

愛媛大学社会連携推進機構
研 究 成 果 報 告 書

第 3 号

平成21年

社会連携推進機構研究成果報告書第3号の発刊にあたって

愛媛大学社会連携推進機構長

泉 英 二

愛媛大学は、平成16年4月の国立大学法人化を契機として、「地域に根ざし地域の発展に貢献する」ことを大学の基本方針の一つに掲げ、地域社会との窓口となる「社会連携推進機構」を新たに設置し、様々な社会貢献活動に取り組んできました。

また、社会連携機能を強化するために、その推進母体である社会連携推進機構自体の体制を強化するとともに、平成16年6月には「地域創成研究センター」、同18年4月には「防災情報研究センター」、同20年4月からは「南予水産研究センター」を設置し機構組織に加えるなどの拡充・強化を図っています。

一方、地域に立脚する大学として「地域に役立つ人材や地域の発展を牽引する人材の育成」に努めるとともに、愛媛大学が持つ知の成果を社会に還元し、地域社会の発展に貢献する様々な活動を実施してきました。

これらの活動の一つとして、地域自治体や産業界等との産官学連携による共同研究を積極的に推進し、その共同研究の成果については、毎年取りまとめを行い年報として発行し、社会に還元しています。

今年度、ここに「社会連携推進機構研究成果報告書第3号」を発刊できることになり、関係者のご努力に対し敬意を表しますとともに、ご支援をいただきました皆様に厚くお礼を申し上げます。

また、研究成果の報告をご承認していただきました企業及び本学研究者に感謝いたします。

地域の皆様方には、この研究成果報告書により、本学の研究に対してのご理解をいただくとともに、これらの知的財産を有効に活用するための情報源や共同研究等での更なる飛躍に向けた情報源として、ご活用していただければ幸いに思います。

社会連携推進機構といたしましても、今後とも各学部等との連携を図りながら、共同研究を始めとする社会貢献活動を強力に推進して参ります。

また、地方自治体や銀行、産業界等との交流機会を通じて、大学のシーズの紹介や地域のニーズの把握に努め、あらゆる面からの社会貢献活動を推進して参りますので、今後とも、皆様方のご指導・ご支援をお願いいたします。

目 次

成果報告書第3号の発刊にあたって

愛媛大学社会連携推進機構長

泉 英二

研究成果報告

磁場誘導焼灼療法のための体深部用直線状発熱針の開発 ----- 1

愛媛大学理工学研究科教授
株式会社アドメテック

前原 常弘
笠井 由紀

頭頸部癌頸部微小リンパ節転移診断におけるOSNA法応用の検討 ----- 3

愛媛大学大学院医学系研究科教授
シスメックス株式会社
ライフサイエンス事業戦略室本部長

浜川 裕之
富岡 敦男

後頭蓋窩に対するマイクロプレートの形状の研究 ----- 4

愛媛大学大学院医学系研究科准教授
村中医療機器株式会社サージカル室1課係長

久門 良明
比嘉 雅之

「認知症診断支援システム」開発のための研究 ----- 7

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助教
愛媛大学大学院医学系研究科講師
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

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

癌の誘導焼灼療法に用いる針状チタン被覆炭素鋼の 交流磁場中での発熱特性 ----- 8

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教授
株式会社アドメテック代表取締役

猶原 隆
青野 宏通
前原 常弘
中住 慎一

ホログラフィックストレージにおける
ニューラルネットワーク等化器の性能評価 ----- 12

愛媛大学社会連携推進機構教授	大澤 壽
愛媛大学大学院理工学研究科教授	岡本 好弘
愛媛大学大学院理工学研究科助教	仲村 泰明
愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程	山下 正人
富士フイ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

遅延故障診断に関する研究 ----- 18

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
愛媛大学名誉教授	高松 雄三
株式会社半導体理工学研究センター	
開発第2部テスト&故障解析開発室室長	相京 隆

P S 灰造粒砂のコンクリートへの適用性に関する基礎的研究 ----- 21

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

水素－空気予混合気の乱流燃焼速度モデル構築及び検証 ----- 31

愛媛大学大学院理工学研究科准教授	中原 真也
三菱重工業株式会社技術本部長崎研究所	岡林 一木
三菱重工業株式会社技術本部高砂研究所	武野 計二

絶縁油中PCBsの処理対策技術に関する研究開発 ----- 36

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
株式会社シーズテック代表	戸井田 秀基
三浦工業株式会社三浦環境科学研究所主任研究員	高橋 知史

磁場誘導焼灼療法のための体深部用直線状 発熱針の開発

愛媛大学理工学研究科教授

前 原 常 弘

株式会社アドメテック

笠 井 由 紀

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。体深部用に利用できるチタン被覆型の針を開発し、その第一段階の評価を行ったので、これについて報告する。治療法の開発の手順は、以下のように行った。

発熱針としてはTi管内部に鉄心(磁性体)を入れたものを用いた。長さ5mm、 $\phi 1.8\text{mm}$ 。交流磁界と磁性体との成す角度によって温度上昇に変化が生じる事を軽減する為に、Ti管を用いて被覆した。これは小線源療法に用いられる $0.8 \times 4.5\text{mm}$ のチタン製の金属カプセル内にヨード(I-125)という放射性物質(シード線源)が封入されたものから、アイデアを得ている。

(1) 針状磁性体の穿刺条件の考察

まず始めに、試料として鶏肉を用いて、様々な穿刺条件下で焼灼実験を行い、試料の温度変化と実験後の鶏肉の焼灼の様子から、今後、実験を行うに当たって、針状磁性体と高周波電源の出力を検討した。

(2) 針状磁性体と交流磁場の向きとの成す角による温度上昇の変化の検証

実験では、針状磁性体を磁場に対して平行になるようにセットしているが、固定時のずれや磁性体の穿刺方向の誤差などによって、平行を維持できなかった場合に温度上昇に変化が有っては実験結果の信頼性に問題が生じてしまう。この為、針状磁性体には、角度による温度変化を抑える為の工夫を行っているが、実際に磁場となす角度によって温度上昇に変化が現れない事を実験的に検証した。

(3) 模擬生体(ファントム)の作成、及び作製したファントムの、鶏肉との比較による温度特性の検証

鶏肉を試料として用いた実験では、熱による収縮によって、穿刺した磁性体の間隔が狭まってしまうという問題がある。また、鶏肉と人体組織では、比熱などの物理的特性が異なり、全く異なる温度上昇のデータとなる可能性

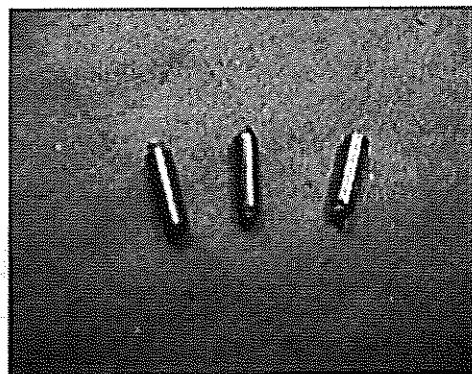


図1 針状磁性体

もある。

様々な環境下(主に極環境)において人体への影響を検証する為に一般的に用いられているものに、人体組織の物理的特性を再現して作られた模擬生体(ファントムと呼ばれる)がある。これを用いることで、臨床試験に向けたより実用的なデータを得られるとともに、鶏肉を試料として用いた場合に、どれほどの再現性があるのかを客観的に検証することが出来る。

本研究では、人体と同じ温度特性(比熱等)を持つファントムを作製し、それを用いて、焼灼実験を行うことで得られたデータから、鶏肉を用いた場合のデータと比較し、温度変化が一致することを確認した。

(4) 癌治療法の為の温度制御プログラムの開発、検証

実際の施術においては、癌細胞が壊死を起こす、ある一定の温度を長時間(30 分～1 時間程度)維持しなくてはならない。この為、試料の温度を一定の温度に保つ為の温度制御プログラムを開発する必要がある。

温度を制御する方法にはさまざまな方法があるが、本研究では、フィードバック制御というコンピュータによる制御法を用いる。

本研究では、以下の手順で制御プログラムの開発を順次、行った。

- ① 基本となる、比例(proportional)制御プログラムの作製、及び検証
- ② より高精度な制御法である、PID 制御プログラムの作製、及び検証
- ③ PID 制御プログラムの改善
- ④ 長時間実験における、プログラムの動作性の確認

最終的な PID 制御による発熱の結果を図 2 に示す。この場合は 45℃を目標としており、目的の温度に維持されていることがわかる。

まとめ

発熱針としては Ti 管内部に鉄心(磁性体)を入れたものを用い、その発熱を評価した。

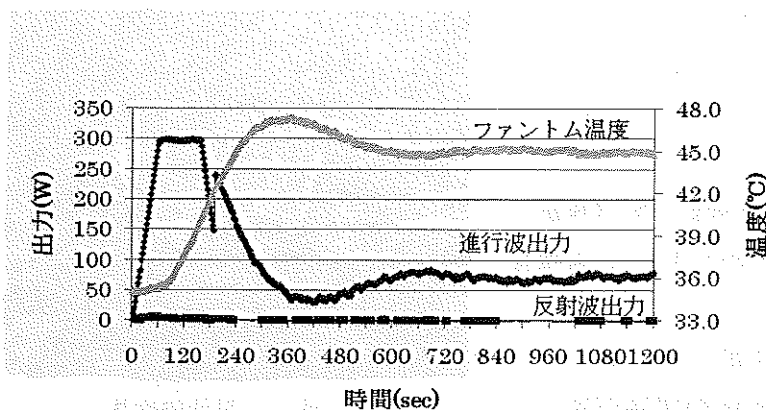


図 2 電力と温度の時間変化

頭頸部癌頸部微小リンパ節転移診断における OSNA 法 応 用 の 検 討

愛媛大学大学院医学系研究科教授

浜 川 裕 之

シスメックス株式会社 ライフサイエンス事業戦略室本部長

富 岡 敦 男

頭頸部扁平上皮癌においてリンパ節転移の有無は予後を左右する重要な因子である。われわれは、以前より準連続切片を用いた病理組織診断および RT-PCR 法による遺伝子診断がセンチネルリンパ節生検を行う上で重要であることを報告してきた。しかしながら、これらの方法は診断結果を得るのに約 2 時間要するため術中応用が困難であることが問題であった。今回、われわれは術中遺伝子診断法としての One-Step Nucleic acid Amplification (OSNA) 法の有用性について検討した。頭頸部扁平上皮癌 65 症例より得た 312 個のリンパ節を用いて検討を行った。それぞれのリンパ節を最大断面にて半割し、一方は病理組織検査に、他方は cytokeratin 19 (CK19) mRNA を検出対象とした OSNA 法に供した。転移診断基準としては、200 μ m 間隔の準連続切片を用いた H&E 染色および cytokeratin AE1/AE3 を用いた免疫組織化学染色による病理組織診断結果とし、OSNA 法の結果との一致率に関して評価した。OSNA 法における CK19 mRNA コピー数の診断基準値は病理組織検査との一致率が最も高い 300 copies/ μ l に設定した。本診断基準値を用いた結果、感度 86.9% (53/61)、特異度 97.6% (244/251)、正診率 95.2% (297/312) であった。また、センチネルリンパ節生検への応用においてはリンパ節摘出から診断結果を得るまで約 30 分と十分術中応用が可能であった。頭頸部扁平上皮癌センチネルリンパ節生検における遺伝子診断法として OSNA 法が有用であることが示唆された。

後頭蓋窩に対するマイクロプレートの形状の研究

愛媛大学大学院医学系研究科准教授

久 門 良 明

村中医療機器株式会社サージカル室 1 課係長

比 嘉 雅 之

【目的】聴神経腫瘍や髄膜腫などの後頭蓋窩の脳腫瘍摘出術に対しては、耳介後部の後頭下開頭手術を行う。その際の骨欠損部は、開頭時に残した自家骨を用いるが、全体を覆うには骨片が足りず、小骨片も固定することは困難である。その結果、手術創部が陥没したり、引っ張られるような違和感を残すことも多かった。既存の長方形で平面的なチタン製マイクロプレートを使用する場合もあるが、骨欠損部に合わせて切断して複雑な形状に合わせることが難しく、時間と手間がかかった。そこで、今回、本開頭手術用に予めマイクロプレートを作成して、術中には僅かな修正で骨欠損部を補えるようにすることを目的に、形状を研究した。

【方法】方法は、頭蓋骨模型を用いて骨削除部分を想定し、その部分を補うようにマイクロプレートの形状を決めた（図 1）。プレートは平面状であるため、切れ込みを入れ（a）、折り曲げて部位的に丸みを作ること（b）で、本来の曲面をもったプレートで覆うようにした（c, d 矢印）。実際の手術時には、平面状プレートを滅菌消毒して、閉頭時に骨欠損部を補うように曲面を作って使用した。

【結果】研究期間の平成 20 年 5 月より平成 21 年 3 月まで 8 例（聴神経腫瘍 5、髄膜腫 2、三叉神経痛 1）、それ以降平成 21 年 12 月までに 5 例（聴神経腫瘍 4、三叉神経痛 1）に使用した。1 号型は、一回り大きく、術中の加工を要したため、2 号型は一回り小さくした。この型（現在使用）は、通常の開頭範囲を十分に補うことができ、大きさや形状についての修正もほとんど不要で、容易に使用できた。また術後の感染例もなかった。当然のことながら、術後の創部の陥凹がなくなり、創部のツッパリ感もなくなり、満足すべき結果が得られた。代表例を図 2 に示す。聴神経腫瘍（a）で、顔面神経と聴力温存のため脳幹と脳神経上の腫瘍を僅かに残して（矢印）亜全摘を行った（b）。右耳介後部の S 字状皮膚切開（c）直下の骨欠損部は 2 号タイプを用いて補填した（d）。術後の CT でも、矢印のようにプレートは元の骨曲面を描いており綺麗に形成されていた（e, f）。

今後の課題として、開頭範囲が一回り小さいサイズのものを作成することや、もう少し薄いプレートに変更することが挙げられた。

図1

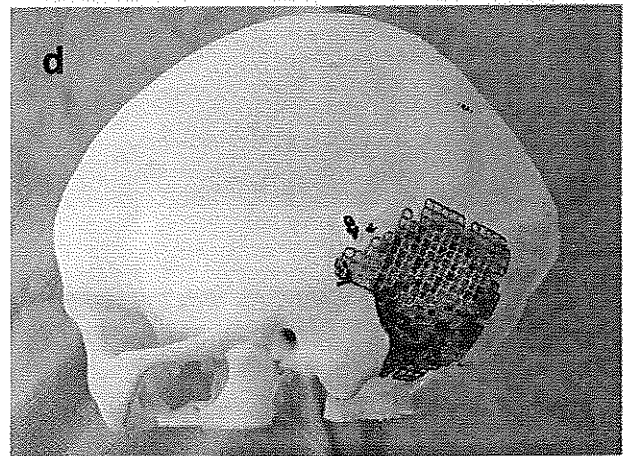
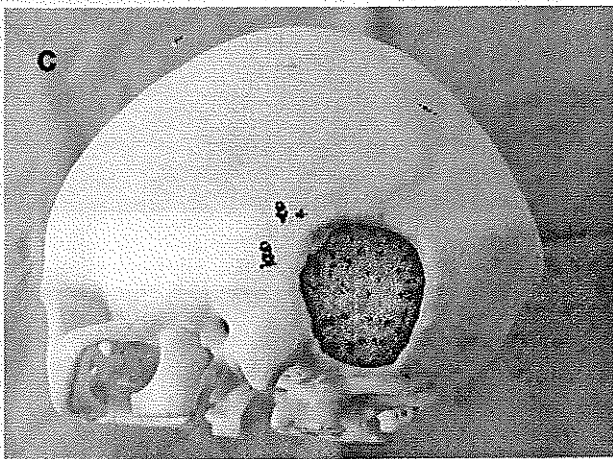
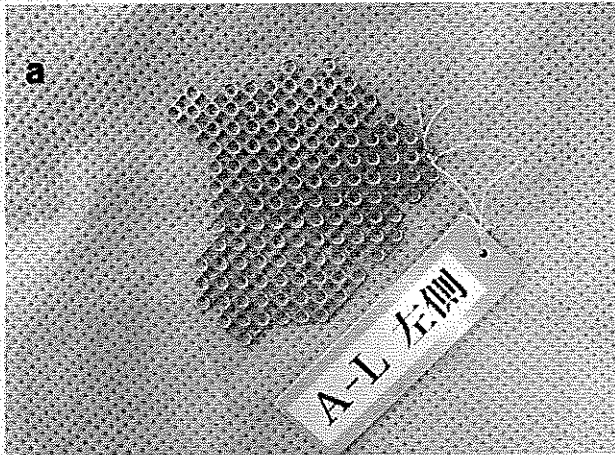
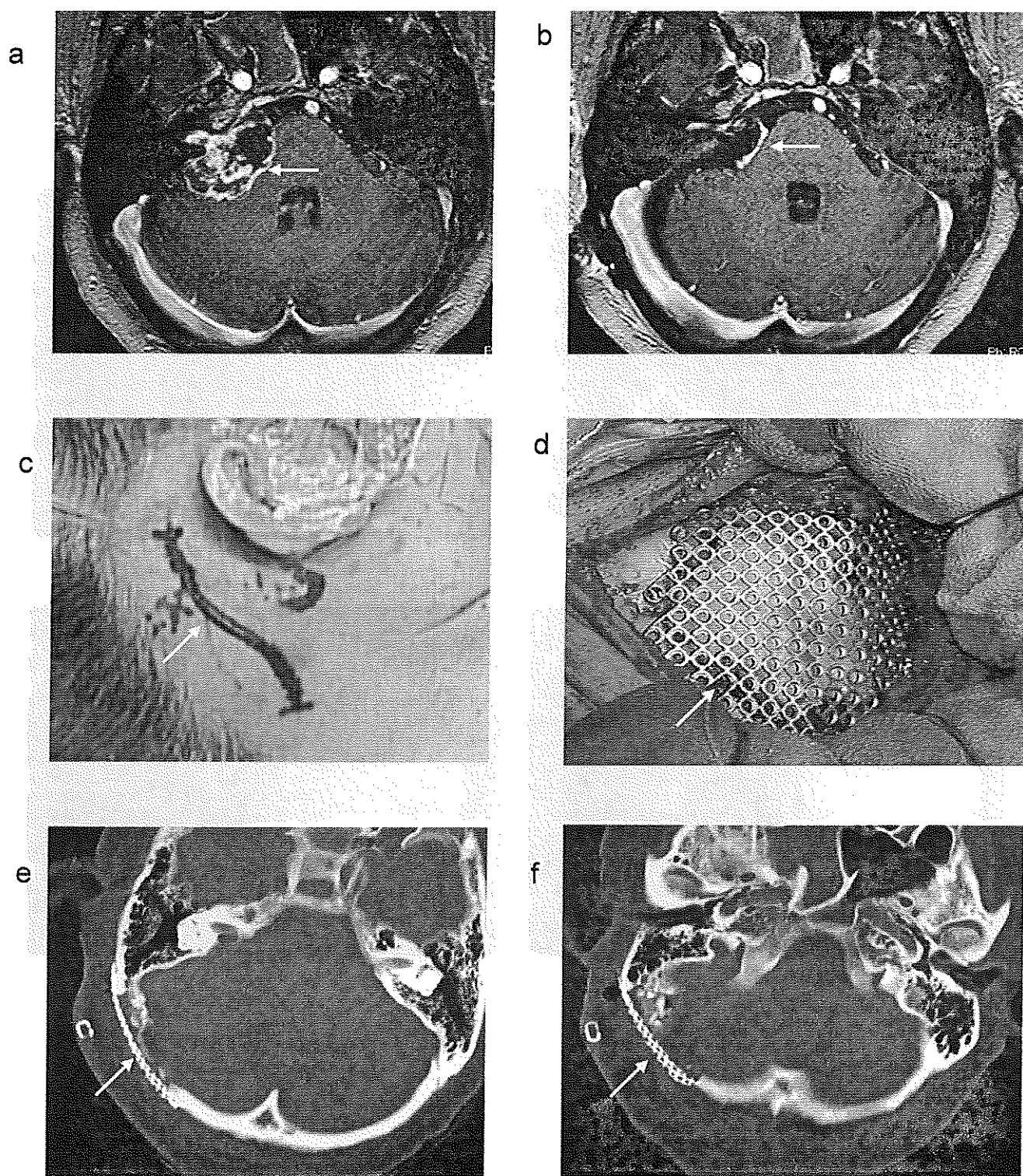


