



道總研

ISSN2189-1230

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.314)

2015

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

北海道立総合研究機構工業試験場報告 (No.314) 2015

目 次

一般論文

1	画像照合と周期構造パターンを利用したレンズ歪みの補正方法	三田村智行, 大村 功	1
2	普通畑を対象とした圃場地図生成手法の検討	奥田 篤, 飯島 俊匡, 堀 武司 近藤 正一, 高橋 裕之, 鈴木 剛	9
3	ホタテウロを原料とした高機能性養魚用飼料の開発	若杉 郷臣, 平間 政文, 富田 恵一 鎌田 樹志, 佐々木雄真, 吉川 琢也 信太 茂春, 石田良太郎, 石田 宏一 佐藤 敦一	15
4	製糖廃棄物からの高性能排煙処理剤の開発	佐藤 正大, 浦 晴雄, 山越 幸康 若杉 郷臣, 松嶋景一郎, 佐々木雄真 北口 敏弘, 内山 智幸, 上出 光志 高橋 徹	25
5	温泉熱回収用プラスチック製柵状熱交換器の開発	白土 博康, 保科 秀夫, 可児 浩 櫻庭 高光, 井浦 奉昭, 山田 英和 鹿糠 幸雄, 舟木 由衣, 高橋 徹哉 鈴木 隆広, 林 圭一, 岡 大輔	35
6	高速播種を可能としたISOBUS対応型ポテトプランタの開発	中西 洋介, 井川 久, 稲野 一郎 吉田 邦彦, 飯島 裕治	45
7	リバースエンジニアリングにおける3DCAD/CAMデータ作成支援ツールの開発	安田 星季, 万城目 聡, 神生 直敏 櫻庭 洋平, 岩越 睦郎, 浦田 昇尚 伊達 宏昭, 金井 理, 後藤 孝行	59
8	金属粉末積層造形による内水冷式金型の製作	戸羽 篤也, 中村 勝男, 平野 繁樹 稲野 浩行	67
9	商品力強化のための食品パッケージデザイン分析ツールの開発	万城目 聡, 日高 青志, 橋場 参生	77
10	荷物取扱作業における上肢負荷軽減技術の開発	前田 大輔, 吉成 哲, 中島 康博 栗野 晃希	83

研究ノート

- 1 水産物の動的挙動シミュレーションに関する研究 浦池 隆文, 多田 達実 89
- 2 北海道向け営農支援ITシステムの要求分析 堀 武司, 奥田 篤, 高橋 裕之 93
飯島 俊匡
- 3 バイノーラル技術の応用研究 橋場 参生, 岡崎 伸哉, 飯島 俊匡 99
本間 稔規, 高橋 裕之
- 4 薄片化黒鉛を充填したプラスチック材料の特性 大市 貴志, 可児 浩, 吉田 昌充 105
瀬野修一郎
- 5 ラバーキャスト法に適した鉛フリー素材の開発 宮腰 康樹, 中嶋 快雄, 斉藤 隆之 111
岩越 睦郎, 戸羽 篤也, 安田 星季
- 6 熱可塑性CFRPのプレス成形法に関する研究 鶴谷 知洋, 飯田 憲一, 三戸 正道 119
畑沢 賢一, 山岸 暢, 岩越 睦郎
- 7 継手条件の違いによるレーザー溶接の溶接変形と残留応力の基礎評価 櫻庭 洋平, 安田 星季 125
- 8 動作に注目した農作業の負担特性評価 前田 大輔, 吉成 哲, 中島 康博 133
栞野 晃希, 白旗 雅樹

CONTENTS

Regular Paper

- 1 Correction Method of Lens Distortion using Image Matching and Periodic Structure Pattern 1
Tomoyuki MITAMURA, Isao OHMURA
- 2 Research on simplified method of map-making for upland field. 9
Atsushi OKUDA, Toshimasa IJIMA, Takeshi HORI
Shoichi KONDO, Hiroyuki TAKAHASHI, Takeshi SUZUKI
- 3 Development of Highly Efficient Feed from Scallop Mid-gut Gland 15
Motoomi WAKASUGI, Masafumi HIRAMA, Keiichi TOMITA
Tatsuyuki KAMADA, Takema SASAKI, Takuya YOSHIKAWA
Shigeharu NOBUTA, Ryotaro ISHIDA, Kouichi ISHIDA
Nobukazu SATO
- 4 Development of a Highly Reactive Calcium Hydroxides from Lime Sludge in Beet Sugar Industry. 25
Masahiro SATO, Haruo URA, Yukiyasu YAMAKOSHI
Motoomi WAKASUGI, Keiichiro MATSUSHIMA, Takema SASAKI
Toshihiro KITAGUCHI, Tomoyuki UCHIYAMA, Mitsushi KAMIIDE
Touru TAKAHASHI
- 5 Development of a palisaded heat exchanger combined plastic pipes for hot spring heat recovery systems
..... 35
Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA, Hiroshi KANI
Takamitsu SAKURABA, Tomoaki IURA, Hidekazu YAMADA
Yukio KANUKA, Yui FUNAKI, Tetsuya TAKAHASHI
Takahiro SUZUKI, Keiichi HAYASHI, Daisuke OKA
- 6 Development of ISOBUS Potato-Planter that Achieves a High-Speed Operation 45
Yohsuke NAKANISHI, Hisashi IGAWA, Ichiro INANO
Kunihiko YOSHIDA, Yuji IJIMA
- 7 Development of 3D CAD/CAM Data Creation Support Tools for Reverse Engineering 59
Seiki YASUDA, Akira MANJOME, Naotoshi KAMIO
Yohei SAKURABA, Mutsuro IWAKOSHI, Akihisa URATA
Hiroaki DATE, Satoshi KANAI, Takayuki GOTOH
- 8 The Manufacturing of Metal-Mold with Inner Water Cooled System by SLS 67
Atsuya TOBA, Katsuo NAKAMURA, Shigeki HIRANO
Hiroyuki INANO

9	Development of Food Package Design Analysis Tool for Product Competitiveness	77
	Akira MANJOME, Seiji HIDAHA, Mitsuo HASHIBA	
10	Assistive Technology to Reduce Upper Limb Burden during Manual Handling	83
	Daisuke MAEDA, Satoshi YOSHINARI, Yasuhiro NAKAJIMA	
	Kouki KUWANO	

Research Note

1	Research on Dynamic Behavior Simulation Technique of Marine Products	89
	Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA	
2	Requirement Analysis of Farm Management System suitable for Hokkaido-style Agriculture	93
	Takeshi HORI, Atsushi OKUDA, Hiroyuki TAKAHASHI	
	Toshimasa IJIMA	
3	Study on Applications of Binaural Technology	99
	Mitsuo HASHIBA, Shinya OKAZAKI, Toshimasa IJIMA	
	Toshinori HONMA, Hiroyuki TAKAHASHI	
4	Properties of flaked graphite plastic composites	105
	Takashi OICHI, Hiroshi KANI, Masamitsu YOSHIDA	
	Shuichiro SENO	
5	Development of the lead free metals suitable for rubber cast	111
	Yasuki MIYAKOSHI, Yoshio NAKAJIMA, Takayuki SAITOU	
	Mutsuro IWAKOSHI, Atsuya TOBA, Seiki YASUDA	
6	Study on Press Forming Techniques of Thermoplastic CFRP	119
	Tomohiro TSURUYA, Kenichi IIDA, Masamichi MITO	
	Kenichi HATAZAWA, Tohru YAMAGISHI, Mutsuro IWAKOSHI	
7	Basic Evaluation of Deformation and Residual Stress of Laser Welding by the Difference in Joint Conditions	125
	Yohei SAKURABA, Seiki YASUDA	
8	Motion-based Evaluation of the Agricultural Work Load	133
	Daisuke MAEDA, Satoshi YOSHINARI, Yasuhiro NAKAJIMA	
	Kouki KUWANO, Masaki SHIRAHATA	

一 般 論 文

Regular Paper

画像照合と周期構造パターンを利用したレンズ歪みの補正方法

三田村 智行, 大村 功*

Correction Method of Lens Distortion using Image Matching and Periodic Structure Pattern

Tomoyuki MITAMURA, Isao OHMURA*

抄 録

画像センサは、計測や制御、ロボットの環境認識など幅広い分野で利用され、その活用範囲が広がっている。画像センサで取得された画像には、レンズによる歪みが生じている場合があり、計測誤差を生じたり、期待した処理結果が得られないおそれがある。このため、歪みによる影響が懸念される用途では、歪みを取り除く補正処理が行われる。本研究では、歪みのある画像と歪みを取り除いた画像の対応関係を表す補正テーブルを、周期構造パターンを撮影した1枚の画像と画像照合を用いて求める方法を開発した。また、この方法を画像センサやステレオビジョンセンサに適用し、その効果を確認した。

キーワード：レンズ歪み, 画像照合, 画像センサ, ステレオビジョンセンサ

Abstract

Image sensors are utilized in a wide range of fields, and its utilization range is widened. The lens distortion of the image sensor causes a measurement error, and there is a possibility that the expected processing results can not be obtained. Therefore, the applications where the distortion becomes a problem, the process of removing the distortion is carried out. This paper describes a method of determining a correction table representing the correspondence between the image with distortion and without distortion, using a single image of periodic structure pattern and the image matching. We applied this method to an image sensor and a stereovision sensor and confirmed the effect.

KEY-WORDS : Lens distortion, Image matching, Image sensor, Stereovision sensor

1. はじめに

画像センサは、計測や制御、ロボットの環境認識など幅広い分野で利用され、その活用範囲が広がっており、当試験場においても、イメージセンサとFPGAを組み合わせた小型画像センサやリアルタイムステレオビジョンセンサの開発と応用に取り組んでいる¹⁾²⁾。画像センサで取得する画像には、レンズによる歪みが生じていることがあり、歪みを考慮せずに画像処理を行うと、計測誤差を生じるなど、期待した処理結果が得られないことがある。補正処理により歪みを取り除くことができれば、誤差の発生を抑制することが可能となる。また、基本的なピンホールカメラモデルで画像を扱うことが

できるため、画像処理が容易になる。

レンズによる歪みの補正処理については、従来から多くの方法が提案されている。補正方法の多くは、レンズによる歪みをモデル化して数式で表し、キャリブレーション用の画像などを用いてモデルのパラメータを求めている³⁾。この方法とは別のアプローチとして、パラメータを用いずに、歪みのある画像と歪みのない画像との対応関係を直接求める方法がある。この方法では、歪みのある画像と歪みのない画像との対応関係を格子模様のパターンなどを用いて求めるため、直接対応関係が求められるのは線の交点など限られた点となり、補正に必要な対応点をさらに求めるには、補間を行う必要がある。補間の精度を高めるため、ベジェ補間を用いる方法⁴⁾

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

事業名：経常研究

課題名：画像照合を用いたカメラ画像の補正・校正手法に関する研究

などが提案されている。また、歪みのある画像と歪みのない画像との対応関係を密に求めるため、時系列的にグレイコードの各ビットで構成されたパターンを液晶ディスプレイに表示させ、得られた複数の画像を用いて対応関係を求める方法も提案されている⁵⁾。

本研究では、画像照合と周期構造パターンを用いて、1枚の画像から、歪みのある画像と歪みを除去した画像の対応関係をすべての画素について求める方法を開発した。複数の画像を扱う必要がなく、補間の必要もないので、当試験場で開発している画像センサのような、イメージセンサとFPGAの組み合わせによる規模の小さなシステムでも活用が可能である。

2. 周期構造パターンと画像照合を用いた歪み補正

本手法では、歪みのある画像から歪みのない画像への対応関係を表す補正テーブルを作成し、歪みの除去を行う。補正テーブルの作成には、基本パターンを繰り返し配置し、周期構造を持たせたパターンを利用する(図1)。このパターンの一部を切り出してテンプレートとすると、パターン中には、テンプレートと同じ画像が、基本パターンの繰り返し周期ごとに並んでいる。そこで、画像照合技術を用いてテンプレートと一致する位置を求めることで、繰り返しの構造を検出することができる。これは、格子模様の線の交点やチェッカーボードのコーナーを検出する処理に相当する。

画像照合には、高速性とロバスト性を備えた方向符号照合法を用いた。

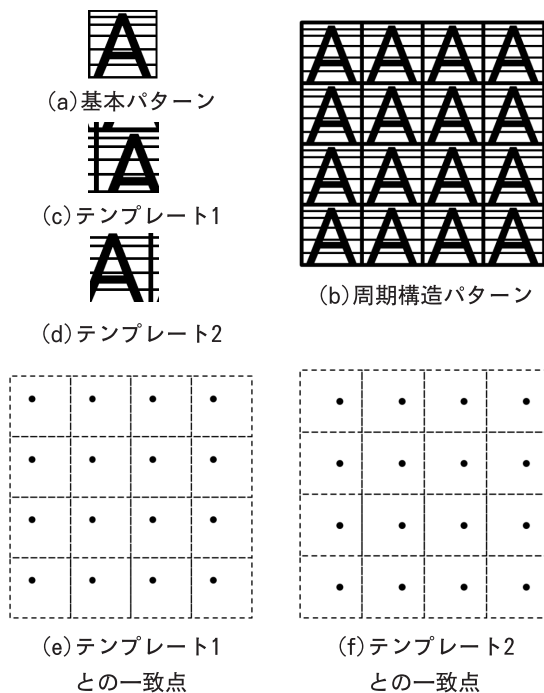


図1 周期構造パターン

2.1 方向符号照合法

方向符号照合法は、画像の明度そのものではなく、画素近傍における明度変化が最大となる勾配方向を量子化して得られる方向符号を用いて、2つの画像の類似度を評価する画像照合法である。この方向符号の分布は画像ごとの固有性が高く、また、照明不良などに起因する明度変動の影響を受けにくい、無相関画像間における類似度が定値性を有する、という特性がある⁶⁾。

画素 (x, y) での明度を $I(x, y)$ とし、画像の x 方向および y 方向の明度勾配を、それぞれ次のとおり定義する。

$$\begin{aligned} \Delta I_x &= \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \\ \Delta I_y &= \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \quad (1)$$

これより、画素 (x, y) における明度勾配の角度 $\theta(x, y)$ は、

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{\Delta I_y}{\Delta I_x} \quad (2)$$

として求めることができる。勾配演算には、Sobelオペレータなどを用いる。このとき、方向符号 c_{xy} は、明度勾配の角度 $\theta(x, y)$ を量子化幅 $\Delta\theta = 2\pi/N$ により量子化した符号として、次式により定義される。

$$c_{xy} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{\theta(x, y)}{\Delta\theta} \right\rfloor & \text{if } |\nabla I_x| + |\nabla I_y| \geq \Gamma \\ N & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 Γ は安定な符号生成を行うためのしきい値として使用する値である。画素近傍のコントラストが低く、十分な勾配値が得られない場合に、無効符号 N を割り当てる。有効な方向符号は $0 \sim N-1$ となる。

画像照合の評価は、参照画像と比較対象となる探索画像の方向符号の平均残差絶対値 D により行う。参照画像を I_{ref} 、探索画像を I_{search} 、それぞれの方向符号を c_{ref} 、 c_{search} とすると、平均残差絶対値 D は、方向符号の残差絶対値 d を用いて、次式により定義される。参照画像、探索画像ともに、画像のサイズは $S_x \times S_y$ である。

$$D = \frac{1}{S_x \times S_y} \sum_{S_x \times S_y} d(c_{ref}, c_{search}) \quad (4)$$

$$d(a, b) = \begin{cases} \min\{|a-b|, N-|a-b|\} & \text{if } a \neq N, b \neq N \\ N/4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

なお、残差絶対値 d の算出では、方向符号が巡回であることを考慮している。方向符号とその残差絶対値の算出例を図2に示す。

さらに、平均残差絶対値 D の最大値が $N/2$ であることに留意して、類似度 S を次式により定義する。

$$S = 1 - \frac{4}{N}D \quad (6)$$

参照画像と探索画像の方向符号に無効符号がないとき、類似度 S は、両画像が同一のときに1、無相関のときに0、輝度が反転した画像のときに-1となる。

所定の範囲内で探索画像を移動させて平均残差絶対値または類似度を計算し、平均残差絶対値が最小または類似度が最大となる位置を、照合位置とする。

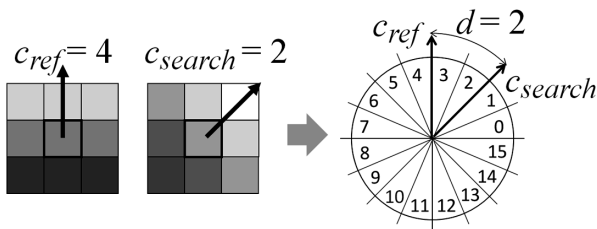


図2 方向符号とその残差絶対値の例 (N=16)

2.2 パターンの検出

方向符号照合を利用した歪み補正に適した周期構造パターンについて検討する。

画像照合により周期構造を検出し、歪みの補正に利用するためには、類似度がテンプレートと一致する位置で鋭いピークを示し、それ以外の位置では十分小さな値となることが重要である。基本パターンにランダムノイズ画像を採用し、これを繰り返し配置して作成した周期構造パターンは、その一部をテンプレートとして方向符号照合により類似度を求めると、照合位置で鋭いピークを示すなど、歪み補正用として優れた性質を示す(図3(a), (b))。しかし、パターンと画像センサの距離やレンズの焦点距離、焦点の調整などにより、撮影された画像上でのパターンの大きさが変化することを想定し、パターンを拡大または縮小すると、画像の周期性は失われ(図3(c)), 周期構造の検出ができなくなる(図3(d))ため、歪みの補正には利用できない。

このため、拡大縮小しても周期構造が維持され、かつ、類似度がテンプレートと一致する位置で鋭いピークを示し、それ以外の位置では十分小さな値となるパターンを採用する必要がある。

周期構造の検出に方向符号照合法を利用することを踏まえると、パターンは、次のような性質を備える必要がある。

- ① 方向符号が一定、すなわち明度変化の方向が一定であ

る適度な大きさの領域の組み合わせで構成されたパターンであること

- ② 領域の境界が多方向を向いていること

- ③ 隣接する領域との方向符号の差が大きいこと

①はパターンの拡大縮小に対応するための要件、②および③はテンプレートと一致する照合位置で類似度が鋭いピークを持ち、それ以外で小さな値となるための要件である。

本研究では、このような性質を持つパターンから、照合位置での類似度のピークの鋭さ、照合位置以外での類似度の小ささ、パターンの拡大・縮小による影響の程度を評価し、歪み補正に利用できるパターンを選定した。図4はその一例であり、パターンは方向符号が一定の領域の組み合わせとなっていることがわかる。図5は、図4(a)のパターン1を縮小し、画像中央にテンプレートを設定して、方向符号照合を行った結果である。縮小しても方向符号の周期構造が維持されて

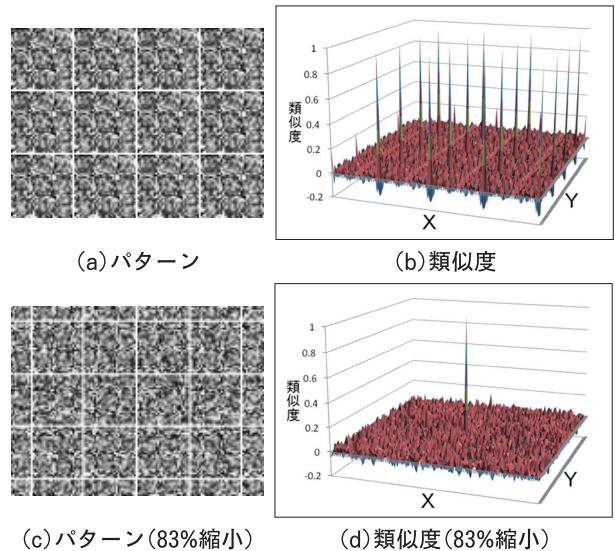
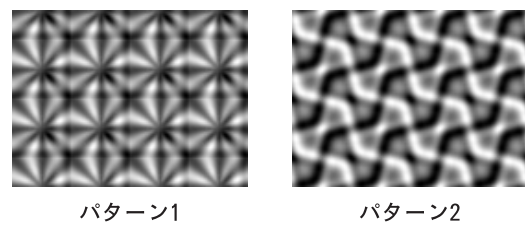
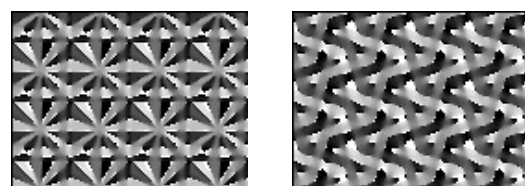


図3 ランダムノイズ画像を用いたパターン



(a) 周期構造パターン



(b) 周期構造パターンの方向符号

図4 周期構造パターンの例

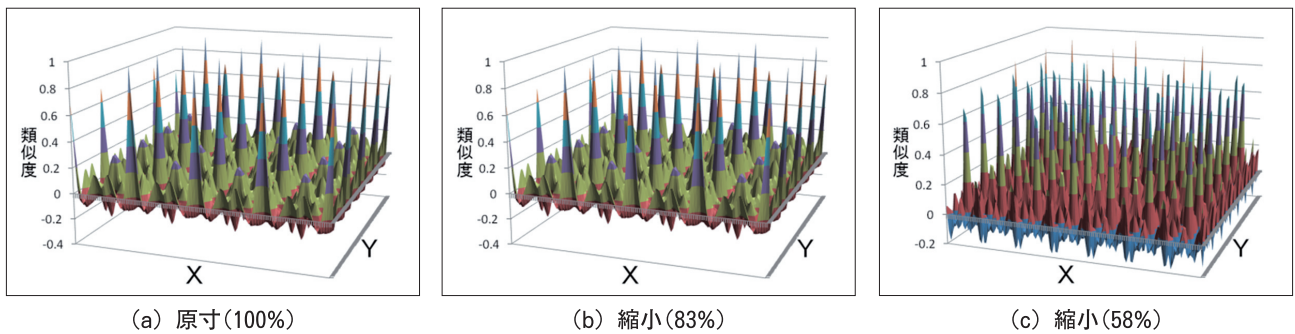
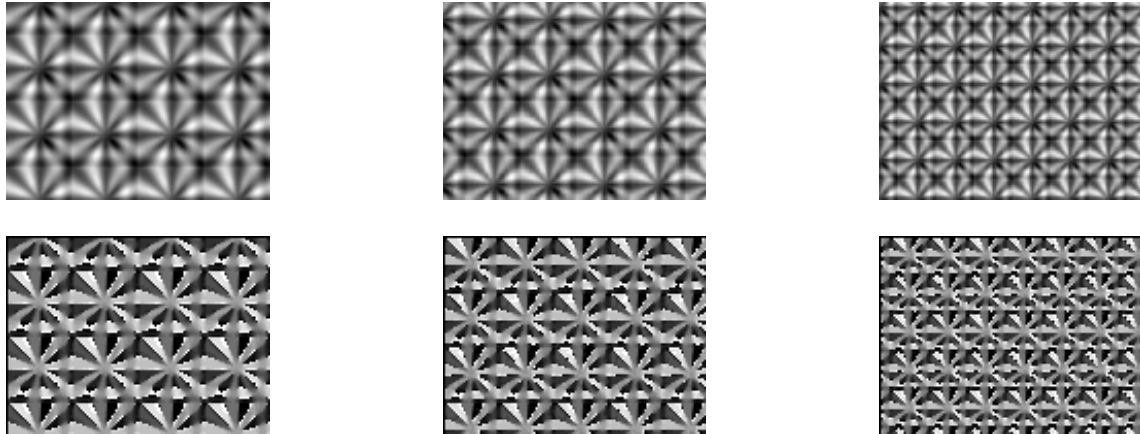


図5 縮小した周期構造パターン(上)とその方向符号(中), 中央をテンプレートしたときの類似度(下)

いること、類似度が照合位置でピークを示し、周期構造を抽出できていることが確認できる。

2.3 補正テーブルの作成

周期構造パターンを撮影した画像から、補正テーブルを作成する。補正テーブルは、補正前の歪みのある画像と歪みを取り除かれた補正後の画像の対応関係を、画像中の各画素について表したものである。

まず、パターンとカメラを正対させ、パターンの水平垂直が画像の水平垂直と一致するよう調整し、撮影されたパターンの周期を求める。これは、歪みが小さく無視できると考えられる画像中央付近を使用して行う。テンプレートを画像中央に設定し、テンプレートと一致する照合位置を画像中央から上下方向、左右方向に探索する。それぞれの方向で最初に現れる照合位置とテンプレートの座標の差が、画像上でのパターンの周期となる。

基本パターンが正方形の場合、上下方向の照合位置とテンプレートの x 座標、左右方向の照合位置とテンプレートの y 座標がそれぞれ一致し、各方向の周期が一致するよう調整することで、パターンとカメラを正対させ、パターンの水平垂直を画像の水平垂直と合わせることができる。

この状態で、テンプレートを、求められた1周期の範囲にわたり1画素ずつ移動させ、画像照合により各々のテンプレートと一致する位置を求める。一方、歪みのない画像では、テ

ンプレートと一致する画像は求めた周期ごとに現れるので、その位置は計算により求めることができる。そこで、歪みのある画像上で求めた照合位置と、歪みがない画像におけるテンプレートの位置の座標の差を求めることにより、補正テーブルを作成することができる。

3. 小型画像センサを用いた実験

本手法の効果を確認するため、当試験場で開発した小型画像センサを用いて実験を行った。実験に用いた画像センサを図6に、その仕様を表1に示す。

周期構造パターンは、図4(a)のパターン1を用いた。パターンのサイズは2880×1920画素、基本パターンのサイズは96×96画素であり、これを大型プリンタで900mm×600mmの大きさに印刷して使用した。基本パターンの大きさは30×30mmである。

パターンと画像センサを正対させ、その間の距離を80cmに調整し、撮影した画像が図7(a)である。撮影されたパターンには、樽型の歪みが生じている。

この画像を用いて、2.3節の方法により補正テーブルを作成し、これを用いて図7(a)の歪みを取り除いた結果が図7(b)である。また、チェッカーパターンを撮影した画像の補正前後の画像を図7(c), (d)に示す。図7(a), (c)で歪んでいたパターン中の直線が、図7(c), (d)では直線となっており、

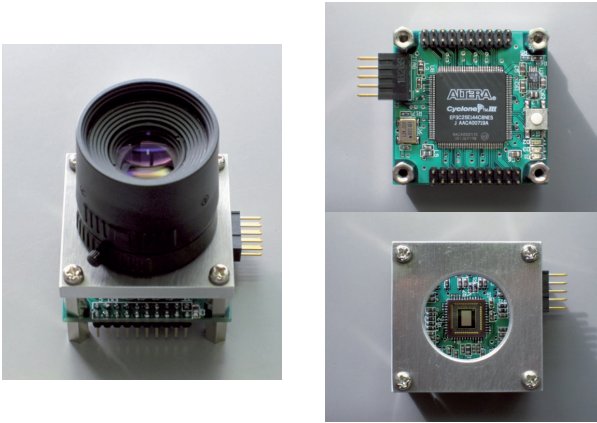


図6 小型画像センサ

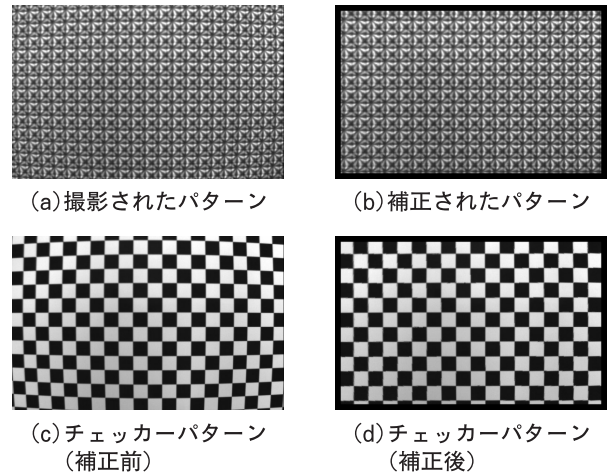


図7 小型画像センサを用いた補正実験

表1 小型画像センサの仕様

イメージセンサ	Aptina社 MT9V032 (Mono, 1/3inch, 752×480px, 60fps)
FPGA	Altera社 Cyclone III EP3C25E144C8NES(25kLEs)
レンズマウント	CSマウント
サイズ	W45×H45×D25mm(レンズを除く)
レンズ	TAMRON CCTVレンズ f=6mm 13FM061R
サイズ	W45×H45×D25mm (レンズを除く)

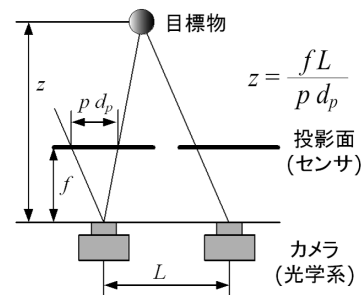


図8 ステレオビジョン (平行等位)

補正の効果が確認できる。

4. ステレオビジョンセンサへの応用

本手法を、当試験場で開発したステレオビジョンセンサ²⁾の簡易較正に応用した。ステレオビジョンは、2台のカメラで目標物を撮影し、カメラから目標物までの距離を三角測量の原理で計測する技術である。この技術では、2つのカメラで撮影された画像の間で、対応点を求める必要があるが、2台のカメラを平行等位の関係とすることで、対応点の探索範囲を1本の水平ライン上に限定できるため、大幅な演算量の削減が可能となる(図8)。当試験場で開発したステレオビジョンセンサでも、平行等位ステレオを採用している。

平行等位ステレオでは、2台のカメラは、光軸が平行で、レンズの焦点距離が等しく、投影面(イメージセンサ)が同じ高さで平行に配置される。しかし、実際のステレオビジョンセンサでは、イメージセンサの実装精度やレンズの取り付け誤差などの影響により、完全な平行等位ステレオを実現することは難しく、較正が必要である。また、画像周辺部ではレンズの歪みの影響を受け、対応点の探索精度が低下するため、歪みの補正を行うことが望ましい。そこで、本手法をス

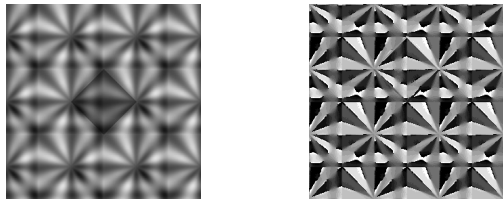
テレオビジョンセンサの較正とレンズ歪みの補正に応用した。

4.1 周期構造パターンへのマーカの付加

左右のカメラそれぞれの画像の歪みの補正は、2.3節の方法により可能であるが、周期構造パターンを撮影した2つの画像の対応関係を求めるためには、パターン中の位置を特定できるマーカが必要である。そこで、歪みの補正に用いる画像照合に影響を与えずに、2つの画像の対応関係を把握することができるマーカを開発した。

本手法では、画像照合において方向符号を用いて類似性を評価しているため、マーカの付加により方向符号が変化しないことが望ましい。方向符号は、明度の勾配方向であり、明度そのものではないので、明度の勾配方向が保存されるように、パターン的一部分の明度を変化させることで、その部分をマーカとして利用することができる。パターンは、方向符号が一定である領域の組み合わせで構成されているので、この領域の境目で明度変化を与えても、方向符号はほとんど影響を受けない。

そこで、図4(a)のパターン1について、図9(a)のように明度差を付け、マーカとした。これを方向符号に変換したものが図9(b)であり、マーカが方向符号には影響していない



(a) マーカを埋め込んだパターン (b) (a)の方向符号

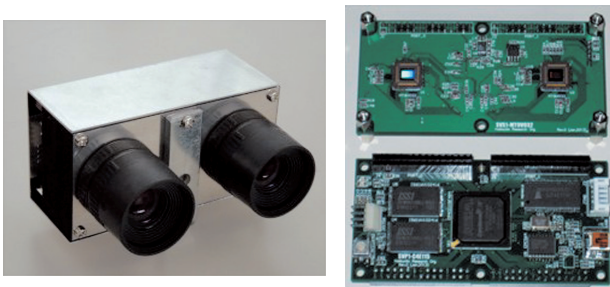
図9 ステレオ校正用のマーカ

ことがわかる。

このマーカを埋め込んだパターンでは、歪みの補正に加えて、周囲と明度の異なる部分同志で画像照合を行うことにより、2つの画像の対応関係を把握することができる。

4.2 ステレオビジョンセンサの補正・校正

当試験場で開発したステレオビジョンセンサに、レンズ歪みの補正と簡易校正を行い、効果を確認した。実験に用いたステレオビジョンセンサを図10に、その仕様を表2に示す。ステレオビジョンセンサの右カメラを基準カメラとし、これと正対するよう調整した後に撮影したパターンが図11(a)である。これを、基準カメラである右カメラの画像については



(a) 外観 (b) 基板

図10 ステレオビジョンセンサ

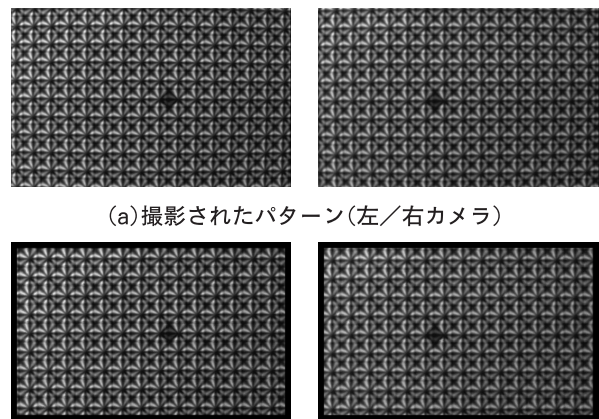
表2 ステレオビジョンセンサの仕様

イメージセンサ	Aptina社 MT9V032 (Mono, 752×480px, 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 × 2枚 (1024k × 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×H50×D40mm (レンズを除く)

2.3節の方法で、左カメラの画像については、基準(右)カメラのパターン周期で補正テーブルを求める。左カメラの画像を基準カメラの周期で補正するのは、左カメラの焦点距離を基準カメラと一致させるためである。得られた補正テーブルで図11(a)の画像を補正したのが、図11(b)である。また、明度の低い部分に着目して画像照合を行うことで、左右カメラの高さのずれ、視差の誤差を得ることができるので、この値を利用してステレオ画像処理を行う。

4.3 屋外で撮影した画像への適用

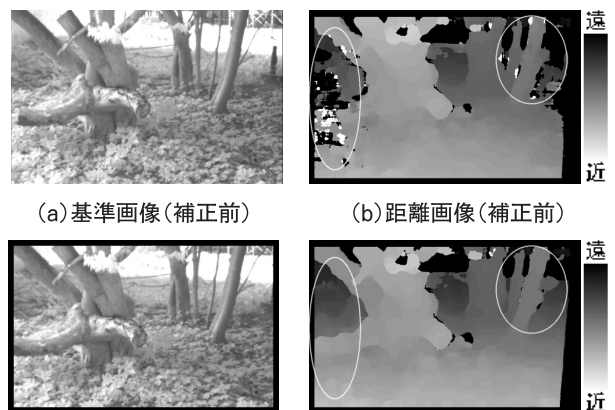
ステレオビジョンセンサを用いて屋外で撮影した画像に、4.2節で得られた補正テーブルおよび左右カメラの高さのずれなどの値を適用し、その効果を確認した。図12(a)が、屋外で撮影した画像(基準(右)カメラ)、図12(b)が左右カメラの高さのずれのみを補正して得られる距離画像である。距離画像では、カメラからの距離が近い画素が白く、遠い画素が黒く表されている。図12(c)は基準カメラの画像を補正したもの、図12(d)は補正・校正した画像から求めた距離画像である。補正前の図12(b)では距離情報が得られず、黒くなっ



(a) 撮影されたパターン(左/右カメラ)

(b) 補正・校正後のパターン(左/右カメラ)

図11 ステレオビジョンセンサの補正・校正



(a) 基準画像(補正前)

(b) 距離画像(補正前)

(c) 基準画像(補正後)

(d) 距離画像(補正後)

図12 ステレオビジョンセンサ実験

ていた部分でも、補正後では距離情報が得られており、補正の効果が確認できる。また、左右の画像の対応点探索が正しく行われず、距離が正しく求められていない白い画素は、大幅に減っている（線で囲んだ部分参照）。

5. おわりに

本研究では、周期構造パターンと方向符号照合法を用いて、レンズ歪みを除去するための補正テーブルを作成する方法を開発し、当試験場で開発した小型画像センサの画像を用いて実験により、有効性を確認した。この方法では、複数の画像を撮影したり、補間処理を行うことなく、補正に必要なデータを得ることができる。また、この方法を応用して、ステレオビジョンの簡易校正を行う方法を開発し、当試験場で開発したステレオビジョンセンサの画像を用いて、有効性を確認した。

今後は、小型画像センサやステレオビジョンセンサでの利用が容易になるように、開発した手法のハードウェア実装を行い、作業機に搭載する画像センサなどに活用する予定である。

引用文献

- 1) 大村 功・三田村智行・吉川 毅・多田達実ほか：画像照合を用いた農作業機向け車速計測センサの開発，北海道立工業試験場報告，No.307，pp27-34，(2008)
- 2) 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)
- 3) R.Y.Tsai：Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses,IEEE Journal of Robotics and Automation., Vol. RA-3, No.4 pp.323-344, (1987)
- 4) A.Goshtasby：Correction of Image Deformation from Lens Distortion Using Bezier Patches, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol.47, no.3, pp.385-394, (1989)
- 5) 高辻誠也・佐川立昌・越後富夫・八木康史：グレイコードパターンを利用したレンズ歪みの補正手法，画像の認識・理解シンポジウム（MIRU2005），(2005)
- 6) 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)

普通畑を対象とした圃場地図生成手法の検討

奥田 篤, 飯島 俊匡, 堀 武司
近藤 正一, 高橋 裕之, 鈴木 剛*

Research on simplified method of map-making for upland field.

Atsushi OKUDA, Toshimasa IJIMA, Takeshi HORI
Shoichi KONDO, Hiroyuki TAKAHASHI, Takeshi SUZUKI*

抄 録

近年、離農による農家戸数の減少に伴い、担い手の営農規模は大きく増加しており、農業生産を安定的に持続させるために、作業管理や意思決定を支援する営農支援システムの利用により農業生産技術の高度化を図ることが期待されている。営農支援システムは、農地区画を地理図形データとして含む電子化された地図を基盤とするが、その作成には煩雑でコストがかかる作業が必要である。そこで、衛星写真および航空写真の正射画像から農地区画形状データを生成する手法を開発した。

キーワード：圃場地図，航空写真，領域抽出，営農支援システム

Abstract

In recent years the size of one farm are increasing because farms decrease. To continue agricultural production stably, it is expected that the advancement of the agricultural production technology is realized by the use of the farming support system supporting work management and decision making. The farming support system needs a computerized map including farm field as geography data. However, complicated work is necessary to make it. Therefore we developed a method to make geography data from an aerial photograph.

KEY-WORDS : field map, aerial photograph, region extraction, farming support system

1. はじめに

近年、農業従事者の高齢化や後継者不足により離農が進んでいる。離農した農家が耕作していた農地は、近隣の農業生産法人、大規模経営農家などの担い手に引き継がれることが多いため、農家戸数の減少に伴い、これら担い手の営農規模は大きく増加している¹⁾。このような状況の下で、農業生産を安定的に持続させるために、情報通信技術を活用した営農ノウハウのデータベース化、作業管理や意思決定を支援する営農支援システムの開発により農業生産技術の高度化を図ることが期待されている。これらは大規模化の進捗が著しい北海道型農業では特に有効であるため、道内の情報処理産業に

とって非常に大きなビジネスチャンスになり得る。

このような状況を踏まえて、当場では、これらの市場への道内企業の速やかな参入を支援するために、農業分野での情報通信技術の活用に関する知見・技術の確立を図っており、企業が営農支援システムを開発する際に共通的に利用可能な基盤の構築を進めている。その一環として、本研究では、衛星ないし航空機で撮影した空中写真を利用して圃場地図を生成する手法について検討した。

北海道を除く都府県全体の水田率が66.3%であるのに対して、北海道の水田率は19.5%であり、かつ畑耕地中の44.8%が果樹地・牧草地を除いた普通畑であることから、北海道農業においては普通畑が大きな耕地面積を占めている²⁾。また、

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

事業名：経常研究

課題名：クラウドを活用する北海道型営農支援システムの共通基盤構築に関する研究

空中写真から圃場地図を生成する既往の試みは、畦があり区画の境界が明瞭である水田を対象としていることが多い。そこで、本研究では、境界に明瞭な構造物等が存在しない普通畑を圃場地図生成の対象とした。得られた検討結果を報告する。

2. 営農支援システムにおける農地区画形状データ

営農における農作業は圃場（農地区画）を主な単位として計画・実施される。したがって、これらの作業履歴を記録・管理する営農支援システムでは、データ構造のインデックス（索引）として、またユーザインタフェースとして、農地区画を利用することが合理的な構成となる。そのため、地理情報システムが、その主要な構成要素となり、農地区画を地理図形データとして含む電子化された地図が内蔵されることが望ましい。しかし、このような農地区画が地理図形データとして整備された電子地図は容易に入手できないため、現地における測量や地図上でのトレースなどの煩雑でコストのかかる作業により農地区画形状を取得・データ化し、これを電子地図中に地理図形データとして合成することが必要となり、システムの開発を阻害している。そこで、衛星写真及び航空写真の正射画像から農地区画形状データを生成する手法の開発に取り組んだ。

3. 農地区画形状データ生成手法の検討

衛星写真（陸域観測技術衛星「だいち」撮影、パンシャープン画像、地上分解能2.5m）及び航空写真（NTT空間情報㈱撮影、地上分解能25cm）を原画像として、農地区画を抽出し、農地区画形状データを生成する手法を検討した。

原画像は、いずれも正射補正されたカラー画像であり、Geo

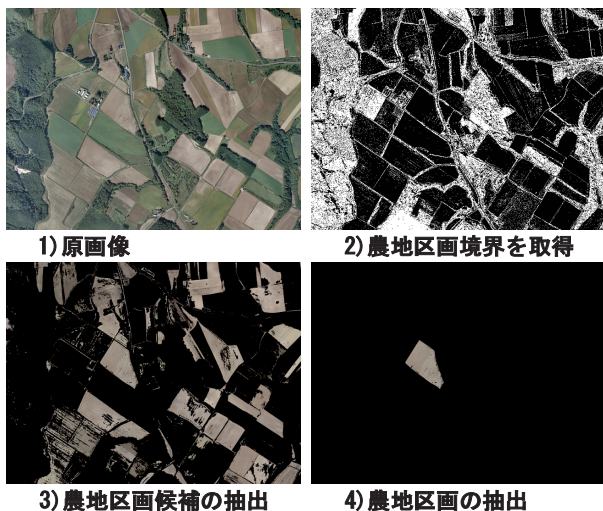


図1 航空写真画像からの農地区画形状の抽出例

Tiff形式の画像データとして（一財）日本地図センターから入手した。画像サイズは、衛星写真画像が4376×3932ピクセル、航空写真画像が8000×6000ピクセルである。座標参照系は、衛星写真画像が世界測地系（WGS84）・UTM座標系、航空写真画像が世界測地系（JGD2000）・平面直角座標系である。

農地区画の抽出及び形状データの生成手順は次のとおりである。

- (1)原画像をRGB色空間からHSV色空間に変換する。
- (2)HSV色空間に変換した画像に対し、ガウシアンピラミッド画像を2段階適用する。
- (3)輝度と色相の成分に対し、ウィンドウサイズ3×3のScharrフィルタを用いて水平、垂直エッジ強度を求め、それぞれのエッジ強度の合算する。
- (4)合算したエッジ強度をしきい値処理で二値化し、農地区画の境界候補とする。
- (5)オリジナルサイズのHSV色空間画像から農地区画の代表点を選ぶ。
- (6)代表点近傍の画像特徴量に近い画像特徴量を持つ領域を選択し、農地候補とする。ここで用いた画像特徴量は色相とした。
- (7)農地候補を(4)で求めた農地区画の境界候補まで拡張して一筆の農地区画とする。
- (8)得られた農地区画をベクター化し、農地区画形状データとする。

この手法を航空写真画像に適用して農地区画を抽出した例を図1に示す。同様に、衛星写真画像に適用して農地区画を抽出した例を図2に示す。

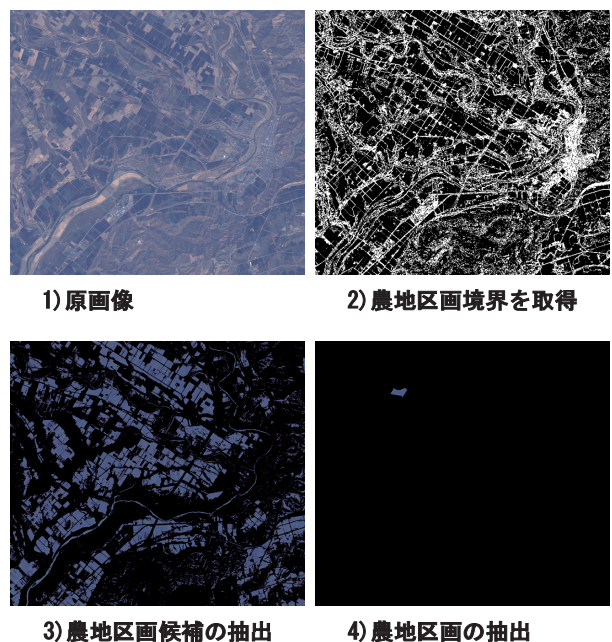
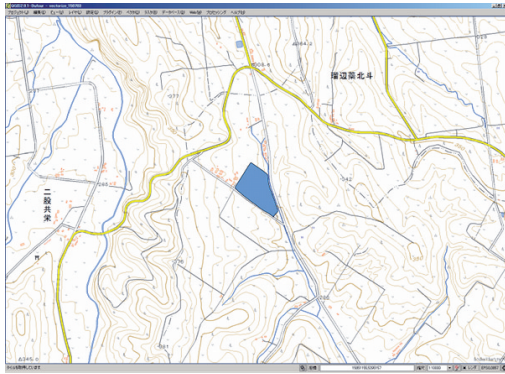


図2 衛星写真画像からの農地区画形状の抽出例



1) 航空写真から抽出



2) 衛星写真から抽出

図3 農地区画形状データの背景図への合成例

抽出した農地区画から農地区画形状データを生成し、地理情報システムに取り込み、適宜座標変換して、背景図への合成を試みた。試験に用いた地理情報システムはQGIS2.0.1 (OSGeo財団)である。背景図には電子国土基本図(国土地理院)を用いた。背景図の座標参照系は世界測地系(WGS84)・Pseudo-Mercatorである。地理情報システム上に背景図と農地区画形状データを合成して、縮尺1万分の1で表示した結果の画面表示例を図3に示す。

いずれの場合でも、農地区画形状が良好に抽出され、かつ適切な位置で背景図に合成されている。航空写真画像に比べて地上分解能の劣る衛星写真画像を原画像とした場合には、航空写真画像を原画像とした場合に比べて、抽出した農地区画形状の輪郭の一部に滑らかでない部分が認められるが、営農支援システムの地理図形データとして利用するには十分な水準で形状を保っている。

これらの結果より、本手法が、地理情報システムの地理図形データとして用いる農地区画形状データの生成に有効であることを確認した。

4. 圃場地図生成への適用の検討

開発した農地区画形状データ生成手法を用いて、網走郡津別町の農業法人が所有する圃場を対象に、航空写真からの圃

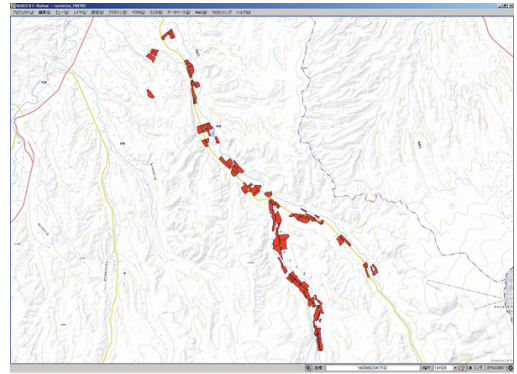


図4 圃場地図(電子国土基本図へ合成)

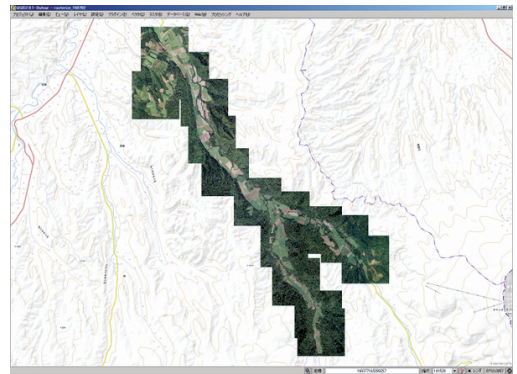


図5 航空写真画像(電子国土基本図へ合成)

場地図生成を試みた。105区画の圃場の農地区画形状データを生成し、これらと既存の圃場地図に含まれる対応する圃場の地理図形データについて、それぞれの形状や大きさを比較することで、本手法を圃場地図生成に用いることの妥当性を検討した。

既存の圃場地図は、網走農業改良普及センター美幌支所が作成したものであり、同支所から提供を受けた。KML形式で電子化されており、座標参照系は世界測地系(WGS84)・緯度経度座標系である。地理情報システム上で電子国土基本図と合成して表示した結果を図4に示す。すべての圃場が、主として小麦・甜菜・馬鈴薯・豆類の栽培に供する普通畑である。

航空写真は、NTT空間情報㈱が提供している電子地図基盤データ配信サービスGEOSPACE CDSを通じて入手した。配信される画像サイズ256×256ピクセルの航空写真タイル(正射補正されたJPEG形式のカラー画像)を、縦横ともに32枚となるように充填して、画像サイズを8192×8192ピクセルとし、GeoTiff形式の画像を生成した。法人が所有するすべての圃場が含まれるように調整し、15枚の画像を得た。これらの画像の地上分解能は約30cmである。また、座標参照系は世界測地系(WGS84)・Pseudo-Mercatorである。地理情報システム上で電子国土基本図と合成して表示した結果を図5に示す。

調整した航空写真画像に本手法を適用して、農地区画を抽出し、農地区画ごとに、原画像の画像サイズ・地理座標が相等な二値化画像を生成した。他方、圃場地図から、各圃場毎に地図図形データを分離し、これらをラスタ化して、航空写真画像と画像サイズ・地理座標が相等な二値化画像を作成した。各農地区画について、対応する圃場と、二値化画像を比較することで、抽出の適切さ（識別率）、すなわち抽出対象とした農地区画が隣接する農地区画や森林・道路等と明瞭に分離可能であったか否かと、抽出できた場合の形状の類似性及び大きさの相違を検討した。

本手法により15枚の原画像から圃場105区画に対して98区画の農地区画が抽出された。このうち、85区画が適切に抽出されていた。識別率は81.0%である。図6に抽出例を示す。残り20区画は、隣接する2ないし3圃場を一つの区画として抽出していた。図7に抽出例を示す。これらは、隣接する圃場間に画像特徴の差異が非常に少ないために、分離に失敗したものである。ただし、いずれの区画も畑地のみを抽出しており、隣接する森林・道路などとは明瞭に分離されている。そのため、地理情報システム上で、これらを分割して適切な農地区画形状データを作成することは容易である。

適切に抽出された農地区画85区画について、目視にて、その形状を対応する圃場のそれと比較すると、すべての区画が良好に類似していることを認めた。

抽出区画と対応する圃場の大きさを比較するために、両者

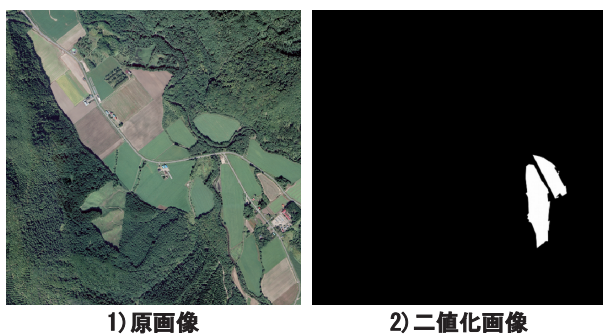


図6 適切に抽出した例

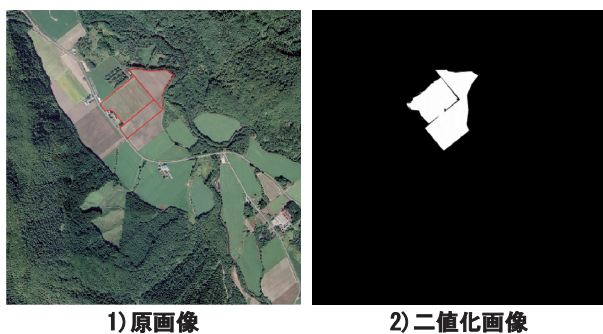


図7 隣接圃場とともに抽出した例

(原画像中の線は地理図形データの輪郭である。)

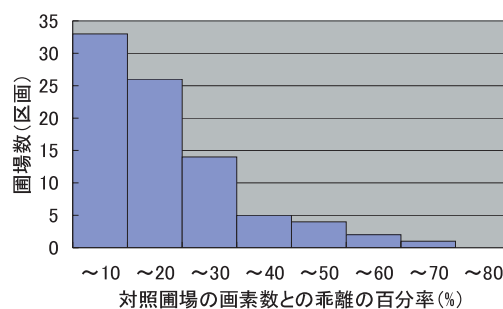


図8 画素数の乖離の度数分布図

の画素数を比較した。両者の間には、平均15.3%の乖離があった。両者の乖離の対照圃場の画素数に対する百分率をヒストグラムとして図8に示す。ほとんどの抽出区画で画素数が対照圃場のそれに比べて少なく、圃場面積が小さいほど両者の乖離が大きくなる傾向が認められた。これは、農地区画の境界候補を得るためのエッジ抽出処理において、境界の切れ目が生じないよう弱いエッジも含めて抽出しているため境界線が太くなり、圃場を侵食するためと考えられる。

本手法により抽出された農地区画は、面積の正確性については改善の余地があるものの、形状については、大きく膨張して隣接する農地区画間で干渉が生ずることもなく、かつ良好に類似しており、これらから営農支援システムでインデックスとして使用するために充分満足し得る地理図形データを生成可能である。

本手法による農地区画の抽出に要した時間は、手作業を含めて40分程度である。ここでは、CPUにIntel Core i7-3930K（動作周波数3.2GHz）、16GBのメモリを搭載した64bit Microsoft Windows 8.1をOSとするコンピュータを用い、開発言語にC++及びC#, 画像処理ライブラリとしてOpen CV (Open Source Computer Vision Library, itseez) を利用した。人手により地形図・地籍図・航空写真等をトレースして圃場の地理図形データを作成する際に要する時間は、対象圃場の形状の複雑さや用いる背景図の縮尺・明瞭さ等により変化するので一概に言及できないが、水田を主な対象として作業した場合で、1時間当たり50~150区画が処理可能とされている³⁾。普通畑を対象に作業した場合は、区画境界が明瞭でない場合が多いため、さらに時間を要すると思われる。実際に検証対象とした圃場図の作成には2時間程度を要した。したがって、本手法は、これらの作業を効率化することが可能であると考えられる。

以上の結果から、開発した農地区画形状データ生成手法が、農業法人に向けて営農支援システムを開発する際に必要となる圃場地図の作成に有効であることが確認された。

5. おわりに

本研究では、営農支援システムの開発に必要な農地区

画の地理図形データを衛星写真および航空写真から簡便に生成する手法を開発した。農業法人の所有する農地を対象に、圃場地図の作成を試み、既存の圃場地図と同水準の圃場地図が作成でき、かつ作成作業の効率化に有効であることを確認した。

今後は、引き続き、農地区画の抽出精度の向上と地理図形データ生成の自動化に関する技術開発を進める予定である。

謝辞

圃場地図を提供いただいた株式会社希来里ファーム・北海道オホーツク総合振興局網走農業改良普及センター美幌支所に感謝いたします。

引用文献

- 1) 農林水産省：2010年世界農林業センサス 第2巻 農林業経営体調査報告書 ー総括編ー，(2011)
- 2) 農林水産省：平成26年耕地及び作付面積統計，(2015)
- 3) 吉田智一・高橋英博：GISマップ表示コンポーネントを利用した圃場地図作成ソフト，農業情報研究，18(1)，pp.41-51，(2009)

ホタテウロを原料とした高機能性養魚用飼料の開発

若杉 郷臣, 平間 政文*, 富田 恵一, 鎌田 樹志, 佐々木 雄真, 吉川 琢也
信太 茂春**, 石田 良太郎***, 石田 宏一***, 佐藤 敦一****

Development of Highly Efficient Feed from Scallop Mid-gut Gland

Motoomi WAKASUGI, Masafumi HIRAMA*, Keiichi TOMITA, Tatsuyuki KAMADA
Takema SASAKI, Takuya YOSHIKAWA
Shigeharu NOBUTA**, Ryotaro ISHIDA***, Kouichi ISHIDA***, Nobukazu SATO****

抄 録

水産系廃棄物として排出されるホタテガイの中腸腺を主とした加工残渣（ホタテウロ）を原料とした魚類摂餌促進物質（Scallop Mid-gut Glands Extract with Cd removal treatment, SMGE）の製造技術開発を行った。自己消化または酸性プロテアーゼで処理して遊離アミノ酸を増加させ、電解法により含有するカドミウムを除去し、中和および濃縮を行いSMGEを得た。ホタテウロエキス電解処理条件の検討の結果、pH3、電解電圧5Vが最適であることがわかった。これらの結果から、1バッチ660kgスケールのミニプラントを構築して実証製造試験を実施した。試験製造品について、いくつかの魚種を対象とした飼育試験を実施したところ、SMGEは摂餌促進効果や成長促進効果を有することが明らかとなった。

キーワード：ホタテウロ、魚類摂餌促進物質、SMGE

Abstract

The manufacturing technology of the feeding stimulant for cultured fish made from scallop mid-gut gland (Scallop mid-gut glands extract with Cd removal treatment, SMGE) was developed. It was treated with a self-digestion or acidic protease to increase free amino acids. And cadmium containing the extract was removed by electrolysis. Then SMGE was prepared by neutralizing and concentrating the extract. It was found that pH of the extract was pH 3 and electrolysis voltage was 5 V were the optimum condition in the electrolysis process. It was built the demonstration production facilities to process the 660 kg of scallop mid-gut gland. And in the several species of fishes, SMGE was found to have the improvement of feeding activity and growth performance in these fishes.

KEY-WORDS : Scallop mid-gut gland, Feeding stimulant for cultured fish, SMGE

1. はじめに

北海道の漁業生産量は全国の27%を占め、全国第1位である。中でもホタテガイの生産は、2013年の生産量で45.4万トンと、魚種別で北海道一を誇る¹⁾。しかし、ホタテガイの加

工に伴い、水産系廃棄物として中腸腺（ウロ）と呼ばれる部位を主とする内臓部分が年間3万トン程度発生している²⁾。これらはタンパク質を60%以上含み、有機質資源としての有効利用が期待されるが、有害重金属のカドミウムを高濃度に蓄積している^{3, 4)}ことが有効利用の足かせとなり、生産者や

* 北海道日油株式会社, * HOKKAIDO NOF Corporation

** 道総研 釧路水産試験場, ** Hokkaido Research Organization Kushiro Fisheries Research Institute

*** 道総研 栽培水産試験場, *** Hokkaido Research Organization Mariculture Fisheries Research Institute

**** 道総研 中央水産試験場, **** Hokkaido Research Organization Central Fisheries Research Institute

事業名：循環資源利用促進特定課題研究開発基金事業

課題名：ホタテウロの利用技術開発

加工業者および自治体等はその処理に苦慮している。

一方、日本の漁業・養殖業生産量は1984年には1,280万トンを超えたが、200海里問題やマイワシ資源の枯渇などの影響により生産量が漸減し、2014年は479万トンとなった。しかし、養殖業の比重は年々増しており、2014年は漁業・養殖業生産量全体の20%以上の102万トンに達している⁵⁾。そのため、養殖業は水産物供給の安定化に寄与するなど、水産業において今後ますます重要となっていくと考えられる。

しかし、養魚飼料原料として用いられる魚粉は2005年頃までは輸入価格が70円/kg程度であったが、ペルー産のカタクチワシの不漁や中国などの養殖生産量の増加による魚粉の需要増加などの影響を受けて高騰し、現在では200円/kgを超えるまでになっている(図1)⁶⁾。それに伴い養魚飼料の価格も上昇し、飼料代がコストの大半を占めるブリやマダイ等の魚類養殖業の経営を圧迫しており、よりコストの低い養魚飼料の開発が急務となっている。魚粉の一部を大豆かす等の植物性タンパクと置き換えれば養殖コストを削減することは可能だが、摂餌性の低下や成長率の低下を引き起こす問題があるため、摂餌促進物質の利用が提案されている。しかしながら、現在摂餌促進物質として用いられているオキアミエキスは600円/kgと非常に高価なため、養殖業界からは安価な摂餌促進物質の開発が要望されている。

そこで、本道のホタテガイ漁業の持続的な発展を支援するとともに、日本の養殖業界のニーズにも対応した研究として、ホタテウロからカドミウムを除去し、付加価値性の高いホタテウロ由来魚類摂餌促進物質(SMGE)への有効利用技術の開発を行ったので報告する。

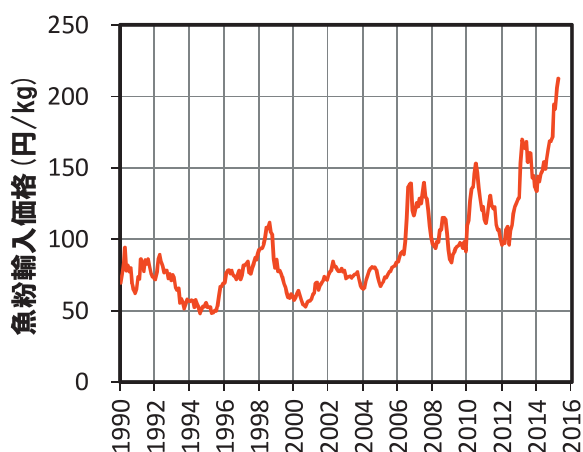


図1 魚粉輸入価格の推移

2. 実験方法

2.1 SMGEの製造方法の検討

魚類に摂餌促進効果を持つ物質として、遊離アミノ酸が知られている⁷⁾。また、ホタテウロには高濃度でカドミウムが

蓄積している問題がある。そこで、SMGEの製造方法として、以下の処理工程の検討を行った。

2.1.1 ホタテウロのエキス化条件の検討

魚類摂餌促進物質となる遊離アミノ酸を増加させるため、ホタテウロのタンパク質の分解(エキス化)処理を検討した。ホタテウロの加工業者からの排出形態は、煮熟処理された物(ボイルウロ)と生のまま排出された物(生ウロ)があり、性状が異なるため、各ウロについてエキス化条件を検討した。各ウロに対し水を0.6倍量添加後、ボイルウロでは酵素添加によるエキス化を行い、pH、温度、酵素の種類、酵素添加量の条件を検討した⁸⁾。また、生ウロについて自己消化によるエキス化を行い、pH、温度条件を検討した⁹⁾。

2.1.2 カドミウム除去のための電解処理条件の検討

ホタテウロにはカドミウムが含まれているため、飼料として利用するにはカドミウム規制値¹⁰⁾の3 mg/kg以下に低減する必要がある。そこで、電解処理法によるホタテウロのエキス化物に含まれるカドミウム除去を検討した。ポリエチレン(PE)製容器の中に加温用のコイル状の銅製パイプと、その内側に容量500mLのポリスチレン(PS)製容器を設置し、その中にエキスを350mL入れ、さらにステンレスSUS304製の陰極板と、白金酸化物をチタン板表面に焼成した不溶性電極(ペルメック電極¹¹⁾)の陽極板をそれぞれ1枚ずつ配置した。各電極板表面はテフロン製テープでマスキングし、一面あたり20cm²がエキス中に浸漬するようにした。PE製容器にはPS製容器の2/3程度が浸る程度の水を入れ、電解装置を一定温度に保つよう、銅製パイプの内部に湯浴で作成した湯を循環した。直流電源は¹²⁾高砂製作所製 GP08-20を使用した。ボイルウロエキスを用い、エキスのpHが2~4、印加電圧が3.2~6 V、液温は約45℃の条件で検討し、カドミウム除去に及ぼす影響について検討した。図2に実験の状況を示す。



図2 電解装置(電解条件検討用)

試験中、一定時間ごとにエキスを採取し、マイクロウェーブ分解装置（マイルストーンゼネラル㈱製 1200MEGA）により分解処理を行った後、ICP質量分析装置（アジレントテクノロジー㈱製 Agilent7700x）によりカドミウムの測定を行った。

2.2 実験室スケールでのSMGEの製造検討

2.1節にて検討したエキス化条件と電解処理条件により、実験室スケール規模（3～9 L）でのSMGEの製造試験を行い、製造技術の確立を図った。

原料にはボイルウロまたは生ウロを用い、自己消化によるエキス化処理後、珪藻土ろ過を行い清澄なエキスを得た。その後、電解処理によりホタテウロエキスに含まれるカドミウムを除去し、濃縮または乾燥処理を行ってSMGEを作製するプロセスについて検討した。

2.2.1 ホタテウロのエキス化

エキス化の方法については、以下に示す方法により行った。まず、水をウロの0.6倍量添加して混合粉碎した。続いて、ボイルウロには硫酸を加えpH2.5に調整し、酸性プロテアーゼをウロの重量に対して0.3%添加した。一方、生ウロには硫酸を加えてpH3.75とした。その後、ボイルウロ、生ウロともに45℃にて40時間振とうしてエキス化を行い、珪藻土ろ過により清澄なエキスを得た。

2.2.2 電解処理によるウロエキス中カドミウムの除去

ウロエキスに含まれるカドミウムについて、表1の条件にて、図3に示す装置により電解法による除去処理を行った。水浴内に容器を設置して、その中にエキスを入れて電極板を配置し、電解処理中に攪拌を行えるよう、水浴をマグネチックスターラーに載せた。陰極板にはステンレス（SUS304製）を、陽極板には不溶性電極（ペルメレック電極㈱製）を用い、それぞれの電極板表面は表1に示す面積となるよう、テフロン製テープでマスキングした。直流電源を電極板に接続し、定電圧モードで所定の電圧を印加し、電解処理を行った。試

表1 SMGE製造試験における電解条件

原料	ボイルウロ	生ウロ
容器	テトラフルオロエチレン・パーフルオアルキルビニルエーテル共重合体(PFA)製 4L容器	ポリカーボネート(PC)製 13L容器
エキス使用量(L)	3	6～9
電極板面積(cm ²)	160	400
pH	2.5	3
電圧(V)	3.2	5
電流(A)	1～2	10～14
液温(℃)	45	45

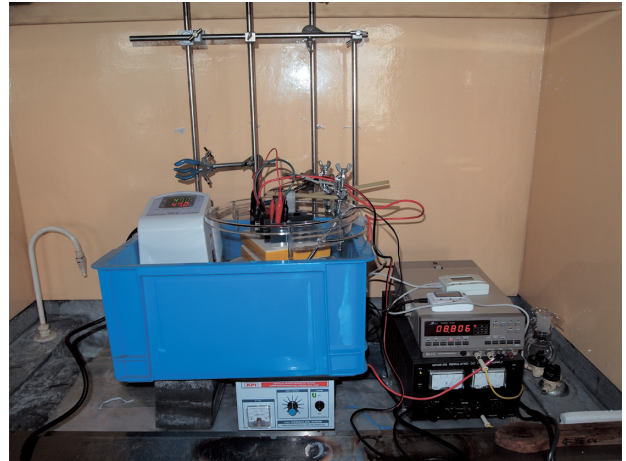


図3 電解装置（SMGE製造検討用）

験中、2.1.2項と同様に一定時間ごとにエキスを採取し、カドミウムの測定を行った。

2.2.3 ウロエキスの濃縮・凍結乾燥・粉末化

カドミウムを除去したエキスは、20%水酸化ナトリウム溶液でpH 7まで中和後、ロータリーエバポレーターを用いて60℃で減圧濃縮を行ってSMGE濃縮エキスを得た。さらに、濃縮液を真空凍結乾燥機（東京理化器械㈱製 FDU-830）により乾燥後、超遠心粉碎機（レッチェ製 ZM200）により粉碎し、SMGE乾燥粉末を得た。

2.3 ミニプラント試験装置によるSMGEの製造試験

実験室規模での製造試験の検討結果をもとに、北海道茅部郡森町のホタテウロ処理施設（ホタテ未利用資源リサイクル施設）内に、ホタテウロをエキス化し、脱カドミウム処理を行うための660kgバッチ規模のミニプラントを構築するとともに、リサイクル施設に隣接する飼料製造会社（北天ハイミール㈱）内に設置されているホタテウロ濃縮・乾燥施設を利用してエキスの濃縮処理を行い、実証試験レベルでのSMGE製造技術確立のための検討を行った。

本試験は平成25～26年度に生ウロを原料として5回、ボイルウロを原料として2回、計7回実施した。以下、本報では、平成26年9月下旬から実施した、生ウロを原料とした場合の試験について示す。

