

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.316)

2017

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術研究本部

工業試験場

目

一般論文

- | | | |
|---|--------------------------------------|--|
| 1 | コンブ乾燥システムの開発 | 多田 達実, 鈴木 慎一, 浦池 隆文 …………… 1
今岡 広一, 畑沢 賢一, 飯田 憲一
保科 秀夫, 鶴谷 知洋, 立松 宏一
下ノ園 慧, 福士 暁彦, 坂本 正博
辻 浩司 |
| 2 | 農作物残渣の燃料化と燃焼に関する研究 | 上出 光志, 山越 幸康, 藤澤 拓己 …………… 17
北口 敏弘 |
| 3 | 熱可塑性炭素繊維強化プラスチックの機械的特性に影響を及ぼす各種因子の評価 | 瀬野修一郎, 吉田 昌充, 山岸 暢 …………… 25
可児 浩, 太田 佳樹, 早川 康之 |
| 4 | 無機廃棄物の溶融による都市鉱山からの金属回収 | 稲野 浩行, 堀川 弘善, 飯野 潔 …………… 33
赤澤 敏之 |
| 5 | 「食」の製品・サービスアイデア創出支援手法の開発 | 万城目 聡, 日高 青志, 印南 小冬 …………… 41 |
| 6 | 溶接作業における熟練技能定量化手法の研究 | 神生 直敏, 櫻庭 洋平, 畑沢 賢一 …………… 51
万城目 聡 |
| 7 | ワイヤ供給レーザクラディングにおける加工姿勢の影響 | 櫻庭 洋平, 鈴木 逸人, 安田 星季 …………… 59
戸羽 篤也, |
| 8 | 3D積層造形法で製作したマルエージング鋼材の金属組織 | 戸羽 篤也, 鈴木 逸人, 平野 繁樹 …………… 69
長船 康裕, 葛西 勝明, 葛西 健央 |

研究ノート

- 1 マルチローター型UAVの利活用技術
浦池 隆文, 多田 達実, 鈴木 慎一 77
飯島 俊匡, 井川 久
- 2 北海道の大規模機械化農業のための作業計画設計支援ソフトウェアの開発
堀 武司, 全 慶樹, 近藤 正一 81
奥田 篤, 佐藤 彰宏
- 3 食品の内部検査技術開発に向けたOCTの適用可能性
岡崎 伸哉, 飯島 俊匡, 本間 稔規 89
- 4 北海道産小豆粉の製造法と利用技術の開発
松嶋景一郎, 浦 晴雄, 三津橋浩行 95
内山 智幸, 渡邊 治, 佐藤 恵理
能登 裕子, 吉川 修司
- 5 膜分離による機能性食品原料の精製
鎌田 樹志, 松嶋景一郎 101
- 6 メタン発酵消化液の浄化処理技術
佐々木雄真, 鎌田 樹志, 富田 恵一 107
若杉 郷臣, 三津橋浩行
- 7 土壌中の六価クロム還元処理の基礎検討
富田 恵一, 若杉 郷臣 113
- 8 天井裏・床下空間に設置した樹脂製放射パネルの暖房時における放射特性
白土 博康, 保科 秀夫, 櫻庭 高光 117
嘉賀 通倫, 井浦 奉昭
- 9 臭気吸着分解処理技術の開発
野村 隆文, 執行 達弘, 吉田 憲司 125
橋本 祐二, 斎藤 隆之, 赤澤 敏之
- 10 放電プラズマ焼結法による透光性材料の作製
中嶋 快雄, 高橋 英徳, 宮腰 康樹 131
板橋 考至, 本間 稔規, 赤澤 敏之
- 11 アルミニウムの溶湯鍛造に関する研究
板橋 考至, 高橋 英徳, 宮腰 康樹 137
田中 大之
- 12 失敗事例から商品開発プロセスを学べるツールの開発
印南 小冬, 日高 青志, 万城目 聡 141
- 13 独立成分分析の魚類寄生虫検出への応用
橋場 参生, 本間 稔規, 飯島 俊匡 147

CONTENTS

Regular Paper

1	Development of Kelp Drying System	1
	Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI, Takafumi URAIKE Kouichi IMAOKA, Kenichi HATAZAWA, Kenichi IIDA, Hideo HOSHINA, Tomohiro TSURUYA, Kouichi TATEMATSU, Kei SHIMOZONO, Akihiko FUKUSHI, Masahiro SAKAMOTO, Kouji TSUJI	
2	Study on Thermal Rycycle of Biomass of Agricultural Residues	17
	Mitsushi KAMIDE, Yukiyasu YAMAKOSHI, Takumi FUJISAWA, Toshihiro KITAGUCHI	
3	Characterization of Various Factors Affecting Mechanical Property	25
	in Carbon fiber Reinforced Thermoprastics Shuichiro SENO, Masamitsu YOSHIDA, Tohru YAMAGISHI, Hiroshi KANI, Yoshiki OHTA, Yasuyuki HAYAKAWA	
4	Metal Recovery from Urban Mine by Reduction Melting of Inorganic Waste	33
	Hiroyuki INANO, Hiroyoshi HORIKAWA, Kiyoshi IINO, Toshiyuki AKAZAWA	
5	Development of Product & Service Idea Creation Support Method for Food-Related Business	41
	Akira MANJOME, Seiji HIDAKA, Kofuyu INNAMI	
6	Study on Quantification Technique of Highly Skill in Welding Work	51
	Naotoshi KAMIO, Yohei SAKURABA, Kenichi HATAZAWA, Akira MANJOME	
7	Influence of the Processing Posture in Wire Supply Laser Cladding	59
	Yohei SAKURABA, Hayato SUZUKI, Seiki YASUDA, Atsuya TOBA	
8	Micro Structures of Maraging-Steel by Selective Laser Melting	69
	Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI, Shigeki HIRANO, Yasuhiro OSAFUNE, Katsuaki KASAI, Takeo KASAI	

Research Note

1	Utilization Technology of Multi-Rotor UAV	77
	Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI, Toshimasa IJIMA, Hisashi IGAWA	
2	Development of a Planning Support System Software for Large-scale Mechanized Agriculture in Hokkaido	81
	Takeshi HORI, Keiki ZEN, Shouichi KONDO, Atsushi OKUDA, Akihiro SATO	
3	Applicability of Optical Tomography for Development of Internal Inspection Technology for Food	89
	Shin'ya OKAZAKI, Toshimasa IJIMA, Toshinori HONMA	
4	Development of Methods for Production and Utilization of Red Bean Powder	95
	Keiichiro MATSUSHIMA, Haruo Ura, Hiroyuki MITSUHASHI, Tomoyuki UCHIYAMA, Osamu WATANABE, Eri SATO, Hiroko NOTO, Shuji YOSHIKAWA	
5	Purification of Functional Food Materials by Membrane Separation Technology	101
	Tatsuyuki KAMADA, Keiichiro MATSUSHIMA	
6	Purification Treatment Technologies for Methane-Fermentation-Digested Sludge	107
	Takema SASAKI, Tatsuyuki KAMADA, Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI, Hiroyuki MITSUHASHI	
7	Basic Examination for Reduction Treatment of Hexavalent Chromium Leached from Polluted Soil	113
	Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI	
8	Heat Release Characteristics of Radiation Panels Combined with Plastics Pipes in Ceiling or Floor Chamber	117
	Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA, Takamitsu SAKURABA, Michinori KAGA, Tomoaki IURA	
9	Development of Adsorption and Decomposition Technologies for Oder Gases	125
	Takafumi NOMURA, Tatsuhiko SHIGYOU, Kenji YOSHIDA, Yuji HASHIMOTO, Takayuki SAITO, Toshiyuki AKAZAWA	
10	Manufacture of Translucent Material by Spark Plasma Sintering Method	131
	Yoshio NAKAJIMA, Hidenori TAKAHASHI, Yasuki MIYAKOSHI, Koji ITABASHI, Toshinori HONMA, Toshiyuki AKAZAWA	
11	Study on Molten Metal Forging of Aluminum	137
	Koji ITABASHI, Hidenori TAKAHASHI, Yasuki MIYAKOSHI Hiroyuki TANAKA	
12	Development of Tools for Learning Product Development Process	141
	Kofuyu INNAMI, Seiji HIDAHA, Akira MANJOME	
13	Application of Independent Component Analysis for Detection of Parasites in Fish	147
	Mitsuo HASHIBA, Toshinori HONMA, Toshimasa IJIMA	

一 般 論 文

Regular Paper

コンブ乾燥システムの開発

多田 達実, 鈴木 慎一, 浦池 隆文, 今岡 広一, 畑沢 賢一,
飯田 憲一, 保科 秀夫, 鶴谷 知洋, 立松 宏一*, 下ノ菌 慧**,
福士 暁彦***, 阪本 正博***, 辻 浩司****

Development of Kelp Drying System

Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI, Takafumi URAIKE, Kouichi IMAOKA,
Kenichi HATAZAWA, Kenichi IIDA, Hideo HOSHINA, Tomohiro TSURUYA,
Kouichi TATEMATSU*, Kei SHIMONOSONO**, Akihiko FUKUSHI***,
Masahiro SAKAMOTO***, Kouji TSUJI****

抄 録

本道の基幹漁業であるコンブ漁業の生産量を維持・拡大するため、除湿機能を重視した新たな乾燥システムを開発した。乾燥コンブの生産地で実証試験を行い、従来の乾燥装置に比べ一次エネルギー換算で59%の省エネ効果があることを確認した。また、乾燥室内の温度推移からコンブの乾燥状態を推定する手法を考案し、乾燥を自動停止する制御を実現した。

キーワード：コンブ乾燥，ヒートポンプ乾燥，省力化，省エネ化

Abstract

Kelp fishery is a key fishery for Hokkaido. We developed new kelp drying system using the dehumidification drying function to maintain and enlarge amount of production of the kelp fishery. We demonstrated the system at the place that performed dried kelp production. And we confirmed that energy saving effect of 59% based on primary energy conversion could be expected in comparison with conventional drying equipment. In addition, we devised technique to estimate dry condition of kelp from temperature change in the storage of drying and realized control to stop drying automatically.

KEY-WORDS : kelp drying, heat-pump drying, labor saving, energy saving

* 建築研究本部, * Building Research Department

** 北方建築総合研究所, ** Northern Regional Building Research Institute

*** 釧路水産試験場, *** Kushiro Fisheries Research Institute

**** 中央水産試験場, **** Central Fisheries Research Institute

事業名：重点研究

課題名：道産コンブの生産安定化に関する研究

1. はじめに

近年、本道の基幹漁業であるコンブ漁業の生産量は減少傾向が続いており、漁家経営へ多大な影響を及ぼすことが危惧されている。コンブ生産量減少の要因としてコンブ漁業者の減少や高齢化・後継者不足等による影響が指摘されおり、重労働であるコンブ乾燥工程の省力化技術の開発が強く要望されている。また、乾燥コンブの生産においては、利益率を上げることは、産業としての魅力を向上させ生産量の維持に繋がることから、生産コストの低減、中でも燃料費の削減が重要である。そのため、本研究ではコンブ乾燥の自動化と省エネ化を可能とするシステムの開発に取り組み、除湿機能を重視した新たなコンブ乾燥システムを開発した。また、このシステムを基にし、協業化のための大規模なシステムの基本設計を行い、実用スケールでの省エネ効果や省コスト効果についての検討を行った。

2. 現状作業分析と開発目標

2.1 釧路・根室地域における実態調査

乾燥工程の課題や、システム設計の条件を把握するため、既存のコンブ乾燥施設を対象に、主に機械乾燥が行われている釧路・根室地域で実態調査を行った¹⁾。

コンブ生産は採取から製品化に至るまで、基本的に漁家単位で行われており、乾燥施設も漁家ごとに有している。また、調査地域のコンブは「ながこんぶ」であり、名前のとおり長さが4～15m程度と非常に長いのが特徴である。

図1にコンブ乾燥施設の例を示す。調査対象としたコンブ乾燥施設は、釧路町昆布森漁協管内1棟、根室市歯舞漁協管内2棟の計3棟である。



図1 コンブ乾燥施設の例

図2にコンブ採取から出荷までの作業工程を示す。昆布森、歯舞地区とも、天然コンブを採取しており、操業は好天時に限られる。したがって、原則として、採取したコンブは干場において一次乾燥（天日乾燥）が行われ、午後にコンブを乾燥施設に移して、機械乾燥で仕上げる。なお、昆布森地区では、天日乾燥のみで仕上げる日もある。また、採取後、天候が悪化した場合には、天日による一次乾燥を行わず、はじめから機械乾燥を行う場合もある。

機械乾燥後、コンブを棒から外して結束するため、再度水分を含ませて軟化を行う必要がある。軟化処理の方法としては、スプリンクラーなどによる水分噴霧を行う場合と、高温な外気を導入する場合がある。

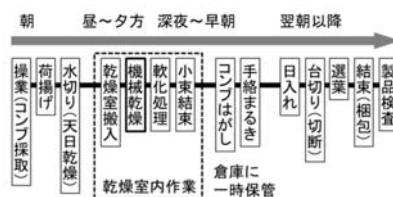


図2 コンブ採取～出荷の作業工程の例（釧路・根室地区）

表1に調査した乾燥施設の主要仕様の一覧を示す。昆布森Aは2階建てに相当する高さがあり、乾燥運転時に棹掛けしたコンブを吊り架台によって上方に移動している。概ね落石岬より西側の地域では、この高軒高の乾燥施設を採用している。歯舞A、Bは手の届く位置に固定式の架台を設けている。

熱源はいずれもA重油で、熱風式のコンブ乾燥機を使用している。その他の機械設備として、排気ファン及び首振り型の天井扇を有するほか、歯舞Aのみ水分噴霧のためのスプリンクラーを設けている。給気は機械室に設けられた常時開放の換気フードから行われ、機械室と乾燥室は上部でつながっているため（開閉機構を設けている場合もある）、乾燥機には外気と乾燥室内の空気が混合して取り込まれる。

表1 乾燥施設主要仕様

	昆布森 A	歯舞 A	歯舞 B
建屋構造	木造	木造	木造
断熱	なし	壁のみ GW 充填	壁のみ GW 充填
床面積	41.4 m ²	51.6 m ²	29.8 m ²
熱源	A 重油	A 重油	A 重油
熱源出力	174kW	233kW	不明
熱源送風機	7,200m ³ /h×3	10,200m ³ /h×3	7,620m ³ /h×3
排気ファン	3,720m ³ /h×4	5,040m ³ /h×2	4,800m ³ /h×2
天井扇	50cm×4	60cm×5	不明×6
スプリンクラー	なし	あり	なし

2.2 その他の地域の実態調査

羅臼漁協の協力を得て、羅臼地区の乾燥施設7棟と保管庫4棟で温湿度の実測調査を行った（図3）。羅臼地区では、高級出汁昆布である「りしり系えながおにこんぶ」（通称：

羅臼昆布)が生産されている。かつては、天日乾燥が行われていたが、40年程前より機械乾燥が導入され、現在ではほぼ全戸が機械乾燥を行っている。特に、養殖コンブは天候に関わらず連日採取を行うため、生の状態から機械乾燥を行っている。

また、南かやべ漁協の協力を得て、南茅部地区のコンブ乾燥施設の調査を行った(図4)。同地区は、道内最大のコンブ産地で、「まこんぶ」が生産されている。養殖コンブが主であり、干場がないため、全量機械乾燥を行っている。

コンブの長さは3メートルほどで、ピンに挟んで吊るしている。レール式の架台を採用している乾燥施設が多いのが特徴で、水平2方向、さらに上下方向に台車が動くよう工夫されたものがある。乾燥施設に隣接して、屋外に水切り場を有し、水切りによって機械乾燥時間の短縮を図っているケースもある。



(a) 乾燥施設の外観

(b) 乾燥室内

図3 羅臼地区のコンブ乾燥施設



(a) 乾燥施設内

(b) コンブかけ外し場

図4 南茅部地区のコンブ乾燥施設

2.3 地域別のコンブ乾燥方法

以上の実態調査のほか、一般社団法人北海道水産物検査協会への聞き取りや文献²⁾による情報を参考に、コンブの機械乾燥に関する実態を以下に記す。機械乾燥の方式は多様であるが、漁協単位で見ると地域内ではほぼ同じ方式が採用されている。

2.3.1 機械乾燥への依存度

コンブの種類(1日で乾燥するかどうか)、生産量、気象条件、操業形態(旗採りを行うかどうか)、天然か養殖か、干場の状況、品質の考え方などにより、各地域により機械乾燥への依存度が異なる。

①原則として天日乾燥で仕上げる地域(乾燥施設の保有は一

部に留まる地域)

いわゆる「旗採り」により、好天時のみ操業を行う地域では、天日乾燥が主体である。現在でも日高地方や宗谷地方の一部では、乾燥施設を保有せず、天日乾燥だけで仕上げる地域がある。日高地方では、天日乾燥のほうが仕上がりの色艶が良いとされることや、宗谷地方では、生産量が少ないため機械乾燥のコストメリットが出にくいことも、天日乾燥が維持されている要因になっていると考えられる。

②補助的に機械乾燥を行う地域(乾燥施設を保有するが、好天時は天日乾燥だけで仕上げる地域)

釧路地方は、天日乾燥主体であるが、途中から天候が悪くなった場合には機械乾燥を使用する。これは、釧路地方特有の気象条件によるものと考えられる。宗谷地方にも同様の地域がある。

③一次乾燥後に機械乾燥を行う地域

根室地方では天日による一次乾燥後、機械乾燥で仕上げることを基本としている。これは、気象条件のほか、根室地方のコンブの特徴として、天日で仕上げると焼けたように色が変わることが要因になっている。

④生から機械乾燥を行う(生掛け)

地域養殖コンブは天候に関わらず採取することができるため、基本的に機械乾燥を行っている。このうち、利尻や道南の上磯以西では天日による一次乾燥を併用しているが、南茅部や羅臼では生から機械乾燥を行っている。南茅部は干場が十分に確保できないことや、機械乾燥のほうが黒く様に仕上がること、羅臼ではテトラポットによる干場の環境変化や、機械乾燥のほうが艶や旨味の点で優れているとされることが機械乾燥導入の要因となっている。また、天日乾燥が可能な地域でも、雄武など他の漁種との兼業のため、作業上の効率を考えて生から機械乾燥としている地域もある。

2.3.2 機械乾燥を行う時間

釧路など補助的に機械乾燥を行う地域では、天候次第で2時間~10時間以上(生掛けの場合)と、日により変化する。基本的に20時頃までに仕上がるよう、タイミングを見計らって、干場から乾燥施設にコンブを移すこととなる。

根室では一次乾燥後、午後のほぼ一定の時間に乾燥施設に移すが、天候の具合により、乾燥終了が深夜0時前後になるケースが見られる。

南茅部では、乾燥所要時間は8~10時間程度で、同じ乾燥施設で1日2回乾燥させる場合と、乾燥施設を複数保有し、併行して乾燥を行う場合がある。1日2回乾燥させる場合は、2回目を翌朝までかけるか、乾燥機を高出力として22時頃までに終わらせるかであるが、時間的な作業負担を減らすため、乾燥施設を複数保有し、当日18時頃までに乾燥を終わらせるケースも増えてきている。

羅臼では、乾燥時間が20時間前後と長く、深夜2時から早朝6時ごろの時間帯にコンブの掛け外しを行っている。

2.3.3 コンブの干し方

①棹に掛ける

「ながこんぶ」は長いので、棹に掛けて吊す。棹はコンブの変色や滑りを防止するため、ネットで覆われている。釧路地区の場合、コンブを二つ折りで棹に掛け、すべて掛け終わった後、架台ごと滑車で上方に移動させる。それでもコンブが床につくほど長いときは、一部M字状に折り返す。根室では、最初から棹にコンブをM字状に折り返して掛ける。

乾燥終了後はコンブに柔軟性がなくなるため、そのままでは棹から外せなくなる。そのため、再度コンブに水分を含ませる軟化処理を必要とし、排気ファンを用いた強制給気により、朝方の高温な外気を導入するか、スプリンクラーなどによる水分噴霧が行われる。根室地区では水分噴霧を行うケースも多いが、釧路と比べて根室のコンブは耳があり互いに付着しやすいことも影響しているとされる。通常外気導入で軟化処理可能な場合でも、生から乾燥を行った場合は、コンブ同士が付着した部分を剥がすため、軟化処理が必要となる場合もある。

②ピンに挟んで吊す

長さの比較的短い羅臼昆布や「まこんぶ」は、ピンで挟んで棹から吊す。コンブの頭を上にするかしっぽを上にするかは地域により違いがある。南茅部では、ピンの位置が高さ3m以上にあるため、脚立に上って掛けるか、上下、水平移動機構を持つ架台を用いている。ピンに挟んで吊すケースでは、乾燥室内での軟化処理は必須ではない。

③寝かせて並べる

実態調査を行った地域では行われていなかったが、渡島の一部や宗谷では、のし昆布を作るため、あらかじめ切った昆布をキャスト付きの台車に寝かせて並べる方法を採用している。

2.4 既存乾燥施設における課題

実態調査から、既存乾燥施設においては、以下のような課題が挙げられる。

- ・既存乾燥施設はすべて熱風乾燥を採用しており、排気による損失が大きい。また、熱源は灯油または重油のため、原油価格変動の影響を受けやすい。
- ・乾燥中は、乾燥むらの抑制や軟化処理のため、何度も乾燥室に入っただけの操作が必要であり、時間的、身体的な負担が大きい。
- ・コンブ生産は、コンブの採取から製品化まで、漁家単位で行われている。早朝から深夜まで人手を要する作業が断続的に生じ、少子高齢化、核家族化が進む中で、家族による作業は難しくなる状況が生じている。一方で、従来からア

ルバイトに頼る部分も多かったが、近年はアルバイトの確保が非常に厳しくなっている。

- ・従来、天日乾燥主体の地域においても、アルバイトの確保困難などを背景に、生がけ機械乾燥を導入する動きが見られる。
- ・建屋については、南茅部の一部乾燥施設を除き木造で、簡素な構造であるが、良好な状態で維持されている。建屋はそのままとして、乾燥機のみ20年程度で入れ替えを行っているケースが多い。

2.5 システム開発の目標

本研究では、投入エネルギーよりも多くの熱エネルギーを得ることが可能なヒートポンプを用いて、省エネ機能を備えた乾燥実証プラントを設計・製作し、乾燥施設内の温湿度や風速等をモニタリング・制御を行いながら、コンブ乾燥の自動化を可能とする乾燥システムを開発することとした。

具体的には、現行の乾燥施設に対して燃費50%減を目標とし、制御アルゴリズムの検討や性能改善について、生産現場（昆布森）での各種試験やシミュレーションを行った。また、乾燥実証プラントでの試験結果を踏まえて協業化を想定した大規模なシステムの検討を行った。

3. モデル試験機による基礎技術開発

ヒートポンプによる加温除湿乾燥法を用いた実証プラント設計の知見を蓄積することを目的に、市販のヒートポンプ式除湿器を用いた簡易なモデル試験機による基礎的な乾燥試験を行った。

3.1 モデル試験機の製作

モデル試験機の構成を図5に、外観を図6に、乾燥ボックス内空気入口・出口の様子を図7に示す。

モデル試験機は、図5に示すように一般に市販されている家庭用のヒートポンプ式除湿器（コロナ製：CDM-1413、除湿能力：0.5L/h）、乾燥ボックス、及び電動三方弁で構成される。基本的には除湿機から吐出した乾燥空気が乾燥ボックスを経由して除湿器に戻る「循環回路」とするが、空気を長時間循環することにより温度が上昇し、除湿機の使用範囲（5～35℃）を超えて除湿機が停止するような場合には、除湿器から吐出した乾燥空気が乾燥ボックスを通った後外気に排出される「一方通行回路」への切り替えが可能となっている。

なお、乾燥ボックスは実際のコンブ乾燥室を模擬するため、コンブを掛ける棹を想定した棒を4本設置できるようにし、乾燥中の状態などが目視で確認できるように透明のアクリル板で製作した。

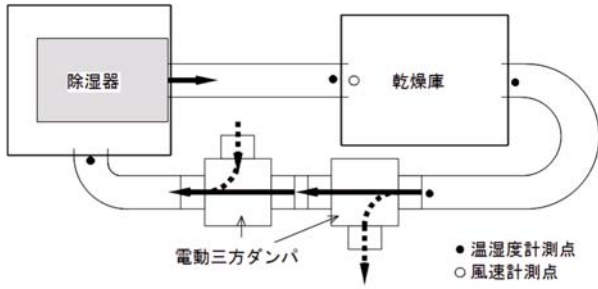


図5 モデル試験機の構成

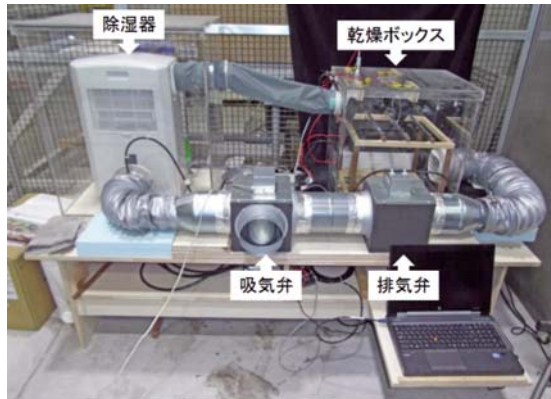


図6 モデル試験機の外観



図7 乾燥ボックス内空気入口・出口の様子

3.2 基礎試験

3.2.1 模擬コンブを用いた試験方法の確立

a) 模擬コンブの選定

基礎試験は、乾燥ボックス内の空気の流れに対する被乾燥物の配置方法が乾燥状態に与える影響を把握することを目的としている。実際のコンブは用いず、品質などが一定である工業製品を模擬コンブとして用いることとし、一般に市販されている製品の中から最適な材質の選定を行った。選定の条件は、実際のコンブと同程度の吸水性を持ち、任意の寸法に切断できることとし、ポリビニルアルコール製の不織布「PVA超吸収クロス」(ワコー(株)製)を選択することとした。

図8に、水戻しコンブ、一次乾燥コンブ、生コンブ、PVA(模擬コンブ)、及び比較対象としてEPDM(エチレンプロピレンジエンゴム製品)の乾燥特性曲線を示す。

この図から、選定したPVA超吸収クロスはEPDMと比べ乾燥特性が生コンブと比較的近いことがわかる。なお、実際

のコンブを用いることで発生する保管状態や個体差による試験条件の変動や使用量の制約などの問題を避けることができたことを付記する。

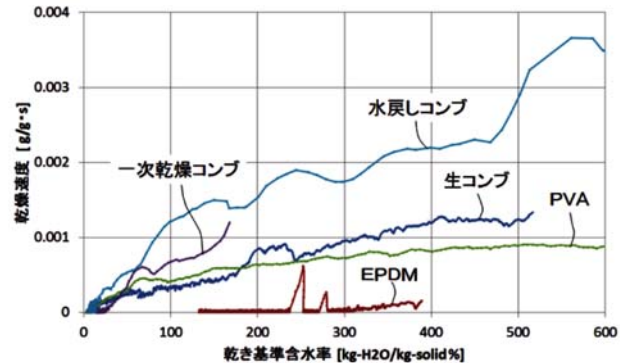


図8 各種材料の乾燥特性曲線

b) 試験方法

模擬コンブの寸法は幅300mm×長さ500mmとし、約300mmの高さに設けた4本の棹に長さ方向で二つ折りにして1枚ずつ掛け、合計4枚の模擬コンブにより試験を行った。また、模擬コンブの含水率は試験開始時に300%d.bとし、試験時間は30分とした。これは、300%d.b.以上含水させた場合、棹に掛けた状態で1時間放置すると水分が下端に集まり滴下し始め蒸発水分量の計測に誤差が生じることによる。

試験の手順を図9に示す。

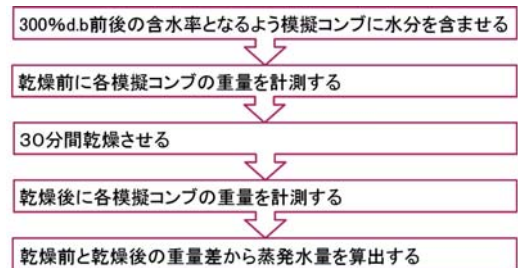


図9 試験の手順

3.2.2 通風方法に関する基礎試験

空気入口の高さを実際の乾燥室と同様に棹よりも低い位置とした試験Ⅰ、空気入口側の壁を二重とし、内側壁を空気分散板として模擬コンブに均一に風が当たるよう直径25mmの孔を20カ所に設け、各孔の風速を4.5~7.0m/sに調整した試験Ⅱについて、それぞれ乾燥空気の流れに対し模擬コンブの棹を対向とした配置(対向配置)と平行とした配置(平行配置)で乾燥試験を行った。

試験Ⅰ(対向配置)、試験Ⅰ(平行配置)、及び試験Ⅱ(平行配置)のイメージを図10~12に、試験Ⅱ(平行配置)の様子を図13に示す。

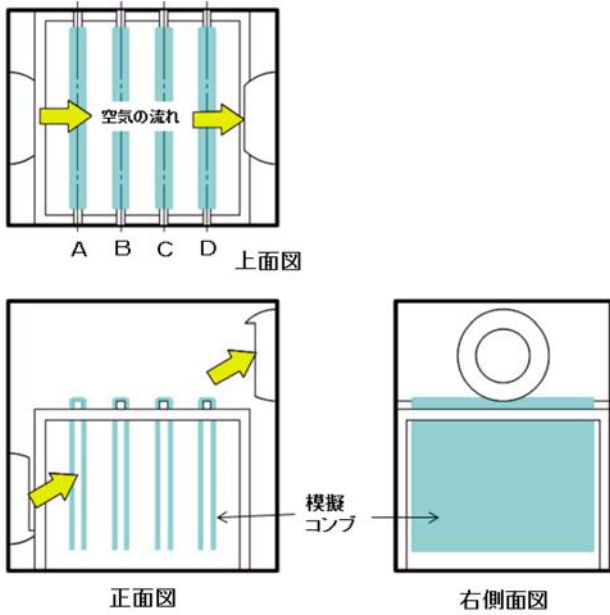


図10 試験 I (対向配置)

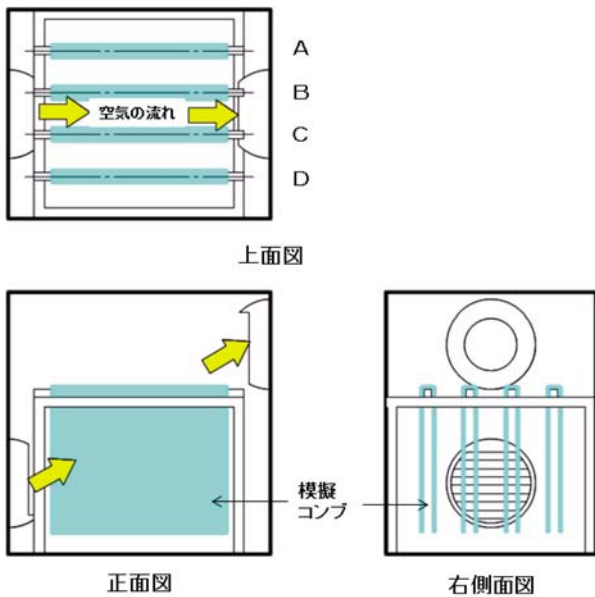


図11 試験 I (平行配置)

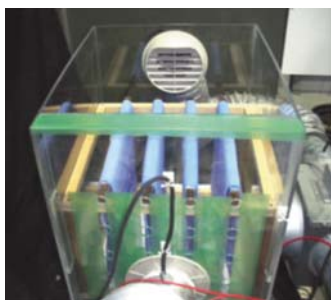


図13 試験 II の様子

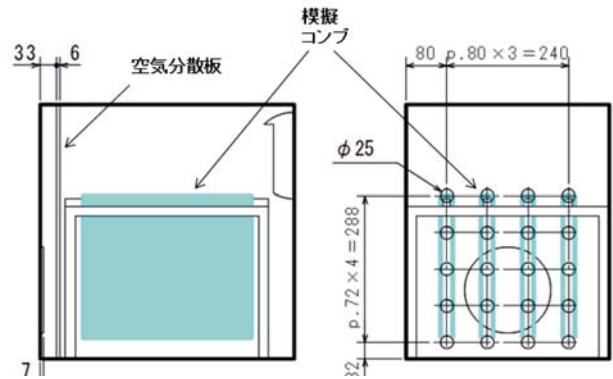


図12 試験 II (平行配置)

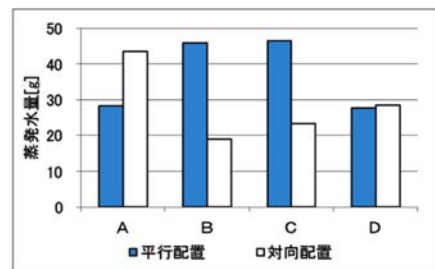


図14 試験 I (平行配置, 対向配置) の蒸発水量

表 2 試験結果

		蒸発水量 合計 [g]	蒸発水量 割合 [%]	最小蒸発 水量 [g]
試験 I	平行	148.3	59.3	27.6
	対向	114.2	45.7	19.0
試験 II	平行	164.2	65.7	34.1

試験の評価は、各試験に用いた模擬コンブ（4枚）の蒸発水量合計、除湿器の除湿能力に対する蒸発水量の割合、及び乾燥完了時間に影響を与える最も蒸発水量が少ない模擬コンブの蒸発水量（最小蒸発水量）により行った。なお、4枚の模擬コンブに見られる僅かな厚みの差が、蒸発水量などに影響を与えることがわかったため、試験はA～Dの位置に配置する模擬コンブが全て異なる4通りの組み合わせで行い、各位置の平均値を試験結果とした。

試験 I における平行配置と対向配置の模擬コンブ毎の蒸発水分量を図14に、試験 I と試験 II の試験結果のまとめを表 2 に示す。

図14から、対向配置は乾燥ボックス内空気吹出口に最も近いAの模擬コンブは蒸発水量が多いが、それ以外の模擬コンブはAの半分程度となっていることがわかる。また、平行配置は空気入口と出口がある乾燥ボックス内の中心線に近い2枚（BとC）の蒸発水分量が多いが、外側の2枚（AとD）は少ないことがわかる。

表 2 から、試験 I においては蒸発水量合計、蒸発水量割合、

及び最小蒸発水量のいずれも平行配置の方が多く、特に最小蒸発水量については、対向配置のおよそ1.5倍であることがわかった。また、試験Ⅰ（平行配置）と試験Ⅱ（平行配置）を比較すると、蒸発水量合計、蒸発水量割合、及び最小蒸発水量のいずれも試験Ⅱの方が多いことがわかった。

以上の結果から、被乾燥物に均一に空気が当るように、コンブの配置は空気の流れに平行とすると良いことがわかった。

3.2.3 運転制御に関する基礎試験

実証プラントへの組み込みを想定した計測システムについて、乾燥工程における温度・湿度データの傾向の把握と、計測データから被乾燥物の乾燥状況を推定する方法を見つけるため、各種条件における試験機内を循環する空気の温湿度変化の計測・解析を行った。

計測データの一例（試験Ⅱ）を図15に示す。図中、約30分間～1時間毎に各データの値が一瞬下がっているのは、乾燥ボックスの蓋を開けて模擬コンブを取り出し、含水率を計測したことによる。

この図から、乾燥ボックス入口温度は乾燥開始から約1時間後に最高の約43℃となる。その後、乾燥が進むに伴い、乾燥ボックスにおける入口と出口の重量絶対湿度（単位重量の空気が含む水蒸気重量を示す値）の差はいずれも小さくなることがわかった。

このことから、外気温度などの影響が少ない重量絶対湿度の差が乾燥状態を推定する有望な指標となり得ると考え、乾燥試験時の模擬コンブの含水率と重量絶対湿度差の時間変化との関係を分析した。その一例（試験Ⅱ）を図16に示す。

この図より、全ての模擬コンブの含水率が乾燥完了の目標値である15% d.b.以下となった時の重量絶対湿度差は0.0007 kg/kgであることがわかった。このことから、乾燥終了を判断する指標として、乾燥室入口と出口の重量絶対湿度差が有用であることが示唆された。

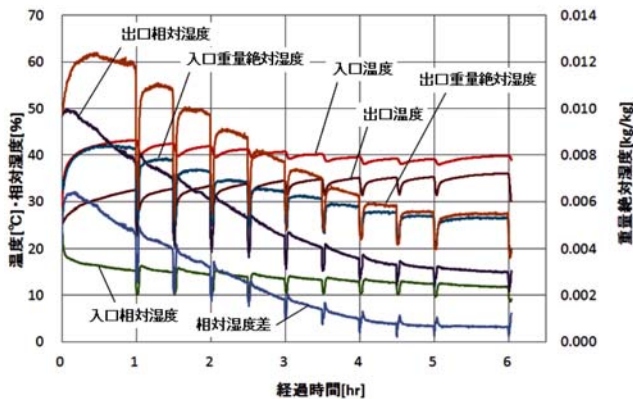


図15 乾燥試験における計測例

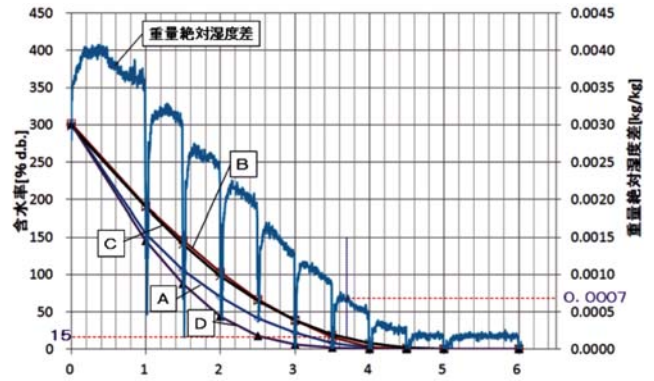


図16 模擬コンブの含水率と重量絶対湿度差

4. 実証試験

モデル試験機の試験で得た基礎技術を活かして乾燥コンブ生産の現場規模を想定した実証試験装置を製作して乾燥機能の確認と乾燥の自動化のための技術開発を行った。

4.1 実証プラントの構築

4.1.1 装置構造

実証試験用に開発したコンブ乾燥システム（実証プラント）の仕様を表3に、構造を図17と図18に、外観を図19に示す。乾燥室の容量は、奥行1.7m×長さ3.6m×高さ2mであり、歯舞で使われている乾燥装置のほぼ1/9の大きさとなっている。

本システムは、ヒートポンプを用いて除湿した乾燥空気を乾燥室内に循環させることにより室内に吊り下げたコンブの乾燥を行う。循環する乾燥空気は、ヒートポンプ内の蒸発器側で除湿と同時に熱が吸収され、その後、凝縮器側で加温されて乾燥室の二重構造部分の空間を通過して天井と側壁の開口部から吹き出し、吊り下げられたコンブの間隙を通過してヒートポンプ側に回収される。本装置内には、温湿度センサや風速センサと乾燥中のコンブの重量を計る荷重センサが組み込まれている（表4）。なお、荷重センサはロードセルであり、図20に示すように、棹毎の荷重を計測するセンサが12個（L1～L12）、棹①～⑧までのユニット1と棹⑨～⑯までのユニット2のそれぞれの総重量を計測するセンサが8個（TL1～TL8）使われている。

また、乾燥室の外周は50mm厚程度の断熱材で断熱されており、内側は防湿フィルムで防湿・気密処理を行っている。コンブを掛ける木の棒は、吸放湿の影響を排除するため、アルミテープで被覆している。

表3 実証プラントの仕様

乾燥室	大きさ	幅約1.8m×長さ約3.6m×高さ約2.4m(面積13.3m ²)
	棟長さ	1.5m
	棟数	16本
	棟間隔	150mm
	棟密度	3.1本/m ²
	投入コンブ許容重量(一次乾燥コンブ)	40kg(一次乾燥コンブ重量)
	内壁	断熱材+防湿シート
機械室	乾燥空気	二重構造、天井と側面の2箇所 吸込口:側面2箇所
	含水率測定	棟8本単位の重量計測用ロードセル2組 棟1本単位の重量計測用ロードセル6組
	大きさ	幅1.8m×長さ1.8m×高さ約2.6m(面積4.8m ²)
	外気取込口	1箇所(切替式)
	ヒートポンプ	三菱電機(株)製 RPH-P5A
	除湿能力	142 L/h (室内吸込空気乾燥温度25℃、相対湿度80%時)
	使用電力	4 kW
電源	3相200V、20A	



図19 実証プラントの外観

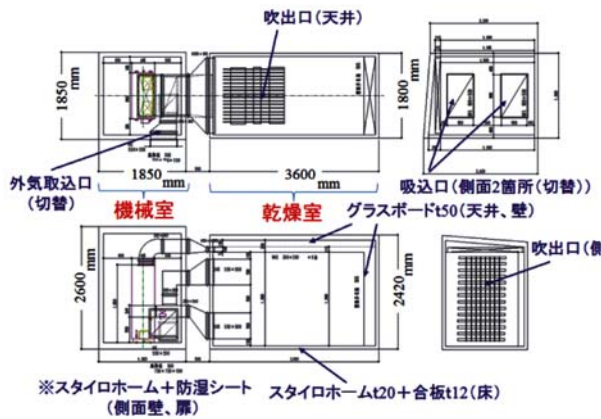


図17 実証プラントの構造 (図面)

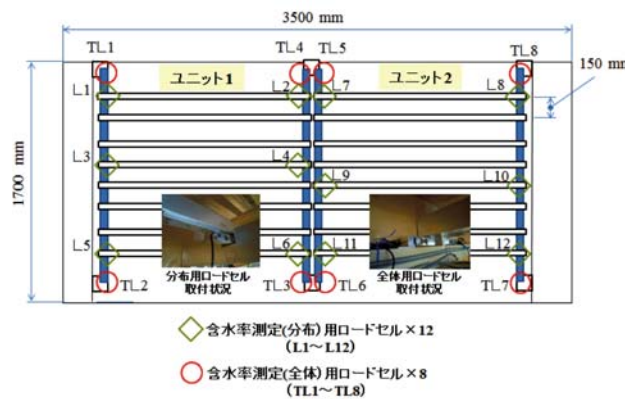


図20 荷重センサの配置

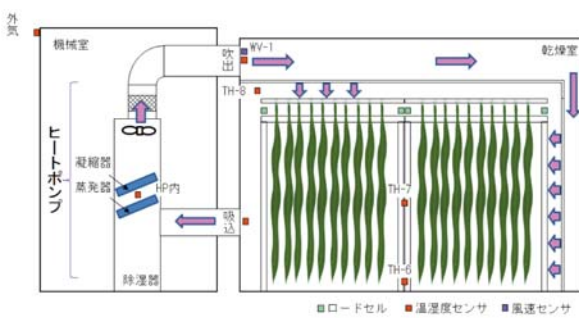


図18 実証プラントの構造 (模式図)

表4 使用センサ

温度センサ	(株)チノー製 温度計 HN-CFA3 7個
風速センサ	カノマックス社製 SYSTEM 6243
重量センサ	(株)エー・アンド・ディ製 LCB03K015M 12個 ロードセル LCB04K060M 8個

4.1.2 センシング・制御システム

乾燥システムのモニタリングと制御を行うシステム系の構成を図21に示す。本システムでは、各センサ信号をインタフェースを介してPCに取り込み、市販のソフトウェア (Labview) で構築したアプリケーションでヒートポンプの運転制御と各センサの状態表示を行う (図22)。

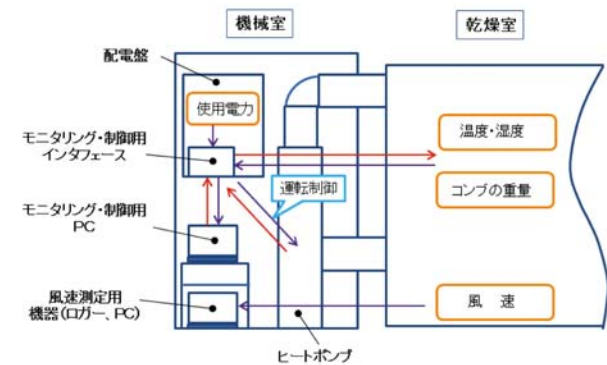


図21 モニタリング・制御システムの構成



図22 モニタリング・制御システムの画面表示

4.1.3 乾燥の均一化

コンブ乾燥装置においては、乾燥し難い所が乾燥目標の含水率になるまで乾燥が行われるため、乾燥が早く進む所は乾燥終了時点では過乾燥となり品質に影響がでるほか、余分なエネルギーが消費されることとなる。そのため、乾燥室内の乾燥ムラは極力抑える必要がある。そこで、本実証試験では、樹脂製の不織布（PVA）を模擬コンブとして用いて、乾燥のバラツキを抑える方法を検討した（図23）。

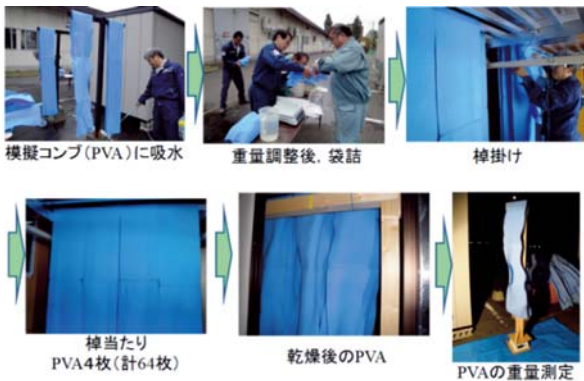


図23 模擬コンブを用いた試験状況

a) 乾燥空気吹出口の開口調整

図24に示す乾燥室内の天井と側壁の2ヶ所の吹き出し口の開口調整を行った。表5に開口の調整条件を、図25に乾燥ムラ解消試験結果（条件①と条件②の乾燥の進行が最も早い棒と最も遅い棒の重量変化）を示す。この図では、表5の条件③とすることで重量変化を示す各線の間隔が狭くなっており、乾燥のバラツキが抑えられることがわかった。

表5 乾燥空気吹出口の開口調整条件

	天井吹出の開口 全開時:幅10mm×長さ600mm ×32本	壁吹出の開口 全開時:幅20mm×長さ1800mm ×8本
①	全塞ぎ	全開口
②	左端開口	約45%塞ぎ
③	3板称開口	約45%塞ぎ

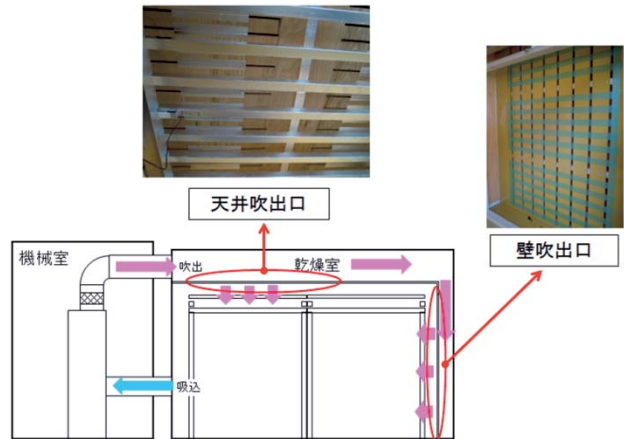
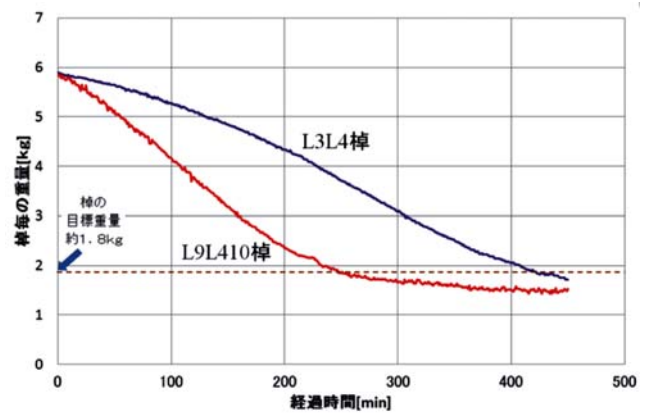
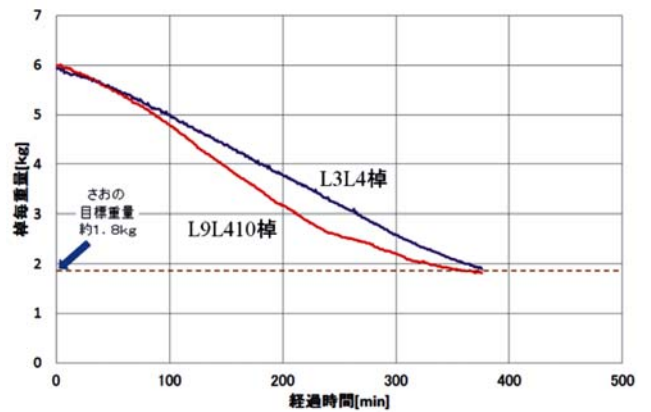


図24 乾燥ムラの解消（吹出口の開口調整）



(a) 条件①



(b) 条件③

図25 乾燥ムラ解消試験結果

b) 攪拌ファンの導入

前述の乾燥空気吹出口を条件③にして乾燥試験を行い、乾燥試験後の64枚の模擬コンブの乾燥のバラツキを調べた所、乾燥ムラが十分解消できていないことがわかり、乾燥が遅れ

る部分を中心にファンによる空気の強制的な攪拌を行った。図26に攪拌ファンとして用いたエアサーキュレーターを、図27に攪拌ファンの設置状況を示す。なお、攪拌ファンは乾燥室中央の乾燥遅れがあった部分に設置した。図28に攪拌用ファンの有無による各模擬コンブの含水率を示す。本試験により入口側右部分（位置名称53, 54, 55, 57, 58, 59, 61, 62, 63）の模擬コンブの乾燥遅れが解消できることがわかった。



図26 攪拌用ファン



図27 攪拌用ファンの設置状況

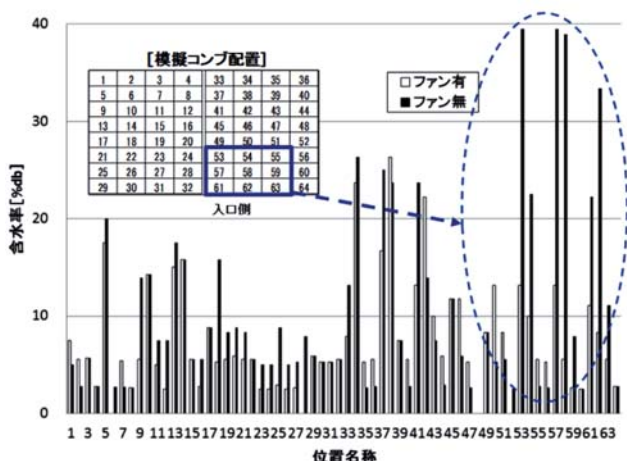


図28 攪拌用ファンの効果

4.1.4 乾燥速度の向上

乾燥速度の向上を目的に乾燥室内に遠赤外線ヒーターを追

加し、効果を確認した。図29に使用した遠赤外線ヒーターの仕様と取付状況を示す。本試験では、500Wのヒーターを8個用い、乾燥開始直後から1時間発熱を継続した。図30にヒーターの有無の効果の確認試験を行った時の乾燥室内の吹出位置の温度と外気温の変化を示す。本試験の結果、ヒーターの追加により循環空気の吹出口で温度上昇が早まる効果はあるものの、目標の含水率に至るまでの乾燥時間には影響がないことがわかった。

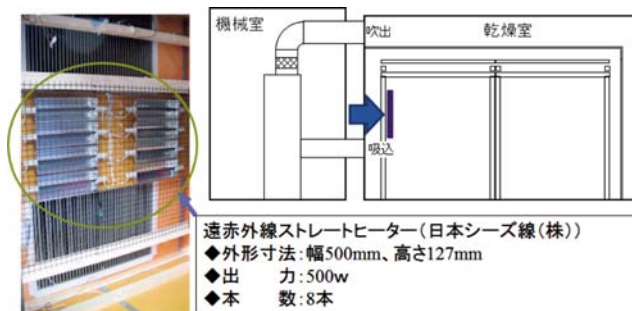


図29 遠赤外線ヒーターの取付状況

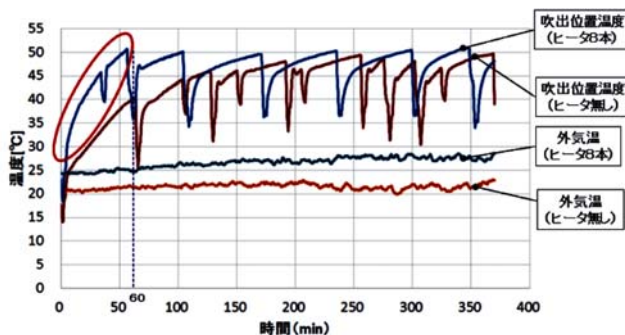


図30 遠赤外線ヒーターの効果



図31 昆布森での実証試験

4.2 乾燥試験

乾燥ムラを極力抑えるように調整した実証プラントを釧路町昆布森に移設し、水揚げされたコンブ（ながこんぶ）の乾燥能力などを確認する乾燥試験を行った（図31）。本試験で

は、図32に示すように、水揚げされたコンブを必要に応じて天日干しし、その後3mの長さで切断し棒に掛けた状態で乾燥室内に吊るし乾燥試験を行った。以下、昆布森で行った試験内容・結果を説明する。

4.2.1 密度試験

棒（棹）にコンブを掛ける際、コンブの間隔を大きく確保することで風まわりが良くなり乾燥速度が速まると考えられる。一方、建屋の建設コストを考慮すると、可能な範囲でコンブの掛け密度を大きくすることも望まれる。掛け密度が大きい場合でも、強制的に気流を与えることで、乾燥速度が向上する可能性もある。そこで、コンブを掛ける棒の間隔、棒に干すコンブの本数、ファンの有無をパラメータとして、乾燥速度を比較する試験を行った³⁾。

図33と図34に密度試験に使用した装置と試験の状況を示す。棒の間隔は3種類で、気流に平行な面は上部を除き対象境界面と考えて風防で囲った。風防の高さは1,000mm、奥行きは508mmである。表6に本試験の条件を示す。実証プラントにおけるコンブの掛け密度と同等の「標準密度」と、そのおよそ2倍の本数のコンブを掛けた「倍密度ファンなし」、さらに倍密度の場合はヒートポンプの吹き出し気流と平行に、乾燥棒の上流側からファンで送風を行った「倍密度ファンあり」の3条件で実験を行った。各条件における含水率の段階ごと（100～500% d. b.）の乾燥速度を示す係数 $f(W_f)$ ³⁾の値を図35に示す（ここで、 W_f はコンブの含水率）。棒間隔120mmで $f(W_f)$ が大きい（乾燥が速い）傾向があるが、120mm間隔の棒を乾燥室中央に配置したことにより除湿機からの吹出し気流の影響を受けやすいことが原因として考えられる。また、倍密度としても、棒間隔120mm以上の条件では、ファンで気流を与えることで標準密度の場合と同等以上の乾燥速度を確保できることがわかった。

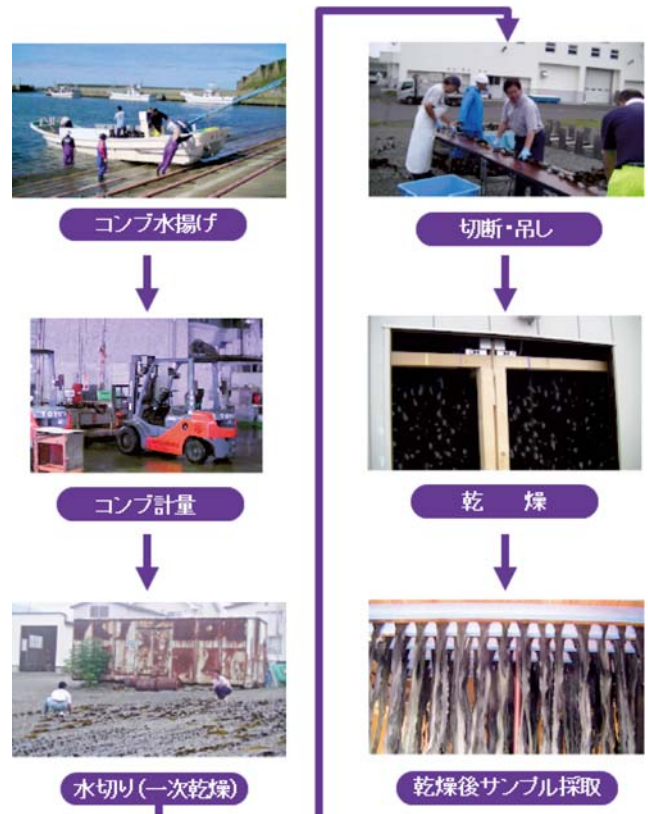


図32 乾燥試験の流れ



従来密度の掛け方 従来密度の2倍の掛け方

図34 密度試験の状況



(棒間隔は左から80mm, 120mm, 160mm)

図33 密度試験用棒

表6 密度試験の条件

実験条件	棒間隔(芯々)	実測掛け密度 [kg/m ³]
標準密度	80mm間隔	3.4
	120mm間隔	2.5
	160mm間隔	2.1
倍密度ファンなし	80mm間隔	8.1
	120mm間隔	5.4
	160mm間隔	4.5
倍密度ファンあり	80mm間隔	8.4
	120mm間隔	5.4
	160mm間隔	4.7

kg³はコンブの絶対質量

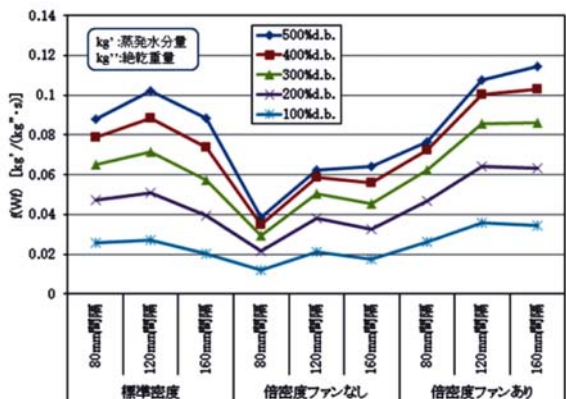


図35 密度試験の結果

4.2.2 乾燥能力試験

本試験では、実証プラントの乾燥能力を検証するため、現場で行われている乾燥方法と同様に一次乾燥したコブと漁獲された直後の生コブの乾燥試験を行った。図36と図37に乾燥試験の結果を示す。

生掛け時のコブの含水率は、完全に乾燥した重量を基準とする含水率で700%、一次乾燥直後のコブの含水率は300%であり、乾燥コブとするため15%まで乾燥する。

本試験の結果、一次乾燥後のコブ乾燥時間は9時間、生コブからの乾燥時間は11時間となり、生コブからの乾燥でも一次乾燥からの乾燥と同質の乾燥コブが得られることがわかった。

4.2.3 外部との空気入替による乾燥速度向上

高温多湿な乾燥室内空気を排出し、低温低湿な外気を導入する方法について、乾燥時間短縮効果を検証した。図38に実証試験装置に追加した空気入替機構を示す。本機構は、ダクト内の開閉を電氣的に制御するものであり、ヒートポンプの排気側と吸気側のそれぞれに取り付けた。生コブを対象として行った試験の結果を図39に示す。

高温多湿な空気の排出によりヒートポンプの運転状態を良好に保つことが可能となったが、乾燥時間短縮への効果は見られなかった。

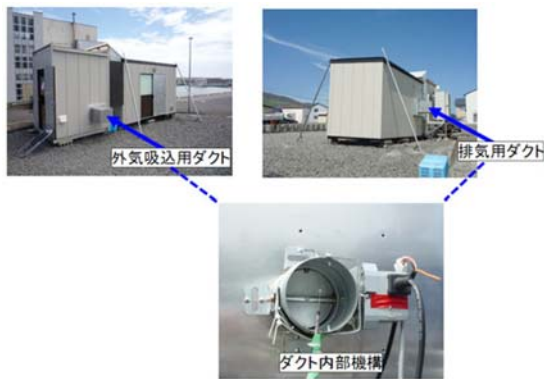


図38 乾燥室空気入替機構

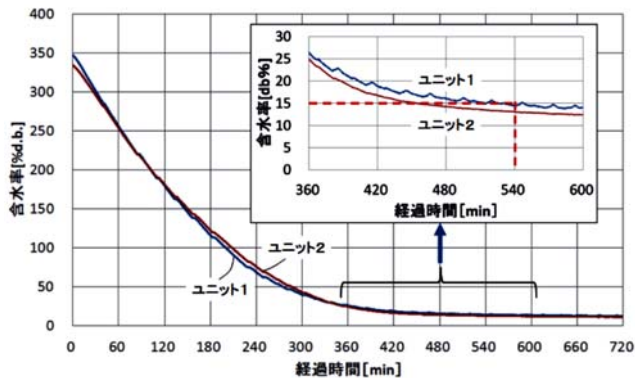


図36 乾燥能力試験（一次乾燥後）

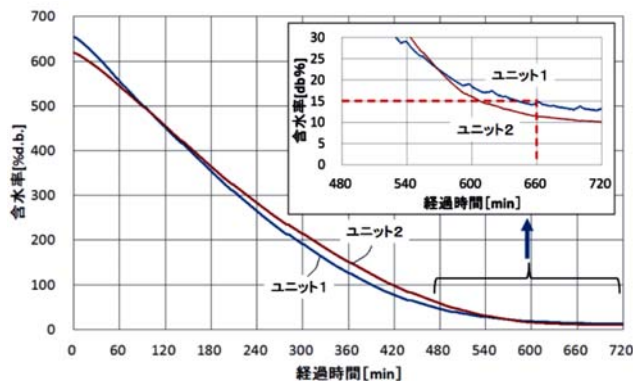


図37 乾燥能力試験（生掛け）

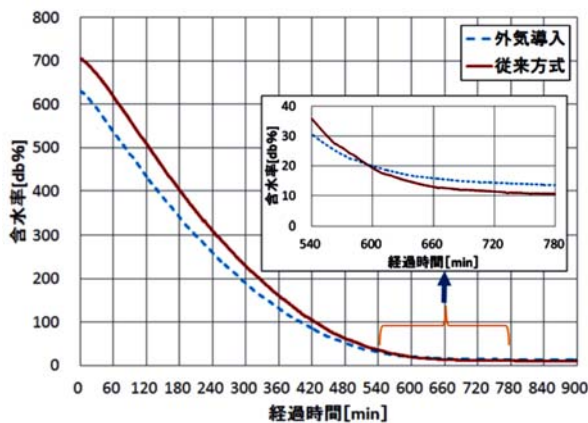


図39 外部との空気入替の効果

4.2.4 自動乾燥制御

本研究では、無駄なエネルギー消費を抑え、乾燥状態の途中点検作業をなくすため、乾燥室内の温度・湿度をモニタリングして乾燥状態を推定し乾燥の自動停止を行う制御技術の確立に取り組み、その最終確認を実証試験で行った。

本試験では、計測の扱いが容易で被乾燥物の乾燥度に強い相関を持つヒートポンプの入口・出口の温度差を新たな指標とし、模擬コブと生コブの乾燥を自動停止することを試

みた。なお、この温度差は、乾燥工程の途中で不定期に発生するヒートポンプの保護機能により大きく変動するため、サンプリング（10秒間隔）に温度差がしきい値を越える回数を積算し、それを乾燥運転の終了の目安とした。試験条件を表7に、被乾燥物を模擬コンブとした場合の乾燥試験の結果を図40に、被乾燥物を生コンブとした場合の乾燥試験の結果を図41に示す。

本試験の結果、模擬コンブと生コンブのどちらの場合も乾燥停止の目安としたカウント値により乾燥を自動停止することが可能であることを確認した。

4.3 モニタリング・制御システムの簡素化

開発技術の現場導入を想定し、モニタリング・制御システムの簡素化の検討を行った。本研究では、プログラムの変更の容易さなどから本システムには当初からPCを用いた。現場での使用を考える場合、操作の単純化や取扱の容易さに加え、コストを考慮する必要があり、本検討では、PCベースのシステムから一般的に製造ラインなどで使われているプログラマブルコントローラ（PLC）を用いたシステムへの置き換えを試みた。図42に簡素化したモニタリング・制御システムの構成を示す。また、PLCに実装したプログラムの画面表示を図43に示す。

本検討により、安価なシステムに置き換えができ、操作性などが向上すると考える。

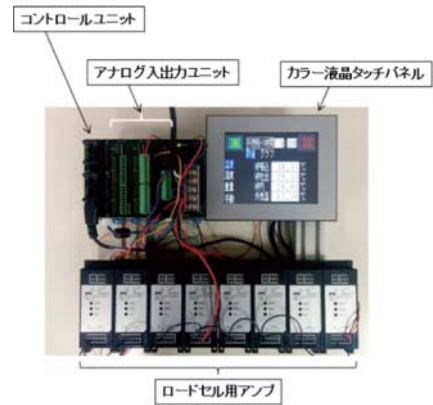


図42 簡素化モニタリング・制御システム

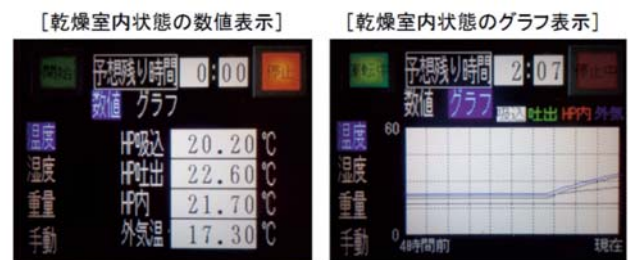


図43 簡素化モニタリング・制御システムの画面表示

表7 自動乾燥試験の設定条件

	指標設定値 (ヒートポンプの吹出口と吸込口の温度差[°C])	カウント設定値 [回]
模擬コンブ(PVA)	6.00	200
生掛け	1.18	200

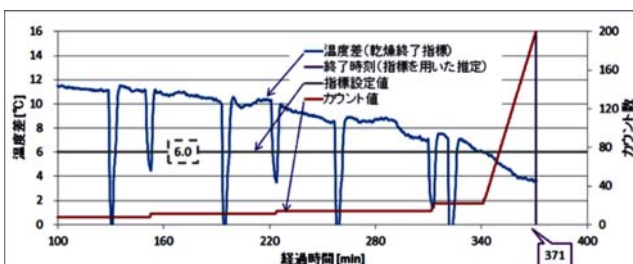


図40 自動乾燥試験結果 (PVA)

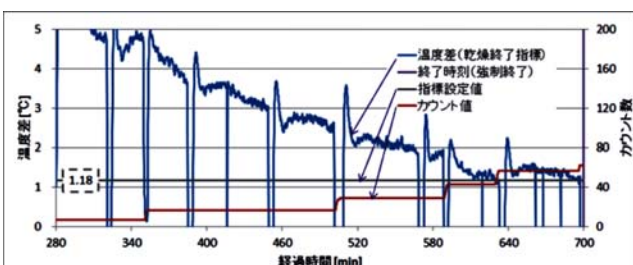


図41 自動乾燥試験結果 (生掛け)

5. 実用スケールシステムの検討

実証プラントは、実態調査を行った「歯舞A」の乾燥施設の1/9スケールである。そのため、省エネや省力化などの効果を把握するためには、実際の乾燥施設の規模にスケールアップする必要がある。ここでは、コンブ漁業就労者の減少、高齢化などコンブ漁業を取り巻く状況を考慮して、複数の漁家で共同利用する「協業化」を想定した実用スケールのシステム検討を行った。

5.1 協業化規模の検討

協業化を検討するにあたり、漁協や漁家に対して協業化の規模、形態、コスト、作業効率などのヒアリング並びに文献調査を行った⁴⁾⁵⁾。図44に共同作業について、図45に共同乾燥センターでの生掛け乾燥についてのアンケート結果を示す。一部の地域に施設の共同利用を強く支持する所が見られるものの、全体的には、肯定的な意見が少数派となっている。また、日高中央漁協やえりも漁協へのヒアリングでは、「乾燥の協業化は、将来的には可能性がある。」「将来の姿として、共同利用設備の使用はあり得る。」「現状でも、3漁家程度の共同施設利用を実施したい組合員がいる。」などの回答が得られた。

協業化への関心度が地域で差があることから、乾燥システムの規模は、3漁家程度の小規模なものにすることとした。

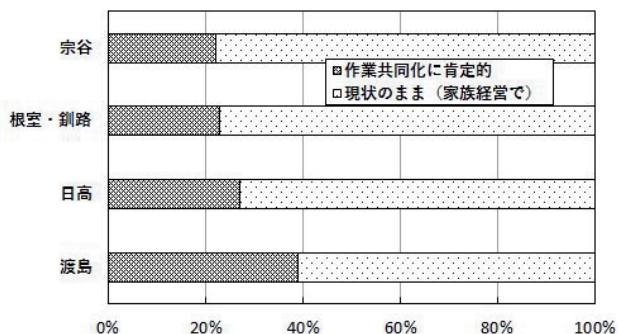


図44 共同作業についてのアンケート結果

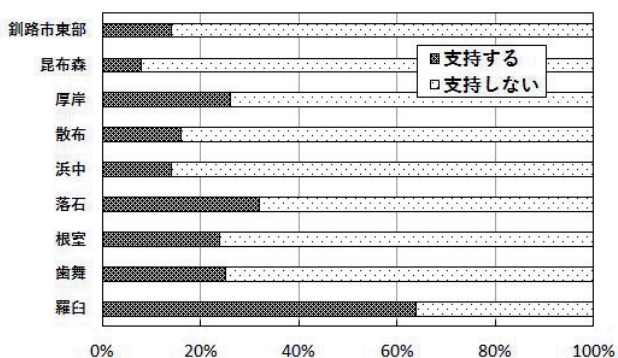


図45 共同乾燥センターでの生掛け乾燥についてのアンケート結果

mで、平面積430 m²となり、従来の乾燥施設の約9倍となる。

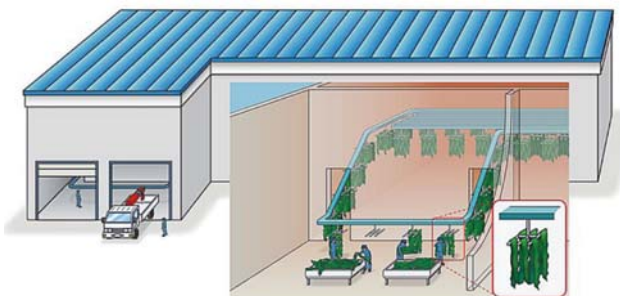


図46 連続式乾燥システムのイメージ図

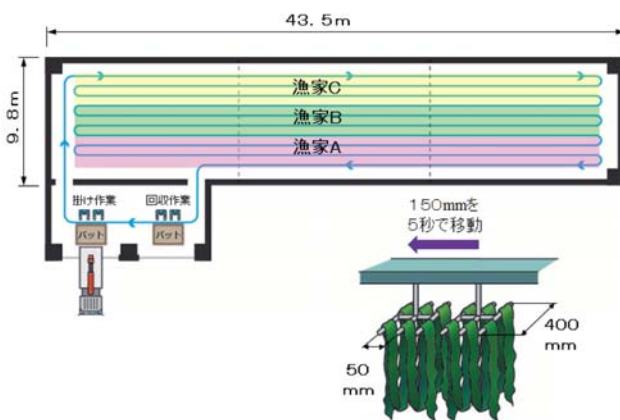


図47 3漁家利用時の乾燥施設と吊り具のイメージ図

5.2 協業化の形態

乾燥システムの協業化を行うに当たり、コンブの取り扱い方法として「連続式」と「バッチ式」の2つの方法について検討した。連続式は、金属製品の塗装ラインで用いられている方式である。また、バッチ式は、木材の乾燥施設で用いられている方式である。

5.2.1 連続式乾燥システム

連続式乾燥システムのイメージ図を図46に示す。投入部と回収部が同じ場所にあり、その2箇所がコンベアで一筆書きのようにつながっている。コンベアに接続されたコンブ吊り具が一定速度で移動するため、作業者は定位置で吊す作業をすることになり、移動による負担が軽減できる。コンベアの長さは、掛け外しの作業速度と乾燥時間により決まるため、従来の乾燥方法と比べて、建物の容積が大きくなる。

具体的に、コンブを収納する乾燥施設の容積について検討を行った。図47に、3漁家利用時の乾燥施設と吊り具のイメージ図を示す。1漁家が1回に採取するコンブの本数は約2000本で、3漁家分で6000本となる。1つの吊り具に2本のコンブを吊して150mmピッチで配置すると、ラインの長さは450mとなる。吊り具が5秒で1ピッチ(150mm)移動すると、1漁家の搬入時間は、1.5時間程度となる。乾燥施設の容積は、コンベアの旋回半径などを考慮すると縦9.8m、横43.5

5.2.2 バッチ式乾燥システム

バッチ式乾燥システムのイメージ図を図48に示す。従来の乾燥施設が複数(イラストでは3漁家)集まった形態である。棹にコンブを掛けて、一定間隔で棹を並べる。乾燥中に棹が移動しないため、連続式と比べると建物の容積が小さい。この方式は、従来の乾燥施設がもともになっているので、縦9.6m、横14mで、平面積135 m²となる。

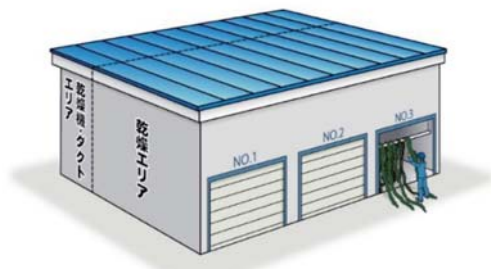


図48 バッチ式乾燥システムのイメージ図

5.2.3 連続式とバッチ式の比較

上記2種類の方法について、「乾燥スペース」、「使い易さ」、「設備コスト」の評価項目ごとに比較を行った。表8に、比

較表を示す。乾燥スペースは、連続式がバッチ式の3倍の面積を必要とする。面積が大きいということは、ヒートポンプの出力が大きくなり、施設の建設費用も大きくなる。連続式では450mのコンベアが必要となり、設備コストも高額となる。以上のことから、乾燥システムでは、バッチ式の形態を検討することにした。

表8 連続式とバッチ式の比較表

評価項目	連続式	バッチ式	備考
乾燥スペース	×	○	連続式：430㎡ バッチ式：135㎡
使い易さ	△	○	連続式：搬入時、待ち時間発生 バッチ式：同時搬入可能
設備コスト	×	○	連続式：コンベアシステムが高価 バッチ式：コンベアシステムより安価
総合評価		○	

5.3 作業効率を考慮した乾燥システムの設計

コンブ生産は、その作業のほとんどが労働集約的な作業で、作業者の身体的な負担も大きい。そのため、乾燥システム利用時のコンブの運搬作業に着目して、作業者への負担を軽減して作業効率を向上させる検討を行った。

歯舞Aの施設では、幅4.6m、奥行9.6mの乾燥施設とコンブを堆積した場所を何度も往復している。乾燥施設に設置された棹が奥まで移動すれば、作業者の移動距離が少なく、負担も軽減されると考えられる。図49に、コンブ搬送装置のイメージ図を示す。

乾燥施設入口付近に棹を十数本配置可能な棹が収納され、作業者はその場所でコンブを吊す作業を行う。棹に棹が配置されたら、棹を奥に押し出す。棹には、ローラーが組み込まれており、乾燥施設の壁に設置されたガイドレールを奥まで移動できるようになっている。これにより、従来の半分以下の移動距離となり、大幅な負担軽減と効率向上が期待できる。

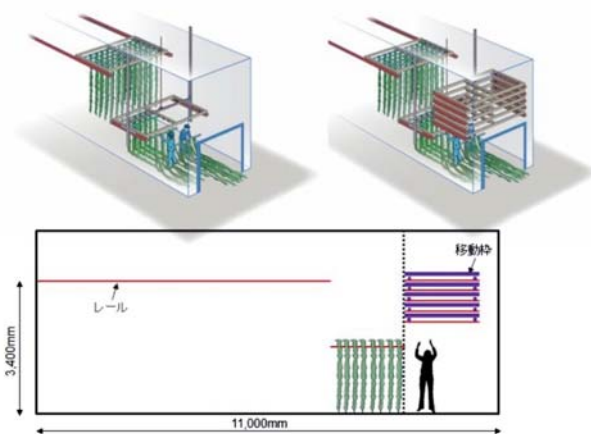


図49 コンブ搬送装置のイメージ図

5.4 実用スケールの省エネ、省コスト効果

以上の検討結果と北方建築総合研究所で行った吸排気や天井扇の配置、乾燥条件のシミュレーション結果を基に、本研究で提案する実用スケールシステムのイメージ図を図50に示す。また、生掛け乾燥と一次乾燥後乾燥（以下水切り後乾燥とする）の場合の計算結果とコスト（燃料代、電気代）を含めた比較を表9に示す。電気代のうち基本料金は年間の使用回数と使用時期により、乾燥1回あたりの額が変わるため、6月～10月の期間に40回使用するとして計算した。なお、計算方法の詳細や仕様選定の根拠については、北方建築総合研究所による別途報告書³⁾を参照されたい。

一次エネルギー（原油換算熱量）の従来型システムに対する実用スケールシステムの削減率は、生掛け乾燥、水切り後乾燥とも59%であった。これは図51に示すように、従来法ではコンブから蒸発した水分を含む高温の空気を排気することで乾燥を進行させるため、捨てられるエネルギーが大きい。一方、ヒートポンプ除湿乾燥では基本的に内気循環で乾燥を行うため、外部に捨てられる熱が少なくなるためである。一方、コスト削減率は生掛け乾燥で34%、水切り後乾燥では運転時間が短くなるため18%となった。ただし、あくまでも現時点の燃料価格や電気料金で算定した結果であり、燃料価格や電気料金は将来変動すると考えられる。参考として、生掛け乾燥の場合についての比較を図52に示す。

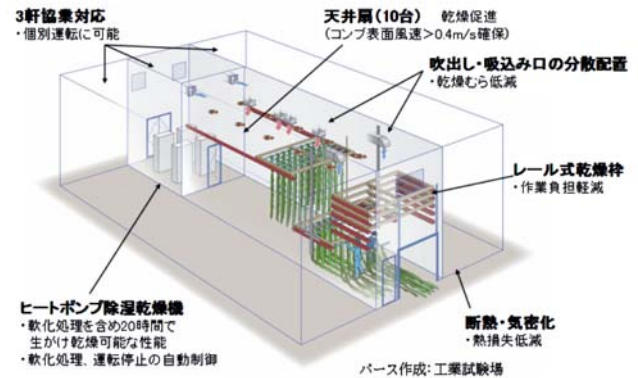


図50 実用スケールシステムのイメージ図

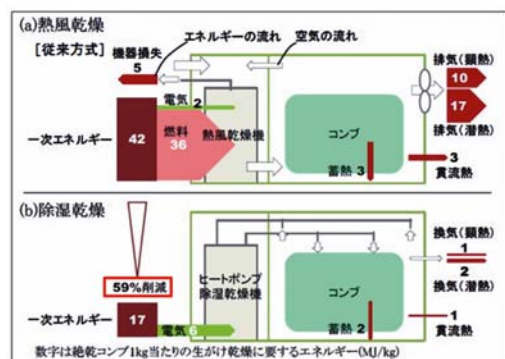


図51 エネルギーの流れの比較

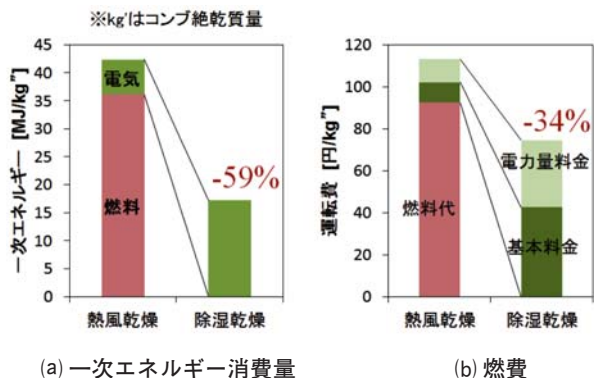


図52 絶乾コンブ 1kg当たりの従来乾燥と除湿乾燥の比較（生掛け）

6. おわりに

本研究では、省エネなコンブ乾燥システムを技術開発し、その技術を基盤として、協業化を想定した大規模なシステムの基本設計を行った。今後は、関係機関と連携し研究成果の展開を行ってきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道水産物検査協会には、乾燥コンブの品質評価について助言をして頂きました、ここに心より感謝申し上げます。

また、根室振興局、釧路総合振興局、根室地区水産技術普及指導所、釧路地区水産技術普及指導所、歯舞漁業協同組合にはコンブ乾燥現場の調査につきましての調整や乾燥コンブ装置開発への助言を頂きました。

また、田尻機械工業㈱には乾燥装置の設計や改造につきまして豊富な経験からの助言を頂きました。

ここに記して感謝申し上げます。

表9 従来型システムと実用スケールシステムのエネルギーコスト比較

項目	生かけ乾燥（初期含水率700%d.b.）		水切り後乾燥（初期含水率400%d.b.）		単位
	従来型システム	実用スケールシステム	従来型システム	実用スケールシステム	
最大消費電力	23.0	79.0	23.0	79.0	kW
契約種別	低圧電力	業務用電力	低圧電力	業務用電力	円/kW・月
基本料金	1,263.6	1,836.0	1,263.6	1,836.0	円/kWh
電力量料金	17.4	18.1	17.4	18.1	円/kW・月
力率	0.85	0.97	0.85	0.97	kWh
力率割引後基本料金	1,263.6	1,615.7	1,263.6	1,615.7	円/年
消費電力量	40	1,123.6	266.7	741.3	
捨棄回数		40		40	
使用期間	6-10月	6-10月	6-10月	6-10月	
1回あたり基本料金	6,176	27,123	6,176	27,123	円/回
電力量料金	7,054	20,359	4,627	13,433	円/回
電気料金	13,230	47,482	10,803	40,556	円/回
A重油消費量	23,014		15,172		MJ/回
燃料代（100円/L）	58,860		38,804		円/回
乾燥所要時間	18:00:00	18:01:00	11:52:00	11:58:00	
一次E	26,981	10,961	17,774	7,232	MJ/回
絶乾1kgあたり一次E	42.3	17.2	27.9	11.3	MJ/kg
絶乾1kgあたり乾燥コスト	113.1	74.5	77.8	63.6	円/kg
一次エネルギー削減率		59%		59%	
コスト削減率		34%		18%	

引用文献

- 立松宏一・遠藤卓・月舘司・鈴木大隆・福祉暁彦・木村稔・飯田憲一・鶴谷知洋：釧路・根室地域におけるコンブ乾燥施設の温熱環境・エネルギー実測調査，日本建築学会北海道支部研究報告集，Vol. 87，pp. 221-224，（2014）
- 北海道ぎょれん広報なみまるくん，北海道漁業組合連合会，No. 328，（2016）
- 道産コンブの生産安定化に関する研究（建築研究本部北方建築総合研究所実施分），北方建築総合研究所調査報告No. 375，（2017）
- 平成23年度 コンブ漁業就業者の確保・省力化等に関する調査報告書，北海道，（2012）
- 平成25年度 「コンブ作業省力化対策事業」に関する調査報告書，北海道，（2014）

農作物残渣の燃料化と燃焼に関する研究

上出 光志, 山越 幸康, 藤澤 拓己, 北口 敏弘*

Study on Thermal Recycle of Biomass of Agricultural Residues

Mitsushi KAMIDE, Yukiyasu YAMAKOSHI
Takumi FUJISAWA, Toshihiro KITAGUCHI

抄 録

エネルギー資源の多様化, 地域エネルギーの開発のためには, 未利用の農作物残渣など低品位バイオマスのサーマルリサイクルが重要である。しかし, 農作物残渣の燃料化は十分に試みられておらず, その燃料特性も明らかにされていない。本研究では, 道内農作物残渣燃料の成型性と燃焼性を調べ, その燃料に適応した燃焼機を開発した。クリンカーが発生しても燃焼を継続できる出力300kWの燃焼バーナを開発し, 農作物残渣ペレットは燃料として全く問題なく利用できることが明らかになった。

キーワード : 農作物残渣, 低品位バイオマス, クリンカー, 燃焼機, ペレット

Abstract

For a diversification of energy resource and a development of regional energy, thermal recycle of the low quality biomass as unutilized agricultural residues is important. Nevertheless, the briquetting of a solid fuel from agricultural residues is not done fully in Japan, and the fuel characteristics are not clear. In this study, the briquetability and the fuel characteristic of them were made clear, and the biomass burner was developed which fitted these fuel. As a result, the developed middle scale biomass burner of output power 300kW can be continued burning even if clinker breeds and it was proved that the agricultural residue pellet could utilize as fuel without problems at all.

