



道總研

ISSN 0441-7402

CODEN HOKSA 9

北海道立総合研究機構 工業試験場報告

Reports
of
Hokkaido Research Organization Industrial Research Institute

(No.312)

2013

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 斜張橋ケーブル検査ロボット昇降機構の開発	浦池 隆文, 波 通隆, 多田 達実 …………… 1 鈴木 慎一, 須永 俊明, 若山 昌信 森木 洋全, 西岡 勉, 宇都宮光治 杉井 謙一, 山下 欣也
2 国際規格を活用した農業機械の通信制御システムの開発	堤 大祐, 中西 洋介, 万城目 聡 …………… 11 多田 達実
3 換気-放射ラジエータ複合型住宅用放射冷暖房システムに関する研究	白土 博康, 保科 秀夫, 富田 和彦 …………… 17
4 担持金属触媒を用いた草本系バイオマスからの糖アルコールの製造	山越 幸康, 北口 敏弘, 上出 光志 …………… 25 小林 広和, 福岡 淳
5 食用としての利用の少ない地域水産資源のすり身化技術開発	内山 智幸, 松嶋景一郎, 浦 晴雄 …………… 31 鎌田 樹志, 蛭谷 孝司, 武田 浩郁 宮崎亜希子
6 鮭由来吸収性生体模倣複合材料の作製と評価	赤澤 敏之, 執行 達弘, 野村 隆文 …………… 37 山岸 暢, 稲野 浩行, 中村 勝男 村田 勝, 伊東 学, 境 勝義 宮崎 聡
7 木材・プラスチック複合材の耐凍結融解性評価	大市 貴志, 吉田 憲司, 長谷川 祐 …………… 45
8 道内食産業のためのブランドづくりに関する研究	万城目 聡, 日高 青志 …………… 51
9 前腕用筋電位CTの基盤技術開発	中島 康博, 桑野 晃希, 前田 大輔 …………… 61 吉成 哲, 東藤 正浩, 原田 証英 但野 茂
10 サーボプレスを用いたファインブランキング加工技術の加工特性	鶴谷 知洋, 飯田 憲一, 畑沢 賢一 …………… 67 三戸 正道
11 ダイナミックダンパーによる振動低減技術の開発	中西 洋介, 堤 大祐, 鈴木 慎一 …………… 77
12 金型重力鋳造における金型減圧による鋳造性の向上	戸羽 篤也, 木下 修, 桃野 正 …………… 85

研究ノート

1 作業機械におけるモーター制御の最適化技術	新井 浩成, 浦池 隆文 ……………	93
2 車載型路面凍結検知技術の開発	宮崎 俊之, 大崎 恵一 ……………	101
3 発話困難者のためのリアルタイム音声生成アプリケーションの開発	橋場 参生, 高瀬 雅由, 須貝 保徳 …………… 藪 謙一郎, 伊福部 達	105
4 小規模ソフトウェア開発における形式手法の活用	堀 武司 ……………	109
5 無落雪住宅向けフェンス状太陽光発電架台に関する研究	保科 秀夫, 白土 博康, 平野 繁樹 ……………	115
6 調湿タイルの量産製造技術の開発	野村 隆文, 執行 達弘, 吉田 憲司 …………… 橋本 祐二, 斎藤 隆之, 工藤 和彦	123
7 ポリプロピレンの難燃化に及ぼすゼオライトの添加効果	山岸 暢 ……………	129
8 鉄系吸着剤によるヒ素の除去に関する研究	稲野 浩行, 堀川 弘善, 板橋 孝至 …………… 富田 恵一, 平野 繁樹	135

CONTENTS

Regular Paper

- 1 Development of Elevating Mechanism for Inspection Robot of Cable-stayed Bridge 1
Takafumi URAIKE, Michitaka NAMI, Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI
Toshiaki SUNAGA, Masanobu WAKAYAMA, Hiromasa MORIKI
Tsutomu NISHIOKA, Kouji UTSUNOMIYA, Kenichi SUGII, Kinya YAMASHITA
- 2 Communication Control System for Agricultural Machinery with Communicational International
Standard 11
Daisuke TSUTSUMI, Yohsuke NAKANISHI, Akira MANJOME, Tatsumi TADA
- 3 Study on a Ventilation- Radiator combined Radiant Cooling and Heating System for Residential Use ... 17
Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA, Kazuhiko TOMITA
- 4 Production of Sugar Alcohols from Herb Series Biomass by Supported Metal Catalysts 25
Yukiyasu YAMAKOSHI, Toshihiro KITAGUCHI, Mitsushi KAMIDE
Hirokazu KOBAYASHI, Atsushi FUKUOKA
- 5 Technology for Production of Surimi from Underutilized Local Marine Resources as Food 31
Tomoyuki UCHIYAMA, Keiichiro MATSUSHIMA, Haruo URA
Tatsuyuki KAMADA, Kohji EBITANI, Hirofumi TAKEDA, Akiko MIYAZAKI
- 6 Preparation and Characterization of Bioabsorbable Biomimetic Composite Materials Originated
from Salmon 37
Toshiyuki AKAZAWA, Tatsuhiko SHIGYO, Takafumi NOMURA
Tohru YAMAGISHI, Hiroyuki INANO, Katsuo NAKAMURA, Masaru MURATA
Manabu ITO, Katsuyoshi SAKAI, Satoshi MIYAZAKI
- 7 Durability of Wood Plastic Composites under Accelerated Freeze-thaw Cycling 45
Takashi OICHI, Kenji YOSHIDA, Yuu HASEGAWA
- 8 Studies on the Branding for the Hokkaido Food Industry 51
Akira MANJOME, Seiji HIDAHA
- 9 Fundamental Study of the Electromyography Tomography System for a Forearm 61
Yasuhiro NAKAJIMA, Kohki KUWANO, Daisuke MAEDA, Satoshi YOSHINARI
Masahiro TODOH, Masahide HARADA, Shigeru TADANO

10	The Characteristics of Fine Blanking Technique using Servo Press Machine	67
	Tomohiro TSURUYA, Kenichi IIDA, Kenichi HATAZAWA, Masamichi MITO	
11	Vibration Reducing Technique by Dynamic Vibration Absorber	77
	Yohsuke NAKANISHI, Daisuke TSUTSUMI, Shinichi SUZUKI	
12	Improvement of Castability by the Decompressed Mold in the Gravity Die Casting Process	85
	Atsuya TOBA, Osamu KINOSHITA, Tadashi MOMONO	

Research Note

1	Optimization Technics of Motor Control in Work Machine	93
	Hironari ARAI, Takafumi URAIKE	
2	Development of Road Ice Detection Technology for Automobiles	101
	Toshiyuki MIYAZAKI, Keiichi OHSAKI	
3	Development of Real-time Speech Synthesis Application Software for Speech Disorders	105
	Mitsuo HASHIBA, Masayoshi TAKASE, Yasunori SUGAI, Kenichirou YABU Tohru IFUKUBE	
4	Utilization of Formal Methods on Small-scale Software Development	109
	Takeshi HORI	
5	A Study on Fence-formed Solar Photovoltaic Panel for Flat Roof	115
	Hideo HOSHINA, Hiroyasu SHIRATO, Shigeki HIRANO	
6	Development of Mass-Production Technology for Humidity Control Tiles	123
	Takafumi NOMURA, Tatsuhiro SHIGYO, Kenji YOSHIDA, Yuji HASHIMOTO Takayuki SAITOU, Kazuhiko KUDOH	
7	Effect of Zeolite on Flame Retardant of Polypropylene	129
	Tohru YAMAGISHI	
8	Arsenic Removal by Iron Adsorbent	135
	Hiroyuki INANO, Hiroyoshi HORIKAWA, Koji ITABASHI, Keiichi TOMITA Shigeki HIRANO	

一 般 論 文

Regular Paper

斜張橋ケーブル検査ロボット昇降機構の開発

浦池 隆文, 波 通隆, 多田 達実, 鈴木 慎一
須永 俊明*, 若山 昌信*, 森木 洋全*
西岡 勉**, 宇都宮 光治**, 杉井 謙一**, 山下 欣也**

Development of Elevating Mechanism for Inspection Robot of Cable-stayed Bridge

Takafumi URAIKE, Michitaka NAMI, Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI
Toshiaki SUNAGA*, Masanobu WAKAYAMA*, Hiromasa MORIKI*
Tsutomu NISHIOKA**, Kouji UTSUNOMIYA**, Kenichi SUGII**, Kinya YAMASHITA**

抄 録

橋梁構造の一つである斜張橋は、ケーブルが主塔と桁の間に長距離・急角度で張られる構造となっている。このことから、ケーブルの検査および保守作業においては作業範囲の制限や交通規制および作業の危険性の問題を生じ、適切に点検することが困難な状況にある。安全で確実な検査作業を行うため、単体でケーブルへの設置が可能な自走式遠隔作業ロボットの開発が求められている。

本研究では、斜張橋ケーブル検査ロボットの要である昇降機構の開発を行った。3D-CADおよびシミュレーション技術による仮想空間上での設計・検証手法を活用することで開発の効率化を図るとともに、昇降機構に必要な機能や構造の最適化を行った。その後仮想試作に基づいた実証機の製作と室内試験および実橋試験による検証を行い、必要な能力を有する昇降機構を実現した。

キーワード：斜張橋, 検査ロボット, 昇降機構, 3D-CAD, シミュレーション

Abstract

In the cable-stayed bridge, the cable is stretched between the girder and the main tower, and that is steep-angle and long-distance. Accordingly, there are restriction of the work range, a problem of traffic restriction, and danger, it is difficult to perform the inspection task of a cable appropriately. Therefore, the robot which can operate by remote control is demanded in order to perform an inspection task safely and certainly.

In this research, the elevating mechanism which is one of the important elements of the robot was developed. 3D-CAD and simulation technology were utilized and efficient development was performed by performing the design and verification on virtual space. And structure and function of the elevating mechanism were optimized. The testing machine was manufactured based on the trial production on virtual space. Finally, verification by an indoor examination and real bridge examination was performed, and the elevating mechanism that has the sufficient performance was realized.

KEY-WORDS : Cable-stayed bridge, Inspection robot, Elevating mechanism, 3D-CAD, Simulation

* 株式会社帝国設計事務所, * Teikoku Design Office Co., Ltd.

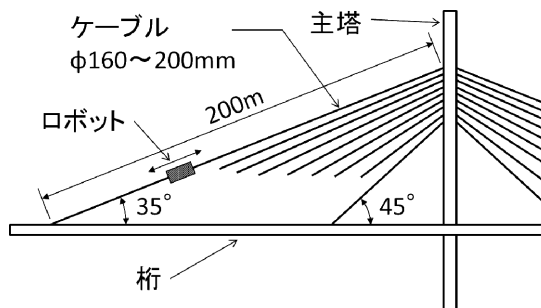
** 阪神高速技術株式会社, ** Hanshin Expressway Engineering Co., Ltd.

事業名：一般共同研究

課題名：斜張橋ケーブル検査ロボット昇降機構の開発



図1 動作試験を行った斜張橋



1. はじめに

橋梁構造の一つである斜張橋は、ケーブルが主塔と桁の間に長距離かつ急角度で張られている。その検査および保守作業において、高所作業車やクライミング技術等を応用した人力による従来の手法では、作業範囲の制限や交通規制および作業の危険性の問題があり、適切に点検することが困難な状況にある。このような現状から、これまでに安全で確実な検査作業を行うことを目的として、単体でケーブルへの設置が可能な自走式遠隔作業ロボットの実用化が検討されてきた。しかしその開発にあたっては、試験機の設計・製作や試験環境の確保に多大なコスト負担と時間的・空間的な制約があり、実証試験の実施と設計へのフィードバックによる改良といった、機械装置開発における一般的な開発サイクルを効率的に回すことが困難であり、十分な能力を持つ昇降機構の実現には至っていない。

そこで本研究では、ロボット化において最も重要な要素である昇降機構の構造について、3D-CADやシミュレーション技術による仮想空間上での設計・検証手法を有効に活用することで開発の効率化を図り、確実に安定した動作が可能な昇降機構を実現することを目的として開発を行った。ケーブルの形状や物理的特性を考慮した昇降シミュレーションを繰り返し行うことで、昇降機構に必要な機能や構造の最適化を行った。その後、仮想試作に基づいた実証機の製作と室内試験を行い、シミュレーションとの整合性の確認および実作業への適用性について検証した。さらに、実作業を想定した実橋における試験を行うことで、必要な能力を有する昇降機構を実現した。

2. 基本構造と仕様の検討

昇降機構の動力性能については、図1に示す斜張橋において確実な昇降動作が可能であるとともに、昇降機構に対する要求事項である表1を満足することを目標とした。最長で約200m、最大傾斜角約45°のケーブルに対し、走行速度は、1本の検査に要する時間を1時間以内と想定して10m/min以

表1 昇降機構に対する要求事項

昇降距離：最長200m	・軽量
傾斜角：最大45°	・着脱が容易
昇降速度：10m/min以上	・φ160~200mm
可搬質量：2kg以上	

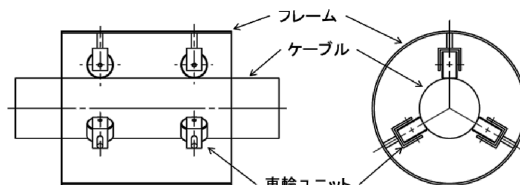


図2 昇降機構の基本構造

上、可搬質量は、本研究とは別途検討されている検査用カメラシステムを想定し、2kg以上とした。動力性能の他、軽量であることやケーブルへの脱着容易性、および複数存在するケーブル径（φ160~200mm）に対応可能であること等が求められる。

図2に昇降機構の基本構造を示す。動力は電動による車輪駆動式とし、フレーム内に、ケーブルに対して三方向から接するよう車輪ユニットを配置し、これをフレーム長手方向に2組設ける構造とした。車輪ユニットには、昇降用の動力伝達機構と、ケーブル軸回りの機体の回転を制御するステアリング機構、およびケーブルに対して確実な接触を維持するためのサスペンション機構が必要となる。また、それぞれの車輪ユニットの取り付け方向（図2は逆Y字）や、取り付け角度（ユニット間の開き角）を検討する必要がある。以上を踏まえ、動力伝達機構と操舵機構、およびフレーム構造について検討を行った。

3. 機構シミュレーションによる動作解析について

3.1 機構シミュレーションの例

昇降機構の詳細構造の決定にあたっては、設計に使用する3D-CADであるSolid Worksに組み込まれている、機構シミュ

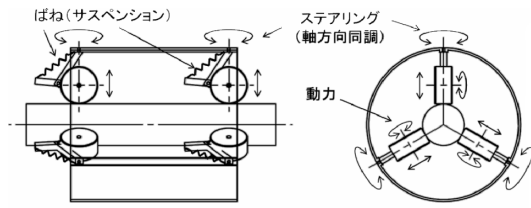


図3 解析した構造の例

レーション機能を活用し検討を行った。図3に解析の例として、すべての車輪ユニットにサスペンション機構を設けた構造を示す。また図4に、上昇動作のシミュレーション結果の例を示す。この構造は、ばね力を用いることでケーブルに対してフレームの位置や姿勢を保持することを期待した構造といえる。図4の上段は側面図、下段は側面図の右下からケーブル軸方向を見た図を表す。これより、時間の経過とともにフレームはケーブルに対して回転し、かつフレームとケーブルの軸がずれていく様子がわかる。図4(c)では車輪とケーブルの接触は維持されているが、さらに時間が経過すると、最終的には車輪がケーブルから逸脱し、動作不能となる。こ

のような現象は、車輪ユニットの配置（Y字・逆Y字）や、車輪表面形状の変更（凸型・凹型・平型）、およびサスペンション機構におけるばね定数等のパラメータの変更にかかわらず発生した。また、このような現象は、本研究以前に検討・試作された試験機においても確認されていたことから、機構シミュレーションによる動作検証は、実機の挙動を事前に予測するうえで有効であることを確認した。

3.2 ケーブルと車輪の間の摩擦係数について

ケーブルと車輪の間の摩擦は、昇降能力を直接左右する重要な要素と考えられるが、前述の解析例では、仮定値としてシミュレーション機能のデフォルト値である静止摩擦係数0.3および動摩擦係数0.25（いずれもゴム対鋼と仮定）に設定していた。ここでは、これ以降の解析精度向上を目的として、実橋ケーブルに使用されているPE（ポリエチレン）と各種車輪素材との摩擦係数の測定を行ったのでその結果を示す。

図5に試験に供した各種タイヤを、図6に測定装置を示す。PEパイプに車輪を接触させた状態で錘と自重により荷重F0を負荷し、引張り荷重を徐々に増加させ、タイヤが滑り始め

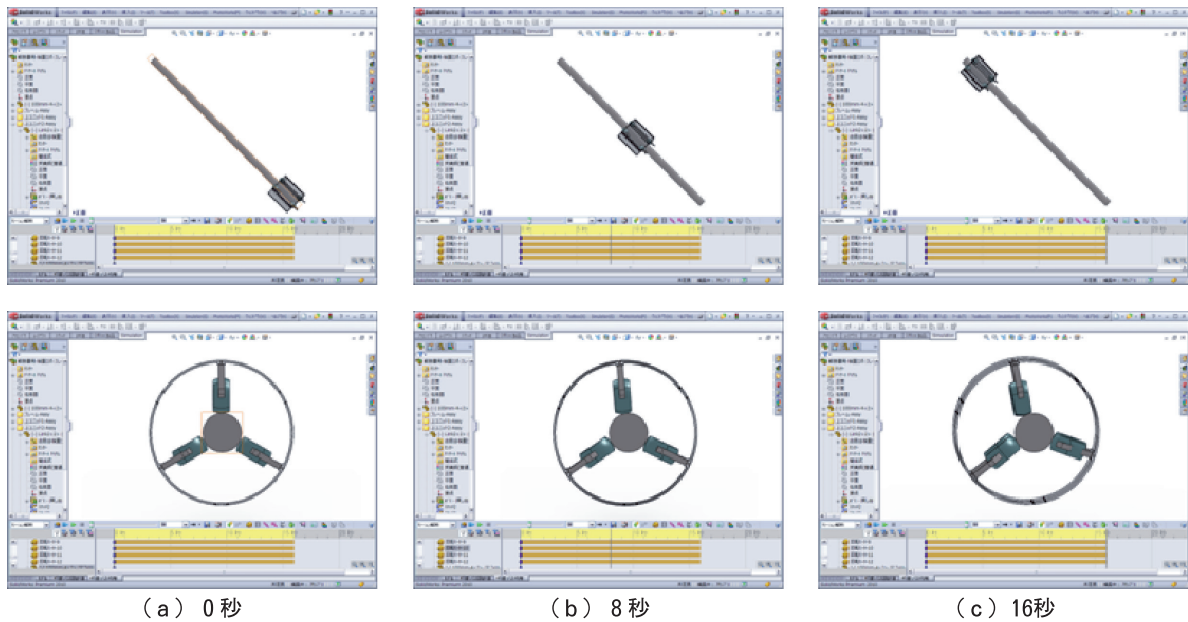


図4 シミュレーション結果の例（傾斜角45°、上昇速度10m/min、ケーブル長3m）



図5 摩擦係数の測定に供試したタイヤ各種

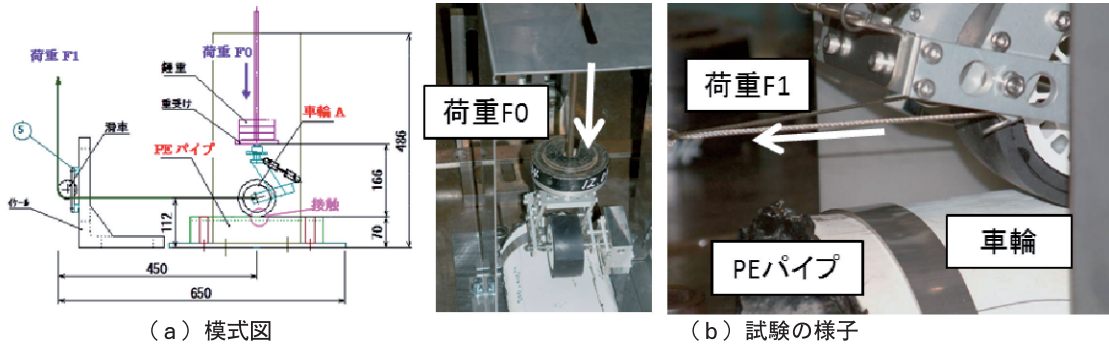


図6 摩擦係数測定装置

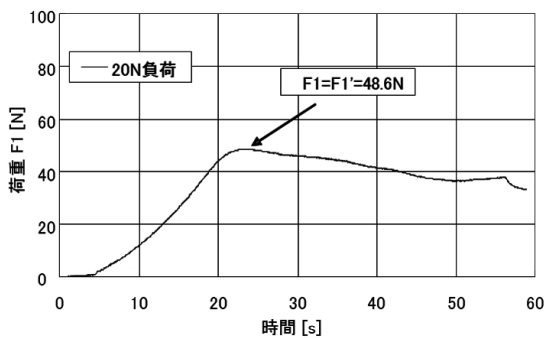


図7 測定結果の例 (ゴムシート巻き付け)

表2 摩擦係数測定結果

車輪の区別	初期荷重(自重) [N]	錘荷重 [N]	負荷荷重F0 [N]	F1 [N]	F1' [N]	摩擦係数	
						F1/F0	F1'/F0
(a) ゴムシート巻き付け	13.0	20.0	33.0	48.6	48.6	1.47	1.47
		50.0	63.0	86.2	89.5	1.37	1.42
		100.0	113.0	150.0	158.9	1.33	1.41
(b) RCバギー用タイヤ	9.0	20.0	29.0	67.2	69.5	2.32	2.40
		50.0	59.0	139.8	151.4	2.37	2.57
		100.0	109.0	191.0	302.4	1.75	2.77
(c) スケート用ウレタン	7.9	20.0	27.9	101.0	101.0	3.62	3.62
		50.0	57.9	190.4	190.4	3.29	3.29
		100.0	107.9	357.0	357.0	3.31	3.31

際の荷重F1を測定した。また、測定中最大の引張り荷重が記録された時の値をF1'とした。図7に測定結果の一例を示す。図ではタイヤが滑り始めた際にF1の最大値F1'も同時に記録されている。供試タイヤの違いによりグラフの形状が変化した。それぞれの供試タイヤについてF1とF1'から求めた摩擦係数をまとめたものを表2に示す。表中のF1/F0が静止摩擦係数に相当する。負荷荷重の大小にかかわらず、各供試タイヤにおいて摩擦係数は概ね一定の値が測定された。また供試タイヤ別では(c)スケート用ウレタンで3以上と最も高い摩擦係数が測定され、最少でも(a)ゴムシート巻き付けで1以上の摩擦係数が測定された。これらの値は当初想定したものより非常に大きく、シミュレーション機能で設定可能な値(静止摩擦係数1.0以下)を超える結果となった。昇降機構実機では、適切な負荷荷重(タイヤ反力)が得られていれば何れのタイヤを使用したとしても摩擦力不足により

スリップ等が発生する可能性は低いと考えられ、今後の解析での摩擦係数の設定は一律1.0として行うこととした。

4 安定した動作が可能な構造の検討

前述の解析例より、すべての車輪ユニットにサスペンション機構を設けた構成では、安定した動作は不可能であることが確認された。機構各部の寸法精度や設置初期状態が理想的に設定されていれば、各車輪のばね力が均等となり、想定通りの動作が可能と考えられるが、実際には困難である。ばね力では、フレームが空間に対して有する6自由度(並進3自由度、回転3自由度)のいずれも拘束することができない。したがって機構自体に、冗長な4自由度(並進2自由度、回転2自由度)を拘束する構造を組み入れる必要がある。フレームの自由度を拘束する最も簡単な方法は、サスペンション機構を固定することが考えられる。サスペンション機構は並進1自由度を有するので、4個のサスペンションを固定することで、フレームの4自由度を拘束することが可能である。以上のような考察にもとづき、図8に示す構造で検討を進めることとした。

車輪ユニットをY字に配置し、上半部4輪と下半部2輪で機能を分担する構造とした。上半部4輪は駆動輪として動力とステアリング機構を、下半部2輪は従動輪としてサスペンション機構のみを組み込んでいる。駆動輪のサスペンションを省略することでケーブルとフレームの軸が一致した状態を維持し、自重と従動輪のサスペンションにより駆動輪をケーブルに押し付けることで摩擦力を確保する。ステアリング機構については、軸方向に対をなすユニットが、平行リンク機構により同調して動作するよう構成されている。このように

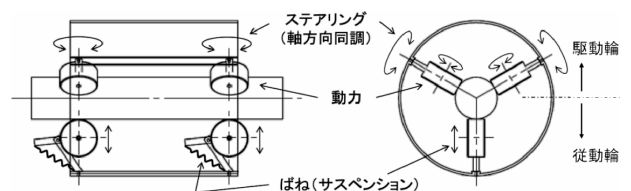


図8 安定動作を考慮した構造

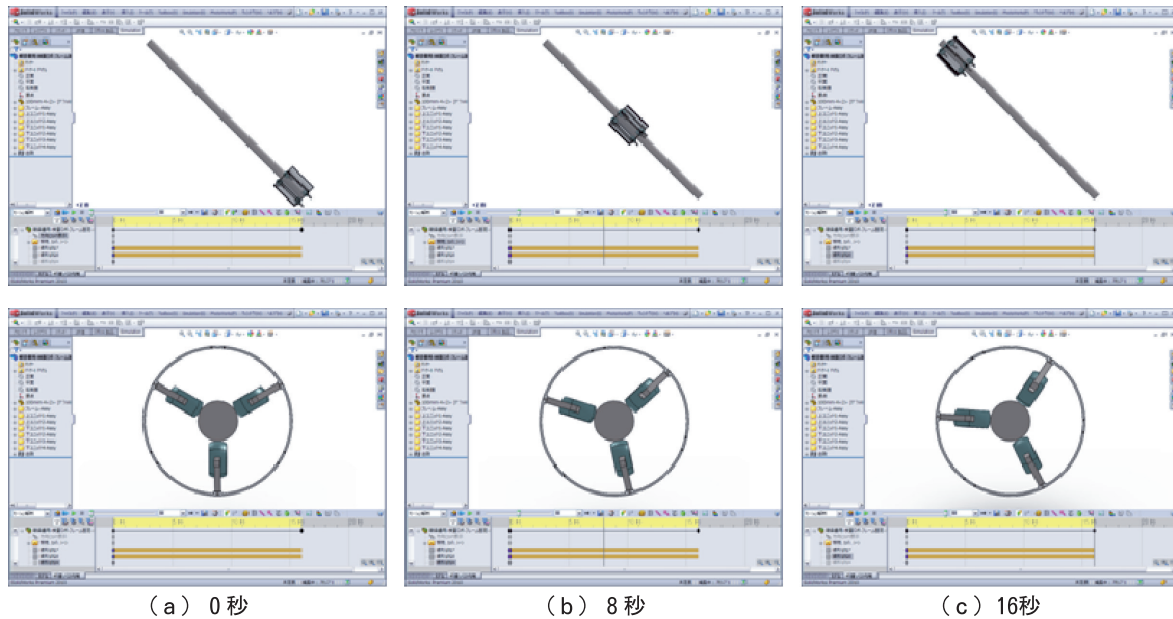


図9 シミュレーション結果（傾斜角45°，上昇速度10m/min，ケーブル長3m）

構成した構造について、機構シミュレーションによる動作解析を行った結果を図9に示す。図4の解析例と同様にフレームがケーブルに対して回転する挙動は見られるが、ケーブルに対して駆動輪が均等に接触し、フレームとケーブルの芯が一致した状態が維持されているのがわかる。図はステアリング機構を固定した際の解析例を示しているが、上昇途中でステアリング機構を動作させ、意図的にフレームが回転するよう設定した場合においても、フレームとケーブルの芯が一致した状態を維持できることを確認した。また、実際のケーブル断面は軸方向に一樣に真円ではなく、微妙な凹凸や断面形状の変化が存在する。このことを考慮した解析の結果も同様に、安定した動作が可能であることを確認した。

5 小型試験機および実証大型機の製作と屋内試験による評価

5.1 小型試験機の製作と動作試験

前述の検討結果にもとづき、動作確認用の小型試験機を製作し、屋内における模擬試験を行った。小型試験機では2章で検討した仕様のうち、複数のケーブル径に対応するフレーム構造は省略し、特定の径のみに対応する簡易構造で設計を行った。表3に主要諸元を、図10に外形図を示す。機体は、ラジコンによる無線操縦で制御する。駆動ユニットは、ウレタンローラをギヤとタイミングベルトを併用した減速機構で駆動する。動力源として選定したモータの定格出力より、設計上の動力性能は、牽引力約160N、走行速度約16m/minとなっている。フレームは駆動輪側と従動輪側の2分割構造とし、ケーブルへの設置時はヒンジとロック機構で開閉する構造とした。

以上により製作した小型試験機の外観を図11に、動作試験の様子を図12に示す。動作試験は、斜張橋ケーブルを模擬したφ165mmの塩ビパイプ6mを傾斜角約35°で設置して行った。試験の結果、ステアリングを固定した一定姿勢での昇降、および昇降と同時にステアリング操作を行った際の機体の回転について、車輪がケーブルから逸脱することなく、シミュレーションと同様、安定して動作可能であることを確認した。昇降動作を繰り返して行った際の消費電流を測定した結果を図13に示す。駆動ユニットは、前側左右2個と後側左右2個を、それぞれ1個ずつのバッテリーで駆動している。グラフより、前後とも大差はなく、上昇時3.5～4.0A、下降時0.5A程度の電流値が記録されている。バッテリー容量は4000mAhなので、およそ1時間程度連続動作が可能である。動作距離4.5mを約13秒で上昇したことから、走行速度は20m/min以上であり、十分な動力性能を有していることを確認した。

5.2 実証大型機の製作と動作試験

実証大型機は、小型試験機で検証した駆動系をスケールアップして製作した。また、φ100～200mmのケーブル径に対応するため、サイズ調整機能を持ったフレーム構造を採用した。表4に主要諸元を、図14に外形図を示す。駆動ユニットは小型機と同様に、ウレタンローラをギヤとタイミングベルトを併用した減速機構で駆動する。ここで駆動用モータについては、搭載を想定しているカメラシステムと合わせて機体質量を20kg程度と想定したため、1ランク出力の大きなものを使用した。モータの定格出力より、設計上の牽引力約400N、走行速度約15m/minの動力性能を有している。また大型機では実作業への適用を見据え、主に次に挙げる4点を考慮して設計を行った。

表3 小型試験機主要諸元

フレーム		駆動輪ユニット	
全長	420mm	車輪材質	ウレタンシヨアA70
全幅	370mm	車輪径	54mm
全高	480mm	車輪幅	40mm
質量	約8kg	動力	タミヤ模型 ギヤードモーター 380K300
取り付け方法	ヒンジとスナップ錠による二分割開閉式	減速比	1/160(ギヤ1/300、ベルト60/32)
無線装置および電源		従動輪ユニット	
無線装置	双葉電子工業 RC飛行機用10chプロポ	車輪材質	MCナイロン
電源	7.4V 4000mAh LiPo バッテリー	車輪径	40mm
	駆動用 2本	車輪幅	40mm
	無線装置用1本	サスペンション	コイルばねにより任意の強度に設定可能

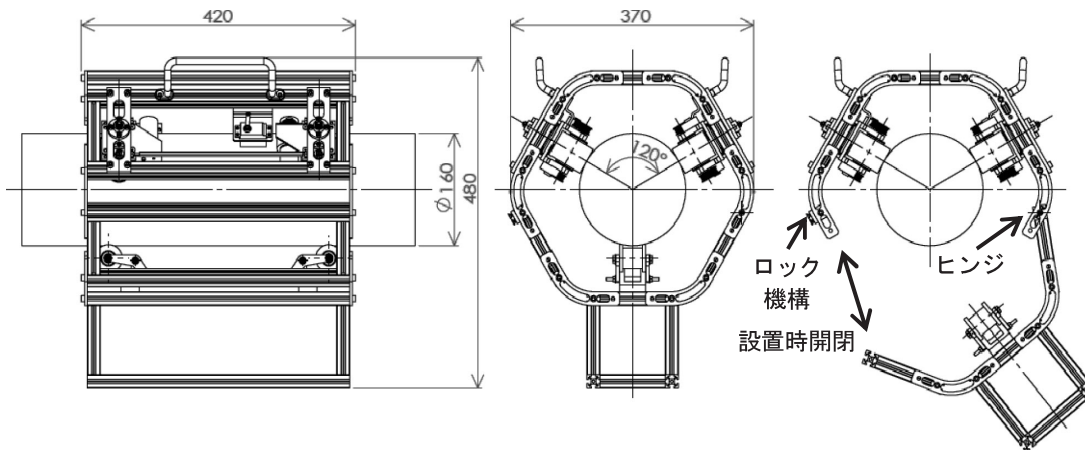


図10 小型試験機外形図

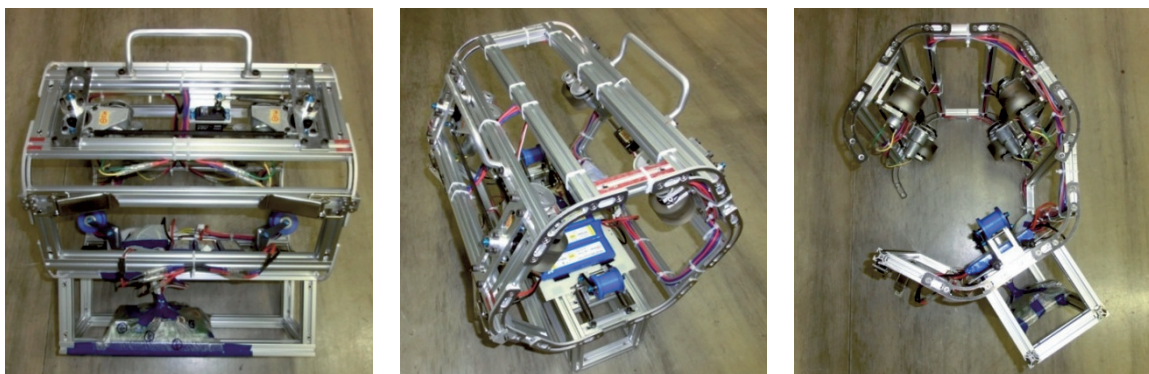


図11 小型試験機の外観

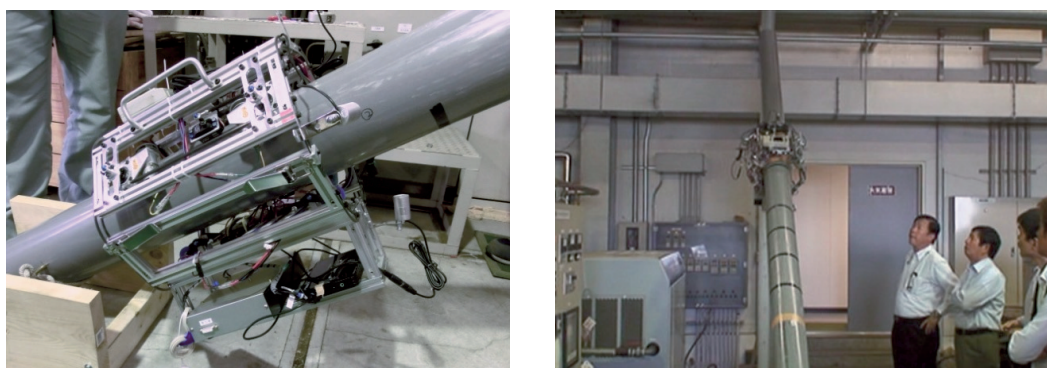


図12 動作試験の様子

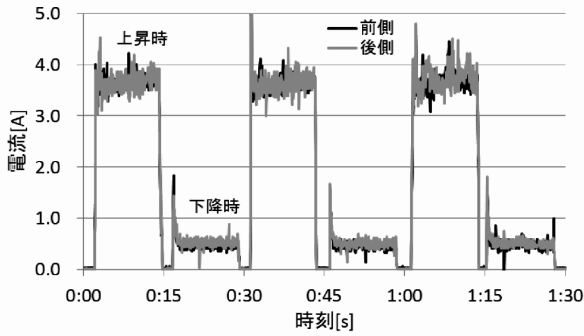


図13 昇降動作時の消費電流

- ①モータの選定は検査用カメラユニットおよび制御用ユニットの搭載に配慮し大型とする。
- ②一般的なケーブル径φ100~200mmに対応できるようにフレーム継ぎ手部にスライド機構を設ける。

- ③取り付け時の作業性改善のため、従動輪のサスペンションを一時的に解放可能な機構を設ける。
- ④ローラーの径は段差乗り越えに配慮し大型とする。

以上により製作した実証大型機の外観を図15に、動作試験の様子を図16に示す。小型機による試験と同様に、斜張橋ケーブルを模擬したφ165mmの塩ビパイプ6mを傾斜角約35°で設置して行った。動作試験の結果、ステアリングを固定した一定姿勢での昇降、および昇降と同時にステアリング操作を行った際の機体の回転について、車輪がケーブルから逸脱することなく、安定して動作可能であることを確認した。また、昇降動作時の消費電流を測定した結果を図17に示す。実証大型機では前後左右合計4個の駆動ユニットを、それぞれ1個ずつのバッテリーで駆動している。グラフは前側左ユニットの消費電流を示す。上昇時4.0A程度、下降時0.5A程度の電流

表4 実証大型機主要諸元

フレーム		駆動輪ユニット	
全長	約700mm	車輪材質	フレタン ショアA70
全幅	約450~500mm	車輪径	80mm
全高	約710~760mm	車輪幅	600mm
質量	20.3kg(カメラ想定質量2kg含む)	動力	タミヤ模型 ギヤードモーター 540K150
取り付け方法	スライド、ヒンジ、手ねじによる二分割開閉式	減速比	1/230(ギヤ1/150、ベルト26/40)
無線装置および電源		従動輪ユニット	
無線装置	双葉電子工業 RC飛行機用10chプロポ	車輪材質	フレタン ショアA90
電源	7.4V 4C00mAh LiPo バッテリー	車輪径	80mm
	駆動用 4本	車輪幅	60mm
	無線装置用1本	サスペンション	引張りばねにより任意の強度に設定可能

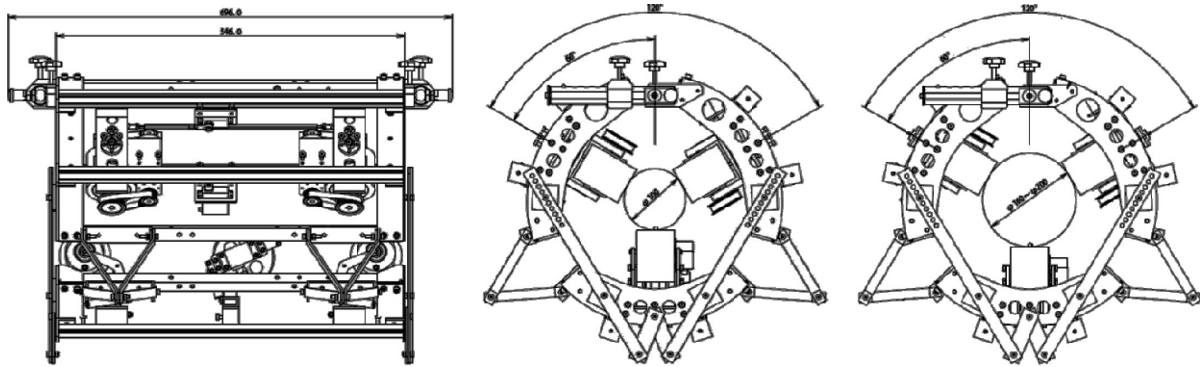


図14 実証大型機外形図



図15 実証大型機の外観

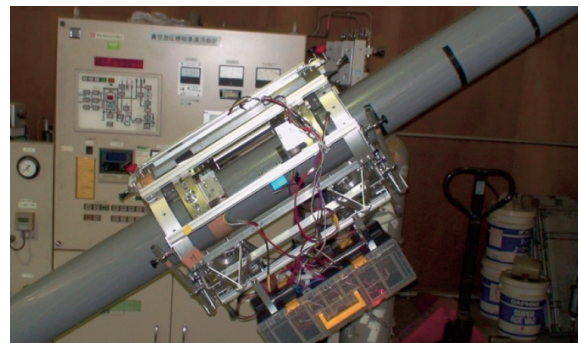


図16 動作試験の様子

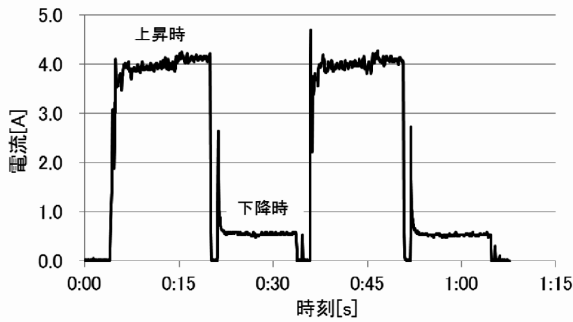


図17 昇降動作時の消費電流

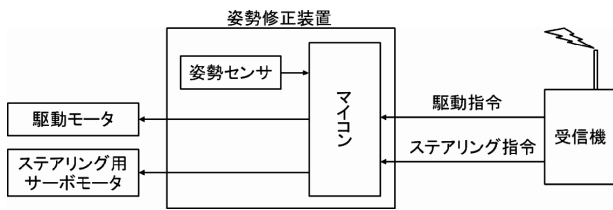


図18 姿勢修正装置のブロック図

値が記録されている。バッテリー容量は4000mAhなので、およそ1時間程度連続動作が可能である。動作距離4.5mを約15秒で上昇したことから、走行速度は18m/min以上であり、実証大型機においても十分な動力性能を有していることを確認した。

5.3 昇降時の姿勢安定化について

小型試験機および実証大型機の動作試験の結果より、いずれにおいても安定した昇降動作が可能であることを確認したが、シミュレーションの結果と同様に、ステアリングを固定した場合でもケーブル軸に対して機体が自然に回転する挙動が確認された。その原因としては主に、ステアリング機構のニュートラル調整と、重量バランス、およびケーブル（屋内試験では塩ビパイプ）断面形状の不均一によるものと考えられる。姿勢の修正には手動によるステアリング操作が必要となる。しかし実際の橋梁現場では、長距離を上昇した際や夜間の作業時には、目視による姿勢の確認が困難になることが想定されるため、姿勢修正装置を別途設けることとした。機械的な対策として振りやヨットなどの船舶に見られるキール

を応用した復元構造が考えられたが、機体寸法の拡大や重量の増加を伴うことからこのような手法は取らず、センサとマイコンを用いた電子制御により姿勢を安定化することを試みた。図18に姿勢修正装置のブロック図を示す。受信機が受けた駆動モータへの指令とステアリング用サーボモータへの指令を、姿勢センサとマイコンで構成される姿勢修正装置へ取り込み、適切な演算を行った後、新たな駆動指令とステアリング指令を出力する。屋内試験によりこのような構成で姿勢の安定化（一定姿勢での昇降）が可能であることを確認し、以下の実橋試験を行った。

6. 実橋試験による評価

実橋試験は図1に示す斜張橋で行った。図1の斜張橋ではケーブルが車線上空に架かることから、装備品の落下や上空での不具合による暴走および停止など不測の事態に備え、三車線のうちケーブルが架かる左側一車線を規制したうえで、高所作業車で到達可能な範囲（鉛直高さ約12m）にストッパーを設けることや、介錯ロープによる機体の誘導等の安全対策を施し試験を行った。現場の状況を図19に示す。試験はφ160mmのケーブルを対象として行い、傾斜角約35°と約45°の2か所で行った。

図20と図21に小型試験機および実証大型機による試験の様子を示す。鉛直高さ約12mの範囲内で、昇降動作を繰り返した。実橋試験では室内試験と比較して、以下の環境の相異が、昇降性能に影響をおよぼすことが懸念された。

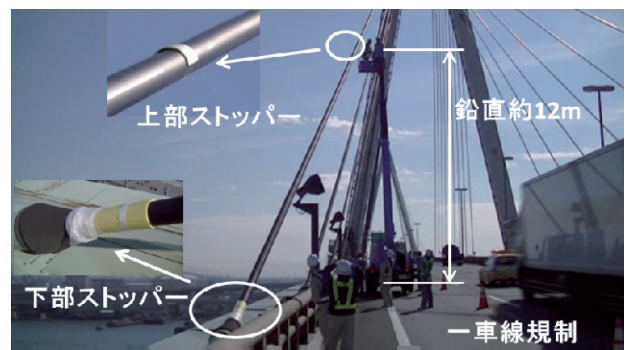


図19 実橋試験現場の状況



図20 小型試験機による実橋試験の様子



図21 実証大型機による実橋試験の様子

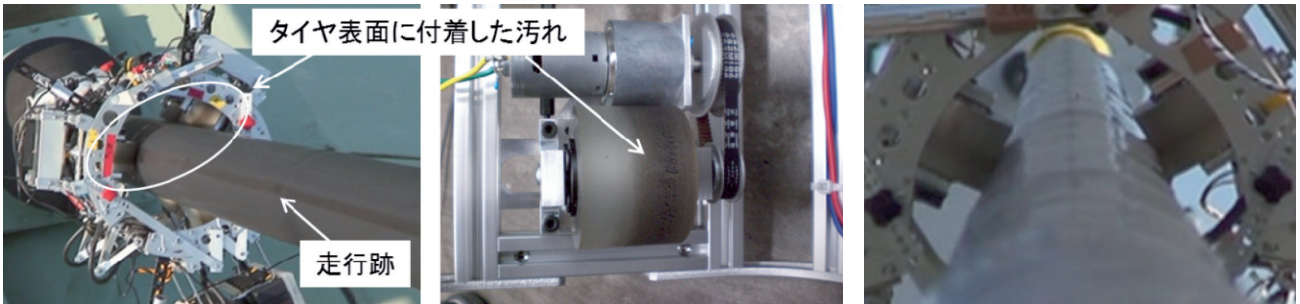


図22 ケーブル表面の走行跡とローラーに付着した汚れ

図23 ケーブルのうねり

- ①ケーブル材質（塩ビパイプ→PEパイプ）
- ②ケーブル表面の汚れによる駆動輪摩擦力の低下（排ガス・排煙成分、塵・埃、塩分）
- ③グラウト注入口の段差
（グラウト：鋼製ケーブルと被覆PEパイプの空隙に注入する樹脂やセメント等の薬液）
- ④グラウトの注入によるPEパイプの膨らみやへこみ（軸方向断面形状の変化）
- ⑤車両の通行による振動
- ⑥風による外乱
- ⑦降雨による水分

7. おわりに

本研究では、3D-CADとシミュレーション技術による仮想空間上での設計・検証手法を活用することで開発の効率化を図るとともに、確実に安定した動作が可能な昇降機構の最適構造を見出した。これをもとにした実証機による屋内試験、および実橋試験を通じ、当初目標とした性能を有する昇降機構を実現した。また、本研究の成果について特許を出願した。今後は、長期的に動作させた場合の耐久性や信頼性に関する検証を行うとともに、検査用カメラシステムや自動制御・モニタリングシステムを統合した実用ロボットシステムの開発を進める予定である。

これらのうち、②と④について図22および図23のような状況が確認された。図22のようにケーブル表面の汚れがローラーに付着し、機体の走行跡がケーブル表面に残った。また図23のように、ケーブルを軸方向に見るとうねりが存在し、軸方向の断面形状が変化していることがわかる。しかしながら、極端な摩擦力の低下やケーブルからの逸脱など、動作に支障をきたすような現象は確認されなかった。⑦の水分に関しては降雨状況での試験は行っていないが、ケーブル表面を水で濡らし、湿潤状態としても動作に影響はなかった。その他懸念された振動や風についても特段昇降動作に影響をおよぼすような現象は確認されず、試験現場として設定した35°および45°のケーブルにおいて、終始安定した動作が可能であることを確認した。以上の実橋試験結果より、当初目標とした性能を有するケーブル昇降機構が実現された。

国際規格を活用した農業機械の通信制御システムの開発

堤 大祐, 中西 洋介, 万城目 聡, 多田 達実

Communication Control System for Agricultural Machinery with Communicational International Standard

Daisuke TSUTSUMI, Yohsuke NAKANISHI, Akira MANJOME, Tatsumi TADA

抄 録

ヨーロッパでは、農業機械用に定められた通信の国際規格ISOBUS (ISO-11783) を採用した農業機械が普及しつつある。この規格はメーカーを問わずトラクタと農業機械を接続して、相互に通信し制御する技術に関するものである。道内農業機械メーカーはこの規格への対応を検討している。本研究ではこの規格の普及を促進するために、ポテトハーベスタを対象として国際規格を活用した通信制御システムを開発した。液晶表示機能を有する操作機（液晶操作端末）とポテトハーベスタのコントローラを通信制御することにより、操作性の向上と配線数を削減する省線化を実現した。

キーワード：ISO-11783, 通信制御システム, 農業機械

Abstract

Agricultural machinery applied the international standard ISOBUS (ISO-11783) increases in Europe. The standard defines a communication protocol for agricultural machinery. Specifically the standard enables to develop a cooperative system by connecting farm working machinery to a tractor. For acceleration to apply the standard to agricultural machinery of Hokkaido manufacturers, we developed a communication control system of a potato harvester. The communication control system controls the potato harvester which communicates operational units with LCD panels. Accordingly, operational performance is increased and electrical wires are reduced.

KEY-WORDS : ISO-11783, Communicate control system, Agricultural machinery

1. はじめに

ヨーロッパのトラクタや農業機械のメーカーは農業機械用に定められた通信の国際規格ISOBUS (ISO-11783) を採用している。この規格はメーカーを問わずトラクタと農業機械を接続して制御できるようにするものである。ISOBUSの通信は車載系のネットワークとして広く普及しているCAN (Controller Area Network) バス²⁾を使用する。CANバスは2本線によるシリアル通信である。日本においては(独)農業・食品産業技術総合研究機構がISOBUSが規格化される前から農作業機械におけるCANバスを用いた通信技術の適用に関する研究を行っている¹⁾。現在、日本のトラクタメーカーなどはこの国

際規格に対応しつつあるが、道内農業機械メーカーは対応を検討している。

通信のインターフェースを統一するとコントローラ、液晶操作端末などの標準化が可能になる。標準化が進むと代替品の使用など互換性が向上し、多機能な液晶操作端末の使用など部品の選択肢が広まり、操作性などを向上させることができる。

また、操作盤に配置されたスイッチの数だけ必要だった配線がCANバスに接続することにより2本線で済み、配線数を削減する省線化が可能となる。省線化の結果、線材のコスト削減と軽量化を図ることができる。さらに、トラクタやGPS等のセンサからの車速情報、位置情報などの活用も容易となり農業機械の制御の高度化を図ることができる。

事業名：経常研究

課題名：国際規格に対応した農業機械の通信制御技術に関する研究

本研究ではポテトハーベスタに通信技術を適用し、機能性・操作性を向上させる通信制御システムを開発した。なお、ポテトハーベスタのコントローラと、液晶操作端末の操作と状態表示に関する通信に国際規格を適用した。

2. 国際規格ISOBUS (ISO-11783)

ISOBUSは農業機械間におけるCANバスを用いた通信規格である。この規格は輸送用車両、建設用車両などの通信規格であるSAE J1939をもとにしている。

ISOBUSではトラクタと作業機を接続して、トラクタから作業機を操作することができる。また、作業機からトラクタを操作することも可能であり、さらに、トラクタに複数の作業機を接続することも可能となっている。ISOBUSは表1に示す13のPartから構成される。

表1 ISOBUSの規格の構成

Part 1: General standard for mobile data communication
Part 2: Physical layer
Part 3: Data link layer
Part 4: Network layer
Part 5: Network Management
Part 6: Virtual terminal
Part 7: Implement messages application layer
Part 8: Power train messages
Part 9: Tractor ECU
Part 10: Task controller and management information system data interchange
Part 11: Mobile data element dictionary
Part 12: Diagnostics services
Part 13: File server

ISOBUSではトラクタに搭載した図1に示すような操作端末（VT：バーチャルターミナル）から作業機を操作する。作業機が変わってもVTを共通にすることができる。そのため、作業機毎に操作盤をトラクタ内に設置する必要はない。VTを装備したトラクタの運転席の様子を図2に示す。また、トラクタと作業機は規格で定められたコネクタを用いて接続するため、脱着に要する時間を短縮できる。このコネクタには、CANバスの通信線をはじめ、ECU（電子制御ユニット：作業機の制御用コンピュータ、コントローラ）用の電源、ライトやモータなどの駆動用電源が割り当てられている。トラクタ側のコネクタを図3に、作業機側のコネクタを図4にそれぞれ示す。ISOBUSに対応したトラクタは車速など様々な情報を送信できる機能を有するため、作業機はそれらの情報

を通信によって容易に取得できる。そのため、センサ類を別途付加せずに、作業機側は車速連動など新しい機能を実現することができる。

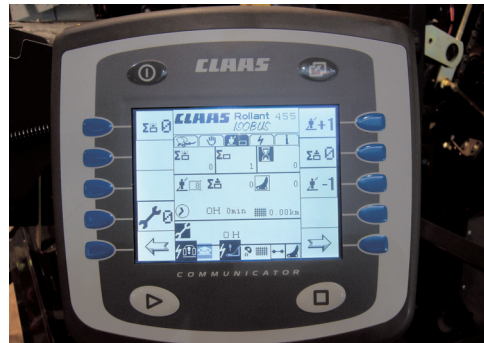


図1 バーチャルターミナルの例



図2 バーチャルターミナルを装備したトラクタの運転席

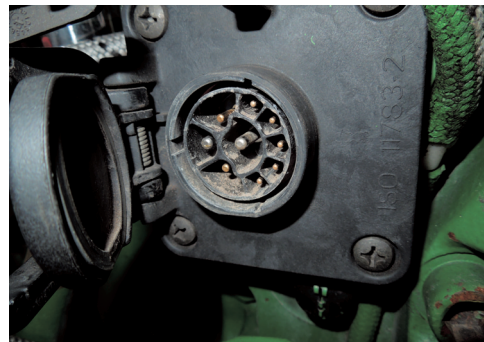


図3 トラクタ側のISOBUSコネクタ



図4 作業機側のISOBUSコネクタ

3. ポテトハーベスタ用通信制御システムの開発

3.1 ポテトハーベスタの概要と現状の課題

ポテトハーベスタの外観を図5に示す。ポテトハーベスタはトラクタで牽引しながら、芋の収穫作業を行う農業機械である。具体的には、土中の芋を掘り起こし、茎葉、土塊、小芋を除き、芋をタンクに一時保管する。収穫後、タンクに保管した芋を排出する。収穫作業を行うため、芋を掘り起こす掘取り刃、タンクに搬送するためのコンベアなどは複数の油圧シリンダ、油圧モータなどを用いて動作させて収穫する。これらの動作は図6に示す操作盤にあるスイッチ類を用いて操作する。また、収穫作業においては、トラクタを運転する要員と、ポテトハーベスタに乗務し、芋の選別作業を行う要員が必要である。



図5 ポテトハーベスタの外観

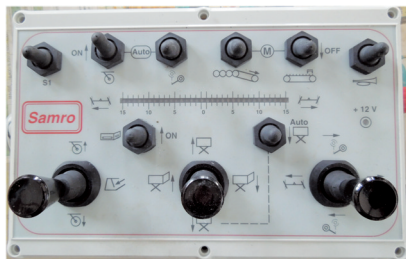


図6 従来の操作盤

ポテトハーベスタを用いた収穫作業の基本的な操作を表2に示す。

表2 ポテトハーベスタを用いた収穫作業の流れ

	作業内容	ト	ポ
A)	ポテトハーベスタを畦に合わせる。	○	—
B)	搬送用コンベアの色度を調整する。	◎	—
C)	掘取り刃を下げ、深さを調整する。	◎	◎
D)	トラクタを走らせて芋を土と一緒に掘り起こす。	◎	—
E)	小芋や土塊を選別、除去する。	—	◎
F)	ステアリングを操作して、次の畦に移動する。	○	—
G)	A)の操作に戻って、芋を収穫する。	—	—
H)	収穫終了後、タンクに保管した芋を排出する。	○	○

ト：トラクタ側から操作することが望ましい作業

ポ：ポテトハーベスタ側から操作することが望ましい作業

表2に示す作業で、○印のA), F), H)は収穫前後に行う操作である。一方、◎印のついたB), C), D), E)は収穫作業中に調整が必要な操作である。表2中のト列の◎印のついたB), C), D)はトラクタ側から操作することが望ましい作業、ポ列の◎印のついたC), E)はポテトハーベスタ側から操作することが望ましい作業である。また、C)はトラクタ側とポテトハーベスタ側の両方から操作することが望ましい作業である。従来、これらの操作は図6の操作盤1系統で操作した。操作盤はトラクタ側またはポテトハーベスタ側のどちらかに設置するため、操作性に課題があった。

また、ポテトハーベスタには作業の負荷を低減するため、いくつかの自動制御機能が組み込まれている。主なものを以下に示す。

- (1) 畦合わせ自動：走行中、畦からのズレを自動で補正する。
- (2) 掘取り深さ自動：掘取り刃の深さを一定に保つ。
- (3) ステアリング自動復帰：枕地旋回時、舵を切ったステアリングを中立位置に自動で戻す。

図6に示す従来の操作盤を用いて操作する場合、スイッチ類の数だけ配線が必要となる。そのため、トラクタ側とポテトハーベスタ側の両方に操作盤を設置する場合、配線数は2倍となり、コントローラの制御も複雑になる。

3.2 通信制御システムの構成

開発したポテトハーベスタの通信制御システムを図7に示す。通信制御システムはポテトハーベスタのコントローラ、液晶操作端末を2台（トラクタ側とポテトハーベスタ側にそれぞれ設置）、ジョイスティック、車速センサから構成され、それらをCANバスで接続した。

ポテトハーベスタはタッチパネル機能付きの液晶を備えた液晶操作端末とジョイスティックで操作する仕様とした。車速センサはマイコンを用いて、GPSから得た車速を国際規格の仕様に変換した。使用した液晶操作端末を図8に、ジョイスティックを図9に、車速センサを図10にそれぞれ示す。2台の液晶操作端末はトラクタ側とハーベスタ側のそれぞれに設置し、どちらからでも操作可能とした。

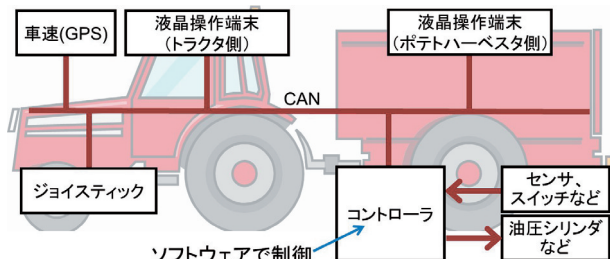


図7 通信制御システムの構成

ポテトハーベスタのコントローラを図11に示す。コントローラには通信機能と制御機能がある。通信機能はCANバス上にある2台の液晶操作端末、複数のセンサなどから情報を受信する機能と、センサの情報、通信制御システムの状態を液晶操作端末へ送信する機能である。制御機能は複数の油圧シリンダなどポテトハーベスタの機構を制御する機能である。

3.3 通信プロトコル

CANバスは主に車載用に使用されるネットワークで1回の送受信あたり最大8バイトのデータを扱える。通信速度は最大1000kbit/sである。液晶操作端末のボタン操作、情報の表示は国際規格の仕様で設計した。通信速度においても国際規格に合わせて250kbit/s³⁾とした。

国際規格ではバイトの意味づけが定義されており、液晶操作端末のボタン操作時のデータフォーマット例を図12に示す。左をByte1, 右をByte8とし、値は16進数表記である。Byte1

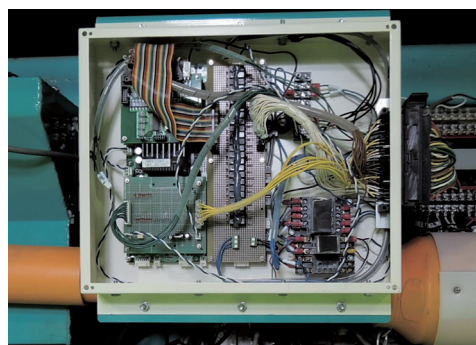


図11 ポテトハーベスタのコントローラ

の00はコマンドでボタン操作を示す。Byte2の01はボタンの状態で「押した」を示す。00の場合は「離れた」状態、02の場合は「押し続ける」状態をそれぞれ示す。Byte3とByte4の0131（上位Byteと下位Byteが入れ替わる）はオブジェクト番号を示し、Byte5とByte6の01D4は現在の画面の識別番号（ID）を示す。Byte7の16はボタンの番号を示す。Byte8は固定でFFである⁴⁾。



図8 液晶操作端末

Byte 1	2	3	4	5	6	7	8
00	01	31	01	D4	01	16	FF

図12 ボタン操作の例（押した場合）

データの表示はコントローラと液晶操作端末であらかじめ変数にIDを与えておき、そのIDにデータを与える。液晶操作端末に表示するためのデータフォーマット例を図13に示す。Byte1のA8はコマンドで変数の更新を示す。Byte2とByte3の085Cは変数のボタンのIDを示す。Byte4は固定でFFである。Byte5からByte8の000184A8は変数の値を示す。変数のデータ長はこの例の32-bit長の他、16-bit長および8-bit長も扱える。



図9 ジョイスティック

Byte 1	2	3	4	5	6	7	8
A8	5C	08	FF	A8	84	01	00

図13 データ表示の例

ボタンは約20種類あり、コンベア回転、タンク操作、畦合わせの自動機能のON/OFFなどの操作を行う。データの表示は約50種類あり、センサの状態や値、自動機能の状態、シリンダの稼働状態などの表示を行う。各操作と表示にIDを割り当てた。

3.4 操作系の設計

操作系の設計では、まず、表2に示したユーザの利用シーンを観察し、操作項目と頻度・優先度を整理した。その結果



図10 車速センサ

を踏まえ、分かりやすく操作しやすいインターフェースの実現を目指した。液晶操作端末の画面デザインにおいては、トラクタ側とポテトハーベスタ側の操作に必要な機能を選択し、表示の位置・大きさを検討した。その結果、ポテトハーベスタの動作状態を把握しやすいように、搬送コンベアの回転速度やセンサの状態を画面中央に表示した。搬送コンベアの速度、堀取り刃の深さと芋タンク類の操作ボタンを画面の左右に配置した。また、堀取り刃については深さの状態を表示した。トラクタ側の表示を図14に、ポテトハーベスタ側の表示を図15にそれぞれ示す。トラクタ側には、表2のB)にある搬送コンベアの速度調整のボタン(図14右上の「コンベア速」、「コンベア遅」)を配置し、ポテトハーベスタ側には、表2のE)にある芋と土塊を選別使用するコンベアの起動ボタン(図15右上の「選別CV回転」)を配置した。トラクタ側とポテトハーベスタ側で共通に使用するため堀取り深さの操作ボタン(図14, 図15右下の「深さキープ」)を両方に配置した。

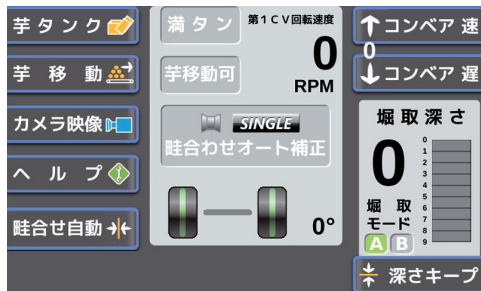


図14 トラクタ側液晶操作端末の表示



図15 ポテトハーベスタ側液晶操作端末の表示

3.5 コントローラの開発

コントローラの役割は、複数のセンサを監視し、複数の油圧シリンダを操作して芋の収穫作業を行うことである。油圧シリンダの操作は手動操作によるものと、自動機能によるものがある。手動操作は非常停止ボタンなど一部の操作を除き、すべてトラクタ側とポテトハーベスタ側にある液晶操作端末からCANバスを通して行う。また、コントローラの動作状態、制御状態、センサの状態などすべての情報をコントローラからCANバスを通して両方の液晶操作端末に送信する。

コントローラは図16に示す4つの動作モードを遷移しながら

ら機能する。電源OFFから電源を入れると通常動作モードになる。この状態はポテトハーベスタのすべての動作を行える状態である。通常モードにおいて、非常停止ボタンを押すと、非常停止動作モードに遷移し、ポテトハーベスタの動作は停止する。この時、液晶操作端末は図17に示す非常停止状態を表示する。非常停止動作モードになると、非常停止ボタンを戻しても通常動作モードには戻らず、復帰準備動作モードに遷移する。この状態に遷移した後、コントローラのリセットボタンを押すことによって、通常動作モードに遷移できる。非常停止ボタンを戻した場合、システムが急に動作することを防ぐため、このような手順とした。

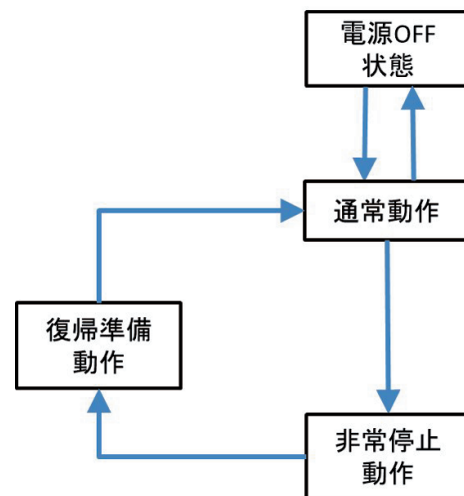


図16 通信制御システムの動作モード



図17 非常停止状態を示す表示

そのほか、自動機能の動作中に手動操作を行った場合、手動操作を優先し、自動機能をOFFにする仕様とした。自動機能を再度ONにする場合、液晶操作端末から改めて指示を出す。これにより、手動操作終了後、自動機能が有効になり意図しない動作となることを防いだ。

4. ポテトハーベスタの動作試験

実際の圃場において収穫作業を行い通信制御システムを試験した。図18に圃場での通信試験の様子を示す。試験ではトラクタでポテトハーベスタを牽引しながら、土中から芋を掘

り起こして収穫する一連の作業を行った。図19に収穫中の芋の様子を示す。また、CANバスの通信をモニタしてポテトハーベスタの動作を監視・記録を行った。監視画面の様子を図20に示す。

圃場での収穫作業の結果と、記録したCANバスの通信を分析した結果、液晶操作端末によるポテトハーベスタへの指示、ポテトハーベスタの状態表示、コントローラによるポテトハーベスタの制御が適切に行われており、通信制御システムが正常に機能していることを確認した。



図18 圃場における通信制御試験



図19 収穫中の芋

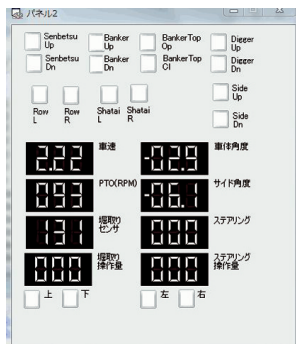


図20 動作状態の監視画面

5. まとめ

国際規格を活用したポテトハーベスタの通信制御システムを開発した。これにより、必要な情報を見やすく表示した液晶操作端末をトラクタ側とポテトハーベスタ側の両方に設置し、どちらからも操作可能になった。以上のことから、通信制御システムの開発により機能性・操作性を向上させることができた。さらに、CANバスの使用により、配線数を削減する省線化を図ることができた。

今後は、各種農業機械において、国際規格を活用した高精度な制御や新しい機能を搭載した通信制御システムの検討を進めていきたい。

謝辞

サンエイ工業(株)には、通信制御システムの開発と圃場試験において、ご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 寺尾日出男, CANによる制御通信と国際規格の動向, 第61回農業機械学会年次大会, pp.653-656, (2002)
- 2) CAN Specification Version 2.0, Robert Bosch GmbH, 1991
- 3) Tractors and machinery for agriculture and forestry –Serial control and communications data network–, Part2: Physical layer, 2002
- 4) Tractors and machinery for agriculture and forestry –Serial control and communications data network–, Part6: Virtual terminal, 2010

換気－放射ラジエータ複合型住宅用放射冷暖房システムに関する研究

白土 博康, 保科 秀夫, 富田 和彦

Study on a Ventilation- Radiator combined Radiant Cooling and Heating System for Residential Use

Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA, Kazuhiko TOMITA

抄 録

冷暖房兼用ヒートポンプ、プラスチック製の放射ラジエータ、及び空気熱交換器を付与した換気システムで構成される換気－放射ラジエータ複合型の放射冷暖房システムの基本概念の提案を行い、以下の知見を得た。

- (1)空気熱交換器を開発し、その熱交換性能・除湿性能を評価した結果、冷房時に十分な除湿能力があること、暖房時に快適性を保つ吹き出し空気温度が確保できることを確認し、住宅用として十分に利用できることがわかった。
- (2)ラジエータ上方から垂直に換気空気を吹き出す手法を検討した結果、送風量に最適値があり、この手法が暖房時の温熱環境の改善に寄与することがわかった。
- (3)本放射冷暖房システムの制御手法として、夏期には、最初に室内湿度を検知し、電磁弁により空気熱交換器流路を開閉し、顕熱負荷の変動にはヒートポンプのオンオフにより室温制御する手法を提案した。冬期にはラジエータだけでも十分顕熱負荷に対応できるため、空気熱交換器は使わなくても良いが、外気温が低く、さらに換気による顕熱負荷が大きい時には空気熱交換器に通水し、プレヒートを行うこともできる。

キーワード：放射冷暖房システム、プラスチック製放射ラジエータ、空気熱交換器、垂直吹き出し

Abstract

We proposed a concept of a radiant cooling and heating system that is composed of a heat pump, radiators made of plastic pipes, a ventilation system with an air-liquid heat exchanger.

First of all, we developed the air-liquid heat exchanger for air dehumidification and preheat of houses. In cooling mode, the rooms can be dehumidified. In warming mode, the suitable temperature of blowing air from the exchanger can be maintained. These results show the exchanger works well for residential use. Next, we studied on the optimization of the vertical air blowing of the ventilation system above the radiators. The optimum value of the air volume was found. The method contributes to improvement of the indoor thermal environment. Finally, we proposed a system control of the radiant cooling and heating system. In summer, first of all, humidity of the room is detected for the control of the electromagnetic valve of the exchanger. Next, the heat pump is controlled by on-off operation for the change of the sensible heat load. In winter, we don't have to use the exchanger because the heat release of the radiators are enough for the sensible heat load. When the sensible heat load is larger because of the lower temperature of outside, we can preheat the ventilation air by using the exchanger.