2.3.1 装置の概要

ミニプラントの概略図を図4に示す。装置はエキス化を促進させるためのウロ破砕ポンプ、ウロ分解槽と自己消化処理に最適な温度を維持するための加温用の貯湯槽、カドミウム除去処理で使用する電解装置と電源装置、電解時に発生する泡を除去するための泡取器、エキス循環ポンプなどから構成されている。以下、主要な装置について詳細を示す。

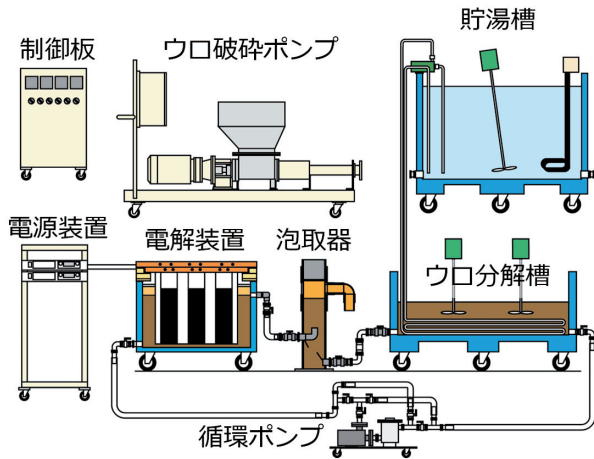


図4 ミニプラントの概略図

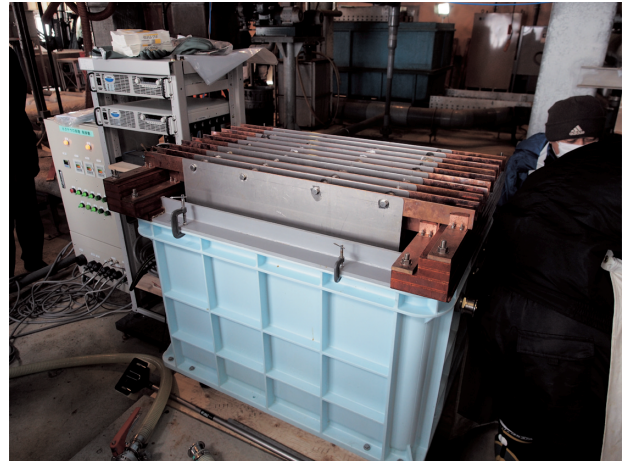


図5 ミニプラントの電解装置

a) ウロ破碎ポンプ

最大2トン/hのウロ破碎能力があり、移送機能が一体化しコンパクトな装置として、ハイシンモノポンプ フードクラッシュシリーズ（兵神装備㈱製）を選択した。

b) 貯湯槽

エキシ化時の熱源として、60℃程度の湯を1,000L程度生成し利用するため、ポリプロピレン（PP）製1,400L水槽に攪拌機と投げ込みヒーター（7.5kW）、およびウロ分解槽に湯を供給するための湯循環ポンプを設置し、貯湯槽として用いた。

c) ウロ分解槽

エキシ化処理において、加温と攪拌を行うため、PP製1,000L水槽に攪拌機2機を設置し、ステンレスフレキパイプを槽の底面に這わして貯湯槽からの湯を循環し、ウロ分解槽を加温できるようにした。

d) 電解装置

PP製400L水槽に、ステンレス製（SUS304）の陰極板と不溶性電極（ペルメレック電極㈱製）の陽極板を交互に配置した（図5）。

e) 電源装置

定格出力8V・600Aの直流電源装置（菊水電子工業㈱製）2台を並列接続し、最大1,200Aの出力を可能とした。

2.3.2 処理工程

a) ウロの破碎・エキシ化

図6に示す生ウロ（冷凍品）660kgを原料とし、シャーベット状となるまで解凍後、ウロ破碎ポンプにて破碎してウロ分解槽に投入した。その後、ウロ分解槽に水をウロの重量に対して0.3倍量添加し、攪拌機で均一になるように混合した。その後、硫酸を添加してpH3～4に調整し、45℃に加温し



図6 ミニプラント試験に使用した生ウロ（660kg）



図7 ホタテウロ濃縮・乾燥施設

ながら2日間自己消化によるエキシ化処理を実施した。

b) 電解処理

電解槽とウロ分解槽をホースで接続し、ポンプでエキスを循環しながら電極板に電圧を印加してカドミウムを陰極板に析出除去した。エキスのpHは3.1、電源装置の運転条件は5V（電極間）定電圧モードとした。

c) 濃縮処理

脱カドミウム処理後のエキスについて、pH計で測定しながら20%水酸化ナトリウムを混合しpH7に調整した。その後、森町でのホタテウロの処理に利用しているホタテウロ濃縮・乾燥施設(図7)を使用し、エキスを濃縮作業した。かきとり式熱交換器(アルファ・ラバル(株)製 コンサーム)によりエキスを90℃以上に急速加熱後、デカンター(アルファ・ラバル(株)製)にて残渣を除去した。その後、薄膜蒸発機(株)櫻製作所製 ハイエポレーター)にて水分50%以下を目標にエキスの減圧濃縮処理を行い、SMGE濃縮エキスを製造した。

2.4 飼育試験による評価

実験室またはミニプラントにて製造したSMGEについて、クロソイ稚魚、マダイ稚魚、ハマチなどの魚種を対象とし、SMGEを数%配合した飼料を摂餌する飼育試験を数週間の期間で実施してSMGEの摂餌促進効果を検討した。クロソイ稚魚については実験室で製造したボイルウロ原料SMGEを、マダイ稚魚には実験室で製造した生ウロ原料SMGEを、ハマチにはミニプラントで製造した生ウロ原料SMGEを用いた。

2.5 コスト試算

本ミニプラント試験にかかるコストのうち、ホタテウロのエキス化、脱カドミウム処理および中和にかかるランニングコストについて、本試験に使用した電力量および薬品量から試算した。

3. 結果と考察

3.1 SMGEの製造方法の検討

3.1.1 ホタテウロのエキス化条件の検討

ボイルウロのエキス化処理について検討したところ、酸性条件で処理しなければ腐敗することが判明した⁸⁾。そこで、pH2.5を至適pHとする酸性プロテアーゼ(エイチ・ビィ・アイ(株)製 オリエンターゼAY)を用いてエキス化条件を検討した。その結果、pH2.5~3.5、45℃の条件がエキス化に適していた。また、酵素の添加量について0~0.6%の範囲で検討したところ、酵素添加量を増加させるとそれに応じて遊離アミノ酸生成量も増加することがわかった⁸⁾。

また、生ウロについては、pH3以上で遊離アミノ酸生成量が多くなり、pH4、40℃で遊離アミノ酸生成量が最大となった。しかし、pH5では腐敗したため、安定的に処理するにはpH3~4の範囲が適していることが判明した⁹⁾。

3.1.2 電解処理によるカドミウム除去条件の検討

図8に印加電圧を変化させた場合、図9にエキスのpHを

変化させた場合のカドミウム濃度変化について示す。図8より、電圧が5Vおよび6Vではカドミウム除去速度がほぼ同等であったのに対し、3.2V、4Vでは除去速度が遅いことがわかった。しかし、3.2V以上の印加電圧の場合、9~10時間で乾物換算3mg/kg程度となる0.3mg/L以下まで低減できた。図9より、pH2での条件が最もカドミウム除去速度が大きかったが、pH2.5、3と大きな差は見られなかった。一方、pH4ではカドミウム濃度が1mg/L以下になると除去速度が低下する様子が見られた。これらのことから、電解条件としてはpH2~3、電圧3.2~5Vの条件が適することがわかったが、薬品コストや処理時間を考慮すると、pH3、電圧5Vの条件が最適であると考えられる。

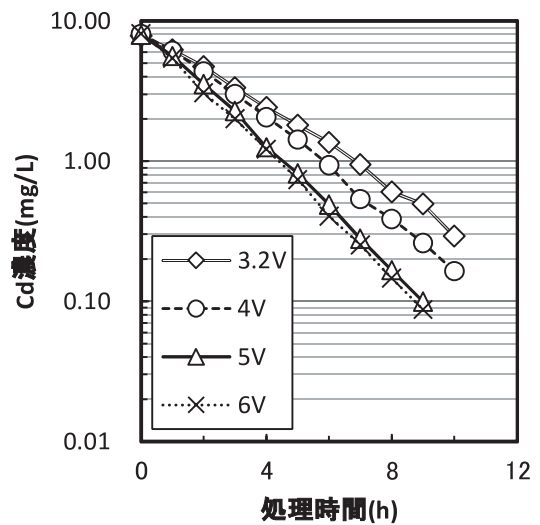


図8 電圧を変化させた場合の電解処理によるカドミウム除去への影響 (pH2.5)

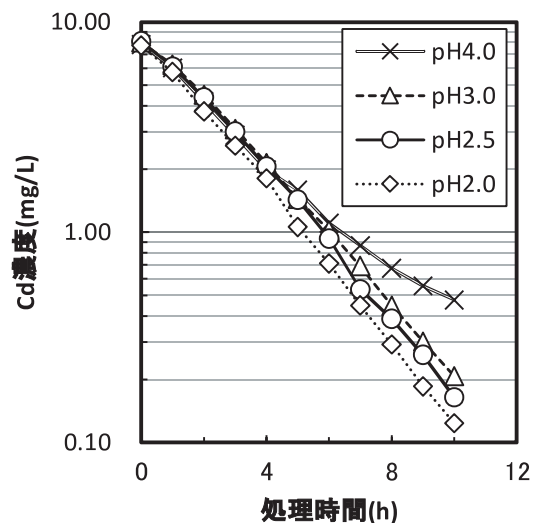


図9 エキスのpHを変化させた場合の電解処理によるカドミウム除去への影響 (電圧4V)

3.2 実験室スケールでのSMGEの製造検討

3.2.1 エキスの電解処理によるカドミウム除去

表1の処理条件によりウロエキスの電解処理を行った。図10にカドミウム濃度変化を示す。ボイルウロエキスについては電解処理9時間で、生ウロエキスについては7時間で、カドミウム濃度が乾燥物換算で3 mg/kgとなる0.3mg/L以下となった。これらの差は原料の違いによるものではなく、処理条件、特に電圧条件の違いによるものと考えられ、処理時間は3.1.2項の小スケールでの電解処理結果とほぼ同様である。これらのことから、電極板の面積を処理量に応じて大きくすることで、性能を維持したままスケールアップ可能と考えられる。

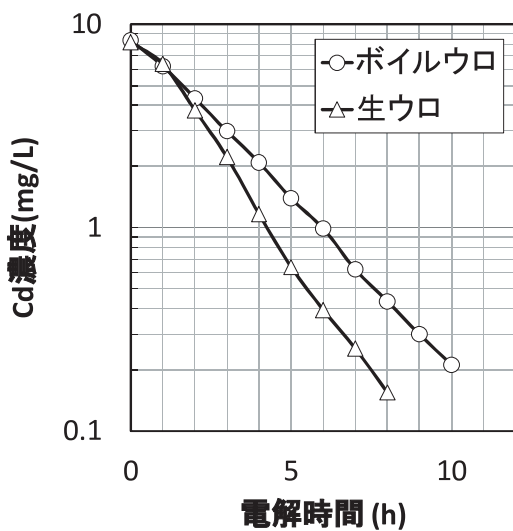


図10 実験室スケールでのSMGEの製造検討における電解処理によるカドミウム濃度変化

3.2.2 濃縮・凍結乾燥・粉末化

得られたSMGE粉末の写真を図11に示す。SMGE粉末には遊離アミノ酸が4割程度含まれていた。しかし、非常に吸湿性が高く、すぐ潮解するため、取り扱いに注意が必要であった。また、凍結乾燥は実用規模での製造に用いるにはコスト高となるため、魚粉等に混合して乾燥する方法を用いるか、あるいは乾燥せず濃縮エキスにとどめるなどの方法を取る必要があると考えられる。

3.3 ミニプラント試験装置によるSMGEの製造試験

3.3.1 ウロ破碎・エキス化処理

エキス化前後の様子について、図12および図13に示す。エキス化前には、図12のように破碎ポンプにて破碎されなかった外套膜等が多量に残っている状態であったが、1日経過すると図13のように分解液の粘性が下がっており、外套膜等は完全に分解していた。しかしながら、分解液には非常に微細な未分解残渣が懸濁状態で存在しており、製品への混入によ



図11 SMGE乾燥粉末



図12 生ウロのエキス化処理開始時の様子



図13 生ウロのエキス化処理後（1日経過）

りアミノ酸含有率を低下させるだけでなく、残渣には油脂分が多く含まれるため、製品の酸化など、品質に悪影響を及ぼす。そこで、遠心分離による油脂分と未分解残渣の除去処理を実施したところ、図14に示すように油脂分と未分解残渣量は低減しており、エキス中の油脂濃度が処理前14%（乾燥物換算）に対し、処理後は5.9%（乾燥物換算）だった。

作品に遜色なく、ミニプラント規模でも十分な品質のSMGEを製造可能であることが判明した。

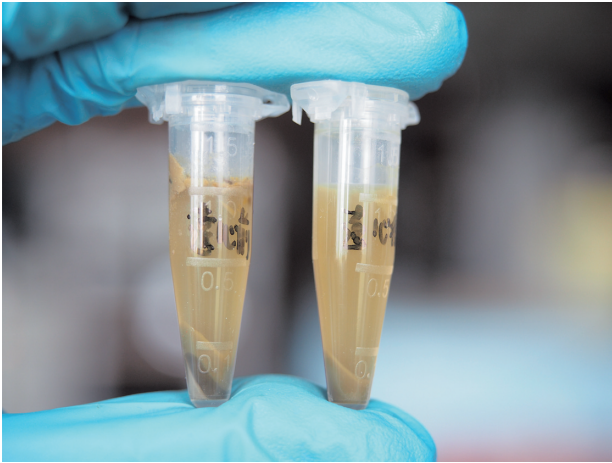


図14 遠心分離前後の未分解残渣量
(左：遠心分離前，右：遠心分離後)

3.3.2 電解処理

図15に電解処理時間とカドミウム濃度変化を示す。本試験で使用したエキスの水分量は87%であったため、乾燥物換算で3 mg/kgになるような濃度として、0.4mg/L以下を目標に処理を実施した。初期濃度は15.5mg/Lであったが、電解処理開始後、徐々にカドミウム濃度が低下し、10時間後には目標の0.4mg/Lを下回る0.35mg/Lまで低下したため、ここで電解処理を終了した。電流は電解処理中のエキスの温度上昇に比例し、開始時830Aから最終的に1,200Aまで増加した。電解処理に要した電力消費量は77.5kWhであった。

3.3.3 エキスの濃縮処理

図7の濃縮・乾燥施設の設備を用いて、エキスを濃縮処理した結果、得られた濃縮エキスの重量は109.6kg、水分率は43.8%であった。表2に遊離アミノ酸組成を示す。遊離アミノ酸総量は乾燥物換算で約35%と、3.2.2項の実験室規模の試

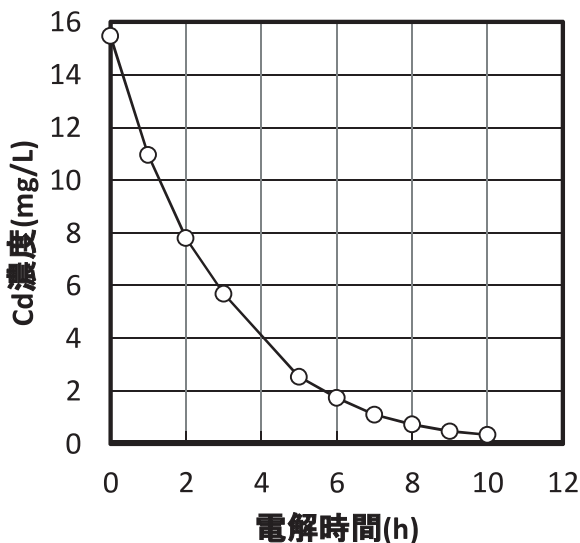


図15 電解処理によるカドミウム濃度変化

表2 ミニプラント製造SMGEの遊離アミノ酸組成
(mg/100g, 乾重量基準)

アミノ酸	ミニプラント製造 SMGE
ホスホセリン	183
タウリン	2,718
アスパラギン酸	2,555
スレオニン	906
セリン	1,752
グルタミン酸	1,834
グルタミン酸	594
サルコシン	0
α-アミノアジピン酸	109
グリシン	4,967
アラニン	2,268
シトルリン	0
α-アミノ酪酸	74
バリン	1,983
シスチン	118
メチオニン	888
シスタチオニン	0
イソロイシン	1,832
ロイシン	2,591
チロシン	288
フェニルアラニン	1,503
β-アラニン	84
β-アミノイソ酪酸	0
γ-アミノ酪酸	601
トリプトファン	100
ヒドロキシリジン	109
オルニチン	1,770
リジン	2,304
1-メチルヒスチジン	14
ヒスチジン	73
3-メチルヒスチジン	25
アンセリン	420
カルノシン	171
アルギニン	64
ヒドリキシプロリン	177
プロリン	1,514
合計	34,591

3.3.4 エキス化・電解処理コストの試算

生ウロを原料とした場合のランニングコストを表3に示す。まず、電力消費量は計333.31kWhとなり、単価18円/kWhとすると、合計6,000円となるが、このうち、加温用の投げ込みヒーターの電力消費量をA重油に換算すると23.2L相当となり、80円/Lで計算すると1,853円となるため、合計3,324円となる。また、薬品使用量については硫酸、水酸化ナトリウムその他で計1,617円となった。生ウロ660kgあたりのホタテウロのエキス化・脱カドミウム処理・中和にかかるランニングコストは4,940円、1トンあたりに換算すると7,484円となる。

表3 エキス化・脱Cd処理コスト

	単価	使用量	生ウロ 660kgあ たりコスト (円)	投げ込み ヒーターを A重油換算 (円)
電力				
投げ込みヒーター	18 円/kWh	251.61 kWh	4,529	1,853
電解用電源	18 円/kWh	77.46 kWh	1,394	1,394
その他	18 円/kWh	4.24 kWh	76	76
計		333.31 kWh	6,000	3,324
薬品				
硫酸	25 円/kg	10.6 kg	265	265
20%NaOH溶液	34 円/kg	23.2 kg	789	789
その他			563	563
計			1,617	1,617
合計			7,616	4,940

3.4 飼育試験による評価

クロソイ稚魚の結果を図16¹¹⁾に、マダイ稚魚の結果を図17¹²⁾に示す。クロソイ稚魚では飼料に2%配合することで無添加区と比べて伸長率や増重率および飼料効率が有意に改善し(図16)、マダイ稚魚は2%添加により摂餌性や成長が向上した(図17)。これらの結果から、原料がボイルウロまたは生ウロのどちらでも摂餌促進効果や成長促進効果が得られることがわかった。

また、ミニプラントにて製造したSMGEについて、ハマチを対象とした飼育試験を実施したところ、図18に示すようにSMGE添加区は無添加区よりも増重量や摂餌量が向上しており、日本の代表的な養殖魚であるハマチにも効果があることを確認し¹²⁾、ミニプラント製造品も実験室試作品と同様に摂餌促進効果や成長促進効果があることがわかった。

しかし、過剰な添加量では成長に悪影響を及ぼすことも判明しており¹²⁾、魚種ごとにSMGEの適正添加量を把握し、遊離アミノ酸の少ない飼料を補完するような使用方法を示す必要があると考えられる。

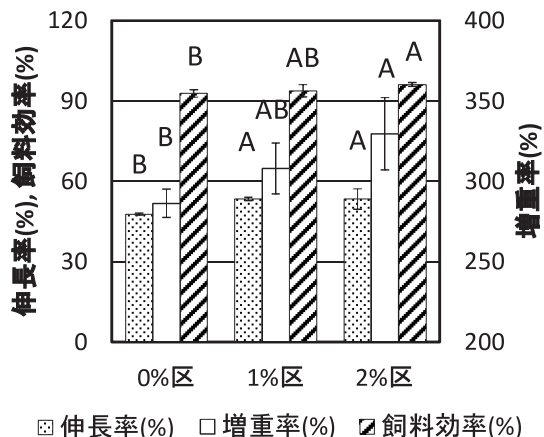


図16 クロソイ稚魚飼育試験によるSMGEの成長促進効果

※異なるアルファベットを有する値同士は統計的有意差がある(有意水準5%, ダンカンの多重比較検定)

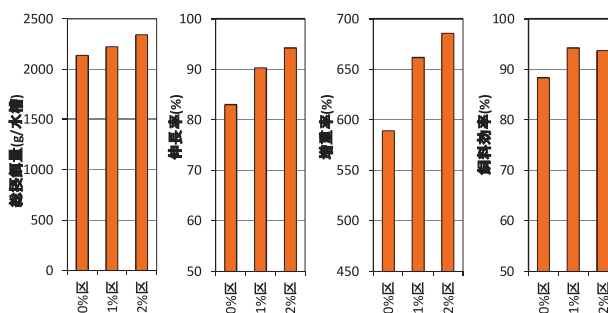


図17 マダイ稚魚飼育試験によるSMGEの成長促進効果

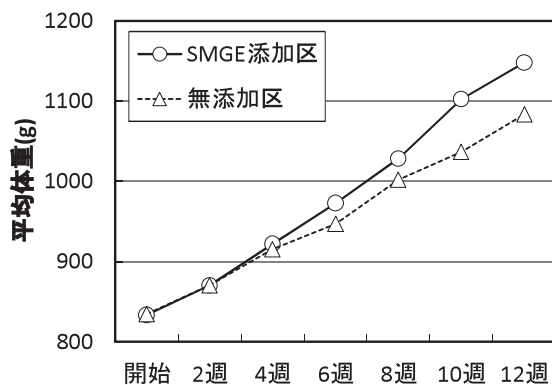


図18 ハマチ飼育試験によるSMGEの成長促進効果

4. おわりに

水産系廃棄物として排出されるホタテウロ原料とした魚類摂餌促進物質の製造技術開発について検討した結果、以下のことがわかった。

- 1) ボイルウロでは、pH2.5~3.5, 45°C, 生ウロではpH 3~4, 40°Cの条件が最も適したエキス化条件であることがわかった。
- 2) 電解条件はpH2~3, 電圧は3.2~5 Vの条件で基準値以

下までカドミウムを除去でき、処理コスト、処理時間を考慮するとpH 3、電圧 5 V が最適であった。

- 3) ミニプラント装置を用いたSMGE製造実証試験を行ったところ、検討した条件でウロをエキス化でき、電解処理時間10時間程度で規制値以下までカドミウムを除去できることがわかった。
- 4) 実証試験により製造したSMGEは約35%の遊離アミノ酸を含有し、SMGEには摂餌促進効果や成長促進効果があることがわかった。

今後、SMGE中の未分解残渣量の低減など、製造工程の改善を図り、より高品質なSMGEを製造するための検討を実施する予定である。

謝辞

本研究は、北海道が北海道循環資源利用促進税の税収の一部を充て、平成22年度から実施している「循環資源利用促進特定課題研究開発基金事業」により、当研究機構が「ホタテウロの利用技術開発」を実施したものです。

本研究は、森町、北天ハイミール株式会社、株式会社朝日エンジニアリングのご協力で実施しました。記して感謝いたします。

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

引用文献

- 1) 北海道水産林務部：平成25年北海道水産現勢，p2（2014）
- 2) 北海道水産林務部：水産系廃棄物発生量（平成22年度）
<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/ssk/hasseijoukyou.htm>
- 3) 作田庸一，富田恵一，田辺雄三：“ホタテガイ副産物の処理・利用技術に関する研究開発（第1報）”，北海道立工業試験場報告，291,13-19（1992）
- 4) 富田恵一，作田庸一，藤島勝美：“ホタテガイ副産物の処理・利用技術に関する研究開発（第2報）”，北海道立工業試験場報告，292,1-8（1993）
- 5) 農林水産省：平成26年度漁業・養殖業生産統計（2015）
- 6) 財務省貿易統計より算出
- 7) 竹内俊郎：“2. 魚類の摂餌と消化吸収 2.2 摂餌”，『改訂魚類の栄養と飼料』，恒星社厚生閣，20-22（2009）
- 8) 信太茂春，秋野雅樹，福土暁彦，麻生真悟，飯田訓之：“釧路水産試験場 平成23年度事業報告書”（2012）
- 9) 信太茂春，秋野雅樹，麻生真悟，飯田訓之：“釧路水産試験場 平成24年度事業報告書”（2013）
- 10) 昭和63年10月14日付け63畜B第2050号農林水産省畜産局長通知：“飼料の有害物質の指導基準について”
- 11) Nobukazu SATOH, Motoomi WAKASUGI, and

Shigeharu NOBUTA : “Availability of Fisheries By-Product Materials with Cadmium Removal Treatment as a Feed Ingredient for Fingerling Black Rockfish *Sebastes schlegeli*”，水研センター研報，第40号，61-65（2015）

- 12) 若杉郷臣ら：“循環資源利用促進特定課題研究開発基金事業報告書 ホタテウロの利用技術開発”（2015）

製糖廃棄物からの高性能排煙処理剤の開発

佐藤 正大*, 浦 晴雄, 山越 幸康, 若杉 郷臣, 松嶋 景一郎, 佐々木 雄真
北口 敏弘, 内山 智幸, 上出 光志, 高橋 徹

Development of a Highly Reactive Calcium Hydroxides from Lime Sludge in Beet Sugar Industry.

Masahiro SATO*, Haruo URA, Yukiyasu YAMAKOSHI, Motoomi WAKASUGI
Keiichiro MATSUSHIMA, Takema SASAKI, Toshihiro KITAGUCHI
Tomoyuki UCHIYAMA, Mitsushi KAMIIDE, Touru TAKAHASHI

抄 録

甜菜糖産業は、北海道の食品工業や農業にとって極めて重要な基幹産業である。製糖工場において白色糖製造時に炭酸カルシウム汚泥（以下ライムケーキと称する）が年間約17万トン排出され、再利用および埋め立て処分に係る高額な費用が負担となっており、大量かつ継続的に利活用される新規用途開発が期待されている。そこで、ライムケーキを原料とした高性能な排煙処理剤の研究開発に取り組んだ。排煙処理剤の酸性ガス除去性能を定量的に評価するために、廃棄物焼却施設を模擬した試験装置を開発した。ライムケーキを原料とした開発品は、常用される特号消石灰や高反応消石灰と比較して、有害酸性ガス（HCl）との反応性・吸着性が高く、排煙処理性能が良好であることが示された。

キーワード：甜菜糖産業、炭酸カルシウム汚泥、ライムケーキ、排煙処理剤、有害酸性ガス

Abstract

Beet sugar industry is extremely essential to food industry and agriculture in Hokkaido district. The 170 thousand tons/year of calcium carbonate sludge (afterwards referred as "lime cakes") are discharged to produce white sugar in the industry which is responsible for expensive disposal fee in its reclamation and utilization although it is expected to achieve novel sustainable development. Therefore we researched a process to utilize the lime cakes as a flue gas treatment reagent and our novel apparatus was constructed to simulate waste incineration plant and to evaluate quantitative elimination of harmful acid gas (HCl). As a result, flue gas treatment reagent from lime cakes was not only brought us high reactivity and large adsorption of the acid gas but also higher flue gas treatment abilities were suggested than versatile calcium hydroxides such as special one and high reactive one.

KEY-WORDS : Beet sugar industry, calcium carbonate sludge, lime cakes, flue gas treatment, harmful acid gas

* 道総研フェロー

事業名：循環資源利用促進特定課題研究開発基金事業

課題名：石灰質未利用資源を用いた高性能排煙処理剤の開発

1. はじめに

甜菜糖産業は、北海道の食品工業や農業にとって極めて重要な基幹産業であり、国内産糖の81%の砂糖を生産し、その出荷額は875億円である。また、原料となる甜菜（ビート）は、産出額が372億円¹⁾であり、馬鈴薯・麦・豆とともに輪作体系を担っている。一方、砂糖製造工程において、炭酸カルシウム汚泥（以下、ライムケーキ）が年間約17万トン発生し、その対策に苦慮している。約16万トンは、排出者が一部費用負担し土壌酸度調整剤、セメント原料、牛舎パドック舗装資材²⁾等に再利用されているが、約1万トンは埋立処分され、その高額な費用が負担となっており、大量かつ継続的に再利用される新規用途開発が期待されている。

また、北海道には、一般ごみ焼却施設67カ所³⁾、産廃焼却施設51カ所⁴⁾があり、合わせて年間152万トン⁵⁾のごみが焼却されている。これらの施設では、排煙中の酸性成分である塩化水素（以下、HCl）、硫酸化合物（以下、SO_x）を除去するために、アルカリ性の排煙処理剤として消石灰が大量に使用されている。近年、酸性成分との反応性に優れ、煙道への吹込み量や処理後の煤じん埋立量が少量で済む「高反応消石灰」が開発されたが、製品価格が高いため、使用量は低迷している。そのため、道内で広く使用されている安価な「特号消石灰」と同等の価格で「高反応消石灰」と同等の性能を有する高性能な排煙処理剤の開発が、自治体、環境関連産業、大型発電施設を有する事業所から望まれている。

本研究では、製糖工場から排出されるライムケーキを原料とした高性能な排煙処理剤の開発に取り組んだ。

2. 実験方法

ライムケーキを原料とした新たな排煙処理剤の性能評価を行うために、ラボスケールにおける排煙処理試験方法の検討と評価装置の開発を行った。

研究課題として、①廃棄物焼却施設を模擬した排煙処理性能評価装置の開発、②模擬排ガスをを用いた酸性ガス成分の反応除去性能評価に関して取り組んだ。また、③廃棄物焼却施設での実証化試験に向けた基礎試験を実施した。

2.1 焼却施設を模擬した排煙処理性能評価装置の開発

2.1.1 廃棄物焼却施設の概要

図1に、廃棄物焼却施設（ストーカ炉）の概要を示す。ゴミ焼却時に発生した燃焼排ガスは減温塔にて150～200℃まで冷却され、排ガス中に含まれる酸性ガス成分（HCl, SO_x）は、消石灰粉体と反応し、塩化カルシウムや石膏となり、集塵機のバグフィルターに捕集され、その結果酸性ガス成分が基準値以下に除去された排ガスが大気中に排出される。

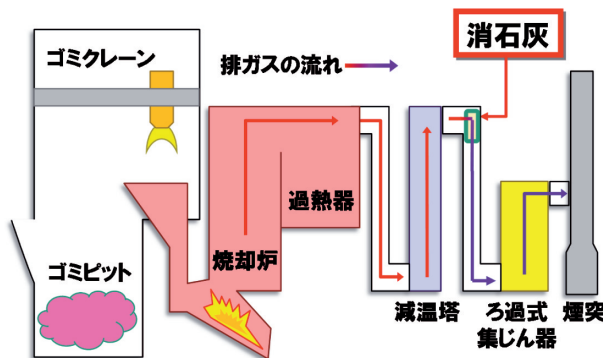


図1 廃棄物焼却施設の概要

2.1.2 装置概要

実際の焼却施設を模擬し、製作した性能評価装置を図2に示す。本装置の特徴は、以下である。

- ① 回分型（バッチ型）装置
- ② 煙道ガスの代わりに酸性標準ガス（窒素希釈）を使用
- ③ バグフィルターは実際の焼却施設同等品を使用
- ④ HClレーザ分析計による連続分析が可能
- ⑤ 可視化反応管による粉体の流動化状態を把握

なお、本装置による試験により破過曲線が求められ、破過時間を与えるだけでなく、破過曲線より得られる面積から酸性ガス吸着量、破過曲線形状から吸着・反応メカニズムが推定される。排煙処理試験は、ブローによって連続的に供給され電気加熱炉によって加熱された空気に、標準酸性ガス、過熱水蒸気が所定量注入された混合ガスに対し、反応管に封入された排煙処理剤を流動化させながら固気反応を行った。

また、反応吸収された酸性ガスの濃度はHClレーザガス分析計（京都電子工業㈱製、KEMレーザガス分析計KLA-1-HCl/H₂O、測定レンジ0～1000ppm）によって測定した。

2.2 排煙処理剤の仕様

表1 排煙処理剤の平均粒子径と比表面積

	平均粒子径 比表面積	
	d_p μm	S_v m ² /g
特号	6.2	13.0
高反応A	15.1	290.8
高反応B	17.2	45.0
開発品	9.4	20.1

本試験では、ごみ焼却施設で常用される特号消石灰（以下、特号）、活性炭を含有する高反応消石灰A（以下、高反応A）、高反応消石灰B（以下、高反応B）、ライムケーキを原料とした消石灰（以下、開発品）の4種類を対象とし性能評価を行った。表1に排煙処理剤の平均粒子径と比表面積を示した。

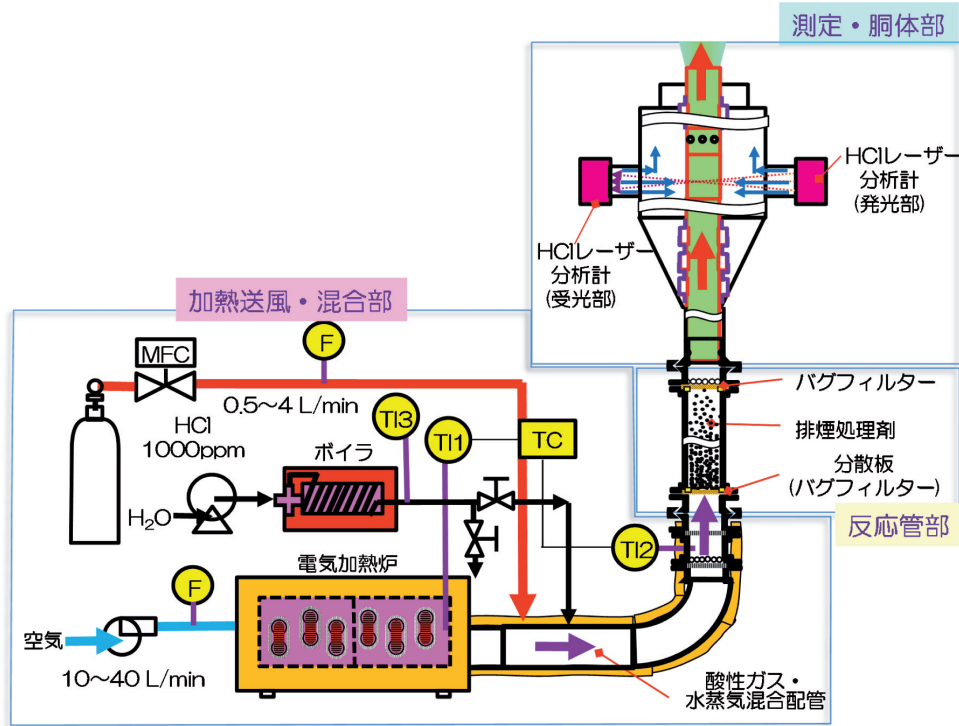


図2 ラボスケール排煙処理性能評価装置

3. 実験結果と考察

3.1 排煙処理剤の性能評価

3.1.1 流動化状態の特定

流動層における固気反応において、流動化状態は吸着・反応性や伝熱に密接に関係している。廃棄物焼却施設の排煙処理では、排ガス中において消石灰が流動化し、酸性ガス成分と反応する。ラボスケール装置において実際の産業廃棄物焼却施設、一般廃棄物焼却施設と同等な流動化状態を実現することにより、吸着・反応性の比較、工学的推測が可能となる。

図3のような各種流動化状態があるが、特定するための状態図としてはいくつかが提案されている⁶⁾。そのうちGraceの状態図を一部改良した図4から推定すると、ラボスケール装置では乱流流動化状態であり、産業廃棄物焼却施設、一般廃棄物焼却施設では気泡流動化状態であると考えられる。ラボスケール装置と焼却施設では流動化状態に相違があるが、乱流流動化状態では物質移動が大きく、十分な固気反応が進行するならば、排煙処理剤の最大性能を示す状態であると考えられる。

3.1.2 各種排煙処理剤の破過曲線

乱流流動化状態に属する条件下で、各種排煙処理剤の比較試験を行った。試験条件は、排煙処理剤10gに反応助剤（昭和化学工業㈱製、珪藻土）1gを混合し、HClのガス濃度1000ppmでガス流量40L/min、反応温度200℃とした。図5に破過曲線を示した。

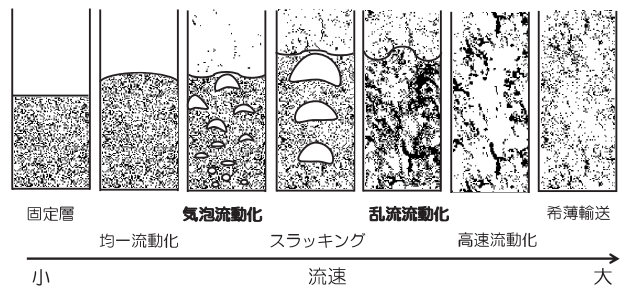


図3 各種流動化状態

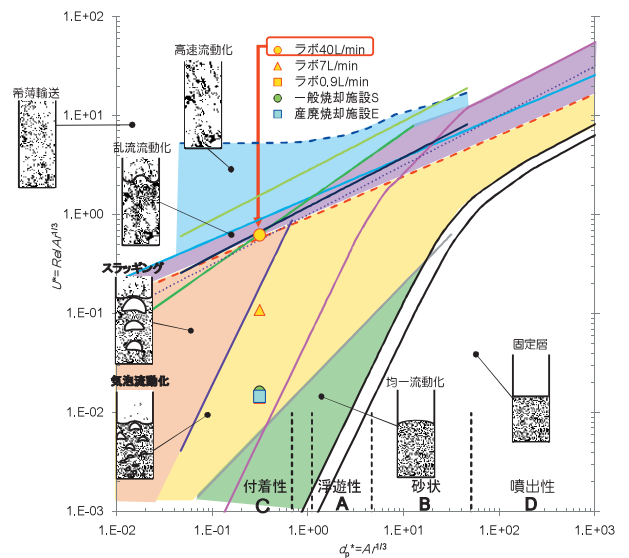


図4 Graceの流動化状態図
(横軸：換算粒径，縦軸：換算流速)

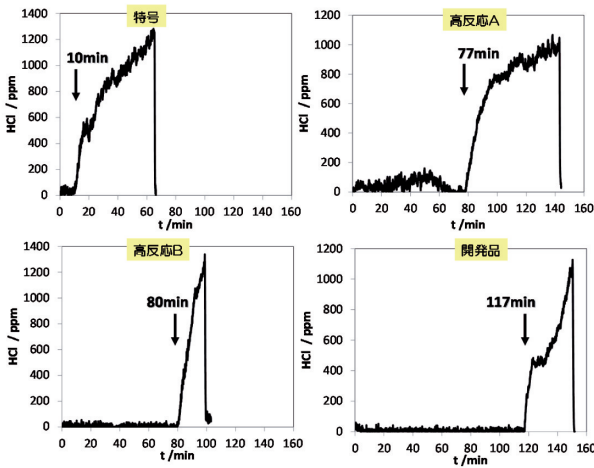


図5 各種排煙処理剤の破過曲線

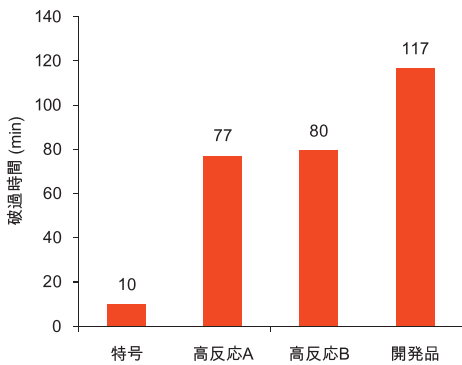


図6 各種排煙処理剤の破過時間

特号消石灰、高反応Aの破過曲線は破過後ルーズな経過を示すが、高反応B、開発品では破過後急激な立ち上がりを示した。

図6に各種排煙処理剤の破過時間を示した。破過時間は特号で10min、高反応Aで77min、高反応Bで80min、開発品では117minとなり、開発品が最も長い破過時間を示した。

3.1.3 破過試験後の排煙処理剤の組成と反応率

上記試験後の排煙処理剤を回収し、XRD Rietveld法で、化学組成を決定したところ、表2に示すとおり特号、高反応A、高反応Bでは一塩素化物CaCl(OH)のみが確認されたが、開発品ではCaCl(OH)以外に2塩素化物CaCl₂・6H₂Oが確認された。したがって、破過時間が117minと十分長い場合にはCaCl(OH)から逐次的にCaCl₂・6H₂O(消石灰1モルあたりに吸着したHClのモル数が増加する)が生成していることが示唆された。

3.1.4 Wheeler-Jonas式による解析

破過曲線からガス吸着量や反応速度を得るために各種数式が提案されている。ここでは、活性炭のガス吸着に汎用され

表2 破過試験後の排煙処理剤の化学組成¹⁾と反応率

吸着剤	HCl				破過時間	
	CaCO ₃ mol%	Ca(OH) ₂ mol%	CaCl(OH) mol%	CaCl ₂ ・6(H ₂ O) mol%		反応率 %
特号	6	85	9	-	9	10
高反応A	1	13	62	-	62	77
高反応B	15	15	70	-	70	80
開発品	-	27	58	15	88	117

1) XRD Rietveld法による

るWheeler-Jonas (W-J) 式⁷⁻⁹⁾を用いた。図7、図8にW-J式と吸着・反応性との関係を明らかにするための、①破過曲線の概念、②吸着・反応メカニズム、③解析に用いた定数を示した。

図9に各種排煙処理剤の破過曲線とW-J式による近似曲線を示した。破過曲線の全時間に対してフィッティングした場合(破線)は大幅にずれているが、一方、良好なフィッティングを得るような時間範囲ごとに分割し、それぞれをW-J式でフィッティングした場合(点線)は良く一致する。表3に、全時間(灰色で表示)範囲および分割時間範囲で解析した結果を示した。

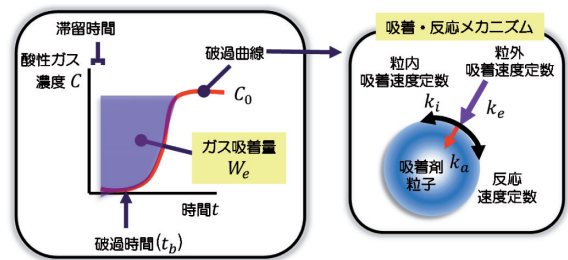


図7 破過曲線の概念および吸着・反応メカニズム

$$t = W_e \left[\frac{W}{C_0 Q} - \frac{\rho_b}{k_v C_0} \ln \left(\frac{C_0}{C} - 1 \right) \right] \quad (1-1)$$

$$\frac{1}{k_v} = \frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_e} \quad k_e = 10^3 \sqrt{\frac{v}{M d_p^3 p}} \quad (1-2)$$

$$k_a = \frac{k_v}{W_e \rho_b} \quad (1-3)$$

t: 吸着時間, W_e : 吸着係数(吸着剤単位重量あたりのガス吸着(kg/kg)), W : 吸着剤重, C_0 : 入口ガス濃度(kg/m³), Q : ガス流量(L/min), ρ_b : 嵩密度(kg/m³), k_v : 総括吸着速度定数(1/s), k_i : 粒内吸着速度定数(1/s), k_e : 粒外吸着速度定数(1/s), v : 流速(m/s), M : 分子量(g/mol), d_p : 粒子径(m), p : ガス圧力(atm), k_a : 反応速度定数(m³/mol·s)

図8 Wheeler-Jonas (W-J) 式と吸着・反応性との関係

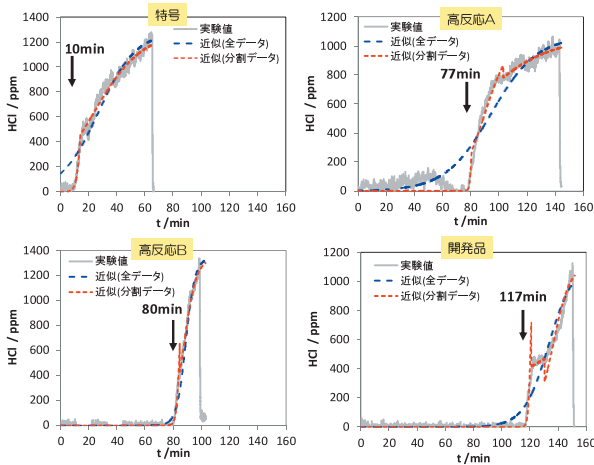


図9 各種排煙処理剤の破過曲線

実測値（灰色線）とWheeler-Jonas式による近似曲線

表3 Wheeler-Jonas式による吸着解析

吸着剤	時間 min	吸着量 I/Ve kg/kg	吸着率 y mol%	累積	吸着	破過 時間 t _b min	破過 時間 推定値 ²⁾ min
				吸着率 Σy mol%	反応率 ¹⁾ x %		
特号	10.1-50.9	0.180	37		0.4		
特号	10.1-14.3	0.104	21	21	1.9	10.1	10.0
特号	14.3-50.9	0.159	32	53	9		
高反応A	77.2-144.2	0.508	103		1.5		
高反応A	77.2-80.5	0.421	86	86	26.7	77.2	79.1
高反応A	80.5-103.0	0.475	97	182	2.5		
高反応A	103-144.2	0.414	84	266	62	0.7	
高反応B	79.3-84.7	0.525	107		6.2		
高反応B	79.3-79.4	0.510	104	104	16.4	79.3	80.9
高反応B	79.4-84.7	0.520	106	209	70	4.7	
開発品	116.7-150.3	0.573	116		0.4		
開発品	116.7-120.6	0.534	108	108	1.9	116.7	117.9
開発品	120.6-132.5	0.647	131	240	0.3		
開発品	132.5-150.3	0.571	116	356	88	0.0	

1) XRD Rietveld法

2) Wheeler-Jonas式による、濃度50ppmでの推定値

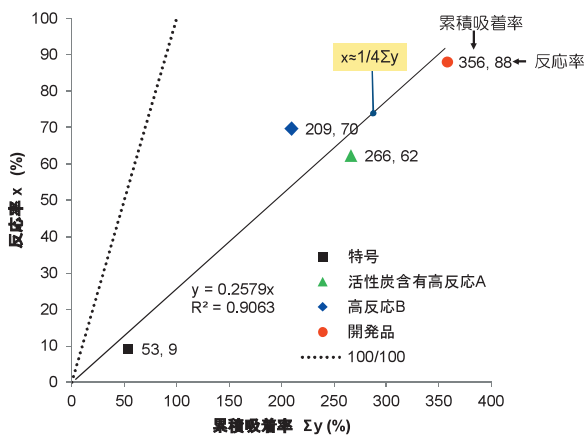


図10 吸着率と反応率の関係

時間分割によりフィッティングしたWheeler-Jonas式を用いて破過時間を推定したところ、表3の右欄の値を与え、実際の破過時間と良く一致した。

3.1.4.1 物理吸着と反応率との関係

一方、吸着量から消石灰1モルあたりに吸着したHClのモル数である吸着率（ただし、HCl初濃度に対する吸着されたHCl濃度ではない）が得られ、これから累積吸着率（消石灰100モル%に対してHClが吸着されたモル%）が求められた。累積吸着率と反応率を対比させることにより図10が得られる。この図10は、物理的に吸着されたHClモル%（累積吸着率）のうち、反応したHClモル%（反応率）を表している。ここで、図の点線のように累積吸着率と反応率は1:1に対応せず、累積吸着率の約1/4が反応に関与し、残り約3/4が反応せず脱着していることが明らかになった。また、累積吸着率が大きい場合には高い反応率を与える。

3.1.4.2 吸着速度定数と反応速度定数

他方、反応速度に関しては、総括吸着速度定数 (k_v) と粒外吸着速度定数 (k_e) から粒内吸着速度定数 (k_i) が求められ、総括吸着速度定数 (k_v) から反応速度定数 (k_a) が求められる。 k_e は特号で最も大きく、 k_i は高反応Aが、 k_a は開発品が最も大きかった。ここで、オーダー的には $k_e \sim 10^9 > k_i \sim 10^{4-5} > k_a \sim 10^{1-2}$ であり、 k_a が最も小さく、反応律速であると考えられる。さらに開発品の反応速度が最も大きく、高い反応性を与えることと一致する。以上から、開発品がHCl吸着量、HCl反応速度の双方とも最も大きいことが示された（表4）。

表4 各吸着速度定数と反応速度定数

吸着剤	総括	粒外	粒内	反応
	吸着速度定数 k_v 10 ⁴ /s	吸着速度定数 k_e 10 ⁹ /s	吸着速度定数 k_i 10 ⁴ /s	速度定数 k_a m ³ /mol s
特号	0.4	9.8	0.4	0.6
特号	1.9	9.9	1.9	2.6
特号	0.3	9.7	0.3	0.4
高反応A	1.5	1.8	1.5	0.1
高反応A	26.7	1.8	26.7	2.6
高反応A	2.5	1.8	2.5	0.3
高反応A	0.7	1.9	0.7	0.1
高反応B	6.2	1.7	6.2	2.0
高反応B	16.4	1.7	16.4	5.3
高反応B	4.7	1.7	4.7	1.5
開発品	2.3	3.6	2.3	1.6
開発品	21.9	3.6	21.9	15.4
開発品	0.5	3.6	0.5	0.3
開発品	3.3	3.5	3.3	2.3

4.1.5 構造物性相関

上記から開発品の高い反応性が示されたが、その理由について粒子構造からの検討を行った。以下では、静的な吸着量、または、動的な吸着速度・反応速度に対して①全細孔容積と平均細孔径、②有効細孔容積を説明変数とした場合についての評価を行った。なお、表5に各種排煙処理剤の比表面積、細孔容積などを示した。

表5 排煙処理剤の表面積,細孔容積,平均細孔径,細孔長

	平均粒子径 d_p μm	比表面積 S_v m ² /g	細孔容積 W_0 m ³ /g	平均細孔径 $\overline{d_{po}}$ nm	細孔長 h Gm/g
特号	6.2	13.0	0.070	21.5	0.19
高反応A	15.1	290.8	0.722	9.9	9.32
高反応B	17.2	45.0	0.220	19.6	0.73
開発品	9.4	20.1	0.130	25.9	0.25

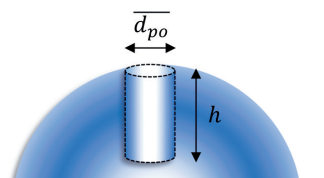
3.1.5.1 2変数構造物性相関

式(1-4)に示したDabinin-Radushkovich (R-D)式によれば吸着量 (W_e) 等の物性値は全細孔容積 (W_0) に関係する。ところが、物性値と全細孔容積は良好な単相関を与えないことから、全細孔容積以外の説明変数が必要となると考えられた(表7)。

$$W_e = W_0 d_L \exp \left[- \left(\frac{RT}{\beta E_0} \right)^2 \left\{ \ln \left(\frac{p_{sat}}{p} \right) \right\}^2 \right] \quad (1-4)$$

W_0 : 細孔容積 (cm³/g), d_L : 吸着質の液体密度 (kg/m³), R : 気体定数, 8.3145 (J/molK), T : 温度 (K), ρ_b : 高密度 (kg/m³), β : 親和係数 (-), E_0 : 吸着エネルギー (J/mol), p_{sat} : ガス飽和圧力 (Torr), p : ガス圧力 (Torr)

そこで、図11に示したシリンダー型の細孔モデルから、式(1-5)に示した全細孔容積 (W_0) と平均細孔径 ($\overline{d_{po}}$) を説明変数とした場合、表6に示すように物性値と良好な相関を与えた。ここで、説明変数の係数はすべて正の値であり、消石灰の全細孔容積、平均細孔径ともに大きい場合には、物性値も増加することがわかった。



$$S_v = \pi \overline{d_{po}} h$$

$$W_0 = \pi \left(\frac{\overline{d_{po}}}{2} \right)^2 h \quad \overline{d_{po}} = \frac{4W_0}{S_v}$$

d_{po} : 平均細孔径(m), h : 平均細孔深さ(m),
 W_0 : 細孔容積(cm³/g), S_v : 比表面積(m²/g)

図11 シリンダー型細孔の模式図

$$W_e, \Sigma W_e, \ln k_v, \ln k_a = a_0 + a_1 W_0 + a_2 \overline{d_{po}} \quad (1-5)$$

3.1.5.2 1変数構造物性相関

一方、平均細孔径は最頻細孔径と違い粒子構造の代表的な値とは言えない。そこで吸着に有効な細孔容積が重要な支配因子であるとする有効細孔容積を考える。

表6 物性構造相関による重相関解析係数

		W_0	$\overline{d_{po}}$	切片	r
吸着係数	W_e	5.75	0.237	-5.10	0.967
累積吸着係数	ΣW_e	1.45	0.062	-1.19	0.797
		$\ln W_0$	$\ln \overline{d_{po}}$	切片	r
吸着速度定数	$\ln k_v$	2.42	3.96	-5.06	0.987
反応速度定数	$\ln k_a$	1.51	4.05	-7.84	0.984

W_0 : 全細孔容積
 $\overline{d_{po}}$: 平均細孔径

図12は特号、高反応B、開発品の細孔径分布である。ここで、細孔径が20-100nmの範囲の細孔容積が吸着・反応に有効な細孔であると仮定すれば、有効細孔容積 (W_0^*) は開発品>高反応B>特号となり、この有効細孔容積 (W_0^*) と吸着量 (W_e) とは式(1-6)で良く相関する(表7)。

$$W_e, \Sigma W_e = a_0 + a_1 W_0^* \quad (1-6)$$

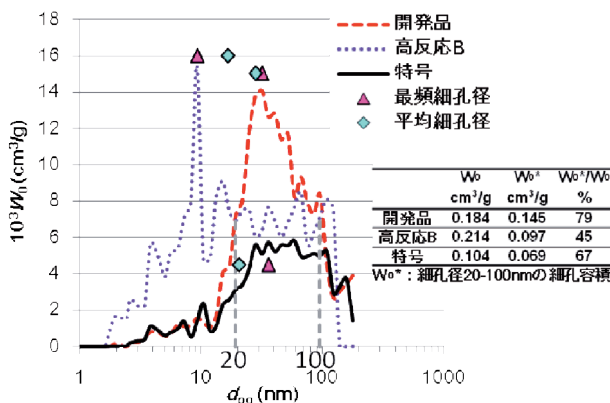


図12 各種排煙処理剤の細孔径分布

表7 物性構造相関による重相関解析係数

		W_0	W_0^*	切片	r
吸着係数	W_e	2.22	-	0.13	0.644
累積吸着係数	ΣW_e	4.08	-	0.44	0.414
吸着係数	W_e	-	7.70	-0.23	0.981
累積吸着係数	ΣW_e	-	21.0	-0.74	0.901

W_0 : 全細孔容積
 W_0^* : 細孔径20-100nmの細孔容積

3.1.5.3 吸着速度定数, 反応速度定数との構造物性相関

式(1-7)に示す様に、一般に吸着速度定数は流速と平均粒子径のべき乗に関係しており、流速、粒径が大きくなると吸着速度定数がそれぞれ増加、低下するとの報告がある。

$$k_v \propto v_L^n d_p^m \quad (1-7)$$

$$n > 0, m < 0$$

しかし、この相関を行ったところ、べき乗の符号が逆転し、矛盾していることが示された(表8)。

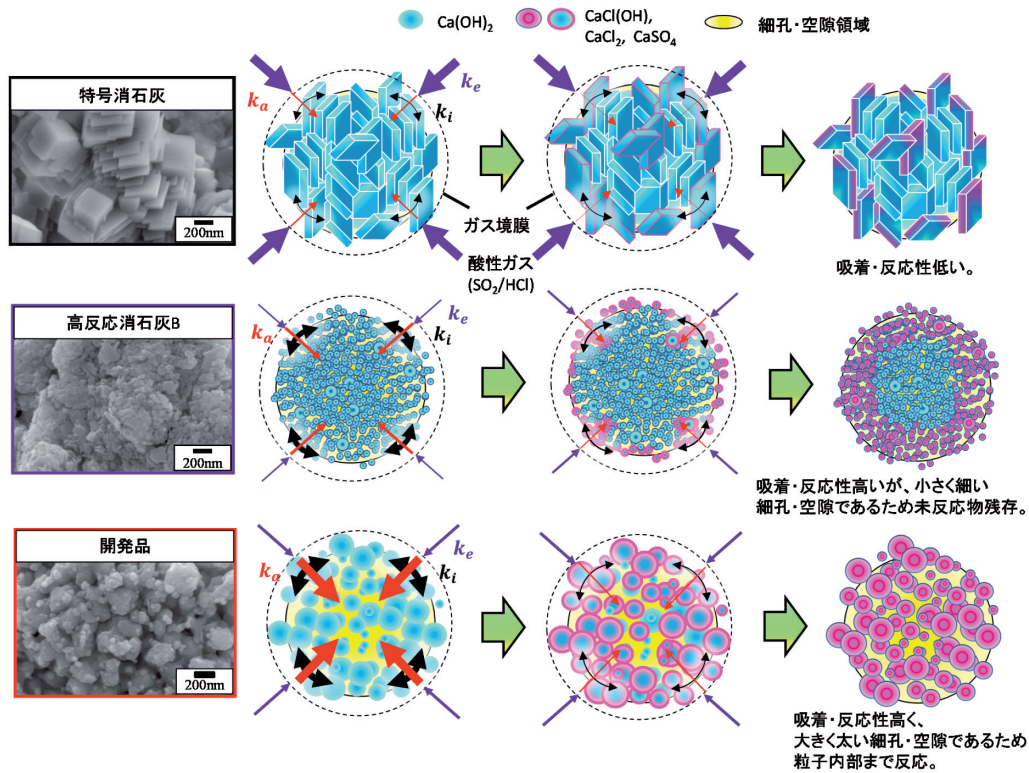


図13 各種排煙処理剤の構造と吸着・反応性の関係

表 8 物性構造相関による重相関解析係数

	$\ln v_L$	$\ln d_p$	切片	r	
吸着速度定数	$\ln k_v$	-0.288	0.946	0.000	0.6543

v_L :流速(m/s) d_p :平均粒径(μm)

そこで、JonasとRehrmannの流速のみの式 (1-8)

$$k_v = \frac{a_1}{1 - a_2 \exp(a_3 v_L)} \quad (1-8)$$

を用いると、相関性は幾分向上した (表 9)。実際に、流速が増加すると、吸着速度定数が増加する。

表 9 構造物性相関による非線形解析係数

	a_1	a_2	a_3	r	
吸着速度定数	k_v	-79095.1	-642.481	4.338	0.7760

一方、反応速度と吸着量および吸着速度定数との間には式 (1-9) の関係がある。これと細孔容積 W_0 を含むDabinin-Radushkvich式 (1-4) とから良い相関が与えられるが (表 10)、式(1-9) と有効細孔容積 W_0^* を含む式 (1-6-1) とから、さらに良好な相関が得られた (表10)。

$$k_a = \frac{k_v}{W_e \rho_b} \quad (1-9)$$

$$W_e = W_0 d_1 \exp \left[- \left(\frac{RT}{\beta E_0} \right)^2 \left\{ \ln \left(\frac{p_{sat}}{p} \right) \right\}^2 \right] \quad (1-4)$$

$$W_e = a_0 + a_1 W_0^* \quad (1-6-1)$$

表10 物性構造相関による重相関解析係数

	$\ln W_0$	$\ln W_0^*$	$\ln k_v$	切片	r	
反応速度定数	$\ln k_a$	-0.201	-	0.639	0.00	0.9836
反応速度定数	$\ln k_a$	-	-0.026	0.679	0.00	0.9933

W_0 :全細孔容積
 W_0^* :細孔径20-100nmの細孔容積

したがって、吸着・反応に最適な細孔径範囲内にある有効細孔容積 W_0^* を用いることで、物性値をうまく説明することが可能となる。

3.1.6 各種排煙処理剤の構造と吸着・反応性の関係

以上の結果から、各種排煙処理剤の構造と吸着・反応性との関係が図13のように推定される。特号の場合、結晶が成長した1次粒子で構成され、粒外吸着速度定数 (k_e) は大きいものの、粒内吸着速度定数 (k_i)、反応速度定数 (k_a) は小さいため、吸着・反応性が低い。一方、高反応Bでは、小さい1次粒子からなる2次粒子であり、 k_i が大きい、細孔径が小さく、細孔も細いため、生成物による閉塞により未反応物が残存しやすく、 k_a が小さくなる。ところが、開発品の場合、ある大きさを有する1次粒子から構成される2次粒子であり、 k_i が大きいだけでなく、 k_a も大きい、粒子内部まで吸着・反応し、吸着率が大きく、高い反応率を示すものと考えられる。

3.1.7 焼却施設と相似な排煙処理剤

排煙処理後の試料回収と流動化状態の可視化のために、ここまで、ラボ装置での排煙処理剤量は10gとした。

産業廃棄物焼却施設での実証化試験に向け、より正確な基礎データを把握するため、消石灰使用量をラボ装置と産業廃棄物焼却施設のバグフィルター（以下、BFと称する）面積から比例計算し、ラボ装置での消石灰使用量を0.38gとした。

3.1.8 吸収・反応時の温度依存性(HCl)

実際の焼却施設における排煙処理装置での温度は150-200℃付近であると言われている。そこで、HClガス雰囲気における温度150℃、200℃での各種排煙処理剤の温度依存性を把握した。試験条件は、排煙処理剤を0.38g、1000ppmのHClガス雰囲気下とした。

図14に示すように、破過時間は、特号<高反応A<高反応B<開発品の順となり、双方の温度とも開発品の破過時間が最も長く、特号を基準とした破過時間の比較では、150℃で1.39倍、200℃で2.83倍となった。なお、いずれの排煙処理剤においても150℃の場合、200℃より破過時間が長く、150℃の方が高い性能を示した。

また、実証化試験を予定している札幌市白石清掃工場は150℃、北海道エコシスは150-170℃で排煙処理が行われており、高い性能を示す温度領域での運転操業と考えられる。

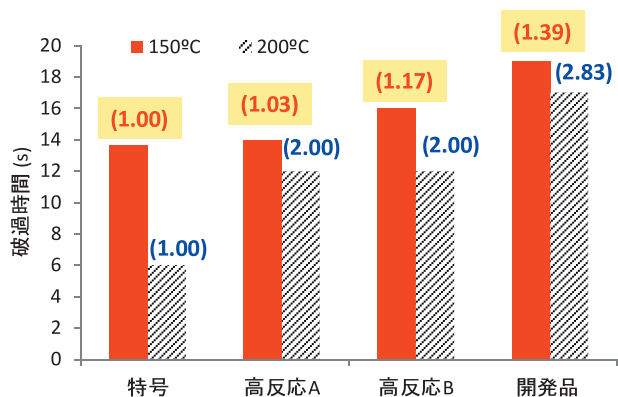


図14 各種排煙処理剤の破過時間の温度依存性

3.1.9 特号消石灰に対する開発品の重量削減率

特号を基準とした比率（対特号破過時間比）からは対特号重量削減率が求められる。

開発品は、対特号破過時間比が大きい200℃では65%の削減率が予想され、150℃では28%の削減率が予想される（図15）。

対特号削減率 [wt%]

$$= \left[1 - \frac{1}{t_b(\text{各排煙処理剤})/t_b(\text{特号})} \times 100 \right] \quad (1-11)$$

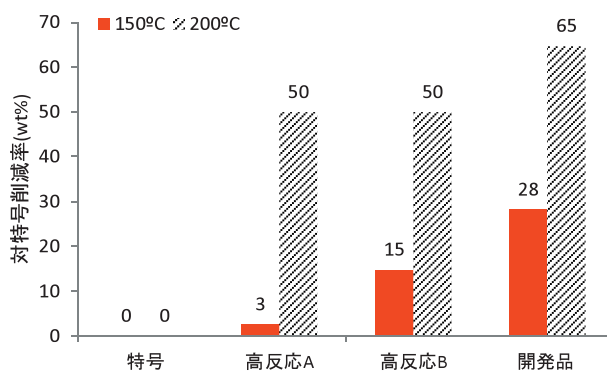


図15 各種排煙処理剤の対特号重量削減率

4. おわりに

本研究では、製糖工場から排出されるライムケーキを原料とした高性能な排煙処理剤の開発に取り組み、以下の成果を得た。

- ① 排煙処理剤の酸性ガス除去性能を定量的に評価するために、廃棄物焼却施設を模擬したラボスケールの評価装置を開発した。
- ② 流動層状態の固気反応を実現し、HClにおいてはレーザー分析計によるリアルタイムの測定を可能とした。
- ③ 開発品、特号消石灰などの比較評価において、開発品が最も高い除去性能を有することを確認した。
- ④ さらに、推定された吸着・反応メカニズムから開発品の特異な構造が吸着・反応性に与える影響を考察した。
- ⑤ 開発品の特異な構造が吸着・反応性に与えるメカニズムを推定することができた。

謝辞

本研究開発は、北海道が北海道循環資源利用促進税の税収の一部を充て、平成22～26年度に実施した「循環資源利用促進特定課題研究開発基金事業」により、日本ビート糖業協会、北海道石灰化工株式会社と共同研究し、札幌市環境局、および株式会社北海道エコシスのご協力で実施しました。ここに記して感謝いたします。

本研究で使用したX線回折装置、細孔分布測定装置は、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) てん菜糖業年鑑2014年版
- 2) 勝世敬一, 「製糖廃棄物を利用した酪農施設用舗装材料」 *J.Soc.Mat.Sci., Japan, Vol.53, No.1, pp.29-32, Jan.2004.*
- 3) 北海道環境白書'14, pp28, (2014)

- 4) 北海道環境白書'14, pp30, (2014)
- 5) 北海道環境白書'14, pp27, (2014)
- 6) J.R. Grace, "Contacting modes and behaviour classification of gas-solid and other two-phase suspensions" *Can. J. Chem. Eng.*, 64, 1986, 353.
- 7) 安彦泰進, 「Wheeler-Jonas式を利用したWoodのモデルによる吸湿活性炭層の有機ガス破過時間の推算」炭素, 248, 2011, 133.
- 8) G. O. Wood, "Estimating Service Lives of Organic Vapor Cartridges II: A Single Vapor at All Humidities", *J. Occup. Environ. Hyg.*, 2004, 1:472.
- 9) G. O. Wood, "Reviews of Models for Adsorption of Single Vapors, Mixtures of Vapors, and Vapors at High Humidities on Activated Carbon for Applications Including Predicting Service Lives of Organic Vapor Respirator Cartridges", LA-UR-00-1531, *Los Alamos National Laboratory Report*, 2000, March.

温泉熱回収用プラスチック製柵状熱交換器の開発

白土 博康, 保科 秀夫, 可児 浩
櫻庭 高光*, 井浦 奉昭*, 山田 英和*
鹿糠 幸雄**, 舟木 由衣**
高橋 徹哉***, 鈴木 隆広***, 林 圭一***, 岡 大輔***

Development of a palisaded heat exchanger combined plastic pipes for hot spring heat recovery systems

Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA, Hiroshi KANI
Takamitsu SAKURABA*, Tomoaki IURA*, Hidekazu YAMADA*
Yukio KANUKA**, Yui FUNAKI**
Tetsuya TAKAHASHI***, Takahiro SUZUKI***, Keiichi HAYASHI***, Daisuke OKA***

抄 録

北海道は有数の温泉地であり、未利用の温泉熱を給湯や暖房に有効利用することが期待されている。温泉熱を回収するにあたって、従来の金属製プレート熱交換器を用いた場合、金属部材の腐食や目詰まりが課題であった。本研究は、新たにプラスチック製の柵状浸漬型熱交換器を開発、導入することによりこの課題を解決し、温泉、浴場施設の省エネルギー化、ランニングコストの削減に貢献することを目的としている。まず、20kWの熱交換能力を有するプラスチック製柵状熱交換器の設計・試作とその熱交換能力、圧力損失、構成材料の耐久性の評価を行い、良好な結果を得た。次に、排湯とその熱交換器を用いた給湯予熱システムを施工して、導入評価を行った。その結果、本システムは、省エネルギー性と経済性に優れたシステムであることがわかった。

キーワード：プラスチック製柵状熱交換器、温泉熱回収、排湯、洗浄

Abstract

Unutilized hot spring energy is expected as heat source for hot water supply and heating in Hokkaido because there are a lot of hot springs. However, metal plate heat exchangers cause metal corrosion and clogging when we recover energy from hot springs. This document aims to contribute energy saving and running cost reduction of hot spring facilities by developing and installing a palisaded heat exchangers combined plastic pipes. First of all, we designed and made the exchangers of 20 kW. The heat-exchange capability, pressure loss, durability of the material was evaluated and positive outcome was obtained. In the second, we installed and evaluated a water preheating system using drained hot water and the heat exchangers. As the result, it is showed that energy conservation and economic efficiency of the system is excellent.

KEY-WORDS : Palisaded heat exchanger combined plastic pipes, Hot spring heat recovery, Drained hot water, cleaning

* 株式会社テスク資材販売, * TSC Material Co., Ltd.

