われている。今回用いた PS 灰造粒骨材には原料の PS 灰および石炭灰に未燃カーボンがそれぞれ 4.0%, 7.1%で含有していたために影響を及ぼしていたと考えられ、今後は造粒の際に含まれる未燃カーボン含有率について追跡調査による成分分析によって把握し検討する必要があると思われる。



図 4-4 PS 灰造粒骨材のフレッシュ性状

5 硬化コンクリートの基本的な性質

5.1 圧縮強度試験用供試体の作製

材齢 28 日の圧縮強度試験用に作製したコンクリートの示方配合を表 5-1 に示す。配合名は前述のフレッシュコンクリートと同様である。配合条件は、粗骨材最大寸法 20mm、水セメント比は 40%, 50%, 60%, 1 バッチ 50L とし、目標スランプ 10±2cm、空気量 3.5±1%とした。打設 1 日後に脱型し、20°C±2°C の水槽内にて養生した。

表 5-1 圧縮強度試験用の示方配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					
			W	C	S	G	AE 減水剤*	AE 剤**
PS 細・粗	40	50	165	413	548	548	945	248
	50	50	165	330	631	516	990	126
	60	50	162	270	588	588	540	540
PS 細・碎石	40	47	177	443	502	893	885	885
	50	50	163	326	572	902	652	652
	60	50	165	275	588	927	550	605
碎砂・碎石	40	47	187	468	741	862	1404	0
	50	47	187	374	797	909	1122	0
	60	47	184	307	805	936	921	0

* 単位量 (g/m³)

5.2 硬化コンクリートの単位体積質量および P 波伝播速度

圧縮強度試験前に各配合における供試体の単位体積質量および P 波伝播速度を測定した。その結果を表 5-2 に示す。単位体積質量は骨材全量に対して PS 灰造粒骨材を用いた PS 細・粗は約 1.70g/cm³ で一般的なコンクリートである碎砂・碎石と比較して非常に軽量なコンクリートであり、細骨材に用いた場合でも 2.0g/cm³ 程度の軽量なコンクリートを製造できることがわかった。P 波伝播速度は単位体積質量において軽量なものほど速度が遅い結果であった。PS 灰造粒骨材は吸水率が高かったことから、骨材粒の空隙も多いことが予測され、硬化コンクリートにおいて密度が低下し粗な状態で形成されている。そのことが速度に影響しているものと考えられる。相対的な比較では碎砂・碎石と PS 細・粗の速度差が約 1000m/s あったことに対して、細骨材のみを使用した PS 細・碎石との速度差は 100m/s ほどしかなかった。このことから伝播速度については粗骨材での PS 灰造粒骨材の使用の有無が与える影響が大きいことがわかった。

表 5-2 単位体積質量および P 波伝播速度

配合名	W/C (%)	単位体積質量 (g/cm³)	P 波伝播速度 (m/s)
PS 細・粗	40	1.76	3086
	50	1.70	2906
	60	1.69	2839
PS 細・碎石	40	2.03	3937
	50	2.04	3905
	60	2.03	3826
碎砂・碎石	40	2.34	4123
	50	2.32	4095
	60	2.31	4021

5.3 圧縮強度および弾性係数

前述の配合で作製したコンクリートの圧縮強度試験結果を表 5-3 に示す。さらに各配合のセメント水比の違いによる圧縮強度の関係を図 5-1 に示す。PS 灰造粒骨材のみを使用した PS 細・粗は水セメント比の違いによる強度増減幅が小さく、強度は 20N/mm^2 程度であった。図 5-2 に示した供試体の破壊状況の観察結果から、特に粗骨材として用いた骨材粒の破壊が著しく、セメントペーストの強度よりも骨材粒の強度が低いことが予見でき、それによってコンクリートとしての強度が低下していたものと考えられる。また、セメント水比の違いによる $C/W-f'_c$ 線が小さな勾配しか得られていなかったことも同様の要因である。細骨材において PS 灰造粒骨材を使用した PS 細・碎石は碎石を併用することにより、W/C 50%以下の配合で鉄筋コンクリート構造物使用基準強度 30N/mm^2 を満たすことが可能である。さらに、軽量コンクリートの呼び強度の範囲が $18\sim 30\text{N/mm}^2$ であることから、軽量骨材としての強度の適用範囲も満たしていた。

表 5-3 各配合の強度および弾性係数

配合名	W/C (%)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
PS 細・粗	40	22.14	5.21
	50	19.36	4.41
	60	18.32	4.29
PS 細・碎石	40	33.74	9.85
	50	29.61	9.19
	60	24.84	8.60
碎砂・碎石	40	47.60	32.50
	50	38.28	30.50
	60	26.56	25.50

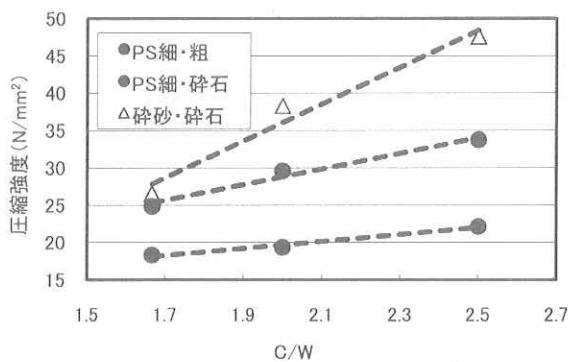


図 5-1 セメント水比の違いによる各配合強度

図 5-3 に各供試体(W/C50%)の圧縮強度試験時における応力-ひずみ関係を示す。PS 灰造粒骨材用いた配合において、ひずみが碎砂・碎石の配合に比べて非常に大きい。したがって弾性係数においても碎砂・碎石と比較して、PS 細・碎石で約 $1/2$ 、PS 細・粗で約 $1/4$ であった。これは PS 灰造粒骨材の吸水率が高いことから空隙率も高くボーラスな構造であることが予見でき、圧縮応力下において骨材の変形や破壊が進み、ひずみも増大したものと考えられる。

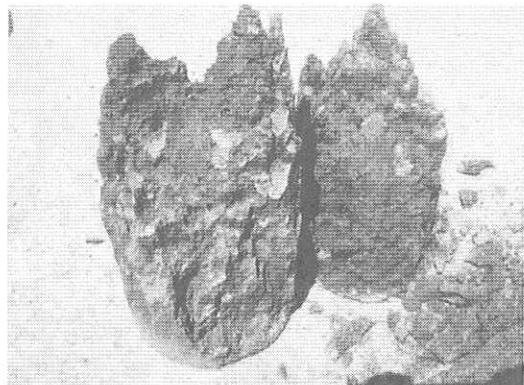


図 5-2 PS 細・粗供試体の破壊状況

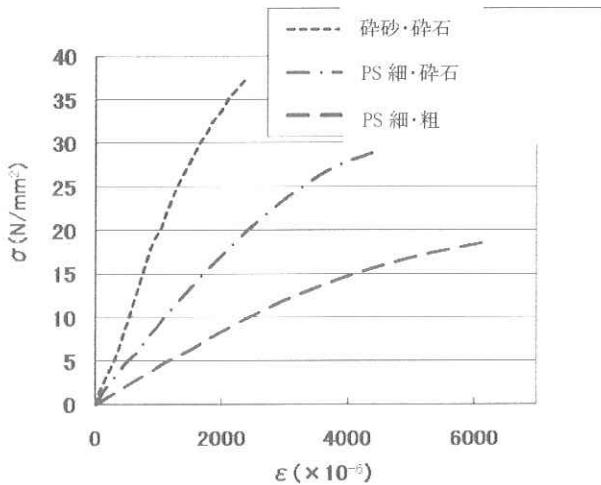


図 5-3 各配合における応力-ひずみ

6. 研究成果のまとめ

PS 灰を活用した造粒物のコンクリート骨材への適用に関する基礎的研究について共同研究をおこなった結果を要約すると以下のとおりである。

PS 灰の造粒に関する項目

1. PS 灰は採取した時期によって成分比および未燃カーボンの含有に変動があることがわかった。一般に石炭灰に含まれる未燃カーボンは AE 減水剤等の混和剤を吸着するため、フレッシュコンクリートの性状が悪化するため、今後は PS 灰および石炭灰の未燃カーボンの含有による影響について検討する必要がある。
2. PS 灰造粒骨材の粉体の配合は单一粒径よりも粒度分布が均質することにより粉体粒子間の空隙が少ない団粒構造となり、粉体粒子間の接触表面積も増加することによって造粒物の緻密さが増すものと考えられる。
3. 造粒における配合方法は、セメントの混入割合を増加することによって圧縮強度を高める効果よりも PS 灰を多く用いる配合の方が強度は高くなることがわかった。

PS 灰造粒骨材のコンクリート用骨材としての適用性に関する項目

1. PS 灰造粒細骨材をふるいの呼び寸法で 1.2m~5.0mm と 1.2mm 以下で分級し、質量比で粒度分布を調整することによってコンクリート用骨材として適している粒度範囲内に調整することができた。
2. PS 灰造粒骨材は表乾判定が困難であった。一般的な JIS A 1109においては表乾より気乾状態に近いと推察された。よって表乾判定は JIS A 1134 構造用軽量骨材の密度および吸水率試験方法を採用した。
3. PS 灰造粒骨材は細骨材で表乾密度 1.65g/cm^3 、吸水率 48.6%、粗骨材で表乾密度 1.65g/cm^3 、吸水率 44.9%あることから軽量で高い吸水率を有していた。また、その吸水作用時間は極めて短かった。
4. PS 灰造粒骨材は碎砂および碎石と比べて粒形が球状であったが実績率は低かった。これは吸水率が高いため骨材粒子内の空隙率も高いと予測され、実績率の低下に繋がっていた。
5. PS 灰造粒細骨材によるフレッシュモルタルの流動性を評価した結果、モルタルフロー値は海砂と同程度であった。PS 灰造粒骨材の粒形は海砂と同じ球状であった。そのため流動抵抗性が緩和されていた。
6. フレッシュコンクリートの流動性においてもフレッシュモルタル時と同様に PS 灰造粒骨材は高い流動性を発揮し、単位水量を低減する効果があった。
7. PS 灰造粒骨材は原料である PS 灰および石炭灰に含まれている未燃カーボンによって AE 剤の空気連通性が阻害されていた。今後、未燃カーボン含有率については追跡調査し、検討する必要がある。
8. 硬化コンクリートにおける単位体積質量は骨材全量に対して PS 灰造粒骨材を用いた PS 細・粗は約 1.70g/cm^3 で碎砂・碎石と比較して非常に軽量なコンクリートであった。細骨材のみ用いた

場合でも 2.0g/cm^3 程度の軽量なコンクリートを製造できることがわかった。

9. P 波伝播速度は単位体積質量において軽量なものほど速度が遅かった。PS 灰造粒骨材を用いた硬化コンクリートは骨材粒の空隙率が高いことから密度が低下し粗な状態で形成され速度に影響しているものと考えられる。また、伝播速度は粗骨材での PS 灰造粒骨材の使用の有無が与える影響が大きい。
10. 圧縮強度は PS 灰造粒骨材のみを使用した PS 細・粗は 20N/mm^2 程度であった。供試体の破壊状況で粗骨材として用いた骨材粒の破壊が著しく、セメントペーストの強度よりも骨材粒の強度が低いことによって強度が低下していた。
11. 細骨材のみ PS 灰造粒骨材を使用した PS 細・碎石は碎石を併用することにより、W/C 50%以下の配合で鉄筋コンクリート構造物使用基準強度 30N/mm^2 を満たし、軽量コンクリートの呼び強度 $18\sim30\text{N/mm}^2$ の適用範囲も満たしていた。
12. 圧縮強度試験時における応力ーひずみ関係から PS 灰造粒骨材用いた配合はひずみが大きかった。弾性係数では碎砂・碎石と比較して、PS 細・碎石で約 1/2, PS 細・粗で約 1/4 であった。この要因として PS 灰造粒骨材は空隙の多いポーラスな構造であることから圧縮応力下において骨材の変形や破壊が進み、ひずみが増大したものと考えられる。

多孔質セラミックの熱特性に関する研究

愛媛大学大学院理工学研究科助教

木下尚樹

愛媛大学工学部等技術部機械・環境建設系技術班

川口隆

株式会社ミユキ・エマイム代表取締役

山内美雪

1. はじめに

本報告は、平成 19 年度共同研究「多孔質セラミックの熱特性に関する研究」において得られた成果を報告したものである。

第 2 章では実施した実験項目と比較検討した既成の建設材料について述べる。第 3 章および第 4 章では各実験の方法と結果について述べ、第 5 章では結果のまとめについて報告する。

研究対象の試料は、商品名「リグノセラミックスタイル（特許取得済）」で、砥部焼の磁器土に特殊配合したものと、瓦の土に特殊配合したものを組み合わせて誕生した新素材である。以下、本報告では実験タイル（建築用実験タイル、道路用実験タイル）と呼ぶ。

実験タイルの用途は床材・壁材・インテリアなどである。



図 1 研究対象の実験タイルの外観

2. 実験項目

本実験において参考となる既成の建設材料は、リグノセラミックスタイルの材料品質から建築用陶器質タイル、普通レンガ、粘土瓦、セラミックメーソンリーユニット、インターロッキングブロックである。

実験で求める材料ごとの品質規格を表1に示す。また、インターロッキングブロックの品質規格項目に記載してある圧縮強さは、△としているがこれはブロックの形状やその他の理由により、曲げ強度試験ができない場合は、コアによる圧縮試験を行うと規定されているためである。

表1 各材料の品質規格

建築用タイル					道路用タイル		
	建築用陶器質タイル	普通レンガ	粘土瓦	セラミックメーソンリーユニット	品質規格		
吸水率	○	○	○	○	吸水率	○	
耐貫入性	○	-	-	-	耐貫入性	-	
耐磨耗性	○	-	-	-	耐磨耗性	-	
曲げ強さ	○	-	○	-	曲げ強さ	○	
耐凍害性	○	-	○	-	耐凍害性	-	
耐薬品性	○	-	-	-	耐薬品性	-	
圧縮強さ	-	○	-	○	圧縮強さ	△	
保水性	-	-	-	-	保水性	○	
吸水性	-	-	-	-	吸水性	○	
すべり抵抗性	-	-	-	-	すべり抵抗性	○	
熱特性							
有効間隙率	○	○	○	○	有効間隙率	○	
熱伝導率	○	○	○	○	熱伝導率	○	
表面温度測定	○	○	○	○	表面温度測定	○	

以下に試験の品質評価の対象とした材料について述べる。

陶器質タイル；吸水率22%以下、焼成温度1000°C以上。ほとんど白素地は多孔質で吸水が多い。たたくと濁音を発する。

普通レンガ；粘土に砂を混ぜて練り成型し、乾燥、焼成したもの。

粘土瓦；屋根葺き材料の1つ。粘土を混練、成形、焼成した屋根材の総称。

セラミックメーソンリーユニット；組積や敷設する為のセラミックの材料の総称。

インターロッキングブロック；インターロッキングブロックとは、高振動加圧方式で製造した舗装用コンクリートブロックのこと。

本研究での実験項目は、前述の各建設材料の品質規格の項目から選定した①吸水率試験、②曲げ強さ試験、③圧縮強度試験、④保水性試験、⑤吸水性試験、⑥すべり抵抗性試験とした。また、熱特性を検討するため、⑦有効間隙率試験、⑧熱伝導率試験、⑨放射熱による加熱抑制評価（室内・屋外）を行った。

また、実験において比較試料とした既成材料は以下通りである。

市販セラミックタイル、排水用セラミックタイル、岩盤平板、コンクリート平板、アスファルト（密粒度高い）、アスファルト（排水用）、普通インターロッキングブロック、透水用インターロッキングブロック

3. 多孔質セラミックの品質評価

3. 1 吸水率試験

- (1) 試験名：吸水性試験
- (2) 試験目的：吸水性試験を用いて供試体の湿潤質量と絶乾質量を求めるとともに計算式により吸水率を求める。
- (3) 試験内容（参考：JIS A5209 陶磁器質タイル）
 - 1 供試体はブロックそのままとする。
 - 2 ブロックを温度 105 以上の空気乾燥器内において一定質量になるまで乾燥した後、常温まで冷却し、絶乾状態とする。この時の単位を 1g まで計測し、乾燥時の質量とする。
 - 3 ブロックを 15~25°C の清水に浸し、24 時間経過した後取り出し、固く絞ったウエスなどで手早く拭き、直ちに質量を 1g 単位まで計測する。この時の質量を吸水時の質量とする。
 - 4 吸水率は以下の計算式で求める。

$$\text{吸水率}(\%) = \frac{\text{吸水時の質量}(g) - \text{乾燥時の質量}(g)}{\text{乾燥時の体積}(cm^3)} \times 100$$

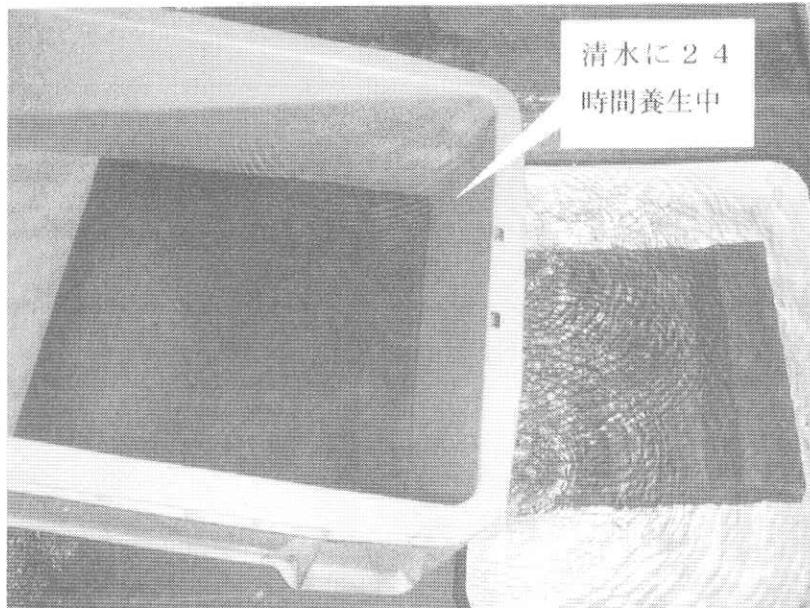


図 2 実験の様子

(4) 品質規格

表 2 吸水率の品質規格

建築用陶器質用タイル(%)			普通れんが(%)		
磁器質	せっき質	陶器質	2種	3種	4種
1	5	22	15	13	10
粘土がわら(%)			セラミックメーソンリーユニット(%)		
ゆう葉瓦	いぶし瓦	無ゆう瓦	40	50	60
12	15	12	14	12	10

(5) 吸水率の実験結果

表 3 吸水性の実験結果

建築用実験タイル288.5×288.5×21.5mmの素材結果

	乾燥時の質量	湿潤時の質量	吸水率(%)
①	3265.7	3634.0	11.28
②	3364.1	3793.4	12.76
③	3355.4	3779.1	12.63

道路用実験タイル255×255×37.2mmの素材結果

	乾燥時の質量	湿潤時の質量	吸水率(%)
①	3226.1	3606.0	11.78
②	3161.9	3566.7	12.80
③	3158.2	3538.5	12.04

建築用実験タイルの吸水率

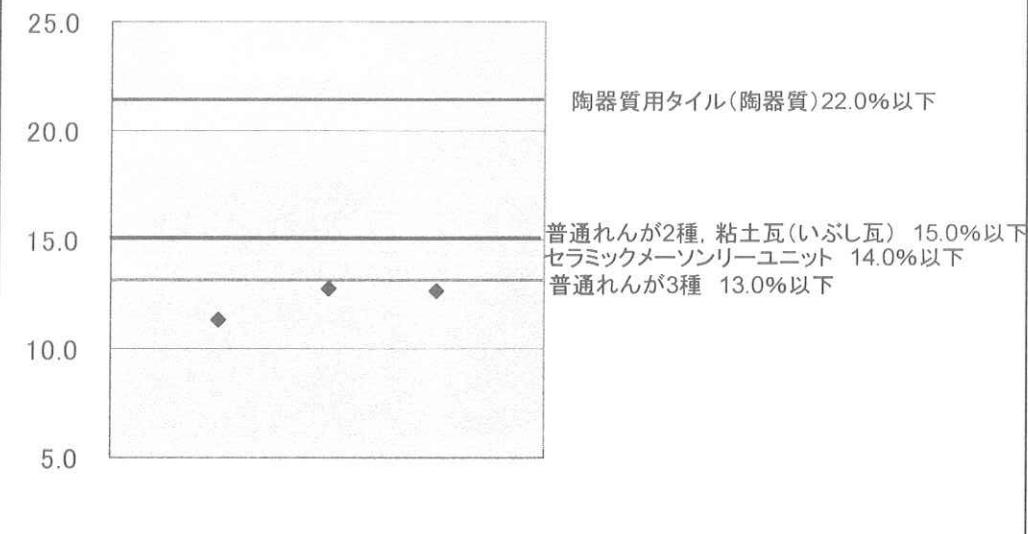


図 3 吸水性の品質規格と実験結果

3. 2 曲げ強さ試験

- (1) 試験名：曲げ強度試験（曲げ強さ試験）
- (2) 試験目的：曲げ強度試験を用いて供試体の破壊荷重を求めるとともに計算式により曲げ強さを求める。
- (3) 試験内容（参考：JIS A5209 陶磁器質タイル）
 - 1 試験体の表面を下にする。
 - 2 スパン L mm で設置した直径 10mm の支援棒の上に載せる。
スパン中央上に直径 10mm の加圧棒を介して荷重をかける。
 - 3 また、タイルが正方形かつ弱い方向が明らかな場合はその方向について試験する。
 - 4 厚さ 3mm のゴム板を試験体と支援棒、加圧棒の間に設置。
 - 5 荷重の速さは 30 秒以上に調整し、破壊荷重を測定し以下の計算式により、幅 10mmあたりの曲げ破壊荷重 P を求める。

$$P = \frac{F}{b} \frac{L}{90}$$

この時スパン L は 180mm で行う。



図 4 実験の様子

(4) 品質規格

表 4 曲げ強さの品質規格

曲げ強度の品質規格

陶器質タイル(幅1cmあたり) N/cm(kgf/cm)			粘土がわら	
内装タイル	壁用	12(1.23)	浅がわら	1500(153.0)以上
	床用	60(6.12)	のしがわら	600(61.2)以上
外装タイル	タイルの寸法が 155mm以下	80(8.16)	インターロッキング	
	タイルの寸法が 155mm以上	100(10.20)	車道	歩行者系道路
床タイル		120(12.24)	5.0MPa以上	3.0MPa以上
モザイクタイル		60(6.12)		

(5) 結果

表 5 曲げ強さの実験結果

供試体番号	建築用タイル			道路用タイル		
	①	②	③	供試体番号	④	⑤
最大荷重(kgf)	395	223	321	最大荷重(kgf)	370	398
最大荷重(N)	3873.61	2186.87	3147.92	最大荷重(N)	3628.45	3903.03
幅1cm辺り の曲げ強 さ N/cm	kgf/cm 27.47	15.50	22.31	幅1cm辺りの 曲げ強度 MPa	3.18	3.42
平均(N/cm)	269.43	152.05	218.80			2.49
	平均(MPa)			平均(MPa)		
	213.42			3.03		

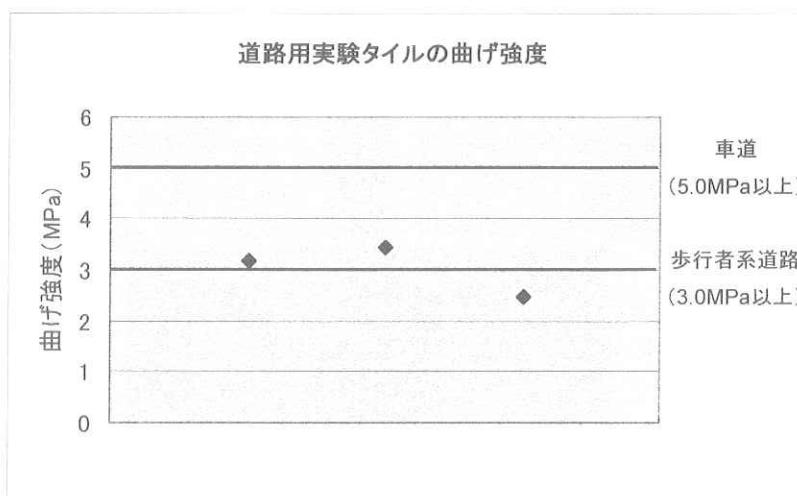


図 5 インターロッキングブロックにおける曲げ強さの品質規格と実験結果

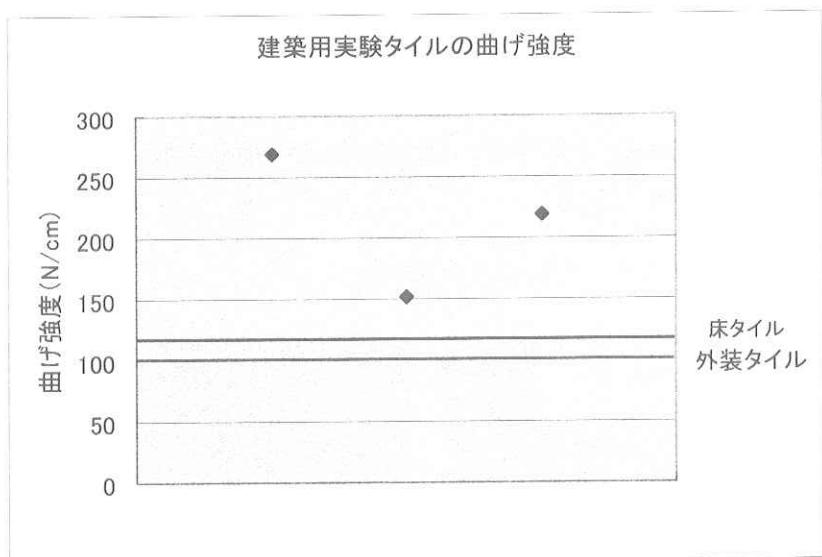


図 6 建築用実験タイルにおける曲げ強さの品質規格と実験結果

表 6 建築用素材の曲げ試験の実験結果

供試体番号	市販コンクリート			市販石材		
	①	②	③	①	②	③
最大荷重(kgf)	653.0	595.0	505.0	652.0	636.0	715.0
最大荷重(N)	6403.7	5834.9	4952.3	6393.9	6237.0	7011.7
幅1cm辺り kgf/cm	43.6	39.7	33.7	43.5	42.5	47.7
の曲げ強さ N/cm	427.2	389.7	330.6	427.1	416.6	467.8
平均(N/cm)	382.5			437.2		
	市販セラミックタイル			市販排水用セラミックタイル		
供試体番号	①	②	③	①	②	③
最大荷重(kgf)	622.0	500.0	380.0	543.0	356.0	404.0
最大荷重(N)	6099.7	4903.3	3726.5	5325.0	3491.2	3961.9
幅1cm辺り kgf/cm	41.3	32.9	25.2	36.3	23.8	27.0
の曲げ強さ N/cm	405.0	322.3	246.7	356.2	233.2	264.5
平均(N/cm)	324.7			284.7		

3. 3 圧縮強度(強さ)試験

- (1) 試験名：一軸圧縮試験（強度試験）
- (2) 試験目的：一軸圧縮応力を用いて供試体の最大荷重を求めるとともに計算式により圧縮強さを求める。
- (3) 試験内容（参考：インターロッキングブロック概要）

1 圧縮強度試験、粗骨材最大寸法の最大3倍以上のコアを試験材から抜取、両端面

をセメントペーストによりキャッピング、または同等の方法で、供試体の軸にできるだけ垂直な平面に仕上げ、高さの直径に対する比が1~2の範囲の円柱供試体を作成。

2 毎秒0.5~1.0N/mm²の荷重速度で破壊するまで加圧する。試験体が圧縮破壊するまでの最大荷重Wを測定。

3 $C = \frac{W}{A}$ の式により、圧縮強さを求める

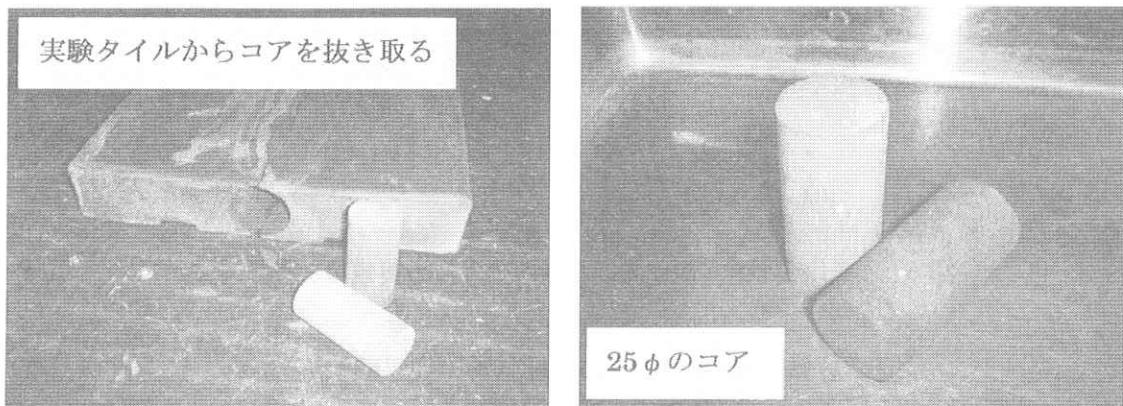


図7 コア抜きした試料

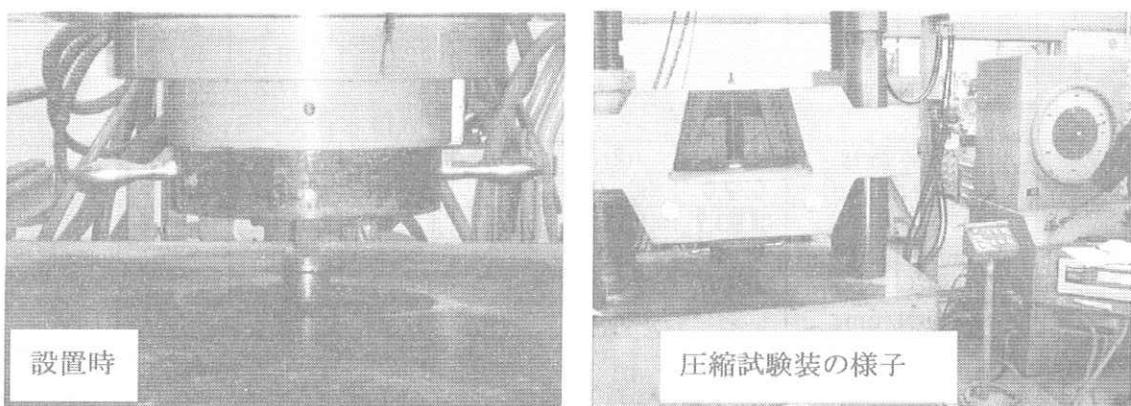


図8 圧縮試験の様子

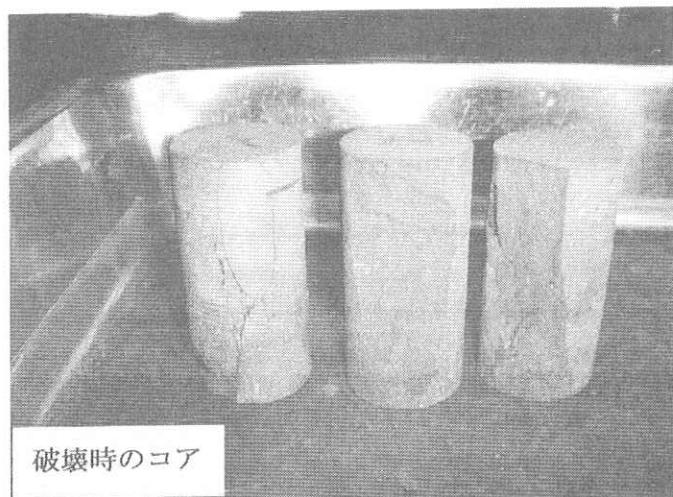


図9 圧縮後のコアの様子

(4) 品質規格

表7 圧縮強度の品質規格

普通れんが			
	2種	3種	4種
N/mm ²	15.0以上	20.0以上	30.0以上
セメントメーソンリーユニット			
品質番号	20	30	40
kgf/cm ²	204以上	306以上	408以上
N/mm ²	20以上	30以上	40以上
インターロッキングブロック			
MPa	曲げ強度5.0MPa以上		曲げ強度3.0MPa以上
	32.0以上		17.0以上

(5) 結果

表8 圧縮強度の実験結果

圧縮強度($\phi=25\text{mm}$)

供試体番号	①	②	③	④	⑤
供試体箇所	端	中	中	中	端
最大荷重(kgf)	1202	2153	1984	1837	2061
圧縮強さ(kgf/cm ²)	244.87	438.61	404.18	374.23	419.87
圧縮強さ(N/mm ²)	24.01	43.01	39.64	36.70	41.17
平均圧縮強さ(N/mm ²)				36.91	

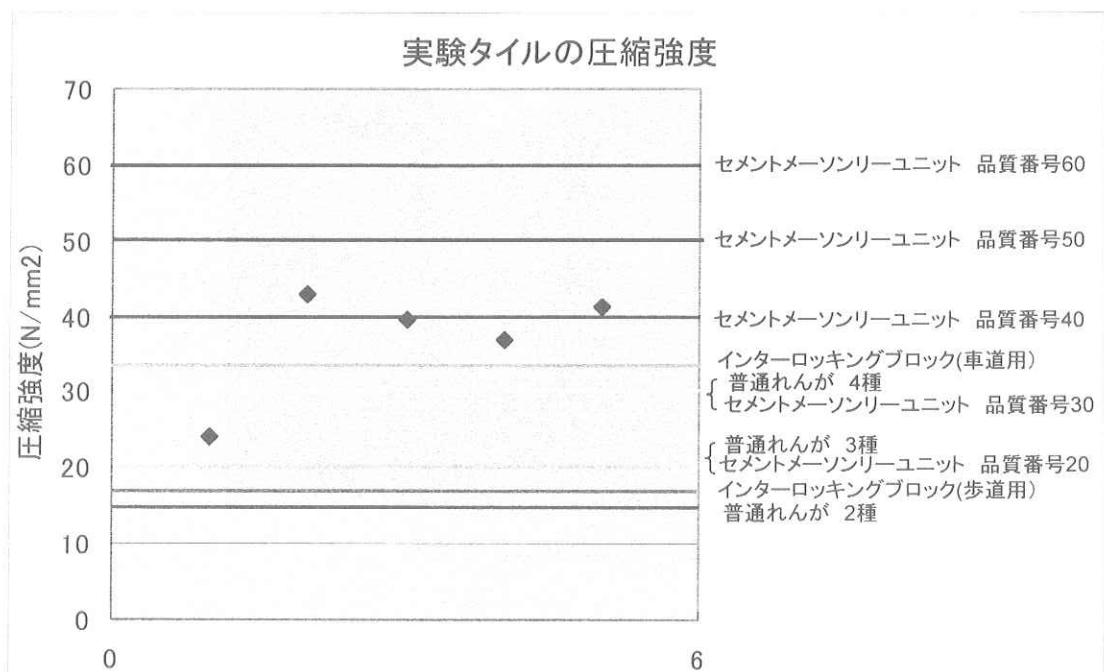


図 10 圧縮強度の品質規格と実験結果

3. 4 保水性試験

- (1) 試験名：保水性試験
- (2) 試験目的：保水性試験を用いて供試体の湿潤質量と絶乾質量を求めるとともに計算式により保水量を求める。
- (3) 試験内容（参考：インターロッキングブロック舗装 設計施工要領）
 - 1 供試体はブロックそのままとする。
 - 2 供試体の幅, 長さ, 厚さを測定して, これから供試体の体積を 0.1 cm^3 単位まで算出する。
 - 3 ブロックを温度 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ の乾燥器内において一定質量になるまで乾燥した後, 常温まで冷却し, 絶乾状態とする。この時の単位を 1g まで計測し, 絶乾質量とする。
 - 4 ブロックを $15 \sim 25^\circ\text{C}$ の清水中で 24 時間吸水した後, 供試体を取り出して図 11 のような密閉式のプラスチック容器に入れ, $15 \sim 30^\circ\text{C}$ の室内で 30 分間水を切り, 絞ったウェスで目に見える水膜をぬぐった後, 直ちに質量を 1g 単位まで計測する。この時の質量を湿潤質量とする。

5 保水量は以下の計算式で求め、保水量の数値は、有効3桁に丸める。

$$\text{保水量}(\text{g/cm}^3) = \frac{\text{湿潤質量}(\text{g}) - \text{絶乾質量}(\text{g})}{\text{供試体の体積}(\text{cm}^3)}$$

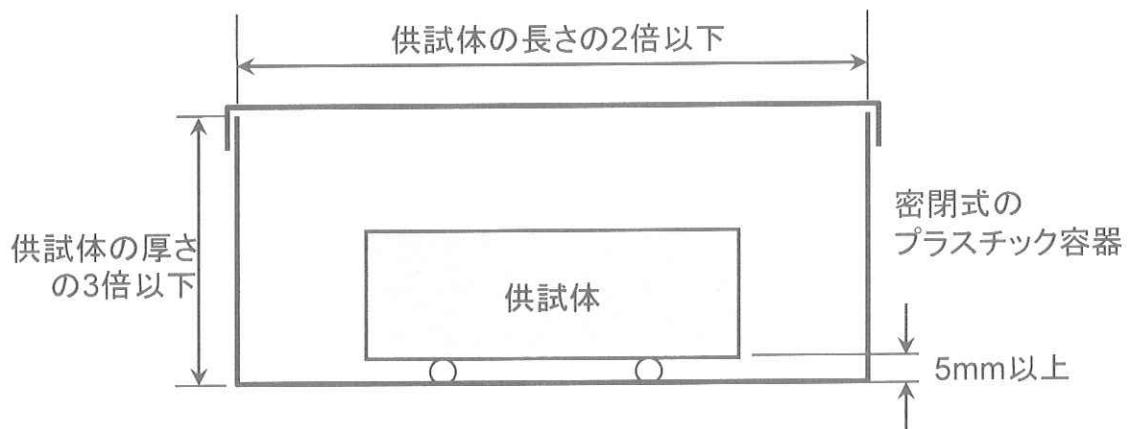


図 11 濡潤状態にする装置の概略図

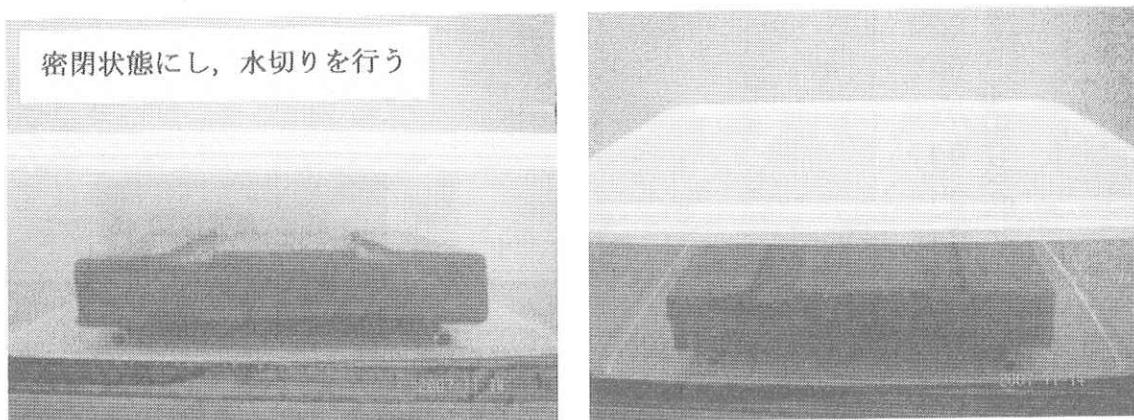


図 12 保水性試験の様子

(4) 品質規格

0.15g/cm³ 以上

(5) 結果

表 9 保水性(道路用)の品質規格

	絶乾質量(g)	湿潤質量(g)	長さ(cm)	幅(g)	体積(cm ³)	保水量(g/cm ³)
1回目	3193.5	3581.3	21.595	3.75	1789.96	0.22
			21.87	3.93		
			21.6	3.76		
			21.75	3.76		
2回目	3216.4	3574.1	21.63	3.7	1770.32	0.20
			21.92	3.75		
			21.65	3.74		
			21.74	3.8		
3回目	3156.2	3515.4	21.62	3.73	1729.26	0.21
			21.47	3.76		
			21.76	3.67		
			21.48	3.69		

