

北海道立総合研究機構 工業試験場報告

Reports
of
the Hokkaido Industrial Research Institute

(No.310)

2011

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術研究本部

工業試験場

目 次

一般論文

- | | |
|--|---|
| 1 針葉樹合板節脱落防止処理装置のための画像処理システムの開発 | 高橋 裕之, 本間 稔規, 飯島 俊匡 …………… 1
平林 靖, 白川 真也 |
| 2 サケ脱血処理装置の開発 | 多田 達実, 鈴木 慎一, 辻 浩司 …………… 7
野俣 洋, 蛭谷 幸司 |
| 3 フリーソフトを活用したローコストHILシミュレータの開発 | 浦池 隆文, 多田 達実 …………… 15 |
| 4 農業機械の姿勢安定化・振動抑制技術の開発 | 中西 洋介, 浦池 隆文, 鈴木 慎一 …………… 23
小林 幸徳, 星野 洋平, 江丸 貴紀 |
| 5 レーザー誘起ブレイクダウン分光分析法を用いた防腐剤 (CCA) 処理木材の判別方法の開発 第2報 | 高橋 徹, 富田 恵一, 若杉 郷臣 …………… 31 |
| 6 高温腐食を受けた鉄鋼材料のリサイクルおよび評価方法の開発 | 高橋 英徳, 板橋 孝至, 戸羽 篤也 …………… 39 |
| 7 低温環境における作業性評価 | 中島 康博, 前田 大輔, 桑野 晃希 …………… 43
吉成 哲, 地家 崇規, 前田 享史
横山真太郎 |
| 8 高機能プレスによる球状黒鉛鋳鉄材の塑性加工技術の開発 | 鶴谷 知洋, 戸羽 篤也, 飯田 憲一 …………… 49
畑沢 賢一, 三戸 正道 |

研究ノート

- | | |
|--|--|
| 1 電力生成技術「エネルギーハーベスティング」に関する研究 | 新井 浩成, 浦池 隆文, 多田 達実 …………… 55
大村 功 |
| 2 除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力評価に関する研究 (第3報)
— 除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力試験方法 — | 富田 和彦, 白土 博康, 保科 秀夫 …………… 61 |
| 3 廃電化製品中の液晶パネルからのインジウムの回収技術 | 富田 恵一, 若杉 郷臣, 高橋 徹 …………… 67
長野 伸泰 |
| 4 地下水色度処理用新規ろ材の開発 | 浅野 孝幸, 三津橋浩行, 鎌田 樹志 …………… 73
佐々木雄真, 中野 和茂 |
| 5 バイオマスの物理化学的手法による前処理技術の検討 | 三津橋浩行, 北口 敏弘, 鎌田 樹志 …………… 77
佐々木雄真, 浅野 孝幸, 松嶋景一郎
上出 光志 |

6	ポリ乳酸と石油系プラスチックの屋外暴露試験	吉田 昌充, 山岸 暢, 大市 貴志 …………… 83 金野 克美
7	放電プラズマ焼結法によるタングステン低減硬質材料の開発	中嶋 快雄, 田中 大之, 宮腰 康樹 …………… 89 高橋 英徳, 相山 英明, 工藤 和彦

他誌発表論文抄録

1	粒子充填層を有する再生型磁気冷凍法の特性解析	平野 繁樹, 川南 剛, 池川 昌弘 …………… 93 麓 耕二, 平澤 茂樹
---	------------------------	--

CONTENTS

Regular Paper

1	Development of Image Processing System for Equipment Prevention of loosened Knots from Softwood Veneer	1
	Hiroyuki TAKAHASHI, Toshinori HONMA, Toshimasa IJIMA Yasushi HIRABAYASHI, Shinya SHIRAKAWA	
2	Development of Assistant Machine for Drawing Blood of Salmon	7
	Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI, Kohji TSUJI Hiroshi NOMATA, Kohji EBITANI	
3	Development of Low-Cost HIL Simulator using Free Software	15
	Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA	
4	Posture and Vibration Control of the Agricultural Machinery.	23
	Yohsuke NAKANISHI, Takafumi URAIKE, Shinichi SUZUKI Yukinori KOBAYASHI, Yohei HOSHINO, Takanori EMARU	
5	Development of Distinction Process of CCA Treated Wood from House Demolition using Laser Induced Breakdown Spectroscopy method Part II	31
	Touru TAKAHASHI, Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI	
6	Development of Recycling and Evaluation Method for the Steels that suffered High Temperature Corrosion	39
	Hidenori TAKAHASHI, Koji ITABASHI, Atsuya TOBA	
7	Evaluation of Dexterity in a Low-Temperature Environment	43
	Yasuhiro NAKAJIMA, Daisuke MAEDA, Kohki KUWANO Satoshi YOSHINARI, Takanori CHIKE, Takahumi MAEDA Shintaro YOKOYAMA	
8	Development of Plastic Forming Technology of Spheroidal Graphite Cast Iron using High-functionality Press	49
	Tomohiro TSURUYA, Atsuya TOBA, Ken'ichi IIDA Ken'ichi HATAZAWA, Masamichi MITO	

Research Note

- 1 Study on Energy Harvesting Technology 55
Hironari ARAI, Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA
Isao OHMURA
- 2 Study on Cooling Performance of Radiant Cooling Panel with Condensation (partIII) 61
A Test Method of Cooling Performance for Radiant Cooling Panel with Condensation
Kazuhiko TOMITA, Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA
- 3 Recovery of Indium from Liquid Crystal Panel in Waste of Electrical Appliances 67
Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI, Touru TAKAHASHI
Nobuhiro NAGANO
- 4 Development of New Filter Media for Underground Water Decolorization 73
Takayuki ASANO, Hiroyuki MITSUHASHI, Tatsuyuki KAMADA
Takema SASAKI, Kazushige NAKANO
- 5 Examination of Pretreatment Technology by Physicochemical Technique for Methane and Ethanol
Production from Lignocelloic Biomass 77
Hiroyuki MITSUHASHI, Toshihiro KITAGUCHI, Tatsuyuki KAMADA
Takema SASAKI, Takayuki ASANO, Keiichiro MATSUSHIMA
Mitsushi KAMIDE
- 6 Outdoor Weathering Test of Polylactic Acid and Petroleum-based Plastics 83
Masamitsu YOSHIDA, Tohru YAMAGISHI, Takashi OHICHI
Katsumi KONNO
- 7 Development of a Hard Material Reduced Tungsten by Spark Plasma Sintering 89
Yoshio NAKAJIMA, Hiroyuki TANAKA, Yasuki MIYAKOSHI
Hidenori TAKAHASHI, Hideaki AIYAMA, Kazuhiko KUDOH

Summaries of Paper Published

- 1 Analytical Investigation on Regenerative Magnetic Refrigeration with Particle Packed Bed 93
Shigeki HIRANO, Tsuyoshi KAWANAMI, Masahiro IKEGAWA
Koji FUMOTO, Shigeki HIRASAWA

一 般 論 文

Regular Paper

針葉樹合板節脱落防止処理装置のための画像処理システムの開発

高橋 裕之, 本間 稔規, 飯島 俊匡, 平林 靖*, 白川 真也*

Development of Image Processing System for Equipment Prevention of Loosened Knots from Softwood Veneer.

Hiroyuki TAKAHASHI, Toshinori HONMA, Toshimasa IJIMA,
Yasushi HIRABAYASHI*, Shinya SHIRAKAWA*

抄 録

合板製造に用いられる樹種として、広葉樹から針葉樹へと転換が進み、今では針葉樹合板が主流となりつつある。しかし、針葉樹は広葉樹に比べ節が多く、乾燥工程において抜け落ちてしまう場合が多い。このため、節の脱落を防止する装置の開発を目的として、節の識別を行い、座標位置と大きさを計測するための画像処理システムの開発を行った。さらに、ロボットシステムを用いた脱落防止処理装置と統合して、動作試験を行い、有効性を確認した。

キーワード：合板節脱落防止装置、画像処理システム

Abstract

In softwood veneer production, conifer softwood veneer is becoming mainstream from broadleaf tree softwood veneer. However, as for the conifer, there are a lot of loosened knots at drying process in comparison with a broadleaf tree.

In this study, we developed an image processing system to measure the position and the size of knots in conjunction with a equipment preventing loosened knots from softwood veneer, and evaluated the feasibility.

KEY-WORDS : Equipment Preventing loosened Knots from Softwood Veneer, Image Processing System

1. はじめに

かつて北海道において製造されてきた合板の主流は、表面化粧を目的とするセン・カバ・ナラ・シナ等の道産材広葉樹合板と、各種オーバレイ用の合板や、コンクリート型枠用合板等の南洋材合板であった。しかし、道産材広葉樹合板は円高により輸出が困難となり、内需に関しても、シナ合板以外のものについては建材として量的な市場確保が難しくなっている。また、南洋材合板については東南アジア諸国の技術力の向上により製品輸出が増加すると共に、環境保全の面から資源国の輸出規制が行われ、熱帯産材の原木輸入は困難となっている。一方、日本の森林資源を見ると、造林木を含めた針葉樹材

の蓄積が多く、高度利用が望まれている。針葉樹合板については、当初生産面においては歩留まりや生産効率が低いとの理由により生産が定着せず、また、販売面においても節の多さが嫌われ、需要が増えなかった。また、樹種によってはコンクリートの硬化不良を発生させるなど種々の困難と直面した。しかし、現在は、長年の技術開発により広葉樹合板と性能的にほとんど差のない「構造用合板」を始め、「型枠用合板」や「普通合板」の一部も製造が可能になり、年を追うごとに合板需要に占める針葉樹合板の割合が増加している。

このように、合板製造は広葉樹合板から針葉樹合板へと転換が進み、今では針葉樹合板が主流となりつつある。しかし、北海道産の針葉樹であるカラマツ、トドマツ、本州における

* 林産試験場 * Forest Products Research Institute
事業名：重点領域特別研究（平成20～21年度）
課題名：針葉樹合板の節脱落防止自動処理装置の開発

スギは広葉樹に比べて節が多く、節部分は他の部分と繊維走向が異なることによる収縮率の違いから単板の乾燥工程で収縮し、抜け落ちてしまうという大きな問題があり、需要拡大の大きな足かせとなっている。

節の抜け落ちた単板を用いて合板を製造した場合、台板合板においては表板を貼った後に抜けた節部分が凹みとなって表面に現れたり、型枠用合板においては節部分がコンクリート面に凸部となって残ったり、また、内装用合板においては節の抜けた合板は美観上好ましくないとされる。このため、現在は人手によって抜け落ちた節の照合を行い再び取り付けるか、照合できない場合にはパテや栓にて埋め込む作業を行っており、多くの時間を費やし、作業効率が悪く、大量生産ができないことから、コストアップの要因となり、現在も量産化までには至らない。今後益々生産量が増加すると思われる針葉樹合板の製造には、製造工程における節の脱落を防止する技術の開発が急務である¹⁾。

本研究では乾燥工程の前工程において、節が脱落するのを防止するための処理方法および処理装置を開発することを目的に、画像処理技術を用いた節識別手法を確立し、存在位置と大きさを計測するための節検出・識別手法および画像処理システムを開発を行った^{2, 3)}。

2. 節識別処理のための画像処理システムの開発

2.1 画像処理手法の確立

節は、生き節と死節に分けられる。生きていううちに枝打

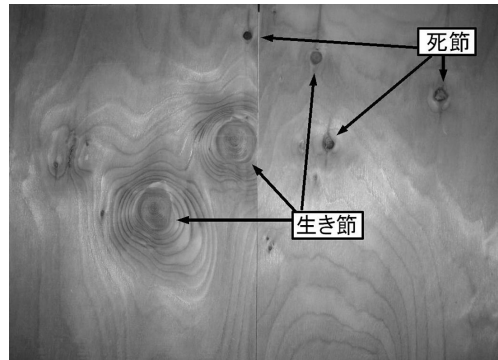
ちした痕跡を生き節、枯枝の痕跡を死節と言う。乾燥工程で抜け落ちてしまう節は、主に死節である。しかしながら、生き節においても、乾燥工程で割れ等が生じ、欠け落ちることがあるため、脱落防止処理を施す必要がある。

節の識別を行い節脱落防止自動処理装置に搭載するための画像処理システムの開発を進めるにあたり、実際の搬送ラインを想定した画像撮像システムを試作開発し(図1)、画像処理フローの検討を進めた。

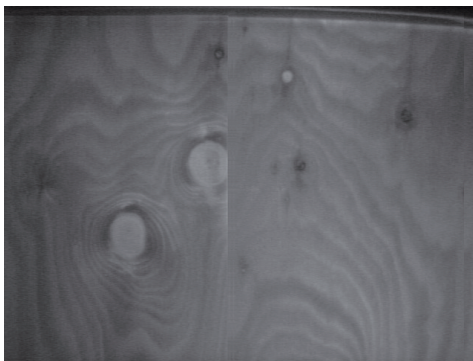
画像撮像システムによる撮像試験を行い、その結果から(図2)、節は生き節と死節では性状が異なることが明確となった。このため、本画像処理手法では、節を生き節と死節を別々に抽出する手法について検討し、最終的に統合することとした。



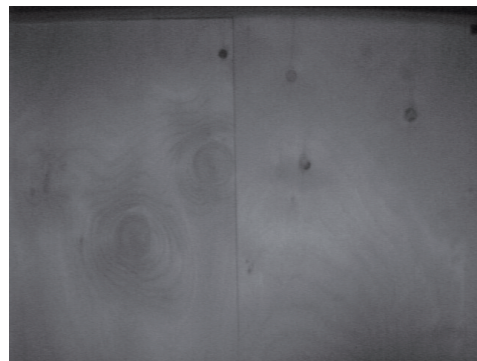
図1 画像撮像システム



a) 対象単板

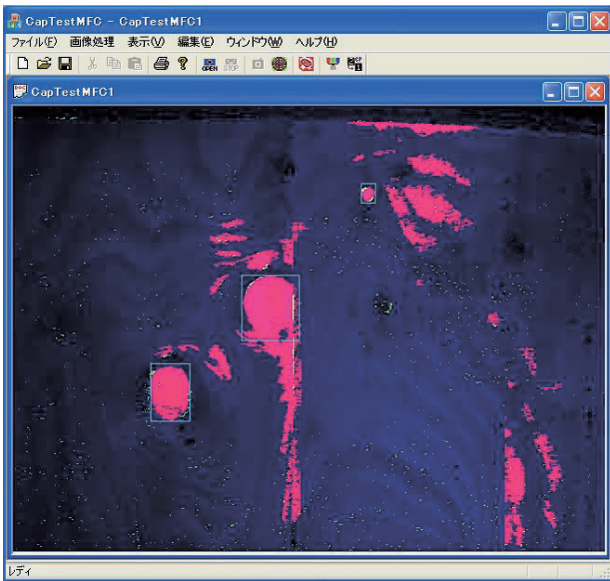


b) 透過光画像

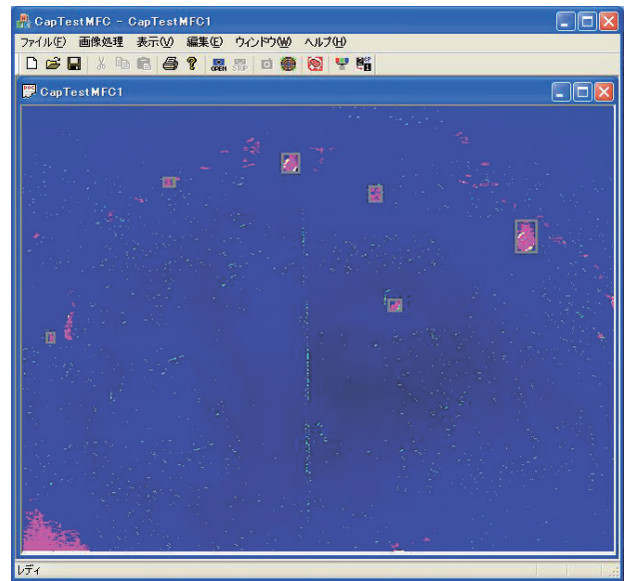


c) 反射光画像

図2 単板撮像画像一例



a) 生き節識別処理結果



b) 死節識別処理結果

図3 画像処理結果例

(生き節識別手法)

生き節は照明を透過しやすいことから、透過光画像を用い、以下の処理フローで識別可能である。

- 1) 低輝度画素削除処理
- 2) 小領域分割2値化処理
- 3) 小/大面積図形削除処理
- 4) 円形図形抽出処理 (特徴量を距離として識別)

(死節識別手法)

死節は外縁部が黒っぽく変色していると共に光を透過しづらいため、反射光画像を用いた以下の処理フローで識別可能である。

- 1) 2値化処理
- 2) 小/大面積図形削除処理
- 3) 円形図形抽出処理 (特徴量を距離として識別)

それぞれの処理結果を図3に示す。このように、2値化処理でノイズが残るが図形形状特徴量から節を識別することが可能である。

2.2 画像処理システムの開発

2.2.1 画像処理システムの構成

処理対象の合板は約1000mm×1800mmであり、この合板上の直径約10mm～数十mmの節を識別できることを目標とした。また、節脱落防止処理装置は、合板を約300mm/秒で搬送させながら、ロボットシステムにより処理剤を塗布することで行う。カメラの撮像領域および解像度から、処理領域を約1000mm×450mmの範囲に設定し、処理領域を左右に2分割して2台のカメラで撮像するシステム構成とした。このため、画像処理システムは、領域毎に2台のカメラで撮

像した2画面分の画像処理を行い、処理結果を統合し、ロボットシステムにデータを転送する。これらの一連の処理は、前後の処理時間や実用化を見据えて1秒以内で終了し、次の処理に備える。この機能を実現するため、本システムは、組込型の画像処理ボード (SVP-330, ルネサス北日本セミコンダクタ製) と2台のカメラ, 小型液晶モニタ, 高周波蛍光灯により構成した。

さらに、カメラ画像 (スルー) 表示, 2値化処理, 節抽出処理など, パラメータの設定などに必要となる画像処理機能を作成し, これらの画像処理機能をイーサネットを介したTCP/IP通信によりコマンド処理として実行できるようにした。このため, クライアント型通信プログラム (Telnet等) からコマンドを送信し, パラメータの設定や動作を確認することができる。これにより, 処理内容を確認した後, ロボットとの通信に切り替えて画像処理動作指令を受け, 画像処理を実行して結果をロボットに返すことが可能となり, 調整作業が容易に行える。実装したコマンド機能を以下に示す。

1) 通信制御機能

クライアントシステムとの通信制御を行うための機能として実装した。

- VS6577G (コネクション確立): STARTを返信してロボットの動作を開始
- STOP: コネクションの切断処理

2) 画像処理機能

画像処理機能の確認およびパラメータ調整のための機能として実装した。

- TRIG: 節識別処理 (2画面統合) の実行
- 1[2]: カメラ1 (または2) スルー表示
- B[b]: 2値化処理 (B: カメラ1, b: カメラ2)

－D [d]：節識別処理（1画面）

（D：カメラ1，d：カメラ2）

－R xxx：しきい値（xxx：10進数3桁）の設定

2.2.2 画像処理フローの実装

本試験では比較的節が明瞭なトドマツを対象とすることにしました。さらに、乾燥工程で抜け落ちてしまう節は主に死節であるため、処理速度や実装の容易さから死節の検出手法を実装した。

このため、画像処理フローは、カメラ入力、2値化処理、ノイズ除去のための膨張処理および縮退処理、ラベリング処理、面積フィルタ処理、図形特徴量による識別処理を行い、得られた節図形から座標値と大きさを算出した。画像処理ボード上で実現する画像処理フローは、画像処理速度の向上のため、画像処理ボードが有する画像処理ライブラリの活用を基本として作成した。それぞれの処理内容を以下に示す。

1) カメラ入力

カメラはNTSCビデオ入力により、画像解像度512画素×512画素×8ビットの画像として取り込む。

2) 2値化処理

対象としたトドマツは、板色と節の濃度値の相違が比較的大きいため、予め設定した固定しきい値による2値化処理とした。

3) ノイズ除去処理

板色の影響や割れなどにより2値化処理において不要な画素が抽出されたり、節が分断される場合があるため、ノイズ除去処理として、膨張処理と縮退処理を行った。

4) ラベリング処理および面積フィルタ処理

2値化画像から節図形を抽出し、個数、面積および図形特徴量の算出を行うためラベリング処理を行った。同時に面積フィルタ処理を行い、予め設定した基準図形に対して、画素数が少ない図形および多い図形を除去した。

5) 図形特徴量による識別処理

これまでは図形特徴量として、距離による円形度を用いた識別を行ったが、実装の容易さから簡便な特徴量として、得られた図形からフェレ径を求め、垂直径と水平径の比を算出し、設定値に対して適正な値以外の極端な長方形の図形を削除した。

6) 座標値、大きさ算出

得られた節図形のフェレ径の中心を座標値とし、フェレ径の垂直径・水平径を比べ小さい値を節の大きさとした。

これらの画像処理を左右のカメラ毎に行い、座標変換し統合した。具体的には、カメラ2で得られた座標値に対しては、予めキャリブレーションにより求めておいたオフセット値を付加し、統合データとした。このとき、ロボットコントローラの通信バッファの制約からデータ数は15以下に制限してお

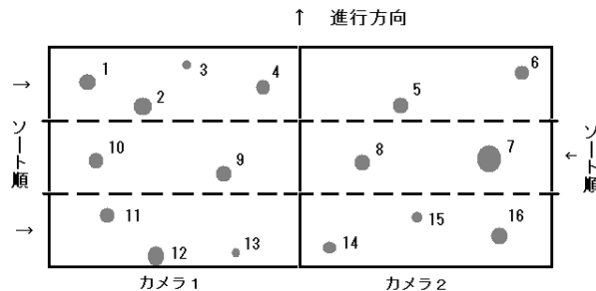


図4 データソート概念図

り、取得した処理結果から15個以上の節図形が抽出された場合には、大きな節から15番目までを有効データとした。

画像処理システムでは、節はラスタスキャンで検出された順番でデータが得られるが、ロボットシステムは通信により受け取ったデータ順に動作を行うため、効率的なロボット経路になるように、データソート機能を付加した。本システムでは、処理エリアを進行方向に対して3分割し、それぞれの分割エリア毎に左から右、右から左、左から右と移動できるようにデータの順序を入れ替えた。データソート機能の概念図を図4に示す。図4の例では、データ番号1番から順に送信されるが、データ数が16であるので、一番小さい節（13番目）を除外して15個分のデータを送信することになる。

3. ロボットシステムとの統合による動作試験および考察

試作した画像処理システムとロボットシステムを統合し、動作試験を行った（図5）。

これらのシステムはイーサネットにて接続され、ロボットシステムからの接続要求を受けて、通信コネクションを確立して通信を行う。ロボットシステムでは、コンベア移動距離に合わせてトリガ信号を送信し、画像処理システムで処理を行い、識別された節の総数に続けて、個数分の節データ（座標値、大きさ）を順に送信する。ロボットコントローラでは、ロボット座標へ変換し、移動動作を行い、スプレーガンで処理剤噴霧を行う。

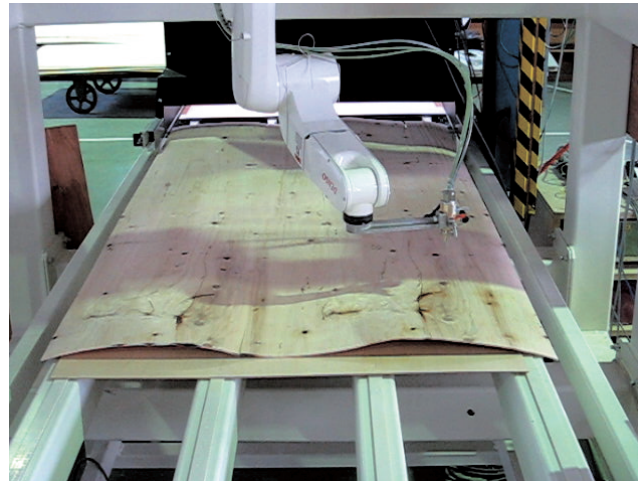
動作試験として、約1000mm×1800mmの単板20枚を搬送させて処理を行った結果、以下のことが確認できた。尚、本動作試験では処理剤は用いずに水による噴霧試験とした。

- 1) 一連の作業動作が実現でき、節に対して脱落防止処理（噴霧）を行うことを確認した。
- 2) 脱落防止処理が節から外れた場合があった。
- 3) 脱落防止処理を行わない節があった。
- 4) 同じ節に対して脱落防止処理を行う場合があった。

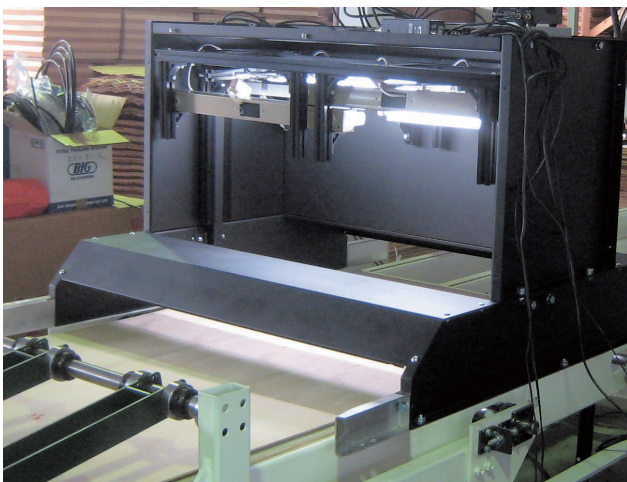
これらの試験結果のうち、2)については、動作試験で用いた単板は、乾燥終了材であったためゆがみ等があることが



a) 節脱落防止処理装置全体図



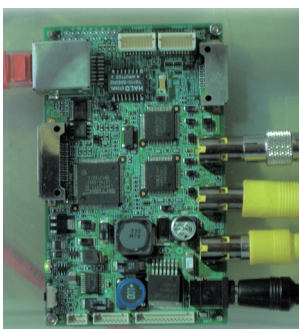
b) ロボットシステム (作業例)



c) 撮像環境



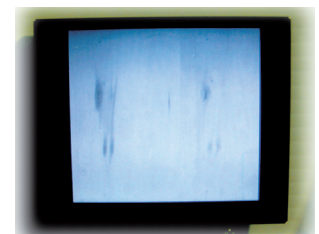
d) カメラ部



e) 画像処理ボード



f) 画像処理プログラム開発システム



g) 画像処理結果例
(上: 原画像、下: 処理結果)

図5 合板節脱落防止処理装置

原因で搬送中に板がずれる場合があり、これに起因すると考えられる。実際に脱落防止処理を行う場合は、湿潤状態であるため、搬送中に板がずれる問題が発生することは少ない。

3) は、画像処理による抽出ができなかった場合もあるが、節の大きさが実際より小さく算出された場合やノイズ等も含

めて15個以上抽出された場合などであった。画像処理フローの改善と併せて、節が多い場合には、分割して送信するなど動作フローの改良やロボットコントローラのバッファ容量を増やすなどの対策が必要である。

4) は、節が分断されて抽出された場合やカメラ1とカメ

ラ2の境界近傍において両方のカメラで抽出された場合があると思われる。画像処理フローの改善と座標位置に近いデータは統合するなどの処理を厳密に行う必要がある。

また、節の未抽出や分断される問題では照明ムラの影響があると考えられる。照明ムラを減らす照明装置の設置方法や領域分割等の2値化処理の高度化の検討が必要である。

4. まとめ

本試験では、画像処理システムを試作開発し、脱落防止処理を行うロボットシステムとの統合化を行い、節脱落防止自動処理装置の構築を行った。さらに、トドマツ単板を用いた動作試験を行った結果、搬送機の単板搬送時間内に一連の節脱落防止処理が可能であることを確認した。しかしながら、抽出できない節や重ねて処理を行った節もあり、画像処理環境や処理フローの改善点が明らかとなった。今後は、これらの改善点を解決し、処理の確実性向上を図ると共にカラマツなど単板の様相が複雑で節の抽出が難しい樹種に対する処理フローの確立を目指す。

引用文献

- 1) 白川真也, 平林靖, 高橋裕之他, 重点領域特別研究報告書「針葉樹合板の節脱落防止自動処理装置の開発」(2009)
- 2) 高橋裕之, 飯島俊匡他: 針葉樹合板節脱落防止装置のための画像処理システムの開発, 工業試験場成果発表会プログラム・発表要旨2010 pp.102, (2010)
- 3) 高橋裕之, 本間稔規, 飯島俊匡: 針葉樹合板節脱落防止装置のための画像識別システムの開発, 北工試だより 2011.07 pp4, (2011)

サケ脱血処理装置の開発

多田 達実, 鈴木 慎一, 辻 浩司*, 野俣 洋**, 蛭谷 幸司***

Development of Assistant Machine for Blood Drawing of Salmon

Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI,
Kohji TSUJI*, Hiroshi NOMATA**, Kohji EBITANI***

抄 録

道産サケの品質向上を図り国内需要を増加させるために活締め・脱血処理が道内各地で行われ始めている。本研究では船上の限られたスペースで安全かつ効率的に脱血作業を行う装置開発に取り組んだ。振り子ローラーの自重によって魚体サイズの違いに適応して魚体を装置内に誘導・固定する無動力な機構を考案し、活魚に弱い電流を流すことで動きを麻痺させて装置内での魚の暴れを防止する技術を確立した。また、それらを組み合わせて的確な脱血処理を行う単純構造の装置を開発し、船上における試験によりその性能を確認した。

キーワード：サケ，脱血処理装置，電気麻痺

Abstract

Immediate killing or blood drawing are beginning to be held in Hokkaido to increase domestic demand of Hokkaido salmon by improve salmon quality. In this study we made efforts to develop blood drawing equipment that works safely and efficiently in a limited space on board. We developed the device for inducing and fixing of fish adaptable to differences in size of fish with the weight of the roller pendulum. And we also established the technology of electric paralysis that prevents the rampage of the fish in the operation machine by weak current through the fish body. Finally we developed a simple structured blood drawing machine to perform accurate blood drawing and confirmed the performance of that by on-board test.

KEY-WORDS : salmon, drawing blood machine, electric paralysis

1. はじめに

本道のサケ漁業は、年間水揚げ15万トンを超える重要な漁業に成長しているが、養殖のサケが大量輸入されている中、道産サケの国内需要は伸びず、一方で国内需要と同程度の量が中国で加工され欧米に再輸出されているのが現状である。そのような状況の中、品質向上による国内需要の確保・拡大が急務となっている。そのため、サケ定置網漁（図1）にお

いて活締め・脱血が道内各地で行われ始めており、装置導入をせずに手締めによる活締めを試行している地区もある（図2）。

本研究では船上の限られたスペースで安全かつ効率的に脱血処理を行う装置開発に取り組み、魚体サイズの違いに対応し、装置内での魚の暴れを防止して的確な脱血処理を行う単純構造の装置を開発した。

* (地独)北海道立総合研究機構 網走水産試験場, ** (地独)北海道立総合研究機構 水産研究本部, *** (地独)北海道立総合研究機構 中央水産試験場

* Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization Abashiri Fisheries Research Institute, ** Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization Fisheries Research Department, *** Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization Central Fisheries Research Institute

事業名：重点研究

課題名：脱血処理による道産サケの高品質化と安定供給システムの開発（平成20～22年）



図1 サケ定置網漁



図2 船上手締め作業

2. 基本設計

2.1 サケの身体特徴とエラの構造

脱血処理装置を開発するに当たり、サケの構造を文献や解剖などにより調査した。サケの体長（尾叉長）の平均はオスで約69cm、メスで約67cmであり、それぞれ±12cm程度の幅がある。¹⁾ また呼吸器官のエラは図3に示すような構造となっており、海水に触れて酸素を吸収する鰓弁が左右4個ずつあり、そこで酸素を取り込んだ血液は鰓弁のつけ根にある鰓弓の内部にある太い血管を通して心臓に戻る仕組みとなっている。

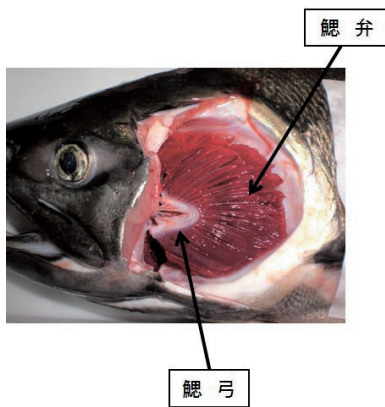


図3 サケのエラ周囲の構造

2.2 脱血条件の確認

釧路水産試験場では、効率的な脱血ができる条件を得るためサケと同系のニジマスで鰓弓の切断箇所や放血条件を得る試験を行った。その結果を図4に示す。試験の結果、サケを生かした状態で鰓弓（図3）を1本以上切削し、常温の海水中で5～20分間放血させ、その後、水を入れた海水中で冷却

することにより、放血量が最も多くなることを見出した。また、鮮度（ATP量が多い）を保ちながら放血量も多めにする場合は、延髄を切削後、直ちに鰓弓も切削する必要があることも分かった。そこで本研究では、脱血を目的に安定して鰓弓を1本以上切削する装置の開発を目標とした。

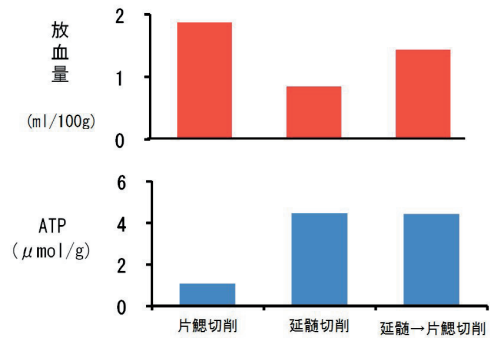


図4 脱血条件試験結果

2.3 装置に求められる機能

前述の脱血条件を満足する装置については、定置網船の船上での作業を前提として基本構想を行い、併せて目標性能を整理した。図5に装置の基本構想を示す。定置網から船上に揚げられたサケを1尾ずつ取り出し、脱血処理し、その後放血用の水槽に投入する。この一連の作業・処理においては、活きがよく暴れるサケを沈静化する技術、1尾ずつサケを取り出し整列する技術、脱血処理を行うための把持・固定技術および鰓弓を的確に切削する技術が必要となる。なお、沈静化技術は、網上げ直後のサケを一次置きする水槽から1尾ずつ取り出す際に必要となる一次沈静化と脱血処理のため魚体を固定する際に必要となる二次沈静化の両方に必要となる。また、開発装置の目標性能を市場から求められる処理量と船上で対応可能な要員数などを考慮して表1のように決定した。

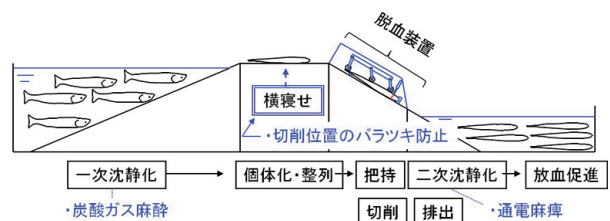


図5 装置の基本構想

表1 目標性能

	目 標
操作要員	1～2名
処理能力	200～300 尾/時間 (12～18秒/尾)
大きさ	定置網漁船に搭載可能
装置価格	300万円以下

3. 沈静化技術

3.1 沈静化の方法

網上げ後の活サケは大型魚でもあり脱血作業を行う際暴れ、人手で扱うには大きな労力がかかる。そのため、一般的にはその際、炭酸ガスでバブリングした水槽に活魚を一定時間入れ沈静化する所謂「炭酸ガス麻酔」が利用されている(図6)。この方法はサケを弱らせるという側面も持っているが作業が簡便であり一度に多数を処理することができる特徴を有する。そこで本開発装置においても、「炭酸ガス麻酔」を一次沈静化の方法の候補とすることとした。また、二次沈静化の方法としては、水産の調査・衛生管理の現場で利用されている通電により魚体を麻痺させる方法^{2), 3)}を利用することとし、装置内での沈静化を行うこととした。なお、通電条件については、サケへの電気麻痺に関する知見が少ないため試験により条件を見出した。



図6 炭酸ガス麻酔

3.2 確認試験

先行する研究では、体長300mm前後の魚種の頭部に陽極、尾部に陰極を接続し、電圧24V、電流30mA程度を通電することで脊髄への信号を遮断して麻酔効果が得られたと報告されている。²⁾ また、時期的に生きているサケを入手することが困難だったため、入手が容易なサケと同型の紡錘形の魚、ソイ (*Sebastes vulpes*) や淡水魚であるがサケと同系のニジマス (*Oncorhynchus mykiss*) を用いて通電麻痺の確認試験を行った。

3.2.1 ソイを用いた通電試験

通電による麻痺効果を確認するため、図7のようにL字の金属電極を頭部と尾部に接触させて通電試験を行った。体長206mm~260mm、150g~300gのソイ、20尾へ電流値(10, 30, 50mA)、電圧値(6~25V)と通電時間(10秒, 30秒)を変化させて通電時と通電後の状態を観察した。その結果、電流10mA、電圧6Vでも通電中は動きが停止し、胸ビレ、背ビレが痙攣していた。しかし、通電後は即時、動き出した。電流50mA、電圧25Vを30秒間通電した場合のみ、通電後も停止状態を維持し、その後、回復した。通電した全数、その後の体調不良などの状態変化は無かった。

この結果より通電による麻痺固定実現の可能性が高まり、次にサケと同程度の大きさで同系種であるニジマスによる試験を実施して通電条件を絞り込んだ。

3.2.2 ニジマスを用いた通電試験

ニジマスは、サケ目サケ科に属する淡水魚でありサケと同サイズになる。そのため、通電条件と沈静効果との関係を試験により確認した。体長400mm~620mm、1100g~3100gのニジマス、9尾へ通電時間(60秒)を一定にして電流値(11~25mA)、電圧値(10, 20V)を変化させて通電時と通電後の状態を観察した(図8)。その結果、ソイよりも魚体は大きい、通電中のヒレの痙攣が激しく見られ、ソイに比べ通電効果が大きいように見て取れた。通電時のエラの切削には解剖用のハサミを使用した。(図9)。手でエラ蓋を持ち上げ切削してもニジマスは動かず、併せて行った回遊調査用の認識タグを背ビレの下方にφ3程度の針を突き刺して取り付け作業時もニジマスは動かず手間無く行うことができた(図10)。

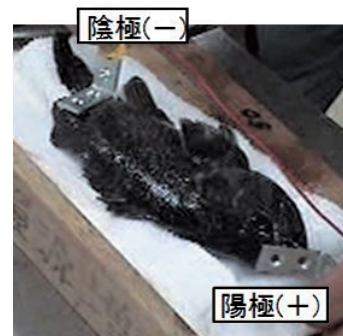


図7 ソイの通電試験



図8 ニジマスの通電試験



図9 ニジマスの鰓切削



図10 タグ付け作業

3.3 サケ類を用いた通電試験

前述の2種の魚による確認試験から、通電による沈静方法の有効性を確認できたため、定置網漁で捕獲したカラフトマス (*Oncorhynchus gorbusha*), サケ (*Oncorhynchus keta*) を使用して具体的な通電条件を設定するための試験を行った。表2に試験で使用した魚体計測値を示す。体長450mm~520mm, 1700g~1900gのカラフトマス, 8尾, 体長650mm~680mm, 3500g~4200gのサケ, 4尾について電圧, 電流値を変えて, 通電時およびエラ切削時の状況を確認した。また, 鮭頭部の大きさ, 形状の違いに適応する電極について検討し, 図11のような傾斜する台の下に柔軟性のあるスチールウールを重ねて設置して魚の頭部が重力によって電極に密着し, 形状の違いを吸収することを想定した試験台を試作して実験した。なお, 尾部の電極は作業者が手で当てた (図12)。図13は, エラの切削の様子である。

この試験の結果, 淡水魚のニジマスに比べて高電圧, 大電流が必要なことを確認した。試験時は, 電極の当て方が悪い場合など, 跳ね上がるものが数尾あったが, 通電中は, 暴れずに動きを止め固定でき, エラの切削時も動くことが無く脱血装置の固定機構として有効であることが確認できた。また, 金属製の電極では, 非常に錆が出やすく, 材質について検討が必要なが確認された。そのため, 船上試験機では, 陽極側を錆びずに柔軟性のある非金属の導電性ゴムを用い, 頭部の形状違いにも対応させた (図14)。陰極側は, 耐錆性が高いステンレス製の魚体固定用の振り子ローラーへ密着する機構とした (図15)。

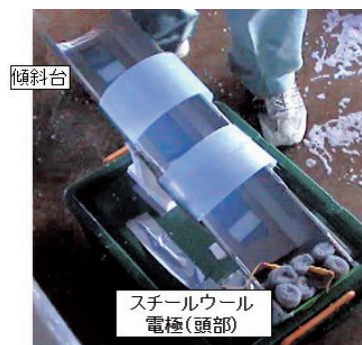


図11 試作した作業台



図12 通电の様子



図13 鰓切削の様子

表2 検体魚の魚長、魚重

検体番号	試験魚		
	魚種	魚長 (mm)	魚重 (kg)
1	カラフトマス	489	1.7
2	↑	498	1.72
3	↑	515	1.74
4	↑	448	1.04
5	↑	446	1.12
6	↑	487	1.46
7	↑	487	1.48
8	↑	524	1.88
1	サケ	682	4.2
2	↑	666	3.52
3	↑	652	3.8
4	↑	665	3.78



図14 船上試験機の陽極



図15 船上試験機の陰極

4. 固定・把持機構

4.1 従来方法とその課題

活サケを装置に挿入して適切な切削位置に魚体を固定するためには柔軟な魚体を押さえ込む機構が必要となる。サケは自然物であり幅や長さといった形状が一定でないことから、固定・把持機構には不定形状に追従する機能が必要となる。一般に魚を扱う装置では対向した柔軟な一對のベルトや魚体の外形に相似形な凹型の押さえ板による挟み込み機構が用いられている。^{4), 5)} ベルト式においては不定形な魚体を固定すると同時に位置決めすることが難しく且つベルトを駆動する動力が必要となる。また、型で挟み込む方式では、押さえる魚の大きさのバラツキに適応することが難しく、魚体の大きさを事前に揃えておく選別作業が必要となる。

4.2 振り子ローラーによる魚体固定

本開発装置では魚体の固定方法として振り子の先端に配置したローラーを自重により魚体に追従させて定規となるテーブルに押さえ込む機構を採用した。図16にその構造を示す。この方式では、魚体は、振り子ローラーとテーブルの間に押し込まれるようにして挿入され、挿入された魚体は振り子ローラーを押し上げながら移動し、ゲートに当たって所定の固定位置で停止する。この方法は構造が単純でありながら魚体サイズのバラツキに適応でき、無動力であるため、装置全体のコストを抑えることができる。

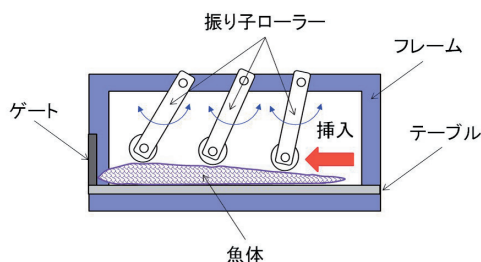


図16 振り子ローラーによる魚体固定

5. 切削機構

5.1 切削位置の検討

前述のように脱血では左右4個ずつある鰓の付け根にある鰓弓を切断することが効果的である。本研究では、サケの頭部の寸法を計測し、魚体のバラツキに対して高確率な切削ができる位置の検討を行った。図17に頭部寸法測定的位置および測定状況写真を示す。本測定では鼻先と目の位置を基準として、鰓蓋の曲線の特徴点となるA～Cの3点位置および頭部の大きさを計測した。その結果を図18(オス)と図19(メス)に示す。本測定の結果から、切削目標となる鰓弓の存在位置には確率が高い領域があることが確認された。

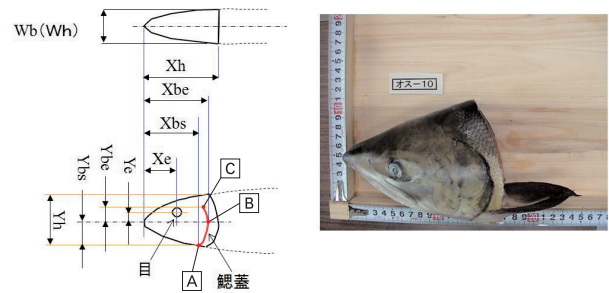


図17 頭部寸法測定

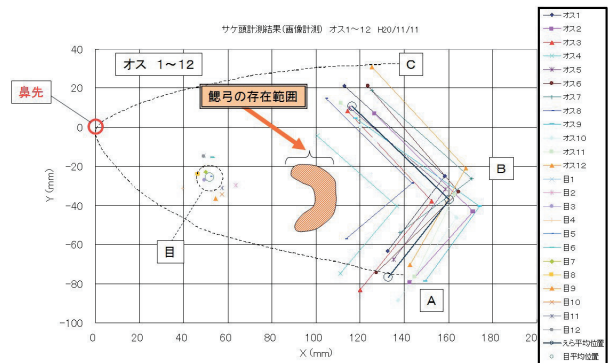


図18 頭部測定結果(オス)

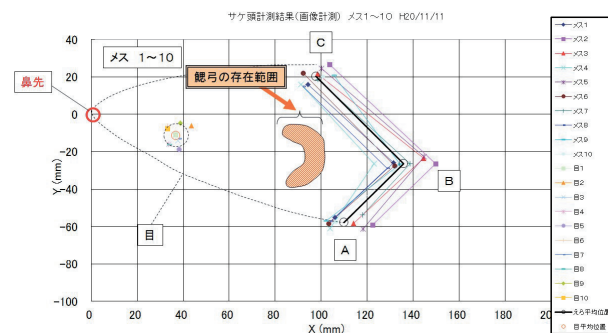


図19 頭部測定結果(メス)

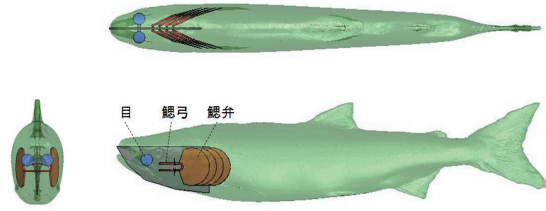


図20 サケ 3 Dモデル

5.2 3Dモデルによる切削機構の検討

本研究では、切削機構の簡素化のため切り込み位置を固定した場合に魚体サイズのバラツキがあっても鰓弓を高確率で切断できるよう、3次元モデルを用いたシミュレーションにより切り込み位置を検討した。図20に作成したサケの3Dモデル（オス）を図21に切削刃の形状と切り込み位置の関係をシミュレーションした結果を示す。

本シミュレーションにより、直進刃による切り込みにおいて刃物サイズや切り込み方向を適当に選ぶことにより、刃物位置を固定しても高確率で鰓弓を切断できることが分かった。

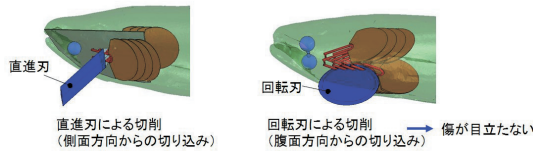


図21 3Dモデルによる切削位置検討

5.3 刃物機構

前述のシミュレーション結果を踏まえて、設計した刃物の図面を図22に、試作した切削機構を図23に示す。刃物は一般的な刃物鋼製とし、切削時に捉えた鰓弓が刃物から逃げないように中央部が窪んだ刃付としたものを3種類（A、B、C）試作した。なお、刃物はロッドが回転しないガイド付きエアシリンダを押し込みのアクチュエータとする機構とした。図24に刃物を選定するために行なった頭部の切削試験状況を、表3にその試験結果を示す。試験において押しつけ力や切断状態を調べた結果、頂角60度で側刃が付いており切削抵抗が小さい刃物（C）を採用することとした。