** 株式会社エコニクス, ** Econixe Co., Ltd.

*** (地独)北海道立総合研究機構 地質研究所, *** Hokkaido Research Organization, Geological Survey of Hokkaido

事業名：公募型研究

課題名：プラスチック製熱交換器を用いた温泉熱の有効利用に関する研究

1. はじめに

2011年に発生した未曾有の原発事故、化石燃料の枯渇に伴う原油の高騰により、エネルギーのあり方に関心が集まる今日である。札幌市は積雪寒冷地であり、大型施設・戸建て住宅を問わず、その給湯・暖房負荷が大きいことから、熱エネルギーを有効に効率的に利用することは非常に重要である。特に、未利用エネルギーを活用することができれば、環境に対する負荷を大きく軽減することが可能になる。

北海道は源泉数2,000以上を誇る温泉地であり、古くは湯治場として、近年は観光産業の担い手として利用されている。温泉地の浴用施設で浴用に用いる温度は43～45℃程度であり、50℃以上の源泉の一部や40℃以下の排湯の熱エネルギーの多くは利用されていないと考えられる。これらの未利用エネルギーを有効利用することにより、多大な一次エネルギー削減効果、二酸化炭素排出削減効果が期待できる。

筆者らは、ポリプロピレンランダム共重合体（以下PPR）を主材料とするプラスチック管を用いた柵状放熱体（以下プラスチック製柵状ラジエータ）に熱源機で作成した冷温水を循環させる冷暖房システムについて研究開発を行い、鋼板製ラジエータの冷暖房能力に匹敵するプラスチック製柵状ラジエータの開発に成功した¹⁻³⁾。本研究は、このプラスチック製柵状ラジエータを技術シーズとして、新たにプラスチック製柵状熱交換器（ここでは、温水と冷水を熱交換する装置なのでラジエータではなく熱交換器と呼ぶ）を開発するとともに、温泉・浴場施設の源泉または排湯熱を回収する熱交換システムについて提案し、温泉・浴場施設の省エネルギー化・経営改善に貢献する。本報では、まず、提案するシステムの概要と開発した熱交換器の基礎的な熱交換特性、耐久性評価を行った結果について述べる。次に、モデル温泉施設の給湯需要、排湯資源量実測、排湯成分分析結果について述べる。最後にこれらの結果を踏まえて、排湯と熱交換器を用い施工した、給湯予熱システムの導入評価と熱交換器の洗浄方法について述べる。

2. 温泉熱回収システムの概要と開発したプラスチック製柵状熱交換器の熱交換能力

2.1 温泉熱回収システムの概要

温泉施設において、プラスチック製柵状熱交換器は、ヒートポンプの一次側熱源や床暖房の循環回路等で利用可能と考えられるが、既設のヒートポンプや床暖房回路がなければ、大きなインシヤルコストを伴う。このため、本研究では温泉施設の省エネルギー化の第一段階として、既設の給湯回路にバイパス回路で容易に施工・接続が可能な熱回収システムを提案する。図1に提案する熱回収システムの模式図を示す。源泉または排湯を槽に貯め、そこにプラスチック製柵状熱

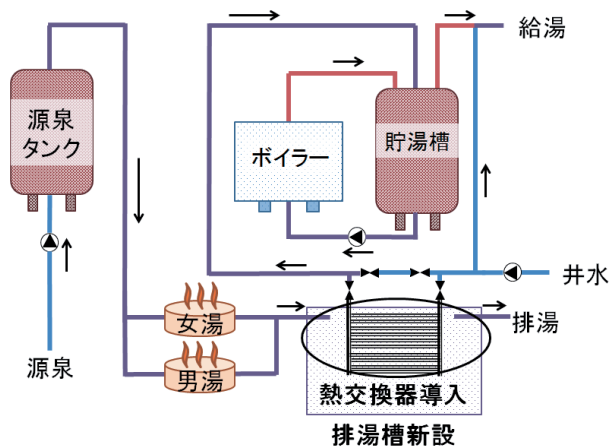


図1 提案する給湯予熱システム

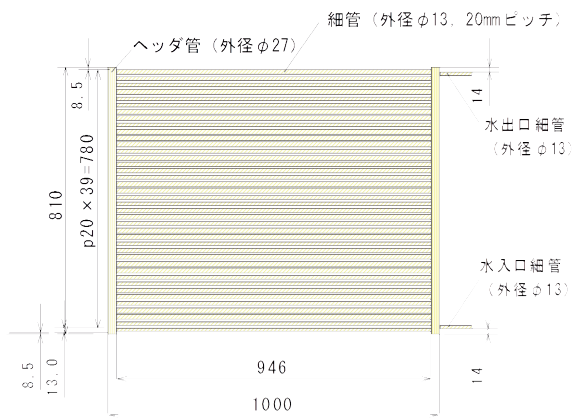


図2 プラスチック製柵状熱交換器の基本構造の模式図と外観

換器を浸漬させる。温泉施設で使用する給湯用の井水・水道水（通常10～15℃程度）をプラスチック製柵状熱交換器に通水して熱交換を行い、最後にバックアップボイラーで加温する。

2.2 温泉熱回収用熱交換器の概要

図2に試作したプラスチック製柵状熱交換器の基本構造の模式図と外観を示す。幅、高さがそれぞれ1000,810mmであり、φ27mmのヘッダー管に20mmピッチで孔を開け、そこにφ13mmの細管を40本熱融着させた構造となっている。

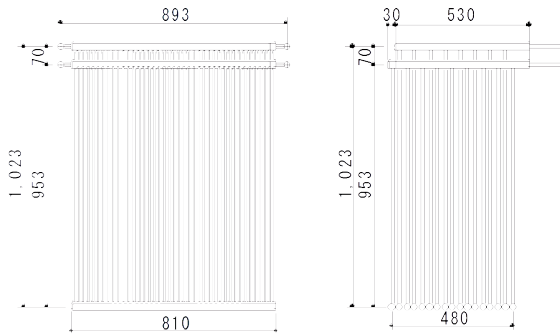


図3 プロトタイプ温泉熱回収用熱交換器の模式図と外観

使用材料は、PPRとした。図3に試作したプロトタイプ温泉熱回収用熱交換器（以下、温泉熱回収用熱交換器とする）の模式図と外観を示す。温泉熱回収用熱交換器は、プラスチック製柵状熱交換器の基本構造を90度回転させ、8枚のユニットと9枚のユニットをヘッダーで連結し、合計17枚配置したものである。上部から水を導入できるため、エア抜きが容易な構造となっている。

2.3 温泉熱回収用熱交換器の評価方法

2.3.1 熱交換能力と圧力損失の評価

図4に評価装置の模式図を示す。FRP槽またはコンクリート槽に井戸から汲み上げた温泉水を貯め、この槽から所定流量、温度で水中ポンプにより水を循環させた。FRP槽には、基本構造のプラスチック製柵状熱交換器、コンクリート槽には温泉熱回収用熱交換器が浸漬されている。次に、温泉・浴場施設で給水することを模擬して、ポリエチレン角形槽に水道水を入れ、電気ヒータ、冷凍機で15℃に制御後、水中ポンプにより基本構造のプラスチック製柵状熱交換器、温泉熱回収用熱交換器に通水、熱交換した後、排水した。表1に実験条件を示す。FRP、コンクリート槽内温度は35℃、50℃、60℃または65℃となるように制御し、その循環流量は50 L/minとした。熱交換器内の水道水の設定流量は基本構造のプラスチック製柵状熱交換器で0.5～6 L/min、温泉熱回収用熱交換器で4.3～51 L/minとした。測定は10秒間隔で行い、熱交換器の能力はほぼ定常状態と考えられる5分間の平均値によ

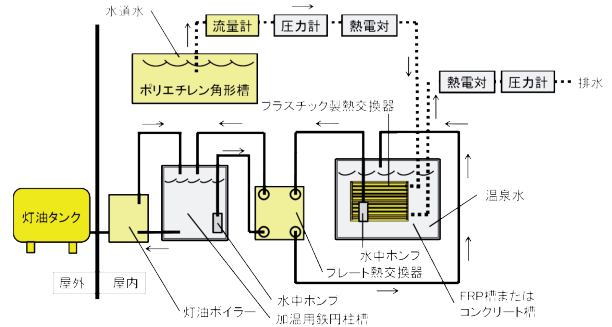


図4 評価装置の模式図

表1 実験条件

熱交換器の種類	熱交換器		FRP槽、コンクリート槽	
	入口温度	流量範囲	槽内温度	循環流量
基本構造のプラスチック製柵状熱交換器	15℃	0.5-10 L/min	35、50、65℃	50 L/min
温泉熱回収用熱交換器	15℃	4.3-51 L/min	35、50、60℃	50 L/min

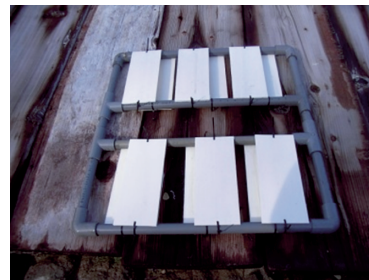


図5 柵に結束した試験片の外観

表2 試験片を浸漬した温泉水の概要

No.	場所	設置日の水温	備考
1	登別温泉	60.2	硫黄泉・強酸性泉
2	壮瞥温泉	72.5	高温泉
3	川湯温泉	58.8	硫黄泉・強酸性泉
4	定山溪温泉	51.5	
5	道総研地質研究所	32.8	

り(1)式で求めた。

$$Q = Cp \times p \times f \times (T_{out} - T_{in}) \text{ [W]} \quad (1)$$

※ Q : 熱交換能力 [W], Cp : 平均水温に対する水の比熱 [J/(g・°C)],

p : 平均水温に対する水の密度 [g/mL], f : 水の流量 [mL/s],

T_{out} : 戻り水温 [°C], T_{in} : 行き水温 [°C]

次に、温泉熱回収用熱交換器について、差圧計を用いて圧力損失を測定した。

2.3.2 耐久性の評価

プラスチック製柵状熱交換器の材料であるPPRペレット材料を押し出し成形し、180℃に加熱したプレス機により50 kgf/cm²で10分程度溶融し、180×75mmの試験片を作成し

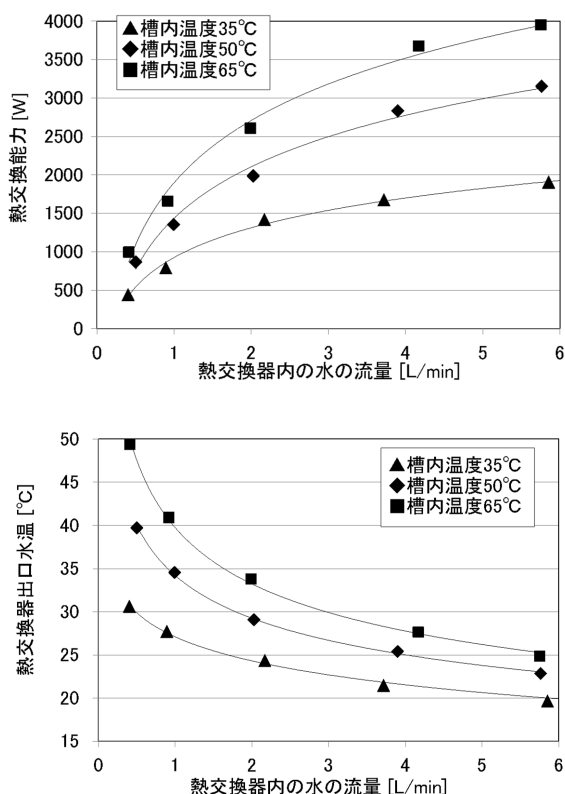


図6 熱交換器内の水の流量に対する熱交換能力, 出口水温 (基本構造)

た。これをステンレスまたは塩ビ管で作製した柵に結束バンドで固定し、各温泉に浸漬させた。図5に柵に結束した試験片の外観を示す。ここで、熱交換器の細管の厚みを考慮し、試験片厚みは1.5mmとした。表2に試験片を浸漬した温泉水の概要を示す。2週間ごとに4回、合計2ヶ月に渡り、取り出し、引張試験を実施することにより、時系列的な強度変化、耐久性を推察した。なお、本試験では、人の髪、垢、シャンプー、石けんなどの影響は考慮せず、温泉成分の材料への影響について検討するものとしている。

次に、本熱交換器で用いたPPR管についてJIS K6787附属書4 水道用架橋ポリエチレン管の浸出試験方法、JIS S3200-7 水道器具溶出試験方法に基づき溶出試験を実施した。この試験は、試験管内部に80℃の浸出液を満たして16時間静置後の溶出濃度を測定するものである。

2.4 温泉熱回収用熱交換器の評価結果

2.4.1 熱交換能力

図6に基本構造のプラスチック製柵状熱交換器内の水の流量に対する熱交換能力、熱交換器出口水温を示す。熱交換器に通水する水の流量が大きくなると熱交換能力が増加し、熱交換器出口水温は低下する。熱交換器内の水の流量が2 L/minであるとき、槽内温度35、50、65℃における熱交換能力(計算値)は1,312、2,105、2,708Wであった。また、そのときの出口水温(計算値)はそれぞれ23.9、29.3、33.2℃であった。

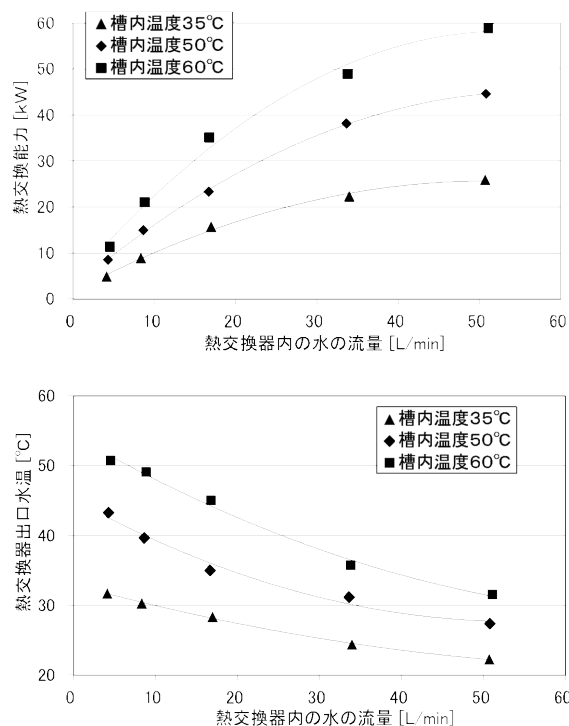


図7 熱交換器内の水の流量に対する熱交換能力, 出口水温 (温泉熱回収用熱交換器)

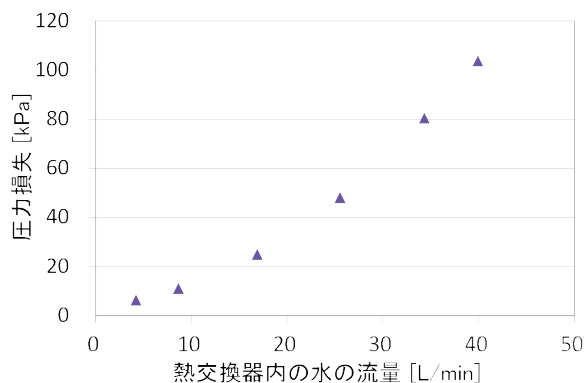


図8 温泉熱回収用熱交換器の通水流量と圧力損失

図7に温泉熱回収用熱交換器における熱交換器内の水の流量に対する熱交換能力、熱交換器出口水温を示す。熱交換器内の水の流量が34L/min(基本構造のプラスチック製柵状熱交換器1枚あたり2L/min)であるとき、槽内温度35,50,60℃における熱交換能力(計算値)は23.0、38.1、51.2kWであった。そのときの出口水温(計算値)はそれぞれ24.6、30.1、36.4℃であった。全体の伝熱面積が基本構造を17倍したものよりも温泉熱回収用熱交換器の方が1.2倍程度大きいため、能力が高くなっていると考えられる。

図8に温泉熱回収用熱交換器の通水流量と圧力損失を示す。スーパー銭湯など大型施設で大きな熱回収量が求められる場合は、ヘッダー方式で並列に連結すると良いと考えられる。

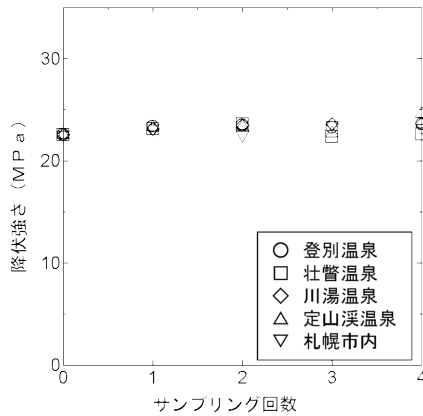


図9 PPR試験片の引張降伏強さ（2週間毎）

表3 PPR管の溶出試験結果

検査項目	結果	判定基準値
色度	<1度	5度以下
濁度	<0.1度	2度以下
味	異常なし	異常でないこと
臭気	異常なし	異常でないこと
有機物(全有機炭素)	<0.3 mg/L	3 mg/L以下

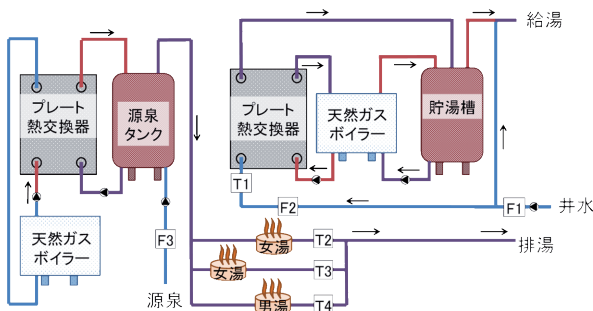


図10 モデル温泉施設の浴用温泉系統，給湯系統の概要

2.4.2 耐久性評価

図9に2週間ごとにサンプリングしたPPR試験片の引張降伏強さを示す。サンプリング回数0回は初期状態を示す。いずれの試験場所においても本試験期間中の引張試験強さの変化は見られなかった。

表3にPPR管の溶出試験結果を示す。これより、規定値を超える溶出は認められなかった。

3. モデル温泉施設におけるエネルギー需要実測・排湯分析

3.1 調査目的

プラスチック製柵状熱交換器は、従来の金属製熱交換器に比べ、低pHなどによる腐食に強いといったメリットがある。しかしながら湯の花やスケールといった熱交換器表面に固着

表4 モデル温泉施設の原湯，排湯の分析項目と分析方法

	分析項目	分析方法
基本性状	水温、pH、電気伝導度	JIS K 0102:測定器観測
	懸濁物質	JIS K 0102:ろ過重量法
汚濁指標	濁度	JIS K 0102:吸光度法(ホルマジン)
	CODMn	JIS K 0102:過マンガン酸カリウムによる酸素消費量
	有機体炭素(TOC)	上水試験法:湿式酸化法
	油分	JIS K 0102:ヘキサン抽出物質
	陰イオン界面活性剤	JIS K 0102:メチレンブルー吸光度法

する成分による熱交換性能への影響については、十分に評価できていない。

このことを踏まえ、本調査では実証実験としてプラスチック製柵状熱交換器の導入を予定したモデル施設（札幌市内のスーパー銭湯）において、給湯流量，給水水温などの実測を行うとともに、排湯成分分析，熱交換器表面付着固形物の観察およびその成分分析を行う。これらは実証試験および熱回収システムの設計に必要な基礎的なデータ収集，およびプラスチック製柵状熱交換器設置後の表面付着物による熱交換能力低下に関する知見を得ることを目的とする。

3.2 調査内容

3.2.1 給湯需要，排湯資源量調査

図10にモデル温泉施設の浴用温泉系統，給湯系統の概要を計測ポイントとともに示す。ここで、Fは流量計，Tは配管内に設置した温度センサを示している。ポンプで源泉から汲み上げられた温泉は源泉タンクに貯留され，天然ガスボイラーによりプレート熱交換器を介して加温される。加温された温泉は，浴場で使用され，排湯系統を経て，公共の下水に排出される。一方，給湯系統は，ポンプで汲み上げた井水が天然ガスボイラーにより，プレート熱交換器を経て予熱され，貯湯槽に導入される。貯湯槽の温水は，天然ガスボイラーとの間で循環され，60℃まで加温維持される。貯湯槽に貯留された温水は，井水と混合され，浴場のシャワー等に使用され，その排水は排湯系統に導入される。

流量および温度の計測ポイントは，井水流量（F1），貯湯槽への補給水流量（F2），温泉水流量（F3），補給水（井水）温度（T1），排湯温度（T2～T4，女湯用の排湯系統は2つある）とした。

3.2.2 モデル温泉施設の原湯および排湯の性状

表4にモデル温泉施設の原湯および排湯の性状を把握するために行った分析項目とその方法を示す。ここでは，水質の基本性状，浴場での利用前後の汚濁の状況，温泉主要成分の濃度推移を把握することを目的としている。分析は鉱泉分析法指針，日本工業規格，上水試験法などの公定法に従って行った。

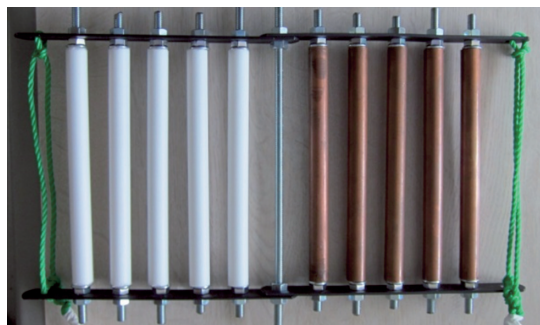


図11 排湯浸漬前のテストピースの外観
(左5ピース；PPR管，右5ピース；銅管)

表5 月別の補給水量と加温前の水温

月	水量[m ³ /日]			平均井水水温 [°C]
	平均	最小	最大	
H25/8	91	68	126	11.2
H25/9	92	67	138	11.1
H25/10	93	71	162	10.9
H25/11	96	68	148	10.9
H25/12	89	73	129	10.9

表6 月別の排湯量，平均排湯水温

月	排湯水量合計[m ³ /日]			平均排水温度 [°C]
	平均	最小	最大	
H25/8	364	327	429	35.7
H25/9	359	308	446	35.4
H25/10	353	310	454	34.8
H25/11	350	286	445	33.9
H25/12	336	308	403	33.6

3.2.3 モデル温泉施設におけるテストピース浸漬試験

排湯が集合する屋外のマンホールに熱交換器材料のテストピースを浸漬し，材料表面に付着する固形物の観察を行った。図11に排湯浸漬前のテストピースの外観を示す。テストピースはプラスチック製柵状熱交換器の材料となるPPR管と比較対象として銅管を用いた。

3.3 調査結果

3.3.1 給湯需要，排湯資源量調査

表5にモデル温泉施設における月別の給湯システムの補給水量と加温前の水温（入口水温）を，表6に月別の排湯量（排湯量は直接測定できなかったため，温泉水，井水の流量の和），平均排湯水温を示す。一日の水量は，休日・平日を平均すると約90m³/日であった。供給水（井水）の入口水温は約11°Cで休日，平日に関係なくほぼ一定であった。排湯量は平均して約350m³/日であり，休日に多くなる傾向がみられた。月ごとの排湯の水温は33～36°C前後で推移している。

表7にモデル温泉施設の原湯および排湯水質分析結果を示

表7 モデル温泉施設の原湯および排湯水質分析結果

種別	単位	源泉	排湯(平日)	排湯(休日)
		H25.8.20(火)	15:40～	H25.9.14(土)
採取日時			15:50～	17:20～
水温	°C	41.1	33.1	36.9
pH	—	8.39	8.29	8.37
EC	mS/m	211	105	144
懸濁物質	mg/L	1未満	9	9
油分(ヘキサン抽出物質)	mg/L	1未満	21	2
濁度	mg/L	1未満	17	13
TOC	mg/L	7.3	8.5	7.8
COD	mg/L	29	30	27
陰イオン界面活性剤	mg/L	0.02	0.01	0.05



図12 排湯浸漬4ヶ月後のテストピースの外観
(左5ピース；PPR管，右5ピース；銅管)



図13 テストピースに髪の毛が絡まる様子

す。汚濁指標とした項目については，排湯で濃度上昇が見られたが，軽微なものであった。図12にモデル温泉施設の排湯に浸漬したテストピースの外観を示す。4ヶ月後においても，PPR管，銅管のいずれの材料表面にも若干の水垢が付着している以外，錆び，表面の劣化，スケール等の付着といった変化は認められなかった。ただしテストピース自体には，排湯と一緒に流れてくる髪の毛が絡みつき，数週間程度で図13のような状態となった。また，髪の毛が絡まりネット状になった部分に濁り成分（水あかや皮膚汚れ等）が留まっており，排水の流れを妨げることが観察された。このため，熱交換器設置箇所に髪の毛を留まらせない対策が必要と考えられた。

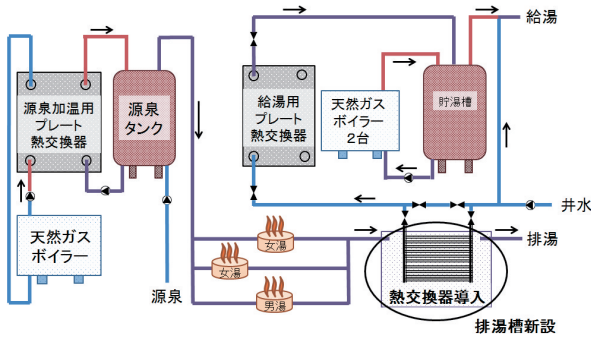


図14 モデル温泉施設の排湯熱を利用した給湯予熱システムの模式図

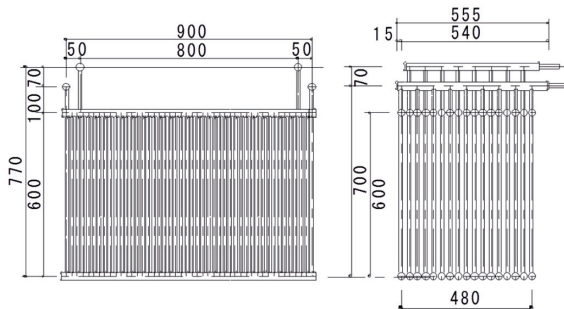


図15 モデル温泉施設に導入した熱交換器の基本構造

4. モデル温泉施設への排湯熱利用給湯予熱システムの施工

4.1 温泉施設の排湯熱利用給湯予熱システム

4.1.1 システムの概要

図14にモデル温泉施設の排湯熱を利用した給湯予熱システムの模式図を示す。本研究では、業務用としてメンテナンスが容易で、かつ現実的な年数で初期投資を回収できることを目指してシステム設計を行った。まず、図10の既設の排湯槽に新たに排湯槽を設け、そこに熱交換器を浸漬させる。次に、既設の給湯系統にバイパス回路を設け、温泉施設で使用する給湯用の井水をプラスチック製柵状熱交換器に通水して熱交換を行い、貯湯槽で貯留する。既設の給湯用熱交換器には通水するが、ボイラーで熱交換しない。貯湯槽の温水は、ボイラーとの循環系統により60℃に加熱されている。

4.1.2 導入熱交換器

図15にモデル温泉施設に導入したプラスチック製柵状熱交換器の基本構造を示す。構造としては図3と同様であるが、排湯系統が地表から深く、縦長の熱交換器を導入すると排湯槽の設置にコストがかかるため、横長の形状とした。

4.1.3 排湯槽、熱交換器、ヘアキャッチャーの設置

図16に施工後の排湯槽周辺および排湯槽内の外観を示す。

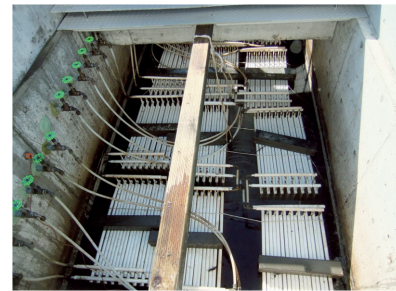


図16 施工後の排湯槽周辺および排湯槽内の外観

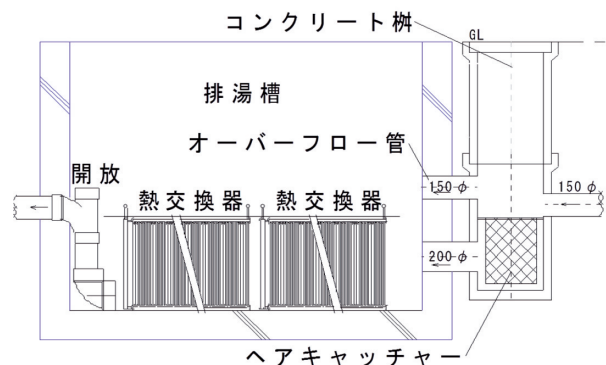


図17 排湯槽の断面図

表8 測定内容の概要

測定内容	測定箇所	測定器
熱交換器の熱交換能力	井水行き温度、熱交換器戻り温度	シーST熱電対
	貯湯槽への井水流量	電磁流量計
排湯資源量	排湯温度(排湯入口、中央、出口)	シーST熱電対
	排湯流量	超音波式流量計

排湯槽は内寸4,600×2,150×1,850(高さ)mmのコンクリート槽を現場打ちし、その中に図15のプラスチック製柵状熱交換器を12個(伝熱面積の合計は図3の6倍)導入した。貯湯槽から熱交換器までは塩ビ管で接続し、排湯槽内は架橋ポリエチレン管で接続した。給湯用の井水は既設のポンプをそのまま使い、全量熱交換器、流量調整弁を経由して貯湯槽へ導入されている。排湯槽内上部は、メンテナンスを考慮し梁を設け、プラスチックの板で覆う構造としている。排湯槽は車両の通らない場所に設置することを標準仕様とした。図17に排湯槽の断面図を示す。排湯槽内へ排湯を導入するコンクリ

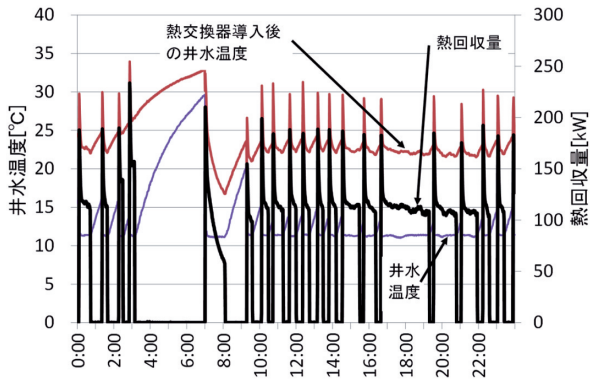


図18 井水行き戻り温度、熱回収量の経時変化（11月9日）

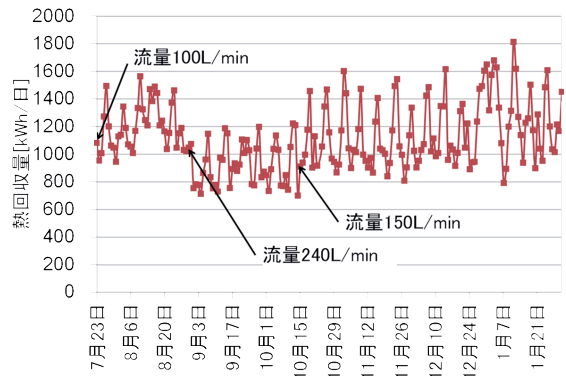


図20 システムの日別の熱回収量

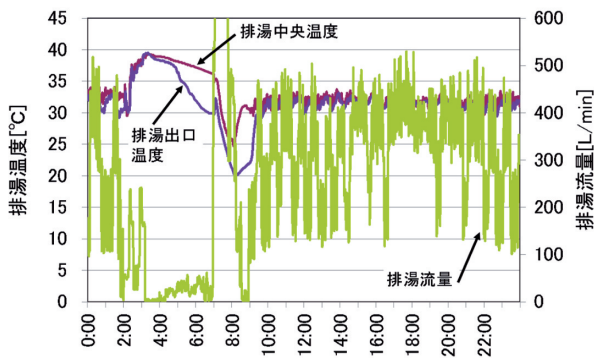


図19 排湯温度、排湯流量の経時変化（11月9日）

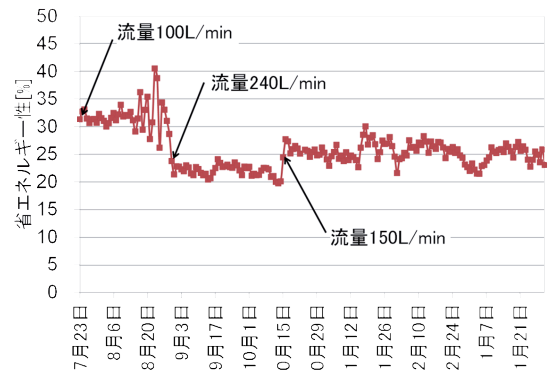


図21 システムの日別の省エネルギー性

ト樹にはゴミ除外用のヘアキャッチャーを設け、懸念される髪の毛等の繊維物や温泉由来の固形物を除去する。

4.2 排湯熱利用給湯予熱システムの導入評価方法

表8に本報告に直接関係する測定内容の概要を示す。測定は機械室内での井水行き温度、熱交換器からの戻り温度、貯湯槽への井水流量計測による熱交換器の熱交換能力、排湯槽内の温度と排湯流量の計測による熱源資源量を確認する目的で実施した。測定間隔は1分とし、7月23日から計測を開始した。なお、熱交換器の熱交換能力は前述の(1)式と同様に求めたが、ここでは12個の熱交換器合計の熱交換能力である。

4.3 評価結果

4.3.1 運転状況

図18に代表日（11月9日）の井水行き戻り温度、熱回収量の経時変化を示す。11°C程度の井水が夕方の連続通水時には22~23°C程度まで加温されている。貯湯槽への給水は水位センサにより制御されており、オンオフ制御で一定流量の予熱後の井水が導入されるため、熱交換後の井水温度は大きく変動せず、熱交換量は連続通水時で100~120kW程度であった。

図19に代表日（11月9日）の排湯温度、排湯流量の経時変化を示す。排湯流量は営業時間内で100~500 L/min程度であり、排湯出口温度は排湯中央温度よりやや低いが、熱交換

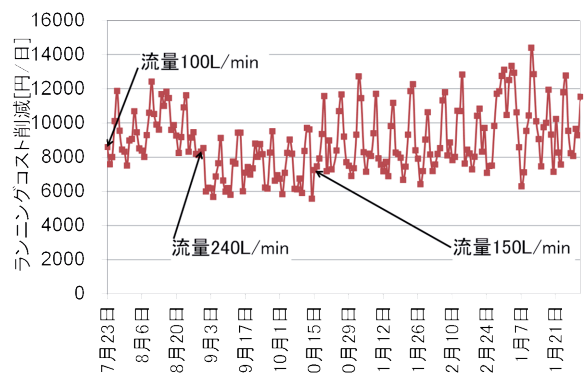


図22 日別のランニングコスト削減状況

されても大きく低下せず、常時30°C以上あり、さらなる熱回収のポテンシャルが認められた。なお、排湯入口、出口温度は排湯槽直前、直後の配管ではなく、排湯槽内で計測しているため、熱交換器による熱回収量と排湯熱の損失は見かけ上一致しない。

4.3.2 システムの熱回収量、省エネルギー性および経済性

図20にシステムの日別の熱回収量を示す。日別の熱回収量は、熱交換器内に通水する流量を変えると井水滞留時間が変わるため変化する。日別の熱回収量は、井水流量を150 L/minに設定後、平均1,169 kWh/日であった。図21にシステ

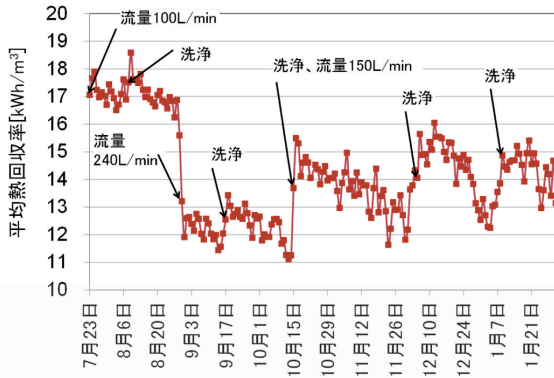


図23 日別の平均熱回収率

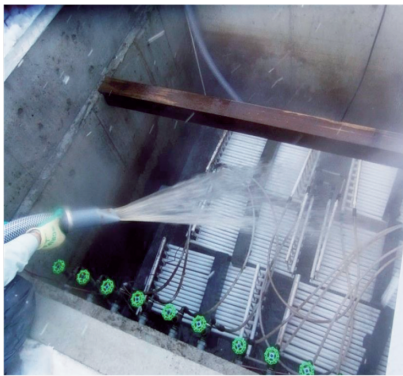


図24 熱交換器の洗浄時の様子

ムの日別の省エネルギー性を示す。ここで、省エネルギー性は(2)式で定義した。

$$\text{省エネルギー性 [\%]} = Q/Q' \times 100 \quad (2)$$

※ Q : 熱交換器による熱回収量 [kWh/日], Q' : 井水を貯湯温度まで加温する熱量 [kWh/日]

ここで、施設の貯湯温度は60℃である。省エネルギー性は井水流量を150 L/minに設定後、平均24.6%であった。図22にシステムの日別のランニングコスト削減状況を示す。貯湯槽で使用するボイラーの燃焼効率を85%、熱源である天然ガスの発熱量を44.8MJ/Nm³、天然ガス料金を84円/Nm³とした。1日あたりのランニングコストは、井水流量を150L/minに設定後、平均9,284円削減となった。この結果、2年強程度で投資回収できる経済性に優れたシステムであることがわかった。

4.3.3 熱回収に及ぼす洗浄効果と熱交換器洗浄方法

図23に日別の井水流量に対する熱回収量を平均熱回収率として示す。平均熱回収率は、洗浄により熱交換器表面へ付着した汚れを取り除くと回復することが確認できる。洗浄の頻度はこの施設では1ヶ月に1回程度必要と考えられる。図24にプラスチック製柵状熱交換器の洗浄時の様子を示す。汚水用水中ポンプを用いて、排湯を熱交換器に吹きつけ浮遊物質を取り除くとともに、槽内に滞留した浮遊物質、ヘドロなど

を吸い出し、下流の公共樹へ排出することにより容易に洗浄可能である。このため、プレート熱交換器のような分解洗浄に比べ、メンテナンスが容易である。

5. まとめ

温泉熱を回収するにあたって、従来の金属製プレート熱交換器の課題であった金属部材の腐食や目詰まりを解決するために、プラスチック製柵状熱交換器を開発し、モデル温泉施設に、排湯とその熱交換器を用いた給湯予熱システムを施工して、導入評価を行った。以下に、製作した熱交換器や得られた知見についてまとめる。

- (1) 試作したプラスチック製柵状熱交換器の基本構造は、幅、高さがそれぞれ1000×810mmであり、φ27mmのヘッダー管に20mmピッチで孔を開け、そこにφ13mmの細管を40本熱融着させたものである。使用材料は、PPRとした。試作した温泉熱回収用熱交換器は、基本構造を90度回転させ、8枚のユニットと9枚のユニットをヘッダーで連結し、合計17枚配置したものである。上部から水を導入できるため、エア抜きが容易な構造となっている。
- (2) 温泉熱回収用熱交換器内の水の流量が34L/min（基本構造1枚あたり2L/min）であるとき、槽内温度35,50,60℃における熱交換能力（計算値）は23.0, 38.1, 51.2kWであった。その時の出口水温（計算値）はそれぞれ24.6, 30.1, 36.4℃であった。
- (3) スーパー銭湯など大型施設で大きな熱回収量が求められる場合は、ヘッダー方式で並列に連結するとよいと考えられる。
- (4) プラスチック製柵状熱交換器の耐久性試験用として作製し、各温泉水に浸漬したPPR試験片の引張降伏強さは2ヶ月間で変わらなかった。また、JISによる溶出試験を行った結果、規定値を超える溶出は認められなかった。
- (5) モデル温泉施設における一日の水量は、休日・平日を平均すると約90m³/日であった。供給水（地下水）の入口水温は約11℃で、休日、平日に関係なくほぼ一定であった。排湯量は平均して約350m³/日であり、月ごとの排湯の水温は33～36℃前後で推移していた。
- (6) 原湯および排湯水質を分析した結果、汚濁指標とした項目について排湯で濃度上昇が見られたが、軽微なものであった。モデル温泉施設の排湯に浸漬したテストピースは、4ヶ月後においても、PPR管、銅管のいずれの材料表面にも若干の水垢が付着している以外、錆び、表面の劣化、スケール等の付着といった変化は認められなかった。
- (7) モデル温泉施設への排湯熱利用給湯予熱システムは、まず、既設の排湯系統に新たに排湯槽を設け、そこにプラスチック製柵状熱交換器を浸漬させる。次に、既設の給湯系統にバイパス回路を設け、温泉施設で使用する給湯用の井

水をプラスチック製柵状熱交換器に通水して熱交換を行い、貯湯槽で貯留する。既設の給湯用熱交換器には通水するが、ボイラーで熱交換しない。貯湯槽は、ボイラーとの循環系統により60℃に加温されるシステムとした。

- (8) 導入熱交換器は、排湯系統が地表から深く、縦長の熱交換器を導入すると排湯槽の設置にコストがかかるため、横長の形状とした。排湯槽はコンクリート槽を現場打ちし、熱交換器を12個導入した。排湯槽内へ排湯を導入するコンクリート柵にはゴミ除外用のヘアキャッチャーを設け、懸念される髪の毛等の繊維物や温泉由来の固形物を除去する。
- (9) 11℃程度の井水が夕方連続通水時にはプラスチック製柵状熱交換器で22～23℃程度まで加温されていることが確認された。熱交換後の井水温度は大きく変動せず、熱交換量は連続通水時で100～120kW程度であった。
- (10) 排湯流量は営業時間内で100～500L/min程度であり、排湯出口温度は排湯中央温度よりやや低いが、熱交換されても大きく低下せず、常時30℃以上あった。
- (11) システムの日別の熱回収量は、井水流量を150L/minに設定後、平均1,169kWh/日であった。また、システムの日別の省エネルギー性は、井水流量を150L/minに設定後、平均24.6%であった。
- (12) 1日あたりのランニングコストは井水流量を150L/minに設定後、平均9,284円削減となった。この結果、2年強程度で投資回収できる経済性に優れたシステムであることがわかった。
- (13) 熱回収に対する洗浄効果を示す指標となる平均熱回収率は、洗浄により熱交換器表面へ付着した汚れを取り除くと回復することが確認できた。汚水用水中ポンプを用いて、排湯を熱交換器に吹きつけ浮遊物質を取り除くとともに、槽内に滞留した浮遊物質、ヘドロなどを吸い出し、下流の公共柵へ排出することにより容易に洗浄可能であることがわかり、熱交換器の洗浄方法を確立した。

謝辞

本研究は、札幌市の25、26年度補助事業「札幌発の環境産業創出事業」により実施いたしました。ここに深く感謝申し上げます。

引用文献

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

高速播種を可能としたISOBUS対応型ポテトプランタの開発

中西 洋介, 井川 久, 稲野 一郎*, 吉田 邦彦**, 飯島 裕治***

Development of ISOBUS Potato-Planter that Achieves a High-Speed Operation

Yohsuke NAKANISHI, Hisashi IGAWA
Ichiro INANO*, Kunihiko YOSHIDA**, Yuji IJIMA***

抄 録

大規模農場経営が進むなか、北海道の畑作経営においては作業効率の高い農業機械を導入し、生産性の向上を図ることが望まれている。特に、収益確保や輪作の維持に欠かすことができない馬鈴しょ栽培の生産性向上が望まれているが、現状の国産ポテトプランタでは機構上の制約から高速に播種することができない。そのため栽培面積を拡大できず、生産性の向上を図ることが困難であることが課題となっている。

本研究では、ISOBUS通信規格に対応した高速播種型ポテトプランタを開発したので報告する。圃場での播種試験を行った結果、現状の作業速度の約2倍にあたる時速7kmでの高速播種が可能であることを確認した。

キーワード：ポテトプランタ、高速播種、車速連動制御、ISOBUS

Abstract

In the upland field farming in Hokkaido, while large-scale farm management advances, improvement of productivity is needed using agricultural machinery with high working efficiency. Especially, in the potato cultivation that is indispensable to securing of profit and the maintenance of crop rotation, improvement of productivity is the most needed. However, high-speed seeding operation cannot be achieved using domestic potato planter from limitation of the mechanism. Therefore, improvement of the productivity by the expansion of the cultivation area cannot be attained, because the seeding operation cannot be carried out at the speed that is higher than the present speed.

In this study, development of ISOBUS potato planter that achieved a high-speed seeding operation is shown. As the result of seeding test in the field, it is verified that the high-speed seeding operation is able to be carried out at the speed of 7 km/h, that is almost two times as large as the present speed.

KEY-WORDS : Potato Planter, High-Speed seeding, vehicle speed-interlocking control, ISOBUS

1. はじめに

経営耕地面積の増大が進むなか、北海道の畑作経営においては高速仕様等の作業効率の高い農業機械を導入し、生産性の向上を図ることが望まれている。特に、収益確保や輪作の

維持に欠かすことができない馬鈴しょ栽培においては、播種時期（4月下旬～5月中旬）が天候不順で短いため、播種作業を高速化して栽培面積を拡大することで生産性の向上を図りたいとの要望が寄せられている。しかし、現状のカップ式国産ポテトプランタ（以下、プランタ）では、機構上の制約

* 十勝農業試験場 * Tokachi Agricultural Experiment Station

** 中央農業試験場 ** Central Agricultural Experiment Station

*** 十勝農機株式会社 *** Tokachi Noki Co. Ltd.

事業名：重点研究

課題名：高度通信制御技術を活用した次世代型ポテトプランタの開発

から現状の作業速度（4 km/h）を超える速度での播種作業は不可能なため、馬鈴しょの栽培面積を拡大することが困難であることが課題となっている。

このような背景のもと、海外製の高速播種対応型ISOBUSプラントの導入が試みられているが、機体が大型で圃場旋回時に大きな面積を必要とするため、旋回面積を極力小さくして作物の栽培面積を広くする日本の慣行農法に合わず、日本国内での導入は進んでいない。しかし、担い手不足による国内の耕作放棄面積は40万haに達し、昨年度より農地中間管理機構（農林水産省）が、これら耕作放棄地の借り受け・貸し付けによる農地集積制度を推し進めるなど、近年、急速な勢いで農場経営の大規模化が進みつつある。したがって、近い将来、大規模農場の最適管理に適した情報化農業の基盤技術であるISOBUS通信に対応した海外製の大型高速播種対応型プラントの導入が進み、国産プラントの国内市場を圧迫するのは必至である。そのため、海外の高効率プラントに匹敵する性能を持ち、かつ、日本の慣行農法に対応した国産プラントの開発が望まれている。

本報告では、海外輸入機にはない小旋回機能を有したISOBUS仕様の高速播種対応型国産ポテトプラントを開発し、現状の作業速度の約2倍にあたる車速7 km/hでの高速播種試験を行ったので報告する。

次章で種芋をV字状に配置した速度差のある一対の平ベルトで挟み、回転・攪拌しながら搬送することで隙間なく一列に整列させる播種ベルトと、ホップから播種ベルトへ適量の種芋を供給・制御する供給コンベア等から構成される高速搬送・播種機構について説明した後、その性能評価試験について報告する。次に第3章で、車速に連動してコンベア搬送速度を制御する油圧式コンベア速度制御システムと、フィードバック制御による制御手法について説明する。最後に第4章で、高速搬送・播種機構と油圧式コンベア速度制御システムを搭載したISOBUS通信仕様の屋外走行型プロトタイプ試作機について説明した後、屋外での種芋播種性能確認試験について報告する。播種試験の結果、車速7 km/hでの高速播種時において、海外製の高速播種機と同等の播種精度を実現できることがわかった。

2. 高速搬送・播種機構の開発

プラントには種芋を一定の株間隔で播種する性能が求められる。図1に従来のプラント（カップ式）を示す。循環するチェーンに一定ピッチ毎に配置されたカップでホップから種芋を受け取り、1個ずつ播種する方式である。確実に一定間隔で種芋を播種することができる半面、作業速度が4 km/hを超過するとカップが高速に移動するため、カップに芋が入らない、あるいは、カップに2個以上の芋が入るなどの不具合が発生する。そのため、本報告では、種芋を高速に搬送す

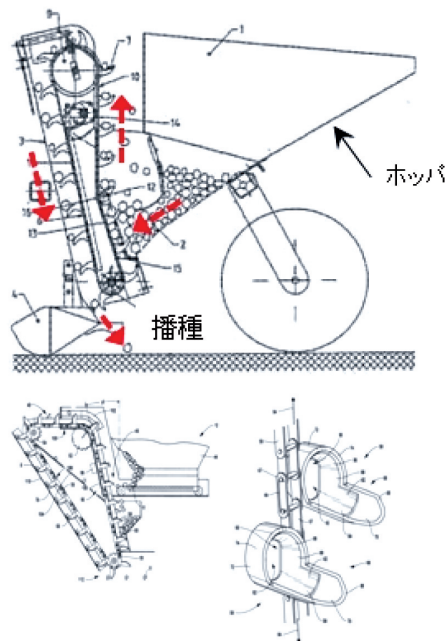


図1 従来の播種機（カップ式）

ることが期待できる平ベルトを使用して高速搬送・播種機構を開発した。

2.1 播種ベルト

カップ式播種機で高速播種する場合、高速に移動するカップに種芋を確実に1個ずつ投入することは困難である。したがって、本報告では図2に示すように種芋をV字状に配置した一対の平ベルト（以下、播種ベルト）で挟みながら高速に搬送・播種する機構を考案した。本機構で種芋を圃場に一定間隔で播種するためには、播種ベルト上に種芋を隙間なく一列に整列させることが必要である。そのためには以下の2点に留意する必要がある。

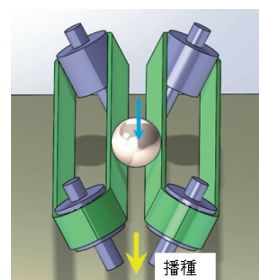


図2 播種ベルト

① 播種ベルトに種芋を過剰供給する

播種ベルトに供給する種芋が播種する種芋より少なければ、播種ベルト上で隣り合う種芋に隙間ができる。一方、播種ベルトに種芋を過剰供給することで隣り合う種芋の隙間を小さくすることが期待できる（余剰な種芋は

播種ベルトから振り落とす)。

② 播種側に向かって上り傾斜とする (図3)

播種側に向かって上り傾斜とすることで、搬送中に種芋が自らの自重で上流側に転がるため(上流に戻る)、隣り合う種芋の隙間が小さくなることが期待できる。

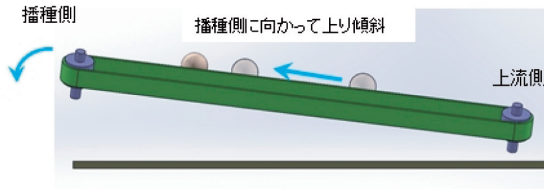


図3 播種側に向かって上り傾斜となった播種ベルト

図4に上記①、②の機能を有した播種ベルト試作機を示す。幅50mmの一对の平ベルト(播種ベルト1、2)をV字状に配置し、種芋を挟みながら搬送する。播種ベルト上流部(複数列搬送部)には播種ベルトと平行して両脇に搬送ベルトが設けられており、下流部(整列搬送部)に種芋を過剰供給する。また、播種側に向かって傾斜角5度の上り勾配としている。

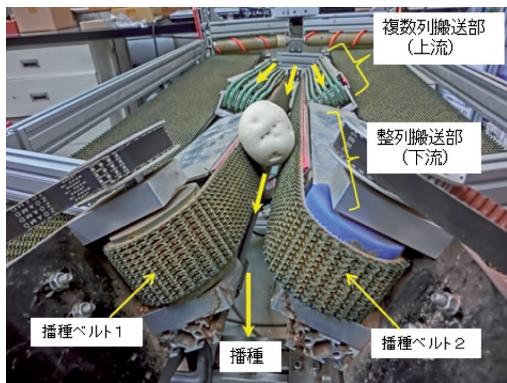


図4 播種ベルト試作機

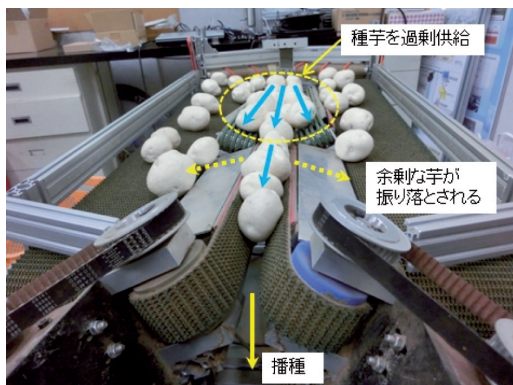


図5 播種ベルト上での種芋の状態

図5に、複数列搬送部により整列搬送部へ種芋が過剰供給され、整列搬送部では過剰供給された余剰分が振り落とされることで種芋が隙間なく一列に整列している状態を示す。

2.2 高速搬送・播種機構

次に、ホッパに溜められた種芋を、圃場に一個ずつ播種する高速搬送・播種機構について説明する。

前項で説明した播種ベルトを使用する場合、整列搬送部で振り落とされた種芋は播種ベルト上流に還流させることが望ましい。一方、播種機には数百kgの種芋がホッパに溜められており、ホッパから逐次、播種量に相当する適量の種芋を播種ベルトへ供給・制御する必要がある。以上を考慮し、高速搬送・播種機構は次のコンベア類で構成した。

i) 播種ベルト

種芋を隙間なく一列に整列させ、播種する。

ii) 還流コンベア

播種ベルトから振り落とされた種芋を、播種ベルト上流へ還流する(戻す)。

iii) 供給コンベア

ホッパ直下に設置し、ホッパに溜められた種芋を播種ベルトあるいは還流コンベアへ供給・制御する。

図6にホッパに溜められた種芋が播種されるまでの種芋の流れを示す(図の実線矢印)。

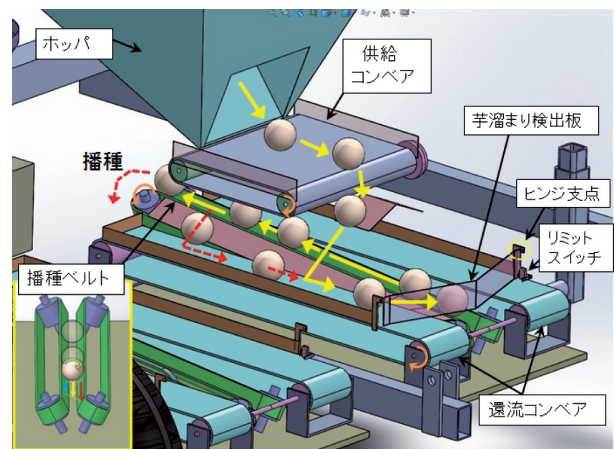


図6 種芋の流れ(ホッパ~播種まで)

- ① ホッパ
- ② 供給コンベア
- ③ 還流コンベア(播種ベルトと逆方向へ種芋を搬送)へ落下
- ④ 還流コンベアで搬送され、芋溜まり検出板に衝突し、播種ベルト上流へと誘導される。
- ⑤ 播種ベルトで一列に整列され、播種地点へ搬送される。
- ⑥ 地面へ落下・播種される(図6 左方が播種地点)

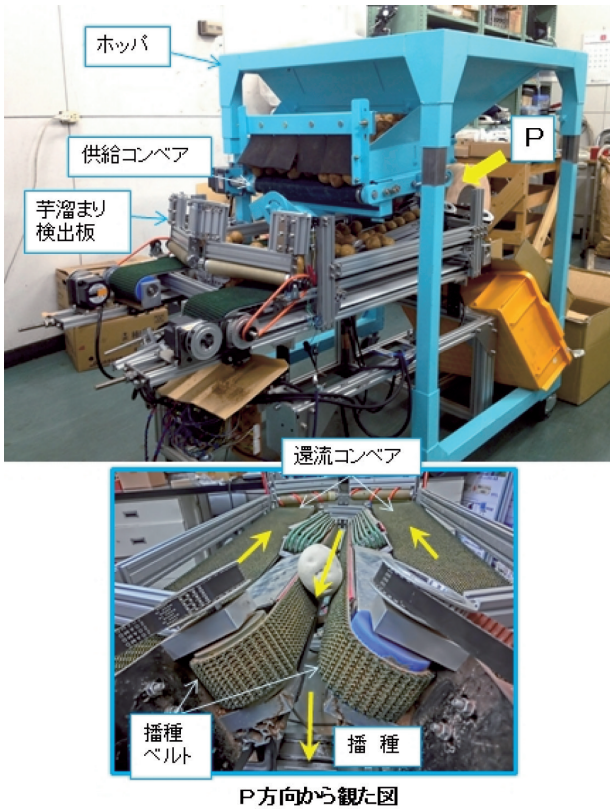


図7 高速搬送・播種機構（その1）

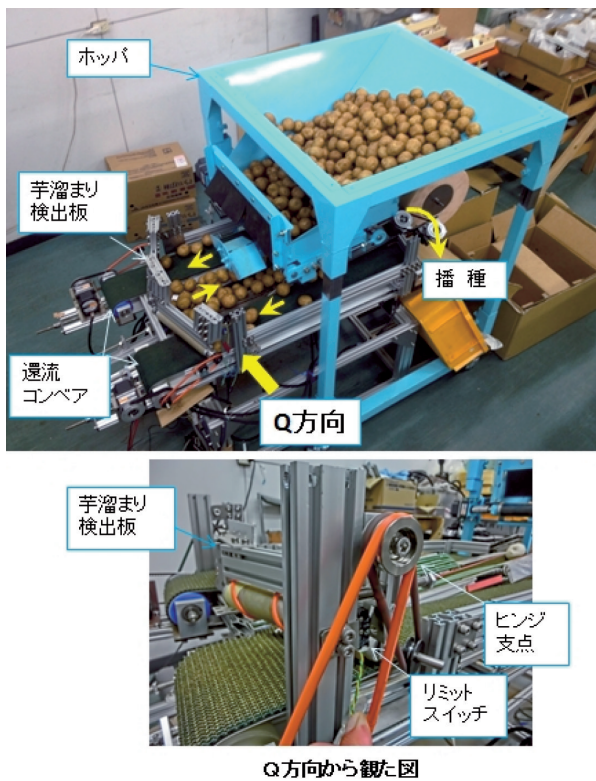


図8 高速搬送・播種機構（その2）

播種ベルトの両脇には還流コンベアが配置されており、播種ベルトから振り落とされた余剰な芋（図6の点線矢印）を

播種ベルト上流へ還流する。

ホッパから種芋が過剰供給された場合（播種量以上の種芋がホッパから供給された場合）、供給コンベアを一定時間停止するなどして、播種ベルトへの種芋供給量を適量に調整する必要がある。以下に、その調整・制御方法を記す。

ホッパから過剰供給された種芋は、還流コンベアで播種ベルト上流へ搬送され、集積する。そのため、播種ベルト上流に「芋溜まり検出板（以下、検出板）」を設置して、集積した種芋（過剰供給分）を検出することにした。検出板は上端をヒンジで回転支持し、背部にリミットスイッチ（以下、LS）を設置している。種芋が過剰供給された場合、播種ベルト上流に集積した種芋が検出板を圧迫し、LSがオンとなるため過剰供給状態が検出可能である。

LSがオフの場合はホッパからの種芋供給量が正常と判断し、供給コンベアを運転する。LSがオンとなった場合、供給コンベアを一定時間停止、あるいは減速することで、ホッパからの種芋供給量を適量に調整・制御可能である。

図7、8に開発した高速搬送・播種機構を示す。各コンベア類はDCモータで駆動しており、個別に運転・停止や搬送速度が制御可能である。

2.3 種芋播種性能評価試験

播種機には圃場に種芋を一定の株間間隔で播種する性能が求められる。播種ベルトから1個ずつ落下する（播種される）種芋の時間間隔のばらつきを測定・評価することで、圃場で種芋を播種した時の株間間隔のばらつきを評価することがで

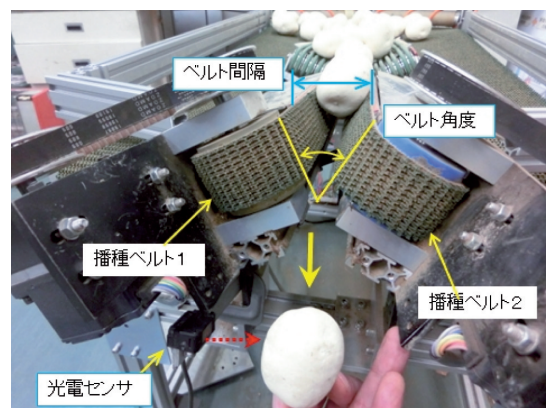


図9 光電センサとベルト間隔，ベルト角度

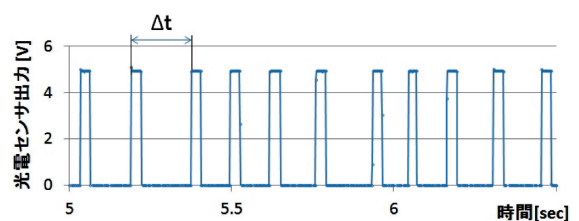


図10 種芋落下時の光電センサ出力値



図11 種芋（北あかり、大きさ平均49mm）

きる。したがって、ここでは図9に示す種芋落下位置に光電センサを設置して播種ベルトから落下する種芋を検出し、光電センサ出力値を用いて高速搬送・播種機構の播種性能（播種間隔のばらつき）を評価した。具体的には、種芋が光電センサを横切った時の出力パルスの立ち上がりから、次の種芋の出力パルスの立ち上がりまでの時間間隔（図10の Δt ）を測定し、それらのばらつきを評価した。時間間隔 Δt のばらつきの評価には、変動係数CV値（ Δt の標準偏差/ Δt の平均値）を使用した。

なお、試験には平均49mm（Sサイズ）の大きさの種芋（北あかり）を使用した（図11）。また、播種ベルトのベルト間隔とベルト角度（図9）は各々47mm、54度とし、ベルト搬送速度は350mm/sとした。これは、株間距離を280mmとして車速7.2km/hで播種作業を行う時のベルト搬送速度に相当する。

上記条件で種芋播種試験を行った結果、播種ベルトの複数列搬送部（図4参照）から過剰供給された種芋が、整列搬送部で重なったまま搬送されることがわかった（図12）。搬送中に播種ベルト上で重なった種芋は、播種ベルト1、2を異なる搬送速度で駆動して回転・攪拌することで隣り合う種芋の隙間に入り込む、あるいは還流コンベア上に振り落とすことが期待できる。さらに、重なった種芋が隣り合う種芋の隙間に入り込むことで、播種間隔のばらつきが小さくなること

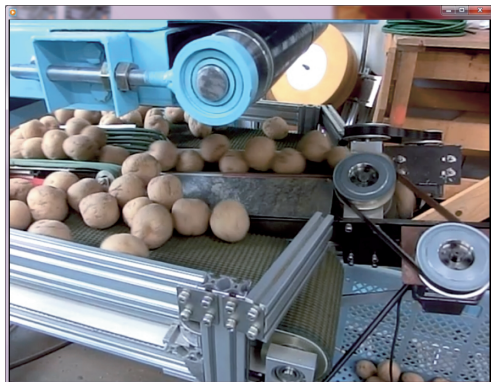


図12 整列搬送部で重なった種芋（播種ベルト速度比1）

が期待できる。

以上より、播種ベルト1、2を異なる搬送速度で駆動した場合の播種間隔のばらつきを調べることにした。播種間隔のばらつき（変動係数CV値）は、220~250個程度の種芋を連続播種し（時間にして約30秒間）、その時の光電センサ出力値を解析して評価した。播種ベルト速度比は1から3まで変化させ、試験は各速度比に対して各々3回ずつ行った。

表1に各播種ベルト速度比に対する光電センサ出力パルスの立ち上がり時間間隔 Δt （播種間隔）の平均値、標準偏差、および変動係数CV値を示す。また、図13に播種ベルト速度

表1 播種ベルト速度比と播種間隔のばらつき

播種ベルト速度比	試験No	パルス立ち上がり時間間隔 Δt			
		平均値 [ms]	標準偏差 [ms]	CV値 [%]	CV値平均[%]
1	1	138.7	39.8	28.7	28.4
	2	136	39.3	28.9	
	3	135.2	37.1	27.5	
1.5	1	131.7	27.3	20.7	19.7
	2	134.4	24.3	18.1	
	3	134.4	27.1	20.2	
2	1	134.7	23.5	17.4	17.0
	2	134.8	23.7	17.5	
	3	135.6	21.9	16.2	
3	1	138.4	24.2	17.5	17.0
	2	139.4	24.8	17.8	
	3	137.2	21.7	15.8	

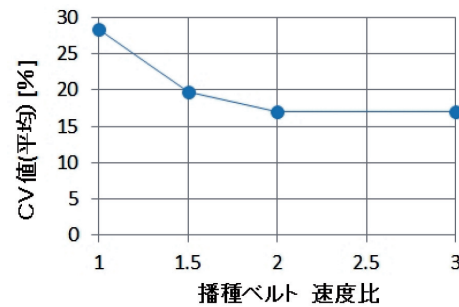


図13 播種ベルト速度比と播種間隔のばらつき

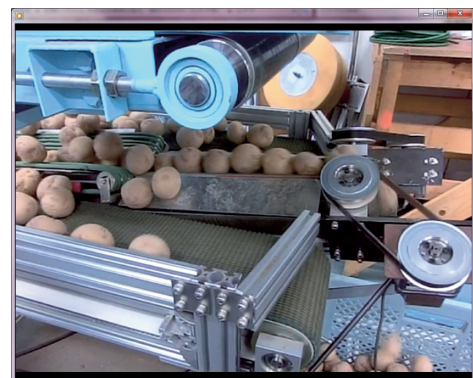


図14 播種ベルト上で整列・搬送される種芋（播種ベルト速度比2）

比に対するCV値（平均値）をグラフ化して示す。

表1, 図13より, 速度比を1から2に上げるにしたがって播種間隔のばらつきの度合いを示すCV値が28.4%から17%へと激減することがわかる。これは, 播種ベルト1, 2を異なる搬送速度で駆動し, 種芋を回転させながら搬送することで播種間隔のばらつきが小さくなることを意味する。なお, 速度比2と3ではCV値は変化せず, 17%となっている。したがって, 本報告では播種ベルトの速度比を2に設定することにした。図14に速度比2で整列・搬送した種芋を示す。種芋が重なり合うことなく, ほぼ隙間なく一列に整列していることが確認できる。

なお, 実際に圃場で種芋を落下・播種した場合, 地面に着地した種芋が転がることで, さらに株間間隔のばらつきが大きくなる懸念される。しかし, 本報告で目標とする圃場での株間間隔のCV値は25%であることから, 17%という値は種芋が地面に着地する直前のCV値として問題のない数値と考える。

以上より, V字状に配置した一対の平ベルトで種芋を挟みながら搬送・播種する場合, 一方の平ベルトをもう一方の平ベルトの2倍の搬送速度で駆動して種芋を回転させながら搬送することで播種間隔のばらつきを抑制できることがわかった。

3. 車速連動型コンベア速度制御システムの開発

車速が変化しても株間距離は一定でなければならない。そのためは, 高速走行時にはコンベアの搬送速度を上げ, 低速走行時にはコンベア速度を下げるなど, 車速に応じてコンベアの搬送速度を精度良く制御する必要がある。

前章で説明した高速搬送・播種機構は室内試験を前提として製作しており, コンベア類はすべて電気式モータで駆動した。しかし, 農業機械で一般的に使用されるアクチュエータは, 大動力を得ることができ, かつ, 電気式アクチュエータと比較して耐候性の高い油圧式アクチュエータである。したがって, ここでは農業機械で一般的な油圧を動力源とし, 逐次車速センサからの車速情報を参照することで, 車速に応じてコンベアの搬送速度を制御する油圧式コンベア速度制御システムを開発した。

3.1 油圧式コンベア速度制御システム

図15に開発した油圧式コンベア速度制御システムを示す。図16はその回路図である。本システムは, 作業機駆動用としてトラクタに設置されているPTO (Power Take Off) 軸を用いて油圧ポンプを駆動し, 搬送コンベアを駆動する油圧モータへの油の流量を電磁比例弁で制御することで, 油圧モータの回転数を制御する構造となっている。電磁比例弁 (KYBエンジニアリングアンドサービス(株)製:最大流量7.5L/min, 最高使用圧力10MPa) は100Hz周期のPWM (Pulse With

