

ISSN 2759-8314 (Online)

REPORTS
OF THE
INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE
OF SHIZUOKA PREFECTURE
No.17 DECEMBER 2024

静岡県工業技術研究所研究報告

第 17 号
令和 6 年12月

静岡県工業技術研究所
静岡市葵区牧ヶ谷2078番地

INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE OF SHIZUOKA PREFECTURE
2078 Makigaya, Aoi-ku, Shizuoka city, Shizuoka, 421-1298 Japan

目 次

静岡県工業技術研究所（静岡）

I 報 告

- 1 熱ナノインプリントによるマイクロプリズムアレイの成形
..... 豊田敏裕、柳原 亘、志智 亘、中野雅晴 1
- 2 乳酸菌発酵による食品の感覚応答の増強・減弱
..... 堀池隼雄、内田邦敏、鳥居大資 8
- 3 CAE解析に向けたPB、MDFのヤング率導出
..... 船井 孝、田村克浩、及川貴康、長澤 正 15
- 4 トイレ介助機器の開発に向けた高齢者施設調査
..... 易 強、長澤 正、金 承革、富山ひとみ、安部一祐 20
- 5 居住空間での木製品の変色要因の検討
..... 村松重緒、渡邊雅之、菊池圭祐、田村克浩、長澤 正 25

II 研究ノート

- 1 摩擦攪拌接合した半溶融成形材継手の疲労特性
..... 岩澤 秀、鈴木洋光、磯部佑太、高橋正詞、上久保佳則、杉浦泰夫 31
- 2 ポリプロピレン/CNF複合材への高密着な樹脂めっきの作製（第2報）
- 射出成形条件の検討 -
..... 田中宏樹、磯部佑太、岩澤 秀、篠原恵吾 33
- 3 半溶融成形法で作製したヒートシンクの放熱性評価
..... 磯部佑太、岩澤 秀、鈴木洋光、上久保佳則、高橋正詞、杉浦泰夫 35
- 4 セルロースナノファイバー（CNF）配合樹脂の取扱い上の留意点
..... 菅野尚子、野澤 遼、鷺坂芳弘 37
- 5 セルロースナノファイバー（CNF）マスターバッチの希釈方法の検討
..... 結城 茜、野澤 遼、小泉雄輔、菅野尚子、鷺坂芳弘、鏈田真一 39
- 6 樹脂製品中のセルロースナノファイバー（CNF）定量分析手法の開発
..... 野澤 遼、菅野尚子、鷺坂芳弘 41
- 7 タルクがもたらすセルロース繊維の凝集の影響
..... 小泉雄輔、野澤 遼、結城 茜、菅野尚子
鷺坂芳弘、大石芳裕、高野一郎 43

8	音声認識技術を用いた自動車室内音環境の評価に関する研究 - 音声認識を用いた評価システムの構築 - 竹居 翼、木野直樹	45
9	マイクロプリズムアレイにおける熱ナノインプリントによる成形の評価 - 光干渉計を用いた表面粗さ測定 - 柳原 亘、豊田敏裕、中野雅晴、志智 亘	47
10	工業技術研究所のIoT導入支援について（第4報） - 静岡県IoT推進ラボ（第五期）の紹介 - 山下清光、望月紀寿、鈴木悠介、松下五樹 岩崎清斗、横井功毅、赤堀 篤	49
11	RFIDによる倉庫内の在庫管理について 望月紀寿	51
12	生産計画自動作成のアルゴリズムおよびアプリケーションの開発 松下五樹、岩崎清斗、山下清光、織田直樹、荒津有希	53
13	IoT大学連携講座による導入支援（第2報） 横井功毅、山下清光、望月紀寿、鈴木悠介、松下五樹、岩崎清斗	55
14	静岡県製食べる後発酵茶（ラペソー）の開発 - 静岡県製とミャンマー製の成分比較 - 山本佳奈恵、長房秀幸、松野正幸、齋藤雅子、齋藤克栄、内野昌孝	57
III 抄 録		
1	照明光学の原理により画像投影を実現するマイクロプリズムアレイの開発 - 実装の実現可能性に関する研究 - 豊田敏裕、柳原 亘、志智 亘、中野雅晴	59
2	豆乳タンパク質の凍結融解分画におけるpHと塩濃度の影響 松野正幸、村上和弥、下山田 真、守田和弘	60
3	豆乳中の7S及び11Sタンパク質とリポキシゲナーゼの通電加熱による熱変性速度論の研究 村上和弥、下山田 真、松野正幸	61

沼津工業技術支援センター

I 報 告

- 1 静岡県オリジナル清酒用種麴の開発
 鈴木雅博、袴田雅俊、飯塚千佳世 62
 横澤 賢、高木啓詞、勝山 聡、岩原健二、杉本芳邦
 岩下和裕、白石洋平、和久 豊、望月正隆、戸塚堅二郎
- 2 熱間鍛造後の金属組織の予測技術の開発
 - 動的再結晶粒径の予測手法の検討 -
 是永宗祐 67

II 研究ノート

- 1 金属材料の引張強さに及ぼす引張速度と試験片採取方向の影響
 木村光平、是永宗祐、久保田 信、金子大和 71

富士工業技術支援センター

I 報 告

- 1 サステナブルファッションに寄与する廃棄繊維を利用した製紙技術の開発
 伊藤 彰、河部千香、深沢博之、鈴木重好 73

II 研究ノート

- 1 セルロースナノファイバー製造時のエネルギー低減のためのTEMPO酸化法の適用及び解繊方法の検討
 中島大介、山崎利樹、田中翔悟、山下晶平 79
- 2 AIを活用した古紙原料の判別に関する研究
 齊藤和明、井出達樹、増井裕久 81

浜松工業技術支援センター

I 報 告

- 1 路面に図形を描画する微細光学部品の開発
 - 作製した光学部品の形状評価 -
 中野雅晴、志智 亘、柳原 亘、豊田敏裕 83
- 2 マイクロプリズムアレイによる図形投影照明の設計
 - 光学シミュレーションによる投影像の評価 -
 志智 亘、中野雅晴、豊田敏裕 88
- 3 IoT・機械学習を活用した機器の稼働状態評価（第2報）
 太田幸宏 94

4	EMC試験における伝導妨害波測定 of 始業前点検法 - 疑似電源回路網の故障の一例 -	山田浩文	100
5	EV向けコネクタ・スイッチの端子・接点用めっきの耐久性評価方法	吉岡正行、高木 誠、木野浩成	106
II 研究ノート			
1	2つの固定アンテナを用いた電波到来方向の簡易的推定	上野貴康、山田浩文	112
2	アルミニウム合金の積層造形における造形物の形状評価	大澤洋文、田光伸也、植松俊明、望月智文 木野浩成、早川邦夫、久保田蓮太	114
3	積層造形法によるステンレス鋼の内部欠陥にレーザ条件が及ぼす影響	植松俊明、望月智文、田光伸也、木野浩成、大澤洋文	116
4	アルミニウム合金積層造形物の緻密化や化学成分に造形雰囲気を与える影響	望月智文、植松俊明、田光伸也、木野浩成、大澤洋文	118
5	生分解性繊維の作製と分解性評価	大木結以、鈴木重好、近藤 隆	120
III 抄 録			
1	照明光学系の原理で投影を実現するマイクロプリズムアレイの開発：光学設計と照明性能の数値評価	志智 亘、中野雅晴、豊田敏裕	122

REPORTS
OF THE
INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE
OF SHIZUOKA PREFECTURE

静岡県工業技術研究所研究報告

静岡県工業技術研究所
静岡市葵区牧ヶ谷2078番地

INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE OF SHIZUOKA PREFECTURE
2078 Makigaya, Aoi-ku, Shizuoka city, Shizuoka, 421-1298 Japan

熱ナノインプリントによるマイクロプリズムアレイの成形

照明音響科 豊田敏裕 柳原 亘
光科 志智 亘 中野雅晴

Fabrication of micro-prism arrays using thermal nanoimprint

TOYOTA Toshihiro, YANAGIHARA Wataru, SHICHI Wataru and NAKANO Masaharu

Automotive lighting devices, such as headlamps and rear combination lamps, have advanced functionalities, but it is required that the sizes of functional modules be further reduced. Communication lighting is a potential novel functionality for automotive lighting devices that has been extensively studied. In communication lighting, communication between humans and vehicles is enhanced by vehicles projecting pictograms onto the road. In this study, optical elements called microprism arrays (MPAs), which constitute numerous small prism arrays, were fabricated as a technology for the realization and commercialization of communication lighting.

The process for the molding of the microprism array involves thermal nanoimprinting, in which structures are printed onto replicas via the pressing of preheated resins and die stampers. The stampers were fabricated using ultra-precision electroforming. The masters required for stamper fabrication were constructed using two-photon polymerization using a femtosecond pulsed laser.

Thanks to this, transparent masters that can be used as optical elements were also successfully realized. These processes yielded replicates with high shape accuracy. Furthermore, this study demonstrated that these replicas can serve as optical elements for projecting pictograms that resemble the intended optical design.

Keywords: Micro-prism array, MPA, Thermal nanoimprint, Electroforming, Micro fabrication

車載照明製品は多機能化が進み、個々の機能に対応するモジュールにはさらなる小型化が求められている。本研究では、路面にピクトグラムを投影することで、人とクルマがコミュニケーションを図る「コミュニケーションライティング」を実現する製品化技術として、微細なプリズムで構成される光学素子、マイクロプリズムアレイの成形に取り組んだ。

マイクロプリズムアレイは熱ナノインプリントプロセスにより成形した。熱ナノインプリントプロセスは、熱で軟化させた樹脂とスタンパーと呼ばれる金型をプレスすることで形状を転写してレプリカを成形する技術である。スタンパーは精密電気鋳造により成形した。また、スタンパーの成形に必要な原盤は、光学素子としても機能するよう、フェムト秒パルスレーザーを用いる二光子重合法により透明なフォトリソを用いて造形した。その結果、成形されたレプリカは、形状精度が高く、設計と同等のピクトグラムを投影できることを確認した。

キーワード：マイクロプリズムアレイ、MPA、熱ナノインプリント、電気鋳造、微細成形

1 はじめに

車載照明製品はCASEに対応する多機能化が進んでいる。ヘッドランプやウィンカーの機能に加え、LiDARやミリ波レーダーなどのセンサーや付加価値を持たせた照明機能など多岐にわたる。なかでも、日本でも令和8年頃から解禁の見込みとなっている「コミュニケーションライティング（路面投影）」は、関連法規（UN/ECE No. 149 No. 48等）の整備も

進んでおり、ヘッドランプの新しい機能として注目を集めている。

コミュニケーションライティングは、路面にピクトグラムを投影することで人とクルマがコミュニケーションを図ることを支援する照明機能である。図1に示すような、法規で定められたピクトグラム（図形）をヘッドランプやリアランプから路面に投影して歩行者や運転手に情報を伝える役割を果た

す。

コミュニケーションライティングはレンズとマスクを用いた投影光学系による方法や、デジタルマイクロミラー素子を用いたプロジェクター方式等が検討されているが、あまねく人々がその恩恵を享受するには性能とコストが両立した製品開発も必要不可欠である。

そこで本研究では、照明光学系の原理でピクトグラムを投影可能で、小型化と品質の両立が可能と考えられる、マイクロプリズムアレイ（図2）の成形に取り組んだ。

マイクロプリズムアレイは一辺が1 mmにも満たない微小なプリズム群で構成される光学素子で、屈折の原理で方向を制御された光を重ね合わせてピクトグラムを投影できる。微細構造を有するマイクロプリズムアレイは、射出成形のような従来の成形方法では成形が困難であると考えられる。そこで本研究では、スマートフォン用のマクロレンズアレイの成形等で実績のある、熱ナノインプリントプロセスを成形方法として採用した。また、本研究は、オープンイノベーションにより、有用な技術を効果的に組み合わせることで、短期間にMPAの成形技術を確立することも目的とした。したがって、本研究で利用した

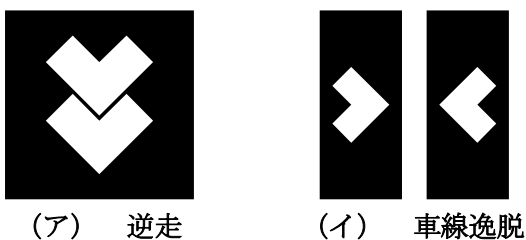


図1 コミュニケーションライティングで採用予定のピクトグラムの一例

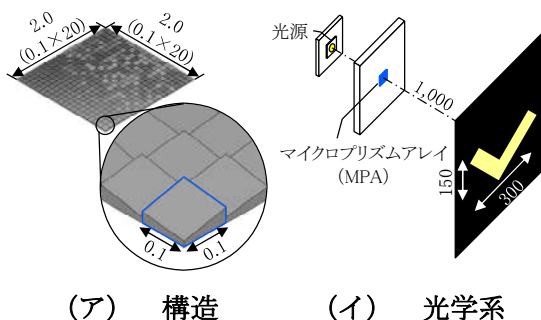


図2 マイクロプリズムアレイの概要
図中の単位はmm。マイクロプリズムの傾斜角は、投影したいピクトグラムに合わせて最適化されている。

個々の技術には、関係機関の保有技術やノウハウが含まれるため、成形条件に関わる具体的な数値や手続きには言及しない。

2 方法

2.1 成形方法の概要

本研究では、熱ナノインプリントプロセスによりMPAを成形した。熱ナノインプリントプロセスは軟化させた樹脂にスタンパーの形状を転写して成形品（レプリカ）を得る方法である。スタンパーは、実際に成形したい形状が反転したもので、精密電気鋳造により成形した。さらに、スタンパーの成形に必要な原盤は光造形により作製した。なお、スタンパー成形結果については発表済み^{1) 2)}であるが、全体を俯瞰するために、全ての手順を時系列に沿って述べる。

2.2 成形対象のMPAモデル

図2に示す通り、一辺が0.1 mmのマイクロプリズムを20個×20個配列したMPAを用いて、MPAから1,000 mm先の幅300 mm、高さ150 mmの範囲にVマークを投影するMPAモデルを成形の対象とした。当該モデルは、マイクロプリズムアレイ設計ソフトウェア VirtualLab Fusion（LightTrans International GmbH製）を用いて、各々のマイクロプリズムの傾斜角と傾斜の方位を最適化することで設計した。マイクロプリズムの最大傾斜角は15°で、プリズムの高さは約0.04 mmに相当する傾斜であった。設計されたMPAモデルでは、図3に示すような投影像が得られると予測される。設計方法や想定される投影品質に関する詳細は別稿^{3) 4)}を参照されたい。



図3 照明シミュレーションにより予測された投影像

2.3 原盤の造形方法及び評価方法

(1) 造形方法

原盤は実際に成形したい形状に相当し、フェムト秒パルスレーザーを用いる二光子重合法^{5) 6)}による光造形装置 LithoProf3D-GSII (Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH 製) を用いて造形した。造形装置の仕様を表1に示す。原盤の材質には、光学特性に優れ、微細形状の造形に適しているフォトリソマール OrmoComp (Microresist Technology GmbH 製) を選択した。フォトリソマールの仕様を表2に示す。当該装置は、独立した直交3軸の走査機構を備えている。X軸(横方向)とZ軸(高さ方向)による走査とY軸(奥行き方向)とZ軸(高さ方向)による走査を交互に繰り返す井桁構造により、25 mm 四方、厚さ4 mmの光学ガラス基板の中央にMPAを積層造形した。なお、ガラス基板とMPAの密着性を向上させるため、ガラス基板にはあらかじめプラズマ処理を施した。MPAの造形に最適な造形パラメーターは、事前の予備試験により決定(表3)し、MPAを構成するマイクロプリズムを1つずつ、計400個(20個×20個)造形した。造形は、当該技術を確立した、ドイツ・Fraunhofer Institute for Silicate Research ISCの研究者が担当した。

表1 光造形装置の仕様

ハッチ方向とは造形(走査)方向を指す。

最少造形サイズ	100 nm (ハッチ方向)
	270 nm (積層方向)
解像度	250 nm 以下
最大造形体積	W100 mm×D100 mm×H50 mm
造形速度	200 mm/s
パルス間隔	250 fs 以下
波長	522±3 nm

表2 フォトリソマールの仕様

光重合波長	300 ~ 410 nm
体積収縮率	5 ~ 7 %
屈折率(重合後)	1.520 @ 589 nm
アッベ数	47
解像度	100 nm

表3 原盤の成形パラメーター

ハッチ距離とは、成形ピッチを指す。

ハッチ距離	約 500 nm
積層厚	約 200 nm
造形速度	約 100 mm/sec

(2) 評価方法

ハイブリッドレーザー顕微鏡 OPTELICS HYBRID L7 (レーザーテック(株)製) を用いて、原盤のマイクロプリズムの傾斜面を点群データとして測定し、その点群データから回帰して求めた傾斜角と傾斜角の設計値を照合した。

また、あらかじめ作製した投影装置(写真1)を用いて、スクリーンに投影したピクトグラム輝度分布を二次元色彩輝度計 CA-2000A (コニカミノルタ(株)製) を用いて測定した。

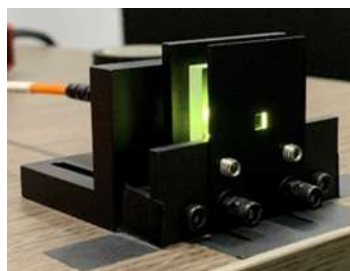


写真1 ピクトグラム投影装置

発光面が直径0.4 mmのLEDファイバー光源の光をMPAの背面から入光させ、約0.2 mm四方の矩形開口を通してピクトグラムを投影する。

2.4 スタンパーの成形方法及び評価方法

(1) 成形方法

精密電気鋳造(図4)によりニッケル製のスタンパーを成形した。精密電気鋳造では、ニッケル板を陽極に、導電膜処理された原盤を陰極に接続し、それらをニッケルめっきに浸漬し、電流を印加することでNiめっき液中のNiイオンを介して電流が流れ、陰極(原盤)の表面にNi層が形成される。十分な厚さのNi層が形成されたら、原盤からNi層を剥離することでスタンパーが完成する。成形は精密電気鋳造技術を開発したTOWA(株)(京都府)の技術者が担当した。

(2) 評価方法

原盤と同じ方法で、マイクロプリズムアレイの傾斜面に対応するスタンパー表面の形状から回帰し

て求めた傾斜角と、同様の方法で求めた原盤のそれを照合した。

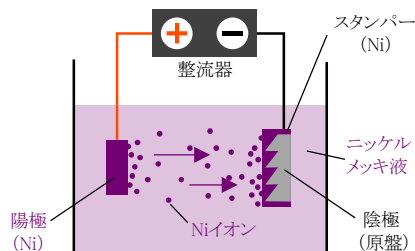


図4 精密電気鋳造の基本原理

電気めっきの原理により原盤上にニッケル層が形成され、原盤とは反転した形状を成形できる。

2.5 レプリカの成形方法及び評価方法

(1) 成形方法

熱ナノインプリントプロセス（図5）によりアクリル製のMPAを成形した。熱ナノインプリントプロセスは、加熱して柔らかくした樹脂とスタンパーをプレスすることでスタンパー上の形状が転写され、レプリカと呼ばれる成形品が得られる。成形条件の導出とスタンパーの洗浄を兼ねたテスト成形を数回繰り返した後、レプリカを成形した。成形は当該プロセスに熟練したTOWA(株)（京都府）の技術者が担当した。

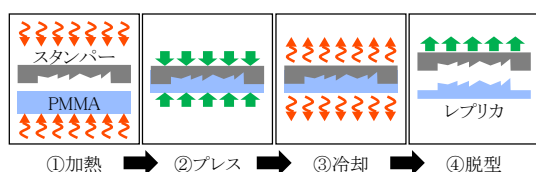


図5 熱ナノインプリントプロセスの原理

熱で軟化させた樹脂にスタンパーの形状を転写する。加熱温度などの成形条件が形状の転写精度に影響する。

(2) 評価方法

原盤及びスタンパーと同様の方法で、レプリカのマイクロプリズムの傾斜面の表面形状から回帰して求めた傾斜角とそれらの設計値を照合した。

また、ピクトグラムの輝度分布は、原盤の評価と同じ方法で測定した。

3 結果と考察

3.1 原盤の造形結果

造形に要した時間的コスト等を表4に示す。総体積は 0.11 mm^3 と非常に小さな形状であるが、総ハッチ距離は $1.4 \times 10^6 \text{ mm}$ 以上に達し、成形には16時間以上の時間を要した。写真2に、造形された原盤の外観及びその一部を拡大した顕微鏡写真を示す。 0.1 mm 四方のマイクロプリズムが規則的に配列されたMPAが成形されていることが確認できた。また、積層造形に由来する積層段差は視認できなかった。

図6に、傾斜角の設計値と造形した原盤の傾斜角の照合結果を示す。造形誤差は平均 0.34° 、標準偏差 0.4° と良好な結果を得た。

また、図7に示す通り、原盤を投影装置（写真1）に取付けてピクトグラムを投影した結果、予測（図3）と同様の投影像が得られることが分かった。

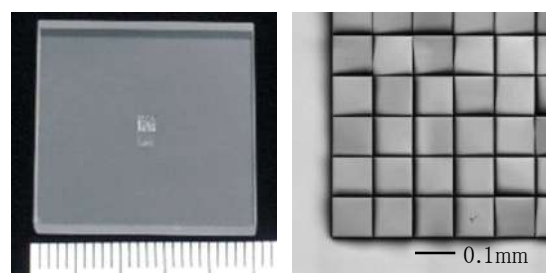
上記の結果から、原盤は所望のピクトグラムを投影するために必要十分な精度で造形されていることが分かった。なお、原盤の造形精度に関する評価の詳細は別稿を参照されたい⁷⁾。

一方、積層造形は造形方法に由来する微視的な段差が生じている可能性が高い。平滑面を必要とするマイクロプリズム面には好ましくない表面粗さやうねりがマイクロプリズム面に生じている可能性がある。原盤の表面性状を詳細に評価した結果は別稿⁸⁾にて報告している。

表4 原盤の造形コスト

400個のマイクロプリズムを1つずつ造形するのに要した総コスト。

体積	約 0.11 mm^3
造形時間	約16.5 h
総ハッチ距離	約 $1.4 \times 10^6 \text{ mm}$



(ア) 外観 (イ) 顕微鏡写

写真2 造形された原盤

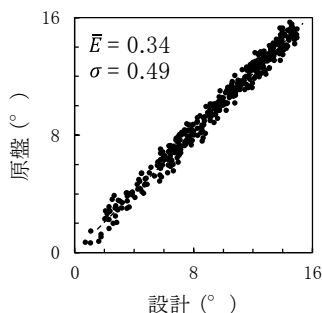


図6 原盤の傾斜角分布

傾斜角の設計値と、原盤の形状測定データ（点群データ）から回帰した傾斜角の比較。



図7 原盤による投影像

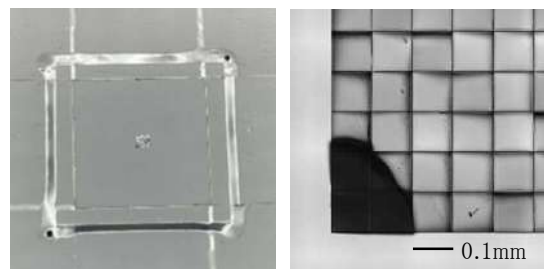
3.2 スタンパーの成形結果

スタンパーの成形には、原盤への導電膜形成などの前処理に約8時間、精密電気鋳造によるNi層形成に約14時間を要した。写真3に、成形されたスタンパーの外観及びその一部を拡大した顕微鏡写真を示す。凸形状である原盤から反転した形状が成形されたので、スタンパーは凹形状を呈している。規則的に配列された、MPAの構造が成形されていることが確認できたが、その一方で、顕微鏡写真の左下には黒い影が観察された。これは原盤がスタンパー状に残渣として付着した様子を捉えたものである。

図8に、原盤の傾斜角に対するスタンパーの傾斜角の照合結果を示す。成形誤差は平均 0.19° 、標準偏差 1.51° であった。精密電気鋳造の成形誤差は原盤の造形誤差より十分小さく、測定時のヒューマンエラーと同程度であると考えられる。このことから、レプリカの成形精度よりも原盤の造形精度がレプリカの形状精度に強く影響を与えることが推察される。一方で、スタンパーの成形誤差の標準偏差は、原盤の造形精度のその約4倍程度大きくなった。これは、スタンパー表面に付着した原盤由来の残渣による影響が考えられる。水酸化ナトリウムや水酸化カリウムなどの水酸化物による溶解や、

熱ナノインプリントの予備成形で残渣は除去することができる。

上記の結果から、精密電気鋳造により原盤の反転形状をスタンパーに成形できることが分かった。なお、スタンパーの成形精度に関する評価の詳細は別稿⁷⁾を参照されたい。



(ア) 外観 (イ) 顕微鏡写

写真3 成形されたスタンパー

原盤が反転した凹形状を呈している。顕微鏡写真の左下の黒い部分は、原盤が残存している箇所。

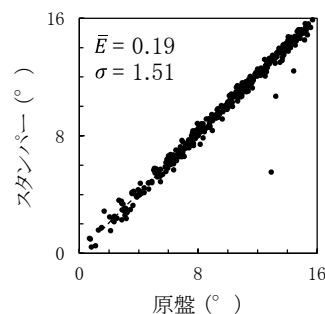


図8 スタンパーの傾斜角分布

原盤の形状測定データ（点群データ）から回帰した傾斜角と、スタンパーの形状測定データ（点群データ）から回帰した傾斜角の比較。

3.3 レプリカの成形結果

写真4に、成形されたレプリカの外観及びその一部を拡大した顕微鏡写真を示す。0.1mm四方のマイクロリズムが規則的に配列されたMPAが成形されていることが確認できた。

図9に、傾斜角の設計値と成形したレプリカの傾斜角の照合結果を示す。造形誤差は平均 0.27° 、標準偏差 0.62° と良好な結果を得た。この成形誤差は、原盤の造形誤差とほぼ同程度であり、精密電気鋳造はMPAの金型を成形する方法に適していることが分かった。

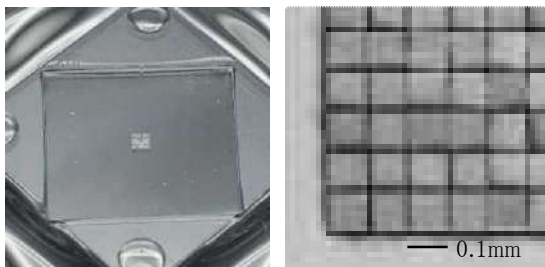
また、図10に示す通り、レプリカを投影装置（写

真1) に取付けてピクトグラムを投影した結果、予測(図3)と同様の投影像が得られることが分かった。

一方、投影したピクトグラムには矩形の枠が見られた。投影装置の前面に取付けられた開口は、MPAとの接触を防ぐために、MPAの外形(2 mm 四方)よりも若干大きく作った。その隙間から漏れた、光源からの直接光が原因である。さらに、熱ナノインプリントプロセスの都合上、レプリカを薄片化したことにより、レプリカと開口の相対的な位置関係が原盤のそれとは異なることや、成形時の熱収縮によりレプリカが原盤よりも小さくなっていることも要因と考えられる。

上記の結果から、熱ナノインプリントプロセスは、MPAを成形する有用な成形方法の1つであることが明らかとなった。なお、レプリカの成形精度に関する評価の詳細は別稿⁷⁾を参照されたい。

なお、成形を繰り返すたびにスタンパーの離型性が悪化することもわかった。成形条件を事前に導出し、水酸化溶液でスタンパーを事前に洗浄しておけば、6枚程度のレプリカは成形可能であると推察される。



(ア) 外観 (イ) 顕微鏡写

写真4 成形されたレプリカ
原盤と同等の凸形状を呈している。

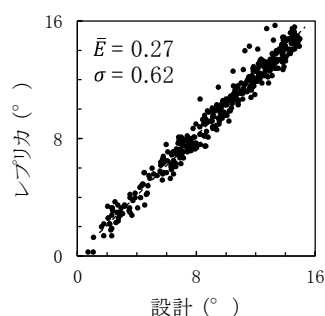


図9 レプリカの傾斜角分布

傾斜角の設計値と、レプリカの形状測定データ(点群データ)から回帰した傾斜角の比較。

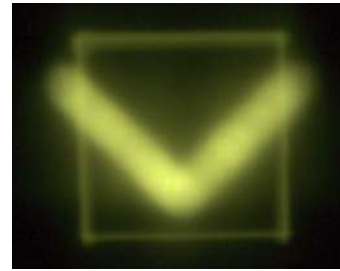


図10 レプリカによる投影像

矩形の枠状の像は開口とMPAの隙間からの漏れ光によって形成されたもの。

4 まとめ

本研究では、熱ナノインプリントプロセスが、ピクトグラムを投影可能な微細光学素子であるマイクロプリズムアレイに適した成形方法の1つであることを実証した。併せて、本研究は、オープンイノベーションを前提とし、最新の加工技術を効果的に組み合わせることで微細光学部品を高精度に成形可能な技術を短期間に確立できることも示した。

現在は、複数のレプリカを一度に成形可能なスタンパーを1つの原盤から成形する実証に挑戦している。

また、投影されたピクトグラムの質の評価も進めており、結果がまとまり次第報告を予定している。

謝辞

原盤の造形にあたり、ドイツ・Fraunhofer Institute for Silicate Research ISC (FISC)には多大な協力をいただいた。併せて、FISCとの調整には、ハイデルベルグ・インストルメンツ株式会社齋藤氏の多大なご尽力を賜った。スタンパー及びレプリカの成形は、TOWA株式会社(京都府)に御協力いただいた。

参考文献

- 1) 豊田敏裕 他：ピクトグラムを投影可能なマイクロプリズムアレイの開発—投影能力と金型作製の実証—。静岡県工業技術研究所研究報告書, 16, 46-48 (2023)。
- 2) Toyota T. et al.: A Development of Micro-Prism Arrays achieving image projection by principle of lighting: Feasibility study of the implementation, Proceedings of the 30th Session of the CIE, 1, 1237-1243 (2023)。
- 3) Shichi W. et al.: A development of Micro-

- Prism Arrays achieving image projection by principle of lighting: optical design and numerical estimation of lighting performance. Proceedings of the 30th Session of the CIE, 1, 1219-1226 (2023).
- 4) 志智亘 他：マイクロプリズムアレイにより図形を投影する照明の設計－効率的な開発に向けた光学シミュレーションを用いた投影像の評価－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 17, (2024)
 - 5) Steenhusen S. et al.: Two-photon polymerization of hybrid polymers for applications in micro-optics, Proceeding of SPIE 9353, 93530K (2015).
 - 6) 丸尾昭二：3次元デジタルマイクロファブリケーション. 情報処理学会研究報告, 2013 (7), 1-4 (2013).
 - 7) 中野雅晴 他：路面に図形を描画する微細光学部品の開発－作製した光学部品の形状評価－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 17, (2024).
 - 8) 柳原亘 他：マイクロプリズムアレイの開発－表面性状測定による成形性の評価－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 17, (2024).

乳酸菌発酵による食品の感覚応答の増強・減弱

食品科 堀池隼雄
静岡県立大学 内田邦敏
鳥居食品株式会社 鳥居大資

Control of food sensory responses by lactic acid bacteria fermentation

HORIIKE Hayao, UCHIDA Kunitoshi and TORII Daishi

We have been working on the development of fermented foods using microorganisms^{1,2,3}), and in doing so, we discovered that by fermenting habanero, a type of chili pepper, using lactic acid bacteria from Suruga Bay, which is in Shizuoka, Japan, can make it less spicy and mellow. In this research, we also aimed to develop technology to control sensations such as spiciness and hotness through fermentation by elucidating the fermentation conditions and the mechanism by which habaneros become less spicy and mellow. As a result, by fermenting habanero paste for one week at 15°C with the addition of 3% NaCl using lactic acid bacteria Is332 from Suruga Bay, the response of the pungency receptor (TRPV1) was attenuated by more than half. The emulsification state of habanero paste changed due to fermentation, suggesting that the fat-soluble pungent components and their state of existence may have been denatured and the influx of capsaicin into cells may have been inhibited, resulting in a decrease in spiciness.

Keywords:Lactic acid bacteria, Habanero pepper, fermentation, pungency receptor

これまで微生物を用いた発酵食品の開発に取り組んできた^{1,2,3)}が、その中で、唐辛子の一種であるハバネロを乳酸菌を用いて発酵することで、辛味がまろやかに感じられることがわかった。本研究では、さらに、発酵条件やハバネロの辛味がまろやかになるメカニズムを解明することで、発酵により辛味・温度などの感覚を制御する技術の開発を目指した。その結果、駿河湾由来の乳酸菌 Is332 を用いて、3% NaCl 添加、15°C の条件でハバネロのペーストを 1 週間発酵することで、辛味受容体 (TRPV1) の応答が 1/2 以下に減弱することが明らかとなった。また、発酵によりハバネロペーストの乳化状態が変化していたことから、メカニズムとして、脂溶性である辛味成分やその存在状態が変性し、細胞内へのカプサイシン流入が阻害されたことで辛味が減弱した可能性が示唆された。

キーワード：乳酸菌、ハバネロ、発酵、辛味受容体

1 はじめに

本県ではこれまでに、県内の海洋資源から収集した微生物を用いて様々な発酵食品を開発してきた。その中で、唐辛子の一種であるハバネロを駿河湾由来の乳酸菌を用いて発酵することで、辛味がまろやかに感じられることがわかった。近年、食品を食べたときに感じる感覚に関連する市場のニーズは大きく、例えば子供用の甘口カレーにかけただけで大人向け辛口カレーになるスパイスソースが販売されている。一方で、辛い食べ物が苦手な人でもかけただけで食べられるような

調味料の開発への需要もあり、食べたときの感覚を制御する技術の開発が望まれている。本研究では、ハバネロの辛味がまろやかになる発酵条件を決定し、そのメカニズムを解明することで、発酵により辛味・温度などの感覚を制御する技術の開発を目指した。

2 方法

2.1 受容体応答が減弱する発酵条件の最適化

(1) 乳酸菌を用いた発酵条件の検討

ハバネロの果実 (図 1) をフードプロセッサー

MK-K61 (パナソニック (株) 製) を用いてハバネロ:水=2:1の重量比でペースト化し、重量比3%のNaClを添加した。これに、以下に示す4株の乳酸菌いずれかの乾燥粉末を、重量比0.1%となるよう添加して15°Cで1週間発酵を行い、pHの変化を測定した。なお、これらの乳酸菌は、令和2年度から4年度に実施された新成長戦略研究「マリノバイオ産業を振興するための海洋由来微生物を活用した新たな食品開発」において、県が収集した海産物や海洋深層水を分離源として同定されたものであり、良好なpH低下能を示した乳酸菌株 (*Lactiplantibacillus plantarum*) である。

- ・ Is117 (駿河湾海藻 (タンバノリ) 由来)
- ・ Is315 (田子 (西伊豆) 海水由来)
- ・ Is332 (田子 (西伊豆) 海水由来)
- ・ Is363 (田子 (西伊豆) 海水由来)



図1 ハバネロ

左: ハバネロの実 右: ハバネロペースト

(2) 受容体応答の評価

ア. サンプルの調製

2.1 (1) で調製した発酵ハバネロペーストを試食し、特に辛味がまろやかになったと感じたIs332発酵ハバネロペーストを試験対象とした。遠心分離機H-19 α 、ローターRF-109K (株)コクサン製) を用いて3,000rpmで3分間遠心分離した後、上清25 μ Lを25mLの還流溶液(140mM NaCl, 5mM KCl, 2mM CaCl₂, 2mM MgCl₂, 10mM HEPES, 10mM グルコース: pH7.4に調整)に加えた後ボルテックスミキサーで十分に攪拌し、1,000倍希釈溶液とした。これをさらに10倍ずつ段階希釈し、10,000倍希釈液及び100,000倍希釈液を調製した。

イ. カルシウムイメージングに用いる細胞の維持

ヒト胚性腎臓由来のHEK293細胞を、10%FBS

(Cell Culture Technologies CC3008-502)、50units/mL ペニシリン (Gibco)、50mg/mL ストレプトマイシン (Gibco) 及び2mM GlutaMAX (Gibco) を含むダルベッコ改変イーグル培地 (DMEM、Sigma) にて37°C、5% CO₂ 中で維持した。

ウ. カルシウムイメージング

OPTI-MEM 培地 (Invitrogen 社製) にて human TRPV1 チャネルの cDNA をトランスフェクション (導入) した HEK293 細胞を、3.3 μ M の Fluo-4 (カルシウム蛍光指示薬、同仁化学研究所製) を含む培地中で37°C、30分間インキュベート (定温静置) した。この細胞が接着したカバーガラスを2.1 (2) アと同組成の還流溶液で洗浄し、蛍光を還流溶液中で測定した。カバーガラスを重力流システムに接続されたチャンバーに取り付け、2.1 (2) アで調製した各希釈倍率の発酵ハバネロペースト上清を流した。ここで、TRPV1とは、トウガラシの辛味成分(カプサイシン)や42°C以上の熱、酸などの刺激に反応して開口するチャネル分子である。細胞内に存在する結合部位にカプサイシンが結合することで開口し、細胞内にカルシウムイオンなどが流入することで辛味や痛みの信号として脳にシグナルを送ることが知られている。カルシウムイメージングでは、カルシウムと結合して蛍光を発するFluo-4が細胞内に導入されており、細胞の蛍光強度を蛍光顕微鏡などで測定することで受容体の応答を評価することができる。

2.2 感覚応答を減弱するメカニズムの解明

発酵による辛味の減弱のメカニズムについて、以下の3つの仮説が考えられた。

- 仮説1: 辛味成分であるカプサイシン等の分解
 - 仮説2: TRPV1の結合部位へのカプサイシン結合の阻害
 - 仮説3: 細胞内へのカプサイシン流入の阻害
- これらの仮説1~3について検討するため、以下の(1)~(3)に示した方法で検討を行った。

(1) 仮説1: カプサイシンが分解された可能性の検討

2.1 (1) で調製した4種の発酵ハバネロペースト100mgにメタノール50mlを加え、高速振盪機CM-1000 (東京理化器械(株)製) を用いて15min振盪した。その後、0.45 μ mのフィルターでろ過し、UPLCを用いてカプサイシン含量を測定した。UPLCの条件を表1に示す。

表1 カプサイシン分析条件

区分	内容
装置	Waters ACQUITY UPLC System (ACQ-SM, ACQ-BSM, ACQ-PDA)
カラム	ACQUITY BEH C18 1.7 μ m 2.1 \times 100mm Column
溶離液	A: 0.1% H ₃ PO ₄ in water B: Acetonitrile
流速	0.6 mL/min
グラジエント	時間 (min) %A %B
	0.00 60 40
	8.00 60 40
	9.00 0 100
	11.00 0 100
	11.20 60 40
	13.00 60 40
カラム温度	40 $^{\circ}$ C
検出波長	280nm
試料注入量	2 μ L

(2) 仮説2：結合部位へのカプサイシン結合阻害の検討

これまでに、乳酸の存在下で TRPV1 の応答が減弱するケースが報告されている⁴⁾。Is332 の発酵により産生される乳酸濃度においてハバネロの辛味が減弱するか、以下の方法で検討を行った。

ア. 発酵ハバネロペースト中の乳酸量

2.1 (1) で調製した4種の発酵ハバネロペーストを4,000 \times g で10min 遠心分離して上清を分取した。この上清を Milli-Q 水で10倍に希釈し、0.20 μ m フィルターでろ過した後、UPLC 測定に供した。UPLC の条件を表2に示す。

表2 乳酸分析条件

区分	内容
装置	Waters ACQUITY UPLC System (ACQ-SM, ACQ-BSM, ACQ-PDA)
カラム	ACQUITY HSS T3 1.8 μ m 2.1 \times 100mm Column
溶離液	A: 20mM NaH ₂ PO ₄ in water (pH2.5に調整) B: 60% Acetonitrile in water
流速	0.4 mL/min
グラジエント	時間 (min) %A %B
	0.00 100 0
	3.00 100 0
	3.50 0 100
	4.50 0 100
	5.00 100 0
	6.00 100 0
カラム温度	40 $^{\circ}$ C
検出波長	210nm
試料注入量	2 μ L

イ. 乳酸がハバネロの TRPV1 応答に及ぼす影響

2.1 (1) と同様の方法で NaCl 添加ハバネロペーストを調製し、乳酸菌を添加せず15 $^{\circ}$ Cで1週間静置したペーストから上清を14 μ L 分取し、5.79mg/mL の乳酸14 μ L を加えて、2.1 (2) アと同組成の還流溶液で14mL にメスアップし、1,000倍希釈溶液とした。これをさらに10倍ずつ段階希釈し、10,000倍希釈液及び100,000倍希釈液を調製した。カルシウムイメージングに用いる細胞の維持及びカルシウムイメージングは、2.1 (2) イ及び2.1 (2) ウと同様に行った。

(3) 仮説3：細胞内へのカプサイシン流入阻害の検討

カプサイシンは脂溶性の物質であり、疎水性の上皮細胞を通り抜けて感覚神経に発現する TRPV1 に作用する。一方、*Bacillus* 属によるカプサイシンの生分解などにより生成するカプシエイトはカプサイシンの類似化合物であるが、カプサイシンよりも疎水性が大きいため細胞膜の脂質二重層にトラップされ、辛味を感じづらいことが報告されている⁵⁾。一方で、ハバネロの色素は、辛味成分カプサイシンと同じく脂溶性である。そのため、ハバネロペースト上清の色、カプサイシン含量及び粒度分布を調べることで、カプサイシンの脂溶性の変化が明らかになると考え、以下の方法で検討を行った。

ア. ハバネロペースト上清のカプサイシン含量

2.1 (1) で調製した4種の発酵ハバネロペーストを4,000 \times g で10min 遠心分離した後、上清200 μ L を2mL チューブにとり、1.8mL のメタノールを加え、高速振盪機 CM-1000 (東京理化工機(株)製)を用いて15min 振盪した。その後、12,000 \times g で10min 遠心分離した上清を UPLC 測定に供した。UPLC の条件は表1と同様である。

イ. ハバネロペースト上清の色調

分光測色計 CM-5 (コニカミノルタ(株)製)を用いて測定を行った。2.1 (1) で調製した Is332 発酵ハバネロペーストを4,000 \times g で10min 遠心分離した上清200 μ L を微小シャーレに入れ測定した。

ウ. 粒度分布

2.1 (1) で調製した Is332 発酵ハバネロペーストを4,000 \times g, 10min 遠心分離して上清を分取した。分取した上清を蒸留水にて10倍希釈し、

粒度分布測定装置 Zetasizer Ultra (Malvern Panalytical 社製) を用いて動的光散乱法にて粒度分布を計測した。粒子径は、体積基準で評価した。

エ. pHの調整によるハバネロペースト上清の色調変化

2.1 (1)と同様の方法でペースト化し、NaCl及び乳酸菌の添加や、発酵を行っていないハバネロペーストを、8,000 × gで10min遠心分離し、上清を分取した。リン酸でpHを1.66に調整して目視で色調を確認した。その後、15°Cで1週間静置し、目視で色調を確認した。

3 結果および考察

3.1 受容体応答が減弱する発酵条件の最適化

(1) 乳酸菌を用いた発酵条件の検討

1週間発酵後に測定したpHを以下の表3に示す。発酵開始前のハバネロペーストのpHは4.77であったが、いずれの菌株も、発酵によりpHが低下した。試食をしたところ、乳酸菌なしに比べ、いずれの株も辛味が減弱しており、特にIs332で顕著であった。

表3 1週間発酵後のハバネロペーストのpH

菌株	なし	Is117	Is315	Is332	Is363
pH	4.66	3.83	3.53	3.51	3.49

(2) 受容体応答の評価

Is332を用いて発酵したハバネロペーストのTRPV1応答を評価したところ、どの希釈倍率でも、乳酸菌なしのハバネロペースト上清と比べ、応答の減弱が確認された(図2)。特に10,000倍希釈で比較すると、応答強度に2倍以上の差が見られた。このことから、3% NaCl及び0.1% Is332を添加して15°Cで1週間発酵を行うことで、ハバネロペーストのTRPV1応答が1/2以下に減弱することがわかった。

3.2 感覚応答を減弱するメカニズムの解明

(1) カプサイシンが分解された可能性の検討

これまでの報告で、*Bacillus*属の細菌や、麹菌の発酵により、カプサイシンが分解され、辛味が減弱するケースが報告されている^{6,7)}。乳酸菌による発酵でハバネロペースト中のカプサイシン

が分解されているか検討するため、カプサイシン含量の測定を行った結果、ハバネロペースト中のカプサイシン量は、発酵による変化が見られなかった(図3)。このことから、カプサイシンの分解により発酵ハバネロペーストの辛味が減弱した可能性は小さいことがわかった。

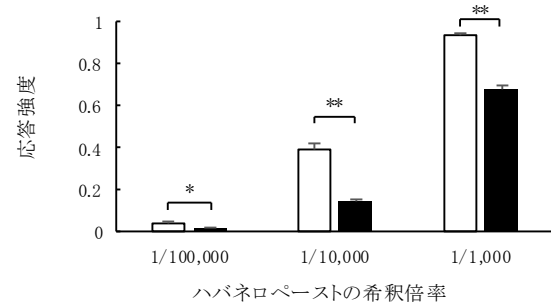


図2 乳酸菌 Is332 を用いた発酵によるカプサイシン

□ 乳酸菌無し ■ Is332

応答強度は 1μM カプサイシンに対する相対強度
Mean+SEM, N=142-457

*p < 0.05, **p < 0.01 (t-test)

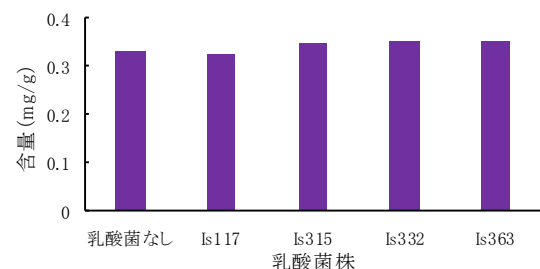


図3 発酵ハバネロペースト中のカプサイシン含量

(2) 結合部位へのカプサイシン結合阻害の検討

ア. 発酵ハバネロペースト中の乳酸量

これまでに、乳酸の存在下でTRPV1の応答が減弱するケースが報告されている⁴⁾。Is332の発酵により産生される乳酸濃度においてハバネロの辛味が減弱するか検討するため、まず発酵ペースト上清中の乳酸量を測定した結果を図4に示す。Is332の発酵により、ペースト上清中に5.79mg/mLの乳酸の生成が見られた。

イ. 乳酸がハバネロのTRPV1応答に及ぼす影響

Is332を用いて発酵したハバネロペースト中の乳酸含有量(5.79mg/mL)と同じ濃度となるよう未発酵のハバネロペーストに乳酸を加え、TRPV1応答を評価したところ、応答の減弱は見られなかつ

た(図5)。このことから、発酵に伴い生成した乳酸が、TRPV1へのカプサイシンの結合を阻害するなどして発酵ハバネロペーストの辛味が減弱した可能性は小さい。これまでに乳酸の存在下でTRPV1の応答が減弱したケースでは、50%阻害がみられる乳酸濃度が $20 \pm 12\mu\text{M}$ と報告⁴⁾されており、そのときのカプサイシン濃度は50nMであった。本測定時の乳酸濃度は、1,000倍希釈で $64.3\mu\text{M}$ であったが、カプサイシン濃度が300nM程度であり、この2成分以外にもペースト中の様々な成分が存在していたため、一概に比較はできない。

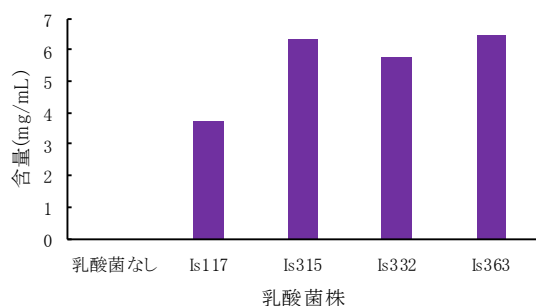


図4 発酵ハバネロペースト上清中の乳酸含量
L-, D-乳酸含む

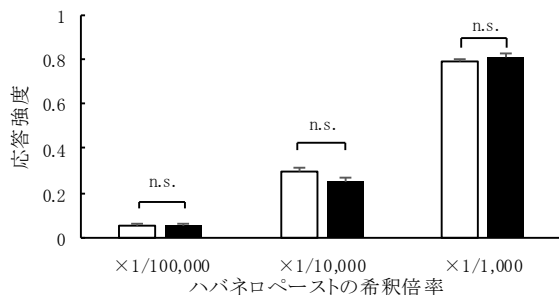


図5 未発酵ハバネロペーストに乳酸を添加したときのカプサイシン受容体TRPV1応答の変化

□乳酸菌無しハバネロペースト ■乳酸菌無しハバネロペーストに乳酸を5.79mg/mL添加
Mean +SEM, N=152-238, t-test

(3) 細胞内へのカプサイシン流入阻害の検討

ア. ハバネロペースト上清のカプサイシン含量

ハバネロペースト上清中のカプサイシン量を測定したところ、発酵によりその量が減少した(図6)。一方、3.2(1)の結果では、ハバネロペースト全体におけるカプサイシン量は発酵により変化しなかった。これらのことから、ペースト中のカプサイシンは、発酵により上清中に存在

しづらい状態に変化したと考えられる。

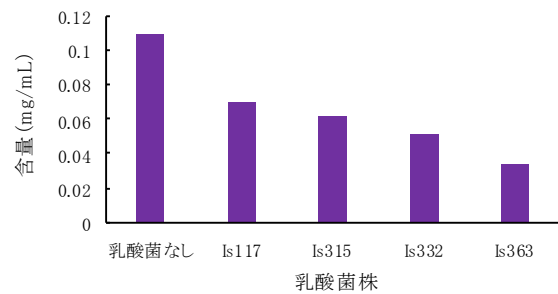


図6 発酵ハバネロペースト上清中のカプサイシン含量

イ. ハバネロペースト上清の色調

乳酸菌無添加のハバネロペーストにおいては、 $L^*a^*b^*$ 色空間における測定値が $L^*:16.44$, $a^*:10.31$, $b^*:22.87$ に対し、Is332を用いて発酵したハバネロペースト上清では $L^*:12.92$, $a^*:3.29$, $b^*:13.08$ であった。 L^* は明度、 $+a^*$ は赤方向、 $+b^*$ は黄方向の色を表しており、Is332で発酵したペースト上清の方が、赤みや黄色みが弱いことを示す結果であった。図7に示すとおり、目視でも発酵により上清の色が薄くなっているように見られた。



図7 ハバネロペースト上清の色の差異

左：乳酸菌なし、右：Is332添加

ウ. 粒度分布

ハバネロペースト上清の粒度分布を測定した結果を図8に示す。乳酸菌なしでは平均径が3,473nmであったが、Is332発酵では2,638nmに変化し、粒子が微細化した。

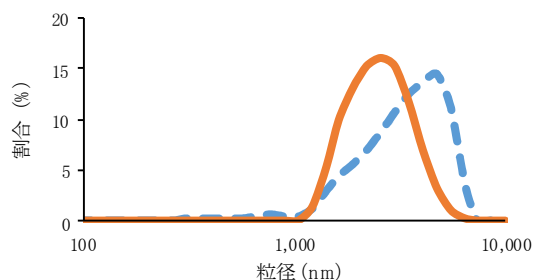


図8 発酵ハバネロペースト上清の粒度分布

--- : 乳酸菌なし、— : Is332、ハバネロペーストを10倍に希釈して測定

エ. pHの調整によるハバネロペースト上清の色調変化

pH 5.14の未発酵ハバネロペースト上清を、リン酸を用いてpH 1.66に調整した結果、直後に色の変化は見られなかった(図9)。トウガラシ色素は、アントシアニン系の色素とは異なり、pHの影響を受けづらいことが知られている。一方、同上清を1週間15℃で静置したところ、pH調整したペースト上清で、液中での沈殿がより明確に認められた(図10、右側)。液部もより澄んでいるように見られたことから、pHの低下により、脂溶性の色素を含む乳化状態が破壊され、油分と水分の分離が進んだ可能性がある。



図9 ハバネロペースト上清
pH調整直後(左:pH5.14、右:pH1.59)



図10 ハバネロペースト上清
pH調整後1週間15℃にて静置
(左:pH5.14、右:pH1.59)

以上ア～エの結果をまとめると、発酵により、ハバネロペーストの乳化状態が変化したと考えられる。このことから、脂溶性である辛味成分やその存在状態が変性し、辛味を減弱させた可能性が示唆された

4 まとめ

【受容体応答を減弱する発酵条件の最適化】

TRPV1受容体の応答の変化が大きい発酵条件として、Is332を用いて、3% NaCl添加、15℃で1週間発酵を行うことで、ハバネロペーストのTRPV1応答が1/2以下に減弱することが明らかとなった。

【感覚応答を減弱するメカニズムの解明】

- (1) ハバネロペースト中の主な辛味成分であるカプサイシンについて、発酵による含有量の減少は見られなかったことから、辛味減弱のメカニズムは、カプサイシンの分解によるものではないと考えられた。
- (2) 乳酸菌を添加していないハバネロペーストに、Is332を用いて発酵したハバネロペーストと同濃度の乳酸を添加しても、TRPV1応答に変化がなかった。このことから、乳酸が、結合部位へのカプサイシン結合を阻害して辛味を減弱させた可能性は小さい。
- (3) Is332を用いた発酵により、ハバネロペーストの乳化状態が変化したことで、脂溶性である辛味成分やその存在状態が変化し、細胞内へのカプサイシン流入が阻害され辛味が減弱した可能性が示唆された。より詳細なメカニズム解明のために、今後さらなる検討が必要である。

謝辞

研究にご協力いただきました静岡県立大学薬学部薬剤学分野の尾上誠良教授及び佐藤秀行准教授に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 堀池隼雄 他: 海洋由来乳酸菌を用いた発酵ハバネロソースの開発, 静岡県工業技術研究所研究報告, 16, 54-55 (2023).
- 2) 袴田雅俊 他: 海洋由来乳酸菌を用いた静岡チーズの開発, 静岡県工業技術研究所研究報告, 16, 24-28 (2023).
- 3) 袴田雅俊 他: 海洋由来乳酸菌を用いた発酵甘酒の開発, 静岡県工業技術研究所研究報告, 16, 29-35 (2023)
- 4) de la Roche J. et al. : Lactate is a

- potent inhibitor of the capsaicin receptor TRPV1. *Scientific Reports*, 6, 36740 (2016).
- 5) 川端二功：スパイスの化学受容と機能性, 日本調理科学会誌, 46 (1), 1-7 (2013).
- 6) Cho S. et al. : Biodegradation of capsaicin by *Bacillus licheniformis* SK1230. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*. 57, 335-339 (2014) .
- 7) Lee M. et al, : Bioconversion of Capsaicin by *Aspergillus oryzae*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 63(26), 6102-6108 (2015).

CAE 解析に向けた PB、MDF のヤング率導出

工芸科 船井 孝 田村克浩*
ユニバーサルデザイン科 及川貴康 長澤 正

Young's modulus derivation of PB and MDF for CAE analysis

FUNAI Takashi, TAMURA Katsuhiko, OIKAWA Takayasu and NAGASAWA Tadashi

In recent years, furniture manufacturers have been considering the introduction of CAE (Computer Aided Engineering) analysis as a technology to reduce prototyping and testing. In CAE analysis, Young's modulus is essential. Therefore, in this study, the Young's moduli of PB (Particle Board) and MDF (Medium Density Fiberboard), which are commonly used for furniture, were derived in two ways: one considering infinitesimal deformation theory and the other large deformation theory. Comparison of the two and the good reproducibility of three-point bending tests by CAE analyses using the derived Young's moduli suggest that infinitesimal deformation theory can be applied to PB and MDF up to a stress of at least 18 MPa, and that the linearization of this range can provide Young's modulus utilized in CAE analysis.

