



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.313)

2014

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	醸造用ぶどう園向け除草作業支援ロボットの開発	鈴木 慎一, 多田 達実, 三田村智行 …………… 1 浦池 隆文, 大村 功, 白旗 雅樹 内田 哲嗣, 金子 俊一, 田中 孝之 桑原 純一, 高松 正志
2	画像計測・検査装置のための微細画像処理技術の開発	飯島 俊匡, 岡崎 伸哉, 橋場 参生 …………… 13 高橋 裕之
3	地理情報の高度利用技術の開発と配送支援システムへの応用	奥田 篤, 宮崎 俊之, 高橋 裕之 …………… 21
4	農産廃棄物カスケード型循環利用バイオエタノール製造システムの構築	北口 敏弘, 鎌田 樹志, 山越 幸康 …………… 27 富田 恵一, 三津橋浩行, 高橋 徹 柏瀬 浩司
5	X線CTとガス分析を用いたアルミニウムダイカスト製品の内部品質評価	高橋 英徳, 板橋 孝至, 中嶋 快雄 …………… 35 宮腰 康樹, 戸羽 篤也, 相山 英明 北原総一郎, 赤見 行弘, 倉田 一美 松浦 清隆
6	バランス能力測定のための足部固有感覚検査装置および検査手法の開発	中島 康博, 栞野 晃希, 前田 大輔 …………… 41 田中 敏明, 前田 佑輔, 泉 隆 Lan-Yuen Guo
7	人間動作の特徴解析技術の開発	栞野 晃希, 中島 康博, 前田 大輔 …………… 45 吉成 哲
8	レーザー溶接時の熱・流体挙動観察によるシールドガス供給機構の適正化	櫻庭 洋平, 安田 星季, 三戸 正道 …………… 51 田中 大之, 宮腰 康樹, 中嶋 快雄 保科 秀夫
9	乗り心地を考慮した車両評価システムの開発	神生 直敏, 飯田 憲一 …………… 59
10	木造共同住宅の防音構造用鋼材設計手法の開発	戸羽 篤也, 飯田 憲一, 廣田 誠一 …………… 65

研究ノート

- | | | |
|---|---|-----|
| 1 北海道におけるセンサネットワーク用無線技術に関する基礎研究 | 宮崎 俊之, 高橋 裕之, 奥田 篤
橋場 参生 | 75 |
| 2 ハードディスクからの希土類元素回収 | 富田 恵一, 若杉 郷臣, 高橋 徹 | 81 |
| 3 下水汚泥焼却灰からのリン回収方法に関する研究 | 佐々木雄真, 鎌田 樹志, 吉川 琢也
富田 恵一, 若杉 郷臣, 高橋 徹 | 89 |
| 4 火山灰を使用した長寿命コンクリートの開発 | 高橋 徹, 富田 恵一, 若杉 郷臣
谷口 円, 垣原 康之, 佐川 孝広
島多 昭典, 吉田 行, 秋山 護
石塚 浩章, 斉藤 宗三 | 95 |
| 5 マイクロ・メソ多孔体への発根促進物質の吸脱着挙動 | 執行 達弘, 野村 隆文, 吉田 憲司
橋本 祐二, 可児 浩, 山岸 暢 | 103 |
| 6 バイオポリエステルのリサイクルにおける機械的特性に及ぼす鎖延長剤の添加効果 | 可児 浩 | 111 |
| 7 原子間力顕微鏡による各種試料の微細形状計測 | 斎藤 隆之, 坂村 喬史, 片山 直樹 | 115 |
| 8 新型デザインマネジメントゲームの開発 | 日高 青志, 万城目 聡, 印南 小冬 | 121 |

他誌発表論文抄録

- | | | |
|----------------------------------|----------------------------|-----|
| 1 異なる磁性冷媒を用いた磁気ヒートポンプの冷却特性に実験的検討 | 平野 繁樹, 川南 剛, 伊藤 孝治
麓 耕二 | 127 |
|----------------------------------|----------------------------|-----|

CONTENTS

Regular Paper

1	Development of Weeding Robot for Brewing Vineyards	1
	Shinichi SUZUKI, Tatsumi TADA, Tomoyuki MITAMURA, Takafumi URAIKE Isao OHMURA, Masaki SHIRAHATA, Tetsushi UCHIDA, Shunichi KANEKO Takayuki TANAKA, Junichi KUWABARA, Masashi TAKAMATSU	
2	Development of the Microscopic Image Processing Technique for Measurement and Inspection Apparatus	13
	Toshimasa IJIMA, Shinya OKAZAKI, Mitsuo HASHIBA, Hiroyuki TAKAHASHI	
3	Research on Advanced Application of the Geographic Information	21
	Atsushi OKUDA, Toshiyuki MIYAZAKI, Hiroyuki TAKAHASHI	
4	Establishment of the Bioethanol Manufacturing System from Agricultural Waste	27
	Toshihiro KITAGUCHI, Tatsuyuki KAMADA, Yukiyasu YAMAKOSHI Keiichi TOMITA, Hiroyuki MITSUHASHI, Touru TAKAHASHI, Kouji KASHIWASE	
5	Internal Quality Evaluation of the Aluminum Die-Cast Products Using X-Rays CT and Gas Analysis ...	35
	Hidenori TAKAHASHI, Koji ITABASHI, Yoshio NAKAJIMA, Yasuki MIYAKOSHI Atsuya TOBA, Hideaki AIYAMA, Soichiro KITAHARA, Yukihiro AKAMI Kazumi KURATA, Kiyotaka MATSUURA	
6	Evaluation Apparatus and Method of Proprioceptive Sense in a Foot for Measuring Balance Ability ...	41
	Yasuhiro NAKAJIMA, Daisuke MAEDA, Kohki KUWANO Toshiaki TANAKA, Yusuke MAEDA*, Takashi IZUMI, Lan-Yuen GUO	
7	The Method for Extraction of Motion Feature from Sensor Data	45
	Kouki KUWANO, Yasuhiro NAKAJIMA, Daisuke MAEDA, Satoshi YOSHINARI	
8	Adjustment of Shielding-Gas Feed Mechanism by Observing Thermal and Fluid Behavior of Laser Welding	51
	Yohei SAKURABA, Seiki YASUDA, Masamichi MITO, Hiroyuki TANAKA Yasuki MIYAKOSHI, Yoshio NAKAJIMA, Hideo HOSHINA	
9	Development Vehicle Evaluation System Adding Ride Feeling	59
	Naotoshi KAMIO, Ken'ichi IIDA	
10	The Design Technique of a Steel Plate Which Used for Sound-Insulation in a Wooden Apartment House	65
	Atsuya TOBA, Ken'ichi IIDA, Tomohito HIROTA	

Research Note

1	Basic Research on Low Power Wireless Technologies for Sensor Network Using in Hokkaido	75
	Toshiyuki MIYAZAKI, Hiroyuki TAKAHASHI, Atsushi OKUDA, Mitsuo HASHIBA	
2	Recovery of Rare Earths from Hard Disk Drive	81
	Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI, Touru TAKAHASHI	
3	Study on Method for Recovering Phosphorus from Sewage Sludge Incineration Ash	89
	Takema SASAKI, Tatsuyuki KAMADA, Takuya YOSHIKAWA Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI, Tohru TAKAHASHI	
4	Long Life Span Concrete Using Volcanic Ashes	95
	Touru TAKAHASHI, Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI Madoka TANIGUCHI, Yasuyuki KAKIHARA, Takahiro SAGAWA Akinori SHIMATA, Susumu YOSHIDA Mamoru AKIYAMA, Hiroaki ISHIZUKA, Munemitsu SAITO	
5	Adsorption and Release Behaviors of Root-Promoting Substances on Porous Silica-Based Ceramics	103
	Tatsuhiko SHIGYO, Takafumi NOMURA, Kenji YOSHIDA Yuji HASHIMOTO, Hiroshi KANI, Tohru YAMAGISHI	
6	Effect of Chain Extender on Mechanical Properties in Recycling of Biopolyester	111
	Hiroshi KANI	
7	Measurement of the Microscopic Shape of Various Samples by Atomic Force Microscope	115
	Takayuki SAITOU, Takashi SAKAMURA, Naoki KATAYAMA	
8	Development of Brand-New Design Management Game	121
	Seiji HIDAKA, Akira MANJOUME, Kofuyu INNAMI	

Summaries of Paper Published

1	Experimental Study on Cooling Characteristics of a Magnetocaloric Device with Two Different Types of Magnetic Refrigerants	127
	Shigeki HIRANO, Tsuyoshi KAWANAMI, Koji ITO, Koji FUMOTO	

一 般 論 文

Regular Paper

醸造用ぶどう園向け除草作業支援ロボットの開発

鈴木 慎一, 多田 達実, 三田村 智行, 浦池 隆文
大村 功*, 白旗 雅樹**, 内田 哲嗣**, 金子 俊一***
田中 孝之***, 桑原 純一****, 高松 正志*****

Development of Weeding Robot for Brewing Vineyards

Shin'ichi SUZUKI, Tatsumi TADA, Tomoyuki MITAMURA, Takafumi URAIKE
Isao OHMURA*, Masaki SHIRAHATA**, Tetsushi UCHIDA**, Shun'ichi KANEKO***
Takayuki TANAKA***, Jun'ichi KUWABARA****, Masashi TAKAMATSU*****

抄 録

北海道の醸造用ぶどう園では、雪害を避けるため、ぶどう樹の幹を傾斜させて植栽する栽培法が主流となっている。このため、本州やヨーロッパで使用されている、幹を垂直に植栽する栽培法を前提とした機械等では、効率的な除草作業を行うことが難しい。そこで本研究では、作業効率の向上を目的として、積雪地の栽培法に適した除草作業支援ロボットの開発を行った。

除草作業では、ぶどう樹根元位置の正確な推定機能や、ぶどう樹を傷つけることなく除草を行う機能が必要となる。このため、これまでに屋外向けのセンサとして開発してきた「ステレオビジョンセンサ」を基礎として「ぶどう樹検出センサ」を開発するとともに、ぶどう樹を傷つけず除草を行う「除草機構」の開発を行った。これらと、GPSセンサ等を用いた自動走行機能を統合し、ロボット化を図った。開発においてはシミュレーション技術を有効に活用し、圃場における実地試験により、ロボットの有効性を検証した。

キーワード：除草作業 支援ロボット, ステレオビジョンセンサ, 3D-CAD, シミュレーション

Abstract

In most Hokkaido vineyards, the cultivation method by tilting the stem of grapes is major for preventing snow damages. Therefore the weeding machines used in Honshu and Europe suitable for the cultivation method, in which grape stems are planted vertical to the ground, aren't available. For that reason we developed appropriate weeding robot for snowy area to improve the work efficiency.

In weeding operation, precise recognizing function of root position and sufficient cutting function without error cutting are required. To realizing the weeding robot, we developed the grape stem sensor by using our developed stereo-vision sensor technique and error-cutting-free weeding mechanism. Finally we integrated them and automatically traveling function by using GPS sensor to try robotization. We proceeded developing effectively by using simulation and verified the effectiveness of the robot in field test.

KEY-WORDS : Weeding Robot, Stereo Vision Sensor, 3 D-CAD, Simulation

* 道総研 研究企画部, * Hokkaido Research Organization Research Planning Division

** 道総研 中央農業試験場, ** Hokkaido Research Organization Central Agricultural Experiment Station

*** 北海道大学, *** Hokkaido University

**** 株式会社イーエスイー, **** E S E Co., Ltd.

***** ディ・アイ・トキワ株式会社, ***** D・I・Tokiwa Co., Ltd.

事業名：重点研究

課題名：果樹園向け除草作業支援ロボットの開発

1. はじめに

醸造用ぶどう園（以下ぶどう園）において、除草作業はぶどう樹を病害虫から保護し健全に育成するために重要な作業である。しかし、多大な労働負荷に加え、作業者の高齢化に伴う労働力不足が課題となっている。また、安全・安心に対する意識の高まりから農薬使用の低減が求められており、除草作業の省力化、自動化を実現する機械の開発が期待されている。

北海道において醸造用ぶどうは、多くが垣根仕立てで栽培されている（図1）。冬期間は、ぶどう樹を凍害・雪害から保護するため、幹を地面に伏せて、雪の下で越冬させる。このため、幹は傾斜させて植えられており、幹がほぼ垂直であることを前提としたヨーロッパ等の除草機械の導入は、困難な状況である。

そこで本研究では、北海道におけるぶどう園の下草刈り支援を目的とした自走式ロボットを開発し、実用化に向けた技術開発を行うとともに、実地試験を行ってその有効性を検証した。



図1 垣根栽培のぶどう園場



図2 垣根栽培の状況

2. 醸造用ぶどう栽培の現状

除草作業支援ロボットに求められる能力等を把握するため、北海道立総合研究機構中央農業試験場の試験農場（北海道夕張郡長沼町）および道内4カ所（後志2，十勝1，空知1）のぶどう園にて作物条件、圃場の条件および労働負担等について調査を行った。

2.1 醸造用ぶどうの作物条件・圃場条件および除草状況

垣根栽培されている圃場の状況を図2に示す。垣根には、ぶどう樹のほかに、ぶどう樹の枝を固定するためのワイヤやこれを支える支柱がある。ぶどう樹は、ワイヤに沿って直線状に、約±0.1mのばらつきで植えられており、列の間隔は2.2～2.5m、樹間は2m程度であった。

また、幹の直径は5～72mmと樹齢によってばらつきが大きく、樹齢1～2年の径の小さい若い樹は、保護カバーや保護ネットをかけて保護されていた（図3）。

除草剤を使用せずに機械除草が行われている栽培面積は、5～120haと様々である。平坦な箇所のほか、傾斜地でも栽培されており、最大傾斜は約15度であった。また、ぶどう樹を中心とした半径約0.3mの範囲の凹凸は、最大で約50mmであった。

刈払機を用いた除草作業の投下労働量は、42.0～45.5人・時/haであった。除草後の雑草草高は50mm、ぶどう樹根元付近の残草部は、根元から100～300mmの範囲にあった。



図3 保護カバー

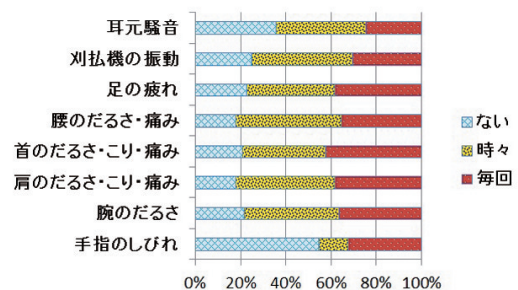


図4 刈払機使用後の肉体的負担（調査人数29名）

2.2 除草作業の労働負担

刈払機を使用した際の肉体的負担およびヒヤリハット体験の調査では、刈払機使用後に80%以上の人が、図4に示すような肉体的負担を感じていた。また、約60%の人が、キック

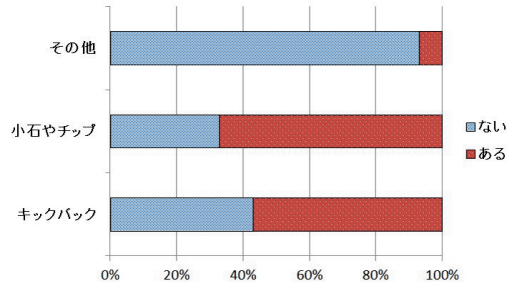


図5 刈払機使用時のヒヤリハット体験（調査人数29名）

バックや小石・チップの飛散などのヒヤリハットを経験しており（図5）、作業者が高い割合で肉体的負担や精神的な不安・緊張感を感じていることを確認した。

3. 除草作業支援ロボットに要求される機能

まず、除草方法について検討を行った。ぶどう樹列の間はトラクタなどにより除草されるので、除草の対象は、この除草で刈り残されたぶどう樹列に沿った幅約0.5mの範囲とした。実用的な除草能率を実現する観点から、除草はぶどう樹列に沿って走行しながら行うこととした。走行しながらぶどう樹列の両側を除草することは困難であるため、除草は片側ずつ行い、往復で除草を完了する方式とした（図6）。除草は退避機能を有する除草機構で行い、ぶどう樹の根元に近づくとき退避動作を行うことで、ぶどう樹を避けるようにした。除草機構は二つの回転刃（直径0.23m）を並置して刈幅を0.4mとし、ぶどう樹列が外側の回転刃の中心を通るよう設定した。これにより、除草対象とした範囲（幅約0.5m）の半分を除草することができる（図7）。

走行経路からの許容偏差は、回転刃の外側がぶどう樹列より内側に入り刈り残しが出ないように、 $\pm 0.1\text{m}$ とした。また、除草機構の退避幅は、走行経路からの許容偏差、ぶどう樹のばらつきを考慮し、0.4mとした。

除草機構の退避の範囲は、刈払機を使用した人手による除草の残草部の大きさ（0.3m）を踏まえ、ぶどう樹周辺0.3mとした。退避動作の制御に必要なぶどう樹の検出と根元位置の推定は、新たにぶどう樹検出センサを開発して行うことにした。除草機構には、ぶどう樹検出センサの検出漏れに備え、一定の力が加わると退避を行う機構を設けることにした。退避を開始する力は、実験でぶどう樹に損傷を与える恐れがないと判断された40Nを上限とした。

ロボットの開発に必要な機能と開発項目を図8に示す。

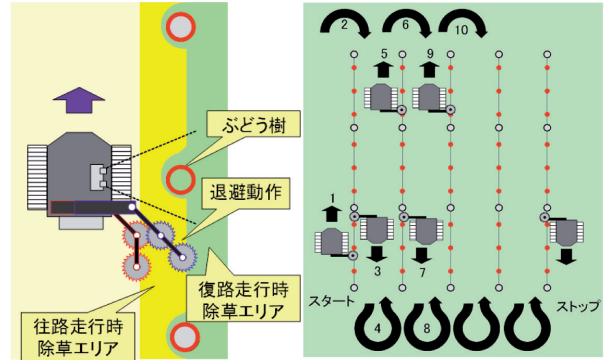


図6 除草方式

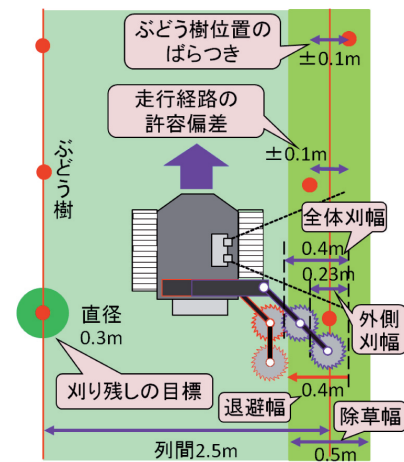


図7 ロボットの除草仕様

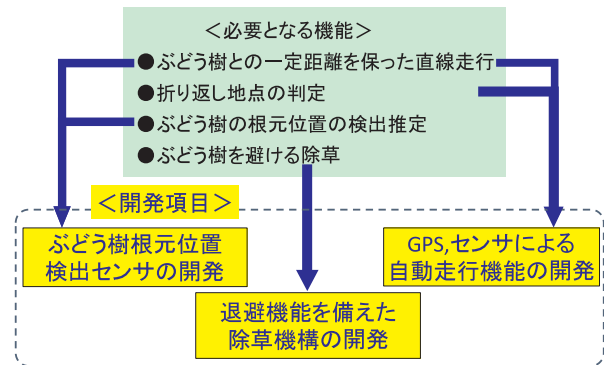


図8 ロボットに必要な機能と開発項目

4. シミュレーションによる設計の検討

本除草作業支援ロボットの開発に際しては、三次元シミュレーションの活用による各種動作の検証を行った。シミュレーションには、3D-CAD (SolidWorks社製 SolidWorks) および機構解析機能 (SolidWorks Motion) を用いた。これにより、実機段階における設計変更や手戻りを大幅に削減することが可能となる。本研究では、作業対象の圃場も含めたモデル化を行い、走行特性と除草機構の動作を事前に確認し

た後に、実機の製作を行った。

4.1 圃場のモデル化

ぶどう圃場地盤の樹列方向断面は概ね図9のような形状となっている。造成されてから時間が経っている圃場では、トラクターの走行等により押圧され、樹列間は若干地盤が低下し、わだちがある。これに対し、除草作業の対象部であるぶどう樹根元付近は、少し盛り上がっている。また傾斜地では、等高線に沿って階段状の断面となるよう造成されている例も見受けられる(図10)。さらにこれらの断面形状は、樹列方向に一様ではない。またぶどう樹列についても、ぶどう樹根元付近の太さや傾きは様々な状態が混在している。これらを考慮し、ぶどう圃場の三次元モデルを作成した(図11)。実際に測定した圃場断面を基準とし、ランダムに変化を与えた複数の断面を長手方向にスイープすることで凹凸の変化を表している。ぶどう樹の植栽間隔、支柱の設置間隔、およびぶどう樹列間の距離は、一般的な圃場での平均的な値とした。ぶどう樹については、根元の直径が50~80mm程度、垂直に対する傾きが10~45度程度のものをいくつか作成し、ランダムに配置した。

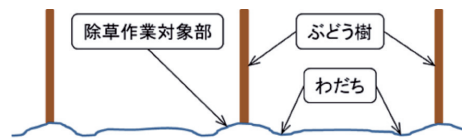


図9 ぶどう圃場地盤の断面

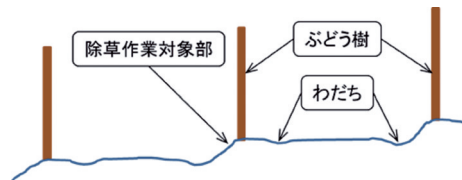


図10 傾斜地におけるぶどう圃場地盤の断面

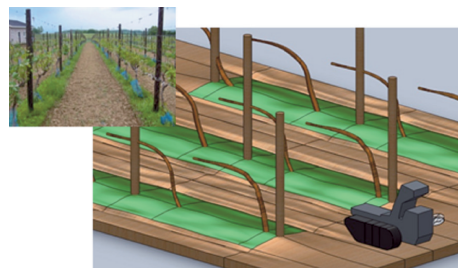


図11 ぶどう圃場の三次元モデル

4.2 走行シミュレーションによる制御と除草機構の検討

前述の圃場モデルに対して、除草機構を搭載した車体の走行シミュレーションを行い、設計の最適化を図った。

車体はクローラにより駆動されるが、シミュレーションにおいてクローラそのものを表現することは、可動部品点数の増加による解析時間の増加をまねくことから現実的ではない。そこで本研究では、クローラの接地面に複数の車輪を配した解析用疑似モデルを用いることで、クローラによる走行を表現した。

走行シミュレーションでは、クローラと地盤の間の摩擦力や弾性等の特性に基づいた物理計算が行われる。しかし実際の圃場におけるこれらの特性は一定ではないため、現実と考えられる範囲で摩擦係数や弾性係数を変化させて設定し、走行特性の検討を行った。除草機構についても、地面やぶどう樹との接触に関する摩擦係数と弾性、およびリンク形状やリンク構造に復元力を発生させるためのばね定数などを変化させて設定することにより、最適な設計条件の検討を行った。

走行シミュレーションの様子を図12に示す。車体の走行経路を確認するとともに、除草機構がぶどう樹や支柱に接触した際の回避動作と、回転刃外周部の軌跡による除草範囲の確認を行った。走行シミュレーションにおいては、実機に搭載されるセンサ(GPSコンパスとぶどう樹検出センサ)による制御を考慮した。除草作業の際、車体はぶどう樹列と平行にかつ一定の距離を保ちながら走行する必要がある。したがって、車体軸の方位偏差および距離偏差に比例した回転差をクローラに与えることで、地面の凹凸による外乱を補正しながら

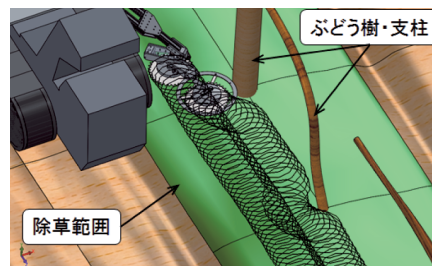


図12 シミュレーションの様子

ら走行させた。除草機構については、ぶどう樹検出センサからの検出信号に基づいて回避動作(能動動作)を行うこととしているが、シミュレーションでは、通常除草時の地面に対する追従性と、センサによる検出に失敗した場合でも機械的な回避(受動動作)を可能とするための構造について検討した。

これらのシミュレーションによる検討を重ねた結果、路面の凹凸の影響を受けずに走行可能とする車体の制御手法と、安定した除草と回避動作が可能な除草機構についての設計方針が得られたため、これらに基づき実機の製作を行った。

5. 開発した除草作業支援ロボット

5.1 基本構造

前述の各機能を搭載した除草作業支援ロボットを試作した。

その外観を図13に示す。

ベース車両は、クローラ式の小型ローダを改造して使用した。ベース車両の諸元を表1に示す。除草ユニットとアームから構成される除草機構は、ロボットの右側面後方に配置した。ぶどう樹検出センサは、除草機構と同じロボットの右側面の前方に配置した。グローバルな自己位置情報を得るため

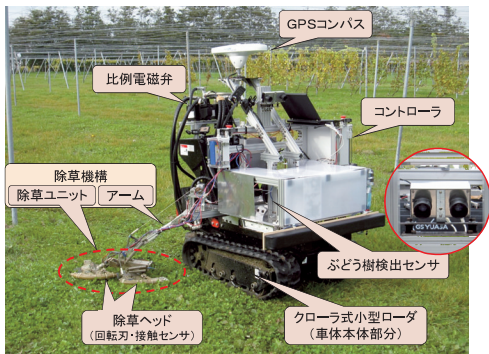
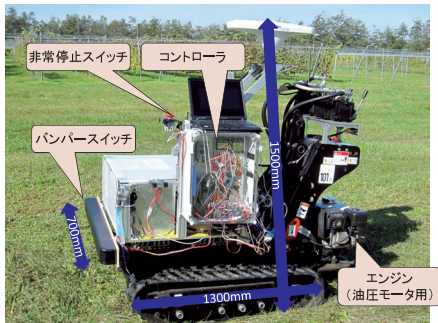


図13 除草作業支援ロボットの外観

表1 ベース車両の諸元

メーカー名	Cormidi 社
型名	RIKISHI
車両重量	約 210 kg
エンジン馬力	6.5 PS
最高速度	2.3 km/h
燃料タンク容量	3.6 L

表2 GPSコンパス諸元

メーカー名	Hemisphere 社
型名	ssV-100
方位精度	0.75° rms
位置精度	1.0m (2DRMS) DGPS 時
データの更新レート	~10Hz
寸法	50.0 x 15.2 x 10.0 cm
重量	1.30Kg
消費電力	5W
接続	RS-232/RS-422

のGPSコンパスを本体中央上部に配置した。表2にGPSコンパスの諸元を示す。左側面には、ロボットの制御を行うコントローラを配置した。また、安全対策として、非常停止スイッチやバンパースイッチを搭載した。

なお、油圧モータ以外はすべて電動であり、電力供給用に自動車のバッテリー (12V) を4個搭載している。

5.2 ぶどう樹検出センサ

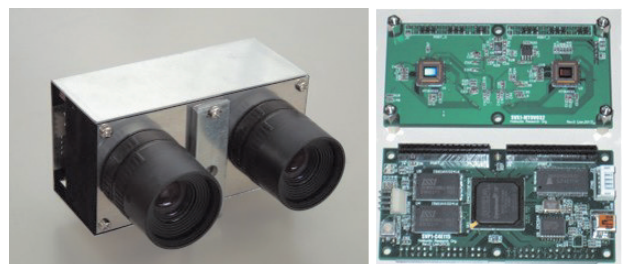
5.2.1 ぶどう樹検出センサの概要

本研究では、平成22~23年度に開発したステレオビジョンセンサ^{1,2)}をベースとして、ぶどう樹の検出処理や根元位置の推定処理を行う回路を付加することにより、新たなぶどう樹検出センサを開発した。その仕様を表3に、外観および内部の基板を図14に示す。センサは2枚の基板から構成されており (図14 (b)), 図の上側の基板には二つのCMOSイメージセンサとイメージセンサ制御用のFPGAが搭載されている。図の下側の基板には、ステレオ画像処理およびぶどう樹の検出処理を行うFPGA, メモリなどが搭載されている。

ぶどう樹検出センサの処理フローを図15に、ロボットへの設置状況を図16に示す。ぶどう樹検出センサは、雑草越しにぶどう樹を撮影できるよう、また、日没近くの直射日光の影響が緩和されるよう、伏角20度でやや下向きに設置されている。

表3 ステレオビジョンセンサの仕様

イメージセンサ	Aptina社 MT9V032 (Mono, 752 x 480px, 60fps)
イメージセンサ制御用FPGA	Altera社 Cyclone II EP2C8T144C8(8kLEs)
画像処理用FPGA	Altera社 Cyclone IV E EP4CE115F23C9L(115kLEs)
SRAM	ISSI社 IS61WV102416 x 2枚 (1024k x 16bit)
USBコントローラ	Cypress社 CY7C68013A (USB2.0 480Mbps)
レンズマウント	CSマウント
基線長	60mm
サイズ	W100 x H50 x D40mm (レンズを除く)



(a) 外観 (b) 基板

図14 ステレオビジョンセンサ

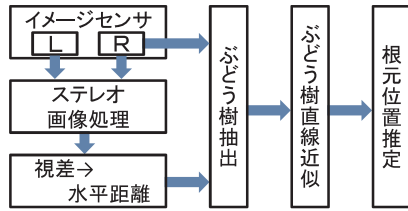


図15 ぶどう樹検出センサの処理フロー

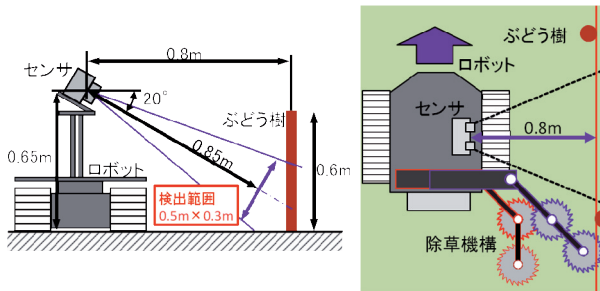


図16 ぶどう樹検出センサの設置状況

5.2.2 ステレオ画像処理

ステレオ画像処理は、二つのカメラで撮影した対象物の画像上での位置のずれ（視差）から、三角測量の原理に基づきカメラと対象物との距離を求める処理である。視差を求めるには、二つの画像上で対応する点を探索する必要がある。ステレオ画像処理において最も重要で、かつ処理に時間を要するこの対応点探索には、回路規模がコンパクトで、屋外でのロボスタ性に優れた方向符号照合法³⁾を採用した。時分割処理、パイプライン処理、並列処理を組み合わせ、普及価格帯のFPGAによりリアルタイムでのステレオ画像処理を実現している^{1,2)}。

5.2.3 ぶどう樹抽出処理

撮影された画像には、ぶどう樹の幹のほかに、雑草、ぶどうの葉や果実などが写っている。ぶどう樹の根元位置推定には、雑草等は不要であり、障害ともなるので、これらを除去し、ぶどう樹の幹を抽出する処理を行う。モノクロ画像では、雑草や葉は比較的輝度が高いのに対し、ぶどう樹の幹の輝度は低めとなる。そこで、一定輝度以上の画素は雑草、葉と判断して取り除き、ぶどう樹の幹の抽出を行った（図17）。

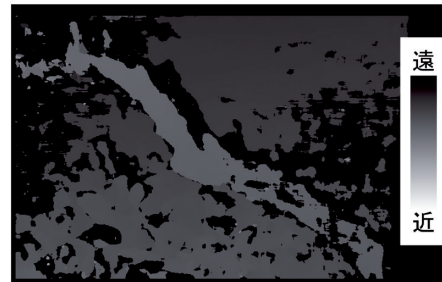
5.2.4 ぶどう樹の直線近似と根元位置の推定

除草機構の動作を制御するには、ぶどう樹とセンサの水平距離およびぶどう樹の根元位置（画像中心からの左右方向の距離）が必要となる。そこで、ぶどう樹の幹を直線近似し、地面との交点を求めることで、根元位置の推定を行った。

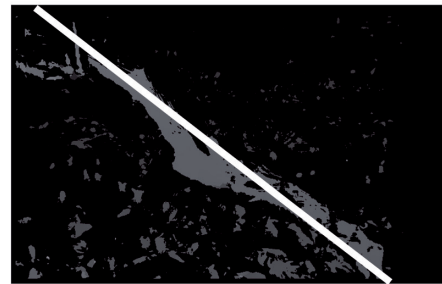
ぶどう樹として抽出された画素は、水平距離によりグループ分けし、グループごとに画像中央を原点とする極座標形式のパラメータ空間（ ρ - θ 空間）でHough変換⁴⁾による直線検



イメージセンサ取得画像



距離画像



ぶどう樹抽出直線近似

図17 ぶどう樹の検出と直線近似の流れ

出処理を行った。

ぶどう園には、ぶどう樹のほかに垣根に張ったワイヤを支える支柱などがある。これらを同時に検出する必要から、本センサでは、最大4本まで直線を検出している。ぶどう樹の幹は傾斜しているのに対し、支柱はほぼ垂直に立っていることから、検出した直線の角度により、ぶどう樹と支柱の識別も行っている。

ぶどう樹の根元位置は、ぶどう樹とセンサとの水平距離、画像上の近似直線およびセンサの設置高と伏角を用いて、直線が地面と交差する位置として求めることができる（図18）。

5.3 除草機構

5.3.1 全体構造

除草機構は、回転刃を有する2個の除草ヘッドを、車体から斜め後方に伸びたアームにより支持する構造とした（図19）。これにより、車体とぶどう樹の接触を避けながらの除草が可能となっている。ぶどう樹や支柱を検出した際は、外側の除草ヘッドが後方にスイングする退避と、除草機構全体が横方向にスライドして退避する二つの動作が可能となっており、ぶどう樹との距離により退避動作の選択が可能である。また

表7 モータ諸元

電源電圧	24 V
出力	250 W
回転数	3, 500~5, 000 rpm
重量	0.95 kg

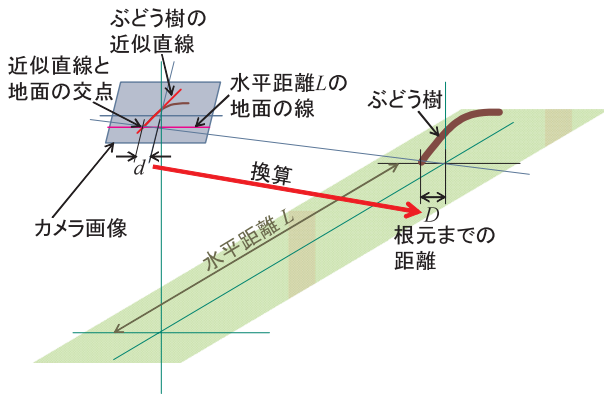


図18 根元位置の推定

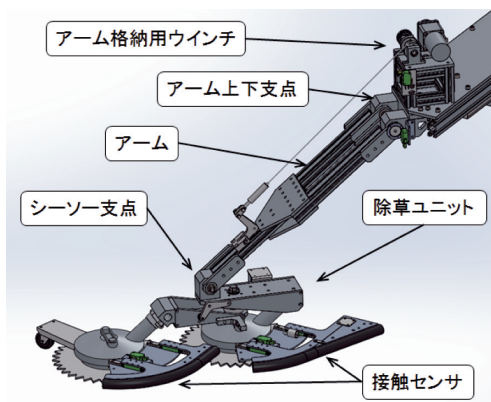


図19 除草機構

除草ヘッドが地面の凹凸に追従するよう、二つの除草ヘッドを組み合わせて除草ユニットとし、アームを介したリンク機構により車体と接続している。車体の移動や方向転換時には、周囲の構造物との不要な接触を避けるため、ウインチによりアームを持ち上げて車体側に格納する。

5.3.2 除草ヘッド

除草ヘッドには、(株)コスモメカニクス社製の電動刈払機に搭載されているコアレス型直流モータを使用した(表7, 図20)。本モータを使用することで回転刃のダイレクトドライブが可能であり、動力伝達機構が不要で軽量かつコンパクトな構造となる。回転刃は直径230mmの刈払刃(市販品)を使用した。人手による除草作業では、刈払機を左右に動かし回転刃外周と雑草が接触する機会を増やすことで、効率的に除草を行っている。しかし本ロボットによる除草では、車体の走行に従って直線状に除草ヘッドが移動する。このため、回転刃の外周部でカットされなかった雑草はそのまま回転刃の下を通過し、刈り残しが増える結果となった。そこで、回転刃の下面に突起を設けることで、回転刃の下を通過する雑草を効率的にカットできるよう工夫した。また、回転刃と地面との接触や食い込みによる過負荷を防止するため、回転刃

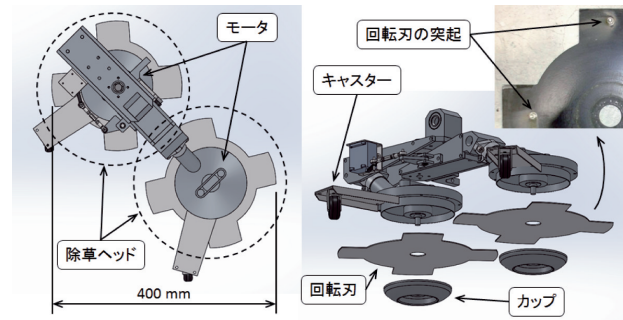


図20 除草ヘッドと除草ユニット

下面にカップ状の部品を装着している。

5.3.3 除草ユニット

二つの除草ヘッドを組み合わせて除草ユニット(図20)とすることで、合わせて約400mmの刈幅としている。また除草ユニットには、地面からの距離を確保し、スムーズな除草を可能とするため、キャスターを装着している。刈高さは約50mmとなるよう調整している。

5.3.4 地面凹凸への追従機構

2章で示したとおり、ぶどう圃場は平坦ではない。したがって、走行の過程で刻々と変化するロボット本体の姿勢に対し、除草ユニットは独立して姿勢を変えながら、ぶどう樹根元付近の地形に追従する必要がある。そこで除草機構(図19)は、車体の傾きや上下動に対しては、車体との接続部を支点にアーム全体が上下に動くことで対応する。また根元付近の地形の変化に対しては、除草ユニットを、アームとの接続部でシーソー状に可動する構造として対応している。このシーソー構造においては、ばねを用いて車体外側の除草ヘッドを地面に押し付ける方向に復元力を働かせることで、過大な姿勢変化を抑制するようにしている。

5.3.5 退避動作と誤刈防止機構

ぶどう樹検出センサがぶどう樹や支柱を検出した際は、外側の除草ヘッドが後方にスイングする動作と、除草機構全体が横方向にスライドする動作により退避を行う。外側の除草ヘッドが接触すると判断された場合はスイング動作のみを行い、内側が接触すると判断された場合はスイング動作とスライド動作の両方を行う(図21)。スイング機構は回転型のサー

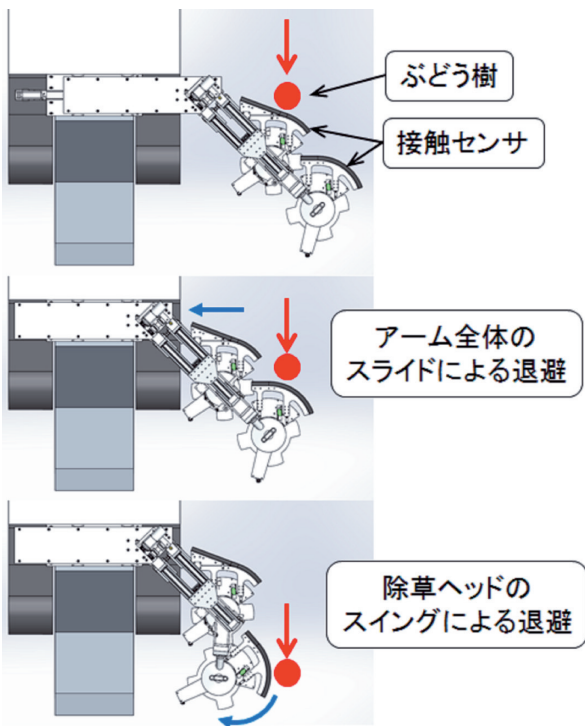


図21 除草機構の退避動作（上方視）

ボモータとリンク機構により駆動する。またスライド機構は、車体に固定したスライドテーブルに除草機構を搭載し、直動型の電動シリンダで駆動する。スイング機構とスライド機構によりそれぞれ200mmの退避を可能としており、合計で400mmの退避幅を実現している。

除草ユニットの誤刈り防止対策として、回転刃前方を部分的にカバーで覆い、さらにカバー前方にはばねで支持した接触式のセンサを設けた。接触時には、このセンサからの信号により除草ユニットを退避させてぶどう樹への影響を最小限に抑えることができる。接触センサの作動に必要な押し付け力は、40Nを超えないように設定し、ぶどう樹に損傷を与えないようにした。

実機に搭載した除草機構を図22に示す。

5.4 走行制御と退避動作

5.4.1 ロボットの制御部

ロボットを制御する制御コントローラは、マイコン（ST Microelectronics社製CORTEX-M3コア）を搭載した2枚の制御ボード（メインボード、サブボード）から構成され（図23）、ボード間や各センサとの通信、付帯装置の入出力制御、クローラの速度制御、走行の経路計画やぶどう樹に沿った走行、除草等の各種動作を制御している（図24）。

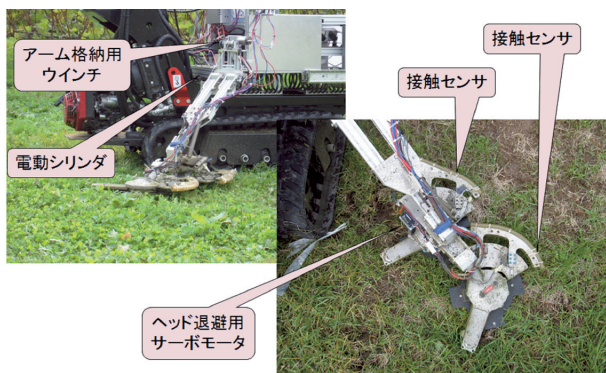


図22 実機に搭載した除草機構

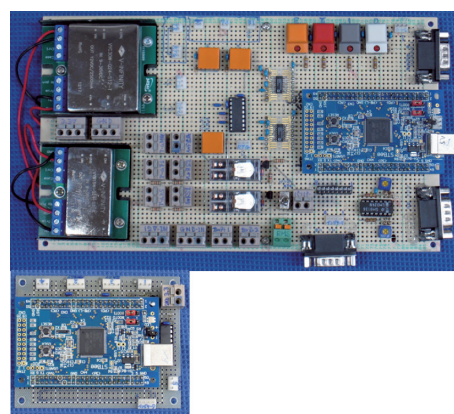


図23 制御ボード（上：メインボード，下：サブボード）

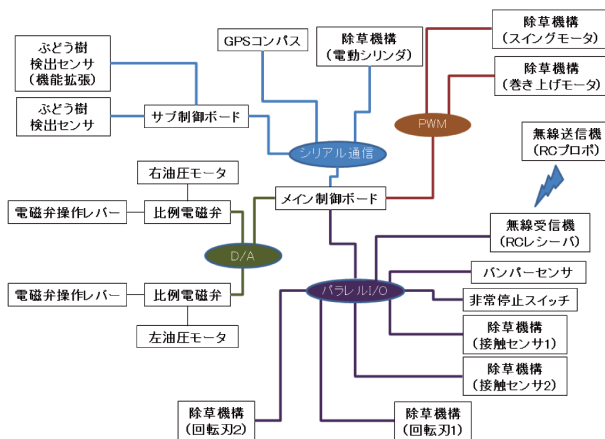


図24 制御系統図

5.4.2 走行制御

ロボットの走行制御は、GPSコンパスで得られる位置情報および方位情報を用いて行う。ロボットには、始点、終点、転回地点などあらかじめ必要な位置情報が与えられ、これに基づき走行直線が計算される。走行直線とロボットの距離、走行直線とロボットの方位の差を逐次求め、比例制御により左右クローラに速度差を与え、走行制御を行っている（図25）。しかし、使用しているGPSコンパスの位置情報には1m程度

の測位誤差が含まれており、ぶどう樹列も直線ではない。したがって、GPSコンパスのデータ上では走行直線上を正確に走行していても、ぶどう樹列とロボットの距離は変動することがある。このため、ぶどう樹検出センサで得られる支柱とロボットとの距離が一定の範囲に収まらないときは、走行直線を補正し、ロボットがぶどう樹列に沿って走行するようにしている（図26）。

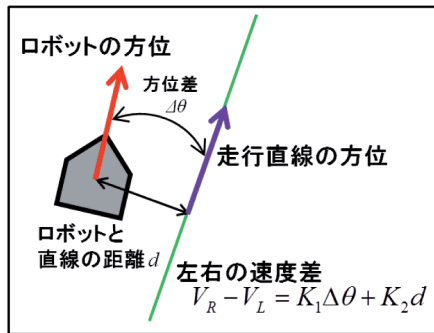


図25 ロボットの走行制御

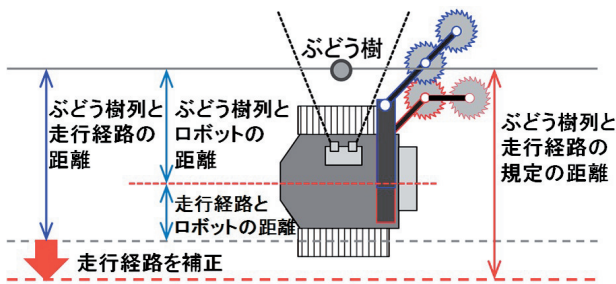


図26 ぶどう樹列に沿った走行経路の補正

5.4.3 除草機構の退避制御

除草機構の退避動作は、通常、ぶどう樹検出センサの信号により制御される。ぶどう樹検出センサは、除草機構の車体前方に設置されているので、除草機構の退避動作は、ぶどう樹検出後、ロボットが走行してぶどう樹等の根元に回転刃が接近するタイミングを計算して行う必要がある。そこで、GPSコンパスの位置情報をもとに根元位置と外側除草ヘッドの距離を求め、一定距離以下になると退避動作を行う。ロボットとぶどう樹等の距離が近く、除草ヘッドの退避のみで接触が回避できない場合は、アームの退避も併せて行う。

外側除草ヘッドが根元位置を通過し一定距離を走行すると、除草機構を復帰させる。ぶどう樹等の間隔が狭くアームが往復する時間的余裕がないときや、外側除草ヘッドを復帰させる位置が次の根元位置から一定距離以内に入っている場合には、アームまたは外側除草ヘッドを復帰させず、退避を続けるようにしている。なお、復帰動作中に接触センサが反応したときは、再び退避動作を行うようになっている。

6. 各機能試験と実地試験

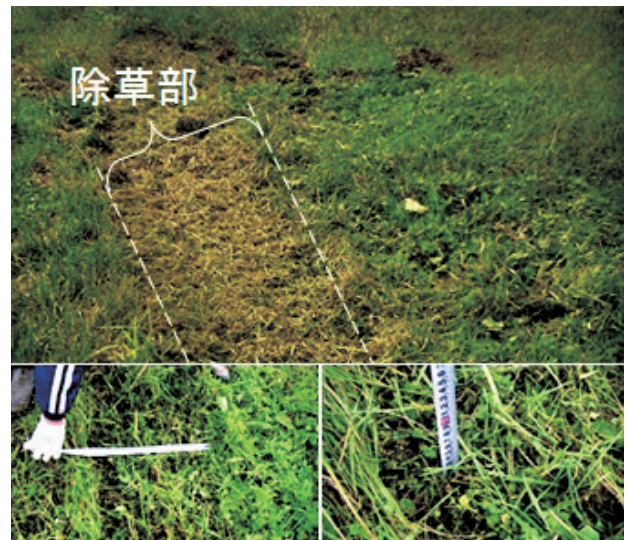
6.1 ぶどう樹接触時の押し付け力試験

製作した除草機構の接触センサに力センサを押し当て、除草機構が退避動作を開始するまでの力を計測した。退避を開始した時の押し付け力は、32.5～38.6Nであった。これは、設計値の40Nを下まわり、除草ヘッドがぶどう樹に接触してもダメージを与えずに退避動作が可能であることを確認した。

6.2 除草試験

ロボットを走行させて除草した後、除草幅および残草草高を計測した。除草後の状況と計測の様子を図27に示す。

この結果、除草幅は約0.3m、残草草高は約50mmであり、残草草高の値は、設計仕様を満たしていることを確認した。



上：除草部、下左：幅の計測、下右：高さの計測

図27 除草試験

6.3 ぶどう園における実地試験

中央農業試験場のぶどう圃場において、除草作業支援ロボットの現地試験を行った。試験を行ったぶどう樹列の例を図28に示す。この圃場の1列の長さは、約57mであった。

現地試験の結果、ロボットを時速0.8kmでぶどう樹列に沿って走行させたときの目標経路からの偏差は約±0.1mであり、目標通りの走行が可能であることを確認した。図29に、試験の様子を示す。

ぶどう樹検出センサのぶどう樹の検出率は、日照条件、ぶどう樹や雑草の状況によって大きく変動するが、カメラ画像中に幹が確認できた場合、95%以上の割合で検出可能であった。誤検出や未検出となった例としては、一部張り出した枝を幹と誤って認識した場合や幹が根元から大きく湾曲していた場合（図30）およびぶどうの葉によって幹が隠れた場合な

どがあった。

また、除草機構の回避動作については、図31のようにスムーズにぶどう樹を避けた除草が可能であることを確認した。以上の試験結果より、本ロボットの有効性が確認された。

一方で、ぶどう樹検出の精度向上や除草機の地面への追従性向上などの課題も見出された。



図28 試験を行ったぶどう樹列



図29 自動走行の様子



図30 湾曲したぶどう樹

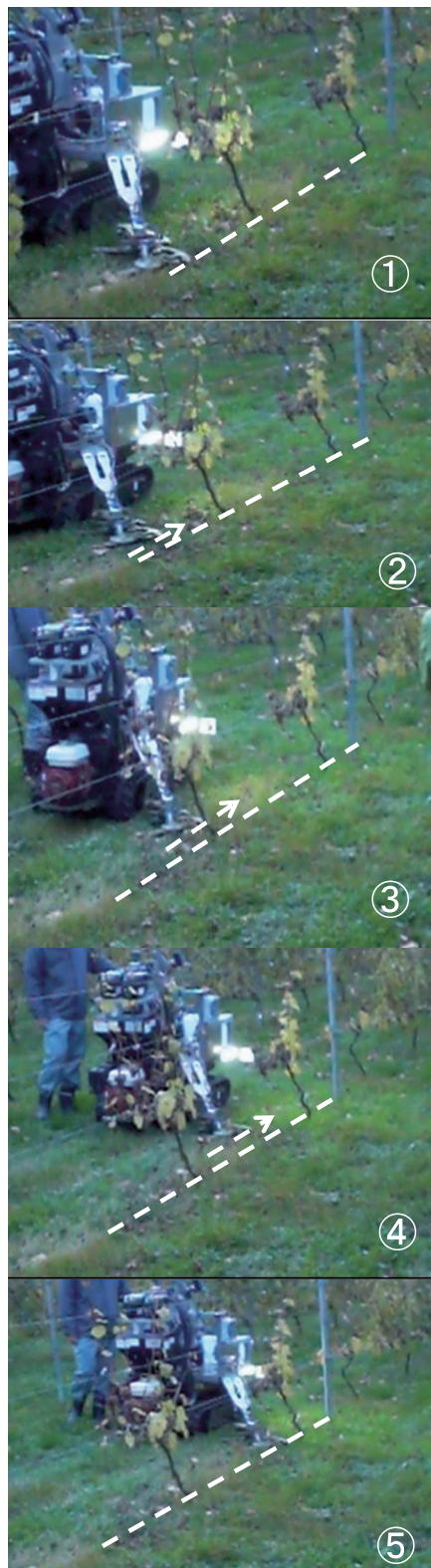


図31 ぶどう園での回避動作

7. おわりに

本研究では、醸造用ぶどう園を対象にした除草作業支援ロボットの開発を行うとともに、圃場で実地試験を行い、良好な試験結果を得た。ロボットの機能実現のために新たに開発したぶどう樹検出センサについては、屋外用の画像センサとしての有用性を確認したが、一方でさらなる検出精度の向上などの課題も明らかになった。

今後は、本ロボットのさらなる実用化に向けた取り組みを進めるとともに、本研究で得られた基盤技術を基に、他の農作業、林業等の作業ロボット、工場内の移動ロボットなどへの幅広い応用展開を図っていく予定である。

引用文献

- 1) 大村功・三田村智行・堤大祐：FPGAを用いたリアルタイムステレオビジョンセンサの開発，北海道立総合研究機構工業試験場報告，No.311，pp.7-13，(2012)
- 2) I.Ohmura・T.Mitamura・H.Takauji・S.Kaneko：A real-time stereo vision sensor based on FPGA realization of Orientation code matching, Proc. of ISOT 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 3 DSI-2, (2010)
- 3) F.Ullah・S.Kaneko・S.Igarashi：Orientation code matching for robust object search, IEICE Trans. on Inf. & syst., Vol.E84-D, No.8, pp.999-1006, (2001)
- 4) デジタル画像処理編集委員会監修：デジタル画像処理, CG-ARTS協会, pp.211-214, (2006)

画像計測・検査装置のための微細画像処理技術の開発

飯島 俊匡, 岡崎 伸哉, 橋場 参生, 高橋 裕之

Development of the Microscopic Image Processing Technique for Measurement and Inspection Apparatus

Toshimasa IJIMA, Shinya OKAZAKI, Mitsu HASHIBA, Hiroyuki TAKAHASHI

抄 録

数十 μm から十数 mm 程度の大きさの物体を対象とした計測や検査技術に関する要望が多く寄せられている。これらの微細な物体を対象として画像計測や検査を行う場合、撮像範囲や焦点の合う範囲が狭くなるなど、一般的な大きさの物体を対象とした場合に比べて、計測や検査に適した画像を取得することが難しい。また、既存装置としてデジタルマイクロスコープなどの高性能な機器があるが、コスト等の問題からフィールドへの持ち込みや検査システムへの組み込みは困難である。そこで本研究では、産業廃棄物の含有成分識別検査や小型部品外観検査などに適用可能な、微細画像処理技術に関する技術開発を行ったので報告する。

キーワード：画像処理, 微細画像, アスベスト, 外観検査装置

Abstract

There are many requests from our customers about inspection and measurement technology for the small object of several tens μm -several mm . In the case of those small objects, it is difficult to obtain the good images for image inspection and image measurement because imaging region and range in focus is narrow. In addition, a high performance measurement equipment such as digital microscope is quite expensive so it is difficult to integrate into the inspection systems or bring to working sites. In this study, we developed microscopic image processing techniques for inspection to identify the components of industrial waste and visual inspection apparatus for small objects.

