



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.317)

2018

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術研究本部

工業試験場

目 次

一般論文

1 UAVを活用した海草繁茂状況調査の効率化	浦池 隆文, 飯島 俊匡, 今岡 広一 …………… 1 井川 久, 宮本 正夫, 小形 孝 全先 清通, 宮川 椋, 新居 久也
2 寒冷地におけるリチウムイオン電池の効率的な設置手法に関する研究	白土 博康, 保科 秀夫 …………… 9
3 冷暖房放射パネルの冷暖房能力評価条件の検討	白土 博康 …………… 15
4 ジャガイモの不用部除去システムの開発	井川 久, 中西 洋介, 川島 圭太 …………… 23 三戸 正道, 畑沢 賢一, 岡崎 伸哉 飯島 俊匡, 大田 佳佑, 栗林 宏光
5 プレス加工の不良判定手法に関する研究	鶴谷 知洋, 畑沢 賢一, 神生 直敏 …………… 31
6 三次元造形鋳型の常温特性評価試験法	戸羽 篤也, 鈴木 逸人 …………… 41

研究ノート

- 1 作業車両のための通信制御システムの開発
堤 大祐, 新井 浩成, 浦池 隆文 49
多田 達実
- 2 量子化学計算を用いた魚油のテラヘルツ帯吸光度分析に関する研究
宮崎 俊之 55
- 3 吸着技術を用いた機能性糖鎖の脱色
吉田誠一郎, 松嶋景一郎, 鎌田 樹志 59
宮本 宜之
- 4 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
松嶋景一郎, 吉田誠一郎, 水本 秀二 65
山田 修平, 菅原 一幸
- 5 セルロースナノファイバー強化樹脂の材料特性
瀬野修一郎, 吉田 昌充, 山岸 暢 71
大市 貴志, 可児 浩, 松嶋景一郎
- 6 熱溶解積層型3Dプリンタ造形物の機械特性
吉田 昌充, 可児 浩, 瀬野修一郎 77
大市 貴志, 山岸 暢
- 7 札幌軟石を用いた高湿度域調湿材料の開発
執行 達弘, 野村 隆文, 森 武士 83
吉田 憲司, 橋本 祐二
- 8 非接触3次元測定における測定位置の最適化に関する研究
安田 星季, 鈴木 逸人, 岩越 睦郎 89
- 9 高齢者サービスにおける動作計測のためのセンサ利用技術
栞野 晃希, 前田 大輔, 中島 康博 93
橋場 参生

CONTENTS

Regular Paper

- 1 Efficiency Improvement of Underwater Forest Survey using UAV 1
Takafumi URAIKE, Toshimasa IJIMA, Kouichi IMAOKA,
Hisashi IGAWA, Masao MIYAMOTO, Takashi OGATA,
Kiyomichi MASSAKI, Ryou MIYAKAWA, Hisaya NII
- 2 Study on an Effective Installation Method of Lithium Ion Batteries in Cold Region 9
Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA
- 3 Study on Evaluation Conditions of Heat Capacity for Radiation Panels 15
Hiroyasu SHIRATO
- 4 Development of Automatic Potato-Eyes Removing System 23
Hisashi IGAWA, Yosuke NAKANISHI, Keita KAWASHIMA,
Masamichi MITO, Kenichi HATAZAWA, Shin'ya OKAZAKI,
Toshimasa IJIMA, Keisuke OTA, Hiromitsu KURIBAYASHI
- 5 Study on Defect Discrimination Method of Sheet Metal Stamping 31
Tomohiro TSURUYA, Kenichi HATAZAWA, Naotoshi KAMIO
- 6 Test Method for 3D-Printed Casting Mold Properties in Normal Temperature 41
Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI

Research Note

1	Development of a Communication Control System for Work Vehicles	49
	Daisuke TSUTSUMI, Hironari ARAI, Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA	
2	Terahertz Absorption Analysis of Fish Lipid using Quantum Chemical Calculation	55
	Toshiyuki MIYAZAKI	
3	Decolorization of Oligosaccharides by Adsorption	59
	Seiichiro YOSHIDA, Keiichiro MATSUSHIMA, Tatsuyuki KAMADA, Nobuyuki MIYAMOTO	
4	Highly Selective and High-Speed Depolymerization of Polysaccharides Using High-Pressure-High-Temperature Water Micro Chemical Process	65
	Keiichiro MATSUSHIMA, Seiichiro YOSHIDA, Shuji MIZUMOTO Shuhei YAMADA, Kazuyuki SUGAHARA	
5	Material Properties of Cellulose Nanofiber Reinforced Plastics	71
	Shuichiro SENO, Masamitsu YOSHIDA, Yohru YAMAGISHI Takashi OHICHI, Hiroshi KANI, Keiichiro MATSUSHIMA	
6	Mechanical Properties of Materials Processed by a Fused Deposition Modeling Printer	77
	Masamitsu YOSHIDA, Hiroshi KANI, Shuichiro SENO, Takashi OHICHI, Tohru YAMAGISHI	
7	Development of Porous Materials with Humidity Controlling Properties at a High Humidity Level	83
	Tatsuhiko SHIGYO, Takafumi MOMURA, Takeshi MORI, Kenji YOSHIDA, Yuji HASHIMOTO	
8	Optimization of the Measurement Position in the Non-contact 3D Measuring	89
	Seiki YASUDA, Hayato SUZUKI, Mutsuro IWAKOSHI	
9	Utilizing Method of Sensors for Motion Measurement at Eldercare Service	93
	Kouki KUWANO, Yasuhiro NAKAJIMA, Daisuke MAEDA, Mitsuo HASHIBA	

UAVを活用した海草繁茂状況調査の効率化

浦池 隆文, 飯島 俊匡, 今岡 広一, 井川 久
宮本 正夫*, 小形 孝*, 全先 清通*, 宮川 椋*, 新居 久也*

Efficiency Improvement of Underwater Forest Survey using UAV

Takafumi URAIKE, Toshimasa IJIMA, Kouichi IMAOKA, Hisashi IGAWA
Masao MIYAMOTO*, Takashi OGATA*, Kiyomichi MASSAKI*
Ryou MIYAKAWA*, Hisaya NII*

抄 録

沿岸部に存在する海草群落（主にアマモ類が群生しているアマモ場）は、水産資源の繁殖や水質浄化など多様な機能を担っている。特に本研究で調査の対象としたサロマ湖においては、ホッケイエビの生息場として重要な役割を持っており、その消長を的確に把握することは、資源量の推定や適切な資源管理の面で非常に重要である。これまでに、航空機による空撮画像や衛星画像を用いたアマモ場調査手法の確立が試みられ、有益な情報を得られることが明らかとなっているが、空撮にかかる費用や衛星画像の入手性の面で課題があり、より簡便な手法が求められている。

そこで本研究では、コストや適時性の面で有効と考えられるUAVを活用した調査手法について検討した。サロマ湖に設定した調査海域において、海草類の現存量測定などの現地調査とUAVによる空撮を実施し、両者を対比することでアマモ場の分布と賦存量の推定を試みた。空撮画像から得られる色情報の解析を行ったところ、HSV色空間における色相がアマモ現存量との相関が認められるパラメータとして抽出された。これらにもとづいた画像解析手法を検討した結果、複雑な処理を必要とせず、アマモ場の推定が可能であることを見出した。

キーワード：アマモ場, UAV, 空撮, 画像解析, 色相

Abstract

Eelgrass bed along the coastal area fulfills a various functions such as breeding aquatic life and purifying water quality. Especially in Lake Saroma, it has an important role as a habitat for North Sea shrimp (*Pandalus latirostris*). From the viewpoint of estimation and proper management of fishery resources, it is important to know the transition of eelgrass distribution. It has been tried to establish a method of eelgrass distribution survey using aerial photographs or satellite images. Although it is obvious that useful information can be obtained, a simpler method is required because there are problems in terms of availability and cost of image data.

In this study, we investigated a survey method utilizing UAV which is considered effective in terms of cost and timeliness. In the survey area set on Lake Saroma, we measured the amount of existing eelgrass and acquired the aerial photographs by UAV. From the analysis of the color information of the aerial photographs, the hue of the HSV color space was extracted as a parameter correlated with the existing amount of eelgrass. As a result of examining the image analysis method based on the hue, it was found that it is possible to estimate the distribution of eelgrass without using complicated image processing.

KEY-WORDS : Eelgrass bed, UAV, Aerial photograph, Image analysis, Hue

* 公益社団法人北海道栽培漁業振興公社, * Hokkaido Aquaculture Promotion Corporation

事業名：一般共同研究

課題名：UAVの活用による沿岸部（浅海域）海草繁茂状況調査の効率化

1. はじめに

沿岸部（浅海域）に存在する海草群落（主にアマモが群生しているアマモ場）は、水産資源の繁殖や水質浄化など多様な機能を担っている。特に本研究で調査の対象としたサロマ湖においては、ホッカイエビの生息場として重要な役割を持っている。このような機能をもつアマモ場の分布は、海流や気候の変動により経時的に変化するため、その消長を的確に把握することは、漁業者にとって資源量の推定や適切な資源管理の面で非常に重要である。栽培漁業振興公社等においてはこれまで、航空機による空撮画像や衛星画像を用いたリモートセンシング手法によるアマモ場分布調査手法の確立¹⁾が試みられており、有益な情報を得られることが明らかとなっている。しかし、空撮にかかる費用や衛星画像の入手性の面で課題があり、より簡便な手法が求められている。

そこで本研究では、コストや適時性の面で有効と考えられるUAVを活用した調査手法の確立について検討を行った。

2. 研究の概要

研究実施においては、サロマ湖養殖漁業協同組合の協力のもと、サロマ湖湧別地区テイネイ海域において、図1に示す約1000m×約500mの調査海域を設定した。海域内に3測線を設定し、1測線当たり5地点の計15地点を調査地点とした。試験は6月・8月・9月の3回実施した。このように設定した調査海域において、海草現存量測定などの現地調査、およびUAV空撮による画像の取得を行い、これら両者を対比することでアマモ場の分布と賦存量の推定を試みた。

海草類現存量の測定は、スキューバ潜水による枠取りで行い、各調査地点近傍において1 m²枠で2試料ずつ採取した（図2）。この際アマモを含む海草類を全量採取した。採取時には枠毎の写真を撮影し、目視による底質状況、レッド（ロープの先に錘を付けた道具）による水深、透明度板による透明度、水温・塩分（JFEアドバンテック社製CTD RINKO-Profiler）の観測を行った（図3）。採取したアマモ類（アマモ・スゲアマモ・コアマモ）は、葉部・根部・枯葉に分類し、総湿重量および種類別に葉部の株数と重量を測定した

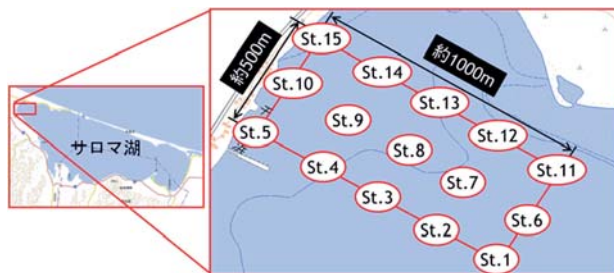


図1 設定した調査海域（St.1～St.15は調査地点）
※地理院地図を加工して使用

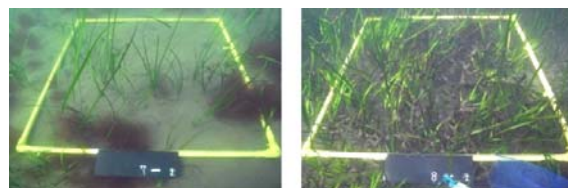


図2 枠取りによる現存量測定



図3 現地調査の様子

図4 採取・分類したアマモ



図5 UAV使用機材と飛行の様子

（図4）。また、その他の海草についても種類・湿重量を測定した。

UAV空撮は現地調査の実施と合わせて行った。工業試験場保有の機体（株式会社自律制御システム研究所製ミニサーベイヤーMS-06LA）を使用し、リコー製GRとBIZWORKS製Yubaflexの2台のデジタルカメラを搭載することで、可視画像および近赤外画像の撮影を行った（図5）。また、サロマ湖養殖漁業協同組合においてもUAVを保有（DJI製Phantom）しており、随時撮影が行われていたことから、工業試験場撮影の画像とあわせて解析に供した。

3. 現地調査結果

各調査地点で採取したアマモ類（アマモ、スゲアマモ）の単位面積当たりの現存量測定結果（栄養株+生殖株+根、枯葉は含まない）を表1に、被度分類（アマモ類の単位面積当たりの重量を区分したもの）を表2に、アマモ類現存量の分布を図6に示す。

3.1 アマモ類の分布

アマモ類は6月のSt.1以外（St.1においても枯葉は確認された）の全ての調査地点で出現した。1000g/m²以上の比較的多量に出現したのは、6月にはSt.5・St.9・St.10、8月と10月にはSt.8・St.9であった。これらの地点は調査海域の中央・陸側に多い傾向であった。その他の地点では、6月に沖側ではほとんど出現しなかったが、8月と10月には若干

表1 調査地点別1㎡当たりの栄養株と生殖株の湿重量および本数

地点	2017/6/7			2017/8/23			2017/10/3			
	湿重量(g)	本数	被度分類	湿重量(g)	本数	被度分類	湿重量(g)	本数	被度分類	
St.1	1	0.0	0	I	35.7	41	II	92.9	65	II
	2	0.0	0	I	12.8	16	II	79.9	41	II
St.2	1	0.9	0	I	130.9	127	II	193.7	59	II
	2	0.3	0	I	48.6	33	II	308.1	144	II
St.3	1	1.4	0	I	83.1	64	II	80.6	48	II
	2	0.5	0	I	13.8	18	II	204.1	103	II
St.4	1	91.0	17	II	95.7	82	II	69.5	27	II
	2	25.7	4	II	125.3	38	II	142.8	45	II
St.5	1	2453.2	524	>III	698.2	207	II	480.8	188	II
	2	1251.2	256	III	344.5	145	II	801.6	468	II
St.6	1	0.6	0	I	47.6	40	II	43.6	30	II
	2	0.1	0	I	18.4	16	II	82.1	52	II
St.7	1	0.0	0	I	61.0	59	II	58.2	36	II
	2	2.9	0	I	38.4	61	II	57.4	41	II
St.8	1	303.1	65	II	1218.0	176	III	1014.4	192	III
	2	649.0	129	II	1228.0	168	III	622.0	108	II
St.9	1	1730.8	568	III	1171.6	532	III	753.6	296	II
	2	1164.0	364	III	1272.8	440	III	1241.6	384	III
St.10	1	608.4	156	II	620.3	162	II	488.8	148	II
	2	1137.6	260	III	700.3	184	II	605.6	308	II
St.11	1	0.1	0	I	22.8	23	II	35.3	30	II
	2	0.5	0	I	43.1	43	II	44.4	43	II
St.12	1	0.4	0	I	37.7	33	II	91.9	67	II
	2	0.0	0	I	27.0	37	II	60.1	45	II
St.13	1	2.1	0	I	128.3	72	II	653.6	292	II
	2	8.5	2	I	373.4	217	II	818.8	464	II
St.14	1	12.6	0	II	163.8	186	II	102.3	88	II
	2	26.7	5	II	305.3	189	II	186.9	134	II
St.15	1	515.2	219	II	537.3	172	II	287.6	428	II
	2	583.8	275	II			256.0	344	II	
全サンプルの平均		352.4	94.8		331.2	123.5		331.9	157.3	

調査地点ボンデン移動により補足データを使用

増加する傾向がみられた。平成26年度に実施されたアマモ調査時の被度分類結果¹⁾を当てはめると、被度Iは6月にのみみられ、調査海域の沖側で6月にIであった地点が8月以降はIIに変わっている。被度IIIは6月にSt.5・St.9・St.10の3地点に出現し、8月にはSt.8・St.9の2地点、10月にはSt.8の1地点のみみられ、調査海域の中央・陸側に分布した。全体を通してみると、8月以降はほとんどが被度IIに該当した。

出現種ではアマモが大部分を占めた。スゲアマモは6月には確認されなかったが、8月にSt.4・St.5においてわずかに確認され、10月ではSt.5・St.9に出現し、8月より多く出現した。アマモの繁殖に関わる生殖株は6月に多く、St.5・

表2 被度分類

昭和59年		平成26年	
被度	g/m ²	被度	g/m ²
I	0	I	0~10
II	1~1025	II	11~950
III	1026~2050	III	951~2050
IV	2051~3075	IV	干潟
V	3076~	V	

St.9・St.10で多く出現した。その他の海藻類は、緑藻類ではアサミドリシオグサ・ホソジュズモ・アナアオサ、褐藻類ではツルモ・モク類、紅藻類ではモロイトグサ・オゴノリなどが出現した。以上のように調査海域内のアマモ類の現存量と分布を把握するとともに、経時的に変化することを確認した。

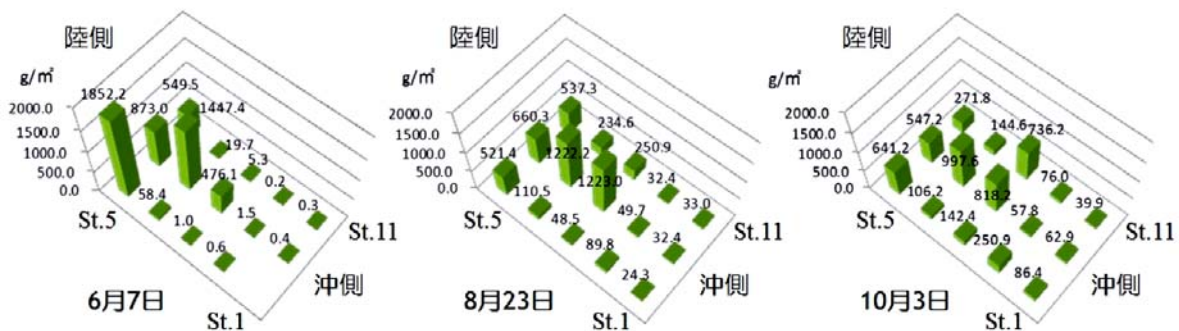


図6 2 枠平均のアマモ類の現存量



図7 設定した飛行経路



図8 オルソモザイク画像（可視画像）

4. UAV空撮

UAV空撮は高度150mから鉛直下向きでの撮影を基本とし、機体が有するGPSによる自律飛行機能と、搭載するカメラのインターバル撮影機能を使用し、自動撮影により行った。図7に、調査海域において設定した飛行経路を示す。飛行経路は、空撮により得られる複数の画像からオルソモザイク画像^{※1}を得るために、隣接する画像について撮影範囲の約8割が重なるように設定した。この場合の撮影枚数は約450～500枚である。オルソモザイク画像の生成処理にはAgisoft製PhotoScanを使用した。St.5近くにある岸壁の基部を離着陸場所とし、St.5付近から沖へ向かって飛行を開始する。図の経路では、調査海域の長辺方向を6往復することで全体をカバーしているが、UAVの飛行速度と飛行可能時間を考慮して、St.5側4往復を2往復ずつ2回、St.15側2往復を1往復ずつ2回の、計4回に分けて空撮を行った（経路間隔約40m、飛行速度6m/s、撮影インターバル5秒、総飛行時間約55分）。

※1 オルソモザイク画像：正射変換した複数の画像を連結し一枚の画像に統合したもの。

4.1 画像取得結果

空撮により得られた画像の例として、10月3日に撮影した画像をもとにオルソモザイク処理を行った結果を図8に示す。図は可視画像を処理した例であり、離着陸場所と対角にあるSt.6～St.7・St.11～St.12付近で画像を連結できていないものの、試験期間中に取得した画像の中では最も広く調査海域を連結することができた例になる。当日は撮影中に曇天と晴天を繰り返す状況であったため、撮影のタイミング（場所）により海底をある程度鮮明に確認できる部分と白味がかかり不鮮明な部分が混在しているが、海草繁茂領域と推察される部分（黒みがかった色の濃い部分）が確認できる。一方、図9の近赤外画像を利用したNDVI^{※2}画像においては、陸地側では海草繁茂領域と推察される部分が淡色で示されているが、画像品質が低くオルソモザイク処理が困難であったため、海

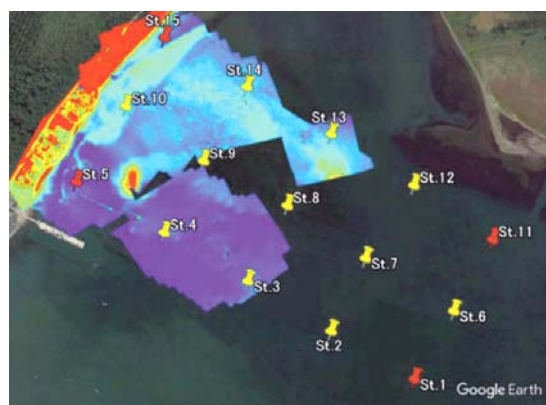


図9 オルソモザイク画像（NDVI画像）

域全体での海草繁茂領域との対応を得ることは困難であった。

※2 NDVI：正規化植生指数とよばれ、植生の活性度を示す指標。活性が高いと近赤外を強く反射することを利用。

4.2 空撮画像の良否について

本研究で設定した試験期間においては、気象の影響や日射状況の影響が大きく、結果として工業試験場が実施した空撮においては、可視画像・近赤外画像ともに調査海域全体のオルソモザイク画像が生成できる良好な画像を得るには至らなかった。取得した個別の画像の例を図10～図13に示す。図10



図10 良好な画像



図11 太陽光の反射



図12 霧によるかすみ



図13 太陽の反射と波

は良好な画像の例であり、海底の様子が鮮明に記録されている。このような画像によれば、画像の連結が可能である。図11～図13は画像の連結には不適となる画像の例である。図11は快晴時であるものの、中心部にさざ波による太陽光の反射が広がっており、海底の様子が確認できない。図12は曇天で霧がかかっており、画像全体がかすんでいる。また、図13は画像上部に太陽光の反射が写り込んでいるのに加え、風の影響によるスジ状の波が多数写り込んでいる。これらのように、目視でも海底の様子を確認することが難しい画像では、オルソモザイク処理を適正に行うことが困難となるが、撮影時の気象条件の確認と、太陽との位置関係を考慮した撮影方法を工夫することにより、空撮画像の品質をある程度確保することは可能である。

4.3 太陽高度と方位の関係

太陽を機体の進行方向正面に見て撮影する場合、垂直画角との関係から、太陽高度が図14に示す角度以下であれば、太陽の写り込みを抑えることが可能となる。ただし進行方向と太陽方位がずれると、図14下部のグレーで示した円内に写り込む。理想的には水平画角もしくは対角画角を基準にすると写り込みのリスクをさらに低減できるが、より太陽高度が低いことが求められる（撮影に不適な時間が長くなる）ことから、全体の作業スケジュールを考慮した設定が必要となる。なお、画角はカメラのセンサーサイズと焦点距離から以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \text{垂直画角} &= 2 \times \arctan(\text{垂直センサーサイズ} / (2 \times \text{焦点距離})) \\ \text{水平画角} &= 2 \times \arctan(\text{水平センサーサイズ} / (2 \times \text{焦点距離})) \\ \text{対角画角} &= 2 \times \arctan(\text{対角センサーサイズ} / (2 \times \text{焦点距離})) \end{aligned}$$

例として2018年のサロマ湖近辺の夏至日の太陽高度と太陽方位を図15に示す。太陽方位は北を0°とした時計回りの角度であり、太陽高度は11時30分頃に最大で69.2°になる。例えばコー製GRを使用した場合、水平画角(65.8°)を基準とした太陽高度(90° - (65.8° / 2) = 57.1°)を越えるのは9時30分頃～13時30分頃までとなり、この時間帯は撮影範囲内に太陽の反射が写り込むリスクが高くなることから撮影には不適となる。このように、使用するカメラと撮影時期・場所により撮影に不適となる時間帯が変化するため、事前に良く検討することが重要となる。

4.4 調査海域の俯瞰画像

工業試験場による空撮のほか、協力機関であるサロマ湖養殖漁業協同組合においても機体(DJI製Phantom)を保有しており、設定した調査海域において空撮が実施された。現地調査実施日と比較的近い9月6日と9月22日に撮影された画像は、調査海域をほぼカバーし、オルソモザイク処理に適

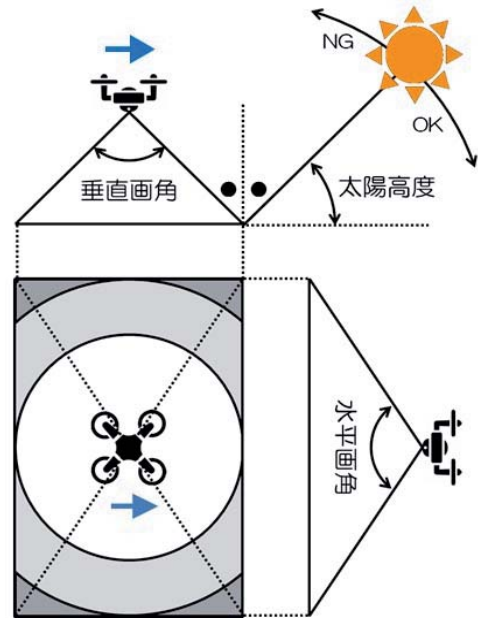


図14 カメラの画角と太陽高度

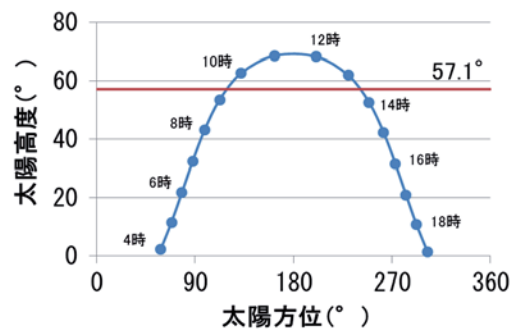


図15 太陽高度と太陽方位の例

した良好なものであった。図16に組合撮影の画像から得られたオルソモザイク画像を示す。飛行可能時間等の制約により、最も沖側のSt.1・St.6・St.11は撮影範囲外となっているが、調査海域全体の様子を詳細に確認することができる。現地調査の結果アマモ現存量が多かった地点は、色が濃い(黒みががっている)部分と対応しているように見受けられる。参考として、アマモ場と推察される領域の抽出を組合職員に依頼

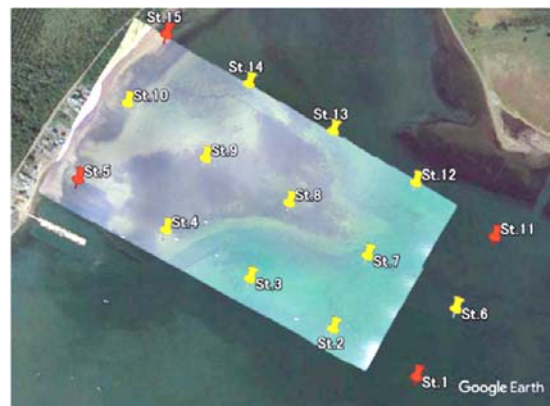


図16 調査海域全体のオルソモザイク画像

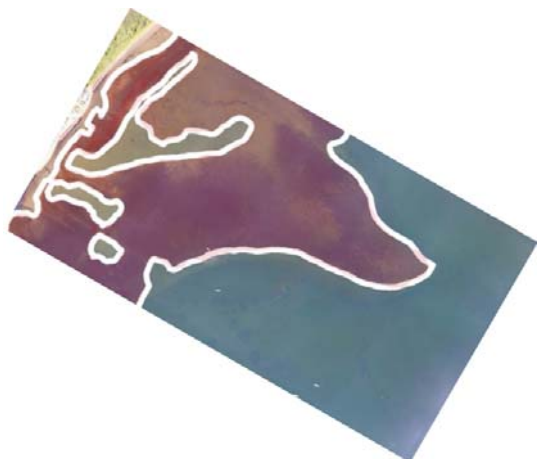


図17 アマモ場と推察される領域

したところ、図17のような回答が得られた。組合ではこの他の時期にも良好な状況での空撮が実施されていたことから画像の提供を受け、工業試験場が取得した画像とあわせて次章のように画像処理手法の検討を行った。

5. 空撮画像からのアマモ場推定

現地調査の結果および空撮により得られた個々の画像や図16・図17をみると、調査海域はおおむね次のような領域に分類できる。

- ① アマモ場 (St.4・St.5・St.8・St.9・St.10・St.15：色が濃く見える領域)
- ② 陸側で海草類がない砂地 (St.5・St.9・St.10・St.14・St.15で囲まれる領域：色が薄く見える領域)
- ③ 沖側で海草類がない深場 (St.1～St.3・St.6～St.7・St.11～St.13：中間的な色合いの領域)

これらは視覚的な判断によるものであるが、画像の色情報との関係について以下のような検討を行った。

5.1 画像解析手法の検討

個別の画像の例として示した図10には、海草類が存在するとみられる色が濃い部分と、海草類が存在せず砂地とみられる色が薄い部分が混在している。ここで各画素のRGB値のうち最も多く含まれる色チャンネルを抽出して表示すると、図18のようになる。海草部分は青の成分(図では黒で表示)が最も多く、砂地の部分は緑の成分(図ではグレーで表示)が最も多く含まれており、RGB値の最大値に着目することで海草部と砂地部に分類することが可能である。この方法で調査海域全体を見てみると図19のようになる。図19は、9月22日に組合が撮影した画像(図16)を処理した結果を示す。陸側の砂地と沖側の深場の区別はなく緑の成分が多い領域

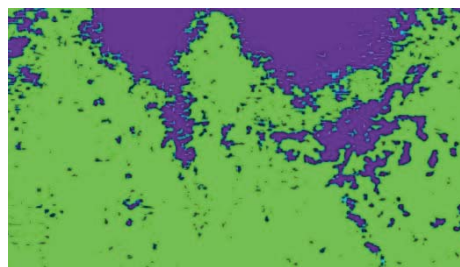


図18 RGB最大値による分類

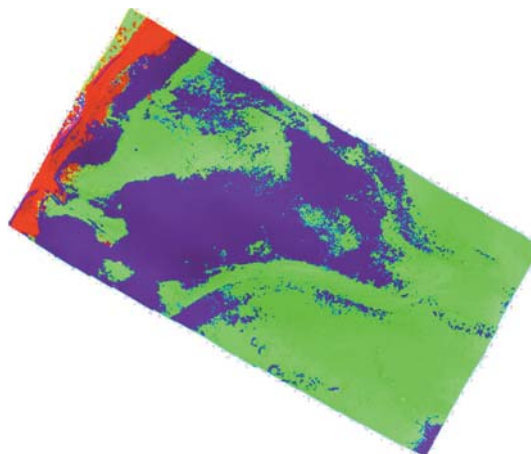


図19 RGB最大値によるアマモ場推定の例

(グレー)として抽出されているが、アマモ場と推定される部分は青の成分が多い領域(黒)として抽出されている。この結果は図17で示した目視により推察される領域とも良く一致している。このように、画像の色情報を用いた処理を工夫することでアマモ場の分布を抽出することが可能であるが、賦存量(被度分類)を推定することはできない。

5.2 画像データの数値化

前述の方法をもとに、他の色チャンネルとの関係も考慮することで、より詳細に特徴を抽出する方法について検討を行った。具体的には、青の成分が多いアマモ場であっても、赤の成分を含むか緑の成分を含むのかにより、異なる特徴を持つ領域に細かく分類することが可能になると考えられる。このように色の特徴で画像を分類する方法として、HSV色空間における色相に着目した処理を検討した。ここで色相とは、RGBを0°・120°・240°に配置し、隣り合う2つの原色の混色が、混合割合(RGBのいずれかは必ず1となるように混合する)に応じて円環上に配され、0°～360°で表されるものである(図20)。例えばGとBを1:1で混合すると水色と

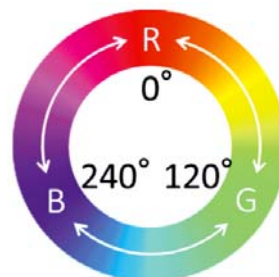


図20 色相

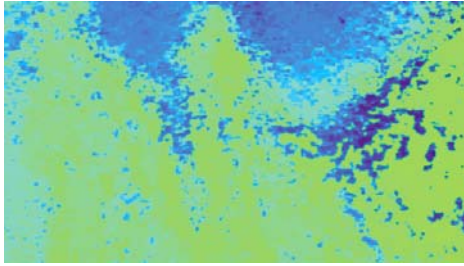


図21 色相による分類

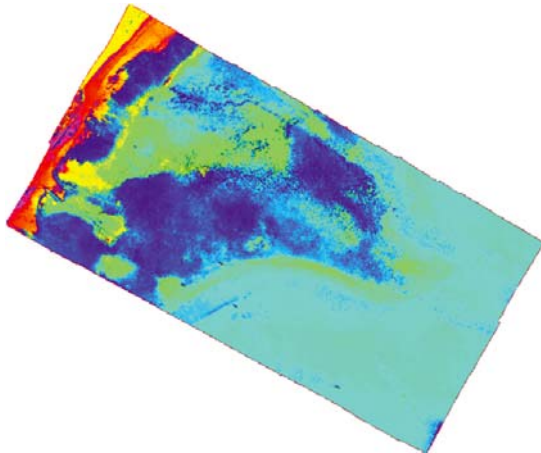


図22 色相によるアマモ場推定の例

なり、色相は180°となる。

図18に示したRGB最大値による分類と同じ元画像を用い、色相を抽出した画像を図21に示す。図18で海草部に分類された領域は、水色から青の中間的な色合い（図ではグレーから黒）で表されている。調査海域全体の画像（図16）から色相を抽出すると図22のようになり、アマモ場と推定される部分は水色から青（グレーから黒）で表され、それ以外の砂地や沖側の深場は水色～緑（グレーから白）で表される。

次に、現地調査の結果得られた現存量と、アマモ場と推定される部分の色相との関係について、以下のように検討した。なお、現地調査実施日と組合の撮影日は異なるが、8月23日の現地調査に対応する画像として9月6日撮影の画像を使用し、10月3日の現地調査に対応する画像として9月22日の画像を使用した。まず、調査海域全体から色相を抽出した画像において、調査地点近傍（ここでは約6m×約6mの領域内）における色相の平均をとり、グラフに表すと図23のようになる（St.1・St.6・St.11は撮影範囲外のためデータなし）。これに対し、調査地点ごとの現存量をグラフに表すと図24のようになる。両者を比較すると、現存量が多かったSt.5・St.8～St.10において色相も大きな値となっており、全体の傾向として類似しているように見受けられる。そこで、現存量がおおむね100g/m²以上であったSt.2・St.5・St.8～St.10・St.13において現存量と色相との相関を取ると図25のようになり、両者には相関が認められた（色相170°（水色）～240°（青）が現存量0g/m²～1500g/m²に相当）。このように、

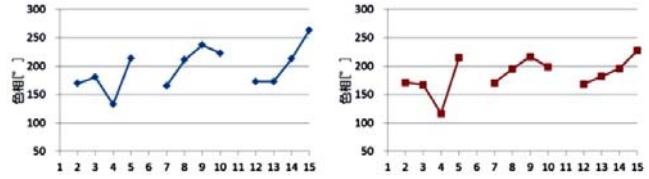


図23 調査地点ごとの色相値
（左：9月6日，右：9月22日）

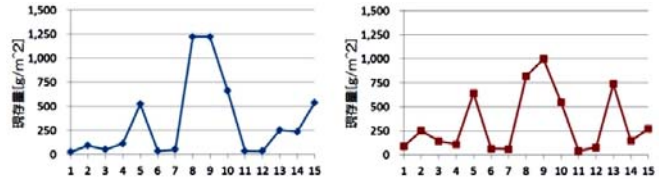


図24 調査地点ごとの現存量
（左：8月23日，右：10月3日）

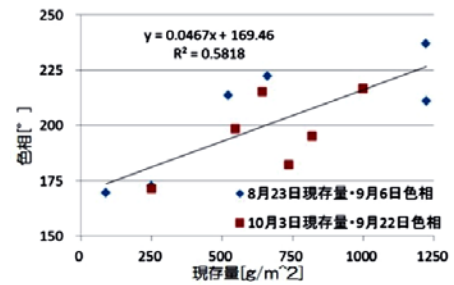


図25 現存量と色相の関係

色相を指標として領域の抽出を行うことにより、アマモ場の抽出と同時に賦存量（被度分類）を推定することが可能と考えられる。

5.3 アマモ場の分布と賦存量の推定

以上の検討結果をもとに、アマモ場の分布と賦存量の推定を行った。これまでの検討で使用した9月6日・9月22日の画像ほか、サロマ湖養殖漁業協同組合により試験実施時期以降にも撮影された10月14日・10月25日の画像も使用した。それぞれについてオルソモザイク処理した画像を図26に示す。9月22日・10月25日の画像は、沖側の深場でも海底の様子がクリアにとらえられている。9月6日の画像は濁りの影響が全体にややくすんで見えるが、海底の様子は確認できる。10月14日については9月6日と同様くすんで見えるのに加え、沖側で波による太陽の反射が写り込み、画像の連結が不完全となった部分がある。これらの画像から色相をもとにアマモ場を抽出した画像を図27に示す。ここでは色相192°（480g/m²）～240°（1500g/m²）の範囲で抽出した。9月22日と10月25日では、図17で示した目視で推察されるアマモ場と同様の領域が抽出され、分布と賦存量（色あい）の経時変化がとらえられている。一方、9月6日と10月14日では、線で囲った部分に誤分類を生じていると思われる。その要因としては、太陽の写り込みや、気象条件・水質（濁り）等の影響による

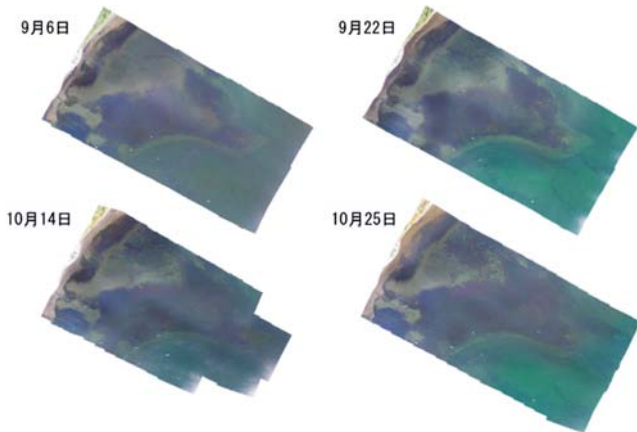


図26 アマモ場推定に用いたオルソモザイク画像

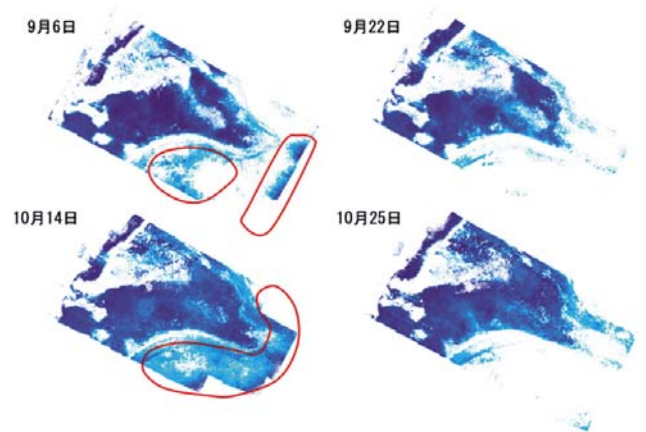


図27 色相をもとに推定したアマモ場

色相の変化が考えられるものの、誤分類と考えられる領域を除けば、同様にアマモ場の分布と賦存量の経時変化がとらえられている。

6. まとめ

本研究では、海草繁茂領域（アマモ場）の調査を効率的に実施することを目的として、UAVを活用した空撮と画像解析の手法について検討し、以下のような結果が得られた。

- ① 調査対象とした海域において15点の調査地点を設定し、枠取りによるアマモ類現存量の測定を行った。アマモ類は調査海域の中央・陸側に多く分布し、季節とともに変動する様子を確認した。
- ② 陸上と比較して海上での空撮は、気象条件や日射（太陽の高度と方位角）の影響を受けやすい。安定した品質の画像を得るためには適切な撮影条件を設定（飛行経路・飛行方法等）することが重要であり、その指針が得られた。
- ③ 調査海域全体の可視画像から色相を抽出し、調査地点での現存量と比較したところ相関が認められた。現存量と対応する色相範囲を抽出することで、アマモ場分布と賦存量の推定が可能であることを確認した。

一方で、アマモ場分布と賦存量の推定に関して、図27に示したように誤分類を生じる場合があり、その要因としては以下が考えられる。

本研究では毎回異なる条件（気象・日時）で記録された画像を使用したことにより、同じ場所をとらえた画像であっても色調の変化を生じていた可能性がある。また、設定した15点の現存量測定点のうち、色相との比較に使用できたのは6点でありサンプル数が十分であったとは言えない。このような画像と現存量の相関においては、図25で得た相関関数のレ

ベルと傾きが真値を表していない可能性がある。

これらより、今後の課題として以下の項目があげられる。

- ① 気象や日照の変化とカメラ設定に起因する色調変化要因の特定と補正
- ② 現存量と色相の相関における「正確性」と「再現性」向上

①については、撮影時にリファレンスとなる対象物を設置するなどして、より正確な色情報を得ることが必要となる。②については、調査コストとのバランスを考慮しながら調査地点を精査し、より確かな相関を得るためのサンプル数の確保が必要となる。

本研究では、UAVを活用した調査手法を確立することとあわせ、漁業関係者自らが実践可能な汎用的で低コストな手法として提案し、普及を図ることを目的としている。UAVによる海上での空撮における留意点や、市販もしくはフリーの画像編集ソフトを活用した画像解析方法などを、別途「UAV空撮によるアマモ場推定の手引き」として取りまとめている。今後は本研究で示した手法をより実践的な手法として確立し、普及・展開を図るため、継続して上記課題の改善に向けた取り組みを進める。

参考文献

- 1) 平成26年度施行 サロマ湖アマモ分布調査報告書，公益社団法人北海道栽培漁業振興公社，平成27年3月

寒冷地におけるリチウムイオン電池の効率的な設置手法に関する研究

白土 博康, 保科 秀夫

Study on an Effective Installation Method of Lithium Ion Batteries in Cold Region

Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA

抄 録

寒冷地における分散型電力供給システムの事業化推進のため、蓄電容量が大きく電力貯蔵システムに適したリチウムイオン電池について、環境温度別の充放電試験や氷点下での充放電サイクル試験を実施した。その結果、氷点下での充放電時の内部抵抗による大きな発熱があること、リチウムイオン電池の内部抵抗は充放電サイクル数による劣化よりも環境温度の影響を強く受けることを把握した。また、その熱を断熱容器で保温することにより、電池の温度を上昇させ、低温下での放電性能が向上可能であることを見出した。

キーワード：リチウムイオン電池, 氷点下での充放電試験, 内部抵抗, 発熱, 断熱容器

Abstract

Charge and discharge characteristics of a lithium ion battery were evaluated and cycle tests below zero temperature were carried out in order to utilize lithium ion batteries for distributed energy system effectively in cold region,. As a result, large amount of heat occurred during charge and discharge of the battery due to the internal resistance below zero temperature. The internal resistance of the lithium ion battery was highly affected by the ambient temperature compared to the deterioration by charge and discharge cycles in below zero temperature. It was shown that the discharge characteristics of the batteries packed by the insulating container could be improved due to the temperature rise caused by the heat occurred during charge and discharge of the battery.