Keywords: CAE, FEM (finite element method), PB, MDF, Young's modulus, furniture

CAE (Computer Aided Engineering) 解析は、製品開発において試作と評価試験を削減できる技術として知られている。そのため、近年では家具製造業においても CAE 解析の導入が検討されている。本研究では、家具試験を再現する CAE 解析の実施に向けて、家具に使用される材料である PB (Particle Board) と MDF (Medium Density Fiberboard) のヤング率を「微少変形理論に基づいた手法」及び、「大変形を考慮した手法」で導出した。両者を比較・検証することで、PB と MDF は応力が少なくとも 18 MPa 程度まで微少変形理論が適用でき、この範囲を直線近似することで CAE に活用できるヤング率が導出できることを示した。

キーワード：CAE、FEM（有限要素法）、PB、MDF、ヤング率、家具

1 はじめに

近年の家具は、デザイン重視で設計される傾向がある。すなわち、設計段階で強度や耐久性は考慮されていない。そのため、JIS 等¹⁾で定義される家具試験を実施して、初めて強度不足が明らかになることがある。強度不足となった家具は、再設計、再試験が必要となる。この再設計と再試験は、試験に合格するまで繰り返されるため、開発コストを増加させる要因となる。この問題を解決できる技術として、試作と試験を行うことなく開発中の製品の強度を評価できる CAE (Computer Aided Engineering) 解析が挙げられる。

家具の CAE 解析を実施するためには、使用される材料である木材や木質材のヤング率が必要となる。ヤング率は、引張試験等の材料試験結果から取得で

きるが、木材や木質材については、多くの場合曲げ試験から導出される^{2, 3)}。三点曲げ試験から金属のヤング率を導出する場合、微少変形理論⁴⁾に基づいて導出することが多い。これに対して、木材は金属と比較して柔らかく、変形量が大きいため、大変形を考慮^{5~10)}しなければならない可能性がある。しかしながら、これまでの木材や木質材のヤング率導出では、大変形導入の必要性が検討されず、盲目的に微少変形理論で導出されてきた。

本研究では、家具に使用されることが多い PB (Particle Board) と MDF (Medium Density Fiberboard) を対象に、CAE 解析に活用できるヤング率の導出を目指した。具体的には、PB、MDF に対する三点曲げ試験を、複数の支点間距離で実施した。また、得られた結果から「微少変形理論に基づ

* 現 富士工業技術支援センター 製紙科

く手法」と、「大変形を考慮した手法」でヤング率を導出し、両者を比較した。さらに、導出した値を使って三点曲げを再現する CAE 解析を実施し、実試験の再現性を評価した。これらの比較及び評価から PB、MDF のヤング率を導出するにあたり、大変形導入の必要性和 CAE 解析に活用できるヤング率の導出方法を検討した。

2 方法

2.1 PB、MDF の三点曲げ試験

PB 及び MDF に対して、JIS A5908: 2022 パーティクルボード²⁾及び JIS A5905: 2022 繊維板³⁾を参考とした三点曲げ試験を行った。使用した試験片は、断面積 50 mm×12 mm、長さ 230 mm の直方体形状とした。試験は、精密万能試験機 オートグラフ AG-X plus 50kN (株式会社島津製作所) と付属の三点曲げ試験治具を使用して実施した(図 1)。圧子 の下降速度は 1 mm/min. とし、支点間距離は 120 mm と 180 mm の 2 パターンとした。

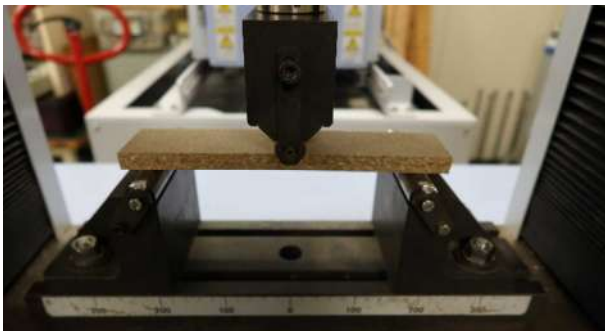


図 1 三点曲げ試験

2.2 ヤング率の導出

三点曲げ試験の結果からヤング率の導出を行った。ヤング率は、微少変形理論に基づいた手法⁴⁾と、堀部らが提案した大変形を考慮した手法⁵⁾の 2 パターンで導出した。

微少変形理論に基づくヤング率は、式(1)及び式(2)による公称応力と公称ひずみを、JIS Z2101: 2009 木材の試験方法¹¹⁾を参考に、7~18 MPa の範囲を直線近似して導出した。ここで、 σ は公称応力、 P は圧子が試験片を押す荷重、 L は支点間距離、 b は試験片の幅、 h は試験片の厚さ、 ε は公称ひずみ、そして z は試験片のたわみ量である。

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{6hz}{L^2} \quad (2)$$

大変形を考慮した導出には、式(3)を使用した⁵⁾。ここで、 E はヤング率、 P は式(1)と同様に圧子が試験片を押す荷重、 L は支点間距離の 1/2、 I は試験片の断面二次モーメント、そして無次元荷重 $\beta^2 (=PL^2/EI)$ は式(4)で定義される値である。式(4)の無次元中央たわみ δ_y は式(5)で定義され、式(5)の z は式(2)と同様に試験片のたわみ量である。大変形を考慮したヤング率は、式(1)の公称応力が 18 MPa のときの荷重 P とたわみ量 z を使用して導出した。

$$E = \frac{Pl^2}{\beta^2 I} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \beta^2 = & 0.650322 \sin\left(\frac{\pi}{1.669} \delta_y\right) \\ & + 0.312678 \sin\left(\frac{2\pi}{1.669} \delta_y\right) \\ & + 0.0741728 \sin\left(\frac{3\pi}{1.669} \delta_y\right) \\ & + 0.0196732 \sin\left(\frac{4\pi}{1.669} \delta_y\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\delta_y = \frac{z}{l} \quad (5)$$

2.3 三点曲げ試験を再現する CAE 解析

導出したヤング率を使って、三点曲げ試験の再現 CAE 解析を実施した。解析は、図 2 に示すように試験片、支点、および圧子で構成された 1/4 モデルで実施した。支点と圧子は剛体扱いとした。境界条件として、図 2 に示すように試験片の切断面に対称条件を定義した。支点と試験片、及び圧子と試験片には接触条件を定義した。また、図 2 のように圧子に対して矢印の方向に 250 N の荷重を負荷し、支点は固定とした。解析は ANSYS Workbench 18.2 (ANSYS Inc.) で実施し、荷重増分は 0.1 (25 N ずつ増加) とした。ポアソン比は 0.29 とした。解析結果から圧子に負荷した荷重と試験片のたわみ量の関係を出し、2.1 節で実施した三点曲げ試験の結果と比較した。

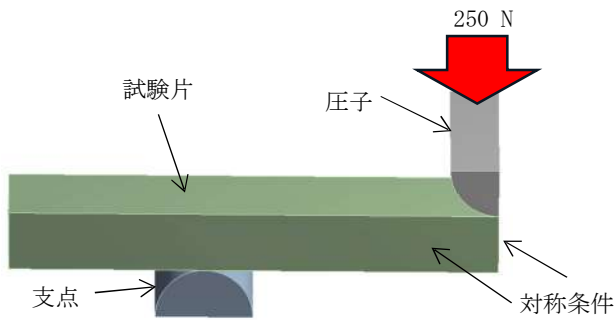


図2 三点曲げ試験の再現 CAE 解析に使用した解析モデル (図1の1/4モデル)

3 結果

PB、MDF に対する三点曲げ試験の結果を図3及び図4の実線に示す。また、三点曲げ試験の結果に基づき、式(1)及び式(2)による公称応力と公称ひずみの関係を図5及び図6の実線に示す。図中のプロットは式(1)で計算された公称応力7MPaと18MPaの点である。図5及び図6のプロット間を直線近似(図中の破線)して得られた傾きを微小変形理論によるヤング率として表1に示す。また、式(1)による公称応力が18MPaのときの荷重値とたわみ量を式(3)～(5)に代入して得られた大変形を考慮したヤング率も表1に示す。さらに、図5及び図6に、大変形を考慮したヤング率を傾きとした

直線を一点鎖線に示す。続いて、導出したヤング率を使ったCAE解析結果から、圧子に負荷した荷重と試験片のたわみ量を出力して図3及び図4に破線(微小変形理論に基づいたヤング率で計算)と一点鎖線(大変形を考慮したヤング率で計算)で示す。

4 考察

まず、微小変形理論によるヤング率と大変形を考慮したヤング率の違いについて議論する。堀部らが提案した式(3)～(5)には無次元変位 δ_r に対して適用範囲があり、 $0 \leq \delta_r \leq 1.669$ とされる。表1から、今回導出したヤング率はすべてこの範囲に入っているため、大変形を考慮したヤング率は適切に導出されていると判断する。また、表1からは、PB、MDF また支点間距離120mm、180mmのいずれにおいても、微小変形理論に基づいて導出したヤング率は、大変形を考慮したヤング率と大きな違いは無い。式(1)及び式(2)は、微小変形理論で仮定された変形⁴⁾をする際に成立する式であるため、仮定された微小な変形を超える大きな変形が生じると、これらの式からの適切なヤング率の導出は期待できない。これに対して式(3)～(5)は、微小変形理論を超えた大きな変形が生じても適切なヤング率を導出できる式として提案されている。これら2種類の式から導

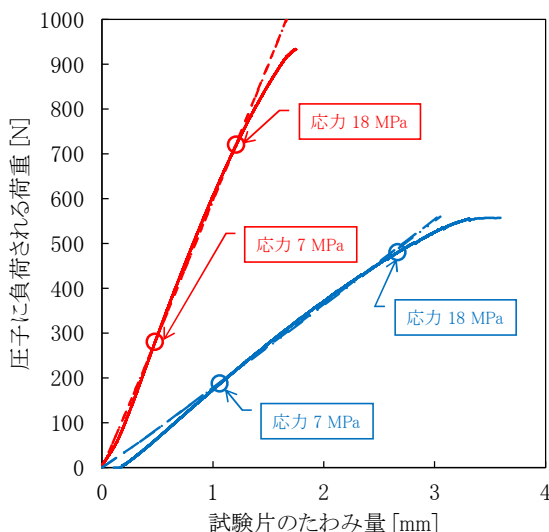


図3 圧子に負荷される荷重とたわみ量の関係 (PB)

- 三点曲げ試験結果(支点間距離120 mm)
- - - CAE 解析結果(支点間距離120 mm、微小変形理論)
- · - CAE 解析結果(支点間距離120 mm、大変形を考慮)
- 三点曲げ試験結果(支点間距離180 mm)
- - - CAE 解析結果(支点間距離180 mm、微小変形理論)
- · - CAE 解析結果(支点間距離180 mm、大変形を考慮)

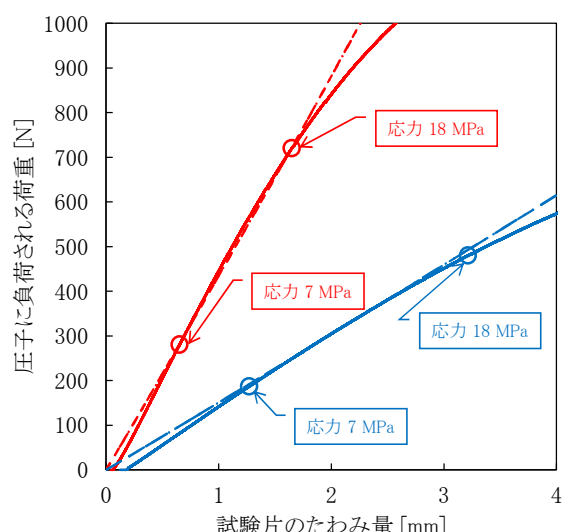


図4 圧子に負荷される荷重とたわみ量の関係 (MDF)

- 三点曲げ試験結果(支点間距離120 mm)
- - - CAE 解析結果(支点間距離120 mm、微小変形理論)
- · - CAE 解析結果(支点間距離120 mm、大変形を考慮)
- 三点曲げ試験結果(支点間距離180 mm)
- - - CAE 解析結果(支点間距離180 mm、微小変形理論)
- · - CAE 解析結果(支点間距離180 mm、大変形を考慮)

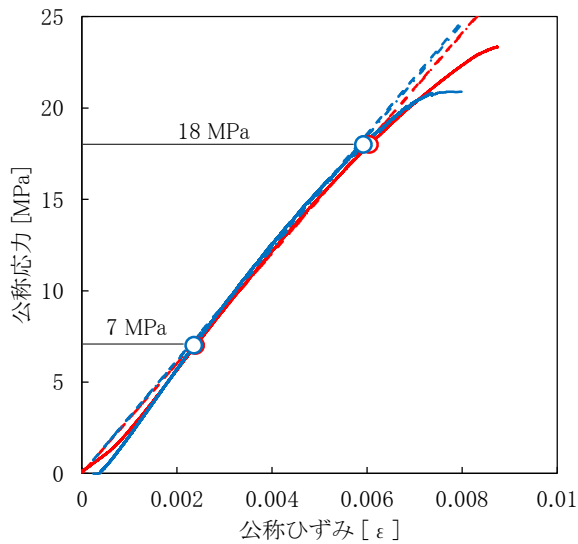


図5 公称応力と公称ひずみの関係 (PB)

- 支点間距離120 mm
- - - 微小変形理論(支点間距離120 mm の試験から導出)
- · - 大変形を考慮(支点間距離120 mm の試験から導出)
- 支点間距離180 mm
- - - 微小変形理論(支点間距離180 mm の試験から導出)
- · - 大変形を考慮(支点間距離180 mm の試験から導出)

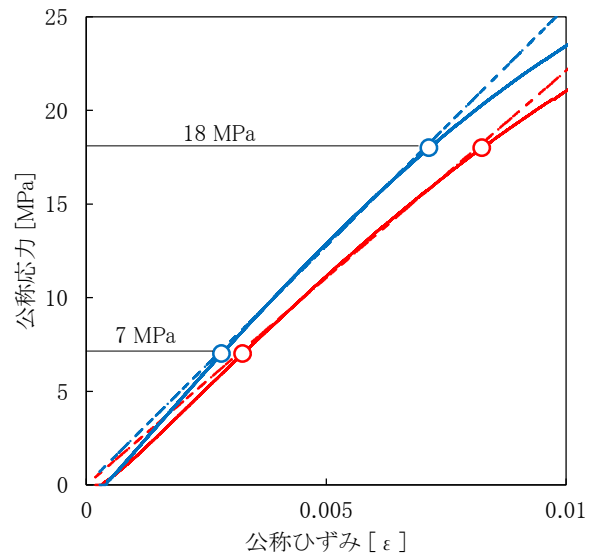


図6 公称応力と公称ひずみの関係 (MDF)

- 支点間距離120 mm
- - - 微小変形理論(支点間距離120 mm の試験から導出)
- · - 大変形を考慮(支点間距離120 mm の試験から導出)
- 支点間距離180 mm
- - - 微小変形理論(支点間距離180 mm の試験から導出)
- · - 大変形を考慮(支点間距離180 mm の試験から導出)

表1 導出されたヤング率

	支点間距離 [mm]	18 MPa の荷重とたわみ量		ヤング率 [MPa]		δ_y
		荷重 [N]	たわみ量 [mm]	微小変形理論	大変形を考慮	
PB	120	719.9	1.211	3013.9	3007.2	2.018×10^{-2}
	180	480.0	2.667	3096.5	3076.4	2.963×10^{-2}
MDF	120	719.9	1.649	2212.5	2210.7	2.748×10^{-2}
	180	479.8	3.214	2552.0	2553.5	3.574×10^{-2}

出されたヤング率に大きな違いが無いことは、本研究が対象としたPB、MDF は少なくとも式(1) による公称応力が 18 MPa までの範囲であれば微小変形理論が適用できる材料といえる。このことは、図3 及び図4 の荷重とたわみ量の関係が、式(1) による応力値で 18 MPa 程度までほぼ線形の関係となっていることからもうかがえる。

続いて、導出したヤング率を使った CAE 解析結果について議論する。図3 及び図4 から、CAE 解析は微小変形理論のヤング率、大変形を考慮したヤング率、いずれも公称応力 18 MPa までの範囲で試験結果を良好に再現できていると判断する。これは、PB、MDF の三点曲げ試験で微小変形理論が仮定できる

ことから自明だが、本研究では導出したヤング率が CAE 解析に活用できることを確認するために実施した。

最後に、支点間距離 120 mm と 180 mm の違いについて議論する。PB、MDF の三点曲げ試験から導出されたヤング率を見ると、PB では支点間距離 120 mm と 180 mm で大きな違いは無い。しかしながら、MDF では 16% 程度の違いが確認できる。MDF において、支点間距離 120 mm、180 mm いずれの試験も公称応力約 18 MPa までは微小変形理論が適用できることが示されている。また、MDF のいずれのヤング率も、CAE 解析において導出元となった三点曲げ試験を良好に再現できている。これらのことから、MDF の

ヤング率はいずれも適切に導出できていると考えられるため、支点間距離 120 mm と 180 mm の違いは、MDF のばらつきに由来するものであると判断する。

以上のことから、本研究が対象とした PB、MDF は、式(1)による公称応力約 18 MPa までの範囲であれば微小変形理論が適用できる。本研究で使用した精密万能試験機をはじめとした多くの試験機は、微小変形理論による式(1)、及び式(2)を実装している。そのため、直線近似を行う範囲(本研究が対象とした PB、MDF の場合 18 MPa まで)を指定するだけで容易にヤング率を導出することができる。これにより、本研究が対象とした MDF のようにばらつきが大きい材料でも、製品ごと、あるいは材料のロットごと等、適宜曲げ試験を実施してヤング率を導出することで、材料のばらつきに対応することが可能である。また、そのようにして導出したヤング率は、そのまま CAE 解析で活用でき、応力 18 MPa までの範囲だが、PB と MDF の変形挙動を良好に再現することができる。

5 まとめ

本研究では、家具試験を再現する CAE 解析実施のため、近年の家具によく利用される PB と MDF のヤング率を「微小変形理論に基づく手法」及び、「大変形を考慮した手法」で導出し、両者を比較した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 本研究が対象とした PB、MDF に対する三点曲げ試験は、少なくとも応力 18 MPa 程度までは微小変形理論が適用できる。
- 本研究が対象とした PB、MDF のヤング率は、材料力学(微小変形理論)に基づいて計算された三点曲げ試験の「応力」と「ひずみ」を 18 MPa までの範囲で直線近似することで導出できる。
- 導出したヤング率は、応力 18 MPa までの範囲で PB、MDF の変形挙動を良好に CAE 解析で再現できる。

参考文献

- 1) 日本産業規格：家具—収納ユニット—強度及び耐久性試験方法. JIS S1200, (2012). など
- 2) 日本産業規格：パーティクルボード. JIS A5908, (2022).

- 3) 日本産業規格：繊維板. JIS A5905, (2022).
- 4) 前澤成一郎訳：改訂材料力学要論, 改訂版(コロナ社, 東京), (1972). など
- 5) 堀部忠志 他：はりの大たわみの近似式に基づくヤング率測定法(片持ちはりおよび3点曲げの場合). ばね論文集, 2020 (65), 43-49 (2020).
- 6) Khatam H. et al. : On the evaluation of the elastic modulus of soft materials using beams with unknown initial curvature. Strain, 49(5), 420-430 (2013) .
- 7) 大槻敦巳 他：圧縮円リングを用いた薄板/細線の新ヤング率測定法. ばね論文集, 2002(47), 27-31 (2002).
- 8) 大槻敦巳 他：片持ちはりを用いた可撓性積層薄肉材料の革新的ヤング率測定法. ばね論文集, 2009 (54), 41-48 (2009).
- 9) Ohtsuki A. : An innovative method for measuring Young's modulus of multi-layered materials using postbuckling behavior. Procedia Engineering, 10, 1041-1046 (2011) .
- 10) 大槻敦巳 他：円リングにおける自重大たわみ変形を利用した薄肉積層材料の新ヤング率測定法(自重大変形積層円リング法). ばね論文集, 2018 (63), 53-62 (2018).
- 11) 日本産業規格、“木材の試験方法”、JIS Z2101、(2009)

トイレ介助機器の開発に向けた高齢者施設調査

ユニバーサルデザイン科 易 強 長澤 正
常葉大学 金 承革 富山ひとみ
有限会社京和工業 安部一祐

Survey of elderly care facilities for the development of toilet assistance devices

YOTO Yi Tsuyoshi, NAGASAWA Tadashi, KIM Sunghyek, TOMIYAMA Hitomi and ABE Ichiyu

We conducted surveys at five elderly care facilities as part of the development of a new toilet assistance device. According to the questionnaire survey, among the residents of the facilities (434 individuals), 58% still have some ability to stand during toilet assistance. Through the work time analysis using video footage of on-site toilet assistance, we were able to identify the duration of the transfer movements that put the greatest burden on the caregiver. If it is possible to maintain the standing posture of the user during the round trip to the toilet, it is estimated that the time required for caregiver transfer tasks could be reduced by 62%.

Keywords:toilet assistance, questionnaire, work time analysis, behavior observation, transfer

新しいトイレ介助機器の開発に向けて5箇所の高齢者施設調査を行った。アンケート調査では、施設の入居者(434人)のうち、トイレ介助の際に少し立つ能力が残っている人は58%であった。現場のトイレ介助の映像から作業時間を分析した結果、負担の大きい移乗動作時間を抽出できた。もしトイレまで往復移動の間に利用者が立位の姿勢を保ったままであれば、介護職員の移乗作業にかかる時間は62%短縮可能と試算された。

キーワード：トイレ介助、アンケート調査、作業時間分析、行動観察、移乗

1 はじめに

本研究の背景の1つには、介護人材の不足がある。令和3年度「介護労働実態調査」¹⁾によると、全国8,809箇所の高齢者施設からの回答で介護職員が不足と感じているのは64.4%であった。厚生労働省が第8期介護保険事業計画に基づいて試算した介護職員の必要数は、2040年度には約280万人と予測し、2019年度の介護職員の約211万人に比較すると、高齢化のほぼピークとみられる2040年度には約69万人不足になる見込みである²⁾。

研究背景のもう1つは、介護職員によるトイレ介助の負担が大きいことである。介護職員の1日の業務を時間分析した報告によると、トイレ介助(移乗や移動も含む)の占める割合は2割前後である³⁾。

トイレ介助(排泄介助)は、被介護者の身体能力によって、介助の仕方が異なる。寝たきりの場合は、主にベッドの上でオムツ交換などの方法で介助を行い、立つことができないが座位姿勢が取れる場合は、ベッドサイドのポータブルトイレを利用して介

助する方法もある。少し長い距離を歩ける場合は、歩行器を利用してトイレまで誘導して介助することが可能となる。短時間でも掴まり立ちできる被介護者の場合は、車いすに移乗して、トイレに備える手すりに掴まり、介護職員が排便・排尿を介助するケースが多い。本研究は介護職員による移乗介助負担の多いこのケースに注目して、被介護者の身体能力を最大限に活かしながら、介護職員の介助負担の低減に繋がる機器の開発を目指す。

開発の前段階として、高齢者施設におけるトイレ介助の現状を調査し、トイレ介助の作業時間分析を行ったので報告する。

2 方法

2.1 調査概要

高齢者施設に入居(利用)する被介護者のうち、少し立つ能力が残っている人のトイレ介助に携わる関係者にアンケート調査を実施した。また、トイレ介助の実態を現場でビデオ撮影し、作業時間分析

を行った。現場調査の際に、起立補助試作機を使って、関係者にトイレ介助にまつわる意見のヒアリングも実施した。

本調査全般について、常葉大学静岡水落キャンパス倫理審査委員会の承認を得た（承認番号研静 21-11）。

2.2 アンケート調査

今後開発するトイレ機器に関する意見をより広範囲に収集するために、高齢者施設の少し立つ能力が残っている利用者、その家族、介護職員、施設管理者、施設経営者、トイレ介助機器などの福祉機器取扱事業者計6種類の関係者向けにアンケート用紙を作成した。各調査対象の属性情報の他、トイレ介助に関連する調査項目を中心にまとめた(表1)。

表1 アンケート内容

対象者	質問項目
利用者	①1日に受ける介護回数
	②移動手段
	③介助人数
	④不満点
利用者の家族	①介助経験
	②1日の介助回数
	③介助時間
	④介助人数
	⑤不満点
介護職員	①1日の介助回数
	②移動手段
	③介助時間
	④使用道具
	⑤不安
	⑥負担を感じる点
施設管理者	①介助により立てる人数
	②使用道具・機器
	③これから導入したいもの
	④課題
介護施設経営者	①よく利用する機器
	②情報の入手方法
	③これから導入したいもの
	④導入の際の重要視点
	⑤購入費用の上限
福祉機器取扱事業者	①販売する機器
	②販売方法
	③改善したい点
	④販売する際の重要視点
	⑤販売価格上限
	⑥販売する際の課題

2.3 トイレ介助現場ビデオ撮影と作業時間分析

施設の利用者が共有トイレを利用する全過程（ベッドからトイレの往復移動含む）をビデオ撮影し、その映像を行動観察記録プログラム OBSERVANT EYE（(株) IT サポート製）に取り込み、起きた事象や動作の時刻リストを記録し、個々の作業時間を算出した（図1）。



図1 OBSERVANT EYEによる作業時間分析の例

撮影された動画を再生し、観察した動作の始まりに、トイレ介助中の動作に対応するボタンを押すことにより、タイムスタンプがOBSERVANT EYEのログに記録される。

2.4 起立補助試作機で現場のヒアリング

本研究実施前に製作した起立補助試作機(図2)を現場に持込み、介護職員などに試用してもらい、トイレ介助に関連する意見を聴取した。

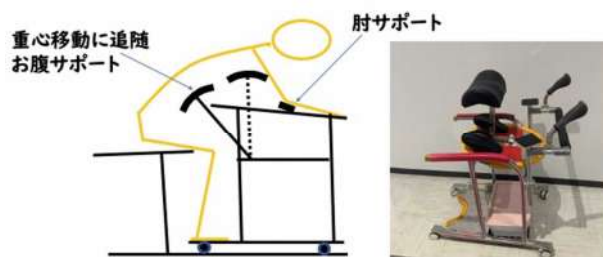


図2 起立補助試作機

手で前方のバーを把持し、肘を支点に上体を起こす。その間、お腹を部分パットに寄りかかる。

3 結果

3.1 アンケート調査結果

高齢者施設 5 箇所、福祉機器取扱業者 4 社から計 83 件の回答を得た。主な結果は以下にまとめる。

- ・利用者：1 日のトイレ回数 6 回、介護職員 1 人、転倒に不安を感じる
- ・利用者家族：車いすへの移乗が大変、1 分以上立っていてほしい
- ・介護職員：トイレ介助は 1 日平均約 15 回（最大 60 回）、その際に利用する小物が多い（累計 14 種以上、表 2）、利用者の事故が不安、移乗時に体重が掛かるので大変
- ・施設管理者：利用者（計 434 人）のうち、今回のトイレ介助の対象者で、且つ少し立つ能力が残っている人は 58%であった、使いやすさを重視、安価なモノが良い
- ・施設管理者：使いやすさ、安全性、値段が機器導入の際に重要視される、利用者個別に対応できる機器が少ないと感じている
- ・福祉機器取扱事業者：トイレ機器の安全性、使いやすさ、値段を重視する、ユーザを見つけて実際に試してもらうのが困難

表 2 トイレ介助に必要な小物

	トイレ介助に必要な小物	出現頻度
1	清拭	38
2	パット	38
3	陰洗ボトル	34
4	オムツ	20
5	手袋	16
6	ゴミ袋	13
7	新聞紙	10
8	トイレットペーパー	5
9	ボディソープ	5
10	膝掛けタオル	3
11	介助用エプロン	2
12	消毒液	2
13	薬やワセリン	2
14	保湿パック	2
15	お湯	2

3.2 トイレ介助現場ビデオ撮影と作業時間分析の結果

高齢者施設 2 箇所計 6 名の利用者がトイレ介助を受けた際のビデオ撮影を行い、行動を時間分析した結果を表 3 に示す。現状のベッドから車いす、車いすから便座、便座から車いす、車いすからベッドの 4 回移乗から、立位に近い姿勢を保持する新しいトイレ介助機器に乗る方式に変える場合、移乗時間は 62%低減可能と試算された。試算例は図 3 に示す。

また、トイレに備えてある手すりは座る方向の正面に対して斜め方向にあるため、体をひねって掴まる必要があり、利用しづらいと観察された。移乗、立位補助の場面での介護職員の作業負担は大きいことが再確認された。



図 3 立位方式で移動する際に移乗時間の試算

表 3 作業時間分析の結果

単位: 秒	排泄以外のトイレ介助時間	移動時間	移乗時間	新方式で短縮可能な移乗時間	新方式で移乗時間の低減率
平均	428	53	161	100	62%
A施設-1	585	75	176	107	
A施設-2	364	46	87	48	
A施設-3	231	62	37	26	
B施設-1	672	47	380	218	
B施設-2	304	58	165	117	
B施設-3	411	32	118	82	

3.3 起立補助試作機で現場のヒアリング結果

起立補助機の使い方に関して、「立った後に掴まる場所が変わることも認知症の多い現場では通じないことも多いと予想される」、「説明しないと見ただけではわからない」、「施設の中でも、小さな段差（トイレの入り口や防火扉の枠など）があり、大きな車輪が必要」、「狭いトイレもあり、小回りの利く移動機器がほしい」という意見があった。「新しい機器提案する場合には、使用方法に慣れた従来機器の改良ならば、利用者や職員に受け入れやすい」という意見があった。

4 考察

高齢者施設において、入居者のうち、トイレ介助の対象者で、且つ少し立つ能力が残っている人は58%であった。大石らの調査⁴⁾では、①「膝関節や股関節の伸展が可能」、②「足底でしっかり体重を支えられる」、③「膝関節などに荷重による痛みがない」、④「重度の円背がない」の4つの条件でスタンディングリフト利用対象者を制限したところ、施設の利用者の内、対象者が31.3%となったという報告がある。今回の調査の58%とは開きは大きいように見えるが、同報告書には、「重度の円背がない」利用者は9.2%しかないとも報告された。つまり、少し立つ能力が残っている人の中には、円背の方が多いと推測される。これは、新しい機器開発において、要注意ポイントの1つと考えられる。

今回の調査では、介護職員が1日トイレ介助平均は約15回（最大60回）であった。利用者の事故が不安、移乗時に体重が掛かるので大変という申告が多かった。これについて、介護職員が行うトイレ介助は1日平均約14.5回、70%の人は身体的負担、50%の人が精神的負担、90%の一人介助の介護職員が危険と感じたと村上らも同様な報告⁵⁾があった。1回のトイレ介助に要する時間は6分22秒（最小1分50秒～最大30分）とも報告された。これはトイレに入ってから出るまでの時間であった。我々の調査では、トイレまでの往復時間を入れて、排泄時間を除いた平均値では7分8秒であった。比較しても、納得の範疇と考えられた。

今回の調査で動画による作業時間分析したことによって、介護職員の身体負担が一番大きいと思われる移乗時間を抽出できた（表3）。その結果、平均

移乗時間は161秒であった。ベッドからトイレの往復で、4回の移乗動作があるので、1回の移乗時間は約40秒である。もし往復移動の間に立位の姿勢を保ったままにすることが可能であれば、61秒の移乗時間（62%の時間削減）が可能である。これに移動の53秒と合わせると113秒となり、一定の自力の立ち座る時間を維持できる。つまり、高齢者の入居者にとってトイレ介助の間の活動量（自力で立ち座り）を維持しながら、介護職員の作業負担を約半分に低減することが可能を意味する。トイレ往復移動の間に高齢者が立位の姿勢を保ったままにすることが可能な機器のメリットが大きいと考えられる。

今回の調査で、起立補助試作機を現場に持ち込み、トイレ介助に関する意見を引き出した。いずれも、トイレ介助機器の開発する上重要なポイントと考えられる。特に直感で利用でき、親しみやすい形のものでヒントになっている。

コロナ禍の中もあり、今回の調査対象高齢者施設の数が5箇所となり、特に現場調査は2箇所という限界がある中での結果であった。今後、施設の形態や規模などを考慮し、追加調査も必要と考えている。

5 まとめ

新しいトイレ介助機器の開発に向けた高齢者施設調査を行った。アンケート調査では、介護職員のトイレ介助の際の負担の大きさの実態が明らかになった。

また、施設の入居者のうち、トイレ介助の際に少し立つ能力が残っている人は過半数であった。現場のトイレ介助の映像で作業時間分析した結果、負担の大きい移乗動作時間を抽出できた。もし、トイレまで往復移動の間に利用者が、立位の姿勢を保ったままにすることが可能であれば、介護職員の移乗作業の時間は、62%短縮可能と試算された。現場でヒアリングした介護職員の意見と合わせて、新しいトイレ介助機器の開発に向けた多くにヒントを得た。

謝辞

コロナ禍の中、今回の調査に協力していただいた高齢者施設の関係者および福祉機器販売業者様に敬意を表したい。

参考文献

- 1) 公益財団法人介護労働安定センター, 令和3年度「介護労働実態調査」結果の概要について.
https://www.kaigo-center.or.jp/content/files/report/2022r01_c_housa_kekka_gaiyou_0822.pdf (2024. 3. 22 アクセス).
- 2) 厚生労働省社会・援護局, 第8期介護保険事業計画に基づく介護職員の必要数について.
<https://www.mhlw.go.jp/content/12004000/000804129.pdf> (2024. 3. 22 アクセス)
- 3) 阿比留志郎, 介護施設の ICT 化～ICT 活用で介護はどう変わる～, 内田洋行 IT フェア 2018.
<https://www.uchida.co.jp/system/report/20180020.html> (2024. 3. 22 アクセス)
- 4) 大石桂子 他, 高齢者施設におけるスタンディングリフト導入の可能性に関する研究, 静岡県立大学短期大学部 研究紀要 36 号 (5) 1-16, (2022 年)
- 5) 村上賢一 他, 立位保持補助装置開発前のアンケート調査およびトイレ動作所要時間データの収集結果. リハビリテーション科学 : 東北文化学園大学医療福祉学部リハビリテーション学科紀要 3 (1), 41-48, 2007

居住空間での木製品の変色要因の検討

工芸科 村松重緒 渡邊雅之* 菊池圭祐** 田村克浩*** 長澤 正****

Study of discoloration of wood, wooden products, etc. in living spaces

MURAMATSU Shigeo , WATANABE Masayuki , KIKUCHI Keisuke , TAMURA Katsuhiko and NAGASAWA Tadashi

In this study, we conducted tests to confirm possible factors such as disinfectants that cause indoor contamination and the discoloration of wooden products, and to consider the causes of such problems. As a result of confirming the effects of alcohol, disinfectants, commercially available cleaning agents, and alkaline solutions with regard to wood discoloration, we found that alcohol does not cause discoloration, but that disinfectants and commercially available detergents cause alkaline discoloration upon contact with the undiluted solution, and that alkaline discoloration occurs at pH 12 or above. Furthermore, it was confirmed that fluorescent X-ray analysis is effective in obtaining information on discoloration factors derived from inorganic elements.

Keywords: discoloration, wooden products, disinfectant, alkaline discoloration, living space

本研究では、消毒剤等の屋内で考えられる汚染要因と木製品の変色の発生について確認し、トラブルの要因を考察することを目的に試験を行った。アルコール・消毒液・市販洗剤・アルカリ溶液による木材変色への影響を確認したところ、アルコールは変色せず、消毒液・市販洗剤は原液の接触でアルカリ変色すること、アルカリ変色はpH12以上で変色するという目安を把握した。また、無機元素由来変色要因の情報取得に蛍光X線分析が有効であることを確認した。

キーワード：変色、木製品、消毒剤、アルカリ変色、居住空間

1 はじめに

木材・木製品・建材などの変色に関するトラブル¹⁻⁷⁾は、工芸科に寄せられる相談の中でも多い。これらが製造現場で起こったものであれば、要因を絞り込むことも可能であるが、販売後や施工後に起こった場合の原因究明は困難を極め、完全な解決に至らない事例も多い。メーカーにとって、商品の交換や、修理工事の発生など、コスト面での負担も莫大であるが、往々にして取引先から原因究明を求められる場合があり、担当者も対応に苦慮しているのが現状である。

また、新型コロナウイルス流行の影響で、家庭でもアルコールや塩素系の薬剤による変色やクレームの増加が懸念されており、こうした問題への対応を求められている。

本研究では、消毒剤等を含め、屋内で考えられる汚染要因と変色の発生事例について確認し、トラブルの要因を考察することを目的に試験を行った。変

色再現試験と変色部位の機器分析（蛍光X線分析）を行ったので、その結果について報告する。

2 方法

2.1 変色再現実験

(1) 試験用手板

試験用手板を写真1に示す。樹種は6種（スギ・ヒノキ・タモ・ナラ・ブナ・キリ）とし、寸法は縦15cm×横7cm×厚さ1cmに調製し、プレーナー仕上げしたものを用いた。

(2) 試験に用いた溶液

試験に用いた消毒液を写真2、試験に用いた市販洗剤を写真3、試験に用いた溶液の成分等とpHを表1に示す。

* 現 富士工業技術支援センター CNF 科、** 現 環境エネルギー科、*** 現 富士工業技術支援センター 製紙科

**** 現 ユニバーサルデザイン科



写真1 試験用手板



写真2 試験に用いた消毒液



写真3 試験に用いた市販洗浄剤

表1 試験に用いた溶液の成分等と pH

種別	薬品	成分等	pH
対照	イオン交換水	—	7.1
消毒液	日本薬局方 消毒用エタノール	エタノール76.9～81.4vol%	7.4
	台所用漂白剤(原液)	次亜塩素酸ナトリウム 界面活性剤(アルキルエーテル硫酸エステルナトリウム) 水酸化ナトリウム	13.1
	〃 (100倍希釈)	〃	11.5
	〃 (167倍希釈)	〃	11.3
	〃 (500倍希釈)	〃	10.7
	弱酸性次亜塩素酸	純水 次亜塩素酸	6.9
洗浄剤	要時生成型亜塩素酸イオン水溶液	精製水 亜塩素酸ナトリウム リン酸 水酸化ナトリウム	7.3
	住宅用洗浄剤(泡タイプ クエン酸)	クエン酸(2.5%) 増粘剤 除菌剤	2.0
	住宅用汚れ落とし(泡タイプ 重曹)	アルカリ電解水 炭酸水素ナトリウム エタノール 増粘剤	10.0
	住宅用汚れ落とし(泡タイプ セスキ)	アルカリ電解水 セスキ炭酸ソーダ エタノール 増粘剤	12.4
	住宅用洗浄剤(泡タイプ 電解水)	アルカリ電解水 (水酸化ナトリウム0.18% ※アルカリ性を換算した値) エタノール 増粘剤	12.8
	住宅用汚れ落とし(アルカリ電解水)	アルカリ電解水	12.8
アルカリ性溶液	水酸化ナトリウム水溶液	1mol/L	13.5
	水酸化カルシウム水溶液	飽和水溶液上澄み液	12.7

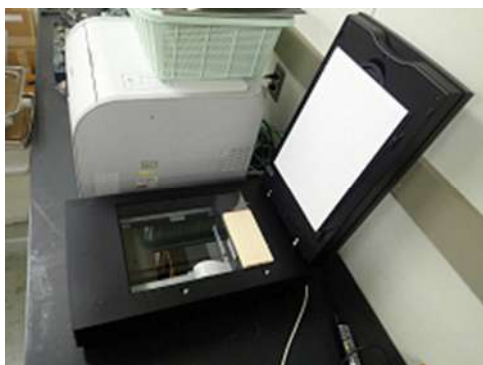


写真4 画像記録に使用したスキャナ

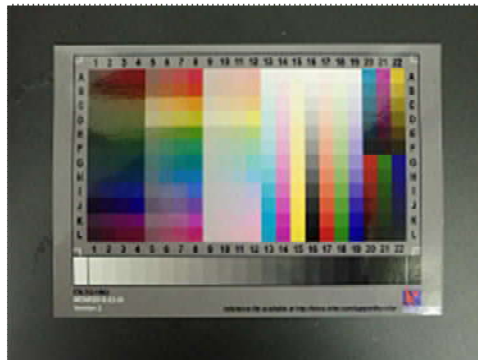


写真5 校正用カラーチャート

(3) 試験手順

各試験液を手板に滴下（φ 1 cm）し、1分後にキムワイプ（日本製紙クレシア(株)製）で吸い取り除去した。その後、室温で1時間乾燥し、表面観察・画像記録を行った。画像記録はスキャナ GT-X980（セイコーエプソン(株)製）を用いた。画像の取り込みはスキャナ付属ソフト（EPSON SCAN）を用い、24ビットカラー、200dpi、sRGB、保存形式 TIFF の条件で記録した。なお、画像取り込みの前に、i1Profiler（ビデオジェット・エックスライト(株)製）およびソフト付属の T8 ターゲット（反射光用）を用いて、スキャナの色を校正を行った。画像記録に使用したスキャナを写真4、校正用カラーチャートを写真5に示す。

2.2 変色部位の機器分析（蛍光X線分析）

鉄汚染試料は、ナラ材に水を滴下後、鉄製治具を5分間接触させて得た。続いて、得られた鉄汚染試料の未汚染部と鉄汚染部について、蛍光X線分析を行った。測定は微小部蛍光X線分析装置 M4 TORNADO PLUS（ブルカージャパン(株)製）を使用し、出力：50kV/600 μ A、

X線管球：Rh、スポットサイズ：約 170 μ m、測定雰囲気：大気、で行った。

2.3 汚染試料の検証

アルカリ汚染、鉄汚染が疑われる試料について、変色再現実験、蛍光X線分析を行った。

3 結果および考察

3.1 変色再現試験

(1) アルコール・消毒液

アルコール・消毒液を滴下した試験用手板の変色再現実験結果を図1に示す。図1より、台所用漂白剤（原液）滴下試料は全ての手板で変色または変色の痕跡が確認された。黒く変色したため樹種ではヒノキの変色が目立った。100倍・167倍・500倍の希釈液滴下では変色は認められなかった。台所用漂白剤（原液）が木材・家具・建材に直接接触する可能性は低いと思われるが、pHが13.1と高く、取り扱いに注意が必要で、接触によりアルカリ変色に至ったことが予想された。



図1 変色再現実験結果（アルコール・消毒液）

樹種：左より、滴下区分・スギ・ヒノキ・タモ・ナラ・ブナ・キリ

A：イオン交換水（対照）、B：消毒用エタノール、C：台所用漂白剤（原液）、D：台所用漂白剤（100倍）

E：台所用漂白剤（167倍）、F：台所用漂白剤（500倍）、G：弱酸性次亜塩素酸、H：要時生成型亜塩素酸イオン水溶液



図2 変色再現実験結果（市販洗浄剤）

樹種：左より、滴下区分・スギ・ヒノキ・タモ・ナラ・ブナ・キリ

A：イオン交換水（対照）、B：クエン酸、C：重曹、D：セスキ、E：電解水、F：アルカリ電解水

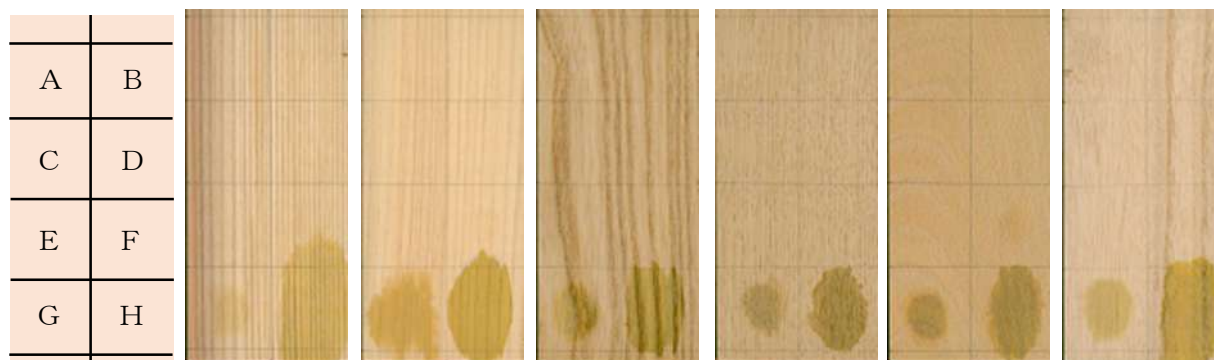


図3 変色再現実験結果（アルカリ性溶液（水酸化ナトリウム水溶液））

樹種：左より、滴下区分・スギ・ヒノキ・タモ・ナラ・ブナ・キリ

A：イオン交換水（対照）、B：pH8、C：pH9、D：pH10、E：pH11、F：pH12、G：pH13、H：pH13.5（1mol/L）



図4 変色再現実験結果（アルカリ性溶液（水酸化カルシウム水溶液））

樹種：左より、滴下区分・スギ・ヒノキ・タモ・ナラ・ブナ・キリ

A：イオン交換水（対照）、B：pH8、C：pH9、D：pH10、E：pH11、F：pH12、H：pH12.7（飽和水溶液）

消毒用エタノール、弱酸性次亜塩素酸、要時生成型亜塩素酸イオン水溶液の滴下試料は変色が確認されず、本実験に使用したものによる変色の心配は低いことが確認された。

（2）市販洗剤

市販洗剤を滴下した試験用手板の変色再現実験結果を図2に示す。

図2より、クエン酸滴下試料は変色が確認されなかった。ただし、クエン酸のpHが2.0と低く、残留すると金属腐食や酸変色に至る可能性があるため、取り扱いに注意が必要と思われた。重曹・セスキ・電解水・アルカリ電解水の滴下試料は全ての手板で変色が確認され、アルカリ変色したと予想された。

市販洗剤も木材・家具・建材に直接接触する可能性は低いと思われるが、元々木材用の洗剤でなく、接触により変色する恐れがあるため、取り扱いに注意が必要と思われた。

（3）アルカリ性溶液

アルカリ性溶液を滴下した試験用手板の変色実験結果を図3、図4に示す。

図3は、水酸化ナトリウム水溶液を滴下した結果で、pH13以上ではすべての樹種で変色が確認された。pH12でも変色の痕跡が確認されていることから、pH12以上のアルカリ溶液は木材を変色させる可能性があり、取り扱いに注意が必要ことが確認された。スギについて、図1、図2の画像は心材でアルカリ変色により黒色に変色していたが、図3の画像は辺材で黄色に変色していた。スギは心材と辺材で変色の様子が異なり、心材の方が変色の様子が目立ちやすいことが確認された。

図4は、水酸化カルシウム水溶液を滴下した結果で、水酸化ナトリウム水溶液を滴下した結果と同様に、pH12以上で変色の痕跡が確認された。変色の様子は、水酸化ナトリウム水溶液の滴下と比較して、水酸化カルシウム水溶液の滴下の方が目立たない、ということが確認された。

3.2 変色部位の機器分析（蛍光X線分析）

ナラ材鉄汚染試料を図5、各樹種のタンニン含有量¹⁾を表2に示す。

鉄は水が介在すると、木材のタンニン、フェノール成分と鉄イオンの反応により、黒色のタンニン鉄化合物を生成して、容易に変色することが知られている^{1,6,7)}。表2より、ナラ材は他樹種と比較してタンニン含有量が多いことから鉄変色しやすいことが予想され、図5に示したように、水の存在下わずか5分間の接触で鉄汚染試料が得られた。

ナラ材鉄汚染試料の蛍光X線分析結果を図6に示す。図6より、鉄由来ピークが鉄汚染部のチャートからは確認され、未汚染部のチャートからは確認されなかった。このことから、鉄汚染試料の変色要因の情報取得に蛍光X線分析が有効であることが確認された。蛍光X線分析では種々の元素検出が可能であることから、CuやZnなどの無機元素由来変色要因の情報取得にも有効であると考えられた。

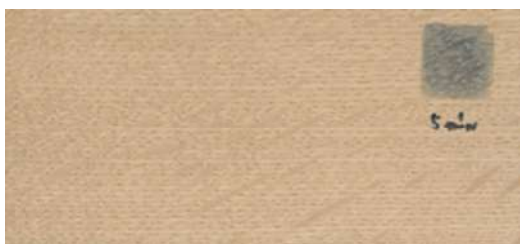


図5 ナラ材鉄汚染試料

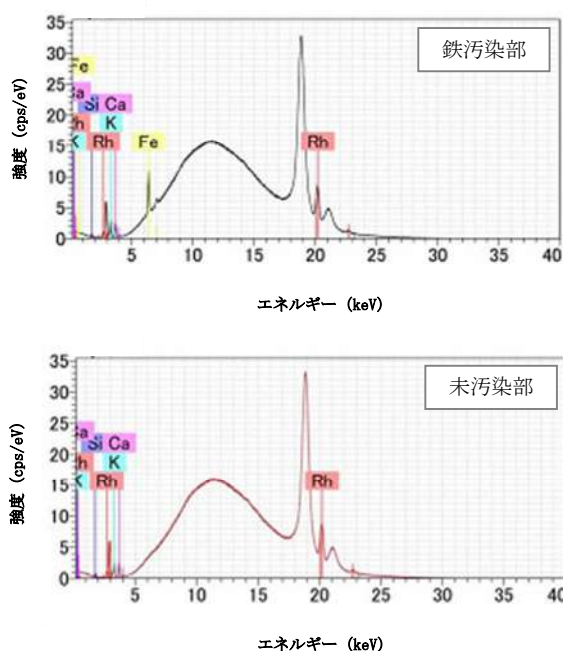


図6 ナラ材鉄汚染試料の蛍光X線分析結果

表2 各樹種のタンニン含有量

種別	樹種	タンニン含有量(%)
針葉樹	スギ	0.3
	ヒノキ	0.1
広葉樹	ミズナラ	5.6
	キリ	0.6
	ブナ	0.4
	ヤチタモ	0.2

3.3 変色トラブルに係る事例および考察

(1) アルカリ汚染試料

美術館関係者よりアルカリ汚染が疑われる試料の提供を受けた。提供試料を写真6に示す。材質はヒノキ、形状は玉子状、用途は遊具で、写真6では上半分がやや黒く変色していた。消毒作業を1日2回実施、消毒剤は二酸化塩素水溶液、オゾン、次亜塩素酸水等を使用しており、徐々に試料の一部に変色が目立つようになった、とのことであった。

未汚染試料についても提供を受け、表1の消毒液(台所用漂白剤(原液))を滴下し、1分後にふき取ったヒノキ製玉子状試料の変色再現試料を写真7に示す。変色の様子は図1の樹種:ヒノキと溶液:漂白剤(原液)との組み合わせによる変色の様子に似ており、消毒液によりアルカリ変色したと推察された。詳細は不明であるが、消毒液の希釈が不十分で、アルカリ変色に至った可能性が考えられた。



写真6 アルカリ汚染が疑われる試料



写真7 ヒノキ製玉子状試料の変色再現試料

(2) 鉄汚染試料

仏壇仏具メーカーより鉄汚染が疑われる試料の提供を受けた。提供試料（研磨済）を写真8に示す。写真8は海外製で、MDFにナラ突板で化粧したもの、接着剤は酢ビ系でウレタン塗装したもの、である。製造時はほぼ問題は発生していない、変色が時折発生する、とのことであった。

変色部について、サンドペーパーで突板部を研磨除去したところ、変色部位は消失した。素地・塗膜は変色しておらず、突板部分に変色していたことが確認された。



写真8 鉄汚染が疑われる試料（研磨済）

変色部の蛍光X線分析結果を図7に示す。図7より、Feが検出されており、表2に示したとおり、ナラ材はタンニンが多いことから、鉄汚染により変色したことが推察された。また、Znも検出されており、下塗りに使用した塗料由来成分と推察された。Znの検出は変色とは関係ないが、無機元素由来成分が検出され、使用原料を類推する情報が得られることは、蛍光X線分析を行うメリットであると考えられた。

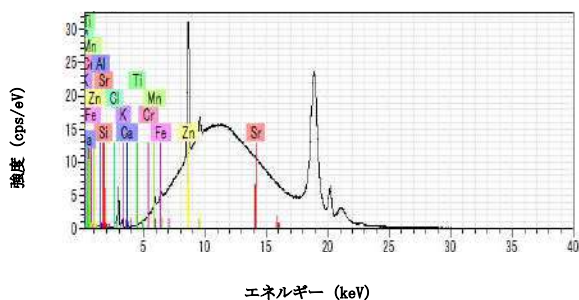


図7 鉄汚染が疑われる試料の蛍光X線分析結果

4 まとめ

消毒剤等の屋内で考えられる汚染要因と木製品の変色の発生事例の確認、トラブルの要因を考察することを目的に試験を行い、以下の結論を得た。

(1) アルコール・消毒液・市販洗浄剤・アルカリ溶液による木材変色への影響を確認したところ、アルコールは変色せず、消毒液・市販洗浄剤は原液の接触でアルカリ変色すること、アルカリ変色はpH12以上で変色するという目安を把握した。

(2) 蛍光X線分析は、非破壊で簡単に無機元素由来の変色要因等の情報が取得できることが確認された。

参考文献

- 1) 武南勝美：木材の化学汚染について，材料，第16巻 第169号，28-33（1967）.
- 2) 平林靖：ミズナラ突き板単板化粧MDFの変色—その原因と対策—，林産試だより，2015年3月号，1-4（2015）.
- 3) 平林靖：ナラ突き板を用いた木質材料の変色およびその防止について，林産試だより，2011年7月号，3（2011）.
- 4) 平林靖 他：酸硬化型接着剤による木質材料の変色汚染，林産試験場報，第19巻 第1号，20-24（2005）.
- 5) 川上英夫：木材を大切に使うために 木材の変色汚染と防除，林産試だより，1981年5月号，1-7（1981）.
- 6) 堀池清：木材の脱色と染色，色材，第49巻 第2号，117-123（1976）.
- 7) 喜多山繁 他：3. 材質改良，「木材の加工」，初版（文永堂出版株，東京），pp145-149（1991）.