图2



「認知症診断支援システム」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助教

田 口 敬 子

愛媛大学大学院医学系研究科講師

田 原 康 玄

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

【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、鑑別診断、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を開発するための基礎研究を行った。

【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。プロトタイプを改良し、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。健常高齢者と認知症患者に対し使用し、プログラムの診断精度を向上させ、この研究に関する論文を進めている。早期認知症の診断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。

癌の誘導焼灼療法に用いる針状チタン被覆炭素鋼の 交流磁場中での発熱特性

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教授 前 原 常 弘
株式会社アドメテック代表取締役 中 住 慎 一

1. 研究の背景と目的

本研究は、『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。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熱することで腫瘍を焼灼する、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、実際の治療では、腫瘍の位置や深さによって磁性体針の穿刺角度が異なる可能性が生じる。その際、磁性体針に特有な形状磁気異方性が問題点として挙げられる。この現象は、磁性体針の穿刺角度により発熱特性が著しく異なるもので、強磁性体の形状磁気異方性に起因する。この課題を解決できないと、焼灼温度の厳密な制御が行えず、臨床現場への応用は実質的に不可能となる。したがって、交流磁場誘導焼灼療法を適用する場合、最適な磁性体針の材質と形状を決定して、穿刺角度の影響を含めた発熱特性を把握する必要がある。

平成21年度は、強磁性の炭素鋼丸棒を被覆するチタン管の厚さを変えることにより、発熱特性と磁束方向との角度との関連性を調べた。そして、最適条件を見出して、完全な無方向性発熱特性を有する、チタン被覆焼灼用磁性体針の試作を行った。

2. 実験方法

2.1 チタンで被覆した炭素鋼丸棒試料の作製

表1に、本研究開発で用いたチタン管の内径、外径、及び双方の比を示す。外径と長さは、それぞれ1.8mm及び20mmとして、内径を1.6mmから0mmまで変化させた。これらのチタン管に対して、その内径に等しい太さの強磁性炭素鋼の丸棒を挿入して複合磁性体針を作製した。試料・No.1($R=0.89$)のチタン管がもっとも薄く、その厚さは0.1mmである。そして、試料・No.4($R=0.56$)は、厚さ0.4mmのチタン管を使用している。一方、試料・No.6は、直径1.8mmのチタン丸棒であり非磁性である。

表1 本研究で用いたチタン管の寸法

試料番号	内径	外径	R
No.1	1.6mm	1.8mm	0.89
No.2	1.4mm	1.8mm	0.77
No.3	1.2mm	1.8mm	0.66
No.4	1.0mm	1.8mm	0.56
No.5	0.8mm	1.8mm	0.44
No.6	0mm	1.8mm	Ti 丸棒

2. 2 交流磁場中での発熱特性の測定

図1に、本研究で使用した交流磁場中での発熱実験装置の概略を示す。発熱用コイルは、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回巻き付けている。Rの値が異なる各試料について、磁束方向との角度を3種類($\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)変化させて発熱実験を行った。測定時間は1200sとして、300kHzで100Wの高周波電力を印加した。交流磁場中においては、熱電対による温度測定が困難であるため、光ファイバー温度計により試料の温度上昇(ΔT)を連続的に測定した。

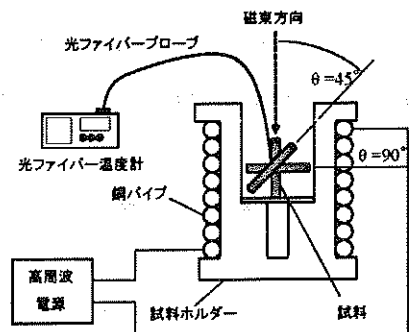


図1 交流磁場中での発熱実験装置の概略図

3. 実験結果

3. 1 チタンで被覆した炭素鋼丸棒の交流磁場中での発熱特性

図2に、試料・No. 1 ($R=0.89$)を交流磁場中で発熱させた場合の磁束方向と試料との角度の関係を示す。 $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ の発熱曲線に着目すると、測定開始直後から急激な ΔT の増大が認められ、120sで 50°C を超えている。一方、 $\theta = 90^\circ$ の場合には、時間とともに連続的に ΔT が増加しており、1200sでの値は 37.2°C である。

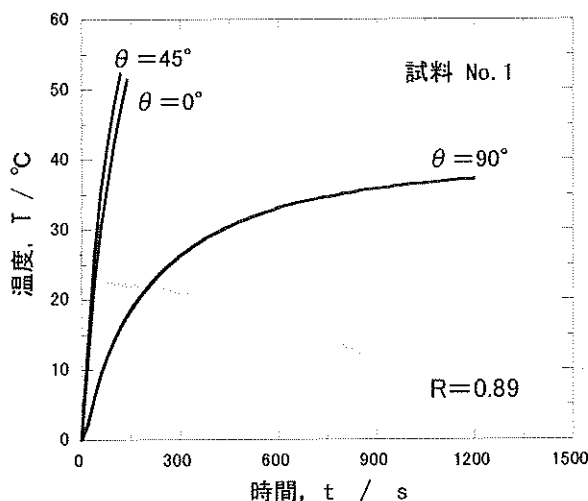


図2 磁束方向に対する角度を変えたチタン被覆炭素鋼丸棒 ($R=0.89$) における交流磁場中での発熱特性の時間依存性

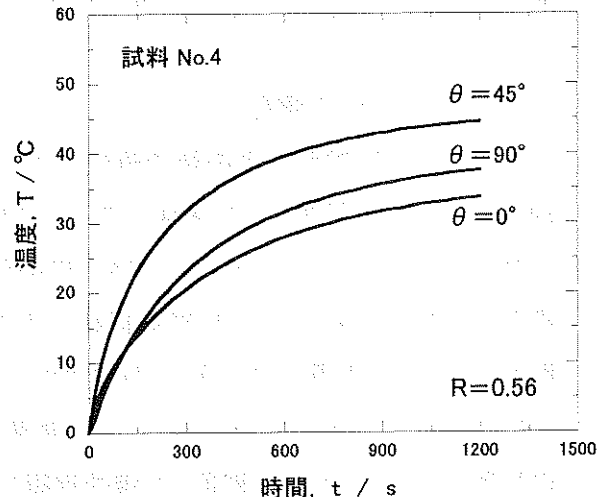


図3 磁束方向に対する角度を変えたチタン被覆炭素鋼丸棒 ($R=0.56$) における交流磁場中での発熱特性の時間依存性

図3に示すのは、試料・No.4 ($R=0.56$) における交流磁場中での発熱特性の時間依存性である。 $\theta =$

90° の試料の発熱挙動は、図2の場合とほぼ同様であり、1200s後の ΔT は37.6°Cである。 $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ の試料の場合、いずれも $\theta = 90^\circ$ の発熱曲線に接近しており、1200s後の ΔT はそれぞれ、44.5°Cと34.0°Cである。図2と図3を比較すると、炭素鋼丸棒を囲むチタンの厚さを変えると、著しい形状磁気異方性の低減が可能であることが分かる。

3. 2 無方向の発熱特性を有するチタン被覆磁性体針の試作

図4に、チタン管に炭素鋼丸棒を充填して得られた結果に基づいて試作した、チタン被覆磁性体針の外観を示す。先端部は、腫瘍への穿刺を容易にするため鋭角状に加工されている。そして、柄の部分は、コッヘルで確実に保持できるように切り欠きを備えている。この試作磁性体針は、生体適合性の優れたチタンで完全に被覆されており、動物実験での使用が可能と考えられる。

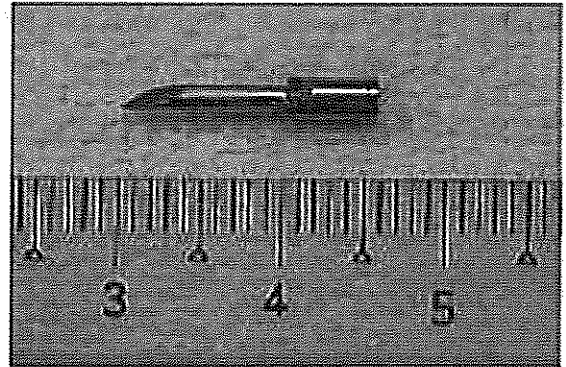


図4 本研究で試作したチタン被覆磁性体針の外観

図5に、試作したチタン被覆磁性体針における交流磁場中での発熱特性の時間依存性、及び磁束方向との角度依存性を示す。3種類の異なる角度で測定したにもかかわらず、発熱曲線はほぼ重なっており、1200s後の ΔT は約32°Cである。これらの結果から、磁束方向に対する完全な無方向性発熱特性が達成されており、本研究における課題を克服できたものと判断される。

4. まとめと今後の課題

肝癌などの深部臓器癌の焼灼療法への応用を目的として、Ti管で被覆した炭素鋼丸棒の交流磁場中での発熱特性を調べた。そして、チタン管の厚さを最適条件に設定することで、反磁場係数の大きさを説明される形状磁気異方性を著しく低減できることを明らかにした。これらの結果に基づいて、炭素鋼丸棒の周囲をチタンで完全に被覆した焼灼用磁性体針を試作した。そして、磁束方向に対して、完全に無方向の発熱特性を持つことを明らかにした。今後は、本研究で試作した複合金属磁性体針を用いた動物実験を行って、臨床応用のための基礎データを集積する必要がある。

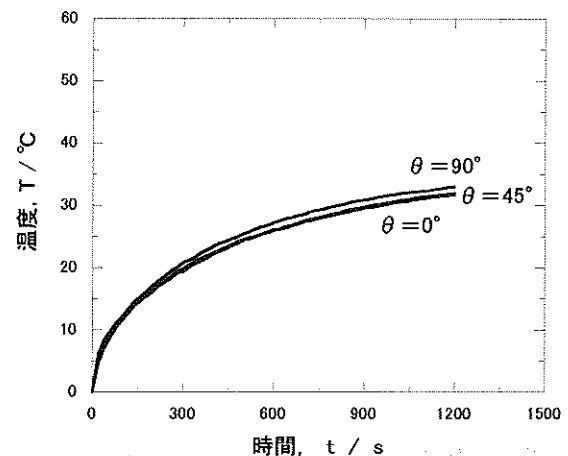


図5 試作したチタン被覆磁性体針における交流磁場中での発熱特性の時間依存性及び磁束方向との角度依存性

5. 学会発表

- 1) Heat Generation Ability in AC Magnetic Field of Needle-type Ti-coated Mild Steel for Ablation Cancer Therapy : T. Naohara, H. Aono, H. Hirazawa, T. Maehara, Y. Watanabe, S. Matsutomo, International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources, May 19-21, 2010, Padua, Italy, (平成22年5月) 発表予定

ホログラフィックストレージにおける ニューラルネットワーク等化器の性能評価

愛媛大学社会連携推進機構教授・大澤 壽、愛媛大学大学院理工学研究科教授・岡本 好弘、愛媛大学大学院理工学研究科助教・仲村 泰明、愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程・山下 正人、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者・北原 淑行

愛媛大学社会連携推進機構教授	大澤 壽
愛媛大学大学院理工学研究科教授	岡本 好弘
愛媛大学大学院理工学研究科助教	仲村 泰明
愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程	山下 正人
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者	北原 淑行

1. はじめに

近年、情報通信技術と情報処理技術の進展により、取り扱うデータ量の飛躍的な増大とネットワークの高速化が急速に進んでおり、高速大容量な情報ストレージに対する要望が益々高まることが予想される。CD、DVDを始めとする従来の平面・ビット記録型光ディスク装置では、光源波長と対物レンズの開口数による制限から記録密度が限界に達しつつあり、これに代わる新たな光ディスク装置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。

ホログラフィックストレージにおいて、多重化のために設ける開口制限は、ピクセル間干渉 (IPI:interpixel interference) を発生させる要因となり、ビット誤り率特性の劣化を引き起こす。本研究では、IPI を軽減するためホログラフィックストレージの信号処理にニューラルネットワーク等化器 (NNE:neural network equalizer)[2] を適用し、その性能評価を実機再生画像を用いて行う。

2. 記録再生系

図1に記録再生系のブロック図を示す。但し、ブロック間中の点線内は実機記録再生系を表す。まず、入力データ系列 $\{a_k\}$ は記録符号器により $\{b_k\}$ に記録符号化された後、ピクセル間隔 Δ_S の SLM(spatial light modulator) で信号光に変換し、参照光とともに媒体に照射してホログラムを媒体に記録する。再生時には、記録時と同一の参照光を媒体に照射することにより行う。再生された信号光は、ナイキスト開口幅で規格化された開口幅 ω の円形開口を通過後、高域成分が遮断されて IPI を生じる。高域遮断された再生光は、SLM のピクセルに対して2倍のオーバーサンプリングに相当するピクセル間隔 $\Delta_S/2$ の撮像素子によって再生画像として検出される。再生画像から、位置検出器により位置情報が推定され、それをもとに補間器により位置補正が行われる。さらに、補間器出力 $\{\hat{b}_k\}$ は NNE を介して記録復号化され、得られた出力データ系列 $\{\hat{a}_k\}$ と入力データ系列 $\{a_k\}$ の比較により BLER(block error rate) が得られる。

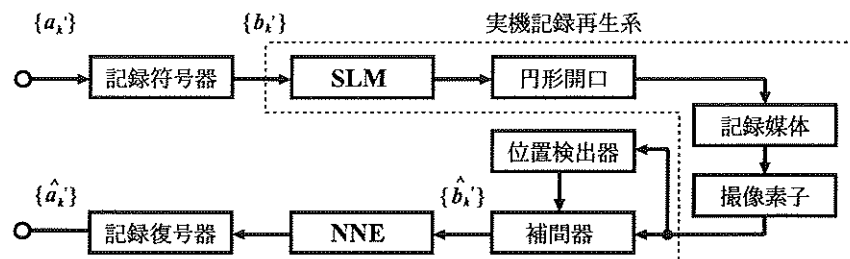


図1 記録再生系ブロック図

3. 記録符号

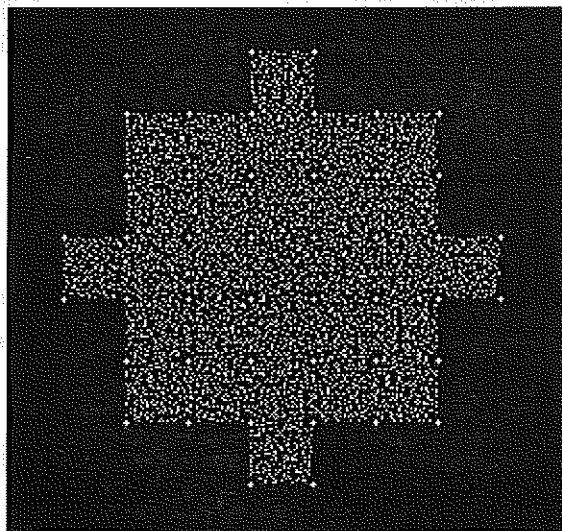
ホログラフィックストレージでは、データ系列の“1”をONピクセル、“0”をOFFピクセルに対応させている。記録符号化を用いない場合は、補間器出力系列に対して一定のしきい値を超えていれば“1”，超えていなければ“0”と判定する。しかし、レーザの光強度分布が一定でないことに起因する輝度むらが再生画像に生じた場合に一定のしきい値で判定を行うと、ビット誤り率特性の大幅な劣化に繋がる。これは、ONピクセル数の増加と共に顕著となるため、符号語内にONピクセルが少なく、且つピクセル間の相対的な明るさの比較によってONピクセルの位置を決定できる符号化方式が望まれる。本研究では、このような条件を満たす符号として5-9記録符号[3]を用いる。