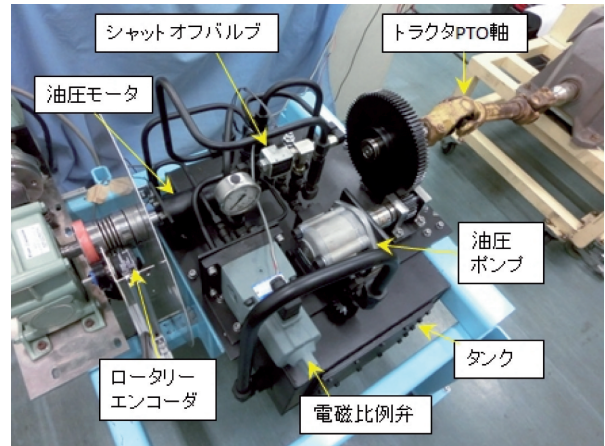


図15 油圧式コンベア速度制御システム

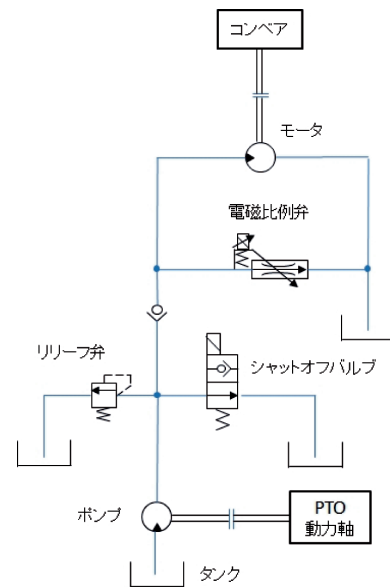


図16 油圧回路

Modulation) 信号で制御可能であり, デューティ比 (以下, duty比) を指定することで弁開度を調整し, モータ回転数を制御することができる。また, モータ回転軸にはロータリーエンコーダを設置しており, 逐次, モータ回転数の値を回転数制御に使用可能である。

3.2 制御手法

3.2.1 PWMデューティ比とモータ回転数の関係

車速に応じてコンベア搬送速度 V_p を制御するためには, 次式で求めた回転数 N_p でモータを駆動すればよい。

$$V_p = V/L \times S \quad \dots(1)$$

$$N_p = V_p/r \quad \dots(2)$$

ここで, V は車速, L は株間距離, S は芋の大きさ (以下, 芋サイズ), r はコンベア駆動プーリの半径である。株間距

離Lと芋サイズSはユーザーが指定し、車速Vは逐次、車速センサから取得する。

回転数 N_p でモータを回転させるduty比を電磁比例弁に与えることで、逐次変化する車速Vに連動してコンベアを搬送速度 V_p で駆動することができる。

電磁比例弁への弁開度指令であるduty比とモータ回転数の関係に再現性（一意性）があれば、以上のように電磁比例弁にduty比を与えることでモータを目標回転数 N_p で駆動することができる。しかし、油圧システムは油温や負荷の影響を受けるのが一般的である。そこで、所定の負荷をかけた状態でモータを駆動し、duty比とモータ回転数の関係に再現性があるかを調べた。なお、再現性を調べるため試験は3回

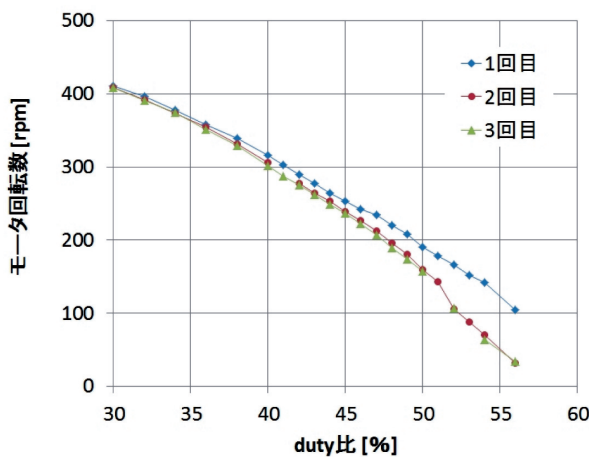


図17 duty比とモータ回転数の関係

行い、1回目の実験後、2日後に2、3回目を連続して行った。

図17にduty比とモータ回転数の関係を示す。図より1回目の実験データと2回目、3回目の実験データが大きく異なっており、再現性がないことがわかる。これは、電磁比例弁に同じ値のduty比を与えてもモータが同じ回転数で回転しないこと、すなわち、モータを意図した回転数で駆動できないことを意味する。この原因として、気温や油圧システムの稼働時間の長短によって油温が大きく変動することや電磁比例弁の精度の問題などが考えられる。

したがって、ここではduty比とモータ回転数の関係に再現性がない場合でも、確実にモータを意図した回転数（目標回転数 N_p ）で駆動することができるフィードバック制御を用いてモータを駆動した。

3.2.2 フィードバック制御によるモータ回転数制御

図18に、車速に連動した油圧モータ回転数制御のブロック線図を示す。車速V、株間距離L、芋サイズSを入力として式(1)、(2)からモータの目標回転数 N_p を計算し、 N_p を元に電磁比例弁へ与えるduty比Pを求めている。なお、Pは以下

の①、②で計算したP1とdPの加算値としている。

①P1: 「duty比とモータ回転数の関係（図17）」から求めたduty比

②dP: フィードバック制御で求めたduty比

P1は、図17に示す3回目の実験値を2次式で近似し、求めた近似式を元に計算したduty比である。電磁弁にP1を与えることでモータは回転するが、3.2.1項の議論より、モータが目標回転数 N_p で回転する保証はない。

dPは、モータ回転数の現在値 N_c が目標回転数 N_p とずれている場合、その差（偏差 $e = N_p - N_c$ ）が0となるように調整するためのduty比である。現在値を目標回転数にフィードバックし、その差を元に制御することからフィードバック制御^{1~4)}と呼ばれる。図19にフィードバック制御のアルゴリズムを示す。過去2秒間の偏差eの平均値EaveにゲインK

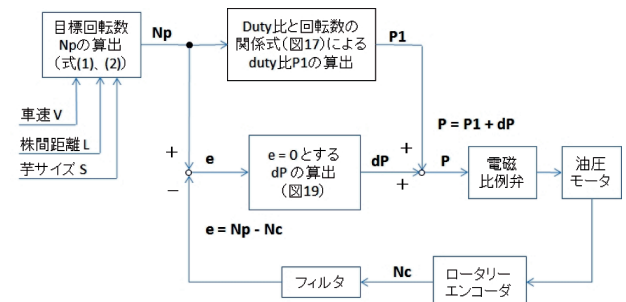


図18 制御アルゴリズム

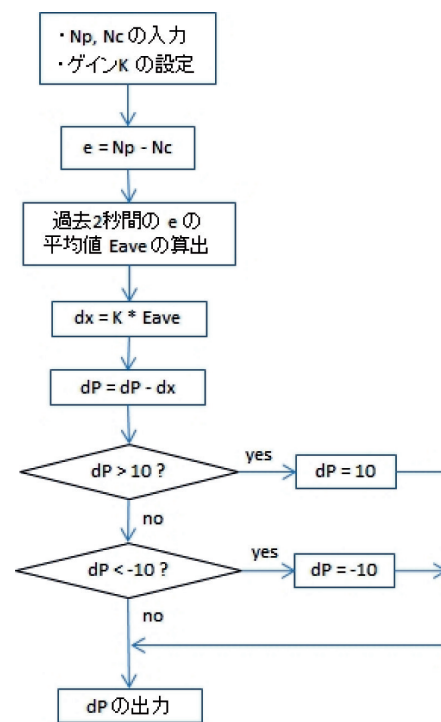


図19 フィードバック制御アルゴリズム

を乗じた量をdxとし、制御周期ごとにdxを加算してdPを算出している。ゲインKは実験により試行錯誤で求めた。なお、電磁弁破損防止のため、dPが±10%以下となるように制限している。

一般的に使用されるフィードバック制御としてPID制御⁵⁾があげられる。しかし、偏差がある状態でPID制御を施した場合、積分効果で操作量が蓄積されて一時的に $e = 0$ となることが期待できるが、 $e = 0$ の状態が継続すると操作量が0となる。したがって、再び偏差が発生するため制御量（ここではモータ回転数）が振動的になる懸念がある。本アルゴリズムは偏差の過去2秒間の平均値を元に操作量dxを計算し、逐次dPに加算して、加算後のdPの値を保持することができる⁶⁾。したがって、制御量が振動的になることはない。

3.2.3 モータ回転数制御試験

前項で説明した制御手法で油圧式コンベア速度制御システムを制御した場合、車速に連動して油圧モータの回転数が変化するか、また、モータ回転数が目標回転数に一致するかを確認するため室内実証試験を行った。

図20に操作端末と制御基盤を示す。操作端末では、株間距

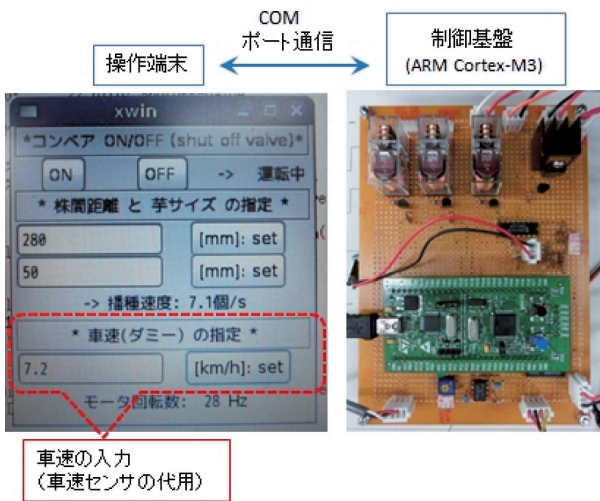


図20 操作端末および制御基盤

離と芋サイズが入力可能である。また、室内試験である都合上、車速情報は操作端末から手動で入力できるようにした。ロータリーエンコーダや電磁比例弁等の入出力機器はARMマイコン制御基盤 (STM32discovery : ARM Cortex-M3) で制御し、操作端末と制御基盤の通信はCOMポートで行った。

図21に電磁比例弁へ与えるduty比を $P=P1$ (フィードバック制御無し) としてモータを駆動したとき、すなわち図17に示す実験値の近似式から計算したduty比のみを電磁比例弁に与えてモータを駆動したときのモータ回転数を示す。車速に連動してモータ回転数が変化しているが、目標回転数とは一致していないことがわかる。

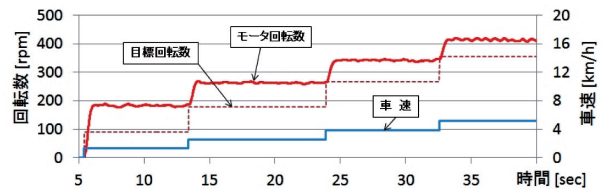


図21 回転数制御試験 1 (P=P1: フィードバック制御無)

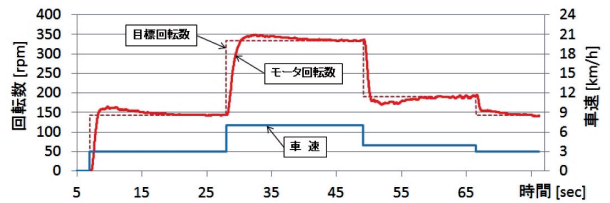


図22 回転数制御試験 2 (P=P1+dP)

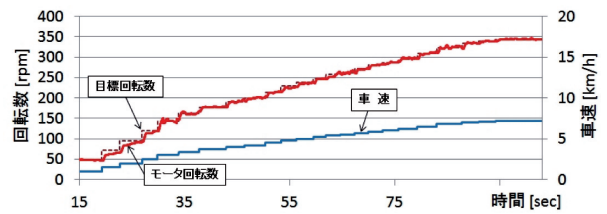


図23 回転数制御試験 3 (P=P1+dP)

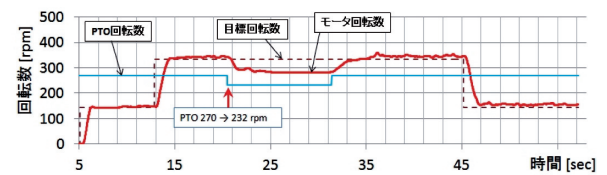


図24 PTO回転数変化時 (P=P1: フィードバック制御無)

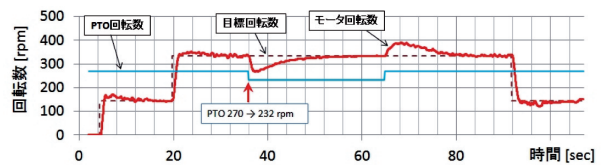


図25 PTO回転数変化時 (P=P1+dP)

図22は $P = P + dP$ (フィードバック制御有り) としてモータを駆動したときのモータ回転数である。車速の急激な変化 (28秒地点で車速が 3 km/h から 7 km/h に変化) に伴い目標回転数がステップ状に変化しているため多少のオーバーシュートが観察されるが、時間経過とともにフィードバック制御の効果でモータ回転数が目標回転数に収束していることがわかる。

図23に実際の播種作業を想定して車速を漸増させ、図22と同じく $P = P + dP$ としてモータを駆動したときのモータ回転数を示す。モータ回転数はオーバーシュートすることなく目標回転数に追従していることがわかる。

ところで、傾斜地走行時等ではトラクタのエンジン負荷変動に伴いPTO回転数が変動し、油圧ポンプから突出する油

の流量と圧力が変動する。その結果、油圧モータで駆動されるコンベアの搬送速度が大きく変動する。この場合、フィードバック制御を施すことでコンベア搬送速度の変動を抑制することが可能に確かめた。

図24に $P = P1$ （フィードバック制御無し）としてモータを駆動し、途中でPTO回転数を270rpmから232rpm（14%減）へ変化させたときのモータ回転数を示す。図24よりPTO回転数の低下に伴いモータ回転数も低下していることがわかる。

図25に $P = P + dP$ として、同じくPTO回転数を変化させたときのモータ回転数を示す。図25より、PTO回転数変化時直後にモータ回転数は低下するが、時間経過とともにフィードバック制御の効果で目標回転数に復帰・収束することがわかる。

以上より、油圧式コンベア速度制御システムに図19に示すアルゴリズムに基づくフィードバック制御を施すことで、車速に連動して搬送コンベアの速度を制御できること、さらにPTO回転数変動しても搬送コンベアの速度が一定値を保つことが確認できた。

4. 屋外走行型プロトタイプ試作機による種芋播種試験

高速播種・搬送機構と油圧式コンベア速度制御システムを搭載した屋外走行型の2畦用プロトタイプ試作機を製作し、圃場での種芋性能確認試験を行った。なお、制御系はISOBUS通信仕様とし、トラクタに搭載した操作端末でプラントに搭載した制御基盤を制御した。

4.1 動力伝達系

高速搬送・播種機構を構成する5個のコンベア（播種ベルト×2、還流コンベア×2、供給コンベア×1）は、油圧式コンベア速度制御システムに搭載した1個の油圧モータで駆動するものとし、油圧モータの動力は、動力伝達系の簡素化とメンテナンス性を考慮し、スプロケットとチェーンを使用して各コンベアへ分岐させた。図26にPTO軸から各コンベアへの動力伝達系のブロック線図を示す。

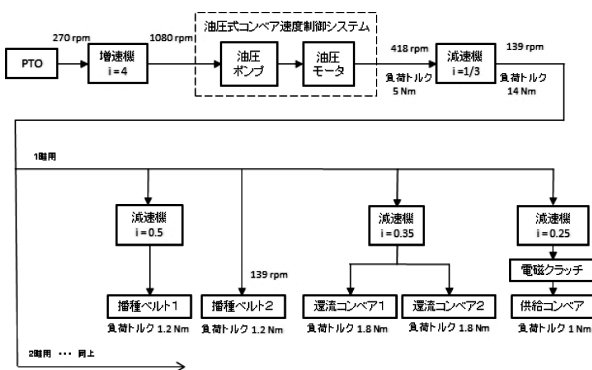


図26 PTO軸から各コンベア類への動力伝達系

各コンベアの種芋搬送力を20~40Nと仮定すると、モータへの負荷トルクは2畦合わせて5 Nm程度である。一方、モータ回転数を418rpmとすることで車速7 km/hでの高速播種に対応したコンベア搬送速度を得ることができる。この場合、全体の動力伝達効率を30%と仮定すると、モータに必要な動力は730Wとなる。以上より、油圧式コンベア速度制御システムには、最高1.2kWの動力が出力できるモータを搭載した。

4.2 屋外走行型プロトタイプ試作機

図27に開発した2畦用の屋外走行型プロトタイプ試作機を示す。機体重量は970kgであり、ホッパへ種芋を満載した場合、1400kg程度の重量となる。したがって、72PS以上のトラクタであれば3点ヒッチ（トラクタ後部に設置された作業機懸架用アーム）で持ち上げることができる。海外製の大型

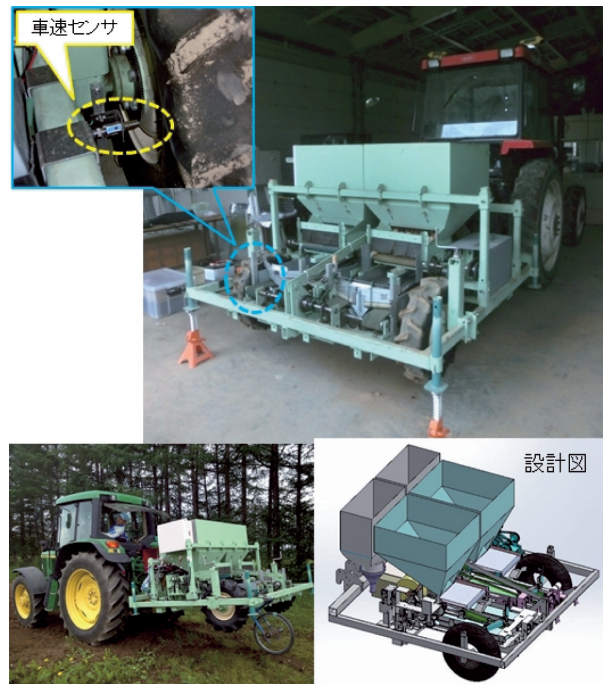


図27 屋外走行型プロトタイプ試作機

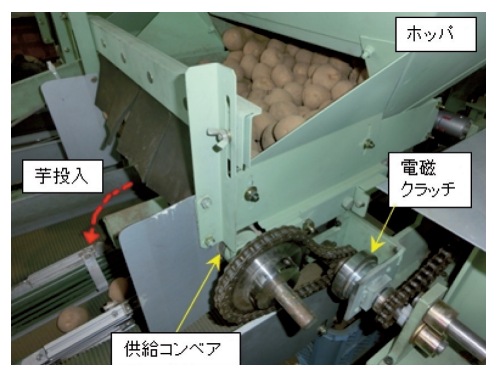


図28 ホッパと供給コンベア

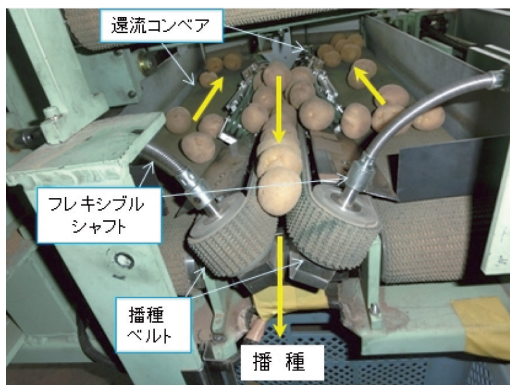


図29 播種ベルトと還流コンベア

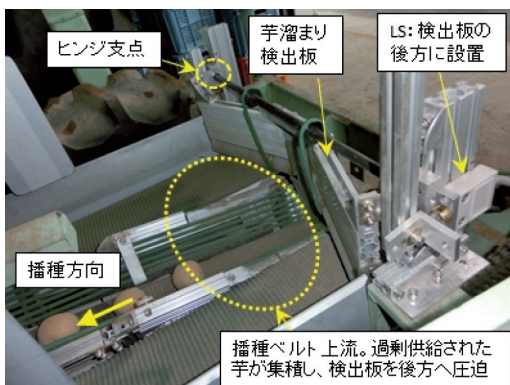


図30 芋溜まり検出板とリミットスイッチ (LS)

播種機は重量が大きく、トラクタで持ち上げることは不可能である。したがって、播種機を牽引したまま旋回するため旋回時に大きな面積を必要とする。播種機をトラクタで持ち上げることができれば、トラクタの旋回半径で小旋回できるため、圃場端の旋回用枕値面積を極力小さくすることが可能となる。これは、圃場面積の有効利用を図ろうとする日本の慣行農法にしたがった播種作業を行うことができることを意味する。

また、車輪には車速を検出するための磁気センサを装着しており、車速に応じたコンベア搬送速度の制御が可能である。

図28にホップと供給コンベア、図29に播種ベルトと還流コンベアを示す。コンベア類の構成・レイアウトは2.2節で説明した高速播種・搬送機構と同様である。

なお、プロトタイプ試作機に搭載したコンベア類はすべて1個の油圧モータで駆動している。したがって、播種作業中の供給コンベアの運転・停止は電磁クラッチで行った。また、播種ベルトの駆動プーリが鉛直方向に対して27度傾斜しているため、フレキシブルシャフトを使用して動力伝達を行った。

図30に播種ベルト上流部（還流ベルト下流部）を示す。ホップから種芋が過剰供給された場合、図中の点線付近に種芋が集積する。その結果、芋溜まり検出板が圧迫され、後方に設置されたLSがオンとなる。LSオンと同時に供給コンベア駆動軸に設置した電磁クラッチを開放することで供給コンベアが停止し、種芋の過剰供給を抑制することが可能である。

4.3 ISOBUS通信によるプロトタイプ試作機の制御

4.3.1 ISOBUS規格

ISOBUS規格 (ISO-11783) はトラクタに設置した操作端末（バーチャルターミナルという。以下、VTと表記）と作業機に設置した作業機ECU（電子制御ユニット。作業機を制御する制御基盤）の通信に関わる国際標準規格であり、現在、欧米を中心に急速な勢いで普及しつつある。ISOBUSに準拠することで、メーカを問わず様々な作業機を同じトラク

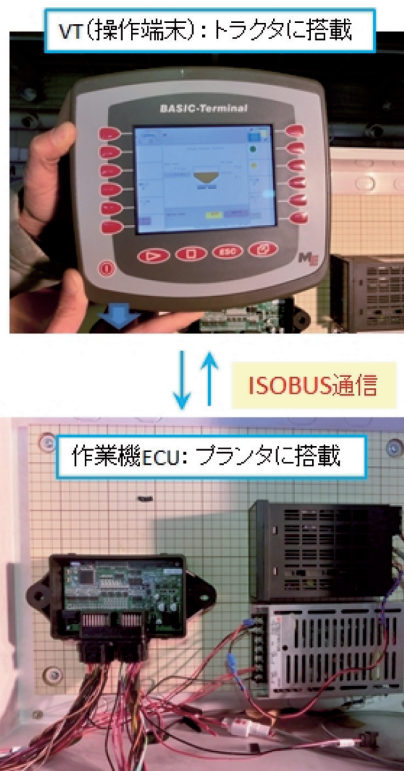


図31 VT（操作端末）と作業機ECU

表2 VT～作業機ECU間通信メッセージ

●メイン画面

1. VT(操作端末) から 作業機ECU へのメッセージ

名称	データ	内容	備考	送信形態
コンベアON	1 or 0	・ボタン押下で、1 送信(シャットオフバルブON) →「コンベアON確認」= 1 受信でボタン点灯 ・再度押下で、0 送信(シャットオフバルブOFF) →「コンベアON確認」= 0 受信でボタン消灯	・ボタン ・「コンベアON確認」は作業機ECUから受信	不定期
株間設定	2byte	・ボタン押下で株間データ送信	ボタン	不定期
芋サイズ設定	1byte	・ボタン押下で芋サイズデータ送信	ボタン	不定期
播種数リセット	1 or 0	・ボタン押下で、播種数(光電センサ値)リセット (2秒同時にリセット)	ボタン	不定期

※ 補足

株間(mm)	データ範囲: 250 ~ 350	ボタン押下で10増分
芋サイズ(mm)	データ範囲: 30 ~ 60	ボタン押下で5増分

2. 作業機ECU から VT(操作端末) へのメッセージ

名称	データ	内容	備考	送信形態
コンベアON確認	1 or 0	・「コンベアON」= 1 受信 → 仮懸端未へ1 送信(ボタン点灯) ・「コンベアON」= 0 受信 → 仮懸端未へ0 送信(ボタン消灯)	・「コンベアON」はVTから受信	不定期
播種数(1畦)	2byte	1畦の手の播種数(光電センサでのカウント値)		定期
播種数(2畦)	2byte	2畦の手の播種数(光電センサでのカウント値)		定期

●デバッグ画面

2. 作業機ECU から VT(操作端末) へのメッセージ

名称	データ	内容	備考	送信形態
モータ回転数	2byte	rpm		定期
LS1	1 or 0	芋溜り検出板開閉検知LS(1畦用)ON/OFF状態		定期
LS2	1 or 0	芋溜り検出板開閉検知LS(2畦用)ON/OFF状態		定期
シャットオフバルブ	1 or 0	油圧モータのON/OFF状態		定期
クラッチ1	1 or 0	ホップコンベア1のON/OFF状態		定期
クラッチ2	1 or 0	ホップコンベア2のON/OFF状態		定期

表3 入出力機器

タで制御することが可能となる。また、大規模農場の最適管理に適した情報化農業や精密農業を行うための農業用情報端末機器類の多くがISOBUSに準拠していることあり、農場経営の大規模化が進む北海道においても、今後、ISOBUS仕様の作業機の導入が進んでいくものと考えられる。以上より、プロトタイプ試作機を制御するにあたり、制御系はISOBUS通信仕様とした。

図31にVT（操作端末）とプロトタイプ試作機を制御するために開発した作業機ECUを示す。また、表2にVTと作業機ECU間で送受信される通信メッセージを示す。

VTには表2に記載した「コンベアON、株間設定、芋サイズ設定、播種数リセット」メッセージに対応するボタンを用意した。たとえば、ユーザーが「コンベアON」ボタンを押した場合、VTから作業機ECUへ「コンベアON」メッセージが送信される。このメッセージを受信した作業機ECUは、シャットオフバルブ（図16参照）をオンにしてコンベアを駆動すると同時に、「コンベアON確認」メッセージをVTへ送信する。「コンベアON確認」メッセージを受信したVTは「コンベアON」ボタンをハイライト（点灯）し、ユーザーにコンベアが駆動されていることを知らせる。

以上のように、表2のメッセージを送受信することで、ユーザーはVTを使用してプロトタイプ試作機を制御することが可能である。

4.3.2 制御方法

次にプロトタイプ試作機の制御方法について説明する。表3はプロトタイプ試作機の制御に使用したセンサ、アクチュエータ等の入出力機器の機能と仕様である。これらの入出力機器を使用して、次の制御を行っている。

- ① 全搬送コンベアの運転・停止制御
- ② 車速に連動した搬送コンベアの速度制御
- ③ ホッパから播種ベルトへの種芋供給量制御
- ④ 種芋播種数の計測

以下に各々の制御方法について記す。

- ① 全搬送コンベアの運転・停止制御

PTO動力軸を回転させた後、ユーザーがVTに配置された「コンベアON」ボタンを押すことでシャットオフバルブ（図16参照）がオンとなり、油圧モータ（全搬送コンベア）が駆動される。再度、同じボタンを押すことで停止する。
- ② 車速に連動した搬送コンベアの速度制御

ユーザーはVT上で株間距離と芋サイズを入力し、「株間設定」ボタンと「芋サイズ設定」ボタンを押すだけでよい。運転開始後、3.2節に記載した制御手法で自

入 力

機 器	機 能	入力ポート	電 源	仕 様	メーカ(型番)
ロータリーエンコーダ (インクリメンタル)	・モータ回転数の計測 ・目的:モータ回転数制御	タイマ Input Capture	5~ 24V	・100 p/rev ・NPN 出力 ・レンジ 0~1500Hz	オムロン E6C2-CWZ6C
磁気センサ (アンプよりアナログ出力)	・車輪回転数の計測 ・目的:車速の計測	A/D	12V	・0~300Hz ・0~5V 出力	小野測器
LS1	・芋溜まり検出板開閉検知 ・目的:供給ホッパー制御 クワッチ1の ON/OFF制御	GPIO			オムロン D4C-1302
LS2	・芋溜まり検出板開閉検知 ・目的:供給ホッパー制御 クワッチ2の ON/OFF制御	GPIO			同上
光電センサ(透過型)	・播種された芋の検出 ・目的:播種数計測 (1畦目用)	GPIO	10~ 30V	・PNPオーブ ン コレクタ	キーエンス PZ-G51P
光電センサ(透過型)	・播種された芋の検出 ・目的:播種数計測 (2畦目用)	GPIO	同上	同上	同上

出 力

機 器	機 能	出力ポート	電 源	コイル仕様	メーカ(型番)
電磁比例弁 (ソレノイド・コイル)	・モータ回転数制御	タイマ: PWM (トランジスタ 駆動)	12V	・1.58A (最大) ・無極性	KYBエンジニアリング グアトサービス CCP012L
シャットオフバルブ (ソレノイド・コイル)	・モータのON/OFF制御 (全コンベアのON/OFF)	GPIO (リレーコイル 駆動)	12V	・1.58A ・無極性	KYBエンジニアリング グアトサービス CSC012L
クラッチ1 (ソレノイド・コイル)	・ホッパコンベア1の ON/OFF制御	GPIO (リレーコイル 駆動)	24V	・0.46A(保 持) ・無極性	三木ブーリ 101-06-13G
クラッチ2 (ソレノイド・コイル)	・ホッパコンベア2の ON/OFF制御	GPIO (リレーコイル 駆動)	同上	同上	同上

動的に車速に連動した全搬送コンベアの速度制御が行われる。

③ ホッパから播種ベルトへの種芋供給量制御

2.2節に記載した制御方法で自動的に種芋の供給量制御が行われる。なお、供給コンベアは、LSオンの状態が続いている間、あるいはLSオン（立ち上がり後）後の2秒間停止するようにしている。図32に供給コンベア

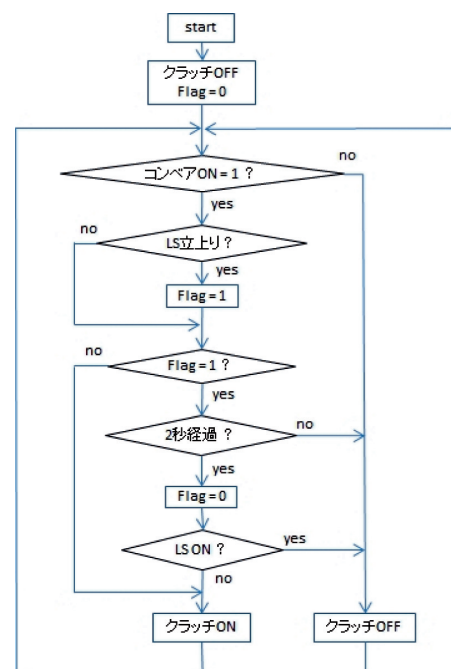


図32 クラッチ制御アルゴリズム

を運転・停止するクラッチの制御アルゴリズムを示す。

④ 種芋播種数の計測

種芋播種位置（図9参照）に設置した光電センサで種芋播種数をカウントする。

これらの制御を行うことで、ユーザーはVTを使用してプロトタイプ試作機を制御することが可能である。

4.4 種芋播種試験

屋外走行型プロトタイプ試作機による圃場での種芋播種性能確認試験を行った。試験は株間距離を30cmに設定して車速3, 5, 7 km/hで30m走行し、その間に播種した種芋の株間距離のばらつきを評価するものである。なお、ばらつきを評価するにあたり、10mを1区間とし、1区間毎に株間距離を測定して標準偏差と変動係数CV値を求めた。

表4 種芋播種試験結果1

	株間間隔	車速 [km/h]		
		3	5	7
区間1	平均 [cm]	31.2	31.1	31.2
	標準偏差 [cm]	7.8	9.8	12.4
	CV値 [%]	24.9	31.4	39.9
区間2	平均 [cm]	32.7	26.6	28.6
	標準偏差 [cm]	8.0	6.0	8.2
	CV値 [%]	24.6	22.5	28.9
区間3	平均 [cm]	29.2	29.6	28.5
	標準偏差 [cm]	7.3	8.4	11.1
	CV値 [%]	25.1	28.3	38.9
各区間 平均値	平均 [cm]	31.0	29.1	29.4
	標準偏差 [cm]	7.7	8.3	10.6
	CV値 [%]	24.9	28.5	36.1

表4に試験結果を示す。車速3 km/hではCV値の各区間の平均値が24.9%であるのに対し、車速7 km/hでは36.1%となった。特に、区間1（最初の10m区間）ではCV値が40%近くとなっており、株間距離が大きくばらついていることがわかる。この原因として、地面に着地した直後の種芋の転がりが考えられる。

種芋を播種する際、作溝器で土を掻き分けて播種用の溝を作り、その溝の中に種芋を落下・播種する。作成された直後の溝は凹凸が少なく種芋が転がりやすい。一方、地面に着地する直前の種芋はプランタと同じ速度で運動しているため、地面に着地すると同時に凹凸の少ない溝の中で転がり始める。そのため、車速が大きくなるにしたがって種芋の転がる距離が大きくなり、株間距離のばらつきが大きくなると考えられる。図33に、車速7 km/hで播種した種芋が、作溝器で作成された溝の中を転がる様子を示す。

地面に着地した直後の種芋の転がりを抑制することで、株間距離のばらつきを小さくすることが期待できる。図34に着地直後の種芋をすみやかに土で覆うことで転がりを抑制するために開発した覆土棒を示す。くの字の形状をしており、一

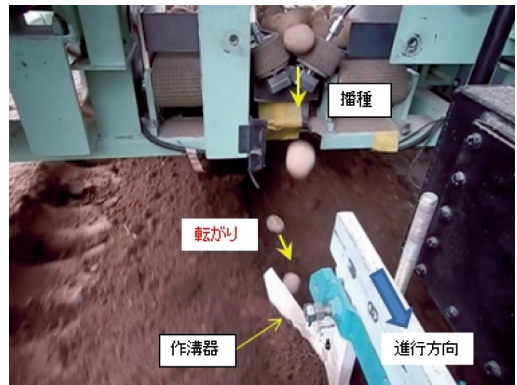


図33 種芋が作溝器で作成された溝の中を転がる様子

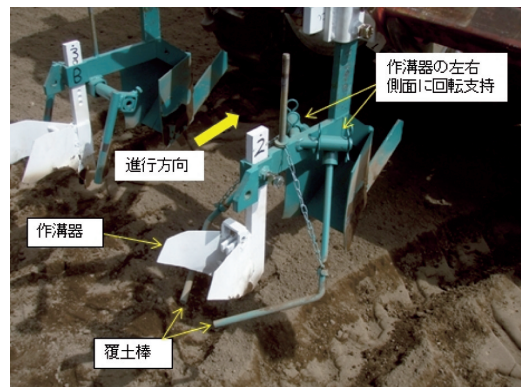


図34 覆土棒

端を作溝器フレームに回転支持し、中間部をチェーンで支持している。図35に車速7 km/hでの播種時に、覆土棒が着地直後の種芋を土で覆う様子を示す。

表5にプランタに覆土棒を装着して種芋を播種した結果を示す。表4と比較して、いずれの車速においてもCV値が小さく、株間距離のばらつきが抑制されていることが確認できる。特に、車速7 km/hでは覆土棒の装着の有無によってCV値が36.1%から24%へと激減しているなど、覆土棒を装着することで高速走行播種時における種芋の転がりが効果的に抑制され、その結果、株間距離のばらつきが小さくなっていることが確認できる。なお、海外製の高速播種機の株間距離

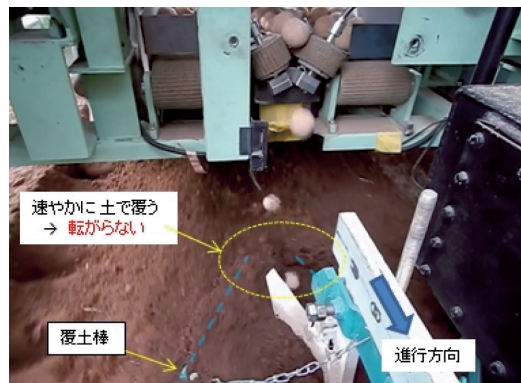


図35 覆土棒が着地直後の種芋を土で覆う様子

表 5 種芋播種試験結果 2 (覆土棒有り)

	株間間隔	車 速 [km/h]		
		3	5	7
区間1	平均 [cm]	28.7	29.3	31.4
	標準偏差 [cm]	5.3	8.1	7.2
	CV値 [%]	18.4	27.6	23.1
区間2	平均 [cm]	29.1	30.9	28.5
	標準偏差 [cm]	7.6	6.4	5.5
	CV値 [%]	26.0	20.8	19.6
区間3	平均 [cm]	28.1	30.0	28.2
	標準偏差 [cm]	5.4	9.2	7.9
	CV値 [%]	19.3	30.5	28.1
各区間 平均値	平均 [cm]	28.6	30.1	29.4
	標準偏差 [cm]	6.1	7.9	7.0
	CV値 [%]	21.3	26.1	24.0



図36 種芋播種試験風景



図37 播種後の種芋 (車速 7 km/h)

CV値が25%程度であることから、プロトタイプ試作機は実用上問題ない播種精度を実現しているといえる。

図36に種芋播種試験風景、図37に播種後の種芋 (車速 7 km/h) を示す。

5. まとめ

本報告では、高速播種可能なISOBUS対応型ポテトプランタの開発を行い、以下のことを確認した。

- (1) 以下から構成される高速搬送・播種機構を開発し、屋内での播種性能評価試験を行ったところ、播種間隔のばらつきは17%であった。
 - ①種芋をV字状に配置した速度差のある一对の平ベルトで挟み、回転・攪拌しながら搬送することで隙間なく一列に整列させる播種ベルト
 - ②播種ベルトからこぼれ落ちた余剰な芋を上流へ搬送する還流コンベア
 - ③ホッパーから適切な量の種芋を播種ベルトへ供給する供給コンベア
- (2) 車速に連動してコンベア搬送速度を制御する油圧式コンベア速度制御システムを開発し、フィードバック制御を用いて制御した結果、車速に連動してコンベアの搬送速度が制御可能であり、さらにPTO軸回転数が変動してもコンベア搬送速度は一定値を保持した。
- (3) 高速搬送・播種機構と油圧式コンベア速度制御システムを搭載したISOBUS通信仕様の屋外走行型プロトタイプ試作機とともに、地面に着地した種芋の転がりを抑制する覆土機構を開発し、圃場での播種性能確認試験を行った結果、車速 7 km/hでの高速播種時における播種間隔のばらつきが24%となり、海外製の高速播種機と同等の播種精度であった。

実用化にあたっては、以下の技術的課題を解決する必要がある。

- 種芋のサイズに応じてユーザーが簡単に播種ベルトの間隔を調整できる機構の開発
- フレーム等のさらなる軽量化
- 高速散布に対応した施肥機構の開発
- 溶接構造を主体として部品点数を削減し、かつ、強固な構造とするなど、堅牢性・メンテナンス性を考慮した各種機構の再設計

今後も引き続き、実用化に向けた開発を進めていく予定である。

謝辞

本研究で振動の計測・データ処理に使用した機械性能記録装置は、財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。また、高速搬送・播種機構をはじめとする各種試作機の設計・解析に使用した3次元CAD解析システムは地域産学官共同研究拠点整備事業により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 中西洋介ほか3名：ダイナミックダンパーによる振動低減技術の開発，北海道立工業試験場報告，No312，pp77-83，(2013)
- 2) 中西洋介ほか5名：農業機械の姿勢・振動制御技術の開発，北海道立工業試験場報告，No310，pp23-30，(2011)
- 3) 中西洋介ほか2名：モーダル解析を用いた柔軟作業アームの制振制御，北海道立工業試験場報告，No307，pp13-19，(2008)
- 4) 中西洋介ほか3名：柔軟作業アームの制振制御，北海道立工業試験場報告，No305，pp25-38，(2006)
- 5) 中西洋介ほか3名：低コストセンサ類を使用した農用車両の自律走行，北海道立工業試験場報告，No302，pp23-32，(2003)
- 6) 中西洋介ほか10名：農作業車両自律走行作業支援システムの開発，北海道立工業試験場報告，No300，pp43-51，(2001)

リバーエンジニアリングにおける3D CAD/CAMデータ作成支援ツールの開発

安田 星季, 万城目 聡, 神生 直敏, 櫻庭 洋平, 岩越 睦郎
 浦田 昇尚*, 伊達 宏昭*, 金井 理*, 後藤 孝行**

Development of 3D CAD/CAM Data Creation Support Tools for Reverse Engineering

Seiki YASUDA, Akira MANJOME, Naotoshi KAMIO
 Yohei SAKURABA, Mutsuro IWAKOSHI
 Akihisa URATA*, Hiroaki DATE*, Satoshi KANAI*, Takayuki GOTOH**

抄 録

製品開発を効率的に進めるためのプロセスの一つである「リバーエンジニアリング」(以下, RE)では各種のデータを作成する。これらのデータは, 現物の素材や形状に応じた作業方法を選択しながら作成するため, 多くの時間を要している。本研究では, このデータ作成時間を短縮するため, 4つのデータ作成支援ツール(マニュアル1種, ソフト3種)を開発した。また, データ作成に特に多くの時間を要する鋳造品を対象として, 開発ソフトの効果を検証する実験を行い, RE全体のデータ作成時間の短縮に有効であることを確認した。

キーワード: リバーエンジニアリング, 非接触3次元測定, 3D CAD/CAM, 鋳造品

Abstract

“Reverse engineering” is one of the process that advance the product development efficiently. In reverse engineering process, a few kinds of data are created and most of these data creation works are performed manually, so it takes a lot of time.

In this study, we developed four data creation support tools (1manual, 3software), in order to shorten the data creation work time in the process. And we also performed a verification experiment to confirm the effect of the developed software, and we found that it is effective to shorten the time.

KEY-WORDS: Reverse Engineering, Non-Contact 3D Measurement, 3D CAD/CAM, Castings

1. はじめに

製品開発を効率的に進めるため, 3次元データを用いた「3Dものづくり」が普及してきている。

「3Dものづくり」を行うためには, 3次元CADデータが不可欠である。椅子などの手加工による試作品の3次元CADデータは, 現物やクレイモデルの形状を非接触3次元測定機などで測定し, それを基に3次元CADソフトで作成することが多い。椅子の試作品例を図1に示す。そのほかに, 図面がない古い部品や手作業で修正された部品も, 現物の形状を

参照して3次元CADデータを作成する場合がある。

このように, 現物の形状を参照して3次元CADデータを作成する製品開発プロセスを, 「リバーエンジニアリング」(以下, RE)と言う。

REでは, その工程の中で複数のデータを作成するが, これらのデータは, 現物の素材や形状



図1 椅子の試作品

* 北海道大学, * Hokkaido University

** 旭川工業高等専門学校, ** Asahikawa National College of Technology

事業名: 重点研究

課題名: リバーエンジニアリングの迅速化を図る3次元CAD/CAMデータ作成支援システムの開発

に応じて、人が作業方法を選択しながら作成することが多いため、多くの時間を要している。製品開発期間を短縮するためには、REの迅速化が必要である。

本研究では、REにおけるデータ作成時間を短縮するため、4つのデータ作成支援ツール（マニュアル1種、ソフト3種）を開発した。また、開発した支援ツールの内の、3つのソフトの効果を検証した。

2. リバースエンジニアリングで作成するデータ

REの作業工程と各工程で作成されるデータを図2に示す。

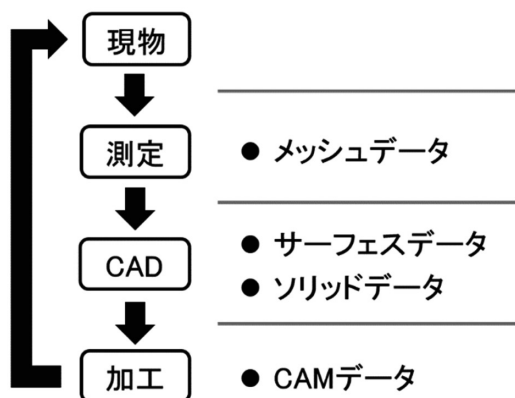


図2 REの作業工程と各工程で作成されるデータ

REは大まかに、「測定」、「CAD」、「加工」の3工程に分けられる。「測定」工程では、現物を測定し、形状データを取得する。「CAD」工程では、各種のCADソフトを用いて3次元CADデータを作成する。「加工」工程では、3次元CADデータを元に加工を行い、再度現物を製作する。

「測定」工程で作成するメッシュデータは、非接触3次元測定などで得られた測定点群データをつなぎ合わせて作成される三角形メッシュの集合で、一般的に数十万～数百万個の三角形メッシュで構成される。

「CAD」工程で初めに作成するサーフェスデータは、メッシュデータに近似した曲面の集合で、メッシュデータに比べて軽量である。

次にサーフェスデータを参照して作成するソリッドデータは、体積を持った3次元CADデータで、円筒や直方体などの基本形状とそれ以外の自由曲面形状からなる。

「加工」工程で作成するCAMデータは、NC加工機を動かすNCプログラムを作成するデータで、CAMソフトで作成する。

上記の各データの例を図3に示す。本研究では、これら4つのデータ作成作業を対象とした。

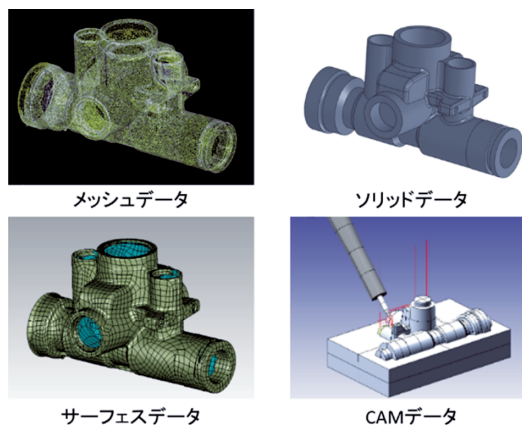


図3 REで作成するデータ例

3. 目的

3.1 REにおけるデータ作成作業の時間短縮に関する課題

REにおけるメッシュデータ作成からソリッドデータ作成までの工程では、作成するデータの「品質」と「容量」が後工程の作業時間に影響する。メッシュデータの品質が低いと、後工程のサーフェスデータ作成工程においてデータの補修作業が必要となるため、作業時間が増加する。サーフェスデータの容量が大きいと、後工程のソリッドデータ作成工程においてソフトの描画などの処理時間が増加するため、作業時間が増加する。このことから、データ作成時間を短縮するためには、高品質なメッシュデータと軽量のサーフェスデータを作成する必要がある。

また、加工で必要となるCAMデータの作成では、荒加工などの加工方法の選択や加工手順の決定など、人が試行錯誤しながらデータを作成するため、多くの時間を要する。このことから、CAMデータ作成時間を短縮するには、一度作成したデータを再利用するなどして、作業を効率化する必要がある。

以上のことから、REのデータ作成時間を短縮するには、これまでの経験で獲得した作業方法に関する多くの知見や、過去に作成した最適なデータなどを活用して、作業を効率化する必要がある。

3.2 鋳造品のデータ作成作業の時間短縮に関する課題

鋳造品は自由曲面形状の部分が多く、穴加工などの機械加工が行われるため、複雑な形状の部品が多い。このため、鋳造品のREにおけるデータ作成作業には特に多くの時間を要する。また、鋳造品はREのニーズの高い部品である。2010年4月～2014年3月に当試験場のRE関連設備を使用してサーフェスデータを作成した件数は146件であり、そのうち約30%が鋳造品だった。また、そのうち約7%が機械加工がある部品だった。

鋳造品のREにおけるデータ作成時間を短縮するためには、

サーフェスデータの容量が増大する原因となる部位のデータを分離するなどして、作業を効率化する必要がある。

本研究では、上記の課題を解決するためのツール開発を目的とした。

4. 開発したデータ作成支援ツール

本章では、4種類のデータ作成作業を支援するために開発した4つのデータ作成支援ツールについて述べる。

4.1 非接触3次元測定実践マニュアル

4.1.1 高品質なメッシュデータ作成の課題

サーフェスデータ作成の作業時間を短縮するためには、高品質なメッシュデータを作成する必要がある。

メッシュデータの品質に大きく影響する要素は2つあり、その一つは測定データの欠損・ノイズである。非接触3次元測定では、測定方式の特性により、測定物に光沢があるとハレーションが起り、測定データに欠損やノイズが生じる場合が多い。この欠損・ノイズが多いとメッシュデータの品質が低くなる。二つめは、測定データのつなぎ合わせ誤差である。メッシュデータ作成工程では、複数の測定データをつなぎ合わせて測定物全体のメッシュデータを作成するため、その誤差が大きいとメッシュデータの品質が低くなる。特に、測定データに位置合わせの手掛かりがない場合は大きな誤差が生じやすい。

これらのことから、高品質なメッシュデータを作成するためには、非接触3次元測定において欠損・ノイズが少ない測定点群データを取得し、測定データのつなぎ合わせ誤差を最小化する必要がある。

上記の課題を解決するための作業方法を示した「非接触3次元測定実践マニュアル」を作成した。作成したマニュアルを図4に示す。



図4 非接触3次元測定実践マニュアル

4.1.2 マニュアルの内容例 一反射防止塗装見本一

測定物の光沢による測定データの欠損・ノイズを削減するため、測定物に反射防止剤を塗布することが多い。しかし、反射防止塗装の膜厚が薄く、下地を透過する部分があるとそこに欠損・ノイズが残る。そこで、反射防止剤を適切に塗布するための反射防止塗装見本を作成した。

光沢素材（鏡面仕上げのステンレス板、厚さ1mm）と透明素材（透明アクリル板、厚さ2mm）に反射防止剤を膜厚約5μm、約10μm、約15μm、約20μm、約30μmで塗布して、それぞれのデータ取得率を調べた。なお、膜厚は1回塗り、2回塗りなど塗装回数を変えて作成した見本の塗装部と無塗装部の境界を、実体顕微鏡（オリンパス製、SZX16）で断面観察して確認した。これにより、光沢素材に膜厚10μmの反射防止塗装をした場合のデータ取得率は、膜厚30μmに比べて約80%であることなどがわかった。作成した塗装見本と各塗装見本のデータ取得率をまとめたものを図5に示す。

これらの資料を参考にして、薄過ぎず、厚過ぎないように適切に反射防止塗装することで、非接触3次元測定で欠損・ノイズが少ない測定データを取得できるようになった。

透明素材			光沢素材		
無塗装	塗装見本	測定データ取得割合(平均)	無塗装	塗装見本	測定データ取得割合(平均)
		約5% (最大12%)			約50% (最大95%)
		約60% (最大90%)			約80% (最大100%)
		約95% (最大100%)			約95% (最大100%)
		約100%			約100%
		100%			100%

無塗装	塗装見本	データ取得率
		約80% (最大100%)

図5 塗装見本とデータ取得率

上記内容のほか、本マニュアルには下記のような情報を掲載した。

- 測定データが欠損しやすい素材と対策方法
- 測定方法選択チャート
- 位置合わせ補助器具の使用方法

本マニュアルを参考にすることで、欠損・ノイズが少ない測定データを取得し、測定データのつなぎ合わせ誤差を最小化できるようになり、非接触3次元測定の経験が浅い作業者でも高品質なメッシュデータを作成できるようになった。

4.2 コマンド履歴・偏差グラフ表示ソフト

4.2.1 軽量のサーフェスデータ作成の課題

ソリッドデータ作成の作業時間を短縮するためには、軽量のサーフェスデータを作成する必要がある。

サーフェスデータは、メッシュデータに近似した曲面の集

合であるため、メッシュデータとの間に差が生じるが、データを軽量にしようとするとその差が大きくなる。メッシュデータとの差が小さく、軽量のサーフェスデータを作成するためには、サーフェスデータ作成ソフトにおいて適切な手順でコマンドを実行し、各コマンドのパラメータを適切に設定する必要がある。しかし、一般的なサーフェスデータ作成ソフトには、作業中に実行したコマンドや各コマンドで設定したパラメータを表示し、確認できる機能がない。

そこで本研究では、代表的なサーフェスデータ作成ソフトの一つであるStudio 2012 (Geomagic製)を対象に、ソフトのコマンド履歴や設定パラメータ、サーフェスデータとメッシュデータの差を可視化する「コマンド履歴・偏差グラフ表示ソフト」を開発した。

4.2.2 「コマンド履歴・偏差グラフ表示ソフト」の機能

本ソフトは、サーフェスデータ作成ソフトが出力する操作ログファイルから、作業者が選択したコマンドや設定したパラメータ、サーフェスデータとメッシュデータの差の計算結果を抽出して画面に表示する。ソフトの画面例と機能の概要を図6に示す。そのほかに以下の特徴がある。

- 作業中のリアルタイムの情報を表示するモードと、過去に行った作業の情報を表示するモードがある。
- 過去に行った作業の情報に対し、メッシュデータとの差などに大きく影響する重要なコマンドのハイライト表示、不要なコマンドの非表示などができる。
- 抽出した情報および上記の表示状態を保存できる。

本ソフトにより、熟練者などが一度行った作業のコマンド履歴を作業の見本として参照できるほか、作成中のサーフェスデータとメッシュデータとの差をリアルタイムに把握できる。これらの機能により、メッシュデータとの差が小さく、軽量のサーフェスデータを効率的に作成できるようになった。



図6 ソフトの画面例と機能の概要

4.3 CAMデータ作成支援ソフト

4.3.1 CAMデータ作成作業の効率化の課題

CAMデータ作成工程では、荒加工などの加工方法の選択や加工手順の決定、工具回転数などの加工パラメータの入力、

加工範囲などを規定する補助図形の作成作業などに多くの時間を要している。多くのCAMソフトにはこれを解決する方法として、一度選択した加工方法と決定した加工手順、入力した加工パラメータを保存し、これらを必要な際にCAMソフトに読み込み、再利用できる機能が用意されているが、加工パラメータを一覧表示できない、一度作成した補助図形を読み込めないなど、一部に使いつらい点があった。

そこで本研究では、加工方法などの設定を再利用できるCAMソフトの一つであるhyperMILL 2012 (OPEN MIND Technologies製)を対象に、これらの点を改善した「CAMデータ作成支援ソフト」を開発した。

4.3.2 「CAMデータ作成支援ソフト」の機能

本ソフトは、CAMソフトで選択した加工方法や決定した加工手順、入力した加工パラメータ、作成した補助図形などを保存したテキストファイルから、加工方法、加工手順、加工パラメータを読み出して画面に一覧表示する。また、補助図形を保存するファイルのパスを読み出し、補助図形をソフト内に保持する。そして、必要な際にこれらのデータをCAMソフトに一括入力できる。ソフトの画面例と機能の概要を図7に示す。その他に以下の特徴がある。

- ソフト上で上記のテキストファイルのコピー、削除などができる。
- 一覧表上で加工パラメータを変更できる。

本ソフトにより、一度選択した加工方法と決定した加工手順、入力した加工パラメータを一覧表示したり、変更したりできるほか、一度作成した補助図形をCAMソフトに容易に読み込めるようになったことにより、CAMデータを効率的に作成できるようになった。



図7 ソフトの画面例と機能の概要

4.4 鋳肌領域・機械加工領域分離ソフト

4.4.1 鋳造品の軽量のサーフェスデータ作成の課題

複雑形状が多いため、REのデータ作成に特に多くの時間を要する鋳造品は、サーフェスデータの容量が増大する原因となる部位のデータを分離するなどして、作業を効率化する必要がある。

サーフェスデータの容量が大きくなる主な要因は、非接触

3次元測定で測定不可能な、穴の内側などに多く発生する「メッシュの欠損」である。こうした部分に曲面を作成すると、大きく歪んだ曲面が数多く生成されるが、大きく歪んだ曲面は歪みの小さい曲面に比べて曲面を定義するデータ量が大きい。このため、曲面の集合であるサーフェスデータの容量が大きくなる。図8に大きく歪んだ曲面の例を示す。

したがって、軽量のサーフェスデータを作成するためには、データの容量を増大する原因となるメッシュの欠損部を分離し、曲面を作成しないようにする必要がある。

そこで本研究では、メッシュの欠損が生じやすい機械加工領域と鋳肌領域に分離できる「鋳肌領域・機械加工領域分離ソフト」を開発した。

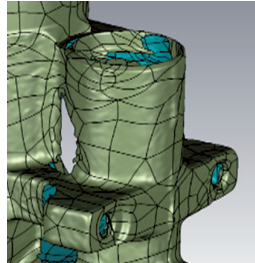


図8 大きく歪んだ曲面

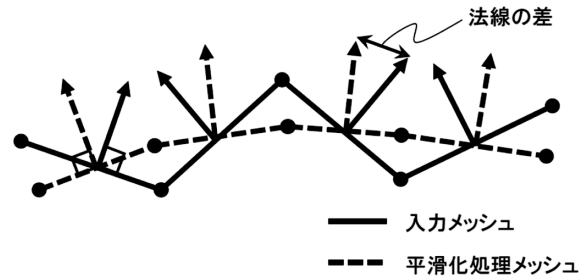


図10 法線の差

4.4.2 鋳肌領域・機械加工領域分離手法¹⁾

鋳肌領域・機械加工領域分離手法の流れを図9に示す。本手法は、メッシュの粗さ値（メッシュごとの面粗さを表す指標）の推定と機械加工領域抽出と面分類からなる。

メッシュの粗さ値推定では、入力メッシュの法線と平滑化処理したメッシュの法線の差を評価し、すべてのメッシュの粗さ値を推定する。法線の差の概念図を図10に示す。

機械加工領域抽出では、前工程で推定した粗さ値が比較的小さいメッシュに対し、機械加工による代表的な形状の一つである円筒を近似し、近似した円筒のパラメータ（軸方向、半径、中心座標）を求めると同時に、入力メッシュから機械加工領域のメッシュを抽出する。

面分類では、前工程で近似した円筒の半径が、部品を取り囲む最小の直方体の、2つの異なる頂点と直方体の重心を通る対角線よりも大きい領域を平面に分類する。また、前工程で誤って機械加工領域に分類された鋳肌領域を、領域内に点在する空白領域の数を評価することにより、再度正しく鋳肌領域に分類する。

上記の流れにより、入力メッシュを平面、円筒面、鋳肌面メッシュに分離し、そのうち平面と円筒面メッシュが機械加工領域と判断され、鋳肌面メッシュが鋳肌領域と判断される。分離結果の例を図11に示す。

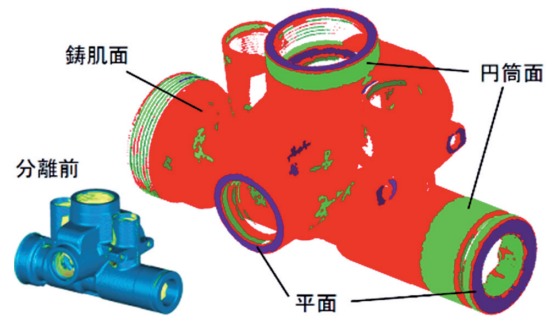


図11 分離結果の例

本ソフトにより、鋳造品のメッシュデータを機械加工領域と鋳肌領域に分離し、サーフェスデータ作成ソフトにおいて鋳肌領域のみに曲面を作成することで、REのデータ作成作業に多くの時間を要する鋳造品のサーフェスデータを軽量化できるようになった。

5. 検証実験

REのデータ作成作業に多くの時間を要する鋳造品を対象に、本研究で開発した3つのソフトの効果を検証する実験を行った。

5.1 実験で使用したRE関連機器およびデータ作成ソフト

実験で使用したRE関連機器を図12に示す。

実験では、現物を測定する機器として非接触3次元測定システム（Steinbichler製、COMET5）、現物を製作する機器として5軸NC加工システム（庄田鉄工製、NC7000U-1631X）を使用した。

また、メッシュデータを作成するソフトとしてCOMET Plus 9.6（Steinbichler製）、サーフェスデータを作成するソフトとしてStudio 2012（Geomagic製）、ソリッドデータを作成するソフトとしてSolidWorks Professional 2012（SolidWorks製）、CAMデータを作成するソフトとしてhyperMILL 2012（OPEN MIND Technologies製）を使用した。

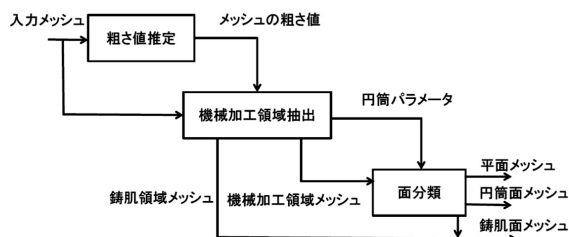
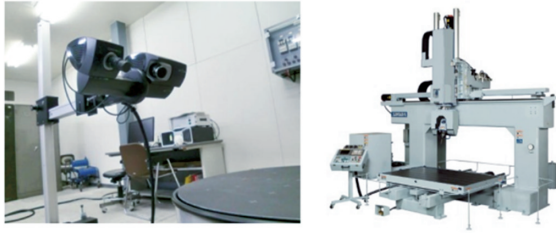


図9 分離手法の流れ

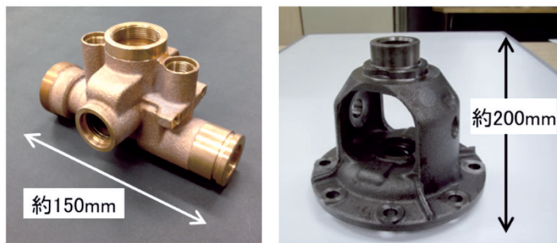


非接触3次元測定システム 5軸NC加工システム

図12 実験で使用したRE関連機器

5.2 実験方法

実験は、現物を元にバルブ部品の木型を製作する例と、現物を元にデフケースの発泡模型を製作する例の2例を行った。実験に用いたバルブ部品とデフケースを図13に示す。



バルブ部品 デフケース

図13 バルブ部品とデフケース

各例について、開発ソフトを使用しない場合と使用した場合のデータ作成時間を計測した。開発ソフトを使用しない場

合は、前記の4つのデータ作成ソフトのみを用いてデータ作成を行い、開発ソフトを使用する場合は、開発ソフトを使用しない場合のデータ処理の流れに開発ソフトを組み込んでデータ作成を行った。検証実験におけるデータ処理の流れを図14に示す。

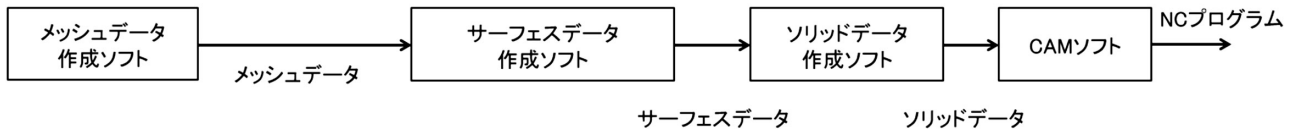
開発ソフトの効果は、開発ソフトを使用しない場合と使用した場合のRE全体のデータ作成作業時間を比較して検証した。

なお、被験者は熟練者2名（CAMデータ作成作業は1名）とし、被験者に下記の作業を、開発ソフトありの場合となしの場合で各1回行わせ、その平均作業時間を求めた。各データ作成作業の内容を以下に示す。

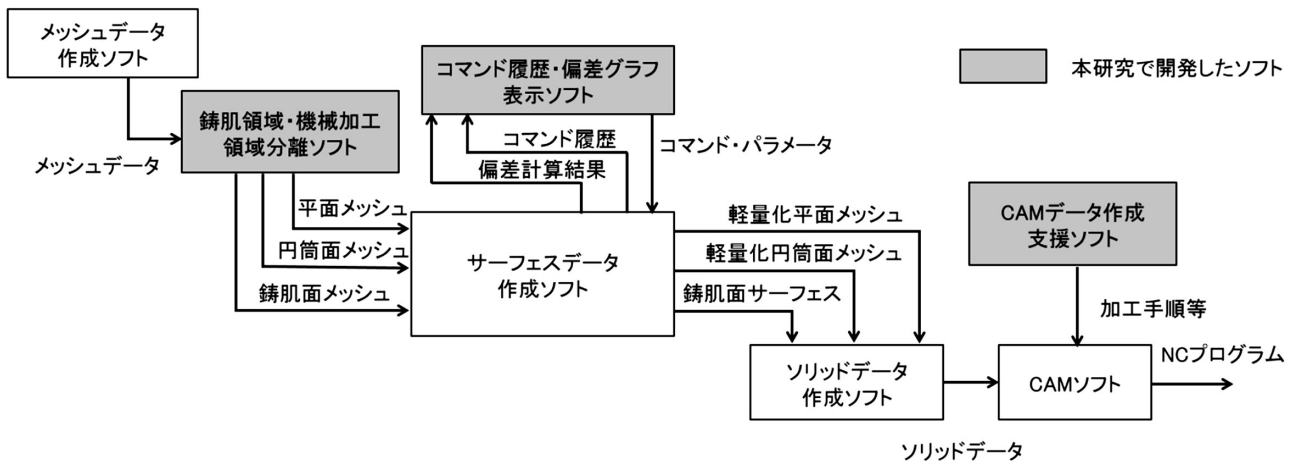
5.2.1 メッシュデータ作成作業

非接触3次元測定システムを用いて対象物を測定し、メッシュデータ作成ソフトによりメッシュデータを作成した。非接触3次元測定の主な測定条件を表1に、デフケースの測定の様子を図15に示す。

開発ソフト使用の場合は、メッシュデータを「鋳肌領域・機械加工領域分離ソフト」に読み込み、メッシュデータを平面、円筒面、鋳肌面メッシュに分離し、メッシュごとに計3つのデータファイルを作成した。



開発ソフトなし



開発ソフトあり

図14 検証実験におけるデータ処理の流れ

表1 非接触3次元測定のための測定条件

反射防止スプレー	マークテック製, スーパーチェック現像液 UD-ST
反射防止塗装膜厚	約 30 μm
1ショットの測定精度	±20 μm
測定ショット数	16
測定データのつなぎ合わせ誤差	約 ±3 μm

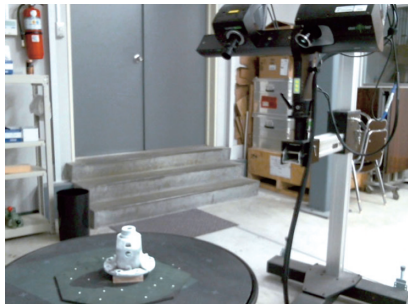


図15 デフケースの測定の様子

5.2.2 サーフェスデータ作成作業

サーフェスデータ作成ソフトにメッシュデータを読み込み、サーフェスデータを作成した。データ作成にあたっては被験者に下記の条件を提示した。

- 曲面とメッシュデータとの差が、おおむね±0.5mm以下であるデータを作成する。
- サーフェスデータ作成ソフトにおいて補修が困難なメッシュデータの欠損部は対象外とする。

開発ソフト使用の場合は、鋳肌領域（鋳肌面メッシュ）のみのサーフェスデータを作成し、機械加工領域（平面、円筒面メッシュ）はメッシュ数を削減して軽量化したメッシュデータを作成した。また、開発ソフト使用の場合は、「コマンド履歴・偏差グラフ表示ソフト」で作業の見本となるコマンド履歴情報を参照しながら作業を行った。

5.2.3 ソリッドデータ作成作業

ソリッドデータ作成ソフトにサーフェスデータを読み込み、ソリッドデータを作成した。データ作成にあたっては被験者に下記の条件を提示した。

- ソリッドデータとサーフェスデータとの差が、おおむね±0.5mm以内であるデータを作成する。
- 自由曲面形状は含まず、基本形状のみで構成する。
- 鋳物の縮み代の補正、機械加工の加工代の追加を行う。
- バルブ部品は木型製作用のデータを作成する。

開発ソフト使用の場合は、ソリッドデータ作成ソフトに機械加工領域の軽量のメッシュデータと鋳肌領域のサーフェスデータを読み込み、ソリッドデータを作成した。

5.2.4 CAMデータ作成作業

CAMソフトにソリッドデータを読み込み、CAMデータを作成した。データ作成にあたっては被験者に下記の条件を提示した。

- 素材：ケミカルウッド（バルブ部品の木型）、発泡スチレン（デフケースの発泡模型）
- 理論仕上げ面粗さ（カスプハイト）：0.05mm（バルブ部品の木型）、0.1mm（デフケースの発泡模型）
- 凹部の最終仕上げはR0.5mmのボールエンドミルを使用する。

開発ソフト使用の場合は、一度作成した補助図形などを「CAMデータ作成支援ソフト」からCAMソフトに一括入力して作業を行った。

5.3 実験結果

実験結果を図16に示す。

開発ソフトを使用しない場合と使用した場合のRE全体のデータ作成時間を比較した結果、バルブ部品の例では開発ソフトを使用した場合は、平均作業時間が22%短くなった。また、デフケースの例では、平均作業時間が25%短くなった。

このことから、開発ソフトはREのデータ作成時間の短縮に有効であることを確認した。

なお、参考までに実際に5軸NC加工システムを用いて現物を製作した。製作した木型と発泡模型を図17に示す。

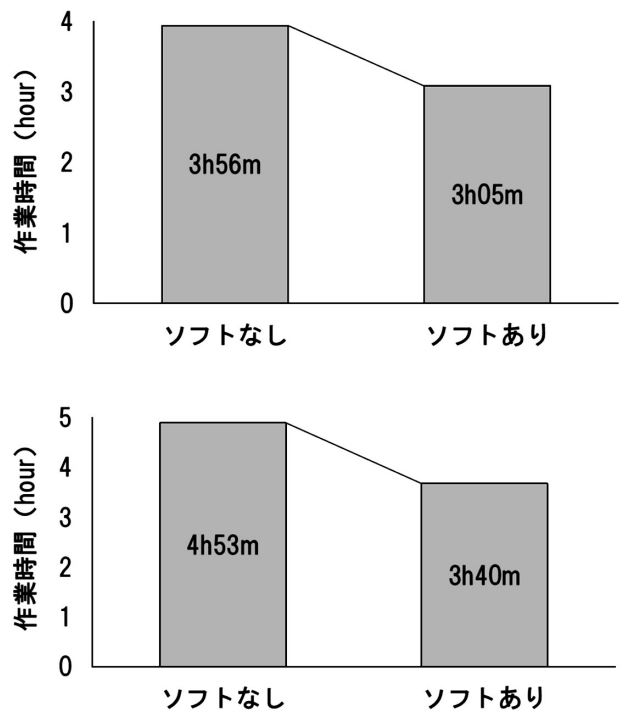


図16 実験結果 (上：バルブ部品, 下：デフケース)



バルブ部品の木型

デフケースの発泡模型

図17 製作した木型と発泡模型

6. まとめ

本研究では、REにおけるデータ作成時間を短縮するため、REのデータ作成作業を支援する下記の4つのツールを開発した。

- ① 非接触3次元測定実践マニュアル
- ② コマンド履歴・偏差グラフ表示ソフト
- ③ CAMデータ作成支援ソフト
- ④ 鋳肌領域・機械加工領域分離ソフト

また、REのデータ作成作業に比較的多くの時間を要する鋳造品を対象として、RE全体のデータ作成時間に対する開発ソフトの効果を検証する実験を行った結果、開発ソフトを使用した場合は使用しない場合に比べて平均作業時間が約25%短くなった。このことから、開発ソフトはRE全体のデータ作成時間の短縮に有効であることを確認した。

今後は、REに取り組む道内の企業や技術支援機関に対し、得られた成果の普及を図っていく予定である。

謝辞

本研究で使用した5軸NC加工システムは公益財団法人JK Aの機械工業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) 浦田昇尚・伊達宏昭・金井理・後藤孝行・安田星季：鋳造品の迅速リバースエンジニアリングに関する研究一面粗さ推定法と鋳肌面分離性能の改善一，2015年度精密工学会春季大会講演論文集，(2015)

金属粉末積層造形による内水冷式金型の製作

戸羽 篤也, 中村 勝男, 平野 繁樹, 稲野 浩行

The Manufacturing of Metal-Mold with Inner Water Cooled System by SLS

Atsuya TOBA, Katsuo NAKAMURA, Shigeki HIRANO, Hiroyuki INANO

抄 録

金属粉末積層造形法は、通常の機械加工が難しい複雑な内部構造を持つ金属製品などを製作することができる。その応用事例として、内部に冷却用の三次元冷却管を配置した機能性の高い金型の設計・製作を目標に、内部配管を造形するための最適な造形条件や熱伝導率等の熱特性を把握した。また、内部に三次元水冷管を配置した試験用金型を製作し、精密鋳造用ロストワックス模型材による成形試験を行い、内水冷式金型を使用することによる成形品品質および生産性の改善効果を確認した。

キーワード：金属粉末積層造形，三次元プリント，内水冷式金型

Abstract

The Selective Laser Sintering (SLS) process using metallic powder is able to manufacture the Metal-Mold which have a complicated internal structure that is difficult processing by the usual mechanical method. As the application example, for the purpose of a design and manufacture of the Metal-Mold which has the three-dimensional internal channel, we have obtained the optimal modeling conditions for fabricating internal channel, and we also found thermal characteristics as thermal conductivity of the Metal-Mold. Moreover, we manufactured a Metal-Mold which has the three-dimensional inner water cooled channel, and we examined the improvement effect on the quality and productivity of castings by using the mold and the wax material that used to models of the precision casting process.