KEY-WORDS : Lithium Ion Battery, Charge and Discharge Characteristics Tests below Zero, Internal Resistance, Heat Generation, Insulating Container

1. はじめに

北海道は、広大な海岸線や土地を有し、再生可能エネルギー由来の電力供給に適している地域である。近年の小型の風力発電機や太陽光発電モジュールの性能改善や価格低下により、分散型電力供給システムの導入が以前より容易になっている。しかしながら、電力を貯蔵する電池の性能は寒冷地では低下するとされており、現在市販されている電池が実用レベルで使用に耐え得るのか十分に分かっていない。また、電池を保温すれば、充放電量も向上すると考えられるが、その保温方法など、寒冷地における最適な設置方法は明らかではない。

本研究では、蓄電容量が大きく、分散型電源に使用可能な

リチウムイオン電池性能の温度依存性に着目し、温度別の性能評価、実用を想定した充放電サイクルによる電池の劣化を評価するとともに、電池の保温による充放電性能の改善や劣化防止に繋がる設置方法に関して得た知見について報告する。

2. 実験方法

2.1 リチウムイオン電池の充放電性能の温度依存性評価方法

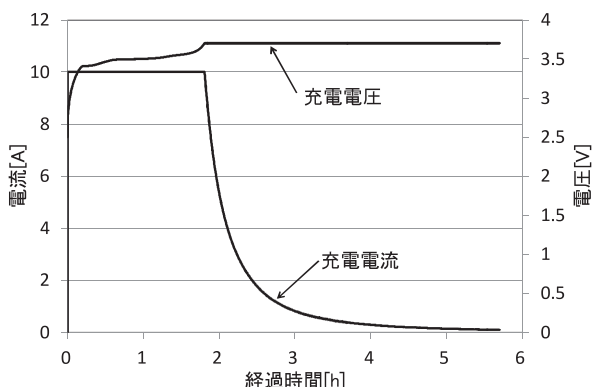
表1に評価した電池の概要を示す。市販のリチウムイオン電池に加えて寒冷地用とされる鉛蓄電池を評価した。このリチウムイオン電池を選定した理由は、安価で入手が容易であること、バッテリーマネジメントシステムが組み込

事業名：経常研究

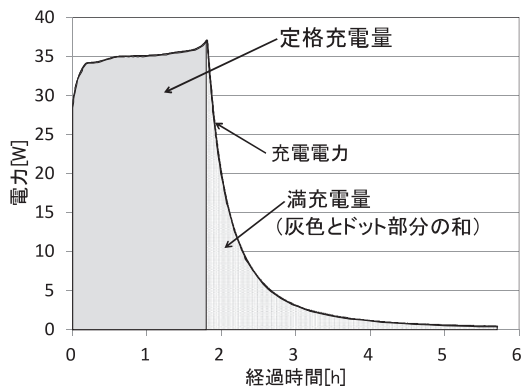
課題名：寒冷地における分散型電源のための蓄電手法に関する研究

表 1 評価した電池の概要

電池種類	公称電圧[V]	公称容量[Ah]	サイズ
リン酸鉄リチウムイオン	3.2	20	95×140×22 mm
鉛蓄電池	12	30	196×132×175 mm



(a) 充電電圧, 充電電流



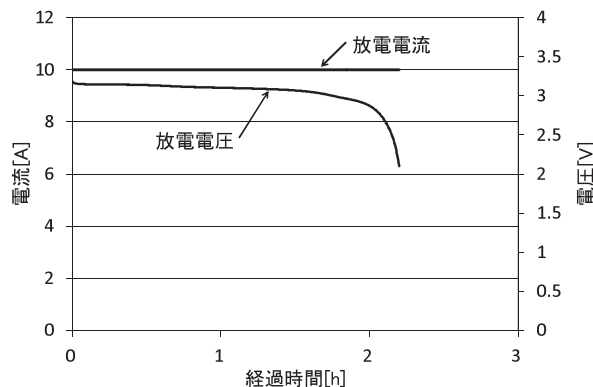
(b) 充電電力

図 1 リチウムイオン電池の充電試験時の経過時間と電流, 電圧, 電力の関係

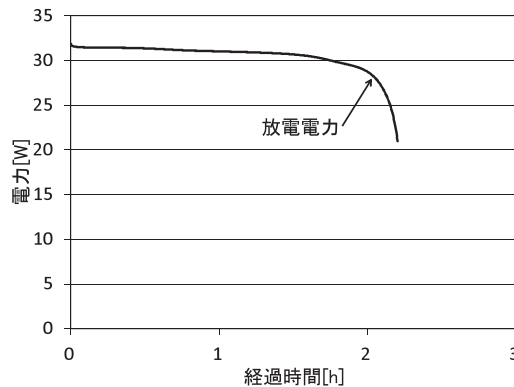
まれておらず, 電池単体で評価できることにある。環境温度を 50, 25, 0, -20℃として恒温恒湿器内に電池を 6 時間以上静置し, 充放電評価装置を用いて所定電圧で電池容量の 0.5, または 0.2 倍の電流値 (0.5, 0.2 C) で充電させた。ここで C とは, 定格容量を 1 時間で放電する電流を 1 C として規格化した表現である¹⁾。図 1, 図 2 にそれぞれリチウムイオン電池の充電試験, 放電試験時の試験結果の例を示す。環境温度 25℃, 0.5 C で充電させた場合の経過時間と電流, 電圧, 電力の関係を示した。電池の電圧が充放電評価装置の設定電圧に達すると定電圧となり, 電流値が降下する。電流値が降下する前までの充電量 [Wh] を定格充電量と定義し, 降下した電流値が 0.01 C 以下になり 1 時間経過後までの充電量を満充電量 [Wh] (充電割合) と定義した。次に 6 時間以上静置後, 同じ電流値で所定電圧まで放電させ, その容量を放電量 [Wh] と定義した。充電設定電圧, 放電下限電圧はメーカー指定値とした。

2.2 リチウムイオン電池の充放電時の発熱量の測定^{2), 3)}

リチウムイオン電池の充放電時の発熱量 Q [W] は(1)式で



(a) 放電電圧, 放電電流



(b) 放電電力

図 2 リチウムイオン電池の放電試験時の経過時間と電流, 電圧, 電力の関係

表される。

$$Q = Q_p + Q_s \dots\dots\dots(1)$$

ここで, Q_p は内部抵抗に起因する発熱量 [W], Q_s は充放電時のエントロピー変化に起因する発熱量 [W] で表され, Q_p は, (2), (3)式により充放電時の電流電圧特性から R を求め, 算出される。

$$Q_p = I^2 R \dots\dots\dots(2)$$

$$E = E_{emf} - IR \dots\dots\dots(3)$$

ここで, E は測定電圧 [V], I は充放電電流 [A], R は電池の内部抵抗 [Ω], E_{emf} は電池の起電力 [V] である。

また, Q_s は(4)式で表され, (5)式により充放電時の温度差あたりの開放電圧差から ΔS を求めることにより算出される。

$$Q_s = -T \Delta S \times I / nF \dots\dots\dots(4)$$

$$\Delta S = nF \times \partial E_{emf} / \partial T \dots\dots\dots(5)$$

ここで, T は電池温度 [K], ΔS : 充放電時のエントロピー変化 [J/K], n : 電子数, F : ファラデー定数である。

本研究では, 0.2 C で充電し, 満充電後 0.2 C で 30 分放電し, 1 時間静置後に開放電圧を測定, 電流電圧特性の評価を行うことにより, Q_p と Q_s を算出した。この時の充電割合を 0.9 とし, 同様に放電不能となるまで充電割合を 0.1 ずつ低下させ, 開放電圧特性, 電流電圧特性を計測した。

2.3 リチウムイオン電池の充放電サイクルに伴う劣化診断

表1のリチウムイオン電池について、環境温度25、-20℃、0.5Cで充放電を行った。この際、充電量が定格充電量に到達後すぐに、放電を開始させた。充放電回数が200, 500, 800, 1000, 1200, 1500, 1800, 2000回となった際に環境温度25℃、0.2Cで充放電（充電時は満充電処理）を行い、その時の充電量を測定した。ここでは、充放電サイクルに伴う蓄電容量（充電量）の変化を(6)式のように η [%]を用いて定義した。また、充放電サイクルに伴う定格充電量の変化を(7)式のように η' [%]を用いて定義した。

$$\eta = C'/C \times 100 \dots\dots\dots(6)$$

$$\eta' = SC'/C \times 100 \dots\dots\dots(7)$$

ここでC'は各所定回数の充放電サイクル後の電池の満充電量 [Wh]、Cは1サイクル目の電池の満充電量 [Wh]、SC'は各所定回数の充放電サイクル後の電池の定格充電量 [Wh]である。

次に、電子負荷装置（エヌエフ回路ブロック製 As510-3）、周波数発生装置（エヌエフ回路ブロック製 FRA5095）を用い、環境温度25、0、-20℃で満充電状態から0.2Cで放電させながら充電割合1~0.8の交流インピーダンス（周波数測定域1MHz~25mHz）を測定し、そのナイキスト線図からオーム抵抗（電解質も含む）、電極反応抵抗を算出した⁴⁾。

2.4 リチウムイオン電池の保温による充放電効率の改善

本研究では、断熱容器へ電池を詰め、充放電時に発生する熱を電池内に貯蔵し、外部空気温度よりも電池温度を高く保持することにより、電池の性能の向上を図る手法を試みた。図3に断熱容器への電池の梱包状態の写真を示す。まず、恒温恒湿室内に設置した空の断熱容器（玉井化成製 AC-525、外寸490×295×350H、厚み55mm、(a)）に16個の電池(b)を、電池の端子が上になるように詰め、縦4×横4の状態となるように配置した(c)。各電池には熱電対（補償導線部分の外径は3.4mm）を付け、表面積が一番大きい面（95×140mm）の中央の表面温度を計測した。容器内部には大きな空間があるが、バッテリーマネージメントシステム(BMS)を組み込むスペースとして空けたままとした。次に空間空気温度を測定するために、電池を詰めて残った空間の中央に熱電対を設置した。また、電池毎の電圧を測定するために、各電池の端子に信号線を接続した。最後に蓋を閉め、蓋を固定した(d)。なお、内部の各配線は蓋に孔を開け外部へリードした。表2に電池を16個直列配置したスタックの充放電実験条件を示す。実験は恒温恒湿室内で環境温度20℃（相対湿度30%）と、-20℃で行った。充電条件として単電池3.7V、16セル合計で59.2Vとし、10A(0.5C)または4A(0.2C)の定電流で充電し、電池が59.2Vに達した後は定電圧運転を行い、電流値が1A(0.05C)に低下するまで充電した。この状態を満充電とする。充電時に発生する熱で電池の温度は上昇しているため、

充電後断熱容器の蓋を開けて、環境温度まで冷却後、放電試験を10A(0.5C)または4A(0.2C)で42Vに低下するまで行った。表3にスタックの充放電試験時の測定項目を示す。各データは10秒毎にデータロガーで記録した。

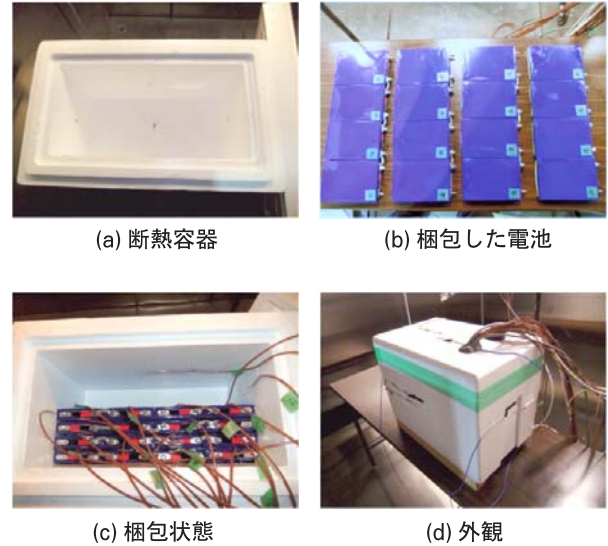


図3 断熱容器への電池の梱包状態の写真

表2 スタックの充放電実験条件

実験No.	環境温度	充電電圧条件	充電電流条件	放電電圧条件	放電電流条件
1	20℃RH30%	DC59.2V (3.7V×16)	定電流DC10A(0.5C)、59.2V到達後1A(0.01C)まで定電圧充電	DC42Vまで放電	DC10A(0.5C)
2	-20℃				
3	20℃RH30%		定電流DC4A(0.2C)、59.2V到達後1A(0.01C)まで定電圧充電		DC4A(0.2C)
4	-20℃				

表3 スタックの充放電試験時の測定項目

測定項目	測定方法
各蓄電池(セル)の電圧	端子電圧をデータロガーに直接入力
スタック電流	シャント抵抗
各蓄電池の表面温度	T型熱電対
容器内部の空気温度	シースT型熱電対
環境試験室内温度	シースT型熱電対

2.5 数値計算によるリチウムイオン電池の設置位置の検討

断熱容器内の電池設置位置の電池温度への影響を数値計算により把握した。本研究では図4のように電池横1列4個を一つのグループとして4つに、空間空気を電池の各グループ間3つとその他の大空間2つに分け、電池と空間空気のそれぞれの熱収支を計算することにより、電池温度の経時変化を把握した。表4に計算条件を示す。図4の空間空気1、2、3を2.4章の試験条件(3.4mm)とその他2条件に設定して計算した。

電池の充放電時の電池の熱収支は(7)、(8)式で示される。また、空間空気の熱収支式は(9)式で示される。なお、本計算では、実測に使用した熱電対補償導線の熱容量、熱電対補償導線と電池の熱伝導は考慮していない。

$$Q = Q_p + Q_s = Q_h + C_{cell} \times dT_{cell}/dt \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$Q_h = h_a \times A_{cell a} \times d(T_{cell} - T_a)/dt + (1/(1/h_o + \lambda_b/L_b)) \times A_{cell b} \times d(T_{cell} - T_o)/dt \quad \dots\dots(8)$$

$$C_a \times dT_a/dt = h_a \times A_{cell a} \times d(T_{cell} - T_a)/dt + (1/(1/h_o + \lambda_b/L_b + 1/h_a)) \times A_{a o} \times d(T_a - T_o)/dt \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 Q_h は電池から外部へ移動する熱量 [W]、 C_{cell} は電池の熱容量 [J/K]、 T_{cell} は電池代表温度 [K]、 h_a は断熱容器内部空気と電池または断熱容器の総括熱伝達係数 [W/(m²·K)]、 $A_{cell a}$ は電池と断熱容器内部空気の伝熱面積 [m²]、 T_a は空気温度 [K]、 h_o は断熱容器外部空気と断熱容器外部表面の総括熱伝達係数 [W/(m²·K)]、 λ_b は断熱容器の熱伝導率 [W/(m·K)]、 L_b は断熱容器の厚み [m]、 $A_{cell b}$ は電池と断熱容器の伝熱面積 [m²]、 T_o は環境温度 [K]、 C_a は断熱容器内部空気の熱容量 [J/K]、 $A_{a o}$ は断熱容器内部空気と外部空気の伝熱面積 [m²] である。

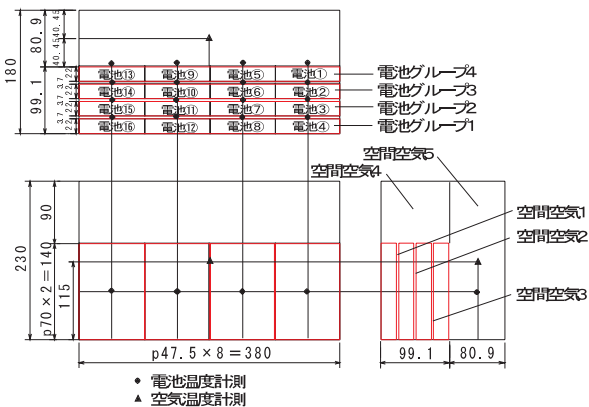


図4 電池・空間空気温度計算モデル

表4 計算条件

空間空気1~3の厚み[mm]
3.4
5.0
10.0

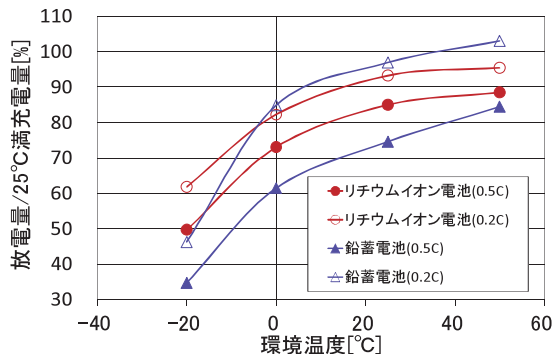


図5 25°C満充電量に対する放電率の環境温度依存性

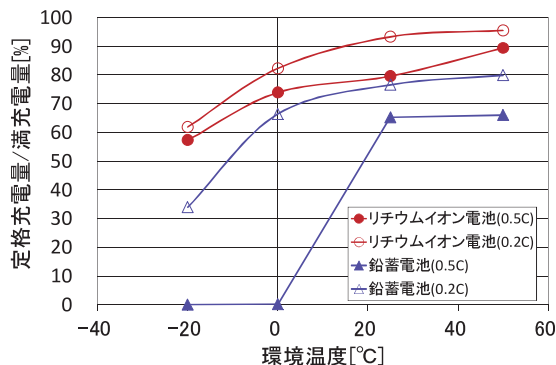


図6 満充電量に対する定格充電量の環境温度依存性

3. 実験結果と考察

3.1 リチウムイオン電池の充放電性能の温度依存性

図5にリチウムイオン電池の25°Cにおける満充電量に対する放電率の環境温度依存性を、図6に各環境温度での満充電量に対する定格充電量を寒冷地用の鉛蓄電池と比較して示す。両電池ともに25°Cの満充電量に対する放電率、満充電量に対する定格充電率は環境温度が高くなると増加する傾向にあり、環境温度-20°Cでは値が低い。鉛蓄電池は0、-20°Cにおいて、0.5Cのような高レートでは定格値で充電できず、リチウムイオン電池の水点下における充放電特性は鉛蓄電池と比較して良好である。

3.2 リチウムイオン電池の充放電時の発熱量

図7に放電時の充電割合に対する内部抵抗に起因する発熱量の推定値を、図8にエントロピー変化に伴う発熱量の推定値を示す。測定電流値は0.5Cとした。内部抵抗に起因する発熱量は、低い環境温度や低い充電割合の時に大きくなる。また、エントロピー変化に伴う発熱量から本電池は放電時に吸熱となるが、内部抵抗による発熱量と比較してエントロピー変化に伴う発熱量の環境温度の依存性は少ないと考えられる。図2で示す30W程度の放電に対して、内部抵抗による発熱量とエントロピー変化に伴う発熱量を合算した充放電時の電池の発熱量は1Wから最大10W程度であり、積層したスタックの場合、保温(断熱)により電池性能の向上が期待できる。

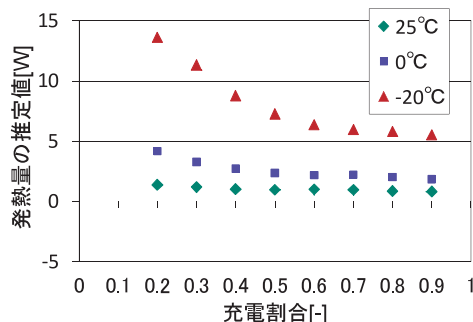


図7 放電時の充電割合に対する内部抵抗に起因する発熱量の推定値

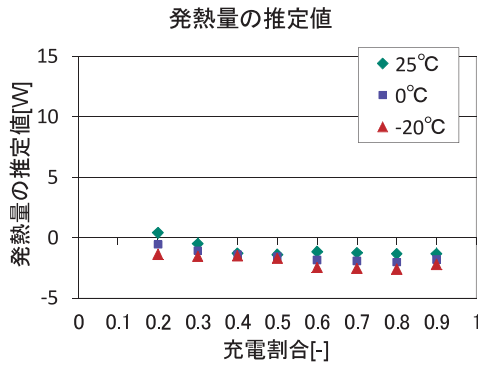


図8 放電時の充電割合に対するエントロピー変化

3.3 リチウムイオン電池の充放電サイクルによる劣化評価

図9に電池の充放電サイクルと満充電量の割合(η)の関係を、図10に電池の充放電サイクルと定格充電量の割合(η')の関係を示す。電池の環境温度25、 -20°C における充放電サイクルに対する満充電量の割合は、1000サイクルまではほぼ同等であったが、1200サイクルで明かな差が認められた。また、電池の環境温度25、 -20°C における充放電サイクルに対する定格充電量の割合は、200サイクルから差が認められた。これらの原因は明らかではないが、今回使用した電池の場合、 -20°C における充放電サイクルを行った後の外観に明らかな膨潤が認められた。また、1000サイクル目までは同じサイクル数でも満充電量の割合と定格充電量の割合に差が生じており、電池を氷点下で充放電することにより、充放電反応に遅れが生じる物理的変化が発生していることが考えられる。

図11に 25°C で1サイクル充放電試験を行った電池と -20°C で2000サイクル充放電試験を行った電池の測定環境温度別の抵抗値を示す。電池抵抗成分をオーム抵抗(電解質を含む)成分と電極反応抵抗成分を分離した結果、環境温度が低下するとリチウムイオン電池のオーム抵抗はやや高く、電極反応抵抗は大幅に高くなること、抵抗成分の増加は2000サイクルの充放電よりも環境温度に依存することがわかった。このことから、環境温度制御でサイクル特性の改善が期待できることがわかる。

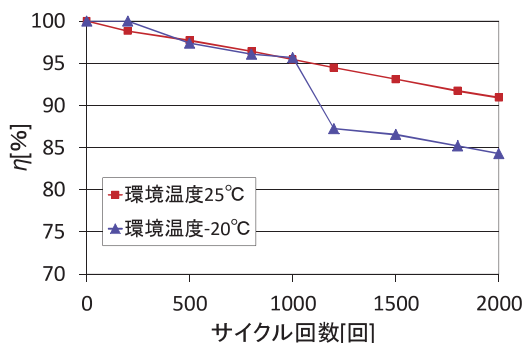


図9 電池の充放電サイクルと満充電量の割合の関係

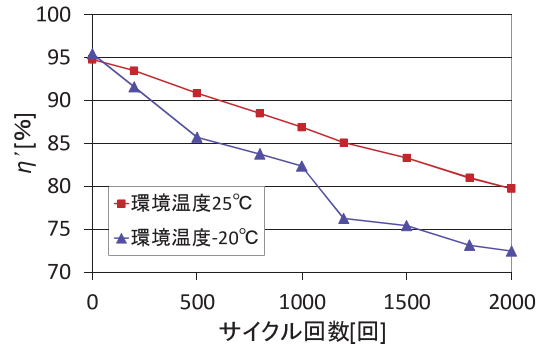


図10 電池の充放電サイクルと定格充電量の割合の関係

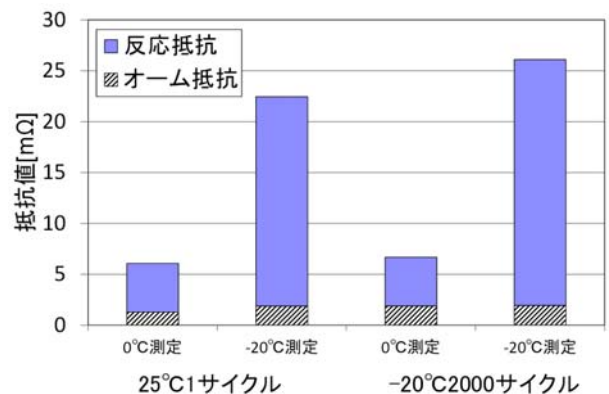


図11 電池の測定環境温度別抵抗値

3.4 リチウムイオン電池の保温による充放電効率の改善

表5に電池を断熱容器で保温した際の 25°C における満充電量に対する放電量の割合を示す。また、図12に実験No.2の放電時における電池温度(図4の電池⑤、⑦)、空気温度の経時変化を示す。表5から単電池で断熱容器なしの条件と比較して0.5C、0.2Cともに環境温度 -20°C の条件で 25°C における充電量に対する放電量の割合が増加していることがわかる。その原因は図12から電池温度の上昇によるものと判断できる。

3.5 数値計算によるリチウムイオン電池の設置位置の検討

図13に空間空気厚みをパラメータとした場合の図4の電池4温度の推定値を示す。図13には空間厚みを3.4mmとした

表5 25°C における充電量に対する放電量の割合

実験No.	実験条件	環境温度	充放電電流条件	25°C の満充電量に対する放電量の割合[%]
1	断熱容器あり 単電池16個直列接続(スタック)	25°C	DC10A (0.5C)	92.1
2		-20°C	DC10A (0.5C)	79.8
3	断熱容器あり 単電池16個直列接続(スタック)	25°C	DC4A (0.2C)	97.6
4		-20°C	DC4A (0.2C)	85.3
ref-1	断熱容器なし 単電池	25°C	DC10A (0.5C)	85.0
ref-2		-20°C	DC10A (0.5C)	49.7
ref-3		25°C	DC4A (0.2C)	93.2
ref-4		-20°C	DC4A (0.2C)	61.8

場合の実測値も示した。空間厚みを3.4mmとした場合の計算結果は図12の電池⑤の実測値とおおむね一致した。電池を密に詰めた方が電池温度をやや高く維持することができるが、夏期に電池を冷却する必要がある場合も想定されるため、今後はその検討も必要である。

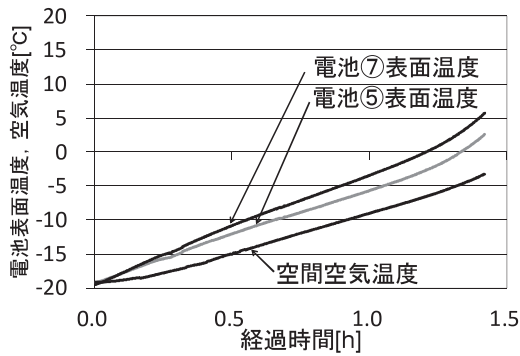


図 12 電池温度, 空気温度の経時変化 (実験 No.2 放電時)

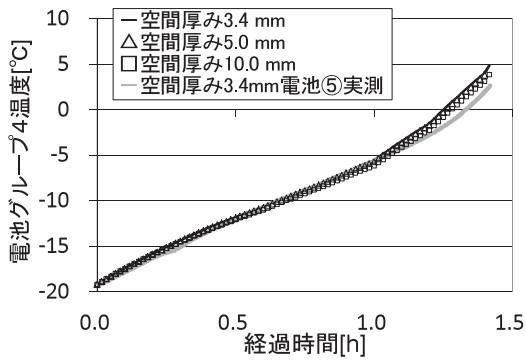


図 13 電池グループ 4 温度の推定値

4. 結言

分散型電源に使用可能なリチウムイオン電池性能の温度依存性に着目し、温度別の性能評価、実用を想定した充放電サイクルによる電池の劣化を評価するとともに、断熱容器により充放電の際に発生した熱を貯蔵して電池の温度を上昇させ、性能を改善する手法について試みた。本研究で得た知見を以下にまとめる。

- ①リチウムイオン電池は鉛蓄電池と比較して氷点下でも優れた性能を有する。
- ②リチウムイオン電池の充放電時の発熱量は内部抵抗とエントロピー変化の計算値から推定可能である。
- ③リチウムイオン電池の内部抵抗はサイクル数による劣化よりも環境温度の影響を強く受ける。
- ④断熱容器による充放電時に発生する熱の貯蔵により、電池の温度を上昇させ、その性能を向上させることができる。

参考文献

- 1) 福田健一・大森吉剛・若原健二他：小型リチウムイオン二次電池の急速充放電時の発熱挙動，日本機械学会論文誌，Vol.71 No.709，pp.155-162，(2005)
- 2) 亀山 寿・花本武史・伊藤衝平他：小型リチウムイオン二次電池の発熱挙動の研究，電気学会論文誌，Vol.122-B No.11，pp.1192-1199，(2002)
- 3) 大島孝昌・中山正人・福田健一他：小型リチウムイオン二次電池の急速充放電時の発熱挙動，電気学会論文誌，Vol.124-B No.12，pp.1521-1527，(2004)
- 4) Allen J.Bard and Larry R.Faulkner：ELECTRO-CHEMICAL METHODS Fundamentals and Applications，pp.383-387，(2001)

冷暖房放射パネルの冷暖房能力評価条件の検討

白土 博康

Study on Evaluation Conditions of Heat Capacity for Radiation Panels

Hiroyasu SHIRATO

抄 録

ヒートポンプを熱源として従来よりも低温で通水する場合の放射パネルの暖房能力、冷房能力試験手法の規程作成を目標として、放射パネルに循環する温度や流量等をパラメータとした放射パネルの冷暖房能力の評価試験を行い、評価条件を明らかにした。その結果、放射パネルの暖房能力は、暖房温度差の影響を受けるため、実際に運転する領域で測定するのが望ましいこと、冷房時は冷房温度差が最大20K程度と小さく、冷房温度差と冷房能力の性能曲線を未実験領域に外挿しても精度が維持できることが分かった。また、放射パネルの冷暖房能力の正確な測定のためには、放射パネルに一定以上の流量で冷温水を循環させ、放射パネル内の水の配流を均一化させることが望ましいこと、放射パネルの結露時の潜熱冷房能力は、結露時の冷房能力と非結露時の冷房能力の差で示すことが可能であることが分かった。

キーワード：放射パネル，冷暖房能力，評価条件，結露

Abstract

Cooling and heating capacity for radiation panels was measured in various circulation temperature and flow rates of the radiation panels aiming to set up the precise evaluation methods of the cooling and heating capacity of the radiation panels that are for heating in low circulation temperature and for cooling by using heat pumps as heat sources. The heating capacity of the radiation panels should be measured during practical operating temperature since it is affected by the heating temperature differences. The accuracy of the cooling capacity is maintained even if the characteristics curves for the heat capacity to the cooling temperature differences are extrapolated. The reason is that the cooling temperature differences are less than 20K in the cooling operation. The distribution of the water flow in the panels should be uniformed by circulating water in more than sufficient flow rate to carry out the accurate measurements of the cooling and heating capacity. The latent heat capacity of the panel can be the difference between the cooling capacity of the panel with condensation and without condensation.

KEY-WORDS : Radiation panels, Cooling and heating capacity, Measurement conditions, Condensation

1. はじめに

放射冷暖房システムは、エアコンディショナーのような主に対流熱伝達による冷暖房と比較して、同じ室内空気温度で「暖かさ」、「涼しさ」を体感できるため、室内空気温度と熱媒温度の差を小さくでき、高い省エネルギー性が得られる。従来のJIS規格では、システムで使用する放射パネルの暖房能力測定条件は、代表室温20℃、定格温水平均温度（放射パ

ネル出入口の平均温度）を70℃、出入口温度差を10℃としている¹⁾が、近年の高断熱・高气密住宅では40℃以下の循環温度で十分であり、JIS規格のデータを外挿すると誤差が発生する懸念がある。また、放射パネルに循環する流量もJIS規格と実際の運転時で乖離があり、暖房能力に相違が発生する懸念がある。

一方、冷房時の冷房能力については、これまでのところJIS等の規格はない。このため、筆者らは冷房時の冷房能力評価

事業名：公募研究

課題名：低負荷住宅に対応する放射ラジエータの放熱能力評価手法の確立

条件として、暖房能力測定に関するJIS規格¹⁾を基に、代表室温27℃、非結露状態、定格冷水平均温度9.5℃、出入口温度差を5℃とした独自の評価方法を設定して試験を実施してきた²⁾⁻³⁾。しかしながら、放射パネルに循環する流量は暖房時と同様にJIS規格と実際の運転時で乖離がある。また、冷房時においては放射パネル上で結露させ、除湿をすることができるが、他の空調機器と併せて室内の空調設計をするため、放射パネルの潜熱分の冷房能力を把握し、顕熱分と潜熱分の冷房能力の両者を分離して評価したい業界の要望がある。

以上の現状を踏まえ、本研究では実機の運転方法に即し、高断熱・高气密住宅に対応できる放射パネルの高精度な冷暖房能力の評価手法を確立することを目的として、放射パネルに循環する冷温水の温度、流量条件を変え、放射パネルの冷暖房能力の測定条件について考察した。

2. 放射パネルの冷暖房能力の計測システム

2.1 試験室の概要⁴⁾

図1に試験室の概要と室温制御システムのフローを示す。試験室の大きさは、床面積2.7×3.6 m、天井高さ2.2 mで床面積9.72 m²、内容積21.4 m³である。試験室は木造で、床、天井、壁は、厚さ100 mmのスチレンフォームで断熱した。天井と壁の内装はスレート板とし、壁と床の内装は表面をアクリルウレタン樹脂塗装で仕上げている。室温制御用として放射パネルが扉部分を除く周囲壁面、床面に設置されている。ここで使用した放射パネルは幅850 mm、高さ1700 mm、厚さ12 mmの床暖房用金属製パネル（以下金属製パネル）であり、配管材に直径8 mmの円形銅管が、表面材に厚さ0.6 mmの鋼板が使われている。なお、鋼板表面はアクリル樹脂塗料で塗装されており、この塗料の全放射率は0.96である。天井面には断熱材の上に架橋ポリエチレン管を施工し、その上にアルミ板、天井仕上げ材で覆っている。タンク内の不凍液はヘッドで6系統に分岐され、同一温度で試験室内の壁、試験室の床、試験室の天井の各金属製パネル、架橋ポリエチレン管へ常時循環される。タンク内不凍液温度は、試験室内温度を温度センサで検出し、連続運転した冷凍機とヒータのオン・オフにより所定温度に制御される。

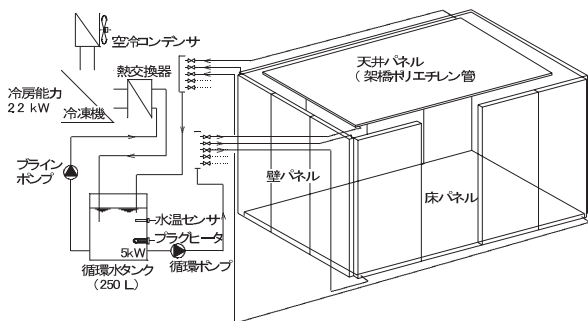


図1 試験室の概要と室温制御システムのフロー

2.2 冷温水循環システム、試験放射パネルの概要

図2に放射パネルの能力評価に用いた冷温水循環システムの概要を示す。冷温水タンク内の調温した水を放射パネルに循環させる。調温の熱源として冷凍機と投げ込みヒータを用いた。冷暖房能力測定用として循環ライン内にパルス発信付き流量計と、放射パネル出入口、室内中央床上750 mmに白金測温抵抗体（JIS A級）を設置した。また、結露を許容する冷房試験を行う際は、放射パネル表面上に発生した結露水を重力で落下させて、ドレインパン、ピーカの順に受け、台秤で重量を自動計測できる構造とした。表1に評価に使用した放射パネルの概要を、図3に外観を示す。放射パネルは、JIS規格での暖房能力がほぼ同等である樹脂管柵状^{3), 5)-7)}、鋼板柵状を使用した。

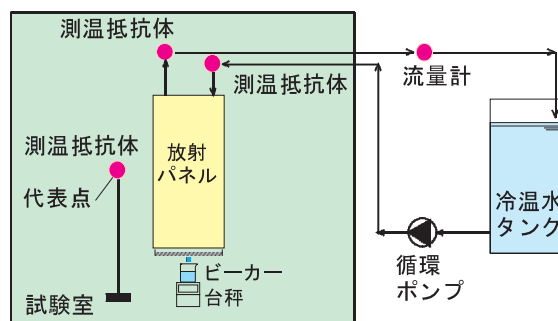


図2 冷温水循環システムの概要

表1 評価に使用した放射パネルの概要

放射パネル種類	樹脂管柵状	鋼板柵状
横幅 [mm]	410	530
縦 [mm]	1200	1200
奥行 [mm]	59	135
外表面積 (伝熱面積) [m ²]	2.01	1.37
投影面積 [m ²]	0.492	0.636
伝熱面積/投影面積 [-]	4.09	2.15



図3 放射パネルの外観（左：樹脂製、右：金属製）

3. 放射パネルの冷暖房能力評価方法

3.1 放射パネルの冷暖房能力評価方法

以下、本論文では温度差の単位を K、温度の単位を℃で記す。表2に評価項目を、図4に評価個所の平面図を示す。放射パネルの冷暖房能力測定、室内空気温度分布、壁・天井・床表面温度分布の各測定項目はJIS規格¹⁾に準拠した。

放射パネル、壁・床・天井に各条件でそれぞれ冷温水を循環させ、表2の各項目について、データロガーで30秒ごとに計測した。各温度が±0.1℃未満の変動であることを確認後、10分間データを取得し、それぞれの平均値を算出した。結露時には定常状態である30分間の結露水の重量データを併せて取得している。

暖房時および非結露時の冷房能力は、JISの暖房能力の算出式¹⁾に倣い、式(1)により算出する。

$$Q = Cp_w \times M_w \times |(T_{wo} - T_{wi})| \quad \dots\dots(1)$$

ここで、Qは暖房または冷房能力[W]、Cp_wは水の比熱[J/(g・K)]、M_wは放射パネルを循環する水の質量流量[g/s]、T_{wo}は出口水温[℃]、T_{wi}は入口水温[℃]である。ただし、|(T_{wo}-T_{wi})|の単位は温度差であるので本論文ではKで示す。

また、暖房、冷房温度差はJISの暖房温度差の算出式¹⁾に準拠し、式(2)により算出する。さらに暖房時、非結露時の暖房能力と暖房温度差、または冷房能力と冷房温度差には式(3)の関係がある。

$$\Delta T = |T_w - T_a| \quad \dots\dots(2)$$

$$Q = B(\Delta T)^n \quad \dots\dots(3)$$

ここでΔTは暖房または冷房温度差[K]、T_wは放射パネルの出入口平均水温[℃]、T_aは代表点(室内中央床750mm)の空気温度[℃]である。また、Bとnは各放射パネルで実験により決定できる定数である。

ここで、結露時の冷房能力は、非結露時の冷房能力と同様に式(4)から求めることができる。一方、JISのエアコンディショナーの試験方法⁸⁾では、式(4)により結露時の顕熱冷房能力は結露時の冷房能力から潜熱冷房能力(除湿能力)を差し引いた差として定義されている。

$$Q = Q - Q_L \quad \dots\dots(4) \quad \text{したがって} \quad Q_L = Q - Q_s \quad \dots\dots(4')$$

ここで、Q_sは顕熱冷房能力[W]、Q_Lは潜熱冷房能力[W]であり、顕熱冷房能力は非結露時の冷房能力と同義である。

さらに、潜熱冷房能力は、結露水の質量測定から得られる除湿速度と凝縮潜熱を乗じて求めることができ、式(5)で示される。

$$Q_L = G_w \times r_w \quad \dots\dots(5)$$

ここでG_wは除湿速度[g/s]、r_wは水の凝縮潜熱[J/g]である。

本論文では、(4)'式と(5)式から潜熱冷房能力を求め、両者を比較することにより、放射パネルにおいて、結露時と非結露時の冷房能力の差から潜熱冷房能力を求められるか検証した。

表2 評価項目

測定目的	測定項目	センサ
放射パネルの冷暖房能力測定	放射パネル冷温水入口水温	測温抵抗体
	放射パネル冷温水出口水温	測温抵抗体
	室内中央代表点(床750mm)空気温度	測温抵抗体
	放射パネルへの水の循環流量	パルス発信付き流量計
室内空気温度分布、代表点温度の把握	室内中央空気温度(床50mm、500、1500、床2150mm)	T型熱電対
	室内中央代表点(床750mm)空気温度	湿度センサ
	A、B、C、D点空気温度(床750、1500mm)	T型熱電対
	室内中央床・天井表面温度	T型熱電対
試験室内の測定環境の把握	壁・天井・床循環不凍液入口液温、壁E、F、G、H出口液温、天井・床出口液温	シースT型熱電対
	壁E、F、G、H、天井、床循環流量	パルス発信付き流量計

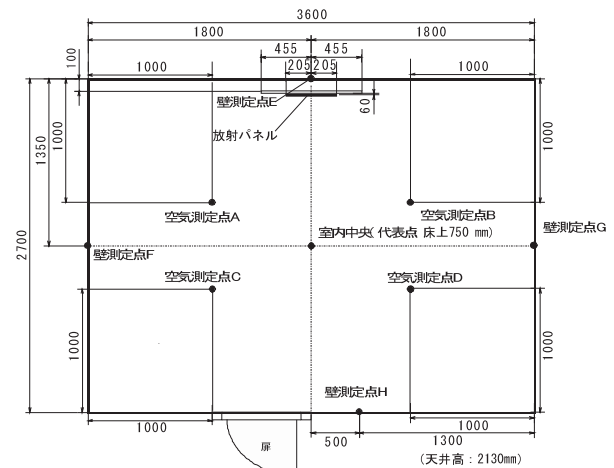


図4 評価個所の平面図

3.2 測定条件

表3、表4に暖房時、冷房時の実験条件を示す。暖房時には、放射パネルの定格流量条件である2 L/min、および平均温水温度が35℃、70℃の時に放射パネルの出入口温度差が所定値となる流量条件で放射パネルに水を循環させた。予備試験での室内空気温度の変動を考慮し、壁・床の金属製パネルの配管材である銅管、天井に設置した架橋ポリエチレン管に連続的に一定流量(1 L/min)で不凍液を循環させることにより、代表点の空気温度は20.0±0.1℃とした。冷房時(非結露)の場合は、放射パネルの定格流量条件である2 L/min、および平均冷水温度が17℃、9.5℃の時に放射パネルの出入口水温差が所定値となる流量条件で放射パネルに水を循環させた。代表温度は26.0または27.0±0.1℃とした。冷房時(結露)の場合は、冷房時(非結露)条件のNo.6の放射パネル流量条件で、出入口平均水温が10℃の時、相対湿度を50~90%に、出入口平均水温が13℃の時、相対湿度を60~90%に、出入口平均水温が17℃の時、相対湿度を70~90%に10%毎で調整して測定を行った。

表 3 暖房時の実験条件

実験No.	1	2	3	4	5
放射パネル温水温度条件	$T_w=30, 35, 40, 50^\circ\text{C}$		$T_w=50, 70, 80^\circ\text{C}$		
放射パネル流量設定条件	$T_w=35^\circ\text{C}$ $T_{wi}-T_{wo}=5\text{K}$		2.00L/min	$T_w=70^\circ\text{C}$ $T_{wi}-T_{wo}=5\text{K}$	$T_w=70^\circ\text{C}$ $T_{wi}-T_{wo}=10\text{K}$
放射パネル流量測定条件	2.00L/min	0.35L/min (樹脂管柵状のみ測定)	2.00L/min	2.42L/min (樹脂管柵状のみ測定)	1.02L/min
暖房温度差	$\Delta T=10, 15, 20, 30\text{K}$		$\Delta T=30, 50, 60\text{K}$		
代表温度	20.0°C				
備考					JIS規格準拠

表 4 冷房時の実験条件

実験No.	6	7	8	9	10
放射パネル冷水温度条件	$T_w=10, 13, 17, 20^\circ\text{C}$	$T_w=8, 9.5, 13^\circ\text{C}$	$T_w=10, 13, 17, 20^\circ\text{C}$	$T_w=8, 9.5, 13^\circ\text{C}$	$T_w=10, 13, 17^\circ\text{C}$
放射パネル流量設定条件	$T_w=17^\circ\text{C}$ $T_{wo}-T_{wi}=1\text{K}$	$T_w=9.5^\circ\text{C}$ $T_{wo}-T_{wi}=5\text{K}$	放射パネル定格		$T_w=17^\circ\text{C}$ $T_{wo}-T_{wi}=1\text{K}$
放射パネル流量測定条件	1.25L/min	0.57L/min	2.00L/min		1.25L/min (樹脂管柵状のみ)
冷房温度差	$\Delta T=6, 9, 13, 16\text{K}$	$\Delta T=14, 17.5, 19\text{K}$	$\Delta T=6, 9, 13, 16\text{K}$	$\Delta T=14, 17.5, 19\text{K}$	$\Delta T=9, 13, 16\text{K}$
代表温度	26.0°C	27.0°C	26.0°C	27.0°C	26.0°C
相対湿度条件	30%以下(非結露)				50, 60, 70, 80, 90% ($T_w=10^\circ\text{C}$) 60, 70, 80, 90% ($T_w=13^\circ\text{C}$) 70, 80, 90% ($T_w=17^\circ\text{C}$)
備考		道総研規格準拠			

4. 実験結果と考察

4.1 放射パネルの暖房能力, 冷房能力

図5に各条件における樹脂管柵状放射パネルの暖房能力の測定結果を、図6に測定結果から算出した暖房温度差(ΔT)と暖房能力の関係(実験No.1, 3のみ)を示す。図6は高断熱・高气密住宅への設置を考慮して ΔT を30Kまでとした。実験No.1, 3, 4では測定温度域に関わらず、同等の暖房能力となった。しかしながら、JIS規格での測定である実験No.5の暖房能力は実験No.3, 4と比較して低く、 $\Delta T=50\text{K}$ では実験No.3の暖房能力に対して82.5%である。また、実験No.2の暖房能力は $\Delta T=15\text{K}$ では実験No.3の暖房能力に対して62.6%である。以上のことから暖房能力の正確な測定のためには、放射パネルに一定以上の流量で温水を循環させ、放射パネル内の水の配流を均一化させることが望ましい。また、図6から $\Delta T=15\text{K}$ では実験No.1に対して実験No.3の暖房能力は8.9%低く、暖房温度差の測定領域によって結果が異なることが分かる。このため、カタログ値掲載やシステム設計の際には、実際に運転する領域で測定

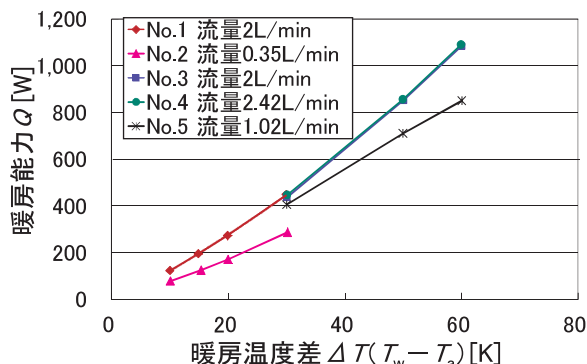


図5 樹脂管柵状放射パネルの暖房能力(実測値)

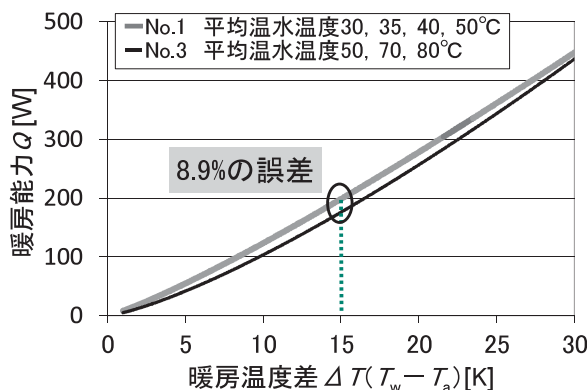


図6 樹脂管柵状放射パネルの暖房能力(計算値)

(高温と低温の温水使用に分けて評価)するのが望ましい。

図7に各条件における鋼板柵状放射パネルの暖房能力の測定結果を、図8に測定結果から算出した暖房温度差(ΔT)と暖房能力の関係を示す。本パネルの予備試験と樹脂管放射パネルの実験結果を踏まえて、条件No.1, 3, 5のみ実験した。流量が低い実験No.5の暖房能力は、 $\Delta T=50\text{K}$ でNo.3の暖房能力に対して90.9%である。また、図8から $\Delta T=15\text{K}$ では実験No.1に対して実験No.3の暖房能力は92.5%であり、樹脂管放射パネルと同様の結果が得られた。

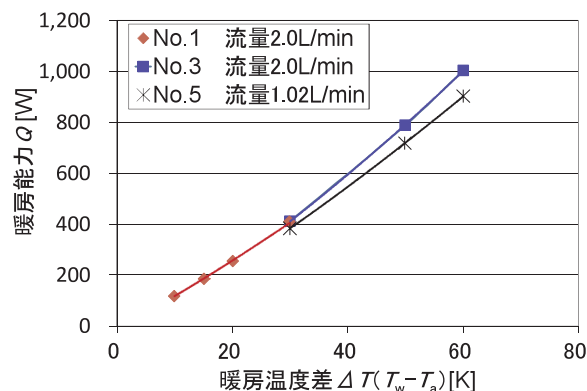


図7 鋼板柵状放射パネルの暖房能力(実測値)

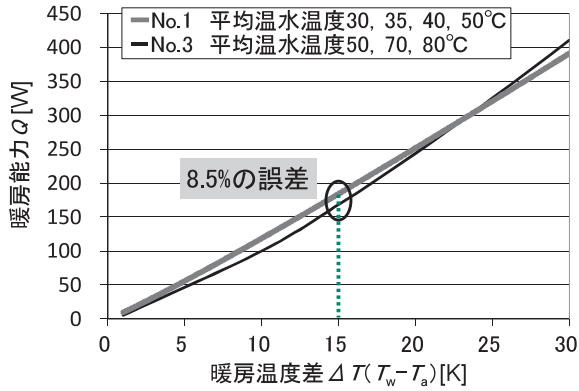


図8 鋼板柵状放射パネルの暖房能力 (計算値)

4.2 放射パネルの冷房能力 (非結露時)

図9に非結露時の各条件における樹脂管柵状放射パネルの冷房能力の測定結果を、図10に測定結果を拡大した冷房温度差と冷房能力の関係 (実験No. 8, 9のみ) を示す。流量が低い実験No. 7はやや低い冷房能力となったものの (冷房温度差17 Kにおける実験No. 6の冷房能力に対して、89.7%)、実験No. 6, 8, 9では測定温度域に関わらず、同等の冷房能力となった。図10から同じ流量条件である実験No. 8と実験No. 9において、平均冷水温度13~20°C (冷房温度差6~13 K) で測定して算出した冷水温度10°Cでの冷房能力は、平均冷水温度8~13°C (冷房温度差14~19 K) で測定して算出した冷房能力に対して2.9%大きい。

同様に図11に各条件における鋼板柵状放射パネルの冷房能力の測定結果を、図12に測定結果を拡大した冷房温度差と冷房能力の関係を示す。鋼板柵状パネルでも樹脂管柵状パネルと同様の傾向がみられる。流量が低い実験No. 7の冷房能力は冷房温度差17 Kにおける実験No. 6の冷房能力に対して、98.9%、平均冷水温度13~20°C (冷房温度差6~13 K) 測定して算出した冷水温度10°Cでの冷房能力は、平均冷水温度8~13°C (冷房温度差14~19 K) で測定して算出した冷房能力に対して99.3%であった。冷房時には冷房温度差が最大20 K程度と小さく、冷房温度差と冷房能力の性能曲線を未実験領域に外挿しても十分に精度が維持できると考えられる。

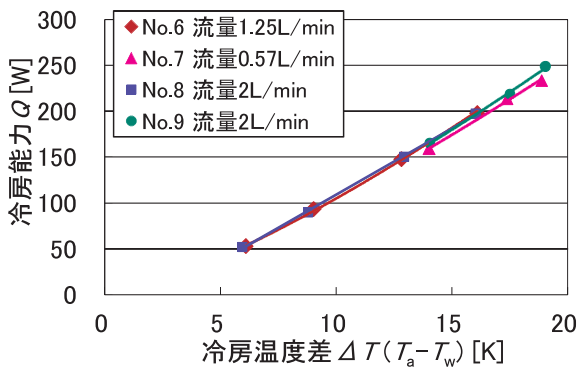


図9 樹脂管柵状放射パネルの冷房能力 (非結露時)

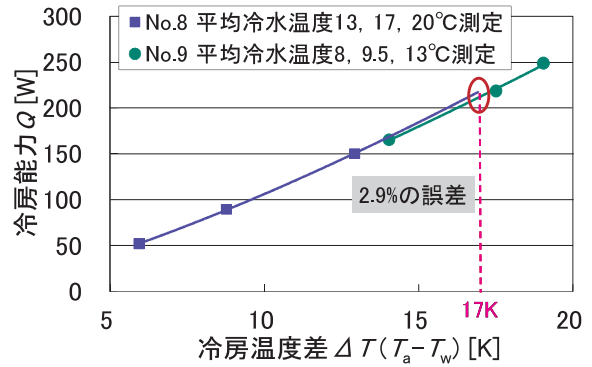


図10 樹脂管柵状放射パネルの冷房能力 (非結露時)

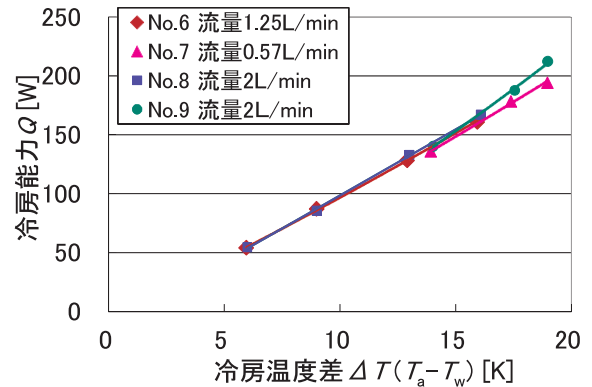


図11 鋼板柵状放射パネルの冷房能力 (非結露時)