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。この記録符号は、9シンボル中のONピクセルとOFFピクセルの割合を2:7、符号化率を $5/9 \approx 0.56$ としている。そこで、復号の際には、符号ブロック内で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、判定されたデータパターンに対して、符号化則に対応するデータ系列を求め、復号系列とする。

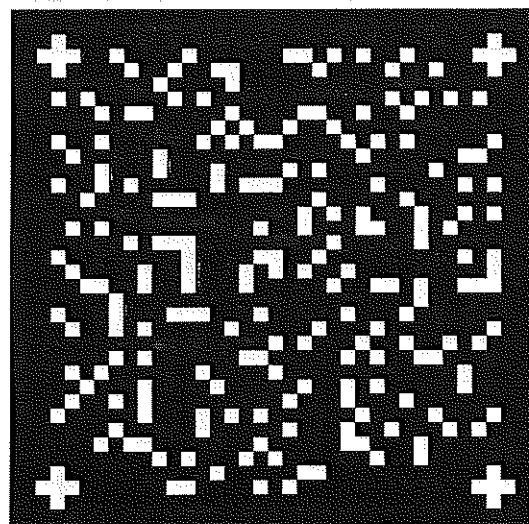
4. データページフォーマットと位置検出方式

図2に、本検討で用いた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。サブページは 3×3 ピクセルの9シンボルからなる記録符号ブロックを96個配置しており、四隅に位置検出用の十字マークを埋め込んでいる。また、データページは 30×30 ピクセルのサブページを29枚配置しており、データの外側に輪状の参照光領域を設けるため、データページの形状を円形に近付けている。

図3に本検討で用いた位置検出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クの粗位置を得る。次いで、この位置情報を元に再生画像とマーク画像の共分散パターンマッチング[4]を行い、共分散値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クで検出した詳細位置情報を用いて修正する。最後に、得られたマーク位置情報を基に補間を用いてSLMの各ピクセル座標ごとの位置情報を算出する。



(a) データページ



(b) サブページ

図2 データページの構成

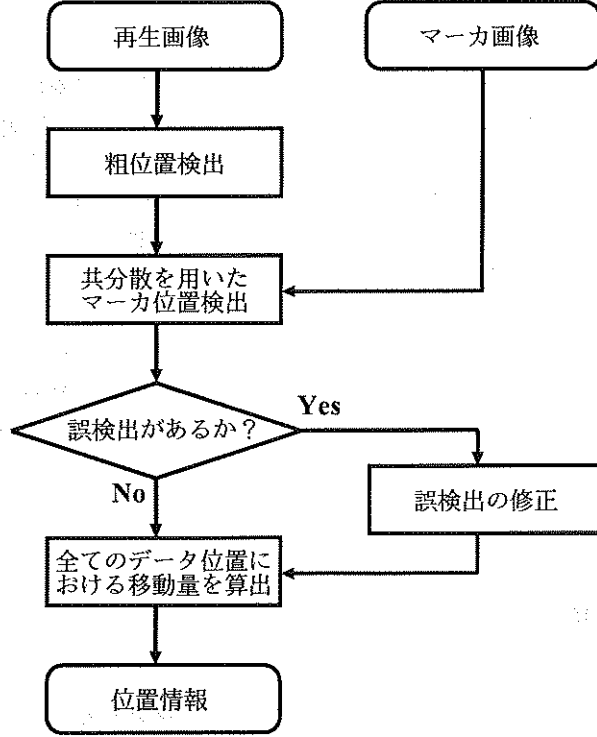


図3 位置検出のフローチャート

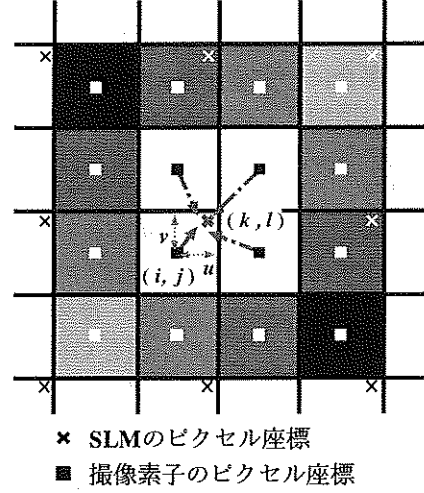


図4 画像補間の様子

5. 補間方式

図4に画像補間の様子を示す。ここで、図における×印はSLMのピクセル座標を、■印は撮像素子のピクセル座標を、 (k, l) はSLMのピクセル座標を、 (i, j) は撮像素子のピクセル座標を、 u と v は x または y 方向の撮像素子のピクセル間隔で規格化された (i, j) と (k, l) の差をそれぞれ表している。画像補間は、位置検出器により推定されたデータの位置情報と周囲の撮像素子の輝度を基に、SLMのデータ位置へ位置補正を行う処理である。SLMのピクセル座標に対応する補間後の輝度 $J_{(k,l)}$ は、補間点から見た撮像素子の近傍輝度 $I_{(i,j)}$ を用いて次式で表される。

$$J_{(k,l)} = \sum_{m=-(\gamma-1)}^{\gamma} \sum_{n=-(\gamma-1)}^{\gamma} I_{(i+m,j+n)} f(u-m) f(v-n) \quad (1)$$

ここで、 γ は補間範囲を、 $f(x)$ は補間関数をそれぞれ表している。代表的な補間方式として、 $\gamma=1$ のBilinear補間[5]、 $\gamma=2$ のBicubic補間[5]、 $\gamma=3$ のLanczos3補間[6]などがある。 γ を大とすると、雑音が重畳された信号を考慮する範囲が広がるため、本研究では、 $\gamma=1$ として次式で表される補間関数を用いてBilinear補間を行っている。

$$f(x) = \begin{cases} 1 - |x|, & 0 \leq |x| < 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

6. ニューラルネットワーク等化器

図5に、ニューラルネットワーク等化器のネットワーク構造を示す。本研究で用いるニューラルネットワークは、教師信号をSLMの入力データページとした、入力層-中間層-出力層の素子数が $N_1=25$ 、 $N_2=3$ 、 $N_3=1$ の3層からなる多層パーセプトロン[7]とする。図において、補間器出力の中央ピクセルは等化対象

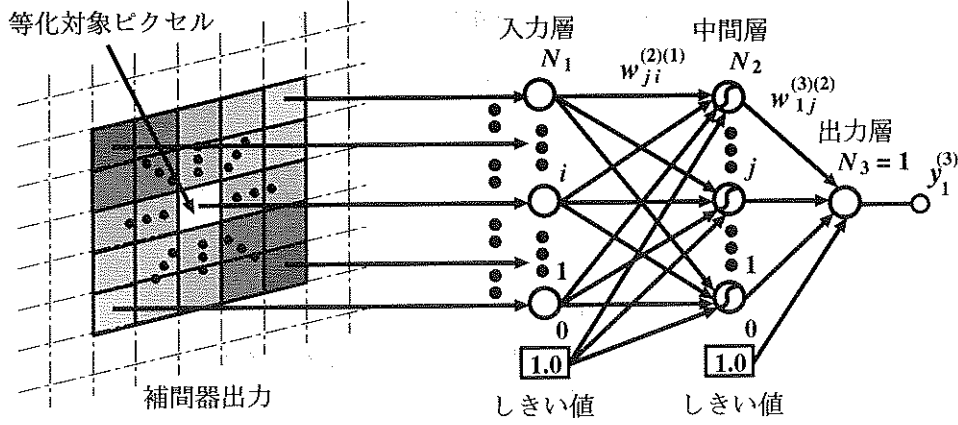


図5 NNEのネットワーク構造

ピクセルとなっており、それを中心とした 5×5 ピクセルの補間器出力がニューラルネットワークの入力層の各素子に入力される。入力 x_i が与えられたときの第 m 層、第 i 番目の素子出力は、

$$y_i^{(m)} = \begin{cases} x_i, & m = 1 \text{ (入力層)} \\ g(u_i^{(m)}), & m = 2 \text{ (中間層)} \\ u_i^{(m)}, & m = 3 \text{ (出力層)} \end{cases} \quad (3)$$

$$u_i^{(m)} = \sum_{j=0}^{N_{m-1}} w_{ji}^{(m)(m-1)} y_j^{(m-1)} \quad (4)$$

で表される。ここで、 N_m は第 m 層の素子数を、 $w_{ji}^{(m)(m-1)}$ は第 m 層の第 j 素子と第 $m-1$ 層の第 i 素子間の結合荷重値をそれぞれ表しており、 $g(u)$ は次式で定義されるロジスティックシグモイド関数[7]を用いる。

$$g(u) = \frac{1}{1 + \exp(-u)} \quad (5)$$

多層パーセプトロンにおける結合荷重値 $w_{ji}^{(m)(m-1)}$ の学習には誤差逆伝搬法[7]を用いる。誤差逆伝搬法は、ニューラルネットワーク出力 $y_1^{(3)}$ と教師信号 $\tilde{y}$ との二乗誤差関数、

$$E = \frac{1}{2} \{ \tilde{y} - y_1^{(3)} \}^2 \quad (6)$$

が最小となるように次式で表わされる最急降下法[7]を用いて結合荷重値の更新を行う。

$$\Delta w_{ji}^{(m)(m-1)} = -\alpha_{(m)(m-1)} \frac{\partial E}{\partial w_{ji}^{(m)(m-1)}} \quad (7)$$

ここで、 $\Delta w_{ji}^{(m)(m-1)}$ は第 m 層と第 $m-1$ 層間の結合荷重値の修正量を、 $\alpha_{(m)(m-1)}$ は、第 m 層と第 $m-1$ 層間の学習速度を決める学習係数をそれぞれ表している。式(6)を出力・中間層間の結合荷重値 $w_{1j}^{(3)(2)}$ で偏微分すると、

$$\frac{\partial E}{\partial w_{1j}^{(3)(2)}} = \frac{\partial E}{\partial y_1^{(3)}} \frac{\partial y_1^{(3)}}{\partial u_1^{(3)}} \frac{\partial u_1^{(3)}}{\partial w_{1j}^{(3)(2)}} = - \{ \tilde{y} - y_1^{(3)} \} y_j^{(2)} \quad (8)$$

となり、 $w_{1j}^{(3)(2)}$ の修正量、

$$\Delta w_{1j}^{(3)(2)} = a_{32} \{ \tilde{y} - y_1^{(3)} \} y_j^{(2)} \quad (9)$$

が得られる。同様に式 (6) を中間・入力層間の結合荷重値 $w_{ji}^{(2)(1)}$ で偏微分を行い、 $w_{ji}^{(2)(1)}$ の修正量、

$$\Delta w_{ji}^{(2)(1)} = a_{21} \left\{ \tilde{y} - y_1^{(3)} \right\} w_{1j}^{(3)(2)} y_j^{(2)} (1 - y_j^{(2)}) y_i^{(1)} \quad (10)$$

が得られる。よって、これらをまとめると

$$\Delta w_{ji}^{(m)(m-1)} = -\alpha_{(m)(m-1)} \delta_j^{(m)} y_i^{(m-1)} \quad , m = 2, 3 \quad (11)$$

$$\delta_j^{(m)} = \begin{cases} \tilde{y} - y_1^{(3)}, & m = 3 \\ \delta_1^{(3)} w_{1j}^{(3)(2)} y_j^{(2)} (1 - y_j^{(2)}), & m = 2 \end{cases} \quad (12)$$

が導かれる。この式から見られるように、誤差逆伝搬法は、結合荷重値の更新を出力層側から入力層側へ誤差を伝搬しながら修正を行うため、誤差逆伝搬法と呼ばれる。

7. 性能評価

本研究では、先ず記録媒体を用いずに開口制限を行った、IPI を伴う記録再生系に対して NNE の性能評価を行う。図 6 に本研究で用いた実機光学系を示す。実機光学系は、波長 401nm の青色半導体レーザ、SLM として DMD(digital micro-mirror device)、対物レンズ、撮像素子として CMOS(complementary metal oxide semiconductor) センサを用いて構成されている。実験概要として、多重記録による信号レベルの低下を CMOS センサのシャッター時間の変化に対応させ、シャッター時間 t_E を 2msec 間隔で 4 から 16msec まで、規格化開口幅 ω をそれぞれ 2.0, 1.70, 1.56, 1.27 と変えて IPI の影響を受けた再生画像を検出している。図 7 に t_E に対する BLER 特性を示す。ここで、NNE を○印、NNE を用いない場合は□印で表す。但し、NNE において、 $\omega = 2.00, 1.70$ の場合は $t_E = 4\text{msec}$ 、 $\omega = 1.56$ の場合は $t_E = 6\text{msec}$ 、 $\omega = 1.27$ の場合は $t_E = 16\text{msec}$ で学習を行っている。図に見られるように、 t_E 及び ω を小さくすることにより、CMOS センサで検出される信号光強度が低下するため、BLER は劣化する傾向にあるが、NNE を用いることで NNE を用いない場合と比べて特性改善が得られており、IPI に対して NNE が有効であると言える。

次いで、実際に記録媒体を用いて開口制限を行った、IPI と媒体雑音を伴う記録再生系に対して NNE の性能評価を行う。図 8 に ω をそれぞれ 2.0, 1.56, 1.27 と変えた場合の実効多重度 M に対する BLER 特性を示す。ここで、NNE を○印、NNE を用いない場合は□印で表す。但し、NNE は $M = 1$ で学習を行い、 $\omega = 2.00, 1.56$ の場合の露光時間は 240msec、 $\omega = 1.27$ は 400msec としている。図に見られるように、 $M = 1$ の学習時においては、僅かに NNE による改善効果が得られているが、その他の場合においては NNE を用いない場合と同等の性能を示している。これは、NNE の学習及び汎化能力が媒体雑音に対してうまく適応していないためと考えられる。

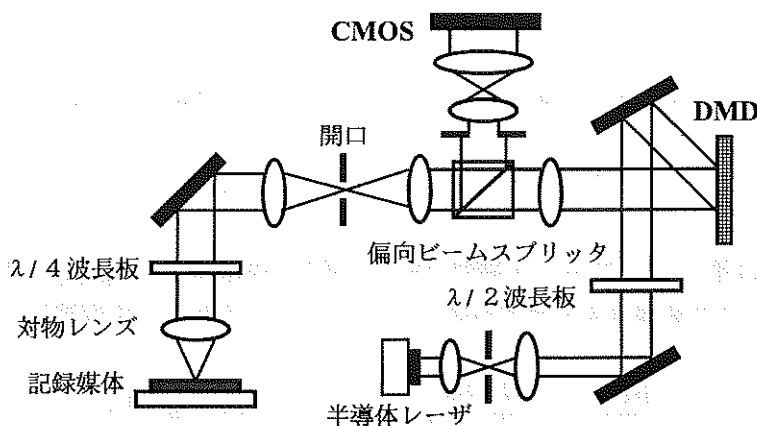


図 6 実機光学系

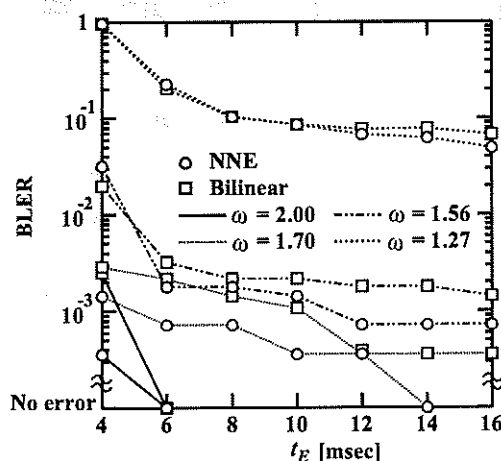


図 7 BLER 特性

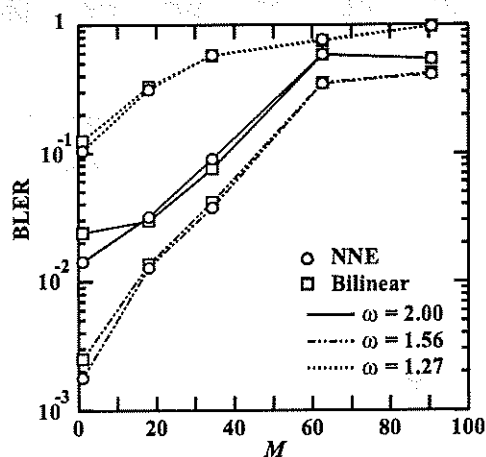


図 8 BLER 特性

8. まとめ

ピクセル間干渉を伴うホログラフィックストレージにおいて、ニューラルネットワーク等化器を用いて波形等化を試み、その性能評価を行った。その結果、ニューラルネットワーク等化器による媒体雑音に対する改善はあまり得られなかったが、ピクセル間干渉の軽減に対して、ニューラルネットワーク等化器が有効であることが明らかとなった。

参考文献

- [1] 志村 努, “ホログラフィックメモリのシステムと材料,” シーエムシー出版, 東京, 2006.
- [2] H. Osawa, N. Kawaue, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Ochi, and S. Marukawa, “An application of neural network equalization to polytopic multiplexing holography and reduction of interpixel interference,” IEICE Trans. Electron., vol.E90-C, no.8, pp.1612-1618, Aug. 2007.
- [3] 山本 学, “ホログラム記録を利用した光メモリ技術の課題,” 信学技報, no.MR2002-64, Dec. 2002.
- [4] M. R. Ayres, A. Hoskins, and K. Curtis, “Image oversampling for page-oriented optical data storage,” ISOM, ThE4, Hawaii, USA, July 2005.
- [5] W. K. Pratt, “Digital image processing,” Wiley, New York, April 1991.
- [6] Tinku Acharya and Ping-Sing Tsai, “Computational foundations of image interpolation algorithms,” ACM Ubiquity, vol.8, no.42, pp.1-17, Oct. 2007.
- [7] C. M. Bishop, “パターン認識と機械学習 上,” シュプリンガー・ジャパン, 東京, June 2008.