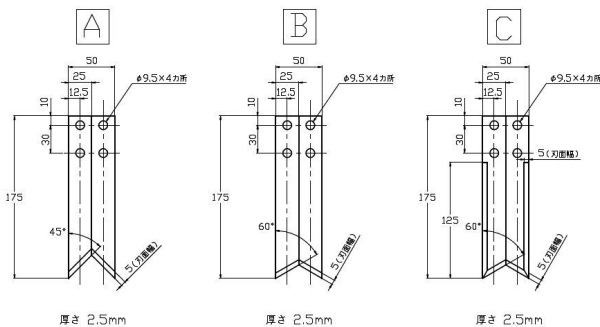


図22 刃物図面

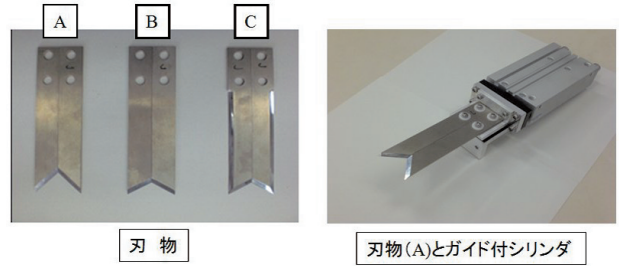


図23 刃物と刃物駆動機構

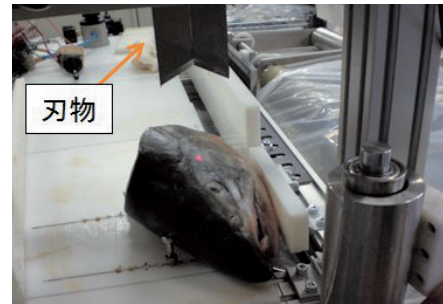


図24 刃物性能試験

表3 刃物性能試験結果

切削状態は鰓を外皮側から数え、完全切断した場合を●、傷が付いた場合を▲と表示

試験番号	刃物	圧力 (MPa)	押しつけ力 (kgf)	切削状態				
				刃物側	裏側	裏側	裏側	
オス大1	B (60度)	試験調整用	-	刃物側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
				裏側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
オス大2	B (60度)	0.64	32	刃物側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
				裏側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
オス大3	B (60度)	0.64	32	刃物側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
				裏側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
オス大4	B (60度)	0.64	32	刃物側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
				裏側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
オス大5	C (60度+側刃付)	0.5	25	刃物側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
				裏側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
オス大6	C (60度+側刃付)	0.5	25	刃物側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
				裏側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
オス大7	C (60度+側刃付)	0.5	25	刃物側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
				裏側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
オス大8	A (45度)	0.5	25	刃物側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
				裏側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
オス大9	A (45度)	0.64	32	刃物側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
				裏側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
オス大10	A (45度)	0.64	32	刃物側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
				裏側	1枚目	2枚目	3枚目	4枚目

6. 試作装置と実証試験

6.1 装置の構造と動作

図25に開発した脱血処理装置の構造を示す模式図を、図26に試作装置の外観写真を示す。本装置では、①向かって右方向から側面を下に向け傾斜したテーブルに沿わせて挿入されたサケは振り子ローラーにより押さえつけられながら鼻先がゲートに当たるまで滑り落ち、鼻先がゲートの当たり面の電極に触れ、同時に尾部が負の電極となる振り子ローラーに触れた所で、サケの頭から尾に向け電流が流れ、サケは麻痺して外部の刺激に反応しなくなる。②その状態になってから刃

物部をエアシリンダにより上下させ所定の位置への切り込みを行う。③その後、刃物部を後退させてからゲートを開けることにより切削されたサケはテーブルを重力により滑り落ち、放血槽に移動する。

なお、本脱血処理装置は図26に示すようにサケの進行方向に前下がり傾斜を持つと同時に切削の基準となるサケの腹が常に切削の定規となる案内に当たるようその方向へも傾斜を持つように設置される。また、開発した装置にはサケが装置から飛び出さず正規の位置に納まるようにガイドなどが多く付加されている。

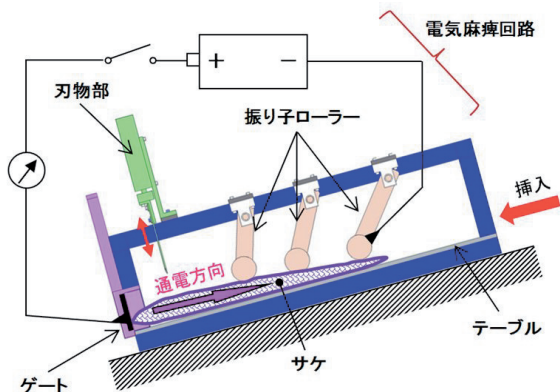


図25 装置の基本構造

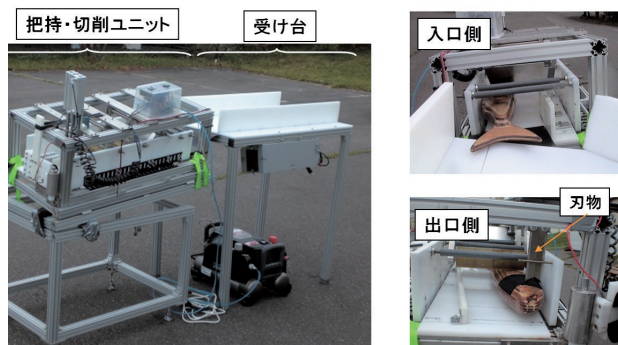


図26 試作装置の外観



図28 脱血処理を行ったサケ

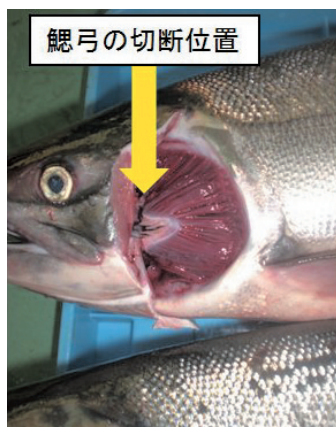


図29 脱血処理後のエラ

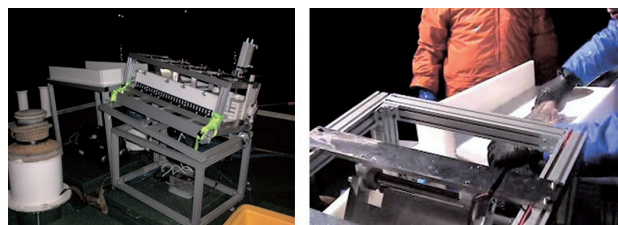


図27 実証試験



図30 脱血処理後のサケの内蔵 (左：オス、右：メス)

6.2 実証試験とその結果

定置網漁の漁船で行った実証試験の様子を図27に示す。本試験では、網上げ直後の活サケを受け台に一時載せ、一尾ずつ手送りにより試作装置の定位置にセットして切削を行い、

表 4 実証試験結果

試験体	Bブナ 11尾 (内訳:オス5尾、メス6尾)
処理時間	18秒/尾 以下 (200尾/時間 以上)
切削・脱血性能	鰓弓切断率: 8/11 尾 脱血成功率: 10/11 尾

本試験の結果以下のことが明らかとなった。

- ・処理時間については、18秒/尾となり現段階の装置で目標値を満足した。
- ・切削/脱血機能については、雄5尾+雌6尾、計11尾の試験において、鰓弓を切断した数は11尾中8尾であり、解剖による内臓の状態観察から、11尾中10尾が良好に脱血されていることを確認した。

7. 実用システムの検討

現状装置の実用化に向けた課題の整理を表5に示す。

基本機能の改良点として、

- ・把持・切削ユニットの一人作業化のための自動化
- ・サケの個別挿入を容易とするための誘導・整列機構

が必要であり、実用機とするための機能として、刃物などの耐久性や刃物周辺部の安全性確保などの課題が残されている。

これらの課題については研究開発を継続し実用機としてできる限り早く製品化したいと考えている。

表 5 残された課題

基本機能	操作の自動化(一人操作)
	誘導・整列の容易化
実用機能	コストダウン
	軽量化
	耐久性(刃物、可動部)
	安全性(刃物周辺)

8. まとめ

本研究により、船上の限られたスペースに設置して脱血処理を行う高効率でコンパクトな装置を開発することができた。今後は、操作の自動化や網上げ後のサケの個別誘導・整列機構の改良に取り組み、コストや耐久性、安全性を満足する実用装置の開発を道内企業と行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、標津町 農林水産課加工開発担当係長佐々木 克之様より試験の調整および試験補助をして頂きました、ここに心より感謝申し上げます。

また、標津漁業協同組合には試験の場を提供して頂き、か

つ装置利用者としての貴重な意見を頂きました。記して感謝致します。

引用文献

- 1) 大熊一正・鈴木俊哉：アムールの秋サケ/2000年の日ロ共同調査結果概要とアムール川サケ資源の現状、さけ・ます資源管理センター、技術情報No168, pp33-46, (2002)
- 2) 二階堂英城・尾花博幸 他：海産魚における電気麻酔効果の検討、栽培漁業センター技法, 3号, pp9, (2005)
- 3) 笠井久会・渡辺研一 他：水産用ワクチン注射装置に組み込む電気麻酔の開発ならびにその安全性について、日本水産学会大会講演集要旨集, 2007巻, pp211, (2007)
- 4) 本田高男・村井正徳 他：魚の高鮮度活〆装置の開発、高知県工業技術センター、研究報告 No.36, pp15-18
- 5) 中山力：サケの自動エラ取り装置（アクアロボ岩手）、NIKKEI MECHANICAL 1994.6.13, pp56-59, (1994)

フリーソフトを活用したローコストHILシミュレータの開発

浦池 隆文, 多田 達実

Development of Low-Cost HIL Simulator using Free Software

Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA

抄 録

自動車や航空・宇宙等の先進的なメカトロニクス分野では、モデルベース開発におけるHILS（Hardware In the Loop Simulation）と呼ばれる手法の利活用が進み、設計・開発の効率化が図られている。近年急速にメカトロニクス化が進む一次産業向け機械装置等の分野にも適用可能なHILSシステムの実現を目的として、汎用PCとI/Oボードで構成されるハードウェアに、リアルタイムOSや数値演算システム等のフリーソフトウェアを組み合わせることで、低コストなHILシミュレータ（リアルタイムシミュレータ）を構築した。3D-CADで設計した機構モデルを解析用のシミュレーションモデルへ変換する手法について検討するとともに、構築したシミュレータの機能の検証事例として、倒立振り子試験機の設計・製作、およびロボットマニピュレータの制御シミュレーションに適用することで、制御アルゴリズムの検討やパラメータ調整に有効であることを確認した。

キーワード：メカトロニクス, モデルベース開発, リアルタイムシミュレータ, HILS

Abstract

In an advanced mechatronics field for the car, aircraft and space-robotics etc., the use of HILS (Hardware In the Loop Simulation) advances in the Model-based development. And the efficiency of the design and development have been improved. In this study, Low-Cost HIL-simulator (Real-Time simulator) that can be used to develop the general machinery was developed with combination of hardware and free software such as general-purpose PC, I/O boards, real-time OS and math system. And the technique of conversion from the mechanism-model which was designed by 3D-CAD to the simulation-model was developed. To verify the functionality of the developed HIL-simulator, the control simulation of robotic manipulator and the design of inverted pendulum were performed. It was found to be effective for study of control algorithm and adjustment of control parameters.

KEY-WORDS : Mechatronics, Model-based Development, Real-Time simulator, Hardware In the Loop Simulation

1. はじめに

自動車や航空・宇宙等の分野では、HILS（Hardware in the Loop Simulation）と呼ばれる、機構系と制御系を統合したシミュレーション技術の利活用が進み、開発サイクルの短縮や付加価値向上の面でその有用性が明らかとなっている。しかし、先進的分野で用いられるHILSシステムは、専用に設計された計算機や信号入出力インターフェイスが用いられているため非常に高価で、かつその運用には高度な専門知識

を要することから製造業全般に広く適用されているものではない。

そこで本研究では、汎用的に用いられるハードウェアと、無償で利用可能なソフトウェア（OS・数値演算ツール等）を有効に活用する事で、低コストで簡便なHILシミュレータ（リアルタイムシミュレータ）の構築を試み、倒立振り子およびロボットマニピュレータ（垂直多関節ロボット）の設計・制御に適用することで機能の検証を行った。

事業名：経常研究

課題名：機械装置のリアルタイム制御シミュレーション技術に関する研究

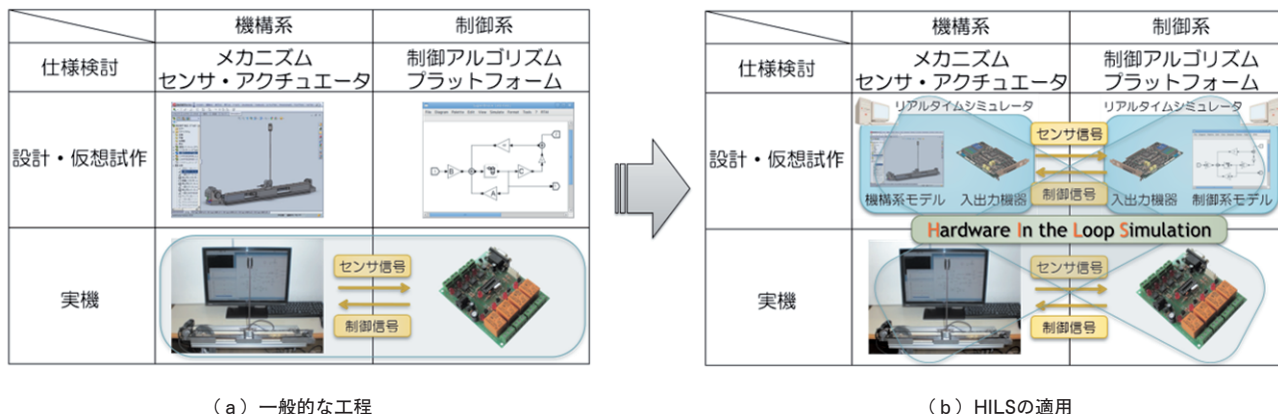


図1 メカトロ機器の開発とHILS

2. HILSについて

2.1 メカトロ機器の開発とHILS

HILSとは、実システムを動作させているのと同様なフィードバック信号の入出力が可能なリアルタイムシミュレータを用いることで、設計・仮想試作段階のモデルと実機を融合した評価・検証を行う設計手法であり、試作や設計変更等にかかる工数とコストの大幅な削減が期待できる。

いわゆるメカトロ機器における一般的な開発工程とHILSの適用について図1に示す。機構系および制御系は先ず仕様の検討を行い、メカニカルCADや制御系設計CADによる設計・仮想試作が行われる。その後、実機の製作・制御プログラムの実装等を行い、両者を統合した試験によりシステムとしての総合的な性能の評価と検証が行われる(図1(a))。しかし実機による試験の結果、何らかの不具合が発見された場合、設計変更や再試作には多くの労力とコストが発生することとなる。そこで図1(b)に示す様に、機構系と制御系の両者をシミュレータとして接続する、もしくは機構系か制御系の一方をシミュレータとし、他方を実機として、図中のたすき掛けのように接続したHILSによる検証を行う事が出来れば、最終的な実機システムによる試験を行う以前に様々な機構や制御アルゴリズムの検討および不具合の早期発見が可能となり、開発効率の向上が図られる。

2.2 HILシミュレータ(リアルタイムシミュレータ)の構成

HILSによる設計・検証では、実機と接続可能なリアルタイムシミュレータをいかに構築するかが重要なポイントとなる。シミュレータに求められる要件としては、大きく分けて次の3点が挙げられる。

- ① 実機に相当するセンサ信号や制御信号等の入出力機能を持つハードウェア
- ② シミュレーションの対象となる機構やアルゴリズムのモデル化と数値演算を行うソフトウェア

- ③ ①のハードウェア上で②の演算を実時間で実行するためのリアルタイムOS

自動車などHILSの適用が進む分野では、②としてMatlab/Simulinkと呼ばれるソフトウェアがほぼ業界標準として用いられ、①と③については解析の対象や規模に応じた独自のシステムが用いられている。しかしこれら商用のシステムは最低でも数百万円以上と非常に高価である。

3. 低コストHILシミュレータの構築

汎用的に用いられるハードウェアと、無償で利用可能なフリーソフトウェアを組み合わせることで、図2に示すリアルタイムシミュレータを構築した。さらに3D-CADによる機構系の設計データを活用したシミュレーションモデルの作成法についても検討した。以下にその概要を示す。

3.1 ハードウェア

本シミュレータのハードウェア部は、一般的に用いられるデスクトップPC(CPU: Intel Core i7 2.66GHz)と、PCI接続の拡張I/Oボードにより構成した。I/OボードはNI(National Instruments)社製PCI-6229(A/D32ch, D/A4ch, DIO48ch, カウンタ2chの入出力を持つ複合タイプ)を使用した。

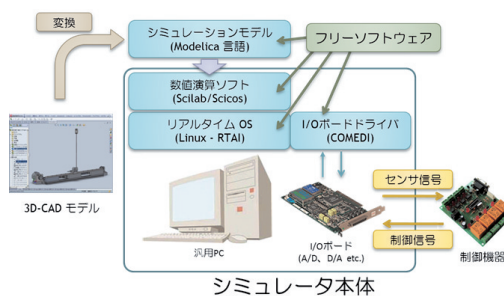


図2 構築したリアルタイムシミュレータ

3.2 ソフトウェア

本シミュレータで使用するソフトウェアは、Linuxカーネルのリアルタイム拡張であるRTAIをベースとし、全て無償で利用可能なものを用いた。

3.2.1 ubuntu9.04

Linuxカーネルと多くのソフトウェアから構成されるOSの一つ。他のLinuxOSと比較して、後述するソフトウェア類をインストールする際に必要な追加パッケージの多くがあらかじめ用意されており、比較的スムーズな環境構築が可能である。

3.2.2 RTAI (Real Time Application Interface)

イタリアのDIAPM (Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale-Politecnico di Milanoミラノ工科大学航空宇宙工学部) が中心となり開発されているLinuxカーネルのリアルタイム拡張モジュール。最新の2.6系Linuxカーネルは、標準でも1msまでのリアルタイム処理が可能であるが、本モジュールを組み込む事で μ sオーダーでの確実なリアルタイム処理が可能となる。

3.2.3 Scilab/Scicos

フランスのINRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique フランス国立情報学自動制御研究所) が中心となり開発されている数値演算システムであり、商用のMatlab/Simulinkと同等の機能を持ち、Scicosブロック線図による直観的な制御アルゴリズムの記述が可能となっている(図3参照)。また前述のRTAIと組み合わせる事で、ブロック線図で表されたアルゴリズムを、リアルタイム処理に必要なCプログラムへ自動的に変換することができる他、次に述べるComediに対応したブロックを配置することで外部機器との信号入出力が可能である。

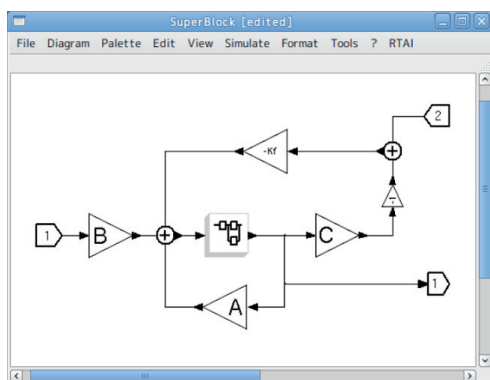


図3 Scicosブロック線図の例
(状態フィードバック制御で用いられるオブザーバ)

3.2.4 Comedi (Linux Control and Measurement Device Interface)

今回使用したNI社製のI/Oボードだけでなく、30社近くの製品に対応したドライバ群であり、各製品に対応したモジュールをLinuxカーネルに組み込むことで、製品毎の差異を吸収し、共通のインターフェイスによる使用が可能となる。

3.3 シミュレーションモデルの作成

以上より、実時間での処理と外部機器との信号入出力が可能なシミュレータ本体が構成される。シミュレーションの際には、Scicosブロック線図でシミュレーションの対象となるモデルを作成し、これを実行する。Scicos自体が制御アルゴリズムの記述に適しているため、制御系のシミュレーションモデルを作成するのは容易であるが、機構系のシミュレーションモデルの作成に関しては、微分方程式で表される機構の運動をモデル化しなければならず、Scicos標準ブロックの組み合わせだけで記述するのは大変困難な作業となる。そこでここでは、3D-CADで設計した機構の、部品毎の接続関係や質量特性に関する情報を活用し、Modelica言語と呼ばれる物理系モデリング言語を用いた機構系シミュレーションモデルの作成について述べる。

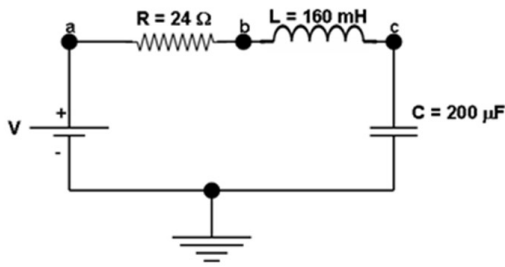
3.3.1 Modelica言語によるシミュレーションモデルの表現

Modelica言語とは、EUのITEA2 (Information Technology for European Advancement) プロジェクトにおいて、Modelica Associationにより開発・公開されているオブジェクト指向のモデリング言語である。Modelica言語によれば、微分方程式で表される物理系(電気・機械・油圧・熱・流体等)のモデル化を行う事が可能であり、数式による表現の他、グラフィカルなエディタ内でModelica標準ライブラリと呼ばれる予め定義された構成要素を接続していくことでモデリングすることが可能である。図4に、RLC回路をモデルとして、標準ライブラリおよび数式による表現の例を示す。

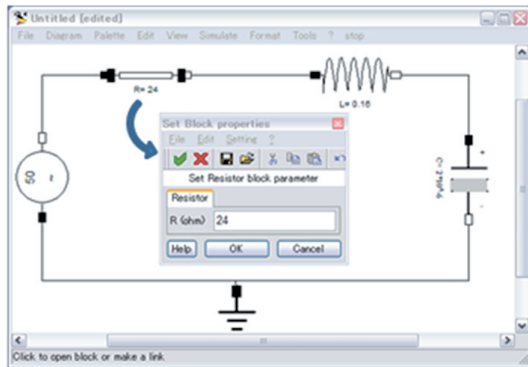
Modelica言語自体は、その言語仕様と標準ライブラリが規格として定められているものであり、モデル作成用のエディタやシミュレーションを行う際の実行環境が別途必要となる。今回構築したシミュレータにおいては、一部機能に制限があるもののScicos上でModelica言語が利用可能である。

3.3.2 3D-CADにより設計した機構の情報取得とシミュレーションモデルへの反映

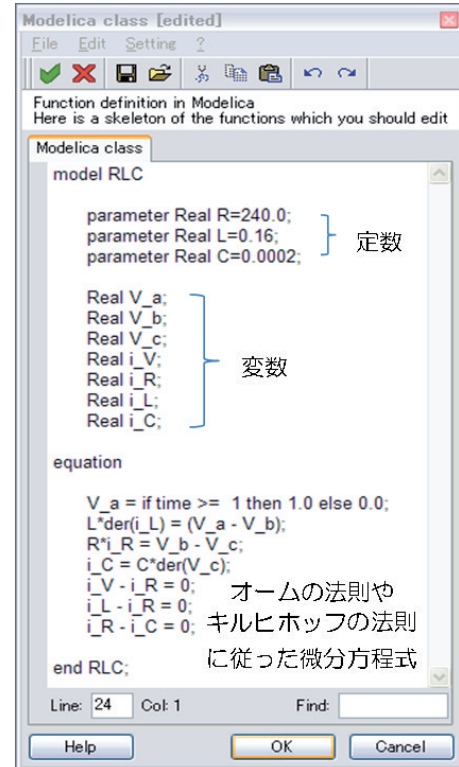
本研究では、機構系設計用3D-CADとしてSolidWorks (Dassault Systems社)を用いた。Modelica言語で機構をモデル化するには、3D-CADにより設計したモデルに含まれる各部品の質量や慣性モーメント、および重心位置を表す「質量特性」と、各部品がどのように接続されているかを表す「合致」に関する情報が必要となる。



(a) 物理モデルの例 (RLC回路)



(b) 標準ライブラリによる表現と定数の設定



(c) 方程式による表現

図4 Modelicaによる物理モデルの例

Scicosに対応したModelicaモデルの作成環境として、Coselicaと呼ばれるツールボックスが提供されている。これに用意されている機構系要素は、主に「Body」と「Joint」と呼ばれるもので、これらを組み合わせることで機構全体が表現される。CAD上で設計したモデルの各部品が「Body」に相当し、これに「質量特性」を設定する。また、CAD上で設定した「合致」の組み合わせにより、部品間の相対的な運動を表す「Joint」が定義される。例えば、凹形と凸形の断面形状を有する2つの部品間で、凹凸が組み合わさるよう直行する2平面を互いに一致させる合致を設定した場合、部品間の運動は部品長手方向への並進運動に制限され、これは並進一自由度を表す「Prismatic Joint」となる。他に回転一自由度を表す「Revolute Joint」等があるが、CAD上で設定した「合致」により拘束される自由度を解析することで、対応する「Joint」を見出す事が可能である。本研究ではSolid Worksが提供しているAPI (Application Programming Interface) を用いたプログラムを作成し、3D-CADモデル内からModelicaモデルの作成に必要な「質量特性」および「合致」に関する情報を得た。

4. HILシミュレータの適用

前章で構築したHILシミュレータについて、実際のメカトロ機器開発を想定した例として倒立振り子試験機的设计・製作、

およびロボットマニピュレータの制御に適用し、HILS用ツールとしての有用性について検討した。

4.1 倒立振り子試験機的设计・製作

倒立振り子は比較的簡単なメカニズムで構成されているが、フィードバック制御系の制御アルゴリズム検証に良く用いられる例題である。SolidWorksによる機構系的设计とScicosによる制御系的设计を行い、この段階で両者をリアルタイムシミュレータ上に実装してパラメータ設定等を行った。その後、機構系の実機を製作し、制御系シミュレータと接続して制御試験を行い、设计の妥当性について検討した。

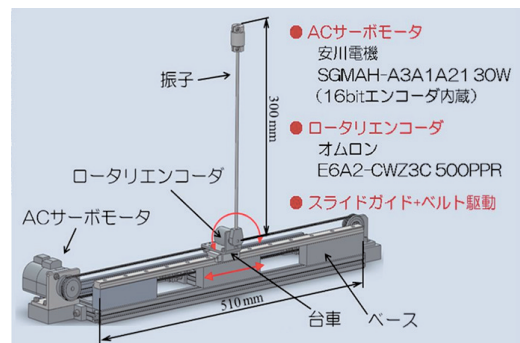


図5 倒立振り子の3D-CADモデル

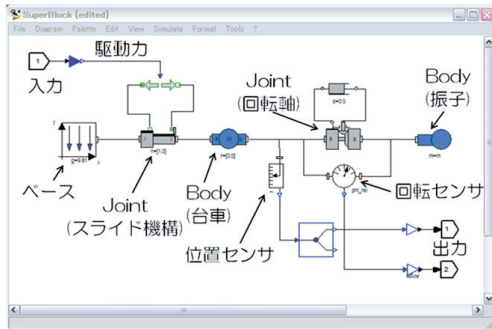


図6 倒立振子のModelicaモデル

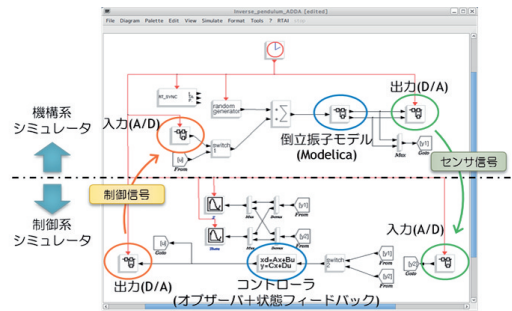


図7 倒立振子のシミュレーション

4.1.1 機構の3D-CADモデル

図5にSolidWorksを用いて設計した3D-CADモデルを示す。機構は大きく3つの要素により構成される。

- ①スライドガイドを含むベース
- ②スライドガイド上で水平方向に駆動される台車
- ③ロータリエンコーダを軸として台車に回転支持される振り子

ベース上の台車はタイミングベルトを介してACサーボモータにより駆動され、振り子回転軸は自由に回転することができる。サーボモータ内蔵のエンコーダと振り子回転軸に取り付けたエンコーダにより、台車位置と振り子回転角が測定され、これらの測定値をもとにサーボモータへの駆動指令を適切に与えることで、振り子の倒立状態を維持することを目的としている。

4.1.2 機構のシミュレーションモデル (Modelica)

図6に倒立振子のModelicaによるモデルを示す。倒立振子の場合部品点数が少ないため、運動方程式や拘束条件をもとにした微分方程式を得ることは比較的容易であるが、ここではModelica標準ライブラリを用いてシミュレーションモデルを作成した。図より3D-CADで設計したモデルと同様に、ベース、台車、振り子の各部品 (Body) が、スライド機構と回転軸 (Joint) により接続されている様子がわかる。スライド機構に駆動力が入力され、位置センサ、回転センサにより得られる値が出力される。各BodyおよびJointに対する初期設定では、SolidWorksのAPIを用いたプログラムを作成し、これにより得られる設計情報を反映させた。

4.1.3 制御アルゴリズム

振り子の倒立制御は、状態フィードバック制御によることとした。倒立振り子の状態フィードバック制御では、台車の位置と速度、振り子の回転角と回転角速度の計4つの入力をもとに、これらに適切なフィードバックゲインを掛けて足し合わせた値を駆動指令として出力する。しかし実機倒立振り子では、台

車速度と振り子回転角速度を直接センシングすることが出来ないため、オブザーバと呼ばれる補償器を併用した制御アルゴリズムの設計を行った。

4.1.4 制御シミュレーション

前述の倒立振り子モデルと制御アルゴリズムをScicos上に実装し、制御シミュレーションを行うことでフィードバックゲイン等のパラメータ調整を行った。このとき用いたScicosブロック線図を図7に示す。線図は、上部の機構系シミュレーション (倒立振り子モデル) を行う部分と、下部の制御系シミュレーション (コントローラ) を行う部分の二つに分けられる。両者の入出力は、I/OボードのA/DおよびD/Aコンバータを介して接続されている。機構系のシミュレーションでは、制御系からの制御信号がA/Dにより入力され、計算の結果得られる台車位置と振り子回転角のセンサ信号がD/Aにより出力される。制御系シミュレーションではA/Dにより得られるセンサ信号をもとに制御信号が計算され、D/Aにより出力される。このように機構系と制御系のシミュレータをI/Oボードを介して独立させることで、次に述べる実機制御への移行を容易にしている。

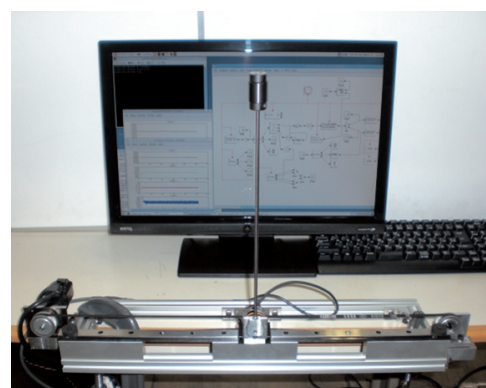


図8 倒立振り子試験機

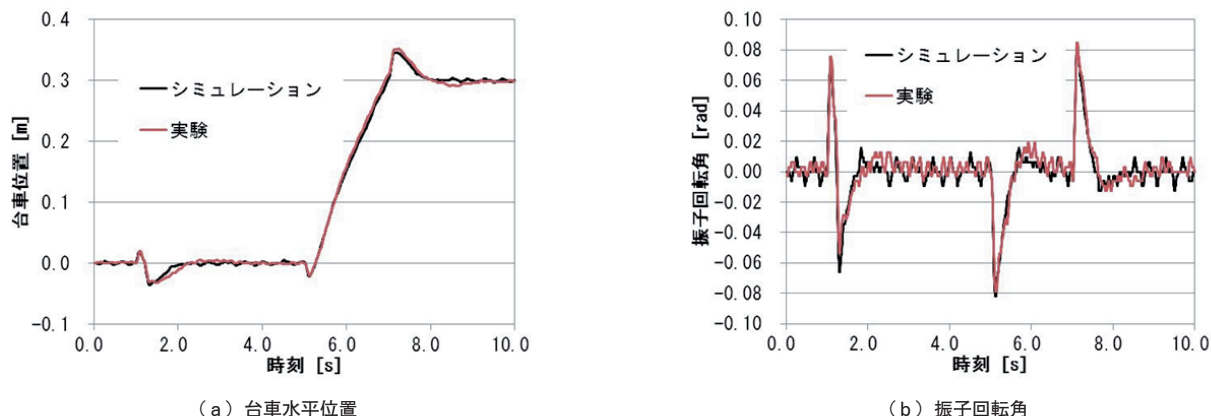


図9 シミュレーションと実験結果の比較

4.1.5 制御試験

3D-CADによる設計とシミュレーションによる制御アルゴリズムの検討を行った後、図8に示す倒立振り試験機を製作した。図7のブロック線図のうち、下部の制御系シミュレーション部分をもとに、実機における制約（台車の移動可能範囲・モータの過負荷防止）を考慮したアルゴリズムを追加したコントローラを、I/Oボードを介して試験機と接続して制御試験を行った。シミュレーション結果と実機による試験結果の比較を図9に示す。制御においては、振子の倒立状態を維持したまま台車水平位置の目標値を変化させ、それに対する追従性を比較した。制御開始から5秒間の目標値を0.0mとし、5秒から7秒の間で目標値を0.3mに変化させた。また制御開始から1秒後に、台車水平方向にインパルス状の外乱信号を与えた。シミュレーションにおいては、実機スライドガイド部や振子回転軸の摩擦係数の測定結果、および離散値として出力されるエンコーダの角度分解能を反映させている。図9より、台車水平位置と振子回転角のそれぞれについて、シミュレーション結果と実験結果が非常によく一致しているのがわかる。また、図9(b)においては、振子回転角測定用エンコーダの分解能が低いことに起因する振動的な挙動が、実験と同様シミュレーションにおいても観測されている。以上より、本研究で構築したリアルタイムシミュレータが、機構系実機の挙動を模擬するシミュレータとして利用することが可能であり、設計・仮想試作段階での検証ツールとして有効に機能することを確認した。

4.2 ロボットマニピュレータの制御

前節で扱った倒立振り子は、平面内での並進と回転で表される二次元運動であったが、三次元空間内での運動の例としてロボットマニピュレータの制御に適用した例を以下に示す。

4.2.1 機構のシミュレーションモデル

倒立振り子の場合と同様に、3D-CADでのロボットマニピュレータ機構系のモデリングを行った後、Modelicaによるシ

ミュレーションモデルの作成を行う。しかし、現段階においてScicos上で利用可能なModelica標準ライブラリには、三次元空間内での運動をモデリングする機能が備わっていないため、数式表現によるシミュレーションモデルの作成を行わなければならない。しかし、三次元空間内での運動は二次元平面内での運動と比較して非常に複雑な微分方程式で表され、機構の自由度が増すほど、手計算で解析モデルを求める事は困難となる。そこで、マルチボディーダイナミクスと呼ばれる理論にもとづいたPyMBsと呼ばれる運動解析ソフトに着目した。PyMBsによれば、機構を構成する部品や部品相互の接続状態を決められた手順で記述することで解析モデルが得られ、Modelica言語仕様に従った数式表現に変換することが可能である。これにより4軸の垂直多関節型ロボットマニピュレータのシミュレーションモデルを作成し、関節角度の制御シミュレーションによる制御パラメータの調整を行った。

4.2.2 制御シミュレーションによる制御パラメータ調整

今回ロボットマニピュレータ実機による試験を行うには至らなかったが、前節の方法で作成したシミュレーションモデルに対して、全ての関節を正弦波状の目標角度で同時に駆動することを想定し、PD制御による関節角度制御を行った。図10にロボットマニピュレータの自由度および動作の様子を、

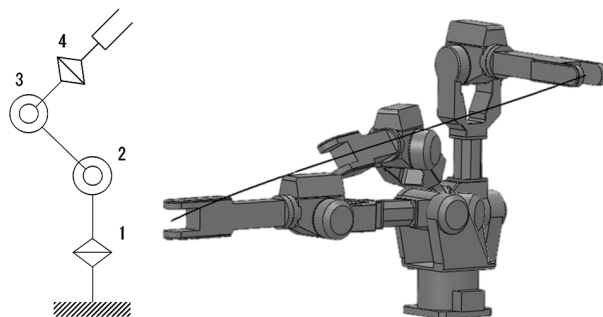


図10 ロボットマニピュレータの自由度と動作の様子

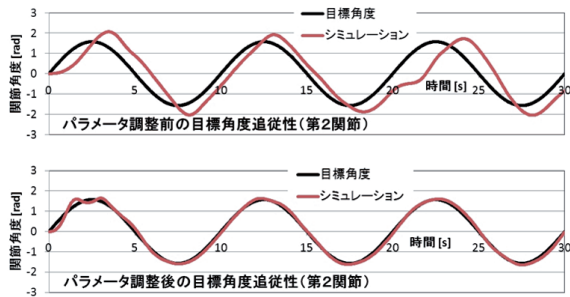


図11 制御パラメータの調整結果

図11に第2関節（アーム全体を上下させる関節）の制御パラメータ調整を行った結果を示す。パラメータ調整前においては、目標とする関節角度と比較して位相遅れを生じ、波形自体も正弦波とは異なる歪な形状をしている。これに対しパラメータ調整後のグラフによれば、動作開始直後に若干振動的な挙動が見られるものの、適切な制御パラメータが設定され、目標関節角度に対して精度よく追従していることがわかる。産業用ロボット等として応用されている垂直多関節型ロボットの関節はサーボモータにより駆動されており、制御パラメータの調整は実機による試行錯誤が一般的であるが、本シミュレータを用いることで事前の検討が可能であることを確認した。

5. まとめ

近年、一次産業向け機械装置もメカトロニクス化が進んでおり、装置開発を効率的・効果的に進める有効な手法として、機構系ばかりでなく制御系までを統合したシミュレーションを行うことが重要となってきている。実機を作成する以前に様々な機構や制御アルゴリズムの検討を簡便に行う事が可能となれば、試作・性能評価にかかる工数とコストの大幅な削減が期待できる。

今回構築したローコストHILシミュレータでは、倒立振子をモデルとして平面内での並進と回転で表される二次元平面運動を、4関節の垂直多関節ロボットをモデルとして三次元運動を扱い、実機と同様の挙動を示すシミュレータとして機能することを確認した。また、フリーソフトや汎用的なハードウェアの組み合わせであるものの、商用のHILS向けシステムと同等の機能が実現され、制御アルゴリズムの検討や制御パラメータの設定において、設計・仮想試作段階で利用可能な検証ツールとして有用であることを確認した。

今回構築したシミュレータは、複数のソフトウェア上でデータをやりとりする必要があるため、ユーザビリティの面で改良の余地がある。今後適用事例を増やしていく中で、必要に応じた機能の追加等を行い、システムとしての完成度を高めていく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道大学大学院情報科学研究科の金井理教授、ならびに旭川工業高等専門学校の戸村豊明准教授より多大なご指導・ご助言を賜りました。心より感謝申し上げます。

農業機械の姿勢・振動制御技術の開発

中西 洋介, 浦池 隆文, 鈴木 慎一, 小林 幸徳*, 星野 洋平*, 江丸 貴紀*

Posture and Vibration Control of Agricultural Machinery

Yohsuke NAKANISHI, Takafumi URAIKE, Shinichi SUZUKI,
Yukinori KOBAYASHI*, Yohei HOSHINO*, Takanori EMARU*

抄 録

近年、本道では生産性を高める目的で、急速な勢いで農場の大規模経営化が進んでおり、農作業の効率化を図る必要に迫られている。農作業は作業機を高速走行させることで作業効率が向上するが、その反面、姿勢が乱れ、振動が激しくなる。特に農薬散布機においては散布用作業アームが長いいため、車輪が僅かな地面の凹凸に乗り上げるだけでアームが上下方向に大きく振動する。また、播種機においては走行速度が大きくなるに従ってオーブナに対する土壌反力が大きくなるため機体全体の振動が激しくなり、播種深さを一定にすることが困難になる。本研究では、農作業機械の姿勢を一定に保持し、振動を低減するための機構設計開発技術および振動を効率的に抑制するためのアクティブ制御技術に関する研究に取り組み、農薬散布機と播種機に適用したので報告する。

キーワード：運動解析, 振動, 制御, CAE, ダイナミックシミュレーション

Abstract

In Japan, especially in Hokkaido, productive large-scale farming is needed to keep a competitive power in market of domestic farm products against the low-cost farm products from foreign countries. To run the large-scaled farm, high working efficiency is needed to agricultural machinery. One of the way to make agricultural machinery work-efficient is to drive them faster than ever. But, vibration and postural instability is getting up, in proportion to the velocity of the vehicle. In this paper, deflective vibration control of the arm of boom sprayer and development of the mechanism to keep the arms of boom sprayer horizontal are shown. Measuring deflective vibration by acceleration sensors and using optimal regulator, deflective vibration of the arm can be kept down effectively. And designing the mechanism using CAE dynamics simulation in advance, development of the mechanism of posture control of the arms can be gone ahead smoothly. And also in this paper, the new method to analyze the vibration of seed planter, which takes account of the viscoelasticity of the soil, is shown. Using this method, the mechanism to keep down the vibration of the seed planter is able to be designed.

KEY-WORDS : Motion Analysis, Vibration, Control, CAE, Dynamic Simulation

1. はじめに

近年、国は国産農産物の低コスト化を促進するため、生産性の高い大規模農場経営への移行を促しており、特に北海道においては大規模農場経営化に向けた農作業の効率化が求められている。農作業の効率を向上させる方法として作業機を

高速走行させることが考えられるが、一般に走行速度に比例して作業機の姿勢が乱れ易くなるとともに振動が激しくなる。例えば農薬散布機においては、散布用作業アームが長いため、弾性たわみ振動が励起されやすくなる。さらに、作物列をまたいで走行する都合上、車輪トレッドが1.2mに制限されており、片輪がわずかな地面の凹凸に乗り上げるだけで長さ10

* 北海道大学大学院工学研究院 * Graduate School of Engineering, Hokkaido University

事業名：重点領域特別研究

課題名：大規模農業に向けた走行安定化機能を搭載した高速農作業機械の開発

m内外の作業アームの先端が上下方向に大きく揺動し、最悪の場合、先端が地面に接触して破損するなどの不具合が生ずる。本稿では、作業アームの弾性たわみ振動については、固定端片持梁の3次モードまでの曲げ振動を考慮し、各振動モードの状態フィードバックを施すことで振動を抑制することを試みた。また、アーム先端の上下方向の揺動、すなわち、ロール方向の回転揺動に関しては、アームがロール方向に回転揺動しにくい機構をCAE (Computer Aided Engineering) の機構シミュレーション機能を活用して設計・開発した。

一方、播種機においては、作物の種を土壤中に巻く必要があるため、オープナと呼ばれる板を土壤に突き刺し土壤を掻き分けながら走行する。したがって、土壤から大きな反力を受けるため、播種機の機体振動および播種深さを精度良く解析するためには、土壤の粘弾性特性を元に計算する土壤反力を考慮した解析モデルが必要となる。本稿では、播種機の振動解析において土壤粘弾性特性を考慮した解析手法を考案し、同手法を用いて播種深さを一定保持する機構を開発したので報告する。

2. 農薬散布機作業アームの姿勢・振動制御



図1 農薬散布機 (マウント型)

図1にトラクタ後部にマウントするタイプの農薬散布機を示す。アーム長は8~15mで、折り畳み式のヒンジ構造となっており、根元支持部のモーメントを軽減するために先端に向かって断面が小さくなっているなど複雑な構造をしている。なお、図1に示すタイプのアームの断面は、水平方向に比して鉛直方向の剛性が高くなっている。すなわち、鉛直方向(上下方向)は、重力による弾性たわみ量を抑えるために断面寸法を大きくして剛性を高めている。一方、水平方向は軽量化のために薄い断面寸法としている。したがって、水平方向では弾性たわみ振動が励起されやすい。本稿では図1に示す断面形状のアームを有する農薬散布機を対象とし、水平方向には弾性たわみ振動を抑制する制御を施し、鉛直方向は弾性たわみ振動を考慮せず、アーム全体を剛体として姿勢保持

する機構を搭載することで上下方向の揺動を抑制し、アームの地面に対するロール方向傾斜角が一定の角度を超過した場合に、アームを初期位置に戻す制御を施すことにした。

2.1 農薬散布機作業アームの弾性たわみ振動制御

図2に弾性たわみ振動を抑制するための室内実験装置を示す。長さ4mであり、中間部に折り畳み式のヒンジを有し、断面を先端に向かって小さくする等、実物を模擬した構造と

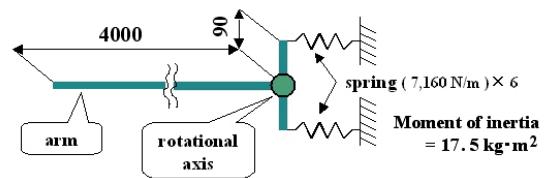
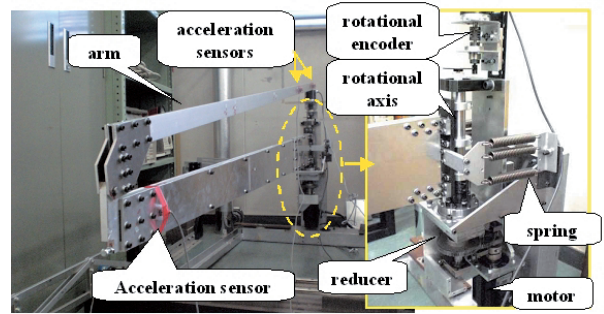


図2 弾性たわみ振動抑制実験装置

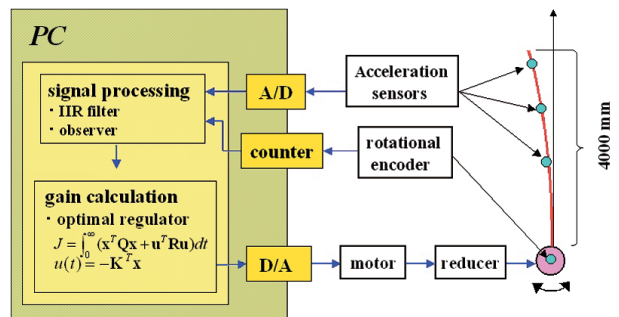


図3 アクティブ制御ブロック図

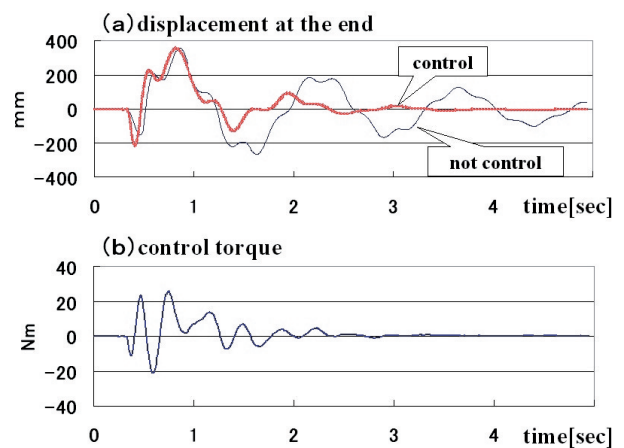


図4 アクティブ制御実験結果

している。根元回転軸には減速比20の減速機を介して出力400Wのサーボモータと剛体回転角を検出するためのロータリーエンコーダを設置し、さらに、アームの3次モードまでのたわみ振動を検出・制御するために、アーム上に3個の加速度センサを設置している。これらのセンサ情報にオブザーバ、IIRフィルタ等のフィルタリング処理を施した後、最適レギュレータで算出した制御ゲインを元に操作量を計算し、アームにアクティブ制御を施した^{1), 2), 3), 4), 5)}。図3に制御方法のブロック図を示す。なお一般に、根元を回転駆動することで柔軟アームのたわみ振動成分にアクティブ制御を施した場合、たわみ振動ではない回転軸回りの剛体回転角が大きくなる傾向がある。試作したアームは長さ4m、質量6.3kgであり、根元回転軸回りの慣性モーメント ($17.5\text{kg}\cdot\text{m}^2$) が大きく、この傾向が強くなる⁶⁾。したがって、ここではアーム根元に静的バネ定数7160N/m (カタログ値) のコイルバネを6本設置し、アクティブ制御時の剛体回転角を小さくした。なお、一般に動的バネ定数は静的バネ定数の1.5~3倍の値となる。したがって、ここでは制御ゲインを算出する際、アーム振動係数学モデルに静的バネ定数値の2.5倍の値を設定して制御ゲインを算出した。

図4(a)にアクティブ制御時および無制御時のアーム先端変位を、(b)にアクティブ制御時の制御トルクを示す。図より、アームにアクティブ制御を施すことで、約350mmの先端初期変位が約2秒で収束し、制御に要した制御力は高々25Nm程度であることが分かる。以上より、アーム根元をバネ支持し、モータで回転駆動することで4mアームの弾性たわみ振動を効率的に抑制できることが分かった。⁷⁾

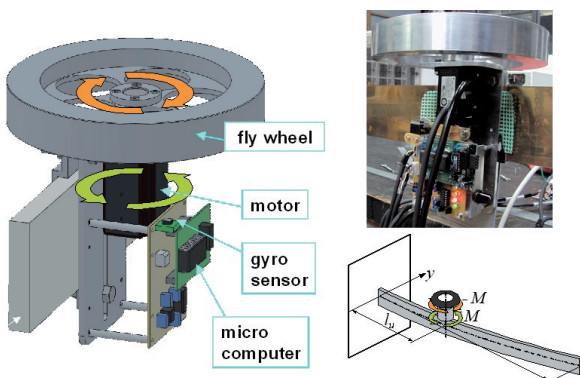


図5 振動抑制ユニット (北海道大学)