摩擦攪拌接合した半溶融成形材継手の疲労特性

金属材料科 岩澤 秀 鈴木洋光* 磯部佑太
株式会社浅沼技研 高橋正詞 上久保佳則 杉浦泰夫

Fatigue properties of semi-solid cast joints fabricated by friction stir welding

IWASAWA Shigeru, SUZUKI Hiromitsu, ISOBE Yuta, TAKAHASHI Masashi,
KAMIKUBO Yoshinori and SUGIURA Yasuo

Keywords: Aluminum alloy, Semi-solid casting, Friction stir welding, Fatigue properties

摩擦攪拌接合した半溶融成形材継手の疲労特性を調べた。半溶融成形のまま (F) 材を接合後、室温放置した接合まま材および T5 材 (接合後 T5 処理) の 10^7 回における疲れ強さは、それぞれ 130MPa、140MPa であり、重力鋳造した AC4CH 合金の T6 材 (AC4CH-T6) に比べて高い。疲労破壊の起点は、試験片表面近傍の鋳造欠陥から発生していた。半溶融成形材は、鋳造欠陥が微小であり、共晶 Si 相も微細であることから亀裂の起点発生および進展が AC4CH-T6 に比べて抑制されたと考えられた。

キーワード：アルミニウム合金、半溶融成形法、摩擦攪拌接合、疲労強度

1 はじめに

半溶融成形法は、アルミニウム鋳造合金の機械的性質を大きく向上させる鋳造法である。我々は、半溶融成形した Al-7%Si-0.5%Mg-1%Cu 合金 (%は mass%) の摩擦攪拌接合 (FSW:Friction Stir Welding) 継手は、ダイカスト成形した ADC12 合金や重力鋳造した AC4CH 合金を用いた場合に比べて高い継手強度をもつことを明らかにした。本研究は、構造部材として重要な強度特性である疲労特性に着目している。

2 方法

疲労試験に供した試験片作製は既報¹⁾と同様とした。試験に供した継手は、接合後、室温放置した試料 (接合まま材)、接合後 T5 処理¹⁾を行った試料 (T5 材) を用意した。比較材として、T5 処理された半溶融成形材、T6 処理された AC4CH 重力鋳造材 (組成: Al-7%Si-0.4%Mg、以降 AC4CH-T6) を用意した。T5 処理は、接合まま材を 185°C×2.5h 保持後放冷、T6 処理は 540°C×6h 保持後水冷+160°C×6h 保持後放冷とした。以降、母材は接合していない状態の試料を示す。

接合まま材、T5 材の熱影響部および AC4CH-T6 の硬さ²⁾は、それぞれ 65HV、70HV および 101HV であっ

た。疲労試験片は、接合方向と直角に幅 6mm、厚さ 4.5mm、平行部長さ 40mm に加工し、表面は耐水ペーパー #400 で研磨した。疲労試験は、電気油圧式疲労試験機 EHF-UV100k1-020-1A ((株) 島津製作所製) を用い、周波数 20Hz、応力比 R=0.1 の条件とした。疲労破面観察には走査型電子顕微 (SEM) SU3900 ((株) 島津製作所製) を用いた。

3 結果と考察

3.1 疲労試験結果

図 1 に疲労曲線を示す。いずれも応力が低くなると破断までの繰返し数は延長する。母材の 10^7 回疲れ強さは、半溶融成形材は AC4CH-T6 の約 1.4 倍となり、半溶融成形による高強度化が達成された。半溶融成形材の継手は、母材に比べて大きく疲れ強さが低下するものの、 10^7 回における疲れ強さは T5 材で約 140MPa、接合まま材で 130MPa となった。この疲れ強さの低下は、接合による熱影響部の強度低下に起因する。いずれの継手も、AC4CH-T6 に比べて高い疲れ強さを示した。

3.2 破面組織

図 2 および図 3 に継手の疲労破面を示す。破断部分は熱影響部であった。亀裂は試験片表面の欠陥か

* 現 産業革新局 新産業集積課

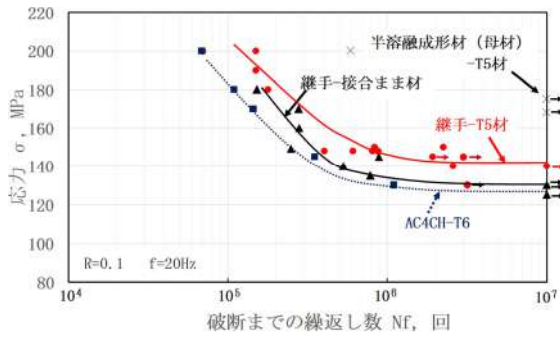
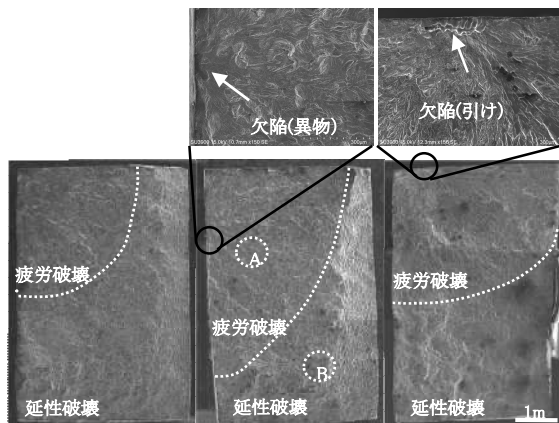


図1 疲労曲線

▲ 継手-接合まま材 ● 継手-T5材
 × 半溶融成形材 (母材) -T5材 ■ AC4CH-T6



(a) σ :180MPa (b) σ :150MPa (c) σ :145MPa
 Nf:178, 355 Nf:2, 248, 069 Nf:350, 374

図2 疲労破面 (全体)

(a), (b) 継手-T5材, (c) AC4CH-T6

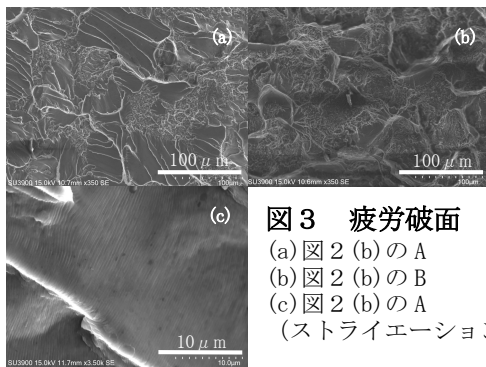


図3 疲労破面

(a) 図2 (b) の A
 (b) 図2 (b) の B
 (c) 図2 (b) の A
 (ストライエーション)

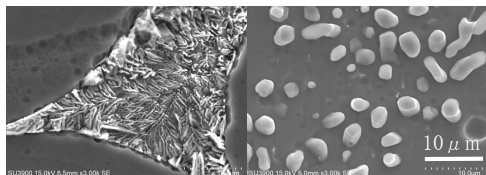


図4 共晶 Si 相の形状

左: 継手-T5材 右: AC4CH-T6-T6

ら発生していた。破面は、脆性的な破壊形態を伴う疲労破壊領域と延性破壊領域に分かれていた (図2)。疲労破壊領域は、平面的な破面を示し、初晶 α -アルミニウム (Al) 相は擬へき開破面を呈しており

(図3 (a))、ストライエーションが観察された (図3 (c))。延性破壊領域は、亀裂の進展に伴い荷重に耐えきれずに急速破壊したところで、擬へき開破面は少なく、亀裂は共晶 Si 相と α 相界面の伝播が支配的となっており、全体的に凹凸が大きい (図3 (b))。疲労破壊領域の面積は、応力が高いほど小さく (図2 (a) と (b)) になった。これは、応力が高いほど亀裂進展に伴い減少した材料断面に加わる応力も高くなり、破壊が起こりやすくなるためである。半溶融成形材では、T5 処理により疲れ強さが上昇した。これは、析出硬化により熱影響部の硬さが増加したことで亀裂伝播に対する抵抗が強くなったためと考えられる。

半溶融成形材の継手は、AC4CH-T6 に比べて破断部近傍の硬さは低い疲れ強さは高い。図2 (b)、(c) において、同等な応力においても半溶融成形の方が疲労破壊領域は広い。このことは、半溶融成形では、亀裂発生および伝播に長期間要するものと考えられる。

継手の熱影響部の共晶 Si 相は、AC4CH-T6 に比べて極めて微細である (図4)。疲労破壊領域において、亀裂は初晶 α -Al 相内および共晶 α 相と共晶 Si 相の界面近傍を進展していた。粗大な共晶 Si 相は、共晶間の亀裂伝播を容易にさせ、その結果亀裂の伝播速度を速めると考えられる。半溶融成形材が高い疲れ強さを示したのは、亀裂発生の起点となる欠陥が小さいことに加え、共晶 Si 相が微細であるため共晶間の亀裂伝播が抑制されたためと考えられる。

4 まとめ

- 1) 半溶融成形材では、継手の疲れ強さは母材に比べて低下した。継手の 10^7 回における疲れ強さは接合まま材で 130MPa、T5 材で 140MPa であった。
- 2) 継手は、AC4CH-T6 に比べて高い疲れ強さを示した。これは、半溶融成形材では、微小な铸造欠陥および共晶 Si 相が微細であるため亀裂の発生および伝播が抑制されたためと考えられた。

参考文献

- 1) 岩澤秀他：摩擦攪拌接合した半溶融成形アルミニウム合金継手の引張特性。静岡県工業技術研究所研究報告，第16号，1-7(2023)。

ポリプロピレン/CNF 複合材への高密着な樹脂めっきの作製 (第2報)

- 射出成形条件の検討 -

金属材料科 田中宏樹 磯部佑太 岩澤 秀
丸長鍍金株式会社 篠原恵吾

Fabrication of highly adhesive plating on polypropylene/CNF composite materials
(2nd Report)

- Research of injection molding conditions -

TANAKA Hiroki, ISOBE Yuta, IWASAWA Shigeru and SHINOHARA Keigo

Keywords: cellulose nanofiber(CNF), polypropylene, plating

本研究では、ポリプロピレン/CNF 複合材のめっき析出性に射出成形条件が及ぼす影響について調べた。金型温度と射出速度を変化させて射出成形した複合材試料に対し、エッチング後の表面粗さやめっき析出性への影響を調べたところ、金型温度の影響はわずかだが、射出速度が遅いほどエッチング後の試料表面が粗化し、めっき析出性が向上することが示唆された。

キーワード：セルロースナノファイバー、ポリプロピレン、めっき

1 はじめに

ポリプロピレン (PP) は自動車用樹脂材料の約半分を占める材料であるが、非極性のために高密着なめっきを施した例は少ない。PP にめっきができれば、意匠性、耐久性等を付与できて更なる用途展開が期待できる。当所では、PP にセルロースナノファイバー (CNF) を複合化することでめっき析出性や密着力が向上することを確認してきた¹⁾。本研究では、射出成形条件がめっき析出性に及ぼす影響を検討した。

2 方法

2.1 樹脂材料の調製方法

試料は PP/CNF 複合材を用い、CNF の含有量が 10wt% となるよう 2 軸混練押出機 (テクノベル製 KZW20TW-45MG-NH-1100-SKG) を用いてペレットを調製した。射出成形機 (芝浦機械製 EC100SXIII-2A、最大射出圧力: 220MPa) を用い、金型温度は 2 水準 (A、B、A<B)、射出速度は 3 水準 (i、ii、iii、i<ii<iii) として (金型温度、射出速度は秘密情報のため非開示)、金型温度及び射出速度がめっき析出面積とエッチング後の表面粗さにどのような影響を及ぼすか検証した。

2.2 めっき処理方法

試料は脱脂後に湿式浸漬処理によるエッチングを行い触媒付与後に無電解ニッケルめっきを施した。

2.3 評価方法

エッチング後の表面粗さは、白色光干渉計 (アメテック製 Talysurf CCI HD) を用い、界面の面積展開比 Sdr を評価した。Sdr は表面積が定義面積に対してどれだけ増大しているかを表す指標であり、値が大きいほど表面が粗いことを示す。表面性状は走査型電子顕微鏡 (日立ハイテク製 SU3900) を用い、観察した。めっき後の試料について、画像解析ソフト (三谷商事製 Win ROOF) を用いめっき析出面積を算出した。

3 結果及び考察

3.1 エッチングの評価

エッチングで Sdr が増大した。エッチング後の Sdr は金型温度にほとんど影響されなかったが、射出速度が遅いほど増大した (図 1)。エッチング後の SEM 像には、射出方向に対して縦長の数 μm ~ 数十 μm 程度の楕円形の孔が見られたが、射出速度が遅いほど、1 μm 程度の微細かつ真円に近い細孔が生成し

ていた (図2)。エッチングで Sdr が増大した理由は、エッチングによって CNF 等添加剤の一部が脱落するなどして凹凸が導入されたためと考えられる¹⁾。そして、樹脂の表面近傍層 (スキン層) は繊維の配向性が高くなる²⁾ ことから、射出方向に対して形成された楕円形の孔は配向した CNF 等添加剤の脱落によるものと考えられる。また、射出成形時の流動抵抗を小さくするために、せん断応力が最大となる金型近傍のスキン層には粘度の低い成分が偏析する³⁾。そのため、スキン層は流動性の良い PP リッチな組成となる。射出速度が遅いほどせん断応力が低下し、スキン層における CNF 等添加剤量が高くなるために、エッチング後の Sdr が増大したと考えられる。

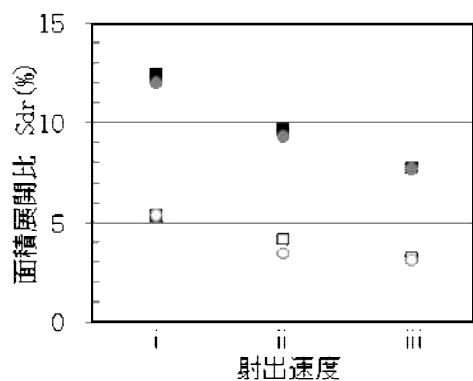


図1 成形条件と表面粗さ

■: 金型温度 A、●: 金型温度 B (白抜きは未処理)

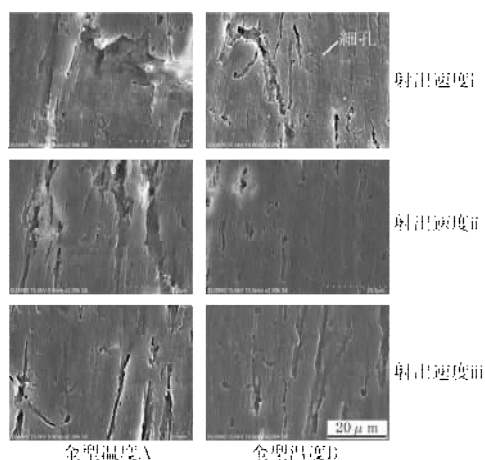


図2 エッチング後 SEM 像

3.2 めっき試料外観

いずれの射出成形条件でもめっきの未析出がみられ、良好な結果を得られなかった。金型温度による大きな差は見られなかったが、射出速度が遅いほどめっき析出量が増える傾向がみられた (図3)。これは、過去の当所での研究と同傾向の結果¹⁾ であり、エッチング後の表面粗さが大きいほど、セルロースなどを由来とした官能基が表面に多く露呈し、触媒付着量が増えた可能性がある。

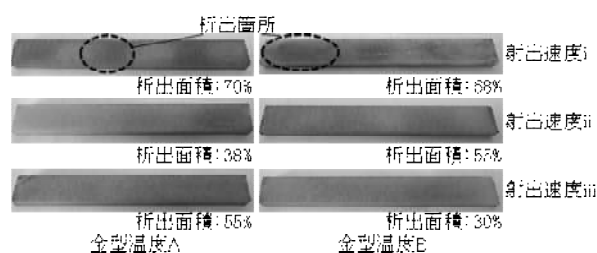


図3 めっき試料外観

4 まとめ

本研究では、射出成形条件がエッチング後の表面粗さやめっき析出性に及ぼす影響を検討した。その結果、金型温度はエッチング後の表面粗さやめっき析出性へ大きな影響を及ぼさなかったが、射出速度が遅いほど、エッチング後の表面粗さが大きくなり、めっき析出性が向上した。

参考文献

- 1) 田中宏樹 他: ポリプロピレン/CNF 複合材への高密着な樹脂めっきの作製-エッチング後の表面性状とめっき密着強度-. 静岡県工業技術研究所研究報告第15号, 53-55 (2022).
- 2) 田中雅夫: 射出成形における繊維の流動配向. 三重県工業技術センター研究報告 No. 19, 47-52 (1995).
- 3) F. Pisciotti. et al.: Polymer Engineering & Science, 43(6), 1289-1297 (2003).

半溶融成形法で作製したヒートシンクの放熱性評価

金属材料科 磯部佑太 岩澤 秀 鈴木洋光*
株式会社浅沼技研 上久保佳則 高橋正詞 杉浦泰夫

Evaluating heat dissipation of a heat sink formed by a semi-solid process

ISOBE Yuta, IWASAWA Shigeru, SUZUKI Hiromitsu,
KAMIKUBO Yoshinori, TAKAHASHI Masashi, and SUGIURA Yasuo

Keywords: Aluminum alloy, Heat sink, Heat dissipation, Semi-solid process, Surface treatment

ヒートシンクの成形には、形状自由度が高く、薄肉形状に対応できる成形プロセスが求められている。本研究では、半溶融成形法にてアルミニウム合金のヒートシンクを作製し、試作した放熱性試験装置にて評価した。また、表面処理による放熱性の向上を期待し、サンドブラストとアルマイト処理、両者の複合処理を行い、それぞれの効果を評価した。その結果、アルマイト処理のみを行うことで、放熱性が向上することがわかった。

キーワード：アルミニウム合金、ヒートシンク、放熱性、半溶融成形法、表面処理

1 はじめに

半溶融成形法は、ダイカストや鋳造法の一つで、固体と液体が共存する半溶融温度領域まで加熱した素材を金型に加圧成形する成形法である。半溶融金属が金型内を流動するときに、液体部分が潤滑剤として働き、固相が滑るように充填するためにダイカストのようなガスの巻込みがなく、また、低い温度の材料を加圧凝固させるために緻密な金属組織となる。すなわち、鋳造欠陥が減少し、微細結晶組織となるため、既存の鋳造法やダイカストに比べて機械的性質が大きく向上する¹⁾。このことから、形状自由度が高く、ヒートシンクのような薄肉形状が求められる部材への適用が期待できる。本研究では、半溶融成形法にてヒートシンクを成形し、表面処理による放熱性を評価した。

2 方法

本研究では、ヒートシンクの放熱性を評価する試験装置を作製した。図1にその概要図を示す。厚さ5mmの亚克力板を組合せた内容積400mm×400mm×400mmの立方体容器、ヒーター加熱部 J2A80（坂口電熱（株）製）（以後ヒーターと略す）、冷却ファン San Ace80（山洋電気（株）製）による熱対流部、容器外から空気を吸い込む空気取込口から構成した。

本装置では、ヒーターにより、発熱体に見立てたダミーブロックを暖める。熱は、ダミーブロックと接触しているヒートシンク（試験体）から放熱される。ダミーブロック中央部にφ1.6mmのシース熱電対を挿入し、温度変化を測定した。ヒートシンクの上方には、風の流れをヒートシンクから吸い取るように冷却ファンを設置した。風速センサー 405-V1（（株）テスト製）を用いて、冷却ファンダクト上部の風速を測定（13ヶ所の平均）し、風量（ダクト内面積 m^2 ×風速 m/s ）を算出した。ヒーター印加電圧及び冷却ファンの駆動電圧は、それぞれのボルトスライダックで制御し、電流値はテスター PC510（三和電気計器株式会社製）から読取った。ヒーター印加電圧に電流値を乗じた値をヒーター印加電力とした。

ヒートシンクには放熱性の向上を目的に、図2に示す表面処理を行い、それぞれ試験体①～④と称す。ダミーブロック表面に熱伝導グリース Arctic Silver5（株式会社アイネックス製）を塗り、ヒートシンクを設置し、加熱試験を行なった。加熱試験は、最初に冷却ファンを作動させた後、データロガー GL220（グラフテック株式会社製）による温度記録を開始し、ヒーターの電源を入れた。ダミーブロックに挿入した熱電対の温度上昇がほぼ飽和するまで

* 現 産業革新局 新産業集積課

放置し、温度上昇を比較した。試験条件は飽和温度がヒートシンクの常用温度域となるよう設定した。試験条件を表1に示す。

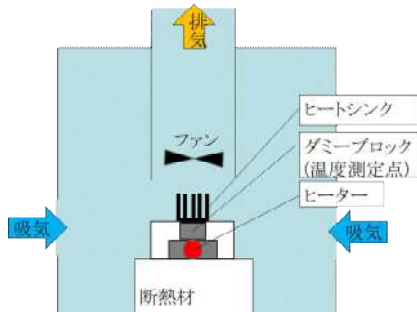


図1 放熱性試験装置の概要図

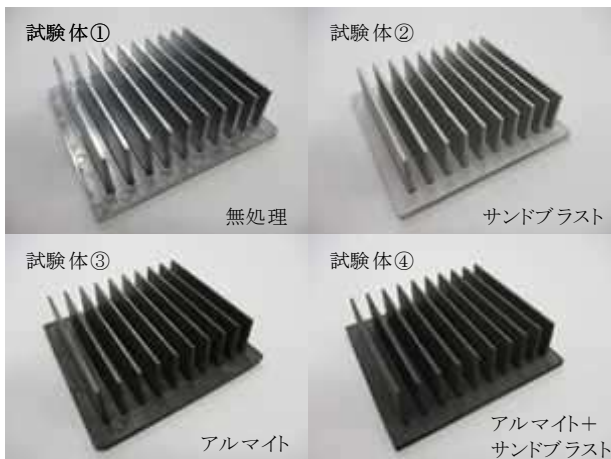


図2 試験体の外観

表1 加熱試験の条件

条件①	ヒーター印加電力：8.2 W ファン風量：0 m ³ /s
条件②	ヒーター印加電力：50.5 W ファン風量：0.6 m ³ /s

3 結果および考察

放熱性評価装置を作製し、加熱試験を行った。条件①の試験結果を図3に、条件②の試験結果を図4に示す。また、各試験体の飽和温度を表2に示す。

放熱性は条件①、②とも試験体③が最も良い結果となった。このことから、表面処理はアルマイト処理が放熱性の向上に効果があることが分かった。これはアルマイト処理により、放射率が向上したのではないかと考えている。

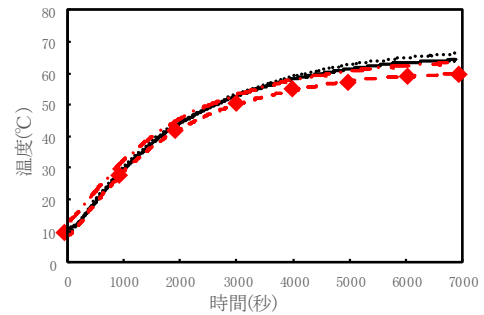


図3 条件①におけるダミープロックの温度上昇

— 試験体① 試験体②
- - - 試験体③ - . - 試験体④

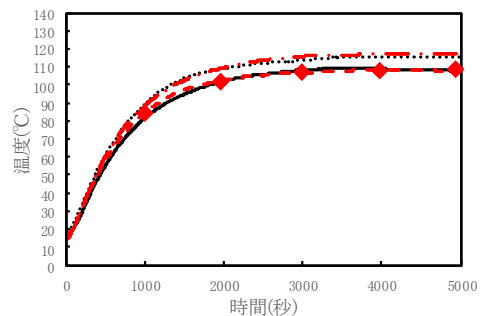


図4 条件②におけるダミープロックの温度

— 試験体① 試験体②
- - - 試験体③ - . - 試験体④

表2 飽和温度の比較

	条件①	条件②
	飽和温度	飽和温度
試験体①	64.4℃	108.1℃
試験体②	66.4℃	115.6℃
試験体③	59.9℃	107.9℃
試験体④	63.4℃	118.2℃

4 まとめ

放熱性評価装置を試作し、半溶融成形法で作製したヒートシンクの放熱性、および表面処理による放熱性の差異を評価することができた。今後は、半溶融成形法の他の成形加工法に対する優位性を明らかにするため、切削加工や鋳造によるヒートシンクの放熱性の評価などに応用していきたい。

参考文献

- 1) 岩澤秀 他：半溶融成形法により製造した Al-7%Si-0.5%Mg 合金の曲げ特性. 静岡県工業技術研究所研究報告, 第11号, 120-125 (2018).

セルロースナノファイバー（CNF）配合樹脂の取扱い上の留意点

化学材料科 菅野尚子* 野澤 遼 鷺坂芳弘**

Considerations when handling cellulose nanofibers (CNF) that contain resins

KANNO Naoko, NOZAWA Ryo and SAGISAKA Yoshihiro

Keywords: cellulose nanofiber, kneading, Charpy impact property, dispersibility

CNF を配合した複合材マスターバッチ (MB) を用いて射出成形を行う際に、原料の混練順序が一部の物性に影響を与えることがわかった。ベース樹脂及び複合材 MB のほかに、樹脂改質剤等を配合する場合には、先にベース樹脂と複合材 MB を混練した方が試料の CNF 分散性や耐衝撃性等が良好であった。

キーワード：セルロースナノファイバー、混練、シャルピー衝撃強さ、分散性

1 はじめに

自動車等の部品メーカーでは、脱炭素に向け、樹脂の使用削減やバイオマス素材の利活用への取組を進めている。また、樹脂製造各社は、CNF 等のセルロース繊維を配合した複合材 MB の開発を加速している。しかし、これら複合材 MB は、一般の MB とは扱いが多少異なることは意外に知られていない。そこで、CNF を含む MB を用いたコンパウンディングや射出成形を行う上での留意点について報告する。

2 方法

2.1 試料の作製

原料の組成及び配合比が同一で、配合法の異なる 4 種類の CNF 複合材試料を作製した。原料には、ポリエチレン (PE)：ペトロセン 339 (東ソー(株)製)、CNF 複合材 MB：STARCEL T-NC318 (星光 PMC(株)製)、樹脂改質剤：タフマー DF810 (三井化学(株)製)とした。試料の組成及び配合比を表 1 に示した。

表 1 試料の組成及び配合比

原料名	割合 (wt%)
PE	70
CNF-MB	20 (CNF 濃度 10wt%)
樹脂改質剤	10

表 2 試料の作製方法

試料	作製方法	混練回数
試料 1	① PE+MB 混練	2
	② ①+樹脂改質剤 混練	
	③ 射出成形	
試料 2	① 3原料を混合し混練	1
	② 射出成形	
試料 3	3原料を混合し射出成形	0
試料 4	① PE+樹脂改質剤混練	2
	② ①+MB 混練	
	③ 射出成形	

4 試料の作製方法を表 2 に示した。混練は、二軸混練機 (株)テクノベル製 KZW20TW-45MG、スクリュ径 ϕ 20 mm、L/D=45) を用い、スクリュ回転数 150 rpm、フィーダ回転数 40 rpm、バレル内温度 150 °C で実施し、ペレット化した。また、射出成形は、射出成形機 (芝浦機械(株)製 EC100SXIII-2A、スクリュ径 ϕ 32 mm、成形温度 190 °C) により、厚さ 4 mm のダンベル型試験片とした。

2.2 試料の物性評価

引張特性は、精密万能試験機 (株)島津製作所製オートグラフ AGX-50kNV) を用いて、試験条件：ロードセル 5 kN、試験速度 5 mm/min、つかみ具間距離 115 mm により引張試験 (N=5) で評価した。耐衝撃性は、シャルピー衝撃試験 (装置(株)オリエンテック

* 現 浜松工業技術支援センター 材料科、** 退職

製 CIT-25J-CI、ハンマー容量 4 J、支点間距離 62 mm、切削ノッチ付試験片、N=10) で評価した。

赤外分光イメージングによる評価は、以下の方法により行った。まず、ダンベル型試験片の断面をマイクロームで調整し ATR イメージング測定 (装置 PerkinElmer 社製 Frontier-Spotlight400、測定分解能 8 cm^{-1} 、ピクセルサイズ $1.56\ \mu\text{m}$ 、積算回数 2 回/ピクセル、測定サイズ $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$) を行った。測定結果から、「 1050 cm^{-1} ピーク面積 (セルロース) / 1467 cm^{-1} ピーク面積 (PE)」を測定領域内の各ピクセルで計算した 16,384 点の値を用い、岡田らの方法¹⁾により窓枠サイズの異なる平均化フィルタを適用して CV 値 (変動係数) を算出し、窓枠サイズとの関係をグラフに表した。

3 結果及び考察

4 試料とも CNF 濃度が同じであるため、引張強さや曲げ特性は試料間でほとんど違いがなかった。しかし、引張破断ひずみ (図 1) とシャルピー衝撃強さ (図 2) は、違いがみられ、試料 1 は試料 4 より数値が上回った。したがって、3 つの原料を混練する場合の順序が物性に影響を与えることがわかった。一方で、3 原料を同時に混ぜる試料 2 と試料 3 はほぼ同じ値であることから、今回の結果では、事前混練の有無は物性への影響はないとみられた。

CNF 分散性を比較した結果を図 3 に示した。縦軸の CV 値は、低いほど CNF 分散性が良いことを示す。それによると、試料 1 が最も良好で、試料 4 が最も悪く、耐衝撃性と同様の傾向が CNF 分散性でも示された。

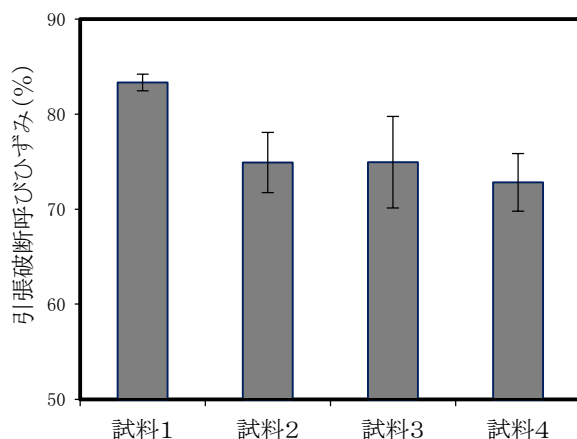


図 1 試料の引張破断ひずみの比較

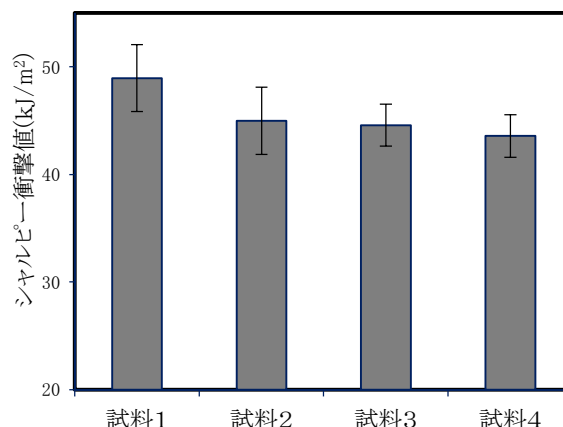


図 2 試料のシャルピー衝撃強さの比較

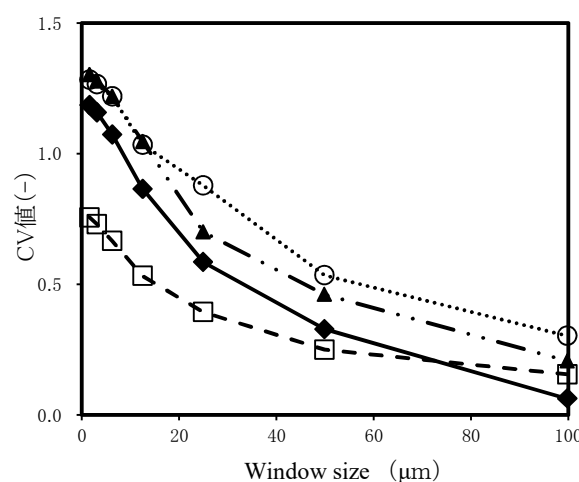


図 3 試料の CNF 分散性の比較

□試料1 ◆試料2 ▲試料3 ○試料4

4 まとめ

CNF を配合した複合材 MB を用いて混練や射出成形を行う場合、原料の混練順序が CNF 分散性や物性に影響を与えることがわかった。ベース樹脂及び複合材 MB のほかに、樹脂改質剤等を配合する場合には、先にベース樹脂と複合材 MB を混練した方が試料の分散性や耐衝撃性等が良好であった。

参考文献

- 岡田きよみ 他：FT-IR イメージングを用いたポリマーコンポジット中の添加剤の分散評価法、高分子論文集, 75 (2), 212-220 (2018).

セルロースナノファイバー (CNF) マスターバッチの希釈方法の検討

化学材料科 結城 茜 野澤 遼 小泉雄輔* 菅野尚子** 鷺坂芳弘***
株式会社サンケミカル 鎌田真一

Study of dilution method for cellulose nanofiber masterbatch

YUKI Akane, NOZAWA Ryo, KOIZUMI Yusuke

KANNO Naoko, SAGISAKA Yoshihiro and YARITA Shinichi

Keywords: cellulose nanofiber, masterbatch, dry blending, kneading, mechanical property

セルロースナノファイバー (CNF) を樹脂内部に分散させた CNF 複合樹脂は、軽くて高強度であることから、自動車業界等から注目されている。通常 CNF 複合樹脂は高濃度に CNF を含む CNF マスターバッチを原料樹脂で混練希釈することで作製される。CNF マスターバッチの希釈方法の違いが機械的性質に影響することが考えられたため、ドライブレンド希釈した材料及び混練希釈した材料を比較評価した。評価の結果、希釈方法の違いによる曲げ強さ、引張強さ、シャルピー衝撃強さへの影響はほぼ無く、ドライブレンド希釈でも混練希釈と同等の材料が得られることが分かった。

キーワード：セルロースナノファイバー、マスターバッチ、ドライブレンド、混練、機械的性質

1 はじめに

セルロースナノファイバー (CNF) は植物由来の高強度ナノ素材で、樹脂材料の補強繊維としての利用が期待されている。CNF 複合樹脂を成形する際、通常 CNF を高い濃度で樹脂に混ぜ込んだペレット (CNF マスターバッチ) を原料樹脂ペレットに混合し、所定濃度に希釈してから成形する。ドライブレンド希釈は、混練希釈に比べ工程が少なく、時間がかからない希釈方法だが、混練希釈より分散性が劣ることで、機械的性質が低下することが懸念された。そこで、CNF マスターバッチをドライブレンド希釈した材料及び混練希釈した材料を用いて、射出成形により試験片を作製し、引張、曲げ及び衝撃特性を比較したので報告する。

2 方法

2.1 試験片の作製

ドライブレンド希釈材料は、CNF 濃度が 5% となるようにポリプロピレン (PP、(株) サンケミカル提供) 及び CNF マスターバッチ (CNF 濃度 30%、(株) サンケミカル提供) を袋に入れ、混ぜ合わせた材料を用いた。混練希釈材料は、CNF 濃度が 5% となるように

PP 及び先の CNF マスターバッチを混練した材料 ((株) サンケミカル提供) を用いた。ドライブレンド希釈材料、混練希釈材料及び比較として PP を用いて、射出成形機 EC100SXIII-2A (芝浦機械 (株) 製、スクリュ径 32mm) にて表 1 の試験片 (JIS K7139 : 2009、多目的試験片タイプ A1) を作製した。

表 1 試験片

PP/CNF 5_D	CNF濃度5%(ドライブレンド希釈)
PP/CNF 5_K	CNF濃度5%(混練希釈)
PP/CNF 0	CNF濃度0%

2.2 実験方法

(1) 機械的性質

曲げ特性は精密万能試験機 AGX-50kNV ((株) 島津製作所製) を用いて JIS K 7171 : 2016 に基づき、試験条件：試験速度 5 mm/min、により曲げ強さ (N=5) 及び曲げ弾性率 (N=5) を求めた。引張特性は、上記精密万能試験機を用いて JIS K 7161-1:2014 に基づき、試験速度 5 mm/min、により引張強さ (N=5) を求めた。衝撃特性は、シャルピー衝撃試験機 CIT-25J-CI ((株) オリエンテック製) を用いて、JIS K 7111-1:2012 に基づき、試験条件：ハンマー容量 2

* 現 富士工業技術支援センター 技術支援担当、** 現 浜松工業技術支援センター 材料科、*** 退職

J、切削ノッチ付試験片（ノッチ形状A）、エッジワイズ衝撃によりシャルピー衝撃強さ（N=10）を求めた。

（2）セルロース繊維の分散性

PP/CNF 5_D及びPP/CNF 5_Kの断面を調整し、偏光顕微鏡LEICA DM750P（ライカマイクロシステムズ（株）製）で観察した。また、PP/CNF 5_D及びPP/CNF 5_Kの断面を調整し、顕微赤外分光分析装置Frontier-Spotlight400（PerkinElmer 製）を用いて、測定条件：測定分解能 8 cm^{-1} 、ピクセルサイズ $1.56\text{ }\mu\text{m}$ 、積算回数2回/ピクセル、測定サイズ $200\text{ }\mu\text{m}\times 200\text{ }\mu\text{m}$ により、ATRイメージング測定を行った。上記測定結果から「 $1,050\text{ cm}^{-1}$ ピーク面積（セルロース）/ $1,380\text{ cm}^{-1}$ ピーク面積（PP）」を測定領域内の各ピクセルで計算した16,384点の値を用い、岡田らの方法¹⁾により窓枠サイズの異なる平均化フィルタを適用してCV値（変動係数）を算出し、窓枠サイズとの関係をグラフに表した（N=3）。

3 結果及び考察

3.1 機械的性質

表2に曲げ強さ、曲げ弾性率、引張強さ、シャルピー衝撃強さの結果を示した。PP/CNF 5_D及びPP/CNF 5_Kの4つの物性値の内、曲げ弾性率はMann-WhitneyのU検定（有意水準5%）で有意差があったが、その他の3物性値は有意差がなかった。CNFマスターバッチの希釈方法（混練、ドライブレンド）による曲げ強さ、引張強さ、シャルピー衝撃強さへの影響はほぼ無いと考えられた。

3.2 セルロース繊維の分散性

偏光顕微鏡観察結果（図1）から、PP/CNF 5_D及びPP/CNF 5_Kともにセルロース繊維の凝集は見られなかった。図2にPP/CNF 5_D及びPP/CNF 5_Kのセルロース繊維の分散性を数値化したグラフを示した。窓枠サイズ $1.56\text{ }\mu\text{m}$ のCV値が2以下で、分散性良好と判断されるが、いずれも2を超過している。分散性が良くなかったがPP/CNF 0よりも機械的物性は向上した。PP/CNF 5_Dの方がPP/CNF 5_KよりもCV値が大きく、セルロース繊維の分散性が悪かったため、曲げ弾性率が低かった可能性が推察される。岡田らの報告¹⁾では、CNFの分散性と力学試験結果は相関があることを確認しているが、力学試験結果がCNFの分散性に依存しないサンプル

表2 引張、曲げ及び衝撃の物性値

	曲げ強さ (MPa)		曲げ弾性率 (GPa)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
PP/CNF 5_D	58.8	0.132	2.11	0.0114
PP/CNF 5_K	59.1	0.330	2.17	0.0179
PP/CNF 0	56.9	0.524	1.94	0.0167

	引張強さ (MPa)		シャルピー衝撃 強さ(kJ/m ²)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
PP/CNF 5_D	37.0	0.482	2.4	0.51
PP/CNF 5_K	36.7	0.364	2.2	0.096
PP/CNF 0	36.2	0.377	1.8	0.26

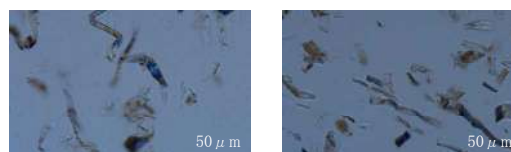


図1 セルロース繊維の偏光顕微鏡写真
左：PP/CNF 5_D 右：PP/CNF 5_K

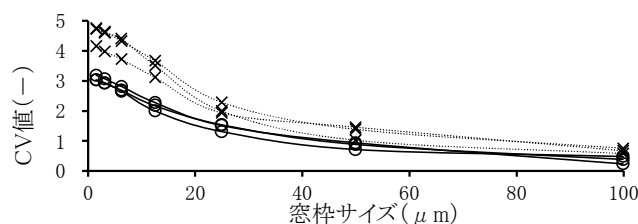


図2 セルロース繊維の分散性
×:PP/CNF 5_D ○:PP/CNF 5_K

もあった。今回作製した試験片の曲げ強さ、引張強さ、シャルピー衝撃強さはCNFの分散性に依存していないと推定される。

4 まとめ

CNFマスターバッチをドライブレンド希釈した材料及び混練希釈した材料を評価した結果、いずれの希釈方法でもセルロース繊維の凝集が無く、曲げ強さ、引張強さ、シャルピー衝撃強さへの影響はほぼ無かった。ドライブレンド希釈は、混練希釈よりも工程が少なく、熱履歴も軽度となるため、CNFマスターバッチを原料樹脂ペレットで希釈し、射出成形する場合、有用といえる。

参考文献

- 岡田きよみ 他：FT-IRイメージングを用いたポリマーコンポジット中の添加剤の分散評価法. 高分子論文集, 75 (2), 212-220 (2018).

樹脂製品中のセルロースナノファイバー (CNF) 定量分析手法の開発

化学材料科 野澤 遼 菅野尚子* 鷺坂芳弘**

Development of a method for the quantitative analysis of cellulose nanofiber (CNF) in plastic products

NOZAWA Ryo, KANNO Naoko and SAGISAKA Yoshihiro

Keywords: cellulose nanofiber (CNF), quantitative analysis, ultra violet-visible spectrophotometer

樹脂製品中に微量の CNF を添加することにより、性能が大きく向上することがある。それら CNF 添加製品では、CNF 含有量を定量することが不可欠であるが、実製品では、共存物質が存在していることや製品中から微量の CNF を抽出することが困難であるため定量が難しい。そこで、湿式摩擦材を例に製品中の CNF 含有量を定量する分析手法を開発した。

キーワード：セルロースナノファイバー (CNF)、定量分析、紫外可視分光光度計

1 はじめに

CNF は、バイオマス素材であることから炭素循環型社会の実現に向けて注目されている¹⁾。これまでに、微量の CNF を製品へ配合することで、製品性能が大きく向上した研究結果が報告がされている。そのような製品の量産化に向けては、性能保証の観点から、製品中の微量 CNF を定量する手法が不可欠であるが、製品中の共存物質の影響により定量することは困難である。

湿式摩擦材は自動車の動力部などに使用される樹脂部品である。これまでに、湿式摩擦材に CNF を微量配合することで、従来技術では困難であったせん断強度と摩擦性能の双方が向上することが報告されている²⁾。しかし、製品化のためには、CNF の含有量が不明であるなどの課題が残されている。そこで、今回、湿式摩擦材を例に製品中の微量 CNF を定量する手法を検討した。

本検討では、摩擦材作製時の抄紙工程で排出される白水に着目し、白水中の CNF 濃度と抄紙前の CNF 濃度から、摩擦材に取り込まれた CNF を算出した。また、共存物質として配合している添加剤が本分析手法に与える影響についても評価した。

2 紫外可視分光分析装置による CNF の定量分析

2.1 検量線の作製

摩擦材の作製に使用する CNF 水溶液を希釈し 2 $\mu\text{g/mL}$ から 40 $\mu\text{g/mL}$ の濃度の異なる 5 種類の CNF 水溶液を作製した。CNF 水溶液をそれぞれ 1 mL ずつ採取した後に、5 %フェノール水溶液 1 mL を加え、さらに、5 mL の濃硫酸を滴下した。得られた溶液について、紫外可視分光分析装置 V-630 (日本分光(株)製)により、吸収スペクトルを測定した。得られたスペクトルからセルロースに由来する 488 nm の吸光度を用いて、検量線を作成した³⁾。

2.2 添加剤の評価

繊維基材であるアラミド及び添加剤 A、B、C、D の水溶液について、それぞれ検量線の作製と同様に、前処理を行った後に吸収スペクトルを測定した。

2.3 白水の分析

パルプのろ水性評価などに使用されるフリーネステスターにアラミド、添加剤 A、B、D 及び CNF 水溶液を投入し、白水を調製した。さらに、比較のため CNF を添加しない白水も別途作製した。調製した白水をそれぞれ前処理し、得られた溶液の吸収スペクトルを測定した。さらに、CNF の濃度が定量下限以下である可能性も考慮し、調製した白水をそれぞれロータリーエバポレータ R-144 (Buchi 製) で 10 倍に濃縮した試料も別途作製し、同様に前処理を

* 現 浜松工業技術支援センター 材料科、** 退職

行った後に、吸収スペクトルを測定した。

2.4 添加剤が CNF の歩留まりに及ぼす影響

添加剤 A、B、D が摩擦材中の CNF の歩留まりに及ぼす影響について評価するため、フリーネステスターにアラミド及び CNF 水溶液のみを投入し、白水を調製した。さらに、10 倍に濃縮した試料も作製し、それぞれ、同様に前処理を行った後に、吸収スペクトルを測定した。

3 結果と考察

3.1 検量線の作成

CNF の濃度が高くなるにつれて、488 nm の吸光度が大きくなり、 $R^2=0.998$ の検量線が得られた (図 1)。

3.2 添加剤の評価

添加剤 C において、488 nm 付近に極大吸収波長を有するスペクトルが得られた。このことから、添加剤 C が CNF の定量分析を妨害する夾雑物を含むことが分かった。

3.3 白水の分析

CNF を添加せずに作製した白水と比較した結果、10 倍に濃縮した白水においても、本分析手法では CNF は有意に検出されなかった。このことから、白水中の CNF 濃度は、文献³⁾により報告されている本分析手法の定量下限値 $1.9 \mu\text{g/mL}$ の $1/10$ 倍である $0.19 \mu\text{g/mL}$ 以下であることが示唆された。同白水の作製時のフリーネステスター中の CNF 濃度が $90 \mu\text{g/mL}$ であることから、摩擦材中の CNF の歩留まりは 99.7 % 以上と算出された。

3.4 添加剤が CNF の歩留まりに及ぼす影響

アラミド及び CNF 水溶液のみから作製した白水においては、10 倍に濃縮することで、488 nm 付近に吸収が観測され (図 2)、検量線との比較から白水中の CNF 濃度は $7.0 \mu\text{g/mL}$ と算出された。添加剤を使用しない白水では CNF 濃度が高くなったことから、添加剤が CNF の歩留まり向上に寄与していることが考えられる。

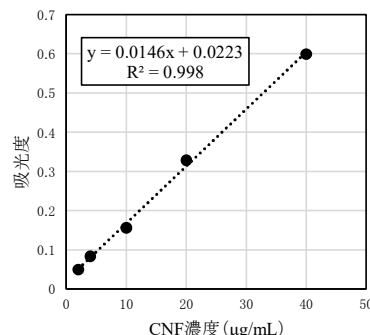


図 1 CNF 濃度と吸光度 (488 nm) の関係

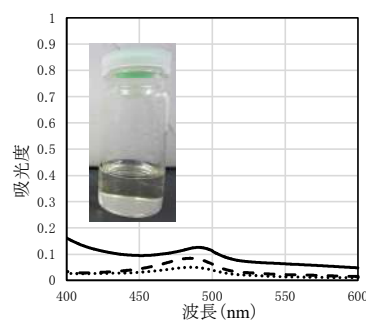


図 2 紫外可視吸収スペクトル

..... CNF 水溶液 (2 $\mu\text{g/mL}$)
 - - - CNF 水溶液 (4 $\mu\text{g/mL}$)
 — 添加剤なしの白水 (10 倍濃縮)

4 まとめ

湿式摩擦材中の CNF を定量する手法として、白水中の CNF 濃度を分析する手法を開発した。分析を妨害する添加剤 C を除いた実験では 99.7 % 以上の CNF が、湿式摩擦材に取り込まれていることが示唆された。今後は、添加剤 C が含有していても可能な CNF 定量手法の開発を目指す。

謝辞

本研究の実施にあたり、分析試料を提供いただいた NSK ワーナー株式会社の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 榎原圭太：セルロースナノファイバーの基礎と応用. 化学と教育, 70 (1), 28-31 (2022).
- 2) 瀬戸井睦 他：湿式摩擦材. および湿式摩擦材を用いた湿式摩擦板. 特開 2023-136867 (2023.9.29).
- 3) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 他：酸分解法, 「セルロースナノファイバーの検出・定量の事例集」, 小倉勇 監修, pp. 4-12 (2020)

タルクがもたらすセルロース繊維の凝集の影響

化学材料科 小泉雄輔* 野澤 遼 結城 茜 菅野尚子** 鷺坂芳弘***
株式会社グリーンループ 大石芳裕 高野一郎

Influence of cellulose fiber agglomeration caused by talc

KOIZUMI Yusuke, NOZAWA Ryo, YUKI Akane, KANNO Naoko,
SAGISAKA Yoshihiro, OISHI Yoshihiro and TAKANO Ichiro

Keywords: cellulose fibers, agglomeration, tensile strength, flexural strength, charpy impact

セルロース繊維を強化材として樹脂に配合する場合、セルロース繊維は樹脂中に均一に分散していることが好ましい。これはセルロース繊維の凝集が強度やじん性の低下などをもたらすといわれるためであるが、実際の影響度は明らかになっていない。そこで、本研究ではタルクとセルロース繊維を樹脂に配合し、意図的にセルロース繊維を凝集させた樹脂を作製して物性を評価した。偏光顕微鏡による観察では、配合したタルク以上の大きさを持つ凝集体が観察されたが、引張強さ、曲げ強さ及び耐衝撃性の著しい低下は生じず、凝集による影響は見られなかった。

キーワード：セルロース繊維、凝集、引張強さ、曲げ強さ、シャルピー衝撃強さ

1 はじめに

令和4年度にプラスチック新法が施行されたことや、2050年のカーボンニュートラル実現に向けた取り組みも相まって、樹脂のセルロース繊維（以下CFと表記）による強化やマテリアルリサイクルが注目されている。福島ら¹⁾は、プラスチック成形体が外観品位や物性を確保するには、CFが樹脂中に均一に分散していることが重要であると報告している。これに対して、CFの凝集体が存在する樹脂の物性については十分に議論されていない。本報では、マテリアルリサイクルを経た樹脂原料を想定し、ポリプロピレンを主成分としてCFを意図的に凝集させたモデル樹脂を作製して、CFの凝集による機械的特性（引張強度や曲げ強度、シャルピー衝撃強度）への影響を調査した。

2 方法

2.1 試料の作製

樹脂のマテリアルリサイクルには洗浄・分別工程があり、樹脂表面の汚れの除去や、樹脂成分の分別が行われている。しかし、リサイクル工程を経た樹脂原料は、分別しきれない樹脂成分や、樹脂に練り

こまれていて洗浄では除去できない無機成分が残存するため、単一組成にはなりえない。本報では、ポリプロピレンを主成分としたリサイクル樹脂を想定し、ポリプロピレン J107G（株プライムポリマー製）80 wt%、ポリエチレン ペトロセン 339（東ソー（株）製）15 wt%、ポリスチレン CR-3500（DIC（株）製）5 wt%からなるモデル樹脂Mを作製した。また無機成分を含有したモデル樹脂として、Mにタルク クラウンタルク DR（松村産業（株）製）7 wt%を配合したモデル樹脂Miを作製した。さらに、タルク周辺に意図的にCFを凝集させた試料を作製するため、Miに、CFを高濃度に配合するマスターバッチ kinari（パナソニック プロダクションエンジニアリング（株）製）を配合し、タルク 7 wt%、CF 10 wt%となるよう調製したモデル樹脂Micを作製した。各試料の調製には二軸混練押出機 KZW20TW-45MG-NH(-1100)-SKG（株テクノベル製）を使用し、混練条件はスクリュ回転速度 200 rpm、バレル設定温度 180 °Cとした。得られた各試料から、協力企業が保有する射出成形機により試験片を成形し、CFの分散状態の観察及び機械的特性の評価を行った。

* 現 富士工業技術支援センター 技術支援担当、** 現 浜松工業技術支援センター 材料科、*** 退職

2.2 CFの分散状態の観察

射出成形により得られた試験片から、マイクロトーム Hist Core MULTICUT（ライカマイクロシステムズ(株)製）を用いて厚さ約 30 μm の薄片を切り出した。薄片を偏光顕微鏡 DM750P（ライカマイクロシステムズ(株)製）を用いて観察し、凝集物の有無を確認した。

2.3 機械的特性の評価

射出成形により引張強さや曲げ強さ、シャルピー衝撃強さを測定した。引張試験及び曲げ試験は、精密万能試験機 AGX-50kN（株島津製作所製）を使用した。引張試験の試験条件は JIS K 7161: 2014 に従い試験速度は 5 mm/min とした。曲げ試験は JIS K 7171: 2016 に従い、試験速度 5 mm/min とした。シャルピー衝撃試験はシャルピー衝撃試験機 CIT-25J-CI（株オリエンテック製）を使用した。試験条件は JIS K 7111: 2012 に従い、ハンマー容量 2 J とし、試験前に切削加工によるノッチを試験片に施した。

3 結果及び考察

図 1～2 に、Mi と Mic の薄片に対する偏光顕微鏡観察写真を示す。また表 1 に、得られた試験片の引張強さ、曲げ強さ、シャルピー衝撃強さを示す。

図 1 から黒色の背景に約 25～50 μm の白色物質が観察された。(1) 配合前のタルクの粒子径が 50 μm であること、(2) 樹脂部分は偏光特性を示さず黒色に映ることから、白色物質はタルクであると考えられる。

図 2 からは、①幅数 μm 、長さ 10～20 μm の長方形形状または糸状の物質と、②約 80 μm の塊が観察された。配合後のタルク（図 1）と形状が異なるため、①は CF であると考えられる。②は、配合前のタルクより大きく CF のような外観形状を有していることから、タルクを覆う CF または CF のみから形成される凝集体と考えられる。いずれにせよモデル樹脂 Mic 中に CF の凝集体が形成されたと言える。

表 1 から Mic について、引張強さ、曲げ強さ及びシャルピー衝撃強さは、Mi と比較して同等程度であり、凝集による著しい物性低下は確認できなかった。凝集体の大きさが、25 μm から 80 μm 程度になっても、物性に大きな影響を与えないと考えられる。

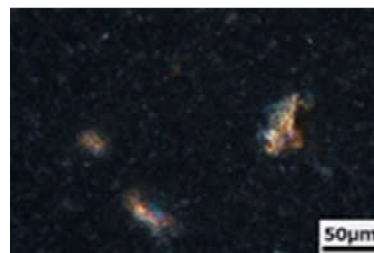


図1 Miの偏光顕微鏡観察

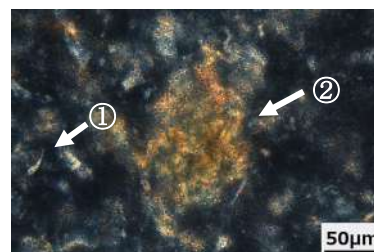


図2 Micの偏光顕微鏡観察

① CFとみられる糸状物質、② タルクを覆うCFまたはセルロース繊維塊とみられる物質

表1 各モデル樹脂の機械的特性

試料名	引張強さ (MPa)	曲げ強さ (MPa)	シャルピー衝撃強さ (kJ/m ²)
M	27.6	44.7	1.33
Mi	29.1	51.0	1.40
Mic	29.2	53.3	1.66

4 まとめ

今回、CF が均一に分散せずに凝集体が生じているモデル樹脂において著しい物性低下は起こらなかった。今後は、CF からなる凝集体の濃度やサイズについても考慮するとともに、タルクだけではなく様々な無機成分を含有するマテリアルリサイクルを経た樹脂における CF の強化材としての適用を検討していく。

参考文献

- 1) 福島直弥 他：セルロース繊維複合樹脂の家電構造材への適用．成形加工，31(11)，423-425(2019)．

音声認識技術を用いた自動車室内音環境の評価に関する研究

- 音声認識を用いた評価システムの構築 -

照明音響科 竹居 翼 木野直樹

Study on evaluating the sound environment inside vehicles using automatic speech recognition technology

- Building an evaluation system using automatic speech recognition -

TAKEI Tasuku and KINO Naoki

Keywords:automotive interior, automatic speech recognition, sound environment

自動車室内の音環境の調整には自動車内装が重要であり、当所では自動車内装の開発に必要な技術支援を実施している。本研究では、自動車内装の技術支援に活用するため、音声認識技術を利用した車室内音環境の数値化を試みる。この実現のため、音声認識ツールキットを利用して評価システムを構築し、既存の音声コーパスを利用して雑音の無い音声の評価した。その結果、単語誤り率2.5%が得られ、雑音の無い音声を概ね正しく認識できることを確認した。

キーワード：自動車内装、音声認識、音環境

1 はじめに

近年、EV化によるモーター騒音や車両接近通報装置の警報音等、自動車の走行音は大きく変化しており、自動車室内の静粛化には、自動車内装がこれまで以上に重要となっている。工業技術研究所では、自動車内装の開発に必要な吸音率等の音響試験を実施している。

本研究では、自動車内装の技術支援に活用する目的で、近年利用が盛んな音声認識技術を用いた車室内音環境の数値化を試みる。この実現のため、音声認識ツールキットを利用して評価システムを構築し、既存の音声コーパスを利用して雑音の無い音声の評価した。その結果、単語誤り率2.5%が得られ、雑音の無い音声を概ね正しく認識できることを確認した。

2 方法

音声認識技術を利用した車室内音環境の数値化の流れを図1に示す。

発話内容付きの音声データが収録された音声コーパスを使用した。

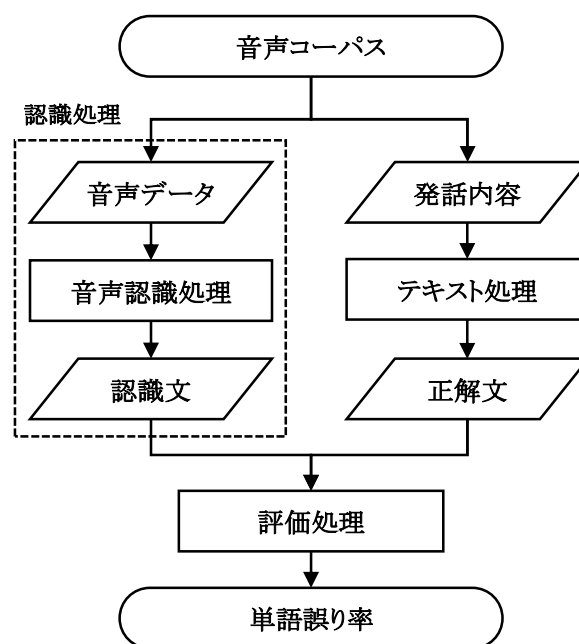


図1 音声認識を用いたシステムの概要

認識処理では、音声データを音声認識処理して得られた認識文を作成する。ここでは、クラウドサービスによる音声認識API等を利用しない音声認識ツールキットを利用して実装した。

評価処理では、音声データに付属する発話内容をテキスト処理して作成した正解文を使用して、認識文との差異を数値化する。ここでは、正解文を作成する処理、および認識文と正解文を比較して単語誤り率を計算する処理を実装した。