KEY-WORDS : Image Processing, Microscopic Image, Asbestos, Inspection Apparatus

1. はじめに

当場に寄せられる多くの要望の一つに、数十 μm から十数 mm 程度の大きさの物体を対象とした計測や検査技術に関するものがある。その対象は様々であり、製品や原材料の傷、欠け、割れ等の外観検査、印刷検査、昆虫識別、生体検査、異物混入検査など、多くの産業分野にわたっている。これらの微細な物体を対象とした画像計測や画像検査を行うためには、まず計測や検査に適した画像を取得する必要がある。しかし、対象が小さな場合は倍率の高いレンズを用いて撮像するため、撮像範囲や焦点の合う範囲が狭くなるなど、一般的な大きさの物体を対象とした場合に比べ、計測や検査に適し

た画像を取得することが難しい。

一方、微細な物体を観測するための既存機器としてデジタルマイクロスコープ（図1）などの高性能な機器があるが、検査処理の連続性やコスト等の問題からフィールドへの持ち込みや生産ラインにおける検査システムへの組み込みは困難である。

そこで本研究では、生産ラインの検査システムへの組み込みや、フィールドへの持ち込みが可能であり、安価なレンズやカメラを用いた場合でもデジタルマイクロスコープと同様の機能を実現可能な微細画像処理技術の開発に取り組み、産業廃棄物の含有成分識別検査や、小型部品の外観検査に適用可能な画像計測・検査装置のための基盤技術を獲得したので

事業名：経常研究

課題名：微細画像計測・検査装置に関する技術開発（平成24～25年度）

報告する。



図1 デジタルマイクロスコープ（キーエンス製VHX-1000）

2. 微細画像取得技術

微細な物体を対象として倍率の高いレンズを用いて撮像する場合、同一画角中に撮像できる領域が狭くなる。また、被写界深度（焦点の合う範囲）が浅く、同一画像中に明瞭な部分とぼやけた部分が存在する。これらの問題を解決し、画像計測や画像検査に適した十分な撮像範囲で明瞭な画像を取得するための画像処理技術として、領域合成技術と深度合成技術の開発に取り組んだ。

2.1 領域合成技術

撮像範囲の広い画像を取得するために、パノラマ画像生成等に用いられるイメージモザイクの原理を利用し、複数の画像を継ぎ目なく合成して1枚の大きな画像を生成する領域合成技術を検討した。イメージモザイクには様々な計算方法があるが、ここでは、各画像から特徴点を抽出し、その対応付けを行うことで画像の変形と位置合わせを行い領域合成する手法を適用した。

一般的に画像を用いた検査や計測を行う場合、顕微鏡のステージとレンズの関係のように、対象物が設置される平面とカメラの位置関係は基本的に変わらないように配置する。このとき、カメラがキャリブレーション済み（内部パラメータが既知）で、かつレンズの収差が補正済みであるとすると、対象物を移動させて得られる2枚の画像の幾何学的関係は、平行移動、回転、拡大・縮小となる。また、照明からの距離が変化する場合もあるため、明るさも同様であるとは限らない。したがって、画像中の特徴点の対応付けを行おうとした場合、それらに対して頑健な特徴量を利用する必要がある。そこで、今回は特徴量としてSURF¹⁾ (Speeded Up Robust Features) を用いた。

SURFはその特徴点に平行移動、回転、拡大・縮小、明るさの変化があっても普遍的な値を持つ特徴量である（図2）。SURFは、画像のエッジの種類を基に特徴点候補を選定して

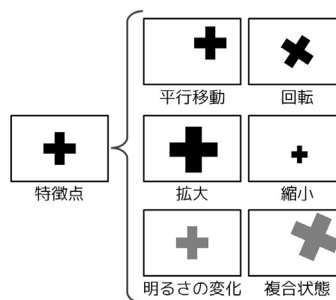


図2 SURFの頑健性

いるため明るさの変化に強く、そのエッジの向きに依存しないようラプラシアンを取っている。さらに、画像の拡大・縮小に対応するため、エッジを判定する領域の大きさを数段階に分けて計算し、エッジの位置と大きさが極値を取る特徴点候補を最終的な特徴点とする。こうすることで、各特徴点は明るさの変化とその向きに依存せず、画像の拡大・縮小に頑健な特徴点となる。

次に、各特徴点の特徴量を算出する。まず、特徴点周辺領域の輝度変位の分布から特徴量を算出する方向を決めることで正規化する。そして、特徴点周辺を正規化した方向に4×4ブロックに分け、各ブロックをさらに4分割して輝度変位の分布を計算することで64次元の特徴量とする。こうすることで画像の回転、平行移動に頑健な特徴量を得る。

このSURFを用いて2枚の画像から特徴点を抽出し、各特徴点を持つ64次元の特徴量から、各特徴点間のユークリッド距離を算出する。そして対応点を一意に求めるため、最も距離が小さい点の距離が、2番目に小さい距離の6割未満であった場合に対応する点とする。図3は2枚の顕微鏡画像に対するSURFとその対応付けの一部を示している。なお、画像を平行移動、回転、拡大・縮小により位置合わせをするために

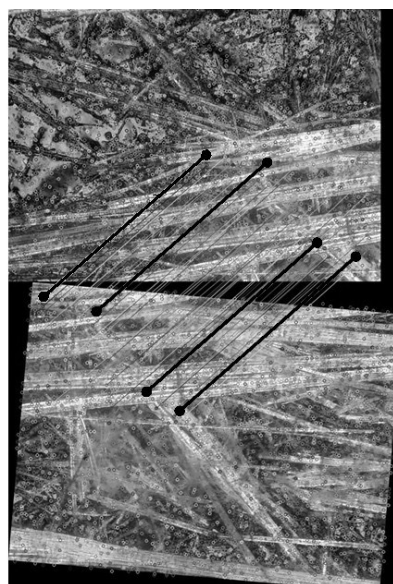


図3 SURFとその対応付け

は、少なくとも3点の対応点が必要であり、SURFの現われないエッジのない平坦な画像では位置合わせは困難である。

本研究では、上記手法を用いて撮像範囲が部分的に重なるよう異なる位置で撮影し、得られた複数枚の画像を自動的に連結して1枚の画像を生成する領域合成ソフトウェアを開発した。実際に2枚の顕微鏡画像に対して領域合成を行った結果、図4で示すように正しく領域合成が出来た。

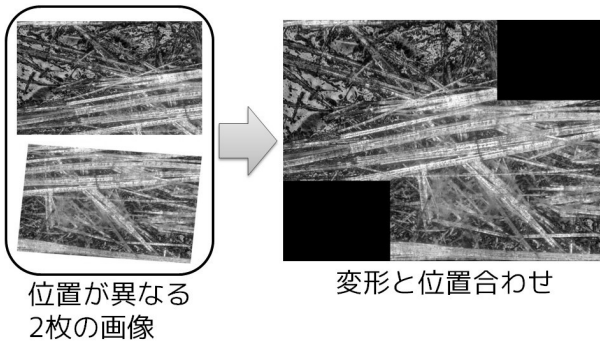


図4 顕微鏡画像の領域合成結果

2.2 深度合成技術

被写界深度が浅い場合、焦点距離を短くするか絞りを絞る、撮影対象物までの距離を長くするなどの光学的な解決方法もあるが、シャッター速度が遅くなったり解像度が下がるといった問題が生じる。そこで、焦点が異なる複数枚の画像を撮影し、画像中の焦点が合った部分を選択して合成することで広範囲に焦点が合った画像を得る深度合成技術について検討した。

焦点が合うということは、合焦部分の境界や模様が鮮明である、つまり近傍のコントラストが高いと言い換えることが出来る。そこで、焦点が異なる複数枚の画像に対して、局所領域内の輝度分散を評価し、極値を持つ焦点距離の画像を選択して深度合成する手法を適用した(図5)。なお、合焦判定を輝度分散の評価で行っているため、輝度変化の少ない画

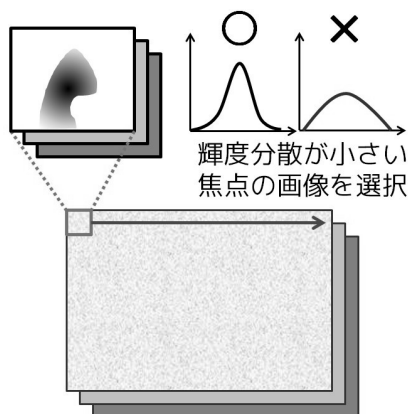


図5 局所領域の輝度分散の評価

像では深度合成は困難である。

図6は、偏光顕微鏡を用いて撮影した焦点の異なる複数枚の画像と、局所領域の輝度分散を評価して得られた合焦領域(図中の白線で囲まれた部分)を示したものである。本研究では、上記手法を用いて広範囲に焦点が合った画像を取得する深度合成ソフトウェアを開発した。実際に偏光顕微鏡を用いて撮影した画像に対して深度合成を行った結果、図7で示すように広範囲に合焦した画像が得られた。

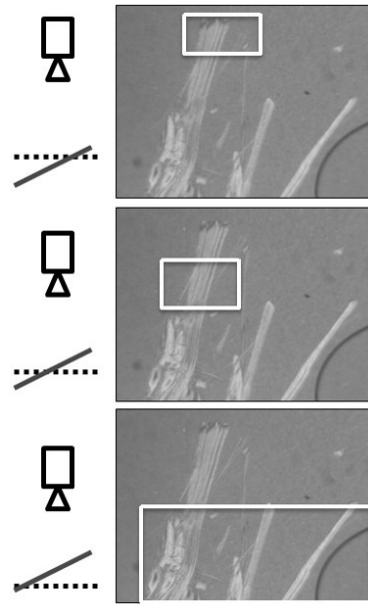


図6 焦点の異なる複数の画像と合焦領域(白線部分)

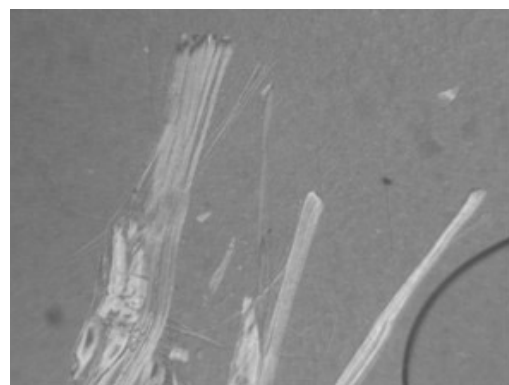


図7 偏光顕微鏡画像の深度合成結果

3. アスベスト識別検査装置の試作

近年、建築物の解体現場において、建築廃材に含まれるアスベスト(図8)の飛散が社会問題化している²⁻³⁾。作業員への被曝や周りの住環境への飛散を防止するために各種法令が定められ、適正な労働環境下で廃棄物の適切な処理が行われている。しかし、現状では建築廃材を専門の分析機関に送付して公定法(JIS A 1481⁴⁾)で定められているアスベ

スト含有判定を行っており、多くの時間とコストがかかっている。そのため、分別の前さばきとしてアスベスト含有の有無を現場で簡易かつ低コストで検査できる装置が求められている。

アスベストの含有検査では、1サンプル当たり50視野以上を観察してアスベスト繊維の数を計数する必要がある。このため、アスベストを識別するための検査装置では、視野内の繊維形状の有無を自動的に認識し、人がアスベストを判別するための補助をする仕組みを搭載することが効果的である。そこで、前節の微細画像取得技術を用いて得られた顕微鏡画像から、エッジ検出とその強度を閾値で判別して二値画像を得、ハフ変換による直線検出を行うことで繊維形状の有無を識別する手法を開発した(図9)。

上記機能を搭載したソフトウェアを製作し、偏光顕微鏡と

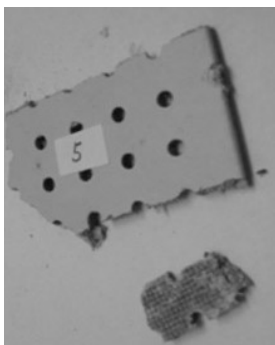


図8 アスベスト含有
建築廃材

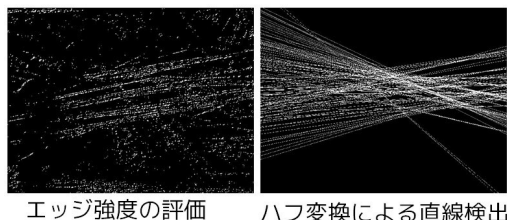
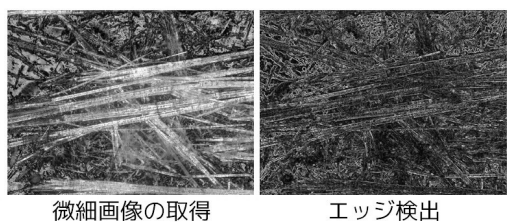


図9 繊維形状有無の識別



図10 試作したアスベスト識別検査装置

ギガビットイーサネットカメラ(以下、GigEカメラと表記)を用いて、建築廃材に含まれるアスベストを識別するための検査装置を試作した(図10)。

4. 小型部品外観検査技術

微細な小型部品等の外観に生じる欠陥を検出するための技術開発として、ここではミニチュアベアリング(図11)を対象として、打痕や傷などの欠陥を判別する手法の検討を行い、小型部品の外観検査に利用可能な画像計測技術の開発に取り組んだ。



図11 ミニチュア
ベアリング

4.1 打痕判別処理

打痕はなだらかな凹凸である場合が多く、局所的な距離の変化やエッジ画像などを用いて判別するのは難しい。しかし、凹凸の変位が微小であっても鏡面反射に関しては変位に大きく反応する。そこで、測定対象物にライン光を投影し、その鏡面反射光を観測することで、打痕を判別する手法を検討した。ここでは、対象となるミニチュアベアリングのカバー面の形状から、対象物を回転させて鏡面反射光を観測することとした。ライン光の反射図形は、正常部位では矩形となり、不良部位では形状が変化する(図12)。

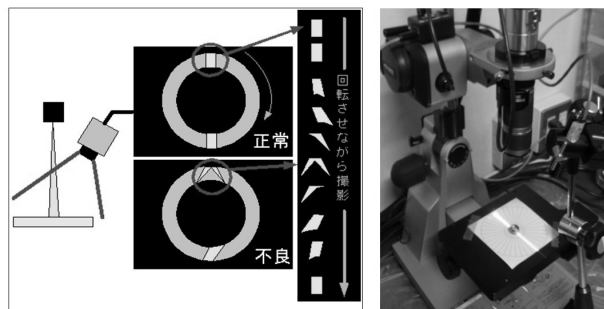


図12 ライン光源を用いた打痕判別手法

反射図形の形状評価は、Haar-like特徴量を用いて評価した。この特徴量は、2つの領域の輝度差に着目することで局所的なエッジ成分や線成分を捉えることができる。ここでは、反射図形の周辺を複数のブロックに分割し、それぞれの組み合わせでHaar-like特徴量を計算して特徴ベクトルとする。得られた特徴ベクトルの相関を算出することで類似度を評価できる。あるサンプルの各部位の類似度を図13に示すと、部位番号5と6で類似度が下がっている。したがってその部位に欠陥があることがわかる。このように反射図形の特徴量を評価することで欠陥検出が可能であることが確認できた。

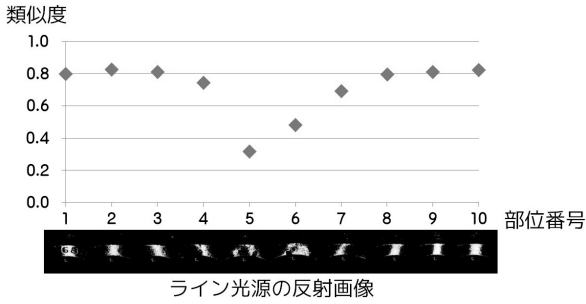


図13 反射図形の形状変化による打痕判別

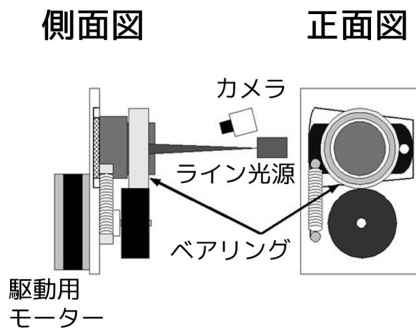


図14 小型部品撮影機構の概念図

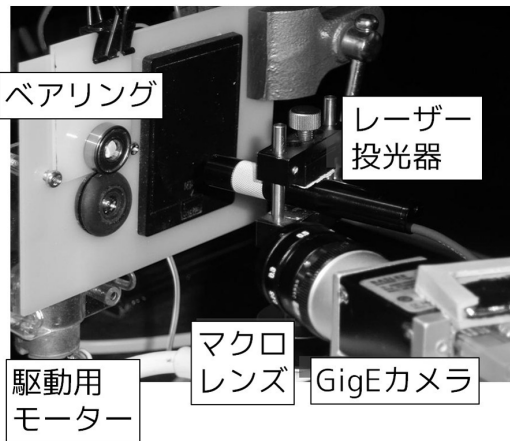


図15 小型部品外観検査の試作機

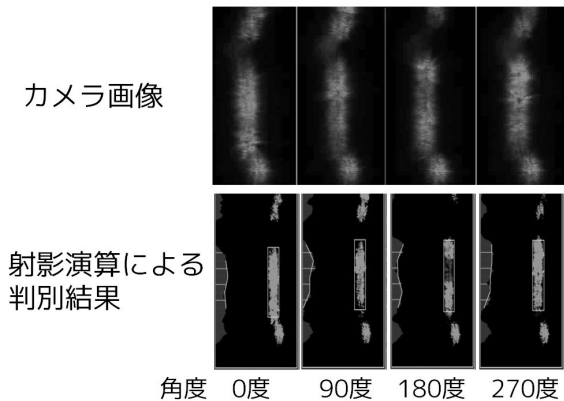


図16 外観検査の試作機から得られた結果

開発した打痕判別処理を用いてレーザー投光器とGigEカメラ、ミニチュアベアリングを回転させる機構からなる小型部品撮影機構(図14)を検討し、試作機を製作した(図15)。

試作した小型部品外観検査装置を用いて、ミニチュアベアリングを計測した結果を図16に示す。カメラ画像だけでは打痕による欠陥の判別は困難であるが、射影演算した結果のプロット(図16下段に示した各角度の図左側)から、角度180度の中心付近に凹みがあることがわかる。このように、画像特徴量として射影演算による判別を行うことで打痕による欠陥が判別可能であることが確認できた。しかし、本試作機では、打痕判別処理により凹みの欠陥は検出可能であったが、傷の欠陥の検出が困難であることが分かった。そこで、傷を検出するための技術開発に取り組んだ。

4.2 傷判別処理

傷は局所的な凹凸がある場合が多く、前節のようなライン光による検出は感度が低く難しい。また、ベアリングのような鏡面を持つ物体の外観検査の場合、鏡面反射光が強くなり、画像による欠陥検出は難しい。そこで、物体表面が鏡面であっても適用可能で、非接触かつ高感度に距離計測が可能な位相シフト法⁵⁾を用いた傷の検出を検討した。

位相シフト法とは、プロジェクタ光源等を用いて測定対象物に位相をずらしながら縞パターンを投影し、カメラで各位相を撮影することで位相分布を算出する。得られた位相分布からは1画素毎に独立して位相値を得ることができ、測定対象物の表面の凹凸を高精度に測定できる手法である(図17)。

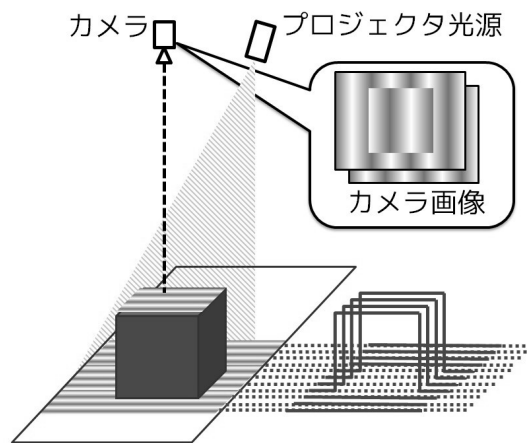


図17 位相シフト法による高さ計測

位相シフト法では、位相を $\pi/3$ ずつずらした縞パターンを3回投影すれば位相分布が一意に求まるが、今回は計算を簡単にするため位相を $\pi/4$ ずつずらした縞パターンを4回投影した(図18左)。各位相の縞パターンを投影して得られた画像の画素 (x, y) における輝度値を $I_1 \sim I_4$ とすると、物体の位相分布 $\theta(x, y)$ は次式で求まる。

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1}\right) \quad (1)$$

しかし、この式(1)で用いられる逆タンジェント関数は一般に多価関数となり、主値域 $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ の値として位相値が出力される。つまり位相が主値範囲にたたままれるので、位相値が $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ の内部では連続的に変化しますが、この範囲をはみ出すたびに不連続に変化する。例えば、測定対象物を置かず、平面に図18左の縞パターンを投影して得られた画像を式(1)で計算すると、図19のような位相分布画像が得られる。位相分布画像は、垂直方向に輝度が同じラインが同じ位相を示すが、逆タンジェント関数の多価性のため、水平方向には不連続に変化する部分が現われる。

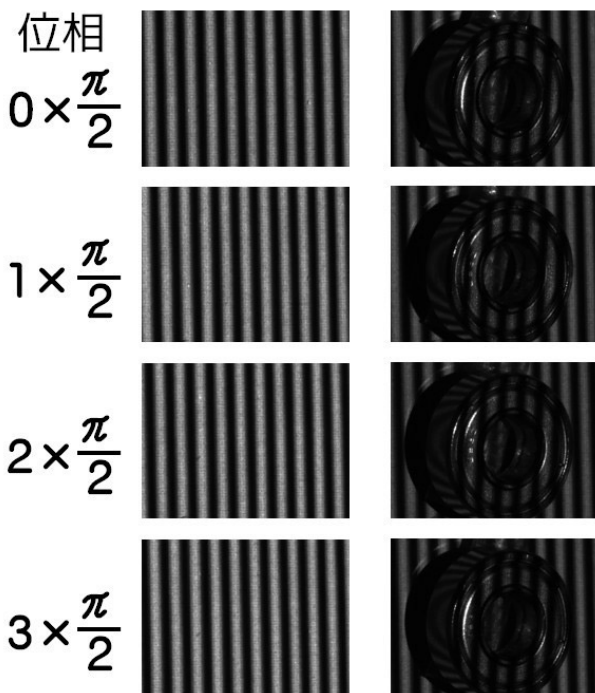


図18 投影した縞パターン (左) と得られた画像 I_n (右)

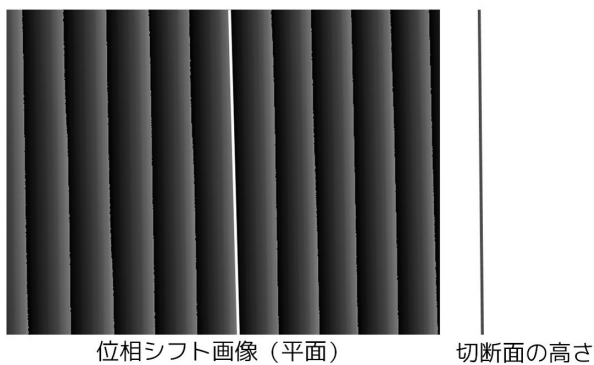


図19 平面の位相シフト画像と切断面の高さ



図20 プロジェクタ光源を用いて縞パターンを投影

計測対象のミニチュアベアリングとプロジェクタ光源、カメラを図20のように配置し、測定して得られた位相シフト画像を図21に示す。なお、ベアリングの位置を見やすくするために輪郭を破線で示している。また、図19、図21中の中央部分にある垂直方向の白線を切断面とした時、その高さを各図の右にプロットしている。図21からベアリングのカバー面の凹凸が高精度に測定できていることがわかる。

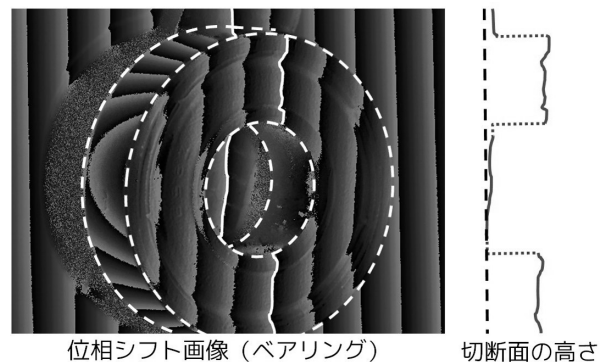


図21 ベアリングの位相シフト画像と切断面の高さ

位相シフト法を用いて物体の高さを求める場合は、得られる位相の不連続性が問題になるが、本処理においては細かな凹凸である傷を検出することが目的である。したがって得られた位相シフト画像の変位を求め、位相の不連続面以外で急激に変化しているところが欠陥であると言える。

図22はミニチュアベアリングの位相シフト画像の変位強度を示した図である。この変位強度を閾値で判別処理することで、細かな傷である型番の刻印や小さな凹みが識別可能であることがわかる。このように、位相シフト画像の変位強度から傷判別処理を開発し、傷の検出が可能であることを確認した。

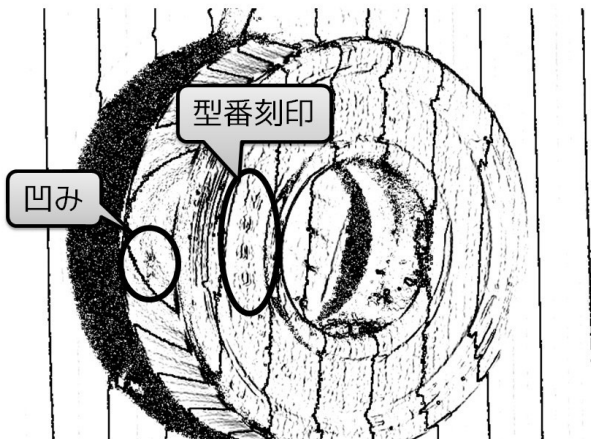


図22 位相シフト画像の変位強度

5. まとめ

本研究では、微細な物体を対象として画像計測や検査を行う場合に必要となる、領域合成手法や深度合成手法などの微細画像処理技術を開発した。開発した微細画像処理技術を用いてアスベスト検出を目的とした建築廃材の含有成分識別検査装置を試作した。

また、レーザー投光と画像特徴量の計算による打痕判別処理と、位相シフト画像の変位強度を用いた傷判別処理を開発した。開発した手法を用いた小型部品外観検査装置を試作し、ミニチュアベアリングの欠陥検出試験を行い、有効な結果が得られることを確認した。

今後は、開発した手法の精度向上や、システム化のための技術開発を行い、実用化を目指した取り組みを進める予定である。

謝辞

株式会社環境科学開発研究所および北日本精機株式会社には、微細画像計測手法と検査装置の開発、撮影試験に用いたサンプルの提供など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) H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "SURF: Speeded Up Robust Features", European Conference on Computer Vision, pp.404-417, (2006)
- 2) 齊藤進・飯島俊匡・高橋裕之・他, 「東日本大震災アスベスト含有建材判別報告」, 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, (2013)
- 3) 齊藤進・高橋徹・飯島俊匡・他, 「震災による建物倒壊現場におけるアスベスト含有建材の迅速判別方法の開発」,

第23回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, (2013)

- 4) JIS A 1481-1-2014, 「建材製品中のアスベスト含有率測定方法」, 日本規格協会, (2014)
- 5) 藤垣元治, 「光学的全視野計測における位相解析技術」システム制御情報学会誌, Vol.48, No.12, pp.495-503, (2004)

地理情報の高度利用技術の開発と配送支援システムへの応用

奥田 篤, 宮崎 俊之, 高橋 裕之

Research on Advanced Application of the Geographic Information

Atsushi OKUDA, Toshiyuki MIYAZAKI, Hiroyuki TAKAHASHI

抄 録

地理情報を生活分野や産業分野で高度に利活用する社会を実現し、新たな産業を創出するために、地理情報処理システムの適用範囲の拡大が期待されている。そこで、GPSを補強する測位衛星の利用による測位精度の向上を検討した。さらに、配送支援に用いる地理情報提示システムを開発した。

キーワード：地理情報システム, 準天頂衛星システム, 配送支援

Abstract

The expansion in the range of application of geographical information systems realizes a society using geographical information widely and is to build new industry. Therefore, we examined improvement of the positioning precision using the positioning satellite which can reinforce GPS. Furthermore, we developed a geographic information system to improve efficiency of the delivery.

KEY-WORDS : Geographic Information System, Quasi-Zenith Satellite System, Delivery System

1. はじめに

衛星測位により簡便に自己位置を知ることが可能となったことを受けて、地理情報を高度に活用する社会の実現が目指されており、地理情報の生活分野や産業分野での利活用の促進、地理情報サービス産業のような新たな産業の創出が期待されている。

国・地方公共団体は連携して基盤地図の整備を進めており、これを活用した官民による地理情報の共用も取り組まれている。また、高機能かつ携帯可能なスレート端末（スマートフォン、タブレット端末等）の普及が急速に進んでおり、これらの端末の多くは衛星測位が利用可能である。このようなことから、場所を選ばずにどこでも地理情報と結びついたサービスを提供することが可能になりつつある。

デスクトップコンピュータでの利用を前提としていた地理情報システムは、携帯することが可能になったことで、測位精度を向上させたり、時間経過に伴い変化する情報を逐次適切に処理して提示したり、目の前にある現実世界を写した画像へ情報を合成して提示するなどの新たな技術を導入することにより、その適用範囲が拡大できると期待されている。

このような地理情報サービスは、道内においても市場の拡

大が見込まれ、観光・流通など幅広い分野での需要が期待される。中でも、運送分野は、冬期の降雪・積雪による配送・運行効率の低下などの地域課題を抱えており、効率維持に有効なシステムを求めていることから、地理情報サービスの利活用が特に有望である。

このような状況を踏まえて、当场では、地理情報処理システムの高度化に関する技術開発を進めている。その一環として、本研究ではGPS（Global Positioning System）を補強する測位衛星の利用による測位精度の向上を検討した。また、得られた知見を利用して、配送支援に用いる地理情報提示システムを開発した。

2. GPS補強システムによる測位精度向上の検討

2.1 衛星測位の現状と課題

衛星測位は、複数の測位衛星からの信号を受信機で受信し、測位計算することで自己位置を取得できる。現在は米国が運用する全地球型衛星測位システムであるGPSが広く用いられている。GPSにおける測位衛星であるNAVSTAR衛星からの信号が安定的に受信できる場合には、測量などに比べて簡便かつ即時的に測位可能であり、GPS受信機の低価格化

に伴い普及が進んでいる。

しかし、市街地や山間地では、低仰角に位置するNAVSTAR衛星からの信号がビルや樹木で遮られるため、測位が不可能であったり、測位精度が著しく低下する場合があります、GPSを補強できる測位衛星の併用による改善が期待されている。

GPSによる測位の精度や信頼性を向上させる方法の一つに、静止衛星型衛星航法補強システム（SBAS：Satellite-based Augmentation System）がある。国内では、2機の運輸多目的衛星（MTSAT：Multi-functional Transport Satellite）を利用するSBASとして運輸多目的衛星航法補強システム（MSAS：MTSAT Satellite-based Augmentation System）が運用されている。補正情報を無償で利用でき、先行した欧米でのSBAS実用化を受けて多くのGPS受信機がMSASにも対応しており、ハードウェア構成を大きく変更することなく利用できることから、単独測位における精度向上に広く利用されている。

しかし、建築物・樹木でGPS信号が遮蔽される現象は、運輸多目的衛星からの補正信号でも同様に生ずるため、市街地等では、しばしば安定して補正することが困難となる。

2.2 GPS補強システムによるGPSの補完および補正

これらの課題への対応を目的として、日本上空に長時間留まる軌道（準天頂軌道）をとり、天頂付近からGPSを補完および補正する信号を放送する準天頂衛星システム（QZSS：Quasi-Zenith Satellite System）の整備が始まっており、現在1機が試験運用されている^{1),2)}。準天頂衛星はGPSおよびMTSATと互換な信号を放送しているため、受信機側の対応も容易であり、測位計算にこれらの信号を利用できる受信機が供給され始めている。

また、ロシアが運用している全地球型衛星測位システムであるGLONASS（Global Navigation Satellite System）が注目されている。GPSと併用することで、測位に利用し得る衛星を増し、低仰角に位置する衛星が遮蔽される影響を回避できると期待されるからである。そのため、GLONASS衛星からの信号を受信し、測位計算の対象とすることができる受信機が供給され始めている。

2.3 GPS補強システムの測位精度への寄与の検討

衛星測位は地理情報処理システムの基盤であり、その測位精度はシステムのあり方に大きな影響を与え、システムを高度化するために重要な要素であることから、これらのGPS補強システムの測位精度への寄与を検討した。

準天頂衛星およびGLONASS衛星からの信号（L1-C/A）を利用してGPSを補完しながら定点測位を行い、測位精度を評価した。また、準天頂衛星が放送する補正信号（L1-SAIF（Submeter-class Augmentation with Integrity Function））を利用してGPSを補正しながら定点測位を行い、

測位精度を評価した。

定点測位に供した受信機は以下のとおりである。

- u-blox社 EVK-6N
- Ashtech社 MB100
- コア CD311

定点測位は、GPS信号再放射システム（SAN JOSE NAVIGATION社RK-104）を使用して行った。すなわち、3階建て建屋の屋上に設置したアンテナでGPS等の信号を受信し、ここから屋内に引き込んだアンテナケーブルに接続した再放射アンテナから信号を再放射した。これを評価対象である受信機で所定の時間受信し、1秒間に1回、測位結果である緯度および経度を出力させた。なお、建屋の近隣にはより高層な建築物等が無く、アンテナは全天が見通せる状態で設置されている。

定点測位結果の一例を図1に示す。緯度・経度として出力された測位計算の結果を平面直角座標に変換し、時間経過に従ってプロットしている。この例では、GPS信号のみを用いて測位した結果とQZSS信号を加えてGPSを補完しながら測位した結果を示しており、両者の測位誤差を比較することにより、QZSSの測位精度向上への寄与が確認された。

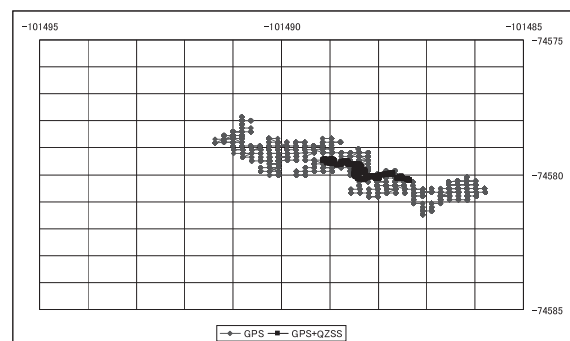


図1 定点測位結果の例

（淡点はGPSのみを、濃点はGPSとQZSSを用いて測位。）

同様に、GLONASS信号によるGPSの補完、MSASないしQZSS（L1-SAIF）によるGPSの補正を組合せながら定点測位を行い、測位精度向上への有効性を検討した。

表1に、それぞれの測位方法における測位誤差の平均を示した。季節の異なる2週間程度の期間において、連日昼夜各

表1 補強システムの測位精度向上への寄与

測位方法	補足衛星数	2DRMS(m)
GPS	9.85	3.20
GPS + QZSS	10.00	0.63
GPS + GLONASS	13.76	0.53
GPS + MSAS	9.35	0.37
GPS + QZSS-SAIF	9.00	0.47
GPS + GLONASS + MSAS	13.56	0.24

10～12時間程度測位して得られた結果を取りまとめたものである。保有機材数の制限により、必ずしも同時に測位した結果のみを比較検討しているわけではないが、測位方法の違いに起因する測位精度の差が現れており、QZSSおよびGLONASS併用によるGPS補完、QZSSによるGPS補正のいずれも測位精度の向上に有効であることを確認した。評価した測位方法の中では、GLONASSをGPSと併用して衛星配置を改善しつつ、MSASによりGPSを補正する場合は、最も高精度な測位が可能であった。

今後、さらに受信機のQZSS・GLONASS対応が進むと考えられることから、地理情報処理システムの開発においては、これらを積極的に利用することで、市街地等での測位精度・安定性の向上が期待できる。

現在はMSASないしQZSSから放送される補正信号がGPSのみを対象としているが、QZSSやGLONASSを対象とした補正信号を放送する試みも開始されており、対応した受信器の供給に応じて、引き続き測位精度向上への寄与を検討する予定である。

3. 配送支援システムの開発

3.1 多積雪下における大型車両を用いる配送の課題

多積雪地域では冬期に積雪により道路が狭隘化することが多いが、都市部では除排雪が積雪に追いつかないため、生活道路のほとんどに及ぶ広い範囲で長期間にわたって道路幅員が減少する。そのため、大型車両を用いる配送では、経路を適切に選択し損なった場合に、これを修正することが容易でなく、配送効率が運転手の地理習熟度に大きく影響を受ける。しかも、近年、運転手の定着率の低下や休日の増加などにより、配送先を固定することが難しくなっており、配送先の地理に未習熟な運転手を相当数起用せざるを得ない。そのため、地理習熟度によらずに配送効率を平準化することが求められている。

そこで、走行軌跡をデータベース化し、そこから抽出した経路を提示することで、地理未習熟な運転手でも効率的に配送が行えるよう誘導する配送支援システムを開発した。

以下に、配送支援システムの概要とシステムを灯油配送に適用した結果について紹介する。

3.2 配送支援システムの概要

開発した配送支援システムは、車両に搭載する走行軌跡記録・経路提示システム（以下、車載システムという）と、走行軌跡データベースから構成した。

車載システムは、タブレット端末（Mobile In Style社 EdenTAB）から構成されており、内蔵GPS受信機を用いた走行軌跡の取得と配送先までの経路の提示に供した（図2）。

車両が走行中は、継続的に測位が行われており、1秒毎に



図2 走行軌跡記録・経路提示システム

出力される位置情報を記録することで、走行軌跡を取得する。

車載システムは地図を搭載しており、経路データベースから配送先毎に応じて抽出される経路データを搭載できる。配送時は、各配送先付近において、車両の現在位置と配送先への経路を運転手に提示することで、転回や再アプローチなどの冗長走行が生じないように誘導する。

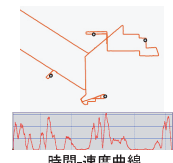
取得した走行軌跡は、走行終了後に走行軌跡データベースに追加した。

走行軌跡データベースは、車載システムで取得された走行軌跡を処理して、各配送先毎に、その付近での経路を蓄積す

走行軌跡データベースの構築



収集した走行軌跡の例



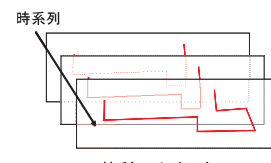
時間-速度曲線
停止位置の特定



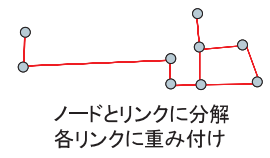
経路の切り出し

走行軌跡
データベース

経路生成手法の開発



蓄積した経路



ノードとリンクに分解
各リンクに重み付け



経路の抽出



生成した経路の例

図3 走行軌跡データベース構築及び経路生成手法の原理

る。走行軌跡は以下の手順に従って処理した。最初に、走行軌跡から時間-速度曲線を生成し、速度の変化を観測して、所定の時間を超えて速度が0 km/h付近に設けた閾値を下回る位置を、配送先の停止位置として特定した。次いで、各停止位置から走行軌跡を辿り、所定の右左折角を経過する位置まで経路を切り出し、データベースに登録する。登録した経路はデータベース中で、住所などの配送先情報と連結される。

走行軌跡データベースからの、与えられた配送先に対応する経路の抽出は、蓄積された当該配送先に対応する複数の経路から走行頻度と時系列を考慮して経路を生成することで行った(図3)。まず、登録されている各経路を解析して、停止位置および右左折点(ノード)を求める。次に、停止位置から、順に、連結しているリンク(ノード間の区間)を辿り、隣接しているノードへ至ることを繰り返して経路を生成した。あるノードにおいて、次のノードの候補となる隣接ノードが複数ある場合には、各ノードとの間のリンクに走行日時の新しい順に高い重みを付けた得点を与え、それを重畳して最も高い得点を得たリンクを選択することで次ノードを決定した。

車載システムを、灯油・ガス配送用タンクローリーに搭載して、走行軌跡を収集した。

収集した走行軌跡の例として、同一車両の一週間分の走行

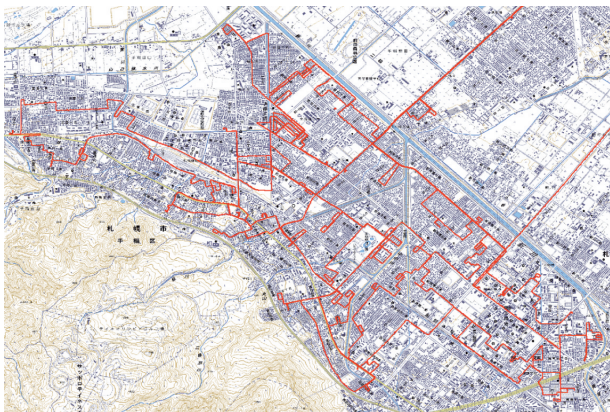


図4 収集した走行軌跡の例

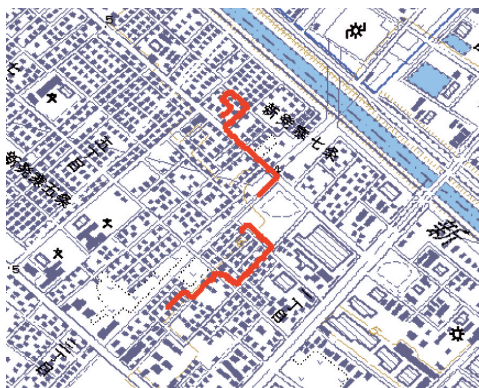


図5 抽出した経路の例

軌跡の一部分を図4に示す。データベース化した走行軌跡から、所定の配送先を与えて抽出した経路の例を図5に示す。

配送を行う際には、あらかじめ、経路データベースに配送先リストを与えて、各配送先に対応した経路データを抽出する。前述のとおり、これを車載システムに搭載して、配送先付近での誘導に利用する。

3.3 灯油配送への配送支援システムの適用

大型車両であるタンクローリーを用いる灯油配送へ配送支援システムの適用を試みた。

まず、地理に習熟した運転手が実際に配送を行った際の走行軌跡を取得した。これを経路データベースで処理して、得られた経路データを車載システムに搭載した。各配送先付近の地理に未習熟な運転者が、車載システムを携帯して、あるいは地図のみを携帯して、取得済走行軌跡を対象に、それぞ

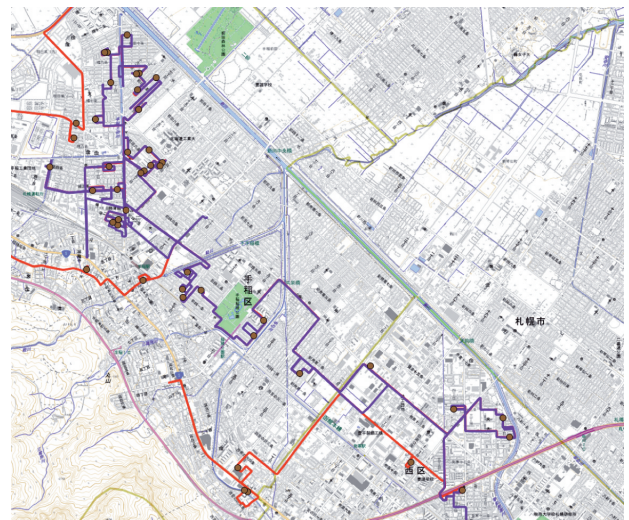


図6 走行試験(追走行)における走行軌跡の例
(淡線は配送における、濃線は追走行における走行軌跡。)

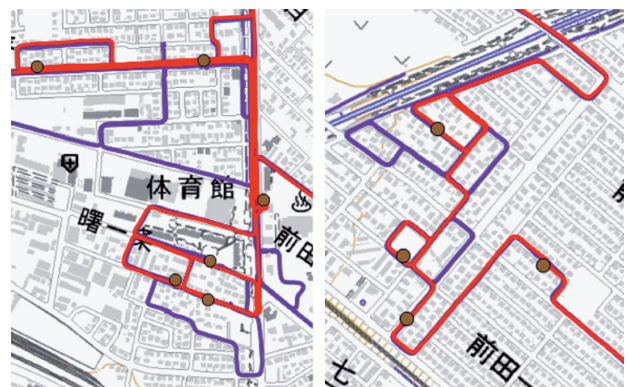


図7 追走行における冗長走行の例
(濃線は地図のみ携行した際の走行軌跡、淡線は対象軌跡。濃線において配送先(点)付近での冗長走行が認められる。)

れ追走行を実施し、その走行の冗長性を評価した。追走行時の走行軌跡の一例を図6に示す。

地図のみを携行した追走行により得られた軌跡の一例を図7に示した。走行軌跡の一部を、対象軌跡と重ねて表示している。図から明らかなように、配送先(図中の点)付近で頻繁に冗長な走行が発生していることが認められる。他方、車載システムを携帯した追走行においては、対象軌跡どおりに走行しており、このような冗長な走行は認められなかった。これらの結果から、配送支援システムの配送効率平準化への有効性が確認された。

4. おわりに

本研究では、GPS補強システムの利用による測位精度の向上など、地理情報処理システムの適用範囲の拡大に有効な知見の確立を図り、これを用いて配送支援システムを構築し、配送効率の平準化に有効であることを確認した。

今後は、引き続き、地理情報処理システムの高度化に関する技術開発に取り組み、配送システムの実用化を進める予定である。

引用文献

- 1) 矢来博司, 準天頂衛星「みちびき」による高精度測位補正技術, (2010)
- 2) 宇宙航空研究開発機構, 準天頂衛星システム ユーザインタフェース仕様書 (IS-QZSS), 1.1 版, (2009)

農産廃棄物カスケード型循環利用バイオエタノール製造システムの構築

北口 敏弘, 鎌田 樹志, 山越 幸康, 富田 恵一, 三津橋 浩行, 高橋 徹, 柏瀬 浩司

Establishment of the Bioethanol Manufacturing System from Agricultural Waste

Toshihiro KITAGUCHI, Tatsuyuki KAMADA, Yukiyasu YAMAKOSHI
Keiichi TOMITA, Hiroyuki MITSUHASHI, Touru TAKAHASHI, Kouji KASHIWASE

抄 録

ビートトップなど畑作農業で排出される農産廃棄物から抗肥満性物質を含有するビートトップ油を生産し、その残渣および麦わら、豆殻をバイオエタノールの原料として利用するカスケード型高効率バイオエタノール生産システムの検討を行った。その結果、有効なビートトップ回収方法、カロテノイドおよび糖類の長期保存方法、ビートトップからの脂溶性物質の抽出方法、エタノール製造のための原料の前処理方法を明らかにした。また、同時糖化発酵の高効率化、エタノール蒸留残渣焼却灰の成分評価を行い、プロセスの最適化を図った。

キーワード：ビートトップ、抽出油、セルロース、バイオエタノール、カスケード利用

Abstract

The purpose of this study is construction of economically competitive bioethanol production system by cascading of the agricultural residue. The tops of the sugar beets (beettops) are a candidate for the cascading waste. It has considerable content of Omega-3 polyunsaturated fatty acids (PUFA) and carotenoids. We studied on producing bioethanol from agricultural wastes such as wheat straws, bean stalks and pods in combination with the cascading of beettops. We found the significant collection method for beettops, the long period presevation method of carotenoids and sugars, the ethanol extraxtion method from beettops, pretreatment methods for manufacturing bioethanol from cellulosic biomass such as wheat straw, bean stalks and pods and the residue after the ethanol extraction treatment of beettops. And it was carried out the efficiecy improvement of the simultaneous saccharification and fermentation, the evaluation of the incineration ashes after ethanol distillation for fertilizers, the process optimization.

KEY-WORDS : Beettops, Extracted Oil, Cellulose, Bio-ethanol, Casucade use

1. はじめに

北海道十勝地方などではビート、小麦、ジャガイモ、豆類の主要4作物による畑作輪作体系が確立されており、その生産量は全国の15～40%を占め、大規模畑作地域が形成されている。その生産活動に伴ってビートトップ（ビートの収穫の際に事前に切り取られる葉部、茎部、根部の一部）、麦わら（麦稈）、ジャガイモ地上部、豆殻などのセルロース系農産廃棄物が大量に発生している。おもに家畜の敷料として圃場から収集されている麦わら以外のものは圃場に鋤込まれるか野

焼きされているのが現状であり、適切な処理が望まれている。

一方、それら廃棄物の中には抗肥満性を示すカロテノイド（ネオキササンチン）などの脂溶性高付加価値物質が含まれているものもあり、それらを回収して廃棄物から機能性食品を生産することで、廃棄物の有効利用ができる。また、高付加価値物質を回収したのちの残渣を原料とする高効率なバイオエタノール製造体系を確立することで、廃棄物のカスケード利用が可能となる。さらに、バイオエタノール製造過程で排出される、エタノール蒸留残渣のサーマルリサイクル後に得られる焼却灰を肥料等として圃場還元すれば、圃場から収奪

事業名：公募型（環境研究総合推進費補助金研究事業研究）

課題名：農産廃棄物カスケード型循環利用バイオエタノール製造システムに関する研究

した肥料成分を再び圃場に戻すことができ、循環利用が可能となる。本研究は、これらを実現し、廃棄物の排出量削減と地球温暖化抑制に寄与することを目的とする。

本事業では原料収集・保存に関する検討、原料に含まれる有用成分評価、エタノール製造のための原料の前処理に関する検討、進化工学的手法による温度ストレス耐性機能性酵母（酵母にセルラーゼを生産させ酵母表層に提示させた酵母）の最適化、酵素生産・同時糖化発酵の装置的課題の実験的検証、エタノール蒸留残渣焼却灰の成分評価、プロセスの最適化の検討を行った。そのうち、原料に含まれる有用成分評価および進化工学的手法による温度ストレス耐性機能性酵母の最適化以外の項目について、以下に報告する。

2. 供試試料（ビートトップ）

ビートトップは高付加価値物質（カロテノイドや ω -3脂肪酸）を高濃度で含有しており¹⁾、本研究では、それらの物質を抽出し、カスケード利用（資源やエネルギーを利用すると品質が下がるが、その下がった品質レベルに応じて何度も利用すること）を目的のひとつとしている。ビートは、図1に示すように、ビート葉部、茎部、クラウン、根部からなり、収穫時に根部の上部を切断するため、葉部、茎部、クラウンからなるビートトップ（図2）が残渣として生じる。

試験の供試試料としては、平成23年9月、平成24年8月、平成25年10月に（地独）北海道立総合研究機構十勝農業試験場で採取したサンプルを使用した。



図1 ビートの部位



図2 ビートトップ

3. 試験方法

3.1 原料の収集・保存

数種の農産廃棄物について、現在の排出状況や実利用のための収集・運搬方法などに関して、文献調査及び関係機関へのヒアリングなどによる情報収集を行い、賦存量を推計するとともに、収集・運搬方法について検討を行った。

また、エタノール水溶液を噴霧したビートトップの長期間の保存時の糖含有量の経時変化、ビートトップのエタノール抽出液の長期間の保存時のカロテノイド含有量の経時変化を調べた。NREL/TP-510-42618²⁾で糖類の含有量を求め、その合計値を糖含有量とした。なお、液体クロマトグラフで、9'-シス-ネオキサンチン、ピオラキサンチン、ルテインを定量し、その合計値をカロテノイド含有量とした。

エタノールによる抽出条件を決定するため、抽出液のエタノール濃度を31-85wt%と変えて、抽出液の糖類、カロテノイド類の抽出率を検討した。

3.2 エタノール製造のための原料の前処理

セルロース系農産廃棄物から有用物質を抽出した後の残渣や他のセルロース系農産廃棄物から高効率なバイオエタノール製造を行うために原料特性の解明、前処理条件の最適化、蒸煮・爆砕処理の連続処理装置の開発を行った。

ビートトップ、麦わら、ジャガイモ地上部、大豆殻、小豆殻、長いも茎を対象として、水・アルコール抽出物質³⁾、糖類²⁾、リグニン²⁾、灰分⁴⁾、たんぱく（ケルダール法）について分析を行った。

賦存量の多い麦わら、豆殻を対象として水酸化ナトリウムを用いたアルカリ処理と蒸煮・爆砕処理を組み合わせた前処理方法について、おもにアルカリ処理条件を変えて最適前処理条件の検討を行った。試験条件を表1に示す。

爆砕処理はバッチ処理となり効率的ではないため、連続爆砕処理装置の設計、試作を行い、不具合点を逐次改良しながら、連続処理装置の開発を行った。図3に連続前処理装置のフロー図を、表2に試験条件を示す。

表1 アルカリ処理、爆砕処理試験条件

試験番号	粒度 mm	処理方法	アルカリ処理				爆砕処理		
			NaOH 濃度 % (対基質)	NaOH 温度 ℃	NaOH 時間 h	アルカリ 処理TS %	攪拌速度 rpm	爆砕温度 ℃	爆砕時間 min
麦稈1	0.18~0.85	振とう 培養機 or 恒温 振とう 水槽	13	60	6	10	150	190	2
麦稈2	0.18~0.85		13	60	6	22	200	190	2
大豆1	0.18~0.85		13	60	6	10	150	190	2
大豆2	0.18~0.85		13	60	6	22	200	190	2
大豆3	0.18~0.85		13	60	6	22	200	190	20
大豆4	0.18~0.85		13	60	0	22	200	190	20
大豆5	0.18~0.85		13	75	6	10	150	190	2
大豆6	0.18~0.85		13	60	24	22	200	190	2
大豆7	0.18~0.85		13	60	48	22	200	190	2
大豆8	0.18~		13	60	6	10	150	190	2
大豆9	0.18~0.85	攪拌培養機	13	75	6	25	50	190	2
大豆10	0.18~0.85	オートクレーブ	13	90	6	10	50	190	2

3.3 酵素生産・同時糖化発酵の装置的課題の実験的検証

糖化・発酵工程におけるエタノール最終濃度を高めることを目的として、同時糖化発酵⁵⁾における二次原料の固形分増

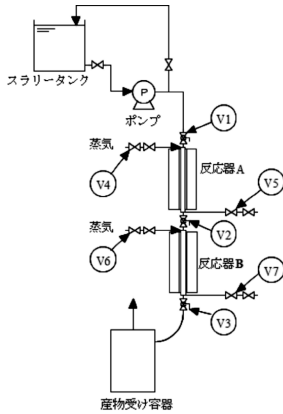


図3 連続爆砕装置フロー

表2 連続爆砕処理試験条件

条件設定項目	設定値
BM種	コーン茎葉、 麦わら
処理回数	3回
BM投入時間	180s
反応器A処理時間	10s
A→B移送時間	3s
反応器B処理時間	120s
排出時間	3s
反応器A設定温度	170℃
反応器B設定温度	190℃

加による効果を調査し、高固形分濃度で高い糖化発酵効率が得られる方法を検討した。まず、同時糖化発酵における固形分濃度の糖化・発酵に対する影響を調査するため100mLの小型糖化発酵試験装置（図4）を用いて、固形分5-10%に対する同時糖化発酵試験を行った。次に、高固形分での同時糖化発酵における酵素酵母液との混合について、①培地・緩衝液・酵素・酵母混合液への浸漬、②酵素製剤量、③振とう攪拌による効果を検証し、同時糖化発酵装置の混合方式に関する基礎検討を行った。最後に、高固形分の原料で酵素、酵母を効果的に原料に接触させるため、ジャケット式セパラブルフラスコ（内容量1L）を用いて、上部から攪拌機で攪拌する反応装置を用いた検討を行った（図5）。



図4 小型糖化発酵試験装置



図5 攪拌装置

3.4 エタノール蒸留残渣焼却灰の成分評価

エタノールを製造した後に生じる各種残渣は、サーマルリサイクルによるエネルギー回収に用いる。最終的な残渣であるサーマルリサイクル後の焼却灰に関して、肥料としての利用が期待できることから、肥効成分の評価、安全性を担保するための有害物質の量および溶出性について検討した。

ビート茎葉部、麦わら、大豆殻について、600℃または815℃で灰化、粉碎して試料とした。得られた粉碎物をプレス成形し、波長分散型蛍光X線分析装置により、定性分析およびファンダメンタルパラメーター法（以下FP法）による半定量分析を行った。

また、安全性の評価のために、重金属などの溶出試験と含有量試験を行った。溶出試験は土壤の汚染に係る環境基準に準拠して行った。含有量試験は焼成汚泥肥料の含有量基準での全分解法を考慮して分解し、分解試料についてICP発光分光分析法（標準添加法併用）などにより定量した。

3.5 プロセスの最適化の検討

ビートトップからビートトップ油を生産し、その残渣と他のセルロース系バイオマスからバイオエタノールを生産するシステムについて、最適と考えられるプロセスを提案し、そのプロセスにおけるLCA評価および経済性評価を行った。

北海道十勝地方でビートトップ、麦わら、豆殻の収集に最適な市町村を選定し、工場建設予定地を想定した。また、原料の保存性や収穫時期、可能収集量などからバイオエタノール生産量、時期による最適な原料の選択とプロセスの提案を行った。

上記の最適化されたプロセスについて、これまでの研究成果や文献値などを用いてそれぞれの工程に係る投入エネルギー量を算出し、CO₂排出量やエネルギー収支について検討を行った。

各原料の収集運搬費、電力費、ユーティリティ費、薬品費、廃水処理費など変動費を、これまでの成果や文献値から推算した。ビートトップ油の生産費用および販売収入額などを予測し、バイオエタノール価格低減額を算出した。

4. 試験結果および考察

4.1 原料収集・保存

本研究でターゲットとしている麦わら、豆殻、ビートトップ、スイートコーン茎葉などについて北海道内及び十勝管内の廃棄物排出量を推算した（表3）⁶⁻¹¹⁾。収集運搬方法については、麦わら、小豆殻、スイートコーン茎葉は、すでに方法が確立されており、ビートトップについては、過去に収集装置を製造し、現在、装置を試作しているメーカーがあり、これらの装置で収集可能であることがわかった（図6）。

各種バイオマスの保存については、麦わら、小豆殻、スイートコーン茎葉は、既往の研究成果であるアルカリ浸漬保存が

適用可能である。ビートトップについては、アルカリ浸漬では含有している有用物質が変質する恐れがある。そのため、エタノール水溶液を噴霧した状態で保存試験を行ったところ、低温下で保存すれば、9ヶ月間経過後も初期値と同程度の糖含有量を維持することができ、長期間保存することは可能であることがわかった(表4)。

表3 北海道内及び十勝管内の農業残渣排出量
(推算値, スイートコーンのみ湿物基準)

農業残渣	作付面積あたりの 乾物重量(kg/ha)	作付面積(ha)		賦存量(万t)	
		北海道	十勝管内	北海道	十勝管内
小豆殻+茎葉	1107	23200	12500	3	1.4
大豆殻+茎葉	3141	24400	4160	8	1.3
麦わら(小麦)	3583	116300	45700	42	16.4
スイートコーン茎葉	—	9640	3190	12	3.7
ビートトップ	6800	62600	26800	43	18.2

表4 長期保存試験での糖含有率の変化
(単位: wt%, 無水ベース)

保存温度 (°C)	噴霧エタノール 濃度(wt%)	初期値	保存期間								
			2日	1週間	2週間	1月	2月	3月	4月	6月	9月
3	0	30	26	27	33	32	33	30	29		
	1	30	28	29	32	34	34	30	25	24	23
	10	30	27	28		31	30	27	31	33	
	90	30	29	21	27	29	32	30	27	31	34
25	0	30	28	30	28	0	27	24	17	15	14
	1	30	30	30	27	32	26	20	16	16	13
	10	30	27	27	24		27	27	22	21	15
	90	30	26	27	29	31	29	29	27	27	31



図6 ビートトップ回収機(試作機)

ビートトップ中のカロテノイドおよび脂質の保存については、高濃度のエタノールにより、低温下で遮光保存することで、長期間にわたり初期値と同程度の含有量を維持できることがわかった(図7)。また、エタノール濃度が低下すると

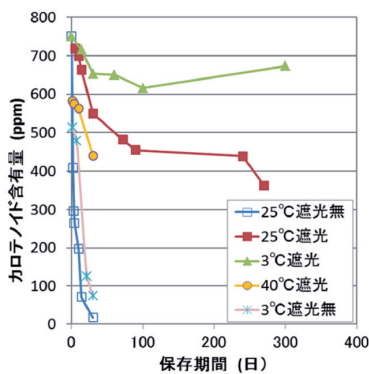


図7 長期保存試験でのカロテノイド抽出率の変化

保存性が悪くなるため、少なくとも75%程度以上の濃度での保存が望ましく、より長期間の保存のためには85%以上が好ましいことがわかった(表5)。

表5 いくつかのエタノール抽出液での保存試験結果
(3°C, 遮光)

抽出液エタノール濃度(wt%)	76	71	65	61	55	参考85%60日
51日後のカロテノイド残存率(wt%)	76	52	49	59	44	87

次に、エタノール抽出条件について、基礎検討を行った。エタノール濃度が高いほど脂質およびカロテノイドの抽出率は高くなり、エタノール濃度75%では、原料ビートトップの15%のカロテノイド、30%の脂質を抽出することができた(図8および図9)。また、抽出時の糖の損失は少なく、90%以上の糖が抽出残渣に残存しており、エタノール溶液で抽出することで効率的に脂質およびカロテノイドなどの有効成分のみを抽出できることがわかった。以上のことから実プロセスでは、少なくとも75%以上のエタノール濃度で抽出し、抽出液をそのままの状態での保存するのが好ましいことがわかった。

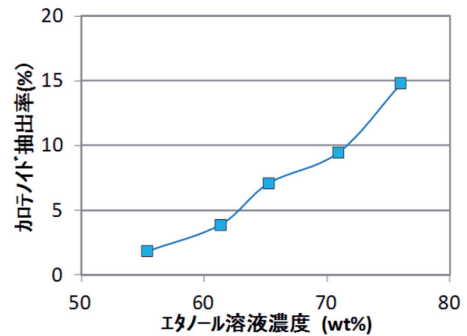


図8 カロテノイド抽出率の変化

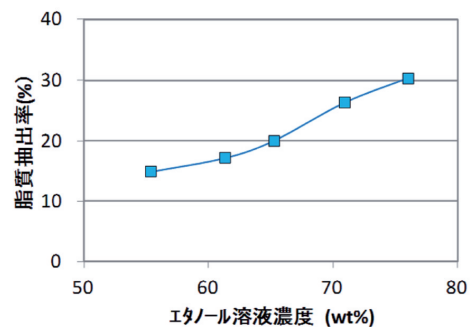


図9 脂質抽出率の変化

4.2 エタノール製造のための原料の前処理

ビート茎葉部およびビートクラウンのバイオマス組成はともに水・アルコール抽出物質が非常に多く、ビート茎葉部で55~58%、ビートクラウンで70%強であり、両者ともグルカ

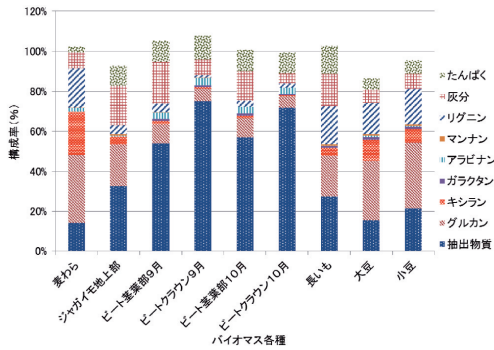


図10 各種バイオマス組成

ンが少なく10%弱であった。また、リグニンは10%以下で非常に少なかった。麦わらおよび豆殻類は抽出物質が15～20%、グルカンが30%台、リグニンは20%程度で他の草本類と同程度であった(図10)。一方、ビートトップ茎葉およびクラウンには多くの可溶性糖が含まれていることが明らかとなり、これをエタノール原料とすべきであることが分かった。また、十勝地方の農産廃棄物の賦存量はビートトップ、豆殻、麦わらがそれぞれ18.2トン、2.7トン、16.4トン(いずれも乾物ベース)と多く、上記結果とあわせて考えると、これらの廃棄物が原料として有望であることが分かった。

これらのバイオマスを原料とし、前処理を行った。麦わらの糖化効率90%以上で良好な結果を得た。大豆殻については、麦わらと同じ前処理条件(アルカリ処理条件:13%, 60℃, 6h)で65%程度であったので、条件を変えて検討した結果、アルカリ処理条件:13%, 75℃, 6hで糖化効率77%を得た(図11)。大豆8の糖化効率が高いが微粉砕によるものであり、エネルギー的に不利と思われた。麦わらではグルカンのほぼすべて、キシランの86%が固形分として残り、良好な残存率を得た(表6)。

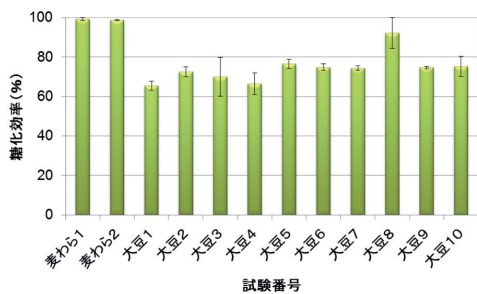


図11 酵素糖化率

表6 前処理産物の残存率(麦わら)

	残存率(%)	
	投入量 =80g	投入量 =125g
グルカン	99	101
キシラン	85	87
リグニン	72	70

試作した連続爆砕装置について、逐次改良を行った。アルカリ処理を施した固形分濃度10%のコーン茎葉を基質として連続運転を行った結果、問題なく運転が可能であることを確認した。また、高固形分濃度(30%)の基質に対しても安定した運転ができた。改造の結果、処理能力は約0.43から0.57kg-dry/h/Lに改善された(図12, 表7)。



図12 連続爆砕装置

表7 連続爆砕能力

項目	H24年度	H25年度	
BM投入量/回	kg-dry/回	0.15	0.21
総処理時間	min	13	13.85
処理量	kg-dry/h/L	0.43	0.57
糖化効率	%	-	96

BM:バイオマス

4.3 酵素生産, 同時糖化発酵の装置的課題の実験的検証

100mLの小型糖化発酵試験では、固形分の増加に従い、同時間での糖化発酵効率が低く、エタノール生成速度が低下していることが認められた(図13)。固形分の増加による糖化発酵速度の低下は、流動性の低下による混合不足が要因と思われた。

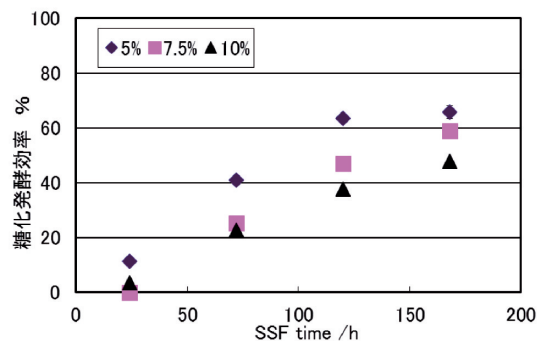


図13 固形分に対する糖化発酵効率

同時糖化発酵装置の混合方式に関する基礎検討では、酵素製剤量の増加や振とう攪拌により処理物全体を揺動させることが糖化発酵効率の向上に影響することを確認した(図14)。また、初期に酵素の至適温度にて糖化(液化)を進行させてから、発酵に適した温度に下げた発酵進めるところ、高固形

る収集範囲を設定した(図16)。

この収集範囲から22万トン(水分87%)のビートトップおよび3.5万トン(水分15%)の麦わら、豆殻を収集し、年間、ビートトップ油5.2トン、バイオエタノールを1.5万kL製造するプロセスを提案した(表11、図17)。

表11 ビートトップ油およびバイオエタノール製造プロセスの各種使用設定

項目	仕様設定
粗粉碎	カッターミルによる素粉碎
破砕	マスコロイダーによるゲル化
ビートトップ初期水分	87%
ビートトップ初期脂溶成分含有量	100mg/g-dry
抽出エタノール/基質比	4kg/kg-wet
抽出エタノール初期濃度	85wt%
抽出エタノール最終濃度	78wt%
抽出段数	1段
抽出時間	16h
固液分離後固形分濃度	25%
固液分離による脂溶成分の液側への亡失率	46%
粗粉碎	カッターミルに供給可能な素粉碎
破砕	スクリーンφ5mm通過
アルカリ処理	アルカリ種:NaOH、濃度:13%、固形分濃度:25%、温度:60~75℃、時間:6h
蒸煮燻砕処理	温度:190℃、時間:2分、アルカリ処理+蒸煮燻砕処理の物質回収率:グルカン100%、キシラン86%、処理後のTS:20%
糖化発酵	セルラーゼ使用量:5FPU/g-セルロース、36℃、収率:ビートトップ200L/t、麦わら220L/t
蒸留・脱水	蒸留:エタノール回収率99.5%、製品濃度92%wt、脱水:ゼオライト膜脱水、エタノール回収率98%、製品濃度99.5%wt

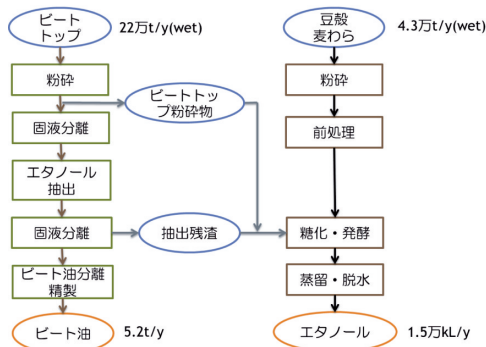


図17 ビートトップ油およびバイオエタノール製造プロセス

プロセスのLCA評価では、農産廃棄物であるビートトップおよび豆殻・麦わらを原料としたバイオエタノール生産に

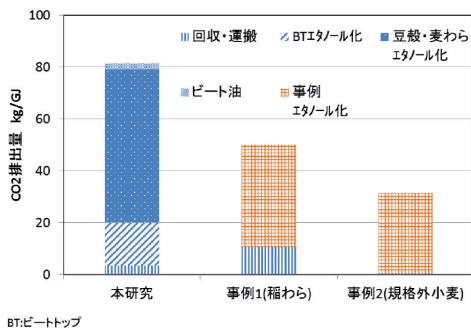


図18 機能単位あたりCO₂排出量 (化石燃料投入時)

におけるCO₂排出量は81kgCO₂/GJである(図18)が、蒸留残渣(リグニン)および豆殻・麦わらを燃焼して投入エネルギーに利用することにより約50%削減され、39kgCO₂/GJとなった(図19)。また、ビートトップ油の生産規模がバイオエタノールに比較して小さいため、CO₂排出量への影響は僅かであった。

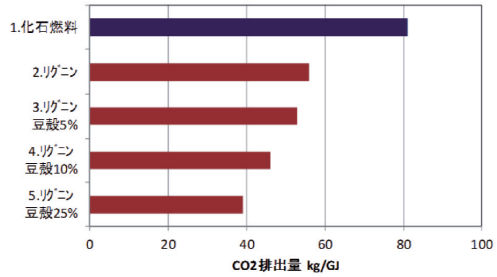


図19 機能単位あたりCO₂排出量 (蒸留残渣および豆殻等燃焼利用)

経済性評価では、原料費が59円/L-BE(BE:バイオエタノール、以下同様)と最も高かった。しかし、蒸留残渣(リグニン)の発電、熱源利用により12円/L-BE、さらにビートトップ油カプセルの販売により31円/L-BE低減されることが分かった。結局バイオエタノール生産価格は71円/L-BE(変動費のみ)となり、農林水産省のソフトセルロース利活用技術確立事業での目標値である90円/L-BEを大幅に下回る価格となることが分かった(表12)。

表12 経済性評価結果

項目	単位	数値	備考
計画生産規模	kL/y	15000	
規程	kL/y	7830	
	kL/y	7170	
処理量	t/y	35591	
	t/y	28160	
変動費			麦等13.7円/kg-dry、豆殻2.4円/kg-dry、ビートトップ(BT):
原料費	円/L	59.2	39円/kg-wet
電力売電	円/L	0	FITバイオマス廃棄物(木質以外)燃焼発電17.85円/kWh
電力使用	円/L	2	
A重油	円/L	14	
工業用水	円/L	0	
	円/L	14	
	円/L	3	
薬品類	円/L	5	NRELの酵素生産の5.1円/L
	円/L	5	日本アルコール協会ベース、軟水剤など
小計	円/L	27	
排水処理	円/L	1	NRELベース
ビートトップ油	円/L	11	3.3万円/kg-BT油
トップ油	円/L	-42	13万円/kg-BT油
合計	円/L	71	

5. まとめ

以上をまとめると以下の通りである。

- 原料収集、保存に関する検討で、原料の賦存量を明らかにした。また、企業が開発している回収機によるビートトップの回収が可能であることが分かった。また、糖類、カロテノイドについて9ヶ月まで長期保存できる条件を見いだした。また、カロテノイドは、遮光+低温により著しく保存性が改善された。

- ・原料の前処理では、グルコース収率は麦わらが90%、大豆殻は77%となる前処理条件を見いだした。さらに安定した運転が可能な連続前処理装置の開発を行った。
- ・エタノール蒸留残渣焼却灰の成分評価では、ビートトップ灰、麦わら灰、大豆殻灰のすべてが粗製カリ塩の基準以上の酸化カリウムを含有しており、肥料として有効に利用できることが分かった。

以上の研究結果を踏まえて、北海道十勝地方にモデルを設定しビートトップ油とバイオエタノールの生産プロセスを提案し、そのプロセスについてLCA評価、経済性評価を行った。

これらより、農産廃棄物から有用物質を生産し、その残渣を利用したバイオエタノール生産プロセスを構築し、価格競争力のあるバイオエタノール生産体系を確立できた。

謝辞

この研究は、平成23～25年度環境省環境研究総合推進費補助金より実施しました。

また、本研究で使用したICP発酵分光分析装置、ICP質量分析装置、X線回折装置は公益財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。ここに記して深く感謝いたします。

引用文献

- 1) 加茂川寛之, 陸上植物由来カロテノイドの分析方法の確立とその応用, 平成22年度北海道大学修士論文
- 2) 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)
- 3) A. Sluiter, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, and D. Templeton Determination of Extractives in Biomass NREL/TP-510-42619 (2008)
- 4) A. Sluiter, B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, and D. Templeton Determination of Ash in Biomass NREL/TP-510-42622 (2008)
- 5) N. Dowe and J. McMillan SSF Experimental Protocols - Lignocellulosic Biomass Hydrolysis and Fermentation, NREL/TP-510-42630 (2008)
- 6) 建部雅子, 花井雄次, テンサイ各部位における糖の消長, てん菜研究会報, 24, pp.57-63 (1982)
- 7) 北海道十勝地域の規格外農産物及び農産化工残渣物利用におけるバイオエタノール変換システムに関する事業化可能性調査報告書, 財団法人十勝圏振興機構, 平成17年

3月

- 8) 小川和夫, 竹内豊, 片山雅弘, 北海道の耕草地におけるバイオマス生産量及び作物による無機成分吸収量, 北海道農業試験場研究報告, 149号, pp.57-91 (1988)
- 9) 北海道バイオマス利活用マスタープラン, 北海道, 平成18年3月
- 10) 平成22年度農林水産省作物統計, <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/index.html>
- 11) 2011十勝の農業, 北海道十勝総合振興局, 平成23年12月

X線CTとガス分析を用いたアルミニウムダイキャスト製品の内部品質評価

高橋 英徳, 板橋 孝至, 中嶋 快雄, 宮腰 康樹, 戸羽 篤也, 相山 英明
北原 総一郎*, 赤見 行弘**, 倉田 一美***, 松浦 清隆****

Internal Quality Evaluation of the Aluminum Die-Cast Products Using X-Rays CT and Gas Analysis

Hidenori TAKAHASHI, Koji ITABASHI, Yoshio NAKAJIMA, Yasuki MIYAKOSHI
Atsuya TOBA, Hideaki AIYAMA, Soichiro KITAHARA*, Yukihiko AKAMI**
Kazumi KURATA***, Kiyotaka MATSUURA****

抄 録

アルミニウムダイキャスト製品は、軽量化の観点から自動車部品に多用されている。その内部には不可避な空孔があり、製品不良の発生の一因となっている。この空孔の低減により、製品不良率の低減や製品強度の向上、ひいては品質向上が期待できる。近年、開発されたX線CTにより製品中の空孔位置を精密に検出できているが、空孔発生原因を特定できないために根本的な解決には至っていない。本研究は、X線CTとガス分析を組み合わせることにより製品内部の空孔の定性的・定量的評価を行い、製品中の空孔発生原因を視覚的に可能とする「空孔原因分布図」を作製した。この分布図を基に企業と連携して casting プロセスの改良・改善を実施することにより、アルミニウム casting 製品内部の空孔の低減を行った。また、casting 工程の改善に寄与できるダイキャスト casting シミュレーション手法を検討した。これらによりアルミニウム casting 製品の品質向上を図り、道内アルミニウム製品製造企業の技術力向上に資することを目的としている。

キーワード：アルミニウムダイキャスト, X線CT, ガス分析, casting シミュレーション

Abstract

From the viewpoint of weight saving, Aluminum die-casting products are used for many motor parts. There is an unavoidable cavity in products, and this may be a main cause of the defective product. It can be expected that the defective product rate would be improved by the reduction of this cavity. In late years, X-rays CT was developed and it can precisely identify the cavity position in a product. However, basic solution was not obtained because the cavity origin was not still identified.