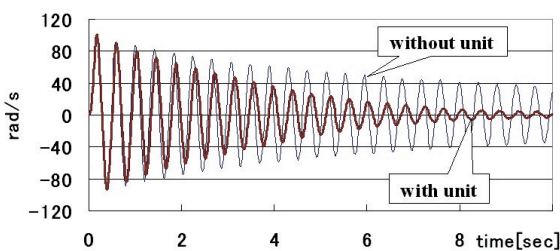


図6 振動抑制ユニット振動抑制実験結果

また、本研究では、アームへの実装時の利便性や低コスト化を考慮し、アームに設置することでたわみ振動を抑制するコンパクトな振動抑制ユニットを開発した。⁸⁾ 図5に開発した振動抑制ユニットを示す。ジャイロセンサで検出したアームのたわみ角速度に応じて、モータ軸に設置したフライホイールを駆動する極めて簡便な構造となっている。一定の慣性を有するフライホイールをたわみと逆方向に駆動することで、その反モーメントが振動抑制力としてアームに作用する原理となっている。図6に振動抑制ユニットによるアームのたわみ振動抑制実験結果 (ジャイロセンサ出力値) を示す。ユニットを設置することで振動が効率的に抑制されていることが分かる。

2.2 鉛直方向姿勢保持機構および姿勢制御

農薬散布機は農薬散布用作業アームが長い場合、アームが車体に固定されている場合、高々数cm程度の地面の凹凸による車体のロール方向傾斜で作業アーム先端が上下方向に大きく揺動する。⁹⁾ したがって、本研究では、アームを重心位置近辺で車体に一点で回転支持する機構を検討した。この場合、アームに対してロール方向の外乱モーメントが作用しない限り、車体が傾斜してもアームは自己慣性で常に一定姿勢を保持することが期待できる。さらに、外乱モーメントによりアームが傾斜した場合でも、アーム支持位置を重心位置近辺に設けることで、アームを初期位置に復帰させるために使用するアクチュエータの駆動トルクを極力小さくすることが期待できる。ここではまず、アームを重心位置で車体に一点で回転支持した場合にアームを駆動するために必要とされる制御トルクをシミュレーションで検討した。

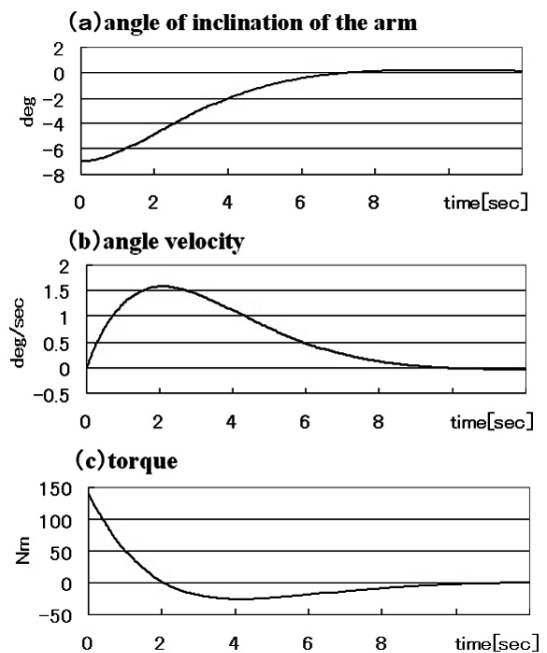


図7 アーム初期値応答および制御トルク (シミュレーション, 初期傾斜角 = 7度)

図7に重心位置で点支持された作業アームについて、7度傾斜した状態から水平状態（初期位置）に復帰させた時の初期値応答（Solidworks Motionシミュレーション結果）を示す。(a)は傾斜角、(b)は傾斜角速度、(c)は駆動トルクである。アームは実機を想定し、全長22m（片腕10m）、全質量269kg（第1アーム=66kg、第2アーム=20kg、支持点回りの慣性モーメント=4,270kg・m²）としている。なお、駆動トルクTは、傾斜角を θ 、傾斜角速度を ω として式(1)で計算した。

$$T = -20\theta - 60\omega \quad \dots(1)$$

なお、 θ と ω に対するフィードバックゲインは、応答を確認しながら試行錯誤で決定した。

図7(a)より、 θ と ω に対して式(1)のようにゲインを設定して制御トルクを計算することで、アームはオーバーシュートすることなく、滑らかに水平状態に復帰することが確認できる。なお、図7(b)、(c)より、アームの傾斜角速度の最大値は毎秒約1.6度、制御トルクの最大値は約140Nmであることが分かる。

表1 DC24V 400W モータ仕様
(高岳製作所(株)：MPTF040-0225BN)

rated torque	Ta	1.91 Nm
rated speed	Na	2000 rpm
reduction ratio	i	400
efficiency of gears	η	0.5
output torque	Tb = $\eta i Ta$	382 Nm
output speed	Nb = Na / i	5 rpm

表1にDC24V 400W モータ（㈱高岳製作所製）の定格トルクと定格回転数、さらに、減速比を400、ギヤの機械効率を0.5とした時のギヤ出力軸でのトルクと回転数を示す。トラック等では電源としてDC24Vバッテリーを使用することが一般的であり、車載用オルタネータ（発電機）も容易に入手可能である。

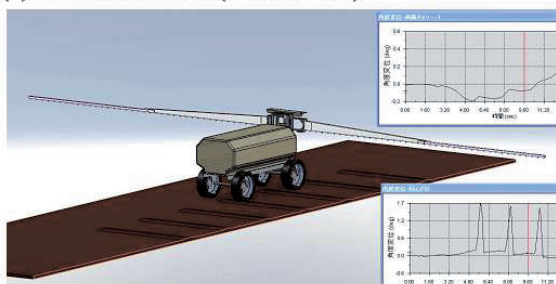
表1より、減速比を400とした場合、ギヤの機械効率を0.5と見積もっても、ギヤ出力軸では最大382Nmのトルクが出力可能であり、実機レベルの全長21mのアームを駆動するために必要とされるトルク（140Nm）の約2.7倍となっていることが分かる。さらに、減速後のギヤ出力軸回転数は5rpm（毎秒30度）となっており、シミュレーション結果（毎秒1.6度）を大きく上回る。したがって、ここでは制御の利便性を考慮し、アーム駆動用アクチュエータとして上記モータを使用することを前提に開発を進めた。

2.2.1 CAE走行シミュレーション

以上より、本研究では通常走行時はアームを重心位置近辺で点支持することでアームの自己慣性で姿勢保持し、ロール方向の外乱によりアーム傾斜角が大きくなった場合、適宜、電気モータで初期位置に復帰させるものとした。具体的には、モータとアーム支持軸の間にクラッチを設け、通常走行時はクラッチを開放してアームの自己慣性で姿勢を保持し、アーム傾斜角が一定値を超過した場合、クラッチを連結してモータ駆動でアームを初期位置に復帰させるものとした。

なお、本研究では試作機製作に先立ち、上記のアーム姿勢保持機構を搭載した農薬散布機走行時のアームの動的挙動を、

(a) CAE simulation (SolidWorks)



(b) Angle of inclination of the arm

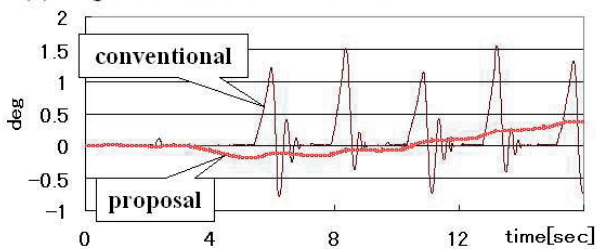
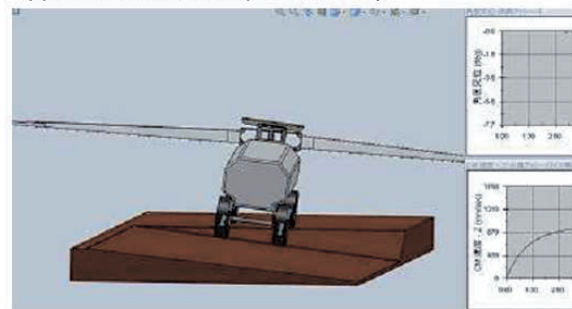


図8 CAEシミュレーション（凹凸路面走行）

(a) CAE simulation (SolidWorks)



(b) Angle of inclination of the arm

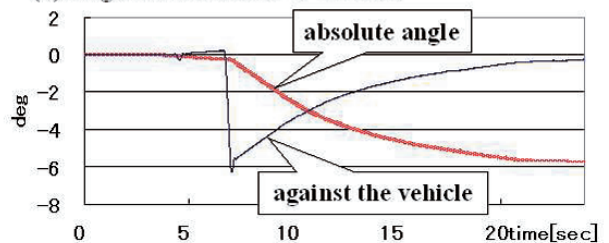


図9 CAEシミュレーション（傾斜地走行）

ダイナミクスを考慮したCAE機構シミュレーション解析で確認した後、試作機を製作し実証試験を行った。¹⁰⁾

図8(a)に、高さ6cm、ピッチ2mの連続凸部を有した路面を走行した時の農薬散布機作業アームの挙動をCAE機構解析ソフトSolidworks Motionで解析している様子を、(b)に既存機構(アーム固定型)と提案した姿勢保持機構でのアーム傾斜角解析結果(絶対水平からの傾斜角)を示す。図より、既存機構では車輪が凸部に乗り上げる毎にアームが1.2~1.5度程度傾斜するのに対して、提案機構ではアームはほとんど傾斜しないことが確認できる。

また、図9(a)に、提案機構を搭載した農薬散布機が傾斜地(傾斜角が0度から6度に変化)を走行した時のアーム挙動解析の様子を示す。(b)はその時のアーム傾斜角(絶対水平からの傾斜角)と車体に対するアーム傾斜角である。車体に対するアーム傾斜角を θ とし、 θ が1度を超過した場合、 θ を制御量として(1)式で制御トルクを計算し、アームが車体鉛直軸に対して垂直となるように制御している。なお、 θ が1度以下に復帰した場合、駆動トルクの付加を停止している。このようにアームを制御することで、傾斜地においてアームを傾斜地と平行に保持することが可能である。

図9(b)において、約7秒付近で車体に対する傾斜角 θ の値が0度から-6度に急変している。これは、車両が傾斜角6度の傾斜地に突入した時点では、まだアームが絶対水平姿勢を保持しており、車体のみが6度傾斜していることを意味する。その後、 θ 値を0とすべく(1)式でアームが制御され、ゆっくりと θ 値が0に収束し、これに伴い、アーム傾斜角(絶対水平からの傾斜角)が-6度に収束している。これは、アームが傾斜地と平行となっていることを意味する。

本シミュレーションを行うことで、本提案機構と制御方法にてアームが局部的な地面の凹凸に影響されことなく一定姿勢を保持すること、さらに、傾斜地においてはアームが地面の傾斜角変化に追従し、傾斜地に対して平行姿勢を保持することが確認できた。以上のように、試作機製作前にCAE走行シミュレーションを行うことで、制御方法を含めた本機構の妥当性を確認することができ、試作機製作後の各種パラメータ調整時間の短縮が可能となった。

2.2.2 試験車両

図10にシミュレーションで得られた知見を元に設計した姿勢保持機構搭載型試作機(けん引型)の図面を、図11に製作した試作機を示す。4mのアーム(図2)を左右に搭載し、アーム全体を重心位置近辺で作業機本体に一点で回転支持している。アームはクラッチと減速機を介して400W DCモータで駆動可能である。また、車体に対するアームの傾斜角を検出するため、アーム支持軸(回転軸)にポテンショメータ(以下、Pot)を設置した。さらに、アームに設置したジャイロセンサ出力値を積分してアーム傾斜角を求め、車体に設

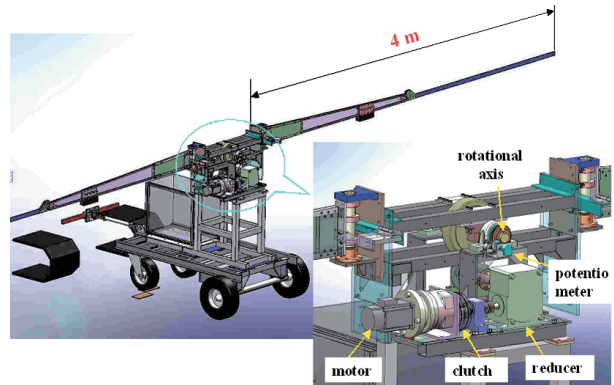


図10 姿勢保持機構搭載型農薬散布機試作機図面



図11 姿勢保持機構搭載型農薬散布機試作機

置した光ファイバジャイロ(以下、FOG)で車体傾斜角を計測した。なお、ジャイロセンサ積分値とFOG出力値の初期値は、各々アームと車体に設置した傾斜角センサの走行開始直前(車両停止時)の出力値で初期化した。

2.2.3 走行試験結果

図12に時速8kmで凹凸の激しい芝生上(平地)を約50m走行した時の既存機構(アーム固定型)と提案機構のアーム傾斜角(ジャイロセンサ積分値)を示す。既存機構ではアームが激しく振動しているのに対し、提案機構ではアームはほとんど振動していないことが分かる。50m走行試験を十数回繰り返した結果、アーム傾斜角は常に±1度以内であり、ほぼ水平状態を保持することを確認した。¹¹⁾

図13に傾斜角2~4度の傾斜地を時速9kmで約100m走行した時の実験結果を示す。(a)はアーム傾斜角(ジャイロ積分値)と車体傾斜角(FOG値)、(b)は車体に対するアーム傾斜角を表すPot(ポテンショメータ)生出力値とその過去2秒間の平均値、(c)はモータの制御トルクである。図12(a)より、車体は激しく高周波で振動(1~3Hz)しているのに対し、アームの高周波振動は抑制されていることが分かる。

先述したように、本走行試験では、通常走行時はクラッチを開放してアームの自己慣性でアームの姿勢を保持している。ロール方向の外乱モーメント等によりアームが傾斜し、Pot

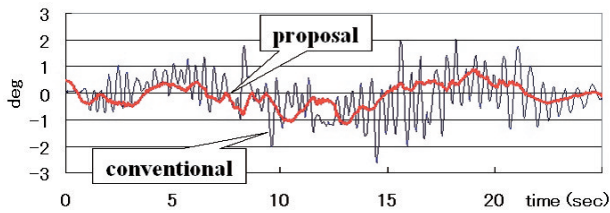


図12 平地走行時アーム傾斜角
(ジャイロセンサ積分値, 車速= 8 km/時)

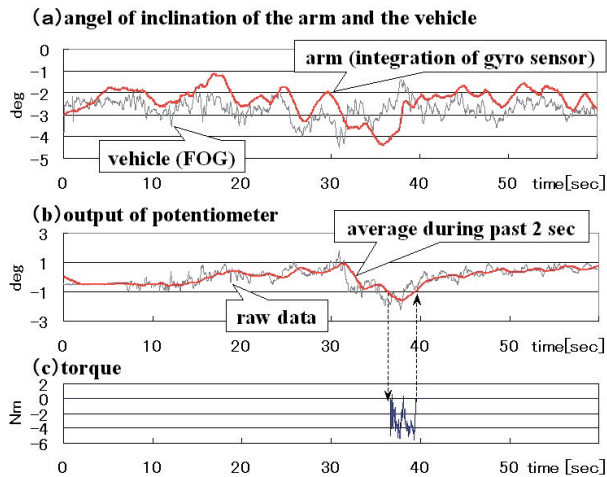


図13 傾斜地走行試験結果
(傾斜角 2 ~ 4 度, 車速 = 9 km/時)

値(絶対値)の過去2秒間の平均値が1度を超過した場合にクラッチを連結し、Pot値を制御量としたPID制御でアームをモータ駆動して初期位置に戻している。図13(b), (c)より、走行開始後36秒付近でPot値平均値が1度を超過したため、5 Nm程度の制御トルクがアームに作用し、その結果、アームが初期位置付近(Pot値=0度)に復帰していることが確認できる。なお、39秒付近ではPot値平均値が1度以下となったため、クラッチを開放して制御を停止している。

車体に対するアーム傾斜角を表すPot値を制御量としてアームにフィードバック制御を施すことで、アームを車体鉛直軸に対して垂直に保持することができる。この場合、Pot値の生出力値を一定値(本試験では1度)と比較してアームの制御を開始した場合、車体が単発的な凸部に乗り上げPot値生出力が一時的に一定値を超過した場合も制御が開始され、アームが一時的に大きく傾斜した車体鉛直軸に対して垂直姿勢を保持するように駆動されてしまう。しかし、この場合、制御が開始されることなくアームは自己慣性で姿勢保持することが望ましい。Pot値生出力ではなく、Pot値の過去2秒間の平均値を一定値と比較して制御を開始することで、単発的な突部乗上時においてアームの制御は開始されないことを確認した。

以上から、本提案機構と制御方法にてアームが地面の凹凸

に影響されることなく一定姿勢を保持すること、さらに、傾斜地においてはアームが地面の傾斜角変化に追従し、傾斜地に対して常に平行姿勢を保持することを確認した。

3. 播種機播種深さ解析

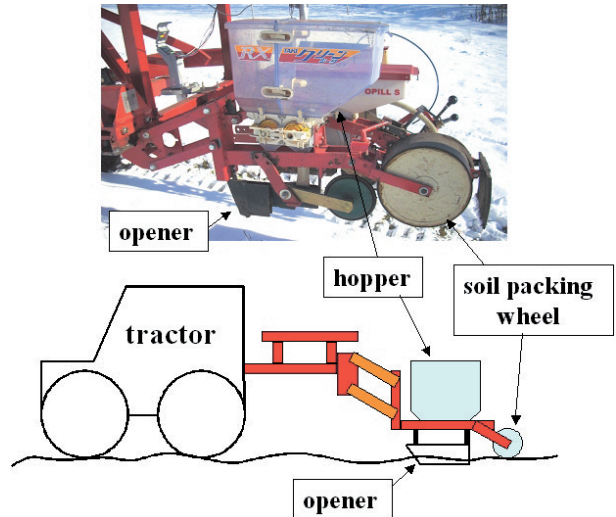


図14 播種機(従来播種機, 平行リンクタイプ)

播種機はオープナと呼ばれる板を土壤に差込みながら掻き分け、ホッパーから種を播種した後、覆土、鎮圧する。図14に平行リンク機構を介してトラクタにけん引されるタイプの播種機(従来播種機)を示す。したがって、高速走行時には、オープナに対する水平方向の土壤反力が大きくなるため機体の振動が激しくなり、一定の播種深さを保持することが難しくなる。さらに、前節の農薬散布機に比して機体全体の質量が小さいため、鎮圧輪(soil packing wheel)等の土壤との接触部位が受ける鉛直方向の土壤反力の影響で機体が大きく上下に振動する。したがって、播種機の機体振動、さらにはオープナによる播種深さを解析するためには、土壤反力を精度良く把握する必要があり、そのためには土壤の粘弾性特性を求める必要がある。したがって、本研究では播種機走行時のシミュレーション解析を行うに先立ち、土壤粘弾性モデル同定試験を行った。

3.1 土壤粘弾性モデル同定試験

土壤に車輪あるいは鎮圧輪等の一定の質量を有する物体が落下した場合、その物体は土壤から反力を受ける。土壤反力を計算する粘弾性モデルとしては、(2)式に示すvoigtモデル(線形モデル)が広く知られている。

$$F = kx + cv \quad \dots(2)$$

ここで、 F [N]は土壤反力、 x [m]は変位(土壤に埋まった深さ)、 v [m/s]は速度、 k [N/m]はばね定数、 c [Ns/m]は粘性係数である。一方、本研究では、4次までの弾性項を

考慮した非線形モデルを提案する。

$$F = k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + k_4x^4 + cv \quad \dots(3)$$

(2), (3)式の妥当性を評価するため、土壌の粘弾性特性を求める実験を行い、各式と実測値を比較・検討した。ある一定の質量を有する物体を任意の高さから土壌に落下させ、その時の土壌反力Fと土壌に埋まった深さxを実測することで、土壌の粘弾性特性を求めることができる。実測値を(2), (3)式で最小自乗近似することで各式の妥当性を評価することができ、さらに各式の未定係数を求めることができる。

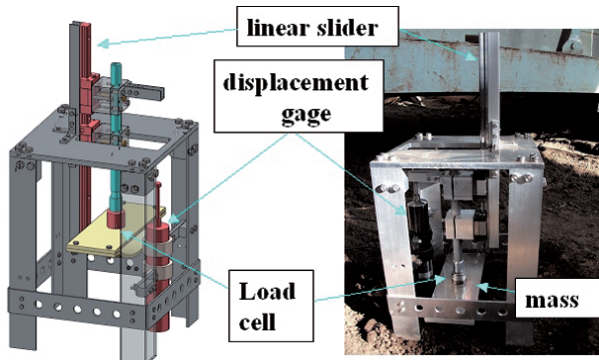


図15 土壌粘弾性特性測定装置

図15に土壌の粘弾性特性を求めるために製作した実験装置を示す。鎮圧輪を想定した平板状のおもりを、土壌に対して常に垂直に当たるようにリニアスライダに沿って落下させる。その時に発生する落下衝撃力（土壌からの反力）をロードセルで測定し、平板状のおもりが地面に埋まる深さを変位計で測定する構造となっている。

図16に土壌粘弾性の実測値と、実測値をvoigtモデル(2)式と提案モデル(3)式で最小自乗近似した結果を示す。横軸は変位（平板が土壌に埋まった深さ）、縦軸は土壌反力である。図より、線形voigtモデルに比して、4次までの弾性項を考慮した非線形提案モデルにて実測値をより正確に近似できて

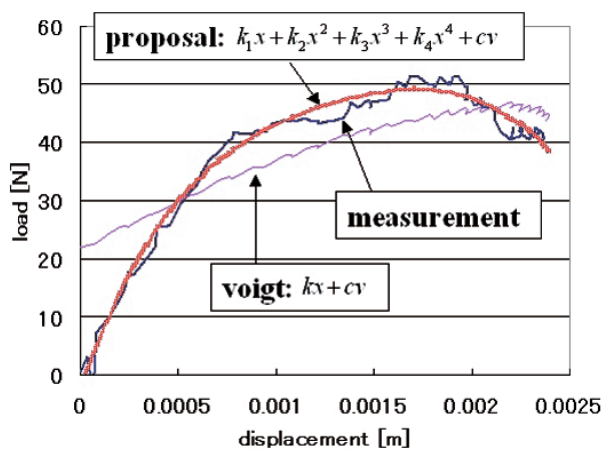


図16 土壌粘弾性モデル実測値とモデル式

いることが分かる。したがって、ここでは土壌粘弾性モデル式として、(3)式を用いて播種機走行時のシミュレーション解析を行った。

3.2 播種機播種深さ解析シミュレーション

播種機の機体振動、さらにはオープンナによる播種深さを解析するためには、土壌の粘弾性特性より導かれる土壌反力を考慮した解析が必要となるが、市販CAE解析ソフトウェアでは解析困難である。したがって、本研究では解析に土壌反力の影響を反映させるため、前節の土壌粘弾性モデルを含めた播種機走行時の力学モデルを考案した。図17に播種機走行時の力学モデルを示す。図に示す力学モデルを元に播種機走

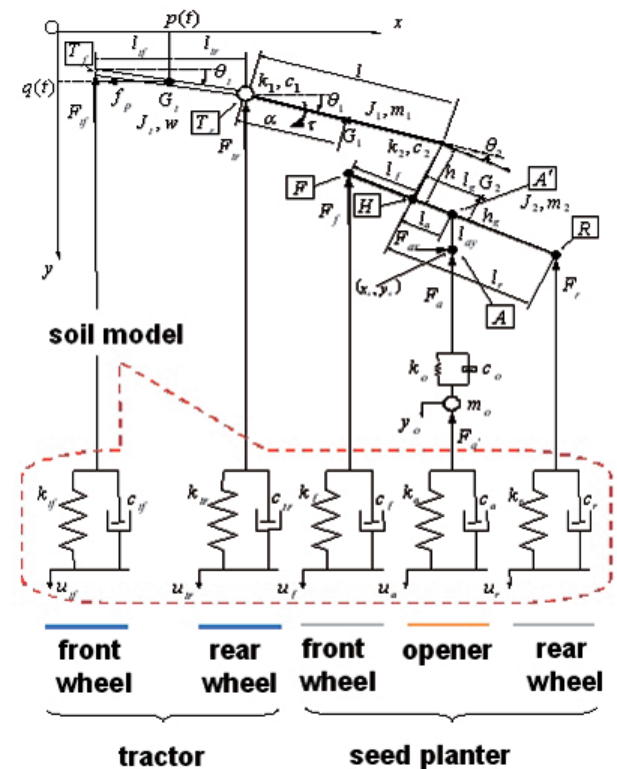


図17 播種機走行時力学モデル

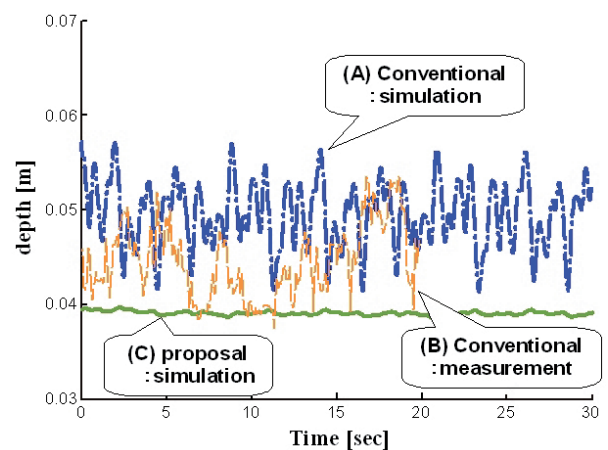


図18 土壌粘弾性モデル実測値とモデル式

行状態を表す運動方程式を導き出し、状態方程式として定式化した後、ルンゲクッタ法を用いて播種機の機体振動、さらには播種深さを解析し、一定の播種深さを得るための機構を提案した。

図18Aに本解析手法を用いて計算した従来播種機(図14)の播種深さを、Bに従来播種機の播種深さ実測値を示す。Cは播種深さを一定にするための提案機構による播種深さ解析値である。AとBを比較すると、振幅および振動数が同傾向であることから本解析手法の妥当性が確認できる。また、Cより、提案機構にて振動の少ない一定の播種深さが得られていることが確認できる。本解析手法を用いることで、一定の播種深さを得るためのリンクの長さ、設置するバネのバネ定数、さらにはリンクのどの位置にバネを設置するのが効果的か等の検討を行うことが可能となった。

4. まとめ

本研究では以下の要素技術を農業機械に適用し、高速走行時においても姿勢の乱れや振動の少ない作業機の開発を試みた。

- (1) アクティブ制御技術
- (2) CAE(機構解析機能)を活用した作業機設計技術
- (3) ダイナミクス解析技術

その結果、農業散布機作業アームにおいては前後方向に発生する弾性たわみ振動が効率的に抑制されること、アームが地面の凹凸に影響されることなく一定姿勢を保持すること、さらに、傾斜地においてはアームが地面の傾斜角変化に追従し、傾斜地に対して常に平行姿勢を保持することを確認した。

また、播種機においては、土壌粘弾性特性を考慮した播種深さ解析手法を開発し、同解析手法を用いることで高速走行時においても一定の播種深さを保持する機構を提案した。

今後は共同研究企業と連携し、実用化に向けた製品開発を行う予定である。なお、上記要素技術は、XYテーブルやロボットアーム等の位置決め、各種搬送作業車の動的挙動解析等、運動を伴う装置一般の解析・制御に適用できる汎用的な技術であり、今後は一般・電気機械器具製造業への展開も図る予定である。

謝辞

本研究で振動の計測・データ処理に使用した機械性能評価システムは、財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。また、CAEシミュレーション解析に使用した3次元CAD解析システムは地域産学官共同研究拠点整備事業により整備されました。記して感謝致します。

引用文献

- 1) 中西洋介ほか2名：モーダル解析を用いた柔軟作業アームの制振制御，北海道立工業試験場報告，No307，pp13-19，(2008)
- 2) 長南征二・高橋和彦：弾性ロボットアームのフィードバック位置決め制御，日本機械学会論文集（C編），Vol.55 No.513，pp.1215-1220，(1989)
- 3) 福田俊男：フレキシブルロボットアームの制御，日本機械学会論文集（C編），Vol.51 No.468，pp.2140-2144，(1985)
- 4) 近藤晋司ほか2名：柔軟構造物の振動制御におけるセンサおよびアクチュエータの位置，日本機械学会論文集（C編），Vol.55 No.513，pp.1206-1214，(1989)
- 5) 福田俊男ほか4名：太陽電池パドルのフレキシビリティ制御，日本機械学会論文集（C編），Vol.51 No.465，pp.979-984，(1989)
- 6) 中西洋介ほか3名：柔軟作業アームの制振制御，北海道立工業試験場報告，No305，pp25-38，(2006)
- 7) 中西洋介：モーダル解析を用いた長尺作業アームのアクティブ制振制御，第67回農業機械学会年次大会講演論文集，pp297-298，(2008)
- 8) 梅田遼平，星野洋平，小林幸徳，江丸貴紀，中西洋介：適応アクティブ制振ユニットの開発とブームスプレーヤーへの適用，第42回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文誌，pp.27-30，(2010)
- 9) 中西洋介，吉川毅，浦池隆文，鈴木慎一，小林幸徳，星野洋平，江丸貴紀：農業散布機作業アームの姿勢・振動制御，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会講演論文集（CD-ROM），1A1-B10，(2010)
- 10) 中西洋介，浦池隆文，小林幸徳，星野洋平：軽量型農業散布機作業アームの安定化制御技術，農業環境工学関連学会2009年合同大会講演論文集（CD-ROM），G71，(2009)
- 11) 中西洋介，吉川毅，浦池隆文，鈴木慎一，小林幸徳，星野洋平，江丸貴紀：農業散布機作業アームの姿勢・振動制御（大規模農業に向けた走行安定化機能を搭載した高速農作業機械の開発），第69回農業機械学会年次大会講演論文集，pp224-225，(2010)

レーザー誘起ブレイクダウン分光分析法を用いた防腐剤（CCA） 処理木材の判別方法の開発 第2報

高橋 徹, 富田 恵一, 若杉 郷臣

Development of Distinction Process of CCA Treated Wood from House Demolition using Laser Induced Breakdown Spectroscopy method Part II

Touru TAKAHASHI, Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI

抄 録

レーザー誘起ブレイクダウン分光分析法（以下LIBS法とする）を用いたCCA（クロム、銅およびひ素）処理木材の判別方法を開発するため、LIBS測定における最適測定条件を決定し、実試料を用いた判別試験を行い、現場のニーズに応えた判別方法について検討した。減圧加圧処理によりCCA標準試料を作製し、クロム、銅およびひ素の測定を行い、クロムと銅は数mg/kgまで、ひ素は200mg/kgまで、正確に測定できることが分かった。さらに、ベイツガ、カラマツなど樹種の違いが分析値に大きな影響を及ぼさないこと、また、土壌等の表面汚れの影響を受けない正確な測定ができることを確認した。銅またはクロム測定による最適判別方法および判別条件を決定し、実試料（クロム、銅含有量：200～3600mg/kg）の場合でも、精度良く判別できることが分かった。また、光ファイバー等を用いた装置でも同様に測定可能であり、実試料の判別ができることを確認した。さらに、検出器内蔵小型分光器を用いたLIBS装置でも、クロムおよび銅の測定が可能であることから、CCA処理木材の判別に特化した装置の可搬型、小型化の可能性を見出した。

キーワード：LIBS法、防腐剤（CCA）処理木材、建築廃材、発光スペクトル

Abstract

It is necessary to distinguish the CCA treated wood from building debris, in order to recycle as safe woody biomass. The emission spectrum of Chromium, Copper and Arsenic are detected through analysis of the CCA standard wood, by using the LIBS (Laser Breakdown Spectroscopy) method. The content determination limits of Chromium, Copper were about 10mg/kg, which are sufficient value to distinguish CCA treated woods. And, the analysis result by using the LIBS was not affected by wood species and soil dirty. Result of analyzing building debris from dismantling site, LIBS method under the best conditions were able to distinguish in high accuracy. It has been understood to be able to measure chrome and copper similarly even with the LIBS installation that uses the optical fiber.

KEY-WORDS : Laser Induced Breakdown Spectroscopy, CCA Treated Wood, House Demolition, Emission spectrum

1. はじめに

CCA（クロム、銅、ひ素）処理木材は1965年頃から住宅の土台として広く用いられてきたが、CCA処理木材を焼却・埋立等する際の有害金属であるクロムおよびひ素の揮散、溶出が問題とされ、1997年以降はその使用量が激減している。

しかし、木造建築物の平均寿命は30～35年と推定されているため、今後木造住宅の解体が進み、北海道だけでも今後20年間にわたり1万m³/年のCCA処理木材が発生すると予想されている^{1, 2, 3)}。現在、森林バイオマス（間伐材、工場廃材）のみでは、敷料および木質ペレット等に使用される木質バイオマスの必要量は確保できないため、安全で質の高い再資源

事業名：公募型研究

課題名：防腐剤（CCA）処理木材の自動判別方法および有効利用に関する研究（H20～22年度）

化原料が必要となり、建築廃材利活用への要望が高まっている。しかし、建築廃材には有害物質を含有しているCCA処理木材等が混入している恐れがあり、再資源化率があまり向上していないのが現状である。CCA処理木材は燃焼時に有害ガスを発生し、燃焼灰中にも有害物質を含むことから高精度の判別法の開発が必要である。現在使用されている目視による判別法、薬品による呈色法および研究開発されている近赤外線法は、経験・熟練が必要であること、試薬調製・反応時間等の煩雑さが伴うこと、さらに判別精度が低いこと等により、誤判別が多く、あまり普及されていないのが現状である。

一方、レーザーを利用した非接触、リアルタイム計測法として、レーザー誘起ブレイクダウン分光分析法（以下LIBS法とする）を用いた計測技術が開発されている^{4,5,6,7,8}。LIBS法は前処理無しで、気体、液体および固体中の主成分から微量成分までの元素含有量をリアルタイムで計測可能である^{9,10,11}。

本研究では高感度元素分析かつ現場分析に適しているLIBS法を用いてCCA処理木材を高精度に判別できる装置の検討を行った。前報¹²では、CCA標準試料を用いて、クロム、銅およびひ素の発光スペクトルを検出し、良好な検量線が得られた。得られた検量線を用いて、実試料を測定した結果、蛍光X線分析結果と同等であったことから、正確に定量できることを確認した。さらに、LIBS法の諸条件（レーザー照射時間、レーザー出力、レーザー焦点距離および遅延時間）の最適化を図った。本報では、各元素の定量下限値、樹種による影響、表面の汚染による妨害等について検討し、実試料による判別を行った結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 標準試料の作製および実試料

重クロム酸カリウム、硫酸銅および60%ひ酸溶液を1Lに定容し、表1に示す濃度のCCA標準溶液（旧JIS K1554 CCA標準組成表 1号相当）を調整した。60℃で48時間乾燥したベイスギ、ベイツガ、カラマツおよびトドマツ（30×36×10mm）を10倍から500倍に希釈したCCA標準溶液に浸漬し、90kPa雰囲気で15分間減圧し、さらに5 kg/cm²で1時間加压処理した。加压処理した標準試料を恒湿乾燥機60℃で24時間乾燥し、クロム、銅およびひ素の含有量が異なるCCA標準試料を作製した。作製した各標準試料のクロム、銅およびひ素の含有量を確認するため、過去に用いられていた針葉樹構造用製材の日本農林規格（旧JAS）の保存処理薬剤の定量法に準じて分析を行った。

建築物の解体現場および中間処理施設では、土壌等の汚れが建築廃材に付着するため、現場での判別を考慮し、土壌汚れ模擬試料を作製し、汚れた試料における正確性を確認した。土壌汚れ模擬試料は、土壌スラリー（30g/100mL）にCCA

標準試料を浸漬し、乾燥して作製した。また、判別試験に使用したCCA処理木材試料は、中間処理施設ならびに家屋解体現場から収集し、針葉樹構造用製材の前述した規格（旧JAS）に準じて分析を行った。

表1 CCA標準溶液の各元素濃度

試薬	1L中(g)	元素	溶液濃度(g/L)
K ₂ Cr ₂ O ₇	137.5	Cr	49
CuSO ₄ ・5H ₂ O	83.75	Cu	21
H ₃ AsO ₄ (60%)	30.7	As	16

2.2 LIBS測定装置

装置概要を図1に示す。レーザーをレンズで集光し、試料に垂直に照射し、プラズマを発生させ、プラズマの熱エネルギーにより発生する元素特有の発光スペクトルを集光し分光器で計測した。装置の仕様および基本条件は以下のとおりである。レーザー発振装置はNd:YAGレーザー（タレス社製半導体励起レーザー）を用い、発振波長は1064nm、レーザー出力は20mJ/pulseを用いて実験を行った。分光器はMS3504i（SOLAR社製）、ICCD検出器はiStarDH73418F03（ANDOR社製）を使用した。さらに、測定部と計測部を離して設置する遠隔操作LIBS装置を開発する目的で、コア径200μmの石英製光ファイバーを10本まとめ、試料からの発光信号を分光器に直接導入するLIBS装置を試作した。また、小型化を図るため、小型分光器MMS-UV（カールツァイス社製）とCCDリニアイメージセンサ（浜松ホトニクス社製）を組み込んだLIBS装置を試作した。

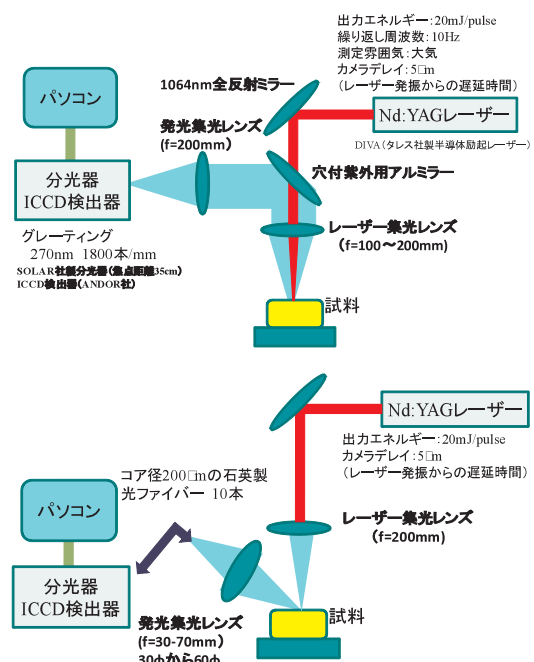


図1 LIBS法の装置概念図
（上図：縦方向に集光 下図：光ファイバー使用）

2.3 LIBS法による最適条件の決定

LIBS法による最適条件を設定するため、各元素の測定波長における定量下限値および感度を調べ、さらに各樹種による定量下限値、および相関係数の比較を行った。LIBS法は、測定高さによる影響が大きいことから¹³⁾、焦点距離50,100および200mm集光レンズによる発光強度と焦点深度の関係を検討し、レンズの最適化を図った。

2.4 判別実験

LIBS法により実試料の判別試験を行った。判別試験はクロム(425.4nm, 359.3nm)、銅(324.8nm)およびひ素(235.0nm)について行い、実用性および正確性について調べた。現場では木口面ではなく木端面が露出していることが多いため、LIBS法の測定面は木端面とし、実試料も木端面で測定した。基本的に、実試料のLIBS測定は、建築廃材処理施設に持ち込まれた試料をそのままの形態で測定した。100×100×300~500mmもしくは90×90×300~500mmの実試料(角材)を試料台に載せ、レーザー焦点を合わせるため、試料の高低のみ精密ラボジャッキにより設定し、測定した。

3. 結果および考察

3.1 作製したCCA標準試料の各元素濃度

標準試料の濃度計算値は、希釈したCCA標準溶液の吸収量から算出した。吸収量は各試料片の処理前後の重量差から求めた。ベイスギ、ベイツガ、カラマツおよびトドマツの各樹種の気乾比重は、それぞれ0.31, 0.51, 0.54および0.34であり、それに伴い溶液吸収量も約630, 790, 500および650kg/m³と異なっている。そのため、実際のCCA処理木材標準試料も樹種による濃度差があると推定される。CCA標準溶液の吸収量から算出した各樹種の標準試料の含有量を表2に、クロムの計算値と実測値の関係を図2に示す。カラマツを除いた樹種の元素含有量は、クロム：約8,000~9,500、銅：約3500~4000mg/kg、ひ素：約2500~3000mg/kgとほとんど同じであるが、カラマツの各元素含有量は、これら樹種の半分程度の濃度であった。カラマツの溶液吸収量は、樹種の中で、最も低く、気乾比重は最も高いため、2-1項で記述した減圧・加圧条件では全量が吸収できなかったためと考えられる。通常、予備試験により樹種にあった減圧・加圧条件をあらかじめ設定しているが、本実験では溶液吸収量の高いベイスギの条件により標準試料を作製したためと考えられる。図2から、クロム測定における各樹種の計算値と実測値の関係は、すべて相関係数：0.9以上であり、各樹種における計算値の元素濃度は実測値に近いことが分かった。旧JAS法により標準試料を分析するには、粉碎する必要があるため、以下の実験では各元素の含有量は計算値を使用することとした。

表2 各樹種の吸収量から算出した各樹種のCCA標準試料中の含クロム、銅及びひ素の含有量 (mg/kg)

	Cr	Cu	As
ベイスギ	9480	4160	3160
ベイツガ	7610	3340	2540
カラマツ	3840	1680	1280
トドマツ	8730	3830	2910

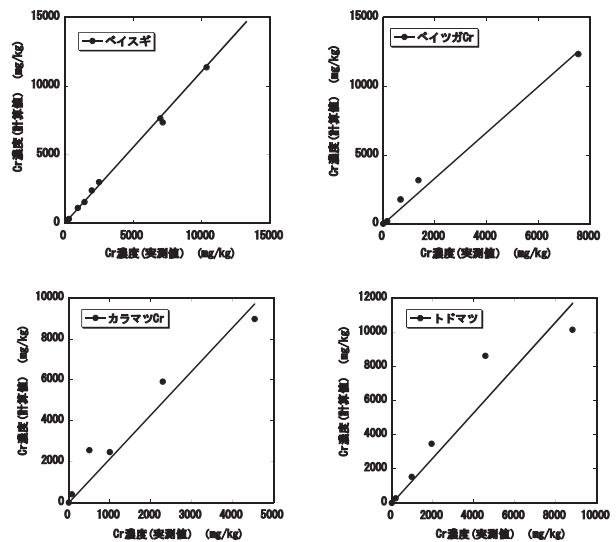


図2 計算値と実測値の関係(クロム)

3.2 レーザー焦点距離とプラズマ発生領域

レーザー用集光レンズと焦点深度(プラズマ発生領域)、ビームスポット径(測定部位の面積)およびエネルギー密度(単位面積あたりのエネルギー mJ/cm²)の関係を図3に示した。焦点距離の異なるレンズを使用した場合、焦点深度(プラズマ発生領域)およびビームスポット径(測定部位の面積)に影響を与える。焦点深度を深くするためには焦点距離の長い集光レンズを使用し、ビームスポット径を小さくするためには焦点距離の短い集光レンズを使用する必要がある。レーザー焦点距離と発光強度の関係を図4に示した。発光強度は最高発光強度を1.0として換算した。359.3nmのクロム測定について、レンズ焦点距離100mmの場合、レーザー焦点距離が±2mmずれると発光強度が20%減少したのに対し、レンズ焦点距離150mmの減少量は15%、レンズ焦点距離200mmの減少量は10%であり、レンズの焦点距離を長くすることにより、レーザー焦点距離の発光強度に与える影響が軽減された。同様に、324.8nmの銅測定についても、レンズ焦点距離100mmの場合、レーザー焦点距離が±2mmずれると発光強度が40%減少し、レンズ焦点距離150mmの減少量は30%、レンズ焦点距離200mmの減少量は20%まで軽減された。現場測定時において、異形状の試料を連続的に測定する場合、プラズマ発生領域は広い方が有利である。発光強度の低下は、レーザー焦点距離がずれることにより、プラズマ発

生に影響を与えるためと考えられる。焦点距離が短い場合は、試料手前のガスがプラズマ化し、バックグラウンドを高め、S/B比（目的元素の発光強度/バックグラウンドの発光強度）が低下する、また、焦点距離が長い場合はレーザーエネルギーの分散によるプラズマ温度の低下が起り、強度が低下すると報告されている¹³⁾。

焦点深度とエネルギー密度は、相反する条件である。本測定は、正確な判別方法を目的としているため、発光強度に与える影響が少なく、測定誤差が小さくなるレンズ焦点距離200mmを選択した。

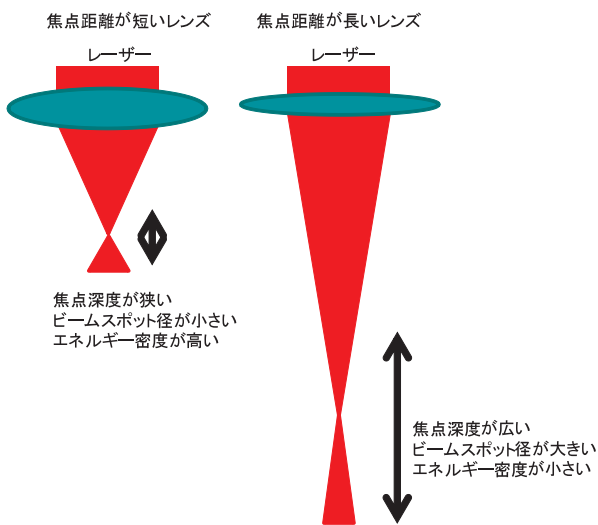


図3 レンズ焦点距離と焦点深度、ビームスポット径、エネルギー密度の関係

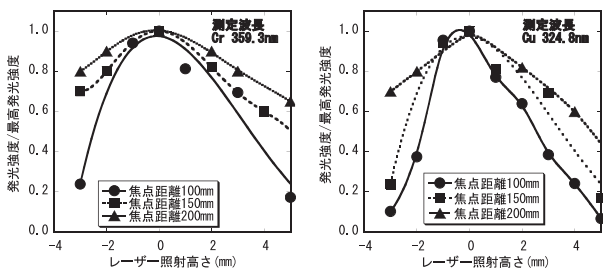


図4 焦点距離を変えた場合のレーザー照射高さのずれと発光強度の関係

3.3 LIBS法による各元素の定量下限値と感度

LIBS法における各元素（測定波長）の定量下限値と感度を表3に示した。定量下限値はブランク試料を10~20回測定したときのバラツキと低濃度のCCA標準試料の測定結果から算出した。感度は各CCA標準試料の含有量と発光強度の関係から算出した。測定時間10secの定量下限値からクロム、銅は数mg/kgまで測定可能であるが、ひ素はいずれの波長も感度が悪く、数百mg/kgまでしか正確に測定できないことが分かった。これは、感度の良いひ素の測定波長が長波長側には無く、吸収・散乱等による感度低下の影響を受けやすい短波長測定（200nm近辺）によるものと考えられる。LIBS測定の感度は積分時間（測定時間）の増加により、ほぼ比例的に増加した。積分時間5secの定量下限値は10secに比べ、2~6倍の値を示し、 $1/\sqrt{n}$ 倍（nは回数）よりも高くなっている。これは、発光強度のバラツキ（繰り返し精度）の影響によるためと考えられる。

3.6項で詳しく記述するが、実際のCCA処理木材のクロムおよび銅の最低濃度は40~60mg/kg程度と極端に低い場合もあるため、安全面を考えると測定時間は10sec必要であることが分かった。また、実際のCCA処理木材の最低ひ素含有量は40mg/kg程度であることを考えると、ひ素測定では正確に判別できないことが分かった。

表3 LIBS法における各測定波長の定量下限値と感度

測定元素(波長)	定量下限(mg/kg)		感度(counts)	
	測定時間		測定時間	
	10(sec)	5(sec)	10(sec)	5(sec)
Cr 359.3nm	17	54	12	8
Cr 425.4nm	6	35	24	14
Cu 324.8nm	6	16	16	8
Cu 327.4nm	8	12	10	6
As 228.8nm	200		4	
As 235.0nm	400		4	

* 定量下限: mg/kg
* 感度: 1mg/kgあたりのカウント数

3.4 各樹種の測定結果

作製した各樹種のCCA標準試料を用いてLIBS法における定量下限値と相関係数を表4に、各樹種のクロム検量線を図5に示す。表から、ひ素の定量下限値はどの樹種も数百mg/kgと高く、ひ素測定では正確に判別できないことを再確認した。銅およびクロムの定量下限値はベイツガが他の樹種よりも高い。2~3倍の定量下限値の差による判別誤差はあまり影響がないと考えるが、現場でのCCA標準試料をベイツガ試料に合わせることで、樹種の影響を受けずに判別可能である。図に示す各樹種のクロム検量線から分かるように相関係数はすべての0.79以上であり、正確に測定できることが分かった。

樹種による感度（検量線の傾き）の差はあるが、先に記述したとおり、CCA標準試料を感度の悪い試料に合わせることで、判別可能である。

表4 各樹種の定量下限値および相関係数

	樹種	定量下限	相関係数
As 235.0nm	ベイスギ	400	0.77
	ベイツガ	440	0.84
	カラマツ	160	0.90
	トドマツ	770	0.85
Cu 324.8nm	ベイスギ	7	0.97
	ベイツガ	65	0.78
	カラマツ	11	0.86
	トドマツ	25	0.83
Cr 425.4nm	ベイスギ	6	0.97
	ベイツガ	18	0.94
	カラマツ	6	0.79
	トドマツ	8	0.92