3 結果と考察

3.1 構築した音声認識システム

音声認識ツールキットは、Open AI, Inc. が提供しているオープンソース版 Whisper¹⁾ を利用した。このツールキットは、モデルパラメータ数が異なる5種類 (tiny、small、base、medium、large) の事前学習済み認識モデルを利用できる。今回は medium の認識モデルを利用して認識処理を実装した。単語誤り率を計算する評価処理は、Hugging Face, Inc. が提供している音声認識性能の評価用の Python モジュール²⁾ を利用して実装した。これら2つの処理は、ローカルコンピュータ上に構築した。

3.2 雑音の無い音声データの評価

英語音声コーパスの LibriSpeech ASR corpus³⁾ に収録されているデータセットのうち、雑音の無い音声データセット (test-clean セット、全 2,620 データ) を評価した。

評価したデータセット全体の単語誤り率は 2.5% であった。このときの各音声データの単語誤り率の分布を図2に示す。この分布より、2,000 ファイル以上の音声データの単語誤り率が 10% 未満であった。今回構築したシステムによって、雑音の無い英語音声を概ね正しく認識できることを確認した。

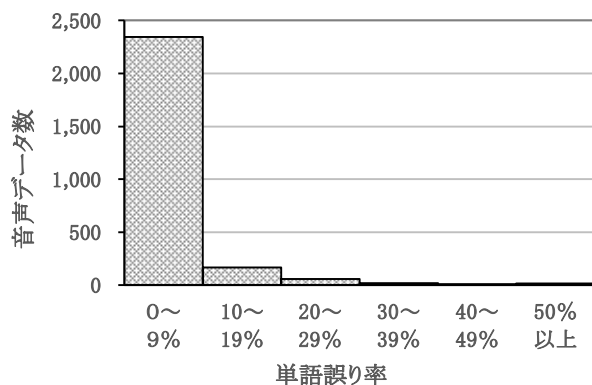


図2 英語音声の単語誤り率の分布

4 まとめ

音声認識結果を評価するシステムを構築し、雑音の無い音声データを評価した。その結果、雑音の無い音声を概ね正しく認識できることを確認した。今後、雑音等のある音声や実車室内を再現した音声データの認識評価を進め、自動車内装が車室内音環境へ及ぼす影響の指標化を目指す。将来的には、本研究の成果を活用して、自動車内装の技術支援の充実化を図る。

謝辞

本研究を進めるにあたり、音声情報処理に関することについてご指導いただきました中部大学工学部山本一公教授に深く感謝いたします。

参考

- 1) OpenAI, Inc.: GitHub openai-whisper, <https://github.com/openai/whisper> (2024.3.18 アクセス)
- 2) Hugging Face, Inc.: GitHub evaluate, <https://github.com/huggingface/evaluate> (2024.3.18 アクセス)
- 3) Open Speech and Language Resources: LibriSpeech ASR corpus, <https://www.openslr.org/12/> (2024.3.18 アクセス)

マイクロプリズムアレイにおける熱ナノインプリントによる成形の評価

- 光干渉計を用いた表面粗さ測定 -

工業技術研究所 照明音響科

柳原 亘

豊田敏裕

浜松工業技術支援センター 光科

中野雅晴

志智 亘

Evaluation of micro-prism arrays mold made by thermal nanoimprinting

- Surface roughness measurement using coherence scanning interferometry -

YANAGIHARA Wataru, TOYOTA Toshihiro, NAKANO Masaharu and SHICHI Wataru

Keywords: Micro-prism arrays, thermal nanoimprinting, coherence scanning interferometry, surface roughness, slope

マイクロプリズムアレイ (MPA) は、傾斜角が異なる微細なプリズム群で構成されており、コミュニケーションランプの路面描画素子として期待されている。本研究では、光造型により作製した MPA と、熱ナノインプリントにより成形した MPA の表面粗さを測定することで、MPA が熱ナノインプリントにより成形可能であることを確認した。傾斜治具を製作することによって、各プリズム面が測定機光軸に対して水平になるように姿勢調整して、ノイズを極力抑えた表面粗さを測定することが可能になった。

キーワード：マイクロプリズムアレイ、熱ナノインプリント、光干渉計、表面粗さ、傾斜面

1 はじめに

マイクロプリズムアレイ (MPA) は、傾斜角が異なる微細なプリズム群で構成されており、コミュニケーションランプの路面描画素子として期待されている。光造型により作製した MPA は、その量産に必要な金型を精密電気鋳造により作製可能であることが明らかになった¹⁾。

本研究では、精密電気鋳造により作製した MPA を使用した熱ナノインプリントにより成形した MPA の表面粗さを測定することで、MPA が熱ナノインプリントにより成形可能であることを確認したので、その結果を報告する。

2 方法

2.1 MPA の概要

本研究で対象とする MPA の概略図を図 1 に示す。一辺が 0.1mm の傾斜角が異なるプリズム群 (20×20 個) で構成されている。

2.2 表面粗さ測定

表面粗さ測定には光干渉計タリサーフ CCI HDXL (アメテック株式会社製) を用いた。光干渉計は、高さ方向の分解能が非常に優れているが、傾斜面を測定する際は、十分な光量が測定機に戻らず、測定

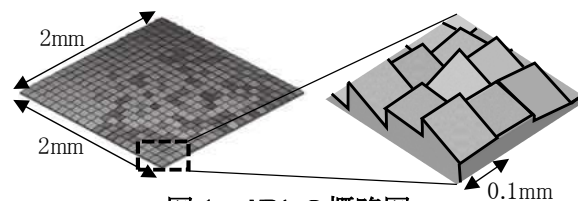


図 1 MPA の概略図

傾斜角が異なるプリズム群で構成されている。

データにノイズが発生するため、正しく表面粗さの測定が出来ない。そこで、写真 1 に示すような傾斜治具を製作し、図 2 に示すようにプリズム面が測定機光軸に対して水平になるように姿勢調整することにより、ノイズを極力抑えて表面粗さを測定した。表面粗さのパラメータは Sa (輪郭曲面の算術平均高さ) とし、S フィルタを 2.5 μ m として算出した。

3 結果

3.1 表面性状の巨視的な評価

原盤とレプリカの巨視的な表面性状を表した結果を図 3 に示す。原盤の表面性状がレプリカの方にも転写されている。表面性状は、全体的に凸形状となる傾向であった。

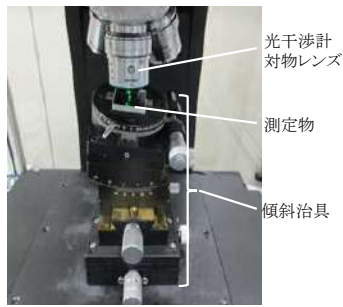


写真1 傾斜治具

傾斜治具上に測定物を置いて、姿勢調整する。

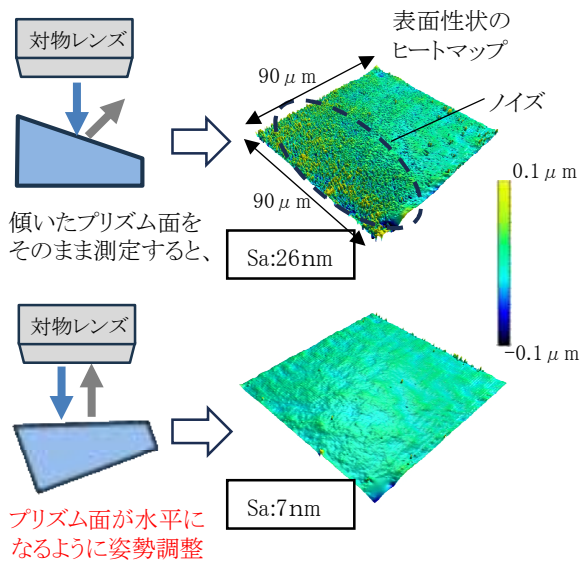


図2 プリズム面の測定方法

傾斜治具を用いて、プリズム面が測定機光軸に対して水平になるように姿勢調整することで、十分な光量が得られ、測定ノイズが抑えられる。

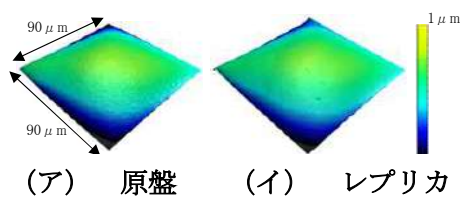


図3 プリズム面の表面性状例

プリズム面の端部を除いた中央部 90 μm 四方の範囲において、凹凸の高さ方向の大きさをヒートマップで表示している。原盤の巨視的な表面性状の傾向が、レプリカにも転写されているのが確認できる。

3.2 表面粗さ Sa

原盤とレプリカの表面粗さ Sa を比較した結果を図4に示す。なお、Saは3.1で示した凸形状も含めた数値となっている。全体的にナノオーダーの表面粗さが転写されているのが分かる。しかし、一部でSaが20nmほど誤差が生じている箇所も見られた。

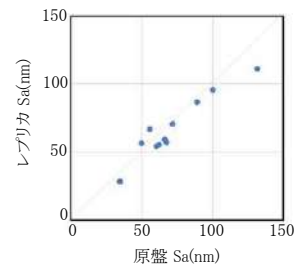


図4 レプリカの表面粗さ分布

原盤とレプリカの表面粗さの比較。20×20個のプリズムのうち、代表的な位置と傾斜角度を持つプリズム12個で評価した。評価範囲は、3.1と同様。全体的にナノオーダーの表面粗さが転写されているのが分かる。

4 考察

表面性状の結果で見られた凸形状は、積層成型という成型方式と、成型に使用した樹脂材料に由来するものと考えられる。レーザーの照射方法を工夫することで、凸形状は改善するものと考えられる。

表面粗さ Sa で誤差が大きい箇所が出た原因については、部分的に原盤から剥離した残渣の影響が考えられる。これは原盤の作製に利用したガラス基板の適切な前処理や、スタンプ成型後に溶液で除去することにより、誤差が少なくなるものと考えられる。

5 まとめ

熱ナノインプリントによりMPAを高精度に成形できることが分かった。表面粗さの測定によって明らかになったプリズム面の凸形状を低減することにより、光学性能が向上するものと考えられる。

傾斜面における表面粗さ測定方法は、車載用光学部品等の微細形状の表面粗さ測定にも活用できる。

参考文献

- 1) 豊田敏裕 他：ピクトグラムを投影可能なマイクロプリズムアレイの開発－投影能力と金型作製の実証－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 16, 46-48 (2023).

工業技術研究所の IoT 導入支援について（第4報）

- 静岡県 IoT 推進ラボ（第五期）の紹介 -

機械電子科 山下清光 望月紀寿 鈴木悠介 松下五樹*
 岩崎清斗 横井功毅
研究統括官 赤堀 篤

Support of the introduction of IoT by the Industrial Research Institute of Shizuoka Prefecture
(4th Report)

- Fifth phase in the establishment of the IoT Competence Center of Shizuoka Prefecture -

YAMASHITA Kiyomitsu, MOCHIDUKI Kazutoshi, SUZUKI Yusuke
MATSUSHITA Itsuki, IWASAKI Kiyoto, YOKOI Koki and AKAHORI Atsushi

Keywords: IoT (Internet of Things), Dissemination, Competence Center, Exhibition

工業技術研究所は、令和元年度から県内中小企業製造業現場への IoT 導入支援を強化してきた。IoT 導入支援拠点として開設した「静岡県 IoT 推進ラボ」は、静岡8、浜松4、沼津3、合計15ブースの体制で第五期を迎えた。ロボットによる自動化を見据え、静岡に小型ロボットアームの展示が新たに加わった。

令和5年度は881人の見学を受け入れ、令和元年11月から令和6年3月末までの累積で3,090人の見学者となった。セミナーは延べ31回開催し、313社464人が受講した。

キーワード：IoT (Internet of Things)、普及、推進ラボ、展示

1 はじめに

工業技術研究所（以下、当所）は、令和元年度から、中小製造業向けの IoT 導入支援を強化してきた。新成長戦略研究（県プロジェクト型研究事業）「設備、モノ、ヒトの統合的データ分析による生産性の効率化」¹⁾による企業の課題解決への取組みに加え、「中小企業デジタル技術導入促進事業」による県内企業への普及啓発^{2) 3)}を進めている。

静岡県 IoT 推進ラボ（以下、ラボ）は IoT 関連技術の製造現場への導入に必要なセンサやソフトウェア関連技術を、「見て」、「触れて」、「試せる」環境を提供している。ラボは、「展示体験室」と「IoT 研修室」で構成され、「展示体験室」は、一年間の展示について公募を行い、第五期現在、民間企業の協力により、静岡8、浜松4、沼津3、合計15ブースの体制である。

「IoT 研修室」では、IoT 実装支援を強化した「IoT 大学連携講座」による、座学⇒実習⇒現場実装⇒成果発表までの伴走型の講座に加え、「展示体験室」への出展企業によるロボット講座を実施した。今後、IoT 導入に加え、ロボット導入などの自動化、効率化、さらには農業、物流分野にも拡大して支援を行なっていく。

2 方法

静岡県 IoT 推進ラボ（第五期）出展者の公募は、前回と同様に稼働する工作機械類の展示、2箇所以上の相互通信、2社以上でのコラボレーション企画の提案は加点することで、最新機器類の展示が提案されることを期待した。

* 退職

3 結果

今回の展示では、小型ロボットアームの展示とRFIDによる管理システムの展示が加わった。

展示体験室のレイアウトを図1、2、3に示す。

見学やセミナー開催の実績を表1に示す。

見学は、第四期に956人を受け入れ、令和元年の開設以降令和6年3月までの累積で3,090人となった。

セミナーは開設から延べ31回開催し、313社464人が受講した。なお、大学連携講座の詳細は、別途報告する。また、ロボットを導入できる人材育成のためのロボット講座を新設し、2回開催した。

4 まとめ

これまでの成果は、当所HPや地域DX推進ラボでの情報提供に加え、グーグルストリートビューやyoutube配信などで公開している。また、毎年11月に開催されている産業振興フェア in いわたや令和5年10月に開催されたふじのくにセルロース国際フォーラムなどに出展し、情報発信に努めている。

引き続き、最新のIoT関連技術の紹介や人材育成に務める他、ロボット導入による自動化支援や農業、物流分野など新たな分野への支援も強化していく。

謝辞

展示体験室への出展に協力いただいている、(株)アイエイアイ、(株)アイティエス、RFアンテナ(株)、SMC(株)、(株)エッチ・ケー・エス、芝浦機械(株)、(株)新冷熱技研、TechShare(株)、(株)デンソーウェーブ、東朋テクノロジー(株)、(株)特電、ナルテック(株)、ニュートラル(株)、(株)朋電舎、碌々スマートテクノロジー(株)にこの場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 松下五樹 他：数値最適化による生産計画の自動作成，静岡県工業技術研究所研究報告，第16号，51-53 (2023)。
- 2) 岩崎清人 他：IoT 大学連携講座による導入支援，静岡県工業技術研究所研究報告，第16号，49-50 (2023)。
- 3) 岩崎清人：Unreal Engine と Node-RED の連携による IoT 機器設置検討支援システムの提案，情報処理学会第86回全国大会論文集，p. 3-29-3-30，神奈川 (2024)。

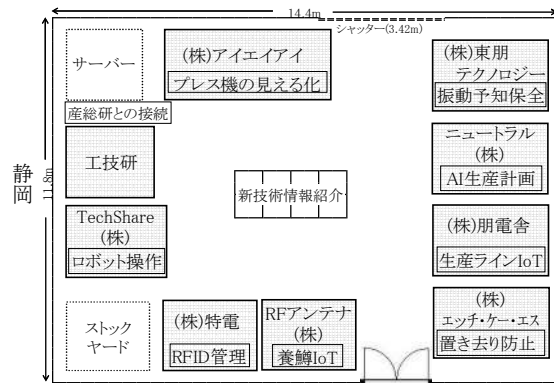


図1 静岡県IoT推進ラボ(第五期)展示レイアウト

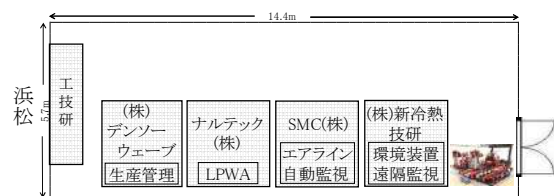


図2 サテライト浜松(第五期)展示レイアウト

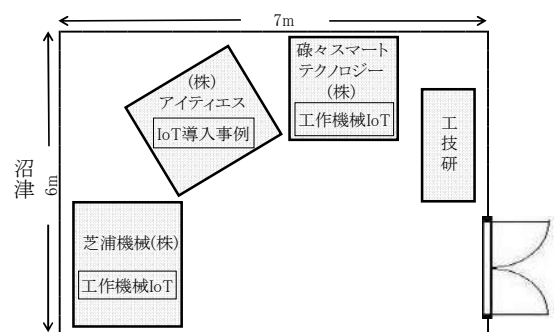


図3 サテライト沼津(第五期)展示レイアウト

表1 見学者および各種セミナーの開催実績

	第1期	第2期	第3期	第4期	第5期
	R元.11 ~R2.10	R2.11 ~R3.10	R3.11 ~R4.10	R4.11 ~R5.10	R5.11 ~R6.3
見学者	649	356	838 ^{※1}	956 ^{※2}	291 ^{※3}
PLCプログラミングセミナー	7社 15人				
IoTを使用した生産管理セミナー	7社 15人				
初心者向けIoTセミナー	10社 10人	11社 11人 10社 10人			
IoT環境構築のための技術知識講座(WEB)				43社 69人	
現場実装講座(IoT大学連携講座)		28社 28人	23社 23人	43社 54人	
スモールスタートIoTセミナー				9社 9人	
ロボットティーチング講座				13社 14人	7社 7人
デジタルツイン技術セミナー					7社 17人

※1、※2、※3 静岡、沼津、浜松の合計

RFIDによる倉庫内の在庫管理について

機械電子科 望月紀寿

Development of an application to manage warehouse inventory using RFID

MOCHIZUKI Kazutoshi

Keywords:RFID, inventory management

倉庫内に保管してある原材料の在庫管理を RFID により行う取り組みを行った。倉庫から原材料を取り出すとき、または戻すときに、原材料に貼付した RFID タグをスキャンすることで、その履歴を記録するアプリケーションを作成した。また、この履歴から原材料の棚卸を行う機能も実装した。アプリケーションは、ハンディ RFID リーダーで読み取ったタグの ID を取得するアドインを使用して、Microsoft Excel において開発した。

キーワード：RFID、在庫管理

1 はじめに

企業より倉庫の物品の在庫や移動、所在を把握したいという要望があった。この要望に対して、静岡県の中企業 IoT 導入促進事業により静岡県産業振興財団を通じてから派遣された IoT アドバイザーから、RFID タグを利用して物品の管理をしたらどうかという提案があった。

そこで、新成長戦略研究「設備、モノ、ヒトの統合的データ分析による生産性の効率化」の一環として、RFID タグによって物品を同定して、手間をかけずに簡単な操作で物品を管理する Microsoft Excel（以下、Excel）のアプリケーションを作成した。

2 方法

2.1 システムの概要

システムの概要を図 1 に示す。

倉庫の中の物品には RFID タグを取り付けてあり、RFID タグの ID を読み取る RFID リーダーと Excel アプリケーションを実行する PC は接続してある。

Excel アプリケーションには、持出、返却、探索、棚卸などの機能を実装した。Excel アプリケーションを動作させた環境は次のとおりである。

- ・ OS：Microsoft Windows 11
- ・ Excel のバージョン：
 - Excel for Microsoft 365（アプリ版）
 - Microsoft Excel 2021
- ・ アドイン：
 - （株）ハヤト・インフォメーション社製
MANICA EXCEL TOOL（基本機能版）^{*1}
- ・ RFID リーダー：ATID 社製 AT388

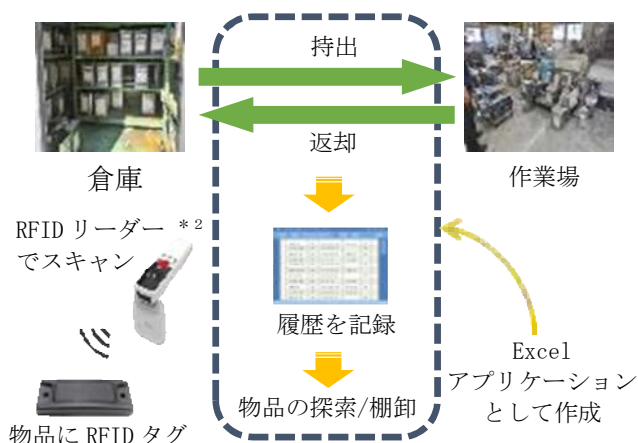


図1 システムの概要

*1 RFIDパッケージ・NFCアプリ | ハヤト・インフォメーション
<https://www.hayato.info/home/index.htm> (2024. 3. 21 アクセス)

*2 AT388 - ATID / 에이티아이디
<https://atid1.com/products/bluetooth-reader/at388/> (2024. 3. 21 アクセス)

生産計画自動作成のアルゴリズムおよびアプリケーションの開発

機械電子科 松下五樹* 岩崎清斗 山下清光
愛工業株式会社 織田直樹 荒津有希

Development of algorithms and applications for automatic production planning

MATSUSHITA Itsuki, IWASAKI Kiyoto, YAMASHITA Kiyomitsu, ODA Naoki and ARATSU Yuki

Keywords: Production planning, Multi-objective optimization, Genetic algorithm, GUI application

製造業において生産計画は生産効率等に直結する重要な項目であるが、多くの中小企業では現状、経験を持つ担当者が長時間を掛け、人手により作成をしている。本研究では遺伝的アルゴリズムの活用により、生産計画を自動で作成する手法について検討を行った。また、現場での計画作成作業が円滑に進むよう、プログラムによって作成された生産計画の詳細をグラフィカルに表示し、確認や修正が可能となるアプリケーションの開発を行った。

キーワード：生産計画、多目的最適化、遺伝的アルゴリズム、GUI アプリケーション

1 はじめに

製品の生産スケジュールを決める生産計画は、生産効率やコストに直結する重要な要素である。プラスチック射出成形では生産製品の変更時に金型や原料の交換が必要となるため、生産効率向上のためには同じ製品をできる限り連続して生産する必要がある。しかし、生産計画は表1のような膨大な組み合わせから決める必要があり、従来は担当者が経験を元に毎週約8時間掛けて作成していた。本研究では新成長戦略研究「設備、モノ、ヒトの統合的データ分析による生産性の効率化」の中で、昨年度に引き続き¹⁾、プログラムによる生産計画の自動作成に取り組んだ。また、作成された生産計画の確認、修正用のGUIアプリケーションの開発を新たに実施した。

表1 生産計画の作成条件

項目名	値
成形機数	37台
製品種類数	500種類以上
計画期間	14日分
総パターン数	約 $10^{1,000}$ 通り

2 方法

生産計画で要求される項目を表2に示す目的関数として設定した。いずれの項目も値が小さい方がよい生産計画となる。このうち、納期遅れを示す^③在庫ショート量などの一部項目は優先して改善すべき項目として設定した。

探索手法は多目的最適化遺伝的アルゴリズムのDRMOGA (Divided Range Multi-Objective Genetic Algorithm)²⁾を使用した。多目的最適化は複数の目的関数を考慮して探索を行う枠組みであり、DRMOGAは多目的最適化を適用した遺伝的アルゴリズムの手法である。プログラムはPythonにより実装し、PyTorchを用いてGPU計算を行うことにより処理の高速化を図った。なお、使用したPCのスペックはCPU: Intel Core i9-9900K、メモリ: 32GB、GPU: NVIDIA GeForce RTX2070である。

GUIアプリケーションはTypeScriptを用いて開発し、UI構築にReact、状態管理にRedux、PC用アプリケーション化にElectronの各ライブラリを使用した。

* 退職

表2 設定した目的関数

	目的関数名
①	在庫スコア
②	装置優先度合計
③	先行日数超過 (休日最小)
④	先行日数超過 (休日最大)
⑤	段替え回数合計
⑥	段替え回数最大
⑦	段替え回数幅
⑧	金型交換回数
⑨	材料交換コスト
⑩	人的コスト合計
⑪	人的コスト休日加重
⑫	稼働工場数
⑬	在庫ショート量 (優先)
⑭	金型重複回数 (優先)
⑮	夜間金型交換回数
⑯	金型交換同時超過数

3 結果

遺伝的アルゴリズムにより探索して得られた生産計画の結果について、開発した GUI アプリケーションで可視化した画面を図1に示す。昨年度までの最適化プログラムでは、生産計画は1日単位であったが、小ロットの生産にも対応できるよう、1時間単位の計画を出力できるよう改善を行った。アプリケーション上ではマウスドラッグ等の簡易な操作で計画の時間修正などが可能な他、計画の結果として各部品の在庫数推移などの詳細情報をグラフや表により視覚的に確認可能となっている。

4 考察

プログラムによる最適化に掛かる時間は1時間弱であるが、最初の設定以外は操作の必要が無いため、生産計画作成作業に掛かる時間を大幅に短縮できることが見込まれる。今後、現場にて試験運用を行い、課題点の抽出や導入効果の検証を実施する。



図1 生産計画を可視化する GUI アプリケーション

5 まとめ

多目的最適化遺伝的アルゴリズムを用いた生産計画の作成を試みた。また、作成された生産計画の確認、修正用の GUI アプリケーションの開発を行った。

参考文献

- 1) 松下五樹 他: 数理最適化による生産計画の自動作成, 静岡県工業技術研究所研究報告, 第16号, 51-53 (2023).
- 2) 廣安知之 他: 領域分割型多目的遺伝的アルゴリズム. 情報処理学会論文誌, 41, pp.79-89 (2002)

IoT 大学連携講座による導入支援（第2報）

機械電子科 横井功毅 山下清光 望月紀寿 鈴木悠介 松下五樹* 岩崎清斗

Implementation support of IoT through a seminar in collaboration with universities
(2nd Report)YOKOI Koki, YAMASHITA Kiyomitsu, MOCHIZUKI Kazutoshi,
SUZUKI Yusuke, MATSUSHITA Itsuki and IWASAKI Kiyoto

Keywords:IoT(Internet of Things), Visualization of Production Process, Seminar

工業技術研究所は、県内中小企業の生産効率向上を目指し、製造現場へのIoT導入支援を行っている。IoT大学連携講座は、静岡大学及び静岡県IoT導入推進コンソーシアムと連携し、中小企業に対して、座学から現場実装までを伴走型で支援するIoT講座である。本講座は、これまで10回開催し、延べ98名中88名の参加者がIoT実装を実現した。

キーワード：IoT(Internet of Things)、生産工程の見える化、セミナー

1 はじめに

静岡県では県内中小企業の生産効率向上を目指した製造現場へのIoT導入支援を行っており、その一環として、IoT大学連携講座を提供している。本講座は静岡大学及び静岡県IoT導入推進コンソーシアムと連携して、中小企業製造現場へのIoT導入を伴走型で支援している。本稿では、講座の内容及びその成果について紹介する。

2 方法

本講座は、座学⇒実習⇒現場実装⇒成果発表会という構成になっている。座学では、静岡大学及び静岡理工科大学監修のもと、IoTの知識を習得する。実習では、シングルボードコンピュータを使用し、ビジュアルプログラミングツール（図1）を用いてIoT実装を体験する。電子工作及びプログラミング初心者でも簡単にIoT実装を行うことができる教材を提供している（図2）。実習後、受講者は実習で使用した機器を持ち帰り、自社現場の課題を解決するため、現場実装を試みる。現場実装では、静岡県IoT導入推進アドバイザーが現場で支援を行う。最後に成果発表会を行い、各自の取り組みを参加者で共有し、IoT実装技術のさらなる向上を図る。

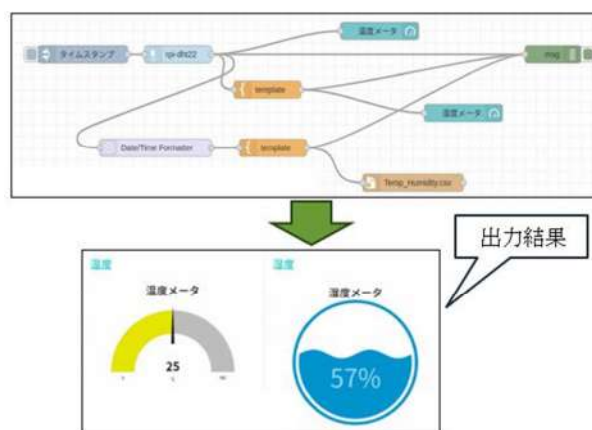
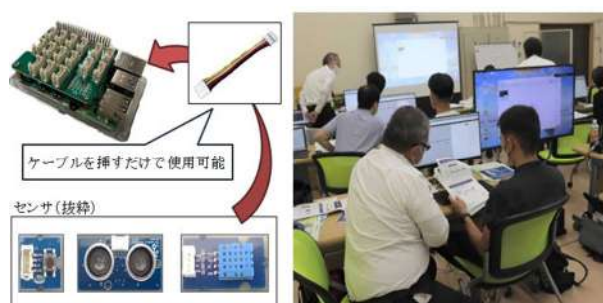
図1 ビジュアルプログラミングの例
(温湿度を計測してグラフ表示)

図2 実習機器（左）と実習の様子（右）

* 退職

3 結果および考察

本講座は、令和2年度から令和5年度までの3年間で10回開催し、延べ98名中88名（約9割）の受講者が生産現場へのIoT実装により、生産機器の稼働状況や現場の在庫管理等を実現した。令和5年度に実施した講座における参加企業の導入事例を示す。図3の事例では、クレーン操作時に使用するコントローラーが保管場所に存在するかを超音波距離センサーで確認し、1日のクレーン稼働状況の見える化を実現している。グラフの縦軸（距離）が大きいときは、保管場所にコントローラーが無いときであり、クレーン稼働中と判断できる。図4の事例では、事務所と離れた場所にある在庫置場の棚の状況を赤外線センサーで確認し、在庫置場に行かずに在庫状況の確認を可能にしている。また、在庫情報をデータで管理できるため、今後は発注業務の効率化にも活用できる。

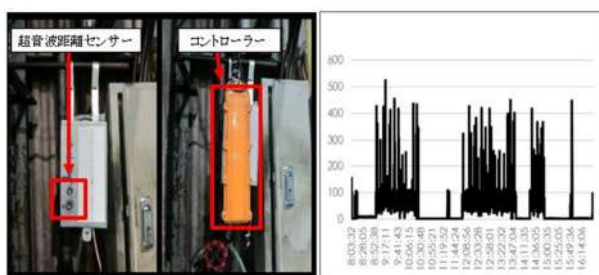


図3 機器の設置（左）と計測結果（右）



図4 機器の設置（左）と在庫管理画面（右）

4 まとめ

IoT大学連携講座を通じて、県内中小企業へのIoT導入を加速させることで、中小企業の生産効率向上に貢献している。参加企業は本講座で習得した技術を活かし、今後も自社現場でIoT化を進めていくことになるため、継続して技術支援を行っていく。また、本講座の広報活動を積極的に行い、参加企業のさらなる増加を目指していく。

参考文献

- 1) 山口智之 他：中小企業へのIoT導入支援の実例Ⅳ－大学連携講座について－，静岡県工業技術研究所研究報告，第14号，52-53（2021）。
- 2) 岩崎清斗 他：IoT大学連携講座による導入支援，静岡県工業技術研究所研究報告，第16号，49-50（2023）。

静岡県製食べる後発酵茶(ラペソー)の開発

- 静岡県製とミャンマー製の成分比較 -

食品科	山本佳奈恵	長房秀幸	松野正幸
食べる発酵茶試験研究コンソーシアム	齋藤雅子	齋藤克栄	
東京農業大学	内野昌孝		

Development of edible post-fermented tea (lapet-so) made in Japan's Shizuoka Prefecture

- Comparative study of ingredients made in Shizuoka Prefecture and Myanmar -

YAMAMOTO Kanae, NAGAFUSA Hideyuki, MATSUNO Masayuki,
SAITO Masako, SAITO Katsuei and UCHINO Masataka

Keywords: Post-fermented tea, Lapet-so

静岡県は、静岡茶の新商品の研究・開発を支援しており、ミャンマー製のラペソーにヒントを得て、日本初となる食用の後発酵茶の商品化を目指した開発を行ってきた。静岡県製とミャンマー製とを成分比較した結果、香りとアミノ酸の成分に各々の製品を特徴づける差があり、これが日本人に受け入れられやすい製品開発のポイントとなると考えられた。また、発酵を経て、発酵前にはなかった香りや機能性が認められている成分の増加が確認できた。

キーワード：後発酵茶、ラペソー

1 はじめに

静岡県は、リーフ茶の需要減少や担い手の減少など本県茶業が困難な状況に直面している中で、静岡茶の新たな価値の創造と需要の創出に資する取組を支援し、本県の茶業の再生及び発展を推進している。

静岡県内では、飲用のみでなく食用にも適した茶葉が生産されているが、食用としての利用は少ない。そこで、我々は、免疫力向上などの点から近年注目されている発酵食品としての茶葉の利用を試み、ミャンマーのラペソーにヒントを得て、県内で採集した乳酸菌・酵母を活用した静岡県製の食べる発酵茶の商品化を目指した開発を行った。

本研究では、成分分析によりその特徴を明らかにし、事前の官能評価においてミャンマー製と比較して静岡県製の方が高評価であった要因を探り、日本人に受け入れられやすい食べる後発酵茶の製造技術の確立につなげたため、成分分析の結果について報告する。

2 方法

2.1 供試試料

試験区には、茶葉の摘採日・生産者等の異なる試作品を用いた(表1)。対照区には、日本のミャンマー食材店で購入したミャンマー製ラペソー(以下「ミャンマー製」という。)と今回の試作時において採捻後に漬け込みによる発酵をせずにとりわけて冷凍保存したもの(以下「漬込無」という。)を用いた。「ミャンマー製」を除く供試試料の茶の品種はいずれもやぶきたとした。なお、「漬込無」の生産者は「No.3」以外の試験区と同様のIである。

表1 供試試料

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
茶葉の摘採日	R4.5	R5.5	R5.5	R5.5	R5.5	R5.5	R5.5	R5.5
漬け込み開始日	R4.11	R5.8	R5.8	R5.10	R5.10	R5.10	R5.10	R5.10
生産者	I	I	III	I	I	I	I	I
乳酸菌スターター	A	A	A	A	A	A	A	A
酵母スターター	無	無	無	無	NT	MT	HM	HT

2.2 成分分析

香氣成分、カテキン類、アミノ酸、有機酸について表2～5に示す分析条件にて成分分析を行った。

表2 GC-MSによる香氣成分分析条件

区分	内容
装置	(GC)7890B-(MS)5977B (アジレント・テクノロジー製)
カラム	DB-5MS LTM (30m×0.25mm、膜厚 0.25μm) (アジレント・テクノロジー製)
ガムオアゲン条件	40℃(2分)→10℃/分で昇温→250℃(10分) 合計33分

表3 UHPLCによるカテキン類分析条件

区分	内容					
装置	UHPLC:Acquity UPLC (Waters 製)					
カラム	Acquity BEH Shield RP-18 (2.1×100 mm, 1.7 μm) (Waters 製)					
溶離液	A 0.1% CH ₃ CO ₂ in UPW B 0.1% CH ₃ CO ₂ in Acetonitrile					
流速	0.6mL/min					
	時間(min)	%A	%B	時間(min)	%A	%B
グラジエント	0.0	96	4	8.7	40	60
	6.3	85	15	10.0	96	4
	7.0	85	15	11.0	96	4
	7.6	67	33			
カラム温度	50 °C					
注入量	2 μL					
検出波長	UV280 nm					

表4 HPLCによるアミノ酸分析条件

区分	内容								
装置	LC-20AD 一式(島津製作所製)								
	(LC-20AD×2台, DGU-20A3, FCV-11AL, LC-10ADVP×2台, DGU-14A, SH-20AC, CTO-20A, RF-10AXL, CBM-20A)								
カラム	Shim-pack AMINO-Li (6.0×100 mm, 5 μm) (島津製作所製)								
溶離液	アミノ酸分析用移動相キットLJ型 A液, B液, C液(島津製作所製)								
反応液	アミノ酸分析用反応液キットOPA 試薬(島津製作所製)								
流速	0.6 mL/min								
	時間(min)	%A	%B	%C	時間(min)	%A	%B	%C	
	0.00	10	0	0	86.01	56	44	0	
	16.00	100	0	0	105.00	49	51	0	
	18.00	99	1	0	105.01	39	61	0	
	22.50	99	1	0	109.00	32	68	0	
グラジエント	22.51	96	4	0	109.01	0	100	0	
	50.00	94	6	0	137.70	0	100	0	
	50.01	91	9	0	137.71	0	0	100	
	64.00	91	9	0	142.70	100	0	0	
	79.00	66	34	0	160.00	100	0	0	
	86.00	66	34	0					
カラム温度	39 °C								
注入量	5 μL								
検出波長	Ex348 nm, Em450 nm								

表5 HPLCによる有機酸分析条件

区分	内容	
装置	LC-10ADVP 一式(島津製作所製)	
	(LC-10ADVP×2台, DGU-14A, SIL-10ADVP, CTO-10ACVP, SPD-10AV, SCL-10AVP)	
カラム	Shodex RSpak KC-811 (レズナック・ホールディングス製) (8.0×300 mm, 6 μm)	
溶離液	4.8 mM HClO ₄ 溶液	
反応液	プロモチモールブルー溶液	
流速	0.8 mL/min	
カラム温度	60 °C	
注入量	10 μL	
検出波長	440 nm	

3 結果および考察

3.1 香気成分分析

図1にトータルイオンクロマトグラム(TIC)を示す。「ミャンマー製」においてはLinaloolの面積値が今回の試作品の3~10倍と著しく大きく、Linaloolは「ミャンマー製」の香りの特徴づけている可能性が高いと考えられた。(Z)-3-hexenolは、「ミャンマー製」では検出されなかったが、試作品ではいずれも著しく面積値が大きく、(Z)-3-hexenolが今回の試作品の香りの特徴づけている可能性が高いと考えられた。

また、「漬込無」では検出されなかったEthyl acetate, Acetoinなどの発酵に関する成分がすべての試作品において検出された。

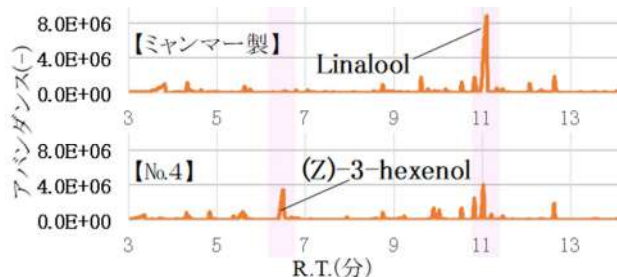


図1 香気成分のTICチャート

3.2 カテキン類分析

没食子酸は、後発酵茶のプーアル茶で機能性関与成分とされているが、これについては「漬込無」と比較するといずれも含量が増加(図2)しており、カテキン類のガロイル基から没食子酸が遊離したものと考えられる。

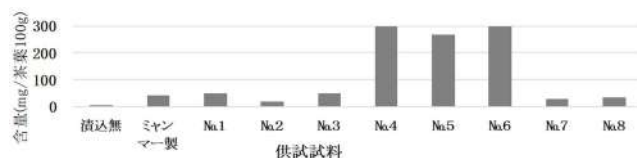


図2 没食子酸量

3.3 アミノ酸分析

茶のうま味に関係する主要アミノ酸3種の合計値を比較すると、「ミャンマー製」の1.9~3.5倍あった(図3)。

日本の茶では生産現場において、品種・摘採期・肥培管理等の面でうま味を重視した管理をしていることから、日本の一般的な管理がされた茶園の茶葉を使用すると、ミャンマー製のものより、うま味が強く感じられる製品になると推察される。日本ではうま味が基本味の1つとなっており、日本人の感じるおいしさに深く関わっているため、今回の試作品が「ミャンマー製」よりも日本人の味覚にあうと言える可能性が高い。

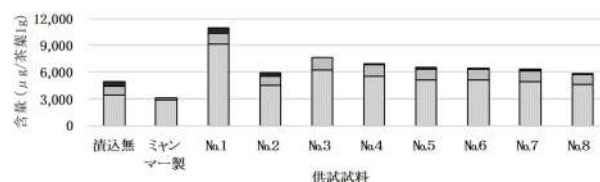


図3 茶のうま味に関係する主要な3種のアミノ酸量

□ テアニン ■ グルタミン酸 ■ グルタミン酸

3.4 有機酸分析

漬け込みにより乳酸・酢酸・コハク酸の増加が認められ、ソフトな酸味が生じたと考えられる。

4 まとめ

事前の官能評価で試作品が「ミャンマー製」よりも好まれた一因として香り、うま味の違いが考えられた。

また、県内で採取した乳酸菌・酵母による発酵を経て、発酵前にはなかった香りや機能性が認められている成分の増加が確認できた。

A development of Micro-Prism Arrays achieving image projection by principle of lighting optics

- Feasibility study on the implementation -

Toshihiro TOYOTA, Wataru YANAGIHARA,
Wataru SHICHI and Masaharu NAKANO

照明光学の原理により画像投影を実現するマイクロプリズムアレイの開発

- 実装の実現可能性に関する研究 -

工業技術研究所 照明音響科 豊田敏裕 柳原 亘
浜松工業技術支援センター 光科 志智 亘 中野雅晴

Proceedings of the 30th Sessions of CIE, 1, 1237-1243 (2023)

Keywords: Micro-prism array, MPA, Novel lighting, Image projection, Microfabrication

キーワード: マイクロプリズムアレイ、MPA、先進的照明、画像投影、微細造形

1 背景と目的

マイクロプリズムアレイ (MPA) は、微小プリズムを配列した光学部品である。各々の微小プリズムの面の傾きを最適化することで、屈折光による疑似スポット光を重ね合わせて投影像を形成する。

MPA は、小型化が求められる車載用照明などの産業分野に革新的な画像投影技術をもたらすが、その成形方法は確立されていない。

本研究では、MPA の量産を実現するために、光造形と電気鋳造を組み合わせた金型作製の実現可能性を実証した。

2 方法

光学 CAE ソフトウェア VirtualLab Fusion (LightTrans International GmbH 製) を用いて設計された、1,000 mm 先の幅 300 mm×高さ 150 mm の範囲に V 字を投影する MPA モデルを実証に用いた。MPA モデルは、一辺が 0.1mm の微小プリズム 20 個×20 個から構成した。

電気鋳造に供する原盤は、フェムト秒パルスレーザー光造形装置 LithoProf3D-GSII (Multiphoton Optics GmbH 製) を用いて、透明なハイブリッドポリマーにより造形した。造形した原盤は、微細構造の

成形に向いている精密電気鋳造に供され、ニッケル製の金型を作製した。

3 結果

造形された原盤の微小プリズムの傾斜角度の造形誤差は 1 %程度であった。また、微小プリズムの表面粗さパラメーター (Sa) は 100 nm 程度であった。また、原盤による投影像は照明シミュレーション同等で、照度計 T-10 (コニカミノルタ株式会社製) で測定した投影像の平均照度は約 33.3 lx であった。

作製したニッケル製の金型の上には原盤と同等の形状が転写された。原盤から金型に転写された微小プリズムの傾斜角の偏差は、測定作業に生じるヒューマンエラー相当のわずかであった ($\sigma=0.30$)。一方、金型の表面粗さは原盤のそれより若干大きくなったが、剥離した原盤が金型表面に残存したことが原因と考えられる。

4 結論

本研究により、光造形と電気鋳造の組み合わせにより MPA の金型を作製できることを実証した。今後は、この金型を用いて製作された MPA の品質評価を行う予定である。

Effects of pH and salt concentration on freeze-thaw fractionation of soymilk protein

MATSUNO Masayuki, MURAKAMI Kazuya, MORITA Kazuhiro and SHIMOYAMADA Makoto

豆乳タンパク質の凍結融解分画における pH と塩濃度の影響

食品科

松野正幸

静岡県立大学食品栄養科学部

村上和弥

下山田 真

実践女子大学

守田和弘

Journal of the Science of Food and Agriculture, jsfa.13322 (2024)

Keywords: freeze-thaw fractionation, 7S globulin (β -conglycinin), 11S globulin (glycinin), sodium chloride, zeta potential, soymilk

キーワード: 凍結融解分画、7S グロブリン (グリシニン)、11S グロブリン (グリシニン)、食塩、ゼータ電位、豆乳

背景

豆乳の2つの主要な貯蔵タンパク質は、グロブリン7Sと11Sである。凍結融解分画は、生乳中のこれらのタンパク質を分離する簡便な方法である。本研究では、様々なpH(4.3 - 11.6)条件及び添加塩(塩化ナトリウム)濃度(0.00 - 0.67 M)下における、生豆乳の凍結融解分画能を評価した。

結言

生豆乳のpHと食塩添加濃度は、凍結融解によるタンパク質分画プロセスに著しい影響を与える。我々は、様々なpHおよび食塩添加濃度条件下で、分画が可能なゼータ電位値の範囲が一定であることを確認した。この結果は、ゼータ電位値が生豆乳の凍結融解分画能の評価指標となる可能性を示唆している。

結果

pH条件は、pH 5.8 - 6.7の範囲内、食塩添加条件は、食塩添加濃度が0.22 M以下の場合に、各々凍結融解分画に成功した。粒度分布測定及び顕微鏡観察結果からは、豆乳エマルションの粒度分布と凍結融解分画能との間に直接的な相関関係は認められなかった。一方、興味深いことに、生豆乳が凍結融解分画される場合のゼータ電位値の範囲は、異なるpHと塩濃度の条件でも一貫していることが確認された。これらの範囲は、pH 5.8 - 6.7では、-23 から -28 mVの間であり、添加塩濃度が0から0.22 Mの範囲では-18 から -29 mVの間であった。

Investigating thermal denaturation kinetics of 7S and 11S proteins and lipoxygenase in soymilk through ohmic heating

MURAKAMI Kazuya, MATSUNO Masayuki and SHIMOYAMADA Makoto

豆乳中の 7S 及び 11S タンパク質とリポキシゲナーゼの通電加熱による熱変性速度論の研究

静岡県立大学食品栄養科学部 村上和弥 下山田 真
食品科 松野正幸

Journal of Food Process Engineering, 46(12):e14493 (2023)

Keywords:denaturation, glycinin, lipoxygenase, simulation, soymilk, β -conglycinin

キーワード: 変性、グリシニン、リポキシゲナーゼ、シミュレーション、豆乳、 β -コングリシニン

要旨

本研究の目的は、豆乳中の 7S 及び 11S タンパク質並びにリポキシゲナーゼの通電加熱処理時の変性速度論を研究することである。7S と 11S の変性速度論は通常 n 次反応で議論されているため、示差走査熱量動的法により算出したアレニウスパラメータを用いて、実験データとシミュレーション結果に基づいて反応次数を推定した。リポキシゲナーゼの変性速度論は、65°C、70°C、72.5°C の通電加熱処理後のオキシゲナーゼ活性から推定した変性率から検討した。生豆乳の通電加熱処理における 7S 及び 11S タンパク質の反応次数は、それぞれ 3.25 及び 1.52 であった。一方、75°C で 1 時間予熱した豆乳における 11S タンパク質の反応次数は 1.94 であり、実験データとシミュレーション結果は良好な相関を示した。電気泳動の結果、トリプシンインヒビターが通電加熱中の 11S タンパク質の変性に影響を与える可能性が示された。リポキシゲナーゼの通電加熱による変性は、すべての温度で一次反応に従い、アレニウスパラメータを用いた変性シミュレーションは実験データとよく一致した。

実践的応用

本研究は、豆乳製品の品質を向上させるための貴重な知見を提供する。7S 及び 11S タンパク質は、豆乳の粘度及び豆乳から作られた豆腐の硬さを決定する上で重要な役割を果たしており、これらは合わせて豆乳中の総タンパク質の大きな割合を占めている。7S 及び 11S タンパク質の熱変性速度論を理解することは、食品メーカーが豆乳の望ましい物性を獲得するために加工パラメータを最適化するのに役立つ。さらに、リポキシゲナーゼは豆乳中の豆風味成分の生成に関与しており、その熱変性動態を理解することは、消費者に受け入れられる豆乳の製造につながる。本研究は、豆乳加工における通電加熱技術の実用化を支持するものである。

REPORTS
OF THE
INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE
OF SHIZUOKA PREFECTURE, NUMAZU

静岡県工業技術研究所
沼津工業技術支援センター研究報告

静岡県工業技術研究所
沼津工業技術支援センター
沼津市大岡3981番地1

INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE OF SHIZUOKA PREFECTURE, NUMAZU
3981-1 Ooka, Numazu city, Shizuoka, 410-0022 Japan

静岡県オリジナル清酒用麹の開発

バイオ科	鈴木雅博	袴田雅俊	飯塚千佳世	横澤 賢*
	高木啓詞**	勝山 聡***	岩原健二**	杉本芳邦
独立行政法人酒類総合研究所	岩下和裕			
株式会社ビオック	白石洋平	和久 豊**		
静岡県酒造組合	望月正隆	戸塚堅二郎		

Development of Shizuoka Prefecture's original sake seed koji

SUZUKI Masahiro, HAKAMATA Masatoshi, IIZUKA Chikayo, YOKOZAWA Ken, TAKAGI Hiroshi,
KATSUYAMA Satoshi, IWAHARA Kenji, SUGIMOTO Yoshikuni, IWASHITA Kazuhiro,
SHIRAIISHI Youhei, WAGU Yutaka, MOCHIZUKI Masataka and TOTSUKA Kenjiro

Until now, the main role of *Aspergillus oryzae* in sake brewing was thought to be the saccharification of raw rice. However, in recent years, it has been reported that it also has a significant effect on flavor components other than sugars contained in sake. In modern sake brewing, it is common to make koji(molt) using commercially available seed koji. However, the sake brewing industry in Japan's Shizuoka Prefecture has been calling for seed koji to be developed that is suitable for sake brewing in the prefecture using Shizuoka yeast. In this study, we will report on the development of Shizuoka's original sake seed koji, the first of its kind in Shizuoka.

Keywords:sake, *Aspergillus oryzae*, seed malt

これまで、清酒醸造における麹菌の主な役割は、原料米の糖化であると考えられてきたが、近年、清酒中の糖以外の香味成分にも大きな影響を与えていることが報告されている。現在の清酒醸造においては、市販の種麹を用いて製麹するのが一般的であるが、県内酒造業界からは、静岡酵母を用いる本県の酒造りに適した種麹の開発が求められていた。そこで本研究では、本県初となる静岡オリジナル清酒用種麹の開発を行ったので報告する。

キーワード：清酒、アスペルギルス オリゼー、種麹

1 はじめに

麹菌は産業におけるその重要性から、2006年に日本醸造学会によって「日本の国菌」に認定されている。古くから、清酒醸造における麹の重要性は認知されてきたが、これまでは、清酒醸造における麹菌の主な役割である、原料米の糖化に関する研究が多くなされてきた。

近年の研究では、麹菌が様々な二次代謝産物を生産していることが明らかになり、清酒中の糖以外の香味成分にも大きな影響を与えていることが報告されている¹⁾。しかし、現在の清酒醸造においては、市販の種麹（麹菌の種菌）を用いて米麹を製造するのが一般的であり、麹菌を用いて多様な酒質を創出

するという研究はほとんど報告されていない。一方、県内の清酒業界からは、より香味の優れた商品、または話題性や魅力のある商品の開発に向けて、酵母や米だけでなく、麹菌においてもオリジナルのものをを使って清酒を醸造したいという要望が強く寄せられていた。

そこで本研究では、静岡酵母を使って醸す、本県の清酒造りに適した独自の麹菌選抜基準を設定し、麹菌株の選抜を行った。また、選抜した麹菌株を使って静岡オリジナル清酒用種麹を試作し、試作した種麹を使った試験醸造を通してその有用性を評価した。

* 現 環境衛生科学研究所 大気水質部、** 退職、*** 現 商工業局 商工振興課

2 方法

選抜には、共同研究機関である㈱ビオックが保有する麹菌 51 株を用いた。また、試験醸造については、選抜した麹菌にて試作した種麹と静岡酵母 HD-1 を用いて行い、対照には、市販の清酒用種麹である「黒判 大吟醸用」（㈱ビオック製）を用いた。

2.1 最適麹菌株の選抜

最適麹菌株を下記の（1）、（2）及び（3）により選抜、評価した。

（1）PCR を用いた麹菌株の系統判定法による選抜

共同研究機関である（独）酒類総合研究所が保持している特許技術「麹菌株の系統判定法及び醸造特性予測法」（特開 2014-197989）²⁾を用いて、麹菌株の系統を判定した。また、製成酒中の酢酸イソアミルの多寡や酸の低生産性を指標に、事前検討にて、静岡酵母を使って醸す本県産清酒の特徴、すなわち酢酸イソアミルを主体とした品の良い香りで、口当たりが良く、すっきりと飲みやすい酒質となる系統の麹菌株を選抜した。更に、孢子形成能や褐変性を指標に選抜を行い、（2）にて貯蔵劣化臭の生成に関する酵素の活性評価に供する株とした。

（2）麹菌が有する清酒の貯蔵劣化臭（イソバレルアルデヒド）の生成に関する酵素の活性評価

吸水歩合が 130%、孢子接種量が 1.0×10^5 spores/ α 化米・g）となるように、各麹菌株の孢子懸濁液を α 化米（精米歩合 60%、徳島製麹㈱製）に添加し、シャーレ上にて、30℃で 48 時間培養して小規模の製麹試験を行った。次に、得られた米麹 2 g、0.2 M 酢酸緩衝液（pH5.0）7 mL 及びイソアミルアルコール 10 μ L をバイアルに入れ、30℃で 7 日間インキュベートした。その後、バイアルを 100℃で 2 分間湯煎して酵素を失活させた後、三井らの手法³⁾に従って、発生したイソバレルアルデヒドの定量を行った。このイソバレルアルデヒド生産量を各麹菌株の貯蔵劣化臭生成酵素の活性とし選抜を行った。

（3）総米 200 g 規模の清酒小仕込み試験

小仕込み試験は、総米 200 g の三段仕込み（初添：12℃、仲添：8℃、留添：6℃）にて行った。仕込み配合を表 1 に示す。最高品温は 11℃とした。麹には 2.1（2）の製麹試験により得られた米麹を用い、掛米には α 化米（精米歩合 60%、徳島製麹㈱製）を用いた。得られた製成酒については、既報⁴⁾に従い、一般成分、有機酸組成、グルコース濃度及び香気成

分組成の分析を行った。

表 1 総米 200 g 規模での清酒小仕込み試験における仕込み配合

	初添	仲添	留添	計
総米(g)	35	70	90	200
麹米(g)	10	14	16	40
掛米(g)	25	56	79	160
汲水(mL)	50	80	150	280
乳酸(mL)	0.2			0.2
エタノール(mL)	4			4
酵母*(mL)	35			35

*) YPD 液体培地 35 mL にて 30℃、2 日間培養したものを集菌後、汲水に懸濁して添加。推定生菌数 = 7×10^9 cells。

2.2 試作種麹を製造するためのブレンド比の検討

2.1 にて選抜した麹菌株を特定の割合でブレンドして、2.1（2）の方法と同様に小規模の製麹試験を行い、イソバレルアルデヒドの生成に関する酵素の活性評価を行った。また、これにより得られた米麹と静岡酵母 HD-1 を用いて、2.1（3）の方法と同様の仕込み配合にて、総米 200 g の清酒小仕込み試験を行った。得られた製成酒については、2.1（3）と同様に分析を行い、試作種麹を製造する際の各麹菌株のブレンド比を決定した。

2.3 総米 6 kg のプラント規模での試作種麹を用いた製麹試験及び清酒小仕込み試験

総米 6 kg のプラント規模での製麹試験及び清酒小仕込み試験は、精米歩合 40% の兵庫県産山田錦を用いた。試作種麹及び市販種麹を 100 kg 白米当り 10 g 散布し、製麹を行った。仕込み試験については、酒母省略の 3 段仕込み（初添：12℃、仲添：8℃、留添：6℃）とし、静岡酵母 HD-1 を用いて、表 2 の仕込み配合にて行った。最高品温は 11℃とした。

表 2 総米 6 kg 規模での清酒小仕込み試験における仕込み配合

	酒母	初添	仲添	留添	計
総米(kg)	0.12	0.96	1.92	3.00	6.00
麹米(kg)	0.12	0.18	0.36	0.54	1.20
掛米(kg)	—	0.78	1.56	2.46	4.80
汲水(L)	0.48	0.90	2.28	4.44	8.06
乳酸(mL)	1.44	0.90			2.34
酵母*(mL)	24.0	—	—	—	24.0

*) YPD 液体培地 24 mL にて 30℃、2 日間培養したものを集菌後、汲水に懸濁して添加。推定生菌数 = 7×10^9 cells。

製麹した米麹の酵素力価（ α -アミラーゼ、グルコアミラーゼ及び酸性カルボキシペプチダーゼ）については、キッコーマン(株)製の測定キットを用いた。酸性プロテアーゼについては、ペプチド研究所社製の測定キットを用いた。また、製成酒の一般成分、有機酸組成、グルコース濃度及び香気成分組成については、2.2と同様の方法にて分析を行った。

2.4 清酒製造実証試験

実証試験は静岡平喜酒造(株)にて実施した。仕込み配合を表3に示す。仕込み品温は、初添11.8℃、仲添8℃、留添6℃とし、最高品温は10.6℃とした。米は、麴米及び掛米ともに兵庫県産酒造好適米の山田錦（精米歩合40%）を使用した。

製成酒の一般成分、グルコース濃度及び香気成分組成について、2.2と同様の方法にて分析を行った。

表3 清酒製造実証試験における仕込み配合

	酒母	初添	仲添	留添	計
総米(kg)	14	34	60	92	200
麴米(kg)	4.6	8.3	12	17.1	42
掛米(kg)	9.4	25.7	48	74.9	158
汲水(L)	16.6	40	83	142.4	282
乳酸(kg)	0.145				

3 結果及び考察

3.1 最適麴菌株の選抜

岩下らは、麴菌は醸造適性にて13系統に分類可能なことことを報告している²⁾。供試麴菌株についてPCRによる系統判定試験を行ったところ、A系統が1株、B系統が2株、C系統が1株、Sake・Miso系統が6株、S01系統が4株、S02系統が1株、RIB40-1系統が18株、RIB40-2系統が2株、NS2系統が15株、NS3系統が1株の計10系統が得られた。このうち、製成酒中の酢酸イソアミルの多寡や酸の低生産性を指標に、事前検討にて、静岡酵母を使って醸す、本県の酒造りに適していると判断した、B系統、C系統及びNS2系統の計18株を選抜した。

また、この18株の中から孢子形成能や褐変性を指標に、更に8株を選抜し、イソバレルアルデヒドの生産性に関する酵素の評価を行った。

イソバレルアルデヒドは、生老香の主要成分とされており、生酒の貯蔵や流通過程で生じるオフフレーバーとされている。イソアミルアルコールを出

発物質としており、酢酸イソアミル主体の吟醸香を生成する静岡酵母を使う本県産の清酒は、イソアミルアルコールを多く含んでおり、高品質な製成酒を市場に届ける上でイソバレルアルデヒドの低減が強く求められている。

各麴菌株及び対照の市販種麴のイソバレルアルデヒド生産量を図1に示す。

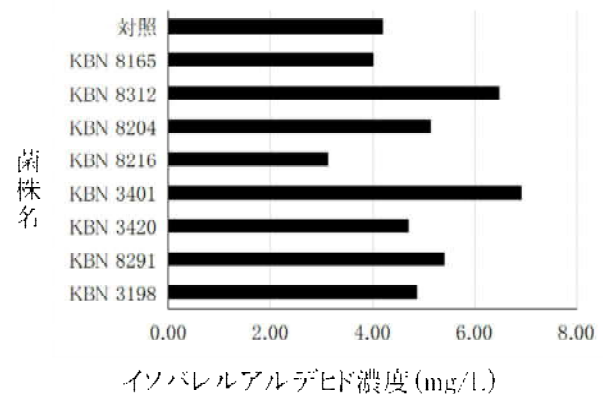


図1 各麴菌株のイソバレルアルデヒド生産量

イソバレルアルデヒドの生産量に生成に関与する酵素活性として評価した。

対照株と比較して、イソバレルアルデヒドの生産量が少ない菌株が2株得られた。特に、イソバレルアルデヒドの生産量が低かったKBN 8216株を2.2の試験の供試菌株として選抜した。

次に、イソバレルアルデヒドの生成に関する酵素の評価試験に供した8株と対照の市販種麴を用いて行った総米200g規模の清酒小仕込み試験による製成酒の成分分析結果（一部抜粋）を表4及び表5に示す。

表4 総米200g規模の清酒小仕込み試験における製成酒の一般成分

菌株名	一般成分			
	アルコール度数(%)	日本酒度	酸度	アミノ酸度
対照	16.6	-1	2.0	1.5
KBN 8165	16.9	-1	2.1	1.6
KBN 8312	16.0	-14	2.1	1.9
KBN 8204	16.2	-1	2.2	1.6
KBN 8216	16.7	+1	2.4	2.0
KBN 3401	16.8	-10	2.4	2.3
KBN 3420	15.2	-7	2.4	1.9
KBN 8291	15.4	-11	2.3	1.9
KBN 3198	15.9	-6	2.5	2.3

表5 総米 200 g 規模の清酒小仕込試験における製成酒のグルコース濃度及び香気成分組成

菌株名	グルコース濃度 (%)	香気成分組成 (mg/L)		
		酢酸イソアミル	イソアミルアルコール	カブロン酸エチル
対照	1.76	5.73	160	1.87
KBN 8165	0.76	7.05	185	2.84
KBN 8312	3.50	7.33	171	2.57
KBN 8204	0.73	6.73	192	2.82
KBN 8216	1.42	7.58	185	3.15
KBN 3401	3.45	6.66	176	2.85
KBN 3420	1.28	7.84	205	2.88
KBN 8291	2.63	6.35	175	2.71
KBN 3198	1.65	8.27	191	3.36

いずれの麹菌株も、対照株と同等のアルコール度数を生成するのに必要な糖化力を有していることがわかった。日本酒度、酸度及びアミノ酸度については、株間差が大きかった。今回の選抜株については、対照株より低い酸度の菌株は得られなかったが、対照と同等の酸度である KBN 8165 株を低生酸性株として、2.2 の試験の供試菌株として選抜した。

また、グルコース濃度及び香気成分組成についても、菌株間で大きな差があることがわかった。特に、酢酸イソアミルについては、いずれの菌株も対照株と比較して、含有量が多かった。8 株のうち、最も酢酸イソアミルの含有量が多かった KBN 3198 株及び適度なグルコース濃度を示した KBN 8291 株の 2 株を 2.2 の試験の供試菌株として選抜した。

3.2 試作種麹を製造するためのブレンド比の検討

2.1 により選抜した 4 株を特定の割合でブレンドした、小規模製麹試験及び清酒小仕込み試験にて得られた米麹及び製成酒の成分分析結果（一部抜粋）を表 6 に示す。

表6 選抜株のブレンド割合と米麹及び製成酒の成分分析結果（一部抜粋）

麹菌①	麹菌②	ブレンド比①:②	イソバレルアルデヒド (mg/L)	酸度	グルコース (%)	酢酸イソアミル (mg/L)
KBN 3198	KBN 8216	1:3	2.96	2.6	1.88	4.44
KBN 3198	KBN 8165	1:1	3.07	2.5	1.63	4.50
KBN 8216	KBN 8291	1:2	3.82	2.6	2.02	3.10
KBN 8291	KBN 8165	1:1	2.98	2.5	2.02	4.60

菌株をブレンドすることで、単菌株の仕込み時に比べて、グルコース濃度（上昇）やイソバレルアルデヒド濃度（低下）を目的の酒質に近づけることができた。

しかし、今回の試験では、酸度や酢酸イソアミル濃度については、ブレンドによる改善は確認できなかった。

3.3 総米 6 kg のプラント規模での試作種麹を用いた製麹試験及び清酒小仕込み試験

2.1 及び 2.2 の結果をもとに、(株)ビオックにて表 7 のブレンド比の種麹を試作した。製麹した米麹の酵素力価及び製成酒の成分分析結果（一部抜粋）を表 8 及び表 9 に示す。

総米 6 kg のプラント規模においても、目的とする酒質（低酸度、高吟醸香）が得られており、試作種麹の実用性が確認できた。また、最も酸度が低く、酢酸イソアミル濃度が高かった試作 No. 2 の製造に用いた、KBN 8165 株単独にて製造した試作種麹を 3.4 の試験に供することとした。

表7 試作種麹の製造に用いた麹菌株とブレンド比

試作No.	使用麹菌株 1	使用麹菌株 2	ブレンド比
1	KBN 8165	KBN 8291	1:1
2	KBN 8165		単独
3	KBN 8165	KBN 3198	1:1
4	黒判 大吟醸用		対照

表8 プラント規模での製麹試験により得られた米麹の酵素力価

試作No.	米麹1gあたりの酵素力価 (U/g・麹)			
	α-アミラーゼ	グルコamilラーゼ	酸性カルボキシペプチダーゼ	酸性プロテアーゼ
1	399	152	5,502	2,342
2	320	108	5,676	2,765
3	509	172	6,262	2,927
4	328	110	7,021	2,961

表9 プラント規模での清酒小仕込試験により得られた製成酒の成分分析結果（一部抜粋）

試作No.	一般成分		グルコース濃度		香気成分組成 (mg/L)	
	アルコール度数 (%)	日本酒度	酸度	アミノ酸度 (%)	酢酸イソアミル	カブロン酸エチル
1	15.6	+4.5	1.7	1.0	2.12	4.27
2	16.4	+1.5	1.7	1.0	2.73	5.04
3	15.0	-2.0	1.8	1.0	3.12	4.34
4	15.5	+0.5	1.8	1.0	2.64	4.52

3.4 清酒製造実証試験

試作 No. 2 の種麹は、実際の製造現場における清酒製造に使用可能であると判断できたため、静岡平喜酒造(株)にて総米 200 kg 規模の製造実証試験を行った。製麹により得られた米麹の酵素力価及び製成酒の成分分析結果（一部抜粋）を表 10 及び表 11 に示す。

表 10 実製造規模での製麹試験により得られた米麹の酵素力価

使用種麹	米麹1gあたりの酵素力価(U/g・麹)		
	α-アミラーゼ	グルコアミラーゼ	酸性プロテアーゼ
試作No.2	587	147	978
黒判 大吟醸(対照)	485	213	1,701

表 11 実製造規模での試験醸造により得られた製成酒の成分分析結果(一部抜粋)

使用種麹	一般成分		グルコース濃度		香気成分組成(mg/L)		
	アルコール度数(%)	日本酒度	酸度	アミノ酸度(%)	酢酸イソアミル	カプロン酸-エチル	
試作No.2	15.9	+1.5	1.2	0.9	0.35	2.62	1.43

実際の製造現場でも清酒製造に使用可能であることがわかったが、総米6kgのプラント規模での試験により得られた製成酒とは、やや異なる成分となった。これは、原料米の性質やその他の仕込み条件等が影響したためであると考えられる。今後は、小仕込み試験時と同等の酒質が得られる、試作種麹の最適な製麹条件や醗経過について検討を進めていく。

4 まとめ

本研究では、本県初となる「静岡県オリジナル清酒用種麹」を開発した。総米6kg規模までの小仕込み試験では、本研究にて開発した種麹を使用することで、静岡酵母を用いる本県産清酒の特徴である、『酢酸イソアミルを主体とする吟醸香が豊かであり、味はきれいで丸く低酸度である酒質』を実現することが出来た。

しかし、実製造規模における試験醸造では、想定していたよりグルコース濃度が低い酒質となっていた。これは、製麹経過や醗経過が小仕込み試験の時と、やや異なっていたことが影響していると考えられる。

今後は、本種麹の最適な製麹条件や仕込み条件を検討することで、実製造規模においても目的とする酒質の実現を目指す。

謝辞

本研究を行うにあたり、実験方法等について、ご指導いただきました東京農業大学応用生物科学部醸造科学科徳岡昌文教授、商業規模試作を行っていた静岡平喜酒造株式会社様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 山下伸雄 他：清酒麹菌の分子育種に関する研究. 生物工学会誌, 第84巻, 第3号, 89-95 (2006).
- 2) 岩下和裕 他：麹菌株の系統判定法及び醸造特性予測法. 特開 2014-197989 (公開日：平成26年10月23日)
- 3) 三井俊 他：HPLCによる清酒中イソバレルアルデヒドの簡便測定. 日本醸造協会誌, 113巻, 6号, 383-388 (2016).
- 4) 望月玲於 他：様々な酒類醸造用酵母株のビール醸造特性の評価. 静岡県工業技術研究所研究報告, 第13号, 55-57 (2020)

熱間鍛造後の金属組織の予測技術の開発

- 動的再結晶粒径の予測手法の検討 -

機械電子科 是永宗祐

Development of prediction technology for microstructure during hot forging

- Predicting the size of grains formed during dynamic recrystallization -

KORENAGA Sosuke

Hot forging is a processing technology that is widely used in the manufacturing of metal parts. In order to enhance the mechanical properties of products, it is necessary to obtain fine-grain structures. In hot forging, it is possible to refine grain size owing to dynamic recrystallization (DRX), and DRX behavior depends on the hot forging condition. Therefore, it is crucial to predict the size of grains that are formed during DRX (DRX grain size) in order to obtain products with enhanced mechanical properties. In this paper, DRX grain size is predicted from a constitutive equation using the Zener-Hollomon parameter combined with finite element analysis. The proposed method is verified via a hot-compression test on Ti-6Al-4V ELI alloy. The predicted and experimental values of DRX grain sizes have been found to be generally consistent with one another. Therefore, the proposed method is expected to be an effective tool for predicting DRX grain sizes.

Keywords: hot forging, titanium alloy, dynamic recrystallization, grain size, finite element analysis

熱間鍛造は、金属製品の製造に広く用いられている。金属製品の機械的特性を向上させる手段のひとつに、金属の結晶粒を微細化させる方法がある。熱間鍛造では、加工中の再結晶（動的再結晶）により結晶粒を微細化させることができるが、動的再結晶後の結晶粒径（動的再結晶粒径）は鍛造条件によって変化する。このため、高い機械的特性を有する製品を製造するためには、熱間鍛造条件から熱間鍛造後の動的再結晶粒径を予測する技術が重要となる。そこで本研究では、有限要素法による鍛造シミュレーションと Zener-Hollomon 因子を用いた動的再結晶粒径の予測式を組み合わせ、鍛造条件から動的再結晶粒径を定量的に予測することを試みた。本手法により、各種条件でチタン合金 (Ti-6Al-4V ELI) を高温圧縮した後の動的再結晶粒径を予測した結果は、実測値とほぼ一致した。これより、本手法を用いることでチタン合金の動的再結晶粒径を定量的に予測可能であることが示された。

キーワード：熱間鍛造、チタン合金、動的再結晶、結晶粒径、有限要素法

1 はじめに

整形外科用インプラント等の金属製の医療機器には生体適合性に優れたチタン合金が広く用いられ、熱間鍛造等によって製造される。これらの製品の加工においては、製品形状を得ること以外に、高い機械的特性（強度）の実現が要求される。金属の機械的特性を向上させる手段のひとつに、金属の結晶粒を微細化させる方法がある。熱間鍛造では、加工中の再結晶（動的再結晶）により結晶粒を微細化させることができるが、動的再結晶後の結晶粒径（動的再結晶粒径）は鍛造条件によって変化する。

試行錯誤を繰り返し、微細な結晶粒が得られる鍛造条件を探索する場合には、非常に多くのコストと期間が必要である。熱間鍛造条件から熱間鍛造後の動的再結晶粒径を予測することができれば、微細な結晶粒が得られる鍛造条件の探索に要するコストと期間の削減が期待できる。

動的再結晶粒径を予測する式として、Zener-Hollomon 因子¹⁾（以下、Z 因子）を用いた以下の予測式²⁾が提案されている。

$$d_{\text{DRX}} = MZ^N \quad (1)$$

$$Z = (d\varepsilon / dt) \exp(Q/RT) \quad (2)$$

静岡県工業技術研究所 研究報告 第 17 号 (2024)

d_{DRX} は動的再結晶粒径 (μm)、 Z は Z 因子 (s^{-1})、 $d\varepsilon/dt$ および T は高温変形中のひずみ速度 (s^{-1}) および絶対温度 (K)、 Q は高温変形における見かけの活性化エネルギー (J/mol)、 R は気体定数 ($8.31451\text{J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$)、 M および N は定数である。まず、高温圧縮試験等の実験を行い、定数項 M および N を事前に決定する。その後、熱間鍛造中のひずみ速度 (変形速度) と温度を予測式に入力することで、動的再結晶粒径を予測することができる。

ただし、熱間鍛造中のひずみ速度と温度は、材料の不均一変形や加工発熱の影響により、材料内で均一にはならず、位置によって変化する (ひずみ速度と温度の分布が生じる)。動的再結晶粒径を予測するためには、材料内のひずみ速度と温度の分布を求め、予測位置のひずみ速度と温度を特定する必要がある。しかし、ひずみゲージを用いたひずみ測定や、熱電対による温度測定等では、材料内部の分布を評価することは困難であるため、材料内部のひずみ速度と温度の分布を評価できる有限要素法による鍛造シミュレーションの活用が有効であると考えられる。

そこで本研究では、鍛造シミュレーションと動的再結晶粒径の予測式 (式(1)) を組み合わせ、鍛造条件からチタン合金の動的再結晶粒径を予測することを試みた。

2 方法

2.1 予測式の構築 (予測式中の定数項 M 、 N の決定)

直径 8mm、高さ 12mm の円柱形状のチタン合金 (Ti-6Al-4V ELI) を表 1 に示す条件で高さ 6mm まで圧縮する高温圧縮試験を実施した。高温圧縮試験には、熱間加工再現試験機 Thermecmaster-Z (富士電波工機(株)製) を用いた。圧縮後、図 1 に示す位置 A および B の金属組織を観察し、動的再結晶粒径の実測値を求めた。金属組織の観察および動的再結晶粒径の算出は、電子後方散乱回折により行い、TSL OIM Data Collection/Analysis system Ver. 7.3 (EDAX 製) を用いた。

つぎに、有限要素法による鍛造シミュレーションソフト DEFORMTM-2D Ver. 11.3 (Scientific Forming Technologies Corporation 製) を用いて、上記の高温圧縮試験をシミュレートした。高温圧縮試験では、表 1 に示す条件を試験機に入力しているが、実際には不均一変形や加工発熱の影響により、

ひずみ速度と温度は試料内部で均一にならず、試料内部でひずみ速度と温度の分布が生じる。そこで、有限要素法により試料内部のひずみ速度と温度の分布を解析し、図 1 に示す位置 A および B におけるひずみ速度と温度を求めた。

動的再結晶粒径の実測値と鍛造シミュレーションにより求めたひずみ速度と温度から、予測式 (式(1)) 中の定数 M および N の値を求めた。

表 1 試験条件

加熱温度 ($^{\circ}\text{C}$)	ひずみ速度 (s^{-1})	圧縮条件の表記方法
700	10^{-1}	$700^{\circ}\text{C}-10^{-1}\text{s}^{-1}$
700	10^{-2}	$700^{\circ}\text{C}-10^{-2}\text{s}^{-1}$
700	10^{-3}	$700^{\circ}\text{C}-10^{-3}\text{s}^{-1}$
800	10^{-1}	$800^{\circ}\text{C}-10^{-1}\text{s}^{-1}$
800	10^{-2}	$800^{\circ}\text{C}-10^{-2}\text{s}^{-1}$
900	10^{-1}	$900^{\circ}\text{C}-10^{-1}\text{s}^{-1}$

高温圧縮試験後の試料

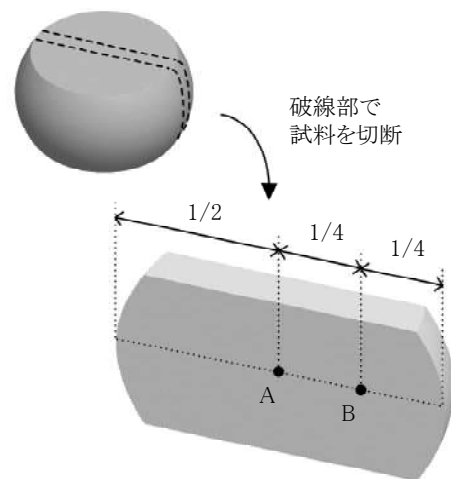


図 1 金属組織観察位置

A および B の 2 箇所金属組織を観察。

2.2 予測手法の妥当性検証

表 1 に示す各種条件で高温圧縮した後の動的再結晶粒径を予測し、予測値と実測値を比較した。予測値は、鍛造シミュレーションにより求めたひずみ速度と温度を予測式 (式(1)) に入力することで求めた。予測位置は、図 1 中の位置 A および B の 2 箇所とした。

3 結果および考察

3.1 予測式の構築 (予測式中の定数項 M、N の決定)

高温圧縮試験後の金属組織の観察結果の一例を図2に示す。図2は、700°C-10⁻¹s⁻¹で圧縮した試料の位置Aにおける金属組織を示したもので、結晶方位の差が15°以上の粒界(高角度粒界)を黒線で示している。伸長された結晶粒と、動的再結晶により生じたと考えられる微細な等軸状(円形状)の結晶粒が観察された。本研究では、微細な等軸状の結晶粒の全てが、動的再結晶により生じた動的再結晶粒であると仮定し、動的再結晶粒のみを抽出して、動的再結晶粒径を面積平均で算出した。表1に示した他の条件についても、同様の解析方法により、位置AおよびBの動的再結晶粒径を求めた。

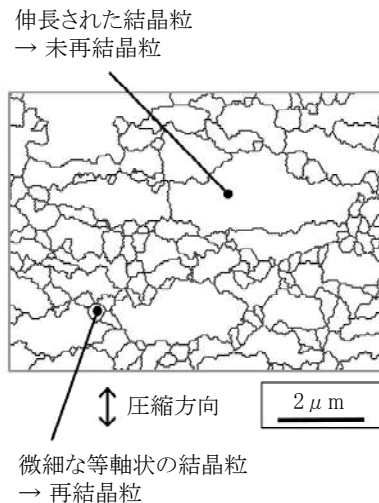


図2 高温圧縮試験後の金属組織

700°C-10⁻¹s⁻¹で圧縮した試料の位置Aにおける金属組織。微細な等軸状(円形状)の結晶粒を抽出し、動的再結晶粒径を算出。

つぎに、鍛造シミュレーションで試料のひずみ速度および温度の分布を解析した結果の一例を図3に示す。図3は、700°C-10⁻¹s⁻¹で圧縮した試料の結果であり、図3中のAおよびBは、図1に示した金属組織の評価位置AおよびBとそれぞれ対応している。このように、高温圧縮後の試料では、内部のひずみ速度と温度が不均一になっているため、本研究では有限要素法による鍛造シミュレーションを活用し、位置AおよびBにおけるひずみ速度と温度の値を求めた。表1に示した他の条件についても、同様の方法でひずみ速度と温度を解析した。得られた

ひずみ速度と温度を式(2)に入力し、高温変形における見かけの活性化エネルギーに $Q=240\text{kJ/mol}^{(3)}$ を用いて、Z因子を算出した。

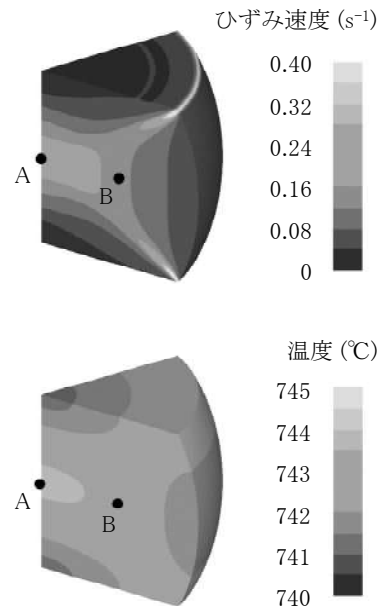


図3 試料内部のひずみ速度と温度の分布

700°C-10⁻¹s⁻¹で圧縮したときの解析結果。位置AおよびBのひずみ速度と温度を式(2)に入力し、Z因子を算出。

金属組織観察から実測した動的再結晶粒径とZ因子の関係を図4に示す。回帰分析により、予測式(1)中の定数項MおよびNを算出した結果、それぞれ71.84、-0.1636となった。

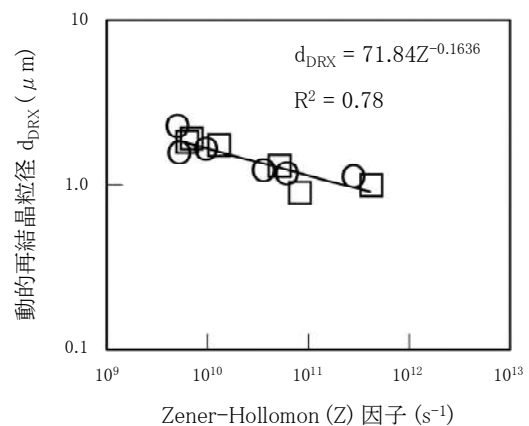


図4 動的再結晶粒径とZ因子の関係

□ : 位置A、○位置B
式(1)で回帰し、式(1)中の定数項MおよびNを算出。M=71.84、N=-0.1636

3.2 予測手法の妥当性検証

表1に示す各種条件で高温圧縮した後の動的再結晶粒径の実測値と予測値の関係を図5に示す。予測値は実測値と概ね一致し、本手法でチタン合金を高温圧縮した後の動的再結晶粒径を予測できることが示された。

equiaxed ($\alpha + \beta$) preform of Ti-6Al-4V: commercial vs. ELI grade, Journal of Materials Processing Technology, 108, 320-327 (2001).

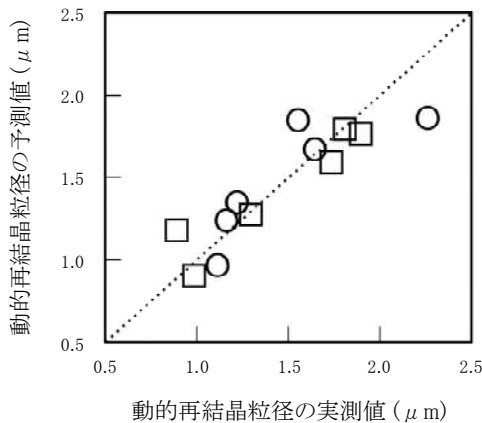


図5 動的再結晶粒の予測値と実測値の関係

□ : 位置 A、○位置 B

予測値と実測値は概ね一致。

チタン合金を高温圧縮した後の動的再結晶粒径を予測できることが示唆。

4 まとめ

本研究では、有限要素法による鍛造シミュレーションとZ因子を用いた動的再結晶粒径の予測式を組み合わせ、鍛造条件から動的再結晶粒径を定量的に予測した。本手法により、各種条件でチタン合金 (Ti-6Al-4V ELI) を高温圧縮した後の動的再結晶粒径を予測した結果は、実測値とほぼ一致した。これより、本手法を用いることでチタン合金の動的再結晶粒径を定量的に予測可能であることが示された。

参考文献

- 1) Zener C. : Effect of strain rate upon plastic flow of steel, Journal of Applied Physics, 15, 22-32 (1944).
- 2) Sellars C. M. : Modelling microstructural development during hot rolling, Materials Science and Technology, 6, 1072-1081 (1990).
- 3) Prasad Y.V.R.K. et al. : Influence of oxygen content on the forging response of

金属材料の引張強さに及ぼす引張速度と試験片採取方向の影響

機械電子科

木村光平

是永宗祐

株式会社富士テクニカ宮津

久保田 信

金子大和

Effects of strain rate and specimen-sampling direction on ultimate tensile strength

KIMURA Kohei, KORENAGA Sosuke, KANEKO Yamato and KUBOTA Makoto

Keywords: Ultimate Tensile Strength, Strain rate, Rolling Direction, High Strength Steel Sheet

引張試験で得られる引張強さは製品の安全設計に用いられる重要な指標のひとつである。引張強さは試験条件によって変化する可能性があるため、引張強さに影響を及ぼす試験条件を予め把握することが重要である。本研究では、引張速度および試験片の採取方向を変化させた種々の条件で高張力鋼板の引張試験を行った。その結果、引張速度の上昇に伴い、引張強さが大きくなった。また、試験片の長手方向が圧延方向に対して 0° 、 45° 、 90° となるにつれて、引張強さは大きくなった。これらの試験条件によって引張強さが変化することから、引張試験を行う際は、目的に応じて適切な試験条件設定をすることが重要である。

キーワード：引張強さ、引張速度、ひずみ速度、圧延方向、高張力鋼板

1 はじめに

引張試験とは、材料に引張荷重を付与し、その材料の強度や変形特性を調べるための試験である。引張試験では、様々な物性値（引張強さ、伸び、耐力、ヤング率など）を得ることが出来るが、その中でも、製品設計における指標としてよく用いられる引張強さは、重要項目のひとつである。この引張強さは、引張速度や試験片の採取方向、材料温度、試験片の加工方法（切削加工またはレーザ切断など）によって変化する可能性がある。

特に引張速度は、範囲に関する規定が JIS に書かれていることから、試験結果に与える影響を把握しておく意味は大きいと考える。試験片採取方向については、製品規格や注文書に従うよう JIS に記載されているが、試験条件設定の際に見落とされがちな項目である。

そこで本報では、この引張速度と試験片採取方向が引張強さへ与える影響について明らかにすることを目的とした。

2 方法

2.1 試験片と試験機

試験片材質は高張力鋼板 SPFC980 とし、形状は JIS Z 2241 で規定されている 5 号試験片（板状：平行部長さ 60mm、原標点距離 50mm、厚さ 1mm）とし

た。図 1 に示すように、圧延方向に対して試験片長手方向（引張方向）が 0° 、 45° 、 90° となるように切り出した 3 種類の試験片を用いた。試験機は、精密万能試験機 AGX-100kN（榊島津製作所製）を用いた。

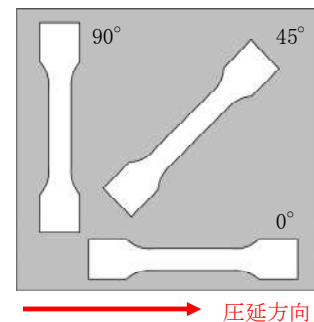


図 1 試験片採取方向

2.2 引張強さに及ぼす引張速度の影響

2.1 節の 3 種類の試験片について、クロスヘッド変位速度から求めた推定ひずみ速度を 0.0006 、 0.003 、 0.006 、 0.06 s^{-1} に設定し、引張試験を行った。試験中の最大試験力を、平行部の初期断面積で除して、引張強さを算出した。

2.3 引張強さに及ぼす試験片採取方向の影響

2.1 節の3種類の試験片について、推定ひずみ速度 0.006s^{-1} で引張試験を行った。各試験片2本ずつ試験を実施した後、2.2 節と同様に引張強さを算出し、2 回の平均値を求めた。

3 結果および考察

3.1 引張強さに及ぼす引張速度の影響

図2に、引張強さに及ぼす引張速度の影響について調査した結果を示す。結果から、引張速度の上昇に伴い引張強さが大きくなることがわかった。その他の材料でも、ひずみ速度上昇に伴って引張強さが上昇することが報告^{1) 2)}されており、今回も同様の傾向となった。

例えば JIS Z 2241 では、引張強さを測定する際は推定ひずみ速度 0.008 s^{-1} 以下で試験を行うよう規定されているため、JIS に準じた試験を行う場合は規定から逸脱しないよう注意が必要である。一方で、JIS に依らずに、製品使用状況を想定してひずみ速度を見積もり、それに近い条件で試験を行うことも有効であると考えられる。

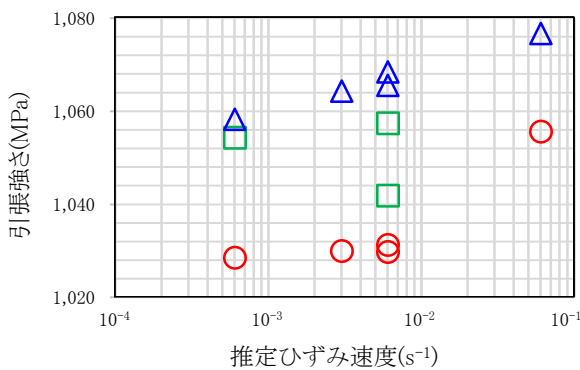


図2 引張強さに及ぼす引張速度の影響

○ : 0° □ : 45° △ : 90°

3.2 引張強さに及ぼす試験片採取方向の影響

図3に、引張強さに及ぼす試験片採取方向の影響について調査した結果を示す。

引張方向が板材の圧延方向に対して、 0° 、 45° 、 90° と大きくなるに従い、引張強さが大きくなった。引張強さに及ぼす試験片採取方向の影響については、アルミニウムなどの他の材料では、異なる傾向になることも報告³⁾されており、結晶構造や結晶方位の違いが原因であると考えられている⁴⁾。

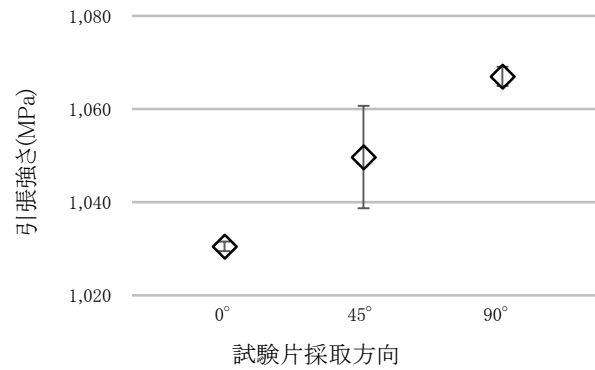


図3 引張強さに及ぼす試験片採取方向の影響

プロットは $N=2$ の平均値。エラーバーは標準偏差。

このように、引張方向によって引張強さは変化するので、製品に対してどの方向にどのくらいの強度が必要かを考慮し、試験片採取方向を検討することが望ましい。

4 まとめ

高張力鋼板 SPFC980 の引張試験結果から、次のことが明らかとなった。

- 1) 引張速度の上昇に伴い引張強さは大きくなる
- 2) 試験片長手方向(引張方向)と板材圧延方向のなす角が大きくなるほど、引張強さは大きくなる

このように、引張速度や試験片採取方向が引張強さに影響を及ぼすことが確かめられた。従って、引張試験を行う際は、引張速度や試験片採取方法について事前に検討をし、適切に条件設定をすることが重要である。

参考文献

- 1) 石塚弘道 他：鉄道車両用アルミニウム合金の動的強度特性. 車両技術, 23 (4), 29-34 (2009)
- 2) 谷村真治 他：各種プラスチック材料の広ひずみ速度域での動的引張強度特性. 日本機械学会論文集, 77 (780), 192-201 (2011)
- 3) 佐久間尚幸 他：純アルミ焼なまし板の機械的性質の異方性. 軽金属, 55 (6), 245-251 (2005)
- 4) 吉田健吾：アルミニウム合金版の異方性と成形シミュレーション活用時のポイント. プレス技術, 60 (3), 29-33 (2022)

REPORTS
OF THE
INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE
OF SHIZUOKA PREFECTURE, FUJI

静岡県工業技術研究所
富士工業技術支援センター研究報告

静岡県工業技術研究所
富士工業技術支援センター
静岡県富士市大淵2590番地1

INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE OF SHIZUOKA PREFECTURE, FUJI
2590-1 Obuchi, Fuji city, Shizuoka, 417-8550 Japan

サステナブルファッションに寄与する廃棄繊維を利用した製紙技術の開発

製紙科 伊藤 彰 河部千香 深沢博之*
 浜松工業技術支援センター 繊維高分子材料科 鈴木重好**

Development of the paper manufacturing technology using waste fibers from textiles to contribute to sustainable fashion

ITO Akira, KAWABE Chika, FUKASAWA Hiroyuki and SUZUKI Shigeyosi

We developed recycled paper using waste fibers from textiles in Enshu, which is in Japan's Shizuoka Prefecture, and succeeded in the trial manufacture of recycled paper containing 30% waste fibers using a factory paper machine at an actual factory. It was confirmed that the paper extracted by the actual machine had the same performance as commercially available printing paper. The recycled paper that has been developed is being used for business cards, shop cards, and other products after exploring its applications with textile-related businesses in Enshu and textile-related organizations in Shizuoka Prefecture.

Keywords: paper manufacture technology, recycle, Enshu textile, cotton fiber

遠州織物の廃棄繊維を原料としたリサイクル紙の開発を行い、廃棄繊維を30%配合したリサイクル紙の工場実機での試作に成功した。実機抄紙した紙は市販の印刷用紙と同等の性能を有する紙であることを確認した。開発したリサイクル紙は、遠州の繊維関連事業者や静岡県内の繊維関連団体と用途探索し、名刺、ショップカードなどに活用されている。

キーワード：製紙技術、リサイクル、遠州織物、綿繊維

1 はじめに

ファッション産業では、ファストファッションの台頭により短いサイクルでの大量生産、大量廃棄が行われており、二酸化炭素の大量排出などで環境に多大な負荷を与えている。環境省が調査した2022年の衣料のマテリアルフローでは、国内新規供給量79.8万トンに対して48.5万トンの大量の衣料が廃棄されている¹⁾(図1)。そのような状況であることから、衣料の生産、着用から廃棄に至るまで環境負荷を考慮した持続可能なファッションへの取組である「サステナブルファッション」が国の関係省庁や民間団体で急速に広まっている。

本研究では、サステナブルファッションに寄与する一つ的手段として、織物工場から排出される端材などを紙の原料としてリサイクルする技術の開発を行い、その紙を排出元の事業者などに活用してもらうことで、循環型社会のモデルケースを示し、サステナブルファッションを推進することを目的とする。

する。



図1 2022年度の衣類のマテリアルフロー¹⁾

出典：(株)矢野経済研究所 環境省令和4年度循環型ファッションの推進方針に関する調査業務

2 方法

2.1 県内の廃棄繊維に係る調査

県内の織物産地である遠州地区において、遠州織物工業協同組合、天龍社織物工業協同組合に所属する組合員を対象に、廃棄繊維に関する調査を行った。

* 現 研究調整官、** 現 公益財団法人 静岡県産業振興財団

廃棄繊維の量、素材、色などについて調査し、紙の原料として利用可能であるかを判断した。

2.2 繊維リサイクル紙の抄紙条件に係る検討

(1) 遠州地区の繊維を利用したリサイクル紙の特性

リサイクル紙の特性を把握するため、木材パルプと解繊コットンを所定の割合に混合し、坪量 80g/m²の手抄き紙を作製し、密度、比引張強さ、サイズ度（インキのにじみ防止性）、印刷時の表面強さを評価した。手抄き紙を作製する際には、紙力剤はアニオンPAM（ポリアクリルアミド）（添加量は対パルプ固形分 0.83%）及びカチオン澱粉（添加量は対パルプ固形分 0.75%）、サイズ剤はロジン系サイズ剤（添加量は対パルプ固形分 0.40%）を添加した。密度は JIS P 8118、比引張強さは JIS P 8113、サイズ度は JIS P 8122 に準じて測定した。表面強さは万能印刷適性試験機 MPT8000（熊谷理機工業(株)製）を用いて TV（タックバリュー）30 のインキ 0.6mL、印圧 20kg/cm の条件で印刷試験を行い、紙の表面が剥けるまで印刷速度を変えて試験した。

(2) 繊維リサイクル紙の性能向上に係る検討

比引張強さ、サイズ度の向上については、製紙薬品添加量の調整、紙料調成（原料のフィブリル化）を検討し、印刷時の表面強さの向上については、サイズプレスに用いる薬品の種類や添加量を検討した。サイズプレスで塗工した薬品は PAM（ポリアクリルアミド）と PVA（ポリビニルアルコール）を用い、その効果を比較した。

2.3 最適な抄紙方法の探索及び実機抄紙への適用

2.2 で検討した結果から最適な抄紙方法を確立し、富士市内の製紙工場の実機で廃棄繊維を混合したリサイクル紙の抄紙を行った。抄紙した紙は比引張強さ、サイズ度、印刷時の表面強さを 2.2 と同様の方法で測定し、パルプ 100% 製品と比較した。

3 結果及び考察

3.1 県内の廃棄繊維に係る調査

廃棄繊維に関する調査の結果、遠州地区の小規模事業者では、1ヶ月に数百 kg 程度、大規模事業者では、1ヶ月半から2ヶ月で数十トン程度の廃棄繊維が排出されていた。小規模事業者では生産工程で生じる織物の耳や検査の結果、規格外となった織物などが多く排出されており（写真1）、その素材は製紙用パルプと同様のセルロースを主成分とする綿、

麻が大半であった。また、先染めのものは少なく、大部分は生成り色、白色であった。一方、大規模事業者では、化学繊維を含む生地や染色された生地を多く排出していた。よって、遠州地区の小規模事業者から排出される繊維はリサイクル紙の原料として適していると判断し、本研究で利用することとした。



写真1 遠州地区の廃棄繊維

3.2 繊維リサイクル紙の抄紙条件に係る検討

(1) 遠州地区の繊維を利用したリサイクル紙の特性

遠州地区の廃棄繊維である綿及び麻を乾式で解繊した後に、10%、30%、50%配合した原料をフリーネス約 440mLCSF となるようにリファイナー（熊谷理機工業(株)No. 2500-I）で叩解し、pH6.3 で手抄きシートを作製した。その密度、比引張強さ、サイズ度、表面強さを測定した。

密度及び比引張強さについては、図2、図3に示すグラフより綿、麻ともに繊維の配合割合が高くなるにつれて低下し、綿と麻で大きな差は見られなかった。

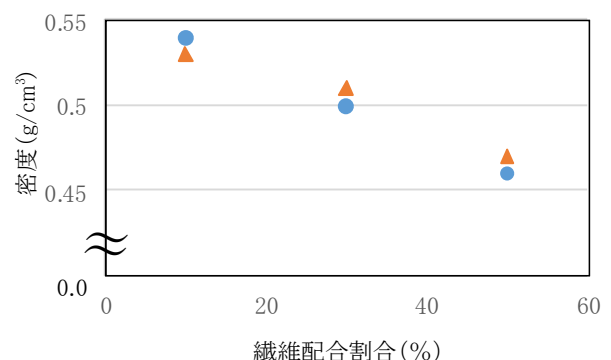


図2 繊維配合割合と密度の関係

●綿 ▲麻

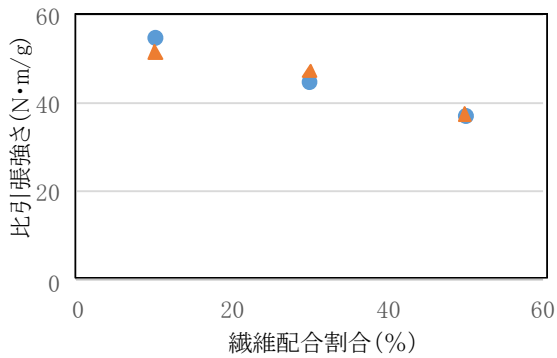


図3 繊維配合割合と比引張強さの関係

●綿 ▲麻

サイズ度については、図4より綿は配合割合に関わらず一定のサイズ度となったが、麻では配合割合が高くなるにつれてサイズ度が低下した。この結果より麻にはサイズ剤が効きにくいと考えられる。

表面強さについては、図5に示すように綿、麻ともに繊維の配合割合が高くなるにつれて低下することが分かった。また、綿より麻を配合した紙が強い傾向となった。

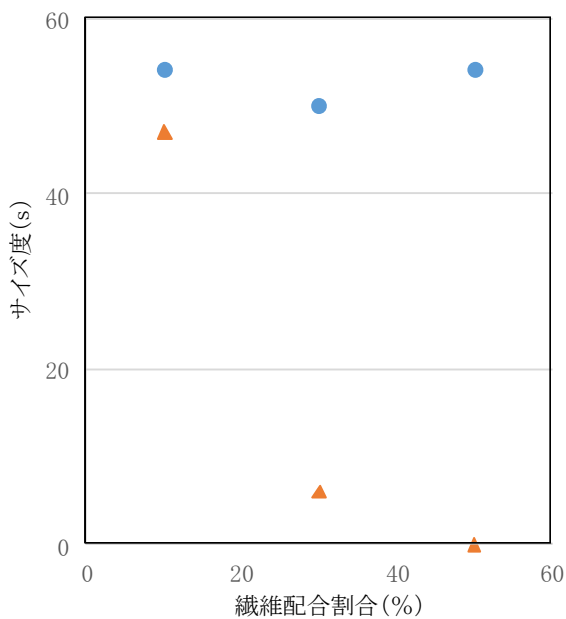


図4 繊維配合割合とサイズ度の関係

●綿 ▲麻

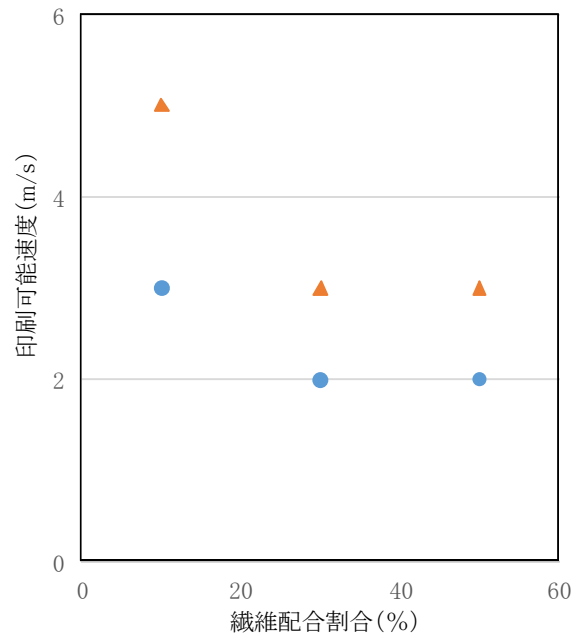


図5 繊維配合割合と印刷可能速度(表面強さ)の関係

●綿 ▲麻

(2) 繊維リサイクル紙の性能向上に係る検討

図3から分かるように、繊維配合率50%のリサイクル紙では、10%配合品と比較し、比引張強さが大きく低下している。また、サイズ度については、綿、麻ともに同等の坪量の市販の印刷用紙のサイズ度(63.1秒)を下回っていた。よって、比引張強さ及びサイズ度を向上させるため、pHを変化させたときの製紙薬品の効果を調べた。綿の検討結果を図6、図7に示す。比引張強さはpHが高いと強くなった。サイズ度はpH5.4以下であれば63.1秒以上となっていたため、印刷用紙として利用可能である値であることが分かった。また、紙料調成によるフリーネスの違いで(約400mLCSFと約440mLCSF)で比較すると、比引張強さはフィブリル化が進んだフリーネス400mLCSFが強くなり、サイズ度はフリーネス440mLCSFが高い値となっていることが分かった。これらの結果より、pH5.4、フリーネス約400mLCSFで抄紙したリサイクル紙が比引張強さ及びサイズ度の値で良好な結果となっていたので、この紙について製紙薬品の添加量調整による比引張強さの向上を検討した(図8)。3.2(1)の図3で添加したときの紙力剤のアニオンPAM添加量(対パルプ固形分0.83%)に対して、1.2倍、1.5倍添加したところ、添加量に応じて比引張強さが向上し、1.5倍添加することで市販の印刷用紙と同等の約40N・m/gまで向上した。

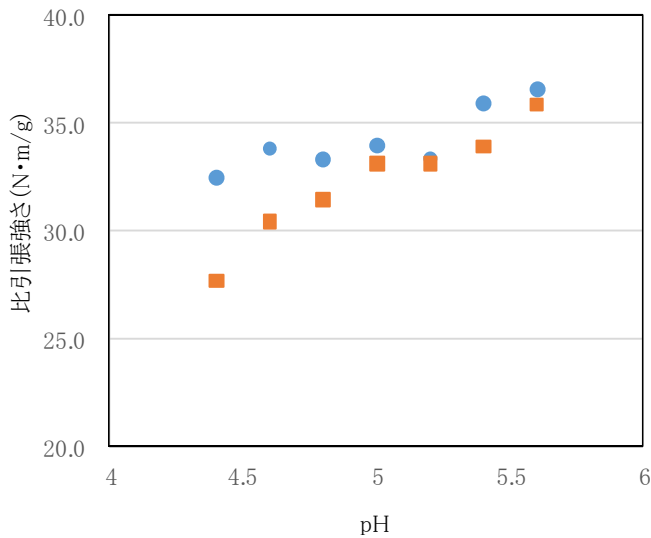


図6 抄紙時の pH と比引張強さの関係(綿)

●フリーネス 400mLCSF ■フリーネス 440mLCSF

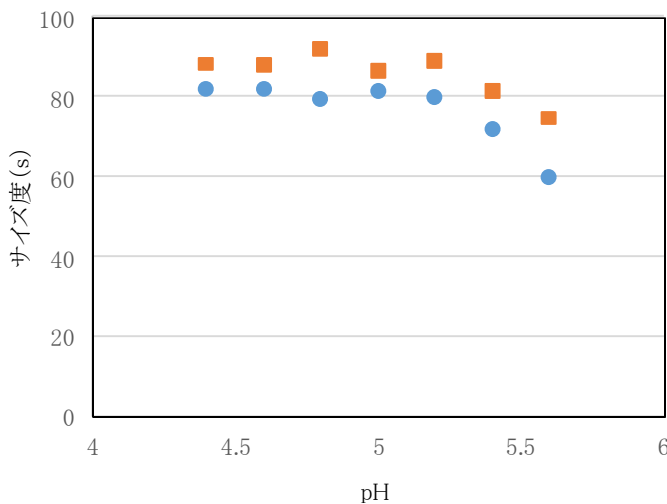


図7 抄紙時の pH とサイズ度(綿)

●フリーネス 400mLCSF ■フリーネス 440mLCSF

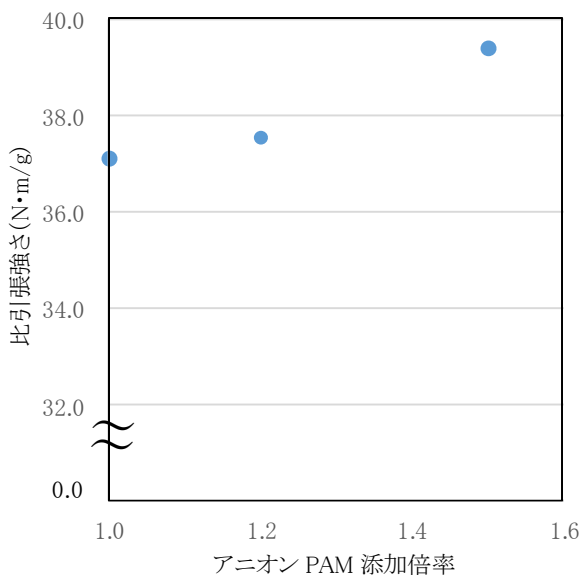


図8 紙力剤添加倍率と比引張強さの関係(綿)

麻については、図9、図10に示すグラフより、比引張強さはpHが高いと強くなり、サイズ度はpHが低いと高くなる傾向にあることが分かった。また、紙料調成でのフリーネス約400mLCSFと約440mLCSFによる比較では、比引張強さ、サイズ度ともにほとんど差が見られない結果となった。麻についても綿と同様に、pH5.4、フリーネス約400mLCSFで抄紙したリサイクル紙で、製紙薬品の添加量調整による検討を行った。

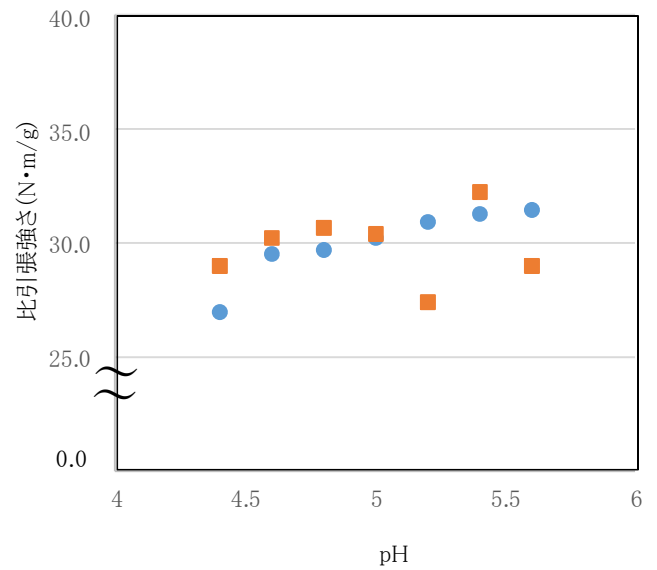


図9 抄紙時の pH と比引張強さの関係(麻)

●フリーネス 400mLCSF ■フリーネス 440mLCSF

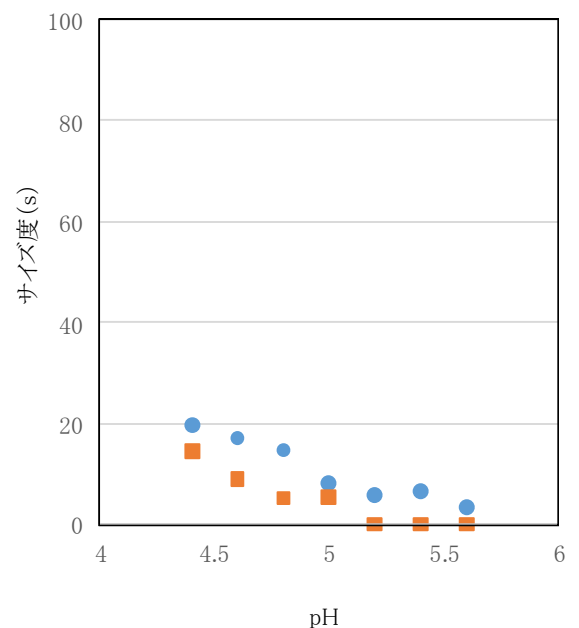


図10 抄紙時の pH とサイズ度(麻)

●フリーネス 400mLCSF ■フリーネス 440mLCSF

麻では綿と異なり印刷用紙として利用するに当たり、比引張強さだけでなく、サイズ度も十分な値となっていなかったため、製紙薬品の添加量調整による比引張強さ及びサイズ度の向上を検討した(図11、図12)。比引張強さについては、3.2(1)の図3で添加したときのアニオンPAM添加量(対パルプ固形分0.83%)に対して、1.5倍添加することで約40N・m/gまで向上した。サイズ度については、3.2(1)の図4で添加したときのサイズ剤添加量(対パルプ固形分0.40%)に対して、最大2.0倍添加したが、サイズ度の向上はほぼ見られなかった。よって、麻については、サイズ剤の効果の高い綿と混合して利用することにより、リサイクル紙の原料として利用可能となると考えられる。

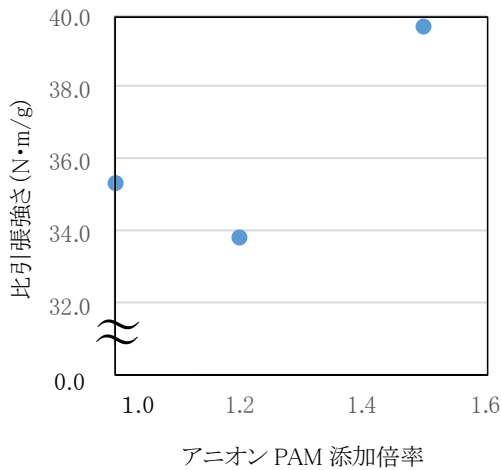


図11 紙力剤添加倍率と比引張強さの関係(麻)

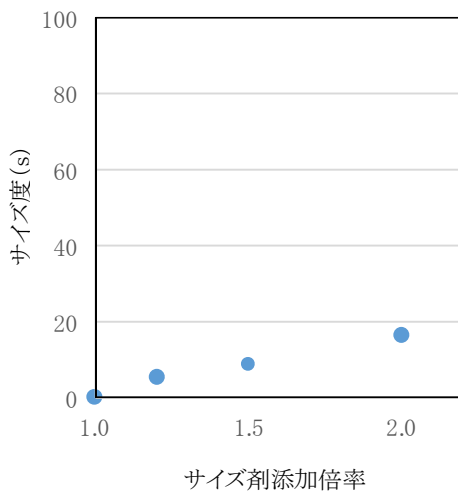


図12 サイズ剤添加倍率とサイズ度の関係(麻)

表面強度の向上については、薬品を紙の表面に塗工するサイズプレスによる方法を検討した。表面強度の向上も比引張強さの向上と同様に50%繊維配合のリサイクル紙で検討した。綿、麻でどちらのリサイクル紙でもPAMは効果が乏しく、PVAで表面強度の向上が見られた(図13、図14)。

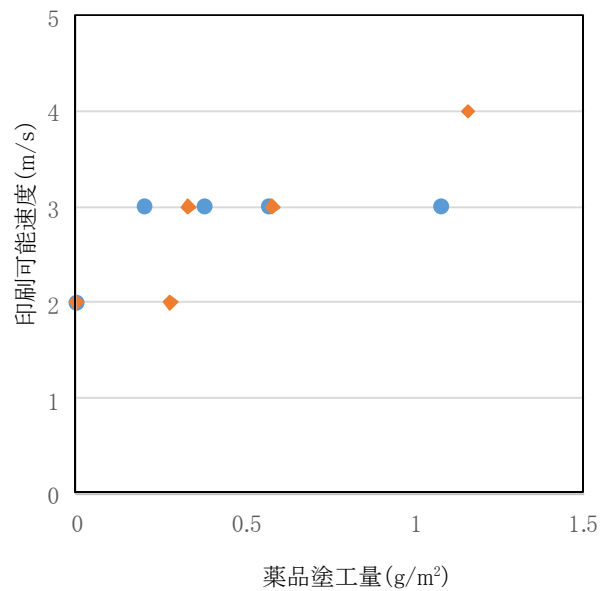


図13 薬品塗工量と印刷可能速度(表面強さ)の関係(綿)

● PAM ◆ PVA

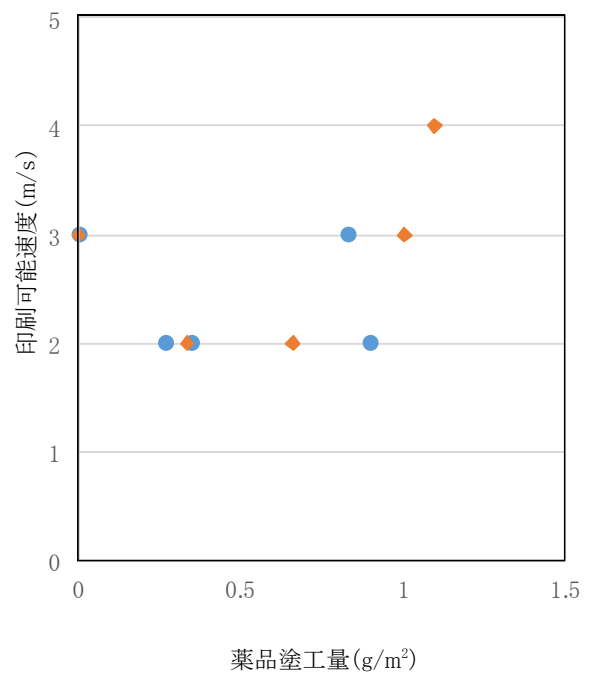


図14 薬品塗工量と印刷可能速度(表面強さ)の関係(麻)

● PAM ◆ PVA

3.3 最適な抄紙方法の探索及び実機抄紙への適用

実機抄紙では、遠州地区の綿及び麻を混合した原料に対する工場実機の抄紙機適性が分からなかったため、繊維の配合割合は30%とした。また、遠州地区の事業者から回収した綿と麻の割合はおおむね綿：麻＝3：1であったため、実機抄紙の際にはその割合で原料に配合した。

3.2 (2) で検討した結果から、比引張強さ、サイズ度の両物性値が高くなる条件はpHは5～5.4、フリーネスは約400mLCSFであり、表面強さについては、PVAの表面塗工が効果があったため、工場実機での抄紙条件はpH5付近、フリーネス約400mLCSF、PVAの表面塗工で行うこととした。また、繊維配合による柔らかな風合いを特徴とするため、カレンダーによる圧力をかけずに抄紙することとした。

今回の実機抄紙では、リサイクル紙の活用先である廃棄繊維の排出元の事業者などの意見を取り入れ、白い無地の紙だけでなく、着色繊維5%を配合し、目視で繊維が配合されていることが確認できるような紙も抄紙した。紙の坪量は160g/m²とした。

実機抄紙したリサイクル紙のうち、白い無地の紙の物性値をパルプ100%の製品（坪量95g/m²）の物性値と比較した（表1）。なお、この比較は紙の坪量が異なるため、参考値となるが、紙の各物性値ともにパルプ100%の市販品を上回っていたため、一般的な印刷用紙と同様に利用できると考えられる。

表1 工場で抄紙したリサイクル紙の物性

紙の種類	比引張強さ (N・m/g)	サイズ度 (s)	表面強さ (印刷可能速度、m/s)
リサイクル紙	47.3	246.4	4
市販品	41.7	63.1	1

4 まとめ

本研究では、遠州織物工業協同組合、天龍社織物工業協同組合の組合員の事業者から排出された廃棄繊維を製紙原料として利用し、富士市内の製紙工場でのリサイクル紙の抄紙に成功した。そのリサイクル紙は、廃棄繊維の排出元の事業者と情報交換などを行い、用途を探索した結果、一部の繊維事業者や繊維関連団体である静岡県繊維協会、遠州織物工業協同組合で名刺や展示会でのPOP広告として活用されている。このように、本研究の目的である繊維

循環のモデルケースを構築することができた。今後は本研究における取組を広く情報発信することで、サステナブルファッションの取組を拡大していく予定である。

参考文献

- 1) 株式会社矢野経済研究所：令和4年度 環境省 調査循環型ファッションの推進方策に関する調査業務-マテリアルフロー-

セルロースナノファイバー製造時のエネルギー低減のための TEMPO 酸化法の適用及び解繊方法の検討

CNF科 中島大介* 山崎利樹 田中翔悟** 山下晶平

Study of applying TEMPO oxidation method and defibrillation methods for energy reduction in cellulose nanofiber production

NAKASHIMA Daisuke, YAMAZAKI Toshiki, TANAKA Shogo and YAMASHITA Shohei

Keywords: CNF, TEMPO oxidation, refinement process

セルロースナノファイバー(以下、CNF)は木材などの植物繊維の主成分であるセルロースをナノサイズまで微細化したバイオマス資源として、製品の付加価値向上やカーボンニュートラルに向けた用途開発に用いられているが、微細化プロセスにおけるエネルギー消費に起因するコスト高が課題となっている。そこで本研究では、エネルギー低減に有効とされる TEMPO 酸化法を適用した際の微細化エネルギー低減率を見積もるために4種類の微細化装置を用いて評価した。さらに得られた CNF 性状を調べ、装置毎の微細化プロセスの特徴を明らかにした。

キーワード：CNF、TEMPO 酸化、微細化処理

1 はじめに

CNF は自然由来材料であり、かつ材料の補強効果が高いことから、カーボンニュートラルに資する材料として応用が広がっているが、製造の際に膨大なエネルギーが必要となるため、社会実装の妨げとなっている。

本研究では、化学的な製造手法である TEMPO 酸化法¹⁾による製造エネルギーの削減効果を検証した。

2 方法

2.1 CNF の試作

試作に供したパルプにはドライパルプシート(NBKP)をパルパーで離解したものと市販の TEMPO 酸化済みパルプ(置換度:1.46mmol/g)を用意した。パルプに蒸留水を加え 1 wt% に調製した分散液を表 1 の条件で繰り返し処理をし、1 回の処理毎に分散液を回収した。なお、未処理のパルプについては装置の目詰まりを防ぐため、同装置による事

表1 試作条件一覧

微細化処理	装置	処理条件	処理時間
ノズル式 高圧ホモジナイザー	ナノマイスターND-10 (株大川原製作所製)	圧力 150MPa	TEMPO 酸化：1 時間半, 5 回処理 未処理：1 時間半, 5 回処理
バルブ式 高圧ホモジナイザー	H3-1D (三丸機械工業株)	圧力 100MPa	TEMPO 酸化：10 分, 5 回処理 未処理：10 分, 5 回処理
グラインダー	マスコロイダー MKCA-5JR (増幸産業株製)	磨砕用特殊砥石 MKGC-6-80 使用	TEMPO 酸化：50 分, 5 回処理 未処理：3 時間半, 3 回処理
製紙用湿式粉碎装置	ラボリファイナー SDR-14 (相川鉄工株製)	回転刃周速 24m/s 流量 0.15m ³ /min	TEMPO 酸化：20 分, 5 回処理 未処理：20 分, 5 回処理

* 現 企業局西部事務所水質管理センター、** 現 工業技術研究所 化学材料科

前の粗粉碎もしくはボールミル PM400 (株Retsch 製) による 6 時間の前粉碎を行った。

2.2 評価方法

試作中の消費電力量をクランプオンパワーロガー PW3365-10 (日置電機株製) で測定し、投入した分散液の重さを除して分散液 1 kg の微細化処理にかかる消費電力量を計算した。CNF は微細化が進行すると分散液の透明度が高まるため、得られた CNF 分散液の可視光透過率を紫外可視近赤外分光光度計 V-770 (日本分光株製) により光路長 10mm で測定し、微細化の進行度合いの指標とした。

3 結果および考察

どの微細化方法においても、TEMPO 酸化を施した場合には 1 回の処理で半透明の CNF が得られた。

可視光透過率と消費エネルギーの関係を図 1 ~ 図 4 に示す。いずれの微細化方法においても、TEMPO 酸化を施したものは 1 回の処理で 70% 以上の可視光透過率が得られたが、未処理のパルプから試作したものは 5 回処理後もこれを上回ることはなかった。また、グラインダーとリファイナー

については TEMPO 酸化を施すことで 5 回処理時の消費エネルギーがそれぞれ 2.0Wh/kg 及び 72.4Wh/kg と低くなった。

4 まとめ

未処理のパルプと TEMPO 酸化を施したパルプを 4 種類の微細化装置でそれぞれ 5 回繰り返し処理し、得られた CNF の可視光透過率を比較することで、微細化の進行度合いと処理にかかる消費エネルギー量を評価した。5 回の処理の中で通常のパルプによる試作品の可視光透過率が TEMPO 酸化を施したものに並ぶことはなかった。このことから、5 倍以上のエネルギーを与えたとしても、TEMPO 酸化を行わずに同等の CNF を得ることは困難であると考えられた。

参考文献

- 1) 磯貝 明：TEMPO 酸化セルロースナノファイバーの調製と特性解析．東京大学農学部演習林報告，126，1-43 (2011)

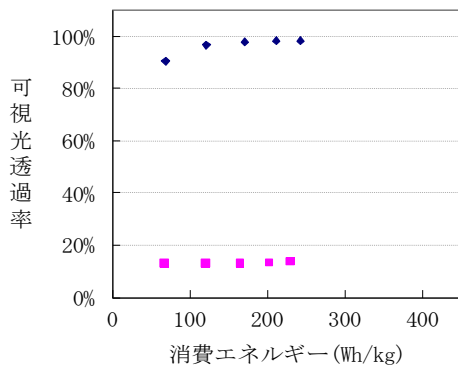


図 1 高圧ホモジナイザー処理(ノズル式)後の可視光透過率

◆ TEMPO 酸化 ■ 未処理(ボールミル 6h 処理)

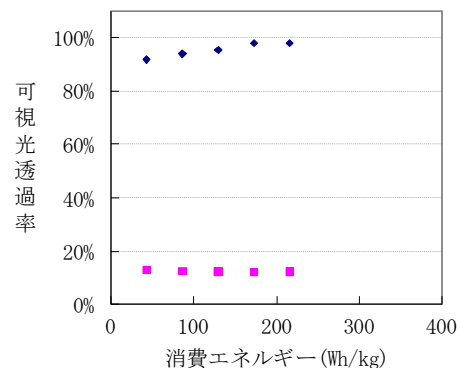


図 2 高圧ホモジナイザー処理(パルプ式)後の可視光透過率

◆ TEMPO 酸化 ■ 未処理(ボールミル 6h 処理)

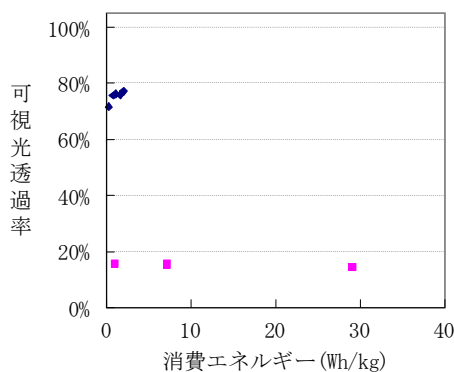


図 3 グラインダー処理後の可視光透過率

◆ TEMPO 酸化 ■ 未処理(粗粉碎)

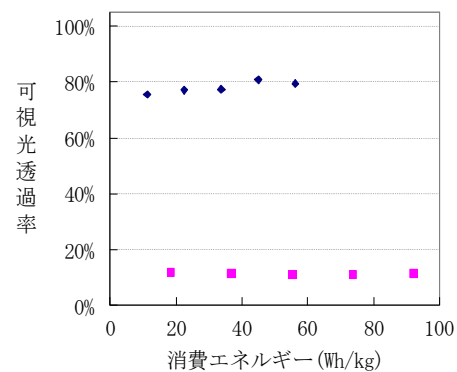


図 4 リファイナー処理後の可視光透過率

◆ TEMPO 酸化 ■ 未処理(粗粉碎)

AI を活用した古紙原料の判別に関する研究

機械電子科 齊藤和明 井出達樹 増井裕久

Study on distinguishing using artificial intelligence raw materials for making recycled paper

SAITO Kazuaki, IDE Tatsuki and MASUI Hirohisa

Keywords: AI, machine learning, classification, separation, textile

中小企業のデジタル化や産業全体の DX (デジタルトランスフォーメーション) は、国や地方自治体の政策として推進されている。AI はディープラーニングによって精度が大きく向上し、AI 等を導入した企業では効果が認められるものの、企業への導入はまだ途上にある。我々はものづくりに AI を活用した DX 推進の一環として、製造業等の課題解決に AI を用いた事例を示すことで企業の AI 導入の動機付けになると考えた。そこで、再生紙工場の原料として用いられるようになった廃棄衣料について、素材が分かれば古紙原料として利用しやすくなるため、AI を活用して 9 種類の繊維の布片について分別できるか試みた。結果、AI を活用して分別できる可能性が示唆された。

キーワード：AI、機械学習、クラス分類、分別、繊維

1 はじめに

中小企業のデジタル化の支援や産業全体の DX は、デジタル社会形成基本法 (令和 3 年) に基づき強力に推進されている。本県では新ビジョン後期アクションプラン (令和 4 年 3 月) において DX による産業構造の改革等を政策として打ち出している。AI はディープラーニングによって精度が大きく向上し、AI 等の導入効果は認められるものの、企業への導入は途上にある¹⁾。

一方、再生紙工場では原料不足等により廃棄衣料を原料に用いる状況にある。繊維の素材は紙質に影響を及ぼすため、廃棄衣料 (布) を素材別に分けられれば古紙原料として利用しやすくなり、原料不足対策の一助となる。

ものづくりへの DX を推進し、再生紙工場の効率化を目的に、AI を活用して、布片の繊維素材別の判別を試みたので結果を報告する。

2 方法

9 種類の繊維 (アクリル: ACR、アセテート: ACT、コットン: CTN、ナイロン: NYL、ポリエステル: PES、ポリウレタン: PU、レーヨン: RYN、シルク: SLK、ウール: WL) の布片を、原則色材の 3 原色 (シアン、イエロー、マゼンタ) と黒、白の 5 色で各色 10 試験片の計 50 試験片を 1 試料とした。各試

験片を、デジタル精密光沢度計 GM-26D (榊村上色彩技術研究所製) を用いて 20°、60°、75° の測定角で測定し (3 測定点)、紫外可視近赤外分光光度計 V-770 (日本分光 (株) 製) を用いて波長範囲 250 ~ 2,500nm を 1 nm 毎に測定し (2, 251 測定点)、フーリエ変換赤外分光光度計 FT/IR-6000 (日本分光 (株) 製) を用いて波長換算で約 2,500 ~ 25,000nm を約 1/cm 毎に測定し (3, 736 測定点)、得られた光学測定データは CSV ファイルにまとめた。

機械学習には、シンプルな構文、豊富な標準ライブラリ・外部ライブラリが利用でき、広く使われているプログラミング言語「Python」を用いた。機械学習の一連の作業を自動化できるオープンソースの機械学習パッケージ「PyCaret」で機械学習モデルを作成・評価した。

各試料は試験片毎に計 50 回ずつ測定し、測定結果そのままのデータ (5, 990 測定点) にターゲット (ACR、ACT、CTN、NYL、PES、PU、RYN、SLK および WL) を追加してデータセットとして、PyCaret の分類のモジュールを用いた。

汎化性能評価として、以上の機械学習モデル作成に使用していない別の色の布片 (PU 以外) に対して同様に光学測定して得たデータセットを用いて、以上で作成した機械学習モデルで予測した。

カタログ等で調べた市販のハイパースペクト

ルカメラ（以下、「HSC」という。）の仕様に基づき、波長範囲やバンド数を調整した（減らした）データセットに対して機械学習モデルを作成・評価した。

3 結果および考察

試料の光学測定データ（各試料の白い試験片1つのみ）について、横軸は測定波長と測定角とし、縦軸は測定した光学データ（分光スペクトル（反射率または透過率）と光沢度）として、図1に示す。

全測定データからなるデータセットについてPyCaretで処理し、各モデルを精度比較した結果（一部を抜粋）を表1に示す。多くのモデルで良く分類できている。

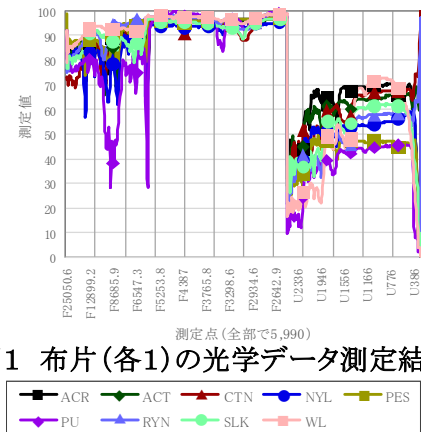


図1 布片(各1)の光学データ測定結果

表1 各モデルの精度比較結果(一部抜粋)

Model	Accuracy	
lda	Linear Discriminant Analysis	0.9874
lr	Logistic Regression	0.9874
knn	K Neighbors Classifier	0.9874
ridge	Ridge Classifier	0.9874
et	Extra Trees Classifier	0.9842
lightgbm	Light Gradient Boosting Machine	0.9715
rf	Random Forest Classifier	0.9715
gbc	Gradient Boosting Classifier	0.9682
xgboost	Extreme Gradient Boosting	0.9618
rbfsvm	SVM - Radial Kernel	0.9558
dt	Decision Tree Classifier	0.9336
nb	Naive Bayes	0.9303

一例として1r（ロジスティック回帰）のモデルの混同行列を図2(1)に示す。良く分類できていることが分かる。

汎化性能評価としてPyCaretで作成した機械学習モデル（1r）で、別の色の布片に対して予測した混同行列を図2(2)アに示す。概ね良く分類できていることが分かる。参考までに、白い布片のみの測定データで作成した機械学習モデルで、別の色の布片に対して予測した混同行列を図2(2)イに示す。衣料は様々な色があり、網羅的に学習に供することはできないが、いくつかの代表的な色の布片で学習するだけでも一定の汎化性能が期待できる。

市販HSCの仕様と、仕様に応じたデータセットに対する機械学習モデル（et（エクストラツリー分類器））の正解率を表2に示す。HSCを用いて布を繊維別に判別できる可能性を示唆するものである。

表2 HSCの仕様と機械学習モデルの正解率

市販HSC	波長範囲 (nm)	バンド数	正解率
A	350 ~ 1,100	150	0.9589
B	400 ~ 950	200	0.9915
C	400 ~ 1,000	224	0.9652
D	800 ~ 4,200	56	0.9747
E	900 ~ 1,700	40	0.9682
F	900 ~ 2,300	46	0.9684
G	2,700 ~ 5,300	154	0.9682
H	8,000 ~ 14,000	35	0.9274

4 まとめ

AIを活用して、一定の汎化性能をもって、布を繊維の素材毎に判別することができた。HSCを用いて判別できる可能性が示唆された。

また、ものづくりへのAI導入の動機付けになれば幸いである。

参考文献

- 1) 総務省: 令和3年版情報通信白書. (2021.7.30 発行)

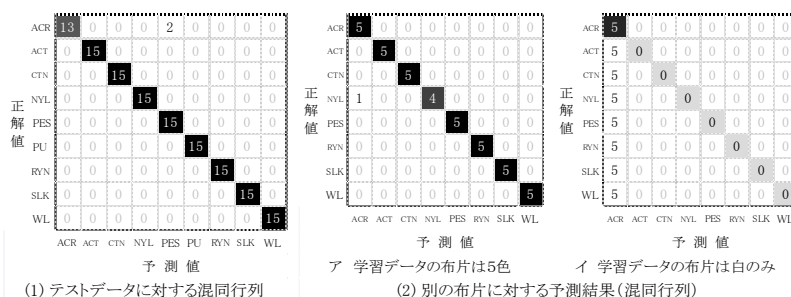


図2 作成した機械学習モデルの混同行列

REPORTS
OF THE
INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE
OF SHIZUOKA PREFECTURE, HAMAMATSU

静岡県工業技術研究所
浜松工業技術支援センター研究報告

静岡県工業技術研究所
浜松工業技術支援センター
浜松市浜名区新都田1丁目3番3号

INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE OF SHIZUOKA PREFECTURE, HAMAMATSU
1-3-3 Shinmiyakoda, Hamana-ku, Hamamatsu city, Shizuoka, 431-2103 Japan

路面に図形を描画する微細光学部品の開発

- 作製した光学部品の形状評価 -

光科 中野雅青 志智 亘
工業技術研究所 照明音響科 柳原 亘 豊田敏裕

Development of micro-optical components for projecting symbols onto the road

- Shape evaluation of fabricated optical components -

NAKANO Masaharu, SHICHI Wataru, YANAGIHARA Wataru and TOYOTA Toshihiro

We have developed a micro-prism array (MPA) to project pictogram on the road surface using LEDs as a light source. The MPA consists of minute prisms with different elevations and azimuths of the inclined planes, and as such it is difficult to fabricate such a detailed shape by conventional cutting and injection molding. Therefore, an MPA was fabricated by stereolithography using a two-photon polymerization method. Then, the MPA produced by stereolithography was used as a master to make a mold by precision electroforming, and MPAs were replicated by thermal nanoimprinting. The shapes of the fabricated MPAs (master, mold, replica) were measured with a confocal microscope. It was confirmed by optical simulation that the angular error of the measured inclined plane was small enough so as not to affect the projected image.

Keywords: Micro Prism Array, stereolithography, electroforming, thermal nanoimprinting, road projection

LEDを光源にして路面に図形を描画するマイクロプリズムアレイ(MPA)を開発した。MPAは、微細なプリズム群で構成されており、プリズムごとに傾斜面の角度と向きが異なっている。このため、従来の切削加工や射出成形の方法では、このような微細形状を作製することが困難であった。そこで、2光子重合方式の光造形でMPAの原盤を作製した。そして、この原盤を用いて精密電気鋳造で金型を作製し、熱ナノインプリントによりレプリカを作製した。作製したMPA(原盤、金型、レプリカ)の形状を共焦点顕微鏡で測定した。実測した傾斜面の角度の成形誤差は、投影像に影響を与えない程度に十分小さいことを光学シミュレーションにより確認した。

キーワード：マイクロプリズムアレイ、光造形、精密電気鋳造、熱ナノインプリント、路面描画

1 はじめに

人とクルマのコミュニケーションを支援する次世代の車載照明機器に用いる、路面に図形を描画する光学部品のマイクロプリズムアレイ(以下、MPA)を開発した¹⁾。図1に示すように、開発したMPAは、プリズム底面の1辺が0.1mmで、高さが数十 μm の微細なプリズム群で構成されている。プリズムごとに傾斜面の角度と向きを変えて光の進行方向を制御し、遠方に図形を描画する。本方式は、投影光学系が光源とMPAだけの単純な構成で、投影レンズが不要なため光学系を小型化できる利点がある。また、投影距離の変化に対して、投影像のぼけやむらといった光学特性の変化が少ない点も優れている。

一方、従来の切削加工や射出成形の技術では、こ

のような微細光学部品を作製することが困難であった。そこで、我々は、微細な造形が可能なフェムト秒レーザーを用いた2光子重合方式の光造形技術に着目した²⁾。また、光造形で作製したMPAの原盤を複製する方法として、精密電気鋳造と熱ナノインプリントの有効性を検証した。本報告では、これらの技術を活用して作製したMPAの原盤と金型、及びレプリカについて、形状を評価した結果について示す。なお、微視的な表面性状の評価については、別報を参照されたい³⁾。

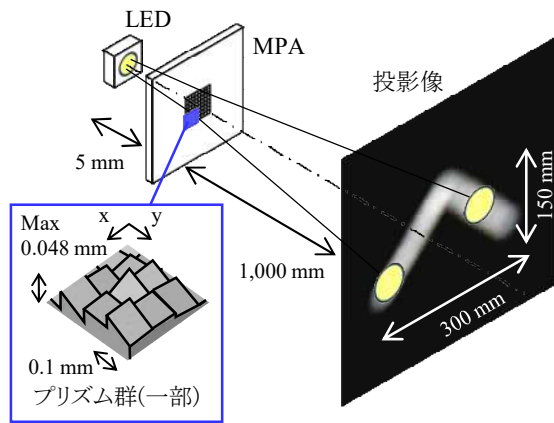


図1 MPAによる図形投影の概略図

2 方法

2.1 MPAの作製

1,000 mm先にブーメラン形状（縦150 mm×横300 mm）を投影するMPAを設計した^{4, 5)}。表1に作製したMPAの仕様を示す。

原盤のMPAは、2光子重合方式の光造形装置を用いて光硬化性樹脂で作製した。次に、この原盤を使い精密電気鋳造でニッケル製の金型を作製した。さらに、その金型をスタンパーにして、熱ナノインプリントでアクリル製のレプリカを3個複製した。光硬化性樹脂と各作製法の詳細は、別報を参照されたい¹⁾。

表1 設計したMPAの仕様

プリズムサイズ（1個）	
・底面	0.1 mm×0.1 mm
・高さ（Max）	0.048 mm
プリズム数（縦×横）	20個×20個
傾斜角度	0.7°～14.9°
光源-MPA間距離	5 mm

2.2 MPAの形状評価方法

作製したMPAの三次元形状は、共焦点顕微鏡OPTELICS HYBRID L7（レーザーテック（株））を使い非接触で測定した。また、測定した三次元形状において直交する2方向（図1のxy方向）の断面プロファイルデータから、各プリズムの傾きをそれぞれ回帰分析し、傾斜面の角度と向き（法線の仰角と方位角）を算出した。このうち、傾斜角度について成形誤差を評価した。評価に用いた断面プロファイルは、プリズム中央部の50 μm幅において断面形状を平均化して求めた。

2.3 傾斜角度の成形誤差を考慮した投影像予測

光造形で作製した原盤について、傾斜面の角度と向きを測定し、実測値を使ったMPAの三次元形状モデルを作成した。この形状モデルを光線追跡ソフトウェアAnsys Zemax OpticStudio（Ansys Inc.）に取り込み、傾斜角度の誤差を含んだMPAの投影像を予測した。光源は、直径0.4 mmの円形白色光源で、発光面の光強度分布は一様とした。

3 結果および考察

3.1 光造形で作製したMPAの形状評価

（1）外観形状

図2に、光造形で作製した原盤の共焦点顕微鏡像を示す。形状の異なる400個の微細なプリズムが、同様な品質で作製できることを確認した。製作した原盤の一部の三次元形状と断面プロファイルを図3に示す。原盤の傾斜面には、積層造形に起因する目立った段差は確認されなかった。一方、エッジ部では丸みが生じた。丸みのある部分では、設計どおりに光の進行方向を制御できないため、不要な背景光が発生する。このため、丸みを可能な限り少なくする必要がある。

（2）原盤傾斜角度の誤差

図4に、光造形で作製した原盤の各プリズムにおける傾斜角度の成形誤差（設計値との差）を評価した結果を示す。傾斜角度の誤差は、その角度の大きさに依存せず、平均値0.34°、標準偏差0.49°の正規分布に従う傾向であった。光造形で作製した同じ形状の5個の原盤について、傾斜面の角度誤差を比較した結果、同様な傾向であった（表2）。

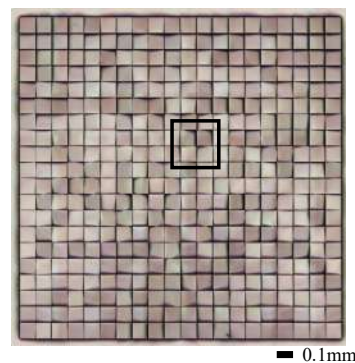


図2 光造形で作製した原盤の顕微鏡像

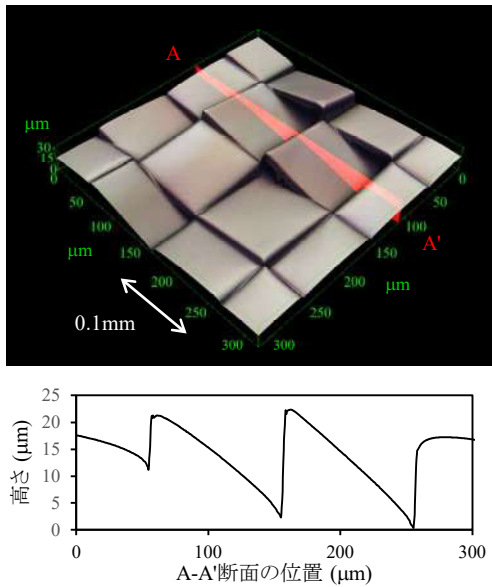


図3 光造形で作製した原盤の形状

図2の黒枠で囲まれた部分の三次元形状とA-A'断面のプロファイル。

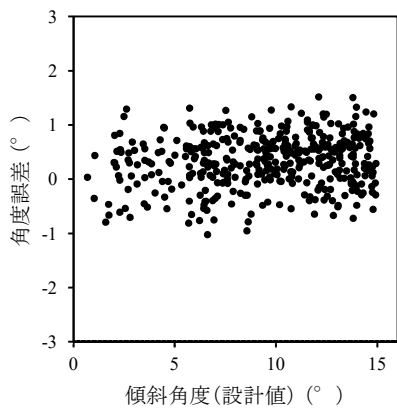


図4 原盤の各プリズムにおける傾斜角度誤差

表2 傾斜角度の原盤間誤差

試料	平均 (°)	標準偏差 (°)
A	0.34	0.49
B	0.32	0.46
C	0.24	0.44
D	0.24	0.46
E	0.24	0.40

3.2 傾斜角度の成形誤差が投影像に与える影響

図5に、光造形により生じた傾斜角度の誤差が投影像に与える影響をシミュレーションにより予測した結果を示す。両者を比較しても顕著な差異は見られず、今回の光造形で発生した角度誤差は、投影像に影響を与えないことが確認された。

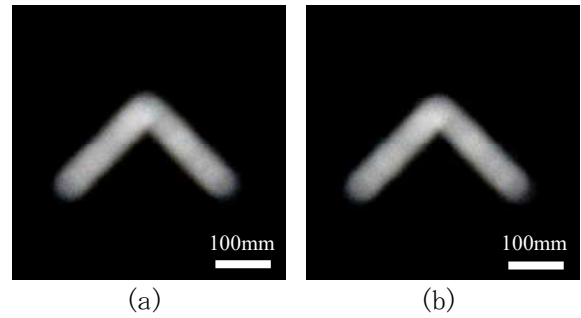


図5 傾斜角誤差が投影像に与える影響

(a)が設計値どおり作製した場合の、(b)が光造形で作製した原盤における傾斜面の角度と向きの実測値を使って予測した場合の投影像

3.3 精密電気鋳造で作製した金型の形状評価

(1) 外観形状

精密電気鋳造で作製した金型の外観形状を評価した。図6に、図3で示した原盤と同じ部分の形状測定結果を示す。傾斜面における高さ方向の形状誤差（金型と原盤との差）は、共焦点顕微鏡の測定精度と同等の $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 程度であった。なお、プリズム間の境界部では、測定ノイズが多いため評価から除外した。

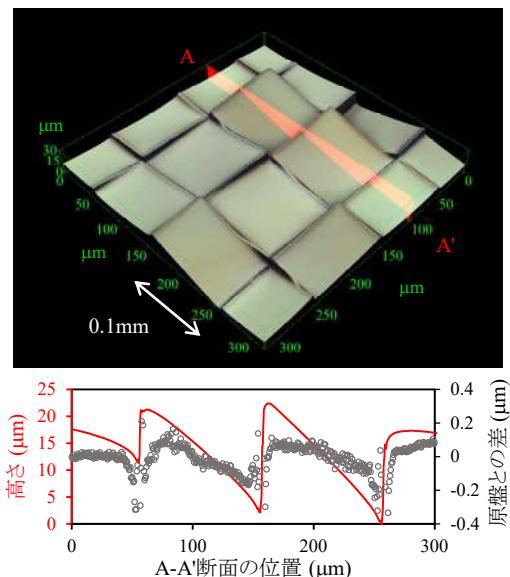


図6 精密電気鋳造で作製したMPA金型の形状

断面プロファイルは、原盤と比較するため、形状を反転して表記した。赤線はMPAの高さ、黒点は原盤との高さの差である。

(2) 金型傾斜角度の誤差

図7に、金型の各傾斜面における傾斜角度の誤差（金型と原盤との差）を評価した結果を示す。傾斜面の角度誤差は、その角度の大小に依存せず、平均値 0.15° 、標準偏差 0.30° の正規分布に従う傾向であった。これらの結果から、精密電気鋳造によりMPAの反転型を高精度に作製できることが確認された。

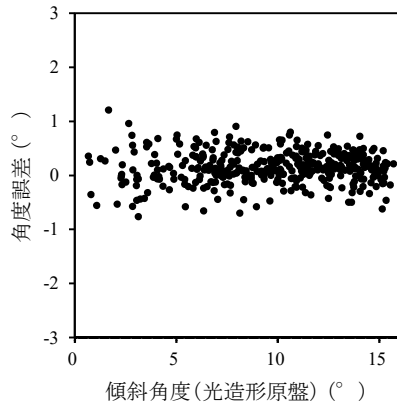


図7 金型の傾斜角度誤差

3.4 熱ナノインプリントで複製したレプリカの形状評価

(1) 外観形状

図8に、精密電気鋳造で作製した金型を使い、熱ナノインプリントで複製したレプリカの形状測定結果を示す。図8(a)に示したレプリカ全体の顕微鏡像からは、プリズム形状が大きく崩れるような欠陥は見られず、熱ナノインプリントで複雑な形状をもつプリズム群を転写できることを確認した。一方、図8(b)に示した断面プロファイルを見ると、レプリカは原盤に対して $2\ \mu\text{m}$ 程度収縮している。また、繰り返し作製したレプリカ間で、収縮の程度に違いは見られなかった。なお、プリズム間の境界部では、測定ノイズが多いため評価から除外した。

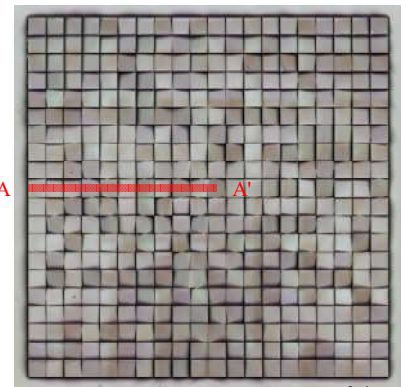
(2) レプリカ傾斜角度の誤差

図9に、ナノインプリントの1回目に作製したレプリカの傾斜角度の成形誤差（レプリカと原盤との差）を評価した結果を示す。誤差は、傾斜角度の大きさに依存しなかった。また、設計値との差を評価した結果については、別報を参照されたい¹⁾。

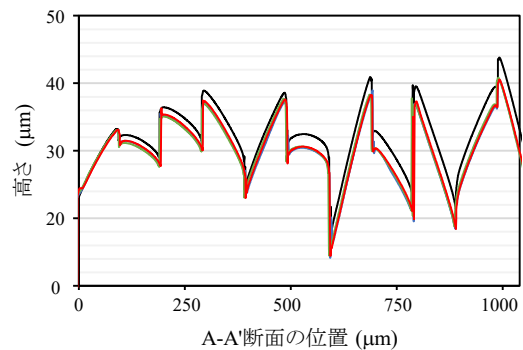
図10に、レプリカの各プリズムにおける傾斜角度の誤差をマッピングした結果を示す。誤差分布は一様ではなく、局所的に大きな箇所が確認された。

また、成形回数による違いが見られた。これは、樹脂の加熱及び冷却、脱型の方法に課題があると考えられる。表3に、3個のレプリカにおける傾斜角度誤差の統計値を示す。統計値では、成形回数による顕著な違いは見られなかった。

これらの結果から、精密電気鋳造により作製した金型と、熱ナノインプリントによりMPAを高精度に複製できることがわかった。



(a)



(b)

図8 ナノインプリントで複製したレプリカの形状

(a)レプリカの共焦点顕微鏡像、(b)A-A'断面プロファイル。黒線は原盤の、赤、緑、青線（重なって差が視認しづらい）は、それぞれ成形1、2、3回目のレプリカの断面プロファイル。

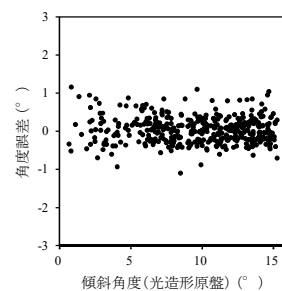


図9 レプリカMPAの傾斜角度誤差

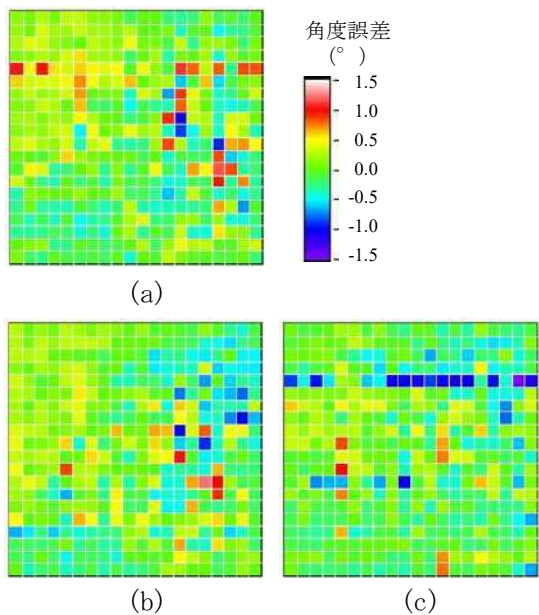


図 10 レプリカの傾斜角度誤差マップ

縦 20 個×横 20 個の各プリズムにおける傾斜角度の誤差。(a)成形 1 回目、(b)成形 2 回目、(c)成形 3 回目。

表 3 成形回数と傾斜角度の誤差

回数	平均 (°)	標準偏差 (°)
1	0.04	0.34
2	-0.02	0.34
3	-0.09	0.33

5 まとめ

路面に図形を描画する微細光学部品である MPA の作製方法について、作製した MPA の形状を評価し、その有効性を検証した。

- (1) 2 光子重合方式の光造形は、形状が異なる微細なプリズム群を均一な品質で作製できることがわかった。また、今回の光造形で発生した傾斜角度の成形誤差は、投影像に影響を与えない程度に十分小さいことが確認された。このことから、本光造形法は原盤作製に有効な方法であるといえる。
- (2) 精密電気鋳造は、光造形で作製した原盤の反転型を高精度に作製できる手段であることを確認できた。
- (3) 熱ナノインプリントは、精密電気鋳造で作製した金型と組み合わせて用いることで、光造形で作製した原盤を複製する技術として有

効であることがわかった。また、3 回の成形では、傾斜角度誤差の統計値に変化は見られなかった。

一方で、投影像の不要な背景光を減少させるためには、MPA におけるエッジ形状の丸みを改善させる必要がある。また、成形時に発生する収縮や、傾斜角度の誤差分布が MPA 全体で一様でないことは今後の課題である。

参考文献

- 1) 豊田敏裕 他：熱ナノインプリントによるマイクロプリズムアレイの成形. 静岡県工業技術研究所研究報告, 第 17 号, 1-7 (2024).
- 2) 丸尾昭二：3 次元マイクロ・ナノ光造形による機能構造体の開発. スマートプロセス学会誌, 3 (3), 175-181 (2014)
- 3) 柳原亘 他：マイクロプリズムアレイにおける熱ナノインプリントによる成形の評価－光干渉計を用いた表面粗さ測定－. 静岡県工業技術研究所研究報告, 第 17 号, 47-48 (2024).
- 4) 志智亘 他：図形を投影するマイクロプリズムアレイの設計. 静岡県工業技術研究所研究報告, 第 15 号, 128-129 (2022).
- 5) 志智亘 他：マイクロプリズムアレイによる図形投影照明の設計－光学シミュレーションによる投影像の評価－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 第 17 号, 90-95, (2024).

マイクロプリズムアレイによる図形投影照明の設計

- 光学シミュレーションによる投影像の評価 -

光科 志智 亘 中野雅晴
工業技術研究所 照明音響科 豊田敏裕

Design of lighting system for pictogram projection using micro-prism array

- Evaluation of projected images using optical simulation techniques -

SHICHI Wataru, NAKANO Masaharu and TOYOTA Toshihiro

Micro-prism arrays (MPA) are optical elements consisting of a two-dimensional array of micro-prisms that can project a pictogram image simply by passing light through it. In this report for the efficient design of an MPA, the effects of design parameters such as the number of prisms, light source distance, light source size and prism tilt angle on the nonuniformity of brightness and blurred contours of the projection image were elucidated by using optical simulation techniques. As a result, the following three guidelines were obtained for designing an MPA that can project a good pictogram image. (1) Increase the number of prisms. (2) Increase the light source distance. (3) Reduce the tilt angle of the prisms to 30 degrees or less. By using these findings, it is possible to efficiently design an MPA that projects a good pictogram image.

Keywords: micro-prism arrays, pictogram projection, optical design, optical simulation, projection performance

マイクロプリズムアレイ (MPA) は微細なプリズム群を2次元アレイ状に配置した光学素子であり、光を通すだけで図形を投影できる。本報告では、設計の効率化を図るため、光学シミュレーション技術を用いてプリズム数、光源距離、光源の大きさ、プリズムの傾斜角といった設計パラメータが、投影像の明るさむらや輪郭のぼけに与える影響を明らかにした。その結果、良好な投影像を得るための以下の三つの設計指針①プリズム数を多くする、②光源距離を長くする、③プリズムの傾斜角を 30° 以下にする、が得られた。これらの知見を用いることで、良好な投影像が得られるMPAを効率的に設計することが可能になった。

キーワード：マイクロプリズムアレイ、図形投影照明、光学設計、光学シミュレーション、投影性能

1 はじめに

近年、自動車メーカーやヘッドランプメーカーでは、自動車の安全性の向上を目的として、路面へ絵文字や記号などの図形を投影し、自動車から歩行者に対して注意を喚起する路面投影の開発が進められている^{1,2)}。またセンサーや表示装置を取付けたスマート街路灯から、路面に情報を描画する実証実験もなされている*。これらの照明は取り付けるスペースに制約があるため、コンパクトな照明装置が望ましい。

マイクロプリズムアレイ (以下、MPA) は微細なプリズム群を2次元アレイ状に配置した光学素子であ

る。MPAは、プリズム群の傾斜面の傾きと向きを個別に設定することにより、光を通すだけでスクリーンや壁面といった投影面に図形を投影することができる (図1)。従って、MPAと光源だけの単純でコンパクトな構成で図形を投影する照明が実現でき、車載照明やスマート街路灯の候補として期待できる。

しかしながら、MPAは非常に微細な構造を精度良く作製する技術が必要なため、その製造方法はまだ確立されていない。また、MPAの形状を設計する手法はあるものの、良好な投影像を得るために必要な設計パラメータに関する知見はまだ十分に蓄積さ

* 裾野市：4社と連携した道路照明灯の実証実験。

<https://www.city.susono.shizuoka.jp/soshiki/6/4/1/1/17668.html> (2024.3.15アクセス)

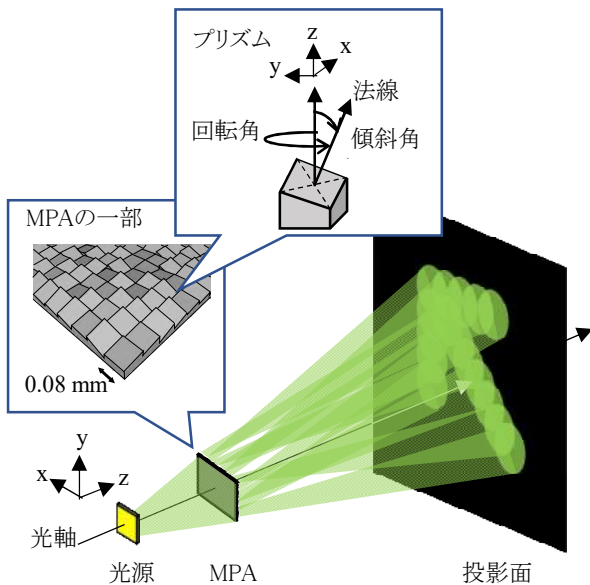


図1 図形を投影するMPAの光学系

れていない。我々はこれまでに、光学シミュレーション技術を用いて、設計パラメータを変えたMPAの投影像を予測し、投影像の明るさむらや輪郭のぼけを評価してきた^{3,4)}。

本報告ではこれまでの光学シミュレーション技術を用いたMPAの設計に関する評価の結果をまとめ、設計パラメータが投影像に与える影響を明らかにし、良好な投影像が得られるMPAを効率的に設計するための指針について述べる。

2 方法

2.1 MPAの設計と光学シミュレーションによる投影像の予測

はじめにMPAの設計手法について述べる。本研究では、MPAの設計にマイクロプリズムアレイ設計ソフトウェア VirtualLab Fusion (LightTrans International GmbH 製) を用いた。本ソフトウェアは、投影したい図形の二値画像、プリズムのサイズ、プリズム数、光源とMPA間の距離(以下、光源距離)、MPAから投影面までの距離を設計パラメータとして入力することで、各プリズムのスポット光が図形を形成するように、それらの傾斜角と回転角を自動的に最適化する。ここで、傾斜角は各プリズムにおける傾斜面の法線とプリズム中心から光軸に平行な軸(z軸)の正方向とのなす角度、回転角は右手系でz軸回りの水平軸(x軸)正方向からの角度である(図1)。本研究では、設計したMPAの投影像を、

同ソフトウェアの光学シミュレーション機能を用いて予測し、その明るさむらと輪郭のぼけを評価した。評価に用いた光学系を図2に示す。投影する図形は、解析が容易な一辺が200 mmの正方形とした。そして、それをMPAから1,000 mm離れた壁面に投影する。MPAは、それを構成するプリズム数及び光源距離と光源の大きさを変化させて設計した(図2)。プリズムのサイズは0.08 mm角とした。MPAの屈折率は光造形で作製する^{5,6)}ことを念頭に、光造形材料(OrmoComp[®])の波長554 nmでの値1.518⁷⁾とした。

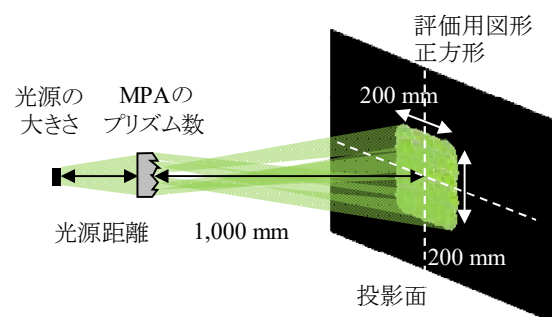


図2 光学シミュレーションに用いた光学系

2.2 投影像の輪郭のぼけと明るさむらの評価

今回実施した光学シミュレーションで得られた投影像の輪郭のぼけは、図3(ア)で示したように投影像の中心を通る水平方向断面における相対光強度の空間分布において、輪郭領域の最大値の10%になる位置と90%になる位置の幅で定義した(図3(イ))。従って、ぼけが目立つ投影像は輪郭のぼけ幅が大きく、輪郭が明瞭な投影像はぼけ幅が小さい。また、投影像の明るさむらは、輪郭部の明るさが単調に減少する領域を除いて面積が最大となる矩形領域(図4の赤線で囲った部分)の照度均斉度⁸⁾を求めた。照度均斉度は評価領域の照度の最小値を平均値で割った値である。従って明るさむらの少ない投影像は照度均斉度の値が大きくなり、明るさむらの目立つ投影像は値が小さくなる。

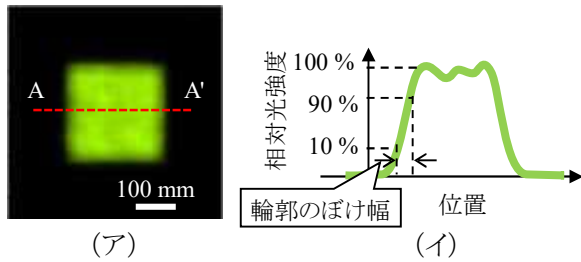


図3 輪郭のぼけ幅の解析の概略図

(ア)は光学シミュレーションで得られた投影像、
(イ)は(ア)で示したA-A'断面の概念図。

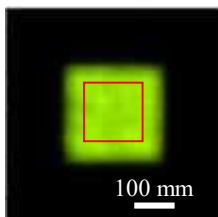


図4 明るさむらの解析領域

2.3 微細なプリズムが投影するスポット光における光強度の計算

MPAは、各プリズムが個別にスポット光を投影するため、各プリズムは微小な開口と見なせる。本研究で設計したMPAを構成するプリズムのサイズは0.08 mm角のため、微小開口による回折の影響を考慮する必要がある。しかし、傾斜面を持つプリズムの回折による影響は、今回実施した光学シミュレーションでは再現されない。そこで、傾斜面を持つプリズムが投影するスポット光における光強度の空間分布を、回折理論⁹⁾を用いた数値計算により求めた。

3 結果

3.1 光学シミュレーションによる投影像の予測結果

図5に今回実施した光学シミュレーションで得られた投影像のうち、輪郭のぼけが目立つものと、明るさのむらが目立つものを示す。図より設計パラメータが異なると投影像の質が大きく異なることがわかる。

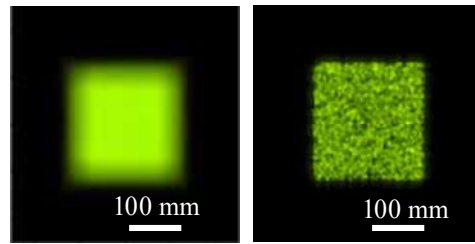


図5 設計パラメータが異なるMPAの投影像

(ア)はプリズム数：150個×150個、投影距離：5 mm、光源の大きさ：0.4 mm角の面光源。
(イ)はプリズム数：50個×50個、投影距離：20 mm、光源の大きさ：無限に小さい点光源。

3.2 投影像の輪郭のぼけと明るさむら

図6に、今回実施した光学シミュレーションで得られた投影像の輪郭のぼけ幅と光源距離の関係を示す。図より、光源の大きさが0.4 mm角の面光源(以下、面光源)の場合は、プリズム数の違いによらず、光源距離が長くなるほど輪郭のぼけ幅が狭くなり、光源距離が5 mmと20 mmでは、輪郭のぼけ幅が2倍程度異なることがわかる。一方、点光源の場合、光源距離及びプリズム数の違いによる輪郭のぼけ幅の違いは僅かであることがわかる。また、それらの輪郭のぼけ幅は約8 mmであった。

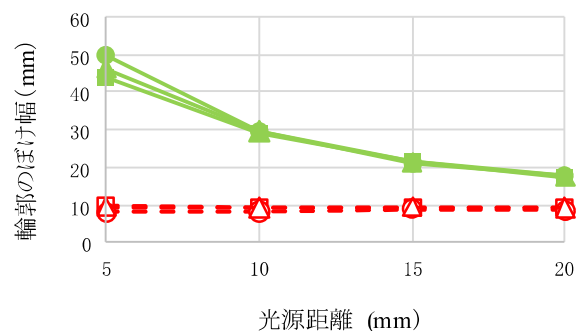


図6 輪郭のぼけ幅と光源距離の関係

●、▲及び■はそれぞれ、プリズム数が50個×50個、100個×100個及び150個×150個、光源の大きさはすべて0.4 mm角の面光源の結果。
○、△及び□はそれぞれ、プリズム数が50個×50個、100個×100個及び150個×150個、光源の大きさがすべて無限に小さい点光源の結果。

図7に、今回実施した光学シミュレーションで得られた投影像の照度均斉度と光源距離の関係を示す。図より、光源距離の変化に対して、点光源と面光源のどちらも照度均斉度の変化は僅かである。一方、点光源は面光源に比べ、プリズム数が少なくなると値が大幅に減少していることがわかる。これは、点光源が面光源より個々のプリズムが投影するスポット光のサイズが小さいため、図5（イ）で示したように投影する正方形の大きさに対してスポット光の数が不足しているためと考えられる。

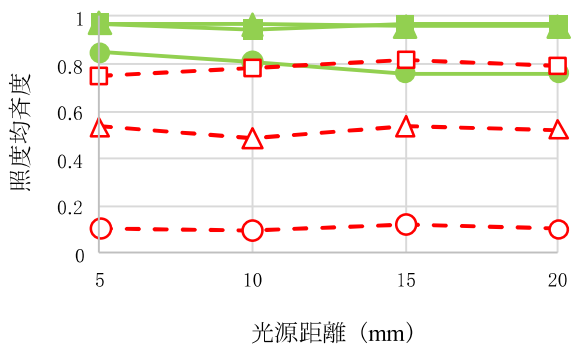


図7 照度均斉度と光源距離の関係

●、▲及び■はそれぞれ、プリズム数が50個×50個、100個×100個及び150個×150個、光源の大きさはすべて0.4 mm角の面光源の結果。
○、△及び□はそれぞれ、プリズム数が50個×50個、100個×100個及び150個×150個、光源の大きさがすべて無限に小さい点光源の結果。

3.3 傾斜面を持つ微細なプリズムの投影像

図8に、2.3の数値計算で得られた異なる傾斜角と回転角を持つプリズムが投影するスポット光の、相対光強度の空間分布を示す。図よりスポット光の大きさは傾斜角 0° 、回転角 0° が最小であり、傾斜角が 30° を超えるとプリズムの回転角と同じ方向に長く引き延ばされた形状になることがわかる。最小のスポット光の縦方向と横方向の半値幅は約8 mmであった。この値はMPAで投影できる最小形状の幅の目安となる。また、相対光強度の空間分布は、中心が最大で、中心から裾を引く分布になっている。この特徴は、MPAの投影像に明るさむらを生じさせ、輪郭をぼけさせる要因となる。このようなことから、傾斜角は 30° 以下に抑えることが望ましい。

4 考察

図9に、検討した設計パラメータの変化に対する輪郭のぼけと明るさむらの傾向をまとめた。図の横軸は輪郭のぼけ具合、縦軸は明るさむらの程度である。この図において、輪郭のぼけが小さく明るさむらが目立たない領域が良好な投影像の条件といえる。従って、良好な投影像を得るには、プリズム数を多くし、光源距離を長くするなどの設定が有効である。一方、光源の大きさについては、大きくすると明るさむらは目立ちにくくなるが輪郭のぼけが大きくなり、小さくすると輪郭のぼけは小さくなる

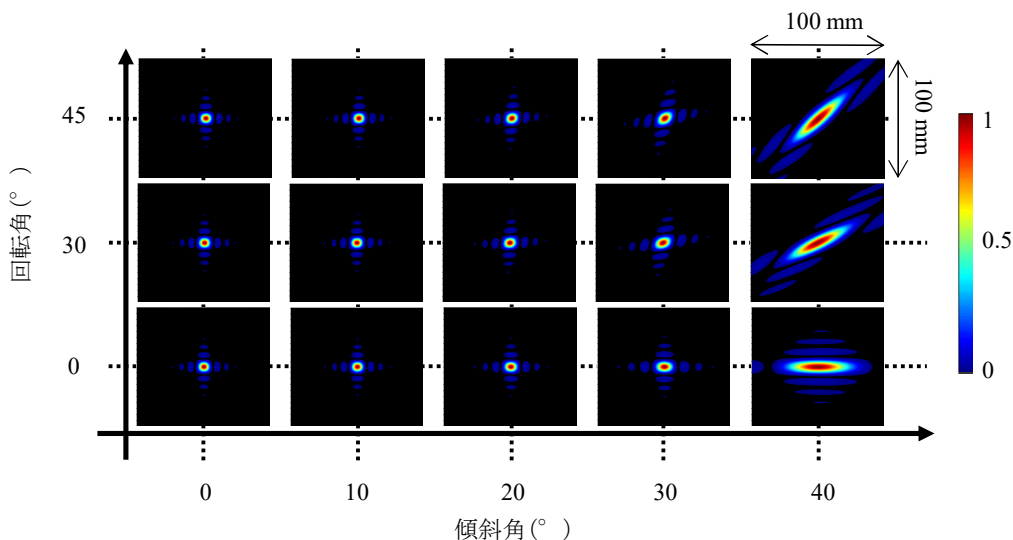


図8 異なる傾斜角と回転角を持つプリズムが投影するスポット光の相対光強度空間分布

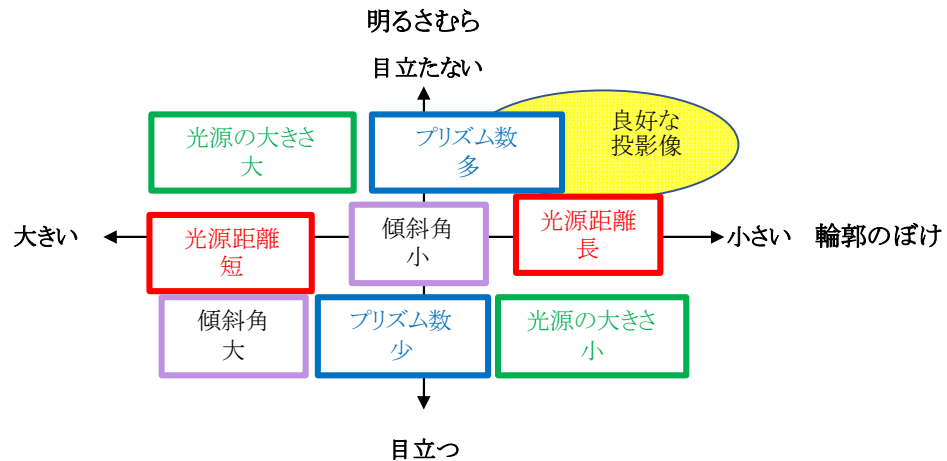


図9 設計パラメータと投影像質の関係

が明るさむらが目立ちやすくなるという二律背反の関係になっている。プリズムの傾斜角は、小さくすることで輪郭のぼけが小さく、明るさのむらが目立たない投影像を得られる。ただし、輪郭のぼけは傾斜角 0° のプリズムが投影するスポット光のそれより小さくすることはできない。また、傾斜角が 30° 以上のプリズムで構成されるMPAは、輪郭のぼけが大きくなる。

これらの結果から、例えばLEDのような発光面が大きい光源を使用する場合、良好な投影像を得るためには、光源距離を長くし、プリズムの傾斜角を 30° 以下に抑えるといった設計指針が得られた。

5 まとめ

MPAを用いた図形を投影する照明の設計において、設計パラメータが投影像の輪郭のぼけと明るさむらに与える影響を明らかにするため、設計パラメータを変えたMPAの投影像を光学シミュレーションで評価した。さらに、傾斜面を持つ微細なプリズムが投影するスポット光における光強度の空間分布を、回折理論を用いた数値計算により求めた。これらの結果から、明瞭な輪郭と明るさの均一性が良好な投影像を得るための以下の設計指針を得た。

- ①プリズム数を多くする。
- ②光源距離を長くする。
- ③プリズムの傾斜角を 30° 以下にする。

ただし、光源の大きさについては、このパラメータ単独で輪郭のぼけと明るさむらを、同時に良好にすることができない。従って、それらの向上を図るた

めには、その他の設計パラメータを目的の仕様に応じて調整する必要がある。

これらの知見を踏まえて、「V」字を投影するMPAを設計し、光造形、精密電気鋳造及び熱ナノインプリントを用いたMPAの成形技術を実証した。光造形で作製したMPAおよび熱ナノインプリントで成形したMPAの投影像は、光学シミュレーションで得られたものと同程度であった。詳細は別稿¹⁰⁻¹²⁾を参照されたい。これらの結果は、MPAの成形技術として上記手法が有効であることを示している。

今後はMPAの社会実装に向けて、傾斜した面へ図形を投影するなど、現実の状況を踏まえたMPAの設計を検討する。

参考文献

- 1) 加藤洋子 他：ターンシグナル路面描画の注意喚起効果に関する研究. 照明学会誌, 107, 13-14 (2023).
- 2) 柴田 裕一 他：ターンシグナル路面描画の注意喚起効果に関する研究, 自動車技術会論文集, 52 (4), 775-781 (2021).
- 3) 志智亘：図形を投影するマイクロプリズムアレイの設計. 静岡県工業技術研究所研究報告, 15, 128-129 (2022).
- 4) Shichi, W. et al. : A development of micro-prism arrays achieving image projection by principle of lighting: optical design and numerical estimation of lighting performance. Proceedings of the 30th Session of the CIE,

- 1219-1226 (2023).
- 5) 豊田敏裕 他：ピクトグラムを投影可能なマイクロプリズムアレイの開発－投影能力と金型作製の実証－. 静岡県工業技術研究所研究報告, 16, 46-48 (2023).
 - 6) Toyota, T. et al.: A development of micro-prism arrays for image projection using principle of lighting optics: feasibility study of the implementation. Proceedings of the 30th Session of the CIE, 1237-1243 (2023).
 - 7) GISSIBL, T. et al.: Measurements of Photoresist for Three-Dimensional Direct Laser Writing. Opt. Mater. Express, 7, 2293-2298 (2017).
 - 8) CIE S 017:2020 International Lighting Vocabulary 2nd Edition : Illuminance uniformity.
 - 9) HECHT, E.: Fraunhofer Diffraction, In "Optics", 2nd ed. 401-434 (1987).
 - 10) 豊田敏裕 他：熱ナノインプリントプロセスによるマイクロプリズムアレイの成形. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 17 (2024) .
 - 11) 路面に図形を描画する微細光学部品の開発－作製した光学部品の形状評価－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 17 (2024) .
 - 12) 柳原亘他：マイクロプリズムアレイの開発－表面性状測定による成形性の評価－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 17 (2024).

IoT・機械学習を活用した機器の稼働状態評価（第2報）

機械電子科 太田幸宏

Operation status evaluation of equipment using IoT and machine learning (2nd Report)

OHTA Yukihiko

The purpose of this research is to retrofit IoT to equipment that has been in operation for a long period of time and to construct an operation diagnostic model using the Maharanobis-Taguchi (MT) method. Regarding the ability of the MT method to determine whether operation is normal or not, it is shown that this method is more capable of making judgments compared to two other machine learning clustering methods. In addition, for the operation diagnosis of motors that are often used in factories, the operation diagnosis model is trained using vibration data during normal operation acquired by retrofitting IoT to electric fans, and is able to set appropriate judgment thresholds even without vibration data during abnormal operation. We show that the amount of calculation required can be reduced by applying factor-effect analysis.

Keywords:IoT(Internet of Things), machine learning, MT method

本研究は、長期稼働している機器に後付け IoT 化を行い、MT法で稼働診断モデルを構築することを目的としている。MT法の正常稼働か否かを判別する能力について、他の機械学習のクラスタリングの2つの手法と比較して、この手法が高い判別能力があることを示す。また、工場で多用されているモータの稼働診断として、扇風機に後付け IoT 化して取得した正常稼働時の振動データで学習した稼働診断モデルで、異常稼働時の振動データがなくても適切な判定閾値が設定できること、さらに、要因効果解析を適用することで計算規模の縮小ができることを示す。

キーワード：IoT (Internet of Things)、機械学習、MT法

1 はじめに

生産現場で長時間稼働する設備を保全するには、作業員が現場で日常的に点検する必要がある。また、一旦、不具合が発生すると修理が終わるまで生産ができないため、多大な損失が生じる。そのため、僅かな予兆を即座に診断する技術が求められている。

そこで、長期稼働する機器に対してセンサーと通信モジュールからなる IoT デバイスを後付けし稼働状態の見える化を行い、取得したデータを学習した稼働診断モデルで長期稼働する機器の稼働状態が正常か否かを診断する技術の開発を行った。今回、稼働診断に用いる機械学習は、長期稼働している機器から容易に大量に取得可能な正常稼働時のデータのみで学習ができるMT（マハラノビス・タグチ）システムのひとつMT法を適用した¹⁾。この手法は、多変量解析に品質工学の理論を融合させたもので、多入力-出力の数値モデルを構築する。この出力値のことをマハラノビスの距離という。第1報では、

市販されている小型 IoT デバイスで、扇風機のモータの回転により発生する振動を計測し、その振動データからMT法により稼働状態の評価を行った²⁾。第2報では、MT法と他機械学習を比較してこの手法の判別能力の優位性を示し、さらに、MT法の特徴を利用した判定閾値の設定及び要因効果解析による計算時間の短縮について示す。

2 方法

2.1 機械学習の判別性能の比較

機械学習は、回帰、分類、クラスタリングの三つに大別できる³⁾。本研究の目的は、長期稼働する機器の稼働状態が正常か否かを診断するシステムの構築であり、分類を使用するのが適当と考えられる。しかし、分類の数値モデルの学習には、異常稼働時のデータが大量に必要であり、その取得は困難である。そこで、クラスタリングの手法を使用して、あるグループのデータのみで数値モデルを学習し、学

学習済み数値モデルに別グループのデータを入力したとき、学習に使用したグループではないと判別する性能について、MT法とK-means クラスタリング、混合ガウス分布 (GMM) クラスタリングの3種類で比較した。学習に使用するデータセットは、プログラミング言語 Python の機械学習ライブラリ scikit-learn の wine データセットを用いた。このデータセットは、表1の13項目からなる3種類のワインのデータで、データ数は178個である。図1に各入力の散布図を示す。図1を俯瞰して見てもヒストグラム、分布図ともに特徴的なピークは見られず、3種類のデータを容易に分類できないことが確認できる。判別用に入力するデータは、学習に使用したデータの平均値と標準偏差で基準化した。判定閾値は、学習済み数値モデルに学習に使用したデータを入力させたときの出力値の平均値 m と標準偏差 σ を求め、 $m + 3\sigma$ の値とした。

表1 wine データセットの入力項目

No.	入力項目
1	alcohol (アルコール度数)
2	malic_acid (リンゴ酸)
3	ash (灰分)
4	alcalinity_of_ash (灰分のアルカリ度)
5	magnesium (マグネシウム)
6	total_phenols (全フェノール含量)
7	flavanoids (フラボノイド)
8	nonflavanoid_phenols (非フラボノイドフェノール)
9	proanthocyanins (プロアントシアニン)
10	color_intensity (色の濃さ)
11	hue (色相)
12	od280/od315_of_diluted_wines (希釈ワイン溶液の OD280/OD315)
13	proline (プロリン)

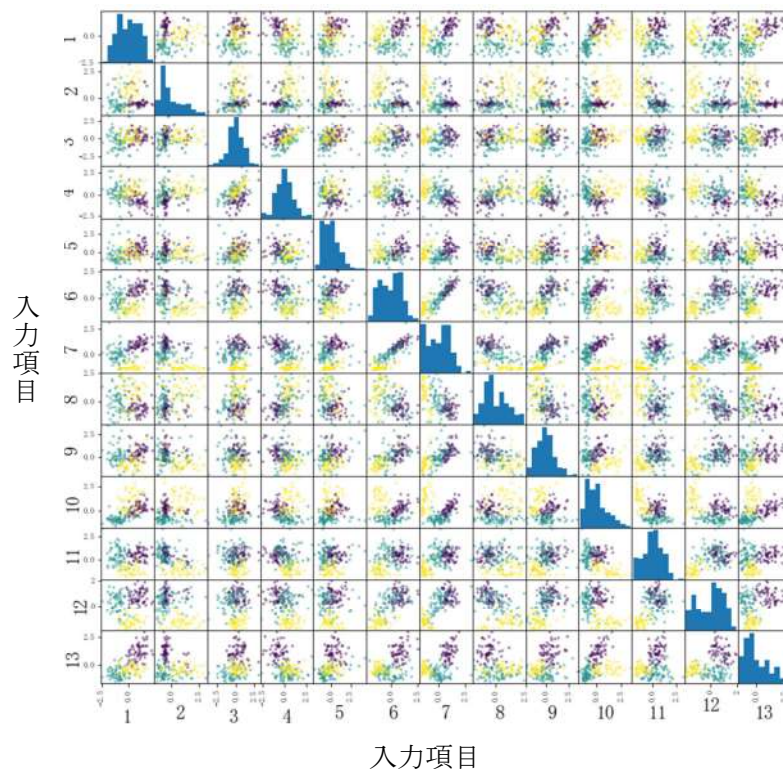


図1 wine データセットの各入力の散布図

● : ワイン1 ● : ワイン2 ● : ワイン3
 対角のグラフは各入力のヒストグラム

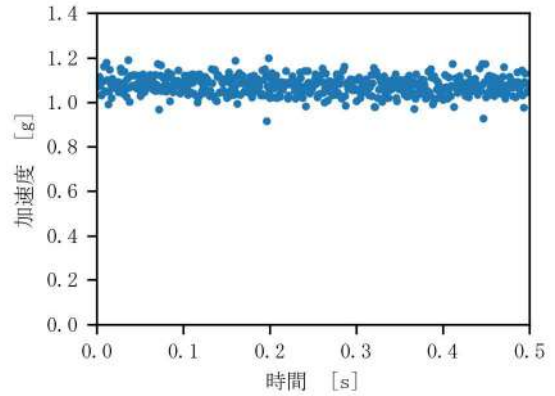
2.2 モータの稼働診断

工場で多用されているモータについて、MT法を用いて稼働診断するシステムを構築することを目標として、異常稼働状態を実験できる扇風機のモータを診断対象にしてシステムを構築した。このシステムでは、モータの回転により発生する振動データからモータの稼働状態の診断を行う。振動計測には、無線通信機能と慣性計測ユニットが搭載された小型 IoT デバイス「M5StickC Plus (M5Stack 製)」を使用した。計測した振動データはパソコンに送信し、モータの稼働状態を評価した。サンプリング周波数 1kHz で 0.5 秒間計測した振動データは、周波数データに変換後、周波数軸を 100Hz 間隔の 5 つの領域に分割し、その領域に描画されるグラフの重心位置の値を MT 法の入力とした⁴⁾ (図 2)。したがって、このシステムでは 10 入力 1 出力の数値モデルとなる。

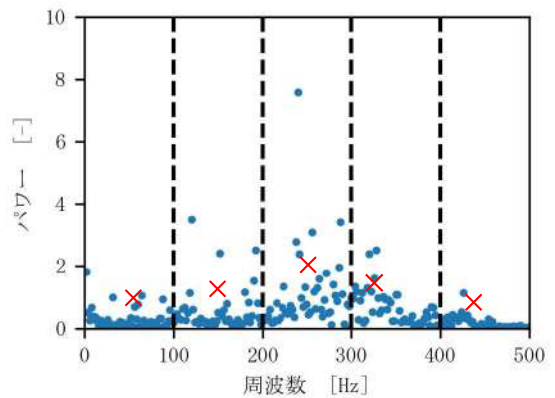
MT 法を機器の稼働状態の診断に用いると、以下の 3 つの特徴を利用できる。

- ・ 正常稼働している機器から取得できるデータだけで稼働診断モデルの学習が可能
- ・ 正常稼働か否かの判定閾値は、学習済みモデルに正常稼働時のデータを入力すると χ^2 分布となることを利用して容易に設定可能
- ・ 各入力の出力値への寄与度を解析できるため、正常稼働ではないと判定したとき、出力値を大きくしている入力項目の特定が可能

本研究では、図 3 のように扇風機の羽根の一枚におもり (0.1g) を 1 個から 3 個付加して稼働させたときの振動データ (W1、W2、W3) が、正常稼働時のデータ (W0) ではないと診断できるか検証した。そのとき、稼働判定に使用する閾値は、数値モデルの入力数と同じ 10 を自由度とする χ^2 分布で 5% を占める値を設定した。また、要因効果解析することで、稼働診断に寄与していない入力項目を検出し、その入力項目を削減することで、計算時間を削減しても同様な稼働診断ができることを検証した。



(1) 振動データ



(2) 周波数データ

図2 入力の前処理

×:各領域のグラフの重心位置



図3 振動計測風景

- : 小型 IoT デバイス
- : おもり付加位置

3 結果および考察

3.1 機械学習の判別性能の比較

図4にワインの種類毎にMT法による13入力1出力の数値モデルを学習させ、そのモデルに全ての種類のデータを入力したときの出力値の分布と、表

2に判定閾値を、表3に正解率を示す。表3に示したように、入力項目の相関関係を考慮したMT法はどの学習データを用いても正解率が最も高く、特にワイン2でその差は顕著であった。

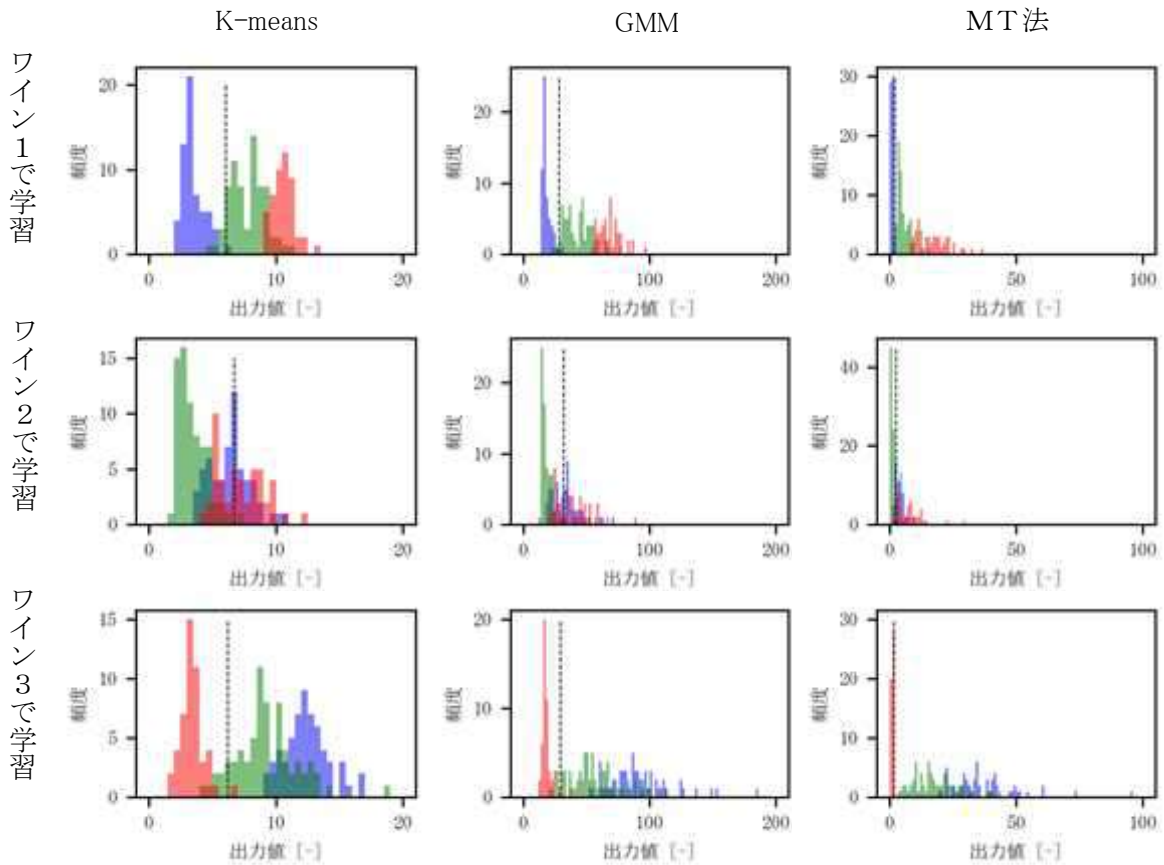


図4 各機械学習の出力分布

■ : ワイン1データの出力、 ■ : ワイン2データの出力、 ■ : ワイン3データの出力、 -- : 判定閾値

表2 判定閾値

機械学習	モデル学習に使用したデータ		
	ワイン1	ワイン2	ワイン3
K-means	6.071	6.760	6.248
GMM	28.577	32.154	29.670
MT法	2.006	2.499	1.953

表3 正解率

機械学習	モデル学習に使用したデータ		
	ワイン1	ワイン2	ワイン3
K-means	96.1	68.0	94.4
GMM	97.2	74.7	96.1
MT法	98.3	91.0	100.0

3.2 モータの稼働診断

ここで用いる判定閾値は、3.1 と異なり、MT法の特徴のひとつである学習済み数値モデルに正常稼働時のデータを入力すると入力項目数と同じ自由度の χ^2 分布になることを利用して設定した。今回、この χ^2 分布で赤い領域の5%を占める値 18.31 とした (図5)。

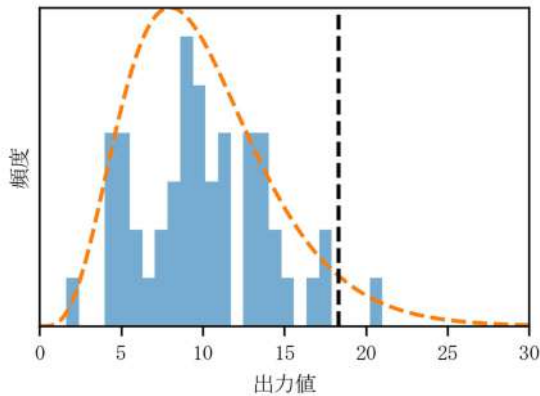


図5 判定閾値の設定

■ :W0(正常)
 - : χ^2 分布 - : 判定閾値

この判定閾値で稼働診断結果を図6に示す。おもりを付加したときの振動データの数値モデルの出力値が、おもりを付加していないときの振動データのみで設定した判定閾値を用い、すべて異常稼働であると診断できた。

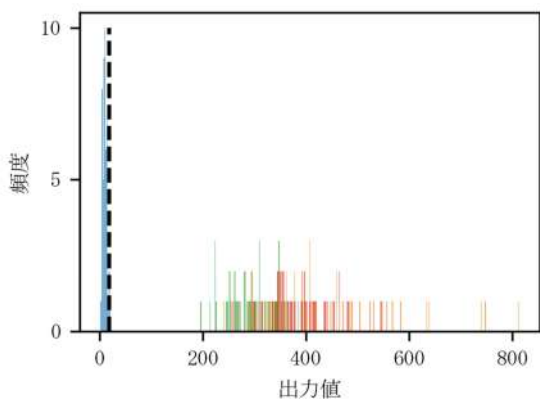


図6 稼働判定結果

■ :W0(正常) ■ :W1(異常)
 ■ :W2(異常) ■ :W3(異常)

2水準系直交表 L16⁵⁾ を用いて、要因効果解析した結果を各入力の寄与度として図7に示す。図中の寄与度が高い2つの赤い領域の入力項目1、2、5、6の4つで再度数値モデルの学習及び診断をした結果を図8に示す。この結果から、入力数を削減しても削減前と同様に稼働診断できることが確認できた。この要因効果解析は、数値モデルの出力値を大きくする入力項目を見つけることができるため、今回の事例と異なる稼働診断する機器の各所の温度、圧力、電力などを入力項目とした場合、異常稼働と診断したときに寄与度が大きな入力項目をセンシングしている箇所が不具合を発生していると推測できる。

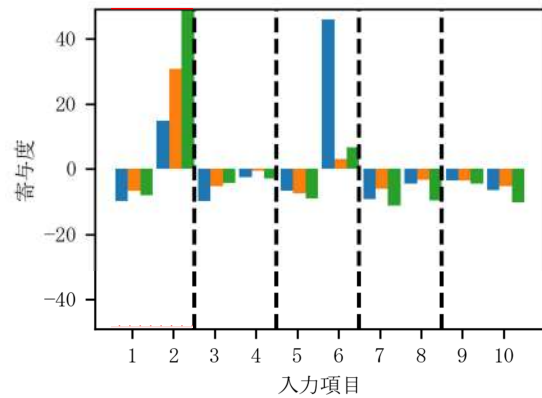


図7 異常稼働データの入力毎の寄与度

■ :W1 ■ :W2 ■ :W3

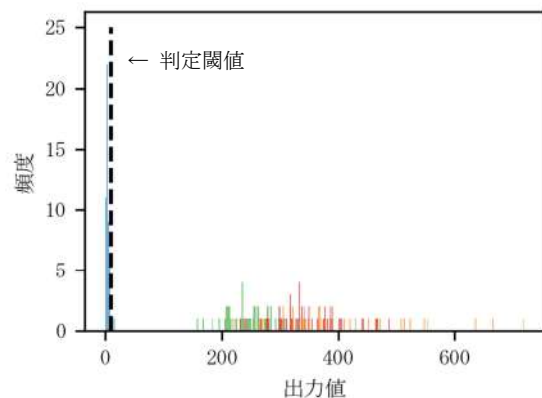


図8 入力項目削減した稼働判定結果

■ :W0(正常) ■ :W1(異常)
 ■ :W2(異常) ■ :W3(異常)

4 まとめ

長期稼働機器の稼働診断に適用したMT法が、K-means クラスタリングとGMMクラスタリングと比較して、高い判別能力があることを確認した。

また、モータの稼働診断にMT法を適用し、正常稼働時のデータのみで学習した数値モデルで、想定できる正常稼働時のデータ分布から設定した判定閾値を使って正常稼働か否かを高い確率で診断できることも確認できた。MT法では、2水準系直交表を用いて要因効果解析をすることで、数値モデルの入力項目を削減しても同様に稼働診断できるため、計算規模の縮小や不具合要因の解明にも有効である。

参考文献

- 1) 鈴木真人：「試して究める！品質工学 MT システム解析法入門」，初版（日刊工業新聞社，東京）（2012）.
- 2) 太田幸宏：IoT・機械学習を活用した機器の稼働状態評価（第1報）. 静岡県工業技術研究所研究報告，第16号，123-124（2023）.
- 3) 毛利拓也 他：「scikit-learn データ分析実践ハンドブック」，初版（秀和システム，東京）（2019）.
- 4) 鈴木真人：「MT法を用いたFFT重心監視」による信号監視システムの提案. 品質工学会誌，26（6），pp.16-22（2018）.
- 5) 鶴田明三：「これでわかった！超実践 品質工学」，初版（日本規格協会，東京）（2016）.

EMC 試験における伝導妨害波測定の前点検法

- 疑似電源回路網の故障の一例 -

機械電子科 山田浩文

Proposal of preoperation inspection methods for conducting disturbance measurements on electromagnetic compatibility test

- An example of a failure in an artificial mains network -

YAMADA Hirofumi

An example of a failure in an artificial mains network during the conducting of interference measurement for consumer appliances is explained. The failure described in this report may not be confirmed even in cases where inspection or calibration is performed by an external calibration organization. It is shown that this failure can be found by performing impedance measurements as a daily check using Nano VNA, which is a low-cost, handheld vector network analyzer.

Keywords: electromagnetic compatibility, conducted emission, impedance measurement, daily check, Nano VNA

民生機器用の伝導妨害波測定における疑似電源回路網について故障の一例を解説する。外部の校正機関で点検・校正を行ってもこの故障を確認できない場合がある。低価格で可搬型のベクトルネットワークアナライザである Nano VNA によるインピーダンス測定を始業前点検として行うことより、この故障を発見することができる。

キーワード：電磁環境両立性、伝導妨害波測定、インピーダンス測定、始業前点検、Nano VNA

1 はじめに

当センターでは、EMC 試験機器に異常がないかを確認するため始業前点検を実施している¹⁾。伝導妨害波測定では、始業前点検としてコムジェネレータ (Comb Generator 楕円信号発生器) からの信号を測定し、測定値が規定の値の範囲にあることを確認している。しかし、外部校正の際に、始業前点検で発

見できなかった疑似電源回路網 (Artificial Mains Network: AMN) の故障が指摘された。本報告では、この故障状況について調査し、その発生原因を推定する。また、外部校正でも発見できない場合があることを明らかにし、発見可能な始業前点検法を提案する。

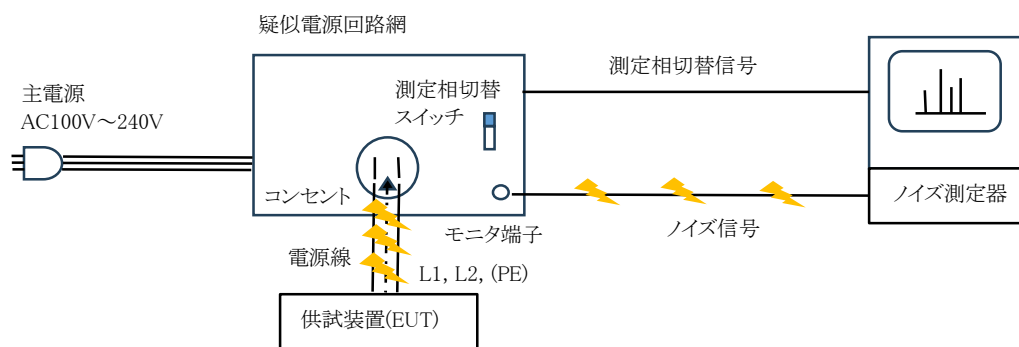


図1 伝導妨害波測定

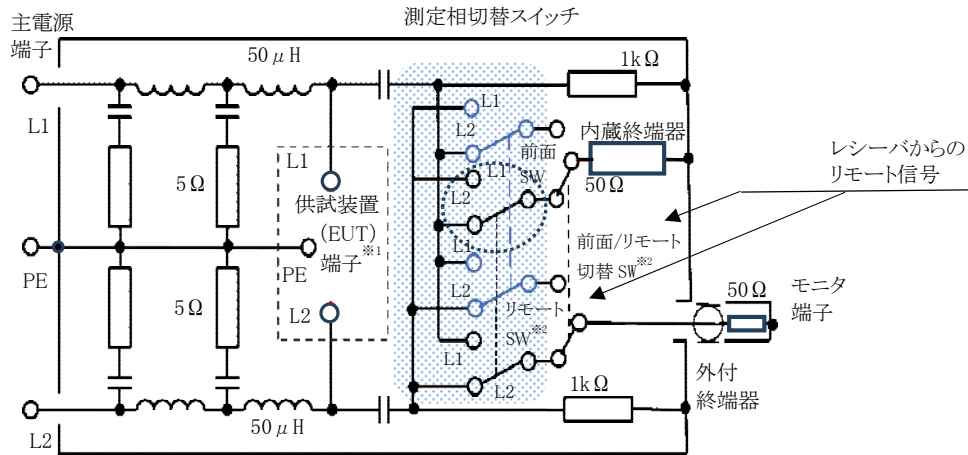


図2 50Ω/50μH+5Ω疑似電源回路網の概念図²⁾

※1 供試装置端子の L1-PE 間、L2-PE 間のインピーダンスを測定した。

※2 前面/リモート切替スイッチとリモートスイッチは、実際には、レーザーからのリモート信号により動作する。

2 方法

伝導妨害波測定とは、供試装置 (Equipment under test: EUT) が動作しているときに、その電源ケーブルに重畳する高周波の伝導ノイズを AMN を用いて測定し、規格などに規定する限度値を超えていないかを評価する試験である (図 1)。

2.1 疑似電源回路網 (AMN)

図 2 に国際規格²⁾を参考に作成した AMN の概念図を示す。故障した AMN は民生機器の測定に用いられるもので、使用周波数範囲が 9kHz~30MHz の 50Ω/50μH+5Ω の V 型 AMN と呼ばれるものである。この AMN は、測定相を AMN の前面パネルのスイッチ (SW) 又はレーザーからのリモート信号によって切り替えられるよう構成されている。また、装置の仕様として、レーザーからのリモート信号が入力されている場合、前面パネルの測定相切替 SW は無効となる。国際規格²⁾に記載の回路図を参考にしながら、この仕様と今回の故障の状態を考慮に入れて、前面/リモート切替 SW、前面 SW 及びリモート SW 等を修正したものを図 2 に示す (修正部は図中のハッチング部分)。また、AMN のモニター端子は、伝導妨害波の測定の際に 50Ω 測定系のレーザーを接続する端子であるが、インピーダンス測定の際には、ここに外付けの 50Ω 終端器を接続した。

AMN には、①主電源から侵入する高周波雑音を遮断する、②供試装置 (Equipment under test: EUT)

端子のインピーダンスを既知の周波数特性を持つ値にする、③EUT 端子と 50Ω 測定系のレーザーとを接続して EUT からのノイズを測定できるようにする、といった 3 つの機能がある³⁾。これらは、国際規格²⁾に記載された①アイソレーション、②インピーダンスや③電圧分割係数といった特性値により性能が評価される。故障の状態を確認するため、これらの値を国際規格²⁾に記載の方法に従って、ベクトルネットワークアナライザ (VNA) E5061B (Keysight Technologies 製) を用いて測定した。また、これらの値は、AMN の前面パネルの測定相切替スイッチ (SW) 及びレーザーからのリモート信号で測定相を切り替えた場合について測定した。

2.2 アイソレーションの測定方法

アイソレーションの測定方法は、国際規格²⁾の 4 章 8 節に記載されている。規格に規定される方法で主電源端子を VNA のポート 1 端子にモニター端子を VNA のポート 2 端子に接続し、ポート 1 端子とポート 2 端子間の減衰量を測定した。

2.3 インピーダンスの測定方法

インピーダンスの許容値は、国際規格²⁾の 4 章 3 節及び 4 章 4 節に記載されている。モニター端子を 50Ω 終端した状態で、EUT 端子を VNA のポート 1 端子に接続し、反射法により EUT 端子から見たインピーダンスを測定した。

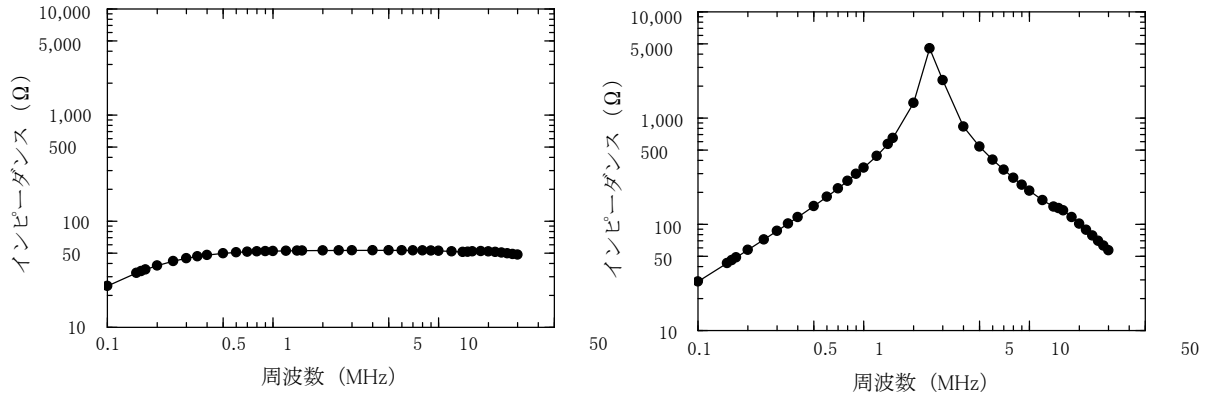


図3 リモート信号で切り替えたときの EUT L1-PE 間のインピーダンス
(左)L1相 正常 (右)L2相 故障

2.4 電圧分割係数の測定方法

電圧分割係数の測定方法は、国際規格²⁾のA章8節に記載されており、規定の方法でEUT端子とモニタ端子間の減衰量を測定した。測定方法についてはこの規格に詳細に記載されているのでここでは割愛するが、EUT端子は周波数に依存したインピーダンスを有するのでEUT端子の測定電圧レベルで正規化する必要があることに注意が必要である。

3 結果

測定の結果、アイソレーションや電圧分割係数には問題がなく、インピーダンス特性が不良であることが明らかになった。

図3にリモート信号により測定相を切り替えた場合のEUT端子のL1-PE間のインピーダンスを示す(図3(左)は測定相の切替をL1にした場合、図3(右)は測定相の切替をL2にした場合)。図3(左)のように0.5~30MHzの周波数で、ほぼ50Ωとなるのが正常である。一方、図3(右)のようにこの周波数範囲で50Ωを大きく逸脱してしまうのは故障である。また、表1にインピーダンス測定結果をまとめたものを示す。リモート信号で測定相を切り替えた場合に、測定相ではない側のEUT端子のインピーダンスが異常なふるまいを示し、故障であること

とがわかった。図2からわかるように、測定相のEUT端子及び測定相とは異なる側のEUT端子は、内部のコンデンサを介して、各々、外部のモニタ端子及び内部の50Ω終端器に接続される。このことから、おそらく図1中の点線で丸く囲ったSWが故障しているものと思われる。なお、通常、外部校正ではフロントパネルの測定相切替SWで測定相を切り替えた場合の測定相のインピーダンスのみを測定することが多いため、この故障は見つけられない可能性が高い。また、測定相のインピーダンスは正常で、かつ、電圧分割係数も正常であったことから前述の始業前点検では故障が発見できなかった。

4 考察

この章では、まず、今回の故障の原因について推定し、次に今回の故障を発見する2つの始業前点検法を提案する。

4.1 故障原因の推定

VNAの等価回路解析機能と回路シミュレータを用いて、3章のインピーダンスの値の異常の原因を推定した。図4は国際規格²⁾に記載のインピーダンスの等価回路図を参考にVNAの等価回路解析機能を用いて回路定数を推定し、それを元にシミュレータ・ソフトウェアLT spice[®]でインピーダンスを計算した結果を示す。故障時には50Ω終端器と直列に80pFのコンデンサが挿入されている状況と同じインピーダンス特性を示すことがわかった。これは測定相切替SWが接触不良により閉じておらず、80pFの容量をもったコンデンサとして振る舞っているものと考察される。

表1 インピーダンス測定結果

切替 測定	前面パネル		リモート信号	
	L1	L2	L1	L2
EUT L1-PE	正常	正常	正常	故障
EUT L2-PE	正常	正常	故障	正常

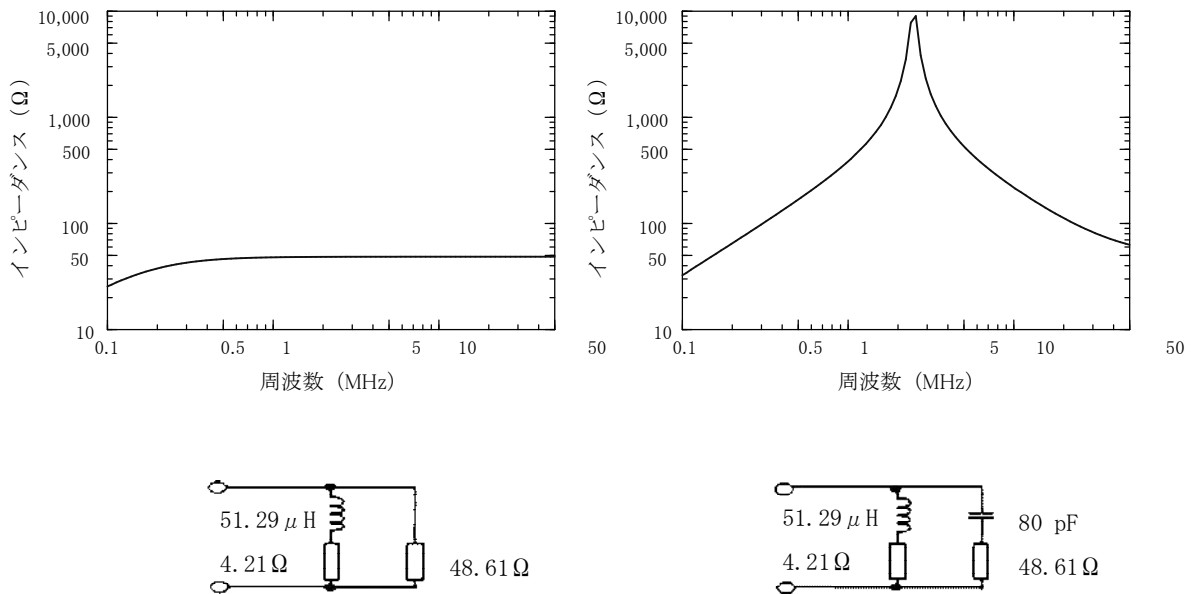


図4 回路シミュレータによるシミュレーション結果と回路

(左上)シミュレーション結果(正常時) (右上)シミュレーション結果(故障時)
 (左下)推定した回路(正常時) (右下)推定した回路(故障時)

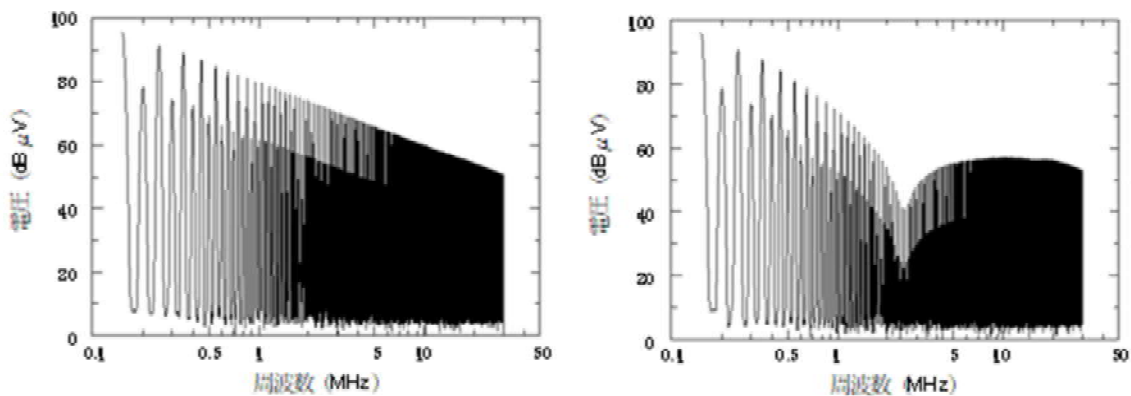


図5 EUT 端子の L1-L2 間にコムジェネレータ信号を入力したときのモニタ端子電圧

(左)前面パネル SW により測定相を切り替えた場合 (右)リモート信号により測定相を切り替えた場

4.2 コムジェネレータによる始業前点検法の改良

当センターでは、始業前点検としてコムジェネレータ YRS02 (York EMC services limited 製) と AMN アダプタ LS03 (York EMC services limited 製) を組み合わせて使用している。この AMN アダプタは、コムジェネレータからの信号を AMN の EUT 端子の L1-PE 間に入力する構造となっている。しかしながら、前章に述べた理由からこの構造では今回の故障を発見することができなかった。そこで、この AMN アダプタを用いず、コムジェネレータからの信号を AMN の EUT 端子の L1-L2 間に入力する始業前点検法を考案した。このような信号入力法にすれば、

コムジェネレータからの信号を EUT 端子の L1-PE 間と L2-PE 間のインピーダンスで分圧した電圧をモニタ端子で測定することになる。この方法を用いれば、今回の故障のようにこれらのインピーダンスのバランスがくずれる場合、故障を検出できることが予想される。このことを実験的に確認する作業を行った。

図5は、EUT 端子の L1-L2 間にコムジェネレータ信号を入力したときのモニタ端子電圧である。図5(左)は前面パネル SW により測定相を切り替えた場合、図5(右)はリモート信号により測定相を切り替えた場合である。測定相として L1 と L2 のどちらを

選択した場合でも同様の波形が得られた。図5(左)では電圧のピークが周波数に対しほぼ直線的に減少した(正常)。一方、図5(右)では、3MHz付近で電圧のピークにくぼみが見られた(異常)。これは、この周波数において、測定相とは異なるEUT端子のインピーダンスが測定相のEUT端子のインピーダンスに比べて大きくなるために測定相の電圧が相対的に下がったためと考えられる。

4.3 Nano VNAによる始業前点検法

近年、低価格で可搬型のベクトルネットワークアナライザであるNano VNA⁴⁾が市販されており、これを用いれば、テスターで測定するように簡単にインピーダンス測定が行える。当センターでは、従来のコムジェネレータによる始業前点検法に加えて、このNano VNAによるインピーダンス測定を始業前点検に取り入れた。この点検法について以下に述べる。測定条件として、周波数範囲を50kHz~30MHzとし、スミスチャート、電圧定在波比を表示させるように設定した。また、事前に校正キット85032F

(Keysight Technologies製)にて1ポート校正(オープン、ショート、ロード校正)を行ない、電源投入後、直ぐに呼び出されるように条件をセーブした。このように設定すると、測定に要する時間は1分もかからない。写真1に始業前点検としてNano VNAを用いてインピーダンス測定を行った結果を示す。始業前点検では主にスミスチャートに着目している。正常な場合には、写真1(左)内の矢印に示すように、円の左端より、中心に向かって半円を描くように表示される。一方、今回の故障では、円の

中心を通らずに円の外側付近を通る軌跡を描いた(写真1(右))。スミスチャートの形におかしなところがある場合には、VNA E5061B(Keysight Technologies製)にて再測定を行なっている。当センターでは、民生機器の伝導妨害波測定その他、車載機器のEMC試験のうち疑似回路網を用いるものについても、このNano VNAによるインピーダンス測定を始業前点検として実施している。

5 まとめ

民生機器用の伝導妨害波測定における疑似電源回路網の故障についてその一例を解説した。今回の故障は、リモート信号で測定相を切り替えたときのみ発生し、かつ、測定相とは異なる相のインピーダンスが不良となる。このことから、疑似電源回路網本体の前面パネルで測定相を切り替えたときみの校正の場合や、測定相のみの校正の場合には、外部の校正機関で点検・校正を行ってもこの故障を確認できない。今回紹介したNano VNAによるインピーダンス測定を始業前点検として行うことより、この故障を発見することができる。この始業前点検法は、疑似電源回路網や疑似回路網にかぎらず、アンテナや結合・減結合回路網など他の機器にも応用できる。

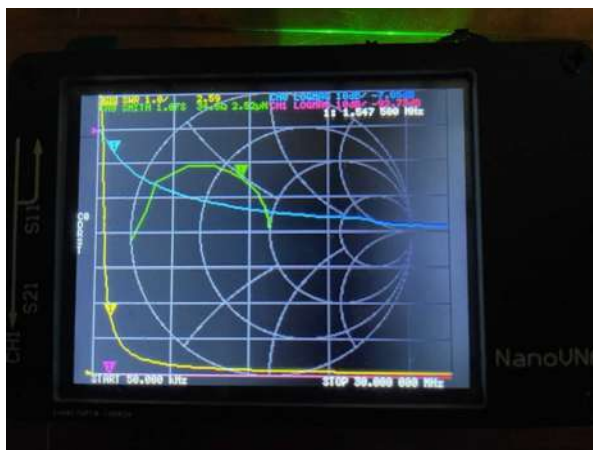


写真1 Nano VNAによる測定結果

(左)正常 (右)故障

参考文献

- 1) 山田浩文 他：EMC 試験機器の日常点検法の確立による信頼性向上. 静岡県工業技術研究所研究報告, 13, 91-94 (2020).
- 2) CISPR16-1-2:2017 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Coupling devices for conducted disturbance measurements
- 3) Morgan D.: Measurement by direct connection, Measurement devices for conducted EMI, In “ A handbook for EMC testing and measurement”, The institution of engineering and technology, pp.48-61 (1994).
- 4) 知念幸勇：とにかく安くなっているポケット型 Nano VNA の世界. トランジスタ技術, 60 (12), 55-60 (2023).

EV 向けコネクタ・スイッチの端子・接点用めっきの耐久性評価方法

材料科 吉岡正行* 高木 誠 木野浩成**

A method for evaluate the durability of plating on connector and switch components for electrical vehicles

YOSHIOKA Masayuki, TAKAGI Makoto and KINO Hironari

We investigated a method for evaluating the durability of plating applied to terminals and contacts of electrical connectors and switch parts. A testing machine was fabricated that measures the contact resistance of the contacts while putting a sliding load on them. The durability of ordinary tin plating, tin plating with a new brightener, ordinary silver plating and silver plating with a new curative agent were evaluated using the testing machine. As a result, it was found that the tin plating with a brightener had the highest wear resistance and its contact resistance value was also stable.