KEY-WORDS : Selective Laser Sintering Method (SLS), 3D-Printing, Inner-Cooling Metal Mold

1. はじめに

金属粉末積層造形法は、近年、新たな製造プロセスとして注目される三次元プリント技法のひとつで、三次元形状データをもとに、金属粉末を用いて金属製品を迅速に製作する技法である。金属粉末積層造形法を利用すると、従来の機械加工では製作が困難であったり、加工できても日数や製作コストがかかるような複雑形状の金属製品を、比較的容易に製作することができる¹⁾。

本研究は、金属粉末積層造形法の特徴を活かして製作する金属製品として、内部に三次元の冷却水配管をもつ金型製作に着目し、その具体的な製作技法と金型設計に必要な諸物性値を得るための試験を行った。また、内部水冷管を三次元配

置した試験用金型を製作し、これを用いて精密鋳造用ワックス模型用のワックス材料を用いた成形試験により、金型の温度制御による成形品の品質および生産性に及ぼす影響に関する知見を得たので報告する。

2. 研究の目的

金属粉末積層造形法は、材料に金属の微粉末材料を用い、製作しようとする立体のスライスデータ（立体を水平面で切断した時の断面形状データ群）をもとに、レーザー光などの高密度エネルギー熱線を照射して各層の断面形状部分を溶融接合し、これを積層して金属の立体物を得る技法である。

この技法によれば、外形だけでなく内部構造も三次元立体

事業名：経常研究

課題名：金属粉末成形による凝固制御可能な金型製作技術の開発（平成24～26年度）

として造形可能である。機械加工は、もっぱら外形切削によって製品形状を製作するので、内部構造をもつ製品の加工には適さない。内部に複雑な構造を製作する金属加工法として「鋳造法」が知られている。鋳造法では中子と呼ばれる耐火性成形物を利用して製品の内部構造を製作することができる。中子は鋳造時に溶湯の浮力を受けるため、これに耐える熱間強度と肉厚が要求される。従って、鋳造法で細い冷却管を製品内部に配置するような製品では、管の径や配置に制限がある。

これに対して、金属粉末積層造形法は、熱線照射の有無によって断面形状を造形し、これを連続的に積層するので、中子のような特別な部材を利用せずに寸法精度よく内部構造を製作することができる。また、造形後に未溶融の金属粉末を排出できるという条件を満足させれば、内部構造の寸法や形状の制限に関する許容範囲はかなり広いものとなる。

金属粉末積層造形法のこのような優位性を活かした金属製品の例として、図1に示すような、内部に三次元配管を設けた金型が挙げられる。一般に、射出成型や金属製品のダイカストに用いられる金型は、予熱温度の調整や、射出成型後の冷却のため、金型系構造内に水冷管を設ける。多くの場合、金型冷却管は、機械加工によってベースプレート（金型基盤）に特殊なドリルで長直穴をあけて、後でこれらを連結したり、溝穴を掘った複数の部材を組み合わせた後で内部配管を形成する。

これに対して、金属粉末積層造形法で造型する内部冷却管は、金型表面の形状に沿って自由に三次元配管が可能となるので、ある範囲においてムラのない冷却条件を設定したり、必要に応じて熱の移動量を変化させたりするような金型設計が可能となる。しかし、金属粉末積層造形装置のメーカーらは、使用する材料の機械的性質や熱特性といった金型設計に必要な諸物性値を明らかにしていないため、ユーザーがこれらを計測し、得られた数値によって設計を行わなければならない。また、金属粉末積層造形法の特質から、製品内部構造の部位や姿勢によって製造条件が変化し、品質に差が生じる可能性がある。

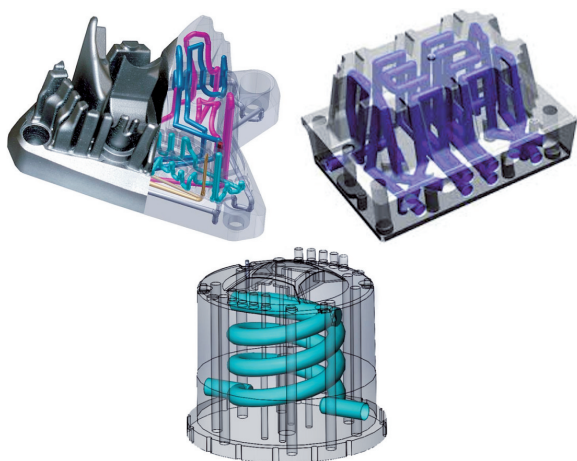


図1 内部に3次元配管した金型の事例
出典；RENISHAWホームページから

そこで、本研究では鉄系金属粉末材料を用いた積層造形装置による三次元水冷管を配置した金型を製作するための設計指標を得るため、製作物の機械的性質および熱伝導率等の熱的特性の把握、内部構造を製作する際のレーザー照射条件と造形品質の関係を調べることを目的に計測試験を行った。また、内部に配置した三次元冷却管を利用して金型温度を制御した場合に、成形品の品質や生産性にどの程度の効果が得られるかを把握するため、試験用金型を製作して精密鋳造用ワックス模型を成形し、成形時の温度変化計測や成形品の外観観察を行った。

3. 金属粉末積層造形の概要

3.1 AM技法について

三次元積層造形技法における製造プロセスの概念について整理しておく。目的の形状を得る従来の加工法には、母材から不要部分を取り除く「切削加工」、材料そのものに永久的な変形を与える「塑性加工」、材料に流動性を与えて型に注入後に固化させる「成形加工」などがある。

近年、新たな製作プロセスとして注目される「三次元積層造形法」は、これらの加工法とは概念を異にするもので、切削加工が母材から製品形状を得るのに不要な部位を取り除いて目的の形状を得る「除去加工」であるのに対して、何もなところから材料を積み上げたり、付け加えたりして目的の製品を得ることから、「付加工（Additive Manufacturing/以下「AM」という）」と呼ばれている。「AM」の呼称は、米国試験材料協会（ASTM）が各種三次元積層造形法を体系化し、規格化を進める中で定められたものである。同協会は、AM技法に関する国際規格を検討する中で表1に示す7つの分類を設けている。

液槽光重合法は、三次元積層造形の中でも歴史が古く、紫外線を照射すると硬化する性質を有する液状の樹脂を材料に用い、積層面ごとに紫外線を照射して断面形状を固化させ、これを積層して樹脂製立体を得る。造形に光線を用いることから「光造形法」とも呼ばれる。

材料押出法は、熱可塑性樹脂を造形材料に用いて、加熱して流動性を持たせた材料をノズルから押し出して既成層と接着させ、これを積層して立体を得る技法である。材料を加熱溶融させて堆積させることから「熱溶融堆積法（FDM）」とも呼ばれる。市販されている安価な三次元プリンターは、この技法を採用しているものが多い。

粉末床溶融結合法は、使用する材料の形態が粉末であり、これを水平に敷き詰めた面に熱線を照射して溶融し、既成層と接合する。材料には、金属あるいは樹脂の粉末を用い、これに熱線を照射して粉末材料自体を溶融して接合する。熱線にはレーザー光を用いるものが一般的であるが、電子線を用いる特殊な装置も実用化されている。

表1 ASTMが定めたAM技法の分類

造形方式	造形材料	特徴
液槽光重合 Vat photo polymerization	光硬化性樹脂	光硬化性の樹脂に光線を照射して選択的に硬化させる
材料押出 Material Extrusion	熱可塑性樹脂	加熱した流動性のある材料をノズルから押し出して堆積させる
粉末床熔融結合 Powder Bed Fusion	金属粉末 樹脂粉末	粉末を敷いた面に熱線を照射して選択的に熔融結合させる
結合剤噴射 Binder Jetting	石膏, 砂 プラスチック	液状粘結材を粉末に噴射して選択的に固化させる
シート積層 Sheet Lamination	紙, 樹脂フィルム, 金属箔	断面形状を切り抜いたシート状の材料を重ねて接着する
材料噴射 Material Jetting	光硬化性樹脂 ワックス	液状にした材料の液滴を選択的に噴射し, 堆積して固化させる
指向性エネルギー堆積 Directed Energy Deposition	金属 (線材・粉末)	材料を供給しながら加熱領域を制御して選択的に熔融結合する

結合剤噴射法は、造形材料に粉末を用いるが、粉末自体を熔融する粉末床熔融結合法とは異なり、粘結材を吹き付けて粉末相互の固化および既成層との接合を行う。粘結材を吹き付ける機構には、書面印刷用のインクジェットプリンターと同じ原理を利用する。吹き付ける粘結材は、糊の水溶液や化学反応で硬化する樹脂を用いるものなどがある。造形材に砂を用いると耐熱性の高い造形物を製作することができ、この技法を応用して鋳造用鋳型を造型して鋳物を得る手法に関する研究も進められている^{2~4)}。

シート積層法は、紙や薄いプラスチックフィルムを断面形状に切り出し、特殊な糊で貼りあわせて立体を造形する技法である。プラスチックフィルムを用いた技法では、光造形法に劣らない品質の造形品を得ることができる。紙積層法で製作した造形物は、密度の高い木製品と同等の品質を実現できるので、鋳造用の木型製作に応用された例もある。この技法では、断面形状を切り抜いたあとのシート材料の再利用が難しく、ほとんどが廃棄されるため、コストや資源問題の観点から、産業用途としてはあまり採用されていない。一方、A4サイズの上質紙にカラー印刷した紙を切り抜いて積層造形する装置は、実物に近い色彩を持たせた造形物が得られることからサンプルモデルの製作用途で使用されている。

材料噴射法は、インクジェットノズルを用いた造形機構を採用する点で結合剤噴射法と共通するが、この技法でノズルから噴出させるのは造形材料そのものである。造形材料には化学反応で硬化する樹脂のほか、ワックスなども用いられる。材料噴出ノズルの配置や構成により、三次元プリント造形法で必須とされるサポートを用いずに立体成型できるため、造形品形状の自由度は高く、複数の素材の噴出量を制御して造形することで材質を傾斜させた造形物を得ることもできる。

指向性エネルギー堆積法は、熱エネルギーを利用して材料を熔融しながら積み上げていく技法で、材料には金属の線材や粉末が用いられる。

3.2 金属光造形複合加工装置

本研究で使用した積層造形機は、金属光造形複合加工装置 LUMEX Avance-25 (松浦機械製作所⁵⁾製、以下「金属粉末造形装置」という)で、その外観を図2に示す。同装置の造形技法は、AM技法の7分類の“粉末床熔融結合法”に該当する。この装置で使用する造形材料は、鉄、ニッケル、銅を主な成分とする金属粉末材である。同装置が「複合加工装置」と称するのは、この装置の造形品製造プロセスの特徴に由来する。すなわち、同装置は金属粉末を水平に敷いた面に



図2 金属粉末積層造形装置の外観
(松浦機械製作所⁵⁾製 LUMEX Avance-25)

表2 LUMEX Avance-25のレーザー照射条件

設定項目	設定範囲
レーザー出力 ^{※1)}	0 ~ 200 ^{※2)} [W]
集光スポット径	0.08 ~ 0.6 [mm]
レーザー走査速度	50 ~ 2500 [mm/s]
レーザー走査間隔	0.1 ~ 0.9 [mm]
レーザー走査方式	全面一括/帯状分割
レーザー走査方向	単一方向/交互方向
層間関係	同方向/XY交互

※1 通常は160Wで固定。

※2 工業試験場に導入した装置の設定範囲。

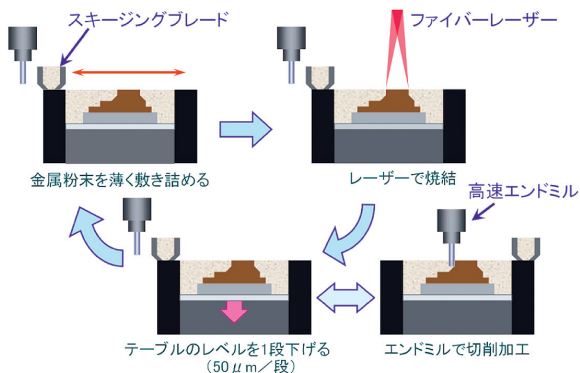


図3 金属粉末積層造形法の加工プロセス（模式図）

レーザー光を照射して材料を熔融接合して立体を造形する「三次元積層造形」の機能に加えて、造形室内に三次元切削加工機能を併せ持ち、積層造形により製作した立体形状の外表面を、機械加工で精度よく上げることができる。

また、この装置では、金属粉末を熔融接合する際に使用するレーザー光の照射条件を項目ごとに表2に示す範囲で選択することができる。これらの設定項目の設定値は、専用のCAMソフトで三次元データからレーザー光の走査パスを生成する際にパスの属性データとして記録される。

同装置の製作工程を図3の模式図に沿って概説する。造型物は、「ベースプレート」と称する鋼製板の上に造形される。金属粉末材料を「リコーター」と呼ばれる機構で水平に敷き、この表面にスライスデータをもとに作成したパスに従ってレーザー光を走査させ、所定の断面形状を熔融接合する。その後、ベースプレートを搭載したテーブルを1層分の積層厚さに相当する分だけ下げる。通常の積層厚さは50μmに設定する。これを10回程度繰り返したところで、三次元切削機構により造形層の輪郭をボールエンドミル等で切削加工する。加工が終わったら、再びリコーターを用いて金属粉末を既成層の上に敷き、レーザー光で所定の部位を熔融接合する。この工程を、造型物の高さに達するまで繰り返して造形物を得る。

4. 実験方法

4.1 内部構造の最適な製作加工条件

金属粉末積層造形では、レーザー光の照射条件により造形物の品質に変化が生じる。特に、内部構造を製作する際、レーザー集光径や走査速度の違いにより形状の再現性や表面状態などに影響を及ぼすことが予測される。

そこで、造形時のレーザー照射条件が造形物の品質へ与える影響を調べるため、レーザー集光径とレーザー走査速度を変化させて内部に水平円管を有する試料を積層造形し、造形物の金属組織観察と内部構造のマクロ観察を行った。

試験片試料は、一辺10mmの立方体とし中央部に直径φ3.2mm、φ4.0mm、φ4.8mmの円形の穴を水平に配置した形

状とした。造形は、レーザー出力を160Wとし、レーザー光集光径をφ0.1mm、φ0.3mm、φ0.4mm、φ0.5mmの4水準、走査速度を80mm/s、100mm/s、120mm/sの3水準で行い、造形試料を鉛直方向に切断した面の金属組織を観察し、レーザー光照射による熔融領域の深さと幅を計測した。また、諸条件で製作した内部円管の外観を観察し、造形時のレーザー照射条件と造形品質との相関関係を分析した。

4.2 造形物の熱伝導率

内水冷管を利用して金型温度を調節して成形材料からの熱移動を制御するには、冷却媒体の選択、流入温度や流量の条件設定のほか、金型表面からの冷却管の深さや配置上の位置関係など、金型の設計が重要になる。成形物から冷媒への熱の流れは、成形物と金型表面、金型内部における金型表面から水冷管までの間の伝熱、水管表面から冷却水への熱伝達による熱移動を見積もる必要がある。その中で、金型表面から水冷管までの間の熱移動量を見積もるためには、造形物の熱伝導率を知る必要がある。

金型表面から水冷管までの間の熱移動量（熱流束） q は以下の式で計算される。

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} [W/m^2] \quad (1)$$

ここで、 λ は金型材料の熱伝導率、 dT/dx は金型表面から水冷管表面に至る部位の温度勾配である。負の符号は、一般に正の向きの温度勾配に対して熱の移動は逆向きとなることを示している。この式で、金型表面から水冷管までの距離と、金型表面温度、冷媒温度が決まれば温度勾配が定まるので、材料の熱伝導率を知ればこの間の熱移動量を見積もることができる。

金属粉末積層造形法で製作する造形物の熱伝導率は、材料の成分・化学組成や造形時の熱線照射条件によって変化するため、成形物ごとに実測して得る必要がある。そこで、金属粉末造形装置で製作する造形物の熱伝導率を得るための試験を行った。

試験片は、金属粉末造形装置により鉄系粉末材料を用いて、直径φ6mm、長さ100mmの丸棒状の造形物を製作し、その後、機械加工で図4に示すように直径φ5mmに仕上げ、その両端にM5×0.8のねじ加工と、基準端面から20mm、30mm、40mm、50mmの位置に直径φ1mm深さ2.5mmの小径穴をあけた。この基準端面側のねじには電熱線ヒーターを取り付け、他方の端面側ねじには銅製の丸棒を取り付けて氷水の入った容器内に浸漬させた。また、4つの小径穴には素

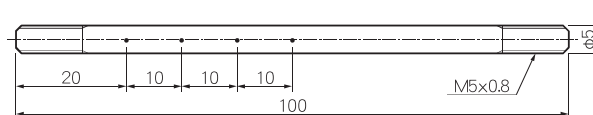


図4 熱伝導率計測用試験片の形状と寸法

線径φ0.2mmのK型熱電対を設置して温度計測を行った。

熱伝導率の測定は、電熱ヒーターに通電した後、熱電対で計測した試験片各部位の温度が定常状態になった時の温度から試料中の温度勾配を求め、電熱ヒーターの消費電力から試料内を流れる熱流束を見積もって、(1)式を変形した次式により熱伝導率を算出した。

$$\lambda = -q \frac{\Delta x}{\Delta T} [\text{W/mK}] \quad (2)$$

電熱ヒーターの発熱量は、ヒーター線に流れる電流と両極間電圧とを計測し、その積で計算される“消費電力”から見積もった。実験条件の設定において、電熱ヒーター加熱後の定常状態で加熱側の温度が100℃を超えない範囲に設定し、発熱量が0.3W、0.4W、0.5W、0.6Wの4水準で試験を行った。熱伝導率は、各実験条件において電熱ヒーターの発熱量を試料断面積で割った値を熱流束値とし、定常状態になった時点の各測温点温度から温度勾配の平均値を求め、(2)式により算出した。

4.3 内水冷式金型の試作と造形試験

金型内部に設けた三次元水冷管による金型温度制御の効果を検証するため、具体的に内水冷管を配置した試験用金型を製作し、成形試験を行った。試験用金型は2分割式とし、図5に示す形状の成形品を得るためのキャビティと、その上部注入口付近と底部に三次元配管を設けた。試験には、成形材料として精密鑄造用ロストワックス模型に用いられるワックス材を選定した。

成形工程は、成形材を約60℃まで加熱して溶融し、35℃に予熱した金型に注入した後、成形材が固化してから成形物を

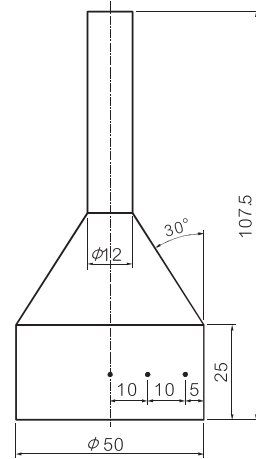


図5 成形試験に用いた成形試料の形状と寸法

取り出してその外観を観察した。また、金型キャビティ内に底面から10mmの高さに、表層から5mm、15mm、25mm（中心）の3点（図5に示す位置）にT型熱電対を設置し、成形材を注入後の冷却過程の温度変化を計測した。

金型の冷却条件は、内水冷管に5℃および24℃の冷媒を約27ml/sの流量で流して金型を冷却する条件と、冷媒を流さないで自然に冷却する条件を設定した。

5. 実験結果と考察

5.1 内部構造の最適な試作加工条件

レーザー照射条件のうち、レーザー集光径とレーザー走査速度を変えて試料を造形し、その鉛直断面の金属組織観察写真を図6に示す。鏡面研磨後のナイタールエッチングにより

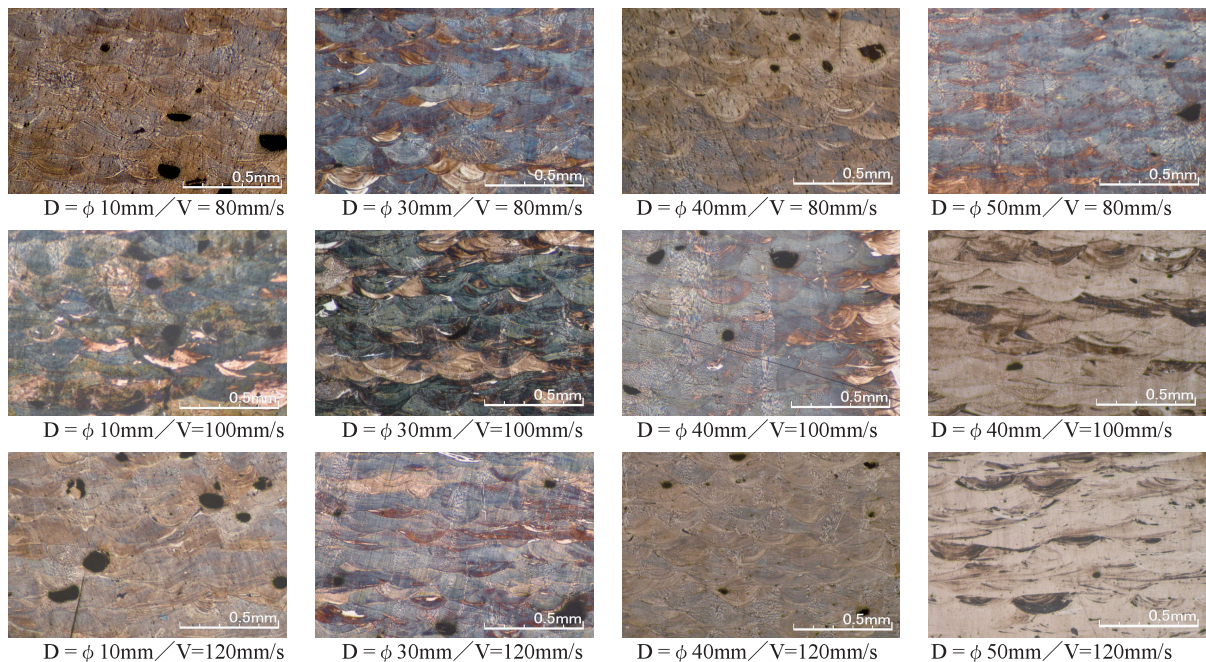


図6 異なるレーザー照射条件による造形物の鉛直断面金属組織

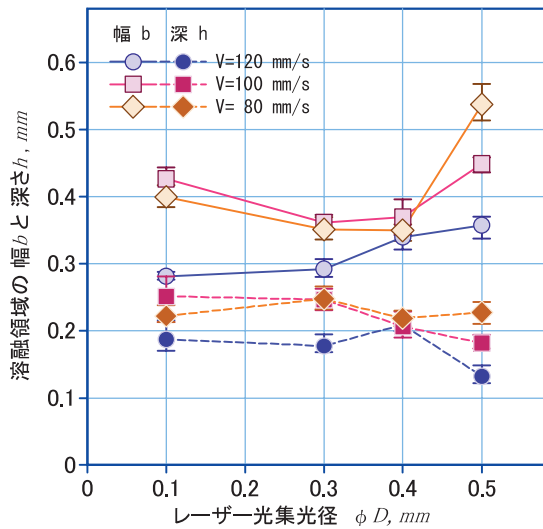


図7 レーザー光単パス照射条件と溶融領域の関係

レーザー光の単パスで形成される溶融域が鱗片状に確認される。これら溶融域形状の深さと幅に着目すると、レーザー集光径の大きさにつれて溶融域の幅が狭く、また集光径および走査速度が大きくなるにつれて、溶融領域深さが浅くなる傾向が認められる。これら金属組織写真を画像処理により計測した結果を図7に示す。走査速度が80mm/sと100mm/sの試験について、集光径を $\phi 0.3\text{mm}$ ～ $\phi 0.5\text{mm}$ として製作した試料の溶融域幅は概ね集光径と一致しているが、集光径を $\phi 0.1\text{mm}$ で製作した試料の溶融域幅は集光径よりかなり大きく計測された。これは、集光径が $\phi 0.3\text{mm}$ 以上では、レーザー光が照らされた範囲で母材表面が昇温し、内部方向に向かって熱が伝わる伝熱形態となるのに対して、集光径を $\phi 0.3\text{mm}$ 以下に絞ると、材料の伝熱特性により微小表面に与えられた熱量が内部方向だけでなく表面方向にも広がるような伝熱形態になったと考えられる。走査速度を120mm/sとして製作した試料では、レーザー集光径が大きくなるにつれて溶融域幅が増大する傾向が見られた。走査速度が大きな条件では単パスのレーザー照射により十分な予熱量が得られないため、溶融域が表層近傍のみとなり、集光径に応じた溶融幅が計測されたと考える。

一方、溶融深さについては、概して集光径が大きくなるにつれて浅くなる傾向が認められるが、顕著な差異は認められなかった。深さ方向への溶融域の広がり、表層に照射されたレーザー光の熱量が内部方向に熱伝導により伝熱されることで生じるが、照射時間は極めて短く、設定した走査速度や集光径の範囲では、熱が伝わるのに十分な時間が得られず大きな差異がなかったものとする。

これらの結果を踏まえ、レーザー光の集光径を $\phi 0.1\text{mm}$ ～ $\phi 0.5\text{mm}$ 、走査速度を80mm/s～120mm/sに変化させて内径約 $\phi 5\text{mm}$ の水平円管を製作し、その断面観察を行った。図8にその断面写真を示す。いずれも円管底部（下側）の表

面粗さに比べて円管頂部（上側）の表面粗さが粗い。水平円管頂部の拡大写真を製作条件ごとに同図右側に示した。集光径を $\phi 0.1\text{mm}$ および $\phi 0.3\text{mm}$ で製作した円管頂部に0.5mm程度の表面粗さが見られるのに対して、集光径を $\phi 0.5\text{mm}$ で製作した円管頂部の表面粗さは若干滑らかになっている。

円管頂部の粗さが粗くなる原因は、金属粉末積層造形特有の造形条件によるものである。金属粉末積層造形における水平円管の造形は、図9の模式図に示すような工程を経る。すなわち、底部は既成層の上に新たな層が積み重ねられるが、円管の中心となる高さを超えると、円管頂部に向かって既成層から積層粉末上に少しずつ張り出しながら造形が進む。このとき、既成層の上に積み上げられた金属粉末の厚さは最大1層分の積層厚さとなるが、下に既造形材がない領域では積層粉末の上にレーザー光が照射されることになる。

既造形部上では、レーザー光照射によって金属粉末と既造形材表面の一部が溶融し、その熱量は既造形材を通じて放出されるため、レーザー光照射面の表面近傍で一様な溶融層が形成される。これに対して、積層粉末材は熱伝導率の小さな

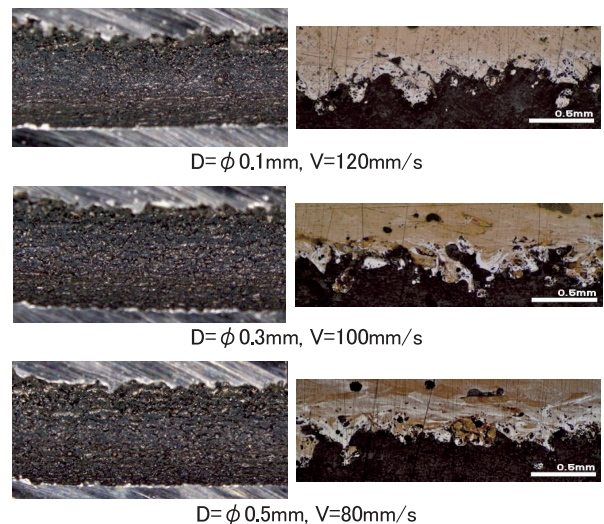


図8 製作した水平円管の断面写真

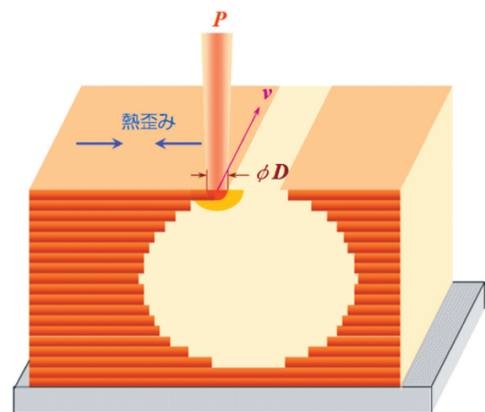


図9 金属粉末積層造形における水平円管の製作プロセス

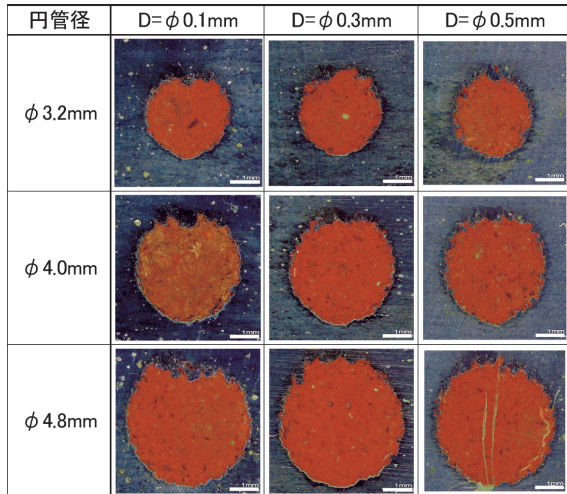


図10 製作した水平円管の断面写真

雰囲気中にあるので、この表面上にレーザー光が照射されると、熱流束が拡散せず、熔融域は深い部位にまで到達し、不安定な熔融層が形成されると考えられる。したがって、積層粉末上に熔融層を形成する場合は、レーザー光の集光径を大きくするほど様な熱量照射面積が広がるとともに熱量の到達深さも浅くなるため、管頂部の造形にはより適した条件に近づく。

図10は、レーザー集光径を変えて製作した水平円管の断面の写真である。円管の径は、φ3.2mm、φ4.0mm、φ4.8mmの3水準で造形した。レーザー集光径をφ0.1mmに絞って造形した場合、いずれの内径においても水平円管の管頂部は不安定な形状を呈した。レーザー集光径をφ0.3mm、φ0.5mmと大きくするにつれて、管頂部の形状は安定した状態となっていく傾向が認められた。

金属粉末積層造形法の特質として、造形物はレーザー光照射による急激な加熱と冷却が繰り返され、大きな温度変化に伴う熱膨張・収縮で熱歪が蓄積される。特に、内部水平円管頂部を造形する部位では、図9で示したように、張り出し部は熱応力によって開口部がめくれ上がるような変形を生じる。次第に張り出し造形が進んで開口部が接続すると、その後の造形が安定するまで接続部付近にレーザー光の熱量が放出されにくくなり、周囲より厚めに積層される。これにより円管頂部は下側に沈み込むような形態で造型される。この下側への沈み込み量が円管径に対して大きい場合、円管内に残った未熔融粉末を拘束して、造形後これを排出するのが困難となる。また、金属粉末積層造形法で製作する内水冷式金型の内部円管の管頂部は、金型表面の成形物に接する面に近い側となるため、安定的に形状を造形できることが望ましい。

管頂部の形状は円形に限らず、矩形断面の水冷管を形成する方が有利な場合もある。いずれの場合も管頂部の成形にはレーザー集光径を広くする製作条件を設定するのが適当であるとの知見が得られた⁵⁾。

5.2 造形物の熱伝導率計測

金属粉末積層造形法で製作した材料の熱伝導率を計測するに当たり、試験方法の妥当性を検証するため、入手できる熱伝導率が既知の金属材料として、Al-Si合金、銅合金（黄銅）、軟鋼（SS400）、炭素鋼（S45C）、ステンレス鋼（SUS304）、純チタンの6種類を選び、図4で示した試験片形状に加工して熱伝導率を計測した。

計測試験の様子を図11に示す。試験片上部には電熱線ヒーターを巻きつけた加熱ブロックを取り付け、下部には純銅棒を取り付けて、その銅棒は攪拌機の上においたビーカー内の氷水に浸漬してある。また、試験片にあげた4つの小孔には熱電対（K型）を埋め込んで温度を計測する。温度計測試験の際は、試験片とヒーターブロックを断熱材で覆い、外への熱の流出を抑えている。

計測試験で得られた各金属材料の熱伝導率の計測結果を図12に示す。図の横軸は、伝熱ヒーターの消費電力を試料断面積で除した値を“見掛けの熱流束値”として整理した。いずれも熱流束値が大きくなるにつれて熱伝導率の計測値が増大する傾向を示すが、これは、実験方法の中でヒーターブロックおよび試験片の断熱方法において完全な断熱状態とはなっていないためと考えられる。すなわち、電熱ヒーターへの通電量を増やして試験片内を流れる熱流束値を上昇させるにつ

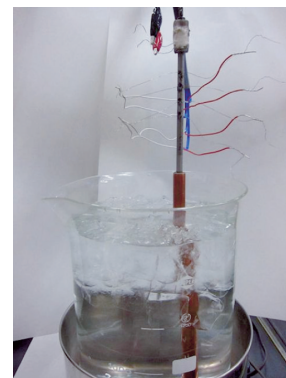


図11 熱伝導率計測試験の様子

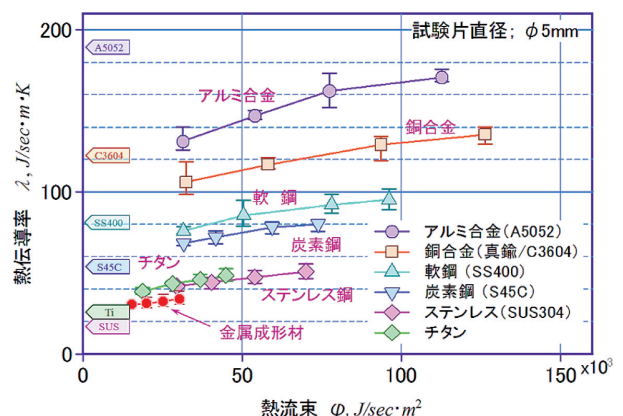


図12 各金属材料の熱伝導率計測試験の結果

れて、ヒーター側の温度が高くなる。断熱材は有限の熱伝導率を有するので、ヒーター側の温度が高いほど断熱材を介して外に放出される熱量は大きくなる。すると電熱ヒーターの消費電力の一部は試験片内部を通らずに外部への損失が増えることになるので、試験片に生じる温度勾配はその分だけ小さくなり、見掛け上の熱伝導率は大きく計測される。

図12の左側に付記した記号は、文献等に記載される各金属材料の熱伝導率の値を示している。アルミ合金、銅合金のように熱伝導率の高い材料は、文献値よりも幾分低く計測され、逆にステンレス鋼、チタンのように熱伝導率の低い材料は、文献値よりも幾分高い値が計測されている。前者については原因を特定できないが、後者については上記と同様の理由で見掛け上の熱伝導率が大きめに計測されたものとする。

材料ごとの熱伝導率の比較目的や、熱損失等の誤差を念頭に入れた設計を心掛けるなどすれば、実運用上の不都合が軽微であることを考慮し、本計測方法で計測した熱伝導率の値を用いることでも有効と判断した。

金属粉末積層造形法で製作した試料を用いて熱伝導率を定常熱流束法で計測したところ、図12のプロットで示すように、30W/mK程度の熱伝導率を得た。金属材料としては熱伝導率が小さく、ステンレス鋼やチタンと同等である。この原因としては、造型材料の金属粉末の組成にNiが20wt%を超える割合で含まれており、これにより造形された材料の金属組織に熱伝導率の低い組織（残留オーステナイトなど）が多く含まれるからではないかと考えられる。

また、金属粉末積層造形では、造形時のレーザー照射量を小さくすることにより、多孔質な金属材料を得ることができる。試験片内に空隙を持たせた時の見掛けの熱伝導率を把握するため、造形時のレーザー照射量を変えて試験片を製作し、見掛けの密度と熱伝導率との相関関係を調べた。その結果を図13に示す。レーザー光の照射量は、レーザー光の出力と走査条件により、造形時にレーザー光によって照射される単位面積当たりの熱量（以下「レーザー光熱密度」という）で整理した。レーザー光熱密度が3J/mm²より小さくなると、材料内に空隙が生じ、さらにレーザー光熱密度が小さく

なるにつれて内部空隙率が小さくなる傾向を示す。材料内部の空隙率の増大は、見掛け密度の減少という形でも表現されるが、図13から、材料の見掛け密度と見掛けの熱伝導率の間には強い相関関係が認められた。

空隙率が増大して材料断面の開口率が増えると、相対的に材料の面積が減少するため、熱は見掛けの断面積より小さな面積を流れることになり、実際に材料を流れる熱流束は材料の占める面積割合に応じて変化する。材料の占める面積割合が減少する分だけ実際の熱流束が大きくなるので、その部位には大きな温度勾配が生じる。見掛けの温度勾配が大きくなることは、見掛けの熱伝導率が小さくなることを意味するので、空隙率が増えるにつれて熱伝導率は小さく計測される。材料の見掛け密度と見掛けの熱伝導率の相関関係は、この理由によるものとする⁶⁾。

5.3 内水冷式金型の試作と造形試験

内部に三次元配管を施した試験用金型を製作し、これを用いて成形試験を行った。金型は、図14に示すような構造の金型を2つ組み合わせ、ベースプレートから成形物の注入口部と底部に三次元流路を配管する方式で設計した。金属粉末積層造形法による金型の造形は、図15の写真に示すように、240×125×20mmの炭素鋼製ベースプレートに配管用の穴を機械加工したものを用意し、この上に2つの金型を並べて造形した。金型造形中の様子を図16に、製作した金型の外観を図

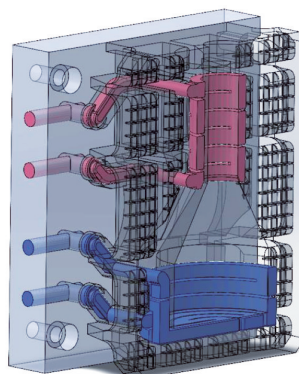


図14 内水冷式試験金型のCAD設計図（半分）

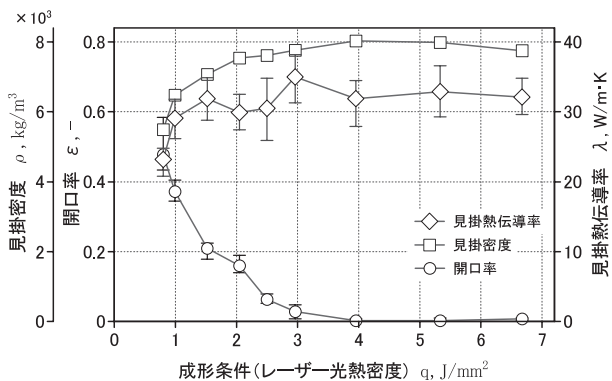


図13 成形条件を変えて製作した試料の熱伝導率計測結果

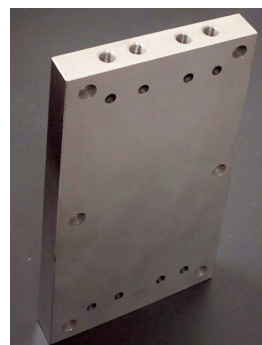


図15 金型製作のため用意したベースプレート

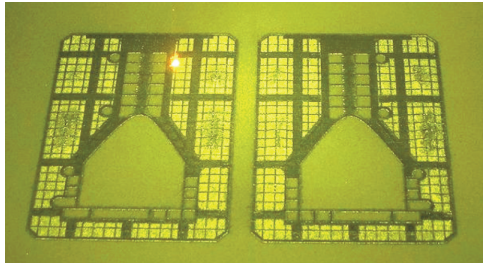


図16 金属粉末積層造形法による金型製作の様子

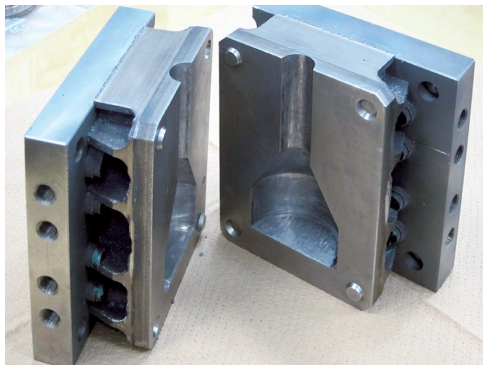
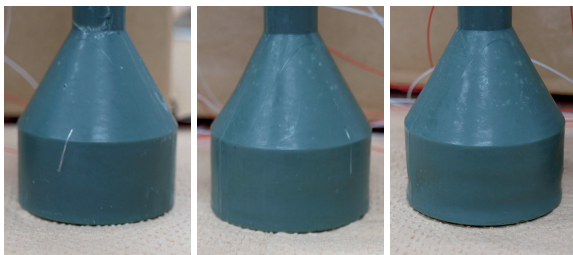


図17 製作した内水冷式試験用金型の外観



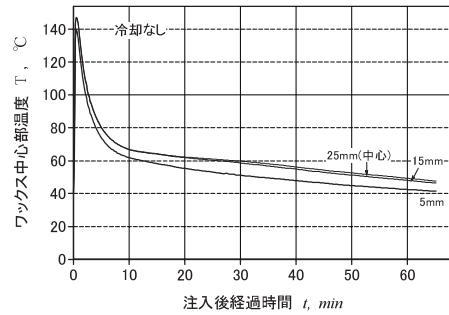
強制冷却なし 水道水(24°C)冷却 冷水(5°C)冷却

図18 成形試験で得たワックス模型の外観

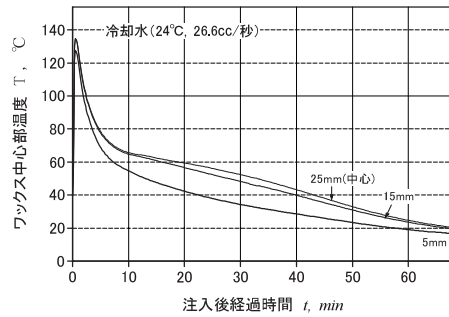
17に示す。造型の高さは約60mmで、加工時間は積層造形と切削加工を合わせて、約180時間を要した。

製作した試験用金型を使用して、精密铸造用ワックス模型用ワックス材料を用いて成形試験を行った。このワックス材の軟化温度は35~40°Cで、液化(熔融)温度は概ね60°Cである。実際の精密铸造用模型の製作では、80°C程度で熔融したワックス材を金型内に圧入して冷却・固化して成形する。本成形試験においては圧入をせず、約140°C程度まで十分に加熱熔融したワックス材を金型内に鑄造し、いくつかの冷却条件で成形することとした。

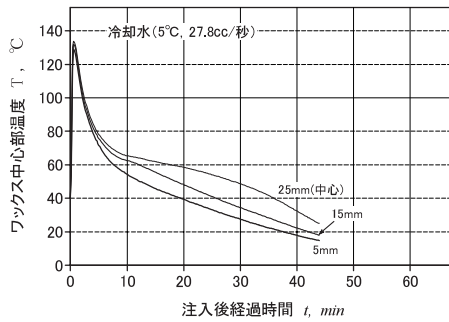
予備実験により、20°C以下の金型にワックス材を注入すると、急冷されて滑らかな表面が得られないものがあったので、成形試験では金型内配管に温水を通して約35°Cに予熱し、その後、配管内の温水を抜いてからワックス材を金型内に注入した。冷却条件は、金型内配管に水を通さないで自然冷却したもの、水道水(約24°C)を通して強制冷却したもの、冷水器を用いて製作した冷水(約5°C)を通して強制冷却したものの3つの条件で行った。また、強制冷却については底部の



a) 強制冷却なし



b) 水道水(24°C)冷却



c) 冷水(5°C)冷却

図19 試験施工による速音性能試験の様子

配管のみを使用して冷却水を流した。

成形試験で得たワックス模型の外観を図18に示す。強制冷却をしない条件と、水道水で強制冷却した条件では、外観上に外引け等の欠陥が見られず、良好な模型を得ることができた。これらに対して冷水で強制冷却したものは外引けによる欠陥を生じた。

欠陥の有無に至る原因を調べるため、図5で示した金型内キャビティの所定の位置に熱電対を設置して、冷却過程における各部位の温度変化を計測した。結果を図19に示す。冷却水の温度が低くなるにつれて材料の冷却速度が増し、短い時間で成形が完了することを示しているが、このこと自体はワックス模型の成形時間の短縮に寄与するので、強制冷却による生産性の向上に効果があることが確認された。

外表面の外引けの有無に関して考察する。外引けの生じなかった、強制冷却なしと水道水冷却の条件では、表層から5mmと15mmの深さにおける温度の変化に大きな差が認められないのに対して、冷水で強制冷却した試料では、冷却の早い段階で表層からの深さ5mmと15mmの部位で温度差が生

じている。これらは、前2者が冷却の過程でワックス模型の表層から深い部位までほぼ同じ温度を保ちながら冷却が進んでいるのに対して、後者は、一定の温度勾配を維持しながら冷却が進んでいることを示している。

ワックス模型内の熱の伝わり方に関して、ワックス材の熱伝導率は約 0.25W/mK ⁷⁾とかなり小さいにも関わらず、強制冷却をしない条件や、冷却水温度が高い条件では成形体内部の温度勾配が小さいことから、表層から順次ゆっくりと凝固が進んだと推定される。これに対して、低温の冷却水で強制冷却した場合は、一定の温度勾配が確認され、冷却過程の早い段階から表層から深い部分まで冷却が進展し、内部でも凝固収縮が生じたことから完全に凝固していない表層の材料を内部に引き寄せる力が働いて外引けが生じたのではないかと推測する。

この結果から、熱伝導率の小さなワックス模型材を冷却水で強制冷却して成形する場合には、内部に大きな温度勾配を生じさせるような過度な強制冷却をすると成形品の品質に不具合が生じる可能性が高いことがわかった。

凝固収縮による引け巣（内引け、外引けを含む）を防ぐには、熔融材料を表層から順次凝固させる「指向性凝固」と呼ばれる凝固形態をとることが必要であり、材料の特性（特に熱伝導率）に応じて冷却速度を制御しなければならないことがわかった。これにより、成形品の形状に合わせて、冷却水管の深さや配置、水管に流す冷媒の温度などを適切に設計することで、成形品の形状や品質を改善するとともに、成形時間の短縮による生産性の向上が期待できる。

6. まとめ

金属粉末積層造形法を利用して内部に冷却水管を自由に配置した内水冷式金型の製作技法の確立と、内水冷管を利用した金型温度制御による成形品の品質や生産性の向上に関する効果の検証を目的として試験を行った。

金属粉末積層造形による内部構造の造形技法について、積層造形の特質を考慮し、特に内部構造頂部を品質よく造形するためのレーザー照射条件に関する知見を得た。

すなわち、内部構造の天頂部を造塊する際は、レーザー集光径を大きくし、積層粉末上になるべく広い範囲に一樣なエネルギーを照射する条件をとるのが有効である。

また、金型設計に必要な物性値に関して、定常熱流束法による計測により、造形材の熱伝導率が 30W/mK 程度であり、造形条件によって見掛けの熱伝導率が変化する。

さらに、具体的に試験用の内水冷式金型を製作し、精密製造用模型に用いられるワックス材による成形試験を行い、内水冷管を利用した金型温度制御により成形品の品質および生産性に向上効果を及ぼすことを確認した。

引用文献

- 1) 山口修一ほか：「産業用3Dプリンターの最新技術・材料・応用事例」, シーエムシー出版 (2015. 5)
- 2) 日本鑄造工学会：「3次元造形技術の進展」, 第165回全国講演大会・技術講習会テキスト (2014. 10)
- 3) 戸羽篤也・稲野浩行・平野繁樹：「粉末積層成形による鉄鉄鑄物の迅速鑄造プロセス」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告No.309 (2010. 8)
- 4) 戸羽篤也・稲野浩行・平野繁樹・桃野 正・八幡一宏・小川貴行・名雪欣也：「粉末RP鑄型による迅速鑄造プロセスの実用性向上」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告No.311 (2012. 8)
- 5) 戸羽篤也・平野繁樹：「金属粉末積層造形における製造品質に及ぼす熱線照射条件の影響」, 日本鑄造工学会第165回全国講演大会 (2014. 10)
- 6) 戸羽篤也・平野繁樹：「金属粉末積層造形による多孔質金属材料の熱伝導率に及ぼす空隙率の影響」, 日本機械学会2014年度年次大会 (2014. 9)
- 7) 熱物性ハンドブック：(株)養賢堂；(2000. 4)

商品力強化のための食品パッケージデザイン分析ツールの開発

万城目 聡, 日高 青志, 橋場 参生

Development of Food Package Design Analysis Tool for Product Competitiveness

Akira MANJOME, Seiji HIDAKA, Mitsuo HASHIBA

抄 録

本道の一般顧客向け加工食品のパッケージデザインは、デザインの魅力度に関する調査において、全般的に都府県の競合商品に比べて低評価となる傾向があり、これが顧客の購買機会損失の原因の一つとなっている。食品の高付加価値化に取り組む食関連事業者からは、顧客視点で魅力的な食品パッケージデザインを開発するための手法が求められている。そこで、食関連事業者のほか、包材業者、デザイン業などパッケージデザイン開発を支援する事業者においても、顧客の視点を取り入れた食品パッケージデザイン開発に取り組めるように、当场が保有するニューラルネットワークを活用したイメージ分析ツールの機能強化や、インターネットアンケートツールの試作開発を行った。これらのツールを食品パッケージデザイン開発ケーススタディで試行した結果、パッケージデザイン開発を効果的に支援できることを確認した。

キーワード：パッケージデザイン, デザインプロセス, デザインコンセプト, ビジュアルマップ, 自己組織化マップ (SOM)

Abstract

Package design of consumer food of Hokkaido, in the study of attractiveness of design, tend to be low valuation compared to competing products of other provinces in Japan, this becomes one of the causes of customers purchasing opportunity loss. From food manufacturer who work in high-value-added food, new approach is required which develop attractive food packaging design at the customer point of view. Therefore as the food manufacturer, packaging materials suppliers, design industry can tackle food package design development at the customer point of view, we enhanced image analysis tools that take advantage of the neural network, and also developed the internet questionnaire tool. A result of these tools was attempted in the food package design development case study, it was confirmed that it is possible to effectively support the package design development.

KEY-WORDS : Package design, Design process, Design concept, Visual map, Self-Organizing Map (SOM)

1. はじめに

本道食産業の課題として、加工食品づくりによる高付加価値化が叫ばれて久しいが、食品工業の付加価値率は都道府県別で40位台と低迷が続いており、大きな課題となっている。このような背景の中、スイーツ、日本酒、ワイン、チーズなど一部の一般顧客向け食品分野においては、北海道の気候風土や素材の持ち味を活かした魅力ある高付加価値商品が生まれつつあり、今後の展開が期待されている。

一般顧客向けの加工食品を開発する上で最も重要なのは、食品の美味しさや品質であることは言うまでもないが、顧客に選ばれる商品づくりという視点では、商品と顧客の接点となる、パッケージデザインの魅力度が重要となる。

しかし、道産商品のパッケージデザインは、デザインの魅力度に関する調査において、全般的に都府県の競合商品に比べて低評価となる傾向があり、これが顧客の購買機会損失の原因の一つとなっている¹⁾。

顧客にとって魅力ある食品パッケージデザインを開発する

事業名：経常研究

課題名：商品力強化のためのパッケージデザイン分析ツールの開発

には、顧客が食品パッケージデザインに対してどのようなイメージを抱き、それが評価や行動にどう結び付くのかといった、顧客の感性情報を捉え、これをデザイン開発に活かすことが有効である。しかし、道内食関連事業者において、このような顧客の感性情報の活用は、ノウハウや支援ツールの不足、調査コストの問題からほとんど実施されていない。

そこで本研究では、食関連事業者のほか、包材業者やデザイン業などのデザイン開発支援事業者も含めて、顧客の感性情報を食品パッケージデザイン開発に活用できるように、当社が保有するニューラルネットワークを活用した「イメージ分析ツール」の機能強化や、インターネットアンケートツール試作開発などに組み込み、これらのツールを食品パッケージデザイン開発ケーススタディで試行し効果を確認した。

2. 食品パッケージデザイン開発現場の現状と課題

本道の食関連事業者が食品パッケージデザインを開発する場合、組織内部に専門のデザイナーがいることはほとんどなく、地域の包材業者にデザインを依頼することが多い。そしてデザインを依頼する食関連事業者が、ターゲット顧客像を設定していなかったり、パッケージデザインの方向性（デザインコンセプト）を持たないまま、包材業者に丸投げしてしまうケースが多々ある。こうなるとデザインコンセプトが不明確なままデザイン案が作成され、提案されたデザインを評価～決定する段階では曖昧な理由や開発担当者の「好き、嫌い」でデザインを決定することになり、リスクが大きい。

このようなやり方でも、パッケージデザイン開発は可能であり、優れたデザインによって売れる商品が生まれる場合もある。しかし、商品を販売する段階で、バイヤーからパッケージデザインの改善を求められたり、販売開始後にパッケージデザインが理由で販売不振に陥ったりするケースは後を絶たない。

このような状況を改善し、失敗リスクの少ないデザイン開発を実現するためには、食関連事業者のみならずデザイン開発を支援する包材業者やデザイン業などとともに、次の①～③に取り組む事が有効と考える。

① 顧客の感性情報の調査・分析

ターゲット顧客の食品パッケージデザインに対する印象や態度などの感性情報を調査・分析する。

② デザインコンセプト主導のデザイン制作・評価

①で得た感性情報を踏まえた顧客視点のデザインコンセプトをつくり、その方向性に沿ってデザイン制作や評価を行う。

③ 開発体制づくり

①②の実践を支援できる食関連事業者、包材業者、デザイン業間の連携体制をつくる。

上記①の、顧客の食品パッケージデザインに対する感性情報

の調査・分析を支援するのが、「イメージ分析ツール」である。

3. イメージ分析ツール

3.1 イメージ分析ツール概要

当场では、SD法（Semantic Differential Scale Method）を用いた調査結果を自動的に分析し、評価対象間の相対的関係をわかりやすい2次元のビジュアルマップで視覚化できるイメージ分析ツールを開発している²⁾。

本ソフトウェアはT.Kohonenが考案したSOM（Self-Organizing Map）と呼ばれる自己組織化ニューラルネットワークを応用したものであり、WindowsOSのPC上で動作する（以下SOMツール）。

SOMツールの利用手順は次のとおりである。

- ① 評価対象となる食品パッケージデザインを選定する。選定数は10点前後が目安である。
- ② ①で選定した画像を被験者に提示し、SD法を用いてn個（最大16まで）の評価項目に対する回答を得る。回答結果から、評価対象ごとにn次元の入力データを作成する。
- ③ ②で作成した入力データをSOMツールに入力し、SOMの学習を行う。学習の開始時には、任意の乱数（0～20）を入力する。
- ④ 学習後のSOMの状態をマップ状に視覚化（ビジュアルマップ化）する。
- ⑤ ビジュアルマップを見ながら評価対象のイメージをグループ化することで、被験者の食品パッケージデザインに対する感性を分析する。

3.2 SOMツールによるイメージ分析

SOMツールを用いると、多変量解析等の専門知識がなく



図1 SOMツールの利用手順

でも、出力されるビジュアルマップを分析することによって、食品パッケージデザインを見た被験者が「美味しさ」、「高級感」、「楽しさ」など、どのような知覚イメージを経て、最終的に「好き-嫌い」、「食べたい-食べたくない」といった心理や態度に至っているのか把握することができる。

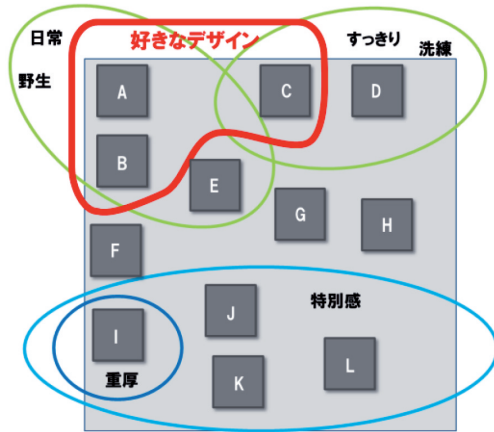


図2 ビジュアルマップを用いたイメージ分析

図2は11点のパッケージデザインのイメージをSOMツールでビジュアルマップ化し、「好きなデザイン」という評価を得たデザインにどのようなイメージが効いているか表したものである。左上の領域にアンケート被験者が「好きなデザイン」と感じた3点のパッケージデザインが集まっており、「日常」や「野生的」というイメージを持った2つの商品A, B, 「すっきり」していて「洗練」されているというイメージを持った1つの商品Cが評価されていることがわかる。さらに「日常」で「野生的」というイメージを感じているにも関わらず、「買いたい」という評価から外れている商品Eもあることがわかる。また、ビジュアルマップの下半分には「特別感」や「重厚」というイメージを持った商品I～Lが見られるが、これらは「好きなデザイン」イメージから大きく外れていることなどがわかる。

このようにSOMツールを用いると、食品パッケージデザインのイメージ分析結果を1枚のビジュアルマップの中でわかりやすく表現することができる。

ビジュアルマップを活用することで、2章の②で示したデザインコンセプト主導のデザイン制作・評価が行えるようになる(図3)。具体的には次の2つのステージA, Bで活用が見込める。

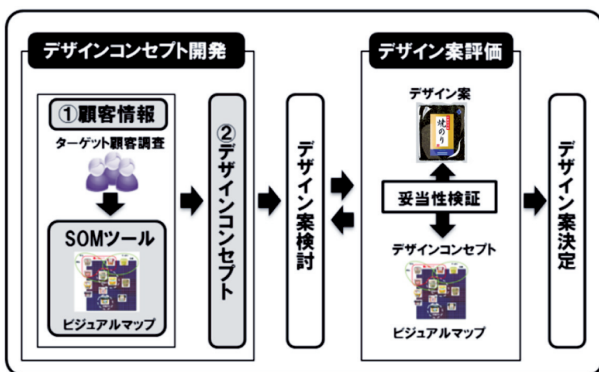


図3 デザインコンセプト主導のデザイン制作・評価

A. 開発前半：デザインコンセプト開発に活用

競合食品や自社の既存食品パッケージデザインについて感性評価を行い、ビジュアルマップでターゲット顧客のデザインに対する嗜好性や考え方を探り、得られた情報を参考にデザインコンセプトを検討する。

B. 開発後半：デザイン案評価に活用

開発したデザイン案がねらいどおりか評価するために、デザインコンセプトに照らし合わせる。ビジュアルマップ上でデザイン案がねらいとするイメージを実現できているか確かめる。

3.3 デザインコンセプトのまとめ方

SOMツールから得られた情報でデザインコンセプトをまとめる場合、ビジュアルマップ上にねらいとするターゲットエリアを示した「ポジショニングマップ」、その領域の特徴を表す「イメージキーワード」、デザイン表現のヒントとなる「デザイン要素」などで構成すれば、曖昧になりがちなデザインの方向性をかなり具体的に示すことが可能になる(図4)。

また、アンケート実施時に評価対象のパッケージデザインそれぞれに対するフリーコメント欄を設けておくと、評価に至る理由やその背景にある価値観など、デザインコンセプト検討に有用な情報が得られる。被験者の生の声を「顧客コメント」としてデザインコンセプトに取り入れると、ターゲット顧客像がより具体的に感じられるようになる。



図4 デザインコンセプトの構成要素

4. SOMツールの機能強化

食品パッケージデザイン開発の中でSOMツールを試行したところ改善すべき課題が抽出された。SOMツールにアンケート調査結果を読み込んで分析を行う際、ソフトウェアの仕様上任意の乱数を入力する必要があるが、その数値によっては、図5のように着目したい領域が分断され、分析が困難なマップが出力されることがあった。このため、読み取りやすいビジュアルマップが出力されるまで、乱数を変えながら

何度もマップ出力を繰り返す必要があり、作業効率を低下させていた。

そこで、分析しやすいマップを効率的に出力できるように、乱数の数値によって着目したい領域がどのように表示されるかが事前にわかるプレビュー機能を追加した。これによって、ビジュアルマップ出力の試行錯誤が不要になり、作業効率が高まった。

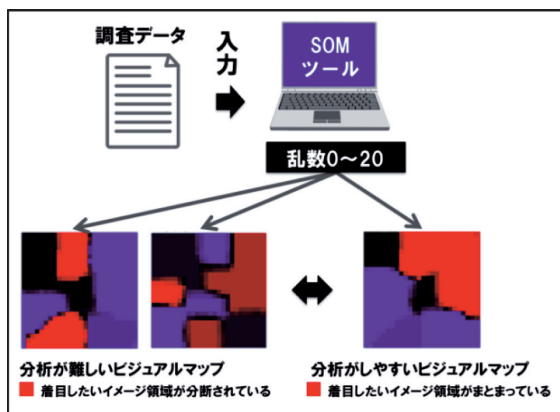


図5 乱数で変わるビジュアルマップ出力結果

また、SOMツールが出力したビジュアルマップは、プリントアウトしたものに分析作業中の書き込みを行ったり、パワーポイントなどに取り込んでプレゼンテーション資料として利用することを想定している。そこで、目的に応じてビジュアルマップの背景デザインを白色、グレー、ドット入り、グリッドなどから選べるようにした。これらの機能強化を図ったことで、SOMツールの利便性が高まった（図6）。

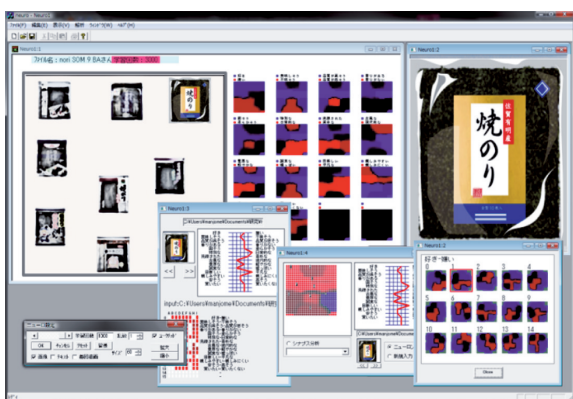


図6 機能強化したSOMツール画面

5. インターネットアンケートツールの試作開発

SOMツールを利用するには、食品パッケージデザインのイメージに関するアンケートを実施する必要があるが、郵送によるアンケートを試行したところ、アンケート用紙の送付

から回収まで3週間を要した。これについて、食関連事業者から調査期間は1週間程度まで短縮しなければ実践活用は難しい、との意見を得ていた。

そこで郵送に比べて実施効率の良いインターネットアンケートが利用できないか、インターネットアンケートサービス事業者が提供するサービス内容について調査を行った。しかし、現状ではアンケートフォームのデザインの自由度が低かったり、調査終了後に出力される集計データが直接SOMツールに読み込めないなどの問題があった。そこで、既存のインターネットアンケートツールをベースに、下記機能の追加や改善を行った独自のインターネットアンケートツールを試作開発した（図7）。

【インターネットアンケートツールの主な機能】

- アンケートフォーム作成機能
- アンケート配信機能
- アンケート結果集計機能
- SOMツールへのデータ出力機能
- アンケート結果の簡易グラフ表示機能
- 被験者管理機能



図7 インターネットアンケートツール試作

このアンケートツールを用いてアンケートを試行した結果、手作業によるアンケート発送や集計作業を省いたことで、一連のアンケート実施作業を1週間程度に短縮できることを確認した。

被験者群へのアンケート依頼は一斉メールで行うが、アンケート回答は依頼日に集中し、その後2～3日でほぼゼロになった（アンケート試行では100人に依頼し、2～3日中に20人程度から回答）。未回答の被験者群にのみ、再度アンケート依頼のメールを送付してみたが、回答率はほとんど上がらなかった。このことから、インターネットアンケートはアンケート依頼日から短期間で集計作業を開始できることがわかった。

食品パッケージイメージ分析のためのアンケート調査において特に重要となるのが被験者の選定であるが、試作したイ

インターネットアンケートツールでは、被験者の年齢、性別、職業、在住地、家族構成など、あらかじめ登録されたデモグラフィック情報をフィルターとした細かな選定が可能である。実際には、まずデモグラフィック情報で絞った被験者候補群に調査対象に関する価値観や、ライフスタイルなどについてのプレアンケートを行い、これらのサイコグラフィック情報も踏まえた精度の高い被験者選抜を行うことを想定している。

6. ケーススタディによる有効性確認

6.1 ケーススタディ概要

食関連事業者の協力を得ながら、水産加工品や菓子など複数のパッケージデザイン開発業務でSOMツールを試行した。主なケーススタディ実施内容は、焼き海苔（10枚入り袋）、プリン（瓶入り）、味噌（500gカップ入り）、海産物ブランド商品（鮭、数の子など）、アイスクリーム（カップ入り）、キャンディー（ギフト仕様）、トマトジュース（ボトル入り）などである。ケーススタディの一部についてSOMツールの活用結果の概要をまとめる。

ケーススタディ① 焼き海苔（10枚入り袋）

【食関連事業者のニーズや課題】

焼き海苔（10枚入り袋）商品は、スーパーなどの小売販売店で競合商品との競争が激しく、顧客の購買行動に対するパッケージデザインの影響は大きい。このため、自社商品のパッケージデザインが、競合商品と比較して顧客にどのように見られているか知りたい。

【パッケージデザインイメージ調査】

主婦層50名を対象として、当該企業の商品2点と競合商品6点についてイメージ調査を実施。

【SOMツール活用の結果】

自社商品のパッケージデザインが、評価が高かった他社商品のパッケージデザインに対して、イメージにどのような違いがあるか具体的に把握できた。一方、自社商品は他社にはないイメージとして、「新しさ」が評価されていることもわかり、このイメージを活かすことが他社商品のパッケージデザインと差別化を図る有効な切り口になるとの仮説を得た。

ケーススタディ② プリン（瓶入り）

【食関連事業者のニーズや課題】

乳製品や菓子など、商品ラインナップの拡充を進めてきたが、パッケージデザインは各商品ごとに個別に開発しているためイメージに一貫性がなく、ブランドイメージが拡散している。ブランドイメージを強化するには、今後パッケージデザインをはじめ顧客との接点となる媒体をどのような方向性で開発すべきか検討したい。

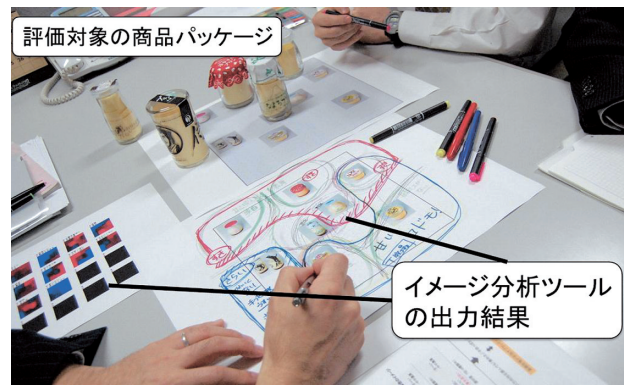


図8 プリンのパッケージデザインイメージ分析試行

【パッケージデザインイメージ調査】

20代～50代女性50名を対象として、当該企業が既に販売しているプリン商品1点、当該企業のイメージの異なる2つのカテゴリの商品を選び、そのデザインコンセプトで試作したプリン商品のダミー2点、さらに他社プリン商品5点の計8点についてイメージ調査を実施した（図8）。

【SOMツール活用の結果】

自社商品の3つのデザインコンセプトは一見異なっているが、競合商品と比べれば顧客はいずれも似たようなイメージとして認識していることを把握した。その中で比較的に評価が高いデザインコンセプトが1つあることがわかり、今後ブランドイメージを強化するためには、そのデザインで商品パッケージデザインを統一していくことが有効との仮説を得た。

これらのケーススタディを通じて、パッケージデザインのイメージ調査とSOMツールによるイメージ分析は、顧客視点でパッケージデザインの課題を発見したり、課題解決に向けた仮説の導出に有効活用できることがわかった。

6.2 ケーススタディで得られた課題

今回ケーススタディの協力を得た食品製造事業者、包材業者、デザイン業に、パッケージデザインイメージ調査とSOMツールによるイメージ分析を体験してみた結果についてヒアリングを行った。

その結果、食品製造事業者は、「顧客の商品パッケージデザインの見方を初めて知った。とても興味深い。」「ビジュアルマップは上司への説明や説得に活用できそう。」「パッケージデザインの見方を理解するのに役立ちそう。」など、全般的に高い関心を示した。

包材業者、デザイン業はいずれも、「クラアイトからどんなデザインが求められているのかわからないことが多く、これまでは手探りで提案せざるを得なかったが、こういった調査を取り入れることで、顧客視点のデザイン提案ができるようになる。」と、デザイン開発プロセスの改善に対する期待が聞かれた。また、「イメージ調査を取り入れることが、

包材業者やデザイン業としてサービスの差別化につながりそうだ。」との感想もあった。

しかし、食関連事業者からは「誰がイメージ調査を実施するのか?」「実施に必要なスキルやノウハウ獲得が難しいのでは?」という声が聞かれた。「現状ではデザイン開発にコストをかける余裕はなく、イメージ調査のための人材確保も難しい。」デザイン業からも、「イメージ調査のコストをデザイン発注者の食関連事業者や包材業者に対して請求することは難しい。」と、調査の実施主体になることについて否定的な反応であった。

これに対して、包材業者は多数の食関連事業者を顧客として抱えているため、「イメージ調査の結果を同一の食品カテゴリを扱う複数の顧客企業に対して有効活用できる可能性がある。」また、「開発したパッケージデザインの成功によって、売れ続ける商品が生まれれば、包装資材の長期的なリピート供給につながるので、イメージ調査のコストも吸収できる。」との見方がなされた。

このことから、今後、包材業者がパッケージデザインイメージ調査とSOMツールによるイメージ分析を実施しながら、食関連事業者、デザイン業との連携で2章の③で示した開発体制づくりを進めるのが有効と考えている。

また、デザイン業からは、具体的な色・形の操作を行い、パッケージデザインをまとめる立場から、「デザインコンセプトの明確化はよいが、それが色・形を最初から指定するものになってしまうと、デザイナーの持ち味である創造性が妨げられてしまう。」という不安が聞かれた。この点に留意して、デザイナーの豊かな創造性を活かし、説得力のあるデザイン提案や、場合によっては新しい商品コンセプトを導出するようなビジュアルマップ活用方法を検討する必要があると考える。

さらに、ケーススタディを実施する過程で、アンケート実施に必要な評価項目を評価対象ごとに検討した。アンケート調査が効率的に行えるように、商品カテゴリごとの評価項目を整備することも今後の課題である。

7. おわりに

顧客の感性情報を食品パッケージデザイン開発に活用できるように、イメージ分析ツール（SOMツール）の機能強化や、インターネットアンケートツール試作を行い、これらを活用したケーススタディでその有効性確認を行った。

この結果、パッケージデザインのイメージ調査とSOMツールによるイメージ分析は、顧客視点でパッケージデザインの課題を発見したり、課題解決に向けた仮説の導出に有効活用できることがわかった。

一方、パッケージデザイン開発現場での実践活用に向けては、食関連産業、包材業者、デザイン業の連携体制づくりや、ビジュアルマップの効果的な活用ノウハウの蓄積が課題である。今後は包材業者をイメージ調査・分析の実施主体とした展開に取り組み、早期の実践活用を目指す。

引用文献

- 1) ノーステック財団,首都圏売れ筋商品比較調査, 2010
- 2) 橋場参生, 及川雅稔, 万城目聡, 高橋裕之, 本間稔規: 自己組織化ニューラルネットワークを用いた感性情報分析支援ソフトウェアの開発, 北海道立工業試験場報告No 300, 2001

焼き海苔(10枚入り袋)	プリン(瓶入り)	
古風な・現代的な 香りがある・香りが無い 固そう・柔らかそう 重厚な・軽やかな 親しみやすい・親しみにくい 誠実な・嘘っぽい	甘さ控え目・甘い かわいくない・かわいい ユーモア・まじめ 淡泊・濃厚 子供っぽい・大人っぽい 大量生産・手造り感	個別項目
美味しそう・不味そう 品質が高そう・品質が低そう 特別な・日常的な 洗練された・素朴な 目新しい・平凡な 安そう・高そう 嫌い・好き	美味しそう・不味そう 品質が高そう・品質が低そう 特別な・日常的な 洗練された・素朴な 目新しい・平凡な 安そう・高そう 嫌い・好き	共通項目

図9 試行した評価用語例

荷物取扱作業における上肢負荷軽減技術の開発

前田 大輔, 吉成 哲, 中島 康博, 栗野 晃希

Assistive Technology to Reduce Upper Limb Burden during Manual Handling

Daisuke MAEDA, Satoshi YOSHINARI, Yasuhiro NAKAJIMA, Kouki KUWANO

抄 録

一次産業に多く見られる荷物取扱作業は上肢障害発生事由の約1割を占めるなど、作業への負担が大きい。本研究では荷物取扱作業における上肢負荷軽減技術の開発を行った。複数の荷物取扱作業を対象とした作業観察の結果から代表事例を抽出し、模擬環境下で上肢の関節角度や筋電位等の生体情報と荷物挙動の計測・分析を行い、手首の剛性を高めるサポートや荷物の安定性確保が軽労化に有効であることを明らかにした。さらに、手首の背屈を補助する負荷軽減ツールを考案し、機能試作を通じて効果を確認した。

キーワード：上肢負担, 筋電図, 一次産業

Abstract

Manual handling is one of the factors that increase the risk of upper limb disorders. Especially, most of workers in Japanese primary industries still do such operations in high risk. The purpose of this study is to reduce upper limb burden during manual handling in primary industries. We performed work observation and simulated work experiment with biological information and load behavior measurement. As a result, we found out that improving stability of the load and wrist support is effective to reduce the burden. Moreover, we developed the prototype wrist support which assists dorsiflexion, and measured wrist joint angle and EMG during the simulated work with it. The effect of reducing the burden has been confirmed by the measurement data.