遅延故障診断に関する研究

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

愛媛大学名誉教授

高松 雄三

株式会社半導体理工学研究センター

開発第2部テスト&故障解析開発室室長

相 京 隆

1. はじめに

論理回路の高速化に伴って、目標の動作速度で回路が正しく動作するか否かを検査することが必要不可欠になっている。さらに、配線の微細化、長距離化、および銅配線の導入等によって、抵抗性のショート欠陥やオープン欠陥等の不良が顕在化してきている。これらは、微小な遅延故障としてモデル化可能であることから、微小な遅延故障に対する故障検査法の確立が望まれている。

従来の遷移故障モデルに基づく故障診断法では、テストパターンによって活性化された経路を信号変化が伝搬するために必要な時間（外部入力に印加された信号変化が外部出力に到達するまでの伝搬遅延）とフリップフロップに信号値を取り込むタイミング（テストタイミング）の関係から求められる検出可能な遅延故障のサイズを考慮できない。従って、遷移遅延故障モデルのもとで微小な遅延故障をもつ故障回路の故障診断を行うならば、故障診断結果の精度に問題が生じる。

また、故障位置や故障原因を特定する故障診断において故障候補数を少なくするためには、故障のペアを区別する故障診断考慮テストパターンの生成が重要であるが、遅延故障に対する故障診断考慮テスト生成法は確立していない。

本研究の目的は、1) 微小遅延故障をもつ故障回路に適用可能な遅延故障診断法を提案すること、および2) 遅延故障に対する故障診断考慮テスト生成法を提案することである。提案する新しい遅延故障検査法は、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

計画1：微小遅延故障診断法の提案

本研究では、次のような特徴をもつ故障診断法を提案する。

1) テストサイクルに従って論理値がスキャンフリップフロップに取り込まれる現在のスキャンテスト環境を考慮していること、

2) 故障診断精度を向上するためにテストパターンによって検出可能な遅延故障サイズの情報を利用すること、

3) 故障診断精度を向上するために誤りを検出しないテストパターンを利用して故障診断を行うこと、および

4) 診断処理時間を短縮するために、テストパターンによって検出可能な遅延故障サイズの最小値のみを利用した診断用遅延故障シミュレーションを利用すること

計画2：遅延故障に対する故障診断考慮テスト生成法の提案

本研究では、次のような特徴をもつ故障診断考慮テスト生成法を提案する。

1) 遅延故障テスト環境として一般的なローチオンキャプチャテストを考慮していること。

2) 与えられた遷移故障検出用テスト集合から区別できない故障ペアに対して付加回路を挿入し、縮退故障用テスト生成ツールを用いて遅延故障に対する故障診断考慮テスト生成を行うこと

3) 回路構造に基づく解析により区別不可能な故障ペアの識別を行うこと、および

4) 故障ペアに対しては、2時刻展開した回路に付加回路を挿入し、縮退故障用テスト生成ツールを用いて遅延故障に対する診断用テスト生成を行うこと

3. 研究の成果

計画1に関しては、図1に示す故障診断フローを提案した。

提案する故障診断法は、まずフェイルテストパターン集合を用いて故障診断を行う。フェイルテストパターンによる故障診断は3つのフェーズで構成される。

フェーズ1 時間付き5値シミュレーションを用いた活性化経路探索処理

フェーズ2 後方追跡による故障候補の推定処理

フェーズ3 時間付き7値演算に基づく診断用遅延故障シミュレーションを用いた一致度の計算処理

次に、フェイルテストパターン集合による故障診断の結果として得られた故障候補に対して、パステストパターン集合を用いた故障診断を行う。パステストパターン集合を用いた故障診断では、時間付き7値演算に基づく診断用遅延故障シミュレーション結果に基づいて、故障候補の一致度を計算する。

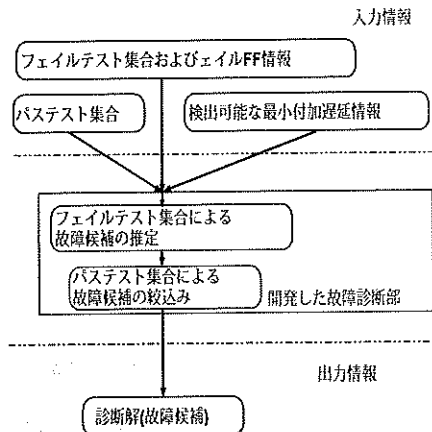


図 1: 故障診断法の概要

提案する故障診断法では、各故障候補毎に、フェイルテストパターンを用いた診断用遅延故障シミュレーションおよびパステストパターンを用いた診断用遅延故障シミュレーションを行う。シミュレーション結果に基づいて、次に示すように一致度の計算を行う。

フェイルテストパターンによる一致度およびパステストパターンによる一致度は次式に従って求める。
フェイルテストパターンによる一致度 =

$$\frac{TFSF+TFSP(D)}{TFSF+TFSP+TPSF+TFSP(D)}$$

パステストパターンによる一致度 =

$$\frac{TPSP+TPSP(D)}{\text{全外部出力数}}$$

なお、一致度の計算における各項目は次のような意味をもつ。

診断前に外部出力で観測した結果に対して、フェイル外部出力をTFと表し、パス外部出力をTPと表す。診断用遅延故障シミュレーションによる結果に対して、フェイル外部出力と判定された場合は、SFとする。故障の影響が伝播していないパス外部出力をSPで表し、故障の影響が伝播しているパス外部出力をSP(D)で表す。

表 1: 故障診断実験結果

回路名	提案手法			
	順位	候補数	成功率 (%)	処理時間
c2670	1.00	9.00	80	0.23
c5315	1.28	3.17	70	0.65
c7552	1.28	5.78	70	1.26

提案手法をC言語で実現化し、評価実験を行った。使用計算機は、Intel Pentium 4 3.2GHz、メモリ容量 3GB である。表 1 に遅延故障診断結果を示す。この表において、回路名は実験を行ったベンチマーク回路を示し、順位は挿入された真の故障の診断結果の順位の平均を示し、故障候補数は診断された順位以上の順位を持つ故障候補数の平均を示す。診断成功率は、次の様に定義する。

以下の条件 1, 2 をともに満足した場合、微小遅延故障診断に成功したと判定する。故障診断実験を行った各回路のケース数に対して故障診断に成功したケースの割合を「診断成功率」と定義する。

- 条件 1 : 真の故障の順位が 1 位
- 条件 2 : 真の故障がもつ順位以上の故障候補数が 20 個以下

計画 2 に関しては、遅延故障のペアに対して故障診断考慮テスト生成法を提案した。

定義: 遷移故障に対する故障診断考慮テストパターン f_1, f_2 を故障診断の対象故障ペアとする。テストパターン $v_1 - v_2$ を印加し、以下のいずれかの条件が満たされたとき、故障 f_1, f_2 は $v_1 - v_2$ によって区別されるという。

D1: 故障 f_1 が検出され、故障 f_2 が検出されない。

D2: 故障 f_2 が検出され、故障 f_1 が検出されない。

D3: 故障 f_1, f_2 とも検出されるが、いずれか一方の故障の影響のみが伝搬しているような外部出力またはフリップフロップが、少なくとも 1 つ存在する。

遷移故障を検出するためには連続する 2 パターンの印加が必要である。信号線 l の遷移故障を f とするとき、テストパターン $v_1 - v_2$ が f を検出するためには、以下の条件が必要十分条件となる。

第 1 パターンの条件: 故障 f が立ち上がり (立ち下がり) 遷移故障の場合、信号線 l にパターン v_1 によって論理値 0 (1) が設定される。

第 2 パターンの条件: 故障 f が立ち上がり (立ち下

がり) 遷移故障の場合、信号線 l の 0(1) 縮退故障がパターン v_2 によって検出される。

条件 D1, D2 を満たすテストパターンを生成する場合、故障ペアの一方の故障を非検出とする必要がある。遷移故障を非検出とするようなテストパターン $v_1 - v_2$ を生成するための条件は、下記のいずれかを満たすことである。ここでは、信号線 l の $w \rightarrow \bar{w}$ ($w \in \{0, 1\}$) 遷移を考える。

U1: 第 1 パターン v_1 によって信号線 l に値 $\bar{w}$ を設定する。

U2: 第 2 パターン v_2 によって信号線 l に値 w を設定する。

U3: 第 2 パターン v_2 によって信号線 l の w 縮退故障を検出しない。

提案手法では、条件を満足する遅延故障に対する診断用テストを縮退故障用テスト生成ツールを利用して生成する。提案する故障診断考慮テスト生成アルゴリズムは以下のような 3 つのフェーズからなる。

テスト生成アルゴリズムに与えられるデータ: F_p :
対象故障ペア集合;

フェーズ 1: 非検出の条件として U1 を考慮し、区別条件 D1, D2 を満たすテストパターンを生成する。

フェーズ 2: 非検出の条件として U2 を考慮し、区別条件 D1, D2 を満たすテストパターンを生成する。

フェーズ 3: 区別の条件 D3 および、非検出条件として U3 を考慮した区別条件 D1, D2 を満たすテストパターンを生成する。

例えば、 l_1 の立ち上がり遷移故障 ($0 \rightarrow 1$) (f_1) を検出し、 l_2 の立ち上がり遷移故障 ($0 \rightarrow 1$) (f_2) を検出しない場合について示す。 f_1 を検出するには C_{11} の信号線 l_1 の値を 0 に設定し、 C_{12} の信号線 l_1 の 0 縮退故障を検出する必要がある、 f_2 を検出しないためには C_{21} の信号線 l_2 の値を 1 に設定することを目指す。したがって、図 2 に示す付加回路を挿入し、その回路に対してテスト生成を行う。

提案手法を C 言語で実現化し、評価実験を行った。表 2 は左から、回路名、対象故障ペア数、区別できた故障ペア数、区別不可であった故障ペア数、生成したパターン数を示す。生成したパターン数には同一パターンは含まれていない。実験の結果、全ての故障ペアに対して、テストパターンの生成に成功、もしくは区別不可能と判定した。

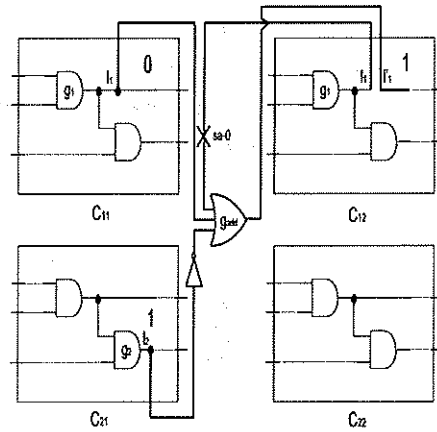


図 2: 診断考慮テスト生成のための付加回路例

表 2: ISCAS ベンチマーク回路に対する実験結果

回路	ペア数	区別可能	区別不可	パターン数
s35932	9874	140	9734	48
s38417	281	171	110	163
s38584	14197	1316	12881	583

4. まとめ

本研究では、微小遅延故障をもつ故障回路に適用可能な遅延故障診断法を提案した。また、遅延故障に対する故障診断考慮テスト生成法を提案した。更に、提案した故障診断法および故障診断考慮テスト生成法のプロトタイプを開発し、ベンチマーク回路に適用した評価実験を行った。

主な関連発表

1) 検出可能な遅延故障サイズを考慮した遅延故障診断法, 相京 隆, 高橋 寛, 樋上喜信, 大津 潤一, 小野 恭平, 清水 隆治, 高松 雄三, 電子情報通信学会論文誌 (D-I 分冊), 第 J92-D 巻, 7 号, 984-993 頁, 2009.7

2) Timing-Aware Diagnosis for Small Delay Defects, T. Aikyo, H. Takahashi, Y. Higami, J. Otsu, K. Ono, and Y. Takamatsu, Proceedings of IEEE Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems Symposium, PP.223-231, 2007.9

3) Diagnostic Test Generation for Transition Faults Using a Stuck-at ATPG Tool, Y. Higami, Y. Kurose, S. Ohno, H. Yamaoka, H. Takahashi, Y. Shimizu, T. Aikyo, and Y. Takamatsu, Proceedings of the IEEE International Test Conference, Paper 16.3, 2009.11

PS灰造粒砂のコンクリートへの適用性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

平成19年度の検討結果より、PS灰造粒骨材のコンクリート用骨材としての適用性を強度面から考慮すると、細骨材および粗骨材の骨材すべてをPS灰造粒骨材使用することは、強度不足から使用可能な適用範囲が狭く、市場における需要も少ないものと考えられる。よって、平成20年度はPS灰造粒骨材の使用を細骨材に限定し、検討する方針とした。

具体的な方策として、これまでに細骨材全量をPS灰造粒骨材で使用した強度・変形特性を整理した。さらに今後の展開として、一般的な細骨材である砕砂との併用することを想定し、細骨材の置換割合を変化させ強度・変形特性を評価した結果、それらの耐久性についても診断する必要があると考えられた。

一方で、PS灰造粒骨材を一般の生コン工場への普及を考えた場合、有用な資源ではあるが品質管理の面で他の材料と同様に普及していくことは難しいと考えられる。また、建設業界に目を向けると建設作業員の高齢化および団塊世代の引退による技術継承が行われていない現状から熟練工が不足し、公共工事そのものも減少の一途を辿っていることから、厳しい価格競争に晒されているなどの課題がある。その解決策として、型枠解体、足場組解体の工程を省略でき、工期短縮が図られるプレキャスト工法が用いられつつある。しかし、プレキャスト工法で用いられる型枠は高強度、高機能である反面、非常に高価であることから一般工事には浸透していない。

そこで、本研究では平成20年度の新規追加検討項目として、骨材として安価なPS灰造粒骨材を用いることにより、より安価で軽量の型枠が開発可能であるか検討することとした。これらの検討結果について以下に報告する。

2. PS 灰造粒骨材（以下、PS 灰造粒砂）用いたコンクリートの耐久性

PS 灰造粒砂を用いた硬化コンクリートの耐久性能（乾燥収縮ひずみ・対凍害性・透気性）を調べるため、乾燥収縮試験・凍結融解試験・透気試験の3種類の試験を行い、評価した。

2.1 試験用供試体の作製

耐久性試験用に作製したコンクリートの示方配合を表 2-1 に示す。今回は細骨材の砕砂を PS 灰造粒砂に置換したものを使用した。置換率は体積比で 60, 80, 100%と変動させ、3 種類の供試体で各試験を行った。

表 2-1 耐久性試験用の示方配合

PS置換率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							スランプ (cm)	Air (%)
			W	C	S(PS)	S(砕砂)	G	AE減水剤	AE剤		
60	50	50	170	340	336	348	897	2.040	0.102	8.5	4.0
80			165	330	453	176	908	0.990	0.099	13.5	3.2
100			160	320	573	0	919	0	0.096	12.0	4.0

2.2 各供試体の性質

置換率の異なる 3 種類の供試体の性質把握のため、圧縮強度試験を行い、圧縮強度および応力 - ひずみ曲線より弾性係数を測定した。その結果を図 2-1 および図 2-2 に示す。また、比較検討するために、PS 灰造粒砂水セメント比が等しい PS 灰造粒砂置換率 0%の普通コンクリートの結果も併せて表示した。

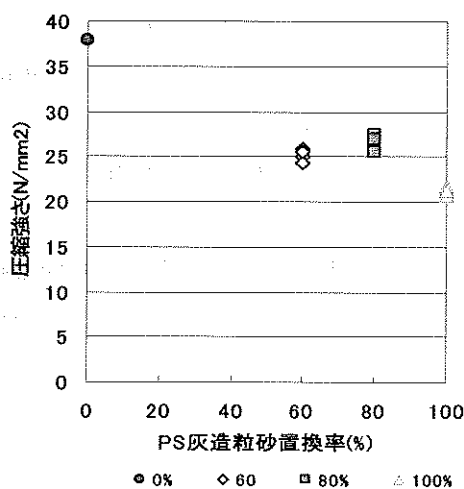


図 2-1 圧縮強度の関係

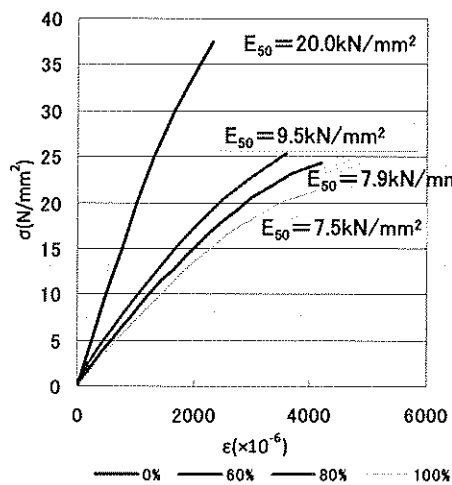


図 2-2 各配合における応力 - ひずみ

置換率と圧縮強度の関係は、細骨材に PS 灰造粒砂を使用すると低下している。また、置換率 80%と 60%の強度は同程度であった。この結果より、圧縮応力下における破壊は、コンクリート内部の PS 灰造粒砂で構成されたマトリックスに対して局所的に集中していることが予見でき、置換率よりも PS 灰造粒砂の使用の有無が影響し大きく関与していることがわかった。また、弾性係数は普通コンクリートの 1/2 以下、ひずみにおいては 2 倍程度となっており、置換率の違いによる大きな変化がない。これは置換率の影響よりも、細骨材で使用した PS 灰造粒砂の骨材粒に外力が集中し、変形および破壊が生じることで大きく影響したためと考えられる。