Keywords: Connector, Switch Component, Tin-plating, Silver-plating, contact resistance, Durability Evaluate

EV 等の輸送用機器用のコネクタやスイッチ部品に用いられる端子・接点でのめっきの耐久性評価方法を検討した。モーターの回転運動をリンク機構によって往復運動に変換して接点試料に摺動負荷を与えながら、接点の接触抵抗の測定を行うことが可能な試験機を作製した。その試験機を用いて通常のスズめっき試料、新規の光沢剤を添加したスズめっき試料、通常のスズめっき試料、新規の硬化剤を添加した銀めっき試料の耐久性評価を行ったところ、光沢剤添加品を添加したスズめっき試料の摩耗が最も少なく、また接触抵抗値も安定するという結果が得られた。

キーワード：コネクタ、スイッチ、Sn めっき、Ag めっき、接触抵抗、耐久性評価

1 はじめに

輸送用機器のコネクタ・スイッチ部品の端子・接点の多くには Sn(スズ)、Ag(銀)等のめっきが施されている。世界的な EV 化の流れを受け、今後はそれらのめっきの需要の増加と性能の向上がより一層求められる。

静岡県西部地域のめっき企業は、従来よりも耐久性に優れたコネクタ・スイッチ部品用めっきの開発及び顧客・市場へそれらを PR できる体制作りを要望している。

スイッチ部品メーカーが最終製品のコネクタ・スイッチに対して通常行っている実環境を模した状況下での耐久性評価試験は、一つのサンプルの評価に長期間(5日~10日等)を要することが多い。

そのため、コネクタ・スイッチの端子・接点に付加されるめっきの基本性能とりわけ耐久性の評価について、めっき企業自身が開発段階でシンプルな形

状のテストピースで試験できる環境を構築する意義は大きい。

しかし、めっき企業や当センターにおける実施可能なめっき試料の性能評価方法は、膜厚測定、硬さ測定、耐食性、テスタによる抵抗値の簡易測定、そして実際・現実の輸送機器部品が受ける負荷とは大きく異なるモードの負荷を与える摩耗試験といった項目に限られるのが現状である。

そこで本研究では、コネクタ・スイッチ部品の端子・接点用 Sn、Ag めっきの耐久性(摩耗・酸化等の状態変化や、それに伴う電気抵抗値の変動等)を評価解析できる試験方法の構築・確立を目的として、試験機を製作し、それを用いて耐久性に優れた Sn、Ag めっきを試作したので報告する。

* 現 工業技術研究所 金属材料科、** 現 繊維高分子材料科

2 方法

2.1 往復摺動負荷試験機の製作

FDM(熱溶融樹脂積層法)方式の樹脂3Dプリンタにより作製したABS樹脂製ジグとモーターをリンク機構で接続し、モーターの回転運動を直線(往復)運動に変換することでめっき試料に摺動負荷を与えることができる試験機を製作した(図1)。

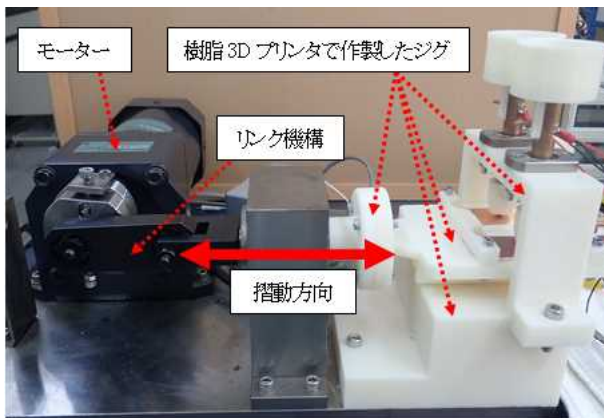


図1 試作した往復摺動負荷試験機の外観①

リンク機構によってモーターの回転運動を直線(往復)運動に変換することで摺動負荷を与えられる試験機

2.2 接触抵抗の測定

この樹脂製ジグにCu(銅)製の棒状電極とCu板を取り付け(両者を電極と見立て)、車載システムの規格電圧の一種である12Vの直流電圧を12Ωのセメント抵抗を介して印加し、約1Aの電流が流れる回路を組んだ(図3)。この電極間の電圧(V)の実測値と、回路全体の電流値(A)から算出した抵抗値($\Omega = V/A$)を、本実験における接触抵抗値とした(図2)。これらの電気信号はデータロガーに記録した。

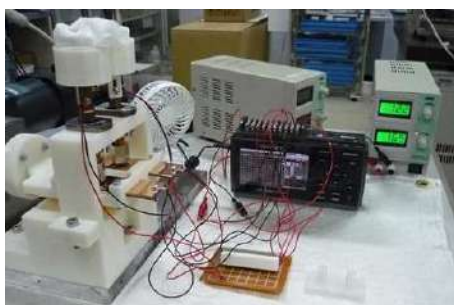


図2 試作した往復摺動負荷試験機の外観②

車載システムの規格である12Vの直流電圧を印加し、接点間の接触抵抗の値をデータロガーに記録

2.3 試料

摺動及び接触部分の接点部品について、各種めっき処理を施した試料を上述のCu製棒状電極の先端に取り付けるに当たって、実際の端子・接点は球面や曲面を有する形状が多いことを考慮し、直径8mmのCu製の球状部品(Cu球)を基材とし、これにめっき処理を施した試料を取り付けることとした(図3「めっきCu球」)。

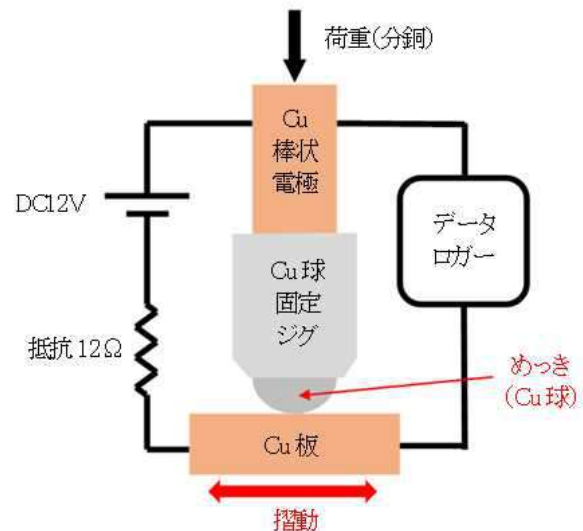


図3 接触抵抗測定のための構成部品のイメージ

車載規格電圧の一種である12Vの直流電圧を印加し(12Ωの抵抗)、約1Aの電流が流れるようにした回路

このCu球へのめっき処理は協力機関であるめっき企業に依頼した。耐久性の高いめっきの試作については、Sn、Agのめっき液の温度、電圧、電流密度等のめっき条件はほぼ確立されており変更は難しいとの考えから、新規添加剤の効果を調べることにした。

Snめっきについては、平滑性の向上による低摩擦を期待し新規の光沢剤を、またAgめっき試料については、近年市場に出回り始めた硬化剤に着目し、硬さの向上による耐摩耗性の向上に期待し、新規の硬化剤を採用した。表1に今回作製した試料の情報を示す。

表1 実験に用いためっき試料の情報

協力機関であるめっき企業が作製した球状試料用保持ジグを用いてCu球にめっき処理を行った。

基材	Cu球	ϕ :8mm
Sn めっき	通常品(半光沢)	膜厚:3.2~3.5 μ m
	光沢剤添加品①	添加量:10mL/L
	光沢剤添加品②	添加量:30mL/L
Ag めっき	通常品	膜厚:3.2~3.5 μ m
	硬化剤添加品①	添加量:10mL/L
	硬化剤添加品②	添加量:30mL/L

2.4 往復摺動負荷試験条件

輸送用機器のコネクタ・スイッチ部品の端子・接点を受ける摺動負荷モードには、大きく分けて2種類ある。

一つは、スライドスイッチのような3~5mm程度のストロークの一般的な往復摺動であり、もう一つは、コネクタのように端子・接点同士が接触した状態で輸送機器が移動・走行する際に生じる振動による、振幅の小さな繰り返しのすべり運動である「微摺動(びしゅうどう)」と呼ばれる摺動である。この微摺動が長時間生じた際に生じる摩耗をフレッシング摩耗と言う¹⁾。

本研究では、輸送用機器のコネクタの端子・接点に用いられることが多いSnめっき試料には微摺動負荷を、またスライドスイッチの端子・接点に用いられることが多いAgめっき試料には往復摺動負荷を与えた。

表2に、摺動負荷試験条件を示す。

2.5 耐久性の評価解析方法

この試験を耐摩耗性試験とみた場合、一般的な評価方法としては摺動痕の表面粗さ・摩耗幅の測定や、蛍光X線膜厚測定分析装置によるめっき膜厚の変化(減少)等で評価することが多い。

しかし本研究は端子・接点を想定した試験のため摺動痕が小さく、上述の方法での評価は難しいこと、また相手材にも基材のCu球と同じCu(板)を使用していることから、どちらが摩耗するかによって正確な膜厚が計れないという問題がある。

そこで今回は、摺動痕についてEPMA(電子線マイクロアナライザー)による元素マッピング分析による評価解析を行った。この方法であれば二次電子

表2 摺動負荷試験の条件

コネクタ...Snめっき品が多い→微摺動負荷試験
スイッチ...Agめっき品が多い→往復摺動負荷試験

Sn めっき	【微摺動負荷試験】 <ul style="list-style-type: none"> ・モーター回転数(摺動回数) 100rpm(100回/分) ・ストローク(≒摺動痕サイズ) 500~800μm(等方的な形態) ・負荷加重 200g(分銅)
Ag めっき	【往復摺動負荷試験】 <ul style="list-style-type: none"> ・モーター回転数(摺動回数) 60rpm(60回/分) ・ストローク(摺動距離) 約4mm ・負荷加重 200g(分銅) ・その他 接点に接点用グリスを少量塗布した

(SE)像の観察で摺動痕の形態や様子を知らることができると同時に、試料由来の元素(Cu, Sn, Ag等)の正確な分布や状態を知ることができる。なお、1,000倍を超える高倍率観察にはSEM(走査電子顕微鏡)を用いた。

【使用機器】

- ・EPMA(電子線マイクロアナライザー) EPMA-1702 (株島津製作所製)
- ・SEM(電界放射型走査電子顕微鏡) JSM-7610FPlus (日本電子(株)製)
- ・マイクロビッカース硬度計 MVK-E (株アカシ製)

3 結果と考察

3.1 Snめっきの耐久性に与える光沢剤の影響

図4に5分間、図5には10分間の微摺動負荷を与えた時の接触抵抗値の時間変化を示す。

図6、図7には、それぞれ5分間、10分間の微摺動負荷を与えた後の接点部の摺動痕のEPMAによる元素マッピング分析結果を示す。

協力機関であるスイッチ部品メーカーの見解として、「端子・接点において、数十m Ω ~100m Ω 以下という接触抵抗の値は十分に低い値と言えないが、実用上は問題はない。それよりも本試験機に限らず、そもそも動的な接触で接触抵抗の絶対値を正確に測定することは難しい」とのことから、今回は抵抗値そのものではなく、

接触抵抗の変動やバラツキの程度に着目することとした。

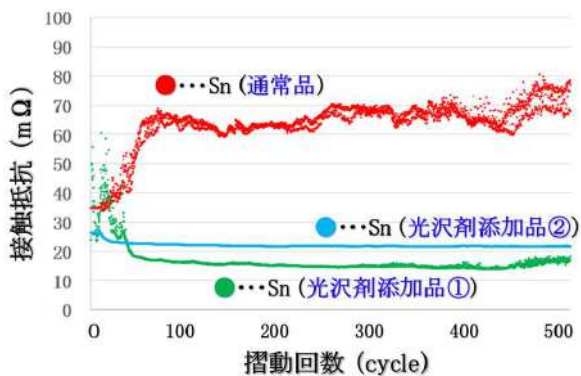


図4 Snめっき微摺動負荷5分間の接触抵抗

通常品の値は変動・バラツキともに大きいのに対し、光沢剤添加品の値はどちらも有意・顕著に小さい。

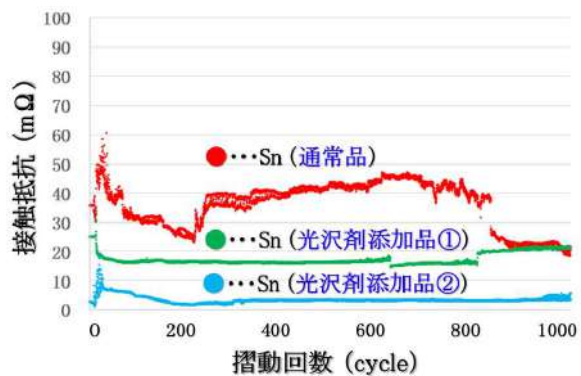


図5 Snめっき微摺動負荷10分間の接触抵抗

通常品の値は変動・バラツキともに大きいのに対し、光沢剤添加品の値はどちらも有意・顕著に小さい。

図4、図5どちらにおいても、Snめっき通常品の接触抵抗値は変動が大きく、光沢剤添加品①及び②は、そのどちらも小さく安定しているという結果であった。なお、光沢剤の添加量（濃度）が異なる①（10mL/L）と②（30mL/L）には有意・顕著な差異は認められなかった。

PMAによる元素マッピングデータでは、図6、図7どちらにおいても、Snめっき通常品は微摺動摩擦によって基材であるCu球のCuの露出が認められた。それに対し光沢剤添加品①及び②ではCu球基材のCuの露出は認められなかった（相手材であるCu板由来のCuの若干の付着は認められた）。この結果は接触抵抗値の挙動・結果と対応していると考えられる。

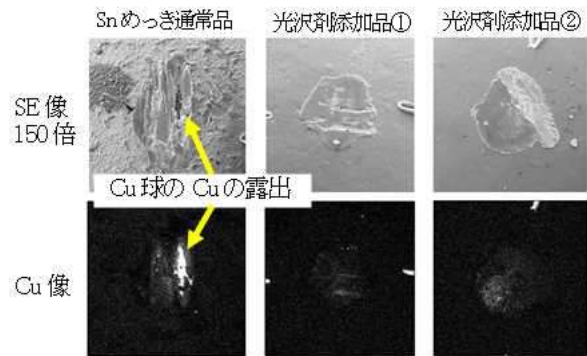


図6 摺動痕（5分後）のマッピング分析結果

通常品は基材のCuの露出が認められるのに対し、光沢剤添加品①及び②はCuの露出は明瞭でない。

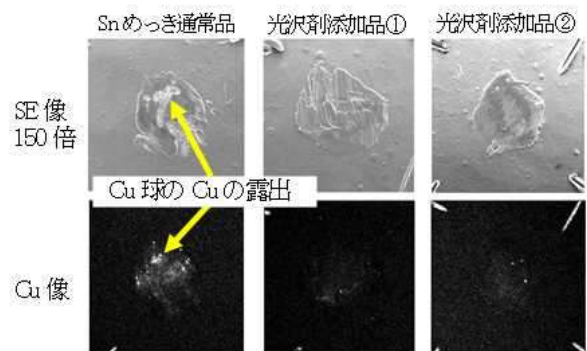


図7 摺動痕（10分後）のマッピング分析結果

通常品は基材のCuの露出が認められるのに対し、光沢剤添加品①及び②はCuの露出は明瞭でない。

光沢剤の添加が接触抵抗の安定とCu基材の露出を抑えることになった理由を調べるため、Snめっき表面のSEM（走査電子顕微鏡）観察を行った（図8～10）。

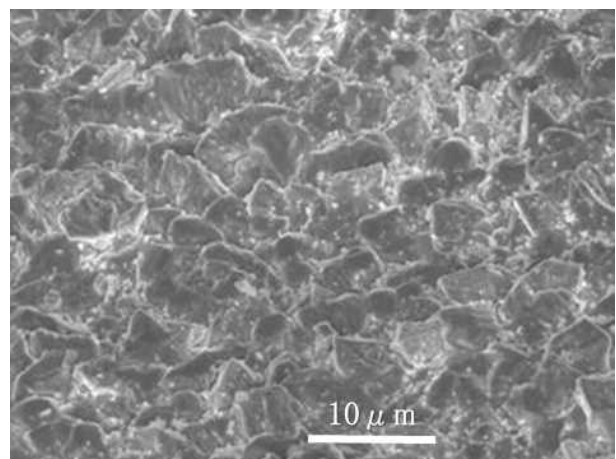


図8 Snめっき通常品の表面の電子顕微鏡像

電子銃加速電圧：10kV WD（作動距離）：15.7mm
観察・撮影倍率：2,500倍

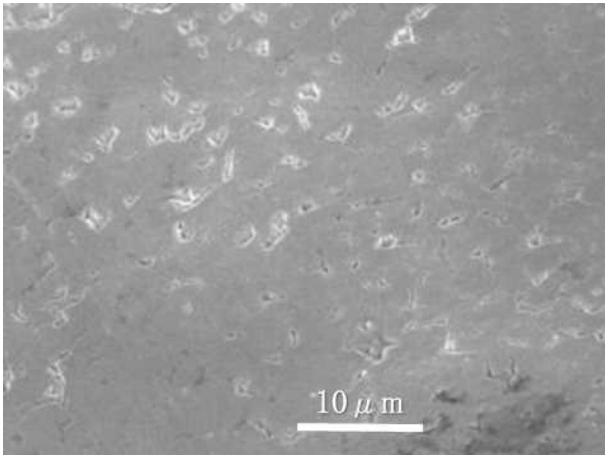


図9 光沢剤添加品①の表面の電子顕微鏡像

電子銃加速電圧：10kV WD（作動距離）：15.7mm
倍率：2,500倍

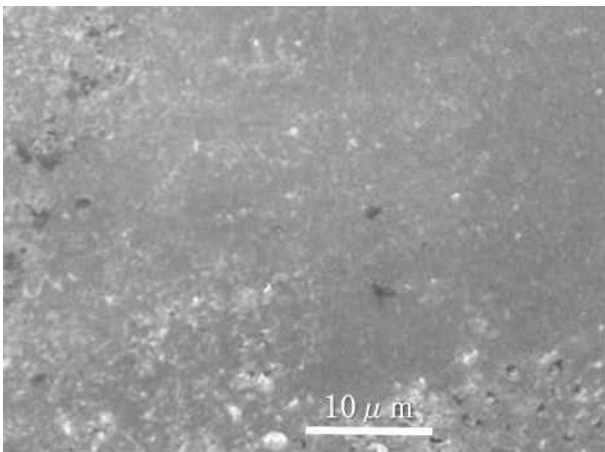


図10 光沢剤添加品②の表面の電子顕微鏡像

電子銃加速電圧：10kV WD（作動距離）：15.7mm
倍率：2,500倍

光沢剤の添加により、明らかにめっき表面の平滑性が改善されていることから、このことが接触抵抗の安定とCu基材の露出を抑えることになった理由と考えられる。

協力機関であるめっき企業は、経験上、端子・接点用Snめっきには半光沢めっきを採用してきた。それは、光沢剤が有機系化合物であることから、添加によって接触抵抗が高くなってしまおうという懸念・認識があったことが理由であった。

本実験結果から、今回採用した光沢剤に関しては、添加によって接触抵抗が顕著に高くなる様子は見受けられず、微摺動負荷に対する耐久性が向上することが示唆された。

なお、光沢剤添加①と②の結果に差異が無かったのは、表面平滑性に有意な差異が無かったためと考えられる。

3.2 Agめっきの耐久性に与える硬化剤の影響

図11に5分間の往復摺動負荷時を与えた時の接触抵抗値の時間変化を示す。図12にその5分間の往復動負荷を与えた後の接点部の摺動痕のEPMAによる元素マッピング分析結果を示す。

図11ではSnめっきとは異なり、接触抵抗値の変動に大きな差異は無く、値の振れ・バラツキには硬化剤添加品の方が大きいという結果であった。

図12で、Snめっきの場合と異なり、SEM像でCu基材の露出は観察されなかったが、有意なCuの存在が認められることから、これは相手材であるCu板のCuの付着と考えられる。

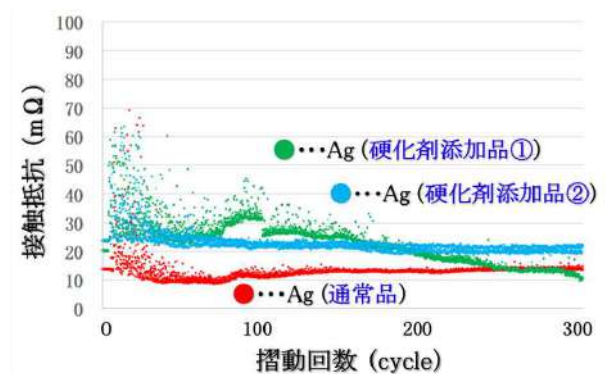


図11 Agめっき往復摺動負荷5分間の接触抵抗

値の変動については大きな差異は認められないが、データのバラツキは硬化剤添加品の方が若干大きい。

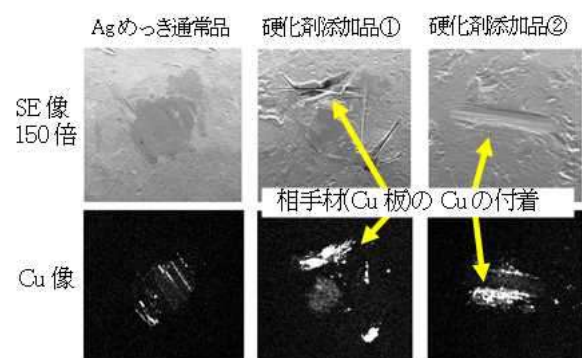


図12 摺動痕（5分後）のマッピング分析結果

通常品に対し、硬化剤添加品①及び②では相手材であるCu板由来と思われるCuの付着が認められる。

表3 めっき試料のマイクロビッカース硬さ

めっきの膜厚が薄いため、基材であるCuの硬さの影響を含んだ値であるが、相対的な比較は可能

試験力：0.01N(10gf) 保持時間：10秒		
基材	Cu球	152 HV0.01
Sn めっき	通常品（半光沢）	18 HV0.01
	光沢剤添加品①	22 HV0.01
	光沢剤添加品②	25 HV0.01
Ag めっき	通常品	90 HV0.01
	硬化剤添加品①	119 HV0.01
	硬化剤添加品②	149 HV0.01

この原因を考察するため、作製しためっき試料のマイクロビッカース硬さを測定した結果を表3示す。表3の結果は、めっき試料は膜厚が薄い（約3.2～3.5μm）ことから、基材であるCuの硬さの影響を含んでいる。しかしAgめっきに関しては、試料間の相対的な比較としても、硬化剤の添加によって有意・顕著に硬さが増している。

このことから、硬化剤の添加によってAgめっき自身の耐摩耗性は向上したものの、それ以上に相手材であるCu板の摩耗を促進してしまったことが相手材であるCu板のCuの付着の原因と考えられる。

5 まとめ

コネクタ・スイッチ部品の端子・接点用Sn、Agめっきの耐久性を評価解析できる試験方法の構築・確立を目的とし、試験機の製作を行った。また、それを用いて耐久性に優れたSn、Agめっきを試作し、評価した。

その結果、コネクタ部品を想定した微摺動負荷試験を行ったSnめっきサンプルについては、通常のSnめっきに対して光沢剤を添加したSnめっきの方が、摩耗による基材(Cu球)のCuの露出が抑えられる傾向があるという結果が得られた。

一方、スライドスイッチを想定したスライド摺動負荷試験を行ったAgめっきサンプルについては、通常のAgめっきに対して硬化剤を添加して有意・顕著に硬度が高くなったことで、相手材であるCu板の摩耗を促進させてしまうという結果となった。しかし今後、硬化のメリットを生かせる場面も考えられることから、硬さや膜厚を適切に制御した条件での活用も検討していく。

接触抵抗値をモニタしながら摺動負荷を与えられる試験機は無く、また摺動痕のEPMA分析が行えるのは当センターの強みであることから、今後、協力機関をはじめ、同様なめっき試料の性能評価や新製品開発の要望に対して、本評価方法を活用していく。

謝辞

本研究の実施にあたり、協力機関として多大なる御協力を賜りました有限会社鷺津メッキ工業所、朝日電装株式会社の御関係者の方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 水戸瀬賢悟 他:通電接触部のSnめっきフレッシング摩耗. 表面技術, Vol.72 (10), 553-558 (2021).

2つの固定アンテナを用いた電波到来方向の簡易的推定

機械電子科 上野貴康* 山田浩文

Simplified estimation of the direction of radio-wave arrival using two fixed antennas

UENO Takayasu and YAMADA Hirofumi

Keywords: direction of radio-wave arrival, antenna

固定した2つのアンテナによる電波到来方向の簡易的推定技術について検討した。小型で安価な2つの八木・宇田アンテナを角度160°で設置することにより、電波を受信した際に2つのアンテナの受信レベル差が最大となり、受信レベル差から電波到来方向を誤差約20°で推定できる可能性を確認できた。

キーワード：電波到来方向推定、アンテナ

1 はじめに

電波の到来方向推定技術は様々な分野で利用されている。重要施設侵入等トラブルが増加している移動体（ドローン等）を検知するシステムなどは、この技術を利用しているが、大規模で高額になるという課題がある。電波到来方向推定技術は、推定範囲の限定や構成の簡素化により、およそその到来方向を推定するシステムとすることで、小規模・低コストでの作製が見込める。そこで、本研究では固定した2つのアンテナによる電波到来方向の簡易的推定技術について検討した。

データが、2つのアンテナ間の角度でどのように変化するかを調べるため、表1の測定環境及び表2の測定機器を用いて電波の受信レベル測定を行った。

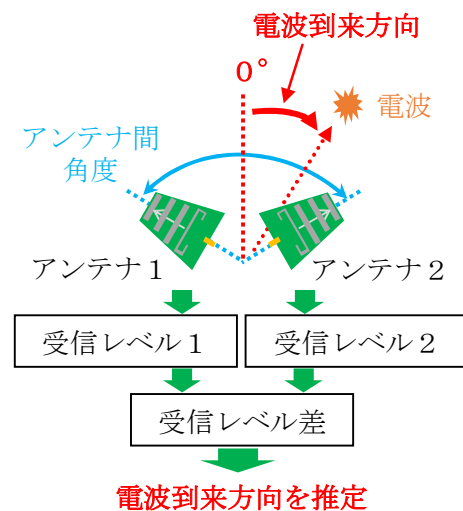


図1 電波到来方向推定の仕組み

2 方法

2.1 アンテナ利得の測定

4種類のアンテナを対象に、本研究に適しているかを検討した。検討したアンテナは、市販の小型で安価な「TEM」、「対数周期」、「八木・宇田」、そして計測機器用である「Double Ridged Guide Horn (ホーン) 3115 (ETS-Lindgren 社製)」の4種類であり、各々のアンテナ利得の周波数特性を測定した。測定は、SAE ARP958 Rev. D 規格に従い（ただし、測定時の高さは3 mではなく1 m）、ベクトル・ネットワーク・アナライザ E5061B (KEYSIGHT 社製) を用いて行った。

2.2 電波到来方向推定方法

電波到来方向推定の仕組みを図1に示す。2つのアンテナを設置し、その受信レベル差から電波到来方向を推定する仕組みである。アンテナで受信する

表1 測定環境

試験室	電波暗室
電波到来方向	アンテナ正面を0°として -90° ~ 90°
2つのアンテナ間 角度	40° ~ 160° (20° ステップ)
受信レベル測定器	EMI テストレシーバー 2台
電波発信器	コムジェネレータ

* 現 技術支援担当

表2 測定機器

機器名称	型番	製造会社
EMI テストレシーバー	ESW	Rohde & Schwarz
EMI テストレシーバー	ESL	Rohde & Schwarz
コムジェネレータ	YRS03	York EMC Service

3 結果

3.1 アンテナ利得の測定

4つのアンテナの利得を図2に示す。「TEM」や「対数周期」は、今回対象としている2.4~2.5GHzにおいて周波数毎に出力される値の変化が大きかったが、「八木・宇田」や「ホーン」はこの変化が小さく、利用するアンテナとして適していた。「ホーン」は計測機器用アンテナであり、アンテナサイズが大きく高額であるため、今回のシステムに適用するアンテナは「八木・宇田」を選定した。

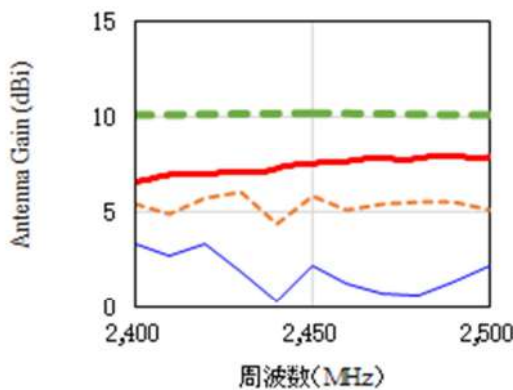


図2 4つのアンテナの利得



3.2 電波到来方向推定方法

「八木・宇田」アンテナを用い、アンテナ間角度を40° から160° まで20° 毎に変化させた条件で、電波到来方向を模した電波源の方向を変化させ、2つのアンテナの受信レベル差を測定した(図3)。その結果、アンテナ間角度が広い程、推定可能な到来方向範囲が広く、受信レベル差が大きくなった。今回の測定条件では、アンテナ間角度を160° とすることで、2つのアンテナの受信レベル差が最大となった。

アンテナ間角度160° の2つのアンテナの受信レベル差及び近似直線を図4に示す。この近似直線は2つのアンテナの受信レベル差と標準偏差(σ)が±9.69°、2σで±19.4°の関係となった。目標の±15°には至らなかったが、2つのアンテナの受信レベル差から電波到来方向を誤差約20°で推定できる可能性が確認できた。

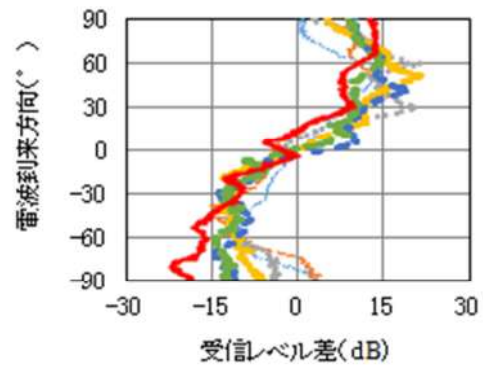


図3 2つのアンテナの受信レベル差

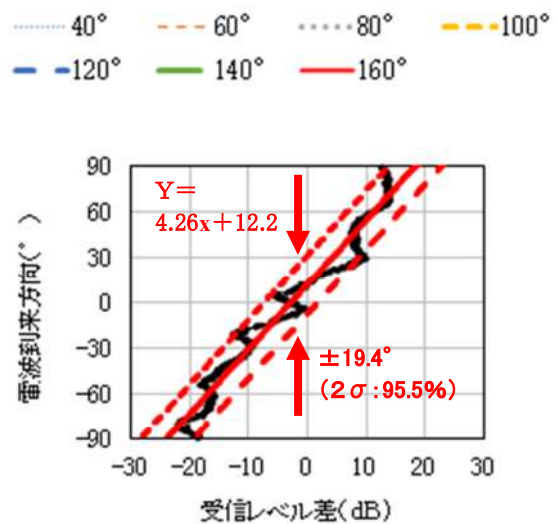


図4 アンテナ間角度160°での受信レベル差とこの近似直線



4 まとめ

小型で安価な電波到来方向推定技術の検討として、2つのアンテナの受信レベル差から電波到来方向を推定する試みを行った。市販の八木・宇田アンテナ2つを160°の角度で設置することにより、約20°の誤差で電波到来方向を推定できる可能性が確認された。

アルミニウム合金の積層造形における造形物の形状評価

機械電子科 大澤洋文
 材料科 田光伸也 植松俊明 望月智文 木野浩成*
 静岡大学工学部 早川邦夫 久保田蓮太

Evaluation of shape accuracy for the laser powder bed fusion additive manufacturing of aluminum alloy

OOSAWA Hirofumi, TAKO Shinya, UEMATSU Toshiaki, MOCHIZUKI Tomofumi, KINO Hironari,
 HAYAKAWA Kunio and KUBOTA Renta

Keywords: Additive manufacturing, Laser powder bed fusion, Aluminum alloy, Shape accuracy

レーザ粉末床溶融結合方式の金属 3D プリンタを用いて、内径が 5mm、10mm、20mm、40mm、厚さが 1mm、5mm、長さ 10mm の円筒と直方体で構成される複数の積層造形物をアルミニウム合金粉末 AlSi10Mg を材料として作製し、円筒外径の円弧形状を評価した。造形物は、造形後の冷却過程でのサポートの収縮、造形時の金属の溶融及び凝固により発生する残留応力で形状が変化した。その結果として、円筒の外径が大きくなるほどその半径の計測値と 3D データの差が大きくなること、並びに厚さが大きいほど形状精度が悪化することを確認した。

キーワード：積層造形、レーザ粉末床溶融結合方式、アルミ合金、形状変化、金属 3D プリンタ

1 はじめに

金属 3D プリンタは、複雑形状や枝状格子を 3 次的に並べたラティス構造など、従来の加工方法では実現不可能な形状を作製できる。これにより、製品の高機能化や軽量化が可能になるため、輸送用機械関連産業など様々な分野での利用が期待されている。

しかし、レーザ粉末床溶融結合方式の金属 3D プリンタは、レーザの熱源によって選択的に金属を溶融、凝固させ、それを積み重ねて目的の形状を造形するため、熱の影響で造形物に変形が生じることがある。そのため、形状精度の高い造形を行うには熱変形や残留応力による形状変化を把握することが重要である。そこで今回、寸法の異なるアルミニウム合金の積層造形物を作製し、大きさや厚さが形状精度に及ぼす影響を確認した。

40 mm の 4 水準、円筒の厚さ t を 1、5 mm の 2 水準、円筒の長さを 10mm とする 8 種類とした。試験は、アルミニウム合金粉末 AlSi10Mg (東洋アルミニウム株) を材料としてレーザ粉末床溶融結合方式の金属 3D プリンタ SLM280 (Nikon SLM Solutions AG 製) で造形した。その際、造形角度 θ が 60° 以上となる円筒内径の下部にサポートを付与した。

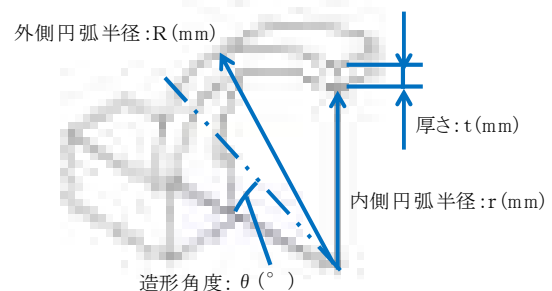


図 1 試験片

2 方法

2.1 試験片

試験片は、図 1 に示す直方体と円筒で構成される形状とし、その寸法は、円筒の内径 r を 5、10、20、

2.2 造形条件

150 °C に加熱したベースプレート上に、造形厚さ 0.06mm、レーザ出力 650 W、走査間隔 0.17 mm、走査速度 1,850 mm/s で造形した。

* 現 繊維高分子材料科

2.3 形状精度の評価

試験片をベースプレートから切り離さない状態で円筒の外径円弧の座標位置を輪郭測定機 CV-4100H8 (株ミツトヨ製) を用いて計測し、3D データと比較した。また、得られた座標位置データから最小二乗円を算出して円筒外径 R を計算し、計測値とした。

3 結果と考察

各試験片における円筒外径 R の計測値と 3D データの差を図 2 に示す。円筒外径 R は、 $t = 1 \text{ mm}$ の場合、 r が大きくなるほど 3D データより小さく、 $t = 5 \text{ mm}$ の場合は r が大きくなるほど 3D データより大きくなり、試験片の厚さによって寸法誤差の方向が異なった。

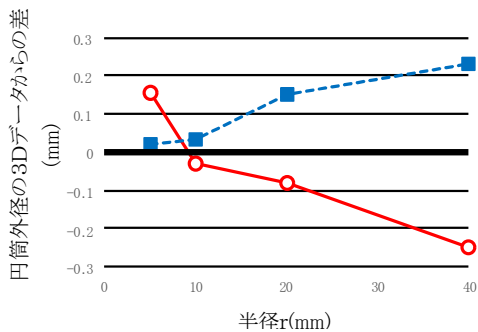


図2 円筒内径 r に対する円筒外径の実測値と 3D データの差

○: $t = 1 \text{ mm}$ 、■: $t = 5 \text{ mm}$

次に、 $r = 40 \text{ mm}$ 、 $t = 1 \text{ mm}$ 及び 5 mm の試験片の円筒外径における円弧形状と 3D データの法線方向の差を図 3 に示す。造形角度 θ が 60° から 90° の区間では、どちらの厚さの試験片の外径も 3D データと比較して 0.2 mm 程度小さかった。この要因として、造形終了時の冷却過程でサポートが収縮し、造形物が形状変化した可能性が考えられる。一方、造形角度 θ が 0° から 60° の区間では、 $t = 1 \text{ mm}$ の試験片では $\theta = 50^\circ$ 付近までは 3D データからの差が小さかったが、 $t = 5 \text{ mm}$ の試験片では 3D データからの差が直線的に増加し、形状精度が悪化した。この形状の差によって、図 4 (a) に示すように円弧の曲率が $t = 1 \text{ mm}$ では小さくなり $t = 5 \text{ mm}$ では大きくなったと考えられる。

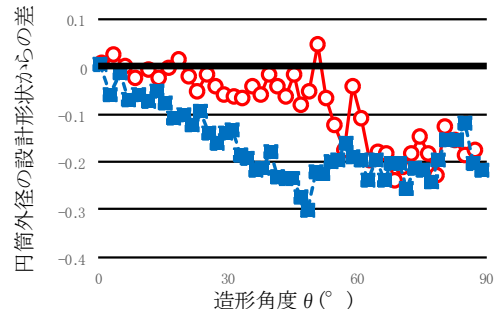
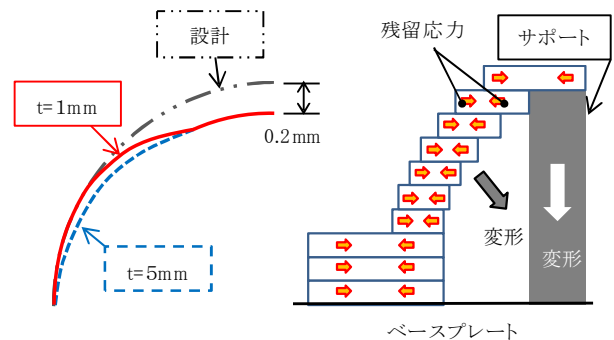


図3 造形角度と設計形状からの差

○: $r = 40 \text{ mm}$ $t = 1 \text{ mm}$ 、■: $r = 40 \text{ mm}$ $t = 5 \text{ mm}$



(a) 円弧曲率分布 (b) 残留応力分布

図4 試験片の変形イメージ

レーザ粉末床溶融結合方式の金属 3D プリンタで造形時の金属内部に働く力を考えると、レーザ照射で溶融した金属が、凝固過程で収縮する際にベースプレートからつながっている下層側が拘束されることで、図 4 (b) に示すように各層内に残留応力が発生する。また、試験片の円筒部は、直方体とサポートによって両側が固定されているために発生した残留応力で内側に形状変化する。以上のことから、円筒の厚さによって 3D データからの差が異なった要因として、積層数が多くなることで残留応力の合力が増加するため、形状変化の量も大きくなり、形状精度の悪化につながったことが考えられる。

4 まとめ

金属 3D プリンタを用いて半径と厚さの異なる円筒形状を含む試験片を作製して形状を評価し、以下の結果を得た。

- (1) 円筒の外径が大きくなるほど、外径の計測値と 3D データの差が大きくなった。
- (2) 造形過程で発生する残留応力により造形物は形状変化し、厚さの大きいほど形状精度が悪化した。

積層造形法によるステンレス鋼の内部欠陥にレーザー条件が及ぼす影響

材料科 植松俊明 望月智文 田光伸也 木野浩成*
 機械電子科 大澤洋文

Effect of laser conditions on internal defects in the laser powder bed fusion additive manufacturing of stainless steel

UEMATSU Toshiaki, MOCHIZUKI Tomofumi, TAKO Shinya

KINO Hironari* and OOSAWA Hirofumi

Keywords: Additive Manufacturing, Internal Defect, Stainless Steel, Laser Condition

樹脂用金型に用いられるマルテンサイト系ステンレス鋼に対し、レーザー粉末床溶融結合法の造形物の内部欠陥の発生に及ぼすレーザーの出力及び走査速度の影響について検討した。造形条件はレーザー出力を 300~600W、走査速度を 600~1,500mm/s、走査間隔を 0.13mm、積層厚さを 0.05mm とした。造形物の相対密度を 99.9%以上にできるレーザー条件であれば、造形物の内部欠陥は 100 μm 以下に抑制できることを確認した。また、相対密度の向上には、エネルギー密度だけでなく、レーザーの走査速度を考慮しなければならないことが分かった。

キーワード：積層造形、内部欠陥、ステンレス鋼、レーザー条件

1 はじめに

金属 3D プリンタは、内部に水管を自由に配置した金型を造形できることから、近年、金型の加工方法の一つとして注目されている。金属 3D プリンタで金型を造形する場合には、金型の品質を低下させる造形物内部の空隙（欠陥）の発生を抑制することが重要である。

そこで、本研究では樹脂用金型に使用可能なマルテンサイト系ステンレス鋼を用い、レーザー粉末床溶融結合法の造形物の内部欠陥の発生に及ぼすレーザーの出力及び走査速度の影響について検討した。

2 方法

供試粉末は粒子径が 25~53 μm のプラスチック金型用ステンレス鋼粉末 LTX420（大同特殊鋼株）を用いた。造形にはレーザー粉末床溶融結合方式の金属 3D プリンタ SLM280（SLM Solutions Group AG）を使用し、一辺 10mm の立方体を作製した。造形条件は、ベースプレート温度を 150°C、積層厚さ：t を 0.05mm、レーザーの走査間隔：s を 0.13mm とし、レーザー出力：P と走査速度：v は表 1 に示す範囲で変化させた。また、積層 1 層分の単位体積当たりの投入エネル

表1 レーザ出力及び走査速度

条件	低出力	高出力
レーザー出力 P (W)	300、375、450	525、600
走査速度 v (mm/s)	600~900	900~1,500

ギーを、レーザー条件から式（1）に示すエネルギー密度 E (J/mm^3) として算出した。

$$E = P / (vst) \quad (1)$$

内部欠陥の評価は、試験片の中央部を切り出し、樹脂に包埋後、鏡面研磨し、金属顕微鏡 MA200（ニコン株）で断面観察を行った。相対密度及び内部欠陥サイズは、画像解析ソフト Quick Grain Pad+（株イノテック）を用いて算出した。また、造形物の表面はデジタルマイクロスコープ VHX-1000（株キーエンス）で観察した。

* 現 繊維高分子材料科

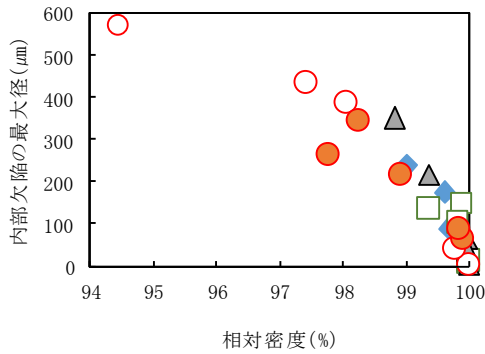


図1 相対密度と内部欠陥の最大径の関係

◆300W □375W ▲450W ○525W ●600W

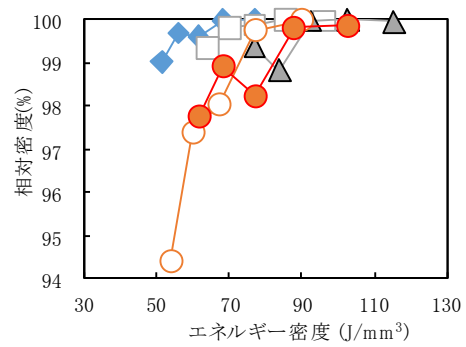


図2 エネルギー密度と相対密度の関係

◆300W □375W ▲450W ○525W ●600W

条件	300W 600mm/s	375W 750mm/s	450W 900mm/s	525W 1,050mm/s	600W 1,200mm/s
断面観察					
表面観察					

図3 各レーザ条件のエネルギー密度 77.69J/mm³ で作製した造形物の断面及び表面観察結果

3 結果および考察

各レーザ出力で作製した造形物の相対密度と内部欠陥の最大径の関係を図1に示す。内部欠陥の最大径は、レーザ出力によらず相対密度が向上することで縮小し、相対密度が99.9%以上で100μm以下となった。

次にエネルギー密度と造形物の相対密度の関係を図2に示す。相対密度は、レーザ出力によらずエネルギー密度の増加とともに向上した。相対密度が99.9%以上の造形物を得るために必要なエネルギー密度は300Wで76.92J/mm³、375Wで85.47J/mm³、450Wで92.31J/mm³、525Wで89.74J/mm³であったが、600Wでは、検討したエネルギー密度の範囲で相対密度が99.9%以上の造形物を得ることができなかった。ここで、造形物の高密度化に必要なエネルギー密度が、レーザ出力によって異なる要因を検討するためにエネルギー密度を77.69J/mm³一定とし、レーザ出力及び走査速度を変化させたときの造形物の断面及び表面を観察した。その結果を図3に示す。レーザ出力375W以下の造形物の断面には、微小な内部欠陥を僅かに観察できるが、450W以上では未溶融による粗大な内部欠陥が多く発生した。また、300W及び

375Wの造形物の表面に形成されたビードは平坦であったが、450W以上では凹凸が見られた。以上のことから、高出力条件で内部欠陥が増加したのは、ビードに凹凸が発生することで金属粉末の積層厚さが不均一になり、レーザ照射部の熔融量に変化したことに加え、レーザ出力が高い場合には低出力条件と比較して走査速度が速いことで熔融池の周辺を十分に熔融できなかったことが原因として考えられる。そのため、相対密度の向上には、エネルギー密度だけでなく、レーザの走査速度を考慮しなければならないことが分かった。

4 まとめ

金属3Dプリンタのレーザ条件がマルテンサイト系ステンレス鋼の造形物の内部欠陥の発生に与える影響について検討した結果、以下のことを得た。

- (1) 高密度な造形物を得るためのエネルギー密度は、レーザ出力が上昇するとともに高くなる傾向にあった。
- (2) 造形物の内部欠陥は相対密度を99.9%以上にすることで100μm以下に縮小できた。

アルミニウム合金積層造形物の緻密化や化学成分に造形雰囲気を与える影響

材料科 望月智文 植松俊明 田光伸也 木野浩成*
 機械電子科 大澤洋文

Effect of atmospheric gases on the densification and chemical composition of aluminum alloy fabricated by L-PBF additive manufacturing

MOCHIZUKI Tomofumi, UEMATSU Toshiaki, TAKO Shinya,
 KINO Hironari and OOSAWA Hirofumi

Keywords: metal 3d printer, aluminium alloy, nitrogen gas, relative density, nitriding

金属 3D プリントによる金属粉末レーザー積層造形は、造形物の酸化等を防止するため不活性ガス雰囲気中で行われる。本研究では、安価な窒素ガス下でアルミニウム合金粉末を用いたレーザー粉末床溶融結合 (Laser powder bed fusion : L-PBF) 方式の金属 3D プリントによる造形を行い、造形物の相対密度や窒素含有量を評価した。その結果、アルゴン又は窒素ガスのいずれを用いても、エネルギー密度が 35~50 J/mm³ で高密度を有する造形物を得ることができ、造形物は窒化しないことが明らかとなった。

キーワード : 金属 3D プリント、アルミニウム合金、窒素ガス、相対密度、窒化

1 はじめに

金属 3D プリントによる金属粉末レーザー積層造形を用いたものづくりは、切削や鋳造等の従来の加工法では成し得ない複雑形状の構造物を製造することが可能であり、注目を集めている。一方、金属 3D プリントの普及拡大のためには、「材料と造形コストが高い」という課題を解決する必要がある。造形コストを高くする要因の一つは、造形物の酸化等を防止するために使用するガスのコストである。通常、造形雰囲気には、高価なアルゴンを用いる。造形コスト削減のため安価な窒素ガスに代替することも考えられるが、造形物表面が窒化してしまう懸念がある。しかし、アルミニウム粉末は、窒素雰囲気中で加熱した場合、窒化反応より先に融解・凝集するため窒素の浸透反応速度が低下し窒化しないといわれている¹⁾。そこで本研究では、アルミニウム合金粉末を対象に造形雰囲気をアルゴンの代替として窒素ガスを用いた際の造形物及び造形パラメータへの影響を検証した。

2 方法

2.1 造形条件

AlSi10Mg 合金粉末 (LPW Technology 製) を原料に、レーザー粉末床溶融結合 (Laser powder bed fusion : L-PBF) 方式の金属 3D プリント SLM280 (Nikon SLM Solutions AG 製) を用いて一辺が 10 mm の立方体を造形し試料とした。造形パラメータは、表 1 に示すとおりとした。雰囲気を用いたガスの純度は、アルゴンが 99.99 %、窒素ガスが 99.999 % であった。試料は、ベースプレートからのコンタミネーションを防止するため、高さ 4.0 mm のサポート部を設け、その上に造形した。

表1 造形パラメータ

造形パラメータ	設定値又は計算値
レーザー出力 P (W)	500~670
レーザー走査速度 v (mm/s)	950~2,150
レーザー走査間隔 w (mm)	0.17
積層厚さ h (mm)	0.06
エネルギー密度 E^* (J/mm ³)	22.8~69.1
予備加熱温度 (°C)	150
造形雰囲気	アルゴン又は窒素ガス

※エネルギー密度計算式: $E = P / (v \cdot w \cdot h)$

* 現 繊維高分子材料科

2.2 評価方法

造形雰囲気ガスの影響を調べるために、試料の相対密度と窒素含有量を評価した。相対密度は、試料の中央部を切り出し、樹脂に包埋後、鏡面研磨し、金属顕微鏡 M200（ニコン株）及び画像解析ソフト Quick Grain Pad+（株イノテック）を用いて3視野の平均値から算出した。金属組織は、鏡面研磨後の試料をケラー氏液により腐食し、金属顕微鏡 M200（ニコン株）で観察した。窒素含有量は、試料の中央部を酸素窒素水素分析装置 EMGA-830（株堀場製作所）により測定した。

3 結果および考察

相対密度の、造形雰囲気による変化はなく、エネルギー密度 35~50 J/mm³ で相対密度が 99.5 % 以上となり、そのエネルギー密度帯から外れるほど相対密度は低下する傾向が認められた（図1）。

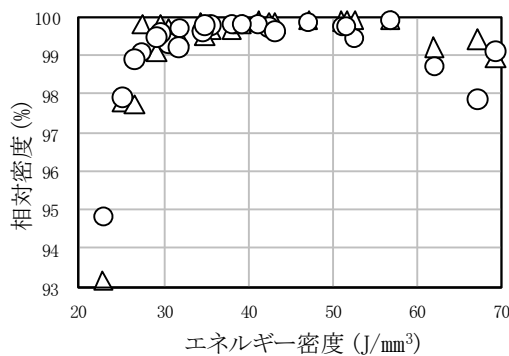


図1 試料のエネルギー密度と相対密度の関係

- △:アルゴン雰囲気で作成した試料
- :窒素ガス雰囲気で作成した試料

図2に試料の垂直断面（積層方向に対して平行な面）の金属組織を示す。全ての試料で、鱗状の熔融池痕を確認した。このような金属組織となったのは、熔融池底部で析出したα-Al相（白色部）並びに、レーザー照射点に向かって成長したα-Al相及びそれを囲むSiとの共晶組織（灰色や褐色部）が現出した結果と考えられる。内部欠陥に注目すると、低エネルギー密度（23 J/mm³）試料では熔融池痕境界部の非球形の未熔融欠陥が、高エネルギー密度（69 J/mm³）試料では熔融池痕底部の球形のキーホール型欠陥が確認できた。エネルギー密度が35~50 J/mm³の試料では、内部欠陥の少ない高密度体が得られた。以上より、現出した結晶の構成及び内部欠

陥の性状が同じであることから、全てのエネルギー密度帯において造形雰囲気による金属組織の差は見られないことが分かった。

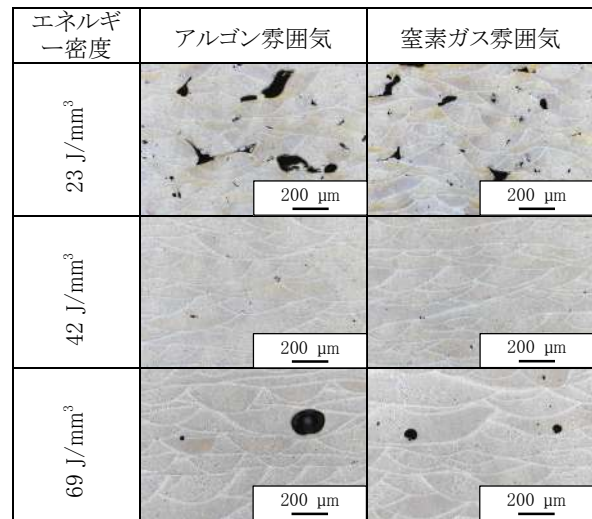


図2 試料の金属組織(垂直断面)

相対密度が低い試料では、内部欠陥内に存在する雰囲気ガスの影響が大きいと考え、窒素含有量の評価は、高相対密度の試料で行った。アルゴン雰囲気、窒素ガス雰囲気で作成した試料の窒素含有量は、それぞれ 1.5 ppm、0.9 ppm とほぼ同等であり、造形雰囲気の影響は認められなかった。窒素ガス雰囲気での造形であっても試料の窒素含有量は十分に低かった理由は、L-PBF法における急熱急冷過程で原料が塊状に凝集し、窒素の浸透反応速度が低下したためと推察される。

4 まとめ

アルミニウム合金粉末の積層造形を対象に造形雰囲気をアルゴンから窒素ガスに変更した際の影響を検証した。その結果、99.5%以上の高い相対密度が得られるエネルギー密度は、アルゴン又は窒素ガスのいずれを用いても 35~50 J/mm³ で一致し、窒素ガス雰囲気での造形であっても試料の窒素含有量は 0.9 ppm と造形物は窒化しなかった。以上より、造形雰囲気を窒素ガスに変更しても造形パラメータ及び造形物に影響を及ぼさないことが確認された。

参考文献

- 1) 松尾重友:窒化アルミニウム. 真空, 9, 183-189 (1966).

生分解性繊維の作製と分解性評価

繊維高分子材料科 大木結以 鈴木重好*
株式会社シラカワ 近藤 隆

Spinning and biodegradable characterization of PBS/PCL blend polymer-monofilaments

OKI Yui, SUZUKI Shigeyoshi and KONDO Takashi

Keywords: Biodegradable fiber, Polybutylene succinate, Poly (ϵ -caprolactone), Monofilament, Melt spinning

生態系へのダメージが小さい漁具の開発に向け、生分解性樹脂であるポリブチレンサクシネート (PBS) とポリカプロラクトン (PCL) のブレンド樹脂からなるモノフィラメント糸を作製し、機械的特性と生分解性を評価した。PBS と PCL を重量比 1 : 1 で混合した糸は、延伸倍率 8.5 倍の時に最大の引張破断強度を示し、漁具に必要な強度を達成した。また、海洋に生息する微生物が産出する酵素を用いた生分解性評価の結果から、PBS と PCL のブレンドや延伸条件による分解速度の制御が可能であることが示唆された。

キーワード：生分解性繊維、ポリブチレンサクシネート、ポリカプロラクトン、モノフィラメント、熔融紡糸

1 はじめに

自然界に流出した漁具が半永久的に海洋生物を捕獲し続けるゴーストフィッシング現象が、生態系に深刻なダメージを与えている¹⁾。漁具の環境負荷低減には海洋生分解性樹脂の活用が有効だが、既存の海洋生分解性樹脂は速やかに分解されるため、養殖といった数年単位で耐久すべき用途に適さない。

本研究では、環境低負荷かつ海水中で 1 年程度、形状や物性を維持する漁具の開発を目的とし、海水での分解が遅いポリブチレンサクシネート (PBS) と海洋生分解性に優れるポリカプロラクトン (PCL) のブレンド樹脂からなるモノフィラメント糸を作製し、機械的特性と生分解性の評価を行なった。

2 方法

2.1 実験条件

市販の PBS と PCL のペレットを重量比 1 : 1 で混合し、二軸押出機 ラボプラスミル ME (㈱東洋精機製作所製) を用いて 200 °C で混練した。得られたブレンド樹脂 (以下、PBS/PCL) を試験用熔融紡糸装置 (㈱中部マシン製) を用いて直径 250 μ m 程度のモノフィラメント糸に成形した。主な紡糸条件を表 1 に示す。

表 1 主な紡糸条件

成形条件	設定値
樹脂の押出温度	180 °C
樹脂の冷却温度	15 °C
第 1 延伸ロール速度	3.2 m/min
第 2 延伸ロール速度	20~24 m/min
第 3 延伸ロール速度	19~28 m/min
延伸倍率	6~8.5 倍

2.2 モノフィラメントの評価方法

(1) 機械的特性

漁具に必要な強度として 5.3 cN/dtex 以上の引張破断強度を示す糸の作製を目標とした。得られた糸について、オートグラフ AG-50kIS (㈱島津製作所製) を用いて JIS L1013:2021 を参考とする引張試験を行い、引張破断強度や結節強度、伸度を求めた。

(2) 酵素を用いた生分解性評価

樹脂フィルムの酵素分解試験²⁾を参考に、海洋に生息する微生物 *B. cepacia* が産出する分解酵素を用いて分解性を評価した。具体的な操作は、分解酵素をリン酸緩衝液 (0.1 mol/L, pH 7.0) に 1.24 g/L の濃度で溶解させた試験溶液を調製し、1.5 g 程度に束ねた糸を浸漬して、35°C で最長 4 日間、振

* 現 公益財団法人静岡県産業振興財団

として反応させた。試験後、試料の重量変化を計測し、分解性の指標とした。

3 結果および考察

3.1 引張試験

PBS/PCL を延伸倍率 6.0~8.5 倍の 6 条件で成形した。延伸倍率 8.5 倍のとき最大の引張破断強度 5.46 cN/dtex を示し、漁具に必要な強度を達成した(図 1)。

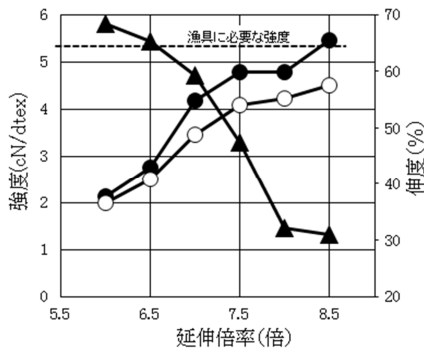


図1 PBS/PCL 系の引張試験結果

●: 引張破断強度(cN/dtex)、
○: 結節強度(cN/dtex)、▲: 伸度(%)

3.2 生分解性試験

PBS 系、PCL 系、PBS/PCL 系を試験溶液に最長 4 日間浸漬させたときの重量変化を図 2、3 に示す。PBS 系では重量減少が生じず、PCL 系は 4 日間で約 17% の重量減少が確認された。他方、PBS/PCL 系は、重量比で 50% の PCL が含まれているにも関わらず、4 日間の重量減少は約 2% であった(図 2)。

異なる延伸倍率の PBS/PCL 系を比較すると、延伸倍率 6.0 倍の糸の重量減少は約 4%、延伸倍率 8.5 倍の糸の重量減少は約 2% であり(図 3)、延伸倍率が高いほど重量減少が小さくなる傾向を示した。PCL 系では延伸倍率が高いほど結晶化度が高く、生分解速度が小さくなるという報告³⁾があることから、PBS/PCL 系でも同様に、延伸倍率が高いほど PBS 成分や PCL 成分の結晶性が高くなり、生分解が抑制されたと考えられる。

4 まとめ

PBS と PCL のブレンド樹脂を調製し、漁具に必要なとされる引張破断強度を示すモノフィラメントの成形に成功した。海洋に生息する微生物が産出する

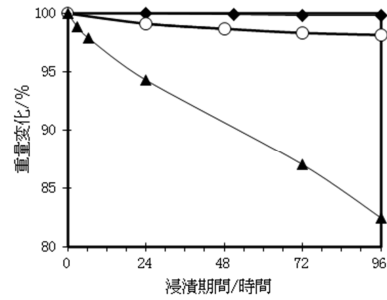


図2 生分解性試験結果

◆: 延伸倍率 5.5 倍の PBS 系、○: 延伸倍率 8.5 倍の PBS/PCL 系、▲: 延伸倍率 8 倍の PCL

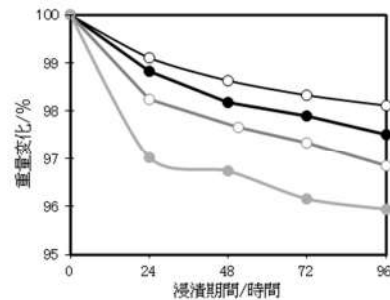


図3 異なる延伸倍率の PBS/PCL 系の生分解

延伸倍率が○: 8.5 倍の糸、●: 7.0 倍の糸、
○: 6.5 倍の糸、●: 6.0 倍の糸

分解酵素を用いた試験の結果から、生分解性樹脂同士のブレンドや延伸倍率により、分解速度が制御可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) J. A. Anderson J. A. *et al.*: Ghost fishing activity in derelict blue crab traps in Louisiana. *Marine Pollution Bulletin*. 79, 261-267(2014). Bilkovic D. M. *et al.*: Derelict fishing gear in Chesapeake Bay, Virginia: Spatial patterns and implications for marine fauna *Marine Pollution Bulletin*. 80, 114-123(2014) .
- 2) Jeepery I. F. *et al.*: Miscibility and enzymatic degradability of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate)-based polyester blends by PHB depolymerase and lipase. *Polymer Degradation and Stability*, 192, 109692(2021).
- 3) 望月政嗣: 脂肪族ポリエステル構造と生分解性. *繊維学会誌*, 52, 200-208(1996).

A Development of Micro-Prism Arrays Achieving Image Projection by Principle of Lighting: Optical Design and Numerical Estimation of Lighting Performance

SHICHI Wataru, NAKANO Masaharu and TOYOTA Toshihiro

照明光学系の原理で投影を実現するマイクロプリズムアレイの開発： 光学設計と照明性能の数値評価

光科 志智 亘 中野雅晴
工業技術研究所 照明音響科 豊田敏裕

Proceedings of the 30th Session of the CIE, 1219-1226 (2023)

Keywords: Micro-prism arrays, Pictogram image lighting, Lighting Design, Illuminance Uniformity, Blur width

キーワード：マイクロプリズムアレイ、図形投影照明、照明設計、明るさむら、輪郭のぼけ

マイクロプリズムアレイ (MPA) は、微細なプリズム群を 2 次元アレイ状にした光学素子である。MPA は個々のプリズムの傾斜角と方向 (回転角) を制御し、光を任意の方向に屈折させることで、スクリーン上に図形を投影できる。したがって、光源と MPA のみで構成されるコンパクトな図形投影装置が実現できる。このことは、装置のサイズに制約がある車載照明用途への応用が期待できる。しかしながら、MPA を用いた照明装置の開発は、MPA を精密に作製することが困難であるため、まだ確立されていない。また、MPA の図形投影は、レンズを用いて図形を投影する

結像光学系とは異なる原理のため、投影像の品質に関する知見も乏しい。そこで本研究では、光学シミュレーション技術を用いて、設計パラメータを系統的に変化させた MPA の投影像質を評価した。得られた結果から、明るさむらが目立たない投影像に必要なプリズムの数が推測できることや、投影像の輪郭のぼけは、光源の大きさや光源と MPA の距離の距離が影響することを明らかにした。

本研究で得られた知見を用いることで、良好な投影像が得られる MPA を、効率的に設計することができるようになった。

静岡県工業技術研究所研究報告 第17号

令和6年12月（2024年）

編集・発行 静岡県工業技術研究所

企画調整部・編集委員会

〒421-1298 静岡市葵区牧ヶ谷2078番地

電話（054）278-3028

FAX（054）278-3066