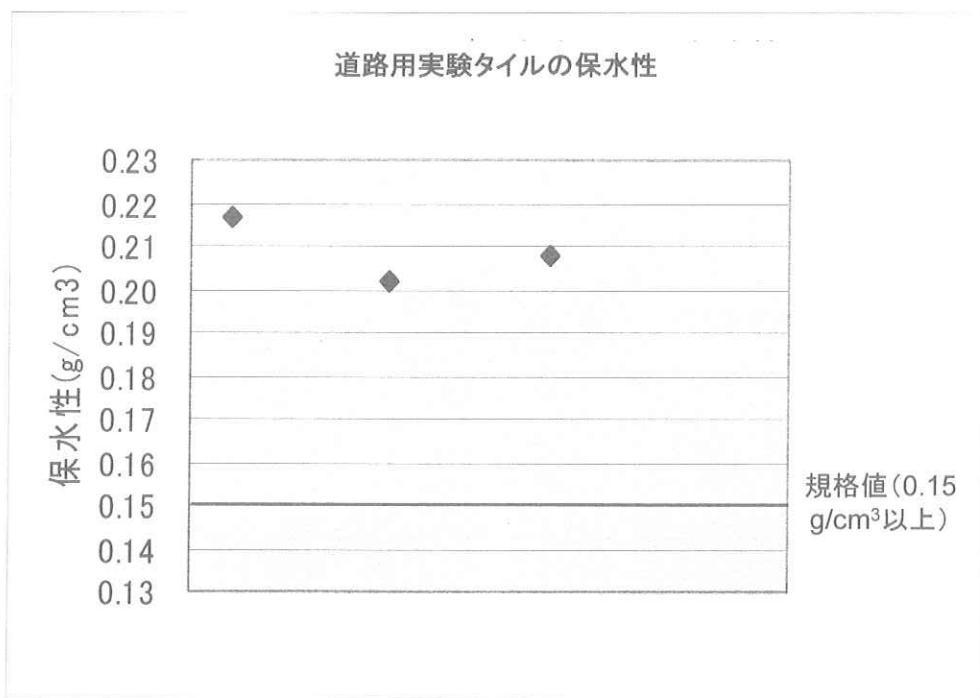


図 13 保水性(道路用)の品質規格と実験結果

3. 5 吸水性試験

(1) 試験名：吸水性試験

(2) 試験目的：吸水性試験を用いて供試体の吸上げ質量、湿潤質量、絶乾質量を求めるとともに計算式により 30 分間の吸い上げ高さを求める。

(3) 試験内容 (参考: インターロッキングブロック舗装 設計施工要領)

- 1 供試体はブロックそのままとする。
- 2 ブロックを温度 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ の乾燥器内において一定質量になるまで乾燥した後、常温まで冷却し、絶乾状態とする。この時の単位を 1g まで計測し、絶乾質量とする。
- 3 絶乾状態のブロックを図 14 に示す吸水性試験装置に設置する。設置時の水位はブロック底面から 5mm の高さとなるようにし、水は $15 \sim 25^{\circ}\text{C}$ の清水とする。供試体設置台の上面には金網などブロックの底面に水が回るような材料を用いるか、吸水性のスポンジをブロックとの間に挟む。
- 4 30 分経過後にブロックを取りだし、水が滴り落ちない程度まで水をきり、絞ったウエスで目に見える水膜を拭う。この時の質量を 30 分後の吸い上げ質量とする。
- 5 ブロックを $15 \sim 25^{\circ}\text{C}$ の清水中で 24 時間吸水させた後、供試体を取り出して図 15 のような密閉式のプラスチック容器に入れ、 $15 \sim 30^{\circ}\text{C}$ の室内で 30 分間水を切り、絞ったウエスで目に見える水膜をぬぐった後、直ちに質量を 1g 単位まで計測する。この時の質量を湿潤質量とする。
- 6 吸い上げ高さは以下の計算式で求め、数値は整数に丸める。

$$\text{吸い上げ高さ}(\%) = \frac{30\text{分後の吸い上げ質量}(g) - \text{絶乾質量}(g)}{\text{湿潤質量}(g) - \text{絶乾質量}(g)} \times 100$$

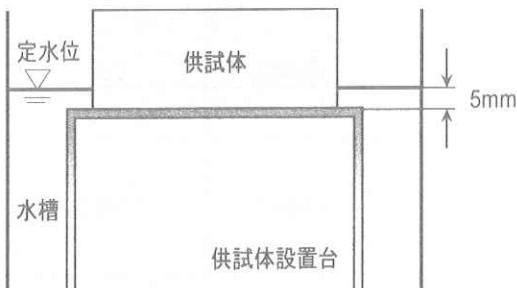


図 14 吸水性試験装置の概念図

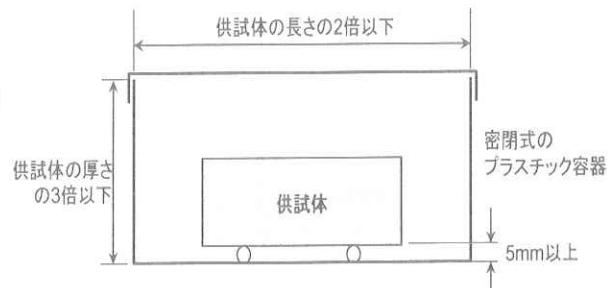


図 15 湿潤状態にする装置の概念図

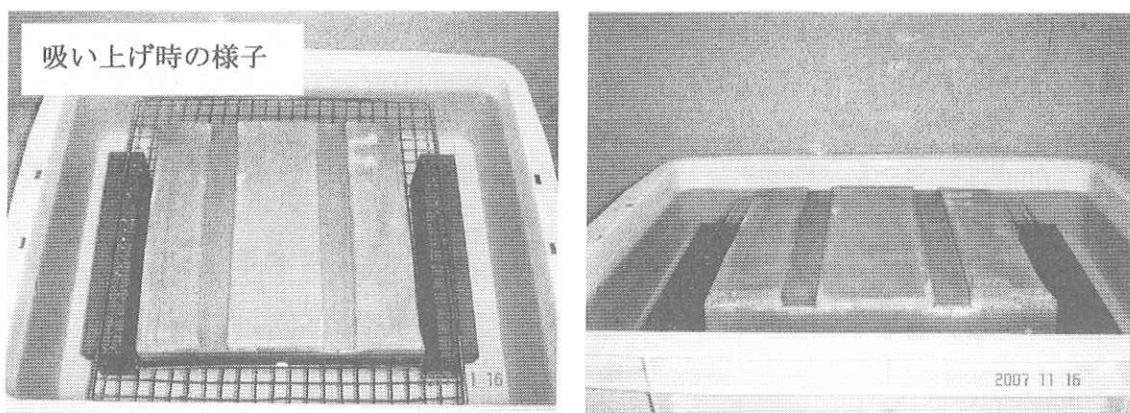


図 16 吸水性試験の様子

(4) 品質規格

70%以上

(5) 結果

表 10 吸水性(道路用)の品質規格

	絶乾質量(g)	湿潤質量(g)	吸い上げ質量	吸水性	吸水性×100%
1回目	3197.4	3606.9	3544.0	0.846	84.6
2回目	3216.4	3628.8	3559.9	0.833	83.3
3回目	3156.6	3576.2	3527.9	0.885	88.5

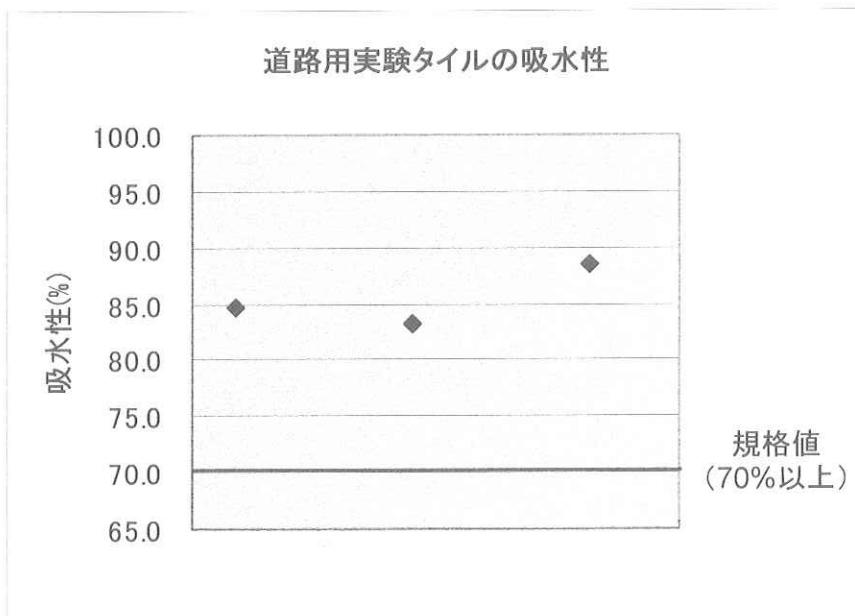


図 17 吸水性(道路用)の品質規格と実験結果

3. 6 すべり抵抗性試験

- (1) 試験名：すべり抵抗性試験
- (2) 試験目的：一軸圧縮応力を用いて供試体の最大荷重を求めるとともに計算式により圧縮強さを求める。
- (3) 試験内容（参考：インターロッキングブロック概要）
 - 1 測定面を十分に散水する。
 - 2 リリースボタンを押し、振り子をはなす。
 - 3 振り子が路面を通過した後、振り子の逆振れがあるのでスライダーが路面に再接触する前に振り子を手で止め、目盛りを 1BPN 単位で読み取る。
 - 4 振り子をスタート位置に戻し、ポインターを戻す。
 - 5 以上の行程を BPN 値が収束するまで繰り返す。
 - 6 BPN 値は、整数で表す。
 - 7 以下の補正式を用い、20°C の BPN 補正値を求める。

$$C_{20} = 0.0074t^2 + 0.0052t - 3.064 + C_t$$

C_{20} ; 20°C に補正した BPN 値

C_t ; 路面温度 t °C の時の BPN 値

t ; 路面温度

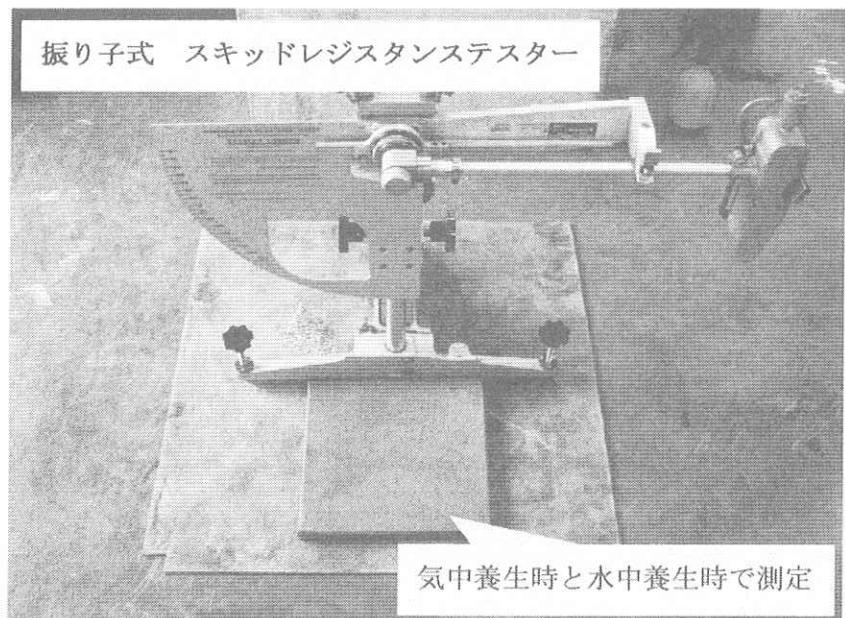


図 18 すべり抵抗性試験の様子

(4) 品質規格

車道用 60 以上

歩道用 40 以上

(5) 結果

表 11 すべり抵抗値(道路用)の実験結果

	乾燥状態の車道 用実験タイル	湿潤状態の車道 用実験タイル	車道用すべり 抵抗値の規定	歩道用すべり 抵抗値の規定
表面温度t	15	12		
決定C _t	110	55		
温度補正值C _{20(BPN)}	109	53	60以上	40以上

表 12 他素材のすべり抵抗値

	乾燥状態							
	建築用実験タ イル(黒色)	建築用実験タ イル(茶色)	市販 セラミック	保水市販 セラミック	石材	コンクリート	れんが	普通インターロッ キングブロック
表面温度t	17	16	15	14	16	15	16	13
決定C _t	110	103	74	80	65	70	83	80
温度補正值C _{20(BPN)}	109	102	73	78	64	69	82	78

	湿潤状態							
	建築用実験タ イル(黒色)	建築用実験タ イル(茶色)	市販 セラミック	保水市販 セラミック	石材	コンクリート	れんが	普通インターロッ キングブロック
表面温度t	17	16	15	14	16	15	16	9
決定C _t	46	44	35	77	45	45	80	77
温度補正值C _{20(BPN)}	45	42	33	75	43	43	78	75

4. 多孔質セラミックの熱特性の評価

4. 1 有効間隙率試験

- (1) 試験名：水銀ポロシメータ試験
- (2) 試験目的：水銀ポロシメータを用いて漏れない水銀に圧力を加えて、固体の細孔中へ圧入し、そのとき加えた圧力と侵入した水銀容積の関係を測定することで対象物の有効空隙率を調べる。
- (3) 試験内容
 1. 水銀ポロシメータとは固体の細孔分布、細孔の容積を測定する装置のことである。
 2. 対象物のセラミックのコアリングを行い、適宜成形し水銀ポロシメータを用いて測定を行う。

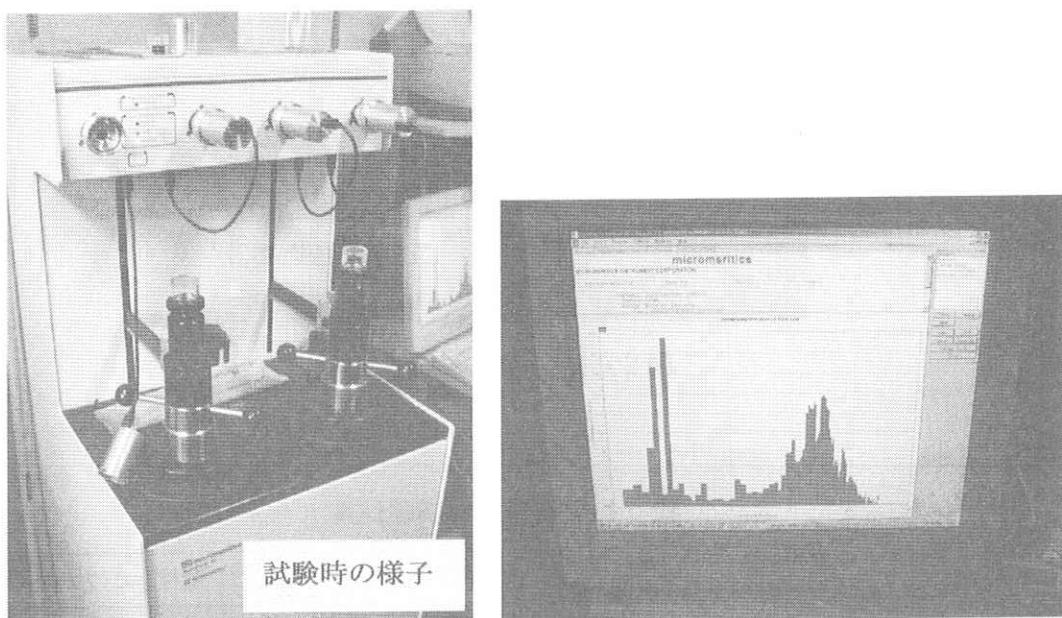


図 19 水銀ポロシメータ試験の様子

2. 結果

表 13 有効間隙率の実験結果

porosity(%)	ceramic					平均
	①	②	③	④	⑤	
28.0	31.7	30.7	30.3	31.2	30.4	

4. 2 热伝導率試験

- (1) 試験名：热伝導率測定
- (2) 試験目的：ブループ法による shothern QTM-D II 迅速热伝導率計を用いる。物質内に温度差があると温度の高い部分から低い部分へ热移動がおこる。热伝導率とはこの热移動のおこりやすさを表す係数で、つまり、热の伝わりやすさを調べる。
- (3) 試験内容：迅速热伝導率計を用い、値を測定する。



図 20 热伝導率測定の様子

(4) 結果

表 14 热伝導率の実験結果

	建築実験 タイル(黒色)	建築用実験 タイル(茶色)	市販セラミック	排水市販 セラミック	石材	コンクリート	れんが
温度(°C)	27	22	22	26	17	21	17
熱伝導(W/mK)	0.70	0.63	0.75	1.37	3.21	2.30	0.53
	車道用実験タイル	普通インターロッキングブロック	排水インターロッキングブロック				
温度(°C)	27	28	34				
熱伝導(W/mK)	0.69	0.80	1.22				

4. 3 放射熱による加熱抑制評価

4. 3. 1 室内実験

(1) 試験名：表面温度室内実験

(2) 試験目的：実験対象物を室内に設置し東芝ランプ（BRF 110V 100W フラッド）を用いた表面温度の変化を測定する。その変化により他の比較試料と比べ、放射熱に対しての効果を判断する。

(3) 試験内容

- 1 測定を行う材料に熱電対を一点貼りで貼り付け。
- 2 約 2 時間の実験で、前半の 1 時間対象物にランプを灯しその温度上昇を、後半 1 時間はランプを消灯しその低下温度を各々求める。
- 3 開始時、その後は 20 分ごとにサーモグラフィーで約 2 枚程度その状況を記録に収めた。室内温度は 23 度に設定。
- 4 乾燥状態と湿潤状態の 2 種類を測定する。

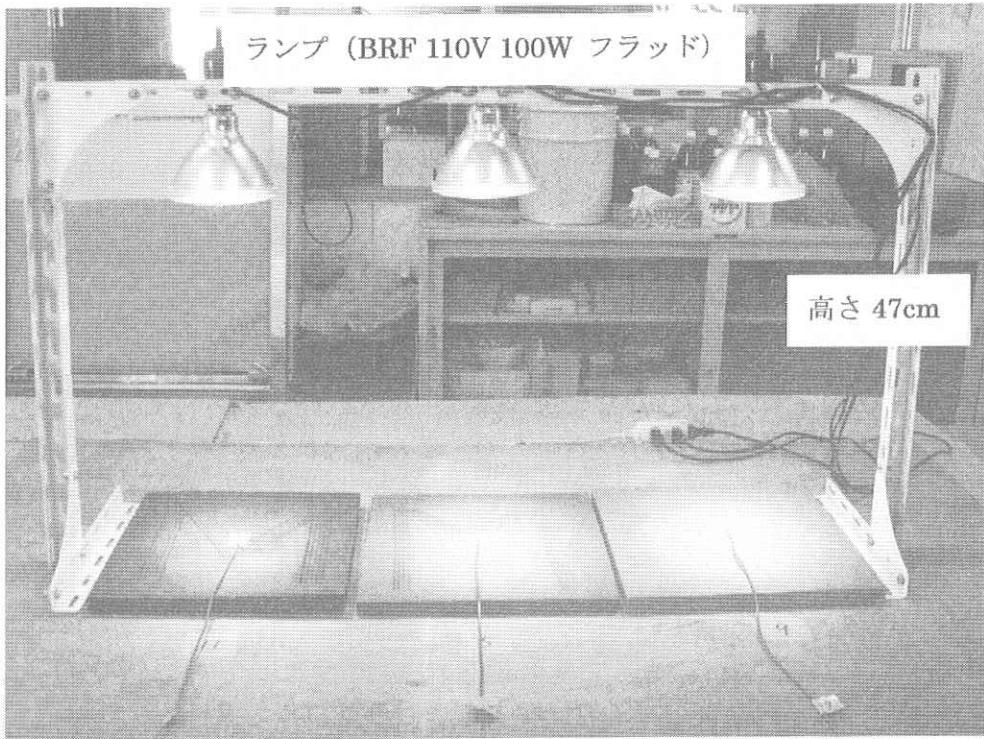


図 21 室内放射熱実験の様子

(4) 結果

実験素材（写真左から）

- 建築用実験タイル（黒色）(T)
- 建築用実験タイル（茶色）(TB)
- 市販セラミックタイル(S)

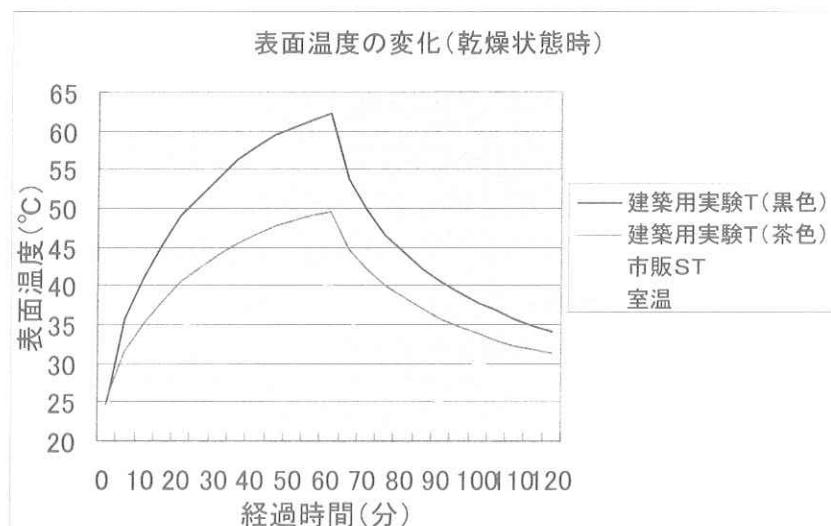


図 22 乾燥状態時の表面温度の変化

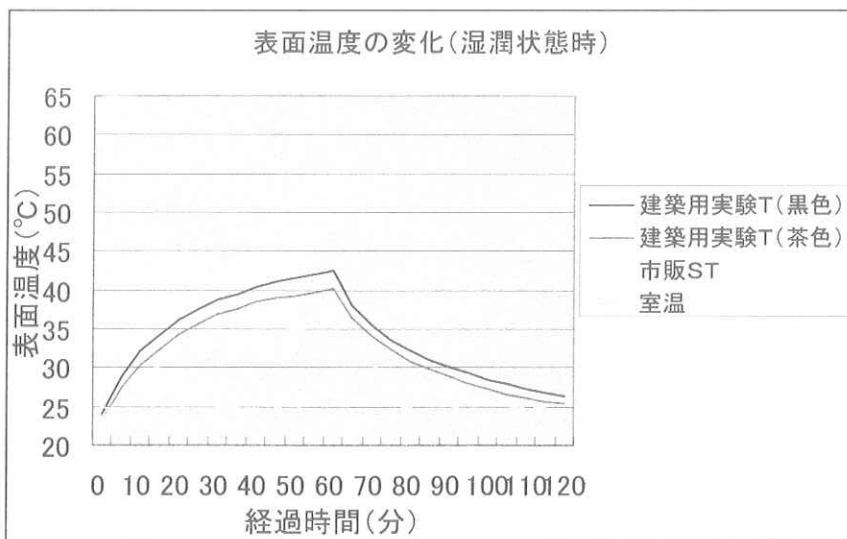
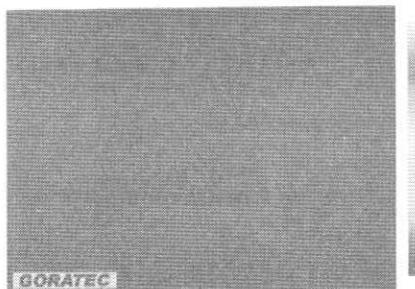


図 23 湿潤状態時の表面温度の変化

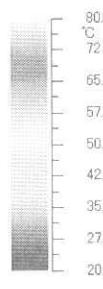
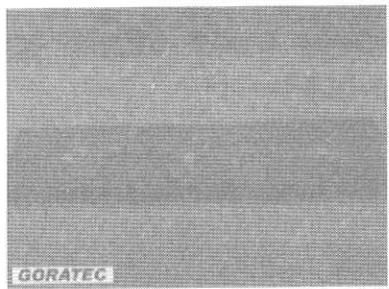
点灯前

乾燥状態



T;23.8°C TB;24.2°C S;24.0°C

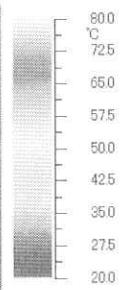
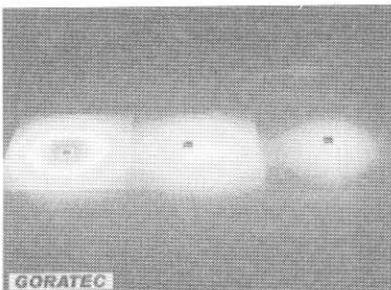
湿潤状態



T;24.2°C TB;24.0°C S;23.5°C

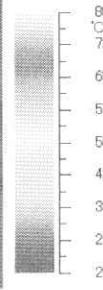
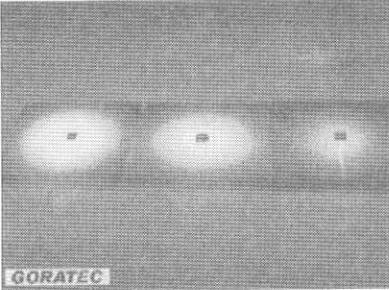
点灯開始から 1 時間後

乾燥状態



T;62.1°C TB;51.6°C S;39.4°C

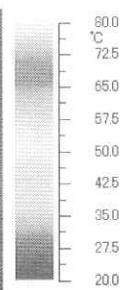
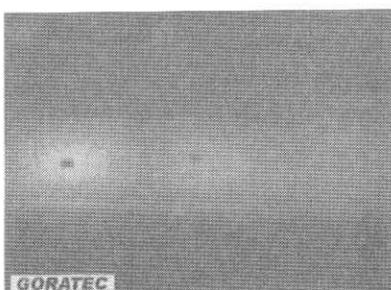
湿潤状態



T;41.5°C TB;40.0°C S;35.3°C

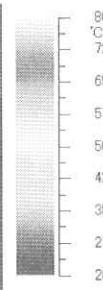
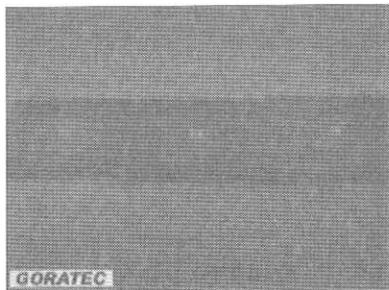
消灯から 1 時間後

乾燥状態



T;32.4°C TB;30.3°C S;28.3°C

湿潤状態



T;26.0°C TB;25.4°C S;24.7°C

実験素材（写真左から）

建築用実験タイル（黒色）(T)

市販岩盤平板（花崗岩）(RM)

市販コンクリート板(C)

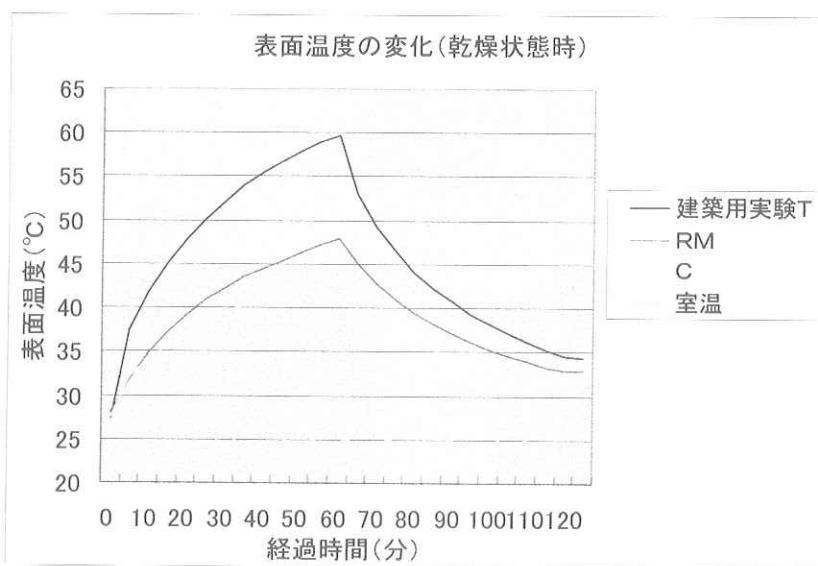
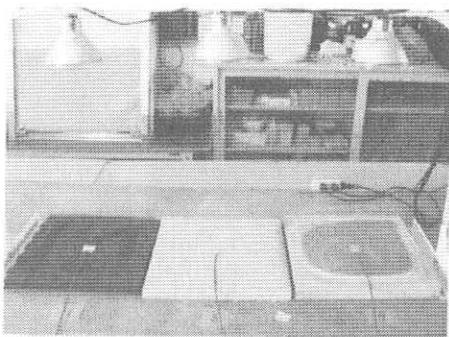


図 24 乾燥状態時の表面温度の変化

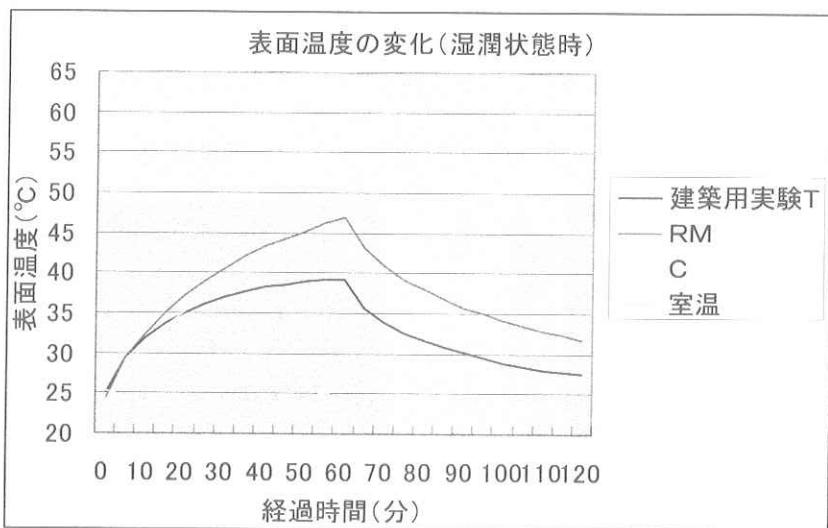
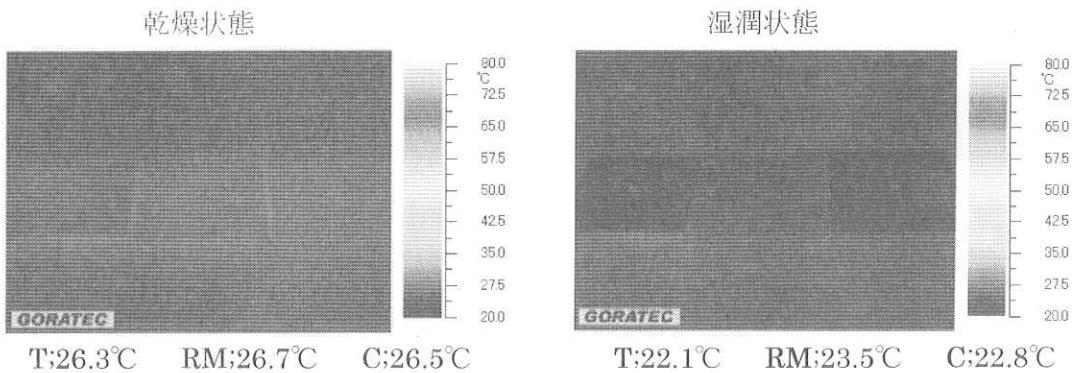
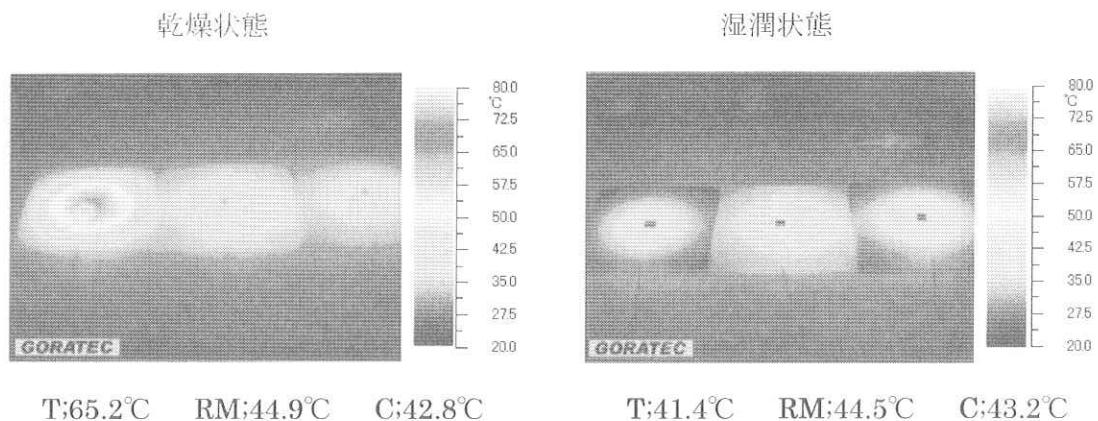


図 25 湿潤状態時の表面温度の変化

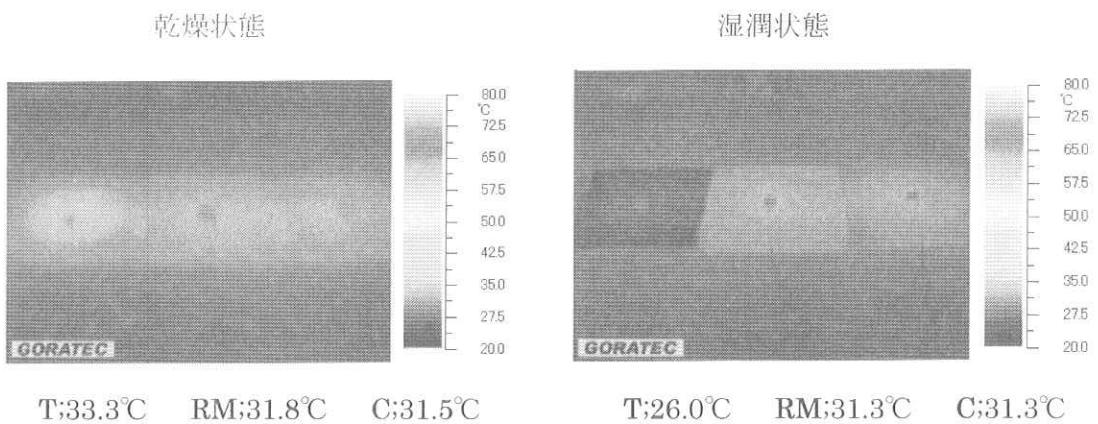
点灯前



点灯開始から 1 時間後



消灯から 1 時間後



実験素材（写真左から）

排水用アスファルト(AS 排水用)

密粒度高いアスファルト (AS 密粒)

道路用実験タイル(T)

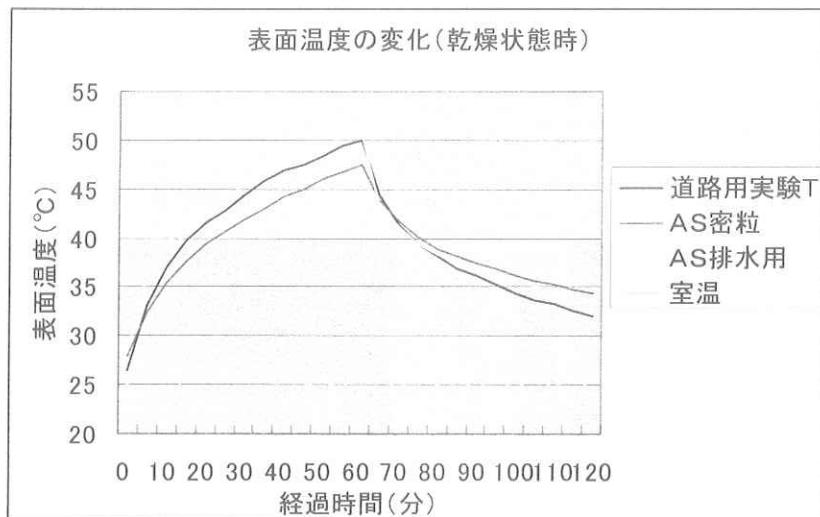


図 26 乾燥状態時の表面温度の変化

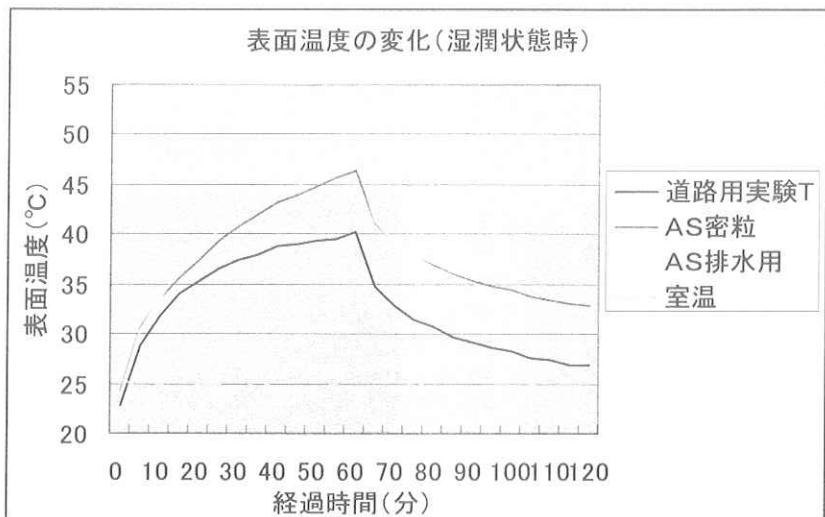
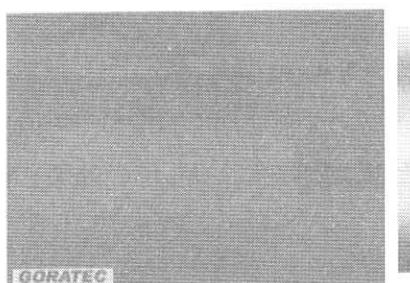