KEY-WORDS : agricultural residues, biomass fuel, low quality biomass, clinker, burner, hot water supply system

1. はじめに

道内のエネルギーを取り巻く環境は電力の固定価格買取制度 (FIT) の施行以降変化しつつあり, 風力, 太陽光, 木質バイオマス, バイオガスなどの再生可能エネルギーの導入量は年々増大している。一方, 将来にわたる国内のエネルギーの安定供給のために, エネルギー源の多様化等が模索されている。道内でも, 森林資源, 農水産業残渣, 廃棄物などを活用した地域エネルギーの地産地消の取組が増加しており, 経済活性化, 新産業創出などを目的とした地域エネルギービジョン実現について, 道総研に対して自治体からの支援要望が増えてきている。

このような背景の中で, 本研究では, 森林資源に乏しい農業地域で排出される未利用残渣の燃料利用に着目した。具体的には, 芽室町で農作物残渣及びプラスチック系農産廃棄物の混合ペレット燃料を製造するとともに, その燃料特性を把握した。さらにこれらペレット燃料の基礎的な燃焼試験により農作物残渣ペレットの燃焼特性を明らかにし, 燃焼機・ボイラ及び熱供給システムを開発した。

また, 自治体が主導する地域エネルギー開発では, 地域特性を活かした燃料開発が試みられているが, その政策実現には, 地域特性・実情に適合した社会実装のための技術開発が重要である。このため, 地元機関との連携強化を図りながら実施した事業化支援例についても報告する。

* 道総研本部, * Hokkaido Research Organization Center Department

事業名: 受託研究

課題名: 農作物残渣等を燃料とする農業ハウス用自動燃焼ボイラーの開発

農業用廃プラスチックの再利用に関する研究

農作物残渣を生産現場で利用するためのペレット化技術の開発

2. 道内農作物残渣ペレットの製造

2.1 道内農作物残渣ペレットの基礎特性

2.1.1 各種試験の概要

各種農作物残渣は、排出時に高高くエネルギー密度が低い
ため燃料として使用するためには、ペレット化し、エネルギー
密度を増加させることが必要である。農作物残渣のペレット
化及び燃料利用に必要な次の条件(①~④)を調べるため、
農作物残渣の性状分析(工業分析、発熱量など)、ペレット
製造試験及び燃焼試験を行った。

- ①連続成型を可能とする原料の水分値、ペレタイザーの温度。
- ②ペレット化に必要なエネルギーの推計(乾燥、粉碎、成型
のための消費電力)。
- ③ペレットの密度、強度など。
- ④ペレットストーブを用いた燃焼実験でのクリンカー(灰分
が高温で熔融し固化した物質)発生状況、排ガス、燃焼温
度など。

農作物残渣として、北海道大学研究農場で栽培されている
道内主要作物の残渣、訓子府町、新ひだか町、平取町、南幌
町で排出されている地域性の強い作物の残渣(各地の主要農
作物の残渣)を用いた。

すべての原料は乾燥後5mm目のスクリーンを通過するサ
イズに粉碎後、フラットダイ型(穴径6mm)のペレタイザー
で成型し、木質ペレットストーブで燃焼試験を行った。

2.1.2 道内農作物残渣の性状

表1に、道内農作物残渣の工業分析値(ドライベース)と
総発熱量を示す。桑の枝とそば殻は木質バイオマス(引用値)
と近い値であった。他の農作物残渣はいずれも灰分が高く、
それに対応して発熱量が低いことが共通の特徴であった。

図1に、農作物残渣中の灰分を示す。土砂成分であるケイ
素、肥料成分であるカリウム、カルシウムなどが含まれてい
る。これらは圃場からの回収時に混入した土砂に由来する成
分と推定される。この結果は、高品質な燃料を得るためには
農作物残渣を粉碎後、篩などを用いて土砂除去が必要である
ことを示唆している。

2.1.3 ペレットの製造試験

ペレットの製造には、適正な温度と水分が重要である。前
項の原料を用いてペレットを製造した結果、ほとんどの原料
で水分を10%程度に調製することにより、ペレットが比較的
容易に製造可能であることがわかった。図2に、トマト茎葉
を原料としてペレットを成型した時のフラットダイの温度変
化を示す。フラットダイの温度上昇に伴い、ペレットの製造
は安定し、30~40℃で連続的に生産することができた。他の

農作物残渣についても、ほぼ同様な傾向が得られた。

表1 道内農作物残渣の工業分析値

	工業分析結果(DB%)			高発熱量 MJ/kg
	灰分	揮発分	固定炭素分	
木質(引用値)	0.3	82.7	17.0	20.1
ミニトマト茎葉(新ひだか)	14.7	70.2	15.1	14.3
玉ねぎ鬼皮(訓子府)	27.5	63.3	9.2	13.1
豆殻(訓子府)	5.4	77.2	17.4	16.7
そば殻(訓子府)	2.0	77.4	20.6	19.1
稲わら(南幌)	11.6	65.0	23.4	16.5
トマト茎葉(平取)	15.8	70.0	14.2	14.4
稲わら(北大)	11.1	74.3	14.6	16.2
豆殻(北大)	16.6	71.2	12.2	16.4
トマト茎葉(北大)	15.8	68.5	15.7	14.4
桑の枝(北大)	2.0	81.2	16.8	17.8
アスパラ茎葉(北大)	5.4	75.4	19.2	18.6
アスパラ根(北大)	23.6	61.2	15.2	15.7
デントコーン茎葉(北大)	7.7	69.9	22.4	17.4
スイートコーン茎葉(北大)	8.9	72.8	18.3	17.0
えん麦わら(北大)	6.9	72.8	20.3	18.5
てん菜茎葉(北大)	17.9	69.7	12.4	15.2

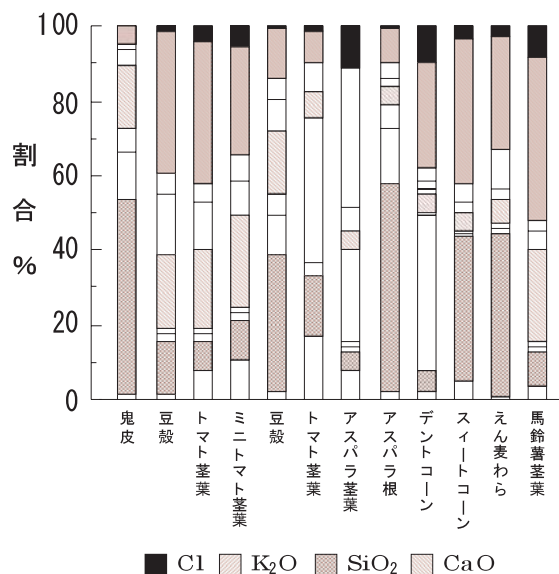


図1 道内農作物残渣中の無機成分

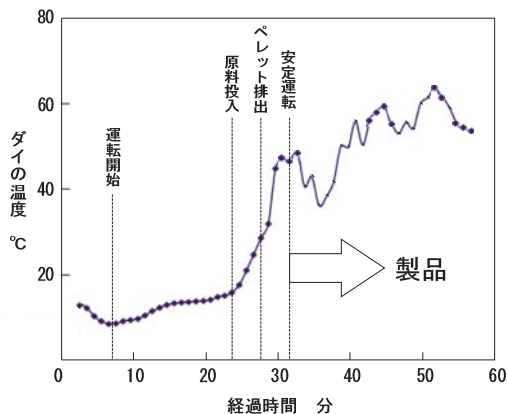


図2 成型時のフラットダイの温度変化

図3に、原料とペレットの密度測定から求めた圧縮率、圧壊強度を示す。鬼皮は圧縮率が17と最も高く、エネルギー密度が高くなるのがわかる。一方、ペレットの直径方向の圧壊強度では、木質ペレットと比較し、鬼皮、豆殻（北大）、えん麦わらは低い値になった。ペレット1kgの製造に要した消費電力量推定値は、乾燥53Wh(原料水分40%を10%まで乾燥)、粉碎185Wh、成型544Whであり、成型に要した電力が総計の70%以上を占有した。農作物残渣の場合、圃場での天日乾燥も可能なため乾燥・粉碎に係る消費電力の削減は可能である。今回の試験生産では、ペレット生産に要するエネルギーは生産されたペレットの全エネルギーの15%（最大）であり、製造された燃料のエネルギー量と製造に要したエネルギーの比（EPR：Energy Profit Ratioエネルギー収支比）は6.7と比較的高い値となった。

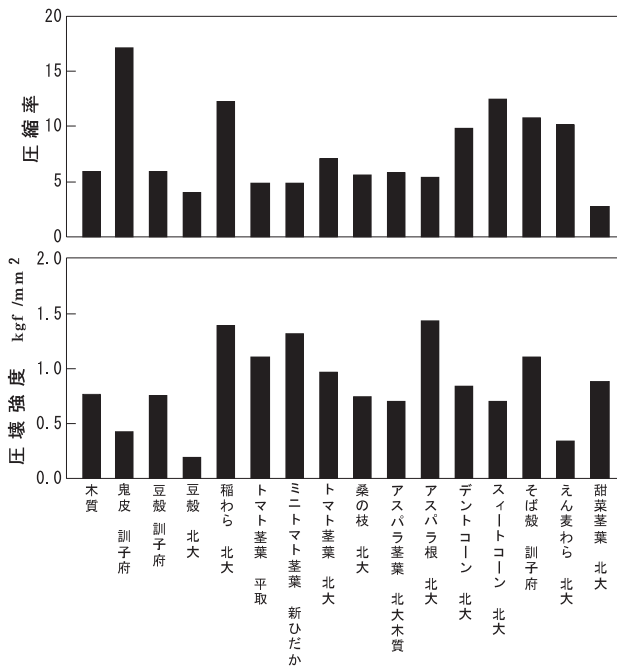


図3 ペレット製造時の圧縮率及び圧壊強度

2.1.4 ペレット燃料の基礎燃焼試験

ペレットストーブによる基礎的な燃焼実験では、ほとんどの燃料でクリンカーが発生し、燃焼継続が困難であった。このため、クリンカー障害を排除できる機構を持つ燃焼装置の開発が必要であることがわかった。

2.2 農作物残渣ペレットの実証試験規模での製造

農作物残渣バイオマスは、土砂混入などのため灰分が高く、発熱量が低い低品位なバイオマス燃料である^{1),2)}。農業残渣の中には、プラスチック系残渣もある。ポリ塩化ビニル系廃プラ（農ビ）は塩素が高濃度に含有するため燃料利用は困難であるのに対し、ポリエチレンなどの廃プラ（農ポリ）は発熱量も高く燃料として利用できる可能性がある。

農ポリに属する長いも育成ネットは、使用後に長いもの茎葉が巻きつき、処理が難しい農業残渣^{3),4),5)}として知られている。

農作物残渣バイオマスペレットは、発熱量が低い低品位燃料であるが、農ポリの混合により、着火性の改善、発熱量の向上が見込まれ、高品質な燃料に改質することが可能と考えられる。2.3節及び2.4節では、芽室町をモデル地域として、小豆殻、使用済み長いも育成ネット（以下廃ネットと記述）の燃料化に関する実証的な検討を行った。

2.3 農ポリ混合燃料の成型

めむろシニアワークセンターで約20tの農ポリ混合燃料を製造した。表2に、原料性状として水分、灰分、低発熱量を示す。これらはロット毎の分析値であり、収集の仕方、圃場での乾燥度合い、ネットに付着した長いも茎葉の腐熟状況によって大きく変化した。

表2 原料性状

	水分 %	灰分 %	低発熱量 MJ/kg
トドマツ	5.1~12.5	0.08~0.7	16.1~17.5
廃ネット	—	8.8~20.5	36.8~42.3
小豆殻	9.4~16.1	8.1~15.4	12.3~14.9

表3に、木質バイオマスに廃ネットを配合し製造したペレットの物性値を示す。原料はすべて10mmスクリーン通過条件で粉碎し、原料水分を10~20%に調整後、廃ネットを所定の割合混合し、ペレット製造した。なお、単位密度はペレット単体の密度を意味し、機械的耐久性とはペレットの壊れにくさをいい、一定量の機械的衝撃を与えた後に壊れなかった重量の割合である。

表3 廃ネット混合がペレット物性に及ぼす影響

廃ネット混合割合	0%	10%	20%
単位密度 g/cm ³	1.15	1.14	0.93
かさ密度 kg/L	0.53	0.52	0.42
機械的耐久性 %	95.5	82.2	71.1

廃ネット20%配合では、機械的耐久性は25%低下するが長距離輸送しない限りペレットが崩壊することはないと推測される。一方、単位密度、嵩密度はともに20%程度低下しており、それらに伴いエネルギー密度も低下するため、設備容量（貯蔵タンク、供給装置、燃焼炉）が大型化し、設備費コストが増大する。このため、廃ネットの適正配合量は最大で10%であることがわかった。

実用上では、芽室町の廃ネット年間排出量、ペレット生産規模(1000t/年)から廃ネット5%配合が適正值と判断される。表4に、廃ネット5%配合ペレットの物性値を示す。

表4 廃ネット5%配合ペレットの物性値

	小豆殻	廃ネット	小豆殻+ネット5%	トドマツ+ネット5%
かさ密度 kg/L	0.6	0.4	0.64	0.63
機械的耐久性 %	95.2	88.5	98.2	95.7
発熱量 MJ/kg	14.5	46.34	18.4	19.44

トドマツ、小豆殻等の原料は単体でペレット化しても発熱量に変化はなく、表2の発熱量に等しいものと仮定し、小豆殻のみの燃料と廃ネットを配合した燃料を比較すると、廃ネット混合により発熱量は13%程度向上し、加えて着火性の改善も期待される。

2.4 原料から土砂除去の方法

土砂が混入した農作物残渣等から製造された燃料ではペレット製造機械の摩耗や燃焼時のクリンカーの大量発生などの課題が顕在化している。それが低品位なバイオマスの利活用を妨げている大きな要因である。バイオマスを燃料利用する場合、各工程に大きな経費をかけることは難しいため、簡易で大きな効果を得ることのできる土砂の除去方法を検討した。

2.4.1 廃ネットからの土砂除去

廃ネットに付着している土砂は、茎葉が腐熟したものが主体でネットの撚り目全体に付着している。このため、一旦ネットを粉砕し、篩分けの方法が容易で低コストである。燃料製造の操作段階での廃ネットの灰分は10%程度まで低下していることから、工場の生産ラインに篩分け工程またはスクリーンコンベアによる振動輸送ラインが設備されていれば十分であることが分かった。

2.4.2 農作物残渣からの土砂除去方法

農作物残渣に土砂が付着する原因は、残渣の収集方法、天候、風、栽培方法など様々なことが考えられる。小豆殻では、付着する土砂量は8~30%と大きく変動した。土砂を完全に除去した小豆殻本来の灰分値(2.8%)と比較し、3~5倍の土砂が付着していることがわかった。この土砂量に応じた対応は不可能なため、廃ネットと同様に、篩分け処理を試みた。表5に、原料の粒度10mmスクリーンを通過した農作物残渣粉砕物を目開き1mmのスクリーンで土砂除去した原料の灰分値を示す。すべての農作物残渣の灰分値が約50%減少し、十分な土砂の除去効果が得られた。

表5 篩分けによる農作物残渣からの土砂除去効果

	灰分値 %	
	処理前	処理後
小豆殻	8.1~15.4	4.8~7.7
小豆殻+廃ネット(5%)	8.8~20.5	3.9~7.4
枝、葉、草	21.4	12.2
剪定枝	3.4	1.7

※篩分け後の原料歩留まりはすべて90%程度

以上の結果から、篩分けするだけで土砂を十分に除去できることが確認できた。水洗等の処理により土砂を除去し、クリンカー障害の軽減は可能ではあるが、これ以上の原料コストの増加は事業性の低下に繋がるため、残存土砂のクリンカー対策には、燃焼機の機能性向上で対処することにした。

3. 燃焼ボイラ及び熱供給システムの開発

農作物残渣(低品位なバイオマス)ペレット燃料を効率的に燃焼できるボイラを開発した。この種のペレット燃料は木質ペレット燃料と比較し、灰分が多く燃焼性が悪い、発熱量が低い、クリンカーが発生し燃焼を阻害するなど多くの欠点がある。このため、日本国内では出力500kW以下の中小ボイラを用いて農作物残渣を効率的に燃焼し、熱回収できるボイラは皆無である。この規模のボイラでもストーカ式燃焼機による燃焼は可能であるが、燃焼室が大型化し、クリンカーの発生を抑制できないため、効率的な燃焼状態は得られない。ここでは、燃焼機を燃焼バーナ、ボイラを燃焼バーナと熱交換器の複合体に分けて表記することにした。

3.1 燃焼ボイラの設計のコンセプト

農作物残渣燃料は、多くの欠点を持つ極めて低品位なバイオマス燃料ためであるため、固体燃料の中でも特に扱いづらい。このため、燃料としての能力を最大限引き出すことのできる燃焼機構を開発しなければならない。本研究では、ボイラの開発にあたり、下記の項目に開発重点を置いた。

- ・クリンカー障害の防止機能を付帯すること。
- ・85%以上の高い熱効率を有すること。
- ・広範囲な性状の燃料に対応できること。
- ・既存重油ボイラと連携運転できること。
- ・全自動運転できること。
- ・IoT(Internet of Things)活用による集中管理が可能なこと。

3.2 燃焼ボイラの詳細機能

図4に、本研究で開発した低品位バイオマス用燃焼バーナ(炉内径600mm、全長1,600mmの円筒形)を示す。燃焼バーナには一次燃焼用空気(一次空気ファン)、二次燃焼用空気(二次空気ファンと冷却空気ファン)の3基の送風ファンが設置されており、燃焼炉内に旋回流を作るように空気が送入される。バーナ炉内の燃料層を攪拌する耐熱ステンレス鋳鋼製のシャフト、レーキ(パドル)からなる攪拌装置には冷却用空気が送り込まれシャフト、パドル外縁部から吹き出し、攪拌装置全体を冷却するとともに、冷却後は二次空気として利用される。なお、本燃焼バーナの熱出力は300kWである。

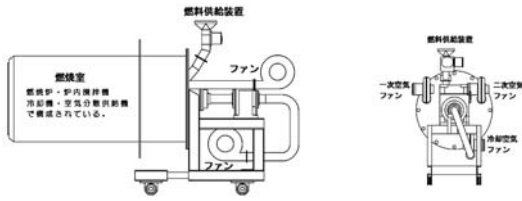


図4 低品位バイオマス用燃焼バーナ

3.2.1 燃焼炉内部の攪拌

バイオマスに付着した土砂などは、カリウムなどのアルカリ金属によって融点が約700℃まで低下する。熔融したクリンカーは燃料を包み込む、空気孔を塞ぐ、冷却時に炉壁などに固着し、燃焼にとっては大きな障害をもたらす。

図5は、固定床におけるクリンカーの形成過程を示したものである。

燃焼初期にはロストル上で灰が熔融し、一次空気が流通した部分に穴が開いたドーナツ状のクリンカーが形成される(図5a)。さらに燃焼が進行すると空気の流通が困難になり、ペレットの形状を保った大きなクリンカー(図5b)に成長し、燃焼灰の排出が困難となって燃焼が継続できなくなる。これらを防止するため、燃焼時には燃焼層を攪拌してクリンカーの成長を阻害(分割)し、冷却時には熔融したクリンカーが強固に固化する前に排出することが必要である。

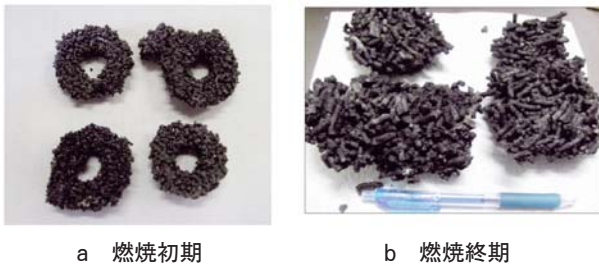


図5 クリンカーの形成(固定床)

本研究では、900℃～1300℃の任意の燃焼温度で、「灰分が多い燃料の効率的な燃焼」、「クリンカーの粘度を低下させ、攪拌動力の省力化、灰の容易な排出」を実現することが可能な燃焼バーナを開発した(図6)。

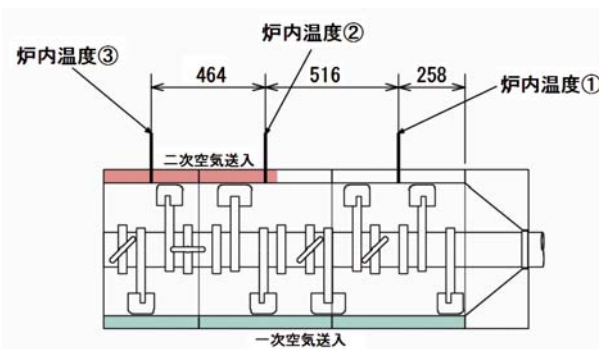


図6 バーナの内部構造と空気の送入方法

バーナには、15個のパドルが取り付けられたレーキが装備されている。このレーキの回転によりクリンカーが破碎され、成長が阻害される。また、燃焼時にレーキの高温腐食を防止するためには、シャフト本体、パドル数カ所から冷却用空気を噴出させている。この方式により冷却空気が燃料層へ拡散され、燃焼が十分に促進される。さらに、バーナ内部の温度は3カ所の熱電対で測定され、温度分布を所定の設定値に保つために、レーキに付属しているパドルで燃料の搬送、滞留、逆送を繰り返し、炉内の燃料層厚さの調整、燃料の滞留時間の調整を行い、燃焼残渣の発生を少なくしている。例を挙げると、灰分の多い燃料は炉内中心部の温度が高くなるように設定し、灰分の少ない燃料は温度分布が一定となるように設定している。

図7に、燃焼層の攪拌によるクリンカーの破碎効果を示す。攪拌速度が速いほどクリンカーの破碎度が増し排出し易くなるが、炉内で燃料の滞留時間が短くなるため、攪拌速度を安易に増すと、燃焼完了前に排出されることがある。今回開発したバーナでは、クリンカーの破碎と燃料の滞留時間を制御し、効果的な燃焼が可能となるように設計した。

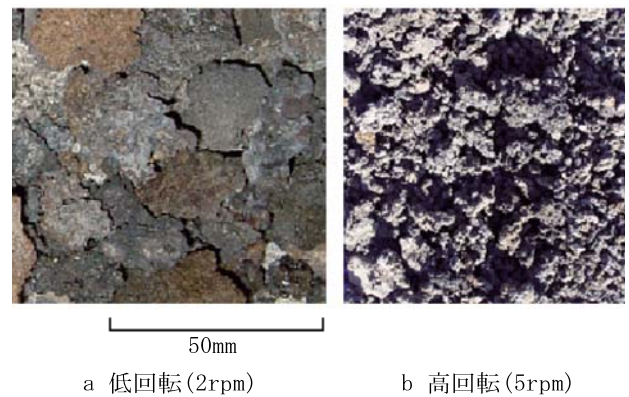


図7 クリンカーの破碎効果

3.2.2 熱効率の向上

今回開発したバーナでは、炉内下部から一次空気のみを送入し、上部から二次空気が送入される機構を採用することで燃焼ボイラの熱損失が極力少ない、高い熱効率を得られる制御システムとした(図6参照)。ボイラからの熱損失は未燃残渣の発生(未燃損失)によるもの、ボイラ本体からの放熱、排ガス損失などが考えられ、この中でも未燃損失や燃排ガス損失は熱効率に大きな影響を与える。本燃焼バーナでは、燃焼層内部を攪拌することで未燃損失は1%以下となった。また、送入空気に旋回を与え、空気と可燃性ガスを効率的に混合し、炉内滞留時間を長くすることによって、燃焼効率の向上と燃焼バーナ内で燃焼を完了する設定とした。さらに、基本的な燃焼制御は酸素濃度を基準に空気比を1.5程度で維持する燃焼制御を行い、燃焼に必要な過剰な空気量を極め

で少なく調整した。このため、排ガスが持ち去る熱は少なく炉内温度が高温となり、燃焼層攪拌効果と併せて燃渣損失は大きく減少し、高い熱効率が得られている。

3.2.3 広範囲な性状のバイオマス燃料に対応

通常の燃焼機では、燃料種に応じた燃焼機の調整をあらかじめ行うが、本燃焼バーナでは、燃焼温度と酸素濃度を基準に燃焼を制御(燃料供給量, 空気送风量など)するため、どのような性状の燃料でもほぼ一律の方法で燃焼が可能であり、900~1,300℃で燃焼温度を任意に設定できた。高温燃焼の利点は、生成する一酸化炭素量が少なくなり、それに伴い煤煙生成量が少なくなることである。燃焼炉内に燃料が供給された時、燃焼性の悪い燃料では炉内全体の温度は一時的に降下するが、高温であればスムーズな燃焼に移行可能である。

3.2.4 そのほかの機能

本ボイラシステムは全自動運転を基本としており、着火・燃焼・消火のためのパラメータはあらかじめプログラミングされているため、使用者は通常運転開始・停止のボタンを押すだけで操作が完了し、ボイラのメンテナンスは熱交換器の清掃のみである。ボイラシステムのシーケンス制御は着火、定常燃焼、停止(消火)と施設への熱供給に大別される。

着火工程は、燃料の性状に大きく影響され、木質燃料のように着火性、燃焼性ともに良好な燃料はスムーズに定常燃焼へ移行できるが、灰分が多く、着火性・燃焼性の悪い燃料の場合、火種を十分に大きく作り徐々に定常燃焼へ移行させる必要がある。水分が多い燃料も同様の手順で着火する必要がある。このような燃料では15段階程度のステップで徐々に火種を大きくする操作を行っている。

定常燃焼に移行後は、温水温度、炉内温度の監視のもと、設定した最適燃焼状態(空気比1.5, 酸素濃度7%)を維持しながら燃焼が継続され、この方法により燃料性状に影響されことなく良好な燃焼を維持することができる。

消火動作は温水温度が設定値(80~85℃)に達したときに始まり燃料供給の停止、燃焼灰の排出で構成され、煙道温度、炉内温度、炉内圧力を監視し、すべてが設定値を下回ったときに停止する。

再着火は、揮発分の爆発的な着火を防止するため、燃焼炉の温度、炉内圧力、煙道温度を参照しながら自動的に判断する。

3.3 ボイラの燃焼試験

ボイラの燃焼試験は芽室町の国民宿舎(新嵐山荘)で実施した。燃料は、街路樹、小豆殻、小豆殻に長いも育成ネットを5%配合したペレットを使用した。表6に、これら燃料の性状を示す。本節の燃焼試験では、ボイラの許容燃料範囲を模索するため、表5の燃料の中で、より低品位の燃料である

篩分け処理前の燃料を使用した。

表6 燃料性状(試験製造ペレット)

	水分 %	低発熱量 MJ/kg	灰分 %
小豆殻	12.6	12.3~14.9	8.1~15.4
小豆殻+ネット	14.7	13.1~14.5	8.8~20.5
街路樹	8.3	16.1~17.9	0.08~0.73
木質ペレット(参考値)	~10	16.5~	~0.5

これらの燃料による燃焼試験の結果を図8に示す。燃焼炉内の温度履歴が示すように、着火後およそ3時間で定常燃焼に移行することが確認された。燃焼初期の炉奥(図6の炉内温度①)、炉中央(同②)、炉出口(同③)温度については、炉奥は着火地点であるためいち早く温度が上昇し、炉中央、炉出口の順に温度が上昇する。炉出口では可燃物はほとんど存在しておらず温度は低くなるはずであるが炉中央の発生熱により温度が上昇している。燃焼が定常状態に制御されている場合には炉中央の温度が高く、炉奥、炉出口の温度はともに低くなる。このように3.2.1項で説明したようにボイラは最適燃焼状態に制御されているのがわかる。

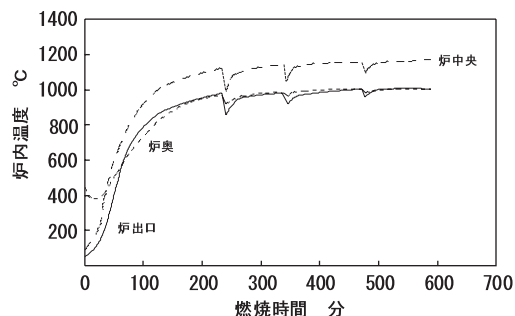


図8 燃焼炉内の温度履歴

表7に、排ガス組成の一例を示す。一酸化炭素濃度は50ppm以下と極めて低い値を示し、他の成分についてもすべて大気汚染防止法の基準値以内であった。熱供給装置でのダイオキシンの規制値はないものの、今回開発した燃焼炉のサイズでは小型焼却炉の排出基準値(5.0 ng-TEQ/m³N以下)を超えないように運転することが求められている。今回、小豆殻を燃料とした場合のダイオキシン排出量は0.14 ng-TEQ/m³Nと極めて低い値であった。

表7 排ガス組成

	基準値	測定値
一酸化炭素	なし	50ppm以下
窒素酸化物	350ppm	103~134ppm
硫酸酸化物	0.864m ³ N/h	0.0072m ³ N/h
ダイオキシン	5.0ng-TEQ/m ³ N	0.14ng-TEQ/m ³ N

※酸素濃度12%換算値、空気比1.5

表8に、ボイラ性能指標の一つである熱効率を示す。ボイラの熱効率は灰分含有量に影響されることなく85%以上の高値を示した。また、排出される灰分にはクリンカーの存在は認められるが、未燃分はほとんど含まれないことから、ほぼ完全に燃料が燃焼したことを示している。

表8 ボイラの熱効率

	炉内温度℃ (炉中央)	熱効率%
小豆殻	900~1000	85.0
小豆殻+ネット	950~1050	84.9
街路樹	1050~1150	90.8

バイオマスを燃焼した後に生じる燃焼灰は産業廃棄物として処理しなければならない。燃焼灰1kgあたりの処理料金は25円程度であるため、10%灰分の燃料を1t燃焼したときには2,500円程度の灰処理料金が必要となる。この処理料金を軽減するため、燃焼灰の有効利用方法を検討した。表9に、小豆殻燃焼灰から溶出した重金属類の分析値を示す。燃焼灰からの、カドミウム、セレン、鉛、ヒ素の溶出は検出されなかった。

表9 燃焼灰の溶出試験結果

	溶出量基準値 mg/L	燃焼1	燃焼2
カドミウム	0.01	ND	ND
セレン	0.01	ND	ND
鉛	0.01	ND	ND
ヒ素	0.01	ND	ND

その他の有害物質として六価クロムがあるが、その濃度は76ppmという高濃度となった。このボイラの燃焼関連部品にはステンレス鋼を使用している。この部品は1,000℃以上の酸化雰囲気での長時間暴露による高温酸化腐食のため攪拌レーキのパドル部分がやせており、部品から脱落した材料が混入し、六価クロム濃度が増大している可能性が高い。図9に、六価クロムを含む燃焼灰を土砂で希釈し三価に還元処理した結果を示す。10%希釈では六価クロム濃度は約30日で肥料取締法基準値(1.5ppm)以下になった。

一方、部品材料の検討では、高温酸化腐食に耐性の高い材料での燃焼実験を行っている。その結果、燃焼灰中の六価クロム濃度は20ppmとなり大きな効果が得られた。以上の結果から、燃焼灰の利用方法として融雪促進剤としての応用が期待される。

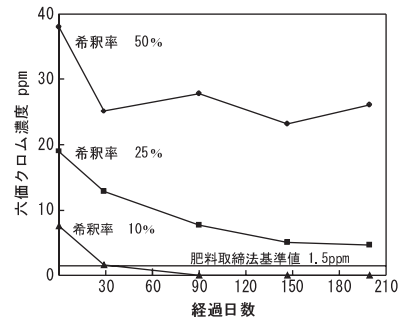


図9 六価クロムの還元処理結果

3.4 熱供給システムの開発及び実証試験

芽室町の国民宿舎において、熱供給システムの開発、ボイラ運転制御プログラムの開発、ボイラ構成部品の寿命判定を行った。図10に、本研究で開発したボイラ給湯システム概要図を示す。本システムは国民宿舎の給湯・暖房システムへ接続され、既存の重油ボイラは本バイオマスボイラのバックアップ熱源として稼働するようにプログラミングした。システム全体の保有水量は約25tで、貯湯タンクを通して既存のラインに熱を供給する方式であり、この保有水が急激な熱需要に対応するバッファとして機能を果たしている。また、バイオマスボイラの運転範囲は宿泊施設への供給温水温度が60℃であるが、実際には温水70℃でボイラの運転開始、85℃で運転停止を繰り返している。

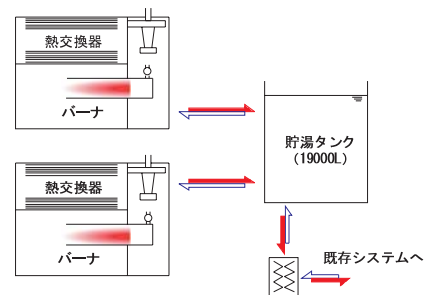


図10 バイオマスボイラ給湯システム

これまでの実証試験では、朝の起床時、風呂の清掃時、炊事場の作業開始時、昼食時間帯(スキー客の出入りが激しい)の熱消費量が多く、夜間は比較的熱需要が低いことがわかった。通常はバイオマスボイラ2台で運用しているが、熱量が不足する状態(貯湯槽温水温度が65~70℃)になると自動的に重油ボイラが稼働し、貯湯槽から施設への熱移動が遮断され、バイオマスボイラは貯湯槽の加温に専念する。貯湯槽温度が設定値に達したら重油ボイラが停止し、貯湯槽から施設への熱供給を開始する。このボイラ運転システムは実証試験を通して、制御プログラムの誤動作対策、燃焼制御の高度化、ボイラ部品の改良、ボイラの遠隔集中管理(IoT化)に取り組んでいる。(図11はボイラとその燃焼状態)。



図11 開発したボイラと燃焼状態

4. まとめ

道内農作物残渣の燃料化と燃焼技術を検討した結果、ペレット製造、燃焼バーナ、社会実装に関して、次の知見が得られた。

4.1 ペレット製造

農作物残渣はいずれの原料でも水分値が約10%で良好な成型性を示し、ペレット化することができた。また、製造したペレットは地域内の輸送にも耐える強度を持つことがわかった。付着土砂の除去については篩分けで50%以上軽減できる方法を見出した。農作物残渣に廃ネットを混合し、ペレットを製造する際には、その混合量は10%が限度であり、それ以上の混合では成型性が悪くなりエネルギー密度が著しく低下することが明らかになった。

4.2 燃焼バーナ

燃焼バーナ開発では、灰分量が0～30%程度までのバイオマス燃料を効率的に燃焼することが達成でき、クリンカーの発生に対しても、破碎しながら排出する機構を設備し、全く問題なく燃焼を継続できた。熱効率はいずれの燃料でも85～90%であった。この燃焼バーナを採用した加温システムは、始動・停止の2つのボタンで運転可能な全自動である。また、将来の普及を見越して、IoTを活用したweb上での一括集中管理方式のプログラム開発を進めている。

4.3 社会実装に向けた取り組み⁶⁾⁻⁷⁾

芽室町を舞台にした、農作物残渣など低品位なバイオマス資源を基軸とした地域循環型社会構築に向けて、燃料の将来的な需給、事業性を考慮した仕組み作りを行い、平成32年度には事業の開始が見込まれている。

さらに、地域活性化のため外部からの技術導入を極力避け、十勝地域既存の技術の活用と開発力の向上を目指し、“十勝発信の技術(all十勝)”を掲げて地場産業として定着を図り、地域の新規産業の起業、地域の活性化を図っている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なる御指導・御助言・御協力を賜りました、北海道大学工学研究院の山形定助教、北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの荒木肇教授、(株)武田鉄工所・(株)NERCの職員の皆様、林産試験場、十勝農業試験場、環境科学研究センターの皆様に、また、ペレット製造、燃焼バーナ開発、実証試験のフィールドを提供していただいた芽室町役場、めむろシニアワークセンター、JAめむろには、衷心より御礼申し上げます。最後に、本研究を強く支持していただきました(株)NERC代表取締役(故人)竹腰和夫氏のご冥福をお祈り申し上げます。

引用文献

- 1) 上出光志ほか、『農作物残渣等を燃料とする農業ハウス用自動燃焼ボイラーの開発』、JST地域ニーズ即応研究報告書、2010
- 2) 山形定ほか、『農作物残渣を生産現場で利用するためのペレット化技術の開発』、ノーステック報告書、2008
- 3) 芽室町、『芽室町地域新エネルギービジョン』報告書、2008
- 4) 芽室町、『芽室町の公共施設を活用したバイオマス資源の町内循環推進事業』報告書、2010
- 5) 芽室町、『地域に賦存する畑作関連バイオマス由来のペレットボイラーの開発』報告書、2010
- 6) 上出光志ほか、『農業用廃プラスチックの再利用に関する研究』、循環税報告書、2014
- 7) 上出光志ほか、『農業用廃プラスチックの地域内資源循環システムの社会実装に係る研究』、循環税中間報告書、2016

熱可塑性炭素繊維強化プラスチックの機械的特性に影響を及ぼす各種因子の評価

瀬野 修一郎, 吉田 昌充, 山岸 暢, 可児 浩
太田 佳樹*, 早川 康之*

Characterization of Various Factors Affecting Mechanical Property in Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics

Shuichiro SENO, Masamitsu YOSHIDA, Tohru YAMAGISHI, Hiroshi KANI
Yoshiki OHTA*, Yasuyuki HAYAKAWA*

抄 録

自動車や航空機等の車体及び部品等の軽量・高強度化を図る材料として炭素繊維強化プラスチックが注目されている。これまでは熱硬化性プラスチックを用いた炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が一般的だったが、近年、熱可塑性プラスチックを用いた炭素繊維強化プラスチック（CFRTP）が新たに開発され、高生産性などの長所を活かし、今後の利用増加が期待されている。しかし、CFRTPは最新の材料であるため、CFRPに比べその機械的特性が未知である部分が少なくない。そこで本研究ではCFRTPの本格的な活用に向けてその特性を把握するため、どのような因子が機械的特性に影響を及ぼすのか評価を行った。各種試験を行った結果、(1)温度に関してはCFRPと比べて影響を受けやすいが、低温下での大きな物性低下の懸念がないこと、(2)マトリックス樹脂に関しては種類によって機械的特性が異なること、(3)繊維方向に関してはCFRPよりも大きく影響を受けることがわかった。

キーワード：熱可塑性炭素繊維強化プラスチック，機械的特性，温度，マトリックス樹脂，繊維方向

Abstract

Carbon fiber reinforced plastics attract attention as composite materials which make bodies and parts of automobile, airplanes and so on lighter. Although carbon fiber reinforced plastics consisted of thermoset plastics (CFRP) are general, recently carbon fiber reinforced plastics consisted of thermoplastics (CFRTP) have been developed. CFRTP has advantage of high productivity, so increased use in the future is expected. But mechanical property of CFRTP is not known very well, because CFRTP is the latest material.

In this research, we study that what factor affects mechanical property of CFRTP to learn the characteristics needed for wide applications. As the results of various evaluations, we have known that CFRTP is easier to be affected by temperature and direction of carbon fiber than CFRP, but there is no large decrease of mechanical property under low temperature, and mechanical property of CFRTP is deferent from kinds of matrix resin.

KEY-WORDS : Carbon fiber reinforced thermoplastics, mechanical property, temperature, matrix resin, direction of carbon fiber

* 北海道科学大学, * Hokkaido University of Science

事業名：公募型研究

課題名：炭素繊維強化熱可塑性材料の義肢装具への応用に関わる機械的特性に関する研究

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチックは比強度、比剛性、耐腐食性に優れるため、自動車や航空機等の車体及び部品等の軽量・高強度化を図る材料として期待されている^{1,2)}。炭素繊維強化プラスチックはその名のとおり炭素繊維とプラスチックからなる複合材料の総称で、これまでプラスチックとしては熱硬化性プラスチックを用いたもの(Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP)が一般的であった。熱硬化性プラスチックからなるCFRPは機械的特性といった品質面では大変優れているが、一方で化学反応によって硬化する熱硬化性プラスチックを使用しているため、硬化するまでに時間がかかり、生産効率が悪く、製品コストが高くなってしまいう課題があった。

そこで、その課題を解決するべく、近年、熱可塑性プラスチックを用いた炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced ThermoPlastics: CFRTP)が新たに開発されている³⁾。熱可塑性プラスチックは熱硬化性プラスチックと異なり、非晶状態から結晶又はガラス状態への状態変化によって硬化し、融点又はガラス転移温度といった物質固有の特性温度を下回することで素早く硬化する。その上この状態変化は可逆的で、融点またはガラス転移温度を上回ると軟化し、再加工も可能となる。熱可塑性プラスチックのそのような硬化特性から高い生産性が予想されるため、CFRTPは今後の利用増加が大変期待されている新材料である。しかしながら、CFRTPは最新の材料であるため、CFRPに比べその各種特性や最適な物性評価方法が明らかではない。

そこで、本研究ではCFRTPの本格的な活用に向けてその特性を把握するため、どのような因子が機械的特性に影響を及ぼすのか評価した。具体的には温度、マトリックスとなる熱可塑性プラスチックの種類、炭素繊維の繊維方向の影響について評価した。機械的特性試験については引張、曲げ変形時の特性を評価するために引張試験、3点曲げ試験、衝撃特性を評価するためにシャルピー衝撃試験を実施した。

2. 実験方法

2.1 試料

CFRTPは3K平織のカーボンクロスを10枚積層した2mm厚の板材をメーカーから購入し、試験に供した。マトリックスの種類はポリアミド6 (PA6)、ポリメチルメタクリレート (アクリル)、ポリプロピレン (PP) の3種類を評価した。従来のCFRPと比較するために炭素繊維 (3K平織カーボンクロス, 10枚積層) は同じでエポキシ樹脂製のCFRPも購入し、評価を行った。PA6は吸湿によって物性が大きく変わり、実使用時には吸湿後の物性が重要であるため、マトリックスがPA6のCFRTPシートに関しては恒温恒湿槽にて調湿

後(70°C, 62%RH, JIS K7143)、試験を実施した。

2.2 試験片の作製

試験片は積層板から各試験に応じた寸法に複合材料切断機(コンボジッターMC-453, ㈱マルトー)を用いて切断し、作製した。寸法は以下のとおり、炭素繊維強化プラスチックに関するJIS規格に準拠した。

引張試験片： 250×25×2 mm (JIS K7164)
 3点曲げ試験片： 100×15×2 mm (JIS K7074)
 シャルピー衝撃試験片： 80×10×2 mm (JIS K7077)

また、炭素繊維の繊維方向の影響を評価するために、平織カーボンクロスの繊維方向と平行(0°)に切断した試験片と45°方向に切断した試験片を2種類作製した(図1)。

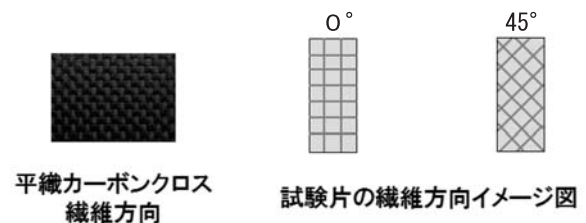


図1 試験片の繊維方向について

2.3 引張試験

引張試験においてはJIS K7164に準拠して行った。試験条件、使用した装置などの詳細については以下のとおりである。

試験片寸法：250×25×2 mm

タブ：なし

試験速度：2 mm/min.

試験温度：23°C, -30°C

試験装置：オートグラフAG-100kNXplus (㈱島津製作所)
 伸び計：ビデオ式非接触伸び幅計TRViewX (㈱島津製作所)

弾性率、ポアソン比の伸び測定には歪みゲージを使用
 歪みゲージ：KFG-2-120-D16-11R 3 M2 (㈱共和電業)
 接着剤：CC-33A (㈱共和電業)

2.4 3点曲げ試験

3点曲げ試験においてはJIS K7074に準拠して行った。試験条件、使用した装置などの詳細については以下のとおりである。

試験片寸法：100×15×2 mm

試験速度：5 mm/min.

支点間距離：80mm

試験温度：23°C, -30°C

試験装置：オートグラフAG-100kNXplus (㈱島津製作所)

2.5 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験においてはJIS K7077に準拠して行った。試験条件、使用した装置などの詳細については以下のとおりである。

試験片寸法：80×10×2 mm

試験方向：フラットワイズ

支持台間の距離：60mm

ハンマ容量：7.5J

試験温度：23℃，-30℃

試験装置：万能衝撃試験機No. 258（㈱安田精機製作所）

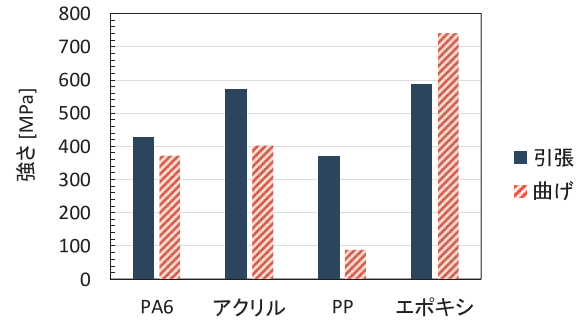


図2 各種CFRTP, CFRPの最大強さ (引張, 曲げ)

3. 結果と考察

3.1 マトリックスの影響について

CFRP及びCFRTPの各種物性の試験結果を表1に示す。表1の結果を用いて各マトリックスでの23℃，0°方向における各種物性を棒グラフにまとめた結果を図2～4に示した。

マトリックスの種類によって強さ，弾性率は異なり，強さは，引張，曲げともに従来のCFRPであるエポキシの場合が最も大きかった。また，CFRTPではマトリックスにより物性値は異なり，PPは引張，曲げともに低く，特に曲げ強さは小さな値であった。弾性率は，CFRTPの方がエポキシ

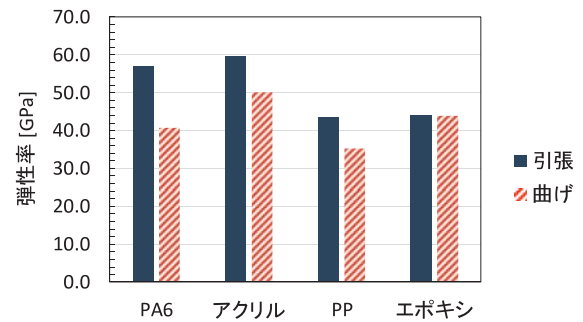


図3 各種CFRTP, CFRPの弾性率 (引張, 曲げ)

表1 CFRP及びCFRTPにおける各種物性の値

試験項目	単位	試験温度(℃)	角度(°)	マトリックスの種類			
				PA6	アクリル	PP	エポキシ
引張強さ	MPa	23	0	426	572	370	586
		-30	0	535	587	480	563
		23	45	188	172	111	489
		-30	45	245	208	139	498
引張弾性率	GPa	23	0	56.9	59.6	43.6	43.9
		-30	0	57.2	61.9	49.9	46.1
		23	45	5.7	12.4	3.3	37.3
		-30	45	15.1	17.1	10.8	38.8
ポアソン比	-	23	0	0.13	0.08	0.26	0.23
		-30	0	0.06	0.08	0.06	0.28
		23	45	0.91	0.79	0.96	0.42
		-30	45	0.76	0.72	0.96	0.44
曲げ強さ	MPa	23	0	372	402	88	741
		-30	0	529	604	199	678
		23	45	100	181	27	667
		-30	45	244	277	85	664
曲げ弾性率	GPa	23	0	40.7	50.2	35.3	43.9
		-30	0	41.7	48.3	38.0	41.7
		23	45	6.8	14.9	1.2	33.7
		-30	45	13.3	14.5	7.8	31.2
シャルピー 衝撃強さ	kJ/m ²	23	0	58	69	64	85
		-30	0	64	83	70	83
		23	45	92	144	30	129
		-30	45	157	152	50	129

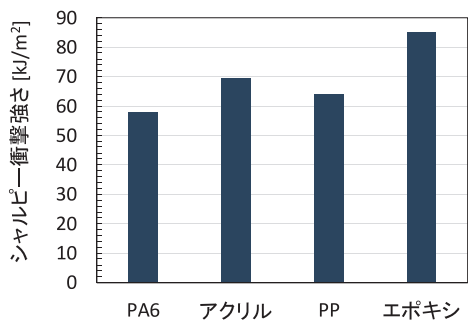


図4 各種CFRTP, CFRPのシャルピー衝撃強さ

のCFRPに比べ大きく、CFRTPの中では強さと同様にPPの場合が最も小さかった。引張破断後の試験片を観察してみると、PPをマトリックスとするCFRTPは試験片表面に肉眼でも確認できる顕著な層間剥離が見られた(図5)。特に物性値の低下が顕著な曲げ特性についても曲げ試験後の破断面を観察すると、剥離が起きやすい圧縮変形がかかる圧子面の方には明確な層間剥離が見られた(図6)。これらのことから、PPのマトリックスと炭素繊維表面の接着強度がその他のマトリックスと比較して弱いことが推測され、その接着強度の違いがマトリックスの違いによる物性差を引き起こす大きな要因の一つと考えられる。



図5 引張破断後のCFRTP(PP)試験片

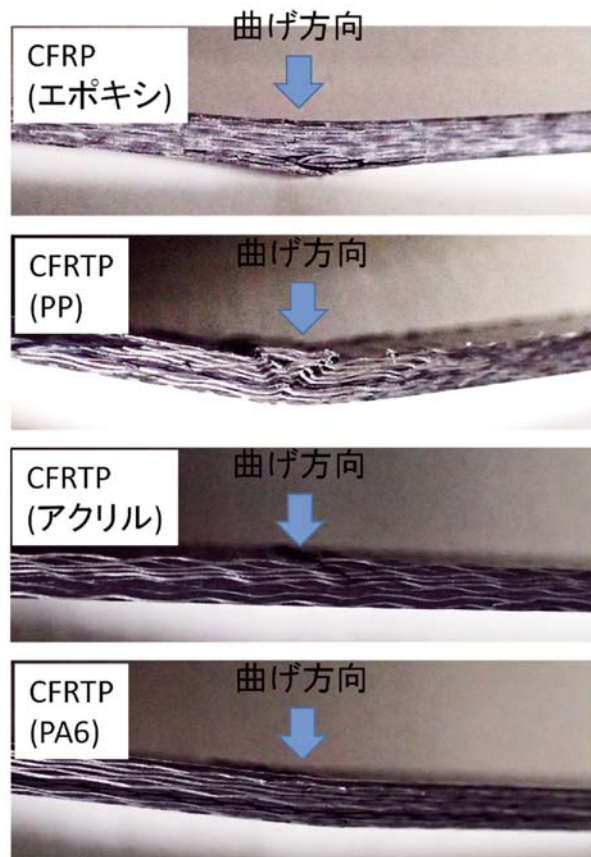


図6 各種CFRTP, CFRPの曲げ試験後の試験片破断面

シャルピー衝撃強さについてはCFRPがCFRTPに比べ、大きかった(図4)。CFRPが最も大きな値を示し、CFRTPに関してはマトリックスの種類でそれほど大きな差異は見られなかった。

3.2 繊維方向の影響について

表1の結果を用いて23°Cで試験した0°, 45°方向における各種物性を棒グラフにまとめた結果を図7~10に示した。

引張、曲げ特性については45°方向の物性値は強さ、弾性率ともにCFRPでは80~90%程度を保持するが、CFRTPについてはマトリックスの種類にもよるが、40%以下まで低下するものもあり、繊維方向の影響を大きく受けやすいことがわかった。-30°Cの物性においても同様の傾向であった。

図11にマトリックスがアクリルとエポキシの場合の0°と45°方向の応力-変位曲線を示した。繊維方向による物性の変化が小さいエポキシのCFRPは0°, 45°方向ともによく似た応力-変位曲線を描いている。一方でアクリルのCFRTPについては0°方向でCFRPと同様の応力-変位曲線を描くが、45°方向においては非常に伸びが大きくなり、応力もそれほど上昇しない。これはおそらく、CFRTPの場合は炭素繊維の応力を伝達する役目となるマトリックスの熱可塑性プラスチックが、炭素繊維に大きな荷重がかからないうちにずれて

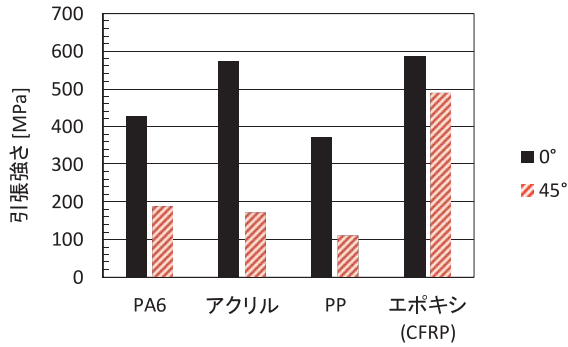


図7 引張強さの繊維方向依存性 (試験温度23°C)

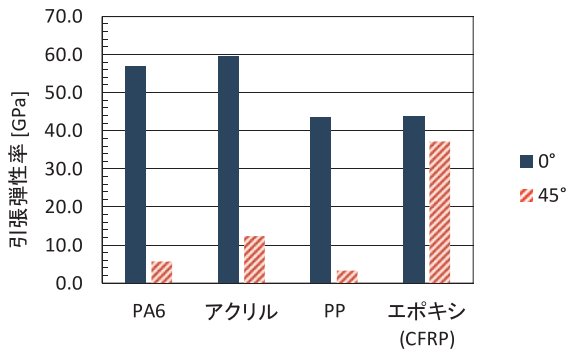


図8 引張弾性率の繊維方向依存性 (試験温度23°C)

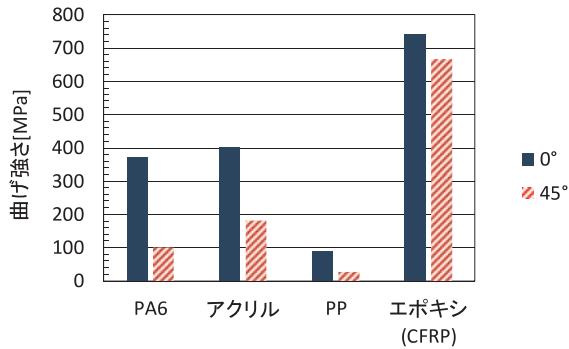


図9 曲げ強さの繊維方向依存性 (試験温度23°C)

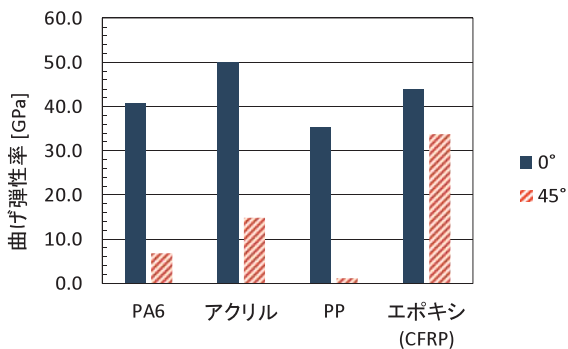


図10 曲げ弾性率の繊維方向依存性 (試験温度23°C)

しまったことが要因と推測される。実際に引張試験後の試験片の様子を観察したところCFRTPの場合は直交していた炭素繊維が変形して菱形となっていた(図12)。また、引張試験後の試験片形状は荷重のかかる長手方向が大きく伸び、幅方向は試験前に比べて大幅に細くなる変形が見られた(図13)。これはCFRTPでの45°方向のポアソン比が非常に大きくなっている(表1)こととも整合する。

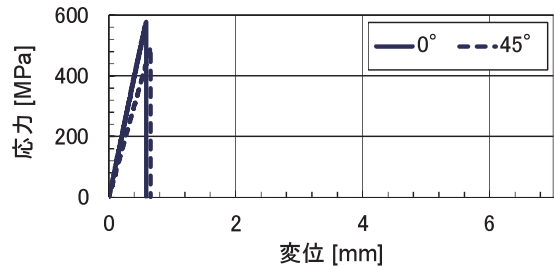
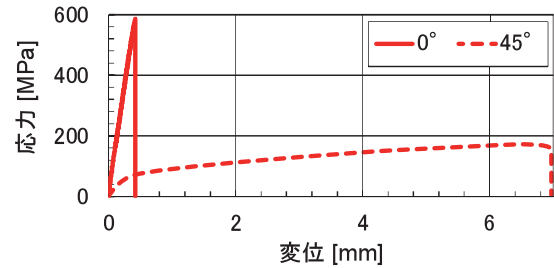


図11 引張試験時の応力-変位曲線 (上: CFRTP(アクリル), 下: CFRTP(エポキシ))

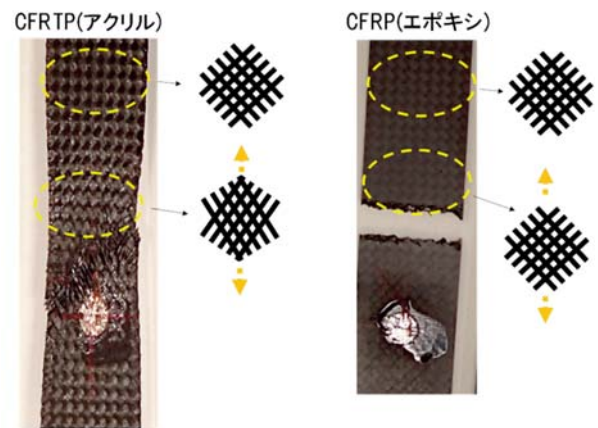


図12 引張試験後試験片の破断点付近の様子

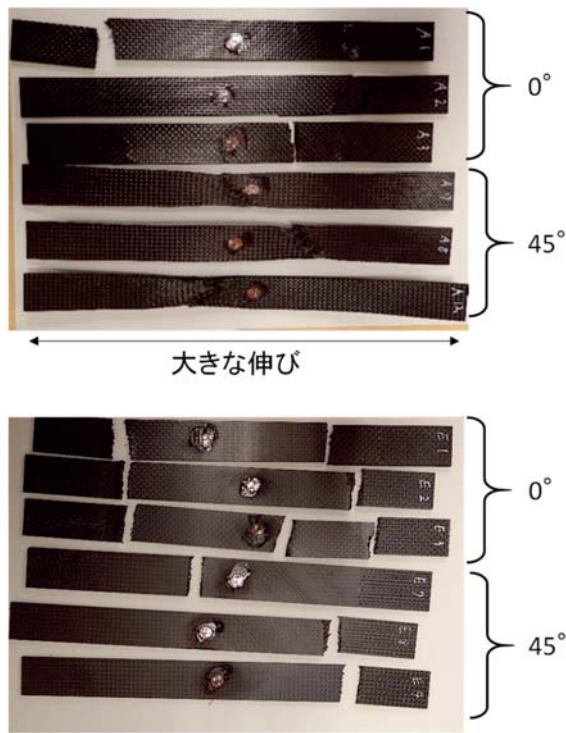


図13 引張試験後の試験片
(上：CF RTP(アクリル)，下：CFRP(エポキシ))

シャルピー衝撃強さについてはPPマトリックスのCF RTP以外はCF RTP, CFRPともに45°方向の物性は向上していた(図14)。衝撃強さはハンマーが試験片と衝突した際に試験片にかかる力と変位からなる仕事量のため、荷重、変位の両方の因子が影響する。シャルピー衝撃試験の変形は試験片の面方向からハンマーを衝突させるため、3点曲げと同様の変

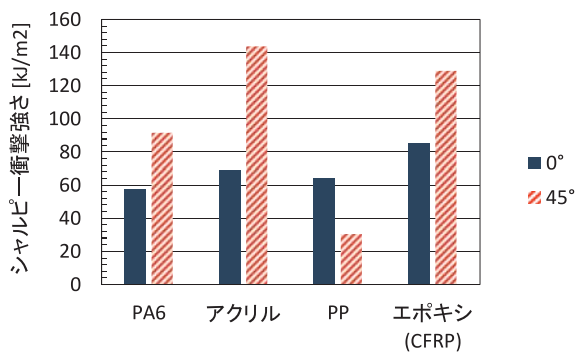


図14 シャルピー衝撃強さの繊維方向依存性
(試験温度23°C)

形となる。図15のように45°方向の曲げ試験において、CF RTPはいずれのマトリックスにおいても変形するが、柔軟なプラスチックのようにしなるだけで全く破断しない。これはシャルピー衝撃試験においても同様で、ハンマーで衝撃をあたえた後でも試験片は破壊されず、シート形状を維持し

ていた。このように45°方向の試験片の場合は0°方向の試験片に比べて大きく変形するため、変形時にかかる荷重は0°方向の試験片に比べて小さくなるものの、吸収するエネルギーは大きくなり、衝撃強さは大きな値を示したものと推測される。PPマトリックスのCF RTPでは変位は大きいですが、図2に示したように他マトリックスの試験片に比べて曲げ強さも非常に小さいため、45°方向でシャルピー衝撃強さが低くなったと考えられる。

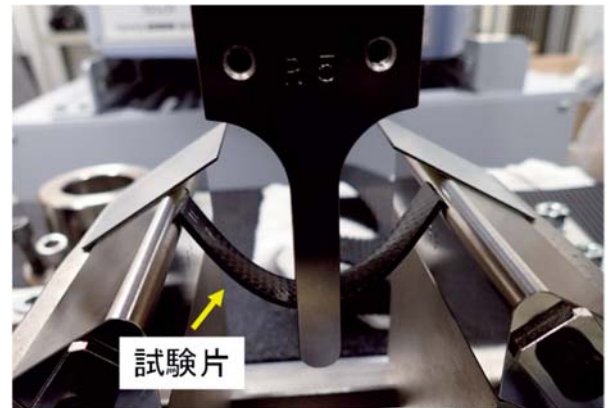


図15 曲げ試験の様子(繊維方向45°)

引張特性について繊維方向の影響をより詳細に評価するためにPA6マトリックスのCF RTPに関して繊維角度をさらに細かく刻んだ試験片を作製し、23°C, -30°Cにおける引張特性を評価した。その結果を図16, 17に示した。強さに比べて弾性率は繊維方向の影響が大きく、およそ16°付近では0°における値と比べてその値は半減している。そして、表1のとおりCFRPの場合は45°方向の場合においても、両温度とも弾性率は0°方向の値のおよそ85%程度を保持しているが、CF RTPの場合は5°付近ですでに85%程度の値に低下している。このようにCF RTPはCFRPと比べても非常に繊維方向の影響を受けやすく、製品設計を行う上で、繊維方向に対してどのような変形が加わるかを十分に考慮する必要がある。

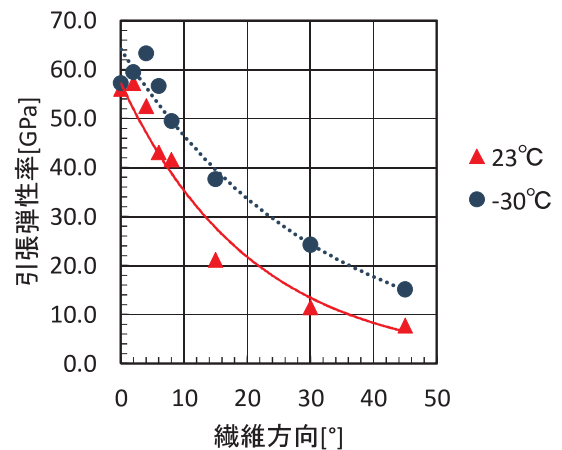


図16 引張弾性率の繊維方向依存性 (CF RTP(PA6))

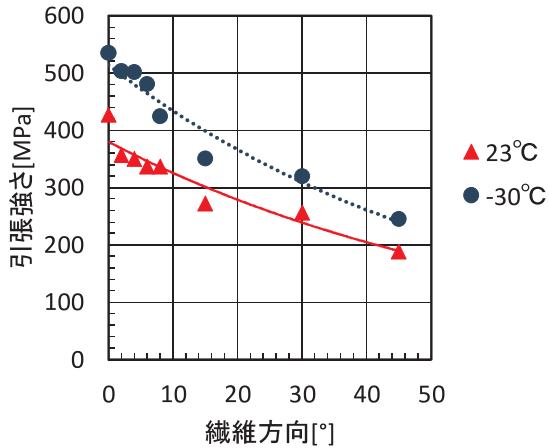


図17 引張強さの繊維方向依存性 (CFRTP (PA6))

3.3 温度の影響について

表1の結果を用いて0°方向における23°C, -30°Cで試験した各種物性を棒グラフにまとめた結果を図18~22に示した。引張弾性率を除いて引張, 曲げ, シャルピー衝撃特性のいずれの場合もエポキシ樹脂をマトリックスとした従来のCFRPは23°Cの場合に比べて-30°Cの低温下で物性値は低下していたが, いずれもその物性値は5%程度のわずかな低下であった。一方で, 各種の熱可塑性樹脂をマトリックスとするCFRTPにおいては多くの場合, 物性値が大きくなった。特にPPをマトリックスとするCFRTPは変化率が大きく, 曲げ強さで220%ほどに上昇した。45°方向における物性についても同様の傾向であった。

CFRPの機械的性質に関しては以前より温度依存性があることが知られているが⁴⁾⁶⁾, 熱可塑性プラスチックの方が熱硬化性プラスチックに比べて温度の影響を受けやすいため, CFRTPの温度を変えた際に機械的性質が大きく変化したものと考えられる。一般的に熱可塑性プラスチックは低温になるほど高分子鎖の分子運動が抑制され, 弾性率が上がり, 硬くなる傾向のため, CFRTPについても物性値の上昇に繋がったものと推測される。

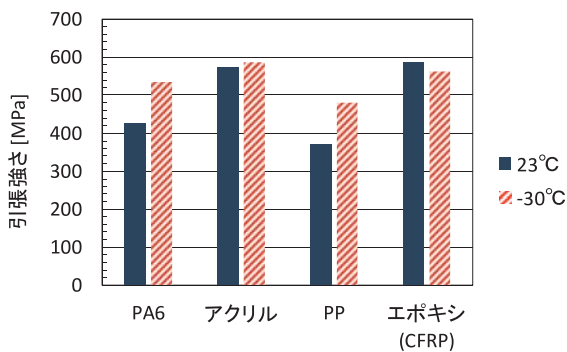


図18 引張強さの温度依存性 (繊維方向0°)

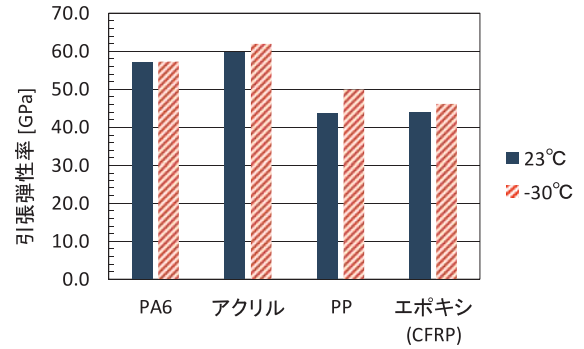


図19 引張弾性率の温度依存性(繊維方向0°)

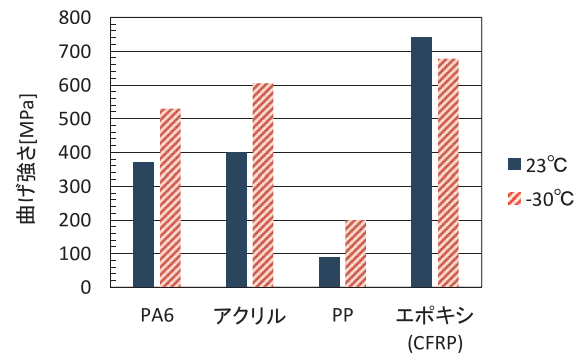


図20 曲げ強さの温度依存性(繊維方向0°)

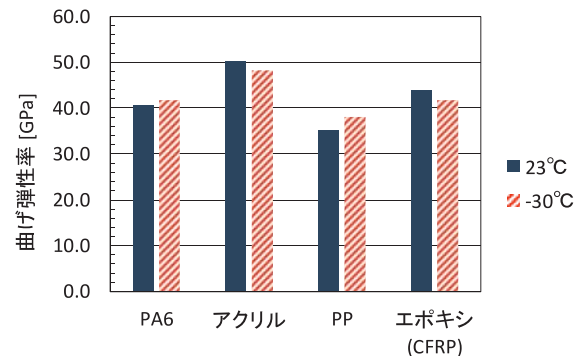


図21 曲げ弾性率の温度依存性(繊維方向0°)

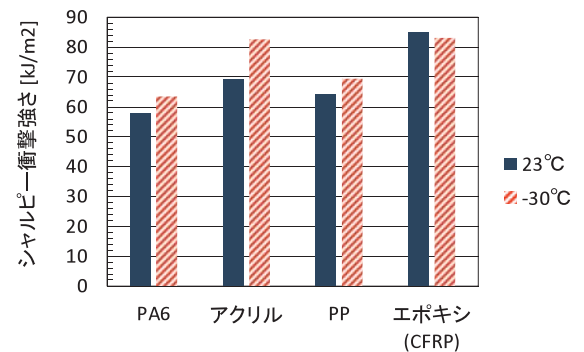


図22 シャルピー衝撃強さの温度依存性(繊維方向0°)

4. おわりに

本研究では熱可塑性プラスチックからなる炭素繊維強化プラスチックの機械的特性に影響を与える温度、マトリックス、繊維方向といった各種因子について評価を行った結果、各因子が与える影響について以下に示す知見が得られた。

(1) マトリックスの影響について

PA6, アクリル, PPの3種類について評価した結果、マトリックスによって機械的特性が異なることがわかった。特にPPについてはその他マトリックスと比較して値が低く、層間剥離も顕著なことから炭素繊維との界面強度が他マトリックスに比べて低いことが推測される。

(2) 繊維方向の影響について

CFRTPはCFRPより大きく影響を受けることがわかった。強度を考慮する製品設計の際は製品にかかる力の方向と繊維方向の関係に十分注意が必要であることが示唆された。

(3) 温度の影響について

CFRTPはCFRPに比べて影響を受けやすいが、低温下での大きな物性低下の懸念は小さいことがわかった。

謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構(JST)のマッチングプランナープログラムにより実施しました。また、本研究で使用したオートグラフ AG-100kNXplusは公益財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 石川隆司：自動車構造部品への炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の応用の展望, 精密工学会誌, Vol.81, No.6, pp.489-493, (2015)
- 2) 岩堀裕：軽量・高効率に貢献する輸送関連CFRP 航空・宇宙分野におけるCFRP技術の現状と展望, 成形加工, Vol.28, No.12, pp. 484-489, (2016)
- 3) 寺田幸平：炭素繊維強化熱可塑性プラスチック-現状, 応用分野および課題-, 精密工学会誌, Vol.81, No.6, pp.485-488, (2015)
- 4) J.H.Greenwood: Creep and fracture of CFRP at 180-200°C, Composites, Vol.6, No.5, pp.203-206, (1975)
- 5) M.N.Irion・D.F.Adams: Compression creep testing of unidirectional composite materials., Composites, Vol.12, No.2, pp.117-123, (1981)
- 6) 金光学：CFRP繊維方向の曲げ強度の時間-温度依存性, 材料, Vol.33, No.370, pp.869-875, (1984)

無機廃棄物の溶融による都市鉱山からの金属回収

稲野 浩行, 堀川 弘善, 飯野 潔, 赤澤 敏之

Metal Recovery from Urban Mine by Reduction Melting of Inorganic Waste

Hiroyuki INANO, Hiroyoshi HORIKAWA, Kiyoshi IINO, Toshiyuki AKAZAWA

抄 録

近年都市鉱山として注目されている家電廃棄物からの金属回収について、化学熱力学計算と溶融試験により検討した。ブラウン管鉛ガラスと金属含有廃棄物を還元溶融し、還元で生成した金属を鉛合金としてガラス相から分離し回収するプロセスを想定した。対象とした金属は家電等に含まれるものの内、著者らの先行研究で取り上げていなかったBa, Ti, Ta, Dy, Snである。各元素の酸化反応における標準自由エネルギー変化を計算し、回収可能性を予測した。溶融試験では、実際の廃棄物に代え、模擬ガラスと金属試薬による基礎試験を行った。化学熱力学計算の結果と溶融試験の結果を比較したところ、良い一致がみられたことから、この系において化学熱力学計算によって金属回収可能性が予測できることが見出された。

キーワード：都市鉱山, レアメタル, 無機廃棄物, ブラウン管, 鉛

Abstract

The metals recovery from electric household appliances that recently draw attention as "urban mine" was investigated by chemical thermodynamics calculation and melting tests. Envisaged process is that CRT lead glass and metal containing waste are melted and metals that generated by reduction are recovered as Pb alloy from glass phase. The target metals are Ba, Ti, Ta, Dy and Sn which are containing in electric household appliances, and are not investigated yet. The changes of standard free energy in oxidation reaction for each metal elements were calculated and recovery possibility was predicted. Model glass and chemical agents were used instead of actual waste at basic experiments. The results of thermodynamics calculations agreed with that of melting test, therefore, it has been found that metal recovery can be predicted in this system.

KEY-WORDS : Urban mine, Precious metals, Inorganic waste, CRT glass, Lead

1. はじめに

電気電子製品は、天然鉱石以上の濃度の有価金属、例えば金、銀、銅、レアメタルなどを含有していることから、近年、その廃棄物などは「都市鉱山」と呼ばれ、そこからの金属回収が注目されている。

その中で、家電リサイクル法で回収が義務化されているブラウン管式テレビは、液晶テレビなどへの急速なシフトにより世界的に生産が激減し、ブラウン管ガラス廃材を再びブラウン管製造に使用する水平リサイクルができなくなった。2011年の地上デジタル放送への移行による買い換えにより、その直前は大量の回収があったが、それを過ぎても回収は継

続しており、平成27年度（2015年）は全国で約150万台のブラウン管式テレビが回収されている¹⁾。しかし、ブラウン管の後部のファンネル部分には鉛ガラスが使用されており、埋立処分を行った場合、人体に有害な鉛の溶出がみられることから²⁾、その処理が課題となっている。一方、自動車や産業用バッテリーの電極材料として、世界的に鉛の需要は増加しており、ブラウン管ファンネルガラスは鉛資源として期待されている。

都市鉱山からの有価金属回収では、いろいろな方法が試みられている。例えばプリント基板については、家電製品などから取り外したプリント基板のみを集め、焙焼により樹脂部分を除去し、金属を濃縮した後に非鉄製錬の炉に入れ、銅を

事業名：経常研究

課題名：無機廃棄物の溶融によるスラグと金属の分離

はじめ、各金属を分離して回収している³⁾。ヨーロッパでは、大手の廃棄物処理業者に対抗し、各地域で小型の移動式設備を用いて、各種電気電子廃棄物(Waste from Electrical and Electronic Equipment: WEEE)を湿式で酸処理により金属類を溶解させ、物理化学的に分離回収するHydroWEEEプロジェクト⁴⁾が試みられている。また、発展途上国では、安全性の低い簡易な設備でシアン化ナトリウム水溶液による抽出や鉛との溶融による合金化を組み合わせ、金やその他金属を回収している例が報告されている⁵⁾。

また、ブラウン管ガラスから鉛を回収する方法としては、高温で処理する乾式⁶⁻¹¹⁾と、水溶液などを使い室温付近で処理する湿式^{12,13)}で、各種方法が試みられている。乾式法は、800℃以上の高温を必要とするため、熱エネルギー的には湿式に比べ不利であるが、乾式法のうち還元溶融法⁶⁻⁹⁾はガラス相から沈殿により金属相を分離し、直接金属鉛を回収できるというメリットがある。鉛は産業上重要なベースメタルではあるが、金や銅に比べ価格が安いいため、特に日本では残渣ガラスの処理も含めて、ガラスからの鉛回収だけで採算を取るのには難しい。

著者らは、還元溶融法によりブラウン管ファンネルガラスから鉛を回収する過程で、溶融状態にある鉛が、共存する他の金属を取り込み同時に回収できることを見いだした。これは、金鉱石の金の定量に使われる乾式試金法と同じ原理である。ブラウン管ガラスからの鉛回収と電子廃棄物からの金属回収を組み合わせることで、金や銅などの有価金属を含む鉛を得ることができ、鉛回収の採算性が向上することが期待できる。この手法により回収できる金属を調べるために、基礎試験として、実際の廃棄物ではなく模擬ブラウン管ガラスと金属試薬を使った試験を行った^{14,15)}。対象金属としたのは、プリント基板に含まれる金(Au)、銀(Ag)、銅(Cu)、ニッケル(Ni)と液晶パネルに含まれるインジウム(In)である。その結果、Au、Ag、Cu、Niは金属として鉛と合金を作り90%以上回収が可能であったが、Inは回収率が60%程度であり、残りは酸化物としてガラス相に残留するため、回収困難であった。

家電等の廃棄物に含まれるすべての金属について、いろいろな温度、圧力、雰囲気(酸化、還元、塩化等)で実験を行うことが望ましいものの、時間や費用の面から現実的ではない。近年は各種熱力学データの充実により化学反応について化学熱力学の理論計算が行えるようになってきた。反応に関わる条件を指定し、自由エネルギー変化や平衡定数を計算することで、反応が進行するかどうかについて予測ができるようになった。

本研究では、前述の基礎試験で取り扱っていない金属を対象として、還元溶融法による回収可能性を検討した。また、化学熱力学計算によって化学反応の進行の予測を行い、実際の溶融試験の結果と比較して予測の有効性について検討した。

2. プリント基板に含まれる金属

電子製品の廃棄物の代表例として、パソコンのプリント基板(図1)に含まれる成分を分析した結果を紹介する。プリント基板を切断、粗粉碎、凍結粉碎して1mm以下の粉末にしたものを分析試料とした。これを蛍光X線分析法(XRF)により主成分を半定量分析した。微量な成分であり金属回収にとって重要な元素であるAu、Ag、Cu、Niについては、分析試料を王水分解し、ICP発光分光分析法で定量分析を行った。水素(H)、窒素(N)、炭素(C)の分析は高温燃焼法で行った。それらの分析結果を組み合わせたプリント基板の化学組成を表1に示す。



図1 パソコンのプリント基板

表1 パソコンプリント基板粉末物の化学組成¹⁶⁾
(0.5mass% 以上及び回収重要元素)

元素	分析値 (mass%)	分析方法
H	2.1	高温燃焼
C	21	高温燃焼
N	1.2	高温燃焼
O	23	XRF
Al	6.7	XRF
Si	9.9	XRF
Ca	5.5	XRF
Ti	0.20	XRF
Fe	2.3	XRF
Ni	0.42	ICP
Cu	16	ICP
Br	7.9	XRF
Ag	0.085	ICP
Sn	1.1	XRF
Sb	0.52	XRF
Ba	0.58	XRF
Au	0.015	ICP

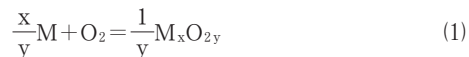
3. 実験方法及び計算手法

本研究では、対象金属元素を、表1に示したプリント基板に含まれる金属元素の内、コンデンサに含まれるバリウム(Ba)、チタン(Ti)、タンタル(Ta)、はんだに含まれるスズ(Sn)に加え、高性能磁石に含まれるジスプロシウム(Dy)とした。これらと、還元剤である炭素(C)、ガラス成分であるケイ素(Si)、ナトリウム(Na)、アルミニウム(Al)、鉛(Pb)について酸化反応における1気圧下での標準自由エネルギー変化を計算した。その上で、対象金属を添加した模擬ガラスの還元溶融試験を行い、添加金属の回収を調べた。

3.1 化学熱力学計算による標準自由エネルギー変化の算出

還元溶融法により各金属が鉛と一緒に回収できるのは、溶融時にその金属が酸化されずに金属として存在している場合である。酸化されて酸化物になっている場合はガラス相に取り込まれるため回収できない。そのため各金属の酸化還元反応を知ることが重要である。

金属をMとして1 molのO₂との酸化還元平衡を一般的に書くと、x, yを整数として、



と表される。

このときの平衡定数Kは、それぞれの活量を[a]として

$$K = \frac{[a_{M_xO_{2y}}]^{\frac{1}{y}}}{[a_M]^{\frac{x}{y}} \cdot [a_{O_2}]} \quad (2)$$

となる。金属と酸化物が純物質だとしてそれぞれの活量を1とし、O₂の活量を分圧を使いp_{O₂}とすると次式となる。

$$K = \frac{1}{p_{O_2}} \quad (3)$$

1気圧の標準状態(右肩付き0で表す)、圧力一定でのギブズの自由エネルギー変化ΔG⁰は、気体定数をR、絶対温度をTとして、次式で表される。

$$\Delta G^0 = -RT \ln K = RT \ln p_{O_2} \quad (4)$$

ギブズの自由エネルギーは、エンタルピー変化をΔH、エントロピー変化をΔSとして、次の関係がある。

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (5)$$

式(5)より、ΔH及びΔSの値がわかれば、ΔGがわかり、それによって酸化還元平衡の平衡定数が求められる。

化学熱力学計算には、熱力学データベースMALT2 for Windows(著作権: MALTグループ, 販売: 科学技術社)を使用した。MALT2には、4931種のおもに無機化合物について、エンタルピー変化(ΔH)、生成ギブズエネルギー変化(ΔG)、298.15℃のエントロピー(S)、比熱(Cp)、相転

移におけるエンタルピー変化(ΔH)のデータが収録されている。任意の化学平衡について各温度での1気圧を標準状態とした、反応の標準エンタルピー変化ΔrH⁰、反応の標準エントロピー変化ΔrS⁰、反応の標準ギブズエネルギー変化ΔrG⁰、平衡定数K_p、ギブズエネルギー関数の変化Δr(GEF)を計算することができる。

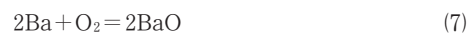
ΔrG⁰と温度Tとの関係は、相変化のない温度域では簡易的に、A, Bを定数として、

$$\Delta rG^0 = A + BT \quad (6)$$

で表され、直線関係がある。

MALT2にはさらに、ギブズエネルギー最小化法による平衡計算を行う計算プログラムgemと、化学ポテンシャル図を構築する計算プログラムCHDが含まれている。本報告では、MALT2によるΔrG⁰(以下ΔG⁰)の計算結果を使って議論する。

対象金属、還元剤、ガラス成分について1 molのO₂との酸化反応の自由エネルギー変化と温度の関係をMALT2により計算した。計算した化学平衡式は次のとおりである。



3.2 供試試料

実ブラウン管ファンネルガラスは微量成分も含めると10種類以上の酸化物で構成されており組成が複雑なため、試験には成分を4酸化物に限定した模擬ガラスを使用した。実際のブラウン管ファンネルガラスと模擬ガラス組成を表2に示す。

本研究の対象とする金属元素のうち、Ta, Dy(和光純薬工業)、Sn(三津和化学薬品)は金属試薬粉末を使用した。TiとBaは、複酸化物であるチタン酸バリウムBaTiO₃(和光純薬工業)を使用した。鉛ガラスを還元し金属鉛を生成するために、還元剤として活性炭C(和光純薬工業)を使用した。

還元溶融によって生成した鉛除去後のガラス融体の粘性を下げ、鉛の沈殿・分離を促進するために減粘剤として炭酸ナトリウムNa₂CO₃(シグマアルドリッチジャパン)を使用した。

表2 ブラウン管ファンネルガラスくずと模擬ガラスの蛍光X線分析値の比較 (1 mass% 以上のみ)

成分	ファンネル ガラス粉末		模擬ガラス
	mass%	mass%	mol %
SiO ₂	49	54	68
Al ₂ O ₃	3.5	4.2	3.1
PbO	22	26	8.7
Na ₂ O	6.3	16	20
K ₂ O	8.4		
MgO	1.6		
CaO	3.8		
SrO	1.5		
BaO	1.8		

3.3 溶融試験

溶融試験は、酸化と還元2条件で行った。原料混合物としては、模擬ガラスを20.0g、Na₂CO₃を10.0g、Ta、Sn、Dy及びBaTiO₃各0.2gを基本とした。酸化溶融の時には、基本の原料混合物を使い、還元溶融では、それに活性炭3.0gを添加して原料混合物とした。反応容器としてアルミナ99.5%容量50mlのるつぼとふたを使用した。

アルミナるつぼに原料混合物を充填し、通気のために隙間を開けてふたを載せ、電気炉中で室温から300℃/hで昇温し、1200℃で1時間保持したのち、逆円錐形状の鉄製の型に流し出し急冷した。

3.4 溶融試験後の試料の評価

試料のガラス相は粉碎後、蛍光X線分析法により化学成分分析を行った。粉碎試料を加圧しペレット状にしたものを測定試料とした。測定には全自動蛍光X線分析装置(リガク製ZSX Primus II)を使用し、標準試料を用いないファンダメンタルパラメータ法によりオーダー分析を行い、原子番号が11(Na)以上の元素について分析結果を酸化物mass%に換算した。結晶相同定は粉末X線回折法により行い、X線回折装置(リガク製Ultima IV)を用い、Cu Kα線、40kV-30mA、スキャン速度2°/min、ステップ0.01°、測定範囲10-70°の条件で測定した。

還元条件の溶融で得られた金属相を切断し、断面を走査型電子顕微鏡(SEM, 日本電子製JSM-6610LA)で観察し、付属のエネルギー分散型X線分析装置(EDS, 日本電子製JED-2300)装置で、電子線微小部分分析を行い、微小部分の成分分析及び元素マッピングを行った。

4. 結果

4.1 化学熱力学計算結果

添加した金属、ガラス成分、Cについて、1 molのO₂と反応した場合の酸化反応の標準自由エネルギー変化ΔG⁰と温度との関係を図2のエリンガム図に示す。図中の線がどの反応を表しているのかを、「還元状態/酸化状態」の対で示した。回収対象とした添加金属は実線で示した。また、模擬ガラスを構成する元素は破線で示し、還元剤であるCとCOについては点線で示した。

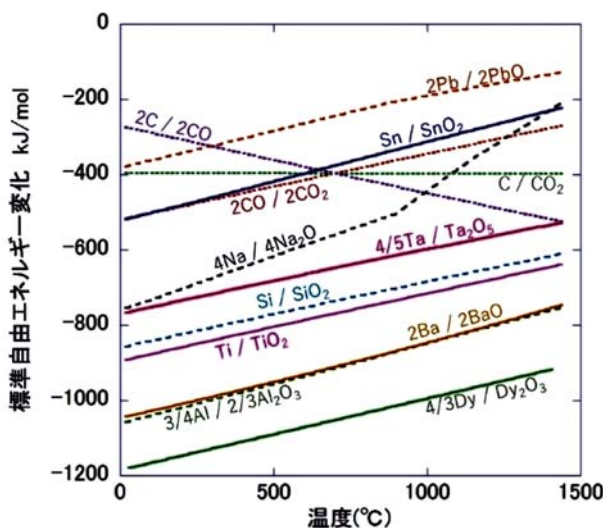


図2 温度と1モルの酸素との酸化反応における標準自由エネルギー変化の関係(エリンガム図)

4.2 溶融試験結果

酸化溶融試験の結果、金属の生成していない逆円錐状のガラス(図3-a)が得られた。同様に、還元溶融試験で得られた試料の写真を図3-bに示す。これにはガラス相に加え、流し出した時に底部になっていた部分に銀色の金属相が見られる。

試料のガラス相を粉碎し蛍光X線分析を行った。分析値と以下の方法で計算した回収率を表3に示す。酸化溶融では、添加した金属は、還元析出、揮発などはしておらず、全量がガラス相に残留している。還元溶融では添加した金属のうち溶融時に金属として存在していた成分は、還元で生成したPbと合金を生成し、ガラス相から除去され、回収することができる。ガラス相の成分のうちSiO₂、Al₂O₃は還元に対して安定であり、溶融試験前後で量が変化しないと考えられる。そのうち、量が多いSiO₂を基準として、ガラス相中の各金属酸化物濃度の変化を回収率として計算した。還元溶融後における金属成分mの回収率E_{m,red}(%)を、酸化溶融後における、各金属成分mの酸化物のガラス相中の濃度をC_{m,ox}(mass%), SiO₂濃度をC_{SiO₂,ox}(mass%), また還元溶融後における各金属成分mの酸化物のガラス相中の濃度

を $C_{m,red}$ (mass%), SiO_2 濃度を $C_{SiO_2,red}$ (mass%) とし、次式により計算した。

$$E_{m,red} = \frac{\frac{C_{m,ox}}{C_{SiO_2,ox}} - \frac{C_{m,red}}{C_{SiO_2,red}}}{\frac{C_{m,ox}}{C_{SiO_2,ox}}} \times 100 \quad (19)$$

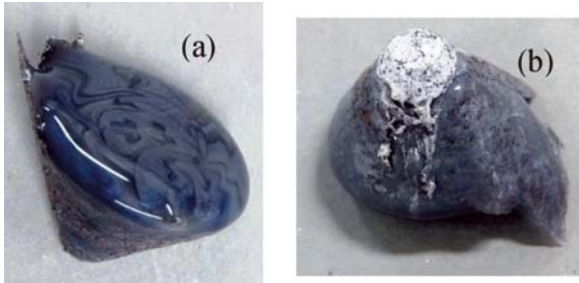


図3 溶融後の試料写真 a: 酸化溶融, b: 還元溶融

表3 溶融後のガラス相の蛍光X線分析値(半定量値)と、各酸化物の回収率

酸化物	分析値(mass%)		回収率 (%)
	酸化溶融	還元溶融	
Na ₂ O	34	41	1.6
Al ₂ O ₃	3.4	4.0	4.0
SiO ₂	40	49	0.00
TiO ₂	0.31	0.33	13.1
SnO ₂	1.0	0.31	74.7
BaO	0.66	0.65	19.6
Dy ₂ O ₃	0.76	1.1	-18.2
Ta ₂ O ₅	1.1	1.4	-3.9
PbO	19	1.7	92.7

ガラス中の PbO は還元され93%が回収された。添加した金属のうち Sn については回収率が75%であった。しかし、Ti, Ba は20%以下で、Dy, Ta については、回収されていなかった。

4.3 還元溶融試料金属相のSEM-EDS分析

還元溶融で得られた試料の金属相を切断し、SEM-EDS分析を行った。元素分析を行ったところ(図4)、Pbの強いピークが検出され、Sn, Cの小さなピークが検出された。しかし、Ti, Ba, Dy, Taのピークが検出されなかったことから、これらは金属相には存在していないといえる。Pb以外のガラス成分であるAl, Si, Naも検出されなかった。

検出されたPbとSnについて元素マッピング(面分析)を行った結果を図5に示す。図の左に示してあるカラーパレットは、元素の濃度を示しており、上部に位置する色で着色された部分ほどその元素の濃度が高い。(白黒印刷では、明るい部分ほど元素の濃度が高い)

この結果により、ほとんどの部分はPbであり、Pbの存在していない部分に粒径数 μm のSn粒子が存在していることがわかった。このことから、回収された金属のほとんどがPbであり、少量のSnと一緒に金属として回収され、Ti, Ba, Dy, Taは回収されなかったといえる。

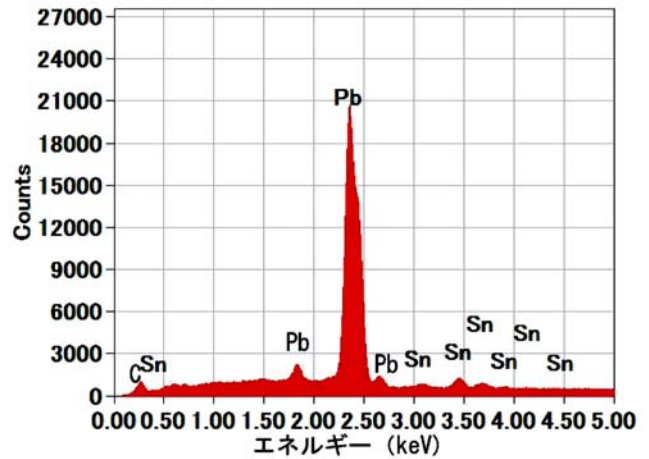


図4 還元溶融で得られた金属相断面のEDSによる元素分析結果

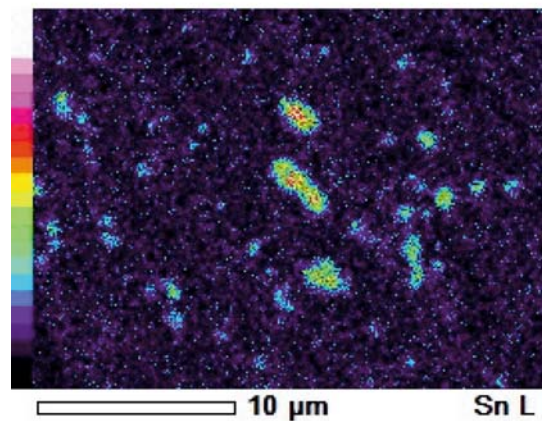
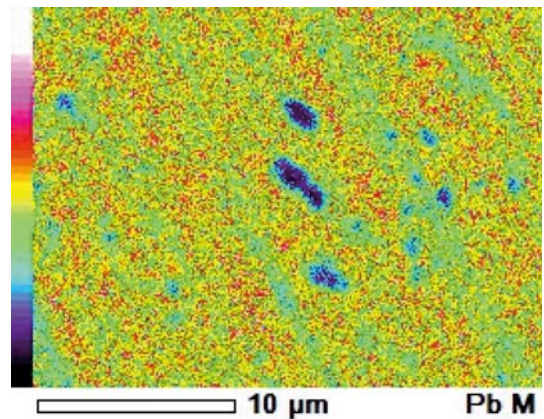


図5 還元条件で得られた金属断面のEDSマッピング結果(上:Pb, 下:Sn)

4.4 ガラス相のX線回折

酸化、還元条件で溶融して得られた試料のガラス相粉砕物のX線回折パターンを図6に示す。酸化条件での溶融試料では、32°付近を中心とするブロードなハローが見られるが、明確なピークが見られず、非晶質であることを示していた。還元条件での溶融試料では、それに加えてPbの明確なピークが見られた。これは還元で生じたPbのうち、一部が沈殿せずに微粒子としてガラスに残ったと考えられる。しかし、その他の金属の結晶は見られなかった。

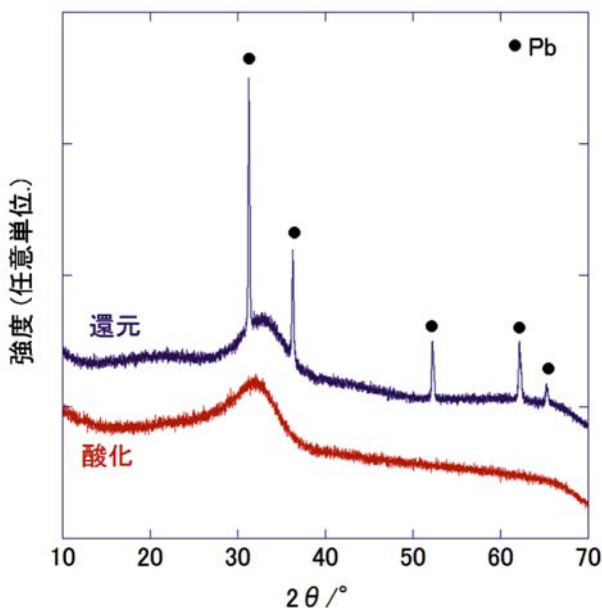


図6 酸化及び還元溶融後のガラス相のX線回折パターン

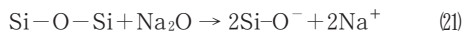
5. 考察

5.1 ガラスの溶融とそれに伴う化学反応

鉛を含む模擬ガラスは、減粘剤であるNa₂CO₃と加熱すると、ガラス中のSiO₂成分とNa₂CO₃が反応し、次式のようにCO₂を発生しながら融体を形成する。



さらに、ガラス中の酸塩基反応により、Na₂OはSiO₂にO²⁻イオンを供与し、Na⁺イオンとなる。



この反応により、共有結合性の高いガラス中のSiO₂のネットワークが切断され、ガラスの粘性が低下し、最終的に生成した金属が沈殿するのに有効である。

ここでCO₂が生成するが、図2のエリンガム図を見ると、700℃以上の高温では、CO₂の生成反応よりも、COの生成反応の方が自由エネルギーの減少が大きい。そのため、CO₂

は、700℃以上の温度で還元剤として添加したCと反応し(Boudouard反応)、次式のように還元されCOが生成する。



この反応は1 molの気体のCO₂から、2 molの気体のCOができる反応なので、エントロピーが増加するため高温でより進行する。

5.2 エリンガム図と金属の酸化還元反応

図2のエリンガム図では、線が下に位置するほど、酸化反応による自由エネルギーの減少が大きいので、化学平衡は酸化側へ進行し、酸化物が安定である。逆に、線が上に位置するものは、酸化物が還元されやすい傾向がある。線が上に位置する酸化物は、線が下に位置する金属により還元することができる。

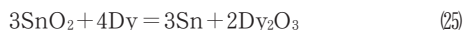
還元剤として添加したものは活性炭Cだけであるが、Na₂CO₃から発生したCO₂とCの反応により生成したCOも還元作用がある。エリンガム図に書かれているCに関わる反応の線は、2C/CO₂、C/CO₂、2CO/2CO₂の3本であるが、1200℃で一番下にあり酸化されやすいのは2C/CO₂であり、この線の上に位置する酸化還元対の酸化物はCにより還元できるということになる。

酸化のエリンガム図を見ると(図2)、2C/2COよりも酸化反応の線が上に位置するものは、2Pb/2PbOとSn/SnO₂のみである。添加したSnが加熱の途中で空気により酸化されSnO₂になったとしても、



の平衡が自発的に右に進行することによりSnは還元される。

しかし、その他の金属、すなわちTa、Ti、Ba、Dyは、酸化反応の線が2C/2COよりも下に位置するために、酸化物が生成した場合、COによって還元することはできない。むしろTa、Ti、Ba、Dyは、ガラス中のPbOや、Snの酸化で生じたSnO₂、系内のCO₂にとって還元剤として働き、自らは酸化物となる。例えば、SnO₂とDyとの酸化還元平衡は



となり、この反応は右へ進行しSnO₂は還元され、Dy₂O₃が生成する。

以上のことから、対象とした金属のうち、鉛ガラスとの還元溶融で回収が可能なのはSnのみであると予測した。

5.3 計算による予測と溶融試験結果の比較

以前の報告^{14,15)}では、回収されたAg、Cu、Niは酸化還元対の線が2CO/2CO₂よりも上に位置しているので、各金属は酸化されずに金属として回収できたと考えられる。Auは

酸化物を形成しないので金属として回収できた。In については、酸化還元対の線が $2\text{CO}/2\text{CO}_2$ とほぼ同じ位置にあり、しかも添加した金属のうちでは一番酸化されやすい金属だったので、酸化物になりやすく、そのため回収率が低かったと考えられる。

今回の試験結果(表3)を見ると、炭素を還元剤として添加した場合、還元されてガラス中から除去されたのは、ガラスの成分である Pb と、添加した金属のうち Sn のみであった。Pb の回収率は93%であった。エリンガム図を見ると、 300°C 以上の温度域において、 $2\text{Pb}/2\text{PbO}$ の線は本研究で扱った元素のうち一番上に位置している。そのため、PbO は C あるいは CO により容易に還元されたと考えられる。Sn/SnO₂ の線は、 $2\text{Pb}/2\text{PbO}$ の線よりは下であるが、 $2\text{CO}/2\text{CO}_2$ の線よりも上に位置するので、SnO₂ は、C あるいは CO により還元される。以前の試験での In と酸化されやすさは同程度であるが、今回はより酸化されやすい金属元素 (Ta, Dy) が共存していたため、還元されたと考えられる。

また、他の金属、Ta, Ti, Ba, Dy は、酸化還元対の線が $2\text{C}/\text{CO}_2$ よりも下に位置するために還元できないと予測され、実際に回収率が低くガラス中に残っていた。さらに X線回折パターンからも、金属としては残っていなかったことがわかった。そのため、酸化物としてガラス中に残っていたと考えられる。

Pb 以外のガラス成分で SiO₂ と Al₂O₃ については、酸化還元対の線が $2\text{C}/\text{CO}_2$ よりも下に位置するために C では還元できないと予測された。金属相の EDS 分析で Si と Al は検出されず、ガラス相の X線回折パターンでも Si と Al は同定されなかったことから、酸化物としてガラス中に残留していると考えられる。

今回の回収試験の結果は、添加金属のうち Sn のみが回収でき、Ta, Ti, Ba, Dy が回収できないと予測した化学熱力学計算の結果と一致していた。前回の試験と合わせ、化学熱力学計算が鉛ガラスを使った還元溶融による金属回収の予測に使えることが確認された。

前回の試験と合わせると、鉛ガラスとの還元溶融法での金属回収は表4のようにまとめられる。

表4 各金属の還元溶融法による回収可能性
(太字は今回の検討結果によるもの)

回収可能	Au, Ag, Cu, Ni, Pb, Sn
回収困難	In, Ti, Ba, Dy, Ta

6. まとめ

都市鉱山からの金属回収と鉛入りブラウン管ファンネルガラスの有効利用及び鉛回収のための検討として、化学熱力学データベースを使った理論計算と、試薬と模擬ガラスによる還元溶融基礎試験を行った。その結果、対象とした Ba, Ti, Ta, Dy, Sn のうち、Sn のみが金属となりスラグと分離して回収されると予測され、実際に Sn のみが回収され、予測の有効性が確認された。

実際の廃棄物は、より多成分で、成分同士の相互作用、さらに活量の変化も起こりうるため反応はより複雑になる。しかし、化学熱力学をベースとした自由エネルギーの計算により、化学平衡について反応の進む方向という基礎的な情報を得ることができる。そのため特に反応速度が大きく化学平衡に達しやすい高温の反応、例えば一般廃棄物の溶融処理などにも適用でき、反応プロセスを構築する上で有用な手段となると考えられる。

謝辞

本研究で使用した X線回折装置は、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。記して感謝いたします。

引用文献

- (一財)家電製品協会：家電リサイクル年次報告書(平成27年度版 第15期)(2016), http://www.aeha.or.jp/recycling_report/pdf/kadennenji27.pdf
- M. Yamashita・S. Matsumoto・T. Akai・H. Sugita・Y. Imoto・T. Komai・H. Sakanakura: Leaching behavior of cathode ray tube (CRT) glasses, *J. Ceram. Soc. Japan*, Vol.122, pp.1020-1027, (2014)
- J X日鉱日石金属株式会社：J X日鉱日石金属におけるレアメタルのリサイクル, http://jsmcwm.or.jp/recycle/10_Hino_JX.pdf
- B. Kopacek: Mobile Hydrometallurgy to Recover Rare and Precious Metals from WEEE, *Proc. Eco Design 2013, 8th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Dec.4-6, Jeju, Korea, (2013) (USB memory)
- A. Terazono・M. Oguchi・A. Yoshida・R. P. Medina・F. C. Ballesteros Jr.: Material recovery and environmental impact by informal e-waste recycling site in the Philippines, M. Matsumoto・K. Masui・S. Fukushige・S. Kondoh (Eds.) *Sustainability through Innovation in Product Life Cycle Design*, Springer,

- 0 pp.197-213, (2016)
- 6) H. Inano: Pb Recovery from the Waste CRT Glass by Reduction Melting Method, *Proc. Eco Design 2009, 6th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Dec.7-9, Sapporo, Japan, (2009) (CD-ROM)
- 7) 稲野浩行・多田達実・岡田敬志・広吉直樹:還元熔融/塩化揮発ハイブリッド法によるブラウン管ガラスからの鉛の分離抽出技術, セラミックス, Vol.47 No.2, pp.96-100, (2012)
- 8) T. Okada・H. Inano・N. Hiroyoshi: Recovery and immobilization of lead in cathode ray tube funnel glass by a combination of reductive and oxidative melting processes, *J. Soc. Inf. Display*, Vol.20, 508-516, (2012)
- 9) H. Inano・T. Tada・T. Okada・N. Hiroyoshi: Recycling Technology for Waste CRT Glass, *Proc. Eco Design 2013, 8th Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Dec.4-6, Jeju, Korea, (2013) (USB memory).
- 10) G. Grause・N. Yamamoto・T. Kameda・T. Yoshioka: Removal of lead from cathode ray tube funnel glass by chloride volatilization, *Int.J. Environ. Soc. Technol.*, Vol.11, pp.959-966, (2014)
- 11) A. Erzat and F.Zhang: Detoxification effect of chlorination procedure on waste lead glass, *J. Mater. Cycle. Waste Manag.*, Vol.16, pp.623-628, (2014)
- 12) 中村崇: ブラウン管用ガラスのカレットリサイクルの現状と課題, セラミックス, Vol.47, No. 2, pp.86-89, (2012)
- 13) R. Sasai・H. Kubo・M. Kamiya・H. Itoh: Development of an Eco-Friendly Material Recycling Process for Spent Lead Glass Using a Mechanochemical Process and Na₂EDTA Reagent, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.42, pp. 4159-4164, (2008).
- 14) Hiroyuki Inano・K. Tomita・T. Tada・N. Hiroyoshi: Recovery of Metals from E-waste Mediated by Molten CRT Lead Glass, M. Matsumoto et. al. (Eds.) *Sustainability through Innovation in Product Life Cycle Design*, Springer, pp.525-536, (2016).
- 15) 稲野浩行・富田恵一・多田達実: ブラウン管ガラスを利用した都市鉱山からの金属回収, 技術移転フォーラム 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成果発表会プログラム・発表要旨, pp.27, (2015)<http://www.iri.hro.or.jp/jyoho/announcement/happyou2015.pdf>
- 16) 稲野浩行: 乾式試金法を基にして鉛ガラス媒介とした廃棄物からの各種金属の回収方法, 平成26年度環境研究総合推進費補助金総合研究報告書 (3K-123019), (2015), https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/h26/pdf/3K123019.pdf

「食」の製品・サービスアイデア創出支援手法の開発

万城目 聡, 日高 青志, 印南 小冬

Development of Product & Service Idea Creation Support Method for Food-related Business

Akira MANJOME, Seiji HIDAKA, Kofuyu INNAMI

抄 録

食関連事業者が魅力的な製品・サービス開発を行うには、顧客視点のアイデア創出が欠かせない。そこで食関連事業者をはじめ、自治体、6次産業化コーディネーターなどの活用を想定した、顧客体験に基づく製品・サービスアイデア創出手法（f-UX手法）を開発した。食関連事業者とのケーススタディでf-UX手法を試行した結果、一般的なアイデア創出手法のブレインストーミングに比べて、アイデアの創出量、顧客視点に立った発想、参加者のモチベーション向上、において有効性を確認することができた。また、f-UX手法の実施を支援するツール類について試作提案を行った。

キーワード：食関連事業者，顧客体験，ユーザエクスペリエンスデザイン，アイデア創出，ワークショップ

Abstract

Creating ideas from the customer's point of view is essential for food-related businesses to develop appealing products and services. Therefore, we developed a product and service idea creation method based on user experience design (f-UX method) assuming use of food-related business entity, department of local governments or sixth sector industrialization coordinator etc.

As a result of trying the f-UX method with a case study (food manufacturers), we were able to confirm the effectiveness in terms of the amount of ideas created, ideas from the customer's point of view, improvement of participants motivation, compared to idea creation without f-UX method (simple brainstorming). We also made trial proposals on tools that support implementation of the f-UX method.

KEY-WORDS：Food-related business，Customer Experience，User Experience Design，Idea development，Workshop

1. はじめに

食に対する顧客ニーズの多様化や、市場競争の激化を背景に、道内食関連事業者等から「商品の素材や食味には自信があるが、思ったほど売れない。」「競合他社との差別化を図らなければならないが、そのために具体的にどんな取り組みをすべきか分からない。」といった声が聞かれる。

このような課題を抱える食関連事業者にとって、もちろん素材や食味の優位性、独自性の追求は基本的な取り組みであり、欠かすことはできない。しかし、商品素材や製法の工夫の範囲では十分な差別化が図れず、結果的に競合他社と似たような商品になってしまうケースが少なくない。このような

モノ中心のアプローチから脱却するための考え方として、「顧客体験視点の製品・サービス開発」がある。これは、顧客が製品やサービスを通じて得られる体験の喜びや驚き、すなわち体験の魅力化を目的とした新しい製品・サービス開発の視点であり、これまでの技術競争や価格競争ではなく、顧客の体験価値によって競争優位性を生み出すためのアプローチとして注目が高まっている。

この顧客体験視点の製品・サービス開発の実践においては、特に企画段階で魅力的な顧客体験を描くための、アイデア創出過程が非常に重要となる。アイデア創出の手法としては、数名のグループでアイデア創出を行う「ブレインストーミング」が一般的である（図1）。しかし、ブレインストー

事業名：経常研究

課題名：顧客体験に基づく食関連製品・サービスアイデア創出支援手法の開発

ミングは参加者間の相乗効果によって発想を誘発し、限られた時間でアイデアの母数を増やすことを主目的とした手法であり、顧客体験視点のアイデア創出のために特に工夫されていない。

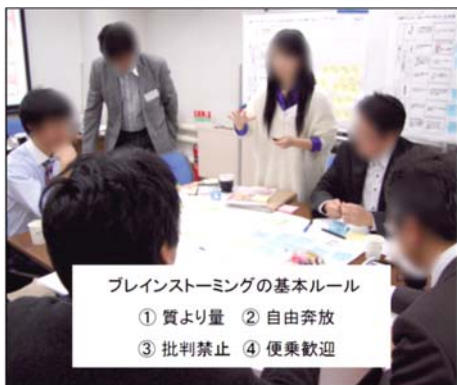


図1 ブレインストーミングによるアイデア創出

そこで本研究では、顧客体験視点の製品・サービスアイデア創出を目的とした効果的なブレインストーミングを実施するための手法提案を行う。具体的には、これまでのブレインストーミング手法に加え、IT関連分野で実践が進みつつある「顧客体験に基づいた製品・サービス開発～ユーザエクスペリエンスデザイン」の考え方や手法を取り入れ、食関連事業者、自治体、6次産業化コーディネーターなども活用できる「顧客体験に基づく製品・サービスアイデア創出手法」を開発する。

2. ユーザエクスペリエンスデザイン

顧客体験に基づいた製品・サービス開発の取り組みの参考として、ユーザエクスペリエンスデザイン関連の文献や、企業などにおけるユーザエクスペリエンスデザインの取り組みについて調査を行った。

2.1 ユーザエクスペリエンスデザインとは

ユーザエクスペリエンス (User Experience) という概念は、IT業界におけるコンピュータを応用したインタラクティブシステムに対する人間中心設計活動の指針 (ISO 13407, 1999年制定、現在はISO 9241-210に変更) が発端になっている。当初は、コンピュータを用いた対話型製品の「使いやすさの向上」に主眼が置かれていたが、ISO 13407の評価指標である「効果・効率・満足度」の中で、特に満足度の向上の観点から、「ユーザのやる気を醸成する魅力的なシステム・機器」の重要性が高まり、企業や大学において様々な研究開発や実践活動が試みられてきた。このことが今日のユーザエクスペリエンスデザインの基礎になっている。

ユーザエクスペリエンスは「製品やサービスの利用を通じ

て得られる体験の総称」であり、製品やサービスの利用に関わるあらゆる要素を含んだ幅広い概念といえる。ISO 9241-210ではユーザエクスペリエンスは「製品・サービスの使用前、使用中、使用后という時間軸の中で起こるユーザの感情、信念、嗜好、知覚、生理学的・心理学的な反応、態度のすべてを含む。」と定義されており、これらを捉えた上で製品・サービス開発を行うことが推奨されている。

ユーザエクスペリエンスという用語は、人の体験の内容や、その体験の結果得られる状態を表わす。これに対してユーザエクスペリエンスデザインという用語は、製品・サービスを通じてユーザに魅力的な体験を提供するための活動全般を指す。

2.2 ユーザエクスペリエンスデザインの動向

ユーザエクスペリエンスデザインは、IT業界において普及している考え方だが、昨今ではIT業界に留まらず、幅広くサービス業 (宿泊業、金融業、レジャー業、など) においても重要性が認識され始めている。特に海外では食関連サービス (レストラン、コーヒーショップ、スーパーマーケット、フードデリバリーサービスなど) への導入事例も見られ、成功事例が生まれている。

IT業界で取り組みが進むユーザエクスペリエンスデザインは、HCD (Human Centered Design: 人間中心設計) の研究によって開発プロセスが標準化され、プロセスごとの取り組みが明確になっているが、サービス業のユーザエクスペリエンスデザイン事例を見ると、「望ましい顧客体験の実現」を目的としてHCDのプロセスや手法を土台としながら、それらを柔軟に取り入れている傾向がある (図2)。

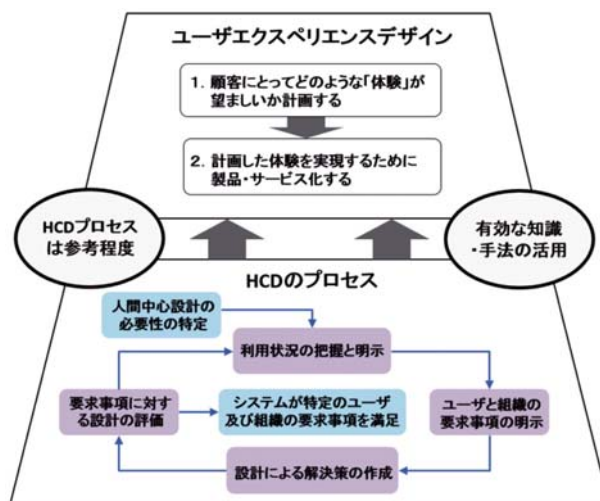


図2 サービス業のユーザエクスペリエンスデザイン

プロジェクトメンバーの条件について見ると、IT業界のHCDでは基本的にリサーチャー、ITエンジニア、インターフェースデザイナーなど、専門スキル保有者を前提としている。一方、サービス業を中心としたユーザエクスペリエンス

デザインでは、プロジェクト内容について意思決定ができるステークホルダーや、顧客との接触経験が豊富なスタッフの参加など、HCD人材のようなスキル保有者に限定しないプロジェクトチーム構成が有効とされている¹⁾。

HCDではスキル保有者による専門的なアプローチ（人間工学やユーザビリティなどの知識・手法の駆使など）が中心だが、ユーザエクスペリエンスデザインではユーザ視点の解決策創出に有効な活動として、必ずしも専門的スキルを持たないチームによるグループワークやワークショップ、あるいは比較的簡易な手法の活用など、より現実的で取り組みやすいものとなっている。このことは本研究のターゲットである道内食関連事業者において有効と考える。

2.3 今回参考とするプロセス・手法

現状ではユーザエクスペリエンスデザインのプロセスは確立しておらず、プロジェクトの内容、人材、スケジュール、予算などの条件によって、HCDのプロセスや手法を参考に組み立てることが推奨されている。その一例として図3に示すようなプロセスと手法群がある²⁾。

本研究の対象となる顧客体験視点の製品・サービスアイデア創出のためのステップはこの図の①～④であり、⑤～⑦は④までの過程で創出したコンセプト案の有効性検証や実装に向けたステップとなる。食関連事業者が取り組む場合、⑤～⑦のステップは例えば「食品の試作」や「店舗サービスの試験的な改善」など日常業務の中で試行、実行できる場合も多く、必ずしも図3にあるようなIT業界で実践されている手法を用いる必要はない。

基本的なプロセス	主な手法
① 顧客体験の把握	観察/エスノグラフィ/インタビュー/フォトエッセイ/日記法など
② 顧客体験のモデル化と体験価値の探索	上位下位分析/KJ法/ベルソナ/顧客体験マップ/問題シナリオなど
③ 製品・サービスアイデア発想・コンセプト案作成	ブレインストーミング/バリュেশナリオ/ストーリーテリングなど
④ 顧客体験の視覚化	顧客体験マップ/ストーリーボード/体験スケッチなど
⑤ プロトタイプの反復による製品・サービスの詳細化	ペーパープロトタイプ/コンセプトテスト/ウォークスルー評価など
⑥ 実装レベルの試作による顧客体験の評価	フィールドテスト/ヒューリスティック評価/認知的ウォークスルーなど
⑦ 体験価値の伝達・指針の作成	コンセプトブック/デザインガイドライン/クレドなど

※「UXデザインの教科書(安藤昌也 著)」P-108 図2.41
「UXデザインプロセスと主なデザイン手法」をアレンジ

図3 ユーザエクスペリエンスデザインのプロセス・手法

今回、上記の手法群の中で、顧客体験視点の製品・サービスアイデア創出に有効な手法として「顧客体験マップ」に着目した。これは、顧客体験マップが様々な調査・分析手法やアイデア発想手法と組み合わせる事が可能なフレキシブ

ルかつ基本的な手法であること。また、手法の学習に要する時間や負担を減らし、道内食関連事業者が取り組みやすいプログラムとするためである。

2.4 顧客体験マップ

顧客体験マップは、図3の「②顧客体験のモデル化」や「④顧客体験の視覚化」のステップで用いられているように、顧客体験を分解・整理し、分かりやすく視覚化するための手法の一つである。顧客体験マップの作成は、次の2つのステップで行う(図4)。

- ① 顧客調査：顧客が製品・サービスを通じてどんな体験をしているか、フィールド観察・インタビュー・アンケートなどの調査によってデータを収集する。
- ② 時間軸/体験軸でマッピング：①で得られた顧客体験情報(インタビューメモ、発言内容、写真、イラストなど)をインプットとして、「時間軸」と「体験軸」でマッピングし、1枚のマップにまとめる。

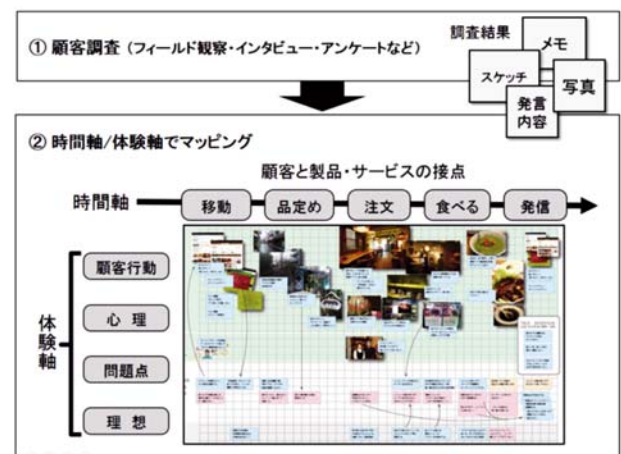


図4 顧客体験マップの作成ステップ

顧客体験マップの横軸(時間軸)は、調査対象・範囲に応じて、その都度最適な軸項目を設定する必要がある。図4は飲食店における顧客体験マップ作成例を示したものであり、飲食店に関する顧客行動を想定した軸項目として「移動→品定め→注文→食べる→発信(SNSなど)」を用いている。

一方、縦軸の体験軸は基本的に共通項目となる。軸項目としては「顧客行動：場面ごとの具体的な行動の記述や描画」、「心理：その場面の顧客の心理状態や気分」、「問題点：その場面の顕在化している、または潜在的な問題点」、「理想：その場面の顧客にとって理想的な状況」、の4つが用いられることが多いが、必要に応じて変えることもできる。

顧客体験マップ上で様々な顧客体験情報が整理・統合され、視覚的に表現されることによって、例えば「顧客体験の問題点がどこにあるのか?」「何が原因でその問題点が起きているのか?」など、アイデア創出に有効な分析が俯瞰的に行える。また、顧客体験マップを数名のグループワークで作成することによって、顧客体

験に対する深い理解と、メンバー間の情報共有が図られ、より効果的なアイデア発想が期待できる。

3. アイディア創出手法

3.1 アイディア創出手法の検討

今回、手法の主な実施対象が道内食関連事業者であることを踏まえ、提案するアイデア創出手法の条件として、下記①～④を設定した。

- ① 小規模事業者（少人数，3人～5人程度）が活用できる。
- ② 業務内容を問わず様々な食関連事業者が活用できる。
- ③ アイディア創出ワークの経験が少ない初心者でも活用できる。
- ④ ユーザエクスペリエンスデザインに関する専門的な知識を必要としない。

これらの条件に対してブレインストーミングによる複数名によるアイデア創出は基本的かつ有効な手法と言えるが、留意すべき点としては次が挙げられる。

- ① ブレインストーミングのテーマに関して、参加者の意識やテーマに関する知識の量などは様々である。
- ② 参加メンバー間でブレインストーミングのテーマや目的をきちんと共有していなければアイデア創出の相乗効果は期待できない。
- ③ アイディアを効率的にアウトプットするためには、ブレインストーミングのテーマに関して何らかの情報をインプットする必要がある。

以上を踏まえ、ブレインストーミングに顧客体験マップを組み合わせたアイデア創出ワークを検討し、これを「f-UX手法（food-User eXperience手法）」とした（図5）。

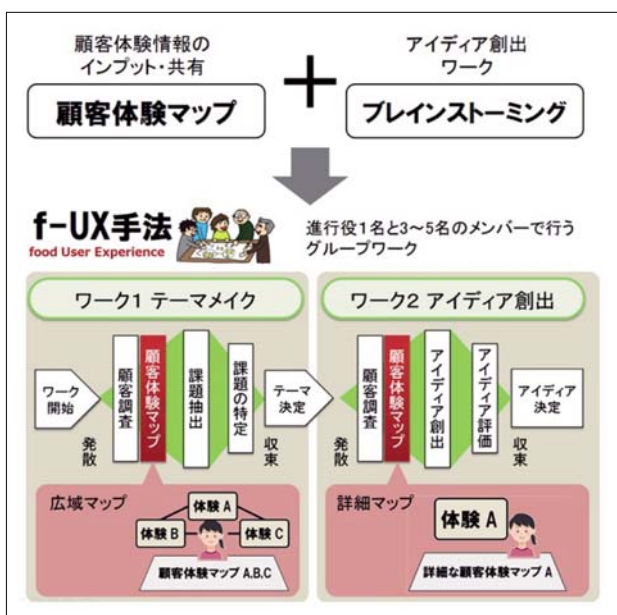


図5 f-UX手法の概要

【f-UX手法の概要】

- ① 「テーマメイク」から「アイデア創出・決定」までの一連のワークプロセス。
- ② 進行役1名と3～5名の参加者で行うグループワーク。
- ③ 大きく「ワーク1：テーマメイク」「ワーク2：アイデア創出」の2つのステップで構成される。
- ④ 2つのステップを通して顧客体験マップを用いる。
- ⑤ 食関連分野のためのアイデア創出支援ツールを用いる。

アイデア創出ワークの前に、テーマメイクのステップを取り入れたのは、顧客体験マップの作成を通じて参加者に顧客体験情報をインプットしながら知識量を揃え、さらにテーマや目的の共通認識化を図ることで、先に挙げたブレインストーミングの留意点に対応するねらいがある。

3.2 アイディア創出手法の詳細

3.2.1 「ワーク1 テーマメイク」の流れ

- 1) アイディア創出ワークを行うメンバーを集める（進行役1名と3～5名の参加者）。以下の項目は、基本的に進行役が中心となって進める。
- 2) 自社の製品・サービスについてグループでディスカッションしながら、課題を複数リストアップする。類似の課題はグルーピングしてまとめる。
- 3) 2) でまとめた課題群の中から特に重要な課題、または顧客との関わりが強い課題を選定する。顧客体験マップを作成する手間を考慮し、選定課題数は5つ以内を目安とする。

【2）～3）所要時間目安：60分】

- 4) 3) で選定した課題について、顧客体験マップ（図4）のフレームを作成する。課題ごとのターゲット顧客像を明確化し、顧客体験マップの横軸（時間軸）を検討する。縦軸には体験軸の項目として「顧客行動、心理、問題点、理想」の4つを用いる。
- 5) 4) で作成した顧客体験マップのフレームを眺め、既に分かっていること、利用可能な調査データなどがある場合は、それらの情報をマッピングする（発言内容、メモ、写真、イラストなど）。さらに情報の不足箇所や確認が必要な箇所は、顧客調査（フィールド観察、インタビュー、アンケートなど）を実施し、その結果をマップに反映させることが望ましい。

【4）～5）所要時間目安：40～60分/顧客体験マップ（顧客調査所要時間は除く）】

- 6) 3) の課題群全てについて、4)～5) のステップを行い、顧客体験マップをまとめる（複数課題の顧客体験マップ群を「広域マップ」と呼ぶ）。

7) 「広域マップ」を俯瞰し、マップに含まれる問題の大きさや解決すべき優先順位などを考慮し、グループメンバーの総意のもと、アイデア創出ワークのテーマを決定する。

【(6)～7) 所要時間目安：60分】

3.2.2 「ワーク2 アイデア創出」の流れ

8) 7) で決定したアイデア創出を行うテーマについて、顧客体験マップを精査する。基本的にはテーマメイクで作成した顧客体験マップを流用できるが、必要に応じて追加の顧客調査を行い、より詳しい顧客体験マップ（詳細マップ）としてまとめる。

【(8) 所要時間目安：60分（顧客調査所要時間は除く）】

9) ワーク参加メンバー全員で「詳細マップ」を俯瞰しながら、マップ上に「顧客体験の問題点」や「顧客体験の理想状態」について推察を行い、メモを加える。

10) 9) のメモをヒントに問題点を克服、理想状態を実現するためのアイデアを考え、マップ上にアイデアメモを加えてゆく（図6）。この時、ブレインストーミングの基本ルールに従い、アイデアの実現性は考慮せずにアイデア数を増やすことを心がける。他メンバーのアイデアを参考に積極的に発想を広げてアイデアをアレンジしたり新たなアイデアを追加する。

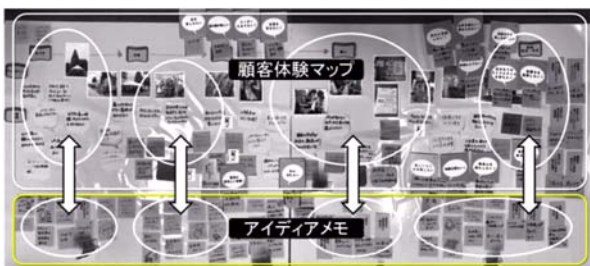


図6 詳細マップ上にアイデアメモを追加

11) 10) である程度アイデア数が出せたら、アイデア内容を具体化して分かりやすくするために、顧客体験マップとは別に用意した「アイデア展開シート」にまとめる（図7）。アイデア展開シートは一つのアイデアで1枚とし、「アイデアタイトル」、「アイデア概要（簡条書き）」の他、アイデアの実現による「顧客体験の変化・効果」について必ず記載する。顧客体験の変化・効果を明確にすることで、アイデアの有効性を評価しやすくなる。

【(10)～11) 所要時間目安：90～120分】



図7 アイデア展開シート

12) 「アイデア展開シート」の記入が全て終わったら、アイデア発案者が作成したシートに沿ってアイデアの概要を説明し、メンバー間でアイデア内容を共有する。この時点でさらにアイデアのアレンジ、追加は行っても良いが、批判は避ける。

13) 12) までに出された全てのアイデアを対象に、ワーク参加メンバー全員で主観評価を行い、アイデアを絞る。アイデア評価の指標には「顧客体験の魅力・効果」「アイデア実現のモチベーション」を用い、簡単な2次元マップをつくる（図8）。このマップ上に全てのアイデアを配置し、第1象限にある顧客体験の魅力・効果とアイデア実現のモチベーションの両方が高評価のアイデアから優先的に選定していく。アイデア数が多すぎて絞り切れない場合はこのステップを繰り返して5～10案を目安に数を減らす。

14) 13) で選定されたアイデアについて実現性や有効性の検証を行い、事業化を検討する担当者を決める。【(12)～14) 所要時間目安：60分】



図8 簡易な2次元マップ評価によるアイデアの選定

3.2.3 アイデア創出支援ツール

アイデア創出活動をより活性化することを目的として、様々なアイデア発想支援法が提案されている。そこで、f-

UX手法においても、顧客体験マップを活用したアイデア創出と組み合わせやすい手法である「オズボーンのチェックリスト」のような強制発想法を取り入れることとした。

オズボーンのチェックリストは「サイズを変えてみたら?」「何かを代用してみたら?」などの汎用的な9つの質問形式になっており、これらを参照することで視点を変え、強制的にアイデア発想を行うものである。このチェックリストは、特にモノの形態・機能・意味などを変えることで新たなモノを生み出すことに優れており、主に製品アイデアの創出に効果を発揮する。一方、本手法で必要となる顧客体験視点によるモノ発想の促進や、コトによる顧客体験そのもののアイデア発想に対する効果はあまり期待できない。

そこで、ユーザエクスペリエンスデザインの手法の中で、顧客体験視点のアイデア発想に有効とされる、価値分析法や上位・下位分析法²⁾を用いて、顧客体験の上位にある「基本的な顧客価値」をカード化したもの(マインドカード)を独自に作成し、強制発想法のツールとして試行することとした(図9)。

マインドカードで用いた顧客価値は、食関連事業者の既存製品・サービスの成功事例(道内外数社)を対象に価値分析法及び上位下位分析法で「顧客の本質的な要求価値」や「上位ニーズ」を分析し、抽出された代表的な顧客価値を20種類にまとめたものである。マインドカードを用いることによって、オズボーンのチェックリストのようなモノ発想思考から切り離され、顧客が主体となった様々な体験のアイデア発想を促すことが期待できる。

またオズボーンのチェックリストについても、モノ視点のアイデア創出支援ツールとしてマインドカードと併用することとした(アレンジカード)。



図9 マインドカード試作

4. ケーススタディによるf-UX手法の試行

f-UX手法の有効性を確認するために、食関連事業者(パン製造・販売業、以下K社)の協力のもと、f-UX手法を活用したアイデア創出ワークを2回試行した。

参加者: K社従業員3名(女性2名, 男性1名)
ファシリテーター: 筆者(工業試験場職員1名)

4.1 f-UX手法の試行①

f-UX手法の効果を確認するため、あらかじめ用意した同一のテーマについてf-UX手法を用いた場合と、用いない場合のアイデア創出ワーク(図5の「ワーク2: アイデア創出」)を試験的に実施し、その結果を比較した。

最初にf-UX手法を用いずに、「K社の店舗販売における顧客満足度を高める」ためのアイデア創出ワークとして、K社従業員3名に60分間のブレインストーミングを行ってもらった。

次に同じ3名に対して顧客体験マップの目的と作成方法について説明を行い、各自業務時間の中で顧客調査(主に店舗内での観察や簡単なヒアリング)を行ってもらい、後日この3名で60分間かけて顧客体験マップを作成してもらった。

この顧客体験マップと、発想支援ツール(マインドカード・アレンジカード)を用いたブレインストーミング(60分間)を行った結果と、先のf-UX手法を用いないブレインストーミングの結果を比較した(表1)。

その結果、定性的ではあるがf-UX手法を用いることで、アイデア総出量を増やせることはもちろん、幅広い視点からの発想や顧客体験視点の発想が促され、メンバー間の相乗効果によるアイデアの発展や、新アイデアの追加などが期待できることが分かった。

表1 アイデア創出手法比較

	f-UX手法なし	f-UX手法あり
顧客体験調査	なし	各自実施
顧客体験マップ作成	なし	60分
アイデア創出時間	60分	60分
創出したアイデア数	26案	さらに46案追加
アイデア内容の広がり	・狭い ・購入場面中心	・広い ・購入前→購入中 →購入後の視点
顧客体験の提案	・ほとんど無し ・製品アイデア中心	・多い ・顧客行動を促す アイデア
メンバーの相乗効果	ほとんど見られない	多く見られる

f-UX手法はブレインストーミングによるアイデア創出時間の他に、顧客調査や顧客体験マップ作成に時間をかける必要があるため、ワーク時間だけ見れば効率が良い手法とは言えないが、本研究のねらいである魅力的な顧客体験のため

のアイデア創出という点では効果的な手法であることが分かった。

また、f-UX手法を用いないブレインストーミングでも一定量のアイデアが創出できるが、上記の試行では時間の経過と共にアイデア創出のペースが極端に落ちる傾向が見られた。一方、f-UX手法を用いた場合は60分間コンスタントにアイデア創出が行われた。これはf-UX手法を用いない場合、アイデア創出に必要なインプット情報が無く、参加メンバー個人が持っている情報に依存すること、また顧客体験情報の共有が無く、メンバー間の相乗効果が起こりにくいたことが原因で、短時間でアイデア発想量の限界に至ってしまうためと考える。

発想支援カード（マインドカード・アレンジカード）は、顧客体験マップと併用して、「いつでも自由に利用できる」こととしたが、ケーススタディの中では自発的にカードを利用する場面はあまり見られなかった。また、マインドカードについては「カードを見て、逆にアイデアが出にくくなった。」という声が聞かれ、アイデア創出のペースが落ちてしまう場面が見られた（図10）。

このため、カードの記載内容やカードを使用するタイミングの工夫、あるいはカードをより気軽に活用できるルールの検討、などの視点から改良が必要であると感じた。



図10 マインドカードを使った強制発想の試行

4.2 f-UX手法の実施支援ツール試作

4.1節の経過を踏まえ、f-UX手法の利便性や効果を高めるために、実施支援ツールを試作開発した(図11)。

- ① 顧客体験マップツール：「マップラベル（食関連の顧客体験場面のラベル）」、「ペルソナさん（ターゲット顧客の人形）」
- ② アイデア発想支援カード：「マインドカード」、「アレンジカード（オズボーンのチェックリスト）」
- ③ アイデア記述・評価ツール：「アイデア展開シート」、「アイデア評価マーカー」



図11 f-UX手法支援ツール試作

4.3 f-UX手法の試行②

4.3.1 具体的な試行内容

次にK社の実課題を対象として、f-UX手法の実践的な活用効果を把握するためにf-UX手法全体を試行した（図12）。

<ワーク1>【所要時間：2時間×2日間】

K社が抱える様々な課題群の中から、毎年夏に開催しているパンの即売イベント「パン祭り」(図13)の活性化をアイデア創出のテーマとして選定した。

<ワーク2>【所要時間：2時間×2日間】

「パン祭り」の活性化のためのアイデア創出ワークを実施した。

この他に、顧客体験マップ作成のためパン祭り会場においてフィールド調査（会場の観察、アンケート）を実施した（所要時間3時間）。K社において「パン祭り」は地域の様々な顧客と接する重要なイベントであるという認識の一方、これまでは商品のディスカウント販売が中心で特に顧客視点での工夫は行っていなかった。

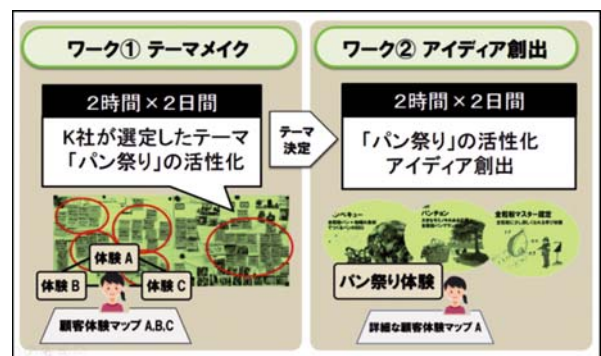


図12 K社ケーススタディの概要



図13 K社が選定したテーマ「パン祭り」

4.3.2 試行結果と考察

今回、f-UX手法のワーク1の実施によって、「パン祭り」の課題を再確認し、ワーク参加者間で製品・サービスの両面から魅力的なイベントを目指す、という共通認識化が図られた。

ワーク2では、実際のパン祭り会場で顧客調査（会場の観察と写真撮影、来場者へのアンケート）を実施し、得られた情報を顧客体験マップとしてまとめた。このことによって、パン祭りを中心とした顧客体験の全体像を明確に把握するとともに、アンケート結果から、どのような顧客がパン祭りのどんな部分にどのような不満を感じているのか、具体的な問題として初めて認識することができた。

4.1節の経過を踏まえ、顧客体験マップの作成においては、アイデア創出のヒントをできるだけ豊富に、視覚的に活用するため、例えばパン祭りの顧客を常に意識させる「人形」の配置や、アンケートで得られた顧客の声が一目で分かるように、「吹き出し型の付箋」を用いるなどの工夫を行った(図14)。



図14 顧客体験マップの視覚効果の工夫

また、発想支援カードの運用については、最初はカードを使用せずに可能な限りアイデア創出を行わせ、ある程度作業が進んだ段階で進行役の判断でカードを用いた短時間の強制発想を挟むこととした。

具体的には、各メンバーに6～7枚のカードをランダムに配り、10分間だけカードを用いた強制発想を行わせた。強制発想の時間を短くすることで、特定のカード内容にとらわれることなく、発想しやすいカードだけを用いてスピーディにアイデア数を増やせることを確認した。

2時間程度のブレインストーミングで、100以上のアイデアが出されたが、この中から有効なアイデアを抽出するために、図8で示した「顧客体験の魅力・効果」「アイデア実現のモチベーション」の2つの指標で簡易評価を用い、20案をアイデア展開シートにまとめた。次に発案者がアイデア展開シートを用いてアイデア内容を説明し、メンバー間で共有を行い、さらにアイデアの追加やアレンジを加えた(図15)。



図15「アイデア展開シート」を用いたアイデア共有



図16 ケーススタディで創出したアイデア事例

今回のケーススタディでは、最終的に「パン祭り」を活性化することを目的として、顧客体験視点を生かした製品・サービスアイデア群を創出することができた（図16）。

特にf-UX手法の効果として、顧客体験の時間軸に沿って幅広い視点からアイデアをまんべんなく創出できたこと、顧客の驚きや喜びを意識した魅力的な顧客体験を提供するためのアイデアを創出できたことが挙げられる。

4.3.3 f-UX手法の評価

f-UX手法の試行後、K社の3名にワーク内容に関する振り返りのディスカッションを行ってもらった。

その結果、「ワークを進める過程で顧客体験視点の考え方や、アイデア創出の方法が分かった。」「f-UX手法自体の分かりにくさや難しさは感じなかった。」という評価が得られ、当初の目的である小規模事業者や、アイデア創出ワークの経験が少ない初心者による活用が十分可能であることを確認できた。

また、「リアリティが感じられるアイデアが出せた。」「実現してみたいと思えるアイデアが出せた。」などの評価も得られ、アイデア実現に対する発想者のモチベーションの高さが伺われた。これは顧客体験マップを取り入れたことによって、アイデア創出が単なる思い付きではなく、アイデア発想の背景や理由を顧客の視点でしっかり検討できているためと考える。

通常のブレインストーミングではアイデア数を稼ぐことが目的になってしまい、その後のアイデアの実施に向けてモチベーションが続かない、といった課題が指摘されている。この点からf-UX手法は、アイデアの実現段階においても有効性が期待できる。このことについては今後ケーススタディを通じて検証を行いたいと考えている。

5. おわりに

食関連事業者などを対象とした顧客体験に基づく製品・サービスアイデア創出手法（f-UX手法）を開発し、ケーススタディを通じてその有効性を確認した。今後はより効果的なワークの進行方法や、発想支援ツールの有効活用方法などについて、実践活用を通じて改善を進めたい。

また、f-UX手法を道内の食関連プロジェクトに普及・展開するためには、f-UX手法の活用方法を理解した進行役が必要となる。このため、食関連事業者、自治体、6次産業コーディネーターなどへのPRや、ワークショップによる体験会などの実施も重要な活動になると考える。

引用文献

- 1) Marc Stickdorn, Jakob Schneider 「THIS IS SERVICE DESIGN THINKING.」(2011)
- 2) 安藤昌也, 書籍「UXデザインの教科書」(2016)

溶接作業における熟練技能定量化手法の研究

神生 直敏, 櫻庭 洋平, 畑沢 賢一, 万城目 聡

Study on Quantification Technique of Highly Skill in Welding Work

Naotoshi KAMIO, Yohei SAKURABA, Kenichi HATAZAWA, Akira MANJOME

抄 録

溶接技能の習得に必要な、材料、溶接機調整、溶接状況、手さばき具合などの各種判断情報は、単純に説明できるものから、説明しにくいものまで、幅広く存在する。熟練者が非熟練者に溶接技能を説明するには、高度な説明能力が求められ、技能伝承が進まない要因となっている。

そこで、熟練者の溶接技能を客観的に捉えるために、溶接作業を階層分析法（AHP）などを用いて分析することで、溶接品質の向上につながる重要項目を抽出し、さらに抽出された項目への重要な対策とされた溶接トーチの動きを6軸センサや視線計測装置で計測した。また、得られた知見をもとに、携帯端末で動作し、2つのツールで構成される溶接作業標準ガイドを作成した。

キーワード：溶接，技能伝承，階層分析法(AHP)，視線計測

Abstract

For learning the welding skills, various judgment information exists from simple explanation to complicated explanation, such as material, adjustment of welding machine, welding situation and hand working. Therefore, In order for experts to explain welding skills to unskilled workers, sophisticated explanatory abilities are required and skill transfer is not advanced.

In order to objectively analyze and evaluate the work and experience of experts, important items leading to welding quality, etc. are extracted by using skilled hierarchical skills such as Analytic Hierarchy Process (AHP), etc. Based on the analysis result The movement of the welding torch was quantified by a 6-axis sensor and eye-tracking device. Based on the obtained findings, we also created a work standard guide that works on mobile terminals.

KEY-WORDS : welding, skill transfer, Analytic Hierarchy Process (AHP), eye-tracking

1. はじめに

ものづくり産業で基盤的な技術である溶接作業は、道内の鉄骨製造業を中心に、大小様々な企業で利用されているが、多品種少量生産の工場では、手溶接（手作業）の割合が多く、また、ロボット溶接機を導入していても、トラブル発生時には手溶接が必要とされることが多い。

溶接技能の習得に必要な技術は、説明に要する難易度の幅が広く、現場で熟練者から非熟練者への技能伝承がなかなか進まないのが現状である。実際、北海道内の大手・中堅鉄骨製造業7社に溶接作業の技能伝承問題について、アンケート調査を実施したところ、5社で技能伝承問題を抱えている実態が明らかとなった（図1）。

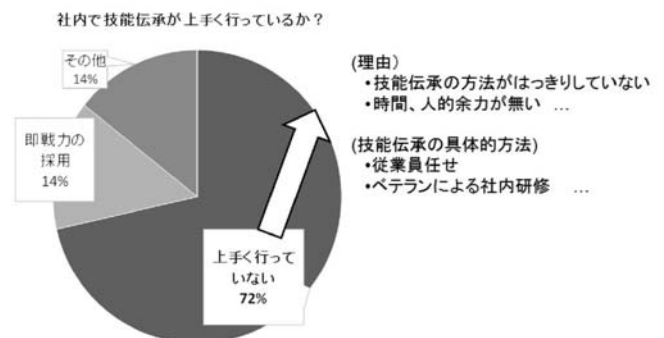


図1 溶接を扱う道内鉄骨製造7社へのアンケート結果

団塊世代の大量退職に由来した技能伝承問題は、少子高齢化が現実のものとなった道内溶接業界にとって、若年層の雇用問題とともに喫緊の課題である。約10年後の2025年の北海

事業名：経常研究

課題名：溶接作業における熟練技能定量化手法の研究

道は、人口が500万人を割り、65歳以上の高齢者人口が全体の3分の1に達する見込みとされ、技能伝承問題は、若年労働者の確保とともに早急に取り組まねばならない課題である。

一方で技能伝承問題は、業種・業態・規模・社員構成・社風・資金など、企業の環境によって解決策が異なる。そのため、すべての問題を一つの手法で解決することは困難であり、状況にあった手法を検討する必要がある。

そこで本研究では、溶接作業における熟練技能伝承を支援することを目的に、熟練者の作業方法や経験などの主観的情報から溶接品質の向上につながる重要項目を抽出し、その重要度を非熟練者へ説明できる情報として定量化した。さらに、熟練者の視線や溶接トーチの動きを計測し、溶接品質の向上につながる重要項目と併せて携帯端末で視聴できる作業標準ガイドを作成した。

2. 階層分析法による溶接技能の定量化

2.1 熟練技能における定量化手法の検討と必要項目の抽出

技能伝承問題に取り組んできた元富士通総研の野中氏によると、「技能伝承における5つの誤解」¹⁾として、

- ① 経験を積みば、誰でもノウハウ継承できる
- ② 熟練者は積極的に伝承を支援してくれる
- ③ 若手は意欲的にノウハウを吸収する
- ④ 仕組みを作れば、後はうまく行く
- ⑤ 職場は、伝承の取り組みをサポートしてくれる

というおもに会社側の思い込みが挙げられている。①に関して取り上げると、非熟練者には熟練者の「背中を見て覚えさせる」のではなく、作業で重要となる項目(ポイント)を絞ってノウハウを継承させることが必要である。数多くある項目の重要性を定量化(数値化)することができれば、合理的な絞り込みが可能となる。

次に最近の代表的な技能伝承の手法を表1に示す。

表1 最近の技能伝承分析手法

	特徴	重要度の定量化	中小企業での実施
作業分析	映像から作業時間と内容を集計	○	△
クドバス CUDBAS	ブレインライティング +技能マップ化	△	○
モーション キャプチャ	作業映像を 画像解析	○	△
階層分析法 (AHP)	一対比較調査結果 から重要度などを 数値化	○	○

作業分析は、作業映像から作業毎の所用時間などを計測し評価する手法である。作業改善などで多く利用されているが、ノウハウ抽出という技能伝承目的での利用には、必ずしも適

切とは言えない。

CUDBAS(クドバス)は元職業能力開発総合大学の森教授が開発した手法であり、熟練者のグループ作業を経て技能マップを作成し作業マニュアルなどを構築するものである。技能マップ等の作成には、社内体制の準備が必要となる。

モーションキャプチャは、作業動作の姿勢・関節角などを作業映像から画像処理ソフトで分析し数値化する手法である。動作が伴うノウハウは数値化しやすいが、思考が伴うノウハウでは数値化は難しい。

階層分析法(Alytic Hierarchy Process;以降、AHPと表記)は、米ピッツバーグ大のSaaty教授が提唱した手法で、目的・重要項目(評価基準)・対策案(代替案)の階層構造をもとに、一対比較調査を行い、重要度分析などを行う手法であり、乗り心地評価の研究²⁾ほか、アルミ溶接の技能分析³⁾や、国会等移転問題で利用された例⁴⁾がある。

各手法とも長所・短所があるが、本研究では、

- ・作業項目を重要度として定量化しやすい
- ・中小企業でも容易に活用できる

などの点で各手法を検討した結果、AHPを利用することとした。

なお、溶接作業は多岐にわたる作業のため、本研究では、溶接作業の基本に当たる「水平すみ肉溶接」と協力企業で作業回数が多い「完全溶け込み突き合わせ溶接(以降、単に突き合わせ溶接と表記)」の2種類について、調査及び分析をすることとした(図2)。

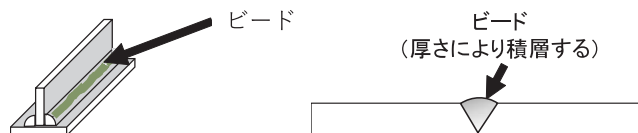


図2 水平すみ肉溶接(左)と
完全溶け込み突き合わせ溶接(右)

AHPを実施する際には、「目標」、「重要項目(評価基準)」、「対策案(代替案)」で構成される階層図を作成し、作業ノウハウである重要項目と対策案を十分に検討しておく必要がある。今回対象とする2種類の溶接作業において、目標を「半自動溶接を行う際に、良好なビード外観と溶接欠陥を生じないこと」と設定し、「重要項目」は7種類を、「対策案」は水平すみ肉溶接で7種類、突き合わせ溶接で8種類を選定した(表2)。AHPの方法により作成した階層図の例として、水平すみ肉溶接用を図3に示す。

表2 選定した重要項目(上)と対策案(下)

重要項目(7種類)	
割れ、ブローホール、融合不良、溶け込み不良、アンダーカット、ビード外観、熱変形	

溶接作業	(不良)対策案
水平すみ肉(7種類)	溶接機の電流電圧調整、前段取り(酸化膜はぎ取り清掃)、シールドガスの流し方、トーチ角度と位置、トーチ移動速度、運棒(ワイーピング)、作業姿勢
突き合わせ(8種類)	溶接機の電流電圧調整、前段取り(酸化膜はぎ取り清掃)、シールドガスの流し方、トーチ角度と位置、トーチ移動速度、運棒(ワイーピング)、作業姿勢、端部処理(スタート・エンド)

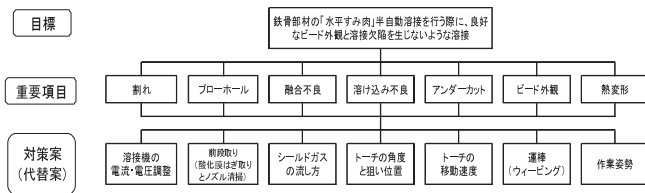


図3 水平すみ肉溶接における階層図

2.2 AHPによる重要度分析結果

前節で作成した階層図をもとに、AHPの手法に従い、図4のような一対比較調査票を作成し、分析を行った。なお、AHPの詳細手順については、文献2)を参照されたい。

鉄骨部材の「完全溶け込み突き合わせ」半自動溶接を行う際に、良好なビード外観と溶接欠陥を生じないような溶接に関する一対比較										
	左の項目が圧倒的に重要 (中間)	左の項目が若干重要 (中間)	左の項目がかなり重要 (中間)	左の項目が少し重要 (中間)	左右同程度重要 (中間)	右の項目が少し重要 (中間)	右の項目がかなり重要 (中間)	右の項目が若干重要 (中間)	右の項目が圧倒的に重要 (中間)	
割れ					○					ブローホール
割れ									○	融合不良
割れ										溶け込み不良
割れ			○							アンダーカット
割れ				○						ビード外観
割れ					○					熱変形
ブローホール						○				融合不良

図4 一対比較調査票の例

分析用データとして、協力企業から選任された熟練者(水平すみ肉溶接4名、突き合わせ溶接3名。いずれも経験年数20~40年)及び非熟練者(比較用)3名のデータを収集した。また、調査票作成及び分析ツールには、専修大学 高萩教授が作成したツール³⁾を一部修正して使用した。

以下に2つの溶接作業における、重要項目の重要度分析結果(表3及び図5,6)を示す。熟練者の分析の結果、水平すみ肉溶接では、「アンダーカット」と「ビード外観」、突き合わせ溶接では「融合不良」と「溶け込み不良」が重要という結果となった。なお、熟練者の傾向はほぼ同じであった。また、比較用として非熟練者のデータも収集したところ、特に水平すみ肉溶接作業での重要項目について、熟練者と非熟練者に違いが見られた。

表3 水平すみ肉(左)と突き合わせ(右)における重要度分析結果

評価項目	熟練者 幾何平均	評価項目	熟練者 幾何平均
割れ	0.07	割れ	0.10
ブローホール	0.13	ブローホール	0.16
融合不良	0.09	融合不良	0.28
溶け込み不良	0.09	溶け込み不良	0.23
アンダーカット	0.20	アンダーカット	0.07
ビード外観	0.16	ビード外観	0.04
熱変形	0.10	熱変形	0.07

—熟練者幾何平均 ———非熟練者A ---非熟練者B ---非熟練者C

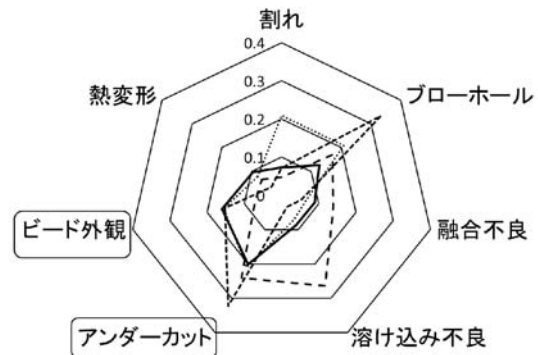


図5 水平すみ肉溶接に重要度分析結果

—熟練者幾何平均 ———非熟練者A ---非熟練者B ---非熟練者C

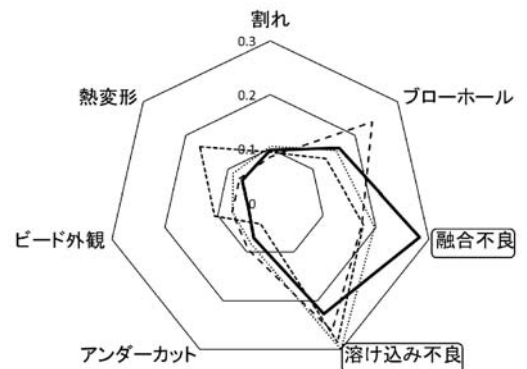


図6 突き合わせ溶接における重要度分析結果

引き続き、2つの溶接作業において、熟練者が重要項目と挙げた項目にどのような対策を採るべきかという分析結果を図7~図10に示す。

順位が前後しているところもあるが、今回調査した熟練者の考えでは、「トーチの角度と狙い位置」、「トーチの移動速度」の2つが重要という結果となり、2つの溶接作業についてAHPを適用することで、比較的容易に熟練者のノウハウ

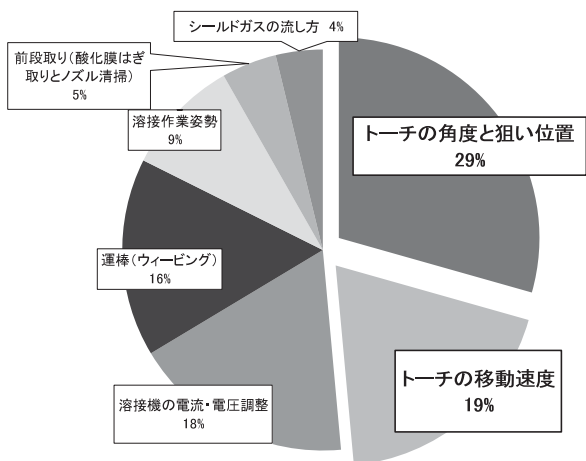


図7 水平すみ肉溶接におけるアンダーカット対策の分析結果

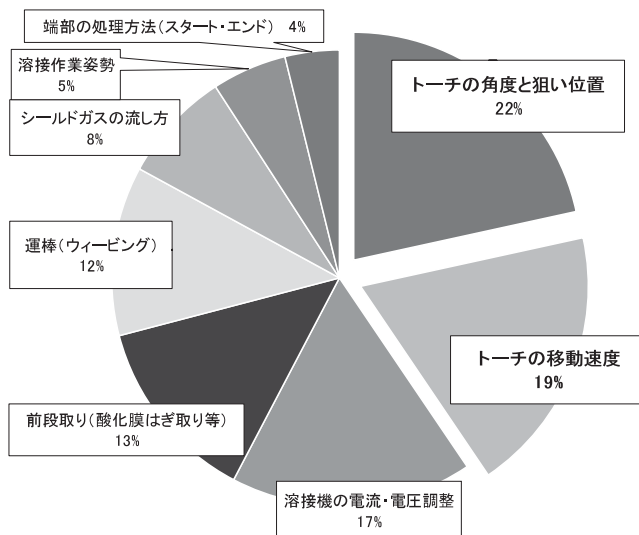


図10 突き合わせ溶接における溶け込み不良対策の分析結果

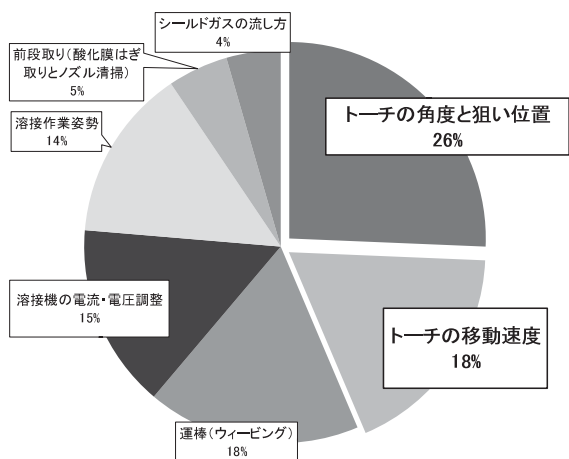


図8 水平すみ肉溶接におけるビード外観対策の分析結果

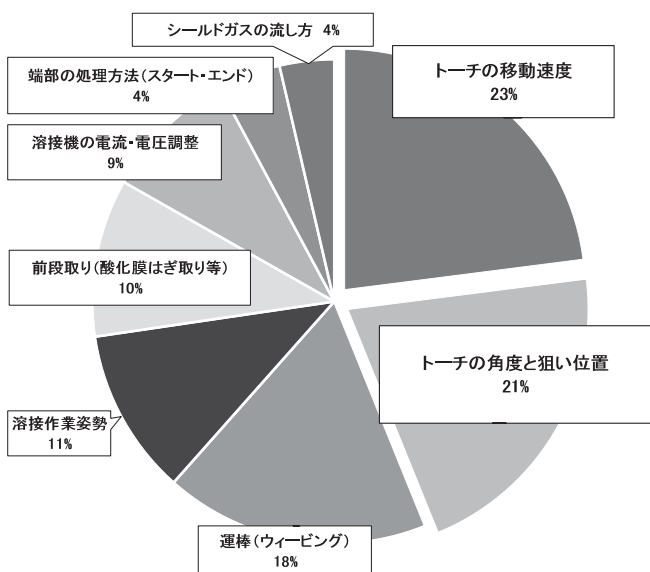


図9 突き合わせ溶接における融合不良対策の分析結果

につながる重要項目及び対策案について、分析・定量化できることが確認された。

分析結果は、協力企業で溶接作業に長年携わってきた熟練者の経験をもとにしたものであり、必ずしもすべての企業で当てはまるものではない。そのため、分析を要望する企業ごとに調査・分析する必要がある。

3. 溶接トーチの動きと視線速度による熟練技能の計測

前章までに、溶接作業における熟練者のノウハウにつながる重要項目及び対策案について階層分析法による分析を行い、定量化できることがわかった。

その結果を踏まえ、今回対象とした2つの溶接作業で重要な作業とされた「溶接トーチ速度」及び「溶接トーチの角度と狙い位置」について、さらに熟練者と非熟練者が数値的に比較できるかを検討した結果、作業中の溶接トーチの動きを多軸センサ及び視線計測装置を利用して計測し、分析することとした。

溶接トーチの動き計測風景を図11に示す。多軸センサはBiologging Solutions社製の超小型6軸データロガーを溶接トーチに取り付けて使用した。このセンサは、6軸の加速度と角速度(X,Y,Z方向加速度+3軸周りの角速度)が測定可能である。また、視線計測装置はトビー・テクノロジー社製のGlass2 50Hzを使用した。これは眼鏡型装置であり、装着者の視点を○印で映像に記録する装置である。ただし、映像は溶接用防護面を通しての記録になる(図12)。

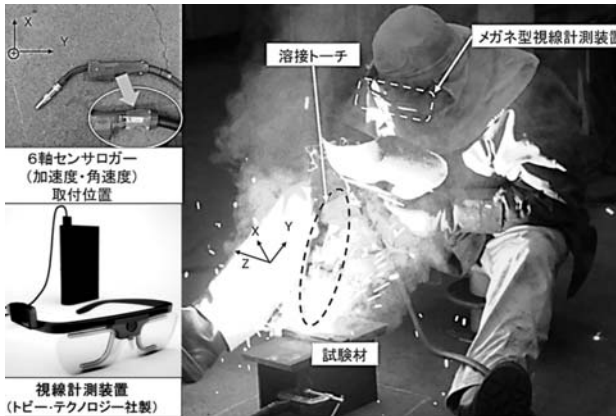


図11 溶接トーチの動き計測風景

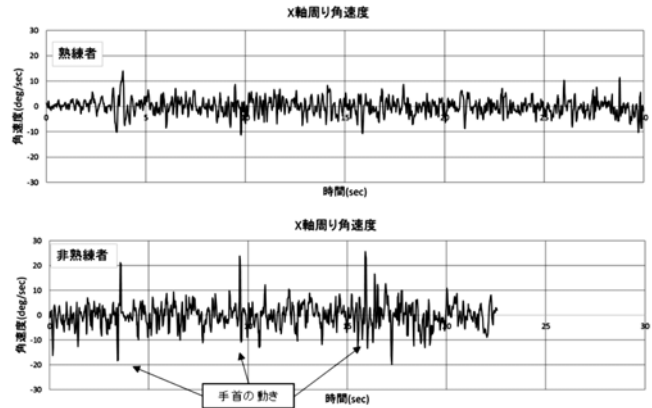


図14 溶接トーチの6軸センサ計測結果 (X軸角速度)



図12 視線計測装置による熟練者の視点 (防護面中央の○印)

トーチ速度を計測するには、理論的には6軸センサでの加速度値を積分すればよいが、センサのドリフトの影響もあり、高い精度での算出は困難であった。むしろ、作業内容からトーチ速度と視線移動速度はほぼ一致していることから、トーチ速度は視線計測装置で測定することとした。映像に○印で記録された視線情報からトーチ速度を算出するに当たって、ライセンスフリーの運動解析ツールKinovea0.8.25⁶⁾を使用した。

水平すみ肉溶接作業における、熟練者・非熟練者の視線計測装置及び6軸センサによる測定結果を図13, 14に示す。今

回の測定では、熟練者と非熟練者で下記の点で特徴的な違いが見られた。

- ①非熟練者の大きな視点動揺が複数で見られた。同時に計測していた6軸センサのデータでは、溶接トーチを握る手首の動きに起因する角速度が計測された。計測後のインタビューから、非熟練者の「手首の動き」は無意識的な動きだった。なお、同時に撮影していた汎用ビデオカメラ映像では、溶接光の影響で手元の詳細な動きまで観察できなかった。熟練者では「手首の動き」は計測されなかった。
- ②非熟練者の作業に係る所要時間が熟練者に比べ短かった。すなわち、非熟練者の溶接トーチの移動速度が熟練者に比べ速いことが判明した。溶接速度は溶け込み量に大きく影響するので、速度を均一かつ熟練者の速度に近づけることが溶接品質を高めることにつながる。今後、視線計測や多軸センサなどの計測結果と非破壊検査などによる品質検査の相関性を確認できれば、品質予測にも活用できる可能性がある。

4. 作業標準ガイドの作成

前章までの知見を活用し、非熟練者が作業現場で参考にできるように、携帯端末 (Windows タブレット) で動作する作業標準ガイドを作成した (図15)。

ガイドは企業で平易に利用操作できるように、導入の多いマイクロソフト Office (Excel, PowerPoint) 上での動作となっている。

ガイドは、2つのツールで構成されている。一方のツールは「AHP分析ツール」で、AHPで重要度分析を行うための一対比較調査票の作成と重要度分析を行うものであり、Excel2013上で動作する (図16)。もう一方のツールは「作業ガイド」であり、AHPでの分析結果や動画なども表示できるようにしており、PowerPoint2013上で動作する (図17)。

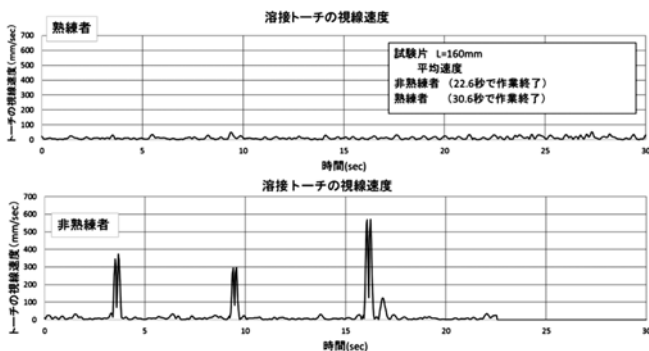


図13 視線速度計測結果

作業動画は、視線と正面・側面からの同期映像であり、作業姿勢などを確認できるほか、溶接作業音を聞くことができ、熟練者而非熟練者自身の作業音・リズムの違いを聴覚的に確認することができる。AHPの分析結果の表示では、作業における熟練者の知見による重要項目が表示されるほか、もし該当する不良を発生させてしまった場合、今後どのような対策を学習すべきか、熟練者の知見を表示させることもできる。併せて、作業後の見本（合格品、不合格品）となる写真や短文コメントも表示される。

さらに、視線及び多軸センサの波形データ（csv形式）を事前に編集し、携帯端末に読み込ませることで、熟練者を基準とした「熟練度」を表示させる機能も付加している。熟練度は、視線及び6軸センサの波形データを、ベクトル内積から算出する「コサイン（COS）類似度」を使って計算し、

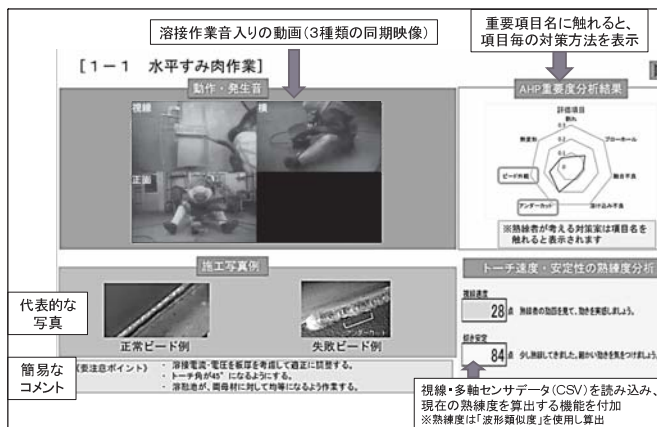


図17 作業ガイド画面例（PowerPoint2013）

点数化した。なお、蓄積するデータ数を増加させることで、たとえば機械学習や品質工学のMTシステムなどでも熟練度が計算可能である。算出手法による熟練度の判定精度については、今後の検討課題である。

本作業ガイドを協力企業で利用したところ、一定の評価を受けた。また、意見としては、

- ・「3画面の動画（特に視線）」は目新しい。新人教育に良い
- ・横動画は「腕の位置」を特に見たい
- ・様々な作業データをもっと追加したい
- ・一年毎などで熟練度がどう変化したか見たい
- ・AndroidやiPadでも動作できるようにしてほしい

など、多数が出されたため、今後、さらに利用しやすいガイドの開発を検討したい。

5. まとめ

本研究では、現場で簡便に実施できることを念頭に、溶接作業における熟練技能を、AHPを用いて定量的に表現した。また、溶接トーチの動き、作業者の視線移動をセンサなどで記録し数値化した。さらに、これらで得た知見をもとに、携帯端末で使用可能な作業標準ガイドを作成した。

本研究で使用した定量化の手法は、人的・資金的に余力の少ない場合でも現場で簡便に実施できるものである。

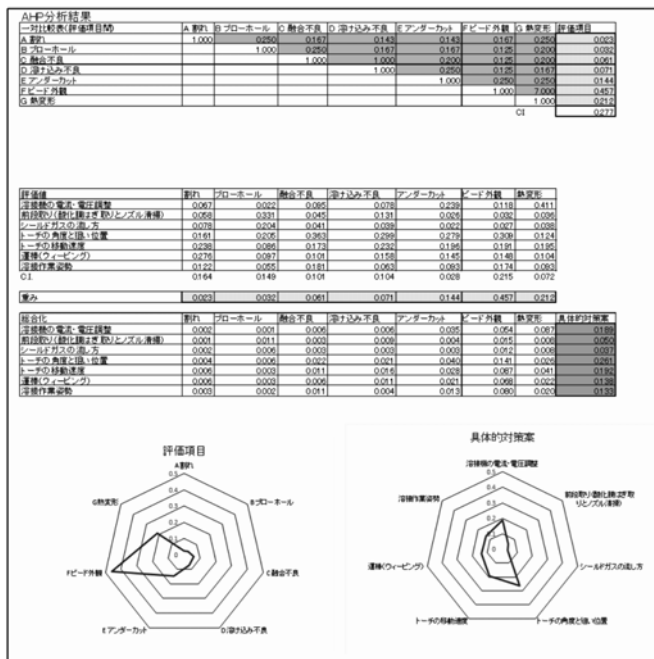
本研究の成果は、溶接作業だけでなく、加工・検査作業や、一次産業への展開が期待できることから、今後、様々な技術支援に活用するとともに、関係機関とも連携して、普及を進める予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、(国研)産業技術総合研究所



図15 作成した溶接作業標準ガイド (Windowsタブレット)



瀬渡直樹主任研究員及び専修大学商学部 高萩栄一郎教授には、溶接作業での階層分析法の適用に際し、多くの助言及び分析ツールの提供を頂いた。また、株式会社 竹原鉄工所 難波常務及び結城課長はじめ社員の方々には、業務多忙の中で、熟練データ収集・作業ガイド作成などで多大な協力を頂いた。記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 野中帝二・安部純一：ものづくりと技術・技能伝承,日刊工業新聞社 工場管理 Vol.58 No.14, pp.10-23, (2012)
- 2) 神生直敏・飯田憲一：乗り心地を考慮した車両評価システムの開発,北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.313, pp.59-63,(2014)
- 3) 瀬渡直樹・森和男・廣瀬伸吾：階層分析法を用いたアルミニウム溶接熟練者の技能抽出と判断傾向の分析, (一社)軽金属溶接協会 軽金属溶接 Vol.50 No.8, pp.14-22, (2012)
- 4) 第153回国会衆議院 国会等の移転に関する特別委員会 議事録第3号, 衆議院, pp.26,(2001)
- 5) 高萩栄一郎・中島伸之：Excelで学ぶAHP入門, オーム社, pp,162,(2005)
- 6) <http://www.kinovea.org/>

ワイヤ供給レーザークラディングにおける加工姿勢の影響

櫻庭 洋平, 鈴木 逸人, 安田 星季, 戸羽 篤也

Influence of the Processing Posture in Wire Supply Laser Cladding

Yohei SAKURABA, Hayato SUZUKI, Seiki YASUDA, Atsuya TOBA

抄 録

レーザークラディング加工は、プラズマ粉体肉盛など他のクラディング技術と比べ入熱量が少ないため、高品質な表面改質が可能となる。また、加工時にワイヤ状の溶加材を使用することで、粉末材料よりも溶加材を安定供給することができる。

本研究では、ワイヤ供給方式によるレーザークラディング加工の優位性に着目し、金型など複雑な起伏を有する製品への適用可能性について検討した。実験では炭素鋼の平板上にステンレス製ワイヤの供給方向や加工面の角度を変えたクラディング加工を行い、加工姿勢がビード内の空隙率や溶込状態に及ぼす影響を把握し、その改善方法を見出した。

キーワード：レーザークラディング, 積層ビード, ワイヤ供給方向, 傾斜角, 空隙率

Abstract

Laser cladding process can make high-quality surface modification, rather than the other cladding method such as powder plasma cladding process, by supplying smaller heat input. And when we use wire-shaped filler material in case of cladding process, we can get the stable supply of filler material rather than powder-shaped material.

In this study, we focused the superiority of wire supply laser cladding and confirming the possibility to use the products having the complicated ups and downs such as the die. We experimented the cladding test on the flat plate of carbon steel, changed to the supply direction of stainless steel wire and the inclination angle of processing surface, and investigated the influence to porosity rate and penetration of laminated bead, and found the improvement method.

KEY-WORDS : Laser Cladding, Laminated Bead, Wire Supply Direction, Inclination Angle, Porosity Rate

1. はじめに

機械部品の冶金的接合法には、溶接、ろう付など部品同士を接合する方法や、めっき、クラディング加工など母材の表面に溶加材を被覆させる方法がある。

レーザークラディング加工は、被覆層の肉厚がめっき処理や溶射よりも厚く結合力も大きい、プラズマ粉体肉盛より微細かつ入熱量が少ない、母材の溶融時間が短いなどの品質面や作業性の優位性がある。このため、熱ひずみや組織変化など熱影響の低減や、加工時間の短縮が期待される。

レーザークラディングの溶加材には、一般的に材料組成の

調整が容易な粉体供給式が使用される。しかし、材料粉末を混合したシールドガス（以下キャリアガス）を用いるため、金型の部分肉盛など複雑な起伏を有する製品にはガス流が乱れて使用できない。

これに対し、ワイヤ供給式のレーザークラディングでは、ワイヤ状の溶加材をモータ等の機械的動力で加工点に送るため、製品形状の影響を受けず安定した材料供給が可能となるなどの優位性がある。しかし、ワイヤ供給式では加工の向きとワイヤの位置関係により溶込状態や空隙の発生量が変化するなど、ビード品質への影響（以下異方性）が生じることが予想され、実用化には異方性の影響と対策について事前に検

事業名：経常研究

課題名：線材供給によるレーザークラディング技術の研究

討する必要がある。

そこで本研究では、ワイヤ供給式レーザークラディング加工を金型など複雑な起伏を有する製品の補修や部分強化などに適用する可能性を探るため、溶接性の良好な炭素鋼とステンレス溶加材によるクラディング加工実験を行い、ワイヤの供給方向や加工面の傾斜角によるビード品質の異方性を評価した。また、異方性対策の基礎実験として、異方性の原因推定をもとに改良した加工条件で確認実験を行い、改善の要点について検討した。

2. レーザクラディング加工

2.1 レーザクラディング加工の概要

レーザークラディング加工は、エネルギー密度の高いレーザー光で母材を溶融させ、そこに溶加材を供給して表面を被覆する肉盛り加工法である。特長として、めっき処理や溶射など母材の溶融を伴わない物理的な結合と比べ、母材と溶加材の融合により結合力の大きい肉厚な被覆層が得られる。

クラディング加工では母材の溶融を伴うため、熱ひずみや熱影響部の組織変化が生じる。しかし、レーザーを熱源とすることで、加工点の熱エネルギー密度をプラズマ放電などの数百倍に高められ、必要最小限の範囲に入熱を集中させることができる。このため、金型表面の補修再生やエンジンバルブのシール部など、熱影響部の精度が要求される製品で、高品質かつひずみの少ない肉盛り加工が可能となる。

2.2 溶加材供給方式の相違点

レーザークラディングの溶加材には、粉体状かワイヤ状のものが使用される。粉体供給式¹⁾は、溶融池にキャリアガスを供給し、溶融池と粉末を融合させる方法であり、粉末の配合比を変えることで異種材料接合や傾斜組成が可能のため、近年ではレーザークラディングの代表的手法となっている。

しかし、粉体供給式は、金型の凹凸など起伏の大きい場所ではキャリアガスが乱れ、入熱量と溶加材のバランスが崩れてビード品質が低下する。

これに対し、ワイヤ供給式は加工ヘッドに設けたワイヤ供給機構からモータなどにより溶加材が供給されるため、製品の起伏などの影響は生じない。また、溶加材の予熱が可能のため、入熱条件の細かな制御による品質面における優位性を有する²⁾が、材料組成の調整がワイヤの種類で限定される。

次に、加工品質の相違点として、粉体供給式は溶加材がレーザー光軸の外周からほぼ均等に供給されるため、レーザーを前後左右どの方向に走査させてもビード品質に異方性は生じない。これに対しワイヤ供給式の場合、溶加材をレーザーの同軸上に配置できないため、レーザーとワイヤの配置が一定の場合、走査方向に対し全ての方向からワイヤが供給される(図1)。溶融池の形状は走査方向に対し縦横比が大きく、深さも場所

ごとで異なるため³⁾、レーザー出力やワイヤ供給速度が同じでもワイヤの供給方向で溶込状態が変化し、空隙や融合不良など異方性の原因となる(図2)。

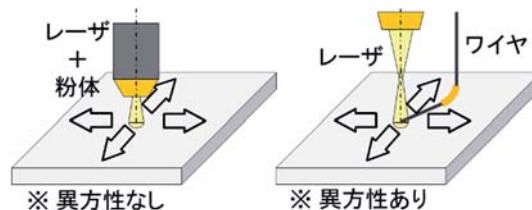


図1 走査方向とワイヤ供給方向の関係

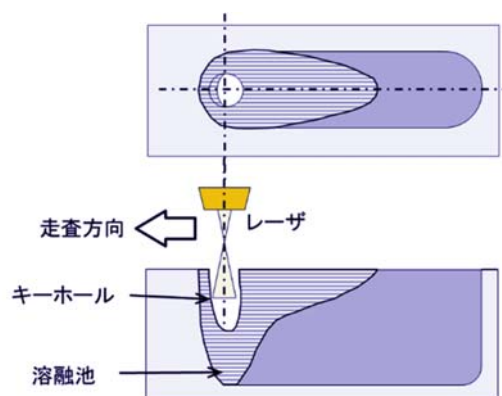


図2 レーザ溶接時の溶融池形状

2.3 ワイヤ供給方向の影響

ワイヤ供給方向に起因する異方性については、加工ヘッドの回転やポジションナ等による加工対象の回転により、最良品質が得られる加工条件(以下適正条件)を維持する方法が考えられる。しかし、金型など複雑な起伏を有する製品では、設備の大型化や予熱装置との接続性などの理由から対応が難しい。また、加工ヘッドを回転させる方法は、加工ヘッドに可とう性が乏しいレーザー伝送ファイバが接続されるため、360°任意の回転は構造上困難である。このため、ワイヤ供給方向による異方性の定量的な把握と対策が必要となる。

2.4 加工面の傾斜角の影響

金型など起伏の多い製品では、傾斜面への肉盛り加工が多くなる。傾斜面ではレーザー光が斜めから入射するため、熱エネルギーの分布が均一ではなくなり、垂直方向からレーザー照射した場合と溶融池やビード形状が変化する。また、溶融池や溶加材が傾斜面の下方に流れるため、ビード形状の安定化が難しい。このため、前述のとおりポジションナが使用できない状況では、傾斜角による異方性の対策が必要となる。

3. 実験方法

3.1 ワイヤ供給方向の影響比較

ワイヤ供給方向について、実用段階では加工面の曲率など

に応じてワイヤ供給方向を連続的に変更するため、ビード進行方向に対して360°あらゆる方向について、ビード品質の異方性やワイヤ供給方向の限界角度を把握する必要がある。

本稿では、肉盛り加工部の品質へのワイヤ供給方向の影響を把握するため、レーザ走査方向の前方、90°側方、後方からワイヤを供給して積層ビードを作製し、積層の可否や空隙の発生傾向を比較した(図3)。その後、これらの溶込状態などから空隙率変化の原因を推定し、改良した加工条件で試験片を製作し、その効果を確認した。

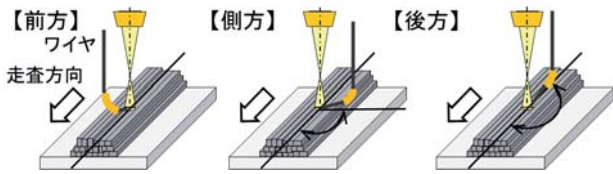


図3 ワイヤ供給方向

実験は、表1に示す条件でレーザ出力やワイヤ供給速度を変えたビードを1パス作製し、ビード断面の幅と高さ、溶込幅と溶込深さを測定して、積層に最低限必要なレーザ出力(以下最小出力)やレーザ出力ごとのビード間隔を、ワイヤ供給方向ごとに評価した(図4)。

表1 実験条件

材料(母材)	
材質(-)	SS400
寸法(mm)	80x80x10
材料(ワイヤ)	
材質(-)	SUS308
直径(mm)	0.6
レーザ	
種類(-)	Ytterbiumファイバーレーザ
波長(nm)	1070
集光レンズ(-)	F150
走査速度(mm/min)	300
焦点径(mm)	1.5
出力(W)	400 - 900
加工条件	
ワイヤ供給速度(mm/min)	600,900

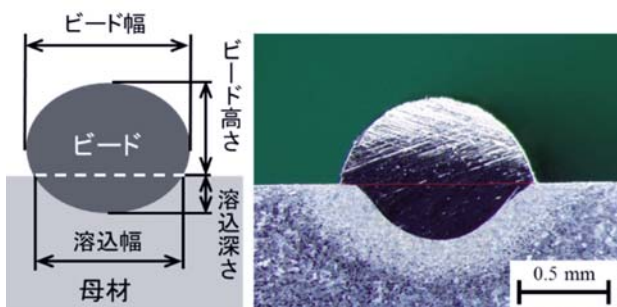


図4 断面寸法の測定箇所

次に、最小出力以上のレーザ出力で3層12パス、全長70mmの積層ビードを作製し(図5)、加工条件ごとの積層可否を確認した。また、ビードに含まれる空隙の体積や形状をX線CT装置(以下CT装置)で測定し、空隙率の比較や積層の良否判別に使用した。

実験装置はIPG Photonics製Ytterbiumファイバーレーザ: YLS-2000を使用し、レーザ加工機に図6のワイヤ供給機構を設置してワイヤを供給した。

レーザ出力は、ワイヤ供給速度600mm/minでは300~800W、900mm/minでは400~900Wとし、それぞれ50W間隔で設定した。また、レーザの照射位置は、隣接するビード同士が重なる谷の部分(以下ビードの谷間)を照射の中心とし、この点を中心に焦点の直径が1.5mmになるよう光学系を配置した(図7)。

空隙率の測定には島津製作所製CT装置: inspeXio225を使用し、積層ビードの長さ30mmに含まれる $1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 以上の空隙を検出し、ビードの体積から空隙率を算出した。

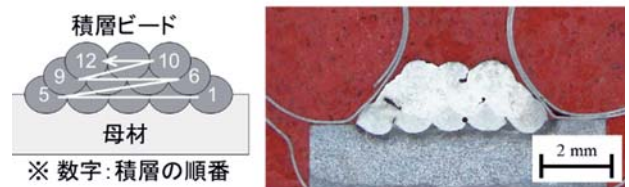


図5 ビードの積層状態

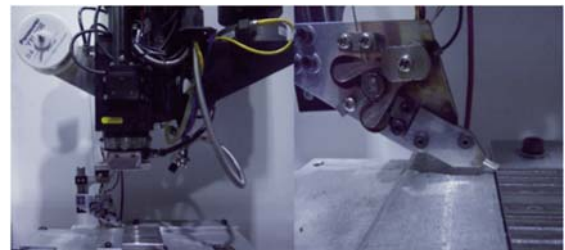


図6 ワイヤ供給機構

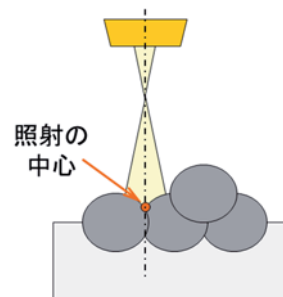


図7 積層ビードへのレーザ照射位置

ビードの積層可否の判別は、ワイヤが熔融池から外れる、母材とワイヤが溶着して加工が継続不能になるなどの不具合が、同じ加工条件で12パス積層するまでに3回連続で発生し

た場合を積層不能とした。また、12パス積層できたビードについても、CT測定時に表面から内部まで連続した融合不良(図8)が全域で観察されたものは不良ビードと判別し、それ以外のビードを良好と判別した。

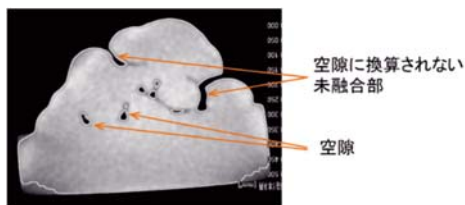


図8 ビード表面と繋がった融合不良部

3.2 傾斜角の影響比較

傾斜角の影響を比較するため、平板を水平方向に対して15°, 30°, 45°, 60°に傾けて設置し(図9)、ワイヤ前方供給でビードを積層し、肉盛加工の可否やビードの断面形状、空隙率の違いを比較した。その後、空隙率を低減する加工条件を確認した。

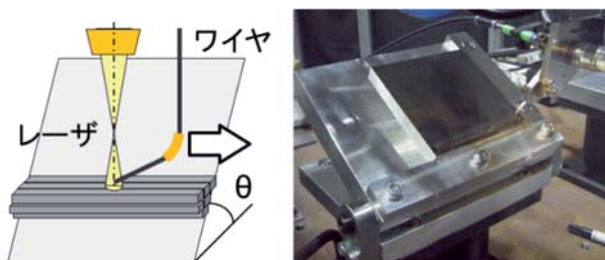


図9 傾斜面へのビード積層

実験は、前項と同様に1パスビードの断面形状から傾斜角ごとに最小出力と積層ピッチを求め、3層12パスの積層ビードの空隙率を測定し、その後改良を加えた加工条件の空隙率低減効果を確認した。

傾斜角以外の実験条件は表1のとおりとし、実験装置やレーザーの照射位置、測定項目については、ワイヤ供給方向の実験と同じ条件で行った。

なお、傾斜面の断面形状は、図4と同様平置きした状態で測定した。また、積層時のビード間隔も、傾斜面に沿って並行移動させた距離とした。

4. 結果と考察

4.1 ワイヤ供給方向の影響比較

4.1.1 1パスビードの形状

図10と図11に、ワイヤ供給方向ごとのレーザー出力とビード幅及び溶込幅の関係を示す。ワイヤを後方から供給した条件では、レーザー出力や供給速度に関わらず、レーザー照射の直後にワイヤが溶融池の後端と溶着し、ビードの形成が不能となった。

ビード幅は、いずれのワイヤの供給方向や供給速度でも、レーザー出力の増加とともに直線的に増加したが、溶込幅は400W未満の低出力域ではビード幅の1/2~1/5と小さく、400W以上になるとビード幅とほぼ同じ幅まで増加した。

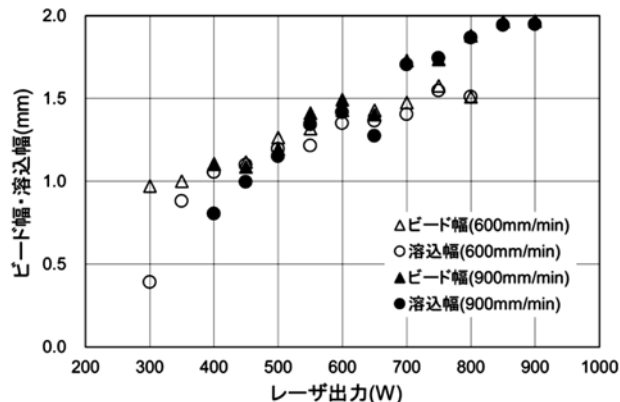


図10 レーザ出力とビード幅・溶込幅の関係(前方供給)

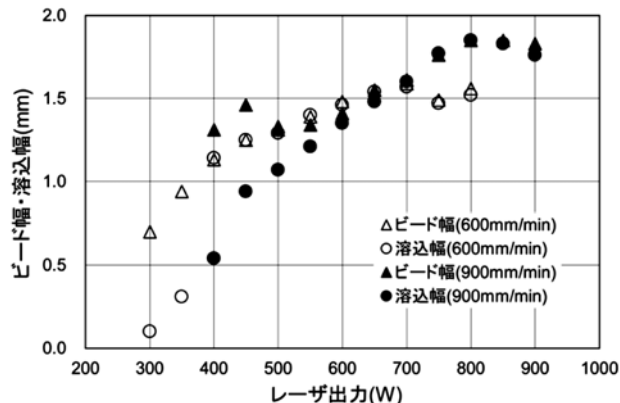


図11 レーザ出力とビード幅・溶込幅の関係(側方供給)

図12のように、溶込量が不足してビード幅が溶込幅より大きくなる場合、ビードの間隔をビード幅と等しく密に並べても消せないすき間が残る。このすき間を残さないためには、最低でもビード幅と溶込幅が等しくなるだけのレーザー出力が必要となる。

しかし、実際の加工ではレーザー出力を高めても溶融して流れたワイヤでビード両端に未融合界面が残る場合が確認され、レーザー出力だけで確実にビード幅と溶込幅を完全に同じくすることはできなかった(図13)。

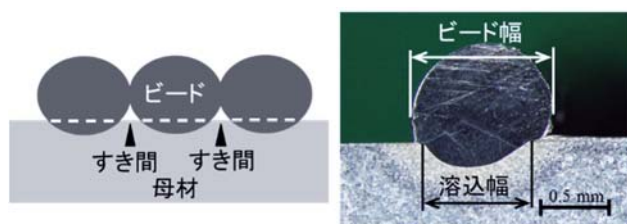


図12 ビード幅過大時の積層状態

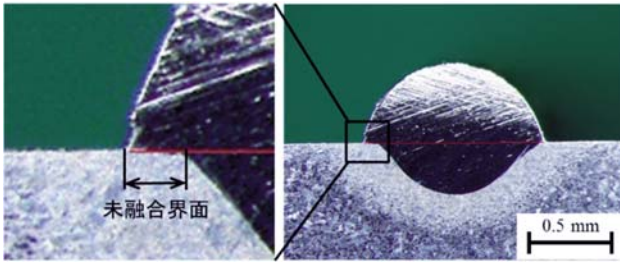


図13 ビード端部の未融合界面

このため本稿では、溶込幅がビード幅の90%以上となった時点のレーザー出力を最小出力とし、積層時に溶込幅の10%分ビードを重ね、先行ビードの未融合界面周辺を再び溶融させることで、未融合界面を消すこととした。表2に、加工条件ごとの最小出力を示す。なお、前方供給と側方供給とで最小出力が異なる場合、同じレーザー出力でビード品質を比較するため、レーザー出力が大きい方を最小出力として採用した。

表2 加工条件ごとの最小出力

ワイヤ供給速度 (mm/min)	最小出力(W)		採用値
	前方供給	側方供給	
600	400	400	400
900	450	600	600

4.1.2 ワイヤ後方供給の溶着原因

ワイヤの後方供給時のみ母材とワイヤが溶着する原因について、ワイヤ供給式では母材とワイヤが溶融池を介して接触するため、両者の間には溶融池の粘性以外の力は発生しない。しかし、実際の加工では前方供給や側方供給でも母材がワイヤに押されており、全てのワイヤ供給方向で母材とワイヤの溶着が生じていたと考えられる。

これをもとにワイヤの溶着挙動を推定すると、図14のとおり前方供給ではワイヤがレーザー中心より前方で溶着するため、一時的に溶着しても直後にレーザーが溶着部に近づいて来るため再溶融されやすい。また、側方供給もワイヤの約半分はレーザーの中心より前方にあるため、前方供給より少ないがワイヤの温度が上昇する可能性があり、溶着後に再溶融したと考えられる。

これに対し後方供給の場合、溶着する場所が常にレーザーの後方になるため、一度溶着するとワイヤの温度が上昇する要素がなく、溶着部の再溶融は起こらなかったと考えられる。

なお、レーザー走査方向に対し90°~270°の範囲では、ワイヤ溶着後にレーザーが離れる側に動くため、180°後方以外でも溶着の発生が予想される。このため、斜め後方からのワイヤ供給で限界角度を拡大するには、レーザー中心より前方寄りの位置を狙ってワイヤを供給するなど、ワイヤ供給機構を改良する必要があると考えられる。

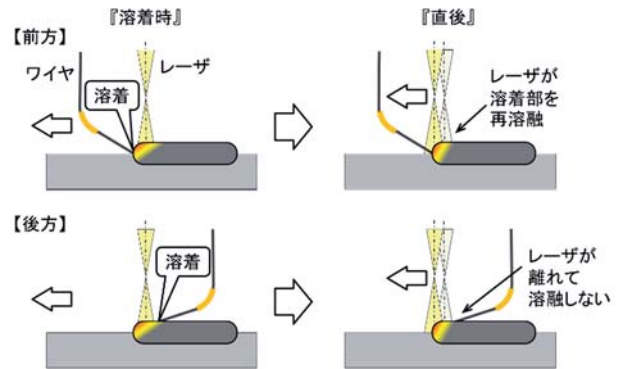


図14 ワイヤ溶着挙動の対比モデル

4.1.3 積層ビードの空隙率比較

4.1.1項の最小出力を含む、数種類のレーザー出力で積層ビードを作製し、積層の可否や融合状態の確認による良否判別を行った(表3)。

表3 積層ビードの品質確認

ワイヤ供給速度 (mm/min)	レーザー出力(W)	積層可否	
		前方供給	側方供給
600	400	△	×
	500	○	△
	600	○	○
	700	○	○
	800	—	○
900	600	○	×
	750	○	○
	900	○	○

凡例 ○:積層可能 △:不良ビード(融合不良多発) ×:積層不能

表3のとおり、最小出力では積層不能や不良ビードが発生し良好な積層ビードが得られないため、レーザー出力を最小出力より20~30%高めることで良好な積層ビードが得られた。また、前方供給で良好な積層ビードが得られても、同条件の側方供給では不良ビードとなる場合が確認された。なお、空隙の発生箇所はビードとビードの境界周辺に集中しており、ビード内部の空隙はCT測定では確認されなかった。

次に、良好な積層ビードの空隙率を測定し、ワイヤ供給方向と空隙率の関係を比較した(図15)。

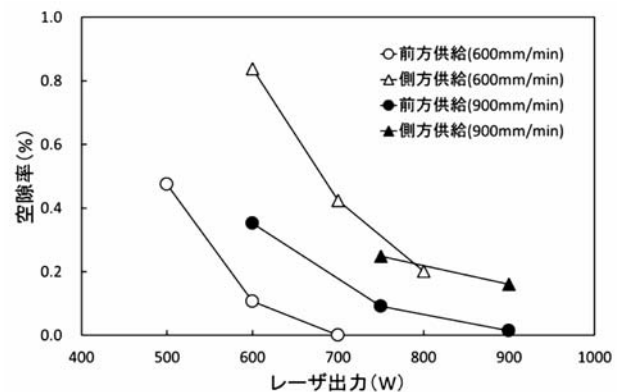


図15 レーザ出力と空隙率の関係

その結果、積層ビードの空隙率は全ての条件でレーザー出力の増加とともに減少し、ワイヤ前方供給では600W-600mm/min、750W-900mm/minで空隙率約0.1%、700W-600mm/min、900W-900mm/minではほぼ0%に低減された。これに対し、ワイヤ側方供給の空隙率は前方供給よりも多くなり、前方供給で空隙率約0.1%が得られたときのレーザー出力を20~30%増加させても、約0.2%の空隙が残った。

側方供給の空隙率が多くなった原因について、側方供給のビード両端の未融合部の幅が小刻みに変動する、レーザー出力が同じ場合に側方供給の溶込が浅くなるなど、ビード形状の違いが確認されたが、空隙率の増加と直結する挙動は確認されず、今後の課題として残った。

4.1.4 側方供給の空隙率低減

側方供給の空隙率低下について、図15のとおりレーザー出力を高めることで欠陥周辺を広くかつ長時間溶融させることは、効果的な方法のひとつとなる。しかし、この方法は入熱量が増え溶融池が拡大するため、母材の希釈や材料組織の変化、熱ひずみの増大などが懸念され好ましい方法ではない。

そこで本研究では、側方供給の空隙率を前方供給と同等のレーザー出力で低下させる方法として、隣接するビード間の重なり率を最適化して空隙を減らす方法を検討した(図16)。

実験は、ビードの重ね幅が溶込幅の0~40%になるようビード間隔を変えて、このときの空隙率や溶込状態を比較した。

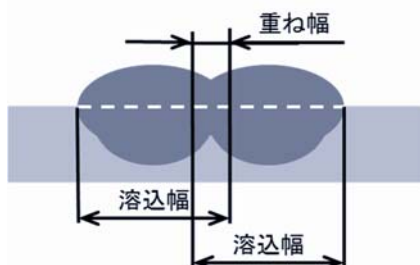


図16 隣接ビードの溶込幅と重ね幅の関係

その結果、図17のとおり空隙率は全てのレーザー出力やワイヤ供給速度において、重なり率0%~20%にかけて増加し、重なり率20%以降では減少に転じた。このため、ほぼ全ての加工条件で、重なり率0%のときに最小の空隙率となった。

この原因について、ビード断面の溶込状態を確認したところ、重なり率0%では図18のとおり、上層ビードの溶融領域が2つ下の層まで達していた(▲部)。しかし、重なり率20%以上では溶融領域が2層下まで到達せず、隣接ビードの境界が残されていた。また、重なり率が高くなるほど、隣接ビードどうしの融合範囲が拡大していた。

前述のとおり、空隙がビードの境界に集中することから、空隙率の低下には、ビードを重ねる際に境界周辺を再溶融させ、残った空隙を除去する方法が効果的と考えられる。図18

のとおり、重なり率が高いほど上層ビードの溶融領域が下層に届かなくなるため、重なり率20%では上層ビードからの再溶融が起こらず、また重なり率40%と比べ隣接ビード同士の融合範囲も少ないため、効果的に空隙を除去できなかったと考えられる。

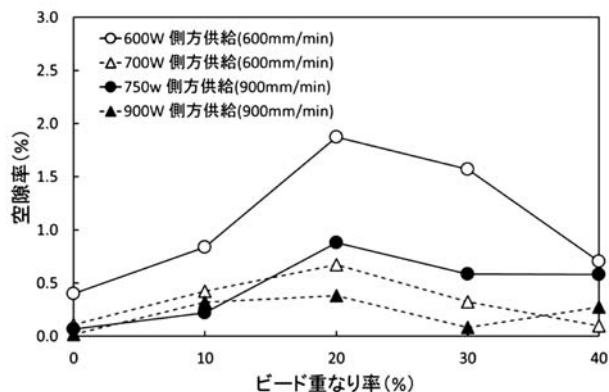


図17 ビードの重なり率と空隙率の関係(側方供給)

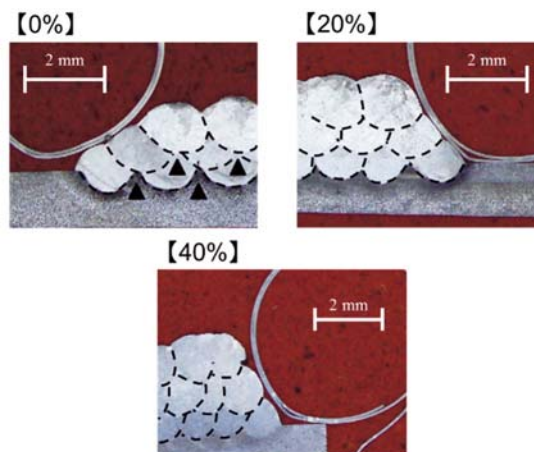


図18 ビードの重なり率と空隙率の関係

4.2 加工面の傾斜角

4.2.1 1パスビードの形状

傾斜面上でのビードの形状について、図19と図20に傾斜角と溶込幅の関係を、図21に断面形状をそれぞれ示す。

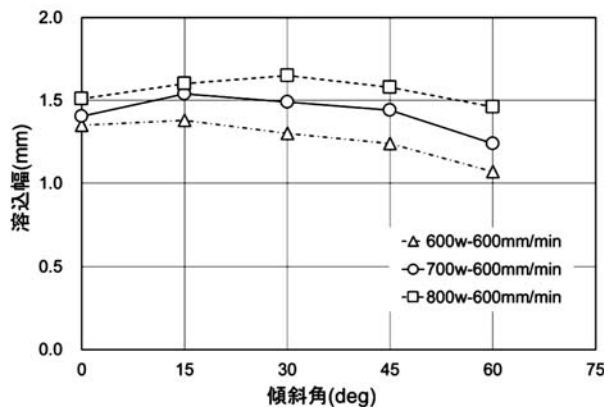


図19 傾斜角と溶込幅の関係(ワイヤ600mm/min)

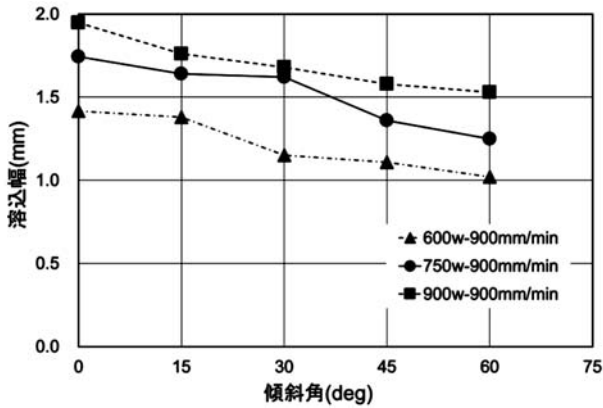


図20 傾斜角と溶込幅の関係 (ワイヤ900mm/min)

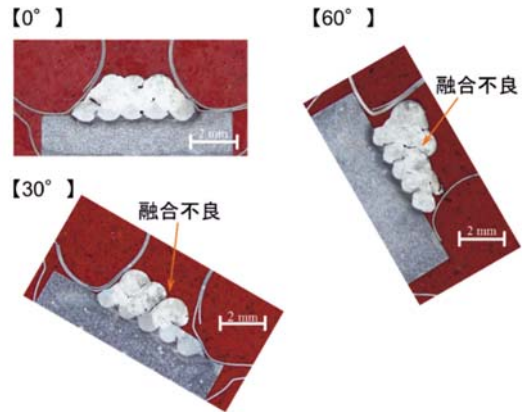


図22 傾斜面での積層ビード断面

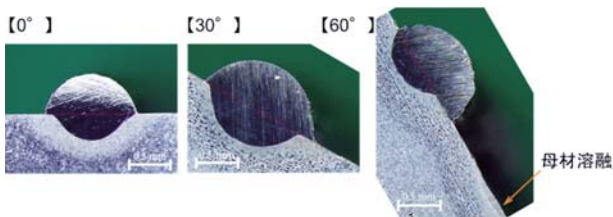


図21 傾斜面での断面形状比較

図19, 図20のとおり, 600W-600mm/minの0°~30°間で, 傾斜0°と比べ最大10%程度のビード幅増加が確認されたが, それ以外の加工条件では傾斜角の増加とともにビード幅が減少する傾向を示し, 傾斜0°と比べ5~25%の減少が確認された。また, 図21のとおり, ビード端部の未融合界面が傾斜0°ではビード両端にほぼ均等に発生したのに対し, 傾斜面では未融合界面がビードの下側に偏る傾向が確認された。

4.2.2 積層ビードの品質

4.2.1項で求めたビード形状をもとに, 傾斜面上に積層ビードを作製し, 傾斜0°で空隙率がほぼ0%となった700W-600mm/minと900W-900mm/minの条件で試験を行い, 断面状態や空隙率を評価した。

積層ビードの断面状態について, 図22のとおり傾斜角が増すほど, 傾斜方向の上側(以下上側)にビードが集中して形状が不定形となり, 700W-600mm/minの傾斜30°, 45°では溶融池からワイヤが脱落し積層自体が不能となった(図23)。また, ビード間の融合不良界面が, 傾斜0°では断面全体にほぼ均等に発生するのに対し, 傾斜面では傾斜方向の下側(以下下側)に集中して発生することが確認された。

次に空隙率について, ワイヤ600mm/minでは15°で約0.7%, 30°, 45°の積層不能など, 全ての角度で空隙率が増加した。

これに対しワイヤ900mm/minでは, 15°, 30°の低角度域では0°の空隙率とほぼ同等だが, 45°では0.25%, 60°では0.4%前後まで空隙率が増加した。

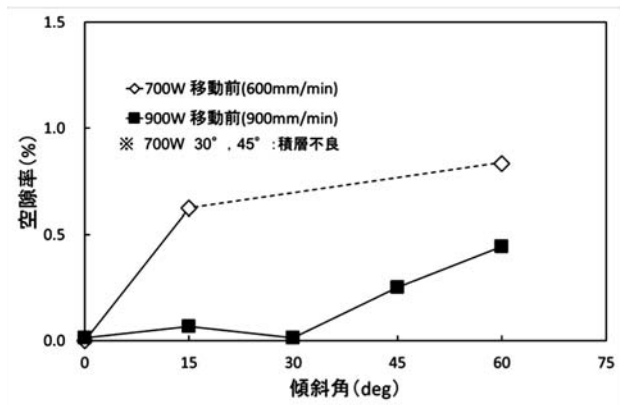


図23 傾斜角と空隙率の関係

4.2.3 ビード形状・空隙率変化の原因

加工面の傾斜により, 断面形状や融合不良の発生箇所に偏りが生じた原因について, 加工点周辺のエネルギー密度分布から原因推定を行った。

傾斜面へのレーザー照射では, 図24のとおり照射中心での焦点径がφ1.5mmとなるように, 加工ヘッドと照射中心の距離を調節している。焦点径は傾斜面上側では小さく, 下側では大きくなるため, 傾斜面上端と下端とでエネルギー密度に差が生じる。本研究で使用したレーザー光学系の場合, 上端と下端の理論上のエネルギー密度差は, 傾斜30°で約1.2倍, 傾斜60°で約1.7倍となる(表4)。

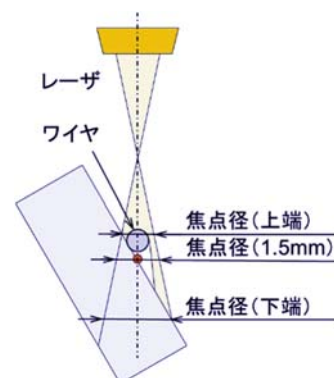


図24 傾斜面でのレーザー照射状況

表4 傾斜角とエネルギー密度の関係

傾斜角 (deg)	焦点径 (mm)	エネルギー密度比(理論値)			
		中心	上端	下端	上端/下端
0		1	1	1	1.00
15		1	1.04	0.96	1.08
30	1.5	1	1.09	0.92	1.18
45		1	1.15	0.86	1.34
60		1	1.27	0.76	1.67

ビードの積層時には、エネルギー密度の高い上側が先に溶融するため、溶けたワイヤが上側の溶融池に引っ張られる形で融合し、これによりビードが上側に偏ると考えられる。また、ビード下側の融合不良については、下側ではエネルギー密度が低いため、上側と比べ溶融の開始が遅れやすく、母材とワイヤが十分に融合しなかったものと考えられる。

傾斜面でのビードの偏りを抑制し、ビード形状を制御するには、レーザーの狙い位置と実際にビードが形成される場所との関係を把握し、それに応じて加工経路を修正する必要がある。そこで、レーザーの照射中心とビード中心の距離Lを測定し、傾斜角と距離Lの関係と比較した(図25)。

その結果、傾斜15°~30°の距離Lは0.3~0.4mmで推移するが、それ以降は角度の増加とともに距離Lも増加し、傾斜60°では照射中心から1.2~1.4mm離れた場所にビードが形成されることが確認された。(図26)

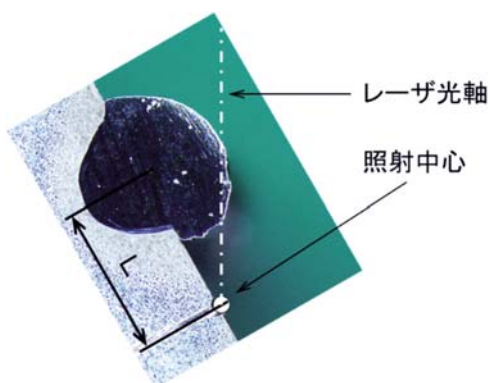


図25 レーザ照射中心とビード中心の距離

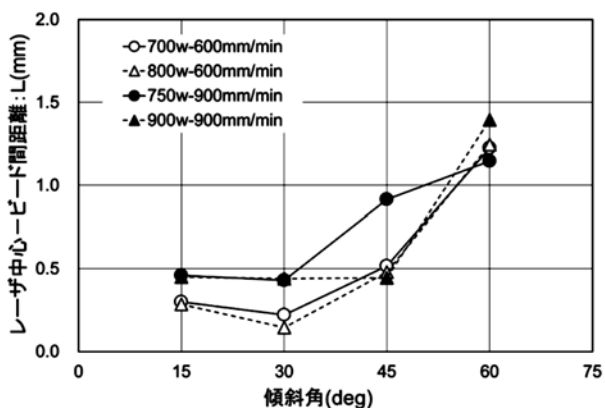


図26 レーザ照射中心からのビード距離

次に、積層時のレーザー照射位置を、図27のとおりビードの谷間から傾斜面に沿って距離Lだけ下方に移動させ、移動前の積層ビードと断面形状を比較した(図28)。

その結果、傾斜15°~45°ではビード位置を移動したことにより断面形状がほぼ左右対称になり、傾斜面上側への偏りがほぼ解消された。また、融合不良が多数発生した700W-600mm/minの傾斜30°と45°においても、CT測定で融合不良面の減少が確認され、積層できない状態が解消された。一方、傾斜60°のビード形状について、傾斜面の下側が重力で流れるため、700W-600mm/min、900W-900mm/minともに形状の制御は困難であった。しかし、傾斜面上側の形状や融合不良面の削減については改善が見られた。

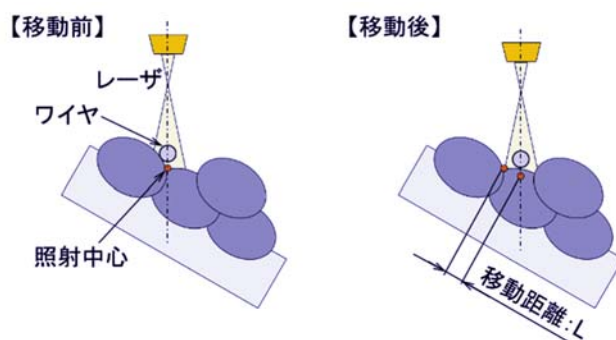


図27 レーザの照射中心とビード中心の距離

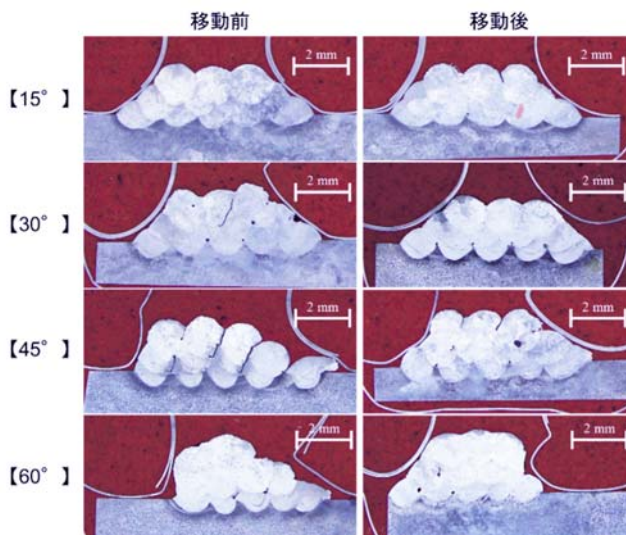


図28 照射位置移動前後のビード形状比較 (700W 600mm/min)

次に空隙率について、傾斜15~30°の範囲では700W-600mm/min、900W-900mm/minとも移動前と同等から減少傾向が見られるものの、傾斜45°~60°では空隙率が増加する場合も確認され、照射位置の移動による明確な改善効果は得られなかった(図29)。

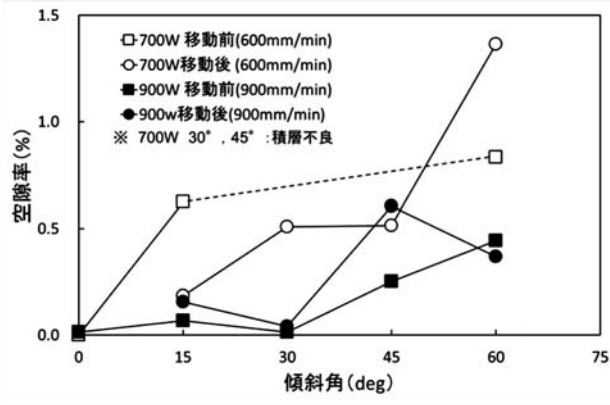


図29 照射位置の移動と空隙率の関係

この原因について、ビード断面の上層ビードと下層ビードの位置関係を比べたところ、照射位置の移動前は上層ビードが下層ビードの谷間のほぼ中央に形成されるのに対し、移動後は上層ビードの中心が下層ビードの谷間より下側に移動し、その分空隙が残しやすいビード谷間の溶込が浅くなっていた(図30)。このため、移動距離Lが溶込幅より大きい傾斜45°～60°では、移動前より多くの空隙が残ったと考えられる。

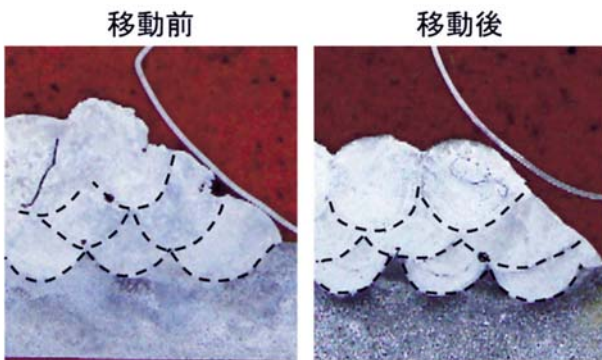


図30 照射位置とビード形成位置の比較 (700W 600mm/min)

以上のことから、傾斜の大きな加工面でビード形状の制御と空隙率の低下を両立させるには、照射位置の移動に合わせて溶融池を拡大し、空隙が集中する下層ビードの谷間を再溶融させる必要がある。図31のとおり、ワイヤ600mm/minのレーザー出力を800Wに高め溶融池を拡大したところ、傾斜15°～60°間の空隙率が0.5%以内に低減され、特に移動距離Lの大きい傾斜45°～60°では空隙率が1/2～1/5に低下した。

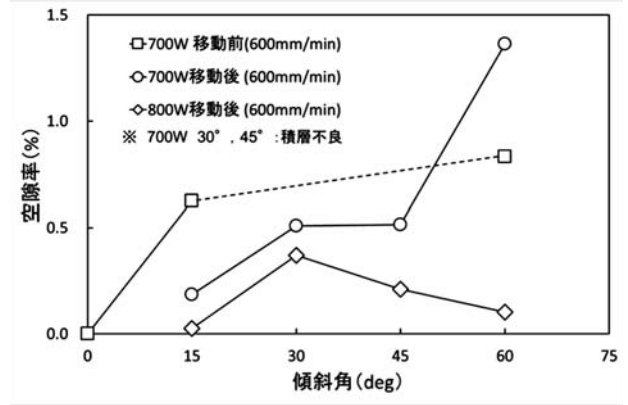


図31 レーザ出力による傾斜面ビードの空隙率低減 (600mm/min)

5. おわりに

金型など複雑な起伏を有する製品へのワイヤ供給式レーザークラディング加工の適用可能性を調べるため、炭素鋼材にステンレスワイヤを溶融積層肉盛りする実験を行い、ワイヤの供給方向が積層の可否や空隙率に大きく影響することを確認した。また、レーザー出力の増加やビード重なり率の調整により、側方供給の条件でも空隙率の少ない前方供給方式と同等の品質を得る改善方法を見出した。

次に、加工面の傾斜と空隙率の関係を調べ、傾斜角の増加に伴う積層ビードの偏りや、パス間の融合不良の偏在を確認した。さらに、この現象について、傾斜面上のエネルギー密度差に着目してその原因を推定し、傾斜角に応じてレーザーの照射位置と出力を修正することでビードの形状不整や融合不良を解消し、かつ傾斜15°～60°の空隙率を低減する方法を確認した。

本研究により、ワイヤ供給式レーザークラディング加工を金型など複雑形状に適用するための技術的課題に関する知見が得られた。今後は、実際の金型を想定した製品形状や材質などに関する加工条件等の研究を進め、自動車部品用金型の肉盛り再生などへの実用化を目指す。

謝辞

本研究は、公益財団法人JKAの平成27年度JKA公設工業試験研究所等における共同研究補助事業を受けて実施しました。

また、本研究で使用したファイバーレーザー加工溶接装置・試料埋込装置・実体顕微鏡は国立研究開発法人科学技術振興機構の地域産学官共同研究拠点整備事業により、X線CTシステムは経済産業省北海道地域イノベーション創出協働体形成事業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) 塚本雅裕：3Dプリンターと金属の積層造形，溶接学会誌 Vol.83 No.4, pp.24-27, (2014)
- 2) 大西輝政・川人洋介・水谷正海・片山聖二：高出力・高輝度レーザーによる高張力鋼厚板のホットワイヤ併用突合せ溶接法，溶接学会論文集 第29巻 第1号, pp.41-47, (2011)
- 3) 新井武二：レーザー加工の基礎工学 改訂版，丸善，pp.381-383, (2013)

3 D積層造形法で製作したマルエージング鋼材の金属組織

戸羽 篤也, 鈴木 逸人, 平野 繁樹, 長船 康裕*, 葛西 勝明**, 葛西 健央**

Micro Structures of Maraging-Steel by Selective Laser Melting.

Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI, Shigeki HIRANO, Yasuhiro OSAFUNE*,
Katsuaki KASAI**, Takeo KASAI**

抄 録

金属粉末積層造形法は、内部に三次元冷却管を配置した金型など、複雑な内部構造を持つ金属製品を製作することができる優位性の高い加工法である。マルエージング鋼は、実用製品の製作に応用できる素材であり、金属粉末積層造形の主要な材料となりつつある。しかし、この材料による積層造形の製作条件に関する報告が少なく、この技法を用いる場合の最適な製作条件を知るためには、レーザー照射パラメータと造形物の品質との関係性を明らかにする必要がある。

本報は、マルエージング鋼を用いた金属粉末積層造形法に関して、レーザー照射条件を変化させて製作した試験片の断面組織の観察により、造形物の内部空隙と材料の溶融形態に及ぼすレーザー照射パラメータの影響を調べた結果を示す。

キーワード：金属粉末積層造形，マルエージング鋼，レーザー照射条件

Abstract

The Selective Laser Melting (SLM) is an additive manufacturing technique that makes metal products with complicated internal structures, such as a Metal-Mold with the three-dimensional cooling channel. Maraging steel is a material that is able to produce practical products, and is becoming the major material of SLM. However, there are few reports of the manufacture conditions for this material. It is necessary to clarify relationship of laser irradiation parameters and the quality of samples in order to know the optimal manufacturing conditions in the case of using this method.

In this report, we present the effect of laser conditions on porosity and melting area shape in the maraging steel sample made by SLM.

KEY-WORDS : Selective Laser Melting Method (SLM), Maraging Steel. Laser irradiation conditions

1. はじめに

金属粉末積層造形法（以下「金属3D造形」という）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¹⁾のひとつである。造形に用いる素材が金属であるため、機械的性質、熱特性、電気特性など、金属特有の機能を有する3D立体物が得られることから、特殊な形状や機能を要求される輸送機械、航空宇宙産業、医療分野で今後の利用展開が期待されている^{2,3)}。

金属3D造形の実用適用事例としては、現在のところ内部に水冷管を3D配置したプラスチック射出成型用高機能金型への応用例が散見される^{3~6)}。当初、金属3D造形で製作する金型には短い製作期間で試作用の使用に耐えるものが求められていたが、直近では数千ショットから1万ショット以上の使用に耐える量産用金型へと、その要求水準が向上している。金属3D造形金型の量産要求に応えるためには、金型表面の硬さと耐久性を併せ持つ強靱な素材が求められる。

マルエージング鋼^{7,8)}は、Ni, Co, Mo等の高価な合金成分

* 室蘭工業大学, ** 株式会社サカイ技研

* Muroran Institute of Technology, ** Sakai-Giken Co., LTD.

事業名：重点研究

課題名：金属3D造形による実用金型製造のための加工・熱処理プロセス技術の開発

を多量に含むため素材価格が高いが、強度や靱性のほか、可鍛性、熱ひずみ、耐低温脆性など、優れた特性を持つため、航空・宇宙分野の構造材として使用されている。このようなマルエージング鋼の特性は、金型素材としても有効である。マルエージング鋼は、時効処理と呼ばれる熱処理によりロックウェル硬さでHRC50以上の表面硬さが得られ、量産に耐える金型を3D積層造形技法でも製作可能となるので、近年、金属3D造形用の粉末素材として多く使用されるようになり、今後もその利用の進展が見込まれる。金属3D造形においては、その製作時のレーザー照射条件が造形物の金属組織や物性に大きく影響する^{9,10)}。しかし、マルエージング鋼粉末の金属3D造形への利用はまだ日が浅く、その造形条件等に関する系統立てた試験データの報告は少ない。また、民間企業が有する知見は企業のノウハウであり、公に開示されないのが現状である。

本報は、マルエージング鋼粉末による3D造形技法の普及を加速させる観点から、その製造条件と造形物の品質との関係を調べ、レーザー照射条件の違いによる造形物内部の空隙との関係について知見を得たので報告する。

2. 実験方法

試料は、図1に示す金属粉末光造形複合加工装置（株松浦機械製作所製/LUMEX Avance-25¹¹⁾を用い、図2に示す125×125×t20mmの炭素鋼基板（以下「ベースプレート」という）の上に10×10×t3mmの試験片を7段×7列に配置し、それぞれレーザー照射条件を変えて製作した。なお、実際の試験片は、後で試験片をベースプレートから切り離すため、高さ2mmのサポートを設け、さらに製作上の都合により、それぞれ向きを左に30°傾けて造形した。

試験片を製作する際のレーザー照射条件を表1に示す。金属3D造形装置では、図3の模式図に示すように、造形物製作時のレーザー照射条件として、レーザー出力 P 、レーザー集光径 D 、レーザー走査速度 v 、レーザー走査間隔 e 、一層当たりの積層厚さ d の各パラメータを設定する。このうち、製作効率の観点から、本実験においては、全てレーザー出力 $P=160$ W、造形積層厚さを $d=0.05$ mmとして試験片を製作した。

レーザー走査速度 v は、以下の式(1)で定義するレーザー光の単位面積当たりの照射エネルギー（以下「レーザー光熱密度」という）が $1.0\sim 10.0$ J/mm²の範囲になるように設定した。

$$q = \frac{P}{ev} \text{ [J/mm}^2\text{]} \quad (1)$$

ただし、 P ：レーザー出力 [W]、

e ：レーザー光走査間隔 [mm]、

v ：レーザー光走査速度 [mm/s]



図1 金属粉末積層造形装置の外観
(株松浦機械製作所製 LUMEX Avance-25)

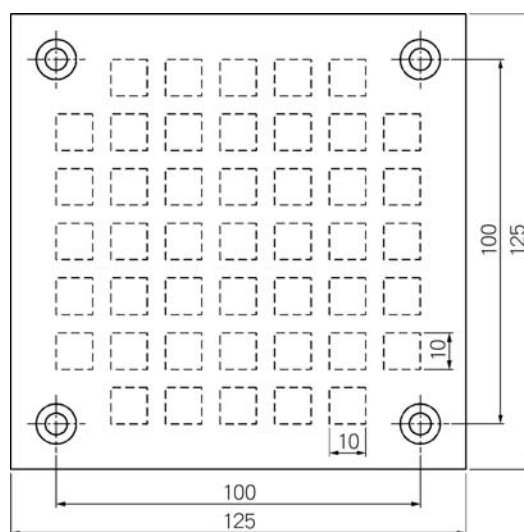


図2 造形試料（試験片）の形状・寸法

表1 試験片の製作条件

設定項目	設定範囲	
レーザー出力： P	160	[W]
レーザー集光径： D	0.1 ~ 0.5	[mm]
レーザー走査速度： v^{*1}	46 ~ 1.280	[mm/s]
レーザー走査間隔： e	0.1 ~ 0.4	[mm]
積層厚さ： d	0.05	[mm]
レーザー走査方式	5mm幅帯状	
レーザー走査方向	XY方向交互照射	
層間関係	XY交互	

※1 レーザ光熱密度の設定値によって固定。

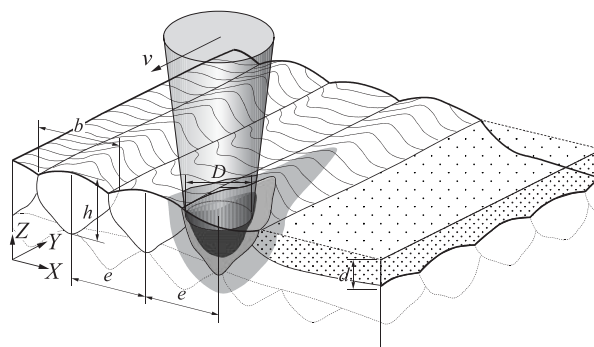


図3 金属3D造形のレーザー照射条件模式図

金属 3 D 造形による金型製作では、空隙の少ない緻密組織の造形と、多孔質組織の双方を効果的に組み合わせる造形する。すなわち、強度や硬さが要求される部位には緻密組織が求められるが、そうでない部位は多少の空隙があっても与熱量を抑えて迅速に造形した方が経済的であるという考え方によるものである。また、多孔質に造形された部位は、その空隙率の程度により、ガスや液体を透過させることができるため、成形時の金型内キャビティの加減圧や、成形後のエアージェクト（空圧で成形品を金型から抜型する技法）、離型剤の供給などに応用できる¹²⁾。

そこで、本研究では試験片の製作に際して、レーザー光熱密度を、内部空隙の少ない緻密組織に対しては 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 10.0 J/mm² の 7 水準、空隙の多い多孔質材に対しては、1.00~2.50 J/mm² の範囲で 0.25 J/mm² 間隔で 7 水準に設定し、式(1)からこれらの条件に適合するようにレーザー走査速度 v を 46 ~ 1,280 mm/s の範囲で変化させた。

レーザー集光径 D は 0.1~0.5 mm の範囲で 0.1 mm ごとに 5 水準、レーザー走査間隔 e は 0.1~0.4 mm の範囲で 0.05 mm ごとに 7 水準に変化させた。

試験片製作後、試験片をベースプレートから切り離し、最上面のレーザー走査方向に垂直となる鉛直面で切断して、その断面組織を観察した。組織観察は、まず鏡面研磨した断面の写真を 10 枚撮影し、その中から 5 枚を抽出して、画像処理によって材料と空隙の間に閾値を設け、視野面積に対する空隙の面積の比率を計測し、これを 3 つの組み合わせで計測してその平均を開口率 ϵ とした。画像処理で計測する視野数が十分に多いとき、開口率は材料内の空隙率と同値に近づくので、ここで計測した開口率は、材料の空隙率と同等と考えてよい。

次に、鏡面研磨した試験片試料の断面を、塩酸 3 : 硝酸 1 の容積比による混酸 (= 王水) でエッチング処理し、その金属ミクロ組織を観察した。特に、造形最上面には最終のレーザー照射によって溶融した金属材料の溶融域断面形状が観察されるので、この組織写真から画像計測法によって単一のレーザー光照射で溶融したと推定される領域の幅と深さを計測した。

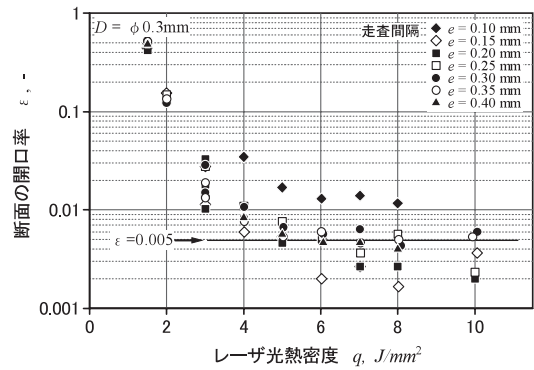
なお、組織写真の撮影には、金属顕微鏡 GX41 (OLYMPUS 製) を用い、100 倍に拡大した画像写真をデジタルカメラによりピクセル数 2144 × 1424 の解像度で撮影した。組織写真からの画像計測には、デジタル画像計測ソフト Quick Grain Pro Ver.4 (株 Inotech 製) を使用した。

3. 実験結果と考察

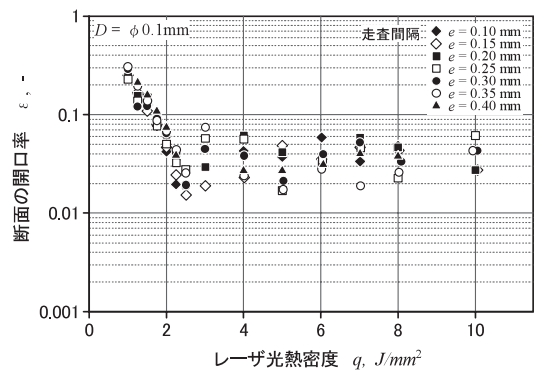
3.1 内部空隙率に及ぼす造形条件の影響

造形条件を変化させて製作した試験片の断面観察によって計測したレーザー光熱密度と開口率の関係を図 4 に示す。

レーザー集光径 $D = 0.3 \text{ mm}$ で製作した試験片では、図 4-a) に示すように、レーザー光熱密度が増大するにつれて開口率が



a) 造形条件 $D=0.3 \text{ mm}$ 時の走査間隔ごとの開口率



b) 造形条件 $D=0.1 \text{ mm}$ 時の走査間隔ごとの開口率

図 4 光熱密度と空隙率(開口率)の関係

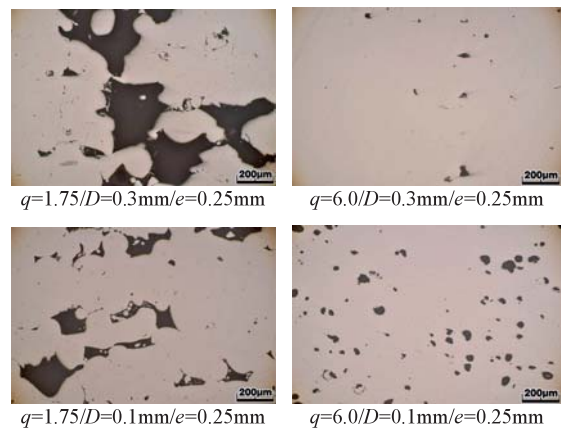


図 5 試験片断面の開口率観察写真 (写真の下の数字は造形条件を示す)

減少する傾向が認められる。金属 3 D 造形による緻密材の空隙率は、実用上、0.005 以下が目安とされる。実験結果から、開口率が 0.005 以下となる造形材は、レーザー光熱密度が 4 J/mm² を超える条件で得られることがわかる。ただし、レーザー走査間隔の違いによりばらつきが大きく、レーザー集光径 $D = 0.3 \text{ mm}$ の条件において開口率が 0.005 以下の造形材を安定して得るには、レーザー走査間隔 $e = 0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ でレーザー光熱密度 q が 6 J/mm² 以上の条件設定が必要である。

一方、レーザー集光径 $D = 0.1 \text{ mm}$ で製作した試験片は、図 4-b) に示すように、レーザー光熱密度を 3 J/mm² 以上に大きくしても、断面の開口率は 0.01 以下とならないことが判った。

レーザー集光径 $D=0.3\text{mm}$ と $D=0.1\text{mm}$ で製作した試験片について、レーザー光熱密度 $q=1.75\text{J/mm}^2$ と $q=6.0\text{J/mm}^2$ の条件で製作した試験片断面の写真を図5に示す。レーザー光熱密度が小さい条件では、いずれの集光径の場合も、金属粉末の未熔融で粉末間空隙を残したまま溶着した組織が認められる。一方、レーザー光熱密度が大きい条件では、未熔融による粉末間空隙が少なくなり、断面組織に観られる空隙の大きさがかなり小さくなっている。空隙の開口径はいずれも概ね $50\mu\text{m}$ 以下となっているが、形状に着目すると、 $D=0.3\text{mm}$ では開口形状がやや尖鋭なのに対して、 $D=0.1\text{mm}$ の開口形状は丸みを帯びているものが多く観られる。

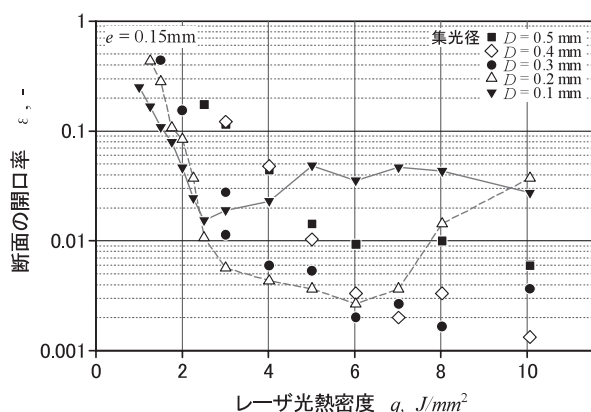
金属3D造形による金型で緻密材が要求される部位には、大きな圧力が加わったり、温度の昇降が頻繁に繰り返されたりすることが予想される。これら圧力や熱歪みによる繰り返し変動荷重を受ける部位では、亀裂の発生やその進展に関して、内部空隙の大きさや形状の影響が想定される。このような条件下では、空隙の数だけでなく、応力の集中に関わる大きさ・形状の空隙が存在することは望ましくなく、これらを低減する造形条件の選定が重要である。

造形時のレーザー光熱密度と試験片断面の開口率の関係をレーザー走査間隔ごとに整理して図6に示す。レーザー走査間隔

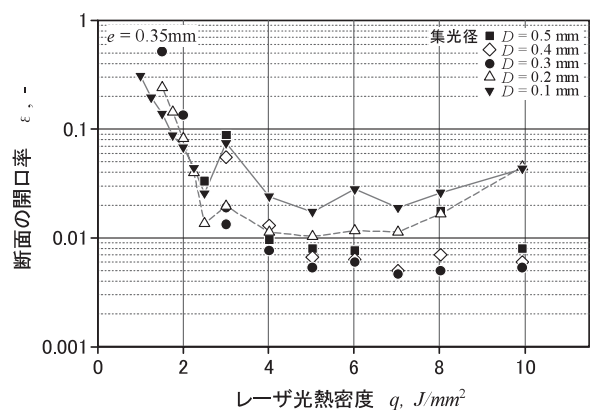
$e=0.15\text{mm}$ の条件で製作した試験片では、図6-a)に示すように、レーザー集光径 D が 0.3mm 以上についてレーザー光熱密度 q の増加に伴って開口率の減少傾向が認められ、特に、 $D=0.3\sim 0.4\text{mm}$ で q が 6J/mm^2 以上の条件で概ね開口率が 0.005 以下の試験片が得られている。 $D=0.5\text{mm}$ の条件では、 $D=0.3\sim 0.4\text{mm}$ の条件に比較して開口率が大きい傾向を示しているが、これは同じレーザー出力で集光径が大きくなると、深さ方向への与熱量が減少するため、積層厚さに対して金属粉末の未熔融部を多く生じさせる条件になったことがその原因の一つと考えられる。これに対して、 $D=0.1\sim 0.2\text{mm}$ の場合は、レーザー光熱密度 q の増加に対して一様の減少傾向とならず、 $D=0.1\text{mm}$ では $q=2.5\text{J/mm}^2$ 、 $D=0.2\text{mm}$ では $q=6.0\text{J/mm}^2$ の条件を境に、 q が増加しても開口率が減少しない挙動が認められた。

一方、レーザー走査間隔 $e=0.35\text{mm}$ の条件で製作した試験片では、図6-b)に示すように、レーザー集光径が $D=0.3\text{mm}$ 以上について、 $e=0.15\text{mm}$ の実験結果と同様に、レーザー光熱密度 q の増加に伴って開口率が減少するのに対して、 $D=0.1\sim 0.2\text{mm}$ では、 q が増加しても $q=5\text{J/mm}^2$ 付近を境に開口率が減少しない。さらに、 $e=0.15\text{mm}$ の実験結果と比較すると、 q の増加に対する開口率の変化は、 $D=0.1\text{mm}$ と $D=0.2\text{mm}$ とでは似た挙動を示しているが、この挙動にはレーザー走査間隔とレーザー集光径との比率が影響している可能性が考えられる。すなわち、レーザー走査間隔 $e=0.15\text{mm}$ のとき、集光径がこれより小さい $D=0.1\text{mm}$ の条件では理論的に隣接のレーザー走査パス間でレーザー照射光が重ならないが、 $D=0.2\text{mm}$ の条件では、隣接のレーザー走査パス間でレーザー照射光が集光径の4分の1程度重なることになる。これに対して、レーザー走査間隔 $e=0.35\text{mm}$ のとき、集光径 $D=0.1\sim 0.2\text{mm}$ は、レーザー走査間隔に対して十分に小さいので、いずれも理論的に隣接するレーザー走査パス間でレーザー照射光が重ならない。図5-a)と図5-b)の結果で示した集光径 $D=0.1\text{mm}$ と $D=0.2\text{mm}$ のレーザー光熱密度に対する挙動の差異は、レーザー集光径とレーザー走査間隔の比率が影響しているものとする。ただし、理論的に隣接するレーザー走査パス間でレーザー照射光が重ならない $e=0.35\text{mm}$ 、 $D=0.3\text{mm}$ の条件で開口率が 0.005 になる試料が得られているので、必ずしもレーザー集光径をレーザー走査間隔より大きくしなければ緻密な造形材が得られないということではない。

図6-a)と図6-b)の実験結果を比較すると、 $D=0.3\text{mm}$ 以上の条件においてレーザー走査間隔の小さい方が概して開口率が小さくなる傾向が認められることから、造形試料断面の開口率は、レーザー光熱密度に加えてレーザー集光径に対するレーザー集光径の比率の影響を受け、緻密な材料を得るためには、レーザー光熱密度を 6J/mm^2 以上に設定するとともに、レーザー集光径を $D=0.3\text{mm}$ 程度とし、レーザー走査間隔をこれ以下にする条件を選定すべきである。



a) 造形条件 $e=0.15\text{mm}$ の集光径ごとの開口率



b) 造形条件 $e=0.35\text{mm}$ の集光径ごとの開口率

図6 光熱密度と空隙率(開口率)の関係

3.2 レーザ照射溶融域に及ぼす造形条件の影響

一般に、積層造形法における造形速度は、単位時間当たりの造形容積で評価され、造形効率を示す指標の一つとなる。金属粉末積層造形における造形速度 V_B を次式で定義する。

$$V_B = evd \text{ [mm}^3\text{/s]} \quad (2)$$

ただし、 e : レーザ光走査間隔 [mm],
 v : レーザ光走査速度 [mm/s],
 d : 1層当たりの積層厚さ [mm],

この式で、レーザ走査間隔とレーザ走査速度は、造形速度を決定する重要なパラメータである。造形効率を維持したうえで内部空隙の少ない緻密な組織を得るためのレーザ走査速度およびレーザ走査間隔を決定するには、図3で示した模式図において、隣接するレーザパス間で溶融部が十分に重なっていることと最上面の粉末と既成層との良好な溶融状態を得るための必要かつ十分な溶融深さを得なければならない。したがって、造形効率の良い造形条件を知るためには、レーザ照射条件の変化に伴う材料の溶融状態の差異を把握しておく必要がある。

レーザ集光径 $D=0.2\text{mm}$ と $D=0.4\text{mm}$ の条件で製作した試験片の断面計測により、レーザ照射による材料の溶融領域の水平方向の幅（以下「溶融幅」という）と鉛直方向の距離（以下「溶融深さ」という）を、レーザ走査速度で整理して図7に示す。いずれもレーザ走査速度が増大するにつれて溶融幅、溶融深さともに小さくなる傾向が確認されるが、レーザ走査速度が大きいということは、材料にレーザ光が照射される時間が短くなることと同義であり、レーザ照射によって与える熱量が小さければ材料の溶融量が小さくなるのは自明である。

集光径 $D=0.2\text{mm}$ と $D=0.4\text{mm}$ の溶融域の計測結果を比較すると、集光径が大きい条件では、溶融幅が広がり溶融深さが浅くなる傾向が認められる。これは、レーザ出力が同じとき、材料に照射されるレーザ光の面積が広がれば、深さ方向の与熱密度が減り、溶融深さが浅くなると理解できる。図8は、レーザ走査間隔 $e=0.25\text{mm}$ 、レーザ走査速度 $v=\text{mm/s}$ でレーザ集光径を変えて造形した試験片の断面マイクロ組織の写真である。最上面の溶融領域の輪郭を強調して書き加えた部位について、隣接する溶融領域の重なりを考慮した形状で比較すると、レーザ集光径が大きくなるにつれて溶融幅が拡大し、溶融深さが浅くなる様子が確認できる。集光径 $D=0.1\text{mm}$ の溶融領域形状は他に比べて特徴的な形状をしているが、これは、図9の模式図で示すように、上部溶融池形成メカニズムの違いが影響していると考えられる。すなわち、レーザ集光径が比較的大きい場合は、図9-a)の模式図に示すように、材料表面にレーザエネルギーが照射されて上面から鉛直方向に進展して溶融池が形成される。一方、レーザ集光径が極端に小さい場合は、図9-b)のように小さな領域に高い与熱密度でエネルギーが照射され、鉛直方向に深く

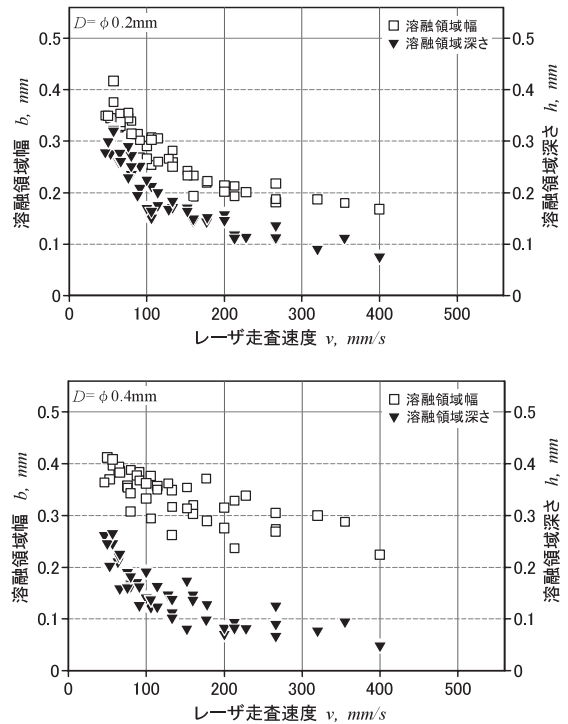


図7 レーザ走査速度と溶融域形状（幅・深さ）の関係

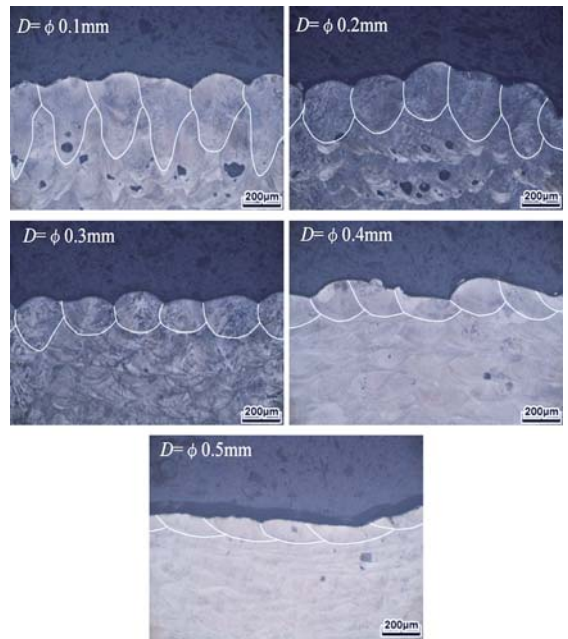


図8 集光径ごとの最上部溶融領域形状の比

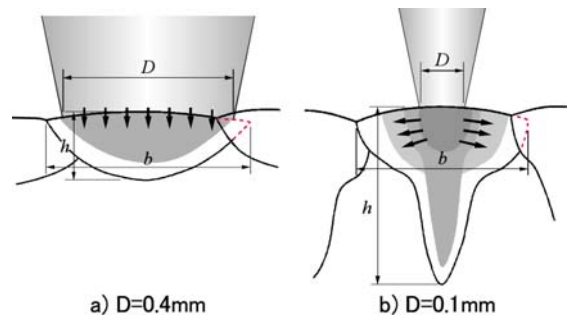


図9 レーザ集光径による溶融形態の違い（模式図）

溶融が進む一方で溶融池上部の溶融金属の昇温が大きくなり、水平方向へ伝熱による溶融が進展して図9-b)のような形状の溶融領域になると推測する。

また、集光径の小さな $D=0.1\sim 0.2\text{mm}$ の組織には、丸い形のブローホール欠陥が散見される。これは、小さく集光された高密度のレーザー照射で急激に昇温した溶融池内に周囲の雰囲気ガスの巻き込みや、金属の蒸発ガスが凝固時に取り残されたものと考えられる。前項で、集光径の小さな造形条件でレーザー光熱密度を高くしても内部空隙率が小さくならなかったという実験結果を示したが、これは、このメカニズムにより材料内にとどまったガスが内部に空隙として残留したためと考えることができる。

図8で示した造形試料断面のマイクロ組織最上部（最後に溶融造形された部位）に観察される溶融領域の形状について、その面積はレーザー光単位照射長さ当たりの溶融容積とほぼ同値であり、単一のレーザー照射で溶融する量に関する指標となる（以下「溶融領域面積」という）。レーザー走査速度と試料断面観察によって計測した溶融領域面積との関係を、レーザー集光径 $D=0.3\text{mm}$ の条件について図10に示す。

レーザー走査速度が増大するにつれて溶融面積が縮小するほか、両者には反比例の関係が認められる。また、レーザー走査間隔が異なっても、概ね同じ線上にプロットされることから、

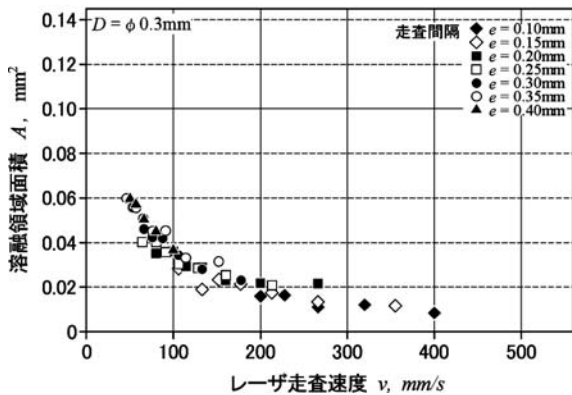


図10 レーザ走査速度と溶融領域断面積の関係

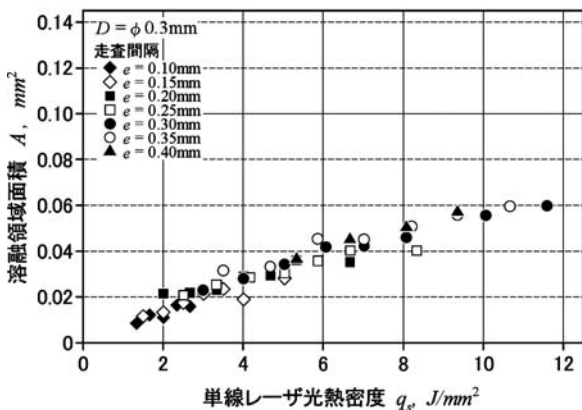


図11 単線レーザー光熱密度と溶融領域面積の関係

レーザー照射による金属材料の溶融状態へのレーザー走査間隔の影響は小さく、溶融量は一本のレーザーパスの照射条件、すなわちレーザー集光径とレーザー走査速度の2つの因子により支配されているようである。

そこで、図3で示した模式図より、単一のレーザー光照射による与熱量 q_s を以下のように定義する。

$$q_s = \frac{P}{Dv} \text{ [J/mm}^2\text{]} \quad (3)$$

ただし、 P ：レーザー出力 [W]，

D ：レーザー光集光径 [mm]，

v ：レーザー光走査速度 [mm/s]

式(3)の単位は、式(1)のレーザー光熱密度と同じ [J/mm²] であるが、式(1)は複数のレーザー照射パスによって広い面積を造形する際の与熱量密度であるのに対して、式(3)は、1本の線状パスのレーザー照射でレーザー集光径とレーザー走査速度の積で定義する面積に対する与熱量密度を表している。ここではこの与熱量 q_s を「単線レーザー光熱密度」と呼ぶことにする。

式から、単線レーザー光熱密度は、レーザー走査速度に反比例し、レーザー走査間隔の影響を受けない。図10で示したレーザー照射による溶融量（溶融領域の断面積）の関係を単線レーザー光熱密度で整理し直して図11に示す。予測どおり、溶融領域の断面積は、単線レーザー光熱密度にほぼ比例していることが確かめられた。今回の試験条件の範囲では、溶融領域の断面積はレーザー走査間隔の影響をほとんど受けていない。実際には、集光径とレーザー走査間隔が異なれば、レーザー照射パスごとに溶融する金属粉末の量や、集光径とレーザー走査間隔の比率の関係で、隣接造形域や下層の材料の再溶融量に違いが生じるので、造形時の溶融条件が異なったり、造形品質に影響することも考えられるが、今後の検討課題としたい。

単線レーザー光熱密度に対するレーザー集光径ごとの溶融幅の変化を図12に示す。式(3)により、単線レーザー光熱密度はレーザー集光径の大きさで変化するので、試験片製作時の単線レーザー光熱密度の範囲は、レーザー集光径ごとに異なる。また、図

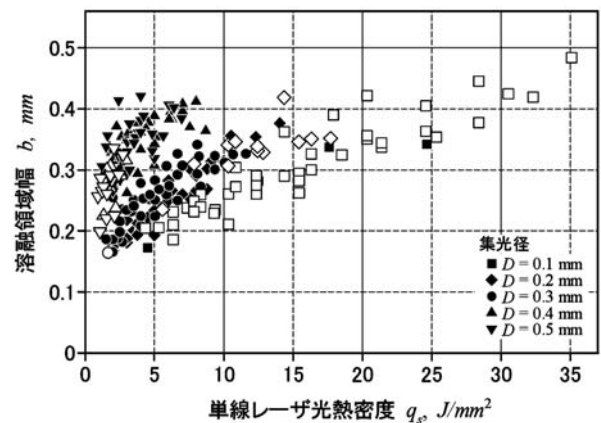


図12 集光径ごとの q_s に対する溶融幅 b の変化
(図中の白抜きプロットは $\epsilon > 0.02$ の試料を示す)

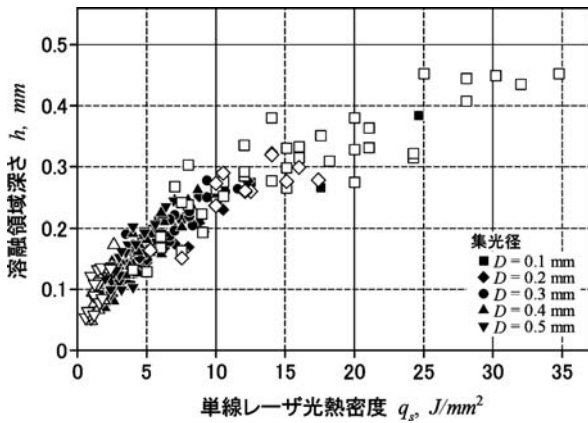


図13 集光径ごとの q_s に対する溶融幅 h の変化
(図中の白抜きプロットは $\epsilon > 0.02$ の試料を示す)

中の白抜きのプロットは、造形物内部の空隙率が0.02以上であることを示す。

いずれの集光径でも、単線レーザー光熱密度が大きくなるほど溶融幅が大きくなる傾向が認められる。また、同じ単線レーザー光熱密度で比較すると、レーザー集光径が大きいほど溶融幅が大きい。ただし、集光径が大きいかつレーザー光熱密度の小さい条件や、レーザー集光径が小さい条件では緻密材が得られず、緻密な造形組織を得ようとする場合は、レーザー集光径 $D=0.2\sim 0.3\text{ mm}$ 、かつ単線レーザー光熱密度 $q_s=3\sim 5\text{ J/mm}^2$ の条件となるようにレーザー走査速度とレーザー走査間隔を選定する必要があることが判った。

単線レーザー光熱密度の違いに対するレーザー集光径ごとの溶融深さ変化を図13に示す。図中の白抜きのプロットは、造形物内部の空隙率が0.02以上であることを示す。いずれの集光径でも、単線レーザー光熱密度が大きくなるほど溶融深さが大きくなる傾向が認められる。また、溶融幅とは異なり、レーザー集光径によるばらつきが少ないことから、溶融深さは単線レーザー光熱密度に強く支配されることが分かった。

造形物の金属組織観察から、金属3D造形における溶融深さは、一層当たりの積層厚さに対して2～3倍の距離が必要になると考えられる。すなわち、一層当たりの積層厚さが0.05mmのとき、溶融深さは0.10～0.15mmの溶融深さとなる条件を選定する。図13からこの条件となる単線レーザー光熱密度を $q_s=4\text{ J/mm}^2$ と読み取り、造形条件としてレーザー出力 $P=160\text{ W}$ 、レーザー集光径 $D=0.3\text{ mm}$ を選定すると、式(3)からレーザー走査速度は、 $v=133\text{ mm/s}$ と算出される。これに、レーザー走査間隔 $e=0.2\text{ mm}$ を選択すると、式(1)からレーザー光熱密度は、 $q=6.0\text{ J/mm}^2$ と計算され、図6-a)で示した緻密材の造形条件に概ね適合する。また、この条件における造形速度は、式(2)から $V_B=1.33\text{ mm}^3/\text{s}$ ($\approx 4.9\text{ cc/h}$)と算出され、実験装置で緻密材を製作するとき、造形所要時間を見積もる際の参考値となる。

4. まとめ

金属粉末積層造形法で金型等の実用金属製品を製作するために多用されるマルエージング鋼粉末を用いた金属3D造形について、その適切な製作条件を得るべく、レーザー集光径、レーザー走査速度、レーザー走査間隔の因子を変化させて試験片を造形し、造形物の内部空隙と金属組織に及ぼすこれらパラメータの影響を調べた。

造形試験の結果、造形物内部の空隙については造形時の単位面積当たりの与熱量の影響を受け、この余熱量が大きいほど内部空隙率が減少する傾向を確認した。ただし、レーザー集光径を小さく絞ると、特殊な溶融メカニズムにより、与熱量を大きくしても内部空隙率が減少しないことが判った。

また、レーザー照射条件の違いによる金属粉末および既溶材の溶融形態を造形物断面のマイクロ組織観察で評価し、単一のレーザー照射による溶融領域の幅、深さ、面積、形状に及ぼすレーザー集光径、レーザー走査速度の影響についてこれらの関係性を調べることにより、マルエージング鋼による金属3D造形における最適条件の設定値と造形速度に関する知見を得た。

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) 京極秀樹：「最近のレーザー積層造形技術の開発状況」, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告 Vol.1 (2010)
- 3) 前田寿彦：「レーザー焼結型AMシステムのマニファクチャリングへの活用について」, 素形材 Vol.53 No.2 (2012)
- 4) 米山 猛, 香川博之, 末廣栄覚, 阿部 諭, 宮丸 充：「金属光造形複合加工金型を用いた射出成形サイクルタイムの短縮」, 成形加工 Vol.19 No.10 (2007)
- 5) 東 喜万, 阿部 諭, 峠山裕彦, 吉田徳雄, 不破 勲：「金属光造形法の開発と金型への応用」, 松下電工技法 No.78 (2002)
- 6) 阿部 諭, 不破 勲, 東 喜万, 峠山裕彦, 吉田徳雄, 太田卯三：「金属光造形複合加工システムによる高機能射出成形金型製作」, 松下電工技法 Vol.53 No.2 (2005)
- 7) 木下禾大, 徳永洋一, 豊島孝行：「マルエージング型ステンレス鋼の組織図と時効硬化」, 日本金属学会誌 Vol.33 (1969)
- 8) 清水謙一, 岡本尚機：「18%Niマルエージング鋼におけるNi3Mo析出物の電子顕微鏡による研究」, 日本金属学会誌 Vol.35 (1971)
- 9) 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」, 日本铸造工学会第165回全国講演大会 (2014.10)

- 10) 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)
- 11) 山岡恒治:「金属光造形複合加工装置『LUMEX Avance-25』」, 精密工学会誌 Vol.74 No.4 (2008)
- 12) 不破 勲, 東 喜万, 阿部 諭, 武南正孝:「低密度層からなるガスベントを有する金属光造形金型」, 松下電工技法 Vol.53 No.2 (2007)

研究ノート

Research Note

マルチローター型UAVの利活用技術

浦池 隆文, 多田 達実, 鈴木 慎一, 飯島 俊匡, 井川 久

Utilization Technology of Multi-Rotor UAV

Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI,
Toshimasa IJIMA, Hisashi IGAWA

抄 録

農業・林業分野や環境・災害調査等の分野では、衛星若しくは有人航空機や大型ラジコンヘリによる上空からの計測や作業が行われているが、より手軽で低コストな手法が求められている。近年はマルチローター型UAVの性能向上と低価格化が進み、各種センサを組み合わせることで様々な用途への応用が可能となってきている。UAVを活用することで上空からの調査を簡便に、適時に、低コストで実施することが可能になると考えられ、より精密な調査・管理を実現する新たな手法としての期待が大きい。

本研究では、H26年度に導入したUAVによる農地上空を主とした飛行試験（空撮）を実施することで、運用に関する技術蓄積を図るとともに、可視光及び近赤外光による画像データの取得と解析手法について検討を行った。空撮で得られる複数の画像から高解像度・広領域な画像を生成し、さらに画像解析による植生状況の把握や圃場地図の生成手法を確立した。また、農業分野のほか林業分野や水産業分野での活用についても検討したところ、有益な情報が得られることを確認した。

キーワード：UAV, 空撮, 可視光, 近赤外光

1. はじめに

近年はマルチローター型UAVの性能向上と低価格化とともに産業応用が進み、衛星や有人航空機を用いるよりも簡便に、精密な調査や管理を可能とする新たな手法としての期待が高まっている。

本研究では、H26年度に導入したUAVによる農地上空を主とした飛行試験（空撮）を実施することで運用に関する技術蓄積を図り、飛行性能や作業能力の確認を行った。また、空撮により得られる画像データ（可視光及び近赤外光）の解析方法について検討し、植生状況の把握や圃場地図の生成手法を確立するとともに、農業分野のほか林業分野や水産業分野への適用と有効性の検証を行った。

2. マルチローター型UAV保有機材

当場では、(株)自律制御システム研究所製ミニサーベイヤーMS-06LAを保有し、飛行試験を行っている。機体の操作は

事業名：経常研究

課題名：マルチローター型UAVの利活用技術に関する調査研究
(H27～28年度)



図1 マルチローター型UAV一式

送信機による手動操縦が基本であるが、機体との通信機能を持つ地上局PCにより飛行経路を設定することで、機体に搭載されたGPSによる完全自律飛行を行うことが可能である。図1に保有機一式の外観を、表1に仕様を示す。

表1 マルチローター型UAV仕様

プロペラ	13インチ (ピッチ7) × 6枚
全長	1010mm
高さ	360mm
バッテリー	LiPo 6s (22.2V) 12,000mAh
最大離陸重量	8kg (本体3kg)
ペイロード	5kg (推奨2kg)
飛行時間	約10分～30分 (ペイロード等により変化)
飛行機能	マニュアル操縦、姿勢アシスト操縦 GPSアシスト操縦、GPSによる計画飛行

3. 保有機の飛行性能

3.1 飛行経路誤差

GPSによる自律飛行を行った際の、目標経路に対する実際の飛行経路を図2、図3に示す。図2のWP1～WP8で示した点がチェックポイント（緯度、経度で指定）であり、チェックポイント間を順に結ぶ直線が目標飛行経路を示す。経路の長辺方向が約30m、短辺方向が約17.5mとなっている。このような経路を設定し、自律飛行を行った際の飛行経路を確認すると、最大でWP2到達時に1.1m程の誤差があった。図3には、WP1～WP8まで飛行した際の高度変化を示している。目標高度10mに対して常に高度が変化しながら飛行しているが、WP3～WP4への移動時に最大で1m程高い高度を飛行していた。なおここで示した実際の飛行経路は、地上局に蓄積される飛行ログを解析することで確認している。飛行経路は、機体に搭載されているGPSや慣性センサ、気圧高度計から演算されている。実際の飛行時は、GPS捕捉数や気流・気圧の変動の影響を受けるため、条件によってはより大きな誤差が発生する場合もあることを考慮すると、飛行経路誤差は最大で数mになるものと考えられる。

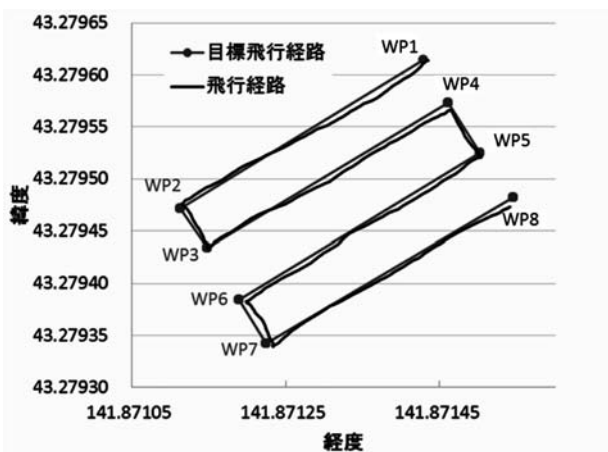


図2 目標経路と実際の飛行経路

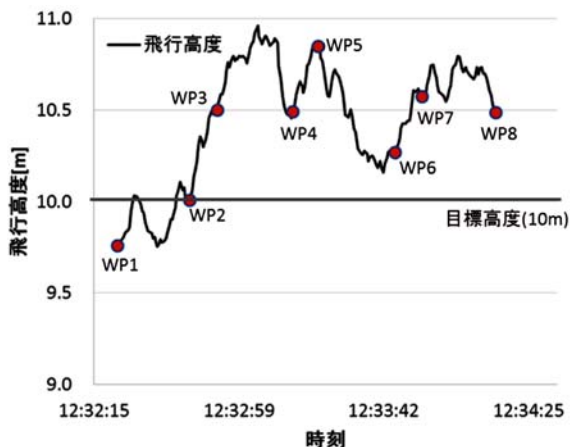


図3 飛行高度の変化

3.2 飛行時間と作業能力

本機の飛行時間は仕様では約10分～30分となっているが、標準装備のバッテリーを使用して空撮を行う場合の作業能力に関しては、1回あたり約15分の飛行で10ha程の領域（飛行高度150mの場合）を撮影することが可能である。重量増加が許容できる場合はより容量の大きなバッテリーを使用することにより、約20分の飛行で20ha程の撮影が可能であることを確認している。

4. 空撮による画像の取得

飛行試験においては、可視画像取得用デジタルカメラ（リコー製GR）と近赤外画像取得用デジタルカメラ（BIZWORKS製Yubaflex）を搭載した状態で空撮を行っている。自律飛行による撮影条件設定の例を図4（とうもろこし圃場）に示す。図中の白線は飛行経路を表す。左下を起点として紙面上方向に前進した後右方向へ移動し、紙面下方向に後進する経路を繰り返しながら移動する、櫛状の経路を設定している。飛行している間は、カメラのインターバル撮影機能により、連続して機体直下の静止画を撮影する。飛行速度や撮影インターバルは、前後の撮影領域が80%程重なるように計算して設定する。航空法により規制される飛行高度の上限150mから空撮を行う場合、GRで記録される1枚あたりの撮像領域は、縦129m×横194m（地上分解能約0.05m）であるが、図4の例では飛行速度5.2m/s、撮影インターバル5秒で約240枚の撮影を行うことにより、縦460m×横400m（圃場面積16.5ha）の領域をカバーするように設定している。

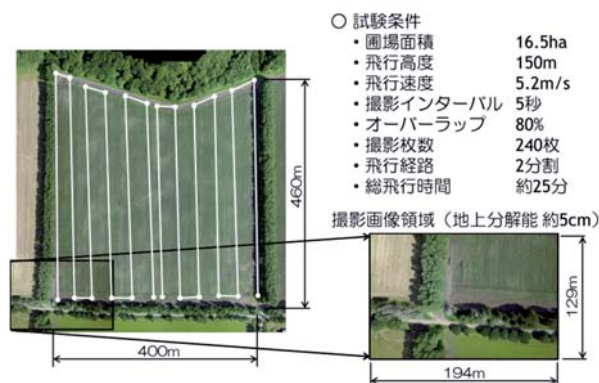


図4 飛行条件設定の例

5. 空撮画像の解析

空撮により得られる複数の画像にSfM (Structure from Motion, 複数の画像からカメラ位置の推定と撮影対象の三次元形状復元を行う手法) による処理を適用することで、広領域な空撮画像や三次元データを生成し、各種解析に利用している。SfMの詳細については割愛するが、処理には

Agisoft製PhotoScanを使用している。PhotoScanでは、複数枚の画像から、点群で表される三次元の地形データやポリゴン地形データの取得、オルソ画像の生成等が可能である。図4で示した圃場全体の画像は、PhotoScanを用いて240枚の画像を処理し、オルソ画像を得た結果である。

5.1 近赤外画像による生育状況の把握

可視画像（GRにより得られる画像）とあわせ、近赤外画像（Yubaflexにより得られる画像）を用いることにより、植生指数分布等の取得が可能である。ここで植生指数（NDVI, Normalized Difference Vegetation Index）とは植生の分布状況や植物の活性度を示す指標であり、同一画素に記録されている近赤外（NIR）と赤(R)の輝度値（撮影対象からの反射）を用いて、 $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ により計算される。これは、光合成が活発に行われていると赤を多く吸収し（反射が少ない）近赤外を多く反射していることを利用したものである。植生指数は-1から1の値をとり、1に近いほど植物の活性が高いことを示す。可視画像と植生指数画像を、同一の圃場で時期を変えて取得した例（小麦圃場）を図5に示す。植生指数画像においては、黒色が植生の無い部分（土や道路等）を示し、灰色～白色となるにしたがって植物活性が高いことを示している。可視画像の緑色の濃淡から植物活性の度合いを直接的に判別することは困難であるが、植生指数画像を用いると圃場内での分布の確認等を行うことが可能であり、精密農業の実践において非常に有益な情報が得られる。

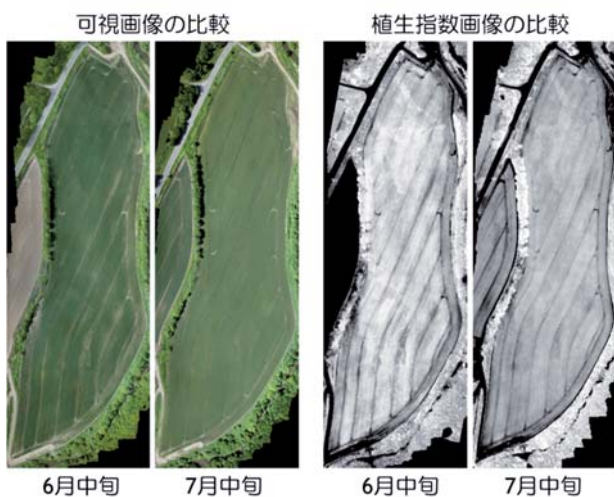


図5 可視画像と植生指数画像の比較

5.2 画像解析による圃場地図の生成

営農においてIT支援システム等を利用する場合、電子化された圃場（農地区画）地図が必要となるが、その入手は容易ではないため、現場ではこれまでに衛星画像や航空写真を用いた圃場地図の生成に取り組んできた。しかし、衛星画像

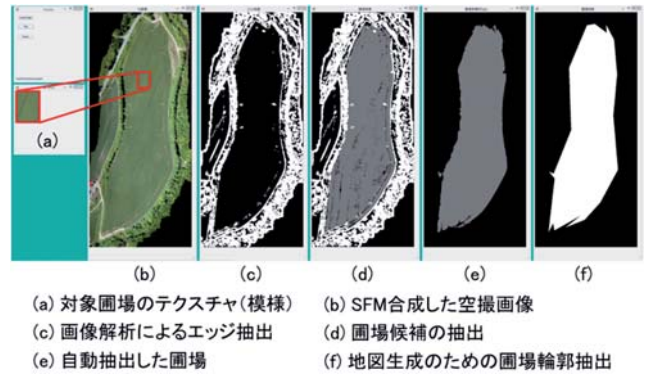


図6 画像解析による圃場地図の作成

や航空写真を任意の時期に低コストで入手することは困難であることから、UAVを利用して得られた空撮画像から画像解析により圃場を自動抽出する手法について検討した。

まず、前節までと同様にして広領域の空撮画像を生成する。次に圃場とその周辺域の画像特徴量に差があることを利用して、輝度及び色相のエッジ強度を閾値処理し圃場の境界候補とする。さらに単一の圃場は概ね様なテクスチャ（模様）を有していることを利用して、近い画像特徴量を持つ領域を選択的に拡大していき一筆の圃場とする。そして、その輪郭を抽出してベクター化し、空撮画像に紐付いた緯度・経度から座標データを付加することで、空撮画像から圃場地図を自動的に生成することが可能となった（図6）。このように、UAVを用いることで低コストに圃場地図が得られ、営農支援システム等で利用が可能である。

6. 林業・水産業分野への応用

農業分野のほか、林業分野や水産業分野への応用について検討を行った。図7、図8に林業分野での活用例を示す。図7は伐採林の空撮を行った例を示している。このような画像を定期的を得ることで伐採後の森林の回復や周辺環境への影響をモニタリングすることが容易となるほか、拡大図のように、台風により発生した倒木の状況等を詳細に把握することも可能である。また図8は、植栽林における幼木の生育状況

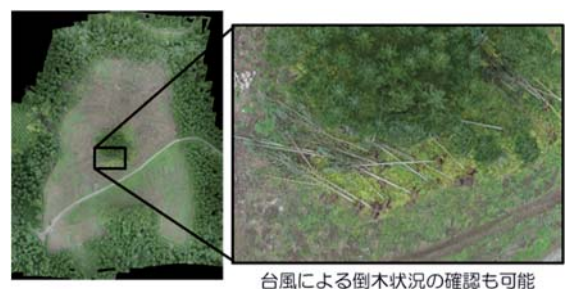


図7 伐採林の撮影例

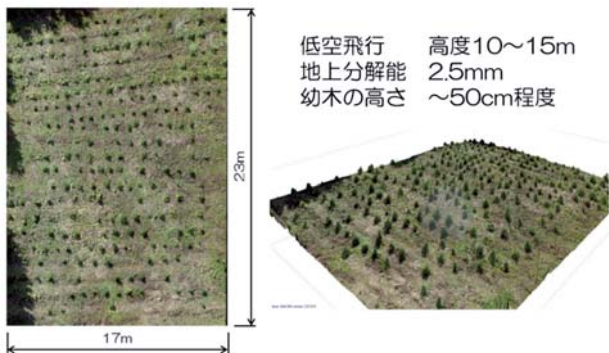


図8 植栽林の三次元化

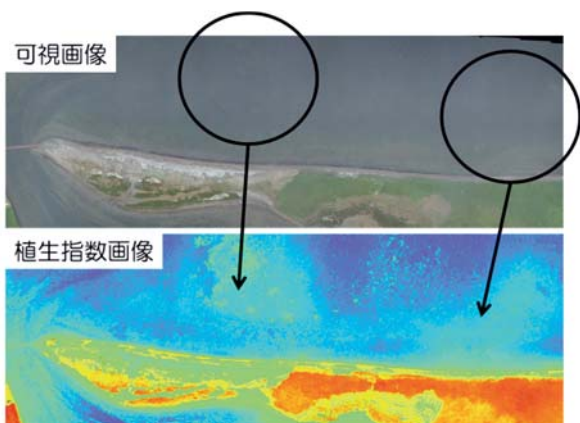


図9 水産業分野への適用

を、三次元点群データで示した例である。この例では低高度(10~15m)での空撮を行い、地上分解能約2.5mmでデータを取得している。これによれば幼木の大きさや地盤の状態を確認することが可能である。下草刈等多くの労力を要する育林作業において、現地状況の確認等に有効である。これらのように、踏査や人手による管理に多大な労力を要する林業分野においても、UAVによる空撮画像の活用は非常に有用なものとなる。

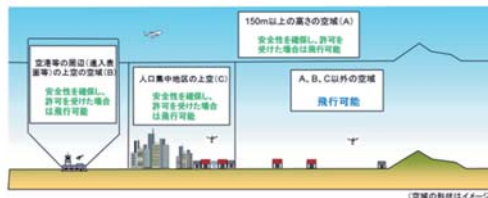
図9は、水産業分野への適用を試みた例である。沿岸部において可視画像では認識が困難な状態が、植生指数画像では強調されている。沿岸部浅海域において海草や藻類の分布を判別できる可能性があり、水産資源の調査や管理においても有効と考えられる。このような、水産業分野での積極的な利用についてはこれまであまり進んでいなかったものの、本研究を実施するなかで技術相談や具体的な要望が寄せられていることから、今後はより踏み込んだ検討を進めることとしている。

7. UAV運用の留意点

UAVの運用に関しては、2015年12月に航空法が改正され、飛行禁止区域や飛行の方法が明確に示された(図10)。これらによらず飛行を行う場合には国土交通省の許可・承認が必要となる。規制の対象となる飛行方法での試験を実施する場

■無人航空機
 ・「人が乗ることができない飛行機、回転翼航空機、滑空機、飛行船であって、遠隔操作又は自動操縦により飛行させることができるもの」 ※200g以上

■飛行禁止区域
 (A) 地表から150m以上の上空
 (B) 空港等の周辺上空
 (C) 人口集中地区(国勢調査において設定される統計上の地区)



■飛行させてはいけない方法



「無人航空機の飛行ルール」(国土交通省)

(http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html)

を加工して作成

図10 航空法による無人航空機の飛行方法

合は、事前検討を十分に行うことが非常に重要である。また、規制対象の有無にかかわらず、安全対策や飛行マニュアル等を作成し安全な運用を第一に考えなければならない。今後はますますUAVが活用される事例も増加すると考えられるが、事故を未然に防ぐ上で飛行前の動作確認や日常点検は必須であり、少しでも不安要素が認められた場合は飛行を中止する仕組みを準備し徹底することに留意する必要がある。

8. おわりに

可視画像や近赤外画像を用いたUAVによる上空からの調査は、従前の衛星画像や有人航空機を利用する方法と比べ、格段に低コストで手軽な手法であり、様々な分野での応用が期待される。今回例示したデジタルカメラを用いた空撮と解析のほか、近年は各種センサ類の小型化が進み、UAVへの搭載が容易になってきている。これまでに得られた知見をもとに、今後も継続して適用分野の拡大に向けた取り組みを進める。

北海道の大規模機械化農業のためのソフトウェアの開発

堀 武司, 全 慶樹, 近藤 正一, 奥田 篤, 佐藤 彰宏*

Development of a Planning Support Software for Large-scale Mechanized Agriculture in Hokkaido

Takeshi HORI, Keiki ZEN, Shouichi KONDO,
Atsushi OKUDA, Akihiro SATO*

抄 録

北海道の農業は、離農者の農地引継ぎや農業生産法人化などにより大規模化が進行しており、これらの特性を生かした営農効率化が求められている。道内の営農指導では「機械化作業体系計画図」などの手法を用いて農業機械の導入・利用を計画的に行うことが推奨されてきたが、計画設計作業の複雑さなどから農業現場で実際に活用されている例は少ない。そこで本研究では、入力された各種営農データをもとに機械化作業体系計画図を作成するITシステムの試作を行った。実際の道内農業法人のデータを用い、試作システムの評価を行った結果、専門家が作成したものとおおむね同等水準の作業計画を、簡便かつ迅速に作成できることを確認した。

キーワード：営農支援システム、機械化作業体系計画、クラウドサービス

1. はじめに

北海道においても農業従事者の高齢化と後継者不足による離農が進んでおり、それらの農地の引継ぎにより一戸あたり営農規模が大規模化する傾向にある。今後も地域の農業を維持・発展させていくためには、更なる大規模化に対応できる営農の効率化が不可欠である。

また、近年の傾向として、経営管理能力の向上と営農効率化を目指し、複数戸の個人農家の合併により農業生産法人を設立する動きが加速している。平成27年の時点では、道内全体で約3,000の法人が存在し、毎年100社程度の法人が新規設立されている。これら農業生産法人に対しては地域農業の中核的な担い手として期待が高まっているが、そのためには組織化された大規模経営の長所を営農効率化につなげるための具体的方策が必要である。

北海道の大規模畑作では、高価格な大型トラクタや各種農作業機械を多数用いる機械作業が農作業の中心である。生産コストにおいても農機具費は全体コストの約二割を占め、労働費（機械オペレータのコストを含む）を合わせると4割弱となる（図1）。そのため、適正な農業機械の導入、運用が営農効率化における重要な課題の一つである。

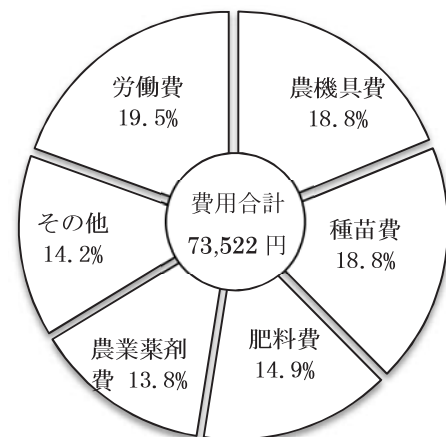


図1 原料用ばれいしょ生産費の主要費目(10aあたり)

北海道内の営農指導では、農業機械の作業能率や負担可能面積などのデータにもとづき系統的に作業計画を設計し、営農規模に対して過不足のない適正な農業機械の導入・運用計画を立てることを推奨してきた²⁾。また、具体的な計画設計法として、機械化作業体系計画図と呼ばれる図表を用いた手法が指導で用いられてきた^{2,3,4)}。

しかし、これらの手法を用いた農作業計画設計は非常に煩雑な作業となることから、実際の農作業の現場では十分に活用が進んでおらず、熟練した農作業管理者の知見に依存する形での作業管理が行われているのが実状である。

そこで本研究では、大規模畑作における農業機械の効率的な導入・運用を支援するため、機械化作業体系計画図にもと

* 株式会社コア, CORE Corporation

事業名：経常研究

課題名：大規模営農を支援する農業情報提供システムに関する研究

づく農作業計画設計を省力化、自動化するためのITシステムの開発を行った。

2. 機械化作業体系計画図による作業計画設計

機械化作業体系計画図とは、輪作により並行して行われる複数作物の作業に関して、各作業の実施時期、及び作業に対するトラクタ、作業機、人員の割当てを表形式でとりまとめたものである(図2)。機械化作業体系計画図を用いることで、①作業の競合と回避方法の検討、②機械の年間使用時間の把握、③現行の作業体系の問題点や改善方策の検討、④新規導入する作物・機械による作業体系変更の効果検討、などの分析が可能となる。

また、機械化作業体系計画図は、個々のトラクタや人員に関する作業スケジュールそのものでもあり、日々の農作業の管理においても活用できる。

項目	月日(日単位で設定)				
	5月	6月	7月	10月	
栽培区分	(例)秋まき小麦(20ha)	追肥			
	馬鈴しょ(20ha)				
	牧草(5ha)		刈草		
	飼料用とうもろこし(15ha)				
基幹機械	1号トラクタ (PS)	作業機名	ブロードキャスト		
		実作業日数	7		
		1日作業時間	5.2		
		労働人員	基幹	1	
	2号トラクタ (PS)	作業機名			
		実作業日数			
		1日作業時間			
		労働人員	基幹		
	自走式機械 (コンバイン、フォレージハーベスタなどの大型機械)	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			
労働人員		基幹	1		
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、たまねぎ移植機など)			
	1日能率×日数×人数	トラクタ・運搬車輛など			
手作業	作業名および使用器具名	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	補助 (作業者数を示す)				

図2 機械化作業体系計画図の例

機械化作業体系計画図の作成手順は、道農政部「農業機械導入計画策定の手引き」³⁾などで詳細に説明されているが、おもに考慮が必要となるのは以下の事項である。

1) 並行作業間の作業競合

4品目以上の作物で輪作を行うことが前提となるため、複数作物に関する作業が同時期に並行して行われる。その際、これらの作業間で、利用するトラクタ、作業機械、人員等の重複が発生しないようにスケジュールしなければならない。

また、可能であれば、各作業のスケジュールをずらすなどして作業の重複を避け、必要なトラクタ台数を削減し機械の利用効率改善を考慮することも求められる。

2) 作業適期

それぞれの農作業には、作物別、作業内容別に実施すべき期間(作業適期)がある。作業適期を逸脱した場合は作物の収量や品質に対する悪影響があるため、具体的な作業期間を定める際には、それぞれの作業適期の範囲内となるように配慮しなければならない。

道内で栽培される主要作物に関しては、「北海道農業生産技術体系」⁵⁾の中で、標準的な作業体系と作業適期の情報が提供されているが、地域ごとの気象条件などに応じて変更が必要である。

3) 作業所要日数の見積り

各作業の所要日数は、機械の作業能率などのデータから、図3に示す計算手順によって見積もられる³⁾。

負担面積とは、当該トラクタ・作業機が所定日数作業した場合に作業可能な面積である。作業期間を適期全体とした場合の負担面積は現在の機械装備で耕作可能な最大面積を表しており、実際の作付面積がこれに近い場合は機械が無駄なく活用された状態といえる。

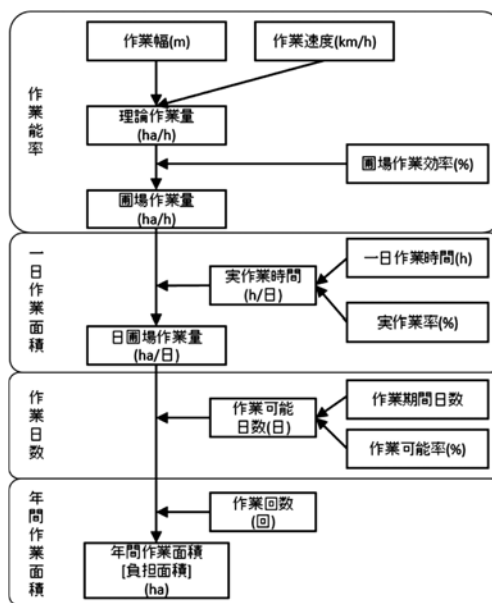


図3 負担面積の計算手順

負担面積の計算には、機械の作業能率(作業速度、圃場作業効率など)、一日あたりの作業可能時間、作業可能日数などのデータが用いられる。作業速度や圃場作業効率などの値は、各農業者の実態に合わせたデータを用いるのが望ましいが、詳細なデータが得られない場合は、標準作業能率表⁶⁾の値を用いることができる。

3. 農作業計画設計支援システムの設計と実装

2章で説明した考え方と計算手順にもとづき、保有する機械装備の能力などのデータにもとづく農作業計画を系統的に設計することができる。しかし、一連の計画設計作業は非常に煩雑であり、手作業若しくは一般の表計算ソフトなどを用いて作業した場合には、熟練者であっても準備作業を含めて数時間以上を要する。新規機械導入に伴う改善効果の検討などを行う場合には、計画設計の前提条件を変更しながら複数の作業計画を作成することになり、更に作業時間を要する。

そこで、計画設計作業の煩雑さを解決し、農業現場における作業改善、経営改善ツールとしての機械化作業体系計画図の活用を促進するため、一連の設計作業を省力化、自動化するためのITシステムの設計・開発を行った。

3.1 既往の営農管理システムの調査

農業分野におけるIT技術活用は近年急速に進んでおり、様々な営農管理システムが既に製品化されている。本研究では、システム開発に先立ち、既往の営農管理システム製品が備える機能の調査を行った（表1）。

表1 主要な営農管理ITシステム製品

製品名	開発元	主な機能
Akisai	富士通	生産履歴管理、販売管理など
GeoMationFarm	日立	GIS上の情報管理
KSAS	クボタ	トラクタ作業記録の管理
apras	農研機構	農作業日誌の記録・管理
PMS	農研機構	農作業計画の設計（水稲中心）

Akisai⁷⁾、GeoMation Farm⁸⁾など大手ITベンダが開発する大規模・多機能製品、KSAS⁹⁾などのトラクタの行動把握機能を中心とする製品、APRAS¹⁰⁾などに代表される小規模なクラウドサービス型製品など、多様な規模と価格帯の製品が提供されているが、これらのシステムのほとんどは生産履歴の記録管理機能を中心として構築されている。一方で、農作業計画については、システム上での計画入力・管理機能、計画入力時の補助機能として前年度作業実績を参照できる機能などは多くの製品が備えているが、機械化作業体系計画図のような系統的な計画設計作業を支援する機能は、調査時点ではどの製品にも存在しなかった。

作業計画・管理支援システム（PMS）^{11,12)}は、数理最適化技術を用いて農作業計画の最適設計を行う機能を備えており、著者らが想定するシステムに近い。しかし、PMSは水稲中心の作業への適用を想定しており計画最適化の観点もそれに沿ったものであるため、北海道の大規模畑作における複雑な並行作業における機械利用の効率化に関しては十分な機能を有していない。

これらの調査結果から、本研究では、北海道の大規模畑作における機械利用を中心とした作業計画設計に特化した独自のシステム開発を行うこととした。

3.2 システムの要求分析と基本設計

想定されるシステム利用形態を「農業生産法人において経営者や作業管理者がおもに利用し、法人の年間作業計画設計や、機械装備の効率化検討のために用いられる」と設定し、これに沿ってシステム要求分析及び基本設計を行った。

作成したシステム機能仕様のおもな項目を表2に示す。設計に際しては、一般的な営農管理に関する各種データ（圃場情報、作付計画など）を取り扱う部分と、作業計画設計に直接関係する部分を明確に区別し、分離可能とするように留意した。これによって、既に導入されている他の営農管理システムと本システムとの相互連携やデータ共有が容易になることが期待される。また、本システムの機能を実作業計画設計のみに限定し、データ管理機能などは外部の営農管理システムに委ねる形態でのシステム実装も考えられる。

表2 システム機能仕様の概要

分類	機能
標準データ管理	標準作業体系管理 標準作業能率表
農場データ管理	ユーザ登録・管理 圃場登録・管理 トラクタ・作業機登録・管理
作業計画設計	作業員登録・管理 計画設計条件入力 計画作成（自動スケジュール） 計画図表示・編集

機械化作業体系計画図の作成方法、機械の負担面積計算などの機能は、「農業機械導入計画策定の手引き」³⁾の記述に従っているが、作業期間の見積り、作業へのトラクタ、人員の割当てなどの設計作業は、各種制約条件を考慮しコンピュータが自動計算する設計とした。

3.3 システムの実装

基本設計にもとづき、実際に動作するシステムの試作を行った（図4）。試作システムの実装形態は、ネットワークサーバ上で動作しユーザはWebブラウザ経由で操作を行う、Webアプリケーションとした。また、試作システムの実装はJava言語で行い、表3に示すフレームワーク、ライブラリ、データベースサーバ等を利用した。



図4 試作システム（主メニュー画面）

表3 システム実装に使用した主なソフトウェア

種別	名称
データベースサーバ	PostgreSQL 9.4
アプリケーションフレームワーク	Apache Spring 4.3
O/R マッピング, 永続化	MyBatis
ガントチャート描画	jqgantt

4. システムの評価

試作システムの機能及びシステムが生成する作業計画の妥当性を検証するため、道東地区の農業生産法人2社における実際の営農データを用いて作業計画設計の試行と評価を行った。

また、システムの発展的な活用方法を検討するため、農作業実績データの反映による作業計画の高精度化、農作業シーズン中におけるリスケジュールへの応用についても試験を行った。

4.1 対象の農業生産法人

道東地区の農業生産法人2社（以下、法人A社、法人B社とする）の協力により、平成27、28年の2カ年にわたって、機械化作業体系計画図の作成に必要な営農データの提供を受けた。

両法人に関する基本的な営農情報を表4に示す。どちらの法人も200ha程度の圃場を保有しており、畑作4品目（ばれいしょ、小麦、てんさい、大豆）を中心とする輪作を行っている。法人A社はトラクタ保有台数がやや多いが、これは法人設立からの経過年数が比較的短く、設立時に持ち寄られた機材の整理が進んでいないためである。

表4 農業生産法人2社の基本情報

	法人A社	法人B社
圃場面積 (ha)	230	200
保有トラクタ (台)	21	14
うち 100馬力以上	6	7
主要な栽培作物	畑作4品+金時	畑作4品+たまねぎ

4.2 GPSを用いた農作業実績の調査

作業計画設計の試行と並行して、法人が実際に行った農作業の実績を把握するため、トラクタ搭載GPSを用いた作業実績調査を実施した。

2法人が保有する主要トラクタ全てに対してGPSロガーを搭載し、2カ年分のトラクタ走行軌跡情報（5秒間隔）を網羅的に収集した。これらのトラクタ走行軌跡と圃場区画形状情報をGISシステム上で処理することで、圃場一筆ごと、トラクター一台ごとの詳細な作業実績情報（作業開始・終了日時、使用トラクタ、作業の種別など）を得ることができた。

4.3 機械作業計画の作成機能の評価

法人から提供された保有トラクタ・作業機械、作付計画などのデータを試作システム上に登録し、自動スケジュール機能を用いて機械化作業体系計画図の生成を行った（図5）。また、それらと同じデータを用いて、農作業計画設計の専門家（農業試験場研究員）が、従来方法にもとづき手作業による作業計画設計を行った（図6）。これら二つの作業計画、及びGPS走行軌跡から得られた作業実績データを比較することで、試作システムが生成した作業計画の評価を行った。

作業計画として満たすべき基本的な制約条件（トラクタ割当の重複、作業適期内でのスケジュール、各作業における所要作業日数の見積り）について、作業計画として妥当な内容となっていることを確認した。手作業による作業計画と比較すると、作業に対する具体的なトラクタの割当てなどは当然異なっているが、基本的な部分についてはおおむね同等な内容であった。



図5 システムが自動生成した作業計画（一部）

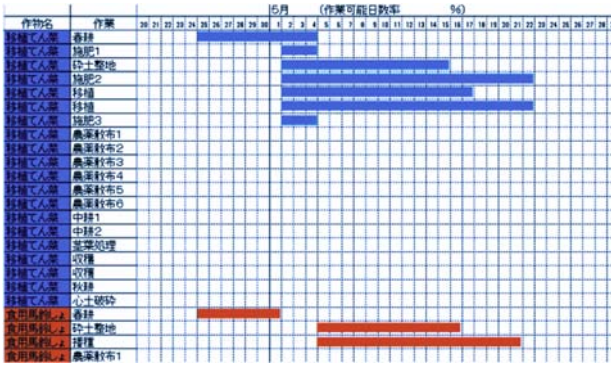


図6 専門家が作成した作業計画（一部）

4.4 計画設計の所要時間

試作システムの自動スケジューラを用いた計画設計の所要時間は、1回につき約2～3秒程度であり、手作業による計画設計では数時間以上を要していたことと比較して、大幅な速度向上が達成された。これにより、前提条件を変化させながら複数の作業計画を作成して比較するなど、経営シミュレーション的な活用方法も現実的なものとなった。

なお、上記の所要時間には、計画設計に必要な各種データの入力作業は含まれていない。しかし、実際のシステム利用場面では、保有する圃場やトラクタなどの情報に関しては、前年度のデータを再利用する、若しくは他の営農管理システムのデータを利用することが可能であり、データ入力作業の手間は大きな障害にはならないと考えられる。

4.5 実際の農作業実績との比較

法人が実際に行った農作業実績と生成された作業計画とを比較すると、いくつかの点で差異が見られた。

法人A社が平成28年度の作業で使用したトラクタ総台数は13台であったが、試作システムでは自動スケジューラによってトラクタ割当てが最適化された結果、同じ作業をトラクタ8台で実施する計画を生成した。これによって、現在の機械装備保有量が過剰であることが示されたが、実際の作業実績と比較すると、作業機交換回数の増加や特定トラクタへの負荷の偏りが見られる（図7）ため、この計画の通り8台まで削減することが現実的かどうかについては検討が必要である。

より現場の実情に近い計画設計を実現するには、トラクタや作業機の選択の際に、現場の作業管理者がどのような条件を考慮して意思決定しているのか、更に調査と分析を行い、計画設計の理論に表れない暗黙の要求事項をシステム仕様で反映させる必要がある。

また、各作業の実施時期や作業期間に関しても、計画と実績の間でのずれが見られた。これは、気象条件等に応じた計画の見直しが行われていないこと、標準作業能率表にもとづく作業効率が実際の作業効率と一致していないこと、がおもな要因と思われる。これらについては、次節以降で述べる、

農作業期間中のリスケジュール、実績値ベースの作業能率の利用などにより解決できるものとする。

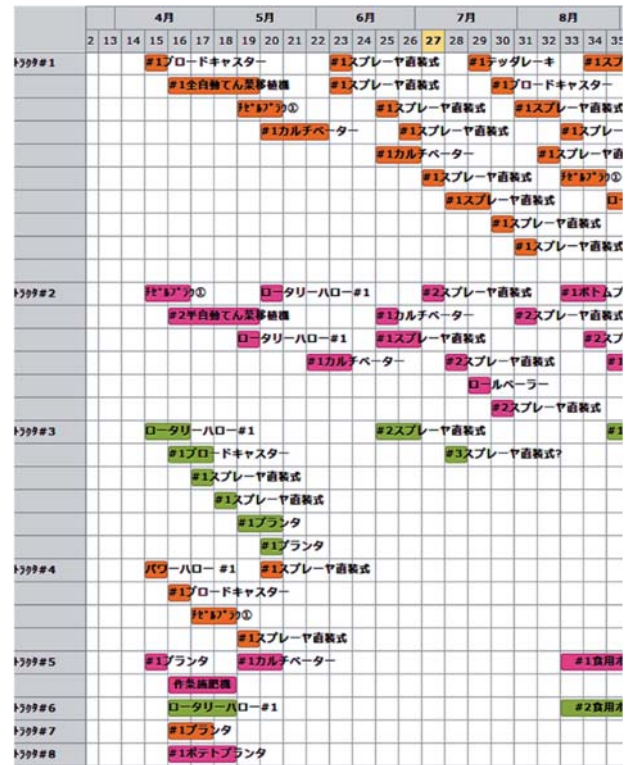


図7 法人Aの作業計画におけるトラクタ利用状況

4.6 農作業実績から導出された作業能率の利用

作業所要日数計算に必要な作業速度、作業能率等は、通常は標準作業能率表の値が用いられるが、実際の作業能率は圃場の条件やオペレータの熟練度などにより大きく異なる場合があり、作業計画の精度に影響を与える可能性がある。

法人A社のGPS走行軌跡データを用いて作業速度を求めたところ、一部では標準作業能率表の値と比べて3倍以上のずれが見られた（表5）。

表5 法人Aにおける実測値ベースの作業速度

作業機械	作業速度 (km/h)	
	標準作業能率表	法人A実績値
ボトムブラウ	6.0	14.0
チゼルブラウ	5.0	3.5
カルチベーター	4.5	5.0
サブソイラ	3.0	15.0
全自動てんさい移植機	4.0	3.1
グレンドリル	6.0	2.0
ビートハーベスタ	5.5	2.8
作条施肥機	5.0	5.5

試作システムには予め標準作業能率表にもとづくデータが登録されているが、農場固有の作業能率データがある場合は

それを用いて計算することも可能である。表5の実績値データを用いて作業計画を再生成したところ、てんさいの移植、施肥、ビートの収穫などいくつかの作業に関して作業所要日数が増加した結果が得られた(図8)。また、計画全体においても、年間のトラクタ利用台数が当初の8台から9台に増

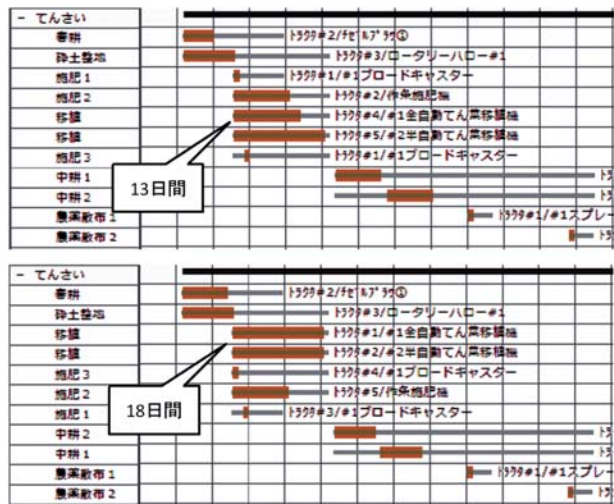


図8 実績値に基づく作業能率を用いた場合の変化
(上:標準値, 下:実績値)

4.7 農作業期間中のリスケジュールへの適用

実際の農作業では、気象条件、作物の生育状況、機械の故障など様々な要因により当初作業計画からのずれが生じるため、実際の作業進捗に合わせて計画を適宜見直す必要が生じる。そこで、農作業期間中のリスケジュール作業への適用を想定したシステム評価を行った。

平成28年8月の台風の影響により、法人A社、B社の地域では8月15日から約10日間、圃場作業が実施できない期間が発生した。今回はこの状況を想定し、作業中断後のリスケジュールの試験を行った。

8月15日時点での作業実績にもとづき、そこから10日間の作業禁止期間を設定し、8月25日以降の残作業に関して作業計画を設計した(図9)。自動スケジューリング機能を活用することで、任意の時期と条件からの計画設計を簡便かつ柔軟に実施できることが確認できた。

将来的に、他の営農管理システムやGPS走行軌跡解析との連携により日々の作業進捗が実時間で把握できる環境が整えば、天候による作業中断時の影響評価、作業再開後の立て直し計画作成などに活用できると期待される。

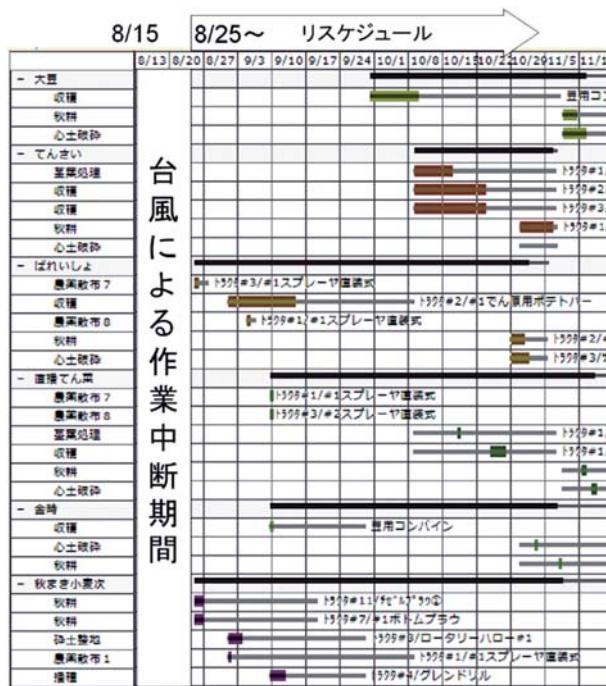


図9 農作業期間中のリスケジュールへの適用例

5. まとめ

道内の営農指導で用いられてきた農作業計画設計手法にもとづき、与えられた営農データから機械化作業体系計画図を自動的に生成するWebアプリケーションシステムの試作を行った。道内農業生産法人2社の営農データを用いて作業計画設計を試行した結果、従来の手法とおおむね同等水準の作業計画を、試作システムが備える自動スケジュール機能を用いて迅速かつ簡便に作成できた。また、作業能率実績値を用いた作業計画の精度向上、農作業シーズン途中でのリスケジュールへの適用が可能であることを確認した。

今後は、農業法人等の現場での評価試験を更に進めながら、生成される作業計画の品質向上、システム全体のユーザーインターフェース改善を図り、システムの製品化を目指す予定である。また、現在研究中であるトラクタGPS走行軌跡の分析技術を統合し、作業の進捗状況や作業能率実績値を自動的に反映可能とすることも検討している。

引用文献

- 1) 農林水産省大臣官房統計部：平成27年度原料用ばれいしょ生産費、農業経営統計調査、(2016)
- 2) 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)
- 3) 北海道農政部：農業機械導入計画策定の手引き、(2014)
- 4) 白旗雅樹：機械化体系見直しと組立ての実際、ニューカントリー夏期増刊号、北海道農業協同組合通信社、

(2008)

- 5) 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)
- 6) 北海道農政部編：農業機械の代表的なほ場作業能率等一覧，(2014)
- 7) 富士通：食・農クラウド Akisai (秋彩)，
<http://jp.fujitsu.com/solutions/cloud/agri/>
- 8) 西口 修：農業情報管理システム「GeoMation Farm」，農業食料工学会誌，76巻4号，pp.289-294，(2014)
- 9) 宮地克嘉・長網宏尚・京田成博：営農支援システム「クボタスマートアグリシステム (KSAS) の開発」，農業食料工学会誌，76巻4号，pp.284-288，(2014)
- 10) 伊藤淳士・遠藤智章・平藤雅之：クラウドサービス型農産物生産工程管理システム「apras」の開発，農業情報研究，23巻4号，pp.154-164，(2014)
- 11) 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，pp.41-51，(2009)
- 12) 作業計画・管理支援システム PMS，
<http://www.aginfo.jp/PMS/>

食品の内部検査技術開発に向けたOCTの適用可能性

岡崎 伸哉, 飯島 俊匡, 本間 稔規

Applicability of Optical Coherence Tomography for Development of Internal Inspection Technology for Food

Shin'ya OKAZAKI, Toshimasa IIJIMA, Toshinori HONMA

抄 録

多くの食品加工工場ではX線異物検査装置や金属検出機などが導入され、オンラインで全数検査が行われている。しかし、人毛やプラスチック片、虫などの異物は検出が困難であり、目視検査で対応しているが、食品内部までは検査することができず、新たな内部検査技術の開発が望まれている。そこで我々は、おもに医療分野において研究、開発が進められ、眼科での診断装置として実用化されているOCTに着目した。OCTは光干渉の原理により計測対象内部の断層画像を取得する技術であるが、医療分野以外への適用事例は少ない。本研究では、基盤技術の獲得及びOCTによる食品異物検査への適用可能性について検討した。TD-OCT及びSD-OCTシステムを構築して検討した結果、SD-OCTシステムにて人毛の計測が可能であり、計測可能深度についてもTD-OCTより深く計測が可能であることから、異物検出にはSD-OCTが有効であると考えられる。

キーワード：OCT, 食品検査, 異物検査, 内部検査

1. はじめに

多くの食品加工工場では食品への異物混入対策としてX線異物検査装置や金属検出機などを導入し、オンラインで全数検査を行っている。しかし、これらの検査装置を用いても人毛や獣毛、プラスチック片、虫などの異物は検出が困難であり、最終的には検査員による目視検査で対応しているのが現状である。また、長時間の目視検査は検査員への負担が大きく、異物混入を見逃してしまうこともある。食品への異物混入は食品回収事案となることが多く、企業のダメージが大きいため、対応可能な検査技術の開発が望まれている。

我々は上記課題への対応が期待できる技術として、光干渉の原理を応用した光コヒーレンストモグラフィ（Optical Coherence Tomography, 以下OCT）に着目した¹⁾²⁾。OCTは光がある程度内部に到達するサンプルに対して断層画像を取得可能な技術であり、主に医療分野において研究・開発、実用化が進められている。OCTは非破壊計測、高空間分解能（数 μm ～数十 μm ）である一方、計測深度が現状の技術では数mmであり、食品内部検査へ適用するには計測深度の向上が不可欠である。

OCTは医療分野以外への適用事例が少ないことから、本研究では基盤技術の獲得及び食品内部の異物検査への適用可

能性について検討した。

2. OCTについて

2.1 OCTの原理

OCTの主要構成部品は低コヒーレンス光源を用いたマイケルソン干渉計である。原理を図1に示す。光源から出射された平行光束はビームスプリッタにより参照光、測定光の2

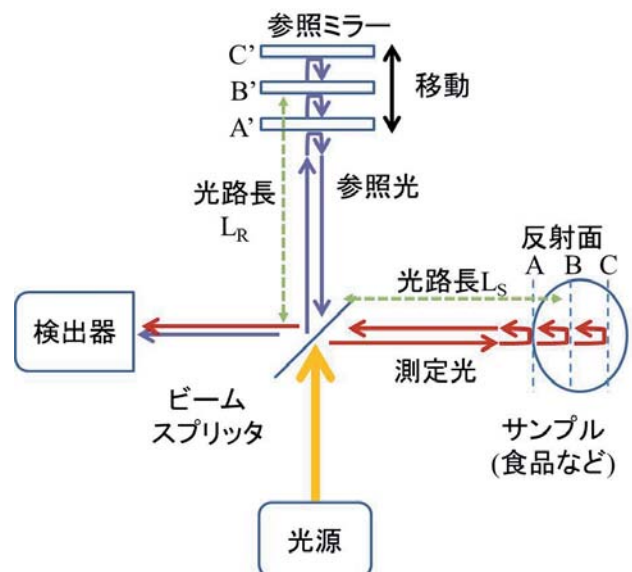


図1 OCT原理図

つに分割される。参照光は参照ミラーで、測定光はサンプル表面及び内部の屈折率が変化する境界面で反射する。それぞれ反射した光を検出器で受光するが、このとき、参照光の光路長 L_R と測定光の光路長 L_S が一致すると干渉信号が得られる。したがって、参照ミラーを走査することにより、サンプル内部を走査することができ、断層情報（屈折率が変化する境界面の位置）を取得することができる。

2.2 OCTの方式

OCTは大きく2つの方式に分類される。光検出器からの信号を復調して画像を得るタイムドメインOCT（Time-Domain OCT, 以下TD-OCT）と、フーリエ変換を用いて光軸上の断層情報を得るフーリエドメインOCT（Fourier-Domain OCT, 以下FD-OCT）である。それぞれの方式はさらにいくつかの方式に分類される（図2）。

本研究では、まず最も原理的な計測方式である点計測型OCT（TD-OCT）の構築を行った。また、検出器にマルチチャンネル分光器（浜松ホトニクス製、PMA-11, C7473-37）を用いることによりスペクトラルドメインOCT（SD-OCT）の構築も行った。SD-OCTは参照ミラーを走査しなくても干渉信号を計測できる、という特長を有する。

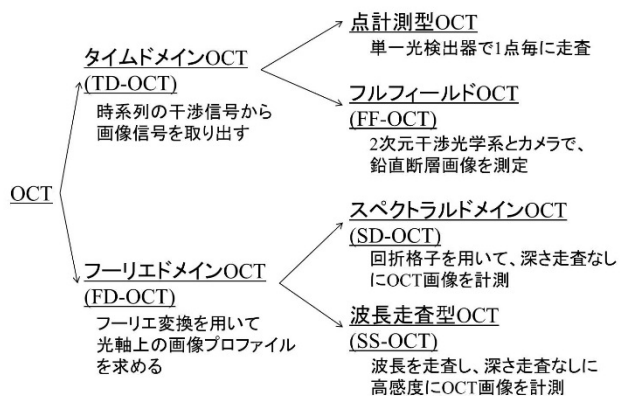


図2 OCTの方式

3. OCTシステムの構築

3.1 構築したシステム

構築したTD-OCTシステムを図3に示す。構成要素を以下に示す。

- ① スーパーluminescentダイオード (SLD) (EXALOS製, EXS210022-02)
- ② 電動ステージ (駿河精機製, ステージ: KY1250C, コントローラ: DS112MS)
- ③ ガルバノミラー (図4) (THORLABS製, GVSM002/M)
- ④ Siフォトダイオード (THORLABS製, FDS100)
- ⑤ A/Dボード (エルモス社製, RAI-16)

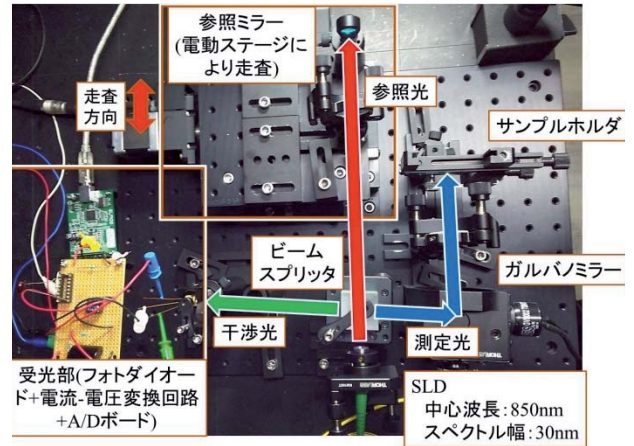


図3 構築したTD-OCTシステム

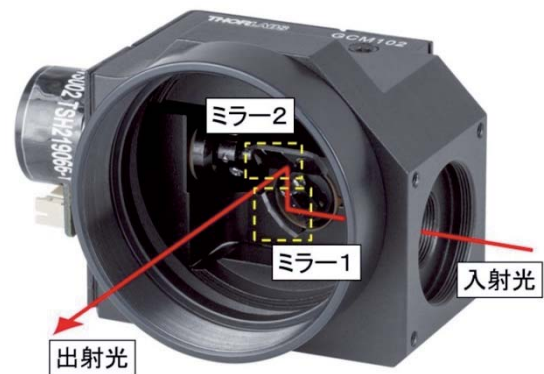


図4 ガルバノミラーによる走査のイメージ

受光部をマルチチャンネル分光器に置き換えると、SD-OCTシステムとなる。SD-OCTの場合、参照ミラーの走査なしに一定範囲の断層情報が取得可能である。その範囲を図5に示す。参照側の参照ミラーまでの光路長が L_R であるとする。このとき、サンプル側において光路長 L_R の位置から Z_{max} の距離まで一括で断層情報が取得できる。 Z_{max} は式(1)により定義される。

$$Z_{max} = \frac{\lambda_c^2}{4\sigma\lambda} \dots\dots\dots(1)$$

式(1)において、 λ_c は光源の中心波長、 $\sigma\lambda$ は分光器の波長分解能である。今回用いた分光器の波長分解能は $\sigma\lambda = 0.739 \text{ nm}$ であるので、 $Z_{max} = 244.4 \mu\text{m}$ となる。

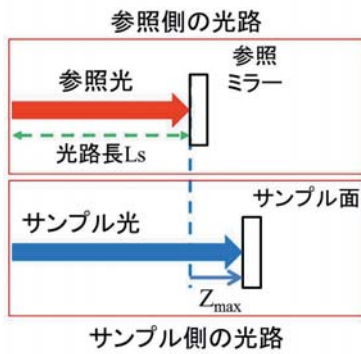


図5 SD-OCTにおける測定範囲 Z_{max}

3.2 取得するデータとその解析方法

構築したシステム（図3）において、サンプル側にミラーを設置し、ガルバノミラーを走査せずに1点のみ測定したデータを例に、各方式により取得されるデータとその解析方法について説明する。

3.2.1 TD-OCTの場合

電動ステージにより参照ミラーを走査すると、図6(a)のデータが得られる。このデータに対し、フーリエ変換を行うと、図6(b)のデータが得られ、干渉が生じているデータと生じていないデータとで差異がみられる。干渉が生じているデータ

のみに表れている部分が断層情報であるため、バンドパスフィルタを適用し、断層情報のみを抽出し、逆フーリエ変換を行うことにより、ノイズが除去された断層情報を抽出することができる（図6(c)）。

3.2.2 SD-OCTの場合

SD-OCTにより得られる干渉光を図7(a)に示す。このデータに対し、波長を周波数に変換したのち、逆フーリエ変換を行うと、図7(b)のデータが得られる。ここで、中心に大きく表れているピークは光源の自己相関関数であり、光源情報以外の部分が断層情報となる。図7(c)は断層情報を拡大した図であり、ここではこのピークが抽出された断層情報となる。

3.3 取得データの例

構築したシステムにおいて、サンプルホルダにテストターゲット（THORLABS製）を設置し、そのパターン及びアルファベットを計測した例を図8に示す。このテストターゲットは主に分解能（解像度）を測定するために使われるものであるが、今回は計測データの一例として使用した。テストターゲットの厚みや明暗パターンなどの3次元情報が取得できていることを確認した。

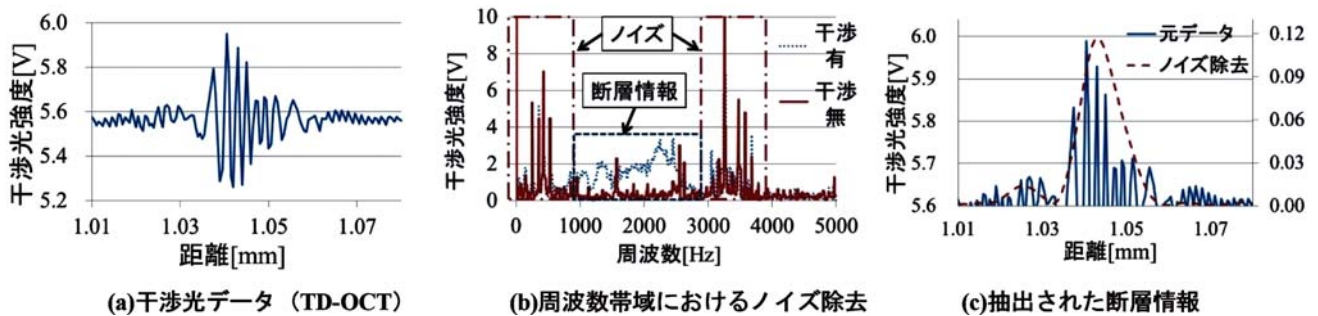


図6 TD-OCTにより得られるデータとその解析

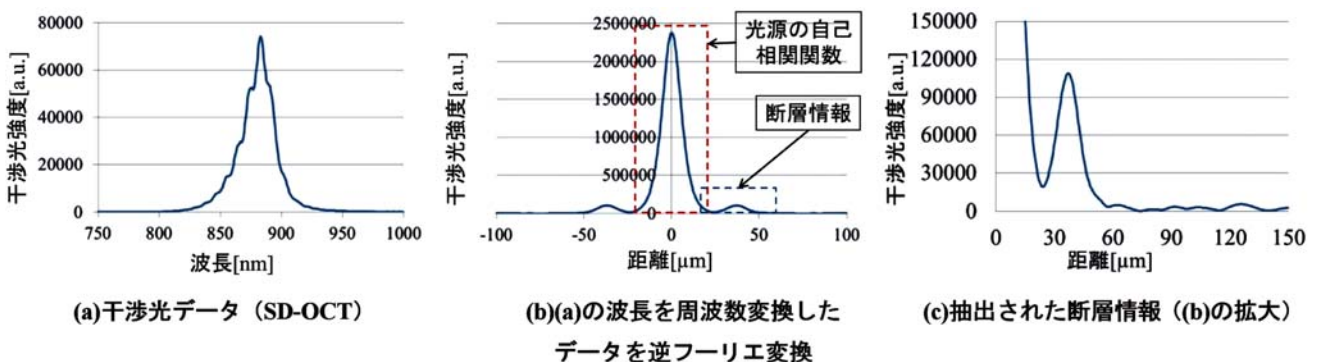


図7 SD-OCTにより得られるデータとその解析

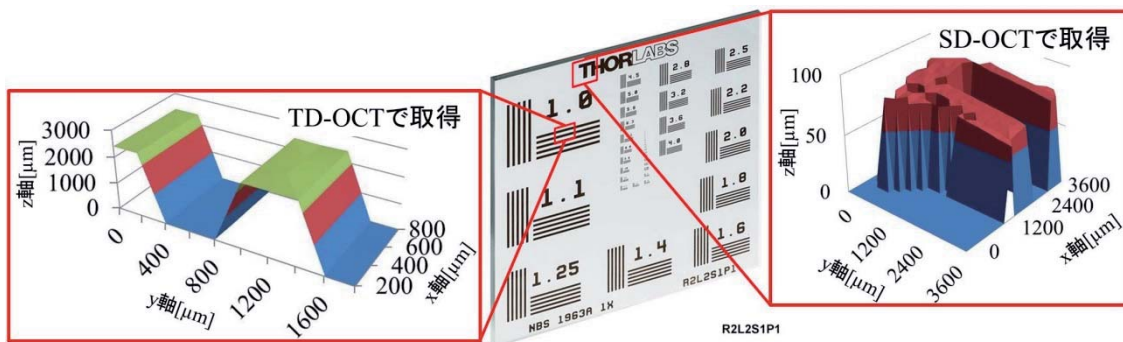


図8 取得した3次元データの例

3.4 構築したシステムの分解能

構築したシステムにおいて、光軸及び光軸以外の空間分解能の検証を行った。

3.4.1 光軸方向

光軸方向の空間分解能の理論値は式(2)により定義される。

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_c^2}{\Delta \lambda} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 λ_c は光源の中心波長、 $\Delta \lambda$ は光源のスペクトル幅である。つまり、光軸方向の分解能は光源の仕様により決定される。実測値の分解能は図6(c)や図7(c)の強度ピークに対してガウスフィッティングを行い、その半値全幅 (FWHM)

として求めた。TD-OCT及びSD-OCTの各方式において理論値と実測値を比較した結果を図9に示す。図9より、両方式においてほぼ理論値通りの分解能が得られていることが確認できる。TD-OCTとSD-OCTにおいて理論値が異なっているのは、SLDを駆動する際の電流値が異なり、それに伴い、光源の中心波長及び半値幅が若干変化するためである。

3.4.2 光軸方向以外 (水平・垂直方向)

光軸方向以外の分解能は平行光束を集光した径により決定される。実測値は図10に示すテストターゲットのラインパターンを測定し、ラインを判別できる限界値から推定する。光軸方向の分解能検証と同様に、測定した強度ピークに対してガ

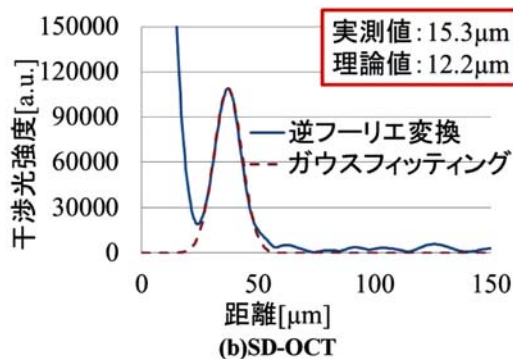
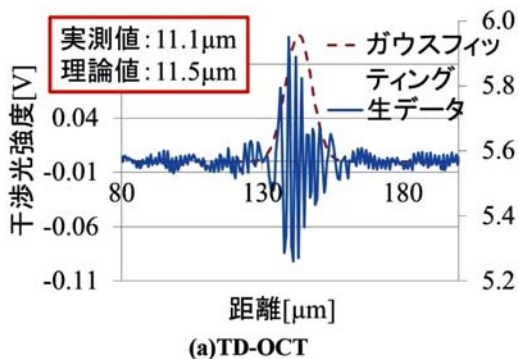


図9 光軸方向の分解能

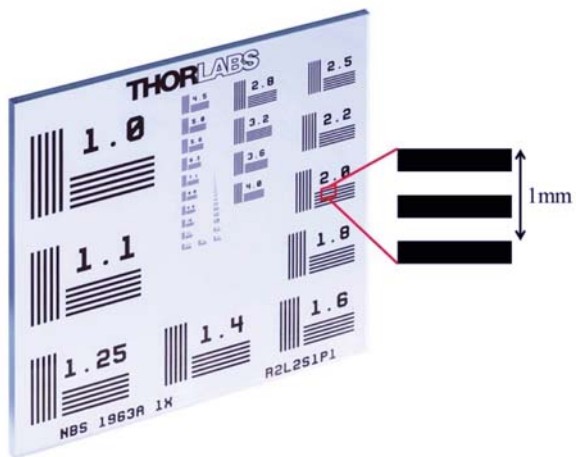


図10 テストターゲットとそのパターンのサイズ

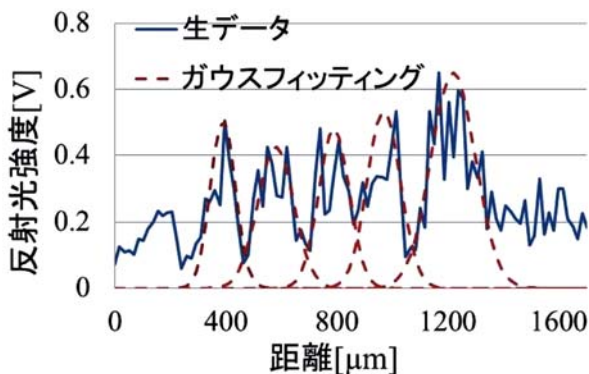


図11 テストターゲット、パターン5.0の測定結果

ウスフィッティングを行い、その半値全幅 (FWHM) がピーク間隔より小さい数値の場合、ライン判別可能とした。テストターゲットに記載のある数値は、単位長さあたりのラインパターンの本数 [サイクル/mm] を表している。たとえば、2.0のラインパターンは明・暗の1サイクルが1mmの間隔に2周期含まれていることとなる。

測定の結果、5.0のラインパターンまで測定することができた (図11)。したがって、分解能としては約200 μ mである。

4. 食品の異物検査への適用可能性

4.1 人毛検出の検証

異物検査への適用可能性の検証では、異物として人毛の測定を行った。TD-OCT及びSD-OCTの両方式にて測定を試みたが、TD-OCTでは人毛からの反射光を検出することができなかった。原因としては、反射光強度以上のノイズが生じており、ノイズに反射光が埋もれてしまったことが考えられる。一方でSD-OCTでは反射光を取得できたものの、表面のみの位置情報しか取得できなかった。OCTにより人毛の断面構造を識別可能であるとの研究例³⁾もあるが、識別するためには今回構築したシステムの2倍以上の分解能が必要であり (該当論文の分解能は6.2 μ m)、また、異物検査の目的には人毛の有無が判別できればよいから、現状のシステムで十分であると考えられる。

測定したデータを図12に示す。測定に用いた人毛は直径が約60 μ mだが、取得したデータは直径が約200 μ mとなった。これは、平行光束がある程度人毛に照射されていれば反射光が得られているが、分解能が200 μ mのため、実際のサイズよりも太く測定されたと考えられる。また、反射光強度のばらつきは光学系の調整が十分でないため生じたものと考えられる。

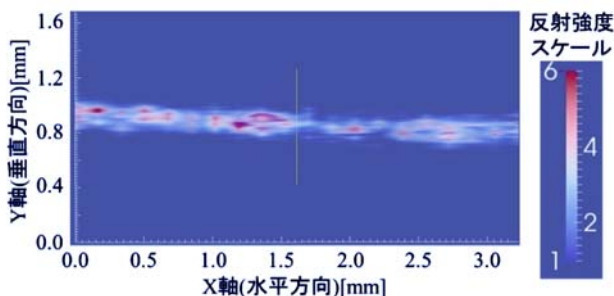


図12 SD-OCTにより取得した人毛データ

4.2 計測可能深度の検証

食品検査へOCTを適用する場合、測定対象物ごとに光の吸収・散乱特性が異なるため、あらかじめ計測深度を知ることが難しい。そこで、計測可能深度をある程度推定できるように、光の透過率に対する計測可能深度のデータ蓄積を行った。

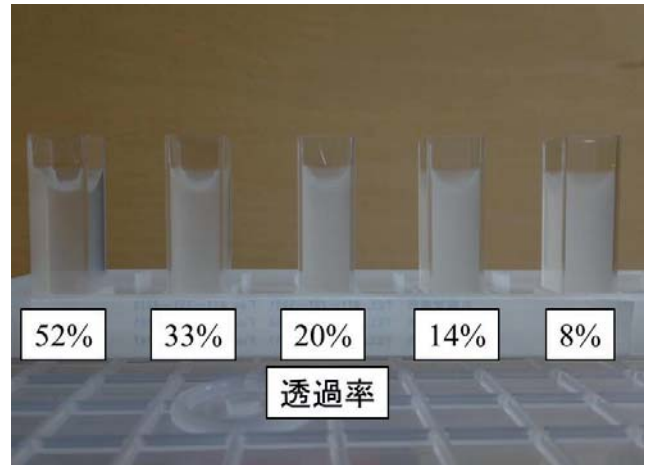


図13 透過率をかえたサンプル (一例)

計測深度を現状の数mmから10mm程度まで拡大することを目標とし、サンプルを入れるセルのサイズを幅10mm、奥行10mm、高さ45mmとした。サンプルとして水に溶解したゼラチンに牛乳を散乱媒質として濃度を調整して添加し、透過率を変えたものをを用いた (図13)。セルの断面を走査し、セル前面及び後面からの反射光を取得することにより、その透過率に対しては10mmまで測定可能とした。実験の結果、TD-OCTでは透過率20%のサンプルまで測定可能であった。また、SD-OCTでは透過率2.6%のサンプルまで測定可能であった。

本試験は牛乳の濃度を変えることにより散乱係数を変化させているが、食品では吸収係数も様々な値をとりうるから、光学定数 (吸収係数、散乱係数) に対する計測可能深度のデータ蓄積を引き続き進める必要がある。

5. まとめ

OCTによる食品内部検査技術の開発を目的として、TD-OCT、SD-OCT実験システムの構築及び食品検査への適用可能性について検討を行った。構築したTD-OCT及びSD-OCTの2方式によるシステムの性能評価を行い、3次元情報を取得できることを確認した。食品検査への適用可能性については、SD-OCTにて人毛の計測が可能であり、また深度検証もTD-OCTよりも透過率が低いサンプルまで計測可能であったことから、SD-OCTが有効であると考えられる。

しかしながら、SD-OCTでは参照ミラーの走査なしで得られる断層情報の範囲が狭いため、参照ミラーの走査を行う、改良型SD-OCTシステムを構築して、計測深度の拡大を目指す。また、食品などの実サンプルを対象として、断層情報が取得可能な深度について実験を行い、検討を進めていく。

引用文献

- 1) Brett E.Bouma, Guillermo J.Tearney: Handbook of Optical Coherence Tomography, informa, pp.756, (2001)
- 2) 佐藤学・丹野直弘：光コヒーレンストモグラフィの基礎, 光学, Vol.32 No.4, pp.268-274, (2003)
- 3) M.V.R.Velasco, A.R.Baby, F.D.Sarruf, T.M.Kaneko, R.E.Samad, N.D.V.Junior and A.Z.Freitas: Prospective ultramorphological characterization of human hair by optical coherence tomography, Skin Research and Technology, Vol.15, pp.440-443, (2009)

北海道産小豆粉の製造法と利用技術の開発

松嶋 景一郎, 浦 晴雄, 三津橋 浩行, 内山 智幸*,
渡邊 治*, 佐藤 恵理*, 能登 裕子*, 吉川 修司*

Development of Methods for Production and Utilization of Red Bean Powder

Keiichiro MATSUSHIMA, Haruo URA, Hiroyuki MITSUHASHI,
Tomoyuki UCHIYAMA*, Osamu WATANABE*, Eri SATO*,
Hiroko NOTO*, Shuji YOSHIKAWA*

キーワード：粉砕，分級，混合，単位操作，小豆

1. はじめに

小豆は北海道の特産品であり，国内の90%以上が本道で生産されている¹⁾。また，小豆は血糖値上昇を穏やかにする低GI食品であることや，食物繊維，ポリフェノールなどを豊富に含むことが知られており，昨今の健康志向にも適した素材である。

しかし，おもな用途である餡製品の消費低迷や，餡以外の用途の少なさなどから，小豆の生産量が減少しており，関連業界から小豆の需要拡大が強く要望されている。

一方，食品加工研究センターでは，米を粉砕操作により粉末化し「米粉」とすることで，その用途がパンや麺などへ拡大した事例をもとに，「小豆粉」の製造及び利用技術について基礎的検討を行ってきた。その結果，小豆粉が，クッキーやスポンジケーキなどへ適用できる可能性が示された。この成果について，道内の食品業界が，「小豆粉は北海道の地域性や機能性をアピールする素材」になり得るとして，強い関心を示している。

そこで，本研究では，道産小豆の新たな需要創出を目的に，粉砕及び分級などの粉体技術を用いて，製パン・製菓に利用可能な小豆粉の製造技術を検討した。

2. 粉砕法の検討

走査型電子顕微鏡（SEM）で観察した，小豆断面の画像を図1に示す。

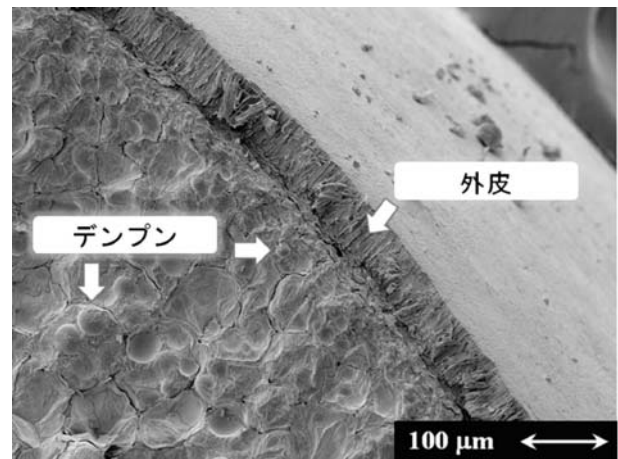


図1 小豆の断面

小豆内部にタンパク質などに包まれたデンプン粒子が観察された。粉砕を進行するに当たって，このデンプン粒子の破損を防ぐ必要があった。これは，破損したデンプン，すなわち損傷デンプンは，正常のデンプンと比較し吸水性が2倍程度大きくなるため，「べたつき」など食感や味に悪影響を及ぼすからである²⁾。

2.1 ロールミル

小麦粉の製造に使用されているロールミルを用いて，小豆の粉砕を検討した。

本研究で使用したロールミル（Quadrumat Junior，Brabender GmbH & Co KG社）の構造を図2に示す。

* 道総研 食品加工研究センター，Hokkaido Research Organization Food Processing Research Center

事業名：重点研究

課題名：北海道産小豆粉の製造とそれを活用した食品製造技術の実用化に関する研究

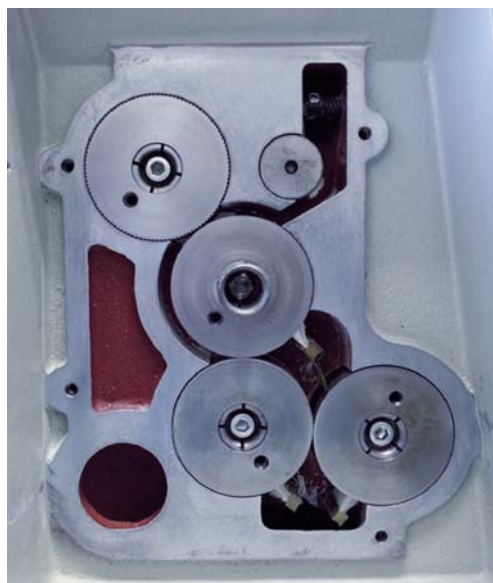


図2 ロールミルの構造

ロールミルは、一般に、2個以上のロールの間に対象物をかみ込み、圧縮力及びせん断力により粉碎する。また、ロール表面は平滑なものや、本機のように凹凸の刻みを持つものがある。

ロールミルでは、図3に示すように、損傷デンプンの発生を抑えながら小豆の粉碎を進行することはできなかった。

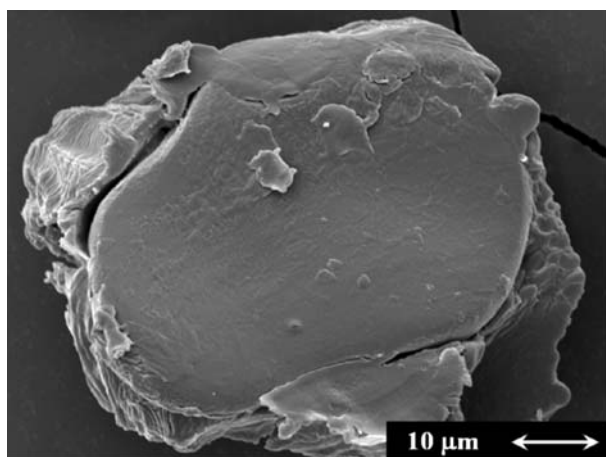


図3 ロールミル粉碎により開裂・変形したデンプン粒子

そこで、ロールミルとは異なる作用の粉碎方法を検討することにした。

2.2 ピンミル

有機物の微粉碎に多用されているピンミルを用いて、小豆粉の製造を検討した。

使用したピンミル（自由粉碎機M-4、(株)奈良機械製作所）を図4に示す³⁾。



図4 ピンミル

粉碎室内では、衝撃柱（ピン）が1周もしくは放射状に取り付けられた円盤が高速回転している。対象物は、回転盤の中央に供給され、遠心力により内周から外周へ移動する際に、ピンにより衝撃力・切断力を受け粉碎される。

本装置を用いて、損傷デンプンの発生を2%以下に抑え、 D_{50} 径（メジアン径：本報告では体積頻度の累積が50%になる粒子径）が $60\mu\text{m}$ 程度にまで小豆を粉碎することができた。例として、 D_{50} 径 $57.6\mu\text{m}$ 、損傷デンプン1.77%の小豆粉について、レーザー回折・散乱法（HRA、マイクロトラック・ベル(株)）により測定した体積基準の粒度分布を図5に示す。

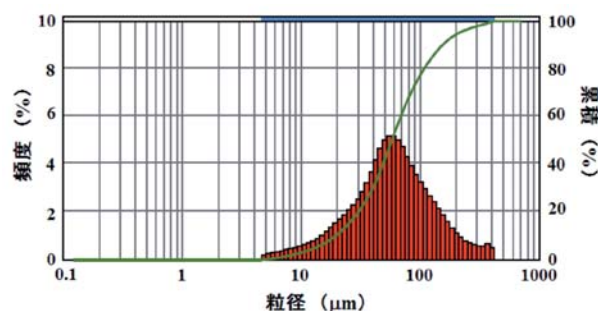


図5 ピンミルにより製造した小豆粉の粒度分布

さらに小豆粉の粉体物性を測定し、市販の小麦粉と比較した結果を表1に示す。

表1 小豆粉及び市販小麦粉の粉体物性

	D_{50} 径 (μm)	かさ密度 (g/cm^3)		圧縮度 (%)	安息角 (deg)
		疎充填	密充填		
小豆粉	57.6	0.60	0.80	25	40
強力粉	56.3	0.43	0.67	36	51
薄力粉	36.8	0.36	0.61	41	52

ここで、かさ密度とは、粉体を容器に充填した際の空隙も含めた見かけの密度のことで、疎充填はゆるく充填した場合、密充填はタッピングにより固く充填した場合のかさ密度である。また、圧縮度及び安息角は粉体の流動性を表す指標である。圧縮度は、密充填と疎充填のかさ密度をそれぞれ A 、 P で表したとき、 $(P-A)/P \times 100$ で求められ、値が小さいほど流動性が良いことになる。安息角は、一般に粉体を平面に落下させたときに生ずる円錐の斜面と水平面がなす角度で、流動性が良いほど角度は小さくなる。

小豆粉のかさ密度は、市販の強力粉及び薄力粉より大きかった。また、圧縮度及び安息角が強力粉及び薄力粉より小さかったことから、小豆粉が小麦粉と同等以上の良好な流動性を持つことが示された。

以上より、衝撃力を主とする粉碎法により、食品に利用可能な小豆粉を製造できることがわかった。

3. 小豆粉の特性

前章で粒度分布を示した D_{50} 径 $57.6 \mu\text{m}$ の小豆粉のSEM画像を図6に示す。

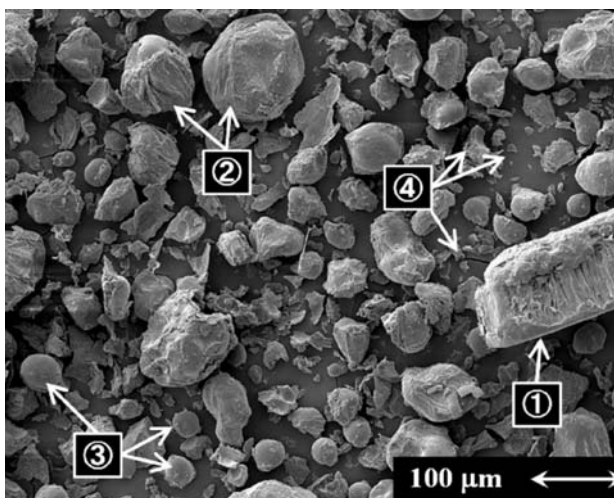


図6 小豆粉のSEM画像

画像観察から、大きさの異なる①外皮、②複数のデンプンをタンパク等が包んだ粒子、③デンプン粒子、④タンパク質などの破片の4種類の粉末が確認された。このことから、小豆粉は粒度区分によって、成分組成が大きく異なることが予想された。そこで、小豆粉を大きさにより分級し、各区分の成分組成を分析した。

分級は、目開き $125 \mu\text{m}$ のふるいで外皮を取り除いた後、乾式の遠心分級機（ターボクラシファイアTC-15N、日清エンジニアリング㈱）を用いて行った。この操作により5区分に分けた小豆粉のSEM画像を、図7に示す。

画像観察から、小豆粉が、ふるいにより外皮が主の区(図7(a)：収率12.8%)、また、遠心分級により、主となる粒子が I：複数のデンプンをタンパク等が包んだ粒子(図7(b)；収率48.5%)、II：デンプン(図7(c)；収率28.0%)、III：デンプンを包んでいたタンパクなどの破片(図7(d)；収率3.3%)、IV：微粉(図7(e)；収率7.4%)の区に分級されていることを確認できた。

乾式の遠心分級により得られた4区分の小豆粉と、小豆全粒粉の成分比較を表2に示す。

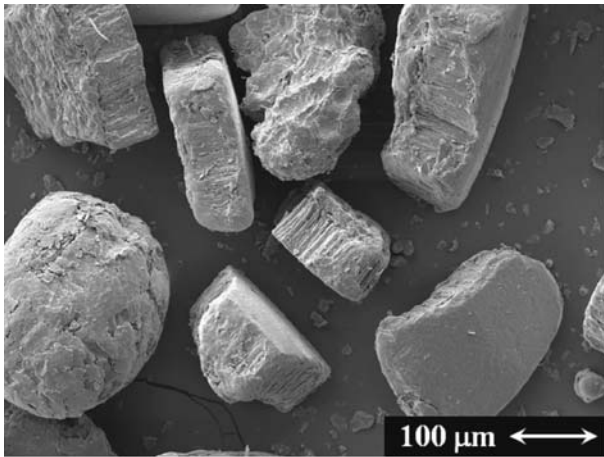
表2 分級区分ごとの小豆粉の成分組成

		炭水化物 (g/100g)		脂質 ^{*4} (g/100g)	灰分 ^{*5} (g/100g)	水分 ^{*6} (g/100g)	
		タンパク質 ^{*1} (g/100g)	糖質 ^{*2} 食物繊維 ^{*3}				
全粒粉		21.3	53.4	10.0	0.7	4.0	10.7
遠心分級区	I	18.3	60.9	5.9	0.5	3.3	11.1
	II	16.8	65.8	3.7	0.5	2.9	10.3
	III	33.7	38.9	13.3	0.6	5.2	8.3
	IV	41.2	14.3	29.3	0.9	6.1	8.3

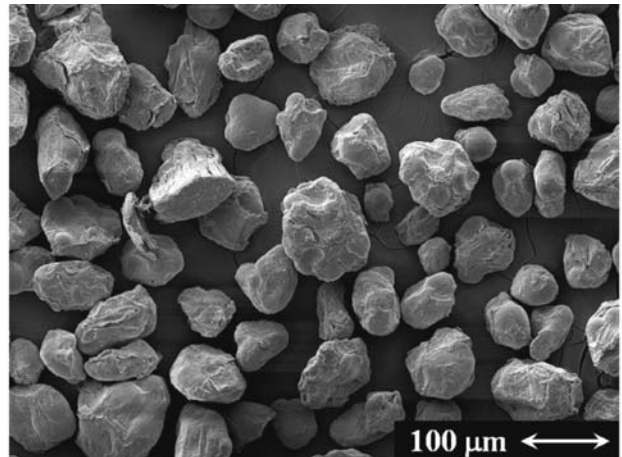
*1:ケルダール法、*2:100-(食物繊維+タンパク質+脂質+灰分+水分)
*3:プロスキー法、*4:酸分解法、*5:直接灰化法(550℃)、
*6:常圧加熱乾燥法(135℃)

分級区I及びIIは、全粒粉と同様に炭水化物が主成分であったが、消化可能な炭水化物である糖質の割合が全粒粉より大きかった。この傾向は、分級区Iに比べIIの方が顕著だった。一方で、タンパク質の含量は、全粒粉と比較し、I及びIIともにやや低かった。分級区III及びIVは、全粒粉と比較しタンパク質の含量が多かった。また、IIIとIVで炭水化物の内訳を比較すると、IIIは糖質が多く、IVは細胞壁由来のセルロースやペクチンが含まれる食物繊維が多かった。

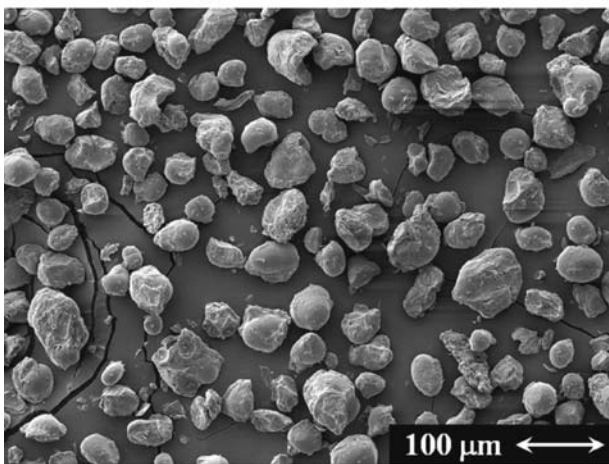
小豆粉をパンやクッキーなどの加工食品に利用する際には、それぞれの食品に適した成分組成や粒度が求められるはずである。本章の検討結果から、粉碎や分級といった単位操作の組み合わせにより、様々なバリエーションの小豆粉素材を製造できることがわかった。



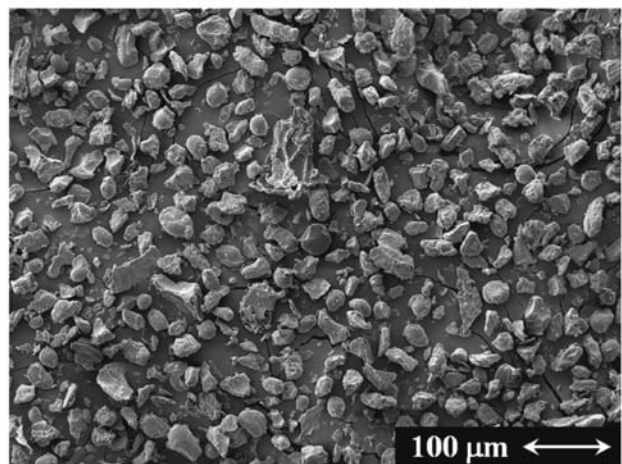
(a) ふるい分級区



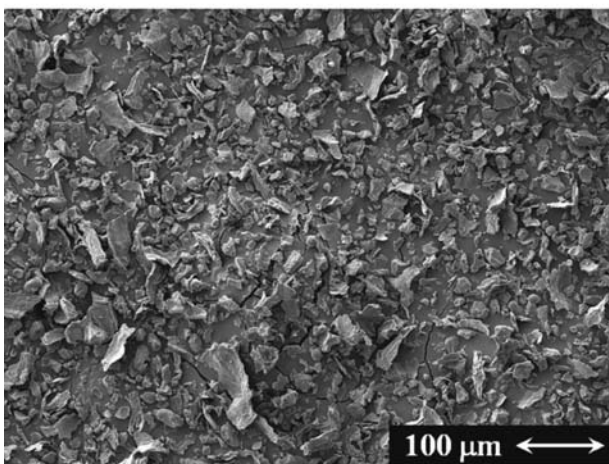
(b) 遠心分級区-I (D_{50} 径: 74.1 μm)



(c) 遠心分級区-II (D_{50} 径: 43.9 μm)



(d) 遠心分級区-III (D_{50} 径: 24.8 μm)



(e) 遠心分級区-IV (D_{50} 径: 17.9 μm)

図7 分級した小豆粉のSEM画像

4. 小豆粉を用いたパンの試作検討

小豆粉を活用する加工食品としてパンを選定し、粒度調整した小豆粉を用いて試作検討を行った。

ピンミルを用いて、小豆を D_{50} 径 $65.0\mu\text{m}$ にまで粉碎した後、目開き $131\mu\text{m}$ 、 $104\mu\text{m}$ 、 $91\mu\text{m}$ 、 $75\mu\text{m}$ の4種のふるいを用いて超音波振動ふるい (RF型 C701C, ㈱ダルトン) により分級し、7種類の小豆粉を調製した。パンの製作は一般的なレシピに則って行い、小麦粉の20wt%を小豆粉に置き換えたパンを製作した。

分級区ごとの小豆粉の粉体物性と試作したパンの評価結果を表3に、外観を図8に示す。なお、比較のために通常の小麦粉のみと、小豆全粒粉を使用したパンの写真も載せた。

表3 小豆粉の粉体物性と試作パンの評価結果

分級区	かさ密度 (g/cm^3)		圧縮度 (%)	比容積 (-)	膨らみ
	疎充填	密充填			
① 131 μm ふるい上	0.68	0.85	21	3.3	
② 131-104 μm	0.66	0.84	22	3.7	
③ 104-91 μm	0.64	0.80	20	4.4	○
④ 91-75 μm	0.65	0.81	19	4.4	○
⑤ 75 μm ふるい下 (104 μm ふるい通過 → 91 μm ふるい通過)	0.52	0.70	26	4.5	○
⑥ 104-75 μm	0.65	0.80	19	5.0	○
⑦ 75 μm ふるい下 (104 μm ふるい通過)	0.52	0.71	26	4.6	○



図8 試作パンの外観

かさ密度及び圧縮度から、微粉区である⑤と⑦の流動性が、他の区より低いことが示されたが、工業的に取り扱うには問題ない値であった。

一方、パンには「膨らみ」を持たせることが必要であり、その定量的な指標が「比容積」である。比容積はパンの重量を容積で割った値で、その値が大きいくほど食感がソフトになる。山形食パンでは4~5程度の比容積が良好な食感を与えるとされている。表3より、 $104\mu\text{m}$ 以下の小豆粉を使用することで、良好な膨らみを持ったパンを製作できることがわかった。このことは、図8の外観写真において、分級区③~⑦の小豆粉を使用したパンの膨らみが、小麦粉で作ったパン (比容積: 5.0) と遜色ないことから確認できた。また、小豆粉全粒粉を使用したパンは、図8からわかるように良好な膨らみを持たなかった。

パンの膨らみを阻害する因子である分級区①の $131\mu\text{m}$ 以上と、分級区②の $131\sim 104\mu\text{m}$ の小豆粉のSEM画像を、それぞれ図9、10に示す。

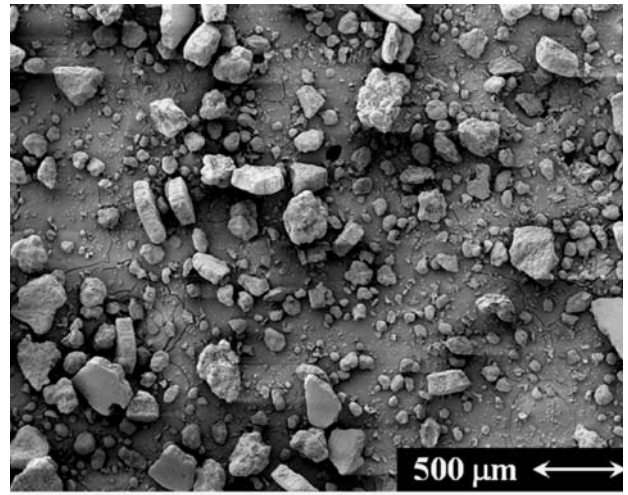


図9 131 μm ふるい上の小豆粉のSEM画像

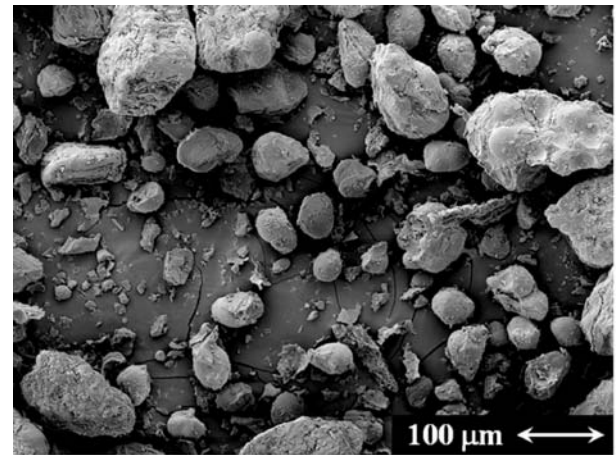


図10 粒径 $104\sim 131\mu\text{m}$ の小豆粉のSEM画像

画像より、分級区①では外皮が、分級区②ではデンプンやタンパク等が包んだ粒子がおもに観察された。

これらの粉末は、小豆を食パンに利用するには除く必要があるが、他の食品では活用可能と推察できる。外皮は、クッキーといった「サクサク感」が求められる食品への適用や、含有されるポリフェノールなどの機能性物質の有効利用、赤色の食用色素としての利用が期待できる。また、デンプンやタンパク等が包んだ粒子は、そもそも給水・加熱により「餡」となるが、「モチモチ」した食感が好まれるケーキなどの洋菓みに利用できると考えられる。

5. まとめ

衝撃力をおもな作用とする粉碎法を用いて、食品素材として利用可能な小豆粉を製造することができた。また、小豆粉の粉体特性を評価した結果、食品に利用するには、粉碎に加え分級等の単位操作が必要になることが示唆された。

小豆粉の食品への活用例としてパンへの適用を検討した結果、適正な粒度調整により、良好な食感を持ったパンを製

できることがわかった。

本研究成果をもとに、既に道内企業が、小豆全粒粉を用いたクッキーやケーキの製品化を決定している。また、パンの商品化も進行中である。今後も食品加工研究センターと共同で、道産小豆の新規需要創出に向けた技術移転を進める。

引用文献

- 1) 農林水産省：特定作物統計調査
- 2) D. W. Greer and B. A. Stewart: The water absorption of wheat flour: Relative effects of protein and starch, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 10 Iss 4, pp. 248-252, (1959)
- 3) <http://www.nara-m.co.jp/product/usage/mil.html>

膜分離による機能性食品原料の精製

鎌田 樹志, 松嶋 景一郎

Purification of Functional Food Materials by Membrane Separation Technology

Tatsuyuki KAMADA, Keiichiro MATSUSHIMA

キーワード：機能性食品，膜分離

1. はじめに

北海道は国内随一の食料供給地域であり、食品の供給に伴い発生する未低利用資源が多く発生する。これら未低利用資源には糖やタンパクなどを多く含むものがあり、これらから機能性物質を製造し、高付加価値製品として商品化する技術開発が盛んになっている。その製造プロセスの一つとして膜分離技術が有効と考えられる。最近では高性能な膜の開発が進み、新たな利用方法が見込まれている。当場ではこれまで、小規模排水処理における膜分離活性汚泥技術の活用や、機能性食品開発における限外ろ過 (Ultrafiltration, 以下UF)、逆浸透法 (Reverse Osmosis, 以下RO)、電気透析 (Electrodialysis, 以下ED) 等を利用した精製プロセスの開発に係る技術支援を行ってきたが、さらに高度な膜利用技術が求められている。

UFはタンパク質、多糖類のような高分子化合物の分離精製・濃縮等に利用されている。その分画分子量は1万前後から数十万の範囲といわれており、各膜メーカーから各種分画分子量を仕様とした膜が市販され、目的物質により最適な膜を選定する必要がある^{1),2)}。

一方、昆布は道内全海域で漁獲されており、昆布生産で排出される昆布仮根は機能性物質 (アルギン酸、フコイダン、ミネラル等) が含まれていることで注目され、有効利用されている。これら機能性物質の中で、フコイダンは昆布仮根特有の構造も見つかっており、機能性の検討が行われてきた。そこで本研究では、昆布仮根から抽出したエキスを試料として、おもにフコイダンに注目し、膜分離による精製方法を検討したので報告する。

2. 昆布仮根エキスからの高分子分画

2.1 昆布仮根エキスの調製

水洗により夾雑物を除いた昆布仮根 (水分約75%, 福島町産) をジューサーミキサーで数秒間粉碎し、粉碎物について4℃冷蔵下、抽出溶媒に3週程度浸漬した。なお、抽出溶媒として水、希塩酸 (0.1N)、希酢酸 (5%) の3種を用いた。次に、冷蔵下の試料を室温に戻し超音波攪拌後、けい藻土をろ過助剤とした減圧ろ過を行い、清澄化した抽出液3種 (水抽出エキス、希塩酸抽出エキス、希酢酸抽出エキス) を得た。表1に昆布仮根から得られたエキス量を示す。

表1 昆布仮根からのエキス量

抽出溶媒	昆布仮根 (wet) 量 (g)	抽出溶媒量 (ml)	抽出エキス量 (g)
水	316.8	1200	923
希塩酸	316.5	1200	867
希酢酸	317.0	1200	1009

抽出エキスには、高分子物質 (目的となるフコイタンを含む) とともに、不要なアミノ酸や塩類 (抽出溶媒由来分も含む) が含まれており、分離精製が必要である。フコイダンの分子量は数百から数十万の幅広い分子量分布を持つといわれているが、高分子のフコイタンには、分画分子量が数万のUF膜による精製を検討した。また、塩類の除去や一部アミノ酸の除去が可能なEDについても比較試験を行った。

2.2 平膜UF処理による精製

平膜UF処理では、平膜試験機B-28 (旧ダイセル化学工業 (株) 製) を使用した。この試験機は有効膜面積28 cm²、最大処理量300ml、窒素による加圧方式で、攪拌機を備えたバッチ式試験機である。UF膜は分画分子量1万 (UH010)、5万 (UP050) の平膜 (ダイセン・メンブレン・システムズ (株) 製、材質ポリエーテルサルホン) の2種類を使用した。各エキス150mlを、ろ過圧力4 kg/cm²でUF処理し、ろ液量が120ml

事業名：経常研究

課題名：膜分離に関する基盤的研究

程度になるまで採取し、濃縮精製された内液について固形物量や核磁気共鳴 (NMR) スペクトル (JNM-ECZR600MHz, 日本電子(株)) による成分分析を行った。表 2 に、UF 処理から得たる液、内液量及び内液の固形物量 (凍結乾燥して測定)、また原料の昆布仮根に対する内液固形物の歩留まりを示す。さらに、図 1, 2 に水抽出液エキスと希塩酸抽出エキスにおけるUH010とUP050の処理速度を比較するため、ろ液量の経時変化を示す。

表 2 平膜UF処理の内液、ろ液量と固形物量

	抽出溶媒	処理時間 (min)	ろ液量 (g)	内液量 (g)	内液固形物量 (g)	原料からの歩留まり (%)
UH010	水	80	122.9	25.5	0.318	0.62
	希塩酸	67	123.5	22.2	0.288	0.53
	希酢酸	—	125.0	28.8	0.444	0.94
UP050	水	78	122.9	22.9	0.262	0.59
	希塩酸	60	124.7	21.9	0.278	0.55
	希酢酸	48	123.7	25.2	0.368	0.78

(UH010による希塩酸抽出液の処理時間はろ圧力の調整を行ったため未測定)

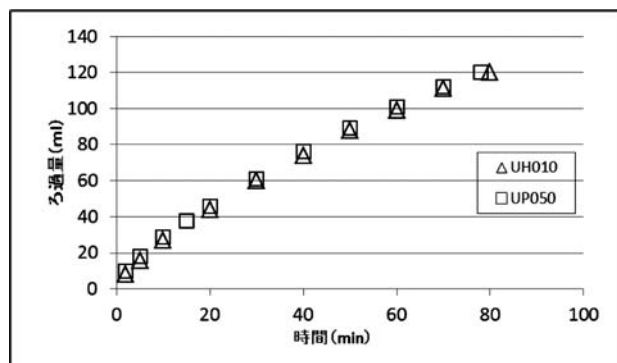


図 1 水抽出エキスのろ過速度(平膜)

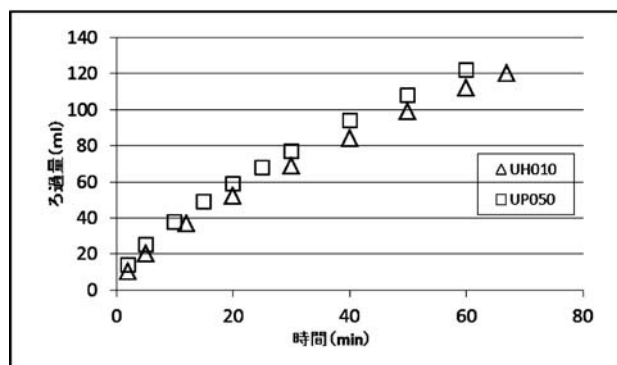


図 2 希塩酸抽出エキスのろ過速度(平膜)

分画分子量の異なる 2 種の UF 処理の結果、抽出・UF 処理精製した固形物量は希酢酸抽出エキスが一番多く、水抽出エキスと希塩酸抽出エキスはほぼ同じであった。当然ながら分画分子量が小さいUH010の方が、UP050より固形物量は

多い傾向であった。しかし、図 1, 図 2 に示すとおり、ろ過速度に大きな差は見られなかった。清水のろ過においてUP050はUH010の約1.6倍(メーカー値)のろ過速度であり、エキス処理においてUF050がUF010と変わらないろ過速度であったことから、抽出エキスにはUF050を詰まらせる分子量5万程度の成分が含まれ、ろ過速度を低下させたと考えられる。得られた固形物量から算出した昆布仮根原料からの歩留まり(原料昆布仮根と抽出精製固形物の比率)は0.53~0.94%であった。

2-3 ED処理による精製

ED 処理では、電気透析装置としてアシライザー-S3 (旭化成(株)製) を、透析膜はAC-220-550 (有効膜面積550 cm²) を、電解液は 5%硫酸ナトリウムを使用した。なお、AC-220は 2 価の塩類も透過するイオン交換膜であり一部のアミノ酸も透過すると考えられる。ED 処理条件は試料の電気伝導率によって 3 段階に電圧値が設定される定電圧モードで行った。3 種の抽出エキスをそれぞれ400g使用し、各エキスの電気伝導率11.3~13.0mS/cmが、1.0mS/cm程度に到達した時点でED処理終了と判断した。表 3 に、ED 処理後の液量と固形物量を示す。

表 3 ED処理の液量と固形物量

抽出溶媒	処理時間 (min)	処理前電気伝導率 (mS/cm)	処理後電気伝導率 (mS/cm)	処理後液量 (g)	処理後固形物量 (g)	原料からの歩留まり (%)
水	35	11.3	1.0	385.4	1.012	0.74
希塩酸	35	12.9	1.0	386.6	1.697	1.16
希酢酸	45	13.0	1.1	368.4	1.555	1.24

ED 処理後のエキス液量は368~385 gであり、固形物量は、希塩酸抽出エキスと希酢酸抽出エキスが水抽出エキスより多かった。原料からの歩留まりは希酢酸抽出エキス、希塩酸抽出エキスが高く水抽出エキスは低かった。

平膜 UF 処理と ED 処理を比較すると、ED 処理の方が原料からの歩留まりは高くなった。この差は昆布仮根の抽出エキスに含まれる無機塩類と一部アミノ酸以外の分子量数百~数万の物質が、平膜 UF 処理により除去・精製されたためと推定される。

図 3 に、水抽出エキスの平膜 UF 処理後固形物 (UH010) の NMR スペクトルを示す。スペクトルの横軸は δ (化学シフト) でプロトン(H)の化学的環境により変化し、測定物質の分子構造を解析できる。フコイダンは δ 5.5, 5.0, 1.2~1.4 付近 (図中ABC) に特有のピークが検出される³⁾が、平膜 UF 処理後固形物の NMR スペクトル分析結果で、フコイダン由来のピークが検出され、UF 処理によるフコイダンの精製を確認できた。しかし、平膜 UF 処理ではフコイダンのピークは弱く、他の糖質またはポリペプチドに帰属されるピーク

(δ 1~2.2, δ 3.65~3.85, δ 8.6) が強く検出され、さらに精製が必要であることがわかった。

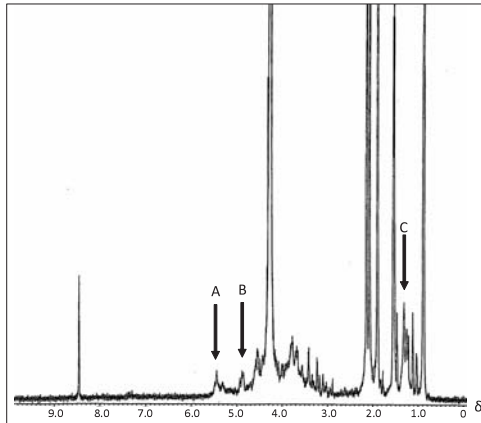


図3 水抽出エキス平膜UF処理後固形物のNMRスペクトル (A, B, Cがフコイダン由来ピーク)

3. 中空糸膜によるUF処理

平膜UF処理による精製効果が確認されたことから、スケールアップのため中空糸膜UF処理を検討した。抽出液は2.2節の調製方法により、昆布仮根4.083kgを13Lの水で抽出して得られた10.86kgの水抽出エキス、及び昆布仮根4.119kgを13Lの希酢酸で抽出して得られた9.73kgの希酢酸抽出エキスを用いた。

図4に、中空糸膜UF試験装置の概略を示す。中空糸膜UF処理は、内液流速で常に膜面の洗浄効果が得られるクロスフロー方式である。試験装置はインバータに接続したポンプ(EBARA FDFP 5.75A)で、原料エキスを内液とし膜モジュールに送液し、中空糸内部を内液が通過する。送液する圧力によりUF膜で低分子がろ過され、外液として排出される。低分子が低減した内液は原料タンクに戻り循環処理される。循環ポンプ駆動周波数と膜出口に設置したバルブで、循環流量と膜に加えるろ過圧力を調整する。中空糸膜は膜面積1 m²、分画分子量13,000のACP-2013(旭化成(株)製、材質ポリアクリロニトリル)を使用した。

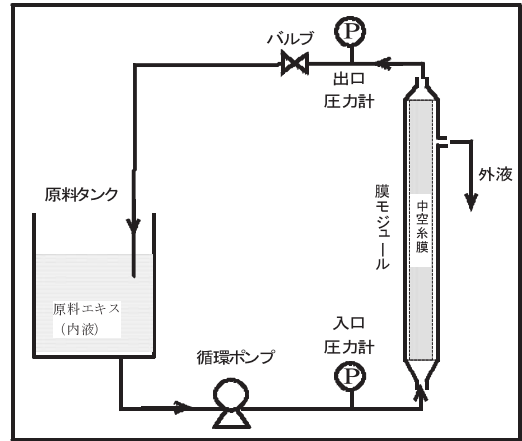


図4 中空糸膜UF処理試験装置の概略

処理条件として、内液の循環流量は膜面線速が約0.5m/sとなる14~15L/min、膜入口圧を0.1MPaとした。このとき、膜出口圧力は0.075MPaであり、処理の過程でほぼ変わらなかった。精製方法はまず抽出エキス原液を内液が循環できる最低量である3~3.5LになるまでUF処理(精製1回目)し、その後内液に10L加水し再び外液が10L得られるまで処理することを2回行い、合計3回の中空糸膜UF処理で抽出エキスを精製した。内液のBrixを測定して抽出エキス原料の値と比較することで処理中の内液固形物濃度の目安とした。図5, 6に、水抽出エキスと希酢酸抽出エキスにおける処理回数毎のろ過速度を比較するため、外液量の経時変化を示す。また、表4に各抽出エキスにおける、中空糸膜UF処理の内液、外液量と固形物量の結果を示す。

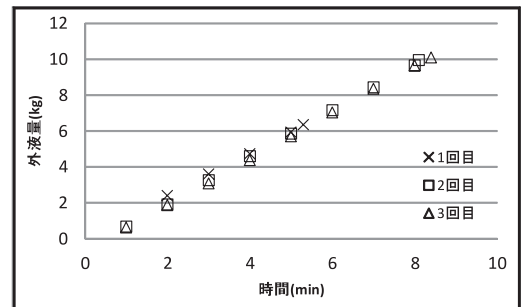


図5 水抽出エキスのろ過速度(中空糸膜)

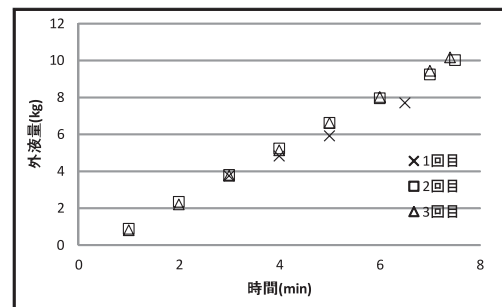


図6 希酢酸抽出エキスのろ過速度(中空糸膜)

表 4 中空糸膜 UF 処理の内液，外液量と固形物量

抽出溶媒		水	希酢酸
試料量 (kg)		9.73	10.86
固形物濃度 (%)		1.22	2.03
Brix (%)		1.3	3.0
pH		6.7	4.2
1	処理時間 (min)	5.3	6.7
	外液量 (kg)	6.35	7.7
	内液 Brix (%)	1.3	2.9
2	処理時間 (min)	8.0	7.5
	外液量 (kg)	9.95	10.02
	内液 Brix (%)	0.5	0.8
3	処理時間 (min)	8.4	7.4
	外液量 (kg)	10.1	10.16
	内液 Brix (%)	0.3	0.2
処理後内液量 (kg)		3.12	3.53
pH		7.1	4.2
固形物濃度 (%)		0.15	0.18
原料からの歩留まり (%)		0.11	0.15

中空糸膜 UF 処理は速やかに進み，2 回目 3 回目の処理時間は変わらず目詰まりの傾向はなかった。これは処理量に対し膜面積が大きかったためと考えられる。精製 1 回あたり処理時間は，10 L に 5.3～8.4 min を要したことから，本試験で使用した中空糸膜（膜面積 1 m²）では，1 時間で 60 L 程度の処理が可能と考えられる。また抽出溶媒による大きな差も見られなかった。3 回の精製について，内液 Brix は水抽出エキスで 1.3%→0.5%→0.3%，希酢酸エキスで 2.9%→0.8%→0.2% で，UF 膜を透過する低分子が外液に排出され，高分子の精製が進んでいることを確認できた。このとき，pH は水抽出エキス原料 pH 6.7→3 回目内液 pH 7.1，希酢酸抽出エキス原料 pH 4.2→3 回目内液 pH 4.2 でほぼ変わらなかった。

3 回の精製による内液の固形物濃度は，水抽出エキスで 0.15%，希酢酸抽出エキスで 0.18% となり，昆布仮根からの歩留まりは水抽出エキスで 0.11%，酢酸抽出エキスで 0.15% であった。これは平膜 UF 処理（UH010）の 2 割程度であり，1 回の平膜処理では通過しなかった不要物質が，クロスフロー方式で膜面が洗浄される中空糸膜 UF 処理では，3 回の精製により膜面を通過し，目的とするフコイダンを含む高分子の分画精製が進んだと考えられる²⁾。

図 7，8 に，水抽出エキス，希酢酸抽出エキスの中空糸膜 UF 処理後固形物の NMR スペクトルを示す。水抽出エキス，希酢酸抽出エキスともにフコイダン由来のピークが確認できた。水抽出エキスについて，図 3 の平膜 UF 処理後固形物 NMR スペクトルと比較すると，他の糖質やペプチド由来ピークが消え，フコイダン由来のピークが強くなっており，中空糸膜 UF 処理による精製が確認できた。

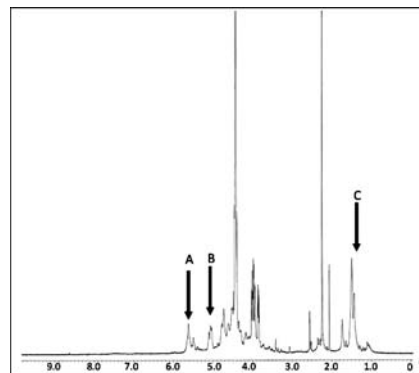


図 7 水抽出エキス中空糸膜 UF 処理後固形物の NMR スペクトル
(A, B, C がフコイダン由来ピーク)

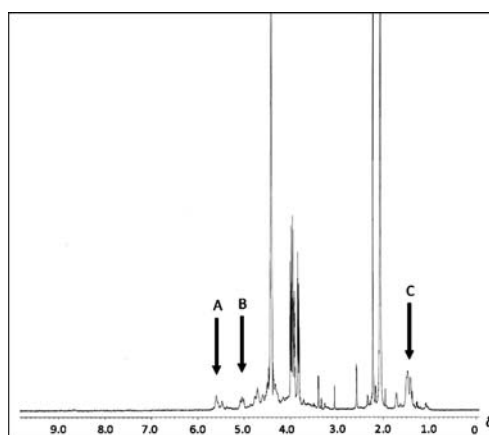


図 8 希酢酸抽出エキス中空糸膜 UF 処理後固形物の NMR スペクトル
(A, B, C がフコイダン由来ピーク)

4. まとめ

昆布仮根から抽出したエキスの精製を検討した結果，抽出エキスの含有成分について，分画分子量の異なる平膜 UF と ED 処理から塩類と数万までの物質の分画精製が可能であり，UF 処理により得られた精製固形物にはフコイダンが含まれていることが明らかになった。分画分子量 13,000 の中空糸膜を用いた UF 処理を 3 回行うことで，目的高分子の精製が可能であることを確認した。

今後，抽出効率の向上を含め，昆布仮根からの機能性食品原料の製造方法について検討を進めたい。

謝辞

本研究にあたり原料エキスの提供や精製処理物の NMR スペクトル分析等に御協力頂いたカイゲンファーマ(株)の西澤信氏に感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 食品膜・分離技術研究会25年のあゆみ-総集編-, (2013)
- 2) 膜の劣化とファウリング対策 p28-79: エヌティーエス, (2008)
- 3) 城間 力・上地俊徳・平良東紀・石原昌信・多和田真吉・田幸正邦: Isolation and Characterization of Fucoidan from *Hizikia fusiformis* (Hijiki), The Japanese Society of Applied Glycoscience, Vol.50, pp.361-365, (2003)

メタン発酵消化液の浄化処理技術

佐々木 雄真, 鎌田 樹志, 富田 恵一, 若杉 郷臣, 三津橋 浩行

Purification Treatment Technologies for Methane-Fermentation-Digested Sludge

Takema SASAKI, Tatsuyuki KAMADA, Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI, Hiroyuki MITSUHASHI

抄 録

生ごみや家畜排せつ物等をメタン発酵処理したあとに残るメタン発酵消化液は、液肥としての利用が困難な場合は浄化処理して河川等に放流されているが、処理コストが高いことが課題となっている。そこで、ばっ気が不要で電気代の削減が期待できる無ばっ気好気法による浄化処理の適用可能性を検討するため、小型の無ばっ気好気処理装置によるメタン発酵消化液の処理試験を実施した。その結果、この処理方法により、有機物の低減及びアンモニア性窒素の硝化ができることがわかった。

キーワード：メタン発酵消化液, 無ばっ気好気法, 浄化処理

1. はじめに

生ごみや家畜排せつ物などのメタン発酵処理は、バイオガスが得られることから注目されているが、残渣としてメタン発酵消化液（以下、「消化液」）が発生する。消化液は、窒素やリン酸、カリウムなどの肥料成分を含んでいるため、液肥として農地還元することにより、有効に利用できる。ただし、化学肥料に比べると肥料成分の濃度が低く、多量に散布する必要がある¹⁾。そのため、輸送コストの観点から、利用できるのはバイオガスプラント近隣に限定される。家畜排せつ物をメタン発酵の主原料としているプラントでは、圃場や牧草地などが隣接している場合が多いため、消化液は主に液肥利用されている。一方、都市生ごみを主原料としているバイオガスプラントでは、近隣に散布できる場所がなく液肥利用が困難な場合が多いため、主に浄化処理して河川や下水等に放流されている。浄化処理においては、有機物や窒素化合物、色度などを低減させる必要がある。一般的には、まず活性汚泥処理により有機物を低減したのち、硝化処理によりアンモニア性窒素を亜硝酸性窒素・硝酸性窒素に酸化し、続いて脱窒処理により窒素ガスに変換している。さらに、活性炭吸着により脱色処理している。これらのプロセスのうち、活性汚泥処理及び硝化処理では、好気的な条件を維持するためにばっ

気が必要である。例えば、下水処理場においては、送風機が全消費電力量の30～50%と大きな割合を占めるとされており²⁾、消化液の処理においても、同様に送風機にかかる電気代が高いことが課題となっている。

そこで、本研究では、消化液の低コストな浄化処理技術の開発を目指し、無ばっ気好気法の適用可能性について検討した。この処理方法では、図1のように微生物担体を充填した処理槽内の空隙を空気が自由に移動でき、図2のように流下している水に自然に空気中の酸素が溶解することから、ばっ気をしなくても好気的な条件を維持できる。そのため、活性汚泥法に比べ、電気代の削減が期待できる。また、発泡によるトラブルの心配がないことも、この処理方法の利点である。

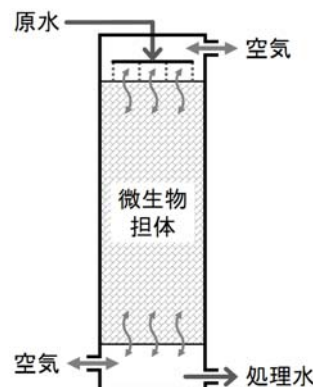


図1 無ばっ気好気処理

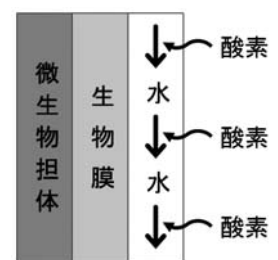


図2 酸素溶解の原理

事業名：経常研究

課題名：メタン発酵消化液の液肥利用および浄化技術に関する研究

2. 消化液の性状

2.1 消化液の前処理

浄化処理試験に使用するため、メタン発酵処理施設の消化液を採取した。この施設では、一般家庭及び事業系の生ごみを受け入れ、中温メタン発酵処理によりバイオガス化を行っている。消化液を脱水分離した液分を、施設内で発生する排水とともに排水処理施設で浄化し、河川へ放流している。そこで、本研究においても、固形分を除去した消化液を試験に用いることとした。消化液を遠心ボトルに移し、2,000Gで10分間遠心分離し、その上澄み液を孔径約1 μ mのガラス繊維ろ紙でろ過した。消化液に対するろ液の平均回収率は88.4wt%であった。

2.2 消化液の水質分析方法

固形分除去後の消化液の水質を把握するため、pH及び電気伝導率(EC)をマルチ水質計(東亜ディーケーケー(株)MM-60R)、生物化学的酸素消費量(BOD)を圧力センサ式BOD自動測定器(ハック社 BOD Trak)、全有機体炭素(TOC)及び全窒素(T-N)をTOC-TN計(株島津製作所 TOC-VCPH, TNM-1)、二クロム酸カリウムによる酸素消費量(COD_{Cr})及びアンモニア性窒素(NH₄-N)をポータブル吸光度計(ハック社 DR2800)、亜硝酸性窒素(NO₂-N)及び硝酸性窒素(NO₃-N)をイオンクロマトグラフ(メトローム社 IC861)、全リン(T-PO₄)及びカリウム(K)をICP発光分光分析装置(株島津製作所 ICPS-8100)で測定した。

2.3 消化液の水質分析結果及び考察

固形分除去後の消化液の水質分析結果を表1に示す。有機物の指標であるBODは、植種なしで予備測定を行ったあと、測定終了後の液を採取して次の測定の植種に用いるという方法で測定を3回繰り返したが、バラツキが大きく、平均値を代表値とした。なお、測定終了後の液のNO₂-N及びNO₃-Nの分析結果から、測定期間中における酸素の消費は、アンモニア性窒素の硝化によるものではないことを確認した。図3に3回目の測定における酸素消費量の推移を示す。測定には、植種として2回目の測定終了後の液を用いた。このような植種を行った場合、微生物が馴化されているため、初期段階において酸素消費速度が大きくなり、その後は徐々に低下していく曲線となるのが一般的であるが、この測定では異なる結果となった。また、BOD/COD_{Cr}比は生物易分解性であれば1に近い数値となるが、この消化液は0.19であった。これらのことから、生物難分解性物質を多く含んでいることが示唆された。窒素に関しては、家畜排せつ物系の消化液のBOD/N比は1~2程度とされている³⁾が、この消化液ではBODとT-Nの値からBOD/N比を求めると0.28となり、窒素の比率が高いことがわかった。また、全窒素のうち約80%をアンモニア性窒素が占めていた。

表1 消化液(固形分除去後)の水質分析結果

項目	pH	EC	TOC	BOD	COD _{Cr}
単位	—	S/m	mg/L	mg/L	mg/L
分析値	8.33	1.50	873	480	2,550

T-N	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-PO ₄	K
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1,730	1,410	N.D.	N.D.	67	1,020

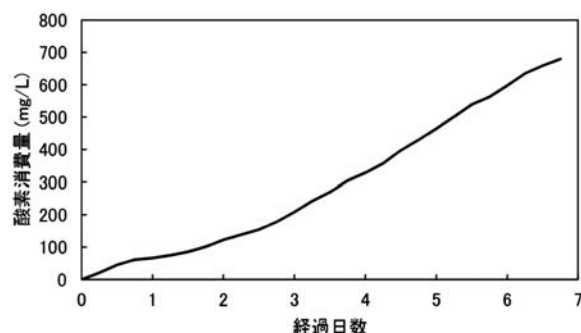


図3 BOD測定(3回目)における酸素消費量の推移

3. 浄化処理試験

3.1 処理装置及び処理条件

図4に示すとおり、内径 ϕ 100mmのアクリル製カラムに、微生物担体(大日本プラスチック(株)ラメールチューブLT-15)を600mmの高さ(容積4.7L)で充填したものを処理槽とした。担体は、外径 ϕ 15mm \times 長さ15mmの中空円筒形、ポリエチレン製で表面に凹凸があり、微生物を保持しやすい構造となっている。処理槽内の酸素濃度を測定できるようにするため、カラムの中央部に穴を開けセプタムで栓をした。測定の際、ガス検知管と連結した注射針を差し込んでカラム内の気体を吸引する(図5)。この処理槽を25 $^{\circ}$ Cの恒温槽内に設置した。固形分除去後の消化液を1~4倍に希釈したものを原水とし、マイクロチューブポンプで送液し、カラム上部より滴下した(図6)。流量は0.25~1.0L/日とした。外部からの植種は行わず、消化液の通水を続けたところ、徐々に担体表面に生物膜が形成された。

通水開始から100日程度が経過し、処理水質が安定してきたことを確認したのち、原水の濃度及び流量が処理特性に及ぼす影響を調べた。負荷(単位時間あたりに流す無希釈換算の消化液量)を一定に保ちながら、4週間ごとに原水の濃度及び流量を変化させた。表2のとおり、phase1では2倍希釈した消化液を流量0.50L/日で、phase2では無希釈の消化液を流量0.25L/日で、phase3では4倍希釈した消化液を1.0L/日で通水した。この条件における1日当たりの消化液処理量(0.25L)と処理槽容積(4.7L)の比は1:18.8となる。



図4 無ばっ気好気処理装置



図5 ガスの測定方法



図6 原水導入部

表2 処理試験の通水条件

	経過日数	原水	流量	負荷
phase 1	99 ~ 127	2倍希釈	0.50L/日	0.25L/日
phase 2	128 ~ 155	無希釈	0.25L/日	0.25L/日
phase 3	156 ~ 183	4倍希釈	1.0L/日	0.25L/日

3.2 処理水質等の分析方法

無ばっ気好気法による処理状況を把握するため、定期的に処理水を採取し、pH、TOC、T-N、NH₄-H、NO₂-N及びNO₃-Nを測定した。pHはコンパクトpHメーター（株式会社堀場製作所 B-712）で測定し、それ以外の項目は、消化液の分析と同じ方法で行った。また、処理槽が好気的な条件を維持しているか確認するため、酸素濃度をガス検知管（光明理化学工業(株) 159SC）により測定した。

なお、有機物に関する指標については、BODは前述のとおりバラツキが大きいことから、TOCを用いることとした。

3.3 処理試験の結果及び考察

無ばっ気好気処理装置による消化液の通水試験を実施した結果、原水の水質（表3）と処理水のTOC（図7）及び形態別窒素（図8）の比較から、試験期間を通じてTOCの低下、NH₄-Hの低下、NO₂-N及びNO₃-Nの生成が確認された。このことから、無ばっ気好気法により、有機物の低減及びアンモニア性窒素の硝化ができることが明らかとなった。出嶋ら⁴⁾は、無ばっ気好気法であるDHS法により、有機物除去及び硝化ができたと報告しており、本研究においても同様の結果が得られた。

原水の濃度と流量の関係について、各phaseにおけるTOCの平均残存率は、図9～11の左側のグラフに示すとおり、phase 1で71%、phase 2で66%、phase 3で64%であり、通水条件による有意な差は認められなかった。これは、有機物中に占める難分解性物質の割合が高く、分解に時間を要するため、濃度や流量の違いによる影響を受けにくいと推

測される。一方で、形態別窒素については、NH₄-Hの原水に対する処理水の平均残存率は、図9～11の右側のグラフに示すとおり、phase 1で47%、phase 2で32%、phase 3で53%となり、流量が少ないほどNH₄-Hの比率が低下し、NO₂-N及びNO₃-Nの比率が上昇する傾向が見られた。このことから、流量の少ない方がアンモニア性窒素の硝化が進みやすいことが明らかとなった。与える負荷は同じでも、流量が少ないと生物膜との接触効率が良くなり、処理性能が向上するためと推察される。

処理水のpHは、図12のとおり、phase 1及びphase 3では7.9程度で推移したが、phase 2では平均7.6に低下した。これは、他の期間に比べアンモニア性窒素の硝化率が高く、亜硝酸性窒素及び硝酸性窒素の生成量が多かったためと考えられる。

処理槽内の酸素濃度は、図13のとおり、約6ヶ月間の試験期間を通じて、大気中と同じ約21%を維持していた。これにより、処理槽は閉塞することなく、好気的な条件を保っていたことが示された。

今後の課題としては、処理性能の向上が挙げられる。今回の試験に用いた消化液は、BOD/N比が低いため余剰汚泥の発生や生物膜の成長が少なく、目詰まりが起りにくい性状であった。このような排水では、充填する担体のサイズを小さくし比表面積を大きくすることが可能と考えられる。また、原水の導入方法にも改良の余地が残されている。処理槽上層部では流れに偏りが生じ、微生物担体として機能していない領域が存在していた。これらの点を改善すれば、同じ処理槽容積のままでも処理性能の向上が期待できる。

表3 原水の水質（単位：mg/L）

	TOC	T-N	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N
phase 1	437	865	705	N.D.	N.D.
phase 2	873	1,730	1,410	N.D.	N.D.
phase 3	218	433	353	N.D.	N.D.

（phase 2は実測値。その他はphase 2からの換算値。）

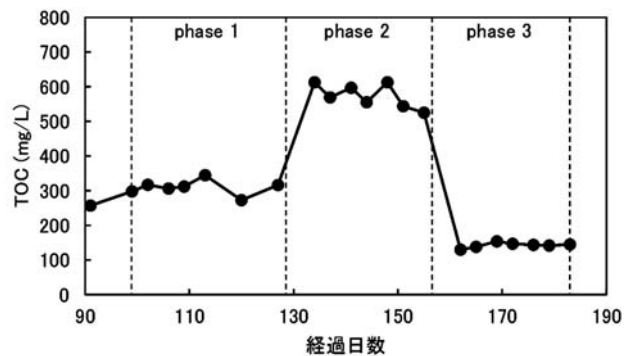


図7 処理水のTOCの経日変化

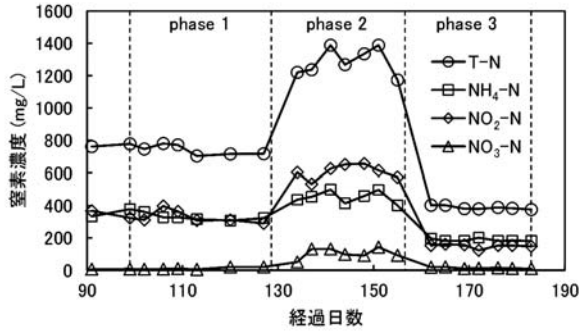


図8 処理水の形態別窒素の経日変化

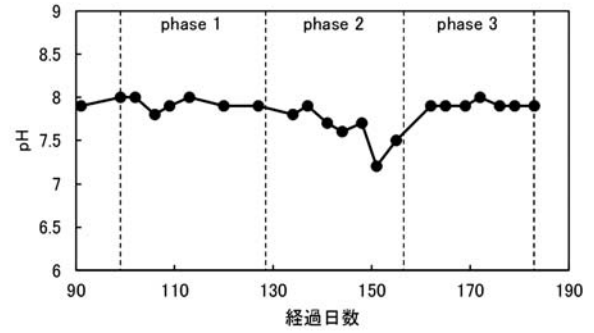


図12 処理水のpHの経日変化

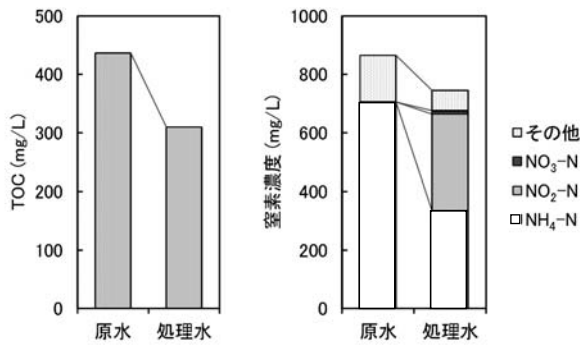


図9 phase 1における平均処理水質

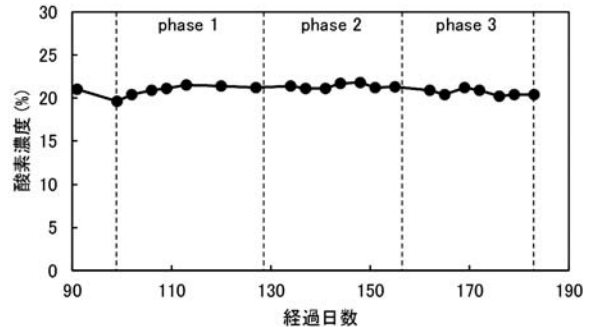


図13 処理槽中央部の酸素濃度の経日変化

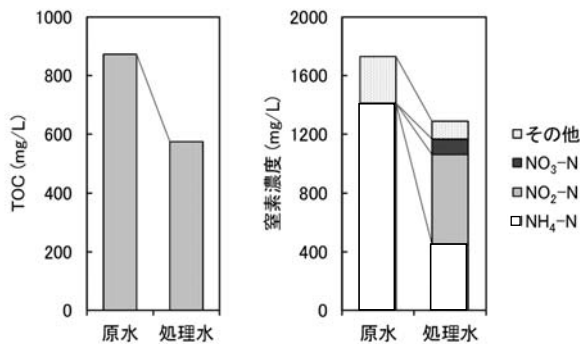


図10 phase 2における平均処理水質

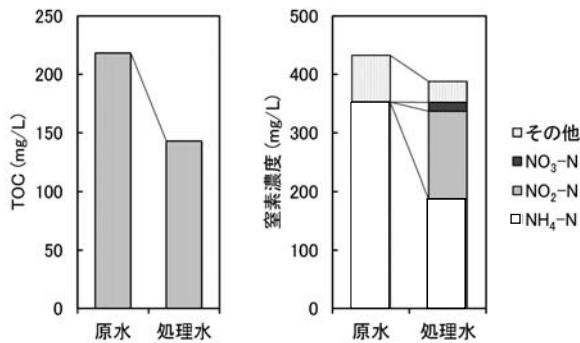


図11 phase 3における平均処理水質

4. まとめ

消化液の浄化処理技術として、無ばっ気好気法の適用可能性について検討した。小型の処理装置により、生ごみ由来の消化液の通水試験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 無ばっ気好気法により、有機物の低減及びアンモニア性窒素の硝化ができることが明らかとなった。
- 2) 有機物の除去性能は、同一の負荷条件においては、濃度や流量による有意な差は認められなかった。これは、全有機物中に占める難分解性物質の割合が高いことに起因すると推測される。
- 3) アンモニア性窒素の硝化性能が、同一の負荷条件において流量の少ない方が高い処理性能を示したのは、生物膜との接触効率が良くなるためと考えられる。
- 4) 排水の性状に合わせて適切なサイズの担体を選定したり、原水の導入方法を改良したりすることにより、処理性能の向上が期待できる。

謝辞

本研究で使用したイオンクロマトグラフ、ICP発光分光分析装置及び純水製造システムは、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。また、大日本プラスチック株式会社には、微生物担体をご提供いただきました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) (一社)地域環境資源センター：消化液の肥料利用を伴うメタン化事業実施手引，(2016)
- 2) 榎本 博・坂本 忠昭・進藤 静一：下水処理場の送風機設備におけるエネルギー評価手法，EICA，第11巻2/3号，(2006)
- 3) 亀岡 俊則：メタン発酵処理技術の現状と課題，畜産環境情報，第35号，(2006)
- 4) 出嶋 京太・幡本 将史・山口 隆司・齋藤 安佐美・大坂 典子・西川 向一・谷川 大輔：UASB-DHSシステムを用いたメタン発酵脱離液の処理技術の開発，第49回日本水環境学会年会講演集，(2015)

土壌中の六価クロム還元処理の基礎検討

富田 恵一, 若杉 郷臣

Basic Examination for Reduction Treatment of Hexavalent Chromium Leached from Polluted Soil

Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI

キーワード：六価クロム, 汚染土壌, パッシブトリートメント

1. はじめに

土壌汚染対策法の改正（平成22年）に伴い、経済性の高い自然由来の汚染土壌に関する対策技術が望まれている。

汚染土壌のパッシブトリートメントは、自然界で得られる地形勾配、微生物代謝、光合成、化学反応などを処理のエネルギー源として利用し、低頻度の保守管理だけで設計寿命の間十分に機能するような、土壌汚染をその場で回避・抑制ないし処理する工学的手法である¹⁾。運用時のエネルギー消費が少なく、汚染土壌の移動がないので掘削、運搬などの処理に伴う経済的及び環境負荷が発生しない手法として注目されている。

汚染土壌のパッシブトリートメントとして人工湿地や嫌気性石灰石水路などによる処理のほか、図1に示す汚染土壌の地下水脈に透水性かつ反応性の資材を使用した透過型反応壁(Permeable Reactive Barrier, 以下PRB)¹⁻⁴⁾を設置し、汚染土壌からの有害物質を系外に出さないようにする処理システムが検討されている。

PRB汚染土壌に含まれる有害物質を直接除去する方法ではないため、全ての有害物質を無害化するまでは長時間を要するが、施工後、設計寿命までの間はメンテナンスフリーに近く、北海道のような積雪地において厳冬の保守の容易さなど大きな利点がある。さらに、設計寿命の間は施工されたPRBの地表部分は他の用途に使用することも可能である。

本研究では、六価クロム（以下Cr(VI)）を処理対象とし、PRBによるパッシブトリートメントを想定して処理資材や流速など基礎的な反応特性の検討を行ったので、その結果について報告する。

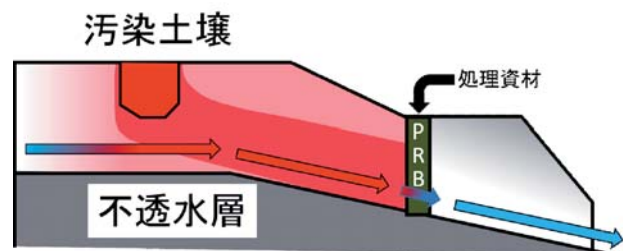


図1 透過型反応壁(PRB)の概念

2. 実験

2.1 装置及び試薬

2.1.1 装置

試験はバッチ式またはカラムにより実施した。バッチ式還元試験にはシェーカー（YAMATO製SA-31型、振とう幅40mm）を用い、振とう速度を200rpmで使用した。カラム試験で送液にはペリスタルティックポンプ（レーニン製DYNAMAX PR-1型）を用い、外径1.30mm、内径0.85mmのタイゴンR3607製チューブをセットして予め回転数と流量の関係を確認して使用した。カラムは柴田科学製カラムHLC-15S型、カラム長150mmを使用した。特に断らない場合、その他の器具はほうけい酸ガラス製のものを使用した。

2.1.2 試薬

Cr(VI)の溶液調製には、二クロム酸カリウム（関東化学製、容量分析標準）を既定の条件で乾燥させたものを正確に秤量し、溶解後定容して10mg/L Cr(VI)になるように調製した。

還元を使用した試薬は、鉄粉（キシダ化学製C, S定量用, 60mesh）、アルミニウム（キシダ化学製, 99.9%）、硫黄（粉末）（関東化学製, 特級）、硫化鉄(II)（関東化学製, 硫化水素発生用）、マグネシウム（小宗化学薬品製, 細片, 99.9%）、グラファイト繊維シート（大阪ガスケミカル製LFP205, 繊維の太さおおむね10μm）（以下それぞれ, Fe, S, FeS, Mg, Cと表

事業名：経常研究

課題名：土壌中の有害元素の判別及び無害化技術の開発

記)を用いた。FeSは鉄乳鉢で粉碎後、篩で分級し0.15~0.30 mm画分を、グラファイト繊維はシートを解砕して、それ以外の資材はそのまま使用した。図2に資材の光学顕微鏡写真を示す。

また、カラム試験では反応層の支持に5号硅砂を使用した。各種化学処理及び湿式分析用の純水は超純水製造装置(ELGA-オルガノ製PURELAB ultra Analytic)で精製した超純水を使用した。

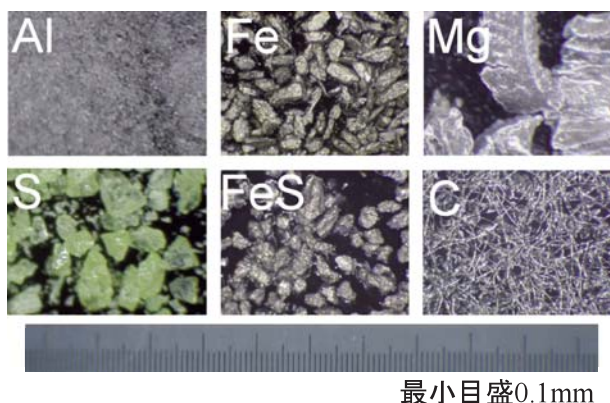


図2 各種資材の光学顕微鏡写真

2.2 各種定量方法

各試験で溶液中のCr(VI)の測定は、JIS K0102 65.2 ジフェニルカルバジド吸光光度法に準じて定量⁵⁾した。ただし、測定液に懸濁物質が含まれている場合は、必要に応じて孔径0.2 μmメンブランフィルターでろ過した。また、ろ過後の測定液はCr(VI)以外の着色性物質がほとんど含まれないため、ブランク操作を省略した。吸光度測定には分光光度計(島津製作所製UV-3100PC型)を、溶液中の全元素濃度測定にはICP発光分光分析装置(島津製作所製ICPS-8100特型)を使用した。溶液のpH測定にはpHメータ(東亜ディーケーケー製HM-60G型、ガラス複合電極GTS-5721C型)を使用した。

2.3 還元資材の検討

Cr(VI)の無害化処理は、Cr(III)への還元による処理とした。PRBを想定した処理のため、還元資材には硫酸鉄(II)のように容易に地下水に溶解して流出する資材ではなく、水溶性の低い資材としてFeS, Fe, Mg, Al, C, Sを選択した。Cr(VI)溶液と各種還元資材を混合し振とうするバッチ式還元試験を行った。図3に試験のフローを示す。反応前のCr(VI)濃度に対する反応前後のCr(VI)濃度減少分をCr(VI)除去率として算出し、還元資材を比較した。

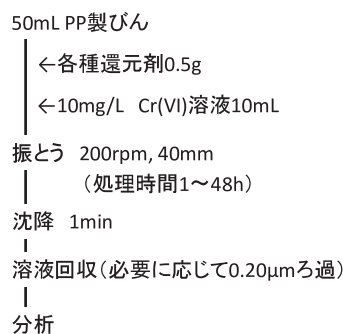


図3 バッチ式還元試験フロー

2.4 Cr(VI)還元におけるFeの前処理の影響

Feの前処理がCr(VI)の還元に与える影響を調べるため、使用するFeを表1に示した条件により浸漬処理し純水で4回洗浄した後、2.3節と同様のバッチ式還元試験を行い除去率を調べた。

表1 鉄粉の処理条件

処理剤	処理時間(sec)
HCl (1+1)	10
HNO ₃	10
H ₂ SO ₄ (1+4)	10
NH ₂ OHHCl (20w/v%)	60
Cu 20mg/L	60

2.5 カラムによるCr(VI)還元試験

図4に示した実際の土壌を模したカラムに、硅砂で挟まれたFe層を設け、Cr(VI)溶液を通液し、流速と溶出液のCr(VI)濃度を測定することにより反応特性を調べた。また、実際の土壌からのCr(VI)含有浸出水をCr(VI)溶液と同程度のCr(VI)濃度(10mg/L)になるよう1/50に希釈し、試験を行った。

カラムへの充填は端部に石英ウールを充填し、十分水洗した5号硅砂をカラムの中心付近まで純水を用いて流し込み表面を平にならしたところに2.4節と同様の塩酸処理済みのFe 2g及び10gを純水で流し込み、カラム上端まで同様に5号硅砂を満たした。ペリスタルティックポンプのチューブとはPTFE製のチューブで接続した。

カラムは内径15mmでFe 20gを充填したFe層の厚さは実測36mmであった。これより実際に用いた2g及び10gの処理層の厚さをそれぞれ3.6, 18mmと見積り、鉄の真比重値7.874から空隙の体積を計算し、さらに空隙1mLあたりの長さや流速からFe層中の線速度を算出した。また、流速の変更時は溶出液が十分に安定する時間を取るため、計算したカラムの空隙体積の1.5倍の量を流してから処理水を回収した。

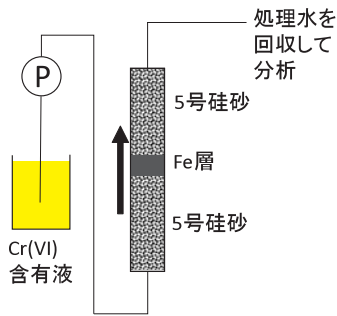


図4 カラム試験の模式図

3. 結果と考察

3.1 還元資材の検討

図5に還元資材に対するCr(VI)除去率の時間変化を示す。FeSは速やかに、Mg, Al, C, Feでは48h処理で20~80%除去されているが、Sでは48h処理では全くCr(VI)濃度が減少しなかった。光学顕微鏡写真から粒度はおおむねMg>S>Fe≒FeS>Al>Cの順であるが、粒度以外に、還元剤の種類の影響も大きいことがわかった。また、Cr(VI)濃度の減少が見られたFeS, Mg, Al, C, Feは還元処理に使用できる可能性があるが、FeSは硫化水素の発生の懸念があり、Mg, Al及びCはコストが高いことから実際の処理資材としては難点があり、この中の資材では反応速度が小さいがFeが有望であると考えられる。

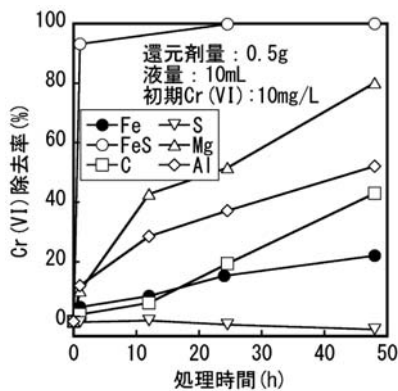


図5 Cr(VI)除去に対する還元資材の種類の影響

3.2 Cr(VI)除去におけるFeの前処理の影響

図6に各種前処理後のFeを用いてのCr(VI)除去率の時間変化を示す。いずれの前処理でも3.1節の前処理無しの結果と比較して著しく反応性が向上することがわかった。硝酸前処理による3時間処理ではCr(VI)除去率がわずかに低いが、これは硝酸が強い酸化性の酸のため、Fe表面が不動態化して反応性が低下している可能性がある。また、酸以外に、Feを腐食するCu溶液及び水溶性還元剤である塩化ヒドロキシルアンモニウム処理でも、Feの反応性が向上することがわ

かった。しかし、処理コストと処理後に残存するCuの環境への影響を考慮すると、Feの処理には硫酸または塩酸処理が望ましい。そのため、以降の試験では処理液の洗浄性も考慮し、Feをより粘性の低い塩酸(1+1)により10秒間洗浄し、純水で十分すすいだものを使用することとした。

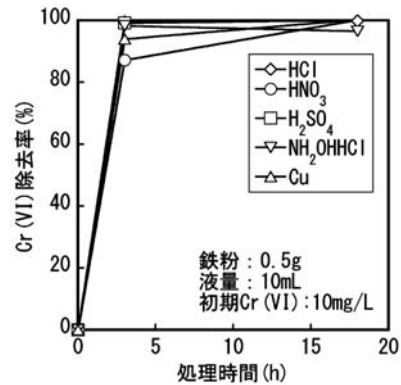


図6 Cr(VI)除去に対するFeの前処理の影響

3.3 カラムによるCr(VI)還元除去試験

図7にCr(VI)溶液(10mg/L)を通液したときの結果を示す。Fe層の厚さが18mmでは4.8cm/minの線速度でも除去率が95%以上であるが、3.6mmでは約0.2cm/minですですに除去率は80%程度まで低下していた。また、Fe層3.6mmで線速度0.5cm/minと18mmで線速度2.5cm/minではFe層での滞留時間が同じであるが、除去率が厚さ3.6mmでは約62%、18mmでは約98%と、Fe層が厚い方が除去率が高い結果が得られた。これは単純に還元で除去されるCr(VI)の量が滞留時間に比例する以外の現象に起因することが示唆される。

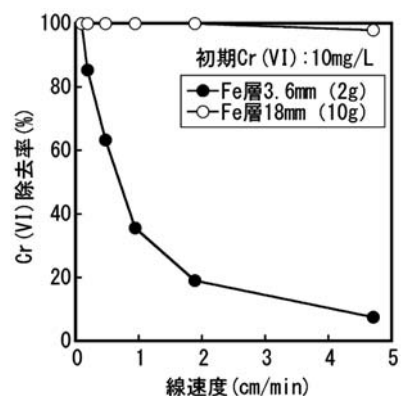


図7 カラム試験での模擬液のCr(VI)除去処理結果

図8に実際の汚染土壌からの浸出液を1/50に希釈した液を通液したときの結果を示す。Cr(VI)濃度は11.36mg/Lであるが、Cr(VI)溶液(10mg/L)を通液した結果と比較すると除去率は大きく低下し、18mmのFe層を用いた場合でも除去を完全にするためには約0.1cm/min程度の流速まで低下さ

せる必要があることがわかった。これはCr(VI)溶液ではpHが中性付近であるのに対して、浸出液希釈液ではpH10.75と高く酸化還元平衡が酸化側に移動している⁶⁾ため、還元除去率が低下したためと考えられる。また、Fe層18mm、線速度0.47cm/minの溶液の全Crの濃度を測定したところ、1.0mg/LではほぼCr(VI)濃度と一致し、還元後のクロムは系内に保持されていることがわかった。本試料では溶液のpHが高いことから、クロムは不溶性の水酸化物となっていると考えられる。

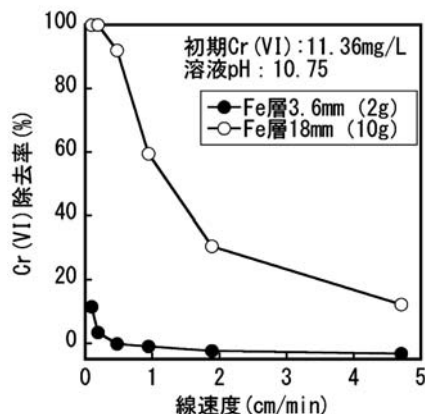


図8 カラム試験での実浸出液希釈液のCr(VI)除去処理結果

4. まとめ

- (1) Cr(VI)汚染土壌処理を念頭に溶解性の低い還元資材について検討した結果、FeS, Mg, Al, C, FeがCr(VI)を還元できるが、Sは全くCr(VI)と反応しないことがわかった。
- (2) 処理層の資材として最も安価かつ環境負荷が小さいと考えられるFe(鉄粉)について反応速度の検討を行ったところ、前処理(活性化処理)の影響が非常に大きいことがわかった。鉄粉の活性化処理では、酸等による表面溶解処理が効果的であるが、硝酸処理Feではやや還元速度が遅いことがわかった。
- (3) PRBを模したカラムによるCr(VI)の還元処理について検討した。Cr(VI)10mg/L液を18mmのFe層で処理した場合は、約5cm/minで処理可能であることが分かった。また、汚染土壌からのCr(VI)含有実浸出液希釈液(Cr(VI)濃度11.36mg/L)は、アルカリ性のため反応性は試薬による試験結果と比較して低く、完全に除去するためには18mmのFe層で、線速度約0.1cm/minまで低下させる必要があった。

謝辞

使用した純水・超純水製造システム、ICP発光分光分析装置、ICP質量分析装置は、公益財団法人JKAの機械振興補助事業により整備された機器である。ここに、衷心より感謝の意を表する次第である。

引用文献

- 1) 納篤：JOGMECの新たな鉍害防止への取り組み－鉍害環境情報交換会資料－平成19年12月4日、(2007)
- 2) United States Environmental Protection Agency: Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation, EPA/600/R-98/125, p.1-7, (1998)
- 3) David W. Blowes・Carol J. Ptacek・Shawn G. Benner・Che W.T. McRae・Timothy A. Bennett・Robert W. Puls: Treatment of inorganic contaminants using permeable reactive barriers, *Journal of Contaminant Hydrology*, 45, pp.123-137, (2000)
- 4) 篠原隆明・榎本幹司：土壌・地下水汚染の浄化および修復技術 浄化技術からリスク管理、事業対策まで、エス・ティー・エス、pp.235-244, (2008)
- 5) 日本工業規格：JIS K0102：2013工場排水試験方法 クロム(VI)[Cr(VI)], pp.270-272, (2013)
- 6) 公害防止の技術と法規編集委員会編：新・公害防止の技術と法規2010 [水質編] 分冊II, 丸善, pp.212-217, (2010)

天井裏・床下空間に設置した樹脂製放射パネルの暖房時における放熱特性

白土 博康, 保科 秀夫
櫻庭 高光*, 嘉賀 通倫*, 井浦 奉昭*

Heat Release Characteristics of Radiation Panels
Combined with Plastic Pipes in Ceiling or Floor Chamber

Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA
Takamitsu SAKURABA*, Michinori KAGA*, Tomoaki IURA*

抄 録

天井裏・床下に設置する樹脂製放射パネルを開発し、微少気流を与えられる送風機と組み合わせた放射冷暖房システムを提案した。送風をしない場合、天井裏や床下に設置した放射パネルの暖房時における放熱量は、居住空間に設置したJIS規格での試験とほぼ同等の値を示し、高い輻射放熱量、良好な室内環境が得られた。送風する場合、輻射放熱量は損なわれるが、放射パネルの放熱量は最大で21～30%増加した。以上のことから、立ち上げ時に風量を多くして素早く室温を上げ、その他の時間帯では送風しないことが最適な運転方法と考えられる。

キーワード：天井裏・床下設置式樹脂製放射パネル、放熱量、送風、室内環境

1. はじめに

放射冷暖房システムは、エアコンのような対流熱伝達による冷暖房と比較して、同じ室内空気温度で「暖かさ」、「涼しさ」を感じやすいため、室内空気温度と熱媒温度の差を小さくでき、高い省エネルギー性が得られる。また、システム運転時における気流は、一般に自然対流かそれに準じるものであるため、人体に不快感を与えず、快適な室内環境を与える。

しかしながら、エアコンが冷暖房システムの主流である地域では、室内の景観の良さや利用可能な空間確保を優先しがちなため、ユーザーが居住空間内に放射パネルを置くことに抵抗感がある。このため、間仕切り内や天井面への設置も見られるが、いずれも建築工事を伴い、コスト高となるほか、建物全体の工期も延長する。以上のことから、特に住宅への放射冷暖房システムの普及には、建築工事と設備工事を分離し、施工性を向上させる低コストな手法が必要である。

本研究は、以上の課題を解決するため、これまでに室内設置用として開発した樹脂製放射パネル^{1)~4)}を天井裏・床下埋設(設置)用に人手による加工部位を減らすなど低コスト化し、その運用方法を明らかにすることによって、特に住宅への放射冷暖房システムの普及促進に貢献することを目的とし

ている。

本報では、工業試験場内の環境試験室⁵⁾(輻射暖房試験室)内に模擬天井または模擬床を配置し、そこに放熱量あたりの重量が鋼板製よりも小さい樹脂製放射パネルを設置して、パネルの放熱量評価、模擬天井板、模擬床表面からの放熱量評価、室内環境の測定を行い、システムの適切な運転方法を明らかにする。また、模擬床や模擬天井に一部開口部を設け、気流を与えることによる模擬天井、模擬床表面からの放熱量や室内環境への影響も明らかにする。

2. 放射パネル天井裏・床下設置式冷暖房システム

2.1 既往システムの概要

図1に筆者らの既往研究における放射冷暖房システムの概要を、図2にこのシステムで使用している樹脂製放射パネルの外観を示す。ヒートポンプを熱源とし、居住空間に設置した樹脂製放射パネルに冷温水を循環させる。冷房時における放射パネルの冷水温度は高め(16℃以上)とし、別のヒートポンプを熱源に天井裏と床下に設置した空気熱交換器(除湿コイル)により潜熱を除去する。

* 株式会社テスク, * TSC Co., Ltd.

事業名: 一般共同研究

課題名: 天井・床下埋設型潜熱顕熱分離式放射冷暖房システムに関する研究

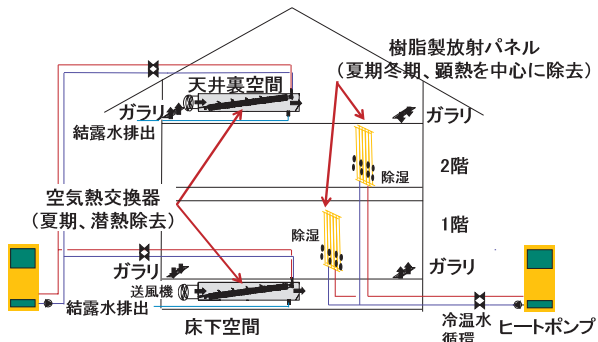
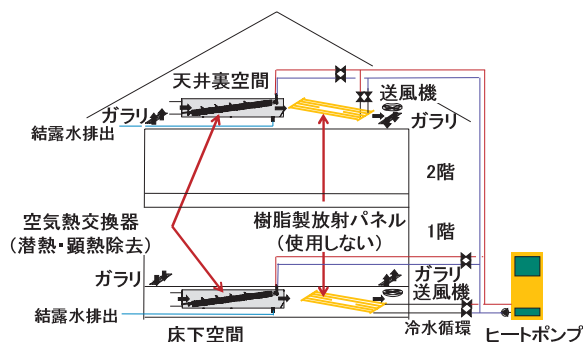


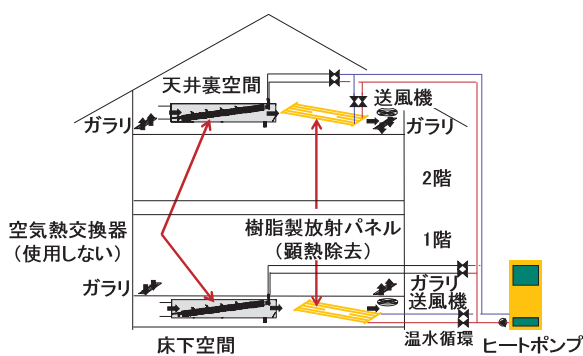
図1 既往研究における放射冷暖房システムの概要



図2 樹脂製放射パネルの外観



(a) 冷房時



(B) 暖房時

図3 天井、床下空間設置式冷暖房システムの概要

2.2 本システムの概要

図3に本研究における放射パネル天井裏、床下空間設置式冷暖房システムの概要を示す。ヒートポンプを熱源とした冷温水を天井裏及び床下に設置した樹脂製放射パネルに循環させる。室内端部に吸込口、吹出口を、吹出口には送風機を設け、天井裏や床下と居住空間の空気を攪拌する。既往システムと同様に冷房時における放射パネルの冷水温度は高め（16℃以上）とする。空気熱交換器も同様に天井裏及び床下に設置する。

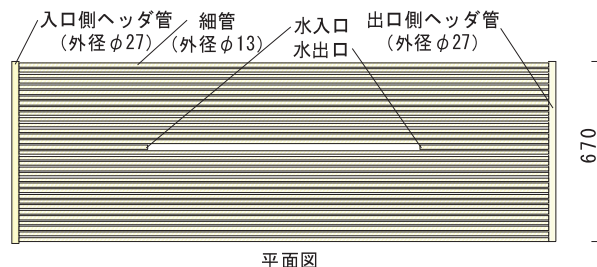
2.3 放射パネルと送風機

図4に開発した天井裏・床下設置式樹脂製放射パネルの外観と概要図を示す。放射パネルは横型670×2000mmである。φ27mmのヘッダ管に20mmピッチで孔を開け、そこにφ13mmの細管を33本熱融着させている。冷温水は、中央の細管下部から導入され、入口側ヘッダ管、他の細管、出口側ヘッダ管を経由して中央の細管上部から排出される。なお、内部の管にエアが滞留することを抑制するため、出口側を50mm持ち上げている。

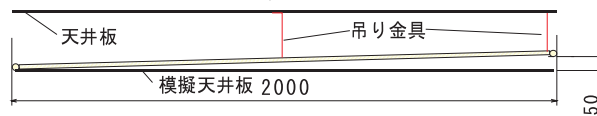
また、これまでの居住空間用の放射パネルは、図5のように設置スペースと放熱量の兼ね合いから、2枚のパネルを重ね合わせ別の管で熱融着して接合させているが、この工程は機械でなく職人が行っている。このため今回の天井裏・床下用の放射パネルは、重ね合わせによる接合の必要がない分、



(a) 外観



平面図



側面図 (天井設置)

(b) 概要

図4 天井裏・床下設置式樹脂製放射パネルの外観と概要

製造コストが抑えられる。

図6に送風機の外観を示す。送風機として、本用途に開発されたデルタ電子製を用いた。寸法は50×250×240mmである。リモコンにより風量を25, 30, 50, 100 m³/hに調整できる。

パネルとパネルの接合部

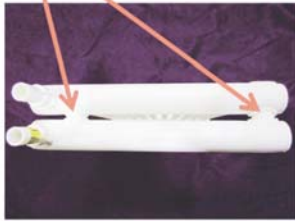


図5 居住空間用樹脂製放射パネル接合部の外観

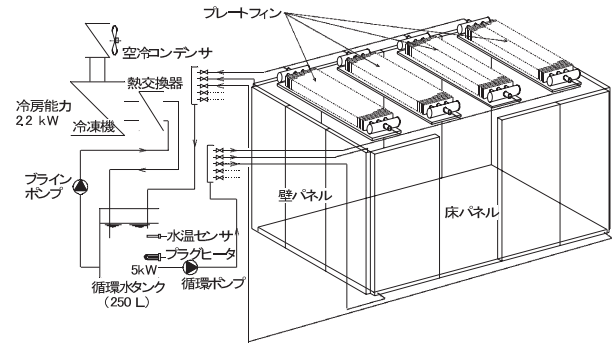


図6 送風機の外観

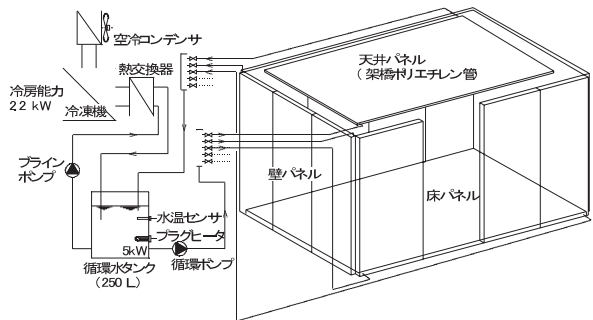
3. 放射パネルの天井裏・床下への設置

3.1 環境試験室

天井裏・床下設置式放射パネルの放熱特性評価は工業試験場の環境試験室で実施した。図7に試験室及び室温制御システムの概要を示す。試験室の寸法は3600×2700×2200mm(天井高さ)である。木構造で、試験室の天井、試験室の床、壁は、厚さ100mmのスチレンフォームで断熱し、試験室の天井と壁の内装はスレート板(内装は表面をアクリルウレタン樹脂塗装仕上げ)、試験室の床は塩化ビニルシート仕上げである。室温制御用として幅850mm、高さ1700mm、厚さ12mmの床暖房用金属製パネル(以下金属製パネル)が扉部分を除く周囲壁面、試験室の床面に設置されている。金属製パネルには、配管材に直径8mmの円形銅管が、表面材に厚さ0.6mmの鋼板が使われている。なお、鋼板表面を放射率向上のためアクリル樹脂塗料で塗装した。この塗料の全放射率は0.96である。床下設置式放射パネルを評価する際には、天井近傍に設置した4つのプレートフィンコイルにより、放射パネルからの放熱を吸収する。天井裏設置式放射パネルを評価する際には、試験室の天井表面がより均質な温度に維持されていることが望ましいことから、プレートフィンコイルを撤去し、断熱材の上に架橋ポリエチレンパイプを1回路で施



(a) 床下設置式放射パネルを評価する場合



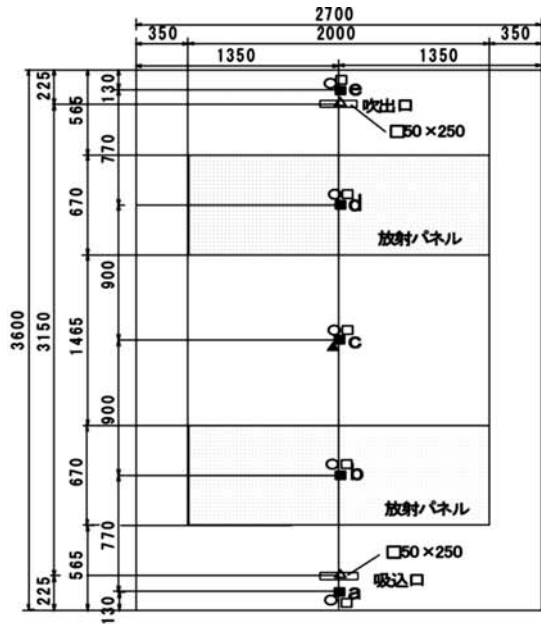
(b) 天井設置式放射パネルを評価する場合

図7 試験室及び室温制御システムの概要

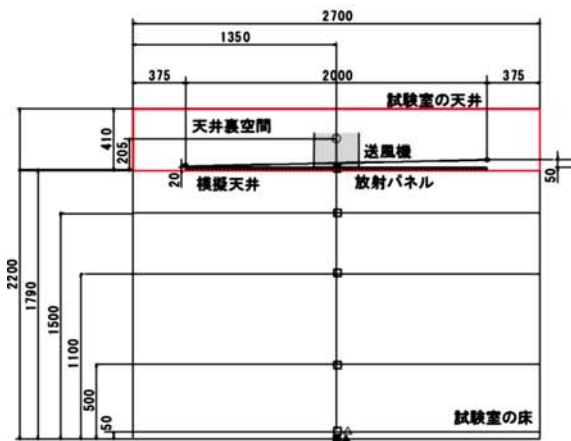
工し、その上にアルミ板、仕上げ材で覆い、模擬天井とした。金属製パネル、架橋ポリエチレンパイプには常時不凍液を循環させ、試験室内温度を温度センサで検出して、タンク内不凍液温度を制御する。なお、タンク内不凍液温度は冷凍機を連続運転し、ヒータのオン・オフにより所定温度に制御される。タンク内の不凍液はヘッダで6系統に分岐され、同一温度で試験室内の壁、試験室の床、試験室の天井の各金属製パネル、架橋ポリエチレンパイプへ送られる。

3.2 放射パネルの設置

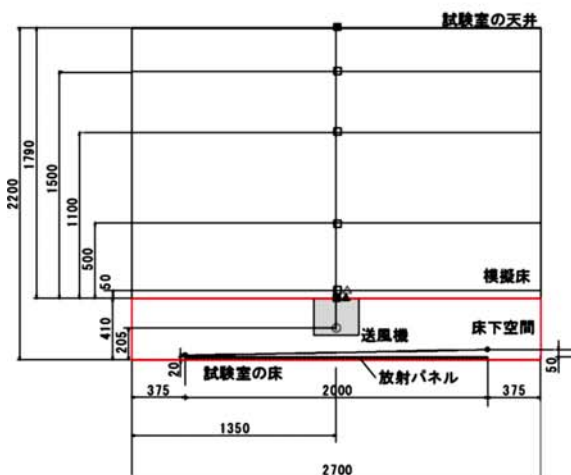
図8に放射パネルの設置図(4章記載の測定点を含む)を示す。天井裏設置の場合は、試験室の天井の下に410mmの空間を空け、模擬天井を設置し、その上に図4の放射パネルを2枚設置した。床下設置の場合は、試験室の床面の上に410mmの空間を空け、模擬床を設置するとともに、試験室の床面の金属製パネル上に図4の放射パネルを2枚設置した。模擬天井材、模擬床材は合板24mm、12mm 1枚ずつとした。図4の側面図左のヘッダ管以外は模擬天井、又は試験室の床に接していない。模擬天井又は模擬床面積に対する放射パネルの敷設面積は28.6%である。また、床下設置の実験条件として放射パネルからの反射や試験室の床面の断熱効果を見込み、放射パネルに対して幅、奥行き方向に150mmずつ大きい遮熱断熱材(アキレス製アキレスボード、厚み30mm、熱伝導率0.024W/(m・K))を敷いた設置と、敷かない設置を行った。放射パネルを天井裏に設置する場合、遮熱断熱材は



(a) 平面図



(b) 側面図 (放射パネル天井裏設置)



(c) 側面図 (放射パネル床下設置)

- 室内空気温度
- 天井裏あるいは床下空間内空気温度
- △吹出、吸込口空気温度
- 模擬天井あるいは模擬床表面温度

図8 放射パネルの設置図

使用しない。図9に放射パネルの天井裏設置状況を、図10に放射パネルの床下設置状況を示す(図10は遮熱断熱材を敷いた状態)。



(a) 模擬天井設置前 (b) 模擬天井設置後

図9 放射パネルの天井裏設置状況



(a) 模擬床設置前 (b) 模擬床設置後

図10 放射パネルの床下設置状況

4. 放射パネルの放熱特性評価方法

表1に測定内容の概要を、表2に測定条件を示す。試験室内での定常条件における放射パネルの放熱量、模擬天井、模擬床面から室内への熱流、室内、床下温熱環境を評価した。具体的には、タンク内で調温した水を放射パネルに循環させ、室内の代表点(放射パネルを天井裏に設置する場合は室内中央試験室の床上1100mm、放射パネルを床下に設置する場合は室内中央模擬床上1100mm)を $20^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ となるように壁、試験室の床の金属製パネルと架橋ポリエチレンパイプ(天井裏設置式のみ)、プレートフィンコイル(床下設置式のみ)の入口温度を調整した。以降代表点の空気温度を代表温度と呼ぶ。その流量は1 L/minである。2つの放射パネルの通水出入口は直列に繋がっており、本報ではその合計の放熱量を算出している。測定は30秒間隔で行い、各温度、流量、熱流が定常と考えられる状態になってから10分間の平均値を算出した(風速は1秒間隔で30分間の平均を算出)。測定パラメータは放射パネルへの入力温度、遮熱断熱材の有無(床下設置式のみ)、送風量である。

表 1 測定内容の概要

測定内容	測定項目	測定器
放射パネルの放熱量	放射パネルに循環される水の出入口温度	測温抵抗体
	放射パネルに循環される水の流量	パルス発信付き羽根車式流量計
室内環境	代表空気温度	測温抵抗体
	室内、床下空間空気温度	T熱電対補償導線(ねじり)
	吹出口、吸込口空気温度	T熱電対補償導線(ねじり)
	床表面温度	T熱電対補償導線(ねじり)
	風速	風速センサ、風速計

表 2 放射パネルの測定条件

実験No.	放射パネルへの入力水温[°C]	遮熱断熱材	風速[m³/h]	流量[L/min]
1	28、32、36、40、50	あり	0	0.5、1、2、3
2		なし		
3	28、32、40、50	あり	100	2
4		なし		
5	36	あり	0、30、50、100	2
6		なし		

5. 放射パネルの放熱特性評価結果

5.1 暖房時の放熱特性

図11に暖房時の放射パネル出入口の平均温水温度と代表温度の差に対する放熱量(送風なし)を示す。放射パネルの放熱量は(1)式で求めた。

$$Q_{pro} = C_{pw} \times p_w \times f_w - (T_{win} - T_{wout}) / A_{pro} \quad [W/m^2] \quad (1)$$

ここで、 Q_{pro} ：放射パネルの投影面積あたりの放熱量 $[W/m^2]$ 、 C_{pw} ：水の比熱：4.179 $[J/(g \cdot K)]$ 、 p_w ：平均水温に対する水の密度 $[g/L]$ 、 f_w ：水の流量 $[L/s]$ 、 T_{win} ：放射パネルの入口水温 $[K]$ 、 T_{wout} ：放射パネルの出口水温 $[K]$ 、 A_{pro} ：放射パネル2枚の投影面積：2.68 $[m^2]$

本試験方法で得た平均温水温度と代表温度の差に対する放熱量は、試験室の空間内に設置したJIS規格⁶⁾の試験による累乗の近似式 ($y = 4.5456x^{1.3185}$) と比較してほぼ同等となった。床下設置式では、遮熱断熱材があるときよりもない方が、放熱量がやや大きい値となった。遮熱断熱材により試験室の床の金属製パネルからの放熱が損なわれることが原因と考えられる。

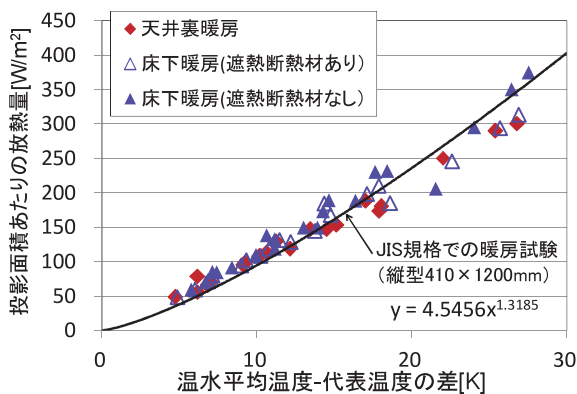


図11 暖房時の放射パネル出入口の平均温水温度と代表温度の差に対する放熱量

図12に送風時の風量に対する放射パネルの放熱量を、図13に送風時の風量に対する放射パネルの総括熱伝達係数を示す。いずれも放射パネル入口水温を36°C、流量2 L/minとした測定条件のものである。放射パネルの総括熱伝達係数は(2)式で求めた。

$$Q_{pro} = U \times A_{ex} \times (T_{s\text{ave}} - T_a) / A_{pro} \quad [W/m^2] \quad (2)$$

ここで、 Q_{pro} ：放射パネルの投影面積あたりの放熱量 $[W/m^2]$ 、 U ：放射パネル表面から代表空気温度測定点への総括熱伝達率 $[W/(m^2 \cdot K)]$ 、 A_{ex} ：放射パネル2枚の外表面積：5.38 $[m^2]$ 、 $T_{s\text{ave}}$ ：放射パネルの平均表面温度 $[K]$ 、 T_a ：代表空気温度 $[K]$ 、 A_{pro} ：放射パネル2枚の投影面積：2.68 $[m^2]$

風量50 m^3/h までは投影面積あたりの放熱量はやや増加するが、それ以上では顕著に変わらなかった。同一温水入力条件では床下暖房の方が高い放熱量、総括熱伝達係数を示した。天井裏暖房の場合、暖気が上部に滞留しやすいことが原因と考えられる。

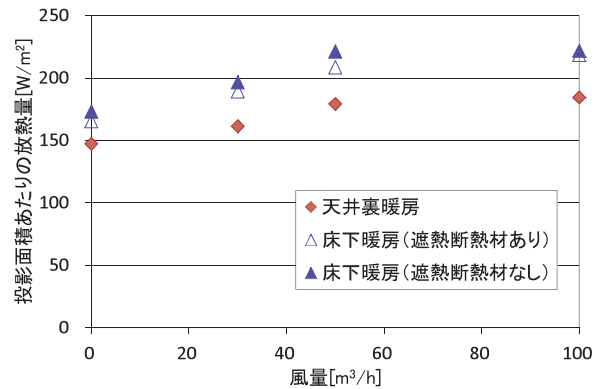


図12 送風時の風量に対する放射パネルの放熱量

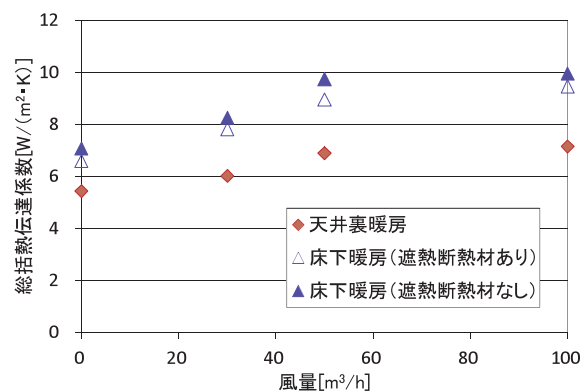


図13 送風時の風量に対する放射パネルの総括熱伝達係数

図14に風量に対する天井裏又は床下から室内へ吹き出す空気の放熱量を示す。その放熱量は(3)式で求めた。

$$Q_{air} = C_{p\text{air}} \times p_{\text{air}} \times f_{\text{air}} \times (T_{\text{air}} - T_{\text{airin}}) / A_{pro} \quad [W/m^2] \quad (3)$$

ここで、 Q_{air} ：放射パネルからの吹き出し空気の投影面積あたりの放熱量 $[W/m^2]$ 、 $C_{p\text{air}}$ ：吹き出し空気の比熱：1.007

[J/(g・K)], ρ_{air} : 平均水温に対する水の密度[g/m³], f_{air} : 吹き出し空気の流量[m³/s], $T_{air out}$: 吹出口の空気温度[K], $T_{air in}$: 吸込口の空気温度[K], A_{pro} : 放射パネル2枚の投影面積: 2.68[m²]

天井裏又は床下から室内へ吹き出す空気の放熱量は、風量の増加に伴って増えることが確認でき、放射パネルの放熱量全体に対する割合は、風量100 m³/hでそれぞれ20.7, 29.7, 29.1%であった。

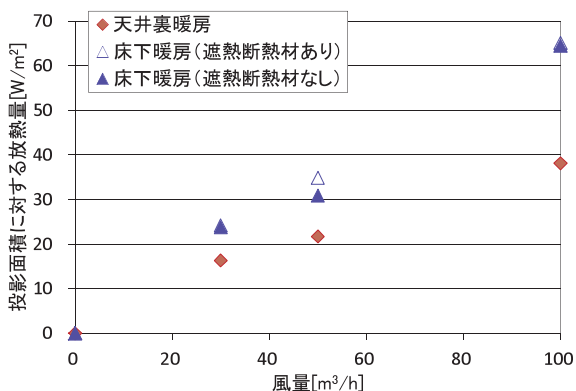


図14 風量に対する天井裏または床下から室内へ吹き出す空気の放熱量

5.2 暖房時の室内温熱環境

図15に天井裏設置放射パネル運転時における図8のa～e点の模擬天井表面温度を、図16に床下設置放射パネル運転時における模擬床表面温度を示す。同様に図17に天井裏設置放射パネル運転時における図8のa～e点の垂直温度分布を、図18に床下設置放射パネル運転時（遮熱断熱材がない場合）における垂直温度分布を示す。いずれも放射パネルへの温水入力温度36℃、流量2 L/minの実験条件とした。放射パネル上部とその他の箇所のいずれも風量が増加すると模擬天井または模擬床表面温度は低下する。この原因は、風量が増加すると天井裏または床下空気温度の低下や放射パネル表面温度の低下がおこるためと推察される。天井裏設置放射パネル運転時の模擬天井表面温度の方が床下設置放射パネル運転時の模擬床表面温度よりも高く、両者の代表温度が同じであることから、輻射熱伝達量が高いことが確認できる。この原因は、放射パネルと模擬天井板の距離が、模擬床板との距離よりも近いためと考えられる。床下設置放射パネル運転時の遮熱断熱材は、放射パネル直上の表面温度上昇に寄与しているものの、他の測定点では、有意な効果がないと考えられる。放射パネルを天井裏あるいは床下のどちらに設置しても、送風なしで大きな垂直温度分布は認められず、室内環境は良好と言える。送風すると吹出口位置の温度が高くなるが、特に放射パネルを床下に設置した場合に、床下内の熱溜まりの解消が確認できる。結論として、送風をしない方が輻射熱伝達量を確保でき、良好な室内環境が得られる。

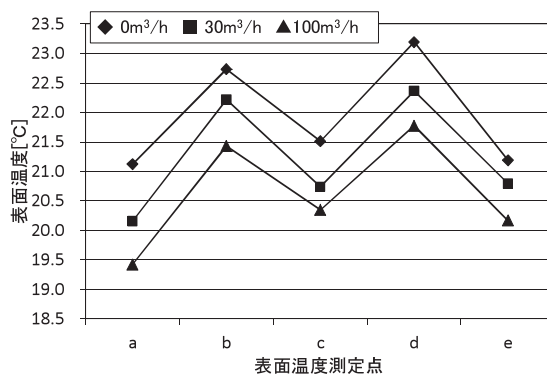


図15 a～e点の模擬天井表面温度 (天井裏設置放射パネル運転時)

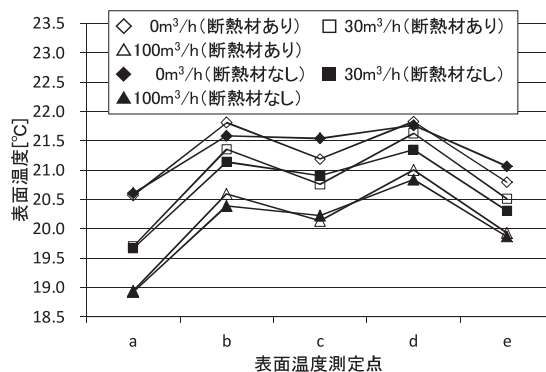
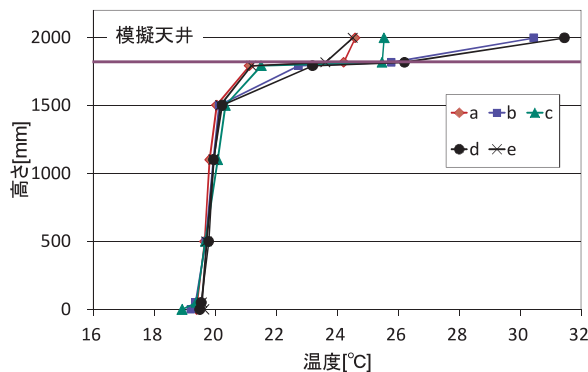


図16 a～e点の模擬天井表面温度 (床下設置放射パネル運転時)



(a) 送風なし

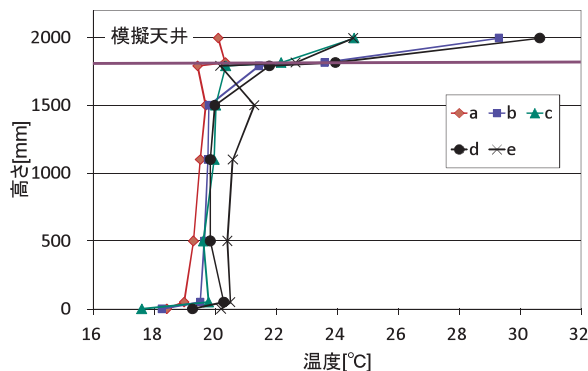
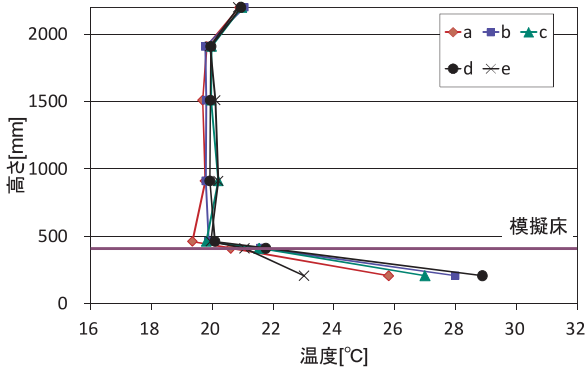
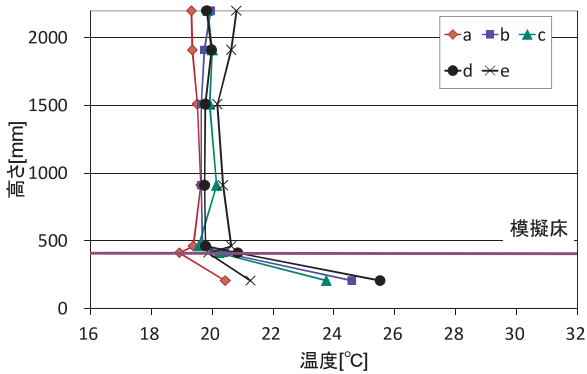


図17 a～e点の垂直温度分布 (天井裏設置放射パネル運転時)



(a) 送風なし



(b) 風量 100 m³/h

図18 a～e点の垂直温度分布
(床下設置放射パネル運転時、遮熱断熱材なし)

表3に図8のc, e点の風速分布(放射パネルを床下設置時は遮熱断熱材がない場合)を示す。吹出口近傍の地点eでは、風量100 m³/hの場合、模擬床上50～1500mm(4測定点)における最大平均風速が天井裏設置の場合1.60m/s、床下設置の場合1.39m/sであり、送風しない場合と比較して気流があるが、中央のc点では、0.3m/s未満であった。送風した場合、放射パネルからの放熱量は高くなることから、暖房時の最適な運転方法として、立ち上げ時に風量を高くして素早く室温を上げ、その他の時間帯では、送風しないなど使い分けることが考えられる。

表3 風速分布

放射パネル設置方式	測定箇所	風量[m ³ /h]		
		0	100	
		平均風速[m/s]		
天井裏	c点中央	床上1500mm	0.00	0.13
		床上1100mm	0.00	0.13
		床上500mm	0.01	0.14
		床上50mm	0.02	0.26
	e点端部	床上1500mm	0.00	1.60
		床上1100mm	0.01	0.97
床下	c点中央	床上1500mm	0.05	0.07
		床上1100mm	0.04	0.11
		床上500mm	0.05	0.07
		床上50mm	0.07	0.16
	e点端部	床上1500mm	0.07	0.48
		床上1100mm	0.07	0.21
		床上500mm	0.05	1.39
		床上50mm	0.07	0.95

6. まとめ

本研究で得た知見を以下にまとめる。

- (1) 環境試験室内の天井裏または床下に設置した放射パネルの暖房時における放熱量は、居住空間に設置するJIS規格での試験とほぼ同等の値を示した。
- (2) 送風しない場合、高い輻射放熱量が得られ、良好な室内環境が得られる。
- (3) 風により放射パネルの放熱量は増加し、全体の放熱量に対する送風による放熱量は最大で21～30%となった。
- (4) 暖房時の最適な運転方法として、立ち上げ時に風量を高くして素早く室温を上げ、その他の時間帯では、送風しないなど使い分けることが考えられる。

引用文献

- 1) 富田和彦・保科秀夫：北海道立工業試験場報告，No.293, pp.85-93, (1994)
- 2) 白土博康・富田和彦・黒田邦臣：空気調和・衛生工学会論文集, 158, pp.15-21, (2010)
- 3) 白土博康・富田和彦・黒田邦臣・井浦奉昭：空気調和・衛生工学会論文集, 164, pp.49-54, (2010)
- 4) 白土博康・富田一彦・保科秀夫・井浦奉昭：空気調和・衛生工学会論文集, 189, pp.47-54, (2012)
- 5) 白土博康・富田和彦・保科秀夫・櫻庭高光・井浦奉昭：空気調和・衛生工学会論文集, 233, pp.11-18, (2016)
- 6) JIS A1400 (2007)

臭気吸着分解処理技術の開発

野村 隆文, 執行 達弘, 吉田 憲司, 橋本 祐二, 斎藤 隆之, 赤澤 敏之

Development of Adsorption and Decomposition Technologies for Odor Gases

Takafumi NOMURA, Tatsuhiro SHIGYOU, Kenji YOSHIDA,
Yuji HASHIMOTO, Takayuki SAITOU, Toshiyuki AKAZAWA

キーワード：臭気ガス, 吸着分解, 光触媒, 基材, コート

1. はじめに

超高齢社会の到来に伴い、医療・介護施設では、患者や高齢者に対する健康科学的な食育と快適な生活環境保持の観点から、料理臭、排泄臭、体臭等の臭気ガス対策が急務とされている。医療施設を対象とした「においに関する調査」¹⁾では、病院内の臭気について「改善必要」が約70%以上と高く、その場所は病室、トイレ、汚物室であり、臭気の種類は排泄臭が約65%、次いで体臭であった。現状の対策は消臭剤や小型の空気清浄機による臭気低減方法と、大型の業務用脱臭装置や空調設備による室内脱臭方法がある。前者は効果が一時的で持続性がなく、十分な能力を有していない。後者は設備導入のコストが高い。そのため、有効な解決手段がなく、複数の医療施設関連企業から、低コストで臭気低減効果のある臭気対策技術の確立が求められている。また、北海道の高齢化率は2012年で約26%と全国平均(約24%)より高く、2040年には約41%と上昇することが予想されており、高齢者施設においても排泄臭などの臭気対策は今後ますます重要な課題となる。

本研究は、病院や高齢者施設において、おむつ交換時等の局所的に発生する臭気強度3程度のアンモニアや硫化水素などに有効な臭気吸着分解処理技術の開発を目的とした。

臭気の吸着フィルタには、これまで開発実績^{2),3)}がある道産資源の利用を検討するとともに、光触媒による新たな臭気分解材料を作製し、その特性を評価した。

2. 実験方法

2.1 臭気ガス吸着フィルタの開発

2.1.1 各種吸着材の特性評価

塩基性ガスのアンモニア (NH_3) や酸性ガスの硫化水素 (H_2S) の低減に有効な吸着材を選定するため、道産資源を中心に、 NH_3 吸着に有効な酸性吸着材として、天然ゼオライト (以下 NZT とする) (北海道仁木町産)、トドマツ炭化物 (以下 TC とする)⁴⁾を、 H_2S 吸着に有効な塩基性吸着材として、褐鉄鉱 (以下 LT とする) (北海道七飯町産)⁵⁾を、比較試料として、代表的な吸着材であるクロマトグラフ用活性炭 (以下 AC とする) (和光純薬工業製)、市販 H_2S 吸着材の薬剤添着活性炭 (以下 GH2 とする) (大阪ガスケミカル製)、 H_2S 吸着に有効な酸化鉄 (Fe_2O_3 特級, 以下 FW とする) (和光純薬工業製) を使用した。

各試料について、蛍光 X 線分析による化学組成分析、粉末 X 線回折による鉱物結晶相の同定、 N_2 ガス吸着法による比表面積の測定を行った。

2.1.2 各種吸着材の臭気ガス吸着特性評価

ガス吸着性能は、 120°C で 24 時間、乾燥処理した各吸着試料 (粒径 $150\ \mu\text{m}$ 以下) を 12 L のデンケータ容器内に 0.1 g 投入後、20 ppm の NH_3 ガスあるいは 3 ppm の H_2S ガスを注入、検知管法によりガス濃度の経時変化を測定した。

2.1.3 吸着フィルタの作製方法

網目状 Al_2O_3 基材 (25mm 角) に吸着材をコートした吸着フィルタを作製した。吸着材と市販無機バインダーの混合スラリー (吸着材の添加量: 10-20 wt%) を調製後、各々のスラリーに Al_2O_3 基材を 10 秒浸漬、 120°C で 24 時間、乾燥処理した。なお、市販無機バインダーはシリカゾル (ADEKA 製 AT-20N) 溶液を用いた。

事業名：経常研究

課題名：臭気吸着分解処理技術の開発 (平成26~27年度)

2.1.4 吸着フィルタの臭気ガス吸着特性評価

吸着フィルタのガス吸着性能は、12Lのデシケータ容器内に吸着材コート基材を装填した小型脱臭装置（満栄工業製）（面風速：0.1m/s, 処理流量：0.54 m³/h）を設置し、2.1.2項と同条件で測定した（図1）。



図1 吸着材コート基材の臭気ガス吸着試験用装置

2.2 臭気ガス分解触媒材料の開発

2.2.1 新規光触媒材料の作製方法

これまでに、光触媒を用いた分解装置は既に実用化されている。しかし、光触媒分解装置は広い受光面積を持つ光触媒フィルタが必要であり、装置の小型化は困難である。本研究では小型臭気ガス分解処理装置に装填可能な新規光触媒材料の検討を行った。また、効率的な触媒効果を発現させるため、有機物吸着に有効な牛骨焼成アパタイト（HAp）をあらかじめ、基材にコートし、臭気吸着機能を付与した材料も作製した。なお、HApスラリーは牛骨由来HAp粉末を硝酸に溶解後、アンモニア水添加により生成した白色スラリーを水洗、アルコールで分散し、3.3wt% HApスラリーに調製したものを使用した。基材に対するTiO₂の密着性向上と紫外線の散乱によるTiO₂への効率的な光照射を行うため、棒状ガラス基材（パイレックス：直径2mm、長さ40,80mm）の表面を市販ガラスエッチング液で粗面化処理した。そのガラス基材を18wt% TiO₂スラリー（テイカ製TKD-701）の5倍希釈スラリー（3.6wt% TiO₂スラリー）あるいは3.3wt% HApスラリーと3.6wt% TiO₂スラリーに順次10秒浸漬、120℃で24時間乾燥後、500℃で2時間焼成し、ガラス表面にTiO₂単独あるいはHApとTiO₂をコートした棒状TiO₂/ガラス触媒、TiO₂/HAp/ガラス触媒を作製した。

2.2.2 新規光触媒材料の臭気ガス分解特性評価

図2に流通式ガス分解装置による臭気ガス分解試験の概要を示す。容器に棒状TiO₂/ガラス触媒あるいはTiO₂/HAp/ガラス触媒60本を充填し、特定悪臭物質であるプロピオンアルデヒド（C₂H₅CHO）（以下PAとする）を100ppm注入し、キセノンランプ光源（500W）から、2.7-4.8mW・cm⁻²の紫外線をガラス触媒断面方向から照射し、PAガス濃度の経時変化を測定した。なお、PAガス濃度は、四重極質量分析計で測定したPA及びN₂イオン強度から求めたイオン強度比（PA/N₂）とPAガス濃度の検量線から換算した（図3）。PA

ガス初期分解速度はPAガス濃度と紫外線照射時間の関係をプロットしたグラフから、照射開始10-20minにおけるグラフの傾きから算出した。

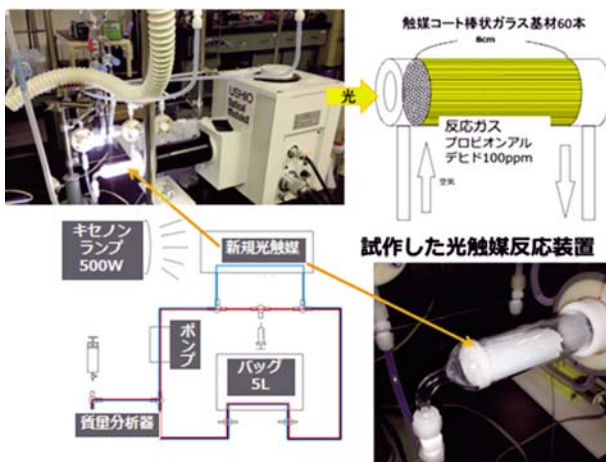


図2 流通式ガス分解装置による臭気ガス分解試験

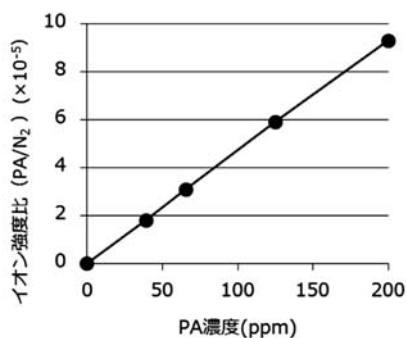


図3 PAガス濃度とイオン強度比（PA/N₂）の関係

3. 結果と考察

3.1 各種吸着材の臭気ガス吸着特性

図4に3種試料のNH₃ガス吸着試験結果を示す。いずれの試料も時間の経過とともに、NH₃濃度は減少した。AC及びTCはNH₃を速やかに吸着し、10分後には初期濃度の約65%を吸着した。NZTはACやTCよりも吸着性能は劣ることがわかった。TCはNH₃吸着性能が最も大きく、60分でほぼNH₃濃度は0となり、代表的な吸着材AC（比表面積1105.1 m²/g）以上の優れた吸着性能を示した。

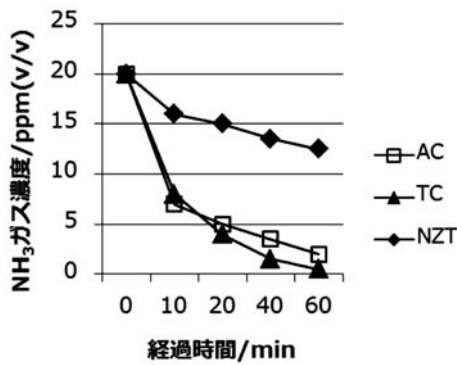


図4 各種吸着材のNH₃ガス吸着特性

木質炭化物は炭化温度と加熱時の雰囲気により、固体表面の官能基が変化し、約300℃の空気雰囲気での炭化処理ではカルボキシル基等の酸性官能基が生成する²⁾。TCの比表面積は約1.1 m²/g、細孔容積0.008 cm³/gで非多孔質であることから、TCのNH₃吸着性能は固体表面の酸性官能基に起因し、その吸着メカニズムは化学吸着と推察される。

図5に4種試料のH₂Sガス吸着試験結果を示す。最も吸着性能が高い市販H₂S吸着材GH2(比表面積993.7 m²/g)は60分で初期濃度の約43%を吸着した。一方、酸化鉄系吸着材であるLT(比表面積32.7 m²/g)はFW以上のH₂S吸着性能(初期濃度の25%を吸着)を有することがわかった。

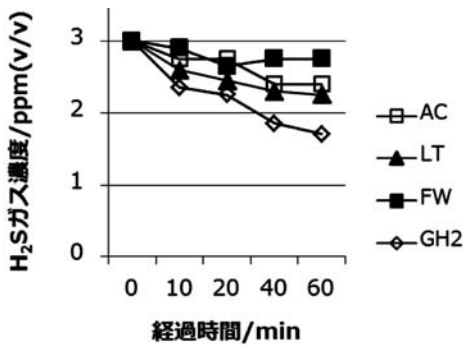


図5 各種吸着材のH₂Sガス吸着特性

古くから酸化鉄(Fe₂O₃)はH₂Sと反応し、Fe₂S₃を生成することが知られており、乾式脱硫法として利用されている。LTは主成分が石英(SiO₂)であり、Fe₂O₃を約15wt%含有するが、Fe₂O₃含有量はFW>LTであり、H₂S吸着性能はFe₂O₃含有量に依存しないことから、水酸化鉄等の結晶形態が影響している可能性が高い。LTの構成鉱物としてH₂Sと反応性が高いゲーサイト(α -FeOOH)^{6),7)}が認められたことから、LTはFWよりもH₂S吸着性能が高くなったと推察される。

3.2 吸着フィルタの臭気ガス吸着特性

図6, 図7にTC基材(8 wt%TCスラリーに含浸, 吸着材担持量0.1 g), LT基材(10wt%LTスラリーに含浸, 吸着材担持量0.1 g), AC基材(10wt% ACスラリーに含浸, 吸着材担持量0.1 g)の臭気ガス吸着特性を示す。TC基材では、NH₃濃度が速やかに低減し、5分で初期濃度の約95%を吸着、10分で検出限界値以下となり、TC基材はAC基材よりNH₃吸着性能に優れることが分かった。LT基材は60分で初期濃度の約10%を吸着したのに対し、AC基材では初期濃度の約50%を吸着した。なお、吸着材担持量を増加したLT基材(20wt%LTスラリーに含浸, 吸着材担持量0.4 g)では、AC基材と同等のH₂S吸着性能を示した。LTのH₂S吸着性能はACと同等以上であることを考慮すると、LTを基材化する際に、その本来の吸着性能が発現していないことから、吸着性能を低下させないバインダーの検討等、吸着材のコート条件の最適化が今後の課題である。

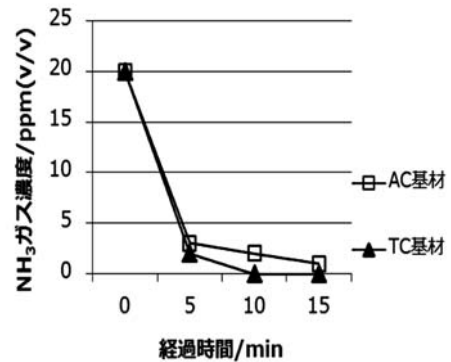


図6 吸着材コート基材のNH₃ガス吸着特性

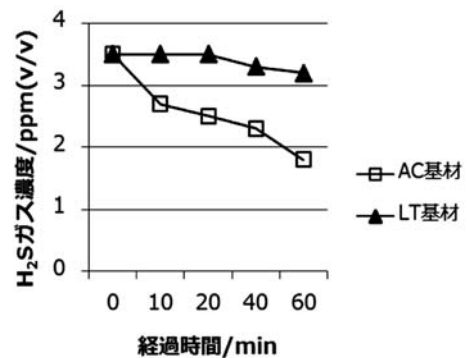


図7 吸着材コート基材のH₂Sガス吸着特性

3.3 新規光触媒材料の臭気ガス分解特性

図8に粗面化処理した棒状ガラス基材とそのガラス基材にTiO₂をコートした基材の微細構造を示す。

1.5時間の化学エッチング処理で、光触媒活性に有効なガラス基材の粗面化が可能であり、基材表面にTiO₂がほぼ均一にコートされていることがわかる。

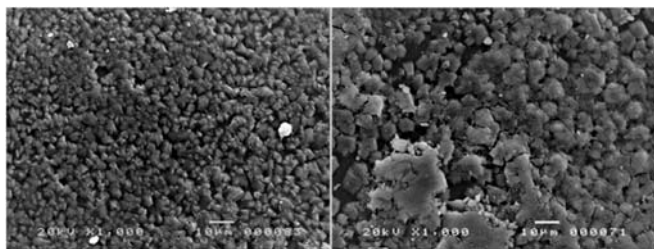


図8 棒状ガラス基材表面の微細構造
(左：粗面化処理，右：TiO₂コート)

図9に棒状TiO₂/ガラス触媒のPAガス分解反応特性を示す。紫外線強度4.8mW/cm²では長さ80mmの棒状TiO₂/ガラス触媒はPAガスを100分で初期濃度の約80%を分解した。PAガス分解速度は長さ80mmで1.5×10⁻⁷mol/min，長さ40mmでは0.9×10⁻⁷mol/minと約1/2となり，触媒の長さで分解速度は相関があり，紫外線強度2.7mW/cm²では長さ80mmで0.7×10⁻⁷mol/min，長さ40mmでは0.4×10⁻⁷mol/minとなり，紫外線強度と分解速度も相関があることから，光触媒反応は触媒表面全体で進行していると考えられる。TiO₂/HAp/ガラス触媒のPAガス分解速度(紫外線強度4.8mW/cm²)は2.4×10⁻⁷mol/minであり，TiO₂/ガラス触媒と比較して，約1.6倍に向上した。有機物の吸着に有効なHApによるPAガスの濃縮とTiO₂粒子による効率的な分解による階層的複合効果で，光触媒活性が向上したと考えられる。

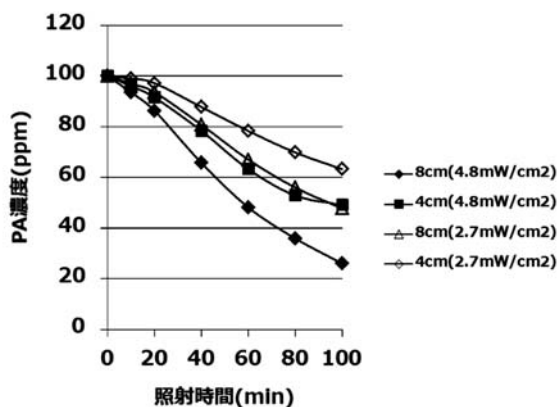


図9 棒状TiO₂/ガラス触媒のPAガス分解反応特性

4 まとめ

1. 各種吸着材の臭気ガス吸着試験から，NH₃とH₂Sに有効な吸着材として，それぞれ，トドマツ炭化物と褐鉄鉱を選定した。
2. トドマツ炭化物及び褐鉄鉱コート基材を作製し，小型脱臭装置で吸着性能を評価した結果，トドマツ炭化物は活性炭と同等以上のNH₃吸着性能を有するが，褐鉄鉱のH₂S吸着性能は活性炭の1/5であった。

3. 棒状ガラス基材表面を粗面化処理し，その表面にTiO₂をコートすることで小型臭気ガス分解処理装置に装填可能な新規光触媒材料を作製した。
4. 新規光触媒材料のPA分解試験では，ガス分解速度は棒状TiO₂/ガラス触媒の長さで紫外線強度に相関関係があることから，光触媒反応はTiO₂/ガラス触媒の全ての表面で進行していることが示唆された。
5. TiO₂/HAp/ガラス触媒のPA分解速度はTiO₂/ガラス触媒の約1.6倍に増加し，HApの複合効果による光触媒活性の向上が示唆された。

道産資源を活用した臭気ガス吸着フィルタ及び小型臭気ガス分解処理装置に装填する新規光触媒材料の作製と評価を行い，NH₃やH₂S等に有効な臭気吸着分解処理技術を開発した。本技術の応用により，病室のベッドサイド等の臭気低減に有効な小型臭気ガス吸着分解処理装置の開発が可能であり，吸着技術と分解処理技術の組み合わせで多様なガスに対応可能なことから，青果物の鮮度保持技術としてエチレン吸着分解や調理臭等の吸着分解等での農業，食品分野への応用が期待される。

謝辞

本研究を進めるに際し，一般財団法人 北海道環境科学技術センターの鈴木誠氏並びに元北見工業大学の伊藤英信氏には，多大な御助言と御協力を頂きました。記して深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 板倉朋世・光田 恵・稲垣卓造：病院内における看護職員の意識に関するアンケート調査，においかおり環境学会誌，Vol.37, No.6, pp.437-447, (2006)
- 2) 野村隆文・赤澤敏之・稲野浩行・吉田憲司・斎藤隆之・勝世敬一：吸着機能性材料の開発と応用，北海道立工業試験場報告，No.303, (2004)
- 3) 平成24～26年度戦略的基盤技術高度化支援事業「環境汚染ガスを無害化するための，先進的な光触媒分解処理システムの開発」研究成果等報告書，pp.33-41, (2015)
- 4) 本間千晶・佐野弥栄子・窪田 実・梅原勝雄・駒澤克己：窒素及び空気雰囲気下で製造したトドマツ炭化物の化学構造とアンモニア吸着能，木材学会誌，Vol.46, No.4, pp.348-354, (2000)
- 5) 野呂田晋・遠藤祐司・八幡正弘：硫黄鉱床周辺の熱水変質岩における有害物質溶出特性－西南北海道七飯地域，旧精進川鉱山における例－，北海道立地質研究所報告，第76号，pp.55-61, (2005)

- 6) 田中利直・古賀智子・筑紫寛明・大平慎一・長谷川麻子・戸田 敬：‘シンク効率’を指標とした固相吸着剤の硫化水素吸着特性に関する動的評価ーリモナイトなどの脱硫特性を例にー 分析化学, Vol. 60. No.8, pp.641-646, (2011)
- 7) R.Walker, A.D.Steele, D.T.B.Morgan, Ind.Eng.Chem.Res., No.36, pp3662, (1997)

放電プラズマ焼結法による透光性材料の作製

中嶋 快雄, 高橋 英徳, 宮腰 康樹, 板橋 孝至, 本間 稔規, 赤澤 敏之

Manufacture of Translucent Material by Spark Plasma Sintering Method

Yoshio NAKAJIMA, Hidenori TAKAHASHI, Yasuki MIYAKOSHI,
Koji ITABASHI, Toshinori HONMA, Toshiyuki AKAZAWA

抄 録

腐食合成法により作製したスピネル型酸化物 ($MgAl_2O_4$) の粉末を原料として、放電プラズマ焼結法 (SPS法) により焼結し、透光性の評価を行った。この結果、厚さ 3 mm の焼結体において、波長 550 nm に対し 9.7% の透過率を得ることができた。このことにより、腐食合成法と SPS 法とから成るプロセスが透光性材料を作製するのに有用であることがわかった。

キーワード：透光性, スピネル, 放電プラズマ焼結法, 腐食合成法

1. はじめに

セラミックスは一般に不透明であるが、1961年に酸化アルミニウムによる透光性が報告されて以来、研究開発が進められている^{1), 2)}。焼結法を利用して粉末から透光性セラミックスを合成する場合に最も重要なことは、光の散乱源となる残留気孔を極限まで低減させることである。そのためには微細粉末によるバルクの高緻密化が必要であり粒成長を抑制する焼結法が有望となる。

腐食合成法^{3)~5)}は、金属複酸化物の粉末を低コストで作製できる方法の1つであり、得られる粒子径はおおよそ100 nm以下である⁶⁾。しかし、腐食合成法で得られた粉末から焼結体を作製し、その特性を評価した例は報告されていない。

一方、放電プラズマ焼結法(以下、「SPS法」と略称する)は、粉末焼結の方法の1つであり、粉末を加熱する原理に特長がある。原料粉末を充填した型に加圧・通電することにより発生するジュール熱を利用して加熱・焼結するため、昇温速度が速く(100°C/min程度)、結晶粒の粗大化を抑制した微細組織構造の焼結体を得ることが可能である。この特長を利用して、超硬合金やセラミックスの作製が行われており、近年、ナノ材料、傾斜機能材料、複合材料、硬質材料、電子材料、熱電変換材料など、様々な分野でSPS法の有効性が実証されている^{7), 8)}。

SPS法によるセラミックスの作製については、近年、透光

性を有する酸化アルミニウム (Al_2O_3) やスピネル型酸化物(例えば $MgAl_2O_4$) の作製例が報告されている²⁾。しかしながら、これらの報告は研究用に特別に作製された粉末(粒径360 nm)を用いた例であり、透光性に及ぼす原料粉末の影響が十分に明らかになっていない。

本研究では、光学的特性の優れた焼結体を得ることが可能な新しいプロセスとして、腐食合成法とSPS法とから成る方法の可能性について検討した。透光性セラミックスは、結晶粒径が波長より小さいとその波長の光を通しやすいことが知られており¹⁾、本プロセスは100 nm程度の粉末を粒成長を抑制しながら焼結するものであるため、可視光(380 nm~780 nm)の透光性を有する材料の作製が期待できる。今回は、この新しいプロセスを検証するために、 $MgAl_2O_4$ (スピネル型酸化物)の焼結体を作製し、得られた焼結体を評価した。