* 定量下限: mg/kg

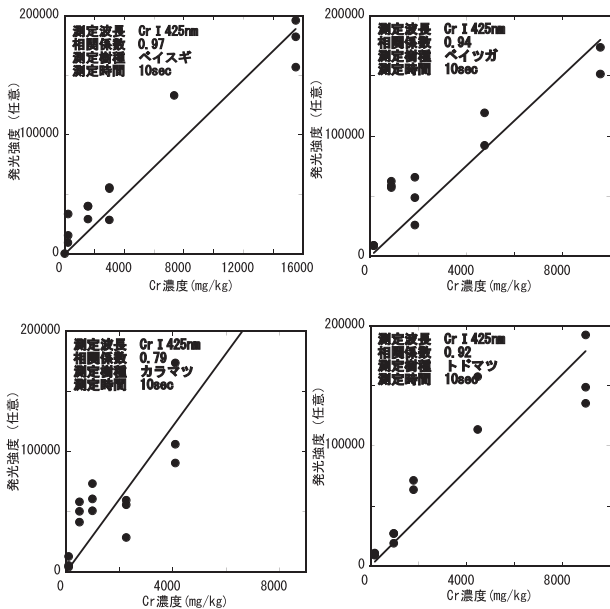


図5 各樹種のクロム含有量と発光強度との関係

3.5 LIBS測定後の試料部位および土壌汚れ試料の測定

図6にLIBS測定における測定部位写真および図7に360nm付近の土壌汚れCCA標準試料の時間ごとの発光スペクトルを示す。LIBS法による測定面積はφ200~300μmと非常に小さいため、非破壊分析に近く、小さい試料にも対応できる利点を有するが、試料の偏析による測定値のバラツキが大きくなると考えられる。測定時間10secの場合、木材試料の測定深さは約500μmであり、深さ方向の分析が可能となり、表面汚れの影響を軽減できる。図に示した時間分画による発光スペクトルからも、測定初期に、土壌に含まれている鉄のピークが検出され¹⁴⁾、時間の経過とともにピーク強度が小さくなっており、逆にCCA処理木材中に含まれるクロムのピークは強度が大きくなっていることが分かる。CCA標準試料を土壌スラリー（30g土壌/100mL）に浸漬して作製した土壌汚れCCA標準試料の分析結果を表5に示す。表からクロ

ム、銅およびひ素の標準試料濃度とLIBS法の分析結果は良く一致しており、LIBS法は表面汚れが激しいCCA処理木材にも十分対応できることが分った。

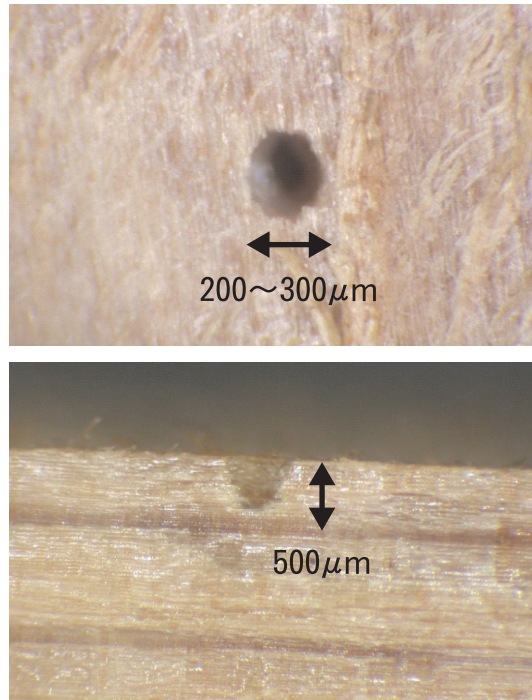


図6 LIBS測定部位写真 測定時間10sec

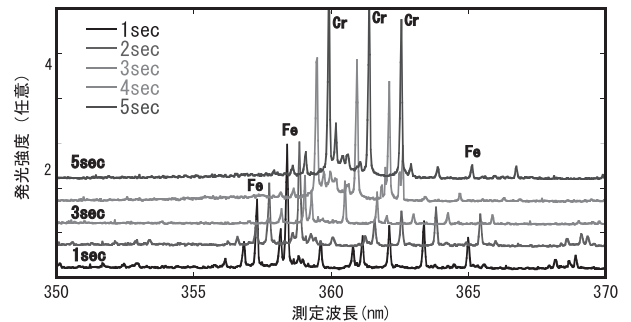


図7 土壌汚れCCA標準試料の発光スペクトル

表5 土壌汚れCCA標準試料分析結果

	標準試料濃度 (mg/kg)	LIBS法(mg/kg)
Cr	15500	15400±1800
	7400	9800±3600
	3000	4800±800
Cu	6800	6500±2800
	3200	4700±2000
	1300	1800±600
As	5200	5600±900
	2500	2500±500
	1000	1500±500

3.6 実試料を用いた判別試験

判別試験に使用したCCA処理木材は、処理施設ならびに家屋解体現場から収集し、針葉樹構造用製材の日本農林規格(旧JAS)の保存処理薬剤の定量法に準じて分析を行った。実試料の集計結果および写真を表6および図8に示す。実試料中の各元素は、ともに数10mg/kgから約5000mg/kgまでの含有量で、平均値は約1000mg/kgであった。正確に判別するためには数10mg/kgまで測定可能な高感度・高精度な分析が必要となることが確認された。実試料を用いて判別試験を行った結果を図9に示す。ひ素235.0nmを用いた判別は、CCA処理木材と無処理木材の発光強度にほとんど差が無く、ひ素含有量が1000mg/kgの試料でも無処理木材と同じ発光強度の場合もあった。先述したようにひ素の定量下限値は、400mg/kgであり、微粒子の散乱を受けやすい測定波長であるため判別精度が著しく悪かったと考えられる。銅324.8nmを用いた判別の場合、CCA処理木材と無処理の判別精度はひ素よりも良く、無処理の発光強度を下回るCCA処理木材は無かった。しかし、銅含有量が1000~1500mg/kgの試料で、無処理と同程度の発光強度を有する場合もあった。このことは、CCA処理木材を安全と誤判別する可能性もあることから、注意しなければならない。クロム359.3nmを用いた判別の場合、CCA処理木材と無処理の判別精度が悪く、無処理木材の発光強度を下回るCCA処理木材がいくつか存在した。試料の測定位置の影響もあるが、その原因を精査する必要がある。一方、クロム425.4nmを用いた判別の場合、CCA処理木材と無処理の判別精度が良く、無処理の発光強度を下回るCCA処理木材は無かった。この結果から、銅(324.8nm)またはクロム(425.4nm)の測定条件で、発光強度3000cpsで境界線を引くことにより、高い精度で判別できることが分かった。しかし、先述したように高いクロムおよび銅含有量にもかかわらず、発光強度が低くなる場合は、CCA処理木材が安全な建築廃材として誤判別される可能性があるため、注意する必要がある。このような試料について、樹種、測定部位の形状、バラツキ、表面含有量の偏析等を精査し、LIBS測定による高い発光強度が発生した要因を解明し、対処する必要がある。

表6 収集した実試料の集計

	クロム	銅	ひ素
試料数(本)	34	34	34
平均値(mg/kg)	1299	919	927
最大値(mg/kg)	6315	4052	5268
最小値(mg/kg)	65	37	40



図8 収集した実試料

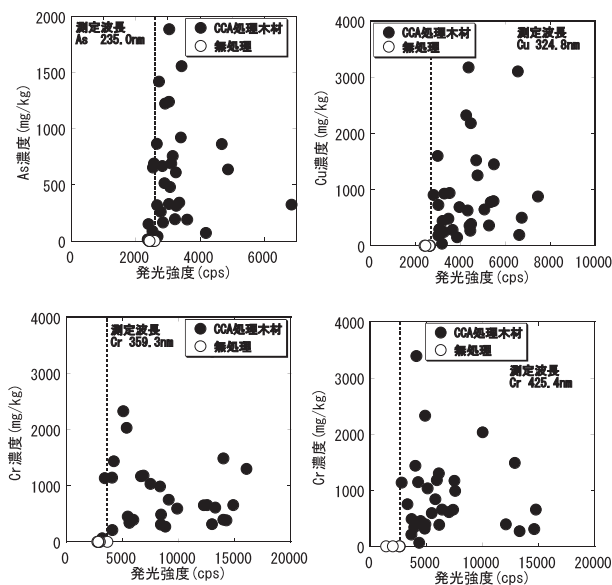


図9 各波長における実試料の判別結果

3.7 光ファイバーを用いたLIBS測定

本測定法を現場へ活用するため、LIBSシステムの可搬化の検討を行った。まず、測定部と検出部を離して設置し、光ファイバーを用いた遠隔操作による測定法を検討するため、レーザー照射後に発生するプラズマ発光を50mm径両凸レンズで集光し、光ファイバーで分光器およびICCD検出器に導入する光学系を検討した。図10に光ファイバーを使用したシステムによるクロム425nmおよび銅325nm付近の発光スペクトル測定結果を示す。図からCCA標準試料中のクロムおよび銅の高いピーク強度が認められ、光ファイバーを使用しても十分な測定ができることを確認した。さらに、図11に示すような光ファイバーの先に30mm径集光レンズを組み込んだシステムを試作し、3-6項の実験と同様に、実試料による判別試験を行った。その結果を図12および13に示す。図12および13から光ファイバーを用いたシステムによる実試料の判別は、先の結果と同様に判別できることが分かった。しかし集光レンズ内蔵光ファイバーを用いたシステムの発光強度は、レンズの小径化の影響もあり、固定型光ファイバーに比べて発光強度が減少し、強度不足が懸念される。レーザー出力の向上、光ファイバー径を大きくする、または本数を増やす等による発光強度の向上が必要であることが分かった。

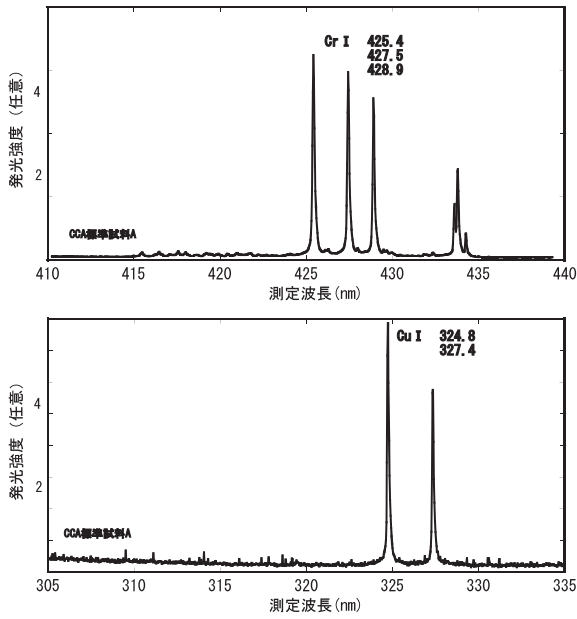


図10 光ファイバーを用いたLIBSによる発光スペクトル (上段：クロム425nm付近、下段：銅325nm付近)

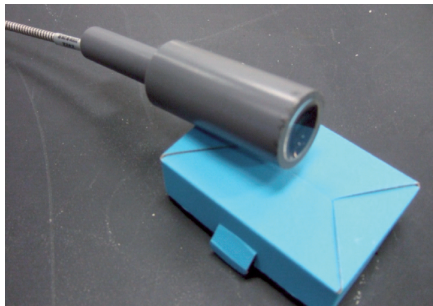


図11 30mm径集光レンズを組み込んだシステム

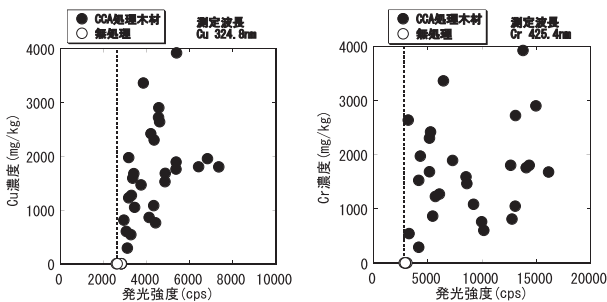


図12 光ファイバーを用いた判別結果 (銅324.8nm、クロム425.4nm)

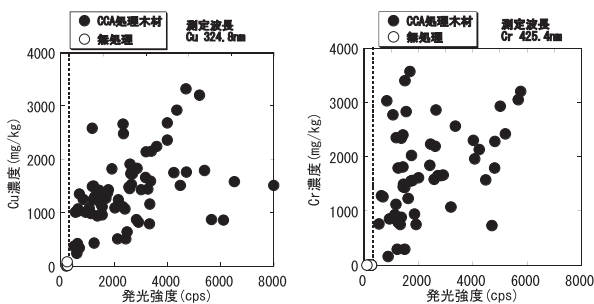


図13 集光レンズ内蔵光ファイバーを用いた判別結果 (銅324.8nm、クロム425.4nm)

3.8 検出器内蔵型の小型分光器を用いたLIBS装置の小型化

分光器、検出器の小型化について、図14に示すような装置を試作し、CCA処理木材判別用LIBS装置の小型化の可能性を調べた。金属クロム、金属銅およびCCA標準試料（クロム16000mg/kg、銅6000mg/kg）の測定結果を図15および16に示す。図から金属中の銅320nmおよびクロム360nm付近の発光スペクトルが認められ、さらにCCA標準試料中の銅およびクロムの発光スペクトルが確認された。小型分光器を用いたLIBSシステムによるCCA判別の可能性があることから、携帯型、小型化が期待される。

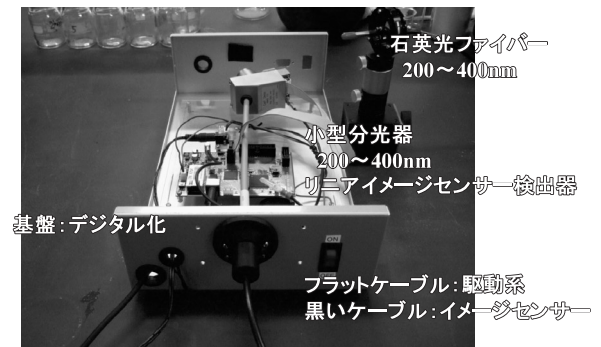


図14 試作した検出器内蔵型小型分光器

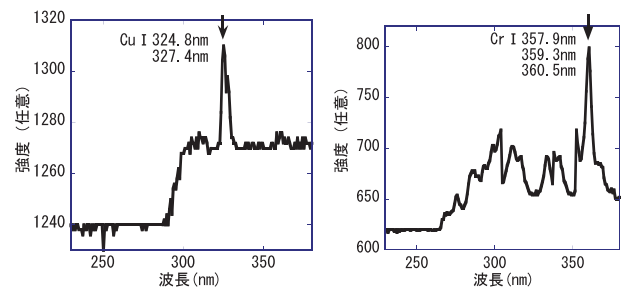


図15 小型分光器を用いた発光スペクトル (左：金属銅、 右：金属クロム)

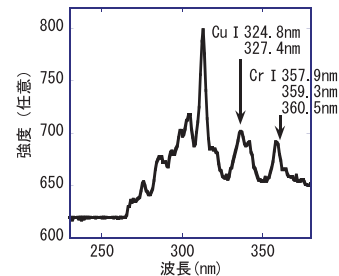


図16 小型分光器を用いた発光スペクトル (CCA標準試料)

4. まとめ

LIBS法を用いたCCA処理木材の判別方法を開発するため、LIBS測定における最適測定条件を決定し、実試料を用いた判別試験を行い、現場のニーズに応えた判別方法について検討した結果を下記に示す。

1) 減圧加圧処理によりCCA標準試料を作製し、クロム、銅およびひ素のLIBS測定を行い、クロムと銅は数mg/kgまで、ひ素は200mg/kgまで、正確に測定できることが分かった。

2) 樹種による発光強度の差異について検討した。銅およびクロムの定量下限値はベイツガが他の樹種よりも高いが、現場でのCCA標準試料をベイツガ試料に合わせることで、樹種の影響を受けずに判別可能である。また、各樹種の検量線の相関係数はすべて0.79以上であり、正確に測定できることが分かった。

3) CCA標準試料を土壌スラリーに浸漬して作製した土壌汚染CCA標準試料を分析した結果、クロム、銅およびひ素の標準試料濃度とLIBS法の分析結果は良く一致しており、LIBS法は表面汚れが激しいCCA処理木材にも十分対応できることが分かった。

4) 銅 (324.8nm) およびクロム (425.4nm) の判別条件を用いて、実試料の判別試験を行った結果、精度良く判別できることを確認した。

5) 光ファイバー等を用いた装置でも同様に測定可能であり、実試料の判別ができることを確認した。さらに、検出器内蔵小型分光器を用いたLIBS装置でも、クロムおよび銅の測定が可能であることから、CCA処理木材に特化した可搬型、小型化装置の可能性を見出した。

謝辞

本研究で使用したICP発光分光分析装置および蒸留水製造装置は(財)JKA補助事業により整備されました。記して感謝いたします。また、本研究は循環型社会形成推進事業科学研究費の補助金により研究を行いました。

引用文献

- 1) 清野新一：建物の解体・新築でどれだけ廃木材が発生するのか、林産試だより、8月号 (2002)
- 2) (財)日本建築センター：CCA処理木材の分別方法および処理技術に関する調査研究、(2002)
- 3) 国土交通省：建設副産物適正処理推進要項 (2002改訂)
- 4) 大畑昌輝：レーザーを励起源とした発光分光分析法、ぶんせき 6月号, p266-271 (2006)
- 5) 出口祥啓：微量金属モニタリング技術、化学工学会誌、

Vol.70, No.7, p351-353 (2006)

- 6) 安田憲二, 田中勝, 出口祥啓：CCA処理木材の連続選別技術に関する研究、第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集, p575-577 (2005)
- 7) 毎田充宏, 濱田智広, 桑子彰：レーザーブレイクダウン分光法による堆肥分析装置、東芝レビュー, Vol.60, p45-48 (2005)
- 8) 吉川典彦, 菅野望, 内藤昭仁, 金光一, 水野喜紀：レーザー誘起ブレイクダウン分光法による土壌微量元素と金属材料元素の濃度計測、金研ワークショップ要旨集, p12-14 (2008)
- 9) 島田温彦, 我妻和明：レーザー誘起プラズマ発光分析法における鉄-クロム合金の原子化及び励起挙動の解析と検量線の作成、分析化学, Vol.60, No.1, p59-65 (2011)
- 10) 原田明, 澤田嗣郎：レーザー分光分析, 丸善, (2009)
- 11) 蓼沼克嘉, 名取ゆり, 黒澤きよ子, Steve BUCKLEY：レーザー誘起分光分析法, ぶんせき, 第9号, p458-463 (2010)
- 12) 高橋徹, 富田恵一, 若杉郷臣：レーザー誘起ブレイクダウン分光分析法を用いた防腐剤 (CCA) 処理木材の判別方法の開発、北海道立工業試験場報告, No308, p33-39 (2009)
- 13) 香川喜一郎, IDRIS Nasrullah:レーザープラズマ分光法による元素分析, The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, Vol83, No5, p401-412 (2007)
- 14) A.Uhl, K.Loebe, L.Kreuchwig :Fast analysis of wood preservers using laser induced breakdown spectroscopy, Spectrochimica Acta Part B 56, p795-806 (2001)
- 15) 財団法人機械システム振興会：土壌環境汚染計測モニタリング機械システムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書、(2006)

高温腐食を受けた鉄鋼材料のリサイクルおよび評価方法の開発

高橋 英徳, 板橋 孝至, 戸羽 篤也

Development of Recycling and Evaluation Method for the Steels suffered High Temperature Corrosion

Hidenori TAKAHASHI, Koji ITABASHI and Atsuya TOBA

抄 録

ごみ焼却プラントで用いられる火格子（耐熱鋳鋼SCH2製）は、高温腐食環境により激しい損傷を受けることから、一定期間使用後に廃棄処分されることはよく知られている。本研究では、工業試験場が従来から技術蓄積を有している溶解・鋳造技術を用いて、これまでに廃棄されてきた高温腐食を受けた鋼材の再利用（リサイクル）を試みた。評価方法としてガス分析装置「グラビマス」を用いて腐食成分（塩素、硫黄）の残留の有無を確認した。

キーワード：火格子、スクラップ、リサイクル、ガス分析

Abstract

It is well known that the grate bar made of heat resistant cast steel (SCH2) was severely damaged due to the high temperature corrosion during exposure time in the actual grate-type waste incinerator, and most of them were discarded after a certain period of time. In this study, recycling of grate bar was conducted by casting technologies that had accumulated in the Hokkaido Industrial Research Institute for a long time. The residual corrosion products such as oxide, chloride and sulfide in the recycled heat resistant cast steel were investigated by means of quadrupole mass spectrometer (QMA)

KEY-WORDS : grate bar, scrap, recycle, mass spectrometer

1. はじめに

ごみ焼却プラントの炉床材（火格子）のような激しい高温腐食環境下で使用される鉄鋼材料（耐熱鋳鋼）は、高温耐食性向上のためにクロムやニッケルなどの高価な合金元素を多量に含有している^{1)~5)}。これらは腐食および損傷の程度にかかわらず一定期間使用後に交換・廃棄処分されているため、再利用（リサイクル）できれば工業的意義は大きい。しかし、鉄鋼材料が受けた高温腐食の程度を評価する手法、特に腐食成分（酸素、塩素、硫黄）の残留の有無を評価する手法が確立されていないことから、これまでは溶解した後付加価値の低いスクラップ塊として用いられ、元の高価な鉄鋼材料に再生されてはなかった。

そこで、本研究では、これまでに廃棄されてきた高温腐食を受けた鋼材の再利用、すなわちリサイクルを試みるもので

あり、ガス分析装置を用いて腐食成分由来のガスを測定して腐食成分残留の有無を判定するという、国内および国外にもこれまでになかった新たな手法を用いることを特徴としている。これに加えて、工業試験場が従来から技術蓄積を有している溶解・鋳造技術を応用して、元の付加価値の高い鉄鋼材料としてのリサイクルを試みた。

2. 実験方法

2.1 酸素吹き込みによる炭素濃度低減

これまでの研究で、ごみ焼却プラントで実際に長期間使用され損傷（高温腐食）した火格子の表面近傍は、炭素濃度が高くなることを見いだした。これはごみ燃焼ガスにより鋼材表面から浸炭が生じたためである。したがって、火格子のリサイクルにはまず炭素濃度を低減する必要がある。そこで、

事業名：平成22年度職員研究奨励事業（シーズ探索型）

課題名：高温腐食を受けた金属材料の評価方法およびリサイクル方法の開発

実際に長期間使用された火格子を溶解炉（高周波誘導炉）で溶解し、その溶湯中にランスを用いて酸素を供給した。これにより炭素が酸素と反応、ガス化（CO₂）して溶湯外部に放出されることによる炭素濃度低減を試みた。炭素濃度低減のために酸素を供すると、シリコン（Si）やクロム（Cr）などのような酸化物を形成しやすい合金元素も濃度低下すると考えられるために、これらの挙動についての検討も行った。

実験には、これまでの共同研究で腐食調査を行った実機火格子（耐熱鋳鋼JIS SCH2製）を用いた。Table 1 に耐熱鋳鋼SCH2の標準的な組成を示す。SCH2は高温耐食性を高めるためにCr（クロム）含有量を26%程度まで高めたフェライト系の耐熱鋳鋼である。火格子一本は約30kgであり、これを一回の溶解実験に供した。Fig. 1 に溶解中の外観を示す。約1600℃の温度に達した後にフラックス添加により溶湯表面に浮遊しているスラグを取り除き、出発材料として分析用試料（φ30×50）を砂型に鋳込んだ。

Table 1 SCH2の化学組成

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
SCH2	0.29	0.93	0.85	0.03	0.01	0.82	25.9	Bal.

炭素量の低減、すなわち脱炭には酸素吹き込みを行った。これは鉄鋼精錬での製鋼工程と同様の方法である。酸素の吹き込みには、市販のアルミナイズドランス（製品名 シントーランス）を用いた。これは、鉄パイプ表面にアルミニウムをコーティングして高温耐食性を向上させたものである。酸素供給は2分間を目標に毎分5リットルおよび10リットルの2水準で行った。酸素吹き込みの様子をFig.2に示す。酸素供給後の溶湯は、鋳造直前に脱酸剤としてフェロシリコンおよびアルミニウムをそれぞれ25g（溶湯の0.1%）添加した。脱酸後の溶湯は、再度溶湯表面に浮遊しているスラグを取り除き、砂型に鋳造した。鋳造の様子をFig. 3 に示す。合金元素濃度の測定は発光分析（カントバック）を用いた。



Fig. 1 火格子の溶解 Fig. 2 溶湯への酸素吹き込み

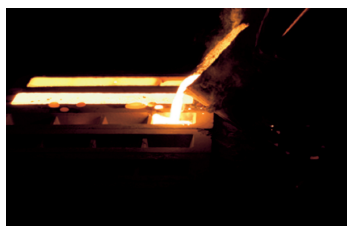


Fig. 3 砂型鋳造

2.2 ガス分析装置「グラビマス」によるアルミニウム中含有ガスの分析

道総研では2009年12月にガス分析装置「グラビマス」を全国に先駆けて導入した。この装置はアルミニウム合金および鋳物製品中に含有するガス成分の迅速、簡便な定性・定量分析が可能である。これまでにアルミニウム中のガス分析方法及び測定ノウハウについて技術蓄積を行った。Fig. 4 に装置外観を示す。

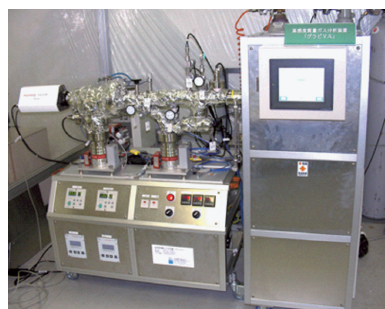


Fig. 4 ガス分析装置「グラビマス」外観

ガス分析装置「グラビマス」は、金属中に含有するガスが真空かつ高温下で排出される、いわゆる昇温脱離法を用いている。装置は、四重極質量分析器（QMS）が付属した真空装置による分析部と、試料を加熱する電気炉の2つから構成されている。約10gのガス分析試料を試料加熱管に入れて装置内に設置した。予め所定の温度にした可動式の電気炉を移動し試料を加熱して、発生するガスをQMSで定性・定量分析を行った。なお、定量分析には、水素および窒素を校正ガスとするガス校正方法を用いた。測定は600℃で行い60分間の測定時間とした。通常、金属材料は再結晶温度近辺で含有ガスのほぼ全量を放出すると言われており、これまでの当試験場における研究から、各種アルミニウム合金（融点560～660℃）では540℃までの温度でガスを放出することを確認している。本実験では鉄鋼材料なので、アルミニウム合金で得られた分析方法が鉄鋼材料にも適用可能かどうかを検討する必要がある。

3. 実験結果と考察

3.1 酸素吹き込みによる元素濃度低減

酸素吹き込みによる元素濃度変化について、炭素（C）およびシリコン（Si）の変化をFig. 5 に示す。図中には2回の実験結果を示しており、1回目のみ供給速度を5リットル/分としており、これ以降は10リットル/分として一回の添加を2分間として繰り返し行った。これは、ランスの消耗（溶解）が著しく、溶湯温度が1600℃を越えると約2mのランスでも最大で2分程度しかもたないためである。

Cは酸素吹き込みによって低減する方向にあるが、部分的に低下していない場合がある。酸素吹き込みによる炭素濃度低減は、鉄鋼精錬における製鋼工程として工業的に確立した

手法であることから、低下しなかった原因として、酸素吹き込み時の溶湯の攪拌に何らかの影響があったと考えられる。酸素供給時間を長くすると安定して濃度低減が可能と推定できる。一方、Siは吹き込み回数に応じて濃度が低減していることがわかる。この結果より、CおよびSiは酸素吹き込みにより濃度低減が可能と言える。

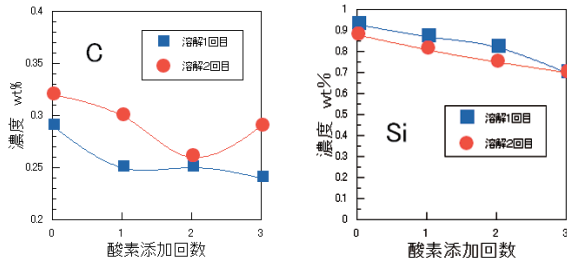


Fig. 5 酸素吹き込みによるCおよびSi濃度変化

同様に、クロム (Cr) および硫黄 (S) の変化をFig. 6に示す。Crは酸素吹き込みによって明確に低減している。Crは酸素親和力が強いために、酸素が炭素と反応するよりも早くCrと反応して酸化物を優先的に形成した結果として濃度が低減したと推定できる。一方、Sは低減しているが、分析での検出限界近傍なので、明確な傾向があるとは言い難い。Sに関してはガス腐食成分でもあるために、後述するガス分析と併せた検討が必要である。

同様に、マンガン (Mn) およびニッケル (Ni) の変化をFig. 7に示す。MnはCrと同様に酸素吹き込みによって明確に低減している。MnもCrもどちらも酸化物形成元素なので容易に濃度が低減できると推定される。一方、NiはCrやMnほど明確ではないが、明らかに濃度低減している。

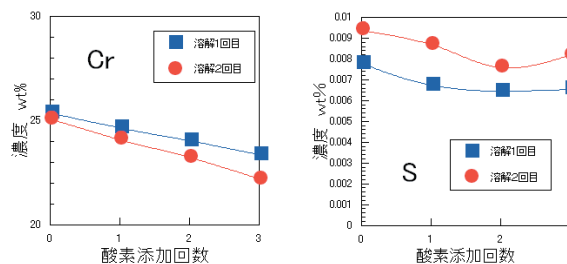


Fig. 6 酸素吹き込みによるCrおよびS濃度変化

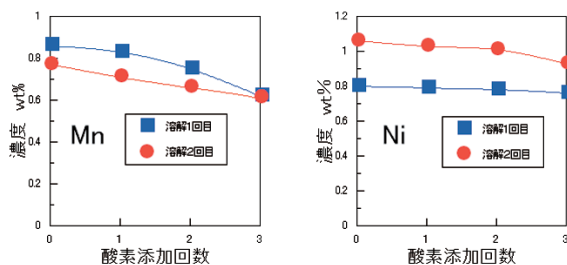


Fig. 7 酸素吹き込みによるMnおよびNi濃度変化

リン (P) およびアルミニウム (Al) の変化をFig. 8に示す。Pは低減している傾向が認められるが、分析での検出限界近傍なので明確な傾向があるとは言い難く、酸素吹き込みに関わらずほぼ一定といえる。Alは実験それぞれで異なった挙動となっており、酸素吹き込みに関わらずほぼ一定の場合と濃度増加の場合が認められる。Al濃度増加に関しては、ランスの表面がアルミコーティングされており、このランスが溶湯中に溶解したために、結果としてアルミ濃度が増加した可能性が高い。

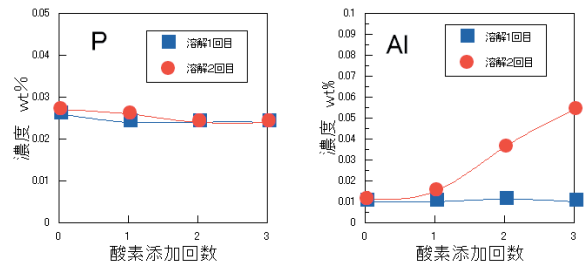


Fig. 8 酸素吹き込みによるPおよびAl濃度変化

3.2 鉄鋼材料中含有ガスの分析

前述のように、本研究では高温腐食を受けた金属材料をリサイクルする際に、酸素 (O)、塩素 (Cl) および硫黄 (S) のような腐食成分が合金内部へ残留しているかどうかについて、ガス分析という新しい手法を用いての評価を試みた。

これまでにアルミニウムについて含有ガス成分分析を行い、技術蓄積を行った。参考としてアルミニウム合金中ガス分析結果をTable 2に示す。測定は540°Cで1 hr行った。この装置による分析は、質量数200までのガスの定性・定量を迅速に行うことを特徴としており、定量結果は体積 (cc) のみならず重量 (g) で得ることができるのが特色である。本研究では、鉄鋼材料 (耐熱鋳鋼SCH2) について検討しているために、まずアルミニウムでの分析手法が鉄鋼材料へも同様に適用可能かどうかを検討した。

実験にはSUS430ステンレス鋼を用いた。大気中900°Cで6時間酸化し、これを600°Cでガス分析を行った。昇温脱離法では再結晶温度付近で測定することが通常である。耐熱鋳鋼SCH2の再結晶温度は800~900°Cといわれている。今回は再結晶温度以下でも含有ガスの測定が可能なのか判定する目的も含めて分析を行った。

Table 2 ガス分析例 (アルミニウム合金)

質量数	ガス種	mol	g	cc	g/100gAl	cc/100gAl
2	H2	1.09E-06	2.172E-06	2.433E-02	3.410E-05	0.382
18	H2O	5.20E-06	9.365E-05	1.165E-01	1.470E-03	1.830
19	F	7.49E-08	1.424E-06	1.678E-03	2.235E-05	0.026
28	CO/N2	1.93E-06	5.404E-05	4.323E-02	8.483E-04	0.679
32	O2	0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000
36	HCl	3.65E-08	1.316E-06	8.187E-04	2.065E-05	0.013
44	CO2	8.98E-07	3.949E-05	2.011E-02	6.200E-04	0.316
46	NO2	1.25E-08	5.732E-07	2.791E-04	8.998E-06	0.004
64	SO2	1.77E-09	1.130E-07	3.954E-05	1.774E-06	0.001
	CxHy	2.69E-07	1.742E-04	6.021E-03	2.735E-03	0.095
	Total	9.51E-06	3.670E-04	2.130E-01	5.761E-03	3.345

Table 3 ガス分析例 (SUS430ステンレス鋼)

試料1		試料1再測定	
H2	1.14E-06	H2	0
H2O	9.16E-05	H2O	0
F(H2O)	1.44E-06	F(H2O)	0
CO(N2)	2.34E-05	CO(N2)	0
O2	1.32E-05	O2	0
HCl	0	HCl	0
CO2	2.67E-05	CO2	0
NO2	3.58E-07	NO2	0
SO2	0	SO2	0
CxHy	9.65E-06	CxHy	1.54E-08
Total	0.000168	Total	1.54E-08

Table 3 に予備酸化を行ったSUS430ステンレス鋼の分析結果を示す。これより再結晶温度以下と思われる600℃でもガス分析が可能ながわかる。また、同じ条件で再測定を行った結果ではガスはほとんど検出されていない。このことは、一回目の測定で含有ガスのほぼ全量を放出したことを示しており、再結晶温度以下でもガス分析が可能ながを裏付けている。以上のことから、アルミニウム合金中ガス分析方法は、鉄鋼材料にも適用できることが認められた。

Table 4 ガス分析結果 (耐熱鋳鋼SCH2)

溶解直後[g/100g]		酸素吹き込み後[g/100g]	
H2	5.94E-05	H2	5.94E-06
O2	6.83E-05	O2	6.83E-06
HCl	2.65E-04	HCl	0
CO2	0	CO2	0
NO2	3.41E-06	NO2	3.41E-07
SO2	4.72E-04	SO2	0
CxHy	0.00168749	CxHy	2.19E-08
Total	2.56E-03	Total	1.31E-05

上記の方法を用いて、前述のリサイクルした火格子材 (耐熱鋳鋼SCH2) の酸素吹き込み前後での腐食成分 (Cl (塩素) およびS (硫黄)) の残留の有無を調べた。分析結果をTable 4 に示す。腐食成分のCl (塩素 表ではHClとして表記) について、明らかに酸素吹き込みによって除去されていることを示している。また、S (硫黄 表ではSO₂として表記) についても同様に酸素吹き込みによって除去されている。

以上のことから、金属中の腐食成分残留の判断および評価方法としてガス分析を適用できることが判明した。

この測定方法を高温腐食を受けた火格子のリサイクル材の評価に適用するためには、以下の項目について詳細な検討が必要である。

- 1) 最適測定温度および測定時間の決定
- 2) 測定にあたっての試料の前処理条件 (洗浄, 保持環境条件など) の確立
- 3) 測定の再現性の評価
- 4) ガス分析データの再現性および精度の実証を行う。

今後の展開については、実用化に向けて民間企業2社 (道内1社, 道外1社) との共同研究を計画している。

4. 結言

本研究では、これまでに廃棄されてきた高温腐食を受けた鋼材の再利用, すなわちリサイクルを試み, ガス分析装置を用いて腐食成分由来のガスを測定して腐食成分残留の有無を判定した。得られた結果は以下のように要約できる。

- ① 酸素吹き込みによる合金元素低減において, 炭素 (C) は濃度低減が可能である。
- ② 酸素吹き込みにより, シリコン (Si), クロム (Cr), マンガン (Mn) およびニッケル (Ni) などの合金元素も濃度低下する。
- ③ アルミニウム合金の分析で技術蓄積したガス分析方法は, 鉄鋼材料にも適用できる。
- ④ リサイクルした鋼材のガス分析結果から, 腐食成分の塩素 (Cl) および硫黄 (S) について, 酸素吹き込みによって除去されていることが明らかになった。

引用文献

- (1) 高橋英徳, 宮腰康樹, 鴨田秀一, 林 重成, 成田敏夫: 「耐熱鋳鋼SCH13の廃棄物焼却炉における高温腐食挙動」材料と環境, Vol.47, No.12, 777-782 (1998)
- (2) 高橋英徳, 宮腰康樹, 鴨田秀一, 林 重成, 成田敏夫, 黒田和博, 斎藤俊雄, 鍛冶彰男: 「廃棄物環境下における耐熱鋳鋼SCH13の高温腐食機構」材料と環境, Vol.48, No.9, 583-588 (1999)
- (3) 高橋英徳, 宮腰康樹, 鴨田秀一, 林 重成, 成田敏夫: 「耐熱鋳鋼SCH2の廃棄物焼却炉における高温腐食機構」材料と環境, Vol.49, No.7, 426-430 (2000)
- (4) Hidenori Takahashi, Yasuki Miyakoshi, Syuichi Kamota, Shigenari Hayashi, and Toshio Narita: 「The Intergranular Corrosion Mechanism of Fe-26Cr-13Ni Heat Resistant Cast Steel in Waste Incineration Environment」Materials at High Temperature, Vol18, 393-399 (2001)
- (5) 高橋英徳, 宮腰康樹, 鴨田秀一, 林 重成, 成田敏夫, 神保 元, 浦上嘉信, 岡 武裕, 八鍬 浩, 野口 学: 「Fe-Cr-C合金表面近傍Cr炭化物の分解に関する温度および雰囲気の影響」材料と環境, Vol.50, No.10, 472-476 (2001)

低温環境における作業性評価

中島 康博, 前田 大輔, 桑野 晃希, 吉成 哲,
地家 崇規*, 前田 享史*, 横山真太郎*

Evaluation of Dexterity in a Low-Temperature Environment

Yasuhiro NAKAJIMA, Daisuke MAEDA, Kohki KUWANO, Satoshi YOSHINARI,
Takanori CHIKE*, Takahumi MAEDA*, Shintaro YOKOYAMA*

抄 録

低温環境下における作業では、作業者の身体や手指の冷却により作業性が低下し、ミスや重大事故を誘発しやすい。このような作業現場では、効率的な身体保温手段により作業性を維持し、かつストレスを軽減することが求められる。そこで本研究では、低温環境下における作業性を体温、筋電位、パーデュールペグボードにより評価した。5℃に設定された室内に7人の被験者を配置して夏季と冬季に計測を行い、手指巧緻性と体温、筋電位との関係を解析した。さらに、被験者の腹部・足部を局所的に加温した際の手指巧緻性を計測した。その結果、身体局所加温により作業性低下を抑制するとともに、筋機能ならびに皮膚温について低下抑制が確認された。

キーワード：作業性、手指巧緻性、局所加温、低温環境、体温、筋電位

Abstract

Working in low temperature environment causes workability to be decreased because the workers' body and fingers are chilled. The low workability often be cause of an error and lead to a serious accident. An effective warming way to keep the workability and to decrease the stress is needed. This study describes to esitmate and to analyze the workabilty in a low temperature environmet with body temperature, electromyography (EMG), and the Perdue pegboard finger dexterity test. Seven subjects were in a room cooled at the 5℃ temperature and were measured on summer and winter. And the relationship between the finger dexterity, the body temperature and the EMG were analyzed. Moreover, the difference of the finger dexterity was measured when subjects' abdomen and soles were locally heated. The results is that the local heating has suppressed the finger dexterity decreasing, additionally has kept the muscle function and the skin temperature.

KEY-WORDS : workability, finger dexterity, local warming, body temprerature, electromyography

1. はじめに

農産物や水産物など一次産品の中でも、魚などの生鮮食品を取り扱う加工現場では、食品の鮮度を保つために低温に保った室内で作業を行うことが多い。作業者は、冷温の室内に長時間滞在して、魚さばきなど手指の巧緻性を要求される作業を行う(図1)。作業者は一般に保温性の高い手袋や靴を装着したり、輻射式スポット暖房などを使用したりして防寒に

努めている。それでも、長時間の作業中には手指や足部が冷えるといった作業者の訴えが多く、心身ともに高ストレス状態での作業を強いられている。

巧緻性を要求される作業では、指や手関節など遠位関節を細かく動かして精密な上肢動作を行うが、身体が冷却されると皮膚感覚が鈍くなり、手指の動きが鈍化する。また、防寒のために手袋を何重にもはめることで、手指の感覚や運動が妨げられ、巧緻性が低下する場合もある。これらの要因によ

事業名：経常研究

課題名：低温環境におけるストレスおよび作業性評価技術

* 北海道大学

* Hokkaido University



図1 低温環境下での鮮魚加工作業（室内気温3℃）

り作業性が低下して作業ミスが起こりやすくなり、生産効率が低下し、最悪の場合事故につながる可能性がある。低温環境における作業性を維持向上し、かつストレスを軽減する効果的な暖房・保温方法が求められている。

そこで本研究では、低温環境における作業性を評価するとともに、作業性を維持向上する局所加温・保温方法について検討する。人工気候室により気温5℃の低温環境を再現し、被験者を90分間寒冷暴露したときの手指巧緻性を、パーデュールペグボードを用いて計測する。同時に身体各所の体温及び上肢筋の表面筋電位を計測し、手指巧緻性との関連について解析する。さらに、手指の作業性を妨げない部位として腹部・足底部を局所的に加温したときの手指巧緻性等を計測比較することで、作業性向上に効果的な加温方法を検討する。

表1 被験者の身体測定値

年齢(year)	22.4 ± 0.8
身長(cm)	172.2 ± 4.9
体重(kg)	60.6 ± 9.2
体脂肪率(%)	13.6 ± 3.9

表2 衣服の重量とclo値

	重量(kg)	clo 値
長袖 Y シャツ	0.20	0.230
ズボン	0.44	0.180
上着	0.50	0.266
靴下	0.06	0.011
肌着	0.12	0.094
パンツ	0.08	0.047
合計	1.40	0.828

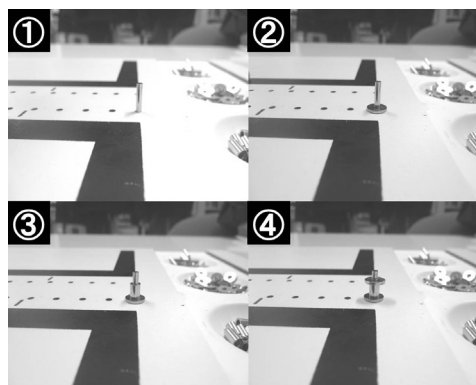


図2 パーデュールペグボード試験
(上、テスト風景、下：アセンブリ試験の工程)

アセンブリ作業では、下図のように、片手でピンを穴に挿し、ワッシャー→カラー→ワッシャーと左右の手を交互に用いて組立作業を行うことをくり返す。ピン立て作業は、ピンを穴に挿すのみの作業をくり返す。

2. 方法

2.1 実験概要

被験者を、室温23℃の前室において30分間座位姿勢で安静にし、その後室温5℃に制御した冷室に移動させ、同じく座位安静状態で90分間の寒冷暴露を行った。

被験者は健康な成年男性7名とした。被験者の年齢、身長、体重、体脂肪率を表1に示す。本実験では、全ての被験者に同一種類の作業着上下、Tシャツ、パンツ、長袖ワイシャツ、靴下を着用させ、着衣量を統一した。着衣の重量とclo値を表2に示す。cloとは衣服の熱抵抗を表す単位で、湿度50%、風速0.1m/s、気温21.2℃の大气中で、椅子に腰かけて安静にしている白人標準男子（産熱量 50kcal/m²h）の被服者が平均皮膚温33℃の快適な状態を継続するのに必要な被服の熱絶縁値が、1 cloである¹⁾。本実験におけるclo値は表2の通り0.828とした。

低温暴露中に、表面皮膚温12点（前額、前腕、手背、手指、背、腹、大腿前部、大腿後部、下腿前部、下腿後部、足背、踵）、核心温（直腸）を、ポータブル型サーミスタ用ロガーにより5秒間隔で測定した。体温は、冷室入室直前を基準値として、その時点からの低下量を算出した。



図3 足部加温装置

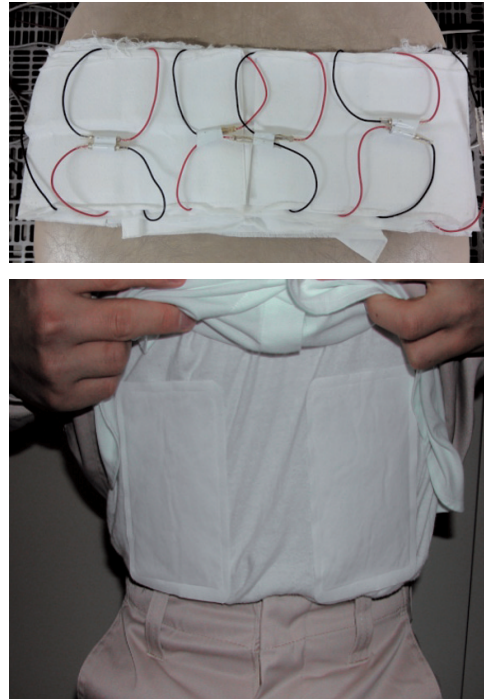


図4 腹部加温装置

パーデューベグボードを用いた手指巧緻性試験を低温暴露直前と90分後にそれぞれ実施した(図2)。パーデューベグボードとは、作業療法に用いる、上肢および手指の巧緻性の試験装置で、30秒間のピン立て作業と1分間の組み立て作業(アセンブリ)1セットにより評価を行う。ピン立て作業は、規定時間内にボード上に空いた穴にピンを立てる本数を計測するもので、右手、左手、両手でのピン立てをそれぞれ1セットずつ行い、その合計をスコアとする。アセンブリとはピン1本、カラー1個とワッシャ2枚の部品を規定の構成に組み立てるもので、組み立てた部品数をスコアとするものである(図2下)。パーデューベグボード試験は、冷室入室直前のスコアを100%として、成績の低下率を算出した。

パーデューベグボード試験と同時に、上腕二頭筋(上腕部)、腕橈骨筋(前腕部)、母指内転筋(手部)の3カ所の筋について等尺性の最大随意収縮を行わせ、その時の表面筋電位を測定した。筋電位は高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform; FFT)により周波数解析を行い、そのときの平均パワー周波数(Mean Power Frequency; MPF)を算出した。一般的にMPFは筋疲労・筋冷却が進むと低下するということが知られており、筋冷却の指標となるとともに、筋活動による運動の精緻さの指標となる。MPFは、冷室入室前を100%として、周波数の低下率を算出した。

2.2 加温部位と計測時期

本実験では、身体への加温が作業性や体温等に及ぼす影響を調べるため、被験者の身体を局所的に加温した。同一被験者に対し、①加温なし、②足底部加温、③腹部加温の3条件

についてそれぞれ実験を行った。足部加温装置を図3に、腹部加温装置を図4に示す。加温装置はペルチェ素子で構成され、人体との接触部が38℃となるように調節して、被験者を低温暴露開始から終了まで加温した。