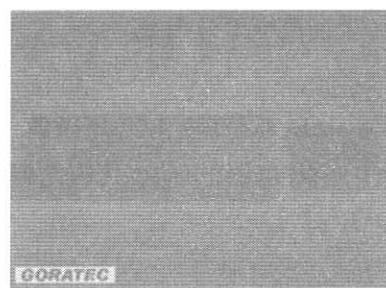
図 27 湿潤状態時の表面温度の変化

点灯前

乾燥状態



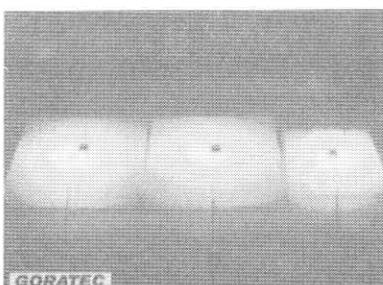
湿潤状態



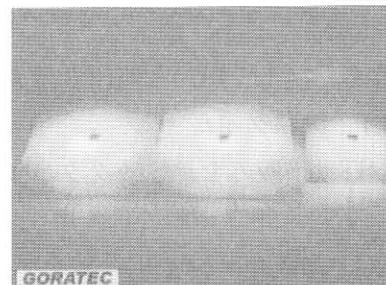
AS 排水用;28.1°C AS 密粒;28.1°C T;25.8°C AS 排水用;23.5°C AS 密粒;23.8°C T;22.8°C

点灯開始から 1 時間後

乾燥状態



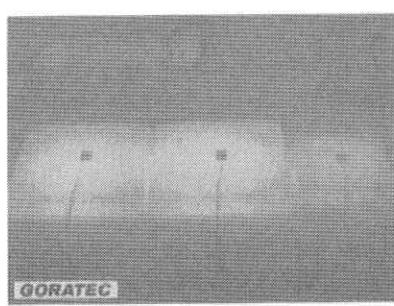
湿潤状態



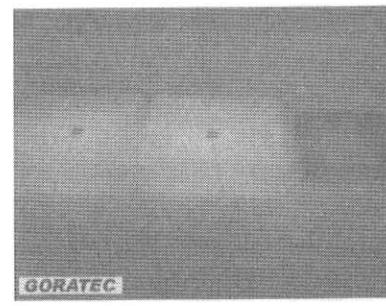
AS 排水用;55.2°C AS 密粒;50.5°C T;52.9°C AS 排水用;51.3°C AS 密粒;48.7°C T;41.6°C

消灯から 1 時間後

乾燥状態



湿潤状態



AS 排水用;34.1°C AS 密粒;33.7°C T;31.1°C AS 排水用;31.3°C AS 密粒;31.5°C T;25.8°C

4. 3. 2 屋外実験

- (1) 試験名：表面温度屋外実験
- (2) 試験目的：実験対象物を屋外に設置。日中最大気温時の表面温度を測定し、その後の温度変化を他の比較試料と比べることで、放射熱に対しての効果を判断する。
- (3) 試験内容
- 1 測定を行う材料に熱電対を一点貼りで貼り付ける。
 - 2 材料を規定場所に規定時間設置した後、サーモグラフィーで材料全体の温度を確認し、その時の最高温度と最低温度を測定する。
 - 3 日中最大気温時、日没時、夜間時中心に測定し、蓄積温度の変化を調べる。
 - 4 乾燥状態と湿潤状態の2種類を測定する。

以下にグラフ上で用いた略語を示す。

実験 T；実験タイル

市販 ST；市販のセラミックタイル

市販 ST 排水用；市販の排水用タイル

市販 C；市販のコンクリート

市販 RM；市販の岩盤平板

市販 R；市販のレンガ

AS 密粒；アスファルト密粒度高い

AS 排水；アスファルト排水用

IRB；インターロッキングブロック



図 28 屋外放射熱実験の様子

(4) 結果

乾燥状態時の建築用素材

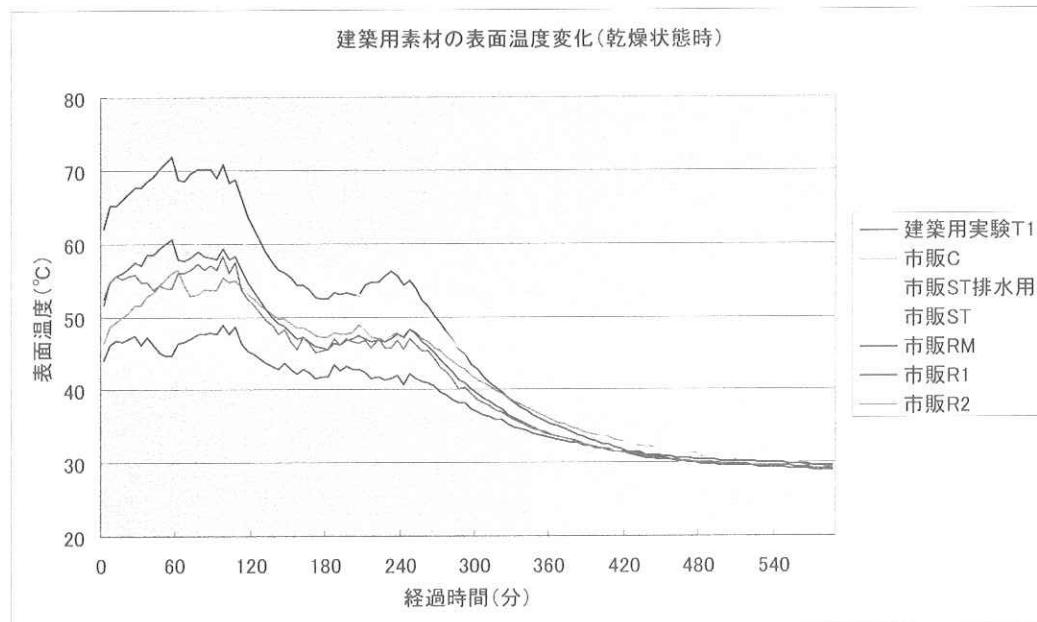


図 29 乾燥状態時の建築用素材の表面温度の変化

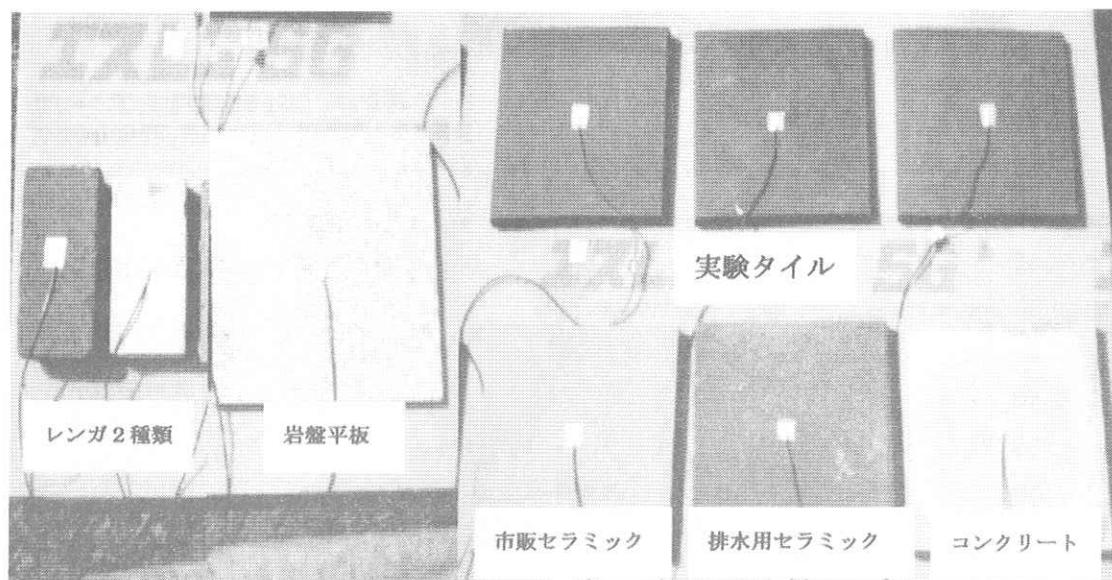


図 30 乾燥状態時の建築用素材の比較写真

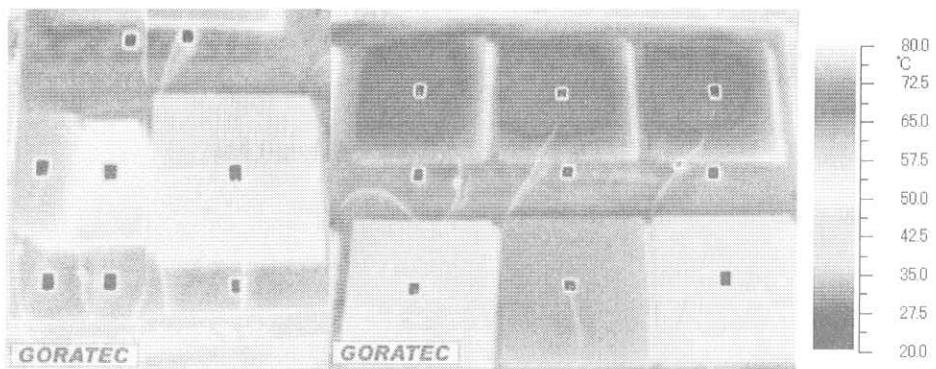


図 31 最高温度蓄積時

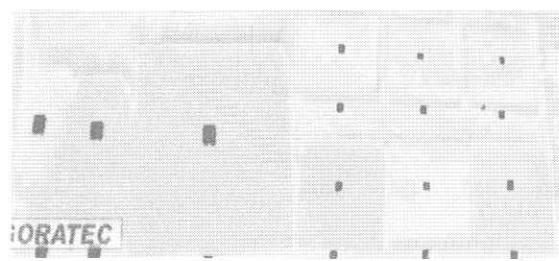


図 32 日没時の温度蓄積

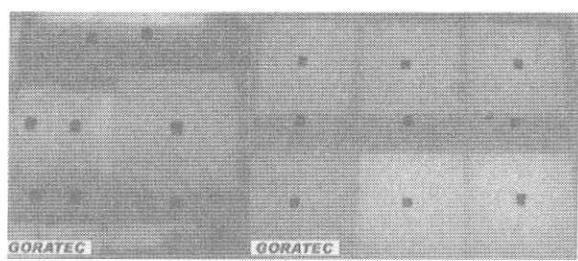


図 33 夜間時の温度蓄積

乾燥状態時の道路用素材

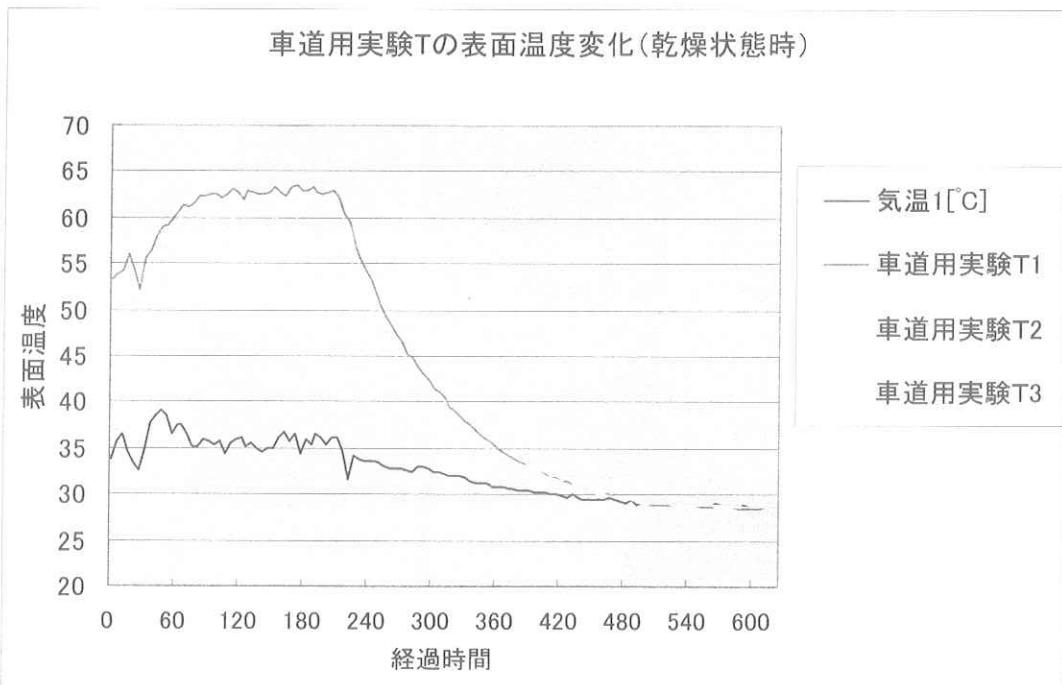


図 34 乾燥状態時の道路用素材の表面温度の変化

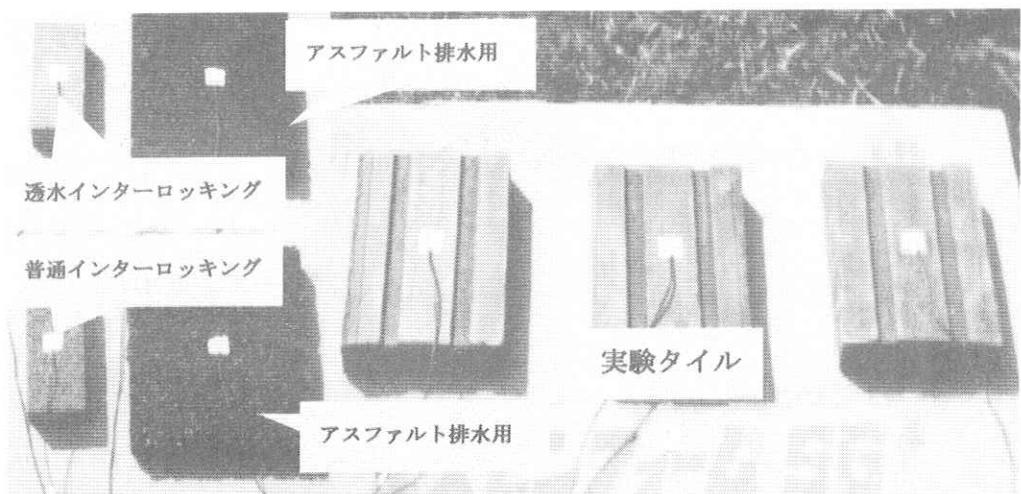


図 35 乾燥状態時の道路用素材の比較写真

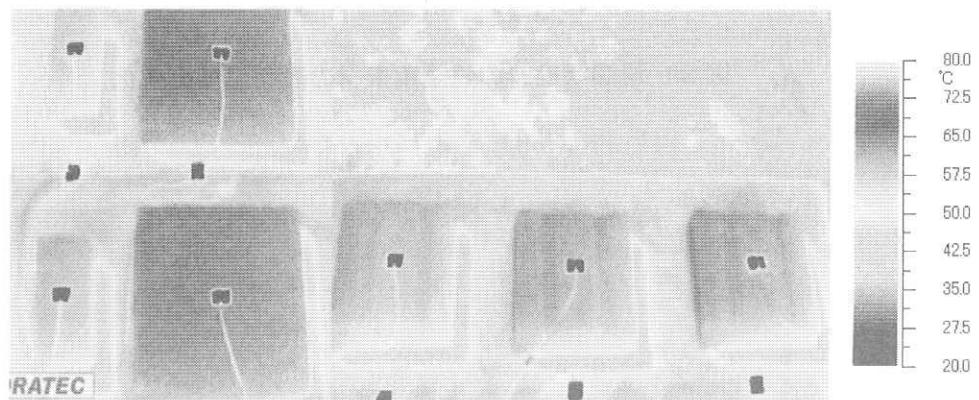


図 36 最高温度蓄積時

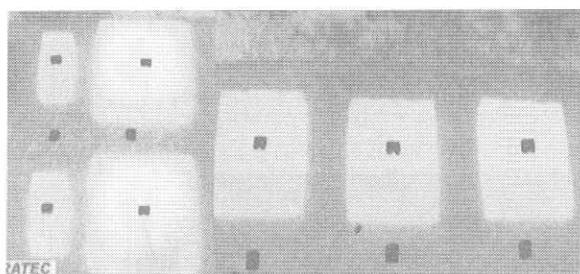


図 37 日没時の温度蓄積

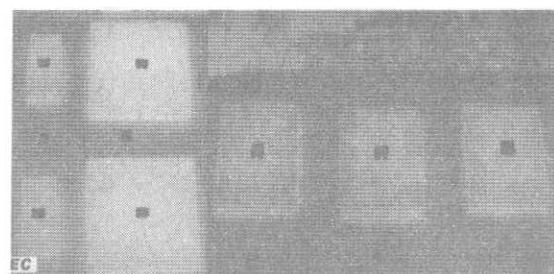


図 38 夜間時の温度の写真

湿润状態時の建築用素材

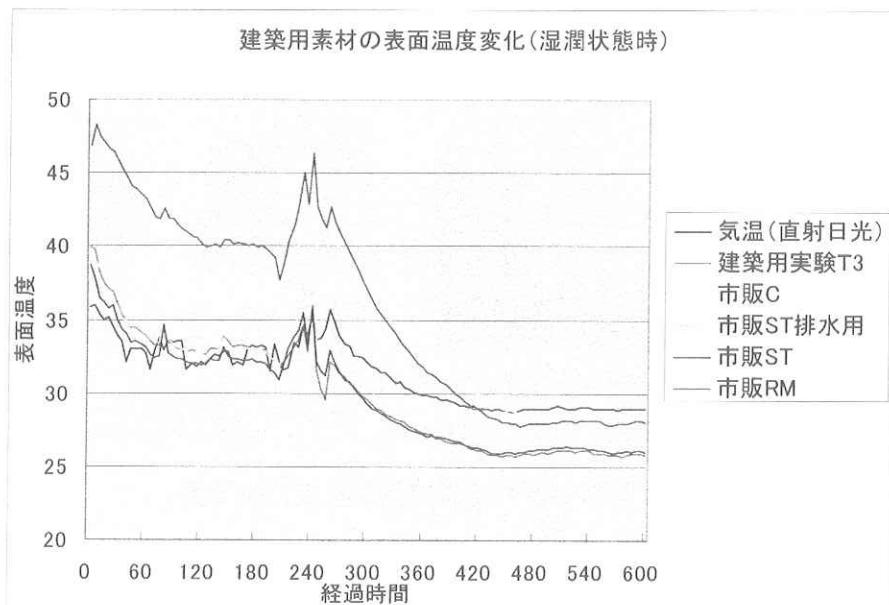


図 39 濡潤状態時の建築用素材の表面温度の変化

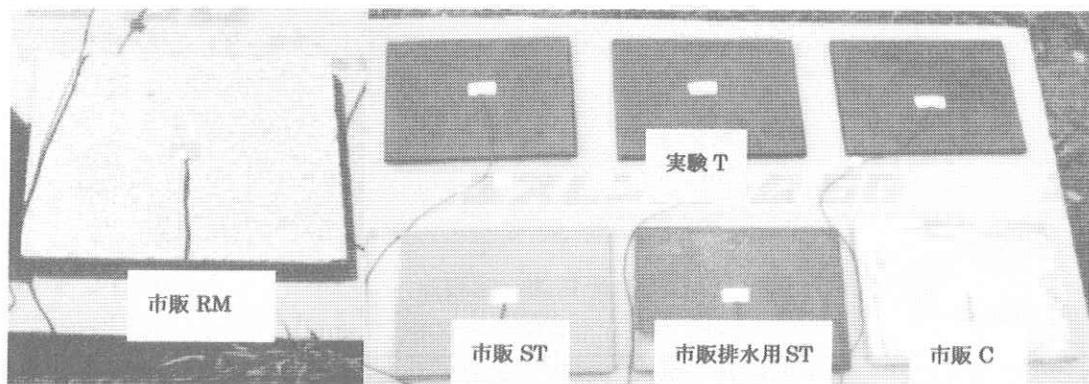


図 40 濡潤状態時の建築用素材の比較写真

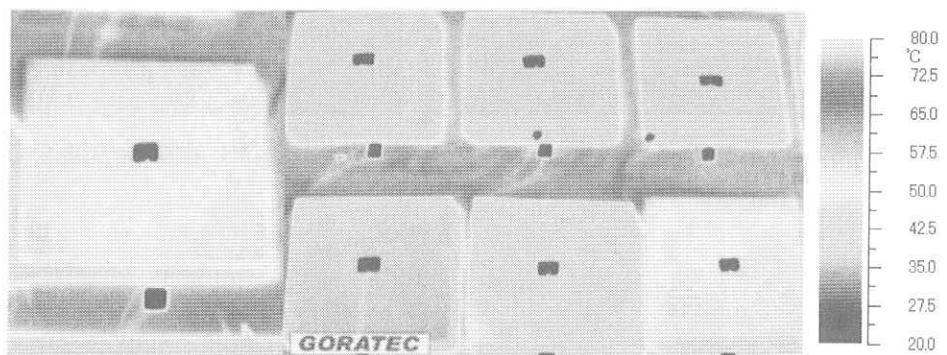


図 41 最高温度蓄積時

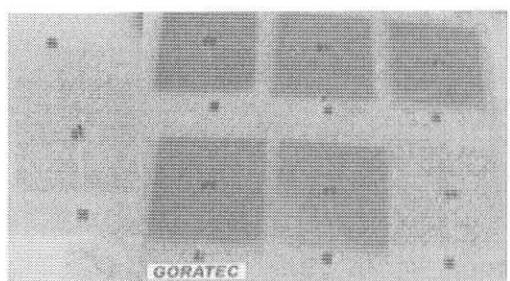


図 42 日没時の温度蓄積

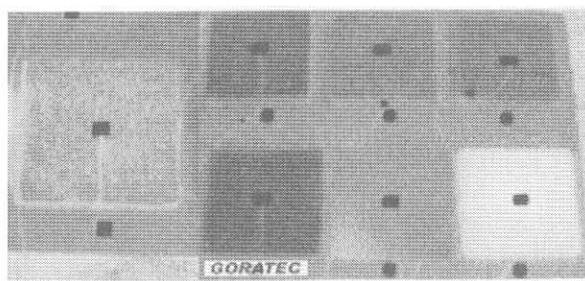


図 43 夜間時の温度蓄積

湿潤状態時の道路用素材

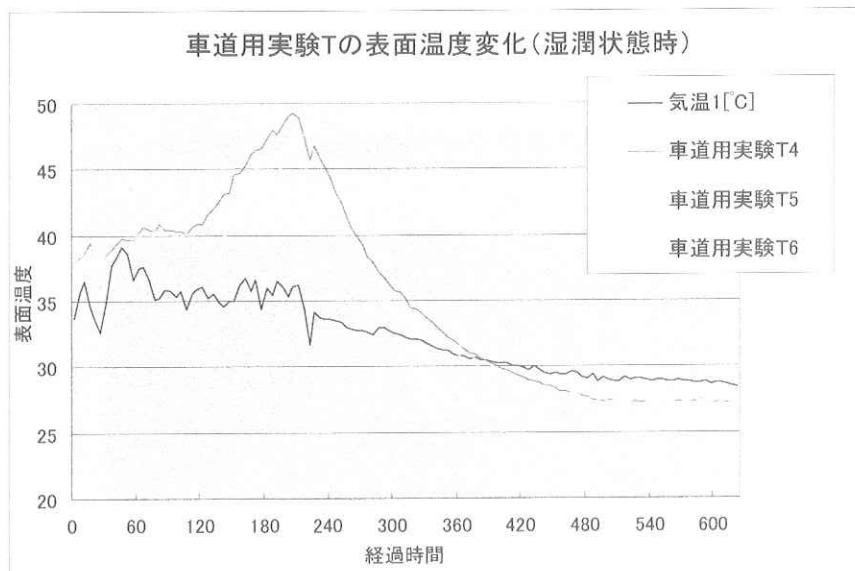


図 44 湿潤状態時の道路用実験 T の表面温度の変化

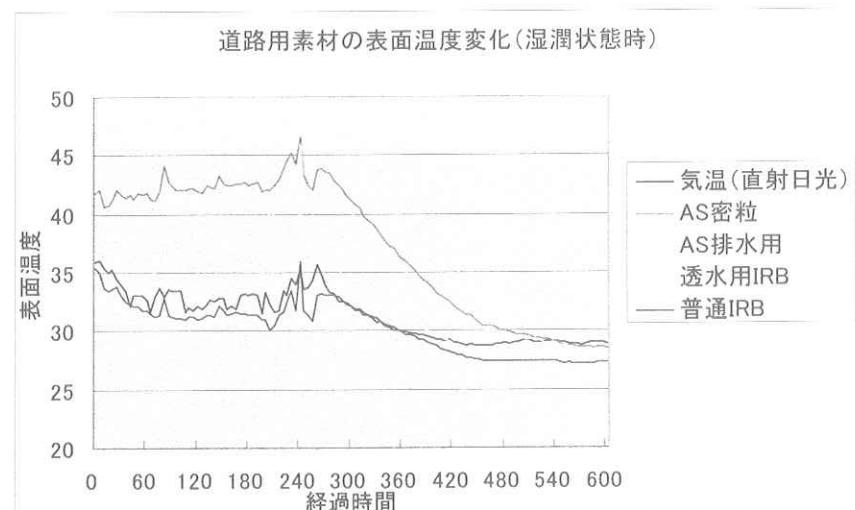


図 45 湿潤状態時の道路素材の表面温度の変化

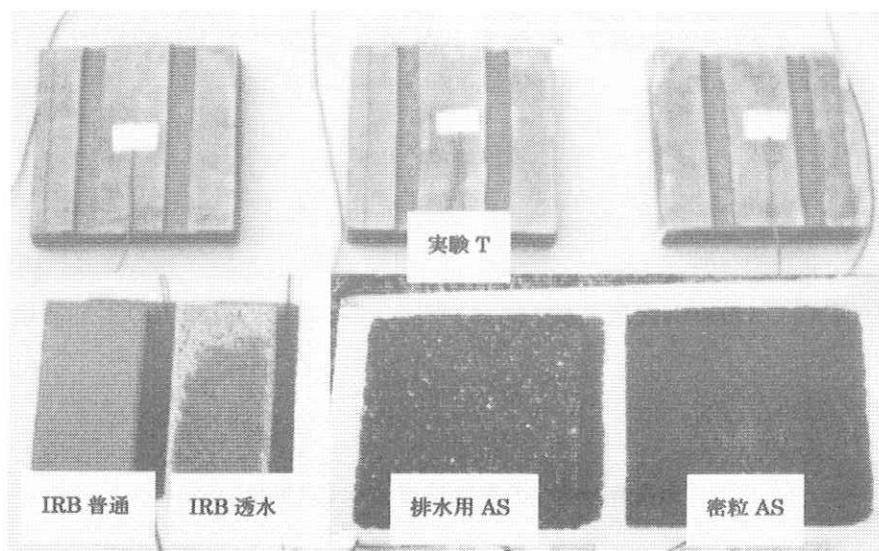


図 46 湿潤状態時の道路用素材の比較写真

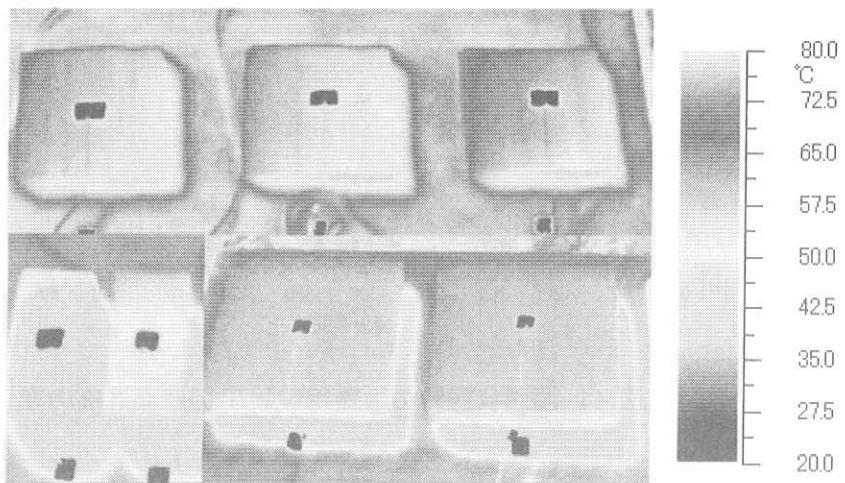


図 47 最高温度蓄積時

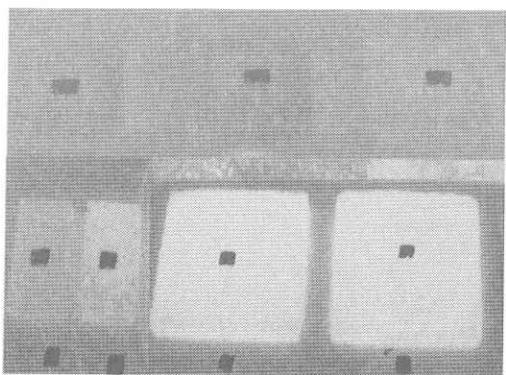


図 48 日没時の温度蓄積

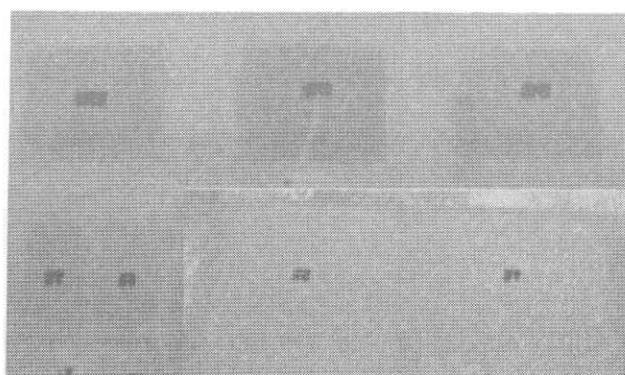


図 49 夜間時の温度蓄積

5. 総括結果

以下に各種類別の規格値の合否の結果を記載する。

表 15 建築用実験タイルの結果

	建築用陶器質用タイル(%)			普通れんが(%)			粘土がわら(%)			セラミックメーソンリーユニット(%)					
	磁器質	せつき質	陶器質	2種	3種	4種	ゆう葉瓦	いぶし瓦	無ゆう瓦	20	30	40	50	60	
吸水率	×	×	○	○	○	×	×	○	×	-	-	○	×	×	
曲げ強さ	○	○	○	-	-	-	×	×	×	-	-	-	-	-	
圧縮強度	-	-	-	○	○	○	-	-	-	○	○	×	×	×	

表 16 道路用実験タイルの結果

	インターロッキングブロック	
	車道用	歩道用
曲げ強さ	×	○
圧縮強度	○	○
保水性	○	○
吸水性	○	○
すべり抵抗性	△	○

また以下に熱特性の評価を比較した結果を記載する。

熱伝導率における評価

表 17 建築用素材の比較

熱伝導率の小さい順	
建築用実験T(黒色)	3
建築用実験T(茶色)	2
市販ST	4
排水用市販T	5
市販RM	7
市販C	6
レンガ	1

表 18 道路用素材の比較

熱伝導率の小さい順	
道路用実験T	1
AS密粒	-
AS排水	-
IRB普通	2
IRB透水用	3

放射熱による効果(室内実験より)

建築用素材

表 19 乾燥状態時の比較

	放射熱の効果(高い順)	
	最高表面温度	最低表面温度
建築用実験T(黒色)	5	5
建築用実験T(茶色)	4	2
市販ST	1	1
市販C	2	4
市販RM	3	3

表 20 湿潤状態時の比較

	放射熱の効果(高い順)	
	最高表面温度	最低表面温度
建築用実験T(黒色)	3	3
建築用実験T(茶色)	2	2
市販ST	1	1
市販C	5	4
市販RM	4	4

道路用素材

表 21 乾燥状態時の比較

放射熱の効果(高い順)		
	最高表面温度	最低表面温度
道路用実験T	2	1
AS密粒	1	2
AS排水	3	3

表 22 湿潤状態時の比較

放射熱の効果(高い順)		
	最高表面温度	最低表面温度
道路用実験T	1	1
AS密粒	2	3
AS排水	3	2

今回の試験を通して、実験対象物のリグノセラミックスタイルは各種類別の規格値をクリアしている。特に建築用のリグノセラミックスは陶器質タイルとしての使用が可能であると考えられる。

しかし、車道用のリグノセラミックスにおいては歩道としての規格値は十分に満たしていたが、車道用においては強度特性が規格値のそれに満たしていない。

また熱特性において、他の素材よりその特性が顕著に現れているのが車道用のリグノセラミックスである。しかし、素材の色地の濃さを薄め、白色に近づけることでその違いは、また大きく変わってくるものと考えられる。また、熱伝導率の試験においては他の素材より値は小さく熱が伝わりにくいことがわかる。

ホログラフィックストレージの信号処理に関する研究

愛媛大学社会連携推進機構特命教授	大澤 壽
愛媛大学理工学研究科准教授	岡本好弘
愛媛大学理工学研究科助教	仲村泰明
愛媛大学大学院博士前期課程	河上直紀
愛媛大学大学院博士前期課程	的場正貴
富士ゼロックス株式会社研究本部先端技術研究所 チーム長研究主査	河野克典
富士ゼロックス株式会社研究本部先端技術研究所	三鍋治郎
富士ゼロックス株式会社研究本部先端技術研究所	小笠原康裕
富士ゼロックス株式会社研究本部先端技術研究所	安田晋
富士フィルム株式会社記録メディア事業部 記録メディア研究所主任研究員	北原淑行

1. はじめに

近年、情報通信及び情報処理技術の進歩と普及によって、取り扱うデータ量の増大とネットワークの高速化が急速に進んでおり、高速大容量な記録システムの必要性が今後一段と高まることが予想される。CDをはじめとする従来の平面・ビット記録型光ディスク装置では、光源波長とレンズの開口数(NA:numerical aperture)による制限から記録密度が限界に達しつつある。そこで、これに代わる新たな記録システムとしてホログラフィックストレージ[1]が期待されている。

本研究では、ホログラフィックストレージに適した信号処理方式の検討を行う。中でもビット誤り率特性に対する影響が特に大きい、誤り訂正符号、画像補間方式に注目し、これらの性能評価を実機再生画像を用いて行う。

2. 記録再生系モデル

図1に、記録再生系のブロック図を示す。まず、入力データ系列 $\{a_{k''}\}$ は誤り訂正符号器に入力され、出力系列 $\{b_{k'}\}$ は $\{c_k\}$ に記録符号化される。そして、 $\{c_k\}$ に応じてピクセル間隔 Δ_S のSLM(spatial light modulator)により信号光に変調され、記録媒体に記録される。このとき、記録密度を向上させるために、直径 D_c の円形開口を設ける。ここで、ナイキスト開口サイズ $D_N = \lambda f / \Delta_S$ で規格化した D_c/D_N を規格化開口サイズとする。但し、 λ 、 f はそれぞれ光源波長、焦点距離である。記録・再生はページ単位で行われている。したがって、再生光は1ページ分のデータを含んでおり、再生光がピクセル間隔 Δ_d のイメージセンサにより検出されて再生画像データが得られる。SLMとイメージセンサのピクセル間隔の比 Δ_S/Δ_d をオーバーサンプリング倍率と呼ぶ。再生画像データに対して位置検出及び補間を行う。補間された系列 $\{\hat{c}_k\}$ は記録符号の復号器に入力され $\{\hat{b}_{k'}\}$ が出力される。 $\{\hat{b}_{k'}\}$ は誤り訂正符号の復号器に入力され、入力データ系列の推定値である $\{\hat{a}_{k''}\}$ を得る。そして、 $\{\hat{c}_k\}$ をしきい値を用いて硬判定した系列と $\{c_k\}$ を比較することによりシンボル誤り率(SER:symbol error rate)を求める。さらに、 $\{\hat{a}_{k''}\}$ と $\{a_{k''}\}$ を比較することによりビット誤り率(BER:bit error rate)を求めて性能評価を行う。

3. 誤り訂正符号

本節では、誤り訂正符号として適用したLDPC(low density parity check)符号[2]について述べる。

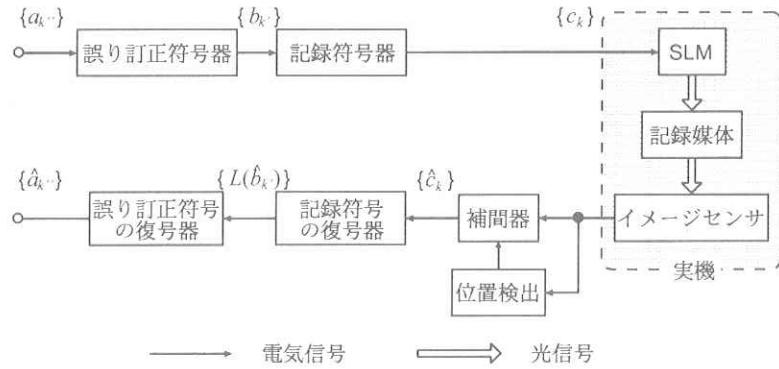


図 1 記録再生系のブロック図

$$\begin{matrix} \text{情報ビット} \\ \left[\begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 0 \end{matrix} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \text{単位行列} \\ \left[\begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \text{生成行列} \\ \left[\begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right] \end{matrix} = \begin{matrix} \text{冗長系列} \\ \left[\begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{matrix} \right] \end{matrix}$$

図 2 LDPC 符号化の一例

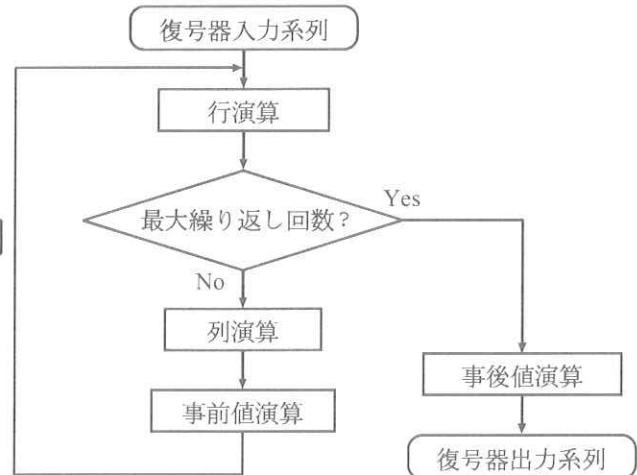


図 3 SP 復号のフローチャート

LDPC 符号は、疎な検査行列に基づいて構成された生成行列により符号化を行う組織符号である。ここで、疎な行列とは、行列内の非零要素の数が非常に少ない行列を指す。図 2 に、LDPC 符号の符号化の一例を示す。図中の点線で囲んだ部分は単位行列を表している。符号化は、入力情報と行列の左側が単位行列となっている生成行列の積により行われ、符号化系列は入力情報の後にパリティが付加された組織符号となる。LDPC 符号には検査行列の各行及び各列の 1 の数がそれぞれ等しいレギュラー LDPC 符号と各行、各列の 1 の数が一定でないイレギュラー LDPC 符号がある。本研究では、レギュラー LDPC 符号を用いる。

