



道総研

ISSN2189-1230

CODEN HOKSA 9

北海道立総合研究機構 工業試験場報告

Reports
of
Hokkaido Research Organization Industrial Research Institute

(No.319)

2020

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術環境研究本部

工業試験場

北海道立総合研究機構工業試験場報告 (No.319) 2020

目 次

一般論文

- | | |
|---|---|
| 1 レーザセンサを用いた機械学習による障害物検知技術の開発 | 堤 大祐, 三田村智行, 今岡 広一 …………… 1
林 峻輔, 浦池 隆文 |
| 2 水蒸気を用いたセルロースからのヒドロキシメチルフルフラール (HMF) の製造 | 吉田誠一郎, 松嶋景一郎, 上坊寺 亨 …………… 7 |
| 3 海岸流木の燃料化に向けた成分分析及び燃焼試験 | 富樫 憲一, 山越 幸康 …………… 13 |
| 4 蒸気二流体洗浄技術を用いた産業機械部品用洗浄装置の開発 | 坂村 喬史, 米田 鈴枝, 斎藤 隆之, …………… 21
飯野 潔, 中嶋 快雄, 板橋 孝至,
高橋 英徳, 可児 浩, 宮腰 康樹,
渡部 正夫, 砂金 養一 |
| 5 3D積層造形法による金属複合材の製作 | 戸羽 篤也, 鈴木 逸人, 平野 繁樹 …………… 29 |
| 6 新製品開発のための企画づくり支援ツールの開発 | 日高 青志, 印南 小冬, 万城目 聡 …………… 39 |
| 7 心拍変動及び脳波の解析による心的状態推定 | 泉 巖, 前田 大輔, 中島 康博 …………… 55
栗野 晃希, 橋場 参生 |

研究ノート

- | | | |
|---|--------------------------|--|
| 1 | アサリ垂下養殖における軽労力化技術の開発 | 浦池 隆文, 鶴谷 知洋, 伊藤 壮生 …………… 61
今岡 広一, 畑沢 賢一 |
| 2 | 天然物エキスの脱色プロセス設計に向けた基礎検討 | 吉田誠一郎, 松嶋景一郎, 鎌田 樹志 …………… 65 |
| 3 | 木質バイオマスボイラー利用熱源システムの容量設計 | 白土 博康, 藤澤 拓己 …………… 69 |
| 4 | 排湯熱回収のための流下液膜式熱交換器の性能評価 | 藤澤 拓己, 白土 博康 …………… 75 |
| 5 | 鉱山坑廃水中のひ素の化学形態分析 | 富田 恵一, 若杉 郷臣, 明本 靖広 …………… 81
阿賀 裕英 |
| 6 | 札幌軟石を用いたアサリ垂下養殖用基質の開発 | 執行 達弘, 野村 隆文, 金森 誠 …………… 87
井上 智 |

CONTENTS

Regular Paper

- 1 Development of Obstacle Detection Technology by Machine Learning with a Laser Sensor 1
Daisuke TSUTSUMI, Tomoyuki MITAMURA, Koichi IMAOKA,
Shunsuke HAYASHI, Takafumi URAIKE
- 2 Production of Hydroxymethylfurfural(HMF) from Cellulose by Using Steam 7
Seichiro YOSHIDA, Keiichiro MATSUSHIMA, Tohru JOBOJI
- 3 Component Analysis and Combustion Test for Utilization of Driftwoods as Solid Fuel 13
Kenichi TOGASHI, Yukiyasu YAMAKOSHI
- 4 Development of Cleaning Equipment for Industrial Machinery Parts Using Steam Two-fluid
Cleaning Technology 21
Takashi SAKAMURA, Suzue YONEDA, Takayuki SAITO,
Kiyoshi IINO, Yoshio NAKAJIMA, Koji ITABASHI,
Hidenori TAKAHASHI, Hiroshi KANI, Yashuki MIYAKOSHI,
Masao WATANABE, Yoichi ISAGO
- 5 Production of a Metallic Composite Material Used by Additive Manufacturing 29
Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI, Shigeki HIRANO
- 6 Development of Tools for Planning in New Product Development 39
Seiji HIDAKA, Kofuyu INNAMI, Akira MANJOME
- 7 Estimation of Mental State Using Heart Rate Variability and Electroencephalogram Analysis 55
Iwao IZUMI, Daisuke MAEDA, Yasuhiro NAKAJIMA,
Koki KUWANO, Mitsuo HASHIBA

Research Note

1	Development of Labor Saving Technology for the Suspended Culture of Asari Clam	61
	Takafumi URAIKE, Tomohiro TSURUYA, Soki ITO, Koichi IMAOKA, Kenichi HATAZAWA	
2	A Fundamental Study of Decolorization Process for Natural Product Extracts	65
	Seiichiro YOSHIDA, Keiichiro MATSUSHIMA, Tatsuyuki KAMADA,	
3	Capacity Design of Heat Source System Using Woody Biomass Boilers	69
	Hiroyasu SHIRATO, Takumi FUJISAWA	
4	Performance Evaluation Test of Falling-Film Heat Exchanger for Shower Drain Heat Recovery	75
	Takumi FUJISAWA, Hiroyasu SHIRATO	
5	Chemical Form Analysis of Arsenic in Mine Drainage	81
	Keiichi TOMITA, Motoomi WAKASUGI, Yasuhiro AKEMOTO Hirohide AGA	
6	Development of Culture Substrates for the Suspended Culture of Asari Clam	87
	Tatsuhiro SHIGYO, Takafumi NOMURA, Makoto KANAMORI, Satoru INOUE	

一 般 論 文

Regular Paper

レーザーセンサを用いた機械学習による障害物検知技術の開発

堤 大祐, 三田村智行, 今岡 広一, 林 峻輔, 浦池 隆文

Development of Obstacle Detection Technology by Machine Learning with a Laser Sensor

Daisuke TSUTSUMI, Tomoyuki MITAMURA, Koichi IMAOKA,
Shunsuke HAYASHI, Takafumi URAIKE

抄 録

本道の農業生産現場などでは人手不足が深刻化しており、人手作業を代行する除草機械や搬送機器などの作業車両の導入が求められている。一方、作業車両においては、走行時に障害物の有無など周囲の環境を認識する必要がある。本研究ではレーザーセンサを用いて作業車両の走行経路上の障害物(人)の検知を機械学習を利用してリアルタイムで処理した。実際に試験用の作業車両(移動体プラットフォーム)を用いて走行試験を実施し障害物(人)を検知して回避動作をさせることを確認した。また、積雪寒冷地である北海道では降雪の影響を考慮する必要があるため、降雪への対応についても報告する。

キーワード：ロボット, 機械学習, 障害物検知, 降雪

Abstract

The shortage of labors is increasing in agricultural production domain in Hokkaido. Machinery for saving labors such as a weeder or a carrier equipment is required. It is required to recognize the surrounding environment in the operation. In this study, we used a laser sensor to detect obstacles on the operational route of a working vehicle in real time using machine learning. In an actual test, the working vehicle detected an obstacle and performed an avoidance operation. In addition, it is necessary to consider the influence of snow in Hokkaido. We discuss the influence and a method to reduce.

KEY-WORDS : robot, machine learning, object detection, snow

1. はじめに

本道の農業生産現場などでは人手不足が深刻化しており、除草や搬送など人手作業を代行する作業車両(フィールドロボット)の導入が求められている。このようなフィールドロボットの走行には障害物の有無など周囲の環境を認識する必要があり、カメラやレーザーセンサなどを使った環境認識技術の開発が行われている¹⁻³⁾。

フィールドロボットの環境認識に使われているレーザーセンサは、レーザーレンジファインダや測域センサとも呼ばれ、レーザー光を回転させながら走査し、その反射光を受光するまでの時間から距離を求める。これによって、センサ周囲の物体までの距離情報を得ることができる。レーザー光の走査角度は様々

で、180度から360度全周を計測できるモデルもある。さらに、レーザーを上下に走査することで3次元データを得るモデルもある。

レーザーセンサを使ってロボット周囲の障害物を含んだ周囲の地図を作成して経路の生成などを行っている⁴⁾ほか、自動追尾の手段としても活用されている⁵⁾。

本研究では、レーザーセンサを用いて周囲の距離情報を取得し、動きのある障害物(人)の検知技術を開発したので報告する。

また、積雪寒冷地である北海道では、フィールドロボットを屋外で動作させるために降雪の影響を考慮する必要がある。本研究では降雪時において試験を実施し、降雪がセンサのデー

事業名：経常研究

課題名：フィールドロボット走行制御のための環境認識技術の研究

タに与える影響を調べ、解決案を示したのであわせて報告する。

2. 移動体プラットフォームとレーザセンサ

障害物(人)の検知はレーザセンサを用いて周囲の距離情報を取得して行った。レーザセンサは図1に示す移動体プラットフォーム上に設置した。今回、使用したレーザセンサは北陽電機製で図2に示す走査角度270度、距離10mの範囲にある対象物までの距離を測定できる。また、角度の分解能は0.25度で、1回の走査にかかる時間は25msである。レーザセンサの外観を図3に示す。レーザセンサのデータは図4に示す障害物検知ECU (Electronics Control Unit)で処理した。なお、レーザセンサは床面から約70cmの高さに設置した。

移動体プラットフォームは4輪駆動で走行可能な車両で前進及び後進、前輪と後輪を独立に操舵可能な車両である。走行制御はCAN(Controller Area Network)による通信技術を用いて行った。CANは差動電圧方式による2線式のシリアル通信でノイズに強く、車載系によく使われるシリアル通信規格であり、作業ロボットの制御システムやトラクタの自動運転など通信制御システムへの適用がなされている⁶⁻⁸⁾。

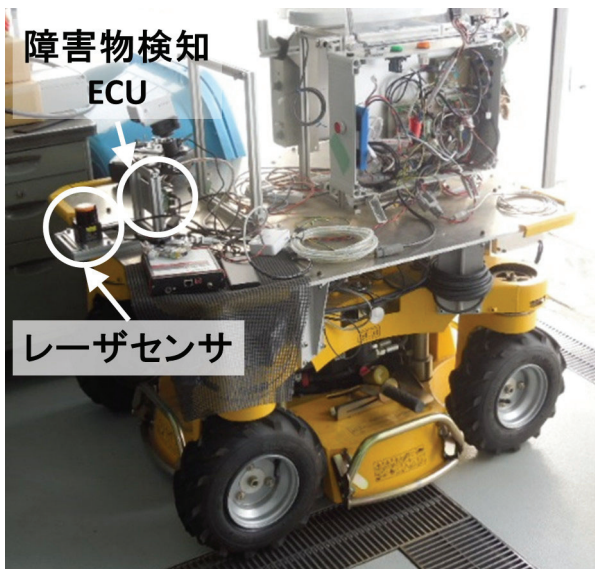


図1 移動体プラットフォーム

図5の試験環境で取得したデータを図6に示す。このレーザセンサは270度の範囲で走査することから、移動体プラットフォームの正面を走査の中心0度として、右側135度、左側に-135度として表示した。図5の正面が角度0度である。また、図6のデータを直交座標系に変換した結果を図7に示す。図7の原点がセンサの位置となる。

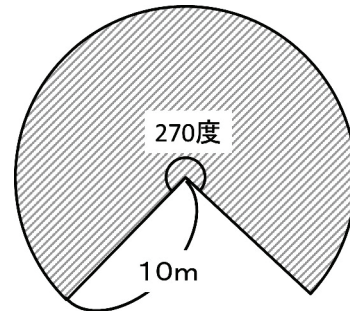


図2 走査範囲



図3 使用したレーザセンサ

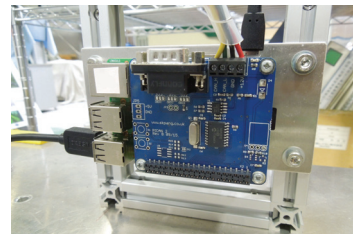


図4 障害物検知 ECU



図5 試験環境

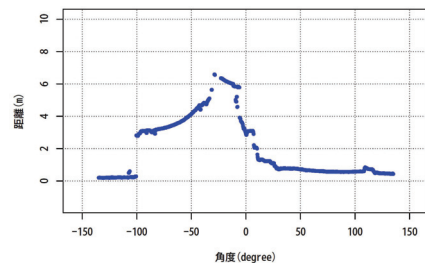


図6 取得したデータの例

図7において、縦軸の6 m付近は図5における奥の扉の反射である。また、図7の横軸の-3 m付近は左側の壁の反射である。このように、レーザセンサは周囲の状況を角度と距離の情報として取得できる。

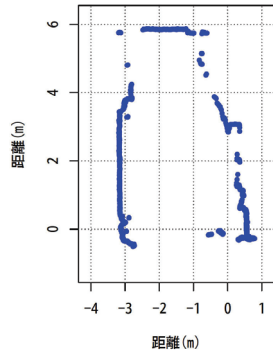


図7 取得したデータの例(直交座標表示)

障害物(人)がある場合におけるセンサ前方の様子を図8に示す。このような場合、図9に示すように角度-10度付近に障害物による反射が生じる。これを直交座標系に変換した図を図10に示す。前方約2mに障害物があることがわかる。移動体プラットフォームにこのレーザセンサを搭載することにより、経路上に現れる障害物を検知できる。

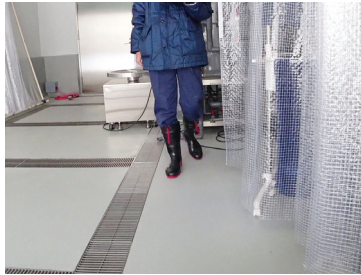


図8 障害物(人)がいる環境の例

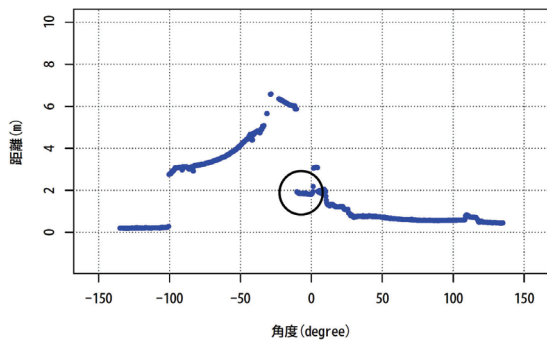


図9 障害物(人)がいる環境での取得データ例
○で囲った部分が障害物

3. ランダムフォレストによる障害物検知

障害物検知処理に機械学習の一手法であるランダムフォレストを用いた。ランダムフォレストは学習データをランダムサンプリングし、多数の決定木を作成し、作成した決定木の結果を統合することで推定結果を出力する。少ない学習データでもよい推定結果を得られる特徴がある。

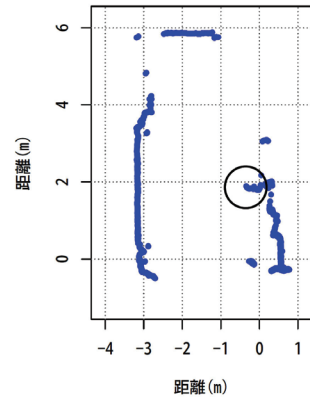


図10 障害物(人)がいる環境での取得データ例
○で囲った部分が障害物

レーザセンサより取得した図6のようなデータにおいて、隣接するデータの差が一定距離以下の場合を同一のクラスタとした。クラスタリングした結果を図11に示す。図11はクラスタごとにマークを変えて表示したものである。このように点を複数の集合として扱い、クラスタの特徴量を計算した。次に、その特徴量から機械学習を用いて障害物であるか否かを判定した。

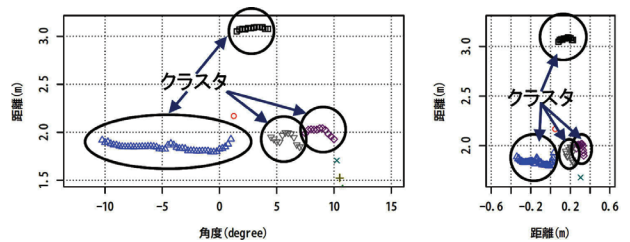


図11 クラスタリングの例

レーザセンサを移動体プラットフォームに搭載し検知処理しながら制御に反映させるには、一定の時間内に検知処理を終える必要がある。加えて、移動体プラットフォームに搭載可能なECUで処理を行うため、デスクトップPCのような高い処理性能を求めない処理手法が求められる。そのため、処理速度を考慮したパラメータを設定した。

学習に使用したパラメータは各クラスタの点の数や距離の平均値など単純な演算で求められる特徴量を使用した。このような単純な演算で求められる特徴量を使用することで、学習モデルに入力するための特徴量の計算コストを抑えられ、移動体プラットフォームに搭載し、リアルタイムで処理可能となる。

屋内及び屋外において取得したクラスタのサンプル約540個を用いて学習モデルを作成し、約90個のクラスタで学習モデルを評価した。結果を表1に示す。

表1 学習モデルの評価

	推定結果		正答率
	障害物(人)	障害物(人)以外	
障害物(人)	61	1	98%
障害物(人)以外	8	23	74%

推定結果で障害物(人)が障害物(人)以外と推定されたクラスが1件あった。このクラスは距離が約2.58mであった。学習に用いたクラスは0.5mから2.5mであり、距離2.58mは範囲外であったため、誤って判定されたものと考えられる。そのため、距離データを増やして学習させると精度を向上させることができる。

一方、障害物(人)以外であるにもかかわらず、障害物(人)と推定された結果の例を図12に示す。図12の円で囲った部分を障害物(人)と推定した。特徴量を追加するなどして、精度の向上を図る必要がある。

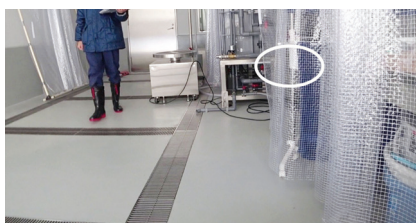


図12 誤検出の例

4. 移動体プラットフォームによる走行試験

作成した学習モデルを図1の移動体プラットフォームに搭載し、屋外での走行試験で障害物検知試験を行った。

移動体プラットフォームは図13に示す構成で走行制御を行った。障害物検知ECUはレーザセンサのデータをEthernet経由で取得した。取得したデータをクラスタリングし、作成した学習モデルを使って障害物検知処理を行った。処理結果はCANを使って送信した。移動体プラットフォーム制御ECUはCANから検知処理結果を取得し、モータ制御ECUに走行指示を与えた。

また、障害物検知ECUと動作確認用PCをレーザセンサとは別のEthernetを使って接続し、動作確認用PCを用いて、レーザセンサのデータと障害物検知処理の状態を監視した。

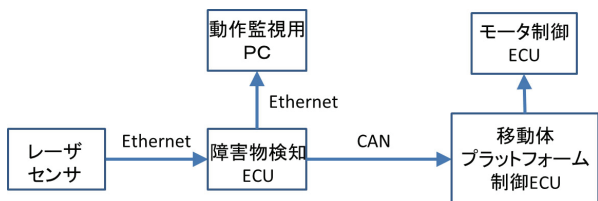


図13 移動体プラットフォームの走行制御のシステム構成図

屋外での実験結果を示す。図14(a)では障害物(人)の検出、(b)は回避行動の開始、(c)は回避中の様子である。このときの動作監視用PCの表示を図15に示す。図15(a)ではセンサによって周辺の物体までの距離情報が取得できており、取得したデータをクラスタリングした結果を示している。これらのクラスの特徴量を学習モデルに与えた結果、図15(b)に示すとおり障害物(人)のみを検出した。

移動体プラットフォームは時速約4kmで走行した。実験時の障害物検知処理に要した時間は約370msであった。この時間に移動体プラットフォームは約40cm進む。今回、除草や搬送など人手作業を代行する作業車両は移動体プラットフォームと同程度の車速を想定している。このため、この処理時間はリアルタイムに走行を制御できたことを示す。



(a) 障害物(人)の検出

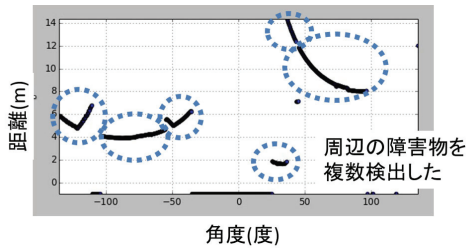


(b) 回避行動の開始

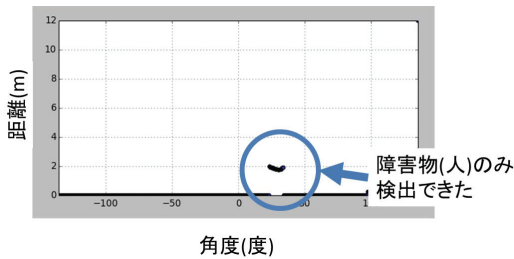


(c) 回避中

図14 屋外での走行試験



(a) センサの情報



(b) 障害物(人)検知処理結果

図15 監視用PCによる障害物検知処理の様子

5. 降雪の影響

北海道において、屋外で作業する作業車両は冬期間における降雪の影響を考慮することが必要である。今回使用したレーザセンサは測定距離10mで、角度分解能は0.25度である。よって、距離1mでは走査上の距離分解能は約4.36mm、距離10mでは43.6mmとなる。そのため、近距離の降雪にレーザが反射する可能性が高い。降雪による反射の例を図16に示す。

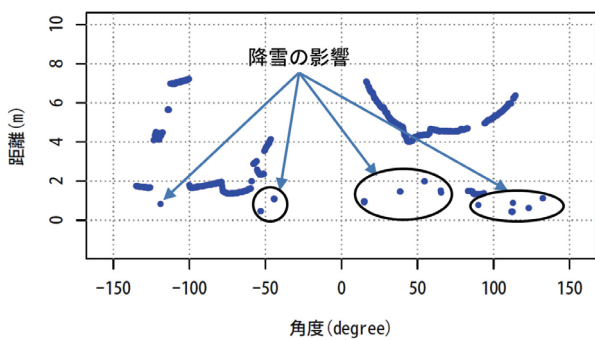


図16 降雪の影響

障害物検知処理はデータをクラスタに分割し個々のクラスタに対して検知処理を行っている。降雪によって、クラスタが分割されると正しく検知処理ができなくなる。図17は障害物(人)として認識されるべきクラスタが降雪によって、2つのクラスタに分割された例である。分割された各クラスタは障害物(人)と認識できなかった。この場合、降雪の反射(図17の×)を直前の走査データで補完することにより、図18のように単一のクラスタとして扱うことが可能となり、正しく障害物(人)として認識できた。

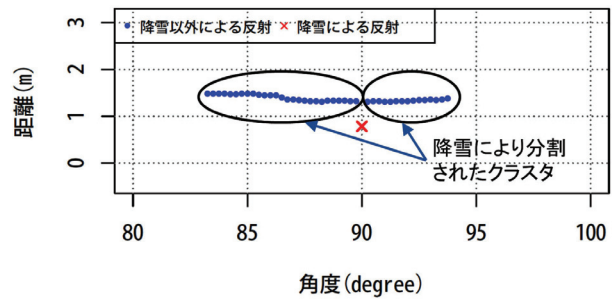


図17 降雪の影響

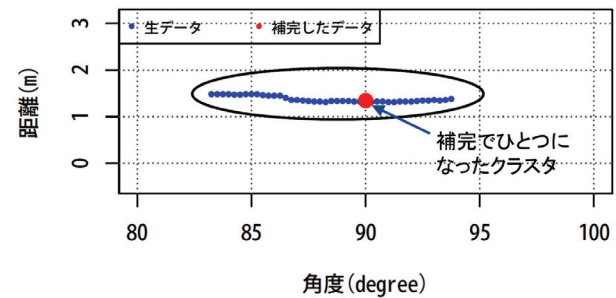


図18 降雪の影響を補完

6. まとめ

移動体プラットフォームにレーザセンサを搭載し、走行経路上の障害物(人)をリアルタイムで検知し、回避動作をさせる走行制御を実現した。

障害物(人)の検知には機械学習のひとつであるランダムフォレストを適用した。距離0.5m~2.5mの範囲内にある障害物を学習させた結果、障害物(人)を正しく検知した比率が約98%となった。

車載可能な組み込み型のECUで障害物検出処理をリアルタイムに行うため、演算量の少ないパラメータを選択し、ランダムフォレストの演算処理の高速化を図ることで、約370msで処理を行うことが可能となった。

さらに、冬期間における降雪によって生じるノイズを除去する手法を開発し、その効果を確認した。

機械学習の評価試験で障害物(人)以外であるにもかかわらず、障害物(人)と推定されたことから、学習させる特徴量を増やして検出精度の向上を図る予定である。扱う特徴量が増えると処理時間がかかり、リアルタイム性に影響することが考えられることから、障害物検知ECUにおけるソフトウェア構成の見直しなどをあわせて進める予定である。

参考文献

- 1) 西田健他, 自動運転のためのLIDARの仕様の検証, 第32回フェジシステムシンポジウム講演論文集, WD2-2, 2016

- 2) 鈴木慎一他, 醸造用ぶどう園向け除草作業支援ロボットの開発, 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.313, pp.1-11, (2014)
- 3) 友納正裕, 移動ロボットの環境認識, システム/制御/情報, 第60巻, 第12号, pp.509-514, (2016)
- 4) 菊池一徳他, 自動追尾のための環境認識, 計測自動制御学会東北支部第307回研究集会, (2017)
- 5) 三浦 純, 移動ロボットの環境認識と行動生成, 日本ロボット学会誌, Vol.26, No4, pp.332-325, (2008)
- 6) 堤 大祐他, 作業車両のための通信制御システムの開発, 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.317, pp.49-54, (2018)
- 7) 堤 大祐他, サイレーズ調製作業の省力化のための自動運転トラクタ用通信制御システムの開発, ネットワークシステム研究会NS2019-193, (2020)
- 8) 堤 大祐他, 国際規格を活用した農業機械の通信制御システムの開発, 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.312, pp.11-16, (2013)

水蒸気を用いたセルロースからのヒドロキシメチルフルフラール (HMF) の製造

吉田誠一郎, 松嶋景一郎, 上坊寺 亨*

Production of Hydroxymethylfurfural (HMF) from Cellulose by Using Steam

Seiichiro YOSHIDA, Keiichiro MATSUSHIMA, Tohru JOBOJI*

抄 録

北海道は植物由来の種々のバイオマス資源が多く賦存しており、これらの高付加価値化は資源の循環利用の観点から重要である。近年、植物由来のバイオマス資源であるセルロースから合成可能で、医薬品、バイオ燃料、プラスチックなどの原料として有用なヒドロキシメチルフルフラール (HMF) が高付加価値なターゲット物質として注目されている。一方、プロセスの効率化やコストの面から、セルロースからHMFを直接合成する「ワンポット合成」の手法を確立することが望まれているが、これまでの手法は環境負荷が大きいことが問題であった。そこで、本研究では環境負荷の小さな反応媒体として高温の水蒸気に着目した。反応条件を検討した結果、水蒸気を用いたワンポット合成でセルロースから直接、最大で約21%の収率でHMFが得られることを明らかにした。本研究ではセルロースの前処理法や添加する水分量が反応に与える影響などを報告する。

キーワード：バイオリファイナリー, ワンポット合成, セルロース, HMF, 水蒸気

Abstract

Development of value-added chemicals from various plant-base biomass is important in a viewpoint of resource recycling because Hokkaido is rich in huge amounts of these biomass. In recent years, hydroxymethylfurfural (HMF), which can be synthesized from cellulose, has been attracted attention as a target because it can be converted to various fine chemical products such as medicines, bio-fuels and polymers. However, from a viewpoint of process efficiency and cost, direct, so to speak “one-pot”, synthesis of HMF from cellulose without using harmful method to environment is still challenging study. Therefore, in this study, we focused on high-temperature steam as a reaction medium with low environmental impact. As results of studying the reaction condition, it was found HMF was obtained in about 21% yield directly from cellulose in “one-pot” by using steam. In this work, we report the effect of pretreatment of cellulose and the amount of added water for the reaction.

KEY-WORDS : Bio-refinery, One-pot synthesis, Cellulose, HMF, Steam

1. はじめに

現代社会は、多くの化成品が石油から合成されている「オイルリファイナリー」を基盤とする社会である。しかしながら、石油資源の枯渇やそれら資源を取り巻く情勢の不安定さ

などから、石油資源ではなくバイオマス資源から化成品を合成する「バイオリファイナリー」への転換が求められている(図1)。一方、北海道はバイオリファイナリーに転用可能な植物由来のバイオマス資源が多く賦存しており、これらの高付加価値化は資源の循環利用の観点から重要である。

*イムラ・ジャパン株式会社, *IMRA JAPAN CO., LTD.

事業名：経常研究

課題名：道産天然物を高機能化する化学変換プロセスの開発

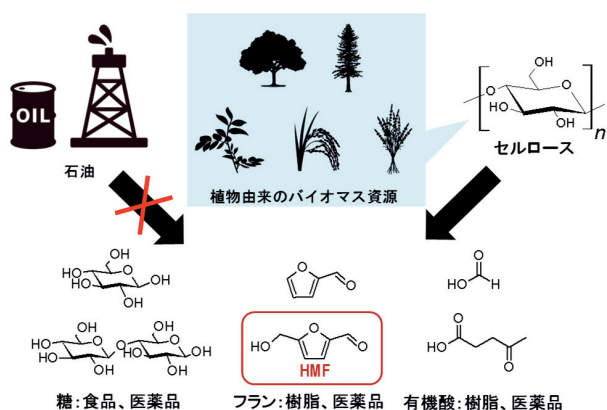


図1 バイオリファインリーの概念図とセルロースから誘導可能な化成品の例

このような背景から、本研究では植物の構成成分の一つであるセルロースから化学的に合成可能なヒドロキシメチルフルフラール (hydroxymethylfurfural, HMF) を高付加価値化が可能なターゲット物質として着目した。HMFは医薬品、バイオ燃料、プラスチックなどの原料となりうる事が報告されており、世界中で関連研究が行われている機能性物質である^{1,2)}。また、HMFはポリエチレンテレフタレート (PET) の代替品として期待されるポリエチレンフタレート (PEF) の原料でもあるため、特にマイクロプラスチックの問題や資源循環の観点からも注目を集めている。

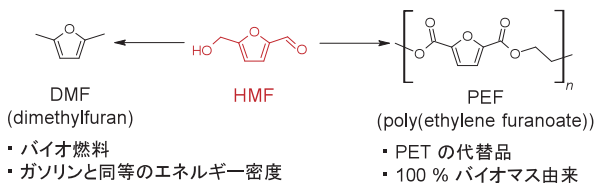


図2 HMFを原料としたバイオ燃料、プラスチックの例

セルロースからHMFが生成する反応は大きく分けてセルロースからグルコースが生成する加水分解反応、グルコースからHMFが生成する脱水反応からなる逐次反応である(図3)。これらの反応をそれぞれに分けて行うことは、プロセスの効率やコストの面から好ましくないため、反応を一つの容器内で完結する「ワンポット合成」の手法を確立することが重要である。一方、これまで報告されているワンポット合成³⁻⁵⁾は、いずれも触媒や特殊な溶媒を使用したものであり、近年の持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals, SDGs) に対する意識の高まりから、環境負荷の小さな変換法の確立が求められている。

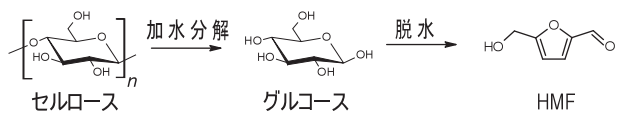


図3 セルロースからHMFが生成する逐次反応

そこで本研究では、水蒸気、すなわち「水」のみを利用した反応によりセルロースからHMFを合成する手法を検討した。これまでの研究から、高温高圧状態の水は糖類の加水分解や脱水反応を促進することが明らかとなっている⁶⁾。よって、水分量などでこれらの反応を適切に制御することで、セルロースからワンポット合成でHMFが得られると考えた。本研究では、水蒸気反応におけるセルロースの前処理法や添加する水分量の影響を評価し、ワンポット合成でセルロースから効率的にHMFを得ることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試薬等

微結晶セルロースはMerck株式会社から、グルコースとHMFは富士フィルム和光純株式会社よりそれぞれ入手した。低分子化セルロースは微結晶セルロースを既報⁷⁾に従って200℃、1,600rpmの条件で6h処理したものを用いた。それぞれの重合度は微結晶セルロースでは231、低分子化セルロースでは32である。

2.2 水蒸気によるセルロースからHMFへの変換

まず所定量のセルロースと脱イオン水をステンレス鋼製の圧力容器 (内容積10cm³) に封入し、オイルバスで200℃まで加熱した。所定時間 (15~240分) 経過後、容器ごと氷浴に浸漬し冷却することで反応を停止した。なお、添加した水分量のパラメータとして、水のモル数(W)に対するセルロース中に含まれるグルコースユニットのモル数(G)の比(W/G)を用いた。

次に容器を開封し内部を所定量の脱イオン水で洗浄し、洗浄液に含まれるグルコースおよびHMFの濃度を高速液体クロマトグラフィー (HPLC, Chromaseter 5210, 株式会社日立ハイテック) で測定した。グルコースのHPLC測定には、カラムにHPX-87P (Bio-Rad Laboratories, Inc.) を用い、検出器には示差屈折率検出器 (RID) を、溶離液には水を用いた。HMFのHPLC測定には、カラムにHPX-87H (Bio-Rad Laboratories, Inc.) を用い、検出器には紫外可視分光光度計 (UV-vis) を、溶離液には5mmol/Lの硫酸水溶液を用いた。どちらの分析においても、カラム温度は50℃、流速0.6mL/minとした。

3. 実験結果と考察

3.1 微結晶セルロースを原料とした場合のHMFのワンポット合成

はじめに、市販の微結晶セルロースから、水蒸気を用いてHMFが得られるかを確認した。微結晶セルロースを200℃の水蒸気中で処理した際の、セルロースの加水分解物である

グルコース及びグルコースが脱水して得られるHMFの収率の時間変化をそれぞれ図4に示した。図4より、グルコースの収率ははじめに増加し、それに追従する形でHMFの収率が増加していることから、セルロースからグルコース、グルコースからHMFへの逐次的な変換反応が系内で起こっていることが確かめられた。一方で、グルコースの収率は120分で約8%、HMFの収率は240分で約8%程度であり、収率がそれほど大きくない。

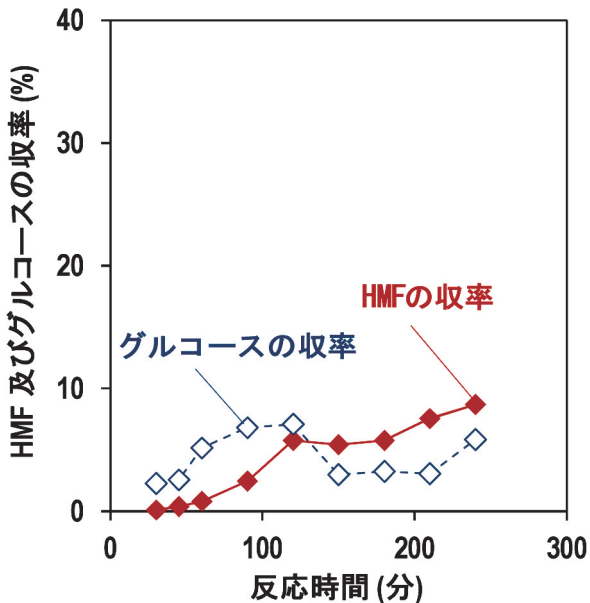


図4 微結晶セルロースを原料とした水蒸気反応におけるグルコースとHMFの収率の時間変化 (200℃, 1.6 MPa, W/G = 123)

3.1 セルロースの前処理がHMFの収率に与える影響

続いて、セルロースの前処理によるHMFの収率向上を検討した。低分子化セルロースを原料として、微結晶セルロースと同じ条件で反応を実施した結果、グルコースの収率が30分の時点で約35%、HMFの収率が60分の時点で約19%と微結晶セルロースを原料とした場合に比べて向上する結果が得られた(図5)。微結晶セルロースの重合度は231、低分子化セルロースの重合度は32と、重合度が1/7程度になっており、この分子量の低下が反応効率を向上させていると考えられる。一方、前処理後の低分子化セルロースにはほとんどグルコースが含まれていない(< 1%)ことも確認しており、加水分解と脱水反応の両方が系内で起こっていることも確かめられた。

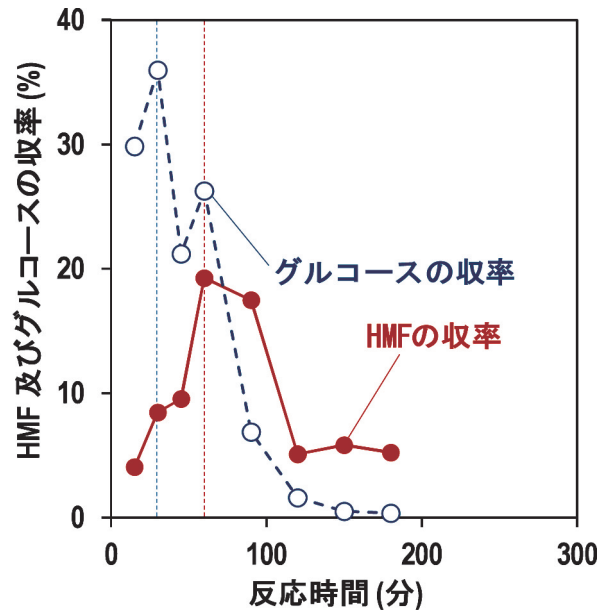


図5 低分子化セルロースを原料とした水蒸気反応におけるグルコースとHMFの収率の時間変化 (200℃, 1.6 MPa, W/G = 123)

3.2 水分量がHMFの収率に与える影響

前項で水蒸気が加水分解と脱水反応を促進し、セルロースから直接HMFを生成できることを確認した。一般的に、加水分解や脱水反応は、系内の水分量の影響を受けると考えられるため、セルロースに添加する水分量がグルコースやHMFの収率に与える影響を評価した。原料としては低分子化セルロースを用いた。パラメータW/Gを変えた際のグルコースとHMFの収率の時間変化を図6、7にそれぞれ示した。

W/Gを変えてもグルコースの収率はそれほど大きく変化していないが、HMFの収率は大きく変化していることがわかる。特にW/Gが低い場合にはHMFの収率は最大でも9%程度であるが、W/G=130でHMFの収率は約21%に達し、その後W/G=150では15%まで低下している。W/Gに対して60分におけるHMFの収率をプロットするとW/G=130に頂点を持つグラフが得られた(図8)。これは、水蒸気反応においてセルロースからのHMF生成の収率を最大化するためには、加水分解と脱水反応のバランスを最適化できるような量の水を添加する必要があると考えられる。セルロースから直接HMFを合成した例を表1にいくつか示した。高価で特殊な触媒や溶媒を用いた例(60%)には及ばないものの、水だけで既報に匹敵するHMFの収率が得られていることがわかる。

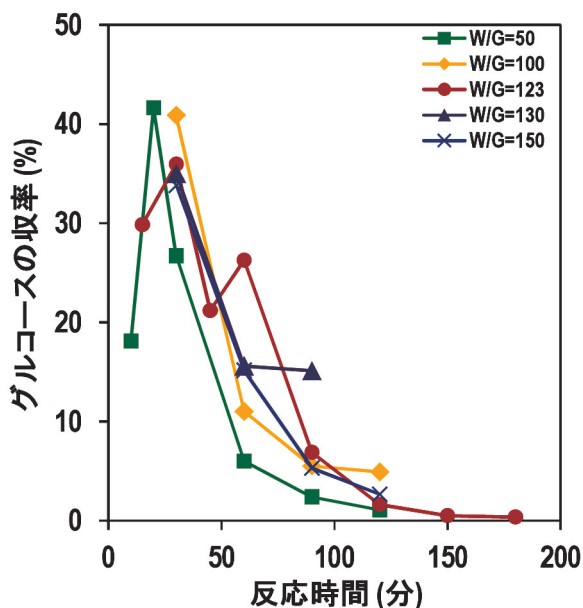


図6 低分子化セルロースを原料とした水蒸気反応におけるグルコースの収率に W/G が与える影響 (200°C, 1.6 MPa)

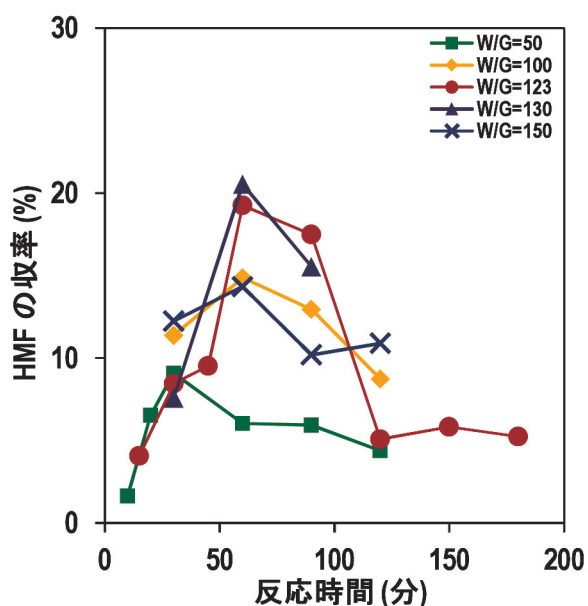


図7 低分子化セルロースを原料とした水蒸気反応における HMF の収率に W/G が与える影響 (200°C, 1.6 MPa)

4. おわりに

- 水蒸気を用いることで、セルロースから効率よく HMF を得る手法を開発した。
- セルロースの前処理と水分量の最適化により、ワンポット合成で最大約21%の収率で HMF が得られることを明らかにした。

にした。

- 本プロセスは原料以外には水しか用いず、SDGs の概念に合致したクリーンかつシンプルなプロセスである。
- 今後は本手法を用いた実バイオマスの変換や他の反応への応用を検討する予定である。

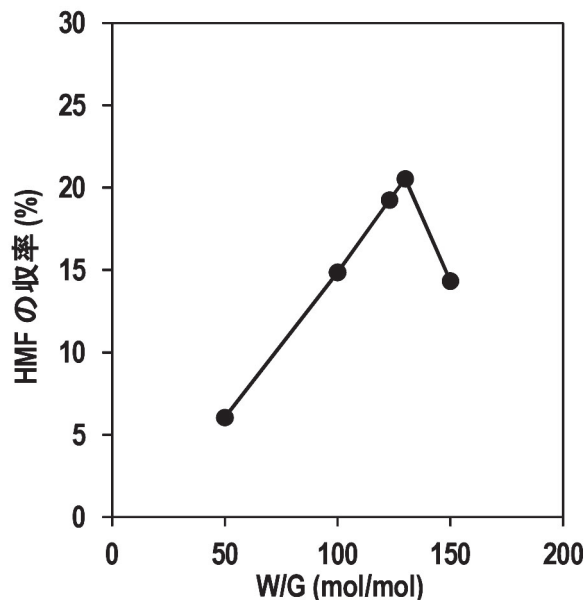


図8 低分子化セルロースを原料とした水蒸気反応における W/G と HMF の収率の関係 (200°C, 1.6 MPa, 60 分)

表1 触媒によるセルロースからの HMF 合成との比較

触媒	収率 / %	文献
CrCl ₂ /RuCl ₂ + Ionic liquid	60	3
Sulphanilic acid	52	4
Acid/base mesoporous silica	20	5
本報告	21	-

参考文献

- 1) Rosatella, A. A., S. P. Simeonov, R. F. M. Frade and C. A. M. Afonso; "5-Hydroxymethylfurfural (HMF) as a building block platform: Biological properties, synthesis and synthetic applications," *Green Chem.*, 13(4), 754-793 (2011)
- 2) Binder, J. B., and R. T. Raines; "Simple Chemical Transformation of Lignocellulosic Biomass into Furans for Fuels and Chemicals," *J. Am. Chem. Soc.*, 131(5), 1979-1985 (2009)
- 3) Kim, B., J. Jeong, D. Lee, S. Kim, H.-J. Yoon, Y. -S. Lee and J. K. Cho; "Direct transformation of cellulose into 5-hydroxymethyl-2-furfural using a combination of metal chlorides in imidazolium ionic

- liquid,” *Green Chem.*, 13(6), 1503-1506 (2011)
- 4) Mirzaeia, H. M., B. Karimi; “Sulphanilic acid as a recyclable bifunctional organocatalyst in the selective conversion of lignocellulosic biomass to 5-HMF,” *Green Chem.*, 18, 2282-2286 (2016)
- 5) Peng, W.H., Y.Y., Lee, C. Wu and K. C. W., Wu; “Acid-base bi-functionalized, large-pored mesoporous silicananoparticles for cooperative catalysis of one-pot cellulose-to-HMF conversion,” *J. Mater. Chem.*, 22, 23181-23185 (2012)
- 6) 松嶋景一郎・吉田誠一郎・水本秀二・山田修平・菅原一幸：高温・高圧水マイクロ化学プロセスによる多糖の高速・高選択低分子化反応，北海道立総合研究機構工業試験場報告，Vol. 317, pp. 65-69(2018)
- 7) Shiraiishi, K., T. Joboji and K. Taneda; “Method for solubilizing cellulose,” US Patent US20140081013A1 (2014)

海岸流木の燃料化に向けた成分分析及び燃焼試験

富樫 憲一, 山越 幸康

Component Analysis and Combustion Test for Utilization of Driftwoods as Solid Fuel

Kenichi TOGASHI, Yukiyasu YAMAKOSHI

抄 録

近年、北海道でも暴風雨の発生頻度が上昇傾向にあり、河川の増水に伴う海岸流木の発生が問題視されている。海岸流木は船舶が出航する際の障害となることに加え、満潮時に海へと再漂流し船舶や漁網に損傷を与えるなど近隣地域に深刻な被害をもたらしている。このような被害を軽減するため、流木の早急な撤去ひいては有効利用が求められており、その一環として海岸流木の燃料化が検討されている。しかしながら塩化ナトリウムを含有する木質バイオマスを用いた燃焼機内での燃焼させる際には、塩化ナトリウムそのものが燃焼ガスに乗って飛散し機材損傷の原因となることに加え、塩化水素などの塩素化合物が生成されることで燃料としての利用が非常に困難となることが懸念される。そこで本研究では、まず海岸流木の燃料利用を念頭に置いて十勝川河口域の海岸から採取した海岸流木の塩化ナトリウム含有率分布を独自の手法で分析し、海岸流木の塩化ナトリウム含有率が6%以内であることを確認した。次に、この分析結果にもとづいて木質バイオマスに塩化ナトリウムを含ませた模擬試料を作製して実験室規模及びボイラー実機規模の燃焼試験に供し、それぞれの条件下で燃焼ガスに含まれる化学物質の分析を行った。燃焼試験の結果、塩化ナトリウムを含有する木質バイオマスを800℃以上で燃焼させると塩化ナトリウムが白煙となって飛散すること、飛散した塩化ナトリウムの大半はその化学的形態を維持したまま析出することがわかった。

キーワード：固形燃料, 低品位バイオマス, 廃棄物の有効利用, 燃焼, 成分分析

Abstract

These years, derelict driftwoods on the seashore brought by typhoons are considered as a social problem in Hokkaido as well as in other regions in Japan. Driftwoods are seriously problematic because they prevent the ships from leaving shore and when sea level rises, they damage ships, fishing net and so on by drifting around the neighborhood. To reduce these kinds of damage, immediate removal and disposal of driftwoods are required and utilization of them as solid biomass fuel is being discussed. However, sodium chloride itself which is contained in the driftwoods and combustion products such as hydrogen chloride possibly cause damages to the environment and burning appliances. In the present study, component analysis and combustion test are performed to discuss the influence of sodium chloride on combustion of driftwoods. At first, natural driftwoods on the seashore in estuarine region of the Tokachi River are sampled and the content rate of sodium chloride is analyzed by an original method developed in the present study. As a result, the content rate was determined to be within 6 mass% for all the samples. Then, the combustion tests using imitation fuels are performed in two different scales: laboratory scale test using tubular furnace and real scale test using actual boiler for solid fuels. As a result, it was found that sodium chloride is volatilized and dispersed into ambient air at the furnace temperature above 800°C and most of it crystallizes at the room temperature maintaining the chemical form of sodium chloride.