また、人体の生理的反応の季節差について考慮するため、同一被験者を夏季(7月下旬)、冬季(11月下旬)それぞれについて測定し、結果を比較した。

3. 結果

3.1 作業性試験

冬季と夏季における作業性試験の結果を図5に示す。図は、前室における成績を100%とした場合の成績低下率で表した。

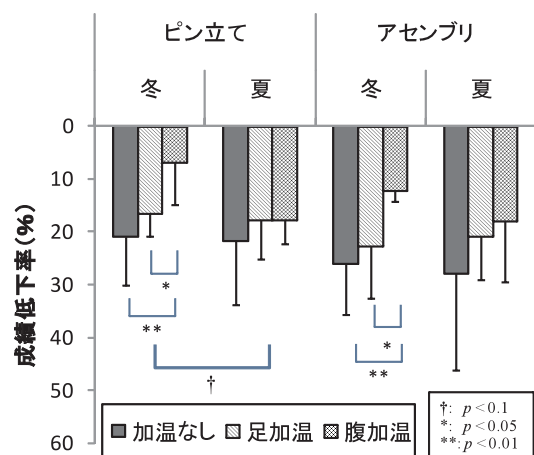


図5 作業性試験結果

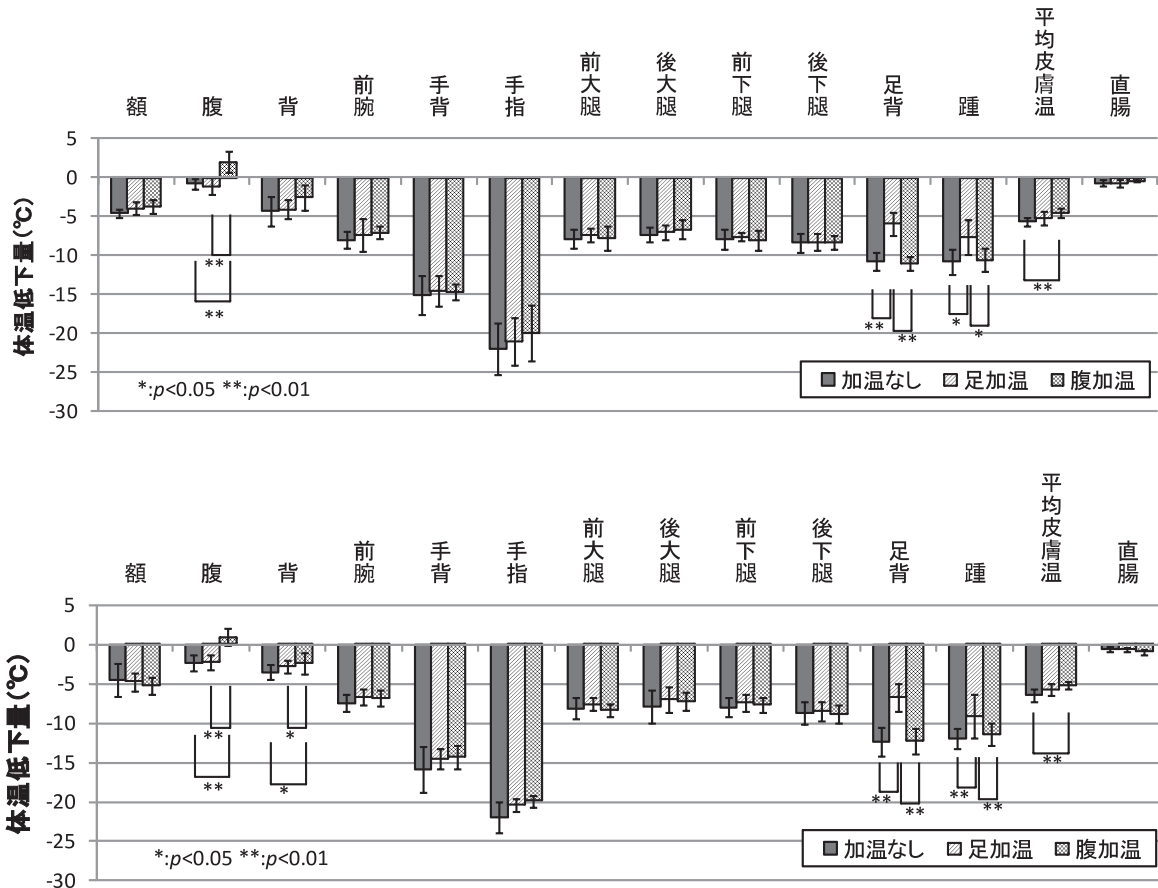


図6 寒冷暴露による体温低下量（上：冬季，下：夏季）

ピン立て作業については、加温なしの場合、冬季・夏季とも21%～22%、アセンブリの場合は26～28%成績が低下した。分散分析およびTukey検定を行った結果、ピン立て作業においては冬季と夏季において成績低下率に有意な差の傾向が見られた。(p<0.1)。冬季において、腹部加温条件が加温なし条件に対して14%の有意な成績向上が (p<0.01)、足部加温条件に対し10%の有意な成績向上が見られた (p<0.05)。

アセンブリについては、腹部加温条件が加温なしに対し14% (p<0.01)、足部加温に対し10% (p<0.05) の成績向上が見られた。夏季については、加温条件による有意差は現れなかった。

3.2 体温

冬季と夏季における、前室時と90分間の寒冷暴露後の体温の変化量を図6に、直腸温の変化量を図7に示す。腹部・足部加温条件では、加温部位付近において、他条件との間に有意な温度上昇が見られた。平均皮膚温においては、腹部加温条件で加温なし条件との間に有意差が見られた。

直腸温については、腹部加温により体温低下抑制が現れると予想されたが、同一季節内において有意差を得られなかった。しかし、図7に示すように、夏季と冬季の比較において、夏季では腹部加温により直腸温が逆に低下する傾向が現れた(0.6° C, p<0.1)。図8に、腹部加温条件における寒冷暴露中の直腸温の時系列変化を示す。冬季においては、直腸温低

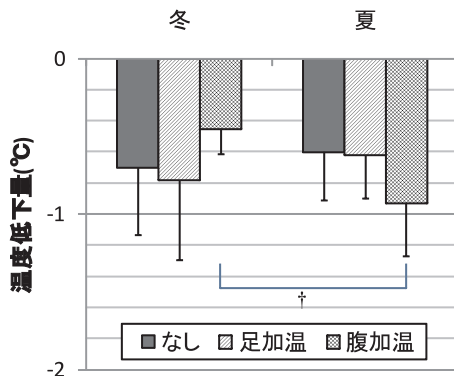


図7 寒冷暴露前後の直腸温低下量

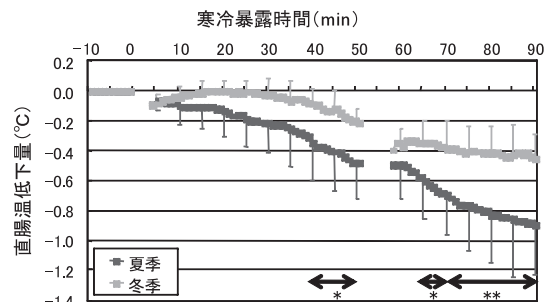


図8 寒冷暴露中の直腸温変化

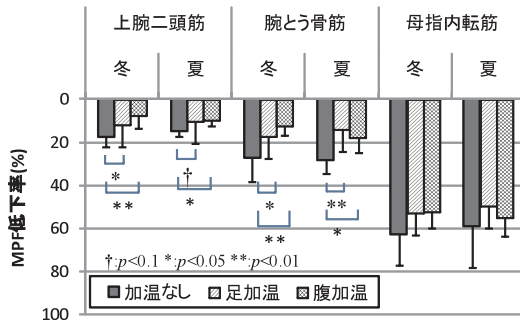


図9 寒冷暴露前後の筋電位MPF低下率

下はおよそ0.4℃にとどまっているが、夏季において温度低下が速く進み、90分後には0.9℃低下して、さらに低下が続く傾向が見られた。

3.3 筋電図

上腕二頭筋、腕橈骨筋および母指内転筋の平均パワー周波数の低下率（MPF低下率）を図9に示す。MPF低下率については、有意な季節差は見られなかった。加温なしの場合では、上腕二頭筋で16%、腕橈骨筋で28%、母指内転筋で61%の筋機能低下が見られた。上腕二頭筋、腕橈骨筋については、腹部加温および足底部加温によりMPF低下は有意に抑制された。夏季における腕橈骨筋のみが足底部加温で抑制効果が大きく（足底部加温時14%低下、腹部加温時18%低下）、他はいずれも腹部加温で効果が高かった。

母指内転筋についてはいずれの条件においてもMPFは大きく低下し、加温条件間、季節間いずれにおいても有意差はなかった。

4. 考察

4.1 体温低下の季節差

実験結果より、夏季における体温低下量が冬季より大きくなる傾向が現れた。これは、人間の環境順応性由来と考えられる。生鮮食品加工場や冷凍庫のような作業環境では、季節にかかわらず人体を低温に暴露することになる。しかし、人体には季節順応があり、季節によって耐寒性すなわち外気温に対する反応（血流量、発汗量など）が異なることから、夏季と冬季では適切な加温方法が異なる。

夏季においては、身体は一般に末梢の血管を拡張し血流量を上げ、体内の放熱を促すように反応する。反対に、冬季においては、末梢の血管を収縮し血流量を下げ、放熱を防ぐように反応を変える。

特に手掌や足底は、動脈と静脈が末梢において毛細管を経ずに直接静脈につづく動静脈吻合が数多く存在し、人体のいわゆる「放熱板」として機能する。夏季においては、この動静脈吻合を開きやすくすることで放熱を促し、冬季において

は、閉じやすくして放熱を防ぐ。したがって、夏季における低温環境下においては冬季より放熱が進み、体温は低下しやすくなる^{2,3)}。

夏季腹部加温時の深部温低下は、腹部加温により末梢における放熱が促進され、末梢において冷却された血液が環流する事により起こると考えられる。この結果は、夏季の低温環境作業は、冬季よりもさらに保温に留意する必要があることを示唆する。

4.2 作業性

寒冷暴露のパーデューベグボード試験結果と筋活動低下について重回帰分析を行った結果、回帰式は次の式で表された。各係数の有意性については、p<0.1以下のものについて記している。

$$[\text{ピン立て作業性低下率}] = 0.316 \times [\text{腕橈骨筋MPF低下率}] + 0.187 \times [\text{母指内転筋MPF低下率}] - 0.036$$

(腕橈骨筋：p<0.01, 母指内転筋：p<0.001)

$$[\text{アセンブリ作業性低下率}] = 0.374 \times [\text{母指内転筋MPF低下率}] + 0.0086$$

(母指内転筋：p<0.001)

一方、皮膚温との回帰については、次式で表された。

$$[\text{ピン立て作業性低下率}] = 0.011 \times [\text{手背温度低下量}] - 0.025$$

(手背温：p<0.001)

$$[\text{アセンブリ作業性低下率}] = 0.016 \times [\text{前腕温度低下量}] + 0.007 \times [\text{手背温度低下量}] - 0.005$$

(前腕温：p<0.1, 手背温：p<0.1)

MPFは筋の冷却や疲労によりその周波数が低下する。筋は、筋内にある運動単位（筋あたり数百程度ある）がそれぞれ運動神経と接合し、神経の電気刺激によって単位ごとに活動する。筋線維の中央付近に神経と筋の接合部があり、神経からの電気刺激によって神経筋接合部から末梢に向かって筋線維が電氣的に活動し、筋が収縮する。この時の筋線維の電氣的活動が、いわゆる筋電位である。筋の制御性は、運動単位の刺激の細かさや筋電位が筋を伝導する速度によって決まるが、筋が冷却されると筋電位の伝導速度が低下し、その滑らかさが失われると考えられる。また、伝導速度低下の原因である筋温低下が熱産生を促すためのふるえを誘発することにより、さらに作業性が低下すると考えられる。

ピン立て作業では腕橈骨筋と母指内転筋が、アセンブリ作業では母指内転筋が有意な相関性を示した。この違いについては、作業に要求される巧緻性で説明できる。大まかに言う

と、腕橈骨筋のある前腕は手関節や手指を屈曲伸展する筋が多く存在し、母指内転筋のある手は、手指を細かく動かす筋が存在する（若干の例外がある）。つまり、要求される動作が大きくなるほど前腕の筋による手関節などの制御性が要求され、動作が小さくなるほど手内筋による細かい操作が要求される。

ピン立て作業とアセンブリ作業では、アセンブリ作業の方が組立に要求される細かい作業性を要求されることから、部品の組立時間に含まれる手指作業の比率が増加したと考えられる。計測した筋は、これらの手指作業を直接行う筋ではないが、それぞれ上腕、前腕、手指の部位にある筋のMPF活動つまり冷却度を代表するものとみなせる。

このような傾向は他の作業でも同様と考えられる。魚の処理作業を例に取れば、魚の内臓取りは包丁を大きく動かすことから前腕や上腕等の筋活動が有意となりやすく、骨をピンセットで抜く作業は手指筋の活動がおそらく有意となりやすい。

回帰係数の有意性から見て、筋活動MPFの方がよりよく作業性を説明できる。MPFは筋活動の指標であるから、身体運動をより直接表すため必然的に相関は高くなる。しかし、局所の皮膚温による作業性低下評価も筋活動、作業性との相関性は高く、簡易手法として有用と言える。

5. まとめ

本研究では、低温下の作業における作業性向上とストレス軽減を目指し、低温環境下における手指巧緻性評価と腹部・足部の身体局所加温による手指巧緻性向上の関連性を、パーデューペグボード、体温、筋電位により計測解析により検証した。その結果、身体局所加温により作業性低下を抑制するとともに、筋機能ならびに皮膚温についても有意に低下を抑制する効果が確認された。

引用文献

- 1) ISO9920:2007 温熱環境の人間工学－着衣の断熱性と透湿抵抗の評価
- 2) 石井泉, 中島康博, 前田享史, 横山眞太郎ほか6名: 身体局所加温が低温環境下作業に及ぼす生理心理的影響－第1報 冬季寒冷暴露実験を中心として, 空気調和・衛生工学会北海道支部第45回学術講演論文集, pp.171-174, (2011)
- 3) 地家崇規, 中島康博, 前田享史, 横山眞太郎ほか6名: 身体局所加温が低温環境下作業に及ぼす生理心理的影響－第2報 季節間の比較を中心として, 空気調和・衛生工学会北海道支部第45回学術講演論文集, pp.147-150, (2011)

高機能プレスによる球状黒鉛鑄鉄材の塑性加工技術の開発

鶴谷 知洋, 戸羽 篤也, 飯田 憲一, 畑沢 賢一, 三戸 正道

Development of Plastic Forming Technology of Spheroidal Graphite Cast Iron using High-functionality Press

Tomohiro TSURUYA, Atsuya TOBA, Ken'ichi IIDA,
Ken'ichi HATAZAWA, Masamichi MITO

抄 録

鑄物部品において、穴あけやフランジ面加工など寸法精度が必要な部分は機械加工が行われている。機械加工をプレス加工に置換できれば、加工時間の短縮や生産コストの低減が図られるため、幅広い産業分野に適用されることが期待できる。そこで、複雑形状を低コストで量産できる鑄造技術と、高精度な形状を低コストで量産できるプレス加工技術を組み合わせた、新しい量産型加工プロセスの開発を行った。

キーワード：高機能プレス，球状黒鉛鑄鉄，塑性加工

Abstract

The part of castings that require dimensional accuracy like drilling and flange facing is machined. If the machining can be substituted for the press working, it can be expected to be applied to a wide industrial field because shortening the processing time and the decrease of the production cost are attempted. Then, we developed a new mass-production technology by combining casting technology that mass-produces complex shapes parts at low cost and stamping technology that mass-produces accurate shapes parts at low cost.

KEY-WORDS : high-functionality press, spheroidal graphite cast iron, plastic forming

1. はじめに

鑄物部品において、穴あけやフランジ面加工など寸法精度が必要な部分は機械加工が行われている。しかし、機械加工費は材料費以上の場合がありその割合は大きい。そのため、コスト低減と加工時間短縮を目的として様々な検討が行われてきた。大林らは鑄造後の切削加工を不要とし品質の安定性を高めるため、リベットや溶接による組立部品への工法転換を提案している¹⁾。また、松岡は高能率・高精度切削による加工時間短縮と品質向上を目的として高速ミーリング加工技術を提案している²⁾。本研究は、機械加工をプレス加工に置換できればコスト低減と加工時間短縮につながると考え、複雑形状を低コストで量産できる鑄造技術と組み合わせた新しい量産型加工プロセスの開発を目的としている。具体的には、

塑性加工に適した鑄鉄材料の材質制御技術を確認し、サーボプレスによる加工条件によって品質がどの様に変化するか検証を行った。最後に鑄鉄品の塑性加工試験を行い本研究の加工技術の有効性を確認した。

2. 塑性加工に適した鑄鉄材質制御技術の確立

球状黒鉛鑄鉄材の組織写真を図1に示す。点在する黒点が黒鉛、黒鉛周囲の白色部分がフェライト、その他の部分がパーライトである。組織写真中の黒鉛は溶湯中のカーボンが晶出して結晶化したもので、材料の強度には寄与しない。フェライトは延性に富み、伸びなどの塑性変形能に寄与する。パーライトは硬い組織を含んでおり、材料の硬さや引張強度に影響する³⁾。

事業名：経常研究

課題名：高機能プレスによる球状黒鉛鑄鉄材の塑性加工技術の開発

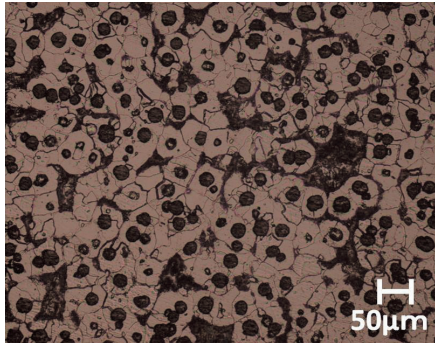


図1 球状黒鉛鑄鉄の組織

球状黒鉛鑄鉄材は、球状の黒鉛結晶が一つずつ独立し応力集中が起きにくいいため、割れにくく高い強度を持つ。そのため、靱性や伸びなどが大きく、自動車部品など高強度・高靱性を要する複雑形状の部材に用いられている⁴⁾。しかしながら、薄肉化することでチルと呼ばれる硬くて脆い組織が生じやすく、機械加工が行えなくなる問題を抱えている⁵⁾。自動車部品をはじめとする産業部品では、強度を保ちながら軽量化することが求められており、これまで様々な検討が行われている⁶⁾。

産業部品に求められる性質と鑄物部品にプレス加工を施すために必要な性質を考慮し、本研究で必要となる鑄鉄の材質を、産業機械部品に多く用いられる球状黒鉛鑄鉄を想定し、引張強度450MPa、伸びは軟鋼と同等の20%以上とした。

球状黒鉛鑄鉄の組織の中で、黒鉛そのものは材料の強度に寄与しないが、黒鉛の量が多くなれば相対的に金属部分の比率が小さくなるので、黒鉛の面積率（組織写真から算出される値）が機械的性質に影響することになる。さらに、黒鉛の面積率が同じであっても黒鉛形状（黒鉛の真円度を示す指標）、黒鉛粒数（単位面積当たりの黒鉛の個数）、黒鉛粒径（黒鉛の大きさの平均値）が異なれば、引張強度、伸び、あるいは靱性といった材料特性に影響を及ぼす⁷⁾。そのため、JIS規格のFCD450を参考に化学組成および基地組織は表1に示す値を目標とした。

表1 鑄物組成・組織の目標値

C (mass%)	Si (mass%)	球化率 (%)	粒径 (μm)
3.6 ~ 4.0	2.3 ~ 2.7	80 以上	50 以下
粒数 (1/mm ²)	フェライト率 (%)	硬さ (HRB)	
1000 以上	80 以上	80 ~ 95	

2.1 薄肉球状黒鉛鑄鉄の鑄造試験

薄肉球状黒鉛鑄鉄材の試験片を得るために、木型を製作し、これを用いて薄板状の試験片を鑄造した。鑄造方案は、冷却速度を低下させるため吐かせ方案とし、駄肉部も設けた。また、Mnを0.5mass%、Mgを含む合金による脱酸処理とFe-Si

による接種処理を行った。JIS規格FCD450の一般的な溶湯温度1350℃~1400℃ではチルが生じやすく十分な伸びが得られなかった。そこで冷却速度を遅くしチルの発生を抑えるため1450~1500℃に管理した。得られた鑄物を図2に示す。

試験片は、得られた鑄物から湯口および駄肉を切り離し、図3に示す幅60mm長さ300mmの板状に切り出した。



図2 鑄造試験により得られた鑄物



図3 切り出した試験片

2.2 材料試験

材料試験を行うに当たり、得られた試験片の両面を鑄肌の影響が残らないよう平面研削し板厚2mmとした。引張試験片については、さらに機械加工を行い図4に示す形状・外観とした。引張試験機は(株)島津製作所製のS-2000、硬さ試験は(株)ミットヨ製のAR-20を使用し、組織は光学顕微鏡にて撮像した画像を(株)イノテック製の画像処理ソフトQuickGrainにて解析した。

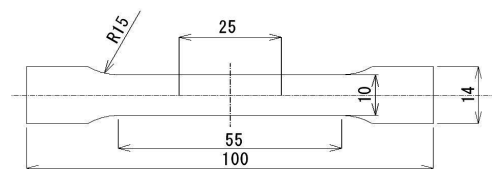


図4 引張試験片（上：形状，下：外観）

目標とする機械的性質（引張強度と伸び）を達成した材料の材料試験結果を表2に、組織写真を図5に示す。C mass%は当初の目標値よりも低い値で、またSi mass%は当初の目標値よりも外れた値で目標とする機械的性質が得られた。伸びに寄与するフェライト量を増やすようCmass%を減らした結果、Cは3.09～3.43mass%の範囲で、Siは範囲が広く1.92～3.30mass%の値において目標とする機械的性質が得られた。一般的な球状黒鉛鑄鉄（FCD450）の化学成分はC 3.6～3.9 mass%、Si 2.4～3.0mass%であるが、C mass%、Si mass%ともに低めの値とすることで伸びが大きくなることが明らかとなった。

次に、鑄物組成および組織であるが、球化率はほぼ当初の目標値通りである79.6%以上、粒径も同様に50μm以下となり目標とする機械的性質が得られた。また、これらの目標とする機械的性質において、ロックウェル硬さの値も89.6HRBとなり、目標値を達成した。

以上のことから、注湯温度の管理とC mass%の調整を行うことにより、塑性加工に必要な引張強度450MPa、伸び20%以上を持つ材料を得ることができた。

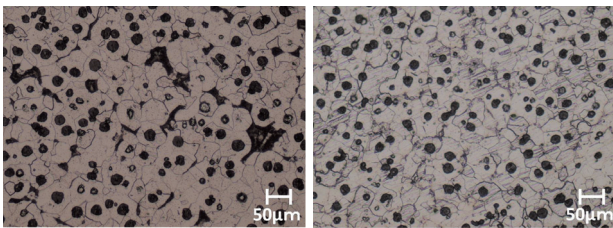


図5 得られた試験片の組織写真（左：A、右：B）

表2 材質試験結果

試験片	C (mass%)	Si (mass%)	球化率 (%)	粒径 (μm)	粒数 (1/mm ²)
A	3.43	1.92	84.3	14.1	191.6
B	3.09	3.30	79.6	11.6	274.6

試験片	フェライト率 (%)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	ロックウェル (HRB)
A	88.5	492.5	24.4	89.6
B	89.0	526.8	21.6	91.1

3. サーボプレスによる加工条件と加工品質の検証

本研究では、加工特性を観察するため様々な加工条件の設定が必要になると想定されることから、一般的なプレスと異なり加工工程中の金型の位置や速度を自由に制御でき、ストローク中の加工可能領域が大きいサーボプレスを用いた。一般的なプレスの加工動作（モーション）とサーボプレスのモーションの一例を図6に、使用したサーボプレスを図7に示す。

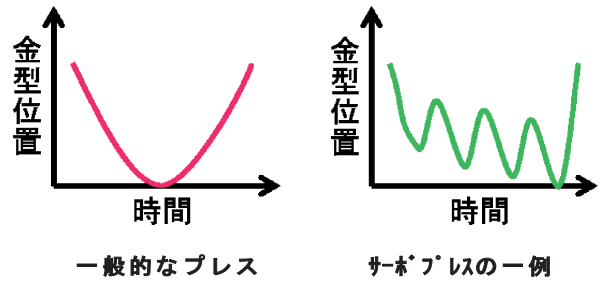


図6 プレスによる加工動作（モーション）の違い



アイダ エンゾニアリング 株式会社

加圧能力	800kN
ストローク	160mm
エアクッション	63kN
エアクッションストローク	70mm

図7 使用したサーボプレス

3.1 平面研削材による加工実験

開発した鑄鉄板の塑性加工品質を検証するため、表2の試験片Bの鑄造条件で得られた材料を用いて加工実験を行った。材質そのものの評価を行うため、鑄肌を平面研削し平滑な状態にした材料を用いた。実験内容は、代表的な塑性加工であるプレス加工とし、材料の加工特性を把握するのに必要な曲げ、潰し、抜き、3種類の加工を行った。加工の模式図を図8～図10に示す。曲げ加工はパルスハンドルによる手動加工、潰し加工および曲げ加工は一般的なプレス加工のモーションと同じであるクランクモーションによる加工を行った。

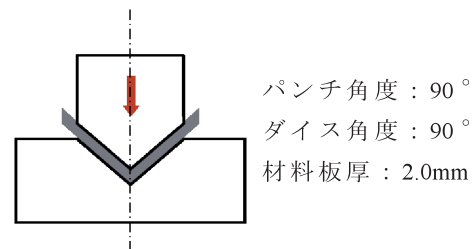


図8 曲げ加工模式図

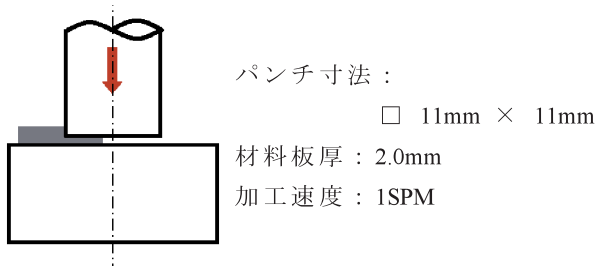


図9 潰し加工模式図

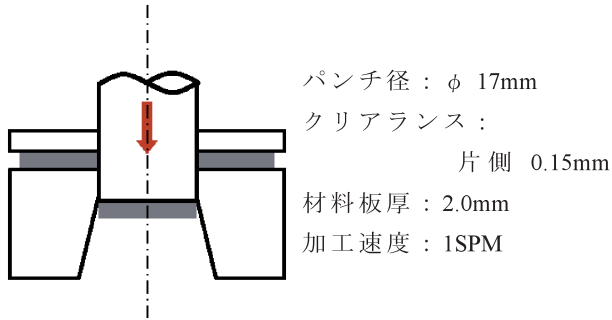


図10 抜き加工模式図

加工後の写真を図11～図13に示す。曲げ加工では頂点部において割れが発生した。しかし、穴ぼこ状の模様（ディンプルパターン）が発生していることから延性破壊が起きていることがわかる。また、結晶構造の弱い面で平らに割れるへき開破面が見られないことから脆性破壊は発生していない。以上のことから、製作した材料は伸びが十分あることがわかった。

潰し加工では黒鉛粒とその周囲の組織が大きく変形して伸びており、材料としての流動性が良い。また亀裂が入っているものの、黒鉛を起点とした破断面で黒鉛をつなぐようになっていること、一部ディンプルパターンが認められることから曲げ加工同様に延性破壊が発生しており、伸びが十分あることがわかる。以上のことから、潰し加工において十分な加工品質が得られることがわかった。

抜き加工では、曲げ加工や潰し加工と比較して黒鉛の変形が小さい。また黒鉛をつなぐように破断面が形成されているものの、加工面が直線になっており、加工精度が高いことがわかった。



図11 曲げ加工結果（左：外観、右：組織）

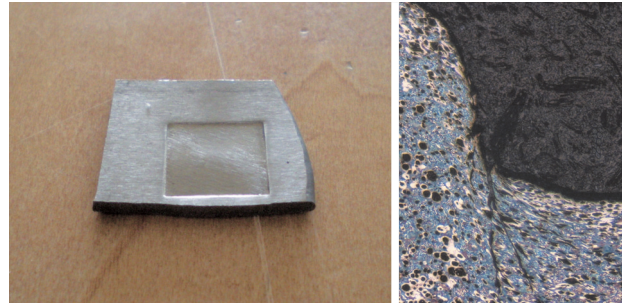


図12 潰し加工結果（左：外観、右：組織）

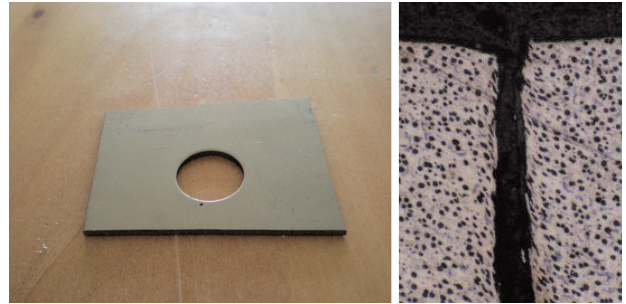


図13 抜き加工結果（左：外観、右：組織）

3.2 鑄放し材による加工実験

3.2.1 高延性薄肉鑄鉄材を用いた加工実験

実部品への適用を想定した場合、鑄放しの鑄鉄品を対象とした実験を行う必要があることから、鑄放しの鑄鉄品に対する加工実験（潰し加工）を行い、加工品質を評価した。実験では図14及び表3に示す一般的な製法による球状黒鉛鑄鉄（FCD450、以下「一般鑄鉄材」という）と本研究で製作した延性薄肉鑄鉄（以下「高延性薄肉鑄鉄材」）を使用した。加工条件を表4に示す。加工動作は一般的なプレスと同じクランクモーションを用いた。

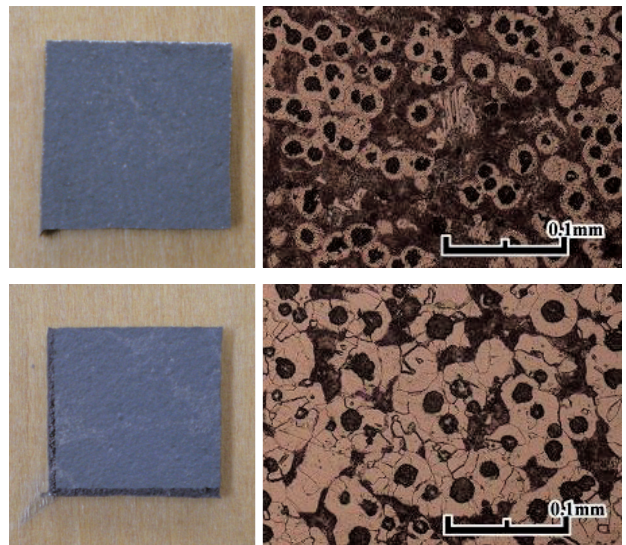


図14 使用した材料
（上：一般鑄鉄材、下：高延性薄肉鑄鉄材）

表3 材料分析値

	一般鋳鉄材	高延性薄肉鋳鉄材
粒数(個/mm ²)	693.4	742.9
粒径(μm)	15.4	18.4
球化率(%)	71.8	80.2
フェライト率(%)	45.4	65.4

表4 加工条件

材料寸法	16mm × 16mm
SPM	5
パンチ寸法	11mm × 11mm
潰し設定値	2.0mm

実験結果を図15および表5に示す。一般鋳鉄材ではパンチ接触部外周から材料の外周に向かい3か所の割れが発生した。高延性薄肉鋳鉄材では材料外周に変形が認められるものの、割れは発生しなかった。また、一般鋳鉄材と高延性薄肉鋳鉄材は加工前後の板厚変化、面粗さ改善が同等であった。

以上から、高延性薄肉鋳鉄材は一般鋳鉄材と同等の板厚変化量を持ち、面粗さの向上も同程度であるが、塑性加工に十分対応可能な伸びを持っていることがわかった。

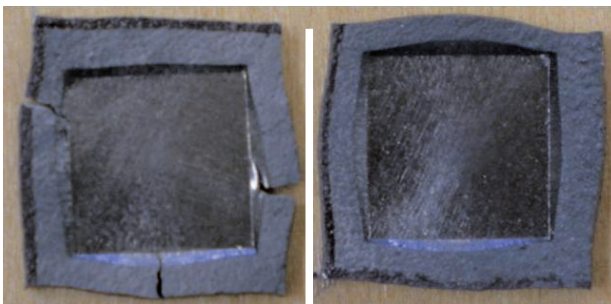


図15 潰し加工後の材料表面
(左：一般鋳鉄材，右：高延性薄肉鋳鉄材)

表5 潰し加工後の板厚および面粗さ

	一般鋳鉄材		高延性薄肉鋳鉄材	
	加工前	加工後	加工前	加工後
板厚(mm)	2.88	2.19	2.87	2.21
面粗さ(Ra)	5.1	0.6	4.8	0.8

3.2.2 サーボプレスのモーショを利用した加工実験

次に高延性薄肉鋳鉄材を対象として、一般的なプレスのモーショとサーボプレスのモーショを利用した場合の加工精度を評価する実験を行った。実験では3.2.1で用いた高延性薄肉鋳鉄材を用いた。実験条件を表6に、サーボプレスのモーショを図16に示す。

表6 加工条件

材料寸法	16mm × 16mm
SPM	5
パンチ寸法	11mm × 11mm
潰し設定値	2.3mm

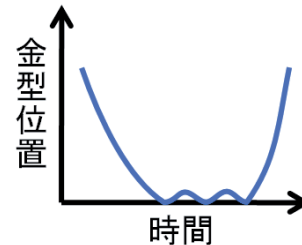


図16 サーボプレスのモーショ

実験結果を図17および表7に示す。一般的なプレスのモーショの加工とサーボプレスのモーショを利用した加工ともに割れは見られない。また、サーボプレスのモーショを利用した加工は、一般的なプレスのモーショの加工と比較して材料外周の湾曲が強く、材料の伸び量が多い。パンチの接触部については大きな違いは認められない。板厚については、一般的なプレスの加工では2.79mmから2.39mmへの変化であったが、サーボプレスのモーショを利用した加工では、2.79mmから2.30mmへの変化となり、サーボプレスのモーショを利用した加工の方が潰し設定値に近かった。以上のことから、サーボプレスのモーショを利用した加工の方が加工精度が良いことがわかった。

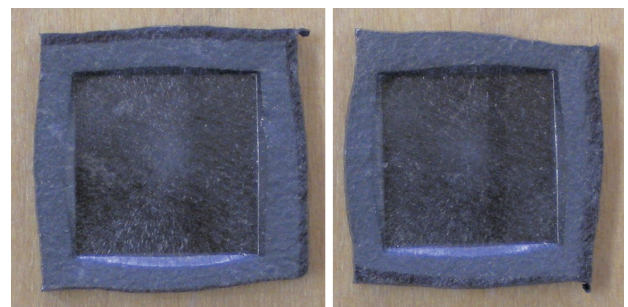


図17 モーショの違いによる加工後の材料表面
(左：一般的なプレスのモーショ，右：サーボプレスのモーショ)

表7 モーショの違いによる潰し加工後の板厚

	一般的なプレスのモーショ		サーボプレスのモーショ	
	加工前	加工後	加工前	加工後
板厚(mm)	2.79	2.39	2.79	2.30

4. まとめ

鋳物部品の後加工である機械加工をプレス加工に置換し、複雑形状を低コストで量産できる鋳造技術と組み合わせた新しい量産型加工プロセスの開発を目的として、塑性加工に適した鋳鉄材料の材質制御技術の確立と、サーボプレスによる加工条件と加工品質の検証、鋳鉄品の塑性加工試験を行った。

- (1) 鋳型の冷却速度を下げ、溶湯温度管理と各種成分調整と脱酸処理、接種処理を行うことで、伸びが20%以上を持つ塑性加工に適した鋳鉄材料が得られた。
- (2) 平面研削した鋳鉄材料を用いて曲げ加工、潰し加工、抜き加工を行った結果、高延性薄肉鋳鉄材は伸びが十分あることがわかった。特に潰し加工、抜き加工においては十分な加工品質が得られることもわかった。
- (3) 鋳放しの鋳鉄材料による潰し加工を行った結果、一般鋳鉄材では割れが発生したが、高延性薄肉鋳鉄材では発生せずに板厚を変化させ面粗さを向上させることができた。
- (4) サーボプレスのモーションを利用した加工は、一般的なプレスのモーションの加工と比較して板厚の変化量が大きく、加工精度が高いことがわかった。

以上のことから、本研究の加工技術の有効性を確認することができた。

5. 今後の展開

今後、財団法人 天田金属加工機械技術振興財団の研究助成を受け、実部品への適用実験を進める予定である。

引用文献

- 1) 大林根生・奈良小太郎:鋳物製機械構造部品の板金製品への転換、塑性と加工, Vol.48 No.563, pp.1094-1098, (2007)
- 2) 松岡甫たか:鋳物の切削加工技術 V 鋼の高速ミーリング加工技術, 鋳造工学, Vol.75 No.2, pp.169-174, (2003)
- 3) 小綿利憲・堀江ひろし:薄肉球状黒鉛鋳鉄の機械的性質の評価, 鋳造工学, Vol.73 No.4, pp.253-257, (2001)
- 4) 野口徹・中村孝:機械材料工学, 工学図書株式会社, pp.186-187, (2001)
- 5) 名雪東彦:鋳鉄の軽量薄肉化技術, 北海道立工業試験場技術情報, Vol.22 No.1, pp.5, (1999)
- 6) 永吉英昭・中野英治・今西幸平・上田精心:薄肉高韌性球状黒鉛鋳鉄, 日立金属技報, Vol.14, pp.65-72, (1998)

- 7) 戸羽篤也・安田星季・櫻庭洋平・三戸正道・宮腰康樹:薄肉球状黒鉛鋳鉄品の製造と材質特性, 北海道立工業試験場報告, No.307, pp.129-135, (2008)

研究ノート

Research Note

電力生成技術「エネルギーハーベスティング」に関する研究

新井 浩成, 浦池 隆文, 多田 達実, 大村 功

Study on Energy Harvesting Technology

Hironari ARAI, Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA, Isao OHMURA

キーワード：圧電素子, 電気二重層コンデンサ, DC-DCコンバータ, カンチレバー, ランダム振動

1. はじめに

エネルギーハーベスティングとは環境中に様々な形態で存在する振動・熱・電磁波などのエネルギーから電力を生成することを意味している。これまで我が国における事業化の取り組みは欧米と比べ10年以上遅れていたが昨年5月、本技術に関する利用促進や標準化に向けて、エネルギーハーベスティングコンソーシアムの設立、各種エネルギーハーベスティング用IC製品の発表が相次ぐなど注目を集めている。

これらの背景には、増え続ける電子機器の電力消費量とそれに伴う二酸化炭素削減、電子機器の電池交換や充電頻度の削減、電子機器を“いつでも・どこでも・誰でも・何にでも”使用するユビキタス社会実現などの手段としてエネルギーハーベスティング技術の応用が期待されているためである。

本研究では変形することで起電力が発生する圧電素子を用い、構造物や自動車などの振動エネルギーを対象に電子回路の省電力化技術および共振現象を得るための機械設計、振動解析技術の活用によって電力生成効率向上を図る取り組みを行った。

2. 圧電素子の特性

圧電素子はコンロの着火装置、電子ブザーや各種センサなどに幅広く用いられている。材料は水晶や特定のセラミックなどで、通常は図1に示すように結晶体の中央にプラスイオンが存在しているが、圧力を受けるとプラスイオンが移動することで圧力に応じた分極（表面電荷）が現れる。¹⁾ また、圧電材料を上部電極と下部電極で挟み込んだ単純な構造によって素子化が可能であるため、薄く、軽いという特徴を有する。

断面構造と電子ブザーを分解して取り出した圧電素子の一例を図2に示す。

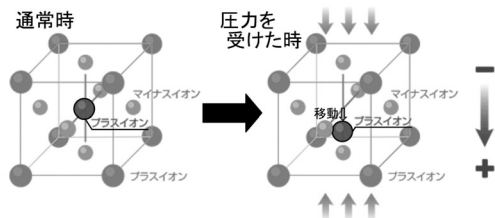


図1 分極の原理

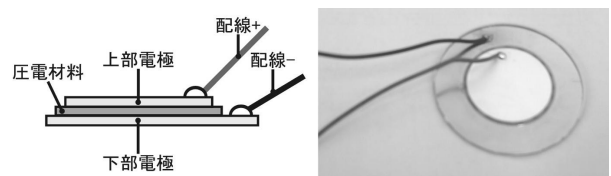


図2 圧電素子の断面構造と電子ブザーの分解例

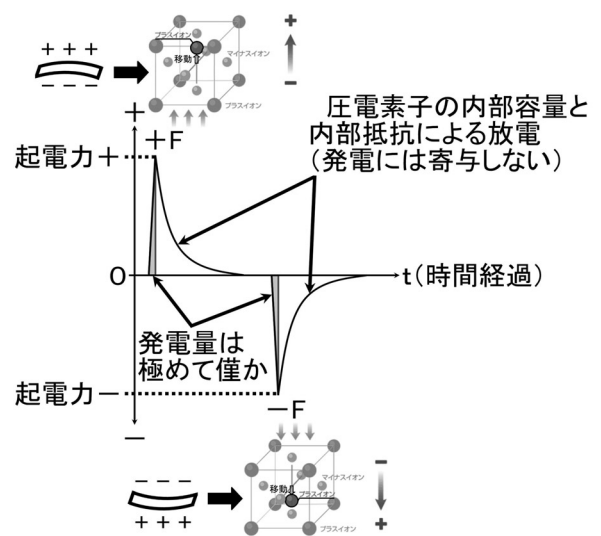


図3 圧電素子の応答特性

事業名：経常研究

課題名：電力生成技術「エネルギーハーベスティング」に関する研究

圧電素子に衝撃を加えると図3に示すようなインパルス応答波形が観測される。実際の起電力は観測された波形の立ち上がり部分のみで極めて僅かとなる。波形の立ち下がり時は圧電素子内に存在する静電容量と内部抵抗による放電現象であるため、発電には寄与しない。さらに変形したままの状態では放電現象によって起電力がゼロになってしまうため、圧電素子に加わる力を連続的に変化させることが電力を生成する上で重要となる。

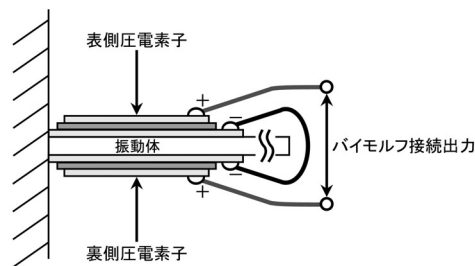


図5 バイモルフ接続 (片持ち梁の例)

3. エネルギーハーベスティングシステムの検討

電力生成効率を上げるためには①小さな圧力(応力)に対して起電力の大きい圧電素子の採用, ②低消費電力でかつ電気損失の少ない電子回路, ③共振現象を得られやすい振動体(機械系)が主な要素である。①の圧電素子は価格面や入手性から市販されている電子ブザーの圧電素子を取り出して使用している例が多く, 本研究では接続方法などを主に検討した。②の電子回路は圧電素子から得られる起電力が僅かであるため, 電気二重層コンデンサへの蓄電とDC-DCコンバータによって必要な電源電圧へ変換する方式とし, 回路および制御方法について検討を行った。③の振動体は3種の機構に関して検討し, 片持ち梁は正弦波振動による評価, カンチレバー(片持ち梁先端に錘を取り付けた構造)については自動車輪送振動を模擬したJIS Z0232に基づくランダム振動による評価を行った。

3.1 圧電素子の接続方法について

圧電素子を貼り付けた振動体からの起電力は僅かであるため, 複数枚の圧電素子を用いることが一般的となっている。その際, 図3に示したように圧電素子に加わる応力によって起電力の極性が変わるため, 接続に当たっては起電力を打ち消し合わないような接続が重要となる。

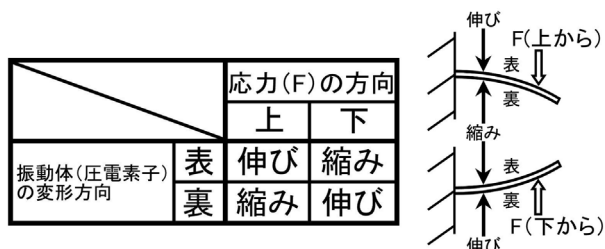


図4 振動体を受ける応力と変形の関係 (片持ち梁の例)

圧電素子をモジュール化している例もあるが, 図4に示すように振動体への応力と変形の違いを利用し, 図5に示すように振動体の表裏に圧電素子を貼り付け起電力を合成するバイモルフ接続が圧電素子を複数枚接続する際の基本単位となる。さらにこれらを振動体からの起電力(電圧)が小さい場合は直列接続, 大きな場合は並列接続とする複数の組合せによって必要な発電量を確保する。

3.2 蓄電回路の検討

圧電素子から得られる起電力だけで電子機器を動作させるのは消費電力との乖離や安定的に電源を供給する観点から難しい。そこで, 本研究では得られた起電力を整流し直流化, 電気二重層コンデンサへ蓄電した後, DC-DCコンバータによって電子機器が必要とする電源電圧へ変換を行う図6に示すような構成とした。なお, DC-DCコンバータには, 0.9Vから動作可能で自己消費電力が16μAのMAXIM社製MAX1675を用いている。

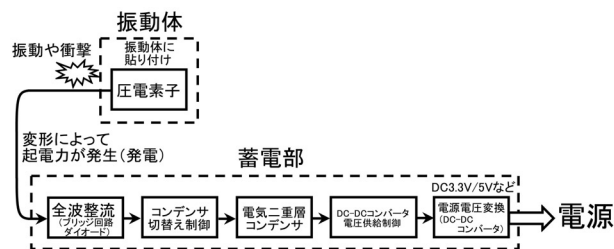


図6 蓄電回路(電気系)の構成

全波整流を行うブリッジ回路のダイオードには順方向電圧降下の少ないショットキーバリアダイオードを用いた。本研究では順方向電圧降下0.475V(順方向電流3A時)の1N5820を使用した。データシートでは漏れ電流が約500μAと大きい。そのため, 圧電素子から起電力が得られない期間に電気二重層コンデンサに蓄電された電気エネルギーが図7に示すようにブリッジ回路のダイオードを経て放電してしまうことが問題となった。

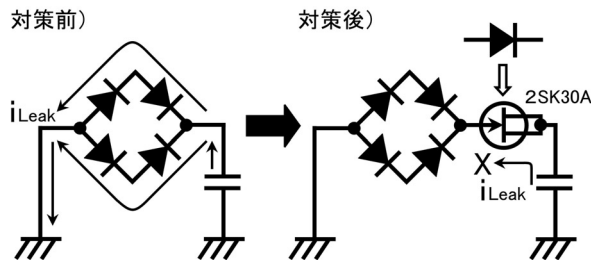


図7 漏れ電流の経路とJ-FETによる対策

対策としてブリッジ回路と電気二重層コンデンサ間にnチャネルJ-FETの2SK30Aのソースとドレイン間を短絡したも

のを低漏れ電流特性を有する等価的なダイオードとして用いる方法で漏れ電流を低減した。しかし、一般のダイオードと同様な順方向電圧降下を有するため、ブリッジ回路にショットキーバリアダイオードを用いた優位性を生かすことは出来ていない。ショットキーバリアダイオードを用いると一般のダイオードと比べ約1Vまでの低電圧領域における蓄電特性の優位性を確認している。そのため、ブリッジ回路には順方向電圧降下が小さく、漏れ電流の少ないショットキーバリアダイオードを用いることが重要となる。

電子機器の駆動時間を長くするためには蓄電する電気二重層コンデンサの静電容量を大きくする必要がある。しかし、コンデンサの蓄電（充電）は過渡現象によって静電容量と蓄電時間の比例関係により、単一のコンデンサでは最適化を図ることは出来ない。そこで、複数のコンデンサの切り替え（並列接続）によって静電容量の拡大と蓄電時間の短縮を図るための検討を行った。

3.2.1 アナログ方式の検討

アナログ方式では電圧制御素子であるnチャンネルMOS FETとpチャンネルMOS FETを組み合わせた図8に示すような切り替え回路によって1組当たり数μAで制御可能となった。²⁾

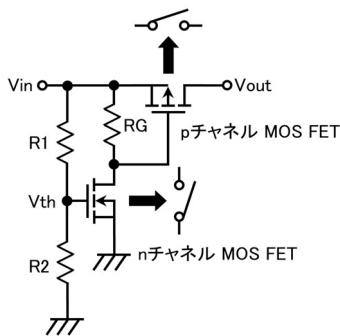


図8 MOS-FETの組合せによる切り替え回路

本回路ではnチャンネルMOS FETのゲートソース間電圧がしきい値電圧Vthを超えるとONになり、切り替え制御を行うpチャンネルMOS FETのゲートを駆動（ゲートソース間に電位差が発生）することでpチャンネルMOS FETも同時にONとなり、VinからVoutへ電圧を供給する。そこで、Voutへ電圧を供給（制御）するための入力電圧Vinは、

$$V_{in} = \frac{R1+R2}{R2} V_{th} \dots(1)$$

で表される。抵抗R1, R2（消費電力を低減するため、抵抗値はMΩ台）による入力電圧Vinの分圧とFET個々でVthが異なるため、設定の自由度という点で若干の制約を受ける。本研究で使用したnチャンネルMOS FET 2SK2009のVthは0.5V~1.5Vであるとデータシートに示されているが、実際には0.4V前後でONになった。試作した蓄電回路を図9に示す。

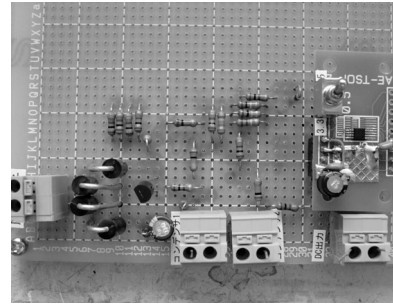


図9 アナログ方式の蓄電回路

3.2.2 デジタル方式の検討

マイクロコンピュータを使用したデジタル方式として、本研究では10Bitの分解能を有するA/Dコンバータを内蔵したPIC12F675を用い、図10に示すような構成について検討を行った。

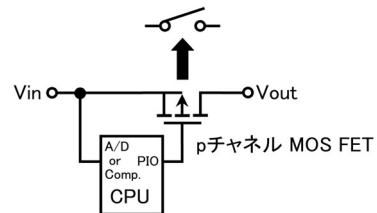


図10 マイクロコンピュータによる切り替え回路

マイクロコンピュータを用いると切り替え制御を行うPチャンネルMOS FETをパラレル出力ポート（PIO）から直接駆動可能となるため、nチャンネルMOS FET、分圧抵抗が不要など回路を簡略化出来る。さらにソフトウェアによって入力電圧をA/Dコンバータで読み取り、その電圧に応じてpチャンネルMOS FETをONにすることが可能となるため、複数の電気二重層コンデンサの切り替えなど制御面の機能向上に適している。また、電圧比較機能（コンパレータ）を有しているマイクロコンピュータであれば、A/Dコンバータを使用しなくても同等の機能を実現することが可能である。しかし、本研究で使用したマイクロコンピュータでは最大1mA程度の消費電流となるため、本方式を用いるためにはある程度の発電能力を必要とする。

3.3 振動体の検討

振動体は（運動エネルギーから効率的に起電力を得るためには）目的とする周波数で共振すること、単純な構造で小型であることが求められる。しかし、振動体の共振周波数は形状（長さや重さ）、材料の弾性係数などに依存するため制約が生じる。そこで、以下の構造に関する検討を行った。

3.3.1 片持ち梁の検討

最も単純な構造、即ち一端を固定し、他端を自由にした片

持ち梁の第一次から第四次までの固有振動モードを図11に示す。腹は固定端付近で曲率がきつく、節は不均等に現れているため、圧電素子を貼り付けるのは固定端側が望ましい。

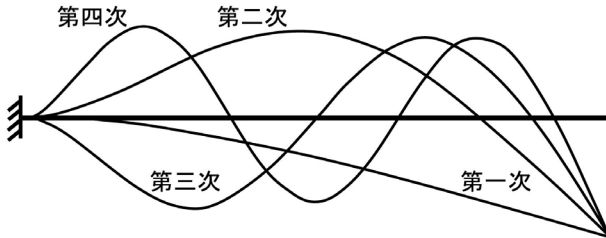


図11 片持ち梁の固有振動モード

全長の異なる2種類の片持ち梁と静電容量0.22Fの電気二重層コンデンサを使用した蓄電回路の組合せで、それぞれの梁が有する第一次共振周波数の正弦波電圧を固定端側に貼り付けた加振用圧電素子へ加え、3時間加振をした際の蓄電特性を評価した。主な試験条件を表1に示す。

表1 片持ち梁正弦波加振試験条件

	片持ち梁試験条件		備考
梁寸法(mm)	200(L)X1.2(H)X40(D)	150(L)X1.2(H)X40(D)	材質はアルミ
第一次共振周波数(Hz)	29.6	49.8	それぞれの共振周波数で加振
圧電素子寸法(mm)	65(L)X0.5(H)X20(D)	30(L)X0.5(H)X20(D)	富士セラミックス社製の特注品
加振時電圧(V/rms)	148	148	加振用とエネルギーハーベスティング用は同じ仕様
加振時電流(mA/rms)	2.40	1.73	同じ仕様の圧電素子

本試験を通じて、先に述べたブリッジ回路に用いたショットキーバリアダイオードの漏れ電流の大きさなど蓄電回路の問題が明らかとなり改善を図って行った。3時間経過後における電気二重層コンデンサの電圧はそれぞれ5.2V、3Vとなり、第一次共振周波数29.6Hzを有する梁の方が大きな電圧を得られた。コンデンサへ蓄電された電気エネルギーWは、

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \dots(2)$$

で表される。Cはコンデンサの静電容量(F)、Vはコンデンサの電圧(V)となる。(2)式に静電容量0.22と電圧を代入するとそれぞれ2.97J、0.99Jの電気エネルギーを蓄電した。この結果、第一次共振周波数29.6Hzを有する梁は約3倍大きくなったが、加振用圧電素子への供給電力は約1.38倍、圧電素子の面積は約2.16倍、第一次共振周波数29.6Hzを有する

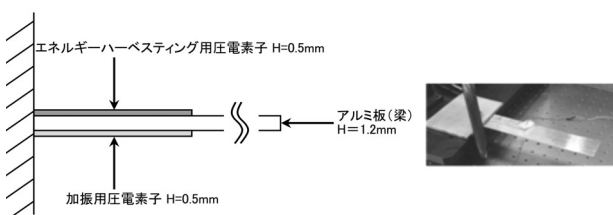


図12 片持ち梁の断面構造および試験風景

梁が大きいかを考慮すると2種の梁に用いた圧電素子単位面積当たりの発電能力はほぼ同じであることを示している。断面構造および第一次共振周波数29.6Hzを有する片持ち梁の試験風景を図12に示す。

3.3.2 両持ち梁の検討

本構造で振動体自体の小型化には適していないが、構造物からの応力を受ける梁の両固定端側に圧電素子を配置することによって片持ち梁と比べ、エネルギー回収量増加に寄与する可能性がある。そこで、圧電素子配置に関する構造解析を図13に示すようなモデルを基に行った。なお、第一次共振周波数を約2Hzとするため、全長600mmのアルミの両持ち梁中央部へ鉄の錘重量1kgを取り付け、圧電素子は加振用およびエネルギーハーベスティング用共に同じ仕様(形状)という想定である。

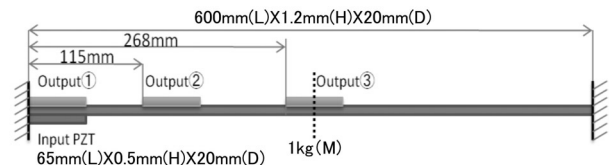


図13 両持ち梁の構造解析モデル

エネルギーハーベスティング用圧電素子の配置位置は梁の上面固定端側のOutput①、固定端から115mmのOutput②、固定端から268mm(梁中央部)のOutput③の3ヶ所で、固定端裏側のInput PZT(加振用圧電素子)で加振した場合の応答特性である。解析結果では固定端側Output①および梁中央のOutput③で、第一次共振周波数に対する応答特性を有していたが、それらに間に配置したOutput②は、節にあたるため応答性は見られなかった。一例として固定端側のOutput①の応答特性を図14に示す。

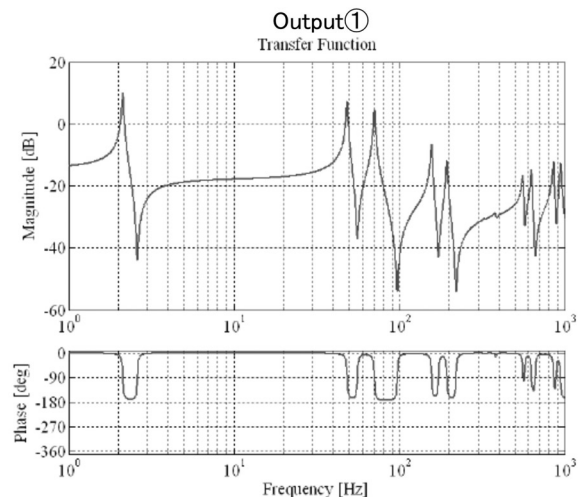


図14 両持ち梁Output①の応答特性

3.3.3 カンチレバーの検討

カンチレバーの固有振動モードは片持ち梁に準じ、先端部の錘によって梁の全長が短くても第一次共振周波数を下げることが可能となる。約2 Hzの第一次共振周波数で応答特性が最大化した構造解析の一例として、解析用モデルと評価パラメータおよび応答特性を図15に示す。その際の条件はアルミの梁全長350mmに鉄の錘重量80gの場合で、表1で示した研究当初の片持ち梁に比べ、約2倍程度の全長しか有しないにも関わらず、第一次共振周波数は約2 Hzと約1/10以下へと低下している。

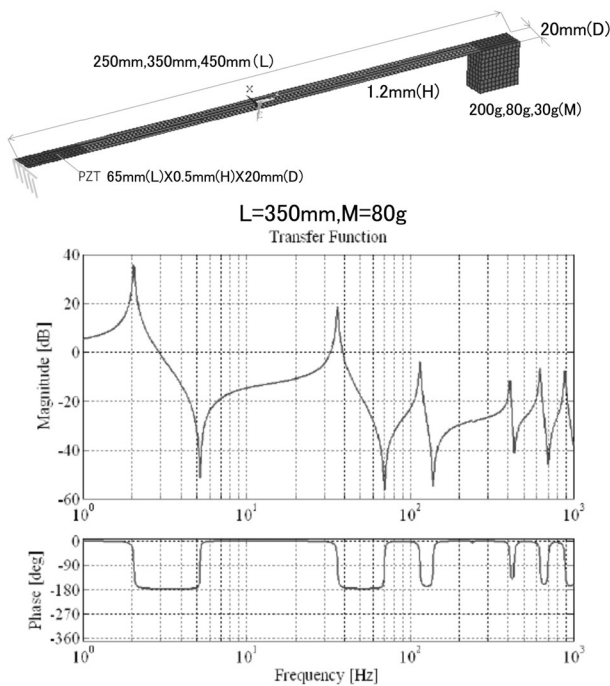


図15 カンチレバー構造解析の一例

4. エネルギーハーベスティングシステムの評価

エネルギーハーベスティングシステムの評価として車載向け用途を対象とした場合、自動車走行時の主な振動は数Hz程度の周波数域に大きく分布している。³⁾ このような条件下ではカンチレバーが小型化に有利で振動体として適している。そこで、振動体として第一次共振周波数を約2 Hzに設計した4種のカンチレバーを用意し、これらに蓄電回路として静電容量0.1Fの電気二重層コンデンサを組み合わせたエネルギーハーベスティングシステムを構築した。本システムを当場が所有する振動試験装置を用い、自動車輸送振動を模擬したJIS Z0232に基づくランダム振動試験によって蓄電特性の評価を行った。なお、主な試験条件を表2に、ランダム振動試験風景の一例を図16に示す。

図17に示した試験結果より、観察された共振現象の大きさ、即ち定常状態の振動に比べ大きく振動する出現頻度および振

表2 ランダム振動試験条件

	ランダム振動試験条件	備考
梁寸法 (mm)	250(L)X1.2(H)X20(D)	材質はアルミ、錘は鉄 M=200g
	280(L)X1.2(H)X20(D)	材質はアルミ、錘は鉄 M=170g
	300(L)X1.2(H)X20(D)	材質はアルミ、錘は鉄 M=120g
	350(L)X1.2(H)X20(D)	材質はアルミ、錘は鉄 M=80g
圧電素子寸法 (mm)	65(L)X0.5(H)X20(D)	富士セラミックス社製の特注品
ランダム振動実効加速度 (m/s ²)	5.8	
試験時間 (分)	30	

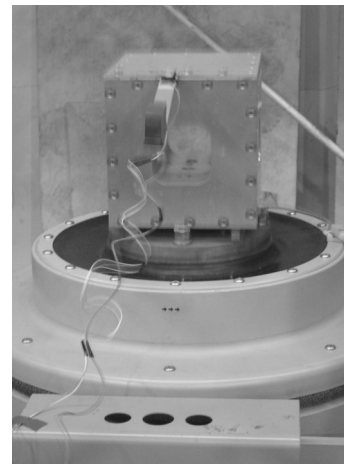


図16 ランダム振動試験風景

幅の大きさが発電能力に反映された。構造解析では全長350 mm、錘80gの条件が最も第一次共振周波数における応答特性が良い結果であった。しかし、実際の試験では全長280mm、錘170gの条件が最も大きく、電気エネルギーは0.98J、発電量は494 μW・hであった。また、全長250mm、錘200gの条件が最も小さく、電気エネルギーは0.13J、発電量は72 μW・hであり、約7倍の差となった。

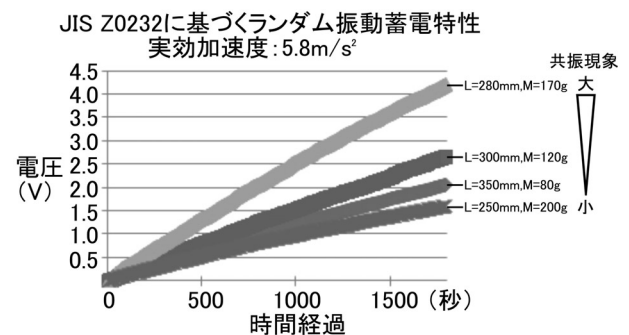


図17 ランダム振動試験結果

自動車走行時を想定したランダム振動の場合、構造解析で得られた第一次共振周波数に対する振動だけではなく前後数Hzの帯を持った振動に対する感度が必要であることを示している。主な電気的特性の最大と最小を表3に示す。

表3 ランダム振動試験による主な電気的特性（最大と最小）

	最大	最小
梁の全長と錘の重量(条件)	L=280mm M=170g	L=250mm M=200g
コンデンサ端子間電圧(V)	4.22	1.60
エネルギー量(J),($W = \frac{1}{2} CV^2$)	0.89	0.13
電力量($\mu W \cdot h$),($P = \frac{W}{1800}$)	494	72
電荷量(C),($Q = CV$)	0.42	0.16
平均電流(μA),($i = \frac{Q}{t}$)	233	89

5. まとめ

車載向け用途を対象としたエネルギーハーベスティングシステムの開発および評価として、自動車輸送振動を模擬したJIS Z0232に基づくランダム振動試験を行い、以下の結果が得られた。

- ①振動体に圧電素子を貼り付け、電気二重層コンデンサ、DC-DCコンバータなどで構成されるエネルギーハーベスティングシステムを試作した。電気二重層コンデンサの切り替え制御ではアナログ方式が1回路当たり数 μA 程度と低消費電力化に有効であることを確認した。また、デジタル方式では切り替え制御の柔軟性や拡張性に対して有効であることを確認したが、消費電流は約1mAとやや大きいことが課題となった。そのため、発電規模を踏まえた上で最適な切り替え制御方式を選択する必要がある。
- ②振動体として、片持ち梁、両持ち梁、カンチレバーの構造検討および評価を行った結果、カンチレバーが第一次共振周波数の低下と小型化に有効で、車載用途を想定した周波数数Hz程度の振動に適していることを確認した。また、両持ち梁は梁の両固定端側に圧電素子を配置することで片持ち梁と比べエネルギー回収量増加に寄与する可能性を確認した。
- ③エネルギーハーベスティングシステムの評価として、JIS Z0232に基づくランダム振動試験を全長と錘重量の組合せが異なる4種類のカンチレバーに対して行った結果、ほぼ同じ約2Hzに第一次共振周波数を有するにも関わらず発電量に約7倍の差が生じ、共振現象の有効性を確認した。自動車走行（ランダム振動）を想定した場合、第一次共振周波数の応答性だけでなく、それ以外の周波数領域に対する応答性も重要であることを確認した。

今後、振動体の適正化などを進め、圧電素子1枚当たり1mW・h以上へ発電能力の引き上げと車載用途以外への展開を目指して行く。また、エネルギーハーベスティングコンソーシアムで検討されている試験方法の統一など客観的な評価手法が必要と考えられる。

本研究を通じて蓄積した電子回路設計・評価技術および振動に関わる機械設計・評価技術は当場の基盤技術として、企業の技術開発支援へ活用して行く予定である。

さらに発電能力が高く安価な圧電素子の開発によって本技術分野の発展が加速されることを期待する。

謝辞

本研究で使用した振動試験装置は財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

最後に、本研究に当たって振動体の機械設計・シミュレーションなど機械系全般に渡って北海道大学大学院工学研究院教授梶原逸郎先生、准教授原田宏幸先生、大学院生の櫻井努氏の協力を頂いたことに紙面を借りて深く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) テクの雑学第89回力で電気を生み出す仕掛け—身の周りにある圧電効果—, TDK株式会社
- 2) トランジスタ技術, CQ出版社, pp.148-150, (2010年11月号)
- 3) 吉川毅・新井浩成・大村功, ランダム振動試験による耐振性能評価手法, 北海道立工業試験場報告No.306

除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力評価に関する研究（第3報） - 除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力試験方法 -

富田 和彦, 白土 博康, 保科 秀夫

Study on Cooling Performance of Radiant Cooling Panel with Condensation (partⅢ) -A Test Method of Cooling Performance for Radiant Cooling Panel with Condensation-

Kazuhiko TOMITA, Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA

抄 録

工業試験場における新たな依頼試験項目の一つとして「除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力試験方法」を提示するとともに、参照事例として、鋼板製さく形パネルラジエータを用いた冷房能力試験を実施し、本試験方法についての検証を行った。

キーワード：放射冷暖房パネル方式，結露，冷房能力，除湿，評価，試験方法，規格

1. はじめに

除湿型放射冷暖房パネルは、JIS A4004¹⁾「暖房用自然対流・放射形放熱器」に分類される暖房用さく形ラジエータにドレンパンを付加した構造が一般的であり、暖房時には温水を流すことで暖房負荷を処理し、冷房時には冷水を流すことで、パネル表面が露点温度以上では顕熱負荷を、露点温度以下ではこの顕熱負荷にパネル表面で発生する結露水による潜熱負荷を加えた冷房負荷を処理する冷暖兼用の自然対流・放射形放熱器である。この除湿型放射冷暖房パネルの暖房能力試験方法についてはJIS A1400²⁾で詳細に規定されているが、冷房能力の試験方法についての規定はなく、このためメーカは物件毎に設備設計者へ技術情報を提供することで対応している。

本研究は、除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力試験方法を当工業試験場における依頼試験項目の一つとして新たに開設することを目的としている。これまでに、除湿能力の実験式を示すとともに、結露時の全冷房能力が非結露時の冷房能力と結露時の除湿能力の和として表されること³⁾、またパネル面のぬれ性向上（超親水性の付与）は除湿能力に影響しないが、結露水の落下を助長させ、室外へ速やかに排出させるのに有効であることを明らかにした⁴⁾。本報告ではこれらの成果を踏まえ、除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力試験方法を提示するとともに、参照事例として、市販の除湿型放射冷暖房パネルを用いた冷房能力試験を実施した。

2. 除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力試験

2.1 試験室

試験室は、図1に示すように、工業試験場に配備の床面積3,600mm×2,700mm、天井高さ2,200mmの水冷密閉型試験室（外室）内に、床面積2,500mm×1,900mm、天井高さ2,000mmの周囲壁がポリエチレンシート、天井がアルミ製パンチングメタルからなる内室（試験室）を設け、外室を温度制御することで冷房負荷を与え、室温（代表）は中央床上750mmに配置した

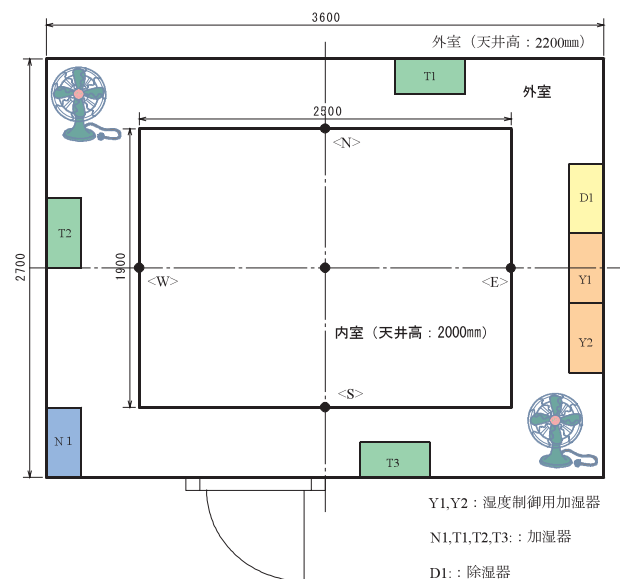


図1 試験室

事業名：経常研究

課題名：除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力評価に関する研究

T熱電対で設定温度に制御される。湿度は、外室に配備した加湿器と除湿器および室温と同一の箇所に配置した湿度センサーにより制御される。

2.2 冷水循環システム

冷水循環システムを図2に示す。冷水は、低温循環装置と投げ込みヒータを用いて冷水タンク内で設定温度に制御される。冷房能力測定用として循環ライン内に制御付き電磁流量計と供試パネル出入口に白金測温抵抗体（JIS A級）を設置した。また、結露を伴う試験では、ドレンパンの下にピーカと台秤を配置し、ドレンパンに溜まる結露水質量を自動計測する。

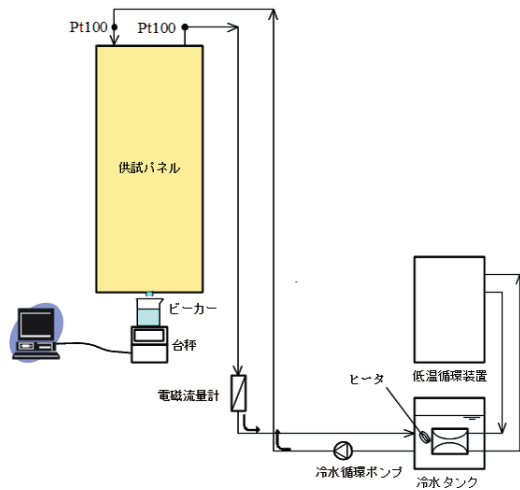


図2 冷水循環システム

2.3 定格冷房能力

除湿型放射冷暖房パネルの定格冷房能力は、非結露時においては表1の条件で測定したときの値とし、結露時には表1の条件に加え、湿度60±5%RHで測定したときの値とする。

表1 定格冷房能力測定条件

代表室温	27°C	
平均冷水温度	9.5°C	
冷水温度上昇	5K	
冷房温度差	17.5K	代表室温－平均冷水温度

2.4 定格通水量

除湿型放射冷暖房パネルの定格通水量は、非結露時の表1に示す定格冷房能力測定時の通水量とする。

2.5 冷房能力の算出式

2.5.1 非結露時の冷房能力算出式

非結露時の冷房能力 Q_c は、式(1)により算出する。

$$Q_c = C_{pw} \times m_w \times (t_{wo} - t_{wi}) \quad \text{..... (1)}$$

ここに、 Q_c : 非結露時の冷房能力 [kW]

C_{pw} : 水の比熱 [kJ/(kg・K)]

m_w : 水の質量流量 [kg/s]

t_{wi} : 入口冷水温度 [°C]

t_{wo} : 出口冷水温度 [°C]

また、冷房温度差 ΔT_c は式(2)により算出する。

$$\Delta T_c = t_a - t_w \quad \text{..... (2)}$$

ここに、 ΔT_c : 冷房温度差 [K]

t_a : 代表室温 [°C]

t_w : 平均冷水温度 [°C]

さらに、冷房能力と冷房温度差には式(3)に示す特性式の関係がある。

$$Q_c = B(\Delta T_c)^n \quad \text{..... (3)}$$

ここに、定数Bと指数nは、 $\log Q_c = \log B + n \log \Delta T_c$ の関数関係を利用し、重み係数を考慮した最小2乗法の適用によって求める²⁾。

2.5.2 結露時の冷房能力算出式

結露時の冷房能力（全冷房能力） Q_{ct} は、JISのエアコンディショナーの試験方法⁵⁾に倣うと、顕熱冷房能力と潜熱冷房能力（除湿能力）の和として式(4)で表される。

$$Q_{ct} = Q_s + Q_l \quad \text{..... (4)}$$

ここに、 Q_{ct} : 結露時の全冷房能力 [kW]

Q_s : 顕熱冷房能力 [kW]

Q_l : 除湿能力 [kW]

ここで、結露時の全冷房能力は、非結露時の冷房能力と同様に式(1)から $Q_c = Q_{ct}$ として求めることができる。また、除湿能力 Q_l は、結露水の質量測定から得られる除湿速度に凝縮潜熱を乗じて求めることができ、式(5)で示される。

$$Q_l = G_w \times r_w \quad \text{..... (5)}$$

ここに、 G_w : 除湿速度 [kg/s]

r_w : 凝縮潜熱 [kJ/kg]

2.6 試験室内の環境測定

2.6.1 空気温度

空気温度測定は、次の試験室内中央垂直軸上の5点を測定する。

(a) 代表空気温度：床 上 750mm

(b) 他 の 点：床 面 上 50mm, 500mm, 1,500mm

天井面下 50mm

2.6.2 壁表面温度

壁表面の温度測定は、各壁表面の中心4点と、天井面及び床面の中心2点を加えた、計6点とする。

2.6.3 湿度

湿度測定は、代表空気温度と同様、試験室内中央垂直軸の床面上750mmの1点とする。

2.7 冷房能力試験

2.7.1 非結露時の冷房能力試験

非結露時の冷房能力は、パネル面に結露が発生しない低湿度条件で行い、特性式(3)を求める冷房能力変化特性試験により決定する。

2.7.2 冷房能力変化特性試験

試験は、表1の定格冷房能力測定条件(平均冷水温度9.5℃、 $\Delta T_c = 17.5K$)を満たす通水量で冷房能力を測定し、次に、通水量を固定したまま冷水温度を変化させ、平均冷水温度13℃($\Delta T_c = 14K$)及び平均冷水温度8℃($\Delta T_c = 19K$)における冷房能力を測定する(表2)。試験時間は最低10分間とし、この間の平均値を持って測定値とする。またこの間、温度、流量ともに定常状態を維持することとする。

表2 冷房能力変化特性試験の条件

代表室温	27℃
平均冷水温度	8℃
	9.5℃
	13℃
通水量	平均冷水温度9.5℃のときに、冷水温度上昇が5Kとなるときにの水量を通水する。

2.7.3 結露時の冷房能力試験

結露時の冷房能力試験は、湿度 $60 \pm 5\%RH$ 、表1の定格冷房能力測定条件で行う。試験時間は、最低1時間とし、温度と流量はこの間の平均値、除湿速度はこの間の結露水質量変化から求める。またこの間、温度、流量が定常状態を維持することに加え、除湿速度については結露水質量と時間が直線関係にあることとする。

3. 試験事例

3.1 供試除湿型放射冷暖房パネル

供試パネル：鋼板製さく形パネルラジエータ(A社製)
 外形寸法：幅490mm、高さ1,500mm、奥行き105mm
 放熱パネル：幅70mm、高さ1,200mm、厚さ8mm、間隔50mm、左右パネルは支持用ダミーパネル
 試験室内の供試パネル設置状態：図3、図4参照

3.2 試験方法

試験方法は、前述の「2. 除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力試験」による。ただし、温度と流量はデータロガーとパソコンを用いて15sec間隔で計測し、非結露時の試験では定常状態と見なせる10分間の平均値を、結露時の試験では結露水質量測定期間である1時間を、各々測定時間とした。なお、結露水質量の測定間隔は1分間隔とした。

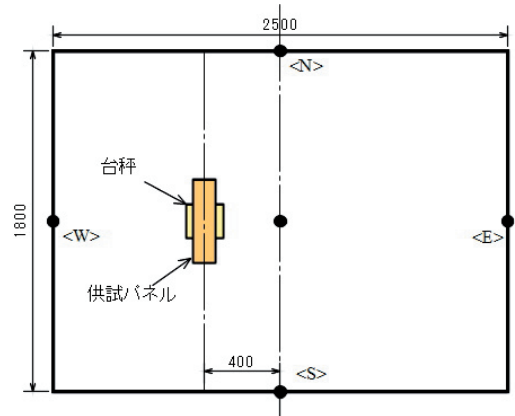


図3 供試パネルの配置図



図4 供試パネルの外観

3.3 試験結果

3.3.1 非結露時の冷房能力

非結露時における冷房能力変化特性を示す冷房温度差(ΔT_c)と冷房能力の関係を図5に、冷房能力試験結果を表3にまとめて示す。供試パネルの非結露時における定格冷房能力は0.169kW、定格通水量は0.484L/minであり、特性式(3)の定数Bは0.00789、指数nは1.07である。

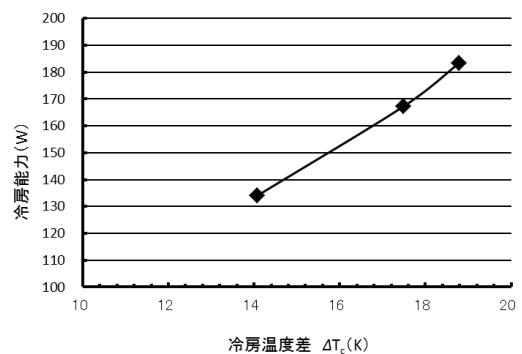


図5 非結露時の冷房温度差と冷房能力の関係

表3 非結露時の冷房能力試験結果

試験 No.		3	1	2
入口冷水温度	°C	5.5	7.0	11.0
出口冷水温度	°C	10.9	12.0	14.9
冷水温度上昇	K	5.4	4.9	3.9
冷水流量	L/min	0.486	0.487	0.493
代表室温	°C	27.0	27.0	27.0
相对湿度	%	19.1	19.1	19.0
平均冷水温度	°C	8.2	9.5	13.0
冷房温度差(ΔT _c)	K	18.8	17.5	14.1
冷房能力	kcal/h	157.7	143.8	115.3
	W	183.4	167.3	134.1
定格冷房能力	kW	0.169		
定格通水量	L/min	0.484		
指数n		1.07		
定数B		0.00789		

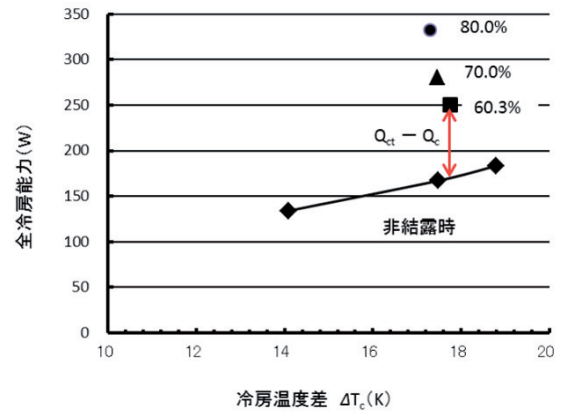


図6 結露時の冷房温度差と全冷房能力の関係

3.3.2 結露時の冷房能力

設定室温27°C，設定湿度60%RHにおける結露時の冷房能力試験結果を表4に示す。なお本研究では，湿度60%RHの他に，湿度70%RHと80%RHについても同様な試験を行ったので，その結果を表4に付記した。

湿度60.3%RHの場合の全冷房能力は0.251kW，除湿能力は0.079kWである。同様に，湿度70.0%RHでは，全冷房能力0.280kW，除湿能力0.117kWであり，湿度80.0%RHでは各々0.333kW，0.151kWである。冷房温度差と全冷房能力の関係を示す，非結露時の試験結果と比較して図6に示す。

非結露時の冷房能力特性式(3)から求まる冷房能力 Q_c (計算値)を用いて算出した($Q_{ct}-Q_c$)の値を，表4に示す。これらの値は，図6から分かるように，結露時の全冷房能力と非結露時の冷房能力の差を示しており，表4の除湿能力 Q_1 にほぼ等しい($Q_{ct}-Q_c \approx Q_1$)ことが分かる。ここで式(4) $Q_{ct} = Q_s + Q_1$ の関係から，結露時の顕熱冷房能力は非結露時の冷房能力にほぼ等しく($Q_s \approx Q_c$)，これまでの結果と同様，結露時の全冷房能力は非結露時の冷房能力と結露時の除湿能力の和($Q_{ct} = Q_c + Q_1$)として表されることが確認される。

表4 結露時の冷房能力試験結果

設定湿度			60%	70%	80%
冷水温度	入口	t _{wi} °C	7.0	7.2	6.9
	出口	t _{wO} °C	12.0	12.1	12.1
	平均	t _w °C	9.5	9.6	9.5
代表室温	t _a °C	27.2	27.1	26.8	
相对湿度	H %	60.3	70.0	80.0	
露点温度	t _d °C	18.8	21.2	23.1	
流量	W L/min	0.725	0.807	0.917	
冷房温度差	ΔT _c K	17.7	17.5	17.3	
全冷房能力	Q _{ct} kW	0.251	0.280	0.333	
除湿速度	G _w kg/h	0.115	0.172	0.223	
除湿能力	Q ₁ kW	0.079	0.117	0.151	
非結露時冷房能力(計算値)	Q _c kW	0.171	0.168	0.167	
	Q _{ct} -Q _c kW	0.079	0.112	0.166	

3.4 附属(参考データ)

本文に記載していない主な試験データを，参考まで，図7～図9に示す。

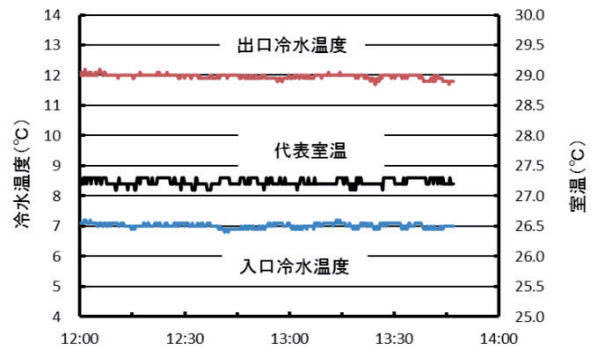


図7 結露試験(No.1)時の冷水温度・室温状態

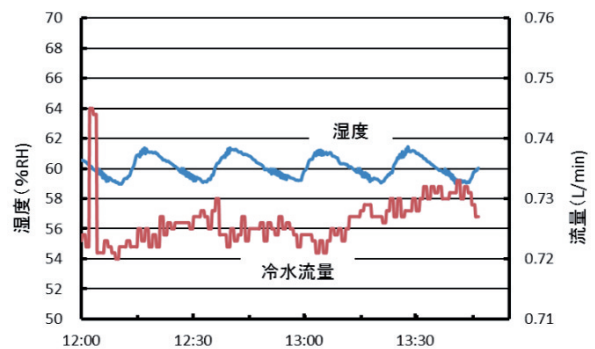


図8 結露試験(No.1)時の湿度・流量状態

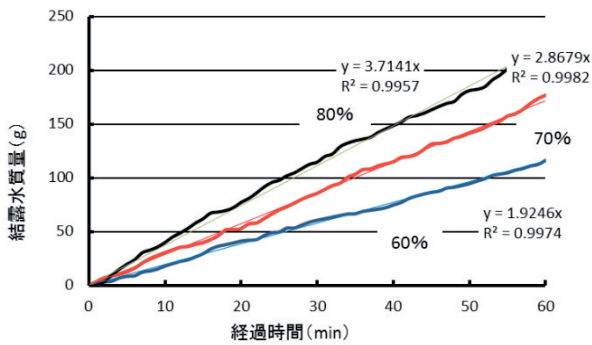


図9 結露水の質量変化

4. まとめ

本研究では、工業試験場における新たな依頼試験項目の一つとして「除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力試験方法」を提示するとともに、参照事例として、鋼板製さく形パネルラジエータを用いた冷房能力試験を実施し、本試験方法についての検証を行った。

引用文献

- 1) JIS A4004-2007 暖房用自然対流・放射形放熱器－種類及び要求項目
- 2) JIS A1400-2007 暖房用自然対流・放射形放熱器－性能試験方法
- 3) 富田和彦, 白土博康, 保科秀夫: 除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力評価に関する研究, 北海道立工業試験場報告, No.308, pp.15-21, (2009)
- 4) 富田和彦, 白土博康, 保科秀夫: 除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力評価に関する研究 (第2報), 北海道立工業試験場報告, No.309, pp.31-35, (2010)
- 5) JIS B8615-2 -1999 エアークンディショナー第2部: ダクト接続形エアークンディショナーと空気対空気ヒートポンプ定格性能及び運転性能試験

廃電化製品中の液晶パネルからのインジウムの回収技術

富田 恵一, 若杉 郷臣, 高橋 徹, 長野 伸泰

Recovery of Indium from Liquid Crystal Panel in Waste of Electrical Appliances

Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI,
Touru TAKAHASHI, Nobuhiro NAGANO

抄 録

廃棄された液晶パネルから、粗酸化インジウムの回収プロセスを構築することを目的として、仮焼、酸浸出、沈殿分離および焙焼の各処理について検討を行った。その結果、液晶をモールドしている樹脂等の有機物は500℃仮焼により分解可能であることが分かった。また、仮焼後の液晶パネル中のインジウムは6 mol/L以上の塩酸による処理で十分な浸出が可能であることが分かった。塩酸浸出したインジウムをアンモニア水で中和し、pH 7にすることにより90%以上の回収率で沈殿回収された。含有する主な不純物は、りんおよび透明電極成分のわずであり、その他の元素はほとんど含有しないことが分かった。沈殿物を焙焼して得られた粗酸化インジウムは、原料の液晶パネルに対し重量比で1/1300になり、保管や輸送に有利な量に濃縮できることが分かった。

キーワード：インジウム、液晶パネル、回収、廃棄物、小型家電、レアメタル、都市鉱山

1. はじめに

薄型テレビ、携帯電話等の廃電化製品の電子基板、電池、液晶パネルには金、パラジウム、ニッケル、インジウム、タングステン、コバルトなどの貴金属やレアメタルが含まれており、今までに生産された電化製品に含有するレアメタル等の総量は世界の流通量の相当量に達することから、集荷された廃電化製品は、近年、「都市鉱山」と称され注目されている¹⁻¹²⁾。我が国では、これらの資源のほとんどを輸入に頼っている⁸⁻¹²⁾が、これら輸出国の経済発展に伴う国際価格の高騰や自国優先による輸出規制などから、資源の安定確保が極めて難しくなっており、「都市鉱山」に対する期待が急速に高まっている。

一方、北海道には蛍光管、電池、携帯電話、薄型テレビなどを集荷している企業が数社あるが、非鉄金属の精錬所が道内に無いこともあり、廃棄物からの有価金属の回収は進んでおらず、現在、単に保管されているか、道外の精錬所に輸送しているのが現状である。その中で、近年伸長している薄型テレビは家電リサイクル法のリサイクル品目に指定され、今後液晶パネル排出量の急増が想定されている。現在、液晶パネル製造工場におけるターゲットからのインジウム回収^{12,13)}

は実施されているのに対し、製品中の液晶パネルの透明電極に含まれるインジウムなどの回収は実施されておらず、いくつかの検討例¹⁴⁻¹⁶⁾があるにとどまっている。このような背景から、廃電化製品中の液晶パネルからのインジウムの湿式回収について検討を行った。

2. 実験

2.1 試料

一般家庭から廃棄された専用ワープロ（A社製1991年製、B社製製造年不明、C社製製造年不明の3種類）を解体し、そこから取りだした液晶パネルを以下の試験に供した。

2.2 試薬

各種浸出処理には、硝酸は関東化学製電子工業用ELグレードを用い、塩酸、硫酸、アンモニア水および水酸化ナトリウムは関東化学製特級を使用した。湿式分析用には、硝酸は関東化学製電子工業用ELグレードを用い、塩酸、ふっ化水素酸、過塩素酸は関東化学製原子吸光分析用を使用した。また、各元素分析用金属標準溶液として、SPEX製assurance標準溶液（各1000mg/L）を希釈して用いた。分析用の純水はヤマト科学製Autostill WA710型蒸留イオン交換水を用い、試薬調製用には純水をELGA-オルガノ製超純水製造装置PURELAB ultra Analyticで精製した超純水を使用した。

事業名：経常研究

課題名：廃電化製品からの有価金属の回収技術に関する研究
(平成21～22年度)

2.3 装置および器具

各種試料の仮焼および焙焼にはADVANTEC FUM332PA型マッフル炉およびモトヤマ製SUPER-C SC-2025H型マッフル炉を用いた。インジウムの浸出処理には、浸出容器にアズワン製アイボーイ広口瓶100mLを、振とうには、ヤマト科学製シェーカーSA-31型を用いた。沈殿生成のための攪拌には井内盛栄堂製デジタルホットプレートスターラーDP-2Lに攪拌子としてPTFE攪拌子（35mm×5mmφ）を使用した。pH測定には電気化学計器（株）製のpH/イオンメータMODEL IOL-50に6157-0.65W型ガラス複合電極を装着して用いた。

各金属分析には以下の機器を使用した。ICP発光分光分析法は島津製作所製ICP発光分光分析装置ICPS-8100を用いた（以下ICP-AESと記載）。各試料の概略組成（半定量値）はリガク製ZSX Primus II型蛍光X線分析装置を用い、ファンダメンタルパラメーター法（FP法）により求めた（以下XRFと記載）。

顕微鏡観察および電子線微小部分分析では、走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型特性X線分析装置として日本電子製走査型電子顕微鏡JSM-5800LV及びオックスフォードインストルメント製高速エネルギー分散型X線分析アナライザLink ISIS 300または日本電子製走査型電子顕微鏡JSM-6610LA/JED-2300/DrySD検出器を用いた。化学形態の推定では粉末X線回折装置としてリガク製ULTIMA IVを用いた。各機器分析における測定は通常の一般的な条件で行った。

各種溶液の濾過には東洋濾紙製No.5A濾紙を使用した。得られた沈殿の焙焼にはニッカト製磁性坩堝B0型を用いた。その他の器具類で特に記載のないものは原則としてパイレックスガラス製を用いた。

2.4 仮焼条件の検討

液晶パネルからインジウムを湿式回収する場合、効率を向上させるためには透明電極である（Indium-tin-oxide）層（以下ITO層）が浸出液と十分に接触する必要がある。しかし、液晶パネルは、内面に透明電極を形成した二枚のガラス基板の間に配向層や液晶層などが挟み込まれており、構造維持と液晶漏れがないようにエポキシ樹脂等で厳重にモールドされている構造^{17,18)}のため、破砕等のみでITO層を完全に露出させることは困難であると考えられる。このことから、樹脂などの有機物を分解し、透明電極を露出させるための仮焼条件について検討した。

A社製ワープロの液晶パネルをダイヤモンドカッターにより切断し、温度（400℃～550℃、6h）及び処理時間（500℃、1～24h）を変化させて、仮焼を行い、最適な有機物等の分解の条件を検討した。なお、急加熱による有機物の自然を避けるため、目的温度まで2hで昇温させた。

2.5 浸出条件の検討

炭化物を極力含まないように仮焼（処理条件：600℃、6h）したB社製ワープロの液晶パネルをアルミナ製乳鉢で軽く粗砕し、SEM/EDSによりITO相を確認した。その一部をアルミナ製乳鉢で微粉碎後XRFにより組成の半定量値を測定した。浸出の検討には、ガラス基板厚さ（約0.7mm厚）より粒径が小さい微粉はガラス内部のみによるITO面を含まない粒子ができる可能性があることから、粗砕した残りをSUS製篩目開き0.6mmで分級し、篩上試料を浸出試験に使用した。すなわち、粗粉碎試料を2.0gずつ100mL広口瓶にとり、それぞれに王水、塩酸（1から12mol/L）、硝酸（6.5および13mol/L）、硫酸（1および9mol/L）、アンモニア水を20mL加え、ふたをした後、振とう幅5cm、振とう速度200rpm、常温で1h浸出させ、5種A濾紙110mmで濾過し濾液を50mLメスフラスコで定容後、ICP-AESによりインジウムを定量した。なお、王水処理は振とうすると発泡し王水が分解し濃度に変化する恐れがあり、また、圧力が高くなるなど操作上も危険なため、12h静置による浸出とした。さらに、王水処理の試料に関して、処理後のガラス基板をSEM/EDSで観察するとともに、ふっ化水素酸等により湿式分解後インジウムをICP-AESにより定量し、含有するインジウムの総量を推定した。

さらに、6mol/L塩酸を用い、浸出時間を1hから24hまで変化させ、同様に浸出試験を行い、浸出率に対する浸出時間の影響について検討した。

2.6 沈殿回収条件の検討

浸出したインジウムを水酸化物として沈殿回収する検討を行った。すなわち、C社製ワープロ液晶パネルを500℃、6hで仮焼し、粗砕後全量140.82gを濃塩酸300mLで振とう幅5cm、振とう速度200rpmで浸出させ、5種A濾紙110mmで濾過し濾液を500mLメスフラスコで定容し、浸出液を製した。なお、この処理での仮焼液晶パネルからの浸出率を確認するため、浸出後の液晶パネルをふっ化水素酸等により湿式分解しインジウムをICP-AESにより定量し、浸出率を算出した。この浸出液を50mLとり、アンモニア水または水酸化ナトリウムを加え、所定のpHにした。その後、5種A濾紙110mmで濾過し、濾液に酸を加えて500mLに定容後、ICP-AESにより各種元素を定量して、この分析結果と浸出液に含まれる各元素濃度から回収率を計算した。

2.7 酸化インジウムとしての回収

沈殿回収試験で得られた粗水酸化インジウムを550℃で6h焙焼し酸化物¹⁹⁾にし、SEM/EDSにより組成を確認、XRDにより含まれる化合物を推定した。なお、XRD測定は試料が微量のため、試料ホルダーにけい素無反射板を用いた。その後、再度、塩酸および硝酸の混酸に溶解後、ICP-AESにより定量して、純度等を評価した。

3. 結果および考察

3.1 仮焼条件の検討

図1に処理後の液晶パネルの写真を示す。450℃以下の処理温度が低い場合は、パネルに使用されている配向層や液晶等が十分分解せず、2枚のガラス基板が有機物により固着している。500℃で6h以上では有機物は十分炭化分解している。また、550℃では有機物の炭化は十分だが高温によりガラス基板が軟化し変形が見られた。また、500℃で処理時間を変えたところ、3hでは炭化が不十分であった。また、6h以上では十分炭化分解が進行しており、ガラスの変形はほとんど見られなかった。以上の検討結果と処理コストを考えると、ITO層を露出させるための仮焼処理条件は500℃、6hが最適であることが分かった。

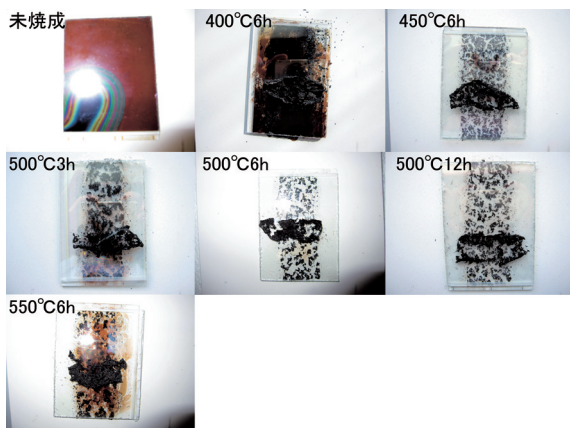


図1 仮焼後の液晶パネル

3.2 浸出条件の検討

図2に液晶パネル仮焼物のSEM像を示す。これより、ガラス基板に極薄いITO層が塗られており、各素子を電氣的に分離させている細い線状の絶縁部分も確認できる。ITO面は非常に薄く、ガラス基板の片面（内側）にしか見られないことから、インジウムの湿式回収にはITO面を露出させることが不可欠であることが確認できた。また、実験に使用した液晶パネル仮焼物のXRFによる半定量値（酸化物換算）を表1に示す。これより、酸化インジウムは液晶パネルのガラス基板全体中では0.1%以下であり、濃度が低いことが分かった。

図3に各種浸出液での濃度におけるインジウム浸出試験結果を示す。王水による12h浸出処理後の基板にはSEM/EDSによりITO層が全く検出されないことを確認した。さらに、浸出後のガラス基板には、湿式分解後の定量によりインジウムがほとんど残存していない（残存率0.2%）ことも確認できた。この時のインジウム含有量（浸出液濃度に換算してIn:52.7mg/L）を100%として各浸出液での浸出率を計算した。これより、硝酸、硫酸およびアンモニア水ではインジウムは

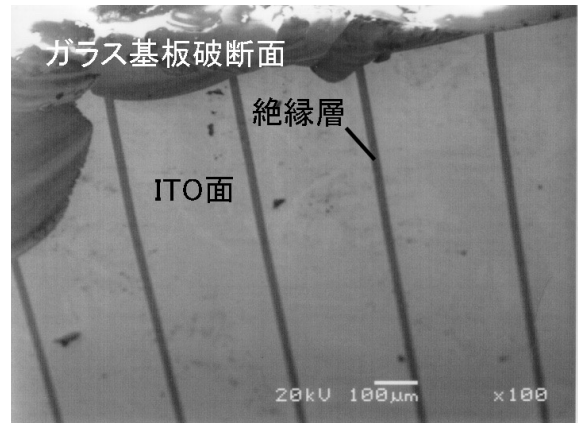


図2 仮焼後の液晶パネルの走査型電子顕微鏡写真

表1 仮焼後の液晶パネルの半定量組成

元素	%
SiO ₂	66
Na ₂ O	13
CaO	10
CO ₂	5.0
MgO	3.6
Al ₂ O ₃	1.9
K ₂ O	0.95
SO ₃	0.20
Fe ₂ O ₃	0.12
In ₂ O ₃	0.06
TiO ₂	0.05
Cl	0.04
P ₂ O ₅	0.02
SrO	0.01
ZrO ₂	<0.01
MnO	<0.01
Rb ₂ O	<0.01