次に、LDPC 符号の復号法である SP(sum-product) 復号法 [3] について述べる。図 3 に SP 復号のフローチャートを示す。まず、LDPC 符号の検査行列に基づいて各行ごとに復号演算を行う。次に、行演算出力に対して検査行列の列ごとに尤度を更新する列演算を行う。そして、事前値演算を行い、SP 復号器内での繰り返し復号が行われる。但し、繰り返し回数が設定した最大繰り返し回数に達すると、事後値演算を行い、SP 復号を終了する。

また、比較方式として、RS(Reed-Solomon) 符号 [4] も検討している。

4. 記録符号

ホログラフィックストレージではデータ系列の“1”をONピクセル, “0”をOFFピクセルに対応させており, SLMにおいてONピクセルでは光を通し, OFFピクセルでは光を遮断する。記録符号無しの場合には, 補間されたデータ系列に対して一定のしきい値を超えていれば“1”, 超えていなければ“0”と判定する。しかし, ホログラフィックストレージ装置の記録再生系における様々な原因により, 正確な判定を行うことは困難である。これはONピクセル数の増加と共に顕著になるため, 符号語内にONピクセル数が少なく, ピクセル間の相対的な明るさの比較でONピクセルの位置を決定できる符号化方式が検討されている。本研究では, このような条件を満たす符号として5-9記録符号を適用した。

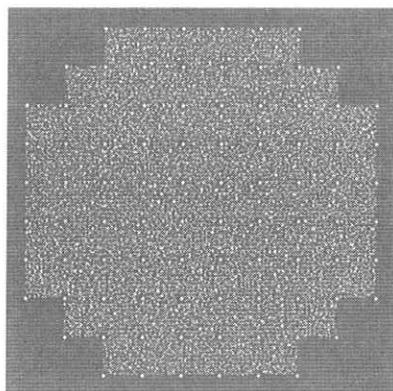
5-9記録符号は入力データ系列を5ビット単位で符号化するブロック符号であり, 5ビットを9シンボルに符号化する。また, 9シンボル中のONピクセルとOFFピクセルの割合は2:7, 符号化率は $5/9 \approx 0.56$ となっている。復号の際は, まず, 符号ブロック内において補間器出力が大きいピクセルから順に2個をONピクセル, 残りの7個をOFFピクセルと判定する。そして, 判定されたピクセルパターンに対して, 符号化則に対応するビット系列を求める。このビット系列を $\{\hat{b}_{k'}\}$ としたとき, 復号器出力系列 $\{L(\hat{b}_{k'})\}$ は次式のようになる。

$$L(\hat{b}_{k'}) = \begin{cases} \frac{1}{2}(\overline{\hat{c}_{\text{ON}}} - \overline{\hat{c}_{\text{OFF}}}), & \hat{b}_{k'} = 1 \\ -\frac{1}{2}(\overline{\hat{c}_{\text{ON}}} - \overline{\hat{c}_{\text{OFF}}}), & \hat{b}_{k'} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

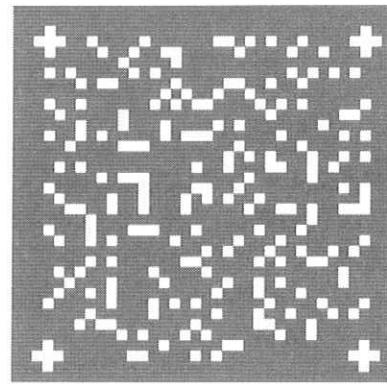
但し, $\overline{\hat{c}_{\text{ON}}}, \overline{\hat{c}_{\text{OFF}}}$ は, 符号ブロック内でONと判定されたピクセルの補間器出力 \hat{c}_k の平均値, OFFと判定されたピクセルの \hat{c}_k の平均値を表わしている。

5. データページ

図4に記録するデータパターンであるデータページの形状とその中に含まれるサブページの構成を示す。図に示すように, 1枚のデータページは69枚のサブページと呼ばれる小ページから成っている。ここで, 位置検出用のマーカをサブページの四隅に埋め込んでおり, 再生画像に拡大・縮小が発生した場合に正しいデータ位置を検出するために用いる。



(a) データページ



(b) サブページ

図4 データページの構成

6. 位置検出方式

再生画像に移動や拡大・縮小が発生した場合に、SLM のピクセル位置に対する正しいデータ位置を知るために位置検出を行う必要がある。本節では、この位置検出を行う方法について述べる。

図 5 に、本研究で用いた位置検出方式のフロー チャートを示す。まず、再生画像の輝度が中心付近に集中していることを利用して各マーカの粗位置を得る。次いで、この位置情報を元に再生画像とマーカ画像の共分散 [5] を求め、共分散が最大になる詳細位置を計算する。ここで、不自然な値が得られた場合は周囲のマーカで検出した詳細位置情報を用いて修正する。最後に、補間を用いて SLM の各ピクセルごとにシフト量を求め、これを位置情報とする。

7. 再生画像の補間方式

本節では位置情報を用いて再生画像の補間を行い、SLM のピクセルデータ位置での輝度を得る方法について述べる。

具体的には、データ位置周辺のイメージセンサ出力輝度に重みをかけた上で、それらの和を計算する方法をとる。この重みを決定するのが補間関数であり、これを $f(x)$ とする。図 6 に、正しいデータ位置 (k, l) と補間に用いるピクセルの位置関係を示す。ここで $(i', j'), (i', j'+1), (i'+1, j'), (i'+1, j'+1)$ は正しいデータ位置を囲むイメージセンサのピクセルの座標である。また、 u はデータ位置、 i' 間の距離、 v はデータ位置、 j' 間の距離である。したがって、正しいデータ位置 (k, l) における補間後の輝度 $J_{(k,l)}$ はイメージセンサ 1 ピクセル当たりの電力 $I_{(i,j)}$ を用いて次式で示される。

$$J_{(k,l)} = \sum_{m=-\gamma}^{\gamma} \sum_{n=-\gamma}^{\gamma} I_{(i'+m, j'+n)} f(u+m) f(v+n) \quad (2)$$

また、代表的な補間方式として Bilinear 法、Bicubic 法が挙げられる [6]。図 7 (a) に Bilinear 法、Bicubic 法における補間関数をそれぞれ実線と破線で示す。これらは Δ_S で規格化した距離 x を変数とする関数であり、これらを従来方式とする。さらに、本研究では最適化を伴う補間方式としてナイキスト補間と数値設定補間を提案する。図 7 (b) にナイキスト補間と数値設定補間における補間関数をそれぞれ実線と破線で示す。ナイキスト補間はナイキスト波形を補間関数として用いる方法であり、このときに用いるナイキスト波形を次式で表す。

$$f(x) = \frac{\sin(\pi f_N x)}{\pi f_N x} \cdot \frac{\cos(\pi \beta_N f_N x)}{1 - (2\beta_N f_N x)^2} \quad (3)$$

ここで、 β_N はロールオフ率、 f_N はナイキスト波形の周波数である。数値設定補間は補間関数のサンプル点ごとのレベルを数値設定する方法であり、各サンプル間の値は線形補間によって求めるものとする。ナイキスト補間の場合は β_N, f_N を、数値設定補間の場合は補間関数のサンプル点ごとのレベルをそれぞれパラメータとし、SER が最小になるように最適化を行う。

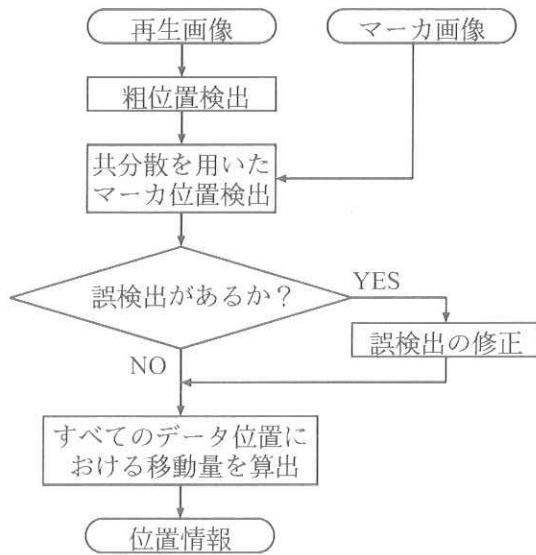


図 5 位置検出の流れ

8. 性能評価

本研究では、記録時の露光時間を20ms間隔で20msから300msまで変化させた場合の実機再生画像を用いて性能評価を行った。ここで、フーリエ平面上開口の規格化直径は $D_c/D_N = 2.82$ 、オーバーサンプリング倍率は $\Delta_S/\Delta_d \simeq 5.37$ であり、この実機再生画像は2007年12月18日に富士ゼロックス株式会社より提供されたものである。

図10に各補間方式におけるSER特性を示す。図の(a), (b)はそれぞれLDPC符号化、RS符号化されたデータパターンであり、図中の□, ○, △, ▽印はそれぞれBilinear法、Bicubic法、ナイキスト補間、数値設定補間の場合を表している。図の(a), (b)共に、露光時間が20msから長くなるにつれて誤りが減少していくが、200ms付近から誤りが増加する傾向が見られる。また、露光時間の短い条件では従来の補間方式と提案方式の差が小さいのに対し、露光時間の長い条件では提案方式による改善が見られる。図9に露光時間が変化した場合の再生画像の例を示す。ここで、図の(a), (b), (c)はそれぞれ露光時間が20, 180, 300msの場合であり、いずれも同じ場所から切り出したサブページ画像である。図より、(a)の露光時間が短い20msの場合は、画像が暗くデータが認識できないが、露光時間が長い300msの場合は、逆に明るすぎて干渉が発生している。したがって、隣接ピクセルに干渉を与えるといった、ページ内で一様に発生する歪に対して補間の最適化が有効であると考えられる。

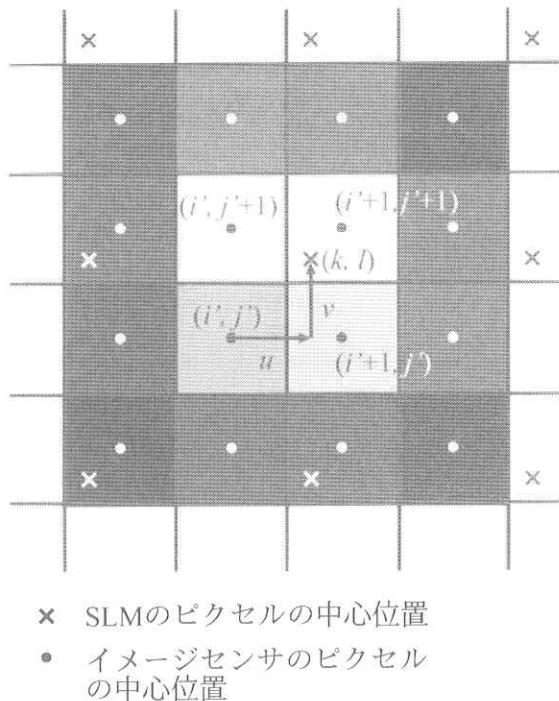


図 6 ピクセルの位置関係

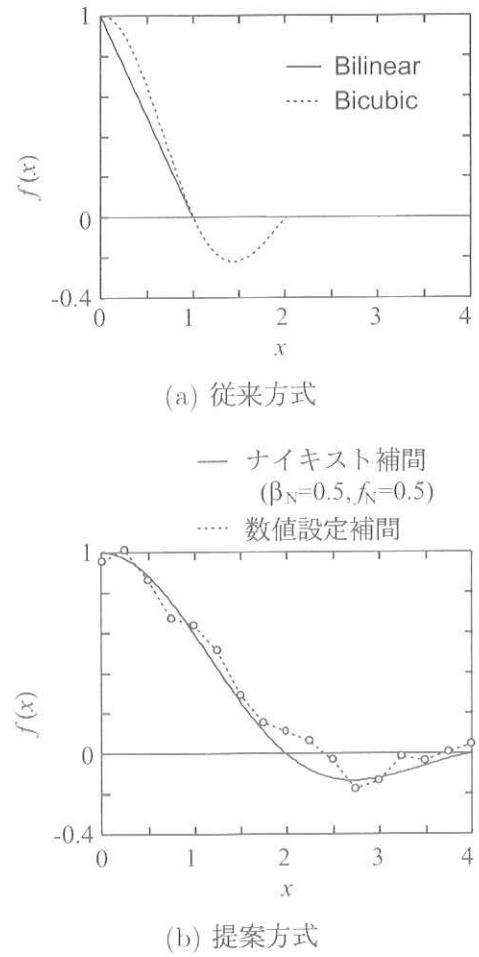


図 7 補間関数

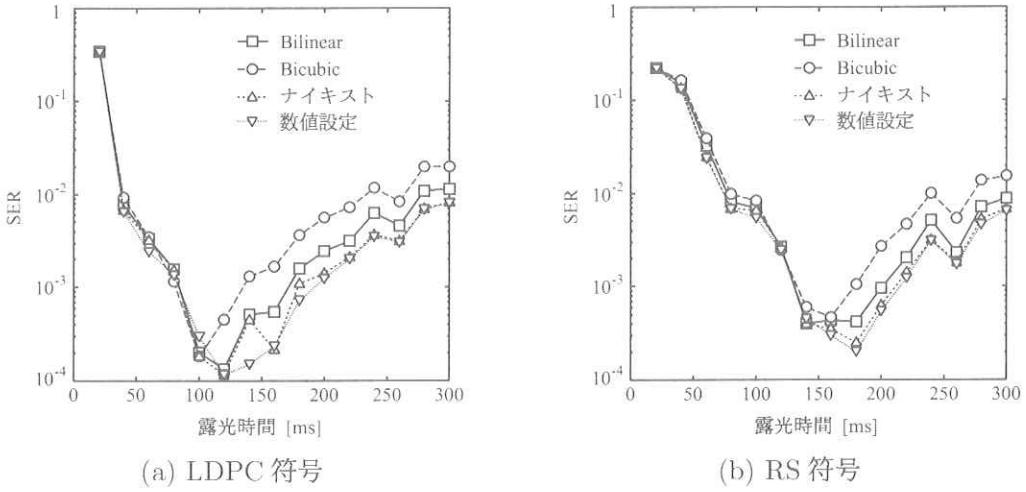


図 8 SER 特性

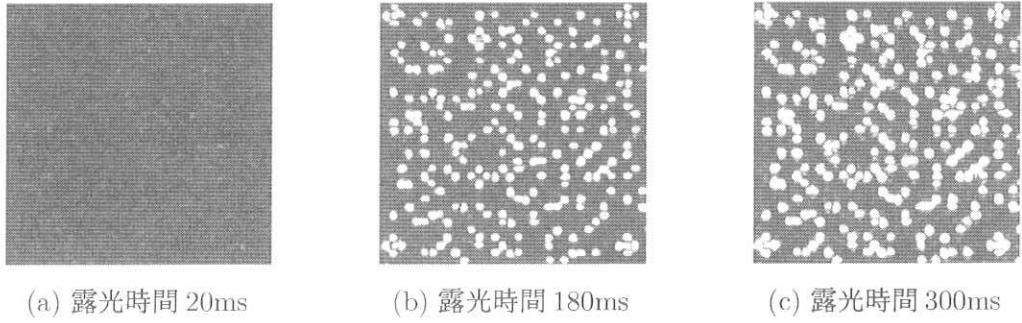


図 9 再生画像の例

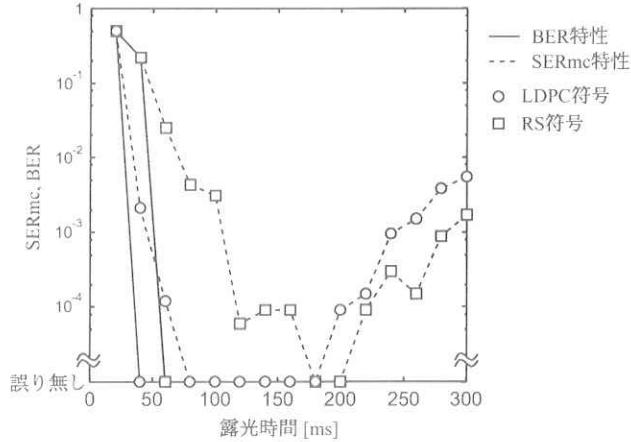


図 10 SER_{mc} 特性, BER 特性

図 10 に、露光時間に対する SER_{mc} 特性, BER 特性を示す。但し, SER_{mc} 特性は 5-9 記録符号の復号後の SER 特性を示している。図中の○, □印は, LDPC 符号, RS 符号を示しており, 破線, 実線は SER_{mc} 特性, BER 特性を示している。図より, SER_{mc} 特性, BER 特性のどちらにおいても, LDPC 符号が良好な特性を示す。しかし, この結果は, 光学系が安定しないために生じた SER 特性の差に起因したものであるため, 純粋な LDPC 符号と RS 符号の性能比較は行えていない。

9. まとめ

ホログラフィックストレージ装置の記録再生系における、誤り訂正符号と補間方式の性能比較を行った。その結果、ページ内で一様に発生する歪に対して補間の最適化が有効であることが明らかとなった。また、光学系が安定せず、SER 特性に差が生じたために、LDPC 符号と RS 符号の性能比較は行えなかったが、今回の条件では LDPC 符号が良好な特性を示すことが明らかとなった。

参考文献

- [1] 志村 努, “システム技術,” ホログラフィックメモリーのシステムと材料, pp.13–45, (株) シーエムシー出版, 東京, 2006.
- [2] R. G. Gallager, “Low-density parity-check codes,” IRE Trans. Inform. Theory, vol. IT-8, pp.21–28, Jan. 1962.
- [3] 和田山 正, “低密度バリティ検査符号とその復号法について,” 信学技報, no.MR2001-83, Dec. 2001.
- [4] 三谷 政昭, “BCH 符号,” やり直しのための工業数学, pp.66–81, (社)CQ 出版株式会社, 東京, Jan. 2001.
- [5] 小倉 久直, “確率論の基礎,” 確率過程入門, p.20, 森北出版(株), 東京, 1998.
- [6] W. K. Pratt, “Image analysis,” Digital Image Processing, pp.441–443, Wiley, New York, 2004.

癌の誘導焼灼療法に用いる金属磁性体針の発熱特性とシミュレーション

愛媛大学大学院理工学研究科准教授 猶原 隆
愛媛大学大学院理工学研究科准教授 青野 宏通
愛媛大学大学院理工学研究科講師 前原 常弘
株式会社アドメテック主任エンジニア 八木 泉

1. 研究開発の背景と目的

本研究開発は、『誘導焼灼療法に用いる針状フェライト酸化物および磁性体発熱針の研究開発』の一環として行われたものである。さらに、この研究課題は株式会社アドメテックとの共同研究として、大学院理工学研究科(理学系)との緊密な連携体制のもとで実施されている。筆者らは、生体内に留置した磁性体を交流磁場中で誘導加温することで腫瘍を凝固壊死させる、新しい治療法の確立を目指している。しかし、この治療法を深部臓器癌に適用する場合、患部は大型コイル内に挿入された状態となる。そして、実際の治療においては、腫瘍の位置や深さによって、磁性体針の刺入角度が異なる可能性が生じる。その際、焼灼用針に特有な形状磁気異方性が問題点となる。これは、大型コイル内に生じる磁束方向と磁性体針間の角度によって、交流磁場中の発熱特性が著しく異なる現象である。この問題を克服できないと、焼灼治療における温度制御が十分に行えず、医療現場で使用することは実質的に不可能となる。このように、深部臓器癌に交流磁場誘導焼灼療法を適用する場合、最適な焼灼用針の材質と形状を決定して、刺入角度の影響も含めた発熱特性を把握する必要がある。さらに、精密な温度制御技術の確立に不可欠な、シミュレーションによる熱解析データの蓄積も課題として挙げられる。

平成 20 年度においては、焼灼用針の発熱特性とその機構に関する基礎データを得るために、各種の純金属及び合金丸棒を用いた交流磁場中の発熱実験とシミュレーションによる解析を行った。

2. 実験方法

2. 1 本研究開発で用いた試料

表1に、各種純金属、及び合金丸棒の磁性と電気抵抗値を示す。純 Fe, Fe-31Ni-5Co 合金, Fe-22Cr-5.5Al 合金、及び純 Ni は室温で強磁性を有する。一方、Fe-18Cr-8Ni 合金と純 Ti は、それぞれ常磁性体と非磁性体である。純 Fe の電気抵抗値は $0.10 \mu \Omega m$ であるのに対して、Fe 系合金は添加元素の効果で著しく大きな値を示す。特に、電熱・抵抗材料である Fe-22Cr-5.5Al 合金の値は、 $1.45 \mu \Omega m$ に達している。純 Ti の電気抵抗値は、Fe-18Cr-8Ni 合金よりも小さく $0.55 \mu \Omega m$ である。これらの試料の寸法は、すべて直径 : 2mm、長さ : 20mm とした。

表1 試料の磁性と電気抵抗値

純金属及び合金	磁性	電気抵抗値 ($\mu \Omega m$)
純 Fe	強磁性	0.10
Fe-31Ni-5Co 合金	強磁性	0.78
Fe-22Cr-5.5Al 合金	強磁性	1.45
純 Ni	強磁性	0.12
Fe-18Cr-8Ni 合金	常磁性	0.72
純 Ti	非磁性	0.55

2. 2 交流磁場中での発熱特性の測定

図1に、本研究開発で使用した交流磁場中の発熱実験装置の概略図を示す。加温用コイルは、内径40mm、外径48mm、長さ60mmのポリプロピレン製の芯に、直径4mmの銅パイプを8回巻き付けたものである。純水(10ml)を注入したパイレックスガラス容器中に、各種の丸棒試料を直立させて発熱実験を行った。測定時間は最長1500sとして、370kHzで200Wの高周波電力(磁場強度:1.77kA/m)を印加した。交流磁場中においては、熱電対での温度測定が困難であるため、試料の上方に設置した放射温度計により水温上昇を連続的に測定した。さらに、ガラス容器中の水温が偏らないように、圧縮空気による攪拌を行った。

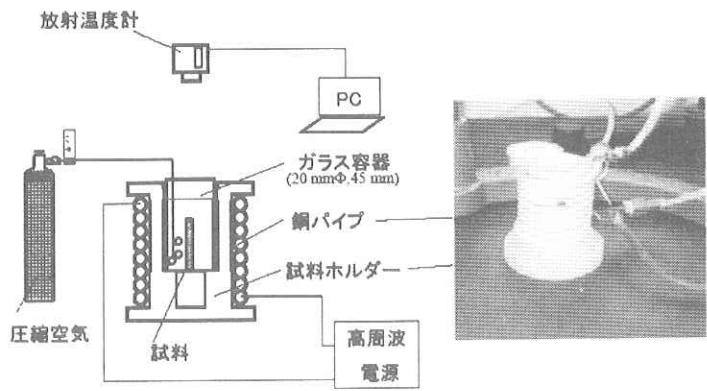


図1 交流磁場中の発熱実験装置の概略図

2. 3 シミュレーションによる発熱解析

交流磁場中の発熱実験に用いた各種金属材料の中から、中間的な発熱特性を示し、温度上昇が連続的に変化する純Ni丸棒を選んでシミュレーション解析を行った。使用したソフトウェアは、有限要素法を用いたJ MAG Studio Version 9.0である。なお、純Niの比透磁率(μ)は600とした。純Ni丸棒の寸法と物性、電流、周波数、コイルの巻数などの諸条件を設定した解析モデルにおいて、丸棒試料の中心位置を原点として、メッシュ数はすべて 200×100 とした。

3. 実験結果

3. 1 各種金属材料の発熱特性

図2に、各種の純金属及び合金丸棒における交流磁場中の発熱特性の時間依存性を示す。純Fe、Fe-22Cr-5.5Al合金、及びFe-31Ni-5Co合金は大きな発熱特性を示しており、400s程度の加熱で50~60°Cの温度上昇(ΔT)が起こった。一方、純Niでは時間とともに連続的な温度上昇が認められ、1200sでの ΔT は36°Cであった。純Fe、及びFe系合金は、純Niと比較して飽和磁束密度(B_s)が著しく大きい。例えば、純Feの B_s が2.15Tであるのに対して、純Niのそれは $1/3$ 以下の0.61Tである。したがって、交流磁場中の最大磁場(H_m)における最大磁束密度(B_m)も、これに対応した値となる。これらの発熱特性の相違に影響を及ぼすのは、主としてヒステリシス損(P_h)の効果と考えられる。なお、常磁性であるFe-18Cr-8Ni合金と非磁性である純Tiの場合、交流磁場中の著しい発熱は認められなかった。

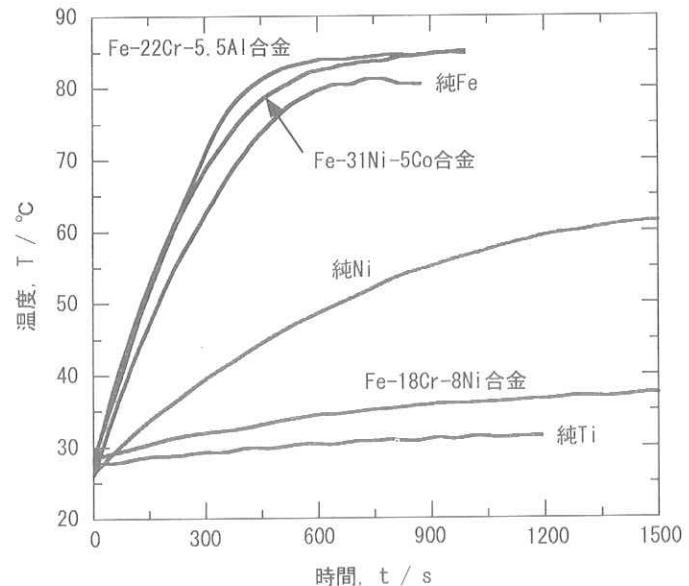


図2 各種の純金属及び合金丸棒における交流磁場中の発熱特性の時間依存性

3. 2 純 Ni 丸棒を用いた発熱シミュレーション

図3は、純 Ni 丸棒を用いたシミュレーション結果であり、純 Ni の電気抵抗値を基準にして、その値を 2 倍、6 倍、20 倍と変化させた場合の電流密度 (A/m^2) への影響を示す。シミュレーション結果から、電気抵抗値の設定によって、表面近傍の電流密度 (A/m^2) が著しく変わることが確認された。電気抵抗値が小さいほど、渦電流損 (P_e) は増大することが知られている。しかし、電気抵抗値が小さくなると電流の浸透深さは減少し、表面近傍のみに渦電流が流れて発熱効率が減少する。これは図3(c)よりも図3(a)の方が電流密度は大きいが、発熱部の厚み、すなわち浸透深さが小さいことからも明らかである。一方、電気抵抗値が高い材料では、渦電流自体が流れにくいため、 P_e による発熱効果は減少する。したがって、 P_e による発熱を大きくするには、最適な電気抵抗値を有する金属材料を選ぶ必要がある。さらに、 P_h の増大には、 B_m の大きな金属材料ほど有利である。以上のことから、交流磁場中での発熱特性を向上させるには、大きな B_m を有しており、しかも最適な電気抵抗値を持つ強磁性材料の選定が不可欠である。本研究開発では、丸棒試料の向きが磁束方向と並行な場合を調べたが、角度の影響についても検討する必要がある。

4. まとめと今後の課題

強磁性である純 Fe, Fe-31Ni-5Co 合金, Fe-22Cr-5.5Al 合金、及び純 Ni の丸棒が交流磁場中で著しく発熱することを確認した。一方、常磁性の Fe-18Cr-8Ni 合金と非磁性の純 Ti の丸棒には、大きな発熱効果が認められなかつたが、双方とも優れた生体適合性を有している。医療用機器として焼灼用針を実用する場合、強磁性体金属材料を Fe-18Cr-8Ni 合金、あるいは純 Ti で被覆すべきと考えられる。

純 Ni 丸棒を用いたシミュレーション解析より、交流磁場中の磁力線を集束することで、表面近傍に渦電流が発生していることが分かった。さらに、金属材料の電気抵抗値が P_e の効果を通して、発熱特性に影響していることが確認された。今後の課題として、複合金属材料からなる焼灼用針の発熱特性を調べるとともに、その熱解析シミュレーションを行うことが挙げられる。

5. 学会発表、及び論文投稿

- 1) 金属材料の交流磁場中での発熱とシミュレーション: 西岡、猶原、青野、前原、平澤、松友、日本金属学会
2008年秋期(第143回)大会、熊本大学(平成20年9月)
- 2) 金属管にフェライトを充填した針状材料の誘導加熱シミュレーション: 小山、青野、猶原、前原、平澤、松友、
日本金属学会2008年秋期(第143回)大会、熊本大学、(平成20年9月)
- 3) 金属材料の交流磁場中での発熱とシミュレーション: 猶原、西岡、青野、前原、平澤、松友、工学ジャーナル、(平成21年2月)印刷中

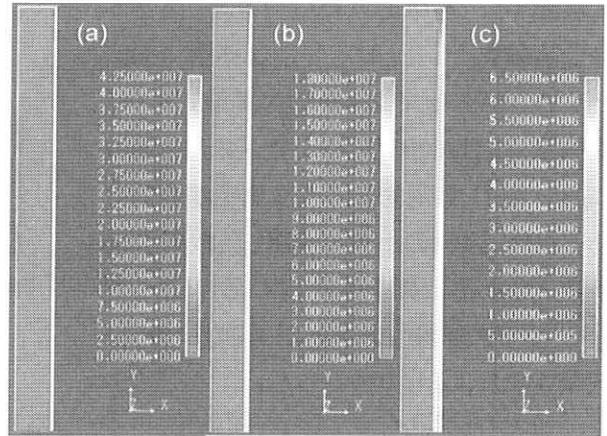


図3 純 Ni 丸棒における電流密度に及ぼす電気抵抗値の影響を示したシミュレーション画像
(a) × 2, (b) × 6, (c) × 20

水性ガスシフト反応におけるCu/Al₂O₃触媒へのFeO_xの添加効果

愛媛大学大学院理工学研究科教授 八尋秀典

三菱重工株式会社技術本部広島研究所 安武聰信

1. 緒言

固体高分子形燃料電池のための水素燃料は炭化水素の水蒸気改質反応から製造される。その際、副生する一酸化炭素が貴金属電極を被毒するため、その除去が必要となる。そこで、改質後の一酸化炭素除去プロセスとして高温、低温水性ガスシフト反応→CO 選択酸化反応の段階的なプロセスが用いられている。水性ガスシフト反応 (CO+H₂O=CO₂+H₂) は一酸化炭素を低減し、同時に水素を生成するため、水素製造過程において重要な反応である。これまでに、低温水性ガスシフト反応には、Cu-Zn系および Cu-ZnO-Al₂O₃系触媒が活性を示すことが報告されている[1]。しかしながら、実用化に向けては触媒の活性および耐久性の向上が望まれる。我々はアルミナ担持銅触媒 (Cu/Al₂O₃) について検討を行い、比較的高温で焼成した触媒が高い活性を示すことを見出した[2]。本研究では、Cu/Al₂O₃触媒活性をさらに向上させるために FeO_xの添加効果について検討を行った。

2. 実験

Al₂O₃(JRC-ALO-8)に所定量の Cu と Fe の硝酸塩混合水溶液を含浸後、973 K, 8 h 焼成して、CuO-FeO_x/Al₂O₃触媒を得た。以後、得られた触媒は CuO-FeO_x/Al₂O₃[焼成温度](Fe/Cu モル比)と略記する。触媒の前処理は 20%H₂/He 中、523 K, 2 h で行った。水性ガスシフト反応は固定床流通式反応装置を用い、ガス組成 CO(9.5%)+H₂O(27.7%)+H₂(56%)+CO₂(6.8%)、触媒量は 0.5 g の条件で行った。触媒のキャラクタリゼーションとして XRD, BET, H₂-TPR 測定を行った。

3. 結果と考察

Fig. 1 に Cu/Al₂O₃触媒と Cu-FeO_x/Al₂O₃触媒の活性と焼成温度の関係について示す。Cu/Al₂O₃触媒の活性は 873-1073 K の焼成温度範囲で大きな変化は得られなかった。一方、Cu-FeO_x/Al₂O₃触媒の活性は焼成温度の上昇とともに増加し 973 K で最大に達し、それ以上の焼成温度で低下した。また、FeO_xの添加による活性の向上は反応温度が高いほど顕著になった。これは反応メカニズムの変化、あるいは反応温度の上昇とともに活性点が増加したためだと考えられる。

Fig. 2 に Cu-FeO_x/Al₂O₃触媒の 523 K における活性の FeO_x添加量依存性を示す。973 K, 1073 K 焼成触媒とも、少量の FeO_xの添加により活性は低下したが、添加量をさらに増加させると活性は向上し、973 K 焼成で Fe/Cu>0.5, 1073 K 焼成では Fe/Cu=0.5 で Cu/Al₂O₃触媒よりも高い活性を示した。さらに 973 K において Cu-FeO_x/Al₂O₃(1.0)触媒は市販触媒(Cu-ZnO-Al₂O₃)に匹敵する活性を示した。

XRD 測定結果から、923 K 焼成の CuO-FeO_x/Al₂O₃触媒の CuO に帰属される回折ピーク強度は、FeO_x添加量の増加とともに弱くなった。また、N₂O パルス測定から、FeO_xを添加すると、Cu/Al₂O₃触媒より大きな Cu⁰表面積が得られた(Cu-FeO_x/Al₂O₃[973](1.0)=17.7, Cu/Al₂O₃[973]=8.7 m²g⁻¹)。このことから、FeO_xの添加量が増加するのに伴い、Cu が高分散することがわかった。この結果は、SiO₂担持 Cu

触媒で Fe の添加が Cu の凝集を防ぐ効果があるという Chen らの報告と一致する[3]. 一方, 1073 K 烧成では, 973 K では観察されなかった α -Al₂O₃ に帰属される回折ピークが観察された. α -Al₂O₃ に帰属される回折ピークの強度は Fe/Cu>0.5 で強くなった. α -Al₂O₃ の相変化に伴う BET 表面積の低下が, 期待した FeO_x の活性向上効果をもたらさなかった原因と推察した.

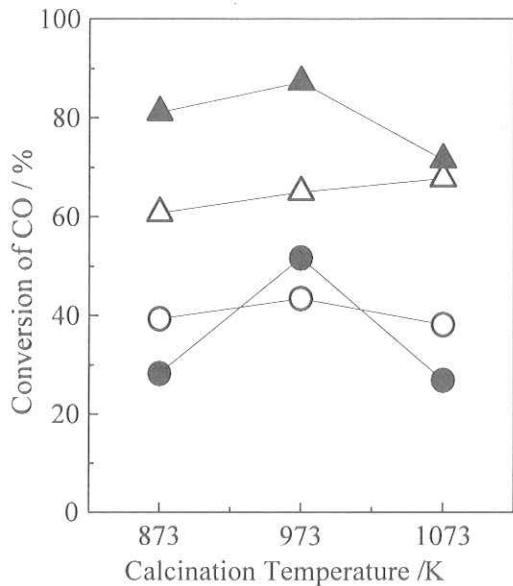


Fig. 1 Cu-FeO_x/Al₂O₃(1.0) と Cu/Al₂O₃ の触媒活性.
 (▲, ●)Cu-FeO_x/Al₂O₃(1.0), (△, ○) Cu/Al₂O₃
 (▲, △)反応温度=473 K, (●, ○)523 K.

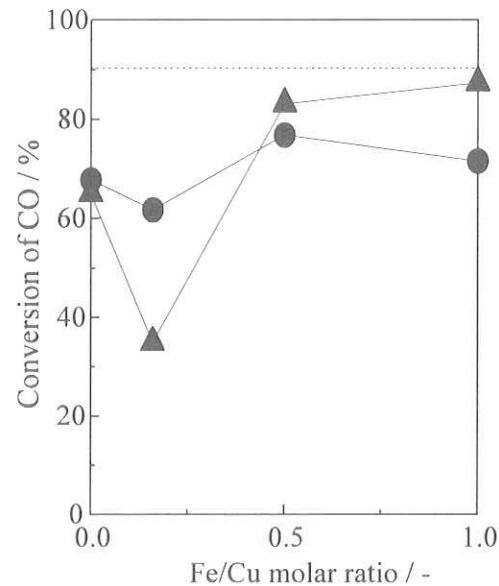


Fig. 2 Cu-FeO_x/Al₂O₃[973](x)の触媒活性.
 (▲)焼成温度=973 K, (●)1073 K
 点線：市販触媒の活性

Fig. 3 に CuO-FeO_x/Al₂O₃[973](x)触媒の H₂-TPR スペクトルを示す. CuO/Al₂O₃[973]触媒に見られる約 420 K から 500 K の大きなピークは CuO から Cu⁰への還元を示している[2]. CuO-FeO_x/Al₂O₃[973](1.0)触媒では CuO の還元ピークとは別の還元ピークが 520 K 付近で観察された. この新しいピークは FeO_x の還元と考えられる. しかしながら, FeO_x/Al₂O₃[973]触媒では 370 K から 570 K で還元ピークが見られなかったことから, Cu⁰ と FeO_x の共存下では FeO_x の還元が促進されると推察される.