KEY-WORDS : Solid fuel, Low-grade biomass, Utilization of waste, combustion, Component analysis

1. はじめに

近年、北海道でも暴風雨の発生頻度が上昇傾向にあり、河川の増水などに伴う海岸流木の発生が問題となっている。海岸流木は強風などによりなぎ倒された樹木が河川を流下して海へ流出し、それが岸辺に再び漂着したものであるが、船舶が出航する際の障害となることに加え、満潮時に海へと再漂流し船舶や漁網に損傷を与えるなど近隣地域に深刻な被害をもたらしている。このような被害を軽減するため、自治体が流木を海岸からやや高い内陸側へ押し上げるなどの対策をとっている地域もあるが、押し上げ後の流木の処理方法が問題となっている。海岸流木の有効利用法のひとつとして燃料化が検討されているが、塩化ナトリウム（以下NaCl）を含有する木質バイオマスをボイラーなどの燃焼機内で燃焼させる際には、NaClそのものが燃焼ガスに乗って飛散し機材損傷の原因となることに加え、塩化水素（以下HCl）などの塩素化合物が生成され燃料としての利用がいっそう困難となることが懸念される。そこで本研究では、まず海岸流木の燃料利用を念頭に置き、十勝川河口域の海岸から採取した海岸流木のNaCl含有率分布を独自の分析手法により評価した。次に、木質バイオマスに分析により得られたNaCl含有率と同等のNaClを含浸させることで模擬試料を作製し、それを用いて管状炉による実験室規模及び固形燃料ボイラー-実機規模の燃焼試験を行った。これらの燃焼試験で発生した燃焼生成物を捕集してそれぞれ成分分析を行うことで、海岸流木に含まれるNaClが燃焼に及ぼす影響を評価した。

2. 模擬試料及び流木のNaCl含有率の分析方法

2.1 模擬試料の作製方法

本研究では、塩分含有率測定手法の妥当性検証を行う際の標準試料として用いること、また燃焼試験にあたって組成と性状の安定した試料を供することの2つを目的として、所定の質量分率のNaClを含有する海岸流木模擬試料を作製した。図1を用いて、木質チップボイラーの燃料として一般的に用

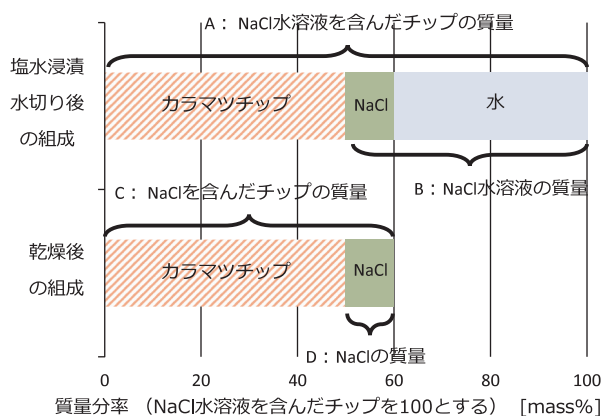


図1 模擬試料の塩分調整方法

いられているカラマツチップに所定の塩分を含ませる過程を説明する。

(1) まず所定の濃度のNaCl水溶液(B)を作り、カラマツチップを水溶液中に浸漬する。

(2) 丸2日程度浸漬すればチップの含水率が一定値（50 mass%程度）に収束することを利用し、含水したチップに占めるNaCl水溶液の質量分率（B/A）を設定する。

(3) 105℃の恒温室内にNaCl水溶液を含んだチップを5時間程度放置し、含まれていた水のみを蒸発させて除去することで、所定の塩分含有率（D/C）のチップを作製した。

本研究では以上のプロセスにより所定の塩分を含ませたチップを作成し、これを海岸流木の模擬試料として用いて塩分含有率分析手法の妥当性評価及び燃焼試験を行った。

2.2 模擬試料によるNaCl含有率の分析手法の妥当性検証

本研究では、流木試料を入れた電気炉内を2～3時間にかけて600℃の高温に維持することで可燃分を揮発させ、残った灰分をすべてNaClと見なすことでNaCl含有率の把握を試みた。しかしながら、木質試料の入った電気炉内を急速に昇温すると、300℃程度で木質試料に含まれる可燃性の揮発分に由来する煙の発生が見られるようになり、間もなくその揮発分に引火することで火炎が発生する。この火炎により試料中のNaClが空气中に飛散することで正確な含有率の測定ができなくなる可能性を考慮し、本研究ではあらかじめ所定のNaClを含浸させた木質チップを有炎と無炎のふたつの方法で灰化し、得られた灰分を設定したNaCl含有率と比較することで分析手法の妥当性を評価した。有炎及び無炎それぞれの方法の灰化過程における炉内温度の履歴を図2に示す。有炎灰化は石炭に含まれる灰分の工業分析手法を定めたJIS M8812¹⁾に準拠し、815℃まで一挙に昇温する方法であるのに対し、無炎灰化は揮発分が発生し始める300℃到達時以降、揮発分への引火を避けるために50℃ずつ段階的に炉内温度を上昇させる方法とした。図3に、それぞれの灰化方法で得られた灰分の試料全体に占める質量分率を、模擬試料の作

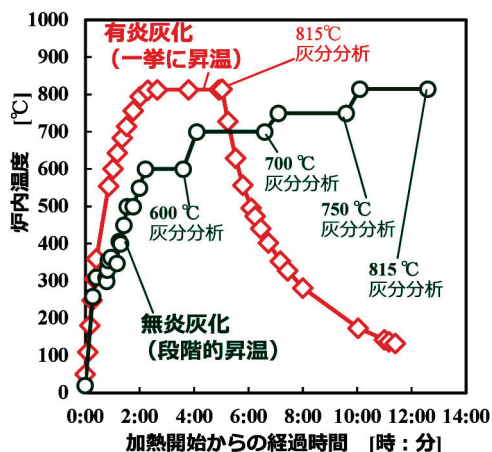


図2 NaCl含有率分析時の炉内温度履歴

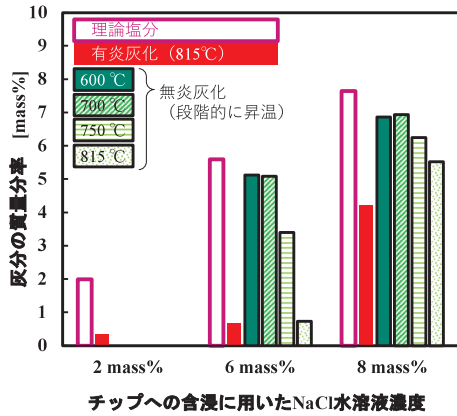
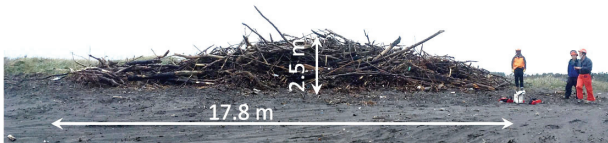


図3 有炎・無炎それぞれの灰化法で得られた灰分の比較

成時に漬け込んだNaCl水溶液の濃度から図1に基づいて算出した理論塩分とともに示す。図より、有炎灰化により得られた灰分は設定した塩分含有率よりも著しく低い値となったのに対し、600°C~700°Cの無炎灰化により得られた灰分は、設定した塩分含有率の90%程度の値を示していることがわかる。また、模擬試料の母材として用いたカラマツを600°C以上で灰化すれば、元のカラマツの質量の0.2%程度の灰分しか残留しないことがわかっていることから、今回の試験で残留した灰分はほぼ全てが意図的に含浸させたNaClであると推定される。この結果を踏まえ、本研究における流木のNaCl含有率分析に際しては最終的な炉内の到達温度を600°Cとする無炎灰化を採用した。さらに、以上の検討から得られた副次的な知見として、NaClを含む木質バイオマスが火災を伴って燃焼する際にはNaClが周囲環境に飛散すること、さらに、ほぼ純粋なNaClとなった灰分を750°C以上に維持すると周囲環境への飛散が起こることが示唆された。

2.3 十勝川河口域における海岸流木の採取及び前処理

海岸流木の成分分析のため、十勝川河口域に漂着した海岸流木の採取を行った。図4に再漂流防止のため内陸側へ押し上げられた流木の山の写真を、図5に採取した流木の外観写真をそれぞれ示す。本研究では、図4に示したような流木の



(a) 再漂流防止のため押し上げられた流木の山



(b) 採取した流木の原形の一部

図4 十勝川河口域の砂浜に押し上げられた流木

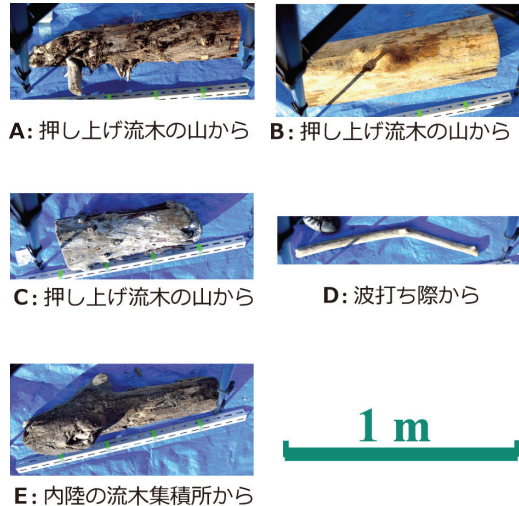


図5 採取した流木



図6 採取した流木の切り分けと粉碎工程

山から直径の大きいもの(図5試料A~C)、及び波打ち際で海水に晒されていたもの(図5試料D)、さらに砂浜から撤去され内陸の流木集積場所に運搬された後風雨に晒されていたもの(図5試料E)を抽出し、その端部から50cmの位置を切断して採取した。採取した流木は道総研林産試験場(以下、林産試)の報告²⁾に倣い、図6に示すとおり軸方向に10cm間隔で輪切りした上、表面近傍部分と中心軸近傍部分に切り分けて粉末状に粉碎し、前節で述べた無炎灰化を行うことでNaCl含有率分布を把握した。

2.4 流木のNaCl含有率分布の測定結果

図7に、流木のNaCl含有率分布の測定結果を示す。林産試による報告²⁾と同様、破断面から徐々に含有率が低くなる傾向がみられる試料もあれば、必ずしもそうではない試料もあることがわかる。これは、海水は原則的に流木の側面ではなく断面から含浸してゆくものの、海岸流木が海水に浸されていた期間や姿勢が一樣ではないことに起因するばらつきがあるためと考えられる。また、すべての試料において、塩分含有率は林産試による報告²⁾と同等の6%以内であることが確認された。さらに、灰分含有率が特に高かった部位を815

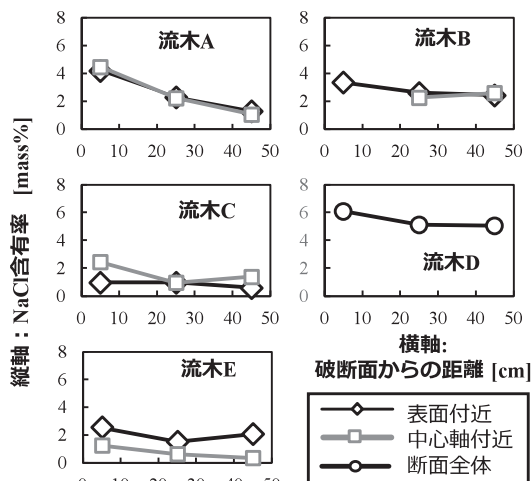


図7 採取した流木の塩分析結果

℃で灰化し、得られた灰に対してFP法による蛍光X線（リガク社製、ZSX Primus II）分析を行ったところ、部位によってばらつきが見られるものの、検出された無機元素全体のうち、質量分率にして60~80mass%がNa及びClであるという結果が得られた。

3. 管状炉を用いた実験室規模の燃焼試験

3.1 実験装置及び方法

図8に、管状炉による実験室規模の燃焼試験に用いた実験装置の系統図を示す。電熱線による加熱及び温度制御機構を備えた管状炉の中心には石英ガラス製の炉心管が設置されており、炉内の温度を1000℃程度までの一定温度に保つことが可能となっている。炉心管の末端にはゴム栓を介して吸引ポンプが接続されており、これにより炉心管内の気体を一定流量で排気することができる。燃焼試験方法として、2.1節で述べた方法により所定の分率のNaClを含浸させたカラマツおよそ1gを試料皿に乗せ、所定の温度に維持された炉内に入れて燃焼させた。燃焼に伴って発生する生成物は吸引ポンプによって下流へと流され、炉心管末端のゴム栓に設置され

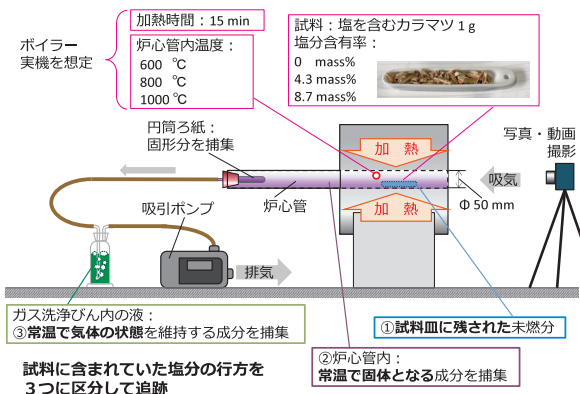


図8 管状炉を用いた燃焼試験装置

た円筒ろ紙を通過する。ここで、炉心管末端の温度はすべての条件において100℃以下であったことから、燃焼生成物に含まれる物質のうち、この温度域で固体となる成分（たとえばNaCl）がろ紙により捕集されると考えられる。ろ紙に捕集されなかった物質すなわち100℃近傍で気体の状態を維持する物質（たとえばHClなど）は、さらに下流のガス洗浄瓶にて蒸留水の中を通過し、ここで水溶性の成分が水に溶解して捕集されると考えられる。固形燃料ボイラー実機での炉内滞留時間を想定して試料の投入から15分間をもって試験終了とし、試料に由来する物質を以下の3通りに区分して捕集した。

- ①試料皿に残った固形残留物
- ②炉心管の内壁及び円筒ろ紙に付着した固形分
- ③ガス洗浄瓶に捕集された水溶性のガス

以上の生成物はそれぞれ以下のとおり捕集し分析を行った。

- ①試料皿の固形分は、重量を測定することで残留物の試料全体に占める比率を算出した。
- ②炉心管内に析出した固形分は、ろ紙を含む管内を蒸留水で洗浄し、洗浄液をICP発光分析装置（島津製作所製、ICPS8100）により分析することで、Na及びClの析出量を把握した。
- ③ガス洗浄瓶に捕集された物質については、洗浄瓶内の液をICP発光により分析することでNa及びClの捕集量を把握した。

実験パラメータとして、試料に含まれる塩分を0, 4.3, 8.7mass%に、炉内温度を600, 800, 1000℃にそれぞれ設定して実験を行った。

3.2 実験結果

図9に、試料NaCl含有率8.7mass%、炉内温度1000℃の条件における炉内を撮影した写真を示す。炉内温度やNaCl含有率に関わらず、炉内に投入した試料はただちに図9(a)のような火炎をあげて発火し、1分程度で揮発分が放出つくさることで炎が消えて熾（おき）燃焼状態となり、その後数分をかけて可燃分がすべて燃え尽き消失するという共通の挙動が見られたが、NaClを含有させた試料を800℃以上の炉内に投入した条件に限り、図9(b)に示したような白煙が試験終了となる15分後まで継続的に発生し続けることが確認

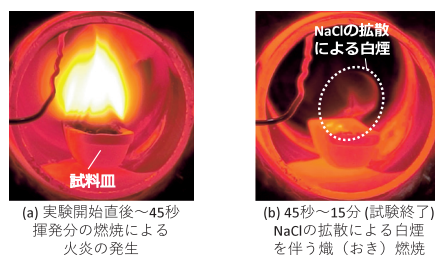


図9 炉心管内の写真
(試料NaCl含有率：8.7 mass%，炉内温度：1000℃)

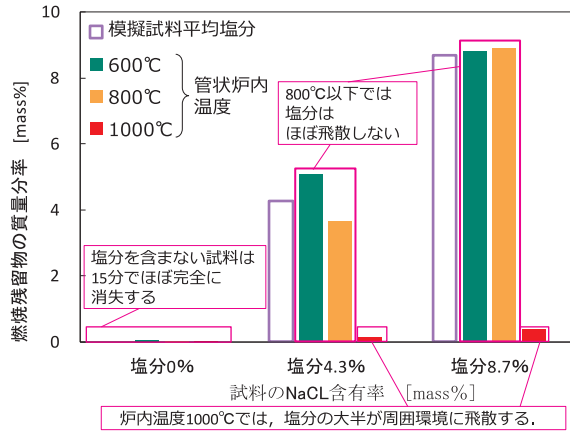


図10 試料皿に残留した固形分の試料に占める質量分率

された。これは、既に2.2節で得られていた750°C以上の高温炉内にNaClを放置すれば周囲環境への飛散が起こることを示唆する結果を視覚的に裏付けるものであり、高温環境に静置されたNaClが白煙となって少しずつ周囲環境に飛散する様子を目視で確認することができた。NaClの融点は800°C程度³⁾とされており、それとほぼ同等の炉内温度で周囲環境への拡散までもが発生することについては疑う余地が考えられたが、既往の研究において、廃棄物中に含まれるNaClが600°Cの炉内では試料皿に残留し、900°Cの炉内では揮発するという報告^{3),4)}があることから、本研究においてもNaClが揮発によって周囲環境へ拡散した可能性が十分に考えられる。

図10に、各条件において実験終了後の試料皿に残留した固形分の、実験開始時の試料全体に対する質量分率を示す。図の横軸は設定した試料のNaCl含有率である。図より、塩分

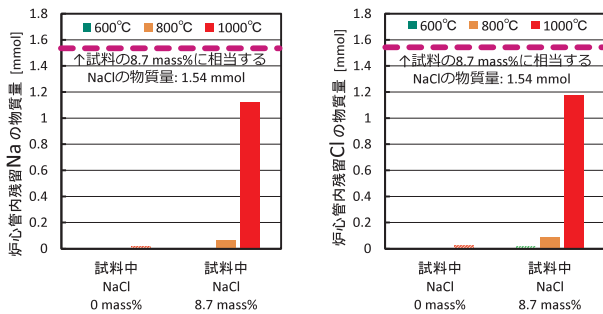


図11 炉心管内に残留したNaとClの物質質量分析結果

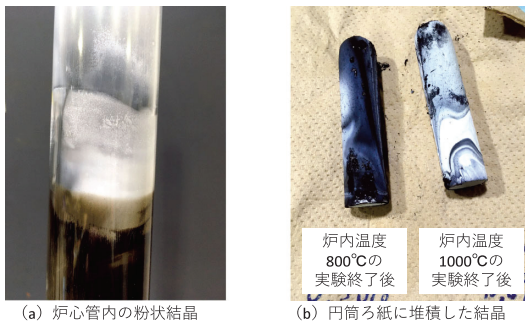


図12 炉心管内に析出した白色結晶

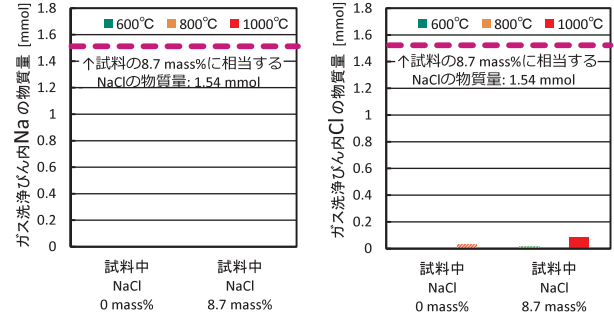


図13 ガス洗浄瓶に捕集されたNaとClの物質質量

を含まない試料はほぼ残留物を残さずに消失していることから、15分という実験時間は木質試料が燃え尽きるのに十分な時間であることがわかる。一方、塩分を含む試料に注目すると、炉内温度600°C及び800°Cでは元々試料に含まれていた塩分と同等の残留物が得られているのに対し、炉内温度1000°Cの条件においては試料の大半がわずかな残留物を残して消失していることがわかる。本節で先に述べた炉内の観察結果より、800°Cと1000°Cの炉内ではNaClの拡散を示す白煙の発生が見られたが、残留物の量に著しい相違が見られることから、炉内温度800°Cの条件と比較して1000°Cの条件の方がNaClの拡散速度が非常に速いものと考えられる。図11に、試料皿を取り除いた炉心管内を洗浄した水をICP発光により分析し、含まれるNa及びClを定量した結果を示す。元々NaClを含まない試料や600°Cで加熱した条件ではNaやClがほとんど検出されないのに対し、NaClの拡散を示す白煙が観察された800°C及び1000°Cの条件においてはNa及びClが検出された。これらの条件におけるNa及びClの検出量を図10に示した試料皿残留物の量と比較すると、炉心管における検出量は試料皿に残された残留物の量が少ないほど多くなっており、これはNaClの質量保存則と整合する傾向と見なすことができる。さらに、NaClが検出された条件ではNaとClの物質質量がほぼ等しくなっていることから、炉心管内に析出したNaCl由来物質の大半は、もとのNaClの形態を維持していることが推察される。分析結果から多量のNaClが析出していると考えられる炉内温度1000°Cの条件においては、図12に示すとおり、炉心管壁及び円筒ろ紙に目視で確認できるほどの白色結晶が析出していた。図12(b)に示したのはそれぞれ炉内温度800°C及び1000°Cにおける実験終了後の円筒ろ紙であるが、実験開始後1分間程度のうちに木質試料の揮発分由来する煤が発生し、その後実験終了までNaCl由来の白煙が継続的に発生し続けるという現象の順序に対応して、円筒ろ紙表面がまず黒い煤で覆われ、その上に白色のNaCl結晶が薄く付着している様子が確認された。さらに、試料皿の残留物及び炉心管洗浄液の分析結果が共に多量のNaClが飛散したことを示している炉内温度1000°Cの条件で、やはり多量の白色結晶が析出していることが目視で確認できる。

図13に、それぞれの実験条件においてガス先浄瓶に捕集さ

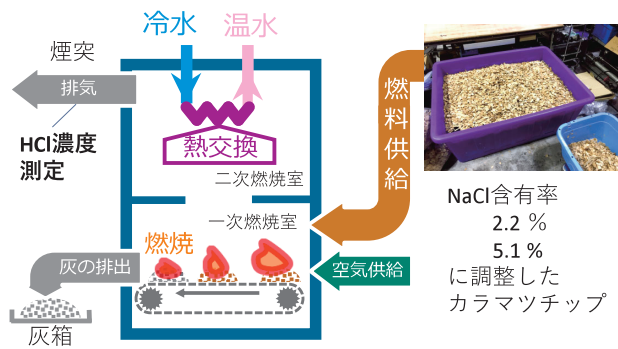


図14 燃焼試験に用いたボイラー実機模式図

れたNa及びClのICP発光分析結果を示す。少量のClが捕集されていることを示す結果が得られているものの、試料に含まれていたNaClの大半がそのまま炉心管内で析出したことを裏付ける結果となっている。

以上の分析結果をNaClの質量保存の観点から考えると、「試料に含まれていたNaClの質量」は、原則的に図8に示した「3通りの燃焼生成物①, ②, ③に含まれるNaおよびClの合計質量」と一致するはずである。今回の分析の妥当性を評価するため、分析結果から両者を算出して比較したところ、燃焼生成物に含まれるNaおよびClの合計質量は、元の試料の平均NaCl含有質量に対して71%から116%の範囲に分布していることがわかった。差異が生じた要因としては、燃焼生成物の分析のための前処理として経由した各過程（捕集、洗浄、希釈など）における誤差が累積されたことに加え、燃焼試験に供する試料の量を1g程度の少量にしなればならなかったことから、試料に元々含まれているNaClの量にばらつきが生じていたことが考えられる。

4. 固形燃料ボイラー実機における燃焼試験

4.1 実験装置及び方法

道総研と富良野市役所にて共同改良を行った固形燃料ボイラー（出力350kW）を用いて実機における燃焼試験を行った。図14に、固形燃料ボイラーの模式図を示す。燃料はスクリュウコンベアにてボイラー内への自動供給が可能となっており、ボイラー内部のストーカー（燃料搬送機能付き火格子）上に一定の供給速度で投入される。投入された燃料はストーカー上の火種から引火することで燃焼を開始し、可燃分が燃え尽きるのに十分な時間をかけて出口まで搬送され、燃え残った未燃残留物が灰箱に落とされて排出される。燃焼室には水が流れる伝熱管が通っており、燃焼で発生した熱が伝熱管内の水に伝わることで温水が得られる構造となっている。本研究では、海岸流木を模擬して2.1節で述べた方法によりNaCl含有率を2.2及び5.1mass%に設定したカラマツチップを燃料として用いて燃焼試験を行い、排気系統最下流の煙突から排気ガスを採取して燃焼機損傷の原因となるHClの濃度を

表1 ボイラー実機による燃焼試験 条件及び結果

		燃料のNaCl含有率	
		2.2 mass%	5.1 mass%
試験条件	燃料水分 [mass%]	18.6	14.5
	燃料供給速度 [kg/h]	76.8	73.1
	実験時間 [h:min]	1:24	1:47
	積算燃料供給量 [kg]	108	130
	積算NaCl供給量 [kg]	1.96	5.70
試験結果	排気中のHCl濃度 [mg/m^3]	1.1	13
基準値	排気中のHCl濃度 [mg/m^3]	700	

測定した。

4.2 実験条件及び結果

表1に、ボイラー実機における燃焼試験の条件及びHCl濃度の測定結果を示す。実験中における炉内温度は800℃程度であったが、ストーカー上の火種の中に熱電対を挿し込んで温度を測定したところ、位置やタイミングによってばらつきがあるもののおおむね1000℃程度であったため、前章で述べた管状炉試験の結果からNaClが周囲環境へ拡散する炉内条件となっていたことが推察される。燃焼により発生した排気を採取して分析を行った結果、HClの濃度は大気汚染防止法の基準値を大幅に下回ることがわかった。ただし、本実験における排気ガスの採取位置はボイラー排気系統最下流付近の煙突であるため、燃焼で発生したHClが採取位置に至るまでの系統内で凝縮した水に溶解して捕集されることで、測定されたHClの量が燃焼室で発生した量を下回っている可能性がある。従って、今回得られたHCl濃度については、今後さらなる検討を要すると思われる。

5. おわりに

本研究では、海岸流木を燃料として利用することを念頭に置き、海岸流木に含まれるNaClの含有率を把握した上で、それと同等の塩分を含ませた木質燃料を燃焼させ、NaClが燃焼に及ぼす影響について検討を行った。結果として、以下の知見が得られた。

- (1) 木質バイオマスに含まれるNaClの定量手法を確立した。
- (2) 採取した海岸流木のNaCl含有率分布を測定し、おおむね6 mass%未満であることを確認した。
- (3) NaClを含む木質バイオマスを750℃以上の高温炉内に静置するとNaClが周囲環境へ拡散することがわかった。
- (4) NaClを含む木質バイオマスを1000℃以上で加熱すると、15分以内に大半のNaClが周囲環境に拡散することがわかった。
- (5) 高温炉内で拡散したNaClの大半はNaClの形態を維持して周囲へ飛散し、常温まで冷やされれば結晶として析

出する。

- (6) ボイラー実機にてNaClを含む木質チップを燃焼させ、排ガス中のHCl濃度を測定した結果、大気汚染防止法の基準値を大幅に下回る数値が得られたが、ガス採取位置の影響など今後さらなる検討が必要である。

以上の知見を踏まえ、今後海岸流木を燃料として利用しようとする際には、以下の点に留意する必要があると思われる。

- (1) ボイラーなどの燃焼機でNaClを含む木質を燃焼させる際、750℃以上の高温となる炉内ではNaClがその形態を維持したまま周囲へ拡散し、燃焼機の損傷や周囲環境への悪影響をもたらす可能性が高い。
- (2) 一般的に、木質燃料を完全燃焼させ、排気中の煤塵発生など不完全燃焼の弊害を回避するためには1000℃以上の炉内温度が望ましいとされており、木質燃料とNaClそれぞれの環境負荷低減を両立させることは難しいと考えられる。
- (3) 以上(1)、(2)より、海岸流木を燃料として利用あるいは焼却処分する際には、雨ざらしによる脱塩やNaClを含まない木質バイオマスとの混合などにより、NaCl含有率を許容範囲まで低減する前処理が望まれる。

謝辞

本研究で用いたICP発光分析装置（島津製作所製、ICPS8100）は、公益財団法人JKAの補助を受けて当場に導入されたものである。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本工業規格 M 8812-1993 石炭類及びコークス類—工業分析法 (1993)
- 2) 斎藤 直人, 平成21年度循環型社会形成推進科学研究費補助金 総合研究報告書 「海岸流木のリサイクルに向けたシステム提案 (漂着ごみ問題解決に関する研究)」, 北海道立林産試験場 (2010)
- 3) 「廃棄物試験・検査法研究部会」1998年度報告書, 日本廃棄物学会 (1999)
- 4) 渡辺 信久, 谷川 昇, 石川 千晶, 山本 実, 前 弘, 篠原 明義, 松江 努, 佐藤 茂夫, 及川 智, 河村 清史, 「ごみ中塩素計測法に関する検討」, 廃棄物学会誌, Vol.12, No.1, pp.60-66 (2001)

蒸気二流体洗浄技術を用いた産業機械部品用洗浄装置の開発

坂村 喬史, 米田 鈴枝, 斎藤 隆之, 飯野 潔, 中嶋 快雄
板橋 孝至, 高橋 英徳, 可児 浩, 宮腰 康樹
渡部 正夫*, 砂金 養一**

Development of Cleaning Equipment for Industrial Machinery Parts Using Steam Two-fluid Cleaning Technology

Takashi SAKAMURA, Suzue YONEDA, Takayuki SAITO
Kiyoshi IINO, Yoshio NAKAJIMA, Koji ITABASHI
Hidenori, TAKAHASHI, Hiroshi KANI, Yasuki MIYAKOSHI
Masao WATANABE*, Yoichi ISAGO**

抄 録

大型産業機械部品のメンテナンス企業から、内燃機関部品のススや電動機部品のコイル上に付着した塵埃などを主体とした汚れの洗浄工程に対し、作業工程の省力化と環境負荷軽減や将来的な人手不足への対応が強く要望されている。現状の洗浄作業工程では大量の有機溶剤が用いられたり金ブラシなどを用い手作業で行われたりしていることから、省力化可能な環境調和型洗浄技術の開発が必要とされている。

本研究では半導体用精密洗浄技術である蒸気二流体洗浄に着目し、産業用機械の洗浄用に対応させるため洗浄の諸条件、防錆対策、および高蒸気圧によるハイパワー化を検討した。その結果、高蒸気圧に対応した新型洗浄ノズルを3Dプリンターを用いて試作するとともに安全性と操作性に優れたグローブボックス型洗浄装置を開発した。

キーワード：蒸気二流体洗浄，液滴衝突，洗浄装置，産業機械，メンテナンス

Abstract

From the companies that maintains large industrial machine parts, there is a strong demand for labor saving of work processes, reduction of environmental load, and future labor shortage in the cleaning process cleaning soot of internal combustion engine and dust of electric motor parts. In the current cleaning process, a large amount of organic solvent is used, and it is conducted manually using a wire brush, etc. Therefore, it is necessary to develop an environment-friendly cleaning technology that can save labor.

In this research, it focused on steam two-fluid cleaning, which is a precision cleaning technology for semiconductors, and examined various cleaning conditions, corrosion inhibition, and high power by high vapor pressure stream in order to clean of industrial machinery. As a result, a new cleaning nozzle for high vapor pressure stream using a 3D printer was prototype, and a glove box type cleaning device with excellent safety and operability was developed.

KEY-WORDS : Steam Two-fluid Cleaning, Droplet Impact, Cleaning Equipment, Industrial Machinery, Maintenance

* 北海道大学, * Hokkaido University

** HUGパワー株式会社, ** HUG POWER Co., Ltd.

事業名：重点研究

課題名：大型産業機械部品のメンテナンスに向けた環境調和型洗浄技術の開発

1 はじめに

道民の暮らしや仕事を支える電力の発電機、船舶などの輸送機械で使用される電動機および内燃機関など、大型産業機械のメンテナンス関連企業は道内で170社以上あり、これらのメンテナンス現場において共通する重要な課題は洗浄工程の省力化と環境負荷の軽減である。特に内燃機関部品のススや電動機部品の塵埃の洗浄工程では、大量の有機溶剤が用いられ、ジェットタガネ、グラインダー、金ブラシなどを用い手作業で行われたりしており、作業環境の改善、将来的な人手不足への対応を図るため、省力化可能な環境調和型洗浄技術の開発が強く要望されている。

本研究では、いくつかの環境調和型の洗浄技術の中から半導体用精密洗浄技術である蒸気＋水二流体洗浄（以下、蒸気二流体洗浄）に着目し、メンテナンス現場で最も苦労しているスス汚れ、および電動機の塵埃汚れに対応するための洗浄の諸条件、洗浄時の防錆対策、および洗浄能力のハイパワー化や専用グローブボックス型の装置開発について報告する。

2 蒸気二流体洗浄のメカニズム

蒸気二流体洗浄は、半導体洗浄用としてデバイスの微細化や環境問題などから薬液などの使用量を減らし、かつ効果的な洗浄技術が必要とされていることから開発された。本手法は二流体スプレー洗浄に分類される洗浄手法であり、噴流の担い手として使用される窒素ガス等の高圧ガスを蒸気に変えた一成分系の二層流が特徴である。その装置構成を図1に示す。蒸気ボイラーにて蒸気を発生させ、これと水をノズル上部で混合させ洗浄対象物に噴射するものであり、洗浄においては、この高速に噴出される水滴が対象物と衝突する際に発生する衝撃波やキャビテーションなどが洗浄力として発揮すると考えられている¹⁾。

Sanadaらの研究では噴射される蒸気二流体中の水滴を計測した結果、直径：15～30 μm 、速度：150～300m/sであり²⁾、蒸気圧：0.1～0.2MPaの噴出で水滴を音速程度まで加速できることが判明している。また、この蒸気二流体を金属表面に噴射させると金属の壊食（エロージョン）が確認されている。しかし、空気＋水などの他の二流体の噴出時においては、水滴の径、および速度には有意な差は観察されないが

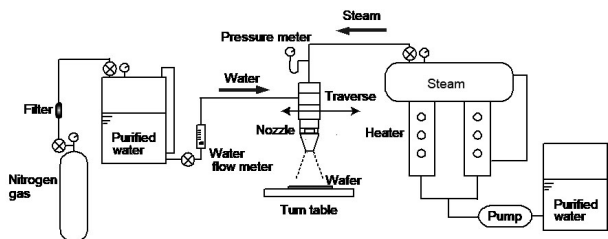


図1 蒸気二流体洗浄装置の模式図¹⁾

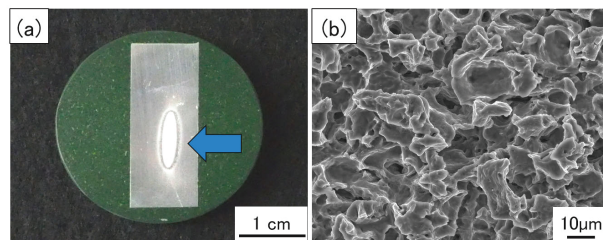


図2 蒸気二流体洗浄を噴射後のアルミニウム片、(a) 外観写真、(b) SEMによる圧痕部分の拡大像

金属表面の壊食の大きさには差が確認されており、蒸気二流体が最も壊食させることが確認されている²⁾。

図2(a)に樹脂埋めをした純アルミニウム片に対して2min蒸気二流体を噴射した試料の外観写真を示す。アルミニウム片上の蒸気二流体が噴射された箇所には、ノズル出口形状である楕円形の圧痕（図2(a)中矢印）が確認できる。この箇所をSEMにて拡大観察した結果を図2(b)に示す。同図より10 μm 程度の凹凸が連続した壊食が確認できる。これよりキャビテーション発生の可能性が認められた。

図3に液滴衝突時の密度分布および応力の時系列変化に関するシミュレーション結果を示す。図3(a)は密度分布の時系列変化をシミュレーションしており³⁾、図3(b)は応力の時系列変化を示している⁴⁾。真球状の径10 μm の水滴が速度200m/sで衝突する瞬間（ $t=20.0\text{ns}$ ）、接地点に高い応力が発生する。その応力が伝播し、 $t=27.7\text{ns}$ のときに水滴中心部に $-1.5 \times 10^8\text{Pa}$ の負の応力を、図3(a)において同様の箇所では水よりも低い密度である950 kg/m^3 を表しており、つまり気泡の発生と消滅が起きていることが言える。このシミュレーション結果からも高速の水滴が衝突する際にキャビテーションが発生することが示唆される。

その他に液滴衝突時の現象として図4中に示すようなサイドジェットと呼ばれる壁面に対して横方向に衝突速度よりも速い速度で流れる現象がある。このサイドジェットには図4(a)の飛び散る様なスプラッシュという形状と、(b)の壁面に広がる様なラメラという形状がある。この形状の形成には液体の物性や速度などの衝突条件が影響されるが、その他に周囲の気体の種類や圧力にも影響され、ラメラは真空中で起きやすいことが報告されている⁵⁾。図4ではエタノールを用い、チャンバー内を空気若しくはエタノール雰囲気満たし、チャンバー内で液を一滴、重力落下させ壁面に衝突する瞬間を高速カメラ撮影したものである。この2条件ではサイドジェットの形状が異なり、図4(a)ではスプラッシュ、図4(b)からはラメラが観察されている⁶⁾。

これらの結果より、雰囲気と液滴が同一成分であるときにラメラが形成していることから蒸気二流体洗浄中においてもラメラが形成され、この壁面に沿うように流れるサイドジェットが壁面に存在する汚れを除去し、洗浄効率の向上に寄与していると考えられる。

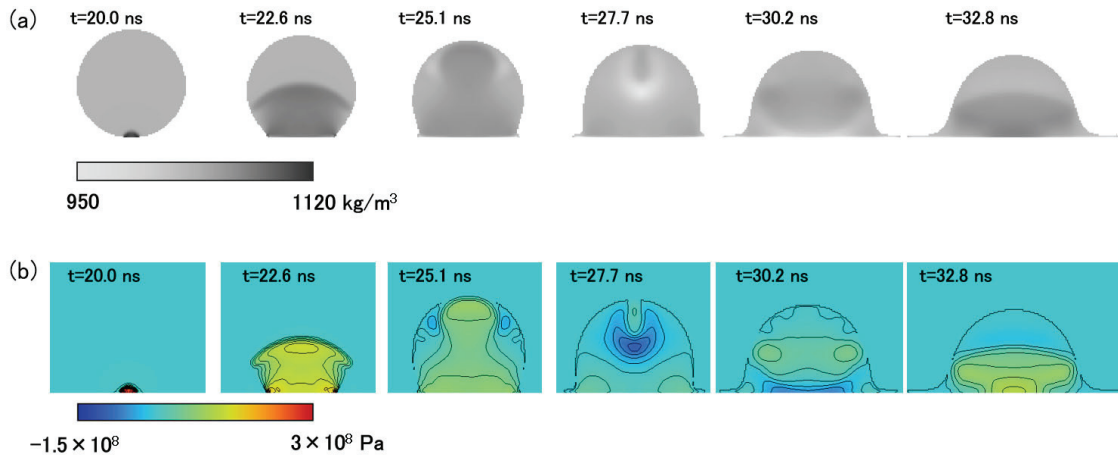


図3 液滴衝突のシミュレーション結果, 水滴直径: $10\mu\text{m}$, 速度: 200 m/s ,
 (a) 密度分布の時系列変化³⁾, (b) 応力の時系列変化⁴⁾

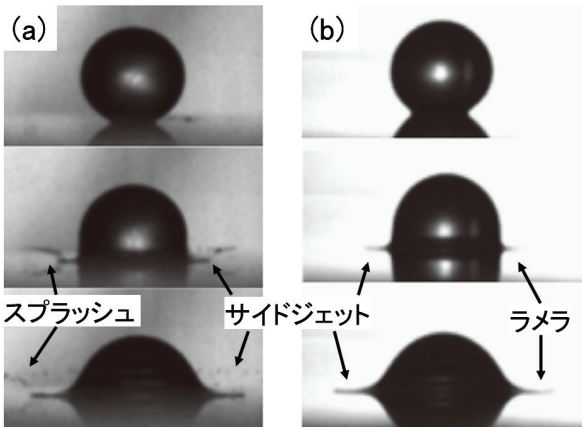


図4 雰囲気制御したチャンバー内でエタノール滴を衝突させた際のサイドジェットの形状観察, 速度: 3.0 m/s ,
 (a) 空气中, (b) エタノール雰囲気中⁶⁾

3 半導体洗浄用蒸気二流体洗浄装置での実験および結果

蒸気二流体洗浄の産業機械の汚れに対する洗浄能力を確認するために、自動車のガソリンエンジン、およびディーゼルエンジンのスス汚れと電動機のコイル上に付着した塵埃汚れを対象として、図5 (a) に示す半導体洗浄用の蒸気二流体洗浄装置を用いて洗浄能力を評価した。この洗浄装置は洗浄用ノズルがXY軸テーブルに取り付けられており、一定の速度でノズルを移動させながら洗浄を行うことができる構成となっている。本装置により汚れの対象物に対してライン状に洗浄を行った。また、汚れの分析としてSEM-EDSによる組成分析を行った。

ガソリンエンジンのピストンヘッドの汚れに対しては、蒸気をゲージ圧力: 0.25MPa , 移動速度: $1.0, 2.5\text{mm/s}$ の2条件洗浄し、移動速度の影響を調べた。洗浄後のピストンヘッ

ドの外観写真を図5 (b) に示す。洗浄箇所を図中に矢印で示している。目視観察では移動速度: 2.5mm/s のときは洗浄箇所上に汚れが残っており、 1.0mm/s のときは大部分の汚れが除去されていることを確認した。このことから 1.0mm/s 以下の速度で洗浄すれば十分に汚れを除去できることを確認した。ディーゼルエンジンに対しては、移動速度: 1.0mm/s , 圧力: $0.2, 0.3\text{ MPa}$ の2条件で洗浄し、蒸気圧の影響を確認した。洗浄後のピストンヘッドの外観写真を図5 (c) に示す。2条件ともに洗浄した後はピストンヘッド端の部分からは汚れが除去され基材の金属色が確認できる。しかし、ピス

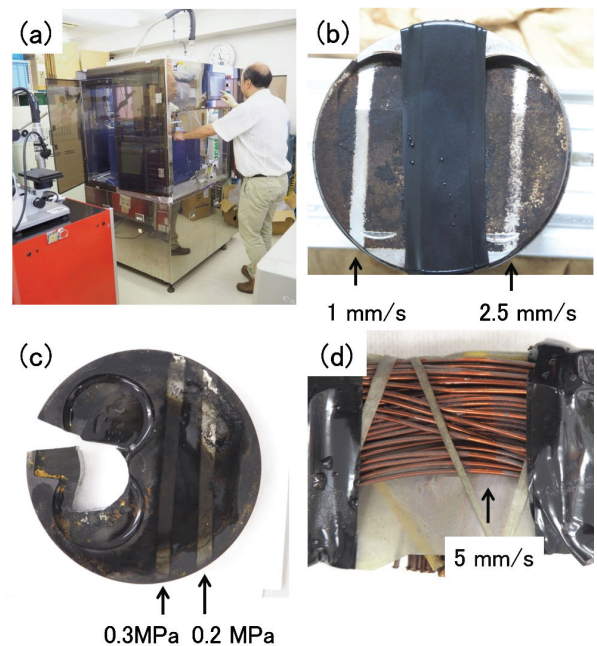


図5 半導体洗浄用の蒸気二流体洗浄装置, および洗浄後の試験片, (a) 装置の外観写真, (b) ガソリンエンジンのピストンヘッド, (c) ディーゼルエンジンのピストンヘッド, (d) 電動機のコイル

トンヘッド中央部は黒い箇所が残っている。そこで、この黒い箇所、およびスス汚れを対象にSEM-EDSを用いた組成分析を行った。スス汚れの成分の大部分は炭素(C)であるが、他に少量の酸素(O)、アルミニウム(Al)、硫黄(S)、鉄(Fe)が検出された。一方で、ピストンヘッド上の黒い汚れからは酸素(O)、アルミニウム(Al)、硫黄(S)、とケイ素(Si)が検出されたことから、洗浄後に残った黒い箇所はピストンヘッドのアルミニウム基材の腐食生成物であることが確認された。したがって、洗浄後に残った黒い箇所もスス汚れは洗浄されていることが認められた。次にコイル上の塵埃汚れに対しても同様に洗浄を圧力：0.2MPa、移動速度：5 mm/sの条件で行った。洗浄後のコイルの外観写真を図5(d)に示す。コイルは装置に入るように切断してある。洗浄箇所は塵埃汚れが除去され、コイルのエナメル線の塗装には傷がないことを確認した。図2に示したアルミニウム片に対しては壊食を及ぼしたが、移動速度を上げ洗浄時間を短くすることで基材のコイルにダメージを与えず、目的の汚れだけを除去できることを確認した。

これらの結果より、蒸気二流体洗浄が産業機械の汚れに対して有効であるという知見を得た。しかし、多品種、多形状である産業機械に対しての洗浄のしやすさ、および洗浄時間の短縮、防錆対策などの課題が見つかった。

4 汚れの分析および模擬汚れ試験片の作製

3章では実機の汚れを用い実験を行ったが、実験を多く行っていく上では同じ仕様の供試材を大量に要する。そこで汚れを模倣した試験片の作製を検討した。まず、大型船舶(フェリー)の内燃機関部品からC重油由来のスス汚れや電動機のコイル上の塵埃汚れを採取し分析を行った。分析機器はSEM-EDS、ラマン分光分析、XRD、ガスクロマトグラフ

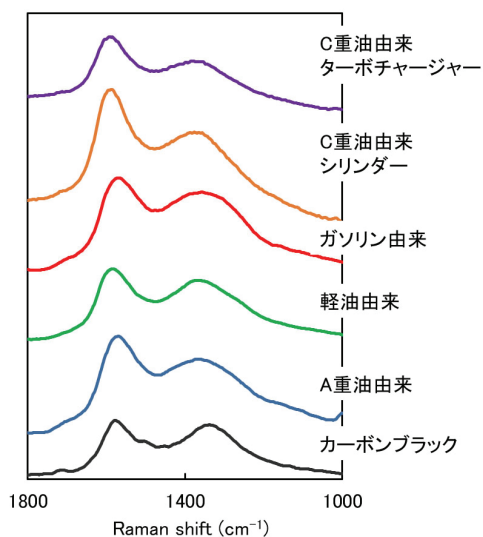
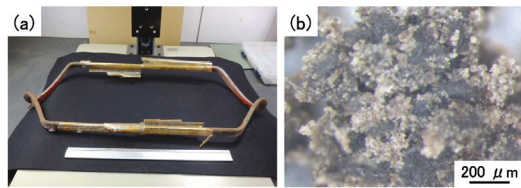


図6 各燃料由来のスス汚れのラマンスペクトル



コイル全体写真 塵埃付着部拡大写真

図7 電動機のコイル (a) 全体の外観写真、(b) 付着していた塵埃の実体顕微鏡写真

分析(GC/MS)、TG/DTAを用いた。

C重油由来のスス汚れに対してEDS分析を行った結果、その主成分は炭素(C)が主体であり、その他に硫黄(S)などが検出された。また、ラマン分光分析より炭素(C)の化学状態を調べた。その際のラマンスペクトルを図6に示す。図6では大型船舶の内燃機関部品のターボチャージャー、およびシリンダー部から採取したC重油由来のスス汚れを示す。また、小型船舶の内燃機関部品から採取したA重油由来のスス汚れや3章の洗浄実験に使用したガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンのスス汚れ、比較材としてのカーボンブラックのラマンスペクトルも合わせて示している。ラマンスペクトルよりすべてのスス汚れはカーボンブラックに近い状態であることが確認された。さらにTG/TDAを用い、C重油由来のスス汚れを熱分解させた結果、分解後の残渣質量から汚れ中のススの割合が50wt%程度であった。GC/MSではC重油とスス汚れの両方を分析した結果、スス汚れからはC重油と比較して揮発成分が少なく、高分子量の成分が多く存在していることを把握した。

電動機のコイルの一部の外観写真を図7(a)に示す。コイル上には図7(b)に示すような黒い粒子が確認できる。この黒い粒子はコイル上に軸受けグリスによって付着していることが確認された。この粒子を採取し分析した結果、EDS分析からは炭素(C)、酸素(O)、カルシウム(Ca)が主体であり、XRD分析からは炭酸カルシウムが検出された。炭酸カルシウムは製紙工場で使用されている填料が浮遊し排気用電動機へと取り込まれ付着したと考えられる。

これらの結果をもとに、洗浄実験で用いる模擬汚れ試験片を製作した。製作条件としてC重油スス模擬汚れ試験片についてはC重油とカーボンブラックとの混合比、混合後の加熱

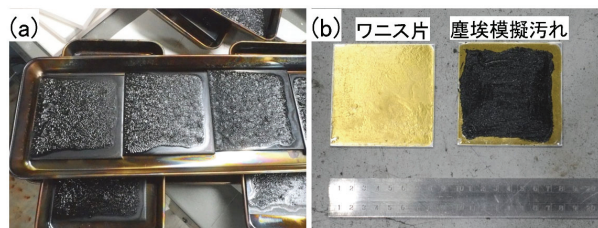


図8 各模擬汚れ試験片の外観写真 (a) C重油スス模擬汚れ試験片、(b) 基材のワニス片と塵埃模擬汚れ

焼成条件を検討した。その結果、C重油とカーボンブラックを重量比9：1で混合したものを80mm角の鋼板に2g塗布し、炉にて250℃、1h乾燥させることで揮発成分を蒸発させ強固な固着状態となるC重油スス模擬汚れ試験片の製作条件を見出した(図8(a))。