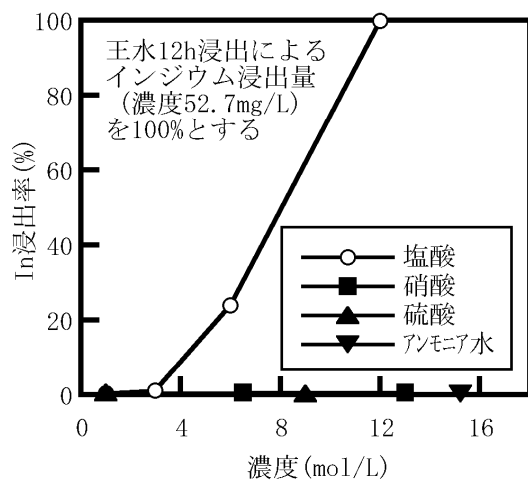


図3 インジウム浸出率に対する各種浸出液濃度の影響 (1h振とう)

浸出されないことが分かった。それに対し、塩酸は6 mol/L以上ではインジウムが浸出され、12mol/Lでは99%以上の浸出率が得られた。インジウムは硝酸塩も硫酸塩も溶解度が十分高い²⁰⁾にもかかわらず、ほとんど浸出されないのは、共存成分であるすず酸化物が塩酸以外の酸には溶解しにくいことから、ITOも同様の溶出特性を有している可能性が考えられる。一方、塩酸は、硝酸および硫酸などのオキソ酸と異なり、塩化物イオンによる錯形成能力を有しており、インジウムはヘキサクロロ錯体として溶解が促進されている^{21,22)}と考えられるが、詳細は不明である。

次に、図4に6 mol/L塩酸を用いて浸出時間を変化させた浸出試験結果を示す。この結果より、6 mol/L塩酸の場合には十分な浸出には6 h必要であることが分かった。これらの結果から、腐食性の高い塩化水素ガスが発生しやすい濃塩酸を取り扱える装置が可能ならば処理時間を短縮でき、6 mol/Lでは処理時間が必要となるが塩化水素ガスの揮発が抑えられるなど、実際の回収処理プラントでは設備コストや労働環境などを考慮してプロセスを設計することが可能である。

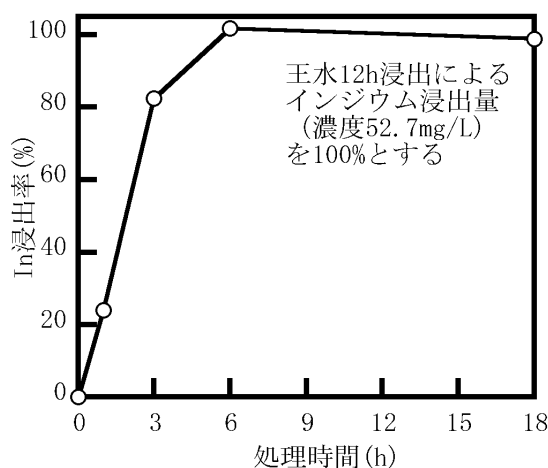


図4 インジウム浸出率に対する浸出時間の影響 (6 mol/L塩酸浸出)

3.3 沈殿回収条件の検討

実験に使用した浸出液の組成を表2に示す。この時のインジウムの浸出率は99.2%で、この固液比条件(140.82g:300mL)においても完全な浸出が達成されていることが分かった。また、浸出液のインジウム:すずの比は11程度であり、一般的なITO組成¹⁷⁾と一致している。このデータからもITO相が完全に浸出していることが示唆される。

図5にアンモニア水を用いて行った中和処理後のpHと回収率との関係を示す。インジウムは、pH6において回収率が90%を超えるが、pH8以上では急激に低下することが分かった。すずは、pH7以下では回収率が高くほぼ100%だが、pH8以上ではインジウムと同様に回収率が急激に低下する。

しかしながら、中和剤に水酸化ナトリウムを用いてpH9.0とした場合はインジウムの回収率は99.9%となった。また、他の共存元素は、けい素がpH7で40%程度沈殿に回収されてしまうことが分かったが、ほう素やアルカリ、アルカリ土類元素、重金属はいずれのpHでも回収率は20%以下と低く、回収された水酸化インジウム沈殿に混入しにくいことが分かった。それに対し、りんは、pH5~pH7では大部分が沈殿に混入することが分かった。pH8以上では主に試薬からと考えられる汚染により、溶液に残存するりん濃度が実験前の濃度を上回っており、回収率が得られなかった。

表2 液晶パネルから得られた浸出液の組成

元素	mg/L
In	144
B	77
Na	15
Zn	14
Sn	12.6
Cu	5.0
Co	2.2
P	2.3
Si	1.5
S	0.9
Mg	0.50
Ni	0.49
Ba	0.28
Fe	0.094
Mn	0.012

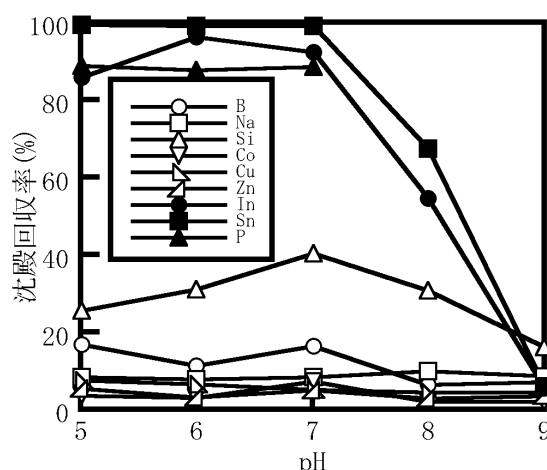


図5 各種金属の沈殿回収に対するpHの影響

インジウムおよびすずは両性金属^{19,22)}として知られており、強アルカリ性では溶解し、回収困難と考えられるのに対し、アンモニア水による中和では、強アルカリ性にならないこと

から沈殿回収率が高いと予想されるが、実際にはpHが8程度の弱いアルカリ性でも沈殿生成が阻害されている。この時、浸出に使用した非常に濃い塩酸を中和するのに、中和後の溶液には7.5mol/Lを超える極めて濃度の高いアンモニアが存在している。このため、インジウムアンミン錯体の形成が起こって沈殿生成が阻害されていると推定されるが、インジウムとアンモニアの錯形成に関する検討²²⁾はあまり行われていないことから詳細は不明である。また、インジウムとすずはアンモニア水による沈殿回収時はほぼ同じ挙動を示したことから、水酸化インジウムとすずの沈殿分離はできなかった。

一方、水酸化ナトリウムによる中和では、中和剤としてはアンモニア水に比較して安価であるが、強塩基のため沈殿生成時の適切なpHコントロールが困難で、pHが上がりすぎると容易に再溶解してしまう恐れがあり、また、得られた沈殿にはナトリウムが不純物として混入する可能性が高いことから、実際の工程では使用は難しいと考えられる。

3.4 酸化インジウムとしての回収

図6に沈殿生成後（pH7処理）焙焼した粗酸化インジウムの写真を、表3にその組成（ICP-AESによる定量値、酸化物換算）を示す。これより、酸化インジウムは61%であり、主な不純物はりんとすずで他の不純物はほとんど含まれないことが分かった。また、図7に示す回収された粗酸化インジウムのXRDチャートより、焙焼物には主成分の酸化インジウム相と少量のりん酸インジウム相が認められた。

実験に使用した液晶パネルは約143gであり、pH7で沈殿生成し得られた粗酸化インジウムの重量を液晶パネル1枚分に換算すると約109mgとなり、重量比では約1300倍に濃縮することができた。

これらの検討結果から構築された、液晶パネルからの粗酸化インジウム回収プロセスを図8にまとめて示す。

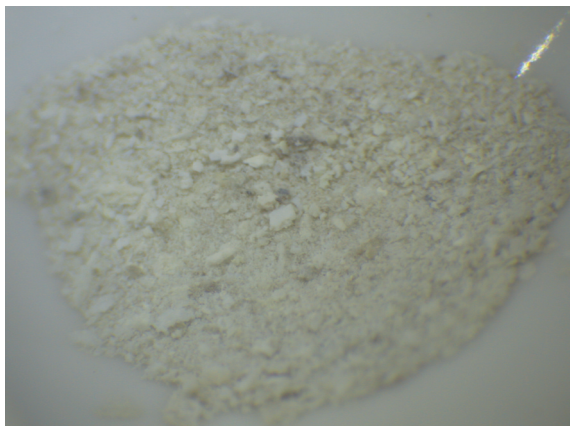


図6 得られた粗酸化インジウム

表3 得られた粗酸化インジウムの組成

元素	%
In ₂ O ₃	61
P ₂ O ₅	20
SnO ₂	6.0
ZnO	0.11
Fe ₂ O ₃	0.10
SiO ₂	0.095
CaO	0.060
Na ₂ O	0.049
SO ₃	0.037
CuO	0.034
CoO	0.015
MgO	0.011
BaO	0.008
NiO	0.002

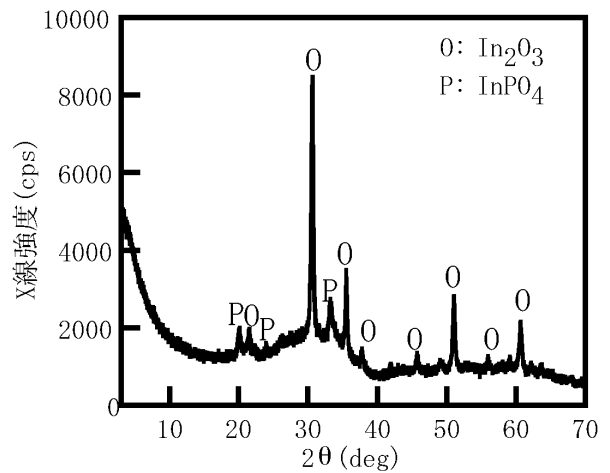


図7 得られた粗酸化インジウムのX線回折図

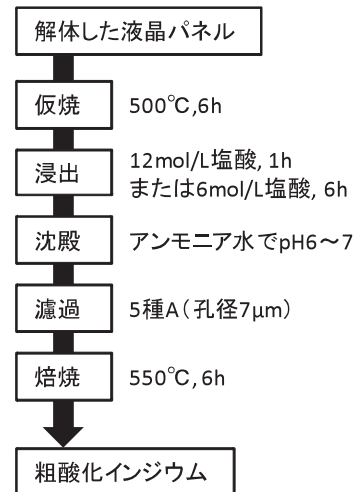


図8 粗インジウム回収プロセス

4. まとめ

廃家電に組み込まれている液晶パネルから、仮焼、酸浸出、沈殿分離、焙焼の各処理を行うことにより、粗酸化インジウムの回収プロセスの構築を目的として各種検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 複層ガラス基板の溶着を防ぎつつ、液晶をモールドしている樹脂や配向層、液晶層を分解するためには、500°C、6 hの仮焼が最適であることが分かった。
- (2) 仮焼後の液晶パネルの浸出処理には硝酸、硫酸、アンモニア水では全くインジウムが浸出されないのに対し、6 mol/L塩酸では6 h処理、濃塩酸では1 hで完全にインジウムを溶解可能であることが分かった。
- (3) 塩酸浸出したインジウムはアンモニア水によりpH 6～7にすることにより沈殿回収され、90%以上の回収率が得られた。また、主な不純物はりんおよび透明電極のすずであり、その他の元素はほとんど沈殿物に混入しないことが分かった。
- (4) 得られた粗酸化インジウムは、原料の液晶パネルに対し重量比で1300倍濃縮され、保管や輸送に有利な形態として得られることが分かった。
- (5) 以上の結果より、廃家電中の液晶パネルから粗酸化インジウムとして回収する実験室規模でのプロセスを構築した。

謝辞

本試験で使用した試験材料の液晶パネルは、北海道環境生活部循環型社会推進課循環推進グループ主催事業である北海道資源リサイクル推進会議によるイベント回収社会実験により回収されたものをお譲りいただきました。本事業関係者には、この場をお借りして感謝いたします。また、本研究で使用した純水製造システム、ICP発光分光分析装置、X線回折装置は財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 南條道夫：都市鉱山開発－包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け，東北大学選鉱精錬研究所彙報，Vol.43, No.2, pp.239-251, (1987)
- 2) 加藤秀和：7. 都市鉱山の現実とレアメタル回収の可能性，日本エネルギー学会誌，Vol.89, No.4, pp.296-301, (2010)
- 3) 山末英嗣・中島謙一・醍醐市朗・松八重一代・橋本征二・奥村英之・石原慶一：家電製品の廃棄に伴うレアメタルの潜在的拡散量評価，日本金属学会誌，Vol.72, No.8, pp.587-592, (2008)
- 4) 原田幸明：わが国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵，独立行政法人物質・材料研究機構プレス資料（平成20年

- 1月11日），(2008)
- 5) 原田幸明：レアメタル類の使用状況と需給見通し，廃棄物資源循環学会誌，Vol.20, No.2, pp.49-58, (2009)
- 6) 貴田晶子・白波瀬朋子・川口光夫：使用済みパソコン中のレアメタル等の存在量と金属分析，廃棄物資源循環学会誌，Vol.20, No.2, pp.59-69, (2009)
- 7) 中村 崇：小型家電のリサイクルー人工鉱床の展開ー，廃棄物資源循環学会誌，Vol.20, No.2, pp.70-76, (2009)
- 8) 東北経済産業局循環型産業振興課・株式会社三菱総合研究所：我が国における鉱種別 需要／リサイクル／用途等 資料，196PP., pp.174-179, (2006)
- 9) 南博志：レアメタル2007(3)インジウムの需要・供給・価格動向等，金属資源レポート，Vol.37, No.3, pp.459-464, (2008)
- 10) 白坂茂泰：インジウム，工業レアメタル，Vol.126, pp.132-133, (2010)
- 11) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構金属資源開発調査企画グループ：非鉄金属のしおりー40鉱種の紹介ー，独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構，80PP., pp.69-70, (2007)
- 12) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構金属企画調査部：鉱物資源マテリアルフロー2009，独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構，391PP., pp.281-293, (2010)
- 13) 田中一誠：レアメタルのリサイクル，科学と工業，Vol.84, No.8, pp.332-336, (2010)
- 14) 辻口雅人・土居英樹：家電メーカーのレアメタル回収リサイクルの取り組み，廃棄物資源循環学会誌，Vol.20, No.2, pp.77-84, (2009)
- 15) 本馬隆道・村谷利明：LCD廃パネルよりのマテリアル回収，シャープ技報，Vol.92, pp.17-22, (2005)
- 16) 新藤佑一朗：公開特許公報，特開2007-84432, (2007)
- 17) 鈴木八十二・古立 学・小林繁隆・筒井長徳・新居崎信也・水野谷清：よくわかる液晶ディスプレイのできるまで，日刊工業新聞社，215PP., pp.112-197, (2005)
- 18) 花形康正：モノづくり解体新書 [一の巻]，日刊工業新聞社，148PP., pp.120-123, (1992)
- 19) 加藤虎郎：標準定量分析法，丸善，927PP., pp.280-284, (1932)
- 20) 社団法人日本化学会編：化学便覧基礎編改訂5版，丸善，pp.I-231, (2004)
- 21) 中原勝儼：無機化合物・錯体辞典，講談社，1242PP., pp.832, (1997)
- 22) L. D. Pettit, K. J. Powell: IUPAC Stability Constants Database, Academic Software (<http://www.acadsoft.co.uk/>), (1993-2001)

地下水色度処理用新規ろ材の開発

浅野 孝幸, 三津橋浩行, 鎌田 樹志, 佐々木雄真, 中野 和茂*

Development of New Filter Media for Underground Water Decolorization

Takayuki ASANO, Hiroyuki MITSUHASHI, Tatsuyuki KAMATA,
Takema SASAKI, Kazushige NAKANO*

キーワード：色度, 二酸化マンガンを, コバルト酸化物, ろ材, 地下水

1. はじめに

地下水に含まれるフミン質による色度を処理する方法として、次亜塩素酸ナトリウムを添加後、二酸化マンガンを担持したろ材（二酸化マンガろ材：Mnろ材）に通水する方法が知られており、実用化されている。このろ材による色度処理機構は、二酸化マンガンの触媒作用によって次亜塩素酸あるいは次亜塩素酸イオンから生じた酸素ラジカルがフミン質を酸化分解するろ材メーカーにより説明されている。

酸素ラジカルによる酸化分解であれば、連続的に処理を継続しても処理効率は一定であり、得られる処理水の色度は変化しないと考えられる。しかしながら、連続処理実験を行った結果、徐々に処理水の色度が高くなったという報告例がある¹⁾。そこで市販二酸化マンガろ材を用いて連続処理実験を行ったところ、同様の結果が得られた。このことから、二酸化マンガろ材による色度処理機構は、酸素ラジカルによる酸化分解ではなくフミン質の吸着除去が主と推定される。

このろ材による処理水の色度が使用目的に適合しない状態になれば、一旦処理を中断してろ材を高濃度の次亜塩素酸ナトリウム液中に1日程度浸漬する再生操作が必要となる。酸素ラジカルによる酸化分解が可能な色度処理ろ材であればそのような再生操作は不要であり、維持管理上好都合である。

一方、コバルト酸化物が次亜塩素酸あるいは次亜塩素酸イオンに作用し酸素ラジカルが生じることが知られている²⁾。そこで、コバルト酸化物を担持したろ材（コバルト酸化物ろ材：Coろ材）による色度処理について検討を行い、二酸化マンガと複合化した新規ろ材（二酸化マンガ・コバルト酸化物ろ材：MnCoろ材）を試作したのでその色度処理特性を報告する。

2. 試験方法

2.1 フミン酸溶液の調製

フミン酸試薬約0.2gを0.1mol/LのNaOH溶液20mLに溶解後、水で約0.8Lに希釈してから2N硫酸でpH 8に中和し1Lとして色度約6500度の溶液を得た。この溶液をフミン質を含む地下水の模擬水として実験を行った。

2.2 色度測定

HACH社製吸光光度計DR/2000を用い、測定波長455nmでの白金コバルト標準法によった。

2.3 ろ材の調製

Mnろ材については、既報³⁾を参考として、電解二酸化マンガ微粉末を湿条件下において加熱しながら粒径約0.5mmのセラミック破砕物に転動コーティングして調製した。このほか市販のMnろ材も使用した。

Coろ材については、粒径0.5～1mmの貝化石を1wt%の塩化コバルト六水和物溶液に浸漬しておき、そこに攪拌しながら遊離塩素濃度1000mg/Lの次亜塩素酸ナトリウム溶液を加え、コバルト酸化物を析出、表面に担持させ調製した。

MnCoろ材については以下のようにして調製した。市販Mnろ材をカラムに充填し、1wt%塩化コバルト六水和物溶液をカラムに循環通水してコバルトイオンをMnろ材表面に吸着させる。次に純水をカラムに通水して吸着されていないコバルトイオンを洗い流した後、ろ材を容器に取り出し、遊離塩素濃度1000mg/Lの次亜塩素酸ナトリウム溶液を容器に加えて攪拌し、コバルトイオンを酸化物としてMnろ材表面に担持する。この操作を繰り返すことで担持するコバルト酸化物の量を増やすことができる。

* オフィスナカノ * OFFICE NAKANO

事業名：経常研究

課題名：良質な産業用水確保のための地下水処理技術の開発

2.4 ろ材のMnおよびCo担持量の測定

適量の乾燥ろ材を採り、硫酸酸性下で3%過酸化水素を添加して二酸化マンガン、コバルト酸化物を還元溶解した後一定容量とし、HACH社製吸光光度計DR/2000を用いPAN法によりMn、Co濃度を定量した。担持量は乾燥ろ材1gあたりに担持されたマンガンあるいはコバルトのmg数で表示した。

2.5 ろ材による色度処理試験

φ20mmのコック付きクロマトカラムにろ材を充填し層高を200mmとした。色度を約20度に希釈したフミン酸溶液を1Lずつ調製し、有効塩素濃度が約20mg/Lとなるよう次亜塩素酸ナトリウムを試験に供する直前に添加し、SV=10/hでカラムに通水した。

2.6 促進酸化による色度処理試験

色度を約20度に希釈したフミン酸溶液430mLを500mLシリンダーに取り、次亜塩素酸ナトリウム溶液を適量添加して紫外線ランプ(15w, λ=254nm)を挿入し照射した。照射中は攪拌のため軽くバブリングした。

3. 結果と考察

3.1 次亜塩素酸ナトリウム添加の影響

色度約20度のフミン酸溶液に遊離塩素濃度0~50mg/Lとなるよう次亜塩素酸ナトリウムを添加し、時間経過による色度の変化を調べた結果を図1に示す。次亜塩素酸ナトリウムの添加により色度が下がっているが、1時間後では5~10%、3時間後でも20%程度の低下であった。図1には示していないが、遊離塩素濃度500mg/Lにおいても30分後で5%、2時間後で30%の低下であった。これらの結果から、次亜塩素酸ナトリウムの添加だけでは短時間のうちに色度を大幅に下げる処理はできないことがわかる。

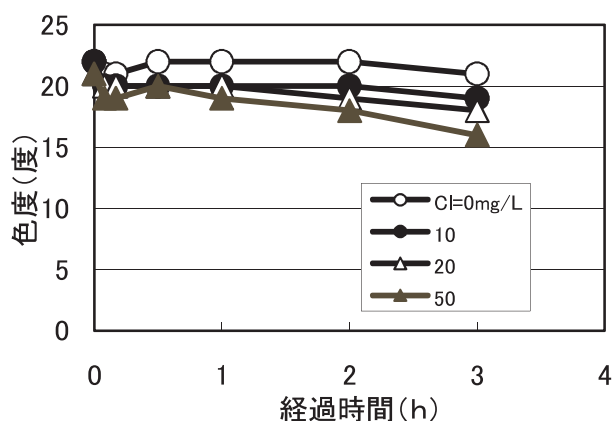


図1 次亜塩素酸ナトリウム添加の影響

3.2 促進酸化による色度処理試験

紫外線照射を開始後、30分間経過まで適宜溶液を採取して色度と遊離塩素濃度(カッコ内数値)を測定した結果を図2に示す。また、図2には純水に次亜塩素酸ナトリウムのみを添加して紫外線照射した時の遊離塩素濃度の経時変化についても示す。

次亜塩素酸ナトリウムを添加しない場合(Cl 0 mg/L)は、紫外線を照射しても色度に変化は見られない。遊離塩素濃度5 mg/L、10mg/L、20mg/Lでは色度が時間経過とともに下がっており、それぞれ、9分後に10度、13分後に7度、21分後に3度となり、以降は変化がなかった。いずれにおいても遊離塩素濃度も減少しており、色度低下が見られなくなった時点では遊離塩素がほとんど検出されなかった。

純水に次亜塩素酸ナトリウムのみを添加し紫外線照射した場合も遊離塩素は速やかに消失している。これは光反応により分解するためであり、この際、酸素ラジカルが発生するとされている⁴⁾。この酸素ラジカルはフミン酸が共存していると二重結合部などと反応し発色機能を失わせるので、このような色度低下が生じたと考えられる。

以上の結果からフミン酸による色度が約20度のとき、酸素ラジカルを発生させて色度を2~3度程度まで下げるには、遊離塩素濃度がおよそ20mg/Lとなるよう次亜塩素酸ナトリウムを添加する必要があると考えられる。

3.3 Mnろ材の色度処理特性

調製Mnろ材と市販Mnろ材による色度処理試験の結果を図3に示す。Mn担持量はそれぞれ67mgMn/gろ材、20mgMn/gろ材であった。遊離塩素濃度が約20mg/Lとなるよう次亜塩素酸ナトリウムを添加した。通水倍率は総通水量をろ材充填量(約60mL)で除した値である。図から明らかのように通水倍率が高くなるに従い処理水の色度も徐々に高くなっている。両ろ材間の比較ではMn担持量が多い調製Mnろ材のほうが処理水色度が全体に低い結果となっている。処理水中の遊離塩素濃度はいずれも1~2 mg/L程度の減少しか見られなかった。遊離塩素濃度5 mg/Lの促進酸化による処理結果では、遊離塩素をすべて消費しても処理水色度が10度までしか下がらなかった。Mnろ材による色度処理において酸素ラジカルの生成が色度低下をもたらすのであれば、1~2 mg/L程度の遊離塩素消費では処理水色度が10度以下になるとは考え難い。このことからMnろ材による色度処理の機構は、促進酸化のような酸素ラジカルによるフミン酸の分解ではなく、吸着除去によるものが主であると推定される。

次亜塩素酸ナトリウムを添加せずに市販Mnろ材による色度処理試験を行った結果を図4に示す。対比のため図3の遊離塩素濃度20mg/Lの結果を再掲してある。通水倍率400までの結果であるが、次亜塩素酸ナトリウム添加の効果がほとんど認められない。この結果も吸着除去が主な色度処理機構であることを示唆している。

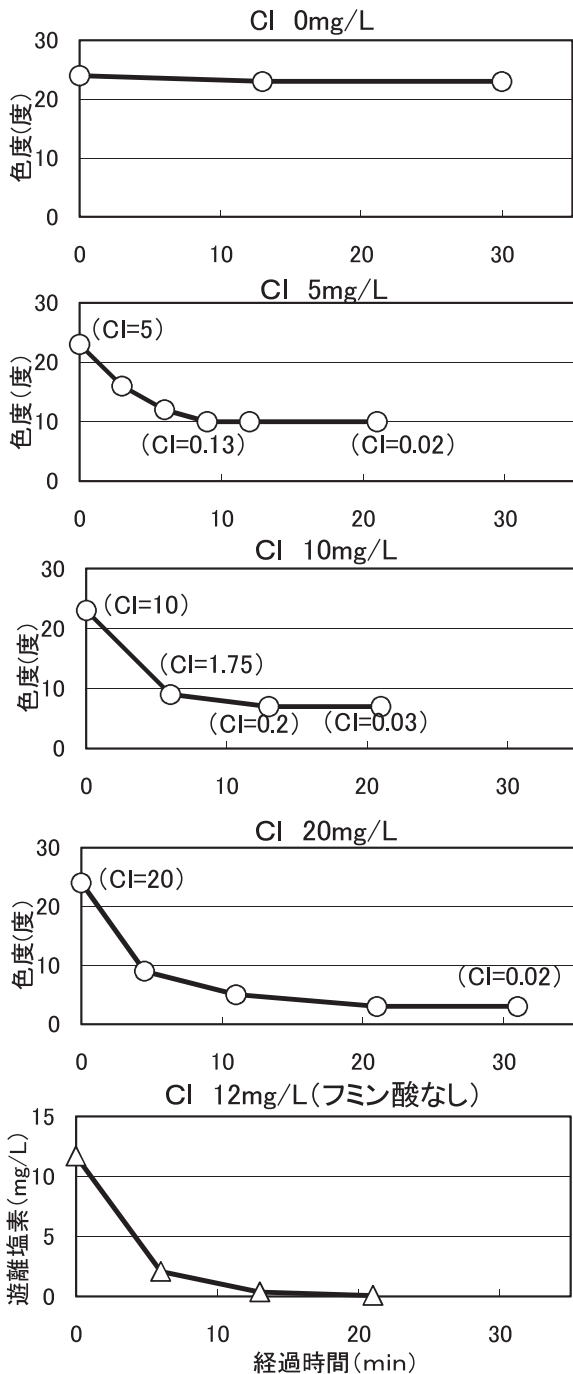


図2 促進酸化による色度処理試験結果

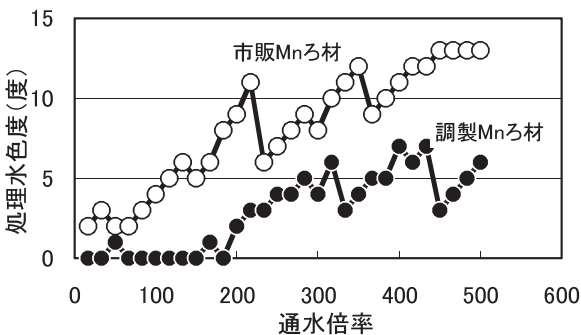


図3 Mnろ材による色度処理試験結果

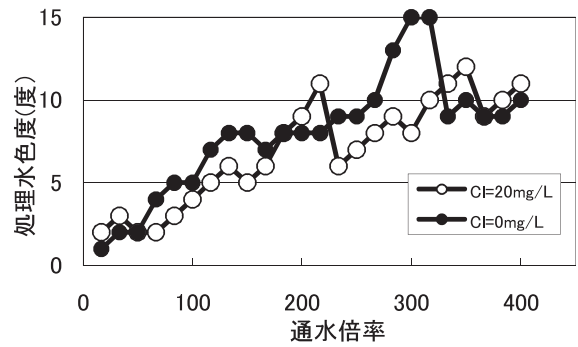


図4 Mnろ材における次亜塩素酸ナトリウム添加の効果

3.4 Coろ材の色度処理特性

Coろ材による色度処理試験の結果を図5に示す。Co担持量は2.5mgCo/gろ材でありMnろ材に比べ少量である。遊離塩素濃度が約20mg/Lとなるよう次亜塩素酸ナトリウムを添加した場合と無添加の場合を示したが、いずれもほぼ同様の処理水色度であり、通水倍率が高くなるに従い処理水の色度も徐々に高くなっている。次亜塩素酸ナトリウムを添加した試験では、処理水中の遊離塩素濃度がMnろ材とは対照的に1mg/L以下になっており、ほとんど分解されていた。しかし、次亜塩素酸ナトリウムの添加効果は認められず、Coろ材の色度処理機構も主として吸着除去と考えられる。

処理水中の遊離塩素がほとんど分解されているので、促進酸化と同様に酸素ラジカルが生成していると考えられるにもかかわらず、なぜ処理水色度の低下に寄与していないのかは不明であり今後の検討を要する。

Mn担持量20mgMn/gろ材である市販Mnろ材と比較すると、Coろ材では少量のCo担持量であるにもかかわらず処理水色度はMnろ材とほぼ同じである。コバルト酸化物の担持量を増すことでより吸着能を高めることができそうであるが、コバルトイオンのろ材への吸着、酸化を繰り返す調製操作には時間を要する。

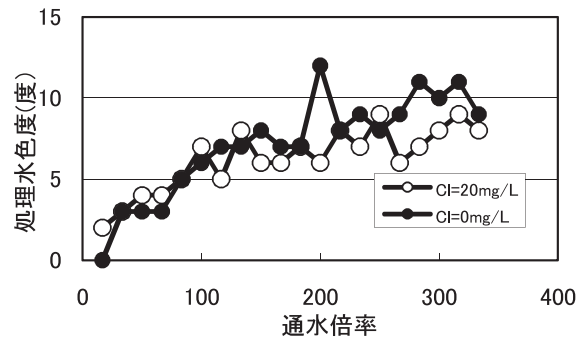


図5 Coろ材による色度処理試験結果

3.5 MnCoろ材の色度処理特性

MnCoろ材による色度処理試験の結果を図6に示す。このろ材は前出の市販Mnろ材にコバルト酸化物を担持したもの

である。Mn担持量はいずれも20mgMn/gろ材であり、Co担持量は1mgCo/gろ材と3.6mgCo/gろ材である。遊離塩素濃度が約20mg/Lとなるよう次亜塩素酸ナトリウムを添加した。通水初期の処理水色度は0度であり、通水倍率100を超えたあたりからはわずかに高くなるが、ほぼ色度2～3度の範囲で一定となっている。処理水中の遊離塩素濃度についてはCoろ材と同様、1mg/L以下でほとんど分解されており、二酸化マンガンを複合化しても影響がないことが確認された。これらの結果はいずれのCo担持量においてもほぼ同様であり、1mgCo/gろ材で十分な効果が得られることがわかる。このように、MnCoろ材による色度処理においては、Mnろ材あるいはCoろ材による処理と比べはるかに良好な結果が得られた。Mn担持量が3倍以上の67mgMn/gろ材である図3の調製Mnろ材の結果と比較しても劣っていない。

同じMnCoろ材による色度処理試験を次亜塩素酸ナトリウムを添加せずに行った結果も図6に示してある。Co担持量は1mgCo/gろ材である。次亜塩素酸ナトリウムを添加しない場合の処理水色度は、通水とともに徐々に高くなっており、この結果はMnろ材やCoろ材とほぼ同じである。すなわち、これまでのろ材においては次亜塩素酸ナトリウムを添加する効果は認められなかったが、二酸化マンガンをコバルト酸化物を複合担持することによって、大きな効果が確認された。

これはコバルト酸化物によって生成された酸素ラジカルが二酸化マンガンの吸着されたフミン酸の分解に有効に作用し、二酸化マンガンの吸着能が逐次再生されることによって長時間にわたって低い処理水色度が保たれるものと考えられる。しかし、なぜCoろ材では同様の効果が得られず、MnCoろ材においてのみこのような結果となったのかについては明らかではない。いずれにしてもMnCoろ材は、フミン酸を吸着するのみではなく、次亜塩素酸に作用して酸素ラジカルを発生させ、それによって吸着したフミン酸を分解するなど、Mnろ材、Coろ材とは異なる色度処理特性を有している。

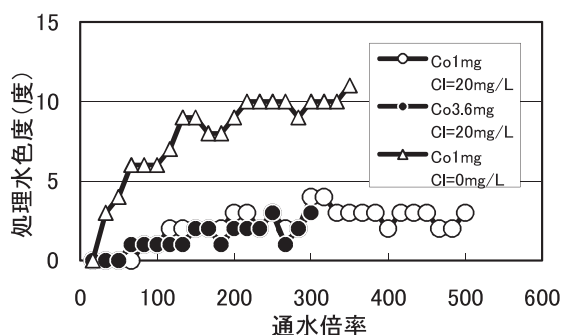


図6 MnCoろ材による色度処理試験結果

4. まとめ

地下水色度処理を目的として二酸化マンガンを、コバルト酸化物を担持したろ材を試作し、次亜塩素酸ナトリウムを添加したフミン酸溶液の色度処理特性について検討し、二酸化マンガンをコバルト酸化物を複合化した新規ろ材を開発した。以下に要約する。

- (1) 二酸化マンガンのろ材による色度処理では、次亜塩素酸ナトリウム添加の効果が認められず、遊離塩素の消費も僅かであった。このため、処理機構は酸素ラジカルによる酸化分解ではなく吸着除去が主と考えられる。
- (2) コバルト酸化物ろ材による色度処理では、遊離塩素はほとんど消費されていたが、次亜塩素酸ナトリウム添加の効果が認められなかった。このため、処理機構は酸素ラジカルによる酸化分解ではなく吸着除去が主と考えられる。
- (3) 二酸化マンガンのろ材に少量のコバルト酸化物を担持した新規ろ材による色度処理では、次亜塩素酸ナトリウム添加の顕著な効果が得られ、遊離塩素もほとんど消費されていた。二酸化マンガンの吸着と酸素ラジカルによる酸化分解により、二酸化マンガンのろ材あるいはコバルト酸化物ろ材による処理に比べ極めて良好な結果が得られたものと考えられる。

謝辞

本研究で使用した純水製造システムは財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 日本原料株式会社：カラーカッターLight技術資料
- 2) 例えば特開昭54-91961号公報「廃水の処理方法」
- 3) 特開昭60-84124号公報「浄水用濾材」
- 4) セン特殊光源㈱ ホームページ：URL <http://www.senlights.co.jp/gijyutsu/uvsokusin/uvsokusin.html>

バイオマスの物理化学的手法による前処理技術の検討

三津橋浩行, 北口 敏弘, 鎌田 樹志, 佐々木雄真,
浅野 孝幸, 松嶋景一郎, 上出 光志

Examination of Pretreatment Technology by Physicochemical Technique for Methane and Ethanol Production from Lignocelloic Biomass

Hiroyuki MITSUHASHI, Toshihiro KITAGUCHI, Tatsuyuki KAMADA, Takema SASAKI,
Takayuki ASANO, Keiichiro MATSUSHIMA, Mitsushi KAMIDE

キーワード：バイオマス有効利用, 繊維質, 前処理, メタン発酵, エタノール発酵

1. はじめに

バイオマスは再生可能かつ温室効果ガス発生量の削減に貢献するエネルギー資源として、天然ガスや石油の代替利用が期待されている。特に、農畜産廃棄物や草本類などの廃棄物系および未利用バイオマスは、食料との競合性も低いことから、メタン発酵やアルコール発酵等において、より高度利用するための技術開発が求められている。しかし、これらのバイオマスは、図1に示すように生物難分解性であるセルロースやリグニンを主成分とした繊維質を多量に含有している。そのため、発酵処理が困難であり、有機物分解率の低下や多量の発酵残渣が生じる。廃棄物系および未利用バイオマスを高度に有効利用するには繊維質を発酵処理に適した性状に分解あるいは可溶化する前処理が必要である。

繊維質の前処理方法としては様々な方法が試みられているが^{1, 2)}、廃棄物系および未利用バイオマスに対する処理条件や前処理効果（処理物の発酵特性）に関する知見はまだ少ない。本研究では道内に多く賦存する農畜産廃棄物、草本類を対象として、化学的手法であるアルカリ法と物理的手法である熱、圧力または機械的操作を組み合わせた物理化学的手法を用いて、メタン発酵およびエタノール発酵に対する適切な前処理方法を検討した。

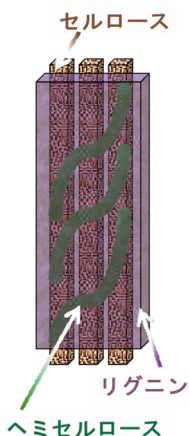


図1 繊維質

2. メタン発酵に対する前処理

2.1 試験方法

2.1.1 試料の準備

前処理試験には、未消化物や敷料等の繊維質を多く含む乳牛ふん尿メタン発酵処理施設の発酵残渣を樹脂製網（網目1.2 mm）を用いて圧搾ろ過した泥状物（図2）を試料として用いた。試料性状を表1に示したが、試料中の有機分と灰分を合わせた固形分（TS）の約89%が繊維質を含む夾雑物（SS）である。



図2 前処理試験試料

表1 前処理試験試料の性状

有機分(TVS) g/100g	灰分 g/100g	固形分(TS) g/100g	夾雑物(SS) g/100g
21.8	3.6	25.4	22.5

2.1.2 前処理試験方法

メタン発酵の前処理として、100ml耐熱広口メジウム瓶に試料を10g入れ、蒸留水または0.25mol/L NaOH水溶液（アルカリ処理）を加えて全量100mlとした試料スラリーに対し、化学的手法（アルカリ処理）と物理的手法を組み合わせた試験を行った。物理的手法としては振とう処理、水熱処理、超音波処理、高温静置処理を行った。試験条件を表2に示す。

試験後の試料スラリーを常温まで放冷後、ガラス繊維濾紙（ADVANTEC製GS-25, 保留粒子径0.6 μm）で濾過し、試料

事業名：経常研究

課題名：バイオマスの低分子化・可溶化処理による高度利用技術に関する検討

スラリーおよび濾液中の有機分（TVS）を測定した。濾過に供した試料スラリーおよび濾液の重量と有機分から有機物量を算出し、濾液中の有機物量を試料スラリー中の有機物量で除した値を可溶化率とした。

表 2 前処理試験条件

試料名	アルカリ処理	物理操作			操作時間 min
		温度	圧力	機械的	
未処理	—	—	—	—	—
振とう	—	25℃	—	120rpm	120
アルカ振とう	○	25℃	—	120rpm	120
水熱	—	121℃	0.1MPa	—	60
アルカ水熱	○	121℃	0.1MPa	—	20,40,60
超音波	—	25℃	—	20kHz,100W	20
アルカ超音波	○	25℃	—	20kHz,100W	20
アルカ高温静置	○	80℃	—	—	120,300

2.1.3 メタン発酵試験方法

前処理によるメタン発酵への効果を検討するため、前処理試験後の試料スラリー40gを乳牛ふん尿メタン発酵処理施設より入手した種汚泥200mlを投入し、図3に示す発酵試験装置を用いて中温（36℃）、バッチ法によるメタン発酵試験を行った。前処理試験でアルカリ処理を加えた試料スラリーは

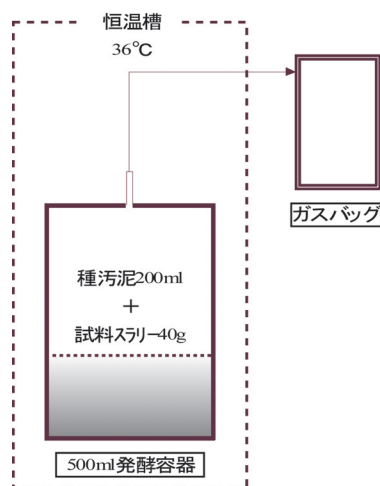


図 3 メタン発酵試験装置

硫酸を用いてpH 6-7に中和した後、投入した。試験開始時の有機物容積負荷は4g-VS/L、汚泥VS負荷比は0.4の中負荷で行い、試験開始後20日目にガスバグ中の発生ガス量を測定して発生量からメタン発酵に対する前処理効果を検討した。

2.2 試験結果

2.2.1 物理的および化学的（アルカリ）処理の効果

振とう処理、水熱処理、超音波処理とアルカリ処理の有無の組合せによる前処理後の可溶化率を図4に示した。

振とう処理による可溶化率は低く、水熱および超音波処理において可溶化率の増加が認められた。また、全ての物理的処理に対しアルカリ処理を組み合わせることにより可溶化率の増加が確認されている。しかし、水熱処理では振とうおよび超音波処理に比較してアルカリ処理を組合せた可溶化率の増加が顕著で、アルカリ水熱処理の可溶化率は90%以上と最も高い値が得られた。

振とう処理および超音波処理にアルカリ処理の組合せによる可溶化率の増加は同程度（約20ポイント）であり、各物理的処理による可溶化分とアルカリ処理の可溶化分との相加的な増加分と考えられる。アルカリ水熱処理ではアルカリ処理と熱（高温）または圧力の物理的処理が相乗的に作用し、顕著な可溶化効果が得られたと予想される。

次に熱（高温）による物理的処理とアルカリ処理との組合せ（「熱+アルカリ」）による可溶化効果を確認するため、図5にアルカリ水熱処理およびアルカリ高温静置処理における可溶化率を示した。熱以外の物理的処理を加えないアルカリ高温静置処理でも約70%の可溶化率を示しており、「熱+アルカリ」の相乗的な可溶化効果が確認された。また、アルカリ水熱処理ではアルカリ高温静置処理に比較して短時間で高い可溶化効果が得られることが認められた。

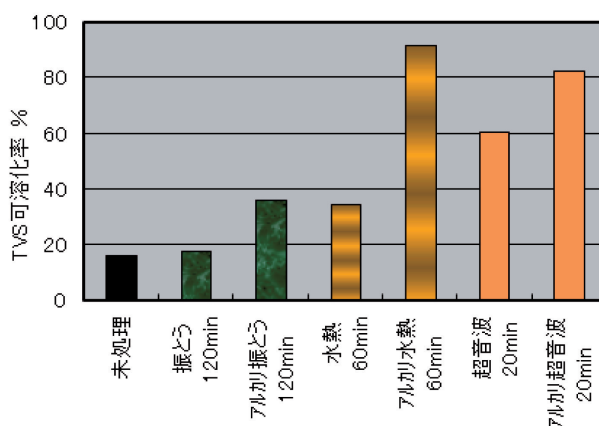


図 4 各種前処理における可溶化効果

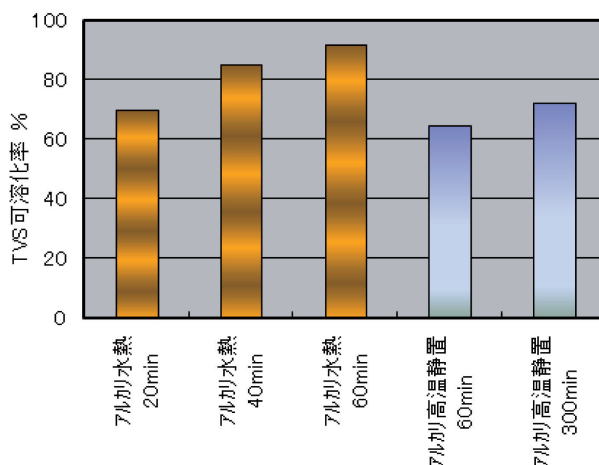


図 5 「熱+アルカリ」処理の可溶化効果

2.2.2 メタン発酵処理に対する前処理効果

前処理後の試料を用いて、中温でメタン発酵試験を行った結果を図6に示す。

水熱単独、アルカリ水熱処理およびアルカリ高温静置処理において、可溶性結果と同様のバイオガス発生量の増加が認められ、メタン発酵処理に対する前処理方法として有効であることがわかった。前処理原料の発酵残渣を入手した発酵施設では200-300ml/g-VSのバイオガスが発生しているが、「熱+アルカリ」の物理化学的処理により、ふん尿中の発酵不適物である発酵残渣分から約130ml/g-VSを回収する可能性が得られた。

一方で、アルカリ超音波処理は可溶性率は高いが、可溶性率に対するバイオガス発生量は少なく、メタン発酵処理に対する前処理効果が得られなかった。可溶性率はガラス繊維濾紙を用いた濾過後の濾液中の有機分から算出している。超音波単独処理でも可溶性率がよく(図4)、破碎、微細化により見かけ上の可溶性率が増加した可能性も考えられる。

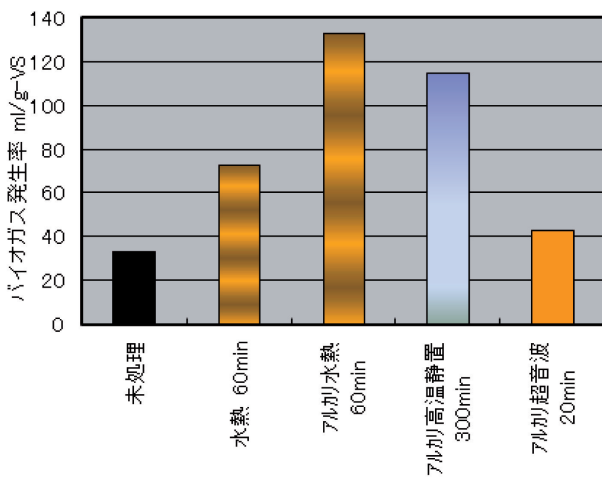


図6 前処理物のメタン発酵試験

繊維質はセルロース、ヘミセルロース、リグニンにより構成されるが、草本類を対象としたアルカリ処理によりリグニンが水可溶性により除去されると報告されている³⁾。また、加圧熱水を用いてリグニンを抽出した事例⁴⁾もある。しかし、発酵残渣の全てが繊維質と仮定しても、一般的リグニン量は10-20wt.%程度であることからリグニンの可溶性分では、「熱+アルカリ」処理における可溶性率の顕著な増加は説明できない。「熱+アルカリ」によるリグニンの溶解にともない露出したセルロースやヘミセルロースが、さらに「熱+アルカリ」作用により分解、低分子化して可溶性化し、メタン発酵によりバイオガスに転換されたものと思われる。

3. エタノール発酵前処理

3.1 試験方法

3.1.1 供試試料

エタノール発酵前処理試験の原料として未利用バイオマス

であるススキ (*Miscanthus sinensis*) および農産廃棄物である稲わらを用いた。ススキは穂部を多く含み、カッターミルでの破碎が困難であったため、105°Cで乾燥後、穂を含む茎葉部をハサミで茎方向に1cm長に切断した。稲わらは圃場で採取し、105°Cで一晩乾燥させた後、カッターミルにて破碎し、20-80meshに分級した。その後、両試料とも実験室内の温湿度環境下で一晩以上放置したものを供試試料とした。表3に供試試料の成分組成を示した。

表3 供試試料の成分組成

	有機分 wt.%					灰分 wt.%	水分 wt.%
	グルカン	キシラン	ガラクトサン	アラビナン	リグニン		
ススキ	53.1	14.0	ND	ND	22.0	4.6	6.3
稲わら	43.9	20.8	0.5	2.2	12.8	9.9	9.9

3.1.2 前処理試験方法

エタノール発酵の前処理として、図7に示す100ml耐熱広口メジウム瓶に試料を5g入れ、メタン発酵前処理試験と同様に蒸留水または0.25mol/L NaOH水溶液を加えて全量を100mlとし、高温静置処理(処理温度80°C,処理時間120min)、水熱処理(処理温度121°C,処理圧力0.1MPa,処理時間60min)、超音波処理(周波数20kHz,出力100W,処理時間20min)を加えた物理化学的前処理試験を行った。