KEY-WORDS : Upper limb burden, EMG, Primary industries

1. はじめに

一次産業に多く見られる運搬や積卸し等の荷物取扱作業は作業関連性運動器障害の主な要因の一つであり、上肢障害発生事由の約1割を占める¹⁾。こうした作業は機械による自動化や台車の利用などが推奨される。しかし、農業におけるほ場内での運搬作業や漁業における陸揚げ作業等、一次産業では場所やコストの制約、作業効率の問題などにより機器の導入が難しい場合も多い(図1)。また、労働力の高年齢化・女性化の傾向が顕著(例えば農業では、就業人口227万人のうち、65歳以上は144万人(64%)、女性は114万人(50%)に上る²⁾)であり、作業の軽労化を望む声が多く、荷物取扱作業についても上肢等の負担軽減に向けた取組が必要と考えられる。

本研究では、一次産業における荷物取扱作業を対象に、作業観察と模擬作業時の負荷計測試験を通じて負荷要因を把握するとともに、上肢の負荷軽減手法について検討した。



図1 一次産業における荷物取扱作業の例

事業名：経常研究

課題名：荷物運搬作業における上肢負荷軽減技術の開発

2. 荷物取扱作業における負荷要因の把握

2.1 荷物取扱作業の分類

一次産業における人手による荷物取扱作業について作業観察を行い、取り扱う荷物の重量と作業継続時間の観点から分類を行った(図2)。対象作業は、醸造用ブドウ収穫作業、ジャガイモ播種作業、キャベツ収穫作業、水稻移植作業、ブロッコリー収穫作業、カボチャ収穫作業、ダイコン選別作業、ナガイモ選別作業、菌床シイタケ収穫作業の9作業とした。上記の作業のうち、取扱重量は軽い(1kg前後)が作業継続時間の長い(数時間~1日)低負荷長時間作業と、作業継続時間は短い(10数分~2時間)が取扱重量が比較的重い(10~20kg)中負荷短時間作業の負担が大きいと考えられる。



図2 取扱重量と作業継続時間による作業の分類

2.2 模擬作業による負荷計測試験

対象作業のうち低負荷長時間作業から菌床取扱作業を、中負荷短時間作業からミニコンテナ取扱作業を代表事例として、作業負荷の計測を行った(図3)。計測は模擬環境下で実施し、生体情報(関節角度および筋電位)と荷物挙動(加速度)の記録、部位別主観的負担度【0:何も感じない】~【10:非常にきつい】の聞き取りを行った。

これらの分析により、次の結果が得られた。

- ① 菌床取扱作業では前腕の手根伸筋群および肩の三角筋・僧帽筋で筋活動が大きく、ミニコンテナ取扱作業ではこれらに加えて上腕二頭筋の筋活動も大きかった(図5, 6)
- ② いずれの作業も手根伸筋群の筋活動が特に大きかった(図5, 6)
- ③ 主観評価による負担部位は筋活動の計測結果とおおむね同様の傾向を示した(表1)
- ④ 手根伸筋群の収縮とほぼ同時に手根屈筋群の収縮が見られた(図7)
- ⑤ 荷物の加速度と筋負荷に相関が見られた(図8)



図3 代表事例による作業負荷計測試験
(左: 菌床取扱作業, 右: ミニコンテナ取扱作業)

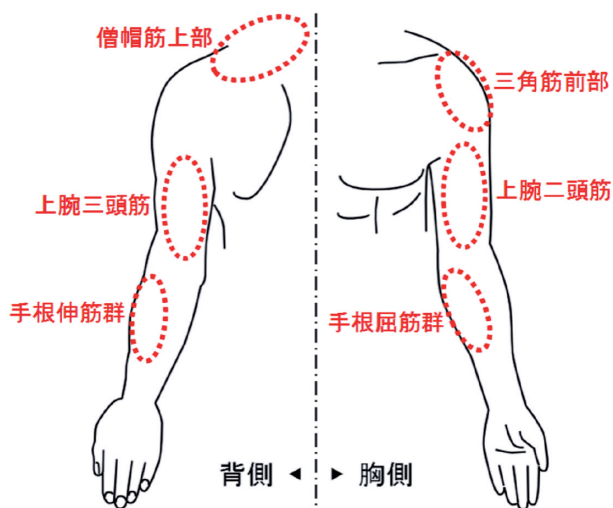


図4 筋電位計測を行った主な筋の配置

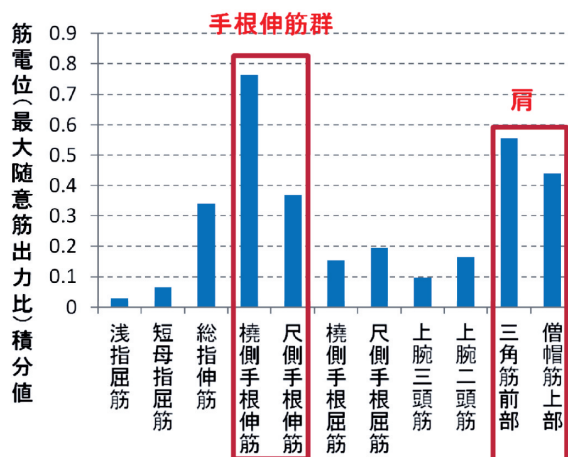


図5 菌床取扱作業における筋電位計測結果

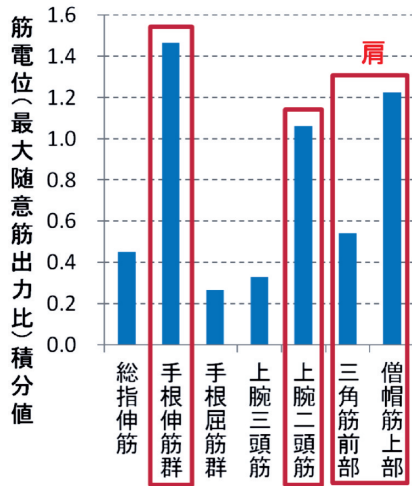


図6 ミニコンテナ取扱作業における筋電位計測結果

表1 主観評価による部位別負担度

	手指	前腕 (手背側)	前腕 (手掌側)	上腕 (背側)	上腕 (胸側)	肩
菌床	7	6	2	4	4	5
ミニコン	5	7	7	4	5	7

※【5：きつい】以上をアンダーバー表示

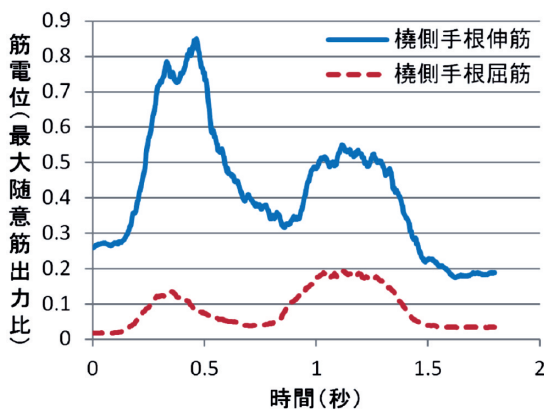


図7 手根伸筋群と手根屈筋群の同時収縮
(菌床取扱作業における例)

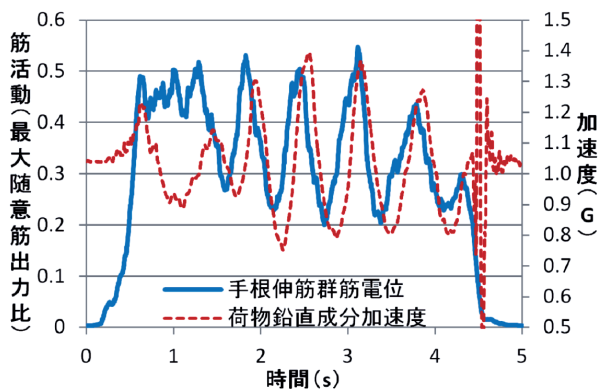


図8 手根伸筋群筋電位と荷物加速度
(ミニコンテナ取扱作業における例)

3. 上肢負荷軽減手法の検討

負荷計測試験において、特に負担の大きかった手根伸筋群は手関節を背屈させる際の主動筋であるため、背屈を補助することで手根伸筋群の負荷を軽減できると考えられる。また、手関節を固定するように手根伸筋群と手根屈筋群が同時に収縮していることから、サポータ等により手関節の剛性を向上させることで筋負担が軽減されることが考えられる。さらに、荷物の加速度が筋負担に影響しており、荷物の安定性を確保することも軽労化に有効と考えられる。ただし、荷物の安定性は取手形状等の形態に左右されるため、作業内容により個別の検討が必要と考えられる。ここでは手根伸筋群の負荷に注目して負荷軽減手法の検討を行った。

3.1 市販サポータ装着による負荷軽減効果

手関節の剛性向上による負荷軽減効果を確認するため、手関節を固定する市販サポータ(図9)を装着し、模擬作業を行った際の筋電位を計測した。

菌床取扱作業における結果を図10に示す。市販サポータの装着により前腕の筋活動は減少したが、肩の筋活動は増加した。手関節固定による可動域の減少に伴い、肘関節・肩関節に代償動作が発生し、肩の筋負担が増加したと考えられる(図11)。2.2節の結果では、代表事例とした作業において、肩は前腕に次ぐ負担部位であり、負荷の増加は望ましくない。荷物取扱作業の負荷軽減を目的に手関節の固定を行う場合は、代償動作が発生しない作業内容であるか確認が必要である。



図9 市販サポータ(手関節固定タイプ)

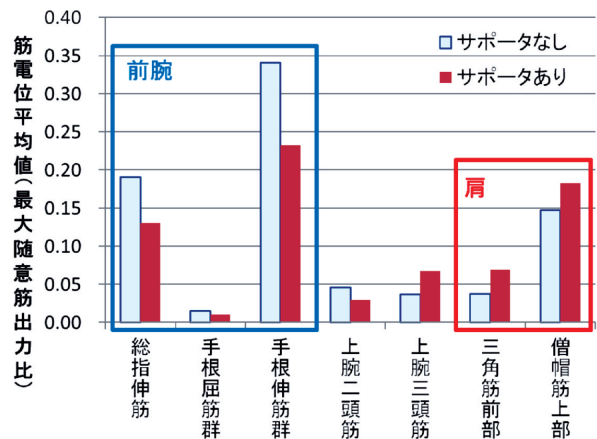
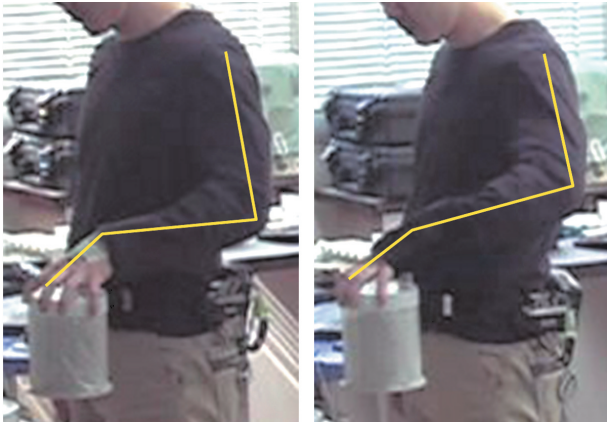


図10 市販サポータ装着による筋活動変化
(菌床取扱作業の例)



サポータなし サポータあり
 図11 市販サポータ装着による代償動作

3.2 上肢負荷軽減ツールの機能試作

手関節の背屈補助による負荷軽減効果を確認するため、ゴムの弾性により背屈を補助する簡易サポータを試作し（図12）、模擬作業による評価試験を行った。菌床取扱作業における手関節角度の計測結果を図13に示す。装着による明らかな代償動作は見られず、作業時の手関節角度が中立位（力を抜いた際の自然な肢位）側に変位した。手首から先を前腕に対して真直ぐにした自然の状態で発揮できる握力を100%とすると、手首から先を左右あるいは上下に屈曲したときに発揮できる握力は60～80%に減少する³⁾。このため、道具の形状を工夫することで手関節の角度を中立位に保ち、負担軽減を図る事例は多く見られる。従って、試作サポータの装着により、中立位に近い、より自然な肢位で作業が可能になることは負担軽減効果が期待できると考えられる。なお、筋活動については、試作サポータの装着による明確な負荷軽減効果は認められなかった。



図12 試作サポータ

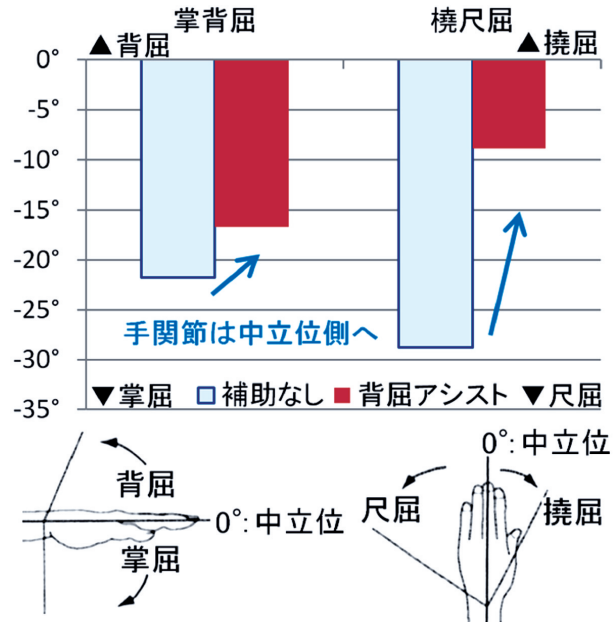


図13 試作サポータの装着による手関節角度の変化（菌床取扱作業）

3.3 上肢負荷軽減ツールの改良試作

試作サポータは手首に巻き付けて身体に固定する構成であり、ゴムの張力によるサポータのずれを防止するためには、手首を強く締め付ける必要がある。また、ゴムの張力を調整することができず、適切な補助力を得ることも難しい。そこで、身体への固定位置を上腕部に変更した改良サポータを試作した（図14）。改良サポータは、肘関節がストップとなるため上腕部を強く締め付ける必要が無い。また、肘関節と手関節の間でゴムの張力を調整することができる。ミニコンテナ取扱模擬作業による改良サポータの評価試験において、手根伸筋群の負荷軽減効果を確認した（図15）。



図14 改良サポータ

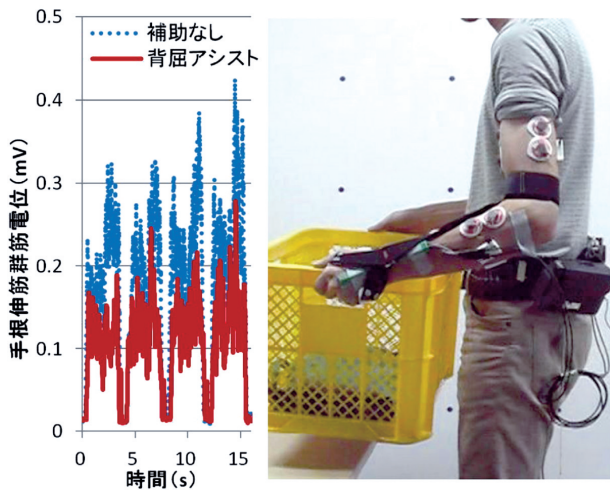


図15 改良サポータの評価試験

4. まとめ

荷物取扱作業において負担の大きい手首の背屈を補助する簡易サポータを試作し、負荷軽減効果を確認した。人手による荷物取扱作業は一次産業のほか、物流業や製造業等、様々な場面でされており、軽労化が実現すれば適用範囲は広いと考えられる。

今後は装着方法や補助力・補助機構の最適化等、実用化に向けた検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究で使用した3次元運動撮影解析システムは、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) 厚生労働省：平成21年度第2回労働基準法施行規則第35条専門検討会資料「上肢障害について」，(2009)
- 2) 農林水産省：農林水産基本データ集，
<http://www.naff.go.jp/j/tokei/sihyo/>，(2015-06-01)
- 3) 横溝克己・小松原明哲：エンジニアのための人間工学—改訂—，日本出版サービス，第2版3刷，231PP，(1995)

研究ノート

Research Note

水産物の動的挙動シミュレーションに関する研究

浦池 隆文, 多田 達実

Research on Dynamic Behavior Simulation Technique of Marine Products

Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA

抄 録

水産加工機械の開発においては、加工の対象となる水産物の漁獲期が限定され、当該の水産物を用いたテストが可能な時期に制限があることから、開発が長期化する傾向がある。また、テストに用いる水産物の購入費負担も大きい。設計開発の効率化には、シミュレーション技術の活用が有効と考えられるが、形状が不定で複雑かつ柔軟な構造を持つ水産物の挙動を厳密にシミュレートするのは、モデル作成に多大な手間がかかり、計算機負荷も高いため実用的ではない。

そこで本研究では、汎用の機械設計向け3D-CADおよび機構解析システムを利用して実施可能な、簡便なシミュレーション手法の構築について検討を行った。本来連続体である水産物（魚類の一例として鮭）を、複数のパーツに分割した低自由度な解析モデルで近似し、摩擦と弾性の実測値を適用することで、実物と類似の挙動を再現する。魚体の方向整列を想定した模擬的なコンベア搬送システム上でのシミュレーションを実施し動作確認を行ったところ、良好な結果が得られた。

キーワード：水産加工機械、3D-CAD、機構解析

1. はじめに

水産加工機械の開発においては、加工の対象となる水産物の漁獲期が限定され、当該の水産物を用いたテストが可能な時期に制限があることから、開発が長期化する傾向がある。また、テストに用いる水産物の購入費負担も大きい。このような現状において、設計開発を効率的に実施するには、シミュレーション技術の活用が非常に有効と考えられる。近年は、様々な分野の機械装置類の開発に3D-CADを用いることが一般的となっており、3D-CADと連動して実施可能な各種シミュレーションも、利用しやすい環境が整ってきている。しかし、水産加工分野では、加工対象となる水産物は形状が不定であり、かつ複雑で柔軟な構造であることから、厳密なモデルによるシミュレーションは、モデル作成に多大な手間が必要であり、計算機負荷が極めて高いため、非常に困難である。

そこで本研究では、水産加工機械開発の迅速化および高度化に資することを目的として、形状が不定で複雑かつ柔軟な

構造を持つ水産物（魚類の一例として鮭）について、汎用の機械設計向け3D-CADおよび機構解析システムを利用して実施可能な、簡便なシミュレーション手法の構築について検討を行った。

2. シミュレーション手法の概要

本研究では、水産物（魚類）のモデリングを行う3D-CADにはDassault Systemes SolidWorks社製のSolidWorks、シミュレーションを実施する機構解析システムには、SolidWorks上で動作するSolidWorks Motionを使用した。魚類は、骨格・筋肉・内臓・皮膚等の組織からなる複雑な構造となっており、かつ柔軟で無限の自由度を有している。このよ

事業名：経常研究

課題名：水産物の動的挙動シミュレーションに関する研究（平成25～26年度）

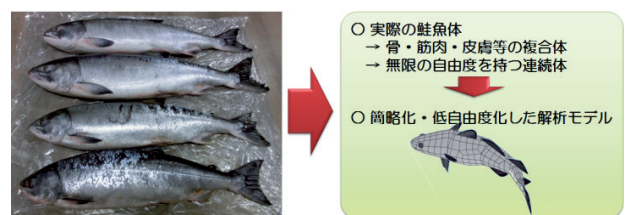


図1 鮭の実体と解析モデル

うな構造に対して、3D-CADおよび機構解析システムを用いて厳密なモデルを作成することは非常に困難である。ここで、簡略化（低自由度化）したモデルによりおおむね実物と同様な挙動を再現することが可能であれば、開発の対象である加工機械の動作や性能について、実機テストを行う前におおむね予測することが可能になると考えられる。そこで、外形や重量は実際の魚体と同様とし、複数のパーツに分割した魚体モデルを再結合することで、低自由度な解析モデルを生成した（図1）。このモデルに対し、全体の柔軟性や表面の摩擦を、魚体の実測値にもとづいて設定した。さらに、作成した魚体モデルの挙動を確認するため、方向の整列を想定した模擬的なコンベア搬送システムを設計し、シミュレーションを実施することで動作の確認を行った。

3. 鮭魚体の機械的特性と低自由度解析モデルの生成

機構解析システムによるシミュレーションにおいては、対象となる物体の形状・寸法・質量特性や、表面の摩擦および柔軟性（弾性）等の機械的な特性にもとづき、力学的な計算が行われることにより、その挙動が得られる。ここでは本道の主要水産物の一例として鮭を対象とし、シミュレーションに必要な上記特性の測定および解析用モデルの生成手法について以下に述べる。

3.1 鮭魚体の機械的特性

鮭魚体の機械的特性のうち、摩擦および弾性について、次

に示す方法により測定を行った。

摩擦係数の測定（図2）は、電動シリンダにより駆動されるスライドテーブル上に鮭を置き、スライドテーブルを図の左方向へ駆動した際の牽引力を、図の右側に配置しワイヤーで鮭と接続したフォースゲージにより測定した。これにより測定される牽引力（摩擦力）を、鮭の魚体重で割ることにより、摩擦係数が得られる。測定は、鮭の頭を右に向けた場合（前進方向）と左に向けた場合（後進方向）の二通りで行った。鮭と摩擦するスライドテーブルの素材はアルミニウムとした。摩擦対象の表面状態と、鮭の皮膚表面にある鱗の効果により、摩擦方向で摩擦係数が変化すること（異方性摩擦）を想定し、無加工で平滑な表面（平板）と、高さ0.7mm、幅15mmのプレートに15mm間隔で貼り付け凹凸を施した表面（凹凸板）の二種類を用いて測定を行った。

弾性に相当する柔軟性の測定は、図3に示す方法により行った。魚体の弾性を直接測定する一般的な方法はないが、魚の鮮度を表す指標の一つに硬直指数という考え方があり、これを参考とした。その方法は、魚体の頭部先端から魚体身長の1/2部分を水平な板の上に乗せ、板の面から垂れ下がった尾部の付け根までの長さ（垂下長）を測定する。硬直指数は、死亡直後の柔軟な状態に対して、硬直の進行により減少する垂れ下がりの割合を%で表した値となる（死亡直後0～完全硬直100）。機械的特性の観点からは、垂れ下がりの長さから、魚体の曲げに対する弾性が推定できる。

四尾の鮭をサンプルとして測定した結果を表1に示す。摩擦係数の測定結果を見ると、平板と凹凸板では異なる結果と

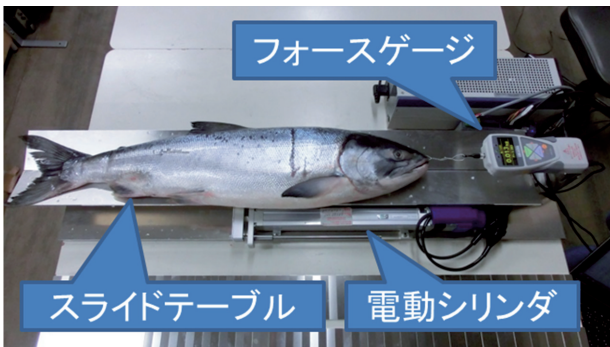


図2 摩擦係数の測定



図3 柔軟性の測定

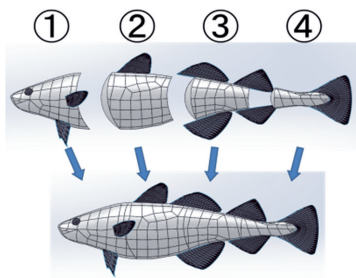
表1 鮭サンプルの測定結果

	身長・体重		摩擦係数				垂下長
			平板(アルミ)		凹凸板(アルミ)		
	尾叉長[cm]	体重[kg]	前進	後進	前進	後進	h[cm]
No.1	63.5	3.9	0.20	0.34	0.64	0.42	10.5
No.2	67.5	4.0	0.26	0.27	0.79	0.38	17.0
No.3	73.0	5.2	0.25	0.20	0.93	0.40	17.5
No.4	69.0	4.4	0.23	0.25	0.89	0.36	17.5
	Ave. 68.3	Ave.4.4	Ave. 0.24	Ave. 0.26	Ave. 0.81	Ave. 0.39	Ave. 15.6

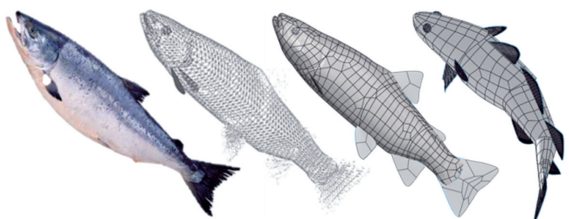
なった。平板では、前進方向と後進方向で明確な差はないが、凹凸板では平板と比較して大きく、かつ前進方向と後進方向で大きく値が異なっている。ここで、測定を実施する前は、凹凸板に対する鱗の「引っ掛かり」により、後進方向の摩擦係数が大きくなるものと想定したが、実際には前進方向の摩擦係数が大きい結果となった。このような現象のメカニズムについては、本研究の範疇を超えるため詳細な検討は行っていないが、後述のシミュレーションは、今回測定された摩擦係数を用いて実施することとした。

3.2 低自由度解析モデルの生成

シミュレーションに用いる鮭魚体モデルは、3D-CADのSolidWorks上で作成した複数のパーツを回転ジョイントで結合し、低自由度なモデルとして再構成することにより生成した(図4(a))。魚体の形状は、近年手軽に利用可能となってきた種々の三次元計測機を使用した計測により得られる点群データを、SolidWorksが有する機能によりソリッドな形状データに変換することで得られる。実際の魚体形状や寸法はすべて異なるものであるが、一度計測したデータに対



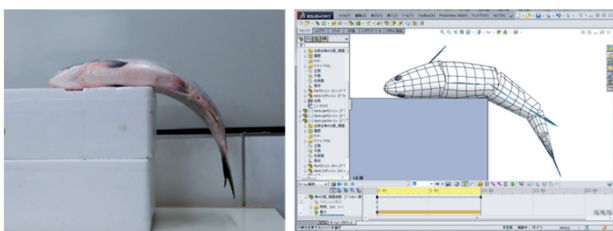
(a) 低自由度モデル



実体 → 点群 → CAD → 解析

(b) 魚体形状のモデル化

図4 低自由度解析モデルの生成



(a) 実測 (b) ねじりばねを設定

図5 弾性の設定

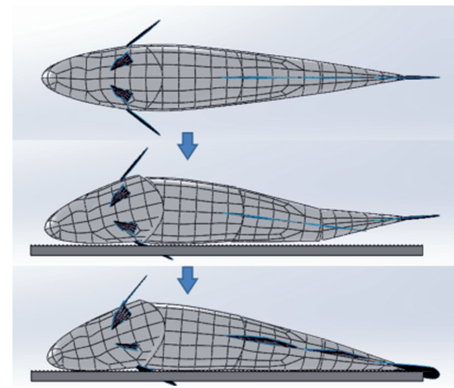


図6 低自由度解析モデルの落下挙動

して、SolidWorks上で縦横比や長さを変化させることにより、バリエーションモデルを作成することが可能である(図4(b))。このようにして作成した低自由度モデルに対し、機構解析システムのSolidWorks Motion上で、回転ジョイント部に「ねじりばね」を設定することにより、柔軟性のある鮭魚体をモデル化した。この際、ねじりばねの強さは、弾性の測定と同じ状態をSolidWorks Motion上でシミュレートし、測定の結果と同様になるよう設定する(図5)。このようにして生成した低自由度解析モデルを、平板上に落下(衝突)させた際の挙動を図6に示す。初期状態では各パーツが一直線上に並んだ状態であるが、胴体部が平板に接触した後は、各パーツが回転ジョイントを軸として回転しながら、最終的には魚体モデルの側面が平板に接した姿勢で静止している。このような挙動は、実物において想定される挙動と一致する。

4. シミュレーションの設定

前述の低自由度解析モデルを用いてシミュレーションを行うにあたり、実測により得られた異方性摩擦を考慮する必要がある。ところが、SolidWorks Motionで設定可能な摩擦は等方性であることから、次のような方法により異方性摩擦を表現することとした。SolidWorks Motionでは、シミュ

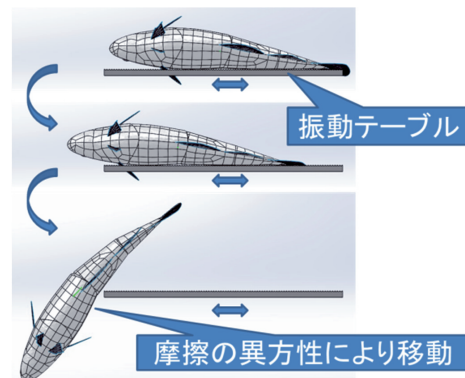


図7 異方性摩擦の効果

レーション中の物体の様々な運動状態を計測しながら、その計測結果をシミュレーションに反映することが可能となっている。この機能を利用して、摩擦対象と鮭魚体モデルの相対的な姿勢と運動方向を計測し、その結果に応じて摩擦力に相当する外力を別途作用させることで、異方性摩擦の効果を与えることとした。これにより、例えば図7に示すように、凹凸板を用いた振動テーブルにより、鮭魚体モデルが一方へ移動するような現象のシミュレーションが可能となる。

5. 方向の整列を想定したシミュレーション

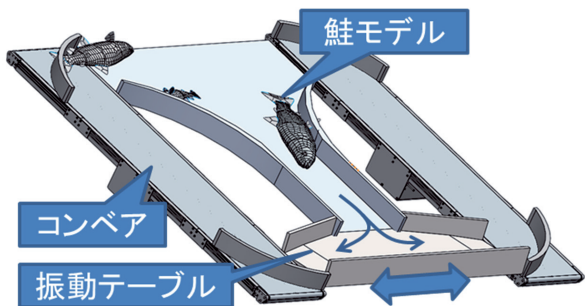
以上のようにして生成したモデルを用いて、魚体の方向整列を想定した模擬的なコンベア搬送システム上でシミュレーションを行い、挙動の確認を行った。シミュレーションは、寸法の異なる三種類の鮭魚体モデルを同時に用いて行った。動作の様子を図8に示す。傾斜したシュートの上部に、初期位置と姿勢をランダムに配置した魚体モデルは、シュートを滑落して振動テーブル部に入る(図8(a))。左右に往復運動

を行う振動テーブル部では異方性摩擦の効果により、それぞれの魚体モデルの姿勢に応じて、左右どちらかの方向へ送られる(図8(b))。コンベア部へ到達すると、コンベアによりシュートの上部へ搬送される(図8(c))。このような動作により魚体モデルがコンベアシステムを繰り返し還流する様子を確認したところ、魚体モデル同士や、シュート壁・振動テーブル壁との衝突により、魚体モデルが振動コンベア部へ到達する際の姿勢や方向は毎回異なるが、確実に方向整列の動作が行われることを確認した。

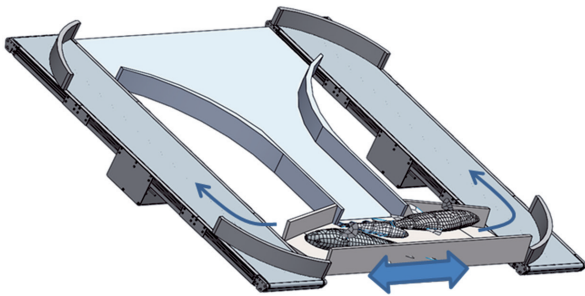
6. おわりに

本研究では、汎用の機械設計向け3D-CADと機構解析システムを利用した、水産物の挙動の簡便なシミュレーション手法の構築について検討を行った。低自由度化した解析モデルを用い、魚体の実測値にもとづいて摩擦係数や弾性係数を設定することにより、実物と類似の挙動が再現可能であることを確認した。また、方向整列を想定したコンベア搬送のシミュレーションを実施し、動作確認を行ったところ、良好な結果が得られた。これにより、試行錯誤を重ねることが多い水産加工機械の開発において、水産物を用いずに、設計段階での動作確認や性能予測ができる可能性が示された。

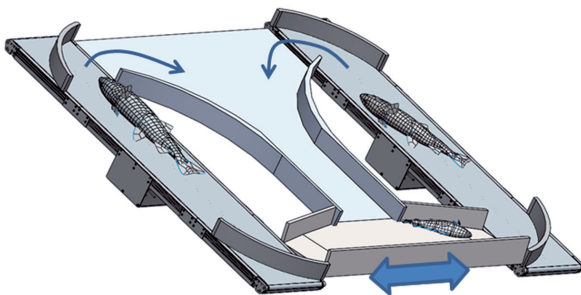
今後は本知見をもとに、実際の機械開発に適用することで技術蓄積を図るとともに、水産分野に限らず、他の生産物への応用についても検討を進める。



(a) ランダムに配置した鮮魚体モデル



(b) 振動テーブルによりコンベア部へ移動



(c) コンベアによりシュート上部へ移動

図8 コンベア搬送のシミュレーション

北海道向け営農支援ITシステムの要求分析

堀 武司, 奥田 篤, 高橋 裕之, 飯島 俊匡

Requirement Analysis of Farm Management System suitable for Hokkaido-style Agriculture

Takeshi HORI, Atsushi OKUDA, Hiroyuki TAKAHASHI, Toshimasa IJIMA

抄 録

農業分野においてもIT技術を活用した作業管理・経営支援システムの普及が進みつつあるが、北海道型農業は機械化された大規模畑作が中心であるなど、他地域とは大きく特性が異なっている。そこで、「機械化作業体系計画」等の北海道特有の要素を考慮した、道内農業者向け営農支援ITシステムの要求仕様に関する検討を行った。また、農業試験場等の研究機関の研究情報をITシステム上で効率的に活用するための試みとして、出版物の形で提供されている「北海道農業生産技術体系」のXML電子文書化を行った。

キーワード：営農支援システム，クラウドサービス，要求工学

1. はじめに

近年、農作業管理の高度化や営農ノウハウの蓄積を目的としたIT技術活用のニーズが高まっており、営農業務を支援する様々なITシステム・サービス(以下、営農支援システム)の製品開発と普及が進んでいる。

営農支援システムが具体的に備える機能は製品により様々であるが、農作業の計画や実施記録の管理、GIS(地理情報システム)による地図上での圃場の管理などを中心としたものが多い。また、最近では、スマートフォン等の通信端末経由で利用するクラウド型のサービスが主流となりつつあり、大手IT事業者においても個人農家や小規模農業法人向けにクラウド型サービスを低価格で提供する動きが見られる。

しかし、大手IT事業者による提供が中心である現在のシステム・サービスに対しては、必ずしも個人農家や小規模農業法人の業務環境に最適化されておらず使いづらいとの意見もあり、道内の農業法人では自社用システムの開発を自ら取り組んでいる事例¹⁾などが注目を集めている。

一方、道内のIT業界においては、今後新規の市場開拓が期待できる領域の一つとして、農業関連分野ビジネスへの注目が集まっている²⁾。これらの事業者による北海道型農業に

特化した新たな個人向け営農支援システム・サービス開発の推進は、本道の基幹産業である農業の高度化と、道内IT産業の振興の両方に寄与するものとして期待される。

そこで本研究では、道内IT事業者による北海道型農業向けの営農支援システム・サービスの製品開発を支援し、北海道農業におけるIT技術活用を推進することを目的とした基盤的技術開発に取り組んだ。

2. 全体コンセプト

前記の目的を実現するための具体的方策として、著者らは図1に示す全体コンセプトを作成した。本コンセプトは、民間IT事業者が行う営農支援システム開発の支援、および農業試験場の研究成果・知見の効率的活用の二つの項目から構成される。

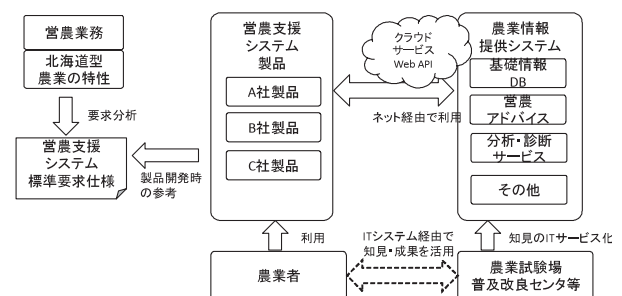


図1 営農支援システム研究の全体コンセプト

事業名：経常研究

課題名：クラウドを活用する北海道型営農支援システムの共通基盤に関する研究

2.1 営農支援システム開発の支援

実際に農業者が導入する営農支援システム・サービス製品を開発、販売する主体は民間のIT事業者であり、様々な事業者の製品による市場競争を通じてイノベーションが進むことが望まれる。

しかし、新規参入が想定される道内IT事業者の多くは、農業や営農業務に関する専門的な業務知識を保有しておらず、また顧客となる農業者へのインタビュー等によつて的確なシステム要求抽出を行うことも容易な作業ではない。そのため、新規参入には高い障壁がある。

そこで本研究では、農業IT分野に新規参入する道内IT事業者の負担軽減を目的として、営農管理業務および営農支援システムに関する基礎的な分析を行い、システム設計・開発の上流工程において参照可能な標準的要求仕様などを含んだガイド文書を作成した。詳細については3章で説明する。

2.2 農業試験場等の研究成果・知見の効率的活用

道総研農業研究本部の傘下には9つの農業試験場があり、本道の農業に必要な様々な試験研究業務を担っている。その研究成果や知見は、直接もしくは農業普及改良センターや地域団体等を通じて間接的に道内の農業者に提供され、営農に活用されている。

これらの研究情報は、現状ではその多くが文書や出版物の形で提供されている。しかし、IT化された営農支援システム等との効率的連携を図るには、農業試験場などの支援機関からの情報発信の方式についてもIT化を前提とした改善が必要である。

そこで著者らは、営農に活用できる様々な知見や研究情報をネットワークサービスとして提供し、外部の様々な営農支援システムと連携した活用を実現する「農業情報提供システム」構想を提案している。

本研究では、構想実現に向けた最初の取組として、研究情報自体の電子データ化が最も重要と考え、農業試験場が発行する基礎的農業データの一部を対象として試験的な電子化を行った。詳細については4章で説明する。

3. 営農支援システムの要求分析と標準要求仕様の作成

2章で述べた全体コンセプトに従い、農業IT分野への新規参入を検討している道内IT事業者を支援するための資料として、「北海道型農業のためのITシステム設計ガイド」(図2)を作成した。

本ガイドは、営農管理業務の分析に基づき、一般的な営農管理システムが備えるべき標準的な要求仕様や、そこで取り扱うデータの構造などといった、システム開発の上流工程で必要となる情報を、概念レベルでモデリングしたものである。

また、北海道型農業に特化したシステム開発を促進するた

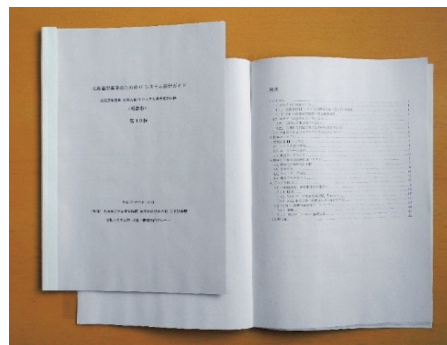


図2 「北海道型農業のためのITシステム設計ガイド」

め、本ガイドには一般的な要求仕様に加えて、機械化作業体系計画の管理機能(3.3節)など北海道型農業特有の課題に関連した要求仕様を含めた。

3.1 営農業務の分析と一般的なシステム要求のモデル化

標準要求仕様の基本部分として、一般的に営農支援システムが備えるべき機能に関する要求分析とモデル化を行った。分析作業にあたっては、道内の先進的農業法人、農業試験場等へのインタビュー、農業IT分野の先行研究事例や各種国際標準などを情報源とした。

また、営農支援システムの開発は既に様々な企業、機関によって進められているため、不必要な独自性を出すことは避け、既存製品との整合性や相互運用性を重視した。特に、(独)農業・食品産業技術総合研究機構で開発されている作業計画・管理支援システムPMS³⁾は、システム実装や関連ドキュメントが無償公開されており、国内の農業IT研究分野ではこれを基盤とするデータ形式等の標準化の動きもあることから、基本的な仕様についてはPMSに準拠することを基本方針とした。

要求仕様文書の記述には、理解の容易さと記述内容の厳密さのバランスを考慮し、UML (Unified Modeling Language)、SysML (System Modeling Language) 等の図形表現モデリング言語を使用した。これらのモデルはすべてコンピュータ設計支援ツールであるEnterprise Architect Version 12 (スパークスシステム社) 上で作成しており、将来的にはモデルデータを直接IT事業者に提供することも検討している。モデルの内容は、おおむね以下のような構成とした。

- ユーザがシステムを利用する際のシナリオ (SysML ユースケース図)
- システムが提供するべき機能群とそれらの相互関係 (SysML 要求図)
- システムが取り扱う物、概念、データと、それらの相互関係 (実体・関連モデル) (図3)

なお、これらのモデルはあくまで概念レベルでの抽象的な記述内容であり、実際のシステム開発の際に必要な詳細な要求仕様書や設計書に相当する内容は原則として含んでいない点に留意が必要である。

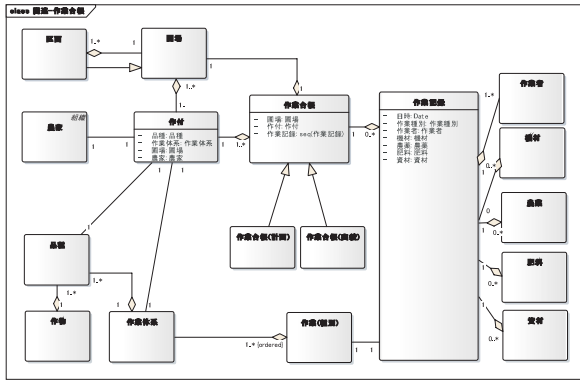


図3 営農支援システムに関する実体・関連モデル (一部)

3.2 GAP要求事項への対応

近年、農業生産の現場においては、GAP (Good Agricultural Practice) と呼ばれる規範に基づく生産工程管理が求められるようになり、個人農業者から地区農協まで様々なレベルでの取り組みが進められている。

GAPに基づく農業生産では、作業の様々な項目について文書化や記録管理が要求されており、営農支援システムによる管理業務の効率化が期待されている。著者らが行った道内先進的農業者に対するインタビュー調査でも、営農支援システム導入の主要な動機の一つとしてGAP対応が挙げられており、GAPに対応できる作業記録管理機能は今後の営農支援システムではほぼ必須の要件といえる。

そこで、GAP要求事項に対応した営農支援システム仕様を得るために、国内の代表的GAPであるJGAP⁴⁾規格文書を対象として分析を行った。その結果、JGAP規格要求事項の中から、記録・管理作業に関係する項目を合計39件抽出した(表1)。また、抽出されたJGAP項目とシステム機能要求の間の対応関係の確認を行った。

表1 JGAP要求事項に含まれる記録・管理に関連する項目

章	章見出し	要求項目数
1	農場運営	6
2	記録と管理	3
3	販売管理とトレーサビリティ	6
4	土・水・種苗の管理	3
5	肥料等の管理	3
6	農薬の管理	10
7	収穫・輸送に関わる衛生管理	3
8	農産物取扱	3
9-14	—	0
15	作業者の安全	2

3.3 北海道型農業への対応と機械化作業体系計画

一口に北海道型農業と言っても、その形態は地域や作物によって様々である。本研究では、特に道外他地域との差異が大きいと思われる大規模畑作分野を主な検討対象とし、北海道型農業に特有な課題として以下のような事項に着目した。

- 他地域に比べて、営農規模が非常に大きい。
- 機械作業が中心であり、高価な大馬力トラクタや作業機械を多用する。そのため、機械利用の効率化、すなわち一定の作業をより少ない機械で効率的に実施することが求められる。
- 輪作が必須であり多数の圃場で複数作物を並行して栽培しなければならないため、作業時期、機械、要員等の競合を考慮した複雑なスケジュール調整と、機械利用の効率化を両立しなければならない。

これらの課題に対応するために、北海道における営農指導では「機械化作業体系計画」^{5,6)}の概念に基づく営農計画管理手法の指導が、昭和40年代から今日まで行われている。

機械化作業体系計画では、各作物の年間作業スケジュールと、各作業に対応するトラクタ、作業機、および要員の割当てを、一枚の計画図としてまとめて記載する(図4)。また、計画図を作成するための基礎情報として、各作業の作業効率(単位時間あたりの作業面積)データが必要であり、計算の際には農業試験場等から提供される標準値もしくは農業者自身の過去の実績値が用いられる。

機械化作業体系計画図を作成することにより、

- 並行して行われる複数作物間の作業に、機械や要員の競合がないこと
- 利用可能な機械、要員の範囲内で、予定した耕作が実施可能であること

の二点を確認することができる。前者は、日々の農作業のための具体的な作業スケジュールを作成する作業そのものである。一方、後者は、圃場面積の拡大や新規農業機械の導入などといった長期的な営農計画を検討する際に、与えられた条件下での営農可能性の判定や、経営効率の分析を行うための手法として非常に重要である。

著者らは、道内の農業関係者らとの議論の結果、大規模畑作を中心とする北海道型農業における課題解決のための知見・ノウハウは、機械化作業体系計画に基づく営農管理として体系化されており、道内農業者向けの営農支援システムにはこれらの概念に基づいた作業計画管理機能が必要であると判断した。

そこで、機械化作業体系計画に関連するシステム機能要求として、

- 作業実績記録データに基づく圃場別作業効率データの算出
- 機械化作業体系計画図の作表
- 機械や作業要員の競合を考慮した自動スケジューリング
- 圃場や機械を増減した場合のシミュレーション機能

などの項目を、標準要求仕様の一部として導入した。

項目		月日(日単位で設定)			
		5月	6月	~	10月
栽培区分	例 秋まき小麦 (20 ha)		追肥		
	馬齢しよ (20 ha)				~
	牧草 (5 ha)			収穫	
	飼料用とうもろこし (15 ha)				
基幹機械	1号トラクタ (PS)	作業機名	ブロードキャスタ		
		実作業日数	7		
		1日作業時間	5.2		
		労働 基幹 人員 補助	1		
	2号トラクタ (PS)	作業機名			
		実作業日数			
		1日作業時間			
		労働 基幹 人員 補助			
	自走式機械	作業機名	フォレージハーベスタ		
		実作業日数	20		
1日作業時間		5.2			
労働 基幹 人員 補助		1 3			
補助臨時機械	作業名・機械名 (台数)	小型動力機械 (スノーモービル、たまねぎ移植機等)			
手作業	一日能率×日数×人数	トラック・運搬車両など			
	作業名 使用機器名	機械を用いない人力作業 (種草取りなど)			
	1日作業時間 補助(作業者数)				

図4 機械化作業体系計画図の例

(1) 秋まき小麦
ア 普通畑
ア) 作業体系と生産資材 (ha当たり)

作業名	作業時期	栽培技術の内容	作業技術							所要資材
			作業機名	規格	作業人員	時間		積算参考		
						機械	人力	作業幅 m	作業速度 km/h	
堆肥散布	8/下~9/中		マニファブ レッダ	横軸ビーク	1	0.7	0.7	3	6.0	堆肥
			フロントローダ	1	0.2	0.2				
耕起	8/下~9/中	耕深20~25cm	リバーシブルプラウ	18インチ×3連	1	1.5	1.5	1.4	6.0	
砕土・整地	9/上~9/下	1回掛け 砕土率70%以上 [土壌条件により機種、作業回数を適宜選択する]	ディスクロー	20インチ×28	1	0.9	0.9	2.7	6.0	
			パワーロー	2.6m	1	3.2	3.2	2.6	3.0	
施肥・播種	9/中~9/下	ドリル密条播き(畦幅12~18cm)	グランドリール・20条	2.5m	2	1.2	2.4	2.5	6.0	種子(消毒済み)
			トラクタ(クレーン付)	4t	1	0.1	0.1			肥料
除草剤散布	9/上~10/上 (5/上~5/中)	播種後~麦2葉期 (または幼穂形成期)	スプレー(直装式)	1,300%	1	0.24	0.24	18	4.3	除草剤
			トラクタ(クレーン付)	4t	1	0.1	0.1			
雪腐病防除	11/中~11/下	雪腐病防除剤散布	スプレー(直装式)	1,300%	1	0.2	0.2	18	4.3	殺菌剤
			トラクタ(クレーン付)	4t	1	0.1	0.1			
融雪促進	3/中~3/下	融雪材散布	融雪材散布機	自走加圧式	2	0.4	0.8	5	8.5	融雪材
			トラクタ(クレーン付)	1	0.1	0.1				
分施肥2回	4/中~5/下	窒素分施肥(起生期~止葉期)	ブロードキャスタ	1500%	1	0.4	0.4	18	5	肥料
			トラクタ(クレーン付)	4t	1	0.2	0.2			
病害虫防除	6/中~7/上	赤かび病 (うどんこ病、赤さび病) 3回 アブラムシ類など	スプレー(直装式)	1,300%	1	0.6	0.6	18	4.3	殺菌剤
			トラクタ(クレーン付)	4t	1	0.3	0.3			
収穫	7/下~8/中	コンバイン収穫	普通型コンバイン	4.5m	1	0.6	0.6	4.5	6	
運搬	7/下~8/中	収穫圃場から乾燥施設へ搬入	トラクタ(クレーン付)	4t	2	1.0	1.0			
乾燥・調製	7/下~8/中	共同乾燥調製施設 (水分30%→12.5%)								
残さ処理	7/下~8/中	麦稈細断・鋤込み	ストロークハブ	2.8m	1	0.9	0.9	2.8	5.5	
			ローリーロー	2.6m	1	1.6	1.6	2.6	3	
合計						14.5	16.1			
							内、外部委託分	0.6	0.6	

注 1. 品種は主として「きたほなみ」を対象とする。

図5 北海道農業生産技術体系の例

4. 農業関連データの電子化の試み

2章で述べた「農業情報提供システム」構想を実現するためには様々な取組が必要となるが、最も重要な事項は、展開すべき研究成果やノウハウの情報が、ITシステムで取り扱える形、すなわち機械可読な電子データとして蓄積される仕組みを整備することである。

そこで本研究では、農業試験場や行政機関が提供する各種農業情報を電子化するための試みとして、本研究では「北海道農業生産技術体系」⁷⁾を対象とした電子データ化を行った。

北海道農業生産技術体系は、道内で栽培される作物ごとに、標準的な作業工程、および作業に必要な機械、資材、人員、工数の情報を整理したものである(図5)。これらの情報は、機械化作業体系計画を作成する際の工程や作業効率データとしても用いられ、営農計画作成における最も基礎的な情報の一つとして位置付けられる。

現在、北海道農業生産技術体系は紙媒体の出版物として提供されており、電子媒体による提供は行われていない。出版物の元となる原稿データはMicrosoft Excelを用いて作成されており、一応の電子化はなされているものの、表の中に不

規則な構造を含んでいること、表記内容の意味解釈が厳密に定義されておらず曖昧さを含んでいることなどから、このままの形では機械可読の要件を満たしておらず、汎用の電子データとしての利用には不適切である。

そこで、これらのデータを、インターネット上の情報交換の標準として広く用いられており、かつ厳密な文書構造を定義できる XML (EXtensible Markup Language) 形式の電子文書への変換を検討した。

元データの意味的な構造を分析した結果から、文書構造定義 (XML Schema) を設計し (図 6)、定義された構造に従って元データの Microsoft Excel データから XML 文書の変換を行った (図 7)。

変換作業の大半は、変換プログラムにより自動化することができたが、元データに含まれる不規則な記述を正規化する作業は、当該部分の意味解釈を人間が行わなければならないため、完全な自動化は実現できなかった。問題の根本的な原因は元データに曖昧さが残っていることであり、改善のためには原稿作成時から厳密な表記ルールを設定して作業を行うなどの方策を取る必要がある。

このように XML 文書化された作業体系データは、様々な情報システム上で柔軟に活用することが可能となる。将来の利用シナリオとしては、農業試験場や普及改良センター等から配布される最新の作業体系データを、営農支援システムがネットワーク経由で自動的に取得し作業計画作成などに反映させる、といった活用を想定している。また、今回対象とした北海道農業生産技術体系以外の各種農業関連データに関しても、農業試験場等との連携により電子化を進めていきたいと考えている。

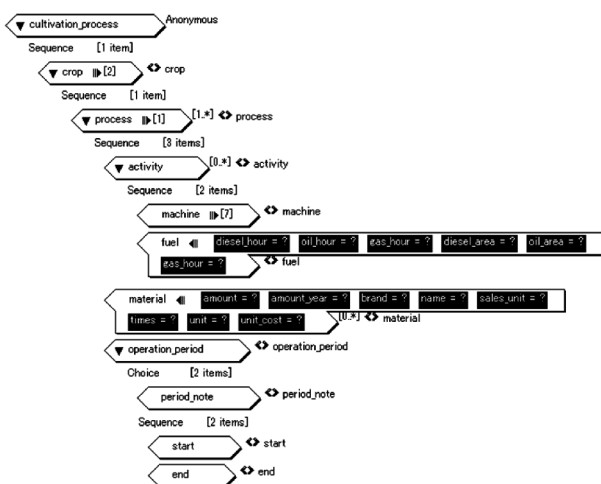


図 6 北海道農業生産技術体系の文書構造定義 (XML Schema)

```

<?xml version="1.0"?>
<cultivation_system xmlns="http://www.iri.hro.or.jp/AGR/"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://www.iri.hro.or.jp/AGR/asr_process_std.xsd">
  <crop kind="秋まき小麦" type="普通畑">
    <process name="堆肥散布">
      <operation_period>
        <start> 8E </start> <end> 9M </end>
      </operation_period>
      <activity>
        <machine name="マニッパ" spec="横軸"
          manpower="1" mtime="0.7" ptime="0.7" width="3" speed="8.0" />
        <material name="堆肥" brand="" times="1" amount="10" amount_per_year="10"
          sales_unit="t" unit_cost="2500" />
        <fuel diesel="8.5" oil="" gas="" />
      </activity>
      <activity>
        <machine name="刈り取り" spec=""
          manpower="1" mtime="0.2" ptime="0.2" />
        <fuel_per_unit diesel="4.57" />
      </activity>
    </process>
  </crop>
</cultivation_system>
  
```

図 7 XML化された北海道農業生産技術体系の例

5. まとめ

北海道型営農支援システム開発の共通基盤として、本道の地域特性を考慮した標準システム要求仕様の作成、オンライン連携を想定した農業試験場の研究データの電子化の検討を行った。

これらの成果については、「ガイド」冊子配布の形で道内 IT 事業者等への展開を開始している。しかし、現在の版の内容はまだ十分ではない点があること、また技術動向の変化に追従する必要があることから、今後も継続的に改訂を行いつつ内容の充実を図る予定である。

また、機械化作業体系計画に関する部分については、IT 技術による省力化が道内の営農指導関係者から強く求められているが、現在製品化されている営農支援システムにはこれらの作業全体をサポートするものが存在していない。そこで、今回実施した要求分析に基づく機械化作業体系計画支援システムの試作開発を著者ら自身で行い、道内 IT 事業者への技術移転を進める予定である。

引用文献

- 1) 興農社作業管理システム KSS LT, <http://kounousha.com/hp/ksslt/lt.html>, (2012)
- 2) 北海道 IT レポート 2014, 一般社団法人北海道 IT 推進協会, pp 7-8, (2014)
- 3) 吉田智一・高橋英博・寺元郁博: 圃場地図ベース作業計画管理ソフトの開発, 農業情報研究, 18巻 1号, pp41-51, (2009)
- 4) 日本 GAP 協会編: JGAP 農場用 管理点と適合記録 青果物 2010, 日本 GAP 協会, pp10-38, (2010)
- 5) 北海道農政部: 農業機械導入計画策定の手引き, (2014)
- 6) 渡辺隆: 農業機械化計画立案に関する考察, 北海道立農業試験場研究報告, 第14号, pp 4-77, (1966)
- 7) 北海道農政部編: 北海道農業生産技術体系 第 4 版, 公益社団法人北海道農業改良普及協会, (2013)

バイノーラル技術の応用研究

橋場 参生, 岡崎 伸哉, 飯島 俊匡, 本間 稔規, 高橋 裕之

Study on Applications of Binaural Technology

Mitsuo HASHIBA, Shinya OKAZAKI, Toshimasa IIJIMA,
Toshinori HONMA, Hiroyuki TAKAHASHI

キーワード：バイノーラル, ダミーヘッド, 臨場感, 音響計測, 遠隔点検

1. はじめに

実寸大の頭部模型の両耳鼓膜位置に埋め込まれたマイクロホンを通して音を計測すると、人間が耳で聴く状態を模擬した音響計測が可能になる。この手法は、バイノーラル技術と呼ばれており、実際の聴取に近い音の質感を得られる特長から、音場の録音・再生、ヘッドホンや携帯電話等の音響特性の測定、人間の心理的印象を考慮した音質評価等に利用されている¹⁻³⁾。

本研究では、道内中小企業等でのバイノーラル技術を活用した新事業・新サービスの実現可能性を探ることを目的として、臨場感通信、音響計測・分析、遠隔点検の3つをケーススタディとして、試作や実験を通じた検討を行った。

以下、本報ではまず、バイノーラル技術で用いられる実寸大の頭部模型（ダミーヘッド）の概要と特性について述べ、続いて、バイノーラル技術の活用可能性について検討を行った3つのケーススタディについて順に報告する。

2. バイノーラル技術

2.1 ダミーヘッドの概要

人間が聴いている音は、耳介(耳たぶ)や頭部等での回折・反射の影響によって周波数や位相等に変化が生じているため、通常のマイクロホンで計測された音とは質感が異なる。バイノーラル技術では、図1に示すような両耳鼓膜位置にマイクロホンが埋め込まれたダミーヘッドを用いて音を計測する方法が一般的で、このような方法によって、人間が耳で聴く状態を模擬した音響計測を可能にする。その効果として、実際の聴取に近い音の質感だけでなく、音場の立体感や臨場感を

備えた音の取得が可能になる。図1は、(株)サザン音響⁴⁾製のダミーヘッド(SAMREC)で、本報の計測や実験は、すべてこのダミーヘッドを用いて行っている。



図1 ダミーヘッド

2.2 ダミーヘッドの特性

吸音ボードを内壁に取り付けた組立式防音室（内寸：W1198×D1639×H2163mm）内に、スピーカ（口径：13cm）とダミーヘッドを1mの間隔で対面させて設置し、スピーカから20Hz～20kHzのサイン波を20Hz刻みで発生させてダミーヘッドの周波数特性を測定した。図2(a)にダミーヘッドの左耳側の測定結果を示す。同図(b), (c)には、比較のために、ダミーヘッドの耳介を外して測定を行った場合と、通常のマイクロホン（精密騒音計RION製NL-31を使用）を左耳の位置に設置して測定を行った場合の結果をそれぞれ示した。図2より、ダミーヘッドを用いて音響計測を行った場合には、耳介等の影響によって、3kHz～6kHz付近の帯域等に音圧の変化が生じることがわかる。

事業名：経常研究

課題名：バイノーラル技術を用いた音響計測処理手法の高度化に関する研究

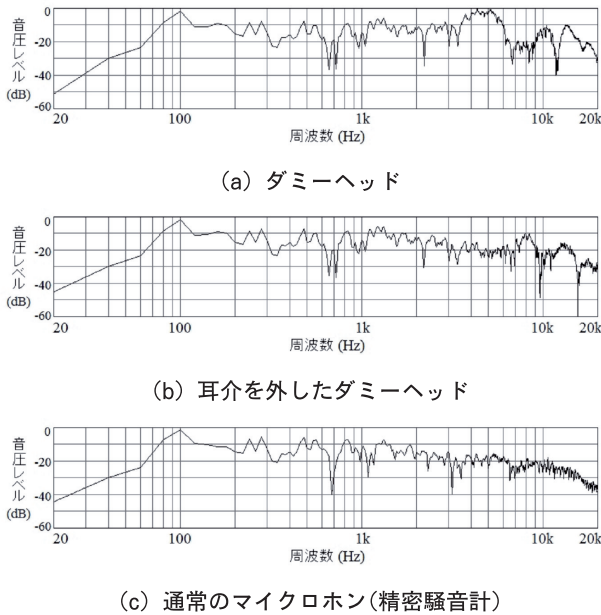


図2 ダミーヘッド等の周波数特性の測定結果

3. 臨場感通信への活用検討

遠隔地の音場を、あたかもその場にいるかのように体感できる臨場感通信サービスへの活用可能性を検討するため、ダミーヘッドで計測された両耳の音を、離れた場所で聴取できる無線送受信システムを試作し、展示会等に出展して来場者の反応を調査した。