塵埃模擬汚れ試験片の製作については、はじめに180℃に加熱した80mm角の鋼板に対してワニス(3ml)を均一に塗布し予備硬化をさせる。これを炉にて180℃、3h加熱し硬化させることでワニス片とし、冷却後その上に軸受け用グリス、炭酸カルシウムと汚れの視認性を高めるために黒色顔料としてカーボンブラックを重量比5：1：1で混合したものを0.5g塗布することで塵埃模擬汚れ試験片を製作した(図8(b))。

5 鋳鉄製部品などへの防錆対策

産業用機械の洗浄では、鋳鉄などの腐食しやすい機械部品を対象としているため、実際のメンテナンス現場においても腐食には細心の注意が払われている。各機械部品を水洗した後に直ちに乾燥、オイル浸漬し防錆対策をしている。そこで防錆対策として、洗浄液にアルカリ性の水溶液に注目し、ここでは防錆作用の有無を浸漬試験により評価した。水溶液としては純水、アルカリ性電解水(レドックステクノロジー製、pH 11.4)、およびメンテナンス現場で使用されているアルカリ性洗浄水(北海精機製、北海スーパー400倍希釈液、pH 12.3)に対して、FC200とFCD490の2種類の鋳鉄を24h、20℃にて浸漬試験を行った。浸漬後の試験片の外観写真を図9に示す。アルカリ性洗浄水に浸漬させた試験片のみ変化が見られず、他の試験片からは錆の発生が確認された。これより防錆にはアルカリ性洗浄水が有効であることが確認された。

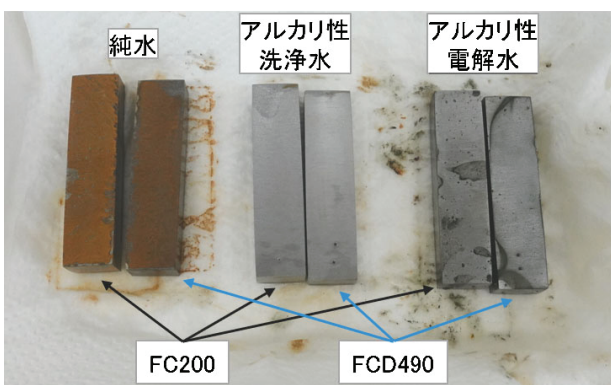


図9 浸漬試験後の各鋳鉄試験片の外観写真

6 ハイパワー蒸気二流体洗浄装置の開発

6.1 高蒸気圧二流体洗浄での実験および結果

3章では半導体用洗浄装置を用い低蒸気圧下での洗浄実験を行ったが、洗浄速度の向上や強固な重油由来のスス汚れの

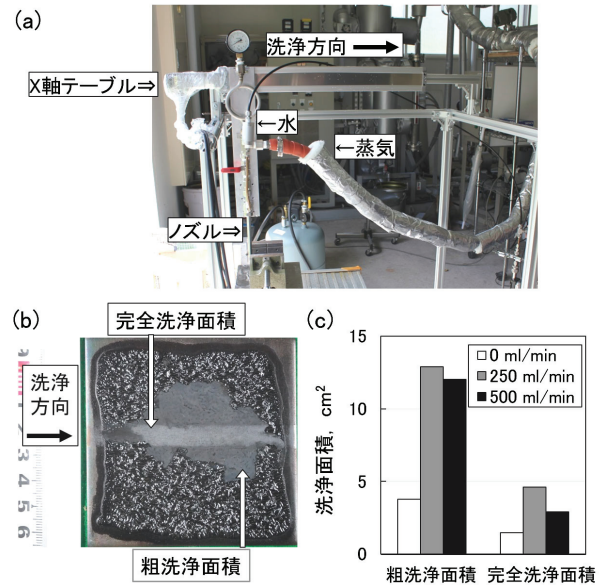


図10 自動X軸テーブルを用いた洗浄実験、(a)装置の外観写真、(b)洗浄後の模擬汚れ試験片の外観写真、(c)各水量における洗浄面積のグラフ

洗浄に対応させるため、蒸気を0.5~1.0MPaに高圧化させて蒸気二流体の洗浄実験を行った。図10(a)に蒸気二流体洗浄装置の外観写真を示す。実験用蒸気ボイラー(日本電熱製、EB-10、蒸気圧：Max.4.0 MPa)と蒸気二流体用ノズルを接続し高蒸気圧仕様の装置を試作した。また、X軸テーブルにノズルを取り付けC重油スス模擬汚れ試験片に対して洗浄実験を行った。実験条件は蒸気のゲージ圧力：0.5、1.0MPa、ノズル先端と汚れ試験片との距離は10mm以下とし、蒸気に対しての添加水量：0、250、500ml/minと変えて、水の添加量と洗浄力の関係を調査した。洗浄力の評価はX軸テーブルを用い0.1~1.0mm/secの速度でノズルを走査しライン状の洗浄を行い、洗浄後の汚れの除去面積から評価した。さらに高速度カメラで蒸気二流体の噴射の様子の撮影を行った。

ゲージ圧力：0.5MPaで洗浄実験後の試験片の外観写真を図10(b)に示す。洗浄箇所は金属素地が現れ、その周辺部では汚れの剥離がみられるが、素地上に薄く汚れが残っている。ここで金属素地まで達した面積を完全洗浄面積、周辺の薄い汚れが残存している箇所を含むすべての箇所を粗洗浄面積として、添加水量と洗浄面積の関係を比較したグラフを図10(c)に示す。図10(c)より添加水量：250ml/minのとき双方の洗浄面積において高い値を示し、洗浄力が高いことが分かる。

添加水量が洗浄面積に影響した原因を調査するために、高速度カメラを用い蒸気二流体の噴出の様子を撮影した。図11にゲージ圧力：0.5MPa、添加水量：250、500ml/minのときの高速度撮影の写真を示す。写真は50,000fpsで撮影した動画から抜粋した連続写真である。写真上部にあるノズルから蒸気二流体が噴出していることが黒い影として観察できる。その流体の噴出方向を図中に実線の矢印で示している。洗浄

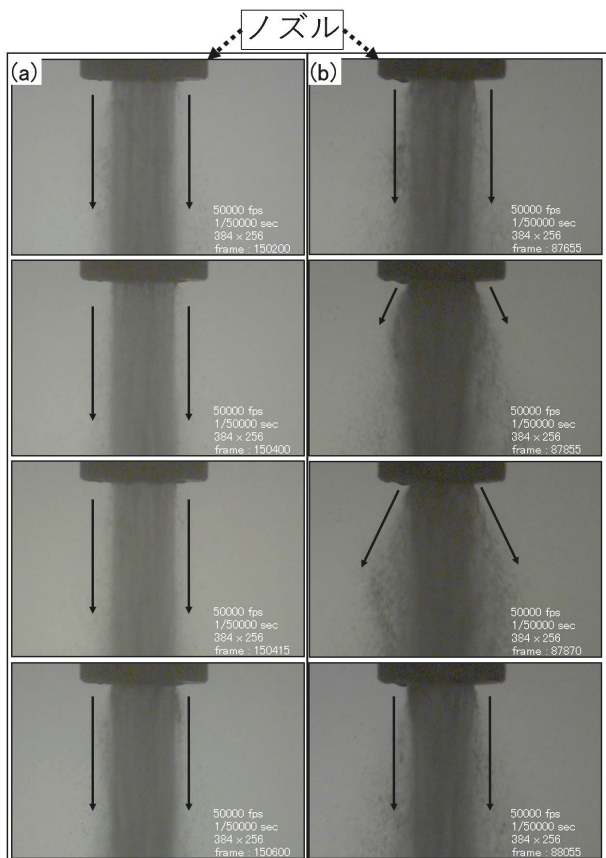


図 11 高速度カメラ撮影による蒸気二流体の噴出の様子，(a) 250ml/min，(b) 500ml/min

面積が最も大きかった添加水量：250ml/minのときは、流体が直線的に噴出して、それが連続的に安定していることが観察される。しかし、500ml/minのときは直線的な噴出が安定せず、断続的に発散するように噴出していることが確認された。このように添加水量が多くなることで噴出が不安定になることで洗浄面積に影響したと考えられる。また、同様にゲージ圧力：1.0MPaでも実験を行ったが、添加水量：500ml/minのとき洗浄面積が高い値を示す結果となった。

次にX軸テーブルの移動速度と洗浄面積との関係を調査した。ゲージ圧力：0.5MPa，添加水量：250ml/minとし、移動速度：0.1，0.5，および1.0mm/sの条件で行った結果を図12(a)に示す。図12(a)より移動速度が速くなると洗浄面積が小さくなるのがわかる。つまり洗浄に時間をかけるほど、より汚れを除去できることが言える。同図には移動速度：1.0mm/sで同じ箇所を10回連続で洗浄を行った結果も合わせて示した。ここで、移動速度：0.1mm/sで1回と移動速度：1.0mm/sで10回、この2つの洗浄面積を比較すると完全洗浄面積に関しては大きな差が見られない。このことからノズルの移動速度でなく、洗浄にかけた時間と洗浄面積との間に相関があることがわかる。次にゲージ圧力：1.0MPa，添加水量：500ml/minで洗浄実験を行ったときの洗浄面積を図12(b)に示す。こちらの結果では、移動速度：0.1~1.0

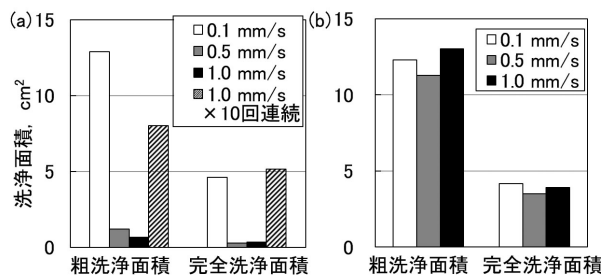


図 12 X 軸テーブルの移動速度と各洗浄面積の関係のグラフ，(a) 圧力：0.5MPa，(b) 圧力：1.0MPa

mm/sの間で同等の洗浄面積を得られた。ゲージ圧力：0.5MPa，移動速度：0.1mm/sのときとゲージ圧力：1.0MPa，移動速度：1.0mm/sのときを比べると、洗浄面積に顕著な差がないことから、圧力を2倍にすると洗浄速度を10倍程度まで速くできることがわかった。

6.2 3Dプリンターを用いた新型ノズルの試作

6.1節の移動速度と洗浄面積の結果から、蒸気二流体洗浄にて大型産業機械を洗浄するためには、よりハイパワー化させる必要がある。そこでまずボイラーの蒸気圧を1.0MPa以上に上げることを検討したが、市販の蒸気ボイラーは最高蒸気圧1.0MPaのものが大半であり、そのため、市販の蒸気配管なども1.0MPaまでのものが多いことから蒸気圧をさらに上げることは現実的ではないと考えた。ここで二流体洗浄はノズルの入口直前で蒸気と水を混合しノズル内で流速を加速させ噴射させるため、ノズル形状の違いによって加速が異なり、洗浄力が変化することがわかっている。6.1節では、従来の精密洗浄用二流体ノズルを使用して実験を行ってきたことから、0.5MPa以上の蒸気圧に対応したノズルの設計をすることでハイパワー化ができると考えた。そこでノズルの長さ、内径、内部のテーパ角度の検討を行い、3Dプリンターを用い複数のノズル形状を設計・試作を行った。3Dプリンターを用いて内部テーパを変えて試作したノズルの例を図13(a)に示す。樹脂だけでは蒸気の圧力に対して強度不足が懸念されたため、圧力のかかる箇所には金属部品を樹脂との接合には耐熱性のパテを使用した。ノズルの評価は噴出

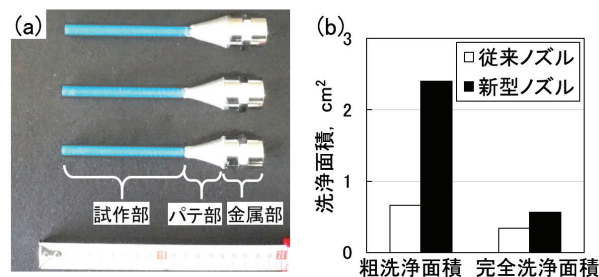


図 13 3D プリンターにて試作した新型ノズル，(a) ノズルの外観写真，(b) 洗浄面積のグラフ

する蒸気温度測定や蒸気流量計測などを行い、これらの結果をもとに二流体の噴出が最も加速する形状を選定した。図13(b)にその3Dプリンター製の新型ノズルをX軸テーブルに取り付け洗浄実験の結果を示す。ゲージ圧：0.5MPa、添加水量：250ml/min、移動速度：1.0mm/sの条件での洗浄実験を行った結果図12(a)の結果と比較して粗洗浄面積が3倍以上となった。

6.3 グローブボックス型洗浄装置の開発

図5(a)の半導体洗浄用の装置では平面状の洗浄物を対象としていたため、XY軸テーブルによる自動送り機構での全自動洗浄機が開発されてきたが、産業用機械においてはピストンヘッド、バルブやターボチャージャーなどの多品種、多形状を洗浄しなければならない。そこで二流体ノズルをグリップに組み込んだハンドガンを考案し、対象が複雑形状であっても洗浄できるようにした。図14(a)に3Dプリンターを用いて試作したグリップとノズルを合わせたハンドガンの外観写真を示す。グリップには蒸気二流体を噴出させるための電磁バルブの開閉スイッチを取り付けている。また、ハンドガンによる蒸気二流体洗浄を行う上では安全性と作業性の問題があげられ、開放状態での洗浄では蒸気や洗浄液などが作業員に対して飛び散り、除去された汚れにより作業現場が汚染されるなどの課題が生じることがわかった。そこで、安全性と作業性の観点からグローブボックス型の洗浄装置を考案した。図14(b)に装置の外観写真を示す。図14(b)中に示すように装置上部に蒸気二流体の噴出用電磁バルブを設置し、図14(c)に示すようにグローブボックス内上部からハンドガンが吊るされている構造である。グローブボックスの窓には曇り防止のため親水フィルムを貼り、背面にはファンを取り付け、蒸気を逃がすことで作業中の視覚が良好になるように設

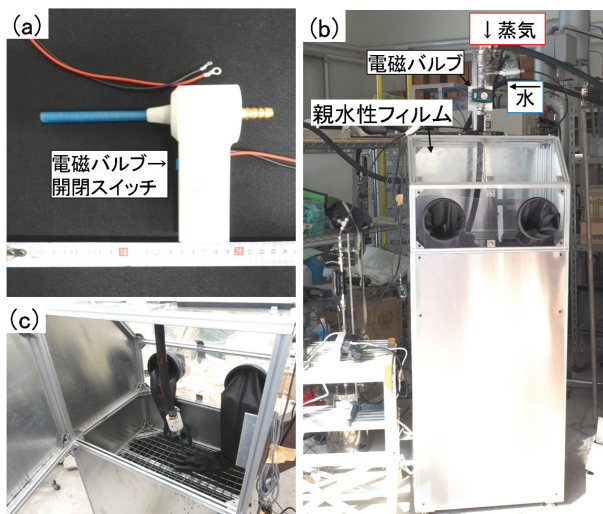


図14 グローブボックス型蒸気二流体洗浄装置

- (a) 3Dプリンターにて試作したハンドガン
- (b) グローブボックスの外観写真
- (c) 装置内部とハンドガン

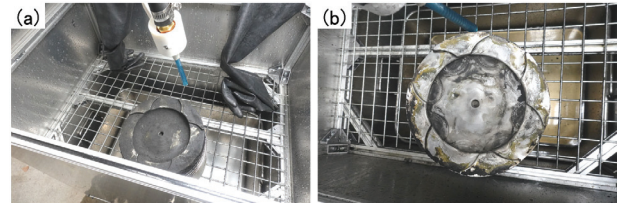


図15 グローブボックス型洗浄装置にて洗浄前後のピストンヘッドの外観写真、(a) 洗浄前、(b) 洗浄後

計した。

このグローブボックス型洗浄装置の安全性と作業性の確認実験を行った。図15(a)に示すように発電用に使用されるA重油用の中型のディーゼルエンジンピストンを洗浄の対象として用いた。洗浄実験では視界も良好に洗浄ができ、ピストンの複雑な形状に追従した洗浄が行え操作性に優れており、また汚れの飛び散りや蒸気を浴びることなく安全に洗浄作業を行えることを確認した。4min洗浄後のピストンの外観写真を図15(b)に示す。洗浄後のピストンヘッド表面を実体顕微鏡で観察すると洗浄箇所は汚れが除去され金属素地が確認でき、基材のアルミニウム合金には壊食がないことを確認した。

また、模擬汚れ試験片を用いた洗浄速度の実験も合わせて行った。塵埃模擬汚れ試験片の洗浄実験は蒸気のゲージ圧：0.5MPa、添加水量：250ml/minおよび1.0MPa、500ml/minの2条件で行った。図16(a)に1.0MPa、500ml/minの条件で洗浄後の試験片の外観写真を示す。塵埃模擬汚れが除去されており、下地のワニスを確認できた。0.5MPa、250ml/minの条件でも洗浄時間が長くなるものの同様に下地のワニスを確認できた。試験片1枚あたりの洗浄時間は0.5MPaのとき平均123sec、1.0MPaのとき平均13secであった。蒸気圧を2倍にすることで図12のとき同様に洗浄時間が10倍速くなる結果を得た。C重油スス模擬汚れ試験片に対しては、ゲージ

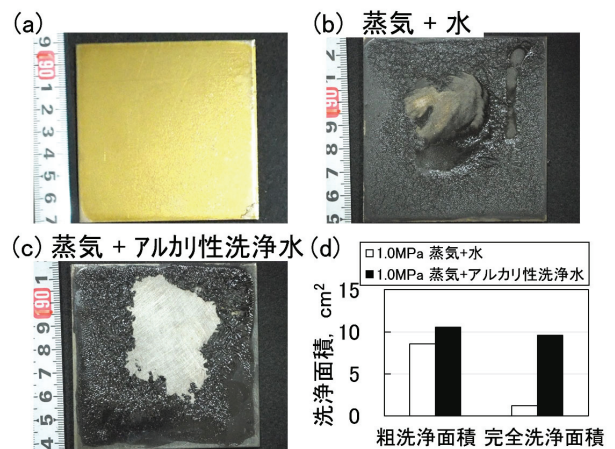


図16 模擬汚れ試験片を用いた洗浄速度の実験

- (a) 洗浄後の塵埃模擬汚れ試験片の外観写真
- (b) (c) 各洗浄条件で洗浄後のC重油スス模擬汚れ試験片の外観写真
- (d) 洗浄面積のグラフ

圧力：1.0MPa、添加水量：500ml/minの条件で水、およびアルカリ性洗浄水を添加し比較した。グローブボックスにより、飛散するアルカリ性洗浄水を浴びることなく安全に洗浄をすることができた。各洗浄条件にて150sec洗浄後の試験片の外観写真を図16(b)(c)に、洗浄面積のグラフを図16(d)に示す。水とアルカリ性洗浄水の洗浄面積を比較すると、アルカリ性洗浄水のときの洗浄面積は粗洗浄面積で1.2倍、完全洗浄面積8倍に拡大した。これは蒸気二流体が粗洗浄である固い汚れを除去し、さらにアルカリ性洗浄水の界面活性材の効果が働き素地上に薄く汚れが残った汚れを除去したと考えられる。このことから添加する水を洗浄水に変えることで洗浄面積が拡大する、つまり洗浄力が上がる結果を得た。

これらの結果より、グローブボックス型洗浄装置の安全性と作業性が確認され、実機ピストンヘッドの洗浄実験においてピストンの汚れが除去されていることから蒸気二流体洗浄を産業機械部品の洗浄に適用できる可能性を得た。

7 まとめ

本研究では環境調和型の洗浄技術の中から、半導体用精密洗浄技術である蒸気二流体洗浄に着目し、メンテナンス現場から強く求められているスス汚れ、塵埃汚れに対応するための洗浄の諸条件、防錆対策、および高蒸気圧化によるハイパワー化を検討し、専用グローブボックス型洗浄装置の開発を行い、以下の結果を得た。

- 1) アルミニウム片に蒸気二流体を噴射すると喰食が観察され、また蒸気二流体の液滴衝突時の応力と密度のシミュレーション結果からもキャビテーションの発生の可能性が認められた。
- 2) 既存の半導体洗浄用の蒸気二流体洗浄装置を用いて、ガソリンエンジンとディーゼルエンジンのピストンヘッド汚れ、および電動機コイルの塵埃汚れに対する洗浄能力を評価した。その結果、蒸気二流体洗浄が産業機械の汚れに対して有効であるという知見を得たが、多品種、多形状である産業機械に対しての洗浄のしやすさ、および洗浄時間の短縮、防錆対策などの課題が判明した。
- 3) C重油由来のスス汚れや塵埃汚れの分析結果をもとに模擬汚れ試験片の製作方法を考案した。
- 4) 鋳鉄への防錆対策としてはアルカリ性洗浄水が有効であることが確認された。
- 5) 蒸気圧を2倍にすると洗浄速度は10倍程度まで速くなり、洗浄速度の向上には高蒸気圧化が有効であることが確認された。
- 6) 添加水量には最適値があることが洗浄面積から確認された。高速度カメラ撮影による撮影から最適水量のときは安定的に蒸気二流体が噴射されている様子が観察された。
- 7) 3Dプリンターを用い新型ノズルの設計、試作を行い、従

来ノズルと比較して粗洗浄面積が3倍となる性能を得た。

- 8) 多品種、多形状に対応するためハンドガン、および安全性と作業性の観点からグローブボックス型洗浄装置を開発した。

今後はメンテナンス現場での利用や洗浄効果の確認をして、装置の改良や他の汚れへの適用について更なる研究開発を進める予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、静岡大学 真田俊之准教授には多くの助言と実験の協力を頂きました。

また、本研究で使用した電子顕微鏡は公益社団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。

ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 真田俊之・齋藤隆之・林田充司他：蒸気と水の混合噴流による洗浄技術の開発、噴流工学, vol.24-3, pp.4-10, (2007).
- 2) T. Sanada・M. Watanabe・M. Shirota et al. : Impact of High-speed steam-droplet spray on solid surface, Fluid Dynamics Research, vol.40, pp.627-636, (2008)
- 3) 渡部正夫, 真田俊之, 山瀬雅男：固体表面への高速液滴衝突過程の数値解析(キャビテーション発生についての検討), 日本機械学会論文集B, 74巻744号, pp.1717-1724, (2008)
- 4) M. Watanabe・T. Sanada・M. Shirota et al. : Thermofluid dynamic study of high speed liquid droplet impacts on solid surface, The 1st International Colloquium on Dynamics, Physics and Chemistry of Bubbles and Gas-Liquid Boundaries, (2007).
- 5) 櫻井泰貴, 小林一道, 藤川秀俊他：固体表面に衝突する単一液滴変形過程の観察(液滴物性, 対象物表面粗さおよび周囲気体圧力の影響), 混相流, 26巻2号, pp.164-171, (2012)
- 6) 真田俊之, 渡部正夫：二流体ジェット法における気体種の影響, エアロゾル研究, 29巻4号, pp.236-240, (2014)

3D積層造形法による金属複合材の製作

戸羽 篤也, 鈴木 逸人, 平野 繁樹*

Production of a Metallic Composite Material Used by Additive Manufacturing.

Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI, Shigeki HIRANO*

抄 録

金属粉末積層造形において脆性金属材料を対象とする場合、造形時の溶融・凝固で生じる熱応力による亀裂や崩壊などが発生し易く、積層造形が困難である。筆者らは、脆性金属粉末と低融点金属粉末を混合した金属混合粉末に対してレーザーを照射し、低融点金属のみを溶融させ、脆性金属材料と結合金属の複合材を製作する方法を考案した。本報では、主金属にMn-Fe系合金、結合金属にSnを使用した場合について検討を行った。Mn-Fe系合金粉末にSn粉末を10wt%混合させた場合、エネルギー密度 $10\text{J}/\text{mm}^3$ 以上、レーザー集光径 0.2mm 以下で造形可能となることがわかった。また、結合金属の配合比を変えて製作した造形物の主金属、結合金属、空隙の容積占有率を計測した結果、結合金属の配合量に応じて空隙率が減少することがわかった。

キーワード：金属3D造形, 付加加工, 複合粉末, 脆性金属, 結合金属

Abstract

In metal powder additive manufacturing of brittle metallic materials, it was difficult to perform additive manufacturing due to cracks and fractures caused by local rapid heating and cooling during modeling. The new method of three-dimensional modeling was developed by using a mixed powder of brittle metal powder and low melting point metal powder to melt only the low melting point metal to produce a composite material. In this paper, the mixed powder with Mn-Fe alloy as the main metal and Sn as the binder metal was examined by the laser beam powder bed fusion. In 10wt% of Sn powder was mixed with Mn-Fe alloy powder, it was possible to make a shape with the laser conditions in energy density of $10\text{J}/\text{mm}^3$ or more and a laser spot diameter of 0.2mm or less. In addition, the specimen porosity of the mixed powder with Sn powder of 10, 20 and 30wt% was measured. As a result, the porosity decreases according to the amount of the binder metal compounded.

KEY-WORDS : Metal 3D-Printing, Additive Manufacturing (AM), Composite Powder, Brittle Metal Material, Binder Metal

1. はじめに

金属三次元積層造形法（以下「金属3D造形」という）は、三次元形状データから複雑な形状や内部構造をもつ金属製品の製作を可能とする新たな金属加工法としてその利活用が注目されている¹⁻³⁾。その造形機構は、金属の微粉末にレーザー光などの熱線を照射して溶融し、直下の既造形材と溶接して所望の立体形状になるように堆積する方式である。したがって、金属3D造形では、造形時に急激な加熱と冷却が繰り返されることで、造形物内部に熱応力が残留したり、その応力

による変形が生じたりしやすい。

造形対象とする金属材料には、マルエージング鋼やステンレス鋼など鉄鋼系合金のほか、ニッケル基合金、チタン系合金、アルミ基合金、銅合金などの非鉄金属などが用いられる。このほか、粉末として供給可能な金属であれば造形に供することが可能で、製品に付与したい機能性に合わせて材料を自由に選択することができる。

しかし、材質が硬く脆い金属や、熱影響を受けて性質が変化する金属は、その造形機構の特徴から金属3D造形を適用しにくい。筆者らは、このような難造形金属材料の粉末に低

*近畿大学, *Kindai University, Faculty of Science and Engineering

事業名：経常研究

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（平成29～令和元年度）

融点の結合金属粉末を混合した複合粉末を用いることにより、結合金属のみを溶融して目的の金属粉末どうしを固着する造形手法を考案した⁴⁾。

本報は、この金属3D造形手法による複合金属部材製作への適用可能性を検証するため、具体的な材料を選定して造形試験を実施したので、そこで得た技術知見を報告する。

2. 複合金属粉末積層造形法

金属粉末を用いる3D造形法は、粉末床溶融結合（PBF; Powder Bed Fusion）法と指向性エネルギー堆積（DED; Direct Energy Deposition）法の2つに大別され、これらは用途や製作目的に応じて使い分けられる。構造的に複雑で精細な金属部材を製作する場合は、前者のPBF方式が優位である。

PBF方式では、金属粉末を水平に敷き、その上からレーザー光などの熱線を所定位置に照射し、その最上層の粉末と下層の既造形材表面を溶融して溶接することを繰り返して立体形状を造形する。このとき、対象とする金属材料が脆い性質の場合、造形時の急激な加熱と冷却で発生する大きな熱応力によって、造形中に亀裂が生じたり、崩壊してその後の造形が不能になったりするため、通常の積層造形方法では立体を作り上げることが困難である。

この種の金属材料で、均質かつ緻密組織であることを必要とせず、その金属特有の機能性を活かした立体構造物の製作が目的であれば、必ずしも単一材質金属粉末の溶融と凝固による造形ではなく、結合材を用いて粉末どうしを固着させることで造形を可能とする方法が考えられる。我々は、その具体的な手法として、目的の金属（以下「主金属」という）粉末より融点の低い金属粉末を結合材（バインダ）として混合した複合粉末による造形方法を考案した⁴⁾。

通常の金属3D造形は、レーザー光等の熱線を照射して造

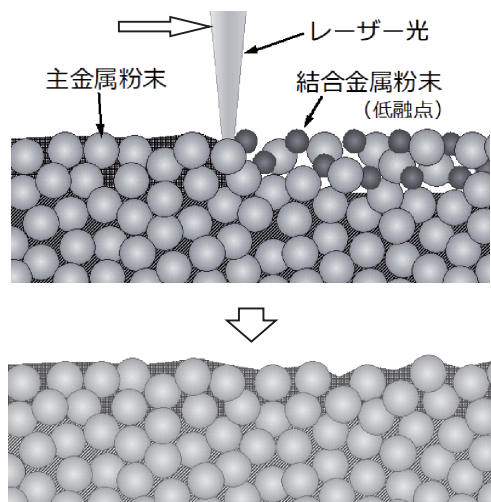


図1 複合金属粉末積層造形法の模式図

形対象とする金属粉末を溶融し、既造形材表面上に溶接・堆積して緻密な組織を形成する。これに対して考案した複合金属粉末3D造形法は、図1に示すように、主金属粉末に低融点の結合金属粉末を一定量混合して既造形層上面に敷き詰め、与熱量を制御したレーザー光照射により、結合金属粉末のみを溶融して、主金属粉末間に浸透・結合する。これにより、造形時の急激な加熱・冷却によって生じる熱応力を緩和し、造形中に崩壊することなく立体を製作することができる。また、主金属のみで造形する場合に比較して与熱量を抑えられるので、造形中の昇温で変質するような材料に対して、その影響を小さくすることができる。

3. 試験方法

3.1 供試材

試験に供した金属材料は、磁気熱量効果⁵⁾をもつマンガン-鉄系合金（以下「Mn-Fe合金」という）を選定した⁶⁾。この材料は、硬質で脆い材質のため、この材料単独で積層造形すると造形時の加熱・冷却で生じる熱応力で造形材に亀裂が発生し、図2に示すように、約1mmの造形高さに至る前に崩壊して立体を製作することができなかった。また、この材料の組成を変えることで磁気熱量効果が最も大きく作用する温度を制御するが、造形時に大きな熱影響を受けるとこの温度が遷移し、設計どおりの機能が得られなくなる。

これらの特徴を有するMn-Fe合金で複雑形状の熱交換部品を製作する試験において、この材料単独では通常の金属3D造形法で造形できないことが判明したため、複合粉末造形法の適用を試みることにした。

結合金属には、当初、熱伝導性、耐熱温度、強度などの観点からアルミ合金粉末を選んで造形試験を行ったが、造形中に炭素鋼製造形基板の鉄とアルミニウムとの化合物が生成して造形動作に不具合を生じたため、これを採用できなかった。次に、低融点に着目して純スズ（Sn）粉末を結合金属材料に選定して造形試験を行ったところ、造形中の不具合も生じず、造形材断面組織観察でも良好な結合性を確認したため、本研究では、純スズを結合金属材料として実験に供した。

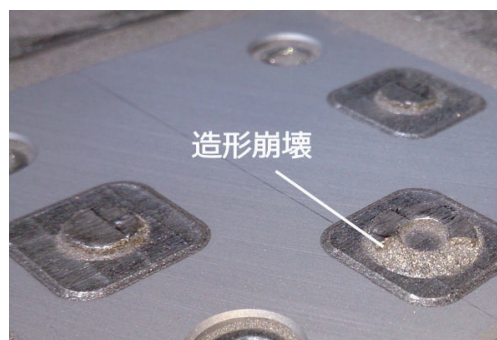


図2 Mn-Fe系合金粉末による造形試験例

3.2 造形試験片の製作

金属3D造形による試験片の製作は、金属粉末積層造形装置(LUMEX Avance-25/㈱松浦機械製作所製)を使用した。図3にその外観を示す。造形試験片は、125mm×125mm×厚さ10mmの炭素鋼製基板の上に、縦横15mm間隔で7列、高さ約3mmに造形した。ただし、装置の造形テーブルに基板を固定するための4隅のネジ穴部には試験片を造形できないので、外周4辺の列は5個ずつの試験片のみとした(図4)。試験片の形状および寸法は図5に示すとおりとし、左半分を塊状造形部、右半分を描画形状部とした。実際の造形では、造形中のスキージングブレードで最上面の金属粉末を水平に



図3 金属粉末積層造形装置の外観
(㈱松浦機械製作所製 LUMEX Avance-25)

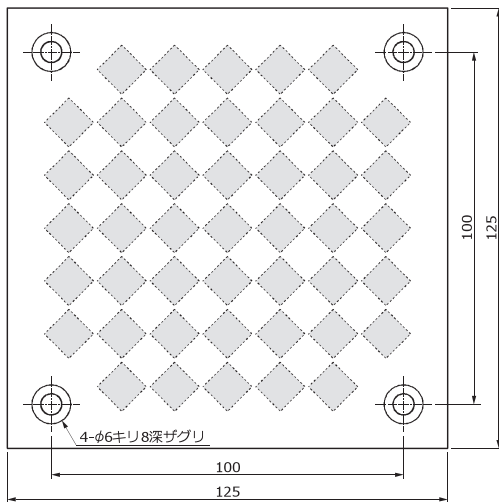


図4 試験に供する鋼製基板(ベースプレート)の寸法

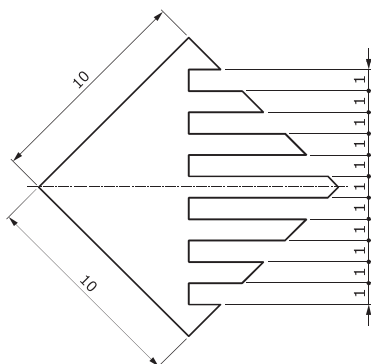


図5 試験片の形状と寸法

敷きながら際に既造形物を破損しないように、上面から見て時計回りに15°傾けて試験片を配置した。

造形試験に用いるレーザー光照射条件は、これまでの金属粉末造形試験等を参考に、レーザー出力 P [W]、レーザー集光径 D [mm]、レーザー光走査速度 v [mm/s]および走査間隔 e [mm]を適宜調整した。また、造形1層あたりの厚さ d [mm]は0.05mm/層で一定とした。

3.3 造形試料の評価

金属3D造形試験で製作した試験片は、造形直後の外観観察の後、鋼製基板から切り離し、樹脂埋め、エメリー紙研磨し、その鉛直断面の光学顕微鏡観察を行った。

造形材内部の空隙率の計測は、倍率×100で5視野以上の断面組織写真を撮影し、その写真の2値化画像から画像計測ソフトQuickGrain(㈱イノテック製)で開口面積率を計測し、その材料内部の空隙率推定値を計算した。

造形材料中の空隙、主金属、結合金属の容積構成比率の評価は、試料断面の研磨直後の組織写真と、研磨面を塩化銅(Ⅱ)でエッチングした後の組織写真を撮影し、エッチングで結合金属(スズ)の腐食による顕微鏡観察写真の色合いの変化を利用してそれぞれ画像解析時の2値化水準を変えて面積占有率を計測し、前者から空隙の面積率を、後者から主金属の面積率を、これらの差分から結合金属の面積率を求めて、それぞれの容積占有率の推定値を計算した。

3.4 金属複合材製作への応用試験

複合金属粉末を使用した3D造形法による金属複合材製作への応用可能性を検証するため、適当な部材を選んで造形試験を行った。造形試験に供する粉末材料は、Mn-Fe合金と純スズ粉末を混合した複合粉末を用い、造形条件は前項までの試験の結果を参考に選定した。造形品質の評価に関しては、造形物の外観および断面マイクロ組織を観察した。

また、結合金属粉末配合量の造形試料金属組織への影響を調べるため、複合粉末供試材の純スズ粉末配合比を10wt%、20wt%、30wt%の3水準に変化させて造形試験を行い、造形試料鉛直断面の光学顕微鏡観察を行ってそれらを比較した。

4. 実験結果と考察

4.1 予備造形試験

Mn-Fe合金(主金属)と純スズ(結合金属)とを混合した複合粉末積層造形の適用可能性を確かめるため、Mn-Fe合金粉末に純スズ粉末を10wt%混合した複合粉末を用意して造形試験を行った。造形に供したMn-Fe合金粉末と純スズ粉末の粒度構成を図6に示す。造形試験の当初において適当な造形条件を得ておらず、この予備試験では通常の鉄鋼系粉末材に適用する与熱量の20%程度に相当するレーザー照射

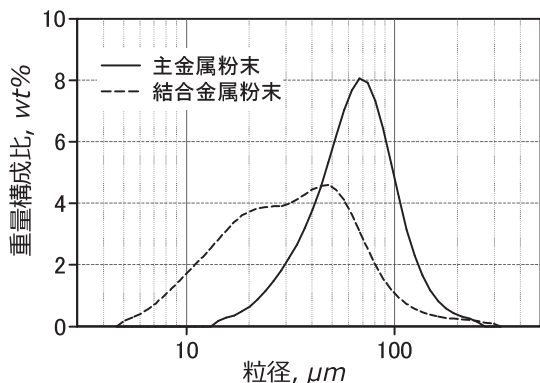


図6 供試粉末の粒径分布構成

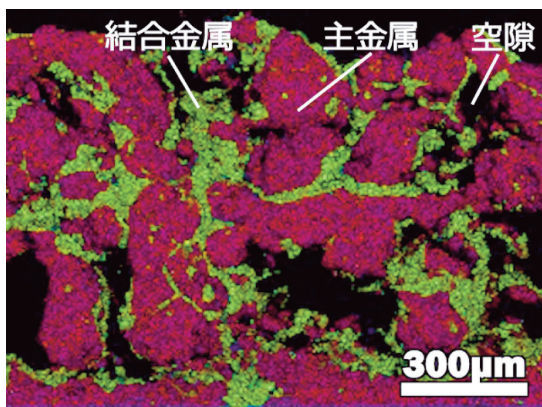


図7 複合粉末による造形試料の元素分布分析

射条件を設定した。

図7に、複合粉末造形法により、レーザー出力 $P=120\text{ W}$ 、レーザー集光径 $D=\phi 0.5\text{ mm}$ 、レーザー走査速度 $v=600\text{ mm/s}$ 、走査間隔 $e=0.2\text{ mm}$ の造形条件で製作した試料断面のEDS分析による元素分布解析結果の例を示す。

Mn-Fe合金粉末粒子の間にスズが存在し、両者は良好に接合されている状態が確認された。造形物の内部には多くの空隙が見られるが、これはMn-Fe合金粉末が破碎・分級工程を経て製作されたもので、粉末粒形が不定形であるため充填密度を高めても容積比3割程度の空隙率が想定されるのに対して、これらの空隙を埋めるに十分な量の結合金属を配合していないことによるものと考えられる。

4.2 純スズ粉末による造形試験

予備造形試験で製作した試験片の断面観察で、主金属供試粉末の粒径が $70\mu\text{m}$ ピークであったことを考慮すると、造形試料の主金属粒径がかなり大きく観察されており、この造形条件では主金属粉末の一部が溶融したと推定される。そこで、スズを結合金属とした複合粉末で、主金属材への熱影響を抑えて造形するため必要かつ十分な熱量を見積もるため、純スズ粉末のみで造形試験を行った。

金属の溶融に要する熱量は、金属材料の融点を $T_M[\text{°C}]$ 、融解潜熱を $q_M[\text{kJ/kg}]$ 、比熱を $C_S[\text{kJ/kg}\cdot\text{K}]$ とすると、室温 T_R から金属を溶融するまで昇温するのに要する熱量 $Q[\text{kJ/kg}]$ は、

表1 鉄およびスズの主な物性値

主な物性		鉄	スズ
融点	[°C]	1,540	232
沸点	[°C]	2,750	2,270
融解潜熱	[kJ/kg]	270	59.6
密度	[kg/m ³]	7,870	5,800
比熱	[kJ/kg·K]	0.449	0.222
熱伝導率	[W/m·K]	80.3	66.6

$$Q = C_S(T_M - T_R) + q_M \tag{1}$$

で計算される。これを、鉄およびスズに適用すると、それぞれの溶融に要する熱量は、表1に示す物性値から、

$$Q_{Fe} = 0.449(1540 - 20) + 270 \approx 952.5 [\text{kJ/kg}] \tag{2}$$

$$Q_{Sn} = 0.222(232 - 20) + 59.6 \approx 106.7 [\text{kJ/kg}] \tag{3}$$

と計算され、スズの溶融に要する熱量は、鉄のほぼ10分の1となる。

これまでの鉄鋼系粉末材料を用いた金属3D造形試験により、良好な造形品質を得るのに要する与熱量は概ね 100 J/mm^3 以上の知見を得ている^{7,8)}。造形時の粉末材料の充填率が0.7程度とすると、単位容積あたりの見かけ重量 ρ_{Fe} は、

$$\rho_{Fe} = 0.7 \times 7.870 \approx 5,500\text{ kg/m}^3 \tag{4}$$

と計算されるので、 $100\text{ J/mm}^3 (= 100 \times 10^6\text{ kJ/m}^3)$ の与熱量を単位重量あたりの与熱量に換算すると、約 $1.82 \times 10^4\text{ kJ/kg}$ と見積もることができ、これは式(2)で推定した鉄粉末の溶融所要熱量の約19倍の値である。

これについて、金属3D造形時の熱収支モデルを図8の模式図に示すように考える。造形時の与熱量は、図のレーザー出力 $P[\text{W}]$ を単位時間あたりの照射領域に存在する粉末材料と既造形材に対して与える熱量である。この熱量によって、

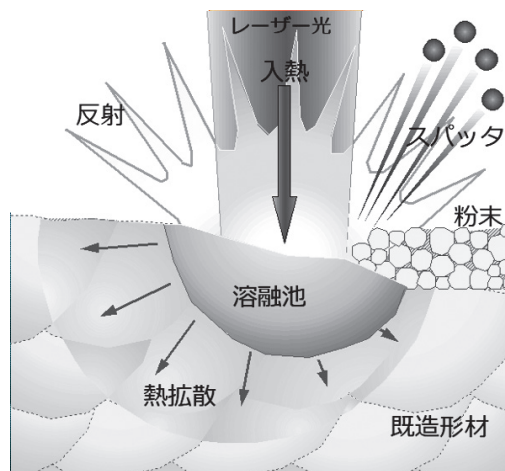






図8 レーザー加工における熱収支 (模式図)

金属粉末および既造形材が昇温し、その一部が熔融する。このとき、レーザー照射に対して、光の反射で材料そのものに入熱しなかったり、粉末間隙に存在する雰囲気急熱・急膨張によって昇温あるいは融解した金属粉末の一部が弾き飛ばされる“スパッタ”が生じたり、あるいは熱伝導率の高い材料では多くの熱量が広い範囲に拡散してしまったりというように、与えた熱量に対して金属粉末および既造形材の昇温と融解に消費されない熱損失が一定の割合で存在する。

与熱量に対する熱損失の割合がどの程度かは、造形条件や金属材料の物性によって異なると考えられるが、スズ粉末で造形する場合にも、造形時の与熱量に対して一定割合の熱損失があるはずである。この割合を正確に求めることは困難な

表2 スズ粉末の造形試験のレーザー照射条件

	D 0.10 v 1600 e 0.10	D 0.10 v 2000 e 0.10	D 0.10 v 2667 e 0.10	D 0.10 v 2000 e 0.10	D 0.10 v 2286 e 0.10	
D 0.20 v 1333 e 0.10	D 0.20 v 1067 e 0.15	D 0.20 v 1000 e 0.20	D 0.20 v 1067 e 0.25	D 0.20 v 2000 e 0.10	D 0.20 v 1524 e 0.15	D 0.20 v 1333 e 0.20
D 0.25 v 889 e 0.15	D 0.25 v 800 e 0.20	D 0.25 v 800 e 0.25	D 0.25 v 889 e 0.30	D 0.25 v 1333 e 0.15	D 0.25 v 1143 e 0.20	D 0.25 v 1067 e 0.25
D 0.30 v 889 e 0.15	D 0.30 v 800 e 0.20	D 0.30 v 800 e 0.25	D 0.30 v 889 e 0.30	D 0.30 v 1333 e 0.15	D 0.30 v 1143 e 0.20	D 0.30 v 1067 e 0.25
D 0.35 v 889 e 0.15	D 0.35 v 800 e 0.20	D 0.35 v 667 e 0.30	D 0.35 v 667 e 0.40	D 0.35 v 1333 e 0.15	D 0.35 v 1143 e 0.20	D 0.35 v 889 e 0.30
D 0.40 v 889 e 0.15	D 0.40 v 800 e 0.20	D 0.40 v 667 e 0.30	D 0.40 v 667 e 0.40	D 0.40 v 1333 e 0.15	D 0.40 v 1143 e 0.20	D 0.40 v 889 e 0.30
	D 0.50 v 640 e 0.25	D 0.50 v 667 e 0.30	D 0.50 v 667 e 0.40	D 0.50 v 800 e 0.25	D 0.50 v 889 e 0.30	
q_v 12.0	q_v 10.0	q_v 8.0	q_v 6.0	q_v 16.0	q_v 14.0	q_v 12.0

レーザー出力: $P=80W$, 積層厚さ: $d=0.05mm$

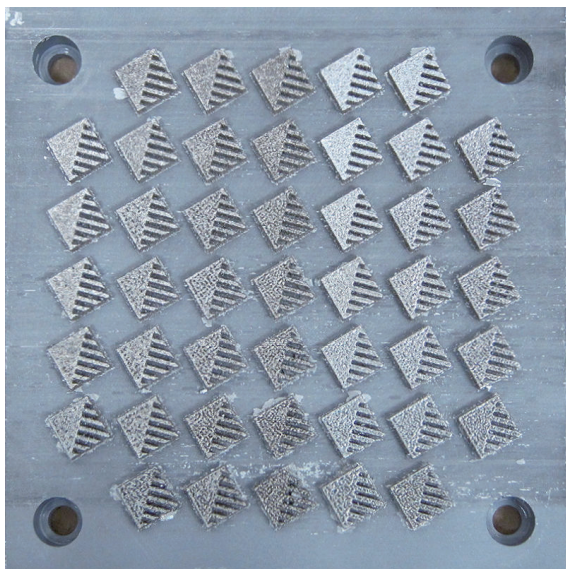


図9 純スズ粉末による造形試験片の外観

ため、純スズ粉末を用いた造形試験において造形条件を変化させて造形試験を行い、その結果から適切な造形と熱量を得ることとした。

純スズ粉末に対する造形条件は、これまでの鉄鋼粉末による造形試験で得た値と、スズの熔融所要熱量が鉄の10分の1であることを考慮し、与熱量 q_v が $6 \sim 12 J/mm^3$ の範囲となるように設定した。造形条件は、レーザー出力 $P=80W$, 1層あたりの積層厚さ $d=0.05mm$ を固定とし、レーザー集光径 D [mm], レーザー光走査速度 v [mm/s], 走査間隔 e [mm] は、試験片部位ごとに表2に示すとおりとした。試験片のうち、右3列は、一度レーザー光を照射した後、粉末材料を追加せずに同条件でレーザー光を再照射して造形した。

図9に、純スズ粉末による造形試験で製作した試験片の外観写真を示す。1層当たりのレーザー光照射量(=与熱量)が小さい中央列と右端列で、造形が一部不完全な部位が認められたが、概ね設定した条件で立体が製作できることを確認した。

4.3 複合粉末造形における最適造形条件の把握

純スズ粉末による造形試験の結果を得て、Mn-Fe合金粉末にスズ粉末を10wt%配合した場合の造形に要する最適な与熱量を見積もった。造形に際して、造形時の昇温目標を、スズのみが熔融して主金属粉末どうしを結合するのに必要かつ十分な温度として $T_m=250^\circ C$ に設定した場合、主金属粉末を室温 T_R から T_m に昇温するのに要する単位重量あたりの熱量 Q_{Fe} と、スズを熔融し液相の温度を T_m まで昇温するのに要する単位重量あたりの熱量 Q_{Sn} は、

$$Q_{Fe} = 0.449(250 - 20) \approx 103.3 \text{ [kJ/kg]} \quad (5)$$

$$Q_{Sn} = 0.222(250 - 20) + 59.6 \approx 110.7 \text{ [kJ/kg]} \quad (6)$$

と計算される。ただし、式(6)はスズの比熱を個体と液体とで同値としているため、厳密には誤差を含んでいる。スズ粉末の配合比率を10wt%とすると、この複合粉末の造形に要する単位重量あたりの熱量 Q_{Cp} は、

$$Q_{Cp} = 0.9Q_{Fe} + 0.1Q_{Sn} \\ = 0.9 \times 103.3 + 0.1 \times 110.7 \approx 104.0 \text{ [kJ/kg]} \quad (7)$$

と計算される。複合材料の単位重量あたりの容積 V_{Cp} は、

$$V_{Cp} = 0.9/\rho_{Fe} + 0.1/\rho_{Sn} \quad (8)$$

で計算されるので、複合粉末の見かけ密度 ρ_{Cp} は、造形時の充填率を0.7程度として、

$$\rho_{Cp} = 0.7/V_{Cp} \\ = 0.7 \times 7,870 \times 5,800 / (0.1 \times 7,870 + 0.9 \times 5,800) \\ \approx 5,320 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (9)$$

