

山形県工業技術センター報告

REPORTS OF YAMAGATA RESEARCH INSTITUTE OF TECHNOLOGY

No. 56 (2024)

山形県工業技術センター

YAMAGATA RESEARCH INSTITUTE OF TECHNOLOGY

目 次

論 文

デザイン経営で次の一手を考える実践型勉強会	1
大場智博 月本久美子 木川喜裕 江部憲一 三井俊明	
デジタル工作機による治具・ロボットハンド作製の効率化	5
齊藤梓 今野俊介 高野秀昭 多田伸吾 一刀弘真	
チタン合金の高能率研削加工技術及び工具の開発	9
村岡潤一 佐藤貴仁 村上周平 大津加慎教 齊藤梓 櫻井孝之 一刀弘真 五十嵐渉	
超短パルスレーザによる cBN 工具の刃先成形	13
佐々木雄悟 糸魚川文広	
早生樹等の国産未活用広葉樹材を家具・内装材として利用拡大するための技術開発 ー塗装条件の検討ー	17
江部憲一 今野俊介 村岡潤一 滝口寿郎	
山形県内清酒製造場から分離した酵母の遺伝子解析	24
下川浩太	
PDMS 膜を用いたトライボ発電デバイスの開発	31
岩松新之輔	
ブラシ加工によるピーニング処理技術の開発	35
荘司彰人	
放熱材料の開発に向けたダイヤモンド微粒子の表面処理技術の探索と分散性評価	40
松田裕史	
抄 録	44

CONTENTS

Papers

Practical Study Session for New Business Using Design Management	1
Tomohiro OBA Kumiko TSUKIMOTO Yoshihiro KIKAWA	
Improving the Efficiency of Jig or Robot End-effector Production using Digital Fabrication Tools ·	5
Azusa SAITO Shunsuke KONNO Hideaki TAKANO Shingo TADA Hiromasa ITTO	
Grinding of Ti-6Al-4V using Porous Copper Composite Resin Bonded Diamond Tools	9
Jun-ichi MURAOKA Takahiro SATO Shuhei MURAKAMI Norikazu OTSUKA Azusa SAITO Takahiro SAKURAI Hiromasa ITTO Wataru IGARASHI	
Shaping of cBN Tool Edge by Use of Ultrashort Pulse Laser	13
Yugo SASAKI Fumihiro ITOIGAWA	
Development of Technology for using Domestic Hardwood Materials such as Furniture and Interior Materials — Consideration of Hardwood Coating Conditions—	17
Kenichi EBE Shunsuke KONNO Junichi MURAOKA Toshio TAKIGUCHI	
Genetic Analysis of <i>Saccharomyces cerevisiae</i> Isolated from Sake Breweries in Yamagata Prefecture	24
Kota SHIMOKAWA	
Triboelectric Energy Generators using PDMS Membranes	31
Shinnosuke IWAMATSU	
Development of Peening Technology using Brush Processing.....	35
Akihito SHOJI	
Surface Modification and Dispersibility Investigation of Diamond Particles for Thermoconductive Material	40
Hiroshi MATSUDA	
Abstracts	44

デザイン経営で次の一手を考える実践型勉強会

大場智博 月本久美子 木川喜裕 江部憲一 三井俊明

Practical Study Session for New Business Using Design Management

Tomohiro OBA Kumiko TSUKIMOTO Yoshihiro KIKAWA Kenichi EBE Toshiaki MITSUI

1 緒 言

社会やビジネスの変化が激しく不確実性の高い現代において、本県でも次の一手を模索しようとする企業は少なくない。このような状況の中、企業が自社のパーパス（社会的存在意義）を探究しデザイン思考で検討した新事業案と、東北芸術工科大学（以下芸工大）の学生が企業のパーパスをもとに検討した新事業案を突き合わせ、互いに学びあう勉強会を開催したので報告する。勉強会名を「やまがた&D プロジェクト」とし、令和3年度から5年度の年度ごとにそれぞれ5社、計15社が参加した。

2 当センターのデザイン支援

2.1 デザイン支援の方針

本県の「山形県デザイン振興指針」では、「デザインとはモノの色や形だけでなく、問題解決のために計画を立て、いろいろと創意工夫する行為」と整理し、デザインを広義に捉えている。この指針に基づき、当センターでは、モノの色や形のデザインを請け負うのではなく、企業の課題に応じて伴走し、製品やサービス開発における広義のデザイン手法（デザイン思考など）を体験してもらい、その活用技術を移転することを支援の基本方針としている。

2.2 デザイン思考

デザイン思考とは、デザイナーの思考プロセスを体系化したもので、常にユーザーの視点を持ち、共感、問題定義、発想、試作、テストを素早く繰り返すことで、消費者がまだ気づいていないニーズを掘り起こし、新たな価値を持った製品やサービスを創出するための手法である¹⁾。当センターで整理したデザイン思考のフローを図1に示す。当センターでは、このデザイン思考を平成24年度頃から、様々な企業の商

品開発に活用し、伴走支援を行ってきた。中には、10年以上売れ続けているヒット商品もある²⁾。

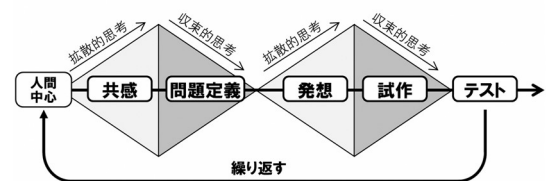


図1 デザイン思考

3 勉強会を企画した背景

3.1 デザイン思考の課題と解決のための仮説設定

デザイン思考は、新たな価値を生み出すための手法としてビジネス界で広がり、取り組む企業も増えた。しかし、デザイン思考は検証や事実を積み上げていく論理的な思考法とは異なり、拡散的思考と収束的思考を繰り返すため、目的が曖昧になり、開発が途中で停滞する事例も多く見られる。これに対し、当センターでは、商品企画のさらに上流工程である事業の目的や企業のパーパスを明確にする必要があると仮説を立てた。パーパスとは、企業がなぜその事業を行い、社会にどのように貢献したいのかを言語化したものである。

3.2 クリエイティブ人材の活用促進

芸工大は山形市に開学してから約30年が経過し、多くのクリエイティブな人材を輩出しているが、卒業生の多くは山形県外に就職しているのが実状である。その要因は様々考えられるが、在学中に山形県内の企業を知る機会が少ないことや、企業側が芸工大生の能力を知る機会が限られていることも挙げられる。山形県内で

のこれらの人材の活用促進を図るためには、互いの魅力を知る場を設けることが重要であると考えた。

4 勉強会の進め方

4.1 全体スキーム

図2に企画した勉強会の全体スキームを示す。

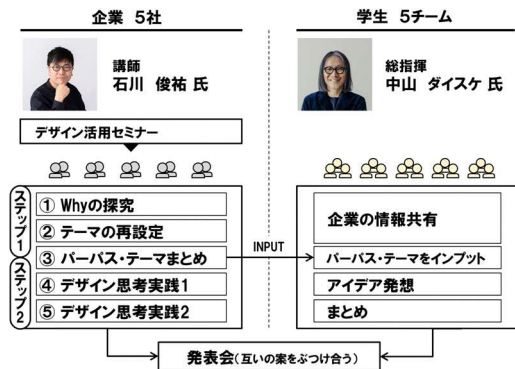


図2 勉強会の全体像

勉強会は企業と学生の2組で構成し、約半年間かけて実施した。

企業からは経営・リーダー層と現場担当者2名での参加を基本とした。これは経験した手法の社内への浸透や、事業案の実現可能性を高めるためである。また、デザイン経営について実績が豊富な石川俊祐氏（株式会社 KESIKI 代表取締役）を講師に招いた。3.1で示した背景を踏まえ、初めからデザイン思考で新規事業を考えるのではなく、まずパーパスを探究し、その後新事業を考える2ステップで実施した。図3に示す全社参加の検討会を月1回ペースで5回行い、その中で進捗報告し、石川氏からアドバイスを受けた。各回の間には、各企業と当センタ



図3 全社参加の検討会

ーとの検討を月2回のペースで行った。

また、3.2で示した背景から並行して芸工大の学生も参加し、企業の新事業案を考えることとした。プロダクトデザイン学科やグラフィックデザイン学科などから選ばれた学生が、企業ごとに3名（令和3年度は2名）ずつ1チームとなって担当した。中山ダイスケ氏（芸工大学長）が全体を指導した。

最後に、企業と学生がそれぞれ考えた新事業案の発表会を行うスキームとした。

4.2 企業の取組み

ステップ1の①～③では、パーパスを探究し言語化する検討を行った。事業のSDGsとの関連性についての分析やSWOT分析³⁾、自社の歴史や業界の起源を調査した。加えて我々より社名の由来やこれまでの経験などに関する質問をすることで、深掘りを行った。探究の様子を図4に示す。

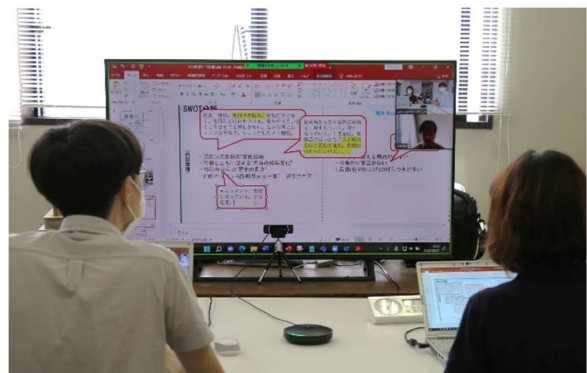


図4 パーパスの探究

ステップ2の④～⑤では、デザイン思考を実践し、事業案を検討した。ターゲット設定、インタビュー、潜在的ニーズの探索、想像力を高めるための設問、アイデア発想といった手法を企業のテーマに合わせてカスタマイズしながら進めた。これらの手法は、当センターが整理したもので、中には独自に開発したものもある。例えば「クロスアイデアシート」と名付けたワークでは、事前に準備した様々な要素のカード（約3cm×2cm）から二つを選び、組み合わせることで、新たな案を強制的に発想する（図5）。「A リンゴ」と「B 鉛筆」を組み合わせ、「C 良い香りのするペン」という具合である。

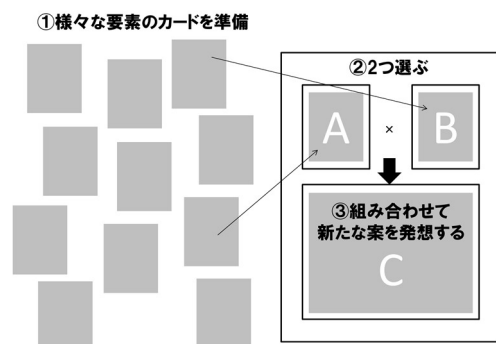


図5 クロスアイデアシートによるワーク

また、発想したアイデアを、紙などを材料に実際に立体物にする「簡易試作」も行った。検討の様子を図6に示す。

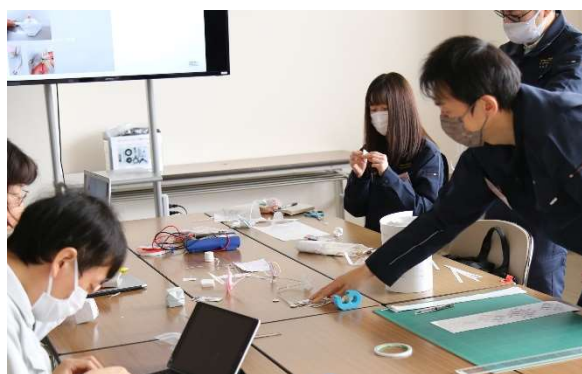


図6 簡易試作

これらのデザイン思考の手法を体験しつつ、最終的にはパーパスに基づいた新事業案をプレゼン資料としてまとめた。

4.3 芸工大の取組み

初めに、企業がステップ1で検討したパーパスと開発テーマをそれぞれの企業を担当する学生に説明するインプット会を開催した（図7）。



図7 インプット会

多くの場合、デザイナーへの依頼は「何をしたいのか」が主な要件となる。しかし、今回

は企業のパーパスを共有することで「なぜそれをやりたいのか」という、より根本的な要件がインプットされる。

インプット会後は、中山氏の指導のもと、学生チームが企業訪問やインタビューを行い、企業の新事業案を考え、プレゼン資料にまとめた。

4.4 発表会

勉強会のまとめとして、企業チーム、学生チームがそれぞれ検討した案をプレゼンし、質疑応答する発表会を開催した。企業の多くは商品案だけではなく、サービスやビジネスモデルにまで踏み込んだ新しい事業案を導くことができた。また、学生からは、企業が普段の業務の中では気づかない魅力や強みを捉え、解釈を変えた上で、新たな価値を生み出す事業案が提案された。

石川氏と中山氏からは、双方の評価や今後の展開の可能性に関する講評があった。発表会の様子を図8に示す。



図8 発表会でのプレゼンテーション

5 成果および考察

5.1 デザイン思考の課題を補う方法

令和3年度に参加した栗野商事株式会社では、勉強会で策定したパーパスを基に検討を重ね、令和5年に新事業を立ち上げた。同社は歴史ある米沢織の間屋で、業界の変化を受けて間屋のあり方を見直したいという課題を持って参加した。検討の結果、「作り手と買い手を繋ぐ存在である」という気づきを得て、間屋業だけでなく小売業として、図9に示すセレクトショップ&ギャラリーをオープンした。

また、その他、社内ベンチャーを立ち上げた企業や、デザイナーとの協業を開始した企業など、勉強会終了後も検討を継続している企業が



図 9 栗野商事株式会社の新規セレクトショップ&ギャラリーの外観

多い。このことから背景 3.1 で示したデザイン思考の課題を補うためにはパーパスの探究と言語化が重要であることが確認できた。

5.2 クリエイティブ人材の活用促進

発表会後にアンケート調査を行ったところ、学生からは「地域の企業との接点を持てたことが良かった」「山形の面白い企業を知ることができた」という感想があった。企業からは「学生チームは、私達と同じ事を感じながらも切り口が違って新鮮だった」「社内ではなかなか見えない課題を独自に設定してくれた」という感想があり、3.2 で示した互いの魅力を知る場になったことが確認できた。

5.3 勉強会の検討プロセス

本勉強会のパーパスを探究しデザイン思考で新たな価値を生み出すというプロセスの概念は、図 10 のように示すことができる。これは図 11 に示す平成 30 年に経済産業省が提唱した「デザイン経営」という概念を、令和 5 年に特許庁が中小企業向けに更新した内容（中小企業のためのデザイン経営ハンドブック 2⁴⁾掲載）とほぼ一致している。つまり、当センターが本県で必要性を感じ、取り組んできたデザイン支援は、国が目指すものと同じ方向性であったと言える。

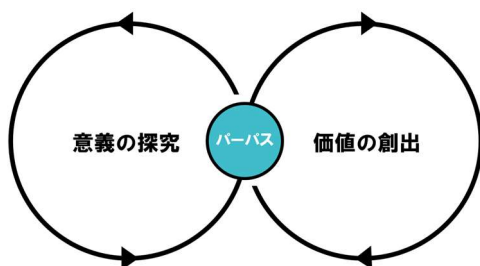


図 10 やまがた&Dプロジェクトの概念



図 11 デザイン経営（特許庁）の概念

6 結 言

本取り組みを行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) パーパスを探究し言語化することでデザイン思考の課題を補い、より効果が得られることがわかった。
- 2) 独自の検討プロセスやワークシートを構築することができ、今後の企業支援にも展開可能となった。
- 3) 企業と学生が互いの魅力を共有する機会をつくることができた。

謝 辞

本事業に参画いただいた石川俊祐氏、中山ダイスケ氏、芸工大事務局の皆様に深謝いたします。

文 献

- 1) 株式会社アンド：思考法図鑑 翔泳社,2019, 88-89 頁
- 2) 株式会社サンカ「lien」
<https://www.yamagatanodesign.jp/archives/case/sanka>
- 3) SWOT 分析：自社の内部環境における「Strength（強み）」と「Weakness（弱み）」、外部環境における「Opportunity（機会）」と「Threat（脅威）」を分析し評価するフレームワーク
- 4) 特許庁：中小企業のためのデザイン経営ハンドブック 2～未来をひらくデザイン経営×知財～ 2024

デジタル工作機による治具・ロボットハンド作製の効率化

齊藤 梓 今野 俊介 高野 秀昭 多田 伸吾 一刀 弘真*

Improving the Efficiency of Jig or Robot End-effector Production using Digital Fabrication Tools

Azusa SAITO Shunsuke KONNO Hideaki TAKANO Shingo TADA Hiromasa ITTO*

1 はじめに

近年、少子高齢化による人口減少が進んでおり、特に東北地域では労働人口の減少が顕著に進んでいる。県内製造業においても、人手不足は大きな課題となっている。こうした課題に対応するため、治具を導入して人の作業負担を軽減することや、人が行っていた単純作業をロボットに代替させることが進められている。一般に販売されているロボットハンドは図 1(a)に示すような汎用形状であり、これを使用するためには対象物（図 1(b)）の形状に合わせた専用の爪（図 1(c)）を作製する必要がある。位置決め治具等に関しても同様に、対象物の形状に合わせた専用設計が必要となる。

加えて、製造業における顧客ニーズは多様化しており、これらに対応するため多品種少量生

産への対応が求められている。特に中小企業では多品種少量の受注が多く、前述したような専用の治具やロボットハンドを作製する場合は、製品仕様に応じて短期間で作製することが求められる。

一方、3D プリンタやレーザ加工機などの「デジタル工作機」は、高性能化、低コスト化が進んでおり、無料で使用できる 3D-CAD も存在する。これらは、他の方法と比較して個別作製のコストが低く、多品種少量の工程で使用する治具やロボットハンドの作製に適している^{2,3)}。本研究では、こうしたデジタル工作機の特徴を踏まえて、更に効率的に運用する方法を検討した。

2 検討方法

2.1 パラメトリック機能を使った 3D データの作成

デジタル工作機を使用するためには、造形するものの寸法や角度等の情報を持った 3D データをその都度準備する必要がある。CAD による 3D データ作成の課題として、作成工程に時間がかかることがある。そこで、パラメトリック機能という CAD の機能を利用し、3D データ作成の効率化を検討した。パラメトリック機能とは、形状を決める際にパラメータをもとに寸法や形状等を定義し、データ作成後にパラメータの調整により形状に反映することが可能な機能である。この機能を持つフリーソフトウェアである OpenSCAD⁴⁾について調査し、パラメトリックな 3D データとして、円柱形状の対象物を把持するためのロボットハンドを作成した。また、作業標準化のため、パラメトリックな 3D データの作成フローをまとめた。

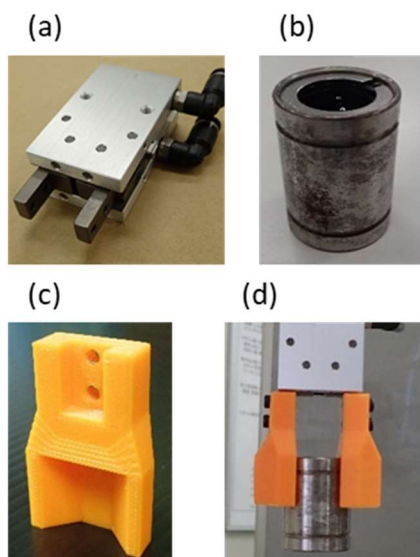


図 1 一般的なロボットハンドの使用例

- (a) 一般に販売されるロボットハンド
- (b) 対象物：円柱形状の部品
- (c) 対象物の形状に合う爪
- (d) 爪を装着し対象物を把持する様子

2.2 治具・ロボットハンドの造形ノウハウ収集

治具・ロボットハンドの作製に適したデジタル工作機として、材料押出 3D プリンタ (FlashForge 製 Creator3), 光造形 3D プリンタ (FlashForge 製 Hunter), レーザ加工機 (Podea 製 ZERO Corsa), 3D スキャナ (SHINING 3D 製 EinScan-SE)を導入した⁵⁾。3D スキャナにより、実物から 3D データを作成することで作業を効率化した。この結果、特に CAD で設計することが困難な曲面の多い形状や表面に凹凸のある形状の 3D データ作成に有効であった。材料押出 3D プリンタ、光造形 3D プリンタ、レーザ加工機は、それぞれ造形原理が異なり、加工可能な材料や造形しやすい形状等の特徴がある。造形原理を考慮しない形状を造形しようとする場合、造形に失敗することもあり、造形失敗による納期遅れを防ぐためのノウハウを収集した。

導入した装置は、令和 4 年 4 月から企業向けに設備貸与を開始した。また、技術センターの研究用途の治具作製にも利用している。相談案件ごとに最適な造形方法の検討や、複数の方法による造形結果の比較を行った。

2.3 活用事例集の作成

デジタル工作機活用を普及するため、治具・ロボットハンドの作製方法について、相談対応した企業や技術センター内部の事例を収集し、事例集としてまとめた。

3 結果および考察

3.1 パラメトリック機能を使った 3D データの作成

円柱状の対象物を把持するためのロボットハンドとして図 2 のように対象物とそれを把持する爪の断面形状を定義し、対象物の直径 D 、爪

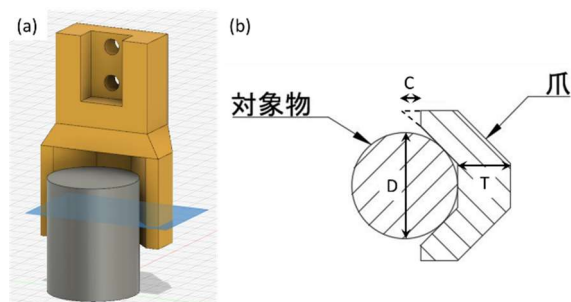


図 2 爪形状の定義

(a) 対象物と爪の外観 (b) (a)の断面図

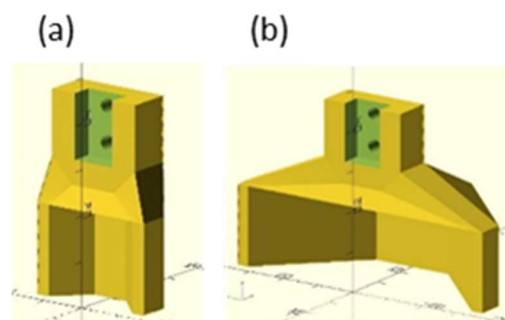


図 3 作成したロボットハンドの 3D データ

(a) $D=20$ の場合 (b) $D=50$ の場合

の厚さ T 、クリアランス C をパラメータとする 3D データを作成した。 D は 10~50mm の範囲で設定できるようにして、 D の値を入力すると図 3 に示すようにその値に対応した 3D データが作られる。このようなパラメトリックな 3D データの作成には通常のデータ作成よりも時間がかかるが、作成できれば、パラメータ変更によるデータ出力は即時に可能となる。対象物の直径が複数必要になることが見込まれる場合には、パラメトリック機能により 3D データ作成が大幅に効率化される。パラメトリック 3D データの作成手順としては、まず汎用の CAD で標準的な形状の 3D データを作成し、その中でパラメータ化が必要な部分を抽出し、その後 OpenSCAD によりパラメータ化する。このような段階を踏むことで情報が整理され、手戻りが少なくなった。このデータ作成手順を標準フローとしてまとめた。