In this study, the qualitative or quantitative evaluation of the cavity in the product by combining gas analysis with X-rays CT was conducted. Furthermore, in order to understand cavity origin in a product at first sight, a manufacture technology of “a cavity cause distribution map” was developed. In addition, simulation technique for die-casting casting that could contribute to the improvement of the casting process was conducted. By these techniques, the quality improvement of the product will be conducted and it contributes to the technology improvement of the aluminum production company in Hokkaido.

KEY-WORDS : Aluminum, Die-Cast, X-Ray CT, Gas Analysis, Casting Simulation

* ホクダイ株式会社 * Hokudai Co, Ltd.

** アイシン北海道株式会社 ** Aisin Hokkaido Co., Ltd.

*** トヨタ自動車北海道株式会社 *** Toyota Motor Hokkaido,INC.

**** 北海道大学大学院工学研究院 **** Hokkaido University

事業名：重点研究

課題名：自動車部品用アルミニウム casting 製品の品質向上に関する研究

1. はじめに

北海道への集積が進む自動車関連産業は裾野が広い産業であり地域への波及効果は大きい。道では重点施策の一つとして自動車産業の振興を推進しており、道内産業にとって重要な位置を占めるに至っている。しかし、自動車産業を支える鋳造等のものづくり基盤産業において、地場企業の参入が進んでいないのが現状である¹⁾。これは、道内企業の競争力不足が要因の一つであり、特に、製品の品質向上が課題となっている。工業試験場では、平成22年度にアルミニウムの利用技術および生産技術の高度化を目的として、「北海道アルミニウム利用技術研究会」を立ち上げた。この中で、自動車部品用アルミニウム鋳物製品、特にダイカスト製品には、不可避な空孔が内在することから、これらの低減により製品品質や製品歩留まりが向上することが提起された。

当場には、これまでに部品の内部構造を3次元的に解析するX線CT装置が導入され、自動車部品用アルミニウム製品、特にダイカスト製品の空孔などの内部品質評価が可能となった²⁾。しかし、空孔の発生原因と有効な低減策は明らかになっていない。そこで、空孔に含有するガスの種類や量を測定するガス分析と組み合わせることにより、空孔生成由来の明確化を図っている³⁻⁵⁾。本研究は、上記のX線CTを用いた非破壊検査技術およびガス分析技術を用いて、空孔の定性的・定量的評価を可能とする「空孔原因分布図」の作製技術を開発し、この分布図を基に企業と連携して鋳造プロセスの改良・改善を実施することにより、アルミニウム鋳物製品内部の空孔の低減を行うことを目的とする。また、鋳造工程の改善に寄与できるダイカスト鋳造用シミュレーション手法を検討する。これらによりアルミニウム鋳物製品の品質向上を図り、道内アルミニウム製品製造企業の技術力向上を目的とする。

2. アルミニウム鋳物製品の空孔原因分布図の作製

X線CTは含有する空孔の位置及び大きさは明確化できるが、その発生原因までは特定できない。そこで、空孔内部に含有するガスの種類および量を測定することにより空孔の発生原因を特定し、これらの組み合わせによりアルミニウム鋳物製品の内部空孔の分布および原因を明確化する「空孔原因分布図」の作製を行った。

内部空孔の検出には、図1上に示すX線CT装置（㈱島津製作所 マイクロフォーカスX線CTシステムinspeXio SMX-225CT）を用いた。この装置は、母材のアルミニウムと空孔ではX線吸収係数が異なることを利用して空孔の検出を行っており、最小10 μ m程度の空孔を検出できる能力を有している。続いて、空孔を含む近傍を製品から切り出した試料について、図1下に示すガス分析装置（日本金属化学㈱製グラビマスGMC-C-7000）を用いて含有ガスの分析を行った。この



図1 X線CTおよびガス分析装置の外観

装置は、試料加熱部と測定部から構成され、真空中で所定の温度に加熱した試料内部から発生するガスを質量分析器(Q-MS)により迅速に定性・定量分析することを特徴としている。ガス測定では、試料を高真空真空中で固体状態の試料から発生するガスを測定する、いわゆる固体抽出法を用いていることから、測定条件についても検討した。

図2に製品から切り出した試料についてX線CTで得られた空孔の分布について、実際の大きさよりも拡大して示している。なお、X線CTによる透過結果は現行製品の内部情報を反映していることから、図2は製品中の任意の場所について部分的に抽出した結果を示している。図中黒色および灰色の部分は含有する空孔である。これより黒色で示した微小な空孔の集合に加えて灰色で示した比較的大きな空孔を有していることがわかる。

図3にガス分析で得られた結果を示す。予めX線CTを用いて内部透過観察した製品からガス分析の対象部分（約30g）を切り出し、アセトンによる超音波洗浄を行った後に直ちにガス分析を行った。測定は装置の基本的な測定条件である真空中530 $^{\circ}$ Cで1時間行った。測定では分子量100までのガスが定性・定量分析できる。図3には試料中に含有する各種ガスのうち、ダイカスト製品の品質に影響を及ぼす4ガス種、すなわちアルミニウム合金中の水素(H₂)、離型剤由来の炭化水素(C_xH_y)、空気(CO/N₂)、および水分(H₂O)について

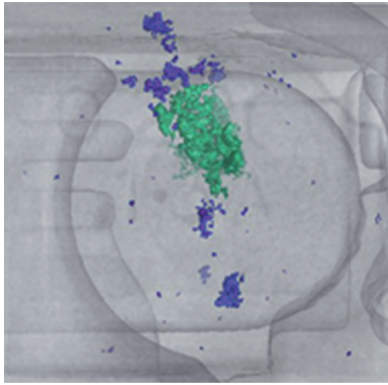


図2 X線CTで得られた製品中の空孔分布

での結果を示している。なお、ガス測定結果は現行製品の定量的なガス含有情報を反映していることから、図3には結果を相対値として示している。測定の結果、製品中のある部位では空気含有量が多いことがわかり、この部分では casting 時に空気を巻き込んでいることが明確になった。これより、X線CTとガス分析の組み合わせにより、製品中の空孔の位置及び大きさのみならず、その由来を明確化できることが判明した。

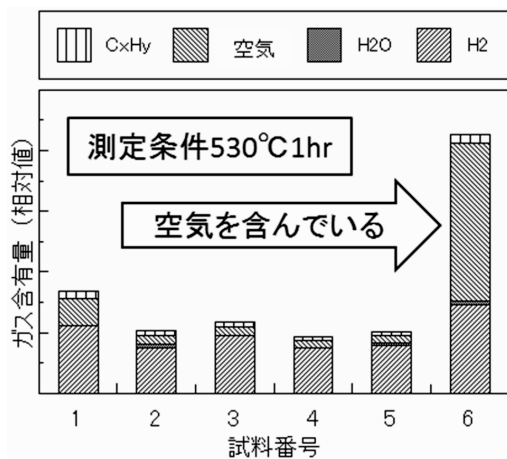


図3 各試料のガス分析結果

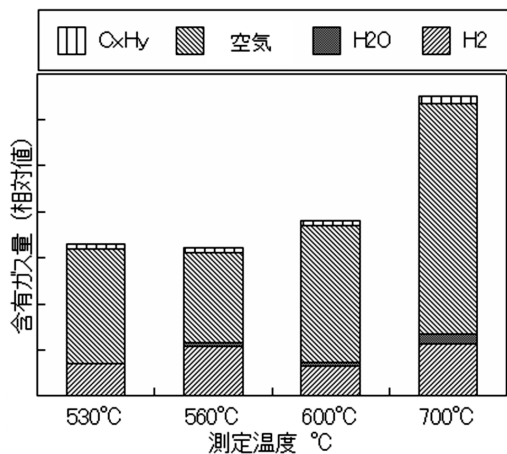


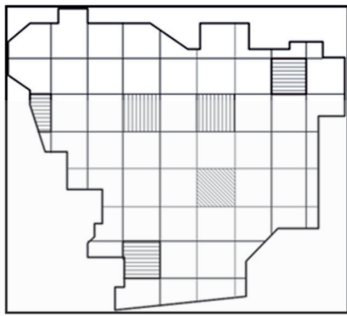
図4 各温度におけるガス分析結果

ところが、図3の結果を製品製造元と検討した結果、検出された総ガス量は製造現場において経験的に得られているガス量よりも極めて少量であることが判明した。これについて検討した結果、装置の基本的測定条件(530°C, 1hr)では、前述のように試料が固体状態での測定であることから、試料内部の含有ガスのすべてを検出できていないことが推定された。当該ガス分析装置は、試料を熔融させない、すなわち固体状態で真空中に高温保持すると表面近傍のガスを排出するという固体抽出法を採用している。評価対象のダイカスト製品はダイカスト合金JIS ADC12 (Al-10Si-1.3Fe-2.0Cu-1.0Zn)を用いており、この熔融開始温度は548°Cであることから、530°Cでの測定では試料は明らかに固体状態である。また、今回の測定に供した試料はアルミニウムダイカスト製品から切り出したもので20mm以上の厚みを有している。空孔は厚さ方向の中心部に多く存在する傾向があることから、この部分に含有するガスを検出できていないと推定された。そこで、予備実験として高温での挙動を調べた結果、700°Cでは試料は完全に熔融状態になることを確認した。これを基に測定条件を検討した結果を図4に示す。測定に供した試料は4個の製品の同一位置から採取した。その結果、測定温度の上昇と共に総ガス量は増加し、700°Cで1時間の測定では現場の知見と一致するレベルのガス量を検出できた。したがって、以降のガス分析では700°C 1時間の測定を行うこととした。

図3に示したガス分析を基に作製した空孔原因分布図の一例を図5に示す。評価対象は、企業の機密保持の面から図5上はモザイク化した製品外観を示している。評価試料製造元と協議して、品質に影響を及ぼすと想定される5箇所を予め特定して分析した結果、空孔の多い部分は空気が巻き込まれていることがわかり、一方では品質には何ら影響のない部分もあることが認められた。

3. 鑄造品質向上のための工程改善

図6に企業での製造工程の改善前後の製品から抽出した試料に対するガス分析結果の比較を示す。測定は、前述のように700°C, 1hrでの熔融状態で行った。図6左の工程改善前の結果では、総ガス量が多く、空気が多く含まれていることがわかる。一方、図6右の工程改善後の結果では総ガス量が少なくなっており、特に空気含有量が低下していることがわかる。これらの結果から、工程改善により製品中の空気含有量が低下したことが明らかとなり、ガス分析によって工程改善の結果を裏付けることが可能となった。この結果は、ガス分析による製品品質評価が有効であることを示している。



■ 空孔多い(空気巻き込み) ■ 空孔やや多い ■ 空孔ほとんどなし

図5 空孔原因分布図

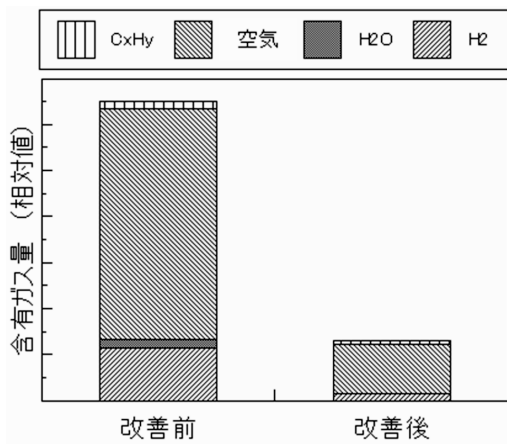
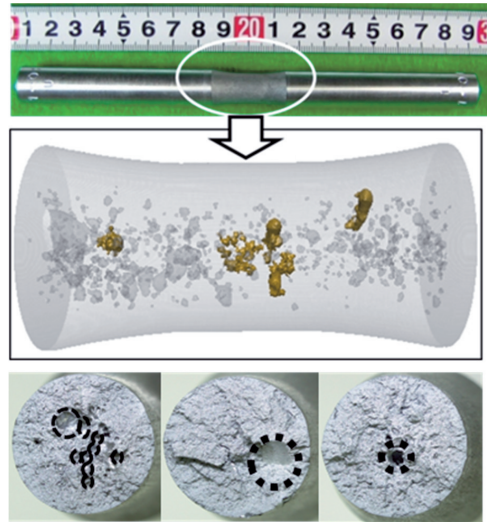


図6 ガス分析結果 (左:改善前 右:改善後)

4. 空孔部分の機械的性質評価

製品中に不可避に内在する空孔は製品の強度低下の一因となり、この強度低下を補うために厚肉化が行われると、アルミニウム化による重量軽減という本来の目的に支障が生じる。しかし、空孔が製品強度に及ぼす影響については評価が困難なことからこれまでほとんど行われていない。そこで、本研究では、空孔による強度低下状況を把握し、品質への影響を検討するために、内部に空孔を含む引張試験片をダイカスト鋳造にて作製し、空孔の大きさや形状をX線CT装置により分析し、次に引張試験によって材料内部の空孔が強度に及ぼす影響について検討した。

図7に作製した引張試験片の外観と図中○印で示した平行部のX線CTによる透過図を示す。これより平行部は内部に空孔を有していることがわかる。また、引張試験後の試料破断面を観察した結果から、空孔以外にも金型内部に入った溶湯がぶつかり合った際に生じる湯ざかいや引け巣などの、いわゆる鑄造欠陥が観察された。



空孔 湯ざかい 引け巣

図7 引張試験片の外観と平行部の空孔

通常、内部に空孔や介在物が存在する部分に引張荷重が加わると、そこに応力集中が生じ破断しやすくなる。また、この応力集中は空孔などの形状に依存することが知られている。空孔および鑄造欠陥などの面積を破断面から差し引いた面積と破断荷重の関係を図8に示す。その結果、破断荷重は空孔や介在物の形状に関わらずこれらを除いた面積に相関していることが認められた。この結果は、X線CTを用いて内部の空孔や介在物を検出して破断強度の予測が可能であることを示している。

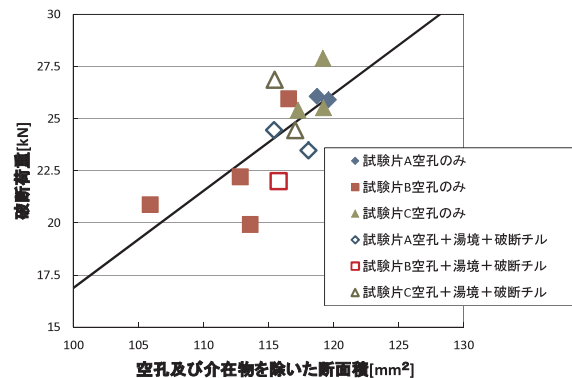


図8 破断部実面積と破断荷重の関係

5. ダイカスト製品製造用鋳造シミュレーション手法の検討

鋳造品の空孔発生予測法の一つに、鋳造シミュレーション解析法がある。鋳造シミュレーションとは、流体力学、伝熱学に基づく理論を背景に、高温で溶解した金属が鋳型内に注入されて鋳型等を介して冷却され、凝固していくまでの過程で起こる諸現象を数値計算によって可視化するものである。本節は、アルミダイカストプロセスで製造した鋳造品の内部空孔発生原因を判別することを目的とした技術開発において、空孔が発生する可能性の大小を関係づける際の理論的裏付けを得るための手法として、鋳造解析の利用を検討した結果について述べる。

アルミダイカスト鋳造品に発生する空孔は、偏析や介在物などに代表される金属組織の異常と、ガスの巻き込みや引け巣等に代表されるものに大別される。本研究が対象とするのは、X線やガス分析を利用した空孔の判別が目的である。

アルミダイカスト鋳造品の空孔の発生原因とされるのは、鋳型内の空気を含む何らかの物質が熱分解してガス化し、鋳造時に空気も含めて鋳物内部に取り込まれることと、金属の凝固の過程での体積収縮により鋳物内部に鋳巣が生じることの2つが主なものとされる。現場的な空孔予測では、前者のガスの巻き込みは湯流れ解析の結果から、鋳巣は凝固解析の結果から、空孔の発生を予測して、その発生原因を推定する。鋳造解析結果と空孔とを関係づける考え方については、発生ガスの巻き込みによる空孔は、鋳型内の湯流れによる内部ガスの取り込み状況や、流速による溶湯圧力と溶湯含有ガスの分圧の関係から推定することができる。一方、引け巣については、最終凝固部の位置と周囲の冷却・凝固状況などの条件から空孔発生の可能性を評価することができる。このほか、湯回り不良や湯境などの溶湯流れと凝固の両方が関係する空孔についても、解析結果を総合的に判断することで空孔発生

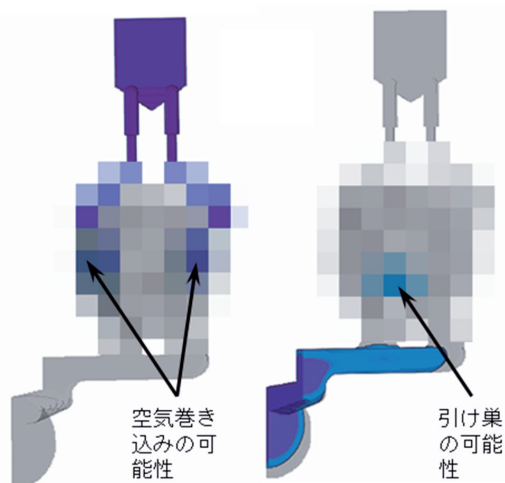


図9 鋳造シミュレーション結果

原因の分析が可能となる。解析にあたっては、ダイカスト製品メーカーから実製品の提供を受けた。なお、試料は現行生産品であることから、解析結果はモザイク化して示している。

使用した鋳造解析システムは、ミッドレンジ普及版のADSTEFAN（茨城日立情報サービス㈱製）を用いた。解析計算の境界条件として、鋳物と鋳型の物性値と、鋳物と鋳型の熱伝達係数を設定する必要がある。鋳物と鋳型の熱伝達に関して、ADSTEFANシステムでは、「熱抵抗」というパラメータで鋳物と鋳型の熱移動を設定する。鋳物と金型との間の熱伝達は、塗型材、離型剤、空気等の介在があり、実際の鋳造条件に依存するため、鋳物と鋳型との間の熱抵抗を正確に設定することは困難である。したがって、この解析では、 $50\sim 200\text{cm}^2\cdot\text{秒}\cdot^\circ\text{C}/\text{cal}$ の値を設定して計算を行い、それらの結果から空孔発生の可能性に関する定性的な評価を行うこととした。

図9に評価対象のダイカスト製品について、鋳造時の湯流れを元にした鋳造シミュレーション、特に空気の巻き込みおよび引け巣発生についての結果を示す。なお、図中でモザイク表示している部分が解析対象の試料を示している。図9左の空気巻き込みシミュレーション結果では、試料の左右に空気を巻き込んでいることが想定され、図9右では試料の下部に引け巣が生じる可能性があることを示唆している。

図10上にX線CTにより試料を内部透過観察した結果および断面組織観察結果の比較を示す。これより、図9左の鋳造シミュレーションで示した空気の巻き込み部分は、肉厚部分に多くの空孔が観察され、この部分のガス分析の結果から鋳造時に空気を巻き込んでいることが明らかになった。この部分を実際に組織観察した結果、図10中Aに示すように明らかに空孔が多く見られた。また、図9右の鋳造シミュレーションで示した引け巣が生じている可能性が高い部分は、図10のX線CTを用いて観察した結果から明らかに空孔が確認され、ガス分析の結果からは空気が検出されないこと、さらに前述と同様の組織観察の結果から、明らかに引け巣の発生が認められた。以上の結果から、鋳造シミュレーションを用いた空気巻き込みおよび引け巣発生の想定は、X線CT結果および組織観察と良い一致を示した。この結果は、鋳造シミュレーションとX線CTの組み合わせにより、空孔発生の可能性の事前評価が可能であることを示している。

6. おわりに

自動車は、今後、省エネルギー化に向けて一層の燃費向上、部品の軽量化が求められる。このため、アルミニウム部品の増加や薄肉化への対応を念頭においた鋳物製品の内部空孔低減による高品質化は、自動車用アルミニウム鋳物製品を製造する既存企業および今後の参入を目指す企業にとって喫緊の課題である。今後は、本研究にて確立したアルミニウム鋳物

製品の内部品質評価技術をベースに、対象とする評価製品を増やして継続的な評価を行う予定である。また、X線CTを用いた非破壊検査技術およびガス分析を組み合わせた評価方法について、産業技術総合研究所および他府県公設試験研究機関と共同で分析方法の高精度化を行い、評価方法の標準化を目指した検討を行う予定である。

(連絡先：takahashi-hidenori@hro.or.jp, 011-747-2981)

謝辞

本研究で使用したX線CTは、経済産業省の北海道地域イノベーション創出協働体形成事業研究開発環境支援事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

北海道自動車産業集積促進協議会 (2014)

- 2) 例えば、相山英明：「X線CTシステムを用いた三次元形状評価」、工業試験場報告, No.311 (2012)
- 3) 高橋英徳, 板橋孝至：「ガス分析を用いたアルミニウム鋳物製品の内部欠陥評価」、軽金属学会第121回秋期講演大会概要集 (2011.10)
- 4) 高橋英徳, 板橋孝至：「ガス分析を用いたアルミニウム鋳物製品の鋳造欠陥評価」、日本金属学会第149回秋期講演大会概要集 (2011.11)
- 5) 高橋英徳, 板橋孝至：「ガス分析を用いたダイカスト製品の内部品質評価」、軽金属学会第123回秋期講演大会概要集 (2012.11)

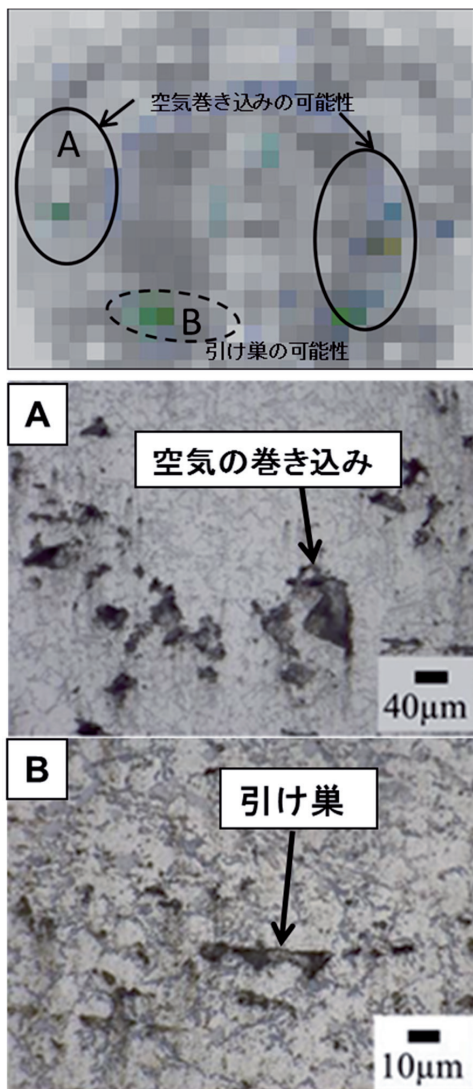


図10 X線CT結果と断面組織観察結果の比較

引用文献

- 1) 例えば、北海道自動車産業集積促進アクションプラン、

バランス能力測定のための足部固有感覚検査装置および検査手法の開発

中島 康博, 栗野 晃希, 前田 大輔
田中 敏明*, 前田 佑輔*, 泉 隆**, Lan-Yuen Guo***

Evaluation Apparatus and Method of Proprioceptive Sense in a Foot for Measuring Balance Ability

Yasuhiro NAKAJIMA, Daisuke MAEDA, Kohki KUWANO
Toshiaki TANAKA*, Yusuke MAEDA*, Takashi IZUMI**, Lan-Yuen GUO***

抄 録

高齢者の転倒予防を図るため、立位時の高齢者の足関節固有感覚（運動覚・位置覚）を定量的に評価する装置および測定手法を開発した。本装置を用いて高齢者とスポーツをする若年者、スポーツをしない若年者を対象に足関節固有感覚の差異を測定したところ、高齢者と若年者で感覚誤差が大きくなる結果が得られ、高齢者と若年者の感覚の違いが明らかになった。今後は検査方法の改良により測定精度を向上するとともに、本装置を応用したバランストレーニング技術を確立し、高齢者・障がい者のバランス能力向上と転倒予防に貢献したい。

キーワード：高齢者，障がい者，バランス，感覚機能，リハビリテーション，福祉工学

Abstract

In this study, we developed a device and measurement method that quantitatively evaluates the proprioception of the ankle joints while standing for preventing falls in elderly adults. Sensory errors of the proprioception of the ankle joints in elderly group, young group taking exercises and mostly not taking exercises were measured using the device. The results showed the great difference in proprioceptive sense of ankle joint between the young and elderly groups. The device has made it possible to measure proprioceptive sensation of the lower extremities while standing. In the future, we intend to contribute to improve poor balance and prevent falls of the elderly and the disabled persons by using our device.

KEY-WORDS : Elderly and Disabled People, Balance, Sensory Function, Rehabilitation, Assistive Technology

1. はじめに

高齢者の転倒による外傷・骨折は日常生活活動を著しく低下させることから保健・医療・福祉行政において大きな問題となっている。図1に示すように、平成22年国民生活基礎調査によると、介護が必要になった主な原因に占める骨折・転倒の割合は10.2%と高く、介護の五大要因の一つとされる¹⁾。

さらに、1994年の厚生省（当時）人口動態統計によると、日本ではこの年の墜落死は4,690名であり、そのほとんどが転倒によるものである。このうち65歳以上の高齢者は3,046名（65%）である²⁾。このような高齢者の転倒の原因として、加齢に伴うバランス能力の低下が大きな因子となっている。

ヒトのバランス保持には、床・地面と足趾（そくし、足の指）および足底面（支持基底面）との接触から得られる触感

* 東京大学 * The University of Tokyo

** 東海大学 ** Tokai University

*** Kaohsiung Medical University

事業名：公募型研究

課題名：高齢者・障害者用新型体性感覚刺激付き立位バランス検査・訓練装置の開発研究

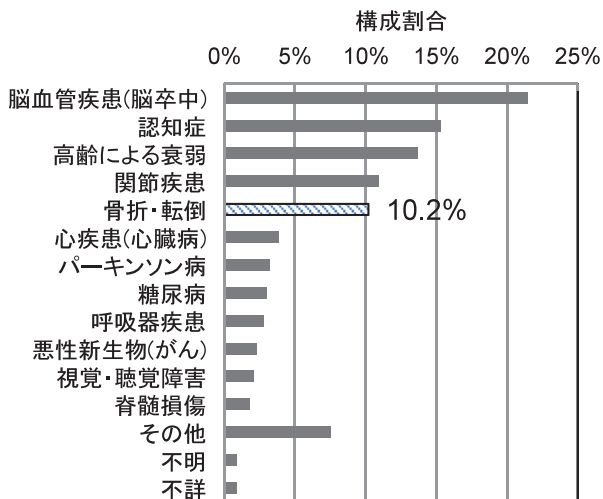


図1 介護が必要となった主な原因の構成割合¹⁾
(平成22年国民生活基礎調査, 厚生労働省)

覚および下肢筋・関節から得られる関節運動としての固有感覚(運動覚・位置覚)の情報が重要である。高齢者のバランス能力低下の要因は、筋力などの運動機能の衰えだけでなく、足趾・足底・足関節部位の感覚機能の衰えも指摘されている。しかしながら、現状においては、運動と感覚の両面からのバランス能力トレーニング手法は確立しておらず、体性感覚(触覚・固有感覚)刺激を利用したバランス保持のための感覚増強フィードバックトレーニングおよび歩行等の動的条件を考慮したバランス支援機器など関連する研究開発は皆無である。こうした取組を進めるにあたっては、まず体性感覚の測定評価が重要であり、その評価に基づいてバランス能力を改善する訓練方法や装置の開発につながる必要がある。

本研究では、バランス感覚に重要な足関節における固有感覚である運動覚(関節の角速度感覚)、位置覚(関節の角度



図2 足関節固有感覚検査装置

項目	仕様
寸法	幅 950×奥行 820×高さ 1135mm
重量	130kg
足底板の傾斜角度	-45°~45°
駆動板の角速度	0.2~22.5°/s
駆動板の角速度設定	0.1°/s 刻み
定格積載荷重	981N (100kgf)

感覚)の検査装置およびこれを用いた測定手法を新たに開発した。この装置は足関節に荷重のかかる立位時での評価を可能とし、さらに足関節の底屈・背屈(つま先を足底側、足甲側に屈曲)および内反・外反(足裏を内側、外側に屈曲)の2自由度に対応する。開発した本装置と測定手法を用いて、高齢者と若年者、さらに運動履歴の有無による足関節固有感覚の差異を測定した。

2. 装置および測定方法

2.1 足関節感覚検査装置

足関節運動覚および位置覚を測定する足関節固有感覚検査装置を開発した(図2)。本装置は立位姿勢における足関節の底屈・背屈運動および内反・外反運動における運動覚と位置覚を評価する(図3)。装置には2枚の足底板が設置されており、一枚は手で角度が固定される固定板で、もう一枚はサーボモータで任意の角速度で制御可能な駆動板である。各々の足底板は底背屈・内外反の方向に可動・固定できる。台上には被験者の左右に手すりを設置し、転倒事故防止に配慮している。本装置の仕様を表1に示す。

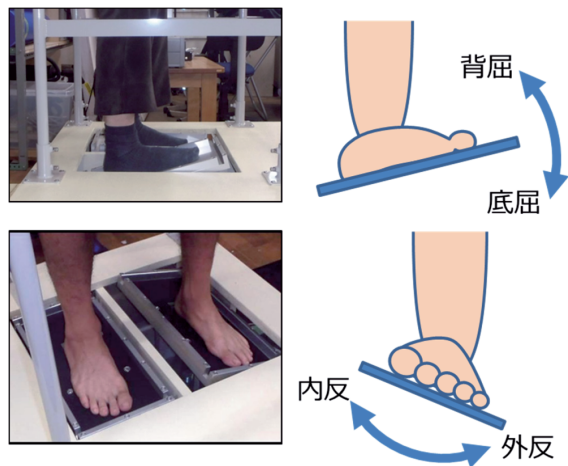


図3 足関節固有感覚検査装置上での足関節運動



図4 実験風景（高齢者）

2.2 足関節固有感覚の足底方法

足関節固有感覚の測定は次の手順で行った。まず、駆動板を水平にし、固定板を任意の傾斜角で固定した。その板上で、各板に片足を乗せるように被験者に立位を取らせた（図4）。このとき、被験者は駆動板側を利き足とした。さらに、被験者には目隠しとヘッドフォンを装着し、視覚と聴覚の影響を排除した。被験者の手元には、駆動板の動作停止スイッチを持たせた。

次に、設定した角速度で駆動板の傾斜を開始した。被験者にはあらかじめ、駆動板と固定板の角度が同じとなったと感じた時点で手元のボタンを押し駆動板を停止するよう指示してある。被験者が駆動板を停止させた後、固定板と駆動板の角度を各々記録した。

なお、転倒事故を防止するため、実験中にはスタッフ2名が近傍にて待機した。

実験条件を表2に示す。足関節の運動方向は底屈、背屈、内反、外反の4種類とした。固定板角度の条件は、足関節背屈では、 $5/10^\circ$ の2条件、底屈は $5/10/15^\circ$ の3条件、外反は $5/10^\circ$ の2条件、内反は、 $5/10/15^\circ$ の3条件とした。駆動板の角速度を $1^\circ/s$ と $2^\circ/s$ の2条件として測定を行った。以上の各条件で、それぞれ2試行実施した。

2.3 被験者

被験者は、既往症のない健常高齢者5名、スポーツ熟練若年者5名、スポーツ非熟練若年者5名とした。各群の年齢構

表2 足関節固有感覚測定の実験条件

運動方向	固定板 角度 ($^\circ$)	駆動板 角速度 ($^\circ/s$)
背屈	5/10	
底屈	5/10/15	
外反	5/10	1/2
内反	5/10/15	

表3 被験者

被験者群	人数 (人)	年齢(歳) (平均 \pm 標準偏差)
健常高齢者	5	71.4 \pm 4.5
スポーツ熟練若年者	5	20.6 \pm 0.9
スポーツ非熟練若年者	5	20.6 \pm 0.5

成は表3の通りである。

被験者からは、基礎データとして、年齢、身長、体重、利き足の情報を取得した。スポーツ熟練群からは、競技種目および競技歴の回答を得た。全ての被験者に対して、片脚立位時間が左右とも10秒以上、継ぎ足位保持時間が30秒以上可能であったことを確認した。さらに、足関節および母趾の固有感覚（位置覚・運動覚）を徒手にて検査し、正常であったことを確認した。

なお、本実験においては、あらかじめ東京大学、東海大学、北海道立総合研究機構の人間工学実験にかかる実験計画の承認を受けた。被験者には、インフォームドコンセントを実施し、了承を得た。

2.4 分析方法

目標角度となる固定板すなわち非利き足の傾斜角を設定角度、測定時に被験者が停止させた角度を停止角度として、その差の絶対値（ $|\text{設定角度} - \text{停止角度}|$ ）を誤差として算出した。この誤差を3群（高齢者、スポーツ非熟練若年者、スポーツ熟練若年者）間で統計学的分析を行った。

3. 結果

各関節運動内での目標角度との誤差は、3群とも目標角度が大きいくほど誤差が大となる傾向を示した。誤差は角度差の絶対値としたが、測定結果はすべて停止角度が設定角度を下回った。代表例として、駆動板角速度 $1^\circ/s$ における高齢者の角度誤差を図5に示す。Kruskal-Wallis検定（対応あり）にて多重比較を行った結果、すべての場合において有意差が検出された。

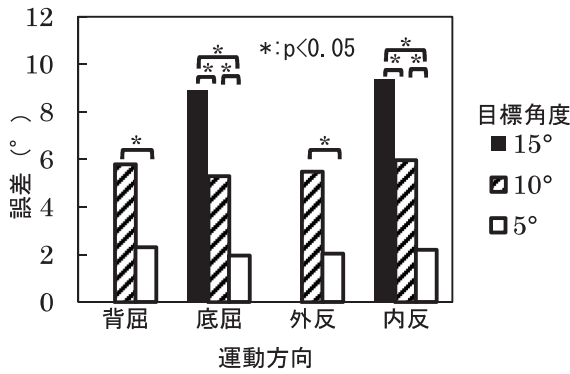


図5 各関節運動における目標角度との誤差
(高齢者, 駆動板角速度 1°/s)

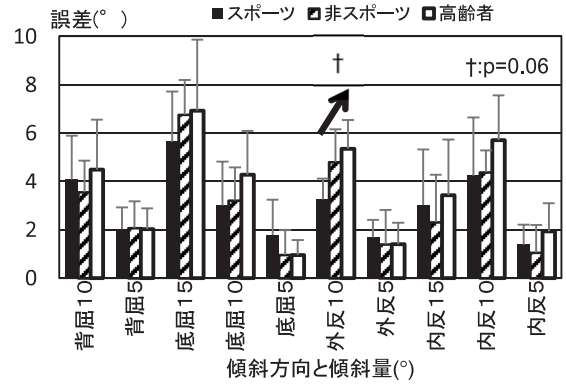


図6 角度感覚誤差の被験者群間比較
(駆動板角速度 2°/s)

足関節固有感覚の被験者群間の比較においては、外反方向 10° 傾斜において、Kruskal-Wallis検定により有意確率 $p=0.06$ が算出された。その他の項目においても、概ねスポーツ熟練若年者<スポーツ非熟練若年者<高齢者の順で、固有感覚の誤差値が大きくなる傾向が示された(図6)。また、3群ともに関節運動の角速度が1°/sでの計測値は、2°/sよりも誤差が大となる傾向を示した。このことから、加齢、運動履歴、関節運動の方向・速さ等により被験者の足関節感覚が影響を受けることが示唆された。

4. 考察

これまで、年齢や運動履歴によって立位バランス時の関節駆動方法が異なることが知られていたが、今回の実験からは、年齢・運動履歴と足関節固有感覚の相関が示唆されている。立位姿勢のバランスを維持するために、足関節の駆動により維持する足関節戦略(ankle strategy)、股関節の駆動により体幹を屈曲する股関節戦略(hip strategy)、さらに足の踏み出しにより転倒を防ぐステップング戦略(steping strategy)の3種を人体は駆使するとされている。足関節戦略は足底における床反力の作用点を足関節周りの筋力を用いて移動するため、素早い反応が可能であるが、高齢者や運動履歴の少ない者では実行が難しくなる。代わりにこれらの者は、体幹屈曲により自身の重心位置を修正する股関節戦略を用いることが多くなる。足関節固有感覚の誤差拡大は、足関節戦略のための感覚入力を鈍化させ身体のバランス戦略を損なう一つの要因であるかもしれない。

これまでの転倒予防はパワーリハビリに代表されるような筋力面のトレーニングに主眼が置かれていたが、本研究により、今後は感覚強化による予防が期待される。実験結果には自身の足関節角度を過大に評価する傾向が強く表れ、年齢の増加や運動履歴の少なさによりさらに傾向が強まった。このことから、感覚面のトレーニング手法を確立し関節や筋の駆

動を精緻に行えるようになれば、高齢者の転倒予防に大きく貢献できると考えられる。

5. おわりに

本装置により、立位バランス能力の重要な要素である足関節固有感覚の計測が可能となった。今後は多様な関節運動速度、感覚評価方法と組み合わせて測定精度を向上するとともに、本装置を応用したバランストレーニング技術を確立し、高齢者および障がい者のバランス能力向上と転倒予防に貢献したい。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業(科学研究費補助金)により実施された。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 厚生労働省, 平成22年国民生活基礎調査, (2011)
- 2) 厚生省, 1994年人口動態統計, (1995)

人間動作の特徴解析技術の開発

葉野 晃希, 中島 康博, 前田 大輔, 吉成 哲

The Method for Extraction of Motion Feature from Sensor Data

Kouki KUWANO, Yasuhiro NAKAJIMA, Daisuke MAEDA, Satoshi YOSHINARI

抄 録

製品の使いやすさや身体負担を人間工学的手法を用いて評価する場合、筋の活動量や身体エネルギー代謝量などの生体情報を計測し、その平均値を利用するのが一般的である。しかし、目的が同じ動作でも、習熟度や個人差などにより活動する筋や姿勢の取り方などが異なるため、平均値では動作の特徴を捉えられないケースも多い。

そこで、モーションセンサや筋電センサなどから取得した複数の生体信号を統合処理し、リサージュ図形を生成し可視化することで、これまでの手法では取り除かれていた多様な動作特徴を把握できる解析手法を開発した。本手法を作業器具の動作に適用し、習熟に伴う動作の変化や、使いやすさの違いを図形の特徴として把握できることを確認した。

キーワード：リサージュ図形, 動作特徴, 人間工学, 生体情報

Abstract

For the evaluation of the usability and the physical burden of using products, average values of various biological information such as muscle activity measured by electromyogram (EMG) or energy metabolic rate are estimated. However, the force to be applied to a products and the posture are sometimes different because of difference of individuals and proficient at the product, there is often a limit in extracting motion feature and using for evaluation according to those procedures based on conventional Ergonomics. In this research, we proposed an analytical method that was available for capturing various movement features by merging the biological information signals and displaying the tracks on two-dimensional space in the form of Lissajous Figures. We have applied this method to the motion of handling work apparatus and confirmed its effectiveness.

KEY-WORDS : Lissajous Figure, Motion Feature, Ergonomics, Biological Information

1. はじめに

北海道では地域特性や産業構造から、除雪用具や一次産業関連の農機具、漁具、など身体運動を伴う製品の開発需要が高い。一般にこれらの製品の使い勝手の評価には、人間工学的手法により多数の被験者から身体の加速度や筋活動量、身体エネルギー消費量などの動作情報や生体情報を計測し、それらの最大値の平均を利用する。

しかしながら、同じ目的の動作でも習熟度や個人差によって、活動する筋や姿勢の取り方などの動作の質に違いがあるため、平均値を利用する従来の手法では評価困難なケースも

多い¹⁾。

本研究では比較的大きな身体動作を伴う製品を対象に、動作の質の違いも考慮した評価を可能とする、センサ信号の特徴解析、可視化手法を開発したので報告する。

2. 従来の人間工学的手法における課題

人の運動時に発生する多くの現象は、センサで計測することができる。人間工学では関節部の移動軌跡や加速度などの動作情報、心拍数や筋電図、脳波などの生理情報を各種のセンサにより数値で捉え、定量評価に利用している。

事業名：経常研究

課題名：人間動作の特徴解析技術の開発

一般にセンサの出力は時系列信号であり、特にその最大値の平均を特徴量として利用する場合が多い。心拍数や筋電図の信号であれば、身体の負担を和らげるために、最大心拍数を下げたり最大筋活動を低減する方策の検討過程で利用する。それに加えて、最大値は実験者の主観に影響されことなく特定でき、客観性を担保している側面もある。

しかし、図1に示すように、最大値を扱うことにより、その現象を強度や頻度などの「量」の尺度でしか評価できないという限界も生じる。また、最大値は点データであり、時間的な幅の中に生じる動作をたった1つの特徴量で代表することになる。したがって、習熟度や個人差によって活動する筋や姿勢の取り方など、動作の「質」が異なる場合、あるいは「質」を捉えようとする場合に、利用できる特徴量が僅少で動作の違いを捉えきれない。

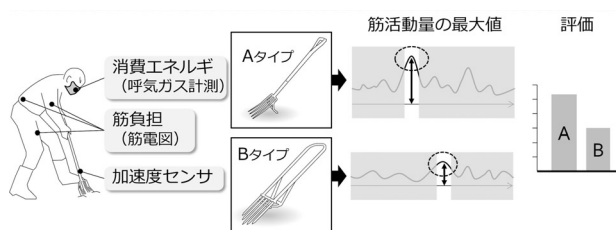


図1 時系列波形と特徴量

3. 本研究の提案手法

本研究では前述の問題に対し、電磁気学で古くから用いられている手法の適用を試みた。それは2種類の時系列データの相関を解析する際に用いる手法で、それぞれの同時刻の信号値をX,Y座標値として平面上にプロットする操作を時間とともに続けていくと、一定の軌道上をめぐる図形パターンが生成されるといものである。この図形をリサージュ図形(Lissajous figure)と呼び、図2に示すように2つの信号の振幅や周波数、位相などの差異や相関を、図形の違いとして可視化し、元の現象の特徴を直観的に把握可能になる。

図形は2つの信号の関係だけでなく、それぞれの元の信号

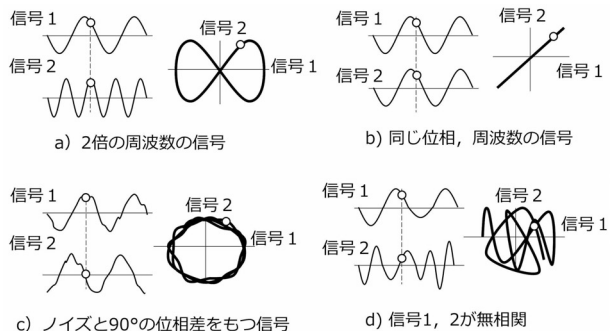
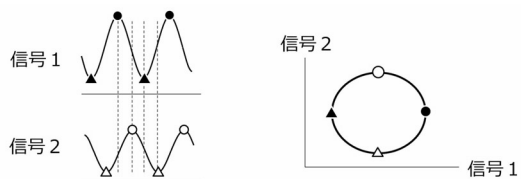


図2 入力波形とリサージュ図形

の情報も保持している。たとえば、図3右のように水平軸、垂直軸のそれぞれの極大値、極小値はそのまま左の元の信号の極大値、極小値を示す。したがって、図形には極大値、極小値などの量の情報のみならず、周辺時刻のデータや動作の情報も含んでいる。ここに質的信息を見出すことができると考えた。

そこで、ヒトの動作情報にリサージュ図形の生成手法を適用し、図形パターンの発生を確認するとともに、パターンの特徴から得られる質的信息を探るための実験を行った。



※位相差90°の波形の例

図3 入力波形とリサージュ図形の極大、極小値の対応関係

4. リサージュ図形の動作情報への適用

リサージュ図形による動作の特徴抽出の可能性を探るため、スコップ除雪を対象に動作特徴解析試験を行った。

4.1 除雪動作試験

図4に実験方法を示す。被験者は3名(M, K, N)で、3m離れた高さ1.5mにある直径30cmの穴をねらい、重さ2kgの砂袋を投入するよう指示した。また、スコップの持ち手の形状による動作の違いを捉えるため、同図に示す3タイプを用意し、それぞれ100回連続して投入させた。この投入動作をバケット部に配置した6軸モーションセンサで計測し、そのデータを解析した。

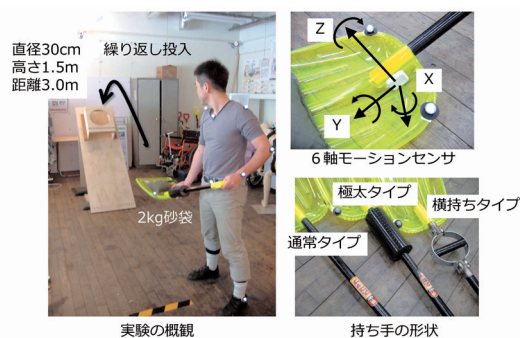


図4 除雪動作試験

4.2 除雪動作試験結果

図5はモーションセンサから得られた10回の投入分の6軸成分の時系列波形の例である。

図6は被験者Nの解析例である。図6 a)は、6成分のセ

ンサ値のうち、x軸（スコップの運動軌道に沿った軸）の加速度とz軸（x軸と柄に垂直な軸）の角速度からなる二次元平面上に、10試行分のセンサ値の軌跡を重畳して描画したものである。これらの成分を選べば、図に示すように投入動作と、試行間で発生する砂袋のすくいあげ、スコップの持ち直しなどの準備動作を、図形のパターンから容易に判別できる。このデータ変換によって、時系列データの全体を集約し俯瞰するとともに、部分的な変化も把握できる。

一方、図6b)は2成分をz軸加速度とy軸角速度（柄の軸回り）に選んだときの生成図形である。このように一定の

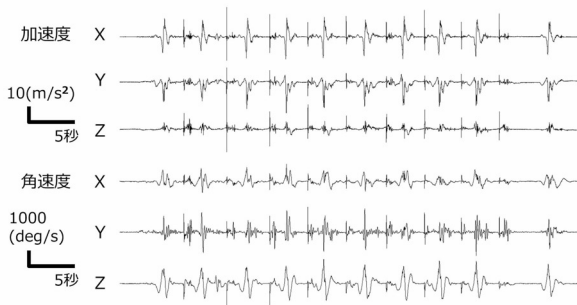
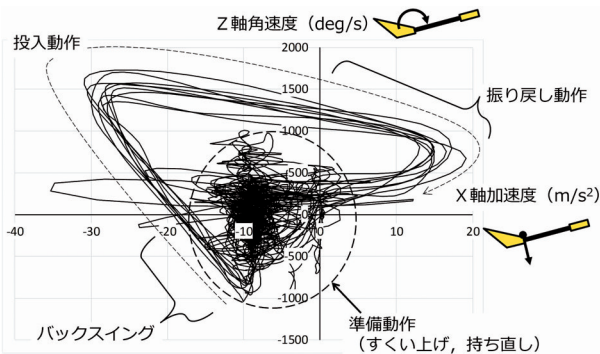
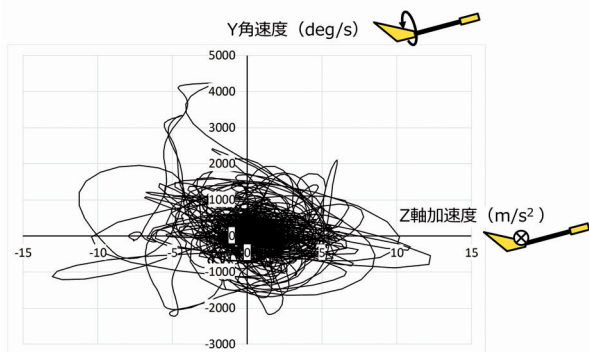


図5 モーションセンサから得られた6軸成分の時系列波形



a) 2軸にx軸加速度とz軸角速度を設定した場合



b) 2軸にz軸加速度とy軸角速度を設定した場合

図6 解析結果の例

パターンが見られない軸成分もあった。

図7は被験者、試行回数、持ち手のタイプによる軌跡の特徴を示した例である。全体的に逆三角形状の共通した図形パターンが生成されていることがわかる。さらに、a)は横持ちタイプを使用した10試行の軌跡で、投入動作の被験者間の差異を読み取ることができる。b)は被験者Mが極太タイプを使用した場合について、試行回数による軌跡の変化を示している。回数の増加に伴う動作変化がパターン変化として現れていることが分かる。c)は持ち手による違いを、被験者Kについて表示している。持ち手の形状が動作に影響を与えることが確認できる。

表1には太柄タイプについて被験者Mから聴取した主観評価結果を図形パターンの特徴とともに示した。

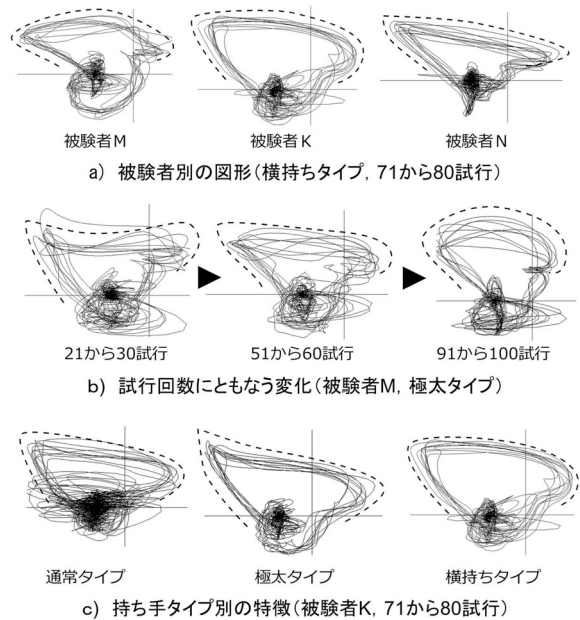


図7 リサージュ図形の特徴
(図中の破線は図形の特徴を示す)

表1 主観評価の例
(被験者M, 極太タイプ)

図形パターン	・ 試行回数を重ねると全体傾向が大きく変化	・ 試行ごとのばらつき大
主観評価	・ 的を狙いやすい	・ 他の身体部位に比べて前腕の疲労が拡大

4.3 リサージュ図形の検討と考察

スコップのバケット部に取り付けられたモーションセンサから6成分の運動情報が得られる。そのうち、特にx軸（スコップバケット部に垂直な軸）の加速度とz軸（x軸とシャフトに垂直な軸）の角速度を2軸に選んだ平面に一定のパターン

が現れることが分かった。このことは単なる偶然ではなく、この道具の機能に即している。すなわち、x軸は砂袋に荷重を伝える方向を指し、z軸回りは砂袋に斜め前方への押出力を効率よく伝えるための角度を与える回転軸であり、この2つの成分が投入動作においてバランスよく作用することがスコップの重要な機能といえるからである。したがって、仮にこれらの成分に相関がなくランダムであれば、一定のパターンは描かれない。実際に、図6b)はz軸加速度とy軸角速度を2軸を選んで描画したリサージュ図形であるが、特に規則性やパターンは見られない。このことはスコップ動作においてこれらの成分間に相関がないことを示している。

表1の太柄タイプに関する被験者Mの主観評価結果では、他の柄形状に比べ、投入回数にともなう前腕の疲労が大きくなってきている。図4b)で全体傾向が大きく変化していることから、投入精度を維持するため、スコップの使い方を微調整させていったためと考えられる。また、同図a)からは同一の道具の使用下でも被験者間でパターンに違いが見られ、個人差による違いを捉えていると考えられる。同図c)からは把持方法によって動作に違いが生じることがわかる。

以上のことから、道具の使用動作において被験者間に共通する特徴や、使い慣れや個人差による差異などの把握に、リサージュ図形を利用した本解析が有効であることを確認できた。

5. 生体情報に拡張した検討

モーションセンサで取得した動作情報から生成したリサージュ図形によって、従来は捉えることができなかった特徴が得られることがわかった。そこで、次に人間工学分野で扱うことが多い筋電図等の生体情報を解析対象に加え、本手法の適用可能性を検討した。

5.1 試験方法

農林業で広く使われている刈払機を用い、先端の回転刃(チップソー)を左右に払う動きを検討対象にした(図8)。計測した生体情報と動作情報は下記の29成分で、被験者は1名である。

- ・回転刃軸中心の6軸モーション：6成分
- ・下肢，体幹，上肢の筋電図：16成分
- ・呼吸換気量：1成分
- ・床反力計(3軸荷重，3軸モーメント)：6成分

また、ハンドル位置が主観的な使いやすさに影響することが経験的に知られている。そこで、器具の構成がリサージュ図形の特徴に与える影響を調べるため、ハンドル位置を図8のように3箇所(A形、B形、C形)にレイアウトし、それぞれに関してデータを計測した。ここで基準位置とは全体の重量バランスの中心にハンドルを固定した状態を指す。

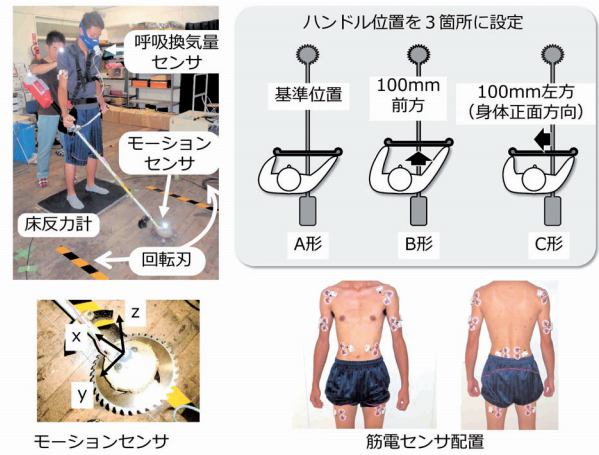


図8 刈払機を用いた実験

5.2 結果と考察

図9はハンドルをA形にして計測したときに得られた波形である。

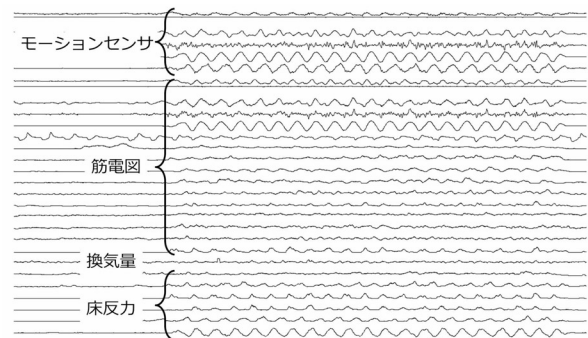


図9 計測機器出力波形の例

リサージュ図形の生成にはこれらの波形から2成分を選ぶ必要がある。しかし、全29成分から無作為に2成分を選択すれば、およそ8.8³⁰種類もの膨大な数の図形を描くこととなるため、以下のような制限を加え、成分の絞り込みを図った。

- ①同種の生体情報からは振幅の大きい成分を選択
- ②回転刃の運動軌道に強く関係するモーションセンサ成分を選択
- ③同様な挙動を呈する成分はペアとして選択しない

①は特に筋電図に関するもので、身体への負担が大きい成分を選ぶことを意味する。②は器具の運動を説明する上で主要な成分を選ぶことを指す。これは、器具や道具の取り回し運動は、3次元空間内においてそれぞれの機能によって決定づけられる一定の平面上や軸回りに生じる場合が多いという経験知による。実際に、前述の除雪動作試験では砂袋への荷重方向加速度と投入角度を与える角速度を選んだことで図形パターンが現れている。刈り払い動作の場合、先端の回転刃

部分は水平面上を被験者の体幹を回転軸とする円弧運動することから、接線方向加速度と鉛直軸回りの角速度に着目した。③に関しては、たとえば回転刃の接線方向加速波形と床反力計の鉛直軸モーメント波形は周期、位相、傾きなどが酷似していることがわかった。したがって、この2成分でリサージュ図形を描くと、前掲の図2b)のように、原点を通るほぼ直線上を往復する軌跡となる。これは、両成分とも被験者の体幹軸回りの回転運動を捉えたものであり、それぞれの波形が独立して振る舞う余地、つまり自由度が小さく、得られる情報が少ないと考え、信号を除外する条件とした。

以上の絞り込みをした結果、以下の成分に着目して検討することとした。

- ・回転刃部左右方向加速度と鉛直軸角速度
- ・左右腹斜筋の筋電図

ここで腹斜筋とは図10に示すように、肋骨部から骨盤部へ走行する筋で、体幹の前屈・側屈・回旋動作に作用する。今回の実験では前屈、側屈動作は見られないため、回旋動作により強く活動したと考えられる。

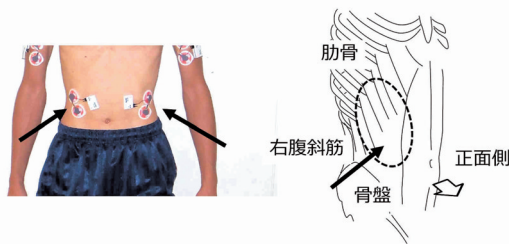


図10 腹斜筋上に貼付した筋電電極

図11に、上記の成分から生成したリサージュ図形の解析例をハンドル位置、主観評価とともに示す。それぞれの図形にはバラツキはあるものの、一定のパターンが見られる。加速度と角速度による図形はほぼ円形(楕円形)であり、角速度と腹斜筋による図形は涙滴型で、かつ左右の図形が対称的である。なお、図中の%MVCとは最大随意筋力に対する発生筋力のパーセント比を示す単位である。

さらに詳細を観察すると、加速度・角速度の生成図形では、前方ハンドル位置としたB形の図形がA形、C形に比べ、図中破線で示したように歪みが大きいことがわかる。さらにこのB形については腹斜筋にも図形の差があることがわかる。たとえば、B形の右腹斜筋の図形とC形の同図形では、B形の方が縦長の形状をしている。これはB形の方が筋負担が大きいことを示している。従来の人間工学的手法であれば、ここまでの極大値に関する議論にとどまる。それに対して、リサージュ図形からは、右腹斜筋活動の極大値において角速度が負であることから右回転時に大きく活動していること、筋

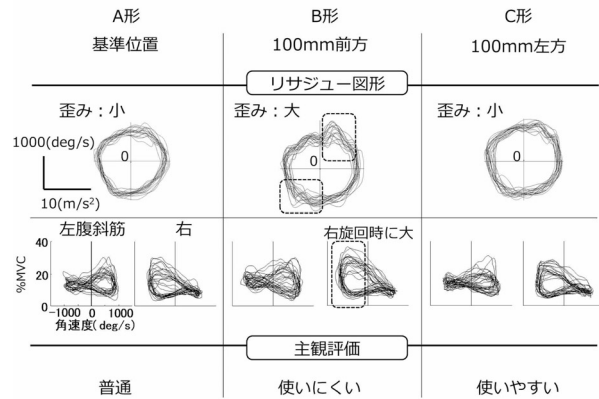


図11 リサージュ図形と主観評価

活動が小さいときのレベルにはハンドル位置による差がないこと、またこれらのことはすべてのタイプで共通した特徴であることなどが直観的に把握できる。主観評価においてB形については「使いにくい」と回答しており、上で述べたリサージュ図形の歪みや、右腹斜筋の負荷パターンが影響している可能性を示唆している。

その一方で、「使いやすい」と評価されたC形については「普通」と評価されたA形との間に図形上の明確な差は見られなかった。ただし、ハンドル位置によって身体動作のダイナミクスが変化することが予想され、センサ成分の組み合わせにより違いを浮かび上がらせられる可能性が十分ある。この点については、図形から得られる様々な特徴情報を基に、その場で被験者の主観を尋ねることで、新たな特徴が見つかる可能性もあり、今後の検討に生かしたい。

6. まとめ

本研究では、人間工学的評価において主流である生体情報の平均値を用いた量的評価手法に対し、動作の特徴をリサージュ図形として可視化することにより、これまで難しかった動作の質を捉える手法の開発を行った。得られた成果は以下の通りである。

- 1) 動作情報や生体情報等の各種センサ信号間の相関性を可視化するリサージュ図形を生成することで、動作特徴の抽出と直観的な把握が可能になった。
- 2) 機具の取り回し運動は空間内において一定の平面上や軸回りに生じることが多いことから、これらの平面や軸に沿ってモーションセンサを配置し、またその運動に大きく寄与する筋活動を計測することで、明瞭なリサージュ図形が得られることを確認した。

今後、様々な身体装着型のセンサが市場に出現し、利用場面の増加が見込まれており、様々なセンサ信号から有用な情報を抽出する技術への要望が高まると思われる。こうした課題に対して、開発した解析手法の活用が期待できる。特に、図形として可視化する手法は、計測した生体情報データの特徴を直感的に理解し、動作へ素早くフィードバックする装置への利用も考えられる。将来的に今回の成果を新たな可能性を持った装着・携帯型デバイス開発へ活用する検討を進める予定である。

謝辞

株式会社コスモメカニクスには、実験対象となる機具や参考情報の提供において、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) 栄久庵 憲司：道具・工具のデザインと人間工学，日本人間工学 Vol.18, No.5, pp239-242, (1982)

レーザー溶接時の熱・流体挙動観察によるシールドガス供給機構の適正化

櫻庭 洋平, 安田 星季, 三戸 正道, 田中 大之
宮腰 康樹, 中嶋 快雄, 保科 秀夫

Adjustment of Shielding-Gas Feed Mechanism by Observing Thermal and Fluid Behavior of Laser Welding

Yohei SAKURABA, Seiki YASUDA, Masamichi MITO, Hiroyuki TANAKA
Yasuki MIYAKOSHI, Yoshio NAKAJIMA, Hideo HOSHINA

抄 録

レーザー溶接は溶接速度が速く熱ひずみが小さいため、溶接時間の短縮や仕上げ作業の簡略化に役立つ。しかし、他の溶接法と比べシールドガスの消費量が多いため、ガス供給条件の適正化が加工コスト削減に向けた課題となっている。

本研究では、シールドガスの酸化保護機能・レーザー誘起プルーム除去機能の向上とガス消費量の低減を目的とした。最初にレーザー溶接時のシールドガス流れ・溶接ビード温度の観察と、溶接ビードの外観・断面形状・空孔欠陥の計測を行い、ガス供給条件と溶接品質の関係を評価した。その結果、酸化保護とプルーム除去が両立する適正流速の範囲が、ガスノズルから溶接部までの距離が離れるほど減少することを確認した。次に、この結果をもとにガス供給システムをガスの機能ごとに分岐することで、酸化保護能力が改善された。また、プルーム除去側のノズル形状を改良することでプルーム除去能力が改善されることも確認した。

キーワード：レーザー溶接, シールドガス, 酸化保護, プルーム除去

Abstract

Because of the high speed welding and the small welding distortion, laser welding is effective to shorten the welding time and to improve simplification of the finishing work. However, adjustment of shielding-gas supply conditions is very important problem to reduce the processing cost of laser welding, because the shielding-gas consumption in laser welding is larger than the other welding methods.