と計算される。

スズ粉末の造形に要する容積あたりの与熱量 q_{Sn} は、粉末

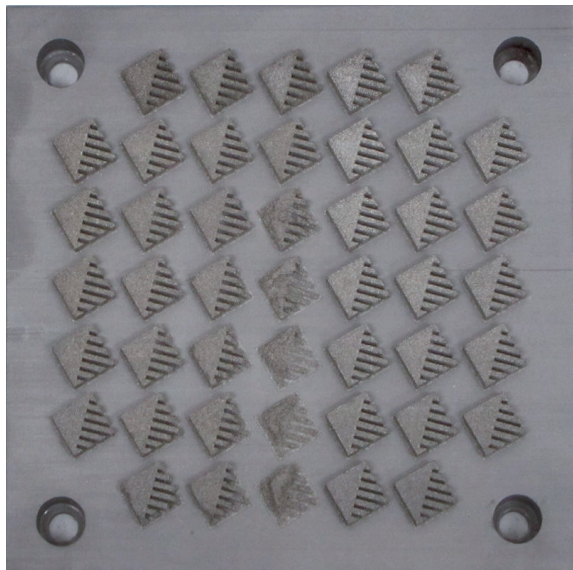


図10 複合金属粉末による造形試験片の外観

充填率 0.7 の見かけ比重を $4,060 \text{ kg/m}^3$ とすると、式(6)から $4.49 \times 10^5 \text{ kJ/m}^3$ と計算されるのに対して、Mn-Fe合金とスズの複合粉末造形に要する単位容積あたりの与熱量 q_{cp} は、式(7)と式(9)から $5.53 \times 10^5 \text{ kJ/m}^3$ と計算され、純スズ粉末と比較して2割以上大きい与熱量が必要になる。ここで造形対象とするMn-Fe合金は造形時の熱影響によって機能性に影響を及ぼすとされるので、可能な限り与熱量を抑えること求められる。これを考慮し、スズ粉末による造形条件が複合粉末でも適用可能かを調べるため、表2で示したのと同じ造形条件で複合粉末の造形試験を行った。

造形試験で得られた試験片の外観を図10の写真に示す。中央列の造形与熱量 $6 \text{ J/mm}^3 (= 6.0 \times 10^6 \text{ kJ/m}^3)$ で造形した試料と、その左側の $8 \text{ J/mm}^3 (= 8.0 \times 10^6 \text{ kJ/m}^3)$ で造形した試料の一部で造形不良が認められた。また、これらの与熱条件で製作した試料について、同じ与熱量であっても、上段の小さな集光径、細かい走査ピッチで造形した試験片は造形できているのに対して、下段の大きな集光径、広い走査ピッチで造形した試験片は造形不良がみられる。

金属3D造形の与熱量は、一般にレーザー出力 P [W]、レーザー走査速度 v [mm/s]、走査間隔 e [mm]、および1層あたりの厚さ d [mm] をパラメータとして、

$$q_v = P / ved \quad [\text{J/mm}^3] \quad (10)$$

で定義されるが、パラメータにレーザー集光径 D [mm] が含まれない。これはレーザー光の面走査エネルギー密度の考え方を基本に、レーザー光照射によって造形表面に与える単位面積あたりの総エネルギー量(面光熱密度) q [J/mm^2] を

$$q = P / ve \quad [\text{J/mm}^2] \quad (11)$$

と定義し、これを1層あたりの造形厚さ d で除して便宜的に用いている指標である。筆者らは、金属3D造形においてレー

ザー集光径 D が造形品質に大きく影響することを見だし、もう一つのエネルギー密度の考え方として、1本のレーザー光照射ごとに材料に与える単位面積あたりの熱量(単光熱密度) q_s を以下のように定義して用いている⁹⁾。

$$q_s = P / vD \quad [\text{J/mm}^2] \quad (11)$$

例えば、造形試験の中央列上段と同下段の与熱量に注目すると、面光熱密度は、

$$q = 80 / (2,667 \times 0.1) \approx 0.30 \quad [\text{J/mm}^2] \quad (\text{上段})$$

$$q = 80 / (667 \times 0.4) \approx 0.30 \quad [\text{J/mm}^2] \quad (\text{下段})$$

と同値であるが、単光熱密度は、

$$q_s = 80 / (2,667 \times 0.1) \approx 0.30 \quad [\text{J/mm}^2] \quad (\text{上段})$$

$$q_s = 80 / (667 \times 0.5) \approx 0.24 \quad [\text{J/mm}^2] \quad (\text{下段})$$

と、下段の方が20%ほど低い。また、単光熱密度が同じであっても、レーザー集光径が小さい場合は、造形時の材料が狭く深く溶融するのに対して、レーザー集光径が大きい場合はそれが広く浅くなる傾向がある。同じ与熱量において異なるレーザー光照射条件で造形の成否に差ができるのはこれらの条件が影響すると考える。

以上の造形試験の結果から、Mn-Fe合金粉末にスズ粉末を10wt%混合した複合金属粉末の3D造形に最適とする造形条件に関して、与熱量については 10 J/mm^3 以上、レーザー集光径については $\phi 0.2 \text{ mm}$ 以下を選定すべきとの知見を得た。

4.4 複合粉末による部材製作

複合粉末による適正な造形条件が明らかになったので、これを応用し、Mn-Fe合金粉末にスズ粉末を10wt%混合した複合金属粉末で機能性部品を製作した。製作した部材は磁気熱気効果を活用したヒートポンプ装置の開発実験に供する磁気熱作業部品で、外観は図11の製作CAD図に示すような内部に微小孔を有する円柱状の試験片である。図12に詳細な寸法を示す。試験片の外径は $\phi 13.8 \text{ mm}$ 、高さ 10 mm とし、その中に直径 $\phi 0.8 \text{ mm}$ の微小孔を85個配置した構造である。

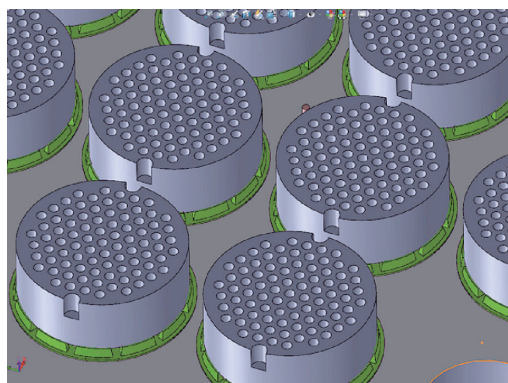


図11 造形試験片の3D-CADモデル

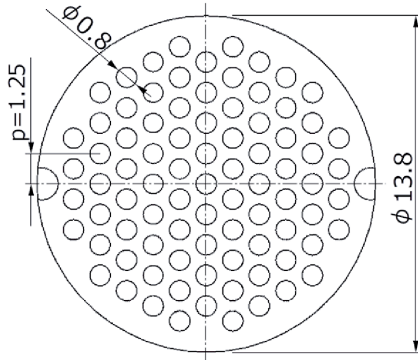






図12 造形試験片の微小孔面寸法



図13 複合金属粉末による造形試験片の外観

表3 磁気熱試験片の造形条件

	#31	#32	
	D 0.20 v 1067 e 0.15 qv 10.0	D 0.20 v 767 e 0.15 qv 13.9	
#20	#21	#22	#23
D 0.15 v 1455 e 0.10 qv 11.0	D 0.20 v 967 e 0.15 qv 11.0	D 0.20 v 889 e 0.15 qv 12.0	D 0.15 v 1333 e 0.10 qv 12.0
#10	#11	#12	#13
D 0.15 v 1333 e 0.10 qv 12.0	D 0.30 v 667 e 0.20 qv 12.0	D 0.20 v 967 e 0.15 qv 11.0	D 0.15 v 1600 e 0.10 qv 10.0
	#01	#02	
	D 0.30 v 571 e 0.20 qv 14.0	D 0.20 v 1067 e 0.15 qv 10.0	

レーザー出力： $P=80W$ ，積層厚さ： $d=0.05mm$

造形条件は、レーザー出力 $P=80W$ ，積層厚さ $d=0.05mm$ とし、そのほかのレーザー照射条件は、この試料形状における適合性を確認するため、与熱量 $10\sim 14J/mm^3$ の範囲になるように表3に示すレーザー集光径 D ，レーザー走査速度 v ，レーザー走査間隔 e を設定した。また、照射回数は重複照射を行わず、1層ごとに1回の照射とした。

製作した試験片の外観を図13に示す。一部の部材について造形途中に崩壊が確認されたため、その破片が他の部材の造形に悪影響を及ぼすのを防ぐため、崩壊が生じた部材についてはその時点で造形を中断した。目視で著しい造形不良が認められるのは、試験片番号#01，#02，#11の3つである。このうち試験片#01と試験片#11は、造形時のレーザー集光径が $\phi 0.3mm$ と他に比べて大きい条件で造形したもので、レーザー光照射による結合金属の溶解深さの不足による造形不良と理解できる。一方、試験片#02は、造形時の与熱量が $10.0J/mm^3$ と低く抑えた条件設定だが、この条件は製作が完了した試験片#31と同じ設定であることから、造形の成否の差は、粉末を敷くスキージング動作のときに隣の試験片#01で

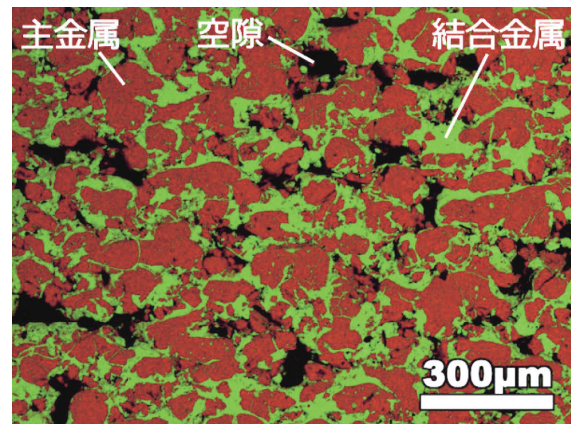


図14 複合金属粉末による造形試験片の外観

造形崩壊が生じた破片による物理的な荷重によって崩壊が連鎖したためと考える。

これらの条件で造形した試験片断面組織のEDS分析による元素分布写真を図14に示す。Mn-Fe合金（主金属）粉末がスズ（結合金属）により固着されている様子が確認できる。また、図7で示した予備造形試験片の断面組織解析結果と比較してMn-Fe合金粉末の粒径が微細であり、供試粉末の粒度分布で示した $10\sim 300\mu m$ の範囲と認められることから、Mn-Fe合金粉末自体は熔融せず、純スズ粉末のみが熔融してMn-Fe合金粉末どうしを固着して造形されていることが確認された。

4.5 結合金属配合量の造形組織への影響

複合粉末による造形試料の断面観察において、造形材内部に多くの空隙が観察される。これは、前述のとおり、主金属粉末の形状により充填状態で一定割合の空隙が存在し、これを埋めるだけの結合金属粉末を配合していないことによるものであるが、粉末粒形不定形状の場合は造形時の流動性が悪いためスキージング動作だけでは十分な充填率が得られないなど、主金属粉末間に大きな割合で空隙が生じる可能性が高い。また、この造形法は、通常の方法で造形できない金属

に対して、その材料の有する機能性を活かした三次元立体を製作することが目的であるから、この金属以外の材料の混入は可能な限り少ない方がよい。

一方、用途によっては主金属材の特性が多少劣化しても機械的特性を求める場合も考えられるが、材料内部の空隙の存在は造形材の機械的性質の劣化に大きく影響し、機械的性質を向上させるためには、造形材内部の空隙を少なくする必要はある。

そこで、Mn-Fe合金粉末に配合する純スズ粉末の比率を10wt%~30wt%に変化させた複合粉末を用いて造形試験を行い、結合金属の配合量と造形材内部の空隙率との関係性を調べた。

純スズ粉末の配合比を変えた場合の造形条件は、式(7)~式(9)の純スズ配合比に関わる数値を変えて計算した値をもとに設定する必要がある。これらの式で、純スズ配合率を変えたときの粉末物性および造形に必要な与熱量の値を表4に示す。純スズ粉末の配合比を10wt%から30wt%に増やすと、造形に要する与熱量は約5%減少するが、実際の造形試験では95%程度の熱損失があることを考慮し、いずれも12J/mm³の与熱量で造形試験を行った。

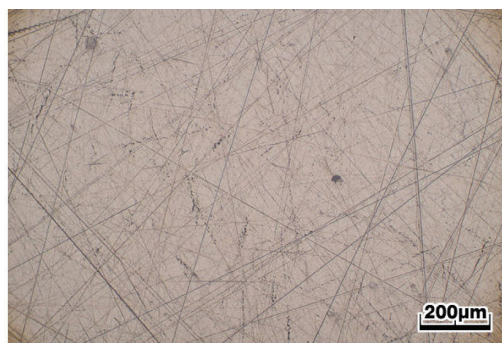
図15に純スズ粉末の配合比を変えて造形した試験片の断面組織写真を示す。図15-a)は、純スズ粉末のみで造形した試料の断面組織であり、ほとんど内部空隙のない緻密な組織となった。図15-b)~図15-d)は、それぞれスズ粉末を10wt%、20wt%、30wt%配合した複合粉末による造形試料の断面組織を示す。いずれの試料断面観察でも、空隙の存在が認められた。純スズ10wt%配合の造形試料ではMn-Fe合金粉末間隙にわずかにスズの存在が見られた程度であるのに対して、スズの配合比を20wt%、30wt%と増やしていくと、Mn-Fe合金粉末間隙にスズの占める面積が次第に増大する傾向が確認された。Mn-Fe合金粉末の充填相対密度は、その粒形と粒度分布から0.7以下と予測されるので、理論上、残り3割に相当する量のスズを添加すれば、空隙のかなりの部分がスズで埋められる。鉄とスズの密度の差から計算すると、スズを30wt%配合した場合のスズが占める容積比は36.8%と計算され、Mn-Fe合金粉末間隙をほぼ埋めるのに足りることになる。しかし、図16-d)の組織観察写真には、まだかなりの割合で空隙が観察される。

表4 結合金属配合量に対する造形条件見積もり

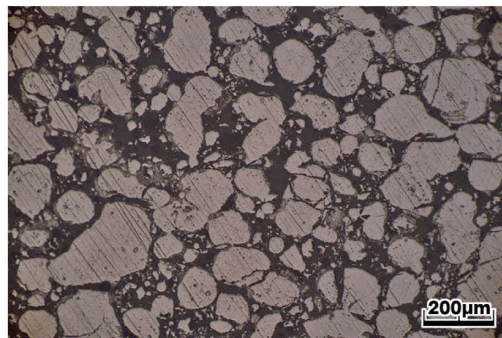
主な物性	10wt%	20wt%	30wt%
造形所用熱量 [kJ/kg]	104.0	104.8	105.5
比容積 [cc/kg]	131.6	136.1	140.7
見掛け密度 [kg/m ³]	5,319	5,142	4,976
所用与熱量 [J/mm ³]	11.06	10.78	10.50

造形材中の空隙が期待したより減少しなかった理由は、造形時の粉末充填率が最密とならないこと、造形時の与熱量を小さく抑えているので結合金属が主金属間隙に浸透するに十分な液相状態になっていないこと、スパッタ等が生じることにより造形中に材料の一部が失われることなどが考えられる。

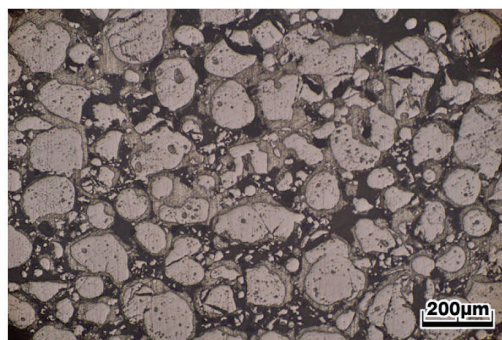
このうち、造形中の与熱量が小さいことで主金属粉末間隙に液相が浸透しにくいとする観点について検証するため、造



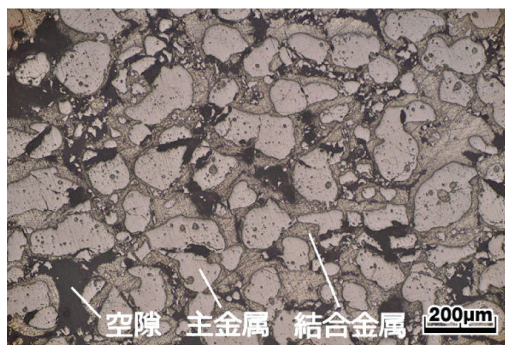
a) Sn 100wt%



b) Sn 10wt%



c) Sn 20wt%



d) Sn 30wt%

図15 結合金属配合量を変えて造形した試験片の組織

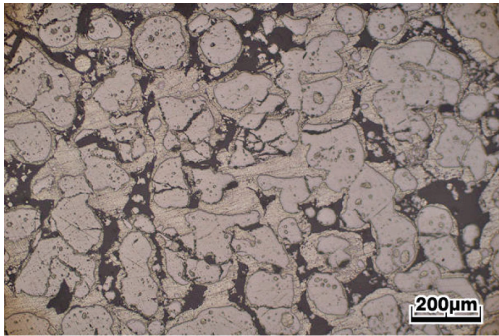


図 16 余熱量を増大して造形した試験片の組織
(Sn 30wt% / $q=18 \text{ J/mm}^3$)

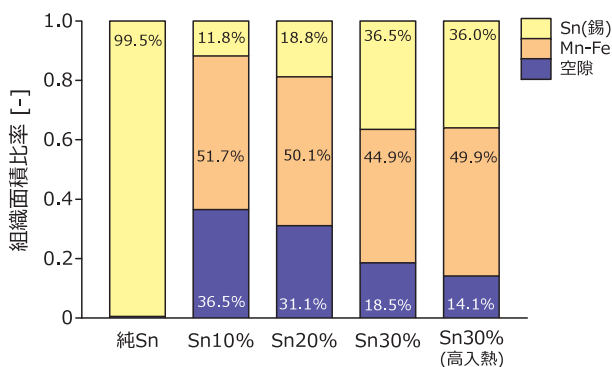


図 17 複合粉末造形材の材料および空隙の構成比率

形と熱量を1.5倍の 18 J/mm^3 にして造形試験を行った。図16は、その造形試料断面の観察写真である。純スズ配合比が同じ30wt%で、 12 J/mm^3 で造形した試料の断面と比較すると、造形材中の空隙が幾分か縮小しているように見えるが、与熱量の増大による空隙率の減少効果は限定的であった。

これらの断面組織写真から、画像計測法により、主金属、結合金属、空隙の占める面積比率を計測し、その計測結果を図17のグラフに整理した。なお、組織断面の面積比率は、計測に用いる写真サンプル数を十分に多く採れば、三次元立体内の容積比率に同値と考えて良い。

造形物のスズの構成容積は、造形に用いた複合粉末に配合した量に比例して増加しており、その容積比率は、ほぼ重量配合比率と同じであった。Mn-Fe合金粉末の構成容積比は、45~50 vol% であり、スズの配合量と明確な相関は認められない。その分、空隙の占める容積割合 (=空隙率) は、配合したスズの量にしたがって減少した。

造形時の与熱量を1.5倍に増大した条件で造形した試験片の容積比率構成は、スズの容積比にほとんど変化はなく、空隙が若干減少するにとどまった。

5. まとめ

通常の金属 3 D 造形の方法では造形が困難な脆性金属や、熱影響によりその機能性が変化する金属材料に対して、容易に複雑な形状や内部構造を製作することのできる積層造形法

の優位性を活かした製作手法を適用するための方策として、対象とする金属粉末にこれを結合・固着させるための結合金属粉末を混合した複合粉末による造形法を提案し、その具体的な造形条件等の検討を行った。

本手法の用途を参考に、主金属に磁気熱量効果を有する Mn-Fe 合金を選定し、一方の結合金属には鉄系材料とのぬれ性が良く、低融点のスズ (Sn) を選定した。スズ単独粉末および Mn-Fe 合金とスズとの混合粉末について熱収支を計算し、これまでに試験で蓄積した造形条件に関する知見をもとに金属 3 D 造形に必要かつ十分な与熱量を見積もった。これに基づいて造形試験を行い、Mn-Fe 合金粉末に10wt%程度のスズ粉末を混合した複合粉末による造形に際しての最適な与熱量として 12 J/mm^3 程度の値を特定し、加えて造形時のレーザー集光径は $\phi 0.2 \text{ mm}$ 以下とするのが適当との知見を得た。これらの知見に基づいて具体的な試験部材の製作を行い、その断面組織観察により、スズ粉末のみを溶解して主金属粉末を固着する造形法の有効性を確認した。

謝辞

本研究における Mn-Fe 系磁性材料の利用に際し、大電株式会社の大西孝之氏、副島 慧氏、大坪健佑氏の三氏には多大なるご協力を戴きました。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山口修一ほか：「産業用 3 D 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) 公開特許公報：「三次元造形方法及び三次元造形物」, 特開2018-003078 (2018)
- 5) 川南 剛：「磁気熱量効果を利用したノンフロン冷凍システムの研究開発」, 日本機械学会誌 Vol.112, No.1082 p50 (2009)
- 6) 和田裕文：「巨大磁気熱量効果を示す一次相転移磁性体の熱伝導度研究」, 科学研究費助成事業研究成果報告 (2016~2018)
- 7) 戸羽篤也・鈴木逸人・平野繁樹, 長船康裕, 葛西勝明・葛西健央：「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」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告No.316, pp.69-76 (2017)
- 8) 戸羽篤也・鈴木逸人：「鉄系粉末を用いた積層造形法による内部三次元構造を有する金属部材の製作」, 鑄造工

学Vol.91 No.9, pp.652-658 (2019)

- 9) 戸羽篤也・中村勝男・平野繁樹・稲野浩行：「金属粉末積層造形による内水冷式金型の製作」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告No.314, pp.67-76 (2015)

新製品開発のための企画づくり支援ツールの開発

日高 青志, 印南 小冬, 万城目 聡

Development of Tools for Planning in New Product Development

Seiji HIDAKA, Kofuyu INNAMI, Akira MANJOUME

抄 録

顧客からの要望に応じて製品を製造する受注型の製造業企業が、自社独自製品の開発に挑戦するケースが増えている。しかし、新製品開発における企画づくりの技術を確立できている企業は少なく、開発者の直感や誤った知識に頼って企画づくりが進められた結果、プロジェクトが頓挫する、あるいは開発した製品が売れないなど、期待した成果に至らないことも多い。本研究では、企業との新製品企画開発や、商品企画講座の運営などを通じて、企画づくりのための実践的な知識を整理した。さらに、それらを活用して、企画づくりの実践を支援するツールを開発した。

キーワード：新製品開発，企画開発，製品開発プロセス，Webコンテンツ，商品企画講座

Abstract

The number of build-to-order manufacturing company that challenge the development of their own unique products is increasing. However, there are few companies that have established planning technology for new product development, and as a result of planning depending on the intuition and incorrect knowledge of the developer, the project is stalled or the developed product cannot be sold. Often, the expected results are not achieved. In this research, practical knowledge for planning is organized through new product planning and development with companies and management of product planning courses. Furthermore, by utilizing them, we developed a tool to support the practice of planning.

KEY-WORDS : New product development, Planning, Product development process, Web content, Product planning course

1. はじめに

顧客からの要望に応じて製品を製造する受注型の製造業企業が、競争環境の変化等を見越して自社独自製品の開発に挑戦するケースが増えている。しかし、新製品開発における企画立案の技術を実践可能な形で確立できている企業や外部支援者は少なく、実際に「新製品開発のチームを立ち上げたが、何から始めれば良いかわからない」といった声もよく聞かれる。その結果、新製品開発のチャレンジは、次のような望まない結末へ至ってしまうことも多い。

- ・ 当たり前のアイデアをそのまま商品にただけで、ユーザー

の共感を得られず売れない。

- ・ 難易度の高いアイデアを実現しようと無理をし過ぎ、やがて開発活動が頓挫してしまう。
- ・ 筋の良いアイデアは見えているものの、社内から試作などの協力を得られず、アイデアづくりだけで終わってしまう。
- ・ 上司から「いつ製品になる?」「どれだけ売れる?」と絶えず聞かれるため開発チームが萎縮してしまう。

こうしたケースは、開発者やその上司・経営者、外部支援者などが、適切な知識を持たないまま、直感や誤った知識に頼って新商品開発を進めてしまうことが原因と考えられる（なお、これらの開発者及び関係者を以降では「ビギナー開

事業名：経常研究

課題名：新製品開発における企画立案を支援するツールの開発

発者」と呼ぶ)。

一方、新製品開発における企画づくりのための手法としては、さまざまなものが公開されている。それらは概ね次の3つに整理できる。それぞれに長所があるが、ビギナー開発者が活用する上では限界もある。

①ハンズオン型

企画づくりの手がかりとなるニーズの発見から製品アイデアの創出、試作及び検証、商品化などを、商品開発指導の経験が豊富な専門家が独自にプログラムや教材を開発し、その専門家自身が講師・指導者となって、企業人などを対象に実践的な講座などを通じてノウハウを伝授するもの。例えば、東京都足立区が実施するあだち新製品開発講座¹⁾には、受注型のもづくり中小企業が参加し、限られた自社技術を活用してヒット商品を開発するなどの成果を上げている。講座へ参加できる時間を確保でき、地理的にも参加できる場合には非常に有効だが、そうでないビギナー開発者が講師不在の状態実践するのは難しいという課題がある。

②メソッド型

企画づくりのさまざまな場面で活用できる具体的なリサーチ、アイデア創出、情報整理等の手法を整理し提案するもの。例えば、米国のデザインファームIDEO社によるメソッドカード²⁾は、新製品企画づくりで活用できるさまざまなデザインリサーチや仮説発見、情報整理の手法をAsk, Look, Learn, Tryの4つのグループに分類し提案している。こうしたツールはデザイナーやマーケターなど新製品開発や企画づくりについてある程度の経験があり、使用目的などを理解して使いこなせる場合には有効だが、ビギナー開発者にはどのような場合にどのメソッドを使えば良いのか、そのメソッドで何が得られるのか、得られた成果をどう活用すれば良いのかといったことがわかりにくく、指導者不在の現場で自発的に使用することは難しいという課題がある。

③ワークシート型

製品コンセプトはターゲットユーザーや使用状況、ベネフィット、製品アイデア、競合優位性などで構成される³⁾。これらの項目を記述するワークシートを中心に、その内容を記入するための手順や必要な活動などを解説したガイドブック等がセットになったツール。例えば、世界的企業における新製品・新事業開発の事例分析を通じて、開発者が検討すべき項目を整理しワークシート化したビジネスモデルキャンバス⁴⁾などがある。これらは、既に何らかの新事業や新製品のアイデアがある場合には、その内容を明確化でき、検討の足りない部分を把握できるなど、効果的に活用することができる。しかし、何もアイデアを持たないビギナー開発者が新たにアイデアを創造する場合には、ワークシートに記入するアイデアをいかに創造するかがむしろ重要な問題であり、ワークシートだけではアイデア創造の役に立ちにくいという課題がある。

以上に述べた既存手法の長所や課題も踏まえて、本研究で

は、新製品開発における企画づくりの際にビギナー開発者が身につけておくべき知識を整理した上で、それらを企画会議等の現場で活用しやすい形で提供するためのツールや、企画アイデアの創出・具体化など企画づくりの実践を支援するためのツールを開発することを目的とした。

2. 研究の概要

ビギナー開発者が身につけるべき企画づくりに関連する知識としては、次の4種が考えられる。

①企画づくり～新製品開発の章立て【ステップ】

新製品開発を成功させるために、自分たちはこれから、まずは何を指して何を行うのか、その次には何を指して何を行うのかといった、企画づくりから新製品の事業化までに開発チームが行う全活動の大まかな章立て。

②企画づくりの取り組み【タスク】

投資する意義のある企画案を作るために、何からどういう順序で取り組みれば良いのかという、企画づくりにおける個々の取り組みとそれらの関係性を含む全体像。

③企画づくりで活用できる手法【メソッド】

上記の各タスク中において、解決すべきユーザーの問題を発見したり、その解決策となるアイデアを創造したり、答えを見出すべき疑問を見つけて必要な調査・研究を行ったり、試作により仮説の正しさを検証するなど、多様な企画づくり活動を実践する上で活用できる具体的な手法や問いかけなど。

④開発者が持つべき心構え・知識【マインドセット】

新製品の企画づくりに取り組む際に、主に開発リーダーに求められる心がまえや考え方、誤って理解されていることが多い重要な知識など。具体的には、新製品開発成功のためのポイントや、企画づくりのゴールのイメージ、リーダーとして気をつけるべき失敗パターンやその原因などが考えられる。

本研究では、これら4つの知識を創造・構築するフェーズを理論化フェーズとして、それらの知識を実際の新製品開発を通じて検証・ブラッシュアップする実践フェーズとを行き来しながら、ビギナー開発者が身につけておきたい効果的な企画づくりのための知識を整理した(図1)。



図1 本研究における知識整理の取り組み

さらに、それらの知識を検証・ブラッシュアップする場と

して、複数の企業が参加し具体的な新製品の企画づくりに取り組む「商品企画実践講座」を実施した。これらの取り組みを通じて、ビギナー開発者を対象に効果的な企画づくりのための知識を提供するWebサイト及び、企画づくりの実践を支援するワークシートを開発した。以下ではそれらの概要について報告する。

3. 初期タスク仮説の整理

理論化フェーズ初期の作業として、成功事例の分析を通じたタスク仮説の整理を試みた。事例として、ものづくり中小企業との新商品開発において豊富な経験と実績を有するデザ



図2 コーヒーフレッシュ容器

イン事務所が主導的に開発した、コーヒーフレッシュ用のパッケージ(図2)を取り上げた。この事例については、これまで現場で運営するデザイン勉強会において幾度か研究対象として取り上げ、開発者である(株)コボ代表取締役社長・山村真一氏から開発の経緯などについてヒアリングを実施してきた。そのヒアリング結果をもとに、フレッシュ容器開発の着想からアイデア創造、製品化、事業化までに実施した主な取り組みを、特に企画づくり段階に注目して整理した結果、企画づくりのための5つの初期タスク仮説に沿ったエピソードと、企画づくりに続く製品開発～事業化段階のエピソードとして整理することができた(図3)。それらの整理結果について解説する。

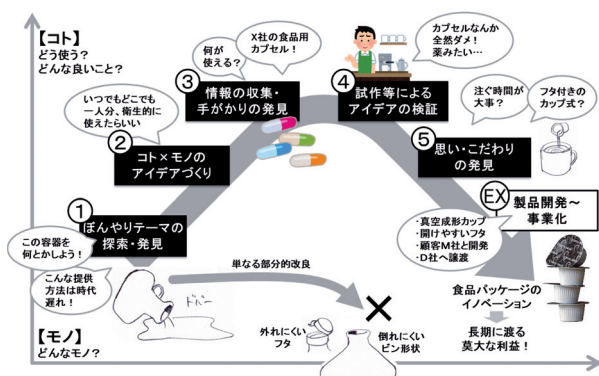


図3 容器開発における企画づくりの5つのタスク

① ぼんやりテーマの探索・発見

この容器の開発を主導した山村氏は、コーヒーフレッシュがまだ大瓶に詰められて流通していた30年以上前、冷蔵庫のドアを閉めた際にビンが倒れて庫内を汚してしまったことをきっかけに、ビンに変わる新しい容器の開発を決意した。このように、作り手が何らかのきっかけで抱いた問題意識や、

顧客と接する中で知り得たニーズ、あるいは新製品開発に生かしたい自社シーズ、作り手が興味を抱いている製品カテゴリなど、企画づくりにおいて最初に注目する対象を「ぼんやりテーマ」と呼ぶことにする。

② コト×モノのアイデアづくり

①で注目した問題に対しては、倒れにくいビンにする、あるいは倒れても外れにくいキャップにするなど、単なる部分的な改良で解決が図られがちである。しかしこの事例では、今後核家族化が進み大家族で食卓を囲むことが減っていく中で、大瓶での供給はライフスタイルに合わなくなること、また衛生面でも弱点があることなど、問題をさらに深掘りして捉え直した。その上で、ユーザーがいつでもどこでも一人分の分量を使えて、しかも長期間衛生的に保管できるべきだという「コト」を考え、それを実現する容器の方式として密閉可能な個装方式への切り替えを考えた。

③ 情報の収集・手がかりの発見

液体食品を個装化する手段として、これまでに付き合いのあったクライアントが持つ技術の中から、カプセルメーカーの製品である食用のカプセルが使えるのではないかと考えた。また、後述する蓋と容器の接着方法については、国内外の接着剤メーカーを調査し、要求を実現できる接着技術を持つ企業を発見した。

④ 試作等によるアイデアの検証

この事例では、カプセルメーカーの協力を得てコーヒー杯分のコーヒーフレッシュを詰めたカプセルをまず試作した。これを開発チーム内で試用したところ非常に良い感触を得たが、主要なユーザーとなる喫茶店経営者に使ってもらったところ、予想に反して「こんな薬のようなものをコーヒーの中にボタンと落とすなどもってのほかで、小さくともピッチャーからフレッシュを注ぐという行為や時間が大切だ」との厳しい指摘を受けることとなった。

⑤ 思い・こだわりの発見

上記の試作・検証を通じて、コーヒーフレッシュの個装化にあたっては、カプセルのように可溶性の容器ごと投入する方式ではなく、ユーザーが自ら注げる方式であることが大事だと気づき、その点にこだわって新しい容器を開発した。

その後の製品開発から事業化の段階では、ユーザー自身が注げる容器のアイデアとして、樹脂製カップにアルミ蒸着フィルムの蓋を接着する方式を考案した。容器の形状は何度も試作と検証を行い、現在も使用されている円錐形状が最も合理的であることを発見した。蓋の接着方法は、子供や高齢者など誰でも開けやすい接着強度を実験により確認した上で、それを実現できる接着方法を接着剤メーカーの協力を得て開発した。

こうして開発した新製品アイデアを事業化する際には、アイデアの知財化、初期大口ユーザーとなるフレッシュメーカーと共同での製品開発、知財と大口ユーザーをセットにした容

器メーカーへの事業譲渡などを行い、特許権が切れるまでの長期間に渡って、これらのメーカーおよび自社に大きな利益をもたらすこととなった。

4. 実践フェーズ

3章で作成した5つの初期タスク仮説を活用しながら、企業等との新製品企画開発や、企業内人材の企画開発マインド向上など実践フェーズに取り組んだ(表1)。

研究期間の1～2年目は個別企業における新製品企画づくりや、そのための人材育成の取り組みを中心に4件の個別企業支援を実施した。また、最終年度である3年目は2件の個別企業等の支援に加えて、企画づくりのための知識やツールの最終的な検証・ブラッシュアップの場として、連続型の商品企画講座を実施した。

表1 実践フェーズの取り組み一覧

年度	企業	業種	概要
2017	A社	家具製造	社内人材の企画開発マインド向上
	X社	金属製品製造	自社企画製品開発
2018	A社	家具製造	自社企画製品開発
	B社	紙箱製造	自社企画製品開発
2019	Y社	電気製品販売	自社製品のリニューアル
	Z総研	公設研究機関	教育用ゲームの開発
	A社	家具製造	商品企画実践講座2019に参加
	B社	紙箱製造	
	C社	ゴム製品製造	
D社	自動車販売		
E社	建具製造		

4.1 個別企業との企画づくり実践活動

企業と個別に取り組んだ企画づくり実践活動のうち、3年間の全研究期間を通じて協力を頂いたA社における個別支援の概要について解説する。

4.1.1 企画づくり活動の概要

学校など公共空間で使われる家具の製造・販売を主事業とするこの企業では、少子化による需要減が懸念される中で、自社企画商品の開発とそれによる新事業創出が当面の課題となっていた。

初年度に実施した、比較的大人数でのグループワークなどを通じた社内人材の企画開発マインド向上の取り組みをベースに、本件では人数を絞ってより具体的な新製品企画づくりに入って行きたいとの要請を受け、民間デザイン業の協力を得ながら新製品企画アイデアづくりを支援した。初年度は言わば学びと認識向上、自社シーズや自社の将来像の整理などに注力したため、今回はそれらを生かした具体的な製品アイデアづくりのトレーニングに注力することとした。以下では、3章で解説した企画づくりの5つの初期タスク仮説に沿って、取り組みの概要を解説する。

①ぼんやりテーマの探索・発見

支援の前半はデザイン業の主導によりテーマ探索に取り組み、例えばあるメンバーは「本棚を作りたい」、別のメンバーは「避難所用の椅子を作りたい」というぼんやりテーマを発見できたものの、具体的にどのような場面でどう役立つどのような本棚なり椅子なりにするかという、具体的なコト×モノのアイデアづくりに苦戦していた。従って、現場が主導的に支援を行う後半では、設定したぼんやりテーマを踏まえて、具体的なコト×モノのアイデアを創造することを目的とした。

②コト×モノのアイデアづくり

「本棚」や「避難所の椅子」などのぼんやりテーマに対して、「そのモノでどんなコトができたらユーザー・自分は嬉しいか」というコトのアイデアを、いくつかの問いを立てて検討した。例えば「本棚」というテーマに対しては次のような問いを設定した。

- ・実際のところ、自分自身は本棚をどう使っている？
- ・本は家の中でどのような場所にどう置かれている？
- ・図書館のヘビーユーザーのための本棚とは？
- ・電子書籍のヘビーユーザーにとって本棚とは？

③情報の収集・手がかりの発見

有意義なコト×モノのアイデアを考えるためには、当事者が現場で何に困っているか、ユーザーが真に望んでいることは何かといったことをより深く知り、考察する必要があった。そこでテーマを「災害時の避難所向けアイテム」の一つに絞り、避難所で何が問題となっているか、避難者は何に不満や不安を感じ、何を求めているかといった問題を把握するため、実際に避難を体験した人のブログなどを調査した。その結果、避難所ではプライバシーの問題や、床を伝う音や振動の問題に悩まされていることがわかった。

④試作等によるアイデアの検証

参加者全員で「避難所のプライバシー問題、音・振動問題などを解決するためのアイテム」をテーマに、「こんなモノがあったらきっと良いはず」と思われる新しいモノのアイデアを考えた。ここでは、紙や粘着テープ、発泡材、針金などの材料を用意し、考えたアイデアは完成度を気にせず即座に工作し形にするラフ試作を行った(図4)。



図4 紙や発泡材によるラフ試作

⑤思い・こだわりの発見

長期の避難生活においては、避難者一人一人のプライバシーを守りつつ、床からの振動や音を伝えない、快適で落ち着けるパーソナルスペースを提供できることが重要と考えられた。また、そういった空間は例えるなら「飛行機のファーストク

ラス座席」のようなものかもしれないと考え、それらを参考にした避難所用パーティションのアイデアを考えた。

4.1.2 得られた気づき

本件を通じて、次のような企画づくり実践に関する気づきを得ることができた。

- モノを先行して考えた場合も、必ずコトを考える。そのためには、コト創造のきっかけとなる問いを見つけることや、実際の現場やユーザーについて知ることが大切である。
- ブログなどでユーザーの困りごとや実態などを調べた上で「ではどんなコトができたら良いか、どんなモノがあったら良いか」というコト・モノを考える方法が役立った。
- 数多くのアイデアを出し、その中から有望なものを探る段階では、しっかりした原寸の試作やきちんと動作する機能試作ではなく、紙や発泡材、針金など工作材料を用意し、考えたアイデアをその場で形にする試作方法が役立った。
- 避難所パーティションのあり方をファーストクラス座席から連想するように、全く別のモノをヒントに新たなコト×モノのアイデアを創造する方法が役立った。

得られたこれらの気づきは5.3節に後述する方法で整理し、企画づくりのためのメソッド・マインドセットの取りまともに活用した。

4.2 商品企画実践講座

本研究の前半2年間を通じて創造・構築した、企画づくりのための知識及び企画づくり実践支援ツールの最終的な検証・ブラッシュアップの場として、複数の企業と8ヶ月あまりの期間に渡って具体的な新製品の企画づくりに取り組む「商品企画実践講座2019」を実施した。

講座のプログラムづくりに当たっては、東京都足立区が実施する「あだち新製品開発講座」を手本とし、座学だけでなく実際に各参加企業が事業化することを前提とした新製品の企画案を、他の参加者やメンター、事務局メンバーも加えた

社外企画チームとの企画会議を通じて開発していく実践型の内容とした。本講座のプログラムを表2に示す。

本講座のメンターとして先述のコーヒーフレッシュ容器開発者である(株)コボ山村氏を迎え、実施方式としては、全員参加型の合同講座を全5回開催し、それらの合間に事務局メンバーが各参加企業を訪問し、検討中の企画案のブラッシュアップやアドバイス、次回合同講座で提出する宿題のフォローなどを行う形を取った。本講座には道内ものづくり中小企業5社から11名が参加した。

4.2.1 講座の実施概要

合同講座各回における取り組みの概要について解説する。

①第一回合同講座

新製品開発の流れを理解するために、メンターによる基調

講演(図5)に続いて、3章と同様の成功事例分解ワークを実施した。また、次回合同講座に向けた宿題として、ぼんやりテーマ案の検討と、必要と考えられるリサーチ等の検討を依頼した。



図5 メンターによる基調講演

②第二回合同講座

検討したぼんやりテーマ案などについて各自が発表し、他の参加者及び事務局も加えたメンバーとの質疑応答や、各参加者の経験や知識を生かしたアドバイスなどが活発に行われた。また、4.2.3項に後述するワークシートを用いて、各自が検討しているテーマ案やモノのアイデアなどを整理するワークを行った。この時点で、自分が作ってみたいと思えるモノのアイデアを絞り込み、アイデアの具体化に入っていく参加者も数名現れた。

③メンターによる参加企業訪問

本講座のメンターである山村氏と事務局が各参加企業を訪問し、各社の製造・開発環境などについて調査した。また、各参加者の企画アイデアづくりの進み具合などについて、記



図6 メンターと参加者の意見交換

入済みのワークシートを用いて意見交換した(図6)。

④第三回合同講座

メンターによる企業訪問の際に受けたアドバイスをもとにアイデアを練り直した部分や、新しく考えたアイデアなどに

表2 商品企画実践講座2019プログラム

企画づくりのステップ	プログラム	日程	主な内容
企画づくりの準備	第一回	7/5	・オリエンテーション ・メンター講義 ・成功事例分解ワーク
企画アイデアの探索			宿題・個別支援
	第二回	8/23	・開発テーマ意見交換 ・講義:テーマ発見~アイデア創造
	参加企業訪問	9/5,6	・参加企業をメンターとともに訪問 ・工場見学、意見交換
企画アイデアの具体化			宿題・個別支援
	第三回	10/18	・開発テーマ意見交換 ・講義:アイデア創造~絞り込みなど
			宿題・個別支援
	第四回	12/5	・開発テーマ意見交換 ・講義:まとめに向けて ・工試の試作支援技術紹介
まとめ	第五回	3/5	開発品ポスター等を用いた成果発表

ついて、各参加者が記入済みのワークシートを用いて発表し、前回同様に参加者全員によるディスカッションやアドバイスなどを行った。この時点で参加者間の進み具合に差が出はじめ、アイデアをほぼ具体化でき製品開発に入りつつある参加者もいれば、まだ自分なりに具体化したいと思えるアイデアが見つからず、アイデアの探索を続けている参加者も複数いた。なお、参加者のうち1社3名が業務多忙のためこの回以降の受講継続を断念した。

⑤第四回合同講座

企業訪問以来のメンター参加回であることから、各参加者がそれぞれの企画アイデアの内容や企画づくりの進捗状況、製品開発や商品化の段階に向けて知った



図7 参加者全員での意見交換

いことなどについて中間発表を行い、メンターをはじめとする参加者からのアドバイスを受けた(図7)。また、次の合同講座最終回に向けて、企画アイデアのまとめ方や、現場が提供できるさまざまな試作技術、試作の評価方法やその実例などについて解説した。この時点で、企画アイデアが完成している受講生は、使い目線で良いモノを作り込む製品開発の段階へ入った。また、製品案が完成した参加者もあり、商品ネーミングや商品パッケージ、プロモーションツールの作成など商品化に必要な各種ツールの開発や、展示会への出展準備など事業化に向けた活動を開始した。

⑥第五回合同講座(最終回)

最終回までに各参加者は、これまでに作成・ブラッシュアップした新製品の企画アイデアを、パネルや試作品などの形に取りまとめた。また、事務局は各参加者がこれまでに検討した企画アイデアの変遷や、個別支援の際の議事録など今後企画づくりを継続していく上で役立つ情報をレポートにまとめ提供した。なお、最終回では再度メンターを招いて、これらの成果物を用いた発表会を実施する予定であったが、新型コロナウイルスの影響により中止となったため、各参加者の成果物に対する事務局及びメンターからのコメントの返送と、講座全体を通じた参加者アンケート調査を実施して本講座を終了した。

4.2.2 本講座における企画づくりの経過

アイデアの探索・具体化で悩む参加者の参考とするため、事務局メンバーも企画アイデアづくりを試みた。その参考例におけるアイデアの探索・具体化の過程を、3章で述べた5つの初期タスク仮説に、企画アイデアの記述やまとめのための2つのタスクを追加し、計7つのタスクに沿って解説する。

①ぼんやりテーマの探索・発見

学校等の公共空間向け家具メーカーを開発主体として想定し、その企業が扱っている他社にはないユニークな素材である理科室用実験卓の耐熱・耐薬品性天板を生かした、家庭向けワゴン・ワークテーブル等の開発をぼんやりテーマとして設定した。

②コト×モノのアイデアづくり

耐熱・耐薬品性の天板を持つワゴン等が、誰にとってどのような役に立つかというコトのアイデアを事務局メンバー自身の趣味嗜好から考え、執筆者はマンション住まいのバイクオーナーのための軽整備～試し乗りをサポートするワゴン考えた。また、別の事務局メンバーは同じく自身の趣味嗜好から、模型づくりを趣味とする人のためのワゴンを考えた。

③情報の収集・手がかりの発見

ライダー向け・モデラー向けワゴンという企画アイデアをさらに煮詰めていくための手がかりとして、実際にどのようなものを収納できたり、どのような作業ができたりしたら良いかといった情報を、自身の体験だけでなくネット上で公開されているブログなどから収集した。その結果も参考に、それぞれのワゴンの理想的な使用方法や、さまざまな関連アイテムの収納方法などを創造した。

④試作等によるアイデアの検証

それぞれのワゴンを3DCAD上でモデリングしてCGを作成したり、針金やスチレンボード等の手近な材料を用いてスケールモデルを作成したりすることで、考えているモノのアイデアを実体化した。

⑤思い・こだわりの発見

ワゴンの理想的な使用方法などを創造する中で、ライダー向けワゴンについては、マンション内で移動する際に床を傷つけたり騒音を出したりしないこと、バッテリーやオイルジョッキなど液体の入った容器をこぼすことなく運べること、ケミカル類を使ったパーツの洗浄等の軽作業ができることなど、実現したい機能をいくつか考案した。モデラー向けワゴンについては、エアブラシを使った極小パーツの塗装ができること、作業途中でワゴンごと別の部屋へ一瞬でしまえること、細々した塗料や工具類を使いやすくかつ眺めて楽しめるように収納できることなどの機能を考案した。

⑥アイデアの記述・完成度チェック

考案した企画アイデアを常に次の3つの視点で眺め、アイデアの具体化や製品開発など先の段階へ進めて行くべきかどうかをチェックした。

- ・開発者自身がそのアイデアを実現したいと思えるか。
- ・そのアイデアは誰かから「そんなのが欲しかった!」と言われてもらえそうか。
- ・そのアイデアを自社で、あるいは協力企業の力を借りて製造・販売できるか。

⑦取り組みの記録・まとめ

考案したモノの特徴や主要なターゲットユーザー、提供し

たい価値や使い方などを解説するコンセプト資料(図8)を作成した。さらに、これらの資料を執筆者の職場内の同じ趣味を持つ同僚に見せながら簡易的なアンケート調査を行い、妥当と感じられる価格感や、特徴的な機能や使用方法への共感の度合いなどを確認した。

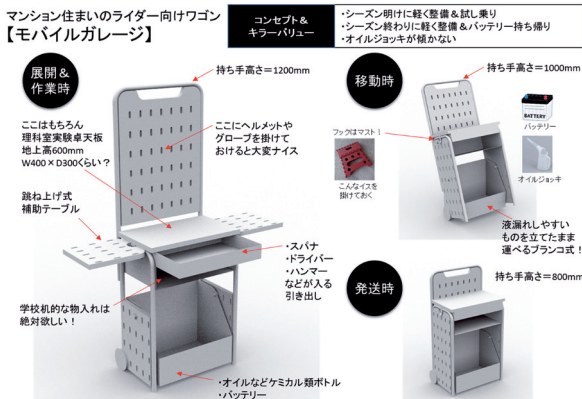


図8 開発した企画アイデアのコンセプト資料

4.2.3 ワークシートの試作・検証

本講座においては、各参加者による企画アイデアの探索～具体化を支援するため、独自に開発したワークシートを活用し、その有用性を検証した。本ワークシートおよびその構成の考え方を図9に示す。

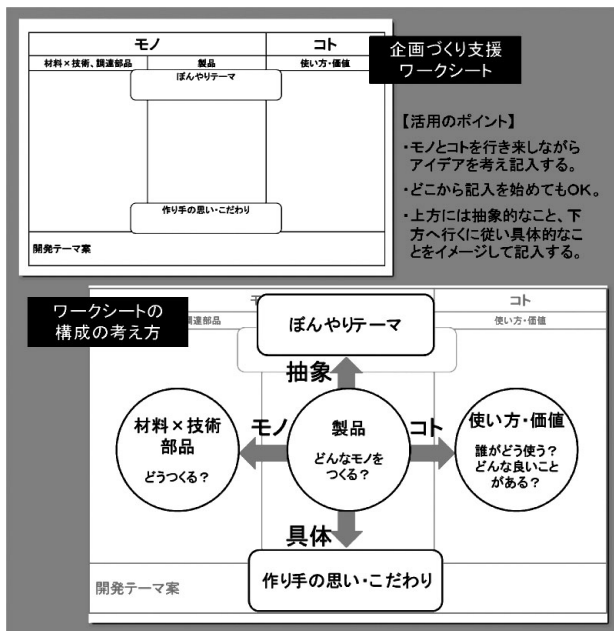


図9 ワークシートと構成の考え方

ワークシートの中心には企画案の主要な要素である製品、すなわち「どんなモノをつくるか」を位置づけ、その左側には自社が得意とする「材料×技術」の組み合わせや調達可能な「部品」など、すなわちそのモノを「どう作るか」を、右側には使い方・価値、すなわちそのモノを「誰がどう使うか」「どんな良いことがあるか」という「コト」を位置づけてい

る。経験上、ビギナー開発者による企画づくりではモノの検討ばかりが重視され、コトの検討がなごりにされる傾向がある。本ワークシートでは右側にコトの記載欄を設けることで、今考えているモノが誰のどのような役に立つのかという、商品を作るのであれば欠かせないコトの検討を、モノの検討と平行して行うことを促す構成となっている。また、記載欄の上下方向の使い分け方法としては、上方にまず「ぼんやりテーマ」などまだ抽象的なアイデアや気づきを記入し、下に行くに従ってより具体的なアイデアを記入していき、最終的には作り手が企画づくり活動を通じて発見した「作り手の思い・こだわり」を記入するという使い方を想定している。

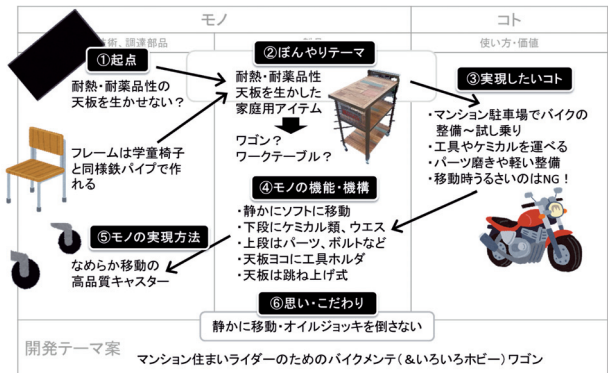


図10 ワークシートの活用例

4.2.2項で解説した事例における本ワークシートの活用例を図10に示す。この例では、①企画づくりに当たってまず当該企業の技術・素材に目を向け、他社にはないユニークな素材として理科室用実験卓の耐熱・耐薬品性の天板に着目し、そこを企画づくりの起点とした。②さらに、その天板を用いたアイテムとして、家庭用のワゴンやワークテーブルなどに可能性がありそうだと考え、それをぼんやりテーマとして記入した。③そこからすぐ左側に戻り製造方法の検討に入るのではなく、右側の「コト」すなわち「耐薬品・耐熱性の天板を持つワゴンを、どんな人がどう使ったら喜ぶか」を考え、ここではマンション住まいのバイクオーナーのための軽整備～試し乗りをサポートするワゴンを考案し、その望ましい使い方を考え記入した。④次に、それらの使い方を実現するためにワゴンが備えるべき機能・機構を考え、これを再び中央の「製品」欄へ記入した。⑤さらにそうした機能・機構を実現するために必要な部品等のアイデアを左側の「材料」欄に記入した。⑥最後にこのアイデアにおいて必ず実現したい使い方や機能を「作り手の思い・こだわり」欄に記入した。

本講座ではこのワークシートを活用し、各参加者が企画アイデアの探索や具体化に取り組んだ。本ワークシートを用いることで、モノのアイデアを考えるだけでなく、「そのモノはどう使われるのか、その結果ユーザーにはどんな良いコトがあるのか」というコトを意識しながら製品案を考えることができ、同時にそのモノをどう実現するかという具体的な

		7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
参加企業	参加者	● 第一回		● 第二回 ● 企業訪問		● 第三回		● 第四回		○ 第五回
A社	Aa	①アイデアの探索				②アイデアの具体化				
	Ab	①アイデアの探索							②アイデアの具体化	
B社	Ba	①アイデアの探索	②アイデアの具体化				③製品開発	④商品化		
	Bb	①アイデアの探索							②アイデアの具体化	
C社	Ca	①アイデアの探索	②アイデアの具体化	③製品開発						
	Cb	①アイデアの探索	②アイデアの具体化							
D社	Da	①アイデアの探索				②アイデアの具体化				
	Db	①アイデアの探索	②アイデアの具体化							

図11 商品企画実践講座における参加者の取り組みの経過

製造方法や使用部品等の検討も促されるため、魅力的でありかつ実現可能な、言わば優位性の高い企画アイデアの探索～具体化を促進できたと考えられる。なお、本ワークシートは6章で後述する、本研究の成果として作成したWebサイト上で提供している。

4.2.4 本講座を通じて得られた気づき・考察

①各参加者の経過と到達点

本講座のプログラム検討時に設定した企画づくりのステップ「企画アイデアの探索」と「企画アイデアの具体化」（表2参照）に、「製品開発」と「商品化」を加えた4段階のステップに沿って各参加者の取り組みの経過を時系列で整理した結果、図11のとおりとなった。到達地点に違いが生じた原因などについて考察した。

- 参加者のうちBaが商品化まで到達できた（図12）。8ヶ月あまりの短期間で商品化に至った要因としては、自社技術・製品を生かし、無理なくつくれるモノのアイデア検討をしたこと、「①アイデアの探索」ステップであまり悩まず「自分が作りたいモノはこれだ」と確信できるアイデア



図12 商品化された成果（小物収納用紙箱）

に早期に出会えたこと、「②アイデアの具体化」ステップに必須の試作を行いやすいテーマ及び社内環境であったこと、これまでにも自社製品開発の経験があり「④商品化」ステップでやるべきことなどを事前に経験していたこと、比較的身近なモノをテーマとしており、開発者自身がモノの使い方や印象などについてユーザーの目線で眺めることが容易だったこと、などが考えられる。

- Caは講座期間内での商品化までは至らなかったものの、

「③製品開発」ステップまで到達し商品化目前の状態まで至った。Baに比べて「③製品開発」ステップの期間が長いのは、Baのテーマと異なり、開発者自身がユーザーの目線では使い方や印象などを評価しにくいテーマであったため、試作とユーザーテストに時間がかかったこと及び、製品の加工・製造の面で技術的な難易度が高かったことが要因であると考えられる。

- Aa, Ab, Bbの3名は比較的「①アイデアの探索」ステップに時間がかかっているが、これはアイデアづくりに苦戦したというよりは、むしろさまざまなアイデアは湧いてくるものの、これだと決めるきっかけや根拠を見つけられなかったことが要因として考えられる。その状況において、第四回合同講座で参加者等からのアドバイスや後押しを得られたことが、アイデアを絞り込み「②企画アイデアの具体化」ステップへ進むきっかけとなったものと推察される。
- その一方、Cb, Da, Dbの3名は「①アイデアの探索」の時間は比較的短く、ぼんやりテーマの発見やアイデアの絞り込みには悩まなかったものの、「②アイデアの具体化」では、コトを実現するためのモノの検討に時間を要した。これは、新しい技術・機構等の開発が必要な、技術的に難易度の高いモノを開発対象として選択したことが主な要因であると考えられる。

講座を通じて得られたこれらの考察・気づきは、5.4節に後述するビギナー開発者のためのマインドセットの取りまとめに活用した。

②評価の高かったプログラム

講座内容の有用性や、事務局が伝えたいと意図した知識がどの程度伝わったかを確認するため、各合同講座の終了後に参加者アンケートを実施した。その結果の概要を図13に示す。概して次のような学びのプログラムや、他者とのコミュニケーションを伴うプログラムの評価が高かった。

- ・メンターによる成功事例解説や、それらについての分析ワークなど、新製品開発のゴールやプロセスについて学べるプログラム。
- ・他社の参加メンバーや事務局・メンターとの意見交換を通じた企画アイデアのブラッシュアップ。
- ・合同講座の合間に実施した事務局による個別支援。

これらのことから、ビギナー開発者が新製品企画づくりに取り組む際は、企画づくりのための知識を提供するツールや企画づくりの実践をサポートするワークシートなど本研究の成果を活用することに加えて、本講座のような場を通じて、新製品開発のゴールやそのプロセスについての学びや、社外の専門家や開発者との意見交換などを取り入れることも有意義だと考えられる。

参加者アンケートでの評価・感想			
企画づくりのステップ	プログラム	日程	主な内容
企画づくりの準備	第一回	7/5	・オリエンテーション ・メンター講義 ・成功事例分析ワーク 宿題・個別支援
	第二回	8/23	・開発テーマ意見交換 ・講義：テーマ発見～アイデア創造 参加企業訪問 9/5,6 ・参加企業をメンターとともに訪問 ・工場見学、意見交換 宿題・個別支援
企画アイデアの探索	第三回	10/18	・開発テーマ意見交換 ・講義：アイデア創造～絞り込みなど 宿題・個別支援
	第四回	12/5	・開発テーマ意見交換 ・講義：まとめに向けて ・工試の試作支援技術紹介 宿題・個別支援
まとめ	第五回	3/5	開発品ポスター等を用いた成果発表

※回答者数 第一回：10名、第二回：8名、第三回：5名、第四回：6名
 ※評価点数は「主な内容」についての5段階評価の平均点
 (5:とてもためになった 4:ためになった 3:どちらでもない 2:ためにならなかった 1:全くためにならなかった)

図13 参加者アンケート結果

5. 理論化フェーズのまとめ

実践フェーズで取り組んだ企業等との新製品開発や商品企画実践講座など企画づくりの実践的活動と、理論化フェーズにおける企画づくりのための知識の整理・構築を行き来するように繰り返し実施し、ビギナー開発者が身につけるべき企画づくりのための重要な知識として、ステップ・タスク・メソッド・マインドセットの4種を取りまとめた。以降では、これら4種の知識の概要について解説する。

5.1 ステップについて

ステップとは2章で解説したとおり、新商品開発における企画づくりから事業化までに至る全活動の章立てであり、開発者自身が現在どの位置にいるか、次に何を指せば良いのかを常に把握することを助ける重要な知識である。本研究では商品企画実践講座で試行・修正したステップを基本として、企画アイデアづくりや新製品開発の到達度に沿って整理した次の5つのステップを提案する。

①企画づくりの準備

実践フェーズを通じて、アイデア出しのための企画会議や各種のリサーチ活動、企業内の製造設備を用いた試作及び検

証など企画づくりに必要な活動を、新製品開発チームが経営者や上司からある程度の権限を与えられた中で自由に実施できるか否かが、企画づくりや新製品開発の成否を大きく左右すると感じられた。しかし実際には、新製品開発やそのための企画づくり活動は、慣れ親しんだ受注型のものづくり業務とは全く異なるものとなるため、企業内で理解が得られにくいことも多い。従って、新製品開発や企画づくりに本格的に着手する前に、社内的にそれらの活動に対する理解を形成した上で、必要な予算や期間、社内の製造設備を使用するための協力体制などを整えるとともに、開発チームのリーダーにはそれらのリソースを自己の裁量で行使できる権限を与えるべきと考えられる。また、そうした社内的な理解を形成するためには、開発チームのリーダーはもちろん、その企業の経営者や上司なども、新製品開発や企画づくりのプロセスや手法、成功のために必要な心構えなどについて理解することが望まれる。

②企画アイデアの探索

企画づくりのゴールは、投資する意義のある新製品のアイデアを創造することにあるが、そのアイデアに出会うためには、最初にフォーカスする何らかの対象（ぼんやりテーマ）を決めた上で「どのようなモノを作れば、誰にとってどんな良いコトがあるか」というコト×モノのアイデアをさまざまな切り口から出し尽くし、先へ進めていくアイデアを絞り込む方法が理想である。この際、ビギナー開発者が出せるアイデアの質には限界があるため、ユーザーや既存製品などについて調査し、フォーカスしたテーマ・コト・モノに対する理解を深めつつ、企画づくりに生かせる重要な手がかりを得る活動も必要となる。なお、考案したアイデアはスケッチもしくは文章の形で記録しつつ、常に作り手・使い手・自社の3つの視点で優位性をチェックする。

上記の活動の詳細については、5.2節①～③及び⑥で解説しているので参照されたい。

③企画アイデアの具体化

考案した数々の企画アイデアから、少数の優れたアイデアを絞り込み、ブラッシュアップしてより具体化していくステップである。より具体的なユーザーや使用シーンを想定しながら、実現すべき機能や使い方などコトのアイデアを煮詰めていくとともに、それらを実現するためのモノのアイデアも詳細化していく。その過程では、アイデアをスケッチや模型などで見える化して、使い方や機能など想定したコトを十分に実現できるかを検証する活動が重要になる。また、こうした活動に取り組む中で、作り手として大事にしたいこだわりや、使い手に伝えたい思いなどを発見することも重要な活動となる。

企画アイデアを作り手・使い手・自社の3つの視点で眺めて十分に優位性が高いと感じられ、これ以降は本格的な製品開発のステップへ移行すべきと判断できる場合は、企画づく

りの段階はここで終了となる。企画会議において生まれた数々のアイデアや気づいたこと、調査を通じて発見したことなどは、今後の新たな企画づくりの参考資料としてまとめておきたい。

上記の活動の詳細については、5.2節②～⑦で解説しているので参照されたい。

④製品開発

作り手・使い手・自社の3つの視点で眺めて十分に優位性が高いモノのアイデアができたと確信できたら、本格的な製品開発に入っていく。具体的な作業は5.2節④のタスク「試作等によるアイデアの検証」の延長であり、引き続き試作と検証を繰り返して使い手にとって良いモノを作り込んでいくことが活動の基本となる。機能や性能の優位性を訴求する開発品の場合は、実験により機能・性能を裏付ける活動も必須である。

⑤商品化～事業化

商品のネーミングやマーク、商品パンフレット等の作成をはじめ、プレスリリースや展示会等におけるプロモーション、製造・販売方法の検討、知財保護のための方策の検討など、魅力的で強い商品にするための各種活動に取り組む。

5.2 タスクについて

3章における成功事例の分析により得られた企画づくりの初期タスク仮説をもとに、実践フェーズにおける試行と調整を通じて、企画づくりにおいて取り組むべき7つのタスクを整理した。これらのタスクは図14に示すとおり、企画アイデアの探索・具体化のために取り組むべき5つのタスクと、考案した企画アイデアの記述・チェック及び企画づくり活動の記録のために取り組むべき2つのタスクに分けられる。

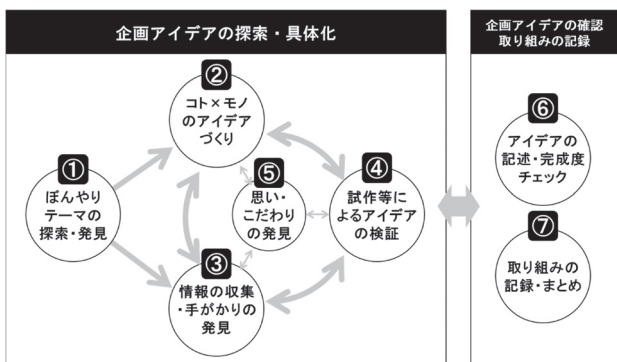


図14 企画づくりの7つのタスク

全く何のアイデアもない状態から企画づくりを始める場合、「①ぼんやりテーマの探索・発見」から始まり、続いて「企画アイデアの探索・具体化」の枠内にある②～④のタスクに取り組むこととなるが、これらの順序は、開発チームにおける関心の度合いなどに応じていずれかのタスクから始めつつ、「⑤思い・こだわりの発見」ができたと確信できるまで②～

④のタスクを繰り返し実施する。

また、図14の右側の枠内には、考案した企画アイデアの優位性をチェックしたり、企画づくりの活動や成果を記録したりするための2つのタスクを配置した。以降では各タスクの概要について解説する。

①ぼんやりテーマの探索・発見

「ぼんやりテーマ」とは、開発テーマと呼べるほどには絞り込まれていないものの、新製品開発に当たってまずぼんやりと注目し、次のタスクであるアイデア創造や情報収集などに着手するための軸足とする、文字どおりぼんやりとした開発テーマのことである。ぼんやりテーマの探索方法には大きく次の3つの切り口がある。

- ・他社にはない自社独自の技術やユニークな特性を持った素材など自社シーズに注目し、その特性を生かしたモノのアイデアや使用シーンなどコトのアイデアを考える。
- ・例えば「以前に商品化したが発売できなかったあの自社製品をやり直したい」「アウトドア用品をやってみよう」というように、特定の製品や製品カテゴリ等に注目する。
- ・「この問題で困っている人を何とかしよう」「この非合理的なモノをもっと良いモノにしよう」というように、開発者自身が持つ問題意識に注目する。

なお、この段階ではあまり悩んだり決め込んだりせず、仮にでもテーマを決めてしまい、「②コト×モノのアイデアづくり」や「③情報の収集・手がかりの発見」を実践してみて優位性の高い企画アイデアを作れそうであれば先へ進める、そうでなければテーマを探索し直すくらいの姿勢で構わない。

②コト×モノのアイデアづくり

設定したぼんやりテーマに対して「こんなモノがあったらこんな人がこう使ってくれて、今までできなかったこんなコトができるようになる」というように、コトとモノがセットになった企画アイデアを創造し、徐々に具体化していく。具体的には、次の思考方法を何度も繰り返し、企画アイデアを具体化していく。

- ・モノのアイデアに軸足を置き「このモノは誰がどう使えて、どんなコトができるようになればいいか」というコトのアイデアを考える「モノ→コト」の思考方法。
- ・コトのアイデアに軸足を置き「このコトを実現するには、どのようなモノであればいいか」というモノのアイデアを考える「コト→モノ」の思考方法

なおビギナー開発者はモノの検討のみに集中してしまう傾向があるため、常にコトも同時に考えることを心がけたい。

③情報の収集・手がかりの発見

設定したぼんやりテーマや検討中の企画アイデアについて、具体化していくために必要な情報を収集し、そこから重要な手がかりや気づきを得ることを目的として実施する、各種の調査・研究等の活動である。調査・研究の対象として例えば、

先行商品の市場形成状況や個々の商品の詳細、ユーザーの現状や不満、使えそうな技術、関係しそうな既存の知財などがある。こうした活動により作り手自身の認識・センス・知識を上げていかなければ、優れた企画アイデアを作れないのはもちろん、良いアイデアを目の前にしてもそれを良いものとして受け止められず、見逃し続けてしまうことになる。

④試作等によるアイデアの検証

いわゆるスケッチや試作をはじめ、それらを用いた社内レビューやユーザーテストなど、検討中のモノのアイデアを見える化・実体化して、想定した使い方や提供価値などコトを実現できるかを検証し、そのアイデアを先のステップへ進めて行くべきか判断するための活動である。この活動は経験上、企画づくりや製品開発の比較的遅い段階で行う製品試作や機能試作などがイメージされがちだが、近年では、多大な投資をしてから失敗してしまうことを避けるために、思いついたアイデアは簡易かつ安価な方法（例えばダンボールや発泡材、針金など）で迅速に見える化・実体化し、企画開発の早い段階で数多くのアイデアを試してしっかり失敗し尽くしておくことが重要だというfail fastの考え方が、企画づくりにおける当たり前の知識として浸透しつつある。

⑤思い・こだわりの発見

コトやモノのアイデアづくりや関連情報の収集、試作によるアイデアの検証など、さまざまな企画づくりの活動に取り組む中で、やがて開発者自身にも「これを何としても世に出して、こんな人を喜ばせたい!」「この開発ではここにこだわらなきゃ!」というように、モノを通じて誰かに伝えたい思いや、自分なりにこだわりたい部分が見えてくるはずである。逆に言えば、開発者が企画づくりに取り組む中で、こうした思いやこだわりを発見できるか否かは、検討中の企画アイデアに十分な優位性があるか否かを判断するための重要な基準になると考えられる。

⑥アイデアの記述・完成度のチェック

頭の中で創造したコト×モノのアイデアは、短い文章やスケッチ、雑に作った模型などにより、他者に伝わる形で表現する必要がある。アイデアを探索している段階では例えば「こんなモノがあったら、こんな人が、今までできなかったこんなコトができるようになる」という程度の短い文章でも十分である。十分な優位性を作れる見込みがあり、具体化を進めているアイデアについてはさらに、どのような機能をどのような機構により実現できるのか、作り手としてこだわりたい部分は何か、ユーザーに最も訴求するポイントはどこか、自社ならではのこういった技術をどう活用するのかといった、より具体的な特徴も表現に加えていきたい。

また、創造したアイデアはどのようなものでも常に、開発者・使い手・自社の3つの視点で優位性をチェックすることを心がけたい。企画づくりのゴールは投資する意義のある新製品のアイデアを創造することにあるが、これはすなわち開

発者自身が「これを作りたい!見てみたい!」という興味や情熱を持てること、使い手が出会い頭に「何それ!そんなのが欲しかった!」という感動や購買意欲を抱いてくれること、そして自社が製造・販売していただけること、これらの3つの条件を満たせるアイデアを創造することに他ならない。

⑦取り組みの記録・まとめ

企画づくり活動では得てして、本命となるアイデアのブラッシュアップなどに関心が向きがちであり、途中段階で生まれた一見馬鹿げたアイデアや、情報収集により得られた既存製品や使い手に関する情報、そのほか企画づくり活動の中で得られた何らかの手がかりや気づきなどについては、多くは記録されることなくやがて忘れ去られてしまう。しかし、こうした活動の中で得られた情報や創造したアイデアなど独自の知識は、今後新たな新製品開発などに取り組む際に貴重な資料として活用できるものである。こうしたものを是非記録して、資料として残していくことを勧めたい。これらを積み重ねていくことにもつながると考えられる。

5.3 メソッドについて

メソッドとは2章で解説したとおり、企画アイデアの探索・具体化のためのタスクである「①ぼんやりテーマの探索・発見」「②コト×モノのアイデアづくり」「③情報の収集と手がかりの発見」「④試作等によるアイデアの検証」「⑤思い・こだわりの発見」「⑥アイデアの記述・完成度のチェック」などのために活用できる、具体的な手法や問いかけのサンプルである。本研究の実践フェーズにおいては、実践したアイデア創造及びリサーチ等の内容や、それらを通じて得られた気づきなどを逐次記録した。さらに、これらを原始データとして、企画づくりや新製品開発に関連する記述を細分化して抽出し、KJ法による整理を行った。その結果、同様の内容に関する記述としてまとめられる、169個の最下層グループ(以後、単位エピソードと呼ぶ)が得られた(図15)。

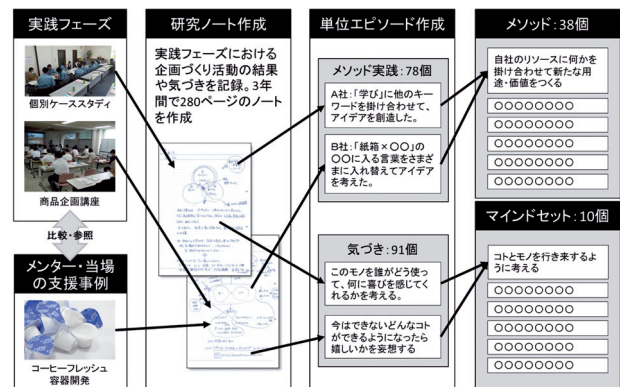


図15 メソッド・マインドセットの整理方法

さらに、これらのうちメソッド実践に関わる78個の単位エピソードから38個のメソッドを取りまとめ、企画づくりのタ

スクごとに整理した（表4参照）。これらのメソッドはビギナー開発者でも無理無く使えることを念頭に、実践フェーズで使用して一定の有用性が確認できたものを厳選した。実際の企画づくりの現場では、ビギナー開発者はこれらのメソッドを活用することで、企画アイデアの探索・具体化をより効果的・効率的に進められるものとする。

5.4 マインドセットについて

一方、実践フェーズから得られた91個の気づきに関する単位エピソードからは、10個のマインドセットを取りまとめた。その概要を表3に示す。ビギナー開発者にとって、新製品開発やそのための企画づくり活動は、慣れ親しんだ受注型のものづくり業務とは全く異なるものとなる。メソッドを適切に活用しながら企画づくりの各タスクを遂行し、投資する意義のある企画アイデアを創造するためには、開発リーダーやチーム、さらには彼らが所属する企業等の経営者・上司なども、新製品開発や企画づくりのための最低限の知識・心構えとしてこれらのマインドセットを予め身につけておくことが望まれる。

表3 開発者が身につけたいマインドセットの概要

マインドセット	概要
① 自社公認の活動にする	・新製品開発に必要な活動を経営者・上司が理解する。 ・開発チームに予算・期間・権限を与え、正式な業務にする。
② 段階的なゴールを描く	・いきなり売れるモノを目指さず、まずは一つプロトタイプを作る。 ・テスト販売して感触が良ければ、さらに投資して事業化する。
③ 社外人の知恵を借りる	・社外アドバイザーに企画会議に参加してもらう、商品企画講座に参加するなど、定期的に打合せをする機会を作る。
④ 作り手自身の認識・センスを上げる	・ユーザーの現状や既存製品などについて調べる。 ・ユーザーの未来やモノの未来形・進化形などをイメージする。
⑤ リーダーは開発品の親となれ	・開発品の企画段階から製造・販売まで責任を持つプロダクトマネージャーを作る。
⑥ 企画づくりのゴールは「ハマる、トキメク、作る・売る」	開発者自身が情熱を持って、顧客が欲しいと感じ、自社で製造・販売できるモノのアイデアを考えることが企画づくりのゴール。
⑦ コトとモノを行き来するように考える	このモノを誰がいつ、どう使うことで、どんな良いことがあるのかという「コト」と、それを実現するための「モノ」を平行して考える。
⑧ 遊ぶように、好き勝手に妄想する	普段の定型的な仕事とは気持ちを切り替え、開発チームでワイワイ楽しむようにネットで調べたり、理想的な使い方を妄想したりする。
⑨ ササッと見える化・さわられる化	「こんなモノどうだろう？」というレベルのアイデアを、紙やダンボールなどでササッと形にして使うマネを試してみる。
⑩ 思いこだわりの発見が大事	「きっとこれが大事だ！」「自分たちがやるべきことはこれだ！」というこだわり・信念を見つけるまで、企画づくり活動を続ける。

5.1節から5.4節で述べた、企画づくりのための重要な知識であるステップ・タスク・メソッド・マインドセットの対応関係など全体像を表4に示す。

6. ツール開発

これまでの取り組みを通じて構築・創造した企画づくりのための知識と、開発したワークシート等のツールを提供する、次の機能を持つWebサイトを開発した。

- ・新製品開発や企画づくりの流れなど、ビギナー開発者が身につけるべき重要な知識を理解しやすい形で提供する。
- ・ビギナー開発者が企画づくりに活用できる具体的な方法を、企画会議などの現場で参照しやすい形で提供する。
- ・上記の知識や方法を活用した企画アイデアの創造・ブラッシュアップの実践を支援する、ワークシート等のツールを提供する。

6.1 ツールの概要

ツール作成に当たっては、印刷物やPDFなどの静的コンテンツではなくWebサイト形式を採用し、タスクごと、あるいは事例ごとにメソッド情報を表示できる動的表示機能や、PC・タブレット・スマホなど使い慣れた情報端末に対応したレスポンスサイト作成機能などを備えたブログシステムであるWordpressを活用した。なお、テーマテンプレートは目的とする動的表示機能に優れたSTACKERを活用した。



図16 企画づくりを支援するWebサイト

作成したWebサイトのトップページは図16のように、38個のメソッドがカード形式で表示されるようになっている。実際の企画会議などの場では、PCやスマホなどでこのページを閲覧し、各メソッドを眺めながらさまざまな話題・関心に対して使えそうなものを選択してクリックし、より詳細な内容を参照する使い方を想定した。

これらカード状に表示されるメソッドは、ワードプレスのカテゴリを用いた動的表示機能により、タスクごと、もしくは実践事例ごとに抽出して表示することもできる。



図17 メソッド解説ページ

トップページのいずれかのメソッドをクリックすると、そのメソッドについてより詳しい内容を解説するページ(図17)が表示される。このページではメソッドの概要をはじめ、具体的な取り組み方法の例や実際の製品開発事例等における活用例などについて解説している。

企画づくりのステップやタスクなど、企画づくりの手順や活動については、時間のある時にじっくり読みたいと考える閲覧者向けに、メソッドとは別に解説ページを設けた(図18)。

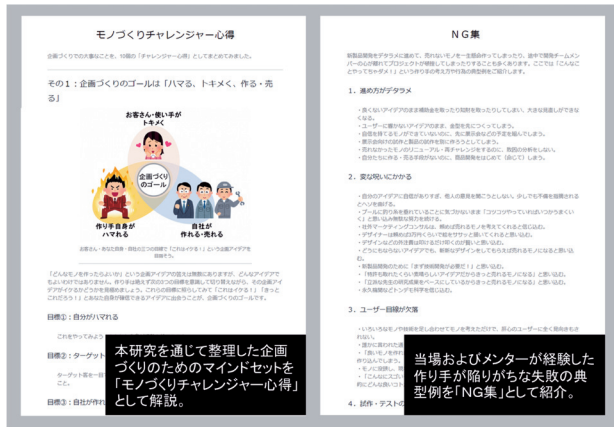


図18 解説ページ

解説ページではそのほかに、当事者がこれまでに関与した製品開発支援事例から抽出した、あるいはメンターから情報提供された、企画づくりや新製品開発における、作り手が陥りがちな失敗の典型例をNG集として紹介している。

そのほか、4.2.3項で解説した企画づくりワークシートや、38個のメソッドをプリントアウトしカード状にして活用できる印刷用データも提供している。

6.2 ツールの評価

作成途中段階の本ツールの内容について、都府県の公設試デザイン担当職を対象とした簡易的なアンケート調査を行い、図19に示す5つの設問について5段階の評価を依頼した。

その結果、本Webサイトの読後感を尋ねたQ1及び、内容が参考になるかを尋ねた設問Q2については、概ね高い評価を得られた。一方、このサイトを企業支援の現場で使いたいかを尋ねたQ4については、7名中3名から「是非使いたい」あるいは「ちょっと使ってみよう」との評価が得られたものの、その他の回答者は「今はわからない」と回答しており、今後の実践を通じた改良の余地がある。

また、サイトの使いやすさや読みやすさを尋ねたQ3については低い評価もいくつかあり、アンケート調査後に内容・構成・デザイン等を改善した。その他、自由回答では「メソッドをカード化するための印刷データが欲しい」という声や、メソッド解説ページについて「シンプルで良いが、もう少し解説が欲しい」といった声もあったため、それらを踏まえた改善も行った。

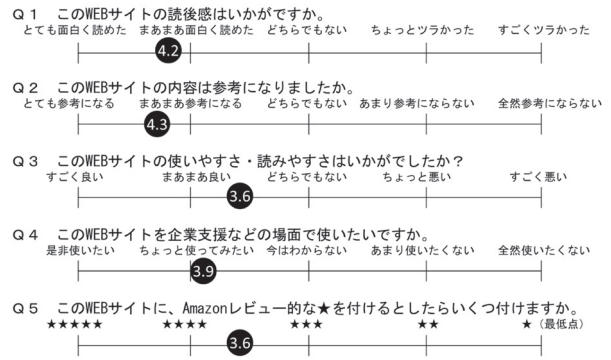


図19 Webサイトについてのアンケート結果

7. おわりに

受注型のものづくり企業等を対象に、新製品開発における企画づくりのための知識を創造・構築する理論化フェーズと、それらの知識を実際の新製品開発を通じて検証・ブラッシュアップする実践フェーズを行き来しながら、効果的な企画づくりのために身につけておきたい実践的な知識を取りまとめた。また、それらの知識を活用した企画づくりの実践を支援する、Webサイトやワークシートなどのツールを開発した。

本研究で取りまとめた企画づくりのための知識のうち、ステップやタスクは、新製品開発を登山に例えれば地図のようなものであり、開発チームの現在地や次に向かうべき方向を判断するための重要な知識と言える。メソッドは安全に山に登るためのさまざまなテクニックであり、これらを適切に活用することでより豊かで有意義な登山、すなわち優位性の高い新製品企画づくりの可能性を高められる。また、マインドセットは安全な登山をする上で身につけておくべき心構えのようなものであり、これらは新製品開発に臨む開発者など関係者が、事前に身につけておきたいものの考え方・心構えである。これらの知識を身につけて、実践で活用していくことで、直感や誤った知識に頼った新製品開発による投資の失敗を避けられる可能性が高まると考える。

一方、実践フェーズにおいて複数企業の協力を得ながら、各企業と個別に企画づくりや新製品開発に取り組んだ結果、同様の知識や手法を用いても進捗には大きな差が現れた。これは、開発リーダーやチームを支える社内体制、より具体的には、新製品開発という新しい業務に対するマネジメントの理解度による部分も大きいと考えられ、こうした新製品開発活動に入る前段階での、マネジメントにおける企画開発マインドの向上も大きな課題であることがわかった。

ステップ 知識	企画づくり			④製品開発	⑤商品化 ～事業化
	①企画づくりの準備	②企画アイデアの探索	③企画アイデアの具体化		
開発チームがやるべきこと	<ul style="list-style-type: none"> ・新製品開発に関する社内の理解を得る。 ・新製品開発や企画づくりのプロセスや手法、心構えなどを理解する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ぼんやりテーマを設定する。 ・テーマに沿ったコト×モノのアイデアを、さまざまな切り口から出し尽くす。 ・必要に応じて他社製品や使用状況等を調査する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・これだ！と確信できる筋の良いアイデアを絞り込む。 ・試作品をテストしアイデアの正しさを確かめる。 ・作り手として大事にしたい思い・こだわりを見つける。 	<ul style="list-style-type: none"> ・試作と検証を繰り返して使い手にとって良いモノを作り込む。 ・開発品の機能・性能を実験データにより見える化する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・商品のネーミングやマーク、パンフレットなど商品に必要な要素を作成する。 ・製造・販売方法を固める。 ・知財を守る。
企画づくりの主なタスク		<ol style="list-style-type: none"> 1. ぼんやりテーマの探索・発見 2. コト×モノのアイデアづくり 3. 情報の収集・手がかりの発見 6. アイデアの記述・完成度のチェック 	<ol style="list-style-type: none"> 2. コト×モノのアイデアづくり 3. 情報の収集・手がかりの発見 4. 試作等によるアイデアの検証 5. 思い・こだわりの発見 6. アイデアの記述・完成度のチェック 7. 取り組みの記録・まとめ 		
タスクごとのおすすめメソッド		<ol style="list-style-type: none"> 1. ぼんやりテーマの探索・発見 <ol style="list-style-type: none"> 1-1: 未完の案件に再チャレンジする 1-2: ユニークな素材・技術・材料を生かしたモノ・用途を考える 1-3: 自社のB TO B 製品を生かしたモノを考える 1-4: 素材やキットなどユーザー自身が作り上げるモノを考える 1-5: あらゆるモノを批判的に見てみる 1-6: ライバル商品や他社の取り組みから考える 1-7: 自分がやってみたいコト、欲しいモノから考える 1-8: 解決すべき問題、満たすべきニーズから考える 1-9: 社会的課題・ニーズから考える 1-10: 近未来の予測から考える 2. コト×モノのアイデアづくり <ol style="list-style-type: none"> 2-1: ターゲットとするユーザーやシーンを絞り込む 2-2: 使い手にとっての理想的な状態＝あるべき未来を考える 2-3: 「自分ならこう使いたい、こうできたら嬉しい」を考える 2-4: 参考例やメタファを探す 2-5: 問題の解決策を創造する 2-6: 「こう役に立つこんなモノ」の仮説をつくる 2-7: 目の前にあるモノのアイデアを生かす道を考える 2-8: モノの使用シーン・用途を広げる 2-9: モノに何かを掛け合わせて新たな用途・価値をつくる 2-10: 常識・当たり前・固定観念の枠の外側を考える 3. 情報の収集・手がかりの発見 <ol style="list-style-type: none"> 3-1: ライバル商品や他社の取り組みなどを調べる 3-2: 解決すべき問題、満たすべきニーズを発見・特定する 3-3: モノの使われ方を調べる 3-4: 利用可能な技術・知財などを調べる 3-5: 近未来を予測する 4. 試作等によるアイデアの検証 <ol style="list-style-type: none"> 4-1: ササッと試作する 4-2: 自分たちで評価する 4-3: ユーザーに見てもらおう 4-4: 機能・性能・価値を見える化する 5. 思い・こだわりの発見 <ol style="list-style-type: none"> 5-1: 開発のそもそもの目的や動機、与件を明確化する 5-2: 自分たちならではのこだわり・信念を見つける 5-3: 開発チームのスローガンを考える 5-4: キラーバリューをつくる 6. アイデアの記述・完成度のチェック <ol style="list-style-type: none"> 6-1: アイデアの完成度を判断する 6-2: アイデアをまとめる 	<p>EX-1: 製品に近いモノを作り込む</p> <p>EX-2: 商品化に向けた準備をする</p> <p>EX-3: 反応を探る・ちょっと売ってみる</p>		
開発チームが身につけたいマインドセット	<ol style="list-style-type: none"> ① 自社公認の活動にする ② 段階的なゴールを描く ③ 社外の人の知恵を借りる ④ 作り手自身の認識・センスを上げる 	<ol style="list-style-type: none"> ⑤ リーダーは開発品の親となれ ⑥ 企画づくりのゴールは「ハマる、トキメク、作る・売る」 ⑦ コトとモノを行き来するように考える ⑧ 遊ぶように、好き勝手に妄想する 	<ol style="list-style-type: none"> ⑨ ササッと見える化・さわれる化する ⑩ 思い・こだわりの発見が大事 		

謝辞

最後に、商品企画実践講座にメンターとして参加頂き、多大な助言を賜った株式会社コボ代表取締役社長・山村真一氏を始め、同講座に意欲的に取り組んでくださった参加者の皆

さま、実践フェーズにおける新製品企画づくりなどの取り組みにご協力頂いた道内企業各社、さらに、講座実施のノウハウを惜しみなく提供くださった、あだち新製品開発講座講師・有限会社エッチピーアイ代表・大塚聰氏に心より御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 東京都足立区：あだち新製品開発講座,
[https://www.city.adachi.tokyo.jp/s-shinko/shigoto/
nyusatsu/29-new-product.html](https://www.city.adachi.tokyo.jp/s-shinko/shigoto/nyusatsu/29-new-product.html)
- 2) IDEO：IDEO Method Cards-51 Ways to Inspire
Design, William Stout, (2003)
- 3) 日高青志ほか2名：製品コンセプト設計支援技術に関する研究, 北海道立工業試験場報告, No.306, pp.95-107,
(2007)
- 4) アレックス・オスターワルダー：ビジネスモデル・ジェ
ネレーション, 翔泳社, (2012)

心拍変動及び脳波の解析による心的状態推定

泉 巖, 前田 大輔, 中島 康博, 栗野 晃希, 橋場 参生

Estimation of Mental State Using Heart Rate Variability and Electroencephalogram Analysis

Iwao IZUMI, Daisuke MAEDA, Yasuhiro NAKAJIMA,
Koki KUWANO, Mitsuo HASHIBA

抄 録

メンタルケアを目的とした製品の開発現場では、その効果検証のために心的状態を客観的に把握する手法が求められている。本研究では、生理心理学の知見を活用し、心拍変動及び脳波からリラックスに関する心的状態を客観的・定量的に推定するための手法を検討した。これを照明観察実験に適用し、3種類の点灯パターン（1/fゆらぎ・点灯・点滅）を観察した場合の心的状態を推定した。その結果、1/fゆらぎ照明観察時は心拍変動性の高周波成分が有意に上昇、 β 波成分が有意に低下し、最も安らぎ・落ち着いた状態にあったことが示唆された。この結果は被験者の主観評価とほぼ一致したことから、本手法の有効性を確認した。

キーワード：心拍変動，脳波，リラックス，照明，1/fゆらぎ

Abstract

At the development of products for mental care, a method for objectively grasping the mental state is required to verify the effect of products. In this research, we investigated a method to estimate the mental state of relaxation objectively and quantitatively using heart rate variability and electroencephalogram, from the viewpoint of physiological psychology. By use of this method, we estimated the mental state of subjects who observed three types of lighting patterns (1/f fluctuation, normal lighting, and blinking). As a result, HF(High Frequency component) was significantly increased and β -wave component was significantly decreased during observing 1/f fluctuation, suggesting that the mental state had been the most comfortable and calm. This result was in agreement with the subjective evaluation, and the effectiveness of this method was confirmed.

KEY-WORDS : Heart Rate Variability, Electroencephalogram, Relax, Lighting, 1/f fluctuation

1. はじめに

近年の健康意識の高まりを背景として、癒しやストレス軽減といったメンタルケアを目的とした製品の開発が積極的に行われている。こうした開発現場では、製品が与える心的効果の検証のため、人の心的状態を客観的・定量的に把握する手法が求められている。このような手法はいくつか提案されているものの、主観評価との整合性が課題となっている。そこで筆者らは、外的刺激の変化に伴う心理生理反応の計測・

解析により、主観評価と合致する心的状態推定手法について検討した。

本研究では、安らぎや心地良さといったリラックス感に関する心的状態を客観的・定量的に推定するため、副交感神経と脳波の心理生理反応に着目し、心拍変動解析及び基礎律動解析による心的状態推定手法を考案した。これを照明観察実験に適用し、照明の点灯パターンが与える心的効果を推定した。さらに、その結果を被験者の主観評価と比較することで、本手法の有効性を検証した。

事業名：経常研究

課題名：心的状態推定のための生体情報計測技術の開発

2. 心的状態推定に用いる生体情報の検討

2.1 リラックスと副交感神経反応

我々の生活には、リラックスに関する単語が深く浸透している。リラックスは「くつろぐこと、力を抜くこと、緊張を緩めること」¹⁾、リラクゼーションは「神経、筋の緊張並びに精神的緊張の緩和を促すこと」²⁾と定義されている。ストレス社会と評される現代において、ストレス解消のために人々がリラックスを求めるのは必然的な成り行きと言える。

リラックスに対する認識や感受性は個人の感覚に由来するものが大きい傾向にあるが、Benson³⁾は「ストレス反応は交感神経反応、リラクゼーション反応は副交感神経反応とみなすことができる」としており、その考えにもとづいた文献も多数存在する⁴⁻⁵⁾。交感神経・副交感神経は、自律神経系を構成する末梢神経であり、循環、呼吸、消化、発汗・体温調節、内分泌機能といった不随意機能を互いに拮抗しながら調整し、ホメオスタシスを維持している⁶⁻⁷⁾。交感神経は、ノルアドレナリン、アドレナリンを主とした神経伝達物質により、心拍数の上昇、末梢血管の収縮、血圧の上昇といった循環器系機能の亢進や、肝臓や筋肉に蓄えられたグリコーゲンを分解して血糖値を上昇させるなどの働きがあり、危機に対処できる態勢を整えることから、「闘争と逃走の神経」とも呼ばれる。一方、副交感神経における神経伝達物質はアセチルコリンが主であり、循環器系に対してはおもに機能を抑制させる働きがある。

2.2 心拍変動解析による副交感神経機能の推定

心臓の拍動間隔は一定ではなく、一拍ごとに時間間隔が異なっている。このような心拍間隔の変動を、心拍変動性 (HRV: Heart Rate Variability) と呼ぶ。心拍間隔は、図1のように心電図R波のピーク間隔 (RRI: R-R Interval) によって定義され、R波の発生時刻を横軸、直前のR波とのRRIを縦軸にとったものをRRIトレンドグラムと呼ぶ (図2)。HRVは、RRIトレンドグラムのスペクトル解析等により評価され、健常者のHRVスペクトルには主たるピークが2つある (図3)。これらは0.04-0.15Hzと0.15-0.40Hz帯の成分であり、前者を低周波成分 (LF: Low Frequency component)、後者を高周波成分 (HF: High Frequency component) と呼ぶ。LFは血圧変動、HFは呼吸の周期と一致することが確認されており、これらの周期は交感神経機能及び副交感神経機能が関与していることから、LF、HFはその評価指標として用いられている。

副交感神経機能はLFとHFの両方に関与するが、交感神経機能はLFにしか関与しない。つまり、HFは副交感神経系機能のみを反映する。2.1節で述べたように、人がリラックス状態にあれば副交感神経系が反応することから、HFの変動に着目することでリラックス状態の推定が可能となる。

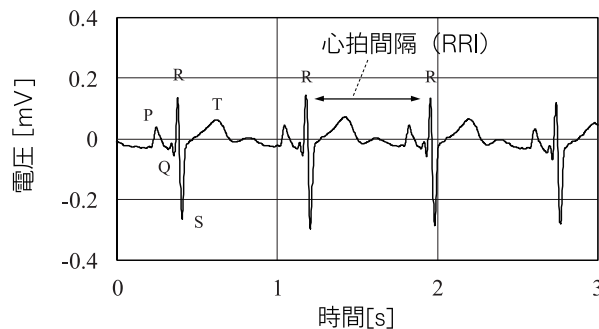


図1 心電図における心拍間隔

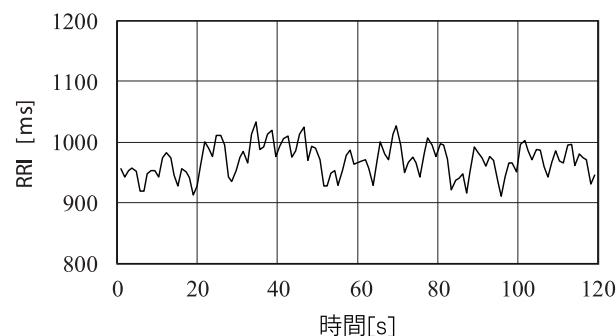


図2 RRIのトレンドグラム

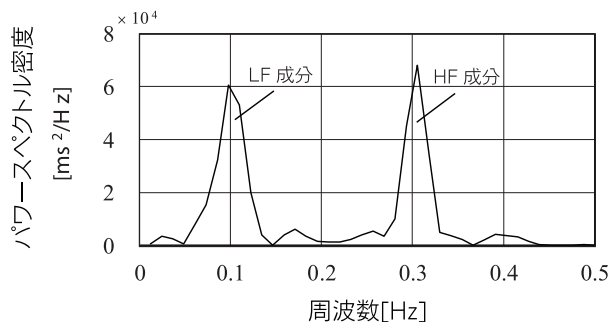


図3 RRIのスペクトル解析

2.3 脳波と覚醒水準の関係

頭皮上に電極を置きアンプで増幅すると、図4のように0.5-100Hzの周波数で構成される数十 μ V程度の電位変動が得られる。これを脳波という。脳波は、脳活動に伴う覚醒水準に応じて周波数及び振幅が変化することが知られている。

脳波を構成する主要な周波数帯成分は基礎律動と呼ばれ、

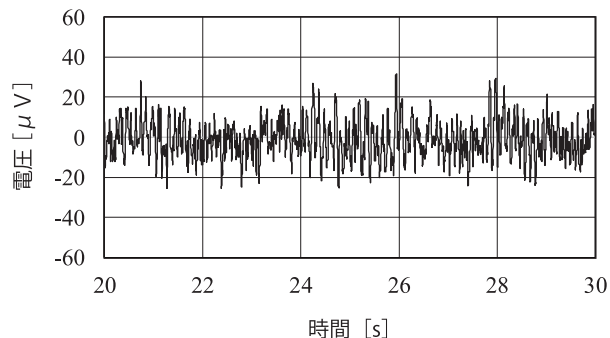


図4 脳波

おもに δ 波(0.5-4Hz)、 θ 波(4-8Hz)、 α 波(8-14Hz)、 β 波(14Hz~)に分類される。基礎律動は、覚醒水準が高いときには高周波帯、低いときには低周波帯の成分が優位になることが知られている。 δ 波と θ 波は徐波と呼ばれ、 δ 波は睡眠が深いとき、 θ 波は入眠初期のまどろみ状態で出現する。 α 波は、目を閉じて光刺激を遮断したり、ぼんやりと目覚めた状態のときに優勢となり、開眼状態では減衰する。 β 波は速波と呼ばれ、意識レベルの高い状態又は興奮した状態で出現し、能動的で活発な思考や集中した状態と関連づけられている。安らぎや心地良さといったリラックスな状態にある場合は、意識を保ちながらも比較的低い覚醒水準にあるとされている。本研究では開眼条件でも減衰しにくい β 波に着目し、その周波数解析により覚醒水準の評価を行い、リラックス状態を推定した。

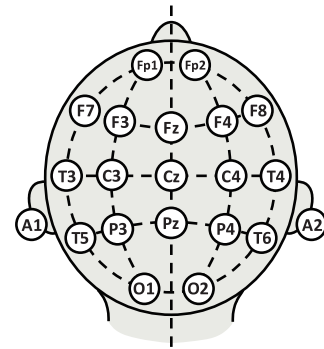


図6 国際10-20法にもとづく電極配置

3. 生体情報の計測及び解析手法

3.1 心電図の計測と心拍変動解析

心電図は、心電心拍センサ (DL-320: S&ME社製) を用いて、図5のように第II誘導で計測した (サンプリングレート: 1 kHz)。心電図からRRIを算出し、RRIの高速フーリエ変換によって得たパワースペクトル密度を0.15-0.40Hzの区間で積分することで、HFを算出した。

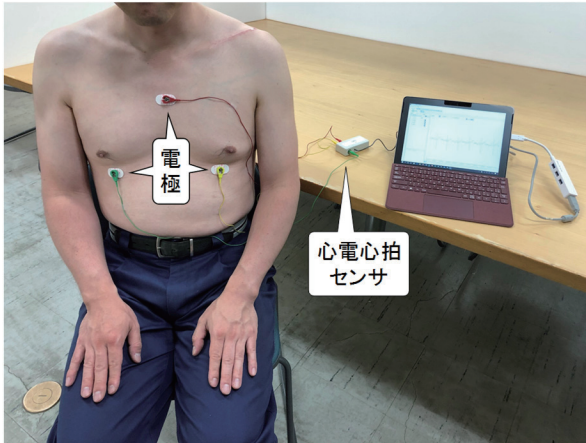


図5 心電図計測 (DL-320: S&ME社製)

3.2 脳波の計測と基礎律動解析

脳波は、2ch脳波センサ (DL-160A: S&ME社製) を用いて、図6の国際10-20法にもとづくFp1-A1, Fp2-A2誘導により計測した (サンプリングレート: 1 kHz)。また、瞬目に伴うアーチファクト除去のため、図7のように無線筋電センサ (DL-5000: S&ME社製) を用いて眼電位を計測した (サンプリングレート: 1 kHz)。眼電位がある閾値を超えた場合に瞬目が発生したと判断し、その前後それぞれ0.5秒区間の脳波を除去した (図8)。瞬目のアーチファクトを除去した脳波データを高速フーリエ変換し、得られたパワースペ

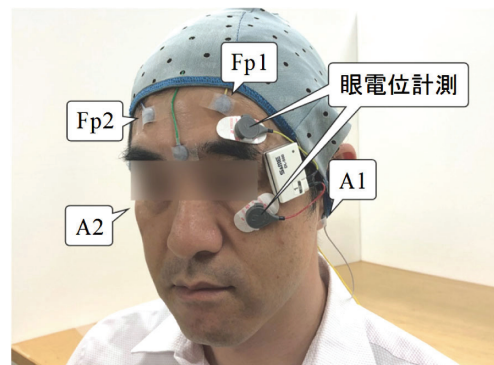


図7 脳波及び眼電位の計測

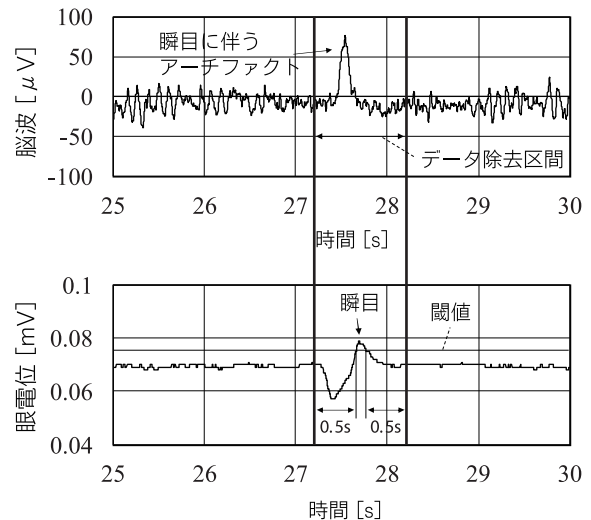


図8 瞬目に伴うアーチファクトの除去

クトル密度を14-20Hzの周波数帯で積分することで、 β 波成分を算出した。

4. 心的状態推定実験の検討

HF及び β 波成分の変化に着目した心的状態推定の有効性検証のため、ヒトの五感の中でも視覚に着目した実験系を検討し、心的ストレス課題と照明観察を組み合わせた実験により、照明の点灯パターンが与える心的効果を推定した。

4.1 心的ストレス課題

心的ストレスを与える課題の一つに、内田クレペリン精神検査がある⁹⁾。こうした継続的な計算作業は、精神的疲労やストレスを負荷する手法として多くの先行研究で利用されていることから、内田クレペリン検査を模した計算課題（図9）を用いて、被験者に心的ストレス負荷を与えた。

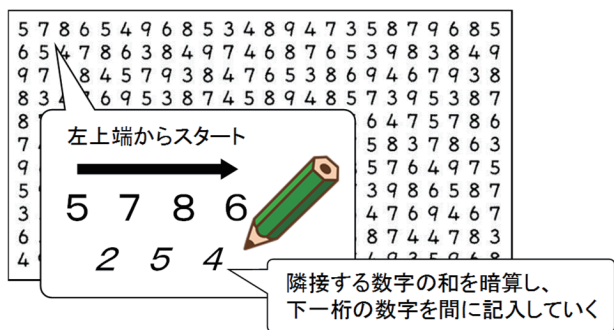


図9 計算課題

4.2 照明観察

白色LEDを用いて、3種類の点灯パターン（1/fゆらぎ、常時点灯、3Hz点滅）をPC上で切替可能な照明を製作した（図10, 11）。



図10 観察用照明

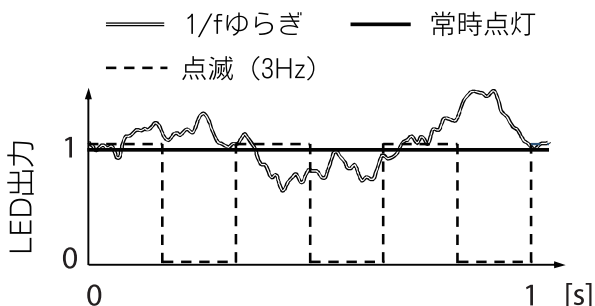


図11 LEDの出力制御

4.2.1 1/fゆらぎ

1/fゆらぎは人に安らぎや心地よさ、快適感などを与える信号とされており、自然風の風速や風向、鳥のさえずり、潮騒、蛍の光等の特徴について調べた事例ではいずれにも1/fゆらぎの存在が報告されている⁹⁾。実験では、M系列信号発生器と高速フーリエ変換を用いて人工的に生成した1/fゆらぎ信号を用いた¹⁰⁾。

4.2.2 点灯パターン制御用コントローラ

LEDの点灯パターンは、マイコン（Arduino Uno）を用いたPWM（Pulse Width Modulation）制御で生成し、PCのアプリケーション上で切替できるようにした。1/fゆらぎの点灯パターンについては、マイコンの内部メモリに格納した1/fゆらぎの配列データを利用し、矩形波のパルス幅を制御・出力した。ゆらぎ信号は180秒でループさせ、平均照度が常時点灯及び点滅の照度と一致するように調整した。

4.3 実験手順

明室で被験者を座位姿勢にて5分間安静にさせた後、心的ストレス課題を10分間課した。その後、部屋を暗室にして照明を5分間観察させた。この手順を3回繰り返して3種類の点灯パターンを観察させ（図12）、それぞれの区間で被験者の心電図及び脳波を計測した。

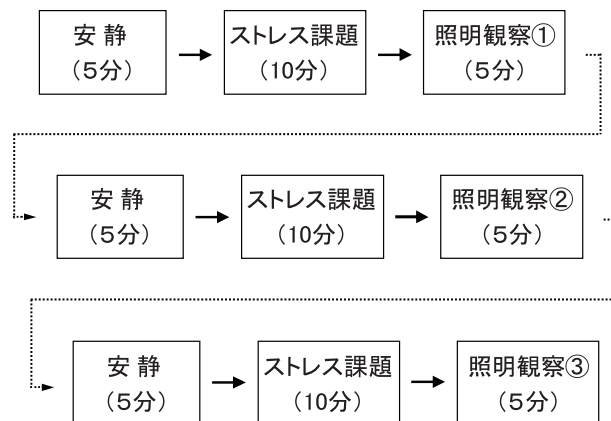


図12 実験手順

4.4 被験者

被験者は20～40代の健常な男性6名とした。3種類の点灯パターンを提示する順番（全6通り）は、すべての被験者で異なるようにした。

被験者には本研究の概要を口頭で説明し、インフォームド・コンセントを実施した上で実験に参加してもらった（図13）。本実験は、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の規定にもとづき、当场における倫理審査委員会の承認を得た後に実施した。



図13 実験の様子

5. 実験結果

5.1 各課題遂行時の生体情報変化

HFと β 波成分を1分ごとに算出し、安静区間の平均値と比をとった結果の一例をそれぞれ図14、15に示す。HFは計算課題開始後から徐々に下降し、照明観察を始めると上昇した。 β 波成分は計算課題開始後に上昇し、照明観察を始めると低下した。こうした傾向は、ほかの被験者の実験結果においても確認することができた。

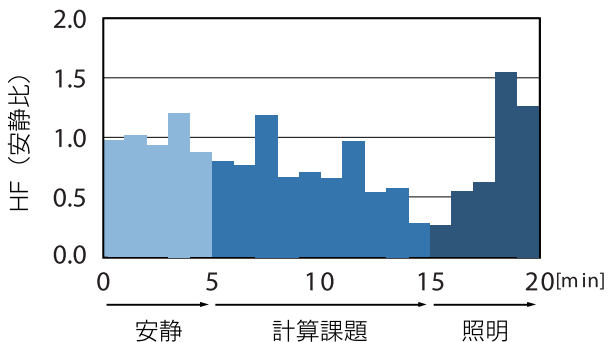


図14 1/f ゆらぎパターン観察時のHFの変化

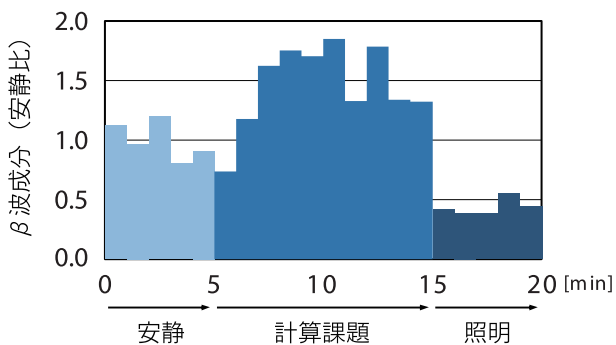


図15 1/f ゆらぎパターン観察時の β 波成分の変化

5.2 点灯パターンの違いによる生体情報変化

照明観察区間のHF及び β 波成分の平均値を算出し、安静区間の平均値との比を点灯パターンごとに比較した結果を図

16、17に示す。常時点灯パターン観察時に対して1/fゆらぎパターン観察時のHFが有意に上昇し、点滅パターン観察時に対して1/fゆらぎパターン観察時の β 波成分が有意に低下した。

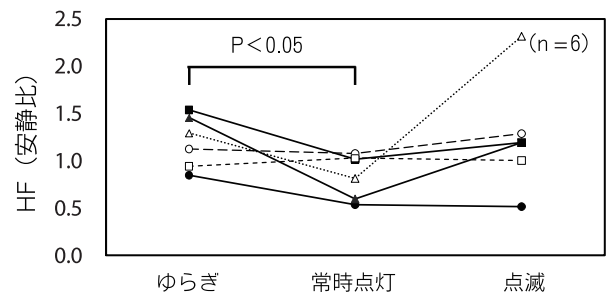


図16 各点灯パターン観察時のHFの変化

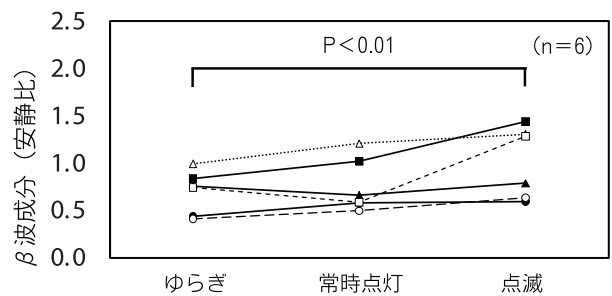


図17 各点灯パターン観察時の β 波成分の変化

また、実験終了後に実施したヒアリングで被験者から得たコメントを以下に示す。1/fゆらぎパターン観察時は落ち着きや穏やかさを感じるなど、リラックスな状態にあったという回答が多くを占めた。

- 最も気分が落ちついたのはゆらぎ照明。点滅パターンは見えていて不快だった。
- ゆらぎパターンをぼんやり眺めたときが一番楽な気分だった。

- ・常時点灯のときは退屈で、点滅パターンは不快だった。ゆらぎパターンは見ていて飽きなかった。
- ・ゆらぎと常時点灯に差は感じなかったが、点滅は不快だった。
- ・ゆらぎ照明を見ているときが一番穏やかな気分だった。
- ・点滅は不快だったが、ゆらぎは落ち着きを感じた。

6. 考察

6.1 心的ストレス課題遂行時の心的状態推定

心的ストレス課題遂行時は β 波成分が活性化したことから、覚醒水準が上昇し、計算作業へ集中した状態であったことが考えられる。また、計算課題時はHFが低下したことから、副交感神経活動が抑制されていたことがわかる。以上より、被験者は計算課題によって強制的に計算作業へ集中させられ、その結果として心的ストレスを受けたことが推定できる。

6.2 照明観察時の心的状態推定

各点灯パターン観察時のHF及び β 波成分を比較した結果から、1/fゆらぎパターン観察時は常時点灯パターン観察時より副交感神経活動が亢進し、点滅パターン観察時より覚醒水準が低下していたことがわかる。よって、1/fゆらぎパターン観察時は最も安らぎや落ち着きといった状態にあったことが推定できる。この推定結果は被験者の主観評価とほぼ一致したことから、本手法による心的状態推定の有効性を確認することができた。

7 おわりに

本研究では、安らぎや心地良さといったリラックス感の客観的・定量的な推定を目的に、副交感神経及び脳波の心理生理反応に着目し、心拍変動解析及び基礎律動解析による心的状態推定手法について検討した。これを照明観察実験に適用し、3種類の点灯パターンが与える心的効果を推定した。その結果、被験者の主観評価とほぼ一致する推定結果が得られたことから、本手法の有効性を確認した。

今後は、ヒトの五感における視覚以外の刺激を対象とした実験系についても検討・検証を進め、実際の製品やサービスの開発支援へ展開していく。

参考文献

- 1) 新村出：広辞苑 第七版，岩波書店，3640PP., (2018)
- 2) 和田 攻・南 裕子・小峰光博：看護大事典，医学書院，3042PP., (2010)
- 3) Herbert Benson, Miriam Z Klipper: The Relaxation Response, Harper Collins, 240PP., (2000)

- 4) Jennifer A. Galvin, Herbert Benson, Gloria R. Deckro, et al.: The Relaxation Response: reducing stress and improving cognition in healthy aging adults, Complementary Therapies in Clinical Practice, Vol.12 No.3, pp.186-191, (2006)
- 5) Bei-Hung Chang, Ulrike Boehmer, Yue Zhao, et al. "Relaxation Response With Acupuncture Trial in Patients With HIV: Feasibility and Participant Experiences, The Journal of Alternative and Complementary Medicine, Vol.13 No.7, pp.719-724, (2007)
- 6) 浅井麻紀：自律神経機能検査，文光堂，508PP., (2015)
- 7) 真島英信：生理学，文光堂，630PP., (1996)
- 8) 坂本千秋・栗崎純一・小林三智子：主観的および客観的ストレス応答を増大させる課題の提案，日本官能評価学会誌，Vol.20 No.1, pp.16-21, (2016)
- 9) 安久正紘・大口國臣：人に快適感を与える1/fゆらぎとその家電機器への応用，電気学会誌，Vol.113, pp.27-33, (1993)
- 10) 橋場参生・新井浩成・大崎恵一：ゆらぎ信号を用いた電子機器制御技術，北海道立工業試験場報告，No.305, pp.87-90, (2005)
- 11) 三宅晋司：商品開発・評価のための生理計測とデータ解析ノウハウ，NTS，324PP., (2017)
- 12) 高薄一弘：ストレス・疲労のセンシングとその評価技術，技術情報協会，598PP., (2019)

研究ノート

Research Note

アサリ垂下養殖における軽労力化技術の開発

浦池 隆文, 鶴谷 知洋, 伊藤 壮生, 今岡 広一, 畑沢 賢一

Development of Labor Saving Technology for the Suspended Culture of Asari Clam

Takafumi URAIKE, Tomohiro TSURUYA, Soki ITO,
Koichi IMAOKA, Kenichi HATAZAWA

抄 録

日本海海域の漁業生産量及び生産額を底上げする新たな漁業振興策の推進が求められている。道総研では、利用が少ない漁港内の静穏域を活用した新たな養殖事業を創生するため、養殖に適した漁港内環境を解明するとともに、漁港静穏域におけるアサリなどの二枚貝養殖技術を開発し、漁業者にとって魅力ある養殖事業化プランを提案することを目的として総合的な取り組みを行った。

当场では、アサリの垂下養殖に関して、高齢者や女性にもやさしい作業環境実現のため、養殖工程の軽労力化技術について検討を行い、実証試験による効果の検証を行った。まずはじめに、養殖作業において身体への負担が大きいと考えられる養殖かごの吊り下げ・引き上げ作業を中心に作業内容を調査し、負担軽減や作業の効率化のポイントを抽出した。これをもとに、補助資材の活用と、養殖に用いる筏の構造の見直しによる工程の改善を検討した。新たに設計・製作した筏による養殖作業試験を行ったところ、作業時間の短縮と身体的負担の低減が可能なことを確認した。

キーワード：日本海、アサリ、垂下養殖、軽労力化

1. はじめに

H28～R1年度に道総研が実施した重点研究「日本海海域における漁港静穏域二枚貝養殖技術の開発と事業展開の最適化に関する研究」では、日本海海域の漁業生産量および生産額を底上げする新たな漁業振興策の推進を目的として、利用の少ない漁港静穏域を活用した二枚貝養殖の技術確立に関する研究開発を行った。

当场では、アサリの垂下養殖に関して、高齢者や女性にもやさしい作業環境実現のため、養殖工程の軽労力化技術について検討を行い、実証試験による効果の検証を行った。本報告では、既往の養殖作業の分析による作業負担の低減や効率化に向けた課題の抽出、補助資材の活用、及び養殖に用いる筏の構造の見直しによる工程の改善について報告する。



図1 養殖に用いる資材（稚貝・基質・カゴ）

2. アサリ垂下養殖技術について

日本海海域でのアサリ垂下養殖技術確立のため、上ノ国町大崎漁港及び海洋牧場において、水産試験場による養殖試験が行われた。同試験におけるアサリの垂下養殖方法は、稚貝と砂利などの基質を入れたカゴ（図1）を陸上施設で準備し、これを船舶を用いて海上運搬して、漁港静穏域に設置した筏から海中へ垂下するというものである。垂下作業の様子を図2に示す。

養殖試験の結果から、人工種苗生産した殻長5～10mmの稚貝を、1年半～2年垂下養殖することにより、殻長30mm以上の出荷サイズの成貝が得られることがわかった。アサリの生育の度合いは、カゴに投入する貝の密度と養殖期間によ

事業名：重点研究

課題名：日本海海域における漁港静穏域二枚貝養殖技術の開発と事業展開の最適化に関する研究



図2 垂下作業の様子

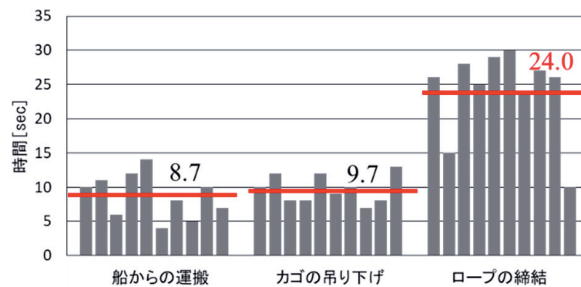


図4 吊り下げ作業に要する時間



図3 養殖作業の流れ

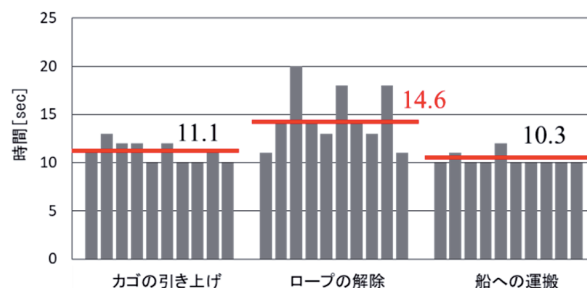


図5 引き上げ作業に要する時間

り変化するが、一カゴあたり100個の稚貝と約5kgの基質を入れ、これを一本のロープに2連結（2段組）することが標準の養殖条件として見出された。試験で使用した筏は外寸が6.1m×6.1mで、内側が4区画に分割されており、それぞれの区画に2段組のカゴを25組垂下し、筏全体では100組（200カゴ）垂下する。

このように垂下した養殖カゴなどの資材には、雑海藻などが付着することにより重量が増加し、収穫作業時の作業性低下につながることから、半年に一度程度資材を回収して、陸上での洗浄作業を行う必要がある。垂下養殖の流れを図3に示す。養殖開始から収穫までの間に、カゴの吊り下げ・引き上げ作業を4～5回行う必要がある。また、その都度陸上と海上の筏の間で、船舶によるカゴの運搬を行う必要がある。

3. 作業内容の調査・分析と軽労力化の指針

前述のとおりアサリの垂下養殖作業は、養殖開始・カゴ洗浄・収穫の都度、不安定な筏上で腰をかがめた状態でカゴの吊り下げ作業と引き上げ作業を定期的に行う必要があるため重労働である。このような筏上での作業を、動作で分類するとおおむね以下の6工程に分けられる。

- 吊り下げ作業
 - ① 船舶から筏へのカゴの運搬
 - ② カゴの吊り下げ
 - ③ ロープ締結
- 引き上げ作業
 - ④ カゴの引き上げ
 - ⑤ ロープ解除
 - ⑥ 筏から船舶へのカゴの運搬

そこで、作業の様子をビデオ撮影し、工程ごとに要する時間の計測を行った。それぞれの作業について、無作為に抽出した10回の平均時間を取ると、図4および図5のような結果となり、ロープの締結と解除に時間を要していることがわかった。

このことから、慣行の養殖作業において身体的負担を低減するためには、補助具を活用することでロープの締結と解除に費やす時間を短縮することが有効と考えられた。一方で、海上に設置した筏上で作業を行う場合、カゴの吊り下げ・引き上げと、運搬にかかる時間を短縮することは難しい。これについては、筏の構造そのものを見直し、作業体系自体を改善する必要があると考えられた。

以上の作業内容分析結果をもとに、養殖作業の軽労力化へ向けた以下2点の改善項目について、実際の作業試験を行うことで効果の検証を行った。

4. 補助金具の活用による作業時間の短縮

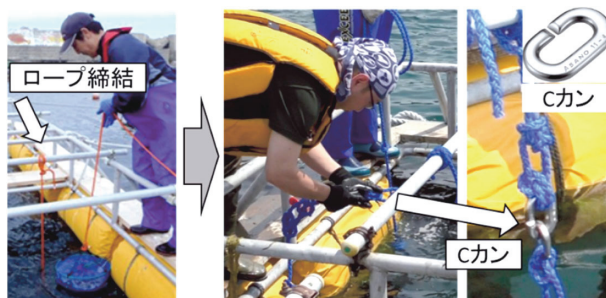


図6 Cカンの活用による作業時間の短縮

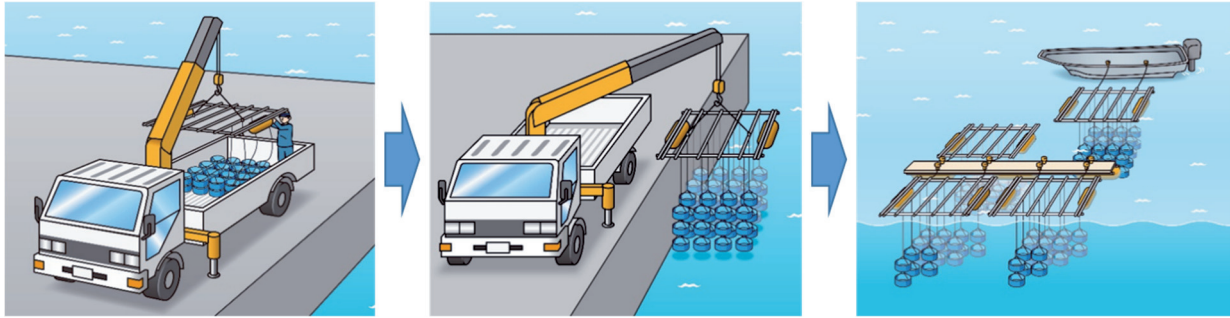
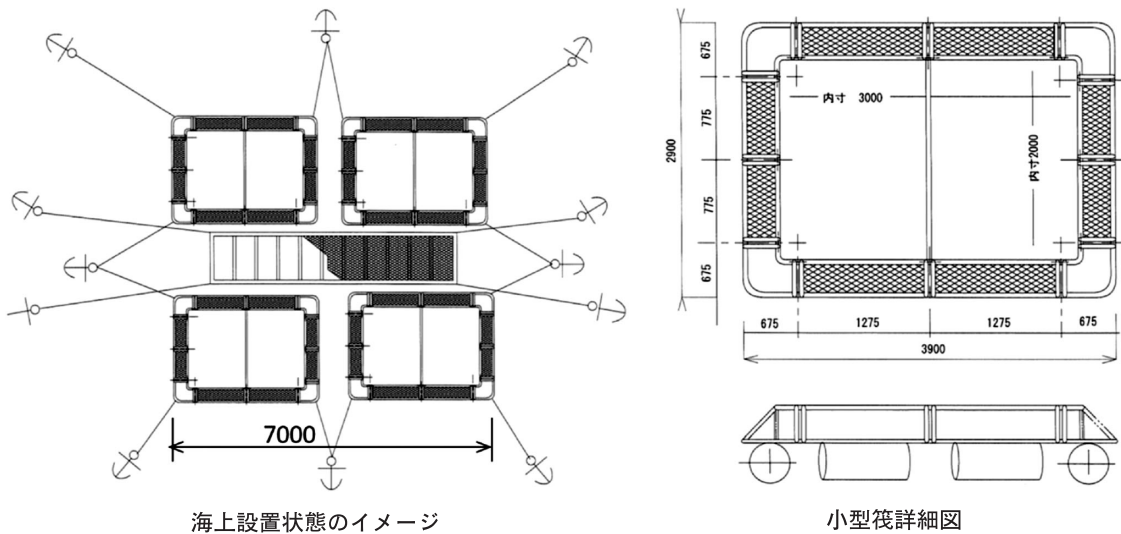


図7 小型筏による作業のイメージ



海上設置状態のイメージ

小型筏詳細図

図8 小型筏の概要

ロープの締結と解除に要する時間を短縮するため、Cカンと呼ばれる補助金具の活用を検討した。Cカンは図6のような形状をしており、2個一組で使用される。養殖開始の準備を行う際に、筏上の桁にCカンを吊り下げておく。一方で、カゴを吊るすためのロープにもCカンを取り付けておく。このように準備することで、筏上での垂下作業時には両方のCカンを組み合わせるだけでロープの締結が可能となる。作業時間を計測し、慣行の方法と比較したところ、吊り下げ作業（ロープ締結）で1/10程度、引き上げ作業（ロープ解除）で1/6程度の時間でロープの締結・解除が実施可能であり、作業者の身体的な負担を大幅に低減することが可能なことを確認した。

5. 筏の改良による作業の効率化

Cカンの使用により作業時間の低減が可能であるものの、海上に設置した筏上での作業は、腰をかがめた姿勢に起因する身体的な負担の発生が避けられない。そこで、筏を小型化しクレーン付きトラックで吊り上げて、これまで筏上で行っていた作業を陸上で行う方式を検討した。

この方法であれば、図7のように筏を陸上に引き上げ、養



図9 製作した筏

殖を開始する際の準備作業や、カゴの交換作業、収穫作業を陸上で行うことが可能になる。陸上で作業を行ったあと船舶で筏を曳航して設置場所まで移動する。このようにすることで、不安定な筏上での腰をかがめた作業が不要となる。本課題では、図8、図9に示す筏を試作した。一組の筏全体はおよそ7m四方で、外寸2.9m×3.9mの小型筏4基と栈橋で構成される。海上での占有面積は慣行の筏より若干増加するが、小型筏4基で大型筏1基と同数のカゴを垂下することができる。養殖資材を含む収穫時の小型筏1基の総重量は1000kg以下を想定しており、中型以上のクレーン付きトラックで吊り上げることが可能である。

これに加え筏を小型化することのメリットとして、製作費



図 10 小型筏による作業試験の様子

を抑えられることが挙げられる。慣行の筏は6.1m×6.1mと大型であり、車両積載時の高さが道路法の高さ制限3.8mを超えるため、完成状態での陸送ができないことから現地での溶接組み立てを行う必要があり、作業にかかる作業工賃が発生する。これに対し今回試作した筏は工場で作成した状態での陸送が可能であり、現地での組み立て作業を省略できることから、比較的安価に製作することが可能となる。

新たに設計・製作した筏を使用して行った作業試験の様子を図10に示す。前述のCカンも併用することで資材垂下用ロープの締結と解除を短時間で行うことができるのに加え、クレーン作業、筏の曳航、海上への筏の設置・分離といった一連の作業を支障なく実施可能であり、かつ身体的負担の軽減が可

能なことを確認した。

6. おわりに

日本海海域における新たな養殖事業の展開に向け、当场が取り組んだアサリ垂下養殖の軽労力化技術のほか、水産試験場を中心とした共同研究機関による、他の二枚貝の垂下養殖技術や、養殖に適した漁港の診断技術などに関する知見が得られた。これらの研究成果をもとに「二枚貝垂下養殖事業化プラン」を作成し、漁業者や漁業協同組合へ提案した。今後も継続して、生産拡大や販売促進などに向けた取り組みを進める。

天然物エキスの脱色プロセス設計に向けた基礎検討

吉田 誠一郎, 松嶋 景一郎, 鎌田 樹志*

A Fundamental Study of Decolorization Process for Natural Product Extracts

Seiichiro YOSHIDA, Keiichiro MATSUSHIMA, Tatsuyuki KAMADA*

抄 録

吸着分離技術は天然物エキス等の脱色に広く用いられるが、吸着材の種類膨大さや脱色現象の複雑さ等から、体系化はされていない。本研究では、多孔質炭素材料である活性炭の吸着特性の評価技術を確認するために、着色物質のメラノイジンをモデルとした基礎検討を行った。その結果、多孔質炭素材料の特定の細孔がメラノイジンの吸着特性を支配していること、それが実際のエキスの脱色にフィードバック可能なことを明らかにした。

キーワード：脱色, 活性炭, 吸着分離, 天然物エキス, 多孔質炭素材料

1. はじめに

北海道は農水畜産物に由来する種々の天然資源が豊富に存在しており、これらを加熱、抽出したエキス形態の商品が数多く存在している(図1)。その一方で、多くのエキスは製造工程の加熱などで着色しており、そのままでは化粧品や医薬品といった高度な用途への展開が困難であった。そのため、吸着などによりエキスを脱色するプロセスを導入する必要があるが、着色物質や液相吸着そのものの複雑さなどから、そのプロセス設計は容易ではない。

エキスの着色の原因物質は、おもに糖やアミノ酸等が加熱等で反応することで生じる褐色物質のメラノイジンである¹⁻³⁾。メラノイジンは糖やアミノ酸の種類、熱履歴などにより、様々な構造を取るため、メラノイジンの分離に適した効率的な吸着材の選定は非常に困難である。

液相の脱色プロセスに用いられる吸着材は、多くの場合活性炭であり、複数のメーカーから活性炭が販売されている。しかしながら、活性炭の性状は多様であり、脱色用の活性炭であっても、メラノイジンに対する脱色能は活性炭の種類によって大きく異なる。例として、液重量に対して1wt%の活性炭を添加したメラノイジン水溶液の、活性炭除去後のろ液の写真を図2に示す。活性炭Aを用いた場合は溶液の色は

原液と変わらないが、Bでは色が薄く、Cでは完全に透明となった。このように、活性炭によって脱色の度合いは大きく異なる。このような事実から、実際の脱色プロセスを設計する際には、種々の脱色用活性炭をスクリーニングする必要があり、これが設計上のボトルネックであった。



図1 道産天然資源エキスの利活用イメージ

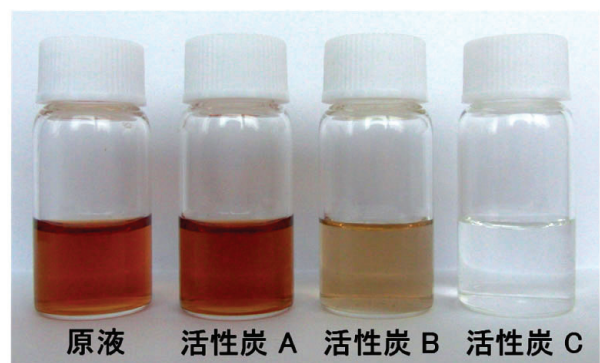


図2 活性炭を1wt%添加したメラノイジン水溶液(24h後、活性炭除去後のろ液)

* エネルギー・環境・地質研究所,

*Research Institute of Energy, Environment and Geology

事業名：奨励研究

課題名：道産天然資源の高度利用に向けた吸着分離技術の開発

そこで本研究では、効率的に脱色プロセスを設計するための基礎研究として、種々の活性炭を用いたメラノイジンの脱色をモデルとして、活性炭の特性と脱色性能の関係を明らかにすることとした。

2. 実験方法

2.1 試薬等

メラノイジンは公益財団法人日本醸造協会から入手した。グルコース、グリシン、炭酸水素ナトリウムは富士フィルム和光純薬工業株式会社から入手した。N-(2,4-Dinitrophenyl)-L-Alanine (分子量 255), シトクロームC (分子量 12,400), α -キモトリプシン (分子量 25,000), ウシ血清アルブミン (分子量 66,000), ブルーデキストラン (分子量 200,000) はSigma Aldrichから入手した。活性炭はフタムラ化学株式会社, 武田薬品工業株式会社 (現大阪ガスケミカル株式会社), 三菱化学カルボン株式会社 (現カルボンカーボン社), 日本ノリット株式会社 (現キャボットコーポレーション), カーボンテック (現株式会社MCエバテック) からそれぞれ入手したものをを用いた。

2.2 活性炭によるメラノイジンの脱色試験

メラノイジンの1,000mg/L水溶液を以下の手順で調製した。メラノイジン500mgを0.1mol/L水酸化ナトリウム水溶液33.3mLに溶解した。このメラノイジン水溶液を0.04mol/Lクエン酸緩衝溶液250mLで希釈し、0.1mol/L塩酸水溶液でpH7に調整した。その後、メラノイジン水溶液を脱イオン水で500mLにメスアップし、孔径0.45 μ mのメンブレンフィルターでろ過したものを吸着実験に用いた。

1,000mg/Lのメラノイジン水溶液に対して、所定量の活性炭を加え、25 $^{\circ}$ Cの恒温槽で24h振とうした(100rpm)。吸着が終了したメラノイジン水溶液から、0.45 μ mのメンブレンフィルターで活性炭を除き、波長420nmにおけるろ液吸光度を測定した。吸光度からろ液中のメラノイジンの濃度を求め、活性炭に対するメラノイジンの吸着量 q を以下の式(1)で計算した。

$$q = (C_0 - C) \frac{V}{m} \quad (1)$$

ここで、 C_0 および C は、初期および24h後の吸着質であるメラノイジンの濃度、 V はメラノイジン水溶液の液量、 m は添加した吸着材である活性炭の重量である。

活性炭の添加量を変えて実験を行い、吸着量と濃度の関係を吸着等温線としてプロットした。吸着等温線は、実験式の一種であるFreundlich式⁴⁾(2)により解析した。

$$q = K_F C^{1/n} \quad (2)$$

ここで、 K_F は吸着材と吸着質の親和性と吸着量を表す定数、 n は吸着材と吸着質の親和性を表す定数である。

2.3 窒素吸着試験による活性炭の細孔特性評価

活性炭の細孔特性は、窒素吸着実験により評価した。前処理として、活性炭を150 $^{\circ}$ Cで6h真空加熱脱気することにより、吸着している水分やガスを除いた。その後、BELSORP MAX (Microtrac BEL Corp.)を用い、77Kでの吸脱着等温線を測定した。得られた等温線から、Dollimore-Heal (DH)法を用いてメソ細孔表面積を計算した。

2.4 高分子量メラノイジンの合成

既報³⁾に従って、市販品とは分子量の異なるメラノイジンを合成した。グルコース1mol/L, グリシン1mol/L, 炭酸水素ナトリウム0.1mol/Lを含む水溶液を調製し、120 $^{\circ}$ Cのオートクレーブで加熱した。加熱時間が3hおよび6hのものをそれぞれ分画分子量5,000Da, 50,000Daの平膜で処理し低分子画分を除いた。分画後の固形分を凍結乾燥し、得られた粉末を高分子量メラノイジンとした。なお、高分子メラノイジンの吸着実験においては、メラノイジンの初期濃度を200mg/Lとした。

それぞれのメラノイジンの分子量はサイズ排除クロマトグラフィー (SEC)により、タンパク質を標準物質として求めた。SECの測定において、カラムはTSKgel G2000SWXL (7.8mm \times 300mm \times 2), 溶離液は0.3mol/L塩化ナトリウムを含む0.1mol/Lリン酸緩衝溶液を用いた。流速は1.0mL/min, カラム温度は25 $^{\circ}$ Cとし、検出部には示差屈折率 (RI) 検出器を用いた。校正曲線の標準物質には、N-(2,4-Dinitrophenyl)-L-Alanine, シトクロームC, α -キモトリプシン, ウシ血清アルブミン, ブルーデキストランを用いた。SEC測定で得られたメラノイジンの分子量を表1に示した。

表1. メラノイジンの分子量

	重量平均分子量 / Da
市販品	7,000
加熱時間 3 h	37,000
加熱時間 6 h	177,000

3. 実験結果と考察

3.1 市販のメラノイジンを対象としたモデル吸着実験

まず、市販されている種々の活性炭を用いて市販のメラノイジン水溶液をモデルとした吸着実験を行った。図3に代表的な吸着等温線を示した。これらの吸着等温線は、どれもFreundlich式で良く近似することができ、活性炭に対するメラノイジンの吸着量は活性炭によって大きく異なることがわかる。この差を活性炭の細孔構造と定量的に比較するために、Freundlich式中の K_F に対して、活性炭のメソ細孔表面積をプロットしたところ、相関係数が約0.97の直線関係が得られた (図4)。よって、メラノイジンがおもにメソ細孔 (直径 2~50nm) に対して吸着していると考えられる。メ

ラノイジンの分子量は約7,000であり比較的分子サイズが大きいと予想されるためこの結果は妥当なものと考えられる。

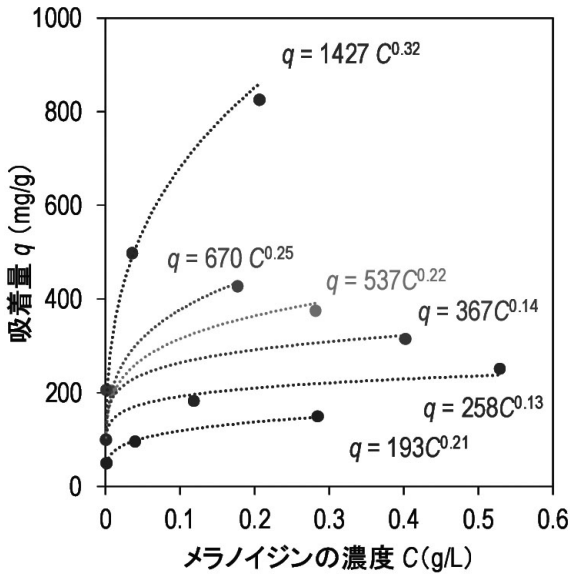


図3 活性炭へのメラノイジンの吸着等温線の例 (25°C)

3.2 実際の食品エキスの吸着実験

上記のモデル実験の結果を実際の食品エキスの脱色にフィードバックするために、企業から提供を受けた着色エキスの吸着実験を実施し、その結果をモデル実験と比較した。実際のエキスに対して、前述のモデル実験で使用したものと同一活性炭を1wt%加えた場合の脱色率Dを式(3)で求め図5に示した。

$$D = \frac{C_0 - C}{C_0} \quad (3)$$

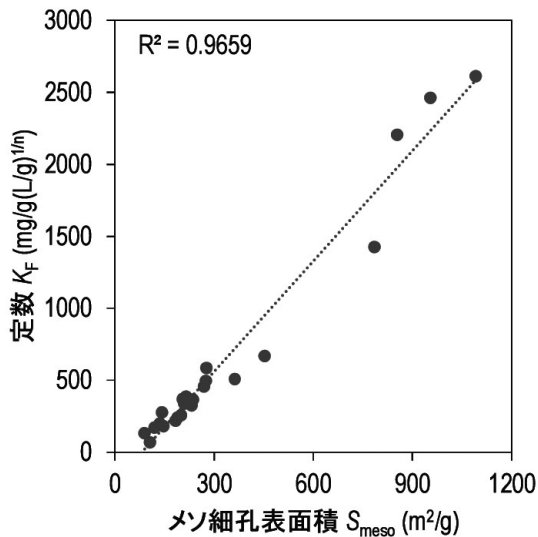


図4 活性炭のメソ細孔表面積と定数 K_F の関係

得られた結果を見ると、活性炭の種類によって脱色率は11～99%と差が大きい。そこでこの結果をモデル実験の結果と比較するために、モデル実験で得られた K_F に対して実際の

エキスの脱色率Dをプロットした(図6)。その結果、 K_F が大きいほど脱色率が高いという関係が見られた(図6中の丸で表下プロット)。実際のエキスに含まれるメラノイジンの量は測定が困難であるため、Freundlich式が実際のエキスでも成立すると仮定して、活性炭の添加量をシミュレートした。 n が一定であるとの仮定のもと、(1)、(2)、(3)の式を連立して、 K_F とDの関係を表す式を求め、定数部分をaとまとめると(4)式が得られる。

$$K_F = \frac{C_0}{C_0^{1/n}} \frac{V}{m} \frac{D}{(1-D)^{1/n}} = a \frac{D}{(1-D)^{1/n}} \quad (4)$$

モデル実験で得られた n の平均値4.0、活性炭の添加量1wt%を(4)式に代入し、カーブフィッティングすると、実験的に得られた K_F とDの関係を良く表すことができた。続いて、活性炭の添加量を0.1～0.5wt%と変えた際の脱色率をシミュレートすると、図6に示すような曲線群が得られた。この結果から、たとえば95%以上の脱色率を目標とした場合、 K_F が約1,200以上の活性炭では、添加量を1.0wt%から0.5wt%と半分減らせることがわかる。このようなシミュレーションを元に、活性炭の価格や活性炭の分離の容易さを勘案することで、具体的なプロセス設計が可能となる。

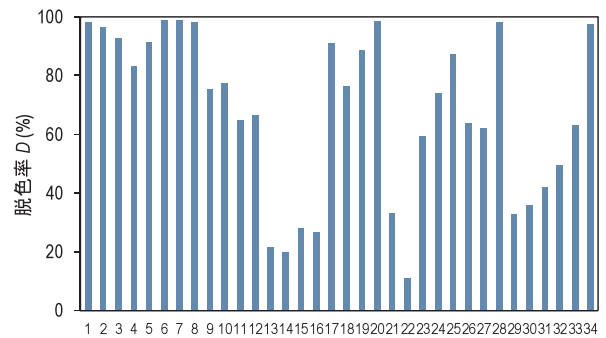


図5 実際のエキスの脱色率(活性炭1wt%, 番号は便宜的)

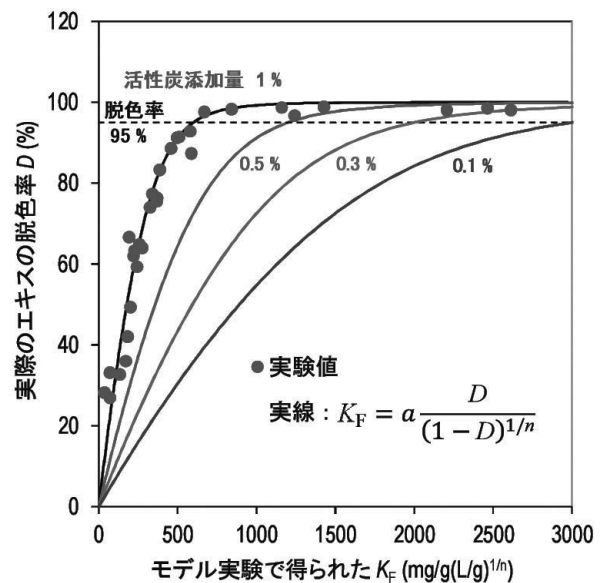


図6 モデル実験で得られた K_F と実際の食品エキスの脱色率Dの比較

以上の解析より、モデル実験の結果を実際のエキスの脱色プロセスを設計する上での指標として適用可能であることが明らかとなった。

3.3 メラノイジンの分子量が吸着に与える影響

メラノイジンは熱履歴や原料となる糖とアミノ酸の種類により、分子量が数百から数十万まで幅広く変化することが知られている。よって、より正確かつ汎用的な脱色プロセスの設計を目指した場合、メラノイジンの分子量が吸着に与える影響を調査する必要がある。そこで、合成した分子量の異なるメラノイジンの水溶液を調製し、活性炭に対する吸着実験を実施した。図7に吸着等温線の一例を示した。この等温線からわかるように、分子量が7,000の場合に比べて、分子量が大きいメラノイジンでは急激に吸着容量が低下している。これは、分子量が大きくなることで、活性炭の細孔に入り込める分子が減るためと考えられる。分子量の影響については今後も評価を続ける予定である。

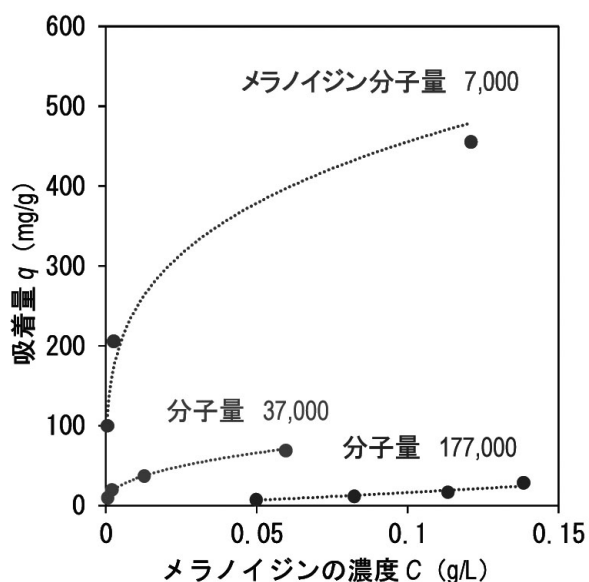


図7 活性炭に対する分子量の異なるメラノイジンの吸着等温線の例 (25°C)

4. まとめ

メラノイジンをモデルとして活性炭による脱色プロセス設計のための基礎検討を行った。活性炭の特定の細孔とメラノイジンの分子量が吸着特性を支配しており、その結果を実際のエキスの脱色にフィードバックすることができた。一方、今回の系ではモデル実験の結果を実際のエキスの脱色にフィードバックすることができたが、吸着量は分子量の影響を受けることを確認した。よって、エキスの種類によっては、今回のような議論が成り立たないことも予想される。今後も分子量の影響などを詳細に評価し、より広い範囲のエキスの脱色に適用可能な評価系の確立を目指して検討を進めていく。

謝辞

本研究で使用した BELSORP MAX 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。

参考文献

- 1) 本間清一：メラノイジンに関する食品化学的研究，日本栄養・食糧学会誌，Vol.58 No.2, pp.85-98, (2005)
- 2) 臼井照幸：食品におけるメイラード反応，日本食品生活学会誌，Vol.26 No.1, pp.7-10, (2015)
- 3) 岡田憲幸・太田輝夫・海老根英雄：メラノイジンの調製および分画過程における高分子化について，日本農芸化学会誌，Vol.56 No.2, pp.93-100, (1982)
- 4) 近藤精一・石川達雄・安部郁夫：吸着の科学，丸善株式会社，228PP., (1991)

木質バイオマスボイラー利用熱源システムの容量設計

白土 博康, 藤澤 拓己

Capacity Design of Heat Source Systems using Woody Biomass Boilers

Hiroyasu SHIRATO, Takumi FUJISAWA

抄 録

当別町の学校をモデルに、施設の暖房熱需要計測方法及び導入予定の木質バイオマスボイラー・重油ボイラー併用の熱源システム全体の制御方法を検討し、数値計算により各ボイラー容量、蓄熱槽容量の最適設計を行った。その結果、木質バイオマスボイラーの寄与率を高く設定できるボイラー容量、蓄熱槽容量を設定できた。需要が平準化されていない施設において、木質バイオマスボイラーの寄与率を増加させるためには、朝の立ち上げ時に木質ボイラーを先に立ち上げ、需要のピークを低減させるなどの対策が有効と考えられた。蓄熱槽の容量に関しては、木質バイオマスボイラーの寄与率に大きく影響しないことが分かった。

キーワード：木質バイオマスボイラー・重油ボイラー併用熱源システム、暖房需要実測、数値計算、ボイラー容量・蓄熱槽容量の最適設計

1. はじめに

我が国では、エネルギー資源の多くを化石燃料に依存しており、将来的なエネルギーの安定利用や気候変動対策の見地から、再生可能エネルギー（以下、「再エネ」）の利用を拡大するとともに、省エネルギー（以下、「省エネ」）の徹底を図ることが不可欠である。

このような状況の中、道総研の第1期エネルギー戦略研究では、「さがす」「つくる」「ためる」「つかう」「しめす」をキーワードに、再エネの賦存量推定から需給モデルの構築まで一連の研究に取り組み、エネルギー賦存量・利用可能量推定手法や統合型GIS（地理情報システム）の構築、可燃ゴミ燃料燃焼システム等の要素技術開発及び施設群のエネルギーベストミックス提案等の成果が得られた¹⁾。

令和元年度からスタートした道総研の第2期エネルギー戦略研究では、エネルギー自給率向上に向けた足がかりを作るため、第1期の成果を継承しつつ、特性の異なる3つの自治体を対象に、社会実装を重視した取組みを行うこととしている。

この中で当別町との取組みでは、地域特性に応じたエネルギー地産地消技術開発、具体的には木質バイオマスや地中熱

の利用拡大を進めており、木質バイオマスに関して、道総研は木のサプライチェーン構築、木質バイオマスボイラーの技術情報提供、省エネに寄与する熱源・制御システム設計支援を行い、公共施設における木質バイオマスボイラー利用熱源システムの実装を支援することとしている。

道内で利用されている木質バイオマスボイラーは海外製のものが多く、実際の運転条件における出力、効率、制御などの設計に必要な情報が不足しており、リスク回避の視点から大容量のボイラーを設置する傾向にある。この場合、ボイラーの頻繁な運転停止による省エネルギー性の低下が懸念されるため、適正な容量のボイラーを導入することが重要である。また、木質バイオマスボイラーで賄い切れない高負荷時は、重油ボイラーなど異種の熱源で対応するシステムが望ましい。さらに、省エネ設計には負荷平準化のための適切な蓄熱槽容量を設定することも必要である。

本報では、木質バイオマスボイラーを利用した熱源システムの省エネルギー化を目的として、耐用年数を迎えた重油ボイラーの木質バイオマスボイラーへの代替が予定されている当別町の2つの公共施設をモデルに、熱需要実測、導入する木質バイオマスボイラーの制御手法の確認と熱源システム全体の制御方法に関する検討、熱供給モデル作成と実測した需要を用いた数値計算によるボイラー容量、蓄熱槽容量の最適設計を行った一連の流れについて報告する。

事業名：戦略研究

課題名：地域特性に応じた再生可能エネルギー供給と省エネルギー技術の社会実装

2. 木質バイオマスボイラー利用熱源システムの概要

図1に検討した熱源システムの概要を示す。検討した公共施設は学校である。木質バイオマスボイラーで発生する熱は、熱交換器を経て蓄熱槽へ送られる。木質バイオマスボイラーは、後述する制御方法で運転される。重油ボイラーは、バックアップとして蓄熱槽の温度が設定値より下がれば稼働し、蓄熱槽の温度が所定値まで回復すると停止する。

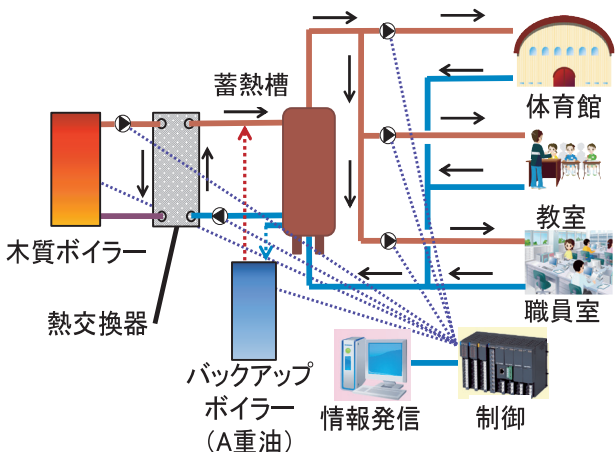


図1 検討した熱源システムの概要

3. モデル施設の熱源システム、熱需要

3.1 モデル施設の熱源システム

表1にモデル施設A, B (以下それぞれ学校A, 学校B)における従来の熱源システムの概要をそれぞれ示す。学校A, 学校Bのどちらの学校にもA重油を熱源とした暖房用のボイラーが2台設置されており、体育館や各教室等のラジエータへ温水が供給される。

表1 学校A, Bにおける熱源システムの概要

学校A

ボイラーの種類	出力[kW]	燃料消費量 [L/h]	燃焼効率 (低位発熱量) [%]	出力口	運転・停止
重油ボイラー	465.2	49.9	91.7	2個	手動オンオフ 運転
重油ボイラー	465.2	51.8	88.3	1個	手動オンオフ 運転

学校B

ボイラーの種類	出力[kW]	燃料消費量 [L/h]	燃焼効率 (低位発熱量) [%]	出力口	運転・停止
重油ボイラー	581.5	66.3	86.3	1個	手動オンオフ 運転
重油ボイラー	232.6	25.9	88.3	1個	手動オンオフ 運転

3.2 モデル施設の熱需要の計測方法

各学校の暖房熱エネルギー需要量は、体育館や各教室等の系統別に暖房熱エネルギー需要 (以下暖房エネルギー需要) を算出し、その積算値とした。各系統の暖房エネルギー需要は、超音波流量計による温水流量測定 (5分間10秒毎計測) とT型熱電対補償導線による温水配管外表面温度測定 (1分毎連続計測・記録) を行い、(1)式により、算出した。流量は固定値とした。(2)式は(1)式の需要を1時間毎に積算したものである。図2に計測時の写真を示す。なお、温水温度は配管内にシース型熱電対を挿入して測定する方法が正確であるが、配管厚みや配管材料 (SGP管) の熱伝導率を考慮すると、挿入シースで測定した温度と外表面温度には理論上はほとんど差はない。また、設備稼働中の配管改造が困難であった。このことから、本研究では、温水配管の外表面温度を測定する方法を採用した。なお、温度計測時にはT型熱電対補償導線と配管をアルミテープで密着させ、その上から断熱材を施すことにより、可能な限り外部への熱損失を低減させた。

$$q_{\text{demand}} = C_p \times \rho \times f \times (T_1 - T_2) \quad \dots(1)$$

$$Q = \sum (q_{\text{demand}} \times \Delta t) \quad \dots(2)$$

q_{demand} : 暖房エネルギー需要 [kW]

C_p : 水の比熱 4.2 [kJ/(kg・K)]

ρ : 水の密度 1.0 [kg/L]

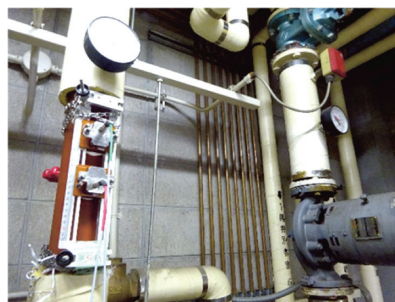
f : 各系統の水の流量 [L/s]

T_2 : 各系統の水のボイラーへの還り温度 [K]

T_1 : 各系統の水のボイラーからの行き温度 [K]

Q : 時間別暖房エネルギー需要量 [kWh/h]

Δt : 1/60 [h]



(a) 系統の流量計測



(b) 系統の配管表面温度計測

図2 計測時の写真

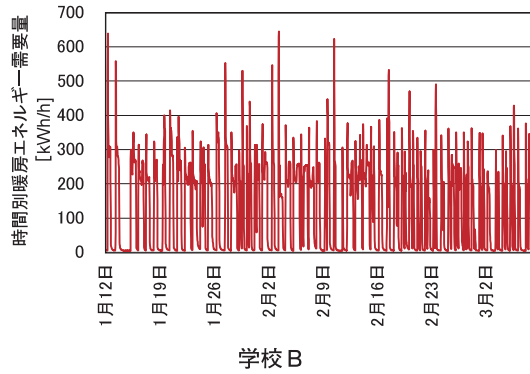
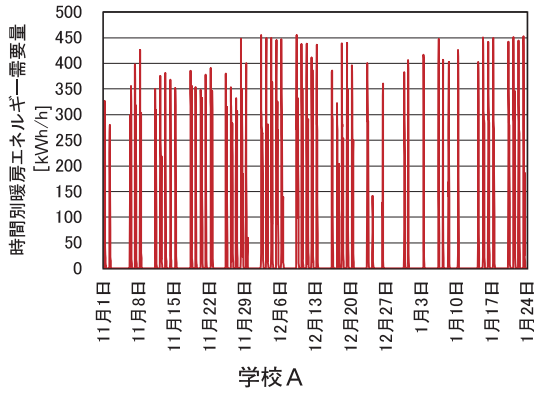


図3 時間別暖房エネルギー需要量

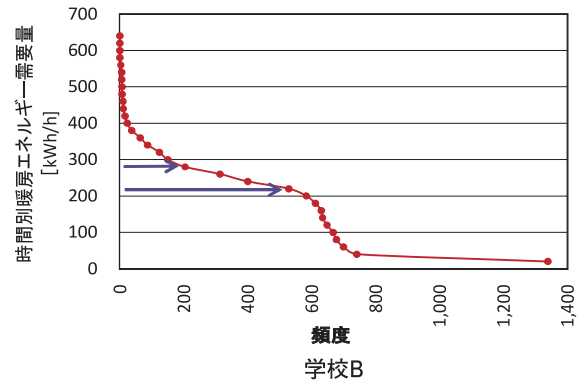
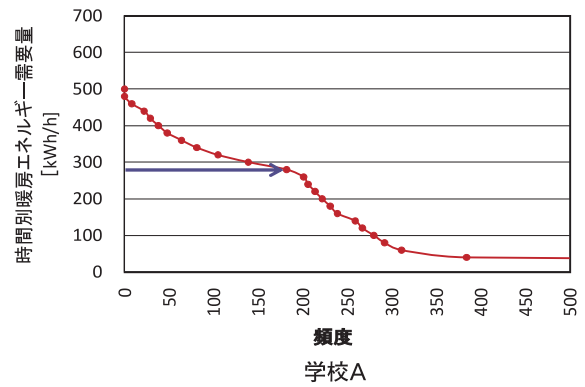


図5 時間別暖房エネルギー需要量の頻度分布

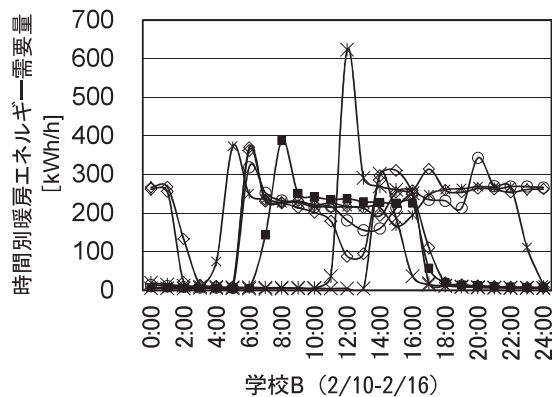
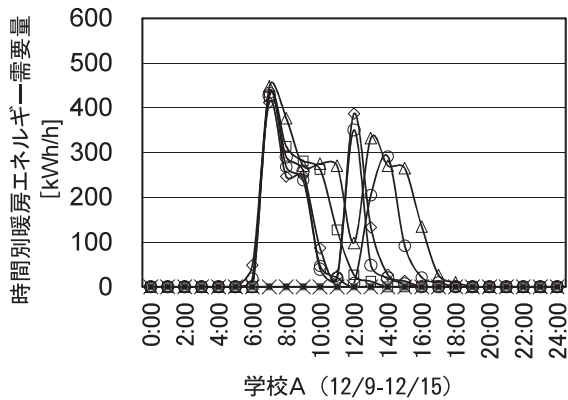


図4 一週間の暖房熱エネルギー需要量
(四角黒塗り:土曜, ×*:日曜・休日, その他:平日)

3.3 モデル施設の熱需要計測結果

図3に時間別暖房エネルギー需要量を、図4に一週間の暖房熱エネルギー需要量をそれぞれ示す。学校Aでは朝の立ち上げ時に時間平均500kW弱の大きな需要があり、それ以降は250~400kWの需要が多い。また、需要は早朝から夕方までに分布しており、夜間と土日は需要がない。学校Bでは250~300kWの領域で多くの需要があり、土日にも一定の需要がある。

図5に時間別暖房エネルギー需要量の頻度分布を示す。

学校Aでは260kW程度に頻度分布の曲値があり、学校Bでは200~280kWに頻度の高い分布が見られる。

本研究では、学校A、Bの需要頻度から、可能な限り定格運転またはそれに近い運転をし、部分負荷運転であっても熱効率が低下する懸念があるオンオフ運転（導入予定ボイラーでは定格に対し、30%未満の負荷で停止する）を極力避ける観点から、木質バイオマスの含水率を考慮した出力が252.8kW、210.8kWであるボイラーを次章の需給シミュレーションに選定した。出力以上の負荷、定格の30%未満の負荷は蓄熱槽からの出力でカバーし、蓄熱槽の容量を使っても賄いきれない負荷は重油ボイラーを稼働して不足分を補う。

図6に各学校における温水配管の表面温度が最も高い系統の行き温水配管表面温度の経時変化を示す。各系統には放熱機器として放射パネルが設置されており、その暖房能力は下記の(3)式で表される^{2,3)}。また、暖房、冷房温度差はJISの暖

房温度差の算出式²⁾に準拠し、(4)式により算出される。さらに暖房能力と暖房温度差には(5)式の関係がある^{2,3)}。

$$Q = C_{pw} \times M_w \times (T_{wo} - T_{wi}) \quad \dots(3)$$

$$Q = B(\Delta T)^n \quad \dots(4) \quad \Delta T = |T_w - T_a| \quad \dots(5)$$

Q：暖房能力 [W]

C_{PW}：水の比熱 [J/(g・K)] = 4.2

M_w：水の質量流量 [g/s]

T_{wo}：放射パネル戻り（出口）水温 [K]

T_{wi}：放射パネル行き（入口）水温 [K]

B, n：試験体形状等で決定される定数 [-]

ΔT：暖房温度差 [K]

T_w：放射パネルの出入口平均温度 [K]

T_a：空気温度 [K]

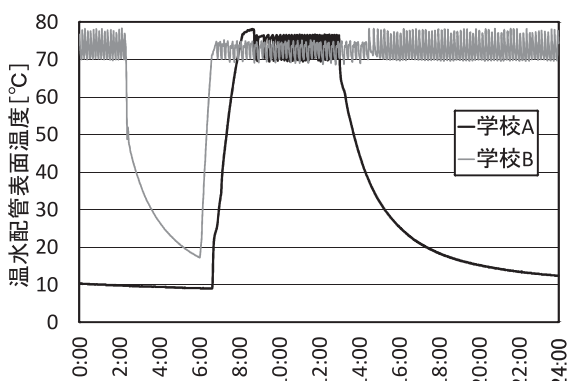


図6 各学校における温水配管の表面温度が最も高い系統の行き温水配管表面温度の経時変化

ここで各学校で行われるのはボイラーの更新だけで、教室などの放射パネルの増設は行われないので、仮に教室内の空気温度が同じであれば、放射パネルの行き温度（入口温度）を学校Aでは70～75℃程度以上、学校Bでは70～78℃程度以上確保することが必要と考えられた。

4. 木質バイオマスボイラーを活用した熱源システムの熱需給シミュレーション

4.1 導入ボイラーの制御の概要

表2に各ボイラーの制御方法を示す。導入予定の木質バイオマスボイラーは、蓄熱槽内の温水温度を感知し、燃焼のオンオフや部分負荷運転を行う制御を行っている。部分負荷運転のロジックは、①ボイラー設定温度までフル運転、②ボイラー設定温度とコントロールヒステリシス（設定幅）の2/3まで100-30%比例制御運転、③残りコントロールヒステリシスの1/3まで30%運転である。

4.2 熱需給計算（シミュレーション）の手法

熱需給シミュレーションは図1をモデルに下記のとおり行った。ただし、木質バイオマスボイラーと蓄熱槽間の熱交換器

の熱交換能力に制限はなく、木質バイオマスボイラーで発生した温水の熱量がすべて蓄熱槽へ導入されるとした。図6から放射パネルの行き温度（入口温度）を70℃以上に保ち、学校Aで75℃以上、学校Bで78℃以上の場合に木質バイオマスボイラーで比例制御が働く運転とした。また、木質バイオマスボイラーの停止温度はボイラーの安全装置が作動する領域から85℃に設定した。

シミュレーションの期間は需要実測を行った日とし（学校A：11/1～1/23、学校B：1/11～3/8）、蓄熱槽は槽内が完全に混合しているとした。蓄熱槽における熱損失は考慮していない。表3にシミュレーションの条件を示す。木質バイオ

表2 各ボイラーの制御方法

A施設

ボイラーが稼働する蓄熱槽温度[℃]	70	75	80	85
木質バイオマスボイラー	■	■	■	■
重油ボイラー	■	■		

■ 定格出力で運転(ただし重油ボイラーは70℃未満でオン、75℃以上でオフ)
 ■ 定格出力の100-30%比例制御運転
 ■ 定格出力の30%で運転

B施設

ボイラーが稼働する蓄熱槽温度[℃]	73	78	81	85
木質バイオマスボイラー	■	■	■	■
重油ボイラー	■	■		

■ 定格出力で運転(ただし重油ボイラーは73℃未満でオン、78℃以上でオフ)
 ■ 定格出力の100-30%比例制御運転
 ■ 定格出力の30%で運転

表3 シミュレーションの条件

学校A

条件	1	2	3	4	5
木質バイオマスボイラー出力[kW]	210.8または252.8				
木質バイオマスボイラー設定温度[℃]	75				
木質バイオマスボイラー設定ヒステリシス[℃]	10				
重油ボイラー出力[kW]	465.2				
重油ボイラースタート温度[℃]	70				
重油ボイラーストップ温度[℃]	75				
蓄熱槽容量[m ³]	2.5	3	4	5	7.5
蓄熱槽蓄熱量[kWh]	43.8	52.5	70.0	87.5	131.3

学校B

条件	1	2	3	4	5
木質バイオマスボイラー出力[kW]	210.8または252.8				
木質バイオマスボイラー設定温度[℃]	78				
木質バイオマスボイラー設定ヒステリシス[℃]	7				
重油ボイラー出力[kW]	465.2				
重油ボイラースタート温度[℃]	73				
重油ボイラーストップ温度[℃]	78				
蓄熱槽容量[m ³]	2.5	3	4	5	7.5
蓄熱槽蓄熱量[kWh]	35.0	42.0	56.0	70.0	105.0

マスボイラーの出力は前述のとおり252.8kW、または210.8 kWとして検討することとし、バックアップ（重油）ボイラーの出力は465kW（出力581kWの導入を検討、安全率20%）とした。また、蓄熱槽については、設置スペースの関係もあるので、2.5~7.5 m³の間で最適容量の検討を行った。

4.3 熱需給シミュレーションの結果

ここで、1分毎で実施したシミュレーション結果を基に、分別暖房エネルギー需要量 Q_{demand} を(6)式で、分別暖房エネルギー供給量 Q_{supply} を(7)式で定義し、図7に分別暖房エネルギー供給量 Q_{supply} のシミュレーション結果の例を示す。図7では、平均的な熱需要パターンの日を選定して示した（学校A：1/15、学校B：2/14）。

$$Q_{demand} = (q_{demand} \times \Delta t) / 3600 \quad \dots(6)$$

$$Q_{supply} = (q_{supply} \times \Delta t) / 3600 \quad \dots(7)$$

- Q_{demand} ：分別暖房エネルギー需要量 [kWh/min],
- q_{demand} ：暖房エネルギー需要 [kW], Δt ：60[s] (1min),
- Q_{supply} ：分別暖房エネルギー供給量 [kWh/min],
- q_{supply} ：ボイラーからの暖房エネルギー供給（ボイラーの出力）[kW]

図7から重油ボイラー、蓄熱槽からの熱供給は朝の立ち上げ時に多くなっており、学校Bに対して学校Aの方が木質バ

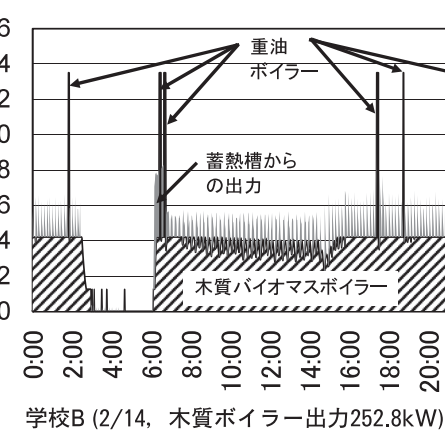
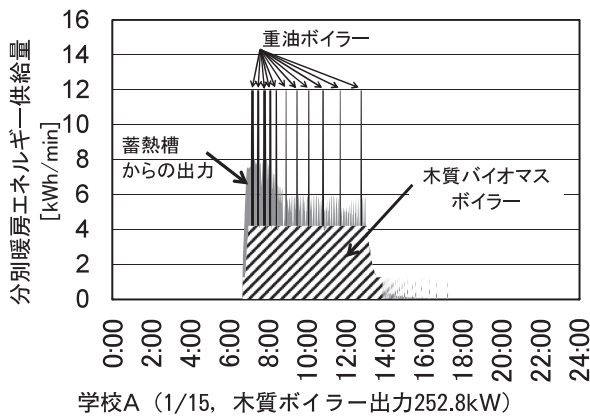


図7 分別暖房エネルギー供給量の経時変化（シミュレーション結果の例）

イオマスボイラーの出力よりも瞬時の需要が大きい時間が多く、重油ボイラーが稼働する回数が増えていることが分かる。

図8に蓄熱量の経時変化を示す。図8は図7と同じ日のデータを示している。蓄熱量 S は(8)式で定義する。

$$S = Cp_w \times M'w \times (T_{w\ tank} - T_{w\ ini}) / 3.6 \quad \dots(8)$$

S ：蓄熱量 [kWh]

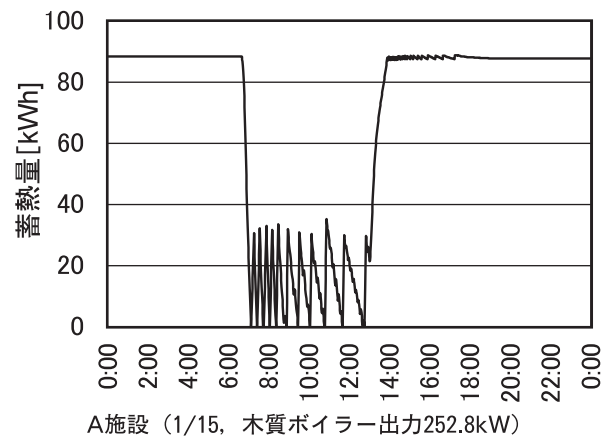
Cp_w ：水の比熱 [MJ/(t·K)] = 4.2

$M'w$ ：水の質量 [t]

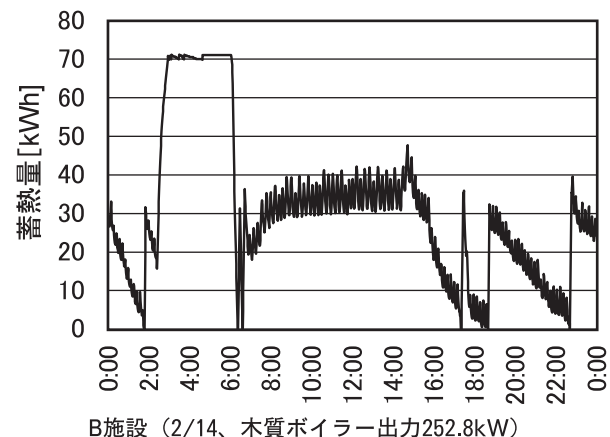
$T_{w\ tank}$ ：蓄熱槽内水温 [K]

$T_{w\ ini}$ ：蓄熱槽内初期設定温度（学校A：343K, 学校B：346K）

図8から、熱需要がない夜間に蓄熱量が最大となり、木質バイオマスボイラーが停止することが分かる。朝大きな需要があると木質バイオマスボイラーが先に稼働し、その後蓄熱量が0 kWh、すなわち蓄熱槽の温度が70°C（学校A）、73°C（学校B）になると重油ボイラーが稼働する。このような制御設定のため、木質バイオマスボイラーの運転・停止回数はA・B両学校とも1回、重油ボイラーの運転・停止回数は学校Aで11回、学校Bで6回となる。ボイラーの運転・停止は省エネ性の低下を引き起こすが、本制御により、木質バイオマスボイラーの運転・停止回数を夜中一朝の間の1回に留めており、本ボイラーの省エネに寄与している。



A施設（1/15、木質ボイラー出力252.8kW）



B施設（2/14、木質ボイラー出力252.8kW）

図8 蓄熱量の経時変化の例

図9に蓄熱槽の容量に対する木質バイオマスボイラーの寄与率を木質バイオマスボイラーの出力をパラメータとして示す。木質バイオマスボイラーの寄与率 η は(9)式で定義する。

$$\eta = Q_{\text{output bio}} / (Q_{\text{output bio}} + Q_{\text{output oil}}) \times 100 \quad \dots(9)$$

η ：木質バイオマスボイラーの寄与率[%]

$Q_{\text{output bio}}$ ：木質バイオマスボイラーによる温水出力量[kWh]

$Q_{\text{output oil}}$ ：重油ボイラーによる温水出力量[kWh]

図9から例えば252.8kWの出力のボイラー、蓄熱槽容量を5 m³とすると、木質バイオマスボイラーの寄与率は学校Aで80%以上、学校Bにおいては90%近くまで達しており、本設計は良好と判定できる。学校Aにおいては、需要が学校Bと比較して平準化しておらず、朝の立ち上げ時の需要が大きい。この結果、立ち上げ時に重油ボイラーの稼働回数(稼働時間)が多くなっている。朝の立ち上げ時に木質ボイラーのみを2時間先に立ち上げ、需要のピークを低減させるなどの対策を行うことにより、重油ボイラーの稼働時間、寄与率を低減させることができると考えられる。また、木質バイオマスボイラーの蓄熱槽の容量を増加させると木質バイオマスボイラーの寄与率は増加するが、その傾きは小さく、蓄熱槽容量は木質バイオマスボイラーの寄与率に大きく影響しないことが分かった。この理由は、例えば蓄熱槽容量5 m³は木質

ボイラー、重油ボイラーがフル運転した時の5～10分程度の容量しかないためと考えられる。この結果、蓄熱槽の位置づけは各系統への出力温度を安定させることでしかないため、蓄熱槽は導入コストが高額になる場合や機械室の設置スペースが狭い場合は低容量でも良いと考えられた。

5. 結言

木質バイオマスボイラーの導入が予定されている当別町の学校をモデルに、施設の暖房熱需要計測、導入する木質バイオマスボイラー・重油ボイラー併用の熱源システム全体の制御方法に関する検討、数値計算により各ボイラー容量・蓄熱槽容量の最適設計を行った。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 2つの学校でその暖房熱需要は大きく異なる。学校Aでは、需要は早朝から夕方までに分布しており、土日は需要がないが、学校Bでは比較的需要在平準化しており、土日にも一定の需要がある。
- (2) 時間別暖房エネルギー需要量の実測値の頻度分布から、木質バイオマスの含水率を考慮した出力が252.8kW、210.8kWである木質バイオマスボイラーをシミュレーションに供した。
- (3) 252.8kWの出力のボイラー、蓄熱槽容量を5 m³とすると、木質バイオマスボイラーの寄与率は学校Aで80%以上、学校Bにおいては90%近くまで達しており、良好な設計と判定できる。需要が学校Bと比較して平準化していない学校Aにおける木質バイオマスボイラーの寄与率を増加させるためには、朝の立ち上げ時に木質ボイラーを2時間先に立ち上げ、需要のピークを低減させるなどの対策が有効と考えられる。
- (4) 蓄熱槽の容量を増加させても木質バイオマスボイラーの寄与率は大きく増加せず、蓄熱槽容量は木質バイオマスボイラーの寄与率に大きく影響しないことが分かった。

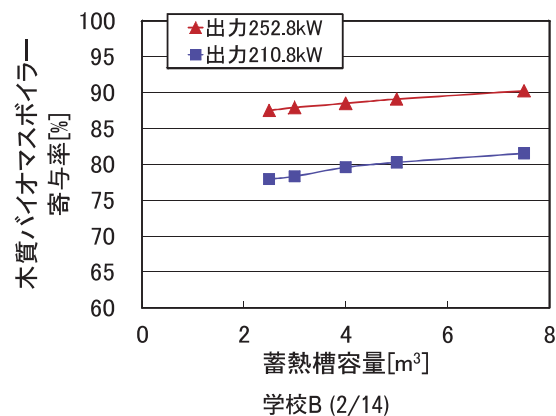
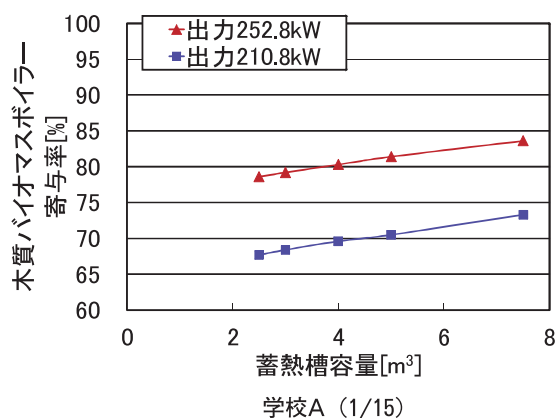


図9 蓄熱槽の容量に対する木質バイオマスボイラーの寄与率

参考文献

- 1) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 戦略研究報告書 地域・産業特性に応じたエネルギーの分散型利用モデルの構築, (2019)
- 2) JIS A1400, (2007)
- 3) 白土博康他：北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.317, pp15-21, (2018)

排湯熱回収のための流下液膜式熱交換器の性能評価

藤澤 拓己, 白土 博康

Performance Evaluation Test of Falling-Film Heat Exchanger for Shower Drain Heat Recovery

Takumi FUJISAWA, Hiroyasu SHIRATO

抄 録

シャワーや浴槽などの排湯から熱を回収して、給水を予熱することで給湯負荷の削減に寄与することを目的とした排湯熱交換器の性能評価を行った。本熱交換器を流下液膜式と浸漬式で使用した場合を比較すると、流下液膜式の方が熱通過率、熱交換効率がともに高く、特にシャワーなどの短時間入浴の場合に流下液膜式が有効であることがわかった。流下液膜式熱交換器は高い熱交換能力を有し、省エネルギーに有効であることを確認した。

キーワード：排湯熱回収, 流下液膜式熱交換器

1. はじめに

入浴時のシャワーや浴槽などの湯は、灯油やガスなどの化石燃料を使用して加温され、使用後も40℃程度の熱を保有しているにもかかわらず、そのまま捨てられている。日本の給湯用のエネルギー消費量は、家庭で消費されているエネルギー全体の約1/3を占めており¹⁾、このような排湯熱を回収して給湯予熱に用いることで燃料費の削減や省エネルギー、環境への影響の低減に貢献できる。

本研究では、排湯熱回収用の熱交換器として、流下液膜式熱交換器を用い、実際の利用条件を想定して、シャワー利用などの短時間入浴時における排湯熱交換器の熱回収量や熱交換効率、熱通過率の評価を行った。また、本熱交換器を浸漬式として使用した試験を行い、流下液膜式との熱交換能力を比較した。

2. 試験装置

2.1 流下液膜式熱交換器

図1に、試験に用いた流下液膜式熱交換器（JOULIA Ltd. J3/DR-5P-630-W）の断面図を、図2には排湯熱交換器としての利用イメージを示す。流下液膜式熱交換器は、図1のように複数の配管を縦に重ねて配置し、上部から高温流体を薄い液膜状に流下させることで、配管内の低温流体に高

い熱伝達率で熱を移動させる熱交換器である。供試熱交換器は上部が開口しており、高さ120mm、横幅733mm、奥行き68mmの金属製のケース内に熱交換部が収められている。ケース内に流入した排湯は、一度堰き止められて熱交換部の上部から流下し排出される。熱交換部は外径11.5mm、長さ630mm（露出部）の銅製の配管が中心ピッチ13.5mmの間隔で縦列に5本配置されており、冷水は配管内を2往復半する間に、排湯から熱を受け取る。銅製配管部の外表面積は、0.1141 m²（メーカー値）である。

図2のように排湯熱交換器を浴室の排水部に設置する場合、シャワー入浴の際には、例えば40℃程度の排湯が流れるが、10℃程度の給水が熱交換器の配管内を通過中に排湯熱が移動し20℃程度まで加温され、さらに給湯器で加温されシャワー温水となる。

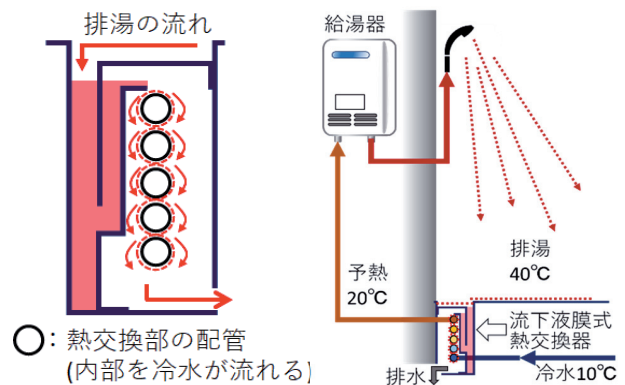


図1 流下液膜式熱交換器断面

図2 利用イメージ

事業名：連携協定活用型 研究交流推進事業

課題名：再生可能熱エネルギーの大量導入に寄与する採熱機器開発のための基礎研究

2.2 熱回収試験装置の概要

図3に熱回収試験装置の概略図を、図4には流下液膜式熱交換器の試験状況写真を示す。装置は、温水と冷水のそれぞれの温度と流量を調整して流すことが可能な構成とした。温水側は、温水槽（約300L）内に水中ポンプを設置し、ビニールホースとステンレス配管で流下液膜式熱交換器に接続し、ホースと配管の周囲と温水槽を断熱材で覆った。温水槽の温度制御には、投げ込みヒーターと温度調節器を用いた。冷水側は、冷水槽（約200L×2台）に、ラインポンプを接続し、ビニールホースとステンレス配管で流下液膜式熱交換器に接続し、ホースと配管の周囲を断熱材で覆った。冷水槽には、チラーを接続した。流下液膜式熱交換器の温水側入口出口、冷水側入口出口の配管の中心部に、それぞれ測温抵抗体を設置した。温水及び冷水の配管には、グローブバルブと羽根車式流量計を接続した。冷水の入口及び出口の配管にデジタル圧力計を設置した。流下液膜式熱交換器の排湯入口の上部には、温水が測定系外に飛散することを防止するためアクリル製の囲いを設置した。

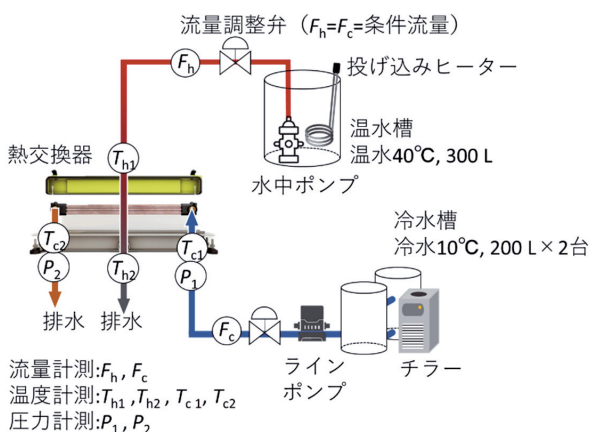


図3 試験装置概略図

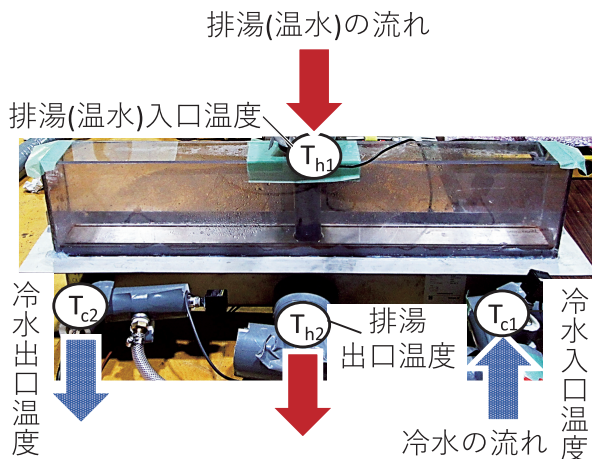


図4 流下液膜式熱交換器の試験状況

3. 試験

3.1 試験方法

試験は、温水と冷水を同じ流量に設定し、表1に示すように5つの流量条件で実施した。このうち3条件は、NTA8800（Netherlands technical arrangement 8800）：2019付属書U（シャワー水熱回収効率についての規定）で定められたものであり、今回の試験では、さらに詳細に特性を把握するため、2条件を追加した。

試験は、各流量条件において以下の方法で行った。

- (1) 温水槽を40℃、冷水槽を10℃に調整した。
- (2) 冷水を通水し、流量調整弁で設定流量に調整した。
- (3) 温水を通水し、流量調整弁で設定流量に調整した。
- (4) 温水の通水を開始した時刻を測定開始時刻とし、10分間の通水を行った。

なお、温度、流量及び圧力の記録はデータロガーを用い、測定間隔は10秒とした。

また、この流下液膜式熱交換器を浸漬式として使う場合には、図5に示すように熱交換器の排湯側出口配管を立ち上げた状態とし、熱交換器ケース内の温水が空の状態から試験を開始し、熱交換部全体を温水に浸漬させた。この時、温水出口温度の計測位置は、配管立ち上げ部である。

表1 流量の条件

流量 (L/min)	積算給水量 (L)	備考
5.8	47	NTA8800:2019 CW-klasse 2
7.5	60	追加した条件
9.2	73	NTA8800:2019 CW-klasse 3
10.5	84	追加した条件
12.5	100	NTA8800:2019 CW-klasse 4,5,6

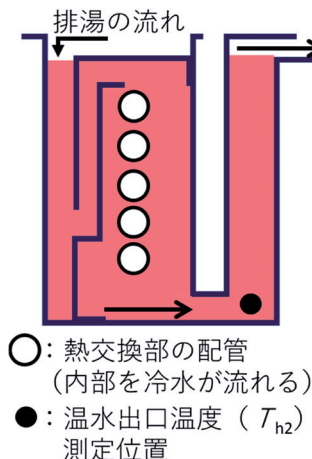


図5 浸漬式として使用した際の熱交換器断面

3.2 熱交換器の効率及び熱通過率の計算

シャワーなどの短時間入浴時を想定した熱交換器の効率の計算は、NTA8800：2019付属書U（シャワー水熱回収効率についての規定）の計算方法をもとに行った。以下に、計算に用いた式(1)～(3)を示す。NTA8800に規定されたとおり、実際のシャワー利用状況を想定した評価を行うため、計算には測定開始後から所定の積算給水量となるまでの約8分間の測定データを用いた。

$$\eta = Q_c / Q_d \times 100 \quad \dots (1)$$

η ：熱交換器の効率[%]

Q_c ：冷水の積算熱回収量 [kJ]

Q_d ：温水と冷水のエンタルピー差の積算値 [kJ]

$$Q_c = \sum \{ F_c \times \rho(T_{c1}) [h(T_{c2}) - h(T_{c1})] \times dt \} \quad \dots (2)$$

F_c ：冷水流量 [m³/s]

$\rho(T_{c1})$ ：冷水密度（冷水入口温度における）[kg/m³]

$h(T_{c1})$ ：冷水の比エンタルピー（冷水入口温度における）
[kJ/kg]

$h(T_{c2})$ ：冷水の比エンタルピー（冷水出口温度における）
[kJ/kg]

dt ：測定間隔 [s]

T_{c1} ：冷水入口温度 [°C]

T_{c2} ：冷水出口温度 [°C]

$$Q_d = \sum \{ F_h \times \rho(T_{h1}) \times [h(T_{h1}) - h(T_{c1})] \times dt \} \quad \dots (3)$$

F_h ：温水流量 [m³/s]

$\rho(T_{h1})$ ：温水密度（温水入口温度における）[kg/m³]

$h(T_{h1})$ ：温水の比エンタルピー（温水入口温度における）
[kJ/kg]

$h(T_{c1})$ ：冷水の比エンタルピー（冷水入口温度における）
[kJ/kg]

dt ：測定間隔 [s]

T_{h1} ：温水入口温度 [°C]

ただし、温度 T [°C] における密度 $\rho(T)$ と比エンタルピー $h(T)$ は以下の(4)式及び(5)式より算出した。

$$\rho(T) = 999.9649 + 0.0264672 \times T - 0.0061549 \times T^3 + 1.775 \times 10^{-5} \times T^5 \quad \dots (4)$$

$$h(T) = 0.167853 + 4.18587 \times T - 0.000146789 \times T^2 + 9.38153 \times 10^{-7} \times T^3 + 8.36764 \times 10^{-9} \times T^4 \quad \dots (5)$$

熱交換器の熱通過率の計算は以下の(6)式を用いて算出した。

定常時の熱交換能力を評価するため、計算には温度が安定した後の測定開始後5～10分までの5分間の各測定データの平均値を用いた。

$$K = Q / (A \cdot \Delta T_m) \quad \dots (6)$$

K ：熱通過率 [kW/(m²·K)]

Q ：冷水の熱回収量 [kW]

A ：伝熱面積 [m²]（メーカー値）

ΔT_m ：対数平均温度差 [K]

4. 試験結果と考察

4.1 流下液膜式 試験時の各温度の推移

図6及び図7に、例として流量9.2L/minの場合における、流下液膜式熱交換器の試験時の温度及び流量データをそれぞれ示す。温水入口温度は、試験が開始され温水が流れると開始温度から上昇し、200秒程度で40°C程度となり安定した。温水出口温度は、試験開始後に低下し、20秒で最低温度となった後、徐々に上昇し安定した。これは、試験手順として先に冷水を流しており、熱交換部が十分に冷却されていたためと考えられる。したがって冷水出口温度が上昇した後に、温水出口温度が上昇し安定する。冷水入口温度は、試験開始から終了まで10°C程度で安定していた。熱交換部では温水から冷水へ熱が移動するため、冷水出口温度は試験開始とともに上昇し、その後安定した。温水流量については、試験開始後50秒以降は設定流量±2%以内で安定していた。冷水流量については、試験開始から終了まで設定流量±2%以内で安定していた。

また、試験の実施時の室温状況により、流下液膜式と浸漬式では温水側の試験開始時の温度や温度上昇の速度が異なっていた。熱通過率は、温度が安定した後のデータを用いており、影響はわずかであった。熱交換効率は、温水入口温度と冷水入口温度と温水流量からエンタルピー差の積算値を算出して分母としており、流下液膜式と浸漬式で1.7%程度の差異があった。この影響については、4.3節で記述する。

4.2 浸漬式 試験時の各温度の推移

図8及び図9に、例として流量9.2L/minの場合における、熱交換器を浸漬式として用いた際の試験時の温度及び流量データをそれぞれ示す。温水入口温度は、試験を開始し温水が流れると上昇し、200秒程度で40°Cとなり安定した。本熱交換器を浸漬式として使用した場合には、熱交換器内が空の状態から試験を開始しており、温水が熱交換器内に溜まった後に排水が始まる。そのため、温水出口温度は流下液膜式として用いた場合よりも安定するまで時間が必要であり、試験開始からの積算温水量が熱交換器容積（約6L）を超える40秒程度から温度が上昇した。冷水入口温度は、試験開始から終了

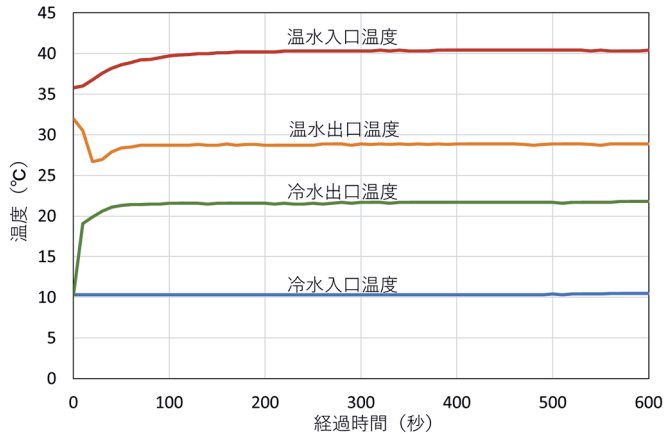


図6 流下液膜式 試験時の温度推移 (流量9.2L/min)

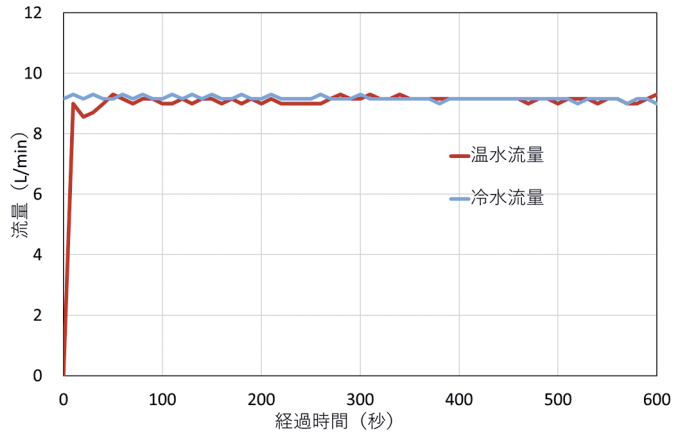


図7 流下液膜式 試験時の流量推移 (流量9.2L/min)

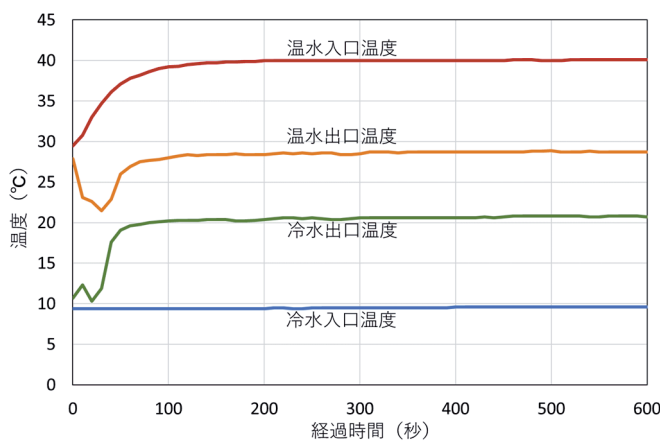


図8 浸漬式 試験時の温度推移 (流量9.2L/min)

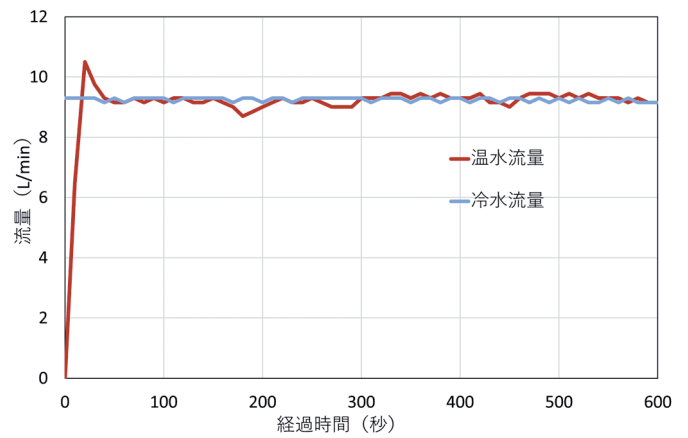


図9 浸漬式 試験時の流量 (流量 9.2L/min)

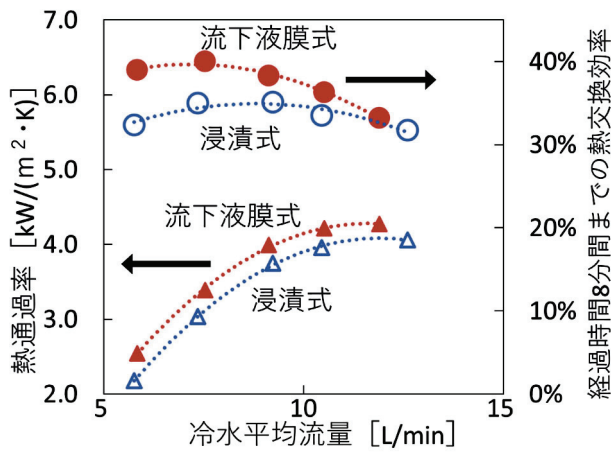


図10 熱通過率と熱交換効率

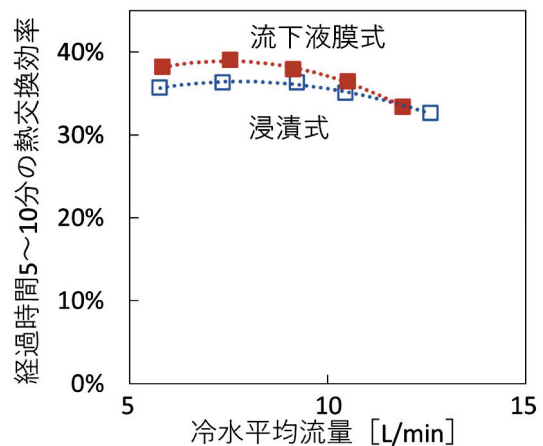


図11 温度安定時の熱交換効率

まで10°Cで安定していた。冷水出口温度は試験開始とともに一旦上昇し、その後低下して再び上昇した。これは、温水から冷水へ熱は移動するが、温水の排水が開始されるまで熱交換器内の温水温度の低下が続くため、冷水と温水との温度差が小さくなり、冷水に移動する熱量が少なくなることが原因であると考えられる。温水流量については、熱通過率計算に用いた300~600秒の範囲では設定流量±2%以内で安定していた。冷水流量は、試験開始から終了まで設定流量±2%以

内で安定していた。

4.3 流下液膜式と浸漬式の能力比較

本熱交換器を流下液膜式及び浸漬式として使用した場合の、各冷水平均流量における定常時の熱通過率と短時間使用時の熱交換効率を図10に示す。各流量条件において、熱交換効率と熱通過率のどちらも流下液膜式の方が高い数値を示しており、浸漬式よりも流下液膜式が高効率の熱交換方式であるこ

とがわかった。これは、流下液膜式では温水が薄い液膜状に流下することで、優れた伝熱特性を示すという既往の成果と合致する²⁾。

熱通過率は、流下液膜式、浸漬式ともに冷水平均流量が10.5 L/min以上では、流量の増加に対し、ほぼ一定値に漸近する傾向にある。どちらの方式においても、流量10.5 L/min以上では、温水から冷水への熱伝達率が一定値に近づくものと推察される。

短時間使用時の熱交換効率は、特に通水流量が少ない条件において流下液膜式に優位性があることがわかった。浸漬式では温水が熱交換器内に溜まった後に排水が開始されるため、それまでは温水側の温度が低い状態で推移し、冷水との温度差が小さく、熱の移動量が小さいことが原因の一つであると考えられる。特に流量が少ない条件では排水開始までに、より多くの時間が必要なため、影響が大きいと考えられる。また、試験の実施時の室温状況により、流下液膜式と浸漬式では温水側の試験開始時の温度や温度上昇の速度が異なっており、熱交換効率を算出する式の分母となる温水と冷水のエンタルピー差の積算値は1.7%程度の差異があるが、これを考慮して熱交換効率を算出しても0.6%程度の差異にとどまる。

さらに、温度が安定した試験開始5分後から10分後までを範囲として、同様の方法で算出した熱交換効率を図11に示す。温度が安定した状態においても、流下液膜式の方が浸漬式よりも熱交換効率が高いことが確認できるが、流量が多い条件では、その差が小さくなっていることがわかる。これは、流量が多くなると液膜が厚くなり、熱交換部分に接触しない温水も増えるため、浸漬式の状態に近づくことが原因と考えられる。

浴場でのシャワー流量は平均9.9 L/min³⁾、節水シャワーでは4.5～8.5L/min程度と報告がある⁴⁾。さらに、シャワー利用時間は平均7分程度(夏季)～10分程度(冬季)であり³⁾、シャワー使用時は排水と給水が同時に行われる。以上より、シャワー使用状況が流下液膜式の優位な条件に合致していることから、今回試験に使用した熱交換器を用いた場合、シャワーなどの短時間入浴の場合に流下液膜式が特に有効であると考えられる。

5. まとめ

流下液膜式である排湯熱交換器の熱交換能力を評価し、省エネに有効であることを確認した。本熱交換器を流下液膜式と浸漬式で使用した場合を比較すると、熱通過率、熱交換効率ともに流下液膜式の方が高く、特にシャワーなどの短時間入浴の場合に流下液膜式熱交換器が有効であることがわかった。

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁：平成29年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2018)，(2018)
- 2) 白岩寛之・喜多由拓：流下液膜式熱交換器の伝熱特性に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，No.202，pp.23-28，(2014)
- 3) 根岸紗弓・飯尾明彦・岩崎彩雅他：シャワー使用行為の実態に関する研究—その1 使用時調査からみた流量・温度について—，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，第1巻，pp.37-40，(2014)。
- 4) TOTO株式会社：水圧に関する注意事項について：
https://jp.toto.com/products/faucet/bath/shower_head/images/shower_head.pdf

鉱山坑廃水中のひ素の化学形態分析

富田 恵一*, 若杉 郷臣*, 明本 靖広*, 阿賀 裕英*

Chemical Form Analysis of Arsenic in Mine Drainage

Keiichi TOMITA*, Motoomi WAKASUGI*, Yasuhiro AKEMOTO*, Hirohide AGA*

キーワード：ひ素, 化学形態分析, 高速液体クロマトグラフィー, ICP質量分析法, 鉱山排水

1. はじめに

北海道内には、天然由来の有害元素を含む種々の地質がある。特にひ素は様々な種類の地質からの溶出リスクが知られているだけでなく¹⁾、金属鉱山や硫黄鉱山の坑廃水は排水基準(0.1mg/L)を超えていることもある。一般に、坑廃水はその流出を止めることは困難であり、付近の河川水への流入による水質悪化を防ぐためには継続的な処理が必要となる。

ひ素はⅢ価、Ⅴ価を中心に多くの無機及び有機化合物が存在し、その化学形態により毒性や反応性が異なることが知られている^{2,3)}。例えば、工場排水からの水酸化鉄によるひ素の除去プロセスでは、ひ酸は亜ひ酸に比較して水酸化鉄と共沈しやすい⁴⁾。

また、坑内水中の各種元素の化学形態を知ること、安全性の観点から立ち入れない休廃止鉱山内部の状況を推測するための重要な情報を得ることができる⁵⁾。したがって、毒性など試料の性状を知る目的だけでなく、排水からの分離除去などの各種無害化処理やひ素溶出の原因の推定のためにも化学形態別に定量することは重要である。

そのため、分別定量法に関する検討が古くからなされており、水素化物発生法⁶⁾、コールドトラップ法⁷⁾、共沈分離法⁸⁾など多くの報告がある。しかし、水素化物発生法では、例えばアルセノベタインは全く水素化物を生成しないなど、測定できる化学種が限定されるだけでなく、差数法での定量を行わなければならないことから精確性の点で問題がある。また、コールドトラップ法や共沈分離法では煩雑な前処理が必要となるといった課題がある。

近年、多くのひ素の化学種を高感度に定量可能な方法として、イオン交換モードによる高速液体クロマトグラフィー(以下HPLC)とICP質量分析装置(以下、ICP-MS)を接

続して分離定量するHPLC-ICP-MSによる定量方法も開発されている⁹⁾。しかし、この方法は使用する溶離液のpHが9程度と高く、鉱山坑廃水のような鉄含有量が高い試料では水酸化鉄の沈殿が生じ、流路の閉塞やひ素が共沈してしまうことによって定量が困難になるため、鉄をあらかじめ分離する前処理操作が必要となる。さらに、使用するカラムも比較的高額で、かつ試料に含まれる夾雑物により容易に劣化し寿命が短いなどの欠点もある。

そこで本研究では、前処理操作を省略できる方法として、鉄の沈殿が生成しにくい酸性条件下での分離が可能で、かつ安価なオクタデシル基化学結合型シリカゲル(以下ODS)カラムを使用し、イオン対形成-逆相モードによるHPLC-ICP-MS¹⁰⁾を用いて坑廃水のひ素の化学形態別定量を行うための分析条件の検討を行い、さらに実際の休廃止鉱山坑廃水試料について適用した。

2. 実験

2.1 装置及び試薬

ひ素の化学種の分離に用いる高速液体クロマトグラフ装置として、HPLCシステム(東ソー株式会社 SD-8020, PX-8020+CCPM-II, CO-8020型)、マイクロシリンジによる手動注入)を用い、汚染や流路への吸着を避けるため接液部の大部分をPEEK樹脂製部材により構成した。分離カラムは東ソー株式会社 ODS-100V(3 μm)4.6mm×150mmに同等品のカラム長250mmタイプを直列接続してカラム長400mmとして用いた。

使用したひ素標準品試薬及び干渉検討用試薬を表1に示す。ひ素化合物標準品のうちAB及びACは少量のメタノールに溶解してから、その他の標準品はそのまま純水で溶解して定容後、ICP発光分光分析装置(株式会社島津製作所, ICPS-8100, 以下ICP-AES)によりひ素濃度を標定し、適宜希釈して使用した。なお、溶解・希釈等に使用した純水は、すべて超純水製造システム(オルガノ株式会社, PURELAB ultra)で精製したものをを使用した。

* エネルギー・環境・地質研究所

Research Institute of Energy, Environment and Geology

事業名：公募型研究

課題名：石灰質未利用資源の休廃止鉱山対策への利用可能性に関する検討

表1 使用したひ素標準品試薬及び干渉検出用試薬

試薬	略号	メーカー	グレード
ひ素標準品			
亜ひ素ナトリウム	As(III)	和光純薬工業	
ひ素水素二ナトリウム七水和物	As(V)	和光純薬工業	特級
メチルアルソン酸	MMA	和光純薬工業	
ジメチルアルシン酸	DMA	和光純薬工業	
トリメチルアルシノキサイド	TMAO	トリケミカル	
よう化テトラメチルアルソニウム	TeMA	トリケミカル	
アルセノベタイン	AB	和光純薬工業	
臭化アルセノコリン	AC	和光純薬工業	
干渉検出用			
硫酸鉄(II)七水和物		半井化学薬品	一級
硫酸		関東化学	特級

溶離液の組成を表2に示す。溶離液組成のうち、1-ブタン
スルホン酸ナトリウム及び水酸化テトラメチルアンモニウム
の添加はそれぞれ、カチオン態とアニオン態のひ素化合物と
イオン対を形成し、固定相のODSと疎水性相互作用を持た
せ、逆相モードによる分離を行うためである。マロン酸は
pH緩衝と錯体形成によるFeの沈殿防止、メタノールはピー
クのテーリングを防ぐために添加している⁹⁾。流速は0.5mL/
min、カラム温度は40℃とした。また、検出器としてICP-MS
(アジレント・テクノロジー株式会社, 7700x)を使用し、
HPLCのカラムからの流出液はICP-MSのネブライザーに直
結して導入した。主な測定条件を表3に示す。それ以外は装
置の標準的な測定条件とした。また、塩素アルゴン化合物
(⁴⁰Ar-³⁵Cl)がひ素と同重体で、干渉する可能性があるため、
塩素の質量数であるm/e=35も測定し、ひ素の質量数m/e=
75に対して干渉がないことを確認した。また、各種試料の鉄、
全ひ素濃度の測定にはICP-AESを用い、ネブライザーによ
る直接噴霧法で測定した。

表2 HPLCにおける溶離液の組成

試薬	グレード	濃度
1-ブタンスルホン酸ナトリウム		10mM
マロン酸	一級	4mM
水酸化テトラメチルアンモニウム	精密分析用	4mM
メタノール	HPLC用	0.5%
硝酸	電子工業用EL	pH2.5または3.0に調製

すべて関東化学製を使用

表3 ICP-MS測定条件

測定質量数(m/e)	75, (35)
滞在時間(ms)	10
測定時間(s)	0.1
コリジョンガス	He
コリジョンガス流速(mL/min)	4.2

2.2 供試試料

北海道内の休廃止鉱山Aにおいて、坑道から排出されてい
る坑内水と坑道湧水が混合された坑廃水を対象として、2019
年7月9日～2020年1月7日の間、数日から1ヶ月に1回の
間隔で、現地水処理プラントの手前からポリプロピレン製び
んに約50mL採水した。極力ひ素の化学種が変化しないよう、
採水後直ちに約0℃に保持して運搬、帰所後そのまま-30℃
冷凍庫に移し、測定直前まで冷凍保管した。予備試験のため
2019年5月22日に採取した坑廃水試料の測定結果を表4に示
す。

表4 坑廃水の分析結果例(2019年5月22日採水)

水温(℃、現地)	14.6
pH	1.8
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	1863
Fe(mg/L)	268
Ca(mg/L)	69
As(mg/L)	6.4

2.3 HPLC分析条件の検討

本方法では、溶離液に含まれる多量のナトリウム塩が、
ICP-MSのスキマーコーン等へ付着し閉塞等が起こること
による測定への影響が懸念されたが、6時間程度の測定にお
いては、影響が見られず、分析値が安定していることを確認し、
以下の検討を行った。

2.3.1 溶離液のpHの影響

溶離液のpHが分離に影響を与える可能性があることから、
pHを3.0と2.5の2条件で、As(III)、As(V)、MMA、DMA
をそれぞれ約100µg/L含む混合液を測定した。

2.3.2 試料を注入する時間の影響

標準品混合溶液の測定時において、無機ひ素、特にAs(V)
のピーク強度が不安定になる場合が見られた。この原因と
して試料の注入時間等が影響を及ぼしている可能性が考えら
れたことから、4種混合標準液を純水で希釈定容してマイク
ロシリンジに採取し①直ちに注入、②15min後に注入、③
pH3.0の溶離液で希釈定容してマイクロシリンジに採取し直
ちに注入、の3種条件について比較した。

2.3.3 鉄の影響

鉱山廃水には多量のFe(II)が含まれることから、測定に
与える影響について確認するため、As(III)、As(V)、MMA、
DMAについてひ素として約100µg/L含む単独溶液と、それ
ぞれに坑廃水に含まれる鉄がすべてII価であると仮定し、それ
ぞれの標準液にFe(II)300mg/L(硫酸によりpH約2.5)を
添加した液を調製し、HPLC-ICP-MSによる測定を実施し
た。なお、このときの溶離液はpH3.0、分離カラム長は250mm
とした。

2.4 ひ素化合物標準品混合溶液の分離

実坑廃水の測定に先立ち、8種類のひ素化合物標準品の混
合溶液(硝酸を添加しpH約2とした)について分析を行い、
各化学種の分離を確認した。

2.5 実鉱山坑廃水の化学形態別定量

前節で得られた分析条件により、実鉱山坑排水について化
学形態別定量を行った。ただし、実試料の予備試験では、保
持時間が長いAB、TMAO、TeMA、ACは検出されなかった

ことから、分析時間及びアルゴンガスの節約のため、As(III)、As(V)、MMA、DMAのみの定量とした。また、試料は鉄を含むことから希釈液の安定性を考え、鉄に対する錯形成能を持ち酸性である溶離液 (pH2.5) により1/100倍に希釈して測定した。定量方法は、クロマトグラムにおける各化学種ごとのピーク面積を、直前に測定した各標準物質100 µg/Lのピーク面積と比較することで行った (一点検量線法)。なお、As(III)原液は一部がAs(V)に酸化されていたため、As(III)原液を加えた標準液についてはAs(III)及びAs(V)の濃度を補正した。また、As(III)、As(V)はピークのテーリングが見られるが、有機態のひ素の濃度は無機ひ素に比較して小さいことから、MMA、DMAのピーク面積はAs(III)、As(V)のテーリングをベースラインとしてピーク面積を算出して定量した。

3. 結果と考察

3.1 溶離液のpHの影響

溶離液のpHを3.0及び2.5に調製して測定した結果を図1に示す。いずれもAs(III)とMMAとの分離が完全ではないが、溶離液のpHが3.0と2.5ではAs(III)の保持時間はほとんど変化しないのに対して、MMAの保持時間はpH2.5の場合に長くなりAs(III)とMMAの分離がやや改善されることがわかった。なお、溶離液のpHを下げることで更なる分離の改善が期待できるが、カラムの使用下限pHが2.0であることから、カラムの劣化等を考慮し、より低いpH条件での検討は行わなかった。

3.2 試料を注入する時間の影響

標準液の希釈方法及び注入までの時間の影響についての結果を図2に示す。なお、各クロマトグラムのスケールは同一である。希釈し直ちに注入した標準液のAs(V)のピークはほぼ同じで、安定して測定できることがわかった (図2①及び③)。一方で、マイクロシリンジで分取して15min保持した後に注入した場合ではAs(V)のピークが小さくなる傾向が見られた (図2②)。これはHPLCへの試料の注入に用いたマイクロシリンジの影響が考えられる。マイクロシリンジ

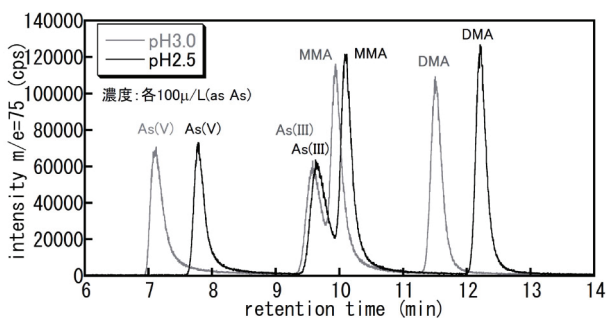


図1 溶離液のpHがひ素化合物の保持時間へ及ぼす影響

はステンレス製のピストンで試料を装置へ注入するが、このピストンがシリンジ内面との摩擦で削れて付着した鉄粉へ溶液中のAs(V)が長時間接触していることで吸着除去されてしまっている可能性が考えられる。そのため、マイクロシリンジで試料を注入する場合、試料及び標準液はシリンジ内で長時間保持せず、直ちに注入し測定する必要がある。

また、マイクロシリンジから直ちに注入した場合については、純水①及び溶離液③と希釈液を変えたことによる各ピークの大きさへの影響は見られなかったことから、どちらの液で希釈しても影響がないことがわかった。

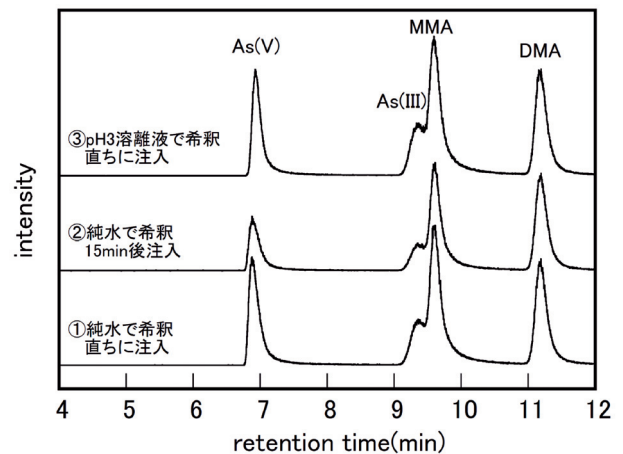


図2 標準液の希釈方法及び注入までの時間の影響

3.3 鉄の影響

ひ素の化学種それぞれについて鉄(II)の共存の有無によるクロマトグラムを図3に示す。各ひ素の化学種について鉄の共存による分離能の低下はほとんど見られなかった。これより、鉄(II)が300mg/L共存する条件でもひ素は化学形態別に測定することが可能であることがわかった。実試料の測定では、1/100程度に希釈して測定するため、鉄の影響はさらに小さくなると考えられる。

3.4 ひ素化合物標準品混合溶液の分離

表1に示した8種類のひ素化合物標準品の混合溶液のクロマトグラムを図4に示す。これより、表3に示した条件(pH 2.5)で、測定液はマイクロシリンジに分取して直ちに測定することにより、これら8化学種の分離測定が可能であることが確認できた。

3.5 実鉱山坑廃水の化学形態別定量

検量線に使用した混合溶液のクロマトグラムを図5に、本方法を実試料に適用し測定したクロマトグラムの一例を図6に示す。試料測定時には図に示した4化学種以外のピークは見られなかった。約6ヶ月にわたり採水した坑廃水について、採取日ごとの無機態及び4化学種の合計のひ素の濃度変化を

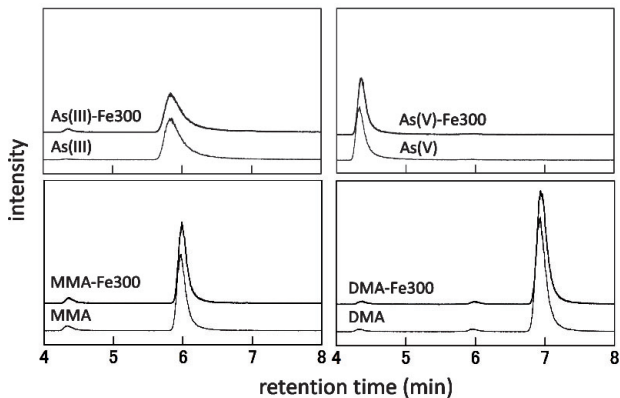


図3 各種ひ素化合物に対する鉄の影響

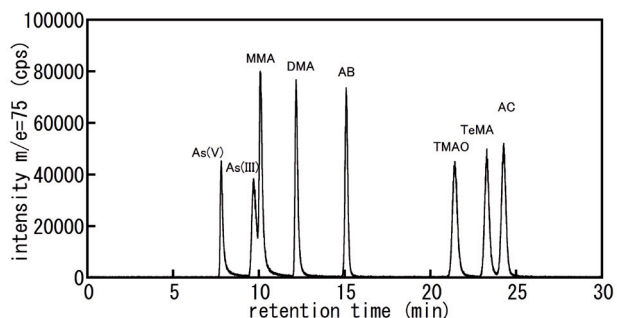


図4 各種ひ素化合物のクロマトグラム

図7に示す。この結果より、4化学種のひ素濃度合計は2.4~6.4mg/Lの範囲となっており、日間変動が大きいことが確認された。しかしAs(III)とAs(V)の濃度比率についてはそれ以上の大きな変動が見られ、加えてAs(III)とAs(V)の濃度は互いに相補的に変動する傾向がみられた。また、有機態のひ素(MMA, DMA)濃度は、最大でも9月11日採取した坑廃水中のMMA濃度が0.043mg/Lで、DMA濃度はそれよりさらに小さく、無機態に比較して極めて微量であることがわかった。

一般に、ひ素は硫化砒の砒石の中ではAs(III)として存在しており、空気中の酸素により酸化が進行し、酸性化して鉄と一緒に溶出していると考えられる⁹⁾。酸化還元電位から導かれる化学平衡論からはpH1.8付近において鉄の一部がFe(III)として存在している場合、ひ素はほぼすべてAs(V)に

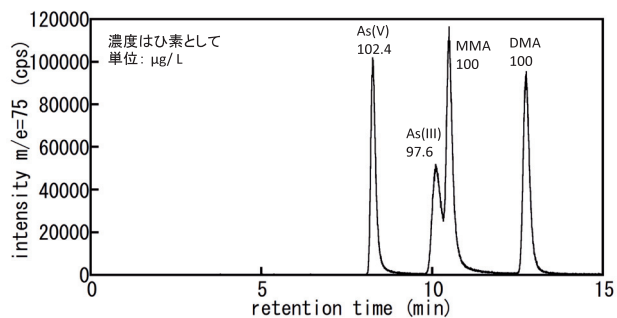


図5 検量線溶液のクロマトグラム

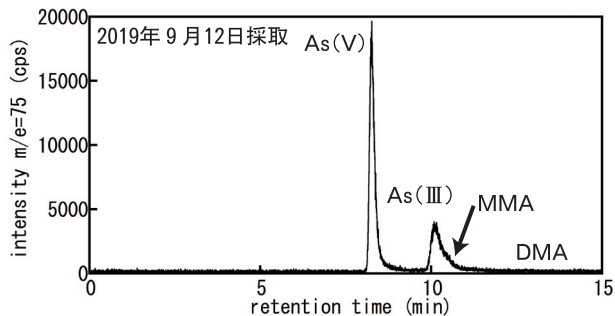


図6 実試料のクロマトグラム例

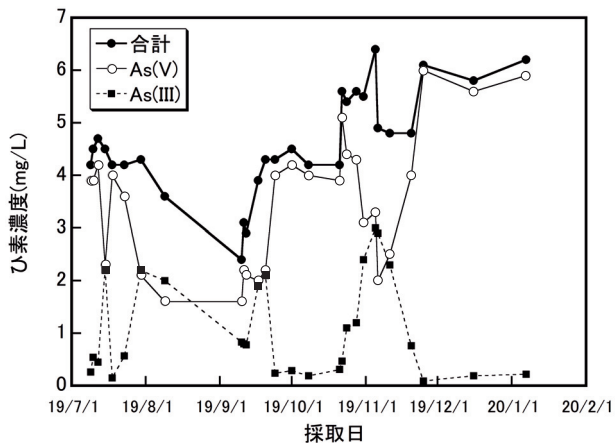


図7 坑廃水の無機態のひ素の経時変化

なっていると推定される¹⁰⁾が、実際の坑排水中にはAs(III)も多い。これは鉄とひ素の酸化還元速度が異なるため、鉄が酸化されていてもひ素の一部はAs(III)のまま流出していると考えられる。

本試験では、性状や成分が異なると考えられる坑内水と坑道湧水の2種類の廃水が混合している場所から採水されており、採取時期によってその混合比率が変化していた可能性もある。そのため、4化学種の合計のひ素の濃度及び化学形態別濃度の経時変化の要因に対して明快な考察はできない。しかし、採取された坑廃水の全ひ素濃度の変化がさほど大きくないにもかかわらず、As(III)とAs(V)の濃度は互いに相補的に変動する傾向が、7月中旬や10月中旬から11月下旬にかけて観察されており、坑廃水のひ素は坑道内もしくは2種類の廃水が混合されることで酸化している可能性が考えられる。

また、わずかに検出されている有機態のひ素は、環境中に存在するメチル化細菌により無機態のひ素の一部が有機態へ代謝³⁾されている可能性もあるが、詳細は不明である。

以上の結果より、これまで坑廃水については全ひ素濃度での検討が一般的であったが、坑内水のみを採取するなどの採取方法を検討し、化学形態別濃度の経時変化を追跡することで、排水処理工程の設計等に役立つだけでなく、坑道内での酸化状態などさらなる坑内状況の推定などに応用できる可能性があると考えられる。

4. まとめ

鉱山坑廃水中のヒ素の化学形態分析を行うため、各種測定条件等の検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) HPLC-ICP-MSを用いて、鉄が夾雑物として含まれる溶液中のヒ素の化学形態別分析において、最適分析条件の検討を行った。その結果、溶離液のpHを2.5に調製し、試料の注入時間に留意することにより、夾雑物として試料中に鉄が300mg/L程度含まれる場合でも、干渉を受けることなく、ヒ素化学種のうち、As(Ⅲ)、As(V)、MMA、DMAについて化学形態別に定量できることがわかった。
- (2) 本研究で検討したイオン対形成ー逆相モードによるHPLC-ICP-MSでは煩雑な前処理を行うことなく、試料の希釈のみで測定を行うことができるため、迅速なヒ素の化学形態別分析が可能となった。
- (3) 以上の検討結果を実際の鉱山廃水に適用し、約6ヶ月間のヒ素の化学形態別濃度の経時変化を追跡したところ、As(Ⅲ)とAs(V)の濃度比率が大きく変動していること、無機態に比べ有機態の濃度が非常に低いことがわかった。
- (4) ヒ素は化学形態によって反応性が異なることから、各種排水中のヒ素の化学形態別の濃度を知ることで、排水からの分離除去などの各種無害化処理工程の設計に役立てることができると考えられる。
- (5) 鉱山廃水に関してヒ素の化学形態を追跡した例は少なく、採水方法に留意することで、酸化還元など坑内状況の推定に応用できる可能性があると考えられる。

謝辞

鉱山坑廃水の試料採取におきましては、道庁経済部環境・エネルギー局環境・エネルギー課にご協力をいただきました。また、本研究で使用しました純水・超純水製造システム、ICP-AES及びICP-MSは競輪の補助を受けて整備されました。記して感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 垣原康之・野呂田晋・高橋良 他：北海道における自然由来有害物質の分布状況，地質研究所調査研究報告第41号，(2014)
- 2) 木村修一・左右田健次 編：微量金属と生体，pp.149-156，(1987)
- 3) J. M. Wood： Biological Cycles for Toxic Elements in the Environment, Science, 183, pp.1049-1052, (1974)
- 4) 並木博編：詳解工業排水試験方法 [JIS K 0102：2013] 改訂5版，pp.507，(2014)
- 5) 野呂田晋・遠藤祐司・荻野激：旧幌別硫黄鉱山における

酸性坑内水の流量およびFe濃度の長期変動，北海道地質研究所報告，第89号，pp.47-51，(2017)

- 6) 辻 治雄・玉利祐三・片桐さやか 他：還元気化原子吸光法による陸水中のヒ素(Ⅲ)及びヒ素(V)の分別定量，分析化学，Vol. 40, T97-100, (1983)
- 7) 田中 茂・金子正秀・今野芳幸 他：液体窒素トラップを組み合わせた還元気化原子吸光法による天然水中の無機及びアルキルヒ素化合物の分別定量，分析化学，Vol. 32, pp.535-541, (1983)
- 8) 辻 治雄・西村公男・玉利祐三 他：水酸化ジルコニウム共沈法による陸水中のヒ素(Ⅲ)及びヒ素(V)の分別比色定量，分析化学，Vol. 33, pp.43-48, (1984)
- 9) Zhilong Gong・Xiufen Lu・Mingsheng Ma他：Arsenic speciation analysis, Talanta, 58, pp.77-96, (2002)
- 10) Shibata, Y・Morita, M: Speciation of arsenic by reversed -phase high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry, Anal. Sci., 5, pp.107-109, (1989)
- 11) 竹野直人：Eh-pH図アトラス 熱力学データベースの相互比較，地質調査総合センター研究資料集，No.419, pp.31-33, 103-105, (2005)

札幌軟石を用いたアサリ垂下養殖用基質の開発

執行 達弘, 野村 隆文, 金森 誠*, 井上 智**

Development of Culture Substrates for the Suspended Culture of Asari Clam

Tatsuhiko SHIGYO, Takafumi NOMURA, Makoto KANAMORI*, Satoru INOUE**

キーワード：アサリ, 垂下養殖, 基質, 札幌軟石, 水工連携

1. はじめに

日本国内のアサリの年生産量は、1980年代の前半までは10万トン以上であったが¹⁾、その後著しく減少し、現在では1万トン以下である²⁾。一方、同じ二枚貝のホタテは1970年代から年生産量を増加させ、1980年代の前半以降20万トン前後という高い水準を維持している²⁻³⁾。この差は、アサリが漁獲に依存しているのに対し、ホタテは養殖技術を導入したためと考えられている。

北海道漁業に目を向けると、平成29年の日本海海域の漁業生産量は13.7万トンであり⁴⁾、オホーツク海域27.3万トンの50%、太平洋海域50.3万トンの27%に留まっている。したがって、日本海海域の生産量を底上げする新たな漁業振興策を推進することが強く求められている。

アサリの養殖技術のひとつに垂下養殖がある。稚貝と、稚貝が潜る海砂などの基質を容器に入れ、その容器をイカダから海中に吊り下げて行うものである^{1,5-6)}。捕食生物がなく、餌料が豊富な海域を選択して養殖することで、天然や人工の干潟と同等か、それ以上の品質のアサリが生産でき、それに伴い生産量が増加するものと期待されている。また、この養殖技術の場合、静穏な漁港を活用することができる。日本海海域には利用が減少している漁港が点在することから、日本海海域での展開には利点が多い。

垂下養殖用基質に求められる条件は、アサリが生残・成長すること、耐久性があることに加えて、作業時に負担になら

ない程度に軽く、波浪で散逸しない程度に重く、そして安価なことである。現在、製塩の副産物である水酸化マグネシウムと混合、固化させたカキ殻加工固形物（以下、市販品と呼ぶ）が基質として広範に用いられている⁶⁾。これに対し、当場に知見がある札幌軟石⁷⁾は、適度な重量をもち、より安価なことから代替品として有望である。

本研究では、アサリの年生産量の増加と、日本海海域の生産量を底上げする新たな漁業振興策の推進を目的とし、垂下養殖技術の確立と普及の一環として、札幌軟石を用いたアサリ垂下養殖用基質の開発を行った。札幌軟石と市販品の基礎物性を比較した後、潜砂試験によるアサリの生残・成長に適した粒度の調査、回転強度試験による耐久性の評価を経て、量産試作と日本海海域での実証試験を行った。

2. 実験方法

2.1 札幌軟石と市販品の基礎物性の比較

札幌軟石（辻石材工業株式会社製）と市販品について、水中アルキメデス法により乾燥重量、吸水重量、吸水率、気孔率、密度を測定し、pHメーターを用いてpHを求めた。

2.2 アサリの生残・成長に適した粒度の調査

札幌軟石をジョークラッシャーとロールクラッシャーで粉碎後、ステンレスふるいで種々の粒度に分級した。所定の量を30×20×15 cm³のプラスチック容器に入れ、水道水、ろ過海水で洗浄後、殻長10~15mmの稚貝10個体を設置し、潜砂（砂に潜る習性のこと）の挙動を60分間観察した。

2.3 耐久性の評価

直径2~4 mmの札幌軟石の粉碎物と市販品を110℃で24h乾燥後、200 cm³を内容積10L (10000 cm³)のロッキングミキサーに入れ、60rpmで積算回転数200回まで回転した⁸⁾。

* 函館水産試験場

* Hakodate Fisheries Research Institute

** 栽培水産試験場

** Mariculture Fisheries Research Institute

事業名：重点研究

課題名：日本海海域における漁港静穏域二枚貝養殖技術の開発と事業展開の最適化に関する研究（平成28~令和元年度）

試料を取り出し、目開き1mmのステンレスふるいで分級することで摩耗分を除去した。回転前後の試料重量の百分率を算出し回転強度とした。同様に、回転する際に蒸留水200mlを入れた湿式での試験も行った。摩耗分を除去後、再度110℃で24h乾燥した試料の重量を回転後の試料重量とした。

2.4 量産試作と日本海海域での実証試験

数百kg規模の札幌軟石をジョークラッシャーとロールクラッシャーで粉碎後、目開き4.2~8.6mm、直径70cmの振動ふるいで分級した。粉碎物の長軸と短軸の長さを測り、粉碎前後の重量減少から歩留まりを算出した。

量産試作品を日本海海域にある上ノ国漁港に運搬し、10Lを丸カゴ（網目の大きさ3mm、直径40cm、高さ10cm）に入れ、平均殻長10mmのアサリの稚貝（100個体）を用いて1年間の垂下養殖を行った。養殖後の生残率と殻長を調査するとともに、量産試作品の作業性を確かめた。

3. 結果と考察

3.1 札幌軟石と市販品の基礎物性の比較

札幌軟石とは、札幌市で採石される、火砕流の噴出物からできた溶結凝灰岩である。壁材や敷材として利用されているが、北海道の貴重な地場資源であることから、種々の調査や研究開発を継続している。化学組成などは、すでに報告している⁷⁾。ここでは、基質として重要な基礎物性を測定した。

表1に札幌軟石と、比較として市販品の基礎物性を、図1にそれらの外観を示す。吸水重量/乾燥重量、吸水率、気孔率、密度は、いずれも同等であることが明らかになった。pHは、より中性（札幌軟石：8.2、市販品：10）であることから、アサリにとって好ましいと推察される。

3.2 アサリの生残・成長に適した粒度の調査

水底の堆積物や岩石の粒度分布が、アサリの生息に影響を及ぼすことから⁹⁾、種々の粒度分布をもつ札幌軟石を用意し潜砂試験を行った。

図2に種々の粒度分布をもつ札幌軟石の外観を示す。0.5mmのふるい下（図2(a)）は、シルト（砂より小さく粘土より大きな土質）のような作業性であり、運搬時の振動により締め固まる挙動を示した。2mmのふるい上、4mmのふるい下（図2(b)）は、短軸は2~4mmであったが、長軸は10mmであり、潜砂試験に用いる稚貝と同等の大きさであった。6.7mmのふるい上、8mmのふるい下（図2(c)）は、短軸は6.7~8mmであったが、長軸は10mm以上であり、明らかに稚貝より大きかった。上記の3種類の粒度の試料を同じ体積ずつ混合したもの（図2(d)）では、粗粒の間に細粒が充填されていた。

表1 札幌軟石と市販品の基礎物性

	札幌軟石	市販品
吸水重量/乾燥重量	1.3	1.2
吸水率 (%)	27	22
気孔率 (%)	39	33
密度 (g/cm ³)	1.5	1.5
pH	8.2	10

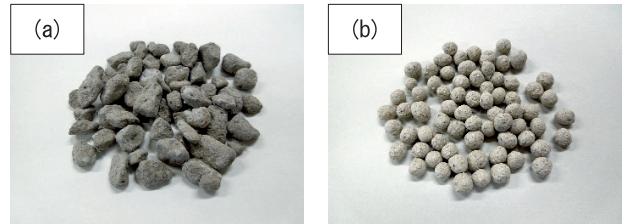


図1 (a) 札幌軟石, (b) 市販品の外観

(a) 長軸が8cmの端材として購入し、粉碎、分級した
(b) 直径8mmの球状の造粒物として購入した

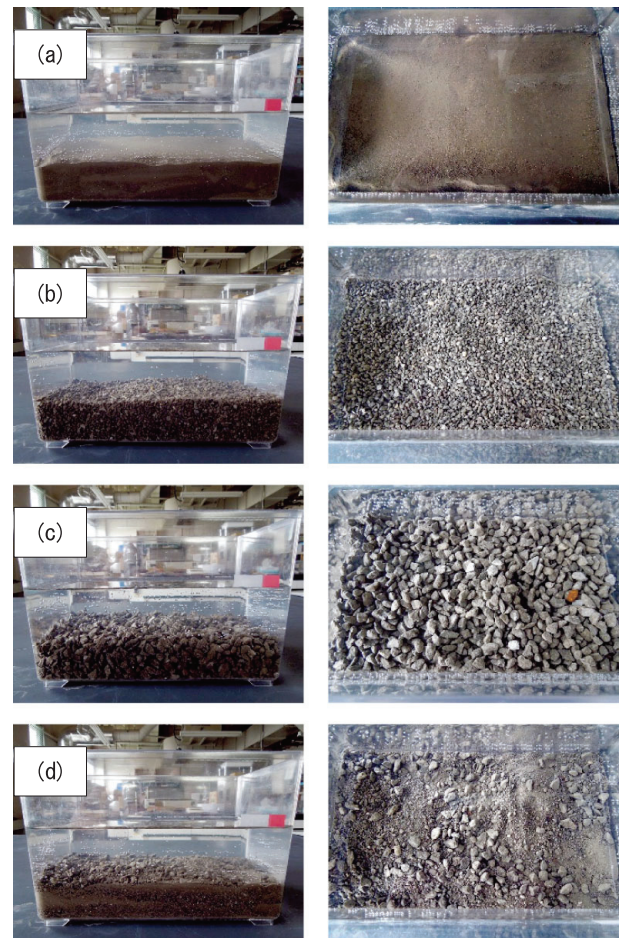


図2 種々の粒度分布をもつ札幌軟石の外観

(a) 0.5 mm 以下, (b) 2 ~ 4 mm, (c) 6.7 ~ 8 mm
(d) (a) ~ (c) を同じ体積ずつ混合したもの

図3に先述の札幌軟石を用いて行った潜砂試験の様子を、図4に、その結果を示す。0.5mmのふるい下(図2(a), 図4(a))を用いた場合、試験開始直後から潜砂を始める個体が多く、5分で40%が潜砂、50%が潜砂中、60分では70%が潜砂、20%が潜砂中であった。また、運搬時の振動により締め固まった影響は見られなかった。2mmのふるい上、4mmのふるい下(図2(b), 図4(b))そして、6.7mmのふるい上、8mmのふるい下(図2(c), 図4(c))と粒径が大きくなるにしたがい、同じ時間での潜砂の割合が減少し、潜砂中の割合が増加する傾向が見られた。3種類の粒度の試料を同じ体積ずつ混合したもの(図2(d), 図4(d))では、これらすべての中間の挙動を示した。これより、殻長10~15mmの場合、粒径が小さいほどアサリの潜砂に好ましいことがわかり、アサリの生残・成長に適していると推察される。

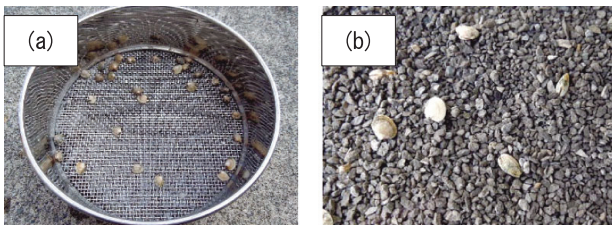


図3 潜砂試験の様子
(a) 殻長10~15mmの稚貝
(b) 札幌軟石上に設置し、60分間観察

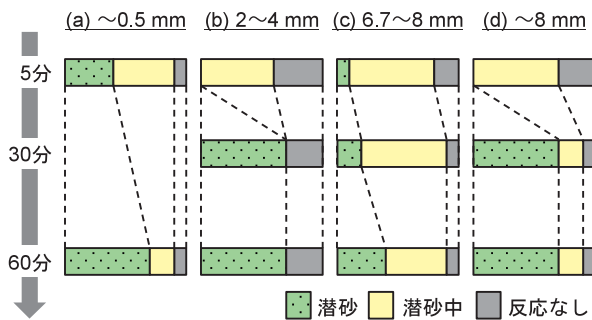


図4 潜砂試験の結果
種々の粒度分布((a)~(d))をもつ札幌軟石に設置したアサリの稚貝10個体の60分間の挙動の変化

3.3 耐久性の評価

札幌軟石と、比較として市販品に対し、運搬時や垂下前の作業時を想定した乾式と、垂下中や垂下後の洗浄時を想定した湿式について、それぞれの回転強度を求めた。

図5に回転強度試験の結果を示す。乾式では札幌軟石92に対し市販品98であり、札幌軟石の方が摩耗しやすいことが明らかになった。これは運搬時に札幌軟石を入れたポリエチレン重袋の底に微粉が見られた現象と結果が一致している。一

方、湿式では札幌軟石91に対し市販品89であり同等であった。乾式と湿式で比較すると、札幌軟石が92→91で変化が小さいのに対し、市販品が98→89で9%減少している。微細構造観察により、札幌軟石は多孔質であるが母材は緻密であるのに対し⁷⁾、市販品は全体にクラックが散見されたことから、吸水時にクラックから崩壊したと考えられる。これより、乾式では札幌軟石の摩耗が懸念される一方、はるかに使用時間が長い湿式では、いずれも同等の値になることがわかり、耐久性に遜色がないと推察される。

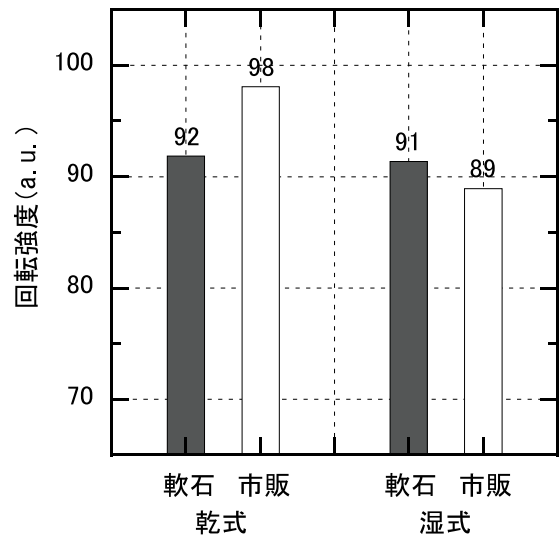


図5 回転強度試験の結果

3.4 量産試作と日本海海域での実証試験

3.1~3.3節で得られた結果を踏まえて、量産試作と日本海海域での実証試験を行った。

潜砂試験により、粒径が小さいほどアサリの潜砂に好ましいことがわかった。しかし水産関係者から、作業時の負担を軽減するには海中から引き上げる際の水の切れのよさが重要であり、垂下養殖に用いる容器を網目の大きさ3mmの丸カゴとするという報告を受けたことから、量産試作は4mm以上で行った。

表2に札幌軟石をジョークラッシャーとロールクラッシャーで粉碎後、種々の目開きのふるいで分級したときの、粉碎物の長軸と短軸の長さや歩留まりを示す。ふるい上とふるい下の目開きの差が大きいほど歩留まりが向上したが、粉碎物の粒径も大きくなった。水産関係者の意見を参考にし、4.2mmのふるい上、8.6mmのふるい下を採用した。なお、粉碎方法や粉碎条件の検討により、歩留まりのさらなる向上が期待できる。併せて4.2mm以下の粉碎物の有効利用法を見出すことも重要と考えられる。

表2 粉砕物の長軸と短軸の長さとは歩留まり

ふるい	長軸 (mm)	短軸 (mm)	歩留まり (%)
ステンレスふるい 4.0 mmのふるい上 6.7 mmのふるい下	8.8	6.6	23
ステンレスふるい 4.0 mmのふるい上 8.0 mmのふるい下	10.4	7.1	45
振動ふるい 4.2 mmのふるい上 8.6 mmのふるい下	13.4	7.6	56

長軸と短軸の長さは粉砕物 20 個の平均値

図6に量産試作品を用いて行った実証試験の様子と結果を示す。アサリの生残・成長に問題はなく、1年後の平均生残率は94.0±0.8%（平均±標準偏差，N=3カゴ）と非常に高く、平均殻長は31.2±3.3mm（平均±標準偏差，N=282個体）まで成長し、出荷サイズの30mmを達成した。水産関係者から、耐久性、作業性にも問題なく、むしろ基礎物性の値に反して軽く感じたとの意見を得た。札幌軟石の量産試作品と市販品のかさ密度を測定すると¹⁰⁾、それぞれ0.7g/cm³、1.0g/cm³であった。札幌軟石は扁平、市販品は球状であることも考慮すると、札幌軟石では海中から引き上げる際の水の切れがよく、軽く感じたと考えられる。価格は市販品の半額程度になる見込みである。

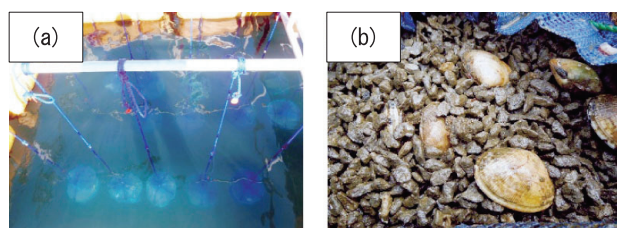


図6 実証試験の様子と結果

4. まとめ

アサリの年生産量の増加と、日本海海域の生産量を底上げする新たな漁業振興策の推進を目的とし、垂下養殖技術の確立と普及の一環として、札幌軟石を用いたアサリ垂下養殖用基質の開発を行った。

札幌軟石と市販品の基礎物性を比較した結果、いずれも同等であることが明らかになった。

潜砂試験によるアサリの生残・成長に適した粒度の調査の結果、粒径が小さいほどアサリの潜砂に好ましいことがわかり、アサリの生残・成長に適していると推察される。

回転強度試験による、札幌軟石と市販品の耐久性の評価の結果、乾式では札幌軟石の摩耗が懸念される一方、はるかに使用時間が長い湿式では、いずれも同等の値になることがわかり、耐久性に遜色がないと推察される。

量産試作品の作製条件を定め、日本海海域での実証試験を行った結果、アサリの生残・成長、耐久性、作業性に問題はなく、水の切れが良かったため軽く感じると好評を得た。

今後は、水産関係者への普及に努め、改善の要望があれば応えていく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、上ノ国町水産商工課栽培漁業総合センター 木村直和氏に多大なご協力をいただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 日向野純也・浅尾大輔：アサリ垂下養殖の意義と普及に向けた課題（総論），水産技術，9(3)，pp.87-100，(2017)
- 農林水産省：平成30年漁業・養殖業生産統計
- 小坂善信：日本におけるホタテガイ増養殖と研究の変遷，水産増殖，65(3)，pp.271-287，(2017)
- 北海道：北海道水産業・漁村のすがた2019
- 安信秀樹：播磨灘におけるアサリ垂下養殖の取り組み，豊かな海，No.33，pp.29-32，(2014)
- 日向野純也：アサリの天然採苗と垂下養殖，豊かな海，No.33，pp.56-58，(2014)
- 執行達弘・野村隆文・森武士他：札幌軟石を用いた高湿度域調湿材料の開発，北海道立総合研究機構工業試験場報告，Vol.317，pp.83-88，(2018)
- 日本工業規格JIS Z 8841
- 中山威尉・福田裕毅・秦安史他：底質の貫入抵抗がアサリの潜砂行動に及ぼす影響，水産工学，Vol.46 No.1，pp.29-36，(2009)
- 日本粉体工業技術協会規格SAP01-79

北海道立総合研究機構工業試験場報告
No.319 (2020)

発行 令和2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
産業技術環境研究本部
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