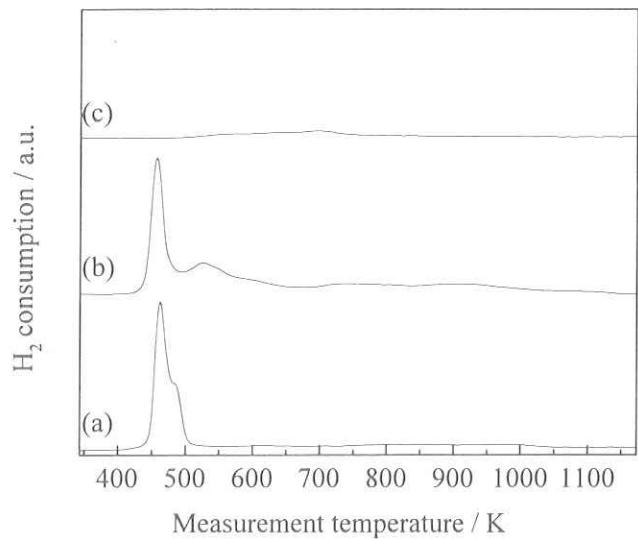


Fig. 3 CuO-FeO_x/Al₂O₃[973](x)触媒の H₂-TPR スペクトル.
 (a)Cu/Al₂O₃[973], (b)CuO-FeO_x/Al₂O₃[973](1.0),
 (c)FeO_x/Al₂O₃[973]

以上の結果から Cu/Al₂O₃触媒へ FeO_xを添加することによる活性向上要因は2つ考えられる。まずはXRDパターン、N₂Oパルス測定結果から示されるFeO_xの添加による高分散したCu⁰の形成である。このことは、我々が以前に報告した水性ガスシフト反応の触媒活性がCu⁰表面積に依存するという結果と一致する[2]。もう一つは、Cu⁰存在下における水性ガスシフト反応への還元されたFeO_xの影響である。FeO_xが高温シフト反応(623-723 K)に活性を示すことが報告されており[4]、FeO_xの酸化還元特性が反応に重要であると考えられている。今回のH₂-TPR測定の結果から、Cu⁰の存在下ではFeO_xの還元がより低温側で起こることが示唆された。今回の実験ではFeO_xの再酸化過程については明らかとなっていないが、Cu⁰上の酸素はすばやくFe表面に拡散するという報告を考慮すると[3]、今回の実験条件下ではFeO_xの酸化還元過程が起こっていると考えられる。このことより、高温(523 K)での触媒活性の向上は、高温シフト反応で活性を示すFeO_xがCu⁰と共に存することにより低温作動化して、相乗的な効果を起していると推察される。

謝辞

本研究は(独)新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)の援助により行われた。

(参考文献)

- [1]G.Ghitotti et al., *Catal. Rev.* **29**, 151 (1987).
- [2]H. Yahiro et al., *Catal. Commun.*, **7**, 228 (2006).
- [3]C. S. Chen et al., *Appl. Catal. A*, **257**, 97 (2004).
- [4]A. Khan et al., *J. Catal.*, **253**, 91 (2008).

液中プラズマを利用したCVD新技術に関する研究

愛媛大学大学院理工学研究科教授

野 村 信 福

愛媛大学大学院理工学研究科准教授

豊 田 洋 通

愛媛大学大学院理工学研究科准教授

山 下 浩 浩

愛媛大学大学院理工学研究科助教

向 笠 忍

株式会社豊田自動織機研究開発センター

下 俊 久

株式会社豊田自動織機研究開発センター

奥 田 真 也

株式会社豊田自動織機研究開発センター

村 瀬 仁 俊

1. はじめに

液中プラズマは、液体中の気泡の中にプラズマを発生させる技術であり、高温・高圧の反応場を液体中に提供することができる^{1, 2)}。気液界面から十分な原料が供給されるため、従来の気相プラズマに比べて飛躍的に成膜速度を向上させることができる。液中プラズマは、液中の気泡内に発生する気相プラズマや蒸気プラズマの一種であることが明らかになってきたが、内部メカニズムや放電形態ははら明らかにされていない。本研究の目的は、新しいプラズマプロセス法として、液中プラズマ法を化学蒸着（CVD）に応用する技術を確立することである。このため、まず、水とメタノールを用いた 27.12MHz の高周波液中プラズマの放電特性を調べて、液中プラズマの基本的な物理現象を把握した。次に、これらの知見をもとにダイヤモンド状膜（DLC）の成膜実験を実施し、その膜物性を評価した。

2. 高周波液中プラズマの放電特性

実験装置の概略図を図 1 に示す。反応容器には内径 55mm、外径 59mm、高さ 84mm の石英ガラス容器を使用した。この反応容器下部から電極を挿入し、この電極から 27.12MHz の高周波が反応炉内部に照射される。電極は直径 3mm タングステン棒であり、周囲を石英ガラスで覆うことによって電極先端部のみが液体と接触する構造になっている。先端形状は半球形である。反応容器内の圧力はアスピレーターによって所定の値に設定する。高周波を照射すると、電極が加熱されて電極先端から気泡が発生し、その後、プラズマが気泡内に発生する。実験では、プラズマの発生を容易にするために反応容器上方から、直径 10mm のアルミニウム電極柱を対向電極として挿入している。パッシエンの法則から推測されるように、電極間距離はプラズマ発生時の放電電圧に影響を及ぼす。そ

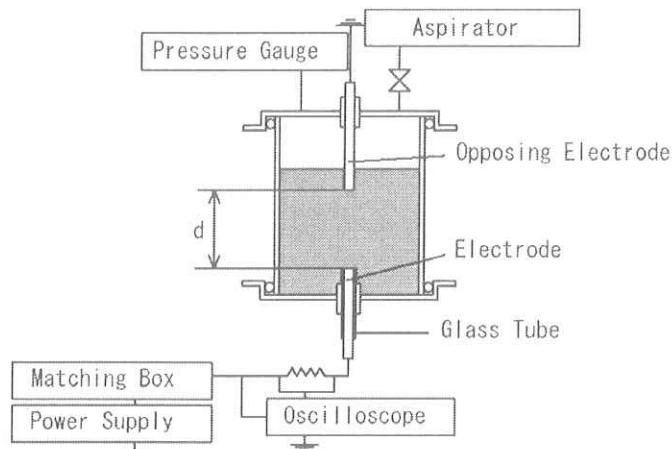


図 1 実験装置

ここで、水中プラズマ実験では電極間距離を 20mm とし、メタノールを用いたプラズマ実験では 1, 5, 20mm として放電実験を行った。

図 2 は高周波出力を変化させて行ったときの高周波水中プラズマの発生の様子を示している。圧力は 30kPa である。電極への入射電力と反射電力の差を高周波出力として表記している。プラズマは電力が増加するにつれて放電部分が上方の対向電極側に伸びていくのがわかる。放電の様子は、電極先端に形成された気泡内に放電が発生していることを除けば、従来の気相プラズマの針状電極と平板電極間の不平等電界に観察されるコロナ放電の形態に類似している。

図 3 は出力 120W, 圧力 6kPa, 101.3kPa のときの高周波プラズマの電圧-電流特性である。図中の電圧波形は高周波電源からの出力波形である。圧力が 6kPa の減圧下では純水およびメタノールいずれの場合も、電流波形は電圧振幅に比例したサイン曲線を描いており、液中に発生するプラズマがグロー放電状態であることを示している。圧力を大気圧にすると、1 周期あたりに複数の変曲点が確認できるが、ストリーマ放電に見られるランダムな電流パルスは見られない。この電流波形は、大気圧ヘリウムグロー放電における放電波形と酷似している³⁻⁵⁾。

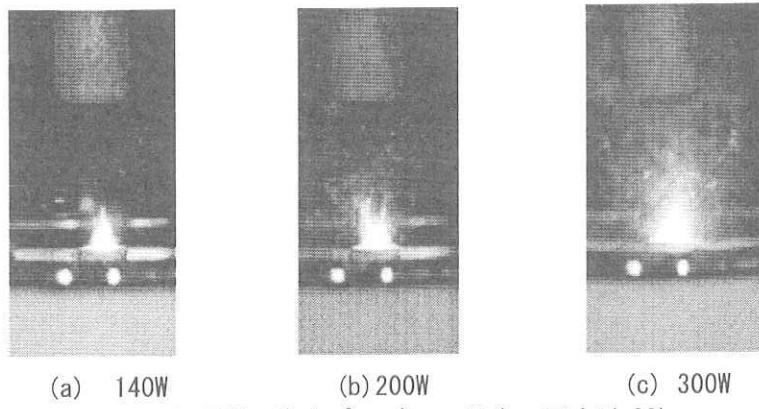


図 2 27.12MHz 液中プラズマの発生、圧力は 30kpa

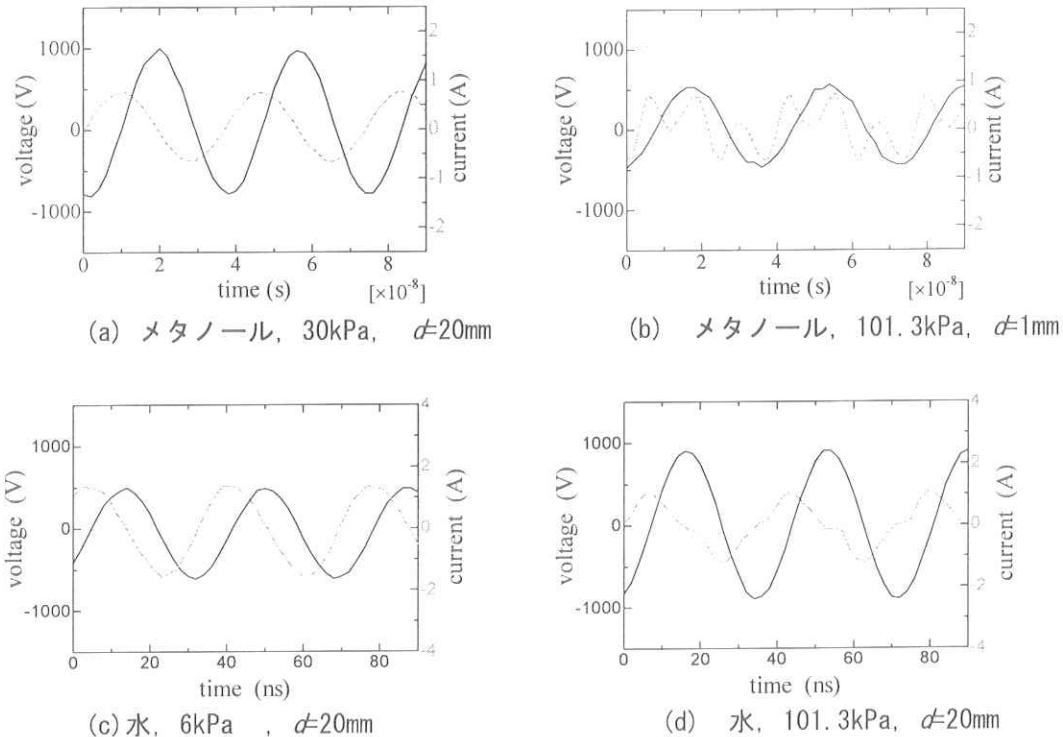


図 3 放電特性

現時点では、電極間に正味に印加されている電圧波形は測定されていないが、電流は誘電体上の電荷蓄積、ならびに誘電体部にかかる電圧上昇を招き、電極間電圧が減少して放電が消去されると思われる。液体自身の蒸発による冷却効果によって、プラズマ反応場の熱が奪われるため液中プラズマではグロー放電が維持される。大気圧グロー放電のように、ヘリウムなどの熱拡散性の高いガスを使うことなく、グロー放電を容易に生成することができる。実験で使用した液体は純水（比誘電率 80、導電率 $2 \mu\text{s}/\text{cm}$ ）であり、気泡と対向電極との間の液体の存在が、誘電体として作用している可能性もある。

3 液中プラズマを用いた DLC 膜の生成

DLC 硬度の測定 図 1 の対向電極のかわりに、 $10\text{mm} \times 20\text{mm}$ の基板を設置し、成膜実験を実施した。基板としては低融点金属であるアルミ基板および工業的用途の多い鉄基板を使用した。溶液としては、鎖状構造の分子であること、分子内に二重結合がないこと、炭素に対する水素の比が多いことを考慮して、エタノール ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) およびメタノール (CH_3OH) を用いることにした。基板と電極の距離は 3mm、装置内圧力は 30kPa である。

図 4 はエタノールを使用したときのアルミ基板上に蒸着された膜の SEM 画像 (1000 倍) である。基板表面に膜状の物質が付着しているのが確認できる。溶液をメタノールに変更しても、同様の蒸着物が確認できた。基板を鉄に変えた場合も大きな差異はなかった。

アルミ基板に蒸着された DLC 膜の硬さをナノインデンション法（ヴィックカース硬さ試験の一種で、ナノサイズの圧子を非常に微小な荷重で押し込む試験法）によって測定した。結果は表 1 に示されている。エタノール中で合成した DLC の硬度は 1.66GPa であるが、メタノールでは最大 12.93GPa の硬度が出ている。従来の気相プラズマ CVD 法で生成された DLC 膜の硬度は 10~30GPa であるので、メタノールで得られた値はこれと同程度の硬さであり、液中成膜による実機への応用が期待できる。

成膜面積の拡大 成膜面積を大きくするために、電極の形状を $1\text{mm} \times 43\text{mm}$ の T 字型電極に変更して成膜実験を行った。基板は図 5(a) に示すように反応容器内に垂直に設置し、この基板を上下させることで、基板全面に成膜することが可能となる。なお全ての成膜実験は装置内圧力が 20kPa で行われた。実験で使用した電極は図 5(b) に示すように、電極材質となる金属ブロック（アルミニウム、または銅）の周囲をエボキシ樹脂で固めたものを用いた。これを T 型電極と以後呼ぶこととする。

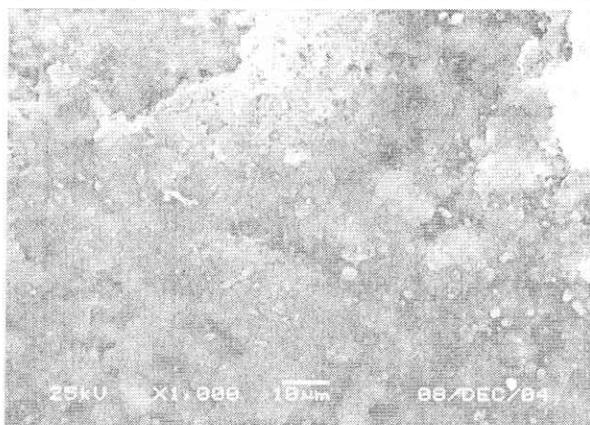


図 4 アルミニウム基板上の DLC

表 1 硬さ測定

Solution	Processing time (sec)	Power (W)	Hardness (GPa)
Ethanol	15	200	1.66
Methanol	15	100	0.55
Methanol	5	200	12.93

図6(a)は蒸着膜の画像である。電極全域にプラズマが発生し、基板に電極と同じ幅の DLC が成膜できている。成膜面積は $40\text{mm} \times 55\text{mm}$ 、成膜厚さは $0.4\sim2.6\mu\text{m}$ である。成膜に要した時間は約 70 秒である。図6(b)は出力 500W、圧力 20kPa のときの膜の SEM 画像である。SEM の表面観察から、膜表面には凹凸が多いことが確認された。プラズマのスケールを増加させ、成膜面積を大きくする場合は、膜の均質性が問題となる。また、このときの硬度は $1.1\sim1.7\text{GPa}$ であり、これは棒状電極と比べて低い値となった。プラズマの発生面積を増加させるために、基板電極間距離を短くしたためであると考えられる。電極と基板の間に全て気泡で覆われたため、誘電体がなくなりアーカ放電が発生したと考えられる。

図7は基板と電極との距離 d が成膜レートに及ぼす影響を調べた結果である。基板電極間距離が 1mm の時に高い成膜レートとなっている。電極間距離が狭くなるほど成膜レートは増加する傾向であると考えられるが、 $d=0.5\text{mm}$ ではアルミ及び銅電極とともに電極素材が溶解し基板に蒸着したため低いレートとなっている。基板と電極との距離が短すぎるとアーカ放電が発生する。

図8は実効電力と成膜レートの関係である。これから電力が 260~280W の時に高い成膜レートを得ることができている。放電面積が $1\text{mm} \times 43\text{mm}$ の T 型電極を用いて、70 秒間に $40\text{mm} \times 50\text{mm}$ 、厚さ $2.6\mu\text{m}$ の DLC 膜を成膜することができ、最大成膜速度 $1.4 \times 10^{-2}\text{mm}^3/\text{s}$ を得た。棒電極と比べ電極の

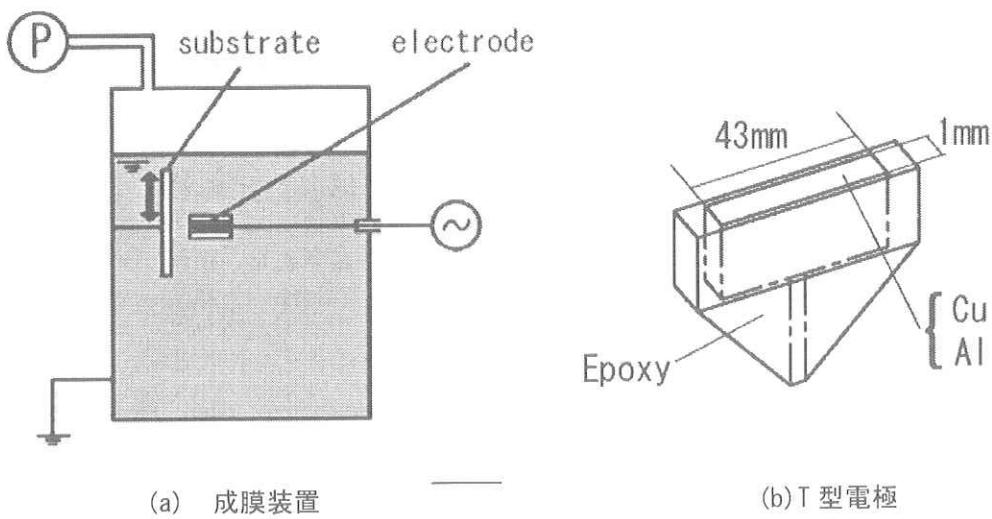


図5 T型電極を使った成膜実験

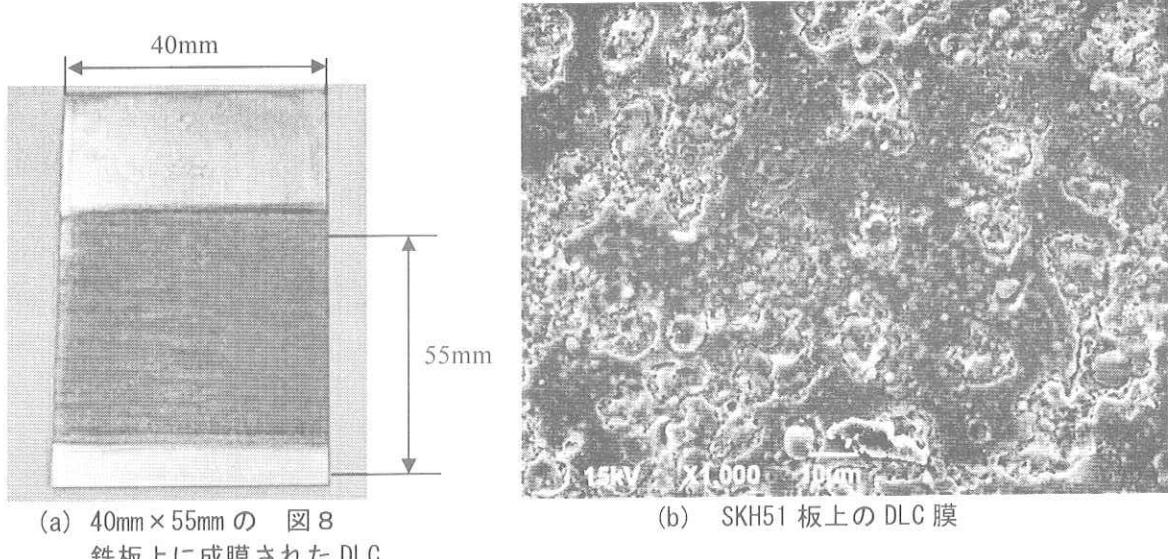


図6 DLC の成膜例

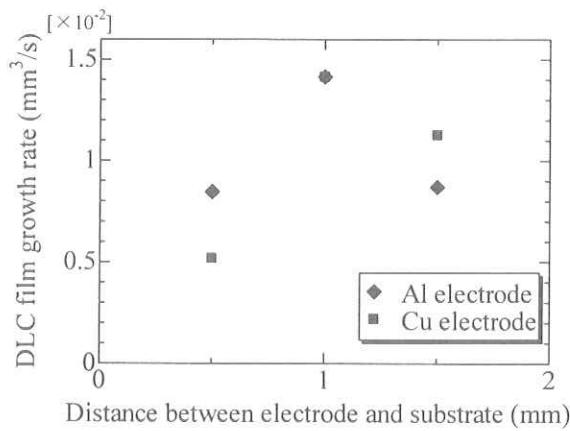


図7 電極間距離が DLC の成膜速度に及ぼす影響

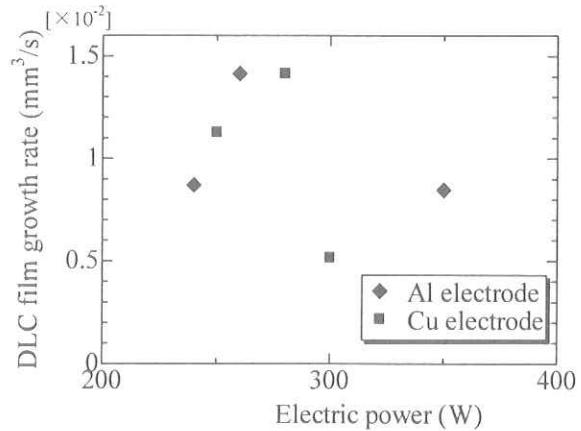


図8 高周波電力が DLC の成膜速度に及ぼす影響

面積が広いため、必要な電力は高くなると考えられるが、300W を超える電力を与えた場合は、異常放電により生成した膜が損傷したものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、水とメタノールを用いた 27.12MHz の高周波液中プラズマの放電特性を調べた。その結果、液中プラズマの放電形態がグロー放電であることが確認された。また、ダイヤモンド状膜の成膜実験から、エタノールを用いた場合は 1.66GPa、メタノールの場合は 12.93GPa の膜を合成できる。

参考文献

- [1] S. Nomura, H. Toyota, M. Tawara, H. Yamashita, and K. Matsumoto: Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 231502-1.
- [2] S. Nomura, H. Toyota, T. Maehara, S. Mukasa, H. Yamashita, and M. Kuramoto: Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 211503-1.
- [3] N. Gherardi and F. Massines: IEEE Trans. Plasma Sci. Sources Sci. Technol. **29** (2001) 536.
- [4] F. Tochikubo, T. Chiba, and T. Watanabe: Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) 5244.
- [5] F. Massines, A. Rabehi, P. Decomps, R. B. Gadri, P. Séguir, and C. Mayoux: J. Appl. Phys. **83** (1998) 2950.

電解研磨に関する研究

愛媛大学大学院理工学研究科准教授

豊田洋通

愛媛大学大学院理工学研究科教授

野村信福

株式会社イズミフードマシナリ製造部主任技師

井上清貴

株式会社イズミフードマシナリ製造部生産技術G

立石裕貴

1. はじめに

通常食品などを保存する容器等の内面には機械によるバフ研磨が施されているが、このバフ研磨では容器内面に加工変質層が形成されたり、表面の微小傷に不純物やバフ粉が蓄積して耐久的、衛生的に問題がある。電解加工と化学研磨を兼ね合わせた鏡面加工方法である電解研磨を行うことで、表面に加工変質層を形成しないで微小傷に入り込んだ不純物やバフ粉も除去することができる。しかし、電解研磨の技術は各企業独自の経験と実績の積み重ねで行っているため、公には公開されていないのが現状である。本研究の目的は、任意の電解液に対して容器の内面を電解研磨で鏡面に仕上げる条件を探索することである。

2. 実験方法

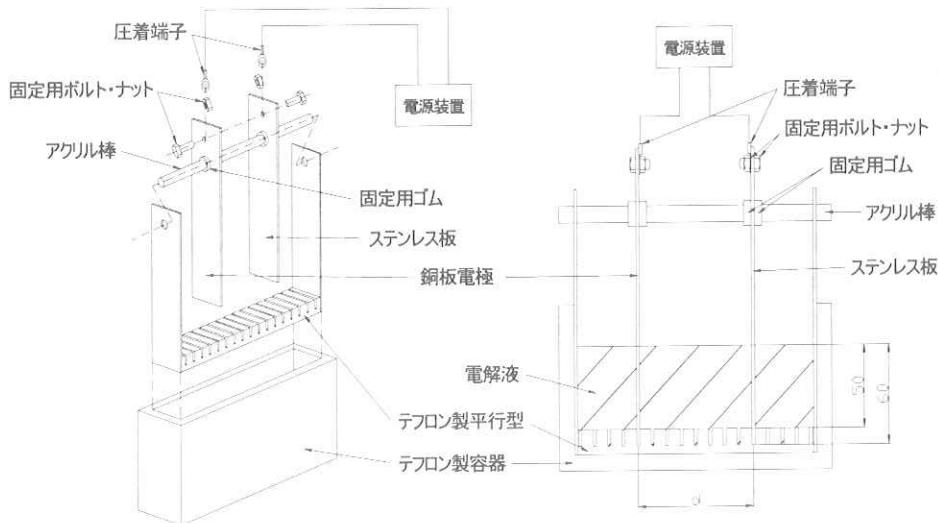


図1 平行電場型実験装置

図1に平行電場型実験装置の概略図を示す。これはビーカー型実験の結果をもとに、より種々の部品の研磨に類似している条件（平行電場）で実験を行うための装置である。また本研究では、独自で製造したリン酸エタノール溶液（磷酸とエタノールを一定の割合で混合した電解液）を用い、実験を行った。

本研究では、電圧・電流・温度の影響を調べるために、電圧を一定、電極間距離100 mmで、ある研磨開始温度を設けそこから温度を上げていき、定めた研磨時間だけ電流を流し研磨する。その後、研磨したステンレス表面を粗さ測定、目視によるピンホール及び微小傷の確認（基準試料との比較測定）を行い評価する。この実験では、電圧・研磨開始温度・研磨時間のパラメータを変化させ、最も適切に研磨されるパラメータを得る。研磨開始温度までは、水またはヒーターを用いて冷却・加熱する。

3. 実験結果及び考察

この実験の前段階であるビーカー型容器での等温度上昇研磨方法による実験結果から、液温がリン酸エタノール溶液は60~80°Cのときが適していることがわかった。また、リン酸の濃度が高くなるほど表面粗さも

小さくなる。さらに電圧は、15Vで最も良く研磨されることがわかった。この結果をもとにして、よりタンク内研磨に条件の近いと思われる平行電場型容器を用いてリン酸エタノール(1:1)の溶液を用いて研磨実験を繰り返し最適な電圧、研磨開始温度、研磨時間の最適条件を出した。実験条件を以下に示し、その結果を図2、3に示す。なお鏡面度とは標準サンプルを作製し、目視で比較して評価する方法であり、4および5が製品として合格レベルであることを示す。

実験条件

・電極間距離 100mm ・電圧 15V ・溶液の磷酸とエタノールの比 1:1 ・研磨開始温度 60~90°C
研磨時間 2分~10分



図2 60°Cからの研磨結果

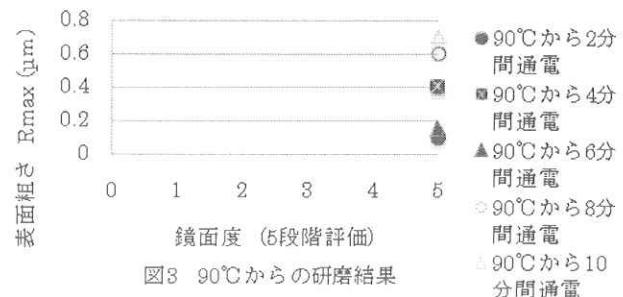


図3 90°Cからの研磨結果

バフ研磨(#400)を施している試料がしていない試料に比べピンホールの発生を格段に抑えることができたことから、電解研磨を行う前の表面仕上げが結果に大きく影響することがわかった。また介在物の少ないステンレス(SUS316L)を用いると同様の効果だけではなく、鏡面度、表面粗さまでもが改善できることもわかった。実際の部品への適用としてサニタリーパイプと、平行電場型容器を用いて同じ最適な条件で電解研磨を行い比較したところ、形状や表面仕上げの違いによる影響はあるものの、ほぼ同様の鏡面を得ることができた。図2、3より、温度が上がれば鏡面度が良くなるが、表面粗さも大きくなる。さらに研磨時間が延びれば表面粗さが大きくなる。さらにピンホールも増える結果となった。これらの結果を用いると適切な研磨条件を求めることができる。

4. おわりに

本研究より、平行電場型実験装置実験とサニタリーパイプ実験との関係性が確認でき、任意の電解液、部品に対して適切な研磨条件を探索する方法が確立できた。

5. 参考文献

- 1) <http://www.e-marui.jp/work/denkai.html>
- 2) 田中義信、津和秀夫、井川直哉、"精密加工学 下 第2版", 共立出版株式会社, (1958) 145-153

石かご水制の水理機能並びに周辺環境に与える環境に関する研究

愛媛大学大学院理工学研究科教授 鈴木幸一

愛媛大学大学院理工学研究科准教授 門田章宏

株式会社親和技術コンサルタント 村岡一志

瀬戸内金網商工株式会社 伏見津隆

1. はじめに

最近環境を考慮した水制ということで松本ら¹⁾, 道奥ら²⁾, 李ら³⁾の研究に見られるような石かご(蛇籠)などの透水性のある水制が注目されつつあるが, 不透過水制ではその先端部付近の局所洗掘が特に問題となる^{4), 5)}のに対し, 石かごのような透水性を有する水制では水制先端部での局所洗掘はわずかで, 水制からかなり離れた下流域での河床形状変化が顕著であり⁶⁾, その河床形状特性に注目した研究は少ない.

既報⁶⁾では石かごを単独設置した場合の検討結果について報告したが, 本研究では, 石かご水制を連続設置した場合の水制周辺及び下流域の河床形状変化について実験的に検討する. パラメータとしては①設置基数, ②越流と非越流, ③水制間隔(アスペクト比)の3点とした.

水制は一般的に水制群として連続設置されることが多いが, 単独設置される場合もある. 従来の研究では単独または連続設置の条件で多くの実験が行われているが, 水制の基数を1基, 2基, 3基と増やしていく場合の影響について研究している報告はほとんど皆無に近いと思われる. 例えはアスペクト比の影響を調べる場合には2基設置して実験されていることが多いが, 同じ実験条件で水制の基数を3基に変化させた場合には, 流れの渦構造に与える影響が微妙に変化して, 主流部と水制間凹部との運動量交換や質量交換に影響を与え, 河床形状変化が異なってくることが予想される.

また, 日本の気象・河川特性として, 降雨量の季節的変動が大きく流路が短く急峻であることから, 日本の河川に設置された水制では越流及び非越流の2つの状態が頻繁に起きているにもかかわらず, 従来の水制周辺の流れに関する研究ではこれらの比較についての議論が乏しく, 越流型水制での報告例^{7), 8), 9)}が多い.

2. 実験の概要

実験は, 図-1に示す長さ20m, 幅0.5m, 高さ0.5m, 勾配1/400の循環式直線水路を用いて行った. 水路の上流部に設置した三角堰によって流量を調整し, 水路の下流端に設置した可動堰で水深を調整できる. 水路中央部の2m区間を移動床として平均粒径0.3mmの砂を厚さ10cm敷き詰めて, この区間に水制を設置した.(写真-1)

水制の模型としては, 金網製のかごに石としてビーベー玉を詰めた直方体水制である. 水制の水路横断方向の水制長 L_g は10cm, 流下方向幅 W_g は7.5cm, 高さ H_g は5cmとした. 石かごの中に詰め

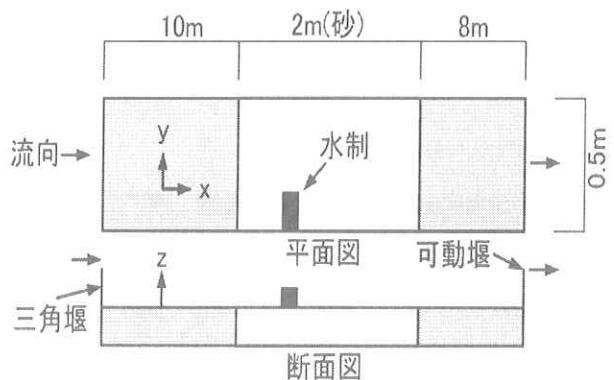


図-1 実験装置平面図

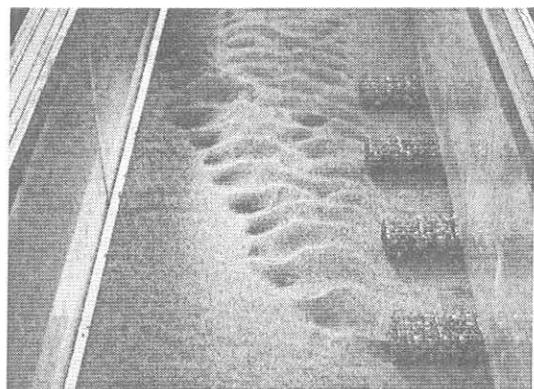


写真-1 石かご水制模型

表-1 実験条件 (間隔=アスペクト比)

Run No.	越流	基数	間隔	Fr	τ^*
1-1	越流	1	-	0.27	0.030
1-2		2	3		
1-3		3	3		
1-4		4	3		
1-5	非越流	1	-	0.34	0.033
1-6		2	3		
1-7		3	3		
1-8		4	3		
2-1	越流	2	2	0.27	0.030
2-2			3		
2-3			4		
2-4			5		
2-5			2		
2-6	非越流	2	3	0.34	0.033
2-7			4		
2-8			5		
3-1	越流	4	2	0.27	0.030
3-2			3		
3-3			4		
3-4			2		
3-5	非越流	4	3	0.34	0.033
3-6			4		

たビーベー玉はほぼ均一粒径でその直径 D_g は 16mm である。また、水理条件としては、接近流の流速 v_0 を 21cm/s の一定とし、接近流の水深 h_0 を変化させて、水制を越流する状態として 6cm、越流しない状態として 4cm とし、無給砂、静的洗掘条件にて実験を行った。これらの実験条件を表-1 に示している。なお、表中のフルード数 Fr 及び無次元掃流力 τ^* は水制を設置していない時の流れについてである。

Run1 では、越流、非越流の条件のもとで水制の設置基数を 1 基～4 基と変化させ、通水 60 分後に河床の凹凸を測定した。接近流速及び接近水深は前述のとおりであり、水制設置間隔は一般的に採用例の多い値としてアスペクト比(水制間隔／水制長)を 3 とした。

Run2 では、水制を 2 基連続設置して水制間隔を変化させた場合の河床形状変化を見るために、アスペクト比を 2, 3, 4, 5 の 4 通りに変化させた。Run3 では水制を 4 基連続設置して水制間隔を変化させた場合の河床形状変化を見るために、アスペクト比を 2, 3, 4 の 3 通りに変化させた。

河床形状測定については、平面位置(x, y)を光センサー(キーエンス製 型式 VP-90)で計測し、河床高(z)はレーザー変位計(キーエンス製 型式 LB-300)で計測した。座標の原点は、砂上面右岸上流端である。

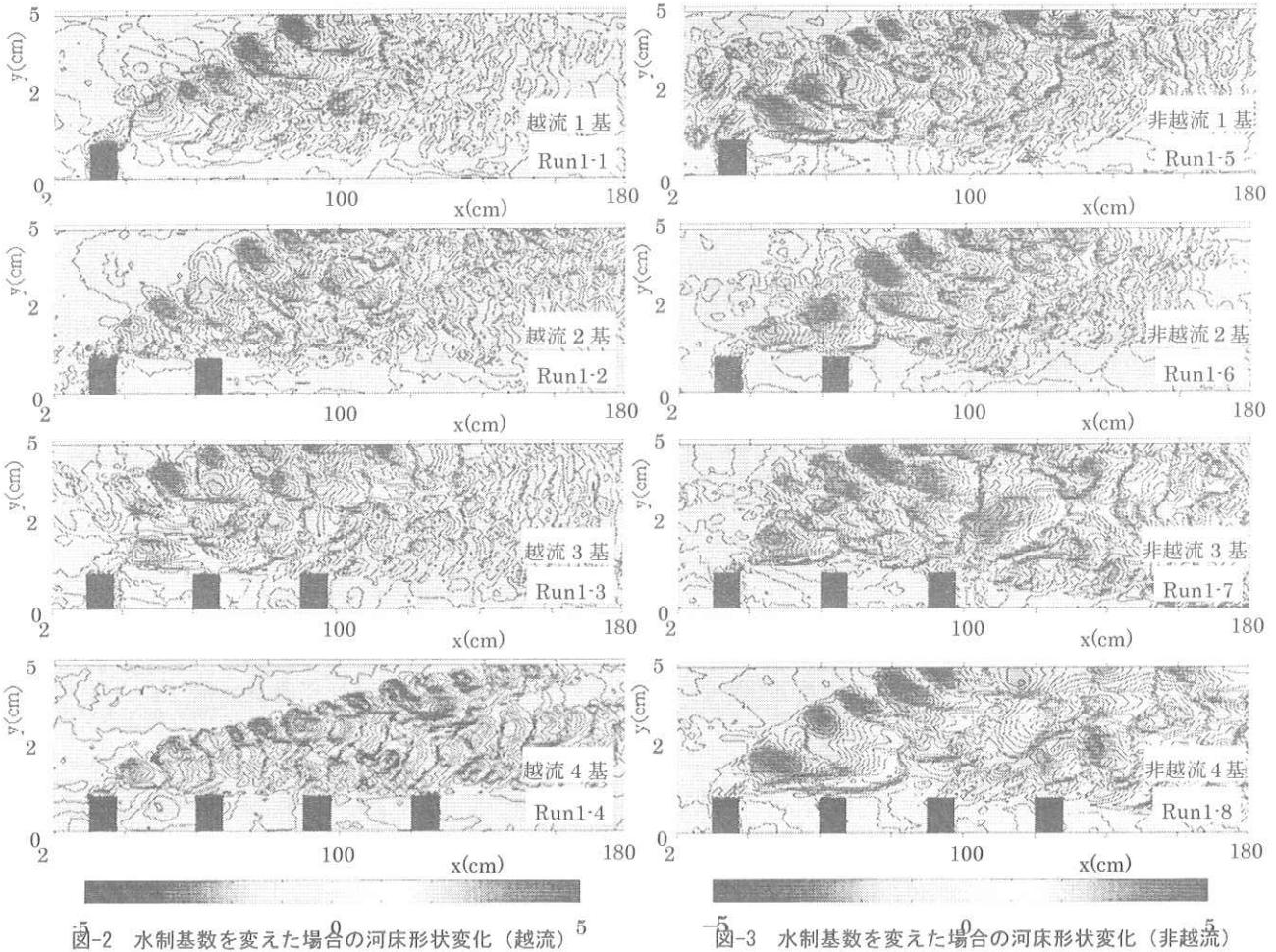


図-3 水制基数を変えた場合の河床形状変化（非越流）

3. 実験結果

(1) 水制基数を変化させた場合の河床形状変化

図-2 に越流状態で水制設置基数を 1 基～4 基に変化させた Run1-1～Run1-4 のセンター測定結果を示す。また、図-3 に非越流状態で水制設置基数を 1 基～4 基に変化させた Run1-5～Run1-8 のセンター測定結果を示す。水は図の左側から右側へ向かって流れ、横軸は流下方向距離、縦軸は横断方向距離を表している。先頭(最上流)水制は移動床上流端から 30cm の位置に設置されており、図の青い所ほど洗掘され、赤い所ほど堆積していることを表している。これらは図-4～図-7 も同様に示している。