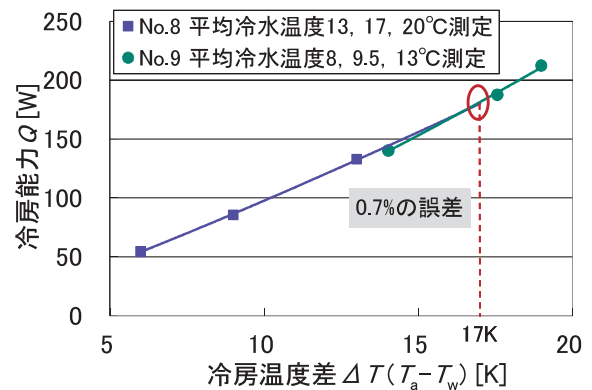


図12 鋼板柵状放射パネルの冷房能力 (非結露時)

4.3 放射パネルの冷房能力 (結露時)

図13, 図14に樹脂管柵状放射パネル, 鋼板柵状放射パネルの結露時の代表点の相対湿度に対する冷房能力をそれぞれ示す。相対湿度が高くなるほど、冷房能力は高くなることから分かる。代表点の相対湿度と冷房能力はほぼ比例関係にあり、測定していない相対湿度での冷房能力は推定可能と考えられる。

図15に樹脂管柵状放射パネルの冷房温度差に対する冷房能力の関係を、図16に図13の結露時の冷房能力から非結露時の冷房能力を差し引いた潜熱冷房能力と結露水の熱量から求めた潜熱冷房能力を比較したものを示す。結露を許容した冷房時の冷房能力と結露を許容しない冷房時の冷房能力の差は、

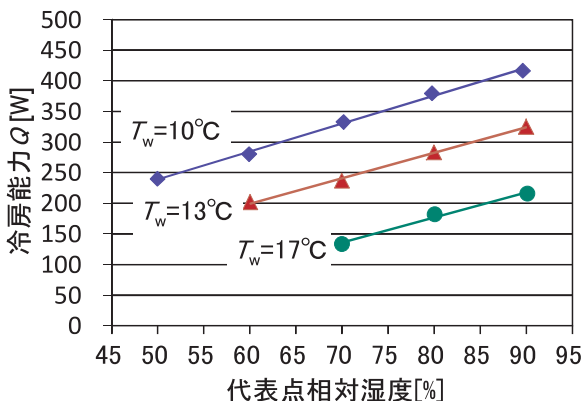


図 13 樹脂管柵状放射パネルの代表点相対湿度に対する冷房能力（結露時，実測値）

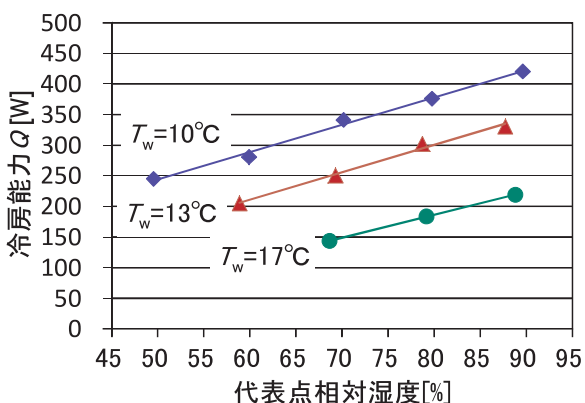


図 14 鋼板柵状放射パネルの代表点相対湿度に対する冷房能力（結露時，実測値）

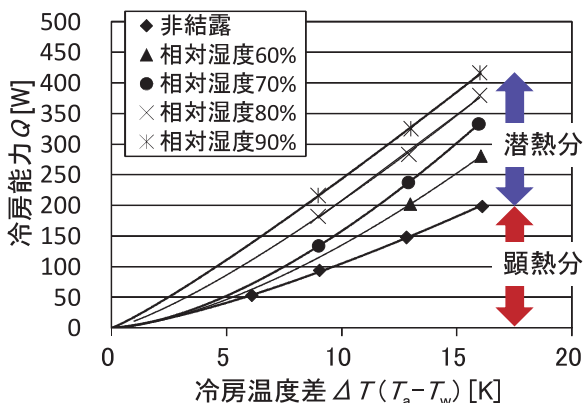


図 15 結露時における樹脂管柵状放射パネルの冷房温度差に対する冷房能力の比較（実測値）

結露水重量と水の潜熱の積とほぼ同等であることが確認できる。このことから、放射パネルの結露時の潜熱冷房能力は、結露時の冷房能力と非結露時の冷房能力の差とできることが分かった。

4.4 放射パネルの水温が室内温度分布に与える影響

図17に暖房時の室内中央の垂直温度分布を示す。各実験条件の定格温度である放射パネル出入口平均温水温度35、70℃

の条件で比較した。放射パネル出入口平均温水温度70℃の場合、床上50mmから2150mmまでに最大5℃程度の温度差が発生する。建物の冷暖房負荷に対して必要な熱量を確保できるのであれば平均温水温度は低温とする方が室内温熱環境は良好である。図18に冷房時の室内中央の垂直温度分布を示す。各実験条件の定格温度である放射パネル出入口平均冷水温度17、9.5、20℃の条件で比較した。床パネルに温水を循環させているにもかかわらず、冷気が滞留していることが確認でき、平均冷水温度が低い方がその傾向が顕著である。暖房時、冷

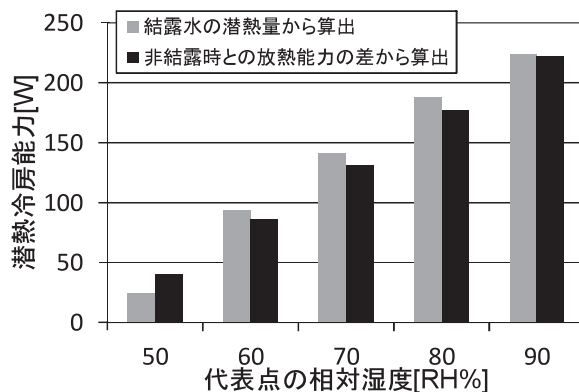


図 16 樹脂管柵状放射パネルの算出方法の違いによる潜熱冷房能力の比較

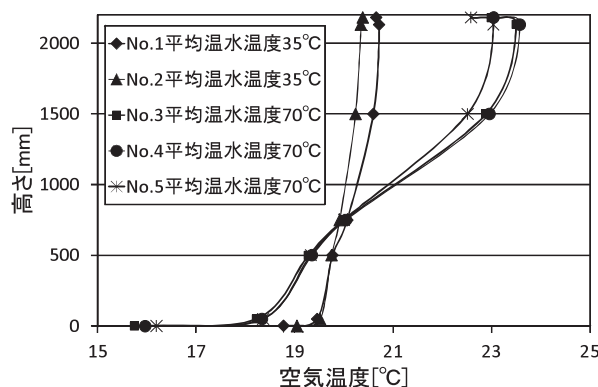


図 17 樹脂管柵状放射パネルの暖房時の室内中央空気の垂直温度分布

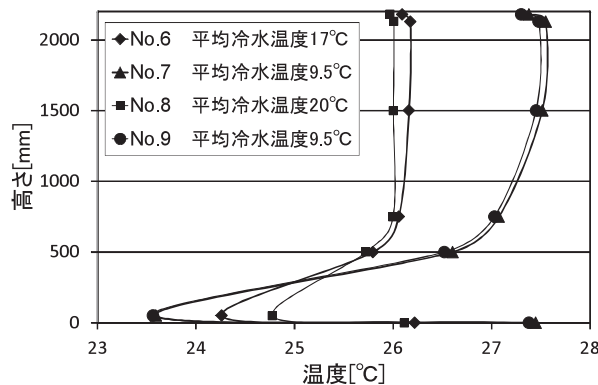


図 18 樹脂管柵状放射パネルの冷房時の室内中央空気の垂直温度分布

房時ともに放射パネルに循環する水温と空気温度との差を小さくして運転する方が良好な室内温熱環境を得られることが本測定で確認できる。

5. 結言

ヒートポンプを熱源として低温で循環する場合の放射パネルの暖房能力、冷房能力試験手法の規程作成を目標として、放射パネルに循環する冷温水の温度、流量条件を変え、放射パネルの冷暖房能力の測定条件について検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 放射パネルの暖房能力は、暖房温度差の影響を受けるため、実際に運転する領域で測定（高温と低温の温水使用に分けて評価）するのが望ましい。
- (2) 冷房時は冷房温度差が最大20 K程度と小さく、冷房温度差と冷房能力の性能曲線を未実験領域に外挿しても精度が維持できる。
- (3) 放射パネルの冷暖房能力の正確な測定のためには、放射パネルに一定以上の流量で冷温水を循環させ、放射パネル内の水の配流を均一化させることが望ましい。
- (4) 放射パネルの結露時の潜熱冷房能力は、結露時の冷房能力と非結露時の冷房能力の差とできる。

謝辞

本研究は公益財団法人LIXIL住生活財団 調査研究助成「低負荷住宅に対応する放射ラジエータの放熱能力評価手法の確立」によりました。関係者に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) JIS A1400 (2007)
- 2) 富田和彦・白土博康・保科秀夫：除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力評価に関する研究 第3報 除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力試験方法，北海道立工業試験場報告，No.310，pp.61-65 (2011)
- 3) 白土博康・富田和彦・黒田邦臣・井浦奉昭：プラスチック製ラジエータに関する研究 第2報 除湿型ラジエータの冷房能力の評価，空気調和・衛生工学会論文集，No.164，pp.49-54 (2010)
- 4) 富田和彦・保科秀夫：簡易放射暖房試験室によるパネルラジエータの放熱量測定，北海道立工業試験場報告，No.293，pp.85-93 (1994)
- 5) 白土博康・富田和彦・黒田邦臣：プラスチック製パネルラジエータに関する研究 第1報 温水暖房パネルラジエータとしての材料耐久性と放熱能力の評価，空気調和・衛生工学会論文集，No.158，pp.15-21 (2010)

- 6) 白土博康・富田和彦・保科秀夫・井浦奉昭：プラスチック製ラジエータに関する研究 第3報 プラスチック製ラジエータ設置住宅における室内温熱環境の評価，空気調和・衛生工学会論文集，No.189，pp.47-54 (2012)
- 7) 白土博康・富田和彦・保科秀夫・櫻庭高光・井浦奉昭：プラスチック製ラジエータに関する研究 第4報 換気システムを統合した住宅用放射冷暖房システムの提案：空気調和・衛生工学会論文集，No.233，pp.11-18 (2016)
- 8) JIS B 8615-1 (2013)

じゃがいもの不用部除去システムの開発

井川 久, 中西 洋介, 川島 圭太, 三戸 正道, 畑沢 賢一
岡崎 伸哉, 飯島 俊匡, 大田 佳佑*, 栗林 宏光*

Development of Automatic Potato-Eyes Removing System

Hisashi IGAWA, Yosuke NAKANISHI, Keita KAWASHIMA, Masamichi MITO
Kenichi HATAZAWA, Shin'ya OKAZAKI, Toshimasa IJIMA
Keisuke OTA*, Hiromitsu KURIBAYASHI*

抄 録

じゃがいもの芽や傷み等の不用部除去作業は、人手作業に起因する低生産性や作業人員確保の困難さから複数の食料品製造企業より自動化が強く要望されているが、難易度の高さからこれまで自動化されてこなかった。食品加工工場の省人化や生産性向上を図るためには、不用部除去システムの開発が喫緊の課題であるが、不用部除去システムには、大量に投入される複雑な形状のじゃがいもを高速かつ確実に処理する性能が求められる。

本研究では、複数のじゃがいもを同時に整列・固定し、3次元画像処理で検出した不用部をロボットで高速に除去する不用部除去システムを開発した。

キーワード：画像処理、産業用ロボット、食品、芽取り、点群

Abstract

Removal work of unnecessary parts such as eyes and bruises of potatoes has not been automated so far due to the high level of difficulty. Automation is strongly required from multiple food manufacturers due to low productivity resulting from manual work and difficulty in securing workers. In order to reduce the number of workers and improve productivity in food processing plant, it is necessary to develop an automatic potato-eyes removing system. The automatic potato-eyes removing system is required to have a capability of processing potatoes of complicated shape to be input in large quantities at high speed and reliably.

In this research, we developed the automatic potato-eyes removing system that can align and fix several potatoes at the same time, and eliminate unnecessary parts detected by 3D image processing at high speed with a robot.

KEY-WORDS : Image processing, Industrial robot, Food, Potato-eyes removing, Point cloud

1. はじめに

じゃがいも（以下、芋）は全国収穫量の約8割を北海道産が占めるなど本道を代表する農作物のひとつであり、収穫量の約2割は様々な加工食品として全国に広く流通している。加工食品用途の内訳としては、ポテトチップや、冷凍食品用のダイスポテト、フライドポテト等が挙げられるが、これら

加工食品用の約7割において、皮を剥いた後に商品価値を損なう芽や傷み等の不用部を除去する必要がある。芋を加工する工程としては、原料の投入、洗浄、スチームピーラ等による皮剥き、不用部の除去があり、その後、製品に応じてカットや加熱処理、梱包等を行い製品化している。それら多くの工程では自動化が進んでいるが、不用部除去作業は、大量の芋を高速に処理する技術、複雑な形状の芋を確実に固定する

* シンセメック株式会社, * Synthemec Co., Ltd.

事業名：重点研究

課題名：じゃがいもの自動芽取り・傷み除去システムの開発

技術、高精度に不用部の3次元位置を計測する技術等、技術的な難易度が高いため未だ実用化事例がない。特に処理能力には高速性が必要であり、不用部除去作業を自動化する場合、芋1個あたり4秒以下で処理する性能が求められる。これまで工業試験場を始め、数社が芋の不用部除去装置の開発に着手しているが^{1) 2) 3)}、除去方法や処理速度等に課題が残り、実用化に至っておらず、未だ多くの人手で不用部除去作業を行っている。しかし、人手作業に起因する低生産性や作業人員確保の困難さが課題となっており、複数の道内食料品製造企業から不用部除去作業の自動化が強く要望されている。

大量に投入される複雑な形状の芋の不用部除去作業を自動化するには、芋を整列・位置決めし、高速かつ確実に不用部を除去する性能が求められる。本研究では、大量の芋の整列・位置決めを可能とした機構、画像処理により不用部位置を検出する技術、およびロボットにより高速に不用部を除去する技術を開発した。

第2章では、整列・位置決め方法が比較的簡便な半割芋を対象として、芋を半割に切断する自動切断機構や、画像処理による不用部の検出技術、さらにロボットで高速に不用部を除去することが可能な不用部除去システムの開発について報告する。第3章では、全粒芋を対象とした整列・位置決め機構の開発、不用部の安定した検出が可能な画像処理技術の開発、およびそれら一連の技術を統合した不用部除去システムの開発について報告する。

2. 半割芋を対象とした不用部除去システムの開発

不用部除去システムには、芋を確実に整列・位置決めする性能が求められる。図1に従来の整列・位置決め機構を示す。芋の両端を左右の保持部により把持し、保持部を回転させることで芋を任意の角度に位置決めして不用部の検出および除去を行っていた。しかし、芋の形状・大きさは一定ではなく、中心軸からずれて把持した場合、不用部を確実に除去することは困難である。また、中心軸上で把持するためには芋の位置・形状をセンサで計測し、保持部を中心軸上に位置決め制御する等の工夫が必要であるため、高速化に課題が残った。そこで、芋を半割にして切断面を下にすることでコンベアと面接触し、姿勢が安定する点に着目し、芋を二分割に切断する機構および整列・位置決めする機構の開発を行った。

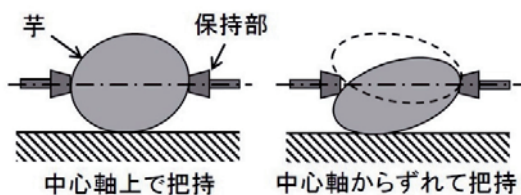


図1 従来の整列・位置決め機構

2.1 整列・位置決め機構の開発

芋を二分割するために、切断する刃は芋の中心軸に配置する必要がある。そこで、芋を2本のスクリューフィーダで搬送し、スクリューフィーダ間の中央に設置した丸刃に押しつけることで二分割する機構を開発した。図2に開発した自動切断機構を示す。切断後は切断面が下向き状態で半割芋がコンベア上へ排出されるように、丸刃-コンベア間をスロープで接続した。多数の芋を投入し切断実験を行ったところ、芋は切断面が鉛直下向きの姿勢で安定して排出されることを確認した。

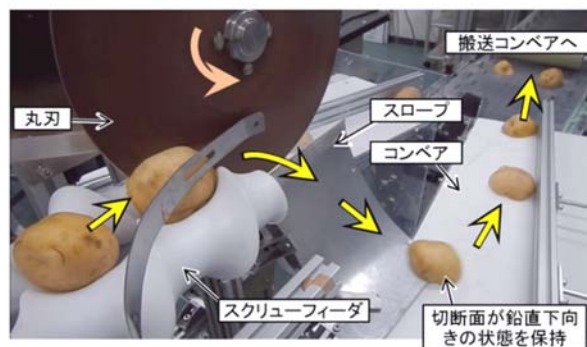


図2 自動切断機構

半割芋を固定するために、搬送されるに従って徐々に先のとがった突起物（以下、トゲ）が突出し、切断面に対してトゲが突き刺さることで半割芋を確実に固定する搬送コンベアを開発した。図3に搬送コンベアの模式図、図4に開発した搬送コンベアを示す。搬送コンベアはトゲ付きプレートと穴空きプレートの2層構造となっており、各プレートのトゲと穴の位置は対応している。半割芋が投入される箇所では、プレートガイドによって各プレート間にトゲの高さよりも広い隙間が生じているため、半割芋にトゲは接触しない。そのため、自動切断機構のスロープから投入された半割芋は滑りながら穴空きプレート上に配置される。搬送コンベアが進むにつれて、プレートガイドで生じていたプレート間の隙間が無くなり、半割芋はトゲに突き刺さる。さらに、ローラで押さえつけることでトゲが半割芋に深く突き刺さり、確実に整列・位置決めすることが可能となる。

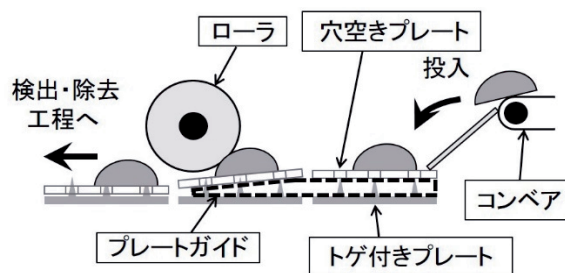


図3 搬送コンベアの模式図

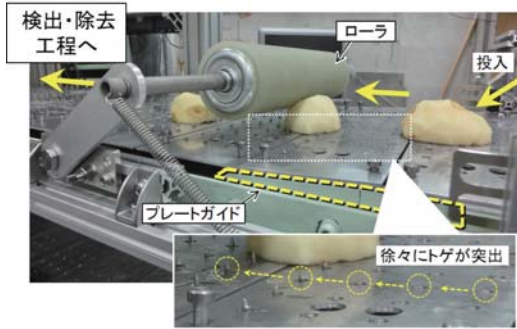


図4 開発した搬送コンベア

2.2 不用部位置検出技術の開発

不用部の位置を検出する工程(検出工程)では、カラー画像と深度画像を同時に得ることができるイメージセンサとしてMicrosoft製のKinectを使用した。本研究では、あらかじめ皮が剥かれて身が露出しているが、芽のくぼみには剥ききることができなかつた茶色い皮が残存している芋を対象としている。芽に残った茶色い皮、すなわち不用部を画像処理により検出する。画像処理の内容としては、身と皮の彩度の違いに着目し、取得したカラー画像をRGB表色系からHSV(色相, 彩度, 明度)表色系に変換する。色相に対して閾値による抽出範囲を設定することで芋に対する背景を除去し、彩度に対する抽出範囲で皮を検出することが可能であることを確認した。図5に、設定した色相の閾値, 彩度の閾値, 取得した元画像, および画像処理結果を示す。

検出した不用部領域を除去機構によりすべて除去するために、除去機構の直径を考慮し、不用部領域の分割を行うことで、平面上における除去機構の目標位置(XY方向)を検出する。不用部の高さは深度画像から取得する。得られた除去機構の目標位置をロボットへ送信することでロボットは除去動作を行うが、除去動作のタクトタイムを短縮させるためには、目標位置の順序を並び変えてロボットの移動距離が小さくなるように経路を生成する必要がある。

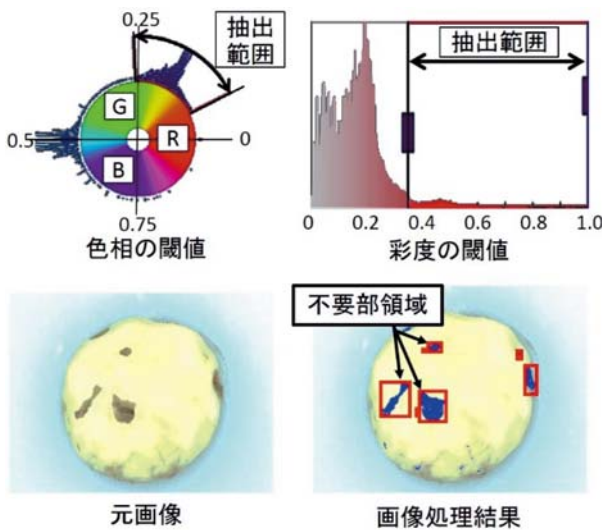


図5 画像処理

本研究では、ロボットの移動距離を低減する経路生成の手法を考案した。除去機構の目標位置をXY方向にプロットした模式図を図6に示す。X軸やY軸方向のソートにより経路を生成することも可能だが、目標位置の配置の仕方に関わらず移動距離を低減することは難しい(図7)。本手法では、まずX軸(もしくはY軸)方向の最小値(もしくは最大値)となる目標位置P0を経路の開始位置として選択し、P0から他の目標位置(P1からP4)までの距離を計算する(図8(1))。次に、P0からの距離が最小となるP1を経路の2点目として選択し、P1から他の目標位置(P2からP4)までの距離を計算する(図8(2))。これらの手順を繰り返すことにより経路の生成が可能となる(図8(3), 図8(4))。生成した経路の一例を図9に示す。このようにして、複数の芋における不用部領域の3次元位置を一括して検出する画像処理および経路生成アルゴリズムを開発した。

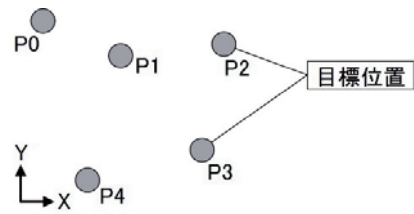


図6 目標位置の模式図

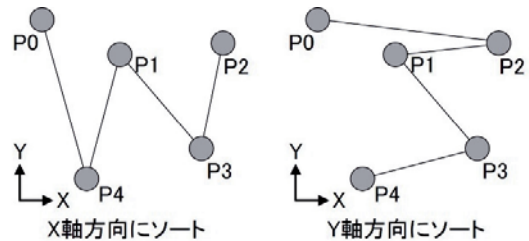


図7 各軸方向のソートによる経路生成

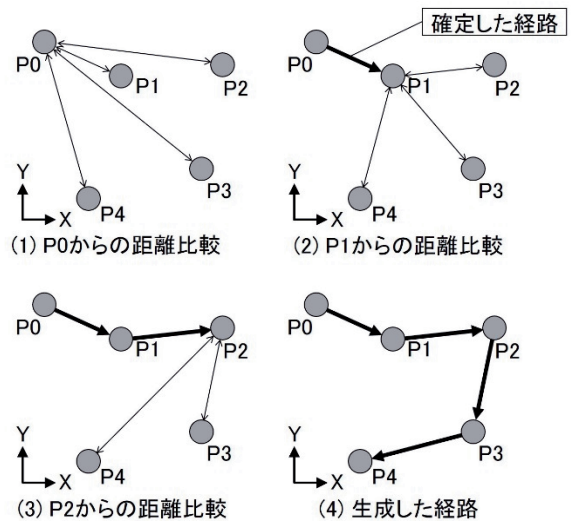


図8 移動距離を低減した経路生成

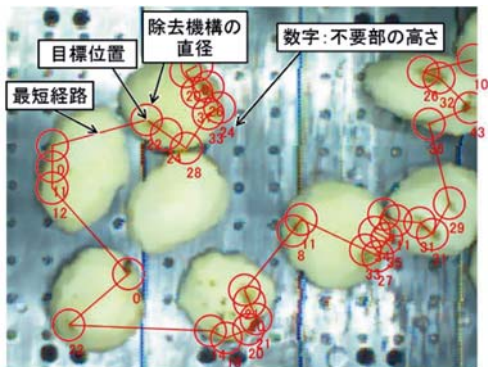


図9 生成した経路の一例

2.3 不用部除去システムの開発

不用部を除去する除去工程は、高速動作が可能なロボットと、ロボット手先に装着する不用部除去機構から構成される。図10に不用部除去機構を示す。除去機構は先端にドリルを有しており、動力はフレキシブルシャフトを通じて、ロボット架台に設置したモータから伝達する。重たいモータをロボット架台に設置することでロボット手先が軽量化され、ロボットの高速動作が可能となる。また、不用部を除去する際、ドリルに接触した芋が動かないように芋抑えプレートおよび圧縮バネにより芋を固定している。

搬送コンベアにより工程間を接続し、開発した不用部除去システムを図11に示す。整列・位置決め工程の制御はプログラマブルロジックコントローラ（以下、PLC）、検出工程および除去工程の制御はパーソナルコンピュータ（以下、PC）で行い、PLCとPC間はシリアル通信で接続することで、一連の流れをコンピュータで通信・制御可能とした。芋12個の除去試験を行った結果、処理速度は5.6秒/個であった。

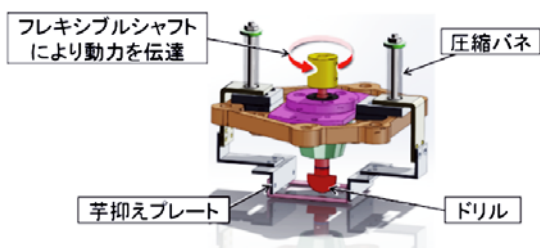


図10 不用部除去機構

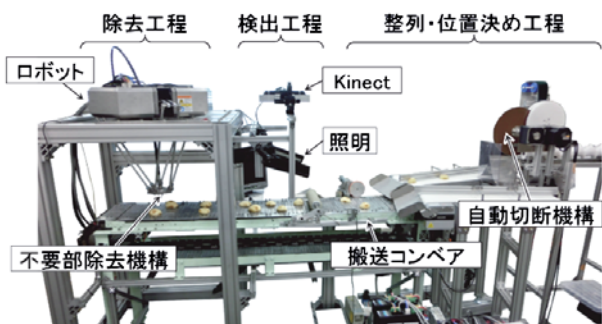


図11 不用部除去システム

3. 全粒芋を対象とした不用部除去システムの開発

第2章では、不定形状の芋を高速かつ確実に整列・位置決めするために、芋を二分割して固定する機構および不用部除去システムについて述べた。しかし、半割芋の対象製品がダイスポテトやコロッケなどに限定されるのに対して、芋を二分割しない全粒芋は全ての芋加工製品が対象となるため、全粒芋の状態 dengan 不用部を除去する自動化機械の早期開発ニーズは高い。本章では、全粒芋を対象とした整列・位置決め機構を考案し、第一試作機および第二試作機の開発を行ったので報告する。検出工程においては、イメージセンサおよび画像処理の改良を行うことで不用部の検出精度を向上させ、除去工程においては、除去対象領域を広げて同時処理が可能な個数を増やすことで処理速度を向上させた。

3.1 整列・位置決め機構の開発

図12に開発した整列・位置決め機構を示す⁴⁾。中心がくびれた一対のローラで芋を挟み込むというシンプルな構造ではあるが、以下の3つの機能を有している。

- i) 姿勢安定化
- ii) 反転（任意の角度に回転）
- iii) 複数同時処理

まず、姿勢安定化について説明する。本研究で開発した不用部除去システムでは、人手で芋を1個ずつ一対のローラ間に投入することを前提としている。芋を投入した直後は、ローラ軸に対して芋の中心軸の方向が必ずしも平行にはならず、芋とローラ間に多くの隙間が散在する（図12左図）。この状態の芋に除去機構を押し付けた場合、押し付ける度に芋が動いてしまうため不用部の除去は不可能となる。芋投入直後にローラで揺動回転させることでローラ軸と芋の中心軸が平行になるため、芋とローラ間の隙間が無くなり芋は安定した姿勢で落ち着く（図12右図）。そのため、芋に除去機構を押し付けても芋が動くことはない。反転に関しては、ローラを回転させることで、芋の大きさや形状の影響を受けることなく、中心軸周りに任意の角度で芋を回転させることが可能である。複数同時処理に関しては、構造がシンプルなためローラの本数を増やすことが容易であり、複数の芋を同時に反転させることができる。このようにして、不定形状である芋を大量に整列・位置決めすることが可能となる。

第一試作機では、ローラ表面に筋状の加工を施すことで、除去機構を押しつけた際の芋の滑りを防いでいたが、第二試作機では、突起状の加工を施すことで芋を確実に保持できるようにした（図13）。

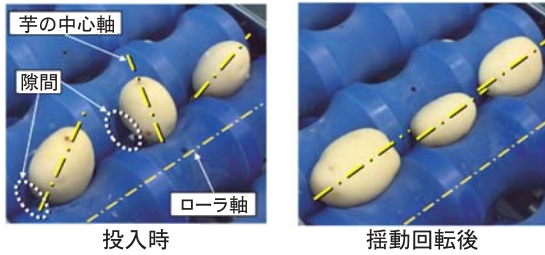


図 12 整列・位置決め機構

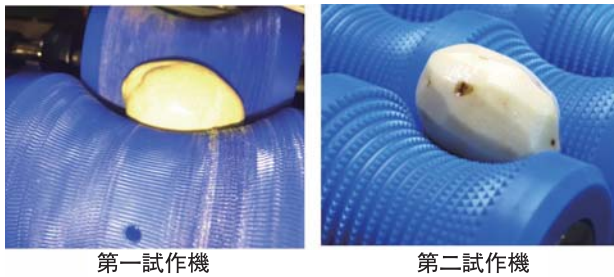


図 13 ローラ表面の加工

3.2 不用部位置検出技術の開発

半割芋を対象とした不用部除去システムにおいて、イメージセンサから測定対象までの距離（以下、WD：Working distance）は60cmであったが、全粒芋を対象とした不用部除去システムでは、ロボットとの位置関係からWDは100cm以上必要となる。ステレオ計測の距離分解能はWDが大きくなるほど低下するため⁵⁾、イメージセンサの計測精度を向上させる必要がある。また、不用部の検出に関して、第2章では、HSV表色系における閾値により不用部の抽出をしていたが、身色の異なる芋の場合、その都度閾値を設定する必要があった。本章では、イメージセンサの精度向上と、品種の異なる芋にも対応した画像処理手法について述べる。

3.2.1 イメージセンサの性能検証

半割芋用装置ではKinectを使用していたが、全粒芋用装置では精度向上を図るためにイメージセンサとしてステレオカメラを使用することとした。ステレオカメラの構成は、30万画素のUSB3.0カラーカメラ2台、レンズ焦点距離8mm、ベースライン150mmとし、キャリブレーションにより両カメラのひずみ補正や左右画像の平行化を行った⁶⁾⁷⁾。また、ステレオマッチングの精度を向上させるために、プロジェクタでランダムパターンを照射し、測定対象に対してテクスチャを投影した。

イメージセンサの性能を検証するために、図14に示す環境でKinectとの精度比較検証実験を行った。まず、Kinectとステレオカメラから1m離れた箇所に、測定対象となるチェッカーボードを各イメージセンサに対して垂直になるように設置する。次に、各イメージセンサでチェッカーボードを計測し、得られた3次元点群から近似平面を抽出する。近似平面

に対して3次元点群のZ軸方向(チェッカーボードに対して奥行き方向)の偏差をヒストグラムで描画した(図15)。標準偏差で比較したところ、Kinectが1.67mmであったのに対し、ステレオカメラは0.59mmという結果となり、Kinectに対してステレオカメラは、取得した3次元点群のZ軸方向のパラッキが小さいことを確認した。

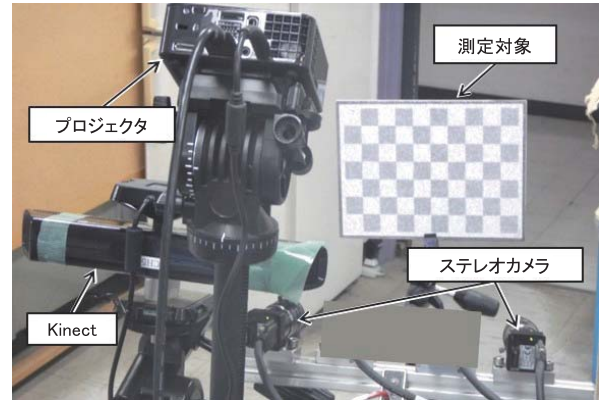


図 14 実験環境

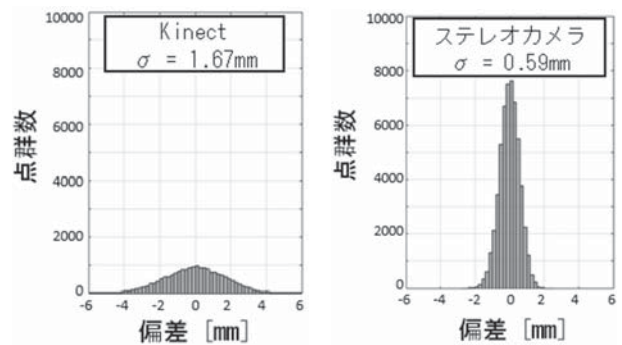


図 15 精度検証 (Z方向の偏差)

3.2.2 不用部領域の検出

芋は品種が異なると身色も異なるため、色相や彩度による閾値の設定で安定して不用部を検出することは難しい。本章では、背景となる青色のローラ部から色相による固定閾値処理により芋領域を抽出し、芋領域ごとに動的な閾値処理を施すことで、安定した不用部領域の抽出が可能であることを確認した。図16に元画像、図17に芋領域および不用部領域を抽出した画像処理結果を示す。

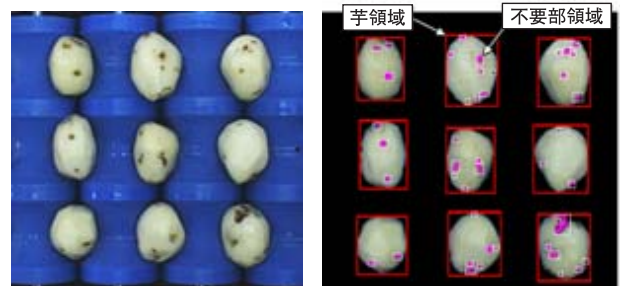


図 16 元画像

図 17 画像処理結果

3.2.3 除去機構の経路生成

前項で抽出した不用部領域に対して、除去機構の形状を考慮した目標位置を抽出する。除去機構のドリル部は、厚さ1mmの板を三角形に切り出した形状をしているが、モータにより高速回転しているため、不用部を除去する際は三角錐の形状で削り取ることとなる。そこで、画像処理により得られた不用部領域の全ての3次元点群が除去機構の三角錐に含まれるように除去機構の目標位置を算出した。図18に、除去機構の目標位置を描画した結果を示す。

2.2節の手法を用いてすべての目標位置を最短経路で接続し、かつ、経路上の芋領域の3次元点群(芋の高さ)を考慮することで、除去機構が芋に衝突することなく、除去機構の上下移動量が最小となるような経路を生成した。図19に生成した経路を示す。

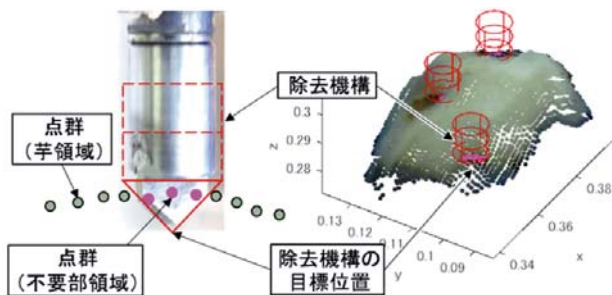


図18 除去機構の目標位置

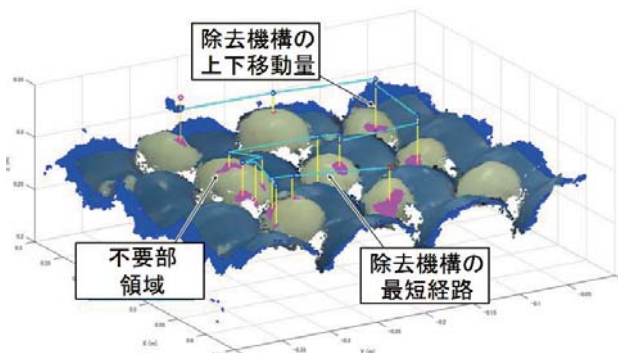


図19 生成した経路

3.3 座標変換

ステレオカメラで得られる3次元点群は、カメラを原点とした座標系で表されるため、実際に除去動作を行うロボットの座標系へ変換する必要がある。図20に、座標変換を行う際の環境を示す。まず、ロボットの手先でチェッカーボードの交点(チェッカーボード上の白と黒が交差する点)の座標を取得する。次にステレオカメラでチェッカーボードを撮像し、交点を抽出する。各座標系で得られた交点の座標の対応付けを行い、回転行列と並進移動ベクトルを特異値分解により推定することで座標変換が可能となる。

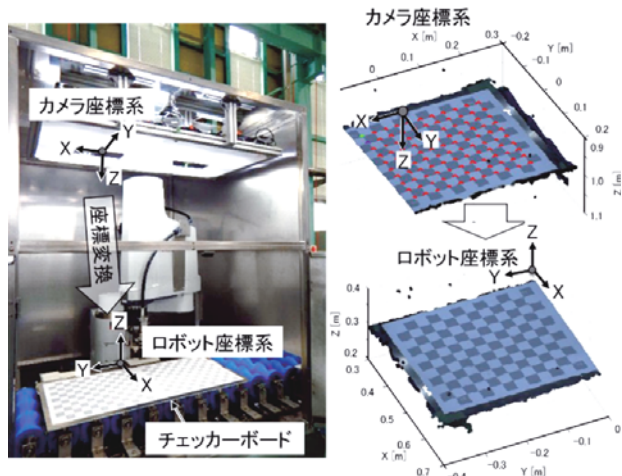


図20 座標変換

3.4 不用部除去システムの開発

芋の整列・位置決めから不用部の検出・除去、そして搬出までの工程を一連のラインに統合した全粒用の不用部除去システムを図21と図22に示す。整列・位置決め工程では、搬送コンベアのローラ上に人手で芋を並べ、ローラの揺動回転により芋の姿勢を安定させる。検出・除去工程では、ローラの上部に設置したステレオカメラにより不用部の検出を行い、除去機構の目標位置となる不用部の座標をロボットへ送る。座標を受けたロボットは、高速に回転するドリルから構成される除去機構により不用部の除去を行い、除去作業終了後、ローラを一定角度回転させて不用部の未処理部分を上部に露出させる。芋全周の処理が終了した後、搬送コンベアを駆動させて芋を搬出する。

第一試作機では、1列の搬送コンベアで芋を搬送する。検出・除去工程は2つの領域A・Bに分かれており、各々の領域に9個の芋、合計18個の芋を投入する。一方の領域で不用部の検出を行っている間に、もう一方の領域でロボットによる除去作業を行うことで、18個の芋の不用部除去作業がすべて終了するまで常時ロボットを稼働させている。しかし、整列・位置決め工程から検出・除去工程へ18個の芋を搬送する間、ロボットは停止しているため、処理速度に課題が残った。第一試作機の芋1個当たりの処理速度は3.6秒/個であった。

第二試作機では、ロボットを挟んで搬送コンベアを2列配置し、一方の搬送コンベアで検出・除去を行っている間に、もう一方の搬送コンベアで芋を搬送する。このような構成にすることで、ロボットは搬送コンベア間の移動以外は常時除去動作が可能となり、第一試作機と比較して大幅な処理速度の向上を実現することができた。なお、各搬送コンベアでは21個の芋を投入可能としており、合計42個の芋の同時処理が可能である。第二試作機の芋1個当たりの処理速度は2.3秒/個であった。



図 21 不用部除去システム（第一試作機）

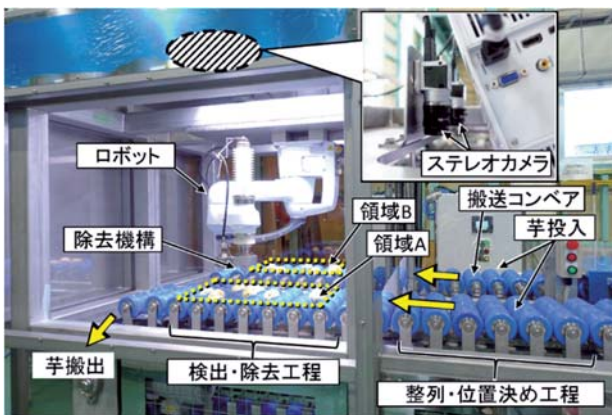


図 22 不用部除去システム（第二試作機）

4 まとめ

本研究では、複数の芋を同時に処理可能な不用部除去システムの開発を行い、以下のことを確認した。

- (1) 複数の芋の整列・位置決めを簡易に行うために、自動切断機構により半割芋を生成・固定し、画像処理により検出した不用部をロボットにより除去する半割芋を対象とした不用部除去システムを開発した。芋1個当たりの処理速度は5.6秒/個であった。
- (2) 新たに全粒芋を対象とした整列・位置決め機構を考案し、画像処理の改良により身色の異なる芋に対しても安定して不用部を検出し、除去することが可能な不用部除去システム（第一試作機）を開発した。芋1個当たりの処理速度は3.6秒であった。
- (3) 第一試作機を改良して搬送コンベアを2列配置させることで高速化を実現し、除去機構の接触による芋の滑りを防ぐためにローラに突起状の加工を施した不用部除去システム（第二試作機）を開発した。芋1個当たりの処理速度は2.3秒/個であった。

開発した全粒芋用の本システムは、整列・位置決め機構の機構上の制約から、芋の長軸端の不用部は検出および除去不可能である。今後、長軸端の不用部を除去する機構の開発を進める予定である。

参考文献

- 1) 牧野功・多田達実・戸羽篤也他：不定形状ハンドリングシステムの研究開発，北海道地域人材不足対策技術開発事業実績報告書，pp.71-128，(1993)
- 2) 今村藤男・上遠野覚：芋の不用部自動除去方法および装置，特許第2572204号，(1996)
- 3) 長岡伸司：じゃがいもの芽取り装置，特許第2963874号，(1999)
- 4) 栗林宏光・松本英二・中西洋介他：農産物の不用部除去装置，特願2017-58731，(2017)
- 5) 下村倫子・農宗千典・高橋宏：ステレオ視差と画像上の先行車高さ変化による車間距離計測のばらつき低減手法の考察，電気学会論文誌C，Vol.120 No.11，pp.1694-1701，(2000)
- 6) Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22 No.11, pp. 1330-1334, (2000)
- 7) J. Heikkila, O. Silven, A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction, IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (1997)

プレス加工の不良判別手法に関する研究

鶴谷 知洋, 畑沢 賢一, 神生 直敏

Study on Defect Discrimination Method of Sheet Metal Stamping

Tomohiro TSURUYA, Kenichi HATAZAWA, Naotoshi KAMIO

抄 録

プレス加工は大量生産の方法として広く普及しているが、割れ・しわ等の不良品検査は加工後の検査工程でロット毎に行われることが多く、不良が発生した場合に大量の不良品が生産される可能性がある。そのため、不良品の発生を自動的に検知して瞬時に加工を停止し、不良品対策を行う必要がある。

本研究では、絞り加工を対象に加工中の不良品の発生を金型内で精度良く判別することを目的として、センシング方法と加工状態認識手法についての検討を行い、不良判別技術の確立を試みた。

キーワード：プレス加工, 検査, 絞り加工, 不良判別, センシング

Abstract

The press processing is widely used as a method of mass production. There is a fear that a large number of defectives will be manufactured in case of failure, since products are inspected for defects, such as cracks and wrinkles, in the inspection process by each lots. For that reason, it is necessary to take measures against defectives by detecting them automatically and stopping press processing instantly.

In this study, we aim to discriminate between complete and defective products for drawing process, we examined the methods of sensing and recognition of the processing state, and attempt to establish a defect discrimination method for press processing.

KEY-WORDS : Sheet Metal Stamping, Inspection, Drawing Process, Defect Discrimination, Sensing

1. はじめに

プレス加工は、他の機械加工法と比較して加工速度が大きく低コストであり、量産加工技術として広く普及している。しかし、品質検査は後工程でロット毎に抜き取りで行うことが多く、ロット内の不良を発見できずにそのまま製品を出荷する、あるいは検査工程で不良が発見されるまでの間に大量の不良品が発生する可能性がある。検査工程に進む前に加工工程内で全数の製品の加工状態を認識できれば、不良品の流出や大量発生防止など品質管理面の効果のほか、加工工程と検査工程を含めた工程の自動化も期待でき、メリットは大きい。そのため、加工工程内で加工状態を自動的に認識する試みがなされている。柿木らは、金型内に超音波センサを組

み込み、深絞り加工におけるしわの検知を行っている¹⁾。小山らは、半導体ひずみゲージを金型に組み込み、曲げ加工における曲げ角度の測定を行っている²⁾。西本らは、AE（アコースティックエミッション）の測定により、打抜き加工におけるバリ発生を検知を行っている³⁾。しかし、絞り加工を対象とした金型内での加工状態認識はほとんど行われていない。その理由として、絞り加工は正常な加工の範囲内では材料の分断がなく、割れの発生時も加工部分の一部の分断しか発生しないことから、不良発生時の信号変化が小さいことなどが挙げられる。

本研究では、プレス加工の中でも絞り加工を対象として、微小な信号変化をとらえる金型内センシングと、加工状態の認識率を高めるための学習型認識手法について検討し、不良判別技術の確立を試みた。

事業名：経常研究

課題名：プレス加工の不良判別手法に関する研究

2. 実験方法

2.1 加工条件

本研究の対象である絞り加工は、図1に示すサーボプレス機（アイダエンジニアリング(株)製NC1-800(D)）を用いて行った。サーボプレスの加圧能力は800 kN、ストローク160 mmで、エアダイクッションを備えている。材料はSPCC（板厚1.0 mm）を使用した。ブランク材を図2に、加工品を図3に示す。得られるデータの特徴を把握しやすいよう、加工方法は軸対称形状である円筒絞りを選択した。加工に使用した金型の概略図を図4に、加工条件を表1に示す。ダイクッション圧及び潤滑油の有無を変えることで、正常加工、割れ、フランジしわの3種類の加工状態を得た。



図3 加工品（円筒絞り）



図1 サーボプレス機

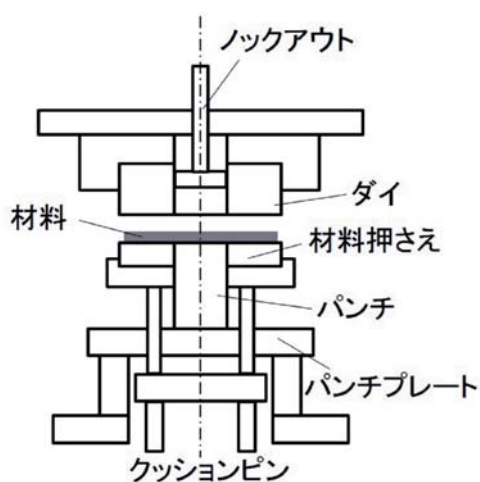


図4 金型概略図

表1 加工条件

絞り径	φ 54 mm
ブランク径	φ 110 mm
絞り深さ	37 mm
ダイハイト	310 mm
加工速度	20 SPM
クリアランス	1.2 mm
潤滑油	カータジル 60NEAT

※ SPM : Shots Per Minute (1分間当たりの加工数)

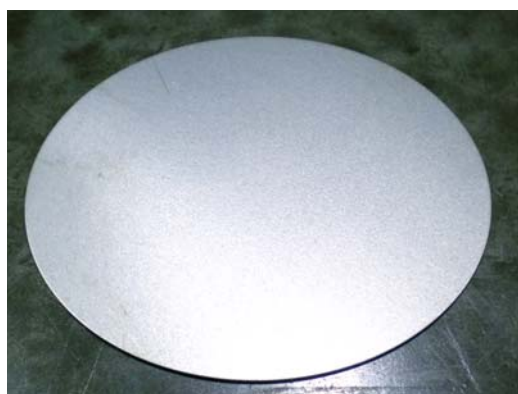


図2 ブランク材

2.2 ひずみの測定

加工中の材料の形状により金型に加わる力が変化すると考えられることから、金型のひずみの測定を行った。ひずみの測定は、材料との接触面積が大きく、かつ金型構造への影響が少ないことから、ダイを測定対象とした。測定にあたり、ダイの材料接触面の反対側に幅8 mm、深さ5 mmの溝を加工し、材料が引き込まれる中央の空間内壁から5 mmの位置にひずみゲージを貼り付けた。貼り付け位置の模式図を図5

に示す。ひずみゲージは(株)共和電業製KFG-2-120-C1を用い、ブリッジボックス、動ひずみ計、アナログ入力デバイスを経てPCにデータを収録した。サンプリングタイムは100 μ s、サンプリング点数は20,000点とした。

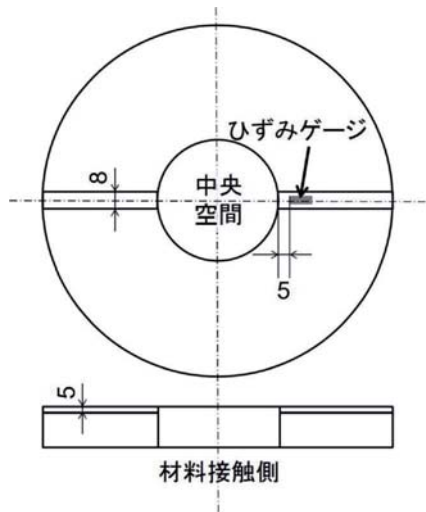


図5 ひずみゲージ貼り付け模式図

2.3 AE信号の測定

AE（アコースティックエミッション）は、材料の変形や、亀裂発生の際に弾性波が放出される現象であり、その周波数はおもに10 kHz～数 MHzの超音波領域である。材料の破壊時だけではなく、塑性変形時にも観測されることから、加工状態認識のため、AE信号の測定を行った。AEセンサは(株)エヌエフ回路設計ブロック製AE-901S（共振周波数：70 kHz）を用いた。センサの取付先は、AEをよりの確に測定するため、また、金型構造への影響を小さくするため、材料との接触面積が大きいパンチの組付け先であるパンチプレートに、マグネットホルダにより取り付けた。亀裂進展時のAEは突発型と呼ばれ、単位時間当たりのAE波形発生数（計数率）の観測が一般的であること、また、加工工程内での加工状態認識はリアルタイムの応答が求められるため、処理速度を考慮するとデータ点数の削減が重要であることから、ここではAEの生波形データではなく計数率を使用した。AEセンサからの信号は、AEテストのアンプによる増幅と、100 kHzを閾値とするハイパスフィルタ処理、波数のカウントを行い、計数率として出力した信号を、アナログ入力デバイスを経てPCに収録した。サンプリングタイム及びサンプリング点数は、ひずみ測定と同じ100 μ s、20,000点とした。金型へのセンサ取付位置を図6に示す。

2.4 金型間距離の測定

プレス加工中の下死点における金型間距離は、金型設計時に計算されているが、フランジしわや加工品の割れ部分の食い込みなどの要因で変化する可能性がある。そこで、下死点金型間距離を測定した。上型のベースプレートにレーザ変位

センサをマグネットにより固定し、下死点における上型と下型の距離を測定した。レーザ変位センサはパナソニック(株)製ANL1600Rを使用し、変位データをアナログ入力デバイスを経てPCに収録した。サンプリングタイム及びサンプリング点数は、ひずみ測定、AE測定と同じ100 μ s、20,000点とした。センサの取付位置を図6に示す。

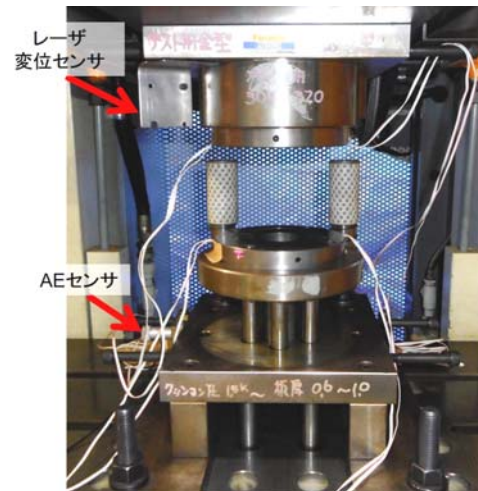


図6 センサ取付位置

2.5 加工状態認識手法

金型内のセンシングデータを用いた加工状態認識は、量産現場での運用を目標としており、外乱の影響が少ないことが求められる。そこで、既知のデータに多く含まれる特徴をもとに加工状態を認識させることで、外乱の影響が小さくなり不良品の判別精度が向上することを期待し、学習型の認識手法を検討した。この手法の有効性を評価するため、既知のデータの平均値を学習データとして入力データとの一致度を計算した。一致度は、学習データと入力データの差分絶対値和により計算した。正常加工、割れ、フランジしわの3種類を認識対象とし、各12個、合計36個のデータを得た。次に3種類の加工状態それぞれ10個ずつのデータの平均値を学習データとし、入力データと正常加工、割れ、フランジしわのそれぞれの学習データの差分絶対値和を計算し、最も小さい差分絶対値和となった学習データの加工状態を、入力データの加工状態と判断した。入力データは36個のデータすべてを使用した。差分絶対値和の計算を式(1)に示す。

$$C_i = \sum_{j=1}^N |X_j - L_{C_j}| \quad (1)$$

X_j ：入力データ

L_{C_j} ：加工状態ごとの学習データ

C_i ：加工状態ごとの差分絶対値和

3. 実験結果と考察

3.1 加工結果

実験で得られた加工品を図7～9に示す。図7の正常加工はダイクッション圧6.25 kNで潤滑油あり、図8の割れはダイクッション圧12.5 kNで潤滑油無し、図9のフランジしわはダイクッション圧1.25 kNで潤滑油ありの加工条件で得た。加工品は各加工状態で12個ずつ、合計36個とした。クッション圧が強い場合及び潤滑不足の場合、材料が伸びきれずに割れが発生し、クッション圧が弱い場合は材料の押さえが効かずダイへの材料流入量が増加することでフランジにしわが発生していると考えられ、一般的な傾向と一致している。



図7 正常加工



図8 割れ



図9 フランジしわ

3.2 ひずみの測定

図10に正常加工のひずみデータ例、図11に割れのひずみデータ例、図12にフランジしわのひずみデータ例を示す。正值は引張ひずみ、負値は圧縮ひずみを表す。正常加工では、0.5 s付近で -8×10^{-6} 程度の小さい圧縮ひずみが検出され、その後大きくなり1.1 s付近で再び小さくなっている。割れでは、0.8 s付近までは正常加工と同様であるが、以後は上昇と下降が複雑に発生している。フランジしわでは、0.6 s付近まではほとんど変化はなく、その後は正常加工と似ているが、圧縮ひずみの値が小さくなる際は、正常加工と異なり一気にゼロへ近づいている。これらのことから、正常加工および割れでの0.5 s付近での小さい圧縮ひずみは、材料がダイの中心部方向に引き込まれる際に、ダイ肩部のRに力が加わるにより発生していること、割れの発生時には一度圧縮ひずみは緩和されるが、変形した材料がダイに力を加え、大きな圧縮ひずみとなること、しわが発生する場合は材料押さえ力が弱いためダイ肩部のRに働く力が弱く圧縮ひずみ小さいことなどが推察される。なお、データの特徴が把握しやすい軸対称形状の円筒絞りのひずみデータであれば、単純な閾値により加工状態の判別が可能と考えられる。

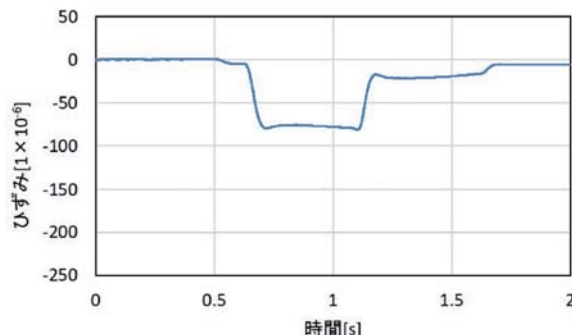


図10 正常加工のひずみデータ例

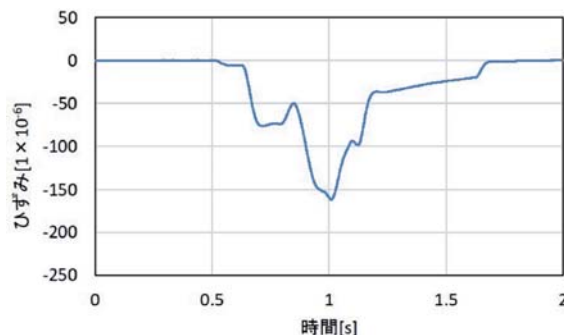


図11 割れのひずみデータ例

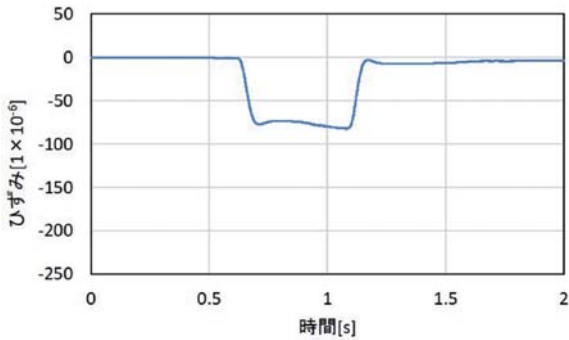


図12 フランジしわのひずみデータ例

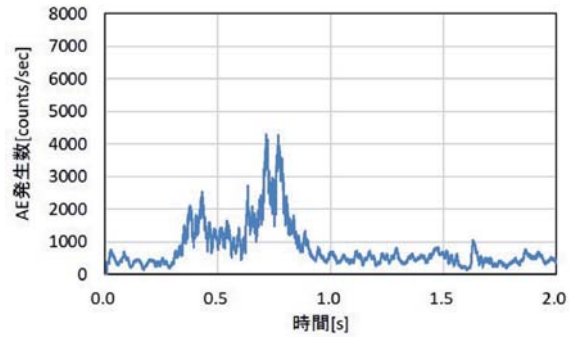


図15 フランジしわのAEデータ例

3.3 AEの測定

図13に正常加工のAEデータ例、図14に割れのAEデータ例、図15にフランジしわのAEデータ例を示す。それぞれ、0.3s付近及び0.7s付近にピークが確認できる。0.3s付近の最初のピークは上型と材料の接触、0.7s付近の2つ目のピークは加工中の材料の変形により発生したAEである。正常加工の場合は塑性変形、割れの場合は破断、フランジしわの場合は正常加工よりも小さな塑性変形に起因するAEが発生していると考えられる。しかし、AEのピークの大きさや形に違いが見られるものの、単純な閾値による加工状態の認識は困難と思われ、より詳細な認識手法の検討が必要である。

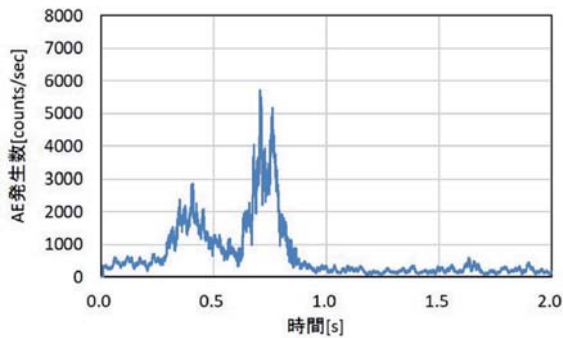


図13 正常加工のAEデータ例

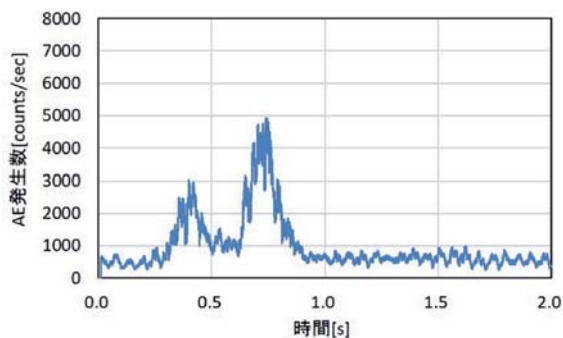


図14 割れのAEデータ例

3.4 金型間距離の測定

下死点における上型と下型の金型間距離について、図16に得られたデータの箱ひげ図を示す。箱ひげ図の箱の部分は、中央値を中心とした全データ数の50%（四分位範囲）を示している。正常加工の四分位範囲はフランジしわ及び割れの四分位範囲と異なっているが、データ全体の存在範囲が重複しているため、加工状態の判別は困難と考えられる。

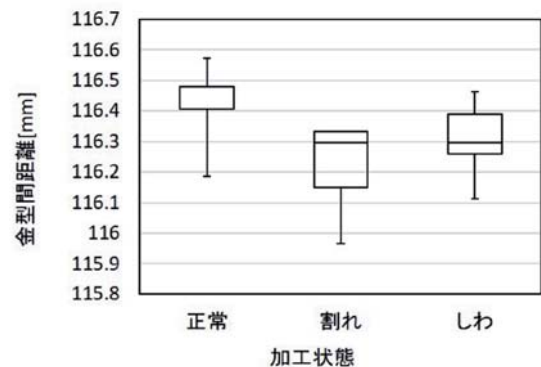


図16 下死点における上型と下型の金型間距離の箱ひげ図

3.5 加工状態認識

得られたひずみ、AE、金型間距離のデータのうち、加工状態の判別が困難であると考えられる金型間距離以外のデータで加工状態認識実験を行った。正常加工、割れ、フランジしわ、それぞれ12個のデータに対して認識実験を行った結果を表2に示す。ひずみデータを使用した場合、3種類の加工状態すべてにおいて認識率は100%となった。しかしAEデータを使用した場合、正常加工の認識率は90%を超えたが、割れとフランジしわは70%前後であった。AEデータは特徴の差が小さいこと、データの再現性が悪いこと、ノイズの影響を受けやすいことなどが認識率が低い原因と考えられる。そのため、認識率が高かったひずみデータを用いた加工状態認識について、不良判別技術確立に向けたさらなる検討を行うこととした。

表 2 加工状態別認識率

	正常加工	割れ	フランジしわ
ひずみ	100%	100%	100%
AE	92%	75%	67%

4. 金型ひずみセンシングによる角筒絞りの不良判別

不良判別技術の確立に向け、軸対称で特徴が把握しやすい円筒絞りの形状から、より実製品に近い角筒絞りの形状を対象とし、認識手法も差分絶対値に加え機械学習を検討した。材料は円筒絞りと同じSPCCを使用した。ブランク形状を図17に、加工品を図18に、加工条件を表3に示す。

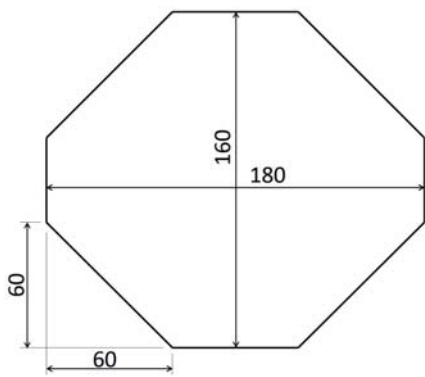


図 17 ブランク形状



図 18 加工品（角筒絞り）

表 3 加工条件

加工品寸法	80 mm × 60 mm
絞り深さ	48 mm
パンチ	肩部 R 7 mm, コーナー R 7 mm
ダイ	肩部 R 5 mm, コーナー R 10 mm
ダイハイト	320 mm
加工速度	20 SPM
クリアランス	1.2 mm
潤滑油	カータジル 60NEAT

加工状態は、量産現場で発生する状況を想定し、潤滑油量のみを変えることで正常加工と不良を得た。得られた加工品を側面から観察した写真を図19～23に示す。くびれ、亀裂、小割れ、割れの4種類を不良として分類した。



図 19 加工品（正常加工）



図 20 加工品（不良：くびれ）



図 21 加工品（不良：亀裂）



図 22 加工品（不良：小割れ）



図 23 加工品（不良：割れ）

金型ひずみの測定は、円筒絞りと同様にダイの材料接触面の反対側に深さ 5 mm の溝を加工し、材料が引き込まれる中央空間の内壁から 5 mm の位置にひずみゲージを貼り付けた。図 24 にダイのひずみゲージ貼り付けの様子を示す。データ収録のシステム構成は 2.2 節と同じものを使用した。処理速度を考慮し、サンプリングタイムは 500 μ s、サンプリング点数は 4,096 点でデータを収録した。得られたデータを図 25～29 に示す。なお、ノイズ対策のためノイズの周波数から計算した 41 点の移動平均と 20 点おきの間引き処理を行い、204 点に圧縮している。正常加工のデータとくびれのデータは酷似しており単純な閾値での判別が困難であるが、亀裂→小割れ→割れと材料の分断度合いが増すにつれて正常加工との違いが大きくなり、閾値での単純な判別が可能と言える。また、ひずみはいずれの加工状態においても絶対値が 10×10^{-6} 未満であり、微小な変化であることが確認できた。なお、3.2 節のひずみデータと異なる正值であり、金型構造の変更により引張ひずみが検出されている。

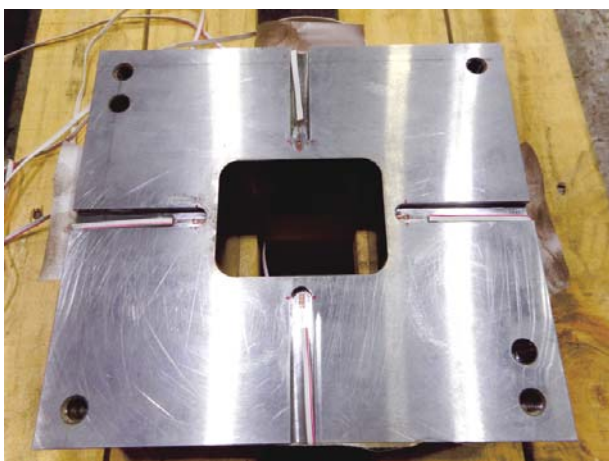


図 24 ダイへのひずみゲージ貼り付け

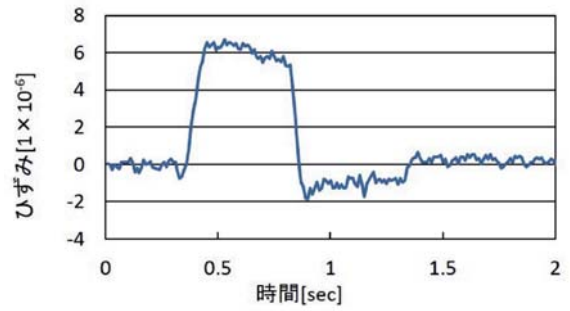


図 25 ひずみデータ（正常加工）

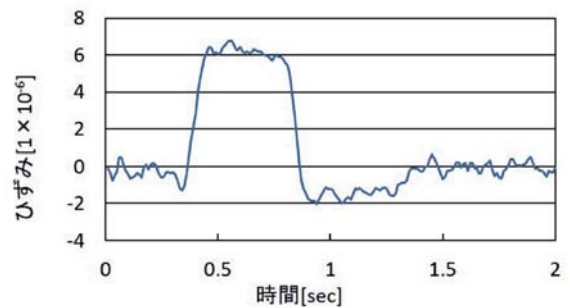


図 26 ひずみデータ（不良：くびれ）

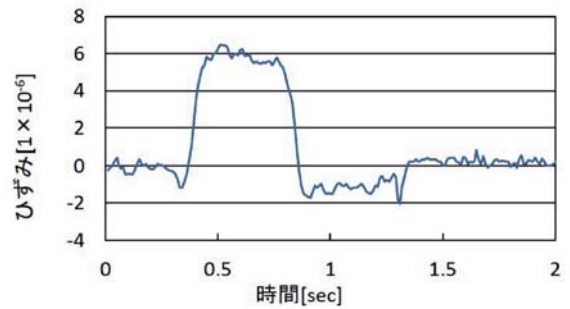


図 27 ひずみデータ（不良：亀裂）

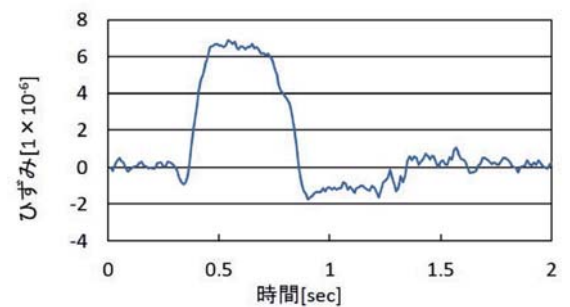


図 28 ひずみデータ（不良：小割れ）

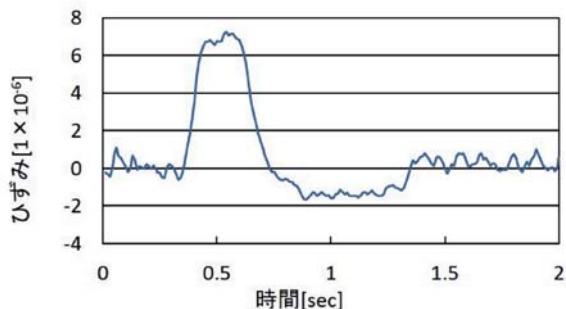


図 29 ひずみデータ (不良：割れ)

ひずみデータを用いて、差分絶対値和による不良判別を試みた。判別は、正常加工のデータ53個、くびれ・亀裂・小割れ・割れからなる不良のデータ44個、合計97個のデータを用意し、それぞれ20個のデータを選んで学習データを作成した。その他の条件は2.4節の内容を用い、判別実験を行った結果、97個のデータに対する認識率は89%であった。加工品によっては正常と不良の境界付近に位置するものがあり、得られるデータが似ているため、単純な手法である差分絶対値和では十分な認識率が得られなかったと考えられる。

次に、認識率の向上を目指し、機械学習による判別を試みた。まず、環境構築が容易で汎用のプログラム言語pythonによる演算処理も利用可能なChainerを用いた機械学習による加工状態認識システムを構築した。Chainerは、(株)Preferred Networks社が提供しているニューラルネットワークの設計・学習・評価を行うオープンソースのフレームワークである。認識システムは、Linux系のOSであるubuntu上に構築した。ネットワークの構成を図30に示す。ChainerはV1を使用し、機械学習の有効性を確認するため、層数は入力層が1、中間層が1、出力層が1の合計3層の最小構成とした。各層間は全結合、入力層のノード数は1加工あたりのデータ点数と同じ204で次元圧縮はせず、出力層のノード数は正常な加工の確率と不良の確率を出力するため2とした。出力層の正常な加工の確率と不良の確率を比較し、確率が大きい方の加工状態を入力データの加工状態と判定した。97個のデータの中からランダムに選んだ7割(68個)を用いて学習モデルを構築し、97個のデータ全てに対して学習モデルを用いた判別実験を行った。学習モデルの最適化手法はAdam、層間の活性化関数はReLUを用いた。Adamは一次微分の勾配法で適用例も多く評価が高い。またReLUは、派生型も含めて適用例が増加しており、認識率が高い。式(2)及び図31で示すように、ReLUは入力値が負であれば0、正であれば入力値を出力する関数である。機械学習による判別実験を行った結果、認識率は96%であった。単純な閾値で判別が困難な特徴を、機械学習により抽出できたことで高い認識率が得られたと考えられる。学習データ数が100程度と少ないにも関わらず高い認識率が得られていることから、データ数の積み上げにより認識率の向上が期待できる。

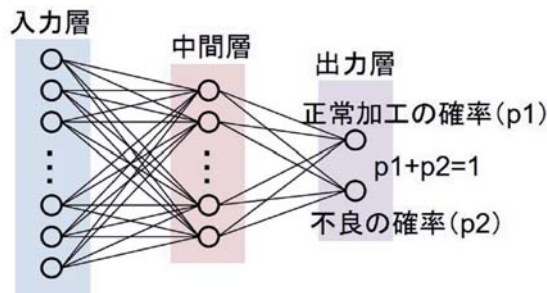


図 30 ネットワークの構成

$$y = \max(0, x)$$

$$\begin{cases} x : \text{入力} \\ y : \text{出力} \end{cases}$$

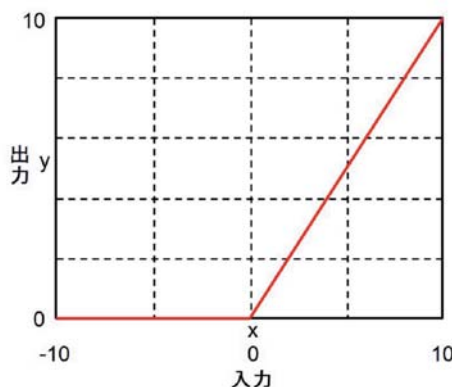


図 31 ReLU の出力

5. おわりに

- (1) 円筒の絞り加工を対象に、ひずみ、AE、金型間距離のセンシングを行い、加工状態と得られたデータの関係について精査した結果、ひずみは単純な閾値での判別が可能なこと、AEは認識手法の検討が必要なこと、金型間距離による加工状態の判別は困難なことがわかった。
- (2) 円筒絞りのひずみデータとAEデータにより、学習型認識手法として差分絶対値和を用いた加工状態認識実験を行った結果、ひずみデータでは高い認識率が得られたのに対し、AEデータでは十分な認識率が得られなかった。これは、再現性やノイズが認識率に影響を及ぼしたと考えられる。
- (3) 実製品環境に近い角筒絞りを対象に、差分絶対値和を用いた不良判別実験を行った結果、十分な認識率が得られなかった。そこで、認識率の向上を目指し、機械学習を用いた不良判別実験を行った結果、高い認識率が得ら

れた。これは、加工状態の特徴を抽出できた結果と考えられる。

今後は工程内での不良判別のため、認識に要する時間について検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 柿木亮太・瀬川裕二・丸茂康男他：金属板のプレス成形における超音波を利用したしわ発生状態のインプロセス評価，塑性加工学会誌，Vol.58，No.676，pp.49-53，(2017)
- 2) 小山純一・柳明：金型内蔵マイクロセンシングシステムの開発，塑性加工学会誌，Vol.51，No.596，pp.60-64，(2010)
- 3) 西本重人・新家昇：AE法による打抜き加工のバリ発生評価，非破壊検査，Vol.54，No.10，pp.557-561，(2005)

三次元造形鋳型の常温特性評価試験法

戸羽 篤也, 鈴木 逸人

Test Method for 3 D-Printed Casting Mold Properties in Normal Temperature

Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI

抄 録

鋳物の品質や欠陥の発生に大きく影響する鋳型の性状を定量的に評価する方法は、生型を対象とした試験方法を定めた規格はあるが、近年注目される三次元造形鋳型を含めて、生型造型以外の鋳型特性の評価を想定した試験方法を定めた規格はない。

筆者らは、三次元積層造形法による鋳型製作技術の開発と並行して、同造型プロセスによって製作された鋳型の特性を定量評価する方法を開発した。本稿は、鋳物の常温特性とされる鋳型強度と通気度の試験方法について、4点曲げによる抗折強度評価法と、通気圧力抵抗による通気度評価法の適用試験を行ったので報告する。

キーワード：鋳造，鋳型，鋳型特性，3D積層造形

Abstract

The casting mold properties have influence to quality and defect of castings. There is only test methods of evaluating the quality for the green sand mold, but there are not test methods for the other molding process, including the 3 D printing molds. We developed a test method of evaluating characteristic of the mold produced by the 3 D printing at the developing project of 3 D printing mold technology. We report the test method of evaluate mold strength by 4 point bending, and the test method of evaluate a permeability by pressure of aeration resistance.

KEY-WORDS : Casting, Casting mold, Properties of mold, 3 D printing

1. はじめに

鋳物製作に用いられる鋳型は、その性状が鋳物の品質や欠陥の発生に大きく影響する。特に、量産鋳物の製造ラインで多く採用される生型造型では、鋳物砂の水分量で鋳型性状が大きく変化するため、その製造ラインにおける重要な管理項目となる。

鋳型の諸特性の評価試験法は、日本工業規格等で規定されたものがあるが、それらは生型砂を対象としたものがほとんどである。また試験の手順や方法も手間を要することから、一般の生型造型ラインでは、CB値¹⁾などの簡便法で生型砂の性状を管理しているのが現状である。

近年、三次元積層造形による鋳型製作法が、従来の鋳型製作で必須であった模型や木型を必要としない新たな造型プロ

セスとして注目されている。三次元積層造形法で鋳型を製作する装置は、既に海外製のものが国内鋳物メーカー等に導入された実績がある。また、平成25年から、経済産業省主導のプロジェクトとして、国産の鋳型製作用造形装置開発の取り組みがある²⁾⁻³⁾。

鋳型特性の評価の目的は、前述の安定した性状の鋳物砂を供給するための日常管理と、異なるプロセスで製作した鋳型の性能比較が挙げられる。生型以外の造形プロセスで製作された鋳型の特性評価は、生型の鋳型特性評価法がしばしば代用される。しかし、これらの鋳型特性評価法では、試験片の製作工程を規定する試験項目もあるため、三次元積層造形法で製作した鋳型に適用できない場合がある。そこで、前述の三次元積層造形装置開発プロジェクト（以下「開発プロジェクト」という）では、同装置で製作した鋳型と他の造型プロ

事業名：公募型研究

課題名：超精密三次元造形システム技術開発プロジェクト（平成23～29年度）

セスで製作した鋳型との特性比較を行うために、鋳型の諸特性の定量評価法の開発に取り組んだ⁴⁾。

本稿は、その中から常温特性に分類される鋳型強度と通気度について、その技術開発における検討の経過と、三次元積層造形鋳型に適用した事例を報告する。

2. 鋳型常温特性評価の概要

鋳型の常温特性は、鋳型製作後に室温で試験する特性項目であり、鋳造工程において鋳型へ注湯後、鋳型内に溶湯が満たされるまでの鋳型の性能を知ることを目的とする評価項目である。生型砂の常温特性評価に関しては、日本工業規格⁵⁾で、試験片の製作方法、抗圧縮強度試験法、通気度試験法、水分含有量試験法、粘土分・粒度構成試験法などが規定されている。この他、実用性の観点から、業界関連団体が生型砂および生型の特性評価試験法を規定したものが見られる⁶⁾。

鋳型特性の評価試験法に関する公式な規定・規格はこれ以外にないため、生型以外の鋳型を対象とした常温特性の評価も、この規定を参考に試験されるのが一般的である。

2.1 鋳型の強度

鋳型の強度は、造型後の鋳型の運搬、型合わせなどの取り扱いや、鋳造時の溶湯圧、中子に加わる浮力など、様々な力に対して鋳型形状を維持する能力に関する評価指標である。

鋳型強度の定量評価試験法として、日本工業規格 JIS Z 2601⁴⁾（以下「JIS法」という）には、抗圧縮力試験法が規定されている。これは、鋳型の強度を圧縮荷重に対する耐性で評価するものである。同規定には、試験片の製作手順が決められており、図1に示す試験片製作機を用い、内径φ50mmの鋼管内に試料砂を投入し、6.5kgの重錘を50mmの高さから3回落下させて、その衝撃力で生型砂を突き固めて鋳型試験片を成形する。この際、成形後の試験片の高さが50±1mmになるように投入する生型砂の量を加減する。

抗圧縮強度 σ_C は、試験片を鋼管から取り出し、図2に示すように、円柱形状の並行両端面に圧力を加え、試料が圧壊した時の荷重 W から、次式によって算出する。

$$\sigma_C = \frac{W}{A} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

ただし、 W ：圧壊時の加圧荷重 [N]，

A ：試験片端面の面積 [m²]

鋳型の抗圧縮強度は、鋳型キャビティ内に満たされた溶湯の重さによって鋳型内面に圧力が加わる状態を想定し、その耐圧性を評価していると考えられる。三次元造形鋳型では、シェル状の主型を製作して、これを砂でバックアップして使用することや、中子を製作する場合も考えられる。このとき、荷重状況は、薄板に圧力（分布荷重）を受けてい

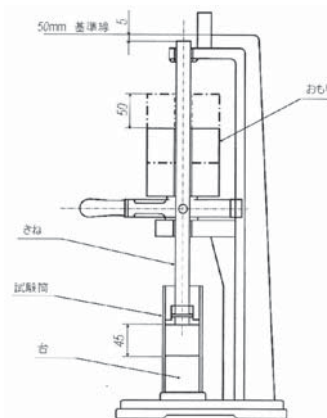


図1 試験片製作法 (JIS Z 2601)

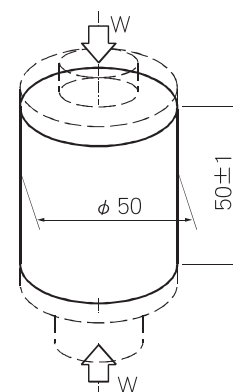


図2 鋳型試験片の抗圧縮強度の評価 (模式図)

る状態であり、鋳型に加わる力は、圧縮力ではなく曲げモーメントが作用している状態と考えるのが適当である。そこで、鋳型強度の評価法として、従前の抗圧縮強度に加え、曲げ試験法を応用した抗折力試験法を検討することとした。

抗折力試験は、一般的に3点曲げ試験法が採用される。3点曲げ法とは、図3に示すように、距離 L の2支点到に梁状の試験体を置き、2支点的中心点直上から集中荷重を加えて試験体に曲げモーメントを与えて行う試験方法である。抗折強度 σ_B は、曲げモーメントを徐々に増大させ、試験片が折れて破壊した時の曲げモーメント M と試験片の断面係数 Z との関係から、次式で評価値を得る。

$$\sigma_B = \frac{M}{Z} \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

ただし、 M ：最大曲げモーメント [Nm]，

Z ：試料の断面係数 [m³]

抗折試験に供する試験片は、矩形断面の場合が一般的である。その断面の荷重方向の寸法（高さ） h と、これと垂直方向の寸法（幅） b により、試験片の断面係数は、 $Z = bh^2/6$ と計算される。3点曲げにおいて、曲げモーメントの最大値は集中荷重点に作用し、その大きさは、 $M = WL/4$ で計算される。

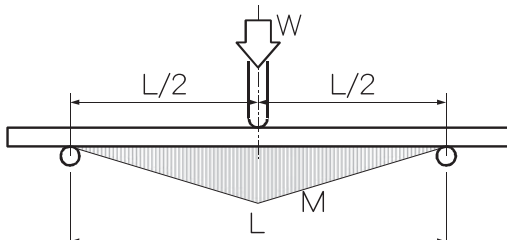


図3 3点曲げによる抗折強度の評価 (模式図)

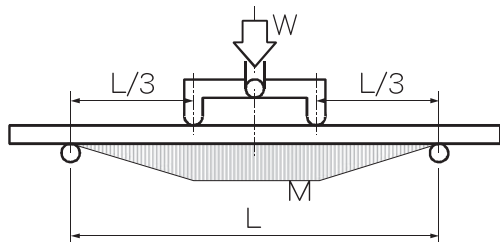


図4 三等分点荷重による4点曲げ抗折強度の評価 (模式図)

したがって、(2)式は、

$$\sigma_B = \frac{3WL}{2bh^2} \quad [\text{Pa}] \quad (2')$$

ただし、 W：圧壊時の加圧荷重 [N]、
L：試料支持点間距離 [m]、
b：試験片の幅 [m]、
h：試験片断面の高さ [m]

となる。

さらに、鋳型と同様な脆性材料の抗折試験では、3点曲げ法の代わりに図4のような三等分点荷重による4点曲げ法⁷⁾を採用する場合がある。このとき、抗折強度 σ_{BT} は次式で算出される。

$$\sigma_{BT} = \frac{WL}{bh^2} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

4点曲げ荷重下では、試料の中央部に曲げモーメントが一定になる区間があり、不均質材料や脆性材料では、この区間で材料の平均的な強度を評価していると考えられる。

2.2 鋳型の通気度

鋳型の通気度は、鋳型キャビティ内の空気や鋳造時に発生する水蒸気、粘結材の熱分解ガス等を鋳型外に排出する能力に関する評価指標である。

JIS規格⁵⁾に規定される通気度試験法は、前節(図1)で示した方法により、内径 $\phi 50$ mmの鋼管内に高さ 50 ± 1 mmの試験片を製作し、これを鋼管とともに図5の計測装置に設置し、これに所定量の空気を所定圧力で通気した時の所要時間を計測し、次式によって算出する。

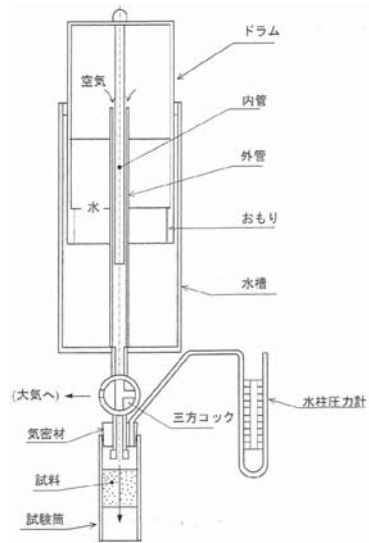


図5 生型の通気度試験法 (JIS Z 2601)

$$\text{通気度 (JIS)} \quad k = \frac{Vh}{pAt} \quad (4)$$

ただし、 V：通気する空気の容積 [cc]、
h：試験片の高さ [cm]、
p：通気時の加圧力 [cmAq]、
A：試験片端面の面積 [cm²]、
t：所定量の空気が通過するのに要する時間 [min]

JIS法による通気度は、各パラメータを所定の単位で数値を代入して得られた値とし、無次元数として取り扱われる。

JIS法では、鋼管内に製作した試験片をそのまま用いるが、これを他の成型プロセスで同じ形状・寸法で試験片を製作して鋼管内に挿入した場合は、鋼管壁面と試料の間隙の影響で、正確な通気度を計測できない。

実際の試験では、式(4)のパラメータのうち、試験片の断面積 A (直径が $D = \phi 5 \text{ cm}$ より $A \approx 19.6 \text{ cm}^2$)、高さ h (=5 cm)、通気容積 V (=2000 cc)、通気圧 p (=10 cm Aq) は試験条件として固定されるので定数として扱われ、通気所要時間 t のみの計測となる。JIS法では、この通気時間を計測する方法のほかに、副次的な簡便法として、通気時の流量と試験片通過時の圧力損失から通気度を換算する方法(オリフィス法)を用意している。そこで、JIS法で規定する通気度では何を評価しているかを検証する。JIS法では通気度を無次元数として扱うが、実際に式(4)の次元解析を行うと、[m²/Pa・s] という単位になる。鋳型の構造と近似した粉末集合体を対象に、粉末間隙を通過する流体の透過度を、圧力勾配下における流体の流速で定義する例がある⁷⁾。すなわち、圧力勾配 $\Delta p / \Delta h$ のもとで粘性 μ の流体が流速 u で通過するときに、その粉末多孔質体の流体透過度は次式で定義される(ダルシー則)。

$$\text{圧粉体空気透過率} \quad k = \mu u \frac{\Delta h}{\Delta p} \quad [\text{m}^2] \quad (5)$$

粉末多孔質材の空気透過度は、面積の次元をもつが、JIS法による通気度の計算式(4)と比較すると、式(4)は空気の粘性を乗ずるのを省略した形になっており、鑄型の通気度試験において空気の粘性を定数と考えれば、両者は同じ評価指標と見なすことができる。このことから、造型後の鑄型に対する通気度の評価法として、鑄型表面から空気を内部に通気させる時の通気抵抗圧力の大小から通気度の程度を推定する方法が検討され、実用を指向した取組みも報告されている⁹⁾。本稿ではこの方法の妥当性検証を目的に実験を行った。

3. 実験方法

3.1 試験片の製作

試験片の製作は、開発プロジェクトで開発した三次元鑄型造形装置 (CMET 製 SCM-800, 以下「開発装置」という) で積層造形したほか、同装置で使用する粘結材 (群栄化学工業(株)製 RPR-102A) および硬化剤 (群栄化学工業(株)製 RPH-10A) を用いて砂を混練し木型を使用して製作 (手込め造型) した。

手込め造型に使用する骨材は、開発装置で当初使用した砂が珪砂であることから、その相当品となる東北珪砂を用い、造型後の嵩密度および通気性を変化させるため、粒度の異なる東北珪砂を適宜配合し、表1の粒度構成となる9種の砂を用いた。その際の混練条件は、初めに硬化剤を砂に対して0.45 wt% 添加して十分に混練した後、粘結材を同じく2.3 wt% 加えて混練し、可使時間内に木型に充填して硬化させた。試験片は、取り出し後、概ね一昼夜養生して用いた。

3.2 鑄型の抗折強度試験

抗折強度試験は、図6に示す自動式荷重検出器 (アイコーエンジニアリング(株)製 MODEL-2257, 容量200 N) を使用し、支点間距離60 mm の支持点を設けた定盤の上に試験片を置き、荷重点支持を荷重計の検出部に取り付けて負荷を行った。試験片は、図7に形状と寸法を示すように、断面形状を16×10 mm の矩形とし、長さ80 mm の寸法で製作した。

抗折力の計測は、3点曲げ負荷方式と4点曲げ負荷方式の両方で行い、その差異を確かめた。4点曲げの荷重方法は、図4に示す三等分点法とした。

3.3 鑄型通気度の評価試験¹⁰⁾

通気度は、鑄型試験片の表面から内部に向かって空気を通気させた時の通気抵抗圧力を計測し、あらかじめ用意した検量線の値を読み取って評価した。

鑄型試験片への通気は、図8に示す専用の通気プローブを作製して行った。この通気プローブの構造は、模式図に示すような二室構造とし、空気は外部の空気供給源から圧力 p_0 、流量 Q_i で通気プローブの第1室 (以下「緩衝室」という)

表1 試験片製作に用いた珪砂の粒度構成 [wt%]

No.	ふるい粒径[μm]									粒度指数 ⁹⁾ [AFS]
	600	425	300	212	150	106	75	53	Pan	
#1	16.2	35.1	18.4	22.7	7.2	0.4	-	-	-	37.9
#2	12.3	26.9	15.7	24.4	14.8	3.8	1.2	0.6	0.2	46.8
#3	8.4	18.6	13.0	26.2	22.4	7.3	2.4	1.3	0.4	55.8
#4	4.5	10.3	10.3	27.9	30.0	10.7	3.7	1.9	0.7	64.7
#5	0.6	2.1	7.6	29.6	37.7	14.1	4.9	2.5	0.9	73.7
#6	0.5	1.8	6.2	24.4	34.6	18.3	8.5	4.2	1.5	82.6
#7	0.4	1.5	4.9	19.2	31.6	22.5	12.0	5.8	2.1	91.5
#8	0.3	1.2	3.5	14.0	28.6	26.7	15.6	7.4	2.7	100.4
#9	0.2	0.9	2.2	8.8	25.5	30.9	19.1	9.1	3.3	109.3



図6 抗折試験に用いた自動式荷重検出器

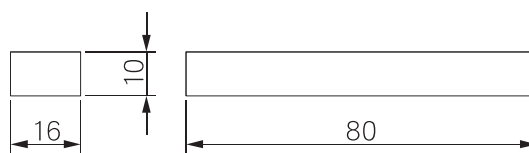


図7 抗折強度評価用試験片の形状・寸法



図8 通気抵抗計測プローブの外観と構造模式図

に流入する。その後、緩衝室から圧力 p_1 (以下「一次圧力」という) でオリフィス k_p を介して第2室 (以下「計測室」という) を経由して、吐出口から圧力 p_2 (以下「二次圧力」という)、流量 Q_p で流れ出す経路となる。通気プローブ内の圧力は、各室にデジタル微空圧計 (Keyence製 AP-44, 容量10kPa) を接続し、専用の検出アンプ (Keyence製 AP-V-41A) に信号を取り込んで圧力値を読み取った。

さらに、計測室にはオリフィス k_D を介して排出口から空気の流れ Q_D をプローブの外に排出する構造を設けた。これは、吐出口を密閉して空気の流れが止まった時に、プローブ内の圧力が過上昇するのを抑えることを目的としたものである。この効果を調べるため、排出口への空気流量が差圧

$\Delta p = 5 \text{ kPa}$ に対して $Q = 100 \text{ ml/s}$ 程度となるような流路面積のオリフィス k_D を設けたプローブを用い、その排気口を閉じたときと開放したときの圧力計測値を比較した。

通気プローブへの空気の供給は、空気が流れた状態でレギュレータにより圧力を $10 \sim 60 \text{ kPa}$ の範囲で制御した。鑄型試料への通気抵抗は、供給圧力を変えて通気プローブに空気を供給し、①吐出口を閉塞したとき、②開放したとき、③鑄型試料に当てたときの3つの状態で各室内圧力を計測した。通気度は、これら圧力値の関係から求めた。

鑄型試料は、 100×100 の面積、厚さ 50 mm の直方体形状にフラン自硬プロセスによって製作した。試験片の製作に用いた骨材、粘結材および硬化剤は、強度試験に用いたものと同じである。

4. 実験結果と考察

4.1 鑄型試料の抗折強度

粒度の異なる砂で手込め成型した試験片の高密度を、試験片の質量と体積から計算して求め、その試験片の抗折強度を3点曲げ法で計測し、これらの相関を図9に示す。

粒度指数が小さい試料は粒径の大きな砂が多く配合されており、これら砂粒の間に粒径の小さな砂が入るので、相対的に高密度が大きくなる。逆に、細かな砂が多いと砂粒間隙の大きさが小さくなってこれらを埋め難くなるため、相対的に高密度が小さくなると考えられる。

抗折強度は、高密度の影響を大きく受け、高密度が $1,380 \text{ kg/m}^3$ で 4 MPa を超える抗折強度が得られたが、高密度の減少とともに抗折強度も低下し、微細な砂を多く含む構成となる高密度が $1,150 \text{ kg/m}^3$ 程度の試験片では 1 MPa 以下の抗折強度が計測された。

開発装置で使用する砂は、粒径が $100 \mu\text{m}$ 程度でかつ粒径の揃ったものが用いられ、その粒度指数は $\text{AFS} = 100$ 程度と推定される。開発プロジェクトでは、造型鑄型の強度向上と粘結材の使用量を減らす目的で、骨材を珪砂から充填性に優れた人工砂に変更した。開発装置により人工砂で三次元造形した試験片を製作し、その抗折強度を評価した。三次元積

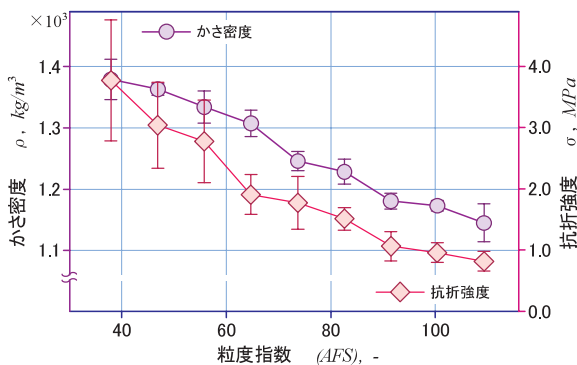
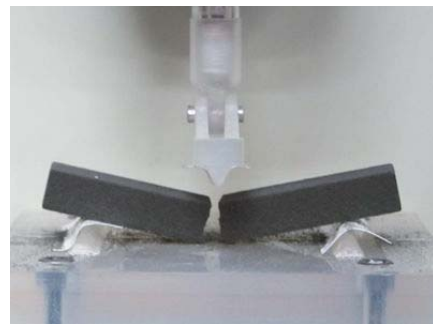


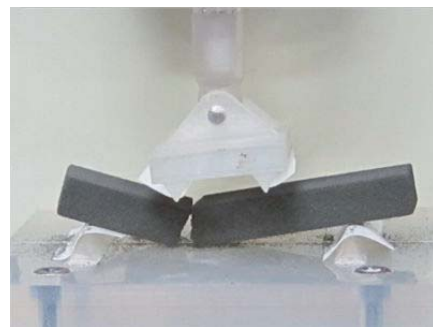
図9 試験片の粒度と高密度および抗折強度

層造形では積層方向による異方性があるとされる。そこで、試験片の寸法・形状は、図7で示したのと同じものを用いたが、試験片に負荷を与える時の姿勢を変えて試験を行った。すなわち、当初想定した試験片の矩形断面 ($10 \times 16 \text{ mm}$) に対して長手方向を水平に置く姿勢に加えて、これを鉛直方向に置いた姿勢で負荷を掛ける方法でも試験を行った。また、抗折強度の際の曲げモーメントの与え方の違いの影響を見るため、3点曲げ法と4点曲げ法の両方の試験を行い、得られる強度評価値への影響を確かめた。

図10に3点曲げ試験および4点曲げ試験による試験片の破壊状態の写真を示す。3点曲げのとき、破壊箇所は中央の荷重付近で生じるのに対して、4点曲げでは、必ずしも中央でなく、2つの荷重点間の部位で破壊している。これは、図3に示す通り、3点曲げにおいて最大曲げモーメントは中央の荷重点に作用するのに対して、4点曲げにおいては図4に示す通り、2つの荷重点間で一定の曲げモーメントが作用するため、この間で最も大きな応力が作用する箇所破壊が起



a) 3点曲げによる抗折試験結果



a) 4点曲げによる抗折試験結果

図10 抗折強度試験における破壊試料の外観

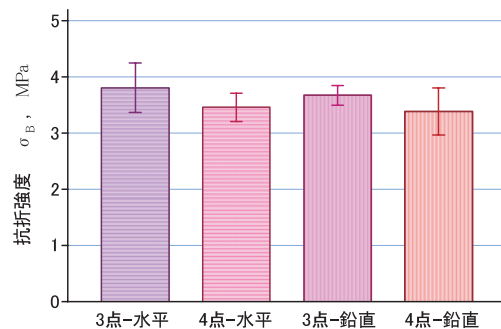


図11 試験条件による抗折強度評価値の比較

こるためと考えることができる。

また、荷重方向について、試験片断面の長手方向を水平にした場合と鉛直にした場合の3点曲げ試験、4点曲げ試験の結果を図11に示す。3点曲げと4点曲げによる抗折強度試験の結果は、4点曲げ試験の結果の方が8～9%小さめに計測された。これは、4点曲げの場合2荷重点間に造形強度の不均一があると、その最も弱いところで破壊が生じると考えられることから、微視的な断面形状や砂粒間の接着強度の不定常などが影響していると推定される。実用面から考えると、材料の最も低い強度が計測されていることは、材料設計上の不都合はなく、鋳型の強度評価方法として妥当と考える。

一方、試験片の負荷姿勢の違いについては、試験片断面の長手方向を鉛直に配置した方の抗折強度が若干小さく計測されたが、その違いはわずかであり、成型時の異方性の影響は小さいことがわかった。

4.2 鋳型試料の通気度試験

粒度構成の異なる砂に硬化剤、粘結材を混練し、鋼管内で硬化させた試験片を用いてその通気度をJIS法によって計測した。試験片砂の粒度指数と通気度の関係を図12に示す。

通気度の計測結果から、粒度指数が大きくなるにつれて通気度が小さくなる傾向が認められた。粒度指数が小さい試料は粒径の大きな砂を多く含み、粒度指数が大きくなるにつれて砂の粒度は細かい砂を多く含む。前項の図9で粒度指数が

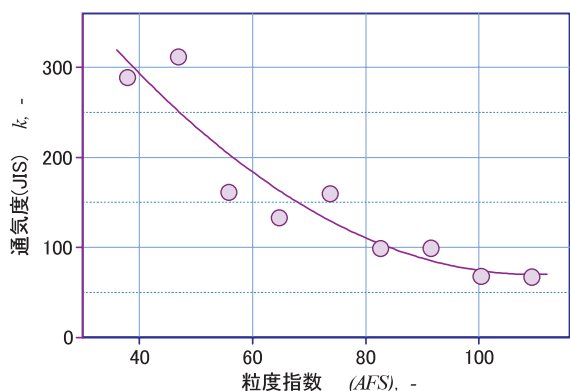


図12 試験片の粒度と通気度

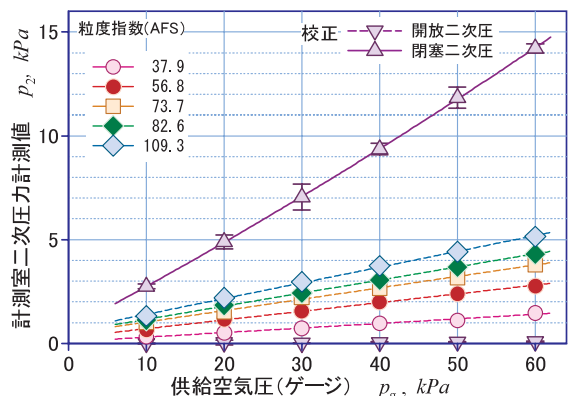


図13 試験片粒度と通気抵抗圧力の比較

小さいほど高密度が大きくなることを示した。高密度が大きいほど通気性が良いことは、一見、矛盾するように思われるが、通気度は砂粒間隙を空気が通過する際の抵抗に反比例すると考えると、砂粒間隙の小さい方の通気抵抗が大きくなると想定され、この試験結果は、空隙の容積比が小さくなることよりも、砂粒間隙が小さくなることの方が通気度に与える影響が大きいことを示している。

粒度構成の異なる砂に硬化剤、粘結材を混練し、直方体形状の試験片を製作し、通気プローブを用いて試験片内に通気させた時の計測される計測室内圧力（二次圧力、以下「通気抵抗圧力」という）を計測した。試験は、供給元圧力を10 kPa～60 kPaになるようにレギュレータで調整し、通気抵抗圧力を計測する前に、通気プローブの吐出口を開放した時と閉塞した時の2つの状態で計測室内圧力を計測した。

図13に試験の結果を示す。通気プローブの吐出口を開放した場合の二次圧力はほとんど0を示し、そのほかの二次圧力計測値は供給圧力に対して良好な比例関係が認められた。通気プローブの吐出口を閉塞したときの二次圧力が供給圧力よりも低いのは、計測室に設けた排気オリフィスを經由してプローブ外に排気される機構のためである。

粒度指数が小さい試験片に対して通気抵抗圧力は小さく計測され、粒度指数が大きくなるにつれて通気抵抗圧力も大きく計測される。これは、通気度が砂粒間隙を空気が通気するときの粘性抵抗に反比例する性質を有するためであり、図12で示した砂粒間隙の大きさと通気度の関係と一致する。すなわち、通気度の大きな鋳型に対しては小さな通気抵抗圧力が計測され、逆に通気度の小さな鋳型に対しては、大きな通気抵抗圧力が計測される。

通気プローブへの供給圧力に対してそれぞれの二次圧力計測値との間に比例関係が認められることから、通気プローブの吐出口を閉塞したときに計測される二次圧力の大きさに対する通気抵抗圧力の比（以下「圧力比」という）を計算し、粒度指数の異なる砂で製作した試験片ごとにJIS法で測定した通気度と圧力比との関係を図14に整理した。通気度と圧力比の間には相関関係が認められるため、これを検量線として

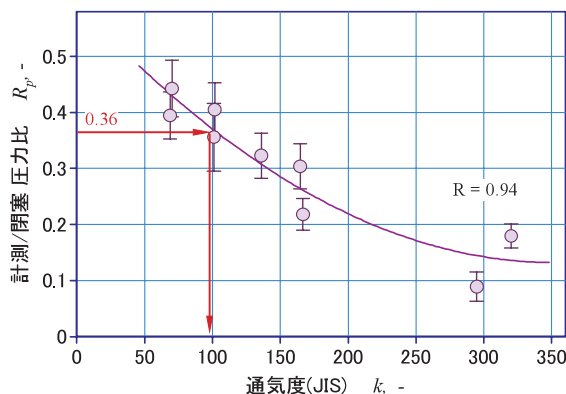


図14 試験片の通気度と通気抵抗比の関係

用いば、既存の鋳型に対応した通気度の計測法となる。

開発装置で積層造形した鋳型試験片に対して、通気プローブを使用して通気抵抗圧力を計測したところ、通気プローブの吐出口を閉塞したときの計測室圧力に対する通気抵抗圧力の比率は0.36であった。この圧力比から JIS 法による通気度に換算すると、図14に付記した通り、概ね100程度の通気度であることが分かった。この値は、生型砂に比較すると少し小さいが、通常の鋳型として使用するのに支障がない値である。

通気度計測用に設計した通気プローブの大きな特徴として、通気用の空気吐出口が閉塞してもプローブ内計測室の空気の流れを止めないようにする排気機構が挙げられる。この効果を検証するため、排気口を塞いだときの、それぞれの計測状態における計測内圧力の挙動を調べた。試験は、開発装置で製作した直方体形状の試験片（粒度；AFS = 103.1, 通気度；JIS 法換算102）を用い、供給圧を10 kPa ~ 40 kPa になるようにレギュレータで制御して空気を供給し、緩衝室圧力（一次圧力）と計測室圧力（二次圧力）を計測した。

通気プローブの排気口を閉塞して試験した結果を図15に示す。特に注目すべきは、通気プローブの吐出口を閉塞すると、通気プローブ内の空気の流れが止まるため、緩衝室、計測室ともに、供給圧力と同等の圧力が計測され、供給圧力を小さくした場合は、見かけ上、供給圧を上回る圧力が計測されている。これは、供給圧の調整を、空気が流れている状態のレギュレータで調整したため、空気が流れが止まると、レギュ

レータ内の圧力も上昇するためと考えられる。通気プローブの吐出口を開放、あるいは鋳型試験片に当てた状態では、通気プローブ内の空気が流れるため、供給圧との関係は比例関係を示すが、吐出口を塞いで空気の流れを止めると、供給圧との関係は原点を通る比例関係とはならなくなる。

これに対して、排気口を適切に開けて機能させた状態で試験した結果を図16に示す。この条件では、緩衝室、計測室ともに、吐出口を閉塞しても通気プローブ内の空気の流れが止まることはなく、ほかの条件の場合とともに、いずれの計測状態においても供給圧力に対して比例関係を維持することがわかる。

この機能は、通気度の評価試験において通気度の小さな鋳型を対象とした通気度比較などで有効と考え、特に細かな砂を使って三次元積層造形する鋳型などを対象とした通気度試験法として優位性があると考えられる。ただし、プローブ内に設けるオリフィス k_D は、対象とする鋳型の通気度の程度に応じてその有効面積を増減させることになるが、その都度、通気抵抗圧力と通気度との相関を検量線として得ておく必要がある。

5. おわりに

三次元積層造形技術を応用した鋳型製造プロセスが実用化段階となり、今後も、鋳造現場の要望や、新たな技術要求に応えながら、これら鋳型造形装置の改良や、粉末材料、粘結材の開発が進んでいくことが期待される。

本稿では、三次元積層鋳型製造装置の開発事業の中で携わった鋳型特性の評価技術開発の中から、鋳型常温特性として、鋳型強度と通気度の評価試験法の事例を取り上げた。いずれの鋳型特性も、鋳物の品質や欠陥防止の観点から重要な特性項目とされ、鋳型特性の評価法に関する技術開発の取り組みも散見されるが、生型や有機鋳型を対象としたものがほとんどであり、三次元積層造形鋳型を対象とした特性評価に関する技術開発は、今後の取り組みを待ちたい。

本稿で報告した鋳型特性項目に関する定量評価法開発の取り組みについては、開発事業の報告書や学会誌等で報告しているのを参考にされたい¹¹⁾。また、本報告には、平成25年7月より開始された経済産業省・産業技術研究開発「超精密三次元造形システム技術開発プロジェクト」の成果を含む。

参考文献

- 1) 名雪東彦・戸羽篤也・田中 勝他：自動生型砂試験機の検量線に影響する生型砂の変動要素，鋳物 第65巻第7号 pp565~570 (1993)
- 2) 大胡田 稔：素形材Vol.54 No.9, pp32~36 (2013)

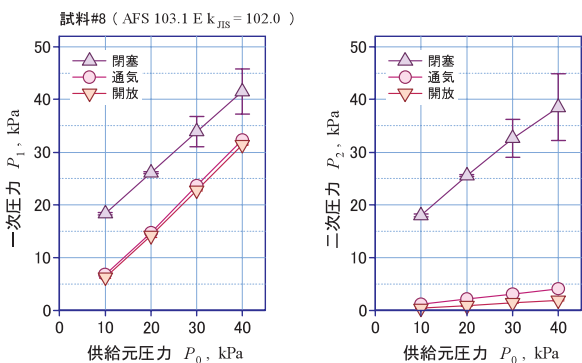


図 15 排出口を閉じた場合の圧力挙動

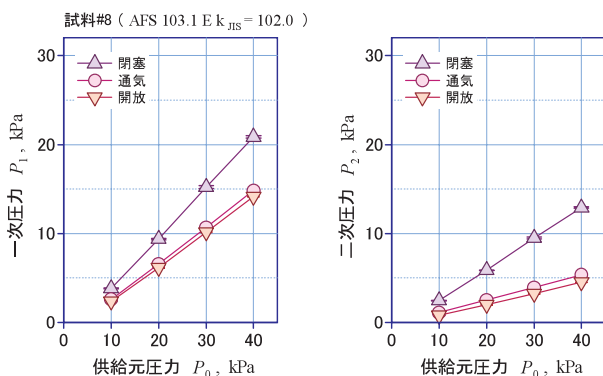


図 16 排出口を機能させた時の圧力挙動

- 3) 岡根利光：鋳造を中心とした3Dプリンターのものづくりへの活用，第165回全国講演大会技術講習会テキスト，pp29～40（2014.10）
- 4) 戸羽篤也：積層造形鋳型の特性評価とCAE連携，第169回全国講演大会技術講習会テキスト，pp59～64（2017.5）
- 5) JIS Z 2601-1993 鋳物砂の試験方法
- 6) 木村 徹他：鋳型および鋳型材料に関する試験方法，中小企業団 情報・技術部（1999.5）
- 7) JIS A 1106-2006 コンクリートの曲げ強度試験方法
- 8) 段野 勝：多孔体を通る流体の流れとその透過率，福井工業大学研究紀要，第23号，pp108～114（1993）
- 9) 久保公雄・福迫達一・大中逸雄：鋳物 Vol.52 No.7 p411～416（1980）
- 10) 戸羽篤也・平野繁樹・兼吉高宏他：日本鋳造工学会第166回講演大会講演概要集，pp19（2015）
- 11) 戸羽篤也・鈴木逸人・兼吉高宏他：3D積層造形鋳型特性の定量評価法の開発，鋳造工学 Vol.90 No.6，pp292～297（2018.6）

作業車両のための通信制御システムの開発

堤 大祐, 新井 浩成, 浦池 隆文, 多田 達実

Development of a Communication Control System for Work Vehicles

Daisuke TSUTSUMI, Hironari ARAI, Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA

抄 録

近年、制御システムは通信ネットワークに接続した、異なる機能を有する複数のECUによる分散処理によって多様な機能を実現している。本研究では、作業車両の制御システムを高機能化するため、走行制御にCANを、外部ネットワークとの接続にEthernetを使用できる通信制御システムを開発した。また、センサ類にネットワーク接続機能を持たせたほか、高度な走行制御を可能とするセンサ類の試作を行ったので報告する。

キーワード：通信制御システム，作業車両，CAN

1. はじめに

作業車両の電子制御化が進んでおり、筆者らは、作業車両の制御技術に関して研究を行っている。特に、近年は農作業機械への活用を積極的に推進しており、これまでに、果樹園の除草ロボットの開発¹⁾や、ポテトハーベスタの開発²⁾を行った。開発した除草ロボットの外観を図1(a)、ポテトハーベスタの外観を図1(b)に示す。

作業車両の制御において、従来は単一のECU (Electronic Control Unit: 電子制御装置) を用いて制御した。ECUはセンサおよびスイッチなどの入力情報を処理し、油圧モータなどのアクチュエータの操作情報を出力する。これらの入出力の制御において、時間管理や排他制御などが容易に実現できることから急速に普及した。その結果、より多くのスイッチやアクチュエータが接続され、制御システムが複雑になった。この状態に対応するため、更に、内部状態を表示するために表示器を追加するなど、制御システムは大規模化かつ複雑化した。

近年の制御システムでは通信ネットワークに接続した、異なる機能を有する複数のECUによる分散処理によって多様な機能を実現している。作業車両系の通信ネットワークにはCAN (Controller Area Network) が広く使われている。筆者らは農作業機械を制御する制御用ECUと、液晶画面と操作ボタンを有する操作端末とをCANで接続した通信システムを開発した³⁾。



(a) 除草ロボット



(b) ポテトハーベスタ

図1 除草ロボットとポテトハーベスタの外観

本研究では、筆者らが研究開発用に使用している移動体プラットフォームの制御システムを高機能化するため、走行制御にCANを外部ネットワークとの接続や大きなデータを扱うためにEthernetを使用できる通信制御システムを開発した。また、このシステムを用いて、センサ類をネットワークに接続することで高度な走行制御が可能になるセンサ類の試作等を行ったので報告する。移動体プラットフォームを図2に示す。

事業名：経常研究[†]，研究職員奨励事業[‡]

課題名：作業車両の協調動作のための制御技術に関する研究[†]，
移動体プラットフォームのための通信制御技術の開発と成果の普及[‡]



図2 移動体プラットフォーム

2. 通信制御システムの構成

図1(a)に示す除草ロボットでは、おおむね図3に示す構成となっている。図3のGNSS⁴⁾センサはGlobal Navigation Satellite System (全球測位衛星システム) による位置情報を取得するセンサである。得られた位置情報はNMEAフォーマットにしたがって、UART⁵⁾ (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) によるシリアル通信で出力するセンサが多い。NMEAフォーマットはNational Marine Electronics Association (米国海洋電子機器協会) により管理されている。接触センサはI/Oポートに接続し、接触状態を取得する。

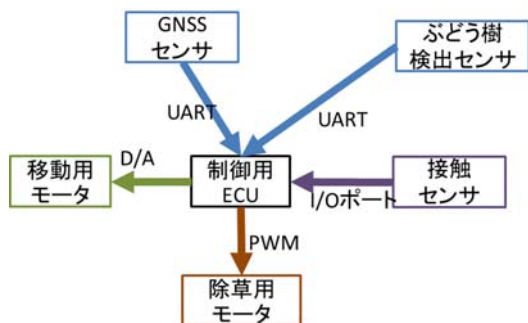


図3 従来の構成

一般に、制御用ECUには図3に示すように多くのセンサ、アクチュエータを接続する。さらに、制御の状態を外部から確認できるように表示器を接続することもある。このように、ECUの処理量は増える傾向にあり、高性能化が求められるようになった。システムが複雑になると、センサの追加や変更による制御プログラムの変更に多大な工数がかかるようになってきた。ECUには外部センサを接続する端子があるが、端子の不足や追加したセンサの処理のため、システム全体の処理のタイミングが変わったりする不具合が発生する可能性がある。

本研究では、センサに通信機能を持たせ、通信ネットワークに接続する通信制御システムを構築した。構成を図4に示す。これにより、センサの情報処理を制御用ECUから切り離すことができた。よって、センサの追加による制御用ECU

の負担が減少し、拡張性の高いシステムとなった。通信ネットワークにはCANを用いた。CANは最大8バイトの情報を送受信可能な通信規格であり、耐ノイズ性を備えていることから、車載系で標準的に使われている。

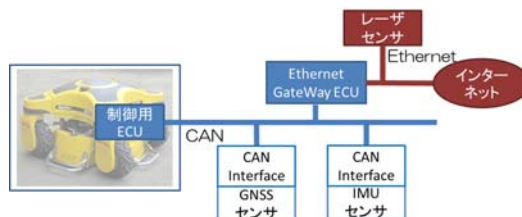


図4 開発した通信制御システム

通信機能を持たせたセンサは、GNSSセンサとIMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置) センサである。それぞれのセンサにCANインターフェースを付けて、通信ネットワークに接続した。IMUセンサは加速度や角速度などを出力するセンサで、移動する機器の姿勢制御に活用されているセンサである。

GNSSセンサはヘミスフィア製ssV-100で、その外観を図5に示す。位置情報の出力はNMEAフォーマットで115,200 bpsでUARTによるシリアル通信によって行う。また、CANインターフェースを図6に示す。



図5 GNSSセンサの外観

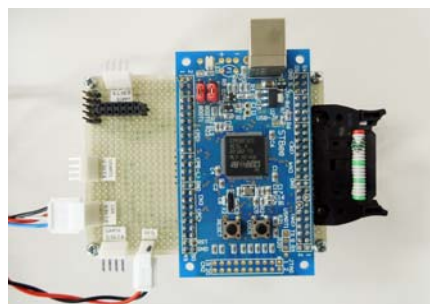


図6 GNSSセンサ用CANインターフェースの外観

GNSSセンサ用CANインターフェースはGNSSセンサが出力する図7に示すような文字列から位置情報を抽出し、図8に示すようなCANのメッセージとして出力する。図7にお

いて、下線部が緯度・経度を示す。図8において、00000441はCANのメッセージの識別子であり、その後続く8バイトのデータが緯度（4バイト）・経度（4バイト）を示す。GNSSセンサ用CANインターフェースはSTMicroelectronics製のCPU（STM32F103）を使用した。このCPUは内部動作周波数72MHzで動作できる。

```
$GPGGA,081819.00,4354.16005900,N,14440.63284059,E,2,06,1.6
                緯度                経度
,5.726,M,26.434,M,7.0,0129*4A
```

図7 GNSS センサの出力例

```
00000441 2B 52 9F 5E 90 3E 0A AC
ID 緯度(4バイト) 経度(4バイト)
```

図8 位置情報の CAN メッセージの例

IMUセンサはSTMicroelectronics製LSM9DS0を使用した。このセンサは3軸（x軸、y軸、z軸）の加速度、3軸の角速度、3軸の地磁気データを出力する。3軸の加速度、角速度、地磁気の合計9個のデータをIIC（Inter-Integrated Circuit）により取得する。各データは2バイトなので、加速度、角速度、地磁気の3種類合計6バイトをCANメッセージとして出力する。図9にIMUセンサの外観を、図10にIMU用CANインターフェースの外観をそれぞれ示す。このCANインターフェースにはSTMicroelectronics製のCPU（STM32F405）を使用した。このCPUは内部動作周波数168MHzで動作できる。今後、高度な補正処理や推定処理を実行することを考慮し高性能なCPUを使用した。



図9 IMUセンサ

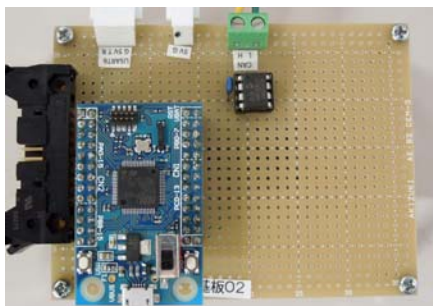


図10 IMUセンサ用CANインターフェースの外観

さらに、大きなデータや外部との通信が可能となるように、EthernetとCANが接続できるGatewayを設けた。このGatewayはEthernetを有しLinuxが動作するシステムにCANインターフェースを追加することで構築した。Linuxは無償で

利用できるOS（基本ソフトウェア）であり、一般的に使用されている。図11に構築したEthernetとCANインターフェースを備えたGatewayの外観を示す。

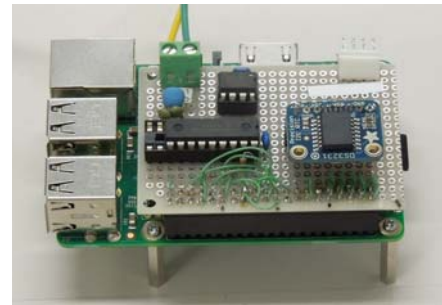


図11 CANインターフェースを備えたGatewayの外観

3. 通信制御システムの動作確認

センサ情報の通信状態の確認はCANのメッセージを監視することで行った。監視はCANのプロトコルアナライザ（CANoe）を用いた。

3.1 GNSSセンサ

図12はGNSSセンサを取り付けた移動車両において、GNSSセンサから得た位置情報をCANのメッセージとして取得し、あらかじめ指定した経路に沿って走行させた時の軌跡である。緯度・経度の情報を平面座標系に変換して図示した。図中、実線は実際の走行軌跡、始点を△、終点（目的地点）を□で示しており、点線は走行させたい経路である。

制御用ECUは図7に示すような受信データを処理する代わりに、図8に示すCANのメッセージを受信するだけで、位置情報を取得できる。これにより、制御用ECUは指定経路にそって走行する機能のみ行えば良い。

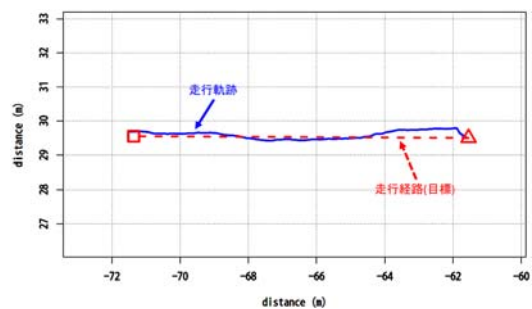


図12 GNSSセンサを用いた走行制御の例

3.2 IMUセンサ

同様にIMUセンサも9種類のデータをCANのメッセージを受信するだけで制御等に活用できる。プロトコルアナライザを用いて受信した様子を図13に示す。図13において、加速度の単位はG、角速度はdegree/sec、地磁気はgaussである。

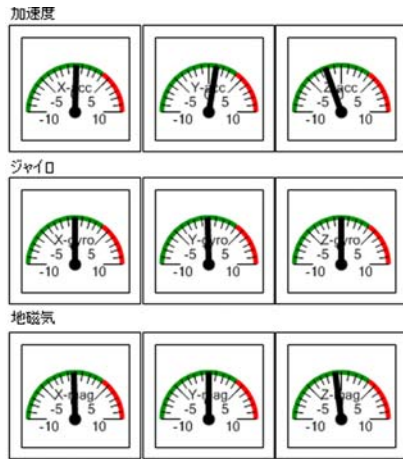


図13 加速度，ジャイロ，地磁気情報の受信例

図4に示した制御用ECUはCANのメッセージによって走行を制御することができる。移動体プラットフォームは前進後進の他、前側の2つの車輪と後ろ側2つの車輪を独立に操舵できる。図11に示すGatewayにWebサーバの機能を持たせ、一般のブラウザから走行の指示を与えることができる。操作画面を図14に示す。この画面は後輪の操舵は行っていない。前進または後進中に画面の後進または前進ボタンを押下すると、サーバ側で一度停止状態にしてから、後進または前進するように制御している。図14は車両の指示のみであるが、車両の状態を表示させることも容易である。Gatewayを追加することで、遠隔操作や遠隔監視が容易に行えるようになった。



図14 インターネット経由での車両の制御画面

4. 通信制御システムへ接続可能な追跡センサ

4.1 レーザセンサ

本通信制御システムではEthernetインターフェースを設けたことから、Ethernetでデータを出力するセンサの活用も容易になった。本研究では移動車両の周辺監視等によく使われているレーザセンサを用いて、周辺監視についての有効性に関する試験を行った。

試験は車両が人を追跡する用途を想定し、レーザセンサを用いて人の検出を行った。使用したレーザセンサは北陽電機

製UST-10LXで周囲270度の範囲にある物体までの距離を測ることができる。図15にセンサの外観を示す。

このセンサを用いて会議室内において人の追跡試験を行った。初期条件として、センサの近傍(0.5m以内)かつ正面(図16の縦方向)に人が位置することとした。図16において、×はセンサの位置を示す。+はレーザセンサの検出結果であり、何らかの反射物があることを示している。○は検出した結果から、初期条件を満たして、人として検出した結果である。検出後、追跡処理を行うことで、人の検出を継続できる。追跡している様子を図17に示す。図17において、人がセンサから遠ざかり約5m離れても検出し追跡していることを示す。

追跡した座標等の結果をCANのメッセージで制御用ECUに送信することで、車両が人を追跡するなどの走行制御に活用可能であることがわかった。

4.2 電波を用いた方位センサ

レーザは直進性が高く障害物があると検出が難しくなる特性がある。そこで、電波を用いて追跡対象の方位を計測するセンサの試作を行った。計測原理を図18に示す。検出対象に送信機を持たせ、計測側で2本のアンテナ(S₁, S₂)で電波を受信する。その際、受信電波の位相差から方位を計測する。

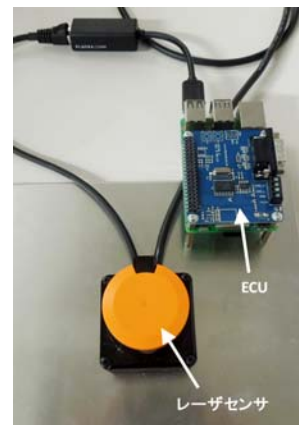


図15 レーザセンサの外観

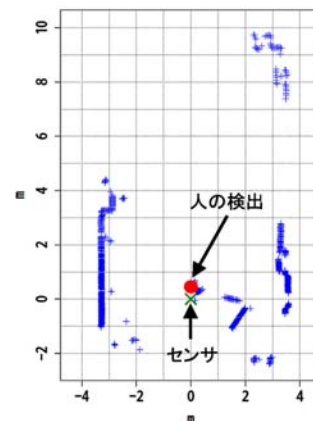


図16 レーザセンサによる人の検出結果

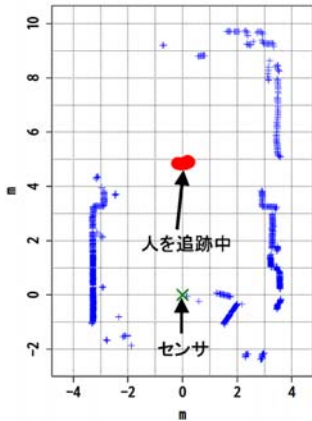


図17 レーザセンサによる人の追跡結果

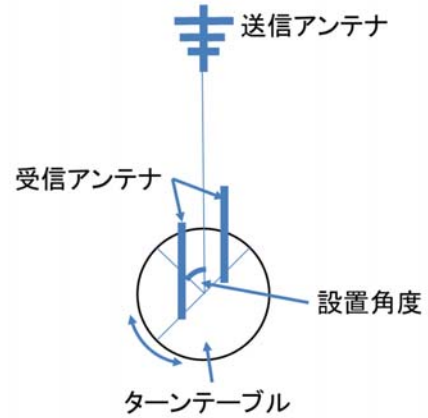


図20 計測試験の方法

位相差の計算は次々に更新されるデータを遅滞なく処理するため、FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いた。FPGAはAltera社製 (現Intel) Cyclone Vを使用した。試作した計測システムを図19に示す。電波は図19の右側にある基板で受信しA/D変換され、左側のFPGA基板に送られる。FPGA基板では位相差の計算を行う。

電波暗室において、計測試験を行い、この計測システムを検証した。試験は図20に示すようにターンテーブル上に計測システムの受信アンテナを設置する。送信アンテナと受信アンテナの設置角度を変えて、計測システムから得られた送信アンテナの方位角度を計測する。設置角度の変更はターンテーブルを回転させて行う。図21に計測試験の様子を示す。



図21 電波暗室における計測試験

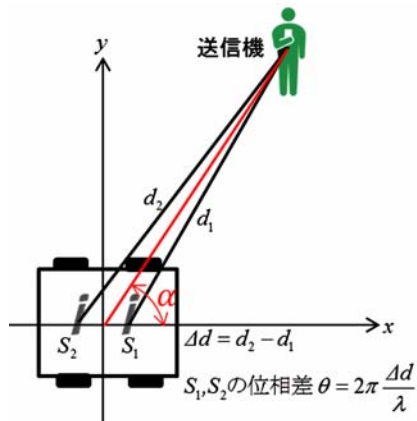


図18 検出原理



図19 計測システム

試験結果を図22に示す。受信アンテナに対する送信アンテナの設置角度と試験結果から求めた計測角度の誤差は最大8度であった。方位の検出のための計測誤差としてはやや大きいですが、試作した計測システムはサンプリング周波数などのパラメータを調整することで精度を向上させることが可能である。

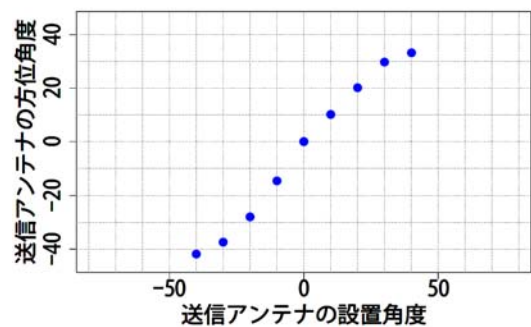


図22 送信アンテナの方位角度の計測結果

5. まとめ

CANによる通信を制御システムの軸にすることで、センサなどの追加接続が容易になり、制御手法の統一化を図るこ

とができた。また、データの送受信の手段としてCANのメッセージを使うため、センサの追加や、他のネットワークへの使用も容易になり、開発の効率化が期待できる。

また、移動車両の走行制御に関わる各種センサの試験をあわせて行った。その結果、電波による対象物追跡の有効性を明らかにし、走行制御の高度化に寄与することがわかった。今後は、多様なセンサを本通信制御ネットワークに接続し、高度な情報処理を行うことで、走行制御の高度化を図る。

参考文献

- 1) 鈴木慎一・多田達実・三田村智行他：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.313，2014
- 2) 多田達実・鈴木慎一・三田村智行他：ISOBUSポテトハーベスタの開発，北海道立総合研究機構工業試験場技術成果支援事例集，2015
- 3) 堤大祐・中西洋介・万城目聡他：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.312，2013
- 4) GNSSとは，http://terras.gsi.go.jp/geo_info/GNSS.html
- 5) UART，<https://ja.wikipedia.org/wiki/UART>

量子化学計算を用いた魚油のテラヘルツ帯吸光度分析に関する研究

宮崎 俊之

Terahertz Absorption Analysis of Fish Lipid using Quantum Chemical Calculation

Toshiyuki MIYAZAKI

抄 録

魚油中には不飽和脂肪酸が多量に含まれており、漁獲直後から急速に品質が劣化する。本研究では、分子の吸光度解析が可能な量子化学計算を用い、各種脂肪酸の種類・構造によるテラヘルツ帯における吸光度の違いについて解析を試みた。これらの解析に基づき、テラヘルツ帯分光により品質劣化を計測できる可能性を見出した。

キーワード：量子化学計算，テラヘルツ波，FT-IR，分光分析

1. はじめに

魚油の主要成分である不飽和脂肪酸は、酸素や光、水分などにより容易に品質が劣化する（図1）。魚が新鮮な状態においては、大きな分子式を持つ不飽和脂肪酸は先端にあるカルボニル基によりグリセリンと結合し、トリグリセリド（中性脂肪）となって魚油中に存在している。漁獲後に生体活動が止まり、酸素、光等にさらされることによりトリグリセリドは急速に分解される。この際の複雑な劣化過程を評価するため、従来は劣化に伴う化学変化で生成される物質に着目し、その生成量により劣化度を評価してきた。しかし、これらの生成量に基づく劣化度判定は化学的手法に基づくものであるため、生産・加工・流通の現場や消費の場において簡易かつ迅速に魚油の劣化状態を計測することが難しかった。

本研究では、即時性が高い分光計測技術を魚油品質劣化計測に活用するため、分子の構造に関する情報が得られるテラヘルツ帯（THz帯：0.1～30THzの電磁波）に着目し、魚油中の脂肪酸の吸光度解析を、THz帯FT-IRによる実測と量子化学計算によるシミュレーションの両面から試みた。

2. テラヘルツ帯における魚油吸光度

本研究で使用したTHz帯FT-IR（日本分光製FT/IR6300FV）を図2に示す。測定には液膜透過法を使用する。本装置はビームスプリッターや検出器を改造しており、50～650cm⁻¹のTHz帯で使用することが出来る。北海道で漁獲されたイワシ、サ

バ、マガレイ、キタノホッケを用い、抽出した魚油について、THz帯FT-IRを用いて取得した吸光度を図3に示す。

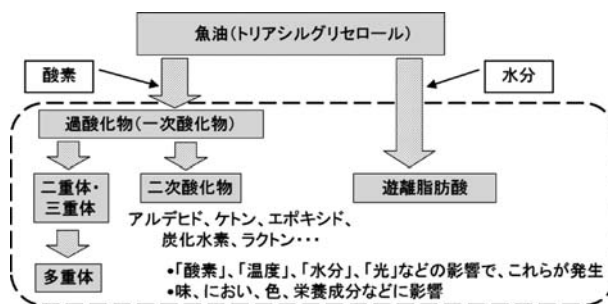


図1 魚油の品質劣化



図2 THz帯FT-IR（日本分光製FT/IR6300FV）

スペクトルは複数の明瞭・急峻なピークを有しており、次に示す2点が明らかとなった。

- ① 魚油では、水分子でみられる大規模な水素結合ネットワークが発生しておらず、広帯域なピークが見られない。
- ② 魚種によらず、ほぼ同一位置に吸光ピークを持っている。

事業名：経常研究

課題名：テラヘルツ波を用いた簡易計測技術に関する基礎研究

また本研究では室温環境下で5～6時間経過した魚油をTHz帯FT-IRで再測定した際に、品質劣化の極初期段階で特徴的な変化を生じることを見出した(図4)。この変化が何によりもたらされたものか、そのメカニズムを知ることで、「初期段階における魚油品質劣化の新たな計測法」として活用できる可能性がある。

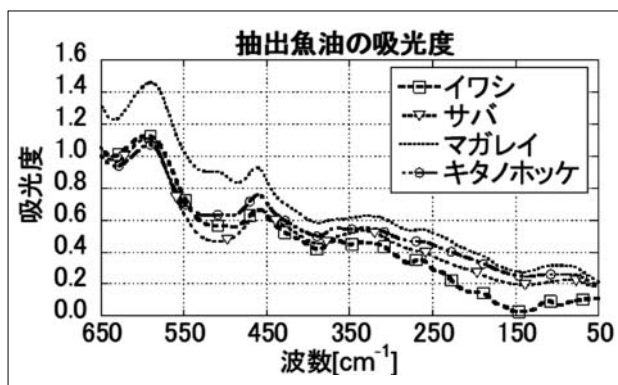


図3 魚種によるテラヘルツ帯吸光度の差異

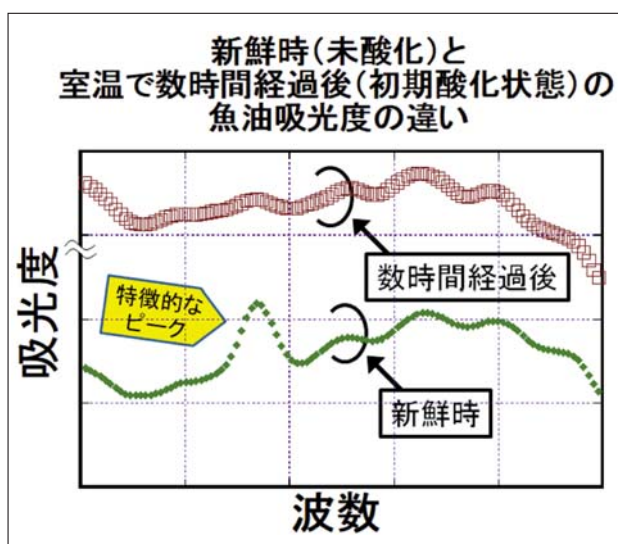


図4 魚油品質劣化に伴うTHz帯吸光度の変化

3. テラヘルツ帯における量子化学計算の適用

テラヘルツ帯分光で捉えた吸光ピークの消失現象のメカニズムを知るために、分子シミュレーションの適用を試みた。分子構造の解析には量子化学計算が広く利用されている。生命工学や創薬分野で量子化学計算は急速に発展しており、実世界における化学変化や現象を高い精度でシミュレーション可能になっている。分子構造が決まると、その結合手の長さ、原子の重さから分子固有の共振周波数が決まる。この吸光ピーク位置は量子化学計算において「HESSIAN行列」を求めることで特定できる。一般にTHz帯では以下の2つの理由により、量子化学計算の適用が難しいとされてきた。

- ① 水分子間ネットワークの影響により、広帯域かつ高強度の吸光ピークが帯域全域に現れるため、それ以外の個々の分子に帰属するピークを実測することが難しい。
- ② THz帯でピークを持つのは比較的大きな分子であり、一般的な計算機では計算時間が膨大となる。

本研究では上述の2つの課題を以下により回避、解決した。

- ① 抽出した魚油を解析対象とすることで、実測・シミュレーションにおける水分子の影響を排除した。
- ② 量子化学計算において適切な基底関数と解析モデルを選択することで、分子サイズが大きな脂肪酸に対しても計算が収束するようにした。

魚油に含まれる不飽和脂肪酸について、量子化学計算による吸光ピーク解析を行った計算例を図5に示す。分子鎖の長さや形状の違いにより、各脂肪酸に特有の吸光ピークが生じることがわかる。

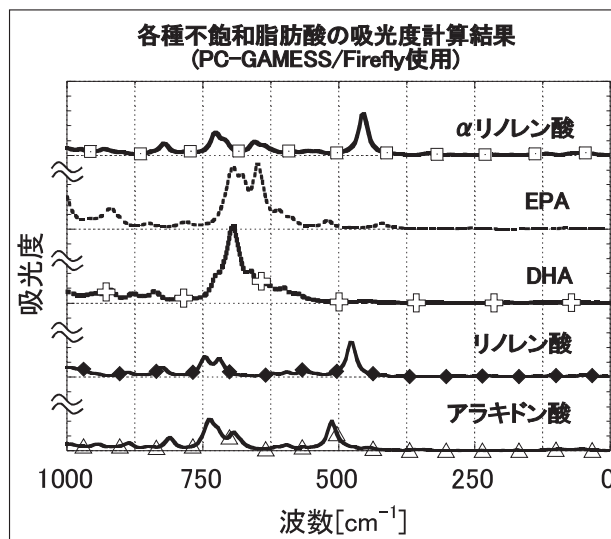


図5 量子化学計算による吸光ピーク解析例

量子化学計算の有意性を確認するために、構造が一部異なる2つの脂肪酸(EPAエチルエステル, EPA遊離脂肪酸)について、THz帯FT-IRを用いた吸光度実測値と、量子化学計算による吸光ピーク解析結果を比較した。図6の吸光度実測値からは、2つの分子における明瞭な差異がTHz帯で現れることがわかる。また明瞭に存在する2つのピークについて精査すると、ピークAはエチルエステル、遊離脂肪酸の双方で共通にみられるのに対し、ピークBは遊離脂肪酸のみで観察される。この吸光度の差異は、2つの分子の構造的な差異である先端官能基(カルボキシル基)によるものであることが示唆される。

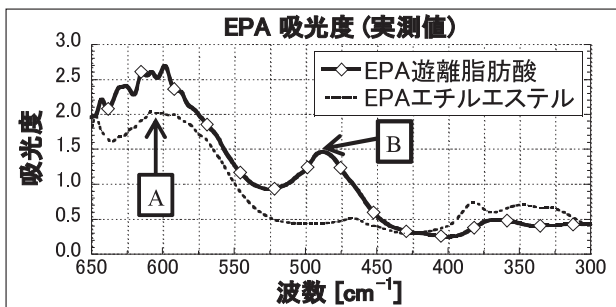


図6 EPAエチルエステルと遊離脂肪酸の吸光度 (THz帯FT-IRによる実測)

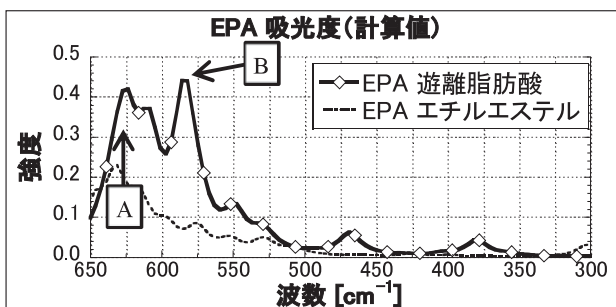


図7 EPAエチルエステルと遊離脂肪酸の吸光度 (量子化学計算シミュレーション)

図7は量子化学計算により吸光ピークをシミュレーションしたものである。分子間結合の評価などの要因で実験結果とシミュレーション結果の完全な一致には至っていないが、2つの分子の吸光度の差異が明確に現れている。

HESSIAN行列計算によりEPA遊離脂肪酸の解析を行った結果を図8に示す。これにより各吸光ピークに対する振動部位と振動モードを特定することができた。この解析から、ピークAはC-H鎖（炭素鎖）の調和的な振動（ねじれ）によるものであり、ピークBはカルボキシル基の変角・回転振動によるものであることを裏付けることができた。

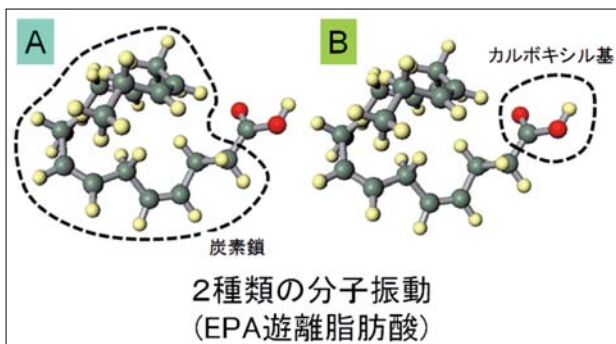


図8 吸光ピークの帰属（振動部位）解析

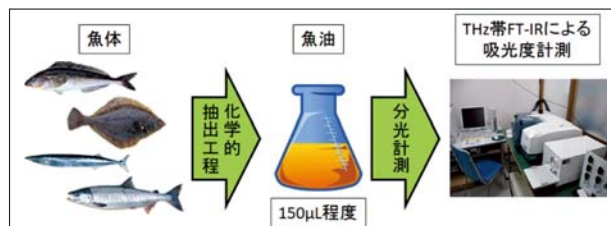


図9 現在の魚油吸光度計測フロー (魚油抽出工程が必須)

4. おわりに

本研究では量子化学計算がTHz帯の魚油解析で有用であること、また従来は解析が難しかったTHz帯における吸光ピーク帰属問題にも適用できる可能性を見出した。本研究の成果を活用することで、図1で示した様な複雑な魚油品質劣化過程において、他の化学的手法では検出が難しい劣化のごく初期段階を計測できる可能性がある。

現在の計測手法の課題は、測定にあたり魚油抽出作業を伴うことであり（図9）、これが測定の手間を損ね、計測コストを上昇させている。今後は、メタマテリアルなどを用いた高機能なバンドパスフィルタの開発や、高感度なTHz帯検出器の開発などを行うことで測定精度と感度を上げる研究を実施し、低価格かつ専門家以外でも容易に使用可能な「魚油品質劣化計測装置」の開発を進める予定である。

吸着技術を用いた機能性糖鎖の脱色

吉田 誠一郎, 松嶋 景一郎, 鎌田 樹志
宮本 宜之*

Decolorization of Oligosaccharides by Adsorption

Seiichiro YOSHIDA, Keiichiro MATSUSHIMA, Tatsuyuki KAMADA
Nobuyuki MIYAMOTO*

抄 録

高分子糖鎖である「グルコサミノグリカン (GAG)」を低分子化したGAGオリゴマーは、高分子糖鎖と比較して生体への吸収性が増加した新しい糖鎖医薬品として期待されている。これまでの検討により、当场が保有する「高温・高圧水マイクロ化学プロセス」を利用してGAGオリゴマーを効率的に得ることに成功した。しかし、得られたGAGオリゴマーは製造プロセスの過程で着色しており、商品価値をさらに高めて医薬品や試薬グレードの商品に展開するためにはGAGオリゴマーを脱色する精製プロセスを構築する必要がある。そこでGAGオリゴマーの精製プロセスとして活性炭による脱色プロセスの構築を検討した。

キーワード：グルコサミノグリカンオリゴマー、高温・高圧水マイクロ化学プロセス、吸着、脱色、活性炭

1. はじめに

グルコサミノグリカン (GAG) は、アミノ糖とウロン酸、あるいはアミノ糖とガラクトースの二糖単位からなる繰り返し構造を有する高分子糖鎖の一種である。GAGは生体内で重要な機能を担っており、医薬品や食品、化粧品の分野で注目を集めている機能性糖鎖である。このGAGを低分子化して得られるGAGオリゴマーは高分子のGAGに比べて生体への吸収性が高く、新たな医薬品としての利用の可能性を有している。これまで当场では高温・高圧水マイクロ化学プロセスを用いることで、北海道の未利用水産資源から抽出したGAGを効率的に低分子化する技術を開発した。本研究ではGAGオリゴマーの純度を向上し、医薬品や試薬グレードの商品へと用途を拡大する目的で、着色成分を除去するプロセスの構築を検討した。

2. 回分式脱色試験

2.1 脱色度の時間変化

はじめに、市販の脱色用活性炭をいくつか選定し、GAG

オリゴマー水溶液の回分式脱色試験を実施した。試験では、GAGオリゴマー水溶液に0.5～2 wt%となるように活性炭を添加し、これを25℃の恒温槽で振とうした。所定時間ごとにサンプリングした溶液を0.45 μmのメンブレンフィルターでろ過して活性炭を除き、ろ液の吸光度 (420nm) を測定した。活性炭ごとの接触時間と脱色割合の関係を図1に示す。どの活性炭を用いた場合でも脱色は24時間以内にはほぼ平衡に達しているが、平衡時の脱色割合には差があることがわかる。特に活性炭A, B, Cでは48hの時点での脱色割合は約96%であるのに対し、活性炭Dでは67%であった。この差の原因を調査するために、それぞれの活性炭の窒素吸脱着測定を行い、活性炭の細孔特性の評価を行った。

食品の着色の主原因であるメイラード反応は還元糖とアミノ化合物が加熱により反応し、高分子量の褐色色素 (メラノイジン) が生成する反応である。GAGオリゴマーの水溶液にはGAGだけでなく、原料由来のタンパク質も含まれているため、GAGオリゴマー水溶液の着色物質の主成分はこれらが反応して生成したメラノイジンと考えられる。メラノイジンの分子量や分子サイズを正確に見積もることは困難であるが、GAGオリゴマーとタンパク質が反応して生成した高分子量の色素であり、比較的分子サイズが大きいと予想される。よって、GAGオリゴマー水溶液の着色成分を吸着できる細孔はメソ細孔 (2～50nm) であると考えられる。窒素の吸着等温線からDollimore-Heal (DH) 法¹⁾により活性炭

* 丸共バイオフーズ株式会社, * Marukyou Bio Foods Co. Ltd.

事業名：短期実用化

課題名：機能性糖鎖の製造技術に関する研究

のメソ細孔容積を計算し、その結果を表1にまとめた。表1より、平衡時の脱色割合が高い活性炭A, B, Cはメソ細孔容積が0.79~1.00cm³/gと活性炭Dの4倍以上大きいことがわかる。前述したようにGAGオリゴマー水溶液に含まれるメラノイジンは分子サイズが大きくメソ細孔に吸着すると予想されるため、メソ細孔容積の大きな活性炭A, B, Cが高い脱色割合になったものと考えられる。

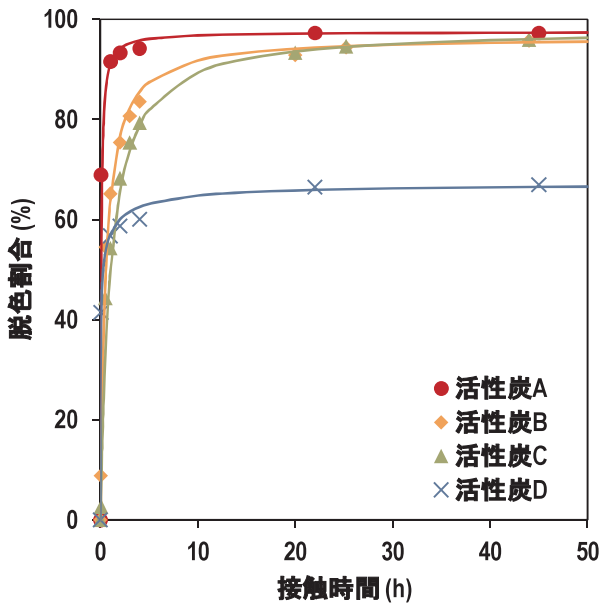


図1 GAGオリゴマー水溶液の脱色割合及び接触時間の関係 (25°C, 活性炭添加量 1 wt%)

表1 平衡時の脱色割合とメソ細孔容積の関係

活性炭	平衡時の脱色割合	メソ細孔容積 (cm ³ /g)
A	97%	1.00
B	96%	0.79
C	96%	0.91
D	67%	0.18

2.2 白色度測定

活性炭と48h接触させたGAGオリゴマー水溶液を凍結乾燥して得られた粉末 (GAGオリゴマー粉末) の白色度を測定した。GAGオリゴマー粉末をポリ袋に入れ、できるだけ平坦にならした後、ポリ袋の上からハンター白色度試験機で白色度を測定した。粉末の白色度を図2に示す。水溶液の脱色割合が67%の場合 (活性炭D), 得られる粉末の白色度は85%であったが、水溶液の脱色割合が96から97%の場合 (活性炭A, B, C), 粉末の白色度は89から90%となっていた。この結果からGAGオリゴマー水溶液を脱色することで白色度の高い粉末が得られることを確認した。

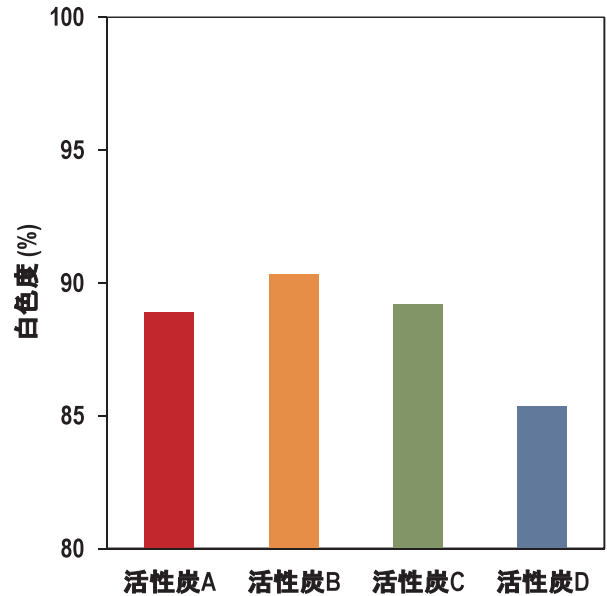


図2 白色度測定の結果

2.3 脱色の等温線

それぞれの活性炭の脱色能力をより詳細に検討するため、活性炭の添加量を変えた脱色試験を実施した。得られたデータを整理するために、活性炭重量あたりの脱色度合い x を次のように定義した。

$$x = (A_0 - A_e) \frac{V}{m}$$

ここで A_0 , A_e はそれぞれ初期および平衡時の吸光度, V は水溶液の重量, m は活性炭の重量である。平衡時の吸光度に対して脱色度合い x をプロットすれば、吸着における吸着等温線に相当する図3が得られる。活性炭A, B, Cでは類似した等温線が得られたが、活性炭Dではそれらから外れた領域の等温線が得られた。得られた等温線を定量的に評価するために、吸着における以下のFreundlich式¹⁻³⁾に相当する曲線を用いて得られたデータをフィッティングした。

$$x = kA_e^{1/n}$$

ここで, n , k はそれぞれ等温線のフィッティングパラメータである。フィッティングにより得られたそれぞれのパラメータを表2に示す。Freundlich式は実験式ではあるが, n は吸着質と吸着剤の親和力の強さ, k はそれら親和力と吸着容量を意味すると考えられている^{1,2)}。今回の系でも同様の議論が成り立つと仮定すると, 活性炭Dは n の値が0.2とほかの活性炭に比べて低く, 着色成分と活性炭の親和力が弱いと考えられる。前述したように活性炭Dは着色成分を吸着できる大きさのメソ細孔がほかの活性炭に比べて少なく, 着色成分は細孔以外の活性炭表面に弱く保持されていると考えられる。

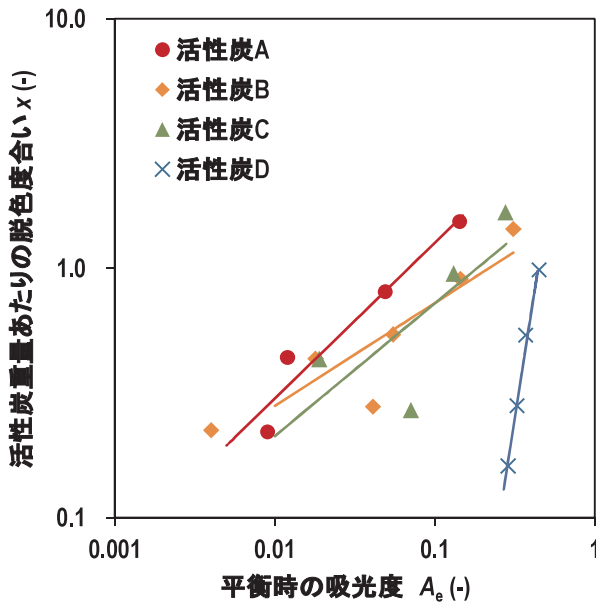


図3 GAGオリゴマー水溶液の脱色の等温線 (25°C)

表2 等温線から得られたパラメータ

活性炭	k	n
A	5.3	1.6
B	2.5	1.9
C	1.9	2.4
D	28.7	0.2

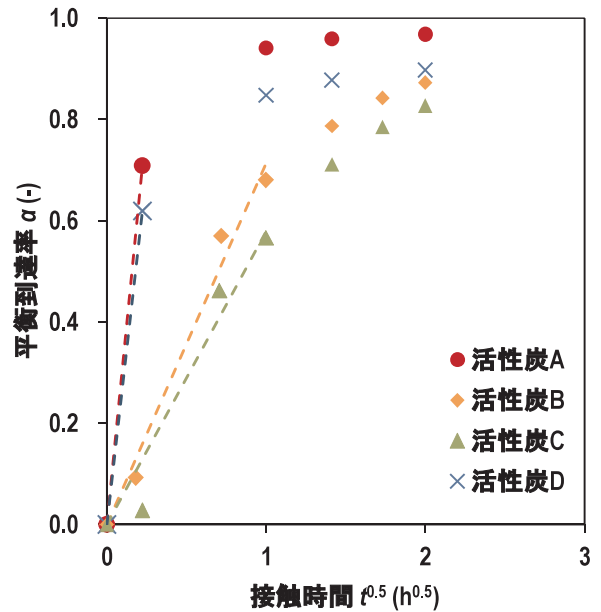


図4 脱色速度のBoydプロット

表3 Boydプロットから得られたパラメータ

活性炭	$D_p(\mu\text{m})$	$k'(1/\text{h}^{0.5})$
A	56	3.2
B	800	0.7
C	490	0.6
D	30	2.8

2.4 脱色速度の解析

続いて、脱色の速度について詳細に検討した。吸着速度を評価する手法は様々なものがあるが、今回はBoydらの手法^{1,3)}を参考にして吸着速度を評価した。Boydらは吸着初期における近似式として、以下の式を導いた。

$$\alpha = \frac{A_0 - A_t}{A_0 - A_c} = \frac{12}{D_p} \sqrt{\frac{D'_1 t}{\pi}} = k' \sqrt{t}$$

ここで、 α は平衡到達率、 A_t はある時点での吸光度、 D_p は活性炭の粒子径、 D'_1 は有効拡散係数、 t は接触時間、 k' は粒子内拡散速度定数を表す。Boydらの手法に従ったプロットを図4に、計算された各パラメータを表3に示す。粒子径が小さな(数十 μm オーダー)活性炭A、Dは着色成分が速やかに活性炭内部まで拡散するため速度定数は大きい。それに対して粒子径の大きな(数百 μm オーダー)活性炭B、Cでは着色成分が活性炭内部まで拡散するのに時間がかかるため、速度定数は小さくなっている。

3. 圧力損失の推算

回分式脱色試験により、GAGオリゴマー水溶液の脱色にはメソ細孔を有する活性炭が適していることが明らかとなった。実際の脱色プロセスを考えた場合は、脱色後の活性炭を分離するプロセスの煩雑さを避けるために流通式のプロセスを適用することが望ましい。流通式の脱色は活性炭を充填したカラムに対して処理液を連続的に通液することで実施されるが、この際カラムの圧力損失を考慮する必要がある。カラムに高い圧力損失が生じる場合には、偏流によるカラムの利用効率の低下やポンプへの負荷が生じる可能性がある。よって、できるだけ低い圧力損失を示す活性炭を利用すべきである。そこでまずは、回分式脱色試験で検討した活性炭を充填したカラムの圧力損失を推算することとした。粒子充填カラムの圧力損失を推算する式として、以下に示すKozeny-Carmanの式⁴⁾を用いた。

$$\frac{\Delta P}{L} = 36k \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu u_s}{D_p^2}$$

ここで、 ΔP はカラムに生じる圧力損失、 L は充填高さ、 k はKozeny定数、 ϵ は充填層の空隙率、 μ は流体の粘度、 u_s は空塔速度、 D_p は活性炭の粒子径である。今回の計算では、 k と ϵ は、それぞれ5、0.4を用いた⁴⁾。また、 μ は20°Cの水

の値 (0.001Pa・s) を用いた。空塔速度と圧力損失の関係をグラフ化したものを図5に示す。活性炭B, Cを充填したカラムの圧力損失は, A, Dのそれらに比べて約2から3オーダー低い値を示すことがわかる。これは, Kozeny-Carmanの式からも明らかであるが, 圧力損失が粒子径 D_p の二乗に反比例するためである。この結果から, 圧力損失という視点で見ただけでは活性炭Bが流通脱色に適した活性炭であるといえる。以降の流通脱色試験では活性炭Bを用いた。

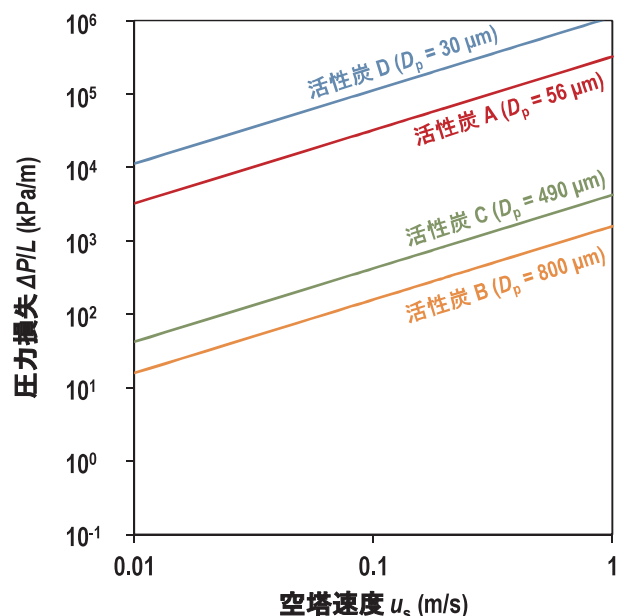


図5 活性炭充填カラムの圧力損失

4. 流通脱色試験

流通式脱色試験の手順を以下に示す。110°Cで1時間加熱処理した活性炭Bを3g秤量し, 脱イオン水に加えた。得られた活性炭のスラリーをダイヤフラムポンプで脱気し, 細孔の中に含まれる気体を除いた。このスラリーを, 空気が入らないようにガラス製カラム (内径12mm) に充填した。カラムの前後には石英ウールを充填した。得られた活性炭の充填層の高さは185mmであった。GAGオリゴマー水溶液を所定の滞留時間になるようにポンプでカラムに通液させた。カラム出口をUV-vis測定装置のフローセルに接続し, 420nmにおける吸光度を連続的に測定した (図6)。

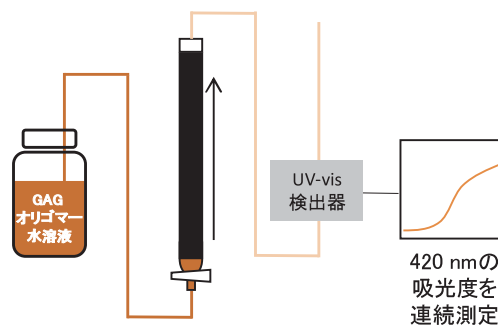


図6 流通脱色試験の模式図

GAGオリゴマー水溶液の滞留時間を変えて得られたカラム出口の吸光度変化を時間に対してプロットしたものの (破過曲線) を図7に示す。通液の初期では, 着色物質が全て吸着するためにカラム出口の吸光度はゼロである。時間の経過とともにカラム内部で吸着が起こっている領域 (吸着圏) がカラムの下流に移動し, この吸着圏がカラム出口に到達した段階から徐々に吸光度が増加する (破過)。吸着対象の濃度が入り口濃度に対して5%程度になった段階を破過とする場合が多い⁴⁾。吸着が平衡に到達していれば, 吸着容量は一定であるため, 破過するまでの総通液量は滞留時間によらない。一方, 今回の系では滞留時間が長くなると雑菌の繁殖などが懸念されることから, 滞留時間をできるだけ短くとした非平衡での脱色操作が必要となる。よって, 非平衡の脱色プロセスの設計には滞留時間と処理可能な容量の関係を明確にする必要がある。今回は, 脱色という観点からカラム出口の吸光度が供給液の5%になった時点で脱色操作を打ち切ることとし, その時点までの総通液量を処理可能な液量とした。滞留時間と処理可能な液量の関係を図8に示す。図8より, 滞留時間の増加とともに, 処理可能な液量が増加することがわかった。これは, 滞留時間が長いほど吸着が平衡に向かって進み, 吸着容量が増加したためと考えられる。このデータをもとに, 任意の滞留時間で通液した際の処理可能容量を見積もることができ, 流通式脱色プロセスの設計が可能となる。

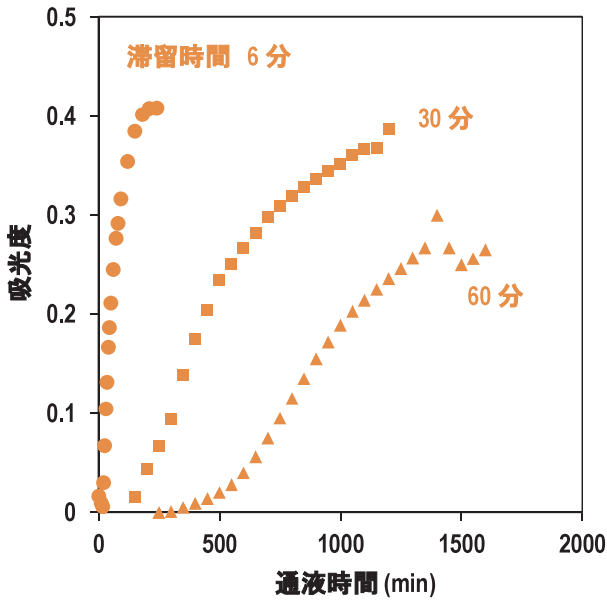


図7 流通式脱色試験の結果（破過曲線）

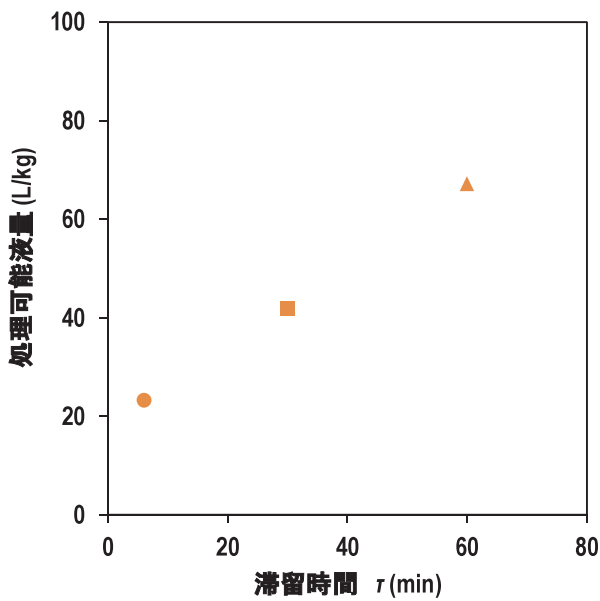


図8 滞留時間と処理可能な液量の関係

5. 実機での検討

今回得られたデータを元に、実プロセスでのGAGオリゴマー精製を行った。カラムに活性炭Bを充填し、GAGオリゴマー水溶液を通液させ脱色処理を行った（図9）。脱色されたGAGオリゴマー水溶液をスプレードライ（図10）で処理することでGAGオリゴマーの粉末を得た。今後は医薬品や試薬グレードの商品へと展開していく予定である。



図9 実際の流通式脱色プロセスの写真



図10 スプレードライによる乾燥

6. おわりに

本研究では、GAGオリゴマーの精製を目的として、活性炭を用いたGAGオリゴマー水溶液の脱色を検討した。回分式脱色試験により脱色用活性炭のスクリーニングを行い、メソ細孔容積の大きな活性炭が、GAGオリゴマーの脱色に適していることを見出した。続いて、選定した活性炭を用いて流通式の脱色試験を実施し、滞留時間と処理可能なGAGオリゴマー水溶液の液量の関係を明らかにした。ラボでの脱色試験の結果を元に実際の連続式脱色を実施した。

参考文献

- 1) 近藤精一・石川達雄・安部郁夫著：吸着の科学，丸善株式会社，228PP.，（1991）
- 2) 柳井弘著：吸着工学要論，共立出版株式会社，250PP.，（1977）
- 3) D. M. Ruthven：Principles of Adsorption and Adsorption Processes，John Wiley & Sons, Inc.，464PP.，（1984）
- 4) 橋本健治・萩野文丸編：現代化学工学，産業図書株式会社，386PP.，（2001）

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

松嶋 景一郎, 吉田 誠一郎, 水本 秀二*, 山田 修平*, 菅原 一幸**

Highly Selective and High-Speed Depolymerization of Polysaccharides Using High-Pressure-High-Temperature Water Micro Chemical Process

Keiichiro MATSUSHIMA, Seiichiro YOSHIDA,
Shuji MIZUMOTO*, Shuhei YAMADA*, Kazuyuki SUGAHARA**

キーワード：マイクロ化学プロセス, 高温・高圧水, 環境調和型プロセス, 多糖, オリゴ糖

1. はじめに

多糖は、増粘剤やコーティング剤などとして、かねてより食品や製紙・繊維工業など、様々な分野で利用されている。近年では、細胞認識といった生体内での機能の解明が急速に進み、医薬品への応用に需要が高まっている。

多糖を産業的に利用する際に、分子量を調整する「低分子化」は極めて重要な反応処理である。このとき、低分子化された多糖の機能が構成糖の数や官能基などの構造に依存するため、官能基の脱離などの副反応を抑え、単位糖同士を繋ぐグリコシド結合のみを開裂させる高い選択性を持った分解法が要求される。工業的には酵素反応が用いられているが、酵素の価格や反応時間等に課題があり、機能性を期待されながら製品化されていない多糖が数多く存在する。また、市場展開されている多糖についても、製造法の改善や新規製造法の創出が求められている。

一方、水の機能を活用した高温・高圧水マイクロ化学プロセス（HP・HTW- μ CP）が、次世代の環境調和型・高効率製造技術として実用化が期待されている。我々はこの先端技術を用いて、高価な酵素や触媒を用いずに水のみで、多糖の低分子化を効率的に促進させる反応技術の開発を進めている^{1,2)}。なかでも医薬品等として広く利用されている高分子多糖「コンドロイチン硫酸」について、オリゴ糖にまで高選択かつ高速で低分子化させるシステムを実生産スケールで構築しており、高分子と異なる機能や、高い生理活性が報告されてい

ながら、既存の酵素法では製造コストの問題があった「コンドロイチン硫酸オリゴ糖」の商品化に、既に成功している³⁾。

本報では、コンドロイチン硫酸以外の多糖で、オリゴ糖まで選択的に低分子化反応を促進させた研究例を紹介する。

2. 高温・高圧水マイクロ化学プロセス

2.1 概念

水は超臨界や亜臨界といった高温・高圧状態になると、イオン積や誘電率などが著しく変化し、反応性に富んだ物性を持つようになる。しかも、それらの物性を温度・圧力条件により連続で変化させることができる。この水の機能と、数百ミクロン以下の微小な流路を反応場に利用した連続・高速反応システムが、高温・高圧水マイクロ化学プロセスである。その概念を図1に示す。

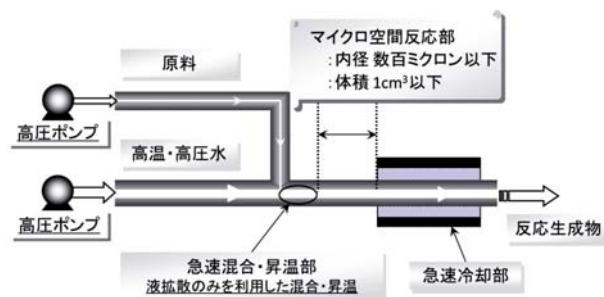


図1 高温・高圧水マイクロ化学プロセスの概念図

微小空間の特性から、流体の拡散のみによる混合、反応温度までの急速昇温、及び反応を急停止させる急速冷却ができる。すなわち、精密な反応時間・温度制御が可能で、これにより副反応が抑制され、反応選択性の向上が可能になり、水

* 名城大学, * Meijo University

** 北海道大学, ** Hokkaido University

事業名：経常研究

課題名：環境に配慮したバイオマス変換技術に関する研究

の高い反応性と相乗効果により、高速・高選択反応を実現できる。

2.2 高温・高圧水マイクロ化学プロセス処理ラボシステム

高温・高圧水マイクロ化学プロセスを用いてラボスケールで構築した多糖の低分子化システム（PS-DP_{syst}）を図2に示す。

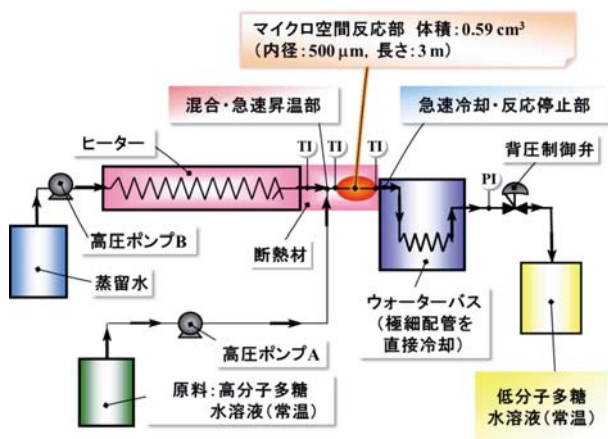


図2 低分子多糖製造ラボシステム

高圧ポンプAにて連続送液された常温の原料多糖水溶液は、ヒーターで加熱しながら高圧ポンプBにより連続送液された蒸留水と、反応部入り口で互いの拡散により精密混合され、所定の反応温度まで急速昇温される。また、反応部出口の極細配管を冷却することで混合液が急速冷却され、反応を急停止させる。これらの機構が精密な反応時間・温度制御を可能にし、高速・高選択で低分子化を促進させる。

なお、本研究では昇温効果を高めるため、蒸留水の流量は原料水溶液の3倍とした。また、マイクロ空間反応部は、内径500 μmのSUS316配管を用いて、空間体積を0.59cm³に調製した。

3. 多糖の低分子化

3.1 キトサン

カニやエビなどの甲殻類や、節足動物の外骨格の主成分であるキチンは、N-アセチルグルコサミンで構成されるホモ多糖である。多糖としては、セルロースに次ぐ資源量を誇り、その有効利用が検討されているが、構造が極めて強固であるため、溶解性・反応性が非常に乏しく、それ自体が商業的に利用されている量は少ない。キチンの多くは、図3に示す様に、脱アセチル化処理を行いグルコサミンのホモ多糖であるキトサンに変換することで、食品、化粧品や、工業、医薬等の分野で幅広く使用されている。また、キトサンのオリゴ糖は、食品として市場展開されているが、免疫賦活などの生理

活性について盛んに研究されており、機能性素材として注目されている。

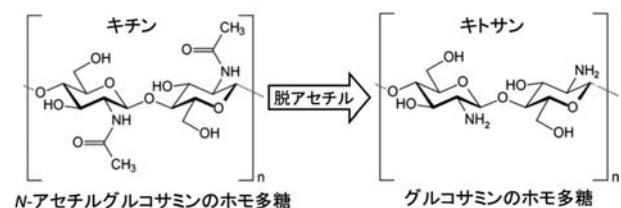


図3 キチンの脱アセチル化によるキトサンの生成

2.2節で示した低分子化システム（PS-DP_{syst}）を用いて、反応時間8.8秒、圧力10MPaの条件のもと、反応温度を調整し処理したときのキトサンの分子量変化を図4に示す。

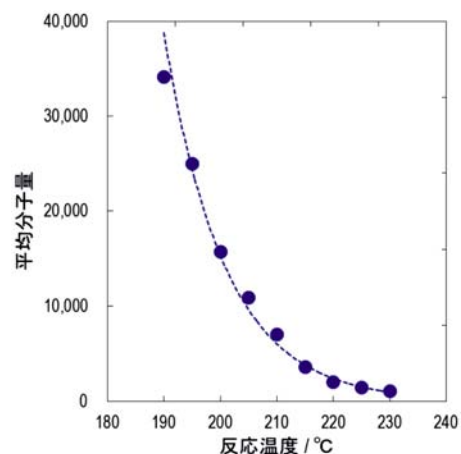


図4 HP・HTW-μCP処理によるキトサンの分子量変化

分子量15万以上の高分子キトサンを、1/150以下の分子量のオリゴ糖（約5糖）まで、酵素や触媒を用いずに、かつ官能基の脱離などの副反応を起こさずに高選択的に低分子化することができた。

キトサンオリゴ糖は、酵素を使用した多段階プロセスで製造されている。本プロセスは水のみで、分子量を精密に制御しながら低分子化できるため、精製工程の簡便化も可能になると考えられ、産業的に有効な方法になり得ると期待できる。

3.2 ヒアルロン酸

ヒアルロン酸（HA）は、我々が商業化に成功したコンドロイチン硫酸（CS）と同じくグリコサミノグリカン（GAG）に分類される多糖の一種で、図5に示す様にグルクロン酸とN-アセチルグルコサミンの2糖が基本単位となり、それが規則的に繰り返され分子量が100万以上にもなる直鎖の高分子多糖である。

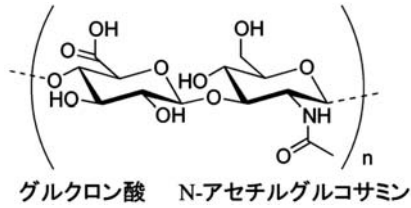


図5 ヒアルロン酸の構造

CSなど他のGAGと異なり硫酸基を持っていない、また、コアタンパク質と呼ばれるタンパク質に結合したプロテオグリカンとしては存在していない。しかしながら、他と同様に生体内で重要な役割を果たしており、関節軟骨では、アグリカン（プロテオグリカン）、リンクタンパク質と非共有結合し、超高分子複合体を作って、軟骨に弾力性を持たせている。そのため、現在のHAの主な市場は化粧品であるが、関節サポート素材としても広がっており、13~15万円/kgの高値で販売されている。また、そのオリゴ糖は世界的に最も研究されている多糖の一つで、特に高分子にない特異的な機能が多数報告されている4糖が注目されている⁴⁻⁶⁾。そこで、キトサンと同様にPS-DP Systを用いて、HAオリゴ糖、特に4糖を高収率で得られる反応条件の探索を行った。

反応時間8.8秒、圧力10MPaの条件下で、反応温度を調整し製造したHAオリゴ糖について、ゲルろ過クロマトグラフィーにより測定した分子量分布の結果を図6に示す。

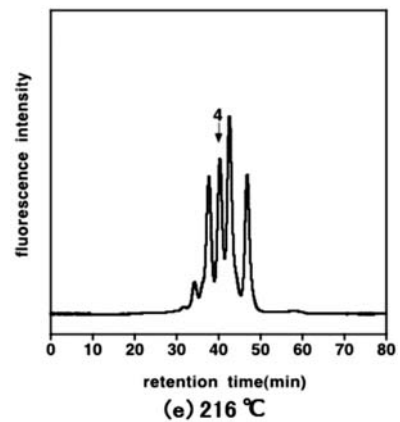
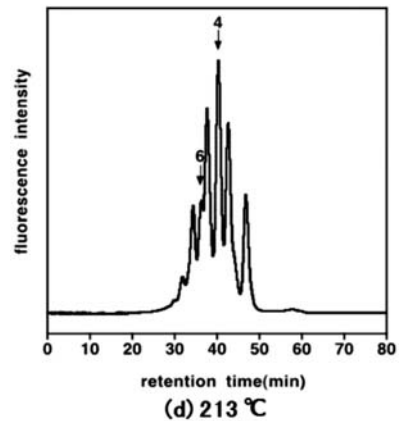
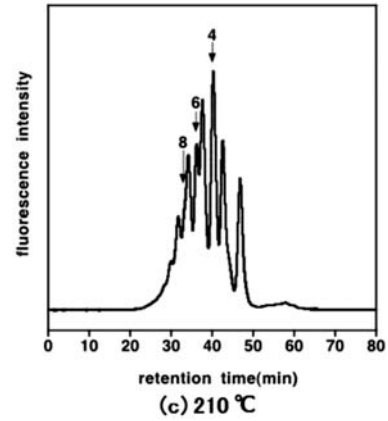
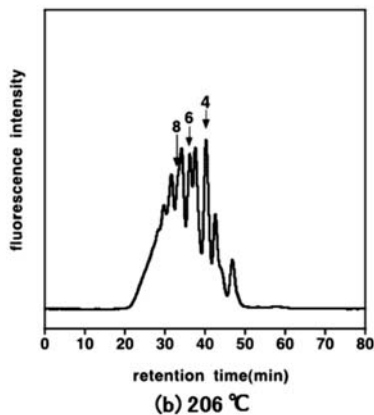
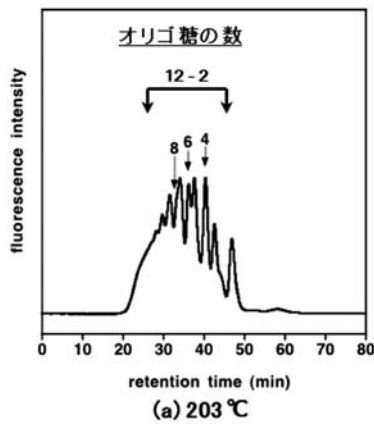


図6 HP・HTW- μ CP処理により得たヒアルロン酸オリゴ糖の分子量分布

この反応時間、圧力条件下で、高分子を残さず12糖以下まで低分子化する反応温度を探索したところ、2~12糖のオリゴ糖の全体の収率は、反応温度203°Cが最も高く59.8%であった。4糖の生成に注目すると、213°C処理の収率が8.6%、210°C処理が8.4%で、いずれも酵素反応の2倍以上の収率であったが、生成したオリゴ糖の4糖の占める割合としては、213°C処理が24.9%と最も高かったことから、後の分離精製工程を考慮すると、213°Cが最適と考えられた。

以上より、数十分から数時間かかる酵素反応と比較し、水のみを用いて10秒以下の高速、かつ高収率でHAオリゴ糖を製造することができた。

3.3 デルマトン硫酸

デルマトン硫酸 (DS) は、図 7 に示す様に硫酸化されたイズロン酸とN-アセチルガラクトサミンの2糖が基本ユニットとなるGAGで、皮膚や骨に多く存在し、コラーゲンと会合し、組織の弾性の維持に寄与している。医薬品、化粧品や機能性食品として利用されているが、その市場は大きくない。しかし、近年、生体系でDSが果たす重要な機能に関する研究が進められており、その解明が待たれている。

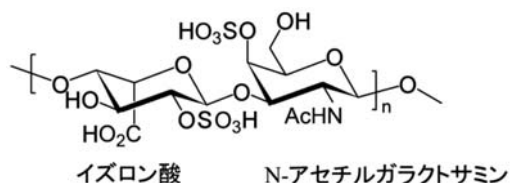


図 7 デルマトン硫酸の構造

これまでの糖鎖科学の研究で、GAGの生理活性機能が長い糖鎖全体にではなく、GAGのオリゴ糖単位のユニット構造に由来することが分かってきた。そこで、DSの機能解明に向け、PS-DPysystによりDSオリゴ糖を高収率で得る条件を検討した。

反応時間8.8秒、圧力25MPaの条件下で、反応温度を調整し検討したところ、図 8 のゲルろ過クロマトグラフィーによる分子量分布測定結果が示す様に180~190℃の範囲で12糖以下のオリゴ糖を効率良く製造できることがわかった。

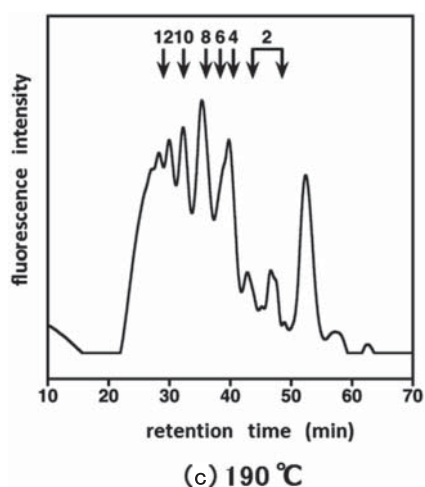
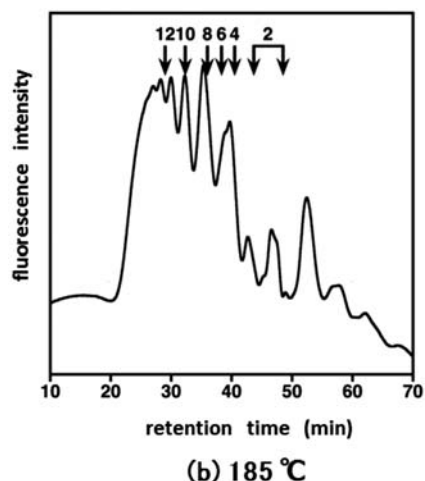
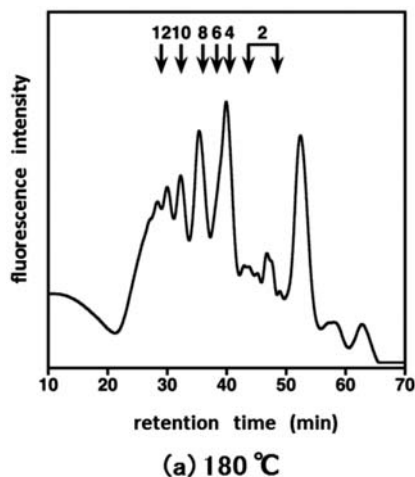


図 8 HP-HTW- μ CP処理により得たデルマトン硫酸オリゴ糖の分子量分布

また、DSの生理活性について評価するため、DSを生合成できないCHO細胞の変異株 (pgsA) に繊維芽細胞増殖因子-2 (FGF-2) とDSオリゴ糖を添加し、ウェスタンブロッティングでMAPキナーゼのリン酸化の亢進の有無で評価した。その結果、亢進が観察され、DSが血管形成、創傷治癒のための肉芽組織形成に作用する生理活性があることが確かめられた。

3.4 ヘパリン

ヘパリン (HPN) は、おもにイズロン酸とグルコサミンを基本単位とする不均一な構造のGAGで、図 9 の分子模型が示す様に、多数の硫酸基が結合している⁷⁾。抗凝固薬といった医薬品として、世界中で幅広く使用されており、特に低分子量ヘパリンは、副作用の少なさを理由に使用量が増えてきている。

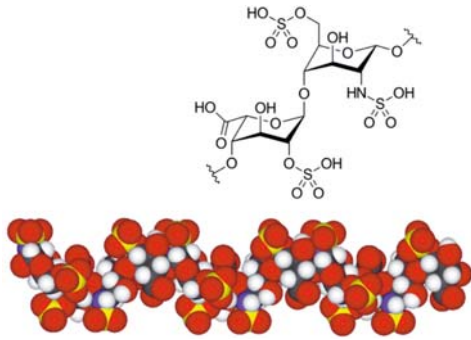


図9 ヘパリンの分子模型

低分子量ヘパリンは酵素反応により製造されているが、一般的に酵素処理で得られたオリゴ糖は、その末端に不飽和結合を有する構造をとるため、免疫原性が高いことが示されている。そこで、新たな低分子量ヘパリン製造法の提案を目的に、PS-DPsystによるHPNの分子量制御を検討した。

反応時間8.8秒、圧力25MPaの条件下で反応温度を変化させHPNを処理し、生成物の分子量分布をゲルろ過クロマトグラフィーにより測定した結果を図10に示す。

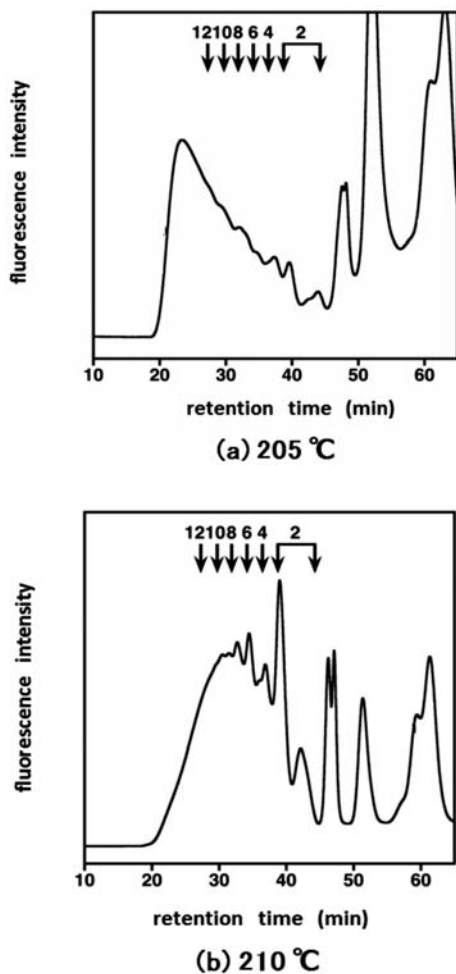


図10 HP・HTW- μ CP処理により得た低分子量ヘパリンの分子量分布

測定結果から、この条件下では10糖以上の低分子ヘパリンの生成には、反応温度205°C以下が、2～8糖のオリゴ糖の生成には、反応温度210°Cが適していることが示された。

4. まとめ

高温・高圧水マイクロ化学プロセスを利用し、多糖を高選択・高速で低分子化するシステムをラボスケールで構築した。

本システムで、キトサン・ヒアルロン酸・デルマトン硫酸・ヘパリンの低分子化を検討したところ、高価な酵素や触媒を用いずに、水のみで分子量を制御しながら反応を進めることができた。さらに、対象とする多糖の種類を変えても、反応条件を調整することで、マイクロ空間反応部を変えずに一つのシステムで適正な製造条件を見出すことができたことから、システムの汎用性も明確になった。

今後も引き続きマイクロ化学プロセスを用いて、糖類やアミノ酸等の天然物を対象に、環境負荷を低減した変換反応の検討を進めていく。

参考文献

- 1) K.Matsushima・H.Minoshima・Y.Ikushima・M.Nishizawa *et al.* : Decomposition Reaction of Alginic Acid Using Subcritical and Supercritical Water, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.44 Iss.25, pp.9626-9630, (2005)
- 2) S.Yamada・K.Matsushima・N.Miyamoto・K.Sugahara *et al.* : Mass Preparation of Oligosaccharides by the Hydrolysis of Chondroitin Sulfate Polysaccharides with a Subcritical Water Microreaction System, *Carbohydr. Res.*, Vol.371, pp.16-21, (2013)
- 3) 特許第6146733号
- 4) J. Wang・X. Wang・J. Wei *et al.* : Hyaluronan Tetrasaccharide Exerts Neuroprotective Effect and Promotes Functional Recovery After Acute Spinal Cord Injury in Rats, *Neurochem Res.*, Vol.40 Iss. 1, pp.98-108, (2015)
- 5) N.Wakao・S.Imagama・Y.Matsuyama・K.Kadomatsu *et al.* : Hyaluronan Oligosaccharides Promote Functional Recovery After Spinal Cord Injury in Rats, *Neurosci Lett.*, Vol.488 Iss.3, pp.299-304, (2011)
- 6) H.Yamanokuchi : Effects of Hyaluronan Tetrasaccharide on the Differentiation of Neuronal Cells and Oligodendrocyte Precursor Cells, *Kokubyo Gakkai Zasshi*, Vol.79 Iss.3, pp100-109, (2012)
- 7) <https://en.wikipedia.org/wiki/Heparin>

セルロースナノファイバー強化樹脂の材料特性

瀬野 修一郎, 吉田 昌充, 山岸 暢, 大市 貴志, 可児 浩, 松嶋 景一郎

Material Properties of Cellulose Nanofiber Reinforced Plastics

Shuichiro SENO, Masamitsu YOSHIDA, Tohru YAMAGISHI,
Takashi OHICHI, Hiroshi KANI, Keiichiro MATSUSHIMA

キーワード：セルロースナノファイバー強化樹脂, 曲げ特性, 温度, 吸水率

1. はじめに

近年, セルロースナノファイバー (CNF, 図1) は高強度・高弾性・低収縮率・低線膨張率などの特長を持ち, 持続性を有するバイオマス資源由来であることから, ガラス繊維, 炭素繊維に次ぐ樹脂強化用充填材として大変注目されている。そのCNF原料となるバイオマス資源は, 木材をはじめとして道内に豊富に存在し, より高度な産業利用が期待されている。

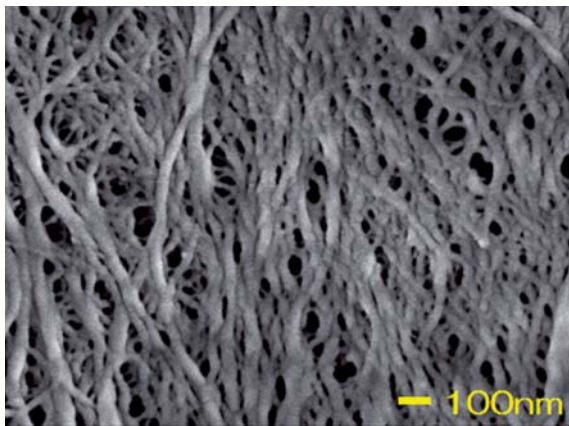


図1 セルロースナノファイバー

従来, 製品開発されてきた多くのCNFは, セルロースの機械的な解繊により製造されているため高価であり, また凝集を防ぐため水を含んだ製品がほとんどである。そのため一般的に乾燥していることが好ましい熱可塑性樹脂の充填材として使用するには, 取り扱いが困難であった。しかしながら, 安価なセルロース集合体であるパルプに化学変性を行った後,

事業名：経常研究

課題名：セルロースナノファイバー強化樹脂の成形加工技術に関する研究

溶融状態の熱可塑性樹脂とともに混練し, その高剪断力を利用し解繊し, 複合材料を製造する技術が近年開発され (パルプ直接混練法 [京都プロセス])¹⁾, これにより樹脂充填材としても比較的安価かつ取り扱いも容易な素材となる可能性が高くなった。

一方, 北海道は国内では寒冷な地域で亜寒帯気候に属し, 冬季には氷点下30℃を記録する地域もあるため, 低温における材料特性を把握することは非常に重要である。しかしながら, 今後普及が期待される最新の材料であるCNF強化樹脂の低温特性に関する報告例はほとんどない。そこで, CNF強化樹脂を作製し, 低温における材料特性について評価した。加えて温度依存性に関する傾向を掴むため, 高温における影響についても評価した。

また, セルロースは親水性であることから水を吸収しやすく, セルロースを主成分とする紙が含有水分量によって強度が変化することが知られている²⁾。そのため, CNF強化樹脂においても水分の有無によりその機械的強度や温度に対する影響が左右される可能性がある。そこで含水状態でのサンプルの材料特性についても評価した。

2. 実験方法

2.1 CNF強化樹脂の作製

市販の製紙用針葉樹晒クラフトパルプ (日本紙パルプ商事(株)) のエステル化により, アセチル変性パルプを作製した。その変性パルプを二軸混練機 (TEM-26SS, 東芝機械(株)) を用いて, ナイロン6 (PA6) 中でナノ解繊および複合化し, CNF含有率10%のCNF強化PA6 (以下, 10%CNF-PA6) のペレットを得た。得られたペレットから射出成形機 (EC100 SX, 東芝機械(株)) を用いて, ダンベル型試験片 (JIS K7139タイプA) を作製した (図2)。

また, 従来の補強繊維であるガラス繊維 (GF) と比較

するため、市販されているガラス繊維含有率30%のGF強化PA6 (CM1011G-30, 東レ (株)) にPA6 (CM1017, 東レ(株)) をブレンドし、希薄化することで、10%GF強化PA6 (以下、10%GF-PA6) を作製した。



図2 ダンベル型試験片
上) PA6, 下) 10%CNF強化PA6

2.2 電子顕微鏡観察

解繊後のパルプの繊維径を確認するため、CNF強化PA6中のPA6成分をヘキサフルオロイソプロパノールで溶解し、解繊後の繊維のみを抽出し、電子顕微鏡観察を実施した。抽出された解繊後繊維の表面に白金薄膜を蒸着し、FE-SEM (JSM-7001F, 日本電子(株)) で観察した。

2.3 3点曲げ試験

3点曲げ試験では、ダンベル試験片中央の平行部を用いてJIS K7171に準拠し、曲げ強さと曲げ弾性率を測定した。試験は射出成形直後の試験片に水分が入らないようアルミ袋や密閉容器で保管し、絶乾状態に近い状態で実施した。試験条件、使用した装置などの詳細は以下のとおりである。

試験速度：10mm/min.

支点間距離：64mm

試験温度：-40℃, 23℃, 80℃

試験装置：オートグラフAG-100kNXplus (株島津製作所)

2.4 吸水試験

吸水試験は、ダンベル型試験片 (JIS K7139 タイプA) を水中に浸漬し、恒温室 (23±2℃, 50±10%RH) にて一定時間静置後の重量を測定することで行った。吸水量は初期重量との差から求め、その吸水量を初期重量で除すことで吸水率を算出した。

含水状態での3点曲げ試験に供した試験片も同様の方法で調整した。試験片の吸水率は通常大気状態 (23℃, 60%RH) におけるナイロン6の平衡吸水率である3.5%及びその中間の1.7%を目安に調整し、曲げ試験を実施した。試験を実施した各試験片の実際の吸水率は、以下のとおりである。

PA6：1.7%, 3.5%

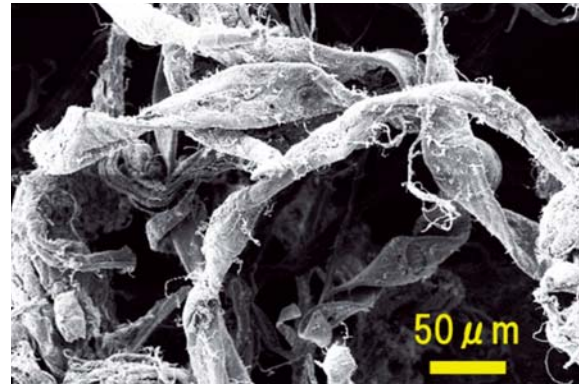
10%CNF-PA6：1.7%, 3.7%

10%GF-PA6：1.7%, 3.5%

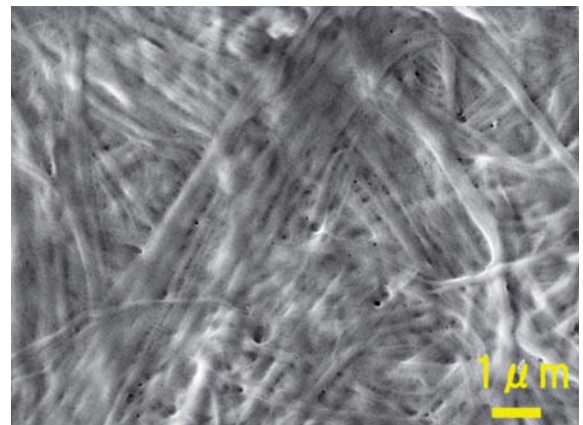
3. 結果と考察

3.1 解繊後パルプの電子顕微鏡観察

解繊後パルプの電子顕微鏡観察結果を図3に示した。30~50μmほどあった繊維径が50~200nm程度まで細くなり、ナノスケールまで解繊されていることが確認された。



(a) 解繊前パルプ



(b) 解繊後パルプ

図3 解繊前後パルプ繊維の微細構造

3.2 室温 (23℃) におけるCNF強化樹脂の曲げ特性

絶乾状態における室温での曲げ特性の評価の結果を図4に示した。10%CNF-PA6の最大強さは161MPa, 弾性率は5.2GPaとなり、PA6単体 (最大強さ：112MPa, 弾性率：2.8GPa) に比べて最大強さが1.4倍、弾性率が1.9倍と大きく向上した。

10%GF-PA6の曲げ特性を評価したところ、最大強さは162MPa, 弾性率は4.5GPaとなり、CNF強化と比べ強さは同等、弾性率は劣るものであった。このことから曲げ特性に対するCNFによる補強効果はGFによるものと同等かそれ以上であることが示唆された。

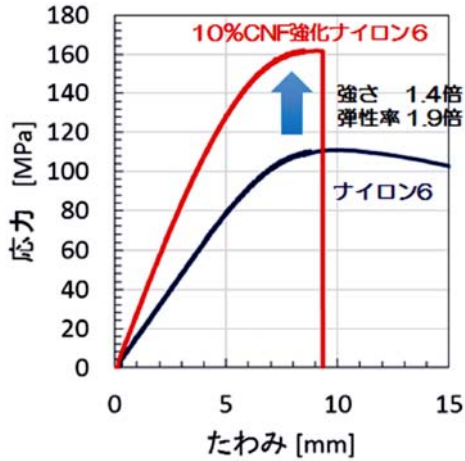


図4 10%CNF強化PA6の曲げ特性

3.3 CNF強化樹脂の曲げ特性に与える温度の影響

絶乾状態の試験片の各温度における曲げ特性を評価した結果を図5、及び図6に示した。23°Cと低温環境下となる-40°Cでは10%CNF-PA6、10%GF-PA6は弾性率、最大強さともに10%以内の変化で顕著な差はなかった。一方でPA6においては弾性率について大きな変化はなかったが、最大強さについては-40°Cが23°Cに比べて40%ほど大きく上昇した。このことから繊維強化樹脂は、その繊維の種類に関係なく低温下では曲げ特性が大きく変化しないことが明らかとなった。

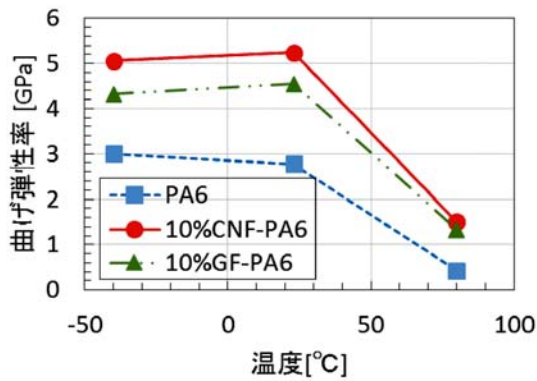


図5 各樹脂の曲げ弾性率の温度依存性

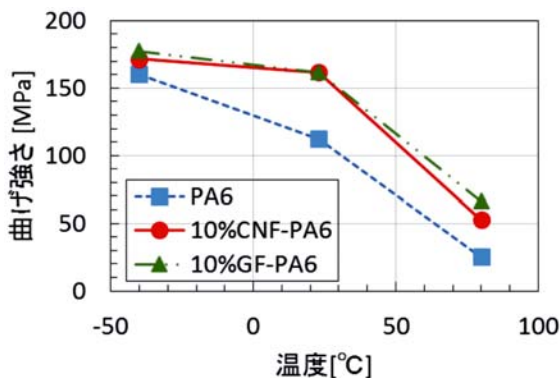


図6 各樹脂の曲げ強さの温度依存性

80°Cにおいてはいずれの試験片においても弾性率、最大強さの低下が見られた。PA6のガラス転移温度は55°Cとの報告があり³⁾、ガラス転移温度を超えた雰囲気下で弾性率や強さが急激に低下する一般的な樹脂の傾向と一致していた。

3.4 CNF強化樹脂の曲げ特性に与える吸水率の影響

セルロースは、構成単位の中に3つの水酸基を含み、親水的な性質を持つため、CNF強化樹脂も水の影響を強く受けることが予想される。そこで、CNFの添加による複合材の吸水率への影響と、曲げ特性と吸水率の関係について調べた。

各樹脂の吸水特性の結果を図7に示した。10%CNF-PA6はPA6に比べて短時間で同程度の吸水率に達し、吸水率が高い。これは、親水性の高いセルロース成分を複合化しているためと推察される。一方で10%GF-PA6はPA6よりも同程度の吸水率に達するのに多くの時間を要し、吸水率は低かった。ガラス繊維自体は吸水率が低く、ガラス繊維よりもより吸水しやすい試験片中のPA6の体積分率が減少しているためと考えられる。

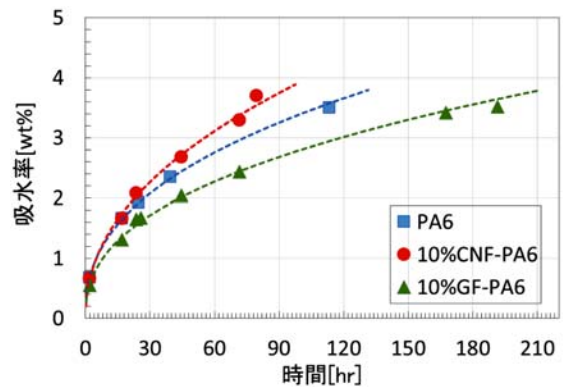


図7 各種樹脂の吸水特性

次に23°CにおけるCNF強化樹脂の曲げ特性に与える吸水率の影響について評価した。その結果を図8～11に示した。図10、11は絶乾状態の曲げ弾性率、強さを1とした際の変化度を示したものである。いずれの試験片も吸水率が高くなるとともに曲げ弾性率および最大強さは低下した。その変化度は吸水率1.7%前後で0.5～0.7程度、吸水率3.5%前後で0.3～0.5程度でサンプル間でそれほど大きな差異はないが、吸水率1.7%前後では弾性率と強さの何れもPA6の変化度がそれぞれ約0.5、約0.6と大きかった。さらに吸水が進んだ3.5%前後では弾性率ではいずれの試験片も同程度の変化度であったが、最大強さにおいては10%GF-PA6やPA6に比べて10%CNF-PA6の変化度が約0.3と大きかった。セルロースを主成分とする紙も含有水分量によって強度が変化することが知られており²⁾、これはセルロースが水の影響を受けやすい繊維であることに起因するものと推測される。

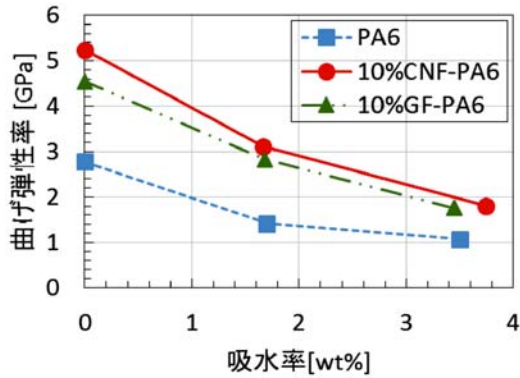


図8 各樹脂の曲げ弾性率の吸水率依存性 (23°C)

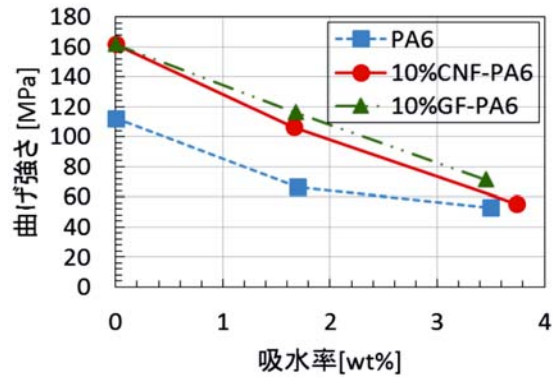


図9 各樹脂の曲げ強さの吸水率依存性 (23°C)

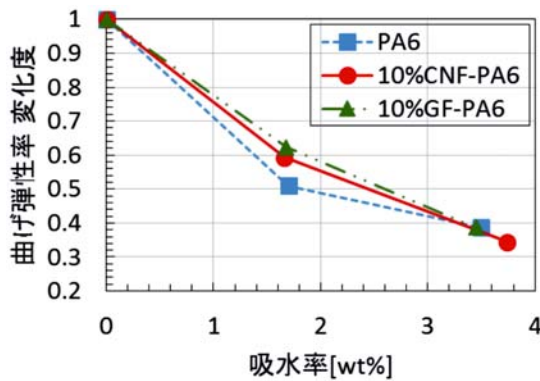


図10 各樹脂における吸水率に対する曲げ弾性率の変化度

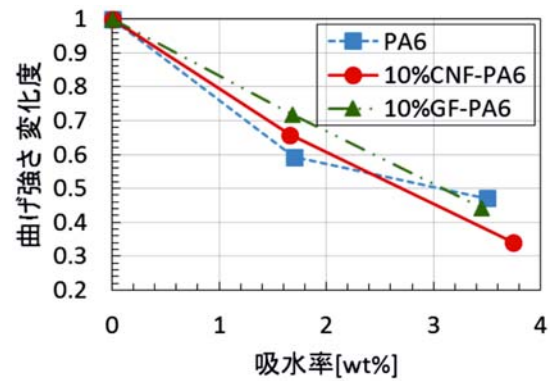


図11 各樹脂における吸水率に対する曲げ強さの変化度

3.5 CNF強化樹脂の曲げ特性に与える吸水率と温度の影響

試験片中に吸収された水分は水点下においては凍結し、その物性へ影響を与えることが予想されるため、含水状態（吸水率1.7%、3.5%前後）で温度が曲げ特性に与える影響について評価した結果を図12～15に示した。

曲げ弾性率、曲げ強さについていずれの試験片、吸水率においても温度の上昇とともに値が低下する傾向が見られた。吸水率が3.5%前後の場合は室温における弾性率、強さともに絶乾状態と比べて3～5割程度と大きく低下しているが、-40°Cでは室温における値と比べて約3倍ほど上昇し、絶乾状態

と同等かそれ以上の値となっていた。低温下では高分子鎖の運動が抑制され、弾性率や強さが大きくなることは一般的な傾向としてよく知られているが、それに加えて繊維強化樹脂中の水分の凍結も寄与したものと推察される。吸水率がいずれの場合も10%CNF-PA6の-40°Cにおける弾性率は最も大きいですが、最大強さにおいては10%GF-PA6に及ばず、PA6と同程度の強さまでしか向上しなかった。この繊維による補強効果による違いはおそらく強化繊維が水分を吸収するか否かの差異に起因するもので、吸水したCNFが弾性率の向上に大きく寄与するが、強さの向上にはそれほど寄与しないことが示唆された。

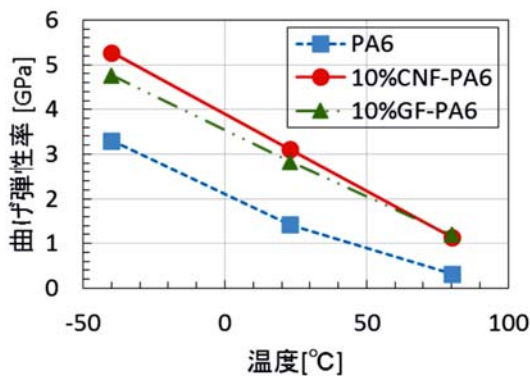


図12 各樹脂の曲げ弾性率の温度依存性 (吸水率1.7%前後)

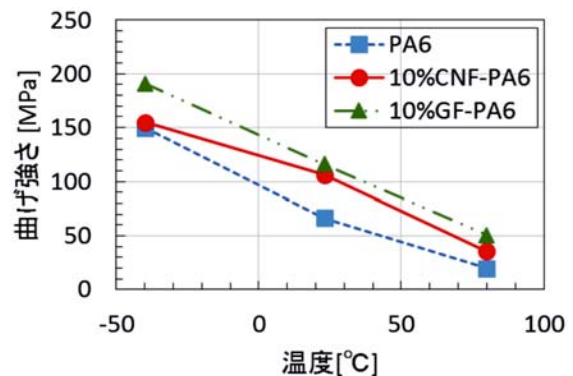


図13 各樹脂の曲げ強さの温度依存性 (吸水率1.7%前後)

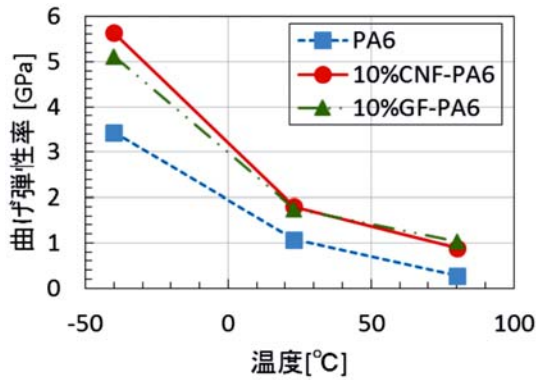


図14 各樹脂の曲げ弾性率の温度依存性
(吸水率3.5%前後)

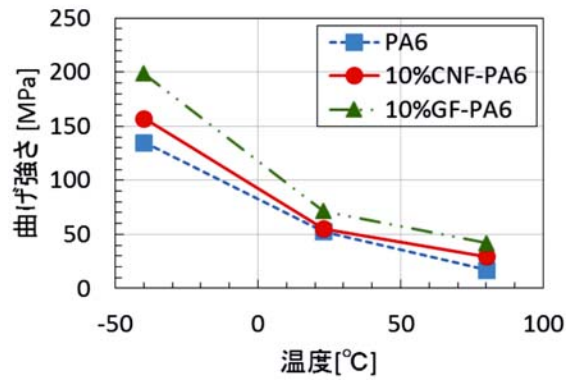


図15 各樹脂の曲げ強さの温度依存性
(吸水率3.5%前後)

80°Cにおいてはいずれの吸水率や試験片の場合も弾性率、強さともに低下し、温度が上昇した際の一般的な樹脂の傾向と一致した。

4. まとめ

CNF強化樹脂の曲げ特性への、温度や吸水率による影響について評価した結果、以下のことが明らかとなった。

- 10%CNF-PA6は、PA6単体や10%GF-PA6と同様に温度の上昇とともに弾性率や最大強さが低下する。
- セルロースが親水性のため、10%CNF-PA6はPA6単体よりも吸水しやすい材料である。
- 吸水した場合、10%CNF-PA6の弾性率、最大強さは吸水率の上昇とともに低下し、吸水性を有する樹脂の一般的な傾向と同様の傾向である。
- 吸水した試験片の温度の影響を評価した結果、絶乾状態の試験片と同様、温度の上昇とともに弾性率や最大強さが低下する。

これらのことから、強さや剛性の観点からは低温下での使用は問題ないが、さらに衝撃強さ等の他の特性も今後調査していく予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、京都大学生存圏研究所矢野教授を始め研究室の皆様、京都市産業技術研究所の皆様には、多大なご協力を頂きました。

また、本研究で使用した射出成形機、二軸混練機（東芝機械(株)）は独立行政法人科学技術振興機構の地域産学官共同研究拠点整備事業により、オートグラフAG-100kNXplus（(株)島津製作所）は公益財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 京都大学生存圏研究所 生物機能材料分野 矢野研究室：
http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labm/wp-content/uploads/2015/12/KyodaiG_OriginalMethod_1.pdf
- 2) 武 祐一郎・太田隆之・八十島治雄：紙の強度における諸問題（第4章）紙の強度におよぼす含有水分の影響，紙パ技協誌，第18巻第4号，pp.19-23，（1964）
- 3) 新保正樹・越智光一・伊藤和平他：ナイロンの摩擦挙動，材料，第27巻，第294号，pp.88-94，（1978）

熱溶解積層型3Dプリンタ造形物の機械特性

吉田 昌充, 可児 浩, 瀬野 修一郎, 大市 貴志, 山岸 暢

Mechanical Properties of Materials Processed by a Fused Deposition Modeling Printer

Masamitsu YOSHIDA, Hiroshi KANI, Shuichiro SENO,
Takashi OHICHI, Tohru YAMAGISHI

キーワード：3Dプリンタ, 熱溶解積層, 機械特性, プラスチック

1. はじめに

近年, 各種の3Dプリンタが市販されており, 中でも熱溶解積層型 (Fused Deposition Modeling, 以下FDM式とする) 3Dプリンタは, 安価な個人用途向けから業務用まで様々な機種が販売されており, 2015年では23万2336台が出荷され, 2019年には3Dプリンタ全体の97.5%を占める552万7493台の出荷予測とする調査報告もある¹⁾。このFDM式3Dプリンタは, 溶融した熱可塑性プラスチックをソフトクリームのように, ノズルからフィラメントを吐出・積層することで, 金型を使うことなく迅速に成形体を造形することが可能な装置であり, 近年では製品や部品のデザイン開発, 治具などの製作などに活用されはじめている。

一方, プラスチック成形体の製造は, 射出成形などで行われているが, 金型を製作する必要がありこれにかかる費用が少なくないことから, 生産量の多い成形体の製造には経済的に有利であるが, 生産量が少ないものには不向きである。

3Dプリンタは上記用途での利用にとどまらず, 生産量の少ないプラスチック成形体の製造などでの活用も期待されるが, この造形物についての機械特性などのデータはあまり明らかにされていない。このことから当场ではこれまでにいくつかのFDM式3Dプリンタで製作した造形物の機械特性の評価を行ってきた²⁾。3Dプリンタの機種の違いによる影響を明らかにした前報に続き, 本報告では3Dプリンタの機種を一種類に固定し, フィラメントの材料に使用する樹脂系や造形時の樹脂の吐出量など, さらに詳細な造形条件の影響を明らかにすることを目的に, 造形物の機械特性を評価した結果について報告する。

2. 試験方法

2.1 3Dプリンタ及び材料

図1, 表1に示す仕様のFDM式3Dプリンタ (プリンタ (株)製CUBIS CBS-150) を使用した。また材料には, このプリンタに純正のフィラメント材料であるABS樹脂系とポリ乳酸 (PLA) 樹脂系の2種類を使用した。



図1 試験に使用した3Dプリンタ

表1 試験に使用した3Dプリンタの仕様

造形方式	熱溶解積層法(FDM)
最大造形サイズ	幅185×奥行き140×高さ125mm
造形スピード	20~120mm/sec
ノズル数	1
ノズル径	直径0.4mm
積層ピッチ	0.15~0.4mm
フィラメント材料の直径	φ1.75mm
フィラメント材料	ABS樹脂, PLA樹脂
ノズル温度	200~230°C
成形テーブル温度制御	65~110°C

2.2 3Dプリンタによる特性評価用試験片の製作

特性評価に使用する試験片は, 曲げ特性評価用と引張特性評価用試験片の2種類を3Dプリンタで, 表2に示す設定条

事業名：経常研究

課題名：熱溶解3Dプリンタ造形物の機械特性向上に関する研究
(平成29~30年度)

件で造形した（図2～5）。プリンタ造形物を構成するフィラメントの充填パターン角度を0°/90°交互積層，45°/135°交互積層の2条件，フィラメント材料の吐出量の設定を3条件で造形し，種々の試験片を得た。

曲げ特性評価用の試験片形状は，JIS K 7171を参考に長さ50mm×幅25mm×厚さ2.4mmとした。また引張特性評価用は，JIS K 7161-2の1B試験片形状で厚さ2.4mmとした。

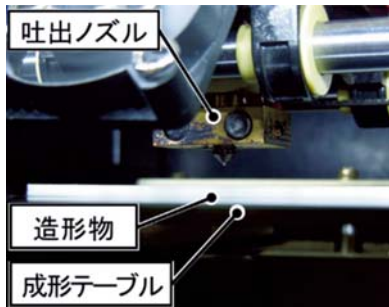


図2 3Dプリンタでの造形①

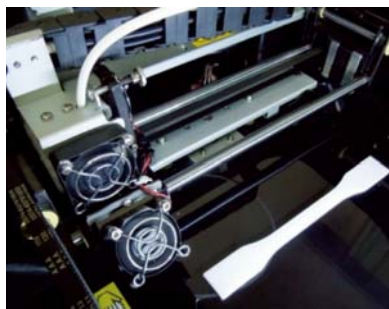


図3 3Dプリンタでの造形②

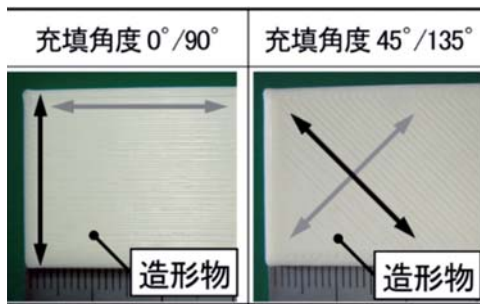


図4 3Dプリンタ造形物のフィラメント充填パターン角度

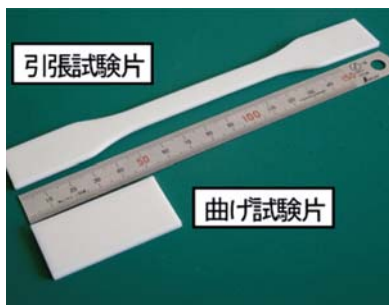


図5 3Dプリンタで製作した造形物

表2 造形物製作時のプリンタ設定条件

設定項目	使用フィラメント	ABS樹脂フィラメント プリンタ造形物	PLA樹脂フィラメント プリンタ造形物
積層ピッチ	0.3mm		
積層数	8層		
造形物の製作方向	・成形テーブルのXY平面上に平行 ・試験片の長手方向をX軸方向に設定		
ノズル温度	230℃	210℃	
成形テーブル温度	110℃	70℃	
造形物の外壁枚数	3		
フィラメント出力速度	30mm/sec		
フィラメント間隔充填率設定	1.0		
フィラメントの充填パターン	Rectilinear (格子)		
フィラメントの充填パターン角度	① 0°/90° , ② 45°/135°		
フィラメント材料吐出量	① 標準, ② 15%増量, ③ 30%増量		
天面パネルの開閉状態	造形時は, パネル閉		
正面パネルの開閉状態	造形時は, パネル閉		

2.3 圧縮成形による特性評価用試験片の製作

3Dプリンタに使用されている純正フィラメントの材料特性を把握し，3Dプリンタで製作した造形物の機械特性との比較を行うため，一般的なプラスチックの成形加工方法である圧縮成形法でも試験片を製作した。

3Dプリンタの純正材料フィラメントを市販のプラスチック成形材料と同様の長さのペレット形状にカットし，ABS樹脂系は90℃で4時間以上，PLA樹脂系は80℃で4時間以上，熱風循環式オーブンで予備乾燥後，JIS K 7151に準拠し圧縮成形を行った。この時，金型には長さ180mm×幅150mm×厚さ2.4mmの平板が得られる平押し金型を使用し，金型温度はABS樹脂系は220℃，PLA樹脂系は200℃とした。上記で得られた平板から2.2節に示した3Dプリンタで製作した曲げ・引張特性用試験片と同形状のものを試験片製作機（㈱東洋精機製作所製サンプルマシンMD）などを使用し切削加工した。

2.4 引張特性試験

引張最大応力及び引張弾性率の評価は，JIS K 7161「プラスチック引張特性の求め方」に準拠して行った。試験温度は23℃とし，万能材料試験機（㈱島津製作所製オートグラフAG-100kNXplus）を用い，試験片数は3片とした（図6参照）。試験速度は，引張最大応力の測定については各プラスチック成形材料の試験方法を参考に，ABS樹脂系では50mm/min，PLA樹脂系では5mm/min，引張弾性率の測定は共に1mm/minとした。

2.5 曲げ特性試験

曲げ最大応力及び曲げ弾性率の評価は，JIS K 7171「プラスチック曲げ特性の求め方」に準拠して行った。試験温度は23℃とし，万能材料試験機を用いて支点間距離は40mm，試験速度は1mm/min，試験片数は3片とした（図7参照）。



図6 引張特性試験（引張最大応力測定）

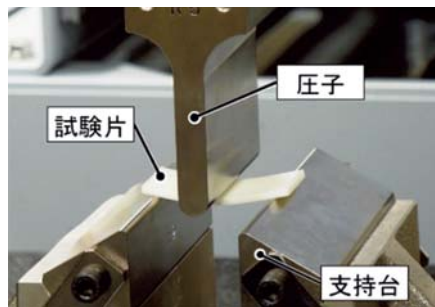


図7 曲げ特性試験

2.6 プリント造形物の断面形状観察

3Dプリント造形物の断面形状観察には、走査型電子顕微鏡（日本電子(株)製JSM-6610LA）を使用した。

2.7 樹脂充填率

3Dプリント造形物の樹脂充填率は、次のようにして求めた。JIS K 7222「発泡プラスチック及びゴム－見掛け密度の求め方」を参考にして、製作した曲げ特性用試験片造形物の質量を長さ・幅・厚さから算出した体積で除して見掛け密度の値を求め、この値を同一材料からなる圧縮成形体の密度で除して算出した。試験片数は3片とした。なお圧縮成形体の密度の測定は、JIS K 7112「プラスチック－非発泡プラスチックの密度及び比重の測定方法」の水中置換法で行った。

3. 試験結果

3.1 ABS樹脂系3Dプリント造形物の機械特性

ABS樹脂系材料を使用し、3Dプリント造形物製作時の樹脂の吐出量を変えて造形した時、機械特性がどのように変化するかについて評価した。樹脂の吐出量は、装置設定の標準値、15%増量、30%増量の3条件とした。併せて造形物を構成するフィラメントの充填パターン角度を0°/90°交互積層、45°/135°交互積層の2条件とした。図8に曲げ最大応力、図9に曲げ弾性率を示す。なお図中（ ）内の値は、圧縮成形体の特性値を100%としたときの割合を保持率として示した。

たものである。プリント造形物の曲げ最大応力は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ40%程度にとどまるが、吐出量30%増量時では80%程度に向上した。プリント造形物の曲げ弾性率は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。樹脂吐出量が標準では圧縮成形体に対する保持率で31~47%であったが、30%増量した場合保持率で81~83%に向上した。

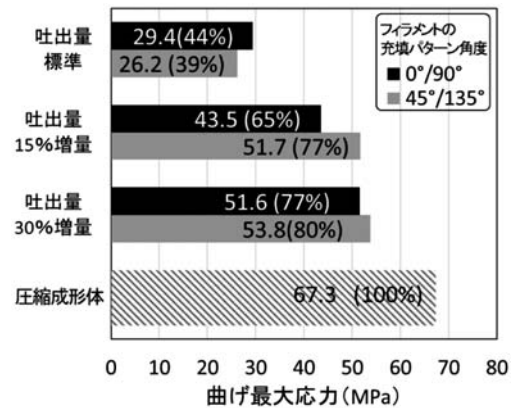


図8 ABS樹脂系3Dプリント造形物の曲げ最大応力

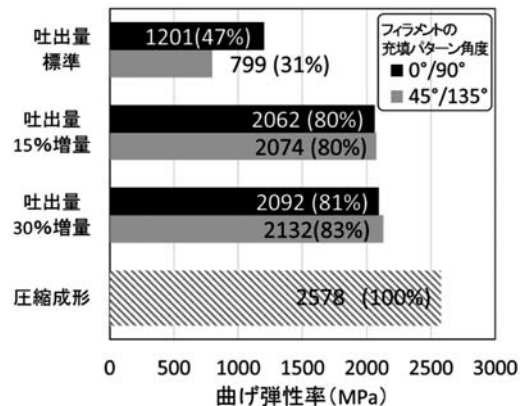


図9 ABS樹脂系3Dプリント造形物の曲げ弾性率

上記曲げ特性と同様に、引張特性についての試験を行った。図10に引張最大応力、図11に引張弾性率を示す。なお図中（ ）内の値は、圧縮成形体の特性値を100%としたときの割合を保持率として示したものである。プリント造形物の引張最大応力は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ43~55%にとどまるが、吐出量30%増量時では89~91%に向上した。プリント造形物の引張弾性率は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ60%程度にとどまるが、30%増量時では90%を超える高い値を示した。

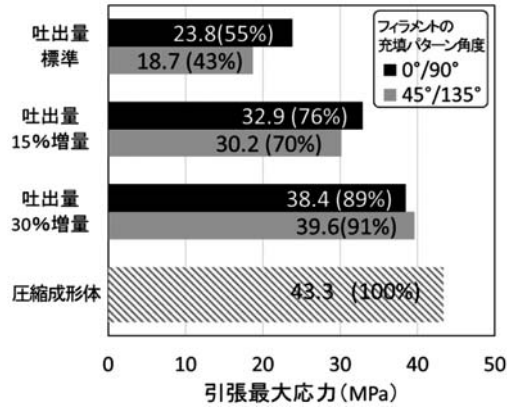


図10 ABS樹脂系3Dプリンタ造形物の引張最大応力

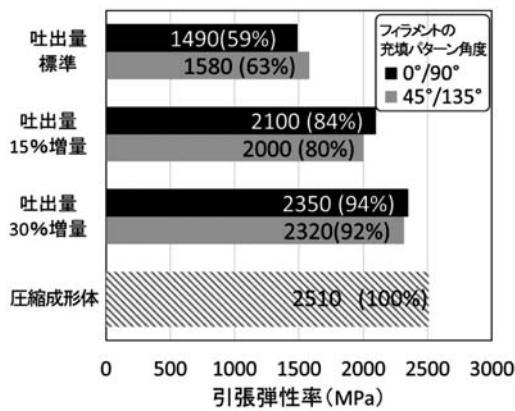


図11 ABS樹脂系3Dプリンタ造形物の引張弾性率

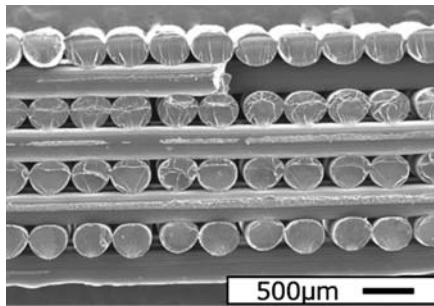


図12 ABS樹脂系3Dプリンタ造形物の断面形状 (樹脂の吐出量：標準)

3Dプリンタ造形物の曲げ最大応力・弾性率、引張最大応力・引張弾性率は、製作時の樹脂の吐出量設定で大きく変化する傾向が見られた。樹脂の吐出量を標準条件で製作したプリンタ造形物について、走査型電子顕微鏡で観察した断面形状を図12に示した。この顕微鏡写真から、プリンタ造形物は微細なフィラメントが整列し積層構造を保持しているが、フィラメント同士が密着していない箇所や空隙があることが確認された。プリンタ造形物の空隙が機械特性に与える影響を確認するため、造形物の樹脂充填率を測定した(図13参照)。プリンタ造形物の樹脂充填率は、樹脂の吐出量を増量することで高くなり、空隙が少なくなる傾向が見られた。

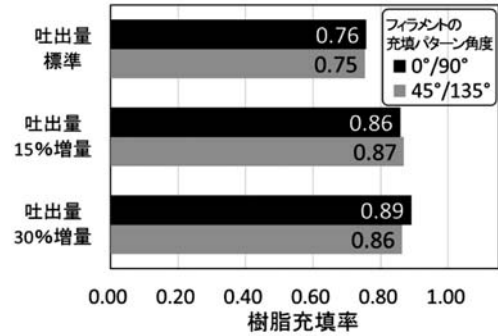


図13 ABS樹脂系3Dプリンタ造形物の樹脂充填率

3.2 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の機械特性

PLA樹脂系フィラメント材料を使って製作したプリンタ造形物についても、前節と同様に機械特性の差異を評価した。図14に曲げ最大応力、図15に曲げ弾性率、図16に引張最大応力、図17に引張弾性率を示す。なお図中()内の値は、圧縮成形体の特性値を100%としたときの割合を保持率として示したものである。プリンタ造形物の曲げ最大応力は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。樹脂の吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ48~58%にとどまるが、30%増量時では81~95%に向上した。曲げ弾性率も同様に、吐出量が多いほど高くなった。吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ55%にとどまるが、30%増量時では81~95%に向上した。

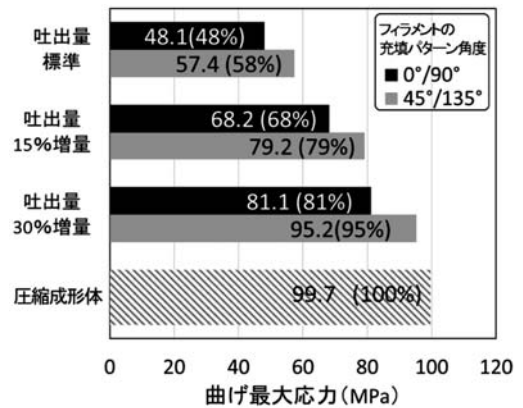


図14 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の曲げ最大応力

プリンタ造形物の引張最大応力についても曲げ特性と同様に、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を示した。吐出量が標準では、保持率が圧縮成形体に比べ56~58%にとどまるが、30%増量時では圧縮成形体とほぼ同等の95~100%の高い値を示した。

PLA樹脂系材料を使用し製作したプリンタ造形物についても、樹脂充填率が機械特性に与える影響を確認するため、樹脂充填率を測定した(図18参照)。造形物の樹脂充填率は、樹脂の吐出量が多いほど高くなる傾向を確認した。

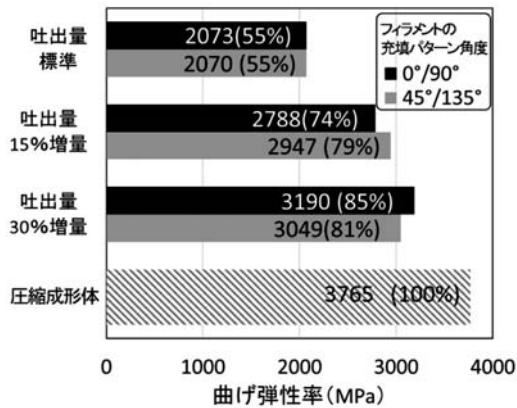


図15 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の曲げ弾性率

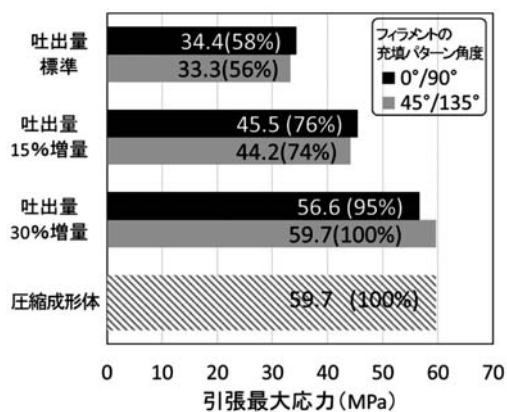


図16 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の引張最大応力

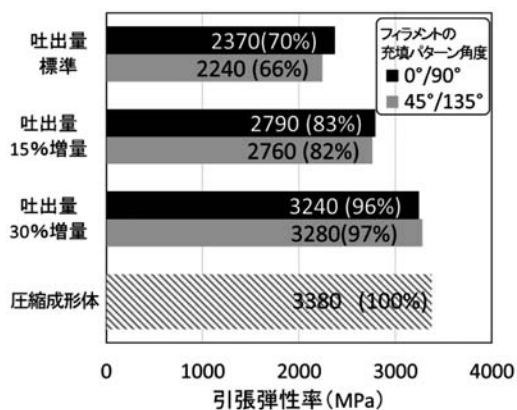


図17 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の引張弾性率

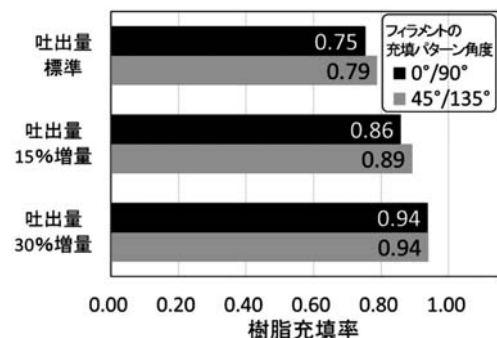


図18 PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の樹脂充填率

3.3 ABS樹脂・PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の機械特性比較

3.1節, 3.2節に示したABS樹脂系・PLA樹脂系3Dプリンタ造形物の23℃における曲げ・引張の最大応力や弾性率を比較した。フィラメント充填角度や材料の吐出量を同一条件で製作した造形物の比較では、PLA樹脂系のプリンタ造形物の方が何れの特性も高い傾向を示した。この傾向は、3Dプリンタ造形物の製作に使用したフィラメント材料を圧縮成形して得た成形体同志で比較した場合にも見られることから、樹脂材料自身の機械特性の差によるものと推察する。

4. まとめ

FDM式3Dプリンタを使い、フィラメント材料の樹脂系や樹脂の吐出量、フィラメント充填パターン角度の条件を変えて製作した造形物の機械特性について評価を行い、次の結論が得られた。

- (1) ABS樹脂系・PLA樹脂系プリンタ造形物の曲げ・引張の最大応力や弾性率は、吐出量を調節し樹脂充填率を上げるほど、高くなることがわかった。
- (2) プリンタ造形物の樹脂充填率を調整することで、造形物の曲げ・引張の最大応力や弾性率は、同一材料を圧縮成形加工した成形体に比べ、7～9割程度の特性値が得られることがわかった。
- (3) 同一機で製作したプリンタ造形物の23℃での曲げや引張の最大応力・弾性率は、ABS樹脂系よりもPLA樹脂系の方が高いことがわかった。

今後3Dプリンタ造形物の材料に繊維強化樹脂を使用した造形物の機械特性評価を行っていく。

謝辞

本研究で使用した万能材料試験機および試験片製作機は、公益財団法人JKAの機械工業振興補助事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Gartner : Forecast, 3D Printers, Worldwide, 2015
- 2) 吉田昌充・板橋孝至・印南小冬他：熱溶解積層型3Dプリンタ造形物の特性評価, 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.315, pp123-127, (2016)

札幌軟石を用いた高湿度域調湿材料の開発

執行 達弘, 野村 隆文, 森 武士, 吉田 憲司, 橋本 祐二

Development of Porous Materials with Humidity Controlling Properties at a High Humidity Level

Tatsuhiko SHIGYO, Takafumi NOMURA, Takeshi MORI,
Kenji YOSHIDA, Yuji HASHIMOTO

キーワード：札幌軟石, シリカゾル, 微細構造制御, 調湿, 鮮度保持

1. はじめに

北海道では、粘土・珪藻土・ゼオライトをはじめとする多様な天然無機資源が大量に産出される¹⁾。多くが多孔質であり、原子サイズ～マイクロメートル規模の細孔をもつ。当場では、それらを活用した材料の研究開発や技術支援に取り組んでいる²⁾。札幌軟石は、火砕流の噴出物からできた溶結凝灰岩であり、明治時代から札幌市で採石される貴重な地場資源である。マイクロメートル規模の細孔に起因して適度に軽く切り出しやすいことから、壁材や敷材として加工・販売されている。その端材の有効活用の要望がある。

調湿材料とは、湿度が上がると吸湿し、乾燥すると放湿する機能をもつ材料である。そのなかで、多孔質無機材料は、相対湿度50～70%に制御された快適な居住空間を提供できる建材の原料として多く用いられている³⁻⁵⁾。調湿機能が高い多孔質無機材料の探索・合成⁶⁻⁹⁾と、それらを用いた建材の製造技術、すなわち、粘土との配合や焼成温度の最適化などに関する研究が多く報告されている⁸⁻¹⁰⁾。一方、近年、相対湿度70～95%の高湿度域で調湿機能を発現する材料への要望が増えている。MA包装による青果物の鮮度保持では¹¹⁾、結露の抑制によりカビや腐敗を発生させないと同時に、高湿度下で青果物の潤いを保たせる材料が求められている。ある電気設備の絶縁不良による事故防止では、水蒸気を吸着した後、高湿度でも脱着し自ら再生する材料が求められている。

本研究では、道産天然無機資源である札幌軟石の有効活用と高湿度域調湿材料の開発を目的とした。札幌軟石のキャラクター化に続き、主に青果物の鮮度保持への適用を想定し、3℃、相対湿度90%で調湿機能を発現する材料の設計・探索・試作を行った。

2. 実験方法

2.1 札幌軟石のキャラクター化

札幌軟石（辻石材工業株式会社製）の破砕物（4～8 mm）について、蛍光X線分析（XRF）による化学組成の測定、X線回折（XRD）による結晶相の同定、走査型電子顕微鏡（SEM）による微細構造観察を行った。多孔特性の評価として、窒素ガス吸着法による細孔径分布・ピーク細孔径・細孔容積（いずれもGCMC法）・比表面積（BETと α_s 法）の測定、水中アルキメデス法による気孔率の測定を行った。調湿機能を発現する相対湿度は、水蒸気吸着法（測定温度3℃）により吸着等温線を作成した後、その曲線の平均変化率が最大となる相対圧から求めた。

2.2 高湿度域調湿材料の設計

合成シリカゲル（富士シリシア化学株式会社製CARiACT Q10/30/50）について、2.1節で述べた手法により、ピーク細孔径と、調湿機能を発現する相対湿度を求めた。それらをケルビン式に代入し、検量線を作成することで、開発する材料がもつべき細孔径を算出した。

2.3 高湿度域調湿材料の探索

既存の天然物として、稚内層珪質頁岩（有限会社稚内グリーンファクトリー製）・珪藻土（北海道ロクシナイ地方で採取したもの）・活性炭（和光純薬工業株式会社製）、合成物として、A型シリカゲル（株式会社東海化学工業所製）・B型シリカゲル（富士シリシア化学株式会社製）・モレキュラーシーブ3A（信和化工株式会社製）について、2.1節で述べた手法により、ピーク細孔径を求め、水蒸気吸着等温線を作成した。

事業名：経常研究

課題名：高湿度域調湿材料の開発（平成28～29年度）

2.4 高湿度域調湿材料の試作

2.1節で述べた札幌軟石を110℃で24h乾燥し、図1のように組んだデシケータ内のピーカーに設置した。真空ポンプでゲージ圧-0.1MPa以下に脱気した後、試料0.1gにつきシリカゾル（株式会社ADEKA製アデライトAT-30、日産化学工業株式会社製スノーテックスST-XL/ZL）10mlを分液漏斗を用いて注入した。さらに10min脱気した後、常温で24h乾燥させることで、札幌軟石の細孔にシリカゾルを含浸・析出させた試料を作製した。得られた試料について、2.1節で述べた手法により、細孔径分布・ピーク細孔径・細孔容積・比表面積を求め、水蒸気吸着等温線を作成し、さらに調湿機能を発現する相対湿度を求めた。

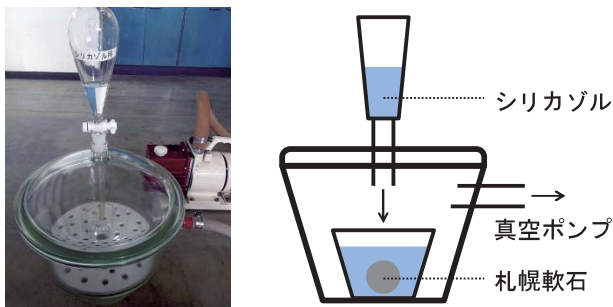


図1 札幌軟石の細孔にシリカゾルを含浸・析出させる装置の概観

3. 結果と考察

3.1 札幌軟石のキャラクターション

図2に札幌軟石の概観を示す。割石という名称で購入できる長軸が8cm程度の端材（図2(a)）は、ジョークラッシャーとロールクラッシャーにより容易に破碎することができた。破碎物を振動篩にかけ、4mmの篩上8mmの篩下を回収したもの（図2(b)）を実験に用いた。



図2 札幌軟石の概観

(a)割石, (b)破碎物 (4~8mm)

表1に化学組成を、図3にXRDパターンを示す。表1より、大部分がSiO₂, Al₂O₃（それぞれ74.3, 13.4mass%, 合計87.7mass%）で、少量のNa₂O, K₂O, Fe₂O₃, CaO（それぞれ4.3, 3.0, 2.2, 1.8mass%, 合計11.3mass%）を含むことがわかった。図3より、結晶相は長石と石英と同定され、2θ=20°付近の盛り上がりからガラス相も含むことがわかつ

た。札幌軟石は一般的な火山噴出物であるといえる。

図4に微細構造を示す。マイクロメートル規模の細孔が無数にあることが確認できた。窒素ガス吸着法では直径20~100nmでも細孔が見られたが（ピーク細孔径・細孔容積と合わせて3.4節で述べる）水蒸気吸着等温線は立ち上がらなかった。BET比表面積は2m²/g、気孔率は39%であった。

表1 札幌軟石の化学組成 (mass%)

F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃
0.1	4.3	0.3	13.4	74.3	0.0	0.0
Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	ZnO
0.0	3.0	1.8	0.2	0.1	2.2	0.0
As ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	BaO	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	

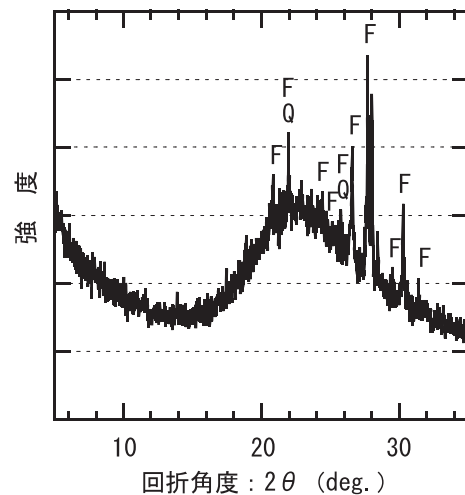


図3 札幌軟石のXRDパターン (F:長石, Q:石英)

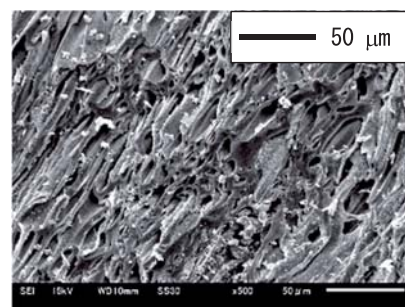


図4 札幌軟石の微細構造

3.2 高湿度域調湿材料の設計

多孔質無機材料が調湿機能を発現する相対湿度と、その材料がもつ細孔径の関係はケルビン式で表される¹²⁾。

$$\ln(P') = -2\gamma V_m \cos \theta / RT(D_p/2) \dots(1)$$

P' : 調湿機能を発現する相対湿度 (=相対圧)

γ : 水の表面張力

V_m : 水のモル体積

θ : 水と固体の接触角

R : 気体定数

T : 絶対温度

D_p : その材料がもつ細孔径 (ピーク細孔径)

(1)式を変形すると,

$$D_p = (\text{定数}) \times -(1/\ln(P')) \dots(2)$$

となる。細孔径が制御された3種類の合成シリカゲルの D_p と P' (表2) を(2)式に適用し、プロットすると直線になった(図5)。この直線(検量線)から $P' = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ となる D_p を算出すると、それぞれ3.1, 3.4, 4.0, 5.2, 8.7 nmと求めることができた。この結果は、従来の多孔質無機材料が相対湿度50~70%に制御するものであり³⁻⁵⁾, 2~5 nmの細孔を多くもつこと⁶⁻⁹⁾に一致する。そして、本研究で開発する、相対湿度90%で調湿機能を発現する材料がもつべき細孔径は $D_p = 8.7\text{nm}$ であることが明らかになった。

表2 合成シリカゲルの D_p と P'

	D_p (nm)	P'
CARiACT Q10	10.6	0.917
CARiACT Q30	30.9	0.978
CARiACT Q50	41.3	0.981

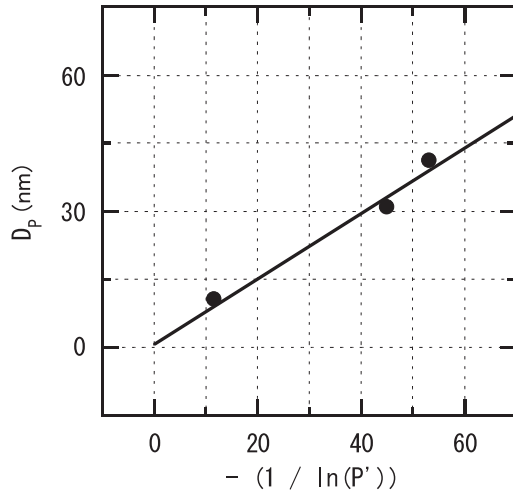


図5 合成シリカゲルを用いて作成した検量線

3.3 高湿度域調湿材料の探索

図6に既存の天然物と合成物の D_p と水蒸気吸着等温線を示す。いずれも $D_p = 8.7\text{nm}$ をもち、 $P' = 0.9$ にもならないことが確認できた。既存の材料では高湿度域で調湿機能を発現しないことから、簡便な手法による新たな材料の開発を試みた。

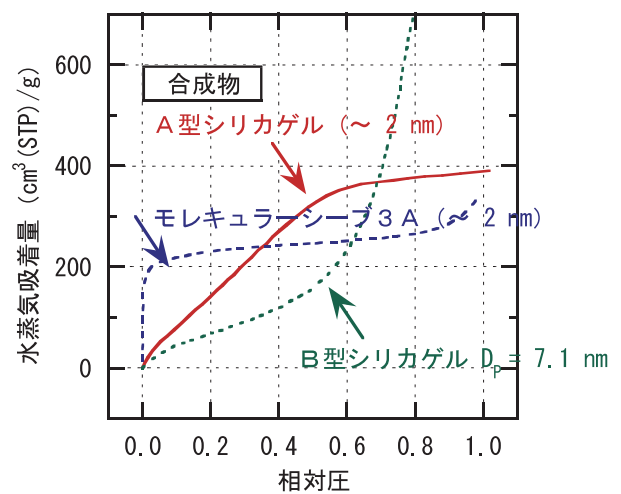
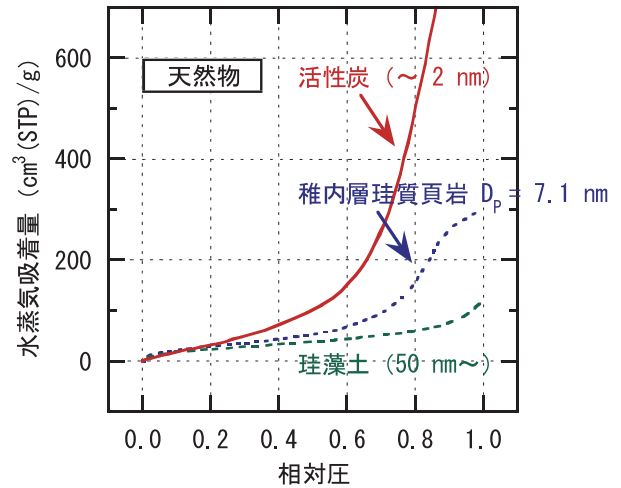


図6 既存の天然物と合成物の D_p と水蒸気吸着等温線
括弧内の数字は一般的に知られている D_p の範囲

3.4 高湿度域調湿材料の試作

合成シリカゲルの細孔にシリカゾルを含浸・析出させた、バイモーダル細孔構造をもつシリカの作製についての報告がある¹³⁾。この材料では、界面活性剤などを用いることなく、含浸・析出のみという簡便な手法によりシリカゲルの50nmの細孔の内壁に5 nmのシリカゾルの粒子からなる細孔が形成されている。この手法を本研究にも応用し、調湿材料としては大きな札幌軟石のマイクロメートル規模の細孔に、ナノメートル規模のシリカゾルを含浸・析出させることで、 $D_p = 8.7\text{nm}$ そして $P' = 0.9$ となる材料の作製を試みた。

図7に札幌軟石と、札幌軟石の細孔に粒径10/50/100nmのシリカゾルを含浸・析出させた試料の細孔径分布を示す。表3にはそれらの D_p ・細孔容積・BET比表面積を示す。得られた試料では、シリカゾルの粒径に応じて細孔径分布と D_p が異なる細孔が形成することがわかった。札幌軟石より比表面積が増加することからも推察できる。一方、札幌軟石がもつ20~100nmの細孔 ($D_p = 44.9\text{nm}$) が減少あるいは見られなくなったことから、そこにシリカゾルが含浸・析出した可

能性がある。しかし、細孔容積は逆に増加している。これについては、比表面積の解析に α_s 法を用いることで(表4)、札幌軟石がもつ20~100nmの細孔(マイクロメートル規模の細孔を含む)の内部に加え、外部にも新たな細孔が形成するためであると推察できる(図8)。

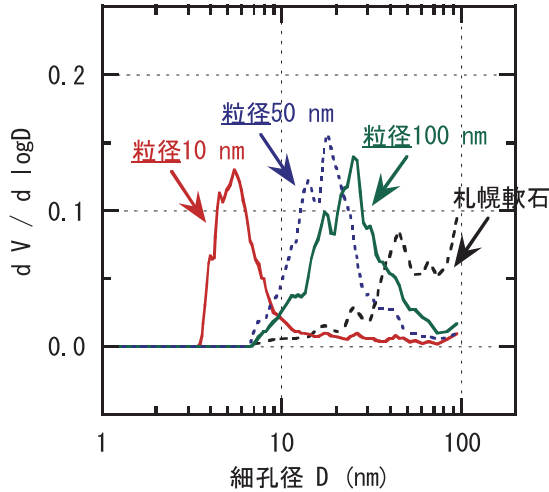


図7 札幌軟石と、札幌軟石の細孔に異なる粒径のシリカゾルを含浸・析出させた試料の細孔径分布

表3 D_p ・細孔容積・BET比表面積

	D_p (nm)	細孔容積 (cm^3/g)	比表面積 (m^2/g)
札幌軟石	44.9	0.037	2
+ 10nm	5.4	0.040	31
+ 50nm	18.0	0.061	13
+ 100nm	26.2	0.059	9

表4 α_s 法で解析した比表面積

	合計 (m^2/g)	内部 (m^2/g)	外部 (m^2/g)
+ 10nm	31	30 (97%)	1 (3%)
+ 50nm	13	9 (69%)	4 (31%)
+ 100nm	9	2 (22%)	7 (78%)

α_s 法：細孔内部と外部を個別に求めることができる比表面積の解析方法

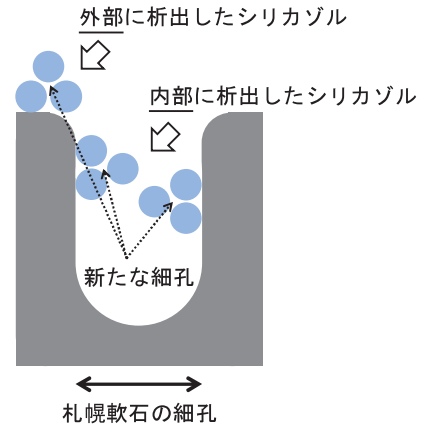


図8 得られた試料のイメージ

図7と表3より、粒径10~50nmの間のシリカゾルを用いたとき $D_p = 8.7\text{nm}$ となる材料が得られると推察できる。その際にはシリカゾルが特注となる。実用化の観点では好ましくないことから、粒径10nmと50nmのシリカゾルを混合して用いることとした。

粒径10nmと50nmのシリカゾルを体積比5:5, 4:6, 3:7, 2:8, 1:9で混合した場合、得られた試料の D_p は、それぞれ7.1, 7.1, 7.1, 9.0, 10.1nmであった。したがって、体積比2:8で混合した場合に $D_p = 8.7\text{nm}$ に近い材料($D_p = 9.0\text{nm}$)を作製することができた。図9に細孔径分布を示す。

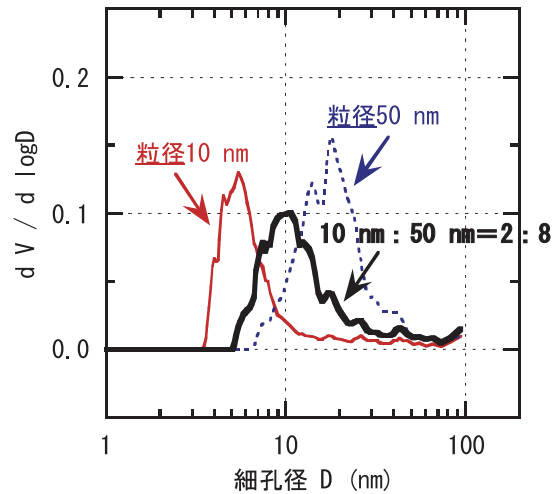


図9 粒径10nmと50nmのシリカゾルを体積比2:8で混合した場合に得られた試料の細孔径分布

図10に水蒸気吸着等温線と P' を示す。既存の材料とは異なり相対圧0.8から曲線が立ち上がり、0.9付近($P' = 0.93$)で平均変化率が最大となることが確認できた。細孔容積は $0.047\text{cm}^3/\text{g}$ 、比表面積はBET法、 α_s 法ともに $17\text{m}^2/\text{g}$ 、内部面積は $15\text{m}^2/\text{g}$ で88%、外部面積は $2\text{m}^2/\text{g}$ で12%であった。

含浸・析出の操作を3回繰り返した試料では、細孔容積は $0.059\text{cm}^3/\text{g}$ 、比表面積はBET法、 α_s 法ともに $22\text{m}^2/\text{g}$ 、内部

面積は20m²/gで91%，外部面積は2m²/gで9%であった。含浸・析出の操作が1回の場合と3回繰り返した場合では、相対圧0.9における水蒸気吸着量は34→54cm³(STP)/gに増加した。したがって、さらなる実験条件の最適化により、水蒸気吸着量も増加できるものと期待している。

興味深い結果として、先に述べた既報¹³⁾では含浸・析出させた後、600℃で焼成するのに対し、本研究では常温で24h乾燥させるだけで札幌軟石とシリカゾルの密着性が高い試料が得られた。試料を蒸留水中で10min超音波洗浄し、さらに蒸留水を用いて2.4節の操作を行った試料でも、細孔径分布にも水蒸気吸着等温線にも顕著な変化が見られなかった。析出したシリカゾルが札幌軟石の表面と結合していると考えられる。当場では、同じく天然無機資源である稚内層珪質頁岩に、Ca成分とAl成分そしてシリカゾルを混合した後、成形することで、非焼成でも焼成体相当に硬化することを見出している¹⁴⁾。これらは、近年、ジオポリマーという名称で注目され¹⁵⁾、Ca・Al・Siなど岩石由来の成分とアルカリが反応することで重合し硬化する現象であると推察できる。しかし、詳細の解明にはさらなる実験が必要である。

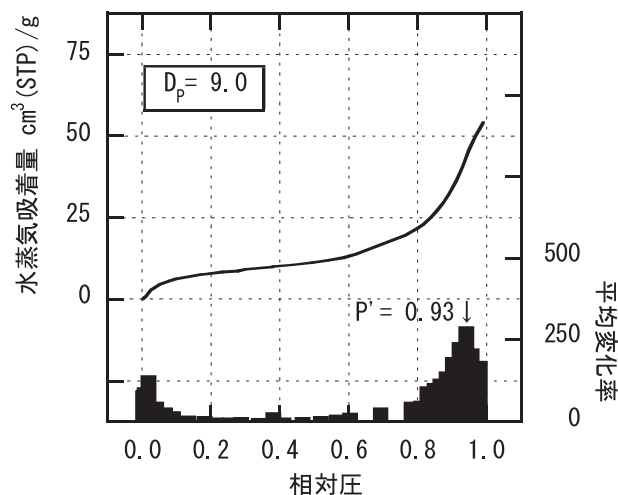


図10 水蒸気吸着等温線とP'

粒径10nmと50nmのシリカゾルを体積比2：8で混合した場合に得られた試料

天然物はブロードな細孔径分布をもつため、8.7nmの細孔をもつものは少なくない。また、細孔を精密に制御した合成物の合成方法も数多く報告されている。しかし、天然物を原料に8.7nmをピーク細孔径にもつ材料の開発と、その材料を高湿度域での調湿に活用しようという発想はオリジナルであると考えている。なお、当場では細孔を精密に制御した合成物で高湿度域での調湿（青果物の鮮度保持）を試みる研究開発にも取り組んでいる^{16,17)}。

4. まとめ

道産天然無機資源である札幌軟石の有効活用と高湿度域調湿材料の開発を目的とし、札幌軟石のキャラクターゼーションと高湿度域調湿材料の設計・探索・試作を行った結果、以下のことがわかった。

- ・3℃、相対湿度90%（≒相対圧0.9）で調湿機能を発現する材料がもつべきピーク細孔径は8.7nmである。
- ・既存の材料では高湿度域で調湿機能を発現しない。
- ・札幌軟石の細孔に、粒径10nmと50nmのシリカゾルを体積比2：8で混合したものを含浸・析出させることで、ピーク細孔径9.0nmの材料を作製することができる。
- ・その材料の水蒸気吸着等温線は、相対圧0.8から曲線が立ち上がり、0.93で平均変化率が最大となる。

実用化には、水蒸気吸着量の増加に加え、実証試験による性能の確認と、コストや歩留まりを意識した量産試作が必要であり、今後の研究で実施する。

謝辞

本研究で使用した自動蒸気吸着量測定装置は、公益財団法人JKAの機械工業振興補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本の窯業原料，工業技術連絡会議窯業連合部会，919 PP.，(1992)
- 2) 野村隆文・執行達弘・赤澤敏之他：道産多孔質資源の利活用と高機能化製品の開発，北海道立総合研究機構工業試験場成果発表会発表要旨集，pp.30-32，(2013)
- 3) 北海道・鈴木産業株式会社：稚内層珪藻土を利用した調湿機能材料の製造法，特許第2652593号，1997-09-10
- 4) 株式会社INAX：独立行政法人産業技術総合研究所・芝崎靖雄・調湿建材及びその製造方法，特許第3368278号，2003-01-20
- 5) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構・株式会社加賀谷ブリック：調湿内装材の製造方法，特許第5070529号，2012-11-14
- 6) 犬飼恵一・鈴木正哉：イモゴライトの可能性，セラミックス，Vol.43 No.1，pp.37-41，(2008)
- 7) 鈴木正哉・前田雅喜・犬飼恵一：高性能吸着剤ハスクレイ^(R)の開発，Synthesiology，Vol.9 No.3，pp.154-164，(2016)
- 8) 野村隆文・高田忠彦・皿井博美他：本道珪藻土の高度利用と資源評価に関する研究，平成4年度共同研究報告書

- (北海道立工業試験場・北海道立地下資源調査所), 26PP., (1993)
- 9) 福水浩史：エネルギーを使わずに湿度を調節する，セラミックス，Vol.37 No.1, pp.6-9, (2002)
 - 10) 野村隆文・執行達弘・吉田憲司他：調湿タイルの量産製造技術の開発，北海道立総合研究機構工業試験場報告，Vol.312, pp.123-127, (2013)
 - 11) 岩元睦夫・河野澄夫・岡村憲道他：青果物・花き鮮度管理ハンドブック，サイエンスフォーラム，479PP., (2004)
 - 12) 近藤精一・石川達雄・阿部郁夫：吸着の科学，丸善，223 PP., (2001)
 - 13) Yi ZHANG, Yoshiharu YONEYAMA, Noritatsu TSUBAKI：Bimodal Porous Silica Prepared by Pore-filling of Silica Sol, Journal of the Japan Petroleum Institute, Vol.46 No.5, pp.335-338, (2003)
 - 14) 執行達弘・森武士・野村隆文：焼成工程を必要としない調湿セラミックスの開発，北海道立総合研究機構工業試験場成果発表会発表要旨集，p.44, (2018)
 - 15) Joseph DAVIDOVITS：Geopolymer Chemistry and Applications, Geopolymer Institute, 644PP., (2015)
 - 16) 森武士・執行達弘・野村隆文：精密制御可能なメソメクロ孔の階層構造をもつシリカ多孔体の開発，平成29年度日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会講演要旨集，p.39, (2017)
 - 17) 執行達弘・森武士・野村隆文：メロンの長期輸送・貯蔵への調湿材の適用，第31回日本吸着学会研究発表会講演要旨集，p.54, (2017)

非接触 3 次元測定における測定位置の最適化に関する研究

安田 星季, 鈴木 逸人, 岩越 睦郎

Optimization of the Measurement Position in the Non-contact 3D Measuring

Seiki YASUDA, Hayato SUZUKI, Mutsuro IWAKOSHI

キーワード：非接触 3 次元測定, 深度カメラ

1. はじめに

非接触 3 次元測定は、レーザー光などの光学技術を応用した 3D 形状測定手法である。本手法は接触式に比べて大量のデータを 1 回の測定で取得できるが、測定機の死角になる領域は測定できないため、データに欠損が生じるという特徴がある。実際の測定作業では、データに欠損が残らないように測定物を多方向から測定する必要があるが、その測定方向・位置は作業者が自身の経験をもとに決定している。

Vasquez-Gomezらは3Dモデルと仮想の測定機の最初の測定位置を規定し、モデルを効率的に再現する一連の測定位置を算出する手法を提案し、コンピュータシミュレーションで提案手法の効果を検証している¹⁾。本研究では実機を対象として、測定中の欠損が残るデータをもとに欠損部を効率的に埋める測定方向・位置を算出し、それらを作業者に提示する「測定支援システム」を試作した。

2. 測定支援システム

システムの構成と外観を図1に示す。本システムは、「測定位置算出プログラム」と「測定位置提示システム」とからなる。

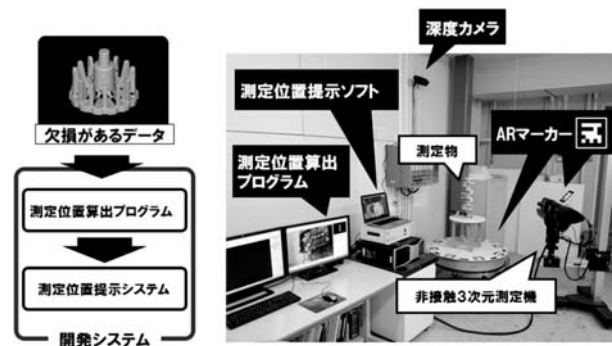


図1 システム構成と外観

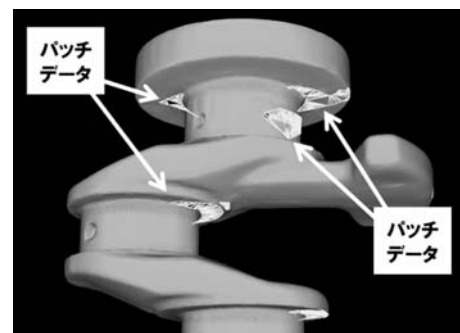


図2 パッチデータ例（クランクシャフト部品の一部）

2.1 測定位置算出プログラム

「測定位置算出プログラム」の処理の流れを以下に示す。

- ① 測定中のデータの欠損部を埋める三角メッシュデータ（以下、パッチデータ）を生成する（図2）。
- ② パッチデータの重心を求める。
- ③ パッチデータの法線ベクトルを求める。

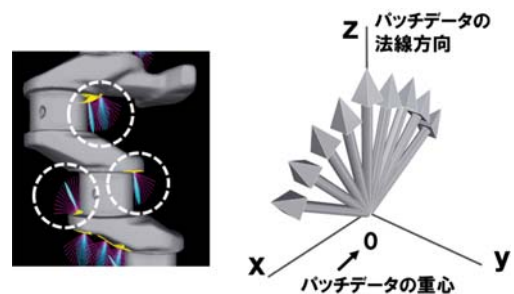


図3 測定方向算出例（○印内）とベクトルの模式図

事業名：経常研究

課題名：非接触 3 次元測定位置の最適化に関する研究

- ④ ②を原点，③をz軸方向とする直交座標系を定め，z軸方向ベクトルを，xz平面上で原点を中心に $\pm 15^\circ$ ， $\pm 30^\circ$ ， $\pm 45^\circ$ ， $\pm 60^\circ$ 回転させたベクトルを求める。z軸ベクトルを回転したベクトルを多数設定することで，計算結果の精度を向上させることができるが，計算コストと精度のバランスを考慮し角度を決定した。測定方向算出例とベクトルの模式図を図3に示す。
- ⑤ 同様にyz平面上で回転させたベクトルを求める。
- ⑥ 測定中のデータと，③，④，⑤で求めた計17個のベクトルとの交差の有無を判定し，交差しないベクトル群を求める。
- ⑦ ⑥のうち，xz平面上のベクトルの数とyz平面上の数を比較し，数の多い方のベクトル群（交差するベクトルが少ない群）の平均ベクトルを求め，これを測定中のデータと最も干渉しにくい測定方向ベクトルとする。
- ⑧ すべての欠損部に対し上記の処理を適用し，欠損部ごとに測定方向ベクトルを求める。また測定機の焦点距離から測定位置を求める。
- ⑨ ⑧の各測定位置から測定できるパッチデータの面積を求め，その値が大きい順すなわち，欠損を埋める面積が大きい順に測定位置をソートする。
算出した測定位置の例を図4に示す。

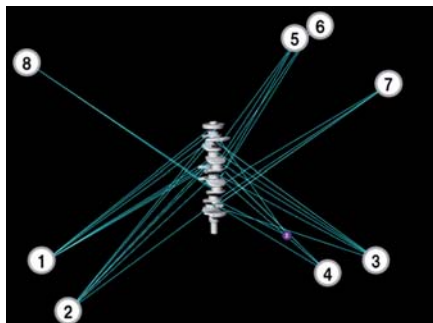


図4 算出した測定位置例

(丸数字：測定位置および欠損を埋める面積が大きい順位を表す。直線：測定位置とパッチデータ重心を結んだ線を示す。)

2.2 測定位置提示システム

「測定位置提示システム」は，「測定位置算出プログラム」で作成した測定位置，測定方向ファイルを読み込み，深度カメラ（Microsoft社製，Kinect v2）で撮影された測定室の映像に「目標位置」として重ねて表示する。また，測定機に貼付した「ARマーカー」により4点の空間座標，法線ベクトル，IDが取得でき，マーカーを追跡することで測定機的位置をリアルタイム表示する。作業者は画面を見ながら，測定機が目標位置に重なるように配置し，測定を行う。作業の流れを図5に，提示画面例を図6に示す。

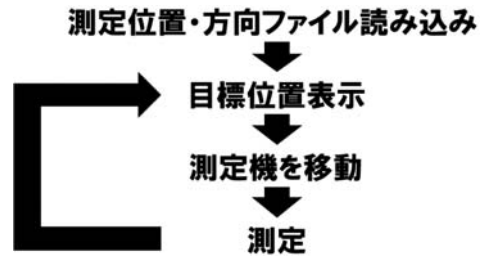


図5 作業の流れ



図6 ARマーカーと提示画面例

3. 効果の検証

開発システムの効果を検証するために複雑な形状をもつ試料を用意し実験を行った。

3.1 クランクシャフトの測定例

クランクシャフトは，エンジンの主要構成部品の一つであり，ピストンの往復運動を回転力に変えるための軸である。測定に用いたクランクシャフトの外観を図7に示す。

クランクシャフトに対し初期の測定状態では欠損箇所が20箇所（図8），測定物全体の表面積に対する測定データが得られた面積の割合（測定面積割合）は97.5%であった。この状態のあと，作業者が測定機を手動で配置して測定した回数と測定面積割合について，従来手法と本システム使用の場合を比較した結果を図9に示す。

この結果，99.8%以上の測定面積割合を得る測定回数は，従来手法では10回で，本システムでは8回となり，従来手法に比べて測定回数を約20%削減することができた。

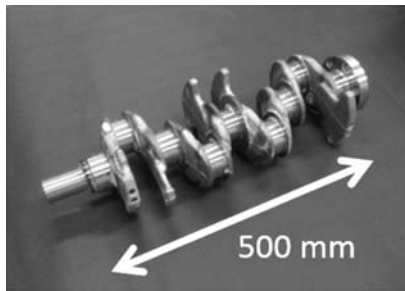


図7 部品外観（クランクシャフト部品）

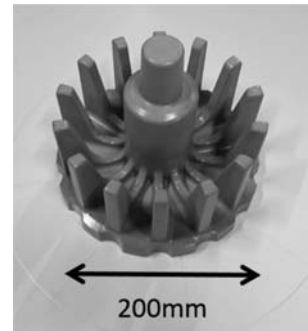


図10 部品外観（プーリー用木型）

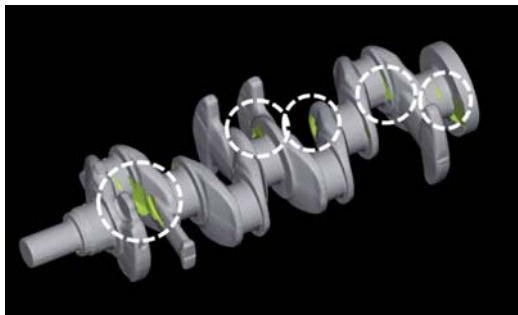


図8 初期の測定例と欠損状態（○印内が欠損部分）



図11 初期の測定例と欠損状態（○印内が欠損部分）

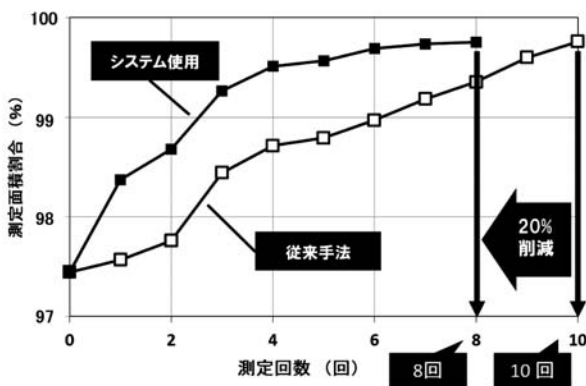


図9 クランクシャフトでの測定回数と測定面積割合

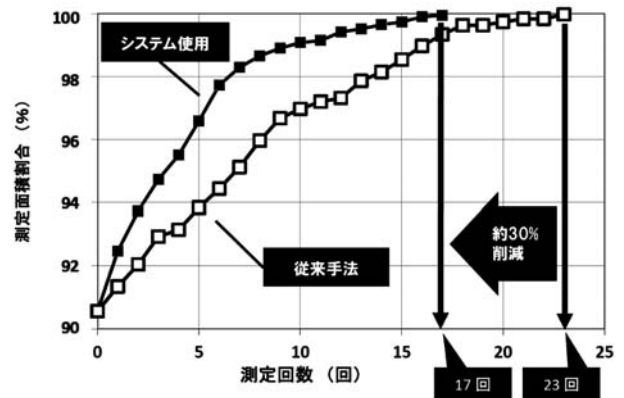


図12 プーリー用木型での測定回数と測定面積割合

3.2 プーリー用木型の測定例

鋳造でプーリーを製造するために用いる木型を対象に実験を行った。測定に用いたプーリー用木型の外観を図10に示す。

プーリー用木型に対し初期の測定状態では欠損箇所が28箇所（図11）、測定面積割合は90.4%であった。測定面積割合が99.8%以上となる回数を従来手法と本システム使用の場合とで比較した結果、従来手法では23回で、本システムでは17回となった。従来手法に比べて測定回数を約20%削減することができた（図12）。

以上の2例から、本システムを用いた場合、従来手法と比較して測定回数を約20%程度削減できることが明らかとなった。一方、システムを適用した場合の作業時間の変化を調べた結果を図13に示す。クランクシャフトの場合、システムを適用すると作業の準備時間が測定時間に加算され、全体の作業時間も増加した。プーリー用木型の場合も作業の準備時間が測定時間に加算され、全体の作業時間の削減効果を相殺していた。今後、本システムを実用化するためには作業の準備時間を削減し、効率的なシステムの運用を実現することが課題である。

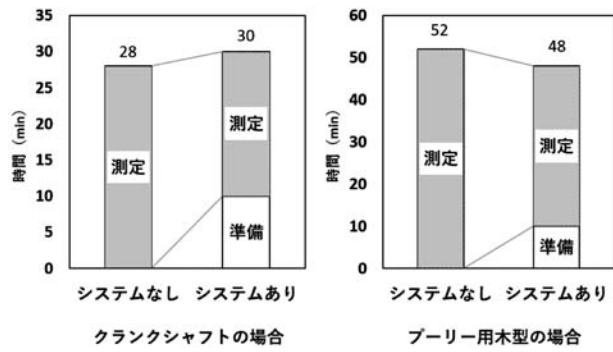


図13 システム適用による作業時間の変化

4. おわりに

本研究では、深度カメラなどを用いて非接触3次元測定作業を効率化する「測定支援システム」を試作し、その有効性を確認した。今後は本研究で得られた知見を関連する研究や道内企業の技術支援などに活用していく。

参考文献

- 1) J. Irving Vasquez-Gomez et.al : Volumetric Next-best-view Planning for 3D Object Reconstruction with Positioning Error, International Journal of Advanced Robotic Systems, No.11 Vol.159, pp.1-13, (2014)

高齢者サービスにおける動作計測のためのセンサ利用技術

栗野 晃希, 前田 大輔, 中島 康博, 橋場 参生

Utilizing Method of Sensors for Motion Measurement at Eldercare Service

Kouki KUWANO, Yasuhiro NAKAJIMA, Daisuke MAEDA, Mitsuo HASHIBA

キーワード：高齢者，センサ，動作計測

1. はじめに

介護保険や高齢者福祉の制度では、高齢者が住み慣れた地域で安心して日常生活を営めるよう、心身の状況や介護度に応じて、介護サービスや生活支援、介護予防教室などのサービス（以下、高齢者サービスと称する）が提供されている。高齢者サービスでは、比較的心身状態が良好で自立した高齢者や介護度の低い高齢者に対して、身体機能の維持を目的に、運動器の訓練や転倒予防教室などのプログラムが実施されている。こうしたプログラムでは、高齢者の健康状態、体力水準などを把握するため、3ヶ月ごとを目安に、問診や図1のような体力測定が実施されている¹⁾。

体力測定では、様々な測定項目に対し、ミスのない計測と、動作の観察に加えて、安全に配慮する必要がある²⁾。例えば、図1下のTUG (Timed Up & Go) テストでは、椅子から立ち上がり、3 m先に置かれたコーンをまわって再び着座するまでの時間を測定するが、その際、下記の注意事項が示されている。

- 走らないように指示する。走ったと判断した場合は口頭で注意して、再度測定する。
- コーンを回るときは、転倒しないように注意させる。
- 再び座るときには、椅子の位置を確認させるとともに、後方や左右に転倒しないように注意させる。



片足立ち
時間測定

SS-5
(立ち座り回数)

ファンクショナルリーチ
(手先を伸ばした距離)



TUG (Time Up and Go)
(椅子立ち上がりー歩行ー着座時間)

図1 体力測定例

体力測定に携わるスタッフは、これらの注意事項に配慮しながら、同時に測定も行うため負担が大きい。実際、介護サービス事業者や介護予防教室の担当者から、体力測定業務におけるスタッフの負担軽減を求める要望が寄せられていた。

そこで、本研究では高齢者の体力測定において、これまで人手で行っていた測定を、各種センサを用いて自動化することで介添えや動作観察、記録を行うスタッフの負担を軽減できると考え、測定ツールの開発に取り組んだ。

2. 体力測定ツールの構成検討

2.1 設計方針と測定物理量

体力測定の項目は一般に握力、片足立ち時間、TUG、5 m歩行時間（通常時・最大時）等が推奨されており、さらに事業所の規模や高齢者の特性に応じて、測定項目が追加、選択されている。これらの項目をセンサを利用して、人に代わって自動測定するツールの開発にあたり、事業者と意見交換した。その結果、以下のことが重要であることが分かった。

事業名：経常研究

課題名：高齢者向けサービスを支援する運動計測技術の開発

- (1) これまでの測定業務にスムーズに導入できること
- (2) スタッフ（測定者）の個人差が影響しない測定結果が得られること
- (3) 開発コストがかからないよう配慮すること

(1)については、ツール導入時の混乱を避けるとともに、導入前の測定データと比較可能にするため、被測定者（高齢者）にはこれまでと同様の動作で測定が進むようなツール構成にすることとした。(2)は測定が被測定者側の動作とともに開始され、ツール側のタイマやセンサ入力信号で測定が終了する仕様にする事で、測定者のスキルや被測定者の反応などの個人差の影響を受けないようにした。また、(3)については、測定項目ごとにツールを開発するのではなく、測定する物理量ごとにグループ化することで、同じ物理量の測定に対しては、同様の要素技術を適用することで開発コストが抑えられると考えた。このことを踏まえ、測定項目と測定物理量をまとめた結果、表1のように4つの物理量（時間、回数、距離、力）で分類できることがわかった。

表1 測定項目と物理量

測定項目	物理量
片足立ち時間	時間
TUG(Timed Up & Go)	
5m歩行時間	
ステッピングテスト	回数
SS-5(椅子立ち座り回数)	
ファンクショナルリーチ	距離
3分歩行距離	
長座位体前屈	
握力	力

2.2 開発対象とする測定項目

表1に示した各物理量ごとのグループから、それぞれ代表的な測定項目についてツールを試作することとした。

まず、「時間」の測定項目については、片足立ち時間、TUGテスト、5m歩行時間がある中で、特に測定作業が煩雑で、事業者からの改善要望が高いTUGテストを対象とした。

次に、「回数」の測定項目については、ステッピングテストやSS-5（椅子からの立ち上がり、着座回数）がある中で、時間当たりのカウント数が比較的多く、また注意集中した計数が求められるステッピングテストを対象とした。

「距離」の測定項目については、指先の位置を測定するために、専用で大掛かりな機材が必要だったり、メジャーで慎重に測定する必要がある、ファンクショナルリーチを対象とした。

4つ目の物理量、「力」については、基本的に握力計を用いた「最大握力」を測定することが多い。これは握力が、特に上肢筋力を代表する数値とされていることによる。しかし、

握力値が最大値に達した後も必要以上に握力計を握り続けてしまう高齢者も多く、その一方で、最大値に達するまでの十分な時間も必要であるため、終了の合図を安易に出すことによる、測定のやり直しも発生していた。そこで、「握力」に関しては、測定中の握力値の変化をリアルタイムに可視化し、最大値に達したことが直観的にわかる、測定を支援するツールを開発することとした。

2.3 測定項目に対するマイコン要件とセンサの選定

ツールの構成イメージを図2に示す。センサや握力計の信号をマイコンで取得し、無線でタブレットやスマートフォンに送信したデータを表示し記録する。図中のマイコンとセンサの選定にあたり、センサ出力信号を取得するマイコンに必要な入力ポート（マイコンのインタフェース部）要件を検討した。

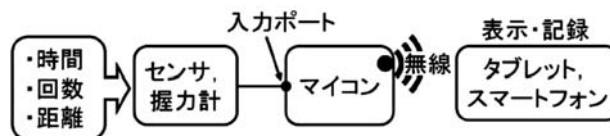


図2 ツールの構成イメージとマイコン

TUGテストでは椅子への着座の有無を検出する。この信号は「有（High）／無（Low）」の2値情報であるため、1チャンネルのデジタル入力ポートで対応できる。センサとしては、被測定者が装着したり把持したりする必要が無く、また動作の邪魔にならないよう、椅子に取り付けた光学式の通過センサで着座と起立を検出する方式とした。

ステッピングテストでは左右脚の足踏み回数の合計をカウントするため、脚の「上／下」の2値情報を左右独立して取得できる2チャンネルのデジタル入力ポートが必要となる。足の僅かな離床でも確実に捉えるために、本開発ではマット型のセンサで検出する方法とした。

一方、ファンクショナルリーチでは取得する情報が増えるため、上記とは異なるインタフェースが必要となる。近年では、距離、重量、角度などを測定するセンサにI²C（アイ・スクウェアード・シー、あるいはアイ・ツー・シー）と呼ばれる、2本の信号線でセンサ信号をシリアルデータとして送信するための通信規格が数多く採用されており、マイコン側もこの規格に対応した製品が市販されている。そこで、ファンクショナルリーチ測定ツールについては、このI²Cポートを備えた光学式距離センサを利用することで、比較的容易にツールを構成できると考えた。

握力測定支援ツールに関しては、握力値をリアルタイムで可視化するために、市販の握力計の中から、握力値を電圧値として出力する機能を備えた製品を選定し、ツールの開発に利用することにした。この電圧値をマイコンで取得するため

には、1チャンネルのアナログ入力ポートが必要となる。

以上の検討結果をまとめると、表2のようになる。マイコンに求められるポートの要件は下記の、3種類となった。

- (1) デジタル入力2チャンネル
- (2) I²Cポート
- (3) アナログ入力1チャンネル

表2 測定項目とセンサ、マイコン要件

測定項目	物理量	マイコン要件	センサ
TUG(Timed Up & Go)	時間	デジタル 1チャンネル	光学式 通過センサ
5m歩行時間	回数		
SS-5(椅子立ち座り回数)	回数	デジタル 2チャンネル	マット型 センサ
片足立ち時間	時間		
ステップングテスト	回数	I ² Cポート	光学式 距離センサ
ファンクショナルリーチ	距離		
3分歩行距離	距離		
長座位体前屈	力	アナログ 1チャンネル	握力計

これらのポート要件を満たすマイコンとして、以降のツールの試作では、図3に示すモノワイヤレス(柵製の無線マイコン「TWELITE DIP (トワイライトディップ)」)を使用することとした。ただし、現在市販されているマイコンにこれらのポートは標準で備わっている場合が多く、他のマイコンでも十分に実現可能である。



図3 ツールに利用したマイコン

3. 体力測定ツールの試作

3.1 TUGテスト測定ツール

前章までの検討に基づき、光学式の通過センサを利用して開発したTUGテストツールを図4に示す。図のa)のようなU型のフレームの一端に発光素子(赤外光LED: OptoSupply製OSI3CA511A)を、もう一端に受光素子(フォトIC: 浜松ホトニクス製S6809)を配置している。この装置をb)のように椅子に装着することで、人の着座の有無を受光素子の励起状態から検出することができる。この変化をマイコンで取得し、時間間隔を記録する。これにより、これまでの測定方法をそのままに、c)のようにTUGテストにおける離座から着座までの「時間」を自動的に測定することが可能になった。

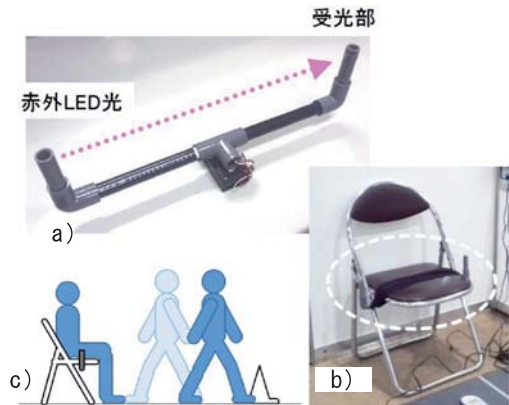


図4 TUGテスト測定ツール(時間の測定)

3.2 ステッピングテスト測定ツール

ステッピングテスト測定ツールを図5に示す。足踏みの検出には、高齢者の「見守り」向けに柵セーコーから販売されている、徘徊検知用の導電繊維マットを用いた。マットには2本の導電繊維が絶縁された状態で編み込まれており、ここに導電体を接触させると2本の繊維が導通する。図左下ののようにアルミテープを足カバーの裏に導電体として貼り付け、このマットの上で足踏みをする時、導通状態が変化し、この変化をマイコンの入力端子から計数すれば、ステップ回数を測定できる仕組みである。図右はタブレット画面に表示した測定結果である。設定時間(5秒間)内における左右のステップ回数がそれぞれ7回と8回で、計15回であったことを示している。また、図右のタブレット画面に矢印で示した矩形は、1ステップごとの左右足の離床時間を表しており、足が確実に離床していることがわかる。



アルミテープを足カバー裏に貼付

図5 ステッピングテスト測定ツール
(回数の測定)

3.3 ファンクショナルリーチ測定ツール

本ツールでは図6のように、壁に設置した光学式のセンサ (Garmin製 Lidar-LiteV3) に手をかざすことで距離を測定する。図の下の波形は腰を曲げて手を差し出した際のセンサとの距離変化をとらえている様子を示している。測定前と測定後の距離の差が測定値となる。このツールでは、センサを人に向けて扱うが、万が一一人の目に入射しても影響のない強度と波長の光を利用した製品を採用した。また、前述のI²Cポートを備えているため、距離をマイコンで容易に取得できる。このように、これまでの測定台やメジャーを用いていた方法を、図のように簡素化することができた。

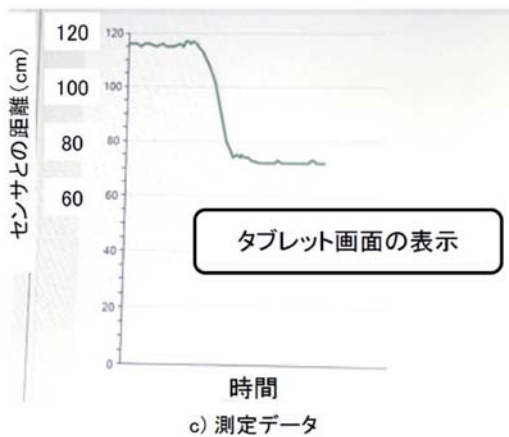
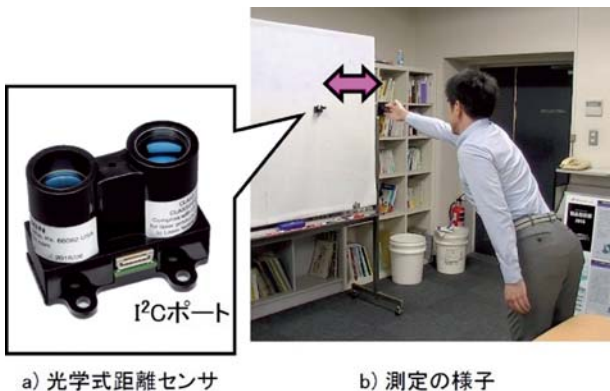


図6 ファンクショナルリーチ測定ツール (距離の測定)

3.4 握力測定支援ツール

図7は握力測定支援ツールを用いて、握力値をタブレット画面上にリアルタイムで波形表示している。図のように、波形の頂点が観測できることで、握力計本体の表示を見ることがなく、最大握力値に達したことを測定者、被測定者の両者が一見して把握できる。



図7 握力変化のリアルタイム可視化ツール

4. 体力測定業務への試験導入

試作した各種ツールを利用した事業者の意見を聞いたところ、すべてのツールに対して測定業務における利便性と負担軽減への期待を感じて頂いた。ただし、一度にすべてのツールを導入することには、不安があるとのことから、はじめにステップングテスト測定ツールを実際の体力測定業務に使用することとなった。図8は従来の目視による計数方法と、ツールによる方法の一人当たりの測定にかかる所要時間を示したグラフである。平均所要時間としては、ツールを利用した場合の方が大きい傾向となったが、標準偏差は小さくなっている。ツールを利用することで平均所要時間が大きくなったのは、目視による従来方法にタブレットを操作する時間が加わったためと考えられる。標準偏差が小さくなったことについては、測定した高齢者が5名で、十分なサンプル数ではないため考察の限界があるものの、ツールを利用することによって、測定作業が安定化した可能性がある。

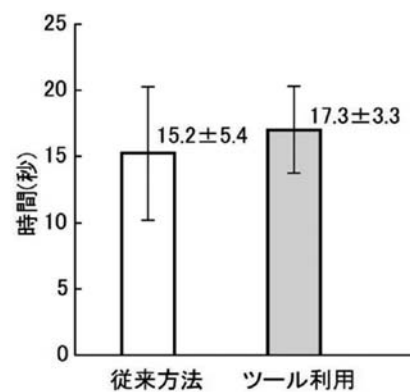


図8 ステッピングテスト1回あたりの所要時間 (N=5)

さらに、ツールを業務の中で使用したスタッフの意見は下記の通りであった。

- (1) 測定をする上で使いやすい。
- (2) 心理的負担は軽い。
- (3) 充電や測定器の準備に、少し手間はかかる。
- (4) しかし、正確性を考えると手間は問題ない。
- (5) 総括として、継続して使い続けるメリットは大きい。

以上のように、おおむね良好な結果であった。(3)については、センサマットとマイコンに電力を供給するバッテリーと、測定結果を記録するタブレットをそれぞれ充電しなければならないことが一因であった。これは、マイコン周辺回路に測定結果を表示する液晶を搭載し、単一のツールとして構成することで、充電の手間が省けると考えられる。(4)については、この感想を聞いたスタッフ以外のスタッフが使用しても、いつでも正確な値が得られることのメリットが大きいとのことであった。結果として、事業者から継続的な使用を求める意向を得ることができた。今後は、長期的な使用による課題やメリットについて調査を継続する予定である。

5. まとめ

高齢者サービスで行われる体力測定に関わるサービススタッフの負担軽減を目的に、各種センサを利用した身体動作の自動計測ツールの開発に取り組んだ。体力測定項目が4種類の物理量の測定で広くカバーできることに着目し、センサとマイコンの要件を整理し、タブレットを用いた可視化と測定値の記録が可能な各種計測ツールを試作した。このうち、ステップングテスト測定ツールをサービス現場に導入し、心理的負担の軽減や、正確な値が得られることのメリットを確認し、継続的な使用を望む意向が得られた。

今後は、改良点の抽出や、他のツールの追加導入の可能性を検討するとともに、センサやIT機器を利用し、一般に人手作業に拠るところが大きいとされる、高齢者サービス内の業務の省力化を図るシステム開発に展開していく予定である。

謝辞

(株)ルシファおよび札幌市東区地域包括支援センターには、高齢者サービスが提供されている現場の見学や測定ツールの開発に対するアドバイスなど、ご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 介護予防マニュアル(改訂版), 厚生労働省, (2012)
- 2) 運動器の機能向上マニュアル(改訂版), 厚生労働省
運動器の機能向上マニュアル検討委員会, (2009)

北海道立総合研究機構工業試験場報告
No.317 (2018)

発行 平成30年 8月31日

発行所 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術研究本部
工業試験場

〒060-0819 札幌市北区北19条西11丁目
電話 (011) 747-2321 (代表)

印刷所 小南印刷株式会社