In this study, we targeted to progress the functions of oxidation protection and removing plume inducement to laser, and to reduce the shielding-gas consumption. At first, we evaluated the relations between the shielding-gas supply conditions and the welding quality, by watching the shielding-gas flow and the temperature of welding beads at the time of laser welding, and measuring appearance, profiles, voids of welding beads. As a result, we confirmed that the range of appropriate velocity of flow both the oxidation protection and the removing plume was decreased to separate the shielding-gas nozzle from welding point. Then, the ability of oxidation protection was improved by branching the shielding-gas supply between oxidation protection and removing plume. And then, the ability of removing plume was improved by reforming the shape of removing plume nozzle.

KEY-WORDS : Laser Welding, Shielding-Gas, Oxidation Protection, Removing Plume

事業名：職員研究奨励事業（提案部門 シーズ探索型）

課題名：熱・流体可視化技術に基づいたレーザー溶接用シールドガスノズルの設計評価技術の開発

1. はじめに

機械部品の生産現場では常に効率化が求められており、溶接工程においても例外ではない。しかし、溶接工程は溶接法により部品に要求される加工精度が変わり、また溶接部の仕上がりや熱ひずみの状態で仕上げ工数が増減するため、溶接時間だけでなく前後工程を含めた総合的な効率の改善が重要となる。

溶接工程の効率化策として、溶接速度が速く熱ひずみの小さなレーザー溶接の活用が期待されているが、高額な装置に加え溶接部品の精度確保の難しさやシールドガス（以下ガス）使用量の多さなど特有の課題も少なくないため、その効果を発揮させるのは難しい。このため、これまで経験によるところの大きかった溶接品質について、その影響要因を明確化し、溶接条件や装置の適正化に繋げることが重要となる。

本研究は、レーザー溶接の運用コストを削減する技術課題の中からシールドガス供給条件の適正化を研究対象とし、シールドガスに要求されるビードの酸化保護能力およびブルーム除去能力の向上と、これらの能力を最小限のガス消費量で満足させるための効率化を目的とした。実験では、レーザー溶接時のガス流れ挙動の観察を利用した酸化保護能力およびブルーム除去能力の評価と、ビード表面の熱挙動が外観品質や断面品質に及ぼす影響の評価を行った。また、これらをもとにガス供給系統やガスノズル形状を改良し、シールドガスの能力向上やガス消費量の低減を行った。

2. レーザ溶接の理論

2.1 レーザ溶接の特徴

図1に、レーザー溶接などの高エネルギー密度の溶接と、アーク溶接などの低エネルギー密度の溶接との溶接状態の違いを示す。レーザー溶接は、溶接部の熱エネルギー密度が $1.0\text{kW}/\text{mm}^2$ 以上とアーク溶接などより数100~1,000倍高いため、図1の右図のとおり溶接材料が瞬間的に蒸発してキーホールを形成する。これにより溶融池の奥にレーザー光が到達するようになり、深さ方向に集中して溶融が進むことから、溶込みが深く幅の小さな溶接ビード（以下ビード）が形成される。これに対し熱エネルギー密度の低い溶接法では、溶接材料が蒸発しないため徐々に熱が伝わり、浅くて幅広な熱伝導型の溶融が進む。

これらの特徴から、レーザー溶接では溶込み深さに対するビードの体積や総入熱量が小さくなるため、同じ溶込み深さを得るために必要な溶接パスの繰り返し数が減少し溶接時間が短縮される、ひずみの縮小により仕上げ工程が短縮されるなど様々なメリットにつながる。

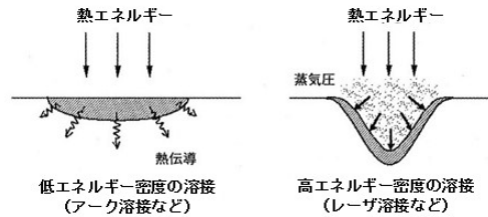


図1 深溶込みビードの形成原理

2.2 レーザ溶接におけるシールドガスの機能と課題

2.2.1 ビードの酸化保護機能

レーザー溶接に限らず、溶接で加熱され溶融したビードが周辺の空気に触れると、空気中の酸素や水蒸気などと材料が反応し、ビードの脆化や耐食性の低下などの不具合を引き起こす。そのため溶接時にはそれぞれの材料に適合したガスを供給し、ビードが再凝固し十分に冷却されるまでビードの周辺を保護する必要がある。

レーザー溶接時のガス消費量が、一般にMAG溶接やTIG溶接などより多くなる原因は、レーザー溶接の特徴である溶接速度の速さによるものである。このことについて、図2にMAG溶接などのガス供給範囲を、図3にレーザー溶接のガス供給範囲をそれぞれ示す。

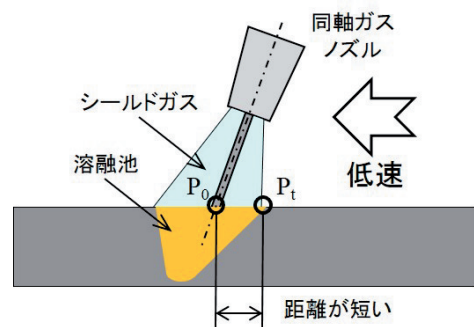


図2 MAG溶接などのガス供給範囲

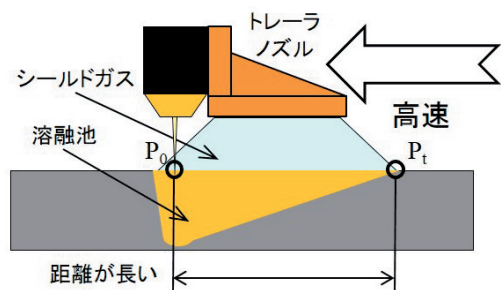


図3 レーザ溶接のガス供給範囲

図2のとおり、MAG溶接やTIG溶接の溶接速度は5～10 mm/s程度であり、ある時刻(t_0)の加工点(P_0)から t 秒後の加工点(P_t)までの距離が短いほど母材や固定治具を通じて熱が拡散する。このため、溶接速度が遅い場合には加工点に近い位置でも既に温度が低下していることから、同軸ガスノズルなど加工点付近の比較的狭い範囲のガス供給でも良好な酸化保護が可能となる。

これに対し、レーザ溶接の溶接速度はMAG溶接などよりも10倍以上高速で、 P_0 から P_t までの距離が長いから、ビードも冷却されていない。ビードが冷却されるまでシールドするためには、図3のようなトレーラノズルやサイドガスノズルなどを使用し、ビード後方の広範囲にガスを供給する必要があるため、必然的にガスの消費量が増加する。

2.2.2 レーザ誘起プルームの除去機能

シールドガスに要求されるレーザ溶接特有の機能として、レーザ誘起プルーム（以下プルーム）の除去がある。プルームとは溶接材料の蒸発で発生した金属蒸気のこと、高密度な熱エネルギーで溶接材料を瞬間的に蒸発させて深溶込みを得るレーザ溶接では避けられない副生成物である。

加工点から発生したプルームはビードの上方に噴出し、その一部はレーザ光の光路上に滞留する。シールドガスによるプルーム除去が不十分な場合、プルームが後から来たレーザ光を吸収し、図4のとおりレーザ光路が激しく発光する。このとき、加工点に到達するエネルギーが減少するため、溶接中に溶込み深さが逐次変動し、溶接能力が著しく不安定になる¹⁾。また、ビーム形状が乱れることでビードの凹凸や幅が不定期に変動し、ビードの外観にも悪影響を及ぼす。

このため、レーザ溶接では他の溶接法にはないプルーム除去用のガスも必要となり、ガス消費量を増大させる一因となっている。



図4 レーザ光路上のプルーム（円内）

3. 実験方法

3.1 実験項目

実験は、最初にレーザ溶接時のガス流れ状態を観察し、プルームの除去能力を評価した。また、ビード表面の酸化や欠損の状態を観察し、酸化保護能力を評価した。また同時に、ビード表面温度の計測、断面形状と空孔欠陥の計測を行い、表面温度と外観・断面品質との関連性について評価した。

次に、評価結果をもとにガス供給機構に改良を加え、加工点とノズル口との距離（以下ノズル距離）を大きくとった場合の酸化保護能力とプルーム除去能力の改善実験を行った。

3.2 観察・計測方法

ガス流れ状態の観察には高速度カメラ（フレーム数：5,000 フレーム/s）を使用し、プルームの滞留時間の計測とスパッタ（溶接部から飛散した熔融金属）の挙動観察を行った。また、ビード表面の温度計測には放射式サーモビュア（フレーム数：60 フレーム/s）を使用し、ビード表面の最高温度を計測した。図5に計測装置の配置を示す。

ビード表面の外観観察は、表面酸化の進行による発色の変化や欠損などビード形状の乱れの有無を確認した。また、ビード断面形状の計測は、図6のとおりビードの表面（ $Z=0.0$ mm）と中層（ $Z=1.0$ mm）のビード幅を実体顕微鏡で計測した。



図5 高速度カメラ・サーモビュア観測系

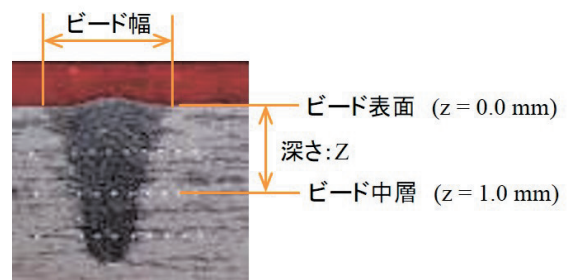


図6 ビード断面の計測位置

3.3 実験条件

本研究ではSUS430（75mm×25mm×10mm）を溶接材料に使用し、図7のとおりフライス加工で仕上げた試験片の上面にビードオンプレート溶接を行った。表1にレーザー溶接の諸条件を示す。

シールドガスには純度：99.99_{vol}%のアルゴンガスを使用し、これをビードの後方にレーザー光路と30°の角度で配置したサイドガスノズルから供給した。実験におけるガス供給条件は、図8および表2のとおりとした。

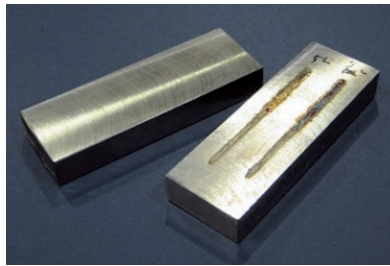


図7 試験片外観（SUS430）

表1 レーザ溶接条件

レーザー種類	Ytterbiumファイバーレーザー
波長(nm)	1,070
焦点径(mm)	0.30
焦点位置(mm)	0.0(材料表面)
レーザー出力(W)	2,000
溶接速度(mm/s)	50.0

図8 ガス供給実験概念図

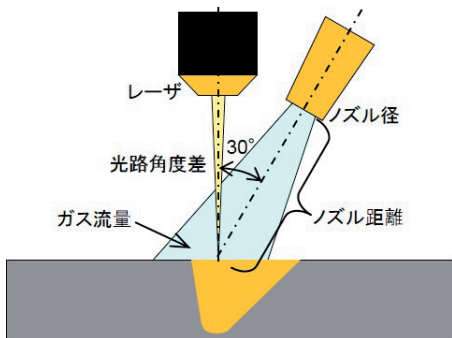


表2 ガス供給実験パラメータ

ガス種類	Ar
ガス流量(L/min)	5 ~ 50
ノズル径(mm)	φ2, φ4, φ8, 楕円(4×2)
加工点ーノズル距離(mm)	20, 50, 80

3.4 評価方法

3.4.1 酸化保護能力

酸化保護能力の評価方法について、本来ならばビード表面の溶存酸素濃度を測定するのが適切だが、複雑な凹凸があるビード表面を同じ条件で機械的に抽出することは難しく、また高精度な仕上げ面を前提とした蛍光X線分析などの成分分析も、凹凸でX線などが乱反射するため正確な測定が困難である。このため本研究では、代替手段として表面酸化によるビードの発色を評価に利用することとした。

評価にはビード表面の観察結果を使用し、ビードの発色とビード欠損の有無により、表3のとおり外観品質を5段階に分類した。

判定の段階分けは、金属光沢ビードを得るために要する後工程の作業量で分類し、判定Vは清掃程度で金属光沢ビードが得られ、判定IVでは酸洗浄を行えば金属光沢が得られるものとした。また、判定IIIのテンパーカラービードはカラーステンレスと同じ原理²⁾の発色であるため、発色そのものが問題となる場合以外は仕上げ不要となる。判定IIおよび判定Iは酸化保護が全く働かない状態で、IIは仕上げ研磨、Iはビードの補修溶接がそれぞれ必須となるものとした。

また、スパッタ等の飛散状態の観察結果を使用して、ビード欠損が生じた原因の確認と分析を行った。

表3 ビード外観品質の判定基準

判定	V	IV	III	II	I
判定基準	金属光沢	酸洗浄後金属光沢	テンパーカラー	黒色酸化	ビード欠損
	← 良好				不良 →

3.4.2 プルーム除去能力

プルーム除去能力の評価方法について、プルームによりレーザー光路が図4のように激しく発光した場合、プルームが除去されず光路上に滞留し続けているものと判断できる。

このため評価にはプルーム滞留時間の計測結果を使用し、溶接時間（1.0s）のうちプルームによる光路の発光時間が短いガス供給条件ほどプルーム除去能力が良好と評価した。

3.4.3 ビード表面温度と外観・断面品質との関連

ビード表面温度と外観・断面品質の関連評価には、ビード表面の最高温度・断面ビード幅・空孔欠陥の体積と分布の計測結果を使用した。これらの計測結果を3.4.1の外観判定結果と重ね合わせることで、外観品質を介して相互の関連性の有無を評価し、原因についての分析を行った。

4. 結果と考察

4.1 その場観察によるガス供給能力の評価

4.1.1 酸化保護能力

シールドガスによる酸化保護能力とブルーム除去能力について、表2の条件でガス供給実験を行い、これをガス流量とノズル径から導出したガス平均流速（以下流速）との関係で整理した。図9に、ノズル距離ごとにガス平均流速と外観品質の関係を示す。

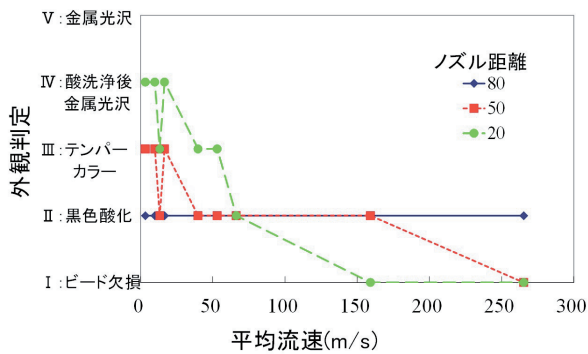


図9 ガス平均流速と外観品質の関係

図9のとおり、ノズル距離が近いほど外観品質が良好となる一般的な傾向が確認されたが、流速と外観品質の関係については、ノズル距離20mmや50mmでは流速の増加とともに金属光沢ビードから欠損ビードまで徐々に低下するのに対し、ノズル距離80mmでは流速による変動が確認されなかった。

ノズル距離や流速の増加とともに外観品質が低下する原因について考察した結果、以下のことが考えられる。

- 今回使用したノズルでは、ノズル径が最も大きいφ8mmのノズルでも、流速4.5m/s以上でレイノルズ数： $Re > 2,300$ の遷移領域となり、実験時のガス流れはほぼ全て乱流域となる。
- このため、ガス供給時に周辺の空気の巻き込みが避けられず、レイノルズ数が等しい場合はノズル距離が長いほど、また高流速でレイノルズ数が大きいほど巻き込まれる空気の量が増え、その分アルゴンガスの濃度が低下した。

また、ノズル距離が近い場合にのみビード欠損が生じる原因について考察した結果、以下のことが考えられる。

- 高流速時のガス流れ観察画像をノズル距離ごとに分析した結果、ノズル距離20mmや50mmでは図10のようにスパッタが加工点の前方に流されガウジング（型彫り）加工に近い状態となったが、ノズル距離80mmでは高流速時でもスパッタの挙動に明確な違いは見られなかった。

- このことから、高流速かつノズル距離が近い場合には、不活性ガスによるシールド効果や冷却効果が得られる前に溶融池が吹き飛ばされ、ビードが欠損した。これに対しノズル距離が遠い場合には、加工点近傍で流速が低下するためビードの欠損に至らなかった。



図10 高流速時のスパッタ挙動

4.1.2 プルーム除去能力

図11に、ノズル距離ごとにガス平均流速とブルーム除去能力の関係と比較した結果を示す。この結果から、全てのノズル距離において、流速10m/s以上でブルームの滞留時間を溶接時間の20%となる0.2秒未満に、流速50m/s以上では滞留時間をほぼ0秒とすることができた。

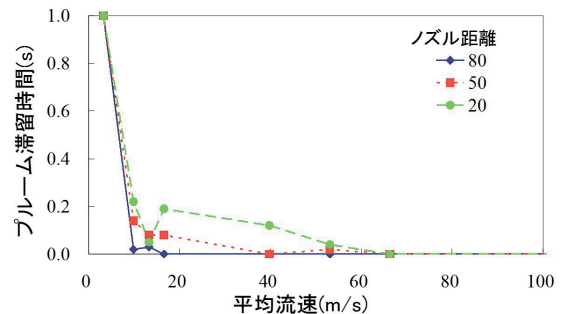


図11 ガス平均流速とブルーム除去能力の関係

この結果から、レーザ光路上のブルーム除去には一定以上の流速で、連続的にガスを供給することが効果的であると考えられる。

4.1.3 温度状態と外観・断面品質の関係

放射式サーモピュアによるビード温度の計測結果について、ビードの外観品質で分類した結果を図12に示す。

使用したサーモピュアでは、フレーム数や解像度の制約から溶融池と母材との反射率の変化を完全に追従できず、計測値は全てSUS430の融点（1,750K前後）を下回り正確な温度は得られなかった。しかし、図12のとおり判定ⅢおよびⅣの酸化保護が良好なビードは、黒色酸化した判定Ⅱのビードと比べ40%ほど温度が低く検出されており、定性的な傾向では

あるが外観品質との関係を把握することができた。

なお、黒色酸化ビードが他のビードより高い温度を示した原因として、シールドが良好ではない分、反応する酸素による発熱が多くなったことが考えられる。

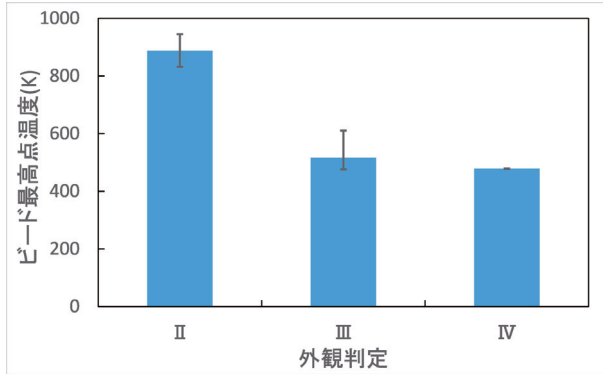


図12 外観品質とビード温度の関係 (参考値)

次に、ビード断面の形状について、表面と中層のビード幅を外観品質で分類した結果を図13および図14に示す。

図13のとおり、外観品質が良好なビードは表面のビード幅が拡大し、判定IVのビードでは判定IIのビードより20%程度拡大した。一方、中層のビード幅には変化が見られず、全体としては図14のとおり徐々にワインカップ状の断面形状に近づくことが確認された。

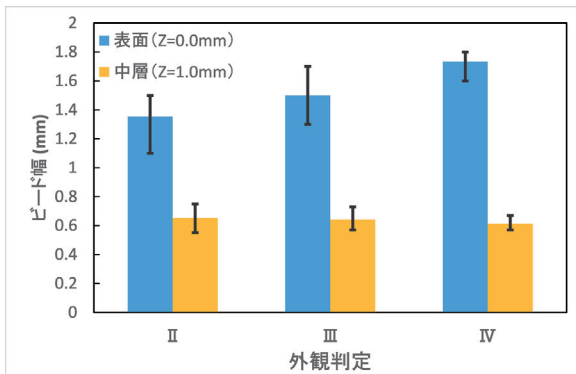


図13 外観品質とビード幅の関係



図14 ビードの断面形状 (左から判定II・III・IV)

断面形状とビード温度の関係について、外観品質を介して考察した結果、以下のことが考えられる。

- 酸化保護が不十分で外観品質が劣るビードは、酸化による発熱反応で温度が上昇し、これにより溶融するビードの体積も増すことが予想される。
- しかし、断面形状の計測結果では、酸化反応が少なく外観品質が良好なビードほど幅広となり、ビードの体積も拡大している。
- これらのことから、ビード温度と断面形状との直接的な関係は小さい。

4.2 ガス流れの分析による供給機構の改良

4.1.1および4.1.2の結果から、酸化保護とブルーム除去の両方が良好となるガス供給条件について検討した。図15に、外観品質がテンパーカラー以上で、かつ溶接時間の80%以上に相当する0.8秒以上の時間でブルームが除去されたガス供給条件の範囲を示す。

図15のとおり、機能が両立する適正流速の範囲は、ノズル距離20mmでは流速10~60m/sと広範囲だが、ノズル距離50mmでは流速10~20m/sの範囲に限定され、ノズル距離80mmでは適正な範囲が得られなかった。

実際の溶接作用では、適正流速の範囲が広いほど溶接速度や溶接姿勢の変化や作業環境周辺の外乱に対する余裕を大きく取ることができるため、良好かつ安定したレーザ溶接を行うにはノズル距離を極力短くし、かつブルームを十分除去できる程度の低流速でガス供給するのが望ましいと言える。しかし、ノズル距離が短いほど部品の凹凸や周囲の治具類と干渉しやすくなるため、作業姿勢の制約や溶接プログラムの複雑化などに繋がり作業性が低下する。このため、少しでもノズル距離を拡大し、そのうえでガス消費量を抑えつつシールドガスの能力を改善させることができれば、レーザ溶接の実用性向上に貢献することができる。

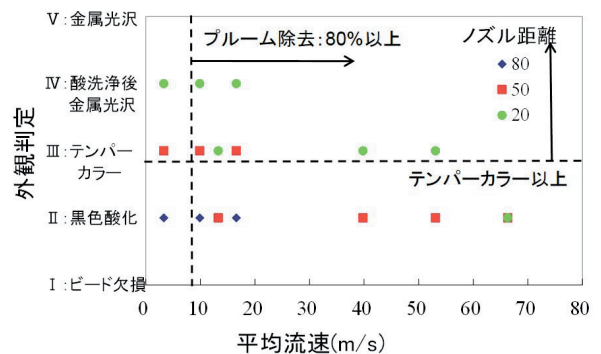


図15 酸化保護とブルーム除去の両立範囲

そこで、先の実験結果とその時のガス流れ状態を分析し、これをもとにガス供給機構に改良を加えることで、シールドガスの機能向上やガス使用量の適正化を行った。

4.2.1 ガス供給システムの分岐による外観品質の向上

ノズル距離が長い場合に酸化保護機能とブルーム除去機能の両立が困難な原因について検討するため、表4および図16のとおり、個々の機能に要求されるシールドガス供給条件を整理した。

表4 シールドガス機能ごとの要求内容

シールドガス機能		酸化保護機能 (酸化反応防止、ビードの冷却)	ブルーム除去機能 (ブルームの物理的除去)
要求項目	供給位置	加工点～ビード後方	レーザ光路
	流れ方向	—	レーザ光路と交叉
	ガス流速	低速 (周辺の酸素巻き込み抑制)	一定以上の流速

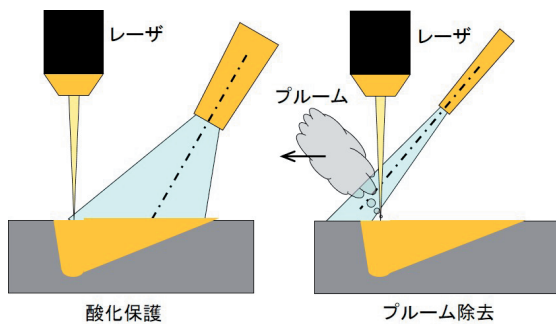


図16 ガス供給範囲の違い

表4および図16のとおり、酸化保護では加工点から後方の広範囲に、周辺の酸素を巻き込まない低流速のガス供給が求められる。これに対しブルーム除去では、レーザ光路と交叉する位置に、一定以上の流速で物理的な力を持たせたガス供給が求められ、両者の供給範囲や適正流速は大きく異なる。このためノズル距離が長い場合には、酸化保護優先のガス供給条件だと加工点近傍までブルーム除去に必要な流速を維持できず、またブルーム除去を優先させガス流速を速くすると、レイノルズ数も大きくなり酸素の巻き込みが増えるため、機能を両立させるのが困難だと考えられる。

そこで対策として、図17のようにガスノズルを酸化保護用とブルーム除去用とでシステムを分岐し、それぞれの機能ごとに適切な条件でガス供給することとした。

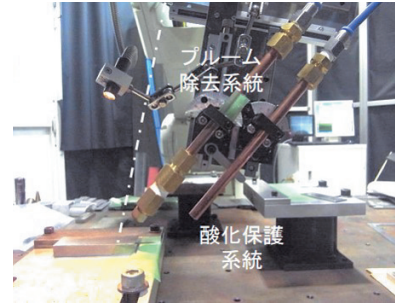


図17 機能ごとのガス供給システム分岐

表5 システム分岐によるガス供給の改善

ガス供給機構	ノズル距離	シールドガス流量(L/min)			ブルーム滞留時間(s)	外観判定
		ブルーム除去	酸化保護	合計		
1系統	80	50	-	50	0.00	II
2系統	80	10	30	40	0.09	III
		10	40	50	0.02	III

その結果、システム分岐前には黒色酸化ビードしか得られなかったノズル距離80mmにおいて、表5のとおりガス使用量を40～50L/minの同程度に維持したまま、ビードの酸化状態をテンパーカラービードに改善し、また0.9秒以上にわたり滞留したブルームを除去することができた。

4.2.2 ノズル形状の改良によるブルーム除去能力の向上

4.2.1のとおり、機能ごとのシステム分岐により酸化保護能力を向上させることができたが、口径や流速が異なるノズルを近接させたことで双方のガス流れが干渉し、システム分岐前と比べノズル距離20mmと50mmのガス供給条件でブルーム除去能力が大きく低下した。

この原因について、このときのブルーム挙動を高速カメラで観察したところ、図18のとおりブルームがガスで一度分断され、その後ビードの横方向から回り込んだブルームが光路上に再度侵入していることが確認された。

そこで対策として、図19のようにブルーム除去側のノズル形状を2mm×4mmの楕円形に変更し、ビード横方向のガス散布範囲を広げ横方向から回り込むブルームを除去することとした。



図18 ブルームの分断(円内)と再侵入

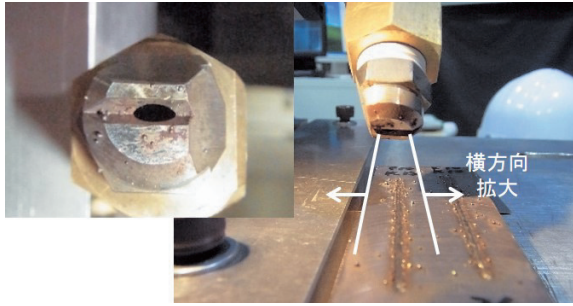


図19 楕円形のブルーム除去ノズル

その結果、φ 4 mmの円形ノズルではブルームの再侵入を防げなかった条件において、表6 および表7のとおりガス使用量や酸化保護能力を維持したまま、ブルームの滞留時間を0.1秒以下に抑えることができた。

表6 ノズル形状の改良によるガス供給の改善
(ノズル距離 20mm)

ノズル形状	ノズル距離	シールドガス流量(L/min)			ブルーム滞留時間(s)	外観判定
		ブルーム除去	酸化保護	合計		
円形(φ4)	20	15	15	30	0.30	Ⅳ
楕円(2×4)	20	10	20	30	0.02	Ⅳ

表7 ノズル形状の改良によるガス供給の改善
(ノズル距離 50 mm)

ノズル形状	ノズル距離	シールドガス流量(L/min)			ブルーム滞留時間(s)	外観判定
		ブルーム除去	酸化保護	合計		
円形(φ4)	50	10	20	30	0.63	Ⅲ
楕円(2×4)	50	10	20	30	0.09	Ⅲ

5. おわりに

レーザ溶接時の熱・流体挙動とビード品質との関連性を評価し、効果的な酸化保護とブルーム除去が可能なガス供給条件を抽出することができた。また、得られた適切なガス供給条件を満足させるような、ガス供給系統やガスノズル形状の改良にも繋げることができた。

今後は、レーザ溶接の導入企業や導入検討企業に対し、より効果的なガス供給条件を抽出し設定する技術などを支援して、レーザ溶接の効率的な運用やレーザ溶接部品の品質向上の支援に繋げていく。

謝辞

本研究で使用したファイバーレーザ加工溶接装置・試料埋込装置・実体顕微鏡は独立行政法人科学技術振興機構の地域産学官共同研究拠点整備事業により、X線CTシステムは経済産業省北海道地域イノベーション創出協働体形成事業研究

開発環境支援事業により、それぞれ整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 川人洋介・木下圭介・松本直幸・水谷正海・片山聖二, 高出力ファイバーレーザによるステンレス鋼溶接時のレーザ誘起ブルームの高速観察および分光分析, 溶接学会論文集, 第25巻 第3号 pp.455-460, (2007)
- 2) 川村伊知良, ステンレス鋼の溶接部のテンパーカラーについて, Newびいど No.5 pp.12, (2003)

乗り心地を考慮した車両評価システムの開発

神生 直敏, 飯田 憲一

Development Vehicle Evaluation System Adding Ride Feeling

Naotoshi KAMIO, Ken'ichi IIDA

抄 録

近年、一般乗用車だけでなくトラック等の産業用車両においても運転者の疲労軽減等の観点から、乗り心地向上は重要な課題である。こうした課題に応えるため、人的感覚が重要な設計要素になる車両部品等の機械的情報と人間による乗り心地官能評価情報から、波形処理手法や重要度分析・相関分析・両側T法を利用して、乗り心地の総合評価値を予測する推定式を算出した。得られた推定評価値と従来の官能評価結果とを比較した結果、良好な推定精度であることを確認した。

キーワード：乗り心地，評価，AHP法（階層分析法），相関分析，両側T法，独立成分分析

Abstract

Recent years, in terms of occupational safety, etc., improvement of ride feeling of the driver is an important issue in industrial vehicles such as trucks. In order to meet these issues, from sensory evaluation information and mechanical information of mechanical vehicle components, such as human sense is an important design element, we calculated the evaluation value equation to predict the overall rating of ride feeling using the importance of analysis and correlation analysis, both sides T (Taguchi) method and waveform processing technique. As a result of comparison between the estimated evaluation values and the conventional sensory evaluation, it was confirmed that a good estimation accuracy.

KEY-WORDS : Ride Feeling, Evaluation, AHP (Analytic Hierarchy Process), Correlation Analysis, both-sides T Method

1. はじめに

近年、産業用車両では、運転者の疲労軽減など労働安全の観点から、乗り心地の向上は重要な課題となっている。乗り心地評価は従来、官能評価のみで行うのが一般的である。しかし、車両を構成する機械システムが複雑化する中、路面状況など様々な使用環境を考慮しつつ、車両の機械情報などから乗り心地を総合的に捉えることができる評価方法が求められている。一般車両では乗り心地評価に係る各種の研究事例¹⁾²⁾はあるものの、産業用車両では十分に確立しているとは言い難い。道内企業からも、複雑な機械システムからなる車両に対して乗り心地といった人的観点から、定量的かつ総合的に評価できるシステムづくりの要望が寄せられている。

そこで本研究では、産業用車両の乗り心地を対象に、車両

を構成する機械装置・部品の計測データと評価者（テストドライバー）による乗り心地の官能評価データを統合し、総合評価する車両評価システム開発に取り組んだ。

2. 車両評価システムの開発

従来、官能評価データのみで算出していた乗り心地評価を、車両走行時の官能評価データと車体振動データの双方を使用して定量的な乗り心地評価値を算出する方法を検討した。

定量的な乗り心地評価値を得るためには、評価者の主観に左右される官能評価データの項目数をできるだけ少なくし、より多くの機械的な計測データを用いて評価値を算出する必要がある。

そこで、各種の分析・評価手法を検討した結果、複数の手

事業名：経常研究

課題名：乗り心地を考慮した車両評価システムの開発

法を用いて評価値を算出することとした。今回開発した車両評価システムにおける検討フローは次のとおりである（図1）。

- ①車両の走行試験時に、車体の機械的計測データと官能評価データを収集する。
- ②官能評価データについては重要度分析を行い乗り心地への影響が強い項目を絞り込む。
- ③機械的計測データは信号分離技術として独立成分分析を使って処理を行い、有効な信号を抽出する。代表的な機械的計測データとして、車体に起因する3方向の振動データを使用する。
- ④機械計測データと官能評価データの相関分析を行い、振動データとの相関が高い官能評価データを振動データと置き換えることで、さらに官能評価項目数の絞り込みを行う。
- ⑤項目数を絞りこんだ官能評価データ・定量的な振動データ・実験条件から、両側T法により総合評価推定式を導出する。



図2 走行試験車両と頸部振動センサ（左下）

今回、データ収集での走行数は16走行であった。加えて、車両のテストドライバー4名には、官能評価7項目に関して、乗り心地評価での重要性についてアンケート調査を実施した。アンケート調査の方法については、5. 原因分析技術の項で説明する。

2.2 情報が混在した波形から有益な波形を分離する技術の検討

過去の乗り心地評価の研究では、路面性状に注目して乗り心地を評価している事例³⁾もあり、官能評価との相関性の点でからも、段差などの路面性状の影響を抽出するのが有効と考えられる。しかし、車両構造上、振動センサで測定したデータの場合、そのままでは複数の振動情報が混在している可能性がある。

本研究では、車両構造上から様々な情報が混在する振動データから段差情報のみの振動データを収集する方法として、独立成分分析（ICA; Independent Component Analysis）を検討した。独立成分分析は、多変量の信号を複数の独立した成分に分離するための計算手法であり、解析後の絶対値が異なるなどの利用条件もあるが、音声分離や画像処理、脳波解析の分野での適用が多い手法である。今回、車両評価システムの適用について検討するため、事前に簡易実験を実施した。

実験では、図3に示すように、4つの加速度センサを載せた台車に送風機を載せて、床面の段差乗り上げ時に計測した振動データから段差に起因する信号だけを分離できるか試みた。解析に使用した独立成分分析の手法はHyvärinen and Ojaが開発したFastICA⁴⁾である。FastICAは固有値数を算出できることで、有効な成分数を把握できる。

解析の結果、独立した成分が2種類と判定され、2つの波形成分（ICA1, ICA2）が抽出された（図4）。別途計測した段差のみの情報と波形形状を比較した結果、一方の成分とはほぼ一致した。収集した振動データから独立成分分析法で段差情報を分離・抽出できたと判断し、この結果を車両評価システムの中で、振動データの波形処理方法に利用することとした。

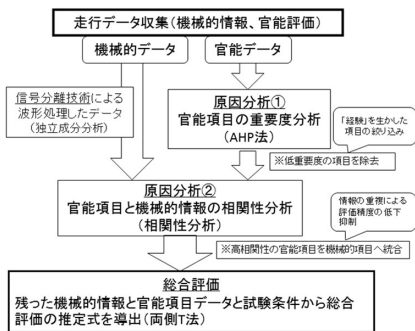


図1 本評価システムでの評価フロー

2.1 走行試験と各種データの収集

車両走行データは、株式会社ワークム北海道の協力を得て、段差のある車両テストコースを走行する大型貨物車から収集した。走行試験における測定内容は、表1のとおりである。官能評価項目は、協力企業から、乗り心地に関する官能

表1 走行試験での測定内容

種類	内容
官能評価項目(7)	サス感A,B,C,D,走行感A,B,ボディ剛性感
振動項目(3)	前後方向,左右方向,頸部上下方向
実験条件(2)	サスペンション有・無,車速3パターン

評価項目の調査を行い、代表的な7項目を抽出した後、それぞれ10点法にて測定した。車両の振動項目は、車両走行時の前後・左右・上下の3種類の振動波形を測定した。なお、上下振動については、協力企業での測定方法を考慮し、図2に示すように、評価者の頸部にセンサをつけて測定した。実験条件は、サスペンションの有無および車速3パターン（40, 60, 80km/h）である。

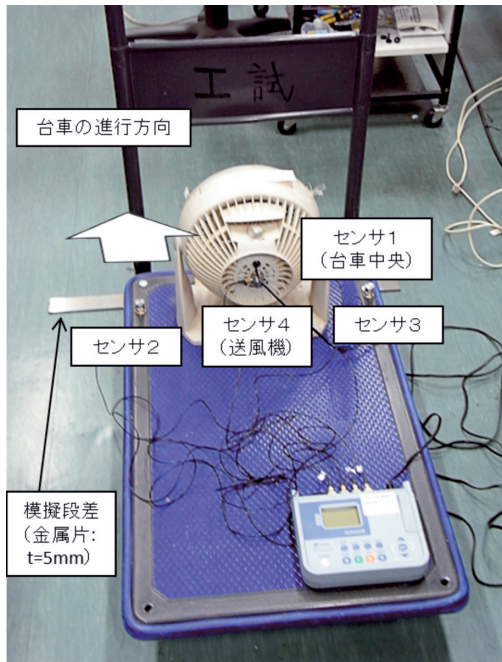


図3 独立成分分析の簡易実験装置

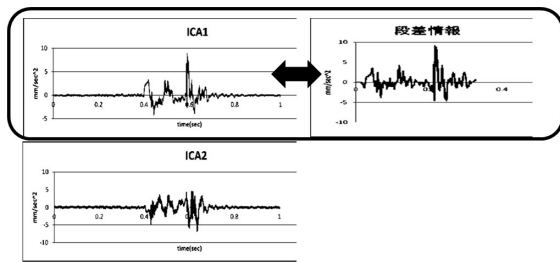


図4 独立成分分析結果の2成分波形（左側）と段差情報の波形（右側）の比較

2.3 原因分析手法の検討

定量的な乗り心地評価値を得るためには、評価者の主観に左右される官能評価データの項目数を少なくし、より多くの振動データを用いて乗り心地評価値を算出する必要がある。そこで、本研究では原因分析手法として、2種類の分析法を用いて、乗り心地に重要な官能評価項目の抽出と振動データへの置換が可能な項目の分析を行うこととした。

2.3.1 AHP法による重要度分析

官能評価7項目に対して評価項目数を絞り込むために、テストドライバーの協力を得ながら、AHP法による重要度分析を行った。

AHP法はSaatyが提唱した問題解決型意思決定法⁵⁾であり、評価項目の重要度と選択肢（代替案）を、一対比較法によるアンケート調査と相対的なウェイト（重み）計算により、決定する手法である。一対比較法は、複数の項目から2つを取り出し、どちらの項目がより重要か、程度も踏まえて調査票に印をつけて回答する方法である。10点法などの直接評価法

に比べ、項目数が多いと、設問数が増大する欠点（項目数nの場合、設問数は $n(n-1)/2$ となる）はあるが、評価の判定ブレが少なく、評価者の訓練もほぼ必要ないという利点も多いのが特徴である。今回使用した調査票を図5に示す。今回の評価項目は7項目であり、設問数は21である。評価はテストドライバー4名で行い、設問順の影響を除外するために、実際の調査票では、設問の順番はランダム順とした。AHP法の特徴として、調査票の重要度項目には左の主要項目から9, 7, 5, 3, 1, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9と尺度がつけられており、この数値を使って重要度を算出する。

重要度分析の結果を図6に示す。分析にはAHPtools⁶⁾を利用した。重要度は相対値のため、4名分のデータについては、算術平均ではなく、幾何平均により分析した。分析結果は、サスペンション感（以後、サス感）Bが一番重要度が高く、以下サス感A, サス感C…となっている。ただし、ボディ剛性感のみが重要度が0.1を下回っていることから、乗り心地に対しての重要性は他の項目に比べ低いと判断し、総合評価での項目から除外することとした。

	左の項目が圧倒的によい	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	左の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	右の項目が中間	
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	
サス感A					○													サス感B
サス感A								○										サス感C
サス感A									○									サス感D
サス感A										○								走行感A
サス感A											○							走行感B
サス感A												○						ボディ剛性感
サス感B													○					サス感C
サス感B																		サス感D

図5 乗り心地官能評価項目の重要度調査票（一部）

AHP法による乗り心地評価項目の重要度分析結果(4名幾何平均)

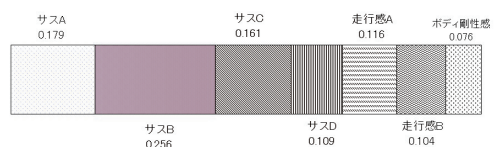


図6 乗り心地官能評価項目の重要度分析結果

2.3.2 相関分析による官能評価項目の機械的項目への置換

重要度分析で官能評価項目が7項目から6項目になったが、これらに機械的データとしての振動項目を加える場合、振動項目と相関性の高い情報があると、次項で説明する総合評価で影響が加重され、適切な結果が得られない。そこで、前項の分析結果から6項目に絞られた官能評価項目の中で、振動項目と置換可能な項目があるかどうかを見極めるために、乗

り心地評価の上位データに内在する共通性を考慮し、乗り心地の官能評価が上位にあるデータ群による相関分析を行った。使用した走行データ数は10である。振動データには、独立成分分析後の波形ピーク値を使用している。

相関分析の結果を表2に示す。分析にはMicrosoft Excel 2013を使用した。分析の結果、「前後振動－サス感A」と「上下振動－走行感B」の間に相関係数（絶対値）が0.9以上と高い相関性が見られた。また、左右振動は全般的に官能項目と相関係数（絶対値）が0.5以上と一定の相関性がみられることを考慮し、官能2項目（サス感A、走行感B）を振動3項目（上下・左右・前後）に置き換えることとした。

AHP法と相関分析により、当初の「官能7項目」から「官能4項目」へと評価項目を絞り込むことができた。

表2 官能評価項目と振動3項目の相関分析結果

機械\官能	サス感A	サス感B	サス感C	サス感D	走行感A	走行感B
上下(G)	0.43	-0.15	-0.15	-0.15	0.12	-0.91
左右(G)	0.76	0.53	0.53	0.53	0.66	-0.80
前後(G)	-0.98	-0.73	-0.73	-0.73	-0.88	0.63

2.4 両側T法による車両評価システムの開発

前項までの結果をもとに、車両の総合評価システムに使用する手法を検討した。協力企業担当者へのヒアリングから、必要な要件としては、

- ・従来の官能評価による総合評価と同等の評価精度
- ・新たな走行データによる総合評価予測が可能
- ・評価項目の総合評価に与える影響度が見える

が挙げられ、各種の予測手法を検討した結果、評価システムの構築には、両側T法を使用することとした。両側T法で使用する数式を図7に示す。

両側T法は、田口玄一氏により体系化された品質工学の手法であり、同様の手法である重回帰分析と比べて、

- ・品質工学で安定性の指標である「SN比」を利用して線形の総合評価値の推定式を導出可能
- ・推定式を使って、新たなデータによる評価値予測が可能
- ・項目数（変数）に比べて、データ数が少ない場合でも、分析が可能

という特徴がある。そこで、両側T法により総合評価値推定式の導出を行うこととした。

推定式算出のために使用した走行データ数は16で、評価項目は、官能4項目+振動3項目に加え、3.項で示した実験条件2種類（サスペンション有・無、車速3パターン）も加えている。分析にはExcel上で動作するT法分析ツール⁷⁾を利用した。分析の結果、評価システムを表す推定式は、図8に示すように、最終的には9つの項からなる線形式となった。なお、各項目の係数値Aiの具体的な数値は、秘匿情報も含まれるため、省略する。

$$r = M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_l^2 \tag{1}$$

$$\beta_j = \frac{M_1 X_{1j} + M_2 X_{2j} + \dots + M_l X_{lj}}{r} \tag{2}$$

$$S_{Tj} = X_{1j}^2 + X_{2j}^2 + \dots + X_{lj}^2 \tag{3}$$

$$S_{\beta j} = r \cdot \beta_j^2 \tag{4}$$

$$V_{ej} = \frac{S_{Tj} - S_{\beta j}}{l - 1}$$

$$\eta_j = \begin{cases} \frac{1}{l} \frac{(S_{\beta j} - V_{ej})}{V_{ej}} & (S_{\beta j} > V_{ej}) \\ 0 & (S_{\beta j} \leq V_{ej}) \end{cases} \tag{5}$$

$$Y_i = \frac{\eta_1 \times \frac{X_{i1}}{\beta_1} + \eta_2 \times \frac{X_{i2}}{\beta_2} + \dots + \eta_k \times \frac{X_{ik}}{\beta_k}}{\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_k} \tag{6}$$

i: 評価項目 (1~k)
 j: サンプル番号 (1~l)
 r: 有効除数
 M: 値数値 (真の総合評価点)
 βj: 比例定数
 S_{Tj}: 全変動
 S_{βj}: 比例項変動
 V_{ej}: 誤差分散
 ηj: SN比
 Yi: 総合評価予測値
 X^{*ij}: サンプルjの評価項目iにおける、規格化(生データ-標準データ平均値)データ

図7 両側T法で使用する数式

総合評価推定値＝

$$A_1 \times \langle \text{サス感B} \rangle + A_2 \times \langle \text{サス感C} \rangle + A_3 \times \langle \text{サス感D} \rangle + A_4 \times \langle \text{走行感A} \rangle + A_5 \times \langle \text{振動X} \rangle + A_6 \times \langle \text{振動Y} \rangle + A_7 \times \langle \text{振動Z} \rangle + A_8 \times \text{実験条件(サスペンション)} + A_9 \times \text{実験条件(車速)}$$

※Ai: 各項目の係数(SN比の関数)、⟨ ⟩は生データを規格化後の値

図8 総合評価推定式

3. 評価システムの検証

前項で得られた総合評価推定式により、実際に新たに収集した走行データ3種（乗り心地の上位、中位、下位）について、走行条件（サスペンション、車速）は同一とし、従来行われている「官能評価7項目」による総合評価値と、本研究で開発した評価システムである「官能評価4項目+振動3項目」による総合評価推定値を比較した。その結果を図9に示す。

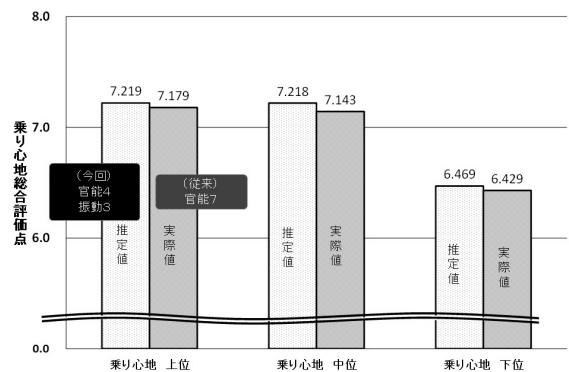


図9 乗り心地評価推定値の検証

推定値は従来の官能のみの評価方法による評価値（実際値）より若干高めに出ているものの、点数差は0.1点未満であり、導出した推定式の有効性が確認できた。このことは、従来の官能評価のみで評価していたものを、一部を客観的な測定値で代替できることを意味しており、テストドライバーの負担を軽減でき、残った官能評価項目に注力できる。なお、総合評価の推定値に与える影響が強い項目は、総合評価推定式の係数値を見ることで判断することができる。

今回開発した評価システムでの推定式により、走行データにないような実験条件や振動データ、官能評価値のパターンで乗り心地の総合評価の予測にも利用できることから、例えば、総合評価推定値を特定の値に設定した場合に振動値がどの程度の値に収まれば良いか、実験条件となる機械部品の種類を複数用意した場合などに、乗り心地予測値から最適な選定を行うなどの利用が可能である。また、評価システム構築に使用した分析は、Excel上でほぼ実行できるため、導入も比較的平易と考えられる。

開発した評価システムの現時点での課題としては、下記の点が挙げられる。

- ・官能評価項目の変更があった場合には、改めてAHPによる重要度分析が必要となる。
- ・官能評価項目を増やす必要がある場合、そのままでは対比較法での組み合わせが膨大なものになるため、現実的ではない。評価項目を何らかのグループ化した上で、組み合わせを少なくする対策が必要になる（多重でのAHP法の活用）。
- ・官能評価項目から置換できる機械的情報をすべて見つけることができれば、理論的には、官能評価情報を不要にした形での総合評価も可能である。

今後は、推定値の精度向上等とともに、上記の課題にも対応することで、システムの実用度を高める予定である。

4. まとめ

本研究により、乗り心地の官能評価データと代表的な機械情報である振動データを統合した総合評価が可能となる車両評価システムを開発した。特に振動データと相関性の高い官能評価項目をいくつかの振動データに代替できたことで、官能評価項目数を減らして、評価者の負担も減らすことができた。

この研究成果については、協力企業への技術指導に活用するほか、官能評価を実施している食品製造業や農畜産業界など他の分野での活用を目指す。

謝辞

本研究を進めるに当たり、走行データ等の収集に協力を頂いた株式会社ワークム北海道、分析方法について助言を頂いた、専修大学商学部 高萩栄一郎教授および和歌山大学システム工学部 鈴木新講師に、記して感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 内田他：T法による自動車乗心地の定量化，品質工学会第16回品質工学研究発表大会論文集，pp.254-257，（2008）
- 2) 小泉他：人体動特性を考慮した乗り心地評価，日本機械学会 Dynamics and Design Conference2000，（2000）
- 3) 諸橋他：路面性状測定車による乗り心地評価の精度検証，測量調査技術，日本測量調査技術協会，pp.106-112，（2002）
- 4) 村田昇：【入門】独立成分分析，東京電機大学出版局，246PP.，（2005）
- 5) 木下栄蔵：入門AHP，日科技連，160PP.，（2000）
- 6) 高萩栄一郎，中島伸之：Excelで学ぶAHP入門，オーム社，162PP.，（2005）
- 7) 鈴木真人：試して究める！品質工学MTシステム解析法入門，日刊工業新聞社，206PP.，（2012）

木造共同住宅の防音構造用鋼材設計手法の開発

戸羽 篤也, 飯田 憲一, 廣田 誠一*

The Design Technique of a Steel Plate Which Used for Sound-Insulation in a Wooden Apartment House

Atsuya TOBA, Ken'ichi IIDA, Tomohito HIROTA*

抄 録

木造共同住宅で求められる防音性を低コストで実現するため、天井に鋼材を配置した防音構造に着目し、目標とする低い周波数域の防音効果を得る鋼材の設計手法を開発した。防音効果周波数は、防音構造を構成する鋼材の見掛け弾性と天井板の面密度を変化させたときの系の固有振動数で見積もり、試験施工によってその遮音性を評価した。

キーワード：レジリエント・チャンネル、木造共同住宅、低コスト防音工法

Abstract

In order to research a low cost construction method of sound-insulation in a wooden apartment house, we focused to the soundproof structure that put a steel plate on the ceiling, and we developed the design technique of steel plate acquiring the sound isolation effect at low frequency range. We estimated the sound isolation effect frequency with the characteristic frequency of the structure when changing the outward elasticity of steel plate and the area density of a ceiling board which constitute soundproof construction, and we carried out insulation evaluation by the trial construction.