3.1 無線送受信システムの試作

試作した無線送受信システムを図3に示す。送信部は、電動雲台に取り付けられたダミーヘッドと無線送信機器で構成し、ダミーヘッドに取り付けたCCDカメラの映像も同時に送信できるようにした。また、受信部では、受信したダミーヘッド両耳の音をヘッドホンで聴取できるようにするとともに、眼鏡型ディスプレイにより、ダミーヘッドが置かれた現場の映像も同時に視認できるようにした。さらに、リモコンスイッチで電動雲台を無線操作することで、ダミーヘッドの向きを上下左右に回転できるようにした。以上の試作の結果、本システムを用いることで、たとえば、ダミーヘッドの前を人が通過した場合には、受信部側で、人の気配も感じるような臨場感で足音等を聴取できるようになることを確認した。

3.2 展示会への出展

試作した無線送受信システムを「いきいき福祉・健康フェア」(2013, 2014: 札幌開催)等の展示会に出展し、一般来場者にバイノーラル技術の体験の場を提供した。図4は2013年の展示の様子で、会場入口に置かれたダミーヘッドからの音や映像を、入口から離れた体験ブースで視聴できる展示構成になっている。また、体験ブースには、図5のように、生

活・福祉分野での活用提案を示したパネルを掲示し、外出が困難な高齢者や障がい者に、遠く離れた観光地や自然環境の音風景を体験できるようにするサービス等の実現可能性について、来場者と意見交換を行った。

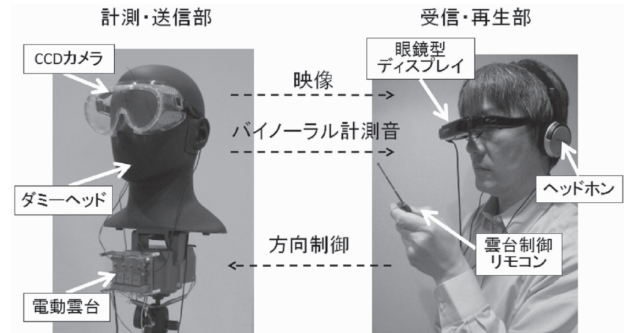


図3 試作した無線送受信システム



図4 いきいき福祉・健康フェアでの展示風景



図5 臨場感通信の活用提案(生活・福祉分野)

3.3 考察と今後の計画

システムを体験した来場者の反応は良好であり、生活・福祉分野等での活用に対しても多くの関心を得られたことから、臨場感通信サービスへのバイノーラル技術の活用は有効であ

り、新規事業の創出等に繋がる可能性も期待できると考える。今後は、具体的事例での実証試験への展開を目指す一方、音だけでなく、映像の高精細化・3次元化を図ることで、より高い臨場感の視聴体験を可能にするシステムへの拡張も進めたい。

4. 音響計測・分析への活用検討

バイノーラル技術の計測・分析への活用可能性について、道内企業から相談があった「トラックミキサ攪拌音からのスランプ値の推定」を適用事例として検討を行った。

4.1 取組の背景

生コンクリートの流動性は、円錐台の試験容器に詰められた生コンクリートの頂点の高さが、容器を引き抜いた際に何cm下降するかによって評価され、その値はスランプ値と呼ばれる。工場で製造された生コンクリートは、トラックミキサで攪拌されながら現場に輸送されるが、輸送に伴うスランプ値の変化を調べるためには、ミキサから生コンクリートを排出して上記の測定を行わなければならない。一方、道内企業からの相談において、当該業務の従事者の中には、ミキサの攪拌音を手がかりにしてスランプ値を推定できる熟練者がいることから、この熟練技能の自動化の可能性を探りたいとの要望があった。そこで、この相談案件を実験対象として、バイノーラル技術を用いた音響計測と分析を行った。

4.2 ミキサ攪拌音の計測実験

生コンクリートの攪拌中にトラックミキサから発せられる音に対して、熟練者がスランプ値を推定しやすいとする聴取位置に精密騒音計とダミーヘッドを交互に設置し、スランプ値が小さい場合(生コンクリートが硬い場合)と、スランプ値が大きい場合(生コンクリートが柔らかい場合)のそれぞれについて、攪拌音の計測を行った(図6)。

図7に、精密騒音計を用いて計測した攪拌音のスペクトログラム(時間-周波数分析結果)を、図8にダミーヘッドを用いて計測した攪拌音のスペクトログラムを示す。両図ともに図(a)がスランプ値が小さい場合の分析結果、図(b)がスランプ値が大きい場合の分析結果で、横軸の時間長はいずれも180秒である。

分析の結果、今回、精密騒音計を用いて計測した攪拌音の場合には、図7に示したように、スランプ値の大・小によってスペクトログラムに明確な違いは確認できなかったが、ダミーヘッドを用いて計測した場合には、図8に示したように、スランプ値の大・小によって濃淡のパターンに変化が生じ、スランプ値が大きい場合(図8(b))の方が、ミキサの回転に伴って周期的に現れる濃い縦縞が比較的明瞭に確認できる結果となった。

一方、精密騒音計を用いて録音された攪拌音と、ダミーヘッ

ドを用いて録音された攪拌音を、当該業務の熟練者にヘッドホンで聞き比べてもらった結果、精密騒音計を用いて録音された攪拌音からはスランプ値を推定し難いが、ダミーヘッドを用いて録音された音であれば、通常聞いている音質に近く、スランプ値の推定も可能であるとの意見を得た。このことから、図8で確認された分析結果の相違点は、今後、熟練者の技能の自動化を目指す際の手がかりのひとつになると考える。



図6 トラックミキサ攪拌音の計測実験

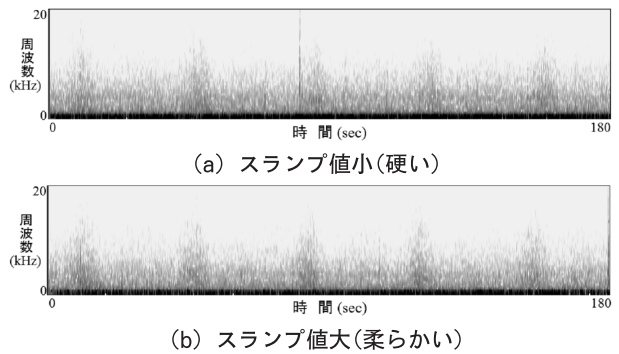


図7 精密騒音計で計測した攪拌音のスペクトログラム

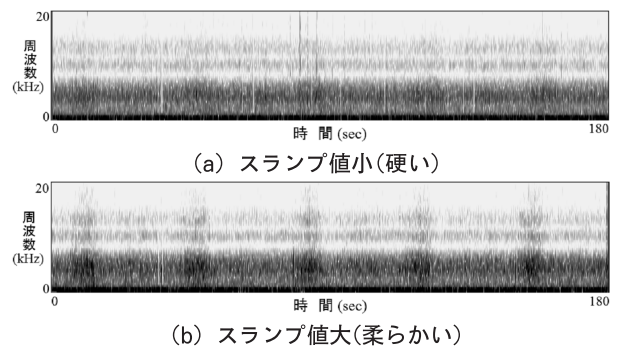


図8 ダミーヘッドで計測した攪拌音のスペクトログラム

4.3 考察と今後の計画

精密騒音計で計測するか、ダミーヘッドで計測するかによって、攪拌音そのものの特性が変化するわけではないが、本実験の結果より、人が聴診によって何らかの判断を行っているような事例を調査する場合には、対象音の計測にバイノーラ

ル技術を活用することによって、着目すべき特徴を効率的に発見できる可能性があると考えます。また、実際の聴取に近い音質で録音結果を残せるという特長も、熟練者の判断基準を探る実験等に活用する上で利点になる。今後は、スランブ値の推定に係る実験を継続して自動化の可能性を探るとともに、音質評価に関連する他の事例にもバイノーラル技術の適用を図りたい。

5. 機械・設備等の遠隔点検への活用検討

バイノーラル技術の遠隔点検への活用可能性について、電力設備等の監視制御装置を開発・製造する道内企業と共同で検討を行った。

5.1 取組の背景

機械・設備等の点検を行う際の代表的方法のひとつに、熟練者の聴覚によって異音の有無や音質の変化を調べる方法がある。しかし、点検・診断箇所が広域・遠隔にわたるような場合には、限られた人員で十分な対応を図ることは難しい。そこで、点検現場の音場をダミーヘッドによって計測し、遠隔地の熟練者に送信して点検・診断を実施する運用方法を想定して、バイノーラル技術を活用した遠隔点検の検討に着手した。

5.2 予備試験

機械・設備等の遠隔点検への活用可能性を検討するため、騒音レベル65dB程度の機械室に図3の無線送受信システムの送信部（CCDカメラは不使用）を設置し、室外の離れた場所でヘッドホンにより聴取する予備試験を行った。その際、接触音を発するように羽根に細工を施したファン（120×120×25mm）を異音発生源として、ダミーヘッドから4m程の場所に設置し、異音の有無や方向の推定が可能かどうかについても調べた。その結果、ダミーヘッドで計測された音をヘッドホンで聴取し、また、必要に応じてダミーヘッドを回転さ

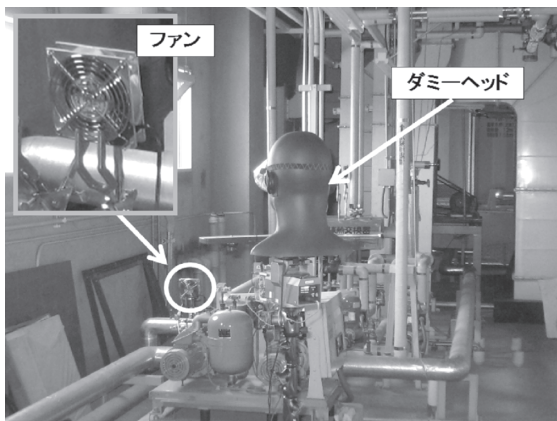


図9 機械室内に設置したダミーヘッドとファン

せながら聴取することによって、機械室内の音場の把握、異音の有無の判定、異音の発生方向のおおよその推定が可能であることを確認した。

5.3 実環境試験

北海道電力（株）札幌水力センターの協力を得て、藻岩発電所（図10）の発電機室にダミーヘッドと前記のファンを図11の概略平面配置図のように設置し、三号発電機のみが稼働している状況下で、計測試験を行った。

図12は、図11に示した①～③の順にダミーヘッドを回転させながら50秒間録音した計測音のスペクトログラムで、上段が左耳、下段が右耳のマイクロホンからの計測音に対応している。図12の両耳のスペクトログラムの変化を比較観察することにより、左耳がファンに近づくと異音の周波数成分に起因する濃い縦縞が強まり、離れると弱まる様子が、また、右耳はその逆の変化を示す様子が確認できる。この分析結果が



図10 北海道電力（株）藻岩発電所

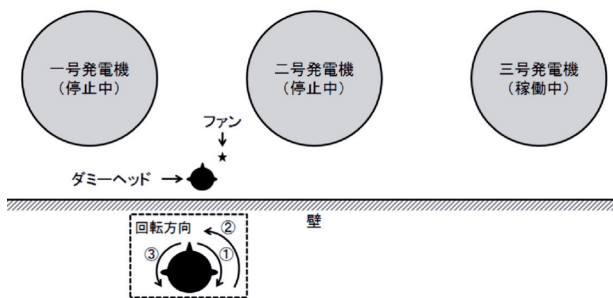


図11 計測時の概略平面配置図

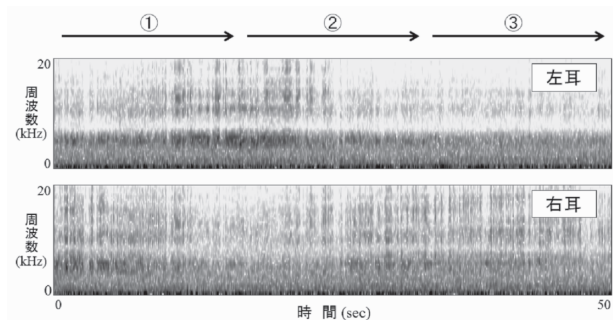


図12 ダミーヘッド両耳の計測音のスペクトログラム

らもわかるように、計測音をヘッドホンで聴取すると、異音の存在だけでなく、ダミーヘッドの回転に伴って異音の方向が変化していく過程も立体的に把握することができた。

5.4 考察と今後の計画

今回聴取の対象とした異音は擬似的、かつ、意図的に発生させたものであったが、発電機等が稼働する実環境の中でも、異音の有無や移動を音場の臨場感とともに把握できたことから、機械・設備等の遠隔点検の用途にもバイノーラル技術の活用が見込めると考える。今後は、様々な実環境での計測試験を引き続き実施して技術蓄積を図るとともに、現場の映像のほか、図12のような分析結果も同時に作業者に呈示することで、より高度な点検を可能にするシステムの実現を目指したい。

6. おわりに

バイノーラル技術を活用した新事業や新サービスの実現可能性を探るため、遠隔地の音場を体験できる臨場感通信サービス、熟練技能の自動化に向けた音響計測・分析、機械・設備等の遠隔点検の3つの事例をケーススタディとして取り上げ、試作や実験を行った。検討の結果、いずれの事例についても、バイノーラル技術の活用の有用性が確認されたことから、今後も各事例の取組を継続するとともに、道内企業等の技術支援にも同技術の活用を積極的に図っていく。

謝辞

音響計測・分析への活用検討にご協力頂いた㈱ホッコン、ならびに、遠隔点検への活用検討にご協力頂いた㈱電制、さらに、㈱電制との現地試験において、貴重な実験の場をご提供頂いた北海道電力㈱札幌水力センターの皆様にご感謝いたします。また、ダミーヘッドの使用に関してご助言頂いた㈱サザン音響の稲永潔文氏にお礼申し上げます。

本研究で使用した低・高周波対応騒音計測システムは、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。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 平原達也：はじめてのバイノーラル録音，日本音響学会誌，71巻，2号，pp.80-88，(2015)
- 2) 大谷真・岩谷幸雄・矢入聡：バイノーラル技術の基礎と応用，騒音制御，Vol.33，No.3，pp.197-203，(2009)
- 3) 佐藤利和：特殊マイクロホンとダミーヘッドの基本特性，騒音制御，Vol.28，No.2，pp.85-92，(2004)
- 4) サザン音響 <http://www.s-acoust.jp/>

薄片化黒鉛を充填したプラスチック材料の特性

大市 貴志, 可児 浩, 吉田 昌充, 瀬野 修一郎

Properties of flaked graphite plastic composites

Takashi OICHI, Hiroshi KANI, Masamitsu YOSHIDA, Shuichiro SENO

キーワード：薄片化黒鉛, プラスチック, 溶融混練, 導電性, 曲げ強さ

1. はじめに

プラスチックにフィラーを充填する技術は、プラスチックに本来持ち合わせていない機能を付与することが可能となり、プラスチックの用途拡大に大きく寄与してきている。一般にプラスチック材料は絶縁性であり、プラスチックに導電性を付与するには、カーボンブラックや金属粉の添加がなされてきた。しかし、十分な性能を得るためには多量の粉末を充填する必要があり、強度低下、成形性や発塵の問題が生じている。

プラスチックに導電性を付与するフィラーとしてグラフェン構造を有する炭素系ナノ材料が注目されている。¹⁻⁴⁾カーボンブラックに比べて少量の充填量で導電性が発現し、発塵を抑制することが可能といわれている。しかし、炭素系ナノ材料は互いに凝集しやすく、プラスチック中に均一に添加することが難しく、さらに、飛散しやすく取り扱いが困難等の欠点を有している。

本報告では、導電性フィラーとして炭素系ナノ材料の一種である薄片化黒鉛を使用し、プラスチックに添加した際の電気的特性および機械的特性について評価した。また、カーボン繊維との併用効果を検討した。さらに、薄片化黒鉛の飛散を抑制し取り扱いを容易にするため、水系溶媒に分散させて用いることを試みた。

2. 実験方法

2.1 試料

天然黒鉛由来の薄片化黒鉛は、超音波等の適宜の方法を用いて水系溶媒に重量割合5%で分散させたペースト状の水分散材として用いた(図1)。プラスチックには、結晶性樹脂のナイロン6(以下、PA)および非晶性樹脂のポリカーボ

ネート(以下、PC)を用いた。パウダー状のPA(A1020LP, ユニチカ㈱)は、150meshの篩を通して使用した。また、粉末状のPC(ユーピロンS-3000F, 三菱エンジニアリングプラスチック㈱)は、超遠心粉碎機(ZM-200, Retsch製)により粉碎し、150meshの篩を通して使用した。カーボン繊維は、ピッチ系チョップドファイバー(GRANOC XN-100-03Z, 日本グラファイトファイバー㈱, 以下CF)を用いた。

2.2 試験片の作製

薄片化黒鉛5%水分散材と篩を通したプラスチック微粉末を遊星式攪拌・脱泡装置(マゼルスターKK-102N, クラボウ製)で混合し、次いで、真空乾燥機で溶媒を除去してプラスチック微粉末の表面に薄片化黒鉛がコーティングされた粉体を得た(図2)。薄片化黒鉛とプラスチックの比率は、水分散材とプラスチック微粉末の混合比で調整した。

得られた薄片化黒鉛コーティング樹脂粉体を加熱溶融して平板を成形するにあたっては、溶融混練を行わない非混練タ



図1 薄片化黒鉛の水分散材



図2 薄片化黒鉛をコーティングしたプラスチック粉体

事業名：経常研究

課題名：プラスチックへの機能性フィラー分散技術に関する研究

イブと熔融混練を行う混練タイプの方法を試みた。

薄片化黒鉛コーティング樹脂粉体をそのまま平押し金型内に投入し、加熱プレスおよび冷却プレスを用いて厚さ2mmの平板を成形し、非混練タイプの複合材とした。また、薄片化黒鉛コーティング樹脂粉体をバッチ式の加熱熔融混合機(プラスチックオーダーPL-2000, BRABENDER製)を用いて熔融混練し、得られた混練物を平押し金型内に投入して、加熱プレスおよび冷却プレスを用いて厚さ2mmの平板を成形し、混練タイプの複合材とした。成形条件は、表1に示した。

CFを添加する試料については、薄片化黒鉛コーティング樹脂粉体をプラスチックオーダーにて熔融混練を行う際に添加し、成形条件は表1に同じとした。

表1 成形条件

		PA	PC
プレス成形条件	加熱温度(°C)	240	265
	冷却温度(°C)	80	90
熔融混練条件	加熱温度(°C)	240	270
	回転数(rpm)	60	60
	混練時間(分)	10	10

2.3 物性評価方法

各成形板から所定の形状に試験片を切り出し、標準雰囲気(23±2°C, 50±10%RH)に一週間以上放置して状態調節を行ったのち、各試験に供した。体積抵抗率は、高抵抗領域

では高抵抗率計(ハイレスタUX MCP-HT800, ㈱三菱化学アナリテック製)を用いてリング電極法により、低抵抗領域では低抵抗率計(ロレスタGP MCP-T6100, ㈱三菱化学アナリテック製)を用いて四探針法により測定した。曲げ物性の測定は、万能材料試験機(AG-100kNXplus, ㈱島津製作所製)を用いJIS K 7171に準じ、曲げ速度2mm/min, 支点間距離30mmで行った。

3. 結果および考察

3.1 非混練タイプ複合材の特性

非導電性であるプラスチックに導電性フィラーを添加して導電性を発現させるには、プラスチック中の導電性フィラーが繋がった導電経路を形成する必要がある。そのため、導電性を付与するにはフィラーの添加率を多くする必要があり、一般的な導電性フィラーのカーボンブラックでは25%以上必要とされている。

図3に熔融混練を行わない非混練タイプ複合材における薄片化黒鉛の添加率と体積抵抗率の関係を樹脂ごとに示した。

PC, PAともにほぼ同じ抵抗率を示し、薄片化黒鉛の添加率が2%以上で導電性が発現し、4%の添加率で体積抵抗率が10Ω・cm程度となった。熔融混練を行わずに成形しているため、樹脂粉体表面に偏在していた薄片化黒鉛が繋がった導

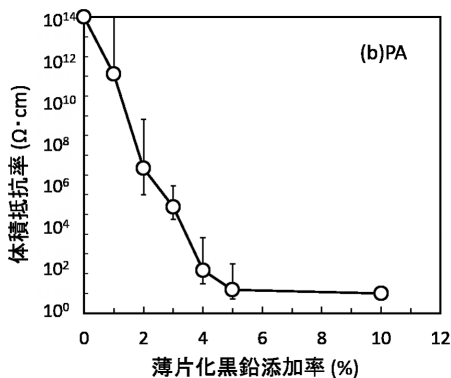
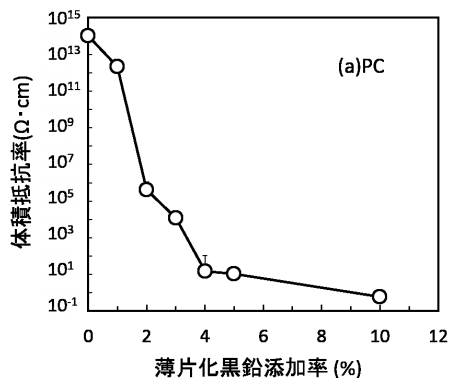


図3 非混練タイプ複合材における薄片化黒鉛の添加率と体積抵抗率の関係 (a)PC, (b)PA

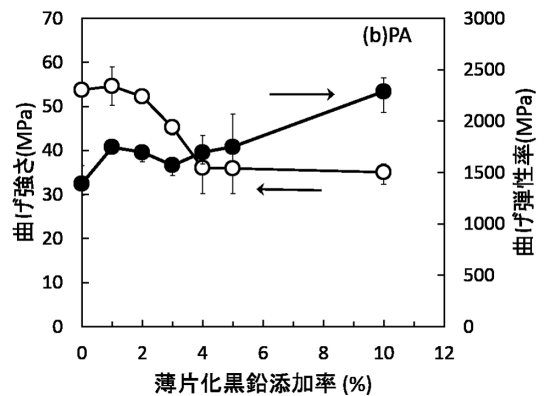
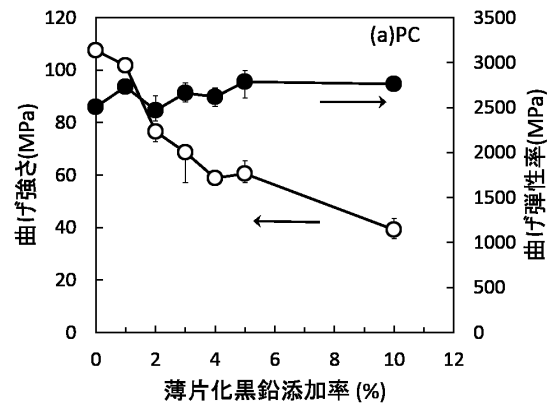


図4 非混練タイプ複合材における薄片化黒鉛の添加率と曲げ物性の関係 (a)PC, (b)PA

電経路を形成し易く、低い添加率でも高い導電性を示したと考えられる。

薄片化黒鉛はグラフェンシートが積層されている構造を有している。また、グラフェンシートは強度、弾性率ともに非常に大きいため、薄片化黒鉛もプラスチックの強化材として期待される。

図4に非混練タイプ複合材における薄片化黒鉛の添加率と曲げ物性の関係を樹脂ごとに示した。樹脂単独に比べて4%の添加率で曲げ強さがPCで45%、PAで33%低下していた。今回の実験では、薄片化黒鉛が何層も重なり、プレス成形のみでは樹脂との複合化が完全にはなされず強度的な欠陥となり、曲げ強さが低下したと推察される。導電性と機械的特性の両立には、薄片化黒鉛の樹脂粉末へのコーティング方法など今後さらなる検討が必要と考えている。

3.2 混練タイプ複合材の特性

プラスチックの成形加工においてプラスチック成形材料が溶融混練されない成形方法は、プレス成形や回転成形など一部の成形方法に限られる。一般的なプラスチック成形方法では、成形材料が溶融混練によりフィラーが分散されるため、非混練タイプ複合材とは異なる特性を示すことが考えられる。

図5に混練タイプ複合材における薄片化黒鉛の添加率と体積抵抗率の関係を使用した樹脂ごとに示した。PC、PAとも

に非混練タイプ複合材に比較して導電性が発現しがたく、4%の添加率における体積抵抗率は、PCで $10^{13}\Omega\cdot\text{cm}$ 、PAで $10^7\Omega\cdot\text{cm}$ であった。また、薄片化黒鉛添加率と体積抵抗率の関係は、樹脂により異なり、PCは添加率が10%でも $10^8\Omega\cdot\text{cm}$ と導電性を発現しなかった。一方、PAは5%で $10^4\Omega\cdot\text{cm}$ 程度とわずかながら導電性を示した。

次に、混練タイプ複合材における薄片化黒鉛の添加率と曲げ物性の関係を図6に示した。樹脂単独に比べて4%の添加率で曲げ強さがPCで21%、PAで17%低下しているが、非混練タイプに比べて強度低下の割合は抑制されていた。薄片化黒鉛が分散され強度的欠陥が少なくなったためと推察される。また、PCとPAの曲げ強さを比較すると、PAの曲げ強さの低下率が小さくなっていた。結晶性樹脂は、強化材による補強効果が発現しやすいため、PCに比較しPAの曲げ強さの低下が抑制されたと推察される。さらに、PCとPAは溶融粘度が異なっているため、溶融混練時におけるフィラーの分散状態が異なり、導電性や強度に影響を与えていると推察される。

今回の実験のような単純な溶融混練では、薄片化黒鉛による導電性は発現し難かった。一方で、物性面の低下は抑制されていた。薄片化黒鉛の分散状態の影響など、今後さらなる検討が必要と考えている。

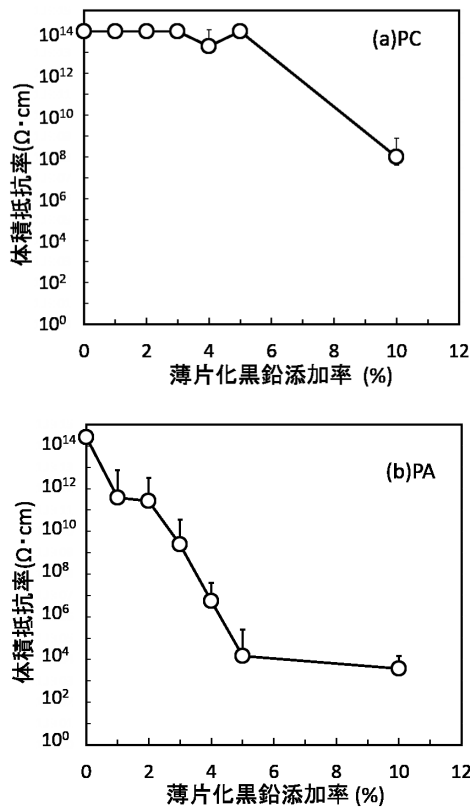


図5 混練タイプ複合材における薄片化黒鉛の添加率と体積抵抗率の関係 (a)PC, (b)PA

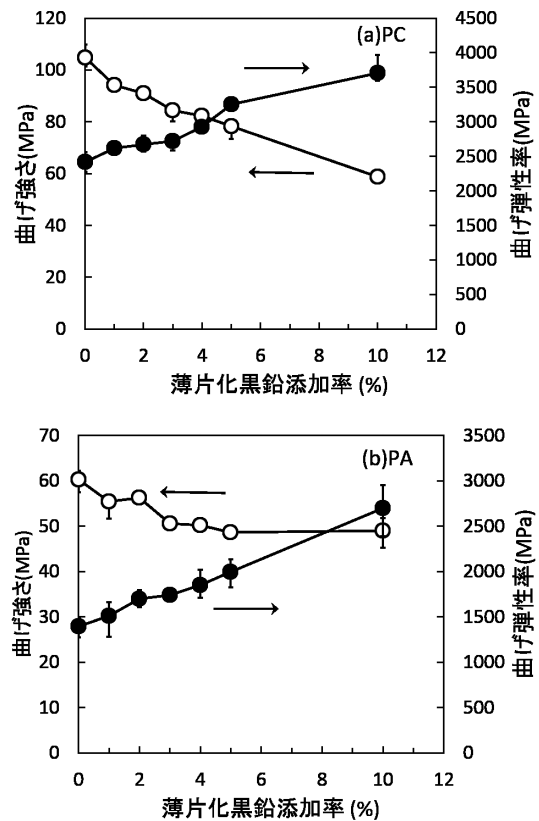


図6 混練タイプ複合材における薄片化黒鉛の添加率と曲げ物性の関係 (a)PC, (b)PA

3.3 薄片化黒鉛とCFの併用

薄片化黒鉛コーティング樹脂粉体を用いて成形加工する際に溶融混練を行った場合、導電性を発現させるには薄片化黒鉛の添加率を増やさなければならず、また、強度低下の問題も生じた。CFは導電性および機械的的特性の向上が期待されるフィラーである。加えて、薄片化黒鉛と形状やサイズがまったく異なるフィラーである。そこで、薄片化黒鉛とCFを併用して樹脂に添加することを試みた。

PAにCFのみを添加し溶融混練した複合材のCF添加率と体積抵抗率の関係を図7に示した。CF単独で導電性を発現させるためには、CFの添加率が20%以上必要であった。

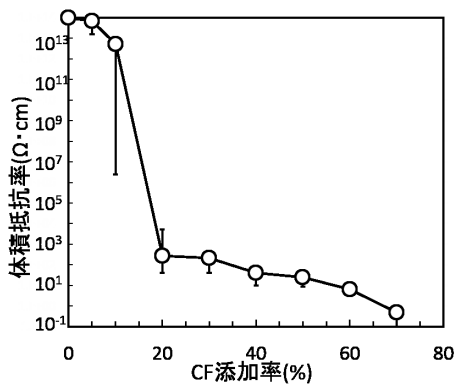


図7 CF添加率と体積抵抗率の関係

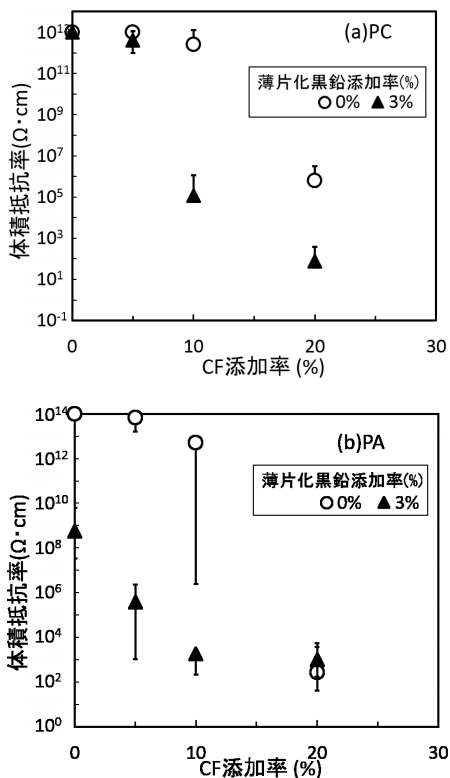


図8 CFおよび薄片化黒鉛の添加率と体積抵抗率の関係 (a)PC, (b)PA

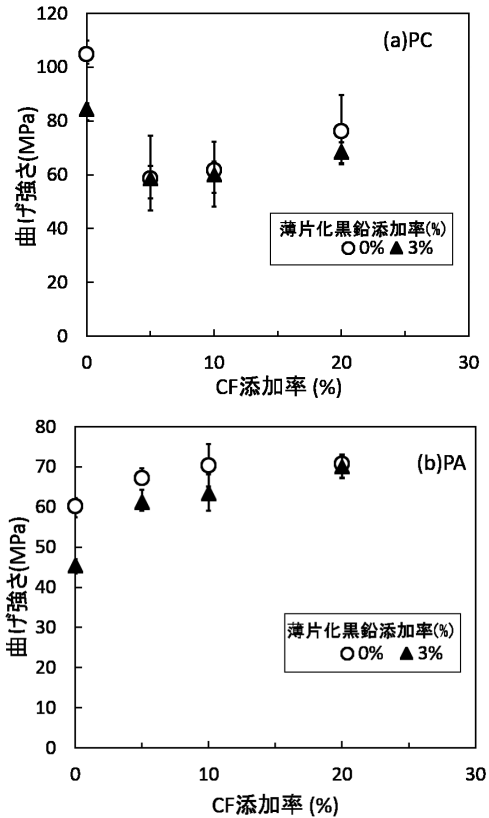


図9 CFおよび薄片化黒鉛の添加率と曲げ強さの関係 (a)PC, (b)PA

次に、薄片化黒鉛とCFを併用した複合材の特性を示す。図8に薄片化黒鉛を0, 3%, CFを0~20%添加し溶融混練した複合材の体積抵抗率を樹脂ごとに示した。CFの添加率10%において、薄片化黒鉛添加率が0%と3%の体積抵抗率を比較すると、PCは 10^{13} から $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 、PAは 10^9 から $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ へと低下した。CFと薄片化黒鉛の併用により導電性が発現しやすくなり、より少ない添加率で導電性が発現することが示された。

図9に薄片化黒鉛およびCFの添加率と曲げ強さの関係を示した。PCはCFを添加すると樹脂単独の曲げ強さより低い値を示し、薄片化黒鉛を添加するとさらに低下した。一方、PAはCFを添加すると樹脂単独の曲げ強さより高くなる。そのため、薄片化黒鉛の添加による曲げ強さの低下をCFが補い、樹脂単独より高い曲げ強さを示し、機械的的特性と導電性の発現が両立されることが示唆された。

4. まとめ

薄片化黒鉛をプラスチックに充填する方法を検討した。また、その複合材料の体積抵抗率および機械的的特性について評価した。その際、水系溶媒に分散させた薄片化黒鉛をプラスチック微粉末の表面にコーティングして用いることにより、薄片化黒鉛の飛散を抑制し取り扱いが容易となった。薄片化

黒鉛をコーティングしたプラスチック粉末を非混練でプレス成形すると2%程度の添加率で導電性を発現するが、溶融混練を行うと導電性を発現するために必要な添加率が増加し、溶融粘度の低いPAで5%、溶融粘度の高いPCでは10%以上必要であった。使用する樹脂の溶融粘度や結晶性、成形方法により薄片化黒鉛の導電性フィラーとしての効果は異なることがわかった。また、薄片化黒鉛による曲げ強度に対する補強効果は発現しなかった。薄片化黒鉛が少ない添加率で導電性を発現させるには、カーボンファイバーを併用することが効果的であり、機械的特性にも有利であった。

謝辞

本研究に使用した薄片化黒鉛水分散材は、北海道大学古月文志教授に提供していただきました。心より感謝いたします。

また、本研究で使用した万能材料試験機は、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。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) グラフェンが拓く材料の新領域～物性・作製法から実用化まで～, エヌ・ティー・エス, 268PP., (2012)
- 2) NPO法人スーパーコンポジット研究会監修：カーボンナノチューブの材料開発と分散・複合技術, 高機能化, 市場・技術の最新動向, アンドテック, 168PP., (2012)
- 3) NPO法人スーパーコンポジット研究会監修：カーボンナノチューブの材料開発と分散・複合技術, 高機能化, 市場・技術の最新動向, アンドテック, 168PP., (2012)
- 4) 中山喜萬監修：カーボンナノチューブの機能化・複合化, シーエムシー出版, 271PP., (2006)

ラバーキャスト法に適した鉛フリー素材の開発

宮腰 康樹, 中嶋 快雄, 斉藤 隆之, 岩越 睦郎, 戸羽 篤也, 安田 星季

Development of the lead free metals suitable for rubber cast

Yasuki MIYAKOSHI, Yoshio NAKAJIMA, Takayuki SAITOU
Mutsurou IWAKOSHI, Atsuya TOBA, Seiki YASUDA

抄 録

ラバーキャスト法への適用を念頭においた種々の鉛フリー候補素材(スズ-ビスマス系合金, スズ-アンチモン系合金, スズ-亜鉛系合金)の基礎的性状(組織, 物性値, 機械的性質, 铸造性など)を調べ, 本法への適用性を検討した。その結果, 強度を要求される製品にはSn-Zn-Al系合金, 量産性を要求される製品にはSn-Sb系合金が適用することがわかった。

キーワード: ラバーキャスト, ゴム型, 鉛フリー, 低融点合金

1. はじめに

ラバーキャスト法はゴム型を用いた遠心铸造法であり, ①遠心力を利用するため溶湯をゴム型の細部にまで充填できる, ②ゴム型を使用するためマイナスの抜け勾配を有した複雑形状にも対応できる, ③ゴム型が金型などに比べ低コストである, など多くの特徴を有している。このため小型複雑形状製品の製造や多品種生産に適しており, 装飾品類や釣り具(主としてオモリ類)の製造に活用されている。ラバーキャスト法に用いられる素材は, ゴム型を劣化させない約400℃以下の低融点合金であることと, 対象製品が複雑形状の場合は強度および靱性も要求される。さらには対象製品が人の手に触れる可能性が多いことから, 鉛(Pb), カドミウム(Cd)などの有害物質を含まない素材であることも重要となる。しかし現状, 生産性が良く, 低コストであることから, 多くの製品にPbあるいはPb含有合金が用いられている。特にハイメタと呼ばれるPbを5mass%含むピューターの一種は, 現在でも装飾品用ラバーキャスト素材の主流として用いられている。

本研究では, ラバーキャスト法への適用を念頭において, スズをベースにした種々の鉛フリー候補素材^{1)~6)}(スズ(Sn)-ビスマス(Bi)系合金, スズ(Sn)-アンチモン(Sb)系合金, スズ(Sn)-亜鉛(Zn)系合金)の組織, 物性値, 機械的性質, 铸造性など基礎的性状を調べ, ラバーキャスト法に適した素材の開発および選定を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材料

本研究では, Pbフリーハンダ材料として検討されているSn-Bi系合金およびSn-Zn系合金, 装飾品用素材のピューターやすべり軸受け用素材のホワイトメタルの基本組成であるSn-Sb系合金を所定の配合に調整し実験に供した。Sn-Bi系合金は, Snに対するBi量を0~100mass%の範囲で, Sn-Sb系合金は, Snに対するSb量を0~20mass%の範囲で配合した。以下, mass%は%と略す。Sn-Zn系合金は, Zn単体では融点が419℃と高いためほぼ共晶組成であるZn-5%アルミニウム(Al)合金をはじめに作製し(融点380℃), これをSnに30~100%の範囲で添加したSn-Zn-Al系合金, および低融点化を目指しSnの代わりにSn-Bi系合金に置き換えたSn-Bi-Zn-Al系合金も作製した。そのほか, 比較材として装飾品用素材の主流でピューターの一種であるハイメタ(Sn-5%Pb-3%Sb), 釣り具用素材の主流である鉛(Pb)および硬鉛(Pb-10%Sb), 比較的低融点で低コストが期待できるZnおよびダイカスト用Zn合金2種(JIS H 2201, AZC2, Zn-4.1%Al-0.4%Mg(マグネシウム))を用いた。

2.2 各種評価方法

2.2.1 組織観察

各供試材の組織は, 試料を鏡面研磨したのち5vol%ナイタールでエッチングし, 金属顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)にて観察した。一部の試料はエネルギー分散型X線微小部分分析(EDS分析)による元素分布を測定した。

事業名: 経常研究

課題名: ラバーキャスト法による小型複雑形状製品の開発

2.2.2 物性値の測定

物性値は、密度、融点(液相線)を測定した。密度測定はアルキメデス法で行った。融点は状態図の存在しないSn-Zn-Al系合金のみ測定した。測定は、溶融した合金に熱電対を挿入し冷却凝固曲線から推定した。

2.2.3 機械的性質の測定

機械的性質は、硬さ、引張強さ、伸び、吸収エネルギーを測定した。硬さは、マイクロビッカース硬さ計により荷重0.98N、保持時間15sの条件で7点測定し、その算術平均で求めた。引張強さおよび伸びは、金型鋳造にて作製した試料(平行部：幅8mm、厚さ4mm、長さ30mm)についてオートグラフ装置を用いて測定した。各値は、試験片5本の算術平均にて求めた。吸収エネルギーは、金型鋳造にて作製した直方体試料(幅4mm、厚さ6mm、長さ70mm)についてシャルピー衝撃試験機を用いて測定し、試験片5本の算術平均で求めた。この際の試験条件は、ハンマー質量252.5N、ハンマーの旋回半径0.6575m、持ち上げ角45°とし、試験片はノッチ無しとし、幅4mmの面にハンマーを衝突させた。

2.2.4 鋳造性の評価

鋳造性は、湯流れ性、凝固特性、引け特性で評価した。湯流れ性試験は、渦巻状の金型(真鍮製)に電気炉で120°C、3.6ksの予熱を与え、合金の融点(液相線)+100°Cの溶湯を押し湯(湯口、φ30×120mm)上部に満たされるまで注ぎ込み、その流動長を測定した。この際、離型剤(BNスプレー)塗布の影響についても調べた。凝固特性は、合金の融点+100°Cに加熱した溶湯をゴム型(22°C)に設けた凹みに3~4.5cm³注ぎ、凝固までの時間を目視にて測定した。引け特性は、容積φ20×15mmの金型に融点+100°Cに加熱した溶湯を充填し、凝固後の引け率を算出し評価した。引け率は、質量と密度から換算した実際の体積V_rと直径および高さの寸法測定から算出した見掛けの体積V_aを求め、以下式により算出した。

$$\text{引け率(\%)} = 100 \cdot (V_a - V_r) / V_a$$

3. 結果および考察

3.1 各合金の基礎性状

3.1.1 Sn-Bi系合金

Sn-Bi系合金は、Snの融点232°C、Biの融点271°Cに対し、Sn-57%Bi付近に共晶点を有し139°Cまで融点が低下し⁷⁾、ゴム型寿命およびエネルギー的に有利な素材である。図1にSnに対するBi添加量と密度との関係を示す。Snの密度7.3g/cm³からBiの密度9.8g/cm³の間で複合則に準じた理論密度通りに変化することがわかる。すなわち密度を意識した合金設計が行いやすい材料である。

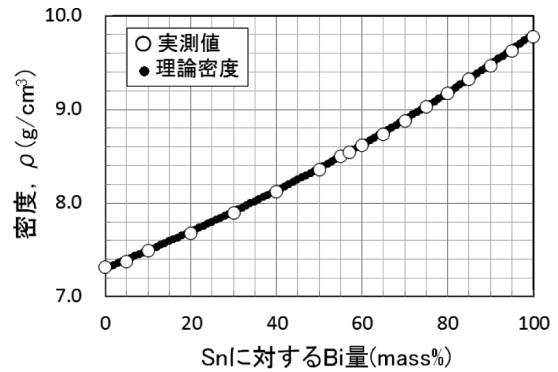


図1 Snに対するBi添加量と密度との関係

図2に共晶組成であるSn-57%Biの断面組織を示す。白とグレーの組織が微細に均一に分布している。EDS分析の結果、白いコントラストの部分がBi相、グレーのコントラスト部分がSn相であった。

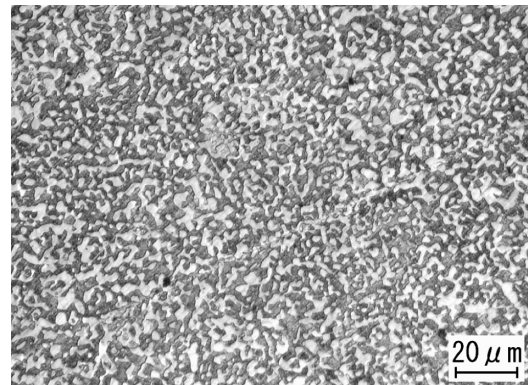


図2 Sn-57%Biの断面組織

図3にBi添加量と硬さとの関係を示す。Bi添加量5~20%付近で27~28HVと高い値を示し、Bi量の増加にともない徐々に低下する傾向を示している。

図4にBi添加量と引張強さおよび伸びとの関係を示す。引張強さの変化は、硬さの結果と似た傾向を示し、SnおよびBi単体では低い値を示すが、合金化することで高い値となっている。特にSnに対しBiを5%添加しただけで引張強さは4倍(80MPa)となり、20%前後の添加で最大値98MPaを示し、それ以上の添加では徐々に強度が低下する傾向を示している。SnおよびBi単体の引張強さに対し3倍以上の高強度を保持しているのは、Bi添加量5~70%の領域である。一方、伸びは、Sn単体が高い値を示すが、わずかなBi添加で減少し、共晶組成付近で再び増加する傾向を示している。共晶組成付近で伸びが大きくなる理由は、結晶粒の微細化に起因すると考える。

図5にBi添加量と吸収エネルギーとの関係を示す。Bi添加量10~20%付近で8J前後の高い値を示し、30%以上のBi添加では0.2~0.7Jと極めて低い値を示している。Sn-Bi系

合金は衝撃試験においてすべて分離し、脆い性質であることがわかった。

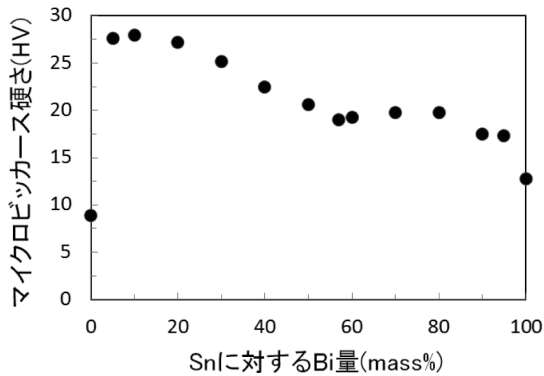


図3 Snに対するBi添加量と硬さとの関係

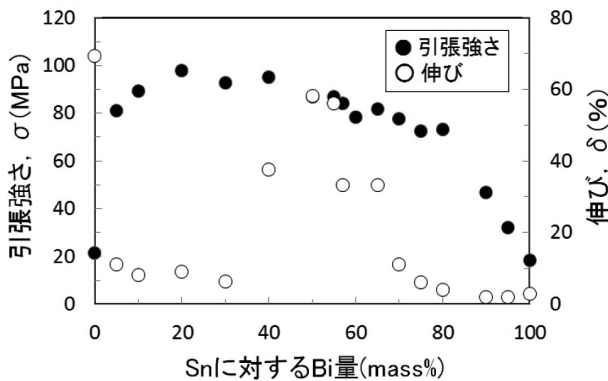


図4 Snに対するBi添加量と引張強さおよび伸びとの関係

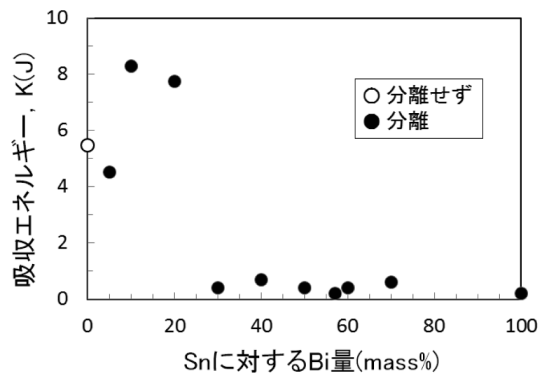


図5 Snに対するBi添加量と吸収エネルギーとの関係

3.1.2 Sn-Sb系合金

Sbは融点631℃と比較的高いが、Snなどの低融点軟質素材の強度向上に活用されている。Sn-Sb系合金は、Sn-8.5%Sbに包晶点(245℃)を有する⁷⁾。密度はSnの密度7.32g/cm³に対しSbの密度は6.68g/cm³であり、Sn-10%Sbで7.28g/cm³であった。またSn-Sb系合金は20%以上Sbを添加すると急激に融点が高くなり湯流れが悪くなるため、各種評価試料の作製が困難であった。今回比較材として用いたハ

イメタは、Sn-Sb系合金にPbを5%含有した素材である。

図6に包晶組成よりわずかにSbが多いSn-10%Sbの断面組織を示す。大部分は濃いグレーで緻密なSnとSbからなる包晶組織を呈し、粒界には白色のSb相が観察される。

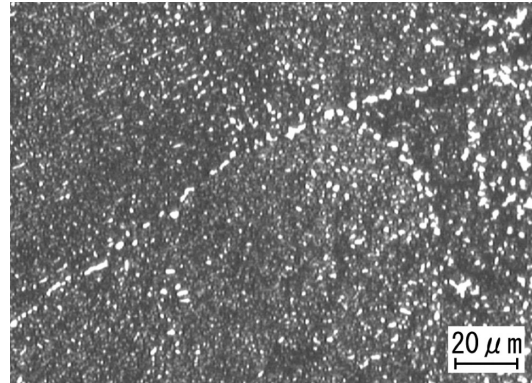


図6 Sn-10%Sbの断面組織

図7にSb添加量と硬さとの関係を示す。Sn-11.3%SbまではSb添加量の増加にともない硬さは高くなり、それ以上の添加では29HV前後でほぼ一定の値となっている。

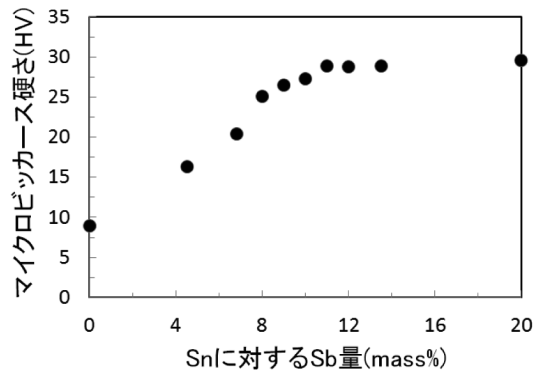


図7 Snに対するSb添加量と硬さとの関係

図8にSb添加量と引張強さおよび伸びとの関係を示す。引張強さの変化は、硬さの結果と同様、Sb添加量の増加にともない高くなる傾向を示している。比較材のハイメタ(58.4MPa)より高強度なのは8%以上Sbを添加した合金となっている。引張強さの最大はSn-20%Sbの94MPaである。

一方、伸びは引張強さと相反する傾向を示し、Sb添加量の増加にともない小さくなっている。ハイメタより伸びが大きいのは10%以下のSb添加となっている。

図9にSb添加量と吸収エネルギーとの関係を示す。Sb添加量11.3%までは添加量の増加とともに吸収エネルギーも大きくなり、それ以上の添加では吸収エネルギーが小さくなる傾向を示している。最大値はSn-11.3%Sbの10.9Jである。添加量11.3%までの試料は分離せず、靱性が高いことも認められた。比較材のハイメタ(8.9J)より吸収エネルギーが大

きいのはSb添加量8～11.3%であり、これらの合金は靱性を要求される製品に有望であることがわかった。

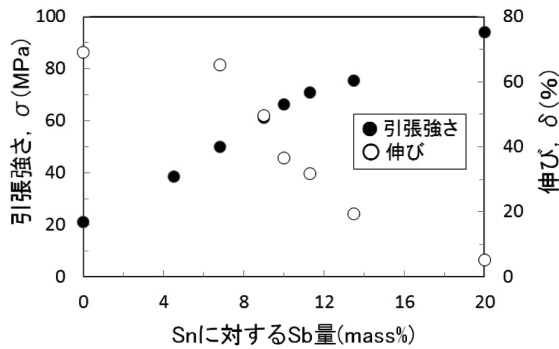


図8 Snに対するSb添加量と引張強さおよび伸びとの関係

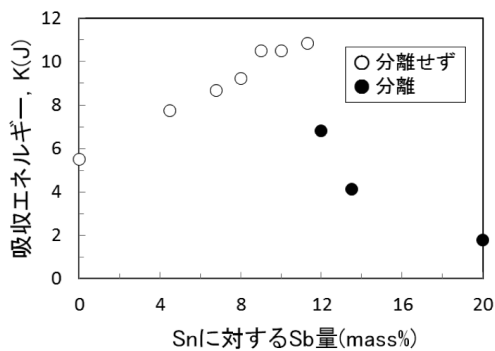


図9 Snに対するSb添加量と吸収エネルギーとの関係

3.1.3 Sn-Zn系合金

Znは他のPbフリー候補材料に比べ低コストであり、活用の可能性が高い素材である。Sn-Zn系合金においてはSn-8.8%Znが共晶組成(融点199℃)である⁷⁾が、この配合ではZn添加による低コスト化の効果が小さいため、本研究では約30%以上のZn添加による効果を検討した。この際、前述のとおり、Zn単体では融点が419℃と高いためZn-Al系合金のほぼ共晶組成であるZn-5%Alをはじめに作製し(融点381℃)、これをSnに30～100%の範囲で添加した。

図10にSnに対するZn-5%Al添加量と融点(液相線)との関係を示す。本実験範囲で最もZn-5%Al添加量の少ないSn-30%(Zn-5%Al)は融点297℃であり、Zn-5%Al添加量の増加にともない融点は直線的に高くなる傾向が認められる。Zn-5%Al添加量を50%より低く抑えると、ラバーキャスト用素材として実績のあるPbの融点327℃より低くなることわかる。低融点化を目指しSnをSn-Bi系合金に置き換えたSn-Bi-Zn-Al系合金は、BiとZnとの組合せが融点を高める方向に作用し、低融点化には寄与しなかった。Sn-Zn-Al系合金の密度は、Sn-30%(Zn-5%Al)が7.1g/cm³、Zn-5%Alが6.6g/cm³であり、Zn-5%Alの添加にともない両者の密度範囲でほぼ直線的に低くなる傾向を示した。

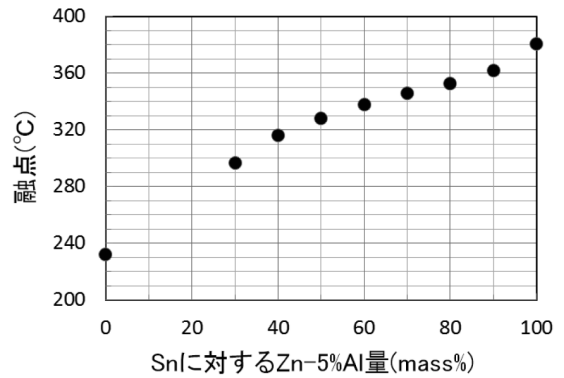


図10 Snに対するZn-5%Al添加量と融点(液相線)との関係

図11にSn-50%(Zn-5%Al)の断面組織を示す。白色のマトリックス中に5～10μm程度の粒状組織(一部は、20～30μmオーダのデンドライト組織)が均一に分散した組織を呈し、EDS分析からマトリックスはSn濃度が高く、そのほかにはZn濃度が高いことがわかった。粒状組織は初晶Zn、マトリックスはSnあるいはSn-Zn共晶組織と考えられる。またマトリックス中には数μmオーダの黒色の微細粒状組織も観察される。この部分はAlと酸素(O)の濃度が高かったため、铸造の際、Al成分が酸化されAl₂O₃を形成した可能性が高い。一方Sn-Bi-Zn-Al系合金の組織は、目視でも確認できる組織むらを生じ、鑄肌もケロイド状を呈す傾向にあった。ケロイド状鑄肌となるのは、Sn-Bi成分が分離し個別に凝固するためと考えられる。Sn-Bi系合金は共晶温度が139℃と低く、凝固体積が膨張する特異な性質を有しているため、Sn-Bi-Zn-Al系合金全体より遅れて凝固したSn-Bi成分が鑄肌表面に染み出しケロイド状鑄肌を形成したと推定される。これらより、Sn-Bi-Zn-Al系合金はラバーキャスト用素材として不適切であると判断された。

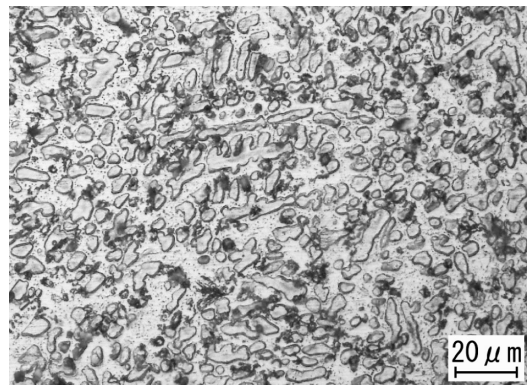


図11 Sn-50%(Zn-5%Al)の断面組織

図12に、Snに対するZn-5%Al添加量と硬さとの関係を示す。硬さの値は70%付近まで徐々に増加し、それ以上の添加で急激に高くなる放物線的な傾向となっている。Sn-30%(Zn-5%Al)は29HVであり、Zn-5%Alは85HVである。

比較材のAZC2は100HVと最も高い値を示した。Sn-Zn-Al系合金は他のPbフリー候補素材(Sn-Bi系合金, Sn-Sb系合金)より全体的に高い硬さを示している。

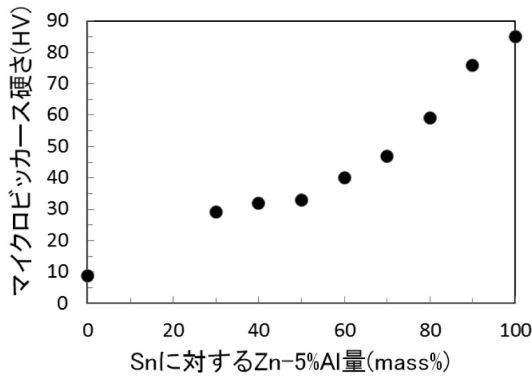


図12 Snに対するZn-5%Al添加量と硬さとの関係

図13にZn-5%Al添加量と引張強さおよび伸びとの関係を示す。引張強さの変化は、硬さの結果と同様、Zn-5%Al添加量の増加にともない放物線的に高くなる傾向を示し、80%でピークを迎えている(159MPa)。Sn-Zn-Al系合金の引張強さは、比較材のAZC2(272MPa)より低いが、硬鉛(69MPa)やハイメタ(58.4MPa)および他のPbフリー候補素材より全体的に高い値を示している。伸びは引張強さと相反する傾向を示し、Zn-5%Al添加量の増加にともない小さい値となっている。60%以上のZn-5%Al添加で急激に伸びが低下している。

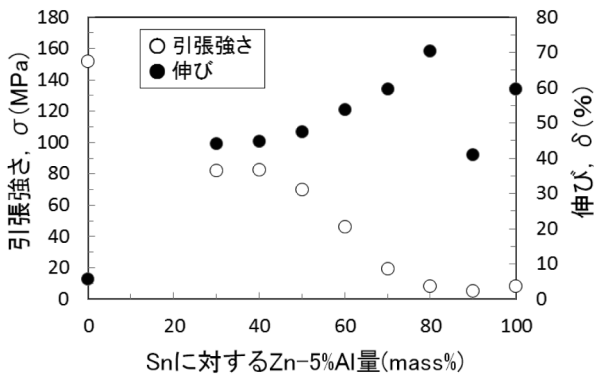


図13 Snに対するZn-5%Al添加量と引張強さおよび伸びとの関係

図14にZn-5%Al添加量と吸収エネルギーとの関係を示す。吸収エネルギーはZn-5%Al添加量50~60%付近で17J前後の極めて高いピークを示し、その前後で低下する傾向となっている。また30~60%の範囲では分離せず、高い靱性を有していることも認められた。この範囲で配合されたSn-Zn-Al系合金は、すべての比較材および他のPbフリー候補素材より高い吸収エネルギーであり、強靱性を要求される製品に極めて有効な素材であることが認められた。

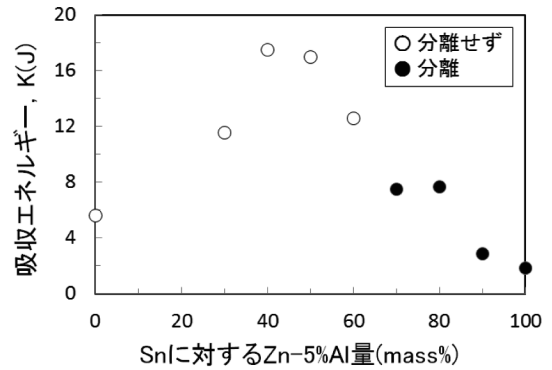


図14 Snに対するZn-5%Al添加量と吸収エネルギーとの関係

3.2 各合金の鋳造性評価

3.2.1 湯流れ性

図15に各素材の湯流れ性試験における流動長を示す。離型剤を塗布した場合の流動長はSn-57%Biが最も大きく、Zn, Sn, Sn-10%Sb, Zn-5%Alが比較的大きな値を示している。

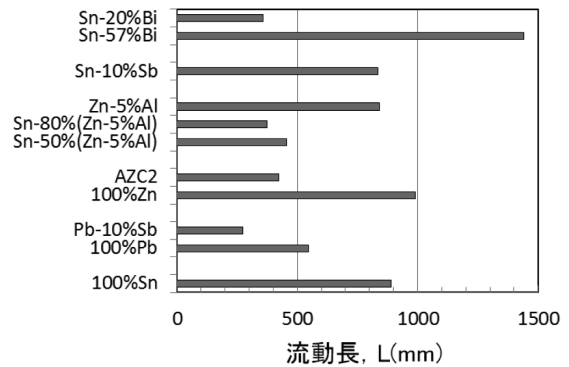


図15 各素材の湯流れ性試験における流動長

これらに共通するのは、共晶組成、単一組成あるいは包晶組成といった固液共存状態がほとんど存在しない素材であることである。ただし、金型鋳造法をはじめとし、ラバーキャスト法においても製品化の実績があるPb系素材は、単一組成でも比較的小きな値を示し、共晶組成のPb-10%Sbにおいては最も小さい値となっている。この理由は、Pbが他の素材に比べ比熱が0.13kJ/(g・K)と小さく⁸⁾冷めやすいこと、および密度が11.2 g/cm³と大きく溶湯が流れるためのエネルギーを他の素材より多く必要とすることに起因すると考える。今回、Pbフリー候補素材として実験に供した合金は、すべて製品化の実績があるPb-10%Sbより流動長が大きいことより、湯流れ性について特に配慮する必要はないことがわかった。

離型剤塗布の有無について着目すると、離型剤を塗布した方が1.4~3.4倍流動長が大きくなる結果となっている。離型剤の塗布により溶湯と金型とのぬれ性が低下し、溶湯の流れ

が円滑になったと考える。離型剤の塗布は、製品を製造する上で重要な因子であることが確かめられた。

3.2.2 凝固特性

ラバーキャスト法において凝固時間は、製品の量産性およびゴム型寿命に影響する重要な因子である。図16に各素材の凝固時間を示す。データは注湯量のわずかな違いを考慮し、鋳造材の体積で除した。製品化の実績があるPb系素材は凝固時間が短く量産性に優れていることがわかる。一方、融点の低いSn-57%Biおよび比熱が比較的大きいZn (0.389kJ/(g・K)) やAl (0.905kJ/(g・K)) を含有する素材は凝固時間がPbの3.8~7.5倍と長く、量産に向かないことがわかる。一連のPbフリー候補素材の中ではSn-10%Sbの凝固時間がPbに対し2.2倍と比較的短く、量産に適したラバーキャスト用素材であると考えられる。

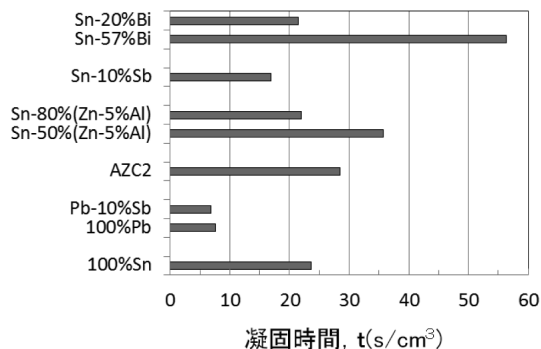


図16 各素材の凝固時間

3.2.3 引け特性

鋳造品は最終凝固部に引けを生じる可能性が高く、それが外周部に生じた場合(外引け)は所定の製品形状を得られない。したがって引けの生じ易さは製品化のしやすさにおいて重要な因子となる。

図17に各素材の引け率を示す。引け率0%の素材が引けを生じないことを意味している。引けを生じない結果となっているのは57%以上Biを添加したSn-Bi系合金である。これはBiが凝固の際、膨張する特異な性質のためである。また比較材のPb-10%Sbも引けを生じない結果となっている。Pb-10%Sbは比熱が小さく凝固が早いため、本実験で用いた金型においては引けを生じる時間がなかったと考える。これらの素材は、所定の製品形状を得るのが容易な素材と位置づけられる。他の素材は0.2~2.5%の引け率を示し、引けを生じたと推定される。特に靱性や凝固特性において優秀なSn-10%Sbは2.1%の比較的高い引け率を示し、製品化の際は最終凝固部を製品以外の部分に設定するなど引け防止鋳造方案が必要となろう。

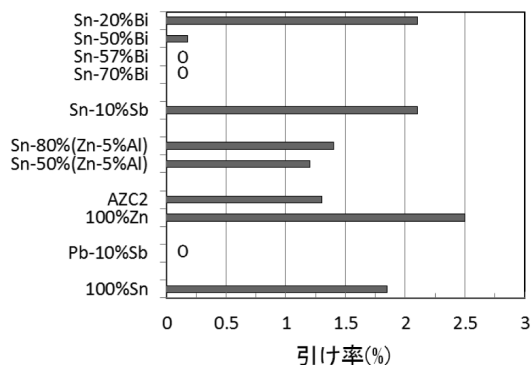


図17 各素材の引け率

4. まとめ

以上、ラバーキャスト法に適した素材の選定を行う目的でPbフリー候補素材について種々の実験を行った。その結果、強度を要求される製品に対してはSn-Zn-Al系合金の適用が有効で、特に靱性をも要求される場合はSnに30~60%の範囲でZn-5%Alを配合した素材が有利であった。量産性を要求される製品に対しては、Sn-Zn-Al系合金よりはやや値が劣るものの、ほど良い靱性を有したSn-(8~11.3)%Sbが凝固速度が早く有利であることがわかった。形状を重視したい製品については引けを生じないSn-Bi系合金の適用も想定される。ラバーキャスト法により新製品を開発する際は、生産性(量産性、操作性)、機械的性質、コストなど多くの視点から総合的に判断し素材を選定する必要があり、本研究で得られた知見がこれらの判断に大いに役立つことを期待する。

謝辞

本研究で使用したオートグラフ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。

また、各種実験に御協力頂いた株式会社フジワラ及び北海道立工業技術センターに感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 管沼克昭：鉛フリー化を迫られるはんだ開発，回路実装学会誌，Vol.12 No.2，pp.83-89，(1997)
- 2) 管沼克昭：低温鉛フリーはんだの動向，エレクトロニクス実装学会誌，Vol.9 No.3，pp.134-137，(2006)
- 3) 竹本 正：Pbフリーソルダとマイクロ接続，あたりあ，Vol.35 No.4，pp.320-325，(1996)
- 4) 後藤靖人・黒崎将夫・江阪久雄：一方向凝固によるSn-Zn二元共晶系合金組織の解明，日本金属学会誌，Vol.75 No.7，pp.392-397，(2011)

- 5) 神谷佳久・本間 仁・北嶋雅之：錫-亜鉛-アルミニウムはんだの実用化, FUJITSU, Vol.54 No.2, pp.154-160, (2003)
- 6) 横田 勝・三船温尚・清水克朗：Sn-Cu-Sb 3 元系合金（ピューター）の金相学と機械的性質, 高岡短期大学紀要, No.5, pp.19-26, (1994)
- 7) 日本金属学会編：金属データブック, 丸善, pp.420-491, (1974)
- 8) 日本機械学会：機械実用便覧, 丸善, pp.554-557, (1990)

熱可塑性CFRPのプレス成形法に関する研究

鶴谷 知洋, 飯田 憲一, 三戸 正道, 畑沢 賢一, 山岸 暢, 岩越 睦郎

Study on Press Forming Techniques of Thermoplastic CFRP

Tomohiro TSURUYA, Kenichi IIDA, Masamichi MITO
Kenichi HATAZAWA, Tohru YAMAGISHI, Mutsuro IWAKOSHI

抄 録

自動車や航空機などの軽量化材料として、鉄に比べて比重が4分の1、比強度が10倍以上ある炭素繊維を用いたCFRP（炭素繊維複合材料）が使用され始めてきている。しかし、多用されている熱硬化性CFRPは加工時間が長いことやリサイクル性が悪いことが課題となっている。それらの改善を目的として、熱可塑性CFRPの材料開発や加工技術に関する研究が国内外で始められている。そこで、次世代材料として注目が集まる熱可塑性CFRPについて、プレスを用いた成形加工技術の確立に向けた技術蓄積を行った。

キーワード：熱可塑性CFRP, プレス成形

1. はじめに

炭素繊維は鉄に比べて比重が4分の1、比強度は10倍以上であり、これまではテニスラケットやゴルフクラブ、釣竿などのレジャー用品と、航空機部品に多く使われてきた。CFRPは炭素繊維と樹脂の複合材料であるが、使用する樹脂の種類により熱硬化性CFRPと熱可塑性CFRPに分類される。熱硬化性CFRPは化学反応により硬化するが、熱可塑性CFRPは熱を加えることにより軟化し、常温で硬化する特徴を持つ。レジャー用品と航空機部品に用いられているのはほとんどが熱硬化性であるが、硬化して製品になるまでの加工時間が長いこと、炭素繊維のリサイクルが困難であることなどの課題があった。そこで、加工時間の短縮やリサイクル性の向上などを目的として、熱可塑性CFRPが注目され、材料開発や加工技術に関する研究が進められている^{1)~3)}。近年では、熱可塑性CFRPの成形性が大量生産に向いていることから、自動車などの輸送用機械の軽量化を目的として使用され始めている。