2. 実験方法

2.1 粉末の作製

図1に、腐食合成法によりスピネルの粉末を作製した工程を示す。試薬は、マグネシウム(Mg, 純度98.0 wt%)粉末、無水塩化アルミニウム($AlCl_3$, 純度98.0 wt%)粉末、エタノール(C_2H_5OH , 純度99.5 vol%)である。まずMg 1.0 g及び $AlCl_3$ 11.0 gを C_2H_5OH 100 mlに溶解し、1時間加熱・攪拌した。その後、純水100 mlを加えて加水分解し、さらにアンモニア水(NH_3 , 28% (mol/mol)) 75 mlを加えて攪拌後、純水500 mlを加えて減圧ろ過を行った。得られた白色のゲル状物質を150°C、12時間乾燥した後、大気雰囲気中で1200°Cで、

事業名：経常研究

課題名：放電プラズマ焼結法による透光性材料の作製に関する研究

2時間焼成を行った。得られた粉末は、電界放型走査型電子顕微鏡(以下「FE-SEM」、日本電子製、JSM-7001F型)による形状観察とX線回折装置(以下「XRD」、リガク製、ULTIMA IV)による分析を行った。

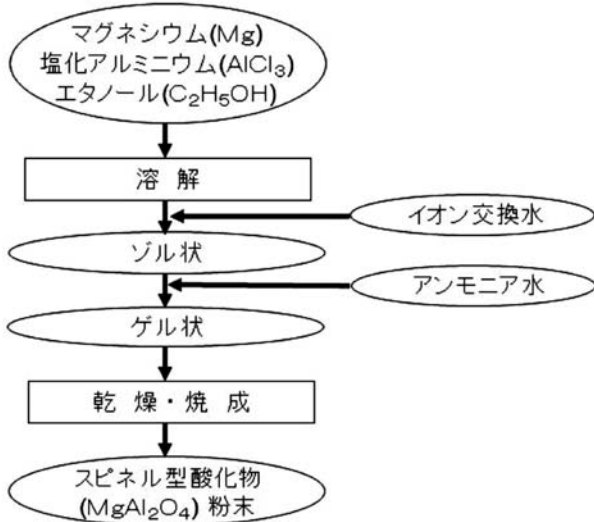


図1 MgAl₂O₄スピネルの作製方法

2.2 粉末の焼結

図2に、粉末を充てんした型を示す。SPS法により直径24.5mm、厚さ3mmの円板状の焼結体を作製した。焼結装置は、住友石炭鉱業製(SPS-1050型)を用いた。

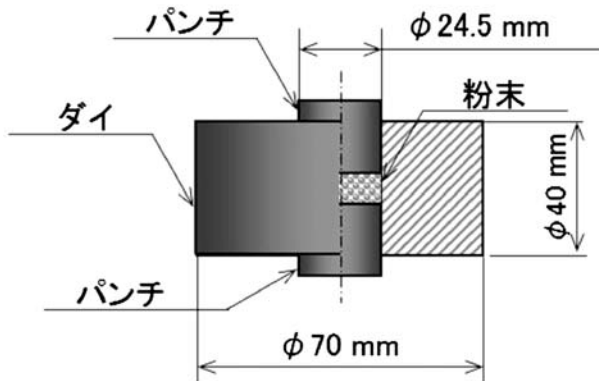


図2 焼結用ダイ・パンチ

図3に、焼結工程を示す。焼結条件は、パンチ径24.5mm、ダイ外径70mmの黒鉛型に粉末を充てん後、一軸圧力 $P_{SPS} = 80\text{MPa}$ の一定条件下で加圧した。温度は電流を制御することにより、昇温速度は5、50及び100°C/minとし、焼結温度(ダイ表面温度と同義。以下同じ。) T_{SPS} を1150°Cから1350°Cまでとし、焼結時間5min間保持後、加熱を終了し炉冷した。

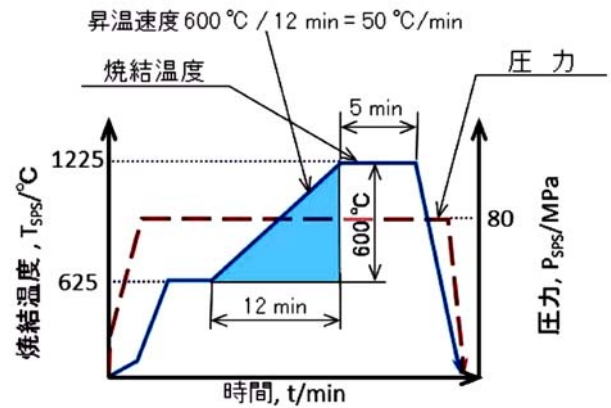


図3 焼結工程の一例

得られた円板状焼結体の両平面を、3 μm までのバフ研磨仕上げを行い、密度測定及び透過率測定に供した。

2.3 焼結体の評価

2.3.1 かさ密度の測定

脱気した純水を用いてアルキメデス法によりかさ密度を測定した。(なお、純水は温度により密度が変化するため、測定前の補正を行った。)

2.3.2 断面組織観察

2.2節で得た焼結体を、FE-SEMにより観察しやすい大きさにするため、ダイヤモンド含有砥石を付けた高速切断機(平和テクニカ製)を用いて長さ5mm×幅3mm×高さ4mmに切断した。2.2節と同様、3 μm までのバフ研磨仕上げを観察面に施した後、サーマル・エッチング(加熱炉内で1200°Cまで昇温し、30min保持後炉冷)を実施した。

得られた試料をFE-SEMを用いて観察した。

2.3.3 透光性評価

得られた焼結体について可視光の透過率測定を行うため、分光光度計(島津製作所製、UV-3100C、光源:50Wハロゲンランプ)を用い光の波長380nm~780nmの範囲で測定した。ここで、図4のように、焼結体の前に空間フィルター(スリット)を置き、焼結体の中心付近8mm×15mmの範囲を、空気をリファレンスとして測定した。

透光性の評価は、透過率1%以上のものを透光性を発現したものとした。

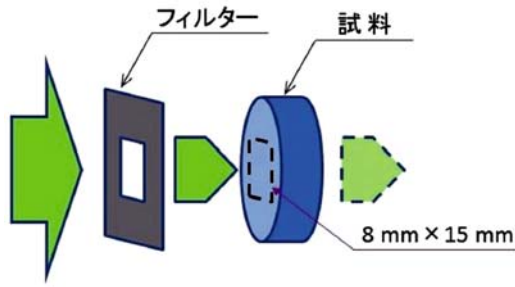


図4 透過率の測定

3 実験結果及び考察

3.1 作製した粉末

図5に、腐食合成法により作製した粉末のSEM観察結果を示す。100nm程度の微細な粉末を1次粒子として、200nm~300nmの凝集体(2次粒子)となっている。

図6に、作製した粉末のXRD分析結果を示す。検出したピークのほとんどは $MgAl_2O_4$ であるが、一部 MgO も存在している。

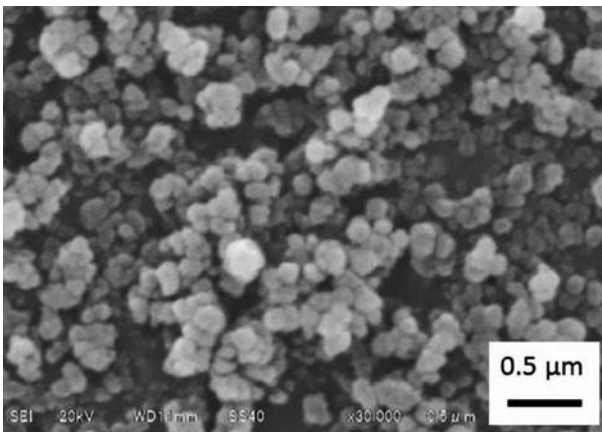


図5 腐食合成法により作製した粉末のSEM像

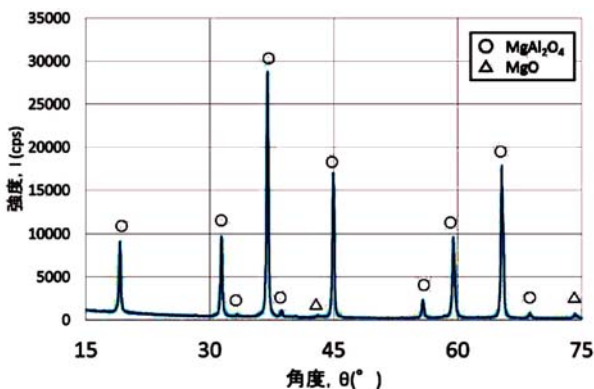


図6 作製した粉末のXRD分析結果

3.2 焼結条件と透光性

図7に、焼結条件と透過率の関係を示す。点の1つは1つの試料についての結果である。ほとんどの試料は透過率1%未満で、目視でも不透明といえるものであった。しかし焼結条件が昇温速度50°C/min、焼結温度1225°Cのものだけは、試料ごとのばらつきはあるものの、1%以上の透過率を示した。これらは目視でも、うっすらと焼結体を通して向こう側にあるものを認識できるものであり、他の不透明なものとは異なる外観であったため、以降は1%以上の透過率のものを、透光性を発現した焼結体と呼ぶことにする。

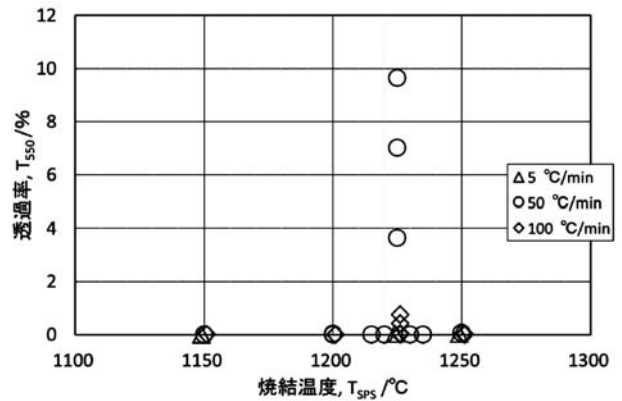


図7 焼結温度と透過率の関係

3.3 焼結体の密度・断面組織

図8に、焼結温度とかさ密度(以下「密度」)との関係を示す。この焼結体は、3.1節で得た粉末から得たものである。昇温速度に関係なく、焼結温度1200°C以上で、密度3.57g/cm³以上の緻密な焼結体を得られた。このことから、緻密な焼結体を得る必要条件是焼結温度1200°C以上であることがわかった。

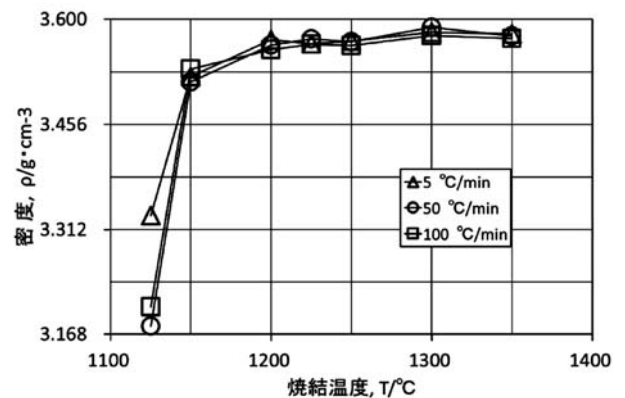


図8 焼結温度と密度の関係

図9に、焼結体(焼結条件：昇温速度50°C/min, 焼結温度1225°C)の断面をFE-SEMで観察した結果を示す。緻密な100nm程度の結晶粒を観察することができるSPS法は粒成長を抑制しながら焼結できるという特長があるが、これにより、その優位性が透光性セラミックスの作製に有用であることが示された。

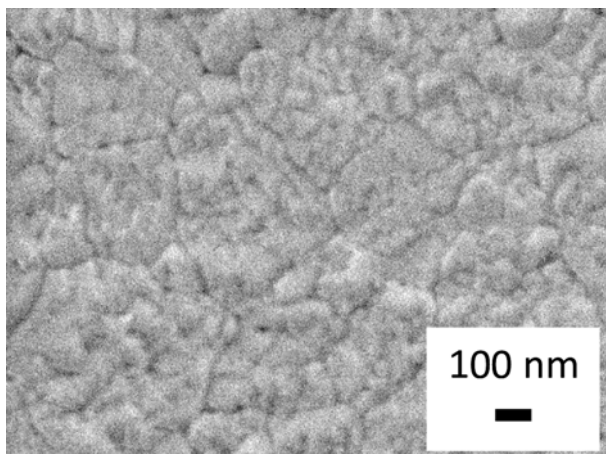


図9 SEMによる組織観察結果
(パンチ径：φ24.5 mm, 圧力80MPa,
昇温速度50°C/min, 焼結温度1225°C, 保持時間5 min)

図10に、透光性を発現した焼結体(焼結条件：昇温速度50°C/min, 焼結温度1225°C)のXRD分析結果を示す。検出しピークのほとんどはMgAl₂O₄であるが、一部MgOも存在している。

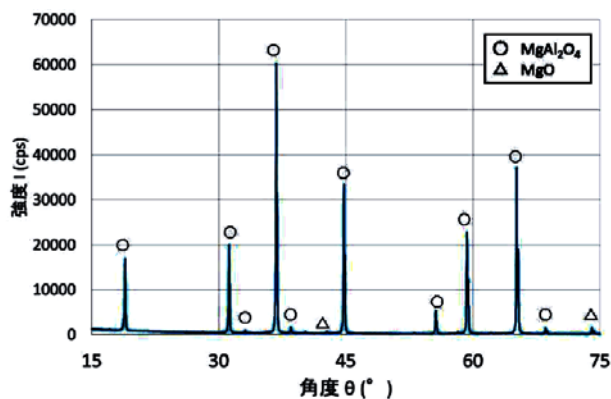


図10 透光性を発現した焼結体のXRD分析結果

表1に、粉末及び焼結体(焼結条件：昇温速度50°C/min, 焼結温度1225°C)の代表的な結晶子サイズを示す。結晶子は、単結晶とみなせるような微結晶で、結晶粒を構成するものである⁹⁾。結晶子サイズは、XRDで検出された各ピークから、Scherrer法により算定した。

表1 結晶子サイズ

試料	角度 θ (°)	結晶子サイズ (nm)
粉末	31.3	42
	36.8	43
	65.2	45
焼結体	31.3	111
	36.8	108
	65.2	111

これによると、合成した粉末は結晶子サイズが43nmであるのに対し、焼結体の結晶子サイズは110nmと大きくなっている。焼結の前で結晶子サイズは変化しているものの、100nm程度となっており、可視光の透光性が期待できる大きさであることがわかる。

3.4 焼結体の透光性

図11に、透光性を発現した焼結体(焼結条件：昇温速度50°C/min, 焼結温度1225°C)の可視光領域の波長と透過率の関係を示す。得られた焼結体(厚さ3mm)について可視光(波長380nm~780nm)の透過率測定を行った結果、昇温速度50°C/min, 焼結温度1225°Cの条件のものが透光性を発現し、代表的な値として波長550nmにおける透過率が9.7%であった。

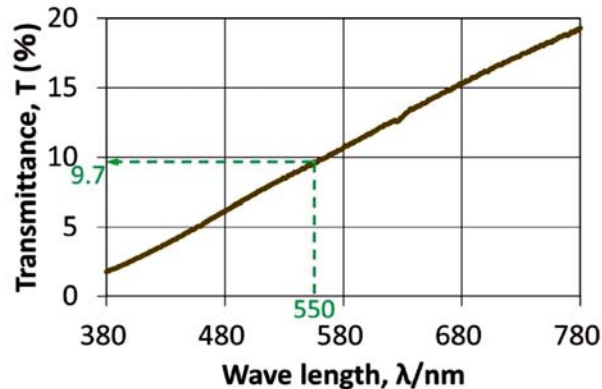


図11 波長と透過率の関係
(パンチ径：φ24.5mm, 圧力80MPa,
昇温速度50°C/min, 焼結温度1225°C, 保持時間5 min)

光学部品として利用する場合、透過率は90%以上を要求されるが、今回の検討では約10%程度となった。透過率を低下させる要因としては、粉末への不純物混入(MgO)、未焼結部分の混在または焼結型からのコンタミネーションが考えられる。

4. まとめ

本研究では、腐食合成法により作製した $MgAl_2O_4$ の粉末をSPS法により焼結した。その結果、パンチ径24.5mm、ダイ外径70mmの黒鉛型、圧力80MPaの一定条件下では、昇温速度50°C/min、焼結温度1300°Cの場合、相対密度99%以上、ビッカース硬さ2200 HV 0.5 程度の焼結体を得ることができた。また波長550nmの透過率が9.7%の値が得られた。

以上の結果から、 $MgAl_2O_4$ 透光性セラミックス焼結体を作製する上で腐食合成法とSPS法とを組合せた新しいプロセスの可能性を見出した。今後、透過率を向上させ、従来法による透光性セラミックスと同等以上の性能を有するものの作製を検討して行く。

謝辞

室蘭工業大学 世利修美教授及び佐々木大地助教には腐食合成法による粉末の合成において、また(株)エヌジェーエス 安藤秀夫氏、相澤春美氏及び田口章弘氏には粉末焼結において、多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 池末明生：光学材料として見たセラミックス，レーザー研究，No. 30，pp.290-296，(2002)
- 2) 森田孝治：放電プラズマ焼結(SPS)装置を用いた透光性セラミックスの創製，まてりあ，Vol.53 No.1，pp.3-10，(2014)
- 3) 佐々木大地・世利修美：エタノール中の腐食反応を用いた $MgAl_2O_4$ スピネルの作製，粉体および粉末冶金，Vol.59 No.1，pp.29-33，(2012)
- 4) 世利修美・葦島 創：カルシウムの腐食反応を活用した $CaTiO_3$ の合成，粉体および粉末冶金，Vol.59 No.3，pp.126-130，(2012)
- 5) 世利修美・矢崎風太郎・長船康裕：エタノール中のマグネシウムの腐食反応を用いた $MgFe_2O_4$ の作製，粉体および粉末冶金，Vol.58 No.9，pp.524-528，(2011)
- 6) 世利修美・西田拓也・和田佳之・長船康裕：腐食合成法を用いたムライト粉末の作製，粉体および粉末冶金，Vol.59 No.7，pp.391-394，(2012)
- 7) 鶴田正雄：放電プラズマ焼結(SPS)法によるセラミックス焼結の現状と将来性，Ceramics，No. 49 pp.91-96，(2014)
- 8) 鴨田秀一・中嶋快雄・宮腰康樹・高橋英徳・嶋村健二・佐藤健一：組成傾斜超硬合金(FGM)を貼り付けた長寿

命スクリーンの開発，金属，Vol.81 No.1，pp.43-49，(2011)

- 9) 早稲田嘉夫：X線回折の限界，まてりあ，Vol.35 No.11，pp.1226-1229，(1996)

アルミニウムの溶湯鍛造に関する研究

板橋 孝至, 高橋 英徳, 宮腰 康樹, 田中 大之

Study on Molten Metal Forging of Aluminum

Koji ITABASHI, Hidenori TAKAHASHI,
Yasuki MIYAKOSHI, Hiroyuki TANAKA

抄 録

複雑形状で、肉厚が薄く、内部欠陥が少ない高品質なアルミニウム部品製造への要望が増えていることから、溶湯流動長の短縮と、ガス巻き込みのない層流充填が可能である溶湯鍛造に関する基礎的検討を行った。伝熱解析シミュレーション、流動特性評価試験、圧力条件及び型材の検討によって適切な条件を選定した結果、従来法では困難であった汎用ダイカスト合金(ADC12)による1.2mm厚さの薄肉の溶湯鍛造に関する要素技術を確立した。

キーワード：アルミニウム, 溶湯鍛造, ADC12

1. はじめに

自動車関連産業は裾野が広い産業であり地域経済への波及効果は大きい。しかし、自動車産業を支える鋳造・プレス・表面処理等のものづくり基盤産業において、北海道における各種部品の地場調達率は18.3%¹⁾と低く、地場企業の参入が進んでいないのが現状である。これは、道内企業の経済・技術両面の競争力不足が主な要因である。特に、自動車部品製造に多用されるアルミニウムダイカストに関しては、金型の狭い隙間(キャピティ)に短時間でアルミニウム溶湯を注入する高速射出装置、及びその注入圧力で金型が開かないよう型締めする高圧装置が一体化したダイカストマシンの導入が必要である。さらに金型などの部品を含む周辺設備も必要となることから新規参入が進んでいない。

一方、自動車の軽量化に拍車がかかっており、従来の鉄鋼材料製部品からアルミニウム製部品への置換がこれまで以上に進むことは明白であることから、複雑形状で、肉厚が薄く、油圧や水圧漏れがない高品質なアルミニウム部品製造への要望が増えている。しかし、道内アルミニウム鋳造の主流であるダイカストは、熔融金属を、狭く凹凸が多い金型内に高圧で押し込む製法であるため、ガス巻き込みや引け巣、湯廻り不良などによる鋳造欠陥の発生が問題となっており、道内企業から、鋳造欠陥を低減する技術が求められている。

ここで、以上の課題を踏まえて、金型内にアルミニウム溶

湯を入れ、プレスによって溶湯に機械的な高圧力を加えながら凝固・成型させる溶湯鍛造に注目した。ダイカストのような高い生産性は得られないものの①溶湯流動長を短縮でき、②ガス巻き込みのない層流充填が可能であることから、高い内部品質を実現できる鋳造方法の一つであるが、適用事例は一部にとどまっている²⁾。本研究では、溶湯鍛造における溶湯温度、圧力等の成型条件が鋳造品質に及ぼす影響など基礎的検討を行うこととした。

2. 実験方法

2.1 溶湯鍛造条件

2.1.1 鋳造品の形状

試作鋳造品の形状は、開口部の外形寸法を横120mm×縦35mm、高さ外寸32mmの箱形とし、壁面の厚さは、1.2mm、底部の厚さは2.0mmとした。図1に外形寸法を示す。なお、型離れしやすさ(離型性)を考慮して、長辺側の壁面の抜け勾配が10°になるように底部側の外形寸法を横120mm×縦23.72mmとした。このような形状を鋳造する場合、通常は製品押しピンをつけた外型と上型の2ピース構造とするが、試作品の取り出し機構を簡略化するために、外型を底板と枠型に分割した3ピース構造とし、鋳造品を底部から押し出すことができるようにした。

事業名：経常研究

課題名：アルミニウムの精密鋳造技術に関する研究（平成26～28年度）

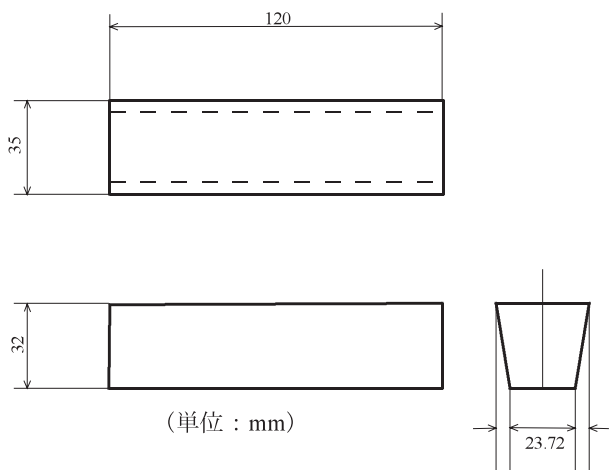


図1 試作鋳造品の外形寸法図

2.1.2 伝熱解析シミュレーション

溶湯鍛造では、注湯後、凝固するまでに加圧を完了するため、型内に入れた溶湯が凝固するまでの時間を把握する必要があります。そこで、溶湯鍛造可能な溶湯温度及び型温度を非定常熱解析が可能な伝熱解析シミュレーション ADINA (ADINA社製)を用いて解析した。

モデルの長手方向の対称性を利用し、鋳造品の長手方向の中央を横断する断面について2次元モデルを作成した。

2.1.3 型材の検討

型材には軟鋼(SS400)を使用した。金型は、金属面を露出させるとアルミニウム合金を鋳造する際に固着が発生するため、表面に離型剤を塗布して鋳造した。しかし、鋳造を繰り返すと離型剤が剥離する上に、離型剤を再塗布するためには150℃まで型を冷却する必要があり、連続鋳造が困難である。そこで、離型剤の一部の製品にカーボンが利用されていることに着想を得て、上型にネジ止めたSS400製の中子をカーボンブロック切削品に変更し、成形性・離型性・内部品質を評価し、適用可能性を検証した。

2.1.4 鋳造材

鋳造材としては、砂型鋳造に用いられる AC7A 及び汎用ダイカスト合金である ADC12 を用いることとした。表1に両合金の組成を、また表2に両合金の固液共存領域の温度範囲を示す。

表2から AC7A は固液共存領域が広い、すなわち半凝固状態を長く保つことが可能であり、加工時間が長い溶湯鍛造に適していると考えられる。一方、本研究で検討している薄肉の溶湯鍛造では、狭隙部に溶湯を短時間で充填するため流動性が重要となる。そこで AC7A と比較して流動性に優れている ADC12 の適用可能性を調査するために金型温度を50～250℃に変化させたスパイラルフロー金型試験を行い、流動特性を評価した。

表1 AC7A及びADC12の組成表³⁾(%)

合金元素	合金番号	
	AC7A	ADC12
Si	0.20 以下	9.6 から 12.0
Fe	0.30 以下	1.3 以下
Cu	0.10 以下	1.5 から 3.5
Mn	0.6 以下	0.5 以下
Mg	3.5 ～ 5.5	0.3 以下
Zn	0.15 以下	1.0 以下
Ni	0.05 以下	0.5 以下
Ti	0.20 以下	—
Pb	0.05 以下	—
Sn	0.05 以下	0.2 以下
Cr	0.15 以下	—
Al	残 部	残 部

表2 AC7A, ADC12の液相線温度及び固相線温度³⁾

合金番号	液相線温度(℃)	固相線温度(℃)
AC7A	635	570
ADC12	580	515

2.1.5 実験装置

図2に実験に用いた溶湯鍛造装置の概略を示す。加圧装置の破損を防ぐため、金型の加熱は加圧装置から少し離れた場所で行い、所定の温度に達してからレールを用いて素早く加圧装置内に移動し、注湯・溶湯鍛造できるようにした。なお、溶湯鍛造に必要な圧力は、50～120MPaと報告されている³⁾。一方、今回試作で用いた装置の加圧上限は60MPaであることから、本研究では60MPa以下の圧力での成型可能性を検証することとした。成型体に作用する面圧力は、プランジャー面積と成型体面積の比から、装置の表示圧力の13.3%と計算された。

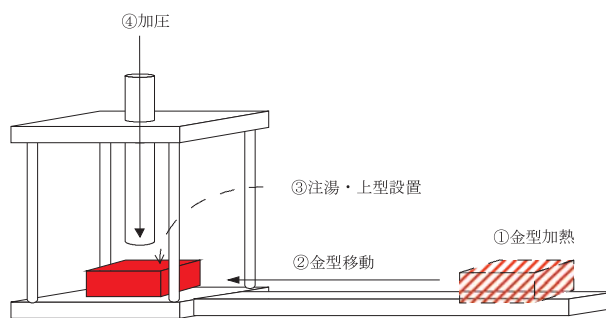


図2 溶湯鍛造装置概略図

2.2 試作鋳造品の寸法精度及び内部品質評価

シミュレーション解析結果と温度測定結果を基にして溶湯温度や型温度を選定し、実際に AC7A 及び ADC12 を用いて鋳造品の試作を行い、湯回りの良否、外形寸法測定、X線CTによる内部品質評価を行った。

3. 結果と考察

3.1 伝熱解析シミュレーションによる検討

図3に、型温度500℃、鋳造材AC7A、溶湯温度800℃、上型を設置した1秒後における伝熱解析シミュレーション結果の一例を示す。図中のアルミニウム溶湯の両肩部が、枠型と中子の隙間に入る前に凝固開始する温度に低下することから、本条件においては溶湯注入後1秒以内に上型を設置し、加圧を開始する必要があることが確認された。実作業において注湯・上型設置・加圧開始までに約3～5秒を要することからAC7Aを鋳造材として用いる場合は、型温度を600℃、溶湯温度を800℃と設定した。同様に、ADC12を用いた場合における適切な型温度と溶湯温度は、シミュレーション結果よりそれぞれ630℃と800℃に設定した。

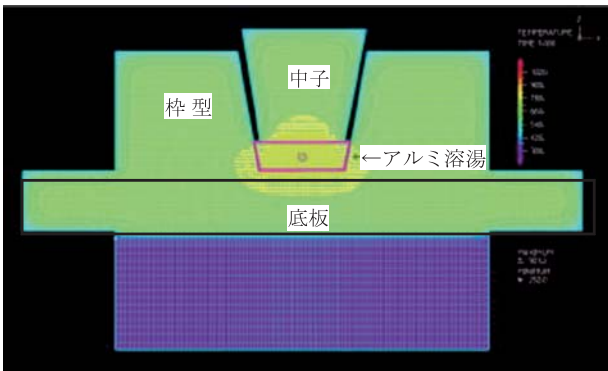


図3 1秒後の等温線図

3.2 鋳造材の検討

図4に、溶湯温度800℃におけるAC7A及びADC12のスパイラルフロー金型試験の型温度の影響を示す。測定した50～250℃の温度域において、ADC12は、AC7Aと比較して流動長が約400mm長くなることを確認した。溶湯温度を750℃、700℃と低下させた場合も同様の傾向が確認された。

なお、150℃以上の温度域で流動長がほぼ一定になったのは、塗布した離型剤の特性によるものと考えられる。

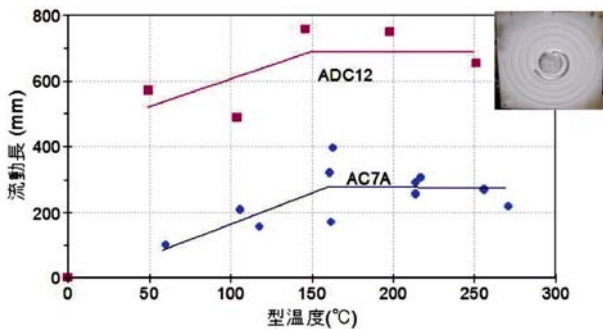


図4 湯温800℃におけるスパイラルフロー金型試験

3.3 カーボン型の適用性検討

図5に中子をカーボン材に変更して溶湯鍛造した試作品の

外観写真を示す。離型剤を使用しなくても固着を防ぐことが可能であり、試作品内面の鋳肌は非常に良好であった。また、SS400製の型のみを使用した場合と異なり、短辺側の側壁に溶湯が十分に供給され設計どおりの成型が可能となった。短辺側の側壁にも溶湯が十分に供給されたことは、枠型がSS400、中子がカーボンという組み合わせであるということに起因すると考えられる。すなわち、鋳造前の加熱により枠型が膨張したのに対し、中子はカーボン製で金属と比較して膨張係数が半分以下と小さいため加熱による膨張がほとんどなく、キャビティがわずかに広がり湯回りが向上したものと考えられる。

試作品を取り出す工程に要する時間を、カーボン型鋳造とSS400型鋳造で比較したところ、カーボン型鋳造では溶湯凝固の際に収縮した枠型及びアルミニウム合金が収縮しない中子を締め付けたため脱型に時間を要し、大きな変化はなかった。



図5 カーボン型成型品の外観写真

3.4 寸法精度及び内部品質評価

3.4.1 AC7Aでの溶湯鍛造

図6にAC7Aを用いて試作した薄肉鋳造品の外観写真を、図7にそのX線CT透過画像を示す。金型を60MPaで加圧することにより、当初目標である壁面の肉厚1.2mmを達成したが、鋳肌が荒れているだけでなく、X線CTによる内部撮影の結果、0.59vol%の内部欠陥が含まれていることが確認された。これは、AC7Aの凝固収縮率が約1.2%であることから、60MPaの加圧では不足であったためと推測される。



図6 AC7A試作鋳造品の外観写真

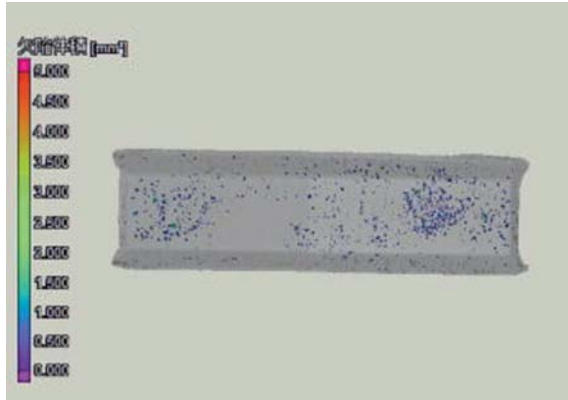


図7 AC7A試作鋳造品の内部欠陥透過画像

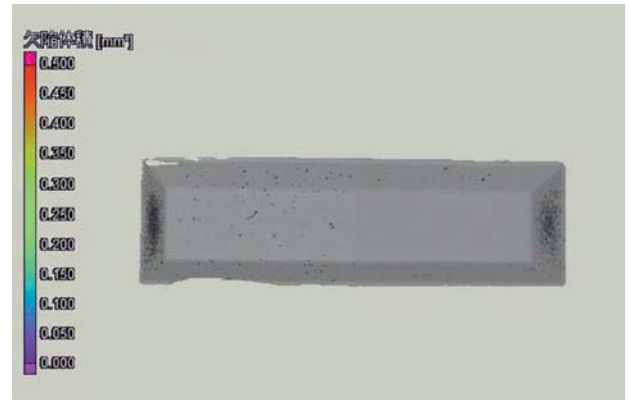


図9 カーボン製中子を用いた場合の内部欠陥透過画像

3.4.2 ADC12での溶湯鍛造

図8に、圧力条件を変えた場合のADC12溶湯鍛造品のX線CTによる内部品質比較を示す。表面形状、寸法、及び内部欠陥の増減に与える圧力の影響を検討したところ、加圧を40MPaまでに抑えた場合は、溶湯が型全体に充填されず寸法どおりの成形ができなかった。また、初期加圧を60MPaに設定し、凝固完了時間までに再加圧して圧力を維持しなかった場合は、溶湯は型全体に充填されたが、成形品の表面に0.1~0.3mmの微小気泡が残り、40MPaで加圧した場合と同様の気泡による内部欠陥が確認された。凝固完了まで60MPaで加圧することにより、壁厚1.2mmの薄肉成型を実現できたが、短辺側の側壁の一部に溶湯が十分に充填されない課題が残った。

図9に中子をカーボン材に変更して溶湯鍛造した試作品のX線CT透過画像を示す。前述したとおり、短辺側の側壁にも十分に溶湯が供給され設計どおりの成型が可能であっただけでなく、内部欠陥を約0.01vol%まで低減することができ、良好な内部品質を有する試作品を鋳造できた。

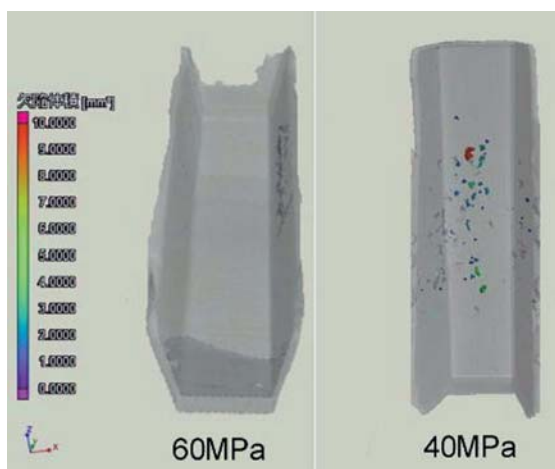


図8 ADC12試作鋳造品の内部欠陥透過画像

4. まとめ

プレス機械を有する道内企業が参入できるように、小型でシンプルな溶湯鍛造システムの構築に必要な基礎的検討を行い、次の結論が得られた。

- (1) AC7Aを用いて湯温及び鋳造圧力の条件を検討し、湯温800℃、型温600℃、圧力60MPaにおいて、1.2mmの薄肉鋳造を試作できた。一方、試作品の表面状態や内部品質では課題が残った。
- (2) ADC12の利用可能性について検討した結果、湯温800℃、型温630℃、圧力60MPaにおいて、1.2mmの薄肉鋳造を試作できた。
- (3) ADC12の溶湯鍛造の際に、金型の一部をカーボンに変更することにより、良好な鋳肌と高い湯回り性が得られることが見出された。また、内部品質の点においても良好な結果が得られた。

引用文献

- 1) 北海道自動車産業集積促進協議会，平成28年度事業報告，(2017)
- 2) 平成21年度 戦略的基盤技術高度化支援事業「革新的・環境配慮型アルミニウム新鋳造システムの開発」研究開発成果等報告書，広島県西部工業技術センター，(2009)
- 3) ㈱日本アルミニウム協会，アルミニウムハンドブック (第6版)，(2001)

失敗事例から商品開発プロセスを学べるツールの開発

印南 小冬, 日高 青志, 万城目 聡

Development of Tools for Learning Product Development Process from Failure Case Studies

Kofuyu INNAMI, Seiji HIDAKA, Akira MANJOME

キーワード：商品開発, 失敗事例, 学習ツール

1. はじめに

自社に企画開発部門を持たない受注依存型の中小製造業などが新たに自社商品の開発を始める利点として、自社商品は他社に依存せずに販売計画を立てやすく、安定した収益源の確保を図れるという点がある。また、商品自体が自社技術のPRになることで顧客の認知度が高まり、受注の拡大も期待できるという点がある。

しかし、商品開発経験が乏しい中小企業においては、商品開発が途中で頓挫する、あるいは発売はしたものの期待した程売れないといった状況に陥ることも多い。これは商品開発の担当者が開発の各場面において、状況判断や方針の選択などを求められた際に何らかのミスを起こし、さらにそのミスに気づかないまま開発を進めてしまうことが原因と考えられる。

このような状況を未然に防ぐには、商品開発の初心者が起こしがちなミスに関する知識を担当者が事前に習得し、その上で商品開発に取り組むことが重要である。しかし、これまでの失敗事例に関する研究は大企業の技術開発や設計における失敗事例を対象としたものが中心であり¹⁾、商品開発経験が乏しい中小企業での失敗事例に関する研究や、失敗事例の知識活用に関する取り組みは殆ど見られない。

そこで本研究では、商品開発初心者が開発中に起こしやすいミスに関する知識を収集・整理し、そうしたミスが商品開発の最終的な失敗につながる経緯について事前に学習できるツールを開発した。なお本研究では、畑村洋太郎氏が提唱する「失敗学」²⁾における失敗の定義を参考に、「開発を行った結果、期待した目的を果たせなかった」ケースを失敗事例として扱う。

2. 失敗事例の収集及び失敗原因の抽出

まず、商品開発の現場でどのような失敗が起きているのかを把握するために、中小企業支援機関の職員やプロダクトデザイナーを対象としてヒアリング調査を行った。ヒアリングでは、調査対象者が経験した商品開発の失敗事例と、その経緯や思い当たる原因などについての情報を収集し、その中から失敗原因と考えられる具体的なミスの抽出作業を行った(図1)。

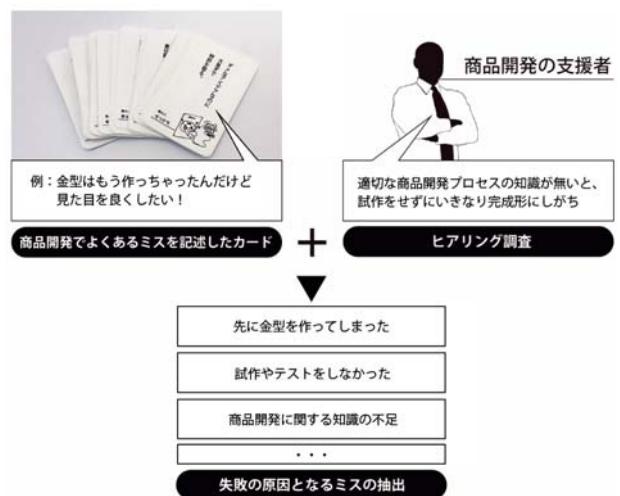


図1 失敗の原因となるミスの抽出

調査に際しては、ヒアリングを効果的に行うために、これまでに現場が関わった商品開発支援事例などから、商品開発で起こしやすい典型的なミスの事例50件を事前に抽出し、それらを記述したカードを準備した。このカードを活用してヒアリングを行うことで、今回対象としている失敗事例のイメージを調査対象者が把握しやすくなり、その対象者が経験した失敗事例に関して、短時間で豊富な情報を引き出すことができた。

事業名：職員研究奨励事業

課題名：失敗事例から商品開発プロセスを学べるツールの開発

以上の調査により、最終的に、失敗の原因となる63種類のミス抽出した。抽出したミスは、「周りの意見を聞かなかった」、「アイデアの評価をしなかった」、「コンセプトが曖昧なまま進めた」などである。

また、今回の調査を通じて、失敗の原因となるのはミスだけではなく、ミスによって商品開発が良くない状態に陥っているにも関わらず、それに気づかないでいることも失敗の原因となることがわかった。そこで、ミスによって発生したこのような状態を『プロセス不良』として位置づけ、ミスとは別に23種類のプロセス不良を抽出した。抽出したプロセス不良は、「顧客の心に響いていない」、「誰もやりたくない企画」、「競合商品との差別化が弱い」などである。

3. 失敗ストーリーの構造化

3.1 失敗の因果関係

ミスとプロセス不良の抽出により、商品開発の初心者が陥りやすい失敗を避けるためには「何をしてはいけないか」、「何が欠けているか」、「どういう考え方が良くないか」などの知識が整理された。本研究ではさらに、商品開発初心者がこれらの知識を効果的に身につけるためには、単に個々の失敗原因を断片的に学ぶだけでなく、「何故そうしてはいけないか」ということがわかるストーリーを伴った方法で学べるようにすることが重要と考えた。

そこでまず、第2章で抽出した63種類のミスと23種類のプロセス不良を合わせた合計86種類の失敗原因を因果関係に沿って並べて整理し、66種類の『失敗ストーリー』として構造化する作業を行った。失敗ストーリーの一例を図2に示す。

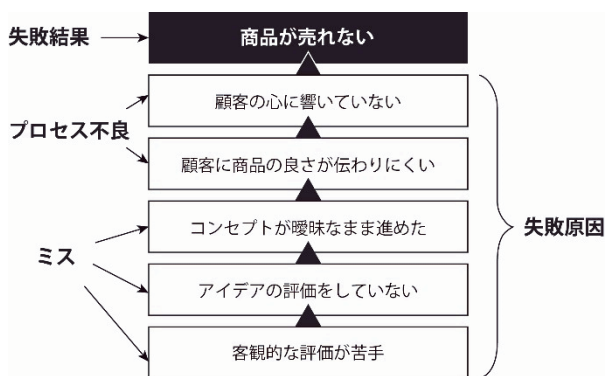


図2 失敗原因の因果関係を示す失敗ストーリー構造

3.2 失敗原因ダイアグラムの作成

構造化された66種類の失敗ストーリーを比較検討した結果、各失敗ストーリーは、失敗結果からの分岐構造として、さらに整理できる見通しを得た。また、各失敗ストーリーにおける失敗結果は、「商品が売れない」、「トラブルによる販売中止」、「開発を途中で断念」の3つに集約できると判断した。

そこで、これら3つの失敗結果を起点として66種の失敗ストーリーを分岐構造の形に整理することで、商品開発時に起こしたミスが失敗結果に繋がっていく過程を体系的にまとめた『失敗原因ダイアグラム』を作成した。前記3つの失敗結果を起点とする失敗原因ダイアグラムの一部を図3～5に示す。

なお、図中では省略しているが、ダイアグラム中のa～eはそれぞれ同一の失敗原因構造が出現する部分をクラスターとしてまとめたものである。一例として、クラスターd「アイデア評価ができていなかった」の失敗原因構造と、クラスターdが繋がる4つの失敗原因を図6に示す。

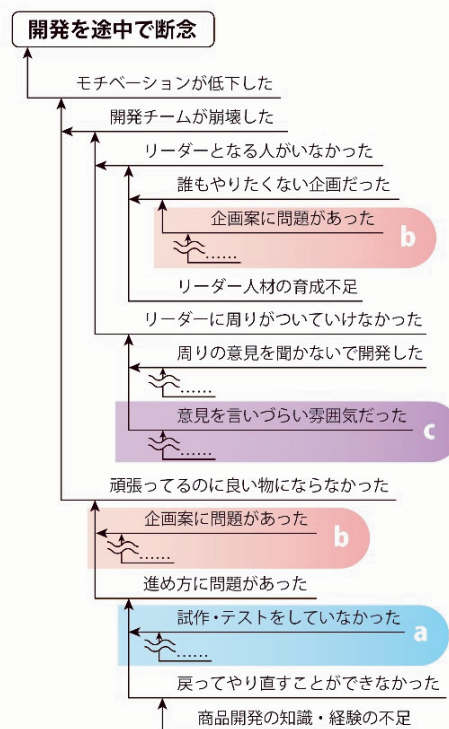


図3 失敗原因ダイアグラム：開発を途中で断念（一部）

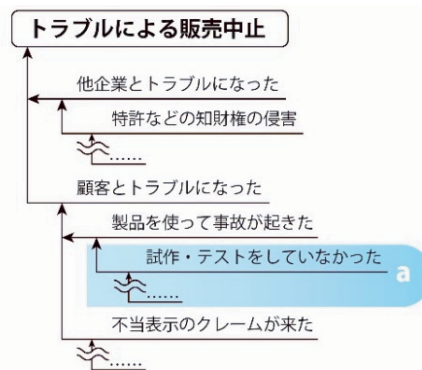


図4 失敗原因ダイアグラム：トラブルによる販売中止（一部）

4. 失敗原因学習ツールの開発

4.1 開発コンセプトの整理

第3章で作成した失敗原因ダイアグラムをもとに、商品開発で起こしやすいミスと、そこから発生するプロセス不良がどのように失敗結果と結びつくのかを、ストーリーを伴った形で学習できるようにするためのツールを検討した。コンセプトの検討結果を以下に記す。

【ツールのコンセプト】

① ツールの形態

商品開発の失敗結果から、失敗原因を因果関係に沿って繋げて失敗ストーリーを作成し、失敗原因ダイアグラムを完成させることで、商品開発が失敗に陥る経緯を学ぶことができるパズル型のツール。パズル型にすることで、予備知識がなくてもダイアグラムを作成できるようにし、失敗原因の因果関係を推測できなくても、パズルのピース形状がヒントになるようにする。

② 誰がいつ使うか

初めて商品開発を行う、または商品開発経験が少ないプロジェクトチームが、開発プロジェクトのキックオフミーティングなどで使用することを想定する。

③ ツール活用によるメリット

開発初心者でも楽しみながら商品開発の失敗原因を学ぶことができ、実際の商品開発での失敗を回避するための知識が身につく。また、チーム内の商品開発に対する認識を共有させることで、チームワークの向上が図られる。

4.2 失敗原因学習ツール

前述のコンセプトに基づいて、図7に示すパズル型の学習ツールを開発した。

本ツールは3種類の失敗結果ピースと、86種類の原因ピースから構成されている。各失敗結果ピースに関する原因ピースの数は、失敗結果「トラブルによる販売中止」を構成する原因ピースが22個、「開発を断念」を構成する原因ピースが41個、「商品が売れない」を構成する原因ピースが64個となっている。当然のことながら、構成する原因ピース数が多い程、パズルの難易度は高くなる。また、ピースの色は、各ピースが納まるべき大体の位置が把握できるように、失敗結果から根本的な失敗原因に向かってグラデーションを施してあり、初心者でもパズルを組み立てやすくなっている。

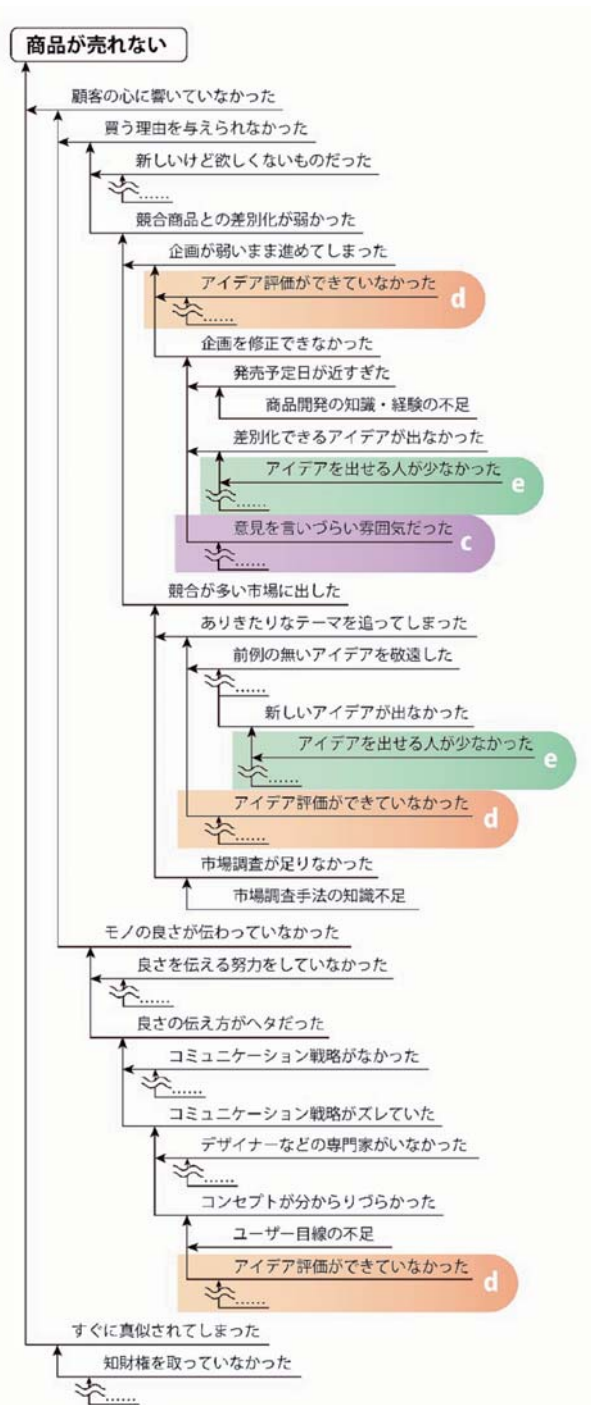


図5 失敗原因ダイアグラム：商品が売れない（一部）

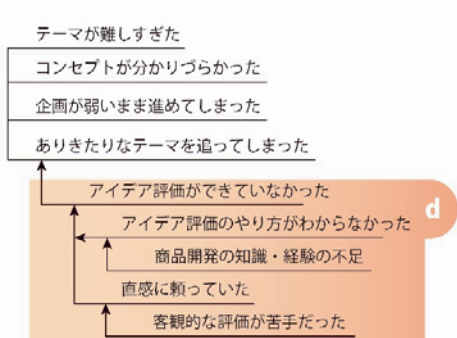


図6 クラスタ-dの失敗原因構造とdが繋がる失敗原因



図7 開発した失敗原因学習ツール

4.3 ツールを使用したワークショップの概要

本ツールを使用したワークショップの進行方法を以下に記す。

- 1) 2～6名のグループで一つのテーブルを囲む。グループが複数になる場合は、ワークショップの進行役を一名おく。
- 2) 「トラブルによる販売中止」「開発を断念」「商品が売れない」の3種類の「失敗結果ピース」の中から一つを選ぶ(図8)。選択するピースによってパズルの難易度が変わるので、学習段階や学習時間を考慮して選択すると良い。
- 3) 選んだ失敗結果ピースに関係すると考えられるミスやプロセス不良が書かれたピースを、原因ピースの中から選び出して失敗結果ピースに繋げる(図9)。このとき、正解のピースでなければ形状が合わないため繋がらない。
- 4) 失敗結果ピースに結合する原因ピースを選択できたら、続いて、結合済みの原因ピースに関係すると思われるミスやプロセス不良が書かれた別の原因ピースを探し、結合済みの原因ピースに繋げる。このようにして原因ピースを次々に繋げていくと、最終的に次に繋がるピースがない原因ピースに行き着く。そこがその失敗ストーリーの根本的な原因であり、一つの失敗ストーリーが完成することになる(図10)。まだ原因ピースが残っている場合には、残りのピースも同様に繋げ、同じ失敗結果に繋がる別の失敗ストーリーを完成させる。
- 5) 全ての原因ピースを繋ぎ終わると、最初に選択した失敗結果における失敗原因ダイアグラムが完成する。その後、グループでディスカッションしながら他に考えられるミスや自身の経験上起きた具体的な出来事などを付箋に書き出し、ダイアグラムに追加する原因追記ワークを行う(図11)。複数グループでワークショップを行っている場合は、追記を行ったダイアグラムについて各グループで発表を行い、学習成果を共有する。



図8 3種の失敗結果ピース

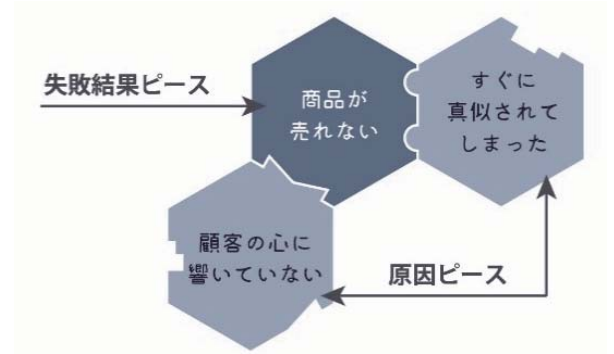


図9 原因ピースの結合(初期段階)

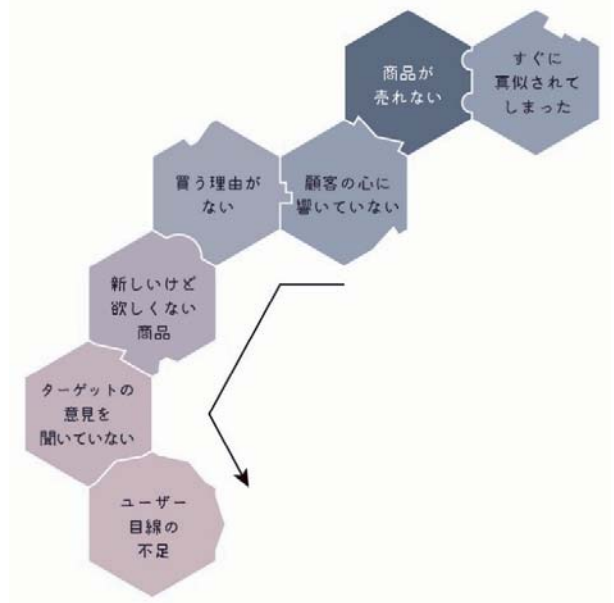


図10 原因ピースの結合(1ストーリーの完成)



図11 原因追記ワーク

4.3 ツール活用の効果

本ツールを用いたワークを、商品開発の経験者に対して試行した結果、本ツールが呈示する失敗ストーリーに多くの共感反応が得られた。また、失敗ストーリーに対して「こういったミスも考えられないか」などのディスカッションも自然に誘発された。これらの結果から、本ツールは、実際の商品開発現場で起こり得る典型的な失敗ストーリーを表現できており、プロジェクトチームなどでの商品開発に対する認識共有を促進する効果も十分期待できることを確認した。

さらに、上記の試行の際には、本ツールの活用方法について、「商品開発プロジェクトのキックオフだけでなく、新入社員教育や起業家支援にも活用できるのでは（企業支援機関職員）」「大学の授業において、学生が商品開発を学ぶためのツールとしても役立ちそう（大学教員）」「企業目線を意識して研究計画を立案する際に有効かもしれない（研究者）」などの意見も得た。これらのことから、本ツールには、さらに幅広い活用の可能性があることがわかった。

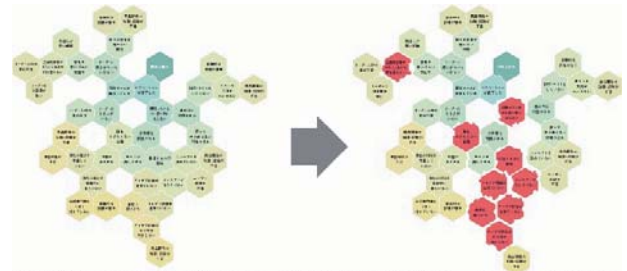
4.4 ツールの応用

本ツールは、商品開発現場での使用を想定して開発されたものであるが、当初のコンセプトとは異なる場面においても効果的な利用が期待できると考えている。ここでは、その一つとして、中小企業支援機関の職員などが、商品開発に悩みを抱えている企業の相談を受ける際に、相談企業の現状分析を行うツールとして使用する応用例を紹介する。

具体的な使用方法を以下に記す。なお、この応用の際には、ピースの裏面が、赤色などの単一色で彩色されているものとする。

- 1) 支援担当者は失敗原因ダイアグラムが完成した状態のパズルを用意する。
- 2) 相談者が自社の現状として思い当たる原因ピースを裏返す。
- 3) 支援担当者がダイアグラムを元にヒアリングを行い、相談者にさらに当てはまる原因ピースがあれば加えて裏返す。
- 4) 作業を終えると、図12に示すように、失敗原因ダイアグラムに対応したパズル上に、相談企業が抱える課題が浮かび上がる。
- 5) 色が変わったピースの位置や領域を参照しながら失敗ストーリーを整理することで、現在の開発プロセスのどこに弱みがあるかを把握でき、さらに、ピースの繋がりを辿ることで、根本的な原因の推測も可能になる。

このように、企業の現状分析に本ツールを活用することにより、相談企業が抱える課題の把握や、効果的な支援方法の立案が可能になる。



思い当たる部分を裏返して、問題がどこに集中しているかを探る

図12 現状分析への応用

5. おわりに

これから商品開発に臨む開発担当者や起業家などが、商品開発初心者が起こしやすいミスに関する知識を事前に学ぶことで、実際の開発において失敗の回避を図れるようにするための学習ツールを試作した。今後は失敗原因ダイアグラムの更新を行いながら、より幅広い失敗事例をカバーできるようにツールの改良を継続的に行っていく予定である。

また、失敗事例のみを学ぶだけでは商品開発へのモチベーションが低下してしまう懸念があるため、失敗の克服方法を学ぶワークを加えるなど、学習プログラムの改良も同時に進める。ツールの展開においては、本ツールを用いたワークショップの開催や、中小企業支援機関などへの配布、さらに、ツールのアプリ化なども検討していく予定である。

引用文献

- 1) 畑村創造工学研究所：失敗知識データベース
<http://www.sozogaku.com/fkd/index.html>
- 2) 畑村洋太郎：失敗学のすすめ，講談社文庫，pp.25-26，(2005)

独立成分分析の魚類寄生虫検出への応用

橋場 参生, 本間 稔規, 飯島 俊匡

Application of Independent Component Analysis for Detection of Parasites in Fish

Mitsuo HASHIBA, Toshinori HONMA, Toshimasa IJIMA

キーワード：独立成分分析, 画像処理, 異物検出, 水産物, 寄生虫

1. はじめに

未知の信号が複数混合した計測信号の中から、元の信号を分離・抽出する能力を備えた信号処理手法のひとつに「独立成分分析」がある。本研究では、食品に混入した異物の検出、具体的には、魚類に寄生するアニサキス幼虫¹⁾の検出に関して、画像を対象とした独立成分分析の有効性を調べる実験を行った。

以下、本報では、独立成分分析の概要について述べた後、アニサキス幼虫が付着した魚(ホッケ)の切り身を撮影した画像を対象として、独立成分分析による特徴抽出を試みた実験結果について報告する。

2. 独立成分分析

2.1 独立成分分析の概要

独立成分分析 (ICA: Independent Component Analysis) を用いた信号処理手法の概要を図1により説明する。

互いに独立した未知の信号を n 個を含んだ測定対象があり(図1では便宜上 $n=3$ として図示)、その測定対象からセンサ等で計測できるのは、未知の信号が混合した状態の計測信号になるとする。このような状況は、例えば、複数の話者が同時に発声した音声を、マイクロホンで計測するような場合に起こり得る。

独立成分分析は、測定対象から観測可能な信号が、複数の未知信号が混合した計測信号であったとしても、少なくとも n 個の計測信号を測定対象から得ることができれば、これらの計測信号を入力として分析を行うことで、未知の n 個の信号を分離・抽出できるという特長を有する。

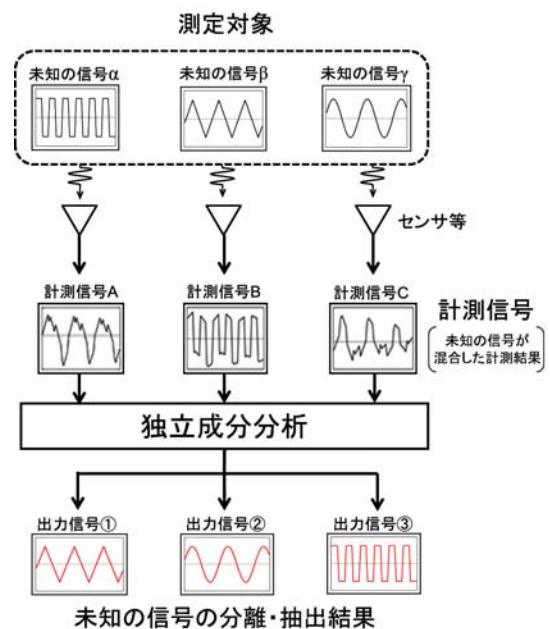


図1 独立成分分析による未知信号の分離・抽出

2.2 独立成分分析の応用事例

独立成分分析は、例としてあげた混合音声の分離のほか、脳波や筋電信号の解析など、おもに、時間-振幅波形を対象とした応用事例が多く報告されている。一方、画像を対象とした分析も可能であることから、顔画像の認識²⁾、肌色ムラの解析³⁾、繊維汚れの鮮明化⁴⁾、掌紋画像の認識⁵⁾などへの応用事例も報告されており、画像からの特徴抽出にも効果が得られることが知られている。

3. 独立成分分析を用いた魚類寄生虫の検出

本研究では、独立成分分析が有する画像からの特徴抽出能力に着目し、魚類に寄生するアニサキス幼虫の検出を目的とした適用実験を行った。

事業名：経常研究
課題名：独立成分分析を用いた計測信号の分離・抽出処理に関する研究

3.1 アニサキス幼虫

アニサキス幼虫は魚類に寄生する線虫で、長さが2～3 cm程度、色は半透明白色である。このアニサキス幼虫が寄生している生鮮魚類を摂取すると、アニサキス幼虫が胃壁に刺入して食中毒（アニサキス症）を引き起こす場合がある。このため、食品加工場などでは、現状、目視と手作業によってアニサキス幼虫の除去が行われており、効率化や自動化が望まれる課題のひとつになっている。

図2にアニサキス幼虫が付着したホッケの切り身(フィレ)を撮影した画像を示す。画像中央部の円環状の物体がアニサキス幼虫である。

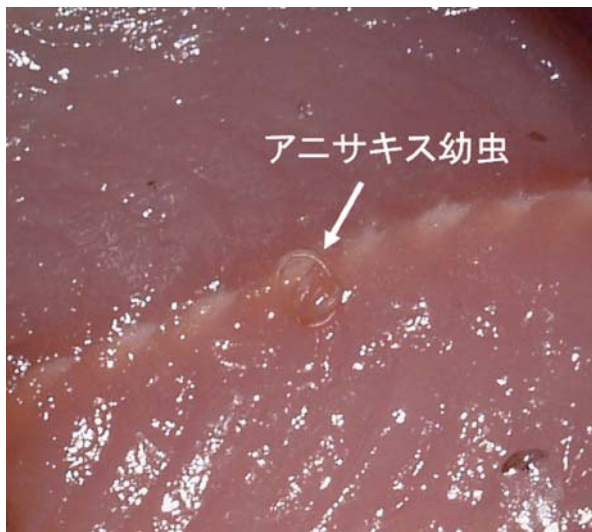


図2 アニサキス幼虫が付着した切り身の画像

3.2 独立成分分析の適用実験

図2の画像に独立成分分析を適用することにより、切り身に付着したアニサキス幼虫の特徴抽出が可能であるかを調べた。2.1節で述べたように、独立成分分析を行うためには、複数の入力画像(計測信号)が必要となることから、本研究ではまず、図2の画像(カラー)をRGB各成分に分割することで3枚の画像を作成し、これらを入力として独立成分分析の適用実験を行った。また、独立成分分析によって得られる出力画像の枚数は、入力画像の枚数と同数になることから、図2の画像をCMYK各成分に分割した場合についても実験を行い、入力画像を4枚(CMYK各成分)に増やすことによって、3枚(RGB各成分)の場合とは異なる特徴抽出結果が得られるかどうかについても調べた。なお、今回の実験は、MATLAB用のツールボックスとして公開されているICALAB[®]を用いて行った。

以下、RGB分割画像を入力とした実験については第4章で、CMYK分割画像を入力とした実験については第5章で報告する。

4. 実験1：RGB分割画像を用いた独立成分分析

4.1 実験方法

実験手順を図3に示す。図2のカラー画像をR・G・Bの3つの色成分に分割することにより、図4に示す3枚の画像を作成した。続いて、これら3枚の画像を入力画像として独立成分分析を行った。入力画像が3枚であることから、独立成分分析によって得られる出力画像も3枚になる。

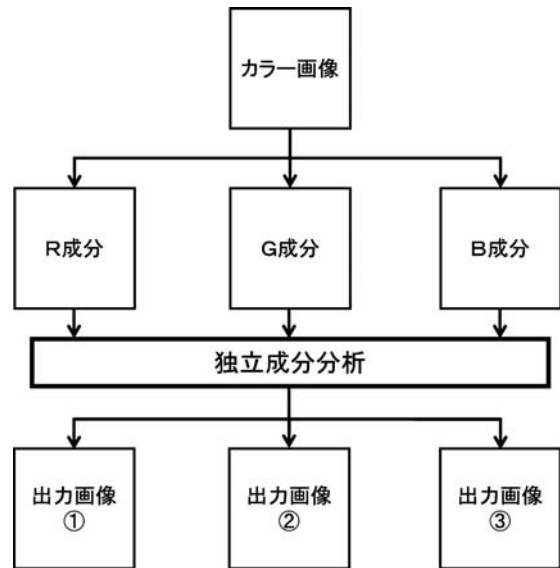


図3 RGB各成分を入力とする独立成分分析

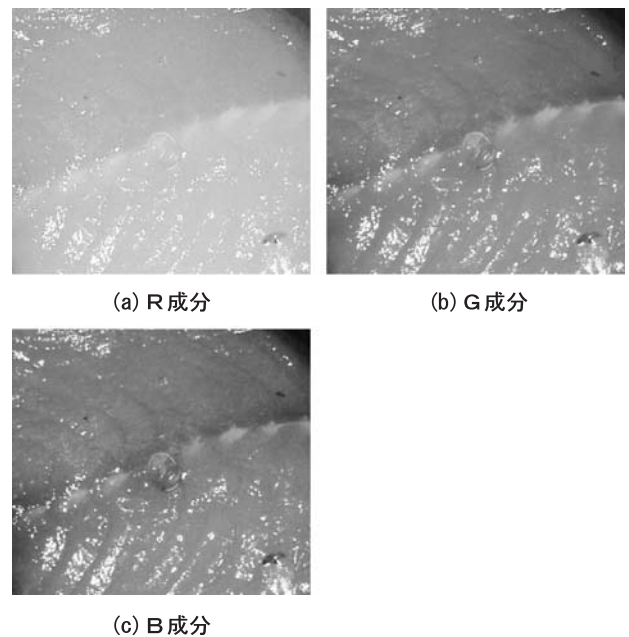


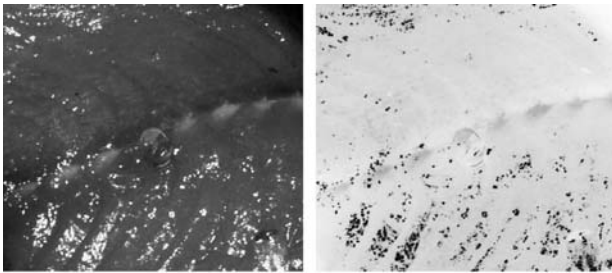
図4 切り身の画像(図2)のRGB各成分

4.2 実験結果

独立成分分析によって得られた3枚の出力画像①～③を図

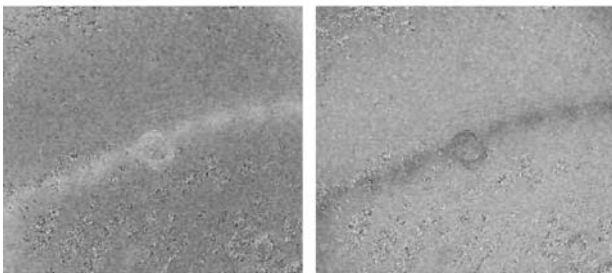
5 (a)~(c)に、各画像の濃淡が反転した画像を図5 (a')~(c')に示す。

実験の結果、独立成分分析によって得られた3枚の出力画像のうち、図5 (b)に示した出力画像②に、アニサキス幼虫の形状が強調された画像が得られた(画像中央部の円環状の部分がアニサキス幼虫)。この結果より、独立成分分析は、画像からのアニサキス幼虫の特徴抽出に活用できる可能性があることがわかった。



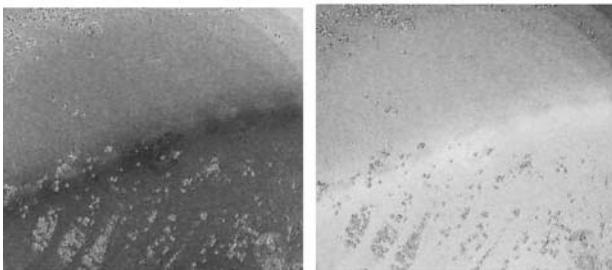
(a) 出力画像①

(a') 出力画像①(濃淡反転)



(b) 出力画像②

(b') 出力画像②(濃淡反転)



(c) 出力画像③

(c') 出力画像③(濃淡反転)

図5 RGB各成分から独立成分分析によって得られた画像

5. 実験2：CMYK分割画像を用いた独立成分分析

5.1 実験方法

実験手順を図6に示す。本実験では、図2のカラー画像をC・M・Y・Kの4つの色成分に分割することにより、図7に示す4枚の画像を作成した。続いて、これら4枚の画像を入力画像として独立成分分析を行った。入力画像が4枚であることから、本実験で得られる出力画像は4枚になる。

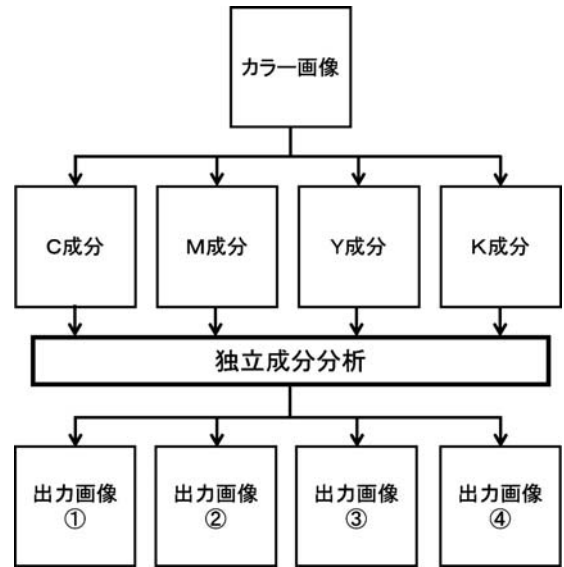
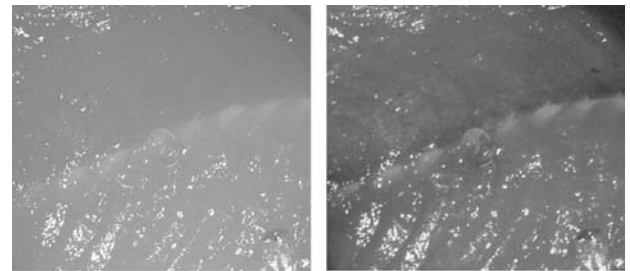
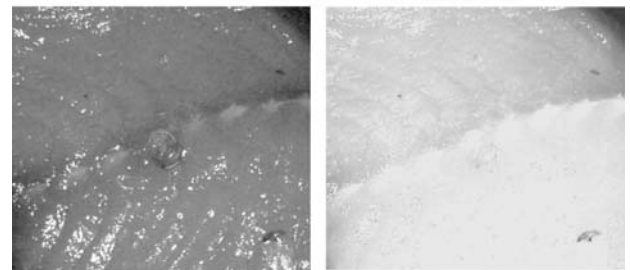


図6 CMYK各成分を入力とする独立成分分析



(a) C成分

(b) M成分



(c) Y成分

(d) K成分

図7 切り身の画像(図2)のCMYK各成分

5.2 実験結果

独立成分分析によって得られた4枚の出力画像①~④を図8 (a)~(d)に、各画像の濃淡が反転した画像を図8 (a')~(d')に示す。

実験の結果、RGB分割画像を入力とした場合と同様に、4枚の出力画像のうち、図8 (b)に示した出力画像②に、アニサキス幼虫の形状が強調された画像が得られた。また、同画像は図5 (b')の画像とほぼ同様の特徴を有する結果となった。この結果より、CMYK分割画像を入力とした本実験においても、アニサキス幼虫を検出するための画像処理に、独立成分分析を活用できる可能性が認められた。

一方、アニサキス幼虫の特徴の有無に関わらずに、RGB分割画像を入力とした場合の実験結果(図5)とCMYK分割画像を入力とした場合の実験結果(図8)を比較すると、図8(a)~(c)の3枚は、図5(a), (b'), (c')とほぼ同様の特徴を示す出力結果であった。また、出力画像④は、入力画像として用いたK成分と比べて、明るさに違いがある程度の変化しか認められなかった。このことから、今回の結果に関しては、3枚のRGB分割画像の利用に比べて、4枚のCMYK分割画像の利用に特段の優位性は認められなかった。

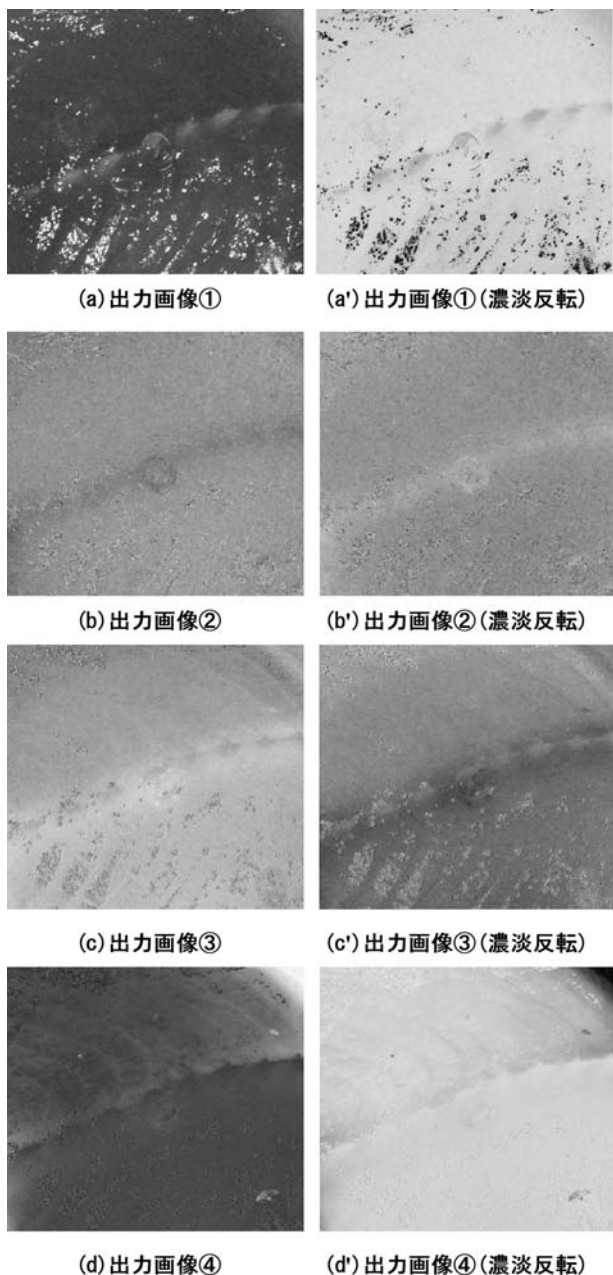


図8 CMYK各成分から独立成分分析によって得られた画像

6. おわりに

独立成分分析が有する画像からの特徴抽出能力に着目し、魚類に寄生するアニサキス幼虫の検出に関して、独立成分分析の有効性を調べる実験を行った。その結果、独立成分分析によって得られた出力画像の中に、アニサキス幼虫の形状が強調された画像を得ることができた。この結果より、独立成分分析は、アニサキス幼虫の自動検出システムなどを構築する際に、画像による特徴抽出処理の一部として活用できる可能性があると考えられる。今後も引き続き、独立成分分析の有効性について検証し、アニサキス幼虫の除去作業の効率化や自動化への活用を目指す。

引用文献

- 1) 大石圭一・平沖道治：アニサキス幼虫とその食品衛生対策，日本水産学会誌，Vol.37，No.10，pp.1020-1030，(1971)
- 2) 二村直広・岡田和典・赤松 茂・森 健策・末永康仁：ICAを用いた顔画像の表現法および顔認識システムへの応用について，信学技報，PRMU99-180，pp.21-28，(1999)
- 3) 井上弥生・西島貴史・小島伸俊・風間治仁・岩田佳代子：独立成分分析法を用いた肌色ムラの実態解析，日本化粧品技術者会誌，Vol.45，No.3，pp.218-224，(2011)
- 4) 桶谷新也・藤田和弘・中森伸行・森本一成：近紫外LED光源を用いた独立成分分析による繊維汚れの画像鮮明化，映像情報メディア学会誌，Vol.64，No.11，pp.1655-1662，(2010)
- 5) 渡辺康寛・平原 誠・永野 俊：独立成分分析を用いた掌紋画像の特徴抽出，信学技報，NC2000-116，pp.101-108，(2001)
- 6) <http://www.bsp.brain.riken.jp/ICALAB/>

北海道立総合研究機構工業試験場報告
No.316 (2017)

発行 平成29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