KEY-WORDS : Resilient Channel, Wooden Apartment House, Low Cost Soundproof Construction

1. はじめに

木造共同住宅の住居者を対象に調査したアンケートによると、居住環境で最も不満を感じるのは隣接住居から伝わる音に関するものが多いとの報告がある^{1,2)}。このため、共同住宅の建築では、階の上下および隣接の住居間の遮音性に配慮した工法が採用される。一般的に、遮音性を高めるには建築構造物のインピーダンスを大きくするのが効果的とされ、床や壁の厚さ、重量、剛性等を増大させることで遮音性を高める方法が採用されるが、その分だけ費用がかかるので施工費が高くなる。

本研究は、本道の資源活用も視野に入れ、良質な木造共同住宅を建築するための低コストで遮音性の高い工法の開発を

目的とする。本報は、階の上下における生活音の防音対策の一つとして、下階の天井に鋼材と天井板を組み合わせる施工する防音構造を対象に鋼材部材の設計手法を開発し、その防音効果の検証試験を行ったので報告する。

2. 研究の目的

共同住宅の音に関する不満として、壁を通じて隣接戸から伝わる音と、床および天井を通じて階上から階下へ伝わる音が考えられる。このうち、木造共同住宅ではその構造上、階上から階下に伝わる生活音の防音対策が困難とされ、これを対象とした有効な防音工法が開発が求められる。

階の上下で伝わる防音法の基本的な考え方は、上階の床構

* 道総研北方建築総合研究所

* Hokkaido Northern Regional Building Research Institute

事業名：重点研究

課題名：良質な木造共同住宅のためのローコスト高性能遮音工法の開発（平成23～25年度）

造を工夫して音源を遮るか、下階の天井の構造を工夫して音の伝達を低減させるか、あるいはその両者による複合的な防音構造を採るかのいずれかであるが、本報は、天井の構造を工夫して遮音性を高める工法の開発を対象とする。

図1に階上の床から階下の天井に至る部位の一般的な構造を模式図で示す。階上の床を梁の上に配置された「根太」と呼ばれる支持材で支え、階下の天井を小梁材に取り付けることで、構造上は階上の床から階下の天井への音の伝達は絶縁される。しかし、床板と天井板に挟まれた空間にある空気が音の振動を伝えるので、これを低減させるためにこの空間に防音材を充填したり、構造部材の重量や剛性を増大させたりする対策が採られる。

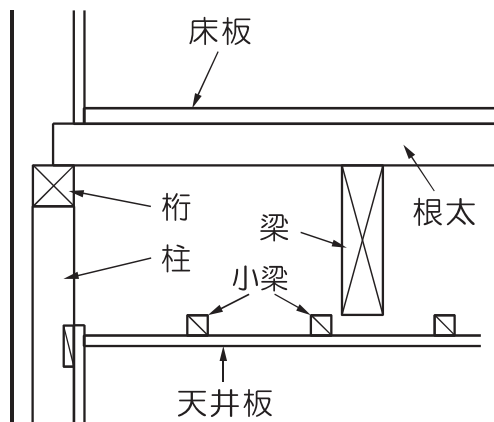


図1 木造建築の床および天井の構造



図2 天井に施工する遮音構造用鋼板
(レジリエント・チャンネル)

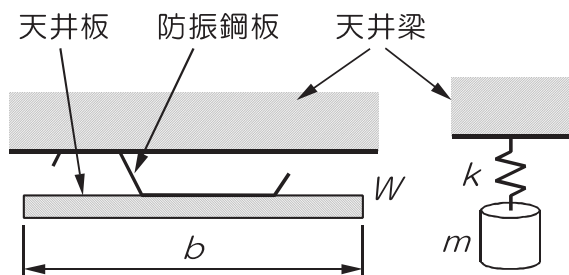


図3 防振鋼板を用いる防音構造の振動モデル

このほか、階上から階下へ伝わる生活音を低減させる工法として、二重にした天井板を鋼板で接続し、その弾性を利用して目標とする音域の振動を吸収する方法が知られている。図2は、この工法で用いられる遮音構造用鋼板（以下「防振鋼板」という）の外観写真である。この防振構造では、防振鋼板の剛性や天井板の面密度を変化させることで防音構造系の固有振動数を設計することが出来る。

共同住宅の防音対象となる生活音として、小物を床に落とした時に生じるような高い周波数域の成分を多く含む音や、人が歩く時の足音のような中・低周波数域の成分を主とする音など、様々に対策が求められる。

本研究では、階上の床板と階下の天井板の支持構造の工夫と防振鋼板を用いて、特に階の上下で伝わる生活音のうち防音対策が難しいとされる低周波数の音域の遮音性を研究対象とした。具体的には31.5Hzの音域で-5 dBの遮音効果を得ることを目標とした。

3. 防振構造の力学

防振鋼板を用いる防音構造において、吸収する音の周波数は、この構造固有の振動数の影響を受ける。この防音構造は、図3に示すように防振鋼板とこれに吊り下げる天井板からなる弾性-質量系モデルで固有振動を考えることができる。

1本の防振鋼板が受け持つ天井板の幅 b [m] に対して長さ L [m] の防振鋼板が支える天井板の重量 W [N] は、天井板の面密度（単位面積当たりの質量）を ρ [kg/m²] とすると、

$$W = \rho g b L \quad (1)$$

となる。この重量が荷重として加えられたことによって天井板が δ [m] だけ変位したとき、防振鋼板の鉛直方向における単位長さ当たりの見掛けの弾性係数（以下「防振ばね定数」という） k [N/m] と、このばねに吊り下げられた天井板に相当する質量 m [kg] は、

$$k = \frac{W}{\delta L} = \frac{\rho g b}{\delta} \quad (2)$$

$$m = \frac{W}{gL} = \rho b \quad (3)$$

で得られる。防振鋼板に負荷をかけない状態から天井板を吊り下げて釣り合った状態にしたときの天井板の変位を δ とし、加振等により天井板が釣り合い位置から変位 e [m] だけ変位したとき、以下の力の釣り合い式が成り立つ。

$$m \frac{d^2 e}{dt^2} = mg - k(\delta + e) \quad (4)$$

このときの天井板の振動について振幅 a [m]、振動数 f [Hz]

または1/s)とし、この振動を角速度 ω [rad/s]の正弦波で近似できるとき、天井板の変位は以下の式で表現できる。

$$e = a \sin \omega t$$

ただし、 $\omega = 2\pi f$ (5)

(4)式天井板の加速度を示す変位 e の2階微分は、

$$\frac{d^2 e}{dt^2} = -a\omega^2 \sin \omega t \quad (6)$$

となるので、(5)式と(6)式を(4)式に代入して、

$$-ma\omega^2 \sin \omega t = mg - k(\delta + a \sin \omega t)$$

$$a(k - m\omega^2) \sin \omega t = mg - k\delta \quad (7)$$

(2)式に(3)式を代入すると、(7)式の右辺は0になるので、

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

(2)式、(3)式および(5)式の関係から、防振鋼板と天井板からなる防振構造の固有振動数は、

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{あるいは} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}} \quad (9)$$

として、防振鋼板の防振ばね定数あるいは天井板を吊り下げたときの変形変位から算出することができる。

4. 実験方法

4.1 防振鋼板の静解析

市販されている防振鋼板（商品名；SR-Bar）は、図4に示す断面形状をもつ。施工は、上側の幅17mmの面（以下「根太固定面」という）を天井の支持梁材（以下「天井根太」という）に固定し、下側の幅34mmの面（以下「天井板取付面」という）に天井板（石膏ボード）をタップネジで固定する。

前章で示した防振鋼板の防振ばね定数を得るため、天井板取付面に荷重を加えた時の防振鋼板の変形による天井板変位について数値計算による静解析を行った。

静解析は、3次元CADシステムで3D形状データを作成し、同システム付属の有限要素法による線形応力-歪解析機能を利用した。計算条件は、天井根太を剛体と仮定し、荷重は防振鋼板が支える天井板の面積相当の重量を天井板取付面に一様な分布荷重として与えた。具体的には、一般の天井板に用いられる石膏ボードの比重（概ね1cm²当たり1g）から天

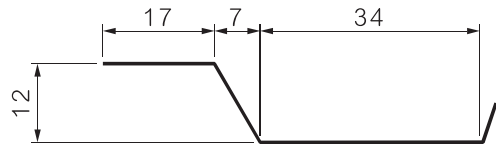
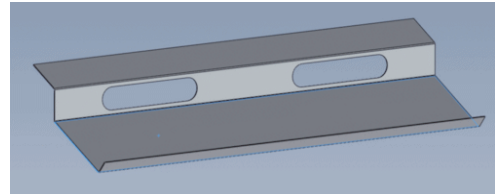
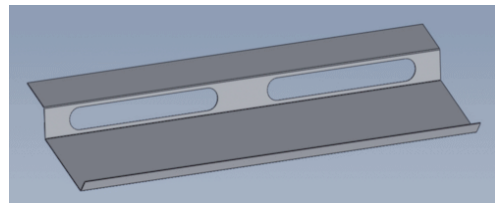


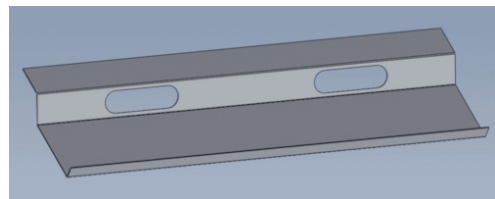
図4 現行防振鋼板の断面形状



a) 現行品 0.5 (1/2)



b) 0.25 (1/4)



c) 0.75 (3/4)

図5 防振鋼板の有効材料率

井板の面密度を10kg/m²とし、通常、防振鋼板は455mm間隔で設置されることが多いので1本の防振鋼板が受け持つ天井板の幅（図3のbで示す長さ）を455mmとした。天井板取付面には、この長さに相当する天井板の重量が一樣に加わると仮定すると、天井板1枚につき約1.3kN/m²の面荷重が作用することになる。実際の施工では天井板を数枚重ねることも考えられるので、数値解析では境界条件として3.0kPaの面圧を設定した。

防振鋼板の形状は現行製品の断面形状を基本とし、板厚を0.4mm、0.5mm、0.6mmの3水準に、折り曲げ部の角Rを0.5mm、1mm、2mm、3mmの4水準に変化させて形状モデルを定義した。現行の防振鋼板には、根太固定面と天井板取付面との接続部（以下「接続面」という）に窓が開けられているが、これは防振鋼板の剛性を調整するためのものと考えられる。そこで、静解析のモデルにも長さの異なる窓を配置し、それらの防振ばね定数への影響を調べた。現行品の窓は、100mmごとに幅50mmの窓が開けられているが、静解析では100mmごとに幅25mm、50mm、75mmの窓を開けたものと窓を設けないものの4水準に変化させた。ここで、接続面に窓を開けることによる材料比率を、窓のないものは1.0、窓の幅が25mm、50mm、75mmのものに

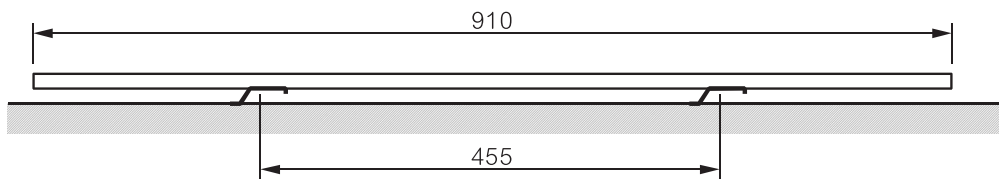


図6 防振構造系の固有振動数の計測実験方法

ついてそれぞれ0.75, 0.5, 0.25となるので、これらを図5に示すように「有効材料率」と定義する。

天井板の変形変位は、数値計算の結果から最も変形量が大きくなる天井板取付面の先端付近の変位を、最も応力の加わる部位を選んで主応力値を読み取り、天井板重量による荷重に対する鋼材の降伏許容応力との関係を確認した。また、これらの関係から、防振鋼板の断面形状因子の防振ばね定数への影響について検討した。

4.2 遮音構造の特性計測試験

前項の防振鋼板の特性解析の結果から、目標とする周波数音域の振動を吸収するための防振鋼板の断面形状の設計、および防振構造系の固有振動数の設計手法を確立するため、防振鋼板と天井板で構成する防振構造系の固有振動数を数値解析結果から推定した。

計算モデルは、図6に示すように、高剛性定盤の上に455 mmの間隔で防振鋼板を固定し、これに天井板に見立てた板を取り付ける条件とし、天井板に荷重を加えた時の天井板の変位から防振ばね定数を求めて防振構造系の固有振動数を推定した。現行の防振鋼板の形状による固有振動数解析の結果を参考に、防振の目標とする固有振動数が得られそうな防振鋼板の断面形状をいくつか考案し、同様の解析計算により防振構造系の固有振動数を推定した。これらの解析結果から、低周波数音域での防振効果が期待できる断面形状の一つ選定して防振鋼板を試作し、これを用いて防振構造系を組み立てて加振実験を行なった。試験に供した防振鋼板は長さ600 mmのものを2本用意し、これらを解析計算と同じモデルになるように455 mmの間隔で木製定盤に固定した後、その上部に天井板に見立てた木製板供試材を防振鋼板にタップねじで固定した。試験に供した天井板は、石膏ボードの面密度に合わせて1枚当たり10 kg/m²となるように板厚を選び、その寸法を910 mm×600 mmとした。加振後の天井板の変位は、非接触式変位センサの出力信号をデジタルストレージオシロスコープに取り込み、振動波形1周期当たりの時間を計測して、固有振動数に換算した。

4.3 防音性能の計測

試作した防振鋼板と天井板を試験施工し、音の伝播特性を計測して、その遮音性能を評価した。試験施工では455 mm間隔に配置した天井根太に試作した防振鋼板を固定し、これ

に天井板をタップねじで取り付けした。振動の計測は、天井根太と天井板それぞれに加速度センサを取り付け、インパクトハンマーで加振したときの天井根太と天井板の振動波形を取り込んでこれらを比較して遮音性能を評価した。

5. 実験結果と考察

5.1 防振鋼板の静解析

現行品に準じた解析モデルによる防振鋼板の弾性特性の解析結果の表示例を図7に示す。図7-a)は、防振鋼板の形状定義の表示であり、これに拘束力等の境界条件を設定する。図7-b)の根太固定面の矢印表示は、この面が3軸方向に拘束されていることを示す。天井板取付面の矢印表示は、この矢印の方向に面荷重が加えられることを示しており、この面に一様な大きさの圧力が加えられている状態を示す。図7-c)と図7-d)は数値解析結果を示すコンター図(数値分布を色分けして表示した図)である。図7-c)は負荷による変位の分布を、図7-d)は応力の分布を示している。図7-c)の赤色で示される天井板取付面の先端部分(モノクロ印刷では同図上方の色の濃い部位)で変位が最も大きくなる。一方、図7-d)から接続面の根太固定面側付け根部分に最も大きな応力が生じている。これらの部位から変位、応力を読み取り、板厚、有効材料率、折り曲げ角Rとの関係を分析した。

荷重を加えたときの防振鋼板の変位および応力に対する板厚の違いによる影響を図8に、有効材料率の違いによる影響を図9に、折り曲げ部角Rの違いによる影響を図10に、それぞれ解析結果の一例を示す。

板厚が薄くなるにともない、また有効材料率が小さくなるにともない、同じ荷重条件下で変位、応力いずれも大きくなる傾向が認められる。いずれも、板厚あるいは有効な板幅の減少によって防振鋼板の断面係数が小さくなり、結果的に防

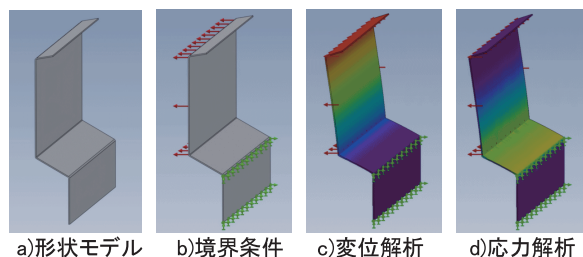


図7 静弾性解析結果の一例

振鋼板の剛性低下にともなって、負荷に対する変形が増大したためである。

材料の断面係数は、曲げ荷重に対する抵抗力の指標となるもので、この防振鋼板に関しては荷重の方向に対して同方向となる板厚の2乗と垂直方向となる板幅に比例する。曲げ荷重に対して変位および応力は断面係数に反比例するので、板厚が20%増えると変位は0.69倍になり、逆に板厚が20%減ると変位は1.56倍になる。図8の板厚0.5mmの変位および応力に対して板厚0.4mmと板厚0.6mmの変位および応力の変化を見ると、概ねこの割合で増減している。

また、同じ曲げ荷重に対して材料の幅が半分になると変位は2倍に、逆に材料の幅が2倍になると変位は半分になる。図9の有効材料率0.5のときの変位および応力に対して、有効材料率が0.25と1.0の変位および応力を比較すると概ねこの割合で増減している。

図10の曲げ加工部位の角Rの影響については、今回の解析で与えた境界条件の範囲では、防振鋼板の変形に対する大きな影響は認められなかった。

一方、天井板の吊り下げ荷重に対する耐性については、板厚0.4mm、有効材料率0.25のとき天井板取付面に3.0kPaの荷重に対して最大応力が250MPaを超えるが、それ以外は200MPa以下である。一般的な鋼板の最大応力は400MPa程度であるが、材料の弾性限度等など安全性を考慮した許容応力は200MPa以下とされるので、想定している使用条件の範囲では材料強度からみた耐荷荷性を満たしていると考えられる。

5.2 遮音構造の防振特性

防振鋼板と天井板による防振構造系の固有振動数の数値解析とその検証試験を行った。図11は、防振鋼板と天井板からなる防振構造系固有振動数の数値解析モデル表示例である。計算条件は4.2項の図6で示した構成とし、2本の防振鋼板を455mmの間隔をおいて設置し、その下に天井板に見立てた幅910mmの板材を接続するモデルとした。防振鋼板の長さ天井板の奥行きは200mmとした。数値計算の境界条件は、防振鋼板の根太固定面を3軸方向に固定し、荷重は、天井板の下方全面に天井板の面比重に当たる0.1kPaの分布荷重として与えた。

現行の防振鋼板を用いた数値解析により荷重を加えたときの天井板の変位から防振構造系の固有振動数を求めた結果を図12に示す。天井板の厚さが増えるにともない防振構造系の固有振動数が高くなり、その増大傾向はほぼ直線的な傾向が得られた。防振構造系の固有振動数は、3章の(9)式で、荷重に対する天井板の変位の平方根に反比例することを示した。また、前項で天井板の変位は、板厚の断面係数に反比例し、断面係数は板厚の2乗に比例することを示した。これらの関係を整理すると、防振構造系の固有振動数は、有効材料比が同じ鋼材であれば板厚に比例することが導かれる。

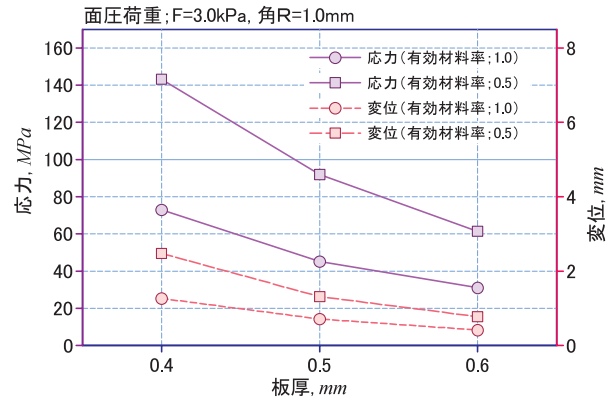


図8 弾性特性に及ぼす板厚の影響

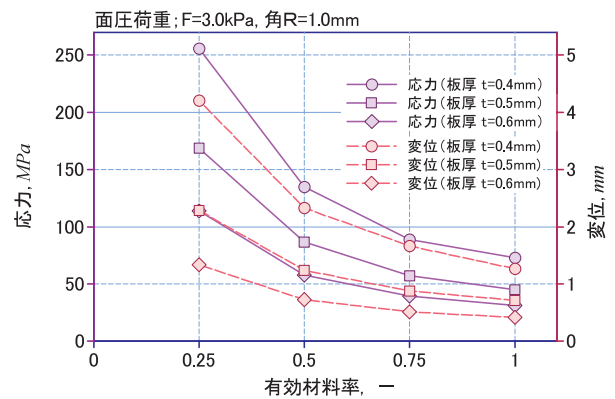


図9 弾性特性に及ぼす有効材料率の影響

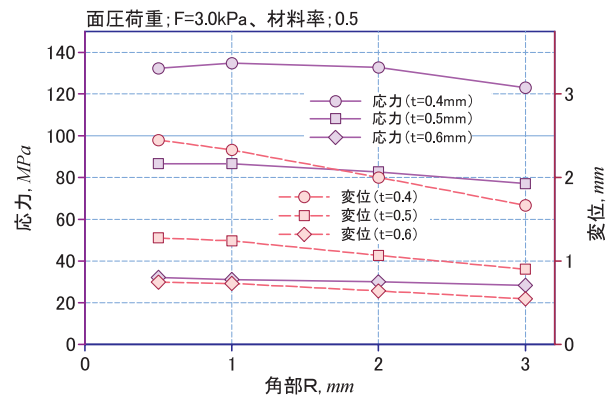


図10 弾性特性に及ぼす折り曲げ部角Rの影響

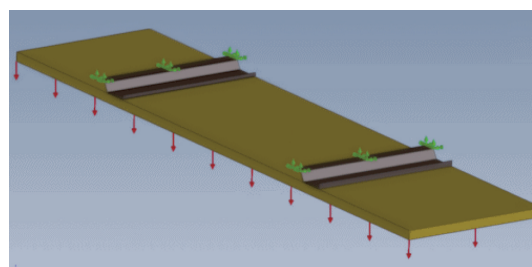


図11 防振構造系の固有振動数解析の表示例

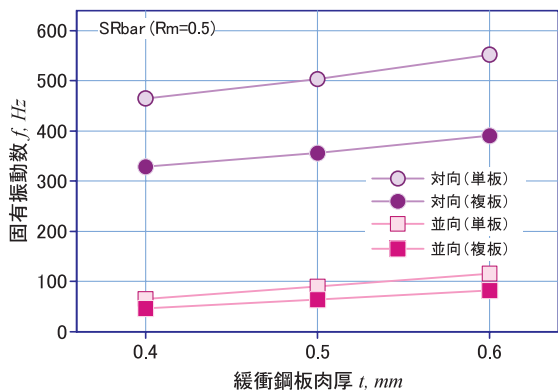


図12 遮音構造系の固有振動数見積り

図12に示した結果を検証すると、2本の防振鋼材の向きを同じ向きとした「並向」条件のときは、この関係が成り立っているように見えるが、防振鋼材の向きを向き合わせにした「対向」条件のときは、板厚と固有振動数の増減は比例関係になっていない。

防振鋼板の天井板取付面に荷重が加わると、主に防振鋼板の接続面に曲げ荷重が作用して曲げ応力に応じた変位を示すが、この現象を大きな視野で見ると、根太固定面と接続面のなす角度の変化により、両面境界の折り曲げ線を中心に回転しているように見える。天井板の変位は、数値計算モデルの性質上、この回転による変形の鉛直方向成分を計測したことになる。2本の防振鋼板が並向のときは、個々の防振鋼板の変形による鉛直方向および水平方向の成分変位は同じなので、鉛直方向成分変位をそのまま全体の天井板変位としても差支えない。しかし、これらを対向とした場合、2本の防振鋼板の鉛直成分変位は同じだが、水平方向成分はお互いに逆向きとなるため、この計算モデルのように2本の防振鋼板を1枚の天井板に接続した条件では、防振鋼板の水平方向成分変位に対して天井板による拘束力が生じることになる。この拘束力によって防振鋼板が変形しにくくなり、見掛け上は防振鋼板の剛性が高くなるので、同じ荷重を与えたときの天井板の鉛直方向の変位が小さくなる分だけ、防振構造系の固有振動数は高くなる傾向を示す。図12の対向条件による解析結果で高い固有振動数となったのは、この理由によるものと考えられる。さらに、(9)式は、天井板の面密度の平方根に反比例することを示しているが、同図で天井板を単板としたときと複板（2枚）としたときとで固有振動数が概ね1：0.7の比率になっていることから裏付けられる。

しかしながら、現行の断面形状をもつ防振鋼板で目標とする振動吸収周波数を得ることは困難であると推定される。そこで、防振構造系の低周波数域での固有振動数をより低くするために、現行品よりも剛性が低くなるような防振鋼板の形状をいくつか考案した。具体的には、図13に示すように天井板取付面に至る角Rを半径6mm、9mmにしたもの、接続

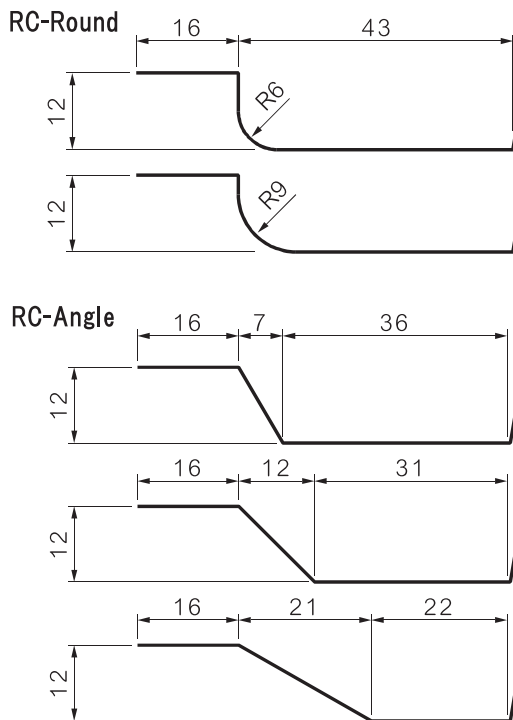


図13 解析に用いた防振鋼板の断面形状

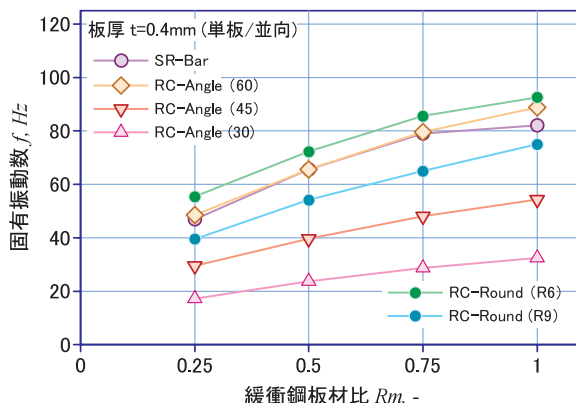


図14 各種鋼板による遮音構造系の固有振動数見積り

面の角度（現行品は60°）を概ね45°、30°とした断面形状を考案し、数値解析によりこれらの防振鋼板を用いて天井板を設置したときの防振構造系の固有振動数を見積もった。

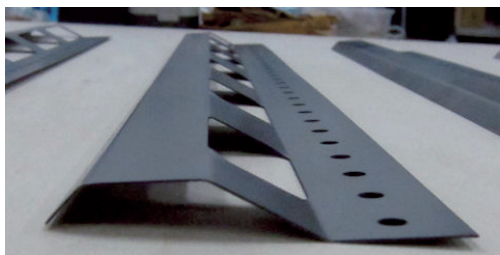
図14に、板厚0.4mmの防振鋼板を並向施工し、面密度10kg/m²の天井板を1枚取り付け付けた条件で、各断面形状について計算した防振構造系の固有振動数の見積り値を示す。現行のSRバーに対して同等以上の見掛け剛性を示したのは連結部の角度を現行とほぼ等しい60°としたものと角Rを6mmとしたものであった。それ以外の角Rを9mmとしたもの、連結部の角度を45°、30°としたものを使用することにより、現行品より低い周波数域で防振効果が得られることがわかった。

これらの解析結果を参考に、図13で根太固定面と接続面とのなす角度が30°の断面形状を選定して長さ600mmの防振鋼

板を製作した。試作した防振鋼板の外観を図15に示す。図15-aの断面形状写真で、右側(孔をあけた面)が根太固定面、左側が天井板取付面である。また、図15-bに示すように、接続面に窓孔を設けないものと窓孔の形状を変えて穴あけしたものを用意した。有効材料率は図の左から0.25, 0.5, 0.75, 1.0となる。加振実験は、製作した防振鋼板を455mm間隔に並向に設置し(図16-a)、この上に910×600mmの天井板(面密度8.5kg/m²)を1枚、あるいは2枚取り付けて上から加振したときの天井板の振動変位を非接触式変位計で計測し(図16-b)、デジタル・オシロスコープに取り込んだ振動波形から天井板の振動周期を読み取った(図16-c)。

実験により計測された系の固有振動数を図17に示す。防振鋼板接続面の有効材料率が增大し、剛性が高くなるにもない計測される固有振動数が高くなる傾向が確認された。また、天井板が1枚のときと比較して、天井板を2枚にしたときの系の固有振動数が約0.7倍となった。(9)式で、系の固有振動数は鋼板の剛性の平方根に比例し、天井板の面密度の平方根に反比例することを示したが、計測結果は概ねこの傾向が確認された。図の破線で示した曲線は、天井板の面密度を10kg/m²とした条件で計算した固有振動数の推定値である。これに比べて計測値が若干低めの結果となったが、概ね目標に近い防振周波数を示しており、防振鋼板の剛性と天井板の面密度により所要の吸振周波数を得るための設計手法の有効性が確認された。

また、実験の結果から有効材料率が1でも30Hz程度の固有振動数が得られた。有効材料率が1の防振鋼板は窓孔の加



a) 断面形状



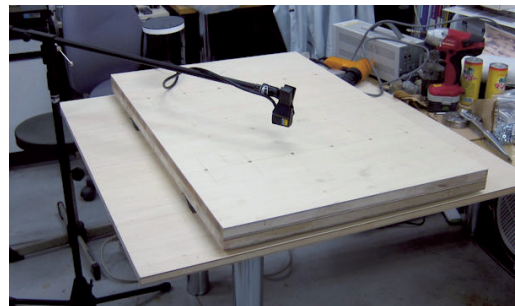
b) 窓孔形状の異なる防振鋼板

図15 試作した防振鋼板の外観

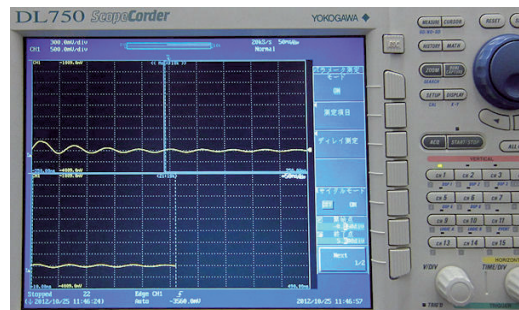
工を要せず、曲げ加工だけで製作できる鋼板でも目標とする音域の遮音性に効果のある構造を構築できる可能性を示している。これにより、施工コストの低減にもつながるので有利である。



a) 防振鋼板の設置



b) 天井板相当の板と変位計の設置



c) 振動波形から周期読み取り

図16 固有振動数計測試験の様子

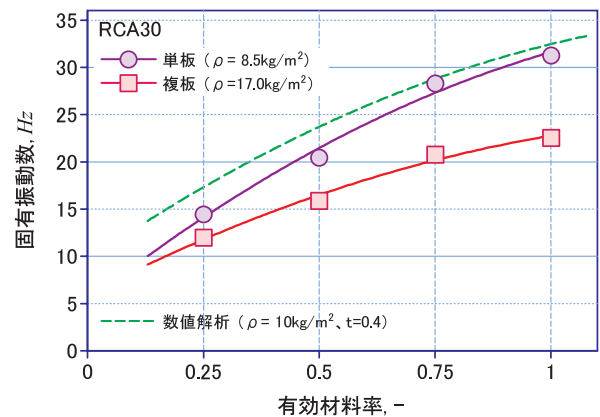


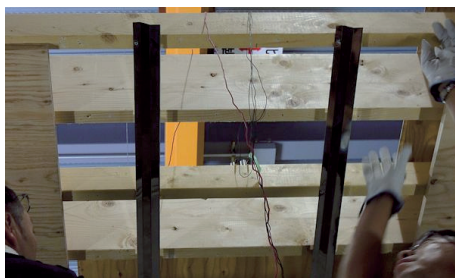
図17 試作した防振鋼板による遮音構造系の固有振動数

5.3 防振性能の計測

前項までの検討結果に基づき、根太固定面と接続面とのなす角度を30°、有効材料率1（穿孔加工なし）、板厚0.4mmの仕様による防振鋼板を製作し、これを使用した試験施工によって遮音性能の検証試験を行った。

図18の写真は検証試験の様子を示す。高さの異なる2系列の梁構造が系ごとに455mm間隔で施工され、背の高い方が床板を支える床根太、背の低い方が天井板を支える天井根太である。試験は、天井根太に製作した防振鋼板を根太と垂直に2本固定し（図18-a）、これに910×910mmの天井板を取り付けた（図18-b）。根太と天井板それぞれに加速度センサを取り付け（図18-c）、インパクトハンマーで根太を加振したときの根太と天井板の振動を計測し、その波形を比較することで遮音性の評価を行った。

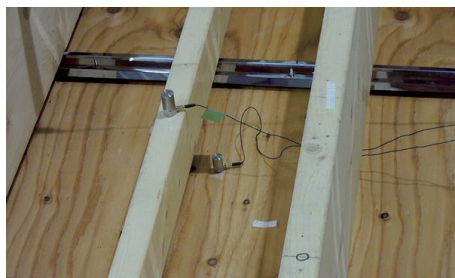
図19に計測結果の一例を示す。図の横軸は周波数（単位；Hz）をとり、縦軸は音圧レベル（単位；dB）をとったものである。図19-aは、天井根太に直接天井板を取り付けて試験したときの天井根太と天井板の振動波形の比較である。高周波域で振動周波数によって振幅の違いが生じているが、今回の研究の目的とする低周波数では振動分析波形が一致している。これに対して、図19-bに示す防振鋼板を用いた場合



a) 試作した防振鋼板の取り付け



b) 天井板の取り付け



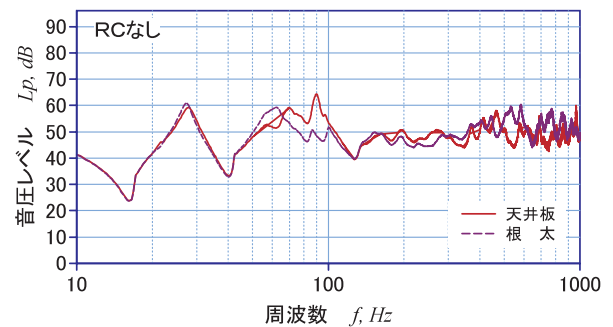
c) 加速度センサの取り付け

図18 試験施工による遮音性能試験の様子

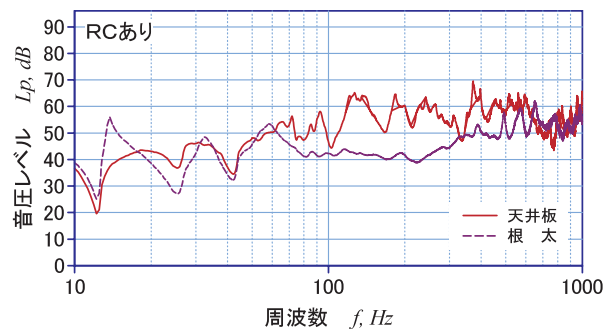
は、二つの振動分析波形に差が認められたが、防振鋼板による明確な遮音効果は認められなかった。この原因を究明するため、床・天井の建築構造や木材の弾性特性などを分析した結果、天井根太の剛性が十分でなく、加振により低周波数域で天井根太そのものが大きく振動するため、防振鋼板の弾性による防振効果が発揮されなかったのではないかと結論に至った。

そこで、天井根太の高さを変えて剛性を高めた条件で根太に直接天井板を取り付けた条件で加振試験を行い、天井根太の剛性による振動分析波形の違いを比較した。図20に、結果を示す。同図で「2×6根太」は図19-bの根太の振動分析波形と同じものである。一方、「高剛性根太」は天井根太の高さを増して補強した条件の振動分析波形であり、2×6根太とは異なる特性を示している。

図21に、天井根太を高剛性のものに代えた条件の遮音性試験結果の振動分析波形を示す。図21-aは、天井根太に直接



a) 防振鋼板なし



b) 防振鋼板あり

図19 振動解析による遮音性評価の例

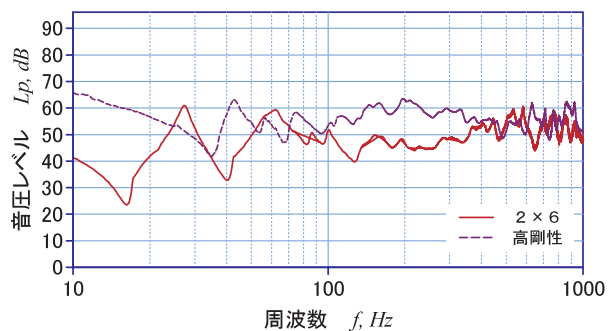


図20 天井根太の剛性による振動解析結果の比較

天井板を取り付けて試験したときの天井根太と天井板の振動波形の比較である。先に示した低剛性根太による試験結果と同様に、低周波数では振動分析波形が一致している。これに対して、図21-bの防振鋼板を用いた場合は、根太と天井板の振動分析波形に大きな差が認められ、約22Hzの周波数域で防振鋼板による遮音効果が得られた。これにより、防振鋼

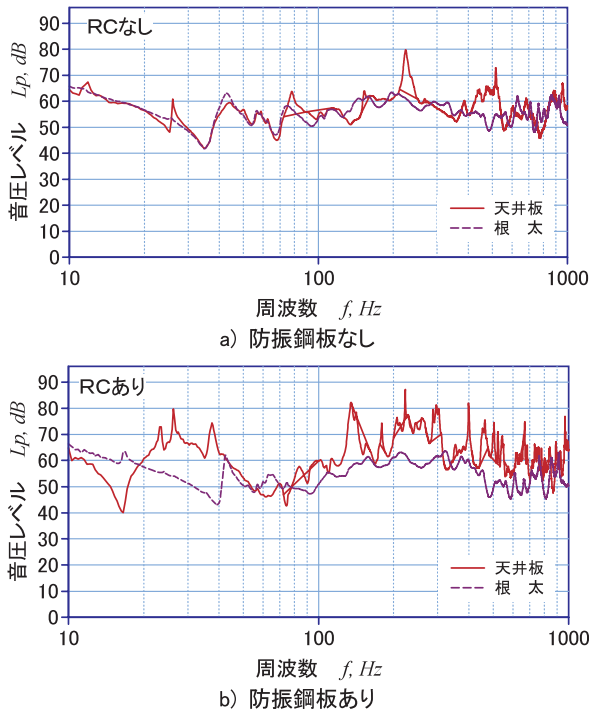


図21 振動解析による遮音性評価の例（高剛性根太）

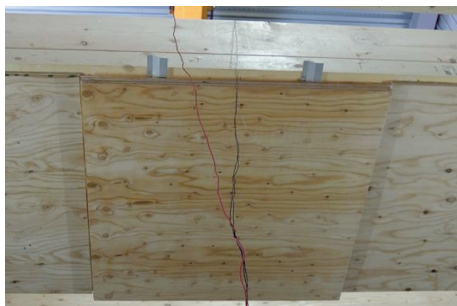


図22 天井板の枚数を増やして防振効果を検証

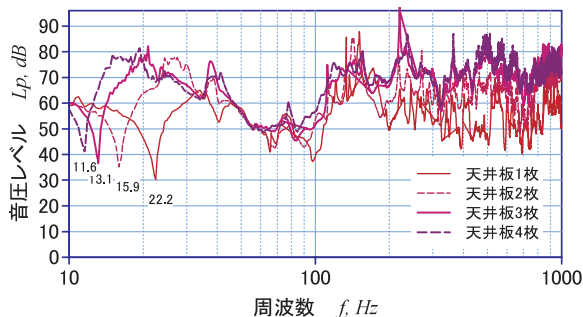


図23 防振性能に及ぼす天井板の枚数（面密度）の影響

板を使用して天井構造の遮音性効果を得るためには、天井根太の剛性を高くする必要があることが分かった。

さらに、天井板の面密度の遮音性への影響について調べるため、図22に示すように天井板の枚数を変えて試験を行い、図23の振動分析波形に示す結果を得た。天井板の面密度を増大させるに連れて防振ピーク周波数が低くなる傾向が認められ、天井板が1枚のときの振動抑制周波数のピークが22.2Hzであったのに対して、重量を4倍にしたときのそれが11.6Hzと、およそ半分になっている。この結果は、(9)式で示した固有振動数が質量の平方根に反比例するという関係式と一致しており、遮音構造系の防振鋼板の見掛けのバネ定数が決まれば、天井板の重量の調整することで目標とする遮音周波数域に対する遮音構造を設計できることが明らかになった。

6. まとめ

木造共同住宅の低コスト遮音工法の開発に関連して、防振鋼板の弾性と天井板の重量を利用した遮音構造に着目し、低い周波数域の遮音性に効果を得るための防振鋼板の設計手法を明らかにした。

防振鋼板に荷重が加えられたときの応力-歪状態を静解析により分析し、防振鋼板の強度の検証と弾性特性の把握を行った。分析の結果、強度は十分に確保されるが、現行の防振鋼板では本研究で目標とする周波数域で遮音効果が得られにくいことを明らかにした。

目標とする低周波数域での遮音性の獲得を目標に、防振鋼板の見掛けの剛性を小さくするための断面形状や窓孔等の異なる防振鋼板を考案し、その弾性特性解析を行った結果、低周波数域の遮音性に効果が期待できる断面形状を見出した。

これをもとに防振鋼板を試作し、試験施工による遮音性能試験を行った結果、防振鋼板による遮音構造を有効にするためには、これを支持する天井根太の剛性を高くする必要があることが分かった。また、目標とする周波数域に対して、防振鋼板の仕様が決めれば、天井板の面あたりの重量を変化させることで調整が可能であることを明らかにした。これらにより、防振鋼板を用いる防音構造の設計手法を開発した。

引用文献

- 1) 廣田誠一, 平光厚雄, 秋津裕志, 朝倉靖弘, 戸羽篤也, 飯田憲一, 田中 学; 「木造公営住宅における床衝撃音遮断性能向上に向けた基礎実験」, 日本音響学会 建築音響研究委員会 4月度研究会 (2013.4)
- 2) 廣田誠一, 平光厚雄, 秋津裕志, 朝倉靖弘, 戸羽篤也, 飯田憲一, 田中 学; 「木造共同住宅における床衝撃音遮断性能向上に向けた基礎実験」, 日本建築学会 第86回北海道支部研究発表会 (2013.6)

研究ノート

Research Note

北海道におけるセンサネットワーク用無線技術に関する基礎研究

宮崎 俊之, 高橋 裕之, 奥田 篤, 橋場 参生

Basic Research on Low Power Wireless Technologies for Sensor Network Using in Hokkaido

Toshiyuki MIYAZAKI, Hiroyuki TAKAHASHI, Atsushi OKUDA, Mitsuo HASHIBA

抄 録

センサネットワークは省エネルギー化・生活利便性向上の課題解決にあたり、重要な要素技術である。センサネットワークで使用する省電力無線モジュールは、性能向上により伝送距離が飛躍的に伸びており、広大な北海道での活用が期待されているが、雨・雪などによる電波の減衰が著しいことから、安定した通信ネットワークを設計・構築するためには、降雨・降雪時の電波減衰のデータ蓄積、および北海道の環境でも安定した通信を行うための技術開発が必要である。本研究では悪天候時や着雪時でも安定したセンサネットワークを構築するために必要な電波減衰量データを蓄積し、省電力無線ネットワークの設計・構築のための基本技術の開発を行った。

キーワード：センサネットワーク, 省電力無線, 電磁波応用, ZigBee

1. はじめに

温度・電力などのセンサと電池、無線機を組み合わせる自律稼働とし、それらを結びつけることで広範囲の情報を取得・活用するセンサネットワークは、センシング技術の発達と電池の高容量化、また無線技術の発達により、スマートグリッドなどの用途において急速な発展を遂げている。特に無線モジュールの発達は目覚ましいものがあり、小型軽量・見通し通信距離10km・電池寿命数カ月～数年といった製品が、比較的安価に入手可能となっている(図1)。

北海道におけるセンサネットワークの活用を考えた場合、電力監視用スマートグリッド、農業用や土木用のテレメータ、医療用ボディアエリアネットワーク(BAN)など幅広い分野での使用が予想される。センサネットワークでは「通信の安定性」が重要な要素となるが、1年の約3分の1が雪に覆われる北海道においては、降雪時における屋外での通信途絶が大きな問題となる。

通信途絶の要因としては、「システム設置時には通信が行えていた」ものが、気象の変化や着雪により電波の減衰が生じ、当初の想定よりも通信距離が短くなることがあげられる。

そのため本研究では、センサネットワークで使用可能な周波数帯において、①降雪や着雪による電波減衰量を明らかにし、②実環境下における無線モジュールの評価方法を検討した上で、③安定したセンサネットワークを構築するための基礎技術の開発を行った。

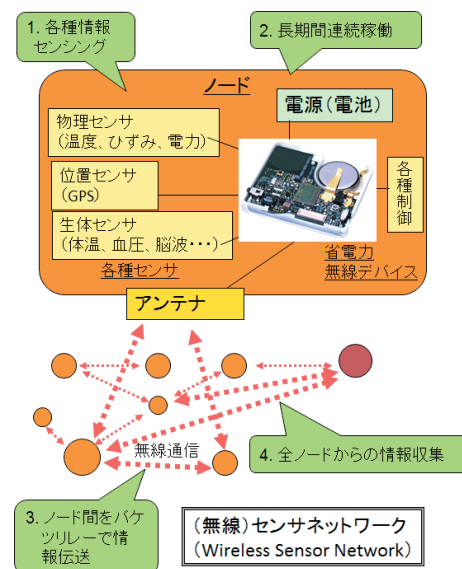


図1 センサネットワーク(概念図)

事業名：経常研究

課題名：北海道におけるセンサネットワーク用無線利用に関する基礎研究(平成24～25年度)

2. 無線伝搬への影響

2.1 天候影響の定点観測

センサネットワークによるデータ伝送手段には、設置時のネットワーク設計が容易で、設置後は長期間にわたりメンテナンスフリーで稼働することが求められる。このため、自律的なネットワーク構築能力を持った省電力無線が使われることが多い。

2012年に電波法が改正され、920MHz帯が使用可能となった。省電力無線で主に使用されるのはこの920MHz帯と2.4GHz帯の二つの周波数帯である。これらはともにUHF (Ultra High Frequency : 極超短波) 帯の電波であるが、2.4GHzには水分子による大きな電波吸収があるため、気象による影響は二つの周波数帯で大きな差があることが予想される。本研究では二つの電波帯の吸収特性の違いを明らかにするため、屋外にアンテナを設置し、晴天時・降雨時・降雪時(含む着雪時)の電波減衰量を計測した。

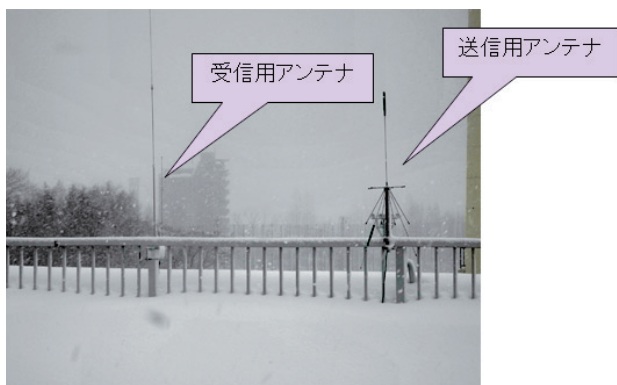


図2 電波減衰量定点計測用アンテナ

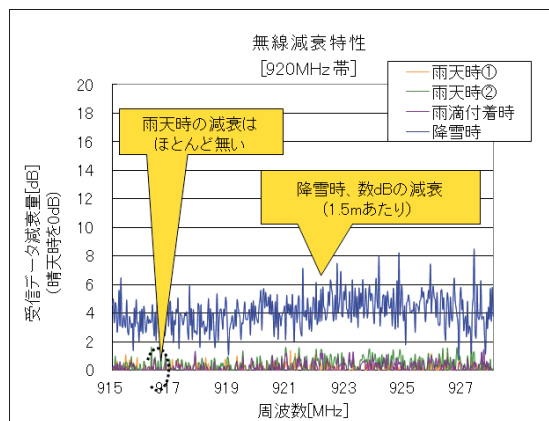


図3 TG機能付きスペクトラムアナライザ

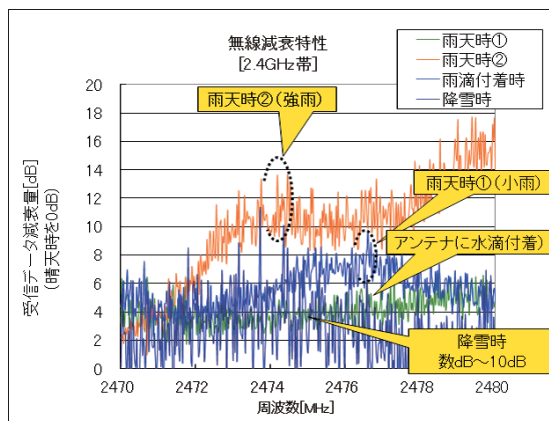
工業試験場の屋上に920MHz帯、2.4GHz帯の送受信が可能な一対のアンテナを設置し(図2)、これに接続したトラッキングジェネレータ(TG)機能付きスペクトラムアナライザ(図3)を用いて、送信・受信アンテナ間の電界強度を計測した。晴天時、降雨時および降雪時のデータを比較するこ

とで、天候による減衰量を求めた。なお計測に当たっては、電波法に定められた微弱無線の範囲内で行った。

雨天時、アンテナへの雨滴付着時および降雪時における電波減衰量の測定結果を図4に示す。両周波数帯ともに降雪による減衰が確認され、920MHz帯では数dB程度、2.4GHz帯では数dB~10dB程度の減衰があることが分かった。また2.4GHz帯では降雨による減衰が非常に大きい、920MHz帯ではほとんど影響が出ないことが確認された。以上の実験から天候の変動に対して、2.4GHz帯に対する920MHz帯の優位性が明らかとなった。



(a) 920MHz帯



(b) 2.4GHz帯

図4 920MHz帯、2.4GHz帯における電波減衰量

2.2 電界マップの作成

デジタル無線通信では、信号を変調することで電波に情報を載せる。たとえば携帯電話では位相偏移変調が、無線LANではスペクトラム拡散などの変調方式が使用されている。省電力無線では業界団体が変調方式を統括しており、周波数帯と用途に応じて、製品ごとに様々な変調方式が使用されている。電波によるデジタルデータ通信では、変調された電波を復調し、「1」、「0」の判別を行う。アナログ通信とは異なり、電波強度がある程度以上ではノイズが無い通信が行える

が、ある限界の電波強度（スレッシュホールド）を下回ると復調時の雑音が急激に増加し、通信不能となる。このスレッシュホールドは変調方式やエラー訂正方式により異なるため、無線モジュールごとに評価・確認する必要がある。また送信機からの電波強度だけでなく、受信機側のアンテナ特性や高周波回路の性能、設置場所周辺の建築物などを考慮し、通信品質を総合的に評価する必要がある。

本研究では実使用環境において、天候変化時の通信品質への影響を調べるため、GPSと無線モジュールを搭載した可搬型の電界モニタを開発し、任意の地点におけるRSSI（Received Signal Strength Indication：無線モジュールにおいて計測した相対的な受信電界強度値）を表した電界マップを作成し、受信アンテナや設置環境の影響も含めた総合的な評価を可能とした（図5）。

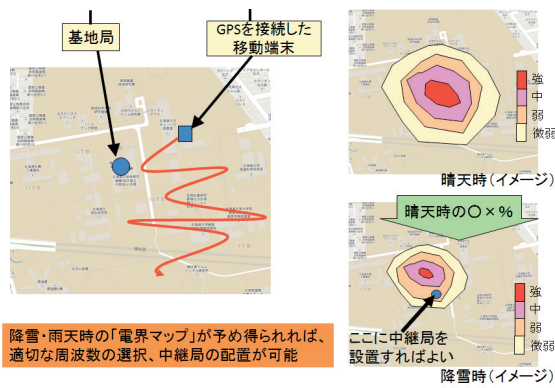


図5 電界モニタを用いた電界マップ取得（概念図）

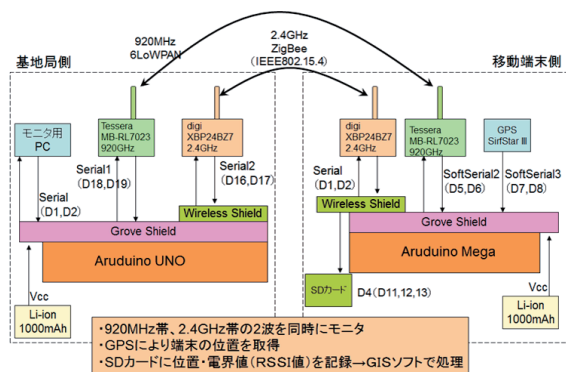
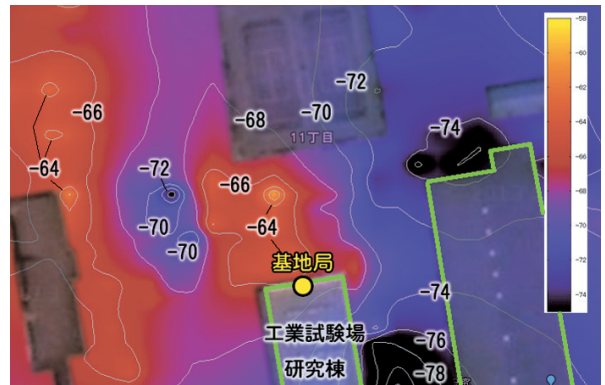


図6 開発した電界モニタの構成

図6に開発した電界モニタの構成を示す。920MHz帯の評価には家電制御通信規格の6LoWPAN無線モジュール、2.4GHz帯の評価にはZigBee無線モジュールを使用した。移動端末側（子機）にはGPSを搭載し、920MHz帯と2.4GHz帯のRSSIとともに位置情報を取得し、これらの情報を子機側ではSDカードに保存し、同時に基地局（親機）側へ無線伝

送することでモニタPC内に同時保存する構成とした。



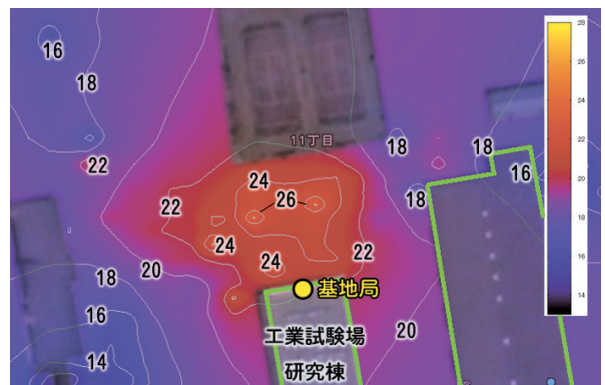
(a) 2.4GHz 晴天時



(b) 2.4GHz 降雪時



(c) 920MHz 晴天時



(d) 920MHz 降雪時

図7 電界マップの取得例（基地局は研究棟3階に設置）

電界モニタを用いて取得した電界マップ例を図7に示す。基地局は工業試験場の研究棟3階に設置し、子機は研究棟北側の周辺(屋外)を移動し、計測を行った。計測は同一日に実施し、降雪時の視程は1.5km、1時間当たりの降雪量は2cmであった。なお取得したRSSI(デシベル値)は数値が大きいほど電界強度が強いことを表す(RSSIは機種依存のため、両モジュールの数値を直接比較することはできない)。

図7の電界マップより、以下のことが分かった。

- ① 降雪による影響は、明らかに920MHz帯の方が少ない。
- ② 降雪時のRSSI減衰量は場所により異なる(雪による散乱、反射等の影響がでていると考えられる)。
- ③ 降雪の直接的な影響ではないが、建物の背後などの電界強度は920MHz帯の方が落ち込みが少なく、2.4GHz帯の方が電波の直進性が強い。

これらの知見をまとめた無線モジュールの選定ポイントを表1に示す。

表1 無線モジュールの選定ポイント

	920MHz帯モジュール	2.4GHz帯モジュール
主なプロトコル	独自プロトコル、6LoWPAN	ZigBee、Wi-Fi
1台当たりの価格	1万円以上	数千円程度
見通し通信距離(カタログ値 晴天時)	～数100m前後	～数10m、～10kmなど多数
降雪影響	あり	あり(920MHzより大)
降雨影響	(ほとんど無し)	あり(降雪と同程度以上)
製品入手性	難あり	良好
想定される使用形態	常時通信・間欠通信	間欠通信
建物背後への通信	状況により可能	難しい
周辺無線LANの影響	なし	混信による通信断の可能性あり
開発環境等	開発事例が少ない	開発事例多数
その他	国により使用周波数が異なる	世界共通の周波数帯

2.3 センサネットワーク設計への活用

電界マップを用いることで、天候による影響をあらかじめ予測することが可能となり、センサネットワークの安定性向上に活用することができる。また電界マップを多数取得し、解析することで、将来的には晴天時の電界マップから降雪時の減衰量を予想することができると思われる。

電界マップを活用したセンサーネットワークの設計ポイントを下記に示す。

- ① 屋外での通信を行う場合、降雨降雪により必ず電波減衰が発生する。通年で安定した通信を行うためには、通信モジュールの間隔に十分な余裕(マージン)をもたせる必要がある。
- ② 通信可能距離は、無線モジュールの性能以外にも、気象状況、無線モジュールの設置場所、周囲の建築物などの影響を受ける。晴天時および降雨・降雪時の電界マップを作成し、電界強度状況を地図上で表示・確認し、送信器、受信器、中継器を適切に配置する。
- ③ 省電力無線モジュールに使用できる電波は、周波数帯に

より天候に対する影響が異なる。より高い通信安定性を得るためには、複数の周波数帯の併用(周波数ダイバーシチ化)や、常に複数の伝搬経路を確保する(空間ダイバーシチ化)を行うなど、冗長性をもたせた設計を行う。

3. 無線モジュール特性評価

センサネットワークの重要な応用先として、身体にセンサを取り付け、生体情報のセンシングをネットワーク化し、健康増進や医療に活用するBAN構想が(独)情報通信研究機構などで検討されており¹⁾、無線技術の仕様がIEEE802.15.6として国際標準化されている。また牛などの家畜に体温センサを取り付け、繁殖や健康管理などに活用することも道内外の研究機関で実用研究が進んでいる²⁾。このような生体に無線モジュールを取り付ける場合、無線モジュールの姿勢(アンテナの向き)が予期できないため、固定間通信とは異なる観点から無線モジュール選定を行う必要がある。

2.4GHz帯無線モジュールから放射される電波の指向性パターンを図8に示す。このモジュールは(a)ダイポールアンテナ、(b)組込み型アンテナの2種類のアンテナを選択できる。電波の指向性は利得によって表現され、この値が大きいほど指向性が鋭いことを示す。

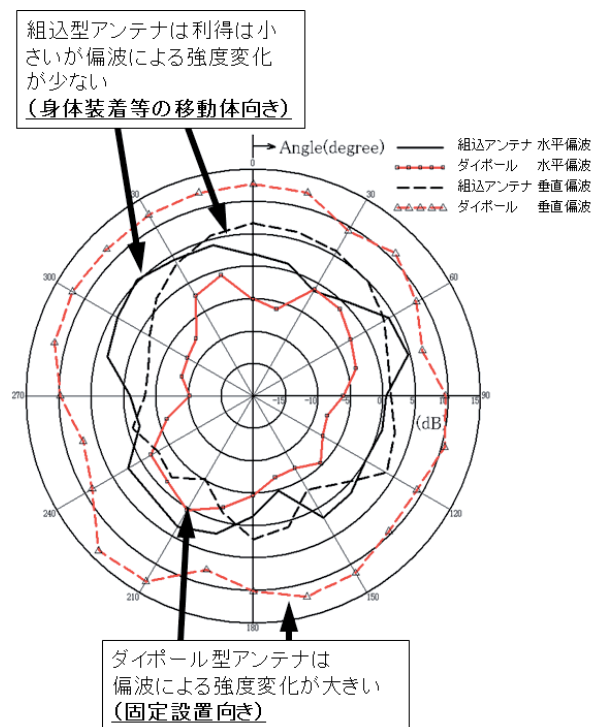


図8 省電力無線モジュールのアンテナ特性

図8の指向性パターンからは以下のことがわかる。

- ① 最も放射強度が大きいのは、ダイポールアンテナの垂直偏波成分であり、送信機を中心に等方向に放射される。

- ② 一方、ダイポールアンテナからの水平偏波成分の放射は小さく、偏波による電界強度の差が大きい。
- ③ 組み込み型アンテナは放射電界強度は小さいが、垂直・水平の両成分の差異は小さく、アンテナ姿勢や照射方向による差異が小さい。

固定設置の場合は、無線モジュールから放射する電波の最大放射方向を通信相手先に向けることができるため、ダイポール型の様に指向性を持つアンテナを用いることができる。しかし、生体に装着する場合は通信相手先との位置関係（相対角度）は常時変わることが予想されるため、等方向に電波を放射・受信する組み込み型アンテナを選択することが望ましい。

4. まとめ

無線によるデータ通信の安定性は設置環境に大きく依存し、使用目的、要求仕様、コストの面から適切なネットワーク設計を行う必要がある。本研究では、北海道においてセンサネットワークを安定的に使用するために必要となる、電波減衰量のデータを取得し、実環境における通信距離評価方法の開発を行った。

開発した評価手法はセンサネットワーク構築時に汎用的に活用することが可能である。今後は北海道内のシステム製造業や、センサネットワークを使用するユーザに対して技術移転を行う予定である。

謝辞

本研究で使用したミリ波ネットワークアナライザは経済産業省北海道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により整備されました。また本研究で使用したEMIレシーバは財団法人JKA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) 李還幫：医療ヘルスケアのためのボディエリアネットワーク標準規格の策定と開発事例一，特技懇誌No.271，pp.53-60，特許庁技術懇話会（2013）
- 2) 後藤貴文：人に優しくスマートな放牧管理を実現する無線生体管理システムの研究開発，ICTイノベーションフォーラム2013 予稿集，総務省（2013）

ハードディスクからの希土類元素回収

富田 恵一, 若杉 郷臣, 高橋 徹

Recovery of Rare Earths from Hard Disk Drive

Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI, Touru TAKAHASHI

抄 録

廃棄物として処分されているレアメタル資源を回収する目的で、使用済みハードディスクドライブ（HDD）に使用されているネオジム磁石から希土類元素を酸化物として回収するため、熱減磁、粉碎分級、酸溶解、沈殿分離などの各工程について検討した。その結果、350℃で完全な減磁が可能であり、磁石に施されているニッケルめっき層は粉碎により粒度が大きな分画に濃縮され、分級で分離できることが明らかになった。また、沈殿分離工程では最適な水酸化物を生成するpHおよび沈殿生成条件を見いだした。構築したフローにより、HDDに使用されているネオジム磁石から純度90%の希土類酸化物を得た。なお、このときの希土類元素の回収率は約90%であった。