図-2 より、水制が 1 基と 2 基の場合はほぼ類似の河床形状変化と見なせるが、3 基の場合には $x=54\text{cm}$, $y=39\text{cm}$ の所に最大洗掘が生じており、先頭水制からすぐ対岸側へ河床波が発達した後、曲線的に下流方向へ発達している。また、4 基の場合には 1 基～3 基の場合とはかなり異なっており、多数の小さな河床波がゆるやかに連続的に規則正しく発達している。図-3 より、非越流の場合には水制基数にかかわらず越流に比べて大きな河床波が発達しているが、3 基の場合には越流 3 基と同様に先頭水制からすぐ対岸側へ河床波が発達している。また、4 基の場合には越流 4 基の場合とは異なって、大きな河床波が発達しその数は越流 4 基の約半分である。

これらの実験のアスペクト比はいずれも 3 であるが、富永・井嶋¹⁰⁾が行った越流型不透過水制を用いた水制周りの水平剥離渦の構造検討では、先頭水制の水はねによる剥離長は水制長の 3 倍程度で

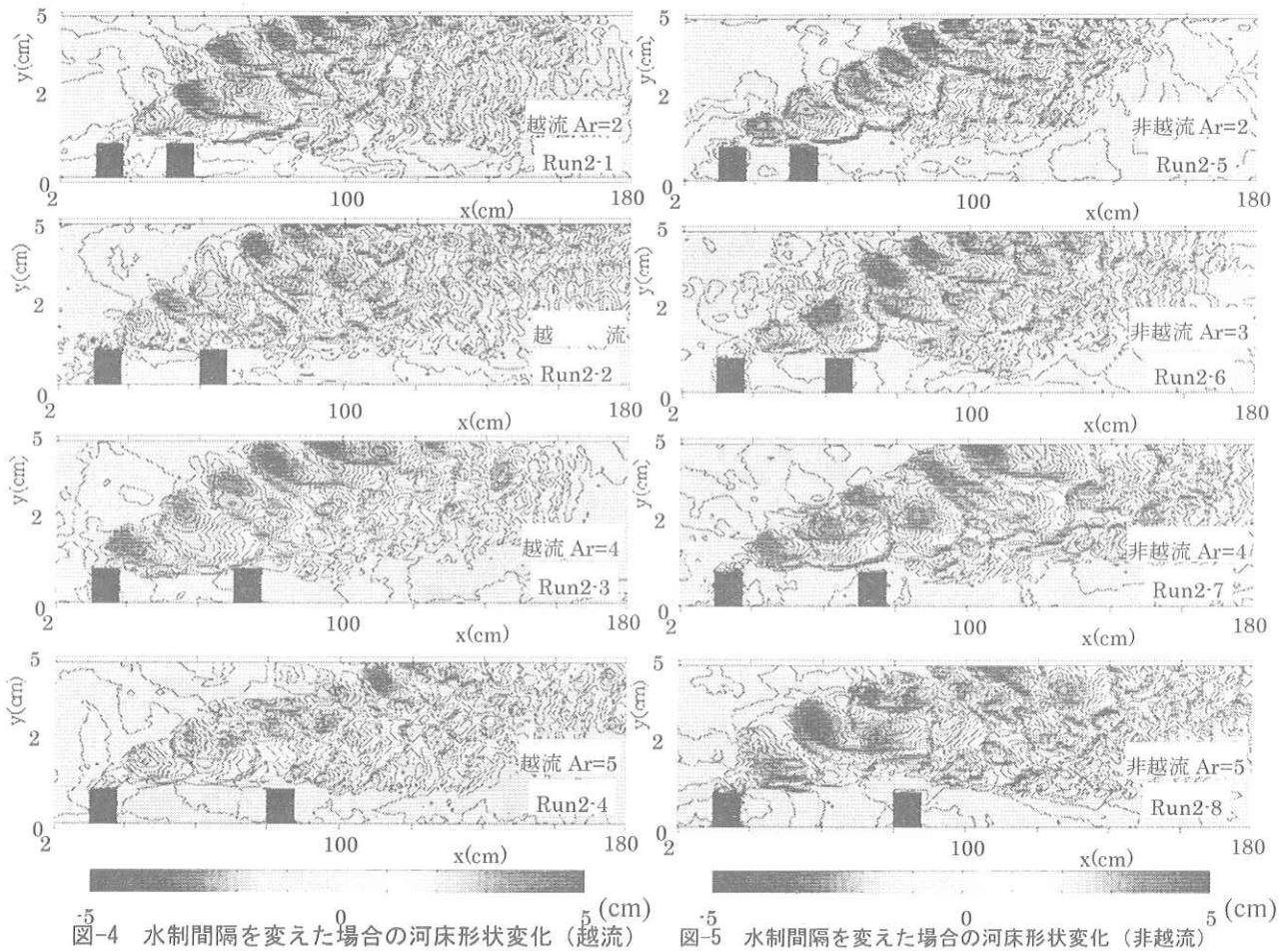


図-4 水制間隔を変えた場合の河床形状変化（越流）

図-5 水制間隔を変えた場合の河床形状変化（非越流）

あり、陳・池田¹¹⁾が行った非越流透過水制では水制長の5~6倍程度であったと報告されており、先頭水制の水はねによる剥離渦が後続の水制と微妙に関係して、波の干渉や共振のような現象が起きている可能性がある。

(2) 水制間隔を変化させた場合の河床形状変化

図-4に水制2基越流状態でアスペクト比を2, 3, 4, 5と変化させたRun2-1～Run2-4のコンター測定結果を示す。また、図-5に水制2基非越流状態でアスペクト比を2, 3, 4, 5と変化させたRun2-5～Run2-8のコンター測定結果を示す。

図-4より、アスペクト比が2と3の場合はほぼ類似の河床変化と見なせるが、アスペクト比が4の場合には凹凸がはっきりした大きな河床波が発達し、アスペクト比が5の場合には逆に凹凸があまりない小さな河床波が発達している。

図-5より、非越流の場合にはアスペクト比にかかわらず越流に比べて大きな河床波が発達しているが、越流の場合は異なってアスペクト比が大きくなても河床波の発達状況はあまり変わらない。

図-6に水制4基越流状態でアスペクト比を2, 3, 4と変化させたRun3-1～Run3-3のコンター測定結果を示す。また、図-7に水制4基非越流状態でアスペクト比を2, 3, 4と変化させたRun3-4～Run3-6のコンター測定結果を示す。

図-6より、アスペクト比が2と4の場合は比較的よく似た河床波が発達しているが、アスペクト比

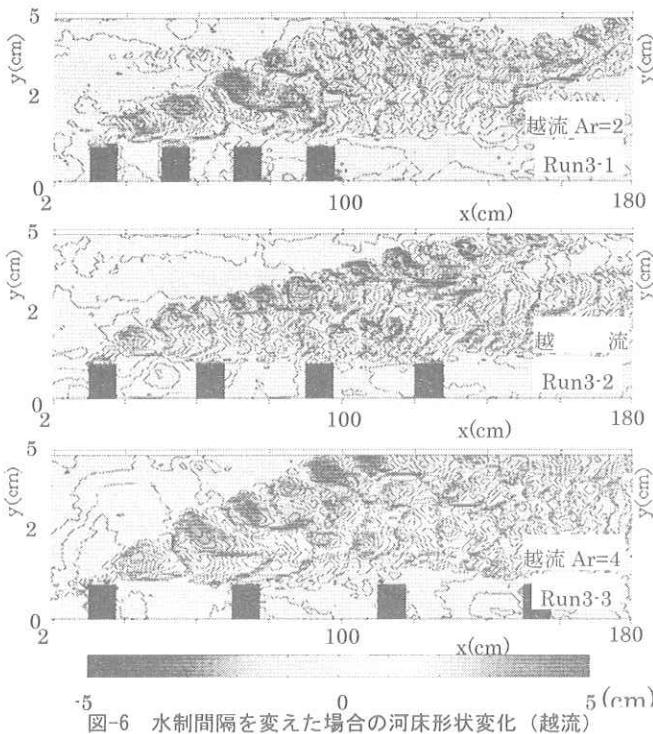


図-6 水制間隔を変えた場合の河床形状変化（越流）

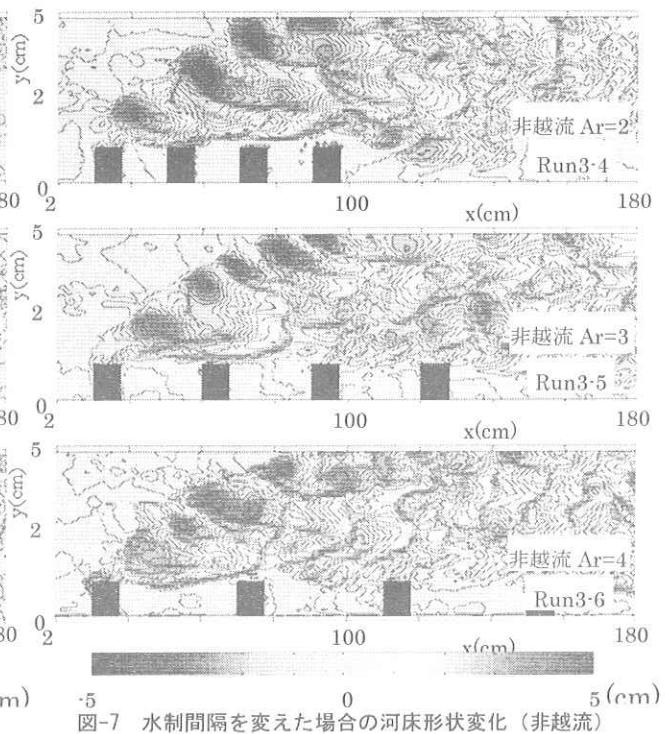


図-7 水制間隔を変えた場合の河床形状変化（非越流）

が 3 の場合には小さな河床波が多数連なっている。また、水制 2 基の場合に比べて全体的に小さな河床波が流下方向になだらかに発達している。

図-7 より、アスペクト比にかかわらず越流に比べて大きな河床波が発達しているが、アスペクト比が大きくなるに従って河床波が小さくなり、下流域への影響が小さくなっている。また、水制 2 基の場合に比べてアスペクト比 2 の場合には大きな河床波が発達している。

以上の結果から、同じアスペクト比でも 2 基と 4 基で実験結果がかなり異なることが判明し、今後の実験を進める上で、従来の多くの研究例であり論じられていない設置基数が重要なパラメータの 1 つになると考えられる。

4. 考察

(1) 最大局所洗掘位置及び最大堆積位置特性

既報⁶⁾で報告したように、不透過水制では水制先端部での局所洗掘が卓越するが、石かご水制の場合は水制先端部での局所洗掘はわずかで、水制からかなり離れた下流域での河床形状変化が顕著となっている。

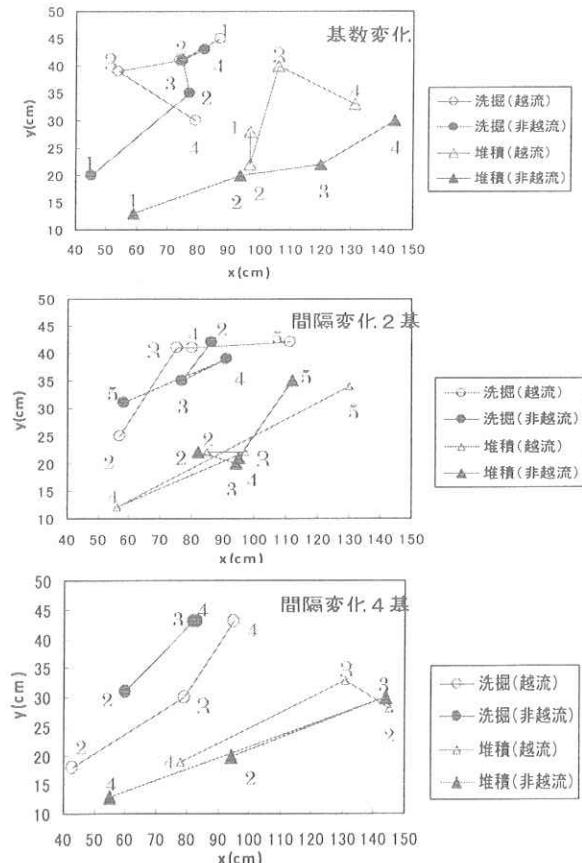


図-8 水制最大洗掘位置および最大堆積位置

そこで、図-8に今回行った実験の各Runにおいて河床が最も洗掘された位置と最も堆積した位置を示す。基数変化時の最大洗掘位置は非越流の場合は基数とともに下流対岸側へ移動するが、越流の場合には1基～3基まではその逆になっている。また、最大堆積位置は非越流の場合基数とともに下流対岸側へ移動するが、越流の場合にはその傾向が鈍っている。

水制2基でアスペクト比を変化させた時の最大洗掘位置は、越流の場合はアスペクト比が大きくなるに従ってより下流対岸側へ移動するが、非越流の場合にはアスペクト比が2, 3, 5の時に逆になっている。また、最大堆積位置は、非越流の場合アスペクト比が大きくなるに従ってより下流対岸側へ移動するが、越流の場合にはアスペクト比4を除くと同じ傾向である。

水制4基でアスペクト比を変化させた時の最大洗掘位置は、越流、非越流ともアスペクト比が大きくなるに従ってより下流対岸側へ移動するが、最大堆積位置は越流の場合にはその逆となり、非越流の場合には明確な傾向がない。

(2) 河床波伝播特性

実際の河川に水制を設置した場合に、水制による河床形状変化がどの方向にどれくらい進むかを事前に推定することが重要である。そこで、今回行った実験の各Runにおいて先頭水制の水はねから生ずるメインの河床波がどの方向に発達しているかを図-9に示す。

図-9より、非越流の場合には基数変化やアスペクト比変化にかかわらずほぼ一定の方向に発達しているが、越流の場合には2基アスペクト比5や4基アスペクト比3の場合に対岸方向への角度がゆるやかになっている。これは、越流があるかないかによって水制域内流体と主流域の流れとの交換状態が変化するためと考えられ、水制高さが重要な設計因子の1つであることを示している。

(3) 河床波形状特性

芦田・道上による小規模河床波の領域区分によるとフルード数 $Fr < 0.8$, 砂粒レイノルズ数 $u_* d/v \leq 8$

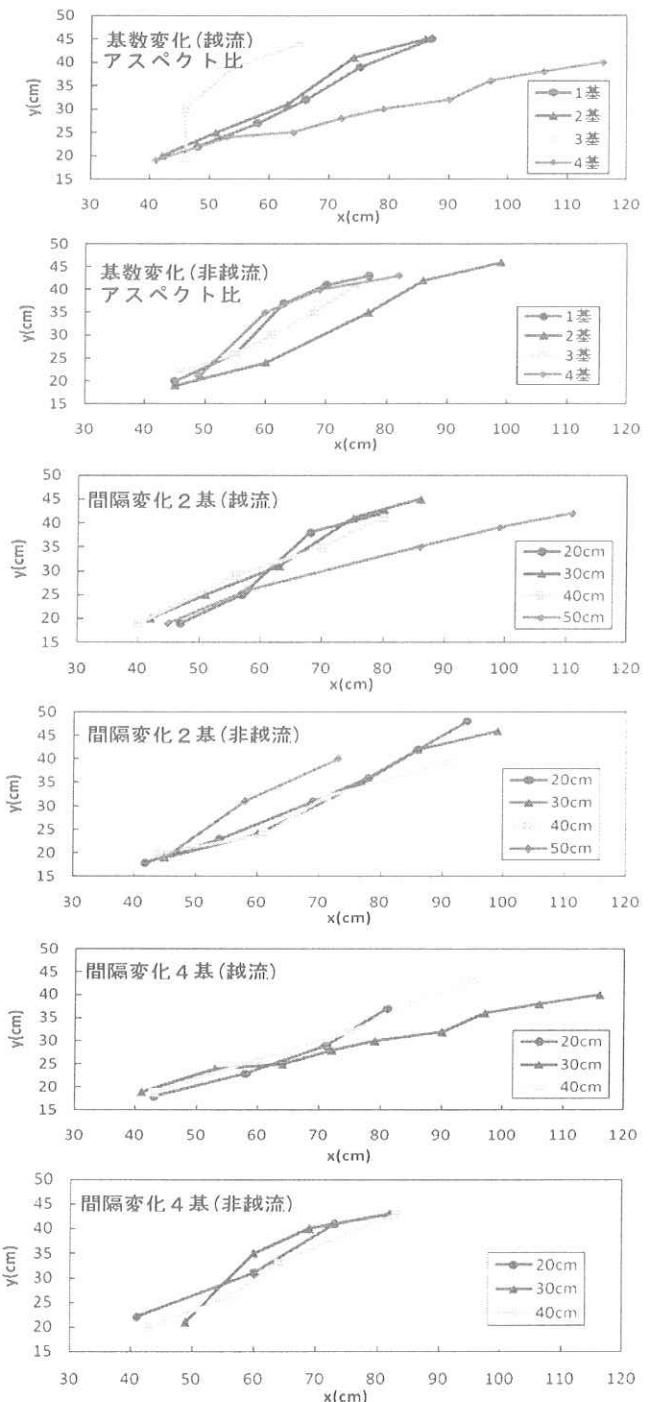


図-9 河床波伝播図

でlower regimeの領域であり、砂れんが形成されていると考えられる。本研究では $Fr = 0.27 \sim 0.34$ 、砂粒レイノルズ数 $3.6 \sim 3.8$ であり、水制周辺のわずかな局所洗掘が砂れんの発生を促し、下流域河床に発達伝播していることがわかる。図-10に今回の実験で得られた主要な砂れんの平均波長 λ および平均波高 Δ を示す。越流と非越流とでは、基數やアスペクト比を変化させた時の波長の変化傾向に差異があり、必ずしも一定の傾向が見られないが、全体的には波長は水制長のほぼ1~2倍の範囲内におさまっており、越流よりも非越流の方が平均波長が少し長くなっている。表-2に今回の実験で得られた河床波の波長と波高の関係を接近水深による表現でまとめた。

5. おわりに

今回の実験結果から水制の設置基數や越流、非越流の条件によって流れ構造が大きく異なるため、水制下流域の河床形状変化に大きく影響することが明らかとなった。今後、水制模型を用いた室内実験で河床形状変化や流れ場の流速分布を調査する場合には、一意的に設置基數を固定した実験データや越流状態だけを見るような実験データでは一般論へ発展させるのが困難と考えられる。また、越流よりも非越流の方が河床形状変化に与える影響が大きいことから、非越流状態での研究がより重要になってくると思われる。

参考文献

- 1) 松本大三, 富永晃宏, 石川光雄: 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす透過性の影響, 水工学論文集, 第52巻, pp.637-642, 2008.
- 2) 道奥康治, 石垣泰輔, 前野詩朗, 南條雅志, 池松健: 透過型水制の周辺・内部の流れに関する実験と解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.799-804, 2004.
- 3) 李最森, 道奥康治, 前野詩朗, 和中隆志: 捨石透過水制を配した開水路における流れと河床変動, 水工学論文集, 第51巻, pp.817-822, 2007.
- 4) RAHMAN,M.M. and MURAMOTO,Y.:Prediction Of Maximum Scour Depth Around Spur-Dike-Like Structures, 水工学論文集, 第43巻, pp.623-628, 1999.
- 5) ELAWADY, E., MICHIE, M. and HINOKIDANI, O.:Movable Bed Scour Around Submerged Spur-Dikes , 水工学論文集, 第45巻, pp.373-378, 2001.

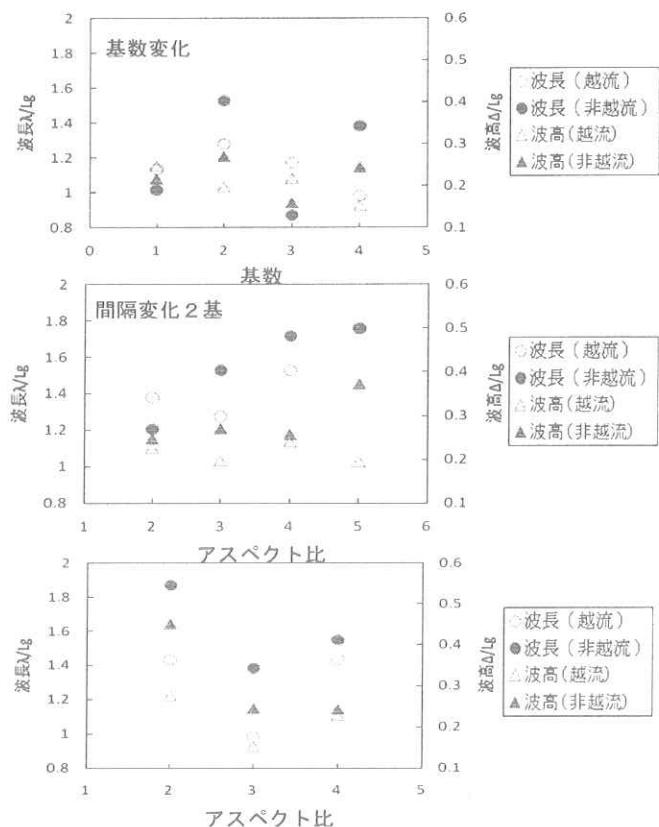


図-10 間隔砂れんの波長および波高

表-2 河床波の波長と波高の関係 (h_0 : 接近水深)

	越流	非越流
平均波長 λ	$\lambda = 2.0 \sim 2.5 h_0$	$\lambda = 3.1 \sim 4.1 h_0$
平均波高 Δ	$\Delta = 0.12 \sim 0.22 \lambda$	$\Delta = 0.15 \sim 0.25 \lambda$

- 6)村岡一志, 森本稔, 門田章宏, 鈴木幸一: 石かご水制下流域の河床形状変化に関する研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.631-636, 2008.
- 7)富永晃宏, 中野義郎, 井嶋康二, 長坂剛: 越流型水制域内の流れ構造に及ぼす相対水制高の影響, 応用力学論文集, vol.3, pp.805-812, 2000.
- 8)富永晃宏, 田本典秀: 越流型水制群周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果, 水工学論文集, 第48巻, pp.805-810, 2004.
- 9)Kimura,I.,Hosoda,T.and Onda,S., Prediction of 3D Flow Structures Around Skewed Spur Dikes by Means of a Non-linear k-ε Model, River Flow 2002,1, 65-73, 2002.
- 10)富永晃宏, 井嶋康二: 越流型水制周辺の流れ構造に及ぼす水制間隔の効果, 水工学論文集, 第 46 卷, pp.475-480, 2002.
- 11)陳飛勇, 池田駿介: 水制周りの水平剥離渦の構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 40 卷, pp.787-792, 1996.

高纖維配合率かつ不連続状の炭素纖維強化プラスチックの 流动シミュレーションツールの開発

愛媛大学大学院理工学研究科助教	岩本幸治
愛媛大学大学院理工学研究科教授	黄木景二
愛媛大学大学院理工学研究科助教	矢代茂樹
Societe des Fibres de Carbone S.A.	和田原英輔
東レ株式会社複合材料研究所	武田一朗
東レ株式会社複合材料研究所	佐藤成道
東レ株式会社複合材料研究所所長	北野彰彦

1 緒言

不連続炭素纖維強化プラスチックは成形性に優れ、高剛性、高強度かつ軽量という利点を有している。その成形方法には射出成形やプレス成形が挙げられるが、中でもプレス成形は比較的長い纖維（50 mm程度）を使用することが出来るため、比較的簡単に高強度が実現できるという点で現在注目されている。しかし、プレス成形時には炭素纖維と熱硬化性樹脂が複雑に干渉し合う個液二相流が形成されるため、製品に強度むらが生じる可能性がある。成形時における材料の挙動が予測できればこの問題は解決されるが、低纖維配合率である射出成形とは違い、纖維および樹脂の影響を同時に考慮しなければ信頼性のある予測は不可能である。プレス成形における材料の挙動を明らかにするため、本報告では纖維を弾性体、樹脂を粘性流体として扱った2次元の近似解析モデルを考案し、実際にシミュレーションを試みた。本報告ではその方法と結果、さらに今後の予定を示す。

2 シミュレーション方法

2.1 支配方程式

対象とする成形材料をFig. 1(a)のようにモデル化する。本解析では纖維を表す弾性体シートと樹脂を表す粘性流体が層をなして重なっているものとする。各層において、長さ方向に ξ 軸、それに垂直な（厚さ）方向に η 軸をとる。それぞれの軸の単位ベクトルを s, n とすれば、各層における支配方程式は以下のように表される。

・弾性体シートの運動方程式

$$\begin{aligned} \rho_s h_s d(\mathbf{u}_s \cdot s) / dt &= \rho_s h_s \mathbf{u}_s \cdot \mathbf{n} \{ \partial_\xi (\mathbf{u}_s \cdot \mathbf{n}) + \mathbf{u}_s \cdot s\kappa \} \\ &\quad + \mu [(1 - h_s \kappa / 2) \{ \partial_\xi (\mathbf{u}^{(2)} \cdot \mathbf{n}) + \mathbf{u}^{(2)} \cdot s\kappa + \partial_\eta (\mathbf{u}^{(2)} \cdot s) \} \\ &\quad - (1 + h_s \kappa / 2) \{ \partial_\xi (\mathbf{u}^{(1)} \cdot \mathbf{n}) + \mathbf{u}^{(1)} \cdot s\kappa + \partial_\eta (\mathbf{u}^{(1)} \cdot s) \}] + f\kappa + \partial_\xi T \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho_s h_s d(\mathbf{u}_s \cdot \mathbf{n}) / dt &= -\rho_s h_s \mathbf{u}_s \cdot s \{ \partial_\xi (\mathbf{u}_s \cdot \mathbf{n}) + \mathbf{u}_s \cdot s\kappa \} + (1 + h_s \kappa / 2) p^{(1)} - (1 - h_s \kappa / 2) p^{(2)} \\ &\quad + 2\mu [(1 - h_s \kappa / 2) \partial_\eta (\mathbf{u}^{(2)} \cdot \mathbf{n}) - (1 + h_s \kappa / 2) \partial_\eta (\mathbf{u}^{(1)} \cdot \mathbf{n})] - \partial_\xi f + T\kappa \end{aligned} \quad (2)$$

ただし添字^{(1), (2)}はそれぞれ弾性体シートの下面、上面と接する流体に関する量、 t は時間、 ∂ は添字方向の偏微分を表す。式(1), (2)は密度 ρ_s 、厚さ h_s 、速度 \mathbf{u}_s 、シート中心(ξ)軸の曲率 κ を持つ弾性体が内部でせん断力 f 、張力 T を受け、さらに下面、上面で接する粘度 μ

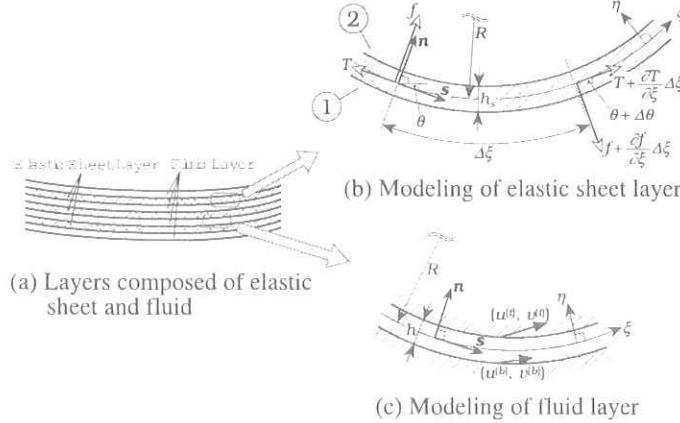


Fig. 1 Problem setting and layers model

の流体から摩擦応力と圧力 p を受けて運動することを表す。せん断力 f 、張力 T は材料力学のはりの式から求める。ただし曲げモーメントによって生じる弾性体の角運動量は考慮していない。また、小さいと予想されるため、 η 軸の曲率は考慮していない。

・流体層の運動方程式

$$\partial_\xi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}) + \partial_\eta (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \kappa \quad (3)$$

$$d(\mathbf{u} \cdot \mathbf{s})/dt = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \{ \partial_\xi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) + \mathbf{u} \cdot \mathbf{s} \kappa \} - \partial_\xi p / \rho - \mu \partial_\eta \{ \partial_\xi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) - \partial_\eta (\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}) + \mathbf{u} \cdot \mathbf{s} \kappa \} / \rho \quad (4)$$

$$d(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})/dt = -\mathbf{u} \cdot \mathbf{s} \{ \partial_\xi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) + \mathbf{u} \cdot \mathbf{s} \kappa \} - \partial_\eta p / \rho + \mu \partial_\xi \{ \partial_\xi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) - \partial_\eta (\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}) + \mathbf{u} \cdot \mathbf{s} \kappa \} / \rho \quad (5)$$

式(1), (2), (4), (5) は弾性体や流体とともに移動する座標系において成り立つ式であるため、 ξ, η 軸が時間とともに変形する。それぞれの式における右辺第1項はこの効果を表す。

2.2 近似解析

プレス成形では、流体層の厚さは長さ (Fig. 1 の横) 方向に比べて十分薄い。また、流体層の厚さ h 、 ξ 方向曲率半径 $1/\kappa$ は高タシート厚さ h_s 程度である。さらに流体の運動は準定常的 ($d/dt \approx 0$) にふるまうと考えられる。以上の仮定を利用して式(3), (4), (5) でオーダーが小さいものを省略すると次式が得られる。

$$\partial_\xi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}) + \partial_\eta (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \kappa \quad (6)$$

$$\partial_\eta^2 (\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}) - \kappa \partial_\eta (\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}) = \partial_\xi p / \mu \quad (7)$$

$$\partial_\eta p = 0 \quad (8)$$

代表厚さを H 、代表横方向長さを L とすれば式(6), (7), (8) はそれぞれ $O(1)$, $O(L/H)^2$, $O(L/H)^3$ のオーダーよりも小さい項を省略したものである。同様に式(1), (2) も近似すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \mu & \left[(1 - h_s \kappa / 2) \{ \partial_\eta (\mathbf{u}^{(2)} \cdot \mathbf{s}) + \mathbf{u}^{(2)} \cdot \mathbf{s} \kappa \} \right. \\ & \left. - (1 + h_s \kappa / 2) \{ \partial_\eta (\mathbf{u}^{(1)} \cdot \mathbf{s}) + \mathbf{u}^{(1)} \cdot \mathbf{s} \kappa \} \right] + f \kappa + \partial_\xi T = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$(1 + h_s \kappa / 2) p^{(1)} - (1 - h_s \kappa / 2) p^{(2)} + T \kappa = 0 \quad (10)$$

2.3 近似解析解

まず、接線方向の Navier-Stokes 方程式 (7) を $\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}$ について解く。式 (7) はこのままで解析的には解くことが出来ない。しかし流体層の厚さ h が非常に薄いため、その上下に位置する弾性体シートの表面がほとんど平行であると仮定すると、 ξ 方向の曲率 κ は $1/\kappa \approx 1/\kappa_0 - \eta$ ($1/\kappa_0$ は流体層高さ中心における ξ 軸の曲率) と近似できる。また、 ξ 方向微分に流体層中心 ($\eta = 0$) における ξ 座標 ξ_0 を用いると $\partial_\xi \approx \partial_{\xi_0}/(1 - \eta\kappa_0)$ と表される。以上の近似を用いると式 (7) は

$$\partial_\eta^2(\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}) - \kappa_0 \partial_\eta(\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}) - \kappa_0^2 \mathbf{u} \cdot \mathbf{s} / (1 - \eta\kappa_0)^2 = \partial_{\xi_0} p / \{\mu(1 - \eta\kappa_0)\} \quad (11)$$

になる。これを流体層の上、下面における境界条件 $\eta = h/2 : \mathbf{u} \cdot \mathbf{s} = u^{(t)}$, $\eta = -h/2 : \mathbf{u} \cdot \mathbf{s} = u^{(b)}$ の下で解くと、 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}$ の η 方向分布が解析的に得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u} \cdot \mathbf{s}(\eta) = & [(1 - h\kappa_0/2)(\eta + h/2) \times \\ & \{\kappa_0(\eta - h/2) - 2\} \{(1 - h\kappa_0/2) \log(1 - h\kappa_0/2) \partial_{\xi_0} p / (2h\kappa_0^2\mu) - u^{(t)}/h\} \\ & - (1 + h\kappa_0/2)(\eta - h/2) \times \\ & \{\kappa_0(\eta + h/2) - 2\} \{(1 + h\kappa_0/2) \log(1 + h\kappa_0/2) \partial_{\xi_0} p / (2h\kappa_0^2\mu) - u^{(b)}/h\} \\ & + (1 - \eta\kappa_0)^2 \log(1 - \eta\kappa_0) \partial_{\xi_0} p / (\kappa_0^2\mu)] / \{2(1 - \eta\kappa_0)\} \end{aligned} \quad (12)$$

ある時刻における弾性体シートの位置が分かれれば流体層の厚さ h や高さ中心における曲率 κ_0 が与えられる。よって、流体層上、下端にある弾性体シートの接線方向速度 $u^{(t)}$, $u^{(b)}$ が決定できれば式 (9) で必要になる $\partial_\eta(\mathbf{u} \cdot \mathbf{s})$ は式 (12) から得られる。また、連続の式 (6) から弾性体シートの法線方向速度も規定できる。

2.4 計算手順

ここでは、前節までの結果から考案した計算手順を示す。図 2 に示すように、弾性体シート、金型上、下面、自由表面をそれぞれ 1 枚のシートと考え、このシートを接線方向に離散化する。以後、 i 番目のシートに属する接線方向 j 番目の離散点における座標を $\mathbf{r}_{s_{ij}}^n$ と表す。またその離散点から垂直方向下向きに外挿し、流体層との境界にあたる点における圧力を $p_{s_{ij}}^n$ と表す。これらを未知量として時間進行を行う手順を以下にまとめる。

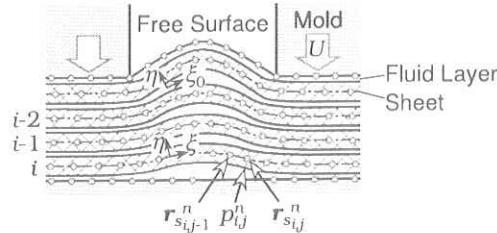


Fig. 2 Discretization

- (1) 流体の粘度 μ , 弹性体シートの縦弾性係数 E_s , シート枚数, 境界条件等の計算条件を設定する。

- (2) 以下の手順で反復を行い、次の時間ステップ $n+1$ における離散点の位置 $r_{s_{i,j}}^{n+1}$ および圧力 $p_{i,j}^{n+1}$ を求める。なお、以後の上付添字 $\langle q \rangle$ は q 回目の反復であることを表す。
- $r_{s_{i,j}}^{n+1}, p_{i,j}^{n+1}$ の初期推定値として $r_{s_{i,j}}^{\langle 0 \rangle} = r_{s_{i,j}}^n, p_{i,j}^{\langle 0 \rangle} = p_{i,j}^n$ を用いる。
 - $r_{s_{i,j}}^{\langle q \rangle}, p_{i,j}^{\langle q \rangle}$ と幾何学的関係や材料力学のはりの式を用いて各離散点におけるシートの曲率 κ や弾性体内に作用するせん断力 f 、張力 T を算出する。
 - 各離散点において流体層の上下端に位置するシートの場所を検索する。この結果から線形補間に用いる重み係数を決定する。
 - 式 (12) から流体による摩擦応力を算出する。シートは刻一刻移動しているので、流体層のちょうど上下に離散点があるわけではない。そこで、2c で求めた重み係数を使用して流体層のちょうど上下の点における値を評価する。
 - 各離散点において、式 (6), (9), (10) および境界条件を満足するように補正量 $\delta r_{s_{i,j}}^{\langle q \rangle}$ および圧力 $p_{i,j}^{\langle q+1 \rangle}$ を求める。ここで、各式の ξ 方向微分および速度は差分近似で評価する。 $\delta r_{s_{i,j}}^{\langle q \rangle}$ を用いて位置を $r_{s_{i,j}}^{\langle q+1 \rangle}$ に更新する。
 - 補正量 $\delta r_{s_{i,j}}^{\langle q \rangle}$ が十分小さくなるまで 2b ~ 2e を繰り返す。
- (3) 補正量が十分小さくなったら $r_{s_{i,j}}^{\langle q+1 \rangle}, p_{i,j}^{\langle q+1 \rangle}$ を $r_{s_{i,j}}^{n+1}, p_{i,j}^{n+1}$ に置き換え、2 を繰り返す。

3 結果と考察

流体の粘度を $\mu = 1$ [Pa · s]、弾性体シートの縦弾性係数を $E_s = 0.1$ [MPa]、プレス部降下速度を $U_p = 1$ [mm/s]、時間ステップを $\Delta t = 0.1$ [ms] とし、中央を開口した金型 (T 字リブ構造が成形される) で 6 層重ねの材料をプレスした場合の結果を図 3 に示す。東レ 複合材料研究所で実施した実験では、総数 16 層のうち表層から 10 層程度 (63% 程度) がリブ構造に入り込み、11~13 層程度 (81% 程度) が開口部に入り込めずに凸型に変形するという結果が得られている。凸型に変形する領域を図 3 と比較すると、弾性体シート総数 6 層のうち表層から 4 層 (67%) は開口部に入り込むように変形し、5 層目 (83%) はリブ構造に入り込まずに凸型に変形しており、実際の T 字リブ構造の成形とほぼ同様の結果が得られている。

現時点では弾性体シートが上側の金型に接触した時点で解析モデルの適用範囲外になり、計算が続行できなくなる。実際にはこのような場合、剛体同士の摩擦が支配的になるため、計算中での切り替えが必要である。

4 結論

本研究により、大規模なシミュレーションを行わずとも高纖維配合率かつ不連続状の炭素繊維強化プラスチックの流動が予測できることが示された。現在のところ弾性体シートに不連続性を与えていないが、材質を部分的に樹脂のそれと置き換えることで対応できるため、現在その変更を検討している。また、剛体摩擦の効果も考慮に入れるべきことが判明した。本 2 次元解析手法を確立した後に、3 次元解析に拡張することを考えている。

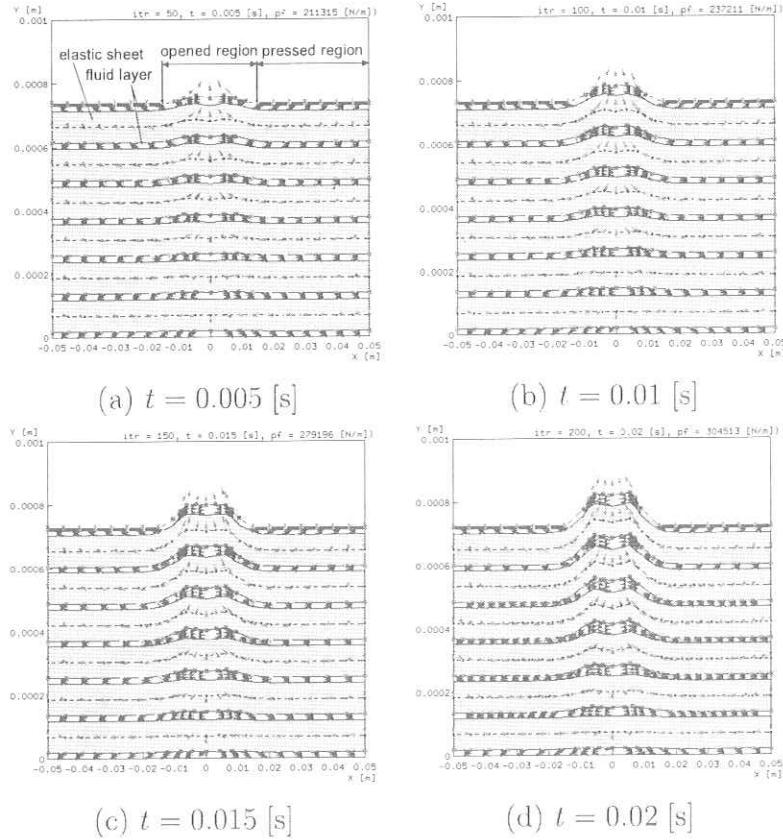


Fig. 3 Calculation result ($\mu = 1 [\text{Pa} \cdot \text{s}]$, $E_s = 0.1 [\text{MPa}]$, $U_p = 1 [\text{mm/s}]$, $\Delta t = 0.1 [\text{ms}]$)

磁気光学磁束観察用YIG膜の磁気的評価

愛媛大学大学院理工学研究科准教授 平岡 耕一
超伝導工学研究所 町 敬人
超伝導工学研究所 中尾 公一
超伝導工学研究所 田辺 圭一

1 はじめに

超伝導体への磁束侵入をリアルタイムに観察するために、ファラデー効果を用いた磁気光学(MO; magneto-optical)磁束観察法は非常に重要な技術である。MO観察にはファラデー回転角の大きな面内配向磁性膜が必要であるが、すべての磁化が面内に配向した磁性膜を得ることは非常に困難である。超電導工学研究所でLPE (Liquid Phase Epitaxy) 法を用いて作製されたBi添加した希土類鉄ガーネット膜(MO膜)について、この試料の面内配向性を測定し、MOインジケータ膜として使用可能であるかを調べた結果を報告する。

2 実験結果

以前報告したように、751.1°Cで成膜した場合よりも746.9°Cの場合の方が面内配向の度合いが高いことが分かる。746.9°Cで成膜して面内配向させたMO膜(Bi:Lu-Feガーネット膜)の磁化の異方性を測定した結果を図1に示す。この図から面に垂直方向にわずかにヒステリシスがあるものの、ほとんどは面内に配向していることが読み取れた。このMO膜(膜厚~2μm)について、光学的な手法で求めたヒステリシス曲線を図2に示

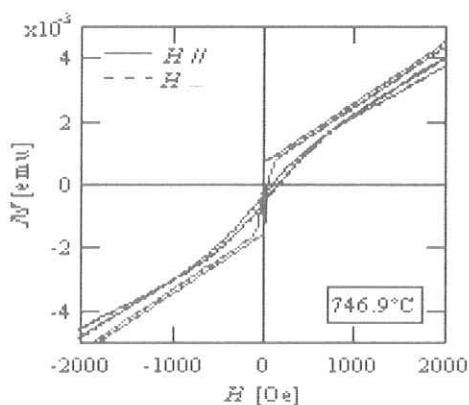


図1 746.9°Cで成膜した $(\text{Bi}, \text{Lu})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ 膜の磁化異方

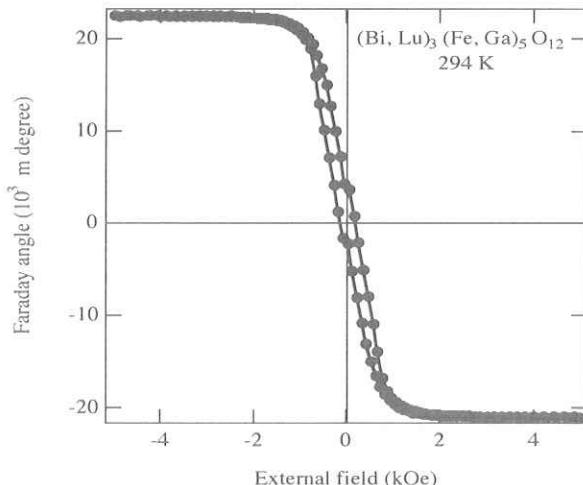


図2 光学的手法により求めたMO膜のヒステリシス特性

す。横軸は面内に印加した外部磁場で、縦軸はファラデー回転角を表す。磁化のデータを反映してヒステリシスを有し、光学的には2000 Oe程度で飽和することが分かった。

3 まとめ

この実験で明らかなように、Bi:Lu-Feガーネット膜は充分な面内異方性を有し、そのファラデー回転角は $1^\circ/\mu\text{m}$ を越える大きな値を示すことが分かり、MOインジケータ膜として実用に耐えうる膜であると結論できる。

3 波長光ディスク用波長板の設計

愛媛大学大学院理工学研究科准教授 市川 裕之

1. はじめに

本研究は、独立行政法人産業技術総合研究所が独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構から受託した「革新的部材産業創出プログラム／新産業創造高度部材基盤技術開発・省エネルギー技術開発プログラム 次世代光波制御材料・素子化技術」の再委託を受けて実施し、発表^{1,2)}を行ったものである。

2. 概要

光ディスクピックアップ系（図1）において四分の一波長板は不可欠な素子である。今後は、CD, DVD に加えて BD に対応する光ディスクシステムの普及が進むことは間違いない。そこで、1枚で 780, 650, 405 nm の3波長に対応するための波長板の設計法の検討を行った。

まず、この波長板の基本的な素子構造は矩形状表面凹凸を持つ1次元サブ波長格子である。ただし、高屈折率ガラスへのナノインプリントで作製することを想定しているため、完全な矩形構造を得ることは困難であり、現実の素子は、図2に示すように、角に曲率を持ち、壁の部分が傾斜した構造になるとして設計を行った。

素子の単位構造の寸法 d は入射光の波長より短いため、正確には電磁気学的な計算を行うべきだが、最適化の過程で多数回の計算を繰り返す必要上、図2のような微細な表面凹凸構造を多層膜として近似出来る有効屈折率法を採用して、近似的だが高速に計算出来る方法を試みた。ここでの設計自由度は、周期 d 、深さ、凸部の幅の3つであるため、少変数の最適化に威力を發揮するシンプレックス法を最適化アルゴリズムとして採用した。

様々な条件下での最適化の試行により得られた11種類の構造に対して、正確だが計算時間や計算機ハードウェアなどの制約の大きな電磁気学的な計算法による確認を行った。両者の結果には一部を除きほぼ一次の相関があるため、ここで提案した近似的だが高速な設計法を用いることで、広域探索を効果的に行うことが可能であることが示された。

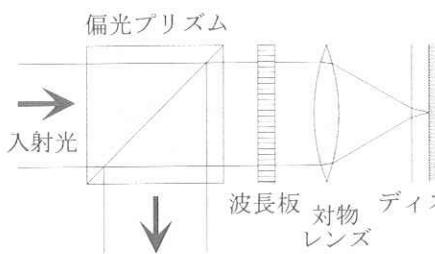


図1: 光ディスクピックアップの原理。

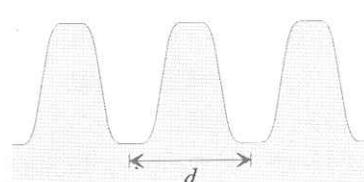


図2: 想定した素子構造。

文献

- 1) 市川, 住吉, 応用物理学関係連合講演会, 船橋 (2008.3.28).
- 2) Ichikawa, Sumiyoshi, European Optical Society Annual Meeting, Paris (2008.9.30).

家畜飼料用ダイオキシン類蓄積抑制添加剤の開発

愛媛大学農学部附属環境先端技術センター副センター長 本田 克久
独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 Keerthi S. Guruge

1. はじめに

ヒトに蓄積するダイオキシン類の摂取量の殆どは食品中に含まれるダイオキシン類由来であることがこれまでの調査結果から明らかになっている¹⁾。よって、ダイオキシン類によるヒトの健康リスクを低減させるためには、食品中のダイオキシン類量を低減させる必要があるといえる。

既報^{2,3)}では、炭素系材料を原料として作製したダイオキシン類蓄積抑制剤を用いて、養殖ブリに蓄積するダイオキシン類の低減技術の開発を目的とした実用化試験を行い、対照区に比較してダイオキシン類の蓄積が大幅に低減したブリ養殖に成功したことを報告した。その結果から、ダイオキシン類の殆んどを魚介類から摂取している日本人においてはダイオキシン類の体内蓄積量を低減することが可能であると考えられた。

一方、アメリカ・ヨーロッパなどの諸外国においては、肉製品、乳製品からのダイオキシン類の摂取量が魚介類に比べて相対的に多く^{4,5)}、魚介類以外にも、家畜や家禽中のダイオキシン類蓄積量を低減する必要があると考えられる。

そこで本研究では1999年にダイオキシン類による汚染が問題^{7,8,9)}となったニワトリに着目し、前述のラットやブリで試験したダイオキシン類の蓄積抑制剤を用いて、ニワトリにおけるダイオキシン類蓄積の低減効果と生体影響について検討を行った。

2. 試料と方法

本研究に用いたニワトリは、孵化直後のチャンキー種(*Gallus gallus*)の雄24検体を供試した。試験飼料は市販のブロイラー用飼料(日本農産工業株式会社)を、またダイオキシン類蓄積抑制剤は、炭素を原料としたフードセイバー[®](三浦工業株式会社)を用いた。ダイオキシン投与飼料の調整は、ダイオキシンの2,3,7,8-異性体について、4, 5 塩素体 11pg/g, 6, 7 塩素体 22pg/g, 8 塩素体 56pg/gとなるようPCDD/DFs 標準液(Wellington Laboratories Inc.)を市販飼料に添加して作製した。

試験区は、①ダイオキシン添加餌群、②ダイオキシン添加餌+フードセイバー添加(0.5% W/W)群とした。また蓄積抑制剤による生体影響を観察するために、③ダイオキシン未添加餌群、④ダイオキシン未添加餌+フードセイバー添加(0.5% W/W)群を設けた。飼育は、2006年8月9日から10月3日まで、茨城県つくば市の動物衛生研究所内の飼育施設で各系群ごとに飼育ケージを設置して行い、給餌・給水は自由とした。また、飼育期間内における各ニワトリの体重測定を定期的に行った。

飼育期間終了後、すべてのニワトリについて体重測定を行った後に、解剖を行った。ダイオキシン類の分析用試料として、筋肉、腹腔内脂肪、肝臓、腎臓の各組織を採取し、ポリエチレン製袋で分析時まで-20°Cで冷凍保存した。血漿については生化学的検査を、また一部検体の臓器・組織については組織病理学的診断を行った。ダイオキシン類分析は既報^{6,7)}に従って、アルカリ分解、多層シリカゲルカラム、活性炭分散シリカゲルによって精製した後、HRGC/HRMSにて測定を行った。

3. 結果と考察

3-1. ニワトリへの生体影響について

試験期間中における体重の変化をFig.1に、また試験終了後の血漿の生化学的検査の結果をTable1に示す。

すべてのニワトリにおいて蓄積抑制剤の添加群と未添加群との間で、飼育期間中の体重変動の有意

な差異は認められなかった(Fig.1)。また、臓器及び組織の病理学的診断を行った結果、異常と認められるものはなかった。しかし、血漿の生化学的検査結果では(Table1)、ダイオキシン添加飼料群(①と②)の中で見ると、蓄積抑制剤添加群(②)は蓄積抑制剤未添加群(①)に比べて、NEFA(遊離脂肪酸)濃度の有意な増加とTG(中性脂肪)濃度の有意な減少が認められた。同様な関係が、ダイオキシン未添加飼料群(③と④)における蓄積抑制剤の添加群③と未添加群④との間にも認められた。さらに、筋肉及び腹腔内の脂肪含量をみると(Table2)、蓄積抑制剤を添加した群(②と④)は腹腔内脂肪が未添加群(①と③)に比べて有意に低値を示した。

これらの結果は、蓄積抑制剤の添加が血漿中のNEFAとTG値に影響することを意味しており、蓄積抑制剤の添加によってニワトリ体内への脂肪吸収が一部抑制され、その中性脂肪の体内必要量を補うために、筋肉及び腹腔内の脂肪を放出し、血漿中の遊離脂肪酸が増加したものと推察される。とくに、この傾向はダイオキシンを添加したニワトリ(①, ②)において顕著であり、これはダイオキシン添加によって、ニワトリの脂肪の蓄積と代謝に何らかの変調が生じ、その変調を蓄積抑制剤を添加することによって、ダイオキシン未添加群と同程度にまで改善されたためであると考えられる。つまり、蓄積抑制剤の適量な添加は飼料からの脂肪吸収を抑え、体内脂肪量を減少させると共に、ダイオキシンによる脂質代謝への悪影響を抑制する作用をもつといえよう。

3-2. ダイオキシン類の蓄積抑制効果

ニワトリの飼育期間中におけるダイオキシンの全投与量を計算し、それに対するニワトリ体内のダイオキシン蓄積の割合をFig.2に示す。なお、ニワトリの体内蓄積量は、胸筋及び腹腔内脂肪の重量とダイオキシン濃度から計算した。

Fig.2から、蓄積抑制剤添加群における、ダイオキシンの蓄積率は極めて低く、蓄積抑制剤未添加群の蓄積率(約25%)に対して1%以下であった。つまり、このことは、炭素系材料が胃消化管内においてダイオキシンを吸着し、体外に排泄したためと言える。また、本結果を、これまでのラット及び養殖ブリの結果と比較すると(Fig.3)、蓄積抑制剤によるダイオキシンの排泄効果は、本研究のニワトリにおいて最も高く、ついでラット、養殖ブリの順であった。ニワトリにおいてダイオキシンの蓄積抑制効果が強く現われたのは、鶏が砂のうを有しているため、抑制剤とダイオキシンとの混合による接触効率が高く、ダイオキシンをより多く吸着したためと思われ、種の持つ固有の組織器官とその機能が蓄積抑制剤の効果に強く影響するといえよう。

ダイオキシン類の体内分布をFig.4に示す。一般にダイオキシンは脂肪組織に多く存在し、ついで肝にも比較的高濃度に蓄積されることが知られている。Fig.4における蓄積抑制剤を添加していないニワトリのダイオキシンの体内分布は、これまでの報告^{2,3)}と同様に、脂肪組織に最も多く存在し、ついで肝臓にも比較的多く蓄積していることを示す。しかし、蓄積抑制剤を添加したニワトリでは、未添加のものに比べて肝臓中のダイオキシン蓄積が大幅に低減した。このことは蓄積抑制剤が肝臓におけるダイオキシンの排泄を促進することを意味しており、肝におけるダイオキシンの毒性影響を抑えることができることを示している。また結果として、鶏肉を食するヒトへの健康リスクも低減できるといえよう。

【参考文献】

- 1) 環境省：平成14年度ダイオキシン類の蓄積・暴露状況及び臭素系ダイオキシン類の調査結果について。
- 2) 岩切良次 他：第14回環境化学討論会講演要旨集 174-175 (2005).
- 3) 岩切良次 他：第15回環境化学討論会講演要旨集 26-27 (2006).
- 4) G. Charneley et al. : Food and Chemical Toxicology 43, 671-679 (2005).
- 5) European Commission DG Environment (1999) : Compilation of EU Dioxin exposure and health data Task 4: Human exposure.
- 6) 岩切良次, 本田克久：環境化学 15, 83-90, (2005).

- 7) Van Larebeke N , et al . : Environ. Health Perspect 2001 ; 109 , 265.
- 8) Hoogenboom R et al . : Talanta 2004; 63: 1249.
- 9) EC(Enropean Conimission), 2002 : Directime 2002/32/EC of the Enropean Parliament and of the Council. Official J. Enr. Union L140.10.

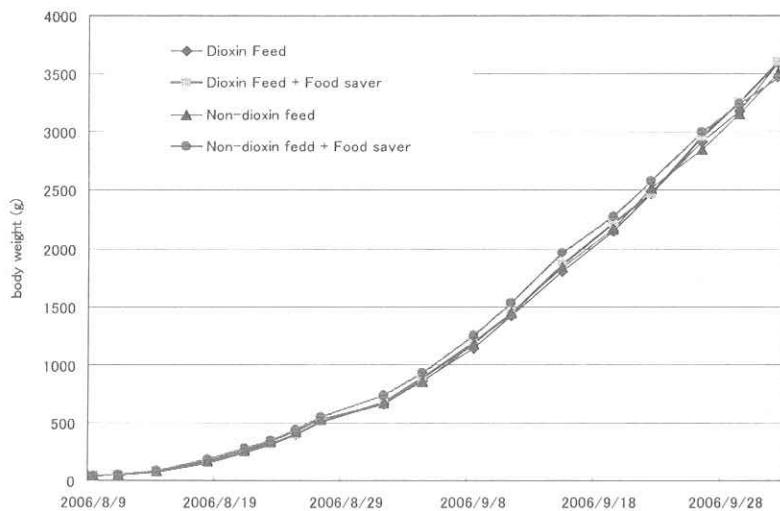


Fig.1 Grouth curve of the broiler chicken

Table 1 Results of biochemical examinations (Ave±SD) for serums of the broiler chicken

	AST (GOT) (IU/L)	ALT(GPT) (IU/L)	ALP (IU/L)	TP (g/dL)	Alb (g/dL)	Glob (g/dL)	BUN (mg/dL)	UA (mg/dL)
①	289±81	2.33±0.52	2620±300	2.88±0.25	1.58±0.068	1.31±0.20	1.35±0.29	3.98±0.91
②	284±66	2.17±0.41	2670±220	2.77±0.13	1.51±0.051	1.26±0.080	1.30±0.25	3.85±1.2
③	272±58	2.33±0.52	2480±630	2.90±0.39	1.55±0.11	1.35±0.32	1.22±0.075	5.10±2.2
④	324±72	2.67±0.82	2870±440	2.68±0.16	1.47±0.074	1.22±0.12	1.35±0.16	5.42±2.2
	NEFA (mEq/L)	TG (mg/dL)	PL (mg/dL)	T·Cho (mg/dL)	E·Cho (mg/dL)	HDL·Cho (mg/dL)	LDL·Cho (mg/dL)	Glu (mg/dL)
①	0.320±0.021	26.5±6.6	215±11	127±6.1	102±4.2	93.5±4.2	23.2±4.4	255±25
②	0.747±0.30*	18.5±3.4 *	208±14	122±8.0	96.2±6.1	90.6±6.4	22.8±4.1	229±30
③	0.502±0.18	22.5±7.7	212±17	124±8.3	99.5±7.7	90.0±7.0	21.2±4.7	236±19
④	0.721±0.13**	19.5±6.3**	237±14	137±9.4	110±7.5	98.9±8.6	26.7±4.1	222±15

①:Dioxin feed, ②:Dioxin feed + Food saver® ③:Non-dioxin feed ④:Non-dioxin feed + Food saver®

*: $p<0.05$ (vs. ①), **: $p<0.05$ (vs. ③) (Mann-Whitney U-test)

AST: Asparate amino transferase, ALT: Alanine amino transferase, ALP: Alkaline phosphatase, TP: Total protein, Alb: Albumin, Glob: Globulin,

BUN: Blood urea nitrogen, NEFA: Non-esterified fatty acid, TG: Triacylglycerol, PL: Phospholipid, T·Cho:Total Cholesterol, HDL Cho: High-density lipoprotein cholesterol, LDL Cho: Low-density lipoprotein cholesterol, Glu: Glucose, UA: Uric acid

Table 2 Fat contents in pectoral muscle and abdominal fat of the broiler chicken

	Abdominal Fat		Pectoral Muscle	
①	93.1	± 1.3	1.26	± 0.53
②	88.1	± 0.79*	1.11	± 0.39*
③	89.5	± 1.3	1.32	± 0.63
④	87.1	± 0.90**	1.02	± 0.37**

Ave±SD

*: $p<0.05$ (vs. ①), **: $p<0.05$ (vs. ③) (Mann-Whitney *U*-test)

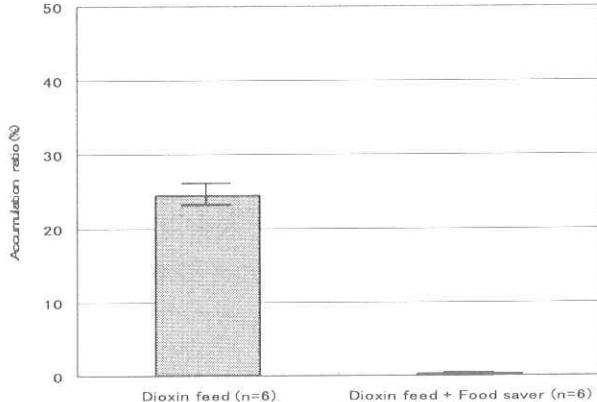


Fig.2 Accumulation ratios of dioxin feed group(①) and dioxin feed + food saver group(②).

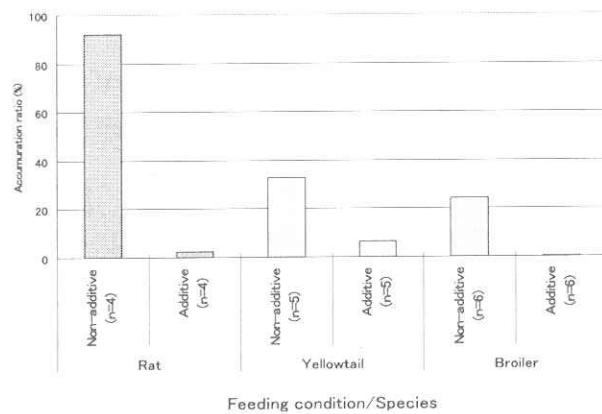


Fig.3 Comparison of PCDD/DFs accumulation ratios of rat, yellowtail and broiler chicken between the feed with/without food saver

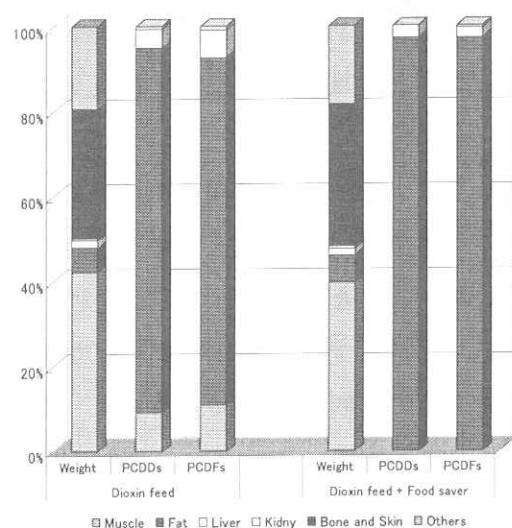


Fig.4 Percentages of tissue weights and PCDD/DFs burdens in broiler chicken (n=1)

食品加工残さから調整したペレットの特性

愛媛大学農学部准教授 枝 重 有 祐
新興工機株式会社 佐 野 善 徳
新興工機株式会社 田 所 研

1 緒言

現代の社会システムは石油を大量消費することで維持されているが、石油の枯渇に対する危機感の高まりから、石油に代替できる新エネルギーの開発と導入が急がれている¹⁾。また、石油の消費で大量に排出される廃棄物は環境負荷が大きいことから、新エネルギーには環境負荷の少ないことも求められる²⁾。新エネルギーには風力発電、太陽電池、水素エネルギーなどがあるが、未利用の有機資源であるバイオマス（農水産廃棄物、林産廃棄物や食品残さ等）も再生産可能で環境負荷の少ないエネルギー資源であるため、新エネルギーの一つに位置づけられている。近年、バイオマスの活用研究と実証試験が世界的に進められ、日本においてもバイオマスのガス化、液化、水素製造やガス化発電システム等の研究、開発と実証試験が進められている³⁾。バイオマスは潜在的には世界の一次エネルギーの7~8倍相当の量があると言われるが、分布が疎らで種類が多い上に含水率の高い資源が多く、輸送、乾燥やエネルギー変換のコストを考慮すると、有効なエネルギーとして活用できる資源量は大幅に限定される⁴⁾。バイオマスを新エネルギーとして活用するには輸送、乾燥や変換のコストを削減することが必要である。

バイオマスの多くは農山村地域で生産されるが、食品廃棄物系のバイオマスについては都市とその周辺部で入手可能である。食品廃棄物には生ゴミ（一般家庭の生ゴミと事業系一般廃棄物の厨芥類）と食品関連事業者からの排出物（本報告の食品加工残さに相当。産業廃棄物）があり、その総量は年間1,800トン強に達する⁵⁾。その約8割は焼却・埋立て処分するしかない一般家庭の生ゴミや事業系一般廃棄物であり、有効活用は難しい。食品加工事業者から排出される廃棄物（食品加工残さ：おから、醤油カス、果実の搾汁カスやケールカス等が含まれる）は比較的均質であり、不要部（金属等）を分別するとコンポスト（肥料や土壤改良材）や家畜飼料の原料となる。2001年に施行された「食品循環資源の再利用等の促進に関する法律（食品リサイクル法）」は食品廃棄物の発生抑制と、製造・流通の過程で発生する事業系の食品廃棄物のうち有用なものの再利用を促進することを目的としていた⁶⁾。しかし、食品加工残さの多くは含水率が高いため腐敗し易く、肥料、土壤改良材や飼料に加工するには原料の選別や品質管理の徹底が必要となる。また加工品の需要先の確保が難しく、特に肥料等の用途では食品加工残さの循環利用を促進するには限界がある。そのため、原料選別や品質管理の容易な食品加工残さの変換法としてバイオガス化が注目され、いくつかのプラントメーカーが参入している⁵⁾。バイオガス化は、食品加工残さを発酵させて燃料用メタンガスを取得する技術で、原料の厳密な分別を必要とせず、小口の排出者も利用できるため、有力なエネルギー変換法として位置づ

けられた。しかし、バイオガスプラントの設備の導入には多額の資金が必要で、食品加工残さの有力な活用法として普及するには至っていない。この状況を打破するため、2007年に「食品リサイクル法」の改正案が提出された⁷⁾。この改正案では食品加工残さの性状や地域の事情で従来の活用法の実施が難しい場合、食品廃棄物から熱回収することが認められた。しかし、貴重なバイオマスである食品加工残さが安易に焼却されることを防止するため、熱回収の認可には一定水準以上の熱効率が要求される。一般的な食品加工残さは含水率が80%以上で、何らかの方法で乾燥と加工を行わないと高い熱効率は望めない。また、食品加工業者には小規模な事業者が多く、バイオガスプラントのような大きな設備投資を必要としない技術が求められる。

木質ペレットは廃材や間伐材を粉碎後、ペレット（直径0.5～1.0cm、長さ1.0～3.0cm）に熱圧成形するもので、主に燃料として利用される。ペレットとすることで輸送や取り扱いが容易になり、圧縮されているため、発熱量も向上する⁸⁾。さらに、木質ペレットの製造装置（ペレタイザー）はバイオガスプラントよりも安価で、小型トラックで運搬でき、製造されたペレットはボイラーやストーブで燃焼できるため、小規模な事業所の利用に適する。食品加工残さも適切な含水率まで乾燥、粉碎後、ペレタイザーでペレットに成形できれば、発熱量の高い燃料に加工できるだけでなく、保存性も向上させることができる。保存性の向上は食品加工残さの利用の際に問題となる腐敗を抑制できることを意味し、燃料以外の用途開発も容易にする可能性がある。これまでに食品加工残さをペレット化し、燃料としての特性を調べた研究はないため、高い熱効率が得られるか検討する必要がある。

この報告では、主要な食品加工残さを市販のペレタイザーを使ってペレット化し、それらの発熱量等を含む性質について述べる。

2 実験

2. 1 試料

スギ木紗は（有）マルヨシ（愛媛県八幡浜市）から入手した。バガスは、ブラジルでのサトウキビからのバイオエタノール製造の過程で生じた残さで、（株）白馬産業（高知県高知市）を通じて入手した。おからは（株）マルミ（徳島県鳴門市里浦町）から、醤油カスは（株）村要本店（愛媛県松山市祓川）から、食パン残さは（株）四国シキシマパン（愛媛県伊予郡砥部町）から、柑橘搾汁カスは（株）えひめ飲料（愛媛県松山市安城寺町）から供与されたものを用いた。

2. 2 ペレット製造

ペレット製造には（株）新興工機（愛媛県松前町）製ペレタイザーTS-450を用いた。試料を（株）マルミ（前述）製乾燥機で含水率約15%まで熱風乾燥後、ペレタイザーに所定量の試料を入れ、ペレットに成形した。ペレタイザーはインバーター制御により50Hz（ローラー回転は約

63回/分)で運転された。得られたペレットは、乾燥後、ファスナー付きポリエチレン袋に入れて密封保存した。

2. 3 密度測定

密度(g/cm³)は各ペレットの全乾重量を体積で割って求めた。体積はペレタイザーのダイスの孔の直径が7mmであるため、ペレットの直径を7mmとし、ノギスで測定した各ペレットの長さを乗じて体積を算出した。各試料について5個のペレットの密度を測定し、平均値を該当試料の密度とした。

2. 4 元素組成

元素組成{炭素(C)、水素(H)、窒素(N)、イオウ(S)}の測定は、産業技術総合研究所バイオマス研究センター(広島県呉市)に依頼した。測定元素以外は全て酸素(O)とした。各試料について3~5個のペレットについて測定を行い、平均値を元素組成とした。

2. 5 発熱量測定

発熱量はカロリーメーターC7000(IKA社製)を用いて測定した。各試料について5個のペレットの発熱量を測定し、平均した。ペレットは全乾とし、高位発熱量を求めた。発熱量測定の際に残存する灰の重量から灰分量を算出し、平均して当該試料の灰分量とした。

3 結果と考察

バイオマスの熱回収を行う場合、その元素組成が発熱量や燃焼ガスの組成に影響する。一般に、炭素含量が高く、酸素含量が低いと発熱量が大きくなる⁹⁾。試料の元素組成を表1に示す。食品加工残さにはタンパク質が含まれているため、1.4%~9.2%のNが検出された。特にタンパク質の多い大豆から得られる醤油カスやおからのN含量は高く、それぞれ9.2%、4.6%であった。一方、O含量はそれぞれ、34.0%、37.8%と低かった。タンパク質中の窒素含量は約16%であることを考慮すると、醤油カスは約半分が、おからは約1/4がタンパク質と推定される¹⁰⁾。バガスや柑橘搾汁カスはO含量がともに51.0%でスギ木紛(44.2%)よりも高い。

これは、リグニンが少なく、多糖類が多いことが原因である。従って、バガスや柑橘搾汁カスのペレットは、スギ木紛のペレットよりも発熱量が低くなると予想される。

次に、食品加工残さからペレットを調製し、ペレットの密度と高位発熱量を調べた(表2)。表2には元素分析の際に得られる灰分量も記載した。食品加工残さのペレットの密度は0.89~1.21g/cm³で、スギ木紛のペレット(1.23g/cm³)の密度よりも低くなった。食品加工残さのペレットの密度が低い原因として、ペレット製造時に調整した含水率(約15%)が適切でなかったことやペレタイザーの製造条件が木質ペレット製造用に設定され、食品加工残さのペレット

表1. ペレット原料の元素組成

試料	元素組成(wt%)				
	C	H	O	N	S
スギ木紛	49.4	6.3	44.2	0.0	0.1
バガス	42.0	5.6	51.0	1.4	0.0
食パン残さ	46.6	2.1	44.2	2.1	0.2
醤油カス	49.8	6.3	34.0	9.2	0.6
おから	50.6	6.8	37.8	4.6	0.2
柑橘搾汁カス	44.0	5.6	51.0	1.4	0.0

表2. 食品加工残さから調製したペレットの性質

ペレット原料	密度 (g/cm ³)	灰分 (%)	発熱量*
バガス	1.19	5.2	18.9
食パン残さ	1.15	0.4	19.6
醤油かす	1.18	5.2	22.2
おから	0.89	2.9	21.9
柑橘搾汁カス	1.21	4.4	17.2
柑橘搾汁カス：おから (5:5)	1.25	3.2	19.4
スギ木紛	1.23	0.2	20.3
スギ木紛：おから (9:1)	1.27	0.6	20.0
スギ木紛：おから (8:2)	1.27	0.8	20.4
スギ木紛：おから (5:5)	1.27	1.0	21.5
スギ木紛：おから (3:7)	1.23	1.5	21.6
スギ木紛：柑橘搾汁カス (9:1)	1.25	0.7	20.4
スギ木紛：柑橘搾汁カス (8:2)	1.32	0.6	20.2
スギ木紛：柑橘搾汁カス (5:5)	1.32	1.9	19.8
スギ木紛：柑橘搾汁カス (3:7)	1.37	2.8	18.8

注) *高位発熱量(全乾基準)

スギ木紛とおからまたは柑橘搾汁カスの混合は重量比で実施

化に適していなかったと考えられる。スギ木紛(発熱量: 20.3 kJ/g)と比べてCが少なくOの多いバガスや柑橘搾汁カスは発熱量がやや低く、それぞれ18.9 kJ/g、17.2 kJ/gであった。タンパク質の多い醤油カスやおからの発熱量はそれぞれ22.2 kJ/g、21.9 kJ/gでスギ木紛よりも高くなかった。タンパク質(C含量: 53%)は木材よりも炭素含量が若干多く⁹⁾、このことが発熱量を高くした原因と思われる。従って、タンパク質を含む食品加工残さからも発熱量の高いペレットが作成可能と言える。しかし、食品加工残さのペレットからは0.4~5.2%の灰分が生じ、スギ木紛(0.2%)より多い。特にバガスと醤油カスからの灰分の発生が多く、ともに灰分量が5.2%になった。バガスはシリカ含量が多く¹¹⁾、醤油カスには塩分が残存していること¹²⁾が灰分量を多くした原因である。燃焼時に多量の灰が生ずるとボイラの保守コストが増大するため、燃焼灰の発生を抑制する必要がある。そこで、食品加工残さと灰分の少ない木材を混合し、ペレット化することを試みた。試料にはスギ木紛とおからまたは柑橘搾汁カスを使用し、木紛と食品加工残さの混合割合を9:1~3:7としてペレットに成形し、密度、灰分量と発熱量を調べた(表2)。スギ木紛とおからを混合して作成したペレットの密度は1.23~1.27 g/cm³で、おからの添加による密度の低下は認められなかった。ペレタイザーは木粉を加熱することなく圧縮成形を行うが、ダイス中では150°C、1.5 MPa相当の熱圧がかかり木紛が可塑化しペレットに成形される¹²⁾。今回使用したペレタイザーは木紛のペレット化に最適化されており、木紛の混合割合が多い場合はおからの添加の影響が少なかったことが原因と思われる。おからを70%添加すると密度が1.23 g/cm³に減少していることがそのことを示唆している。スギ木紛と柑橘搾汁カスを混合してペレット化すると1.25~1.37 g/cm³と密度が高くなった{同様の現象が、おからと柑橘搾汁カスを1:1で混合した場合にも見られ、密度が1.25 g/cm³まで上昇した(表2)}。柑橘搾汁カスが木粉の接着に寄与している可能性があるが、このことに関してはさらなる検討を要する。これらのこととは、おからや柑橘搾汁カスを木粉に混合しても容易にペレット

に成形できることを示している。おからはスギ木紗よりも高い発熱量をもつため、おからの混合割合を増やすと発熱量は 20.0 kJ/g から 21.6 kJ/g に向上した。一方、柑橘搾汁カスはスギ木紗よりも発熱量が低いため、その混合割合を増やすと発熱量は 20.4 kJ/g から 18.8 kJ/g に低下した。発熱量の低下は好ましくないため、柑橘搾汁カスについては混合割合を低くすべきである。灰分の多い食品加工残さを過剰に添加すると木紗と混合しても燃焼後の灰は多くなり、おからでは灰分が 0.6% から 1.5% まで、柑橘搾汁カスでは灰分が 0.7% から 2.8% まで増大した。燃焼灰の発生とボイラーの保守コストの関係についてはボイラーを使った燃焼試験を行って検討する必要があるが、通常の木材の灰分が 1% 以下である¹³⁾ことを考慮すると、スギ木紗と混合する場合、おからでは 50% 以下、柑橘搾汁カスについては、発熱量の低下を抑制する必要もあり、20~30% 以下の混合割合にすべきである。

4 結言

改正された「食品リサイクル法」で食品廃棄物の熱回収が認められたため、食品加工残さ（バガス、食パン残さ、醤油カス、おから、柑橘搾汁カス）を保存と運搬が容易で、高発熱量の燃料に変換できるペレットとし、その燃料としての諸性質を調べた。今回用いた食品加工残さは乾燥、粉碎すると、ペレタイザーでペレットに加工できたが、そのペレットの発熱量は木質ペレットと比較すると同等もしくはやや低く、灰分が多くなった。発熱量を維持し、灰分量を削減するには、木材と混合してペレットとすることが有効だが、各食品加工残さについて適切な混合割合を決める必要がある。また、食品加工残さをペレット化すると保存や運搬の効率が大幅に改善するため、燃料以外の利用、例えば、飼料、土地改良材や食品素材としての再利用も容易になると思われる。

謝辞

本研究は、四国産業政策局“平成 18 年度バイオマス等未活用エネルギー実証試験補助金（バイオマス等未活用エネルギー調査）”の支援を受けた。

文献

- 1) 資源エネルギー庁 (2002): 平成 18 年度エネルギーに関する年次報告
- 2) 厨川道雄 (2002): 新エネルギー大辞典, 茅陽一監修、工業調査会, pp. 3-60
- 3) 小木知子 (2007): バイオマス, 日本エネルギー学会誌, 86(8), 609-611
- 4) 小木知子 (2002): バイオマスの定義と分類, バイオマスハンドブック, 日本エネルギー学会編, オーム社, pp. 2-6
- 5) 竹ヶ原啓介 (2002): 食品リサイクルとバイオマス, 調査 (日本政策投資銀行), vol. 48
- 6) 食品循環資源の再利用等の促進に関する法律 (食品リサイクル法) : 平成 12 年度法律第 116

号

- 7) 環境省：報道発表資料（平成 19 年 3 月 1 日）
- 8) 大場龍夫（2002）：木質ペレット、バイオマスハンドブック、日本エネルギー学会編、オーム社、pp. 224-228
- 9) 小木知子（2002）：バイオマスのエネルギー含有量、バイオマスハンドブック、日本エネルギー学会編、オーム社、pp. 16-19
- 10) 菅原潔、副島正美（1990）：タンパク質の定量法第 3 版、生物化学実験法 7、学会出版センター、pp. 1-8
- 11) K. Umamaheawaran, Vidra S. Batra (2007): Physico-chemical characterization of Indian biomass ashes, Fuel, under printing.
- 12) 山内文男：大豆の発酵食品、大豆の科学、山内文男、大久保一良編、朝倉書店、pp. 92-103
- 13) 佐々木寛人、枝重有祐（2007）：木質ペレットの製造条件を検討するための簡易ペレット調製法の開発. 森林バイオマス利用学会誌 2(1), 17-21
- 14) 森林総合研究所（2004）：木材工業ハンドブック、丸善、pp. 139