3.2 治具・ロボットハンドの造形ノウハウ収集

導入したデジタル工作機の特徴⁶⁾や治具・ロボットハンドに活用した事例を表 1 に示す。作製したい治具ごとに形状や用途を考慮し、適した

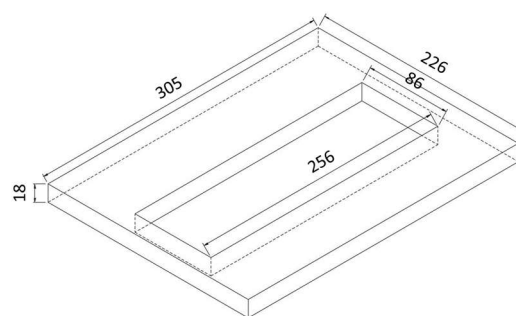


図 4 サンプル位置決め治具の寸法図

表 1 各種デジタル工作機の特徴

	材料押出 3D プリンタ	光造形 3D プリンタ	レーザ加工機
造形原理	フィラメント状の熱可塑性樹脂材料を熱で溶かしてノズルから押し出す。造形ヘッドとステージを動かして目的の形状を積層造形する。	液体状の光硬化樹脂を底面が透明なタンクに入れ、下部から 3D データの断面形状に紫外線を照射して樹脂を固める。造形品は造形ステージに釣り吊り、逆さに引き上げられて行く。	2 次元のベクターデータに沿って CO ₂ レーザを照射して板状材料を切断加工する。また、レーザをスキャンさせて文字や画像を材料表面に彫刻加工するモードもある。
材料	ABS, PLA, PC, HIPS, PA, PP 等	アクリル系樹脂	アクリル, POM, FDM 合板, 厚紙等
利点	・材料コストが低い ・後処理が容易	・微細な造形が可能 ・表面が滑らか	・大型部品の加工時間が短い
欠点	・表面に積層痕が残る ・熱収縮による反りが生じることがある	・サポート構造の除去, 洗浄, 2 次硬化等の後処理に時間がかかる	・立体造形ができない ・加工可能な材料が限られる
活用した治具・ロボットハンドの例	・形状確認のための試作 ・部品の固定治具 ・耐久試験用のロボットハンド	・微小部品用のロボットハンド	・平板型の位置決め治具 ・形状確認用の検査治具

機種を選択した。ここでは、複数の加工機を比較した事例を示す。対象は、図 4 に示すサンプル位置決め治具で、これは 305mm×226mm×18mm の直方体の中に 256mm×86mm の長方形の孔があいた形状をしている。

この治具を作製するため、まず材料押出 3D プリンタでの造形を試みた。デジタル工作機各機種は、造形パラメータがあり材料の性質や目的の形状に合わせて設定する必要がある。特に材料押出 3D プリンタは、ノズルの温度や造形速度等の調整可能なパラメータが多く、造形不良が生じた際にどのパラメータを変更すると改善するか判断することが難しい場合がある。3D プリンタ用の制御ソフトウェアを開発している Simplify 3D 社のウェブサイトには、トラブル時の画像を選択するとその対策として見直すべきパラメータを示した手引きがあり、造形パラメータ検討の参考になる⁷⁾。

図 4 の治具の造形を標準の条件で試した結果、造形品に反りが生じて造形中にステージから剥がれてしまった。反りが生じた原因は樹脂の熱収縮によるものであると考えられる⁸⁾。Simplify

3D 社のウェブサイト等を参考にヒートベッド温度の設定やステージと造形物の接着性を向上するラフト構造の設定を見直すとステージから剥がれることなく造形することができたが、図 5(a)(b)に示すように反りにより造形品が歪み位置決め治具として使用することができなかった。そこで、レーザ加工機によって切り出した板を組み合わせる方法で同様の形状を作製した

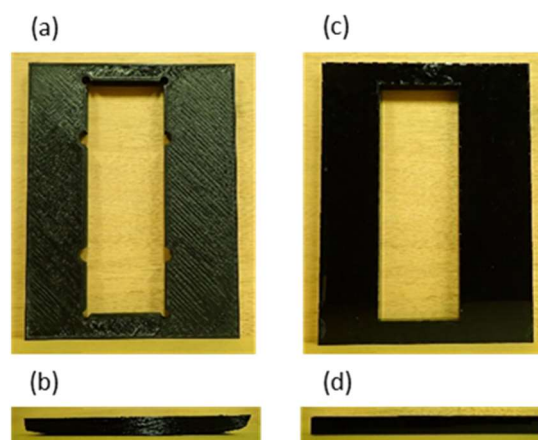


図 5 加工機による造形品の比較
材料押出 3D プリンタ造形品の(a)上面(b)側面
レーザ加工機造形品の(c)上面(d)側面

ところ、反りのない造形品が得られた。この方法では、切断加工した部品を組み立てて接着する工程が必要となるが、作製にかかる全体の時間は材料押出 3D プリンタによる造形時間よりも短かった。このことから、平板型の直方体に近い形状のものを作製するには、材料押出 3D プリンタよりもレーザ加工機の使用が適していると考えられる。このように、造形に失敗した事例を収集し、その原因や対処方法に関するノウハウも蓄積することで試作回数の低減につなげたいと考えている。

3.3 活用事例集の作成

治具・ロボットハンドの作製について、相談対応した企業や技術センター内部の案件について事例集としてまとめた。掲載項目は、件名、造形品の写真、使用したデジタル工作機の種類、治具・ロボットハンドの種類・用途、造形時に気づいたノウハウであり、1 ページの標準様式に 1 件ずつ記録し、下記 17 件の事例を収集することができた。

- ・形状確認用検査治具
- ・筒状製品の立ち上げ治具
- ・プレス成型された微小製品の整列治具
- ・めっき処理時の固定治具
- ・配管補修材の 3D データ化
- ・切粉吸い取り口の形状検討の効率化
- ・成形品の耐久試験用のロボットハンド
- ・射出成型品の洗浄用のロボットハンド
- ・加工食品の体積計量治具
- ・ビス止め作業用の位置決め治具
- ・射出成型品のバリ取り機用位置決め治具
- ・粉体プレス成型時の材料固定治具
- ・微小部品の多数個取りロボットハンド
- ・ロボットのティーチングペンダントホルダー
- ・微小電子部品の整列治具
- ・日本酒の品質管理用のスキャナ位置決め治具
- ・耐候試験機のサンプル固定治具

今回は、治具やロボットハンドに絞って情報収集したが、生産工程で使用される道具として、鋳造砂型の原型や食品用成形型など型の造形についても相談案件があった。収集できた事例は、技術センター内部で共有し、企業支援に活かしたい。

4 まとめ

本研究を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 複数パターン of 3D データ作成が見込まれる場合、パラメトリック機能によりデータ作成が効率化される。
- 2) 平板型の直方体形状の治具作製には、材料押出方式 3D プリンタよりもレーザ加工機の使用の方が適しているケースがある。
- 3) 試作用途や形状に応じた 3D データ作成方法や使用するデジタル工作機の選定について、事例を収集し、再利用しやすいように情報を整理した。

謝 辞

本研究の一部は、公益社団法人 JKA からの助成で行われたものである。ここに記し関係各位に謝意を表する。

文 献

- 1) 西村 仁：初めての治具設計，日刊工業新聞社(2020)
- 2) 門田和雄：門田先生の 3D プリンタ入門，講談社(2015)
- 3) 林園子，濱中直樹：無料データをそのまま 3D プリント，三輪書店(2021)
- 4) OpenSCAD The Programmers Solid 3D CAD Modeller, <https://openscad.org/> (2024-12-12)
- 5) 山形県工業技術センター：主要機器ーデジタル造形 <https://yrit.jp/mainequipment/digital/> (2024-12-12)
- 6) 一般社団法人コンピュータ教育振興協会：3D プリンター活用技術検定公式ガイドブック，日経 BP 社(2016)
- 7) Simplify 3D：Print Quality Troubleshooting Guide <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/> (2024-12-12)
- 8) A. Armillotta et al.：Robotics and Computer - Integrated Manufacturing, Vol.50, 140-152 (2018)

チタン合金の高効率研削加工技術及び工具の開発

村岡潤一 佐藤貴仁 村上周平 大津加慎教 齊藤梓 櫻井孝之 一刀弘真* 五十嵐渉

Grinding of Ti-6Al-4V using Porous Copper Composite Resin Bonded Diamond Tools

Jun-ichi MURAOKA Takahiro SATO Shuhei MURAKAMI Norikazu OTSUKA Azusa SAITO
Takahiro SAKURAI Hiromasa ITTO* Wataru IGARASHI

1 緒 言

チタン合金は、軽量かつ高強度であり、耐熱性に優れ、さらに生体適合性を有するため、自動車、航空宇宙、医療分野に高い需要がある。チタン合金製品のうち、特に表面粗さが必要とされる部品加工においては、研削による仕上げ加工が行われている。しかしながら、チタン合金は低い熱伝導率や高い化学的活性により¹⁾、加工温度が上昇しやすく、工具が著しく摩耗する難削材として知られている²⁾。特に、主にチタン合金研削に適用されているレジンボンド砥石は、高温の加工屑が砥石表面に堆積し、ボンド層である樹脂を軟化させることで異常摩耗を起こすため、工具寿命が短いことが課題である。

レジンボンド砥石の耐熱性を高める方法として、高熱伝導率の物質と複合化することが挙げられるが、樹脂中に分散させる構造では、熱伝導率への影響が小さく、耐熱性はほぼ向上しない³⁾。筆者らは、高温となる研削点と相対的に温度が低い砥石内部が高熱伝導率の金属体により接続される構造により、素早く加工熱を逃がす高耐熱性砥石を提案している。

本研究では、熱を逃がす金属体として、ポラス金属を用いた複合レジンボンド砥石(以下、ポラス金属複合砥石)を試作した。はじめに、ポラス金属複合砥石の熱伝導率がより高まる形状についてシミュレーションによる検討を行った。続けて、ポラス金属複合砥石によるチタン合金の加工試験を行い、工具寿命を調べた。

2 ポラス金属複合砥石の熱的設計

2.1 実験方法

高耐熱性砥石の実現には、熱伝導率が高まる設計が必要である。金属が連続的な構造を持つ

ている金属・樹脂複合体において、熱伝導率がより高まる条件について FEM 解析を用いて調査した。

図 1 に、FEM 解析モデルの概念図を示す。複合体は熱が通過する断面を模して、円柱状の樹脂の中に同じく円柱状の金属が存在し、片面が高温部と、もう片面が低温部と接している形状とした。図 2 に、評価する樹脂・金属複合体の断面図を示す。図 2(a)のように、金属が樹脂中央に集中している複合体と、図 2(b)のように、図 2(a)と金属と樹脂の体積割合は同一であり、かつ金属が複数の円柱に分割されている複合体について比較した。表 1 に解析条件を示す。樹脂中の金属の体積割合は 20%、金属部の分割数

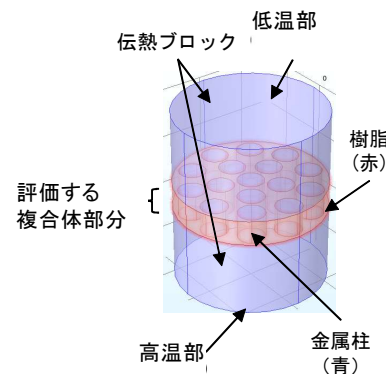


図 1 FEM 解析モデル

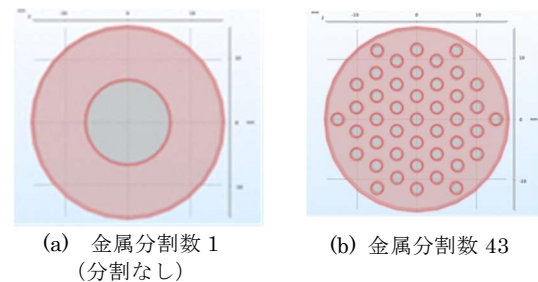


図 2 樹脂・金属複合体の断面図の一例 (FEM 解析モデル)

(以下、金属分割数)を1~309とした。高温部温度 T_h を 393K, 低温部温度 T_l を 273K とした。以上の条件で、定常状態となった際の複合体の法線熱流束と温度差から熱伝導率を計算した。解析には、市販の FEM 解析ソフト (COMSOL Multiphysics) を用いた。

2.2 実験結果

図 3 に、金属・樹脂複合体における金属分割数と熱伝導率の関係を示す。白丸のプロットが解析結果、赤のラインが金属の体積割合 20 % における平行平板の理論熱伝導率⁴⁾である。熱伝導率は、金属分割数が 1 (分割なし) において、約 57 W/m・K と理論熱伝導率の約 71% でありかなり低い、金属分割数を増加させると、一様に増加し、ほぼ理論熱伝導率に収束した。以上の結果より、金属・樹脂複合体が理論通りの熱伝導率を得るためには、熱が流れる範囲に十分な数の金属分割数が必要であり、これをポーラス金属に適用する場合には、ポーラス金属の微細化が必要であることがわかった。

表 1 解析条件

解析方法		定常解析
高温部温度	[K]	393
低温部温度	[K]	273
熱伝導率 [W/m・K]	樹脂	0.18
	金属	400
複合体直径	[mm]	30
複合体厚さ	[mm]	5
金属分割数		1~309
金属部の体積割合		20%

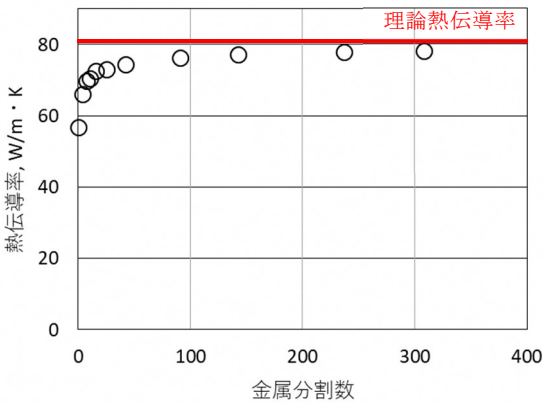
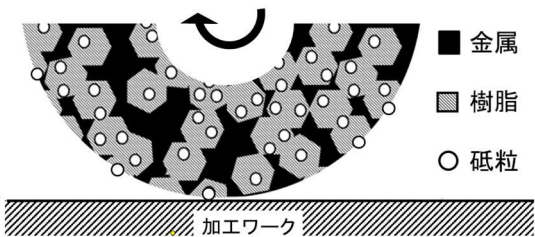


図 3 金属・樹脂複合体における金属分割数と熱伝導率の関係 (金属比率 20%)

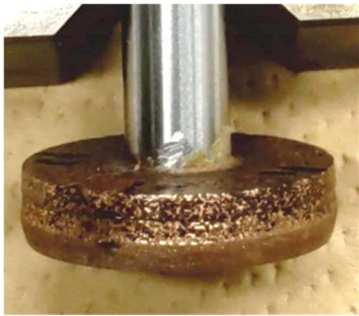
3 樹脂・金属複合砥石による加工試験

3.1 実験条件

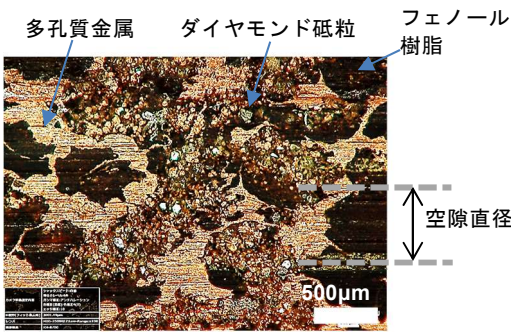
2.2 の結果を受けて、微細な構造を持つポーラス金属を複合した砥石の効果を確認するため、加工試験を行った。図 4 に、ポーラス金属複合砥石の構造を示す。ポーラス金属複合砥石は、連続気孔を持つポーラス金属の中にボンド材となるフェノール樹脂及び切れ刃となるダイヤモンド砥粒を含浸させた構造となっている。表 2 に、ポーラス金属複合砥石の構成を示す。ポーラス金属複合砥石は、純銅製のポーラス金属 (空隙率 80 %), ダイヤモンド砥粒 (トーメイダイヤ製 TMS 平均粒径 105 μm) 及びノボラック型フェノール樹脂 (リグナイト製 LR-412) から成り、上記材料を温度 180 $^{\circ}\text{C}$, 圧力 24 MPa にて $\phi 30\text{mm}$ の円板状に加圧成形した。ポーラス金属は、その空隙の大きさが小さくなるほど、多数の



(a) 砥石構成の概念図



(b) 砥石外観



(c) 砥石表面の拡大図

図 4 ポーラス金属複合砥石の構造

穴が存在し、2.2 のシミュレーションにおける金属分割数が多い状態になると考えられる。そのため、4水準(0.5 mm～3.0 mm)の空隙直径のポーラス金属を複合した砥石を用意し、工具寿命への影響を調べた。表 3 に加工条件を、図 5 に加工試験の概念図を示す。加工試験は、立型マシニングセンター(日立精機製 VM40)を用い、円板状に成形したポーラス金属複合砥石の外周部で、一辺 50 mm、厚さ 2 mm のチタン合金(Ti-6Al-4V)板を側面加工した。加工条件は、研削速度 $V=471$ m/min、半径方向切込み量 $t=0.05$ mm、送り速度 $F=130$ mm/min、アップカットとし、加工中は水溶性研削液

表 2 ポーラス金属複合砥石の構成

工具直径	φ30 mm
ポーラス金属	材質:純銅 空隙率:80 % 空隙直径:0.5、1.0、1.5、3.0 mm (4水準)
砥粒	ダイヤモンド砥粒 平均粒径105 μm トーマイダイヤTMS
砥粒集中度	50 (12.5 vol.%)
バインダー	ノボラック型フェノール樹脂 リグナイト LR-412

表 3 加工条件

研削速度V	471 m/min
半径方向切込みt	0.05 mm
送り速度F	130 mm/min
加工方法	アップカット
総加工距離	1400 mm (28パス)
加工液	水溶性研削液(ソリュブル系)
使用砥石	試作砥石 表1参照
加工ワーク	チタン合金Ti-6Al-4V 50×50mm、厚さ2mm

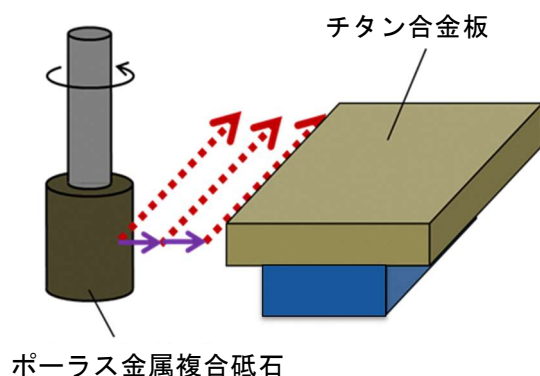


図 5 加工試験の概念図

を供給した。砥石表面の観察には、環境制御型電子顕微鏡(FEI製 Quanta400)を、砥石消耗量の測定には、非接触三次元測定機(三鷹光器製 NH-3SP)を用いた。ワークの除去量測定には、画像測定機(ミットヨ製 SQV303-PRO)を、表面粗さ測定には、表面粗さ・輪郭形状測定機(ミットヨ製 SVC4000H4)を用いた。

3.2 実験結果

図 6 に、ポーラス金属複合砥石の空隙直径ごとの研削比を示す。実験の範囲において、研削比は空隙直径が小さくなるほど向上した。チタン合金研削における研削比の例としては、愛⁵⁾が調査した市販のレジンボンド砥石#170 での研削比 16 が挙げられるが、空隙直径 0.5 mm で、その 2 倍である 32 が得られた。

図 7 に、加工後のチタン合金の表面粗さ (R_a : 算術平均粗さ) を示す。算術平均粗さ R_a は、実験の範囲においてほぼ一定であり、空隙直径との相関は認められなかった。

図 8 に、電子顕微鏡による加工後の砥石表面観察の結果を示す。空隙直径 3.0 mm (図 8(a))、

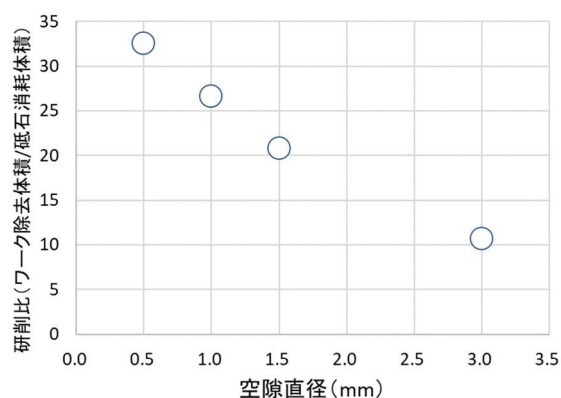


図 6 ポーラス金属複合砥石の研削比

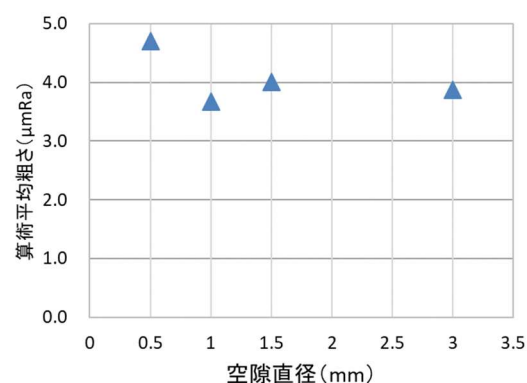


図 7 加工後のチタン合金の表面粗さ

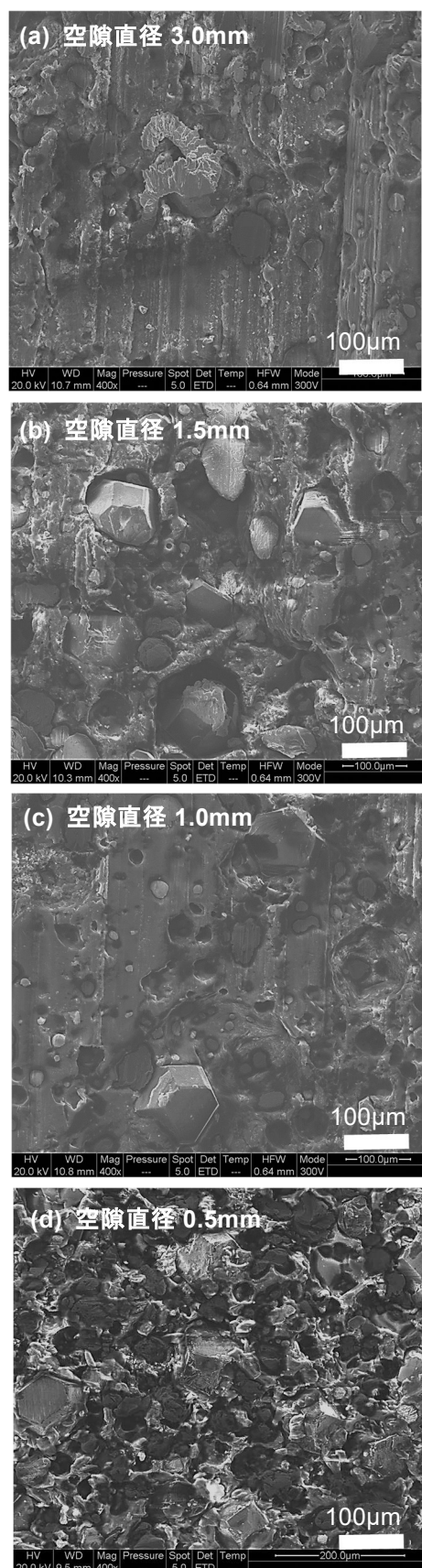


図 8 加工後の砥石表面の電子顕微鏡像

1.5 mm (図 8(b)) では、砥粒上に、切り屑が溶着している様子が観察された。また、砥粒とバインダーの間に隙間が発生し脱落しかけている様子なども確認された。一方、空隙直径 1.0 mm 以下では、切り屑の溶着は確認されず、特に空隙直径 0.5 mm では、砥粒の脱落もほぼ見られなかった (図 8(c),(d))。

以上の結果より、空隙直径 1.0 mm 以下のポーラス金属を用いたポーラス金属複合砥石では、複合化により熱伝導率が向上したため、砥粒及び砥石表面に対するチタン合金の溶着が抑制されるとともにボンド材の軟化が抑制され、研削比が向上したと考えられる。

4 結 言

チタン合金の高効率加工を目的として、ポーラス金属複合砥石の試作及び砥石の工具寿命の把握を行った。以下にその結果を示す。

- 1) シミュレーションより、樹脂・金属複合体の熱伝導率は、金属分割数と共に増加し、平行平板の理論熱伝導率に漸近することがわかった。
- 2) 本実験の範囲において、ポーラス金属の空隙直径が小さいほど研削比が向上し、空隙直径 0.5 mm のポーラス金属を複合した砥石は、市販のレジンボンド砥石と比較して 2 倍の研削比となった。

謝 辞

本研究の一部は、大澤科学技術振興財団 2021 年度一般研究助成の支援を受けて行われたことを記し、謝意を表す。

文 献

- 1) 田中善衛他：精密工学会誌 Vol 69, No.3, 2003, pp.380-384.
- 2) 佐藤秀明他：砥粒加工学会誌, Vol 55, No.4, 2011, pp.22-27
- 3) 太田弘道他：日本金属学会会報, Vol29, No.3, 1990, pp.147-154
- 4) 日本機械学会：JSME テキストシリーズ 伝熱工学, pp.31-32
- 5) 愛恭輔：現場で役立つ研削加工の勘どころ, 2007, 日刊工業新聞社, pp.120-123.

超短パルスレーザーによる cBN 工具の刃先成形

佐々木雄悟 糸魚川文広*

Shaping of cBN Tool Edge by Use of Ultrashort Pulse Laser

Yugo SASAKI Fumihiro ITOIGAWA*

1 緒 言

cBN (cubic Boron Nitride) は、ダイヤモンドと同じ結晶構造であるため、非常に高い硬度、高い熱伝導率、低い熱膨張係数を有し、化学的にも安定しており、切削工具として理想的な性質を持つ¹⁾。しかし、硬質な粒子の焼結体であるため、一般的な刃先成形法であるダイヤモンド砥粒による研削では刃先のチップングが発生しやすく、意図的に丸みを付けている。従来の cBN 工具は、刃先が鋭利でないため、精密加工において十分な仕上げ面粗さが得られていない²⁾。本研究では、超短パルスレーザーを用いた刃先成形法である PLG (Pulse Laser Grinding) 加工にて、従来法では困難な鋭利で且つチップングが少ない刃先を成形し、加工実験から PLG 加工の効果を検証する。

また、PLG 加工は、複雑な光学系を必要としないため、切削加工と工具の再研磨を加工現場内で完結することも可能である。そこで、3 軸マシニングセンタを活用した PLG 加工を想定し、直動軸による PLG 加工を実施することで、加工特性への影響を調査する。

2 実験方法

2.1 PLG 加工による cBN 工具の刃先成形

PLG 加工では、超短パルスレーザーを長焦点レンズで集光し、円筒状の加工領域を形成する。この加工領域を工具の加工面に対して平行に近い角度で照射しながら、工具の稜線に倣い、繰り返し走査し、切り込みを与えることで刃先を成形する³⁾。

本研究では、超短パルスレーザー (TeemPhotonics, PNV-M02510) で旋削加工用インサートチップの刃先を成形する。工具は、cBN 工具 (住友電気工業株式会社, BN2000) を使用

する。走査には高精度ステッピングモータステージ (コムス株式会社, posicon) と多軸モーションコントローラ (Delta Tau Data Systems, PMAC) を使用する。PLG 加工条件を表 1 に示す。PLG 加工後の刃先形状評価として電子顕微鏡 (株式会社日立ハイテク, TM4000Plus) と白色干渉計 (株式会社東京精密, Opt-scope) にて観察を行う。

表 1 PLG 加工条件

1) レーザ出力条件	
波長	355nm
パルス幅	350ps
平均出力	20mW
繰り返し周波数	1kHz
パルスエネルギー	20μJ
2) レーザ加工条件	
走査速度	1mm/sec
往復回数	10回
照射角度	5deg
1回の切り込み量	0.5μm
総切り込み量	20μm

2.2 PLG 工具の性能評価

PLG 工具の性能を評価するため、NC 旋盤 (オークマ株式会社, LT-200-M) で外周加工を行う。被削材は、高周波焼入れをした焼入れ鋼 (SUJ2, HRC56~60) で、切削動力計 (日本キスラー合同会社, 5019A) にて切削抵抗を測定する。加工後は、触針式表面粗さ測定機 (株式会社ミットヨ, SJ-410) にて表面粗さを評価する。旋削加工条件を表 2 に示す。

【令和 5 年度 高度技術者育成支援事業】

*名古屋工業大学 工学部 電気・機械工学科

表2 旋削加工条件

切り込み量	30 μ m
切削速度	100m/min
送り速度	0.05mm/rev
切削距離	80m
加工液	ドライ
被削材形状	ϕ 30mm

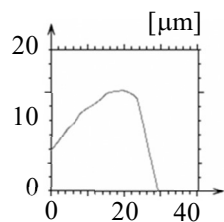
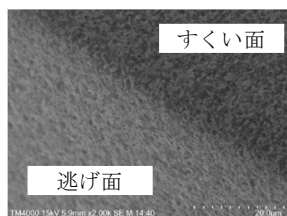
3 実験結果および考察

3.1 PLG 工具の刃先形状

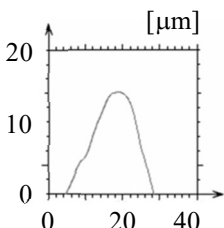
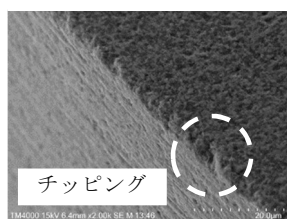
図1に市販のcBN工具とPLG加工を施したPLG工具のSEM画像と白色干渉計で測定した断面形状を示す。SEM画像および断面形状より、市販品(標準)は、刃先にR=約6 μ mのホーニングが施されていた。市販品(シャープエッジ)は、刃先がR=約3 μ mと標準品よりも鋭利になっていたが、ダイヤモンド砥粒の研削で成形しているため、刃先にチッピングが確認された。

PLG工具の刃先は、R=約2 μ m以下になっており、シャープエッジ品のようなチッピングは確認されず、鋭利な刃先であることが確認できた。

●標準品



●シャープエッジ



●PLG 工具

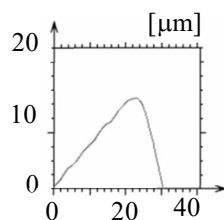
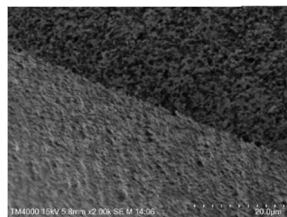


図1 刃先のSEM画像と断面形状

3.2 PLG 工具による旋削加工実験

図2に、旋削加工後の被削材の粗さ曲線と算術平均粗さRaおよび最大断面高さRtを示す。表面粗さの数値に関して、Raは0.063~0.065, Rtは0.63~0.67となり、各種で大きな差は確認されなかった。しかし、PLG工具の粗さ曲線は、他種と比べて山谷部が規則正しくなっており、ツールマークが良化している。これは、切れ味が良くなったことで、刃先形状が綺麗に転写されたためだと考えられ、PLG加工によってcBNのインサートチップを精密加工に適用できることが示された。

図3に旋削加工実験の切削抵抗を示す。PLG工具は、切削抵抗3分力全てで標準品、シャープエッジ品よりも抵抗値が低いことが確認された。また、切削抵抗合力は、標準品20.7N、シャープエッジ品14.8N、PLG工具13.5Nとなり、PLG工具は、標準品よりも35%、シャープエッジ品よりも9%抵抗値が低い結果を得た。これは、刃先の鋭利化により切れ味が良くなったため、切削抵抗値が減少したと考えられる。

図4に、旋削加工実験における切りくずのSEM画像を示した。標準品は、切れ味が悪いいため、切りくず端部に被削材をむしり取ったような不規則な鋸刃形状が多く確認された。一方、切れ味が良いシャープエッジ品とPLG工具では、切りくず端部の鋸刃形状が少なく、なかでもPLG工具の鋸刃形状が最も小さかった。この切りくずのSEM画像の結果から、PLG加工によって切れ味が良化することで、綺麗に切りくずが生成されることが示唆された。

●標準品
Ra=0.065
Rt=0.63

●シャープエッジ
Ra=0.063
Rt=0.67

●PLG 工具
Ra=0.063
Rt=0.64
[μ m]

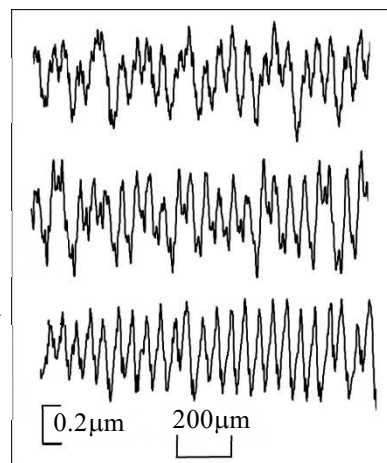


図2 被削材の粗さ曲線(旋削加工後)

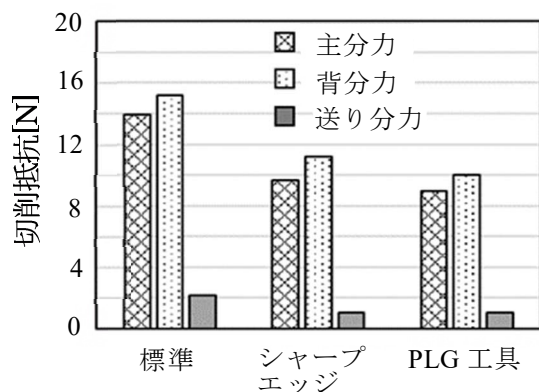
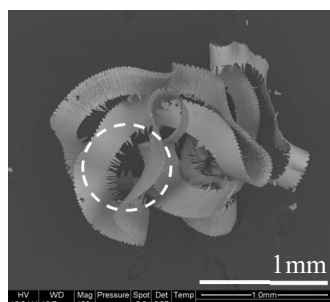
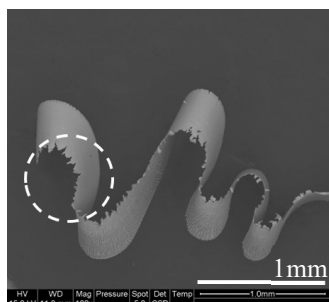


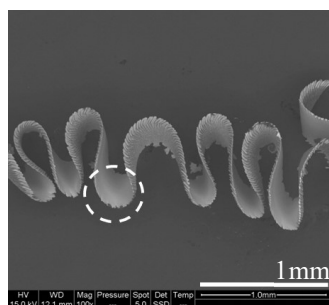
図 3 各種の切削抵抗



1) 標準品



2) シャープエッジ



3) PLG 工具

図 4 切りくずの SEM 画像

3.3 加工レートへの影響

3.3.1 加工位置と偏光の関係

図 5 に、PLG 加工後のインサートチップを示す。図 5 より、PLG 加工した際の加工跡が確認

され、前切れ刃が最も加工幅が大きく、横切れ刃に近いほど、加工幅が小さくなる傾向が確認された。この原因として、加工レート（1 パルスあたりの加工量）の変化が考えられる。レーザー加工では、レーザー光の波長やパルス幅、加工部の熱伝導率や表面状態など様々な要因によって加工レートが変わる。本研究では、直動軸のみを使用した PLG 加工を行ったため、図 6 に示すように、工具刃先に対するレーザーの位置によってレーザー光の偏光の割合が異なることから偏光の影響を確認した。偏光状態は、図 6 の①と③の位置（横切れ刃側）においては s 偏光 100% で加工する状態になるが、②の位置（前切れ刃側）においては p 偏光 100% で加工することになる。また、①と②、②と③の間では、s 偏光 50%、p 偏光 50% となる。このように、加工位置により偏光の割合が異なり、偏光によって光の反射率や吸収率が変わることから、加工位置によって加工レートが変化することが予想される。



図 5 PLG 加工後のインサートチップ

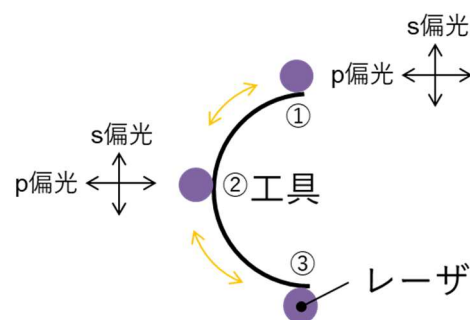


図 6 加工位置による偏光の変化

3.3.2 偏光板を用いた加工実験

偏光の違いによる加工レートを確認するため、光路に偏光板を入れ、以下の条件で直線のみの PLG 加工を行った。

条件①：p 偏光 100%

条件②：p 偏光 50% + s 偏光 50%

条件③：s 偏光 100%

レーザー出力条件とレーザー加工条件は、表 1 と同

様、総切り込み量を 5, 10, 15, 20 μm とし、各総切り込み量での加工幅（加工痕の幅）を測定することで偏光による加工レートの違いを評価した。加工幅の測定はマイクロSCOPE(株式会社キーエンス,VHS-6000)で行った。

図 7 に偏光板を用いた加工実験の結果を示す。図 7 より、条件①が最も加工レートが高く、条件③が最も加工レートが低いことがわかる。総切り込み量 20 μm では、条件①で 131 μm 、条件②で 73 μm 、条件③で 6 μm の加工幅となり、条件①と条件③では加工レート比が約 22 倍となった。この結果から、偏光状態が PLG 加工の加工レートに大きく影響することが確認された。

図 5 の様に横切れ刃に近いほど加工幅が小さくなる原因は、横切れ刃に近づくほど s 偏光の割合が大きくなり、加工レートが小さくなるためと考えられる。そのため、直動軸のみでインサートチップを PLG 加工する際は、偏光の影響を考慮し、加工位置によって総切り込み量を調整することで前切れ刃と横切れ刃での加工幅の差を小さくできると考える。

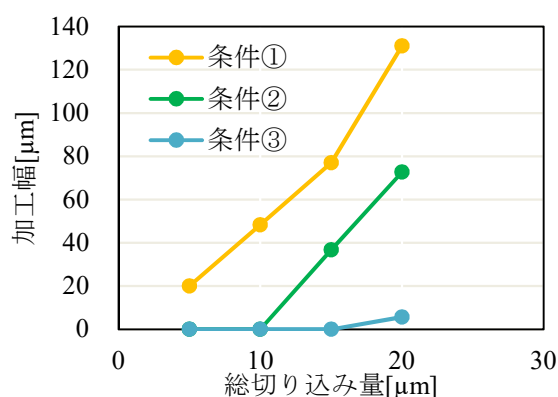


図 7 偏光の違いによる総切り込み量と加工幅の関係

4 結 言

本研究で、以下の知見が得られた。

- 1) PLG 加工により、市販の cBN 工具の刃先を $R \approx 2\mu\text{m}$ 以下に成形できた。
- 2) PLG 工具で加工することで切削抵抗が低減し、ツールマークが良化した。
- 3) 直動軸のみで PLG 加工を行う場合、偏光の影響により、横切れ刃側の加工レートは前切れ刃側と比べ約 22 分の 1 と小さい。
- 4) 加工位置によって切り込み量を調整する

ことで、前切れ刃側と横切れ刃側の加工幅の差を小さくできる可能性がある。

謝 辞

本事業を受け入れてくださった名古屋工業大学 生産機器研究室の皆様、ご指導いただきました糸魚川文広教授に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) K.S. Neo et al: Performance evaluation of pure CBN tools for machining of steel, J. of Materials Processing Technology, 140, (2003), 326-331
- 2) Y. Mabuchi, et al: High Precision Turning of Hardened Steel by Use of PcBN Insert Sharpened with Short Pulse Laser, Key Engineering Materials, Vol.656-657, (2015), 277-282.
- 3) D. Suzuki et al., Int. J. of Automation Technology, 7, 3, (2013), 337-344.

早生樹等の国産未活用広葉樹材を家具・内装材として 利用拡大するための技術開発 －塗装条件の検討－

江部憲一 今野俊介 村岡潤一 滝口寿郎

Development of Technology for using Domestic Hardwood Materials such as Fast-growing Trees as
Furniture and Interior Materials
－ Consideration of Hardwood Coating Conditions －

Kenichi EBE Shunsuke KONNO Junichi MURAOKA Toshio TAKIGUCHI

1 緒 言

これまで国内の木製家具および内装材には、主に外国産の広葉樹材が用いられてきた。しかし近年、資源の減少等に伴う外国産広葉樹材の価格高騰等により、国内への安定供給が見通せなくなりつつある。こういった現状を踏まえ近年、木製家具・内装材原料として、国産広葉樹材が注目されている。しかし早生樹等の国産広葉樹材を家具・内装材として活用するためには、製材・切削加工特性、乾燥特性、塗装性、接着性能といった様々な物性データの蓄積が重要であり、研究¹⁻²⁾も開始されつつあるものの、いまだ十分ではないのが現状である。そこで本研究では、早生樹として近年注目されているセンダンとハンノキ、全国的に蓄積があるにもかかわらず家具等への利用の少ないコナラとホオノキについて、意匠性を向上させるために重要となる透明着色仕上げ（ステイン仕上げ）塗装の最適条件を検討したので、その結果を報告する。

2 実験方法

2.1 透明着色仕上げ塗装および物性評価

塗料には、透明着色仕上げ塗装に一般的に用いられるポリウレタン樹脂塗料を採用し、塗装条件が各樹種の塗装仕上がりおよび物性に与える影響について評価を行った。

2.1.1 試験材および透明着色仕上げ塗装条件

センダンは福岡県産、コナラは岐阜県産、ホオノキは山形県産のものを使用した。ハンノキについては、山形県内でハンノキの名で流通し

ている木材を購入して研究に用いることとした。

環孔材であるセンダンとコナラについては、板目材もしくは追い柵目材に対して、表1に示す工程（セミオープンポア仕上げ）でウレタン透明着色仕上げ塗装し、ウレタン塗装試験片を得た。

表1 環孔材の塗装工程

工程	使用塗料とその処理	塗装方法	塗り回数
素地調整	P180ペーパーで研磨	－	－
素地着色	顔料系着色剤	ワイピング	1
下塗り	ウレタンウッドシーラー	スプレー	1
補色下塗り	ウレタンウッドシーラー 顔料系着色剤	スプレー	1
下塗り	ウレタンウッドシーラー	スプレー	1
中塗り	ウレタンサンディングシーラー	スプレー	3
研磨	P400ペーパーで研磨	－	－
上塗り	15部消しウレタンフラットクリヤ	スプレー	1

散孔材であるホオノキとハンノキについては、板目材もしくは追い柵目材に対して、表1の環孔材の塗装工程の内、「素地着色」工程を省略し、その代わりに「補色下塗り」の回数を3回に増やす工程で塗装し、ウレタン塗装試験片を得た。

各試験片の塗装画像データを色補正したスキャナで取得し、塗装仕上がり状態を評価した。

2.1.2 無塗装材の光変色評価

既往の研究³⁾を参考に、各樹種の無塗装材の柵目材（168mm（繊維方向：L）×20mm（接線方向：T）×60mm（半径方向：R））について、多波長照射分光器を用いて216nmから526nmまでの光を試験片表面に3時間分光照射した。分光照射前後に各波長間隔約30nmの分光照射箇所を分光測色計にて測色し、色差（ ΔE^*ab ）

を求めた。試験片数は、各樹種につき 1 片とした。

2.1.3 促進耐光性試験

作製したウレタン塗装試験片、比較のため作製した着色剤を使用せずクリア仕上げとしたウレタンクリア塗装試験片、および無塗装材各 2 片 (140mm (L) × 70mm (T) × 10mm (R)) について、JIS K 5600-7-7 方法 2⁴⁾ に準拠した窓ガラス越し条件の促進耐光性試験を行った。放射照度は 50W/m² (300~400nm)、ブラックパネル温度 63°C±2°C、試験槽空気温度 38°C±3°C、相対湿度 50%の条件で、キセノンランプにより 100 時間連続照射を行った。試験前後に試験片表面の定位置 2 か所を分光測色計にて測色した。色差 (ΔE^*ab) は、各試験片につき 2 片×2 か所=4 か所のデータを平均して求めた。

2.1.4 耐衝撃試験

作製したウレタン塗装試験片および無塗装材各 1 片 (140mm (L) × 70mm (T) × 10mm (R)) について、JIS K 5600-5-3⁵⁾ に準拠したデュポン衝撃試験を行った。撃ち型形状および撃ち型は R6.35mm、落下高さは 300mm、おもりを 300g とした。試験回数は 1 片につき 5 回とした。試験後の凹み量をダイヤルゲージで測定し、平均値を求めた。

2.1.5 鉛筆引っかき試験

作製したウレタン塗装試験片および無塗装材各 1 片 (140mm (L) × 70mm (T) × 10mm (R)) について、JIS K 5600-5-4⁶⁾ に準拠した鉛筆引っかき試験を行い、鉛筆引っかき硬度 ((柔) 6B~B, HB, F, H~6H (硬)) を求めた。芯先荷重は 750g とし、引っかき方向は木材の L 方向および T 方向とした。

2.1.6 摩耗試験

作製したウレタン塗装試験片および無塗装材各 2 片 (120mm (L) × 120mm (T) × 10mm (R)) において、試験が可能なように四隅を切削したものについて、JAS 合板の摩耗 A 試験⁷⁾ に準拠した摩耗試験を行った。試験機にはテーバー型摩耗試験機を用い、研磨紙を巻き付けたゴム製円板 2 個を試験機に取り付け、試験片を 100 回転させ、回転前後の試験片質量を測定することにより摩耗減量を測定し、さらに平均値である摩耗量を求めた。なお、試験は 500 回転まで実施し、試験片面上に加わる総質量は、ゴム製

円板の質量を含め 500g とした。

2.2 透明着色仕上げ塗装の最適化の検討

塗装条件が仕上がりおよび物性に与える影響について評価した結果をもとに、各樹種について意匠性を向上させるための塗装条件についての検討を行った。

2.2.1 コナラ

コナラについて、ウレタン透明着色仕上げ塗装工程 (実験方法 2.1.1, 表 1) の内、素地着色量と補色下塗り量を種々変えたウレタン塗装試験片 (140mm (L) × 70mm (T) × 10mm (R)) を作製した。

素地着色条件は、「素地着色なし」、「素地着色 1/3 : (顔料系着色剤原液 1 : シンナー 2, ハケ塗り回数 1)」、「素地着色 1 : (着色剤原液のまま, ハケ塗り回数 1)」、「素地着色 2 : (着色剤原液のまま, ハケ塗り回数 2)」の 4 水準とした。補色下塗り条件には、「補色なし : (顔料系着色剤を塗料に投入せず 3 回下塗り)」、「補色 3 : (塗料主剤 100 g に対し着色剤 3g)」、「補色 15 : (塗料主剤 100 g に対し着色剤 15 g)」の 3 水準とした。よって作製する塗装試験片は、4×3=12 種類 (素地着色条件 4 水準×補色下塗り条件 3 水準) となる。

塗装前後の試験片表面について、画像データをスキャナで取得し、着色の程度として面全体の平均明度 (L^*) を、木目の明瞭性として edge (塗装面のコントラストを示す値) を導出して評価することにより、塗装仕上がり品質を定量的に評価した。試験片数は、各条件につき 1 片とした。

2.2.2 ホオノキ、ハンノキ

ホオノキとハンノキについて、ウレタン透明着色仕上げ塗装工程 (実験方法 2.1.1) の内、素地着色は行わず、補色下塗り条件を種々変えた塗装工程によるウレタン塗装試験片 (140mm (L) × 70mm (T) × 10mm (R)) を作製し、スキャナ画像から塗装仕上がり状態を確認した。

補色下塗り条件は「着色剤濃度 1 倍×1 回塗装」、「着色剤濃度 2 倍×1 回塗装」、「着色剤濃度 3 倍×1 回塗装」の 3 水準、さらに色ムラの発生を抑える目的で「着色剤濃度 1 倍×スプレー回数 2 回」、「着色剤濃度 1 倍×スプレー回数 3 回」の 2 水準のウレタン塗装試験片を作製した。試験片数は、各条件につき 1 片とした。

2.2.3 センダン

素地着色時におけるセンダンへの着色剤の過度な浸透を防ぐため、①目止め剤 (a) (木目着色用ベース) 処理、②目止め剤 (b) (フィラーベース) 処理、③シンナー10倍希釈着色剤による素地着色、④ウォッシュコート (ウレタンウッドシーラーをシンナーで2倍に薄めた液) 処理、⑤湿気硬化型ウレタン木質強化剤処理、という五つの手法の効果を検証した。センダン表面に対し、改善手法①～③、⑤のいずれかを素地着色前に施した上でウレタン透明着色仕上げ塗装 (実験方法 2.1.1, 表 1) を行った場合、もしくは (実験方法 2.1.1, 表 1) の素地着色工程を④に置き換え塗装した場合について、素地着色前後の重量差から求めた素地着色剤含浸量とスキャナ画像により最適塗装条件について検討した。試験片数は、各条件につき3片とした。

3 実験結果および考察

3.1 透明着色仕上げ塗装および物性評価

3.1.1 透明着色仕上げ塗装条件

図1に、無塗装材とウレタン透明着色仕上げ結果の比較画像を示す。

センダンとコナラはともに環孔材であるため、素地着色を行い、木目を強調させる仕上げとすることが一般的である⁸⁾。コナラの場合、今回の塗装条件によって適度に表面全体に着色されるとともに、年輪に沿って並んでいる道管に着色剤が集中して沈着されるため、木目も適度に強調された美しい仕上がりとなった。このことから、コナラに関しては、素地着色を伴う一般的なウレタン透明着色仕上げ工程による塗装が適していることがわかった。一方、センダンに関しては、コナラとは異なり素地着色剤が過度に浸透し、美観上問題のある仕上がりとなった。このことから、センダンを素地着色する場合は、素地着色剤の過度な浸透を防ぐ何らかの前処理が必要であることがわかった。

ホオノキとハンノキはともに散孔材である。散孔材に透明着色塗装するにあたり、素地着色を行うと全体に散在している道管に色が絡んでムラになることが知られている⁸⁾。そこで、素地着色は行わず、補色下塗りのみの着色塗装を試みた。その結果、表面全体にムラなく着色できることを確認した。このことから、ホオノキ

とハンノキに関しては、着色工程を補色下塗りのみとしたウレタン透明着色仕上げ塗装が適していることがわかった。



センダン



コナラ



ホオノキ



ハンノキ

図1 ウレタン透明着色仕上げ
左列：無塗装材，右列：塗装材

3.1.2 無塗装材の光変色評価

図2に、分光照射試験前後の表面色差 (ΔE^*ab) を示す。4樹種ともに、主に紫外域で変色が進むことが示された。各樹種に着目すると、セン

ダンの変色は軽微であるもののホオノキとハンノキは変色が著しく、コナラも黄変が比較的激しかった。この結果から、屋内において家具や内装材としてこれら4樹種を使用する場合には、塗装等の光変色対策が必要であることが示唆される。

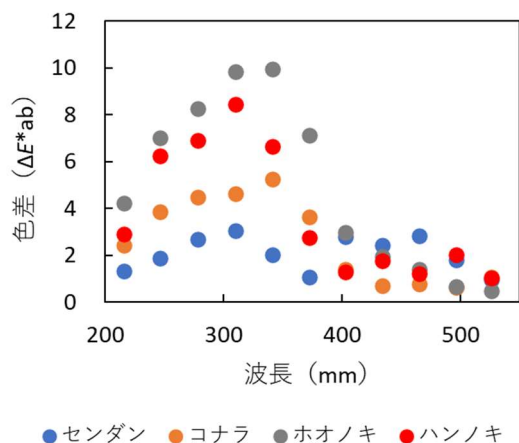


図2 分光照射試験前後の表面色差

3.1.3 促進耐光性試験

図3に、促進耐光性試験の結果を示す。いずれの樹種も、無塗装の場合は色差が10に迫るほどの変色が生じている。しかし、ウレタン透明着色仕上げ塗装を行うことにより、いずれの樹種も変色が大幅に抑制されていることがわかる。したがって、ウレタン透明着色仕上げ塗装は意匠性の向上に加え、光変色対策にも極めて有効であると言える。

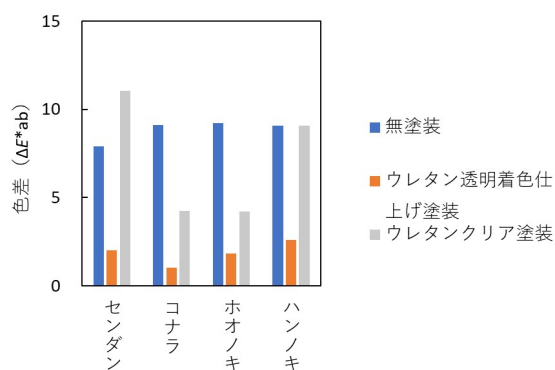


図3 促進耐光性試験前後の表面色差

一方、着色剤を加えないウレタンクリア塗装の場合、コナラとホオノキは無塗装材よりも変色が大幅に抑制されているものの、センダンは無塗装材よりも激しく変色し、ハンノキは無塗装材と同程度に変色することが示された。ちなみに、今回使用したポリウレタン樹脂塗料は、

無黄変型の塗料である。センダンとハンノキは、コナラとホオノキに比べ、材色が淡色である点が共通しているため、この結果が抽出成分の違いに起因する可能性も考えられる³⁾。または、ポリウレタン樹脂塗料と抽出成分との相乗効果の影響も考えられ、今後詳細な検討が必要である。

3.1.4 耐衝撃試験

図4に、デュポン衝撃試験の結果を示す。4樹種の中ではコナラが最も耐衝撃性能が優れていることが示された。また、いずれの樹種も、ウレタン透明着色仕上げ塗装によって変形量が減少している。

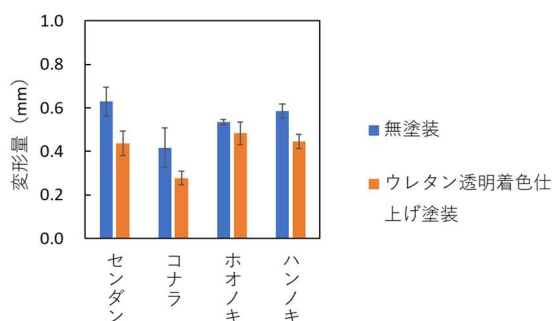


図4 デュポン衝撃試験結果

なお、脚物家具や箱物家具の性能評価方法には特に耐衝撃性は定められてはいない⁹⁾。ただし、例えばフローリングに使用する場合、今回の試験条件で傷や凹みが生じないことが性能として求められている⁹⁾。したがって、そのような用途の場合は、より硬質な塗料を選択する必要がある。

3.1.5 鉛筆引っかかり試験

無塗装材L方向の鉛筆引っかかり試験の結果は、センダン：6B、コナラ：3B、ホオノキ：6B以下、ハンノキ：6B以下という結果であった。ウレタン透明着色塗装の場合は、4樹種ともにHBまで向上した。なお、T方向の場合も、L方向のそれと全く同じ結果となった。このことから、コナラを除いた3樹種は鉛筆引っかかり硬度が極めて小さいこと、しかしウレタン透明着色塗装により鉛筆引っかかり硬度を大幅に向上できることが示された。ただし、箱物家具の場合の鉛筆引っかかり硬度はF～2H程度が求められ⁹⁾、今回はわずかに性能が不足した。よって、今回採用したポリウレタン樹脂塗料よりも若干硬質なタイプを選択することが求められる。

3.1.6 摩耗試験

図5に、回転数100回転ごとの摩耗量の結果を示す。

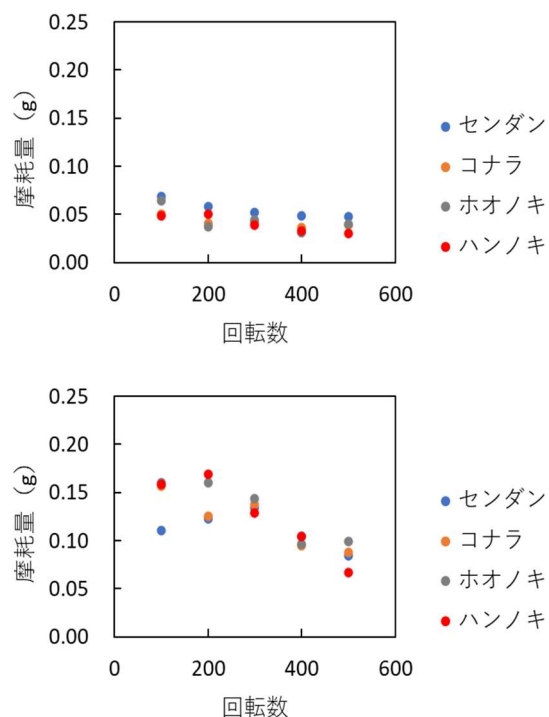


図5 摩耗試験結果
 上：無塗装材，下：塗装材

例えば特殊加工化粧合板の場合、摩耗量は0.1g以下と規定されている⁷⁾。無塗装材の場合、いずれの樹種も0.1g以下の基準を満たしており、耐摩耗性能が優れていることがわかる。ところがウレタン塗装材の場合、いずれの樹種も摩耗量が0.1gを超えている。これは、ウレタン塗膜そのものの摩耗量を示している。また、回転数が増えるにつれ摩耗量が減少する傾向を示したのは、試験が進むにつれウレタン塗膜の摩耗減少が進み、木地が徐々に表面に現れてきたためである。

なお、耐衝撃性と同様に、脚物家具や箱物家具の性能評価方法には特に耐摩耗性は定められてはいない⁹⁾。しかし、特殊加工化粧合板のように、より高い耐摩耗性が求められる用途の場合は、より硬質の塗料を選択する必要がある。

3.2 透明着色仕上げ塗装の最適化の検討

3.2.1 コナラ

画像解析の結果を図6に示す。なお、 ΔL^* は塗装前後の明度差であり、負の方向に大きくなるほど暗くなることを意味する。 $\Delta edge$ は塗装

前後のコントラストの差であり、負の方向に大きくなるほど木目が不明瞭になることを意味する。例えば、「素地着色2_補色0」と「素地着色0_補色15」に着目すると、両者の ΔL^* はほとんど同じ値である一方で、 $\Delta edge$ は大きく異なっており、「素地着色2_補色0」の方が、木目が明瞭であることがわかる。この結果から、コナラの場合、補色下塗りを多用すれば木目のコントラストが小さくなること、逆に素地着色が木目のコントラスト維持に重要であることを定量的に明らかにできた。つまり、コナラは通常のウレタン透明着色仕上げの塗装条件で問題なく塗装できるが、木目をより鮮明に仕上げるには素地着色を一定濃度以上で行った方がよいこと、色調合わせのために行われる補色下塗りは着色剤高濃度条件で行わない方がよいことを定量的に明らかにした。

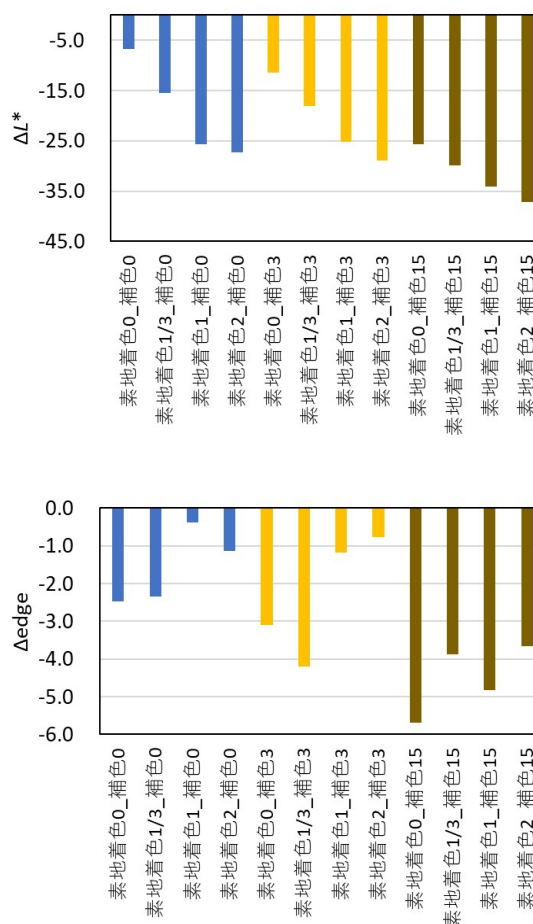


図6 コナラの画像解析結果
 上：塗装前後の明度差
 下：塗装前後の edge 差

3.2.2 ホオノキ, ハンノキ

補色下塗り条件を「着色剤濃度 1 倍×1 回塗装」, 「着色剤濃度 2 倍×1 回塗装」, 「着色剤濃度 3 倍×1 回塗装」の 3 水準とした場合, 着色剤の濃度が増すにつれ面全体に色ムラが生じた。一方, 補色下塗り条件が「着色剤濃度 1 倍×スプレー回数 2 回」, 「着色剤濃度 1 倍×スプレー回数 3 回」の 2 水準の場合は, 色ムラが抑えられつつ, 面全体が濃色に仕上がった。

このことから, 散孔材の場合は, 素地着色は行わずに補色下塗りで色調を制御すべきであるが, 着色剤の濃度を過度に高くすると色ムラが発生する。そこで, 着色剤濃度をある程度抑えた上でスプレー回数を調整することにより, 希望の色調に調整できるとともに色ムラも抑えることができることを明らかにした。

3.2.3 センダン

図 7 に, センダン無塗装材, センダン塗装材, 湿気硬化型ウレタン樹脂系木質強化剤処理センダン塗装材のスクヤナ画像を示す。



図 7 センダン無塗装材: 左, センダン塗装材 (素地着色前処理無し): 中央, センダン塗装材 (素地着色前木質強化剤処理有り) 右の各画像

素地着色前処理無しの場合は, 表面全体が濃色化されることに加え, 特に白斑部と呼ばれる腐朽部位に素地着色剤が集中して含浸され, 黒色斑模様となっている。一方, 湿気硬化型ウレタン樹脂系木質強化剤で処理したものは, 黒色斑模様は全く観察されず, 面全体の色調も若干明るめに仕上がった。これは, 木質強化剤が表面全体に加え特に白斑部に効率よく充填され, さらに高分子化したため, 過度な顔料の含浸を防ぐことができたためと思われる。なお, 目止

め剤 (a) (木目着色用ベース) 処理, 目止め剤 (b) (フィラーベース) 処理, ウォッシュコート (ウレタンウッドシーラーをシンナーで 2 倍に薄めた液) 処理については, 素地着色前処理無しの場合と比べれば意匠性の向上効果は多少あったものの, 特に白斑部への着色剤の過度な含浸は抑制されず, 黒色斑模様が確認された。また, シンナー 10 倍希釈着色剤による素地着色の場合も, 特に白斑部が褐色に着色された。

図 8 に, 各素地着色前処理における素地着色剤浸透量の結果を示す。含浸量が最も少ないのは湿気硬化型ウレタン樹脂系木質強化剤であり, 目止め剤 (b) および (a) がそれに続いた。一方, ウォッシュコートの場合は, 着色剤の含浸抑制効果は低かった。なお, 10 倍希釈した着色剤による処理は, 通常濃度の着色剤のセンダンへの過度な含浸を防ぐ目的の他処理とは異なり, 素地着色工程における使用着色剤濃度そのものを減らすことを目的とした処理である。したがって, シンナー 10 倍希釈素地着色剤の含浸量は, 素地着色前処理無しの場合とほぼ同様の含浸量ではあるものの, センダンへ含浸される着色剤そのものの量は 1/10 程度であると推測される。

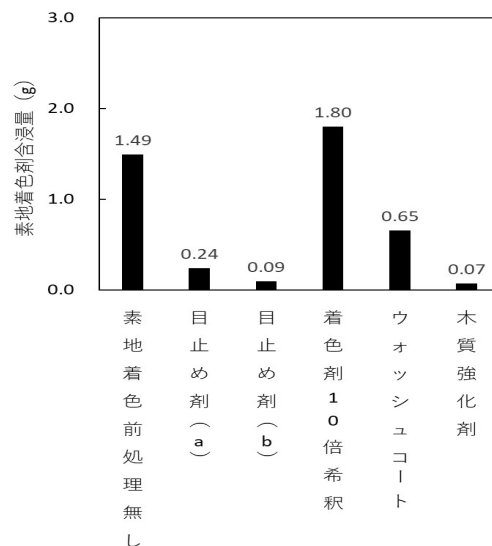


図 8 各素地着色前処理後の素地着色剤含浸量の比較

各処理における黒色斑模様出現の理由は, 以下のとおりであると考えられる。まずウォッシュコート処理については, 図 8 の結果が示すとおり, センダンへの過度な着色剤含浸を防ぐことができなかったためであると思われる。着色剤 10 倍希釈処理については, そもそも着色剤の

過度な含浸を防ぐ前処理ではないことから、たとえ低濃度ではあっても、特に白斑部に着色剤が集中的に含浸されてしまったためであると思われる。目止め剤（a）および（b）処理については、着色剤含浸を防ぐ効果は比較的大きいものの単に充填されるだけであるので、木質強化剤ほどの効果は得られなかったためであると思われる。

4 結 言

早生樹等国産未活用広葉樹材のウレタン透明着色仕上げ塗装について研究を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 広葉樹材にウレタン透明着色仕上げ塗装することにより、無塗装材よりも表面物性が概ね向上することに加え、光変色も抑制できる。
- 2) 環孔材であるコナラの場合、素地着色することにより、意匠性に優れた透明着色仕上げとすることができる。
- 3) 散孔材であるホオノキとハンノキの場合、素地着色せず補色下塗りのみとすることで、色ムラのない仕上げとすることができる。
- 4) センダンの場合、環孔材であるものの着色剤の吸込みが激しく素地着色が困難であるため、素地着色前の湿気硬化型ウレタン樹脂系木質強化剤による前処理が有効である。

謝 辞

本研究は生物系特定産業技術研究支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業（JPJ007097）」（課題番号 04012B2）の支援を受けて実施した。

文 献

- 1) 村田明宏，長谷川良一，河合真樹：岐阜県生活技術研究所研究報告，No.22(2020)50.
- 2) 江部憲一，滝口寿郎，今野俊介，仁藤敬喜：山形県工業技術センター報告，No.55(2023)37.
- 3) 山本健，片岡厚，古山安之，松浦力，木口実：木材学会誌，53(6)(2007)320.
- 4) JIS K 5600-7-7：塗料一般試験方法－第7部：塗膜の長期耐久性－第7節：促進耐候性及び促進耐光性（キセノンランプ法）

(2008).

- 5) JIS K 5600-5-3：塗料一般試験方法－第5部：塗膜の機械的性質－第3節：耐おもり落下性(1999).
- 6) JIS K 5600-5-4：塗料一般試験方法－第5部：塗膜の機械的性質－第4節：引っかかり硬度（鉛筆法）(1999).
- 7) JAS 0233：合板(2024).
- 8) 木材塗装研究会編：第33回 木材塗装基礎講座テキスト，2024，44頁.
- 9) 村井まどか：材料試験技術，67(3)(2022)90.