2.3 乾燥収縮ひずみ

前述の配合で作製した 3 種類のコンクリートのコンタクトチップによる乾燥収縮試験の結果と、示方書による $W/C=50\%$ の予測式より求めた収縮ひずみの値と乾燥期間との関係を図 2-3 に示す。また、ひずみと減少重量の関係を図 2-4 に示す。PS 灰造粒砂を用いたコンクリートを予測式と比較すると、置換率による大きな影響は見られない。また、70 日で 1.4~1.7 倍程度になっており、予測式を大幅に上回っている。また、重量の減少は普通コンクリートと比較して 4 倍以上になっている。乾燥収縮が大きくなる要因として、セメントペーストの乾燥収縮率は、コンクリートより非常に大きく、水セメント比の影響が明確に現れ、水セメント比が大きいほど、乾燥収縮も大きくなるということが分かっている¹⁾。PS 灰造粒砂は吸水率が高いため、細骨材内からセメントペーストへの水分供給が起こり、配合時の水セメント比よりも供試体の水セメント比が大きくなり、ひずみが増大したのではないかと考えられる。また、乾燥収縮については、骨材の比重や空隙率が大きく影響しており、比重が大きく空隙量の少ない骨材を用いたコンクリートは、骨材がセメントペーストの乾燥収縮に対して大きく抵抗しているために収縮量が小さく抑えられている²⁾。しかし、図 2-4 より吸水率の高い PS 灰造粒骨材を用いたコンクリートは、骨材内の水分の乾燥による重量減少が大きいことがわかる。乾燥により比重が小さく空隙量の多くなった骨材は、収縮に対する抵抗力が弱くなり、収縮量が大きくなっていると考えられる。

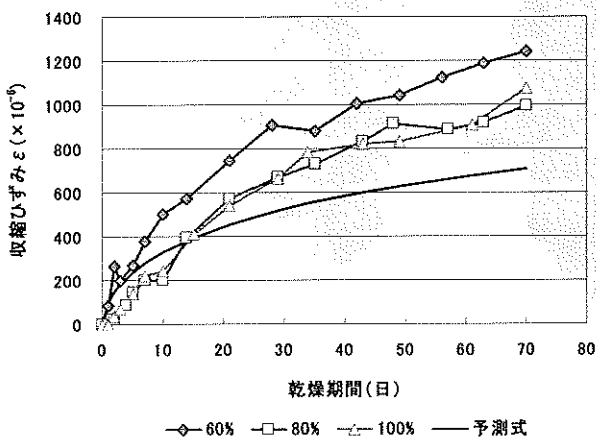


図 2-3 乾燥収縮ひずみの経時変化

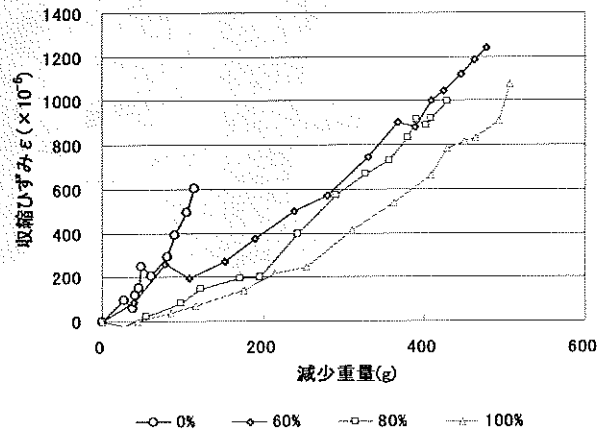


図 2-4 乾燥収縮ひずみと減少重量の関係

2.4 対凍害性

凍結融解試験の結果を図 2-5 に示す。相対動弾性係数は大きく減少することなく、限界相対動弾性係数の 60% を上回っている。コンクリートの耐凍害性の評価に用いる「凍結融解試験方法(JIS)」で定められている性能を満たしていることが分かる。しかし、図 2-6 に示すように、表面層の劣化が激しくスケーリングが起きていることがわかる。原因として、吸水率が高い PS 灰造粒砂により、表面のコンクリート中の水分量が増加したことで、表面層の劣化が進行したと考えられる。また、中心部では、水の浸透が少なく、PS 灰造粒砂の空隙が、凍結による水圧の発生を緩和しているのではないかと考えられる。

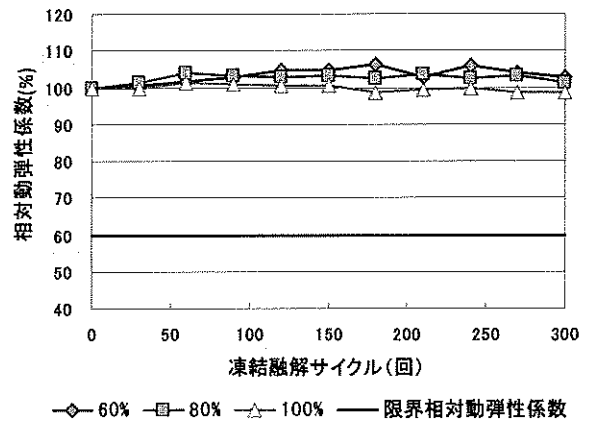


図 2-5 相対動弾性係数とサイクル数の関係

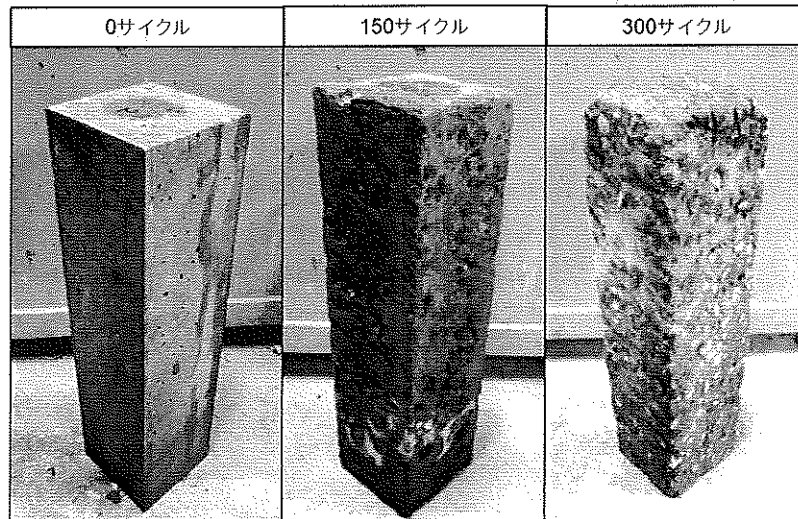


図 2-6 サイクル数と供試体の表面

2.5 透気性

透気試験の結果を図 2-7 に示す。PS 灰造粒砂を用いたコンクリートの透気係数と空隙率の関係は、置換率が違っていても大きな変化は見られない。また、一般的な普通コンクリートと比較すると、PS 灰造粒砂を用いたコンクリートの方が、同空隙率では透気係数は大きく、密実性が低いという特徴があげられる。原因として、PS 灰造粒砂は空隙が多くポーラスな構造であることから、透気しやすくなり、透気係数に影響を与えていると考えられる。また、吸水率が高いため、乾燥により空隙率はさらに上昇すると予見でき、透気係数はより大きくなると予想される。

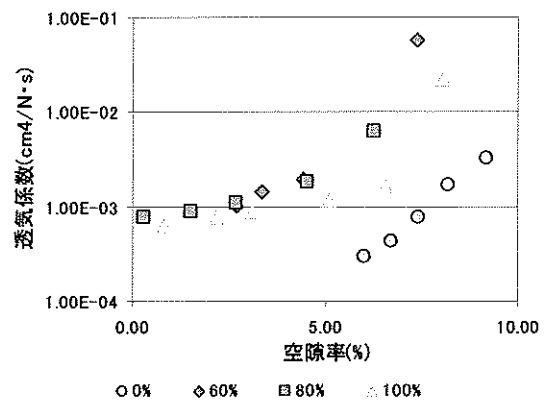


図 2-7 空隙率と透気係数の関係

3. PS 灰造粒砂を用いたモルタルによるプレキャスト工法用の埋設型枠の開発

3.1 型枠に用いるモルタルの繊維混入による影響と性質

PS 灰造粒砂を用いて開発するプレキャスト工法用の埋設型枠はモルタル製とした。そのモルタル（以下、PS モルタルと称す）の配合を検討するにあたり、試作段階の形状は平板とし、型枠での使用に必要な曲げ耐力を向上させるため繊維を混入することとした。検討事項として、繊維の違いおよび混入率の違いによって、フレッシュモルタルの流動性および硬化後の強度に及ぼす影響を評価する。

PS モルタルに混入する繊維の選定には、一般的に用いられている鋼繊維では型枠全体としての質量が増加してしまい、PS 灰造粒砂の特徴である軽量性を活かすことができないと判断し除外した。また、軽量かつ高強度な炭素繊維は非常に高価であることから、建設材料として大量に使用することは不向きであると判断した。これらのことから軽量であること、安価であることを条件とし、図 3-1 ビニロン繊維、図 3-2 ポリプロピレン繊維、図 3-3 廃ペットボトルから製造された繊維（以下、PET 繊維と称す）を用いることとした。3 種類の繊維の主な物性を表 3-1 に示す。

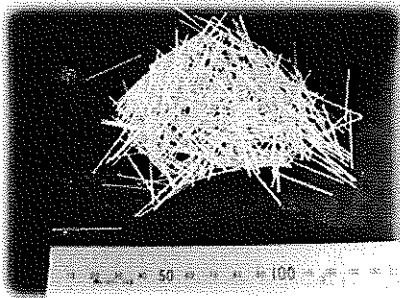


図 3-1 ビニロン繊維

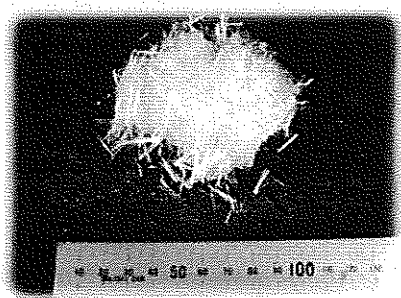


図 3-2 ポリプロピレン繊維

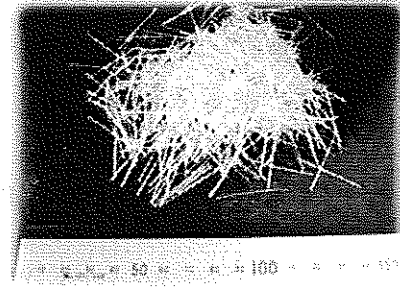


図 3-3 PET 繊維

材 質	繊維径 (μm)	繊維長 (mm)	引張強さ (N/mm^2)	ヤング率 (N/mm^2)	密 度 (g/cm^3)
ビニロン	660	30	861	23000	1.30
ポリプロピレン	43	12	500	7500	0.91
PET 繊維	700	30	450	20000	1.32

表 3-1 各繊維の主な性質

3-2 モルタルフロー値および曲げ強さの目標値の設定と試験方法

PS モルタルのフロー値の目標は 170mm~220mm の範囲とした。その理由として、予備実験として繊維を混入して試し練りを行った結果、170mm 以下のモルタルでは流動性が乏しく、打設作業や締固めなどが困難と予想されたためである。さらに、220mm 以上の場合、混入した繊維が材料の密度の違いから打設時にブリーディングの上面に浮き不均一な状態であったためである。

また、そのほかの配合条件として、強度を高めるために水セメント比を 30%と低く設定し、流動性を確保するため、高性能 AE 減水剤（以下、SP 剤）を使用した。

3-3 繊維の種類の違いによる流動性および強度への影響

繊維の違いによる流動性および強度を評価するにあたり、予備試験において相対的な評価が行える PS 灰造粒砂の混入割合は全体積に占める容積比でいずれも 42%とした。以下、表 3-2 に配合を示す。ここで、高性能 AE 減水剤混入による影響を同一とするため添加量はいずれの場合もセメント質量の 1.0%とした。さらに各繊維の混入率は繊維メーカーに添付されていた資料を基に最大量を混入した。よって、それぞれビニロン繊維および PET 繊維は容積比で全体積の 2.0%、ポリプロピレン繊維は 0.20%とした。各配合において 1 バッチ 20L のモルタルを寸法 40mm×40mm×160mm の角柱供試体用の型枠に 6 体分打設した。脱型を翌日行い、水温 20℃±2℃の水槽内に静置し、材齢 28 日で JIS R 5201 に準じて曲げ試験および圧縮強度試験を実施した。

表 3-2 PS 造粒砂を 42%使用時のモルタルの配合

繊維種類	W/C (%)	PS/V (%)	単位量(kg/ m ³)				
			W	C	S	SP 剤*	繊維
繊維なし	30	42	272	939	688	9.390	0.000
ビニロン	30	42	267	920	674	9.200	2.546
ポリプロピレン	30	42	272	939	688	9.387	1.819
PET 繊維	30	42	267	920	674	9.200	2.585

*高性能 AE 減水剤(SP 剤) C×1.0%

表 3-3 PS 造粒砂を 42%使用時の各試験結果

繊維種類 (混入率)	曲げ強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	吸水率 (%)	モルタル フロー
繊維なし	5.8	38.7	14.5	182
ビニロン (2.0%)	7.8	47.6	14.3	176
ポリプロピレン (0.2%)	7.9	45.8	12.9	171
PET 繊維 (2.0%)	7.3	50.3	14.9	193

表 3-3 に繊維なし、繊維の種別による曲げ強度、圧縮強度、吸水率、モルタルフロー値の試験結果に

ついて示す。曲げ強度は繊維を混入することにより繊維なしと比較した場合、いずれも約 20～30%強度が増加していた。圧縮強度についても同様に強度が増加していた。また、曲げ試験時の破壊状況を観察した結果、供試体が破壊する際に繊維なしおよびポリプロピレンはひび割れ発生と同時に平板が破断されていた。一方、ビニロンおよび PET 繊維は複雑に絡み合った繊維の架橋効果によって、モルタル部をつなぎながら折れ曲がっていく現象であった。

吸水率はポリプロピレンにやや低下する傾向が見られた。これは繊維径および繊維長さが他の繊維と比べ細くて短く、モルタルと付着する被表面積が大きいことから、より緻密なモルタルが形成されていたことが推測される。

フレッシュモルタルの流動性は繊維を混入しなかった場合のモルタルフロー値に対して、ビニロン、ポリプロピレンを混入した場合は、モルタルフロー値が減少していた。しかし、PET 繊維を混入した場合のみ、モルタルフロー値が増加していた。手触りではあるが PET 繊維は他の繊維と比べ表面の摩擦が少ないことから流動に対する抵抗性が少なかったと考えられる。このことから PET 繊維の曲げ強度が他の繊維をよりも小さかったのはモルタルとの付着が弱かったと考えられる。

3-4 PS 灰造粒砂を用いたプレキャスト工法用埋設型枠の作製および養生効果実験の概要

開発する型枠によって、保護を必要とするコンクリート構造物に対しての養生効果の有無を明らかにするため簡易的な実験を行った。また、ここでは比較のために PS 灰造粒砂を用いたモルタルと砕砂を用いたモルタルの型枠を作製し、型枠内部に打設したコンクリートの養生後の諸性質について検討する。

型枠の形状は平板とし、寸法は、600mm×300mm×30mm とした。モルタルの配合は前述の表 3-2 のポリプロピレン繊維を使用した配合を採用し、PS 灰造粒砂を用いたものを PS 砂型枠、砕砂を用いたものを砕砂型枠と以下から称す。20±2℃の恒温水槽内で養生した材齢 28 日後の各モルタルの単位体積質量および吸水率を表 3-4 に示す。PS 砂型枠の単位体積質量 1.71g/cm³ に対して砕砂型枠は 2.09 g/cm³ と軽量であることから約 20%の軽量化が図れることができる。また、吸水率は PS 砂型枠 17.1%，砕砂型枠 7.4%であることから PS 砂型枠は約 2.3 倍の吸水性能を有していることがわかった。

表 3-4 各モルタル型枠の性能

モルタル名	単位体積質量 (g/cm ³)	吸水率 (%)
PS 砂型枠	1.71	17.1
砕砂型枠	2.09	7.4

図 3-4 に実験の様子を示しているが、内寸法で 600mm×300mm×300mm の合板で 5 面を覆い、それぞれ集光ライトを当てる一面を PS 砂型枠および砕砂型枠で覆った型枠を作製した。その内部に養生効果の有無を評価するための砕砂および砕石を用いた W/C50%の同じ配合のコンクリートをそれぞれの型枠に打設した。打設後は残った上面を断熱材で覆い、水分の逸散の無いよう