本研究では、次世代材料として注目が集まる熱可塑性CFRPについて、炭素繊維織物（CFクロス）と樹脂シートによるCFRPシートの成形方法と材料特性、穴あけ・曲げなどのプレスによる加工特性、単純立体形状のプレス成形特性について検討し、プレスを用いた成形加工技術の確立に向けた技術蓄積を行った。

2. 熱可塑性CFRPのシート成形と材料特性

熱可塑性CFRPシートは、一部市販されているものの研究途上にあり、成形条件が明確ではない。そこで、目標とする寸法や形状のプレス成形品を得るため、シート成形技術を理解する必要がある。そこで、はじめに樹脂とCFクロスからCFRPシートを成形する実験を行った。

シート成形は、CFクロスと樹脂シートを交互に積層し、(株)上島製作所製手動ホットプレス（図1）で加熱・加圧した。シート成形の模式図を図2に示す。CFクロスは東レ(株)製C06343（平織、T300-3K）、樹脂シートは(株)プライムポリマー製ポリプロピレン（PP）Y6005GM（融点：165℃）を0.1mmにシーティングしたものである。成形したシートを図3に示す。ホットプレスを180℃に設定し、初めに圧力1 kg/cm²で加熱し樹脂を十分軟化させ、次に圧力5 kg/cm²で加熱し樹脂を十分含浸させ、最後に1 kg/cm²で冷却した場合に最も良好なCFRPシートが得られた。成形時の温度や加圧力、加圧力の段階的变化、加圧時間等により、CFクロスへの樹脂の含浸が不十分であったり、重ねたCFクロスがずれることなどがわかった。

次に、成形したシートの材料特性を把握するため、引張試験を行い市販品との比較を行った。市販品は、製作品と同じ厚みとCFクロス積層数のもので、使用している樹脂も同様にPPのものを選択した。試験片は板厚2 mmと3 mmの2種類について30mm×200mmに切り出し、引張試験には、(株)島津製作所製のオートグラフAG-250kNDを使用した（図4）。結果を表1に、試験前後の試験片の外観を図5に示す。

引張試験の結果、板厚2mm、3mmともに今回成形したシートと市販のシートで同等の引張強度を持つことがわかった。これは、市販品と製作品の炭素繊維の引張強度は同程度であり、

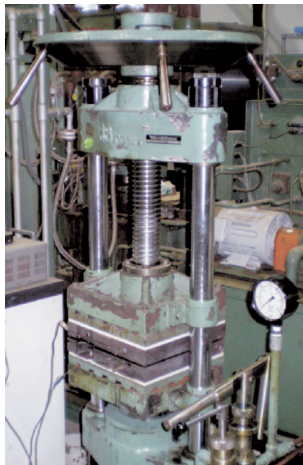


図1 使用したホットプレス

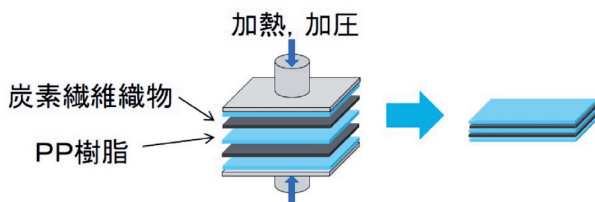


図2 シート成形の模式図

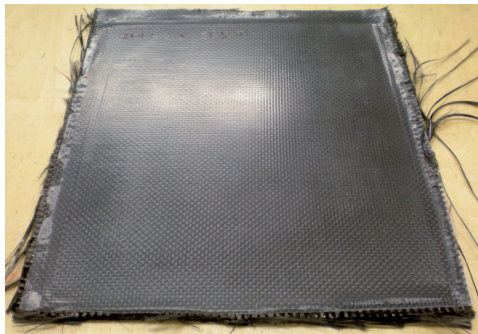


図3 成形したシート



図4 使用した万能材料試験機

シートの引張強度は樹脂ではなく主に炭素繊維の引張強度の影響を大きく受けること、製作品は炭素繊維にダメージを与えることなく成形できたことなどが理由として考えられる。

また、板厚2mmの方が引張強度がやや大きいですが、これは板厚3mmのシートでは2mmと比較して樹脂の含有率が高いため、万能材料試験機のクランプに炭素繊維を的確に把持できなかったためと考えられる。

表1 引張試験結果

板厚[mm]	種類	最大点応力[MPa]
2	市販品	447.3
	製作品	464.8
3	市販品	413.2
	製作品	399.8

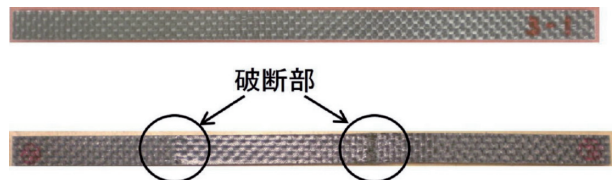


図5 引張試験片（厚さ3mm、上：試験前、下：試験後）

3. 熱可塑性CFRPシートのプレス加工試験

成形したシートを用いて曲げ加工と穴あけ加工などの加工特性を調べるため、プレス加工試験を行った。実験はアイダエンジニアリング(株)製の80トンのサーボプレス(図6)を用いて行った。

曲げ加工は90度のV曲げとし、予熱したシートを加熱した金型で加工して下死点(金型が最も下がった位置)で停止させ、冷却後に加工品を取り出した。予熱はホットプレート上に切り出したシートを置き、温度計でシート表面が所定の温度に達するまで加熱した。金型にはカートリッジヒータによる加熱機能、水管を通る水による冷却機能を付加した(図7)。試料サイズは20mm×70mmでCFクロス8層の板厚2mmと、12層の3mmを用いた。

穴あけ加工は円形状の打抜きとし、ダイとパンチにより製品側と抜きかす側を分断する加工とした(図8)。実験は形状が一般的な円筒型と徐々に材料の分断が進む波型の2種類のパンチ(図9)を用いてシートを打ち抜き、パンチとダイの隙間(クリアランス)は0.1mmと0.01mmの2種類の条件で行った。

曲げ加工の例を図10に示す。金型温度が160℃以上の場合、金型に拘束されていない部分の変形が起り、V字状ではなくM字状に近い形状になることや、シートから樹脂が流れ出し、金型表面に付着するなどの現象が見られた。これはシートが軟

化し、金型に拘束されていない部分が下がったためと考えられる。金型温度が80℃以下になると、シート外側の樹脂が白くなり、内側にしわが入った。これは、樹脂が十分に軟化しておらず流動性が不足したためと考えられる。

その他、ホットプレートからプレスへの材料の移動は速やかに行うこと、シートの温度が十分低下するまで下死点で動作を停止していることなど、加工上の注意点が明らかになった。

穴あけ加工の例を図11に示す。一般的に加工時の抵抗が少ない波型パンチを用いて打抜いた場合、端部表面の樹脂が薄く剥離した(図12)。これは、円筒型のパンチであればパンチ表面とシート表面は接触したまま、こすれることなくシートが分断されるが、波型パンチの場合は刃先が徐々にシートに刺さり込み、その際に発生した摩擦熱でシート表面の樹脂が溶けたためと推察される。クリアランスによる加工面の違いについては認められなかった。鉄の場合、クリアランスによって材料の破断状況が変わるが、CFRPの場合は主に繊維の切断になることからクリアランスによる加工面の違いが発生しなかったと思われる。

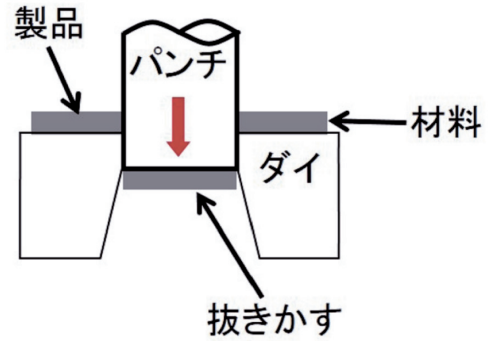


図8 打抜き加工の模式図

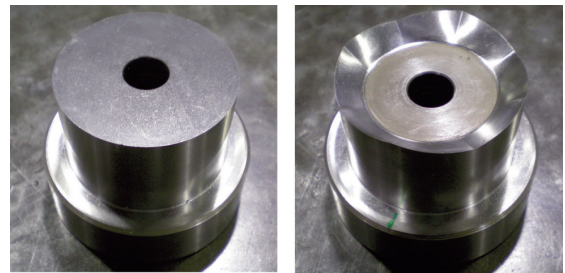


図9 穴あけに使用したパンチ



図6 使用したサーボプレス

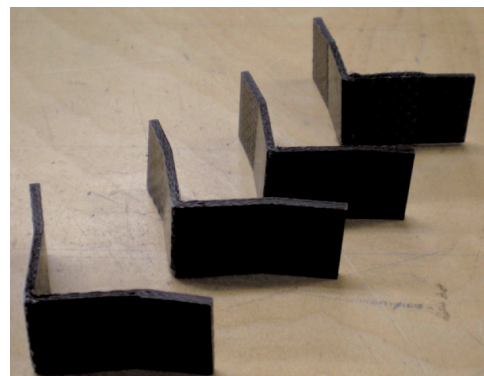


図10 曲げ加工例

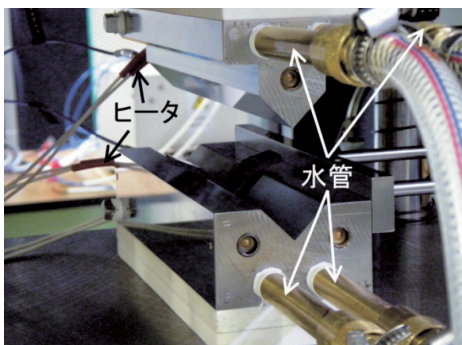


図7 曲げ加工の金型

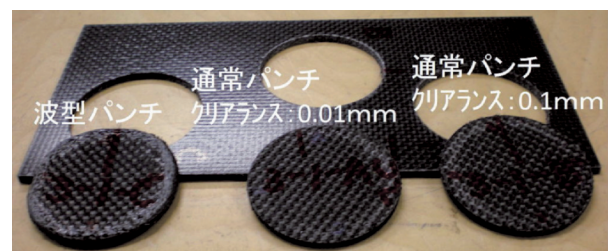


図11 穴あけ加工例

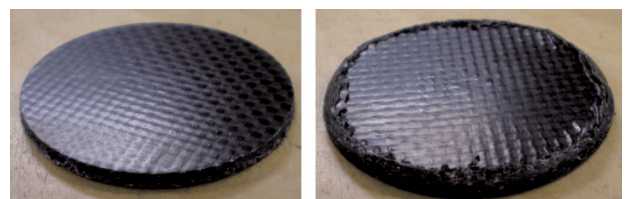


図12 パンチによる違い(左:通常パンチ, 右:波型パンチ)

4. 熱可塑性CFRPシートのプレス成形試験

製作したシートを用いてプレス成形特性を調べるため、プレス成形試験を行った。成形方法はパンチの直径58mm、片側クリアランス1mmの絞り加工とし、前節と同様にアイダエンジニアリング(株)製の80トンのサーボプレスを用いて行った。成形手順は、シートを恒温槽で予熱して軟化させ、加熱した金型に入れて成形し、下死点で形状が固定された後に取り出した(図13)。恒温槽はアズワン(株)製のEOP-300B(図14)を使用し、金型はシーサーヒータを組み込み温度調節器で温度制御する仕組みとした(図15)。また、シートのブランク形状はフランジ部のしわを抑制するため正八角形とした。シートの切り出しは、複合材料切断機に取り付けたダイヤモンドカッタにより行った。成形例を図16～23に示す。

予熱(時間・温度)が不足すると絞り深さが小さく、予熱温度が高すぎると頂点の平面が凹んだ。また、下死点での停止時間が短いと形状が安定せず、頂点の平面が凹んだ。プレス成形では、炭素繊維は、ずれるだけで伸縮せず、軟化した樹脂が流動することで形状ができあがる。そのため、樹脂が十分に軟化していなければ目標とする形状ができず、軟化しすぎると目標の形状にとどまっていることができないため、下死点での停止時間が短ければ頂点の平面が凹むと考えられる。

その他、シートが軟化しすぎるとシート恒温槽から金型への移送が困難になること、予熱時間が長すぎると樹脂が焼けて表面から炭素繊維が露出するため、成形すると炭素繊維が断裂すること、図24のように樹脂の含浸が不十分なシートで成形すると、炭素繊維の交差部から樹脂が染み出してくることなど、プレス成形における注意点が確認できた。



図14 恒温槽



図15 プレス成形金型

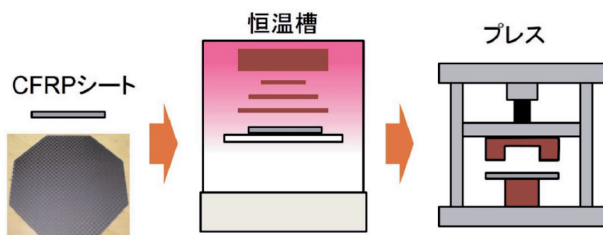
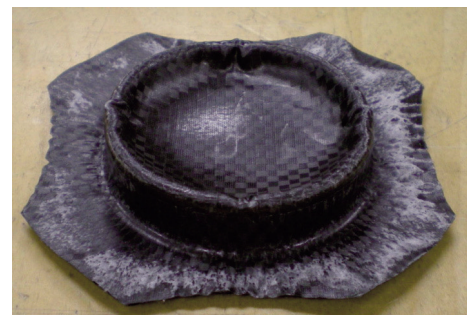


図13 成形の模式図



金型温度：150℃，材料予熱温度：200℃
材料予熱時間：8分，下死点停止時間：60秒

図16 プレス成形例①



金型温度：150℃，材料予熱温度：200℃
材料予熱時間：8分，下死点停止時間：30秒

図17 プレス成形例②



金型温度：130℃，材料予熱温度：200℃
材料予熱時間：8分，下死点停止時間：30秒

図21 プレス成形例⑥



金型温度：150℃，材料予熱温度：200℃
材料予熱時間：6分，下死点停止時間：60秒

図18 プレス成形例③



金型温度：130℃，材料予熱温度：200℃
材料予熱時間：8分，下死点停止時間：60秒

図22 プレス成形例⑦



型温度：150℃，材料予熱温度：200℃
材料予熱時間：6分，下死点停止時間：30秒

図19 プレス成形例④



金型温度：130℃，材料予熱温度：200℃
材料予熱時間：8分，下死点停止時間：30秒

図23 プレス成形例⑧



金型温度：130℃，材料予熱温度：200℃
材料予熱時間：8分，下死点停止時間：60秒

図20 プレス成形例⑤

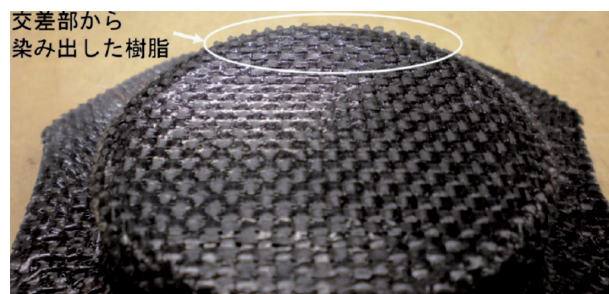


図24 樹脂の含浸が不十分なシートの成形例

5. まとめ

熱可塑性CFRPシートの成形において、ホットプレスの設定温度、初期圧力と保持時間、最終圧力と保持時間など良好なCFRPシートを得るための条件を見出した。また、成形条件によってはCFクロスへの樹脂の含浸が不十分であったり、重ねたCFクロスがずれることなどがわかった。

成形した熱可塑性CFRPシートについて、市販品と引張強度を比較した結果、同等の引張強度を持つことがわかった。その他、成形したシートの炭素繊維にダメージが無いこと、板厚によって強度が変わることなど、材料特性や成形したシートの品質を把握した。

シートの曲げ加工と穴あけ加工を行い、金型温度が高すぎる場合は曲げ加工後の形状が悪く樹脂が金型に付着すること、波型パンチを用いて打抜いた場合、端部表面の樹脂が薄く剥離するなど、加工特性を把握した。

最後に絞り加工による成形を行い、予熱（時間・温度）が不足すると絞り深さが小さく、予熱温度が高すぎると頂点の平面が凹むことなど、プレス成形特性を把握した。

今後は実製品を想定した成形など、さらなる技術蓄積を進めていく予定である。

引用文献

- 1) 株式会社東レリサーチセンター，自動車軽量化技術の開発動向，(2013)
- 2) 日根野翔治・米山猛・立野大地・木村理紀・守安隆史・長島重憲・岡本雅之，熱可塑性CFRPシートによる角筒成形と強度・内部組織，第64回塑性加工連合講演会講演論文集，pp445-446，(2013)
- 3) 米山猛・寺岡達也・増澤健太・西原嘉隆・長島重憲・吉田春夫，熱可塑性炭素繊維シートのプレス成形，塑性と加工，pp55-59，(2012)

継手条件の違いによるレーザー溶接の溶接変形と残留応力の基礎評価

櫻庭 洋平, 安田 星季

Basic Evaluation of Deformation and Residual Stress of Laser Welding by the Difference in Joint Conditions

Yohei SAKURABA, Seiki YASUDA

キーワード：レーザー溶接，溶接変形，溶接継手，非接触三次元測定

1. はじめに

機械部品の生産現場では、価格競争力を維持向上させるため、溶接工程を含むすべての工程で効率化が求められており、そのひとつとしてレーザー溶接の有効活用が期待されている。

レーザー溶接は、アーク溶接など他の溶接法と比べ溶接速度が速いため、溶接作業そのものの時間を短縮することができる。また、他の溶接法より溶融部の体積が小さいため、熱ひずみが小さいことによる矯正作業の削減や、他の溶接法では難しい薄板軽量部品の製作が可能となる。

これらの特徴から、レーザー溶接の導入と活用に多くの道内企業が関心を示しているが、レーザー溶接の装置は他の溶接法と比較して高額なため、導入にあたっては現在の溶接法と溶接品質や加工時間の点で比較したうえで、優位性のある箇所を的確に把握することが重要となる。

そこで本研究では、溶接品質に係る多くの評価項目のうち、溶接前後の溶接変形と応力状態を対象に、板厚や溶接継手の違いによる大きさや発生箇所の変化を測定し、板厚や溶接継手の違いによる影響や傾向を比較した。

2. レーザ溶接の理論

2.1 レーザ溶接の溶接現象¹⁾

図1に、半自動溶接や被覆アーク溶接（以下、アーク溶接など）とレーザー溶接の溶融状態を示す。アーク溶接などは、左図のとおり溶接部に加わる熱エネルギーの密度が低く入熱の範囲も広いため、表面から徐々に深さ方向に熱が伝わり、幅広く浅い熱伝導型の溶接ビード（以下、ビード）となる。

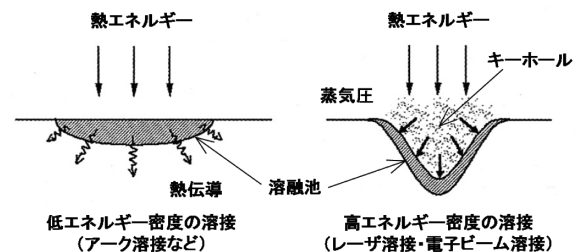


図1 溶接状態の比較

これに対し、レーザー溶接の熱エネルギー密度は $1.0\text{kW}/\text{mm}^2$ 以上で、アーク溶接などの数100~1,000倍高いため、図1右図のとおり溶接部が瞬間的に蒸発し、キーホールと呼ばれる空隙を形成する。これによりレーザーが溶融池の底部まで到達するようになり、溶融が深さ方向に進むことから、溶込み幅の小さいキーホール型（深溶込み型）のビードとなる。また、溶込み深さが同じ場合には、溶融池の体積が熱伝導型ビードよりも小さくなり、溶込みに必要な入熱量も少なくなる。

2.2 溶接変形と残留応力の発生機構²⁾

溶接変形が発生する原因について、図2に溶接変形の原因である残留応力の発生機構と、その時の応力状態を示す。

図2のとおり、溶接部Wと周辺部Bは一体構造であるため、モデル上は両端が剛体板で固定されたものと見なすことができる。材料の加熱時に長さλだけ一様膨張するが、溶接部と周辺部には温度差があるため、溶接部に圧縮応力が、周辺部に引張応力がそれぞれ生じる。圧縮応力が材料の降伏応力を超えた場合、溶接部に塑性変形（残留塑性ひずみ）が生じ、冷却された後に残留応力が生じる。力のつりあいにより、残留応力を打ち消す応力が材料全体に生じ、これにより生じた変形が溶接変形と呼ばれる。

事業名：経常研究

課題名：ファイバーレーザー溶接における溶接部の変形・残留応力に関する研究

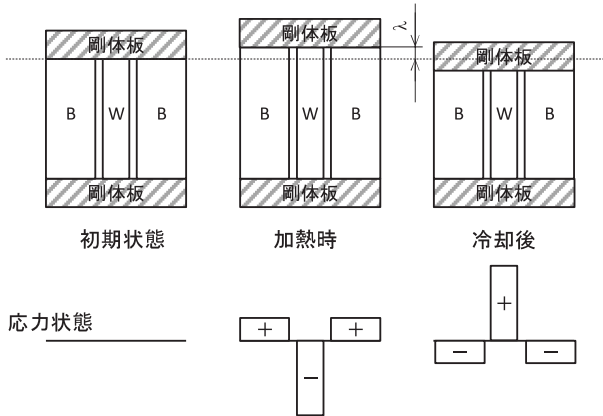


図2 溶接時の残留応力発生機構と応力状態

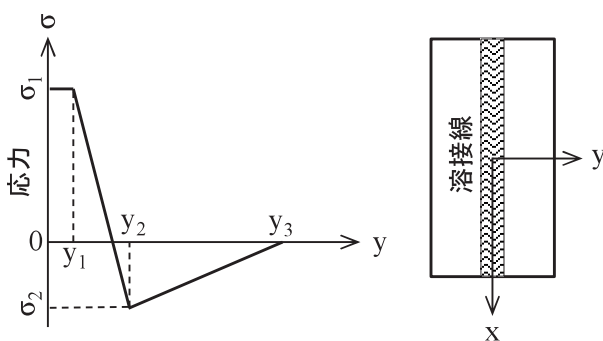


図3 突合せ溶接の溶接線距離と残留応力分布の関係

図3のとおり、溶接線の中心から距離 y_1 までの領域は残留塑性ひずみが生じている部分であるため、残留応力 σ_1 は材料の降伏応力 σ_y 以上となる。

距離 y_1 を過ぎると、力のつり合いにより距離 y_1 までの引張応力を打ち消す力が働いてくる。距離 y_2 で圧縮応力が最大となり、引張応力を打ち消した位置が距離 y_3 となる。

最大圧縮応力 σ_2 の大きさは、材料によって異なるが降伏応力の25~30%程度であるため、距離 y_1 より離れた領域の変形は弾性変形となる。また、距離 y_n (mm) ($n=1, 2, 3$) の大きさは次式(1)で与えられ、長さ1mmあたりの入熱量 Q (J/mm) に比例し、板厚 h (mm) に反比例する。オーステナイト系ステンレス鋼の場合、 y_n (mm) はそれぞれ $y_1=0.24Q/h$, $y_2=0.53Q/h$, $y_3=3.6Q/h$, となる。

$$y_n = m_n \alpha \frac{Q}{\varepsilon_y \rho c h} \quad \dots (1)$$

m_n : 材料ごとの係数, c : 比熱, ρ : 密度
 h : 板厚, ε_y : 降伏ひずみ, α : 線膨張係数

2.3 レーザ溶接の特徴と影響

レーザー溶接の長所は、薄板溶接などの形状面と、溶接時間やひずみ矯正時間などの生産面とで大別される。

薄板溶接が可能となる理由は、以下のとおりである。

- アーク溶接などの熱伝導型溶接では、溶接部の広範囲で温

度が急激に上昇し、入熱部が溶け落ちて溶接できなくなる。

- これに対しレーザー溶接の場合、薄板の場合でも熔融部分の面積が狭いため、溶け落ちにくくなる。

レーザー溶接では、薄板溶接に用いられるTIG溶接でも困難な板厚0.5mm以下の鉄鋼材料や、熱伝導率が大きく一般にろう付け接合される銅合金などを溶接できるため、これにより製品の軽量化や微細化など付加価値が向上する。

次に、溶接時間が短縮される理由は、レーザー溶接では深さ方向の溶融が瞬間的に起こり、アーク溶接などと比べ必要な深さに短時間で到達できるためである。

レーザー溶接の溶接速度は、板厚や熱源の出力などにもよるが、アーク溶接などで通常2.5~10mm/s (0.15~0.6m/min) 程度に対して、25~1000mm/s (1.5~60m/min) 以上が可能であり、これにより溶接時間が大幅に短縮される。

また、ひずみ矯正時間が短縮される理由は、アーク溶接などと比べ入熱量が少ないことから、溶接部の収縮も小さくなるためである。溶接部の収縮量 S は、式(2)のとおり入熱量 Q に比例するため、入熱量の少ないレーザー溶接では収縮量は小さくなり、それに伴い製品全体の溶接変形も小さくなる。これにより、ひずみ矯正作業の短縮や省略が可能となる³⁾。

$$S = \alpha \frac{Q}{c \rho h} \quad \dots (2)$$

ひずみの矯正に必要な時間や人員は、製品形状や要求精度で異なるため一概には比較できないが、事例としてレーザー溶接の採用により化学機械用フランジの製作で2割程度を占める矯正時間が半分以下に短縮された⁴⁾などが報告されている。

3. 実験方法

3.1 試験片の諸元および固定方法

表1に、試験片の諸元と比較条件を示す。

表1 試験片の諸元および比較条件

材 料	SUS304
寸 法	50mm × 50mm
板厚(mm)	0.3, 0.5, 1.0(※)
溶接継手	突合せ, かど, T

※ T継手の下板は全て板厚2.0mm

表1のとおり、実験材料にはステンレス鋼SUS304の50mm×50mm板を使用した。試験片の板厚は0.3mm, 0.5mm, 1.0mmの3種類で、突合せ継手とかど継手では同じ板厚の試験片同士を溶接し、T継手では板厚2.0mmの下板の端面に試験片を溶接した。試験片は、シャーリング装置で所定の大きさに切断した後、溶接部の密着性を高めるため、溶接線となる一辺のみ湿式高速切断機で切削した。

溶接継手の種類は、図4に示す突合せ継手、かど継手、T

継手の3種類とした。なお、溶接変形を比較する際の基準として、溶接線の溶接方向を $+x$ とする直交座標系を設けた。

溶接実験では、各継手とも2枚の試験片を図5のクランプ治具で固定し、溶接線の始端から2mm, 13mm, 25mm, 37mm, 48mmの合計5箇所、表4, 5にて後述する仮付条件でスポット溶接した後、溶接線の始端から終端まで連続溶接を行った。各継手の試験片とクランプ押さえとの位置関係を図6に示す。クランプ治具による試験片の締付力は、突合せ継手用が4.7kN、かど継手・T継手用が1.8kNとした。

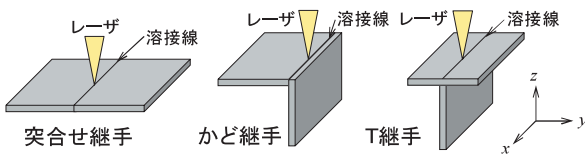


図4 溶接継手の種類

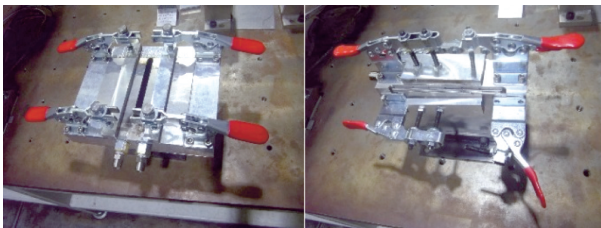


図5 クランプ治具
(左：突合せ継手用 右：かど・T継手用)

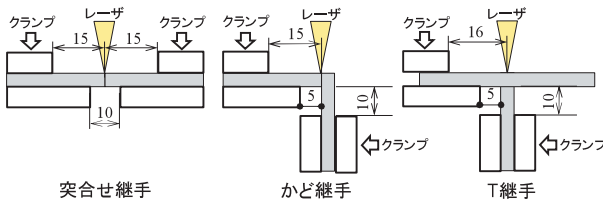


図6 試験片のクランプ押さえ位置

3.2 溶接変形の測定

溶接変形の測定には非接触三次元測定装置COMET5を使用し、仮付した段階(溶接前)と連続溶接後(溶接後)の変形の大きさや変形箇所を測定した。

測定では、溶接前後の三次元CADデータを重ね合わせて、溶接前の形状から法線方向への変位量を数値化した。なお、溶接前後の位置合わせの基準点を得るために、図7のように片方の試験片の溶接線から40mm離れた場所に、 $\phi 8$ mmの丸穴を2箇所設けた。

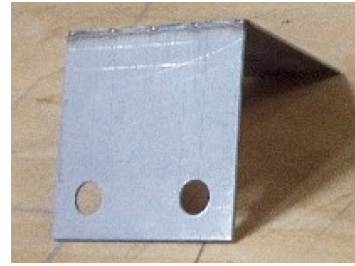


図7 位置合わせ穴の例(かど継手)

3.3 溶接部付近の応力測定

溶接部付近の応力測定は、試験片の図8に示す溶接線から5mm, 7.5mm, 10mmの箇所に各2枚ひずみゲージを貼り、クランプ治具で固定した時をひずみ0として、溶接後クランプ治具から外したときのひずみから応力をもとめた。

ひずみの測定方向は溶接線の直角方向とした。使用したひずみゲージの諸元を表2に示す。

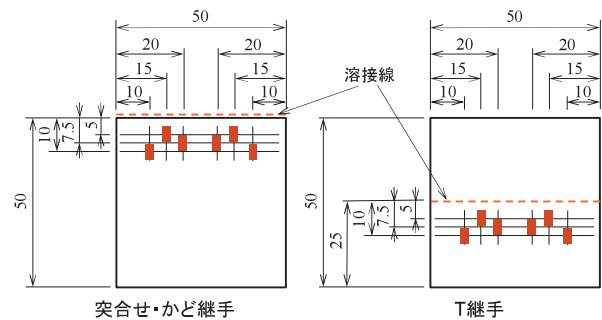


図8 ひずみ測定箇所

表2 ひずみゲージ諸元

ゲージ長(mm)	2
ゲージ抵抗(Ω)	120.4 \pm 0.4
ゲージファクタ(-)	2.14 \pm 1.0%

なお、ひずみゲージによる応力測定では、試験片の一部を破壊したときに解放される応力を測定する破壊法が一般的である。しかし、本研究で使用したステンレス鋼SUS304は加工硬化性が高く、また、試験片の板厚も薄いため、破壊時の切削抵抗による塑性変形を防ぐのが極めて困難なことから、前述の方法を採用した。

3.4 レーザ溶接条件

レーザ溶接の溶接条件は、表3の溶接速度などを共通条件とし、突合せ継手とかど継手のレーザ出力を表4、T継手のレーザ出力を表5のとおりとした。なお、レーザ出力の良否は、突合せ継手とかど継手では途切れない連続した裏波ビードが得られる最小出力とし、T継手では上板と下板の溶接部にすき間が生じない最小出力とした。

表3 レーザ溶接実験条件（全試験片共通）

溶接速度 (m/min)	レーザー 焦点径 (mm)	シールド ガス	ガス流量(L/min)	
			表側	裏側
1.5	0.3	N ₂	10	10

表4 レーザ照射条件（突合せ継手・かど継手）

板厚 (mm)	溶接条件		仮付条件		
	レーザー 出力(W)	発振 形態	レーザー 出力(W)	照射時間 (ms)	仮付 箇所数
0.3	240		150	150	
0.5	380	CW	280	200	5点
1.0	550		400	400	

表5 レーザ照射条件（T継手）

板厚 (mm)	溶接条件		仮付条件		
	レーザー 出力(W)	発振 形態	レーザー 出力(W)	照射時間 (ms)	仮付 箇所数
0.3	450		400	100	
0.5	500	CW	400	200	5箇所
1.0	550		400	400	

表6 最大変位の大きさと発生箇所

溶接継手	板厚 (mm)	最大変位		発生箇所
		変位量(mm)	方向	
突合せ	0.3	1.1	+z	溶接線終端
	0.5	0.65	+z	溶接線終端
	1.0	0.23	+z	溶接線始端
かど	0.3	0.70	+y	溶接線始端
	0.5	0.27	+y	溶接線始端
	1.0	0.12	+y	溶接線始端
T	0.3	0.35	+z	固定端側
		0.51	+z	自由端側
	0.5	0.20	+z	固定端側
		0.22	+z	自由端側
	1.0	0.020	+z	固定端側
		0.46	+z	自由端側

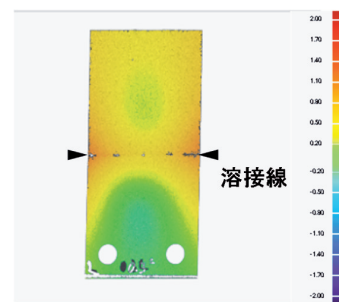


図9 突合せ継手の変位分布

4. 結果と考察

4.1 溶接変形の傾向

溶接前後の主な変形箇所や大きさについて、表6に主要な変位が生じた箇所と変位量の比較を、図9～11に各継手の変位量の分布画像をそれぞれ示す。なお、溶接後の変位の向きについて、突合せ継手とT継手では+z方向を、かど継手では+zと+y方向をそれぞれ正の向きとした。

4.1.1 突合せ継手

突合せ継手の場合、図9のとおり溶接線の始端と終端付近に顕著な変位が確認され、板厚0.3mmの試験片では溶接前後で最大約+1.1mmの変位が生じた。この変位は板厚1.0mmでは約+0.2mmとなり、板厚とともに減少する傾向を示した。

溶接線の始末端付近に大きな変位が生じた理由について、図3のとおり溶接線上では引張応力が働くが、力のつりあいにより溶接線の始末端部では圧縮応力に転じる。この圧縮応力により始末端部に座屈変形が生じ、z方向の変位になった可能性が考えられる。

また、板厚とともに変位が減少する原因については、実験で使用した試験片の材質がすべて同じであるため、式(2)の物性値 α 、 c 、 ρ はすべて等しくなり、 S の大小は入熱量と板厚 Q/h (W/mm)で比較することができる。表4より、板厚ご

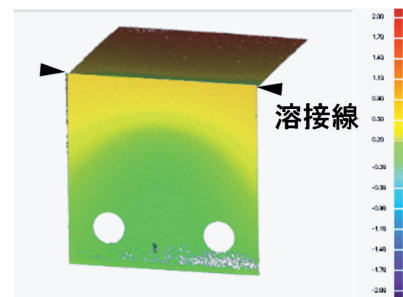


図10 かど継手の変位分布

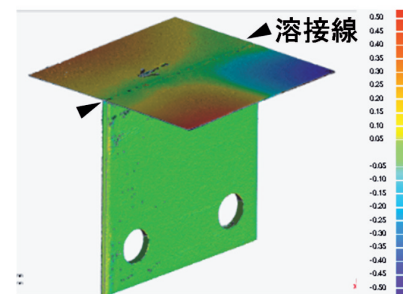


図11 T継手の変位分布

との Q/h は $Q/h_{0.3}=933$ 、 $Q/h_{0.5}=760$ 、 $Q/h_{1.0}=550$ となり、板厚が厚いものほど S の値が小さくなるため、それに伴い変位が減少したと考えられる。

4.1.2 かど継手

かど継手の場合、図10のように y 方向については溶接線の始末端付近に顕著な変位が確認され、板厚0.3mmの試験片では最大約+0.7mmとなり、板厚1.0mmでは約+0.1mmまで減少した。しかし、 z 方向の溶接線付近では y 方向と異なり板厚によらずほぼ±0 mmとなった。

板厚と変位の関係については、突合せ継手の場合と同様な原因が考えられる。一方、溶接線をはさんだ両側で変形の傾向が異なる理由については、以下のことが考えられる。

- 溶接線の仮付により、後述のT継手の場合と同様に z 方向の変形が抑制された。
- 溶接線とクランプ押さえとの距離が図6のとおり異なるため、溶接線の片側のみに変形が集中した。

4.1.3 T継手

T継手の場合、他の継手と異なり溶接線付近の変位が±0.1mm前後と小さく、試験片の端部に顕著な変形が生じた。板厚との関係については、クランプ治具で固定した側は板厚0.3mmで約+0.4mm、板厚1.0mmではほぼ±0 mmとなり、板厚とともに減少した。一方、クランプで固定していない側の端部では明確な板厚との関係は確認できなかった。

板厚と変位の関係については、他の継手と同様の理由と考えられる。また、T継手の溶接線付近の変形が他の継手より小さい原因には、以下のことが考えられる。

- T継手のみ2.0mm板との溶接になるため、溶接線付近の剛性が高く変形が小さくなった。
- T継手の下板の剛性に加え、仮付溶接の効果でさらに変形が抑えられた。

以上より、一般に溶接変形が少ないと言われるレーザ溶接においても、薄板では一定の変形が生じることを確認した。薄板の溶接変形を最小限に抑える場合には、溶接線ぎりぎりの位置でクランプ押さえを配置する方法や、本実験のT継手のように重ね溶接の下板に剛性の高い部材を配置する方法など、設備面や製品設計からの対策が重要となる。

4.2 溶接部付近の応力状態の傾向

溶接線付近の表面応力について、溶接線からの距離と表面応力の平均値との関係を比較した。図12～14に各継手の比較結果を示す。なお、同一条件での測定回数は、2～6回とした。

図12～14のとおり、一般的な傾向として、各継手とも溶接線から近いほど表面の圧縮応力が大きく、溶接線から離れるに従って応力が0に近づくことを確認した。また、距離5 mmの圧縮応力は板厚が厚いものほど大きくなることを確認した。

溶接継手の違いについて、距離5 mmから10mmにかけての応力の変化は、突合せ継手やかど継手では120MPa前後に対しT継手では80MPa程度となり、他の継手の2/3程度と

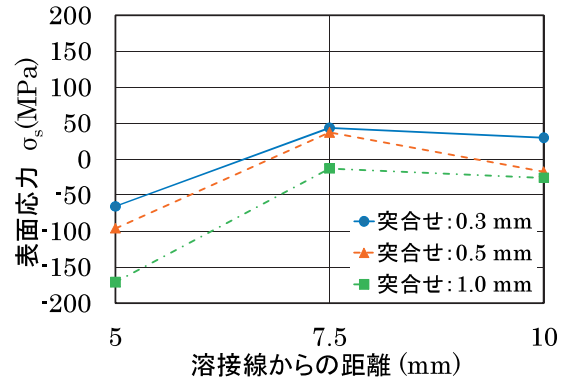


図12 突合せ継手の表面応力分布

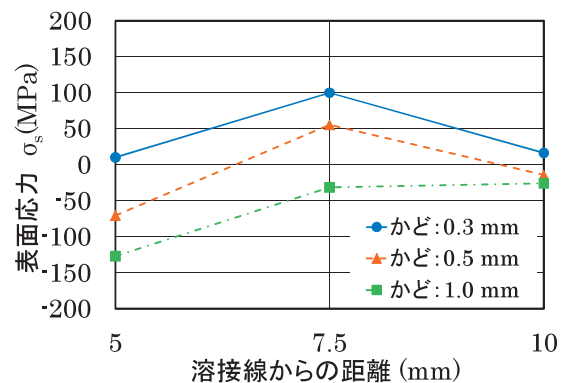


図13 かど継手の表面応力分布

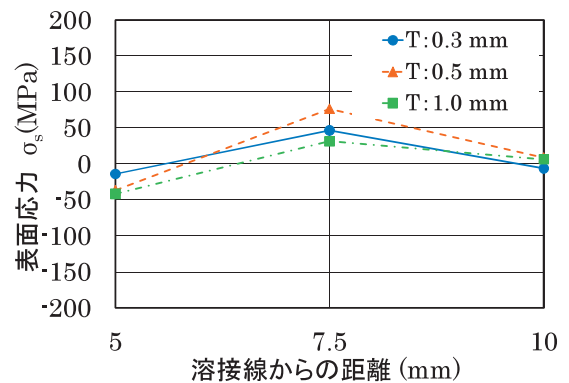


図14 T継手の表面応力分布

なることを確認した。

これらの原因について、図12～14の測定結果を図3の応力分布の理論モデルに当てはめ比較した。図15～17に突合せ継手とかど継手の、図18～20にT継手の、板厚ごとの理論値と実測値との比較を示す。なお、照射したレーザ光の一部は反射により失われるため、レーザの出力すべてが入熱にはならない。文献⁹⁾より、ステンレス鋼のレーザ吸収率や光学系部品による損失を、レーザ出力の約40%と仮定した。また、理論モデルの σ_1 と σ_2 は、オーステナイト系ステンレス鋼の場合 $\sigma_1 = \sigma_y$, $\sigma_2 = -0.3\sigma_y$ となり、SUS304の σ_y は255MPaとなる。

図15～17のとおり、突合せ継手とかど継手の距離 5 mm における応力は、理論値は板厚1.0mmでは y_2 - y_3 間の圧縮応力域、板厚0.3mmと0.5mmでは y_1 - y_2 間の引張から圧縮に転じる領域となる。応力の理論値は、 $\sigma_{0.3-5mm} = +140\text{MPa}$, $\sigma_{0.5-5mm} = +50\text{MPa}$, $\sigma_{1.0-5mm} = -80\text{MPa}$ となり、板厚とともに圧縮応力が増加する。一方実測値は、引張応力となる場合や理論値以上の圧縮応力となる場合があるものの、板厚とともに圧縮応力が増加する点については、理論値との整合性が確認された。実測値と理論値の誤差については、前項で確

認された試験片の曲げや座屈による可能性が考えられる。

一方、距離7.5mmと10mmについては、理論値では圧縮応力を示す領域であるが、実測値ではほぼ応力0から引張応力を示しており、理論値とは合致しなかった。この原因については、図3の応力分布モデルが試験片を拘束しない条件のものであり、これに対し実測では図6のとおり溶接線の両側のクランプ拘束が影響した可能性が考えられる。

これに対しT継手の実測値は、図18～20のとおり応力の大きさや引張・圧縮の傾向ともに、理論値と合致しなかった。

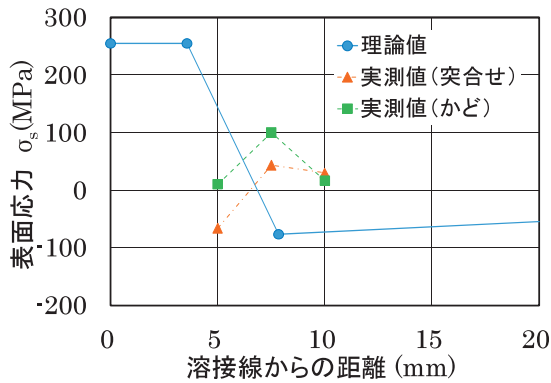


図15 応力分布モデルと実測値の比較 (突合せ・かど継手 板厚0.3mm)

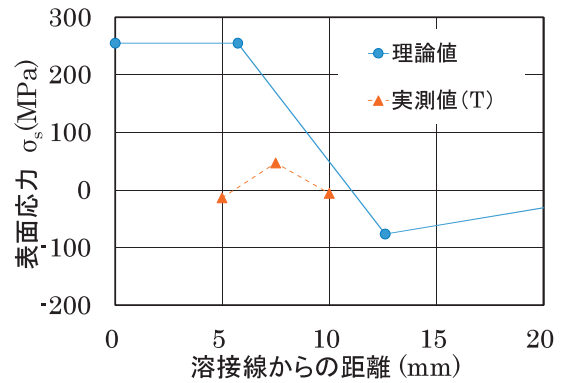


図18 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚0.3mm)

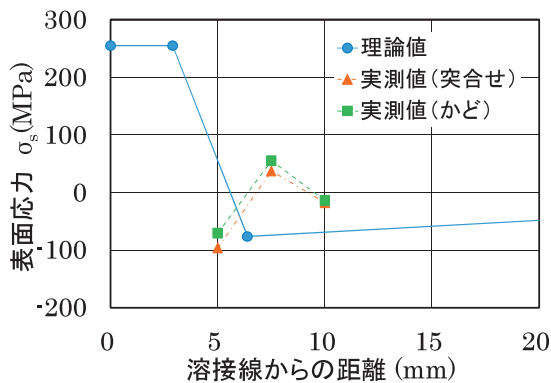


図16 応力分布モデルと実測値の比較 (突合せ・かど継手 板厚0.5mm)

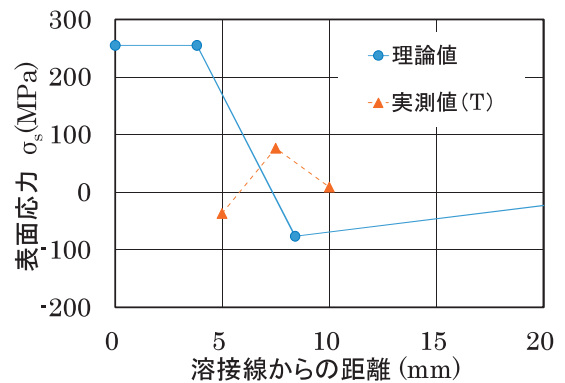


図19 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚0.5mm)

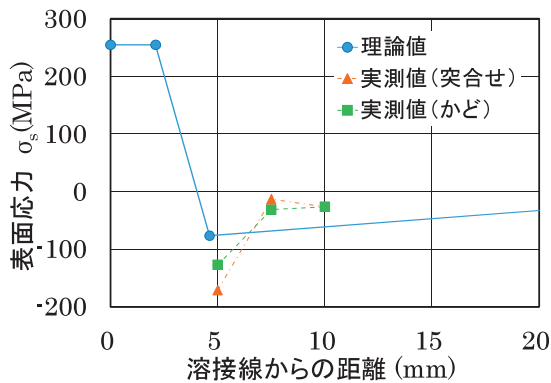


図17 応力分布モデルと実測値の比較 (突合せ・かど継手 板厚1.0mm)

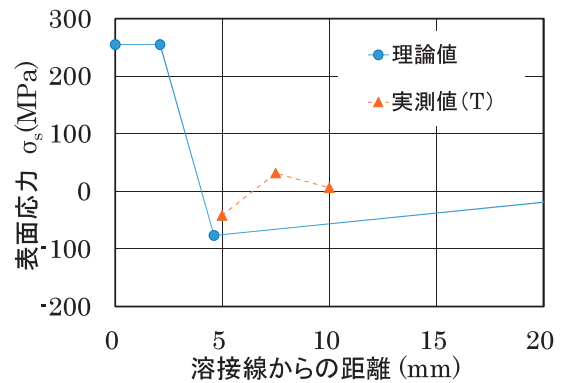


図20 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚1.0mm)

この原因について、突合せ継手やかど継手の入熱では入熱がすべて溶接で消費されるのに対し、T継手では下板の溶融にも入熱が必要なため、測定対象の上板に加わる入熱が照射したレーザーの出力より大幅に少ない可能性が考えられる。

この仮定について、上板と下板で入熱量を熱伝導率で分解することを検討した。なお、上板と下板の入熱量については、厳密には材料表面の熱伝達や放射による熱損失をすべて網羅する必要があるが、今回は熱伝導成分のみの検討とした。

熱移動量の分解について、上板と下板の材質が同じであるため、上板と下板が十分密着している場合は断面積(=板厚)の合計から上板の断面積で按分できるものと考えられる、図21~23に、図18~20の理論値の式に表7の按分率を代入し、修正した後の理論値と実測値の比較を示す。

表7 T継手の板厚による熱移動量按分率

板厚(mm)		按分率: $2a/(2a+b)$
上板:a	下板:b	
0.3	2.0	0.23
0.5	2.0	0.33
1.0	2.0	0.50

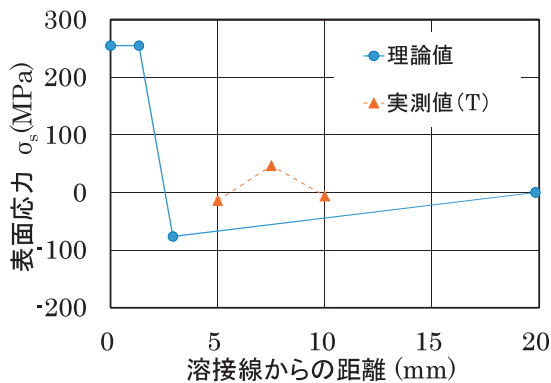


図21 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚0.3mm 熱量按分後)

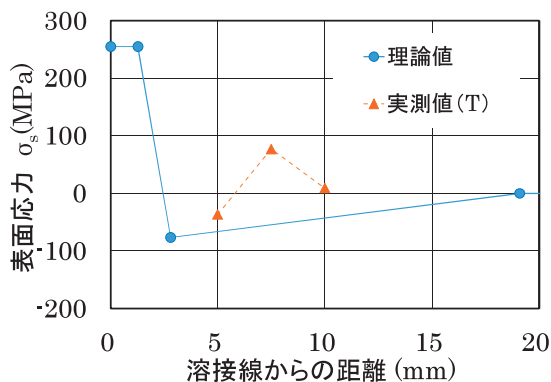


図22 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚0.5mm 熱量按分後)

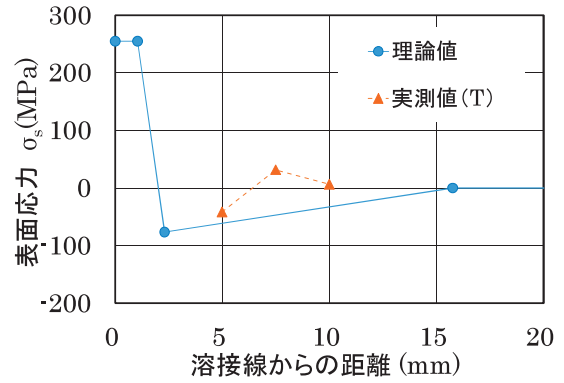


図23 応力分布モデルと実測値の比較 (T継手 板厚1.0mm 熱量按分後)

図21~23のとおり、修正後の理論値はすべての板厚で $y_2 - y_3$ 間の領域となり、距離 5 mm と 10 mm については理論値との誤差はあるものの、理論値と同様に溶接線から離れるほど応力が ±0 に近づく傾向が確認された。しかし、距離 7.5 mm についてはいずれも引張側の応力となり、理論値と大きく異なる結果となった。この原因について、試験片の端部が拘束されていることで座屈が生じた可能性や、溶接線方向の変形が影響した可能性が考えられるが、本研究の測定内容のみで原因を特定するのは困難であり、今後の課題として残った。

以上により、試験片の拘束条件などによる誤差はあるものの、図3のモデルによってレーザー溶接の応力分布や傾向をおおむね評価できることを確認した。

5. おわりに

ステンレス鋼のレーザー溶接における溶接変形の大きさや主な変形箇所の分布、溶接部付近の応力状態を測定し、板厚や溶接継手の種類による傾向を確認した。これらの知見をもとに現在の溶接法と比較し、レーザー溶接でひずみ矯正作業を省略可能な箇所の抽出や、溶接法に合わせた製品設計の改良などが可能となる。

一方、溶接変形や応力状態の数値的な検証には、曲げや座屈など三次元的な溶接変形をモデル化し、これをもとにシミュレーション等による検証作業が必要となる。

今後は、本研究で得られた測定結果をもとに溶接変形や応力状態の測定データを加え、同時に測定データの誤差の範囲や誤差の発生原因について検証作業を進め、技術情報としての信頼性向上に努めていく。そのうえで、適切なレーザー溶接使用箇所の選定、レーザー溶接に適した製品設計の改良、装置導入時の機器選定や周辺設備の改善提案など、道内企業が生産する溶接製品の品質や付加価値の向上を支援する。

謝辞

本研究で使用したファイバーレーザー加工溶接装置・非接触3次元測定システム・試料埋込装置・実体顕微鏡は(独)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整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 新井武二：レーザー加工の基礎工学，丸善，pp.316-354，(2007)
- 2) 溶接学会編：新版溶接・接合技術特論，産報出版，pp.238-248，(2011)
- 3) 寺崎俊夫：溶接変形と残留応力，溶接学会誌 第78巻 第2号，pp.55-62，(2009)
- 4) 北側彰一・山崎洋輔：大出力ファイバーレーザー溶接システムの開発と生産応用，第76回レーザー加工学会講演論文集，pp.81-86，(2011)
- 5) 新井武二：レーザー加工の基礎工学，丸善，pp.122，(2007)

動作に注目した農作業の負担特性評価

前田 大輔, 吉成 哲, 中島 康博, 栗野 晃希
白旗 雅樹*

Motion-based Evaluation of the Agricultural Work Load

Daisuke MAEDA, Satoshi YOSHINARI, Yasuhiro NAKAJIMA, Kouki KUWANO
Masaki SHIRAHATA*

キーワード：農作業，作業負担，作業姿勢，作業動作，部位別負担度

1. はじめに

担い手の高齢化や後継者不足により，農業従事者の減少が続いている。全国の基幹的農業従事者数は平成16年に219万7千人¹⁾であったが，平成26年には167万9千人²⁾と10年間で24%減少している。また，65歳以上の割合は62.8%²⁾にも上る。農業には人手による作業が多く存在するため，労働力が不足する高齢農家では作業の継続が困難となり，作付面積の縮小や廃業につながるケースも少なくない。

こうした状況を背景に，高齢労働者の無理のない就労継続を支援するため，各方面で個別の作業ごとに負担軽減策の検討が行われている。現場においても，キャベツの収穫作業に着目し，腰部の筋力を補助するアシストスーツを試作³⁾するなど，農作業の軽労化に向けた取組を実施してきた。

しかし，農作業には図1に示す前屈姿勢のように共通する姿勢／動作が多く存在するため，個別の作業に着目するのではなく，複数の作業に共通する姿勢や負担部位に注目することで，特に負担の大きい作業の特徴等，優先度の高い労働課題を効率的に把握することができると考えられる。

そこで本研究では，複数の農作業を対象とした作業姿勢／動作と作業負担に関するフィールド調査を行った。ビデオや心拍数，主観的負担度などの情報を記録するとともに，農作業に共通する姿勢／動作の出現頻度と身体部位負担度との関係を分析し，各種作業の負担特性を整理した。



キャベツ収穫

カボチャ収穫

図1 共通姿勢の例（前屈）

2. 農作業負担フィールド調査

2.1 調査対象作業

農作業における作業姿勢／動作と身体部位負担度を記録するフィールド調査を実施した。

調査対象作業はカボチャ収穫作業・積込作業，キャベツ収穫作業，トマト収穫作業・脇芽取り作業，ブロッコリー収穫作業，アスパラ収穫作業，ナシ摘果作業の計6作物8作業とした。カボチャは作業方法の異なる2事例（カボチャ用ヘタ切りハサミを使用する事例，枝切ハサミを使用する事例）を調査対象とし，それ以外の作物については各1事例とした（図2）。被験者は対象作業に従事する農業者とし，被験者数は各事例1名とした。

*道総研 中央農業試験場

*Hokkaido Research Organization Central Agricultural Experiment Station

事業名：職員奨励事業（提案部門：シーズ探索型）

課題名：農作業負担の特性把握に向けた動作別の作業負担評価方法に関する研究



カボチャ（ヘタ切りハサミ使用）左収穫，右積込



カボチャ（枝切りハサミ使用）左収穫，右積込



キャベツ収穫

ブロッコリー収穫



トマト 左収穫，右脇芽取り



アスパラ収穫

ナシ摘果

図2 調査対象作業

2.2 調査方法

作業動作への影響を考慮し、被験者の負担が少ない調査・計測手法を用いた。被験者には胸ベルト式の汎用心拍計を装着させ心拍数を計測した（図3）。その他にビデオによる作業姿勢／動作記録、部位別の主観的負担度（【0：何も感じない】～【10：非常にきつい】）の記録、母指-示指間のつまみ力計測（図4）、ならびに、30秒間に何回椅子からの立ち上がりができるかをカウントするCS-30テスト⁴⁾を実施した。

調査は次の手順で行った。まず、作業開始前に安静座位における心拍数を記録し、続いて主観的負担度記録、つまみ力計測、CS-30テストを実施した。次に、被験者が普段通りの内容・時間で作業する様子をビデオ撮影した（作業姿勢／動作の記録）。作業中に休憩を挟む場合は、休憩時に主観的負担度記録、つまみ力計測、CS-30テストを実施した。さらに、作業終了後、主観的負担度記録、つまみ力計測、CS-30テスト、踏み台昇降運動時（30回/分、4分間、高さ200mm）の心拍数を記録した。また、作業量を明らかにするため、収穫物等の取扱重量を別途記録した。



トランスミッタ

ロガー

図3 汎用心拍計



図4 つまみ力計

3. 作業姿勢／動作の分析

体幹と下肢の関節角度を基準に立位・前屈等の8種類の基本姿勢を定義し（表1）、鉛直下向に対する上腕の角度を基準に上肢の挙上の有無を定義した（表2）。また、足の位置の変化を歩行（移動）の有無として定義した（表3）。

次に、各作業の姿勢／動作を記録したビデオ映像から0.5秒ごとにフレーム画像を切り出し、定義にもとづいて姿勢のコード化を行い、各コードの出現割合を集計した。

さらに、基本姿勢の変化を動作として定義し（表4）、各作業における動作出現頻度と姿勢継続時間を集計した。

表1 基本姿勢の定義

コード	姿勢	鉛直方向に対する 体幹前屈角度	骨盤に対する両肩 ラインの回転角度	伸展位0°からの 膝屈曲角度
0	立位	0° 以上 ~30° 未満	20° 未満	60° 未満 (両膝平均)
1	ひねり	0° 以上 ~30° 未満	20° 以上	60° 未満 (両膝平均)
2	前傾	30° 以上 ~60° 未満	20° 未満	60° 未満 (両膝平均)
3	前屈	60° 以上	20° 未満	90° 未満 (両膝平均)
4	中腰	60° 未満	20° 未満	60° 以上 ~120° 未満 (両膝平均)
5	しゃがみ	0° 以上 ~60° 未満	20° 未満	120° 以上 (両膝平均)
6	椅座位	0° 以上 ~60° 未満	20° 未満	120° 未満 (両膝平均) 椅子等に腰掛ける
7	膝つき	0° 以上 ~60° 未満	20° 未満	90° 以上 (片膝or両膝) 地面に膝をつける(片膝or両膝)

表2 上肢挙上の定義

コード	鉛直下向きに対する上腕の角度
0	0° ~45° (挙上なし)
1	45° ~ (挙上あり)

表3 歩行（移動）の定義

コード	前フレームと比較した足の位置
0	変化なし
1	変化あり

表4 動作の定義

基本姿勢コード		動作
n-1 フレーム	n フレーム	n フレーム
5~7	0~4	立ち上がり動作
1 以外	1	ひねり動作
3 以外	3	前屈動作
5 以外	5	しゃがみ動作
6 以外	6	腰掛け動作
7 以外	7	膝つき動作

4. 各作業の負担特性

作業姿勢／動作の分析結果と主観的負担度の記録をもとに、各作業の負担特性を評価した。図5にカボチャ作業（カボチャ用ヘタ切りハサミを使用する事例）における部位別主観的負担度を、表5に姿勢／動作出現頻度と取扱重量を例示する。収穫作業はカボチャのヘタを切り、集める作業、積込作業は集めたカボチャを連続して鉄コンテナに積み込む作業である。収穫作業の負担度は、上肢よりも下肢の負担が大きかった。また、姿勢／動作は歩行や前屈動作の出現頻度が高かった。歩行や前屈動作の頻度が下肢の負担度に影響したものと思われる。一方、積込作業では上肢の負担度が大きく、取扱重量の多さや上肢の挙上頻度の高さが影響したものと思われる。

以上のように、各作業の姿勢／動作等の特徴と負担特性について整理した。

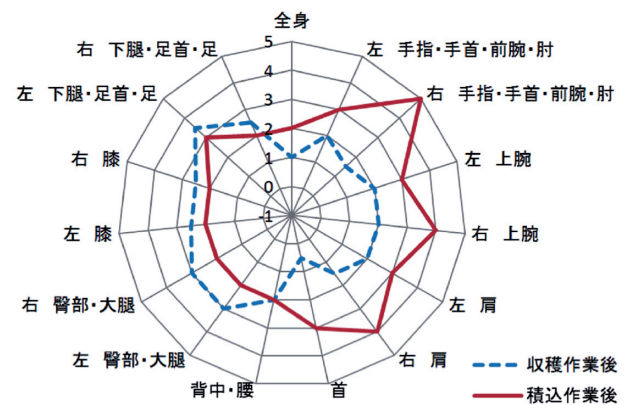


図5 カボチャ作業（ヘタ切りハサミ使用）における主観的負担度（作業前からの増加値）

表5 カボチャ作業（ヘタ切りハサミ使用）における姿勢／動作出現頻度と取扱重量

作業	歩行 (%)	左上肢 挙上 (%)	右上肢 挙上 (%)	前屈 動作 (回/分)	取扱 重量 (kg/分)
収穫	36.8	0.7	0.0	5.0	8.7
積込	14.2	2.9	6.6	1.3	22.8

5. 作業間の負担特性比較

5.1 姿勢／動作の特徴による負担特性の違い

姿勢／動作の特徴が共通する作業について、主観的負担度の平均を求めることで、作業による負担特性の違いを評価した。図6に調査対象全作業の平均主観的負担度を、図7に前屈姿勢の出現頻度が高い（25%以上）作業の平均主観的負担度を、図8に上肢の挙上時間が長い（5秒以上の姿勢継続が20分に1回以上）作業の平均主観的負担度を示す。前屈姿勢の出現頻度が高い作業は背中・腰の負担度が特に大きいことがわかった。さらに、全作業の平均と比較すると、全身各部位の負担度が大きいことから、前屈頻度の高い作業は総合的に負担の大きい作業であると考えられる。また、上肢の挙上時間が長い作業は下肢と比較して上肢・体幹の負担度が大きいことがわかった。以上のように作業姿勢／動作の特徴による負担特性の違いを整理した。

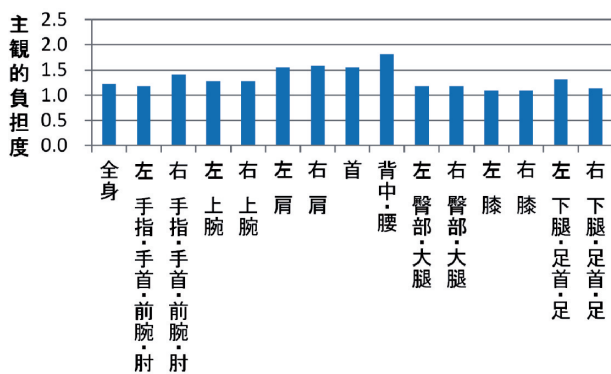


図6 全作業の平均主観的負担度（作業前からの増加値）

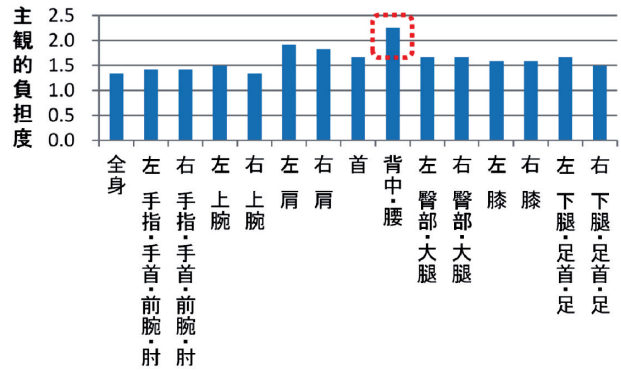


図7 前屈姿勢の頻度が高い作業の平均主観的負担度（作業前からの増加値）

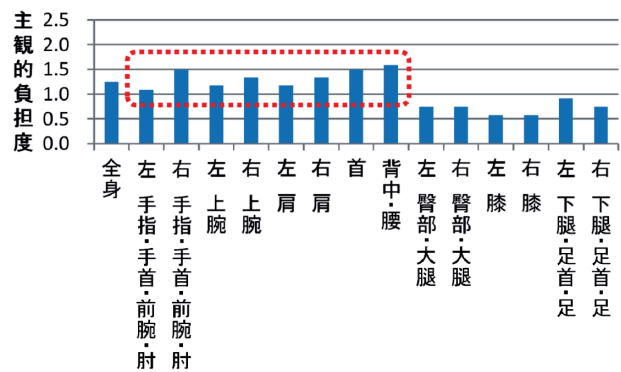


図8 上肢の挙上時間が長い作業の平均主観的負担度（作業前からの増加値）

5.2 心拍データと姿勢／動作分析結果による負担度比較

計測した心拍データと姿勢／動作分析結果をもとに、作業間の負担度の比較を行った。図9にトマト収穫作業における心拍変動のグラフを例示する。コンテナ持ち上げ等の高負荷動作時に心拍数の上昇が見られ、身体負担度がデータに反映されていることを確認できる。ただし、心拍データは個人差が大きいため、次式(1)により踏み台昇降時の心拍に対する作業時の心拍の割合を求め、被験者間の比較に用いた。

$$\frac{HRw - HRr}{HRs - HRr} \times 100 \quad (1)$$

HRw : 作業時の平均心拍数

HRs : 踏み台昇降運動時の最大心拍数

HRr : 安静座位における平均心拍数

図10に(1)式により求めた心拍データと前屈動作の頻度を示す。両者が良く相関していることから、前屈動作の頻度が高い作業は、作業負担の大きい作業であると考えられる。

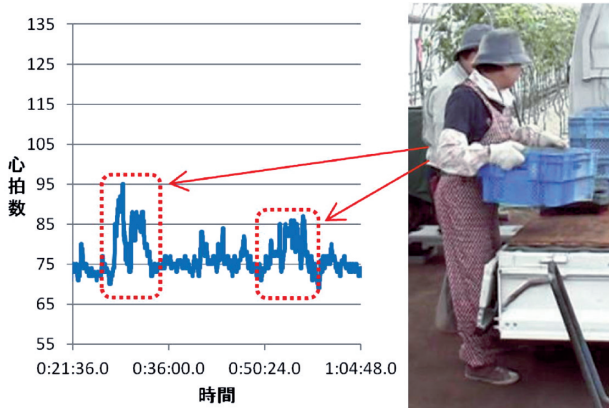


図9 トマト収穫作業における心拍変動

引用文献

- 1) 農林水産省：平成16年農業構造動態調査，(2004)
- 2) 農林水産省：平成26年農業構造動態調査，(2014)
- 3) 前田大輔・吉成哲・中島康博・榎野晃希：農作業軽労化支援技術の開発，日本機械学会第21回バイオエンジニアリング講演会講演論文集，pp.409-410，(2009)
- 4) 中谷敏昭・灘本雅一・三村寛一・伊藤稔：日本人高齢者の下肢筋力を簡便に評価する30秒椅子立ち上がりテストの妥当性，体育学研究，47，pp.451-461，(2002)

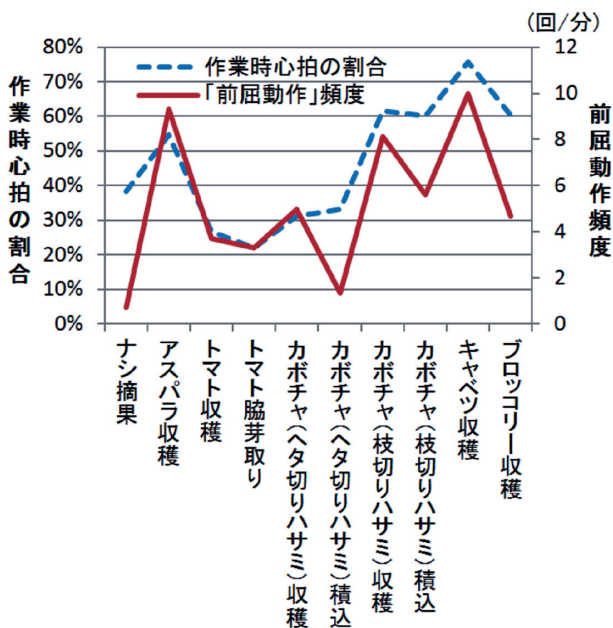


図10 作業時心拍と前屈動作頻度

6. まとめ

農作業を対象に，基本姿勢／動作の出現頻度と部位別負担度との関係进行分析し，各作業の負担特性を明らかにした。今後は調査事例を増やし，さらなる負担特性データの蓄積を図るほか，複数の作業に共通する主要な労働課題等に対し，軽労化用具を開発するなど，負荷軽減策を検討する予定である。

謝辞

本研究で使用した3次元運動撮影解析システムは，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。また，調査対象作物の生産者の皆様，石狩農業改良普及センターおよび空知農業改良普及センターの関係各位には多大なるご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

北海道立総合研究機構工業試験場報告
No.314 (2015)

発行 平成27年 8月31日

発行所 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術研究本部
工業試験場
〒060-0819 札幌市北区北19条西11丁目
電話 (011)747-2321 (代表)

印刷所 小南印刷株式会社