山形県内清酒製造場から分離した酵母の遺伝子解析

下川浩太

Genetic Analysis of *Saccharomyces cerevisiae* Isolated from Sake Breweries in Yamagata Prefecture

Kota SHIMOKAWA

1 緒 言

清酒製造において、酵母 *Saccharomyces cerevisiae* はアルコール発酵を担う重要な微生物である。現在は、(公財)日本醸造協会(以下、醸造協会)から販売されているきょうかい酵母や各県で開発された県酵母を使用するのが主流だが、全国で開発されている様々な酒米と同様に、地元由来するオリジナル酵母を使用したいというニーズが高まっている。そのため、「醸造環境由来微生物を活用した発酵方法の開発」(県単研究 R3-5)のテーマの一つとして、山形県内清酒製造企業の要望に応じ、蔵内の醸造環境から複数の微生物サンプルを採取し、酵母の分離を行ってきた。県内全域の清酒製造場から酵母の分離を試み、うち 16 社から 22 株の *Saccharomyces cerevisiae* を分離した(以下、分離酵母)。その中から、要望を受けた分離元 2 社と共同研究を実施し、分離酵母の醸造特性を評価してきた¹⁾。その結果、分離酵母は、現在頒布されているきょうかい酵母や県酵母に類する可能性が示された。

(独)酒類総合研究所(以下、酒総研)赤尾氏らにより、高解像度融解(High Resolution Melting: HRM)解析法を用いて、きょうかい酵母(きょうかい 6 号(K6), K7, K9, K10 及びこれらの派生株: 以下、K7 グループ)か否かを判定する DNA マーカーが開発された²⁾。HRM 解析法とは、PCR 増幅産物の配列内の一塩基多型を検出し、DNA 配列の差異を識別する解析手法である。本事業において、酒総研の研究生として研修に参加し、HRM 解析法を用いて分離酵母の K7 グループの判定を行い、さらに K7 グループ内の菌株の系統判別(K6 or K7 or K9 or K10)、アルコール耐性及びセルレニン耐性(カプロン酸エチル高生産性)の二つの醸造特性の有無について推定したので報告する。

2 実験方法

2.1 酵母試験株

本実験には、令和 3 年 1 月から 2 月にかけて、県内 16 社の清酒製造場から取得した分離酵母 22 株を使用した(表 1)。なお、分離酵母 22 株は微生物分類同定分析装置 MALDI Biotyper[®](Bruker 製)により *Saccharomyces cerevisiae* であることを確認した。

表 1 分離酵母と採取場所

分離酵母	採取場所	
No.1	A 社	泡掃除棒
No.2	B 社	醪タンク外側
No.3	B 社	醪タンク外側
No.4	B 社	発酵場の甕
No.5	C 社	櫛棒
No.6	D 社	酒母タンク外側
No.7	D 社	醪タンク外側
No.8	E 社	醪タンク外側
No.9	F 社	醪タンク外側
No.10	G 社	櫛棒
No.11	H 社	酒母タンク外側
No.12	H 社	酒母タンク外側
No.13	I 社	酒母タンク外側
No.14	I 社	醪タンク外側
No.15	I 社	醪室扉
No.16	J 社	醪タンク外側
No.17	K 社	酒母タンク外側
No.18	L 社	甑場
No.19	M 社	製造場神棚
No.20	N 社	醪タンク外側
No.21	O 社	櫛棒
No.22	P 社	醪タンク外側

2.2 酵母試験株の培養及び全 DNA の調製

赤尾氏らの方法に従い、培養した分離酵母 22 株

から全 DNA を調製した。分離酵母を YPD 培地 (Difco 製) 中に 30℃で一晩振盪培養して得られた菌体を回収し、Gen とるくん™DNA 抽出キット (タカラバイオ製) を用い、製品添付のプロトコールに従い全 DNA を回収した。また HRM 解析法による遺伝型タイピングの対照区として、K6 (NBRC: (独) 製品評価技術基盤機構バイオテクノロジーセンター), K7 (RIB: 酒総研保存株), K9 (NBRC), K9 (RIB), K10 (2006BY: 醸造協会 2006 年頒布), K11 (2005BY: 醸造協会 2005 年頒布), K1601 (RIB), K1701 (RIB), K1801 (RIB), 実験室酵母 X2180 (RIB) の全 DNA を試験に応じて使用した。なお、対照区的全 DNA については、酒総研より提供されたものを使用した。

2.3 遺伝型タイピング

赤尾氏らの方法に従い、リアルタイム PCR ベースの HRM 解析法を行った。リアルタイム PCR 装置には、LightCycler® 96 system (Roche 製) を用いて、飽和型蛍光色素には ResoLight Dye (Roche 製) を、耐熱性 DNA ポリメラーゼには Blend Taq® Plus (東洋紡製) を使用した。PCR プライマーと DNA プロブの配列を表 2 に、PCR 反応液組成を表 3 に示した。なお、DNA プロブの 3'末端は、PCR で伸長しないようリン酸基で修飾した。PCR の温度サイクル及び HRM 解析法の条件は、[94℃, 120 秒→ (98℃, 10 秒→ 55℃, 30 秒→72℃, 15 秒)×50 サイクル→95℃, 60 秒→降温 (毎秒 4℃)→40℃, 60 秒→昇温 (毎

秒 0.05℃)→95℃]とした。蛍光強度の測定は、40℃から 95℃への昇温過程で行った。PCR 増幅後、HRM 解析法により得られた蛍光強度のデータを温度微分し、得られた曲線のピーク温度について、分離酵母と DNA マーカー位置の遺伝型が既知である対照区を比較し、分離酵母の遺伝型の判定を行った。

2.4 K7 グループの判定、K7 グループ内の系統判別及び醸造特性の推定

2.4.1 RIM15^{5067ins} と MSN4¹⁵⁴⁰ の遺伝型タイピングによる K7 グループの判定

分離酵母の全 DNA は 2.2 で調製したものを使用した。HRM 解析法による RIM15^{5067ins} と MSN4¹⁵⁴⁰ の遺伝型タイピングは、対照区として K7 (RIB), 実験室酵母 X2180 (RIB) の全 DNA を使用し、2.3 の手法で行った。

2.4.2 K7 グループ内の菌株の系統判別

分離酵母の全 DNA は 2.2 で調製したものを使用した。HRM 解析法による遺伝型タイピングは、対照区として K6 (NBRC), K9 (NBRC), K10 (2006BY) を使用し、2.3 の手法で行った。なお、K7 グループ内の菌株を系統判別する DNA マーカーは、赤尾氏らにより開発された PCR プライマー及び DNA プロブを使用した (詳細は未公表のため不記載)。DNA マーカーは、K6 と K7, K9, K10 の判別で 4 セット, K7 と K6, K9, K10 の判別で 5 セット, K10 と K6, K7, K9 の判別で 5 セット, K6, K9 と K7, K10 の判別で 3 セットの合計 17 セットを使用し、

表 2 PCR プライマー及び DNA プロブの塩基配列

オリゴ DNA	塩基配列
RIM15-HRM-Forward-Primer	5'-CGGTGATGAAGTAGTTAGCAGAGC-3'
RIM15-HRM-Reverse-Primer	5'-ATTGGTGTTGTCGAATTAGCACCA-3'
RIM15-HRM-DNA-Probe	5'-GACTTAATTATGACAAGCCTTGAAGCp-3'
MSN4-HRM-Forward-Primer	5'-CTCTTCGTTCAAAATGCTTCCTAC-3'
MSN4-HRM-Reverse-Primer	5'-GGACTTAAAGTAACACTTGACGAC-3'
MSN4-HRM-DNA-Probe	5'-CTCAACATCATCAATAACAACCTACp-3'
CYR1-HRM-Forward-Primer	5'-GTCGAGTGCCAACTGGAACATTA-3'
CYR1-HRM-Reverse-Primer	5'-TACCGTCGAAGAGATAATACCTGC-3'
CYR1-HRM-DNA-Probe	5'-AGGCACTATGCTATTCGTATATTCp-3'
FAS2-HRM-Forward-Primer	5'-CTGGTATCACCGACCCATACG-3'
FAS2-HRM-Reverse-Primer	5'-CAGGCTCATCCTTGAACGCGTC-3'
FAS2-HRM-DNA-Probe	5'-CTGTTCTGGTTCTGGTATGGGTGp-3'

表 3 PCR 反応液の組成

	<i>RIM15</i> ^{5067ins}	<i>MSN4</i> ¹⁵⁴⁰	<i>CYR1</i> ²⁰⁶⁶	<i>FAS2</i> ³⁷⁴⁸
H ₂ O	10.17 μ L	10.30 μ L	10.17 μ L	10.086 μ L
PCR Buffer (10 $\times$)	2 μ L	2 μ L	2 μ L	2 μ L
dNTPs (2 mM)	2 μ L	2 μ L	2 μ L	2 μ L
<i>RIM15</i> -HRM-Forward-Primer (2 pmol/ μ L)	0.63 μ L	-	-	-
<i>RIM15</i> -HRM-Reverse-Primer (10 pmol/ μ L)	1 μ L	-	-	-
<i>RIM15</i> -HRM-DNA-Probe (10 pmol/ μ L)	1 μ L	-	-	-
<i>MSN4</i> -HRM-Forward-Primer (2 pmol/ μ L)	-	0.5 μ L	-	-
<i>MSN4</i> -HRM-Reverse-Primer (10 pmol/ μ L)	-	1 μ L	-	-
<i>MSN4</i> -HRM-DNA-Probe (10 pmol/ μ L)	-	1 μ L	-	-
<i>CYR1</i> -HRM-Forward-Primer (2 pmol/ μ L)	-	-	0.63 μ L	-
<i>CYR1</i> -HRM-Reverse-Primer (10 pmol/ μ L)	-	-	1 μ L	-
<i>CYR1</i> -HRM-DNA-Probe (10 pmol/ μ L)	-	-	1 μ L	-
<i>FAS2</i> -HRM-Forward-Primer (2 pmol/ μ L)	-	-	-	0.714 μ L
<i>FAS2</i> -HRM-Reverse-Primer (10 pmol/ μ L)	-	-	-	1 μ L
<i>FAS2</i> -HRM-DNA-Probe (10 pmol/ μ L)	-	-	-	1 μ L
gDNA (10 ng/ μ L)	2 μ L	2 μ L	2 μ L	2 μ L
ResoLight Dye (20 $\times$)	1 μ L	1 μ L	1 μ L	1 μ L
Blend Taq Plus (2.5 U/ μ L)	0.2 μ L	0.2 μ L	0.2 μ L	0.2 μ L
Total	20.0 μ L	20.0 μ L	20.0 μ L	20.0 μ L

複数のマーカーを使用することにより、一塩基変異などによる誤判定のリスクを低減させた。

2.4.3 *CYR1*²⁰⁶⁶ の遺伝型タイピングによるアルコール耐性株の推定

分離酵母の全 DNA は 2.2 で調製したものを使用した。また、HRM 解析法による *CYR1*²⁰⁶⁶ の遺伝型タイピングは、対照区として K7 (RIB), K9 (RIB), K11 (2005BY) の全 DNA を使用し、2.3 の手法で行った。

2.4.4 *FAS2*³⁷⁴⁸ の遺伝型タイピングによるセルレニン耐性株（カプロン酸エチル高生産株）の推定

分離酵母の全 DNA は 2.2 で調製したものを使用した。HRM 解析法による *FAS2*³⁷⁴⁸ の遺伝型タイピングは、対照区として K9 (RIB), K1601 (RIB), K1701 (RIB), K1801 (RIB) の全 DNA を使用し、2.3 の手法で行った。

3 実験結果および考察

3.1 *RIM15*^{5067ins} と *MSN4*¹⁵⁴⁰ の遺伝型タイピングによる K7 グループの判定

RIM15^{5067ins} をマーカーとして得られた対照区の HRM 解析結果を図 1 に示した。K7 型ホモ接

合体は K7, 非 K7 型ホモ接合体は X2180 の DNA を使用し、疑似ヘテロ接合状態として K7 と X2180 の DNA を等量配合して試験に供した。

その結果、K7 のピーク温度は X2180 より数℃高く、X2180 と K7 の等量配合では二つのピークが得られた。このことは赤尾氏らの結果と一致しており、再現性を確認することができた。同様に、分離酵母を用いて HRM 解析を行い、対照区と比較したところ、No.19 のみが X2180 と同じ温度にピークが現れ、その他 21 株で K7 と同じ温度でピークが現れた（図 2）。従って、No.19 のみが非 K7 グループ、その他 21 株が K7 グループと判定された（表 4）。また、*MSN4*¹⁵⁴⁰ をマーカーに HRM 解析を行ったところ、*RIM15*^{5067ins} の結果と同様に、No.19 のみが非 K7 グループ、その他 21 株が K7 グループと判定された。

3.2 K7 グループ内の菌株の系統判別

次に、K7 グループ内の菌株を判別可能な DNA マーカー 17 セットを用いて、分離酵母及び対照区で HRM 解析を行った。その結果、得られた曲線のピーク温度やパターンから、K6 系は該当なし、K7 系が 3 株、K9 系が 10 株、K10

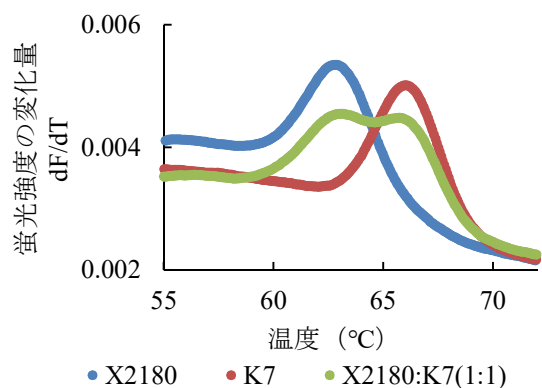


図 1 $RIM15^{5067ins}$ をマーカーとした対照区の HRM 解析結果

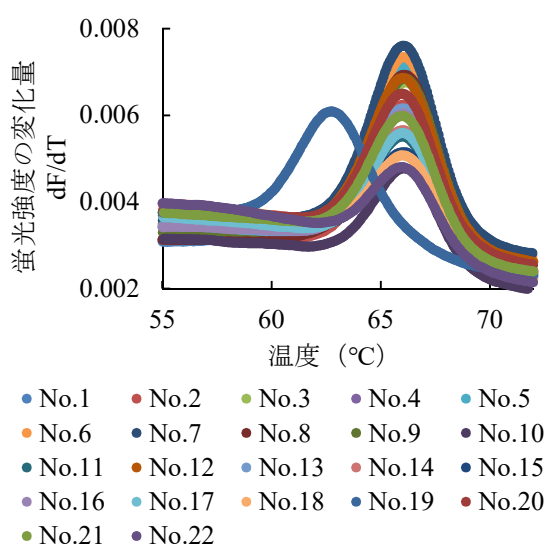


図 2 $RIM15^{5067ins}$ をマーカーとした分離酵母 22 株の HRM 解析

表 4 HRM 解析法による分離酵母 22 株の K7 グループ判定結果及び、系統判別結果

分離酵母	K7 グループ判定	系統判別
No.1	K7 グループ	K9 系
No.2	K7 グループ	K10 系
No.3	K7 グループ	K7 系
No.4	K7 グループ	K9 系
No.5	K7 グループ	K9 系
No.6	K7 グループ	K7 系
No.7	K7 グループ	K1801
No.8	K7 グループ	K1801
No.9	K7 グループ	K9 系
No.10	K7 グループ	K10 系
No.11	K7 グループ	K9 系
No.12	K7 グループ	K9 系
No.13	K7 グループ	K1801
No.14	K7 グループ	K9 系
No.15	K7 グループ	K7 系
No.16	K7 グループ	K1801
No.17	K7 グループ	K9 系
No.18	K7 グループ	K9 系
No.19	非 K7 グループ	該当なし
No.20	K7 グループ	K10 系
No.21	K7 グループ	K1801
No.22	K7 グループ	K9 系

系が 3 株と判定され、また、K1801 が 5 株と推定された (表 4)。さらに、No.2 については K10 と K6, K7, K9 判別用マーカー 5 種類のうち 2 種類、No.20 については 1 種類で、対照区である K10 と異なるピーク温度を示した。なお、この 2 株の系統判別結果は、それぞれ採取した蔵で使用していた可能性がある K10 系統の清酒酵母 (明利小川酵母, M310, YK009) とも異なっていたため、K10 系統ではあるものの、既存の清酒酵母と異なる遺伝型である可能性が示された。

以上のことから、リアルタイム PCR 法を用いた HRM 解析法により、明瞭かつ迅速に分離酵母の系統を判別することができた。今回取得した分離酵母の多くはきょうかい酵母系統であっ

たが、一部の株においては、蔵の製造環境下で生息するにつれて、LOH (loss of heterozygosity/ヘテロ接合性の消失) 等により遺伝型が変異したと推察された。

3.3 $CYR1^{2066}$ の遺伝型タイピングによるアルコール耐性株の推定

K11 は、1975 年に K7 の自然突然変異体として分離され、アルコール耐性を有し、醗後半でもアルコール発酵が安定していることが知られている。これは、細胞の増殖を促すシグナル物質である cAMP を合成する酵素の設計図となる $CYR1$ という遺伝子配列の 2066 番目の塩基が、K7 では [A/G] のヘテロ接合であるのに対して、K11 では [A/A] のホモ接合に変異したことに起因している。本研究において、 $CYR1^{2066}$ の対照

区として、野生型ホモ接合体[G/G]は K9（非アルコール耐性酵母）、変異型ホモ接合体[A/A]は K11（アルコール耐性酵母）、ヘテロ接合体[A/G]は K7（非アルコール耐性酵母）の DNA を使用し、*CYRI*²⁰⁶⁶ をマーカーとして HRM 解析を行い、アルコール耐性株の推定を行った。

まず対照区の結果では、K11 のピーク温度は K9 よりも数℃低く現れ、K7 では二つのピークが現れた（図 3）。分離酵母でも同様に HRM 解析を行ったところ、3.2 で K7 系と判定された 3 株（No.3, 6, 15）は、本試験でも二つのピークが現れたことから K7 と同じ[A/G]ヘテロ接合と判明し、K7 系であることを支持する結果となった（図 4、表 5）。また、それ以外の 19 株は、非アルコール耐性型[G/G]ホモ接合と判定された（図 5、表 5）。従って、本試験に供した 22 株の分離酵母は、いずれもアルコール耐性を有さないことが推定された。

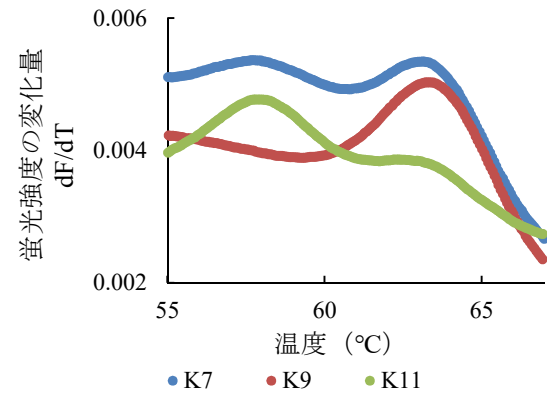


図 3 *CYRI*²⁰⁶⁶ をマーカーとした対照区の HRM 解析結果

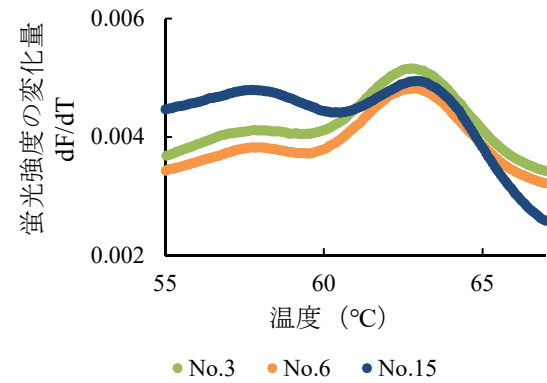


図 4 *CYRI*²⁰⁶⁶ をマーカーとした分離酵母（No.3, 6, 15）の HRM 解析結果

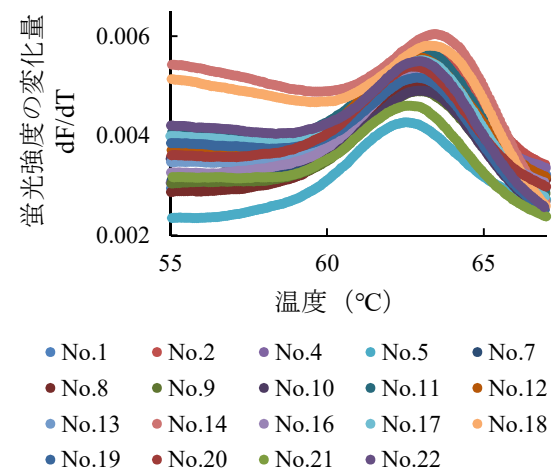


図 5 *CYRI*²⁰⁶⁶ をマーカーとした分離酵母（No.1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22）の HRM 解析結果

表 5 *CYRI*²⁰⁶⁶ をマーカーとした HRM 解析法による分離酵母のアルコール耐性の推定結果

酵母	遺伝型	アルコール耐性株
		推定結果
K9	G/G	-
K11	A/A	○
K7	A/G	-
No.1	G/G	-
No.2	G/G	-
No.3	A/G	-
No.4	G/G	-
No.5	G/G	-
No.6	A/G	-
No.7	G/G	-
No.8	G/G	-
No.9	G/G	-
No.10	G/G	-
No.11	G/G	-
No.12	G/G	-
No.13	G/G	-
No.14	G/G	-
No.15	A/G	-
No.16	G/G	-
No.17	G/G	-
No.18	G/G	-
No.19	G/G	-
No.20	G/G	-
No.21	G/G	-
No.22	G/G	-

3.4 $FAS2^{3748}$ の遺伝型タイピングによるカプロン酸エチル高生産株（セルレニン耐性株）の推定

セルレニンは、中鎖脂肪酸に類似の構造を持つ脂肪酸合成の阻害剤である³⁾。セルレニン耐性酵母は脂肪酸合成酵素に変化が生じており、その結果、清酒の吟醸香成分であるカプロン酸エチルを高生産することが知られている^{4,5)}。これは、脂肪酸合成遺伝子 $FAS2$ の 3748 番目の塩基が野生型 G から変異型 A へ変異し、酵素 Fas2 の 1250 番目のアミノ酸であるグリシン (G:glycine) からセリン (S:serine) への変換 (G1250S) が起因している⁶⁾。さらに、この $FAS2$ -G1250S 変異を識別して、カプロン酸エチル高生産清酒酵母を検出する方法が報告されている^{6,7)}。本研究において、対照区として $FAS2^{3748}$ の野生型ホモ接合体[G/G]は K9 (非セルレニン耐性酵母)、変異型ホモ接合体[A/A]は K1601 (セルレニン耐性酵母)、ヘテロ接合体[A/G]は K1701 及び K1801 (セルレニン耐性酵母) の DNA を使用し、 $FAS2^{3748}$ をマーカーとして HRM 解析を行い、セルレニン耐性株の推定を行った。

まず対照区の結果では、K1601 のピーク温度は K9 よりも数℃低く現れ、K1701、K1801 では二つのピークが現れた (図 6)。分離酵母でも同様に HRM 解析を行ったところ、No.1 が[A/A]ホモ接合 (図 7、表 6)、No.2、7、8、10、13、16、20、21 が[A/G]ヘテロ接合 (図 8、表 6)、それ以外の 13 株が[G/G]ホモ接合と判定された (図 9、表 6)。3.2 の系統判別結果と照らし合わせると No.1 は K9 系、No.2、10、20 は K10 系、No.7、8、13、16、21 は K1801 由来の、それぞれ $FAS2^{3748}$ 変異によるセルレニン耐性株 (カプロン酸エチル高生産株) であることが推定された。

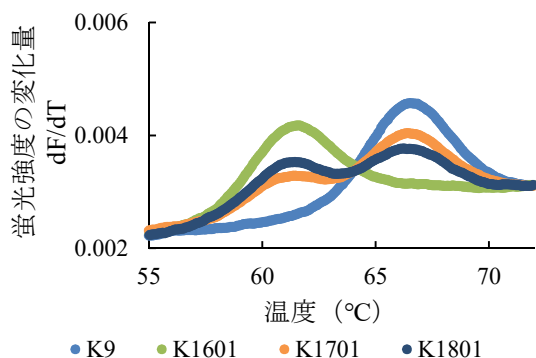


図 6 $FAS2^{3748}$ をマーカーとした対照区の HRM 解析結果

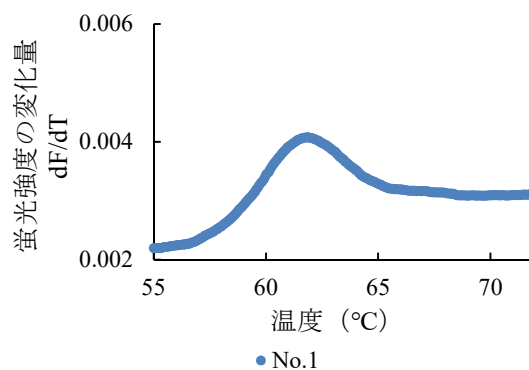


図 7 $FAS2^{3748}$ をマーカーとした分離酵母 (No.1) の HRM 解析結果

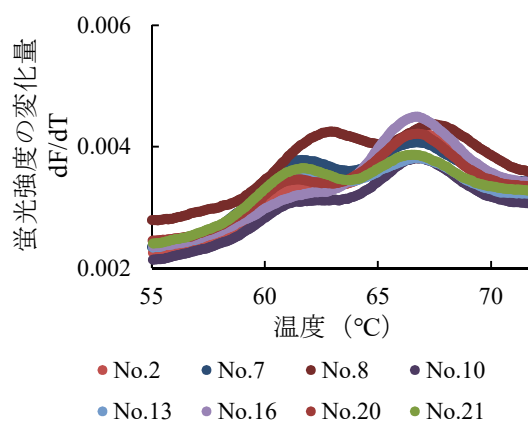


図 8 $FAS2^{3748}$ をマーカーとした分離酵母 (No.2, 7, 8, 10, 13, 16, 20, 21) の HRM 解析結果

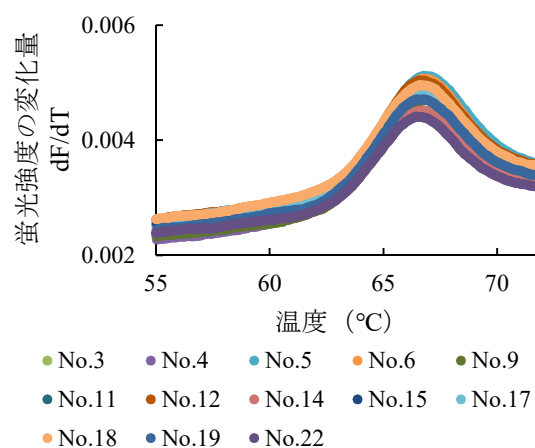


図 9 $FAS2^{3748}$ をマーカーとした分離酵母 (No.3, 4, 5, 6, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 19, 22) の HRM 解析結果

表 6 $FAS2^{3748}$ をマーカーとした HRM 解析法による分離酵母のセルレニン耐性株（カプロン酸エチル高生産株）の推定結果

酵母	遺伝型	セルレニン耐性株 推定結果
K9	G/G	-
K1601	A/A	○
K1701	A/G	○
K1801	A/G	○
No.1	A/A	○
No.2	A/G	○
No.3	G/G	-
No.4	G/G	-
No.5	G/G	-
No.6	G/G	-
No.7	A/G	○
No.8	A/G	○
No.9	G/G	-
No.10	A/G	○
No.11	G/G	-
No.12	G/G	-
No.13	A/G	○
No.14	G/G	-
No.15	G/G	-
No.16	A/G	○
No.17	G/G	-
No.18	G/G	-
No.19	G/G	-
No.20	A/G	○
No.21	A/G	○
No.22	G/G	-

4 結 言

本研究で得られた知見は以下のとおり。

- 1) 分離酵母 22 株のうち K7 グループが 21 株、非 K7 グループが 1 株 (No.19) と判明した。
- 2) K7 グループ内の系統判別したところ、K7 系が 3 株、K9 系が 10 株、K10 系が 3 株と判別され、K1801 が 5 株と推定された。
- 3) K10 系と判別された 2 株 (No.2, 10) は、既存の清酒酵母と遺伝型が一部異なっていた。
- 4) 分離酵母 22 株のうち、 $CYRI^{2066}$ 変異によるアルコール耐性を有する株はないと推定

された。

- 5) 分離酵母 22 株のうち、9 株 (No.1, 2, 7, 8, 10, 13, 16, 20, 21) で $FAS2^{3748}$ 変異によるセルレニン耐性株（カプロン酸エチル高生産株）であることが推定された。

謝 辞

本研究は、独立行政法人酒類総合研究所にて研究生として行ったものである。研修を受け入れていただいた赤尾健部門長、金井宗良先生、周延さんをはじめ、醸造微生物研究部門の皆様には深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 下川浩太, 長谷川悠太, 工藤晋平, 奥山隆史, 中村信介, 大比良信孝, 神理 : 山形県工業技術センター報告, **55**, 34-36 (2023).
- 2) 赤尾健, 周延, 渡辺大輔, 岡崎直人, 下飯仁 : 醸協, **113** (10), 631-641 (2018).
- 3) S. Omura : *Bacteriol. Rev.*, **40**, 681-697 (1976).
- 4) E. Ichikawa, N. Hosokawa, Y. Hata, Y. Abe, K. Suginami, S. Imayasu : *Agric. Biol. Chem.*, **55** (8), 2153-2154 (1991).
- 5) K. Aritomi, I. Hirokawa, H. Hoshida, M. Shiigi, Y. Nishizawa, S. Kashiwagi, R. Akada : *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **68** (1), 206-214 (2004).
- 6) H. Tamura, H. Okada, K. Kume, T. Koyano, T. Goshima, R. Nakamura, T. Akao, H. Shimoi, M. Mizunuma, Y. Ohya, D. Hirata : *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **79** (7), 1191-1199 (2015).
- 7) 田村博康, 栗林喬, 久米一規, 五島徹也, 中村諒, 渡邊健一, 赤尾健, 下飯仁, 水沼正樹, 平田大 : 醸協, **110** (12), 820-826 (2015).

PDMS 膜を用いたトライボ発電デバイスの開発

岩松新之輔

Triboelectric Energy Generators using PDMS Membranes

Shinnosuke IWAMATSU

1 緒 言

IoT センサを活用した工程管理、品質管理が、多くの製造業で行われている。IoT センサを用いることで情報の取得が容易になり、設備稼働状況の監視、作業条件の自動収集など、多様な用途へ応用が進んでいる¹⁾。一方で、多数のセンサを運用する際、センサの設置や維持コストの増大が課題となっている。この課題の解決策の一つとして、環境発電デバイスを用いた IoT センサの自律駆動化が提案されている。環境発電は、環境中に広く薄く存在するエネルギーから電力を取り出す技術であり、振動、熱、光、電波などがエネルギーソースとして利用されている。本研究では、環境中のエネルギー密度が高い振動に着目し、摩擦帯電と静電誘導を利用したトライボ発電デバイスの原理検証と実用を想定した応用開発を行った。

2 実験方法

2.1 原理試作

トライボ発電の原理を図 1 に示す。帯電列が異なる物体を接触させると、摩擦帯電により接触面で電荷の移動が発生する。その後、接触面を分離すると物体間に電位差が生じ、電流が流れる。このような接触、分離を繰り返すことで交流電流が得られる²⁾。本研究では、接触面の材料にポリジメチルシロキサン (PDMS) とポリイミド (PI) を採用した。PDMS には、SILPOT 184 (東レ・ダウコーニング) を用いた。基剤と硬化剤を重量比 10:1 で混合し、真空乾燥機で脱泡後、3000 rpm、30 s の条件で 50 mm 角、厚さ 0.5 mm の銅基板にスピコートした。その後、70°C で 2 h、大気中で加熱し、硬化反応を進行させた。PI には、厚さ 0.1 mm のカプトンテー

プを用い、PDMS と同様の銅基板に張り付けた。

図 2 に振動発電評価系の構成を示す。二対の門型構造体を組み合わせた構成であり、内側の構造体の上面、外側の構造体の下面にトライボ電極を設置した。内側の門型構造体に圧縮空気で駆動する振動体を固定し、天板を上下振動させ、外側の門型構造体との間で接触、分離を繰り返す構成とした。トライボ電極の出力特性は、電極間に接続した負荷抵抗の電圧をオシロスコープで測定することにより評価し、発電量の負荷抵抗依存性、振動周波数、初期電極間距離の影響を検証した。

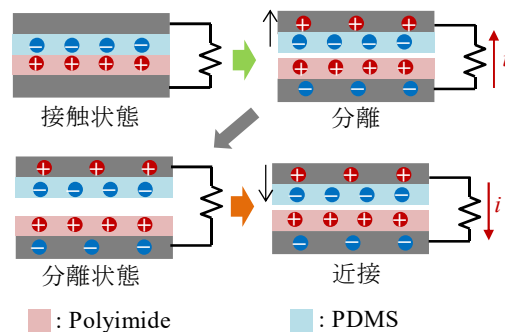


図 1 トライボ発電の原理

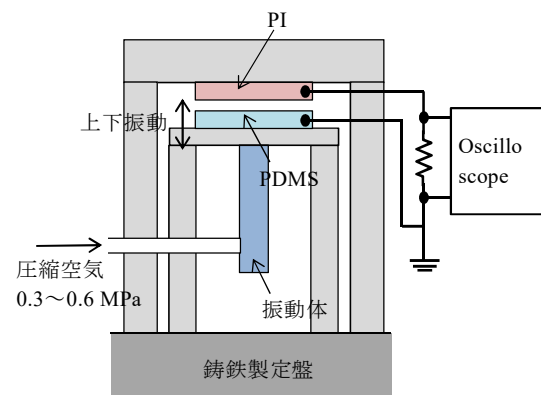


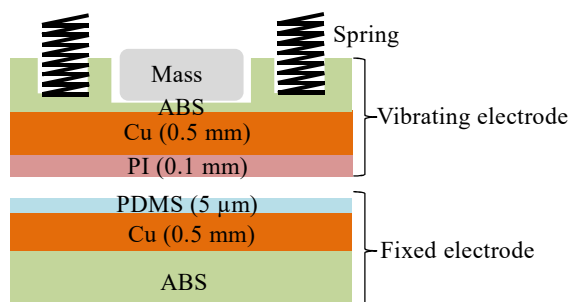
図 2 振動発電評価系

2.2 小型一体型デバイスの開発

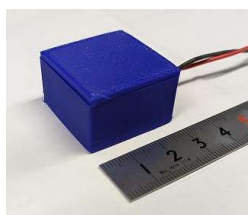
機械振動による発電を実現するため、小型一体型デバイスを開発した。断面構造と外観を図3に示す。3Dプリンタで作製したABS製筐体に電極を納めた構造であり電極基板には20mm角、厚さ0.5mmの銅基板を用い、前述の方法でPDMSとPIを形成した。PDMS電極はABS筐体に固定し、PI電極を可動電極とした。PI電極には、おもり、バネを取り付け、機械振動により上下に駆動する構造とした。発電特性の評価は、図2に示した振動発電評価系とコンプレッサの振動を用いた。

3 実験結果および考察

原理試作デバイスの出力電圧波形を図4に示す。負荷抵抗には、10 k Ω 、100 k Ω 、1 M Ω 、10 M Ω の固定抵抗を用い、振動体への供給圧は0.4 MPa、初期電極間距離は1 mmとした。オシロスコープを用いて固定抵抗の電圧を測定した結果、PDMSとPIの接触時に正の電圧、分離時に負の電圧が確認され、振動体の駆動周波数に対応した60 Hz程度の交流電圧が得られた。出力電圧は、負荷抵抗を大きくすると増加する傾向となり、負荷抵抗10 k Ω で0.5 Vpp、100 k Ω で5.6 Vpp、1 M Ω で22.6 Vpp、10 M Ω で29.4 Vppとなった。以上の結果から、負荷抵抗を大きく

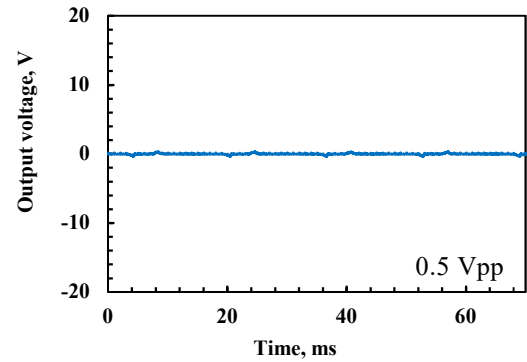


(a) 断面構造

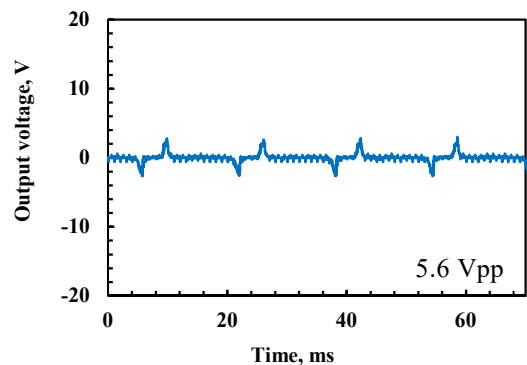


(b) 外観

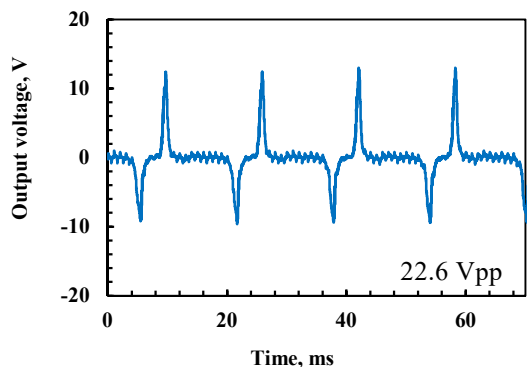
図3 小型一体型デバイスの断面構造と外観



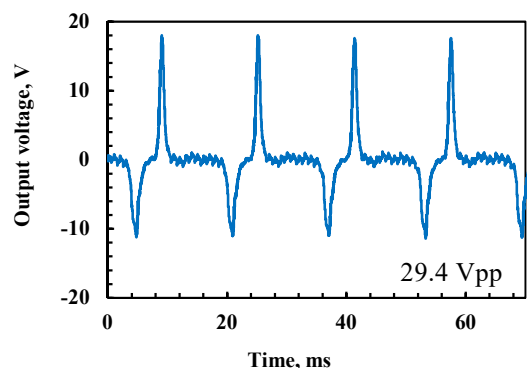
(a) 10 k Ω



(b) 100 k Ω



(c) 1 M Ω



(d) 10 M Ω

図4 出力電圧の負荷抵抗依存性

することで、高い出力電圧が得られることが確認された。一方で、負荷抵抗を大きくすると、ノイズの影響を受けやすくなるため、用途に応じて適切な抵抗値を選択する必要があることもわかった。

電力量の負荷抵抗依存性を図 5 に示す。電力量は、オシロスコープで測定した出力電圧と負荷抵抗の値から算出した。負荷抵抗 1 k Ω から 10 M Ω の範囲で評価を行った結果、100 k Ω から 1 M Ω の間にピークがある応答となった。一般に振動発電では、インピーダンスが整合する負荷抵抗で最大値を取ることが知られており³⁾、本研究の構成では、負荷抵抗 1 M Ω で最大電力 500 μ W を示した。以上の結果から、平行平板構造、単振動条件におけるトライボ発電の出力特性が明らかとなり、デバイス設計の指針が得られた。

次に振動周波数の影響を評価した。評価結果を図 6 に示す。振動体への供給圧を 0.2 から 0.6 MPa の範囲で変化させ、40~80 Hz の振動条件で評価を行った。負荷抵抗に 1 M Ω の固定抵抗を用い、出力電圧を測定した結果、60 Hz 付近までは出力電圧が増加し、その後、飽和する傾向が確認された。以上の結果から、本構成における最適周波数を 60 Hz と判断し、標準条件として用いることとした。

初期電極間距離の影響を評価した結果を図 7 に示す。電極間距離は、接触状態の 0 mm から 2 mm の範囲で変化させた。電極間極理が 1 mm 以下の振動時に電極が接触する条件では、40 Vpp 程度の出力電圧が得られ、距離の依存性は小さかった。一方、振動時に電極が接触しない 1.5 mm 以上の条件では、電極間極とともに出力電圧が低下し、電極間距離 2 mm では 6.6 Vpp の電圧となった。この出力電圧の低下は、帯電体の接触による摩擦帯電が減少したためと考えられる。一方で、帯電列が異なる誘電体の近接により電極表面に電荷が生じるため、非接触条件でも電圧が発生することが確認され、接触による電極の消耗を抑制した非接触発電の可能性を見出した。

小型一体型デバイスの出力電圧特性を図 8 に示す。振動発電評価系を用いた評価では、負荷抵抗 1 M Ω 、供給圧 0.4 MPa の条件で 4 Vpp の電圧出力が得られた。図 5 の原理試作デバイスと

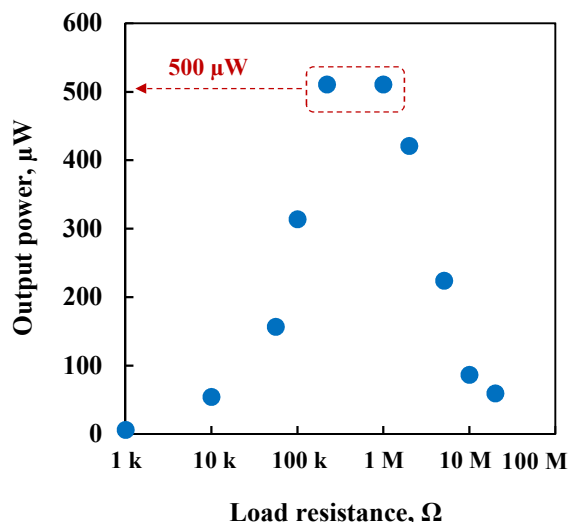


図 5 電力量の負荷抵抗依存性

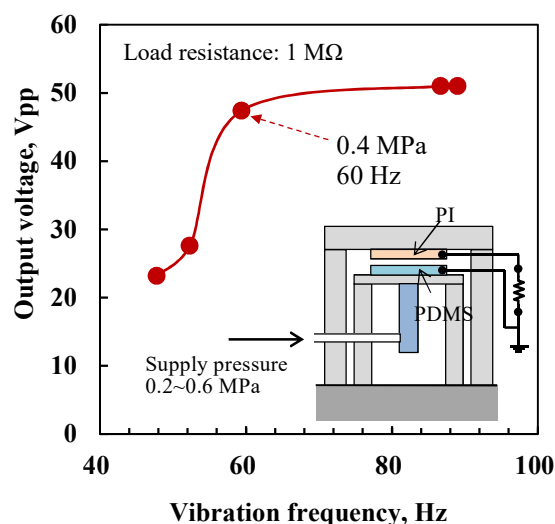


図 6 出力電圧の振動周波数依存性

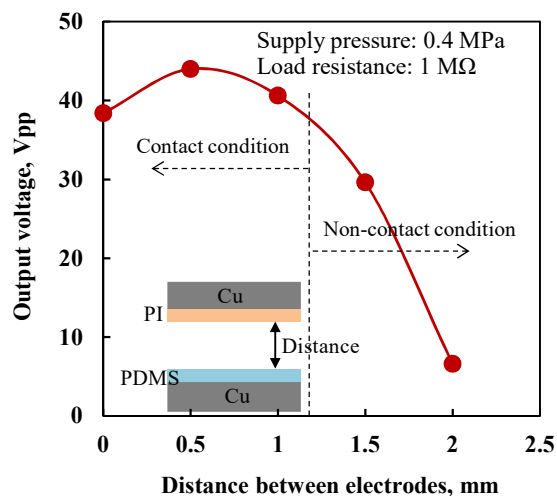


図 7 出力電圧の電極間距離依存性

比較して電極面積が 25% になっているため、出力が大幅に低下したが、一体構造による電圧出力を確認することができた。一方、デバイスをコンプレッサに接触させ、加振した場合は、出力電圧は 1 V_{pp} 程度となり、ノイズの増加も確認された。この要因は、振動発電評価系と比較すると、振動加速度が低く、振動方向が不規則なためと考えられる。今後、機械振動により発電を行うためには、発生する振動に合わせたデバイス設計が必要になる。

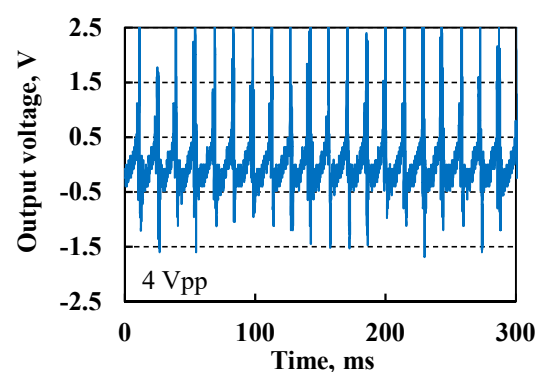
4 結 言

PDMS 膜を用いたトライボ発電デバイスの特性評価を行い、以下の知見を得た。

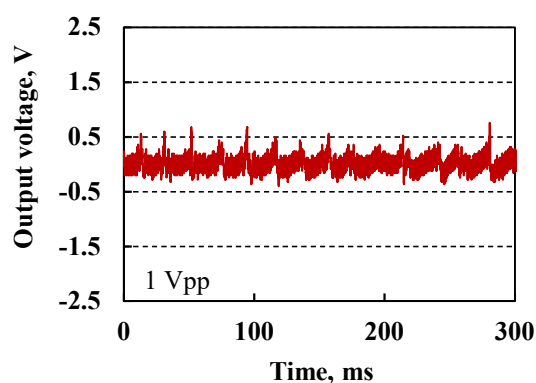
- 1) PDMS と PI を組み合わせた原理検証デバイスを作製し、両者の接触、分離による交流電圧の発生を確認した。
- 2) 原理試作デバイスを用いて、発電量の負荷抵抗依存性を評価した結果、1 M Ω で最大電力量 500 μ W が得られた。
- 3) 出力電圧の周波数依存性、電極間距離依存性を明らかにした。
- 4) 小型一体型振動発電デバイスを開発し、コンプレッサの振動による電圧出力を確認した。

文 献

- 1) 知崎一紘, 地主岳史 : デジタルプラクティス, **8**, 3 (2017).
- 2) 柳田幸祐, 飯田泰基, 本間浩章, 橋口原, 年吉洋, 鈴木孝明 : 電気学会論文誌 E, **141**, 7 (2021).
- 3) 神野伊策 : 表面技術, **67**, 7 (2016).



(a) 振動発電評価



(b) コンプレッサ

図 8 小型一体型デバイスの出力電圧特性

ブラシ加工によるピーニング処理技術の開発

莊司 彰人

Development of Peening Technology using Brush Processing

Akihito SHOJI

1 緒 言

機械・構造物の破損原因の6～7割が金属疲労といわれており¹⁾、疲労強度を高める表面改質処理の一つにピーニングがある。様々なピーニング手法で材料表面を塑性変形させることで、圧縮残留応力付与、硬さ向上等の効果が得られ、多くの工業分野で活用されている²⁾。

一般に広く利用されているショット法は、粒子材を空気圧等で加速し材料表面に投射する手法で、活用するためには専用装置の導入が必要となる³⁾。ブラシ法は、ブラシ工具を用いる簡便な手法であり、既存の機械加工機を用いた加工が可能である。また、条件変更や工具交換が容易である他、ショット法では制約がある内径部等への適用や、ブラシ工具の用途開拓も期待できる。一方、ブラシ法は関連する技術情報が少なく、その効果や実現性が明らかでない。

そこで、本研究では金属材料を対象として、ブラシ加工部のピーニング効果の評価、ブラシ加工品の耐久性評価を行い、ブラシピーニング（以下BP）の有効性を検討した。

2 実験方法

2.1 BP加工部のピーニング効果の評価

2.1.1 供試材

供試材は、表1に示す4種類の金属材料を用い、25 mm×100 mm×10 mmの板材とした。SKS3のみBP加工を施す箇所は前処理として表面研磨を行い、その他は切削面とした。

表1 供試材

試料	①	②	③	④
材質	SS400	SUS304	A2017	SKS3
質別	焼鈍材	焼鈍材	時効材	焼入材
表面	切削面	切削面	切削面	研磨面

2.1.2 BP加工

BP加工は、図1のとおり、汎用立形フライス盤（日立精機、MS型）に外径50 mmのブラシ工具（高島産業、軸付きホイール型）を取り付け、乾式で行った。このブラシ工具の通常の用途は、バリ取り、錆・スケール除去等である。

加工条件は、表2（SS400、A2017）、表3（SUS304、SKS3）に示すとおりで、項目毎に水準1～3を設けた。ある項目を3水準実験する際は、その他の項目は表中の網かけ部に固定した。例えば、表2では、切込量を水準1から3まで変化させ実験を行う場合、回転数は980 rpm、送り回数は1回、毛材材質は軟鉄線に固定し、また、毛材線径は0.15 mmのみとした。表3では、回転数を水準1から3まで変化させ実験を行う場合、切込量は1.0 mm、送り回数は1回、毛材材質は硬鋼線、毛材線径は0.15 mmに固定した。また、BPの加工の強さを示すピーニング強度は、水準3が最も高い想定である。



図1 BP加工

表2 BP加工条件（SS400、A2017）

項目	水準1	水準2	水準3
切込量, mm	0.1	1.0	2.0
回転数, rpm	155	980	1800
送り回数 (60 mm/min)	1回	5回	10回
毛材材質 (硬さHV)	軟鉄線 (約250)	硬鋼線 (約450)	砥粒線 (約2000)

表 3 BP 加工条件 (SUS304, SKS3)

項目	水準 1	水準 2	水準 3
切込量, mm	0.1	1.0	2.0
回転数, rpm	155	980	1800
送り回数 (60 mm/min)	1 回	5 回	10 回
毛材材質 (硬さ HV)	軟鉄線 (約 250)	硬鋼線 (約 450)	砥粒線 (約 2000)
毛材線径, mm	0.15	0.25	0.35

2.1.3 残留応力測定, 硬さ測定, 粗さ測定

BP 加工部表面の残留応力, 硬さ, 粗さを測定し, BP 加工によるピーニング効果を評価した。残留応力測定には X 線応力測定装置 (リガク, RINT2500V) を用い, 表 4 に示す測定条件により, ブラシ回転方向に対して平行方向, 直角方向の表面残留応力を測定した。硬さ測定にはマイクロビッカース硬さ試験機 (ミットヨ, HM221) を用い, 試験荷重 100 gf (HV0.1) で表面硬さを測定した。粗さ測定には表面粗さ測定機 (ミットヨ, SV-C4500) を用い, 基準長さ 0.25mm, 評価長さ 1.25 mm の条件で, ブラシ回転直角方向の表面粗さ Ra を測定した。

表 4 残留応力測定条件

項目	SS400	SUS304	A2017	SKS3
解析方法	並傾法, $\psi 0$ 一定法			
コリメータ	直径 2 mm			
管球, フィルタ	Cr, V (SUS はフィルタなし)			
X 線出力	40 kV, 40 mA (SUS は 30 mA)			
ψ 角度	0°, 20.7°, 30°, 37.8°, 45°			
2 θ	156°	148°	157°	156°
計数時間	10 s	50 s	50 s	30 s

2.2 BP 加工品の耐久性の評価

2.2.1 供試材

供試材は, SKH40 の焼入材を用い, 5 mm×60 mm×1 mm の薄板材とした。BP 加工を施す箇所は前処理として表面研磨を行った。

2.2.2 BP 加工

毛材線径 0.35 mm, 外径 50 mm の硬鋼線ブラシを用い, 切込量 1.5 mm, 回転数 980 rpm, 加工時間 5 秒の条件で, 供試材の片面中央部に BP 加工を施した。供試材長手方向に対してブラシ回転方向を平行とした。

2.2.3 3 点曲げ繰返し試験

材料試験機 (島津製作所, AGX-100kNV) を用い, 図 2 のとおり, 3 点曲げ繰返し試験を行い, BP 加工による破断サイクル回数の変化を比較評価した。供試材 BP 加工部は下面側とした。繰返し負荷の最大値 $\sigma_{\max}$ は静的曲げ強さ σ_b の 90%, 最小値 $\sigma_{\min}$ は σ_b の 10% とした。

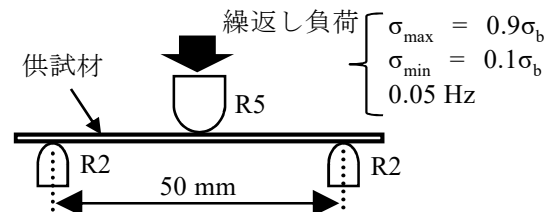


図 2 3 点曲げ繰返し試験

3 実験結果および考察

3.1 BP 加工部のピーニング効果の評価

3.1.1 SS400, SUS304, A2017 (軟質材)

図 3(a)(b)に SS400, 図 4(a)(b)に SUS304, 図 5(a)(b)に A2017 の表面残留応力の測定結果を示す。BP 無し (切削面) の測定結果も併せて示す。3 材質全てで, BP 加工により供試材表面の引張残留応力が圧縮残留応力に変化し, 応力状態が改善した。引張残留応力は材料表面のき裂の発生や進展を促進し, 圧縮残留応力はそれらを抑制するため, 疲労強度においては表面に圧縮応力が残留することが望ましい。

図 3(c)に SS400, 図 4(c)に SUS304, 図 5(c)に A2017 の表面硬さの測定結果を示す。(A2017 の毛材材質・水準 2 は加工表面が粗く試験不可。) 3 材質全てで, BP 加工により表面硬さが向上した。また, ピーニング強度が高いほど, 表面硬さは高くなる傾向を示した。これは, ピーニング強度が高いほど, ブラシ毛材先端の衝突および擦れによる加工部表層の塑性変形の程度がより大きくなったためと考えられる。

図 3(d)に SS400, 図 4(d)に SUS304, 図 5(d)に A2017 の表面粗さの測定結果を示す。SS400 および A2017 では, 毛材材質が硬鋼線, 砥粒線の加工条件で表面粗さが大きくなる傾向を示した。これは, 供試材と比較して毛材の硬さが高いため, 塑性変形よりも除去作用の程度が大きくなった可能性が考えられる。SUS304 では, 毛材線径 0.25mm, 0.35mm の加工条件で表面粗さが大きくなる傾向を示した。

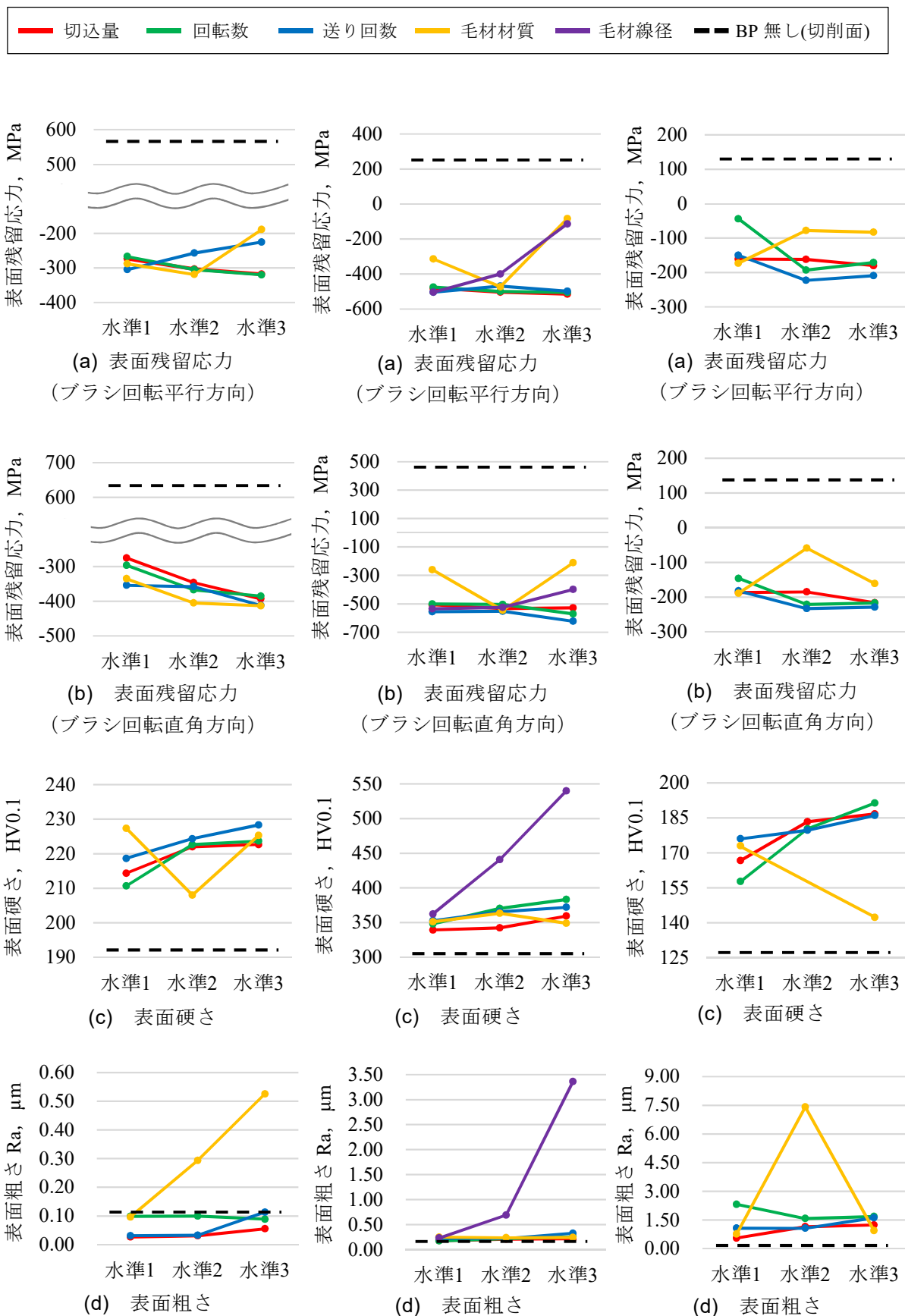


図 3 BP のピーニング効果 (供試材 SS400)

図 4 BP のピーニング効果 (供試材 SUS304)

図 5 BP のピーニング効果 (供試材 A2017)

3.1.2 SKS3 (硬質材)

図 6(a)(b)に表面残留応力の測定結果を示す。BP 無し（研磨面）の測定結果も併せて示す。BP 加工により供試材表面に圧縮残留応力が付与された。また、ピーニング強度が高いほど、付与される圧縮残留応力は高くなる傾向を示した。加工条件としては毛材線径による影響が比較的大きく、毛材線径 0.35 mm 硬鋼線ブラシを用いた加工条件で、最も高い圧縮残留応力が得られた。これは、線径が太いほどブラシ毛材の毛腰が強く工具としての剛性が高くなり、ピーニング強度が高くなったためと考えられる。

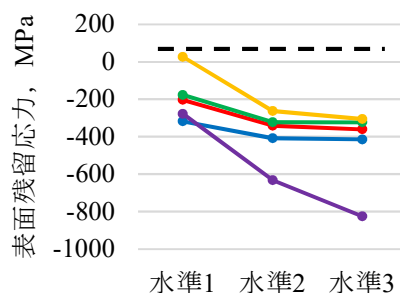
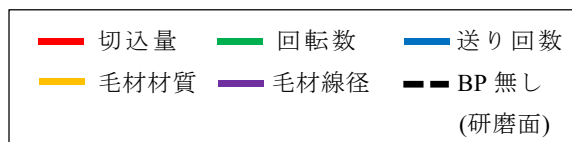
図 6(c)に表面硬さの測定結果を示す。表面残留応力の測定結果と同様、ピーニング強度が高いほど表面硬さは高くなる傾向を示し、毛材線径 0.35 mm 硬鋼線ブラシを用いた加工条件で、最も高い表面硬さが得られた。

図 6(d)に表面粗さの測定結果を示す。砥粒線ブラシを用いた加工条件で表面粗さが最も大きくなった。

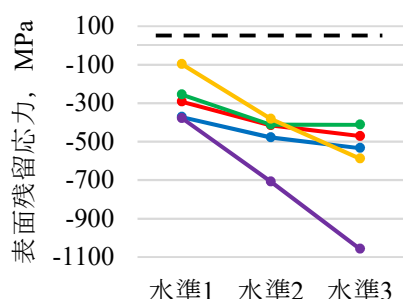
図 7 に毛材線径の加工条件における両測定方向の表面残留応力を示す。ブラシ回転平行方向と比較して、直角方向の圧縮残留応力が高い傾向にあり、測定方向によってピーニング効果に違いが見られた。他の加工条件および SS400, SUS304, A2017 においても概ね同様の傾向を示した。研削加工後の表面においても、加工方向と比較して直角方向でより高い圧縮残留応力を示し、パニシ作用によるものと報告されている⁴⁾。本研究のブラシ加工も研削加工と同様に有向性加工（被加工材の一定の向きに力を加える加工）であるため、測定方向によってピーニング効果に違いが見られたと推察される。

図 8 に深さ方向の応力分布を示す。深さ方向の加工は電解研磨で行った。加工条件は基本条件（表 3 網かけ部）で、ブラシ回転平行方向の結果である。圧縮残留応力のピークが供試材最表面に存在することが確認され、これは SS400, SUS304, A2017 においても同様であった。

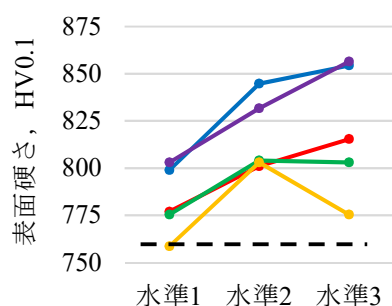
本研究では、SS400, SUS304, A2017 の軟質材と比較して、SKS3 の硬質材においてより高い圧縮残留応力が得られた。これは、ピーニングにより形成される残留応力は材料の降伏強度に依存するとの報告⁵⁾があり、このためと考えられる。



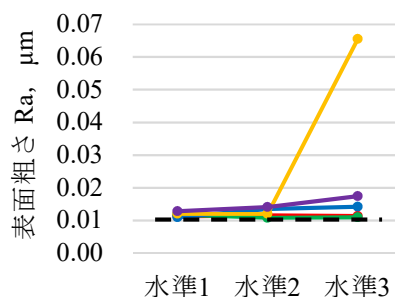
(a) 表面残留応力
(ブラシ回転平行方向)



(b) 表面残留応力
(ブラシ回転直角方向)



(c) 表面硬さ



(d) 表面粗さ

図 6 BP のピーニング効果
(供試材 SKS3)

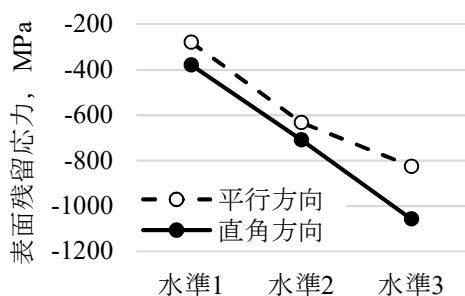


図 7 測定方向によるピーニング効果の違い
(供試材 SKS3) (加工条件：毛材線径)

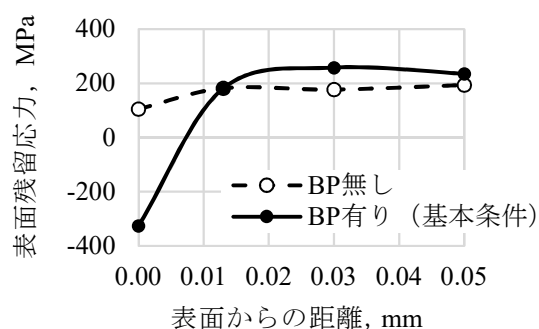


図 8 深さ方向の応力分布
(供試材 SKS3) (ブラシ回転平行方向)

3.2 BP 加工品の耐久性の評価

表 5 に供試材の表面残留応力、表面硬さ、表面粗さを示す。BP 加工によりピーニング効果が得られている。

図 9 に 3 点曲げ繰返し試験における破断サイクル回数を示す。BP 無し品と比較して、BP 加工品は破断サイクル回数が増加した。BP 加工のピーニング効果により繰返し負荷試験における耐久性が向上したと考えられ、金属材料の疲労強度向上における BP 加工の有効性が示唆された。本研究では、低サイクル域における評価を行ったが、高サイクル域の評価については今後の課題である。

表 5 供試材 SKH40 の各種パラメータ

項目	測定方向	BP 無し	BP 加工
表面残留 応力 (MPa)	回転平行	-100	-830
	回転直角	-40	-930
表面硬さ (HV0.1)	-	850	920
表面粗さ Ra, μm	回転直角	0.01	0.15

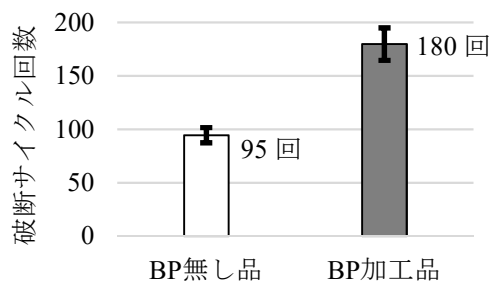


図 9 BP による破断サイクル回数の変化 (N=4)

4 結 言

本研究では、金属材料を対象として、ブラシ工具を用いたピーニング手法の有効性を検討し、以下の知見が得られた。

- 1) BP 加工により表面残留応力、表面硬さが改善し、ピーニング効果が得られた。
- 2) ピーニング効果に及ぼす BP 加工条件 (切込量、回転数、送り回数、毛材材質、毛材線径) の影響を評価した。焼入鋼において高いピーニング効果が得られ、毛材線径 0.35mm 硬鋼線の加工条件で効果が最も高くなった。
- 3) ブラシ回転平行方向と直角方向で、BP 加工による圧縮残留応力に違いが見られた。
- 4) BP 加工品は、低サイクルの 3 点曲げ繰返し試験において、破断サイクル回数が増加した。湿式加工やブラシ工具構造がピーニング効果に及ぼす影響に関しては、さらなる検討が必要である。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人 JKA からの助成で行われたものである。ここに記し関係各位に謝意を表する。

文 献

- 1) 中村 宏，堀川 武：金属疲労の基礎と疲労強度設計への応用，2008，1 頁。
- 2) ショットピーニング技術協会：金属疲労とショットピーニング，2018，7～16 頁。
- 3) ショットピーニング技術協会：金属疲労とショットピーニング，2018，48～62 頁。
- 4) 若林 三記夫，中山 守，玉村 謙太郎，精密機械，1984，50 巻 9 号，1481～1487 頁。
- 5) 岡田 秀樹，丹下 彰，安藤 柱：圧力技術，2003，41 巻 5 号，233～242 頁。

放熱材料の開発に向けたダイヤモンド微粒子の表面処理技術の探索と分散性評価

松田裕史

Surface Modification and Dispersibility Investigation of Diamond Particles for Thermoconductive Material

Hiroshi MATSUDA

1 緒 言

情報化社会の進展により、電子機器の小型化、高集積化による発熱が問題となっている。そのため放熱技術の重要度が増しており、グリスやシール等の放熱材料の熱伝導率向上が求められている。

熱伝導率を向上させるためには、樹脂母材中へ熱伝導性の高い微粒子(放熱フィラー)を高充填する必要がある。しかし、微粒子は凝集してしまうため、理想的な充填状態にはならない。微粒子の凝集を抑制し、理想的な充填状態に近づけるためには、微粒子の分散性改善が必要となり、表面処理などによる分散性改善が検討されている¹⁾²⁾。

ここで、材料の熱伝導率例を表1に示す³⁾。放熱フィラーとしては、シリカ、アルミナ、窒化ホウ素、炭素材料などが挙げられ、そのなかでもダイヤモンドは熱伝導率が2000 W/mKと非常に高く、放熱フィラーとして有力な材料である。そこで、高い熱伝導率を有する放熱材料開発の芽出し研究として、本研究ではダイヤモンド微粒子の表面処理技術を探索し、その分散性評価を行った。

表1 材料の熱伝導率例³⁾

物質名	熱伝導率 [W/mk]
結晶性シリカ	10
アルミナ	20
窒化ホウ素	60 ~ 200
炭化ケイ素	270
銅	400
ダイヤモンド	2000

表2 使用したダイヤモンド微粒子

サンプル	粒径 [μm]	備考
Dia-H	0.5	トーメイダイヤモンド株式会社製水素化ダイヤモンド微粒子 MD-500
Dia-OH	0.5	MD-500 を酸化させたダイヤモンド微粒子
Dia-Cl	0.5	MD-500 を塩素化させたダイヤモンド微粒子

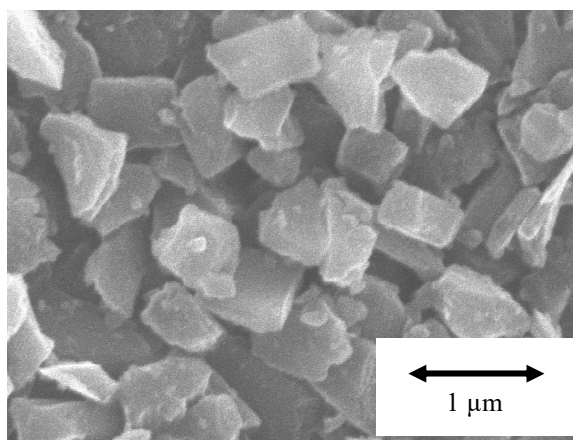


図1 Dia-H の SEM 画像

2 実験方法

2.1 ダイヤモンド微粒子

表2に本研究にて使用したダイヤモンド微粒子の一覧を示す。また、図1に走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて撮影した画像を示す。本研究では、トーメイダイヤモンド株式会社製の水素化ダイヤモンド微粒子 MD-500 (Dia-H)、及びトーメイダイヤモンド株式会社にて MD-500 に酸化、塩素化処理を実施したダイヤモンド微粒子 (Dia-OH,

Dia-Cl)を使用した。粒径は $0.5\ \mu\text{m}$ のものを使用した。

2.2 ダイヤモンド微粒子の表面処理

ダイヤモンド微粒子表面を文献⁴⁾⁻⁸⁾に記載された方法を参考に化学的に修飾した。反応後、分離洗浄を4回実施し、室温にて12時間以上乾燥させたものをサンプルとして用いた。反応スキームを図2から図4に示す。

Dia-H 表面の水素を過酸化ベンゾイル(BPO)の熱分解により生成したラジカルにて引き抜き、Dia-H 表面にラジカルを生成させた。Dia-H 表面のラジカルとカルボキシル基末端ポリジメチルシロキサン(PDMS-COOH)とを反応させ、ジメチルシロキサンにて Dia-H 表面を修飾したサンプルを Dia-PDMS とした。

Dia-OH とヘキサメチレンジイソシアネート(HMDI)とを反応させた後、4,4'-アゾビス(4-シアノ吉草酸)(ACVA)と反応させることで、Dia-OH 表面にアゾ基を導入した。導入したアゾ基の熱分解により生成したラジカルとスチレンとをラジカル重合させることにより、ポリスチレンにて Dia-OH 表面を修飾したサンプルを Dia-PSt(1) とした。

高分子合成手法である原子移動ラジカル重合(ATRP)により、Dia-Cl 表面をポリスチレンにて修飾したサンプルを Dia-PSt(2)とした。なお、反応はラジカル開始剤を還元剤として添加する Initiators for Continuous Activator Regeneration ATRP にて行い、触媒は臭化銅(II) / トリス(2-ピリジルメチル)アミン(TPMA)、開始剤は 2,2'-アゾビス(イソブチロニトリル)(AIBN)を用いた。

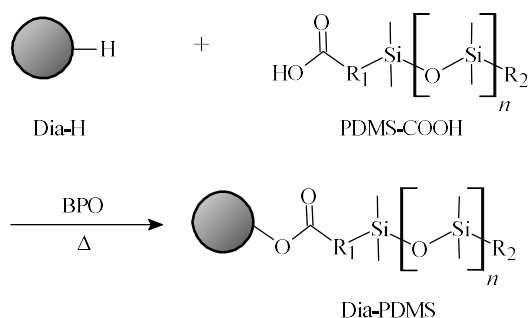


図2 Dia-PDMS の反応スキーム

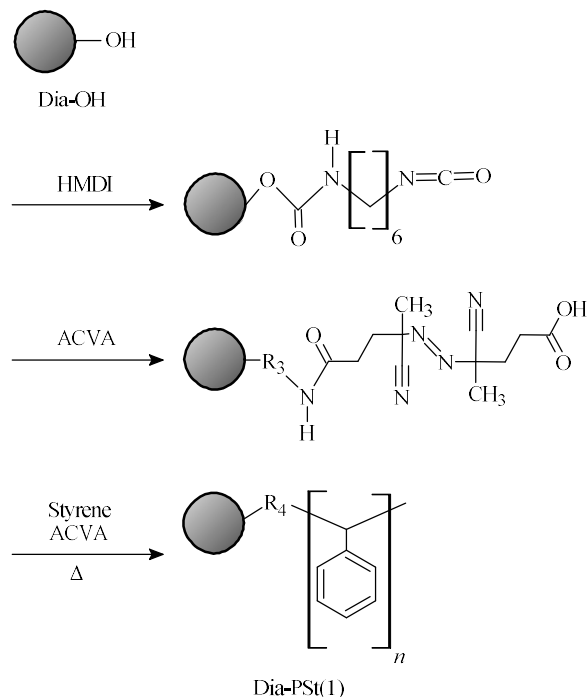


図3 Dia-PSt(1)の反応スキーム

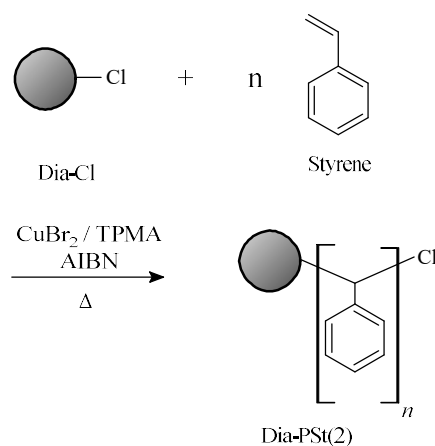


図4 Dia-PSt(2)の反応スキーム

2.3 評価方法

PerkinElmer 製フーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR) SpectrumBX によりダイヤモンド微粒子表面の赤外吸収を確認した。測定は、拡散反射法にて実施した。なお、測定結果を Kubelka-Munk 変換しているため、吸収ピークは上に凸となっている。

また、表面処理による重量変化分を表面修飾率とし、株式会社リガク製示差熱重量分析装置 TG8120 を用い算出した。測定は窒素雰囲気下にて行った。表面修飾率の算出方法を図5に示す。ベースラインの接線と熱重量減少曲線の

接線の交点から重量減少開始点、及び終了点を求め、重量減少率を算出し、その値を表面修飾率とした。

分散特性の変化は、蒸留水に対する微粒子の濡れ広がりを確認した後、デカンー水の二層における分散状態を確認した。

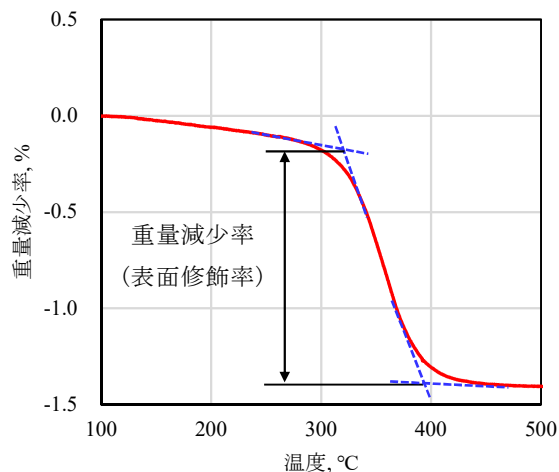


図5 表面修飾率算出方法

3 実験結果および考察

図6にFT-IRの結果を示す。Dia-PDMSにおいて、 790 cm^{-1} と 1040 cm^{-1} にポリジメチルシロキサン(Si-C結合とSi-O結合)に由来する吸収が確認された。また、Dia-PSt(1)、及びDia-PSt(2)において、 700 cm^{-1} と 3020 cm^{-1} にポリスチレンのベンゼン環のC-H結合に由来する吸収が確認された。

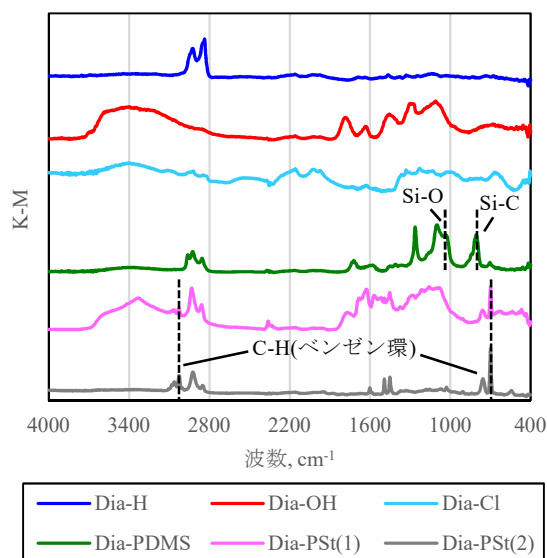


図6 FT-IR 測定結果

図7に熱重量減少曲線の代表図、表3に表面

修飾率の代表値を示す。重量減少率は、Dia-PDMSが0.5 %、Dia-PSt(2)が0.9 %であった。これは、それぞれがポリジメチルシロキサン、及びポリスチレンで修飾された量と考えられる。Dia-PSt(1)は、重量減少曲線が多段であった。これは、Dia-PSt(1)の反応が多段であるためと考えられる。全体の重量減少率は1.1 %であり、そのうちポリスチレンにて修飾された量は0.5 %であった。

FT-IRと熱重量分析の結果より、作製した表面処理ダイヤモンド微粒子表面はポリジメチルシロキサン、及びポリスチレンにて修飾されていることが確認された。

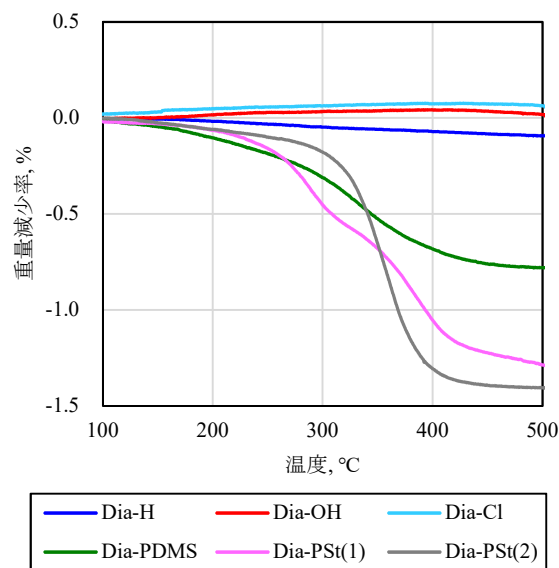


図7 熱重量減少曲線

表3 表面修飾率の代表値

サンプル	表面修飾率
Dia-PDMS	0.5 %
Dia-PSt(1)	0.5 % (全体の減少率 1.1%)
Dia-PSt(2)	0.9 %

図8、図9に分散特性の変化について示す。本稿では、表面修飾率が一番高かったDia-PSt(2)の結果を示す。図8に水に対する濡れ広がりを確認した結果を示す。Dia-H、Dia-Clは水面に濡れ広がる様子が確認されたのに対し、Dia-PSt(2)は濡れ広がる様子が確認されなかった。また、図9にデカンー水の二層における分散性を確認

した結果を示す。Dia-H, Dia-Cl は水層に多くの微粒子が分散しているのに対し, Dia-PSt(2)はデカン層に多くの微粒子が分散している様子が確認された。これらの結果より, 表面処理によりダイヤモンド微粒子表面の疎水性が高くなり, デカン溶液に対する分散性が向上したと推測される。

以上より, 本手法にて表面処理を実施したダイヤモンド微粒子は, 樹脂材料への分散性向上, 放熱材料への展開が期待される。



図 8 水に対する濡れ広がり

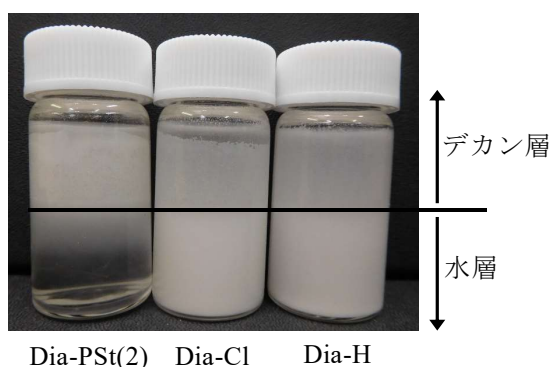


図 9 デカン-水の二層における分散性確認結果

4 結 言

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) ダイヤモンド微粒子表面がポリジメチルシロキサンとポリスチレンにて修飾された表

面処理ダイヤモンド微粒子を作製した。

- 2) 表面処理を実施した Dia-PSt(2)は, デカン溶液に対する分散性が向上することを確認した。

謝 辞

ダイヤモンド微粒子を提供頂いたトーメイダイヤモンド株式会社様に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 竹澤由高監修, 高熱伝導性コンポジット材料, シーエムシー出版, pp48-62, 111-139 (2011).
- 2) 川口春馬監修, 微粒子分散・凝集ハンドブック, シーエムシー出版, pp72-80 (2014).
- 3) 竹澤由高監修, 高熱伝導性コンポジット材料, シーエムシー出版, pp172 (2011).
- 4) T. Tsubota, S. Tanii, S. Ida, M. Nagata and Y. Matsumoto, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **5**, 7, pp1474-1480 (2003).
- 5) 坪田敏樹, 平林修, 伊田進太郎, 永岡昭二, 永田正典, 松本泰道, 草壁克巳, 諸岡成治, 日本化学学会誌: 化学と工業化学, **11**, pp631-636 (2001).
- 6) Y. Zhang, A.A. Tamijani, M.E. Taylor, B. Zhi, C.L. Haynes, S.E. Mason and R.J. Hamers, *J. Am. Chem. Soc.*, **141**, 20, pp8277-8288 (2019).
- 7) N. Tsubokawa, *J. Jpn. Soc. Colour Mater.*, **80**, 6, pp174-182 (2007).
- 8) W. Jakubowski, N.V. Tsarevsky, P. McCarthy, K. Matyjaszewski, 落合文吾訳, 精密ラジカル重合ガイドブック, Merck 社, pp4-8.

抄 録 / 論 文 発 表

Thinking Model for Japanese Small and Medium-Sized Enterprises Innovation Explicated by OntoIS

Toshiaki MITSUI and Ryuzo FURUKAWA*

EcoDesign for Sustainable Products, Services and Social Systems I (Springer), 119-132 (2023)

Under environmental constraints, transformation to sustainable manufacturing is indispensable. The backcast way of thinking (BWT) promotes creation of new values based on the environmental constraints. To introduce the BWT widely to small and medium-sized enterprises (SMEs), we explicated implicit knowledge of SME innovators who might use similar thinking process to create new products. The developed thinking model framework is ontology engineering method for innovation strategy (OntoIS).

* Graduate School of Environmental and Information Studies, Tokyo City University
(東京都市大学大学院環境情報学研究科)

平板・円柱鋳物の凝固速度と凝固時の冷却速度のシミュレーション及び中心線引け巣発生との関連

後藤 育壮* 松木 俊朗 土田 菜摘**
鋳造工学, 96, 12-21 (2024)

純金属及び合金鋳物の凝固過程における凝固速度分布と冷却速度分布の挙動を鋳造シミュレーションにより検討し、そのメカニズムや純Al鋳物のひけ巣発生などの実現象との関連を調べた。

平板鋳物の2次元凝固解析では、鋳造材料や鋳型材料、臨界固相率によらず、端部や押湯効果範囲外の中心線上に加速凝固域が生じた。実際の純Al板鋳物の断面観察でも、この領域に沿ったひけ巣が観察された。

円柱状純Al鋳物の3次元湯流れ・凝固解析及び断面観察では、明確な凝固加速域及び中心線ひけ巣は見られなかった。

臨界固相率が0.99の場合の2次元凝固解析では、端部効果範囲内及びその付近において、冷

却速度が速い領域が生じた。この高速冷却域は、微細結晶粒組織などの凝固形態と関連すると考えられる。

*秋田大学大学院理工学研究科、**秋田大学大学院理工学研究科 (現：早稲田大学大学院基幹理工学研究科)

純アルミニウム及び鋳鉄鋳物の凝固組織と凝固解析による冷却速度分布の関連

後藤 育壮* 松木 俊朗 田宮 温* 佐々木 豊** 高橋 俊介** 千蔵 真言**
鋳造工学, 96, 299-307 (2024)

純Al鋳物及び鋳鉄鋳物における凝固組織形態の分布と、鋳造シミュレーションによる凝固速度・冷却速度分布との関係を調べた。

純Al鋳物の解析では、微細結晶粒組織に対応する顕著な高速冷却域の形成が見られた。

ねずみ鋳鉄の解析及び断面観察では、D型黒鉛組織と凝固速度・冷却速度が速い領域の対応が見られた。また、球状黒鉛鋳鉄の解析では、逆チルの発生挙動と鋳物中心部における高速冷却域の有無の対応が見られた。

0.99など、1に近い臨界固相率における高速冷却域は、微細粒組織やD型黒鉛組織、逆チルなどの発生に概ね対応していることから、この臨界固相率における冷却速度分布は、過冷凝固組織の発生位置の統一的かつ簡便な予測法としての利用が見込まれる。

*秋田大学大学院理工学研究科、**日野自動車株式会社材料技術部

純銅鋳物の電気伝導性に及ぼす微量元素の影響

後藤 育壮* 肖 英紀* 松木 俊朗 三井 俊明 黒沢 憲吾**

鋳造工学, 95, 123-133 (2023)

純銅鋳物の健全性と電気伝導性に及ぼす微量元素の影響について、電気伝導率測定や熱力学計算により調べた。

熱力学計算の結果、Cu-Cu₂O系の亜共晶組成では、酸素含有量が約0.02～0.1%の範囲において、他の酸素含有量の範囲よりも固液共存領域

が広くなり、発生した水蒸気ガスがトラップされやすいため、これがポロシティとなって健全性を低下させる。

グロー放電発光分光分析(GD-OES)により鋳片表面近傍の水素分布を調べたところ、鋳型や冷し金の急冷効果により過飽和化が顕著であったことから、表面ピンホールやフィッシャー欠陥の発生は、過飽和度以上の水素含有量による気泡の核生成によるものと考えられる。

Cu-Cu₂O共晶が存在しない場合の電気伝導率の低下に影響を与える主な要因は、りん、鉄、硫黄などの含有である。一方、Cu-Cu₂O共晶がある場合の電気伝導率は微量元素の含有量に依存せず、電気伝導率の低下させる主要因は、ポロシティの発生など鋳物の健全性で低下であると考えられる。

*秋田大学大学院理工学研究科、**秋田県産業技術センター

セルロースナノファイバを感応膜に用いた湿度センサの応答特性 Response Characteristics of Humidity Sensor Using Cellulose Nanofiber

加藤睦人 矢作徹 山田直也 田中秀治*

第 71 回応用物理学会春季学術講演会(2024. 9.22)

セルロースナノファイバ(CNF)を湿度官能膜に用いた櫛歯型センサを作製し、湿度変化に対するインピーダンス応答を評価した。低周波領域では容量成分が現れており、湿度が高くなるとインピーダンスは一定値に漸近することがわかった。櫛歯型 CNF 湿度センサは、約 1kHz のインピーダンス変化を検出することで、広い湿度利用域に対応できる。

*東北大学大学院工学研究科

バイオミメティクスを指向した高アスペクト比微細構造金型作製と樹脂への形状転写

矢作徹 山田直也 サモリ ペトルス ヤサヤ* 石井大佑** 齋藤潤一* 三澤孝夫* 中西為雄***

(一社)プラスチック成形加工学会第 31 回秋季大会 (2023.11.29)

近年、樹脂成形品の表面に生物由来の微細構造を形成することで、表面濡れ性など様々な機能を付与するバイオミメティクスへの指向が高まっている。我々は石井ら名古屋工業大学、スズキハイテック(株)、山形大学と産学官連携の共同研究開発を実施しており、フナムシ模倣構造による指向性、および瞬時の液滴拡散機能を有する無動力液体制御システムの実用化を目指している。本研究では高アスペクト比レジストパターンを転写した電鍍金型による成形実験を行い、樹脂への形状転写、および表面機能性について評価した。

*スズキハイテック株式会社

**名古屋工業大学

***山形大学

a-InGaZnO TFT のトライボ発電への応用

岩松新之輔

第 71 回応用物理学会春季学術講演会(2024. 3.24)

我々は、インジウム-ガリウム-亜鉛酸化物薄膜トランジスタ(a-InGaZnO TFT)を用いた静電気センサの開発に取り組んでいる。a-InGaZnO 活性層直上に帯電体を近接させることで、ドレイン電流の変化が誘起され、帯電の大きさ、極性を測定することができる。一方、この現象を別の視点から見ると、帯電体の近接によるドレイン電流の増加は、発電と捉えることができる。近年、IoT センサの自律駆動を実現する技術として、環境発電が注目されている。環境中に存在する振動、熱、電波などの微小エネルギーを回収し、電力に変換する技術である。本研究では、トライボ発電と a-InGaZnO TFT を組み合わせた、環境発電デバイスの可能性を検証した。

カンチレバー構造 a-InGaZnO TFT の応力依存性評価

岩松新之輔 峯田貴*

第 85 回応用物理学会秋季学術講演会(2024.9.17)

アモルファスインジウム-ガリウム-亜鉛酸化物薄膜トランジスタ(a-InGaZnO TFT)のセンサ応用が進められている。a-InGaZnO の外部電界に対する感受性を活用した pH センサ、ガスセンサなどが開発されているが、MEMS 構造体を活用したセンサの報告例は少ない。本研究では、a-InGaZnO TFT と MEMS 構造体の融合を目的として、a-InGaZnO TFT を単結晶 Si カンチレバー構造体の上に形成するプロセスを検討し、外部応力が TFT 特性に与える影響を評価した。

* 山形大学工学部

ルータビットによる国産未活用広葉樹材の切削特性

五十嵐裕基 村岡潤一 滝口寿郎 江部憲一 木村直樹 荘司和也

日本木材加工技術協会 第 42 回年次大会 (2024.9.20)

木材資源の世界的な減少等により、これまで用材として未活用であった国産広葉樹材が注目されているが、切削特性に関してほとんど報告がない。そこで本研究では、未活用樹種であるセンダン、ハンノキ、ホオノキ、コナラについて、ルータビットによる切削試験を行い、加工方法・繊維傾斜角ごとに加工面粗さと切削抵抗を求め、樹種ごとの切削特性について評価した。

SPring-8 の X 線 CT による Al₂O₃ 溶射皮膜の微細欠陥評価

桑嶋孝幸*, 熊倉和之, 伊藤桂介**, 内海宏和**, 園田哲也*, 黒須信吾*, 星野真人***, 上杉健太朗***

溶射, Vol.61, No.1(2024), pp10-14

内部に微小欠陥を含む溶射皮膜を非破壊で検査することができれば、溶射皮膜の品質管理に非常に役立つと思われる。しかし、汎用の X 線 CT 装置では検出が難しい。本研究では高い空間分解能を有し微細な構造を観察することが出来る SPring-8 の X 線 CT 装置を用い、Al₂O₃ 溶射皮膜の微細欠陥観察を行った。その結果、放射光 X 線 CT 撮影では汎用機の X 線 CT 撮影よりも鮮明な画像が得られ、気孔などの欠陥を観察することができた。皮膜は白黒の濃淡が異なった組織で、線吸収係数が局部的に高い部分があった。また、放射光 X 線 CT 撮影の再構成画像による解析では、気孔や層間の未接合の解析の他に、未熔融粒子などの組織解析ができる可能性があることがわかった。

* 岩手県工業技術センター, ** 宮城県産業技術総合センター, *** 高輝度光科学研究センター

山形県工業技術センター報告 No. 56(2024)

2025 年（令和 7 年）3 月

発 行 山形県工業技術センター

〒990-2473

山形市松栄二丁目 2 番 1 号

Tel. (023)644-3222