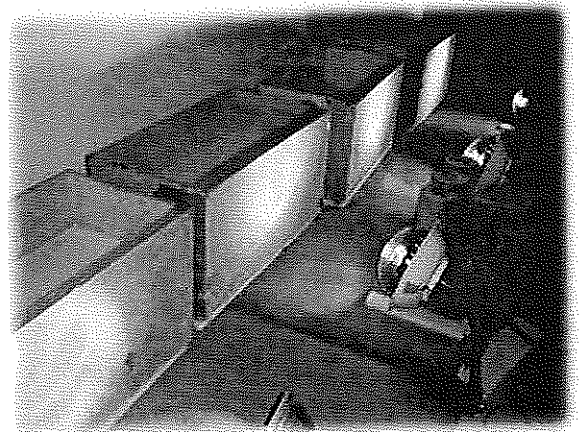
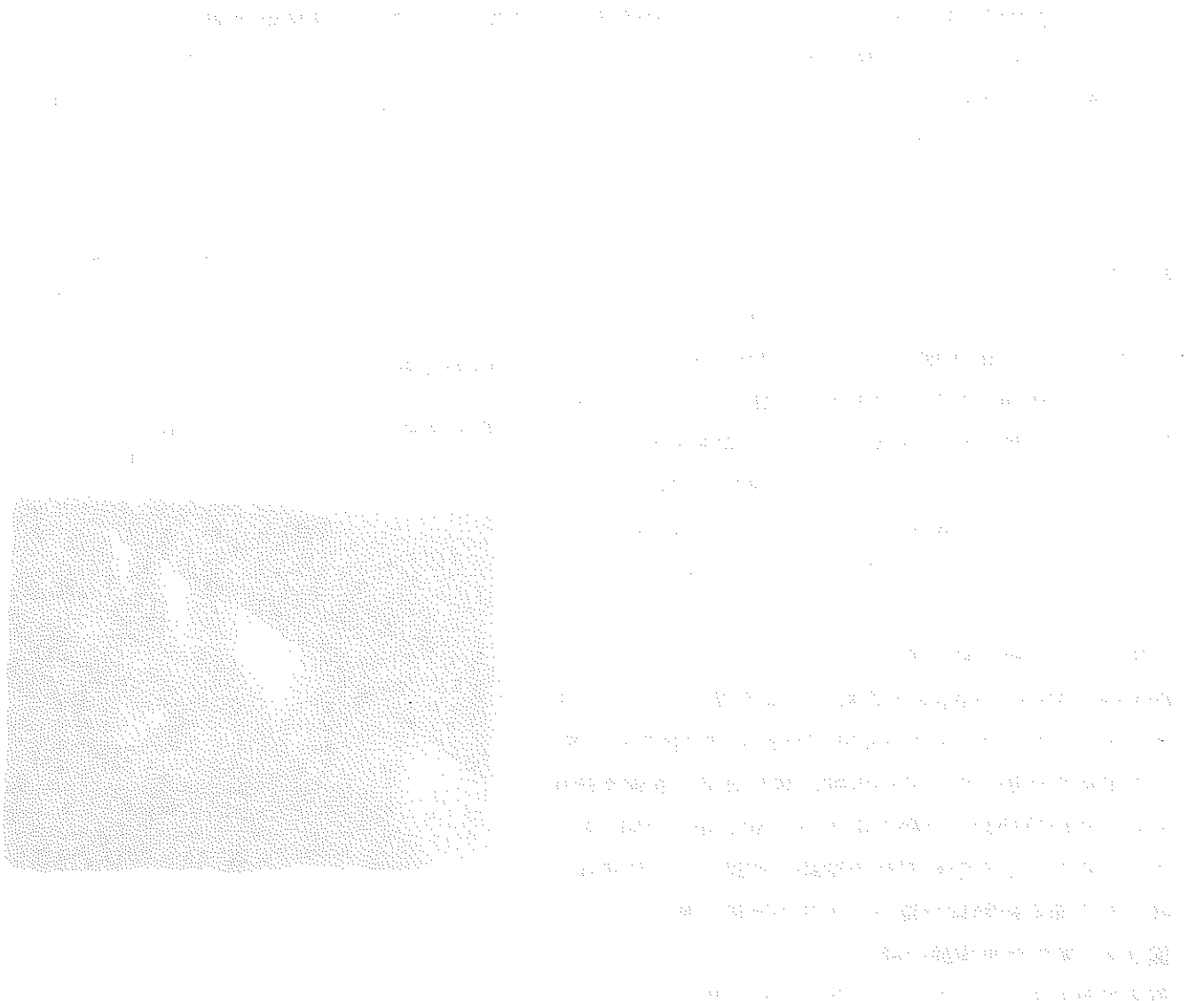


図 3-4 養生効果実験の様子

気密処理を施した。また、これとは別に同

配合のコンクリートの $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を6体作製した。実験条件として、各供試体は $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ に管理された恒温室内にて行った。ただし、円柱供試体は同室内で材齢1日後に脱型し、気中養生したものと $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ の水槽内で水中養生したものの2種類とした。集光ライトは直射日光が型枠に当たることを想定条件としている。円柱供試体の気中養生にも恒温室内にてライトを当てた。それぞれ材齢28日後にPS砂型枠および砕砂型枠に打設したコンクリートは $\phi 100$ でコアリングした供試体によって、円柱供試体はそのまま圧縮強度試験、透水試験、透気試験を順次実施した。



3-5 PS 灰造粒砂によるプレキャスト工法用埋設型枠の養生効果実験の結果

養生条件の異なる供試体の各実験結果を表 3-5 に示す。さらに、透水試験、透気試験結果は明確にするため図 3-5 に示す。

表 3-5 各モルタル型枠の性能試験結果

養生条件	圧縮強度 (N/mm ²)	透水係数 (cm/s) × 10 ⁻¹²	透気係数 (cm ⁴ /N・s) × 10 ⁻⁵
砕砂型枠	35.24	61.20	3.34
PS 砂型枠	41.88	23.10	2.67
気中養生	17.93	92.40	48.30
水中養生	51.53	48.30	1.19

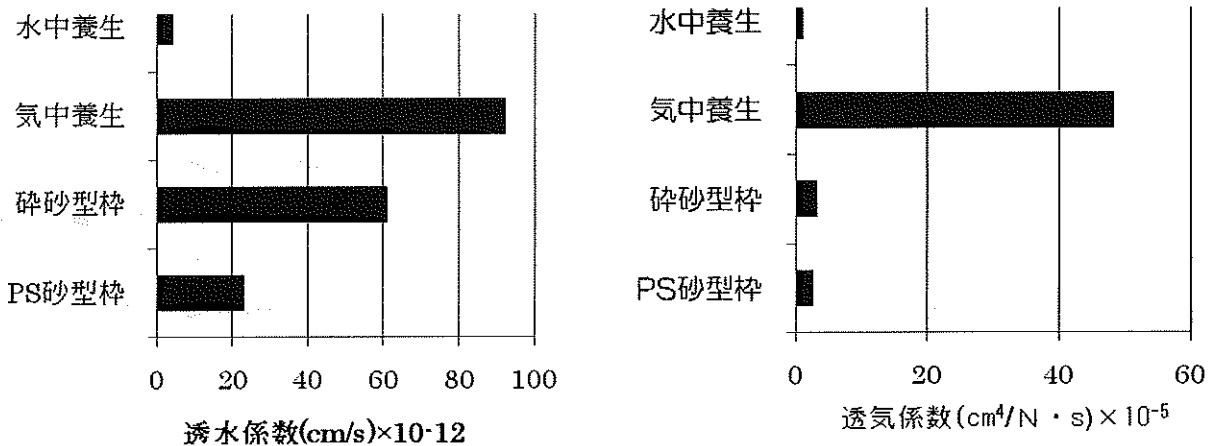


図 3-5 各モルタル型枠の透水・透気係数

圧縮強度は PS 砂型枠の方が高かった。円柱供試体の水中養生と気中養生の違いから考えると早期材齢時における水分の供給の違いによって水和反応に違いがでたものと考えられる。また、透水試験結果からも砕砂型枠よりも PS 砂型枠の方が透水性は低く、密実性が高まっていることが裏付けられている。ただし、円柱供試体の水中養生を含めて透気試験では密実性に有効差は見いだし難いことがわかった。今後、有効性を検討する際に透気試験の実施について検討を要することがわかった。

今回の簡易的な実験から、PS 灰造粒砂による埋設型枠の有効性として、軽量化が可能なこと、保護を必要とするコンクリート構造物の密実性が高まることがわかった。今後は内部温度の状況や実規模や野外実験を通して検証を進める必要があると考えられる。

4. まとめ

平成 20 年度に実施した PS 灰造粒砂によるコンクリートの耐久性およびプレキャスト工法用の埋設型枠の開発に関する基礎的な実験を以下に要約する。

耐久性に関する項目

- 1) PS 灰造粒砂を用いたコンクリートの耐久性は、置換率の違いによる影響よりも PS 灰造粒砂の使用の有無が大きく影響していることがわかった。
- 2) PS 灰造粒砂の置換率よりも、軽量で吸水率が高く、ポーラスな構造であるという PS 灰造粒砂の特徴が大きく影響しており、乾燥によるひずみの増加や凍結による表面の劣化、透気係数の増加などの耐久性能の低下に結びついた結果となった。
- 3) PS 灰造粒砂の置換率の違いを比較すると、置換率 80%と 60%の強度は同程度であり、100%では低下していたことや、耐久性試験からは置換率の違いによる大きな影響が現れなかったことから、PS 灰造粒砂を置換して使用するときは、80%の置換率で使用することが良いと考えられる。
- 4) 耐久性への対策として、繊維混入による補強や、塗料などを用いて表面をコーティングすることで、耐久性を向上させる工夫が必要であると考えられる。

プレキャスト工法用の埋設型枠の開発に関する項目

- 1) 平板型枠の曲げ強度は繊維を混入することにより繊維なしと比較した場合、いずれも約 20～30%強度が増加していた。また、曲げ試験時の破壊状況を観察した結果、ビニロンおよび PET 繊維は複雑に絡み合った繊維の架橋効果によって、モルタル部をつなぎながら折れ曲がっていく現象であった。
- 2) PET 繊維を混入した場合のみ、モルタルフロー値が増加していた。PET 繊維は他の繊維と比べ表面の摩擦が少なく流動抵抗性が少なかったと考えられる。
- 3) 開発した PS 灰造粒砂による埋設型枠の方が圧縮強度は高く、透水性も低いことから保護を必要とするコンクリートの密実性が高まっていた。

参考文献

- 1) 張茂剛, 畑中重光, 三島直生:「ポーラスコンクリートの体積変化特性に関する基礎的研究」, 三重大学修士論文, 2007.
- 2) 木村卓嗣, 島弘:「コンクリートの収縮特性と粗骨材の吸水特性との関係」, 高知工科大学修士論文, 2001.

水素-空気予混合気の乱流燃焼速度モデル構築及び検証

愛媛大学大学院理工学研究科准教授

中原 真也

三菱重工業株式会社技術本部長崎研究所

岡林 一木

三菱重工業株式会社技術本部高砂研究所

武野 計二

1. はじめに

安全で快適な水素社会を迎えるためには、水素の製造、貯蔵・輸送、利用の各段階に潜在化する水素火災・爆発事故の予測・予防技術の開発は急務である。特に、水素関連機器等の開発や設置に関する安全を確保するために、水素に関わる火炎伝ばや乱流燃焼の爆燃を高精度に予測できるシミュレーション技術の開発が重要な課題である。したがって、水素を燃料とした予混合気の乱流燃焼機構の解明およびモデルの構築が必要不可欠である。

本共同研究は、水素-空気予混合気の爆燃シミュレーションの精度および汎用性を向上させるための基礎データの把握、さらには新しい乱流燃焼速度モデルを構築することを目的とする。

そこで本研究では、①狭隘空間での火炎伝ば特性の把握・評価、②商用・汎用爆燃のシミュレーションコードで使用されている乱流燃焼モデルの検証、③乱流燃焼速度を整理する上で重要な局所燃焼速度特性の Markstein 数との関係の把握・評価、を実施した。

本報では、これらのうち①の狭隘空間内での水素予混合火炎伝ば機構を解明することを目的に、狭隘空間型モデル燃焼器を用いて実施した実験により、爆燃計算で重要となる火炎伝ば速度特性について検討した結果を以下で報告する。

水素利用社会に潜在する危険の一つに、水素ガスの漏洩に関わる火災や爆発が、重大な被害をもたらす爆ごうへ遷移する事故へつながり易いことがあげられる。水素社会を迎えるに際し、水素に関わる爆ごう現象を解明し、その予防法や抑制法を確立することは重要である。そこで特に、水底トンネルや地下施設内通路等など一方向の寸法が他の二方向に比べて非常に長い空間では、爆ごうに遷移し易い⁽¹⁾とされることから、これまでに管長や管径と爆ごう限界等との関係⁽²⁾が詳細に調べられて来た。

しかしながら、水素ステーション等の水素利用施設を考えた場合、機材の隙間やロッカー等の調度類の隙間に水素が滞留する可能性があるが、この様ないわゆる狭隘空間での爆ごう危険性に関しては、十分に解明されているとは言い難い。

本研究では、基礎的な検討として、爆ごうへの遷移が火炎伝ば速度の増大が重要な因子であることに着目し、水素混合気に対して、機材の隙間を模擬した狭隘空間モデル内を伝ばする火炎の燃焼特性を明らかにする。ここでは、爆ごう希薄限界近傍⁽³⁾の当量比 0.3~0.5 の水素-空気混合気、および層流燃焼速度を 50cm/s に揃えた当量比 0.5~1.4 の水素人工空気混合気を対象に、高さ 50 cm の上端開放の狭隘空間モデル燃焼器内を伝ばする火炎を観測し火炎の伝ば距離と速度の関係を定量的に検討した結果を示す。さらに、モデル内の圧力特性についても明らかにする。

2. 実験装置および方法

本研究では、表 1 に示す、当量比 ϕ が 0.3, 0.35, 0.4, 0.5 の水素-空気希薄混合気、および水素-空気混合気を室で希釈し層流燃焼速度 S_{L0} を 50 cm/s にほぼ揃えた ϕ が 0.5, 0.7, 1.0, 1.4 の水素人工空気混合気を使用した。なお、 $\phi=0.35$ の水素-空気混合気の S_{L0} は約 50 cm/s である。なお表 1 中、 S_{L0} は定容燃焼器を使用し得られた燃焼圧力履歴から算出した層流燃焼速度⁽⁴⁾、 a_0 は熱拡散率、 T_p は化学平衡計算による定圧燃焼時の断熱燃焼温度、 Le は不足成分の拡散係数に基づくルイス数である。

実験装置の概略を図 1 に示す。機材やロッカー等の調度類の隙間等を模擬したモデル燃焼器のサイズは、断面が 10x150 mm で底面から上端までの高さが 500 mm である。なお、燃焼器は、モデル内の火炎伝ば状況を観測できるように、アクリル製である。実験は、図 1 に示すようにモデルは縦置きとし、まず上端部に取り付けた蓋を閉じ、モデル内を真空に引いた後、予め作った所定の混合気を大気圧まで充填する。次に、上端部の蓋を開放し 2 秒後に、モデル中央で底面から 40 mm 上方の位置にて火花点火により着火する。なお、点火エネルギーはコンデンサ容量から算出した値で 0.9 J とした。

火炎伝ばの観測には、直径 150 mm のコリメータレンズ($f=1500$ mm)および平面鏡を用いた連続シャドグラフ撮影法により実施した。撮影は、焦点距離 200 mm のレンズを装着した高速ビデオカメラ (1024x1024 画素, 8bit, 1,000FPS) で行った。ここで、有効な撮影径が約 120 mm と制約を受けることから、撮影中心を図 1 に示すように点火栓中心を原点とし縦方向 x が 20, 210, 360 mm の I~III の 3 カ所に移動し撮影した。得られた画像データは PC に送り、火炎面を検出し、モデル縦方向中心での火炎面位置 x_F および火炎伝ば速度 V_F の算出を行った。なお、図 1 に示すように I~III の撮影から、点火線から 20, 35, 50, 165, 210, 255, 315, 360 mm 位置を V_F の計測点とした。ここで、 V_F は、各位置前後 2 点間を火炎が等加速度運動するとして算出した。また、得られた画像の解像度は、0.12 mm/pixel である。

さらに、モデル底面中央には圧力ピックアップを取り付け、モデル内圧力履歴の観測も行った。燃焼実験は、各当量比に対し各撮影位置で 8 回行い、各 V_F 計測点で V_F の平均値を算出した。

表 1 使用した混合気

Mixture	ϕ	N_2/O_2	Molar Fraction			S_{L0} cm/s	a_0 mm ² /s	T_p K	Le
			H ₂	O ₂	N ₂				
H03-AIR	0.30	3.762	1.000	1.667	6.270	33.9	29.2	1187	0.403
H035-AIR	0.35	3.762	1.000	1.429	5.374	53.5	30.5	1309	0.420
H04-AIR	0.40	3.762	1.000	1.250	4.703	73.1	31.8	1425	0.438
H050-AIR	0.50	3.762	1.000	1.000	3.762	119.2	34.2	1641	0.471
H050-50N	0.5	5.530	1.000	1.000	5.530	50.1	30.9	1347	0.426
H070-50N	0.7	7.330	1.000	0.714	5.236	50.1	31.7	1431	0.439
H100-50N	1.0	9.100	1.000	0.500	4.550	49.9	33.4	1591	-
H140-50N	1.4	10.200	1.000	0.357	3.643	50.0	36.3	1430	1.376