キーワード：ネオジム磁石、回収、レアメタル、都市鉱山、廃棄物

1. はじめに

薄型テレビ、携帯電話、パソコン等の廃電化製品の電子基板、スピーカー、モーターにはAu, Pd, Ni, In, Ta, Co, 希土類元素などの貴金属やレアメタルが含まれている。今までに生産された電化製品に含有するレアメタル等の総量は世界の流通量の相当量に達することから、集荷された廃電化製品は、近年、「都市鉱山」と称され注目されている¹⁻¹³⁾。わが国では、レアメタルのほとんどを輸入に頼っているが⁸⁻¹³⁾、これら輸出国の経済発展に伴う国際価格の高騰や自国優先による輸出規制などから、資源の安定確保が極めて難しくなっており、「都市鉱山」に対する期待が急速に高まっている。

一方、北海道には蛍光管、電池、携帯電話、薄型テレビなどを集荷している企業が数社あり、小型家電リサイクル法の施行とともに小型家電の回収も始まってきている。しかし、非鉄金属の精錬所が道内にないこともあり、現在、単に保管されているか、道外の精錬所に輸送している例が多い。その中で、使用済みハードディスクドライブ（以下HDDと記載）には磁気ヘッドを駆動するためのボイスコイルモーターが使用されており、ほとんどの製品でネオジム磁石が使用されている。ネオジム磁石にはNdのほかPrや耐熱性を向上させる

目的で価格が高いDyなどが含まれている。磁石にはこれらの希土類元素が比較的高濃度含有されており、コストを抑えて回収可能と考えられるボイスコイルモーター用磁石からの希土類元素の湿式回収について検討を行った。

2. 実験

2.1 試料

一般家庭および事務所から廃棄された3.5インチHDDを解体し、取りだしたボイスコイルモーターのネオジム磁石を以下の試験に供した。

2.2 ネオジム磁石の性状

回収試験に先立ち、磁石の成分および性状を明らかにするために各種分析を行った。3.5インチHDDを解体した写真を図1に、HDDのボイスコイルモーターに使用されているネオジム磁石の一例を図2に示す。250℃で1h保持し減磁された磁石をアルミナ製乳鉢で微粉碎し、粉末X線回折法（以下XRDと記載）による化学形態分析を行い、さらにプレス成形し蛍光X線分析法（以下XRFと記載）のファンダメンタルパラメータ（FP）法により定性・半定量分析を行った。さらに試料粉碎物0.2gをビーカーに取り、塩酸5mLおよび硝酸2.5mLに溶解後100mLメスフラスコに定容して、随時希釈を行ってICP発光分光分析法（以下ICP-AESと記載）お

事業名：経常研究

課題名：廃小型家電の電子部品に含まれる貴金属およびレアメタルの回収技術に関する研究（平成23～25年度）

およびICP質量分析法（以下ICP-MSと記載）により定量を行った。



図1 3.5インチハードディスクドライブの解体



図2 ボイスコイルモーター用ネオジム磁石

2.3 熱減磁の検討

磁石からの希土類元素の回収にあたり、磁力は各種処理を行う上で、処理装置に付着してしまうなど大きな障害を生じるため、減磁処理について検討した。ネオジム磁石はキュリー温度以上までの熱処理により減磁が可能であるが、含まれているDy濃度が高くなると高温時の保磁力が増加すること¹⁴⁾が知られており、実際の磁石を用いて熱減磁特性を確認した。試料を一定温度にした定温電気加熱器または電気炉に入れ、1時間保持し冷却後、最も磁束密度が高い磁石短辺端面中央近傍の磁束密度を測定した。また、熱処理時間の影響を調べるため、定温乾燥器と電気炉を用い一定の温度下で1時間熱処理し冷却後、磁束密度を測定し、さらに1時間熱処理を行い、合計2時間加熱後の磁束密度を測定した。

2.4 粉碎および分級によるめっき層の分離の検討

めっき層の物理処理による分離を検討するため、熱減磁後の試料をアルミナ製乳鉢を用いて粉碎した。このとき、脆く粉碎されやすい磁石本体と粘りのある金属箔のNiめっき層

を分離しやすくするため、粉碎するにあたって試料を乳棒でこすり潰さないよう注意しながら、叩く操作だけで粉碎するようにした。その後、目開き1.18mmと0.60mmの篩で連続的に分級して、>1.18mm、0.60-1.18mm、<0.60mmの各粒度毎の金属の定量を行った。各粒度毎にピーカーに分級後の全試料0.78g、2.21g、9.70gを取り、純水で試料を浸した後、時計皿をかぶせて注意深くそれぞれ10mL、20mL、50mLの塩酸を加え、加熱して分解させた後25mL、50mL、100mLのメスフラスコにて定容した。得られた各溶解液を適宜希釈後、ICP-AESによりNiを定量し、<1.18mm部分を合算し物質収支を計算した。

2.5 鉄と希土類元素の分離の検討

2.5.1 模擬液を用いた鉄とネオジムの沈殿分離の検討

磁石の酸溶解液に含まれる不要なFeを希土類元素から分離するため、水酸化物が生成するpHの差を利用した分離を試みた。ピーカーにFeおよびNdの酸溶解液をそれぞれ金属として10mgずつになるようにとり、pH毎にフタル酸塩、酢酸、中性りん酸塩のうち適当な各種緩衝液を加え、所定のpHになるまでアンモニア水（1+2）により沈殿生成した後、ろ別して固相は酸で再溶解し、固相および液相ともICP-AESによりFeおよびNdを定量して固液の分配率を計算した。

2.5.2 磁石を用いた鉄と希土類元素の沈殿分離の検討

減磁後、アルミナ乳鉢で微粉碎したネオジム磁石（めっき層も含む）0.2gを塩酸5mL硝酸2.5mLで溶解し、100mLに定容し分解液を調製した。50mLピーカーにこの分解液を5mLとり、2M酢酸アンモニウム溶液を1.5mL加え、純水で約25mLまで希釈して試験を行った。分離性の向上を目的に、アンモニア水を加えpH5.5の条件下、0.1%キトサン溶液を0.2mL添加して1h静置し、スラリーの性状を観察した。

また、さらなる沈殿の沈降性を向上させるため、沈殿生成後、加熱処理の検討を行った。すなわちピーカーに分解液5mLを取り、純水で約25mLまで希釈し、0.1M酢酸緩衝液0.1mLを加え、アンモニア水で所定のpH（4.0、4.5、5.0）にした後、時計皿をかぶせ、約200℃のホットプレート上で加熱した。さらに、加熱時間についても検討を行った。調整pHは4.0とし、90℃以上で15min、30min、60min処理し、0.1%キトサン溶液を0.1mL加え、沈殿のフロックを形成させた後、遠心分離（3000rpm、5min）により固液分離を行った。固相は硝酸5mLと少量の塩酸で沈殿を溶解し、液相にはそのまま硝酸5mLを加え、100mLに定容して、ICP-AESによりFe、Nd、Dyを定量して沈殿割合を算出した。

2.6 実際の磁石を用いた希土類酸化物の生成と物質収支の評価

検討で得られた結果をもとに、図3の処理フローで希土類

酸化物の回収試験を行った。希土類イオンは定量的に $RE_2(COO)_3 \cdot nH_2O$ (REE: 希土類元素Nd, Pr, Tb, Dyなど) を生成し沈殿する。沈殿は1000°C 1 hで加熱し¹⁶⁾、酸化物とした。それぞれの分析結果から酸化物換算して物質収支を計算した。

さらに、HDDを解体して得られたボイスコイルモーター1組から図4の処理フローで粗希土類酸化物の回収試験を行った。得られた酸化物はXRF (FP法) により元素分析を行い、酸化物換算して純度を確認した。

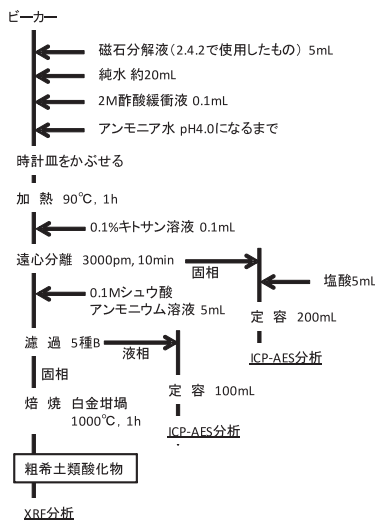


図3 磁石溶解液を用いた希土類酸化物の回収試験

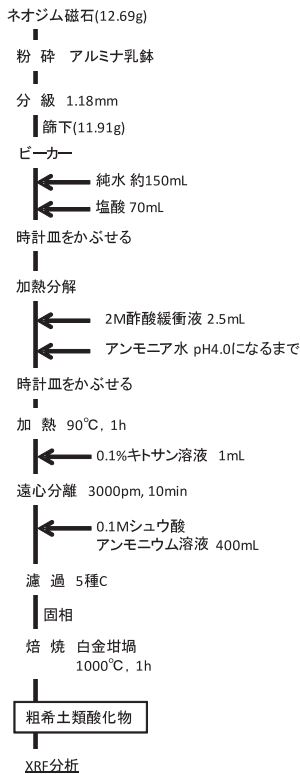


図4 実際の磁石を用いた希土類酸化物の回収試験

3 結果と考察

3.1 ネオジウム磁石の性状

今回調べたHDDの一例では、全体が612gでそのうちネオジウム磁石は10gで1.6%を占めていた。現在流通しているHDDの磁石の比率としては、おおむねこのオーダーと考えられる。この結果から、解体処理のみでも約1/60まで濃縮ができることが分かった。湿式処理が困難な場合、解体して減磁できれば、Fe, Ni, Bなど他の元素が含まれたままではあるが、低コストに希土類資源を保管輸送可能であると思われる。

磁石粉砕物の元素分析結果を表1に示す。多くの元素に分析上の干渉が見られたことから、ICP-AESやICP-MSでは干渉がない測定波長、質量数を使用して定量した。この結果より、ネオジウム磁石の主成分であるFe, Nd, Dy, Bが含まれているほか、めっき層であるNiのほか、各種微量添加物質および不純物と考えられるO, C, Pr, Co, Tb, Al, Nb, Si, Ga, Cuが0.05%以上の濃度で検出された。そのうち、Dy, Co, Al, Cu, Ga, Nbは機能を付加するため添加され、Pr, TbはNd原料の不純物と考えられる¹⁵⁾。いずれにしてもネオジウム磁石の典型的な組成であることが分かった。試料の粉末X線回折データを図5に示す。この結果からもネオジウム磁石 $Nd_2Fe_{14}B$ およびめっき層と思われる金属ニッケル相のみが同定され、磁石は主成分としては単一相からなっていると考えられる。

表1 ボイスコイルモータ用ネオジウム磁石の組成

元素	濃度(%)	分析法	元素	濃度(%)	分析法
Fe	63	A	Co	0.62	M
Nd	24	A	Tb	0.25	M
O	3.0	X	Al	0.21	M
Dy	2.1	M	Nb	0.13	X
C	1.8	X	Si	0.096	X
B	0.86	M	Ga	0.092	M
Pr	0.69	M	Cu	0.056	M
Ni	0.65	M			

分析法は、A: ICP-AES, X: XRF(FP), M: ICP-MS

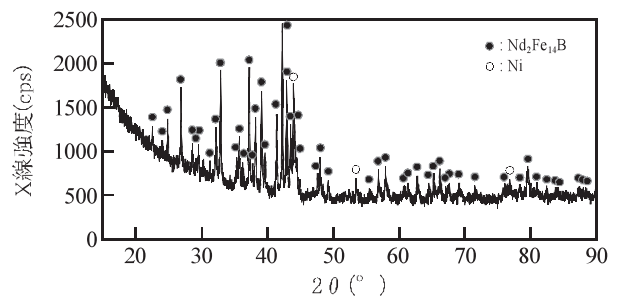


図5 ボイスコイルモータ用ネオジウム磁石のX線回折パターン

3.2 熱減磁の検討

図6に処理温度の影響の検討結果を示す。これより、今回試験したネオジム磁石Aは100℃処理でもすでに磁束密度の低下が始まっており、260℃では完全に消失している。ただし、使用されている磁石のDyやTbの含有量が高くなると、高温下でも保磁力が大きくなるとされており¹⁴⁾、別のHDDのネオジム磁石Bでの測定結果では260℃処理では磁力が残存しており、350℃処理で消失している。これより、多くの使用済みHDDを処理するためには、安全を考え、350℃での処理が望ましいと考えられる。図7に処理時間の影響についての結果を示す。100℃処理では2h処理でも磁束密度は10%程度しか低下していないのに対して、240℃処理では約90%低下している。さらに350℃処理では急速に減磁が起り、20分処理でほぼ完全に減磁した。また、熱処理後の磁束密度は処理時間を長くしても大きく変化せず、処理時間の影響は小さく低温での長時間処理を行っても磁力はある一定の値までしか低下せず、完全に減磁するためには高温処理が必須であることが分かった。これらの結果より、HDD用ボイスコイルモーターのネオジム磁石の熱減磁処理においては余裕を見て350℃で20min以上処理するのが望ましいことが分かった。

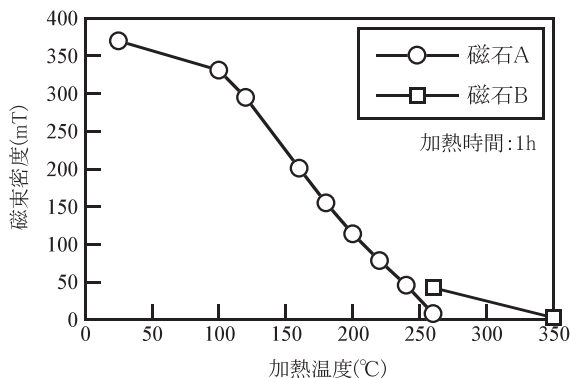


図6 ボイスコイルモータ用ネオジム磁石の熱減磁試験における温度の影響

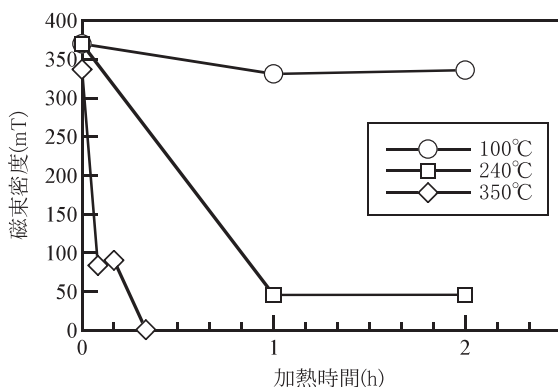


図7 ボイスコイルモータ用ネオジム磁石の熱減磁試験における加熱時間の影響

3.3 粉碎および分級によるめっき層の分離の検討

粉碎後の磁石の写真を図8に示す。磁石本体は容易に粉碎され粒状になっているが、めっき層は金属箔状に剥離している。これを、目開き1.18mmおよび0.60mmの篩で順次分級したときの量と含まれるNiの量を表2に示す。質量で6.0%の目開き1.18mm篩上部分に磁石全体に含まれるNiの約40%が含まれていた。これより、粉碎・分級法によってニッケルめっき層を効率よく除去できる可能性があることが分かった。



図8 粉碎後のネオジム磁石

表2 粒度毎の質量とニッケル含有量

粒度(mm)	量(g)	質量割合(%)	Ni含有量(g)	Ni含有割合(%)
>1.18	0.78	6.0	0.168	42.6
0.60-1.18	2.21	17.1	0.117	29.7
<0.60	9.70	74.8	0.109	27.7

3.4 鉄と希土類元素の分離の検討

3.4.1 模擬液を用いた鉄とネオジムの沈殿分離の検討

FeとNdの混合溶液を水酸化物生成により沈殿分離した結果を図9に示す。FeはpH4.5付近で固相への分配率が95%を超えてすでに全量沈殿しているのに対して、NdはpH4.0~5.5では液相に95%以上分配されており、5.5以上で沈殿が生成し始め、pH7でも完全には沈殿してないことが分かった。以上より、ネオジム磁石の酸分解液をpH制御しながら中和することによりFeとNdの沈殿分離の可能性を確認した。

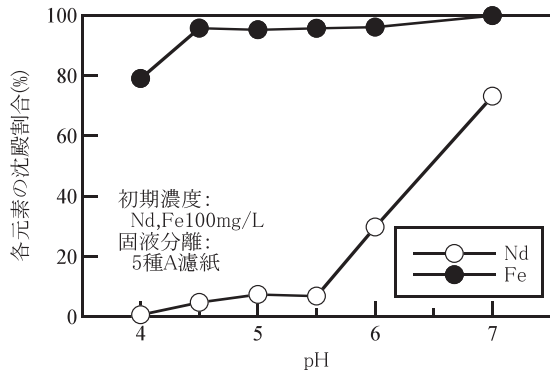


図9 FeとNdの水酸化物沈殿とpHの関係

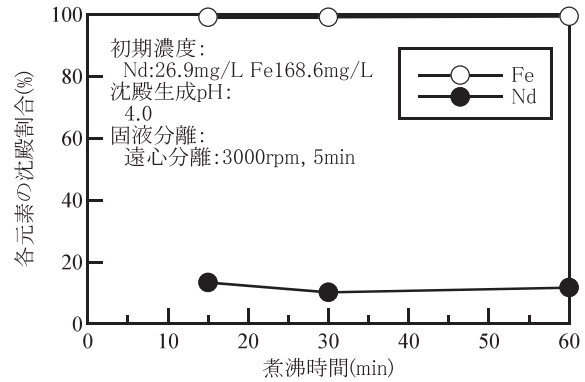


図11 ネオジム磁石の水酸化物沈殿時の煮沸時間の影響

3.4.2 磁石を用いた鉄と希土類元素の沈殿分離の検討

磁石を酸溶解した液について前節と同様の試験を行ったが、pH5.0では目視で確認できる水酸化鉄の沈殿は生成しなかった。原因は不明であるが、磁石に含有する他の成分が干渉して沈殿生成を阻害しているものと思われる。そこで、凝集剤を加えるなど沈殿のフロック形成の促進の検討を行った。キトサン添加の有無によるpH5.5での沈殿生成試験では、キトサン無添加では溶液は褐色になるが透明だったのに対し、キトサン添加により濁りが発生してフロックが形成されていることが分かった。

さらに、3.4.1項の結果から、希土類の沈殿が混入しにくい低pHで沈降しやすい沈殿を生成させるための煮沸の効果について検討した結果を図10に示す。加熱を始めるとpH4.0の低pH溶液でも、中和時には褐色透明だった溶液が、加熱に伴って水酸化物の濁りを生じた。また、加熱時間の影響について検討した結果を図11に示す。これより、沈殿生成には加熱処理15minでも十分であることが分かった。一般に、生成した沈殿は不安定で加熱することにより結晶が成長し粗大化して分離性が向上することが知られており¹⁰⁾、この試験でも同様の機構で極微細な沈殿が粗大化し、分離性が向上したと考えられる。

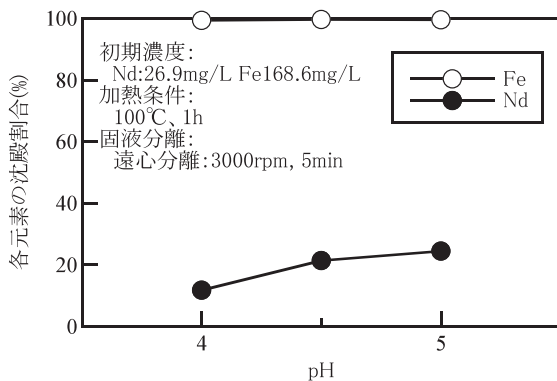


図10 ネオジム磁石の水酸化物沈殿分離のpHの影響

3.5 実際の磁石を用いた希土類酸化物の生成と物質収支の評価

検討の結果、得られた希土類の回収フローを図12に示す。鉄を分離した溶液に、弱酸性下で定量的に希土類元素と不溶性塩を生じるシュウ酸アンモニウム溶液¹⁷⁾を加え、含有する希土類に対しシュウ酸塩を生成させろ紙によりろ過した。この希土類のシュウ酸塩の結晶は粒子が水酸化鉄よりは大きく沈降性も良好であり、実操業では遠心分離でもフィルターによるろ過でもどちらでも使用可能と思われる。このときの水酸化物沈殿、シュウ酸塩沈殿、残液に含まれる各元素の濃度から各画分への分配率を図13に示す。これより、Fe、希土類、Niの分離は良好でNd、Dyはシュウ酸塩沈殿に回収率約90%で分配された。また、シュウ酸塩沈殿を白金坩堝に移し焼成した粗希土類酸化物の組成を表3に示す。これより、希土類酸化物含有量の合計は90%を超えており、回収ストックまたは再精錬原料として良好な純度を得ることができた。

実際の磁石の粉碎、分級処理での<1.18mm粒度部分を酸溶解し、フローの処理を行った。鉄の沈殿生成加熱後の写真を図14に示す。約10gまでスケールアップしても沈降性の良好な水酸化鉄の沈殿が得られた。さらに、1台のHDDのモーター磁石全量より回収された粗希土類酸化物(3.8g)の組成を表4に示す。この量での回収試験でも良好な純度の希土類酸化物が得られた。

表3 得られた粗希土類酸化物の組成

元素	含有量(%)	元素	含有量(%)	元素	含有量(%)
Nd ₂ O ₃	82	Fe ₂ O ₃	8.9	SO ₃	0.21
Dy ₂ O ₃	6.7	Cl	0.44	SiO ₂	0.14
Pr ₆ O ₁₁	1.4	NiO	0.28	Al ₂ O ₃	0.09

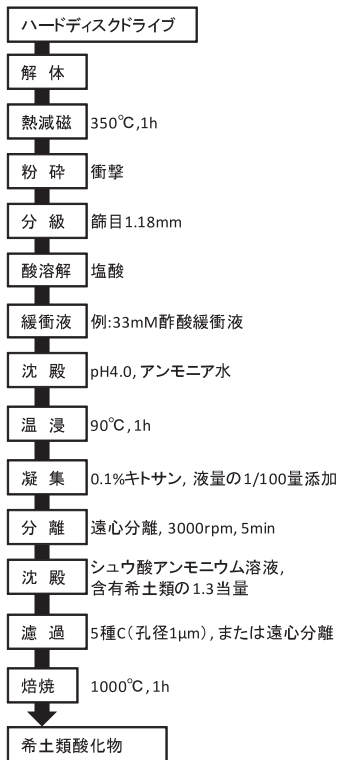


図12 ネオジウム磁石からの希土類酸化物回収プロセス

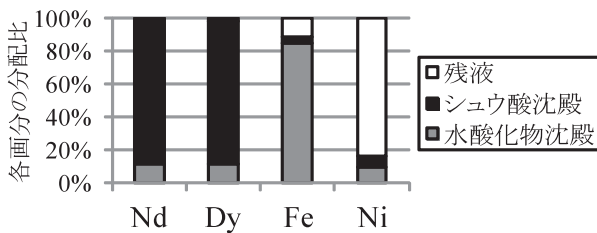


図13 ネオジウム磁石からの分離工程後の各成分の分配



図14 ネオジウム磁石塩酸溶液の水酸化物沈殿処理

表4 HDD 1台分から得られた粗希土類酸化物の組成

元素	含有量(%)	元素	含有量(%)	元素	含有量(%)
Nd ₂ O ₃	89	Fe ₂ O ₃	1.5	SO ₃	0.12
Dy ₂ O ₃	8.8	SiO ₂	0.13	Al ₂ O ₃	0.03
Pr ₆ O ₁₁	0.30	NiO	0.13		

4 まとめ

使用済みHDDから、熱減磁、酸浸出、沈殿分離、焙焼の各処理を行うことにより、粗希土類酸化物の回収プロセスの構築を目的として各種検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) HDDのボイスコイルモーターに使用されているネオジウム磁石は350°C 1h減磁処理が望ましいことが分かった。
- (2) すりつぶさないようなタイプの粉碎および分級を行うことにより、めっき層に使用されているNiの効率的な分離が可能であることが分かった。
- (3) 粉碎後のネオジウム磁石は塩酸に容易に溶解する。酸溶解後の液について緩衝液とアンモニア水添加によりpHを4.0まで上げ加熱処理を行うことにより、希土類の損失を最小限に抑えFeを沈殿分離できることが分かった。
- (4) 鉄分離後の塩酸溶解液に含まれる希土類元素はシュウ酸アンモニウム溶液を添加することにより定量的に沈殿回収され、磁石全体ベースで90%以上の回収率が得られた。純度も90%を超え、その際のおもな不純物は残存する鉄であり、その他の元素はほとんど沈殿物に混入しないことが分かった。
- (5) 以上の結果より、使用済みHDD中のネオジウム磁石から粗希土類酸化物として回収する実験室規模でのプロセスを構築した。

謝辞

本研究で使用した純水製造システム、ICP発光分光分析装置、ICP質量分析装置、X線回折装置は公益財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 南條道夫：都市鉱山開発—包括的資源観によるリサイクルシステムの位置付け，東北大学選鉱精錬研究所彙報，Vol.43, No.2, pp239-251, (1987)
- 2) 加藤秀和：7. 都市鉱山の現実とレアメタル回収の可能性，日本エネルギー学会誌，Vol.89, No.4, pp.296-301, (2010)
- 3) 山末英嗣・中島謙一・醍醐市朗・松八重一代・橋本征二・奥村英之・石原慶一：家電製品の廃棄に伴うレアメタルの潜在的拡散量評価，日本金属学会誌，Vol.72, No.8, pp.587-592, (2008)
- 4) 原田幸明：わが国の都市鉱山は世界有数の資源国に匹敵，独立行政法人物質・材料研究機構プレス資料（平成20年1月11日），(2008)
- 5) 原田幸明：レアメタル類の使用状況と需給見通し，廃棄

- 物資源循環学会誌, Vol.20, No.2, pp.49-58, (2009)
- 6) 貴田晶子・白波瀬朋子・川口光夫：使用済みパソコン中のレアメタル等の存在量と金属分析, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.20, No.2, pp.59-69, (2009)
 - 7) 中村 崇：小型家電のリサイクルー人工鉍床の展開ー, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.20, No.2, pp.70-76, (2009)
 - 8) 東北経済産業局循環型産業振興課・株式会社三菱総合研究所：我が国における鉍種別 需要／リサイクル／用途等 資料, 196PP., pp.174-179, (2006)
 - 9) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉍物資源機構金属資源開発調査企画グループ：非鉄金属のしおりー40鉍種の紹介ー, 独立行政法人石油天然ガス・金属鉍物資源機構, 80PP., pp.69-70, (2007)
 - 10) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉍物資源機構金属企画調査部：鉍物資源マテリアルフロー2009, 独立行政法人石油天然ガス・金属鉍物資源機構, 391PP., pp.281-293, (2010)
 - 11) 田中一誠：レアメタルのリサイクル, 科学と工業, Vol.84, No.8, pp.332-336, (2010)
 - 12) 辻口雅人・土居英樹：家電メーカーのレアメタル回収リサイクルの取り組み, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.20, No.2, pp.77-84, (2009)
 - 13) 森本慎一郎・徐維那：レアアースの中長期的需要予測に関する動向, J. of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, Vol.130, No.6, pp.219-224, (2014)
 - 14) 佐川真人・浜野正昭・小林久理眞・徳永雅亮・大森憲次・大橋健・近田滋・宝野和博・杉本諭・広沢哲・岡部徹：ネオジム磁石のすべて, アグネ技術センター, 204PP., pp.121-123, (2011)
 - 15) 同上, pp.42-43
 - 16) 例えば, 日本分析化学会北海道支部編：増補新版分析化学実験, 化学同人, 624PP., pp.164-165, 90-94, (1980)
 - 17) 足立吟也：希土類の科学, 化学同人, 896PP., pp.164-165, 359-368, (1999)

下水汚泥焼却灰からのリン回収方法に関する研究

佐々木 雄真, 鎌田 樹志, 吉川 琢也, 富田 恵一, 若杉 郷臣, 高橋 徹

Study on Method for Recovering Phosphorus from Sewage Sludge Incineration Ash

Takema SASAKI, Tatsuyuki KAMADA, Takuya YOSHIKAWA, Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI, Tohru TAKAHASHI

キーワード：リン回収, 下水汚泥焼却灰, 肥料, 酸アルカリ抽出法, 部分還元溶融法

1. はじめに

リンは生活排水, 工場排水等に多く含まれ, 環境中に流出すると, 湖沼や内湾などの閉鎖性水域において富栄養化を引き起こし, 赤潮やアオコの発生原因となる。一方でリンは肥料の三要素の一つであるが, 原料のリン鉱石は日本では産出されず, 全量を輸入に頼っている。しかし, リン鉱石は枯渇資源で, 近年, 主要産出国において輸出制限などの動きが出てきており, 価格が急騰するなど不安定な情勢となっている。そのため, 水環境の保全と資源の有効利用の観点から, 排水処理等においてリンを除去・回収する必要性が高まっている。

国内に輸入されるリンは年間約80万t-P/年で, 食料・飼料・肥料系が約56万t-P/年と70%を占めている。そのうち約10%に当たる年間約5.5万t-P/年のリンが下水道に流入している。下水道を経由するリンの量は, これからも下水道普及率の向上に伴い増加すると予想される。また, 下水処理場における高度処理導入の進展により, 下水汚泥中に含まれるリンの量も増加していくと推測される¹⁾。以上のことから, 下水汚泥からリンを回収する意義は大きいと考えられる。

本研究では, 下水汚泥焼却灰を対象としたリン回収方法として, 酸アルカリ抽出法および部分還元溶融法について検討した。酸アルカリ抽出法は, 焼却灰を酸またはアルカリ溶液に浸漬してリンを抽出した後, 抽出液にカルシウム等を加え, リン酸塩として沈殿させて回収する方法である。部分還元溶融法は, 焼却灰にカルシウムおよびマグネシウムを添加し, 適度な還元雰囲気において溶融後, 水砕処理によりスラグとメタルに分離するものである。得られたスラグは, 肥料取締法の規格を満たせば, 熔成汚泥灰複合肥料として適用できる。

事業名：経常研究

課題名：リンの除去・回収技術に関する研究（平成23～25年度）

これらの手法について, リン回収特性等を把握するため, 各種条件設定において試験を実施した。

2. 下水汚泥焼却灰の組成

試験には, 札幌市東部スラッジセンターにおいて2012年11月19日に採取した下水汚泥焼却灰を用いた。当センターでは, 市内を流れる豊平川の右岸に位置する3箇所の水再生プラザ（下水処理場）から下水汚泥を集めて焼却処理しており, 年間1,800t程度の焼却灰が発生し, セメント原料として利用されている。

採取した焼却灰について, 蛍光X線分析装置（㈱リガク ZSX Primus II）により, 組成を分析した。

また, 肥効成分としてリン酸全量, ク溶性リン酸, 有害成分としてヒ素, カドミウム, ニッケル, クロム, 水銀, 鉛を分析した。リン酸全量およびク溶性リン酸, ならびに水銀は肥料等試験法²⁾により, それ以外についてはマイクロ波分解処理後, ICP質量分析装置（アジレント・テクノロジー㈱ Agilent 7700x）で分析した。

焼却灰の蛍光X線分析の結果を図1に示す。SiO₂, P₂O₅, Fe₂O₃, Al₂O₃, CaOの順に多く含まれ, リンはP₂O₅として21.9%であった。また, リンと同様に肥料の三要素の一つであるカリウム（K₂O）は2.2%であった。札幌市下水道資源公社の調査によると, 平成22～24年度の平均値でP₂O₅は24.5%, K₂Oは2.8%となっており³⁾, 今回採取した焼却灰は2項目ともにこれより低い値となっていた。要因としては, 季節的な変動や, 降雨による下水への土砂の流入などが考えられる。

肥効成分の分析結果は, リン酸全量 18.7%, ク溶性リン酸 10.2%であった。有害成分については表1のとおりであった。

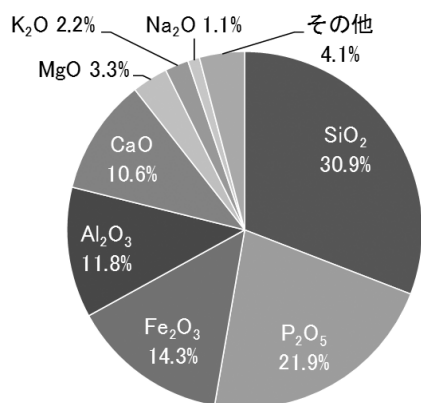


図1 下水汚泥焼却灰の組成

表1 下水汚泥焼却灰の有害成分

成分	ヒ素	カドミウム	ニッケル	クロム	水銀	鉛
含有量 (mg/kg)	49	2.5	73	127	62	1.5

3. 試験方法

3.1 酸アルカリ抽出法

3.1.1 溶出特性試験

下水汚泥焼却灰からのリン等の溶出特性を調べるため、酸液またはアルカリ液に焼却灰を入れ、各種条件設定において溶出試験を行った。溶媒には、酸液として塩酸、硫酸、硝酸、アルカリ液として水酸化ナトリウム溶液を用いた。溶媒の濃度は、酸液では0.1N, 0.2N, 1Nとし、アルカリ液では0.1N, 0.5N, 1Nとした（塩酸、硝酸、水酸化ナトリウムは1N=1 mol/L, 硫酸は1N=0.5mol/L）。温度は25℃, 50℃, 70℃（アルカリ液のみ）、溶出時間は60分または120分（酸液のみ）に設定した。ポリ瓶250mlに酸液またはアルカリ液を100ml, 焼却灰を5g入れ、恒温振とう器により150rpmで往復振とうした。所定の時間が経過した後、No.5Cのろ紙でろ過して溶出液を得た。

この溶出液について、リン濃度、有害物質であるヒ素およびカドミウム濃度をICP質量分析装置により分析した。

3.1.2 回収特性試験

酸またはアルカリによる溶出液からのリン回収特性を調べるため、溶出液に水酸化カルシウムを添加し、リン酸塩として沈殿させた。

ポリ瓶250mlに0.5Nの塩酸、硫酸、硝酸、または1Nの水酸化ナトリウム溶液100ml, 焼却灰10gを入れ、温度は酸液25℃およびアルカリ液70℃とし、150rpmで60分振とう後、No.5Cのろ紙でろ過して溶出液を得た。

これらの溶出液を10mlずつ分取し、水酸化カルシウムの量を100~180mgに変化させて添加し、よく振り混ぜた後、

一晩静置してリン酸塩を沈殿させた。

溶出液および沈殿生成後の上澄み液について、リン酸イオン濃度をイオンクロマトグラフ（メトローム社 IC861）により分析した。また、沈殿物を乾燥して得られた回収物について、X線回折装置（株式会社 楸リガク Ultima IV）により解析した。

3.2 部分還元溶融法

3.2.1 適正条件の探索

部分還元溶融法の適正な条件を把握するため、カルシウムおよびマグネシウムの添加量、溶融温度を変化させ試験を行い、得られたスラグの性状・組成等を評価した。

試験のフローを図2に示す。試験に用いた下水汚泥焼却灰のP₂O₅ : CaO : MgOのモル比は、蛍光X線分析の結果をもとに算出すると1 : 1.2 : 0.5であった。生成スラグのク溶率（=ク溶性リン酸/リン酸全量）を高めるためには、P₂O₅ : CaO : MgO = 1 : 2.5~3.5 : 2.5~3.5の範囲となるようにCaOおよびMgOを添加すると良いとされている⁴⁾。そこで、不足分のCaOおよびMgOを補うため、焼却灰に試薬の酸化カルシウムおよび酸化マグネシウムを加え、モル比を1 : 1.5 : 1.5, 1 : 2.5 : 2.5, 1 : 3.5 : 3.5の3段階に調整した。これらに還元剤として活性炭を2%ずつ添加したものを黒鉛のつばに入れ、電気炉で溶融した。温度は1,300, 1,350, 1,400℃に設定し、室温から設定温度まで90分程度で上昇させ、保持時間は15分とした。水砕処理により得られたスラグおよびメタルの混合物は、110℃で乾燥させた。メタルは鉄を多く含み、磁石につく性質があることから、磁力選別によりスラグとメタルに分離した。さらに、スラグについては振動ミルにより粉末状とした後、肥料等試験法により肥効成分としてク溶性リン酸およびク溶性カリウムを分析した。

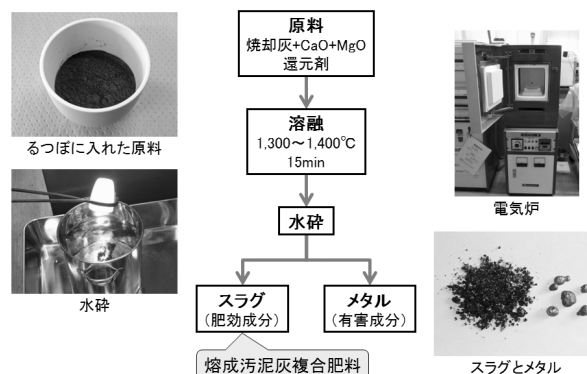


図2 部分還元溶融法のフロー

3.2.2 廃棄物由来の添加物の適用

次に、部分還元溶融法の低コスト化を図る目的で、添加物として廃棄物を適用することを検討した。表2に示すように、酸化カルシウムとして試薬の代わりにライムケーキ焼成物、

還元剤として活性炭の代わりに農作物残渣炭化物を用いることとした。ライムケーキは、砂糖を精製する工程で排出され、主成分は炭酸カルシウムである。これを900℃以上で焼成したものをを用いた。また、農作物残渣はトマトの茎葉とし、これを600℃の還元雰囲気中で炭化したものをを用いた。これらについては、蛍光X線分析により組成を調べた。

添加物として試薬類を用いた場合と、廃棄物を用いた場合について比較するため、同一の配合比および溶融条件においてスラグを作製した。

スラグとメタルを分離し、重量を測定後、スラグについては振動ミルで粉末状とし、肥効成分および有害成分を分析した。分析項目は、肥料取締法に基づく熔成汚泥灰複合肥料の公定規格で定められている肥効成分のク溶性リン酸およびク溶性カリウム、有害成分のヒ素、カドミウム、ニッケル、クロム、水銀、鉛とした。分析方法は、前述の下水汚泥焼却灰と同様とした。

表 2 添加物の種類

	酸化カルシウム源	酸化マグネシウム源	還元剤
試薬添加	試薬CaO	試薬MgO	活性炭
廃棄物添加	ライムケーキ焼成物	試薬MgO	農作物残渣炭化物

4. 結果および考察

4.1 酸アルカリ抽出法

4.1.1 溶出特性試験

各種条件における溶出試験により得られた溶出液について分析を行った。酸液として塩酸、硫酸、硝酸を用いた場合の溶出液のリン濃度を図3に示す。0.1N~1Nの範囲では酸の濃度が高いほど溶出量が増加する傾向となり、酸の種類には依存しないことがわかった。また、振とう時間および温度については、60分と120分、25℃と50℃で大きな差は認められなかった。有害成分であるヒ素およびカドミウムについては、図4,5のとおり、リンと同様に酸の濃度が高いほど濃度が高くなる傾向となり、酸の種類、振とう時間、温度には依存しないことがわかった。ただし、カドミウムがリンとよく似た傾向を示したのに対し、ヒ素については酸の濃度による溶出量の差が小さかった。

アルカリ液として水酸化ナトリウム溶液を用いた場合の溶出液のリン濃度を図6に、ヒ素濃度を図7に示す。酸液を用いた場合に比べ全体的に溶出量は少なく、カドミウムについてはすべての条件において定量下限値(0.009mg/L)以下であった。リンおよびヒ素の溶出量は、酸液を用いた場合と同様、溶媒の濃度が高いほど多かった。また、温度については高いほど溶出量が多くなった。温度に依存する点は、酸液と異なっており、アルカリ液を用いた場合の特徴であることがわかった。

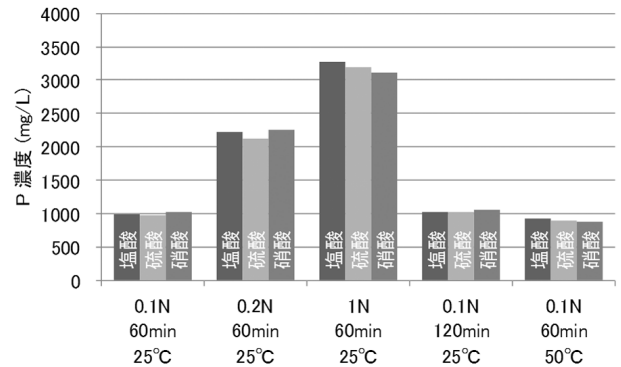


図3 酸溶出液のリン濃度

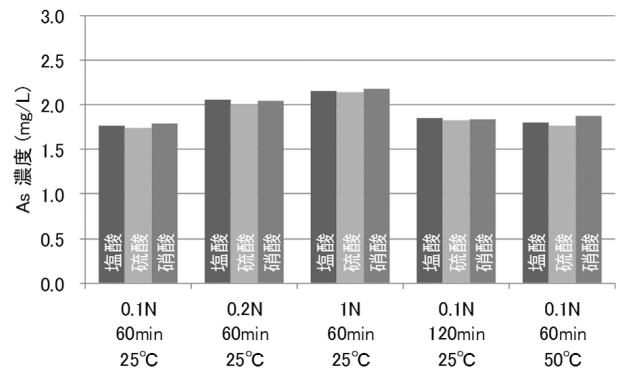


図4 酸溶出液のヒ素濃度

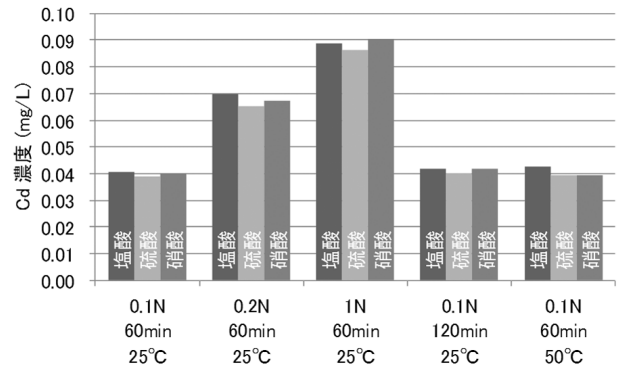


図5 酸溶出液のカドミウム濃度

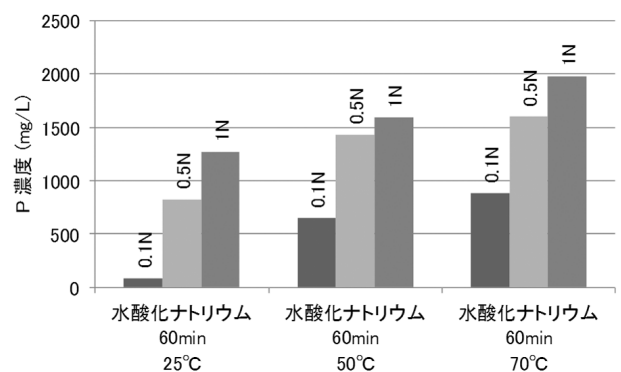


図6 アルカリ溶出液のリン濃度

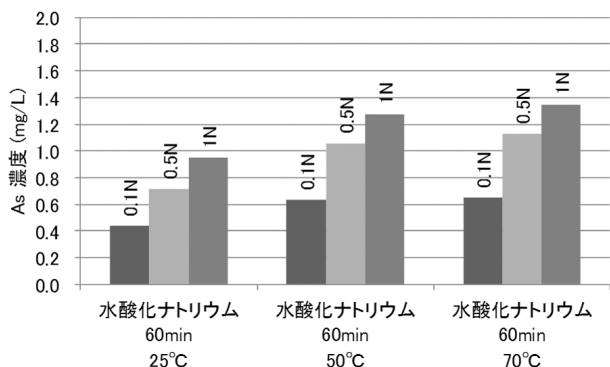


図7 アルカリ溶出液のヒ素濃度

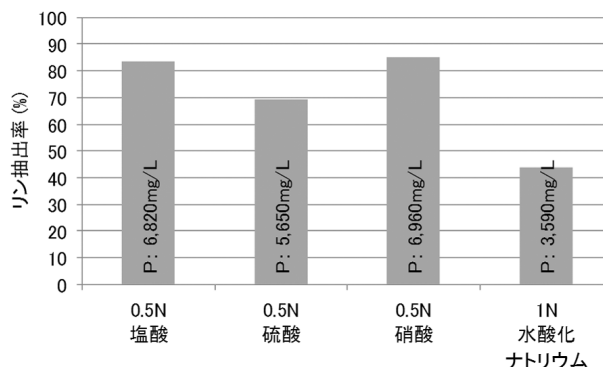


図8 酸アルカリ液によるリン抽出率

4.1.2 回収特性試験

試験方法3.1.2の条件において得られた溶出液のリン濃度を分析した。この濃度と焼却灰のリン酸全量の分析値から算出したリン抽出率を図8に示す。酸液の溶媒濃度はすべて同一だが、リンの抽出率は塩酸で83%、硝酸で85%であったのに対し、硫酸では69%と低かった。また、アルカリ液では溶媒の濃度は酸液の2倍だが、抽出率は44%であった。

次にこれらの溶出液を一定量ずつ分取し、水酸化カルシウムの量を変化させて添加し、リン酸塩の沈殿物を生成させた。初期の溶出液および沈殿物生成後の上澄み液のリン酸イオン濃度からリン回収率を求めた。図9のとおり、いずれの溶出液についても、回収率95%程度までは水酸化カルシウムの添加量に比例して回収率が高くなり、それ以上では傾きが緩やかになる傾向が認められた。コスト面から、回収率95%程度となるように水酸化カルシウムを添加するのが適切と考えられる。この回収率が得られる水酸化カルシウムの添加量は、塩酸溶出で13g/L、硫酸溶出で15g/L、硝酸溶出で13g/L、水酸化ナトリウム溶出で17g/Lであった。

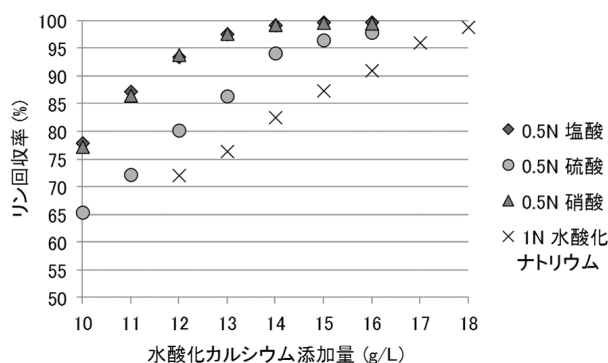


図9 水酸化カルシウム添加量とリン回収率

回収率95%以上となる条件で得られた沈殿物のX線回折結果を図10~13に示す。塩酸溶出では、図10のとおりCaHPO₄およびCaHPO₄・2H₂Oが主成分と推定された。硫酸溶出では、図11のとおりCa(HPO₄)(SO₄)・4H₂OおよびCaSO₄・2H₂Oの回折パターンと比較的高い一致が認められた。硝酸溶出では、図12のとおり主成分はCaHPO₄と考えられた。水酸化ナトリウム溶出では、図13のとおりCa₁₀(PO₄)₆(OH)₂が主成分と推定された。リン酸塩の回収において、塩酸および硝酸溶出液に比べ、硫酸および水酸化ナトリウム溶出液で水酸化カルシウムを多く必要とするのは、前者はCaSO₄・2H₂Oの生成にもCaが消費されるため、後者はCa₁₀(PO₄)₆(OH)₂の生成がPO₄:Ca=3:5(モル比)の反応であるためと推察される。

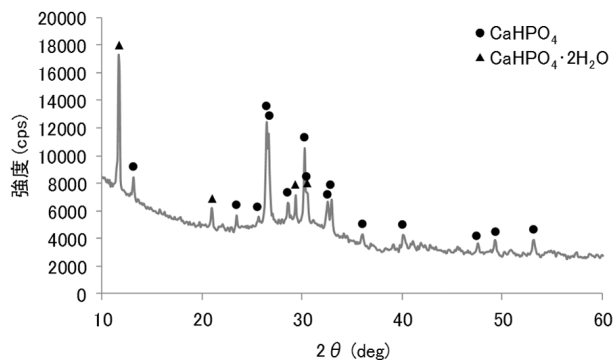


図10 塩酸溶出液からの回収物のX線回折結果

以上の結果から、塩酸または硝酸を用いるとリンを多く抽出でき、かつ水酸化カルシウムの添加量も少なくできることがわかった。ただし、コストや得られる回収物の種類などを考慮して、適切な条件を選択する必要があると考えられる。

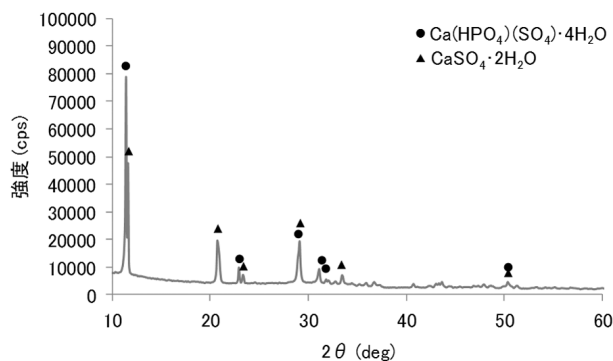


図11 硫酸溶出液からの回収物のX線回折結果

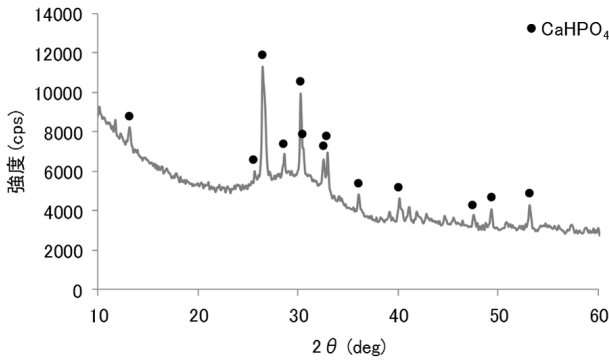


図12 硝酸溶出液からの回収物のX線回折結果

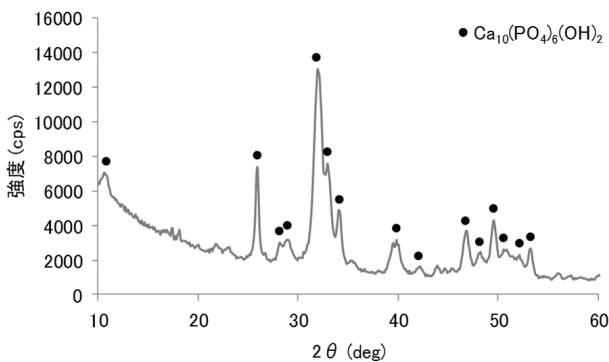


図13 水酸化ナトリウム溶出液からの回収物のX線回折結果

4.2 部分還元溶融法

4.2.1 適正条件の探索

下水污泥焼却灰の部分還元溶融法によるスラグ化の適正条件を求めるため、各種条件下において試験を行った。適正か否かの判断材料として、「溶融物の流動性」、「スラグとメタルの分離性」、「スラグの肥効成分含有量」の3つの項目について評価した。

溶融物の流動性は、水砕処理の際、るつぼからの流れ落ちやすさを表したもので、表3のとおり、酸化カルシウムおよび酸化マグネシウムの添加量が多いほど良好な結果が得られた。逆に、添加量が少ないと、溶融物の粘性が高く、るつぼから流れ落ちずに残存する量が多かった。このことから、適切な $P_2O_5 : CaO : MgO$ のモル比は1 : 2.5~3.5 : 2.5~3.5であることがわかった。

スラグとメタルの分離性を表4に示す。分離性が悪いと、スラグとメタルが混在する粒子の存在比率が高くなる。このような粒子は、磁石につくためメタルとして回収され、結果としてスラグの収率が低下する。溶融温度が高いほど分離性は良好で、1,400℃以上が望ましいと考えられた。

スラグのク溶性リン酸およびク溶性カリウムの含有量を表5,6に示す。ク溶性リン酸、ク溶性カリウムともに、添加物量の比較では、 $P_2O_5 : CaO : MgO = 1 : 2.5 : 2.5$ でもっとも多かった。理由としては、 $P_2O_5 : CaO : MgO = 1 : 1.5 : 1.5$

では、リン酸およびカリウム全量の値は高いもののク溶率が低く、 $P_2O_5 : CaO : MgO = 1 : 3.5 : 3.5$ ではク溶率は高いものの、添加物を多くしたことにより、相対的にリン酸およびカリウム全量の値が低くなったためと推察される。また、溶融温度の比較では、ク溶性リン酸、ク溶性カリウムともに、温度が低いほど多くなる傾向が見られた。

以上の項目について総合的に評価した結果、 $P_2O_5 : CaO : MgO = 1 : 2.5 : 2.5$ 、溶融温度1,400℃が適正な溶融条件と判断した。

表3 溶融物の流動性

添加物	無し	CaO, MgO	CaO, MgO	CaO, MgO
$P_2O_5 : CaO : MgO$ (モル比)	1:1.2:0.5	1:1.5:1.5	1:2.5:2.5	1:3.5:3.5
1,400℃	×	△	○	○
1,350℃	-	△	○	○
1,300℃	-	-	○	○

表4 スラグとメタルの分離性

添加物	無し	CaO, MgO	CaO, MgO	CaO, MgO
$P_2O_5 : CaO : MgO$ (モル比)	1:1.2:0.5	1:1.5:1.5	1:2.5:2.5	1:3.5:3.5
1,400℃	○	○	○	○
1,350℃	-	○	△	○
1,300℃	-	-	△	△

表5 スラグのク溶性リン酸含有量 (%)

添加物	無し	CaO, MgO	CaO, MgO	CaO, MgO
$P_2O_5 : CaO : MgO$ (モル比)	1:1.2:0.5	1:1.5:1.5	1:2.5:2.5	1:3.5:3.5
1,400℃	-	12.0	14.5	11.4
1,350℃	-	13.0	15.0	12.9
1,300℃	-	-	16.2	13.8

表6 スラグのク溶性カリウム含有量 (%)

添加物	無し	CaO, MgO	CaO, MgO	CaO, MgO
$P_2O_5 : CaO : MgO$ (モル比)	1:1.2:0.5	1:1.5:1.5	1:2.5:2.5	1:3.5:3.5
1,400℃	-	0.30	1.16	0.98
1,350℃	-	0.39	1.18	1.03
1,300℃	-	-	1.25	1.12

4.2.2 廃棄物由来の添加物の適用

$P_2O_5 : CaO : MgO$ のモル比を適正に調整するための添加物として、試薬の酸化カルシウムの代わりにライムケーキ焼成物を、還元剤として活性炭の代わりに農作物残渣炭化物を用いることを試みた。両者の組成は、蛍光X線分析の結果、ライムケーキ焼成物にはCaO 90%のほかに P_2O_5 3.8%、MgO 3.7%が、農作物残渣炭化物にはC 70%のほかにK 5.8%、Ca 3.0%、Mg 1.5%が含まれていた。このことから、これらの廃棄物を用いることにより、単に試薬類の代わりとなるだけでなく、肥効成分の増加も期待できることがわかった。

なお、この試験ではアルミナ製のるつぼを使用した。前述の適正条件探索試験で用いた黒鉛のるつぼは、それ自体も還元作用を有するが、アルミナではそのような作用はないため、還元剤の添加量を増加させた。アルミナるつぼを使用した場

合、還元剤の添加量を5%とすると、黒鉛るつばで還元剤を2%とした場合と同様の性状・組成のスラグが得られることを、予備試験により確認した。

試薬添加区では、試薬CaOおよび試薬MgOを用いP₂O₅ : CaO : MgO = 1 : 2.5 : 2.5に調整し、活性炭を5%添加した。廃棄物添加区では、同一の添加量で試薬CaOをライムケーキ焼成物に、活性炭を農作物残渣炭化物に置き換えた。これらを1,400℃、15分間保持で溶融した後、水砕、乾燥、磁力選別の処理を経て、スラグおよびメタルを回収した。

試薬添加区では29.0gの原料（焼却灰+CaO+MgO）からスラグ16.9gおよびメタル1.6gが、廃棄物添加区では29.5gの原料からスラグ17.8gおよびメタル1.7gを回収できた。

回収スラグの肥効成分の分析結果を図14に示す。試薬添加スラグはク溶性リン酸14.4%、ク溶性カリウム1.48%、廃棄物添加スラグではそれぞれ15.5%、1.80%であった。いずれのスラグについても、ク溶性リン酸およびク溶性カリウムの両項目について、肥料取締法の熔成汚泥灰複合肥料の規格であるク溶性リン酸12.0%以上およびク溶性カリウム1.0%以上を満たしており、特に廃棄物添加スラグのほうが、肥効成分を多く含むことがわかった。

有害成分の含有量は、公定規格による肥効成分1%当たりの許容値をもとに、それぞれのスラグの肥効成分量から算出した許容値と比較すると、表7に示すとおり、すべての項目において十分に下回っており、規格を満たしていた。

以上のことから、廃棄物由来の添加物として、ライムケーキ焼成物および農作物残渣炭化物は適用可能であるとともに、肥効成分の増加も見込めることが示された。

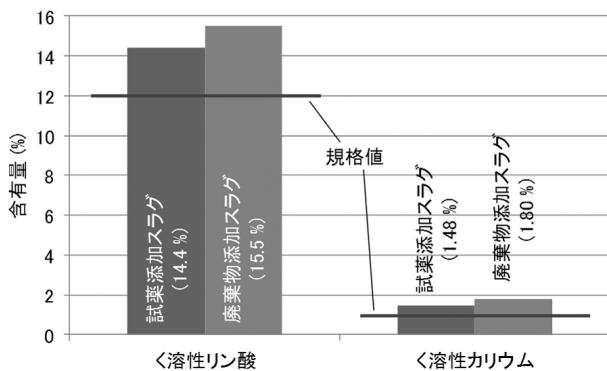


図14 スラグの肥効成分含有量

表7 スラグの有害成分含有量

	ヒ素	カドミウム	ニッケル	クロム	水銀	鉛	
公定規格 (肥効成分1% につき)	許容値 (%)	0.002	0.000075	0.005	0.05	0.00005	0.003
試薬添加 スラグ	許容値 (%)	0.03	0.0012	0.08	0.8	0.0008	0.05
	含有量 (%)	0.0003	0.000001	0.0003	0.01	<0.0000005	0.0003
廃棄物添加 スラグ	許容値 (%)	0.03	0.0013	0.09	0.9	0.0009	0.05
	含有量 (%)	0.00009	<0.0000007	0.0002	0.01	<0.0000005	0.0004

5. まとめ

札幌市の下水汚泥焼却灰を用い、リンを回収する方法として、酸アルカリ抽出法および部分還元溶融法について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 下水汚泥焼却灰からの酸液およびアルカリ液によるリンの溶出量は、酸液では酸の濃度、アルカリ液ではアルカリの濃度および温度に依存することがわかった。
- (2) 各種酸アルカリ液により抽出したリンの回収特性として、水酸化カルシウムの添加量は、抽出液のリン除去率が95%程度となるように設定するのが適切と考えられた。
- (3) 部分還元溶融法により下水汚泥焼却灰をスラグ化するための適正条件は、P₂O₅ : CaO : MgO(モル比) = 1 : 2.5 : 2.5、溶融温度1,400℃であることが明らかとなった。
- (4) 添加する酸化カルシウムおよび還元剤として、廃棄物由来であるライムケーキ焼成物および農作物残渣炭化物の適用可能性が示唆された。

謝辞

一般財団法人札幌市下水道資源公社には、下水汚泥焼却灰の採取等において、ご協力をいただきました。また、本研究で使用したICP質量分析装置、イオンクロマトグラフおよびX線回折装置は、公益財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：下水道におけるリン資源化の手引き，(2010)
- 2) 独立行政法人 農林水産消費安全技術センター：肥料等試験法，(2013)
- 3) 一般財団法人 札幌市下水道資源公社：調査研究事業報告書，第30号，p.12，(2013)
- 4) 岩井良博・定塚徹治・小林 剛・亀屋隆志・三宅祐一・小松貴司・高木禎史・三品文雄：下水汚泥焼却灰を原料とした熔成リン酸質肥料製造における各種成分比と溶融条件の影響，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.20，No.3，pp.203-216，(2009)

火山灰を使用した長寿命コンクリートの開発

高橋 徹, 富田 恵一, 若杉 郷臣
谷口 円*, 垣原 康之**, 佐川 孝広***
島多 昭典****, 吉田 行****
秋山 護*****, 石塚 浩章*****, 齊藤 宗三*****

Long Life Span Concrete Using Volcanic Ashes

Touru TAKAHASHI, Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI
Madoka TANIGUCHI*, Yasuyuki KAKIHARA**, Takahiro SAGAWA***
Akinori SHIMATA****, Susumu YOSHIDA****
Mamoru AKIYAMA*****, Hiroaki ISHIZUKA*****, Munemitsu SAITO*****

抄 録

火山ガラスを大量に含み、均質かつ大量に賦存する北海道の火山灰について元素分析、鉱物組成分析、ポゾラン反応性の検討を実施した。その結果、北海道内火山灰がポゾラン反応性を持つことを明らかにし、反応性の評価方法等を提案した。

キーワード：火山灰，ポゾラン反応，コンクリート，火山ガラス，Rietveld法

1. はじめに

コンクリートの長寿命化を図るために、セメント量を増やし、高強度化する手法が一般的であるが、単価が増加する一方でメンテナンスフリーを実現するわけではない。そのような中、火山灰をセメントの一部に使用した小樽北防波堤コンクリートは、建設後100年を経て十分な機能を果たし、長寿命コンクリート構造物の代表例となっている。その一因として、近年の調査ではポゾラン（フライアッシュ、火山灰等）の未反応成分が未だ残存し、水和反応が継続していることが

明らかとなっている¹⁾。また、火山灰の長期的な反応の活用によっては、自己修復効果も期待でき、コンクリートへの火山灰の利用は、コンクリートの長寿命化に寄与するものと考えられる。しかし、戦後火山灰をコンクリートに利用した例はごくわずかである。武若ら²⁾は、シラスを細骨材としたシラスコンクリートを提案、実用化を図り、粒径0.15mm以下の微粒分もそのまま混合することで、ポゾラン反応による長期強度の増進や耐硫酸塩性に優れることを示している。ただし、品質管理を容易にする観点から、鹿児島では始良カルデラの入戸火砕流に使用火山灰を限定した検討となっている。