KEY-WORDS : Radiant cooling and heating system, Radiator made of plastic pipes, Air-liquid heat exchanger, Vertical air blowing

1. はじめに

放射冷暖房システムは、放射効果により室温と熱媒温度の差を小さくでき、省エネルギー性が高いシステムである。また、ちり・ほこりを拡散せず、気流感を与えないことから快適な室内環境を与える。これらのことから、北海道では多くの新築住宅に暖房用として採用されている。しかしながら、本州以南の地域では、放射冷房のニーズが高いにも関わらず、特に住宅では普及していない。その理由としては以下の点が挙げられる。

- ①大量生産され、低コストなエアコンが住宅の冷暖房機器として主流である。一方、放射パネルは結露受けのパンや排水管が必要なこともあり、受注生産になりやすく、コストが高い。
- ②従来の放射パネルは一般に鋼板製であり、冷温水と接触する内面側の腐食だけでなく、冷房の場合は、結露による外面腐食の懸念がある。

本報告では、これらの課題を解決する換気-放射ラジエータ複合型の住宅用放射冷暖房システムについて概説するとともに、各部材の特性評価や複合システムの制御方法について報告する。

2. システムの概要

図1に本研究で提案する放射冷暖房システムの概要を示す。本システムは、冷暖房兼用ヒートポンプと冷暖房に対応する放射放熱体（以下ラジエータと呼ぶ）で室内の顕熱負荷に対応するとともに、同一ヒートポンプを熱源とし、夏期には潜熱負荷の除去、冬期には換気空気の前熱を目的として、給気口空気熱交換器を付与した換気システムで構成される。

ヒートポンプは空気熱源・地中熱源等、場所・コストに応じて使い分けが可能である。換気システムには、給気押し込み型の第一種または第二種が利用できる。排気型の第三種を使用する場合は、居室空気を別途熱交換器に循環させる方式を採用する。本空気熱交換器は、デシカント（吸着材）に水分を吸着させ、ヒータにより再生する従来のデシカント空調機に比べ、高い省エネルギー性を確保できる。本研究では換気量 $120\text{m}^3/\text{h}$ において、夏期の 30°C 相対湿度 80% ($21.67\text{g}/\text{kgDA}$)の外気を 26°C 相対湿度 60% ($12.69\text{g}/\text{kgDA}$)に調整することを想定し、システム全体で除湿速度を $1165\text{g}/\text{h}$ （除湿量を $8.98\text{g}/\text{kgDA}$ 相当）とすることを目標としている。

放射ラジエータには、安価で耐食性を有する縦型のプラスチック製のラジエータ¹⁻³⁾を使用する。縦型放射ラジエータは意匠性があり、圧迫感が少なく冷暖房に兼用できるが、自然対流条件下では暖気が上昇し、室内上方で滞留しやすい。しかしながら、換気システムを併用し、上部暖気を下降させる空気の流れを形成すれば、これを改善できる。予備実験で、

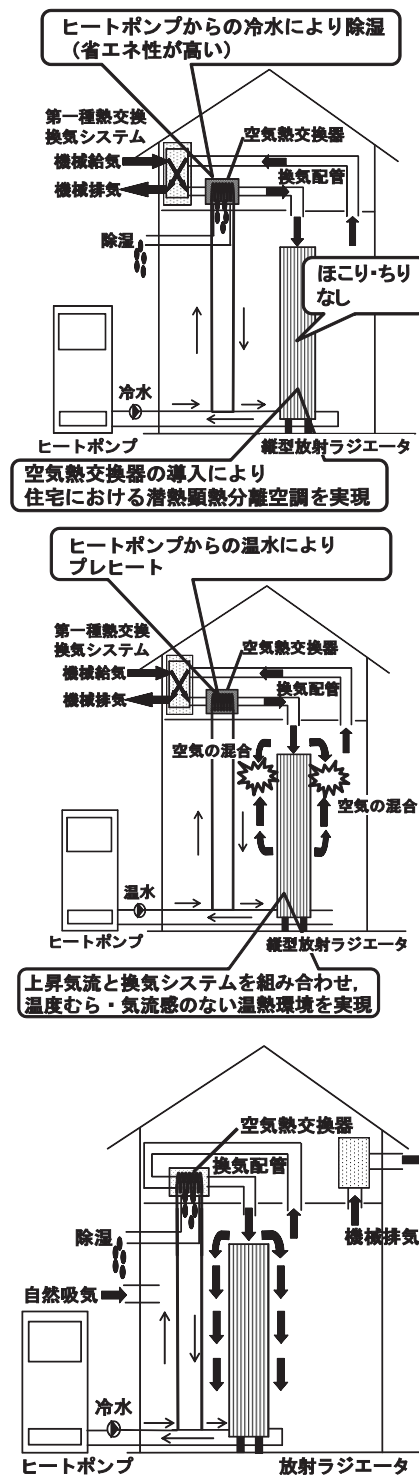


図1 換気-放射ラジエータ複合型放射冷暖房システムの概要（上；第一種換気型冷房時、中；第一種換気型暖房時 下；第三種換気型）

放射ラジエータに対し、水平よりも垂直に吹き出すことによって室内環境を改善できると判断できたため、本研究では、換気システムをラジエータに垂直に吹き出した場合の放熱能力の評価と給気吹きだし方法の最適化を行った。

3. 空気熱交換器の概要と評価

3.1 空気熱交換器の概要

図2に開発した空気熱交換器の外観を示す。空気熱交換器は、給気・排気口、冷温水出入口による熱交換コイル、ドレイン等で構成されており、寸法は830（横）×144（高さ）×214（奥行）mmである。除湿量の拡大、製作の容易さを得るため、筒内の長手方向に冷温水コイルを配置することにより熱・湿度交換効率を上げる等の工夫を施している。

3.2 熱交換器の性能評価方法

3.2.1 試験室の概要

図3に試験室の概要を示す。水冷密閉型環境試験室（外室）内に、床面積2400mm×1800mm、天井高さ2000mmの内室（試験室）が設けられており、内室の周囲壁はポリプロピレンシート、天井はアルミ製パンチングメタルである。その外周囲に加湿器と扇風機を配備し、試験室中央、床上750mmの位置に配置した湿度センサーと温度制御装置により恒温恒湿に自動制御される。なお、暖房実験では特に部屋の湿度制御は行っていない。

3.2.2 冷温水循環システムの概要

冷温水循環のシステムの概要を図4に示す。冷温水タンク中の不凍液を循環恒温槽、ヒータで温度調整し、空気熱交換器に通水する。なお、除湿能力試験時には、熱交換器のコイル表面に結露を発生させて除湿を行うため、結露受けとしてビーカー、結露水の重量測定用に台はかり（パソコンで自動計測）が配置される。また、熱交換器は24Kグラスウールで覆われている。

3.2.3 試験方法

熱交換器の冷温水入口に所定の温度、流量で不凍液を循環させ、試験室の中心、床上750mmを代表点とし、代表点の温湿度が所定値となるように、試験室の壁を加温・冷却し、加湿器により加湿した。なお、熱交換器の熱交換能力 Q_{ex} [W]は、平均水温に対する不凍液の比熱 C_{pw} [J/(g・°C)]、平均水温に対する不凍液の比重 ρ [g/L]、不凍液の循環流量 f_w [L/s]、熱交換器の入口温度 $T_{wi,ex}$ [°C]、熱交換器の出口温度 $T_{wo,ex}$ [°C]の実測値により、式(1)で求められる。

$$Q_{ex} = C_{pw} \times \rho \times f_w \times |(T_{wo,ex} - T_{wi,ex})| \quad (1)$$

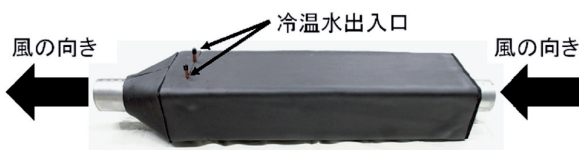


図2 空気熱交換器の外観

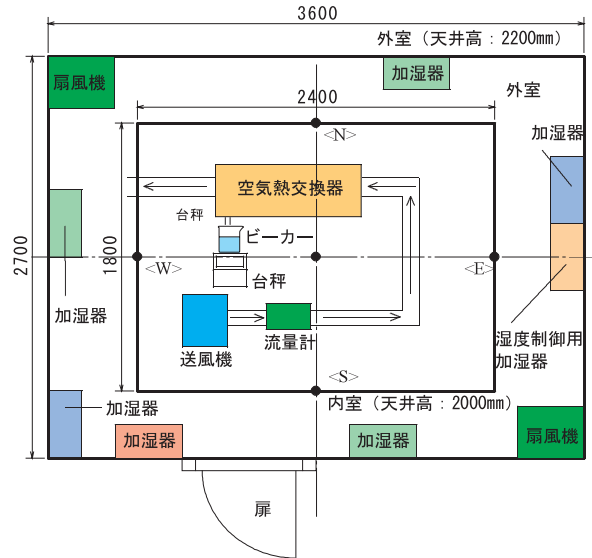


図3 試験室の概要

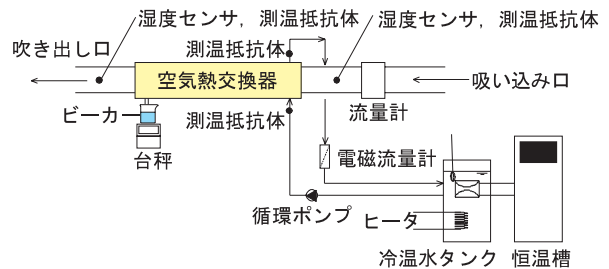


図4 冷温水循環のシステムの概要

さらに、熱交換器試験時にはビーカーに溜まった結露水重量を1分間隔で測定し、安定した状態下における30分間の重量変化の傾きから除湿速度を算出した。

冷房能力、暖房能力の各試験条件を表1、表2に示す。冷房能力の試験では、全熱交換型第一種換気システムと第三種換気システムを想定した給気空気温湿度27°C、70RH%の実験と、第二種換気システムを想定した35°C、70RH%の実験を行った。風量は20~150m³/h、入力設定冷水流量は0.8~4.5L/minとした。暖房能力の試験では、第一種、第三種換気システムを想定して、給気空気温度を20°C、風量を20~120

表1 冷房能力試験条件

冷水入力温度 [°C]	設定流量 [L/min]	風量 [m³/h]	給気空気温度 [°C]	給気空気湿度 [RH%]
10	0.8、2、4	20、40、80、120	27	70
	2、3.5、4.5	100、120、150	35	70

表2 暖房能力試験条件

温水入力温度 [°C]	設定流量 [L/min]	風量 [m³/h]	給気空気温度 [°C]
30、40	2、3.5、4.5	20、40、80、100、120、150	20
		100、120、150	10、0

m³/hとした実験とそれに加え第二種換気システムを想定して、給気空気温度を0, 10℃, 風量を100~150m³/hとし実験を行った。入力設定温水流量は2~4.5L/minとした。

4. 熱交換器の性能評価結果

4.1 冷房実験

図5に給気空気温湿度をそれぞれ27℃, 70RH%, 風量を20~120m³/hとした場合の冷水流量と熱交換量, 除湿速度, 吹き出し空気の温湿度の関係について風量をパラメータとして示す。同様に図6に給気空気温湿度をそれぞれ35℃, 70RH%, 風量を100~150m³/hとした場合について示す。冷水

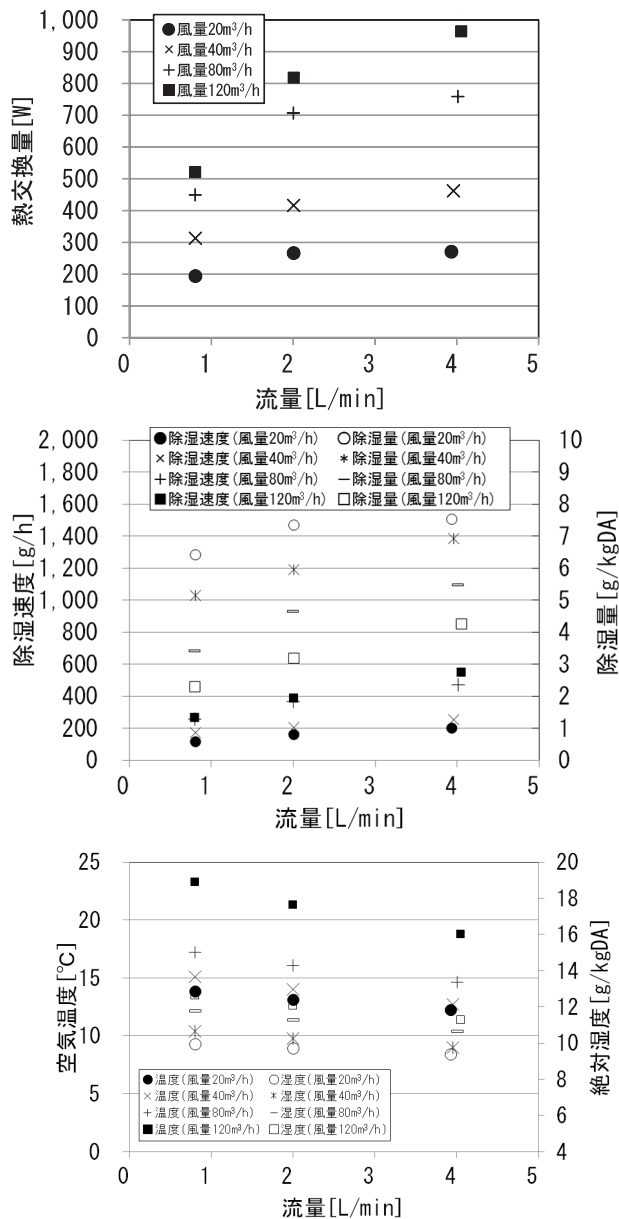


図5 冷水流量と各物性値の関係(上;熱交換量,中;除湿速度,下;吹き出し空気温度,給気空気温度27℃,70RH%)

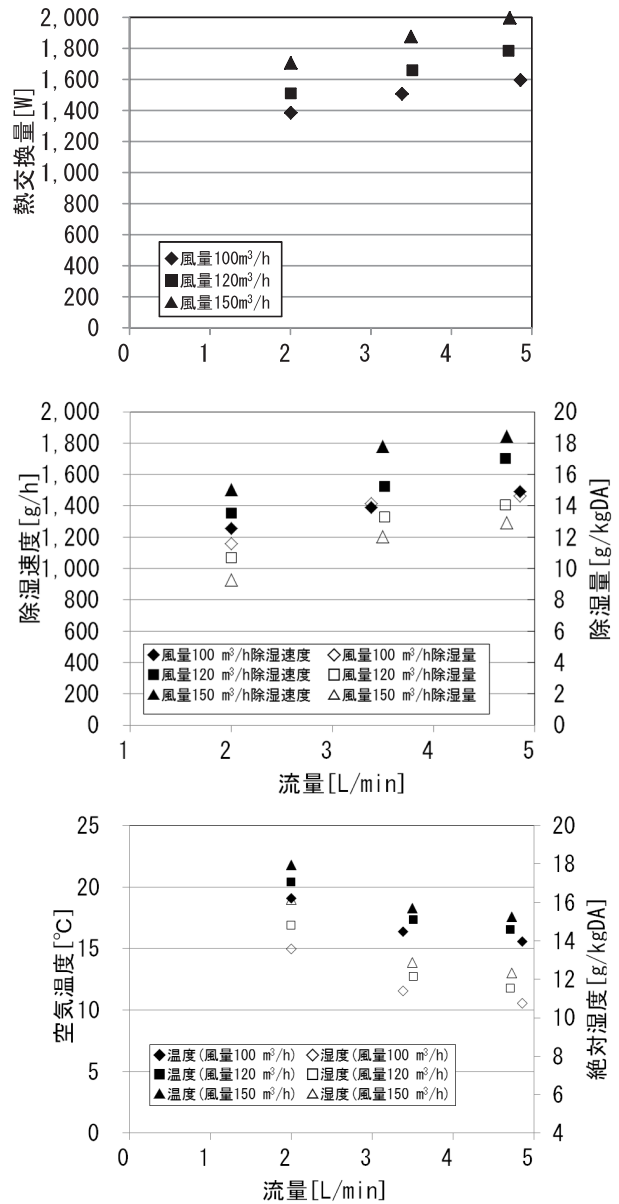


図6 冷水流量と各物性値の関係(上;熱交換量,中;除湿速度,下;吹き出し空気温度,給気空気温度35℃,70RH%)

流量, 風量が大きくなると, 熱交換量, 除湿速度が増加する。冷水流量が大きくなると, 熱交換量が増えることから, 吹き出し空気温度, 絶対湿度は低下する。風量が大きくなると熱交換される空気量も多くなることから, 吹き出し空気温度, 絶対湿度は上昇する。いずれの場合も冷水流量を5L/min程度確保できれば必要な除湿(吹き出し空気絶対湿度12g/kgDA以下)は可能と推定できる。

4.2 暖房実験

図7に給気空気温度を20℃, 温水入力温度を30℃とした場合の温水流量と熱交換量, 吹き出し空気温度の関係について, 風量をパラメータとして示す。実験の範囲では温水流量の明

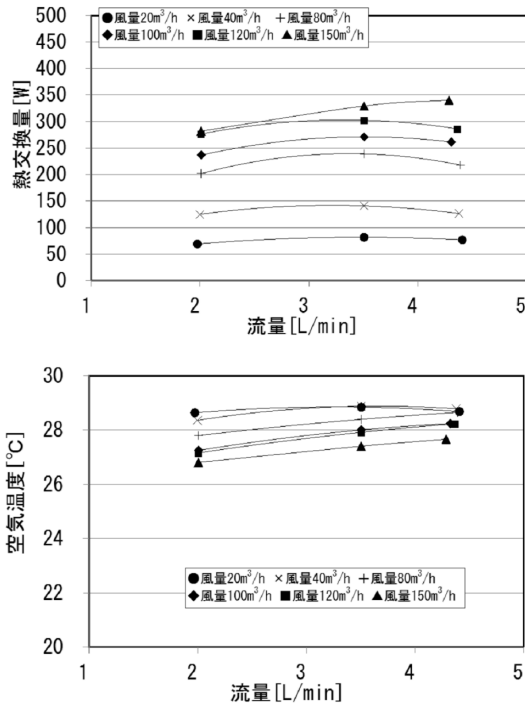


図7 温水流量と熱交換量, 吹き出し空気温度の関係 (上; 熱交換量, 下; 吹き出し空気温度, 給気空気温度20°C, 温水入力温度30°C)

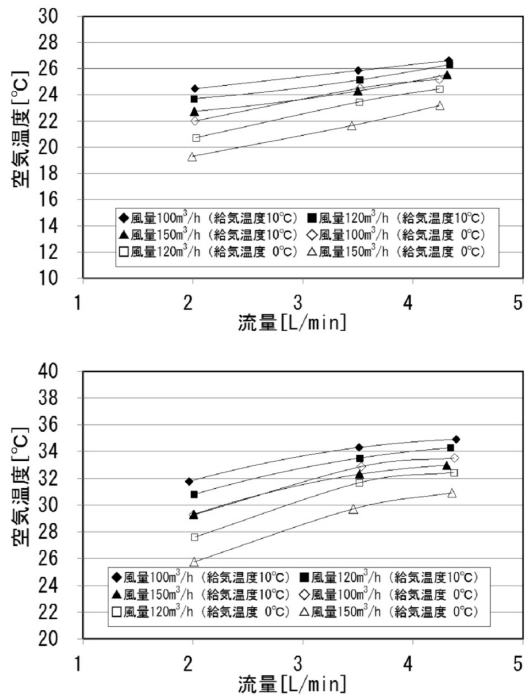


図8 温水流量と吹き出し空気温度の関係 (上; 温水入力温度30°C, 下; 温水入力温度40°C, 給気空気温度10°C, 0°C)

快な依存性は見られず, 給気空気温度を10°C, 0°Cとした場合でも同様の傾向が見られた。風量が大きくなると熱交換される熱量も多くなることから, 吹き出し空気温度は低下するが, 26°C以上である。図8に温水入力温度を30°C, 40°C, 給

気空気温度を10°C, 0°Cとして, 風量を100~150m³/hとした場合の温水流量と吹き出し空気温度の関係について風量をパラメータとして示す。温水入力温度30°Cで給気空気温度が0°Cの場合, 吹き出し空気温度が20°Cを下回る。外気温度が0°C以下で第二種換気システムと本空気熱交換器を用いる場合, 温水入力温度を40°Cとするなどの設定が必要となると考えられる。この場合, 外気温度が0°C, 温水流量2~4.4 L/minで熱交換量は818~1228Wであり, 暖房負荷が大きい北海道でも放射ラジエータと併用することで十分に機能する。

5. 換気システムの放射放熱器吹き出し方法の検討

5.1 実験方法

5.1.1 試験室及び冷温水システム

図9に実験の模式図を, 図10にその外観を示す。本実験には恒温恒湿室を2室使用した。片方の恒温恒湿室で空気熱交換器からの出口の温度を模擬した所定温度の空気を作成した。もう一方の恒温恒湿室を試験室とし, 試験室内に縦型放射ラジエータ (縦1000mm, 横410mm, 奥行き60mm) を設置し

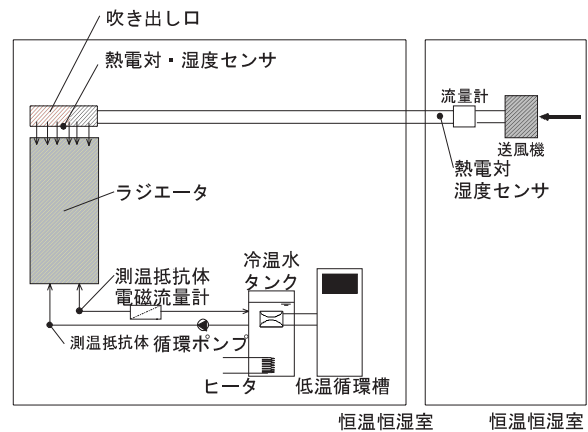


図9 実験装置の模式図

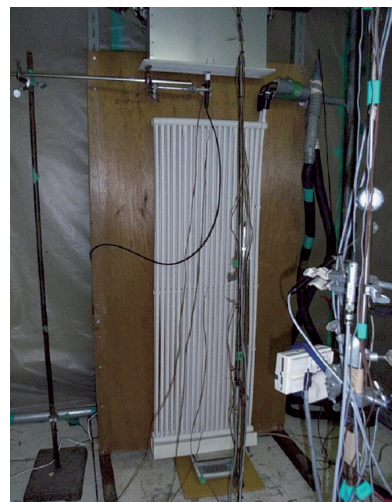


図10 実験装置の外観

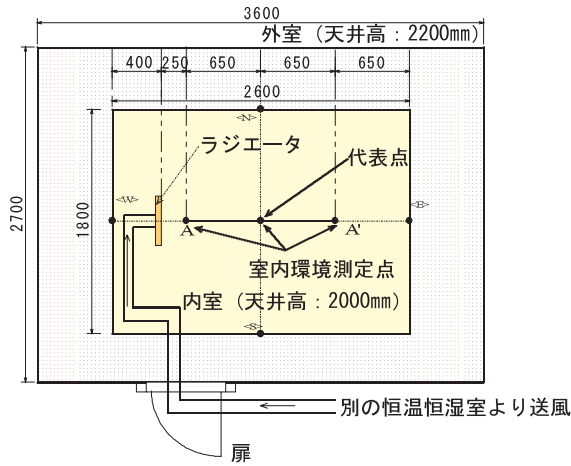


図11 試験室の概要

た。放射ラジエータから150mm上部には恒温恒湿室で作成した空気の吹き出し口を設けた。試験室，冷温水システムの概要は3.2.1及び3.2.2と同様である。なお，本実験は暖房実験であるので特に試験室内の湿度制御は行っていない。冷温水タンク中の不凍液を循環恒温槽，ヒータで温度調整し，放射ラジエータに通水する。図11に試験室の概要を示す。室内環境測定点はラジエータ正面250 (A点)，900,1550mm (A'点)とし，床上100, 500, 1000, 1500, 2000mmに熱電対を設置した。

5.1.2 試験方法

放射ラジエータに所定の温度，流量で不凍液を循環させ，試験室の中心，床上750mmを代表点とし，代表点の温度が20℃となるように，試験室の壁を加温・冷却した。放射ラジエータの熱交換能力 Q_{ra} [W] は，平均水温に対する不凍液の比熱 C_{pw} [J/(g・℃)]，平均水温に対する不凍液の密度 ρ [g/L]，不凍液の循環流量 f_w [L/s]，放射ラジエータの入口温度 T_{wi} [℃]，出口温度 T_{wo} [℃] の実測値により，式(2)で求められる。なお，通水流量は2L/min，入力温水温度29.4, 34.2, 39.0℃，吹き出し口風量を0, 20, 40, 60m³/hとした。なお，入力温水温度は空気熱交換器に2L/minで通水した時の空気熱交換器出口温水温度である。

$$Q_{ra} = C_{pw} \times \rho \times f_w \times |(T_{wo} - T_{wi})| \quad (2)$$

5.2 実験結果

図12に放射ラジエータ入力温水温度29.4℃における図11のA-A'断面の温度分布を示す。換気風量がない場合は床表面近傍に冷気が滞留していることがわかる。これに対し風量20 m³/hの場合は，垂直温度分布の改善が見られる。さらに風量40,60m³/hとすると，上方に熱気が滞留することが確認できる。この結果から，温熱環境を改善する送風量に最適値があり，この手法が暖房時の温熱環境の改善に寄与することがわかった。放射ラジエータは一般住宅で6枚程度設置する設計となっており，換気システムの風量が120m³/hとすると，

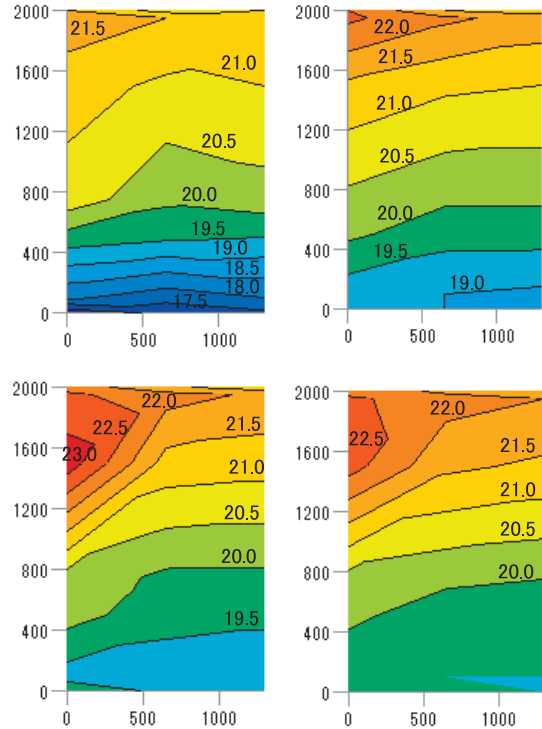


図12 A-A'断面の温度分布 (入力温水温度29.4℃，左上，上右，下左，下右の順に風量0, 20, 40, 60m³/h)

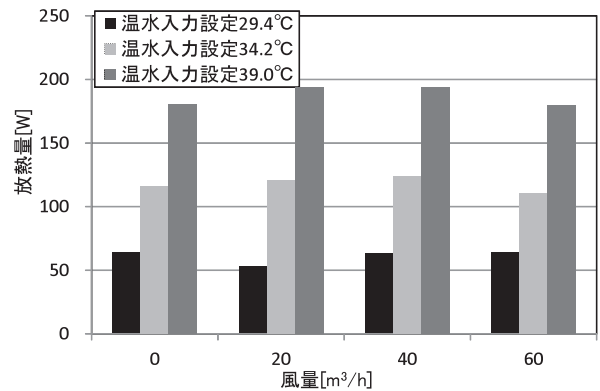


図13 放射ラジエータの放熱量

ほぼ最適な吹き出し風量が得られる。換気システムの風量が最適化されない場合は，放射ラジエータに吹き出す口数を調整することによって対応する。

図13に入力温水温度29.4, 34.2, 39.0℃における放射ラジエータの放熱量を示す。ラジエータの放熱量は，入力温水温度の影響は受けるが，吹き出し風量に依存せずほぼ同等であった。

6. システム制御

6.1 システム制御手法

図14に本研究で提案する放射冷暖房システムの制御手法の模式図を示す。夏期には，最初に室内湿度を検知し，電磁弁

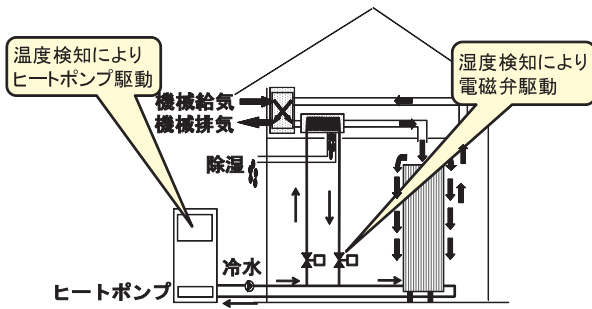


図14 システム制御の模式図

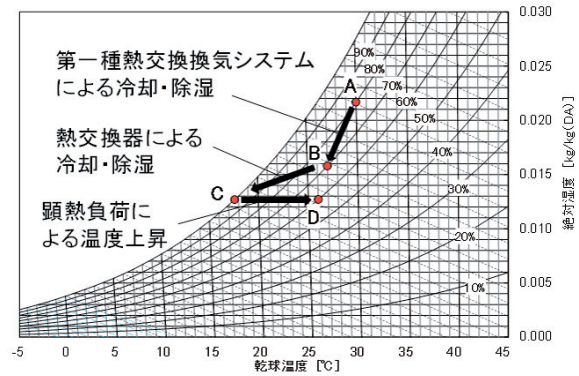


図15 本システムにおける空気線図

により空気熱交換器流路を開閉する。顕熱負荷の変動にはヒートポンプのオンオフにより室温制御する。冬期には、ラジエータだけでも十分顕熱負荷に対応できるため、空気熱交換器は使わなくても良いが、外気温が低く、さらに換気負荷が大きい時には空気熱交換器に通水し、プレヒートを行うこともできる。

6.2 システム制御例

ここで、温度30℃相対湿度80%の外気に対し、本システムによって居住空間を26℃相対湿度60%とすることを考える。図15にその空気線図を示す。温度30℃相対湿度80%の外気(点A)は、温度交換効率75%、湿度交換効率65.6%、換気量120m³/hの全熱交換第一種換気システムで26℃相対湿度60%の室内空気と温湿度交換すると式(3)、(4)により27.0℃相対湿度70%(点B)が得られる。

$$\text{温度交換効率}[\%] = (T_A - T_B) / (T_A - T_D) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{湿度交換効率}[\%] = (X_A - X_B) / (X_A - X_D) \times 100 \quad (4)$$

ここで T は各点での空気温度[°C]、 X は絶対湿度[kg/kg(DA)]である。この空気を温度26℃相対湿度60%(点D)とする際の除湿速度、全熱交換負荷は、換気量 F 、各点での絶対湿度 X 、比エンタルピー h [kJ/kg(DA)]、比容積 V [m³/kg(DA)]により(5)、(6)式で411g/h、322Wと算出できる。

$$\text{除湿速度}[\text{g/h}] = F \times (X_B / V_B - X_D / V_D) \quad (5)$$

$$\text{全熱交換負荷}[\text{W}] = F \times (h_B / V_B - h_D / V_D) / 3600 \quad (6)$$

その除湿速度に対応するため、流量2.43L/minで冷水を空気熱交換器に循環させると、除湿空冷により相対湿度がほぼ100%となり(点C)、居室に吹き出す。点Cから点Dまでは、顕熱が余剰しているが、開口部や断熱部による顕熱負荷で空気温度が上昇する。それ以上の顕熱負荷にはラジエータからの放熱で調整し、顕熱負荷が小さい場合にはヒートポンプを停止させる。また、換気量120m³/h、30℃相対湿度80%の外気を26℃相対湿度60%とする際に必要な除湿速度は1165g/hであるから、第三種型の場合は冷水温度10℃、4.4L/minの流量を2台の熱交換器に循環させると換気による潜熱負荷は賅える。

まとめ

冷暖房兼用ヒートポンプ、プラスチック製の放射ラジエータ、熱交換器を付与した換気システムで構成される換気-放射ラジエータ複合型の放射冷暖房システムの基本概念の提案を行った。次に、空気熱交換器の開発と熱交換特性の評価及び換気システムのラジエータ上方からの吹き出し方法の最適化、システム制御について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1)開発した空気熱交換器の冷房時における熱交換性能・除湿性能を評価した結果、冷房時には十分な熱交換能力、除湿能力があることを確認した。また、暖房時にも十分な熱交換能力があり、快適性を保つ吹き出し空気温度が確保できることを確認した。これらの結果、この空気熱交換器は住宅用として十分に利用できることが分かった。
- (2)ラジエータ上方から垂直に換気空気を吹き出す手法を検討した結果、送風量に最適値があり、この手法が暖房時の温熱環境の改善に寄与することが分かった。
- (3)本放射冷暖房システムの制御手法として、夏期には最初に、室内湿度を検知し、電磁弁により空気熱交換器流路を開閉し、顕熱負荷の変動にはヒートポンプのオンオフにより室温制御する手法を提案した。冬期はラジエータだけでも十分顕熱負荷に対応できるため、空気熱交換器は使わなくても良いが、外気温が低く、さらに換気負荷が大きい時には空気熱交換器に通水し、プレヒートを行うこともできる。

参考文献

- 1) 白土博康他：空気調和・衛生工学会論文集，158，(2010-5)，pp.15-21
- 2) 白土博康他：空気調和・衛生工学会論文集，164，(2010-11)，pp.49-54
- 3) 白土博康他：空気調和・衛生工学会論文集，189，(2012-12)，pp.47-54

担持金属触媒を用いた草本系バイオマスからの糖アルコールの製造

山越 幸康, 北口 敏弘, 上出 光志, 小林 広和*, 福岡 淳*

Production of Sugar Alcohols from Herb Series Biomass by Supported Metal Catalysts

Yukiyasu YAMAKOSHI, Toshihiro KITAGUCHI, Mitsushi KAMIDE
Hirokazu KOBAYASHI*, Atsushi FUKUOKA*

抄 録

白金／カーボンブラック触媒 (Pt/C), ルテニウム／活性炭触媒 (Ru/AC)を用いた草本系バイオマスからの糖アルコール製造について検討を行った。原料の様々な前処理について検討を行った結果、草本系バイオマス原料としてスキを用い、前処理としてアルカリ水溶液への浸漬と蒸煮爆砕処理を施した場合、触媒反応のみでキシランをキシリトールへ70mol%の高収率で変換することができた。前処理でのキシラン残存率は80%で、前処理と触媒反応を通して56mol%の高収率でキシランをキシリトールに変換することができており、Pt/C及びRu/AC触媒は、草本系バイオマスからの糖アルコール製造に有効な触媒であることがわかった。

キーワード：草本系バイオマス, 担持金属触媒, キシリトール, 糖アルコール

Abstract

Sugar alcohols were produced from herb series biomasses by catalysts of Pt/carbon black (Pt/C) and Ru/Active carbon (Ru/AC). High xylitol yield of 70mol% for the catalytic reaction by Pt/C was obtained for a silver grass with both immersion of alkali aqueous solution and steam explosion treatments. Since 80mol% of xylan for the original silver grass was kept after the pretreatments, conversion ratio of xylan of the silver grass to xylitol was 56mol% for a series of the pretreatments and the catalytic reaction process. It was found that Pt/C and Ru/AC were available catalysts for direct production of xylitol from herb series biomasses.

KEY-WORDS : Herb series biomass, Supported metal catalyst, Xylitol, Sugar alcohol

1. はじめに

食料と競合しない非可食部のバイオマスを原料とした化学製品製造に関する検討が盛んに行われている。特に、木質や草本系のバイオマスは国内に豊富に存在しており、それらの中に多量に含まれるセルロースやヘミセルロースは、素材そのままでは活用の範囲は限定的であるため、有用化学物質への分解・変換が期待されている。これまでも酵素や硫酸などを用いたバイオマスの分解・変換が検討されてきたが、酵素法は高コスト、低反応速度、生成物分離の点で問題があり、

硫酸法では装置腐食性や反応後の硫酸の中和除去が障害となっている。近年、それらの課題を克服するため、固体触媒を利用したバイオマス変換に関する研究が検討されており^{1,2)}、担持金属触媒を用いて糖アルコールを製造する技術が開発されている¹⁾。その技術により、試薬セルロースでは高収率で糖アルコールに変換することができているが、実バイオマスでの詳細な検討はなされていない。本研究では、担持金属触媒を用いた実バイオマスからの糖アルコールの製造を目指し、前処理及び触媒反応条件等を検討した。

事業名：経常研究

課題名：触媒を用いたバイオマスからの化学原料製造プロセスに関する研究（平成22～24年度）

* 北海道大学

* Hokkaido University

2. 実験方法

2.1 供試試薬及びバイオマス

供試試薬としては、セルロース（メルク-アビセル）、キシロオリゴ糖（和光純薬工業㈱）を使用した。

供試バイオマスは、稲わら（岩見沢市）、ススキ（中標津町）、麦わら（芽室町）、オギ（中標津町）、ヨシ（中標津町）を使用した。

供試の試薬及びバイオマス等について、グルカン、キシラン、ガラクトタン、アラビナン、マンナン及びリグニン含有量をNREL/TP510-42618³⁾で定量した。また、NREL/TP-510-42621⁴⁾で固形物含有量を測定し、それぞれの無水ベースの含有率を求めた。

さらにススキについては、JIS M8812⁵⁾に準拠して灰分を測定するとともに蛍光X線分析装置（㈱リガク、ZSX Primus II）を用いて、ファンダメンタルパラメータ法で灰化物中の無機成分の含有量を測定し、ススキ中の無機成分の含有量を求めた。

2.2 前処理

供試バイオマスは、カッターミル（㈱ホーライ、MAC-0.75 kW、スクリーン3 mm）で粉碎後、20-80mesh（177-850 μm）に篩い分けしたサンプルに表1に示す前処理を施した。

2.3 触媒の調製

触媒には、カーボンブラック（BP2000）担持白金触媒（1.3 wt%Pt, Pt/C）及び活性炭（Norit）担持ルテニウム触媒（2 wt%Ru, Ru/AC）を使用した。調製方法は既報のとおりとした^{6), 7)}。また、比較用としてスポンジニッケル触媒（日揮触媒化成、N152D）を使用した。

表1 バイオマスに施した前処理

前処理名	前処理条件
微粉碎	振動ミル、振動数18.3Hz、振幅14mmで5分間粉碎 ※いくつかのサンプルについては微粉碎後、0.1N塩酸で洗浄処理
蒸煮爆砕	190℃2分間加熱後、瞬時に大気解放
アルカリ	1.4%水酸化ナトリウム水溶液に所定温度(25℃,60℃)で所定時間(6h,96h)浸漬 ※触媒反応前に0.1N硫酸水溶液で中和

2.4 糖アルコール製造試験

所定量の触媒、蒸留水、供試試薬もしくはバイオマスをオートクレーブ（オーエムラボテック-MMJ100）に入れ、室温で5 MPaの水素を封入し、キシロオリゴ糖の場合170℃1.5時間、そのほかの場合は190℃24時間攪拌することで試験を行った。

2.5 触媒反応での糖アルコール収率及び転化率

前処理後のバイオマスについて、グルカン、キシラン及び

リグニン含有量をNREL/TP510-42618で定量し、それぞれの物質量を求め、初期値とした。また、反応後の溶液中のソルビトール、キシリトール含有量を液体クロマトグラフで測定し、その値から溶液中の物質量を算出し、初期値で除することで、物質ベースの糖アルコール収率を求めた（式(1)、分母の物質量はグルカンの場合は、C₆H₁₀O₅ベース、キシランの場合はC₅H₈O₄ベースで算出した）。

$$\text{糖アルコール収率(\%)} = \frac{\text{生成した糖アルコールの物質質量}}{\text{仕込みバイオマス中の単糖の物質質量}} \times 100 \quad (1)$$

なお、反応後の溶液中の未知物質については、液体クロマトグラフ質量分析計（サーモフィッシャーサイエンティフィック、LCQ Fleet）を用いて、質量数を確認することで推定した。

3. 結果と考察

3.1 セルロースでのソルビトール製造試験

実バイオマスでの試験に先だって、試薬セルロースを用いて、糖アルコール製造収率向上の阻害要因について検討した。

表2にセルロースにいくつかの無機成分を入れた場合の触媒分解反応の結果を示す。無機成分の存在により収率は大幅に減少している。特にNaHCO₃、CaCO₃などの弱酸と強塩基

表2 セルロースからのソルビトール製造に及ぼす無機成分の影響

サンプル名	ソルビトール収率(mol%)
セルロース	33.9
セルロース+CaCO ₃	0.1
セルロース+CaSO ₄	23.8
セルロース+NaHCO ₃	1.0
セルロース+Na ₂ SO ₄	15.9
セルロース+K ₂ SO ₄	10.0

※反応条件190℃24時間、水素5MPa、Pt/C触媒:200mg、セルロース320 mg、蒸留水40g、無機成分：Ca,Na,Kベースで0.34mmol

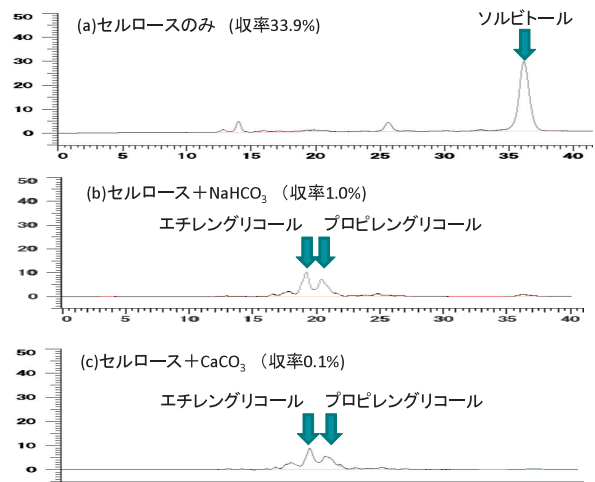


図1 無機成分による液体クロマトグラフの変化

の塩を入れた場合は、ソルビトールはほとんど生成していない。

図1に液体クロマトグラフのチャートを示す。弱酸と強塩基の塩の場合、エチレングリコール、プロピレングリコールなどの過分解物が多量に生成しており、その塩が過分解反応の進行を助長しているものと示唆された。実バイオマスには、これらの無機成分が相当量含有している場合があり、糖アルコール製造収率を向上させるためには、これらの除去が必要であることがわかった。

また、福岡ら⁸⁾は、ボールミルによる微粉砕がセルロースのソルビトール収率を著しく向上させることを報告している。本研究がターゲットとしている反応は固体触媒と固体のバイオマスの反応であるため、反応領域はそれらが会合することのできる限られた領域でのみ起こるものと想定され、粒径も大きなファクターと考えられる。さらに、実バイオマスの場合、一般的な酵素反応や酸による分解の場合でもいわれているようにリグニンの含有量も大きな因子と考えられる⁹⁾。

3.2 実バイオマスでのキシリトール製造試験

国内での糖アルコールの価格及び市場性は表3のとおりである¹⁰⁾。ソルビトールの市場規模は大きく、魅力的な化学製品ではあるが、本研究では、より高価格のキシリトールをターゲットとして検討を行った。

供試草本系バイオマスのキシラン含有量の分析結果を図2に示す。図には、従来キシリトール製造用原料として使用されている白樺の値を参考値として示した。ススキ、ヨシ、オ

表3 糖アルコールの価格と市場性¹⁰⁾

種類	形状	需要量 (t, 2011年)	平均価格 (円/kg)	用途
ソルビトール	液状	120,000	150	甘味料、医薬品、化学物質合成原料 (ビタミンC, 界面活性剤等)
	粉末	7,500	300-500	
エリスリトール		8,000	700-1000	甘味料、低カロリー食品
マンニトール		2,000	1,000	医薬品 (錠剤用賦形剤、血圧降下剤)、食品添加物、界面活性剤原料
キシリトール		8,400	600-800	甘味料、化粧品、医薬品

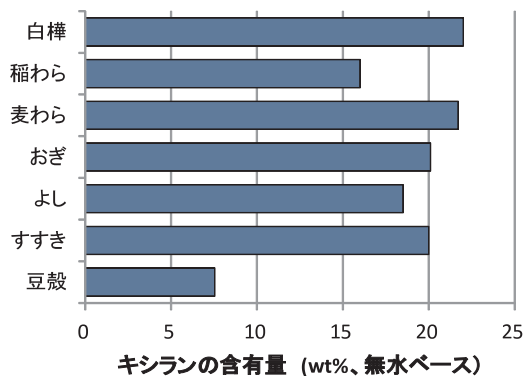


図2 いくつかのバイオマスのキシラン含有量

ギ、麦わらのキシロース含有量は20%程度と高い値であり、キシリトール製造用原料として使用できる可能性があることがわかった。

まず、実バイオマスに含まれるリグニンなどの影響を除外して触媒反応に関する検討を行うため、キシロオリゴ糖を用いてキシリトールの製造試験を行った。試験結果を表4に示す。Pt/C, Ru/ACでは、それぞれ50.7%, 48.2%の高収率でキシリトールを製造することができている。表には参考のため、市販の糖アルコール製造触媒であるスポンジニッケル触媒の結果も示したが、Pt/C, Ru/ACに比べて多量の触媒(金属原子数ベースで概ね1000倍)を加えているにもかかわらず、収率は22.8%にとどまっている。

キシロオリゴ糖からのキシリトールの製造は、加水分解によるキシロースの生成とその水素化の二段階で進んでいるものと推定される。スポンジニッケル触媒での反応生成物の液体クロマトグラフ質量分析計のマスペクトルでは、炭素数2から9のキシロオリゴ糖アルコールの存在を示すピークが現れており、糖の水素化は十分に進行するものの、糖の分解反応はあまり進まず、結果としてオリゴ糖のアルコール物が多量に生成することが示唆された。このことから、本研究で用いたPt/C, Ru/AC触媒は、スポンジニッケル触媒に比べて多糖類の加水分解能が高いことがわかった。

表5にススキを原料として、様々な前処理を施した際のキシリトール収率を示す。Pt/C触媒では、前処理なしでは、収率は3.2%であったが、振動ミルで微粉砕処理すると収率は向上し、17.0%となり、さらに酸での洗浄処理を加えることで32.0%まで向上した。供試のススキには、カリウムが0.3%, カルシウムが0.2%程度含まれており、それらは前項で記述したように、糖アルコールの収率を低下させる効果がある。そのため、振動ミル処理サンプルでの酸洗浄による収率

表4 キシロオリゴ糖でのキシリトール製造試験結果

触媒種	キシリトール収率 (mol%)
Pt/C	50.7
Ru/AC	48.2
スポンジニッケル	22.8

※スポンジニッケル触媒は、アルカリ分除去のため酢酸水溶液で洗浄。キシロオリゴ糖300mg, 水40g, 170°C, 1.5時間, 水素5MPa

表5 いくつかの前処理でのキシリトール収率

前処理	キシリトール収率 (mol%)
前処理なし	3.2
微粉砕	17.0
微粉砕+酸洗浄	32.0
蒸煮爆砕	7.4
アルカリ	8.2
アルカリ+蒸煮爆砕	56.6

※バイオマス320mg (ススキ, 乾物ベース), 水40g, Pt/C触媒100mg, 反応条件: 190°C 24時間, 水素5MPa

の向上は、それらのアルカリ分の除去に起因しているものと思われる。

また、表5に示したように蒸煮爆砕処理やアルカリ処理を施しても、収率は、それぞれ7.4%、8.2%と低かったが、2つの処理を組み合わせることで収率は大幅に改善され、56.6%となった。一般的にアルカリ処理は、リグニンを溶解することでその含有量を低下させて、糖化を起こしやすくする効果があるといわれている。本研究でもアルカリ+蒸煮爆砕処理により、ススキ中のリグニンの含有量は21%（未処理）から12%（アルカリ+蒸煮爆砕後）へ著しく低下しており、それによる分解反応の促進効果は大きいものと思われる。さらに、図3に示すように、アルカリ+蒸煮爆砕後の粒径は、元原料（177-850 μm）よりかなり細かくなっており、それも高収率化の一因と考えられる。

本研究の反応は、固体触媒と固体のバイオマスの反応であるため、それらの会合の頻度を増加させるためにバイオマスに対する触媒の量は非常に重要なファクターである。ススキに対する触媒量を増加させていくとキシリトール収率は、向上する傾向があり、Pt/C触媒の量を表5の試験の2倍にすることで、ススキの場合、アルカリ+蒸煮爆砕処理では70%、振動ミル処理では58%と高収率となった。

表6にいくつかのバイオマスでの試験結果を示す。Pt/C触媒では、すべてのサンプルで50%以上の高収率となった。ススキについては、Pt/C触媒とRu/AC触媒の両方で試験を実施している。Ru/ACはPt/Cには及ばないものの50%程度

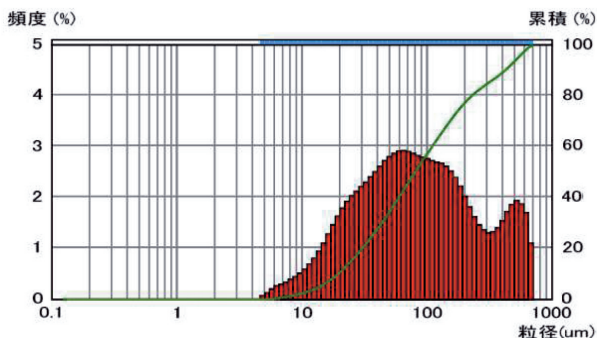


図3 アルカリ+蒸煮爆砕処理後サンプルの粒度分布

表6 いくつかのバイオマスでのキシリトール製造試験

バイオマス (触媒)	キシリトール収率 (mol%)
ススキ (Pt/C)	69.9
麦わら (Pt/C)	58.5
オギ (Pt/C)	53.4
ヨシ (Pt/C)	64.2
ススキ (Ru/AC)	48.7

※バイオマス：アルカリ+蒸煮爆砕処理物320mg（乾物ベース）、水40g、Pt/C触媒200mg（Ru/AC触媒70mg）、反応条件：190℃24時間、水素5MPa

の高収率となった。実用化を考えた際にRuはPtに比べて1/50程度の価格であり、より実用性は高い触媒と想定され、今後高収率化に向けてさらなる検討が必要と思われる。

3.3 キシリトール製造時のマテリアルバランス

実用化のためには、触媒反応のみならず、製造工程全体での収率を高めることが重要である。

図4にススキを原料として用いて、アルカリ+蒸煮爆砕処理及び分解反応を行った際のキシランのマテリアルバランスを示す。前処理と触媒反応工程を合わせた収率は56%であった。従来法でのキシリトール収率は、50%程度といわれており、特許実施例では、40%程度の事例もある¹⁰。本研究では、精製工程の検討を行っていないため、従来法との厳密な比較はできないが、精製工程でのロスを勘案しても、実用的に有望なプロセスであるものと想定される。また、前処理時のキシラン減少は20%程度であるが、その大部分は搾汁液中への溶出（14%）であり、液の利用によりさらなる高収率化を達成できる可能性があることがわかった。

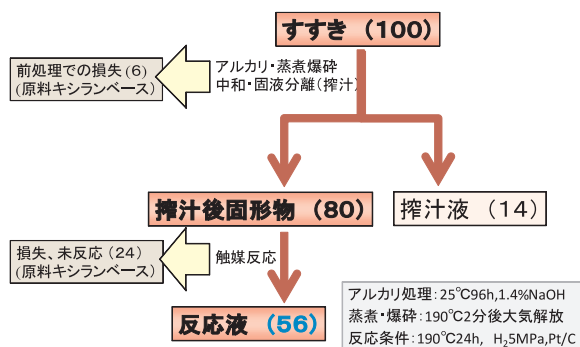


図4 キシリトール製造時のマテリアルバランス

3.4 実用化に向けた展望と課題

本研究では、ヘミセルロースを水素化分解して、キシリトールを製造したが、生成物を精査するとそのほかに図5に示すような化学物質も製造できる可能性があることが判明した。

また、本研究では、キシリトールに重点を置いたが、本研究の変換技術は前処理や反応条件を変えることで、ソルビトール

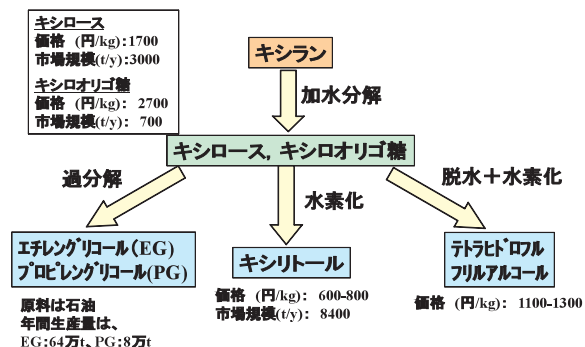


図5 本プロセスで製造可能な化学製品

ル、マンニトール、アラビトールなどの他の糖アルコールに
応用可能である。

なお、実用化のためには、触媒と反応残渣の分離に課題が
残っている。これまでの研究で用いた触媒は数十 μm の粉末
状であるため、固形物残渣が生じた場合に分離が難しい。触
媒は貴金属を使用しているため、コスト低減のためには複数
回の使用が必要である。また、反応残渣についても、未反応
のセルロースが高含有率で残存しており、反応残渣からのソ
ルビトール等の製造によるカスケード的な利用の検討が必要
不可欠であると考えられる。

4. まとめ

白金／カーボンブラック触媒 (Pt/C)、ルテニウム／活性
炭触媒 (Ru/AC) を用いた草本系バイオマスからの糖アル
コール製造について検討を行った。原料の様々な前処理につ
いて検討を行った結果、草本系バイオマス原料としてスキ
を用い、前処理としてアルカリ水溶液への浸漬と蒸煮爆砕処
理を施した場合、Pt/Cでは触媒反応のみでキシランをキシ
リトールへ70mol%の高収率で変換することができた。また、
その際の前処理でのキシラン残存率は80%で、前処理と触
媒反応を通して56mol%の高収率でキシランをキシリトール
に変換することができた。さらに、Ru/AC触媒についても同
様の前処理を施すことにより、50mol%程度の触媒反応率で
キシリトールを製造することができており、Pt/C及びRu/AC
触媒は、草本系バイオマスからの糖アルコール製造に有効な
触媒であることがわかった。

本研究の方法は、担持金属触媒を使用することで、高温で
硫酸を使用せずにより温和な条件で製造可能な方法であり、
従来法と比べて、その優位性は大きいものと思われる。また、
工程についても、本研究で使用する担持金属触媒は、バイオ
マスの分解・水素添加反応の両反応に対して活性を有するた
め、両方の反応を同時に進行させることができ、製造工程の
簡略化が期待される。

今後は、前処理と反応条件を精査し、より高収率化を図る
とともに実用化に向けた課題の解決に取り組む予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日揮触媒化成株式会社様からは
スポンジニッケル触媒を、旭化成ケミカルズ株式会社様から
は微結晶セルロースを、丸善製薬株式会社様からはキシロピ
オースをご提供いただきました。心より感謝申し上げます。

引用文献

1) A. Fukuoka and P. L. Dhepe, *Angew. Chem. Int.*

Ed. 45, pp.5161-5163, (2006)

- 2) S. Suganuma, K. Nakayama, M. Kitano, D. Yamaguchi, H. Kato, S. Hatashi and M. Hara, *J. Am. Chem. Soc.*, 130, pp.12787-12793, (2008)
- 3) A. Sluiter, B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton, and D. Crocker, *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass*, NREL/TP-510-42618, National Renewable Energy Laboratory (2008)
- 4) A. Sluiter, B. Hames, D. Hyman, C. Payne, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton and J. Wolfe, *Determination of Total Solids in Biomass and Total Dissolved Solids in Liquid Process Sample*, NREL/TP-510-42621, National Renewable Energy Laboratory (2008)
- 5) JIS M8812:2004, 石炭類及びコークス類—工業分析方法
- 6) H. Kobayashi, Y. Ito, T. Komanoya, Y. Hosaka, P. L. Dhepe, K. Kasai, K. Hara, A. Fukuoka, *Green Chem.* 13, pp.326-333, (2011)
- 7) H. Kobayashi, H. Matsuhashi, T. Komanoya, K. Hara and A. Fukuoka, *Chem. Commun.*, 47, pp.2366-2368, (2011)
- 8) JP WO2007/100052 セルロースの加水分解および／または加水分解物の還元用触媒およびセルロースから糖アルコールの製造方法
- 9) 田中三男, セルロース資源の再利用, *酵素工学*, 第58巻, 第3号, pp.145-155, (1980)
- 10) シュガーレス・低カロリー食品と素材の市場動向, *食品と開発*, Vol.47, No.4, pp.59-64, (2012)
- 11) 特許第4223579号, キシロース及びキシリトールの製造方法

食用としての利用の少ない地域水産資源のすり身化技術開発

内山 智幸, 松嶋 景一郎, 浦 晴雄, 鎌田 樹志
蛸谷 孝司*, 武田 浩郁**, 宮崎 亜希子***

Technology for Production of Surimi from Underutilized Local Marine Resources as Food

Tomoyuki UCHIYAMA, Keiichiro MATSUSHIMA, Haruo URA, Tatsuyuki KAMADA
Kohji EBITANI*, Hirofumi TAKEDA**, Akiko MIYAZAKI***

抄 録

本研究では、食用としての利用の少ない魚から、スケトウダラの代替となるすり身製造技術の開発を行い、加熱ゲル物性の改善を目的に湿式粉碎および加熱方法に関する検討を行った。

湿式粉碎処理システムは、コロイドミル、モノポンプ、試料ホッパー、攪拌機から構成され、高粘性試料を安定かつ連続的に供給し、粉碎時の品温を15℃以下に抑制することが可能となった。本システムを、冷凍ウロコメガレイ塩ずり肉に適用し、①直加熱、②2段加熱、の2種類の方法でゲルを作製し物性評価を行った。その結果、食塩濃度1.5%の2段加熱ゲルにおいて粉碎処理品の凹みは、原料塩ずり肉と比較し顕著に向上した。

ジュール加熱法による加熱ゲル物性は、ボイル加熱法と比較し、オオナゴでは破断強度を2倍以上に、オクカジカでは破断強度と凹みを、ウロコメガレイでは凹みを増加させることができた。

キーワード：コロイドミル、湿式粉碎、ジュール加熱、未低利用魚、ゲル物性、冷凍すり身

Abstract

In this study, we develop the technology for production of surimi, that is substituted the pollock with underutilized fish as food, and discuss the wet grinding and the heating method for the purpose of improvement of heat-induced gel properties.

Grind-processing system is constituted from a colloid mill, mo-no pump, hopper and stirrer. It has become possible to feed highly viscous sample continuously and stably, sample temperature is suppressed to below 15 degree C during grinding. We prepared the gel from scalveve plaice frozen surimi on various salt concentration in this system, evaluated physical properties of the gels in two heating-methods, ①direct heating and ②2-step heating. As a result, the indentation length of break of 2-step heating gel on 1.5% salt concentration was remarkably improved, compared to the indentation length of break of the gel by general process.

The gel properties by Joule-heating method is increased, compared to by the boiled- heating method. The breaking strength is increased more than twice on Japanese sand eel, on plain sculpin, both of the breaking strength and the indentation length of break are increased, and the indentation length of break is significantly increased on scalveve plaice.

KEY-WORDS : Colloid-mill, Wet grinding, Joule-heating method, Underutilized marine resources, Gel property, Frozen surimi

* 中央水産試験場, ** 釧路水産試験場, *** 網走水産試験場

事業名：重点研究 課題名：食用としての利用の少ない地域水産資源のすり身化技術開発

1. はじめに

水産加工業界では、加工原料不足が深刻になっており、特に、すり身業界ではスケトウダラの漁獲量の低迷により、慢性的な原料魚不足となっている。

スケトウダラは、1970年台には100万トンを超える漁獲量の年もあったが、200海里規制後は、70万トン前後の漁獲量となり、漁業海面の減少等による大幅な減船、さらに沿岸資源の減少から、20万トン前後まで激減しており、1985年以降、国産すり身が減少する中、輸入すり身が年々増加している。

近年、国産と輸入による国内でのすり身需要は40万トン程度と考えられるが、水産白書によると欧米諸国での白身魚フィレの需要増大による、すり身原料魚の不足が懸念されている。こうした状況の下、水産業界における食用利用の少ない地域資源の活用が関係業界から要望されており、沖合底びき網漁業で漁獲される、ウロコメガレイ、大型イカナゴ（以下オオナゴ）、カジカ類のすり身化技術に関する研究を実施した。ウロコメガレイは道北日本海域のスケトウダラ漁等で、カジカ類は道東沿岸のシシャモ漁等により混獲され、その推定資源量はウロコメガレイが300トン/年、カジカ類では5000トン/年程度と考えられている。一方、オオナゴは道北地域で主に養魚用餌料として、1万～1万5000トン/年が漁獲されている。

本研究では、これら3魚種を対象として、スケトウダラの代替となるすり身製造技術の開発を行い、加熱ゲル物性の改善を目的に湿式粉碎および加熱方法に関する検討を行った。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

試料には、ウロコメガレイ、オオナゴ、オクカジカの3魚種の冷凍すり身を用いた。表1に冷凍すり身の基本性状を示した。なお、湿式粉碎処理に関する評価においては、冷凍ウロコメガレイ（高野冷蔵試作製造）を用い、加熱方法に関する評価においては、ウロコメガレイ（布川加工所試作製造）、オオナゴ（草地商店製造）、オクカジカ（釧路水産試験場製造）の3魚種の冷凍すり身を用いた。

表1 魚肉の性状

	水分 (wt%)	粗たんぱく質 (wt%)	粗脂肪 (wt%)	灰分 (wt%)	その他 (wt%)
ウロコメガレイ (高野冷蔵)	75.5	10.9	4.2	0.8	8.5
ウロコメガレイ (布川加工所)	81.3	11.3	1.0	0.4	6.0
オオナゴ (草地商店)	73.8	16.6	3.3	0.5	5.8
オクカジカ (釧路水試)	74.7	15.9	1.5	0.6	7.4

2.2 実験方法

2.2.1 加熱ゲル調製方法

冷凍すり身を用いた加熱ゲルの調製方法を図1に示す。

冷凍すり身は、通常3.0wt%の食塩を添加し、サイレントカッターで塩ずり後、ポリ塩化ビニリデン製チューブに充填し、温水中のボイル加熱にて加熱ゲル（蒲鉾）となる。ボイル加熱には、直加熱と2段加熱があり、直加熱は90℃で30分間の処理であるが、2段加熱は坐り工程にて約20℃、

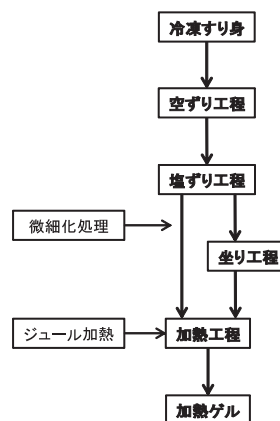


図1 加熱ゲルの調製方法

16時間処理後に90℃、30分間処理する方法である。

また本研究では、塩ずり工程後の湿式粉碎処理、加熱工程のジュール加熱の適用により、物性改善を検討した。

2.2.2 加熱ゲルの物性評価

加熱ゲルの物性評価¹⁾は、冷凍すり身品質検査基準（水産庁）に準じて、レオメータ（FUDOH RT-2010 j-CW）による破壊試験法にて行い、ゲルが切断される際の破断強度（g）と凹み（mm）を測定した。破断強度は噛んだ時のかまぼこゲルの硬さに対応し、凹みは噛んだ時のしなやかさに良く対応すると見なして水産加工業界で重用されてきた。なお、加熱ゲル物性の品質は、1級では破断強度320g以上、凹み11mm以上、2級ではそれぞれ220g、10mmである。

2.2.3 湿式粉碎処理

(1)湿式粉碎処理システム

本研究で構築した湿式粉碎処理システムを図2に示す。本システムは、繊維質な魚肉等の粉碎が可能な①コロイドミル（Labor Pilot, IKA 社製）、高粘性物質の安定供給が可能な②モノポンプ、③原料ホッパーから構成され、粉碎時のタンパク質の熱変性を抑制するために、ホッパー、コロイドミルには冷却機構が付与されている。なおコロイドミルは、上部より高粘性のスラリー（懸濁液）状の被粉碎物を供給し、シャフトとステータ間の摩擦および剪断作用によって、連続的に微粉碎され、同時に精密混合が行われる。

(2)試験方法

本実験には、ウロコメガレイ冷凍すり身を半解凍後、食塩を1.5、3.0wt%の2水準で添加して、小型サイレントカッター（花木製作所）にて5分間塩ずりした試料5kgを使用した。なお、塩ずり肉（肉糊）のすり上がり温度は5℃前後であった。

湿式粉碎処理の際には、起動時の空運転に起因する装置負荷を低減するために、冷水800gをホッパー内に投入し、その後5kgの魚肉を投入した。本システムによる複数回の処理は、

品温を15℃以下に制御するため、1回毎にホッパー内で十分に冷却後（10℃以下）、再度処理するサイクル運転とした。なお、操作因子としてはラジアルギャップ（0.2, 0.6mm）、シャフト周速（10.4m/s）、モノポンプ供給速度（2 kg/min）とした。

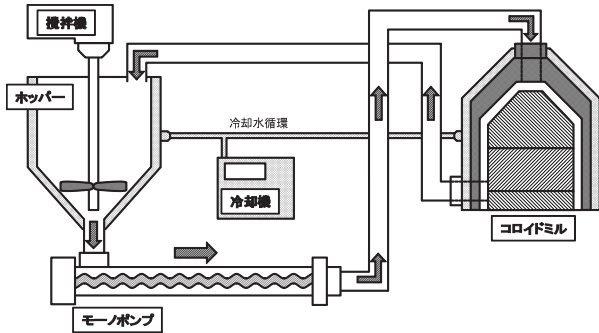


図2 湿式粉碎処理システムの概略図

(3)評価方法

①粒度評価

本システムにより得られた試料の粒度分布は、レーザ回折散乱法（マイクロトラックHRA, ㈱日機装製）にて測定し、循環回数と平均粒子径D₅₀（体積基準による50%径）に関する評価を行った。なお粒度測定は各循環回数の試料を採取後、蒸留水にて希釈し、超音波分散処理後実施した。

②色調評価

本システムにより得られた試料の色調は、色彩色差計（CR-200, ㈱ミノルタ製）にて測定し、L, a, b値から白色度を算出し、循環回数との関係について評価を行った。

③加熱ゲル物性評価

各種試料は、ボイル加熱（直加熱, 2段加熱）により加熱ゲルを調製し、破断強度、凹みに関する評価を行った。

④電気泳動による評価

粉碎処理による加熱ゲルの魚肉たんぱく質成分の重合や低分子化等の組成変化を、SDSポリアクリルアミドゲル電気泳動（SDS-PAGE）により分析²⁾した。なお染色は、Coomassie Brilliantblue R-250により行った。

2.2.4 ジュール加熱法

(1)ジュール加熱の原理と有用性

すり身の加熱ゲル調製法において、加熱方法は外部加熱方式と内部加熱方式に分類される。一般的には外部加熱方式（ボイル加熱）が使用されるが、図3に示した内部加熱方式であるジュール加熱は通電加熱とも呼ばれ、対象物に電気を通電することにより、短時間での均一加熱が可能である。

加熱ゲルの調製においては、ゲル構造に関与するタンパク質を分解する酵素反応の温度域を短時間で通過することが物性改善に繋がるといわれており、ジュール加熱はボイル加熱と比較し物性改善には有効な方法と期待される。

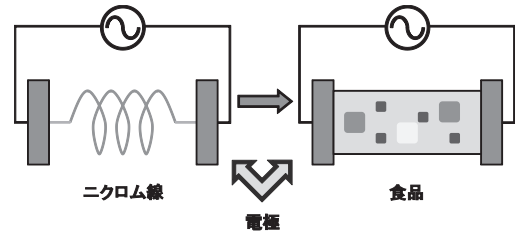


図3 ジュール加熱の概念図

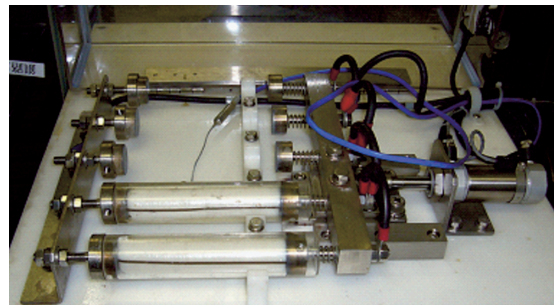


図4 ジュール加熱試験装置

(2)試験方法

本実験には、表1に示したウロコメガレイ、オオナゴ、オクカジカの冷凍すり身を用い、3.0wt%の食塩を添加し、サイレントカッターで塩ざりした試料を用いた。

(3)加熱ゲルの調製方法

加熱ゲルの調製は、ボイル加熱と図4に示したジュール加熱（㈱フロンティアエンジニアリングFHO-1）とした。ジュール加熱は円筒状の透明なケーシング内にすり身を充填後、140V, 80℃にて1 minと3 minの処理を行った。また、ボイル加熱は直加熱を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 湿式粉碎処理

3.1.1 湿式粉碎処理品の基本性状

冷凍ウロコメガレイの塩ざり肉（食塩濃度1.5wt%）を原料とした、各循環回数の処理品の基本性状を以下に示した。

(1)温度制御

図5に循環回数とコロイドミルの入口品温、出口品温の関係を示した。操作条件を、ラジアルギャップ（0.6mm）、シャフト周速（10.4m/s）、モノポンプ供給速度（2 kg/min）とした場合、コロイドミルの入口品温を12℃以下に制御することにより、出口品温を目的の15℃以下に制御することが可能となった。

(2)白色度

図6に循環回数と白色度の関係を示した。白色度は循環回数1, 2回で顕著に増加し、その後原料塩ざり肉と同様の値を示した。

本システムにおける塩ざり肉処理品の白色度の増加は、食

塩の精密混合による効果と考えられた。なお循環回数2回以後の白色度減少の原因は、処理回数の増加に伴うタンパク質の局所的な熱劣化に由来することと推察した。

(3)粒子径評価

図7に循環回数と平均粒子径の関係を示した。一般的には循環回数の増加に伴い、平均粒子径は減少するが、本試料に関しては、粒子径の減少は認められなかった。

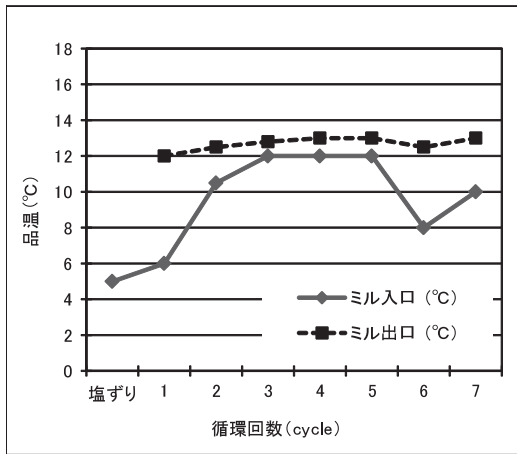


図5 循環回数と品温の関係

以上の結果より、本システムにおける魚肉タンパク質の熱劣化を抑制する操作条件においては、粉碎の進行は認められなかった。

(4)電気泳動による評価

図8に循環回数と電気泳動 (SDS-PAGE) による分析結果を示した。魚肉たんぱく質低分子化等の組成変化に関する評価を行ったが、粉碎処理による差違は認められなかった。

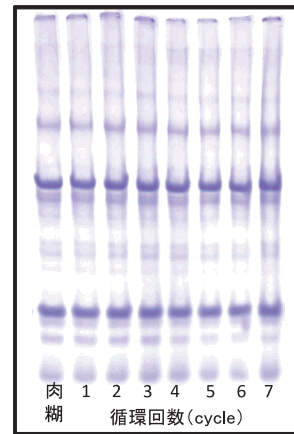


図8 循環回数と分子量の関係

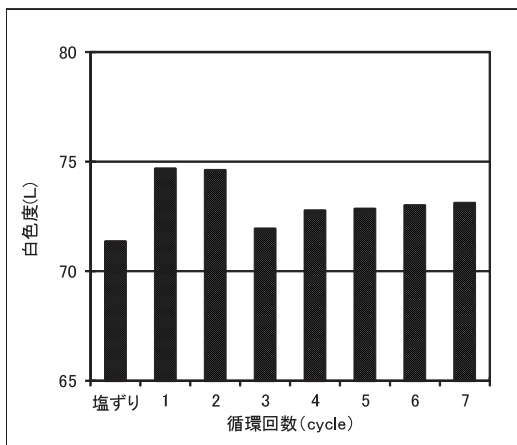


図6 循環回数と白色度の関係

3.1.2 湿式粉碎処理品の加熱ゲル物性

ウロコメガレイの塩ずり肉 (1.5, 3.0wt%添加) を原料とした各循環回数の処理品から加熱ゲルを調製し、物性評価を行い、以下の知見を得た。

(1)循環回数と加熱ゲル物性の関係 (食塩濃度1.5wt%)

図9に循環回数と破断強度の関係、図10に凹みの関係を示した。

直加熱ゲルにおける粉碎処理品の破断強度は、塩ずり肉と同等であり、凹みは循環回数2まで向上し、その後平衡状態

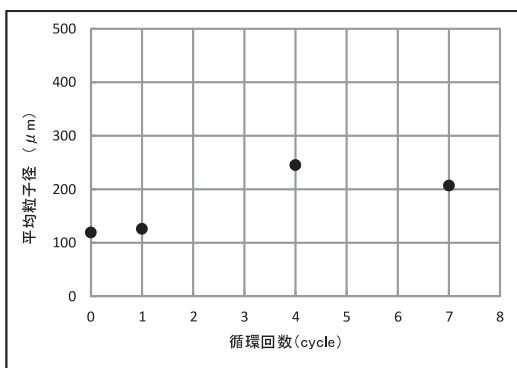


図7 循環回数と平均粒子径の関係

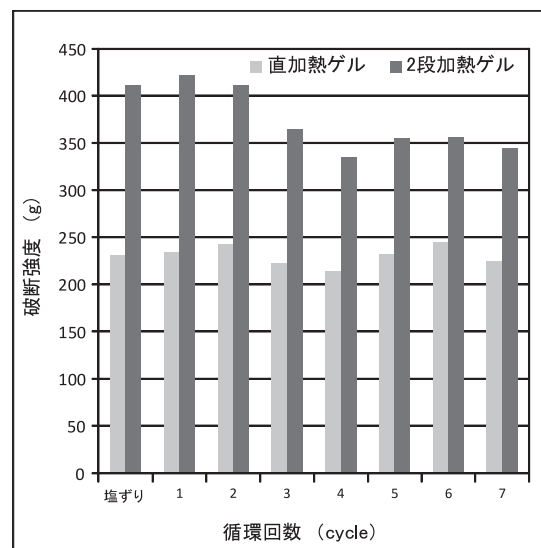


図9 循環回数と破断強度の関係

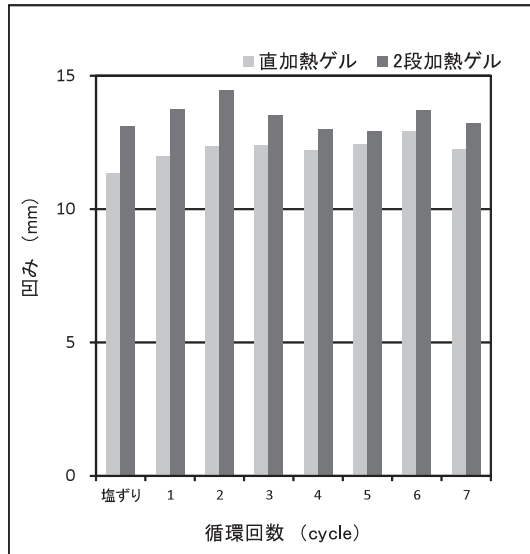


図10 循環回数と凹みの関係

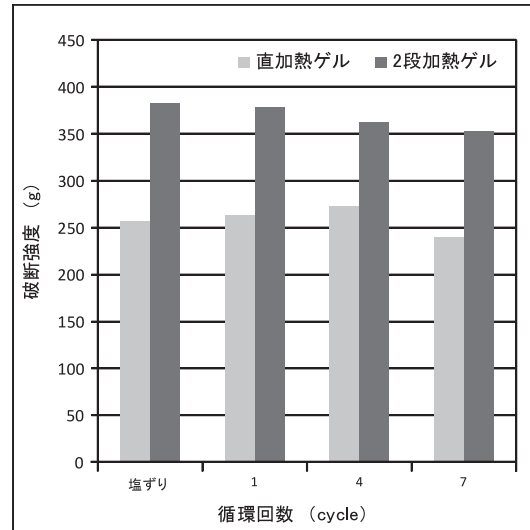


図11 循環回数と破断強度の関係

となった。

2段加熱ゲルにおける粉碎処理品の破断強度は、循環回数2までは、塩ざり肉と同等であったが、その後低下した。凹みは循環回数2まで顕著に増加し、最大値14.4mmを示した。なお、以後の循環回数では、塩ざり肉と同等の値を示した。

(2)循環回数と加熱ゲル物性の関係 (食塩濃度3.0wt%)

図11に循環回数と破断強度の関係を、図12に凹みとの関係を示した。

直加熱ゲルにおける粉碎処理品の破断強度は、塩ざり肉と同等であり、凹みは循環回数の増加に伴い僅かに増加する傾向を示した。

2段加熱ゲルにおける粉碎処理品の破断強度は、循環回数の増加に伴い僅かに低下した。また、凹みは塩ざり肉と同等であった。

以上の結果より、本システムの処理品は最適条件下 (食塩濃度1.5wt%, 循環回数2回, 2段加熱) において、塩ざり肉と比較し、凹みに関する物性を向上させることが明らかとなった。この効果は、粉碎処理品の基本性状にも記載した添加食塩の精密混合による効果と推察された。

3.2 加熱処理による物性改善

3魚種の冷凍すり身を用い、ボイル加熱 (直加熱) とジュール加熱にて各種加熱ゲルを調製し、破断強度、凹みに関する物性評価を行い以下の知見を得た。

3.2.1 ウロコメガレイ

図13に、ボイル加熱およびジュール加熱にて得られた加熱ゲルの物性を示した。破断強度は差違が認められないが、凹みはジュール加熱により、有意に増加した。なお、ウロコメガレイはボイル加熱においても良好な物性であることが確認された。

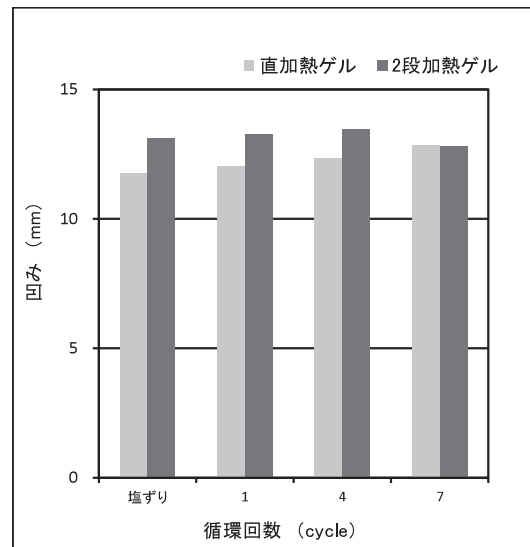


図12 循環回数と凹みの関係 (塩濃度3.0wt%)

3.2.2 オオナゴ

図14に、ボイル加熱およびジュール加熱にて得られた加熱ゲルの物性を示した。ジュール加熱はボイル加熱と比較し、凹みに関しては効果が認められないが、破断強度に関しては3分処理にて、ボイル加熱の2倍以上に増加した。

3.2.3 オクカジカ

図15に、ボイル加熱およびジュール加熱にて得られた加熱ゲルの物性を示した。ジュール加熱はボイル加熱と比較し、凹み、破断強度を共に増加した。

3.2.4 加熱ゲル組織

オオナゴではジュール加熱法の適用により、ボイル加熱法と比較し大幅な物性改善が認められた。図16に、オオナゴのボイル加熱とジュール加熱の低真空SEMによるゲル組織を示した。図に示される様に、ジュール加熱品はボイル加熱品と比較し、組織の緻密化が示唆された。

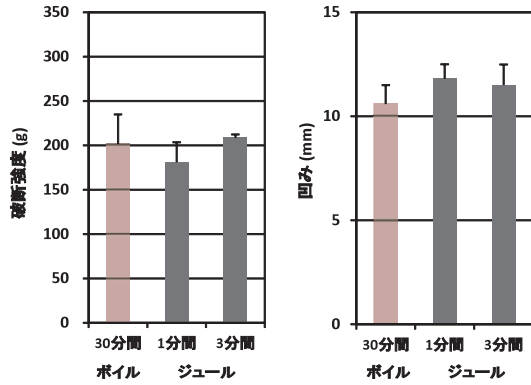


図13 加熱方法と加熱ゲル物性の関係（ウロコメガレイ）

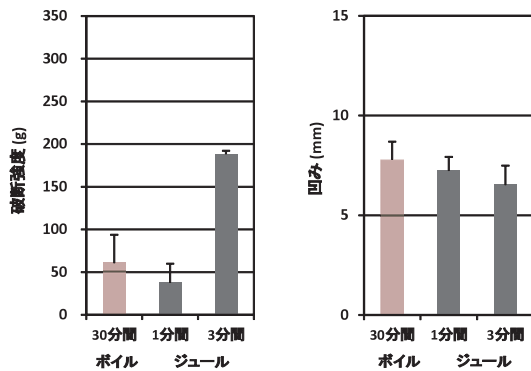


図14 加熱方法と加熱ゲル物性の関係（オオナゴ）

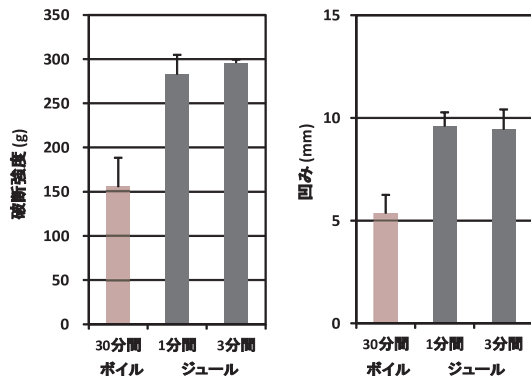


図15 加熱方法と加熱ゲル物性の関係（オクカジカ）

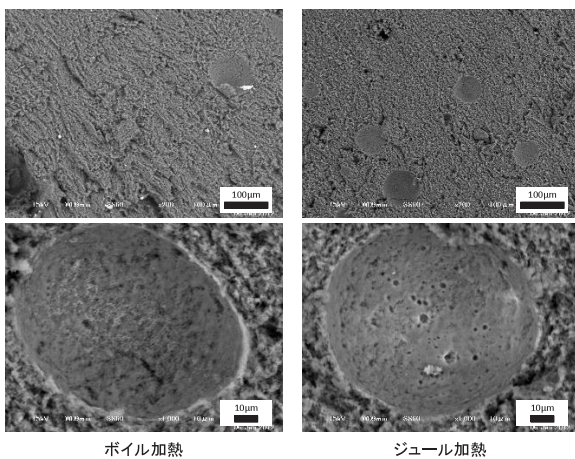


図16 加熱ゲル組織評価

4. まとめ

食用として利用が少ない魚から、スケトウダラの代替となるすり身製造技術の開発を行い、加熱ゲル物性の改善を目的に湿式粉碎および加熱方法に関する検討を行い、以下の知見が得られた。

湿式粉碎処理について

- (1) 本システムにおける塩ずり肉（食塩濃度1.5wt%）の白色度は、サイクル数1および2で顕著に増加した。
- (2) 上記粉碎処理品の加熱ゲル物性は、未処理品（塩ずり肉）と比較し、破断強度に関しては差違が認められないが、凹みに関しては、適正な処理条件にて顕著に増加した。
- (3) 本システムの凹みに関する物性改善効果は、添加食塩の精密混合に起因するものと推察された。

加熱方法について

- (1) ウロコメガレイは、ポイル加熱、ジュール加熱、共に良好な物性を示すが、ジュール加熱の適用により、凹みを有意に増加させることができた。
- (2) オオナゴは、ジュール加熱を適用することにより、ポイル加熱に比べ、破断強度を2倍以上に増加させることが可能となった。また、ジュール加熱ゲルは、ポイル加熱ゲルと比較し、組織の緻密化が示唆された。
- (3) オクカジカは、ジュール加熱を適用することにより、ポイル加熱に比べ、凹み、破断強度を共に増加させることができた。

謝辞

本研究で使用したレーザー回折式粒度分布測定装置は財団法人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) 北上誠一ほか、スケトウダラ冷凍すり身のゲル形成能とその加熱温度依存性、日本水産学会誌、pp.354-364, 70(3), (2004)
- 2) 北上誠一ほか、スケトウダラ冷凍すり身タンパク質のゲル形成能とその濃度依存性、日本水産学会誌、pp.957-964, 71(6), (2005)

鮭由来吸収性生体模倣複合材料の作製と評価

赤澤 敏之, 執行 達弘, 野村 隆文, 山岸 暢, 稲野 浩行, 中村 勝男
村田 勝*, 伊東 学**, 境 勝義***, 宮崎 聡****

Preparation and Characterization of Bioabsorbable Biomimetic Composite Materials Originated from Salmon

Toshiyuki AKAZAWA, Tatsuhiro SHIGYO, Takafumi NOMURA
Tohru YAMAGISHI, Hiroyuki INANO, Katsuo NAKAMURA
Masaru MURATA*, Manabu ITO**, Katsuyoshi SAKAI***, Satoshi MIYAZAKI****

抄 録

溶解析出法により道産鮭骨・皮を用いたアパタイトとコラーゲン (HAp-C) 複合材料を作製した。HAp-Cは Ca^{2+} 欠損型水酸アパタイト (HAp), I型コラーゲンとゼラチンの複合体であり, HApとコラーゲンの組成比 (H/C) に依存して, 283K合成でコラーゲン線維とHAp微結晶が, 293K合成でフロック状凝集粒子や線維配向の柱状粒子が観察された。水蒸気の吸着徐放特性では, 293K合成のH/C=2.2粉末の吸湿率と保湿率は市販品より高かった。水蒸気の吸着等温線では, 293K合成のH/C=2.2粉末は親水性が強く, 相対圧0.70~0.90で水蒸気吸着量は最高値を示した。ラット背部皮下組織内への埋入では, 巨細胞浸潤が認められ, 293K合成のH/C=3.5粉末は組織体液がHAp凝集粒子内へよく浸透した。生体模倣性HAp-Cは, 優れた生体吸収性, 生体適合性, 保湿性を有する水の吸収・吸着徐放材料として, 再生医療や化粧品産業への応用が可能である。

キーワード : 海洋資源, 生体模倣, アパタイト/コラーゲン複合体, 生体吸収, 水蒸気吸着, 保湿

Abstract

Biomimetic composites of hydroxyapatite (HAp) and collagen were prepared utilizing salmon bone and skin by a dissolution-precipitation method. The HAp/collagen composites (HAp-C) were constituted by Ca^{2+} -deficient HAp, I type-collagen and gelatin. Depending on the composition ratio (H/C) of HAp to collagen, at the synthetic temperature of 283K, collagen fibers and HAp microcrystals were seen, while at 293K, frock like-agglomerated particles or fiber like-oriented columnar ones were observed. Concerning water vapor-absorption-release characteristics, moisture absorption-and-retention coefficients for the H/C=2.2 powder synthesized at 293K were higher than those for commercial products. From water vapor-adsorption isotherms, the amounts of water vapor adsorbed for H/C=2.2 with strong hydrophilicity were the highest in the relative partial pressures of 0.70~0.90. At 2 weeks after implantation of the H/C=3.5 powder synthesized at 293K into the subcutaneous tissue of the back region in rats, multi-giant cell-infiltration was recognized and body fluid well permeated into agglomerated particles. Accordingly, the biomimetic HAp-C can be applied as water-absorbable adsorption-release materials having excellent bio-absorption, biocompatibility and moisture retention characteristics for regenerative therapy or cosmetic industry.

KEY-WORDS : Marine resource, Biomimetic, Apatite/Collagen composite, Bio-absorption, Water vapor-adsorption, Moisture retention

事業名 : 平成22-23年度経常研究, 課題名 : 海洋資源由来生体模倣材料の創製と応用, * 北海道医療大学歯学部 (School of Dentistry, Health Sciences University of Hokkaido), ** 北海道大学大学院医学研究科 (Graduate School of Medicine, Hokkaido University), *** 北海道曹達株式会社 (Hokkaido Soda Co., LTD.), **** 井原水産株式会社 (Ihara Co., LTD.)

1. 緒言

近年、超高齢化社会の進展に伴い、骨折、感染症、外傷骨欠損の難治療疾患や歯周病患者が急増し、高齢化が進む北海道でも先端医療や再生医療の導入が注目されている。骨や歯の無機成分を有する水酸アパタイト ($\text{HAp:Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) は、優れた生体親和性と骨伝導性を有する生体硬組織代替材料として、人工骨、人口歯根及び骨充填材等へ臨床応用されている。しかしながら、市販の試薬合成のHApは生体吸収性が低く、既存骨と均質な置換は困難であるため、骨形成能が長期的に必ずしも有効な材料ではない¹⁾。

動物の硬組織は細胞が構築した粒子形態、表面構造及び化学的性質を保持しているため、生体組織の再生や新陳代謝に有効な機能原料である²⁾。生体由来金属イオンと3次元的多孔構造は、細胞が増殖・分化する最適環境である。

我々は、道産動物骨由来アパタイト (b-HAp) は海面骨の細孔径と気孔率、微量金属イオンを保持したアパタイト固溶体であること、焼成・部分溶解析出法によりb-HApを原料とした傾斜機能アパタイト (fg-HAp) は優れた生体吸収性と体液浸透性を示すことを報告してきた^{2,3)}。骨形成蛋白質 (rhBMP-2) を担持したrhBMP-2/fg-HApは理想的な骨誘導性材料であり、ラット頭頂骨骨膜上への埋入では、fg-HApの崩壊と吸収、断片化fg-HApを包含した骨形成、fg-HAp周囲に多核巨細胞、新生骨周囲に骨芽細胞が観察された。

一方、動物由来コラーゲンは生体適合性や生分解性が高く、皮革、ゼラチン、食品、人工臓器及び人工皮膚等に利用されている。安全・安心な生体材料の開発と水産資源の有効利用を目的として、水産加工で廃棄処分される道産鮭皮からコラーゲンを抽出し、製造する技術が確立されている⁴⁻⁶⁾。低温水環境で育成された魚類由来コラーゲンは変性温度 (278~303 K) が低いため、ヒトの体温では変性・溶解し、蛋白質分解酵素により速やかに分解・吸収される。鮭皮由来コラーゲン溶液は、生体環境の温度とpHでは、自己組織化し線維ゲルを形成する。コラーゲンの線維化とコラーゲン分子間へ化学架橋の導入により、鮭皮由来コラーゲンの耐熱性は改善され、伸縮性細胞培養用基材が開発された⁷⁾。その線維ゲルを用いたヒト歯根膜細胞の培養では、増殖性は豚コラーゲン線維ゲルより約1.5倍高い値を示し、アルカリフォスファターゼ活性は7日後から増大し、分化機能の維持が立証された。

このような生体模倣材料は細胞や生体高分子の最適環境維持に効果的であるため、低温水環境で育成された魚類由来コラーゲンやアパタイトは、ヒト組織への埋入で早期の溶解吸収や良好な体液浸透が期待される^{8,9)}。

また、健康生活思考から、優れた保湿性、質感を有するコラーゲン系化粧品は、シートパック等に商品化されているが、多くの製品は牛由来であるため、安心素材の高機能製品の開発が要望されている。

医科・歯科領域の臨床には、生体模倣材料を用いた骨再生医療が重要であり、加齢臭と角質の分離除去には、吸着機能を付加した生体模倣化粧品が有望である。本報では、吸収性生体模倣材料の開発と応用を目的として、溶解析出法により道産鮭骨・皮を原料としたアパタイトとコラーゲン系複合材料を作製し、リン酸カルシウム結晶の析出・成長、コラーゲンの線維化条件を決定、微細構造に及ぼす混合組成比の影響を調べ、吸湿・保湿率や水蒸気吸着量を測定、動物実験の組織形態学的所見より生体親和性と組織適合性を検討した。

2. 実験方法

2.1 歯用冷却高速粉碎の試作と抜去歯の粉碎

HApとコラーゲンの出発原料として、鮭骨と鮭皮を用いた。鮭骨を解体、煮沸、大気中773~1373Kで焼成し、骨由来アパタイト (b-HAp) を作製した。それを HNO_3 水溶液に溶解後、 NH_3 水を添加し293K、pH 9~10で24h熟成、濾過、洗浄、凍結乾燥により溶解析出アパタイト (dp-HAp) を調製した。一方、鮭皮を脱脂、酸抽出、消化、塩析、透析により非抗原性の低濃度アテロコラーゲン水溶液を調製した⁶⁾。b-HAp水溶液とアテロコラーゲン水溶液を所定組成比 (H/C=1.0~3.5) で混合後、283~293K、pH7.5~7.9で熟成し、同様にして、アパタイト/コラーゲン (HAp-C) 複合材料を合成した⁸⁻¹⁰⁾。

2.2 各種粉末の物理化学的特性の評価

得られた試料について、X線回折 (XRD) より生成相を同定、走査型電子顕微鏡 (SEM) とデジタルマイクロスコープ (Digital Microscope: DM) より微細構造を観察、誘導結合プラズマ発光分光分析 (ICP) と電子線微小部分析 (EPMA) より化学組成を分析し、室温で24h真空脱気後、窒素吸着法によりBET比表面積と細孔径分布 (PSD) を測定した。

水蒸気の吸湿・保湿特性では、試料を288~308Kで4h真空脱気後、恒温恒湿器へ入れ、相対湿度80%、72h、さらに20~40%、55h放置し、その重量変化率を測定した^{11,12)}。

水蒸気の吸着特性では、室温で24h真空脱気後、自動吸着等温線測定装置 (日本ベル社製) を用いて298K、相対圧 (P/Ps) = 0~0.90の水蒸気吸着量 (吸着過程と脱着過程) を測定し、吸着過程と脱着過程の吸着等温線を作成した^{11,12)}。

2.3 各種粉末の生物検定

生体親和性や骨誘導特性の評価では、試料をウイスター (Wistar) 系ラット背部皮下組織内に埋入、2~4週後周辺組織を一塊として摘出、固定、脱灰し、ヘマトキシリン・エオジン (H-E) 染色後、光学顕微鏡より組織形態学的に観察した^{10,12)}。

3. 実験結果及び考察

3.1 b-HApの結晶性と微細構造に及ぼす焼成温度の影響

図1に、DMとSEMによる鮭肉を除去した鮭皮、393Kで24h乾燥、空气中1373Kで24h焼成した鮭骨の外観写真を示す^{11,12)}。(a)ではコラーゲン組織、(b)では脊椎動物の典型的な脊柱構造、(c)では海面骨由来の多孔構造が観察される。



図1 鮭由来材料の外観

((a)皮, (b)393K乾燥骨, (c)1373K焼成骨)

図2にSEMによる1073~1373K、24h焼成したb-HApの微細構造を示す^{10,12)}。XRDよりb-HApは単一相が得られ、ICPより微量のNa⁺、Mg²⁺含有Ca²⁺欠損型HApであった。焼成温度の上昇に伴い、HApの結晶性はよくなり顕著な粒子成長が進行し、1073~1273Kで板状と柱状粒子の交互配列、1373Kで3~10μmの板状巨大粒子が観察される。XRDよりHApの格子定数は六方晶系のa=0.942nm、C=0.688nmとなり、JCPDSカード(9-432)値とよく一致した。

3.2 dp-HApとHAp-C複合材料の合成

図3に、SEMによる283K、pH7.5~7.9で調製した鮭由来コラーゲンと293K、pH9~10で調製したdp-HAp凍結乾燥粉末の微細構造を示す。コラーゲンでは、蛋白質が変性しない温度と中性領域での調製により、架橋剤を無添加でもコラーゲンの線維化が認められる(図3(a),(c))。dp-HApでは、微結晶からなるフロック状凝集粒子が観察され、XRDとICPより低結晶性Ca²⁺欠損型HApが同定された(図3(b),(d))。

合成温度とpH条件の選定によりHApの分散性が良好な複合材料の作製が可能であり、HApとコラーゲンの混合組成

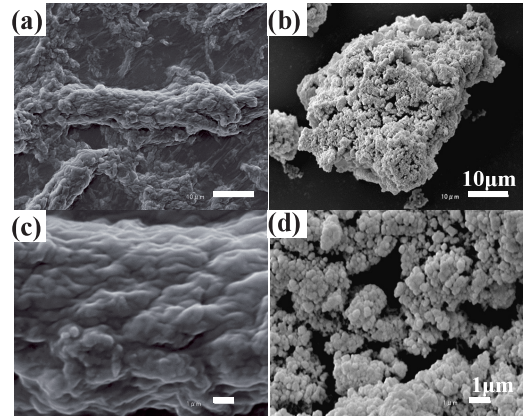


図3 鮭骨・皮由来コラーゲンとdp-HAp凍結乾燥粉末の微細構造 ((a),(c)コラーゲン;283K, (b),(d)dp-HAp;293K)

比(H/C)に依存し、結晶の配向性・凝集性、線維化が異なる複合粉末が得られた。283~293K、pH7.5~7.9で合成された低結晶性HAp-Cは、XRDとICPよりCa²⁺欠損型HAp、I型コラーゲンとゼラチンであった。図4にSEMによる283K合成のHAp-C凍結粉末の微細構造を示す^{11,12)}。H/C=1では柱状のコラーゲン線維、H/C=2.2と3.5ではフロック状凝集粒子が観察される。図5にそのHAp-C粉末のPSD曲線を示す。直径3~30nmの部分細孔容積は大きくマイクロ・メソ細孔が確認された。H/C値の増加に伴い細孔容積は減少した。比表面積(A_{SS})と全細孔容積(V_{TP})は、H/C=1.0で242m²・g⁻¹と0.790cm³・g⁻¹、H/C=2.2で178m²・g⁻¹と0.711cm³・g⁻¹、H/C=3.5(皮質骨や象牙質におけるアパタイトとコラーゲンの組成比に相当)で155m²・g⁻¹と0.382cm³・g⁻¹になった。図6と7に、293K合成のHAp-C凍結粉末の微細構造とPSD曲線を示す^{11,12)}。H/C=2.2で配向した柱状HAp粒子が認められ、H/Cの増加に伴い細孔容積は増加した。A_{SS}とV_{TP}は、H/C=2.2で16m²・g⁻¹と0.086cm³・g⁻¹、H/C=3.5で68m²・g⁻¹と0.543cm³・g⁻¹、dp-HApで202m²・g⁻¹と0.989cm³・g⁻¹になった。293K合成のHAp-C粉末の微細構造とPSD曲線の変化は、コラーゲンの変成近傍温度の合成による鮭皮由来コラーゲンの部分的ゼラチン化に起因している。

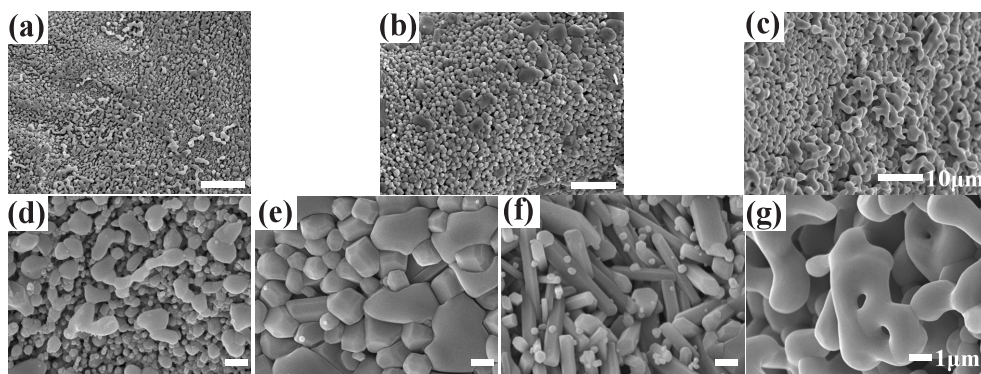


図2 鮭骨由来b-HApセラミックスの微細構造(空气中24h焼成, (a),(d)1073K, (b),(e),(f)1273K, (c),(g)1373K)

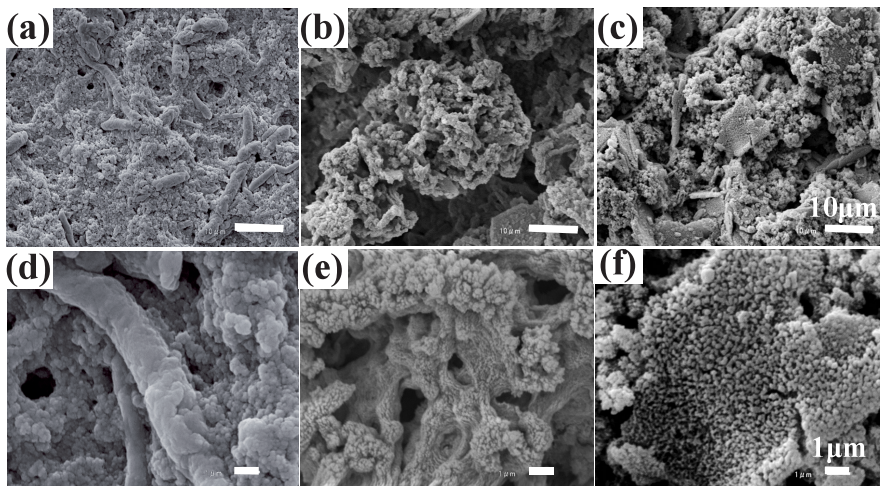


図4 鮭骨・皮由来HAp-C 凍結乾燥粉末の微細構造
 (合成温度283K, pH7.5-7.9, 24h, (a), (d)H/C=1, (b), (e)H/C=2.2, (c), (f)H/C=3.5)

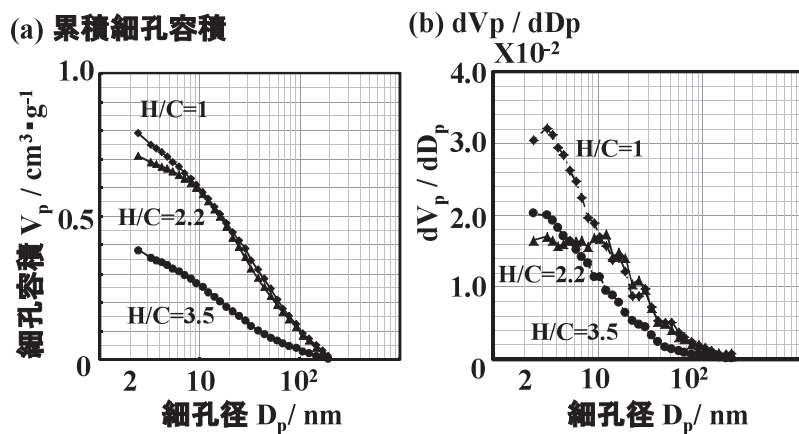


図5 鮭骨・皮由来 HAp-C 凍結乾燥粉末の細孔径分布曲線
 (合成温度283K, pH7.5-7.9, 24h, ■:H/C=1.0, ▲:H/C=2.2, ●:H/C=3.5)

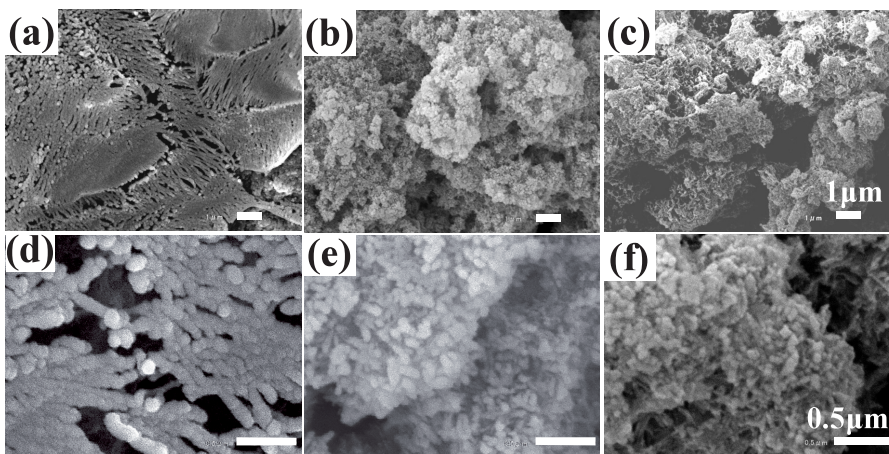


図6 鮭骨・皮由来 dp-HApとHAp-C 凍結乾燥粉末の微細構造
 (合成温度293K, pH7.5-7.9, 24h, (a), (d)H/C=2.2, (b), (e)H/C=3.5, (c), (f)dp-HAp)

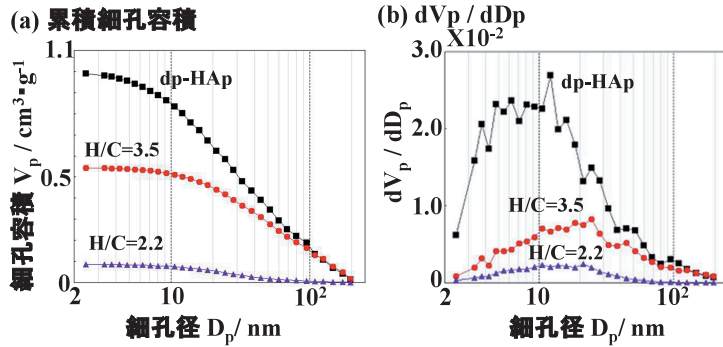


図7 鮭骨・皮由来 dp-HApとHAp-C 凍結乾燥粉末の細孔径分布曲線
(合成温度293K, pH7.5-7.9, 24h, ▲:H/C=2.2, ●:H/C=3.5, ■:dp-HAp)

3.3 HAp-C複合材料の水蒸気の吸着徐放特性

図8に本研究の合成粉末、市販化粧品粉末について、288Kにおける水蒸気の吸着徐放特性を示す^{11,12)}。各種粉末の重量は相対湿度80%の高湿環境に放置されると同時に7hまで急増し、20~40%の低湿環境に変換されると激減した。293K合成のH/C=2.2粉末は市販化粧品材料やヒアルロン酸粉末に比べ、重量増加率は大きく24hで86%に到達し、高湿から低湿への移行により約100hまで緩やかな重量減少が認められ、高い保湿率を示した。

図9に、HAp-C (H/C=2.2) 凍結乾燥粉末について、288K~308Kにおける水蒸気の吸着徐放特性を示す¹¹⁾。293K合成の粉末は、283K合成の粉末より重量変化率が顕著に高くなり、コラーゲンの部分的ゼラチン化と線維状配向の柱状粒子によって吸湿・保湿率の熱安定性が維持できることが分かった。恒温恒湿器内で試料の保持温度が高い場合の方が、コラーゲンの熱変性によって重量変化率は低くなる傾向がみられた。

試料の固液界面における水分子の吸着挙動を推測するため、気固系の水蒸気吸着等温線を測定した。図10に、293K合成のdp-HApとHAp-C粉末における298Kの水蒸気吸着等温線を示す^{11,12)}。全ての粉末について吸着・脱着工程で水蒸気吸

着量のヒステリシスが認められ、特に、H/C=2.2粉末の脱着過程では、相対圧0.45~0.60で不連続な吸着等温線が得られた。この不連続な曲線は、H/C=2.2粉末が水蒸気分圧に依存し材料表面で水分子を吸着するのみならず、材料内部に吸収する特性を持つことを示唆している¹²⁾。

水の単分子層吸着を意味する相対圧0~0.3での吸着量は、H/Cの減少に伴い、BET表面積の減少と対応して減少した。材料表面上で単分子層水分子の親和性を考察するため、親水性と疎水性の判定指標として、窒素吸着によるBET比表面積に対する水蒸気吸着によるBET比表面積の比率 ($R_{w/N}$) を計算した。コラーゲン含有量の増加に伴い、 $R_{w/N}$ の序列はdp-HAp(1.17) < H/C=3.5(1.67) < H/C=2.2(4.47)となり、親水性が向上することが明らかになった。

一方、固液界面の水分子の吸着挙動に近い、水蒸気の多分子層吸着を意味する相対圧0.70~0.90での吸着量は、dp-HApとH/C=3.5よりH/C=2.2の方が顕著に大きい値になった。これらの結果から、H/Cは気固や固液界面の境界膜の厚さと水分子の吸着強度に影響を与え、親水性表面を持つH/C=2.2粉末は固液界面で比較的厚い境界膜を形成し、水分子を強く吸着・吸収すると推察される¹²⁾。

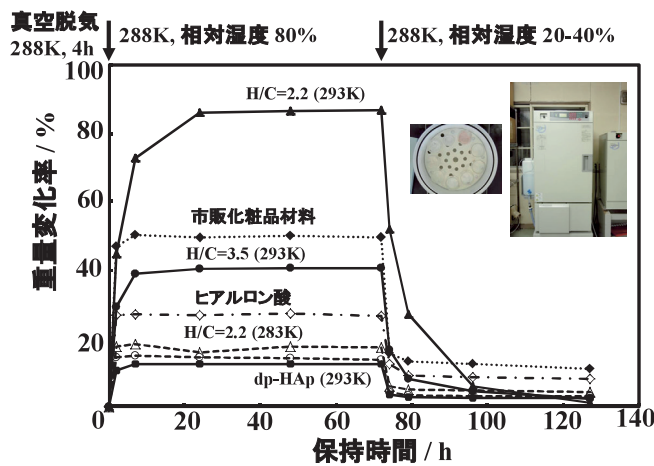


図8 各種粉末の水蒸気の吸着徐放特性

(保持温度288K, 相対湿度変化20-80%, ○:H/C=2.2(合成温度283K), ●:H/C=2.2(293K), △:H/C=3.5(283K), ▲:H/C=3.5(293K), ■:dp-HAp(293K), ◆:市販化粧品材料, ◇:ヒアルロン酸)

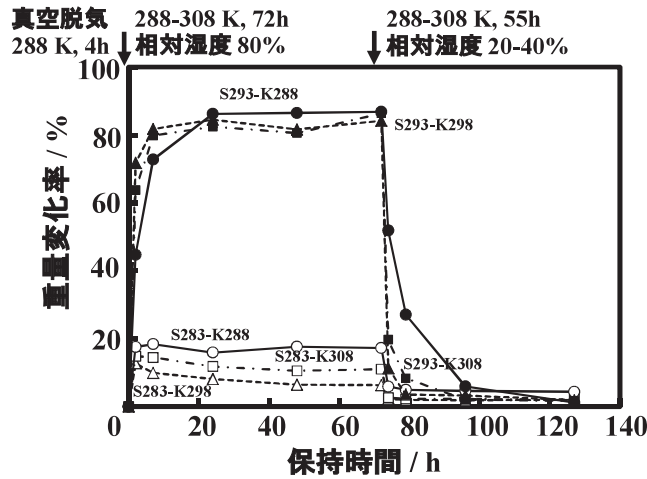


図9 HAp-C凍結乾燥粉末の水蒸気の吸着徐放特性

(●:合成温度293K, 保持温度288K (S293-K288), ▲:S293-K298, ■:S293-K308, ○:S283-K288, △:S283-K298, □:S283-K308)

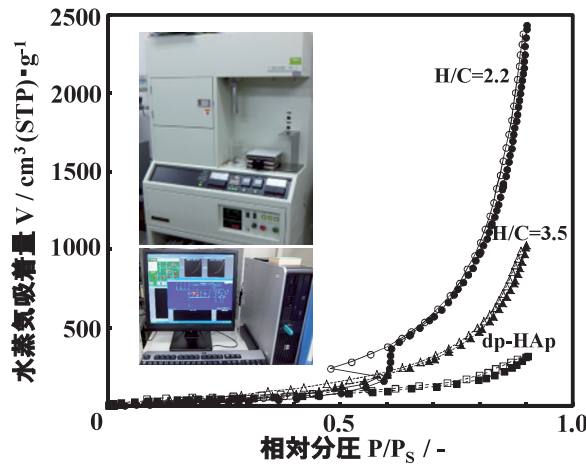


図10 鮭骨・皮由来 dp-HApとHAp-C 凍結乾燥粉末の水蒸気吸着等温線

(吸着温度298K, ○●:H/C=2.2, △▲:H/C=3.5, ■□:dp-HAp, ●▲■:吸着過程, ○△□:脱着過程)

3.4 HAp-C複合材料の生体組織適合性

293K合成のdp-HApとHAp-C粉末の生体組織適合性を評価するため、両粉末をラット背部皮下組織内へ埋入、摘出し、組織形態学的に観察した。図11に埋入2週後の典型的なH-E標本を示す^{8, 10, 12)}。両粉末では、コラーゲンは完全に吸収され、化膿性炎症はなくHAp粒子の表層に多核巨細胞浸潤が

観察されることから、良好な生体吸収性と生体親和性が確認された。生体組織環境では、dp-HAp粉末は特殊な細孔構造と化学的性質を有する生体活性表面を形成、多核巨細胞の導入と分化を誘導し、生体模倣性HAp-C粉末は、適度な蛋白質やサイトカイン吸着徐放性により優れた骨伝導性を示すと考えられる。dp-HAp粉末に比べて A_{SS} と V_{TP} が小さいH/C=3.5粉末では、組織体液がよく浸透した100~500 μ mのHAp粒子が認められる。この組織体液の浸透は、HAp-C粉末が凝集しながら組織体液や血液を吸水する性質を意味し、吸収性止血材としての可能性が示唆された。

以上の結果から、道産鮭骨・皮由来HAp-C複合体は、H/C値、温度、pH等の析出条件の選定により、材料の表面構造と化学的性質を制御し、生体組織に適当な生体関連材料の設計が可能であり、化粧品原料、蛋白質の吸着、細胞の付着・増殖性に優れた吸収性生体模倣材料へ応用展開が期待される。

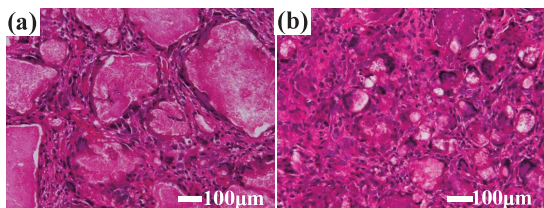


図11 ラット背部皮下組織内へ埋入、2週後摘出粉末のH-E標本写真 (293K合成, (a)H/C=3.5, (b)dp-HAp)

4. 結言

鮭骨・皮を原料としたHAp-C粉末を作製し、生体模倣材料の設計・制御技術を検討した結果、下記の結論が得られた。

- 1) b-HApは微量Na⁺、Mg²⁺含有Ca²⁺欠損型HApであり、焼成温度の上昇に伴い結晶性は向上、顕著な粒子成長が進行し、格子定数は六方晶系のa=0.942nm, C=0.688nmであった。
- 2) HApとコラーゲンの組成比(H/C)に依存して、凝集性、配向性、線維化、微細構造が異なるHAp-Cが得られた。
- 3) 283~293KとpH7.5~7.9合成のHAp-Cは、低結晶性Ca²⁺欠損型HAp、I型コラーゲンとゼラチンの複合体であった。
- 4) 293K合成では、H/C値の増加に伴い比表面積と全細孔容積は増加し、3~30nmの部分細孔容積は大きい値になった。
- 5) 288~308K保持の水蒸気の吸着徐放特性では、293K合成のH/C=2.2は、市販品に比べ吸湿率と保湿率が高く、優れた熱安定性を示した。
- 6) 298Kの水蒸気の吸着等温線では、吸着・脱着過程で水蒸気吸着量のヒステリシスがみられ、293K合成のH/C=2.2は親水性が強くなり、水蒸気吸着量が最高値を示した。
- 7) ラット背部皮下組織内への埋入では、多核巨細胞浸潤が認められ、293K合成のH/C=3.5は、100~500μmのHAp粒子内へ組織体液が浸透し、凝集性、生体吸収性が検証された。

以上より、道産鮭骨・皮由来HAp-Cは、優れた吸湿性、保湿性、生体適合性を有することから、組織再生や新陳代謝に有効な生体模倣材料として、再生医療現場、細胞工学、医薬学分野での研究、化粧品原料への応用が可能である。

引用文献

- (1) T. Kawakami, Y. Kuboki, J. Tanaka, S. Hijikata, T. Akazawa, M. Murata, R. Fujisawa, H. Takita, M. Arisue, Regenerative Medicine of Bone and Teeth -with special references to biological principles, problems and their indicators-, Journal of Hard Tissue Biology, Vol.16, No.3, pp.95-113, (2007)
- (2) 赤澤敏之, 村田勝, 伊東学, Phosphorus Lett., 生体模倣セラミックスの開発と骨再生工学, No.66, pp.4-13, (2009)
- (3) 赤澤敏之, 執行達弘, 野村隆文, 稲野浩行, 板橋孝至, 山岸暢, 中村勝男, 日高青志, 万城目聡, 三津橋浩行, 高橋徹, 村田勝, 長野二三, 田崎純一, 飯田俊二, 柏崎晴

彦, 大久保直登, 柴田智裕, 菊地雅彦, 歯のバイオリサイクル医療技術の開発と応用, 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.311, pp.51-59, (2012)

- (4) S. Yunoki, T. Suzuki, M. Takai, Stabilization of Low Denaturation Temperature Collagen from Fish by Physical Cross-Linking Methods, J. Bioscience and Engi., Vol.96, No.6, pp.575-577, (2003)
- (5) S. Yunoki, N. Nagai, T. Suzuki, M. Munekata, Novel Biomaterial from Reinforced Salmon Collagen Gel Prepared by Fibril Formation and Cross-Linking, J. Bioscience and Engi., Vol.98, No.1, pp.40-47, (2004)
- (6) 特許 第4064435号, コラーゲンゲルおよびその製造方法.
- (7) 井原慶児, 永井展裕, 柚木俊二, 森一生, 鮭皮コラーゲンのバイオマテリアル化技術の開発と商品化, 生物工学会誌, Vol.85, No.3, pp.126-131, (2007)
- (8) 赤澤敏之, 村田勝, 伊東学, 飯田俊二, 執行達弘, 野村隆文, 稲野浩行, 山岸暢, 中村勝男, 宮崎聡, プラスチック成形加工学会第19回秋季大会講演予稿集, p.61, (2011)
- (9) 赤澤敏之, 村田勝, 南田康人, 執行達弘, 野村隆文, 稲野浩行, 山岸暢, 中村勝男, 伊東学, 飯田俊二, 宮崎聡, 日本セラミックス協会2012年 年会講演予稿集, p.358, (2012)
- (10) Akazawa, T., Murata, M., Ito, M., Iida, S., Shigyo, T., Nomura, T., Inano, H., Yamagishi, T., Itabashi, K., Nakamura, K., Key Engi. Mate., Characterization of Bio-absorbable and Biomimetic Apatite/Collagen Composite Powders Derived from Fish Bone and Skin by the Dissolution-Precipitation Method, Vol.493-494, pp.114-119, (2012)
- (11) Akazawa, T., Murata, M., Nomura, T., Shigyo, T., Sakai, K., Minamida, Y., Kabir, A., Yamagishi, T., Iida, S., Ito, M., Nakamura, K., Miyazaki, S., Key Engi. Mate., Surface Design and Water Vapor-Adsorption Characteristics of Biomimetic Composite Materials Derived from Salmon Resource, Vol.529-530, pp.430-435, (2013)
- (12) 赤澤敏之, 村田勝, 伊東学, Phosphorus Lett., 動物骨の利活用と機能性誘導, No.76, pp.9-20, (2013)

木材・プラスチック複合材の耐凍結融解性評価

大市 貴志, 吉田 憲司, 長谷川 祐*

Durability of Wood Plastic Composites under Accelerated Freeze-thaw Cycling

Takashi OICHI , Kenji YOSHIDA, Yuu HASEGAWA*

抄 録

寒冷地での屋外使用環境下における木材・プラスチック複合材（WPC）の耐久性を評価する目的で、水の存在下で凍結・融解を繰り返す凍結融解試験を1800サイクルまで行い、寸法および機械的特性の経時挙動を測定した。

また、WPCの耐凍結融解性向上に向けた木粉の化学的処理を検討した。その結果、WPCは凍結融解試験により曲げ特性が低下し、低下の度合いはプラスチックの種類および木粉の種類により異なっていた。WPCの耐凍結融解性を高めるには、粒度の小さい木粉を使用する、酸変成樹脂（MAPP）等の相溶化材を適切に添加する、木粉をアセチル化処理することが有効であった。

キーワード：木材・プラスチック複合材，耐久性，凍結融解試験

Abstract

Wood Plastic Composites (WPC) is promoted as a low-maintenance, high-durability product. However long term testing reports are still scarce. The purpose of this study is to evaluate the outdoor durability of Wood Plastic Composites in snowy-cold region. WPC samples were exposed up to 1800 water immersion-freeze-thaw cycles. Thickness swelling and mechanical properties were appropriately examined. In addition, the effects of chemical modification of wood flour on durability of WPC were examined.

Flexural properties of WPC showed a tendency to reduce by water absorption caused by freeze-thaw cycling. The tendency varied according to a kind of plastic and a kind of the wood flour. It was confirmed that the methods used to raise the durability were :1) use the small wood flour of the particle size, 2)use of coupling agent, 3)acetylation of the wood flour.

KEY-WORDS : Wood plastic composites, Durability, Freeze-thaw cycles

1. はじめに

木粉と熱可塑性プラスチックを加熱下で溶融混練し成形した複合材料は、木材・プラスチック複合材（混練型WPC；Wood Plastic Composites）と呼ばれ、木質材料由来の天然の風合いとプラスチック由来の高い成形加工性を併せ持ち、デッキ材などのエクステリア製品を中心に需要が拡大している。この新規なエクステリア材であるWPCは、屋外で長期

間使用する用途が大半を占めていることから、長期耐久性に関する技術蓄積を図ることが求められている¹⁻³⁾。

WPCは木質材料の割合が多くなるほど、木の風合いが高くなる反面、成形加工性や物性に問題が生じ易くなる。現在普及しているデッキ材等のWPCにおける木質材料の割合は50%程度が主流となっている。WPCに用いられるプラスチックの多くは、ポリプロピレン（PP）やポリエチレン（PE）等のオレフィン系樹脂であり、疎水性の高い材料であ

*（地独）北海道立総合研究機構 林産試験場

* Local Independent Administrative Hokkaido Research Organization Forest Products Research Institute.

事業名：経常研究

課題名：高耐久性木質プラスチック複合材料の開発（H23～24）

る。一方、複合化される木粉は親水性の高い材料である。そのため、両成分間の親和性の低さがWPCの課題ともなっている。この課題に対しては、酸変成樹脂などの相溶化剤を添加することにより改善が図られている。しかし、WPCに含まれる木質材料の吸水を完全に防ぐことは出来ず、吸水によって引き起こされる物性低下や寸法変化の懸念がある。

屋外用途が使用量の大半を占めるWPCにおいて、吸水による性能への悪影響は避けて通れない課題であり、多方面でその耐水性の評価が行われている。一方、北海道のような積雪寒冷地では、WPC中に侵入した水が凍結・融解作用を繰り返して更なる物性劣化を引き起こすことが懸念される。

本研究では、積雪寒冷地での屋外使用環境下におけるWPCの耐久性を評価する目的で、WPCを水の存在下で凍結・融解を繰り返す凍結融解試験を行い、寸法変化および機械的特性の変化を測定した。また、耐凍結融解性の向上を目的に、改質処理による木質材料の疎水化を検討し、その手段としてアセチル化処理および熱処理を行った木粉を原料としたWPCの耐凍結融解性について評価を行った。

2. 実験方法

2.1 試料

WPCのプラスチックには、汎用ブロックポリプロピレン樹脂 (PP;サンアロマー(株)製 PM472W) を使用した。相溶化剤には無水マレイン酸変成PP樹脂 (MAPP;三洋化成(株)製 ユーメックス1010) を使用した。木質材料は、原料として数cmの大きさにチップ化したトドマツチップを用い、回転式破砕機および超遠心粉碎機で微粉碎し、ふるい振とう機で250 μ mのふるいを通過した細木粉を使用した。また、木粉粒径の比較として、ふるい網上に残留した粗木粉 (250-500 μ m) を使用した。

2.2 木質材料の改質

木質材料の改質は、トドマツチップを無水酢酸の蒸気で常圧相処理するアセチル化およびオープン中で加熱する熱処理の二通りの方法を試みた。アセチル化処理条件は、120 $^{\circ}$ Cのオープン中で48時間とした。この時のアセチル化度は約35%であった。熱処理は、トドマツチップを200 $^{\circ}$ Cのオープン中で6時間加熱した。各処理後の木チップは、未処理チップと同様の粉碎・ふるい分けを行い250 μ m以下の細木粉として用いた。

2.3 WPC供試体の作製

使用するプラスチック材料には、PPのみを使用したPP単独系およびPP:MAPP=95:5の比率でMAPPを混合したMAPP添加系の2種類を用い、WPC供試体を作成した。

各木粉は、105 $^{\circ}$ Cで3時間以上乾燥してから使用した。プラ

スチック材料と木粉が重量比で1:1となるように計量した材料をドライブレンドし、同方向回転二軸押出機 (BRABENDER製 D=20, L/D=29) を用いて、180~190 $^{\circ}$ Cで混練してペレット化した。混練ペレットを105 $^{\circ}$ Cで3時間以上乾燥した後、一軸回転押出機 (BRABENDER製 D=19, L/D=25) にて190 $^{\circ}$ Cで熔融混練し、リボンダイを用いて厚さ約7mm、巾約50mmに押出して板状の成形品とした。板状成形品の上下両表面を切削加工により平滑にし、約50cmの長さに切断しWPC供試体とした。

2.4 凍結融解試験方法

凍結融解試験は、気中凍結気中散水融解法とした。WPC供試体は、凍結融解試験に先立ち、24時間水中に浸漬させた。凍結融解試験の1サイクルは、気中凍結2時間、散水融解1時間とした。気中凍結時の槽内温度は-20 $^{\circ}$ C、散水融解は上部からの散水方式でその水温は20 $^{\circ}$ Cとした。図1に融解散水時の状況を示した。散水時は、試験片全体に水が掛かり、水膜で覆われている状況であった。



図1 凍結融解試験機と散水融解時の試験槽内の様子
(田尻機械工業(株)製, TM-622020)

2.5 厚さ変化率の測定

凍結融解試験後のWPC供試体を常温水中に約1時間浸漬して完全に融解させた後、表面の水を拭き取り直ちに湿潤状態の厚さを測定した。その後、WPC供試体を標準雰囲気 (23 $^{\circ}$ C, 50%RH) で2週間以上放置して乾燥させ、乾燥状態の厚さを測定した。厚さ変化率は、凍結融解試験前の厚さを基準として計算した。

2.6 機械的特性の評価

機械的特性の評価として、曲げ試験およびシャルピー衝撃試験を行った。曲げ試験は、JIS K 7171 (試験速度2mm/min) に準拠して、万能材料試験機 (株島津製作所製 オートグラフAG-250kND) を使用して行った。衝撃試験は、JIS K 7110に準拠してシャルピー衝撃試験機 (株安田精機製作所製 万能衝撃試験機No.258) を使用して、フラットワイズ試験片を用いて試験を行った。試験片は、乾燥後のWPC供試体から押出方向が試験片の長さ方向となるように切り出し、切削加工により作製し、標準雰囲気 (23 $^{\circ}$ C, 50%RH) で状態調節を行い、試験に供した。

2.7 微小硬さ計によるWPC供試体内部の劣化状態の評価

WPC供試体内部への凍結融解作用の影響を測定することを目的に微小硬さ計（Fischer Instruments製 Fischerscope H100, 図2）を用いて供試体深さ方向における弾性率分布を測定した。WPC供試体を1cm幅に切断して、切断面を800番および1200番の研磨紙で研磨し、研磨面の垂直方向に最大荷重500mNでダイヤモンド圧子を押し込み、押し込み深さと荷重の関係から押し込み弾性率を求めた。図3に示したようにWPC供試体表面側から深さ方向に一定ピッチで押し込み弾性率を測定することにより、深さ方向の弾性率分布を求めた。図4にWPC断面に残った四角錐状の圧痕を示した。圧痕の面積は約 $30 \times 30 \mu\text{m}$ 、押し込み深さは10から $20 \mu\text{m}$ 程度である。

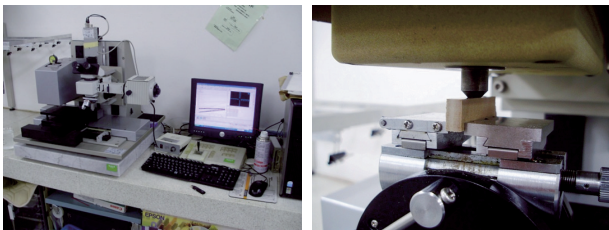


図2 微小硬さ計と測定部の拡大写真

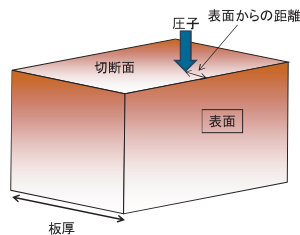


図3 WPC断面の押し込み弾性率測定

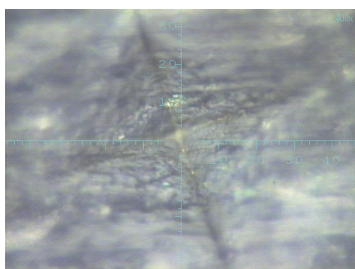


図4 微小硬さ測定後の圧痕

3. 結果および考察

3.1 各種WPCの曲げ特性

図5と図6に凍結融解試験前の各WPCの曲げ強さと曲げ弾性率を示す。WPCの曲げ特性は、プラスチックの種類に大きく依存していた。同種の木粉を使用したWPCを比較すると、全ての木粉でPP単独系WPCに対しMAPP添加系WPC

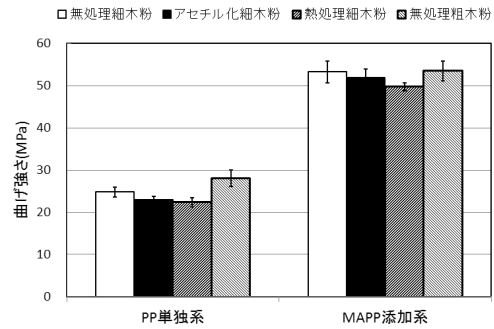


図5 標準状態におけるWPCの曲げ強さ

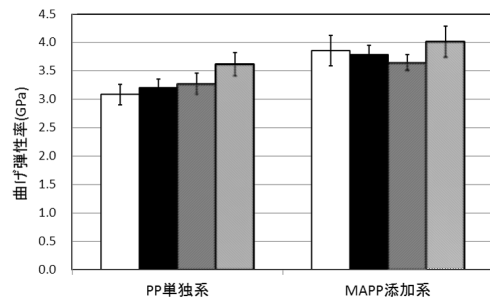


図6 標準状態におけるWPCの曲げ弾性率

は、曲げ強さが約2倍高い値を示した。また、曲げ弾性率も同様に、MAPP添加系WPCは10~25%高い値を示し、MAPP添加によるWPCの曲げ特性向上の効果が顕著に認められた。

次に、木粉の改質効果を比較すると、アセチル化細木粉のWPCは無処理細木粉のWPCに比較し、曲げ強さがPP単独系で7%、MAPP添加系で2.5%低い値を示した。同じく熱処理細木粉も曲げ強さがPP単独系で10%、MAPP添加系で7%低い値を示した。曲げ弾性率は、アセチル化細木粉および熱処理細木粉ともに、PP単独系で僅かに上昇しているものの、MAPP添加系では減少しており、木質材料の改質効果は、曲げ特性では認められなかった。

無処理木粉における粒径の影響を見ると、粗木粉のWPCは、細木粉のWPCより、曲げ強さ、曲げ弾性率ともに高い値を示し、木粉の粒径が大きいほどWPCの曲げ特性が高くなった。

図7に使用した木粉の写真を示す。本実験では、木チップを改質してから粉砕・ふるい分けを行ったため、同じふるい通過粒径でも木粉の種類により粒径が異なり、無処理細木粉に比較し各改質細木粉は、粒径が小さくなっていった。一般に木粉を疎水化するとプラスチックとの馴染みが良くなり物性が向上すると考えられている⁴⁾。しかしながら、本実験では、木粉の粒径が無処理に比較し小さいため曲げ特性が低くなり、木粉の改質効果が認められなかったと考えられる。

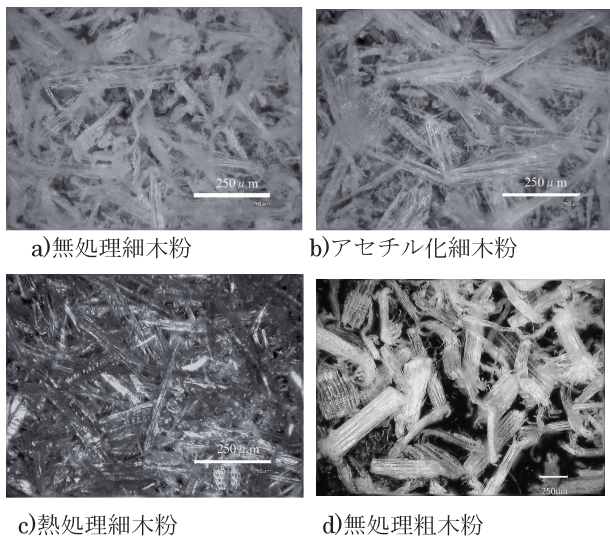


図7 使用した木粉の写真

3.2 凍結融解試験によるWPCの物性変化

図8と図9に100, 300, 900および1800サイクルの凍結融解試験を行った各WPCの曲げ強さと曲げ弾性率を示す。凍結融解試験によりWPCの曲げ特性は低下傾向にあり、その傾向はプラスチックの種類および木粉の種類により異なっていた。

PP単独系WPCを木粉の種類別で見ると、無処理細木粉は、100サイクルからすでに曲げ特性の低下が始まり、300サイクルでは、初期値より曲げ強さが8%、曲げ弾性率が14%低下していた。1800サイクルになると、曲げ強さは25%、曲げ弾性率は60%も低下していた。熱処理細木粉は、100サイクルは初期値を維持していたが、300サイクルから低下し始め、1800サイクル後では、曲げ強さが20%、曲げ弾性率が50%低下していた。一方、アセチル化細木粉の曲げ強度は、1800サイクル後も初期値を維持していた。また、曲げ弾性率も5%の低下に抑えられていた。

MAPP添加系のWPCは、全ての木粉で曲げ特性の低下がPP単独系に比較し抑制されていた。特に、アセチル化細木粉と熱処理細木粉は、1800サイクル後も曲げ強さ、弾性率と

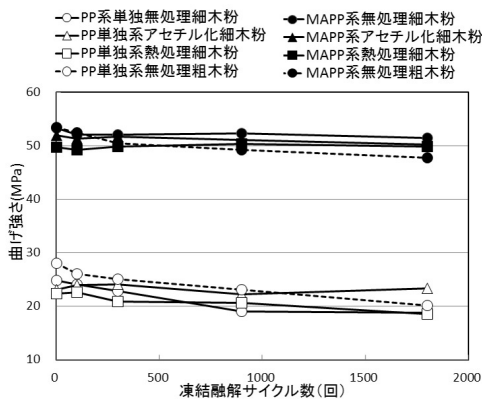


図8 凍結融解試験後のWPCの曲げ強さ

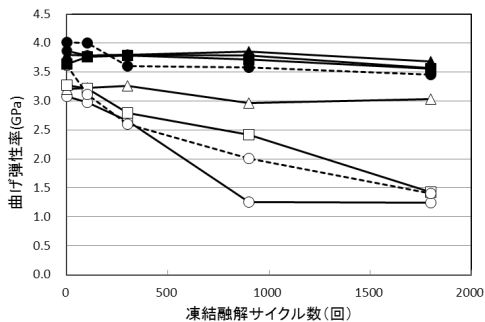


図9 凍結融解試験後のWPCの曲げ弾性率

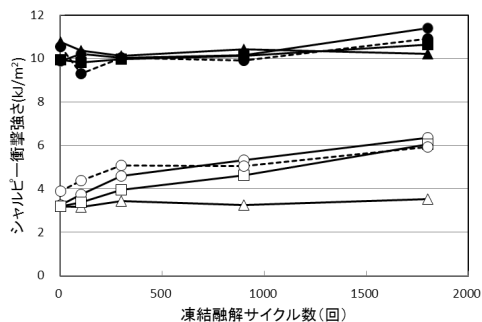


図10 凍結融解試験後のWPCの衝撃強さ

もに初期値をほぼ維持していた。一方、無処理細木粉は、300サイクルで曲げ強さと弾性率が2%の低下とほぼ初期値を維持していたが、1800サイクル後では、曲げ強さが3%、曲げ弾性率が8%低下していた。

また、粗木粉は細木粉に比較し、曲げ強度および弾性率とも低下傾向が大きく、木粉粒度による耐久性の差が認められた。

図10に凍結融解試験後のWPCの衝撃強さを示す。凍結融解試験によりWPCの衝撃強さは増加傾向にあった。

一般に、フィラー分散型プラスチック複合材料において、マトリクス/フィラー界面が強固に一体化していないと衝撃試験時にフィラー/マトリクス界面に空隙が形成され易く、それにより衝撃のエネルギーが吸収され、衝撃強度が増加することが知られている。今回、凍結融解試験により衝撃強さが増加したのは、木粉の吸水凍結膨張でマトリクス樹脂と木粉界面がはく離し、微細な空隙が形成され、衝撃エネルギーが吸収されたためと考えられる。

凍結融解試験による衝撃強さの変化は、曲げ特性の変化の傾向と反対であり、MAPP添加系およびアセチル化細木粉は、衝撃強さの変化が少なく、プラスチックと木粉の界面はく離が少ないと推測される。

図11と図12に凍結融解試験後における湿潤状態および乾燥状態のWPCの厚さ変化率を示す。WPCは、凍結融解試験により膨潤し、乾燥後も元の厚さに戻らない変形が生じていた。WPC内部へ水が侵入すると木粉が吸水して膨潤する。さらに、凍結により体積が膨張してWPCが変形する。この時、

プラスチックと木粉の界面がはく離し空隙が出来るとさらに水を含みやすくなり凍結でより膨張する。この作用を繰り返す、不可逆的な変形が起ると考えられる。

厚さ変化率は、曲げ特性と同様にプラスチックの種類および木粉の種類により異なっていた。同種の木粉を使用したWPCを比較すると、全ての木粉でPP単独系がMAPP添加系より大きい厚さ変化率を示した。

PP単独系WPCでは、無処理木粉の厚さ変化が大きく、細木粉および粗木粉ともに300サイクル後の湿潤状態で3%を越え、乾燥状態でも2%を越えた。その後は粗木粉が高く推移し、1800サイクル後には11%膨潤した。また、改質木粉は、厚さ変化率が無処理に比較し低く推移し、アセチル化細木粉は、1800サイクル後でも湿潤状態1.2%、乾燥状態0.8%と低い値であった。

MAPP添加系のWPCでは、無処理細木粉は、300サイクルで湿潤状態1.2%、乾燥状態0.6%となり、PP単独系の1/3程度まで厚さ変化が抑制された。また、無処理粗木粉は、細木粉より高い値を示し、木粉粒径による差がみられた。熱処理木粉は、湿潤状態の300サイクル後で0.5%、1800サイクルで0.8%と無処理細木粉の半分以下の値となった。さらに、アセチル化細木粉の1800サイクルの湿潤状態の厚さ変化率は、0.4%と凍結融解試験による寸法変化がほとんど生じなかった。

以上のことから、WPCの耐凍結融解性を高めるための方法として、粒径の小さい木粉を使用する。MAPP等の相溶化剤を適切に添加する。さらに、木粉をアセチル化処理することが有効であることが言える。

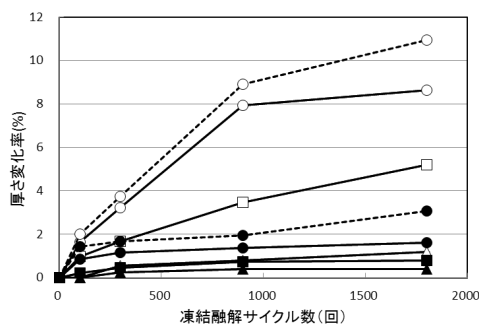


図11 凍結融解試験後の湿潤状態におけるWPCの厚さ変化率

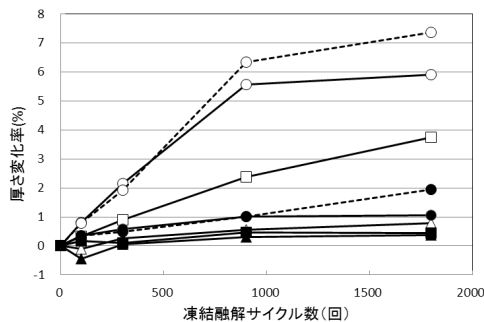


図12 凍結融解試験後の乾燥状態におけるWPCの厚さ変化率

3.3 WPC断面深さ方向の押込み弾性率分布

WPCは、表面から水が内部に浸透し、凍結融解作用を受けて曲げ弾性率が低下した。凍結融解作用を受けた範囲は弾性率が低下していると考えられる。そこで、微小硬さ計を用いて供試体断面の押込み弾性率分布を測定し、供試体表面から深さ方向への凍結融解作用の影響範囲の把握を試みた。

図13に各凍結融解サイクル後の各WPC断面における押込み弾性率の深さ方向の分布曲線を示す。WPCは、木粉との複合材であるため微小領域の弾性率にはばらつきがある。そのため、図中は3回測定した平均値をプロットしている。

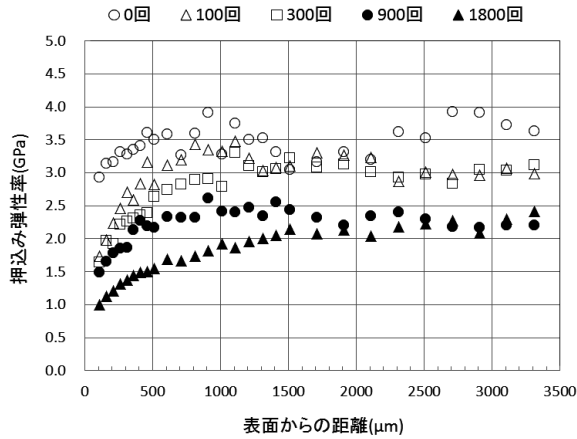
凍結融解試験前のWPCは、全ての供試体で表面近傍の押込み弾性率が低く、深さ500μm位まで徐々に上昇し、それより深くは比較的一定の値を示した。表面近傍が低いのは、供試体作成時に表面を切削加工したことによる影響とも考えられるが、この理由は明らかとなっていない。ただし、凍結融解サイクル数が増えると押込み弾性率は低下する傾向を示していることから、本報告では凍結融解試験前の押込み弾性率分布を基準として各データの相対比較を行い、WPC試料内部の劣化状況を評価した。

図13 a) に示したPP単独系無処理細木粉WPCは、100サイクルで既に深さ方向全域にわたって押込み弾性率が低下し、サイクル数の増加により押込み弾性率がさらに低下した。WPC内部への水の浸透は100サイクル以前の凍結融解開始から比較的早い段階で内部まで水が浸透していたと推測される。

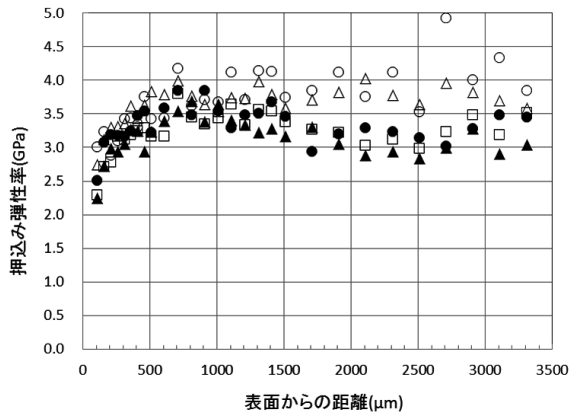
図13 b) PP単独系アセチル化細木粉WPCは、300サイクル以降で表面近傍また1000μmより内部での押込み弾性率の低下が顕著であった。一般に、凍結融解試験では、表面から先に水の凍結温度以下となるため、表面に近い水が初めに凍結する。この凍結による膨張のため、凍結していない水は内部に押し込まれ、内部に膨張圧が掛かり、この作用を繰り返すことにより内部から崩壊すると言われている。WPCもこの現象により内部の押込み弾性率が低下したと考えられる。

図13 c) MAPP添加系無処理細木粉WPCは、PP単独系無処理木粉WPCより押込み弾性率の低下が抑制され、表面近傍はその傾向が顕著であった。また、300サイクルにおいても内部の押込み弾性率は低下せず、相溶化剤を添加してプラスチックと木粉の接着性を高めることは、耐凍結融解性にも効果的であることが認められた。900サイクル以降は、表面側より内部の押込み弾性率の低下が大きく、曲げ弾性率の低下割合よりも大きかった。このことは、WPCは凍結融解により内部から崩壊する可能性を示唆していると考えられる。

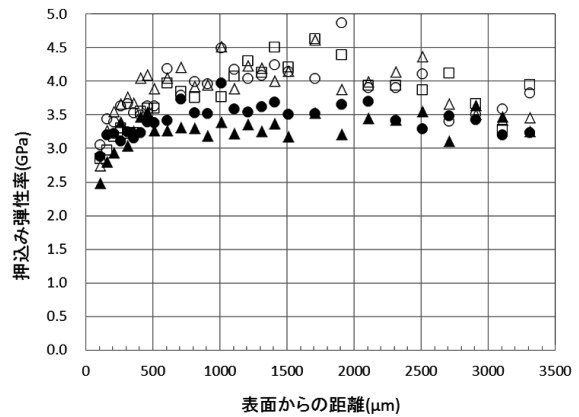
図13 d) MAPP添加系アセチル化細木粉のWPCは1800サイクル後も、内部の押込み弾性率が3.5~4.0GPaとほぼ変わらず、高い耐凍結融解性が示された。このことから、プラスチックの相溶化剤による改質と木粉のアセチル化による疎水化を組み合わせることにより耐凍結融解性が大幅に向上することが確認された。



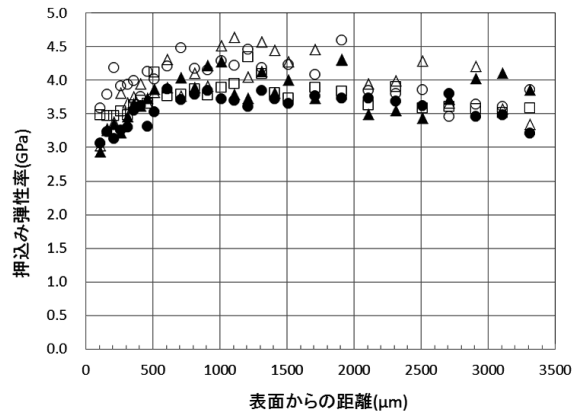
a) PP 単独系無処理細木粉の WPC



b) PP 単独系アセチル化細木粉の WPC



c) MAPP 添加系無処理細木粉の WPC



d) MAPP 添加系アセチル化細木粉の WPC

図13 WPC断面の押し込み弾性率の深さ方向分布曲線

4. まとめ

積雪寒冷地での屋外使用環境下におけるWPCの耐久性を評価する目的で、水の存在下で凍結・融解を繰り返す凍結融解試験を行い、寸法および機械的特性の経時挙動を測定した。

また、WPCの耐凍結融解性の向上を目的に、木質材料のアセチル化処理および熱処理を行い、そのWPCの耐凍結融解性の評価を行った。得られた結果は以下のように要約される。

- 1) WPCは、凍結融解試験により膨潤した。また、曲げ特性が低下し、衝撃強さが大きくなる傾向を示した。これは、WPC内部まで水が浸透し、凍結融解作用によりプラスチックと木粉の界面がはく離したためと思われる。
- 2) 曲げ特性の低下傾向は、プラスチックの種類および木粉の種類により異なり、相溶化剤を添加してプラスチックと木粉の接着性を高めることは、耐凍結融解性の向上に効果的であることが認められた。また、木粉の粒径は小さいほど耐凍結融解性が高かった。
- 3) 木粉のアセチル化処理は、耐凍結融解性を高めるのに有効であることが確認された。また、相溶化剤と組み合わせることにより耐凍結融解性が大幅に向上した。

- 4) 微小硬さ計によるWPC断面の押し込み弾性率を測定することにより、試料内部の凍結融解作用の影響範囲を評価できることが分かった。

引用文献

- 1) 木口実：木材・プラスチック複合材（WPC）の現状，木材保存，vol.31，No.5，pp.192-1198，(2005)
- 2) 木口実，片岡厚，松永浩史，桃原郁夫，川元スマレ，大友祐晋：木粉・プラスチック複合材（混練型WPC）の耐久性(1)，木材保存，vol.36，No.2，pp.52-58，(2010)
- 3) 大島明：木材・プラスチック再生複合材の長期耐久性に関する研究，建材試験センター 建材試験情報，vol.49，pp.8-12，(2012)
- 4) 小幡谷英一，大澤晃司，山内秀文：アセチル化木粉-ポリスチレン複合体の力学特性，木材学会誌，Vol.57，No.2，pp.88-93，(2011)

道内食産業のためのブランドづくりに関する研究

万城目 聡, 日高 青志

Studies on the branding for the Hokkaido food industry

Akira MANJOME, Seiji HIDAKA

抄 録

近年、道内食産業の高付加価値化が大きな課題となっており、食関連事業者のブランドづくりに対する関心が高まってきた。しかし、ブランドづくりのために具体的に何をしたら良いのかわからず、事業活動として計画しにくいという課題がある。また、ブランドづくりの活動内容は事業者ごとにケースバイケースであるが、そのためのプロセスや手法は確立していない。

このような状況を背景に、本報ではブランドづくりの活動を推進する手法の提案を試みるとともに、それらを実際のブランドづくりプロジェクトの中で試行し、一定の効果を確認した。また、これらの成果をブランドづくりに取り組む食関連事業者などに幅広く提供することを目的として、情報提供冊子を取りまとめた。

キーワード：ブランド、ブランドづくり、食産業

Abstract

While the high-value-added of the Hokkaido food industry has become a major issue, interest in branding of food-related businesses is growing. However, there is a problem that it is quite difficult to create a plan as a business activity specifically for branding. In addition, activities of branding is a case-by-case basis in each entity, but a method or process for it has not been established yet.

So we proposed some methods to promote the activities of branding, and also tried them in the actual branding project to confirmed their effectiveness. In addition, these results were compiled as a booklet to provide information for a wide range of food-related businesses.

KEY-WORDS : Brand, Branding, Food industry

1. はじめに

北海道は国内の地名ブランドにおいて特に高い優位性がある。一方で、食品ブランドとして全国的に知られ親しまれる商品は夕張メロンや日高昆布など、ごく一部に限られている。また、北海道は豊富な一次産品を生産しながら、製造品出荷額における付加価値率は都道府県別で44位（2009年）と低位にあり、食料生産基地として食の大量生産・安定供給の役割を果たす一方、食関連産業の高付加価値化については都府県に遅れをとっており、これが大きな課題となっている。

道内の食関連事業者がより高付加価値な商品づくりにシフトし、強いブランドを確立することができれば、事業者や地

域側には「より高い利益率、価格競争力、安定した販売量」、顧客側には「商品選択のリスク低減、高い満足感」といったメリットが生じ、将来的な道内食産業の持続的発展に大きく貢献できる。このため、道内食関連事業者のブランドづくりに対する関心や期待は高まっており、食関連企業や団体、あるいは自治体などにおいて様々な取り組みが始まっている。

しかし、実施主体者にとってブランドづくりのための具体的な活動はわかりにくい。この理由として、ブランドづくりの取り組みは商品開発やマーケティング活動などを含む広範なものであり、様々な事業活動と密接に結びつき不可分なことが挙げられる。また、ブランド化とは商品や商品の送り手に対する受け手の強い信頼、愛着の獲得と、それらの長期的

事業名：経常研究

課題名：道内食産業ブランド構築のためのデザインメソッド研究（平成22～24年度）

な維持，すなわち受け手との関係づくりであり，決して送り手の思いだけではなし得ないことだからである。

このようなことを踏まえ，本研究では道内の食関連事業者が効果的にブランドづくりに取り組めるように，ブランドづくりの活動を推進するための考え方や，これを支援する手法について提案を行った。

2. 研究の進め方

2.1 ブランドづくりケーススタディ

ひとことでブランドづくりと言っても実施主体の規模や，組織構成，主要な商品やサービスの内容などによって取り組み内容は異なる。また，ブランドづくりの活動は個別の商品開発やプロモーションのような短期的な事業活動と違い，5～10年といった中長期的な視点で取り組むべきものであり，事業が存続する限り継続的に行う必要がある。

そこで本研究では実施期間が限られているため，道内で新規に取り組みを開始する3つのブランドづくりプロジェクトを初期段階のケーススタディとして選定し，研究期間の3年に渡って参画しながらブランドづくりの活動を推進するための考え方や，これを支援する手法の提案を行い，可能なものについてケーススタディの中で有効性の確認を行うこととした。

ケーススタディの選定にあたっては，実施主体を「企業」と「地域」の2つに大別し，さらに企業主体においては規模の違う2つの事業体を取り上げ，実施主体の違いを踏まえた適切な取り組み方を探ることとした。

<企業（2件）>

- ①アロニアや行者大蒜などの道産素材を活用し，主に健康食品の企画開発や販売を行う(有)ウィズユーコーポレーション。
- ②ホルスタイン牛肉としてブランド展開を進めてきた「十勝若牛」を筆頭に多様な農畜産物を取り扱う十勝清水町農協（JA十勝清水町）。

<地域（1件）>

- ③豊かな自然から育まれる豊富な海産物・畜産物を強みとする，「くしろ地域8市町村（釧路総合振興局が主導）」。
- 将来的に広域地域ブランドを目指している（図1）。

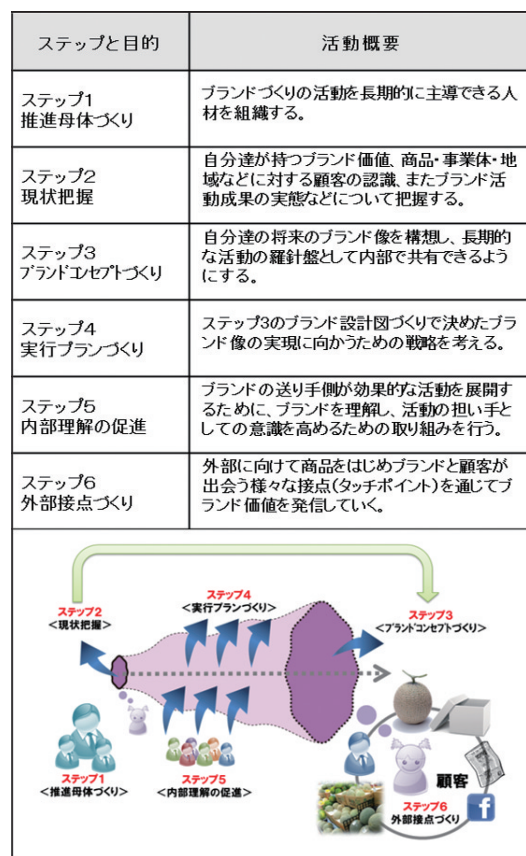


図1 選定した3つのケーススタディ

2.2 ブランドづくりの基本6ステップの活用

ブランドづくりの活動内容は事業者ごとにケースバイケースであり，現状ではブランドづくりのための明確なプロセスは確立していない。このことが事業者がブランドづくりに着手しようとする時に「具体的に何をすれば良いのか分からない」「事業活動として計画できない」といった課題に直面する要因となっている。

そこで，道総研工業試験場のデザイングループが編集し，北海道経済部が発行している「地域ブランドづくりのためのデザインIT活用ガイド¹⁾」の中で提示されたブランドづくりの初期段階の基本6ステップ（図2）の一部アレンジして活用することとした。



※北海道「地域ブランドづくりのためのデザインIT活用ガイド」を参照

図2 初期段階の基本6ステップ

これは地域ブランドづくりを開始し，活動を軌道に乗せるまでを段階的に推進するガイドであり，企業主体のブランドづくりにも応用が可能な汎用性の高いものである。今回，この基本6ステップを3つのケーススタディに適用することによって，実施主体ごとに異なる取り組み方を比較することができ，その違いやポイントを明確にできると考えた。

一方「地域ブランドづくりのためのデザインIT活用ガイド」では，基本6ステップごとの活動目的は明示されているが，具体的にどのような活動を行うかについてはあまり触れ

られていない。そこで、ケーススタディを進める過程で、この6ステップに沿った具体的活動や支援手法を検討し、その有効性の検証した。

3. ケーススタディの準備段階

ケーススタディの実施前に、まず実施主体ごとにブランドに関する認識や、活動を想定した場合の組織の状況などについてヒアリングを行った。その結果3つのプロジェクトに共通していたのは、

- ・実施主体の内部にブランドに関する専門知識や活動経験がある人材が不在。
- ・実施主体の一部にブランドづくりの重要性について認識があるが、それを組織として理解・共有し、実践できる状態ではない。

基本6ステップはこのような状態を出発点に取り組める手順となっており、実施主体からは基本6ステップの活用について容易に理解が得られた。

続いて基本6ステップの具体的な活動内容を検討するために、ヒアリング結果を踏まえ、ケーススタディを推進する上での課題の整理、具体的な活動内容の検討、利用可能な既存手法などの調査を行い、具体的な活動案（支援手法やワークショッププログラム）を用意した（表1）。

4. 取り組みステップごとの実施結果と考察

4.1 ステップ1 推進母体づくり（表1-A）

3つのプロジェクトの組織内部にブランドづくりの活動経

験がある人材はいなかったため、推進母体づくりの前段で、まず推進母体の候補者を対象にブランドの基礎知識を理解・共有することを目的としたセミナーを実施した。

セミナー講師は工業試験場が対応し、ブランドの基礎知識に関する1時間程度の講義の後、セミナー参加者との間で質疑応答の時間を設けた。

この結果、参加者のブランドに関する理解が深まり、活動に対するモチベーションの向上が図られ、推進母体づくりに向けた準備として有効であった。

推進母体の構成においては、事業主体が企業か地域かによって、活動スタイルが異なることを踏まえ、企業主体の場合は経営層自らの参画と、トップダウンによる担当者の指名、地域主体の場合は行政主導でブランドづくりのコアとなる地域の事業者を集めた。また、内部の人材だけではまかなえない領域について、外部の専門家や業者（デザイン業、農業コンサルタント、包材資材業、シンクタンクなど）とも連携した（表2）。

表2 推進母体の構成

主体の区分	ケーススタディ対象	推進母体の構成
企業	小規模 ウィズユー コーポレーション	
	中規模 JA十勝清水町	
地域	地域 くしろ地域 8市町村	

表1 基本6ステップと具体的な活動案

ステップと目的	活動概要	ケーススタディを推進する上での主な課題	具体的な活動案 (支援手法やワークショッププログラム)
ステップ1 推進母体づくり	ブランドづくりの活動を長期的に主導できる人材を組織する。	・ブランドに関する知識や経験を持った人材がいない状態から効果的な組織をつくる。 ・企業主体・地域主体、それぞれの活動を考慮したふさわしい組織構成。 ・トップマネジメントを推進母体の活動に組み込む。	A ブランドの基礎知識に関する内部セミナー
ステップ2 現状把握	自分達が持つブランド価値、商品・事業体・地域などに対する顧客の認識、またブランド活動成果の実態などについて把握する。	・ブランドに関する実態を把握するための考え方や手法を明確にする。 ・ブランド力が弱い活動の初期段階における現状把握手法。	B 「ファクトの4つの領域」や「バリューチェーン分析」を活用したファクトの把握 C 既存の評価手法を組み合わせたブランド認識調査
ステップ3 ブランドコンセプトづくり	自分達の将来のブランド像を構想し、長期的な活動の羅針盤として内部で共有できるようにする。	・その事業体ならではの独自のブランドコンセプトを導出できる、推進母体メンバーによる効果的なコンセプトワーク計画と実施。	D 「ブランドモデル」を活用したコンセプトワークショップ
ステップ4 実行プランづくり	ステップ3のブランド設計図づくりで決めたブランド像の実現に向かうための戦略と戦術を考える。	・多様かつ長期的な視点から戦略検討を行い、戦術の幅を広げるとともに、組織内で共有できるようにする。	E 「ブランドづくり戦略の5つの視点」を活用した実行プラン検討ワークショップ
ステップ5 内部理解の促進	ブランドの送り手側が効果的な活動を展開するために、ブランドを理解し、活動の担い手としての意識を高めるための取り組みを行う。	・ブランドに関する基本的な知識の理解・共有の徹底。	F ブランドの基本事項に関する内部セミナー 内部理解促進ツール(ブランドブックなど)
ステップ6 外部接点づくり	外部に向けて商品をはじめブランドと顧客が出会う様々な接点(タッチポイント)を通じてブランド価値を発信していく。	・ブランド価値の情報発信の視点を組み込む。 ・タッチポイントの一貫性の確保と管理体制づくり。	G 「タッチポイント評価フレーム」を活用したタッチポイント開発

今回のケーススタディの活動の推移を見ると、推進母体には活動推進に対する意識を強く持った人材の確保が重要であると言える。その人材にさらにブランドに関する専門知識や活動経験があれば理想的だが、道内でそのようなケースはほとんど期待できない。従って、推進母体の構成段階でブランド活動をコントロールできる経験を持つ外部のコーディネーターを組み込むことが重要と考える。

今回のケーススタディでは、JA十勝清水町のプロジェクトにブランディングの専門知識を持った農業コンサルタントが参画しており、活動推進に大きな役割を果たした。

外部のコーディネーター人材にはブランディングを専門とする「ブランドコーディネーター」も存在しており、くしろ8市町村プロジェクトではスポット的なセミナーやワークショップの実施で支援を得た。このようなブランドコーディネーター人材は道内にはまだ少ないため、現状では道外も含めた人材の選定が必要となる。

4.2 ステップ2 現状把握

具体的な活動に入る前に、まずブランドづくりにおける現状把握の基本的な考え方を検討した(図3)。

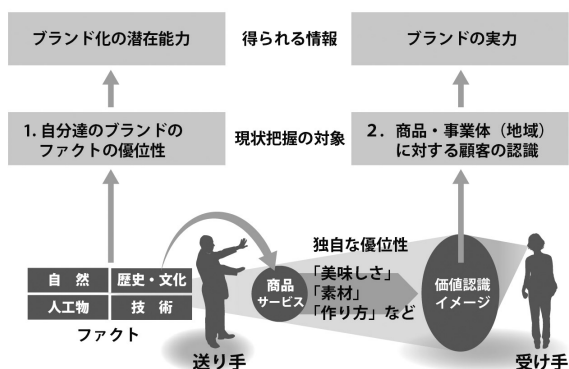


図3 現状把握の基本的な考え方

ブランドの送り手には、まず顧客にブランド価値認識を生じさせる何かが必要となる。食品の場合は「美味しさ」「素材」「作り方」などにおいて、他を圧倒する他が真似できない独自の優位性が必要であり、このような優位性を生む固有の性質・事実を「ファクト」と呼ぶ。このファクトを活用し、人々が魅力価値を感じられるような商品やサービスを創出することでブランド化の可能性が生まれる。従ってファクトの優位性が高いほど、「ブランド化の潜在能力」が高いと言える。また、ブランドのファクトを明確にしておくことは、次のステップ3でブランドのコンセプトをつくるためにも非常に重要である。

一方、実際にブランドが生まれるかどうかは受け手の価値認識やイメージによって決まる。商品や事業体あるいは地域に対する受け手の価値認識やイメージが良好であればある程、

それは強いブランドということであり、「ブランドの実力」と見せる。この考えに基づき、「1. 自分達のブランドのファクトの優位性」、「2. 商品や事業体(地域)に対する顧客の認識」の双方を把握しておくことが、今後のステップ実施に必須と考えた。

4.2.1 ファクトの優位性把握(表1-B)

ファクトの優位性を把握するために、以下の手順で推進母体メンバーによるワークショップを実施した。

＜ワークショップの手順＞

- ①自分達のブランドのファクトになり得るモノ・コトを思いつく限り書き出す。
- ②①で出されたファクトについて、ファクトの3つの条件である「魅力的なモノ・コトであること」「容易に真似されないモノ・コトであること」「永続するモノ・コトであること」を全て満たしているかについて議論する。満たしていない場合はファクトから外す。
- ③競合する他の事業体や商品と比較し、ファクトにどの程度優位性があるか検討する。

今回、①のファクトの抽出過程では「ファクトの4つの領域と要素¹⁾」(図4)や、原材料の調達から製品・サービスが顧客に届くまでの事業活動全体を捉える「バリューチェーン分析」(図5)の考え方を参考にした。

自然	歴史・文化
景観、気候、地形、水、土、風 日照、動植物、...	過去の出来事、生活様式 伝統工芸、人物、キャラクター...
人工物	技術・サービス
品種、育種、素材、料理、味、 外観、パッケージ、デザイン...	選別、加工、品質管理、流通、売り方、 食べ方、もてなし方、使い方、演出...

田中章雄(2008)「事例で学ぶ地域ブランドの成功法則」光文社、P142をアレンジ

図4 ファクトの4つの領域と要素

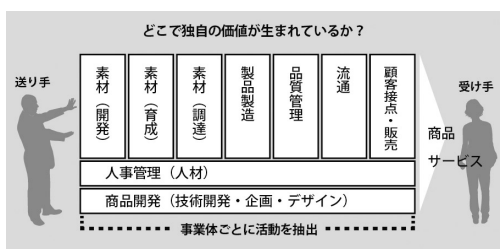


図5 バリューチェーン分析

その結果、ファクト抽出の多様な視点もたらされたことによって、これまで見過ごしていたファクトについて気づきも得られるなど効果を確認した。一方、ファクトの優位性確認については、絶対的な判断を行うことは困難であり、最終的には推進母体メンバーの合意でまとめた。ワークショップは、特に今まで気づかなかったファクトや、磨きかけるこ

とで将来的に魅力的な価値となるファクトの可能性を発見できるという点で有効であったが、ファクトの優位性の特定方法については今後検討が必要である。

4.2.2 顧客認識の把握 (表1-C)

商品や事業体(地域を含む)に対する顧客の価値認識やイメージを捉える手法を検討した結果、①ブランド認知状況、②ブランド体験状況、③ブランド意向・支持状況、④ブランドイメージ状況の4つが見出され、表3のように整理することができた。

ブランド活動の初期段階では、顧客にブランドとしての認知はほとんど生まれていないと考えるべきであろう。このため、①ブランド認知状況や③ブランド意向・支持状況の把握については、まずブランド名や商品がどの程度知られているかを調べる「a. 認知度調査」や商品などに対する興味の高さを調べる「d. トライアル意向調査」で、顧客認識がブランド化に向かっているかどうか把握することが有効と考えられる。

ブランド活動が進み、顧客にブランド認識が定着してきたら、顧客の心の中で自分達のブランドが占める割合を聞く「b. マインドシェア調査」や「e. リピート・推奨意向調査」が有効となる。マインドシェア調査やリピート・推奨意向調査は、顧客に「これが一番、自分にとって特別」「人にぜひお奨めしたい」といった、強いブランド認識の有無を直接的に聞くものなので、ブランドの実力を見る総合評価として信頼度が高い手法である。

②のブランド体験状況では、「c. 体験状況調査」として、受け手が商品購買・使用などの実体験をしている場合どの程度満足しどのような印象を持ったかを、インタビューやアンケートで調べる。

④のブランドイメージ状況では、「f. タッチポイント調査」として、受け手がタッチポイントからどのようなイメージを持ったか、インタビューやアンケートで調べる。また、タッチポイントのイメージや一貫性を自己分析する手法もある。

現実的にはこれら全ての調査を実施することは主にコスト面から困難であるため、実施すべき調査内容を絞ることが重要となる。ケーススタディにおいては、ブランドに関して自らを取り巻く状況について既に把握できている情報を整理した上で、表3の内容に従って必要な調査内容を特定した(表4)。表3の中で実施内容が無い項目は、既に事前の調査結果があり実施の必要がない、もしくは現時点では有効な調査結果が得られないと判断したものである。

表4 ケーススタディで実施したブランド認識調査

主体区分	ケーススタディ対象	①ブランド認知状況	②ブランド体験状況	③ブランド意向・支持状況	④ブランドイメージ状況
企業	小規模 ウイズユー コーポ レーション	・アロニア認知度調査	—————	・アロニア商品のトライアル意向調査	・タッチポイントの棚卸し分析評価
	中規模 JA十勝 清水町	—————	—————	—————	・タッチポイントの棚卸し分析評価
地域	くしろ地域 8市町村	・8市町村の認知度調査 ・地域産品の認知度調査 ・地域産品のマインドシェア調査	・来訪者の体験と満足度調査	・地域産品や推奨料理の摂食意向調査 ・来訪者の再来訪意向調査	—————

この結果、各プロジェクトにおいて部分的ではあるがブランドを取り巻く顧客の認識状況を明らかにすることができ、ステップ3以降のブランドコンセプトや実行プランづくりの検討に有効な情報を得ることができた。

例えば、くしろ8市町村プロジェクトが実施した地域産品(さんま)のマインドシェア調査では、道内(札幌周辺)顧客においては「さんま=くしろ地域」という認識が定着して

表3 顧客認識の調査手法案

調査項目	ブランド活動の進捗	ブランド活動の初期段階	顧客にブランド認識が定着
	①ブランド認知状況	a. 認知度調査 調査目的: 受け手がブランド名や商品、産地などの情報についてどの程度知っているか把握する。 主な手段: アンケート調査	b. マインドシェア調査 調査目的: 受け手の心の中で自分達のブランドが占める割合を把握する。 主な手段: アンケート調査
②ブランド体験状況	c. 体験状況調査 調査目的: 受け手が商品購買・使用などの実体験をしている場合どの程度満足しどのような印象を持ったかを把握する。 主な手段: インタビュー調査、アンケート調査		
③ブランド意向・支持状況	d. トライアル意向調査 調査目的: 受け手が商品などについてどの程度興味を持ち、試してみたいと思っているか把握する。 主な手段: アンケート調査	e. リピート・推奨意向調査 調査目的: 受け手が自分達のブランドをリピートし、誰かに推奨したいと思っているか把握する。 主な手段: アンケート調査	
④ブランドイメージ状況	f. タッチポイント調査 調査目的: 受け手がタッチポイントからどのようなイメージを持つか、また実際に持ったかについて把握する。 主な手段: インタビュー調査、アンケート調査、タッチポイント分析		



いる一方、道外顧客は「さんま＝道内諸地域」という認識であり、そのギャップが明らかになった（図6）。これは実施主体にとって想像していなかった状況であり、この結果から道外顧客に向けたくしろ産さんまのブランド価値を伝達するための、コミュニケーション戦略を強化する必要性が強く認識された。

Q 以下に挙げるそれぞれの物産等について、その物産に結びつく地域名をお知らせ下さい。（複数回答）

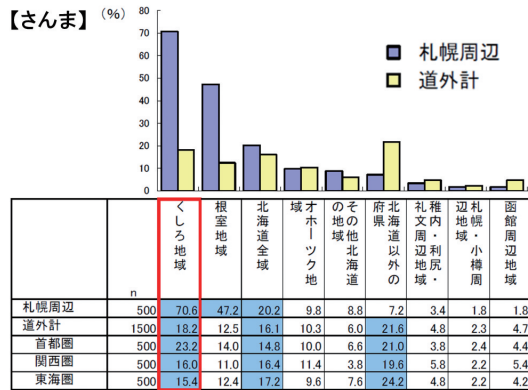


図6 地域物産（さんま）の産地に関するマインドシェア調査結果

また、同じくくしろ8市町村プロジェクトが実施した地域産品の摂食意向（トライアル意向）調査では、地域の代表的な産品（さんま、カキ、トキシラズなど）に対して、道内（札幌周辺）顧客と道外顧客の「買ってみよう」という意向にそれ程大きな差は見られなかった（図7）。

Q 今後「くしろ」地域を旅行された際や、お住いの地域のお店で見かけたら買ってみようものを全てお知らせ下さい。（複数回答）

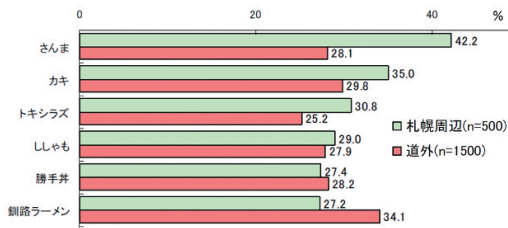


図7 くしろの地域産品に対する摂食意向調査結果

このことから、道外顧客もくしろ地域の産品に対する関心度は高く、従ってこれらの地域産品を実際に提供し、摂食体験をしてもらう場面（道外での試食会、販売店など）を強化する必要性が認識された。

今回試行した現状把握の活動は人的、コスト的な制約から必ずしも十分ではなかったが、得られた結果についてはいずれもこの後のステップ3以降の検討のために有効であった。現状把握の活動は、将来的にブランド活動が定着した後も継続的に実施することでブランド活動の開始時と将来的のブランド力の変化を比較評価し、ブランド活動の見直しや強化に活用していくことが重要と考える。

4.3 ステップ3ブランドコンセプトづくり（表1-D）

ブランドコンセプトづくりでは、ゴールとなるブランド像を構想し、長期的な活動の羅針盤として内部共有できるようにする。このことによってこれから長期的に展開する多様なブランド活動の継続性や一貫性を保つことが可能になる。

ここでの推進母体の役割はブランドコンセプトをまとめ、これを明文化することである。「地域ブランドづくりのためのデザイン・ITガイド¹⁾」ではブランドコンセプト検討のためのフレームとして、目標となるブランド像をコアバリュー、ファクト、ベネフィット（機能的、情緒的）など7つの要素に分け、構造的に表現した「ブランドモデル」を提示している（図8左側）。このブランドモデルの内容を事業体全体で共有しやすくするために、読みやすい一つの文章にまとめたものが「ブランドステートメント」となる（図8右側）。

ケーススタディでは、このブランドモデルを活用した「ブランドモデル構築ワークショップ」を検討・試行した。ブランドモデル構築の考え方を図9に示す。まずこれまでの事業を起点に、中長期的な視点で将来の事業構想を描き（ワークショップ1）、ブランドモデルの要素となるターゲット顧客像や、強化すべきファクト、既存のブランドシンボルの課題などについて認識共有を行う。次にこの結果を踏まえ、ブランドモデルの各項目を一つずつ検討していった（ワークショップ2）。

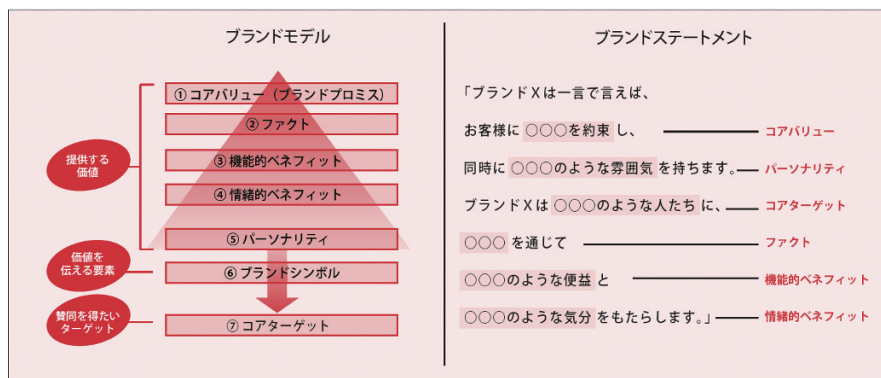


図8 ブランドモデルとその構成要素

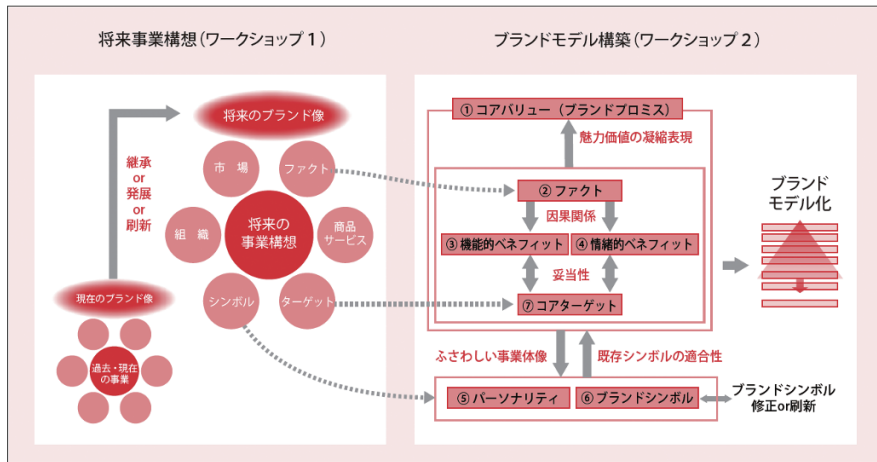


図9 ブランドモデル構築の考え方

今回、ブランドコンセプトの検討にブランドモデルのフレームを活用したワークショップを取り入れることで、ブランドコンセプトづくりの活動内容が明確になり、また推進母体メンバーによるグループワークによってブランドコンセプトに対する共通認識が進むなど、その有効性を確認した。

ブランドコンセプトは、推進母体内部をはじめブランドづくりの関与者で広く共有するために、最終的にイラストや写真なども用いて視覚的に分かりやすくまとめられた (図10)。



図10 ブランドコンセプトの例 (くしろ8市町村)

4.4 ステップ4 実行プランづくり (表1-E)

ここではステップ3のブランド設計図づくりで決めたブランド像の実現に向かうための実行プラン案を考える。

ケーススタディでは様々な実行プラン案が検討されたが、それらを整理するために「地域ブランドづくりのためのデザインIT活用ガイド」で提示されているブランドづくり戦略

の5つの視点を活用した。提案された実行プラン案を5つの戦略項目に割り振ることで、ブランド戦略として手薄だった未検討の部分を明確にすることができ、効率的な検討が行えた (図11)。さらに実行プランの優先順位や因果関係を考慮して実施計画を作成し、これに従って順次着手していった。



図11 5つのブランド戦略視点と実行プラン (JA+勝清水町の例)

4.5 ステップ5 内部理解の促進 (表1-F, G)

ここではブランドの送り手側が一体となって効果的な活動を展開するために、自らのブランドを理解し、活動の担い手としての意識を高めるための取り組みを行う。

ケーススタディでは、事業体内部の職員または地域住民に向けて、ブランドづくりの活動について理解を促すことを目的に、取り組みの目的や内容を簡単にまとめた冊子 (ブランドブック) を作成・配布した (図12)。また、同様の目的で推進母体メンバー以外の職員を対象としたブランドセミナーや、地域住民が参加できるイベント (図13-(1), (2)) などを実施し、自らの事業体や地域が展開するブランド活動への理解を促進した。



図12 ブランドブック（JA十勝清水町）



(1) 地域住民参加のブランドワークショップ（くしろ8市町村）



(2) 地域の食をテーマとした地域住民参加イベント（くしろ8市町村）

図13 地域住民参加イベント

今回はいずれもブランド活動を開始し始めたばかりであるため、内部理解促進のための活動が積極的に行われた。またそれらの活動に対する好反応も得ており、一定の効果を挙げたと考えるが、今後は内部の認識とブランドづくりの活動に対するモチベーションをいかに維持し続けるか、ブランドに対する理解の深化やブランド活動内容の変化に応じて推進母体側の工夫が必要になってくると考える。

4.6 ステップ6 外部接点づくり

ここでは外部に向けて商品をはじめブランドと顧客が出会う様々な接点（タッチポイント）を通じてブランド価値を発信していく。

地域を対象としたケーススタディでは、ブランドコンセプトを具体化したモデル商品（図14）の開発が行われ、店舗やインターネット上で商品の販売を開始した。モデル商品は、

単にモノを売るだけでなく、商品販売が軌道に乗るにつれてブランド価値認識が顧客の頭の中に定着していくように、独自のブランド価値を印刷物やインターネット上で伝えることを重視した。このブランド価値伝達においては、既にステップ3でブランドコンセプトを固めていたため、情報発信媒体によらず内容の一貫性を保つことができた。タッチポイントが発信するメッセージやイメージの一貫性は、ブランドづくりにおいて極めて重要であり、ブランドコンセプトの意義を確認することができた。

この他、ステップ4で検討した実行プランに沿って、食関連のイベントやコンテストなどへの参加とブランドのPR、ソーシャルネットワークサービス（フェイスブック図15）の活用による情報発信と交流などが実施された。

また、今回ブランドコンセプトや実行プランを策定したことによって、これに適合するように既存のタッチポイントの見直しや、新しいシンボルマークのデザイン開発も行われた（図16）。



図14 モデル商品「くしろ海藻バター」（くしろ8市町村）



図15 facebookを活用した情報発信（くしろ8市町村）



図16 新しいシンボルマークのデザイン開発（ウィズユー・コーポレーション）

このステップは、商品や宣伝広告、イベントなど、様々なタッチポイント媒体を取り扱うため、一見ごく普通のPR活動と同じように捉えられがちである。しかし、一方的に売り込むことを目的としたPR活動だけでは顧客のブランド認識を生むことは難しいと思われる。

今回、基本6ステップを段階的に実践してきたことにより、自分達ならではの魅力価値の伝達をしっかりと意識したタッチポイント開発が行われており、こういった活動の積み重ねが将来的に顧客のブランド認識に結びつくことを確信している。

5. ケーススタディの考察

5.1 基本6ステップの有効性と活動成果の考え方

ブランドの送り手が様々な活動を展開しても、その成果はすぐにブランド力の向上に結び付くとは限らない。特にブランドづくりの初期段階の活動効果を計る手段として、ブランド力の変化を数値的に把握し、これを評価指標とすることは難しい。

この点、ケーススタディでは基本6ステップをガイドとしたことで、各ステップが小さなゴールとなって活動を推進し、進捗管理の面でも有効性を確認できた。

ただし、ブランド活動が定着していくにつれて、様々な活動の結果がブランド力向上にどう反映しているかについて量的に把握し、これを成果指標とする必要がある。ブランド力の総合評価については顧客認識の調査手法案(表3)で挙げたマインドシェア調査やリピート・推奨意向調査によってある程度捉えられるが、個別のブランド活動との因果関係まで特定することは難しい。これについては今後検討が必要である。

5.2 基本6ステップの実践

基本6ステップの具体的な活動内容と支援手法を提案し一部試行しその有効性を検証した。内容はセミナー企画・実施、顧客調査などのリサーチ、様々なワークショップなど、多岐に渡る。これらの活動を支援するためには、提案した手法やワークショッププログラムをより実践しやすく改善する必要がある。また、活動を支援できる人材の育成も今後の重要な課題である。

5.3 実施主体による取り組み方のポイント

今回のケーススタディでは実施主体として「企業主体(小規模・中規模)」「地域主体」を選定し、その取り組み方を比較することを目的としていたが、その結果をまとめると表5のようになる。

表5 実施主体による取り組み方のポイント

実施主体	企業 	地域 
ステップ1 推進母体づくり	<input type="checkbox"/> トップマネジメント型 	<input type="checkbox"/> フラットなネットワーク型 
ステップ3 ブランドコンセプトづくり	<input type="checkbox"/> 経営層が思い描くブランド像が起点 	<input type="checkbox"/> 地域のモノ・コトを包括できる土台 
ステップ4 実行プランづくり	<input type="checkbox"/> 競合との圧倒的な差別化 	<input type="checkbox"/> 地域の魅力価値の探索と活用 

ステップ1の推進母体づくりでは、企業主体の場合、経営層が自ら参画し、推進母体を牽引する「トップマネジメント型」である必要がある。基本6ステップには、事業体のブランド活動のあり方を決める重要な決定事項が含まれるため、そこにトップマネジメントが組み込まれていなければならない。一方、地域主体の場合は地域のコア事業者や住民の連携が基本であり、互いに対等な関係により地域の自発的な活動を誘発する「フラットなネットワーク型」が理想と思われる。

ステップ3のブランドコンセプトづくりでは、企業主体の場合「経営層が思い描くブランド像」が起点となり、地域主体の場合は「地域のモノ・コトを包括できる土台」を考慮することが基本となる。

ステップ4の実行プランづくりでは、企業主体の場合、「競合との圧倒的な差別化」を実現することがブランドにつながるが、地域主体の場合はあまり他地域との競合を意識せず、むしろ「地域の魅力価値を探索し、それらを活用」することが結果的にブランドにつながるのではないかと考える。今後、ブランドづくりの取り組みを開始する段階で、このような実施主体による取り組み方の基本的なポイントを押さえておくことがより効果的・効率的な活動につながると思われる。

6. 情報提供冊子の発行

前項までで述べたブランドづくりの基本6ステップを活用した初期段階の活動方法や支援手法を、これからブランドづくりに取り組む食関連事業者や行政機関担当者などを対象に幅広く提供することを目的として、情報提供冊子を取りまとめた。冊子の概要は次の通りである。

【タイトル】「北海道・食のブランドづくり読本」

【対象者】

- ・道内食関連事業者
- ・ブランド関連の事業に携わる行政機関担当者
- ・ブランドづくりを支援するコーディネーター
- ・その他、ブランドづくりのあらゆる関与者

【構成】

- 第1章 ブランドの基本的な事柄
- 第2章 北海道・食・ブランド
- 第3章 ブランドづくりの視点
- 第4章 ブランドづくりの活動

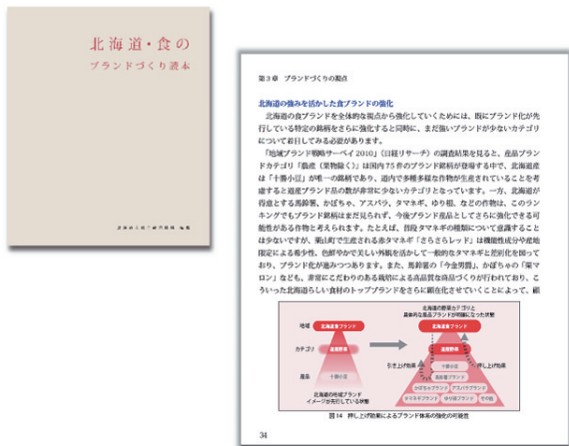


図17 情報提供冊子「北海道・食のブランドづくり読本」

引用文献

- 1) 「地域ブランドづくりのためのデザイン・IT 活用ガイド」北海道経済産業局 P 8, P9, P12, P13P32, P33, P34, P35, P36, P38 (2009)
- 2) 『『くしろ』食・観光の戦略的ニーズ調査事業』調査結果報告書 北海道釧路総合振興局 P66, P79 (2011)

7. まとめ

近年、道内の食産業事業者のブランドづくりに対する関心が高まってきているが、いざブランドづくりを開始しようとすると具体的に何をしたら良いのかはわからず事業活動として取り組みにくいという問題に直面するケースが多い。

こうした状況の改善を目的として、ブランドづくりの活動を推進する手法提案を試みるとともに、それらを実際のブランドづくりプロジェクトの中で試行した。その結果、ブランドづくりの活動を新規に開始する場合、初期段階の基本6ステップが取り組みのガイドとして有効であり、また具体的な活動を支援する手法や、手法を活用したワークショップについても一定の効果を確認することができた。

現在、JA十勝清水町プロジェクトについてはホルスタイン牛肉ブランド「十勝若牛」が地域団体商標登録となり、顧客の評価も高まるなど展開が軌道に乗り始めている。また、くしろ8市町村プロジェクトについては民間企業が実施する全国の地域ブランド評価において、釧路市が道内市町村の中でも特に急速に評価が高まりつつあるなど、徐々に目に見える成果として現れ始めている。

今後は、今回の提案手法の改善を図りながら、ブランドづくりに取り組む食関連事業者の支援に活用して行くと共に、今回の3件のケーススタディについても引き続き関与しながら、初期段階を脱したブランドづくりを対象とした支援のあり方や支援手法について考えていきたい。

前腕用筋電位 C T の基盤技術開発

中島 康博, 栗野 晃希, 前田 大輔, 吉成 哲
東藤 正浩*, 原田 証英**, 但野 茂*

Fundamental Study of the Electromyography Tomography System for a Forearm

Yasuhiro NAKAJIMA, Kohki KUWANO, Daisuke MAEDA, Satoshi YOSHINARI,
Masahiro TODOH*, Masahide HARADA**, Shigeru TADANO*

抄 録

前腕筋のマヒ診断は、これまで針筋電計で行われてきた。しかし、針電極による計測は、患者に多大な苦痛や感染リスクを生じる。本研究では、新たに前腕の筋活動電位分布を計測できる“EMG-CT”システムを提案した。本システムは多点表面筋電計と筋活動電位の電気伝導モデル、筋活動電位分布の逆計算エンジンからなり、患者に一切の苦痛を与えず筋マヒ診断が可能である。本システムを用いて中指における近位と遠位の指節間関節に屈曲負荷をかけたときの前腕の筋活動分布を5名の被験者で計測した。その結果、いずれの被験者においても、主働筋の領域における筋活動分布が算出された。

キーワード：筋活動，表面筋電位，前腕，電気伝導モデル，逆推定

Abstract

A needle electromyography has been used to detect a muscular paralysis in a forearm. However, the needle electrode causes subject significant pain and infectious risk. The study proposed a new system to measure the distribution of the muscle action potential in the forearm, called “computed tomography of electromyography” (EMG-CT), which consists of the multi-point surface electromyography, the conduction model of the muscle action potential and the reverse calculation engine of the distribution of the muscle action potential. EMG-CT system never causes subjects pain in the diagnostics. The muscle action potential distribution from five subjects when a flexion load to a proximal and distal interphalangeal joint was applied was estimated using EMG-CT. The results showed the distribution of the activation at the area of the agonistic muscles.

KEY-WORDS : Muscle activity, Surface electromyography, Forearm, Mathematical model, Reverse estimation

1. はじめに

手指の筋がマヒすると、日常生活に多大な影響を及ぼす。手指の複雑な動きは、上肢にある29本の筋により行われる。つまみや握りといった物体の操作は、これらの筋による手首の前後左右の屈曲、指の各関節の曲げ伸ばしによって実行される。もし脳血管障害や外傷によってこれらの筋が一本でもマヒして動作が制限されれば、たちまち生活が不自由になることは想像に難くない。

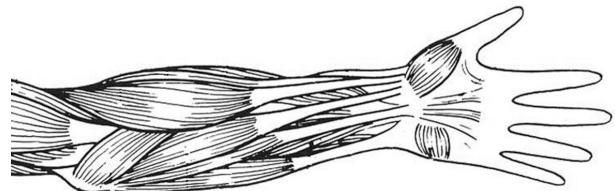


図1 前腕の解剖図¹⁾

* 北海道大学 * Hokkaido University, ** 原田電子工業株式会社 ** Harada Electronics Industry, Co. Ltd.

事業名：経常研究（平成23～24年度）

課題名：表面筋電計による筋活動詳細計測技術の開発

手指筋が集中する前腕は、そのような筋マヒを診断するのが特に難しい部位である。前腕には、図1に示すように、その小さな円筒形の内部に19本の筋が集中している¹⁾。これらの筋は外周から中心にかけて3層にわたる複雑な重層構造をなしているため、専門家である整形外科医や理学療法士・作業療法士でも触診のみでマヒを診断するのは難しい。

このような筋マヒの診断には針筋電計が用いられるが、患者の苦痛、手技の難しさ、侵襲性の三つの点で問題があった。針筋電計とは、筋活動電位（筋が収縮する時にその細胞膜から発生する電位変化）を計測する装置の一種で、筋に針電極を直接刺入する。筋がマヒしていれば筋活動電位は計測されないため、筋活動電位の有無でマヒの診断が可能である。針筋電計の問題は、第一に患者の苦痛である。筋に直接針を打ち込むため、計測には痛みを伴う。また、筋一本に対し針電極が一本必要なので、複数の筋を測定するならばその分だけ電極を刺入する必要がある。二つ目の問題は、手技の難しさである。針電極を正確に打ち込むには、筋位置を正確に特定しなければならない。それは、平面的な位置だけでなく深さ方向の精度も必要である。特に深層の筋を測定する場合には、困難さが増す。この技術を持つ者は、整形外科医でも多くはない。三つ目の問題は、侵襲、つまり生体を傷つける計測手段そのものである。生体を傷つける計測は、患者に苦痛だけでなく感染症や傷害のリスクを負わせることになる。また、侵襲計測には必ず医師の介在が必要なため、装置の管理運用が制限される。このように、針筋電計は筋マヒ計測に用いられてきたが、苦痛やリスクなど大きな問題も抱えてきた。

これらの問題を解決するには、非侵襲で筋電位を計測できる表面筋電計が有用だが、これまで前腕の筋マヒの測定に用いるのは困難であった。表面筋電計は、皮膚に貼り付けた表面電極により、皮膚表面に伝導した筋活動電位、すなわち表面筋電位を計測する。計測は非侵襲で、極めて簡便である。しかし、表面筋電計の計測原理では、計測対象以外の筋電位が伝導して重なり合うことが避けられなかった。特に前腕では狭い領域に多数の筋が密集しているため、特定の筋のみを計測するのは困難であった。これを解決し、表面筋電計ですべての筋活動を特定できれば、極めて簡便で苦痛のない筋マヒ診断が実現できる。さらには、医学的な用途のみならず、作業時の手指負荷解析や、リハビリテーションやトレーニング等への応用が期待される。

そこで本研究では、表面筋電計による筋活動電位分布の断層計測技術、『筋電位CT』を新たに提案する（図2）。これまでの表面筋電計の問題点を克服し、多点表面筋電計から得られる表面筋電位分布から、電気伝導モデルと筋活動逆計算エンジンで前腕内部の筋活動分布を表示するシステムの基盤技術を開発する。さらに、開発したシステムを用いて、5名の被験者の手指に負荷をかけたときの被験者の前腕筋活動分布を計測し、本システムの有用性を検証する。

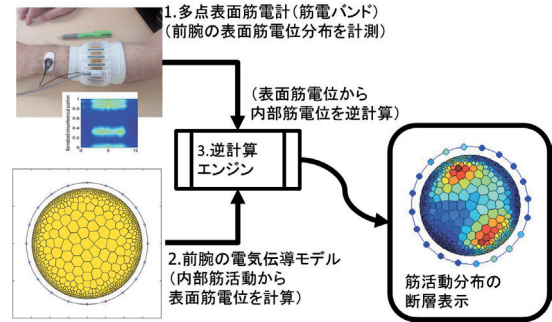


図2 筋電位CTのシステム構成

2. 方法

2.1 筋電位CTのシステム構成

筋電位CTシステムは、表面筋電位分布を入力すると、筋電位の位置と強さの情報を用いて繰り返し計算を行い、内部の筋活動分布を出力する。本システムは、以下の三つの要素で構成される（図2）。一つ目は、内部の筋活動から表面筋電位をシミュレーションする前腕の電気伝導モデル、二つ目は、表面筋電位分布を実測する多点表面筋電計、三つ目は、電気伝導モデルを用いて表面筋電位分布から内部筋活動分布を繰り返し計算する逆計算エンジンである。以下、各構成要素について述べる。

2.1.1 前腕の電気伝導モデル

前腕の電気伝導モデルは、前腕内の筋活動電位の伝導を計算し表面筋電位の分布を直ちに算出する。本モデルでは、筋活動電位の減衰を定式化し、高速計算を実現している。

まず、この減衰の定式化のため、有限要素法により筋活動電位の減衰シミュレーションを行った（図3）²⁾。筋線維 k の活動電流を電流強度 m_k (mA) の電流双極子モデルに置き換え³⁾、筋と同じ異方性導電率を有する円柱有限要素モデルの内部に配置した⁴⁾。表面には電極間隔 d_i (mm) のバイポーラ電極 i を皮膚表面に配置したと仮定し、シミュレーションされた表面筋電位の2乗平均平方根（Root Mean Square; RMS） \bar{V}_{ik} (mV) を算出した²⁾。その結果、筋活動電位の減衰は皮膚表面までの伝導距離の累乗に反比例し、その乗数は電極間隔により決まった²⁾。

$$\bar{V}_{ik} = m_k V_0 (d_i) \left(\frac{l_{ik}}{l_0} \right)^{b(d_i)} \quad (1)$$

l_{ik} はバイポーラ電極の電極間中心から筋線維までの距離 (mm)、 l_0 は無次元化のための単位距離 ($l_0 = 1\text{mm}$) である。 b は減衰乗数、 V_0 は変換係数 (mV/mA) で、電極間距離 d_i の関数であり、その関係は図4のようになった⁵⁾。

この筋電位RMS値の減衰関係を用いると、表面筋電位分布の算出が著しく容易となる。筋線維の活動は同一筋内の筋線維が数十Hz程度のサイクルで発生するが¹⁾、相互の筋線

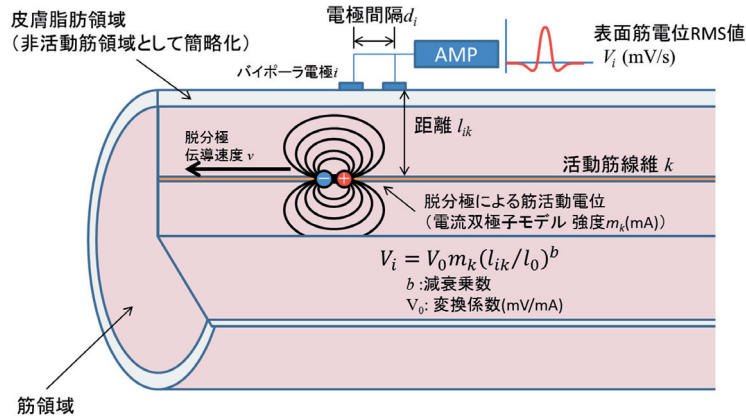


図3 有限要素法による筋活動電位の減衰シミュレーション²⁾

維は、巨視的に見て統計学的にはほぼ独立な関係と見なせる。このとき、筋要素 \$j\$ が発する表面筋電位パワー \$\bar{V}_{ij}^2\$ (mV²) は、要素内にあるすべての筋線維 \$k\$ が強度 \$m_j\$ で活動したと仮定すると、式(1)の総和を用いて簡単に表される。

$$\bar{V}_{ij}^2 = m_j^2 V_0 (d_i)^2 \sum_{k \in \text{Mus}_j} \left(\frac{l_{ik}}{l_0} \right)^{2b(d_i)} \quad (2)$$

この式から明らかなように、筋活動量 \$m_j\$ 以外は、すべて静的で空間配置にのみ依存する。つまり、あらかじめ前腕および筋要素の形状と電極配置を決定しておけば、次式のように電極-筋要素間のパワー減衰関数 \$L_{ij}\$ は定数となる。

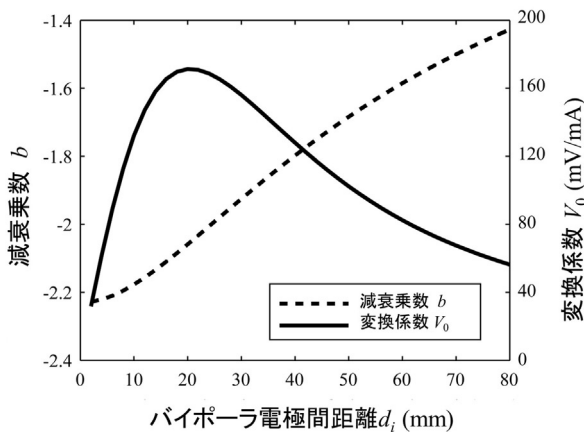


図4 減衰乗数と変換係数⁵⁾

$$\bar{V}_{ij}^2 = m_j^2 L_{ij} \quad (3)$$

さらに、この総和の関係は筋要素間で成り立つから、すべての筋要素からの表面筋電位パワーを総和すれば、電極 \$i\$ におけるすべての筋からの表面筋電位パワー \$\bar{V}_i^2\$ が得られる。これが、本システムの電気伝導モデルの基礎式となる。

$$\bar{V}_i^2 = \sum_j \bar{V}_{ij}^2 = \sum_j m_j^2 L_{ij} \quad (4)$$

電気伝導モデルの形状は、まず、被検者の前腕周長と同じ外周長を持つ円断面形状とした(図5)。さらに、外周からキャリパで測定された皮膚脂肪厚さの分だけ内側に境界を設

け、その内側を筋領域とした。外周には、実験時の電極に合わせて、仮定の電極を配置した。筋領域は0.2mm角に分割し、その一つ一つを仮想筋線維 \$k\$ とした。筋領域は、その領域を800個程度の筋要素 \$j\$ に区分けし、仮想筋線維はいずれかの筋要素に所属するものとした。筋要素はVoronoi法を用いて、外周を約1mm、中心付近を約5mmに徐々に変化させて分割した⁶⁾。

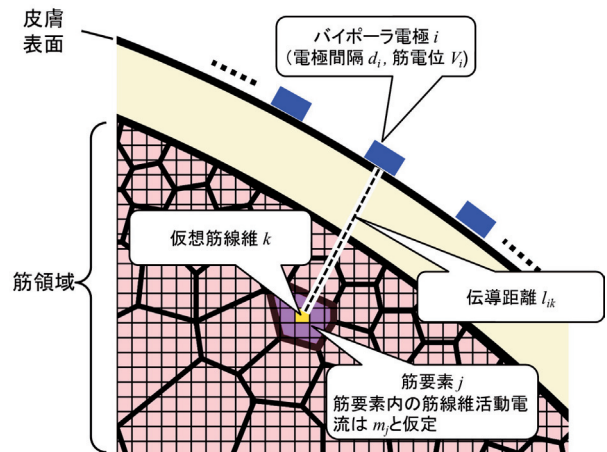


図5 前腕の電気伝導モデル

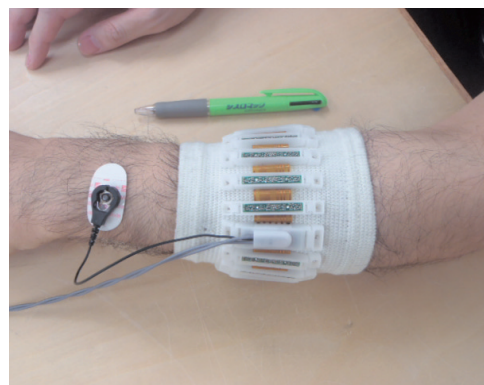


図6 多点表面筋電計「筋電バンド」

2.1.2 多点表面筋電計

多点表面筋電計（通称『筋電バンド』）は、前腕の表面筋電位分布を簡便に計測するために著者らによって開発された⁷⁾（図6）。形態をバンド状とすることで、装着が極めて簡便となり、1分以内で完了することができる。伸縮サポーターの周囲には、電極列20本が等間隔に配置されている。電極列には、列の中央を中点として電極間隔15mmと45mmの2種類のアクティブ式バイポーラ電極が組み込まれている（図7）。式1と図3から明らかなようにバイポーラ電極の間隔は狭いほど減衰率が高くなるので、狭い間隔の電極は近傍のみの筋活動を検出し、反対に間隔が広いと広範囲を検出する。この特性を利用すれば、筋活動分布計算における深さ方向の分解能を高めることができる。

計測された表面筋電位は、電極に内蔵された9Hzの3次バターースハイパスフィルタと500Hzの2次ローパスフィルタを通過した後、1kHzでA/Dコンバータにサンプリングされ、USBを介してPCにデータ送出された。さらに、ソフトウェア上で10Hzの2次双方向バターースハイパスフィルタと100Hzの2次ローパスフィルタを通過した後、501点(0.5s)の二乗平均処理により表面筋電位パワー測定値 \bar{V}_{Mi} を算出した。

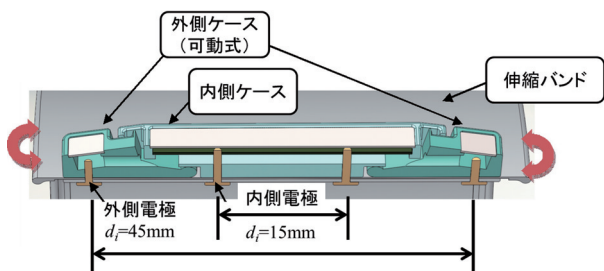


図7 電極列の構造

2.1.3 逆計算エンジン

逆計算エンジンでは、多点表面筋電計から得られた表面筋電位分布と前腕の電気伝導モデルから、逐次二次計画法（Sequential Quadratic Programming; SQP）を用いて内部の筋要素活動量を計算する。表面筋電位分布のモデル計算値と測定値とが一致するように繰り返し計算し、すべての筋要素活動量を定める。

SQP法では、まず最小化したい値を目的関数 f として定める。本手法では、各電極における表面筋電位RMS値の測定値と計算値の差の2乗和を f とした。この関数が0となれば、表面筋電位は完全に一致する。

$$f = \sum_i (\bar{V}_i - \bar{V}_{Mi})^2 \quad (5)$$

SQP法では、この目的関数(5)に対する次の2次計画問題を解いて、目的関数を最小化する変数 m_j の探索方向 $[D_j]$ を決定する。

$$\min_{[D_j]} \left\{ \nabla f^T [D_j] + \frac{1}{2} [D_j]^T \nabla^2 f [D_j] \right\} \quad (6)$$

∇ はベクトル微分演算子で、 ∇f は目的関数の変数 m_j に対する勾配を表す。ここで得られた探索方向 $[D_j]$ に適宜定めた修正量 β をかけ、変数 m_j を修正する。

$$\text{new } m_j \leftarrow m_j + \beta D_j \quad (7)$$

以上の手順をまとめると、次の通りである（図8）。

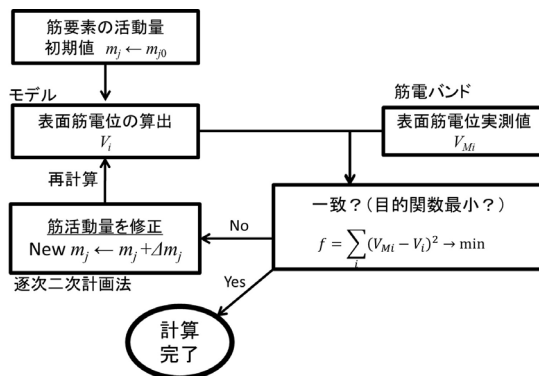


図8 筋活動逆計算エンジンのアルゴリズム

1. モデルに筋活動電流 m_j の初期値を与える。
2. モデルの表面筋電位 \bar{V}_i を算出する。
3. 表面筋電位分布の一致度（目的関数）を求める。
4. 目的関数が最小でなければ、式(6)(7)により m_j を修正し、2にもどる。
5. 目的関数が最小であれば、 m_j を解とし、終了する。

2.2 実験

この筋電位CTシステムを用いて、被験者による前腕内筋活動分布計測実験を行った（図9）。被験者は右利きの健常男性5名（年齢：22.2±0.8y、身長173.1±5.5cm、体重62.8±4.5kg、前腕周径248.2±7.4mm、皮膚脂肪厚2.3±0.7mm）とした。被験者の前腕には、橈骨茎状突起と外側上顆の中央に多点表面筋電計を装着した。被験者は座位で上腕を屈曲45°、外転45°の肢位で前腕を水平に固定され、手掌を下にして手関節を背屈20°で固定された。この状態で2種類の負荷をかけてそれぞれの表面筋電位分布を計測し、内部筋活動を逆計算した。一つは、中指基節をほぼ水平、PIP関節（Proximal Interphalangeal Joint; PIP）をほぼ直角に屈曲した肢位で、中指DIP関節(Distal Interphalangeal Joint; DIP)の位置を4.9Nで水平方向に牽引、すなわちPIP関節に屈曲負荷をかけた。もう一つは、同様の肢位で、中指末節の中央を同様の力で牽引、すなわちDIP関節に屈曲負荷をかけた。

なお、パワー減衰関数行列 $[L_{ij}]$ の要素間の値の差が大きいと計算が不安定になるため、行内要素の最大値に対し要素の値が1%未満となる場合は0とみなし計算に寄与しないと

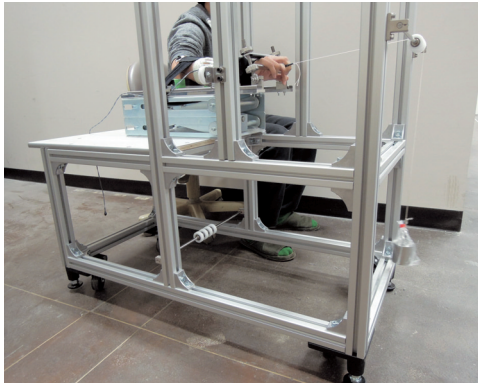


図9 手指負荷実験

するフィルタリングを行った。逆計算には、Intel Core i7-2600(3.40GHz)とWindows7(64bit)を搭載したPCを用い、MATLABのOptimization Toolboxを用いて実行した。

3. 結果

図10に、出力された筋活動分布の代表例を示す。図10中央はPIP関節屈曲負荷時の筋活動分布の計算結果である。この負荷では、浅指屈筋が主に活動する。浅指屈筋は掌側の中間層に位置し、示指から小指までの4指のPIP関節を強く屈曲する。図10左に参考として前腕の筋配置図を示すが、浅指屈筋付近が活動している様子が出力されるのが確認された。

次に、図10右に、DIP関節屈曲負荷時の筋活動分布計算結果を示す。この負荷では、深指屈筋が主働筋となる。深指屈筋は掌側深層、浅指屈筋の下部に位置し、示指から小指までの4指のDIP関節を強く屈曲する。この負荷においても、深指屈筋付近の活動が算出されているのが確認できた。

これらは代表例だが、いずれの被験者においても同様の活動分布が得られた。また、計算時間は、1回の逆計算あたり平均0.92秒であった。

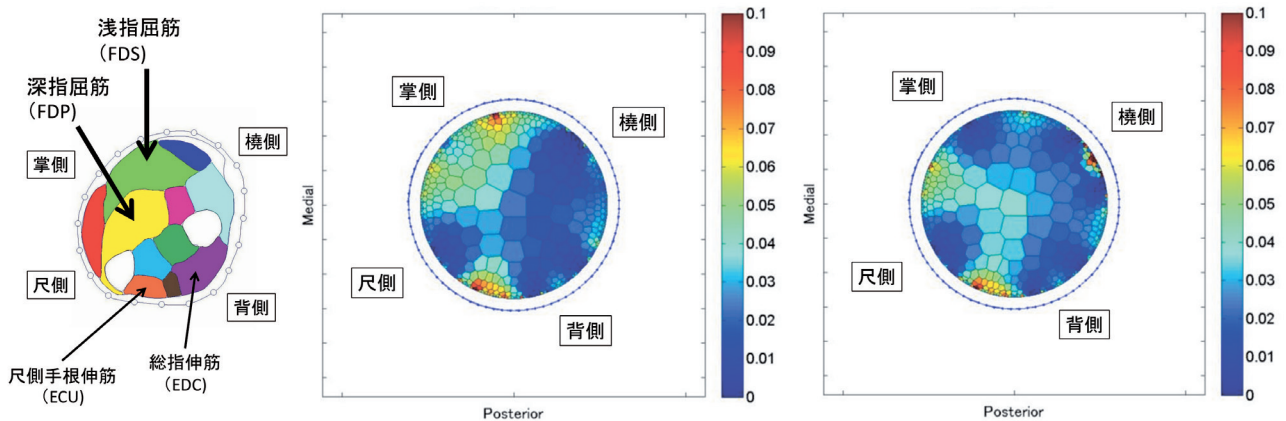


図10 内部筋活動分布の逆計算結果

(左：前腕の筋配置図，中央：PIP関節屈曲負荷時，右：DIP関節屈曲負荷時)

4. 考察

本手法では計算に簡易な円断面モデルを用いたが、筋の識別が容易な筋活動分布の計算結果が得られ、十分に実用的な筋活動検出を行えた。これは、本システムが現場に導入された際に大きな意味を持つ。簡易な診断や計測においては、大規模な装置と煩雑な事前準備が不要となるからである。MRIは非常に大規模な装置で計測の段取りに時間がかかり、また外周や筋エッジを抽出する作業に時間がかかる。しかし、今回の結果は、これらの事前段取りがない簡易モデルにおいても、筋活動の識別に十分な機能を有することを示している。

一方、本報告では示していないが、MRI断層撮影を用いてモデル形状の同定を行えば、さらに高精度な計測を行うことが可能である。計測に際し事前の段取りは増えるが、MRIモデルでは被験者の筋位置を特定することができるため、筋要素の配置を正確に行うことができる。また、外周の形状も測定できるため、電極と筋要素間の距離を算出でき減衰計算の予測精度が高まる。精密な診断をおこなうには、MRIモデルの使用も有効な手段である。

また、本手法は、内部筋活動分布を非常に高速に計算できることから、将来的なリハビリやトレーニングへの応用が期待される。この応用において、極めて重要となるのが、計測のリアルタイム性である。筋活動表示がリアルタイム化すると、被検者は自身の状態を即座に確認しながら運動を行えるようになる。このことは、運動実施者やトレーナーに大きな利点をもたらす。運動実施者は、鍛錬したい筋の活動状態を見ながら運動を調整してトレーニングする、「フィードバックトレーニング」を行えるようになる。トレーナーや療法士についても、相手の運動状況をその場で把握しながらトレーニングの指示を出せるため、極めて運動効果の高いリハビリやトレーニングが可能となる。本手法は計算の高速化に注意を払っており、電気伝導モデルにおける表面筋電位分布の計

算やSQP法においてアルゴリズムを工夫し、逆計算時間を1秒以内まで短縮している。さらに、並列演算手法を逆計算過程に導入すれば数倍の計算速度が容易に得られ、実用的に十分なリアルタイム性が確保できる0.5秒以内の計測－表示タイムラグを実現できる。

5. まとめ

多点表面筋電計、電気伝導モデル、逆計算エンジンからなる前腕内筋活動電位分布計測システム「筋電位CT」の基盤技術を開発した。本システムにより被験者5名による実証実験を行った結果、手指の負荷に対し妥当な筋活動分布を出力することができた。今後はさらに高精度化、高速化などシステムの改良をはかり、実用化を目指したい。

引用文献

- 1) 中村隆一・斎藤宏：基礎運動学，医歯薬出版，539PP，(1976)
- 2) 中島康博・吉成哲・但野茂：前腕筋活動電位の表面伝導解析，機論C，Vol. 75 No. 751，pp.695-702，(2009)
- 3) Rosenfalck P：Intra- and extracellular potential fields of active nerve and muscle fibres，Acta Physiologica Scandinavica，Vol. 75 Supplementum 321，(1969)
- 4) Gabriel C・Gabriel S・Corthout E：The dielectric properties of biological tissues: I. Literature Survey，Physics in Medicine and Biology，Vol. 41 No. 11，pp.2231-2249，(1996)
- 5) 中島康博・前田大輔・栗野晃希・吉成哲・増田耕平・東藤正浩・但野茂：前腕の電気伝導モデルによる筋活動推定手法の開発，Dynamics and Design Conference 2009，(CD-ROM)，(2009)
- 6) Voronoi, G：Nouvelles applications des parametres continus a la theorie des formes quadratiques，J. reine angew. Math.，133，pp.97-178，(1907)
- 7) 独立行政法人科学技術振興機構：研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラムFSステージシーズ顕在化タイプ事後評価報告書，科学技術振興機構，(2013)

サーボプレスを用いたファインブランキング加工技術の加工特性

鶴谷 知洋, 飯田 憲一, 畑沢 賢一, 三戸 正道

The Characteristics of Fine Blanking Technique using Servo Press Machine

Tomohiro TSURUYA, Kenichi IIDA, Kenichi HATAZAWA, Masamichi MITO

抄 録

ファインブランキング (FB) 加工は専用機を用いて行うのが一般的である。しかし、専用設備が高額で高度な熟練が必要なことなどから、汎用機による加工例も見られる。汎用機は高い加工精度が求められていない場合や生産量が少ない場合に使用されるが、加工条件と加工品質の関係など加工特性についての情報は少ない。そこで本研究では、汎用機であるサーボプレスと高機能金型を用いたFB加工において、加工条件と加工品質の関係、金型の負荷などについて実験により明らかにした。

キーワード：サーボプレス, ファインブランキング, せん断, Vリング, 静水圧

Abstract

Fine Blanking process (FB process) is commonly processed using specialized machine. However, general-purpose machine is also used for FB process, because specialized machine is expensive and requires highly-trained skill. General-purpose machine is used in the case that quantity of production is small, or high processing accuracy is not required. However, there is little information available about FB process using general-purpose machine, such as the information about the relationship between processing conditions and processing qualities. In this study, using servo press machine as a general-purpose machine and advanced die, it is experimentally-verified that the relationship between processing conditions and processing qualities, and load conditions of die.

KEY-WORDS : Servo press machine, Fine Blanking, Shear V-ring, Static pressure

1. はじめに

自動車や産業機械は、海外での現地生産が急速に進んでいるものの、生産拠点の主力が国内生産である場合や重要部品の生産が国内である場合が多い。重要部品の国内生産を維持し、グローバルな競争力を持ち世界市場で戦うためには、必要な時に必要な量の製品を投入できなければならない。部品においても短納期化が求められている。また、為替市場の動向や国外メーカーとの競争激化など減益要因への対応として、部品加工の低コスト化が求められている。

プレス加工は加工速度が速く、生産数量が多くなるほど生産コストが抑えられることから、低コスト化・短納期化に対

応する加工方法として自動車部品の50%以上で採用されている。また、プレス加工の新たな技術として、板金成形と鍛造の複合成形である板鍛造¹⁾や後工程が不要な高精度冷間鍛造²⁾などが開発されており、他の加工方法からプレス加工への工法転換が増えている。工法転換のためのプレス加工技術としては、古くからあるファインブランキング (FB) などの精密せん断加工も有効であり、高い加工精度が求められていない場合や、生産量が少ない場合などに汎用機によるFB加工が検討されているが、加工特性についての報告はあまり見られない。

そこで本研究では、汎用機であるサーボプレスを用いたFB加工技術において、厚板 (板厚3.0mm以上) を対象に加工

事業名：重点研究

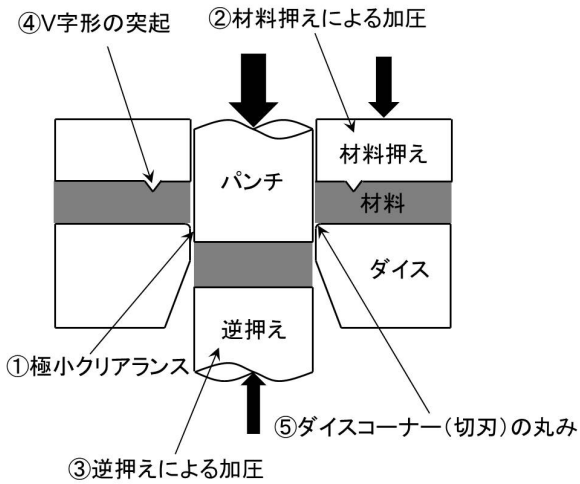
課題名：高度な金型設計技術とサーボプレスの動作制御技術を組み合わせた高精度プレス加工技術(平成23～平成24年度)

条件と加工品質の関係、モーションと金型負荷の関係、耐久性等について実験により明らかにしたので報告する。

2. サーボプレスによるFB加工技術

2.1 FB加工の原理³⁾

FB加工は塑性せん断によってき裂の発生を抑制し、平滑なせん断面を得る方法である。FB加工技術はスイスが発祥と言われており、1960年頃に専用機が開発された。特徴は、工具切刃寄りのき裂発生を抑制するため、切刃付近の材料を圧縮応力状態とする積極的手段をとっている点である。き裂発生は延性材料が分離する過程で起こる現象であり、き裂が開く方向に対して圧縮力が加わっていれば、材料分離が起きないとの考えに基づいている。FB加工は圧縮応力下での打抜き加工を行うため、図1に示す手段が施されている。



- ①パンチとダイスのクリアランスをできるだけ小さくし、零クリアランスに近い極小クリアランスとする。
- ②材料押えにより材料を加圧して打抜きを行う。
- ③逆押えにより材料を加圧して打抜きを行う。
- ④材料押えにV字形の突起をつけて材料に押し込むことにより、圧縮力が周辺に逃げるのを効果的に防ぐとともに圧縮力を高める。
- ⑤き裂発生点であるダイス切刃に多少の丸みをつけ、圧縮力を高める。

図1 FB加工の概要

2.2 実験装置

2.2.1 金型

実験に使用した金型の構造を図2に示す。FB加工を行うには打抜き力、材料押さえ力、逆押え力の3つの力が必要である。専用設備であればプレス機が3つの力を与えるが、汎用機では困難である。そこで本研究では専用機の機能を代替する高機能金型を考案し、打抜き力、材料押さえ力、逆押え力をそれぞれサーボプレスのスライド、ガススプリング、エアダイクッションにより与える機構とした。

2.2.2 サーボプレス

実験に使用したサーボプレスを図3に示す。構造はC型フレームでエアダイクッションおよび荷重計が搭載されており、加圧能力が異なる2機種（最大加圧能力800kNおよび1500kN）を用いた。

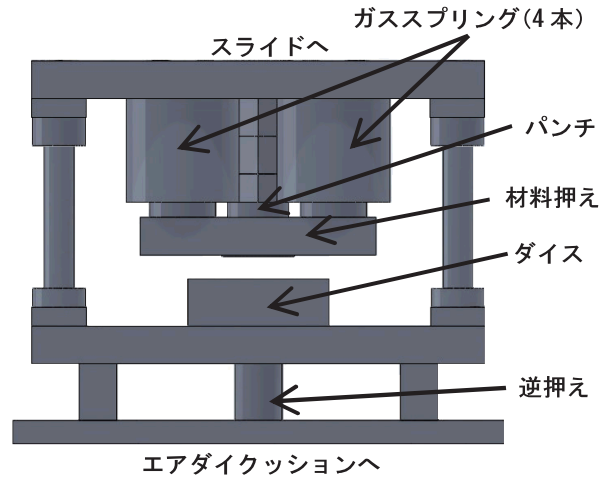
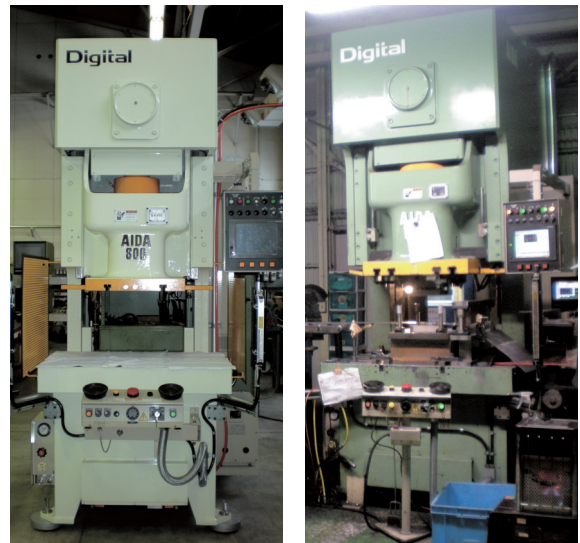


図2 金型の構造



最大加圧能力800kN

最大加圧能力1500kN

図3 使用したサーボプレス（アイダエンジニアリング製）

3. 加工特性の検証実験および結果

本研究では、加工品質の指標としてダレ量、バリ高さ、加工面性状を用いる（図4）。ダレとはパンチとダイの移動により材料が引っ張り込まれることで発生する丸みであり、バリとはパンチとダイスの隙間に材料が流れ込み発生する突起のことである。加工面性状は材料の分離時にき裂が発生することによる荒れた面（破断面）と、き裂の発生なく分離された場合の平滑な面（せん断面）がある。

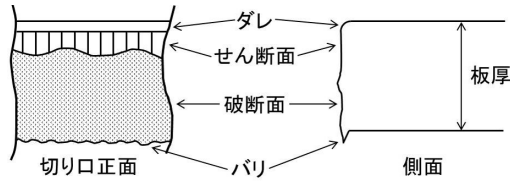


図4 ダレ、バリ、加工面性状の模式図

3.1 金型設計値と加工品質の検証

3.1.1 実験条件と実験方法

金型設計値と加工品質の関係について明らかにするため、円形状と四角形状の打抜き実験を行った。材料はSPHC（熱間圧延鋼板）の板厚4.5mm，加工油は揮発性打抜き油（出光興産(株)製 ダフニーニューパンチオイル）を用いた。実験条件を表1に，使用した金型を図5に示す。

表1 実験条件

抜き形状	円形状（外径φ60mm）， 四角形状（□60mm）
クリアランス（円形状のみ）	0.5%，0.75% （板厚に対する割合）
ダイスコナーR（円形状のみ）	0.1，0.5
芯ずれ（円形状のみ）	あり（0.01mm），無し
製品コーナーR（四角形状のみ）	0.1，0.2，0.3，0.4

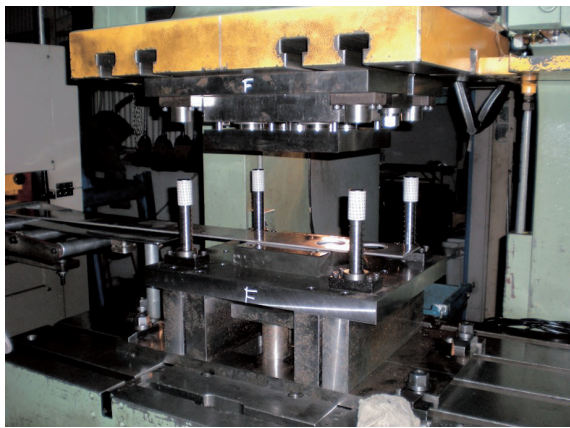


図5 使用した金型

ガススプリングによる材料押え力は70.4kN，サーボプレス下部に設置されているエアダイクッションによる逆押え力は12.5kN，サーボプレスのスライド速度は35SPM（分あたりのshot数）として実験を行った。

円形状は表1に示した項目のうちクリアランス，ダイスコナーR，芯ずれの水準を組み合わせ，四角形状は加工品の四隅のコーナーR（製品コーナーR）をすべて異なる値として，それぞれ実験を行った。なお，芯ずれとは金型の組立精度の影響を確認するため，プレス機の左右方向にパンチとダイス

の中心をずらしたものである。

加工品のダレ量・バリ高さの測定，サーボプレスに搭載された荷重計による加工時の最大荷重の測定，加工面性状の観察により，金型設計値と加工品質の関係を明らかにした。ダレ量は加工面を撮影した画像から測定し，バリ高さはバリの頂点とバリ付近の平坦部をマイクロメータで測定した差分とした。最大荷重は5 shotの平均値，ダレ量，バリ高さは5回測定した平均値を用いた。

また，C型フレームのプレスは最も普及している構造であるが，大きな荷重がかかると口開き（図6）が発生しやすいため，円形状の加工品についてはプレス機の手前側，奥側に相当する加工品の2か所について評価を行った（図7）。

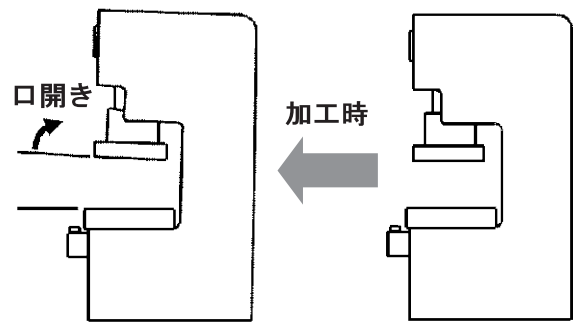


図6 プレス機側面から見た口開きの様子

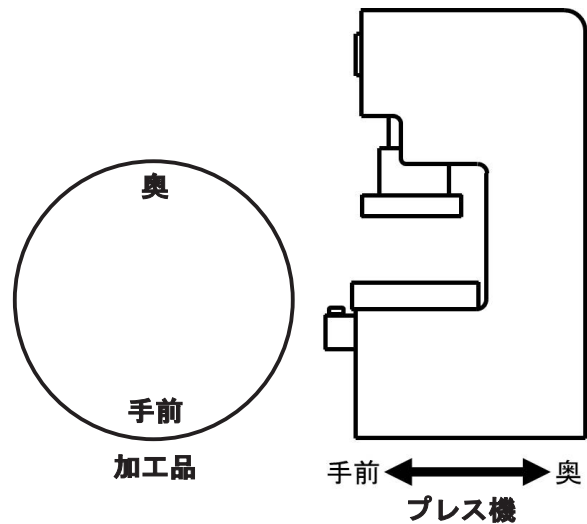


図7 加工品の測定位置とプレス機との位置関係

3.1.2 実験結果と考察

実験により得られた加工品を図8に，ダレ量，バリ高さの測定結果を図9に，加工時の最大荷重の測定結果を図10に，加工面性状の観察結果を図11に示す。

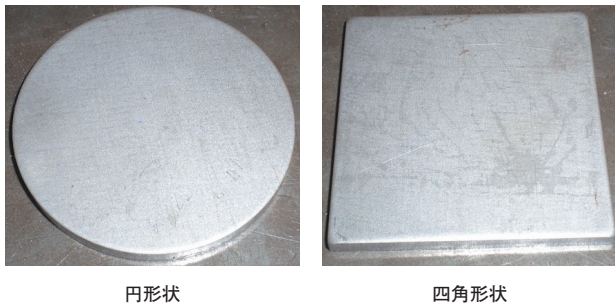


図8 得られた加工品

(1) 円形状

円形状においては、クリアランスとダイスコーナーRが大きくなるほどダレ量が大きくなるが、芯ずれの影響はほとんどなかった。この傾向は一般的な打抜き加工と同じであり、パンチとダイスの間の空間体積が増加して材料の移動可能領域が増加すること、ダイスコーナーRが大きくなると材料が引き込まれやすくなるのが原因と考えられる。手前側のバリ高さは、クリアランスが小さいほどバリ高さが大きくなった。また、クリアランスが小さい場合にダイスコーナーRが大きいのほどバリ高さが小さくなった。一方で奥側のバリ高さは、クリアランスとダイスコーナーRが大きくなるほど大きくなっており、一般的な打抜き加工と同じ傾向である。これらの原因は、プレス機本体の口開きの影響で手前側のクリアランスが非常に小さくなり、材料の圧縮力が大きくなった結果、延性が増したためと推察される。その他、手前側、奥側ともに芯ずれによりバリ高さが変化しており、金型の組立精度の影響がバリ高さに現れることがわかった。

(2) 四角形状

四角形状においては、製品コーナーRが大きくなるほどダレ量およびバリ高さが小さくなる傾向であった。これは、製品コーナーRが大きくなるほどパンチおよびダイスに接触する材料の面積が小さくなることで、材料を引き込む力や隙間に押し込む力が弱くなるためと考えられる。

加工時の最大荷重を測定した結果、クリアランスとダイスコーナーRが大きくなるほど荷重が大きくなる傾向であった。また、芯ずれによる荷重の変化も認められた。クリアランスが大きいほど金型に接触していない材料の面積が大きいため圧縮力を受ける面積が小さく、塑性せん断に移行しにくいこと、ダイスコーナーRが大きくなるほどダイス切刃と材料の接触面積が増えるため必要な力が増えることが原因と考えられる。芯ずれの場合は、局所的にクリアランスが変わることにより同様の現象が発生していると考えられる。

円形状の加工面性状については、クリアランス0.5%–ダイスコーナーR 0.1の奥側およびクリアランス0.75%–ダイスコーナーR 0.1の手前側でのみ破断が発生した。その他の条件では、クリアランス0.75%–ダイスコーナーR 0.1の奥側のように、せん断面が得られた。円などの単純形状では、

クリアランス0.5%~0.75%、ダイスコーナーR0.1~0.5の条件でせん断面が得られることを確認した。しかし、ダイスコーナーがR0.1程度に小さい場合は、材料の圧縮が不十分であり、塑性せん断の前にき裂が発生する可能性があるとして推察される。

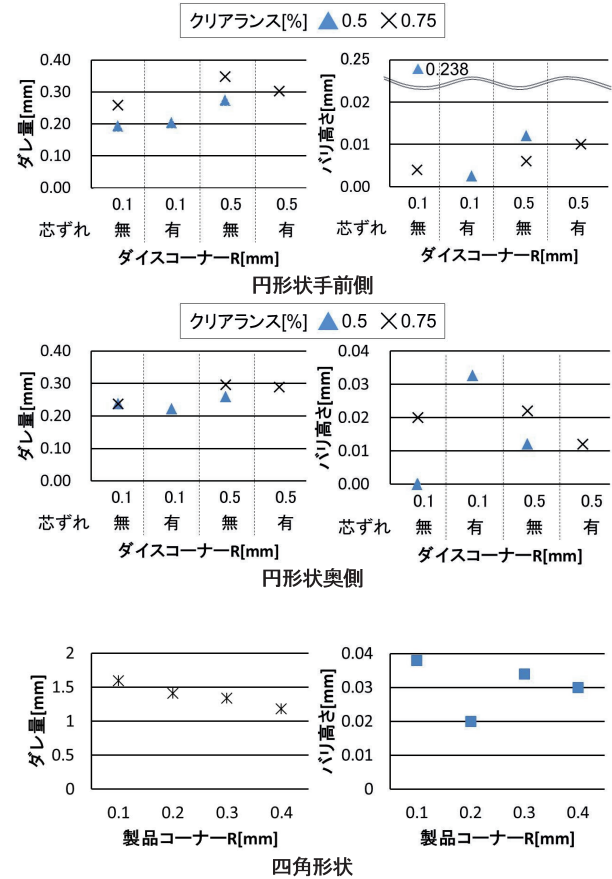


図9 ダレ量・バリ高さの測定結果

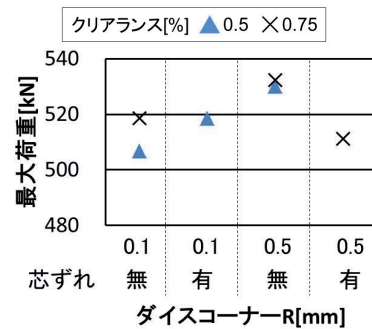


図10 最大荷重の測定結果（円形状）

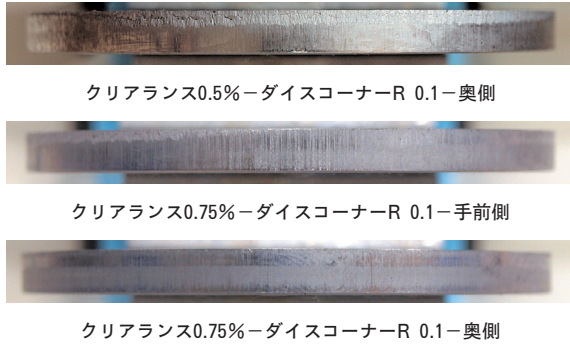


図11 加工面の観察結果（円形状）

3.2 加工油の検証

FB加工は材料に大きな圧縮力を与えて打抜くため、パンチなど金型の工具部分への負担が大きい。そこで、加工油の違いによるパンチ表面への影響について検証した。

3.2.1 実験条件および方法

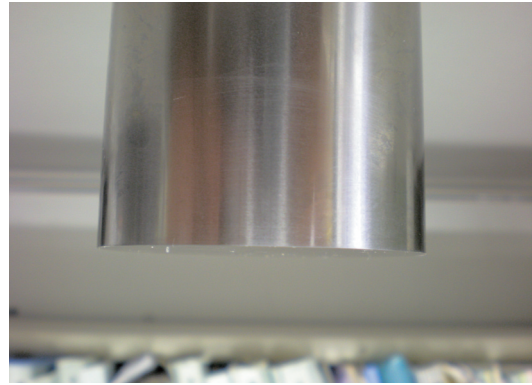
材料はSPHCの板厚4.5mmを用いた。クリアランスは0.5%、サーボプレスのSPMは35、加工形状は外径φ60mmの円、パンチはSKD11で製作し熱処理を行った。加工油は汎用の揮発性打抜き油（出光興産㈱製 ダフニーニューパンチオイル）とFB加工専用油（ユシロ化学工業㈱製 ユシロンフォーマーFE155）の2種類を用い、加工後のパンチ表面の状態を観察した。

3.2.2 結果と考察

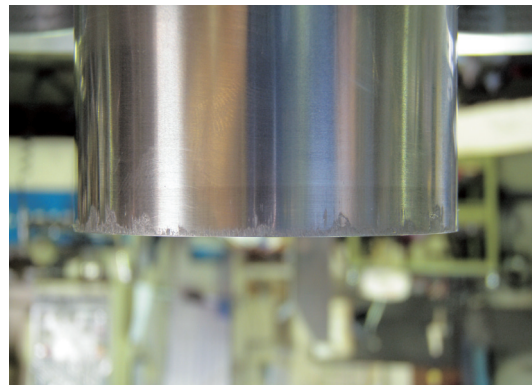
加工後のパンチ表面の観察結果を図12に示す。汎用加工油では3shotでパンチ表面に材料が溶着したが、FB加工油では30shotでも溶着が起らなかった。今回使用した汎用加工油は後処理で加工油の洗浄が不要になるよう高い揮発性が付与されており、FB加工時の高圧力で十分な潤滑性能を発揮できないためと考えられる。FB加工油は、極圧添加剤と呼ばれる高圧下での潤滑性能を高める成分が添加されていることから、溶着が発生しなかったと推察される。以上から、汎用プレス機においてもFB加工を行う場合は、高圧下で十分な潤滑性能を発揮できる加工油を選択することが重要であることがわかった。

3.3 サーボプレスのモーションによる負荷軽減と耐久性の検証

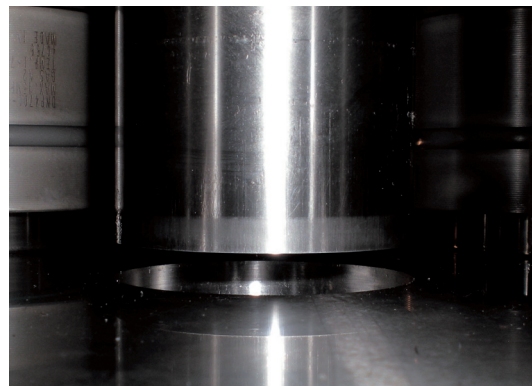
FB加工は打抜き力以外に材料押え力や逆押え力が与えられており、一般的な抜き加工と比較して金型負荷が大きい。量産加工を行うには長い金型寿命が求められるため、金型の負荷を減らすことが重要となる。そこで、金型負荷が小さく、量産に適したモーションを導出するため、モーションが金型に与える負荷と、負荷が小さいモーションによる加工を行った場合の耐久性について明らかにした。



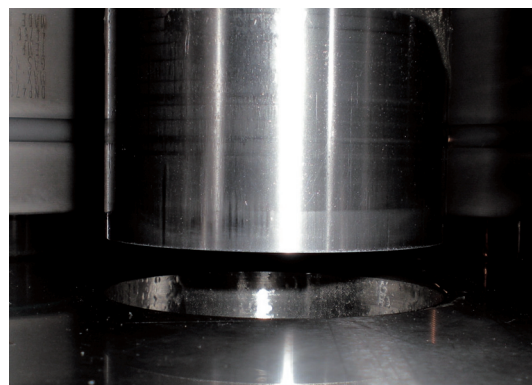
加工前



汎用加工油3shot後



FB加工油3shot後



FB加工油30shot後

図12 パンチの観察結果

3.3.1 実験条件および方法

加工時の金型負荷は加工音で推定できると考えられることから、音圧測定を行った。加工速度が遅くなれば金型の負荷が小さいことが予想されるが、速度変化量と金型負荷の変化量について明らかにするため、加工速度を変えた4種類のモーションについてそれぞれ加工時の音圧を測定した。

(1) 使用したモーション

モーションは、一般的なプレスと同じ動作のクランクモーション（定速）で1サイクル35SPMのもの、金型が材料に接触してから材料が分離されるまでの間のみ速度をクランクモーションの10%に減速するモーション（サーボプレス機の減速の限界）で1サイクル19SPMのもの、これら2つのモーションの間である50%に減速するモーションで1サイクル31SPMのもの、30%に減速するモーションで1サイクル28SPMの4種類を使用した。

(2) 音圧測定

音圧測定の様子を図13に、使用したモーションを図14に示す。マイクロフォン（UC-52 リオン(株)製）で得られたデータは、アンプ（NH-22 リオン(株)製）を介してデータロガー（DA-20 リオン(株)製）に記録した。マイクロフォンの位置はサーボプレスの騒音測定例⁴⁾を参考に、床からの高さ1.5m、加工点から水平方向1.5mとした。サーボプレスは最大加圧能力800kNの機種を用いた。板押え力は加工開始時点で200kN、逆押え力は40kN、被加工材はSPHCの板厚4.5mm、クリアランスは0.5%とした。

(3) 連続加工実験

次に、負荷が小さいと推察されるモーションによる連続加工を行い、加工品の面粗度、バリ高さ、加工面性状の観察から耐久性を検証した。

材料はSPHC板厚4.5mmのコイル材、サーボプレスは最大加圧能力1500kNの機種を用いた。ガススプリングによる材料押え力200kN、サーボプレスの下部に設置されているエアダイクッションによる逆押え力40kN、サーボプレスのスライド速度は35SPMとした。加工形状は外径φ60mmの円、パンチはSKD11で製作し表面にTiN処理を行った。加工油はFB専用加工油（ユシロ化学工業(株)製 ユシロンフォーマーFE155）を使用した。アンコイラとNCレベラーフィーダによりコイル材の連続供給を行い、量産加工を想定した連続加工を実施した（図15）。

3.3.2 音圧の測定結果

4種類のモーションによる音圧の測定結果を図16に示す。音圧は5点の移動平均処理を施し、絶対値で表示している。波形のピーク値は、クランクモーションが2.9、50%減速が2.8、30%減速が1.1、10%減速が0.6であり、10%減速モーションが最も小さく、最も大きかったクランクモーションの約1/5の値であった。

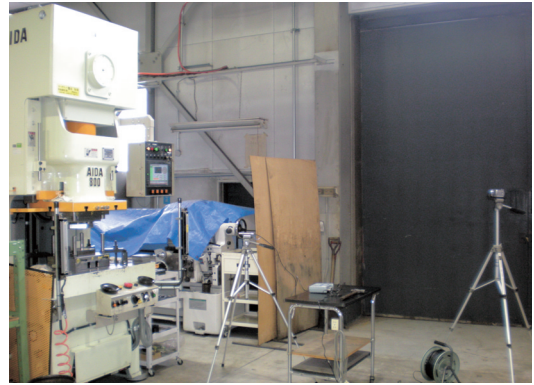


図13 音圧測定の様子

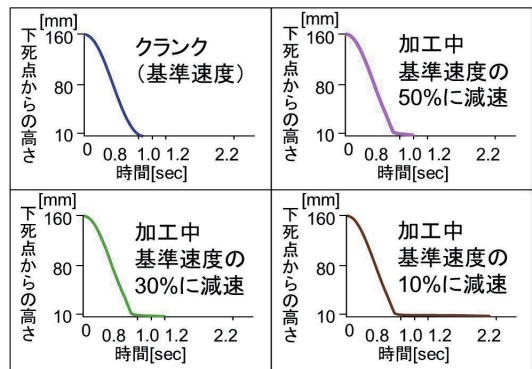
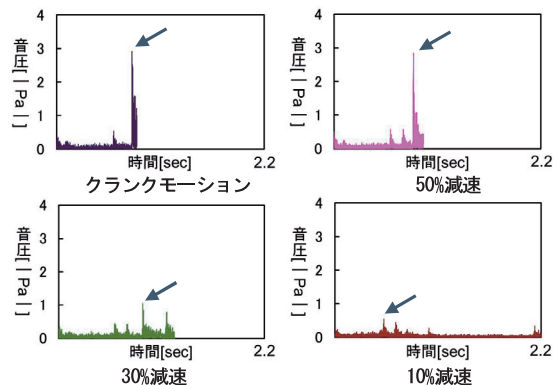


図14 使用したモーション



図15 連続加工実験の様子



← : ピーク値

図16 音圧の測定結果

3.3.3 連続加工実験の結果

前節の4種類のモーションの中で、最も負荷が小さいと思われる10%減速モーションにより連続加工した加工サンプルの面粗度を図17に、バリ高さの測定結果を図18に、加工面性状の観察結果を図19に示す。面粗度、バリ高さ、加工面性状において、ばらつきはあるものの大きな変化は認められなかった。

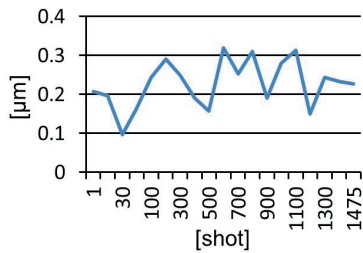


図17 面粗度の測定結果

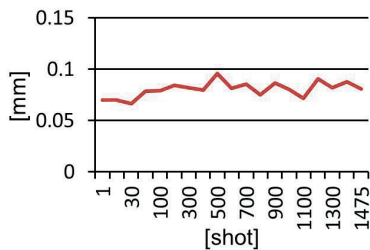


図18 バリ高さの測定結果

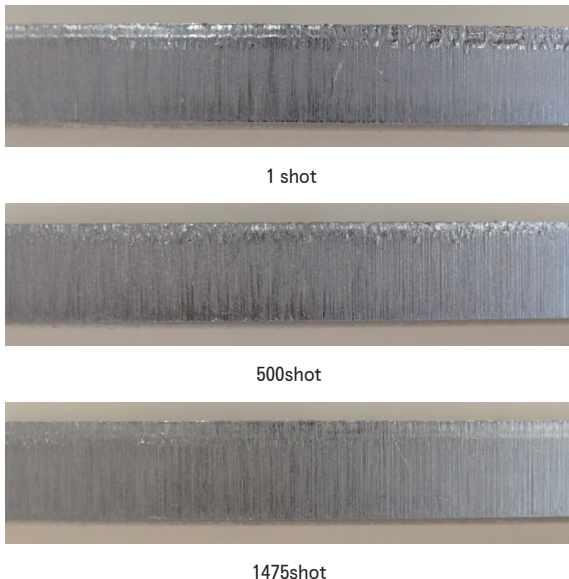


図19 加工面性状の観察結果

3.3.4 考察

加工開始時に金型に与えられる負荷は主に金型の運動エネルギーである。運動エネルギーは音のエネルギーと熱エネルギー等に分解され、その中で音エネルギーが最も大きいと推

定される。運動エネルギーは速度の二乗に比例し、音エネルギーは音圧 (Pa) の二乗に比例する。10%減速モーションはクランクモーションと比較して最高速度が1/10、音圧のピークが約1/5であったことから、加工前に金型が保有する運動エネルギーは1/100に減少したが、音のエネルギーは1/25にしか減少していないと考えられる。よって、金型負荷は減速量ほど減少しないと推察される。

また、10%減速モーションによる耐久試験を行った結果、面粗度、バリ高さ、加工面性状に大きな変化はなかったことから、10%減速モーションの適用により汎用機による量産加工が可能になったことが示唆された。しかし、10%減速モーションのサイクルSPMは19、クランクモーションのサイクルSPMは35であることから生産性は約54%に減少する。

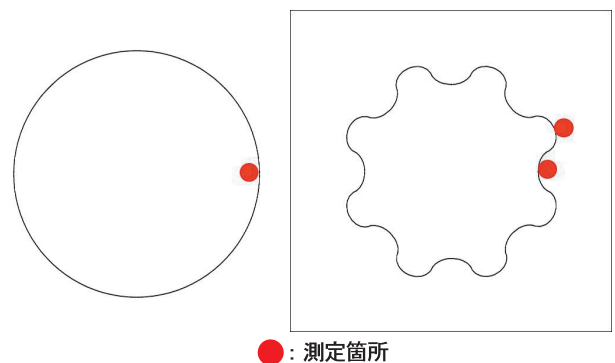
3.4 サーボプレス加工条件と加工品質の検証

サーボプレスの加工条件と加工品質の関係について検証するため、サーボプレスのスライド速度、逆押え力を変えた加工実験を行った。

3.4.1 実験条件および方法

材料はSS材の板厚6.0mm、加工油はFB専用加工油（ユシロ化学工業㈱製 ユシロンフォーマーFE155）を用いた。クリアランスは0.5%、板押え力は加工開始点で471kNである。抜き形状は、外周の形状に相当する外径φ64mmの円形状と、内周の形状に相当する最大幅58mmのギア形状の2種類とした。

実験条件として、サーボプレスのスライド速度は20SPM、30SPM、40SPMの3種類、逆押え力は40kN、80kN、110kNの3種類で行った。ダレ量、バリ高さの測定箇所は口開きの影響が少ないと思われる、オペレーターから見た製品の右側とし、ギア形状においては凹部と凸部の2か所について測定した。測定値は5回測定した平均値とした。測定箇所を図20に示す。



●: 測定箇所

図20 ダレ・バリ測定箇所

3.4.2 結果と考察

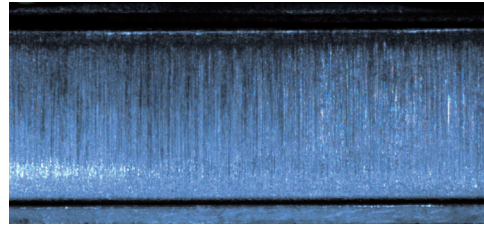
円形状の結果を図21に、ギア形状の結果を図22に、加工面性状の観察結果を図23に示す。

円形状のダレ量は、ばらつきがあるもののSPM、逆押え力の変化との相関は認められなかった。円形状のバリ高さは逆押え力が大きくなるほど小さく、SPMが小さいほど大きくなる傾向が認められた。

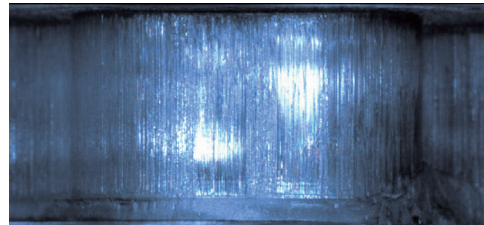
ギア形状のダレ量は、凹部ではSPMによる違いは小さく逆押え力が大きくなるほど大きくなる傾向が認められたが、凸部ではSPM、逆押え力ともに違いが見られなかった。バリ高さは、凹部、凸部ともに逆押え力が大きくなるほど大きくなる傾向であり、ばらつきがあるもののSPMとの相関は認められなかった。

加工面は、円形状ではすべての条件でせん断面が得られたが、ギア形状では凸部と凹部の境界付近で破断面が認められた。

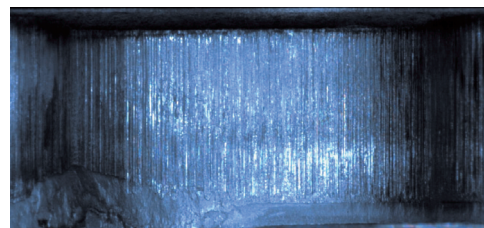
円形状とギア形状の加工品質の相違は、円形状は単純な形状であるため、金型の組立精度やプレスの口開き等の影響を受けにくい、ギア形状は複雑であるため影響を受けやすい事に起因していると推察される。



円形状



ギア形状凸部



ギア形状凹部

図23 加工面性状の観察結果

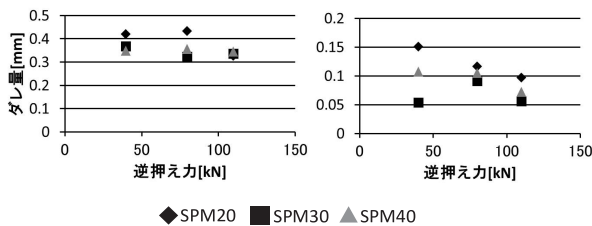


図21 円形状のダレ量・バリ高さ測定結果

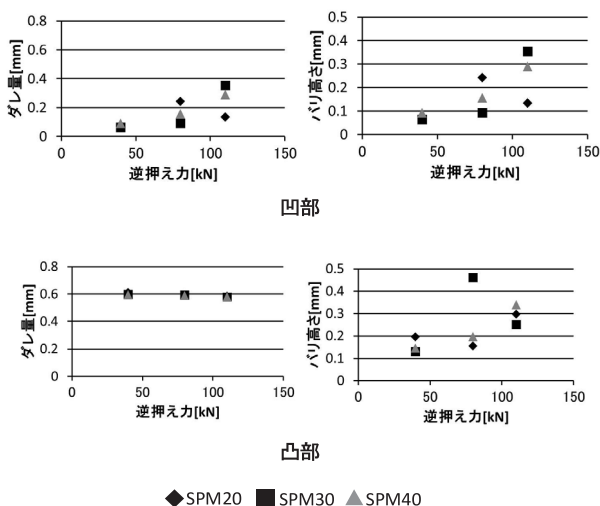


図22 ギア形状のダレ量・バリ高さ測定結果

4. まとめ

サーボプレスと高機能金型を用いたFB加工技術において、厚板を対象に加工条件と加工品質の関係、モーションと金型負荷の関係、耐久性等について検証し、次の結果を得た。

- (1) 円と四角の抜き形状について金型設計値と加工品質の関係を調べた結果、一般的な抜き加工と同様にクリアランスとダイスコナーRが大きくなるとダレ量、バリ高さが大きくなる傾向が確認されたが、プレス機の口開きが加工品質に大きく影響することが明らかになった。
- (2) FB加工に揮発性の高い加工油を使用すると数shotでパンチ表面に材料の溶着が発生することから、汎用プレス機においてもFB加工で行う場合、FB加工専用油を選択することが重要であることがわかった。
- (3) 加工中の速度を減速すると金型負荷は小さくなるが、減速量ほど負荷が減少しないことが明らかになった。また、金型が材料に接触してから打抜きが完了するまでの工程において、速度を基準速度の10%に減速することで量産加工に対応可能なことが明らかとなった。
- (4) 実部品を目標とした加工実験を行い、本研究で用いたサーボプレスおよび金型で板厚6.0mmのSS材のFB加工を行い、加工条件と加工品質について確認した結果、円形状では平滑なせん断面が得られ、実用上問題ないことを確認した。

今後は、実部品を対象にした適用実験と耐久実験を行い、技術の信頼性を高めることで道内企業への普及を図る。

引用文献

- 1) 中野隆志・芦原和男・石永信行・井村隆昭・外山泰治：厚板のFCF（板鍛造）工法開発，塑性と加工，日本塑性加工学会，Vol.47 No.551，pp.8-12，(2006)
- 2) 佐藤日出之・今井敏博・宇都宮誠治：冷間鍛造による高精度化，デンソーテクニカルレビュー，Vol.6 No.29 pp.20-29，(2001)
- 3) 中川威雄：ファインブランキング精密打抜きの理論と実際，日刊工業新聞社，162PP.，(1998)
- 4) クランチャートジュンラベン・水落健・古閑伸裕：塑性と加工，日本塑性加工学会，Vol.51 No.591，pp.83-87，(2010)

ダイナミックダンパーによる振動低減技術の開発

中西 洋介, 堤 大祐, 鈴木 慎一

Vibration Reducing Technique by Dynamic Vibration Absorber

Yohsuke NAKANISHI, Daisuke TSUTSUMI, Shinichi SUZUKI

抄 録

各種機械装置・運搬装置は高速化・高出力化,あるいは軽量化によるコスト低減等で付加価値を高めることができる。しかし,軽量化した機械装置を高速化・高出力化する場合,振動が励起され易くなるため適切な振動対策を施す必要がある。本研究では,制振対象構造物に容易に設置可能であり,かつ,制振装置の中でも装置の単位質量当たりの制振効果が最も優れている動吸振器をとりあげ,磁気ダンパを搭載した装置を設計・製作し,実証試験を通してその制振効果を確認したので報告する。また,線形2乗最適制御を用いてアクティブ動吸振器を設計し,3Dシミュレーションを通してその制振効果を確認したので報告する。

キーワード : 動吸振器, 振動, 制御, 3Dシミュレーション, 磁気ダンパ

Abstract

Machinery, equipment and vehicles can be added value, when they are sophisticated by speeding up and souped-up, or when their cost is reduced by weight saving. But, lightened machinery is easy to vibrate, especially when they are speeded up and souped-up. This is why there need to make an appropriate measure against vibration. In this study, the effect of vibration suppression by dynamic vibration absorber is shown through verification test. Dynamic vibration absorber is easy to be equipped to vibrating structures, and is the most superior in terms of the effect of vibration suppression per unit mass among other vibration control devices. And through 3D CAE simulation, the effect of vibration suppression of active dynamic vibration absorber designed by Linear Quadratic control is also shown.

KEY-WORDS : Motion Analysis, Vibration, Control, CAE, 3D CAE simulation, Magnetic damper

1. はじめに

各種機械装置,一般構造物の付加価値を高め,国内外での市場競争力を高めるためには,高速化・高出力化を図る,あるいは軽量化により製造コストを低減することがその一つの方法である。しかし,高速化・高出力化あるいは軽量化に伴い振動が励起され易くなるため,適切な振動対策が必要となる。一般的に,振動問題の多くは機械装置や構造物の内部減衰が小さいことに起因する。したがって,現在の振動対策は大きく以下の3つに分類することができる。

- ① 制振材料を用いて構造物に減衰を与える
- ② 制振装置を設置して外部より減衰を与える
- ③ 構造物の断面の剛性を高め,共振点を高周波数領域にずらす

バネ・質量・ダンパから構成される動吸振器は②に分類され,以下の特徴がある。

(利点)

- ・構造や取扱いが簡単で低コスト
- ・制振対象構造物に容易に取り付け可能
- ・制振対象構造物の適切な位置に設置した場合,他の対策

事業名: 経常研究

課題名: ダイナミックダンパーによる振動低減技術の開発

と比較して最も優れた制振効果を発揮
(欠点)

- ・減衰率（粘性係数）の変動による制振効果の減退
- ・制振対象構造物の固有振動数の変動による制振効果の減退

以上のように動吸振器は、構造が簡便で製造コストが低い
ため広く産業界で使用されている反面、構成要素の一つである
ダンパの粘性係数が温度変化、経年劣化等で変動した場合、
制振効果が減退するというデメリットを有する。そこで本報
では、粘性係数の変動が極めて少ない磁気ダンパを用いた動
吸振器を設計・試作し、実証試験を通してその制振効果を確
認した¹⁾。

なお、動吸振器のデメリットを改善するものとしてアクティ
ブ動吸振器が考案されている。アクティブ動吸振器はセンサ
からの状態フィードバックを基本としているため設計パラメ
ータ変動に対して強く、ロバストな制振制御系を実現可能である。
さらに、粘性はソフトウェアで実現するため減衰率が変動
することはない。しかし、構成要素としてセンサやアクチュ
エータ、さらにコントローラを必要とし、3つの機械要素の
みから構成される動吸振器と比較してコスト高となるため、
高層ビル、橋梁等の付加価値の高い構造物の制振装置として
使用されるのが一般的である。本報では、設計パラメータの
変動に対してロバスト性を有する線形2乗最適制御（LQ制
御）を用いてアクティブ動吸振器を設計し、3Dシミュレー
ションを通してその制振効果を確認した。

まず、次章で動吸振器とアクティブ動吸振器の設計手法
について説明した後、片持梁の曲げたわみ振動問題について振
動低減シミュレーションを行い、それぞれの設計手法の妥当
性を確認する。次に第3章で、振動低減シミュレーションで
得られた知見を元に設計・試作した動吸振器について説明し、
それらを用いた振動低減実証試験について報告する。

2. 振動低減シミュレーション

一般的に動吸振器は定点理論を用いて設計する。本報では
試作機による実証試験に先立ち、Solidworksの機構解析機
能であるSolidworks Motionを用いた3Dシミュレーション²⁾
により、定点理論を用いて設計した動吸振器の振動低減効果
を確認した。また、アクティブ動吸振器は線形2乗最適制御
を用いて設計し、同じく3Dシミュレーションにより、その
振動低減効果を確認した。

2.1 等価質量の同定

本報では、長さ1m、幅50mm×板厚6mmの長方形一様
断面を有する鋼製片持梁（質量2.6 kg）を対象とし、動吸
振器およびアクティブ動吸振器による曲げたわみ振動低減シ

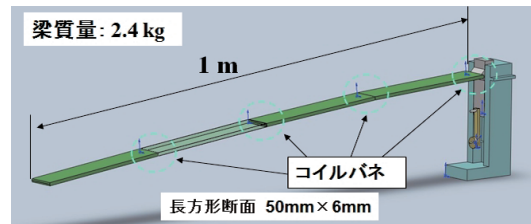


図1 片持梁4分割モデル (Solidworks)

表1 片持梁の固有振動数 (Hz)

次数	弾性体	4分割モデル
1次	4.96	4.92
2次	31.1	34.1
3次	87.1	118

ミュレーションを行った。なお、Solidworks Motionによる
機構解析は剛体のみ解析可能であり、弾性体を取り扱うこ
とができない。したがって、ここでは図1に示すように、片
持梁を剛体要素として4等分に分割し、それぞれをコイルバ
ネで連結して片持梁の弾性たわみ振動を模擬した。その際、
4つのコイルバネのバネ定数は全て等しいものとし、4分割
モデルの1次と2次の固有振動数が、弾性体として計算した
片持梁の1次と2次の曲げ固有振動数とほぼ等しくなるよう
にコイルバネのバネ定数（1,120Nm/rad）を決定した。表
1に弾性体として計算した片持梁の固有振動数とSolidwork
s Motionで計算した4分割モデルの固有振動数を示す。

なお定点理論では、制振対象構造物を集中質量系である1
自由度のバネ-質量系として動吸振器を設計する。しかし、
周知のように弾性変形を伴う一般の機械・構造物は分布定数
系である。したがって、動吸振器を設計する際、制振対象で
ある分布定数系の一般構造物を1自由度のばね-質量系で近
似する必要がある。近似したばね定数と質量をそれぞれ等価
ばね定数、等価質量と呼び、近似する方法を等価質量同定法³⁾
と呼ぶ。以下に等価質量同定法の概要を記す。

制振対象構造物の固有振動数を実測あるいは数値計算によ
って求め、その値を ω とする。また、等価質量と等価ばね定数
をそれぞれ M 、 K とする。この時、既知の固有振動数 ω は
次式で表される。

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (1)$$

制振対象構造物に既知の付加質量 Δm を取り付けると、
固有振動数 Ω は変化する。 Ω は実測あるいは解析で求められ、

$$\Omega = \sqrt{\frac{K}{M + \Delta m}} \quad (2)$$

で表される。したがって、式(1)、(2)より未知の等価質量が次
式で計算できる。

$$M = \Delta m \frac{\Omega^2}{\omega^2 - \Omega^2} \quad (3)$$

等価ばね定数 K は、式(3)を式(1)に代入して求めることができる。なお、実測で固有振動数を求める際、 ω と Ω にはFFTの周波数分解能に起因する測定誤差が含まれる。したがって、式(3)の分母より、 ω と Ω の差が小さい場合、等価質量 M の計算精度が著しく劣化することがわかる。一方、 ω と Ω の差を大きくするために付加質量 Δm の値を大きくすると振動モード形状が変化する。したがって、式(3)を用いて等価質量 M を計算する場合、振動モード形状が変化しない程度に十分に大きな付加質量 Δm を選定する等の工夫が必要となる。

表2に、図1の片持梁4分割モデルにおいて、固定端より0.77mの位置に付加質量 Δm を設置した時の1次固有振動数と、式(3)で計算した等価質量を示す。なお、固有振動数はSolidworks Motionで計算した片持梁先端変位の時系列データにFFT処理を施して求めた（周波数分解能0.15Hz、サンプリング周波数300Hz、データ長2048）。表2より、片持梁4分割モデルの1次モードに対応する等価質量は $M = 1300\text{g}$ とした。同様の手順を踏み、付加質量 Δm を固定端より0.52mmの位置に設置した場合の2次モードに対等する等価質量を計算した結果、 $M = 1200\text{g}$ となった。

表2 片持梁の等価質量

付加質量 Δm (g)	固有振動数 (rad/s)	等価質量 M (g)
0	31.3	-
140	30.4	2290
187	29.5	1457
234	28.5	1151
281	28.5	1382
351	27.6	1224

2.2 動吸振器による振動低減シミュレーション

2.2.1 定点理論による動吸振器設計

定点理論⁴⁾によると、動吸振器の質量 m [kg]、バネ定数 k [N/m]、粘性係数 c [Ns/m] はそれぞれ次式で算出することができる。

$$m = \mu M \tag{4}$$

$$k = m \frac{K}{M} \left(\frac{1}{1+\mu} \right)^2 \tag{5}$$

$$c = 2m \sqrt{\frac{K}{M}} \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \tag{6}$$

ここで、 M 、 K はそれぞれ制振対象構造物の等価質量、等価バネ定数、 μ は制振対象構造物の等価質量に対する動吸振器の質量比 (m/M) である。

表3に質量比 $\mu = 0.1$ として式(4)~(6)を用いて計算した1

表3 動吸振器緒言計算値 (定点理論)

	1次モード	2次モード
質量比	0.1	0.1
質量[kg]	0.13	0.12
バネ定数[N/m]	105	3790
粘性係数[N/(m/s)]	1.37	7.87

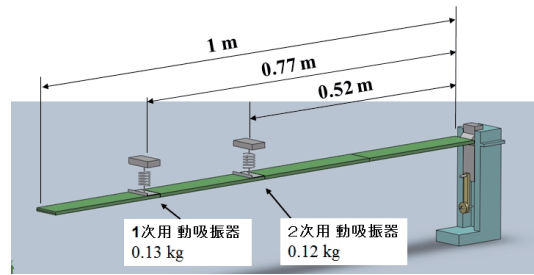


図2 動吸振器を設置した片持梁4分割モデル

次モードと2次モード制振用動吸振器の質量、バネ定数、粘性係数を示す。また、図2にそれぞれの動吸振器を設置した状態の片持梁4分割モデルを示す。

2.2.2 シミュレーション結果

図3に、1次、2次モード振動吸収用動吸振器に表3に示す値を設定してSolidworks Motionでシミュレーションした結果を示す。横軸は時間、縦軸は梁の先端変位である。図3(a)は、梁先端に5Nの外力を0.5秒間ステップ状に負荷した時の過渡応答である。図より外力除荷後、約1秒で振動が収束していることが確認できる。図3(b)、(c)はそれぞれ梁の根元に5Hz（1次共振）と30Hz（2次共振）で±5mmの強制変位を与えた時の定常応答である。図より、動吸振器を設置しない場合と比較して、振動振幅が大幅に低減していることが分かる。

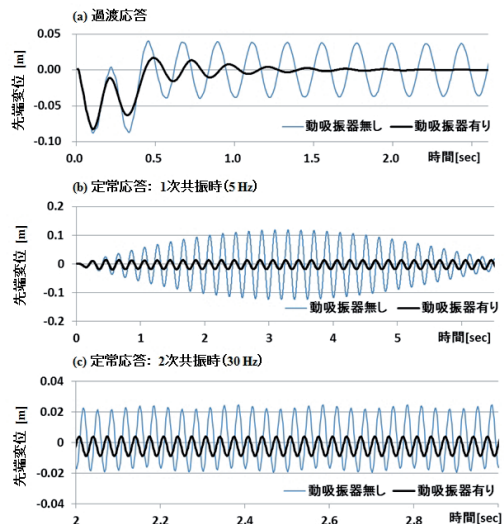


図3 シミュレーション結果 (動吸振器)

2.3 アクティブ動吸振器による振動低減シミュレーション

2.3.1 線形2乗最適制御による動吸振器設計

図4に本報で設計したアクティブ動吸振器の構成を示す。制振対象である4分割片持梁は、1自由度のバネ-質量系（質量 M 、バネ定数 K ）で表現している。

2個の変位センサを用いて制振対象の絶対変位 X と、制振対象に対する質量 m の相対変位 x_d を検出する。コントローラでは X と x_d 、さらにそれらを微分した速度信号にそれぞれフィードバックゲインを乗算して状態フィードバック制御量、すなわちアクチュエータの駆動力 f_c を計算する。質量 m のおもりを制振対象に固定したアクチュエータで駆動することで制振対象の振動を抑制する構成となっている。なお、実機では通常、アクチュエータとして油圧シリンダ、モータ（ボールねじ駆動）、電磁石等を使用する。

図4を元に質量 M , m の運動方程式を構築すると、次式で表現される。

$$M\ddot{x} = -kx + (kx - K) + f_c \quad (7)$$

$$m\ddot{x}_d = -k(x - X) - f_c \quad (8)$$

制振対象に対する質量 m の相対変位 x_d を用いて表すと、

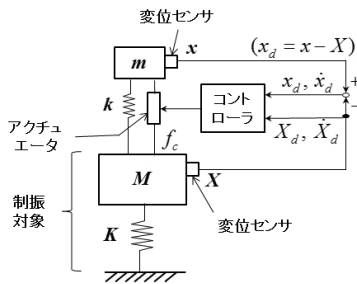


図4 アクティブ動吸振器の構成

$$\ddot{x} = -\frac{K}{M}X + \frac{k}{M}x_d + \frac{1}{M}f_c \quad (9)$$

$$\ddot{x}_d = \frac{K}{M}X + \frac{m+M}{mM}kx_d - \frac{m+M}{mM}f_c \quad (10)$$

ここで、状態変数を次のように定義する。

$$\mathbf{x} = [X \ \dot{X} \ x_d \ \dot{x}_d]^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T \quad (11)$$

式(8)で定義した状態ベクトルを用いると、式(6), (7)は次式の状態方程式で定式化される。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}f_c \quad (12)$$

ここで、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K}{M} & 0 & \frac{k}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K}{M} & 0 & -\left(1 + \frac{m}{M}\right)\frac{k}{m} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} & 0 & -\left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M}\right) \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

である。

以上より、アクティブ動吸振器による制振制御問題は、式(12)で表現されたシステムの状態変数 \mathbf{x} をすみやかに $\mathbf{0}$ に収束させるために必要となる外部入力 $f_c(t)$ を決定する問題として定式化することができる。本報では上記問題を解決する

ための常套手段である状態フィードバック制御則

$$f_c(t) = -\mathbf{K}^T \mathbf{x} \quad (15)$$

を用いて制御力 $f_c(t)$ を決定した⁵⁾。ここで、 \mathbf{K} は制御ゲインである。制御入力 $f_c(t)$ を大きくすることで状態変数 \mathbf{x} をすみやかに $\mathbf{0}$ に収束させることが可能となるが、過大な入力によりアクチュエータや制振対象が破損する、あるいは操作部が飽和して制御特性が劣化するなどの問題が発生する。すなわち応答性の良さと制御入力の大きさにはトレードオフが存在する。ここでは状態変数 \mathbf{x} と制御入力 $f_c(t)$ を用いた2次形式評価関数

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + f_c^T \mathbf{R} f_c) dt \quad (16)$$

が最小となるような制御入力 $f_c(t)$ を決定する線形2乗最適制御を用いて、制御ゲイン \mathbf{K} を決定した。ここで \mathbf{Q} , \mathbf{R} は重み行列で、設計者が決定する設計パラメータである。 \mathbf{Q} を大きくすることで速応性が高くなるように、また \mathbf{R} を大きくすることで制御入力を抑えるように制御ゲイン \mathbf{K} が調整可能である。

2.3.2 シミュレーション結果

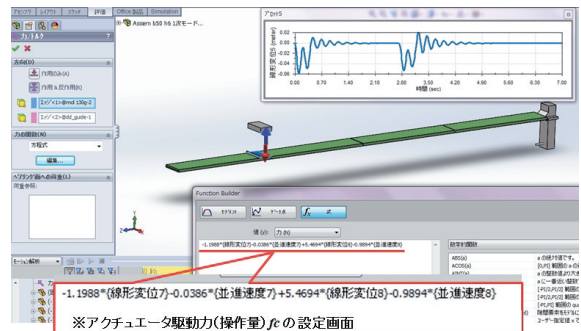


図5 アクティブ動吸振器シミュレーション

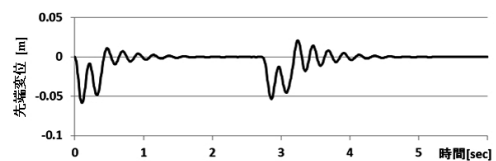


図6 シミュレーション結果（アクティブ動吸振器）

図5にSolidworks Motionでのアクティブ動吸振器のシミュレーションを、また、図6に梁先端に5Nの外力を0.5秒間ステップ状に負荷した時の過渡応答（シミュレーション結果）を示す。横軸は時間、縦軸は梁の先端変位である。なお、設計パラメータであるおもみ行列の値、および、その結果計算された制御ゲインの値はそれぞれ、

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[80, 80, 80, 80]$$

$$R = 10$$

$$K = [10.9267 \quad -0.0041 \quad 14.7758 \quad -2.5709]^T$$

である。

図6より外力除荷後、約1秒で振動が収束していることが確認できる。

以上より、等価質量同定法および定点理論を用いて設計した動吸振器と、最適2乗線形制御を用いて設計したアクティブ動吸振器の振動低減効果を3Dシミュレーションにより確認することができた。

3. 実証試験

シミュレーション結果で得られた知見を元に、等価質量同定法および定点理論を用いて動吸振器を設計し、実証試験を通して制振効果を確認した。

3.1 制振対象構造物

図7に制振対象構造物として製作した門型構造物を示す。高さとは幅は共に500mmで質量は2.74kgである。1次振動は図7に示す変形方向に励起され、基本振動数は8.1Hzである。動吸振器を図に示す位置に設置するものとし、2.1項に記述した方法にしたがって等価質量を同定した結果、1.81kgとなった。

質量比 $\mu = 0.1$ とし、式(4)~(6)にしたがって動吸振器を設計すると、 $m = 0.181\text{kg}$ 、 $k = 341\text{N/m}$ 、 $c = 2.90\text{N/(m/s)}$ となる。

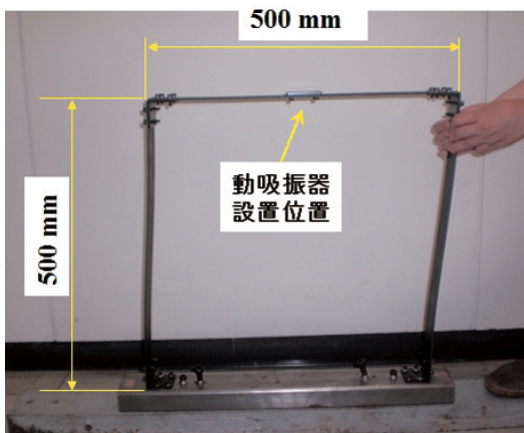


図7 門型構造物

3.2 磁気ダンパ

動吸振器に使用するダンパとして、オイルダンパ、摩擦ダンパ、磁気ダンパ、シリコンゲル等がある。オイルダンパは古くから使用され最も汎用的だが、温度や経年劣化で粘性係数が変化するため使用環境に留意する必要がある。一方、磁気ダンパは、

- 温度変化の影響を受けにくい
- 非接触なので不要な摩擦がない
- 構造と取付けが簡単で小型化が可能

等の特徴があり、小型の制振対象構造物の振動抑制を目的とした動吸振器用のダンパとして理想的である。粘性係数を大きくするためには強力な磁力を必要とするが、近年、ネオジム磁石等の高性能永久磁石が比較的安価に入手可能であり実用段階に達している。したがって、ここでは動吸振器用ダンパとして磁気ダンパを採用することにした。

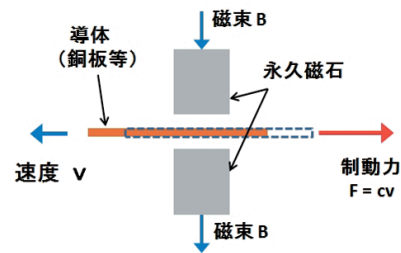


図8 磁気ダンパの基本構成

図8に磁気ダンパの基本構成を示す。永久磁石の磁場内を導体が通過すると導体内に渦電流が発生し、導体の運動と逆方向に磁気制動力が発生する。導体の厚さを $t[\text{m}]$ 、導体の固有抵抗を $\rho[\Omega\text{m}]$ 、永久磁石の磁極面積を $a[\text{m}^2]$ 、磁束密度を $B[\text{T}]$ とすれば、磁気ダンパの粘性係数 $c[\text{N/(m/s)}]$ は次式で表される。

$$c = K_m \frac{atB^2}{\rho} \quad (17)$$

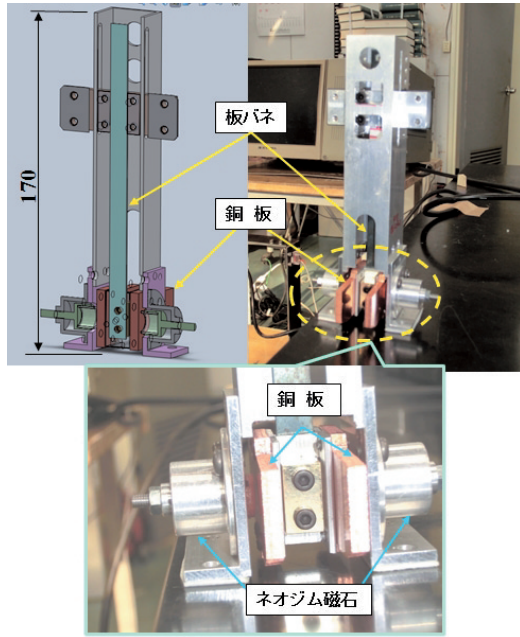
ここで、 K_m は導体面積 $A[\text{m}^2]$ と磁極面積 $a[\text{m}^2]$ の比で定まる係数で、 $A/a \gg 1$ の場合、 $K_m = 0.5$ となる。

動吸振器を製作する際、ダンパの粘性係数値を微調整し、式(6)で計算された値にする必要がある。式(14)より、磁気ダンパの粘性係数値は導体の厚さ t 、あるいは磁束密度 B により微調整可能である。磁束密度 B は磁石～導体間距離で調整可能である。

3.3 板バネ式動吸振器

図9に試作した動吸振器を示す。幅10mm、厚さ1mmの板バネ（SK5材）の先端に、全質量が0.181gとなるように大きさを調整した2枚の銅板、真鍮等を設置している。また、板バネの長さ（支持端～動吸振器質量重心位置）はバネ定数が341N/mとなるように、114.7mmに調整している。

板バネ先端に設置した2枚の銅板の横には、銅板との距離を0～3mmの範囲内で微調整できるにネオジム磁石（直径10mm、軸長10mmの円柱形状）を設置しており、銅板の運動方向と逆方向に磁気制動力が発生する。式(14)に、銅板の厚さ $t = 0.004[\text{m}]$ 、固有抵抗 $\rho = 1.69 \times 10^{-8}[\Omega\text{m}]$ 、磁極面積 $a = 7.85 \times 10^{-5}[\text{m}^2]$ 、磁束密度 $B = 0.4[\text{T}]$ 、 $K_m = 0.5$



磁気ダンパ部
図9 板バネ式動吸振器

を代入すると、 $c = 1.49\text{N(m/s)}$ となる。銅板とネオジム磁石が2対あることから、結局、粘性係数は $c = 2.98\text{N(m/s)}$ となる。

図10に直径10mm、軸長10mmの円柱形状ネオジム磁石の磁石～銅板間距離と磁束密度の関係（計算値）を示す。磁石～銅板間距離を調整することで、磁束密度、さらに粘性係数を微調整することが可能である。

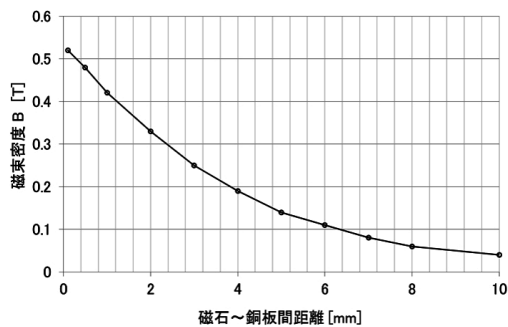


図10 磁極～銅板間距離と磁束密度の関係

3.4 実験結果

図11に動吸振器を設置した門型構造物を、図12に門型構造物上端の水平方向初期変位を9mmとした時の過渡応答を示す。横軸は時間、縦軸は門型構造物上端の水平方向変位である。図より、動吸振器が無い場合、振動が持続しているのに対し、動吸振器を設置した場合、約3秒で振動振幅がほぼ0に収束していることが確認できる。

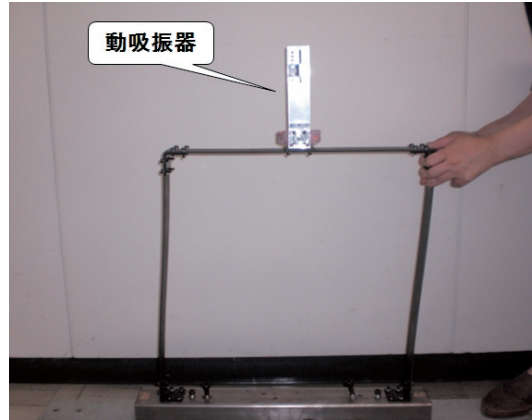


図11 動吸振器を設置した門型構造物

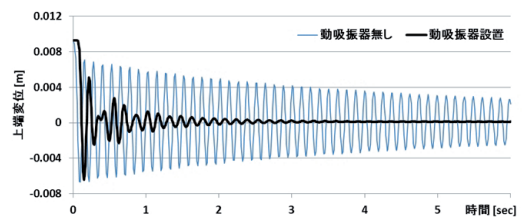


図12 実験結果

4. まとめ

本報では、等価質量同定法、定点理論にしたがって動吸振器を設計し、その振動低減効果をSolidworks Motionによる3Dシミュレーションを通して確認した。さらに、シミュレーションで得られた知見を元に磁気ダンパを搭載した動吸振器を設計・試作し、門型構造物に対する振動低減試験を行った結果、極めて良好な結果を得た。さらに、設計パラメータの変動に対してロバスト性を有する線形2乗最適制御（LQ制御）を用いてアクティブ動吸振器を設計し、3Dシミュレーションを通してその制振効果を確認した。

今後は、磁気ダンパを搭載した動吸振器を一般構造物、機械装置等の実振動問題に適用し、その振動低減効果を確認していきたい。

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、3Dシミュレーションに使用した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) 背戸一登：磁気ダンピングを有する定数可変形動吸振器の研究，日本機械学会論文集（C編），Vol.45 No.397，pp.1010-1017，（1979）
- 2) 中西洋介ほか5名：農業機械の姿勢・振動制御技術の開発，北海道立工業試験場報告，No310，pp.23-30，（2011）
- 3) 背戸一登：動吸振器とその応用，コロナ社，84PP.，（2010）
- 4) 背戸一登：振動工学，森北出版，179PP.，（2002）
- 5) 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，pp.25-38，（2006）

金型重力鋳造における金型減圧による鋳造性の向上

戸羽 篤也, 木下 修*, 桃野 正**

Improvement of Castability by the Decompressed Mold in the Gravity Die Casting Process

Atsuya TOBA, Osamu KINOSHITA*, Tadashi MOMONO**

抄 録

金型重力鋳造で薄肉のアルミ合金鋳物を製造するには、溶湯が凝固する前に金型を満たすように鋳造条件を設定する必要がある。本研究では、薄肉部における溶湯の湯流れを改善する方法の一つとして金型内を減圧して鋳造する「減圧鋳造法」に着目し、それが鋳造性向上に及ぼす効果について実験を行った。

実験の結果、減圧鋳造時の負圧が大きいと吸引力が過大となって不具合が生じることから、薄肉鋳物の減圧鋳造では適正な負圧を設定する必要があることがわかった。そこで、金型内に適正な負圧を与えるための金属製ベントフィルターを製作し、これを用いた鋳造実験により減圧鋳造による湯流れの改善効果を確認した。

キーワード：アルミ合金鋳物, 金型重力鋳造, 減圧鋳造法, ベントフィルター

Abstract

When we produce thin aluminum alloy castings by gravity die casting, it is needed that molten metal is filled to mold before it solidifies. In this study, we focused to "a decompression mold casting method" as one of method to improve molten metal flowability at a thin part, and we performed an experiment to examine the effect that it gave on a castability.

As a result of experiment, a defect occurred when the power of absorption became excessive by decompressed pressure, so we found that it was necessary to set suitable pressure for the decompression gravity die casting of the castings which have some thin parts. Therefore we made a metal vent-filter to give suitable decompressed pressure in a die and confirmed the improvement effect of the molten metal flow by the decompression casting by the experiment using this.

KEY-WORDS : Aluminum alloy castings, Gravity die casting, Decompressed mold casting, Vent-Filters

1. はじめに

金型によるアルミ合金鋳物の製造では、高い生産性ととも
に寸法精度や材質特性等で高い品質が期待できる。その一方
で鋳型の冷却能が著しく高いことにより注湯後の熔融金属
(以下「溶湯」という)の凝固進行が早く、特に薄肉部をも
つ鋳造品ではその部分に溶湯が流入せずに湯回り不良を生じ

やすい。アルミ合金の金型鋳造において鋳造性を確保するた
めには、溶湯が凝固する前に金型内キャビティを完全に満た
す必要がある。そのためには、溶湯の凝固進行を遅らせるか、
溶湯の充填時間を短くするかのいずれかの方法が採られる。
前者としては、金型の温度を予め高める方法や、溶湯を攪拌
して溶湯の流動性を改善する方法が考えられる。一方、後者
としては溶湯を高い圧力で金型内に注入する方法がある¹⁾。

* 株式会社木下合金, ** 室蘭工業大学

* Kinoshita Alloy Casting Co., LTD., ** Muroran Institute of Technology.

事業名：公募型研究（戦略的基盤技術高度化支援事業）

課題名：薄肉・高強度・高靱性アルミニウム合金鋳物製造のための多機能グラビティー複合金型鋳造システムの研究開発（平成24年度）

アルミ合金溶湯は、一般に凝固温度より100～200℃高い温度範囲で厳しく管理される。これはアルミ合金を高温で溶解すると酸化やガス吸収による铸造欠陥を引き起こすからであり、溶湯温度を高温にして铸造後の流動性を確保する方法には限界がある。

一般にダイカストは、アルミ合金溶湯を高压で金型内に強制的かつ短時間で充填する铸造法である。ダイカストは铸造時の溶湯流速が極めて速いため金型内の空気や酸化膜等の介在物を铸物内部に巻き込みやすく、高い材料品質が要求される製品には適用しにくいとされる。これに対して、同じく金型を用いる铸造法として「金型重力铸造法 (Gravity Die Cast)」がある。金型重力铸造は、特に压力を加えずに湯口から重力だけを利用して金型内に铸込む方法であり、铸造方案を適切に設計すれば、高い生産性を維持しつつ高品質のアルミ合金铸物を生産することができる。

本研究は、金型重力铸造によって薄肉铸物を製造するための自動铸造装置を開発する取り組み^{2), 3)}の一部として、金型内の減圧による溶湯充填時間の短縮および溶湯攪拌による铸造性の改善効果を調べる実験を行い、金型減圧铸造時の負圧と湯流れ性との関係について知見を得たので報告する。併せて、金型内の負圧を制御するための金属製ベントフィルターの製作に関して、金属粉末積層成形によるフィルター設計・製作技法を検討したので紹介する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

金型重力铸造における減圧铸造法の铸造性改善効果を調べる実験を行うため、実験装置を図1に示す機器構成で用意した。減圧ポンプは、排気能力450W（アルカテル社製）のポンプを使用した。この減圧ポンプの能力を補うとともに、圧力変動を抑えるため減圧容器を用意した。減圧容器の容積は40リットル（内径φ300mm×長さ600mm）とし、減圧容器内の压力を確認するため負圧ゲージを取り付けた。

減圧容器の両側面にフランジ型継ぎ手を用意し、この一方を用いて減圧ポンプと減圧容器とを専用のゴム製ホースで接続した。他方の継ぎ手には、減圧の開閉を行う電磁弁とエアフィルターを取り付けた。エアフィルターは金型等から流入する空気に混入する粉塵などを取り除き、減圧容器や減圧

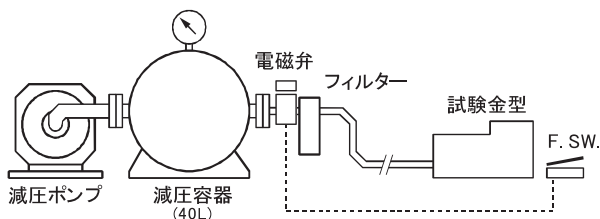


図1 铸造試験装置構成の模式図

ポンプへの損傷を防ぐために配置した。

電磁弁・エアフィルターと試験用金型とはステンレス製フレキシブル管で接続した。铸造時の金型内压力は、電磁弁、エアフィルター、接続管等で生じる压力損失により、減圧容器で計測される負圧と異なる可能性が高いが、本実験においては金型内の压力を直接計測する検出器を用意せず、負圧計の計測値から実験条件を設定した。

铸造実験に際して金型内の減圧のための電磁弁の開閉は、試験金型の近くに置いた足踏み式スイッチを踏下して行う方式とした。

2.2 試験用金型

铸造性を評価する指標の一つである「湯流れ性」の評価は、金型内の小断面流路への給湯距離（溶湯が凝固するまでに流路に進入した長さ）を比較して評価した。試験用金型の形状・寸法を図2に示す。試験用金型は4つの部材で構成し、湯口（図2の左側）と主金型2つ（同図右側）を铸铁で製作した。さらに、板金型は厚さ $t=4.5\text{mm}$ の鋼板を図3に示す形状に加工して用意し、2つの主金型の間挟んで湯流れ性の評価用小断面流路を形成した。小断面流路は、1枚の板金型に同じ幅と深さで3本加工し、図3の上から順に大気への開放口を先端に持つ「開放流路」、先端が閉じ込み状態となる「閉塞流路」、先端部が压力制御装置と接続する「压力流路」と

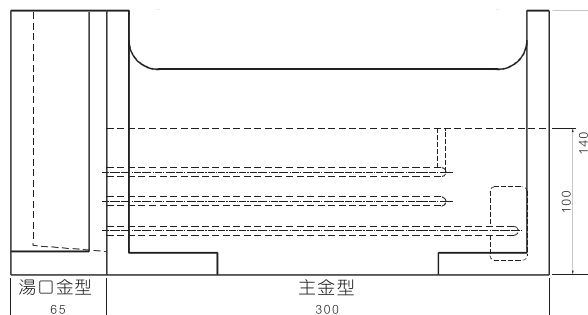


図2 铸造実験用金型の形状・寸法

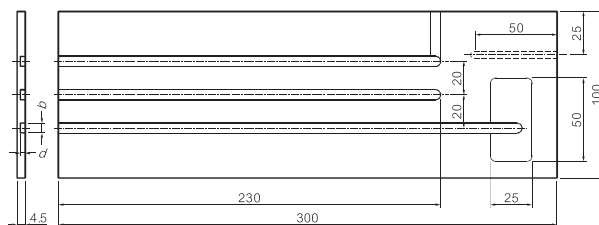


図3 湯流れ性試験に用いた板金型の形状・寸法

表1 铸造実験用板金型の小断面流路寸法

呼び記号	深さ d, mm	幅 b, mm	断面積 s, mm^2
D20	1.8	10.6	19.08
D25	2.4	8.4	20.16
D30	3.2	6.3	20.16

した。板金型に加工する小断面流路の寸法は、目標とする铸件肉厚²⁾を考慮し、表1に示す3水準とした。また、圧力流路の先端接続部には溶湯が未凝固のまま圧力流路先端に達しても減圧配管系に進入しないように50mm×25mmの面積でチルベントを設けた。さらに、板金型の裏側に深さ4mm、長さ50mmの溝を加工し、ここに熱電対を埋め込んで铸造時の金型温度を計測した。

2.3 铸造実験の方法と試験条件

減圧铸造による湯流れ性評価実験は、一般的に用いられる铸造用アルミ合金AC4CHを溶解し、種々の条件下でこれを金型に铸込んだ。アルミ合金の溶解は、図4の模式図に示す

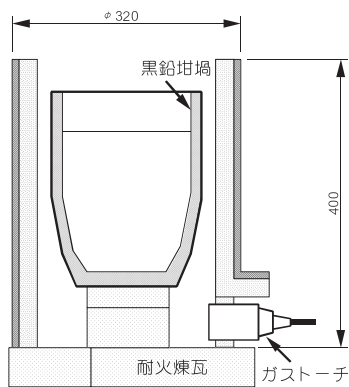


図4 アルミ合金の溶解方法（模式図）



図5 铸造実験の様子

黒鉛坩堝内に約7.5kgの金属塊を投入し、プロパンガスバーナーで徐々に加熱・昇温した。加熱の当初は、材料への入熱が上部から拡散しないよう、別に用意したトーチを用いて上部からも加熱した。

金属塊が溶解し、溶湯が坩堝容量の半分程度まで達したら、上部から熱電対を差し込んで溶湯の温度を計測しながら加熱を継続し、所定の保持温度になるように火力を調整した。

試験用金型は、溶湯が触れる面に塗型を施した後、耐火煉瓦上に組み上げてシャコ万力で固定した。板金型に設置した熱電対によって所定の予熱温度になるようにプロパンガスで加熱し、金型の予熱温度と溶湯の溶解温度がそれぞれの実験条件に達したら、減圧装置の減圧ポンプを作動させて目的の負圧になったところでポンプを停止し、予熱した汲み出し用黒鉛坩堝で必要量の溶湯を汲み出して金型の湯口から注湯し、板金型の開放流路口の水準まで溶湯が達すると同時に足踏式スイッチを踏み込んで電磁弁を開放して金型内を減圧した。铸造条件は、溶湯温度を700℃、金型予熱温度を200℃とし金型減圧の負圧は、減圧容器のゲージ計測により0(大気圧)～-98kPaまでの範囲で変化させた。また、汲み出し黒鉛坩堝は、アルミ合金溶解に使用する黒鉛坩堝の溶湯の上に置き、予熱するとともに溶湯の酸化防止に役立てた。

3. 実験結果

3.1 湯流れ性評価

板金型を用いて金型重力铸造における金型内減圧の効果を確認するため、D30試験片（铸件肉厚 $t=3.2\text{mm}$ ）とD25試験片（铸件肉厚 $t=2.4\text{mm}$ ）を用いて、減圧铸造法で铸込み実験を行った。铸造実験の様子を図5の写真に示す。減圧铸造法に際して減圧容器内の圧力は、減圧ポンプの能力の最大限となる2kPa（負圧-98kPa）程度まで下げた。

図6に、減圧铸造法と通常铸造法（負圧=0）による湯流れ試験結果の一例を示す。通常铸造法ではD25試料、D30試

試験条件・試料	D25 (d = 2.4mm)	D30 (d = 3.2mm)
通常铸込 (負圧 = 0)		
減圧铸込 (負圧 = -98 kPa)		

図6 試験金型による湯流れ性実験結果

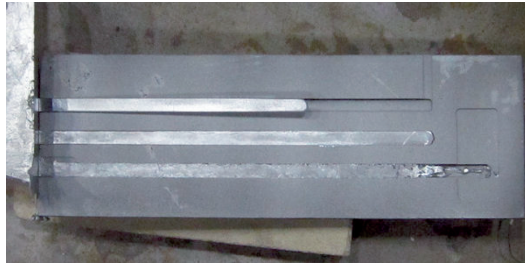


図7 湯流れ性試験結果の事例
(D25試料/減圧铸造)

料ともに圧力流路の給湯距離が最も長くなる試験結果が多くなった。これは、閉塞流路では溶湯の流入に際して金型キャビティ内の空気が圧縮されることによる背圧の影響を受けるのに対して、これ以外の開放流路と圧力流路は金型キャビティ内の空気が流路先端から開放され、背圧の影響が小さくなることに加えて、湯口から注がれた溶湯の圧力ヘッドが下段になるに連れて大きく、溶湯が圧入状態となるので、圧力流路の給湯距離が最も長くなったと考える。特に、D25試料では開放流路より閉塞流路の給湯距離が長くなる例が見られたが、これは金型キャビティ内空気による背圧よりも薄肉による冷却能の影響を大きく受けたと思われる。

これに対して、圧力流路の金型キャビティ内を減圧して铸造した湯流れ試験では最下段の圧力流路の給湯距離が最も長くなることを期待したが、D25試料、D30試料のいずれも期待したような結果とならず、むしろ圧力流路キャビティの減圧で発生する吸引力により溶湯先端が大きく乱れた形状で凝固した。この原因として、減圧によって溶湯の流速が早くなると同時に鑄型の流入口付近での熱伝達量や粘性抵抗が大きくなり、凝固が加速したのではないかと考えられる^{4),5)}。

減圧吸引による湯流れ性の改善について、いくつかの実験結果で減圧铸造による金型内キャビティに働く吸引力の効果

が認められる事例が見られた。その一つを図7に示す。圧力流路の溶湯先端部分が吸引力により乱れた形で凝固しているのに対して、その上段の閉塞流路には溶湯が綺麗に満たされている。この理由として、試験金型を組み立てるときに板金型を2枚の主金型で挟み、シャコ万力で締め付けて固定するが、このとき板金型の流路面と主金型の面とは塗型材を介して接するので、必ずしも密着せずに減圧による圧力がわずかに閉塞流路にも影響を及ぼす可能性が考えられる。

先に示した実験結果と併せてこの実験結果を考察すると、本来は減圧による湯流れ改善効果は及ばないとした閉塞流路に、実際は金型のわずかな隙間から負圧が作用して湯流れが良くなったと仮定すれば、減圧時の圧力が強すぎると返って溶湯の流れを乱すなどの悪影響を及ぼし、金型減圧による湯流れ性改善の効果を得るのに適切な負圧の大きさがあることになる。

そこで、減圧铸造の負圧を変化させて湯流れ性への影響を調べる実験を行った。鑄物の肉厚を1.8mmとしたD20試料と肉厚2.4mmのD25試料の実験結果を図8に示す。铸造条件は減圧なしで鑄込んだ通常の重力铸造(負圧=0)と、铸造時の減圧容器内の負圧を-50kPaおよび-25kPaに調整して鑄込んだ減圧铸造試験の結果である。

同じ減圧条件下で実施した湯流れ性試験の結果を比べると、給湯距離は相対的にD20試料の方がD25試料より短い。これは、鑄物の肉厚が薄いほど冷却速度が速く、铸造後の溶湯が短時間で凝固することによるものである。

通常鑄込みの実験結果は、圧力流路の給湯距離が最も長くなり、次いで開放流路、閉塞流路の順となった。中段流路の給湯距離が短かったのは、金型キャビティ内の空気による背圧の影響が考えられる。また上段流路より最下段流路の給湯距離が長くなる傾向については、先に示した考察のとおり、流路の位置関係に伴う圧力ヘッドの影響で最下段流路の入り

試験条件・試料	D20 (d = 1.8mm)	D25 (d = 2.4mm)
通常鑄込 (負圧 = 0 kPa)		
減圧鑄込 (負圧 = -25 kPa)		
減圧鑄込 (負圧 = -50 kPa)		

図8 減圧条件を変化させたときの湯流れ性への影響

口付近の溶湯に加圧力が働いたことが影響したものとする。減圧して铸造した実験の結果を比較すると、減圧容器内の圧力を -50kPa としたときの圧力流路の溶湯が負圧で強く引っ張られたと推定できるような先端部の乱れや溶湯の入り口付近で破断が見られた。

これに対して、減圧容器内の圧力を -25kPa としたときの実験結果では、圧力流路、閉塞流路ともに湯流れの乱れが少なく、溶湯の充填状態も -50kPa の実験結果に比べて良好になっている。

このことから、铸造時に金型キャビティ内を減圧して湯流れ性を改善しようとするには、高い負圧を加えて強い吸引力を発生させるよりは、小さな負圧で静に吸引力を与える方が有効であるとの知見を得た。

減圧铸造法による湯流れ性の改善を目的とした最適な負圧の設定値は、鋳物の肉厚、溶湯温度、金型の予熱温度等によって異なると考えられる。本研究で用意した実験条件、すなわち、溶湯温度 700°C 、金型予熱温度 200°C で、鋳物の肉厚が $2\sim 3\text{mm}$ 程度の場合、実験結果より減圧金型铸造における負圧の設定値を -25kPa 程度にすることで効果的な湯流れ改善が図られるとの見通しを得た。

3.2 金属組織観察

減圧铸造法で金型内キャビティを減圧すると湯流れ性の改善効果が得られることについて、金型内で溶湯に吸引力が働いて溶湯の流速が増すので給湯距離が長くなるのが直接的な理由として考えられるが、同じく溶湯流速が増すと溶湯に攪拌作用が働き、溶湯の流動性が長く保たれることもその理由として挙げることができる⁹⁾。

すなわち、铸造後の溶湯内に固相が晶出し、デンドライト(=樹脂状晶)を成長させながら凝固が進行する過程で、あ

る一定の固相率に達すると溶湯内の液相がデンドライトの結晶間を移動できなくなる状態(このときの固相率を「限界固相率」という)となり、溶湯は流動性を失う。しかし、凝固進行の過程で溶湯に攪拌を加えると、デンドライトが分断されて、同じ固相率でも流動性を保つことが出来る。このメカニズムにより、金型内キャビティの減圧で溶湯に吸引力が加わると溶湯に攪拌作用が働いて、湯流れ性の改善に寄与する可能性がある。

減圧铸造に伴う溶湯攪拌作用を検証するため、鋳物の顕微鏡組織観察を行った。通常の重力铸造法と減圧铸造法の実験で得たD30試料の各部位で観察した金属マイクロ組織の写真を図9に示す。減圧をしない重力铸造法で鋳込んだ試料では、いずれの流路も溶湯先端部に比べて湯口付近の結晶粒径が小さい。一般に、本実験で用いた铸造方案では金型流路に比べて湯口部の熱容量が大きいので、冷却・凝固は先端部から湯口部に向けて進行すると考えられる。この場合、凝固が遅い湯口部の方がデンドライト成長に伴って結晶粒は大きくなる。組織観察の結果、湯口部の結晶粒の方が小さいことの原因として、溶湯が湯口から流入する際に剪断力が作用してデンドライトが分断されて結晶成長が抑えられたと考えることができる。すなわち、減圧をしない重力铸造法でも湯口部付近の溶湯に攪拌作用が働いたことが伺える。

铸造時の金型減圧の有無について金属組織を比較すると、試料湯口部について両者に顕著な差が認められないが、圧力流路の溶湯先端部では減圧铸造で鋳込んだ方の結晶粒が小さくなっていることがわかる。これは、溶湯先端に金型キャビティ減圧による吸引力が溶湯の剪断力として作用したことでデンドライトの分断が生じたと考えられる。金属組織観察の結果、金型減圧による溶湯攪拌作用が溶湯の流動性に影響することが確かめられた。

観察部位・铸造条件	通常の重力铸造 (減圧なし/負圧 = 0)		減圧铸造 (負圧 = -98kPa)	
	湯口付近	溶湯先端	湯口付近	溶湯先端
開放流路 (上段)				
閉塞流路 (中段)				
圧力流路 (下段)				

図9 減圧铸造による金属組織への影響 (D30/d=3.2mm)

4. ベントフィルターによる減圧金型の負圧調整

金型重力鋳造で減圧鋳造による湯流れ性改善を検討するに当たり、適切な負圧設定によって効果が得られることを示した。ここでは、減圧金型の負圧を調整する方法としてベントフィルターによる圧力損失を利用する方法⁷⁾を取り上げ、金属製ベントフィルターの設計・製作法を検討した。

4.1 負圧調整法の原理

ベントフィルターは、一定の通気特性をもつエアレギュレータの一種である。フィルターは微小孔あるいは多孔質の構造をもち、空気粘性抵抗を利用して通気圧力を制御する。いま、図10に示すような通気条件を考える。すなわち、内径 ϕD [mm]の流路内に厚さ h [mm]、開口率 ε [-]のフィルター部を配置し、この流路に流量 Q [mm³/s]の空気が流れているとする。このとき、流入側の圧力を P_{in} [Pa]、フィルターを通った後の流出口の圧力を P_{out} [Pa]とする。

フィルター内を通過する空気速度 u [mm/s]は、空気の流量と実効通気面積 A [mm²]との関係式から、

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\varepsilon\pi D^2} \quad [\text{mm/s}] \quad (1)$$

と計算される。一般に、フィルター内の流速は圧力勾配（単位長さ当たりの圧力損失）と流体の粘性の影響を受けると考えられるので、空気の粘性を μ [Pa・s]とすると、フィルターの通気度（通気性を示す指標）は以下の式で定義される⁸⁾。

$$k = \mu u \frac{h}{\Delta P} = \frac{4\mu Q h}{\varepsilon\pi(P_{in} - P_{out})D^2} \quad [\text{mm}^2] \quad (2)$$

上式で、流路およびフィルターの形状が変わらなければ、

$$k = \frac{4\mu h}{\varepsilon\pi D^2} \cdot \frac{Q}{(P_{in} - P_{out})} \quad [\text{mm}^2] \quad (2')$$

と整理して、通気度は流量と圧力差によって求められることがわかる。

減圧金型重力鋳造において、鋳造時の金型内キャビティの負圧（図10の P_{in} で示す圧力）を制御するには、この関係式から減圧系配管の内径、減圧容器の圧力、フィルターの開口率および厚さを決定する。ただし、配管系の寸法や減圧容器の圧力は設備で決まる要素が多いので、実質的に金型内の負

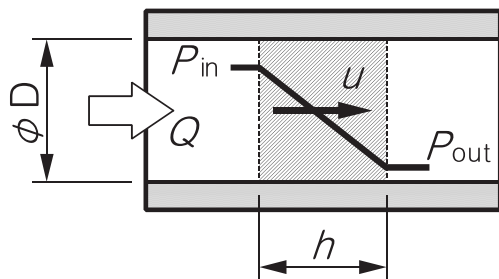


図10 ベントフィルターによる負圧制御の考え方

圧の制御はベントフィルターの開口率と厚さで設計することになる。

いま、鋳造しようとする金型キャビティ容積 V [mm³]と鋳込みに要する時間 t [s]が決まれば、減圧時の平均流量 Q は、

$$Q = \frac{V}{t} \quad [\text{mm}^3/\text{s}] \quad (3)$$

で計算される。ベントフィルターの製作条件や開口率等からその通気度 k が推定できるとき、(2)式を厚さ h について、

$$h = \frac{\varepsilon\pi D^2 t}{4\mu V} k (P_{in} - P_{out}) \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

と変形した式により、金型の容積、鋳込み時間および負圧に応じて適切なベントフィルターの厚さを決定する。

4.2 ベントフィルターの製作

金属粉末積層成形法によりベントフィルターを製作し、その通気特性を計測した。ベントフィルターの試験片試料は、図11に示す形状および寸法とし、試験条件として圧力勾配を変化させるため、フィルター部の厚さを3 mm、5 mm、8 mmの3水準で製作した。また、フィルターの開口率を変化させるため、表2に示すように金属粉末積層成形時のレーザー照射条件を変えて製作した⁹⁾。

通気度試験は、鋳造用生型通気度試験装置（JIS Z 2601）を利用し、2000ccの空気が通気するのに要した時間を計測して流量を求め、(2)式により通気度を算出した。通気時の加圧力は1.0kPaと1.5kPaの2水準とし、粘性は18.22 μPa・sとして計算した。

製作したベントフィルターの通気特性試験の結果を図12に示す。図の横軸に圧力勾配（フィルター両端面の圧力差をフィ

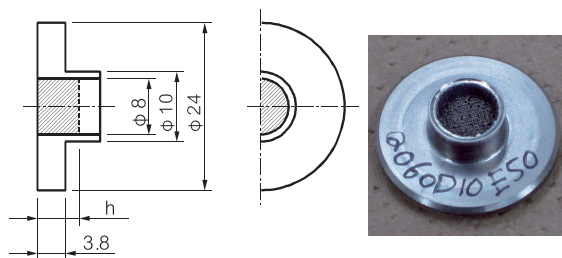


図11 試作ベントフィルターの形状・寸法および外観

表2 ベントフィルターの製作条件

試料製作装置		金属粉末光造型複合加工装置 (LUMEX Avance-25)		
レーザー種別		ファイバーレーザー		
出力/最大出力		160 W / 200W max		
資料番号	集光径 [mm]	走査間隔 [mm]	走査速度 [mm/s]	光熱密度 [J/mm ²]
Q050E50	φ 0.1	0.5	640	0.50
Q055E50			582	0.55
Q060E50			533	0.60
Q065E50			492	0.65

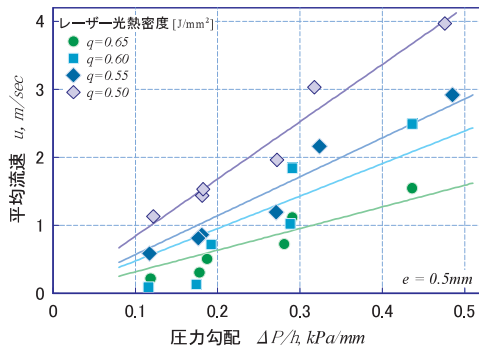


図12 ベントフィルターの通気特性計測結果

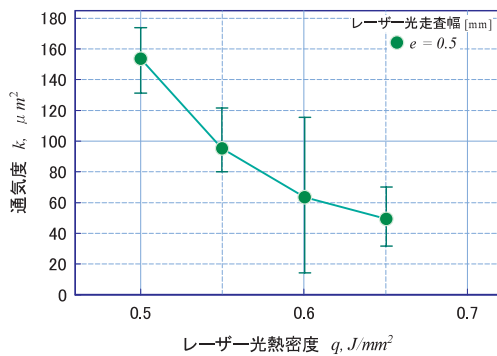


図13 ベントフィルターの製作条件と通気度

ルター厚さで割った値)、縦軸にフィルター内を通過する空気の見かけの流速をとると、成形時のレーザー光熱密度ごとに比例関係が認められる。ここで、レーザー光熱密度 q [J/mm²] とは、レーザー照射による成形条件の指標の一つで、成形単位面積当たりに照射するレーザー光線熱量である。レーザー光熱密度が大きくなると同じ圧力勾配を与えたときに通過する空気の見かけの流速が遅くなるのがわかる。これは、成形時の与熱量が大きくなるに連れて溶融金属の量が増すことでフィルターの開口率が小さくなるためと考えられる。

圧力勾配と見かけの流速との間に比例関係が認められたので、(2)式からこの比率に空気の粘性を掛けて通気度を計算し、

図13に整理した。若干のばらつきはあるが、レーザー光熱密度とベントフィルターの通気度の間に一意的な関係が認められた。これにより、金属粉末積層成形法による製作条件を制御することでベントフィルターの通気度を設計する手法について前項で示すと通りの知見が裏付けられた。

4.3 ベントフィルターを用いた鋳造実験

金属粉末積層成形法で製作したベントフィルターを用いて金型減圧時の適正な負圧を設定して鋳造した場合の、湯流れ性への影響を検証する実験を行った。

はじめに、実験に使用するベントフィルターを製作した。試験用金型の圧力流路のキャピティ容積は約4,600mm³である。ベントフィルターの設置条件からフィルターの断面積を50mm²、長さを10mm程度にする必要があったので、約75kPaの圧力損失を生じさせる圧力勾配は7.5kPa/mmとなる。

減圧鋳造時の鋳込み時間を $t = 0.2s$ 、フィルターの開口率を $\epsilon = 0.3$ とすると、減圧鋳込み時にフィルターを通過する見かけの流速は約 $u = 1,500mm/s$ と計算される。(2)式にこれらの値を代入すると、製作すべきベントフィルターの通気度は $k = 3.7\mu m^2$ となる。これまでの実験結果¹⁰⁾から、この条件に合うベントフィルターの製作条件を、レーザー光照射間隔 $e = 0.2mm$ 、同走査速度 $v = 1,100mm/s$ (レーザー光熱密度 $q = 0.73J/mm^2$ と設定してベントフィルターを製作した。

ベントフィルターを使用した減圧鋳造試験の結果を図14に示す。肉厚の最も厚いD30試料では減圧の有無による顕著な差異は見られなかったが、薄肉のD20試料、D25試料では、通常の重力鋳造に比較して減圧鋳造の給湯距離が長くなる結果を得た。また、減圧鋳造で負圧吸引力による溶湯の乱れも認められなかった。以上の実験結果より、ベントフィルターを使用して適切な負圧で減圧鋳造することで鋳造性が改善することが確かめられた。

なお、今回の減圧鋳造実験の結果、減圧の効果が及ばない

試料・試験条件	通常重力鋳造 (減圧なし)	減圧鋳造 (負圧目標:-25kPa)
D20 試料 (d = 1.8 mm)		
D25 試料 (d = 2.4 mm)		
D30 試料 (d = 3.2mm)		

図14 ベントフィルターを使用した減圧鋳造による湯流れ改善効果

ことを想定していた閉塞流路の湯流れ性の改善も認められた。このことについては、3.1項でも考察した通り、この実験で用いた試験金型の構造上、減圧による圧力が金型接触面の隙間を通じて作用したと考えられる。減圧の有無に伴う定性的な効果の検証だけではなく、さらに厳密な減圧条件と铸造性との関係を調べるための実験を行う場合には、これを参考に実験方法を検討しなければならない。

5. まとめ

アルミ合金鋳物の金型自動鋳造装置の開発に関連し、鋳物の薄肉化に対応する鋳造性改善を目的に金型内キャビティを減圧する減圧鋳造法の効果を検証する実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 金型内の減圧により溶湯に吸引力が働き、湯流れに変化を及ぼすことを確認した。また、減圧による溶湯流速の変化に伴い、溶湯への攪拌効果により金属組織にも影響を及ぼすことがわかった。
- (2) 減圧鋳造において過度に負圧を大きくすると、溶湯流の乱れや湯口付近での熱伝達の変化で逆に湯流れが悪化するなどの不具合が生じたので、減圧時の負圧を変化させて鋳造実験を行った結果、湯流れ性を改善するのに適切な圧力条件があることがわかった。具体的には、本実験で用いた鋳物の肉厚約2mm、溶湯温度700℃、金型予熱温度200℃の鋳造条件で金型内キャビティ容積が5,000mm³程度の場合、鋳造時の金型キャビティの負圧を-25kPa程度にすることで良好な鋳造性改善効果が得られることがわかった。
- (3) 減圧鋳造における適切な負圧を調整するため、金属製ベントフィルターを用いる方法を検討し、金属粉末積層成形法によるベントフィルターの設計・製作法に関する知見を得た。

参考文献

- 1) 菅野友信, 榎原寅蔵;「ダイカスト技術入門」, 日刊工業新聞社, 271PP., (1997)
- 2) 戸羽篤也 ほか;「薄肉・高強度・高靱性アルミニウム合金鋳物製造のための多機能グラビティー複合金型鋳造システムの研究開発」, 平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業(第3次補正予算)研究開発成果等報告書, pp.10-22, (2013)
- 3) 桃野 正, 田湯善章 ほか;「薄肉・高強度・高靱性アルミニウム合金鋳物製造のための多機能グラビティー複合金型鋳造システムの研究開発」, 平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業(第3次補正予算)研究開発成果等報告書, pp.23-38, (2013)
- 4) 新山英輔;「金属の凝固を知る」, 丸善, 108PP., (1998)

- 5) 新山英輔;「鋳造伝熱工学」, アグネ技術センター, 229PP., (2001).
- 6) 桃野 正, 伊藤能暢, 尾崎正樹, 片山 博;「アルミニウム合金の振動凝固と溶湯ろ過による微細等軸鋳塊の溶製」日本鋳物協会第133回全国後援大会講演概要集, 78 (1998.10).
- 7) 戸羽篤也, 平野繁樹, 稲野浩行;「金属粉末RP成形による多孔質ベントの通気特性」, 日本鋳造工学会第160回全国講演大会概要集 (2012.5).
- 8) 可児 明, 長田晴裕, 片山彰治, 平林 弘;「SiC多孔質体の通気性と機械的強度」, 日本セラミックス協会学術論文誌99 [1] pp.63-67, (1991)
- 9) 戸羽篤也, 安田星季, 三戸正道, 平野繁樹, 稲野浩行;「金属粉末光造形複合加工プロセスと成形体の機械的性質」, 日本鋳造工学会北海道支部平成24年度研究発表概要集 (2012.4).
- 10) 佐藤友哉, 宮本健輔, 見山克己, 吉田 脇, 戸羽篤也;「金属粉末成形による多孔質金属製作技術に関する研究」, 北海道工業大学平成24年度卒業研究論文 (2013.2).

研究ノート

Research Note

作業機械におけるモータ制御の最適化技術

新井 浩成, 浦池 隆文

Optimization Technics of Motor Control in Work Machine

Hironari ARAI, Takafumi URAIKE

キーワード：誘導モータ，インバータ，IGBT，PWM，定トルク制御

1. はじめに

地球温暖化対策としての二酸化炭素排出削減，化石燃料の需給逼迫，内燃機関に対する効率や応答性などの優位性を背景に各種機械装置の動力源を内燃機関からモータへ移行する電動化の動きが進んでいる。ハイブリッド自動車は身近なものとなり，一次産業分野においても電動トラクタの商品化を表明した大手農業機械メーカーも現れている。

モータは，使用する電源によってDC（直流）モータとAC（交流）モータに分けられる。制御性という面では電圧と電流によって回転数が制御可能なDCモータが優位である。しかし，回転子に流れる電流を一方方向にするため，整流子を切り替えるブラシ（接点）が必要となり，電流の断続によるノイズの発生やトルク変動，機械的な摩耗の発生による定期的な保守が必要となる。ACモータでは印加電圧により回転磁界を作り出す必要があることから，商用電源周波数の50Hzや60Hzに基づく一定回転となるものが大半であった。しかし，近年のマイクロコンピュータや絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（IGBT）に代表される電力制御素子の発達により任意の周波数および電圧の交流を生成可能なインバータとの組み合わせによって可変速制御を行う例が増えている。

本研究ではモータの中で最も多く用いられているAC誘導モータを対象に負荷となる機械が要求する応答性を得るためのインバータ制御技術に関する取り組みを行った。

2. AC誘導モータの原理

AC誘導モータは図1に示す回転子鉄心が筐体部外側の固定子巻線に囲まれる断面構造となっており，固定子巻線（コイル）に三相交流を印加し，回転磁界を発生させる。回転子

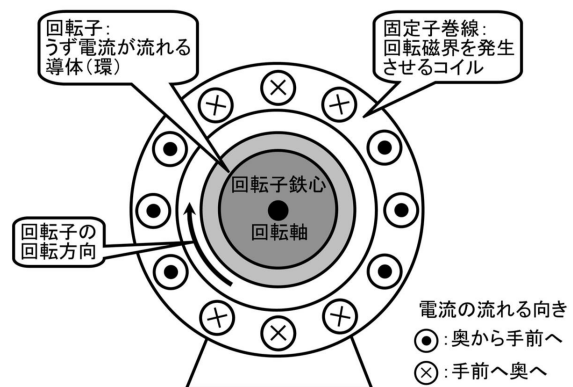


図1 モーターの断面構造

の構造例として，かご形回転子を図2に示す。回転子は回転磁界からの誘導現象によって発生するうず電流との間に作用するフレミング左手の法則に基づく力（トルク）を利用して回転する。

なお，かご形回転子はうず電流を大きくし，電流通路を整えるためスリットを設けたケイ素鋼板を積層した回転子鉄心とかご形胴体を組み合わせた構造となっている¹⁾。なお，これらの形状や構造は各社によって異なる。

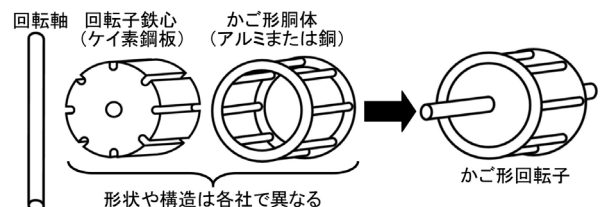


図2 かご形回転子の構造例

2.1 運転特性

AC誘導モータに一定周波数・電圧を加えたときの始動から加速段階を経て一定速に至るすべり，トルク，電流は図3

事業名：経常研究
課題名：作業機械におけるモータ制御の最適化に関する研究

のような変化をする。すべりSは回転子の回転速度n(rpm)が同期速度ns(rpm)からの相違割合であり、

$$S = \frac{ns - n}{ns} \dots\dots\dots (1)$$

と表され、概ね同期速度より数%程度遅い回転数が定格回転数となっている。

同期速度ns(rpm)は誘導モータに印加する三相交流周波数f(Hz)、モータの極数Pより、

$$ns = \frac{120f}{P} \dots\dots\dots (2)$$

で表される。

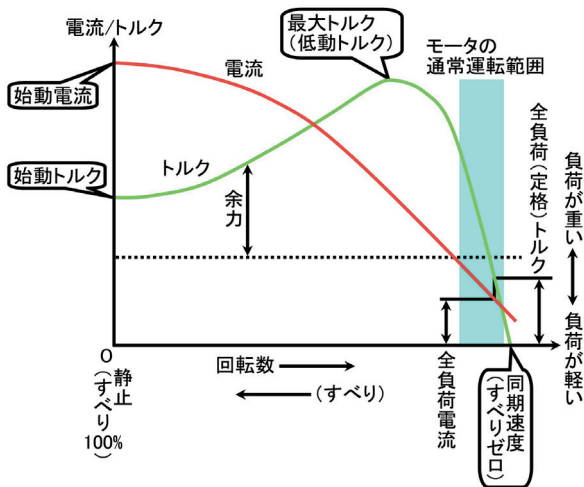


図3 誘導モータの運転特性²⁾

これまで誘導モータは商用電源周波数で用いられ、始動トルクは定格トルクの2~3倍程度であり、加速時に最大トルクを上回らない範囲内で通常運転領域まで移行する必要があった。また、通常運転範囲で軽負荷であっても商用電源周波数で始動が困難なため、負荷が要求する以上に大きな減速比のギア機構を選定せざるを得ない事例も多かった。

2.2 可変電圧可変周波数制御

インバータを用いた任意の周波数および電圧の交流生成とモータの特性に合わせて周波数・電圧を制御する可変電圧可変周波数制御は、①可変速(加減速)の実現、②始動電流(突入電流)の減少、③短時間使用定格活用によるモータの小型化、④電力消費効率の向上、⑤減速機構の簡素化などが可能となるため、ハイブリッド自動車や家電製品など幅広い分野に用いられている。

モータ固定子巻線コイルのインピーダンスZ(Ω)は、

$$Z = j\omega L \dots\dots\dots (3)$$

で表される。jは複素数で虚数、ωは交流の角周波数2πfでf

は印加電圧の周波数(Hz)、Lはコイルのインダクタンス(H)であり、(3)式からインピーダンスは周波数に比例することがわかる。そのため、固定子巻線コイルに一定電圧を印加すると周波数が低い(直流に近い)程、電流が大きくなるため、周波数に応じて適切な電流を流すために電圧を調整する必要がある。また、図3に示した特性のように一定周波数・電圧で駆動していても負荷の増大による回転数の低下(すべりの増大)と共に電流が大きくなるため、運転状況に応じて一定周波数であっても電圧の調整が必要となる。そのため、一般的な可変電圧周波数制御では、電圧は周波数に比例して大きくなる図4のような電圧-周波数(V-f)特性が用いられている。

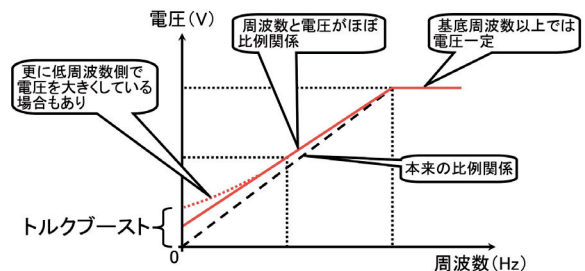


図4 インバータの電圧-周波数特性

3. インバータ制御システムの開発

3.1 電力変換制御回路

インバータは図5に示すように直流入力から三相交流出力(U,V,W)の一相当たり2個のスイッチング素子(通称、上下アームと呼ばれる)が3組とこれらスイッチング素子を制御するソフトウェアで構成される。

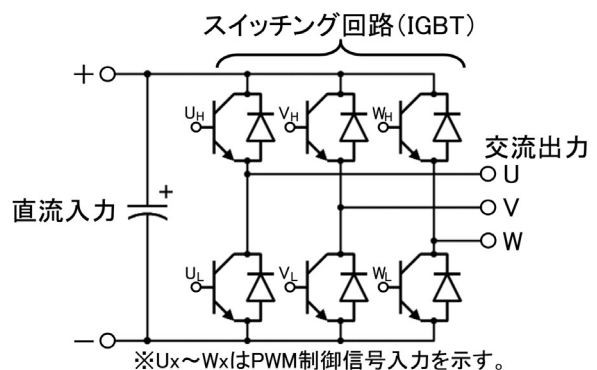


図5 インバータのスイッチング回路

本研究では任意の周波数および電圧の正弦波を生成する方法として、情報を伝達するためのキャリア(搬送波)周波数と呼ばれる一定周期中におけるパルス幅を0~100%の間で変えることで、目的の正弦波を生成するPWM(パルス幅変調)を用いた。

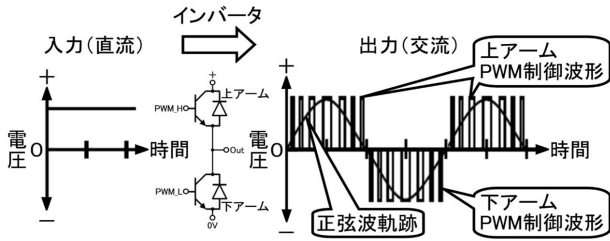


図6 PWMによるインバータ動作概念

図6にPWM動作で正弦波を得るためのインバータ動作概念を示す。本方式では入力となる直流電圧は一定で、パルス幅すなわちPWMキャリア周期に基づく単位時間当たりのON/OFF比率を表すデューティ比の増減によってスイッチング回路に用いられる2個の電力制御素子（IGBT）を制御し出力周波数および電圧を変化させる。上アームを駆動するPWM制御信号は、正弦波の正の最大振幅付近でデューティ比100%、0V付近で50%、負の期間中はゼロとなる。下アームを駆動するPWM制御信号は、正弦波の負の最大振幅付近でデューティ比100%、0V付近で50%、正の期間中はゼロとなり、上アームとは逆の関係になる。さらに、三相交流となるため120°ずつ位相が異なる正弦波を同時に生成する。

3.2 正弦波制御ソフトウェア

PWMの生成は使用しているマイクロコンピュータに内蔵されているマルチファンクションタイマパルスユニットの動作モードの一つである相補PWM機能を使用した。本モードは各カウンタにPWMキャリア周期、上・下アームが同時にONとなり短絡を防ぐためのデッド時間（今回、4μsに設定）、正弦波を生成するための比較データ（三相分）を書き込むことで図5に示した三相分上下アーム電力制御素子の駆動に必要な6出力（U_H、U_L、V_H、V_L、W_H、W_L）が得られる。

表1 正弦波データ更新条件

データ更新角度 (°)	インバータ 出力周波数(Hz)	
	上昇時	下降時
1	1~25	1~22
6	25~333	22~333

正弦波は表1のような条件で2段階のデータ更新角度の切り替えに伴いPWMキャリア周期が変わる。本来、データ更新角度は細かいほど正弦波の精度は上がるが、電力制御素子のスイッチング能力やマルチファンクションタイマパルスユニットのカウンタ分解能（16Bit）などの制約を受ける。データ更新角度が1°の場合はPWMキャリア周波数はインバータ出力周波数の360倍、6度では60倍となる。データ更新角度毎に割込が入り、出力電圧に応じ予め計算によってスケールされた三相分の正弦波比較データを書き込むことでPWM

のデューティ比が逐次変更される。

AC誘導モータを駆動した際、同じ出力周波数であってもPWMキャリア周波数によって駆動音の違いが観察された。しかし、性能面で大きな差は見られなかった。また、データ更新角度切替は周波数可変の際、境界で頻繁なPWMキャリア周波数更新を防ぐため、周波数の上昇もしくは下降に応じて3Hzの緩衝帯を設けている。図7にモータ駆動時のインバータ出力の一例を示す。電圧波形はPWM制御によるキャリア周波数の残留が見られるが、電流波形は乱れがごく小さい正弦波になっていることから意図通り制御されていることを示している。



図7 モータ駆動時のインバータ出力例

3.3 試験装置の検討

商用電源の三相交流200Vからインバータによって生成される任意の周波数および電圧の三相交流をAC誘導モータに印加することでモータは回転する。ただし、制御などの評価を行うためにはモータに負荷を与え、トルクを発生させる機械的な機構部が必要となる。

3.3.1 試験装置の構成

インバータ制御システムは図8に示すような構成で、マイクロコンピュータはSH2/7045F（ルネサスエレクトロニクス(株)製の動作周波数28.7MHzが、これまで説明した正弦波を生成するためのPWMパルス制御、さらに2種類の加減速パターン、加減速時間などの制御に加え、トルクの計測やモータ回転数の把握、動作状況などを表示する液晶および各種設定を入力するキーボードも含めたシステム全体の制御を一括して行っている。

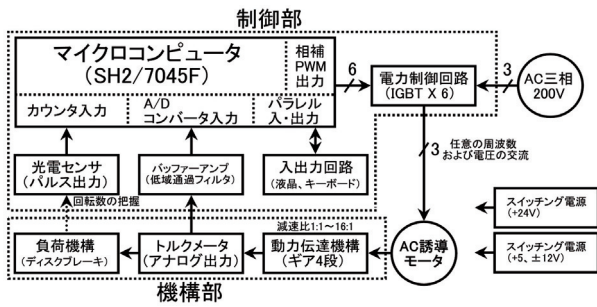


図8 インバータ制御システムの構成

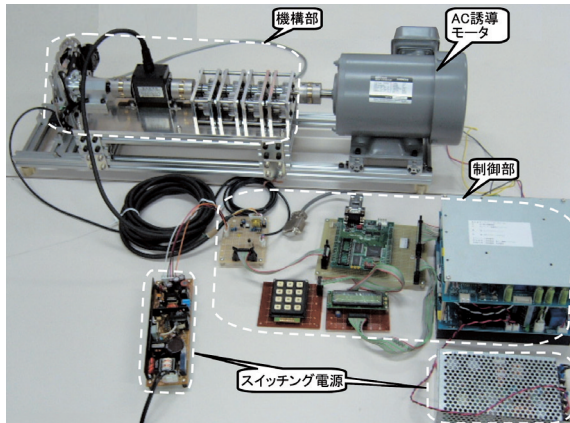


図9 インバータ制御システムの全景

図9にシステムの全景を、表2に主な仕様を示す。今回評価に使用したAC誘導モータは0.4kW、4極仕様（TFO-FK、㈱日立産機システム製）である。電力制御回路はインバータ用評価機材MWINV1R022（Mywayプラス㈱製）、出力1kVAを使用している。

表2 インバータ制御システムの主な仕様

項目	仕様	備考
出力周波数(Hz)	1~333	
出力電圧(%)	1~100	
最大出力(kVA)	1(200V)	※使用した電力制御回路に依存
可減速パターン	比例/二乗	
可減速時間(s)	1~100	
最大トルク(N・m)	10	※使用したトルクメータに依存
動力伝達機構	ギア4段	※最大16:1(5段階の切替)

3.3.2 動力伝達機構

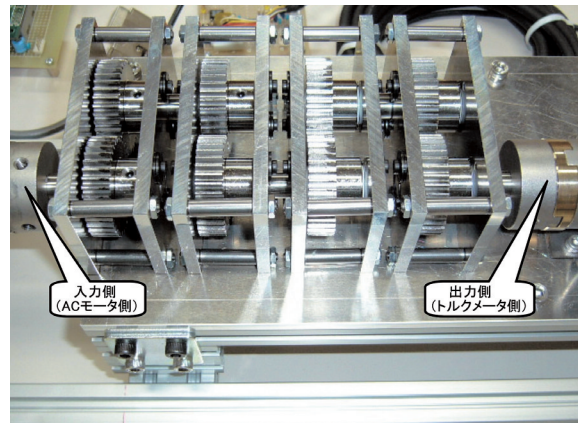


図10 4段のギア機構

負荷に対するモータのトルク不足を補う動力伝達は、図10のような4段のギア機構とした。各段には1:1もしくは2:1のギアを組み込むことで、最小1:1から最大16:1まで5段階の減速比を選択可能とした。

3.3.3 負荷機構

モータに負荷を与える機構として、図11に示すような自転車用のディスクブレーキを用いた。機械式のディスクブレーキで、ブレーキキャリパ内にブレーキロータを挟んでブレーキパッド（摩擦体）が対向している。ワイヤを引っ張るとキャリパ内の片側に内蔵されたピストンが押し出され（片押し式）、対向するブレーキパッドとの間でロータを挟み込み摩擦力が発生する。

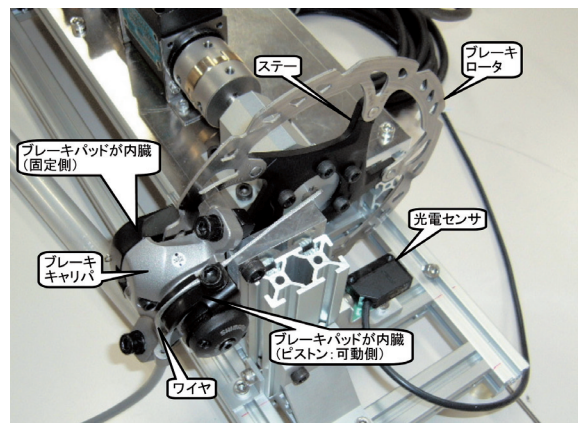


図11 負荷機構を構成するディスクブレーキ

ブレーキロータを支えるステータが5本あり、光電センサを用い、ステータからの反射の有無をカウンタへ入力し、一定時間毎のパルス数から毎分当たりの回転数を計算している。

本機構は簡便で一過性のデータを収集するには適していたが、一定の負荷を長い時間与えようとすると負荷の立ち上が

りが急であることやブレーキパッドがブレーキディスクと接触したまま引きずることによる負荷変化の難しさが課題となった。

動力伝達機構と負荷機構の間に図12に示すような最大10N・mのトルク計測可能なトルクメータを挿入した。トルクはアナログ出力で得られ、ノイズが重畳しているため、低域通過フィルタを用いてノイズを除去し、A/Dコンバータの最大入力電圧5Vに適合するように電圧を補正後、マイクロコンピュータに内蔵されている分解能10BitのA/Dコンバータへ入力している。得られたデータは、回転数や周波数、出力電圧などと共に、マイクロコンピュータのシリアル出力 (RS-232C) から出力される。

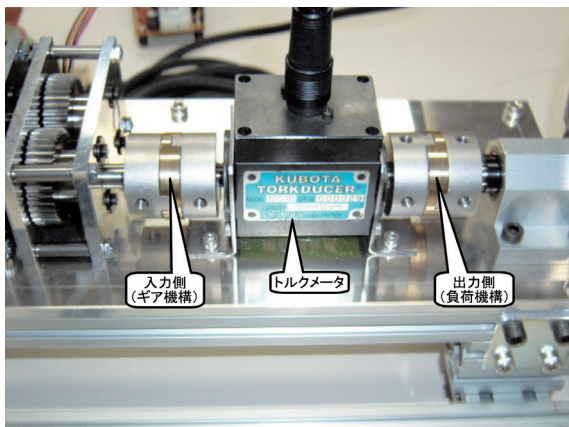


図12 トルクメータ

3.4 性能および特性

3.4.1 定格条件の評価

インバータ制御システムを用い、初めにモータ定格条件における特性評価を行った。AC誘導モータは三相電源電圧220V (最大)、極数4、出力0.4kWであり、周波数50Hzで1,410rpm、周波数60Hzで1,690rpmのすべりを含む回転数が明記されている。その他仕様に関する記述は取扱説明書やホームページを含め一切明確にされておらず、あくまでも上記条件での使用が前提となっている。そこでモータの出力P (W)、回転速度 ω (rad/s) よりトルクT (N・m) を求めると、

$$T = \frac{P}{\omega} \dots\dots\dots (4)$$

と表される。モータの回転数Nはrpmであるため、 ω は $2 \times \pi \times N / 60$ となる。したがって(4)式は、

$$T = \frac{P \times 60}{2\pi \times N} \dots\dots\dots (5)$$

と最終的に表される。

出力400Wとすると(5)式より、周波数50Hzの回転数1,410rpmでは2.71N・m、周波数60Hzの回転数1,690rpmでは2.26N・mと約3N・m弱のトルクとなる。

図4に示したようなインバータの電圧-周波数特性による

定トルク制御を行った結果、図13のようなトルク特性が得られた。横軸は回転数、縦軸はトルクを表し、(2)式に基づき回転数はモータを駆動する周波数に応じて比例する。無負荷ではトルクはほぼゼロ、すべりもゼロであり同期速度となる。負荷を掛けることで回転数が低下し、すべりが大きくなることでトルクを得ている。本来の使用周波数である50Hzおよび60Hzでは(5)式を基に計算した値に近い定格トルクが得られている。また、周波数30Hz以上の領域で定格トルクにはほぼ等しい3N・mの始動トルクが得られていることからインバータの定トルク制御によって周波数30Hzから60Hzまで使用可能であり、また70Hz以上の周波数では始動トルクの減少は見られるが、モータ自身の機械的な摩擦などを考慮すると一時的な使用が妥当であることがわかった。

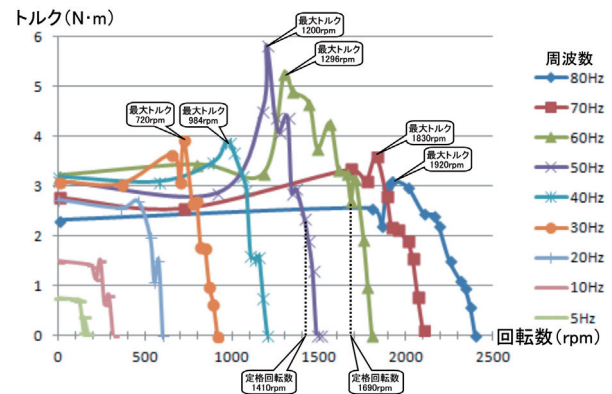


図13 AC200V定格条件における定トルク制御特性

3.4.2 電圧特性の評価

インバータ制御では電圧によって回転数を低下させずにトルクを制御することが可能である。そこで周波数を一定とした時に電圧を変化させた場合のトルク特性を計測した。図14に周波数60Hzで一定とし、電圧を定格200Vから可変した場合のトルク特性を示す (データにバラつきがあるため、直線近似を付記した)。電圧60V以上の無負荷時には(2)式に基づく1,800rpmの同期速度となっている。しかし、それ以下の電圧ではモータ自身の機械的損失 (摩擦など) により、すべりによる回転数の低下が見られ、モータの正常動作範囲外となる。また、電圧60V以上100V以下の範囲では1N・m以下のトルクしか得られず、実質的に使用することは出来ない。

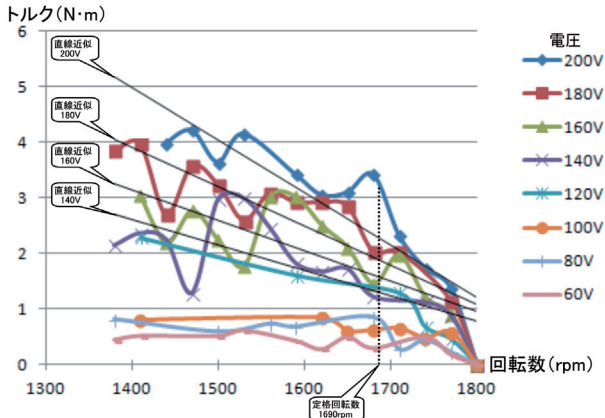


図14 電圧によるトルク特性

定格電圧である200Vから電圧を低下して行くにしたがって、回転磁界の磁束減少に伴うトルク変動が増大する傾向や最大トルクが得られる回転数を下回るとモータが停止しやすくなる傾向が見られたが、電圧120V以上、回転数1,400rpm以上の領域で出力制御可能である。なお、ここには示さないが周波数50Hzでもほぼ同様な傾向が得られた。

3.4.3 負荷変動による評価

実際の使用状況では、負荷の変動が考えられ、それに応じて回転数を一定とする制御が必要である。本研究では、回転数を基にした図15のようなフィードバック制御を適用した。図13で示された定トルク制御特性のように、無負荷の同期速度から最大トルクが得られるまでの回転数がAC誘導モータの使用範囲内とされる。さらに負荷が大きく回転数が低下する（すべりが大きくなる）とトルクが低下し、モータが停止しやすくなる不安定領域に入る。

そこで、定格周波数での使用を前提とし、最大トルクが得られる回転数まで低下していなければ、回転数の偏差に応じてモータ駆動周波数に偏差分に応じて加・減算し、回転数の上昇・下降制御を行い、また、最大トルクが得られる回転数を下回る場合は制御不能と判断し、定格回転周波数へモータ駆動周波数を戻している。

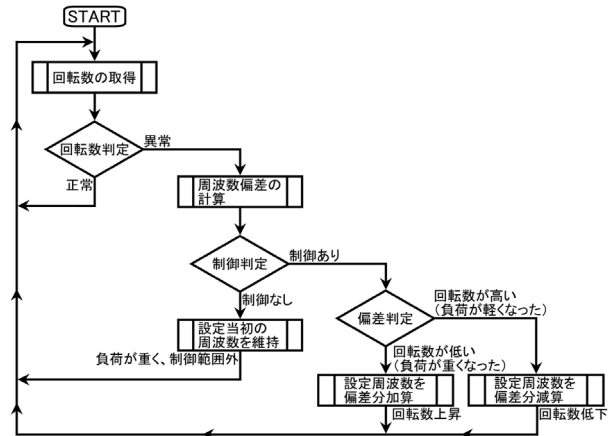


図15 回転数フィードバックに基づく負荷変動制御フロー

フィードバック制御の効果を調べるため、モータに負荷変動を与えたときの停止時間を計測した。図16に示す1.44kgの重りをブレーキ荷重とし、モータに負荷を掛け、さらに160gの重りを追加して負荷変動を与えた。その結果を表3と図17に示す。図17は最初の負荷が安定している状態の2秒後に負荷変動を与えた場合の回転数の時間変化である。



図16 重りの重量測定 (左) と負荷変動測定風景 (右)

表3 制御の有無停止までの時間

	停止までの時間(s)	
	制御なし	制御あり
1回目	3	18
2回目	4	20
3回目	5	16
4回目	4	17
5回目	6	18
平均	4.4	17.8

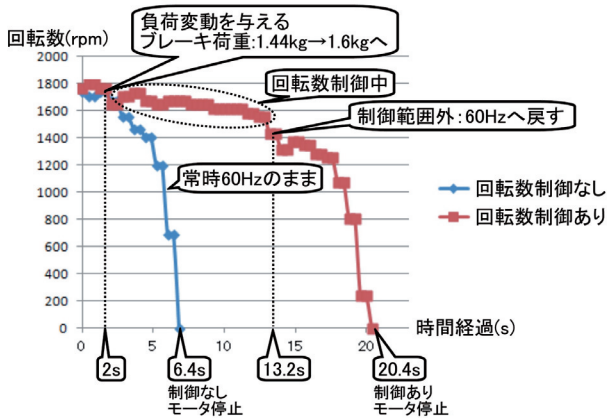


図17 負荷変動による回転数変化の一例

制御の有無によってモータが停止するまでの時間に約4倍の差が現れ、回転数の偏差に基づくモータ駆動周波数フィードバック負荷変動制御による優位性が確認された。

4. まとめ

AC誘導モータを対象に、負荷となる機械が要求する応答性を得るための取り組みとしてインバータ制御システムを構築し、以下の結果が得られた。

- ①今回使用したAC誘導モータではインバータと組み合わせ、定トルク制御を行うことで周波数30Hz以上の領域で可変速制御が可能であり、使用周波数を拡大可能であることを確認した。また、定格周波数において電圧は120V以上、回転数は1,400rpm以上の範囲でトルク制御が可能であることを確認したが、最大トルクを発生する回転数を下回るような駆動条件ではモータが停止しやすくなるため、負荷が必要とするトルクを十分に確認する必要がある。
- ②AC誘導モータの定格周波数50Hzおよび60Hzでは定格トルクの約2倍となる約6N・m弱の最大トルクが得られており、最大トルクが得られる回転数1,300rpm以上の運転条件であれば、一時的に大きなトルクを必要とする加減速や負荷変動に対応可能であることを確認した。
- ③負荷変動に対する可変速制御の取り組みを行った結果、モータが停止するまでの時間が約4倍に伸び、回転数の偏差に基づく負荷変動制御の有効性が確認された。

以上のように、インバータ制御の有効性を確認したが、①～③の項目では、AC誘導モータの定格使用条件から逸脱した運転条件も含まれているため、発熱に対する冷却に十分な注意を払った上で使用する必要がある。

本研究を通じて蓄積した電力制御技術および機械設計・評価技術は当場の基盤技術として、道内の中小企業に対する技術支援へ活用して行く予定である。

引用文献

- 1) 小型インダクションモータとその応用, 横河技報, Vol.45 No.2, pp.87-90, (2001)
- 2) 誘導電動機の基礎, 資料番号:HG-002A-0911 (2009年12月1日), 株式会社明電舎

車載型路面凍結検知技術の開発

宮崎 俊之, 大崎 恵一

Development of Road Ice Detection Technology for Automobiles

Toshiyuki MIYAZAKI, Keiichi OHSAKI

抄 録

路面凍結検知装置の車載化は、車の運転の安全性向上や積雪地における冬期間の効率的な道路管理のために重要となる技術である。本研究では路面凍結検知装置の車載化に必要な小型化、高速応答性、耐環境性を考慮した凍結検知技術の開発の可能性について検討・評価した。

キーワード：凍結検知装置、電磁波応用、センシング、マイクロ波

1. はじめに

北海道は1年の約3分の1が雪に覆われる積雪寒冷地であるが、都市間距離が長く鉄道輸送等の公共交通手段が少ないため、冬期においても道路交通への依存度が高く、例年冬期には凍結路面上でのスリップに起因する自動車事故が多発している。冬期の自動車事故を減らすためには、路面の凍結状態をドライバへ情報提供する事が有効であることから、車載型の路面凍結検知装置の開発が望まれている(図1)。

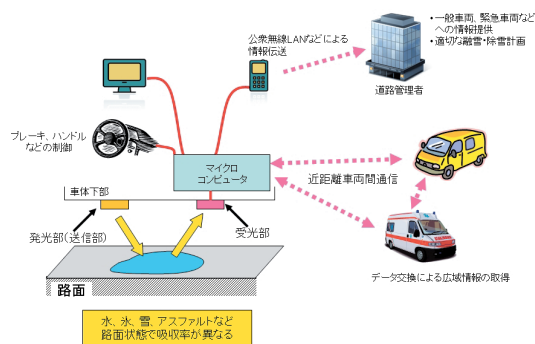


図1 車載型路面凍結検知装置とその活用(概念図)

工業試験場では従来から赤外光を用いた据置型路面凍結検知装置を開発、商品化を行ってきた¹⁾(図2)。この装置は高感度赤外線カメラを搭載し、電柱等の高所に設置することで広い面積における凍結、積雪状況を把握できるなど高い性

事業名：経常研究
課題名：車載型路面凍結検知技術の開発



図2 従来の据置型路面凍結検知装置

能を有していたが、装置形状が大きく高コストであり、車載化には不向きであった。本研究では据置型で得た知見を基に、近赤外線方式、電磁波方式の2つの方式で車載化に必要な技術開発を行った。

2. 近赤外線方式

2.1 システム検討

近赤外線方式は据置型での開発実績があるが、車載化にあたっては、以下の課題があった。

- (1) 面検出を行うために撮像素子を用いる必要があり、カメラやレンズが赤外線対応のため高価かつ大型であること
- (2) 光学フィルタの機械的な切替を行っているため、測定時間が長いこと
- (3) 太陽光の影響を排除するための照度センサ機構が必要なこと

そのため、車載化を検討するにあたっては、上記の問題を解決するため、以下の仕様とした。

- (1) 車載センサは「一点検出型」とし、レンズ光学系を使用せず、受光素子単体での受光とした
- (2) 各々異なる透過波長帯を持つフィルタを取り付けた光電センサを2個使用することでフィルタ切替機構を排除した
- (3) 外光の影響が少ない車体下部への搭載を想定し、照度センサを省略した

この仕様に基づき作製した計測系概念図を図3に示す。

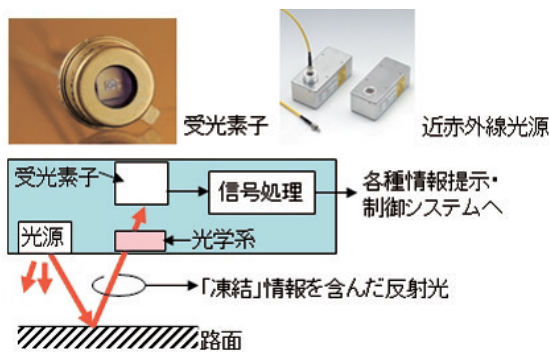


図3 近赤外線方式システム概念図

2.2 試験結果

使用する受光素子を決定するために、近赤外領域における反射特性を計測した(図4)。1400~1500nmで大きな反射率の変化があり、この波長帯を用いることで水、氷、雪が分離可能であることがわかった。

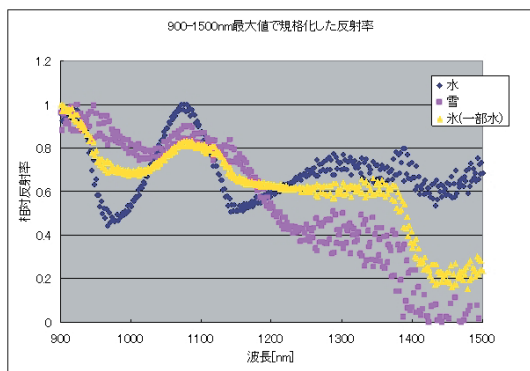


図4 規格化反射率(標準反射板=100%)

このデータに基づき、InGaAs素子を用いた計測系を構築し、試験を行った。InGaAs素子は900~1900nmに感度を持ち、高い応答性を有するなど、車載用デバイスとして優れた特徴を持っている。InGaAs素子前面に取り付ける狭帯域フィルタとして、路面状態による反射率差が小さい波長帯(波長

帯I)と反射率差が大きい波長帯(波長帯II)を用意した。それぞれのInGaAs素子の出力比(反射率比)と路面状態の関係を見たのが図5である。適切な閾値を設定することで、雪、氷、水を分離検出可能なことがわかった。

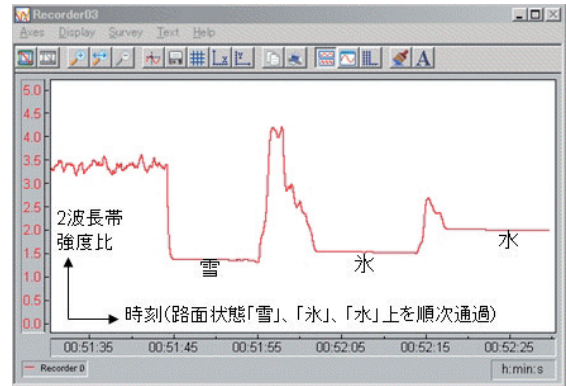


図5 各種路面状態における反射率比

3. 電磁波方式

近赤外線方式が持つ雪の巻き上げによる使用環境の制約や、汚れ等による性能劣化の問題を克服するため、光学を用いない計測手法として電磁波(マイクロ波)を用いたセンシング方式についても可能性検討を行った。

3.1 仕様検討

水の各種状態を検出するには、水分子との相互作用が大きい周波数帯を使用する必要がある。本研究では水分子の誘電緩和が強く現れるSバンド(2.3~3.3GHz)帯を用いた。道路面の鉛直方向にアンテナを配置し、ネットワークアナライザ(アジレントテクノロジー製E8362C)を用いて反射率を測定するシステムを構築した(図6)。

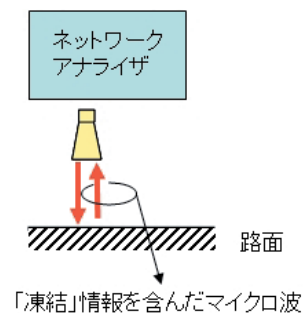


図6 マイクロ波路面凍結システム概念図

3.2 計測試験

電波を用いた試験を行う際には、電波法に基づき外部機器や通信への干渉を排除する必要がある。本研究では小型電波暗室(シールドルーム内)に計測系を構築し、試験を実施した(図7)。

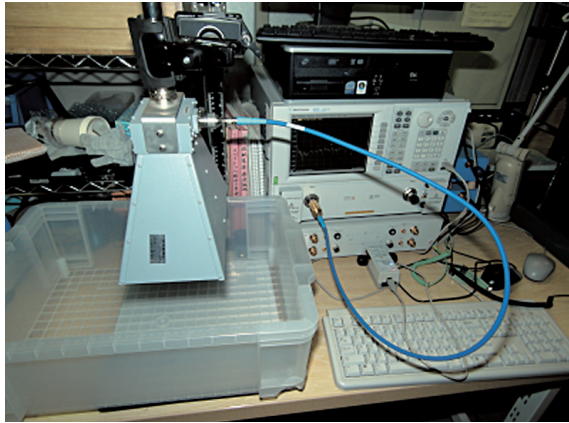


図7 構築した計測系

ネットワークアナライザで取得した、各種路面状態での反射率（ S_{11} ）を図8に示す。アンテナ移動時の強度変化が非常に大きく、また横軸（周波数軸）方向の振動が激しいことから、アンテナ面と路面間で定在波が発生し、測定値に影響していることが確認できた。

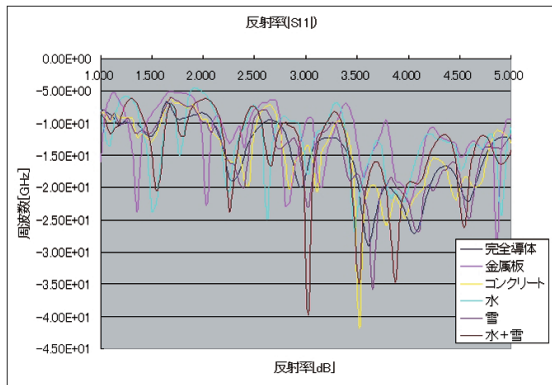


図8 垂直方向での反射波強度

3.4 計測系の改良

路面と垂直方向においた一つのアンテナのみの測定では、定在波が発生し測定値に影響をおよぼす。この影響を排除するため図9に示す様に斜め方向においた二つのアンテナを用いた構成へ計測系を改良した。これにより安定した反射特性を得ることが可能となった。

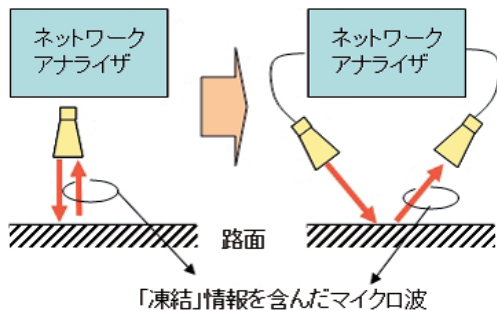


図9 改良した計測系

改良した計測系で取得した、マイクロ波帯反射率特性の一例を図10に示す。Sバンド帯において、乾燥路面（コンクリート）と雪、氷状態で反射率に差異があることがわかる。この反射率特性と路面状態の関係を二つの周波数帯で見たのが図11である。路面状態により変化の大きい周波数帯、小さい周波数帯が存在することがわかり、2周波数法による分離検出の可能性が示された。

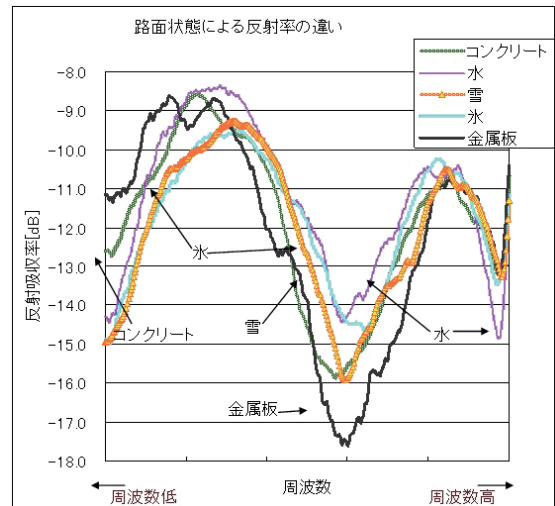


図10 マイクロ波反射率特性

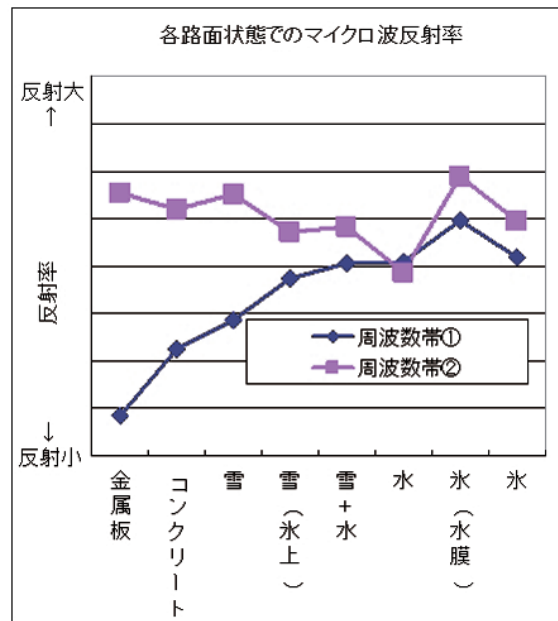


図11 路面状態とマイクロ波反射率

4. まとめ

本研究では、車載型路面凍結検知装置開発に必要となる基礎技術について検討した。近赤外線方式については小型化、低価格化が可能であることがわかった。一方、電磁波方式ではネットワークアナライザを用いたマイクロ波反射率計測により、水、氷、雪が分離検知できる可能性を見いだした。

車載型装置の実用化を目的とした場合、メンテナンス性や耐環境性において電磁波方式は近赤外線方式よりも有利であり、本研究で可能性を見いだせたことから、今後は計測精度の向上や信号処理技術の開発、得られた路面凍結情報の活用方法の検討など、実用化に向けた継続的な取り組みを行う予定である。

謝辞

本研究では平成20年度地域イノベーション創出共同体形成事業研究開発環境支援事業で導入したミリ波ネットワークアナライザシステムを使用しました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 波通隆・本間稔規・宮崎俊之・他：赤外光を利用した路面凍結検知装置の開発，北海道立工業試験場報告，No. 300，pp.111-118，(2001)

発話困難者のためのリアルタイム音声生成アプリケーションの開発

橋場 参生, 高瀬 雅由*, 須貝 保徳*, 藪 謙一郎**, 伊福部 達***

Development of Real-time Speech Synthesis Application Software for Speech Disorders

Mitsuo HASHIBA, Masayoshi TAKASE*, Yasunori SUGAI*
Kenichirou YABU**, Tohru IFUKUBE***

キーワード：音声，発話障害，構音，ホルマント，音声合成，福祉機器

1. はじめに

我々が普段何気なく使用している音声は、主に、肺からの「呼気の送付」、喉頭での「原音生成」、そして、口唇や舌を動かして原音に変化を加える「構音」という一連の過程を経て作り出されている。従って、舌・唇・顎などに欠損や変形が生じてしまった場合や、筋肉や神経系の疾患などで、これらの動きに制約が生じてしまった場合には、音声の生成に必要な「構音」機能に障害が生じ、発話が困難になる。

筆者らはこれまで、喉頭癌などで生じた「原音生成」の障害を支援するための福祉機器『電気式人工喉頭』の製品化に取り組んできたが^{1,2)}、この度、「構音」の障害により発話が困難な方々も支援するために、新たな音声生成技術の研究開発を実施した。本技術は、二次元平面上で指示した座標の軌跡を基にしてリアルタイムに音声を生成する技術で、キーボード等による文字入力が必要とせず、発話内容にも制限が生じないという特長がある。

以下、本報では、まず、発話の仕組みと構音の役割について説明し、続いて、開発した音声生成術の原理と概要について述べる。さらに、本研究の成果を基にして、一般ユーザも利用可能な形で商品化したスマートフォン向けアプリケーションソフトウェアについて報告する。

2. 発話の仕組み

2.1 発話器官

音声の生成に関わる発話器官を図1に示す。音声は主として、肺から喉頭への「呼気の送付」、喉頭内の声帯が呼気で振動して起こる「原音生成」、舌・唇・顎などの動きによって原音に変化が加えられて音声言語となる「構音」という三つの過程を経て生成されており、何れの過程に障害が生じて、音声によるコミュニケーションが困難になる。発話障害を引き起こす原因としては、舌・唇・顎などの欠損や変形の他、脳血管障害、筋ジストロフィ、筋萎縮性側索硬化症(ALS)などで生じる神経系や筋肉系の疾患、また、喉頭癌による喉頭の摘出などがある。

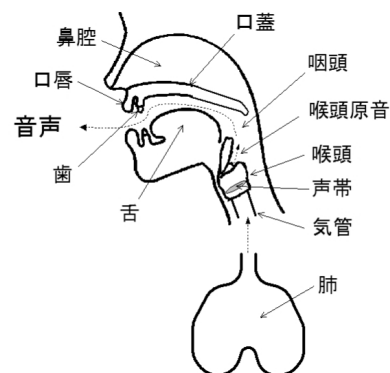


図1 発話器官

2.2 構音とホルマント

音声は、母音と子音によって構成されており、このうち母音は構音運動によって生じる複数の共鳴周波数によって特徴づけられている。この共鳴周波数は、周波数の低い方から第1ホルマント(F1)、第2ホルマント(F2)と呼ばれており、

* 株式会社 電制

** 東京大学 先端科学技術研究センター

*** 東京大学 高齢社会総合研究機構

事業名：重点研究

課題名：人間親和型ICTシステム開発のためのインタラクティブ
インタフェース技術に関する研究

F1とF2を両軸に取って、日本語5母音との対応をグラフ化すると図2に示すように5角形の配置が得られる³⁾。そして、図3に示すように、この5角形の配置は、顎の開閉や舌の前後の動きによる母音の構音位置とも密接な関係を持っている。また、子音も同様に、口唇や舌による狭めや閉鎖といった構音運動によって作り出されている。

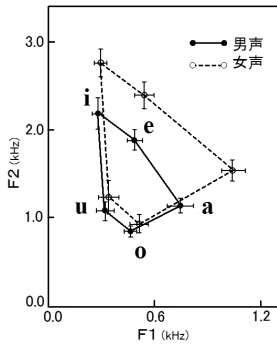


図2 F1-F2平面³⁾

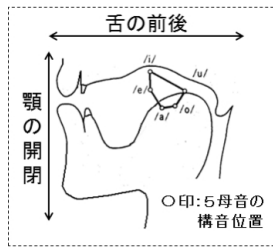


図3 日本語母音の構音位置

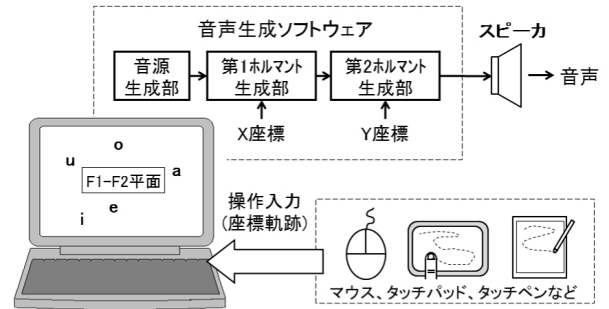


図4 開発した音声生成技術の概要

3. リアルタイム音声生成技術の開発

3.1 発話困難者を支援する既存技術

発話が困難になった場合のコミュニケーション手段としては、筆談の他、文字盤やメッセージカードを利用する方法、手話などがあるが、これらは何れも相手の視覚を通じたコミュニケーションとなり、音声は伴わない。音声によるコミュニケーションを可能にする電子的な支援機器はVOCA (Voice Output Communication Aids) と呼ばれており、大別して、事前に登録されたメッセージのみを再生できる方式と、キーボードから入力した文章を音声合成して読み上げる方式がある。しかし、前者の方式には、発話内容が限定されるという課題があり、後者の方式には、会話のリアルタイム性に制約が生じるという課題がある。

3.2 開発した音声生成技術の概要

開発した音声生成技術の概要を図4に示す。F1-F2平面を操作座標平面に見立て、マウスやタッチパッド等で指示されたX座標から第1ホルマント生成部の共鳴周波数を計算し、Y座標から第2ホルマント生成部の共鳴周波数を計算する。そして、音源生成部で生成された原音に、第1・第2ホルマント生成部で共鳴の特性を加えてスピーカから出力する。図3に示したように、F1-F2平面は、顎の開閉と舌の前後の動きに対応していることから、図4の音声生成技術を用いると、マウス等を動かす方向や速度によって、あたかも顎や舌が動いて生じるような様々な音声の変化を作り出せることになる。なお、図4では省略しているが、子音については、疑似ホワイトノイズを原音として、破裂音や摩擦音などに相当する音を生成する処理を開発している。

3.3 音声の生成

図4の音声生成技術をパーソナルコンピュータ上で動作するソフトウェアとして実装し、タッチパッドを接続して音声の生成試験を行った⁴⁾。まず、画面に表示された/i/, /e/, /a/, /o/, /u/の位置を順に指示し、5母音を離散的に発生させた場合の時間波形と周波数分析結果を図5(a)に示す。また、同図(b)に、成人男性による同様の発声結果を示す。両図の周波数分析結果の比較から、本技術で生成された5母音は、健常者と類似した第1・第2ホルマントを有する音声になっていることがわかる。

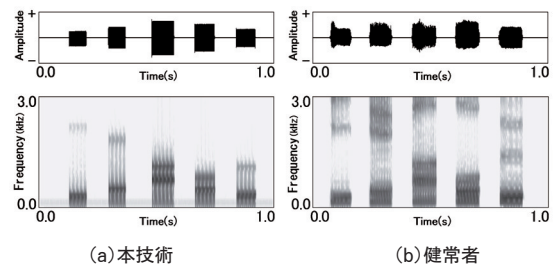


図5 /i/, /e/, /a/, /o/, /u/の離散生成結果

次に、画面に表示された/i/, /e/, /a/, /o/, /u/の位置を、指を離さずに順になぞって行くことによって、5母音を連続的に発生させた場合の時間波形と周波数分析結果を図6(a)に示す。同図(b)に示す健常者の発声結果と比較することにより、母音の特徴である第1・第2ホルマントはもちろんのこと、母音から他の母音へと移行する際のホルマントの連続的な推移(調音結合)も、良好に生成できていることがわかる。

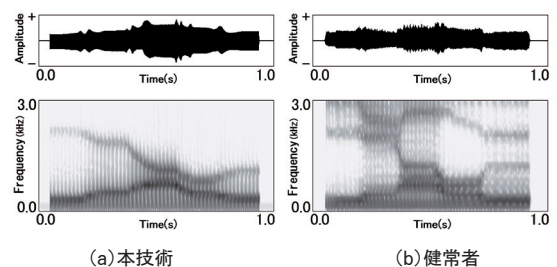


図6 /i/, /e/, /a/, /o/, /u/の連続生成結果

4. スマートフォン向けアプリケーションの開発

研究成果の早期実用化を図るため、図4の音声生成技術を基にして、近年普及が著しいスマートフォンやタブレット端末上で動作する音声生成アプリケーションを開発した。

4.1 概要

スマートフォンやタブレット端末向けに開発したアプリケーションの操作画面を図7に、操作方法を図8に示す。操作画面の中央部には、F1-F2平面に相当する操作エリアがあり、日本語5母音や子音の一部を表すローマ字が配置されている。また、その左側には「カ (ka)」の/k/、「サ (sa)」の/s/などの破裂音や摩擦音を生成するための補助ボタンが配置されている。この操作エリアを、図8のように指先やタッチペンでなぞることにより、様々な音声をリアルタイムに生成することができる。さらに、本アプリケーションは端末の傾斜角度を基にして音声の基本周波数を変化させる機能を備えており、この機能を併用することで「雨」と「鈴」などのイントネーションの違いを表出することもできる。この他、画面上部には後述する設定画面などに移動するためのボタンや、音声の生成にあわせて口や舌が動く横顔のアニメーション画像が表示されており、画面下部には生成中の音声の基本周波数などの情報が表示されるようになっている。

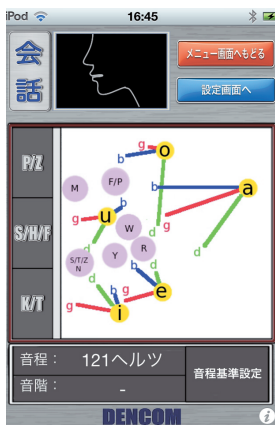


図7 操作画面



図8 操作方法

4.2 発声操作例

図9から図12に基本的な操作例を示す。図9は「アイウエオ」と音声生成する場合の操作軌跡で、画面上の/a/, /i/, /u/, /e/, /o/の記号を連続して順になぞれば良い。図10はマ行を生成するための軌跡で、/M/の記号から/a/, /i/, /u/, /e/, /o/に向けて素早く指を動かすことで「マ・ミ・ム・メ・モ」を生成できる。図11はヤ行を生成するための軌跡で、ヤ行は/i/の口形から/a/, /u/, /o/の口形に変化させて発話することから、画面上でも/i/を起点にして/a/, /u/, /o/の方向へ素早く指を動かすことで「ヤ・ユ・ヨ」

の生成が可能となる。同様に「ワ」は/u/の口形から/a/の口形に変化させて発話することから、/u/の記号から/a/の記号へと素早く指を動かせば良い。図12は「バ・ガ・ダ」に相当する音声を生成するための操作で、これらは、/a/に向かって引かれている3本の導線に沿って指を動かすことで実現できる。

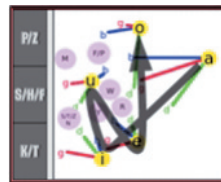


図9 「アイウエオ」

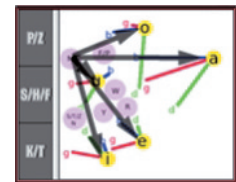


図10 「マ・ミ・ム・メ・モ」

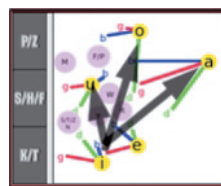


図11 「ヤ・ユ・ヨ」

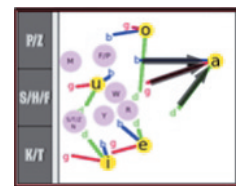


図12 「バ・ガ・ダ」

次に、具体的な言葉を生成するための操作例を図13から図18に示す。図13は「青い海」と出力する場合の操作軌跡で、/a/, /o/, /i/, /u/, /M/, /i/の順に記号をなぞれば良い。図14と図15は、それぞれ「暑い」と「寒い」の操作軌跡で、操作エリア左端の補助ボタンも利用することで「ツ (tu)」の子音/t/に相当する破裂音や「サ (sa)」の子音/s/に相当する摩擦音を含んだ音声を生成できる。図16は「ありがとう」の操作軌跡である。

なお、本技術は、子音の生成に関して必ずしも厳密に操作する必要は無く、例えば、図17のように円を描く操作で「おはよう」と聞こえる音声を、図18のように左右に指を動かす操作で「こんばんは」と聞こえる音声などを生成することができる。このような特徴から、発話内容がある程度推定できるような場面では、F1-F2平面上をなぞる操作だけでも、意思疎通の支援に十分役立つ音声を生成できると考えている。

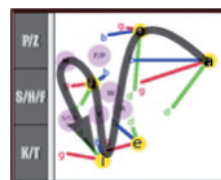


図13 「青い海」

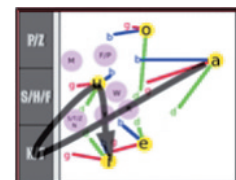


図14 「暑い」

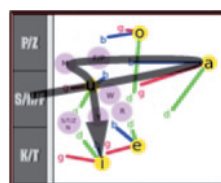


図15 「寒い」

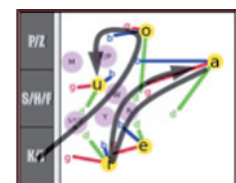


図16 「ありがとう」

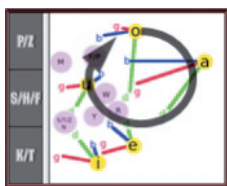


図17 「おはよう」

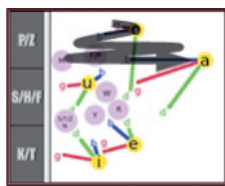


図18 「こんばんは」

4.3 その他の機能

図19はアプリケーションの各種設定を行う画面で、操作エリアの導線の有無や、端末の傾斜で基本周波数を変化させる機能のオン・オフ、男性・女性・合成音などの音源の選択などを行うことができる。また、音源に関しては、図20の録音・分析機能を開発し、録音された音声からユーザ固有の音源を作成することで、ユーザの特徴に近い声質での音声生成もできるようにした。この他、日常会話などの操作の練習サンプル(図21)や、歌詞に沿って画面をなぞると、自動的に音程が付加されて歌を歌える練習サンプル(図22)なども開発した。

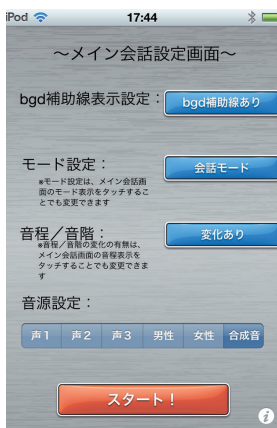


図19 設定画面

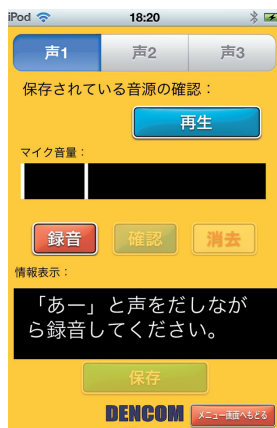


図20 録音分析画面

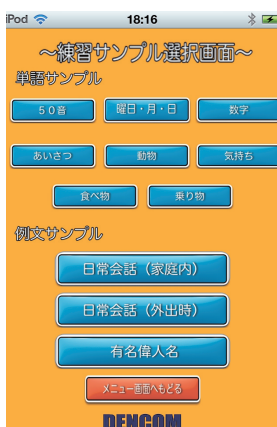


図21 練習サンプル選択画面

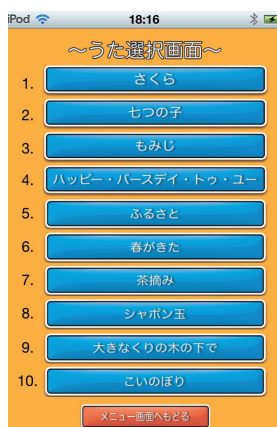


図22 うた選択画面

5. 商品化

開発した音声生成アプリは、iPhoneやiPad、iPodTouch等のiOS端末上で動作するアプリケーションソフトウェア

『ゆびで話そう』として2013年4月15日に商品化された(図23)。現在、アップル社が運営するApp Store(アップストア)より、有料版と無料体験版がダウンロード可能になっている。



図23 音声生成アプリ「ゆびで話そう」(株電制HPより)

6. おわりに

発話困難者の支援を目的に、画面をなぞる指やペンの軌跡からリアルタイムに音声生成する技術の研究開発に取り組み、一般ユーザも利用可能なスマートフォン向けアプリケーションとして商品化した。今後は、子音の生成方法等に関する先行研究^{5,6)}の成果を反映させて一層の音質向上を図ると共に、手指の動きに制約がある発話困難者の支援を可能にするための各種操作インターフェースの開発を進める計画である。

引用文献

- 1) 橋場参生・上見憲弘・及川雅稔・山口悦範・須貝保徳・伊福部達：抑揚制御機能を備えた電気式人工喉頭の製品化と評価，電子情報通信学会論文誌D-II，Vol. J84-D2，No. 6，pp. 1240-1247，(2001)
- 2) 橋場参生：喉頭摘出者の音声コミュニケーションを支援する電気式人工喉頭の製品化と展開，第25回バイオエンジニアリング講演会講演論文集，pp. 31-32，(2013)
- 3) 佐藤大和：男女声の声質情報を決める要素，通研実報，vol.24，No5，pp.977-993，(1975)
- 4) 橋場参生・藪謙一郎・井野秀一・泉隆・伊福部達：F1-F2平面で操作する会話補助装置の提案と試作，ヒューマンインタフェースシンポジウム2005論文集，pp. 585-588，(2005)
- 5) 藪謙一郎・伊福部 達：発話障害者支援のための連続タッチ平面で操作する音声生成器—子音改善のための基礎的検討—，信学技報 WIT2010-40，pp. 41-46，(2010)
- 6) 藪謙一郎・伊福部達：発話障害者支援のためのペン入力座標によるリアルタイム音声生成方式—鼻子音出力の操作方法と音声生成方法の検討—，信学技報，SP2010-126，pp. 67-72，(2011)

小規模ソフトウェア開発における形式手法の活用

堀 武司

Utilization of Formal Methods on Small-scale Software Development

Takeshi HORI

キーワード：形式仕様記述，モデル検査

1. はじめに

北海道には主に札幌周辺を中心としてソフトウェア開発などのIT産業が集積しており、年間売上高 約3,800億円、従業員数約2万人の規模を有する¹⁾。一方、そのかなりの部分は小規模な事業者で占められている。これらの小規模事業者におけるソフトウェア開発は、少数の技術者により「職人」的に行われる場合が多い。そのため、開発プロセスの管理が十分に行われておらず、製品の品質保証は個々の技術者の力量に委ねられている点が問題である。これらの問題を解決するための正攻法は、ISO9000やCMMIなどの枠組みに従い社内の開発プロセス改善をすすめることであるが、人員と予算の制約が大きい小規模な開発現場では、文書作成等の間接的作業負荷が増大するプロセス管理体制の導入は必ずしも現実的ではない。

著者は、上述の小規模ソフトウェア開発において品質向上を実現するための方策の一つとして、ソフトウェア開発の新しい技術である「形式手法」の活用の可能性に着目した。

形式手法とは、ソフトウェアの仕様定義や設計などを、数学や論理学などを基盤とする技術によって行うことで、高品質なソフトウェア開発の実現を目指す手法の総称である。形式手法の中には、ソフトウェアの仕様定義や設計を自然言語や図表の代わりに、より厳密な数学的表現で記述することで曖昧さを排除する「形式的仕様記述」や、設計内容の検証を数学的理論とコンピュータ支援ツールを用いて自動的・網羅的に行う「形式検証」などの技術が含まれる。

これまで、形式手法は主に極めて高い信頼性が要求される航空宇宙、運輸、医療などの分野では使われてきたものの、手法導入のコストが高いこと、高度な専門知識を持つ技術者

の確保が難しいことなどから、一般のソフトウェア開発における利用はまだ広がっていない。しかしながら、検証支援ツールの整備、検証に使われるコンピュータ自体の能力向上などにより、一般的な開発現場でも形式手法の活用が現実的なものとなってきた。

本研究では、北海道内の中小ソフトウェア企業等におけるソフトウェア開発に対して、形式手法の技術普及を推進し品質と生産性の向上を図ることを目的として、基礎的な調査や評価、および技術者向け教材の開発に取り組んだ。

2. 中小企業での導入に適した手法・ツールの調査

形式手法と呼ばれる手法は、広く知られているものだけでも100種類を越え、その技術的内容や得意とする適用対象も様々である。また、日本語で得られる現場向けの技術情報もまだ少ない。そのため、中小企業の技術者が形式手法の導入を検討しようとした場合、どの手法から始めるべきかを判断することは容易ではない。

そこで著者は、中小企業への導入に際してどのような手法が適切かを判断し、今後取り組みを進める手法の絞り込みを行うため、主要な形式手法について、手法の概要、適用分野、および支援ツールや技術情報の整備状況などに関する調査を行った。同様の調査は既にいくつか公開されている²⁾が、今回の調査では特に、中小ソフトウェア企業での技術導入を前提とし、以下の観点に留意して調査を行った。

- 習得が比較的容易であり、何らかのプログラム言語を習得した平均的技術者が、無理なく理解できる水準の難易度であること。
- 日本語による技術情報がある程度整備されており、国内における研究会活動などが活発であること。
- 手法の実践に必要な支援ツール等が、オープンソース、無償、もしくは安価で入手できる。

事業名：経常研究

課題名：中小規模ソフトウェア開発への形式手法導入に関する研究（22～23年度）

表1 主要な形式手法の比較

手法	記述方法	支援ツール (*は無償利用可)	検証技術	習得の難 易度	国内での 技術情報	備考
VDM	VDM 言語	VDMtools * Overture *	アニメー ション	低	比較的豊富	国内で最も普及
Z 記法	Z 記法	ZETA* CZT*	-	中～高	比較的豊富	ツール環境が弱い
B メソッド	B 言語	Atelier B * ProB *	定理証明 モデル検 査 アニメー ション	中～高	入門書一冊	強力な検証機能 記述制約が厳しい
SPIN	専用言語 (Promela)	SPIN *	モデル検 査	中	比較的豊富	
UPPAAL	状態遷移図 (GUI)	UPPAAL	モデル検 査	低	入門書一冊	GUI を備える 時間制約を取扱う 事が出来る
CSP	CSP (プロセス代 数)	FDR PAT * CSP-Prover	モデル検 査 定理証明	中～高	入門書一冊	国内でのコミュニ ティ活動が活発

これらの条件を考慮した上で、いくつかの手法を候補として選択し、調査を行った（表1）。

2.1 形式仕様記述言語

一般的なプログラム言語の概念に近い形で、ソフトウェアのデータ構造や関数の機能仕様の定義などを扱うための手法として、VDM、Z記法、Bメソッドなどに代表される「モデル規範型 (model-oriented)」と分類される手法がある。これらの手法は、いずれも論理学と集合論による数学的な基盤に基づいており、記述する対象を「状態」とそれに対する「操作」の観点から表現する。この考え方は、状態を「変数」、操作を「関数、メソッド」と言い換えればC、FORTRAN、Javaなどの手続き型プログラム言語と同じであり、一般のソフトウェア技術者にも理解しやすい手法といえる。これら3手法に関する調査結果を以下に示す。

(1) VDM

VDMは、モデル規範型の代表的な手法であり、形式仕様記述手法として最も普及が進んでいる手法の一つである。国内の産業界でもFelica ICカードに関するものなど³⁾いくつかの適用事例が報告されている。VDMに関する支援ツールとしては、SCSK社のVDMtools、オープンソースのOvertureなどがあり、特に前者は国内企業による開発であるためサポート体制等も整っている。これらのツールでは、モデルの文法やデータ型のチェック機能に加えて、インタプリタ上でモデルを動作させること（仕様アニメーション）が可能である。

アニメーションによるモデルの動作確認やテストが、VDMにおける主要な検証手段である。アニメーションによる検証は直感的に分かりやすい技術であるが、完全に網羅的な検証をテストで実現することは困難であり、検証能力の面では他の手法よりも弱い。

(2) Z記法

Z記法は、Jean Raymond Abrialらによって提案された手法であり、VDMと並び代表的な形式仕様記述言語として知られている。ただし、中小企業への技術導入を前提に考えた場合、全般的に学術研究寄りであること、支援ツールのサポートが弱いことなどの理由から、検討候補からは除外した。

(3) Bメソッド

Bメソッドは、Z記法と同じくAbrialが提案した手法であり、数学的背景はVDMやZ記法と共通であるが、より仕様の検証の側面を重視した手法である。Bメソッドでは、モデルから論理学の証明問題（証明責務）を生成し、これを定理証明系で証明することでモデルの正しさを保証する。テストによる検証とは異なり、検証された事柄に関しては100%正しいことが数学的に保証される。また、Bメソッドは単なる仕様記述だけの手法ではなく、仕様から設計、実装を導出する過程の正しさを証明によって保証することで、最終的に正しいプログラムを得るという考え方（Correct by Construction）の実践を目的としている。

Bメソッドの支援ツールとしては、フランスClearSy社のAtelier-Bがあり商用利用も含め無償で利用できる。Atelier

Bでは、B言語による仕様記述、内蔵された自動定理証明系によるモデルの証明、Cなどのプログラム言語へのコード変換など、Bメソッドによる開発作業を一貫して実施できる。

以上の結果より、手法自体の難易度の低さ、汎用性の高さの観点から、VDMを主要な手法の一つとして選択した。候補の一つとして検討したBメソッドは、良好な支援ツール環境と強力な検証機能の面で非常に優れているが、その一方でモデル記述の自由度に大きな制約がある。特に、文字列等の可変長データの扱いや、モジュール間をまたいだデータ書き換え操作に関する制約が厳しく、業務系ソフトウェアなどを含む幅広いソフトウェア開発への適用は、現時点では難しいと判断した。

2.2 モデル検査手法・ツール

モデル検査は、対象の振る舞いに関する仕様検証を目的とした形式手法の一分野であり、近年、組み込みソフトウェア分野などを中心に産業界での普及が急速に広がっている手法である。

モデル検査では、対象を状態遷移モデルとして表現し、そこである性質が成り立っているかどうかを、コンピュータ上の支援ツールによってモデルの状態空間を網羅的に探索して確認する。モデルの状態空間全体を網羅的に検査できれば、定理証明による検証と同様、検証された性質が100%正しいことが保証される。ただし、ある程度以上複雑なモデルをそのまま記述すると、状態空間が爆発的に増大してしまい網羅的検証は困難になる。そのため、検証したい内容に合わせてモデルを抽象化し状態数を削減するなどの工夫が必要になる。

モデル検査の代表的な手法、ツールとしては、SPIN, UPPAAL, PAT などがある。これらのツールは、いずれも

- ・状態遷移モデルを対象とすること
- ・複数のプロセスが相互に関連しながら並行に動作する「並行プロセス」の記述ができること
- ・時間の概念について拡張された論理学である時相論理を用いて、検証条件を記述すること

などの点で共通しているが、モデルの記述方法やツールの使い勝手の面では差異がある。

SPINでは、C言語に似た専用の言語（Promela）を用い、手続き型プログラム言語に近い形でモデルを表現する。

一方、UPPAALは標準でグラフィカル・ユーザ・インターフェース（GUI）を備えており、状態遷移図をツール上で直接描画できる。また、モデルのアニメーションや検証結果の表示もGUI画面上で対話的に行うことができる。

PATは、並行プロセスを扱うための数学体系（プロセス代数）の一種であるCSP（Communicating Sequential Processes）を用いてモデルを記述する。モデルの記述はテキストベースであるが、アニメーションや検証結果の表示はGUI上で行うことができる。

上記以外の特長としては、UPPAALとPATでは、離散的な状態遷移だけではなく、時間付きオートマトンによって時間の概念を直接取り扱うことができる点が挙げられる。これらの機能は、リアルタイムシステムにおける時間制約の検証などに特に有用である。

これらのツールはいずれも実業務への適用に十分な能力を持っているが、状態遷移図を直接扱えることによる直感的なわかりやすさを重視し、UPPAALを当面の主要なツールとして選択した。

ただし、UPPAALは比較的高額な商用製品であり、その点が中小企業への導入の障害として懸念されるため、長期的にはPATなど他のツールへの移行も検討している。PATの最新リリース版（v3.5.0）ではUPPAALに類似したGUIベースのモデリング機能なども追加されており、UPPAALで蓄積した技術ノウハウが活用できると思われる。

3. 実業務への適用試験

2章で選定した手法に関して、実際の開発業務における有効活用の可能性について、更に詳細な検討をすすめるため、いくつかの具体的な開発事例への適用試験を行った。

3.1 形式仕様記述手法の適用試験

形式仕様記述手法の適用試験の一つとして、過去に著者が関わった開発事例の一つである橋梁点検ロボット車「橋竜」⁴⁾（図1、(株)帝国設計事務所）を題材として、VDMによる仕様記述を試みた。

「橋竜」は、ビデオカメラ等を搭載したロボットアームによって橋梁桁下部の遠隔点検を行うシステムであり、著者は、カメラからの点検画像データとロボットアーム等から得られた位置座標データを自動的に記録・管理し、3次元CGによる可視化表示、点検報告書の自動生成などを行う「点検作業支援ソフトウェア」（図2）の試作開発を分担した。

対象ソフトウェアの大まかなアーキテクチャを図3に示す。ロボットとの通信処理などが含まれている以外は、概ね業務系ソフトウェアに近い内容である。これらのコンポーネント毎に、VDMによる仕様記述の可能性を検討し、可能な部分については実際の仕様記述の試行を行った。

「点検データ管理」コンポーネントは、点検作業で得られる各種データ（写真、位置情報、時刻、コメント等）、点検対象の橋梁の基礎データなどを管理し、データ構造、データ間の関連、およびデータの参照・更新操作などを実現している。過去の開発では、設計にUMLクラス図やE-R図（図4）を用いていたが、それらと同等の内容をVDMによって書き直すことができた。また、記述作業においては、VDM自体の制約によって意図通りの記述が出来なくなる、といったこともほとんどなく、十分な記述能力を有していることが確認

できた。

一方、それ以外のコンポーネントに関しては、VDMによる記述の適用は難しいと判断した。例えば「画面表示」コンポーネントの場合、3次元CG処理のためのライブラリ Java3Dを利用するための処理が大半を占めており、独自のロジックは少ない。これらの部分に対するVDMの適用は可能ではあるものの、得られるメリットが少ない。

本ソフトウェアのアーキテクチャ設計では、アプリケーション固有のデータ処理は、表示やユーザ・インターフェースに関する処理とは分離され、「点検データ管理」コンポーネント内に集約されている。そのため、記述すべき仕様も当該コンポーネントに集約されており、この部分のみへのVDMの適用でも十分メリットは大きいといえる。

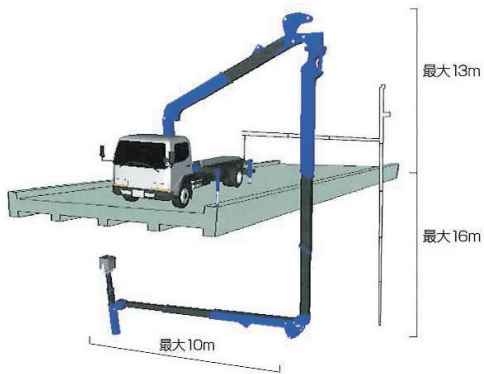


図1 橋梁点検ロボット車「橋竜」



図2 点検作業支援ソフトウェア

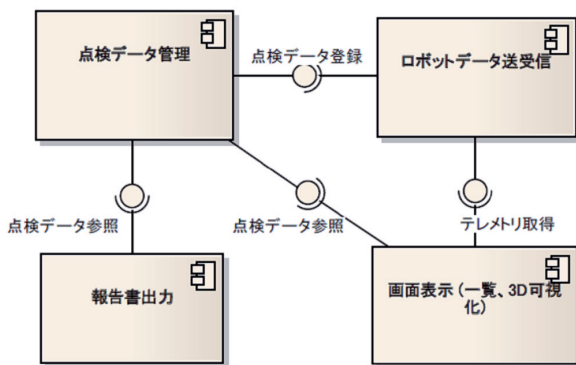


図3 点検作業支援ソフトウェアのアーキテクチャ

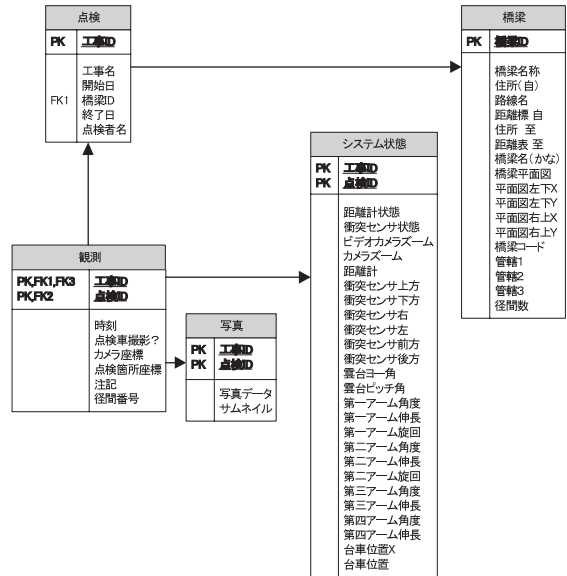


図4 橋梁点検データの構造の一部

3.2 モデル検査ツールの適用試験

組込みマイコン上で動作する制御ソフトウェア開発に対する形式手法の適用試験の一つとして、NEXCESS名古屋大学組込みソフトウェア技術者養成プログラム⁵⁾の教材に含まれる例題「カップラーメンタイマ」を題材として、モデル検査ツール UPPAAL の適用試験を行った。

例題「カップラーメンタイマ」では、2つのスイッチと2つのLEDを備えたマイコン上で、タイマの起動・停止や、LED表示によるタイムアウト通知などの制御を行うソフトウェアを開発する。

例題の設計では、リアルタイムOS上で並行動作する2つのタスク（タイマ、LED点滅）と4つの周期ハンドラによりシステムの機能を実現しており、各タスクの設計は状態遷移図として記述されている（図5）。

これらの設計文書に基づき、タスク、ハンドラの状態遷移モデルをUPPAALによる並行プロセスとして記述を行った。タイマ制御タスク、およびLED点滅タスクを記述したUPPAALモデルをそれぞれ図6、図7に示す。いくつかの中間状態が追加されているが、概ね元の状態遷移図の構造をそのまま反映した形でUPPAALプロセスを記述することができた。

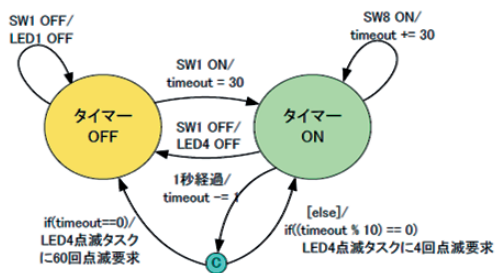


図5 タイマ制御タスクの状態遷移図

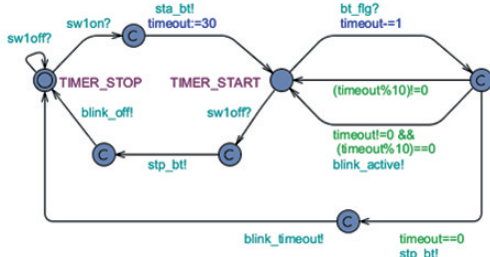


図6 UPPAALによるタイマ制御タスクの記述

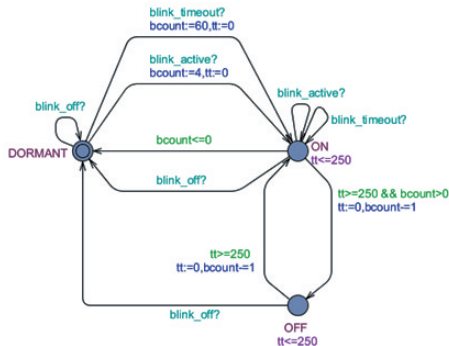


図7 UPPAALによるLED点滅タスクの記述

並行動作するUPPAALプロセス間の同期処理は、チャンネルを用いたプロセス間通信として記述した。チャンネルの通信処理は次のように記述される。

送信側 channel_name!

受信側 channel_name?

チャンネルによる通信は同期型通信であり、送受信双方が実行可能となった場合のみ実行され、それ以外の場合は処理がブロックされる。

元の例題では、タスク、ハンドラ間の通信はμITRON OSの通信機能であるイベントフラグ等で実装されているが、UPPAAL上ではこれらのイベントフラグに対応するチャンネルを用い、ほぼ同じ構造でモデルを記述することができた。

これらの結果から、リアルタイムOS上で実装されたソフトウェアの設計は、その構造を保ちつつ比較的容易にUPPAALモデルとして記述できることが確認できた。この事例では既に存在する設計や実装から形式モデル記述を行ったが、UPPAALのモデルをμITRON OSのタスクや通信機能を用いて実装することも容易である。

4. 教材開発と技術者教育の試行

形式手法の技術導入において最も大きな課題の一つは、形式手法を習得し、使いこなすことができる技術者の育成である。近年は国内においても産業界向けの入門書や教育コースが充実してきているが、中小企業の技術者向け教材としてはまだ十分とはいえない。著者は、道内中小企業における形式手法の実践的な普及促進を図るための活動の一環として、道

内の中小企業技術者を対象とした形式手法の教育コースのための教材開発を行った。

4.1 教材のテーマと概要

教材では、検査ツールによって設計不具合を発見できる、という導入効果が明快でわかりやすいこと、検査作業はコンピュータが全自動で行うため検査に関する高度なスキルが不要であることといった特長から、初めて形式手法に取り組む受講者にも受け入れられやすいモデル検査について取り扱うこととした。また、具体的な手法、ツールとしては、GUIを備えており直感的に理解しやすいUPPAALを選択した。

コースの内容は半日～1日程度で実施することを想定し、形式手法自体の概念的な内容は最小限とし、実際にUPPAALツールを使用した実習作業を中心とする現場の技術者向けの構成とした。カリキュラムの構成を以下に示す。

- ・形式手法の概要
- ・UPPAALにさわってみよう！（ツールの使い方）
- ・プロセスの記述
- ・チャンネル通信
- ・時間制約の記述
- ・検証式の書き方と時相論理
- ・実習課題: 哲学者の食事問題のモデリング
- ・UPPAAL適用事例の紹介

4.2 実習用例題：哲学者の食事問題のモデリング

受講者がモデル検査技術とUPPAALの特長を一通り体験できるように配慮したコンパクトな実習用例題として、並行処理の有名な問題である「食事する哲学者」を題材とする例題を作成した。

「食事する哲学者」問題では、図8のようにN人の哲学者とN本のフォークが円卓に配置された場面を考える。哲学者はそれぞれ任意のタイミングで思索と食事の動作を繰り返す。食事の際に、哲学者は左右のフォークを順に手に取り、食事が済むとフォークを卓上に戻す。フォークは両隣の哲学者により共有されるため、共有リソースの排他制御に関する例題として取りあげられる。



図8 「食事する哲学者」問題

例題では3人の哲学者と3本のフォークをそれぞれ並行プロセスとしてモデリングした(図9)。

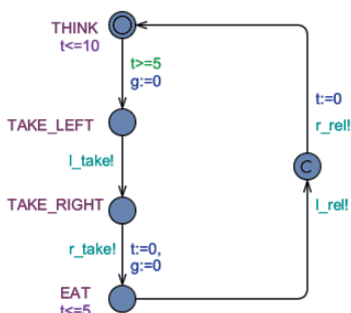


図9 哲学者のUPPAALモデル

「食事する哲学者」問題では、全ての哲学者が同時に左フォークを取得した場合にデッドロック(その先の動作が一切進まなくなる状態)に陥ることが知られている。対策を行っていないモデルに対してUPPAALの検証機能を用いると、デッドロック発生が検出され、さらにその時点までの実行履歴を示すシーケンス図(図10)が出力される。

さらに、この例題ではUPPAALの時間制約機能の活用例として、哲学者の思索、食事の時間をそれぞれ5~10分、0~5分に設定している。このモデルに対してUPPAALの検証機能を使うと、例えば「ある哲学者が食事を取るまでの待ち時間は、最長でも15分である」といった、システムの最悪応答性能に関する性質の検証を試すことができる。

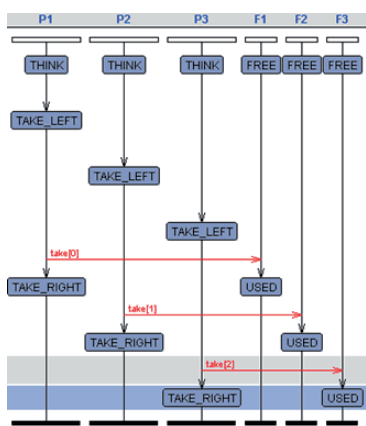


図10 デッドロック発生までの実行履歴

4.3 技術セミナーの実施と評価

開発した教材の評価と、道内企業への技術普及を目的として、「ソフトウェアモデル検査技術研修」を実施した(国際競争力の強化に向けた技術系人材育成事業: 苫小牧市テクノセンター, 平成23年1月)。

研修の受講者は15名であったが、1日の座学と実習により、

ほぼ全員がUPPAALによる簡単なツールの使用法を理解し、用意した例題のモデル作成と検証作業を完了することができた。

研修終了後に行った受講者アンケートの結果では、大半の受講者から「状態遷移モデルに対して検証ができる点が良いと思った」という主旨のコメントがあり、実際の開発現場においても状態遷移モデルに基づく設計が広く浸透しており、それらとの親和性の高いモデル検査に対するニーズが高いことが確認できた。

5. まとめ

北海道内の中小企業における小規模ソフトウェア開発に対して形式手法の導入を推進するため、主要な形式手法・ツールの調査と評価、および技術者育成のための教材開発などの取り組みを実施した。

形式手法は技術的難易度や導入コストが高いとされてきたが、形式手法の適用試験や教材を用いた技術研修の結果から、中小企業技術者が形式手法を習得することは十分可能であること、開発現場における形式手法に対する潜在的ニーズが十分に高いことが確認できた。

今後は、業務系ソフトウェアに対するVDM、組込み制御ソフトウェアに対するUPPAAL, PATなど、比較的導入しやすいと判断された手法・ツールに絞って教材等の整備を行うとともに、道内企業との連携により、実際のソフトウェア開発業務を適用対象とした事例研究を推進していく予定である。

6. 引用文献

- 1) 一般社団法人北海道IT推進協会編, 北海道ITレポート2012, <http://www.hicta.or.jp/report/pdf/2012.pdf>, (2012)
- 2) 独立行政法人情報処理推進機構ソフトウェア・エンジニアリング・センター, 形式手法適用調査, <http://www.ipa.go.jp/sec/reports/20100729.html>, (2010)
- 3) 栗田太郎・太田豊一・中津川泰正. : モバイルFeliCa ICチップ開発における形式仕様記述手法導入の効果と課題. ソフトウェアシンポジウム2005 論文集, pp. 73-80, ソフトウェア技術者協会, (2005)
- 4) 堀武司・中西洋介・波通隆: 橋梁点検システムの開発, 工業試験場報告 No. 308, pp. 7-14, (2009).
- 5) NEXCESS 名古屋大学組込みソフトウェア技術者養成プログラム, <http://www.nces.is.nagoya-u.ac.jp/NEXCESS/>, (2008)

無落雪住宅向けフェンス状太陽光発電架台に関する研究

保科 秀夫, 白土 博康, 平野 繁樹

A Study on Fence-formed Solar Photovoltaic Panel for Flat Roof

Hideo HOSHINA, Hiroyasu SHIRATO, Shigeki HIRANO

キーワード：無落雪住宅，フェンス状，太陽光発電，架台

1. はじめに

太陽光発電は、化石燃料を消費しない新エネルギーの一つとして温暖化対策や経済発展に大きく貢献するものである。国の住宅用太陽光発電の導入目標は、2020年に2005年の約20倍を掲げており、その導入拡大は全国的に緊急を要する重要な課題となっている。そこで、(株)太陽光発電普及拡大センターでは、国からの委託を受け導入拡大のための補助制度を実施しているほか、2012年7月からは、電力事業者による固定価格買取制度もスタートしている。また、北海道においても、2010年6月にリーフレットを作成するなど、導入拡大のための事業を積極的に展開している。

このような中、北海道の住宅用太陽光発電の導入状況を見ると、2011年度までの合計件数は全国の約1%¹⁻⁴⁾で、住宅1戸当たりの導入割合は47都道府県中最下位となっており、ほとんど普及していないのが現状である。普及を阻害している原因として、北海道、とりわけ人口が密集する札幌市や旭川市などでは、傾斜がフラットあるいはM字形の無落雪屋根の住宅（以後、無落雪住宅）が約5割以上を占め⁵⁾、この屋根の上に太陽光発電パネルを設置する際に専用の架台が必要となる。そのため、一般の三角屋根に比べ、費用が嵩むことに加え、架台の集中荷重による屋根への負担や太陽光発電パネル上に積もった雪による落雪事故など、さらなる太陽光発電の普及に向けて解決すべき問題が山積している。

そこで本研究では、積雪寒冷地における住宅用太陽光発電の導入、とりわけ無落雪住宅への普及拡大を図るため、従来の架台の代替として、フェンス状の部材を無落雪屋根外周の四辺を利用して四角形に組んだ架台（以後 フェンス状太陽光発電架台）を提案し、そのシステム設計のための基礎データを蓄積した。

事業名：経常研究

課題名：無落雪住宅向けフェンス型太陽光発電システムに関する研究（平成23～24年度）

2. フェンス状太陽光発電架台の期待される効果

フェンス状太陽光発電架台の設置イメージを図1に示す。太陽光発電架台を図1のような形状とすることで、次の効果が期待できる。

- ① 最も荷重に強いと思われる、屋根外周部（壁との取り付け部）周辺に架台の荷重を分散することで、屋根への負担が低減
- ② 屋根への穴開けなどを必要としない簡易的な設置方法とし、屋根への負担や雨漏りなどの問題を回避
- ③ 無落雪屋根に発生する雪庇や太陽光発電パネル上に積もった雪による落雪事故の抑制

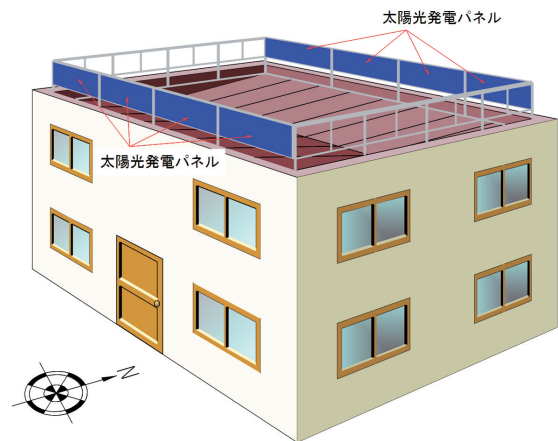


図1 フェンス状太陽光発電架台のイメージ

3. 研究の概要

本架台を図1のような方で設置する場合、南辺に設置する太陽光発電パネルは発電量の予測が可能だが、北辺に設置するパネルは手前に無落雪屋根があることから、北の風が多い冬季は図2に示すようにパネル手前に発生する吹き溜まりや積雪による発電障害が懸念される。一方、夏季は屋根面の

反射光による発電量の向上が期待できるが、その程度は図3に示すように、一般的に3/100から15/100の角度を持つ屋根勾配⁶⁾や、屋根面の塗料などの影響を受けるとされる。

以上のことから、本研究では図4に示すように、周囲に日射や風に影響を与えるものがない工業試験場の最上階屋上に、表1に仕様を示す太陽光発電パネルを用いた各試験モデルをほぼ南向きとなるよう設置し、次の内容を実施した。

表1 太陽光発電パネルの仕様

メーカー	三菱電機
型名	PV-MG134CF
公称最大出力	134W
公称最大出力動作電圧	19.4V
公称最大出力動作電流	6.91A
公称解放電圧	24.3V
公称短絡電流	7.43A
質量	12.5±1kg
外形寸法 (W×D×H)	1,248×803×46mm

<設置方法の検討>

積雪の影響や吹きだまりの発生を最小限とし、屋根への負担を最小限とする設置方法を提案する。

<屋根の塗料別発電特性の検討>

屋根に熱線高反射の機能性塗料を塗布することで発電量の向上を図る。

<屋根の勾配別発電特性の検討>

無落雪屋根の勾配が発電量に与える影響を把握し、設計の基礎データとする。

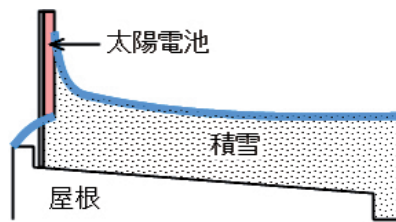


図2 冬季の積雪による発電障害のイメージ

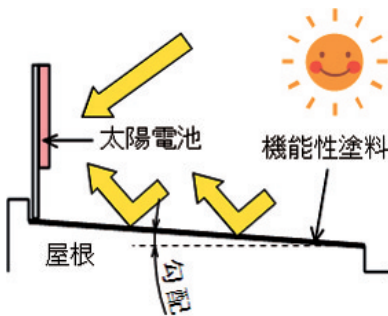


図3 夏季の反射光による発電量向上のイメージ



図4 各種試験の実施場所

4. 設置方法の検討

4.1 最適なパネル間隔や設置高さの検討

積雪の影響や吹きだまりの発生を最小限とする太陽光発電パネルの設置方法および本研究で提案するフェンス状架台の検討を行った。

4.1.1 平成23年度の試験方法

平成23年度は太陽光発電パネルの下辺と屋根面との隙間(以後 パネル下隙間)が積雪や吹き溜まりに与える影響を確認するため、太陽光発電パネルのパネル下隙間を0から720mmまで180mm刻みで5段階とした試験モデルを設置し、平成23年12月20日から平成24年2月20日にかけて冬季発電試験を行った。

図5に試験モデルのイメージを、図6に試験モデル設置の様子を示す。

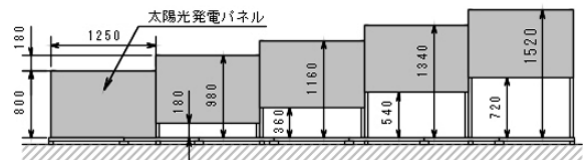


図5 平成23年度試験モデルのイメージ (mm)



図6 平成23年度試験モデル設置の様子

4.1.2 平成23年度の試験結果

試験結果の一例として、平成24年1月12日の様子を図7に、

各パネルの試験期間中における日発電量の平均値をまとめて表2に示す。

図7から、パネル下隙間が0以外はパネル手前の積雪が風によって排除され、パネルのほぼ全面が露出していることがわかった。

さらに表2から、パネル下隙間が0以外は全く積雪の影響を受けなかった720mmとほぼ同じ発電量であることから、試験期間を通してパネル下隙間が180mm以上は積雪の影響を受けず、パネル全面が露出していたことがわかった。



図7 冬季発電試験の様子（平成24年1月12日）

表2 平成23年度の試験結果

パネル下隙間 [mm]	日平均発電量 [Wh/日]
0	83.9
180	263.8
360	265.5
540	269.6
720	268.9

（試験期間：平成23年12月20日～平成24年2月20日）

4.1.3 平成24年度の試験方法

本研究で提案するフェンス状の部材を四角形に組んだ架台を、置くだけの簡易的な方法で設置し、このような構造に対する問題点を把握するため平成25年1月17日から平成25年2月27日にかけて冬季屋外試験を行った。

同時にパネル下隙間が180mm以下における積雪状況の変化を確認することを目的とした高さ別発電試験と、パネルの間隔が積雪や吹き溜まりに与える影響を確認することを目的とした間隔別積雪試験を行った。太陽光発電パネルのパネル下隙間を0から200mmまで50mm刻みで5段階とした高さ別発電試験モデルを上記架台の南辺に、模擬パネル（木製合板製）の間隔を0から240mmまで80mm刻みで4段階とした間隔別試験モデルを北辺にそれぞれ設置し試験を行った。さらに、南面のパネル下隙間200mmのパネル裏側に北向きのパネルを取り付け、両面タイプの太陽光発電パネルを想定した冬季の発電試験を行った。

各試験モデルの設置概要として、屋上の平面イメージと設置の様子を図8と図9に、高さ別発電試験モデルのイメージを図10に、間隔別積雪試験モデルのイメージを図11に示す。

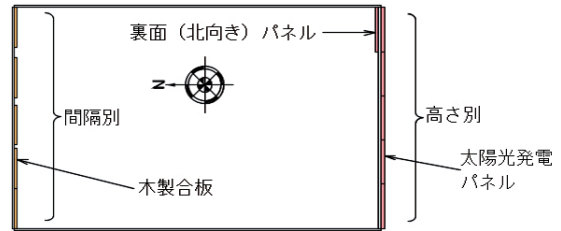


図8 屋上の平面イメージ



図9 試験モデル設置の様子

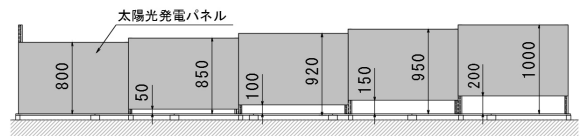


図10 高さ別発電試験モデルのイメージ (mm)

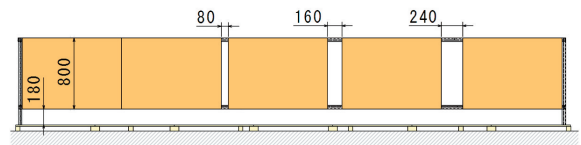


図11 間隔別積雪試験モデルのイメージ (mm)

4.1.4 平成24年度の試験結果

高さ別発電試験結果の一例として平成25年2月20日の様子を図12に、各パネルの試験期間中における日発電量の平均値をまとめて表3に、間隔別積雪試験結果の一例として平成25年2月20日の様子を図13に示す。

図12から、パネル下隙間が200mm以外はパネルの一部が積雪に隠れており、その割合はパネル下隙間が小さいパネルほど大きいことがわかった。

さらに表3から、パネル下隙間が小さくなるほど発電量が少なく、積雪の影響を受け易いことがわかった。

平成23年度と24年度の冬季発電試験結果から、パネル下隙間は200mm以上が積雪や吹き溜まりの影響が少なく、風に対する強度などを考慮するとパネルの高さはなるべく低い方が望ましいことから、パネル下隙間は200mm程度が適当であることがわかった。

また、パネル下隙間が200mmの裏面（北向き）に設置し

た太陽光発電パネルについてはほとんど発電していないことから、架台を南向きで設置した場合、両面タイプの効果はほとんど期待できないことがわかった。

図13から、パネルの間隔が広いほど、パネル手前の積雪が排除されていることから、パネル数量と屋根の寸法から架台の端部に余裕がある場合は、可能な限りパネル間の間隔を空ける方が積雪や吹き溜まりの影響を低減できることがわかった。



図12 高さ別発電試験の様子（平成25年2月20日）

表3 平成24年度の試験結果

パネル下隙間 [mm]	日平均発電量 [Wh/日]
0	83.9
50	87.6
100	119.0
150	192.2
200	218.7
200(裏)	10.1

(試験期間：平成25年1月17日～平成25年2月27日)

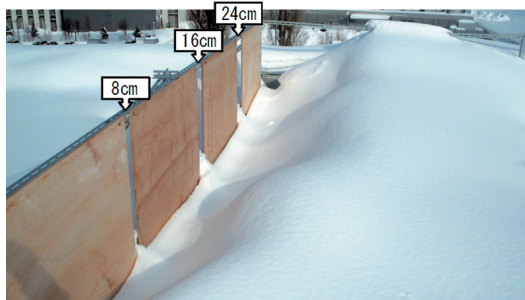


図13 間隔別積雪試験の結果（平成25年2月20日）

5. 屋根の塗料別発電特性の検討

5.1 試験方法（機能性の有無による比較）

パネル下の隙間が180mmとなるように設置した太陽光発電パネルの手前部分（幅：約1.8m、長さ：約2.7m）に、機能性塗料2種類と比較対象として一般塗料1種類の合計3種類の塗料を塗布した屋根用鋼板（t=0.27mm）をそれぞれに貼り付けた試験モデルを3台設置し、平成24年7月13日から8月1日にかけて発電試験を行った。

試験に用いた塗料をまとめて表4に、試験モデル設置の様子を図14に示す。

表4 塗料一覧

使用塗料	機能	色	樹脂系
機能性塗料E	遮熱・熱線高反射率	白	フッ素
機能性塗料B		茶	フッ素
一般塗料	—	茶	—

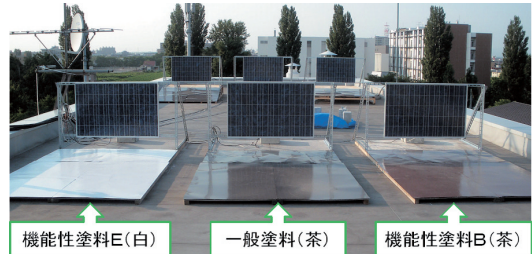


図14 試験モデル設置の様子

5.2 試験結果（機能性の有無による比較）

試験の結果として、各日の発電量を図15に、一般塗料（茶）の発電量を100%とした時の他の塗料の発電量の割合を図16に、発電量の平均値と割合をまとめて表5に示す。

これらの図表から、一般塗料（茶）と比較して機能性塗料B（茶）の発電量はほぼ同じだが、機能性塗料E（白）は発電量が7割程度大きいことがわかった。

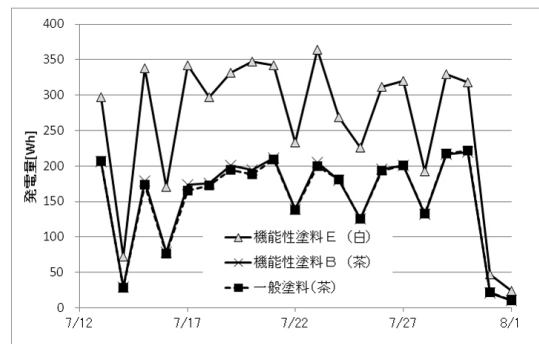


図15 塗料別発電量

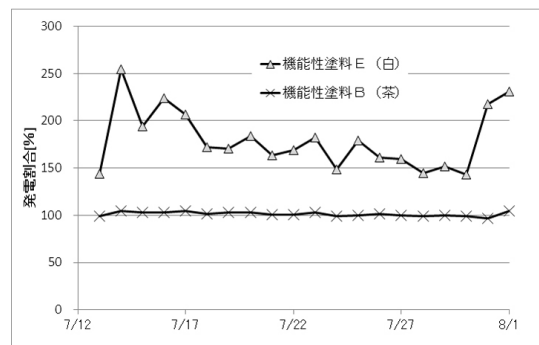


図16 塗料別発電量割合

表5 塗料別発電試験の結果

塗料	日平均発電量 [Wh/日]	発電割合 [%]
一般塗料(茶)	153.0	100.0
機能性塗料B(茶)	154.7	101.1
機能性塗料E(白)	258.6	169.0

(試験期間：平成24年7月13日～平成24年8月1日)

5.3 試験方法 (塗料の色による比較)

機能性塗料E(白)の発電量が一般塗料(茶)と比較して7割程度大きい結果となった理由として、塗料の機能性と色のどちらが大きく影響しているのかを確認するため、機能性塗料B(茶)を一般塗料(白)に変更して、引き続き平成24年8月3日から8月31日にかけて発電試験を行った。

試験モデル設置の様子を図17に示す。

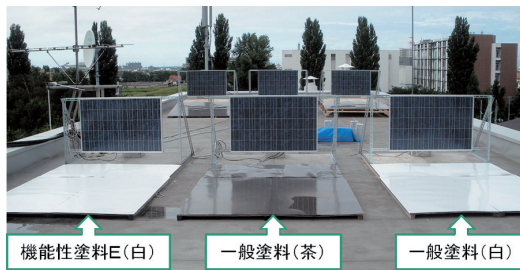


図17 試験モデル設置の様子

5.4 試験結果 (塗料の色による比較)

試験の結果として、各日の発電量を図18に、一般塗料(茶)の発電量を100%とした時のその他塗料の発電量の割合を図19に、発電量の平均値と割合をまとめて表6に示す。

これらの図表から、一般塗料(白)の発電量は機能性塗料E(白)とほぼ等しく、一般塗料(茶)より2割程度発電量が大きいことがわかった。

機能性の有無による比較結果と合わせて、機能性(熱線高反射率・遮熱)よりも塗料の色(明度)が発電量に大きく影響し、明度が高いほど発電量が大きくなることがわかった。

これは、機能性(熱線高反射率・遮熱)塗料が0.8μm以上の波長を持つ近赤外領域の反射や断熱を目的としたものであるのに対し、図20で示すように太陽電池の材料である結晶シリコンの吸収帯は0.3~1.1μm²、可視光の波長は0.4~0.8μmであることから、機能性よりも塗料の色(明度)が発電量に大きく影響したと思われる。

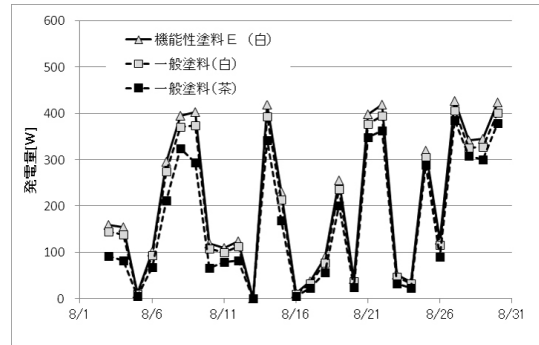


図18 塗料別発電量

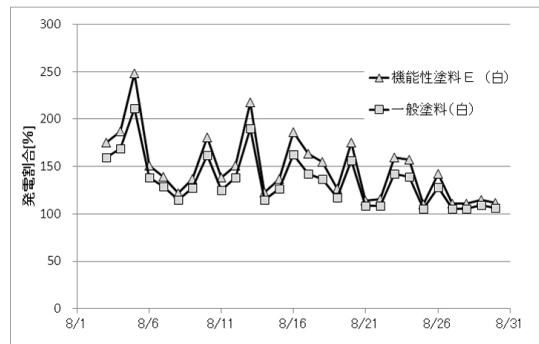


図19 塗料別発電量割合

表6 塗料別発電試験の結果

塗料	日平均発電量 [Wh/日]	発電割合 [%]
一般塗料(茶)	166.5	100.0
一般塗料(白)	195.5	117.4
機能性塗料E(白)	209.5	125.8

(試験期間：平成24年8月3日～平成24年8月31日)

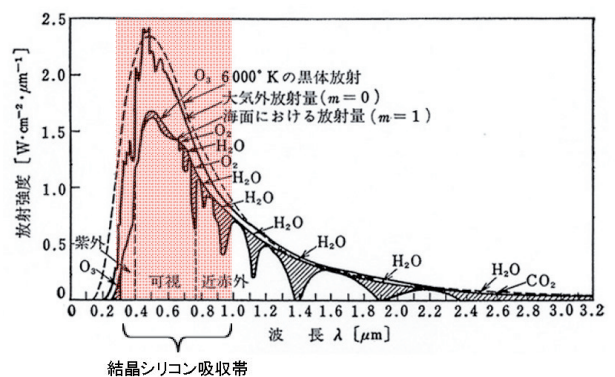


図20 シリコン系太陽電池の吸収帯

6. 屋根の勾配別発電特性の検討

6.1 試験方法

パネル下の隙間が180mmとなるように設置した太陽光発電パネルの手前部分(幅：約1.8m、長さ：約1.8m)に、15/100、10/100および5/100の勾配をつくり、一般塗料(茶)を塗布

した屋根用鋼板 (t=0.27mm) をそれぞれに貼り付けた試験モデルを3台設置し、平成24年7月13日から8月31日にかけて発電試験を行った。

試験モデル設置の様子を図21に示す。

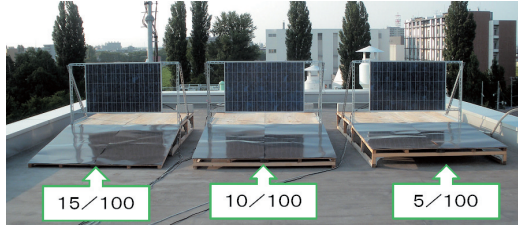


図21 試験モデル設置の様子

6.2 試験結果

試験の結果として、各日の発電量を図22に、15/100の発電量を100%とした時の他の勾配の発電量の割合を図23に、発電量の平均値と割合をまとめて表7に示す。

これらの図表から、太陽光発電パネルとの角度が小さいほど発電量は大きい、最も発電量が大きい5/100でもその割合は15/100の5%程度であることがわかった。

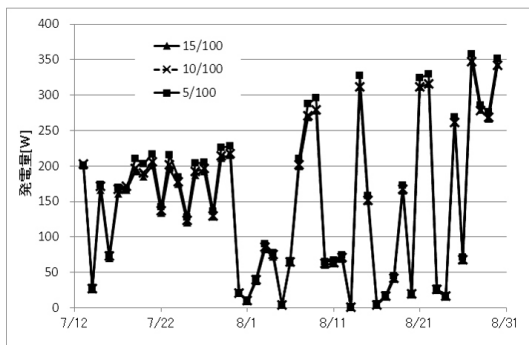


図22 勾配別発電量

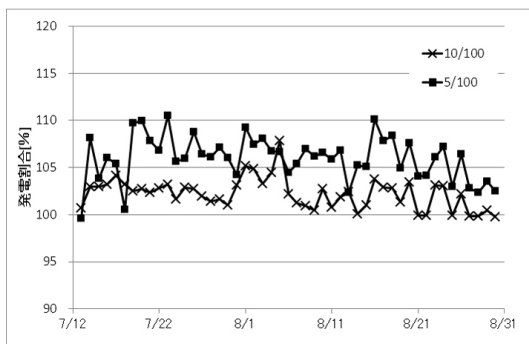


図23 勾配別発電割合

表7 勾配別発電試験の結果

勾配	日平均発電量 [Wh/日]	発電割合 [%]
15/100	145.1	100.0
10/100	147.1	101.4
5/100	152.8	105.3

(試験期間：平成24年7月13日～平成24年8月31日)

7. まとめ

積雪寒冷地における住宅用太陽光発電の導入、とりわけ無落雪住宅への普及・拡大を図るため、従来の架台の代替として、フェンス状の部材を無落雪屋根外周の四辺を利用して四角形に組んだ架台（フェンス状太陽光発電架台）を提案し、システム設計に向けた基礎データの蓄積を目的として、設置方法の検討、屋根の塗料別発電特性の検討、および屋根の勾配別発電特性の検討を行い、以下の知見を得た。

- ・冬季屋外試験から、置くだけの簡易的な設置方法に問題はなく、発電パネルを設置高さ200mm以上で、より広い間隔で設置することにより、積雪の影響を最小限に抑えられ、フェンス状架台に実用化の可能性を確認した。
- ・二種類の機能性（熱線高反射率・遮熱）塗料および一般塗料を塗布した模擬屋根での発電試験により、機能性よりも塗料の色（明度）が発電量に大きな影響を与えることがわかった。
- ・無落雪屋根の勾配を模擬した角度別発電試験を行い、各勾配の発電量にほとんど差がないことを確認した。

なお、本研究で得た知見は平成23年度と24年度に工業試験場の屋上で行った試験の結果のみであることから、積雪寒冷地全域への展開に向けて、今後は最終モデルの通年発電試験による従来架台と比較したデータ蓄積などを行う予定である。

謝辞

太陽光発電パネルの使用に際し、サンエス電気通信㈱の池田英明氏と伊藤貴史氏より多大なるご協力を賜りました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 新エネルギー導入促進協議会：調査報告等 (3. 住宅用太陽光発電システム導入状況に関する調査), <<http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/0900817.pdf>>, (参照2013年6月8日)
- 2) 太陽光発電普及拡大センター：都道府県別申請件数集計データ (平成20・21年度住宅用太陽光発電補助金交付決定件数・設備容量データ), <http://www.j-pec.or.jp/information/doc/pdat_h20-21koufu_20110106.pdf>,

(参照2013年6月8日)

- 3) 太陽光発電普及拡大センター：都道府県別申請件数集計データ（平成22年度住宅用太陽光発電補助金交付決定件数・設備容量データ），〈http://www.j-pec.or.jp/information/doc/pdat_h22koufu_20110707.pdf〉，（参照2013年6月8日）
- 4) 太陽光発電普及拡大センター：都道府県別申請件数集計データ（平成23年度住宅用太陽光発電補助金交付決定件数・設備容量データ），〈http://www.j-pec.or.jp/information/doc/pdat_h23koufu_20120424.pdf〉，（参照2013年6月8日）
- 5) 住宅金融支援機構：フラット35住宅仕様実態調査報告（平成19年度），〈<http://www.jhf.go.jp/files/100526472.pdf>〉，（参照2013年6月4日）
- 6) 北海道建築指導センター：無落雪（M形）屋根設計施工基準，〈http://www.hokkaido-ksc.or.jp/06_warranty/pdf/sekou_kijun.doc〉，（参照2013年6月4日）
- 7) 佐藤勝昭：太陽電池のキホン，ソフトバンククリエイティブ，192PP.，（2011）

調湿タイルの量産製造技術の開発

野村 隆文, 執行 達弘, 吉田 憲司, 橋本 祐二, 斎藤 隆之, 工藤 和彦

Development of Mass-Production Technology for Humidity Control Tiles

Takafumi NOMURA, Tatsuhiro SHIGYO, Kenji YOSHIDA, Yuji HASHIMOTO
Takayuki SAITOU, Kazuhiko KUDOH

キーワード：調湿, 非焼成, 押出成形法, 稚内層珪質頁岩, メソポア

1. はじめに

道北で産出される珪藻土起源の稚内層珪質頁岩はメソポア（直径2～50nm）を多量に含有し、高吸放湿性を持つ調湿機能材料である。現在、稚内層珪質頁岩を利用したタイル、塗り壁材、床下調湿材等が多くの企業により商品化されている。需要が多い塗り壁材は、施工に熟練を要する非焼成の調湿機能建材である。我々は、施工が容易な非焼成型調湿機能タイルを企業と共同開発してきた¹⁾。このタイルは、樹脂型を利用した成形法および水溶性のコロイダルシリカと遊離Caイオンの硬化反応により作製されている²⁾。その量産製造技術として、押出成形法によるタイルの製造法を検討し、調湿機能タイルを製品化した。調湿機能を最大限発現させるため、タイル原料の組成重量比は調湿材（稚内層珪質頁岩）：石膏＝7：3で配合し、高い調湿機能（700g/m²）を実現させることに成功した。しかしながら、タイルの機械的強度や押出成形機による成形歩留まりの改善、すなわち、安定した成形条件の検討が課題とされている。

本研究では、非焼成型調湿タイルの最適量産製造技術の確立を目的として、押出成形法により各種タイルを試作し、その曲げ強度と吸放湿量を測定、調湿材の粒度が強度と成形性に及ぼす影響を検討し、強度と歩留まりを向上させる配合組成や新規バインダーの種類と添加量を選定した。さらに、原料混練に起因するタイルの変形や亀裂対策の視点から、新規成形法を提案した。

2. 実験方法

2.1 タイル強度に影響する調湿材粒度と石膏配合量の検討

出発原料として、調湿材（WS）に粒度の異なる稚内層珪質頁岩粉末（WSL:粒度1mm以下, WSS:粒度0.25mm以下）、結合材に石膏ボード粉砕物（GB:0.5mm以下）とコロイダルシリカ（AT-30:ADEAKA製）を用いた。強度向上に寄与する因子として、主原料である調湿材の粒度（微粉）と石膏の配合量が考えられるため、これらの配合量の変化から、強度向上を実現する配合組成を検討した。

押出成形用配合組成を迅速に決定するため、金型を用いたプレス成形法（プレス圧54kgf/cm²）で、GBの配合量を30wt%に固定し、調湿材のWSS配合比率（WSS/(WSL+WSS)）を0.2～0.4に変化させた配合組成でタイル（長さ222mm, 幅76mm, 厚さ13mm）を作製した。次に押出成形法により、プレス成形法で決定した調湿材のWSS配合比率、GB配合量を30～50wt%に変化させた配合組成でタイル（長さ190mm, 幅58mm, 厚さ8mm）を作製した。作製したタイルについて、3点曲げ強度試験と25℃で異種湿度に伴う24h毎の重量変化（90%と50%相対湿度の吸湿量の差）から吸放湿量を測定した。

2.2 最適配合組成に適合するコロイダルシリカの検討

決定した最適配合組成に対し、これまで標準で使用していたAT30と比較して、コロイダルシリカの種類を変えた配合組成で押出成形法により、タイル（長さ140mm, 幅43mm, 厚さ10mm）を作製した。作製したタイルについて、成形性、乾燥性、曲げ強度、吸放湿量を把握した。

2.3 新規バインダーの検討

強度向上と調湿機能の効率的な発現を目的として、新規バインダーの検討を行った。コロイダルシリカとCaイオンの

事業名：重点研究

課題名：道内資源の使用量拡大を目指した建材開発と利用法に関する研究（平成21～23年度）

反応による硬化技術は、調湿材の調湿機能を効果的に発現可能な方法としては有効であるが、一方で、大幅な強度向上は困難であることから、本試験では、バインダーにメチルセルロース（以下MC）、天然ゼオライト、ツノマタ、骨材は天然ゼオライト、阿寒貝化石、成形助剤はグリセリン（以下G）、脂肪酸Na（以下Na）を選定し、さらなる強度向上の可能性について検討した。成形は2.2項と同条件で行い、作製したタイルについて、成形性、乾燥性、曲げ強度、吸放湿量を把握した。

2.4 新規成形方法の検討

現在、使用している土練押出成形機は2つのオーガスクリューで原料を混練しながら成形するため、粘土原料の成形には適しているが、コロイダルシリカと石膏の硬化反応を伴う原料の成形では、押出成形時の発熱による水分変化により、硬化反応が促進され、極めて成形が困難になる場合がある。そこで、ピストン式押出成形の予備試験を行い、その可能性を検討した。

3. 結果と考察

3.1 タイル強度に影響する調湿材粒度と石膏配合量の検討

プレス成形法で作製したタイルの強度は、3点曲げ強度試験と相関のあるデジタルフォースゲージ（DS 2 -500N、㈱イマダ製）で破壊荷重を測定した。また、押出成形法で作製したタイルの強度はオートグラフ（㈱島津製作所製AG-50 kNG）を用いて、3点曲げ強度試験により、曲げ破壊荷重を測定した。測定条件は、JIS A 1509-4「陶磁器質タイル試験法第4部：曲げ破壊荷重及び曲げ強度の測定方法」に準拠した。表1に調湿材の粒度を変化させたタイル原料の配合組成を、図1にGBを30%に固定し、調湿材のWSS配合比率を0.2~0.4と変化させた時のタイル曲げ破壊荷重を示す。WSS配合比率が0.3で強度が最大となり、0.4では強度の低下が認められた。この要因として、調湿材は調湿機能の他に骨材としても機能しており、その最適粒度組成の設定により、強度が向上したと推察される。

表1 調湿材の粒度を変化させたタイル原料の配合組成

配合組成	(wt%)			
	①WSL	②WSS	②/(①+②)	GB
WS7GB3(0.2)	56	14	0.2	30
WS7GB3(0.3)	49	21	0.3	30
WS7GB3(0.4)	42	28	0.4	30

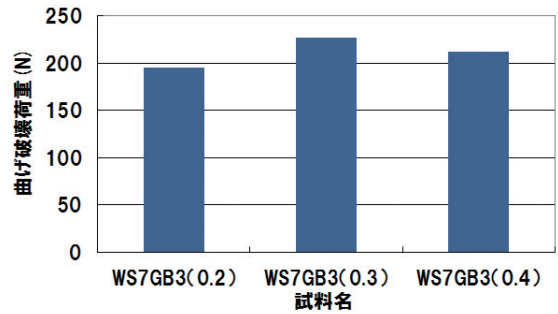


図1 調湿材の粒度と曲げ強度の関係

プレス成形による配合試験の結果から、押出成形法では、調湿材のWSS配合比率を0.3に固定した配合組成でタイルを作製した。表2に押出成形用タイルの配合組成を、図2に押出成形状況を示す。各組成ともに、原料混練用土練機で、1回混練した原料の投入により、良好に押出成形が可能であった。GB30~40%配合では、従来組成と比較して、可塑性があり、容易に成形可能で、GB50%配合では、40%と比べて粘りが少ない状態であった。

表2 押出成形用タイルの配合組成

配合組成	(wt%)			
	①WSL	②WSS	②/(①+②)	GB
WS7GB3(0.3)	49	21	0.3	30
WS6GB4(0.3)	42	18	0.3	40
WS5GB5(0.3)	35	15	0.3	50

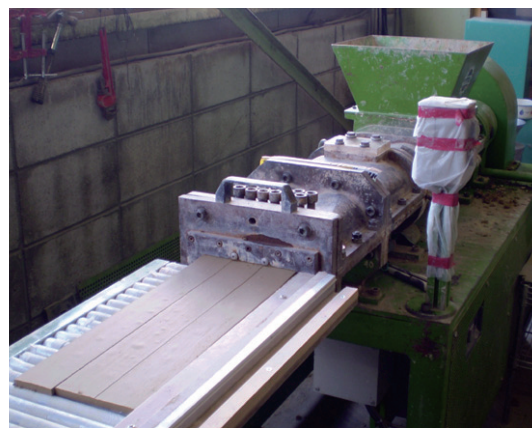


図2 押出成形状況

図3に調湿材のWSS配合比率を0.3に固定し、GBの配合量を30~50%と変化させた時のタイルの曲げ破壊荷重を、図4に原料の混練回数とタイルの曲げ破壊荷重の関係を示す。

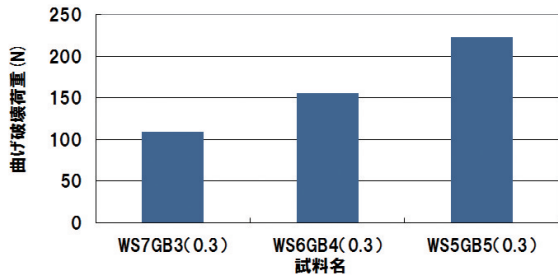


図3 石膏配合量と曲げ強度の関係

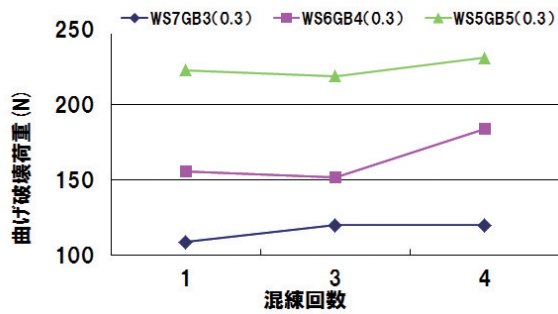


図4 原料の混練回数と曲げ強度

曲げ破壊荷重はGB配合量と正の相関があり、WS5GB5(223N) > WS6GB4(156N) > WS7GB3(109N)の序列で、GBの増加とともに、強度向上が認められた。JIS A 5209内装壁タイルの曲げ破壊荷重の基準である108N以上をいずれもクリアした。GB50%配合では、従来品の約2倍の強度となった。これはGBの配合量の増加により、コロイダルシリカと遊離Caイオンの硬化反応(ケイ酸カルシウム水和物の生成)が促進されたこととGBの自硬性によると考えられる。土練押出成形機に投入する原料の混練回数(原料混練用土練機で混合する回数)4回では、1回混練時の曲げ強度と比較して、約4~18%の強度向上が認められた。強度向上の要因として、混練回数を多くすることで、原料および水分の均一化による効率的な硬化反応が促進したためと推察される。従来組成では、押出成形にバラツキがあり、安定した成形が困難であったが、今回の組成では、容易に成形可能となった。特に、WSSの配合により、粒子間隙に成形および反応に寄与する水を保持できることが成形性および強度向上に影響していると推察される。

調湿機能は、温度一定で相対湿度変化を与えた時の試料重量変化から評価した。測定条件は、各試料を吸湿面(190×58mm)以外を断湿した後、60℃で24時間乾燥し、乾燥重量(Wa)を測定後、温度25℃、90%RHの恒温恒湿槽内で24時間静置後、吸湿重量(Wb)を測定し、(1)式より、吸湿量(H90)を算出した。同様に、25℃、50%RHに設定した槽内に24時間静置した試料の吸湿重量を測定し、吸湿量(H50)を算出した。次に、(2)式により、25℃、90-50%RH

条件下における試料の調湿機能(Hca)を算出した。

$$\text{吸湿量H90(またはH50)}(\text{g/m}^2) = (\text{Wb} - \text{Wa}) / \text{A} \quad (1)$$

$$\text{調湿機能Hca} = \text{H90} - \text{H50} \quad (2)$$

A: 吸湿面積 (m²)

湿度変化に伴う試料重量変化が大きい試料は、調湿機能が優れていると判断される。作製タイルの調湿機能を図5に示す。GBの配合量の増加とともに調湿機能は低下し、WS7GB3(705g/m²) > WS6GB4(631g/m²) > WS5GB5(544g/m²)の序列であった。

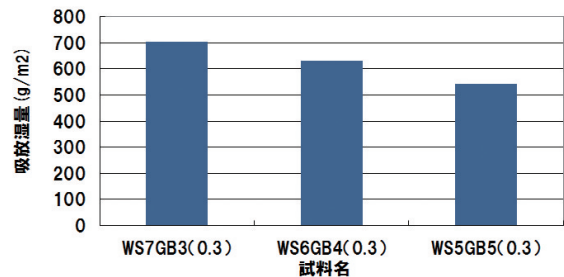


図5 押出成形法で作製したタイルの調湿機能

以上から、タイルの成形性、曲げ強度、調湿機能を考慮し、押出成形法の最適配合組成として、調湿材のWSS配合比率を0.3、WS(WSL+WSS):60wt%、GB:40wt%を決定した。

3.2 最適配合組成に適合するコロイダルシリカの検討

表3に使用したコロイダルシリカの種類を示す。いずれもADEAKA製コロイダルシリカで、SiO₂含有量、pH、粘性が異なる5種類である。AT20、AT20Qでは粘性が少ないが原料投入量の調整により、良好に成形可能であった。AT30、AT40では粘性が少なく、成形体に亀裂が多く認められた。いずれも原料と押出成形機内部の摩擦熱による機械の温度上昇が発生した。AT30Aは粘性が高く、若干の亀裂は認められたが、曲り等の変形はなく、比較的良好に成形できた。

乾燥収縮率は大きくなると乾燥時の曲りや亀裂の発生に繋がる。乾燥収縮率はAT20Qが最も小さく、AT20Q(5.7%) < AT20、AT30A(5.8%) < AT40(6.0%) < AT30(6.1%)の序列であり、AT30、AT40は6%以上の大きい値を示した。

表3 コロイダルシリカの種類

	SiO ₂ (wt%)	pH	粒子径 (nm)	粘度 (mPas)
AT20	20	10	15	6
AT20Q	20	3	15	5
AT30	30	10	15	15
AT30A	30	9	15	20
AT40	40	10	15	20

図6にコロイダルシリカの種類と曲げ破壊荷重の関係を示す。いずれもJIS A 5209内装壁タイルの曲げ破壊荷重108N以上をクリアした。特にAT30, AT20Qはそれぞれ284,277Nと大きな値を示し、以下AT30A>AT20>AT40の序列であった。

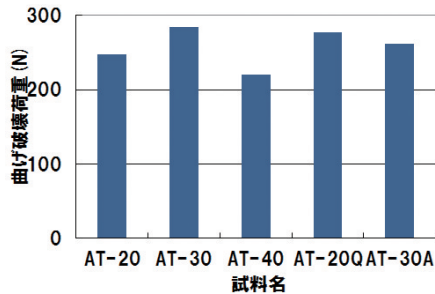


図6 コロイダルシリカの種類と曲げ強度

図7にコロイダルシリカの種類と調湿機能の関係を示す。AT30は最も調湿機能が大きく、596g/m²を示したが、その他のタイルはいずれも540~580g/m²であり、コロイダルシリカの種類の違いによる調湿機能の低下は最大10%以内であった。

以上から、これまで標準で使用しているAT30は曲げ強度、調湿機能ともに大きいことが確認された。コロイダルシリカの種類により、タイルの成形性、乾燥性は変化し、特にAT20, AT20Qは他のコロイダルシリカと比較して、成形性、乾燥性が良好であることから、歩留りの向上に有効であることが示唆された。

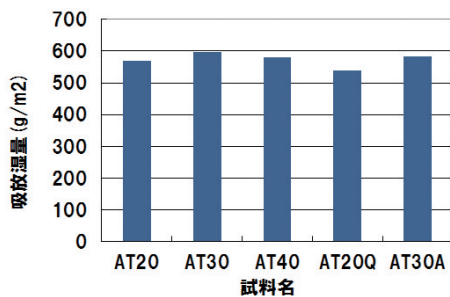


図7 コロイダルシリカの種類と調湿機能

3.3 新規バインダーの検討

表4に原料の配合組成を示す。すべての組成で成形は可能であったが、配合組成3は最も成形性が良好であった。逆に、配合組成4は成形性・ハンドリングともに困難であった。

表4 原料の配合組成

配合組成	(wt%)					
	WSL	MC	ゼオライト	貝化石	ツノマタ G	Na
1	100	3				
2	100	3				2
3	100	2				2
4	100				2.2	
5	70	3	30TZ			
6	70	3	30NZ			
7	70	3		30		
8	70		30TZ			
9	50		50TZ			

※TZ：十勝ゼオライト，NZ：仁木ゼオライト

図8に各種バインダーを用いたタイルの曲げ強度を示す。配合組成4および8以外はいずれも、内装壁タイルの曲げ破壊荷重108Nをクリアした。特に配合組成1, 5, 6, 7は400N以上の高強度であり、MCが強度向上に有効なバインダーであることが示唆された。

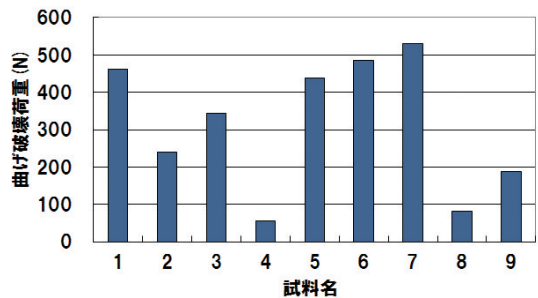


図8 各種バインダーとタイルの曲げ強度

図9に各種バインダーを用いたタイルの調湿機能を示す。配合組成4および8はいずれも800g/m²以上の高い調湿機能を発現した。配合組成1および3は曲げ破壊荷重が350~460N、調湿機能はいずれも600g/m²以上であり、強度と調湿機能を兼ね備えた配合組成にはMCの有効性が示唆された。

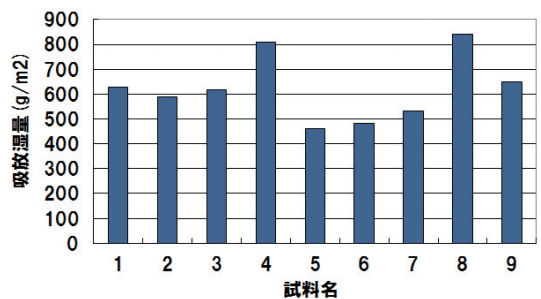


図9 各種バインダーとタイルの調湿機能

3.4 新規成形方法の可能性の検討

図10, 11に成形状況を示す。成形は混練しながら成形せず、装置に充填した原料を、後方から加圧装置により、一軸加圧成形する方法である。この方法では、土練成形機で見られた

オーガーによる原料の混練に起因するタイルの曲りや亀裂が減少することから、歩留りの向上が期待できる。



図10 新規成形試験（ピストン式）



図11 成形機の加圧部

4. まとめ

押出成形法による非焼成型調湿タイルの最適生産製造技術の確立を目的として、強度及び歩留まり向上を実現する配合組成や新たなバインダーの検討、さらには新規成形方法を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 押出成形法によるタイルの最適配合組成は、調湿材のWSS配合比率0.3, WS:60wt%, GB:40wt%であり、作製したタイルの曲げ破壊荷重は156N, 調湿機能は631g/m²だった。
- 2) 標準で使用しているコロイダルシリカAT30は曲げ強度、調湿機能ではいずれも最大値を示し、成形性や歩留りの向上にはAT20, AT20Qが有効であることが示唆された。
- 3) 新規バインダーとして、強度と調湿機能を兼ね備えた配合組成ではMCの有効性が示唆された。
- 4) 新規成形方法（ピストン式）により、土練成形機のオーガーによる原料の混練に起因する曲りや亀裂が減少し、歩

留りが向上することが判明した。

本研究で実施したタイルの量産化技術（押出成形に適した原料組成）を企業へ導入し、成形性及び強度の向上を実現した。従来の樹脂型枠によるタイル成形の生産量と比べて、押出成形法の導入により、約3倍の生産能力を実現し、製造コストは約1/3に低減することができた。一方、現在のタイル販売価格は他社製品と比較して約2倍であるため、さらなる効率的な量産製造条件の確立と歩留りの向上等により、コストの低減化が今後の重要な検討課題である。また、調湿機能のみならず、VOCガスや脱臭等多様なガス吸着分解機能もニーズとして増加が見込まれることから、製品の競争力強化、製品のバージョンアップを図りながら、商品開発を進めていく。また、多様な室内環境改善に効果が期待される光触媒との複合化技術の蓄積により、ニーズに適合した製品開発が期待される。

引用文献

- 1) H21年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会講演要旨（非焼成型光触媒担持調湿機能材料の開発）
- 2) 特許5070529

ポリプロピレンの難燃化に及ぼすゼオライトの添加効果

山岸 暢

Effect of Zeolite on Flame Retardant of Polypropylene

Tohru YAMAGISHI

抄 録

環境負荷の少ないプラスチックの難燃化の方法として、イントメッセント系難燃剤について検討した結果、ポリプロピレンにポリリン酸アンモニウム、ペンタエリスリトール、ゼオライトを複合添加する方法が難燃化に有効であることが明らかになった。

キーワード：プラスチック、ポリプロピレン、ゼオライト、難燃剤、イントメッセント

1. はじめに

建材や生活用品等の私達の身近なものに難燃性の材料を用いることは、火災を防止するために非常に有効な手段である。難燃性のプラスチック製品は、難燃剤を添加することにより難燃化されているが、難燃剤の多くは有害性が疑われており、WEEE（廃電気電子機器指令）やRoHS（電気電子機器に含有する有害物制限指令）等でEUを中心に化学物質に対する規制が進む中で、国内でも一部の難燃剤に関し法的な管理が定められ今後さらなる規制の拡大が予想されるため、環境負荷の少ない難燃化技術の開発が望まれている。

最近、安全性の高い難燃化の手法としてイントメッセント系難燃剤が検討されている。これは燃焼時に形成される炭化層に断熱効果を持たせるため炭化層を泡状にして膨張させるもので、膨張層の表面が炭化しているので燃焼の進行が抑制される。イントメッセント系難燃剤として一般的なのは、炭化層形成のためにポリリン酸アンモニウム等のリン化合物を添加し、さらに炭化・発泡効果を向上させるため炭化促進剤や発泡促進剤を併用する方法である。

ゼオライトは一般には石油の接触分解反応触媒に用いられ、主反応はパラフィン系炭化水素のC-C結合の開裂によるパラフィンとオレフィンへの分解であるが、同時にオレフィンや芳香族の重合によるコーク生成反応（炭化反応）も発生する^{1,2)}。

本報では、イントメッセント系難燃剤に及ぼすゼオライトの炭化促進効果を調査し、有害性の少ない難燃性プラスチックの材料構成について検討した。

2. 試験方法

2.1 材料

プラスチックとしてポリプロピレン（PP）（J721GR、(株)プライムポリマー）を用いた。ポリリン酸アンモニウム（APP）としてTERRAJU C-30（ブーデンハイム社）を用いた。ペンタエリスリトール（PER）としてキング化学(株)の試薬（純度95%以上）を用いた。ゼオライト（ZE）として、とかちゼオライト（モルデナイト、(株)共成レンテム）、モルデナイト（新東北化学工業(株)）、クリノプチロライト（仁木ゼオライト）、合成ゼオライト（モルデナイト、和光純薬工業(株)）を用いた。

2.2 試験片の作製

PPと各添加剤をプラスチックコーダー（PL-2000、ブラベンダー社製）を用いて設定温度200℃で熔融混練・複合化し、加熱プレスで厚み2mmの平板に成形した後、幅13mm長さ125mmの短冊状の試験片に切削加工した。

2.3 物性評価方法

難燃性は、JIS C 60695-11-10 耐火性試験のA法水平燃焼試験の線燃焼速度で評価した。加熱時の熱特性はTG-DTA（示差熱-熱重量同時測定、(株)日立ハイテクサイエンス）で評価した。加熱時の熔融特性はフローテスター（CFT-500D、島津製作所(株)）で評価した。

事業名：経常研究

課題名：低環境負荷型難燃性高分子系複合材料の開発
（平成22～24年度）

3. 試験結果および考察

3.1 ポリリン酸アンモニウムによる難燃化

図1にPPへのAPPの添加率と線燃焼速度の関係を示した。PPのみでは、20mm/min以上の速度で燃焼するが、APPの添加率が増加すると線燃焼速度は減少し、40wt%以上の添加率で着火しなくなった。

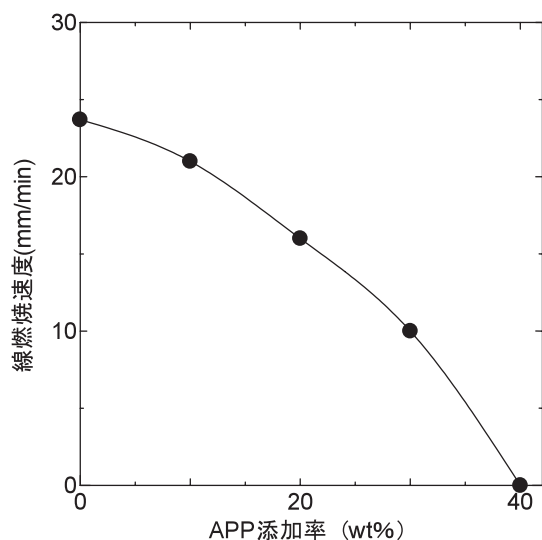


図1 APP添加率と線燃焼速度の関係

添加率が大きくなるに従い、このピークは小さくなった。またPPのみでは350~400°Cの範囲のピークは無かったが、APPの添加により発熱ピークが発生し、添加率が大きくなるに従い、ピークが大きくなった。250~300°Cの範囲では熱分解・燃焼反応が進行し、350~400°Cの範囲では炭化反応が進行するものと考えられる。PPへのAPPの添加による炭化反応の促進効果が明らかになった。

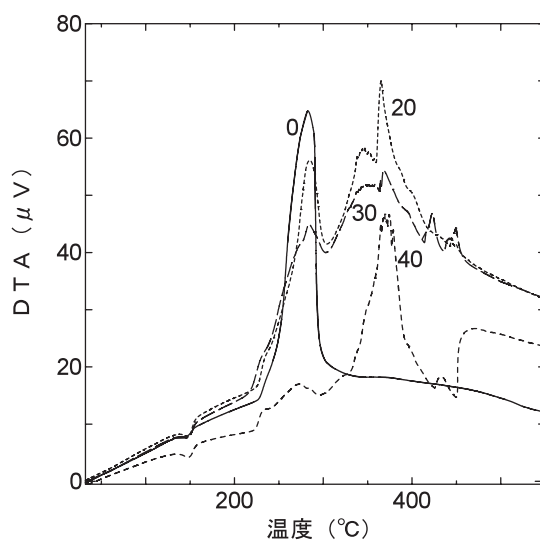


図3 APP添加率とDTAの関係

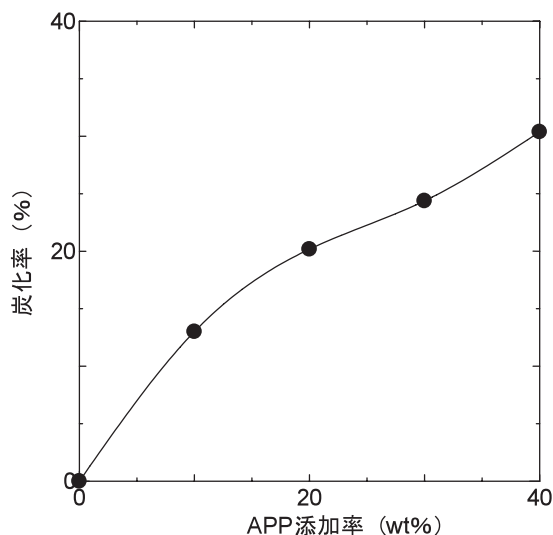


図2 APP添加率と炭化率の関係

図2にPPへのAPPの添加率と炭化率の関係を示した。TG-DTAによりair雰囲気では10°C/minの速度で昇温し、550°Cに到達したときの残渣分を炭化率とした。APPの添加率が増加すると炭化率は増加し、40wt%の添加率では約30wt%の炭化率になった。難燃化には燃焼時に30wt%以上の炭化が必要である。

図3にAPPの添加率とDTAの関係を示した。PPのみでは250~300°Cの温度範囲に大きな発熱ピークがあり、APPの

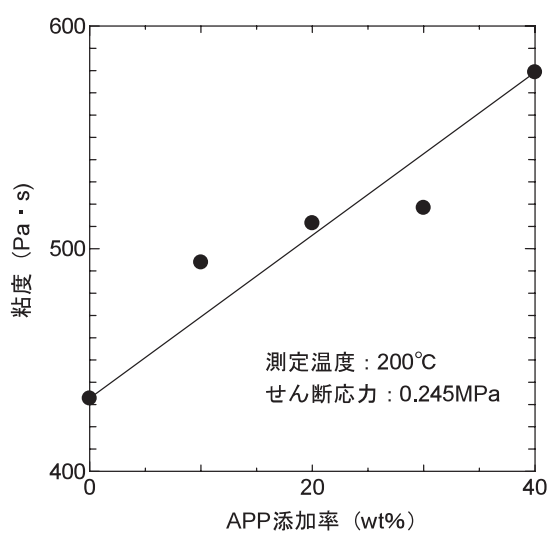


図4 APP添加率と熔融粘度の関係

図4にPPへのAPPの添加率と熔融粘度（測定温度：200°C、せん断応力：0.245MPa）の関係を示した。APPの添加率が増加すると熔融粘度は増加した。粘度の増加は成形加工性を低下させるため、添加剤の添加率の低減を検討する必要がある。

3.2 ペンタエリスリトールの添加効果

PP本来の物性の保持を目的とし、難燃化に必要な添加剤の添加率の低減のため、炭化発泡促進剤としてPERを選定しAPPとの複合効果を検討した³⁾。

図5にPP/APPを70/30の重量比で複合化した試験体へのPERの添加率と線燃焼速度の関係を示した。PERの添加率が増加すると線燃焼速度は減少し、5wt%以上の添加率で着火しなくなった。この配合処方ではPPの割合は67wt%であった。

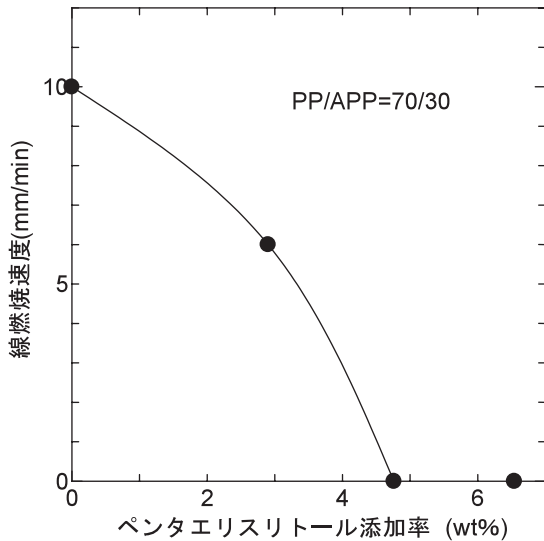


図5 PER添加率と線燃焼速度の関係

さらなるPPの割合の増加の検討のため、PP/APPを90/10の重量比で複合化した試験体へのPERの添加率と線燃焼速度の関係を調べた結果を図7に示した。PERの添加率が増加すると線燃焼速度は減少し、約20wt%以上の添加率で着火しなくなった。この場合の複合材中に占めるPPの割合は約75wt%であり、PP/APPの複合比率が80/20の場合と変わらないため、PP/APP/PERの複合化でこれ以上複合材中のPPの割合を増加させるのは不可能であることが明らかになった。

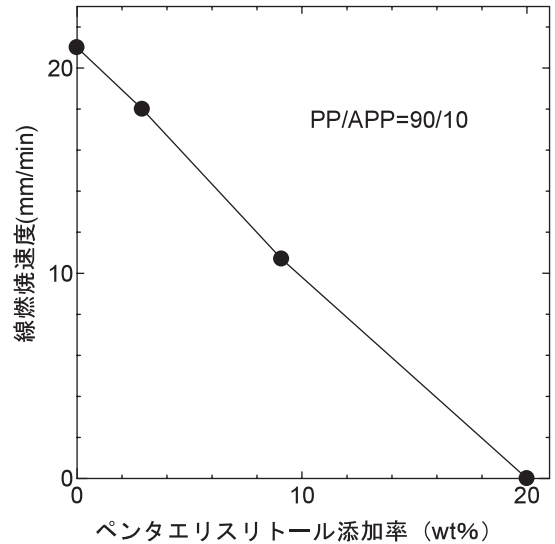


図7 PER添加率と線燃焼速度の関係

さらなるPPの割合の増加の検討のため、PP/APPを80/20の重量比で複合化した試験体へのPERの添加率と線燃焼速度の関係を調べた結果を図6に示した。PERの添加率が増加すると線燃焼速度は減少し、7wt%以上の添加率で着火しなくなった。この複合化処方ではPPの割合は約75wt%であった。

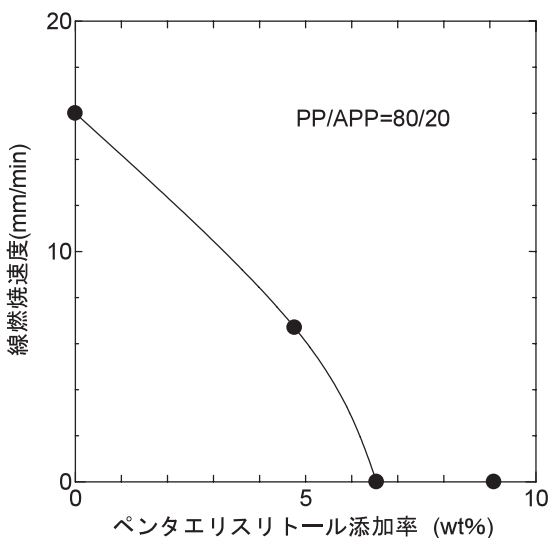


図6 PER添加率と線燃焼速度の関係

3.3 ゼオライトの添加効果

PP本来の物性の保持を目的とし、難燃化に必要な添加剤の添加率のさらなる低減のため、ZE, PER, APPの複合効果を検討した。

図8にPPのみの場合と、PPにZE（とちかちゼオライト）を30wt%添加した場合のDTAを示した。PPのみの場合の250～

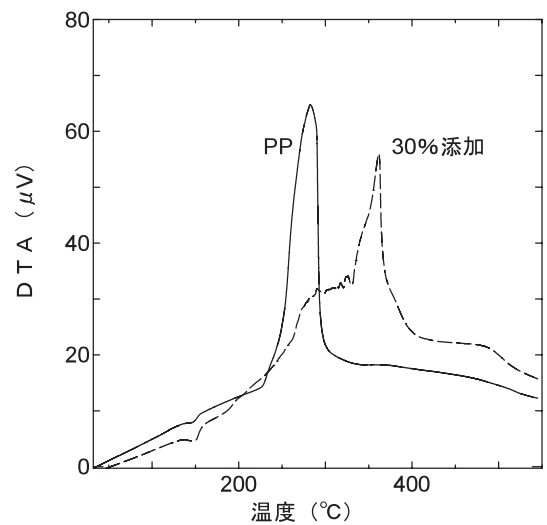


図8 ZEの添加によるDTAの変化

300℃の温度範囲の大きな発熱ピークは、ゼオライトの添加によりほとんどなくなり、さらに350~400℃付近の発熱ピークが発生した。ゼオライトによる炭化促進効果が確認された。

図9にPPへのゼオライトの添加率と炭化率の関係を示した。ゼオライトの添加率が増加すると炭化率は増加するが、50wt%の添加率でも炭化率は約12wt%であった。3.1節の結果では難燃化には30wt%以上の炭化率が必要なため、PPにゼオライトのみを添加しても難燃化は不可能であることが明らかになった。

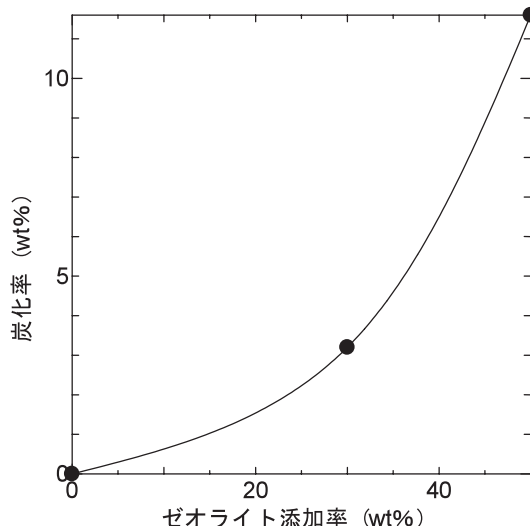


図9 ZE添加率と炭化率の関係

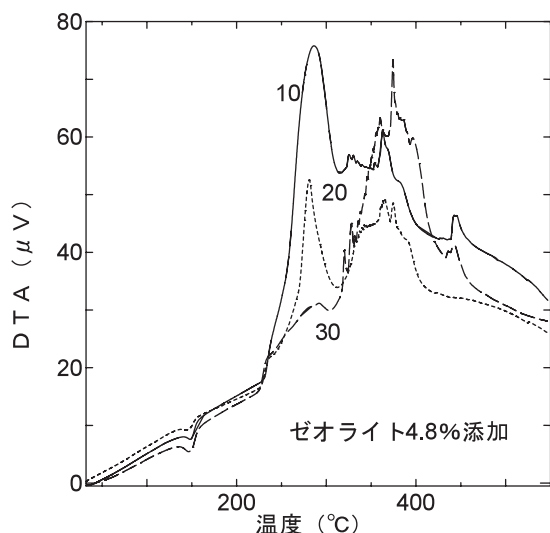


図10 APP添加率によるDTAの変化

図10にPP中へのAPPの添加率を10, 20, 30wt%にし、さらにゼオライトを4.8wt%添加した複合材のDTAを示した。APPの添加率が増えるほど250~300℃の温度範囲の発熱ピークが小さくなるとともに、350~400℃の範囲の発熱ピークが大きくなった。APPとゼオライトを併用することにより炭化が促進されることが明らかになった。

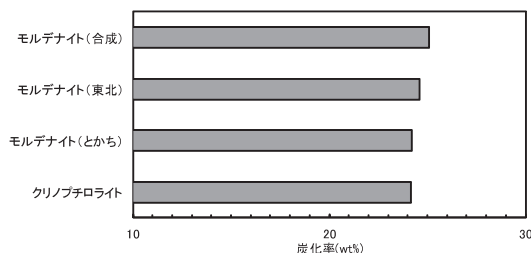


図11 各種ZEの添加による炭化率の比較

図11にPP/APP/各種ゼオライトを70/30/5の比率で複合化した場合の炭化率を示した。各ゼオライトの添加により炭化率はほとんど変わらないため、炭化の促進効果は何れのゼオライトでもほぼ同じであった。しかしこの配合処方では、炭化率は25wt%程度であり、難燃性は十分に得られないため、APPとゼオライトのみの併用では難燃化は困難であった。

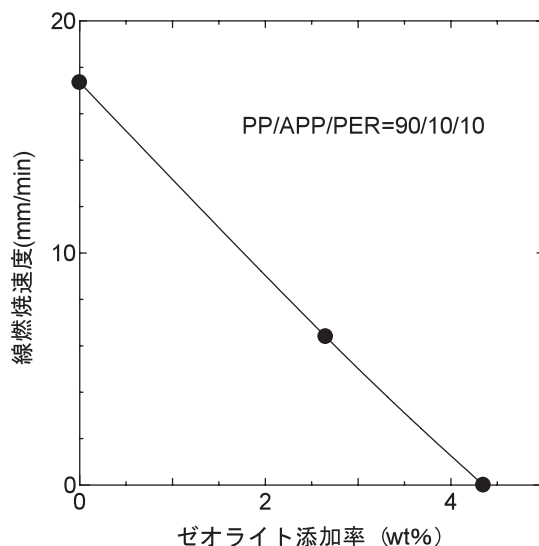


図12 ZE添加率と線燃焼速度の関係

図12にPP/APP/PERを90/10/10の比率で複合化した試験体へのゼオライトの添加率と線燃焼速度の関係を示した。ゼオライトの添加率が増加すると線燃焼速度は減少し、4wt%以上の添加率で着火しなくなった。この配合処方ではPPの割合は79wt%であった。

4. まとめ

PPにAPP, PER, ZEを添加し複合化した材料の難燃特性について検討した結果、次の知見が得られた。

- (1) PPにAPPを40wt%以上添加すると燃焼時に30wt%以上の炭化率が得られ空気中で着火しなくなった。
- (2) PPとAPPの複合材にPERを添加すると難燃化が促進され添加剤の総量が低減された。
- (3) PPとAPPの複合材にZEを添加すると難燃化がさらに促

進され添加剤の総量が約20wt%まで低減された。

以上のことから、APP、PER、ZEを併用したイントメッセント系難燃剤におけるZE添加による難燃性相乗効果が確認された。

謝辞

本研究で複合材の評価に使用したフローテスターは、平成23年度の財団法人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) 原 伸宜, 高橋 浩: ゼオライト, 講談社, 143PP., (1975)
- 2) 富永博夫: ゼオライトの科学と応用, 講談社, 193PP., (1987)
- 3) 河原崎政行, 菊池伸一, 平舘亮一, 平林 靖: 高度な難燃性能を有する木質系防火材料の開発, 林産試験場報, Vol. 18, No. 4, (2004)

鉄系吸着剤によるヒ素の除去に関する研究

稲野 浩行, 堀川 弘善, 板橋 孝至, 富田 恵一, 平野 繁樹

Arsenic Removal by Iron Adsorbent

Hiroyuki INANO, Hiroyoshi HORIKAWA, Koji ITABASHI
Keiichi TOMITA, Shigeki HIRANO

キーワード：ヒ素, 除去材, 鉄粉, オキシ水酸化鉄

1. はじめに

休廃止鉱山からの廃水, 温泉水, 土壌などには人体に有害な重金属が含まれている場合があり, その対策が求められている。特に北海道では, 温泉水に水質汚濁防止法の排水基準である0.1 mg/Lを超える1 mg/L程度の高濃度のヒ素Asが含まれる地区があり¹⁾ 効率的で安価な廃水処理が課題となっている。また土壌に高濃度のAsが含まれる地域がある²⁾ ため, 自然由来の重金属類も対象となった平成22年4月の土壌汚染対策法の改正³⁾により土木工事では対応が求められることとなった。世界的にはバングラデシュ, 中国, インドなどで1億人以上が飲料水基準の0.01mg/Lを超える地下水を飲用しており深刻な健康被害が問題となっている。

Asは水中ではⅢ価とⅤ価の酸化物イオンとして存在し, 前者は亜ヒ酸イオン AsO_2^- 等, 後者はヒ酸イオン AsO_4^{3-} 等である。Ⅲ価の方がⅤ価よりも毒性が強く, 有機ヒ素よりも無機ヒ素の方が毒性が強い。Asを長期間摂取すると体内に蓄積し皮膚がんなどの症状が発症する健康リスクがある。

水中からのAsの除去技術については, 鉄(Ⅲ)塩, アルミニウム塩, 硫化物による沈殿法(凝集分離法), 活性アルミナ, 活性炭, 希土類の含水酸化物などによる吸着法, 逆浸透法, 吸着コロイド浮上法などがある⁴⁾。また, 近年は低結晶性鉄鉱物であるシュベルトマナイトの硫酸イオンとヒ酸イオンを置換し構造内にヒ素を保持して安定化することによりヒ素汚染水を浄化する手法が開発された⁵⁾。トンネル工事などにおける土壌中のAsなど重金属の対策としては, 遮水シートによる封じ込め工法と吸着層工法がある。吸着層工法では, 含有される重金属の種類によって適切な吸着材を含んだ層を施工しその上に汚染土壌を載せる。

水中, 土壌中のAsの除去, 固定化に使われる吸着材のひ

とつとして鉄粉がある。鉄粉を使う利点としては, 水中のAsを吸着させた後, 磁力で回収することができるため取り扱いが容易なことである。Asは水酸化鉄等と難溶性のヒ酸鉄塩, 亜ヒ酸鉄塩などを形成することが知られており鉄粉による吸着も似たようなメカニズムかと推論されるが詳しいことはわかっていない。

本研究では, 水中からのAs除去材として鉄粉を使う場合の基礎的な検討を行った。まず物性の異なる3種類の鉄粉を用いてAs除去試験を行い, 物性と除去性能についての関係を検討した。そのうち一番効率の高かった鉄粉について, 腐食処理, 加熱処理を行い, 処理方法とAs除去性能について検討した。なお, 道内で処理しなければならない温泉排水中のAs濃度は高くても1 mg/L程度であるが, 本研究ではAs除去材開発の基礎的知見を得るため100mg/Lの高濃度溶液で除去試験を行った。

2. 実験

2.1 使用した鉄粉とその評価

As除去性能の比較のため, 物性の異なる3種類の鉄粉を用いた。粒度分布は粒度分析計(日機装製マイクロトラックHRA 9320-X100)を用いて測定した。鉄粉の形状は走査型電子顕微鏡(日本電子製JSM-6610LA)を用いて観察した。電子顕微鏡での観察条件は, 加速電圧15kVである。結晶相の同定はX線回折装置(リガク製Ultima-IV)を用い, Cu管球, 印可電圧40kV, 電流30mAの条件で行った。

2.2 As除去試験

Ⅲ価のAsを含む試薬の NaAsO_2 を蒸留水に溶解しAs100 mg/L水溶液を調整した。水溶液の初期pHは9.6であった。容量250mlのポリエチレン製の瓶に NaAsO_2 水溶液100mlと, 除去材として各鉄粉を1.0g入れ, 密栓して室温で1時間振とうした。その後, 1 μm のメンブレンフィルターを用いて

事業名：経常研究(平成23~24年度)

課題名：鉄系吸着材による重金属除去に関する研究

吸引濾過し固液分離を行った。濾液にHNO₃を加え酸性にして10倍に希釈した溶液のAs濃度をICP発光分光分析装置（島津製作所製ICPS-8100）にて分析した。除去材を入れずに同様の操作を行ったものと比較し、As除去率を求めた。

2.3 鉄粉表面処理試験

上記2.2項でAs除去率が一番高かった鉄粉に対して、腐食処理と加熱酸化処理を行った。腐食処理は、鉄粉に水道水を添加して静置する手法と、5 w/w% CaCl₂水溶液を浸透させ、その後水蒸気加熱することで腐食処理を促進する方法の2種類を行い比較した。加熱酸化処理は、鉄粉をアルミナのつぼに入れ電気炉で加熱し400、800℃になったときに電気炉から取り出し室温まで放冷して行った。結晶相の同定は前述(2.1項)と同様の方法で行った。加熱時における吸発熱と重量変化測定(TG/DTA)は、示差熱重量同時分析装置(セイコーインスツルメンツ製TG/DTA6300)を用いて行った。アルミナ製試料容器に20mgの試料を充填し、対象には同量のα-アルミナ粉末を用いた。空気を200ml/minで流しながら、10℃/minで昇温し、1000℃まで測定した。

2.4 処理鉄粉によるAs除去試験

2.3項で各種処理を行った処理鉄粉1.0gを用いて2.2項と同様の試験を行った。

2.5 As除去試験後鉄粉のTG試験

未処理および腐食処理した鉄粉と除去試験後鉄粉の含水量を調べるために熱重量測定を行った。標準物質として比較のため試薬の水酸化鉄(Ⅲ)(キシダ化学製)の測定も行った。測定は2.3項における重量変化測定と同様の方法で350℃まで行った。

3. 結果と考察

3.1 使用した鉄粉とその評価

鉄粉の粒度分布測定の結果を表1と図1に示す。A、Bは

50%径が50 μm付近であるのに対しCは150 μm付近であり、CはA、Bに比べ粒径が大きかった。この装置の測定範囲は704 μmまでであるがCにはそれ以上の粒径の粒子が含まれていた。また、Bは10 μm以下の微粒子が多く累積で11.65%存在するが、A、Cでは1%以下である。粒子を球と仮定した場合の比表面積は、B>A>Cであり、Bの比表面積はCの5倍以上である。

使用した鉄粉の走査型電子顕微鏡写真を図2に示す。Aはほとんどが100 μm弱の粒子である。Bは表面に凹凸が多く入り組んだ形状であり、微細な粒子とそれが凝集したような大きな粒子で構成されている。Cは不定形で荒く一部には小さな球状粒子が見られる。これらの鉄粉は粒度だけでなく表面形状も大きく異なっていた。

表1 使用した鉄粉の粒径と表面積

鉄粉	A	B	C
体積平均径(μm)	59.16	59.65	180.2
50%径(μm)	57.4	45.21	157.8
比表面積(m ² /cc)	0.14263	0.3776	0.07194

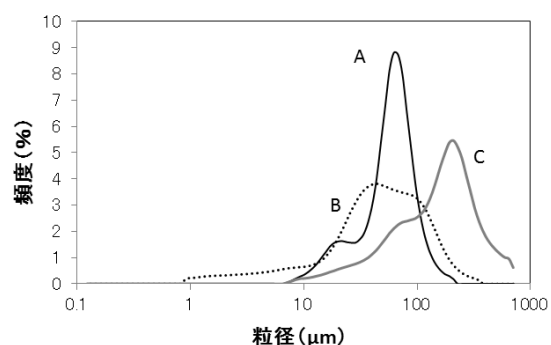


図1 使用した鉄粉の粒度分布

3.2 As除去試験

図3のように振とう試験を実施した。振とう試験後の溶液は、AとCは薄い灰色で、Bは黒色であった。Bには10 μm以

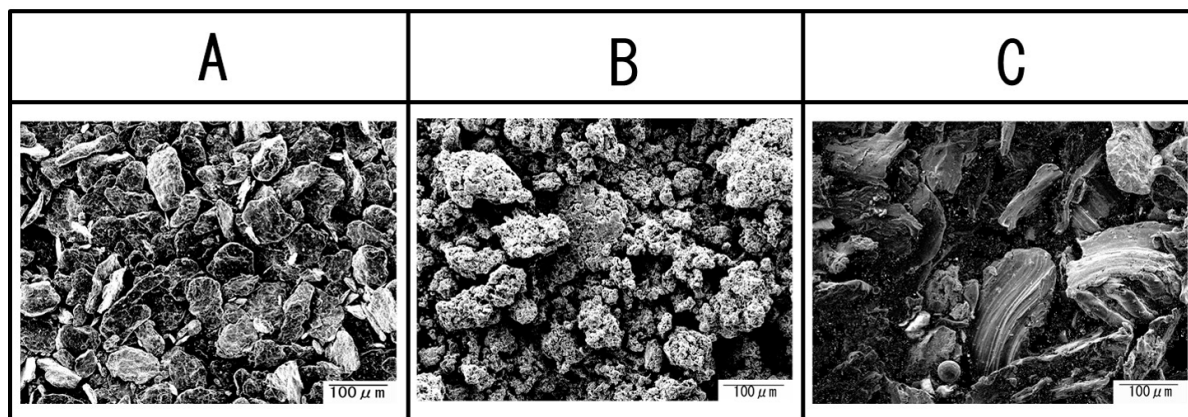


図2 使用した鉄粉の走査型電子顕微鏡写真

下の微粒子が含まれておりそれが沈殿しなかったためと思われる。1 μmのメンブレンフィルターで濾過後は、AとBは無色透明であったが、Cはごく薄い黄色に着色していた。濾液中のAs濃度をICPで測定し、以下の式でAs除去率 R_{As} を計算した。

$$R_{As} = \frac{C_N - C_F}{C_N} \times 100$$

ここで、 C_N は鉄粉を入れずに振とう試験を行った時の濾液中As濃度、 C_F は鉄粉を入れて振とう試験を行った時の濾液中As濃度である。

その結果のグラフを図4に示す。その結果、As除去率が一番高かったのは、粒度が大きく比表面積が小さい鉄粉Cで38.2%であった。単純に物理的に吸着するのであれば鉄粉での除去率は表面積に比例するはずであるが、鉄粉Cの2倍の比表面積を持つ鉄粉AではAs除去率は鉄粉Cの1/3程度であり、鉄粉Cの5倍の比表面積を持つ鉄粉BではAs除去率は鉄粉Cの60%程度であった。以上により、鉄粉によるAs除去性能は鉄粉の種類によって大きく異なることが判明した。しかも除去性能は鉄粉の比表面積や粒度という物理的な性質に依存しないことから、鉄粉の化学状態に依存することが示唆された。



図3 振とう試験

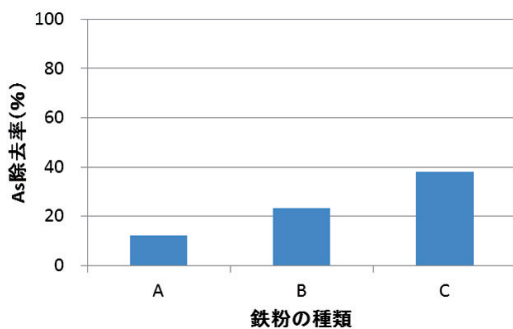


図4 As100mg/L水溶液での振とう試験における鉄粉の種類とAs除去率

3.3 鉄粉表面処理試験

鉄粉の種類を変えた振とう試験によってAs除去性能が鉄粉の化学的性質に依存することが示唆されたため、鉄粉の化学的性質を変化させることによりAs除去性能の向上が期待できる。鉄化合物として水酸化鉄⁶⁾、酸化鉄によるAs吸着の事例があるため、上記As除去試験によりAs除去率の一番高かった鉄粉Cについて腐食処理、加熱処理によって表面に水酸化鉄、酸化鉄を形成し、As除去試験に用いることとした。

水酸化鉄は、いわゆる鉄の赤さびのことである。鉄粉Cを腐食させ水酸化鉄を得るために水道水を添加し室温で静置した。肉眼で観察したところ褐色に変化するまでに時間がかかり変色も少なかったため、腐食をより促進させるために5 w/w%のCaCl₂水溶液を添加し、さらに高温水蒸気加熱を行った。30分の加熱で鉄粉Cは褐色に変色した。

加熱処理については、処理に先立ちTG/DTA測定を行った。TG/DTAの測定結果を図5に示す。350°C付近から発熱とともに質量増加が始まる。発熱は550, 600, 700°C付近にピークを持つ。質量は800°Cまではほぼ直線的に増加を続け、最終的に35%の増加となる。この時の質量比はFe:O=100:35でありモル比では3:4に近い。加熱処理は鉄粉Cをアルミナるつばに充填し電気炉で加熱した。400°Cで取り出したものは鉄粉の金属光沢が失われ濃灰色になっており、鉄粉同士は軽く焼結していた。800°Cで取り出した試料は、試料上部が赤褐色になり、内部は濃灰色であった。焼結は、より進行し鉄粉同士が固着していた。加熱した鉄粉のX線回折パターンを図6に示す。未加熱では主にFeのピークが同定され、それに加えわずかに自然酸化と思われるFe₃O₄のピークが同定された。400°C加熱の試料ではFeに加えFe₃O₄とFe₂O₃のピークが同定された。800°C加熱ではFeのピークは消失しFe₂O₃が同定された。鉄粉Cには不純物としてSiが含まれていたため、800°CではSiO₂のピークが同定された。

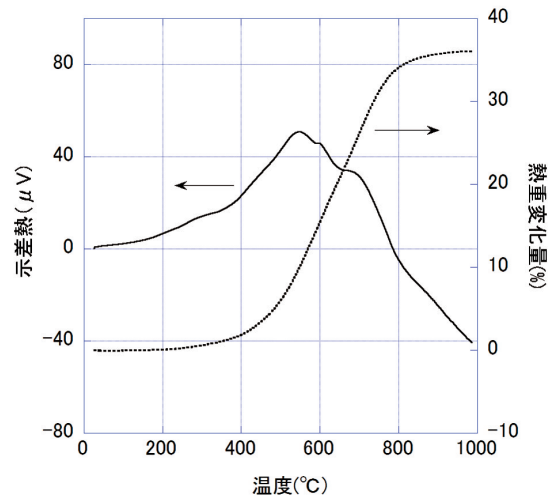


図5 鉄粉CのTG/DTA結果

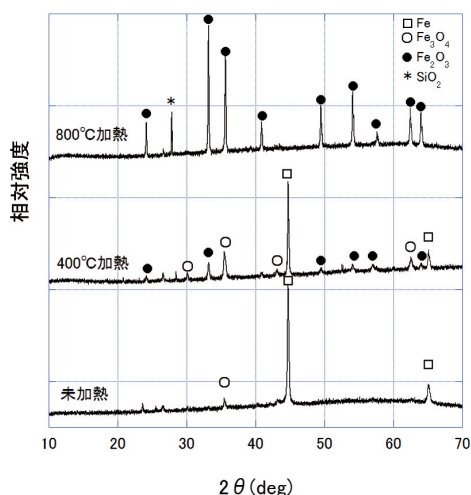


図6 未加熱および400および800°C加熱した鉄粉CのXRDパターン

3.4 処理鉄粉によるAs除去試験

除去率の一番高かったCについて、腐食処理、加熱酸化処理を行ったものを除去材とした時のAs除去率を求め、未処理の場合と比較した結果を図7に示す。水道水による腐食処理鉄粉ではAs除去率が53.1%となり、未処理鉄粉Cに比べ向上した。さらにCaCl₂による腐食処理鉄粉では98.7%にまで除去率が向上した。100ppm水溶液100mlには10mgのAsが含有されているので、腐食した鉄粉1gによって、約10mgのAsが除去されたことになる。

しかし加熱酸化処理を行ったものは、逆に除去率が低下した。400°C加熱の鉄粉では17.1%，800°C加熱鉄粉ではさらに3.3%まで低下した。

これにより、鉄粉そのものよりも、腐食処理によりAs除去率が向上し、特にCaCl₂による腐食処理を行うことで、As除去率が向上するということがわかった。しかし、加熱処理ではAs除去率が低下し、特に加熱温度が高くなるほど除去率が低下するということがわかった。

3.5 鉄粉のTG試験

腐食試験では鉄粉表面に赤さびであるオキシ水酸化鉄が生成していると予想しTGによる重量変化を測定した。オキシ水酸化鉄は加熱により脱水反応が起こり重量が減少する。図8に示した試薬のオキシ水酸化鉄FeO(OH)の測定結果では、室温から100°Cまでに1%弱の重量減少があり、200°Cを超えてから320°Cにかけて大きく重量が減少し、320°Cでは全体の10.4%の重量減少となった。これはFeO(OH)からH₂Oが脱離し酸化鉄に変化したからである。本研究で使用した鉄粉のAs除去試験前後における熱重量測定結果を図9に示す。未処理の鉄粉Cではほとんど重量減少はみられなかったが、As除去試験を行った後は350°Cまでに0.4%の重量減少があった。CaCl₂による腐食処理を行った鉄粉の350°Cまでの重量

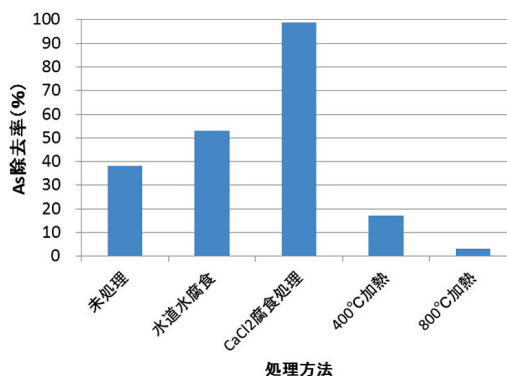


図7 腐食処理、加熱酸化処理を行った鉄粉CのAs除去試験結果

減少は、除去試験前は1.2%であり、試験後は1.8%に増加した。鉄粉CよりもAs除去率の低かった鉄粉Bは180°Cまで0.1%の重量減少があったが、それ以上の温度では重量増加に転じた。

オキシ水酸化鉄は生成後の処理方法によって脱水挙動が異なることが報告されている。沈殿生成後そのままの懸濁液を25°Cの恒温槽で28日間保持し熟成処理した後に濾別して得られたオキシ水酸化鉄の場合、図8と同様に250~300°Cでほぼ直線的な大きな重量減少を示し、熟成処理を行わなかった場合、50°Cから350°Cの範囲に連続的な重量減少を示す⁷⁾。これらのことから、鉄粉Cはオキシ水酸化鉄を含まず、As除去試験後の鉄粉Cはオキシ水酸化鉄を含んだ状態であると考えられる。CaCl₂で腐食処理し赤錆びを生じさせた鉄粉Cは、除去試験前からオキシ水酸化鉄を含んだ状態であり、除去試験で水と接触することにより含水量が増加した。除去試験の結果と合わせると、As除去率の高いCaCl₂腐食処理鉄粉Cは、含水率が未処理の鉄粉Cよりも高く、試験後はさらに含水率が高くなる。鉄粉同士の比較では、As除去試験後において、As除去率の高い鉄粉Cは、鉄粉Bよりも含水率が高かった。これらから、鉄粉やその処理物は含水率が高いほどAs除去性能が高い傾向があることがわかった。これは亜ヒ酸イオンに対し反応性の高いオキシ水酸化鉄が鉄粉表面に多く存在するためと考えられる。また、As除去率が高い鉄粉は除去試験後の含水率が高いということがわかった。これは振とう試験中にさらに腐食が起こり含水率が増加したためと思われる。

以上により、表面に水酸化物が生成しやすい鉄粉、すなわち腐食しやすい鉄粉ほどAs除去性能が高いということが示唆された。

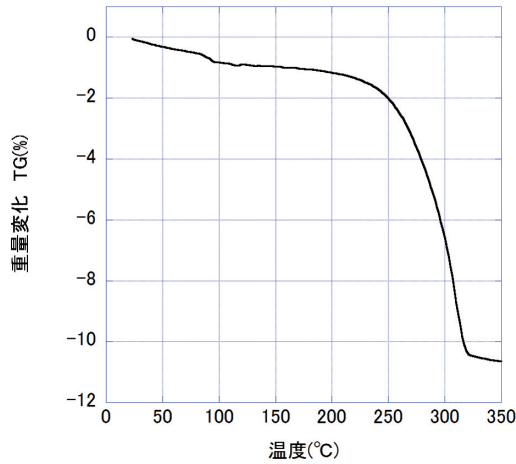


図8 FeO(OH)試薬の熱重量変化

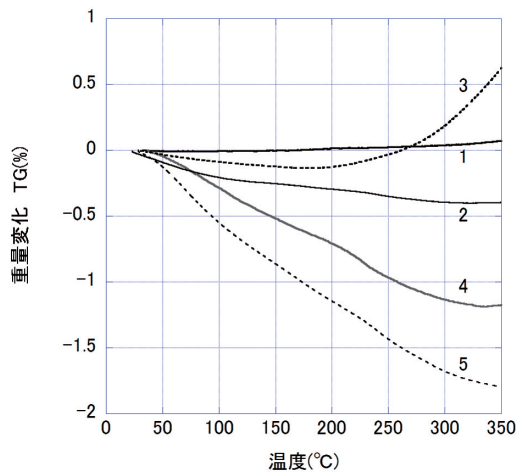


図9 鉄粉の熱重量変化 1. 未処理の鉄粉C 2. As除去試験後の鉄粉C 3. As除去試験後の鉄粉B 4. CaCl₂腐食処理鉄粉C 5. As除去試験後のCaCl₂腐食処理鉄粉C

4. まとめ

鉄粉を除去材として、水中からの人体に有害なAsの除去に関して100mg/LのAs水溶液での除去試験を行った。粒度、表面形状の異なる3種類の鉄粉でAs除去率を比較し、さらに除去率の高いものについては腐食処理、加熱酸化処理を行い、鉄粉の性質とAs除去性能について検討した。これによって以下の知見を得た。

- 鉄粉により水中のAsは除去することが可能であり、その除去性能は、鉄粉の比表面積に依存しない。
- 鉄粉に対しCaCl₂による腐食処理を施すとAsの除去率は向上する。
- 鉄粉の加熱による酸化物の生成はAs除去効率を低下させる。
- As除去性能の高い鉄粉は含水率が高くオキシ水酸化鉄を多く含む。

謝辞

本研究で使用した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

- 北海道地下資源調査所：北海道の地熱・温泉 調査研究報告書第4号(B) 西南北海道北部, 198PP., (1977)
- 独立行政法人産業技術総合研究所地球化学図：<https://gbank.gsj.jp/geochemmap/Hokkaido/gazou/hokkaidoAs-s.jpg>
- 土壤汚染対策法について、環境省ホームページ<http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009.html>
- 徳永修三：水中からのヒ素の除去技術，水環境学会誌，Vol. 20 No. 7, pp. 452-454, (1997)
- 佐藤努・福士圭介・池田穂高：安定性に優れたヒ素吸着物質及びそれを用いた汚染水等の浄化方法，特開2005-871
- 柴山敦・内田篤志・藤田豊久・橋本晃一：水酸化鉄化合物を用いた廃水中に含まれるヒ素の吸着除去，環境資源工学，Vol. 51, pp. 181-188, (2004)
- 古市隆三郎：含水酸化鉄<鉄さび>の熱分析，材料と環境，Vol. 42, pp. 322-330, (1993)