試験後の試料スラリーは常温まで放冷後、可能な限り全量を回収し、硫酸を用いてpH 6-7に中和後、市販のPP製お茶パックにて豆絞りの要領で圧搾し、繊維質を含む固形物とスラリーに分離した。



図7 試験容器

成分の推移を検討するため

固形物の有機分、灰分、糖成分組成、リグニン分をNREL Protocol⁵⁻⁷⁾により測定した。また、スラリー中の有機分および灰分を測定した。

3.1.3 糖化試験

エタノール発酵ではグルカンから糖化生成したグルコースがエタノールに変換する。そこでエタノール発酵に対する前処理効果の検討は、酵素を用いた糖化試験により得られたグルコース収率を指標として行った。

糖化試験は前処理後の固形物をNREL Protocol⁸⁾によりセルラーゼ(Nobozyne社製50013)およびβグルコシダーゼ(Nobozyne社製50010)を用いて行い、グルコース量を測定して、グルカンに対するグルコース収率を算出した。

3.2 試験結果

3.2.1 エタノール発酵前処理

図8にススキを対象として各種前処理を行った結果を、有

機分のマスバランスで示した。ここでは、原料スキの有機分を100とし、各種前処理後の固形物のリグニンおよび糖成分、さらにスラリー中の有機分に分けて示している。

各種前処理で、糖成分が分解、低分子化によりスラリーに移動し、リグニンの多くは固形物に残存することがわかった。

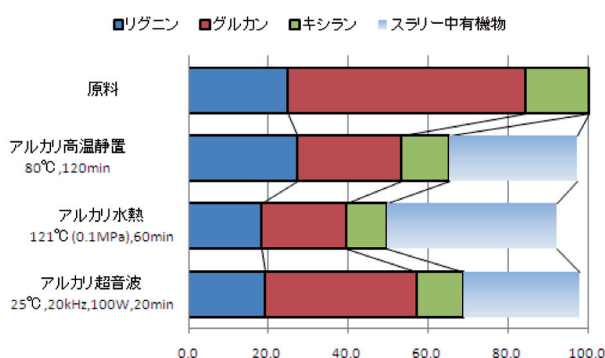


図8 原料スキに対する前処理物の有機物量およびリグニン、糖成分量

3.2.2 糖化試験

図9にスキおよび稲わらを前処理し、前処理後の固形物を酵素糖化した結果を、固形物のグルカン量に対する生成グルコース量の収率（糖化率）で示した。

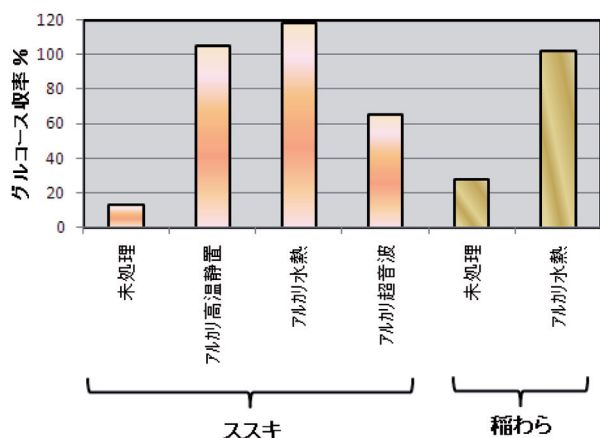


図9 前処理物の糖化試験

糖化率が100%超を示す結果がみられるが、酵素糖化に供する処理後の濾滓が図10に示すように不均一であるため、糖成分分析試料と酵素糖化試料でグルカン量が異なっていたためと思われる。アルカリ高温静置処理およびアルカリ水熱処理ではリグニンが残存しているにもかかわらず糖化率が高く、それに比べてアルカリ超音波処理ではリグニンが残存し糖化率も低い結果となった。

未処理物は、リグニンが強固にセルロースを覆って残存し、糖化が進行しない。アルカリ高温静置処理およびアルカリ水

熱処理で糖化が進行したのはリグニンが高温アルカリ水に溶解し、セルロースが露出し、酵素と接触できるようになったためと考えられる。リグニンは中性以下のpHでは不溶であることから、アルカリ処理により溶出除去された後、



図10 処理後の固形物

中和操作による析出で固形物に再付着したため、セルロースが露出した状態でリグニンが固形物に残存したと考えられる。

同じアルカリ処理でもアルカリ超音波処理ではメタン発酵に対する前処理効果と同様に破碎のみの効果であり、一部のリグニンの溶出ではセルロースの露出が少なく、糖化率が低かったと考えられる。

4. まとめ

繊維質を多く含む農畜産廃棄物、草本類を対象として、化学的手法であるアルカリ法と熱、圧力、機械的作用等の物理的処理を組み合わせた物理化学的処理を用いて、メタン発酵やエタノール発酵に適切な前処理方法を検討した。

その結果、発酵不適物である繊維質に対する前処理方法として「アルカリ+熱」を用いた物理化学的処理が最も効果的であることが認められた。「アルカリ+熱」処理による前処理効果はリグニンの水可溶化が要因と思われる。機械的操作では、振とうはアルカリ処理を加えても前処理効果が低く、超音波処理も発酵処理に対する前処理効果が得られなかった。

謝辞

本研究で使用したスキは北海道大学北方生物圏フィールド科学センター 山田敏彦教授よりご提供いただきました。なお、本研究の一部は平成21年度特別教育研究経費連携融合事業により行われました。さらに本研究で使用した純水製造システムは財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) Carlo N Hamelinck, Geertje van Hooijdonk, Andre PC Faaij: Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle-, and long term, *Biomass and Bioenergy*, 28, pp.384-410, (2005)
- 2) David I. Bransby: A Comparative Evaluation of Cellulosic Biofuel Technologies, [http://www.adeca.state.al.us/C17/ATF/Document%](http://www.adeca.state.al.us/C17/ATF/Document%20)

20Library/Cellulosic%20Biofuel%20Technologies.pdf,
(2007)

- 3) Toyama N, Ogawa K, and Toyama H: The Royal Society of Canada International Symposium on Ethanol from Biomass, p.570-621 (1982)
- 4) 安藤浩毅, 古川郁子, 神野好孝, 坂本剛, 植村芳三, 幡手泰雄: 加圧熱水を用いた木質バイオマスの分解挙動, 鹿児島県工業技術センター研究報告, 14 (2000)
- 5) NREL Biomass Analysis Technology Team: Laboratory Analytical Procedure "Determination of Total Solids in Biomass"
- 6) NREL Biomass Analysis Technology Team: Laboratory Analytical Procedure "Determination of Carbohydrates and Lignin in Biomass"
- 7) NREL Biomass Analysis Technology Team: Laboratory Analytical Procedure "Determination of Ash in Biomass"
- 8) NREL Biomass Analysis Technology Team: Laboratory Analytical Procedure "Enzymatic Saccharification of Lignocellulosic Biomass"

ポリ乳酸と石油系プラスチックの屋外暴露試験

吉田 昌充, 山岸 暢, 大市 貴志, 金野 克美

Outdoor Weathering Test of Polylactic Acid and Petroleum-based Plastics

Masamitsu YOSHIDA, Tohru YAMAGISHI,
Takashi OHICHI, Katsumi KONNO

キーワード：バイオマスプラスチック, ポリ乳酸, 耐候性, 屋外暴露試験

1. はじめに

近年, 原油枯渇や環境負荷への懸念や配慮から, 再生可能な資源を活用した循環型社会の構築が求められている。トウモロコシなどから得られるデンプンを原料としたポリ乳酸は, バイオマスを原料としたプラスチックを代表する材料のひとつである。

ポリ乳酸は, 最近では袋やフィルムをはじめとする用途に使われており, 今後, 更なる利用拡大が期待されている^{1)~4)}。ポリ乳酸を耐久性が必要な用途への利用を考えた場合, 耐候性などの耐久信頼性が求められる。

本報では, ポリ乳酸を屋外暴露したときの機械的強度や色調の経時変化を測定し, 石油系プラスチックとの比較評価した結果を報告する。

2. 試験方法

2.1 材料

試験に使用したプラスチック材料は, バイオマスプラスチックのポリ乳酸には標準グレードと耐久グレードの2種類であり, 比較試料として, 石油系プラスチックのポリプロピレン (PP), 高密度ポリエチレン (HDPE), ポリスチレン (PS), アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン共重合体 (ABS) の4種を使用した。表1に, 各樹脂の概要を示した。なお, ポリ乳酸の耐久グレードは, 同標準グレードと比較し比重が大きく, 材料全体に含まれるバイオマス由来成分 (バイオマスプラスチック度) が65.0%であることから⁵⁾, フィラーを充填した材料と推察される。

2.2 試験片の調製方法

屋外暴露試験に使用した試験片は, 後述の引張試験用とし

て, JIS K 7113に準拠した2mm厚さの1号形試験片と同じく後述の曲げ試験用試験片 (2mm厚さ×25mm幅×120mm長さ)を採用した。

表1 使用したプラスチック材料

材 料	メーカー	グレード	備 考
ポリ乳酸 標準グレード	ユニチカ(株)	テラマック TE-2000	比重:1.25
ポリ乳酸 耐久グレード	ユニチカ(株)	テラマック TE-8300	比重:1.47
ポリプロピレン (PP)	(株)プライムポリマー	プライムポリプロ J715M	ブロック 共重合体
高密度ポリエチレン (HDPE)	日本ポリエチレン(株)	ノバテックHD HJ560	—
アクリロニトリル・ブタジエン・ スチレン共重合体(ABS)	日本エイアンドエル(株)	クララスチック GA-501	—
ポリスチレン (PS)	日本ポリスチレン(株)	G430	一般用

各種試験片の調製は, 以下のように行った。ポリ乳酸標準グレードは, 着色剤を添加しないナチュラル色の試験片と白色及び黒色に着色した試験片を調製した。白色に着色した試験片は, 酸化チタン系着色剤マスターバッチ (大日精化工業(株)製BR-RM MK1459)を使用した。これを試験片中の白色顔料含有量が2.5質量%になるよう射出成形時にベース樹脂に配合して調製した。黒色に着色した試験片は, カーボンブラック系粉末状着色剤 (東京インキ(株)製PF AB36-75K3)を使用した。この着色剤が10質量%になるように2本ロールを用いて溶融混練・粉碎したものをマスターバッチとした。これを用いて試験片中の黒色顔料含有量が0.5質量%になるよう配合して射出成形した。なお上記ポリ乳酸標準グレードのナチュラル色試験片及び白色・黒色着色試験片の射出成形は, シリンダ温度210~220℃, 金型温度30℃に設定して行った。

事業名：経常研究

課題名：バイオマスプラスチックの耐久性改良に関する研究

ポリ乳酸耐久グレードは、着色剤を添加しないナチュラル色のままで射出成形（シリンダ温度200～210℃設定、金型温度30℃設定）した後、100℃で15分間の加熱処理によりポリ乳酸を結晶化させた。

PP, HDPE, PS, ABSは、着色剤を添加しないナチュラル色のままで射出成形を行い、試験片とした。

2.3 屋外暴露試験

屋外暴露試験は、JIS K 7219に準拠し、北海道立総合研究機構 工業試験場屋上（北緯43° 4' 51"，東経141° 20' 15"）において実施した。試験片の向きは南向き、水平に対する仰角は45°とした。図1に試験状況を示した。試験期間は平成21年2月から平成23年2月までの24ヵ月とし、試験片は1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21及び24ヵ月後に採取した。採取した試験片は、水洗し表面の水分を拭った後、温度23±2℃、相対湿度50±10%の雰囲気下に150時間以上放置した。その後、引張試験、曲げ試験、色調変化の測定を行った。

また屋外暴露試験時の気象データは、気象庁ホームページより入手した。図2に、札幌の月平均気温及び降水量月合計を示した。なお、試験期間中の年間を通した平均気温は9℃、平均年間降水量は1235mmであった。



図1 屋外暴露試験（札幌市内 工業試験場屋上）

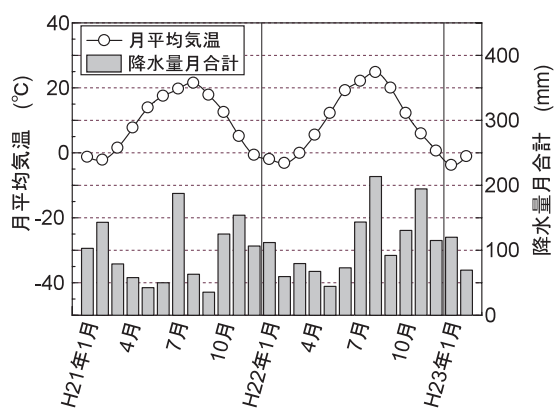


図2 屋外暴露試験地（札幌市）の気象

2.4 引張試験

引張強さの評価は、JIS K 7113に準拠して行った。引張試験は、万能材料試験機（株式会社島津製作所製オートグラフAG-250kND）を用いて試験速度5 mm/min、試験片数は暴露前が5片、暴露時後が3片とした。引張強さは、単位断面積あたりの破断荷重から算出した。引張強さ保持率は、暴露試験前の引張強さを100として百分率で表した。

2.5 曲げ試験

曲げ強さと曲げ弾性率の評価は、JIS K 7171を参考にして行った。曲げ強さは、万能材料試験機を用いて支点間距離は40mm、試験速度は1 mm/min、試験片数は暴露前が5片、暴露時後が3片とした。屋外暴露時に太陽光が直接当たっていた面側に引張の力がかかる向きで、3点曲げ試験を行った。曲げ強さ及び曲げ弾性率の保持率は、暴露前を100としてそれぞれ百分率で表した。

2.6 色調変化

色調の変化は、JIS Z 8722に準拠し、色彩色差計（株式会社ミノルタカメラ製CR-200）を用いて屋外暴露前後の試験片について測定した値から、屋外暴露前に対する色差 ΔE^*_{ab} として算出した（JIS Z 8730に準拠）。なお、測定はC光源で、白色校正板（L*97.8, a*-0.41, b*1.80）上に試験片を置いて行った。

3. 試験結果

3.1 ポリ乳酸、石油系プラスチック（ナチュラル色試料）の経時変化

図3に、ナチュラル色のポリ乳酸標準グレードと各種石油系プラスチックの暴露時間と引張強さ保持率の関係を示した。何れの材料も屋外暴露時間が長くなると、引張強さ保持率が低くなる傾向を示した。ポリ乳酸は屋外暴露24ヵ月では、暴

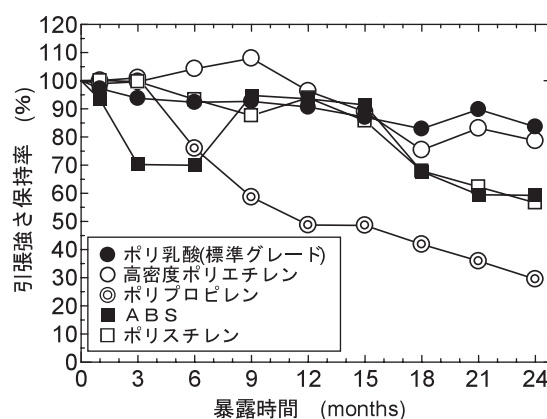


図3 各種プラスチック（ナチュラル色）の引張強さの経時変化

露前の84%の引張強さ保持率があった。ポリ乳酸は石油系プラスチックのPPやABS, PSに比べ引張強さ保持率が高く、経時変化が小さい傾向を示した。今回比較の材料の中では、PPが最も引張強さ保持率の低下傾向が大きかった。

図4に、ナチュラル色のポリ乳酸標準グレードと各種石油系プラスチックの暴露時間と曲げ強さ保持率の関係を示した。何れの材料も屋外暴露時間が長くなると、曲げ強さ保持率が低くなる傾向を示した。ポリ乳酸は屋外暴露24ヵ月では、暴露前の73%の曲げ強さ保持率があった。ポリ乳酸は石油系プラスチックのPPやPSに比べ曲げ強さ保持率が高く、経時変化が小さい傾向を示した。今回比較の材料の中では、PPが最も曲げ強さ保持率の低下が大きかった。

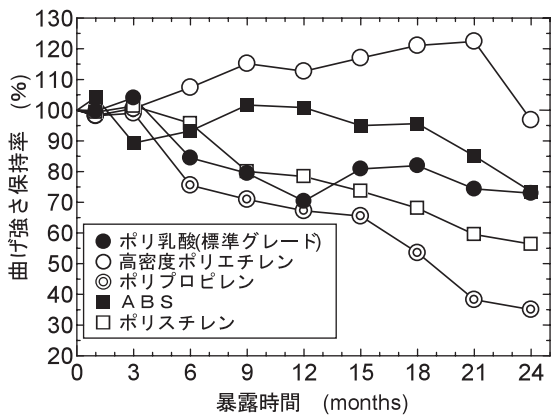


図4 各種プラスチック（ナチュラル色）の曲げ強さの経時変化

図5に、ナチュラル色のポリ乳酸標準グレードと各種石油系プラスチックの暴露時間と曲げ弾性率保持率の関係を示した。屋外暴露24ヵ月では、ポリ乳酸やPSは曲げ弾性率に大きな変化は見られなかったが、PPでは大きな経時変化が認められた。

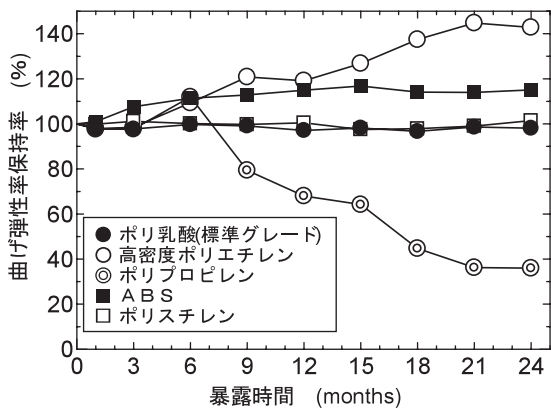


図5 各種プラスチック（ナチュラル色）の曲げ弾性率の経時変化

図6に、ナチュラル色のポリ乳酸標準グレードと各種石油系プラスチックの暴露時間と色調変化の関係を示した。何れ

の材料も屋外暴露することで色調の変化が見られた。ポリ乳酸の色調変化は、屋外暴露24ヵ月でPSに比べ小さく、HDPEやPP, ABSに比べ大きかった。

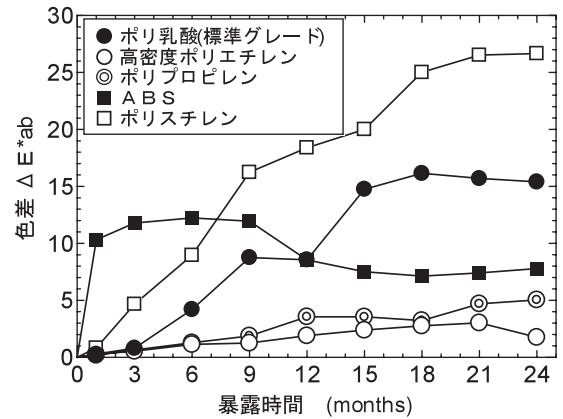


図6 各種プラスチック（ナチュラル色）の色調の経時変化

図7に、ナチュラル色のポリ乳酸と各種石油系プラスチックの暴露前と24ヵ月暴露した試験片の色調変化を示した。ポリ乳酸標準グレードは、暴露前は透明な状態であったが、24ヵ月暴露では白濁した状態となった。この白色化現象は、ポリ乳酸の結晶化に起因するものと推察される。またABSやPSは目視でも色調が黄色に大きく変化することが確認された。

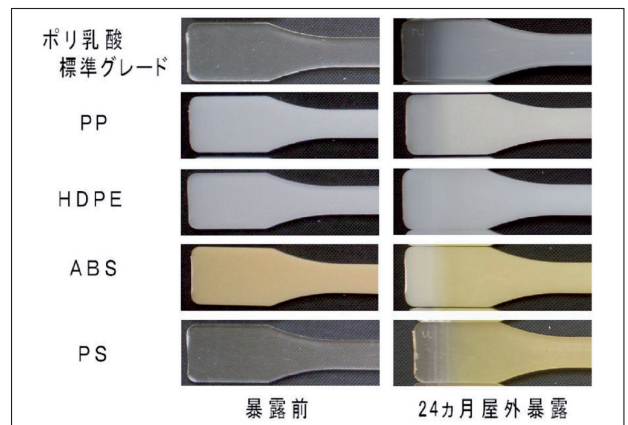


図7 各プラスチック（ナチュラル色）の屋外暴露試験前後の色調

3.2 着色したポリ乳酸の経時変化

白色及び黒色に着色したポリ乳酸標準グレードについて屋外暴露経時変化を調べた。図8に、ポリ乳酸標準グレードの着色なしのナチュラル色及び白色・黒色の暴露時間と引張強さ保持率の関係を示した。屋外暴露24ヵ月では、白色や黒色に着色した方がナチュラル色のものに比べ引張強さ保持率が高く、経時変化が少ない傾向を示した。

図9に、ポリ乳酸標準グレードの着色なし（ナチュラル色）と白色・黒色の暴露時間と曲げ強さ保持率の関係を示した。

屋外暴露24ヵ月では、白色や黒色に着色した方がナチュラル色のものに比べ、曲げ強さ保持率が高く経時変化が少ない傾向を示した。

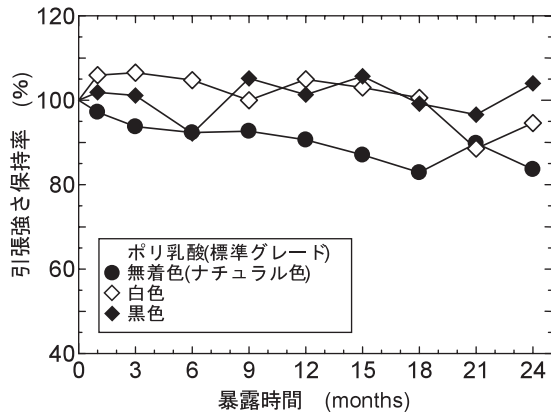


図8 ポリ乳酸着色時の引張強さの経時変化

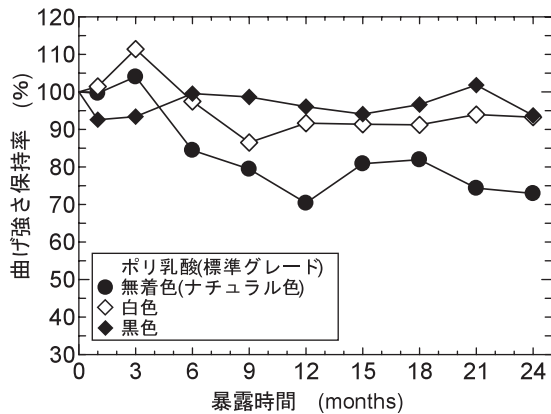


図9 ポリ乳酸着色時の曲げ強さの経時変化

図10に、ポリ乳酸標準グレードの着色なし（ナチュラル色）と白色・黒色の暴露時間と曲げ弾性率保持率の関係を示した。屋外暴露24ヵ月では、白色・ナチュラル共に、曲げ弾性率保持率に、大きな経時変化は認められなかった。

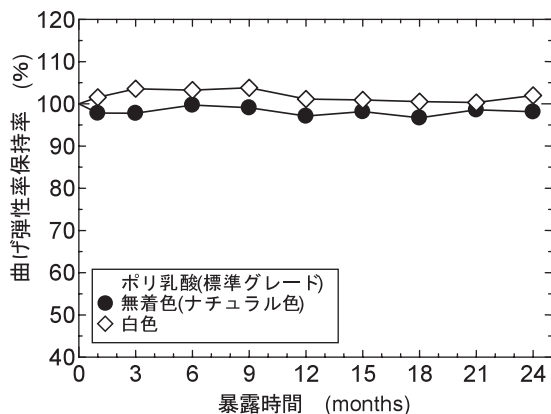


図10 ポリ乳酸着色時の曲げ弾性率の経時変化

図11に、ポリ乳酸標準グレードの着色なし（ナチュラル色）と白色・黒色の暴露時間と色差の関係を示した。白色や黒色に着色した方がナチュラル色に比べ、色調変化が小さく、特に黒色が小さかった。

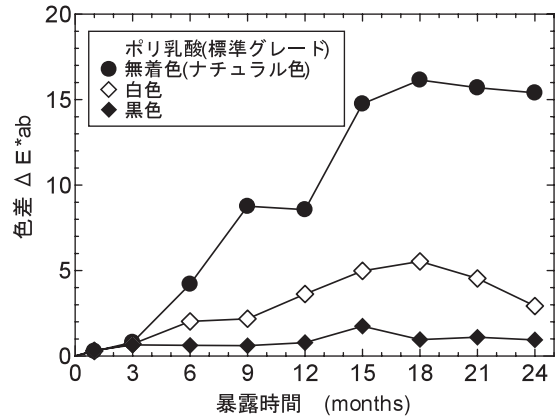


図11 ポリ乳酸着色時の色調の経時変化

今回使用した着色剤は、白色及び黒色共に各種石油系プラスチックの着色に幅広く使われている⁶⁾。ポリ乳酸を白色や黒色に着色することで無着色のナチュラル色に比べ色調の経時変化が小さく良好になると共に引張強さや曲げ強さの経時変化も小さくなる結果となった。これは白色・黒色の試験片では、着色剤の隠蔽性により試験片の深さ方向での劣化が抑制されたためと考える。

なお、屋外暴露試験中に、ポリ乳酸標準グレード黒色試験片は屋外暴露試験中に太陽光による熱変形が見られた（図12参照）。ポリ乳酸は耐熱性が悪く、黒色にすることで熱の吸収のため熱変形したと思われる。このような状況はナチュラル色・白色及び前項と比較したPP, HDPE, ABS, PSでは観察されなかった。



図12 ポリ乳酸黒色試験片の屋外暴露状況

3.3 ポリ乳酸耐久グレードの経時変化

ポリ乳酸耐久グレードの屋外暴露経時変化を調べた。

図13に、ポリ乳酸耐久グレードの暴露時間と引張強さ保持率の関係を示した。耐久グレードは屋外暴露時間が長くなると引張強さが低下する傾向にあり、24ヵ月では75%の保持率を示した。その傾向は、標準グレードと同様であった。

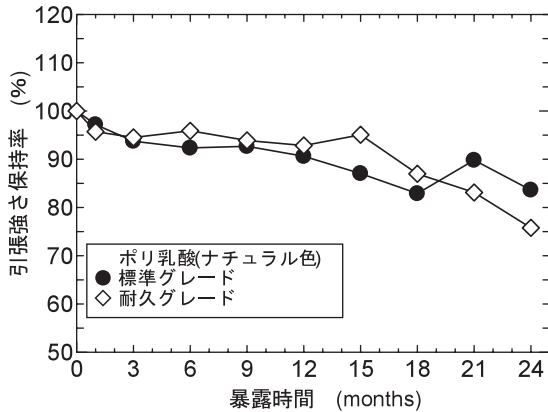


図13 ポリ乳酸耐久グレードの引張強さの経時変化

図14に、ポリ乳酸耐久グレードの暴露時間と曲げ強さ保持率の関係を示した。曲げ強さについても、耐久グレードは屋外暴露時間が長くなると強さが低下する傾向にあり、24ヵ月では56%の保持率を示し標準グレードに比べ低下傾向が大きかった。

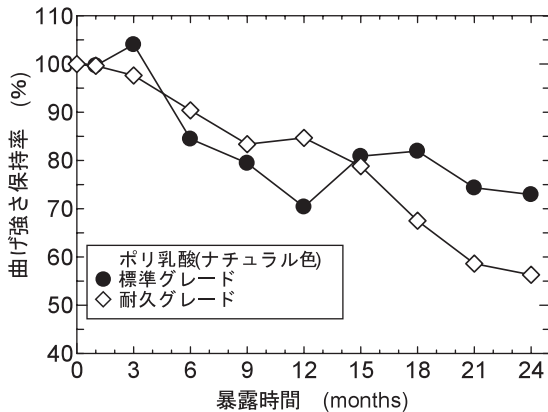


図14 ポリ乳酸耐久グレードの曲げ強さの経時変化

図15に、ポリ乳酸耐久グレードの暴露時間と曲げ弾性率保持率の関係を示した。

耐久グレードは屋外暴露時間が長くなると曲げ弾性率が低下する傾向を示し、24ヵ月では79%の保持率となり、標準グレードに比べ低下傾向が大きかった。

図16に、ポリ乳酸耐久グレードの暴露時間と色差の関係を示した。耐久グレードは経時と共に色調の変化が大きくなる傾向にあったが、標準グレードに比べ色差は小さい傾向にあった。

以上の結果より、ポリ乳酸耐久グレードは標準グレードに比べ屋外暴露したときの色調変化は小さいものの、機械的

性の保持率は劣る結果となった。ポリ乳酸耐久グレードについても標準グレードと同様に白色や黒色に着色することで、機械的特性の保持や色調変化の低減を図ることが可能ではないかと推察する。

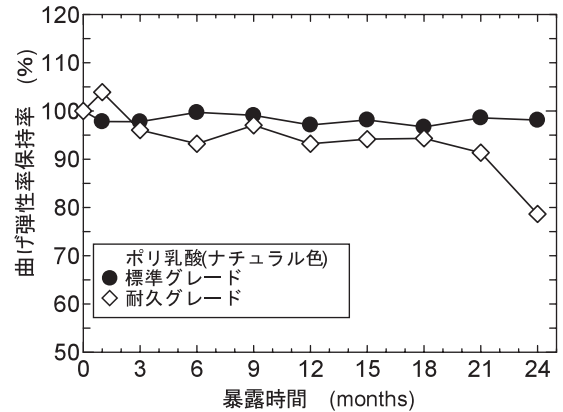


図15 ポリ乳酸耐久グレードの曲げ弾性率の経時変化

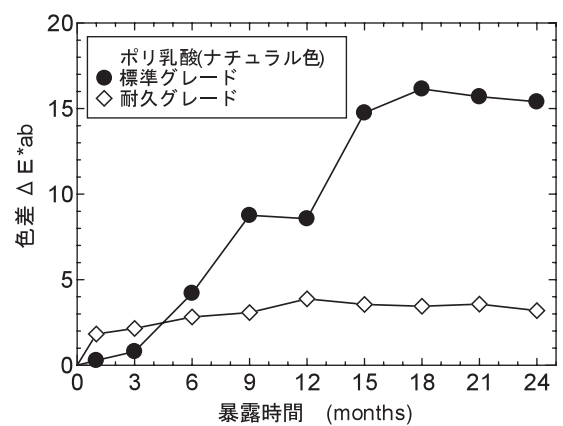


図16 ポリ乳酸耐久グレードの色調の経時変化

4. まとめ

バイオマスプラスチックのポリ乳酸と石油系プラスチックの屋外暴露試験を行った結果、次の結論が得られた。

- (1) フィラーを充填しないナチュラル色のポリ乳酸標準グレードと各種石油系プラスチックを比較した場合、ポリ乳酸はポリプロピレンよりも経時の機械的特性保持率が高く、ポリスチレンよりも経時の色調変化が小さいことがわかった。
- (2) ポリ乳酸標準グレードを白色や黒色に着色することで屋外暴露時の機械的特性の低下や色調変化を小さくし、耐候性を向上できることがわかった。
- (3) フィラーを充填したポリ乳酸耐久グレードについても屋外暴露試験を行い、その経時の機械的特性や色調変化の挙動を明らかにした。

謝辞

本研究を進めるに当たり、着色剤試料を提供いただいた大日精化工業㈱、東京インキ㈱に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 西谷吉憲ほか：循環型社会に適応するプラスチックリサイクル/バイオマスプラスチック，プラスチック，Vol.57 No.11，pp.9-41，(2006)
- 2) 猪股勲ほか：環境とリサイクル/バイオマスプラスチックの最新動向，プラスチックエージ，Vol.53 No.12，pp.65-110，(2007)
- 3) 猪股勲ほか：ここまできたバイオマスプラスチック—技術動向と普及の課題を探る，工業材料，Vol.56 No.2，pp.17-77，(2008)
- 4) 植物由来プラスチックの高機能化とリサイクル技術，サイエンス&テクノロジー，(2007)
- 5) 日本バイオマスプラスチック協会ホームページ，
URL http://www.jbpaweb.net/bp/bp_pl.htm
- 6) 増補プラスチックおよびゴム用添加剤実用便覧，化学工業社，pp.791-843 (1987) ほか

放電プラズマ焼結法によるタングステン低減硬質材料の開発

中嶋快雄, 田中大之, 宮腰康樹, 高橋英徳, 相山英明, 工藤和彦

The Development of Hard Material reduced Tungsten by Spark Plasma Sintering

Yoshio NAKAJIMA, Hiroyuki TANAKA, Yasuki MIYAKOSHI,
Hidenori TAKAHASHI, Hideaki AIYAMA, Kazuhiko KUDOH

キーワード：放電プラズマ焼結法, 希少金属

1. はじめに

1.1 研究の背景

ものづくり産業を支える重要な物質であるタングステン(W)は、国内需要のほとんどを輸入に依存する希少金属である。その供給リスクの高さのため、国のレアメタル備蓄物質に登録されるとともに、代替技術・使用量低減技術が望まれている。

超硬合金は、ものづくり産業を支える基盤材料の1つで、工具等の材料となる。その組成は、硬質材料である炭化タングステン(WC)を主成分とし、コバルト(Co)を結合材とするのが一般的であり、各成分原料の粉末を焼結することにより作られる粉末焼結材料である。

WCの他に硬質な炭化物としては、炭化けい素(SiC)が挙げられる。これはWCに比べ、軽量・高硬度という特長を持ち、また熱伝導率が高い¹⁾が、焼結温度が高く、ホットプレス等の一般的な外部加熱による焼結法では高密度な焼結体を得るのが困難である²⁾。

粉末焼結法の1つである「放電プラズマ焼結法(SPS法)」は、通電加熱によって短時間で高温を実現できる特長がある焼結法であり、当時はSPS法に関して多くの知見を有し、過去に傾斜組成超硬合金の製造方法を開発し製品化した実績がある³⁾。

1.2 研究の目的

本研究では、SPS法を用い、超硬合金のWCの全部または一部をSiCに置き換えたタングステン低減硬質材料の作製条件を把握することを目的とした。具体的には、開発の基準材料としてWC-10mass%Co合金を選び、このWCの一部または全部をSiCで置換した混合粉末をSPS法により焼結し、その焼結条件を検討し、焼結体の評価を行った。

事業名：経常研究

課題名：放電プラズマ焼結法によるタングステン低減硬質材料の開発

2. 実験方法

2.1 粉末の混合

基準材料として選んだWC-10mass%Co合金のうち、WCが占める体積の一部または全部(10,20,50および100vol%)をSiCで置換するように混合比を定め、遊星ボールミルで原料粉末を混合した(図1)。なお、WC粉末は $2.5\mu\text{m}$ 、SiC粉末は $2\sim 3\mu\text{m}$ 、Co粉末は $0.5\mu\text{m}$ のものを用いた。

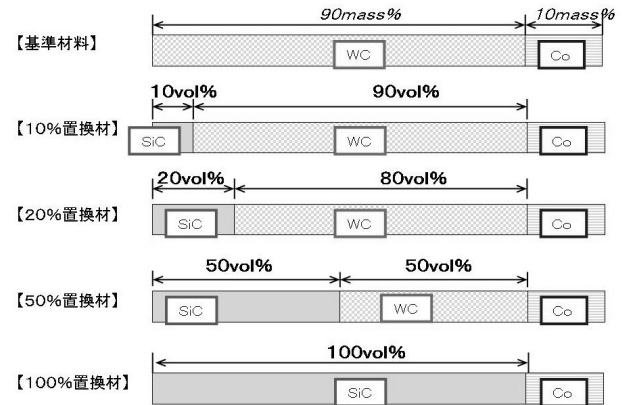


図1 粉末の混合比

以下、試作材を置換率に応じて「□□%置換材」と称する。

2.2 焼結

焼結はSPS法を用いた。SPS法は、原料粉末を導電性のある型(ダイ・パンチから成る)に充填し、加圧しながら通電することにより原料粉末に発生するジュール熱を利用して昇温し、焼結するというものである。図2にSPS法の主な工程を示す。

本研究では、内径 $\phi 30\text{mm}$ の黒鉛製ダイ・パンチに粉末を充填し、焼結条件は加圧力 20.0kN 、保持時間 180sec として、ダイ表面温度を $1448\text{K}\sim 1573\text{K}$ の範囲で変えて焼結した。

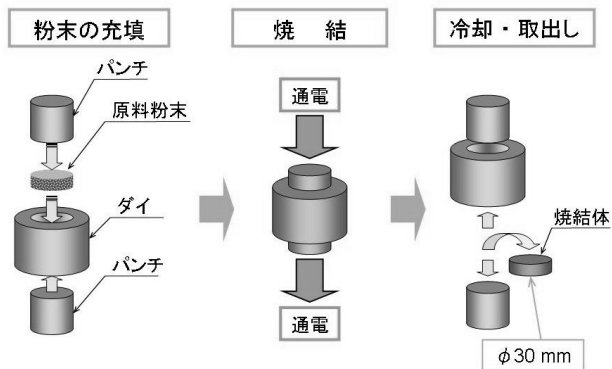


図2 SPS法の主な工程

WC-Co系合金等は、焼結の過程で一旦液相が生成することが知られている（液相焼結とよばれる）。一般に液相焼結では、焼結温度を高くするにしたがって焼結体の密度が高くなるが、ある温度を超えると液相が溶出し、所望の成分の焼結体を得ることができなくなる。したがって、この溶け出す直下の温度がその成分における最適焼結温度となる。

2.3 焼結体（機械的性質）の評価

得られた焼結体について、硬さ試験およびすべり摩耗試験を行った。硬さ試験は、ロックウェル硬さ計（Aスケール）を用いた。

摩耗試験は、すべり摩擦による耐摩耗性を評価するため、大越式迅速摩耗試験機によるすべり摩耗試験を実施した。この試験方法は、平板状の供試材に回転円板を一定荷重で押付けながら、一定距離をすべらせ、摩耗減量を測るものである（図3参照）。摩耗減量の指標は、図4の式にある「比摩耗量」が用いられる。これは、単位摩擦距離・単位荷重あたりの摩耗体積を意味するので、比摩耗量が少ない程、耐摩耗性に優れていることを表す。

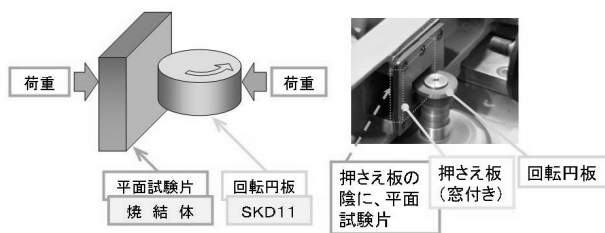


図3 すべり摩耗試験

本研究では、材料同士の相対比較を目的としたため、試験条件は、摩擦速度のみを0.054, 0.94, 3.62m/secと変えて、他の条件は、回転円板SKD11, 摩擦距離600m, 荷重124 N, 潤滑油なし、と一定にした。

比摩耗量 W_s :
$$W_s = \frac{B \times b_0^3}{4D \times P_0 \times I_0} (\text{mm}^3 / (\text{mm} \cdot \text{kN}))$$

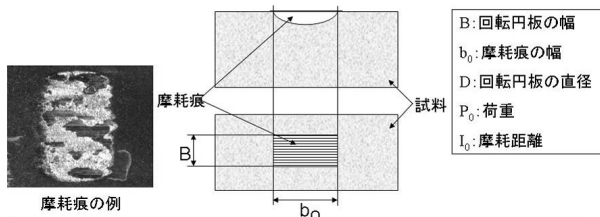


図4 比摩耗量

また、比摩耗量算定のために摩耗痕の外観を実体顕微鏡で拡大観察・摩耗痕幅の測定をした他、必要に応じて摩耗粉を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察し、X線微小部分分析装置（EDS）で元素分析を行った。

3. 結果および考察

3.1 最適焼結温度

焼結温度における液相溶出の有無および焼結体の硬さから、各混合成分ごとに最適焼結温度を検討した結果、それぞれの温度は10, 20, 50および100vol%の順に1548, 1473, 1448および1533Kであった。以下、「□□%置換材」は、この最適焼結温度により得られた焼結体であることを指すものとする。

3.2 焼結体の組織

図5に各焼結体の断面組織を示す。暗いコントラストとして観察されるのがポア（空孔）である。SiC置換量が増加するにつれて、ポアが多くなるのが認められた。

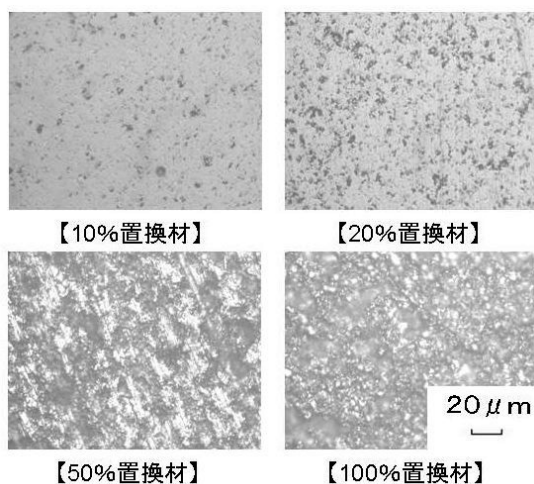


図5 焼結体の断面組織（エッチングなし）

表1に、図5に示した各焼結体の断面を画像処理することにより算出した気孔率を示す。最も焼結状態が良好な10%置

換材においても、気孔が5.8%存在する結果となっている。これは、SiCがWCに比べ、結合相であるCoとのぬれ性が悪いことに起因すると考えられる。焼結保持時間、結合相成分および添加剤のさらなる検討が必要と考える。

表1 各焼結体の気孔率

試料	【10%置換材】	【20%置換材】	【50%置換材】	【100%置換材】
焼結温度 (K)	1548	1473	1448	1533
気孔率 (%)	5.8	15.3	64.3	92.7

3.3 焼結体の硬さ

図6に、各々の置換率において最適焼結温度で得られた焼結体の硬さを示す。10%置換材および20%置換材は、基準材料と同等の硬さを有する焼結体を得られているが、50%置換材および100%置換材は、十分な硬さが得られていない。これは、両試料の焼結状態が図5および表1に示したとおり、極めて低い充填率だったことによる。

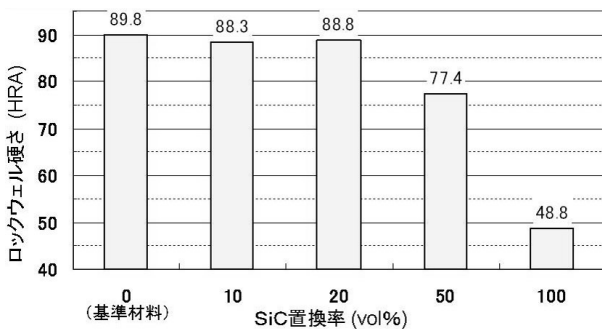


図6 置換率と硬さとの関係

3.4 焼結体の耐摩耗性 (すべり摩耗特性)

焼結体の耐摩耗性を評価するため、すべり摩耗試験を実施した。ここで、硬さが不十分だった50%置換材および100%置換材については、優れた耐摩耗性が期待できないことから試験を行わず、硬さが基準材料と同程度であった10%置換材および20%置換材のみについて実施した。その結果を図7に示す。

縦軸の比摩耗量は値が低いほど耐摩耗性に優れることを意味している。すなわち、10%置換材は、基準材料に比べ中・高速域 (図7の0.94 m/secおよび3.62m/sec) でのすべり摩耗特性が優れていることがわかる。これはSiCがWCより熱伝導率が高いため、摩擦面が高温になりにくく、強度低下が起こりにくかったためと考えられる。また20%置換材は、中・高速域では基準材料と同程度の摩耗特性であったが、図7の低速域 (0.054m/sec) では基準材料ほどの耐摩耗性はない結果となった。

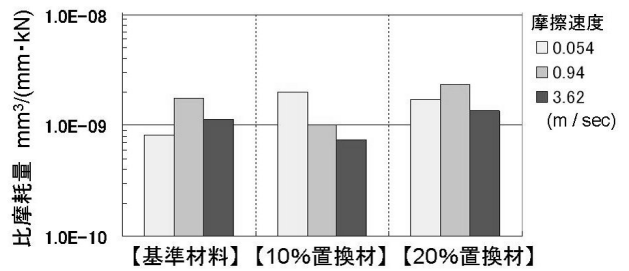


図7 すべり摩耗試験結果

また試験後の供試材摩耗痕と、試験機の試験部周囲から採取した摩耗粉を観察した。摩耗痕の外観を図8に、摩耗粉のSEM像を図9にそれぞれ示す。ただし、観察したWC-Co合金は、基準材料とは異なる組成比の市販材である。

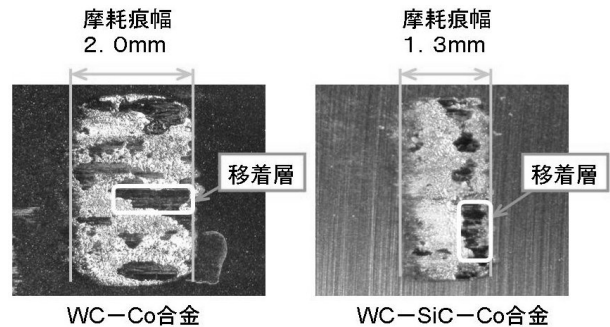


図8 摩耗痕の外観

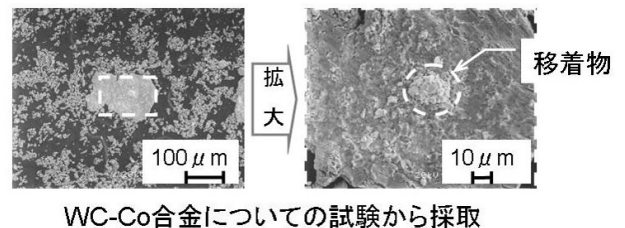


図9 摩耗粉のSEM像

図8でWC-Co合金とWC-SiC-Co合金の両者を比較すると、試作材は基準材より摩耗痕幅が狭いことがわかる (図4の計算式から、この違いが比摩耗量の違いとなって表れる)。また、摩耗痕の所々に摩擦の相手材から移着したように見える部分が認められた。この部分をEDSにより分析した結果、回転円板の主成分である鉄 (Fe) であることが確認されたことから、回転円板の一部が平面試験片に移着したものであることがわかる。

図9の摩耗粉観察結果では、回転円板から剥離したFe系摩耗粉に焼結体から移着したWを主成分とする移着物が見

られた。このことから、すべり摩擦の環境下にある両者は、
摩耗の過程で、互いに移着という現象が起こっていることが
分かった。

4. おわりに

本研究では、SPS法により、WC-10mass%Co合金に対し、
WCの一定割合をSiCで置換した材料を試作した。その結果、
10%置換材については、基準材料と同程度の硬さを有し、中・
高速域では優れた耐摩耗性を有する焼結体を得ることができ
た。また、他の置換率の焼結体は、硬さ・耐摩耗性とも十分
な焼結体は得られなかった。これらの成分については、保持
時間を長くするなど、さらなる焼結条件の検討が必要である。

引用文献

- 1) 日本金属学会編「金属データブック」p.102,127
- 2) 鈴木壽編著「超硬合金と焼結硬質材料」p.402-403
- 3) 第15回傾斜機能材料シンポジウム論文集, ほか

他誌発表論文抄録

Summaries of Paper Published

タイトル Title	粒子充填層を有する再生型磁気冷凍法の特性解析 Analytical Investigation on Regenerative Magnetic Refrigeration with Particle Packed Bed
執筆者	平野 繁樹 ^{1†} , 川南 剛 ² , 池川 昌弘 ³ , 麓 耕二 ⁴ , 平澤 茂樹 ² ¹ 北海道立総合研究機構 工業試験場, [†] 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻, ² 神戸大学大学院, ³ 北海道大学大学院, ⁴ 釧路工業高等専門学校
抄録	磁気熱量効果による温度差を効果的に拡大させるActive Magnetic Regenerator (AMR)を用いた磁気冷凍法における冷却特性について、実験結果を基に磁気作業物質粒子充填層における伝熱解析モデルを構築し、数値シミュレーションを行い、AMRを用いた磁気冷凍システムの性能評価および性能予測を行った。その結果、大きな磁束密度環境下では磁気熱量効果の増大により、より大きな温度差を得られた。また、流動体積及び流動速度について、生成できる温度差が最大となる最適値の存在が明らかとなり。噴流および滞留層を考慮した解析モデルを用いてAMR冷凍サイクルの冷却特性を精度良く再現することが出来た。
キーワード	冷凍、冷却装置、磁気熱量効果、永久磁石、粒子充填層
その他	
掲載	日本冷凍空調学会論文集, Trans. of the JSRAE, Vol.27 No.1 (2010) pp.39-47

北海道立総合研究機構工業試験場報告

No.310 (2011)

発行 平成 23 年 8 月 31 日

発行所 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術研究本部

工業試験場

〒060-0819札幌市北区北19条西11丁目

電話 (011) 7 4 7 - 2 3 2 1

印刷所 小南印刷株式会社