河川・海洋堆積物中からのフミン酸抽出物代謝菌の探索

愛媛大学農学部4回生

乾 祥子

愛媛大学沿岸環境科学研究センター教授

鈴木 聰

東京海洋大学海洋科学部教授

今田 千秋

高知大学海洋コア研究センター教授

安田 尚登

要旨

近年、日本の湖沼などで、難分解性溶存有機物が分解されずに蓄積され、水質汚濁の原因のひとつとして問題となっている。フミン物質は難分解性の溶存有機物の代表的なものであり、フミン酸(HA)とフルボ酸に分けられる。本研究では、微生物を使った環境改善の技術開発の一環として、フミン酸の成分を代謝・分解する菌を、海洋・河川の堆積物中から探索した。

まず、HA抽出物分解のアッセイ法を検討した。HAは、分子量1000以下から数十万以上までの混合物の総称であり、その構造には芳香環や脂肪族鎖を骨格に多数の二重結合を含んでいる。このことに着目して、本研究では芳香族二重結合保有分子を標的として、蛍光分光光度計を用いた定量法を考案した。

市販のHAを抽出溶媒(1%DMSOを含むリン酸緩衝液PBS)に入れ、25°C暗条件で24時間静置後、遠心分離し、上澄み中に溶け出したHA抽出物を実験に用いることにした。そのHA抽出溶液40mlに6つの海洋・河川底泥サンプル(日本海(4検体)・東シナ海・メコン川)を約1gずつ入れ、3週間25°C暗条件で培養し、その間の蛍光値の変化を測定した。その結果、日本海・東シナ海試料において、蛍光値の減少が確認された。芳香族二重結合の減少は、¹H-NMRでも確認された。一方、これらの試料から単離した菌で同様の実験をしたところ、蛍光値を減少させるものは得られなかった。以上のことから、難培養性の菌または群集の総体として活性を持つことが示唆された。

1.はじめに

1900年代後半、日本の湖沼などでは水質汚濁の問題が指摘されるようになり、それ以降改善にむけて流入源の対策が行なわれ始めた。それにもかかわらず、ここ20年以上の調査より、有機物のうち微生物が利用できる易分解性の有機物量(BOD)が低減傾向にあるのに対し、有機物の全量(COD)は増加していることが分かっている(国立環境研究所の調べ / URL:
<http://www.nies.go.jp/index-j.html>)。また、湖沼の有機物のほとんどは溶存態である¹⁾。つまり、湖沼の水質汚濁は、難分解性で溶存態の有機物の蓄積が原因であろうと指摘される。

その難分解性溶存有機物の代表的なものに、天然水中の溶存有機物の50~80%を占めると言われるフミン物質がある²⁾。フミン物質は、動植物の遺体が微生物による複雑な分解・重合を繰り返して生成した不均質な有機化合物の総称である。

フミン物質を構成する成分は様々であるが、一成分として、フミン酸(HA)が知られている。HAはフミン物質をアルカリ性水溶液に溶かせば可溶、かつ酸性溶液に不溶な酸性区分の総称である。HAの構造の解析は、元素分析に基づく平均分子量、官能基の種類と量の照合、部分構造の組み合わせなどで仮想的な構造が推定されており、Stevenson³⁾は図1に示すHAの構造モデルを提案している。HAの分子量は1000以下から数十万以上まで様々であり、芳香環や脂肪族鎖を含み、多数の二重結合を含んでいる。

HA の工学的分解法については、これまで、オゾンによる酸化⁴⁾、不均一光触媒⁵⁾、光化学⁶⁾、電気化学⁷⁾、光電気触媒処理⁸⁾など様々な方法が報告されており、微生物による分解についても陸上の土壤由来の微生物については研究されている¹⁾が、水圏由来の微生物による HA 分解の研究についてはまだ報告されていない。微生物の持つ様々な環境汚染物質の分解性を使った環境問題改善が近年盛んになってきていることから、HA に対しても分解・代謝の能力を発揮する微生物の探索と利用は大いに期待できると考えられる。

そこで、難分解性溶存有機物による水質汚濁の問題に対して、微生物を使った新たな環境改善の技術開発をめざし、本研究では HA の成分を代謝・分解する菌を海洋・河川の堆積物中から見つけだすことを目的とした。

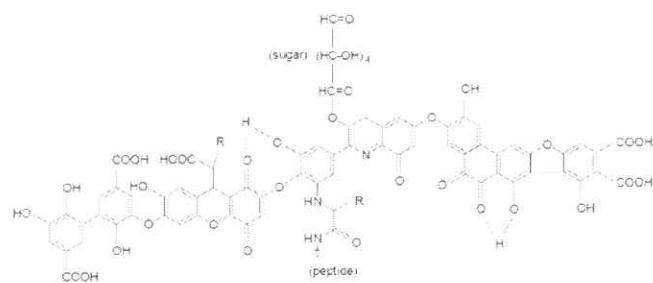


図 1. フミン酸の構造モデル
(Stevenson, 1982)

2. 材料と方法

2.1 サンプル

本研究では海洋と河川の堆積物サンプルを用いた。海洋堆積物サンプリングは 2006 年 9 月に東シナ海ならびに 2006 年 8 月と 2007 年 7 月に日本海で行なわれた。河川堆積物サンプリングは 2003 年 9 月にベトナムのメコン川にて行われた。サンプリング地点および各地点の状況については表 1 にまとめる。

表 1. サンプリング地点および状況データ (nd, not done)

地域別	サンプル ID	採取日	緯度・経度	水深(m)	水温(°C)	堆積物温(°C)	堆積物 pH	
A (日本海)	ST1	2007.7.21	N35°12' 6.00"	E131°59' 6.00"	139	23.1	13	7.40
	ST2	2007.7.22	N36°30' 1.09"	E134°30' 0.03"	1340.2	23.0	5.2	7.54
	ST3	2007.7.22	N36°47' 6.32"	E135°01' 4.22"	1778.4	22.6	3.9	8.73
	ST4	2007.7.23	N36°40' 0.52"	E135°17' 0.48"	640	22.3	5	7.25
	SKT	2006.8.7	N42°59' 8.01"	E140°06' 3.23"	775	22.0	13.9	7.33
	HSN	2006.9.15	N31°56' 1.34"	E128°12' 3.37"	340	nd	nd	8.06
C (メコン川)	CC-7	2003.9.10	N10°01' 16.0"	E105°46' 25.1"	nd	28.1	nd	nd

低水温の海底では、暖水温の海底に比べて分解能が低いため、難分解性の物質がより多く蓄積されていると言われている⁹⁾。また、沿岸には外洋よりも有機物が蓄積されやすいため、本研究で目的の菌が得られる可能性が高い。それらのことを踏まえ、本研究の当初の予定では、石狩湾・富山沖で採泥することを予定していたが、航海上の都合により当初予定とは異なる地点である SKT (積丹半島西)・ST1~4 (日本海鳥取沖) でのサンプリングとなった。東シナ海は、温暖域として設定した。東シナ海は、環境汚染物質を含む長江からの水や黄砂の影響を受ける地帯であり、汚染物質に対する分解・代謝能を持つ菌の存在も考えられるため、HA に対しても共代謝・交差分解能力を期待した。メコン川堆積物サンプルを使用した理由は、メコン

川が東南アジア最大の国際河川であり人為起源の有機物に富んでいることから、多様な化学物質に対する分解・代謝能力をもつ菌を期待したためである。メコン川堆積物中の化学汚染物質分解菌については研究例もある¹⁰⁾。

2.2 実験方法

2.2-1 HA 抽出法

20 $\mu\text{g}/\text{ml}$ フミン酸(HA)(Wako, Japan)を、1 %ジメチルスルホキシド(DMSO)(Wako, Japan)を含むPBS(1.47 mM KH₂PO₄, 8.1 mM Na₂HPO₄·12H₂O, 2.68 mM KCl, 137 mM NaCl, pH 7.4)に溶かし、スターラーでよく混合し、暗所25°Cで48時間静置して可溶性の物質を溶液中に抽出し、3000×g, 25°C, 6分間、遠心分離して上澄みを回収した。ここで、スタートのHA抽出物中の二重結合をもつ物質の量を一定にするため、蛍光値を約3100に合わせることとし、その後、最終濃度0.01%でグルコース(Wako, Japan)を添加し、孔径0.22 μm のMILLEX-GSフィルター(Millipore, USA)で除菌して、50 mlポリプロピレンコニカルチューブ(コニカルチューブ)(Becton Dickinson Labware, USA)に40 ml入れた。

2.2-2 培養

光によるHA抽出物中の蛍光値上昇を防ぐため、培養は暗条件で行ない、25°Cで静置した。1日に1回程度の頻度で、ゆるやかに懸濁した。

2.2-3 HA 抽出物の濃度測定

HA抽出物の濃度は、F-2500 Fluorescence Spectrophotometer(蛍光分光光度計)(日立ハイテク, Japan)を用いて、自家蛍光値を測定した。これはHA抽出物中の芳香環や脂肪族鎖の二重結合に起因する自家蛍光を利用した方法であり、種々の波長を検討した結果、励起波長270 nm、蛍光波長405 nmにおける蛍光値が、HA抽出物の濃度に依存して変化することを確認した。

測定前に、サンプルを遠心分離し(3000×g, 25°C, 6分)，上澄みから3 mlを回収して測定した。また、蛍光分光光度計による測定では、蛍光値が温度の影響を受けるため、回収した上澄みを20°C一定の条件下で測定した。測定は1サンプルにつき3回ずつ行ない、底泥サンプルの入っていないプランクの蛍光値を、各底泥サンプルの蛍光値から差し引いた。

この蛍光値測定を、底泥サンプルを入れたもの、単離細菌株を入れたもの、複数の単離株を組み合わせて入れたものについて行なった。

底泥サンプルでの実験では、約1 gのサンプルをHA抽出物入り溶液40 mlに添加、懸濁させた。測定は0, 3, 7, 11, 14, 21日目に行なった。

次に、底泥サンプルの測定実験において、0日目と比較して蛍光値の減少したサンプル(*t*検定, P < 0.05)から菌を単離し、単離株で同様の測定を行うことにより、HA抽出物を分解・代謝する菌を特定しようと試みた。蛍光値が下がったサンプルの懸濁液から100 μl をHA抽出物入りで作製したBacto™ Agar培地(Agar培地)(Becton, Dickinson and Company, USA)に接種し、暗所25°Cで培養を行なった。Agar培地作製では、オートクレーブ後の培地に対しHA抽出物を最終的に蛍光値が約3100となるように添加した。HA抽出物は終濃度0.01%のグルコースを加えて孔径0.22 μm のフィルターで滅菌したものを用いた。

コロニーとして得られた単離株を、それぞれ白金耳で5 mlの1/10濃度のMarine Broth 2216培地(1/10 MB培地)(Difco, USA)に植えついで25°C暗所で培養した。ここで、MBは、人工海水(ASW)(1 LのDW中に10.68 g MgCl₂·6H₂O, 5.32 g MgSO₄·7H₂O, 30 g NaCl, 0.7 g KCl, 1.26 g CaSO₄·2H₂O)で塩濃度を調整した。菌を接種後、DU 640 Spectrophotometer(分光光度計)(Beckman Coulter, USA)でOD₆₀₀値が0.1となったところで、そこから100 μl を、底泥サンプルを入れた場合と同様のHA抽出物入り培地に入れ、0, 3, 6, 10, 14日目に蛍光値を測定した。経時的に測定したところ、3日目で蛍光値が減少したので、以降測

定値は 0 および 3 日目のものを採用した。さらに、単離株を複数加えて同様の実験を行なった。SKT 地点の単離株については、単離できた 10 株全てをそれぞれ 1/10 MB 培地で OD₆₀₀ 値 0.1 になるまで暗所 25°C で培養した後、10 μ l ずつ全部で 100 μ l を、HA 抽出物入りの培地に添加して、0, 3, 6, 7, 11, 15 日目に蛍光値測定を行った。

2.2-4 ¹H-NMR による分析

¹H-NMR により、HA 抽出物中の芳香族二重結合の解離を確認した。底泥サンプルを入れないコントロール、蛍光値の上がったサンプルおよび蛍光値の下がったサンプルの 3 種を ¹H-NMR に供試した。サンプルはそれぞれ遠心分離 (3000 \times g, 25°C, 6 分) し、上澄みを約 15 ml 回収して、フィルター (孔径 0.45 μ m) で懸濁物を除去後コニカルチューブに入れた。それを -80°C で凍結させ、凍結乾燥機 (LABCONCO, USA) で凍結乾燥させた後、得られたサンプルの全量 (100~140 mg) を愛媛大学総合研究支援センターへ ¹H-NMR 測定を依頼した。また、測定時には全量のうち約 4~5 mg を、テトラメチルシラン (内部標準) 入りの DMSO+0.05% TMS の溶媒に溶かし、測定した。

3. 結果

3.1 測定法の検討

HA 20 μ g/ml を 1%DMSO 入りの PBS に溶かして 2 日間静置した後、遠心分離した後の上澄み (HA 抽出物) を蛍光分光光度計によって、励起波長 270 nm で励起させたときの蛍光スペクトルは、HA 抽出物の濃度が上がるに従って高くなつた (図 2)。また、その中で蛍光波長 405 nm における蛍光値が、HA 抽出物の濃度に対応して変化することが確認できた (図 3)。この

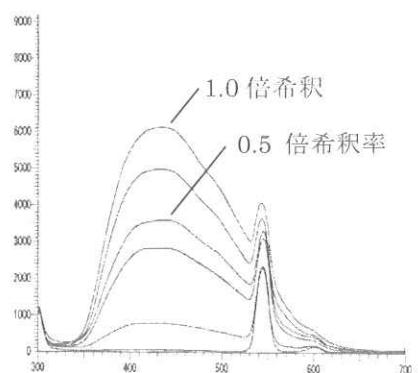


図 2. HA 抽出物の蛍光スペクトル
X 軸、蛍光波長 (nm) ; Y 軸、蛍光値

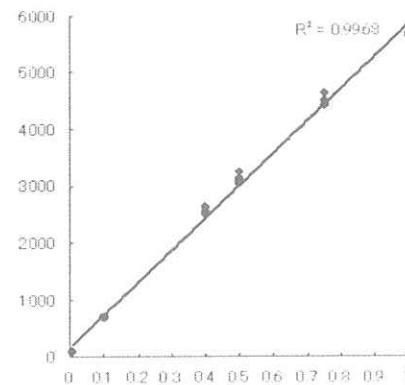


図 3. HA 抽出物濃度と蛍光値の相関
X 軸、抽出物希釀率 ; Y 軸、蛍光値

ことから、本研究では HA 抽出物中の芳香族二重結合を持つ物質の濃度を、蛍光分光光度計で励起波長 270 nm, 蛍光波長 405 nm で測定することとした。

また、蛍光値 (励起波長 270 nm, 蛍光波長 405 nm) は、0.01% グルコースおよび 1/10 MB 100 μ l を入れても、ほとんど影響がないことを確認した。

3.2 底泥入りサンプルの蛍光値変化

測定はトリプリケートで行ない、各サンプル 0 日目の蛍光値より、SKT サンプル 3 つ全てで約 -360~-480, HSN サンプルのうち 2 つで約 -120~-200, ST3 と ST4 サンプルから 2 つずつ約 -60~-130 の減少が有意に見られた (*t* 検定, P < 0.05) (図 4, 矢印 a)。このことから、SKT で最も大きい蛍光値減少の活性があることが分かった。しかし、それ以外のサンプルでは、蛍光値増加の活性を示し、特にメコン川サンプル (CC-7) では、0 日目よりも蛍光値が約 210~1000 増加した。

3.3 単離株の蛍光値変化

底泥入りサンプルの実験で蛍光値が減少したものについて、細菌を分離し、単離株で同様の

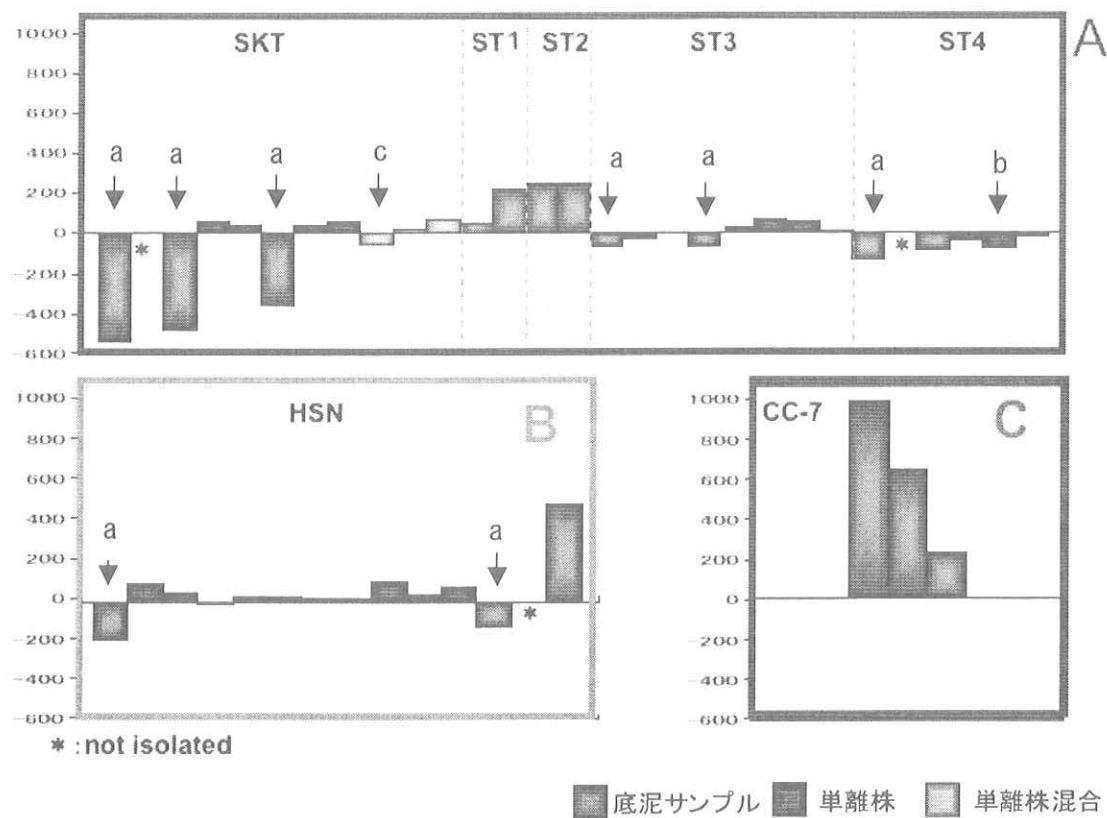


図4. 底泥サンプルおよび単離株のHA抽出物中培養後の蛍光値変化

実験を行なった。ST4からの単離株のうち1株は0日目から-70(底泥サンプルの場合の約90%)の減少が見られたが(図4, 矢印b),それ以外の単離株はほとんどが蛍光値を増加させた。若干減少したものもあったが、底泥サンプルの場合の7~40%ほどの変化であった。結果は図4に示す。

3.4 単離株を混合した場合の蛍光値変化

単離株同士を再び混合させることで、どう変化するのかを調べた。SKT単離株10株全てを混合してトリプレリケートで測定を行なったもののうち、1つだけが6日目に減少が見られた(図4, 矢印c)。0日目から約-50(底泥サンプルの場合の10~15%)の低減であったが、この値は底泥入りサンプルの実験のときに比べ減少は少なかった。

3.5 ¹H-NMR分析による確認

蛍光値の上昇した日本海(SKT)サンプルについて分析を行なったところ、6~9.5 ppm付近の芳香族物質由来ピークをTMSを基準とした積分値の相対値で比較すると、その値はコントロールの場合よりも小さくなっていた(図5)。また0~2 ppm付近でコントロールには見られない小さな波形が確認できたことから、芳香族物質が分解され小さな物質に変化したと考えられた。蛍光値の増加したメコン川(CC-7)サンプルについても分析をおこなったが、コントロールに比べ波形が非常にシンプルになった(data not shown)。

4. 考察

本研究では、海洋河川中のフミン酸抽出物代謝菌の探索を目的とし、フミン酸の芳香環二重

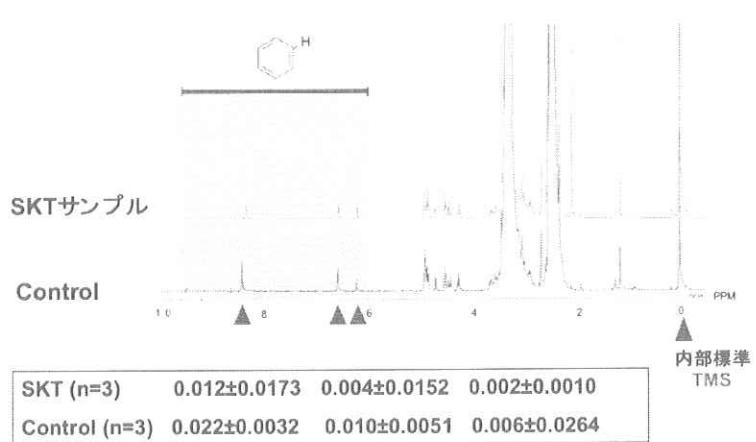


図5. SKT サンプルの ^1H -NMR プロフィール

のときに蛍光波長を変化させると、蛍光波長 405 nm において蛍光値と、フミン酸抽出物量との関係が $R^2 = 0.9968$ と高い相関関係にあった。このことから、本研究では励起波長 270 nm、蛍光波長 405 nm の蛍光値を用いて、フミン酸抽出物濃度の測定を行なった。

サンプリングは、日本海 5 地点、東シナ海 1 地点、ベトナムメコン川 1 地点にて行なった。難分解性有機物は寒水温域または沿岸で蓄積されやすいと言われており⁹⁾、日本海は寒水温域に属する地域であることから、日本海沿岸には陸生フミン物質の蓄積と、それを基質とする細菌の存在が期待される。また、東シナ海は中国からの環境汚染物質や黄砂の影響をうける海域であり、メコン川は人為的有機物に非常に富んでいる。これらの地点では、それぞれに対して分解能をもつ菌がフミン酸に対しても分解能を示すのではないかと考えた。

底泥サンプルでは、日本海サンプルのうち積丹沖のサンプル（SKT）で蛍光値が減少した。滅菌した底泥ではこの減少が見られないことから、これは微生物反応と考えられた。その他の日本海サンプルのうち ST1, ST2 では蛍光値が 200 度増加し、ST3, ST4 では減少が見られた。しかし、これらの変化はわずかであり、SKT とは異なっていた。メコン川サンプルでは、蛍光値は増加した。しかし、滅菌した泥においても同様の結果が得られたため、この増加は微生物以外の物に起因する化学反応によると考えられた。

蛍光値が減少したものについては、単離株および単離株を再混合して同様の実験を行なった。SKT, HSN, ST3, ST4 からの単離株および SKT 混合では、蛍光値は減少したが、わずかであり、有意差はなかった。

底泥を用いたときに減少が見られた SKT サンプルの場合は、 ^1H -NMR によって芳香環二重結合を持つ物質の変化を調べた。6~9.5 ppm のケミカルシフトにピークをもつ物質は芳香環を持つ物質と考えられる。陰性コントロールと SKT サンプルを比較すると、6~9.5 ppm の範囲に見られた 3 つのピークの減少が見られた。また、同時に 0~2 ppm 付近においてコントロールには見られなかった新しいピークが出現し、これは芳香環物質が分解した産物に由来するピークと考えられた。

このように、SKT の底泥の添加によって生じたフミン酸抽出物の蛍光値の減少は微生物反応によるものと考えられたが、一方で単離した菌では確認されなかったことから、蛍光値減少は、底泥に含まれる培養できない菌の活性によるものと考えられた。除草剤の分解では、单一の菌では分解は見られないが複数の菌の相乗的な効果により分解がおこることが報告されており¹²⁾、本研究でみられた結果も難培養性の菌またはそれらを含む群集内コンソーシアムの共代謝による反応であることが示唆される。

結合に対する分解代謝に着目した。これまでに行なわれている土壤由来のフミン酸分解に関する研究で蛍光分光光度計を用いた報告があり¹¹⁾、それによると励起波長 340 nm、蛍光波長 500 nm 付近にピークが検出されることが分かっている。

そこで、本研究ではこれをもとにフミン酸抽出物の二重結合の変化を、蛍光分光光度計を用いて測定した。励起波長 270 nm

本研究では、海洋堆積物中の微生物群集によってフミン酸抽出物の芳香環二重結合を有する分子が変換されることが示唆された。このような活性は、人工的汚染物質（例えば Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH など）をも分解する可能性も持っており、自然界での自浄作用の一翼を担っていると考えられる。

謝辞

NMR 測定にご協力いただきました総合科学支援センター鎌田浩子氏、倉本誠氏に感謝いたします。本研究は NPO 法人ジオバイオテクノロジー振興会議との共同研究として行われた。

引用文献

- 1) Tóth, N., Vörös, L., Mózes, A. and V-Balogh, K. (2007) Biological availability and humic properties of dissolved organic carbon in Lake Balaton (Hungary), *Hydrobiologia*, 592: 281-290.
- 2) Thurman, E. M. (1985) Organic geochemistry of natural waters. Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 497 pp.
- 3) Stevenson, F. J. (1982) Humus chemistry genesis, composition, reactions. Wiley Interscience, New York.
- 4) Singer, P. C. (1990) Assessing ozonation research needs in water treatment. *J. Am. Water Works Assoc.*, 82: 78-88.
- 5) Wiszniowski, J., Robert, D., Surmacz-Gorska, J., Miksch, K. and Weber, J. V. (2002) Photocatalytic decomposition of humic acids on TiO₂. Part I : Discussion of adsorption and mechanism, *J. Photochem. Photobiol. A* 152: 267-273.
- 6) Kamiya, M. and Kameyama, K. (1998) Photochemical effects of humic substances on the degradation of organophosphorus pesticides. *Chemosphere*, 36 : 2334-2337.
- 7) Moyheo, A. J. and Pinheiro, L. (2000) Electrochemical degradation of humic acid. *Sci. Total Environ.*, 256 : 67-76
- 8) Li, X. Z., Li, F. B., Fan, C. M. and Sun, Y.P. (2002) Photoelectrocatalytic degradation of humic acid in aqueous solution using a Ti/TiO₂ mesh photoelectrode. *Water Res.*, 36 : 2215-2224.
- 9) Huang, Y., Eglinton, G., Vanderhage, E. R. E., Boon, J. J., Bol, R. and Ineson, P. (1998) Dissolved organic matter and its parent organic matter in grass upland soil horizons studied by analytical pyrolysis techniques. *Eur. J. Soil Sci.*, 49 : 1-15.
- 10) Suehiro, F., Mochizuki, H., Nakamura, S., Iwata, H., Kobayashi, T., Tanabe, S., Fujimori, Y., Nishimura, F., Tuyen, B. C., Tana, T. S. and Suzuki, S. (2007) Occurrence of tributyltin (TBT)-resistant bacteria is not related to TBT pollution in Mekong River and coastal sediment: with a hypothesis of selective pressure from suspended solid. *Chemosphere*, 68: 1459-1464.

- 11) Chen, J., LeBoeuf, E. J., Dai, S. and Gu, B. (2003) Fuluorescence spectroscopic studies of natural organic matter fraction. Chemosphere, 50 : 639-647.
- 12) Dejonghe, W., Berteloot, E., Goris, J., Boon, N., Crul, K., Maertens, S., Höfte, M., De Vos, P. and Verstraete, W. (2003) Synergistic degradation of linuron by a bacterial consortium and isolation of single linuron - degrading *Variovorax* strain. Appl. Environ. Microbiol., 69: 1532-1541.

無細胞タンパク質合成系を活用した牛妊娠認識物質の合成等に関する研究

愛媛大学無細胞生命科学工学研究センター教授 戸澤 譲
愛媛県農林水産研究所・畜産研究センター 木下 政健

【研究の目的】

ウシ胚の栄養膜細胞から產生されるタンパク質性因子インターフェロンタウ（bIFN- τ ）は、プロスタグランジン（PGF2 α ）の產生を抑制し、黄体の退行を阻止する妊娠認識物質として作用するサイトカインであることが知られている。さらに、栄養膜細胞の細切によって作成される栄養膜小胞と胚を共移植することにより、bIFN- τ が補強され、受胎率が向上することが報告されている。しかしながら、栄養膜小胞を用いた bIFN- τ 補強技術は、細切後の栄養膜小胞作成効率及び凍結保存技術等に問題があるため、畜産生産現場への普及には至っていない。そこで、我々は、無細胞タンパク質合成系を活用し、畜産生産現場への応用を目標として bIFN- τ タンパク質生産技術の開発に取り組むこととした。本課題では、愛媛県畜産試験場との共同研究として、これまでに遺伝子の単離からタンパク質の合成および精製行程を確立し、調製した精製 bIFN- τ が実際に細胞レベルでの抗ウイルス活性を示すことを確認している。しかしながら、これまでに確立した方法では依然として精製 bIFN- τ タンパク質の収量が低く、生体実験に用いるタンパク質サンプルを十分量確保することが困難であった。今年度は合成・精製システムのさらなる条件検討を進め、従来に比べ 16 倍の合成・精製の効率向上に成功した。今年度がプロジェクト最終年度なので、昨年までの経緯を含め、以下に研究の進捗および成果を報告する。

【方法および結果】

1. タンパク質合成条件の検討

bIFN- τ 遺伝子のクローニングおよび無細胞タンパク質合成系専用のプラスミドベクター構築は昨年度に報告済みであるので詳細は省く。bIFN- τ は分泌性タンパク質でありアミノ末端に小胞体移行に必要なシグナル配列と呼ばれる領域を含む形で前駆体合成されるため、生体内で最終的に除去される「シグナル配列領域」を除いた部分（成熟型タンパク質）を最終的に精製する必要がある（図 1A）。この理由より、成熟型タンパク質をプレシジョンプロテアーゼ認識ペプチドをはさんでグルタチオン-S-トランスフェラーゼ（GST）を付加した融合タンパク質として合成する系の構築を進めた（図 1B）。タンパク質合成は図 2 に示す様に良好な結果を示したため、次に精製の行程を確立した。

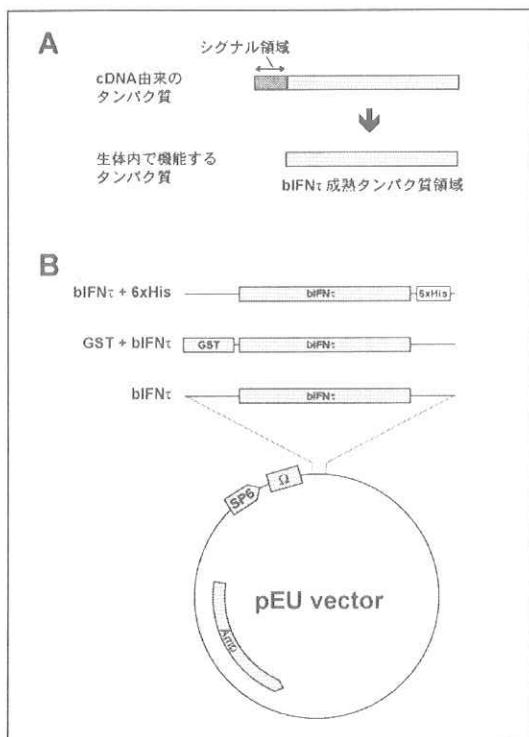


図 1. bIFN- τ の成熟領域 (A) と
タンパク質合成用ベクター (B)

2. タンパク質精製行程の確立

合成したタンパク質はコムギ胚芽抽出液を含むため、効率的に精製する必要がある。昨年度までに、図 3 に示す様に融合タンパク質の GST 領域が特異的にグルタチオンに結合する性質を利用し、市販のグルタチオンカラムにより合成タンパク質の精製を行なった。効率的な精製を確認した後に、合成タンパク質をカラム担体に結合させた状態でプレシジョンプロテアーゼを用いて GST と成熟型タンパク質の間にいったプロテアーゼ認識部位で目的とする成熟型タンパク質を切り離す作業を行なった。これらの行程により、成熟型 bIFN- τ タンパク質の精製に成功した。

3. タンパク質合成条件の検討

上記の条件では、タンパク質合成反応液 500 μ Lあたり 10 μ g 程度の精製タンパク質しか得られず、収量が低い。そこで今年度は、タンパク質合成反応の温度、添加する錆型 mRNA 濃度などの反応諸条件を詳細に再検討し、bIFN- τ タンパク質合成に至適化させた反応条件の設定を進めた。その結果、

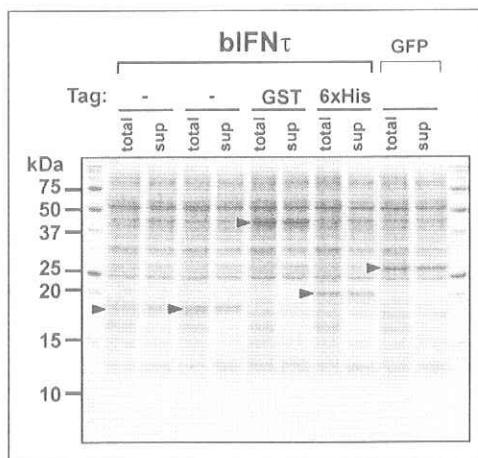


図 2. bIFN- τ タンパク質の合成

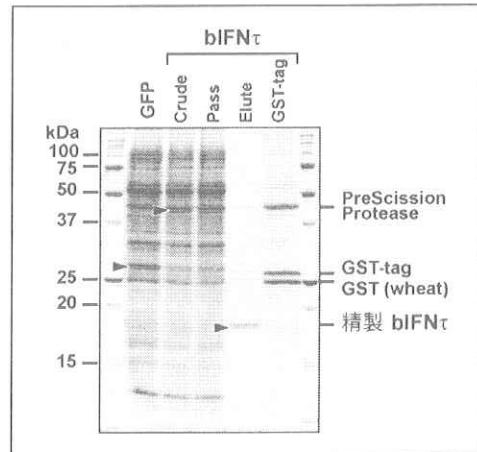


図 3. GST 融合タンパク質の
カラム精製および GST の切除

本タンパク質合成量の向上には、反応温度を従来の 26°C から 14°C に下げるとともに、反応時間を 24 時間から 96 時間へ延長することが効果的であることを確認した（図 4）。反応時間下げると一般的には酵素反応が遅くなるため、タンパク質合成速度も下がる。しかしながら、長時間かけてゆっくりとタンパク質合成反応を行うことにより、基質アミノ酸を取り込み伸長するペプチドが、より自然に近い構造を取れるようになり、可溶化状態での融合タンパク質が多量に調製できるものと推察される。

4. タンパク質精製条件の検討

昨年度までの系では、GST 融合タンパク質を室温条件でグルタチオンカラムに添加して精製を進めていた。上記の項目 3において確認したように、GST-bIFN- τ タンパク質は低温での合成により合成量が上昇したため、低温での構造維持が効果的である可能性を考えた。そこで、今年度はグルタチオンカラム精製の温度を下げて条件検討を行った結果、4°C での精製行程が著しい可溶性タンパク質収量の向上に効果的であることが確認できた（図 5）。さらに、残存している夾雜タンパク質を除去するため、新たにゲルろ過カラムを用いた分子量分画を行い、純度が 99%以上の精製 bIFN- τ タンパク質を得ることに成功した（図 6）。

ゲルろ過の溶出パターンより、精製したタンパク質の分子量分布は一様であることが観察される（図 7）。構造が乱れたタンパク質の混合物では、溶出ピークが収斂しない。従って、精製タンパク質は、質的にも均質なサンプルであるものと推察する。

これらの合成・精製条件により、500 μ L のタンパク質合成反応液より、最終的に 160 μ g の精製 bIFN- τ タンパク質が得られ、昨年度の 16 倍に相当する収率を達成することに成功した。従来問題であったコスト面でのデメリットをかなり解消できたと考える。

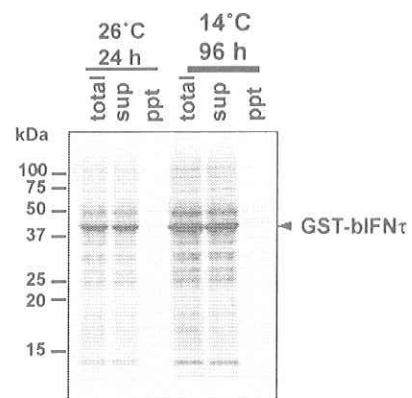


図 4. 反応温度による
タンパク質合成量の比較

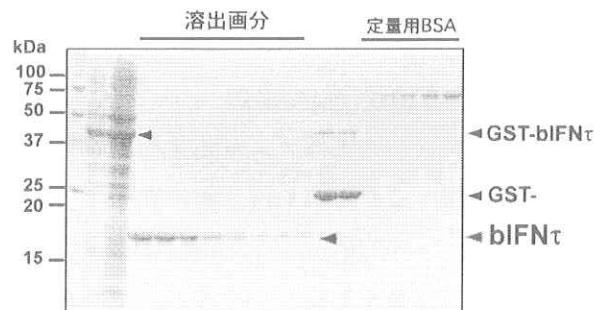


図 5. 低温条件下でのタンパク質精製



図 6. ゲルろ過による夾雜タンパク質の除去

【今後の展開】

本研究により確立した合成システムで作成した bIFN- τ の有効活用法については、今後も愛媛県畜産試験場において体外受精胚の成長因子としての活用法を中心に検討する実験を推進する予定である。

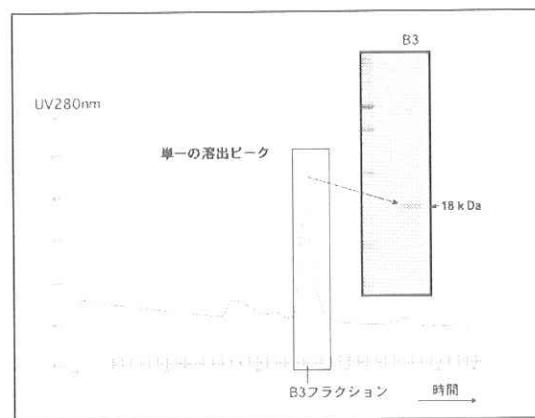


図 7. ゲルろ過による精製 bIFN- τ タンパク質溶出パターン

【学会報告】

木下政健, 戸澤譲, コムギ胚芽無細胞タンパク質合成系を活用した牛インターフェロン・タウの合成. 日本産業動物獣医学会四国大会, 愛媛県県民文化会館, 2008 年 9 月 7 日

愛媛大学社会連携推進機構研究成果報告書第2号

発 行 2009年3月
発行者 愛媛大学社会連携推進機構
〒790-8577 松山市文京町3番
TEL (089)927-8819
FAX (089)927-8820
印 刷 セキ株式会社