* 道総研 北方建築総合研究所,

* Local Incorporated Administrative Hokkaido Research Organization Northern Regional Building Research Institute

** 道総研 地質研究所,

** Local Incorporated Administrative Hokkaido Research Organization Geological Survey of Hokkaido

*** 日鉄住金セメント株式会社,

*** NIPPON STEEL & SUMIKIN CEMENT CO.,LTD.

**** 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所,

**** Incorporated Administrative Civil Engineering Research Institute for Cold Region

***** 全国コンクリート製品協会,

***** Japan Concrete Products Association

事業名：重点研究

課題名：火山灰を使用した長寿命コンクリートの開発

北海道では、火山灰の埋蔵量が膨大であるにもかかわらず、近年はコンクリートへの利用はほとんどない。また、火山灰のガラス部分の化学・鉱物組成を評価する標準的な手法が確立されておらず、火山ガラスの特性とボゾラン反応性の関係は明らかではない³⁾。北海道の火山灰を新たなボゾラン源として活用するため、ボゾランの評価手法の確立が望まれる。そこで本研究では、北海道内に分布する未利用資源である火山灰の品質、賦存量に関する調査を行い、コンクリート用混和材としての利用可能性に関する検討を行った。

2. 実験方法

2.1 火山灰試料

図1に北海道の火山灰の分布を示す。北海道内には鮮新世～第四紀にかけて噴出した複数の大規模火砕流堆積物が広く分布する(灰色の領域)。これらの中から規模が大きく、火山ガラスの含有量が高いものを対象に30試料を採取した。

火山灰30試料は、105℃で恒量まで乾燥後、5mmふるいを通したものを使用した。20±3℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室で恒量となるまで保管し、ボールミルにて粉砕した後、75μmふるいを通したものを使用した。

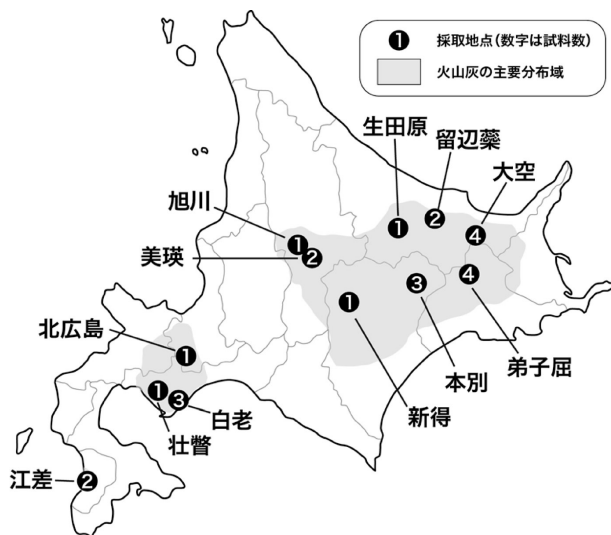


図1 北海道の火山灰の分布

2.2 火山灰の基礎物性の測定

2.2.1 化学組成

火山灰の強熱減量は、105℃乾燥試料を1000℃で強熱した際の質量変化から算出した。また、火山灰の密度については、micro meritics社製密度測定装置AccuPyc 1330を用いて、ヘリウム置換法により測定を行った。火山灰の化学組成は、蛍光X線分析装置(リガク社製RIX3000)を用いて、ファンダメンタルパラメーター法FP法により測定した。

2.2.2 鉱物組成および比重分離

火山灰の鉱物相の把握と非晶質を推定するためにX線回折装置(リガク社製ULTIM IV)により測定した。X線回折装置(以下XRD)の測定は、内部標準物質として平均粒径3μmのコランダム(Corundum)を内割20%添加して行った。XRDの測定条件は、ターゲットCuKα、管電圧40kV、管電流30mA、走査範囲5~63deg. 2θ、ステップ幅0.02deg.とした。

Rietveld解析は、SIROQUANT Ver.3を用い、定量対象鉱物の粒径を直径10μmとして吸収効果を補正した。解析の対象とした鉱物は、事前の定性結果に基づき、解析ソフトのデータベースから適宜選択した。解析対象鉱物は石英(Quartz)、曹長石(Albite)、中性長石(Andesine)、曹灰長石(Labradorite)、灰長石(Anorthite)、輝石(Augite)、黒雲母(Biotite)、角閃石(Hornblende)、鋼玉(Corundum(内部標準))とし、クリストバル石(Cristobalite)やカオリン(Kaolin)およびモンモリロナイト(Montmorillonite)などはピークが認められた場合に対象鉱物とした。それぞれの鉱物の結晶構造データがデータベースに複数登録されている場合は、すべて含めたサーチマッチを実施し、対象鉱物を選択した。対象相の選択後、精密化を行い、鉱物相の定量値を得た。非晶質量は内部標準の混合率と定量値から、以下の式(1)により算定した。

$$A = 100 \times (C - C_0) / (C(100 - C_0) / 100) \quad (1)$$

ここで、A：非晶質量(%)、C₀：内部標準の混合率(%)、C：Rietveld解析によるCorundumの定量値(%)

既存の非晶質量の定量手法として、武若らは、シラスの検討において、重液分離を行い、密度2.4g/cm³以下となるものをガラスとみなしている⁴⁾。本研究においても、重液分離により密度2.4g/cm³以下の浮遊粒子と2.4g/cm³以上の沈降粒子を分離し、その重量比から非晶質割合を算出することとした。

市販のポリタングステン酸ナトリウム(SOMETU社製)を水に溶かして、密度が2.39~2.41g/cm³になるように調製し、JIS Z8804の「比重瓶による密度及び比重の測定方法」に準拠し、重液の密度を確認した。試験管(10mmφ 容量25mL)に火山灰1gを秤量し、重液10mLを加え、超音波振

動及びローター回転により攪拌した。24時間静置後、重液の下部に沈降している沈降粒子を残し、浮いている浮遊粒子をスポイトで回収した。回収した浮遊粒子と沈降粒子を固液分離後、水洗いし、乾燥した。得られた各粒子を秤量し、密度2.4g/cm³以下の粒子が占める割合を求め、非晶質割合とした。分離後の試料については、非晶質粒子と鉱物粒子の顕微鏡観察を行った。

2.3 ポゾラン反応性の評価方法

2.3.1 ポゾラン反応

ポゾラン反応とは、ポゾランに含まれる二酸化ケイ素等がセメントの水和反応によって生じた水酸化カルシウムと反応し、緻密で耐久性に優れたケイ酸カルシウムの水和物を生成させる反応である。緻密なケイ酸カルシウム水和物はコンクリート中の細孔に生成し、コンクリート構造物を脆くする硫酸塩、塩化物、炭酸塩の透過を抑え、長寿命化が期待できると考えられる。

2.3.1 EN規格

火山灰の反応性をEN196-5-2005 (Methods of tenting cement-Part5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement) に準じ、評価した。普通ポルトランドセメント15g、火山灰5gを水100gと混合し、40℃恒温状態で15.60日経過した後ろ過し、ろ液中の水酸化イオンとカルシウムイオンを塩酸滴定、ICP発光分光分析法(株島津製作所製ICPS8100)により測定した。

2.3.2 酸-アルカリ溶解法

大沢ら⁵⁾の既報において、フライアッシュ混合セメントペースト中の未反応フライアッシュを定量する手法として示された2 mol/L塩酸-5%炭酸ナトリウム溶解法を適用し、不溶残分を測定した。また、2.3.1項のろ過残分は、40℃で15、60日と養生した火山灰混合セメントペーストであるため、このろ過残分を乾燥、粉碎し、酸-アルカリ溶解法の試料とした。なお、火山灰単体について同様の試験を実施し、未反応の火山灰の大部分が酸に溶解しないことを確認した。不溶残分試験は1gの試料で実施し、火山灰単体とセメントペーストでの反応後の不溶残分から以下の式(2)により反応率を算定した。なお、今回使用したポルトランドセメントおよび水和物の不溶残分は1%未満であることを確認し、セメント由来の残分の補正は実施していない。

$$\alpha(t) = 100 \times (P_0 - Rt/B) / P_0 \quad (2)$$

ここに、 $\alpha(t)$ ：材齢tでの火山灰の反応率(%)、 P_0 ：火山灰単体の不溶残分(g)、 Rt ：セメントペーストの反応後試料の不溶残分(g)、 B ：火山灰の置換率(ここでは0.25)。

2.3.3 火山灰の微粒分の反応性評価

火山灰の微粒分(ふるい目0.075mmを通過するもの)に着目し、火山灰から4種類を選別し、ペースト、モルタルに混合し、セメント硬化体中での反応を検討した。測定材齢は、7、35、91、182日とし、酸-アルカリ溶解法による反応率を測定した。

3. 実験結果

3.1 火山灰の化学組成

表1に強熱減量および化学組成を示す。主成分は、二酸化ケイ素(SiO₂)、酸化アルミニウム(Al₂O₃)、副成分として酸化鉄(Fe₂O₃)、酸化ナトリウム(Na₂O)、酸化カリウム(K₂O)、酸化カルシウム(CaO)、酸化マグネシウム(MgO)、微量成分として酸化マンガン(MnO)、酸化チタン(TiO₂)、酸化硫黄(SO₃)となっている。ポゾラン反応に必要な二酸化ケイ素および酸化アルミニウム含有量が多いことが分かった。ASTM C618でclass Nポゾラン規格は、SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃が70%以上、SO₃が4.0%以下、強熱減量は10%以下とされている⁶⁾。表1に示した30種類の火山灰はASTM C618のclass Nに適合する組成であった。

表1 火山灰の化学組成(%)

試料No.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	強熱減量
448	3.2	0.6	15.8	70.2	2.9	1.9	0.3	0.1	0.1	3.3	3.6
461	2.5	0.6	22.1	64.0	2.1	2.2	0.4	0.1	0.2	3.9	5.2
467	3.4	0.8	14.1	70.7	2.9	2.7	0.3	0.1	0.1	3.7	3.1
468	3.5	0.8	16.3	69.4	3.0	1.2	0.3	0.1	0.1	3.8	4.6
471	3.2	0.6	18.3	67.5	2.6	2.0	0.3	0.1	0.2	3.5	4.6
474	3.0	2.9	19.0	67.1	0.6	9.8	0.8	0.3	0.1	9.6	2.8
482	2.6	0.6	14.4	72.0	5.7	1.3	0.2	0.2	0.0	1.5	5.5
486	3.0	1.8	16.6	63.3	3.4	5.0	0.5	0.1	0.1	4.6	3.0
496	2.4	0.4	17.1	70.0	4.8	1.3	0.2	0.1	0.1	1.9	5.3
516	2.8	0.5	14.8	70.9	4.7	2.1	0.3	0.1	0.0	2.4	3.9
519	3.0	0.1	13.6	72.0	5.7	1.4	0.2	0.1	0.0	2.5	3.7
526	3.0	0.3	14.0	73.8	5.5	1.4	0.2	0.1	0.0	1.4	2.3
527	3.1	0.4	14.2	71.6	4.5	1.9	0.2	0.1	0.0	2.4	4.6
528	2.2	1.1	14.7	71.7	5.1	1.2	0.1	0.1	0.1	1.9	6.1
530	2.5	0.4	14.2	72.6	5.4	1.1	0.1	0.1	0.0	2.0	5.4
531	3.7	0.6	16.0	66.7	2.2	5.0	0.6	0.1	0.0	3.8	2.8
534	3.7	0.6	15.2	68.3	2.3	4.1	0.6	0.1	0.0	3.8	2.9
538	3.6	0.5	13.8	71.7	2.5	3.1	0.5	0.1	0.0	3.1	4.1
540	3.8	0.4	14.5	70.8	2.1	2.5	0.6	0.2	0.1	3.6	4.0
544	2.5	0.1	14.1	72.7	6.2	1.2	0.2	0.1	0.0	2.6	6.0
555	3.3	1.0	17.7	62.0	0.7	7.0	0.7	0.2	0.0	5.9	1.4
557	3.5	1.2	16.5	63.1	1.9	5.6	0.8	0.1	0.0	5.6	2.1
558	3.1	0.6	19.2	64.1	1.9	3.7	0.8	0.2	0.1	4.8	4.9
566	3.3	0.9	15.1	67.6	1.4	4.9	0.6	0.2	0.0	4.6	3.1
572	3.0	0.6	14.5	71.4	3.8	2.1	0.2	0.1	0.0	2.6	2.9
574	3.2	0.3	13.9	73.2	5.1	1.9	0.2	0.1	0.0	1.8	2.2
580	3.7	0.5	14.8	69.3	4.2	1.9	0.3	0.1	0.0	3.7	3.8
581	2.8	0.5	14.2	72.2	3.7	2.8	0.1	0.0	0.0	2.3	4.1
598	2.4	0.3	14.5	73.3	5.0	1.8	0.2	0.1	0.0	2.0	5.6
osaru	2.8	0.9	14.0	69.9	2.2	4.3	0.4	0.1	0.0	4.0	2.1

3.2 火山灰の鉱物組成および重液分離

図2に火山灰のXRDパターン、表2にRietveld解析により求めた非晶質量と鉱物相および非晶質相の組成を示す。定性分析結果から試料467のような石英、長石等の鉱物が多く、非晶質ピークの低い火山灰、544のような鉱物がほとんどなく、非晶質ピークの高い火山灰、さらにその中間の鉱物組成を有する火山灰に分けられる。定性判断では、ピークが認められれば粘土鉱物有としたが、Rietveld解析では定量値が得

られない場合があった。微量鉱物、粘土鉱物の取り扱いは今後の課題と考える。Rietveld解析により求めた非晶質量の妥当性は、火山灰の非晶質量の真値を知る手法が得られていないため、検証が難しい。ここでは、重液分離により求めた非晶質量割合との比較を試みた。

表3に各鉱物の密度、表4に各火山灰の密度と密度2.4g/cm³以下の割合を示す。さらに、重液分離後の顕微鏡写真を図3に示す。表3からガラス以外の石英、長石、雲母、角閃石は、いずれも密度2.4g/cm³以上であり、分離可能と予測される。図3に示すように、火山ガラス粒子は光学的等方体であるため直交ニコルでは暗黒となる。浮遊粒子には、長石（白色）がわずかに混入しているが、そのほとんどがガラス粒子からなる。沈降粒子は、浮遊粒子よりも相対的に粒径が大きく、またガラス粒子のほか、長石（白色）と輝石（白色）が認められた。このことから、沈降粒子には、大きな粒子と重い粒子が濃縮されているが、火山ガラスも含まれており、ガラス含有量の推定には、多少の誤差が生じる可能性があることがわかった。

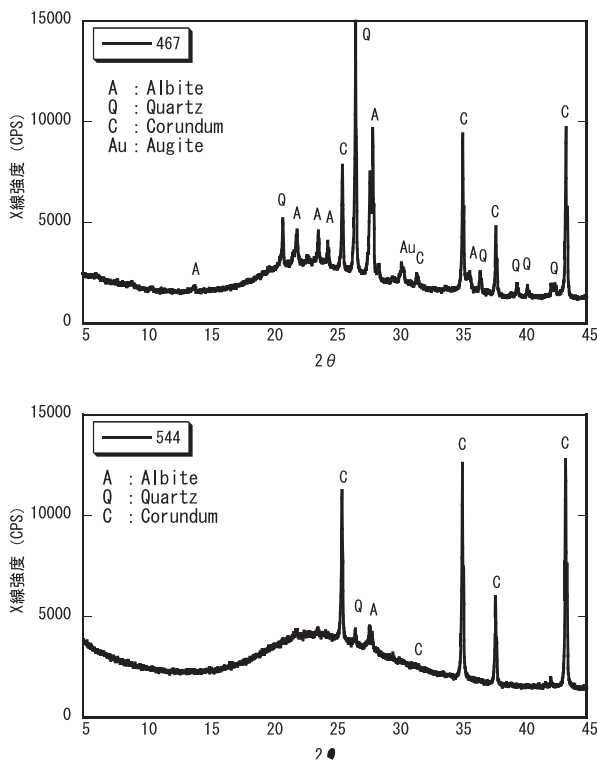


図2 火山灰のXRDパターン
 上 試料467 非晶質量 70.1%
 下 試料544 非晶質量 91.5%

表2 Rietveld解析による非晶質量と鉱物割合

	非晶質量		鉱物割合(%)					
	(%)	石英	曹長石	中性長石	曹灰長石	輝石	黒雲母	その他
448	88.4	3.3	2.3			0.3	0.2	灰長石 1.9
467	70.1	7.8	4.5	6.3	7.6			磁鉄鉱 0.7
468	74.6	6.7	14.1					
471	84.5	3.8	1.3		5.9			
482	84.3	2.9		4.4	2.6		0.3	
496	68.1	5.1	5.4		14.4		0.5	カオリン 1.2
519	90.1	0.7			5.5			
526	75.6	7.8			14.3			
528	90.1	1.5		1.1	1.2			
530	88.6	2.1		1.8	2.2			
531	63.3	0.6			33.4			
534	58.4	0.8	16.5		21.4			
538	73.9	0.7			21.3			
540	87.1	0.6	2.1		6.3			
544	91.5	0.3	0.1		2.1			
555	51.1	6			41.5			
557	51.3	3.8			42.8			
558	72.8	0.7	4.8		16.7			
566	50.7	6.2			40			
572	68.6	8			20.5			
574	75.1	5.6		3	13.7		0.5	
580	71.7	2.7		2.4	19.5			
581	60.5	10.3			25.1			
598	93.6	0.2	0.6					
osaru	46.6	13.3			34.9			角閃石 3.2

表3 各鉱物の密度 (g/cm³)

- 鉱物組成
- ・ガラス(2.4)
 - ・ケイ酸塩鉱物
 - 石英:2.7、クリストバライト:2.3、トリジマイト:2.3
 - 曹長石:2.62、灰長石:2.76
 - 正長石:2.6、角閃石:3.3、黒雲母:3.3
 - ・粘土鉱物
 - イライト、カオリナイト、スメクタイト:2.6-2.8

表4 各火山灰の密度と密度2.4g/cm³以下の割合

試料	2.4g/cm ³ 以下割合(%)	密度 (g/cm ³)	試料	2.4g/cm ³ 以下割合(%)	密度 (g/cm ³)
448	87.46	2.45	531	65.34	2.54
461	93.17	2.59	534	89.68	2.57
467	88.31	2.51	538	94.44	2.48
468	96.71	2.51	540	95.37	2.51
471	89.05	2.48	544	83.44	2.37
474	13.23	2.63	555	53.58	2.63
482	84.59	2.42	557	68.01	2.63
486	74.83	2.59	558	74.35	2.57
496	95.17	2.47	566	64.14	2.58
516	62.78	2.50	572	92.41	2.47
519	92.31	2.40	574	88.72	2.51
526	93.55	2.49	580	85.80	2.48
527	73.85	2.48	581	89.80	2.47
528	92.81	2.42	598	96.61	2.43
530	92.64	2.43	osaru	51.75	2.55

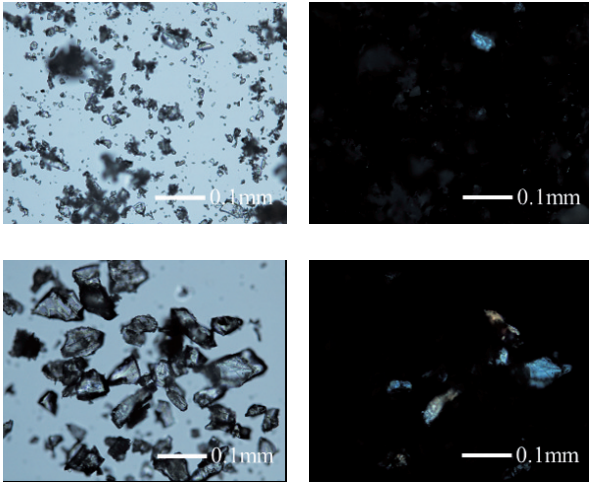


図3 重液分離後の顕微鏡観察

浮遊粒子(上): 平行ニコル観察(左), 直交ニコル観察(右).
沈降粒子(下): 平行ニコル観察(左), 直交ニコル観察(右).

図4にRietveld解析による非晶質量と重液分離により求めた密度 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ 以下の粒子の割合の関係を示す。ばらつきが認められるが、相関係数 0.7 程度であり、正の相関が認められた。以上から、Rietveld解析による非晶質量は重液分離による非晶質量と対応しており、非晶質量は概ね妥当なものであると判断した。

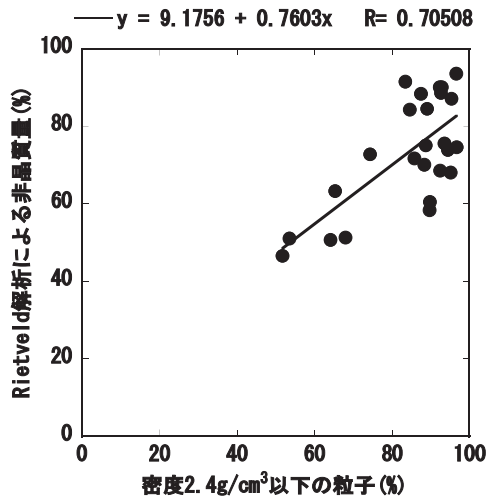


図4 Rietveld解析による非晶質量と重液分離により求めた $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ 以下の粒子の割合の関係

3.3 ポゾラン反応性の評価

3.3.1 EN規格による評価

図5にEN196-5-2005 Methods of testing cement-Part5: Pozzolanicity test for pozzolanic cementによる反応性の評価を示す。これは材齢15日の結果である。セメント+火山灰+水試料を 40°C で反応を促進させた後、ろ過し、ろ液に存在する水酸化物イオンとカルシウムイオンを実測する。その

結果が、カルシウムイオン飽和曲線の上部にあればポゾラン反応性なし、下部であれば反応性ありと判断される。図中の実線が飽和曲線であり、本検討での試料は、すべて反応性ありと判断された。

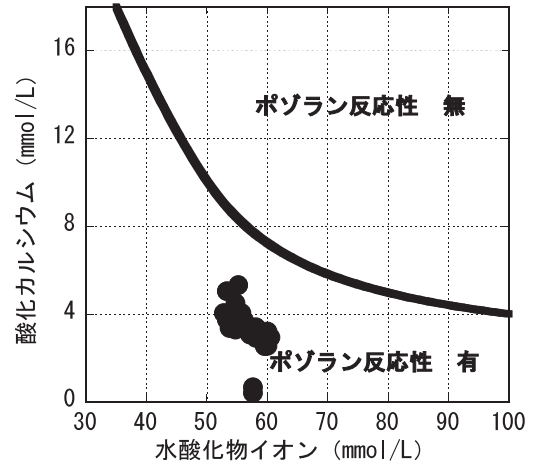


図5 EN規格によるポゾラン反応性試験

3.3.2 酸-アルカリ溶解法による評価

酸-アルカリ溶解法により求めた反応率を表5に示す。表から反応日数の増加により反応が促進し、火山灰単体では、ほとんど反応せず、セメントはほぼ100%の反応率を示した。

表5 酸-アルカリ溶解法による各火山灰の反応率

	反応率(%) 15日	反応率(%) 60日	反応率(%) 火山灰
448	35.0	50.0	4.7
461	32.8	58.5	6.7
467	39.5	52.0	7.7
468	39.6	47.5	5.7
471	34.7	46.1	10.5
474	41.8	52.3	8.0
482	34.3	52.1	5.4
486	27.2	49.2	7.7
496	32.4	58.2	4.9
516	32.4	60.4	3.1
519	28.5	56.4	3.4
526	32.1	65.9	1.9
527	42.0	61.6	5.8
528	38.4	60.0	7.0
530	29.5	59.1	5.0
531	43.4	63.5	5.1
534	39.5	64.1	3.7
538	46.8	66.3	3.8
540	34.8	57.7	3.3
544	48.4	60.3	3.1
555	47.2	62.1	5.8
557	54.9	61.6	5.6
558	53.5	63.7	5.8
566	49.1	64.7	5.0
572		49.0	3.6
574	43.9	64.1	2.9
580	44.2	53.6	2.8
581	56.6	62.7	2.8
598	74.0	66.0	3.1
osaru	41.7	55.2	6.2
セメント	97.4	98.7	

図6に酸-アルカリ溶解前後の火山灰とその残渣のXRDパターンを示す。酸-アルカリ溶解法により非晶質のハローピーク（面積，高さ）が減少しており，可溶性物質は，非晶質相（ガラス相）が多いことが確認された。

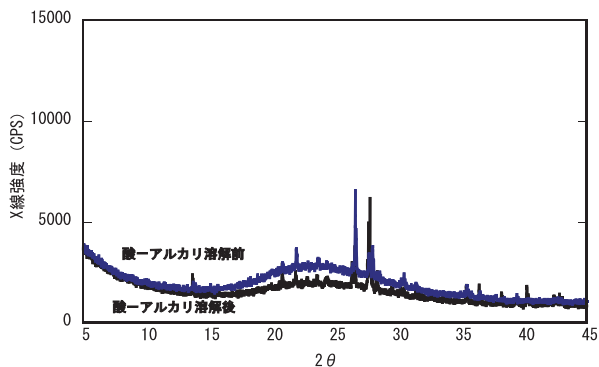


図6 火山灰と酸-アルカリ溶解法残渣のXRDパターン

表6に酸-アルカリ溶解法による可溶性物質の化学組成を示す。酸-アルカリ溶解前後の火山灰とその残渣の化学組成から可溶性物質の組成を算出した。表6から火山灰の組成と可溶性物質の組成は良く一致しており，反応に寄与する火山ガラスは，火山灰がガラス化したものと推測される。

表6 酸-アルカリ溶解法による可溶性物質の化学組成 (%)

試料名	448		482		516		555	
	火山灰	可溶性物質	火山灰	可溶性物質	火山灰	可溶性物質	火山灰	可溶性物質
Na ₂ O	3.2	3.8	2.6	3.9	2.8	4.9	3.3	4.7
MgO	0.6	0.6	0.6	0.7	0.5	0.8	1.0	1.2
Al ₂ O ₃	15.8	14.2	14.4	14.3	14.8	15.9	17.7	20.0
SiO ₂	70.2	73.0	72.0	70.0	70.9	69.1	62.0	60.0
K ₂ O	2.9	3.1	5.7	4.5	4.7	3.5	0.7	0.5
CaO	1.9	2.2	1.3	4.7	2.1	3.3	7.0	8.1
TiO ₂	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.7	0.5
Fe ₂ O ₃	3.3	2.0	1.5	1.0	2.4	1.7	5.9	4.4

3.3.3 火山灰の微粒分の反応性

図7に火山灰別，養生温度ごとに材齢と火山灰の反応率の関係を示す。図からすべての火山灰，養生温度で材齢の進行に伴い，反応率の増加が認められた。40℃では，91日以降で反応率の増加が緩慢となった。また，火山灰種類により反応速度が異なる傾向が認められた。

以上から酸-アルカリ溶解法は，火山灰の反応性指標として有効であることがわかった。

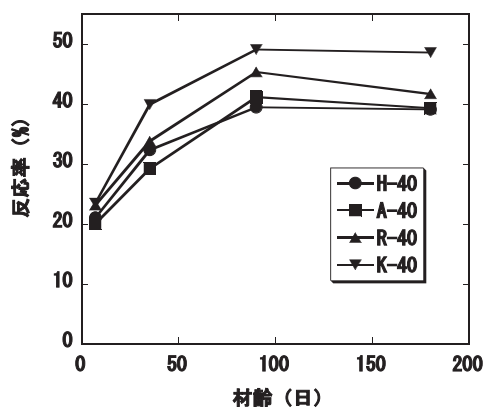
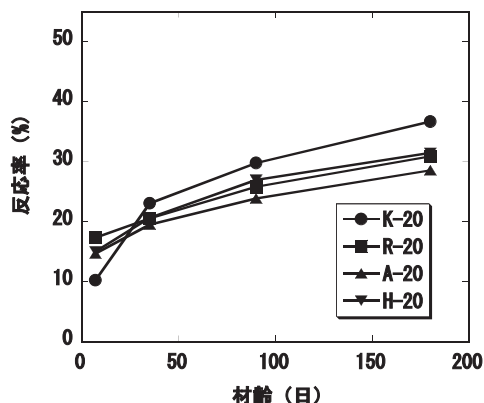


図7 材齢と火山灰の反応率

4. おわりに

北海道内に分布する未利用資源である火山灰の品質，賦存量に関する調査を行い，コンクリート用混和材としての利用可能性に関する検討を行った結果，次のことがわかった。

- 1) 火山灰中にはSiO₂・Al₂O₃含有量が多く，火山ガラスを含有しており，ポズランとして活用できる。
- 2) Rietveld解析による非晶質量は重液分離による非晶質量と対応しており，非晶質量は概ね妥当なものであると判断した。これにより，火山ガラス含有量の推測が可能となった。
- 3) EN規格では，すべての火山灰試料で「ポズラン反応性有り」と評価され，ポズラン源として利用できることがわかった。
- 4) 火山灰の反応率は，酸-アルカリ溶解法により測定でき，材齢の進行とともに増加した。酸-アルカリ溶解法は，火山灰の反応性指標として有効であることがわかった。
- 5) 北海道内の火山灰は，コンクリートへの利用が可能となり，耐久性向上に寄与できると考えられる。

謝辞

本研究で使用したICP発光分光分析装置，X線回折装置は，公益財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 長滝重義監修：コンクリートの長期耐久性 [小樽港百年耐久性試験に学ぶ]，技報堂出版，(1995)
- 2) 武若耕司：シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状，コンクリート工学，Vol.42, No.3, pp.38-47, (2004)
- 3) ACI 232.1R-00 (Reapproved 2006), Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete, Reported by ACI Committee 232
- 4) 武若耕司：しらすを利用したコンクリート用混和材の開発に関する研究，J.Soc.Mat. Sci. , Japan, Vol.48, No.11, pp.1300-1307, Nov.1999
- 5) 大沢栄也，坂井悦郎，大門正機：フライアッシュセメント系水和におけるフライアッシュの反応率，セメント・コンクリート論文集，No.53, pp.96-100, (1999)
- 6) ASTM C618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete

マイクロ・メソ多孔体への発根促進物質の吸脱着挙動

執行 達弘, 野村 隆文, 吉田 憲司, 橋本 祐二, 可児 浩, 山岸 暢

Adsorption and Release Behaviors of Root-Promoting Substances on Porous Silica-Based Ceramics

Tatsuhiko SHIGYO, Takafumi NOMURA, Kenji YOSHIDA
Yuji HASHIMOTO, Hiroshi KANI, Tohru YAMAGISHI

キーワード：シリカゲル, ゼオライト, 道産天然無機資源, 発根促進物質, 吸脱着挙動

1. はじめに

北海道では、粘土、珪藻土、ゼオライトをはじめとする多様な天然無機資源が大量に産出される¹⁾。これらの多くは多孔質、すなわち、原子サイズ～マイクロメートル規模の細孔を有するため、吸着材原料として有望である。天然ゼオライトは、合成ゼオライトと比べると純度、機能では劣る傾向にあるが、埋蔵量が無尽蔵とも言われることから、圧倒的に低コストでの入手が可能である。また、国内では主に北海道南西部と本州の日本海側で産出する貴重な地場資源でもある。原子サイズの細孔に起因する、優れた陽イオン交換能や水分・ガス吸着能を示すことから、地力増進法で定められた土壌改良材²⁾、乾燥材³⁾、各種ガス吸着材⁴⁾などとして利用されている。

道産天然無機資源は主に建材分野で利用されている。そのため、吸脱着挙動評価は水蒸気（乾燥、調湿）、揮発性有機化合物ガス（空気清浄）、臭気ガス（脱臭）などを対象とし、気相中で行われる⁵⁾。しかし近年、環境分野におけるアンモニア態窒素⁶⁾、農業分野におけるジャガイモシストセンチュウ防除成分⁷⁾や発根促進物質⁸⁾などを対象とする、幅広い分野からの液相中での評価の要望が増えている。発根促進物質とは、農作物の生産性向上に寄与する植物成長調整剤の一種である⁹⁾。一般に溶液状で用いられるが、天然無機資源を吸脱着担体として用いる製剤化の試みがあり¹⁰⁾、最低有効濃度（発根促進作用が見られる最低の濃度）以上、最高許容濃度（薬害など好ましくない作用を起こさない最高の濃度）以下での脱着量を確認できることが重要である。また、固液系で

の吸着には、広範な研究が行われている気固系（吸着材と吸着質の系）での吸着に対し、第三成分として溶媒が関与する。そのため、吸着材-溶質間の相互作用に加えて、吸着材-溶媒間、溶質-溶媒間の相互作用も考慮に入れる必要があり、非常に複雑となることが知られている¹¹⁾。

本研究では、道産天然無機資源の有効利用の拡大および材料開発による高度利用を目的とし、その一環として液相中での物質の吸脱着挙動評価を行った。多孔特性や表面性状が制御された3種類の合成物に対し、固液系における発根促進物質の吸脱着挙動を明らかにした後、道産天然無機資源から成る資材にも適用し、農業用資材への展開の可能性および材料開発の方針について検討した。

2. 実験方法

2.1 吸着材のキャラクタリゼーション

合成物として、シリカゲル（富士シリシア化学(株)製CARi ACT Q3; SSQ3）、ゼオライト（東ソー(株)製HSZ-640HOD1A; SZ64 (Si/Al=18)、HSZ-690HOD3A; SZ69 (Si/Al=230で、より疎水性))を用いた。

道産天然無機資材としては、ゼオライト（(株)共成レンテム製とかちゼオライト)⁸⁾と、細孔容積の増加を目的とした稚内層珪質頁岩（(株)稚内グリーンファクトリー製¹²⁾の複合体（TZWS）を用いた。両粉末を重量比1:1で混合、加水（20 mass%）後、水分を均一に浸透させるため24h静置した。得られた粉末をディスクペレットにより直径3mm、長さ約6mmの円柱状に成形した。作製した成形体は40°Cで24h乾燥した後、空气中、600°Cで2h焼成して複合体を得た。

吸着材について、X線回折（XRD）により生成相を同定し、電界放射形走査電子顕微鏡（FE-SEM）により微細構造を観察した。多孔特性の評価として、窒素ガス吸着法による細

事業名：経常研究

課題名：有機・無機複合による低コスト・高度徐放性制御材料の開発（平成24～25年度）

孔容積（細孔径分布）と表面積の測定，水中アルキメデス法による気孔率の測定を行った。

2.2 発根促進物質の吸脱着挙動評価

育苗時に散布処理することで，植物の発根を促進，活着・生長を早め，収量を増加させる発根促進物質として，フェニル乳酸（PLA；Phenyl Lactic Acid，分子式： $C_9H_{10}O_3$ ，分子量：166（図1））を用いた。

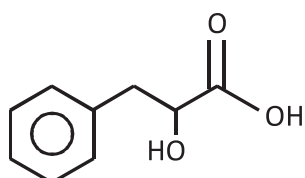


図1 フェニル乳酸の構造式（0.9nm）

吸着挙動の評価では，150℃（シリカゲル）または200℃（ゼオライト）で24h乾燥させた吸着材を，PLAが0.25～1.5 mg/cm³，クエン酸緩衝液が100mmol/cm³（pH=3； $C_6H_4(OH)(COOH)_3H_2O$ ， $Na_3C_6H_5O(COO)_3 \cdot 2H_2O$ ）またはリン酸緩衝液が50mmol/cm³（pH=7； KH_2PO_4 ， $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ ）となるように調製した溶媒に入れ，8℃または23℃で最長16日間攪拌（400rpm）した。その後，高速液体クロマトグラフ（UV法，258nm）によりPLA吸着量の経時変化および平衡吸着量と平衡濃度を測定した。脱着挙動の評価では，23℃で0.5日間（道産天然無機資材）または12日間（合成ゼオライト）PLAを吸着した試料を乾燥後，蒸留水に投入し，同様にPLA脱着量の経時変化を測定した。

3. 結果と考察

3.1 吸着材のキャラクタリゼーション

図2に，各種吸着材のXRD図を示す。SSQ3（図2（a））は非晶質，SZ64（図2（b））およびSZ69（図2（c））はゼオライトであるモルデナイト相（●）の単一相，TZWS（図2（d））は，とかちゼオライト由来であるモルデナイト相，石英相（▲）^{8）}および稚内層珪質頁岩由来であるクリストバライト（オパールCT）相（■）^{12）}の混合相であることがわかった。天然ゼオライト（図2（d））のモルデナイト相は，合成ゼオライト（図2（b），（c））よりも結晶性がよくなかった。

図3に，各種吸着材の微細構造を示す。SSQ3（図3（a））は低倍では平滑な平面に見えたが，拡大すると直径数十nmの球状粒子から成る均一な微細構造を有することがわかった。SZ64（図3（b））およびSZ69（図3（c））では，直径数～数

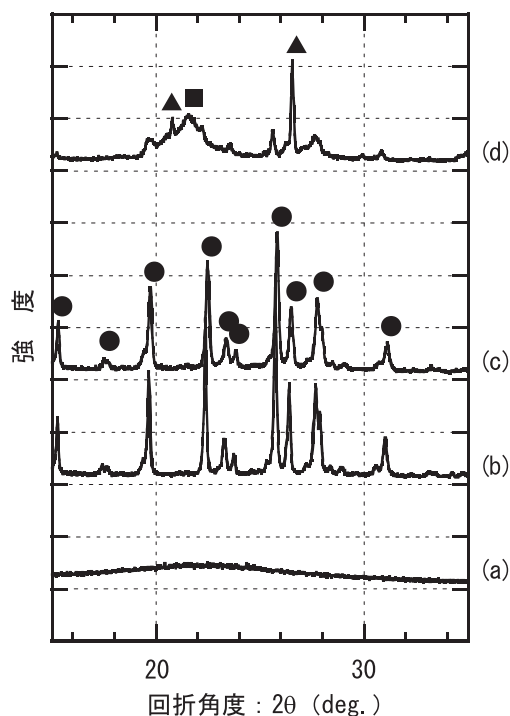


図2 各種吸着材のXRD図

(a)SSQ3, (b)SZ64, (c)SZ69, (d)TZWS

(●) モルデナイト： $(Ca,Na_2,K_2)Al_2Si_{10}O_{24} \cdot 7H_2O$

(▲) 石英： SiO_2

(■) クリストバライト（オパールCT）： SiO_2

十nmの球状あるいは針状粒子で構成される二次粒子が，多孔質な構造を形成していた。TZWS（図3（d））では，とかちゼオライト中のモルデナイトに特徴的な，数十μmにわたる針状粒子^{8）}に加えて，稚内層珪質頁岩に特徴的な，数μmの珪藻殻が風化してできた数十nmの球状粒子の集合体^{12）}が観察された。

表1に，各種吸着材の多孔特性を示す。ここで，（1）ゼオライトはマイクロ孔を有する，（2）合成シリカゲルSSQ3は3nm付近を中心とする急峻なピークをもつ細孔径分布を示すが，大部分が2nm以下のマイクロ孔に分布することから，細孔容積と比表面積の算出にはマイクロ孔の評価に適した as 法を用いた。ただし，稚内層珪質頁岩は大量のメソ孔を有するため^{12）}，TZWSについてはメソ孔の評価に適したDH法およびBET法で求めた値も併記した。これより，合成物であるSSQ3，SZ64，SZ69では細孔容積が0.29～0.31cm³/g，比表面積が594～683m²/gと同様の特性を示した。一方，TZWSは合成物と比較すると細孔容積で0.21cm³/gと3分の2程度，比表面積では72m²/gと8～9分の1程度しかないとわかった。なお，稚内層珪質頁岩で造孔せず，とかちゼオライトのみを600℃焼成した場合，細孔容積は0.05cm³/g，比表面積は15m²/gまで低下した。気孔率は37～53%であり，SZ64とSZ69はそれぞれ53%と50%で，50%以上であった。

表 1 各種吸着材の多孔特性

試料名	細孔容積 (cm ³ /g)	比表面積 (m ² /g)	気孔率 (%)	ピーク細孔径 (nm)
SSQ3	0.29	594	39	3 ^{a)}
SZ64	0.29	647	53	0.3- 0.7 ¹³⁾
SZ69	0.31	683	50	0.3- 0.7 ¹³⁾
TZWS	0.21	72	37	0.3- 0.7 ¹³⁾ および3.7 ^{b)}
	0.22 ^{b)}	78 ^{c)}		

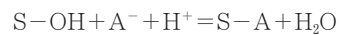
a) : カタログ値, b) : DH法, c) : BET法

SZ64: Si/Al=18に対してSZ69はSi/Al=230で、より疎水性
TZWSはゼオライト由来(0.3- 0.7 nm)と稚内層珪質頁岩由来(3.7 nm)のバイモーダルなピーク細孔径を有する

3.2 合成物への発根促進物質の吸着挙動評価

図 4 に、pH= 3 およびpH= 7 におけるSSQ3, SZ64への発根促進物質 (PLA) の吸着量の経時変化を示す。いずれのpHにおいても、SZ64 (図 4 (c), (d)) の方がSSQ3 (図 4 (a), (b)) よりも吸着量が大きかった。表 1 より、SSQ3とSZ64の細孔容積、比表面積の値に顕著な差が見られず、また、後述する通り気孔率が吸着量に及ぼす影響は小さいことから、PLAの吸着には3 nmのメソ孔よりも0.3~0.7nmのマイクロ孔の方が好ましいことがわかった。分子サイズを考慮すると、PLAは直鎖方向に吸着していると考えられる。また、細孔径が吸着質の直径に近いマイクロ孔内では、向かい合う細孔壁および吸着質間のポテンシャル場が重なる¹¹⁾。そのため、吸着質の吸着エネルギーおよび吸着質間の相互作用も著しく大きくなり、吸着量も大きくなったと推察される。

SSQ3, SZ64, いずれにおいても、pH= 3 (図 4 (a), (c)) の方がpH= 7 (図 4 (b), (d)) よりも吸着量が大きかった。酸性下での固体表面への陰イオンの吸着では、



ここで、Sは固体表面、A⁻は陰イオン

という反応が起こる。したがって、pHが低いほど反応が右に進み、吸着量が大きくなったと考えられる。

平衡吸着量に達する時間については、SSQ3 (図 4 (a), (b)) で8日、SZ64 (図 4 (c), (d)) で16日以上であった。ゼオライトのもつ細孔が微細であるため、吸着質の拡散が律速になっているものと考えられる。

図 5 に、SZ64 (図 4 (c) に相当) および、より疎水性であるSZ69へのPLAの吸着量の経時変化を示す。SZ69 (図 5 (b)) の方がSZ64 (図 5 (a)) よりも吸着量大きいことが明らかであり、16日目では約7倍となった。表 1 より、SZ64とSZ69の多孔特性に顕著な差が見られないことから、本研究の系において、ピーク細孔径を除く細孔容積、比表面積、気孔率が吸着量に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、PLAは親水性のカルボキシ基 (-COOH) に加えて、疎水

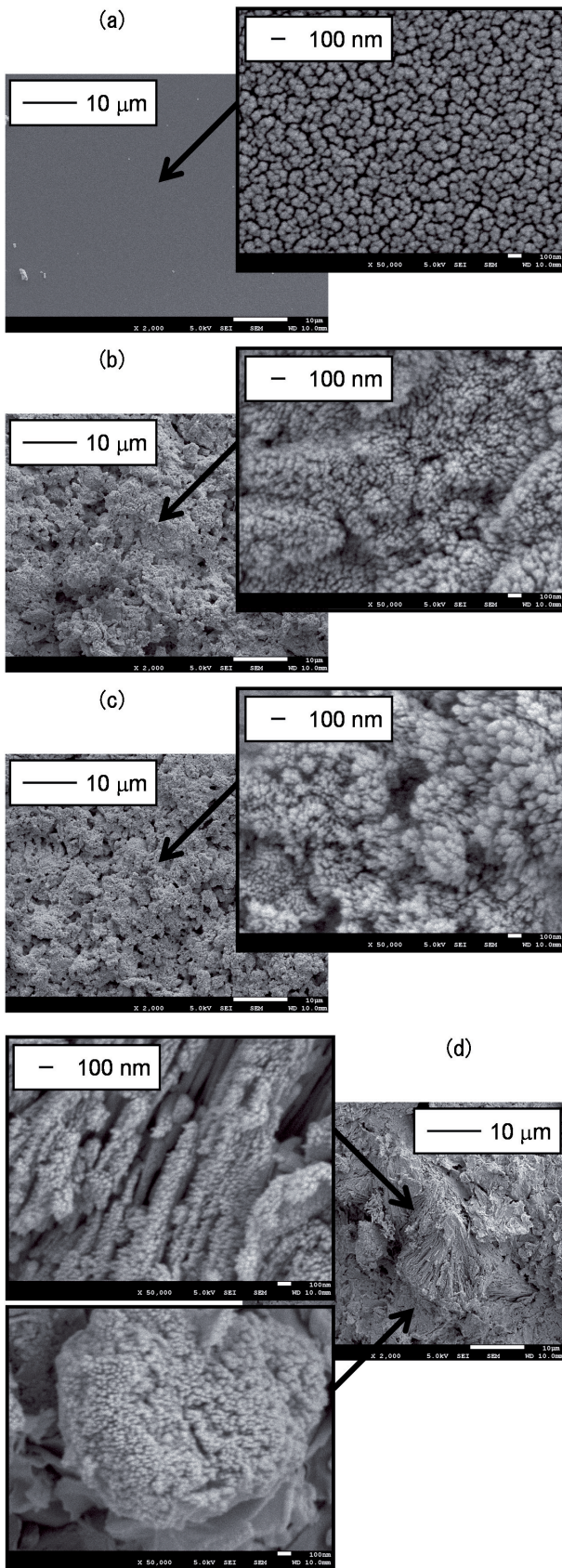


図 3 各種吸着材の微細構造
(a)SSQ3, (b)SZ64, (c)SZ69, (d)TZWS

性のフェニル基 (C₆H₅-) を有している。また、溶媒 (蒸留水) の極性が高いので、溶質 (PLA) の吸着にとって吸着材の極性は低い方が好ましい。そのため、より疎水性である SZ69での吸着量が大きくなったと推察される。

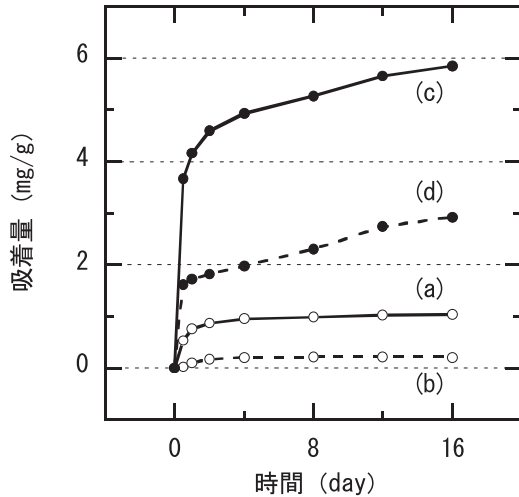


図4 親水性吸着材へのPLA吸着量の経時変化
(a)pH=3および(b)pH=7, SSQ3
(c)pH=3および(d)pH=7, SZ64
吸着温度: 23°C

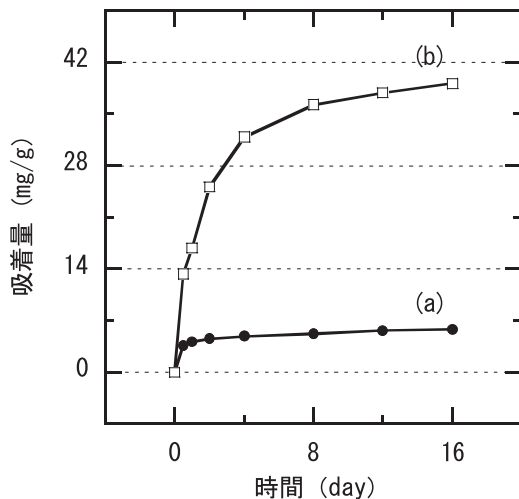


図5 疎水性吸着材へのPLA吸着量の経時変化
(a)SZ64, (b)SZ69
pH=3, 吸着温度: 23°C

図6に、SSQ3 (図6(a)), SZ64 (図6(b)), SZ69 (図6(c)) に対するPLA吸着等温線 (23°C) を示す。これは、SSQ3では8日間、SZ64およびSZ69では12日間、初期濃度を0.25~1.5 mg/cm³に変化させてPLAを吸着させたときの濃度を横軸に、吸着量を縦軸にとったものである。いずれも

平衡濃度が増加するに伴い吸着量も増加し、上に凸の曲線を描いた。吸着材表面と吸着質間に吸着を促進させる引力がはたらいっている場合に相当する。さらに、測定データを、

$$1/W = 1/W_s + (1/a W_s)(1/C)$$

ここで、Wは平衡吸着量、W_sは飽和吸着量、aは吸着平衡定数、Cは平衡濃度

に適用、すなわち、図6(a)~(c) から得られる (1/C) の値を横軸に、(1/W) の値を縦軸にプロット (Langmuirプロット) したところ、いずれも直線関係が成立した。したがって、Langmuirの理論により、PLAは吸着材表面の吸着サイトに単分子層吸着していると近似可能である。また、直線を外挿して得られる切片は (1/W_s) に相当することから、W_s (飽和吸着量) を算出した。SSQ3, SZ64, SZ69のW_sはそれぞれ4.4, 6.9, 53mg/gであった。

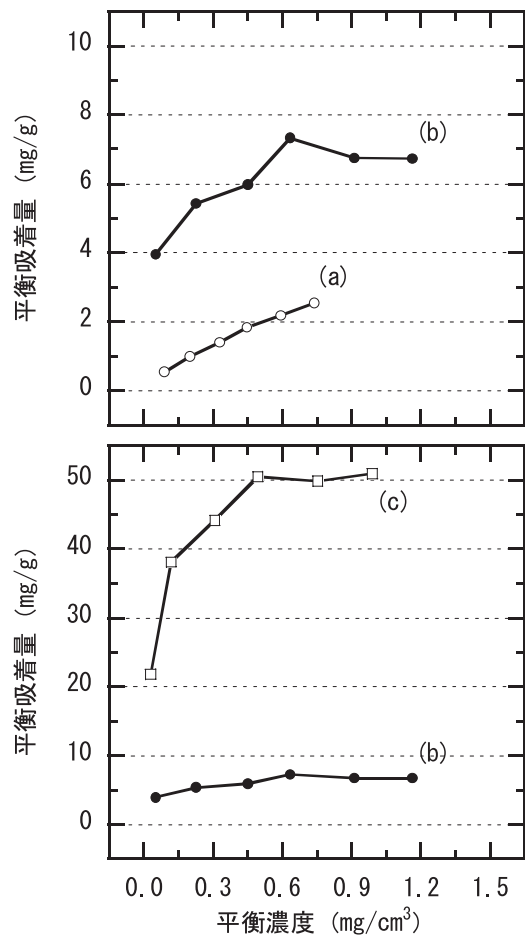


図6 各種吸着材に対するPLAの吸着等温線
(a)SSQ3, (b)SZ64, (c)SZ69
pH=3, 吸着温度: 23°C

吸着材へのPLAの吸着力を評価するため、8°Cまたは23°CでSSQ3では8日間、SZ64およびSZ69では12日間吸着させた吸着等温線を作成し、Clausius-Clapeyronの式

$$\Delta H = \log(C_1/C_2)R/(1/T_1 - 1/T_2)$$

ここで、 ΔH は吸着熱、 C_1 、 C_2 は同一平衡吸着量を示す平衡濃度、 R は気体定数、 T_1 、 T_2 は測定温度

から吸着熱を算出した。SSQ3では7 kJ/molであり、吸着形態は物理吸着と推察される。一方、SZ64、SZ69においては、8℃での吸着量が23℃の場合よりも小さかったため、吸着熱を算出することができなかった。この原因として、(1)温度変化により、吸着質または吸着材の状態（例えばPLAの形状や、大きさ、溶解度など）が変化した、(2)温度変化により、平衡吸着量に達する時間がさらに伸びた、(3)ゼオライトが水を優先的に吸着し、吸着質または吸着材の状態が変化したことなどが考えられる。引き続き実験を行い、吸着熱の算出および吸着力の評価を行う予定である。

3.3 合成物からの発根促進物質の脱着挙動評価

図7に、pH=3、吸着温度23℃で12日間PLAを吸着させたSZ69（図5(b)に相当）を、蒸留水に投入したときのPLAの脱着量の経時変化を示す。これより、PLAは4日間かけて最低有効濃度以上¹⁰⁾を脱着し、それ以降は飽和することが確認できた。図5(b)より、吸着量が36mg/gであることを考慮すると、新しい蒸留水に投入すると再び脱着するものと考えられる。

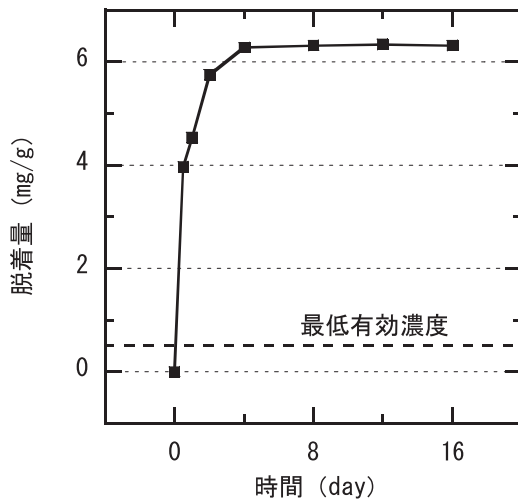


図7 疎水性吸着材からのPLA脱着量の経時変化
SZ69, 脱着温度: 23℃
pH: 投入直後3.2 → 3.9~4.3

以上より、PLAの吸着には、pH=7よりもpH=3の酸性下が好ましく、吸着材としては、メソ孔よりもマイクロ孔を有し、かつ疎水性である方が、飽和吸着量が大きくなり有利であることがわかった。ただし、マイクロ孔を有する材料では平衡吸着量に達するまで、より長い時間を必要とする点に留意が必要である。SZ69の場合、吸着後、蒸留水に投入す

ると4日間かけて最低有効濃度以上を脱着したことから、発根促進物質製剤として有望であると考えられる。

3.4 道産天然無機資材への適用

合成物は機能性や再現性に優れるが、コストが非常に重視される農業分野における使用は現実的ではない。合成物により得られた知見を基に、コスト面で有利である天然無機資源から材料を探索することは有意義である。疎水性という視点では、例えば間伐材の炭化物が有望であると考えられる。しかし、現在想定している製剤化の工程においては、材料が親水性であることが求められる。そこで、親水性の材料の中からTZWSに着目し、そのPLA吸脱着挙動を評価した。

図8に、pH=3におけるTZWSへのPLAの吸着量の経時変化を示す。これより、2hで吸着が平衡に達し、そのときの吸着量は0.13mg/gであることがわかった。合成物と比較すると、平衡吸着量に達する時間が短くなったが、吸着量も数十~数百分の1と著しく小さくなった。

図9に、TZWSに対するPLA吸着等温線（23℃）を示す。この濃度範囲では、吸着量が濃度に比例して直線的に増加するHenry式に適合した。これは、ごく希薄な溶液からの吸着あるいは低被覆率での吸着のときに相当するが、ここでは後者に該当すると考えられる。

吸着熱については、8℃と23℃での吸着等温線に有意差が見られなかったため、合成物と同様に吸着熱を算出することができなかった。しかし、TZWSへのPLAの吸着量が著しく小さくなったことを考慮すると、TZWSでは、吸着熱も小さく、そのために算出することができなかったと考えられる。

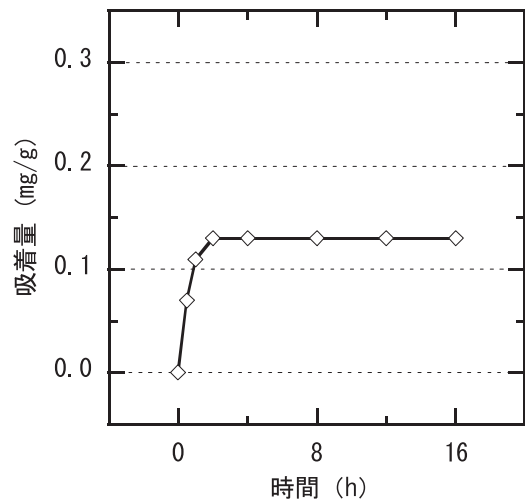


図8 道産天然無機資材へのPLA吸着量の経時変化
TZWS, pH=3, 吸着温度: 23℃

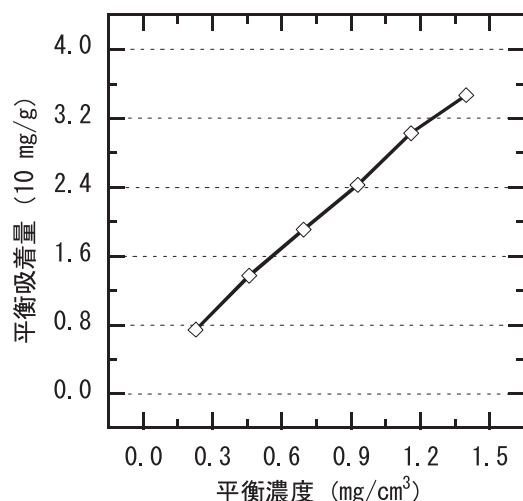


図9 道産天然無機資材に対するPLAの吸着等温線
TZWS, pH= 3, 吸着温度: 23°C

図10に、pH= 3, 吸着温度23°Cで12 h, PLAを吸着させたTZWSを、蒸留水に投入したときのPLAの脱着量の経時変化を示す。これより、TZWSは16 h以上かけて最低有効濃度以上を放出することが確認できた。脱着量としては非常に小さい値ではあるが、最低有効濃度以上であり、資材として利用可能であることが示唆された。吸着等温線から、資材に吸着させるPLA水溶液の初期濃度を増加させることや、複合化などにより可能な限り極性を低下させることで、吸脱着量を増加させ、脱着時間も延長させた材料を開発することができると思われる。今後も、農業分野の研究者と密に情報を交換しながら、研究開発を行う予定である。

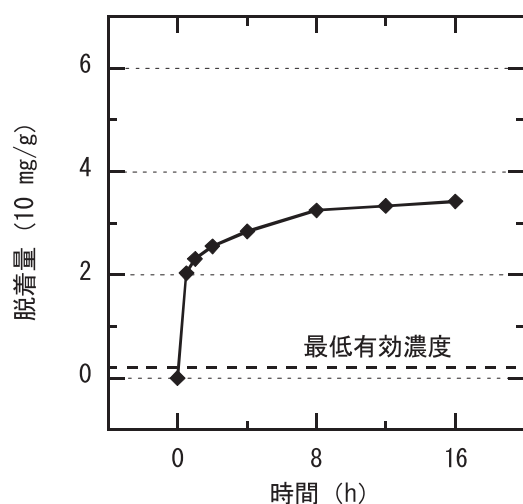


図10 道産天然無機資材からのPLA脱着量の経時変化
TZWS, 脱着温度: 23°C
pH: 投入直後3.2 → 3.6~3.7

4. まとめ

道産天然無機資源の有効利用の拡大および材料開発による高度利用を目的とし、その一環として液相中での物質の吸脱着挙動評価を行った。

細孔容積、比表面積が同等で、気孔率、ピーク細孔径、表面の親水/疎水性が異なる合成シリカゲル (SSQ3), 合成ゼオライト (SZ64およびSZ69) に対し、固液系における発根促進物質 (PLA) の吸着挙動を調べたところ、

- PLA吸着量はpH= 7よりもpH= 3の酸性下で増加する
- 吸着材としては、メソ孔よりもマイクロ孔を有し、かつ疎水性である方が、飽和吸着量が大きくなり (SSQ3: 4.4 mg/g < SZ64: 6.9mg/g < SZ69: 53mg/g) 有利である
- ただし、マイクロ孔を有する材料では平衡吸着量に達するまで、より長い時間 (8日→16日以上) を必要とする
- 気孔率が吸着量に及ぼす影響は小さい

ことがわかった。

pH= 3, 吸着温度23°Cで12日間PLAを吸着させたSZ69を蒸留水に投入すると、4日間かけて最低有効濃度以上を脱着した。

固液系におけるPLA吸脱着挙動評価を、道産天然無機資源から成る資材にも適用したところ、農業用資材として利用可能であることが示唆された。材料設計により、吸脱着量を増加させ、徐放性能を付与した材料の開発が期待される。

謝辞

本研究の多孔特性の評価の一部は、公益財団法人JKAの機械工業振興補助事業において整備された自動蒸気吸着量測定装置により実施しました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 工業技術連絡会議窯業連合部会: 日本の窯業原料, 919 PP., (1992)
- 2) 渡邊裕: ゼオライトと土壌肥料, ゼオライト, Vol.3 No.1, pp.3-10, (1986)
- 3) 高坂彬夫: 食品の真空凍結乾燥における天然ゼオライトの利用, ゼオライト, Vol.3 No.3, pp.12-16, (1986)
- 4) 日本学術振興会鉱物新活用第111委員会・天然ゼオライト利用研究分科会: 天然ゼオライト-利用にあたっての品質評価基準-, 306PP, (2006)
- 5) 野村隆文・赤澤敏之・稲野浩行・吉田憲司・斎藤隆之・勝世敬一: 吸着機能性材料の開発と応用-吸着等温線法による調湿・ガス吸着機能性材料の評価-, 北海道立工業試験場報告, Vol.303, pp.81-89, (2004)
- 6) 三津橋浩行・佐々木雄真・野村隆文・吉田憲司・執行達