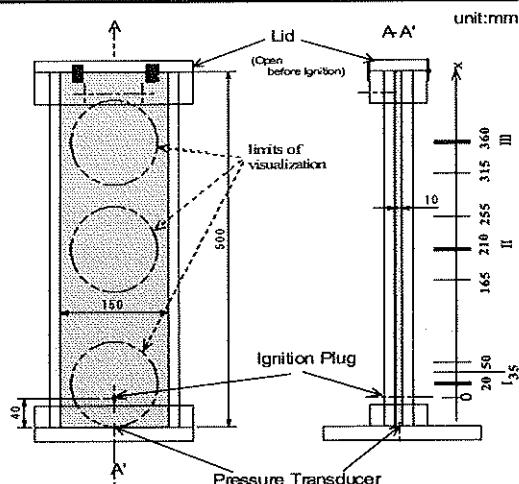


図 1 実験装置

3. 実験結果および考察

3.1 火炎伝ば観測

図2に、 S_{L0} を50 cm/sに揃えた当量比 ϕ が0.5, 1.0, 1.4の混合気のシャドーグラフ写真の一例を示す。図2の撮影位置Iの写真から、 ϕ に関わらず、火花放電により形成された火炎はほぼ同心円状に伝ばし、かつ火炎面は概ね乱れることなく層流火炎であることが確認できた。撮影位置IIの写真から、 ϕ が0.5の混合気では、火炎面に乱れ、不安定性が生じセル化している様子が観察できる。一方、当量比の大きい ϕ が1.0では、火炎面の不安定化は僅かにみられるものの、 ϕ が1.4になると全く不安定化は観察されない。なお、 $S_{L0}=50\text{cm/s}$ の $\phi=0.7$ では、 $\phi=0.5$ と同様の火炎面不安定性が観察されるが、そのセル状の凹凸のスケールは小さくなる傾向がみられる。また、水素-空気希薄混合気では、図2(a)と同様の火炎面のセル化が観察される。

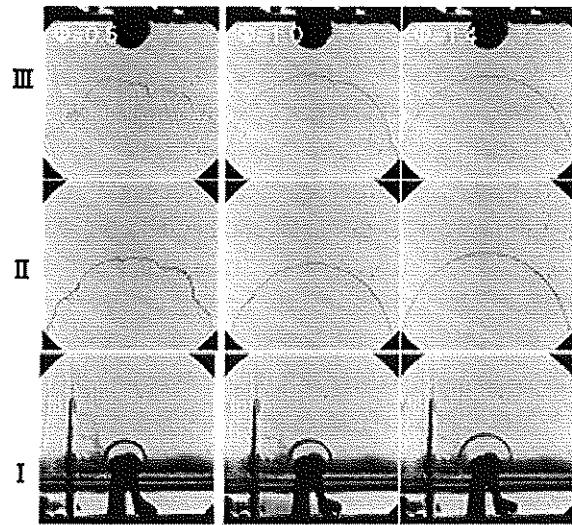


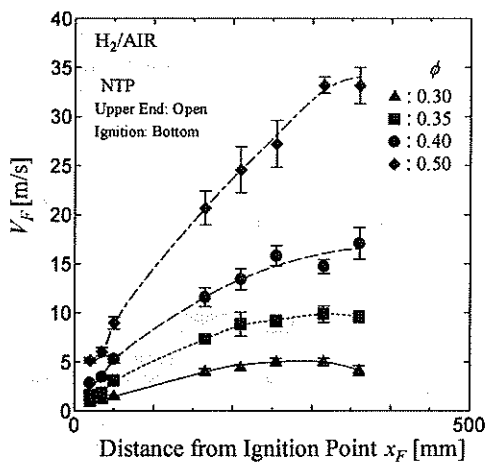
図2 シャドーグラフ写真一例
($\phi=0.5, 1.0$ and 1.4 with $S_{L0}=50\text{cm/s}$)

これは、本実験に使用した水素混合気では、不足成分の拡散係数 D_d に基づくルイス数 $Le (= a_0/D_d, a_0$: 熱拡散率)は、表1中に示しように希薄混合気では0.4程度、 ϕ が1.4の過濃混合気では1.4程度となり、上述の希薄混合気の火炎面の不安定化はルイス数の影響⁽⁵⁾と推定できる。すなわち、 $Le < 1$ の場合は拡散-熱的不安定性により、火炎面の凹凸を発達させる傾向となる。一方、 $Le > 1$ の場合は基本的には火炎面の凹凸の不安定を安定化する方向に作用するからである。

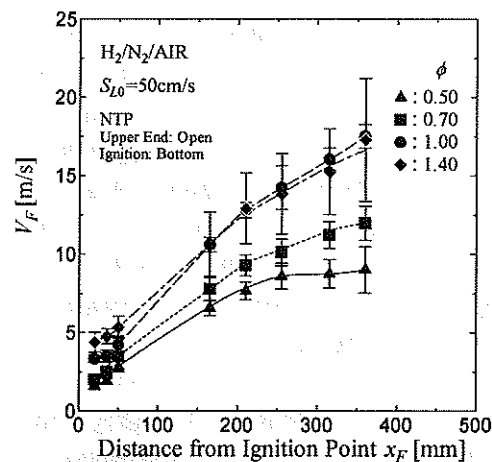
3.2 火炎伝ば速度

ϕ が0.3~0.5の水素-空気混合気、および S_{L0} を50 cm/sに揃えた混合気の火炎伝ば速度 V_F と伝ば距離 x_F の関係を図3に示す。

図3から、火炎伝ば距離の増大にともない、概ね V_F も増加する、すなわち火炎の伝ばが加速する傾向にあることがわかる。しかしながら、本実験範囲では、既報⁽⁶⁾の横方向に設置した断面が10x10mmのトンネル状モデル燃焼器の場合に、 ϕ 0.4の水素-空気混合気でみられたような、爆ごうへ遷移する危険性のあるような火



(a) H_2 -空気混合気($\phi=0.3\sim 0.5$)



(b) H_2 混合気($S_{L0}=50\text{cm/s}$, $\phi=0.5\sim 1.4$)

図3 火炎伝ば速度 V_F と伝ば距離 x_F の関係

炎伝ばが著しく加速し続ける現象は観察されなかった。

図3(a)の水素-空気混合気では、 ϕ が大きいほど、同一 x_F での V_F は増大し、特に $\phi=0.5$ の V_F は、それ以下の ϕ と異なり、開放端近傍まで、 V_F が増大し続ける。一方、図3(b)の $S_{L0}=50\text{cm/s}$ の混合気の V_F は、 $\phi=1.0$ までは図3(a)と同様に ϕ が大きくなると増大するが、 $\phi=1.4$ では $\phi=1.0$ と同程度となる。

図4に、火炎が側壁や底面に達していない位置 $x=20\text{mm}$ での伝ば速度 V_{F0} で無次元化した V_F と無次元化伝ば距離 x_F/H との関係を示す。ここで、 H は点火栓位置から開放端までの距離 460mm である。

図4から、火炎伝ば開始初期の伝ば速度で無次元化した場合、過濃混合気のデータは少ないものの、水素-空気または $S_{L0}=50\text{cm/s}$ の混合気によらず、 ϕ が $0.3\sim 0.7$ 希薄水素混合気は概ね x_F/H に対して同様の V_F/V_{F0} 履歴を示す。一方、図3(b)では希薄混合気より大きな V_F 値を示していた ϕ が 1.0 と 1.4 は、同一 x_F/H での V_F/V_{F0} は、明らかに希薄混合気に比べて、 ϕ が $1.0, 1.4$ の順で低下することがわかる。これは、火炎伝ば開始初期速度で無次元化した場合、図2の位置IIおよびIIIで観察されたように、希薄混合気には火炎面の不安定化、すなわち火炎面に凹凸が発生し、一方 ϕ が 1.0 から 1.4 の混合気では顕著な火炎面の凹凸が発生しないことに起因していると推測できる。

3.3 圧力履歴

圧力履歴の一例として $\phi 0.4$ の水素-空気の場合を図5に示す。図5中の縦破線は、火炎がモデル上部から出た時刻を示す。図5から、僅かではあるが圧力が変動していることがわかる。

図6に、得られた圧力の振幅の正および負の最大値の平均値 P_{max} を各混合気に対して整理した結果を示す。図6と図3から、同一 x_F で V_F が大きい混合気ほど、 P_{max} の絶対値が増大する傾向にある。なお図6中、 $\phi 0.5$ の水素-空気混合気の P_{max} は、他に比べて著しく大きな値を示しているが、これは開放端から火炎が出た直後に観察された値で、火炎がモデル内を伝ばしている間では 1kPa 以下である。

また、火炎がモデル内を伝ばしている間での圧力変動より算出した周波数の平均値は、 $160\sim 170\text{Hz}$ 程度であった。ここで、片端開時の気柱共鳴による音響的振動の基本周波数⁽³⁾は 180Hz 程度であることから、図5にみられる圧

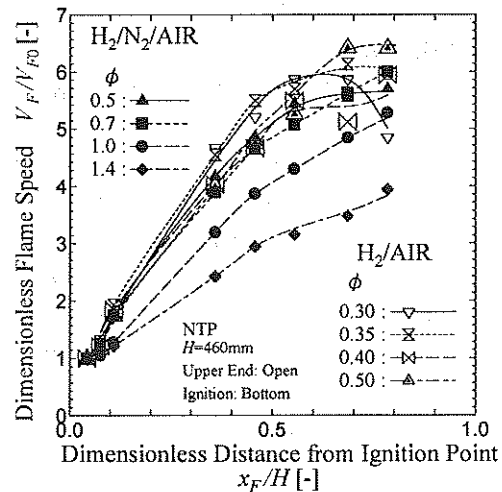


図4 無次元化火炎伝ば速度 V_F/V_{F0} と無次元化伝ば距離 x_F/H の関係

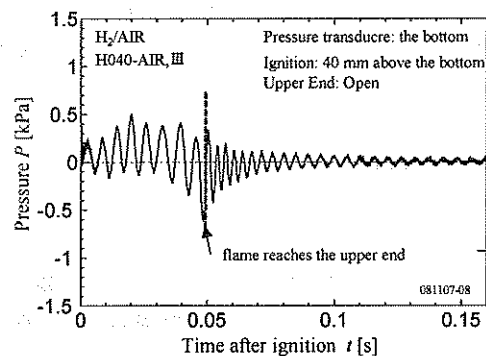


図5 圧力履歴の一例

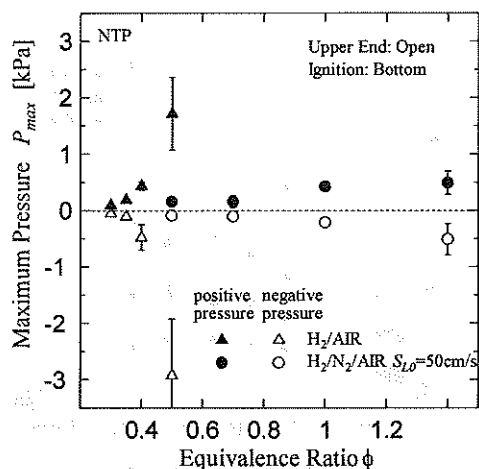


図6 正負の圧力の最大値 P_{max}

力変動は基本的には気柱管振動に起因すると推測できる。

4. 結 論

狭隘空間での火炎伝ば特性の把握・評価することを目的に、上端開放で断面が10x150mmの狭隘空間モデル燃焼器を用いて実験的検討を行い、次のような成果を得た。

- (1)狭隘空間モデル内を伝ばする $\phi 0.3 \sim 0.5$ の水素-空気予混合火炎は、 ϕ が大きいほど同一伝ば距離 x_F に対する火炎伝ば速度 V_F は増大する傾向にあることが明らかになった。
- (2)また S_{L0} を50cm/sに揃えた $\phi 0.5 \sim 1.4$ の混合気では、同一 x_F での V_F は $\phi \geq 1.0$ では差異がみられない傾向を示すことがわかった。
- (3)火炎面の不安定化と初期伝ば速度で無次元化した伝ば速度の増加には相関関係があることが明らかになった。
- (4)モデル燃焼器内の圧力は僅かな振幅であるが変動し、その圧力の変動値と各混合気の V_F に相関関係があることがわかった。

参考文献

1. 平野, ガス爆発予防技術, (1983).
2. 松井, 第19回燃焼シンポジウム前刷集, pp.68-70(1981).
3. 日本機械学会, 燃焼工学ハンドブック, p.123(1995).
4. 城戸, 中原, 日本機械学会論文集B, Vol.63, No.614, pp. 3477-3483 (1997).
5. Williams, F.A., *Combustion Theory 2nd*, (1985), The Benjamin/Cummings.
6. 中原, 他4名, 第43回燃焼シンポジウム, pp.172-173(2005).

絶縁油中PCBsの処理対策技術に関する研究開発

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
株式会社シーズテック代表	戸井田 秀 基
三浦工業株式会社三浦環境科学研究所主任研究員	高 橋 知 史

1. はじめに

ポリ塩化ビフェニール(PCB)については昭和 47 年から新たな製造がなくなったが、それまでに製造された高圧トランス及び高圧コンデンサ等が廃棄物となったものの処理体制の整備が著しく停滞していたため、長期にわたり処分がなされずに事業者において保管されてきた。このような状況において、これらの廃棄物の紛失等による環境汚染についての懸念を踏まえ、平成 13 年に PCB 廃棄物の適正な処理の推進に関する PCB 特別措置法(平成 13 年法律第 65 号)が制定され、環境事業団(後の日本環境安全事業株式会社)による拠点的広域処理施設での処理体制が整備されてきた。

一方、PCB を使用していないとする電気機器は OF ケーブルに微量(その大部分は数 mg/kg から数十 mg/kg 程度と推計)の PCB に汚染された絶縁油を含むものが存在し、その量は電気機器が約 450 万台(柱上トランス以外の電気機器が約 120 万台、柱上トランスが約 330 万台)、OF ケーブルが約 1,400 km に上ると推計されている。このような微量の PCB に汚染された電気機器等は廃棄物となったものについて、技術的に安全・確実で、かつ廃棄物の特性を踏まえた処理を推進する必要がある。

PCB 汚染廃電気機器等は PCB 廃棄物(特別管理産業廃棄物)に該当し、保管事業者は廃棄物の処理及び清掃に関する法律(昭和 45 年法律第 137 号)及び PCB 特別措置法に基づき、保管および処理等の状況に関する届出を行うとともに、処理基準に従い適正に保管し、期間内に自らの責任において確実かつ適正に処分するか廃棄物処理法に基づく都道府県知事の許可または環境大臣の無害化処理認定を受けた処分業者に委託して、適正に処分しなければならない。

ところで、廃 PCB 等の処理技術は焼却と分解の 2 つの技術に大別される。前者は主に微量 PCB を含む絶縁油の処理を行い、後者は、低濃度又は高濃度 PCB を含む絶縁油に対して適用される。また、分解技術には脱塩素化処理(アルカリ触媒、化学抽出、有機アルカリ金属、触媒水素化脱塩素、金属ナトリウム分散、触媒水素還元など)、水熱酸化分解処理(超臨界水酸化、水熱分解法)、還元熱化学分解処理(気相水素還元、溶融触媒抽出など)、光分解処理(紫外線/触媒、紫外線・生物処理、紫外線・蒸留分離)、プラズマ分解処理の技術があり、中でも脱塩素化処理が最も多く実施されている。

しかしながら、処理技術の多くは、処理プラントが大型であるため建設費や処理のランニングコストが高価となり、また、比較的小規模事業体で保管し、かつ処理施設まで移送しなくてはならない場合には、輸送中の事故や周辺環境の汚染などに配慮する必要がある。

本研究開発課題は、オンサイト処理が可能であり、比較的安価であること、また、処理装作が比較的容易であり、周辺環境や作業環境への影響も少ない分解技術を開発することを目的とした。

2. 実験及び成果

(実験 1)

活性化した酸化カルシウム(CaO)がダイオキシン類を分解することは以前の我々の研究より明らかにしており、既に測定分析に供した有機溶媒中や飛灰中のダイオキシン類の分解に用いてきた。本件ではこの技術を応用し、絶縁油中に混入した低濃度 PCB(～約 50mg/kg)の分解を試みた。

まず、ヘキサン溶液 10ml に PCB 標準物質(KC-Mix)を 20mg/L となるように添加し、それに CaO を

1.0g 加えて室温(20℃)にてマグネチックスターラーを用いて攪拌を行い、上澄液中の PCB 濃度を GC-ECD により経時的に測定した。その結果(図 1)、ヘキサン溶液中の PCB 濃度(20mg/L)は約 30 分後に約 4mg/L に減少し、6 時間後にはほぼ 0mg/L まで分解消失した。また、上澄液のヘキサンを除去し、水を加えて塩素量を測定したところ、添加した PCB の総塩素量に相当する塩素イオンが検出され、本分解が脱塩素反応であることが明らかとなった。さらに、図 1 の PCB の各異性体について分解量をみると、高塩素体 PCB の消失が低分子体よりも速く、高塩素体 PCB 分解に伴う低塩素体生成の傾向は認められない。この傾向は多くの脱塩素化処理でみられる高塩素体 PCB の低塩素化とは異なる。これは、おそらく CaO への PCB 吸着が高塩素体で速く起こり、脱塩素化反応が進行し、生成した低塩素体は脱着することなく、脱塩素化が進行しているためと考えられる。

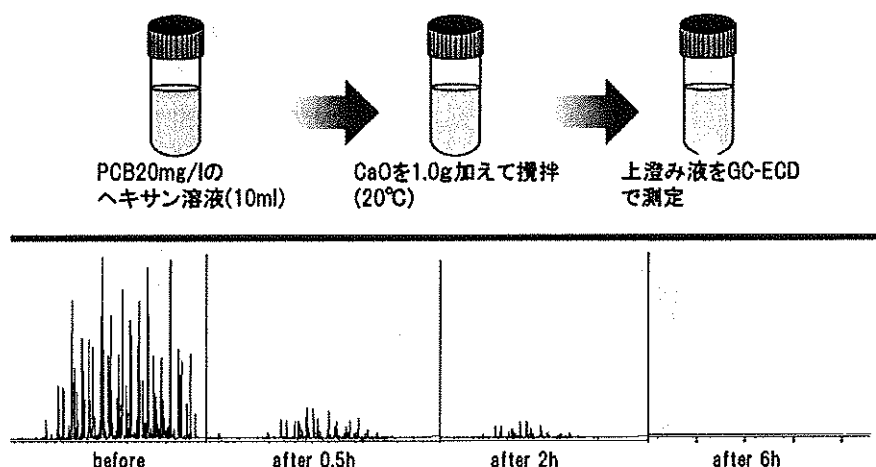


図 1. ヘキサン溶液中の PCB の分解

主成分	製造年	所有者	PCB mg/kg
JIS1種(used)	鉱油	1970	愛媛大学
			17

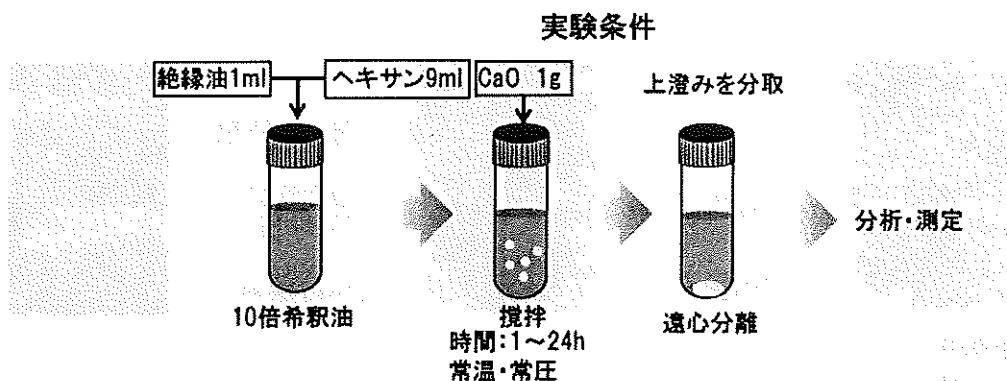


図 2. 絶縁油(JIS1 種)中の PCB の分解試験方法

(実験 2)

愛媛大学に保管していたトランスの絶縁油 (JIS1 種, 鉱油, 17mg-PCB/L) を用いて, 分解試験を試みた (図 2). つまり, 絶縁油 1ml にヘキサン 9ml を加えて希釈し, それに CaO を 1g 添加して 1~24 時間室温にて攪拌し, 経時的に上澄液中の PCB 濃度を GC-MS にて測定した. その結果を図 3 に実験 1 のヘキサン中 PCB の分解結果と併せて示す. 絶縁油が加えられると, 24 時間後においても約 25% の分解率しか得られず, しかも絶縁油とヘキサンの混合溶液は淡茶色を示し, 酸化重合物が存在することが明らかであった.

そこで, 使用済絶縁油中に存在する酸化重合物が, CaO と PCB の反応を阻害したものと考え, 活性炭を約 1g 添加したところ (図 4), 上澄み液が透明化し, 酸化重合物が除去され, それに CaO を添加して再度分解を試みた. その結果 (図 5), 絶縁油混合ヘキサン溶液中の PCB は活性炭に約 60% 吸着し, 残り約 40% の PCB のうち 60~70% 程度が CaO により分解し, 図 3 に示した活性炭処理を行わなかった場合の PCB 分解率 (約 25%) よりも高い分解率を示した. このことは絶縁油中に生成した酸化重合物が CaO と PCB の反応を阻害していたことを示している. しかし, 本方法は技術的に PCB の分解が可能ではあるが, PCB が吸着した活性炭の処理が不可欠であることから実用的ではないと判断した.

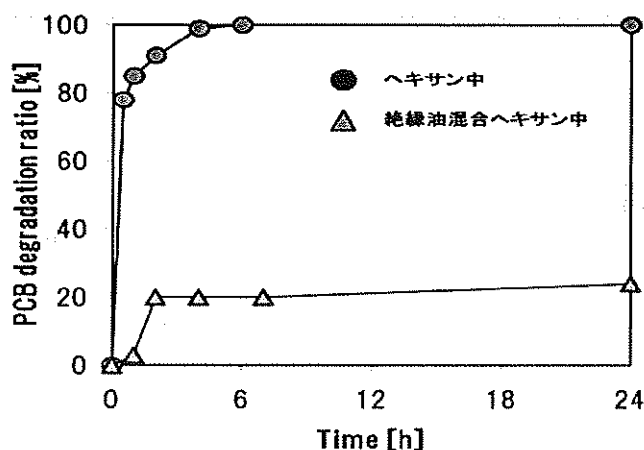


図 3. 絶縁油混合ヘキサン中及びヘキサン中の PCB の分解

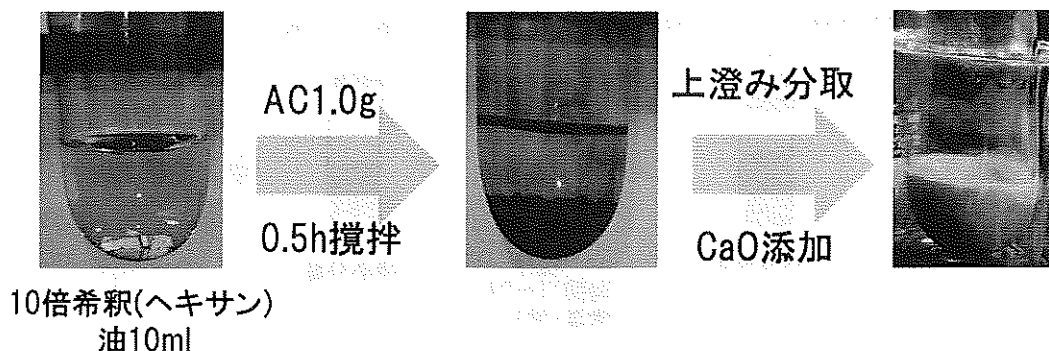


図 4. 絶縁油中の酸化重合物の処理及び PCB 分解試験方法

(実験 3)

活性炭を用いた反応障害物質除去といった二次(前)処理を行わない方法を考案した。すなわち、加熱により反応速度を上昇させ、かつ CaO 量に対する全体の液量を減少させることにより、CaO と PCB の接触効率を向上させることを試みた。本実験では、絶縁油 (JIS1 種) 1ml に対して CaO を 0.6g 加えることにより、つまり油と CaO の量をほぼ同等に調整し、室温 25℃、及び 150℃と 200℃で加熱を行い、PCB 分解率を経時的に求めた。その結果(図 6)、温度依存的に PCB の分解率と分解速度が上昇し、200℃では 2 時間ではほぼ 99%の PCB 分解率が得られた。

(実験 4)

実験 3 より、JIS1 種油では 200℃で高い分解率が得られたことから、次に絶縁油の種類をかえて、つまり新油及び使用済又はあらかじめ劣化させた JIS1 種(鉱油)、2 種(アルキルベンゼン)、4 種(アルキルナフタレン)、5 種(アルキルジフェニルアルカン)、7 種(鉱油+アルキルベンゼン)の計 5 種類に加え、これら絶縁油と沸点がほぼ同等であるヘキサデカンを用いて、PCB の分解実験を行った。実験条件は実験 3 に従った。その結果(図 7)、新油でおこなった JIS1 種では 96%、ヘキサデカンは 99%以上の高い

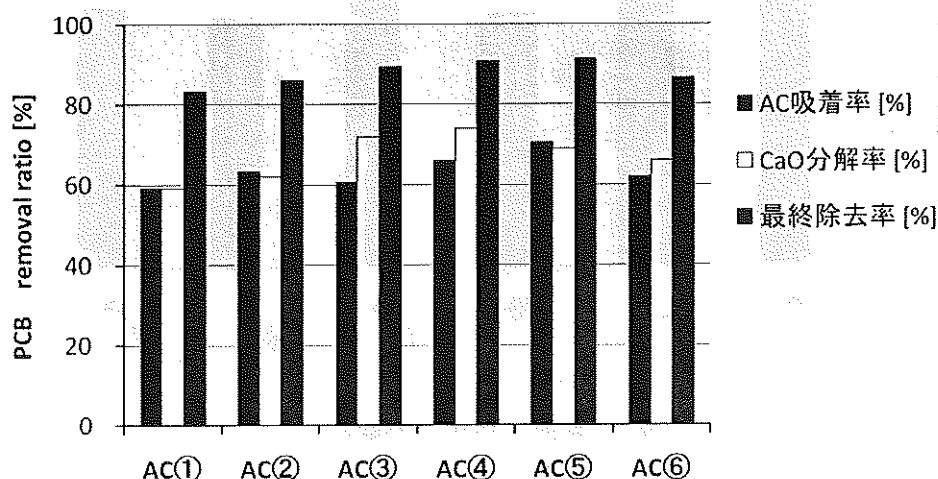


図 5. 絶縁油混合ヘキササン溶液中の酸化重合物の除去後の PCB 分解率

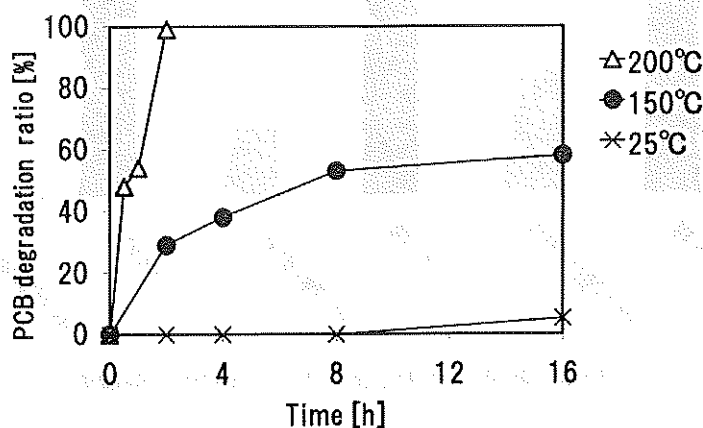


図 6. 絶縁油中 PCB の加温による分解

PCBの分解率を示した。一方、合成油であるJIS2種、4種、5種、7種では80~91%の比較的低い分解率であり、これは芳香族炭化水素が含まれるとPCBの溶解度が上昇し、CaOへのPCBの吸着率が低下したためと考えられた。

さらに、上記と同様な試験を使用済又はあらかじめ劣化させた油において行ったところ(図8)、新油の場合に比べてすべての劣化油のPCB分解率の低下がみられ、これは先述したように劣化により生じた酸化重合物がCaOとPCBとの反応を阻害したためと考えられた。

(実験5)

実験1~4におけるCaOとPCBの反応条件を総合的に考慮し、ここでは各種絶縁油(0.1ml)をヘキサデカン(0.9ml)で10倍に希釈し、希釈油1mlに対してCaOを0.6g加え、200℃で加熱し2時間後のPCBの分解率を求めた(図9)。図9の結果より、すべての油において96%以上のPCB分解率が得られ、中でも鉱油では99%以上の高い分解率を示した。

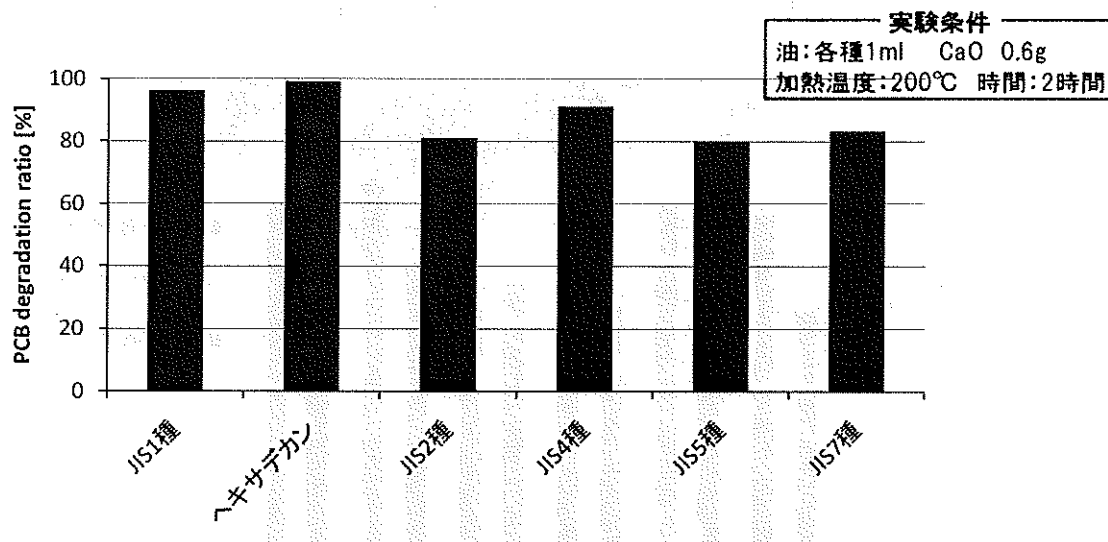


図7. 新油中PCBの分解率

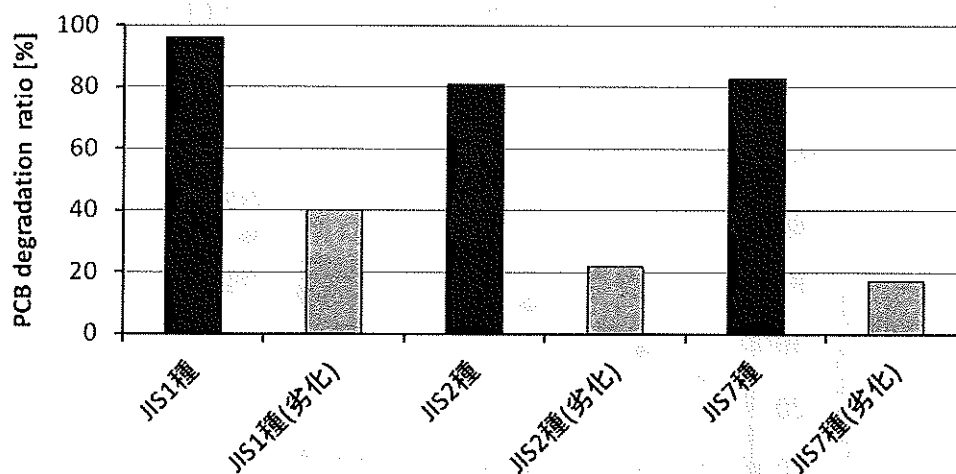


図8. 新油及び劣化油におけるPCBの分解率

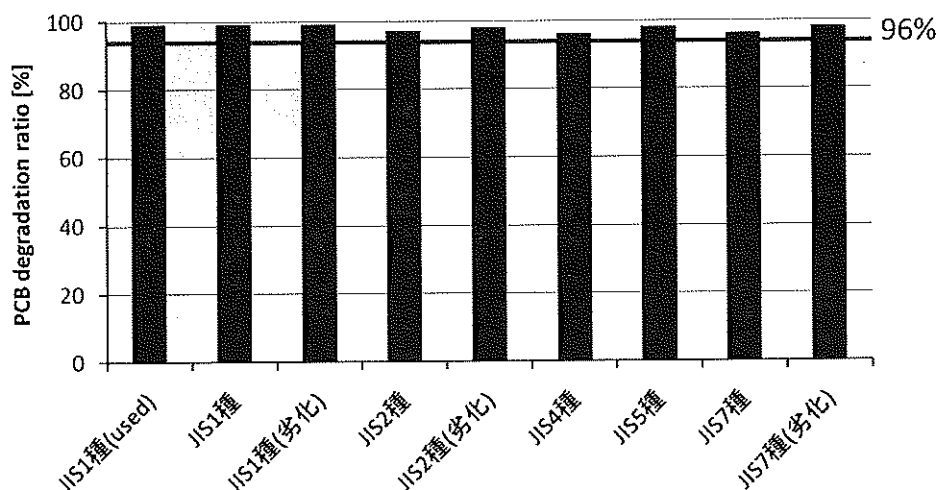


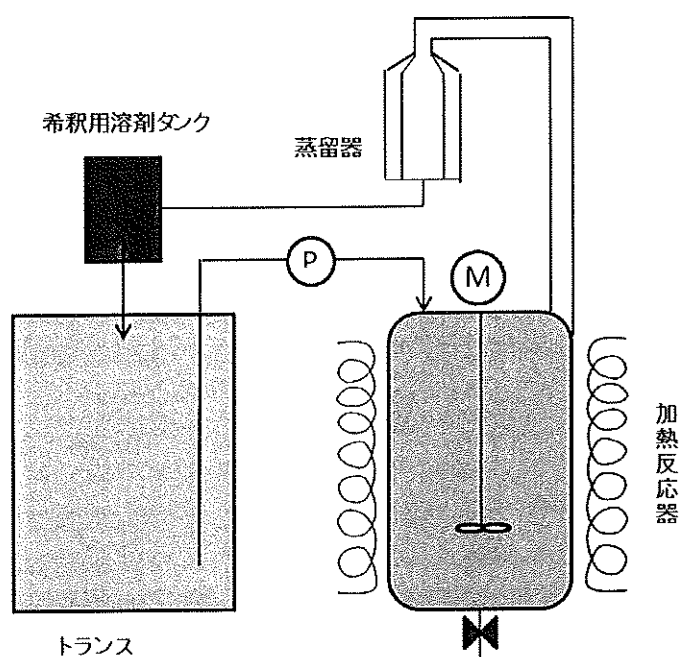
図 9. 新油・使用済み及び劣化油のヘキサデカン希釈後における PCB の分解率(200℃・2 時間)

3. 結論

以上の結果より、低濃度 PCB の分解処理は PCB 汚染の絶縁油 1ml に対し、ヘキサデカンで 10 倍に希釈した後、CaO を 6g 添加し、200℃で 2 時間加熱することにより、簡易・迅速かつ低コストで行えることが分かった。

4. 想定されるオンサイト型 PCB 分解技術

PCB 汚染油を抜油し、加熱反応器 (CaO 入り) に移送後 200℃で加熱攪拌する。同時に希釈溶剤は蒸留器によって再利用される。この処理装置は現場に設置され、全体がクロード化されていることから、外部に PCB がもれる危険性が極めて低く、処理が安全に実施できる。



愛媛大学社会連携推進機構研究成果報告書第3号

発 行 2010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