- 弘・赤澤敏之：とかちゼオライトを利用した水処理材の特性評価，北海道立工業試験場技術支援成果事例集2008, p.10, (2008)
- 7) 執行達弘・吉田憲司・野村隆文・板橋孝至・赤澤敏之：道産天然無機資源の土壌害虫防除分野への応用，北海道立総合研究機構工業試験場成果発表会発表要旨集, p.19, (2012)
- 8) 執行達弘・吉田憲司・野村隆文・橋本祐二・工藤和彦・赤澤敏之：天然ゼオライトを用いた多孔質セラミックスの開発と発根促進物質の吸脱着特性，北海道立工業試験場報告, Vol.309, pp.53-61, (2010)
- 9) Yoichi Mikami・Hiroyasu Takahara・Hiroko Iimura・Akinori Suzuki・Saburo Tamura：Several Synthetic Hydroxy-acids as Plant Growth Regulators, Agr. Biol. Chem., Vol.34 No.6, pp.977-979, (1970)
- 10) WO 2009/104405 A 1
- 11) 近藤精一・石川達雄・阿部郁夫：吸着の科学, 丸善, 223 PP., (2001)
- 12) 野村隆文・高田忠彦・皿井博美・吉田憲司・岡孝雄・八幡正弘・庄谷幸夫：平成4年度共同研究報告書（北海道立工業試験場・北海道立地下資源調査所）本道珪藻土の高度利用と資源評価に関する研究, 26PP., (1993)
- 13) 原伸宜・高橋浩：ゼオライトー基礎と応用, 講談社, 330 PP, (1995)

バイオポリエステルのリサイクルにおける 機械的特性に及ぼす鎖延長剤の添加効果

可児 浩

Effect of Chain Extender on Mechanical Properties in Recycling of Biopolyester

Hiroshi KANI

キーワード：バイオプラスチック，バイオポリエステル，マテリアルリサイクル

1. はじめに

政府が2002年12月に策定した「バイオテクノロジー戦略大綱」では、バイオプラスチックの利用の拡大が政策目標とされた。枯渇が懸念されている化石資源のみを原料としていたプラスチックの全部または一部を再生可能なバイオマス資源によって生産できれば、化石資源の消費の削減と大気中の二酸化炭素濃度の上昇を抑制することが可能と考えられ、近年もその開発が盛んに行われている。

現在商業生産されているバイオプラスチックとして、ポリエチレン、ポリプロピレンテレフタレート、脂肪族ポリエステル、ポリアミドなどは、ポリエチレンを除き縮合系高分子であり、成形加工時のせん断力など物理的作用のほかに、高温下の加水分解により図1に示すような分子鎖切断が起こる性質を持っている。

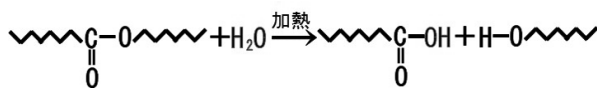


図1 ポリエステルの加水分解

成形加工やリサイクルの際に起こる分子鎖の切断は、引張強さや衝撃強さなど製品性能に影響を与えるのみならず、熔融時の粘度低下など成形加工性にも影響を与えることから、縮合系高分子の成形加工時には、新品の材料を使用する場合においても原料の吸湿に留意することが重要である。

容器類や繊維に使われるポリエチレンテレフタレート（以下、PET）はポリエステルの一種であり、イソシアネート

基やエポキシ基などの多官能基をもつ化合物と反応させ新品やリサイクル品の改質を目的として、分子量を調節する方法が知られている¹⁻³⁾。しかしながら、バイオプラスチックの一種である脂肪族ポリエステルは、当初、その多くが生体内分解吸収性材料や生分解性プラスチックとして開発・使用されてきた経緯から、使用後のマテリアルリサイクルがあまり想定されなかった。今後、石油系プラスチックに置き換わる材料として生産量が増加し、それに伴い廃棄物の排出量が増加した際は、石油系プラスチックと同様に適切な処理により再利用することが求められると考えられる。本研究では、バイオポリエステルのマテリアルリサイクル時に問題となる分子鎖切断による物性低下の問題を解決するため、架橋剤の使用により切断された分子鎖を再結合し、物性低下を最小限に抑え、良質な再生成形品を得ることを目的とした。

2. 実験

はじめに、市販の顆粒状材料（以下、ペレット）をそのまま用いて、射出成形により試験片を作製し、各種物性試験を行い初期物性値を得た。続いて、初期物性試験に用いた試験片を実際のマテリアルリサイクルと同様に粉碎し、架橋剤の有無別に押出成形にてペレットに加工を行った後、再度射出成形で試験片を作製し、再生工程の物性への影響と架橋剤の添加効果を検証した。試験の流れを図2に示す。

2.1 材料

バイオポリエステルとして、ポリ乳酸（ユニチカ㈱製 テラマックTE-2000, 以下PLA）およびポリブチレンサクシネート（昭和電工㈱製 ビオノーレ1020MD, 以下PBS）を使用した。いずれも射出成形用の標準グレードである。なお、バイオマスを原料としたPBSは未だ開発品であるため、今回は石油原料由来のものを使用した。

事業名：公募型研究

課題名：バイオプラスチックのマテリアルリサイクルに関する研究（平成24～25年度）

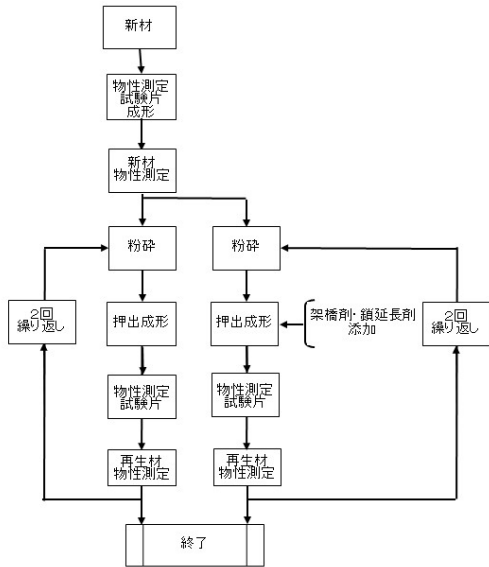


図2 試験の流れ

架橋剤として、エポキシ基含有樹脂（以下EPO）、イソシアネート基含有樹脂（以下ISO）およびカルボジイミド基含有樹脂（以下CAR）を用いた。EPOおよびCARはポリエチレンテレフタレート改質用樹脂として、ISOは接着剤用架橋剤として市販されているものである。

2.2 新品の成形

各プラスチックは射出成形機（東芝機械(株)製 EC100SX）を用い、製造メーカー推奨の成形条件で図3に示す多目的試験片（JIS K7139 タイプA1）を作製し、物性試験に供した。なお、材料包装が未開封であればそのまま成形に供し、残った原料は吸湿しないよう乾燥剤とともに密閉容器に保管した。

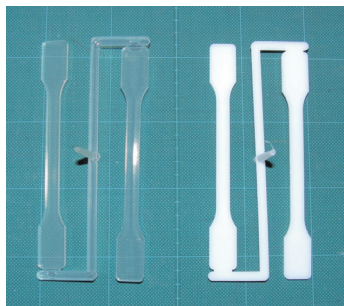


図3 成形した多目的試験片
左：PLA 右：PBS

2.3 リサイクルを模した再成形

物性試験に供した試験片を粉碎機（(株)ホーライ製 P-1328）により粒状に粉碎し、PLAおよびPBSともに80℃で6時間以上真空乾燥を行った後、そのまま、あるいは所定量の架橋剤を加え二軸混練押出機（東芝機械(株)製 TEM-26SS）にて成形し、架橋反応および再ペレット化を行った。再ペレット化の際、プラスチックの冷却に水槽を用いたため、射出成形前に再度真空乾燥し、新材と同様に試験片を作製し物性試験を行った。せん断粘度の測定は溶融樹脂粘度計（Malvern Instruments社製 ROSAND ツインキャピラリーレオメータ RH2000）、引張強さの測定は万能材料試験機（(株)島津製

作所製 オートグラフAG-250kND）、衝撃強さの測定は万能衝撃試験機（(株)安田精機製作所製 No.258）を用い、それぞれ日本工業規格に定められた方法に準拠を行った。

3. 結果

3.1 リサイクル工程のせん断粘度への影響

プラスチックのせん断粘度は分子量の指標となるのみならず、成形加工条件にも影響を与える重要な数値である。また、溶融状態の熱可塑性プラスチックは典型的な非ニュートン流体であり、その粘度はせん断速度により変化する。

2回成形を繰り返したPLAおよびPBSのせん断速度-せん断粘度の関係をそれぞれ図4、図5に示す。いずれの試料においても成形を行う毎に粘度が低下しており、加水分解により分子量が低下していると考えられる。

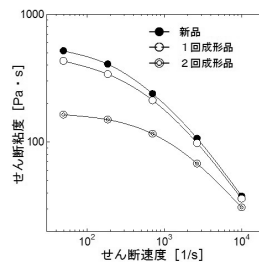


図4 PLAの粘度変化
測定温度：200℃

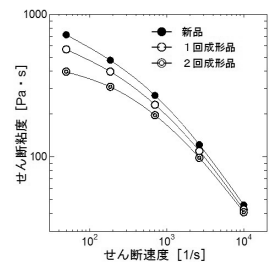


図5 PBSの粘度変化
測定温度：150℃

再成形時に所定量の架橋剤を加え、2回成形を繰り返したPLAおよびPBSのせん断速度-せん断粘度の関係を図6～11に示す。架橋剤を添加した試料は、図7に示したPBSに対するEPOの添加以外では、効果に差はあるがせん断粘度が上昇した。これは、成形加工時の加水分解により切断した分子鎖が架橋剤と反応することで再結合し、その結果粘度が上昇したと考えられる。

以上の結果から、適切な種類と量の架橋剤をリサイクル時に加えることにより、せん断粘度を新材と同程度まで回復できることがわかった。

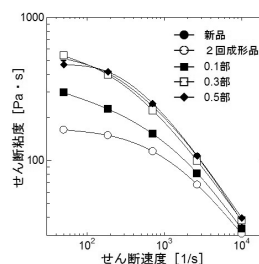


図6 架橋剤の効果 (PLA)
測定温度：200℃
架橋剤：EPO

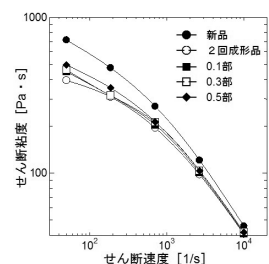


図7 架橋剤の効果 (PBS)
測定温度：150℃
架橋剤：EPO

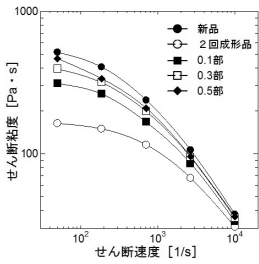


図8 架橋剤の効果 (PLA)
測定温度：200℃
架橋剤：ISO

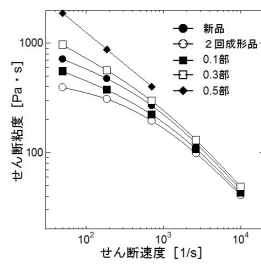


図9 架橋剤の効果 (PBS)
測定温度：150℃
架橋剤：ISO

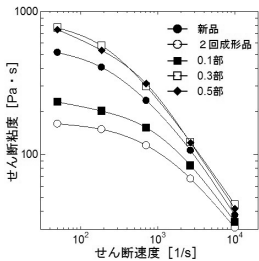


図10 架橋剤の効果 (PLA)
測定温度：200℃
架橋剤：CAR

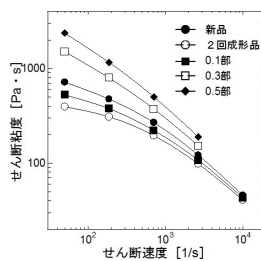


図11 架橋剤の効果 (PBS)
測定温度：150℃
架橋剤：CAR

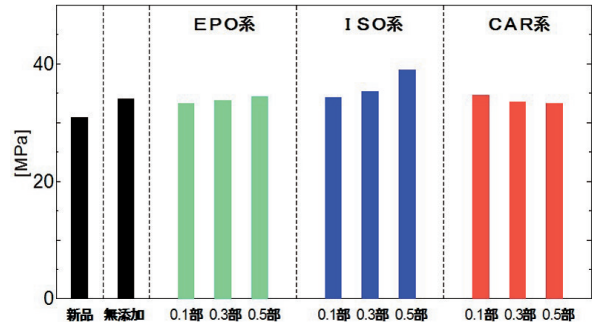


図13 架橋剤の引張降伏強さへの効果 (PBS)

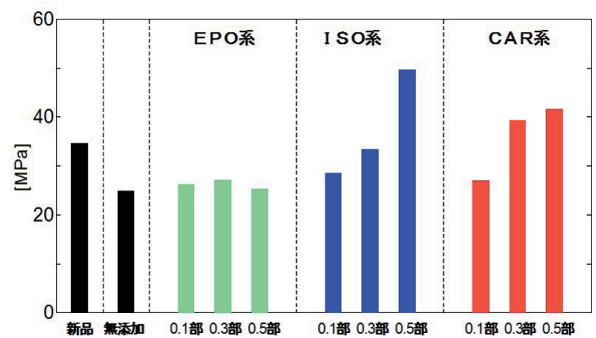


図14 架橋剤の引張破断強さへの効果 (PBS)

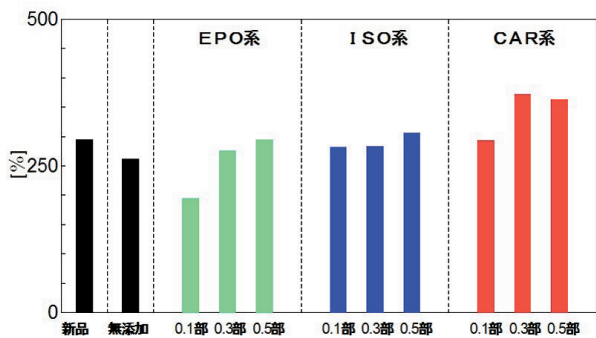


図15 架橋剤の引張破断伸びへの効果 (PBS)

3.2 リサイクル工程の引張強さへの影響

再成形時に所定量の架橋剤を加え、2回成形を繰り返したPLAおよびPBSの引張降伏強さをそれぞれ図12、図13に示す。引張降伏強さは、新品と再成形時の架橋剤の有無による大きな差はみられなかった。

同様の操作を行なったときのPBSの引張破断強さと引張破断伸びをそれぞれ図14、図15に示す。なお、PLAについては降伏後速やかに破断するため明確な引張破断強さが得られなかった。

架橋剤を添加せず、2回成形を繰り返したPBSの引張破断強さは新品の70%程度まで低下する。それに対し架橋剤を添加した試料では、EPOでは添加の効果がみられなかったがISOおよびCARについては添加量が増えるとともに破断強

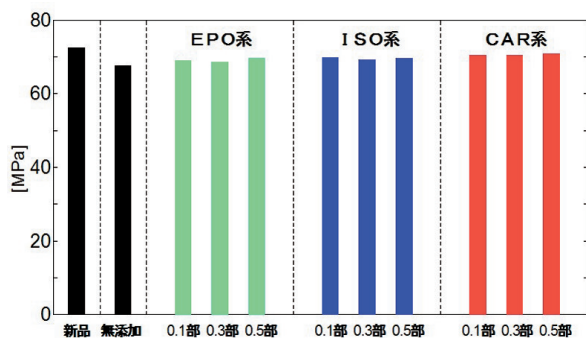


図12 架橋剤の引張降伏強さへの効果 (PLA)

さが増加し、0.3部添加したもので新品とほぼ同等の値が得られた。せん断粘度の場合と同様に一旦切断した分子鎖が架橋剤と反応することで再結合し、その結果破断強さが上昇したと考えられる。

以上の結果から、引張強さについても適切な種類と量の架橋剤をリサイクル時に加えることにより新材と同程度に維持出来ることがわかった。

3.3 リサイクル工程の衝撃強さへの影響

再成形時に所定量の架橋剤を加え2回成形を繰り返したPLAおよびPBSのアイゾット衝撃強さ(ノッチ付き)をそれぞれ図16、図17に示す。衝撃強さは新品と架橋剤無添加で再成形した試料において大きな差は見られなかった。架橋剤を添加した試料ではPLAについては大きな効果は認められ

ないが、PBSに特にISOおよびCARを添加した試料では添加量が増えるとともに衝撃強さが著しく増加し、新品を遙かに超える値が得られた。

以上の結果から、今回使用した2種類のバイオポリエステルはリサイクルによる衝撃強さの低下はみられないものの、PBSについては樹脂改質目的で使用出来る可能性があることがわかった。

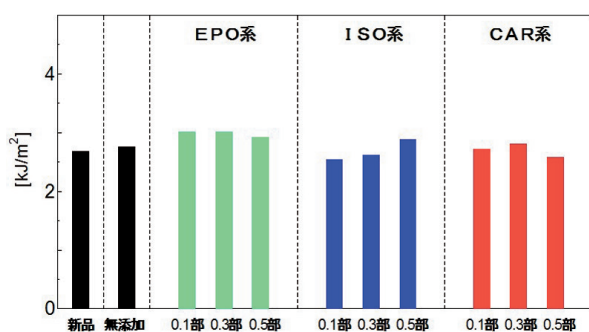


図16 架橋剤のアイゾット衝撃強さへの効果 (PLA)

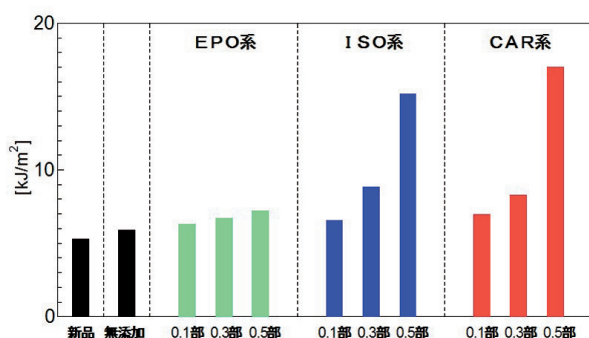


図17 架橋剤のアイゾット衝撃強さへの効果 (PBS)

4. まとめ

- 1) PLAは、成形加工による分子量の低下により溶融粘度が低下するが、リサイクル時に架橋剤（特にEPOとCARが有効）を適切量用いることにより新材と同程度の溶融粘度に回復できる。また、樹脂の吸湿等に留意し適切にリサイクルを行えば物性低下はそれほど大きくない。
- 2) PBSにおいても、PLAと同様に成形加工による分子量の低下により溶融粘度が低下するが、架橋剤（特にISOとCARが有効）を適切な量で用いることにより新材と同程度の粘度に回復できる。ただし架橋剤の効果が大きく、過剰量使用した場合には成形性に悪影響が出る可能性がある。また、リサイクルによる物性低下はみられるが、架橋剤を用いることにより新品と同程度の強度を保つことができる。

謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構（JST）の研究成果最適展開支援プログラムにより実施しました。また、本研究で使用したプラスチック射出成形機、2軸押出機、溶融樹脂粘度計は独立行政法人科学技術振興機構（JST）の地域産学官共同研究拠点整備事業により、万能材料試験機は公益財団法人JKAの機械工業振興補助事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 葭原 法：成形性改良剤の選定と評価方法、上手な使い方、Polyfile, Vol.47 No.553, pp.57-59, (2010)
- 2) 木村次雄・犬飼宏・栢森聡・河合道弘：広がるUFOポリマーの応用展開，東亞合成研究年報，No.6, pp.32-39, (2003)
- 3) 山本清志・片桐正博・宇井 剛・吉野学・原島勝子：再生ポリエステル原料の改質と複合繊維化，東京都立産業技術研究所研究報告，No.7, pp.71-74, (2004) など

原子間力顕微鏡による各種試料の微細形状計測

斎藤 隆之, 坂村 喬史, 片山 直樹

Measurement of the Microscopic Shape of Various Samples by Atomic Force Microscope

Takayuki SAITOU, Takashi SAKAMURA, Naoki KATAYAMA

キーワード：原子間力顕微鏡，微細形状，ハイアスペクト比，生体試料

1. はじめに

近年，工業製品や材料等の表面の微細な凹凸形状評価や表面粗さ計測の要求が増えてきている。例えば，触針式の表面粗さ計では測定不可能なナノメートル以下の光学素子表面の粗さや，開口部にくらべて深さが大きな，すなわちハイアスペクト比であるミクロンオーダーの凹凸形状の評価などである。当場では，平成22年に原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope:AFM）を導入した。本装置は，定量的な表面の微細形状計測を行う装置である。本報では，工業材料やさらに生体試料などを対象として，AFMにより実施した微細形状計測の事例について報告する。

2. 原子間力顕微鏡について

本装置は走査プローブ顕微鏡（Scanning Probe Microscope:SPM）の1種である。SPMは図1に示すように，微小な探針（プローブ）を試料表面に接近させ，局所的な物理

量を検出する。この物理量が一定となるように，フィードバック回路により垂直方向（Z）の圧電体の伸縮を制御する。面内方向（X,Y）の圧電体に電圧を加え，探針を2次元的に走査することでフィードバック電圧により表面像（SPM像）を得ることができる。物理量としては電気的情報，力学的情報，光学的情報，誘電的情報および磁気的情報などがある¹⁾。

カンチレバーと呼ばれる“片持ち梁”の先にある探針と試料間の原子間力を検出して，表面の凹凸を定量的に計測・画像化するのがAFMである（図2）。一對の2個の原子があるとき，その間には距離に依存した力が働く。遠い距離から近づいていくと，まず引力が働きある距離で極大になりその後，弱くなり，さらに近づくと斥力が働く。これらを一般的に原子間力と呼んでいる。この引力あるいは斥力を一定に保つためカンチレバーの変位が一定になるよう垂直方向（Z）の距離をフィードバックし，試料を水平方向（X,Y）にスキャンすると試料表面の凹凸が得られる。カンチレバーの変位の検出にはレーザーと光センサーが用いられる。

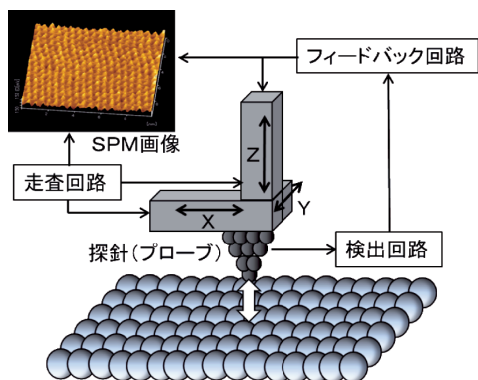


図1 SPMの動作原理

(文献1) 基礎編II第1章 図1.1をもとに再作成)

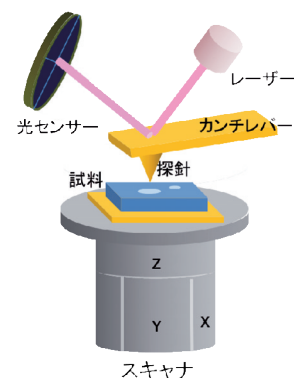


図2 AFMの動作原理

通常，斥力領域で測定されるが，これは探針が試料と接触していることを意味する。この測定法をコンタクトモードと呼ぶ。これに対し，カンチレバーを数k～数百kHzで微小振動させながら試料に接近させていき，振幅の減衰率が一定になるようにZ軸をフィードバックする測定方法もある。これ

事業名：経常研究

課題名：機能性微細表面の計測・解析技術に関する研究

(平成23～24年度)

はダイナミックフォースモードあるいはタッピングモードなどと呼ばれる。このモードは、間欠的な接触であるため、試料や探針の損傷が小さい、軟らかい試料でも真の形状を得やすい等の利点がある。しかし、測定条件の設定が複雑になる、摩擦などの物性が取得できない等の面もありコンタクトモードと使い分けられる。また完全に非接触となるノンコンタクトモードもあり、さらにスローブ検出法や周波数変調法などに細分される。当場の機種で可能な方法は前者のスローブ検出法であるが、今回の報告では使用していない。

3. 実験

試料として工業製品の光学素子、ナノインプリント用のシリコン型および液中での生体試料等を取り上げた。装置は日立ハイテクサイエンス製走査プローブ顕微鏡L-trace IIおよび同E-sweepを用いた。前者(図3)は直径150mmまでの大きな試料が測定可能であり、後者は試料サイズが20mmまでだが大気中のほか真空中・液中での測定および温度制御下での測定が可能であるという特徴をそれぞれ有している。表1にそれぞれの仕様を示す。試料サイズや測定内容で機種を選択し、試料ごとに適切な形状計測ができるよう測定条件を検討した。



図3 走査プローブ顕微鏡(L-trace II)

4. 事例と計測結果

4.1 光学素子の表面粗さ

道内で光学素子を製造する企業から水晶表面の粗さ計測の要望があった。ナノメートルオーダーと予想されたが、触針

式の粗さ計では測定が不可能な領域で、走査プローブ顕微鏡で実施した。装置はL-trace IIを用いダイナミックフォースモードで行った。このような硬い試料についてはコンタクトモードとの差はほとんど無いと言われているが、試料とカンチレバーへのダメージが少ないモードとして前者を選んだ。測定に用いた条件を表2に示す。

これらのパラメータの意味を簡単に記述する。モードは前述の通りである。カンチレバーは代表的な特性であるバネ常数 K と全長 L を括弧内に示している。振幅減衰率 ΔA の -0.283 とはもとの振幅から28.3%の減衰を意味する。P, Iゲインは、 ΔA を一定に保つZ軸フィードバックのための、誤差信号での比例、積分制御項のそれぞれの係数である。Qカーブ測定倍率とはカンチレバー変位の検出電圧の電気的増幅率、加振電圧はカンチレバーを振動させる圧電素子への電圧、Q値は共振周波数でのピークの鋭さ、動作周波数は実際に振動させた周波数である。また走査周波数はスキャンの周波数で上記振動とは無関係である。

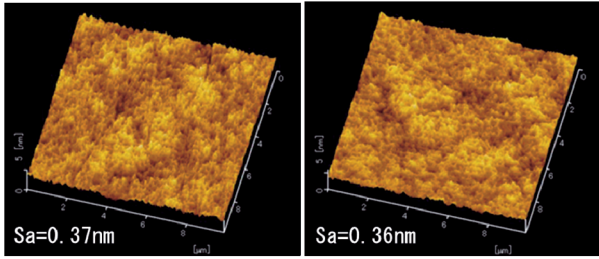
表2 水晶の表面形状測定条件

モード	ダイナミックフォースモード
カンチレバー	SI-DF40P2 (K=26N/m, L=160 μ m)
振幅減衰率 (ΔA)	-0.283
Iゲイン	0.025
Pゲイン	0.0063
Qカーブ測定倍率	2
加振電圧	0.117V
Q値	241 (共振周波数: 301.117Hz)
動作周波数	300.675Hz
走査周波数	0.45Hz

測定結果と計測された平均面粗さ S_a (3次元の算術平均粗さ)を図4に示す。左はレバーの回転角度が 0° 、右は -90° での結果である。回転角度とは高さデータを取得する際のカンチレバーの試料に対する相対的スキャン方向のことで、図2においてカンチレバーが右へ動く場合を 0° として、時計回りに増加するよう定義される。計測された S_a は1nm以下であり、このような凹凸の少ない試料の場合、表面の微細構造と走査により生じるノイズの区別が困難になる。ノイズは外部からの振動や電気的な原因によるほか、探針の先端の損傷にも起因する。判断のためには回転角度を直交させた2つの測定を実施することが有効であった。2つの結果を比較す

表1 走査プローブ顕微鏡の仕様

	E-Sweep	L-trace II
分解能	原子分解能	水平: 0.5nm, 垂直: 0.05nm
試料サイズ	20mm ϕ , 厚さ 10mm 以下	150mm ϕ , 厚さ 22mm 以下
試料駆動範囲	X-Y ステージ 5mm	X-Y ステージ 150mm x 110mm
スキヤン走査範囲	水平 20 μ m/垂直 1.5 μ m, 水平 100 μ m/垂直 15 μ m 選択可能	水平 90 μ m/垂直 6 μ m (※形状計測の正確性が高い)
位置決め顕微鏡	金属顕微鏡(微分干渉付き) (最大 2000 倍)	組み込みズーム顕微鏡 (285~1100 倍)
主な機能	形状(コンタクト), 形状(ダイナミック), 摩擦, 磁気力, 粘弾性, 表面電位, 液中・真空中・温度制御測定	形状(コンタクト), 形状(ダイナミック), 摩擦, 位相



$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| dx dy$ A: 面積, Z: 基準面(全データの平均面)との差
 図4 水晶の表面形状 (左: 回転角度 0°, 右: 同-90°)

ると互いの画像は90°回転しており、抽出されるSaもほとんど一致し表面粗さが適正に取得できている。

4.2 微細なハイアスペクト比形状の計測

微細加工技術の一つとして、微細な凹凸表面を有する型を可塑性材料に押しつけ、表面の構造を転写する技術にナノインプリント法がある。当场でもこの方法を工業生産に利用するための研究を実施してきた。この際、表面の転写状態の評価にはAFMが適している。しかし、型の形状が幅：1 μm、間隔：2 μm、深さ5 μmの溝状のようなハイアスペクト比の場合、通常のカンチレバーによる測定が困難なため、適切なカンチレバーの選定と測定条件の検討を行った。

一般的なカンチレバーの探針は三角錐あるいは多角錐形状で3~13 μm程度の長さ、また同程度の最大幅を有している。そのためAFMで狭い溝を計測すると実際の幅より狭く測定されることがあり、場合により溝内に探針が侵入できず、この場合真の形状とかなり異なった計測結果となる。上記のハイアスペクト比形状を適切に計測するため、特殊なカンチレバーとしてnanotools社製のSpecial EBD 5 μmを選択した。これは長さ約5 μm、直径約0.5 μmの高密度カーボン製の探針が取り付けられているカンチレバーである。

これを用いて、上記ハイアスペクト比のナノインプリント用シリコン型の断面形状計測した結果を図5に示す。測定はL-trace IIのダイナミックフォースモードでかつ装置メーカー独自の測定方法であるSISモードを用いた。これは振動している探針が試料に接触すると瞬間的に上方へ待避する動きをし、軟らかい試料や急峻な突起を有する試料で真の形状が得やすいとされている。さらに本装置は仕様上、スキャナのZ軸の可動範囲が6 μmであるため、最初に探針が接触した位置の高さに応じてZ軸の原点を測定者が適切に調整しなおす必要があった。通常の試料ではほとんど意識しなくとも測定

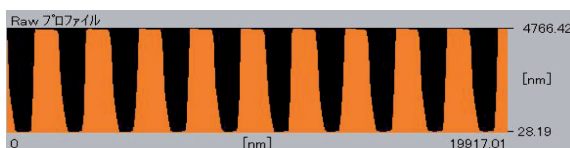


図5 シリコン型の断面形状

すべき高さが、可動距離と近接してくると注意が必要になる。図5では5 μmの型の深さがほぼ適正に計測できている。型の壁の部分に傾斜が認められるが、これは原理に起因する見かけ上の現象で、実際にはほぼ90度の角度があると思われる。

4.3 生体試料1 - 毛髪表面形状 -

表1に示したように走査プローブ顕微鏡E-sweepは、形状測定が液中や真空など環境制御下でも可能である。液中での測定が要求される例として生体試料がある。細胞であれば液中でなければ短時間で通常、死滅が起こる。また毛髪、赤血球、染色体、コラーゲンなど生体の一部分が抽出された組織であれば大気中でも測定可能だが、液中での形状を求められる場合が多い。最初に簡単な生体試料として、毛髪の大気中と純水中での表面形状の計測を試みた。生体試料の液中測定で特に留意する点は、固定法および液中で安定状態にするための保持時間と考えられる。

毛髪は観察部に力をかけないように採取し、エタノールで軽く拭きセルに設置可能な長さに切断して用いた。試料の固定は大気中では両面テープで問題はなかったが、液中測定ではテープの膨潤が認められるため、専用の液中用固定セルを用い、液中で1時間以上保持した後、測定に供した。測定条件を表3に示す。本測定では、コンタクトモードを用いた。試料の硬さから推定して試料にも探針にも損傷が生じにくいと判断し、パラメータ設定が特に液中で簡単な本モードを選んだ。たわみ量とはカンチレバーに与えた一定の変位で、マイナスは上へのたわみ(斥力領域)であることを意味する。

表3 毛髪表面形状測定条件

モード	コンタクトモード
カンチレバー	SI-AF01 (K=0.14N/m, L=450μm)
たわみ量	-0.977nm
Iゲイン	大気中: 0.454, 純水中: 0.770
Pゲイン	大気中: 0.113, 純水中: 0.190
走査周波数	0.38Hz

図6に測定結果を示す。これより液中では、表面のキューティクルが開いている状態が良くわかる。これを定量化するために2次の傾き補正、すなわち毛髪表面を平面に近似した後、平均面粗さSaを求めた。大気中では88nm、純水中では120nmとなり表面の凹凸は純水中で大きいことが確認された。

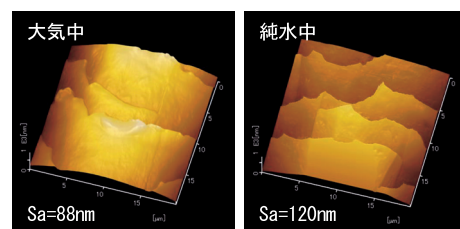


図6 毛髪表面形状

4.4 生体試料 2 - 生きた細胞形状 -

細胞の生きた状態の (in vivo) AFM測定は既に多くの報告²⁾があり、本報でもAFMによる細胞のin vivo形状計測を試みた。対象としたのはマウスの頭蓋骨由来の骨芽細胞 (MC3T3-E1細胞) を培養液 (メディウム) 中のカバーガラス上で、数日間培養した試料である。培養は温度37℃、二酸化炭素濃度 5%で行い、観察の直前までこの環境に保った。ただし、培養と測定が異なる場所であったため、途中で通常温度、雰囲気にした時間が生じたが光学像での観察から細胞は生きてると判断された。

測定はE-sweepによりダイナミックフォースモードで、専用の液中用固定セルにカバーガラスを固定して行った。また、セルには純水ではなく培養液を入れた。測定装置内で温度、雰囲気制御はせず極力短時間での測定を意図したが、最大で 2 時間程度この環境に置かれた。さらにカンチレバーも試料の変形を防ぐため極めてばね定数が低いものを選択した。測定箇所的位置決めの際、CCDによる光学画像を用いるが、この試料はほとんど透明であるため微分干渉方式で観察した。この方式は透明な試料でも屈折率と厚みの差で生じる光路差を利用し、観察像があたかも横から光が当たっているような立体感を有する。また測定用のスキャナは、細胞の個体が数 10~100 μmのサイズであるため可動範囲が水平方向に100 μmで垂直方向に15 μmのものを選択した。この試料は以上のような適切なハードウェアの選択とともに測定条件の検討が非常に重要であった。表 4 に代表的な測定条件を示す。レバーの回転角度は-180度である。測定上で課題となった点は、ばね定数が極めて弱いレバーで液中測定を行うため、共振ピークが非常に弱く通常は左右対称になる共振曲線は非対称となりSN比が低下した。そのためQ値が定まらず、適切な動作周波数を選定するのに多大な時間を要した。このことはAFMによる細胞のin vivo測定上での大きな隘路と考えられる。

表 4 生きた細胞形状の測定条件

モード	ダイナミックフォースモード
カンチレバー	BRUKER 社製 MLCL C レバー (K=0.01N/m, L=310μm)
振幅減衰立 (ΔA)	-0.437
I ゲイン	0.0311
P ゲイン	0.0103
Q カーブ測定倍率	10
加振電圧	10V
Q 値	不定 (共振周波数 : 5.76KHz)
動作周波数	5.00Hz
走査周波数	0.20Hz

測定結果を光学画像とともに図 7 に示す。光学画像の四角で示した範囲をAFMで計測している。図 8 に形状の立体表示を、図 7 (AFM画像) の白線部の断面を図 9 に示す。複数の画像解析から今回の細胞が 3 μm程度の高さであることが分かった。測定条件を追い込んで、レバーの回転角度が

0度では、レバーによる試料の引きずりと見られる現象が常に発生した。この方向は柔らかい試料では引きずりが発生しやすいと言える。

AFMによる細胞のin vivo形状計測にはさらにいくつかの課題が挙げられる。(1) 本測定ではスライドガラス上に培養した細胞が自発的に固着している状態で測定したが、固着が弱い場合、測定中に変形や移動する場合がある。(2) 測定時間が長時間になると細胞が明らかに変形 (死滅など) してくる。そのため、測定時にも温度と二酸化炭素濃度を制御することが必要である。

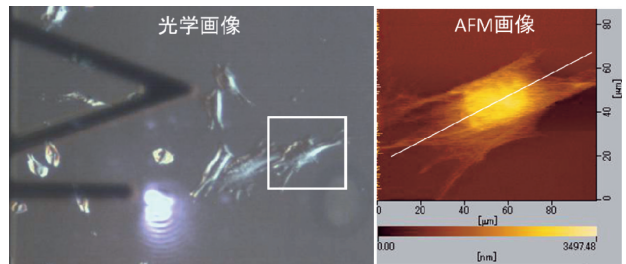


図 7 細胞の表面形状

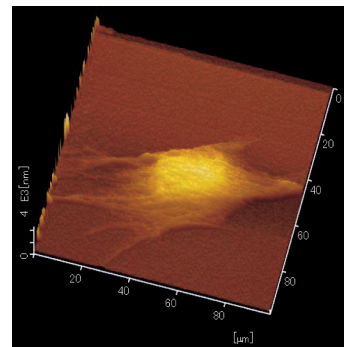


図 8 細胞形状の立体表示

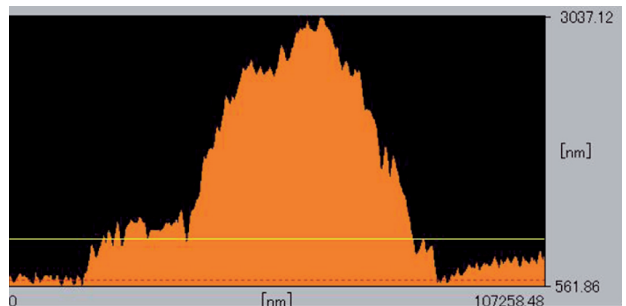


図 9 細胞の断面形状

5. おわりに

AFMを用いて工業材料や生体試料など様々な試料の微細形状計測に取り組み、多くの試料が適正に計測できるようになった。生きた細胞試料については、固着と測定環境に関して課題が残った。測定条件ではノンコンタクトモード (スロー

ブ検出法)も検討の余地があり、本試料について引き続き検討する予定である。

謝辞

本研究で使用した原子間力顕微鏡は、独立行政法人科学技術振興機構(JST)の地域産学官共同研究拠点整備事業で導入されました。また、培養した細胞をご提供頂いた北海道大学病院・口腔総合治療部の飯田俊二先生に、深く感謝いたします。

引用文献

- 1) 重川秀美 他編：走査プローブ顕微鏡－正しい実験とデータ解析のために必要なこと－, 共立出版株式会社, 425pp., (2009)
- 2) 例えば, 水谷武臣, 川端和重：表面科学, Vol.34, No.9, p.500-504, (2013).

新型デザインマネジメントゲームの開発

日高 青志, 万城目 聡, 印南 小冬

Development of Brand-New Design Management Game

Seiji HIDAKA, Akira MANJOUME, Kofuyu INNAMI

キーワード：デザインマネジメント，デザイン活用，ゲーミングシミュレーション，製品開発プロセス

1. はじめに

魅力的な製品の開発や長期的な視点でのブランド力向上といった経営課題を解決していくためには、製品開発をはじめとする企業活動において、デザイン活用やブランド構築などを適切に進めていける人材（デザインマネジメント人材）を社内に育成する必要がある。当场では、デザイン活用力の向上を図1に示す4つのステップに整理した上で、デザイン活用に必要な知識やノウハウを学んでいただくためのツール開発をはじめ、さまざまな取り組みを行ってきた。

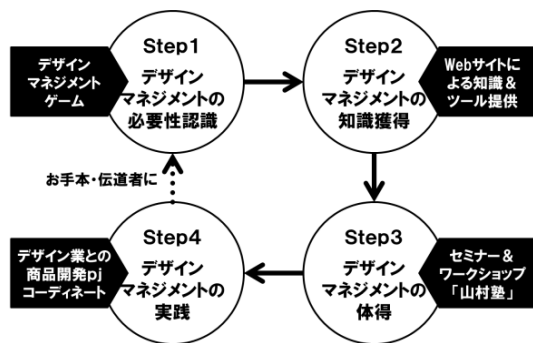


図1 デザインマネジメント人材育成の4ステップ

そのうちStep 1として掲げる「デザインマネジメントの必要性認識」を促進するためのツールとして、現実世界をモデル化し模擬的に体験させることができるゲーミングシミュレーションの手法に着目し、重点研究「中小製造業における戦略的デザイン活用支援ツールの開発」(H19～21)の中で二つのバージョン (Ver1.0および1.5) のゲームを試作した¹⁾。

その後、当场が運営に関わるデザインの勉強会や、企業の若手経営者が集まる勉強会、デザイン系大学における授業などの場で本ゲームのプレイ体験会を開催するなど、運用を重ねる中でいくつかの課題も見えていた。

事業名：職員奨励事業（提案部門：技術支援型）
 課題名：中小企業のためのデザイン活用支援ツールの改良・強化
 （平成25年度）

本研究ではそれらの課題を踏まえつつ、デザインを活用した新製品・サービスの開発を主導的に進めていきたいがどのように進めれば良いかわからないと考える、製品開発リーダー予備軍とも言うべき人材を主な対象として、製品開発プロセスの全体像や、その中でデザイン活用のポイントなどを学べる、新しいバージョン (Ver2.0) のゲームを開発した。

2. 新型デザインマネジメントゲームの開発

2.1 Ver 1.0および1.5の概要と課題

ゲームのVer1.0およびVer1.5は、どちらもボードゲーム形式を採用し、各プレイヤーは仮想企業の経営者となって、新製品の開発や製造・販売を行う。それらの企業活動に伴って発生した費用や売上といった資金の出入りをワークシートに記入していき、最終的なゲームの勝敗は、決められた期間のプレイを終えた時点での、製品1個当たりの営業利益率などで決定する。

Ver1.0 (図2) では、プレイヤーはゲーム開始当初デザインを活用しない状態での製品開発・製造・販売を強いられ、やがて過当競争による製品の値引き合戦など、多くの製造業企業が経験する現実を体験する。その後二つのデザイン能力 (プロダクトデザインおよびコミュニケーションデザイン) を活用したより高付加価値な製品づくりにシフトしながら、

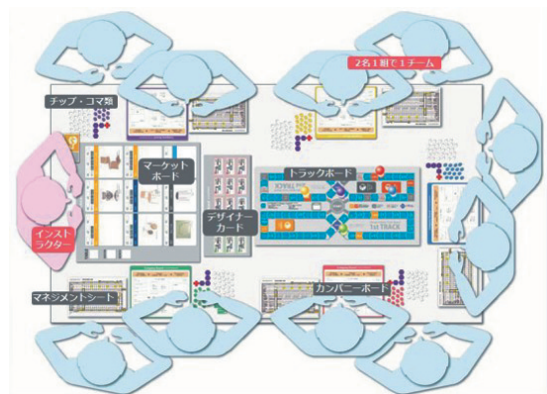


図2 デザインマネジメントゲームVer1.0

より利益率の高い市場を目指して製品を開発・販売していく。

一方Ver1.5は、Ver1.0をベースに、活用可能なデザイン能力を「戦略策定力」、「造形力」、「他分野との調整力」など10種類に拡大した。プレイヤーは7つある高付加価値製品市場への自社製品販売を目指して、必要とされるデザイン能力値の組み合わせを推理しながら、狙った市場に対して適切なデザイン活用を行い、製品を開発・販売していく。

どちらのバージョンもプレイヤーへのアンケート結果は総じて好評であり、「デザイン活用のタイミングを理解できた」、「楽しみながら気づきを得られた」といった回答を得ることができた。そこでVer1.0および1.5において採用した次のようなゲームアイデアおよびストーリー等を、新たなバージョンのゲーム開発においても継承していくこととした。

- プレイヤーが仮想企業の経営者となって、効果的にデザインを活用しながら市場の求める製品を開発し、その販売により得られた利益をさらに投資に回して、よりレベルの高い市場に向けた製品を開発・販売していくという基本的なゲームストーリー。
- 顧客から提供された図面通りに製品をつくるB to Bの製造請負的な市場から、顧客のニーズを予測して高付加価値なオリジナルブランド製品を作るB to C製品市場まで、いくつかのレベルからなる市場構成。
- 製品開発における投資と回収のバランスを意識させる【資金繰り表】などの道具立て。

一方、Ver1.0およびVer1.5の運用を通じて、ゲームの改善すべき点や課題として次のようなものが見えていた。

- デザイン活用についてはいずれも、チップやカードの購入によるもののみとしており、これが例えば「デザイン活用は、能力の高いデザイナーに高額なデザイン料を払って依頼しさえすればうまくいく」といった誤解を招きかねなかった。Ver2.0の開発では「デザイナーと依頼者の双方が努力し、協力し合うことで良い成果が生まれる」というストーリーをプレイヤーに伝えられるものとする。
- いずれのゲームも、ターゲット市場に向けたデザイン活用による製品製造・販売、損益確認を中心としており、製品開発プロセスを詳しくシミュレートできるプレイを組み込むまでには至っていなかった。Ver2.0の開発では、製品開発の全体像やデザイン活用のポイントなどについてプレイヤーが有用な気づきを得られるよう、製品開発段階に重点を置く。
- ゲームを収納した状態で衣装ケース一つ分ほどの大きさがあり、運搬しづらいという欠点があった。また、ゲームプレイの所要時間も、ゲーム前後のブリーフィングを含めて約4～5時間が必要であった。Ver2.0の開発では道具立てをコンパクトにするとともにプレイ所要時間の短縮を図る。

2.2 ゲームの基本コンセプト

以上の課題などを踏まえ、Ver2.0の開発にあたっては、自社独自商品の開発に初めて取り組む企業経営者や開発担当者、研究者、学生など、製品開発リーダーを目指す幅広い人材を対象として、製品開発プロセスの全体像を把握でき、さらにデザイン活用を成功させるための有用な気づきを得られるゲームを目指すこととした。

2.3 ゲーム開発工程

新しいデザインマネジメントゲームの開発は、上に述べた旧バージョンの継承すべき特徴や課題と、ゲームの基本コンセプト、ブレインストーミングなどにより生み出された断片的なゲームアイデアなども加えながら、簡易的な試作と関係者および外部専門家によるテストを繰り返しつつ進めていった。その開発の流れを図3に示す。



図3 新型デザインマネジメントゲーム開発の流れ

まず、名作との評価が高い複数種のボードゲームおよびカードゲームを体験プレイした後にブレインストーミングを行い、新しいゲームのための断片的なアイデアを創出した。

次いで、それらのアイデアを取捨選択・統合しつつ、市場ボード、打ち手カード、資金繰り表などから成るラフなゲームの簡易プロトタイプ（プロト01）を、パソコンおよびプリンタを用いて作成した。このプロト01では、山札から引いた打ち手カードで役を作り、その役に応じて商品コマの商品力を上げていく仕組みを導入したが、内部メンバーによるテストでは「デザインや製品開発の結果が運任せであり、役と商品力の対応なども複雑過ぎる」といった指摘がされた。

プロト02ではそうした意見を踏まえて、プレイヤーが自分の意志で製品開発に必要な人材や打ち手を調達・選択できる仕組みを導入した。このプロト02を用いて、ビジネスゲーム開発に豊富な経験を持つ外部専門家によるテストプレイを実施したところ「非常に面白かった」、「製品開発やデザイン活用で押さえておくべきポイントなど、ゲームの作り手が伝えたいメッセージもわかりやすく伝わってくる」という評価が得られた。その一方で「ゲームを構成する要素がまだ概念的であり、実際の産業・企業などをイメージできた方が良い」といった声も聞かれた。

プロト03では製品開発に必要な人材を「デザイン（D）」、「マーケティング（M）」、「エンジニアリング（E）」の3タイプに分け、これらの人材の効果的な活用により製品開発を進めていく仕組みと、具体的な製品市場（プロト03では電気自動車関連製品市場）を舞台にシェアを競い合うストーリーを追加した。また、商品コマなどの製作には、当场に導入された3DプリンタおよびUVプリンタなどの機器を活用した。このプロトについても外部専門家によるテストプレイを再度行ったところ「着実に良くなっているが、行動の選択肢が多いため、初めてプレイする人はなかなかゲームの世界に入り込めない」との指摘を受けた。

その指摘を踏まえ、現時点での最新版となるプロト04には、初めてプレイする人が悩まずに経営行動を取ることができるよう、取るべき経営行動を指示する「アシストカード」を導入した。

2.4 ゲームの概要

以上の開発工程を経て、デザインを活用した製品開発を主導的に進めていく上で役立つ、数々の気づきを得られるカードゲーム形式のゲームを開発した。このゲームを通じて、プレイヤーはモノづくりにおけるデザインの活用をはじめ、開発チームの編成や育成、公的な助成金やコーディネーターなどの活用、開発製品の売り上げによる回収を意識した投資、さらに市場でのシェア獲得といった製品開発における一連の流れを模擬的に体験することができる。

現時点での最新版であるプロト04は、ゲームプレイ所要時

間が前後のブリーフィングを含めて3時間程度、収納時にはA4サイズのブリーフケースに収まるサイズとなっている。このゲームの道具立ておよび進め方の概略を図4に示す。



図4 ゲームの道具立てと進め方の概略

このゲームの中で各プレイヤーは中小製造業企業の経営者となり、初めての自社ブランド商品開発に取り組む。プレイヤーはまず、手札の「リソースカード」のうち3枚を行使して、商品開発を行う（図4中の①）。本ゲームにおいては、商品の魅力や満足感の実現に関わる要素を「機能・性能」、「スタイリング」、「ブランド」の三つに整理して捉えており、「商品コマ」にもこれら三つの要素に対応した領域が設けられている。プレイヤーはリソースカードを適切に組み合わせ行使することで、これらの領域に「商品力ピン」を差し込み、商品力を高めていく（図5）。

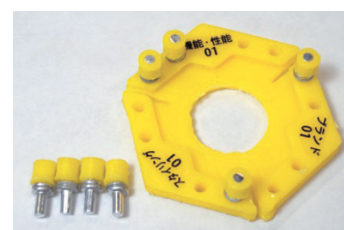


図5 商品コマと商品力ピン

次いで、自社の製品開発チームの人材や打ち手を表した「リソースカード」を調達し、開発力を高めていく（図4中の②）。このリソースカードには、社内のマーケティングおよびエンジニアリング担当者や、社外のデザイン業およびコーディネーターなど、製品開発に関わる社内外の人材の属性を表したものと、補助金や人材育成といった各企業の開発力を高める打ち手を表したものがある（図6）。

すべてのプレイヤーが上記の経営行動を一回ずつ終えた段階で、プレイヤーは開発した商品を一齐に「市場ボード」上

の市場に売ることができる（図4中の③）。市場は「パーツ市場」、「コモディティ市場」、「OEM市場」、「プレミアム&ニッチトップ市場」の四つに分かれており、それぞれ求められる商品力の下限值と市場規模が設定されている（図7）。プレイヤーは狙った市場におけるこれらのパラメータを意識しながら商品開発をしていくことになる。



図6 リソースカードの構成

市場タイプ	パーツ市場	コモディティ市場	OEM市場	プレミアム&ニッチトップ市場
求められる商品力	機能・性能 スタイリング ブランド 機能・性能 ≥3	機能・性能 スタイリング ブランド 機能・性能 ≥3 ブランド ≥2	機能・性能 スタイリング ブランド 機能・性能 ≥3 スタイリング ≥2	機能・性能 スタイリング ブランド 全ての性能 ≥3かつ 一つ以上の性能が4
市場規模	4	3	3	制限なし

図7 各市場の商品力下限と市場規模の一例

これら一連の企業活動に伴う売上や費用といった現金の出入りを、プレイヤーは資金繰り表に逐次記録していく（図4中の④）。ここまでは各プレイヤーが1ターンにおいて取ることができる1セットの経営行動となる。

ゲームの勝敗は、この1セットの経営行動を12ターン（三期）に渡って行った上で、資金繰り表における最終的な現金の残高などで決定する。

2.2節で述べた通り、本ゲームは製品開発リーダーを目指す人材に対して、デザインを活用した製品開発を意義ある成果に結び付けていくための有用な気づきを提供することを目的としている。本ゲームのプレイ体験を通じてプレイヤーに

提供したい気づきと、そのために採用したゲームアイデアの一例を次に示す。

a) 【提供したい気づき】製品開発の目標は「長く稼げる事業」を創出することであり、そのためには「作れるモノ」、「作りやすいモノ」を作るという視点だけでなく、市場や顧客が何を求めているかを常に考えながら製品開発を進めていくことが大切である。

【採用したゲームアイデア】先述の通り、それぞれの市場には求められる商品力の下限值が設定されているため、プレイヤーは自分の作りたいモノ、作れるモノを適当につくだけでは売れるモノができず、市場（顧客）がどのようなモノを求めているかを十分に意識しながら製品を開発しなければならない仕組みとなっている。また販売した製品については、その製品の商品力と市場ごとに設定された係数を乗じた額の売上が1ターンごとに入ってくるが、大きい投資が必要な市場ほど長期間独占的に販売ができるようになっている。これらは、同一の市場内では良いモノ、すなわち商品力の高いモノほど高い価格で売ることができ、また、多大な投資により適切なデザイン活用を行って切り開いた市場では、より長期に渡り市場を占有できるという、一般的な現象を反映した仕組みとなっている（図8）。

市場タイプ	パーツ市場	コモディティ&OEM市場	プレミアム&ニッチトップ市場
1ターン当たりの売上高	商品力 × 6	商品力 × 5	商品力 × 4
販売可能期間	2ターン	4ターン	8ターン

図8 各市場の売上高と販売可能期間の一例

b) 【提供したい気づき】製品開発プロセスは大きく三つの段階に分けてとらえることができる。まず製品コンセプトや事業イメージなどをつくる「戦略づくり段階」、次に、顧客の協力も得ながら顧客の喜ぶモノとして作り込んでいく「モノのつくりこみ段階」、そして、長期的に大きな収益を上げられるよう必要な手だてを講じながら良い事業に育てていく「事業化段階」である。また、それぞれの段階に対応した三つのデザイン活動がある。

【採用したゲームアイデア】開発チームにおけるデザインの能力を表すカードとして、製品のコンセプトや事業のイメージを創造するための「戦略デザイン」、モノのつくりこみ段階を支える「プロダクトデザイン」、事業化段階を支える「コミュニケーションデザイン（製品マーク・ロゴ、カタログ、パンフレット等のデザイン）」の三種を用意した（図9）。このうち「戦略デザイン」すなわち、製品コンセプトや事業イメージなどをデザイン

する業務は、プロダクトデザインにもコミュニケーションデザインにも必要とされる業務であるという現実を踏まえ、ゲーム進行上は「プロダクトデザイン」および「コミュニケーションデザイン」のカードを入手するには、一定の費用に加え手持ちの「戦略デザイン」カードを一枚、引き替えとして消費する仕組みとした。



図9 デザイン関連リソースカード

c) 【提供したい気づき】新製品開発にはさまざまな業務が必要であり、その遂行にはデザインだけでなく、エンジニアリングとマーケティングの視点や能力が必要である。そして、製品開発におけるデザイン活用を意義ある成果に結び付けるには、これらの社内系人材と外部デザイン系人材の協働が不可欠である。

【採用したゲームアイデア】リソースカードの中に、製品開発に直接関与する社内人材としてマーケティング、エンジニアリング人材のカードを用意した。それぞれのカードにはレベル1～3があり、低位のカードを人材育成していくことで、あるいは新たに雇用することで、より高いレベルの人材を開発チームに加えることができる。また、b)で説明したデザイン系カードは、マーケティングおよびエンジニアリングを担う自社系人材カードと組み合わせることで初めて効果を発揮する仕組みとなっている。

d) 【提供したい気づき】新製品開発やデザイン活用などへの投資をするにあたっては、その結果としてどのくらいの収益を獲得できるかといったおおよその見積もりも意識し、適切な資金繰りを行っていくことが重要である。

【採用したゲームアイデア】本ゲームでは、開始当初は製品開発力を高めるための人材育成・雇用や、新製品開発などの投資を行い、数ターン経過した後に開発製品による売上が入ってくることになる。典型的なプレイヤーにおけるターンごとの売上・費用および現金残高の推移を図10に示す。本ゲームでは投資と回収の時間的ギャップにより、手持ちの資金が底を突きかける時期が生じるように設定されており、また資金がマイナスになった場合は手痛いペナルティが用意されている。そのためプレイヤーは短期的な資金繰りだけでなく、投資と回収の長期

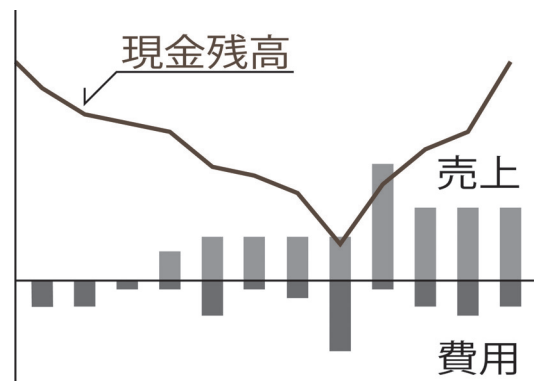


図10 典型プレイヤーの売上・費用・現金残高の推移

的なバランスを考えながら、製品開発や人材育成などの企業活動を行っていくことの重要性に気づくことができる。

e) 【提供したい気づき】製品開発にはデザイナーの活用だけでなく、公的な助成制度やコーディネーターなど、外部から受けられるさまざまな形の支援があるので積極的に活用するべきである。

【採用したゲームアイデア】自社の製品開発を有利に進められる「補助金」および「コーディネーター」などのカードを用意した。「補助金」を使用することで、新たなカードを調達する際のコストを一定額抑制することができる。また、通常のターンにおいてプレイヤーは製品開発後にカード調達をするが、「コーディネーター」カードを使用することで、製品開発前にカード調達および活用ができるようになる。これにより、雇った人材を即座に活用してスピーディに製品開発を進めることが可能になる。

2.5 ゲームの評価

本ゲームの開発は2.3節で述べた通り、試作とテストプレイ(図11)を複数回に渡って実施した。そのうち開発後期にあたるプロト02のテストプレイヤーへのアンケート結果は「ためになった」、「楽しかった」との回答が8割を越え、プロト03についてはすべてのテストプレイヤーから同様の回答を得ることができた。また、2.4節で述べた五つの気づきのうち、特にb)とc)の二つについて気づきの有無をたずねたところ、ほぼすべてのプレイヤーから「気づきを得られた」との趣旨の回答を得ることができた。これにより、本ゲームはプレイヤーに対して実際のデザイン活用に役立つ気づきを提供できる有用性と、ゲームとしての娯楽性を概ね両立できている。適切な製品開発やデザイン活用の必要性認識を促進するツールとして、ある程度の完成度に達したものと考えられる。



図11 プロト03テストプレイ風景

3. おわりに

本ゲームについては当面、主に行政や各種の勉強会などが主催するデザイン活用力向上をテーマとしたセミナー・ワークショップなどの場面で試験的運用を行い、各種のパラメータをさらに煮詰めていくとともに、ビギナー向け、経験者向けなどいくつかのレベルに対応したゲームシナリオや道具立ての整備を図っていく。さらに、道内企業等からの要望に応じて、社内勉強会や研究会活動等への出前プレイ会を積極的に実施し、デザインマネジメント人材の育成に協力していきたい。

将来的には、ゲームとその前後のインストラクションも含めた学びのプログラムとして、事業化の可能性も探って行きたいと考えている。

引用文献

- 1) 及川雅稔ほか6名：中小製造業における戦略的デザイン活用支援ツールの開発，北海道立総合研究機構工業試験場報告，No.309，pp.77-96，(2010)

他誌発表論文抄録

Summaries of Paper Published

タイトル Title	異なる磁性冷媒を用いた磁気ヒートポンプの冷却特性に関する実験的検討 Experimental Study on Cooling Characteristics of a Magnetocaloric Device with Two Different Types of Magnetic Refrigerants
執筆者	平野繁樹 ¹ , 川南剛 ² , 伊藤孝治 ³ , 麓耕二 ⁴ 1 北海道立総合研究機構 工業試験場, 2 神戸大学大学院 工学研究科 機械工学専攻, 3 株式会社蔵王精機, 4 弘前大学 理工学部 知能機械工学科
抄録	磁気冷凍技術は、磁場の変化により生じる磁性冷媒のエントロピー変化にともなう温度変化に基づいた物理現象「磁気熱量効果」を利用した冷却技術である。この磁気熱量効果を用いた機器は、フロン系などの冷媒（F-gas）などを使用しない環境負荷の小さな冷却機器であることから、近年、この原理を利用した磁気ヒートポンプを室温域における冷凍・空調への応用について注目されてきている。ここでは、単純な制御とシンプルな装置構成により改良された回転型の磁気ヒートポンプシステムを用い実験的検討を行った。装置は中央間隙部において0.96テスラの磁場強度を有する1対の永久磁石回路、内部に磁気作業物質粒子充填層セルを有する回転ロータ部、回転ロータ部を覆うステータであるとともに、熱移動媒体である流体を制御するステンレス製ケーシング部、流体循環用のポンプ、および、回転制御部より構成されている。粒子充填層に適用した磁気作業物質はガドリニウムとガドリニウム-ジスプロシウム合金であり、精製水を熱移動媒体として用いた。ガドリニウム、ガドリニウム-ジスプロシウム合金およびおそれらをハイブリッド配置した3種の粒子充填層を用いて、回転型磁気ヒートポンプの冷却性能について、実験的検討を行った。その結果、磁気ヒートポンプの低温端と高温端との発生温度差は、ロータ回転周波数と熱移動媒体流量の影響を大きく受けることが明らかとなった。また、磁性冷媒である磁気作業物質が異なる場合には、流入温度の違いにより、磁気ヒートポンプの低温端と高温端の発生温度差およびCOP（成績係数）に影響を及ぼすことが明らかとなった。
キーワード Keyword	冷媒, 冷凍サイクル, 成績係数, 冷却, 特殊設備, ヒートポンプ Refrigerant, Refrigeration cycle, Coefficient of performance, Cooling, Special appliance, Heat pump
その他	
掲載	4th IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants