

京都市産業技術研究所

研 究 報 告

No. 16

令和 7 年度

地方独立行政法人
京都市産業技術研究所

目 次

技術ノート

- 1 難燃性を付与したセルロース繊維強化プラスチック複合材料の開発
～分析機器部品への適用に向けた、力学的特性・成形加工性と難燃性におけるトレードオフの克服～…… 1
材料・素材技術グループ 仙波 健、野口 広貴、伊藤 彰浩、横田 久幸
株式会社島津製作所 サステナブル素材普及委員会
安居 嘉秀、松葉 哲治、小森 隆史
- 2 セルロースナノファイバー強化ポリプロピレンの
マテリアルリサイクルが機械的特性及び発泡性に与える影響…………… 8
材料・素材技術グループ 伊藤 彰浩、仙波 健、野口 広貴
- 3 速度制御熱分析法によるアルミナセラミックス 3D 造形体の脱脂条件の効率化に関する検討 …… 11
材料・素材技術グループ 稲田 博文、高石 大吾
- 4 京都市内産ヒノキから得られたおが粉を複合したバイオマスポリエチレンの物性評価…………… 17
材料・素材技術グループ 野口 広貴、井内 俊文、伊藤 彰浩、仙波 健
- 5 カッティングプロッタを用いた引箔裁断の条件最適化と代替工程の構築…………… 22
加工・製造技術グループ 藪内 快、本田 元志

指導事例

- 6 油滴天目釉の生成過程考察のための各種分析結果について…………… 25
材料・素材技術グループ 鈴木 芳直
- 7 京都工芸研究会 異業種コラボレーション商品開発事業「こうげい組体操 2」…………… 31
製品化・人材育成支援グループ 竹浪 祐介、松原 剛

調査

- 8 デザイン分野における生成 AI 活用に関する調査研究…………… 36
知恵産業推進グループ 沖田実嘉子、竹浪 祐介、松原 剛

研究抄録

- 9 茜色素およびその誘導体における染色条件に依存した金属錯体形成：耐光性および発色特性への影響…………… 42
(原題：Dyeing Condition-Dependent Metal Complex Formation in Madder and Its Derivatives: Effects on Lightfastness and Color Properties)
材料・素材技術グループ 井内 俊文、野口 広貴、伊藤 彰浩、仙波 健

- 10 厚膜化したポーラス型アノード酸化皮膜の安定製造プロセスの確立…………… 43
 (原題: Stable fabrication methods for thick porous anodic aluminum oxide films)
 加工・製造技術グループ 山梨 眞生

- 11 リン酸塩・モリブデン酸塩系中性液による工具鋼からの CrN コーティングの選択的電解剥離技術 …… 44
 (原題: Selective electrochemical stripping of chromium nitride coatings from tool steels using a neutral phosphate-molybdate electrolyte)
 加工・製造技術グループ 山梨 眞生

- 12 信号蓄積型イオン感应性電界効果トランジスタ (SA-ISFET) と
 免疫測定法を組み合わせた新規な簡易細菌検出システム…………… 45
 (原題: Novel simple bacteria detection system combining signal accumulation type of ion sensitive field effect transistor (SA-ISFET) and immunoassay)
 加工・製造技術グループ 泊 直宏
 プロジェクト推進室 山本 佳宏
 佐々木化学薬品株式会社 北脇 優香
 株式会社メイベル 高木 由美
 株式会社バイオエックス 谷 敏夫
 独立行政法人製品評価技術基盤機構 高橋 幹男
 摂南大学理工学部 西矢 芳昭

- 13 ミミズ (*Eisenia fetida*) 抽出物中の α -アミラーゼ阻害剤 2'-デオキシグアノシンの同定及び
 ブタ膵臓 α -アミラーゼに対する阻害活性の特性評価…………… 46
 (原題: Identification of 2'-deoxyguanosine for an α -amylase inhibitor in the extracts of the earthworm *Eisenia fetida* and characterization of its inhibitory activity against porcine pancreatic α -amylase)
 ワキ製薬株式会社 小笠原昌子、芳井 克洋、井上 國世
 製品化・人材育成支援グループ 和田 潤
 プロジェクト推進室 山本 佳宏

技 術 ノ ー ト

難燃性を付与したセルロース繊維強化プラスチック複合材料の開発 ～分析機器部品への適用に向けた、力学的特性・成形加工性と 難燃性におけるトレードオフの克服～

材料・素材技術グループ

仙波 健、野口 広貴、伊藤 彰浩、横田 久幸

株式会社島津製作所 サステナブル素材普及委員会

安居 嘉秀、松葉 哲治、小森 隆史

要旨

分析機器分野における二酸化炭素排出量削減とサーキュラーエコノミーに貢献できる材料として、難燃性、リサイクル性に優れ、さらに高バイオ度であるセルロース繊維強化バイオポリエチレンの開発に取り組んできた。令和6年度には、自動車、家電に使用されるポリプロピレンを超える高い力学的特性（目標値：曲げ弾性率 2000MPa 以上、Izod 衝撃強度 8kJ/m^2 以上）、及び UL94 の難燃性規格における垂直試験の最高評価である V-0 を試験片厚さ 4mm において達成した¹⁾。本報告では、力学的特性の目標値を維持したうえで、さらに高度な難燃性として試験片厚さ 2mm における V-0 を目指した。材料組成を最適化することにより、難燃性の低下を招く「難燃剤の減量」を行ったにもかかわらず、試験片厚さ 2mm での V-0 を達成した。さらに、これらと相反関係にある流動性（成形加工性）を大幅に向上させ、目標とする力学的特性との全般的な両立に成功した。

キーワード：セルロース、サーキュラーエコノミー、高バイオ度、力学的特性、難燃性、成形加工性

1. はじめに

プラスチックの環境問題がクローズアップされる中、株式会社島津製作所（以下、島津製作所）では 2022 年に全社的な経営戦略としてバイオプラスチックや再生プラスチックの利用推進を目指し、全社組織である「サステナブル素材普及委員会」を立ち上げ、低環境負荷材料の探索と各事業部への適用を推進してきた。これに伴い中期経営計画（2023～2025 年度）においても、サーキュラーエコノミーへの移行に向けた取り組みとして「サステナブル素材の活用」が掲げられた²⁾。2023 年には、業界初のセルロース繊維により強化したポリプロピレン（PP）製部品を搭載した高速液体クロマトグラフ装置を上市した。本材料は、セルロース繊維強化による高剛性化と、最適な難燃剤配合による高度な難燃性を両立させ、分析機器部品としての実用性を高めた。大気中の二酸化炭素を吸収し固定化した植物由来のセルロース繊維を、独自の難燃技術によって部品化できたことで、廃棄時に二酸化炭素を排出する石油由来プラスチックの含有量を大幅に削減できるようになり、材料製造から廃棄に至るライフサイクル全体での二酸化炭素排出量の低減に成功した³⁾。

このような中、島津製作所と京都市産業技術研究所との連携により、強化材には同様にセルロース繊維を用い、マトリックス樹脂には従来の石油由来 PP ではなく、植物由来のバイオポリエチレン（バイオ PE）を利用した分析機器部品用の材料開発に取り組んできた¹⁾。令和6年度の検討の結果、バイオ PE に力学的特性の低下が懸念されるノンハロゲン系難燃剤を添加したにもかかわらず、セルロース繊維の補強効果により弾性率 2000MPa 以上、Izod 衝撃強度 8kJ/m^2 以上、そして難燃性は試験片厚さ 4mm で V-0 に到達した。しかしながら試験片厚さ 2mm（試験片が薄い方が燃えやすく難燃化が困難）では、水平試験に合格（HB）したが、より難易度の高い垂直試験では不合格であった。

そこで本検討では、マトリックス樹脂と難燃剤の組成を最適化することにより、試験片厚さ 2mm での V-0 達成に取り組んだ。難燃剤の増量による薄肉難燃化（V-0 達成）は比較的容易である。しかし、それは相反する特性である耐衝撃性（力学的特性）や熔融流動性（成形加工性）の低下を招き、さらにバイオ度の減少やコスト増という新たな課題に直面させる。そこで本検討では、難燃剤の添加量を令和6年度以下に抑制しつつ、これら相

反する諸特性を高い次元で制御することを目指した。

2. 実験

2.1 材料

マトリックス樹脂には中粘度及び低粘度のバイオ PE、強化用セルロース繊維には漂白パルプを用いた。難燃剤には、ハロゲン系難燃剤よりも環境及び人体への影響が小さいノンハロゲン系難燃剤を選定した。また力学的特性及び難燃性を調整するため、セルロース粉体及び数種類の改質剤を準備した。

2.2 複合化と試験片作製

バイオ PE とパルプの複合化には二軸混練機（スクリュー径 15mm、L/D=45）を用いた。混練設定温度は 150℃ とした。得られたセルロース繊維強化バイオ PE をインラインスクリー式射出成形機（型締力 7 トン）により厚さ 4mm の短冊形試験片（幅 10mm、長 80mm）に成形した。射出設定温度は 170℃ とした。

2.3 評価

- ① 走査型電子顕微鏡観察：令和 6 年度に曲げ弾性率 3640MPa、Izod 衝撃強度 8.95kJ/m²、試験片厚さ 4mm で V-0 が得られたセルロース繊維強化バイオ PE¹⁾（表 1 の PE478）の断面を観察した。厚さ 4mm の短冊形試験片の中央部・樹脂流動方向の断面をミクロトームで平滑化し、イオンエッチングして観察に供した。
- ② 曲げ試験：万能試験機（ロードセル 1kN）を使用し、厚さ 4mm の短冊形試験片の三点曲げ試験を実施した。試験条件は、曲げ速度 10mm/min、支点間距離 64mm とした。
- ③ 衝撃試験：厚さ 4mm の短冊形試験片の中央部に

2mm の切り欠きを挿入し、Izod 衝撃試験機（ハンマー容量 2.75J）を使用し、エッジワイズにおける衝撃強度を測定した。

- ④ 難燃試験：厚さ 4mm の短冊形試験片、及びこの短冊形試験片を 190℃ にて熱プレスすることにより厚さを 2mm とした短冊形試験片を準備した。これらの厚さの異なる短冊形試験片に対して、UL-94 規格に準拠し、垂直及び水平燃焼試験を実施した。垂直燃焼試験（最高グレードは V-0、続いて V-1、V-2）の方が、水平燃焼試験（基準を満足した場合は HB グレード）よりも難易度が高い⁴⁾。

2.4 射出成形金型を用いた複合材料の流動性評価

スパイラルフロー金型（厚さ 2mm）を積載した射出成形機（型締め力 30 トン）を用いて、セルロース繊維強化バイオ PE の成形加工性を評価した。シリンダー温度 / 金型温度を 200℃ / 35℃、射出圧力を 120MPa、射出速度を 50、70 及び 100mm/sec とした。

2.5 分析機器部品への成形試験

島津製作所の分析機器部品製造用の金型を使用し、セルロース繊維強化バイオ PE の射出成形を京都市内の協力メーカーにおいて実施した。生産用射出成形機では多くの材料が必要となるため、2.1～2.4 で使用したセルロース繊維強化バイオ PE と同様の組成材料を、コンパウンドメーカーにおいて作製した。

3. 実験結果と考察

3.1 バイオ PE に分散したセルロース繊維及び難燃剤の観察

本検討では、令和 6 年度に曲げ弾性率 3640MPa、Izod 衝撃強度 8.95kJ/m²、試験片厚さ 4mm で V-0、試

表 1 作製した材料の概要と物性

番号	検討年度	概要	バイオ度	曲げ弾性率 (MPa)	Izod 衝撃強度 (kJ/m ²)	難燃性	
						試験片 4mm 厚	試験片 2mm 厚
-	-	目標値	%	2000 以上	8 以上	V-0	V-0
ニート PE	-	ニート PE、難燃剤なし	100	1260	15.5	不合格	不合格
PE478	令和 6	PE、セルロース、難燃剤多量	55	3640	8.95	V-0	HB
PE558		PE478 の加工性改良材料 分析機器部品の試作用材料 (コンパウンドメーカーで大量生産)	55	3200	9.01	V-0	HB
PE628	令和 7	PE558 にセルロース粉体を添加	58	3650	4.86	V-0	V-0
PE700		PE558 のバイオ PE の一部を 低粘度バイオ PE に置き換え	55	2300	6.11	V-0	V-1
PE752		PE700 の難燃剤をブレンド難燃剤に変更	55	2300	6.33	V-0	V-0
PE839		PE752 のブレンド難燃剤の減量	58	2300	9.06	V-0	V-0

試験片厚さ 2mm では HB を達成した材料 (PE478) を基本材料として、材料組成を最適化した。したがって PE478 のセルロース繊維及び難燃剤の分散状態を把握しておくことが重要であると考えた。図 1 に PE478 の厚さ 4mm の短冊形試験片の走査型電子顕微鏡による断面観察写真を示す。図 1 (a) では、幅がサブミクロンから最大 $20\mu\text{m}$ 程度のセルロース繊維が樹脂流動方向に配向するとともに、直径がサブミクロンから $30\mu\text{m}$ 程度の粒子状の難燃剤が均一に分散していた。このようにセルロース繊維及び難燃剤が、本実験における混練及び射出成形の工程において、力学的特性や難燃性の低下につながり得る凝集がないことを確認できた。

図 1 (b) に高倍率の観察写真を示す。セルロースの表面からエピタキシャルに PE ラメラが成長することで、セルロース繊維 / バイオ PE 界面は隙間がなく良好に接着されていることが示唆された。一方で難燃剤 / バイオ PE 界面には隙間が観察され接着が不十分であることがわかった。

3.2 セルロース粉体の添加による難燃性向上の検討

令和 6 年度の検討では、実験用の小型混練機で作製した PE478 の混練吐出時のハンドリングを改善し、コンパウンドメーカーの大型混練機で大量生産した PE558 において、曲げ弾性率 3200MPa 及び Izod 衝撃強度 9.01kJ/m^2 を達成した。そして難燃性においては、試験片厚さ 4mm では V-0 を達成したが、試験片厚さ 2mm では HB であった。

そこで PE558 を基本組成として、試験片厚さ 2mm において V-0 を達成するため、燃焼時に酸素を遮蔽する炭化層の形成を期待できるセルロース粉体を添加した材料を作製した (PE628)。PE628 では、曲げ弾性率は 3650MPa 、試験片厚さ 2mm において V-0 に到達した。このようにセルロース粉体の添加が、高い曲げ弾性率、優れた難燃性を付与することがわかったが、Izod 衝撃強度は 4.86kJ/m^2 であり、目標値以下であった。さらにセルロース粉体の添加は、成形加工性の低下を招くことが予測されることから実用性に乏しいと判断し、以下の

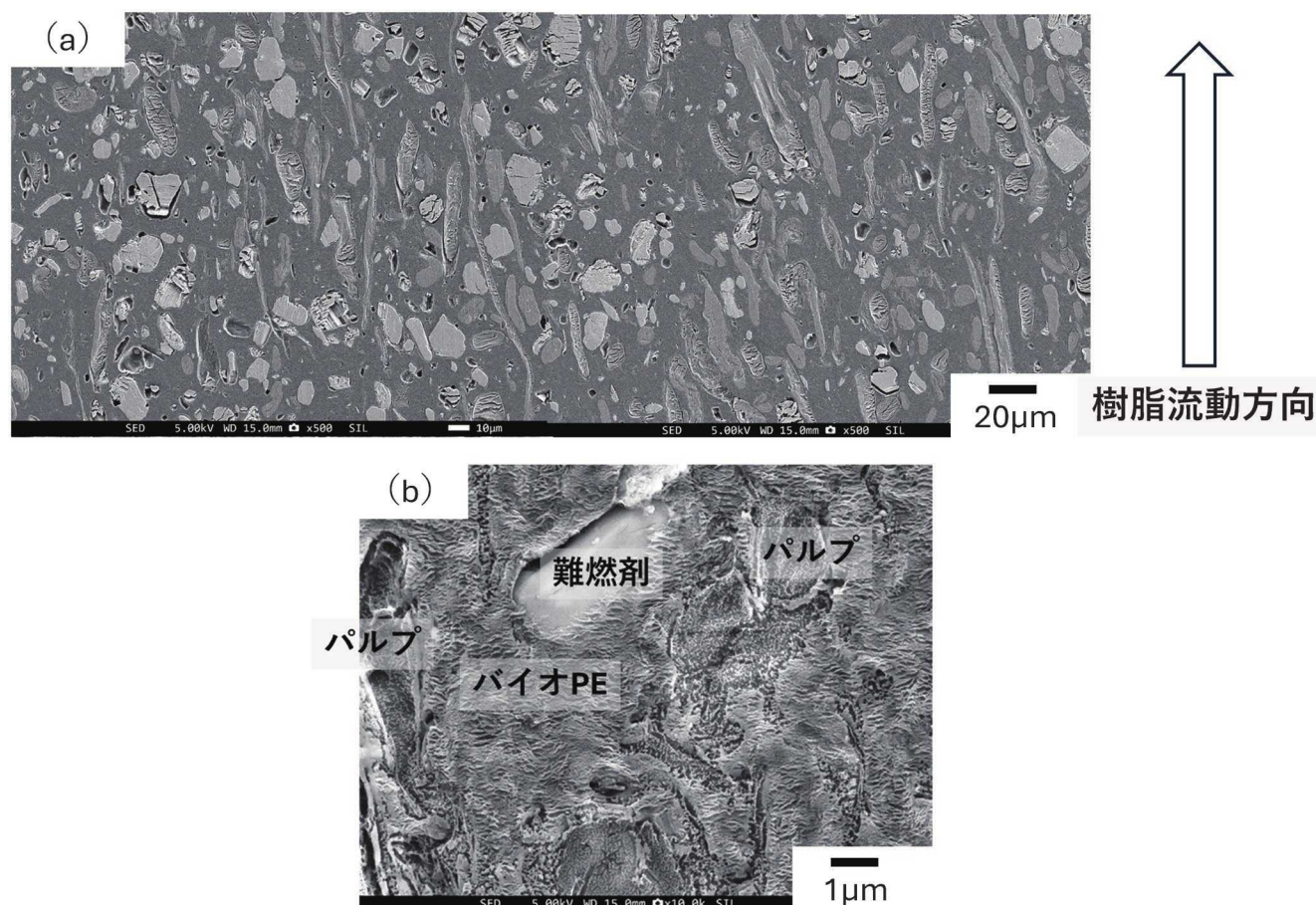


図 1 バイオ PE マトリックスに分散したセルロース繊維と難燃剤
(a) 低倍率、(b) 高倍率

検討を実施した。

3.3 材料組成最適化による難燃性向上の検討

3.3.1 低粘度バイオ PE の添加

3.2においてセルロース粉体の添加は、燃焼時の炭化層の形成により難燃性は向上するが Izod 衝撃強度が目標値以下となり、成形加工性低下の懸念もあった。そこで令和6年に検討した PE558 を基本組成として、セルロース粉体の添加以外の方法で、力学的特性と難燃性を維持しつつ、低下が懸念される成形加工性を改善するため、バイオ PE の一部を低粘度バイオ PE に置き換えた (PE700)。PE700 では、曲げ弾性率は 2300MPa、Izod 衝撃強度は 6.11kJ/m²、試験片厚さ 2mm において V-1 (V-0 よりも難燃性が低く、HB よりも難燃性は高い) であった。PE558 (難燃性 HB) と難燃剤量、セルロース繊維量及びバイオ度が同じであるにも関わらず、低粘度バイオ PE への置き換えにより V-1 を到達することができた。さらに低粘度バイオ PE の添加は、成形加工性の向上も期待できることから、PE700 を基本組成として以下の改良を試みた。

3.3.2 難燃剤の最適化による難燃性及び成形加工性の向上

PE700 を基本組成とし、その難燃剤の一部を異なる難燃剤に置き換えたブレンド難燃剤を添加した材料が PE752 である。その曲げ弾性率は 2300MPa、Izod 衝撃強度は 6.33kJ/m²、試験片厚さ 2mm において V-0 に向上した。Izod 衝撃強度が目標の 8kJ/m² に到達しなかったが、難燃性が優れていたことから、PE752 の難燃剤を減じた PE839 を作製した。これにより Izod 衝撃強度 9.06kJ/m²、試験片厚さ 2mm において V-0 を維持、さらにバイオ度を上昇させることができた。

PE839 と PE558 の成形加工性の違いを把握するため、スパイラルフロー金型を用いた溶融材料の流動長を測定した。流動長を厚さで除した値 (L/T) の射出速度依存性を図2に示す。PE558 では、いずれの射出速度でも L/T は 100 程度、それに対して PE839 では 305 ~ 338 であり、流動長が大きくなった。比較材料として自動車の大型部品用の高流動性 PP を測定したところ、L/T は 383 ~ 395 であり、PE839 は自動車大型部品用の PP に近い流動性 (成形加工性) を有することが確認できた。

以上の検討により、令和6年度に作製した PE558 の

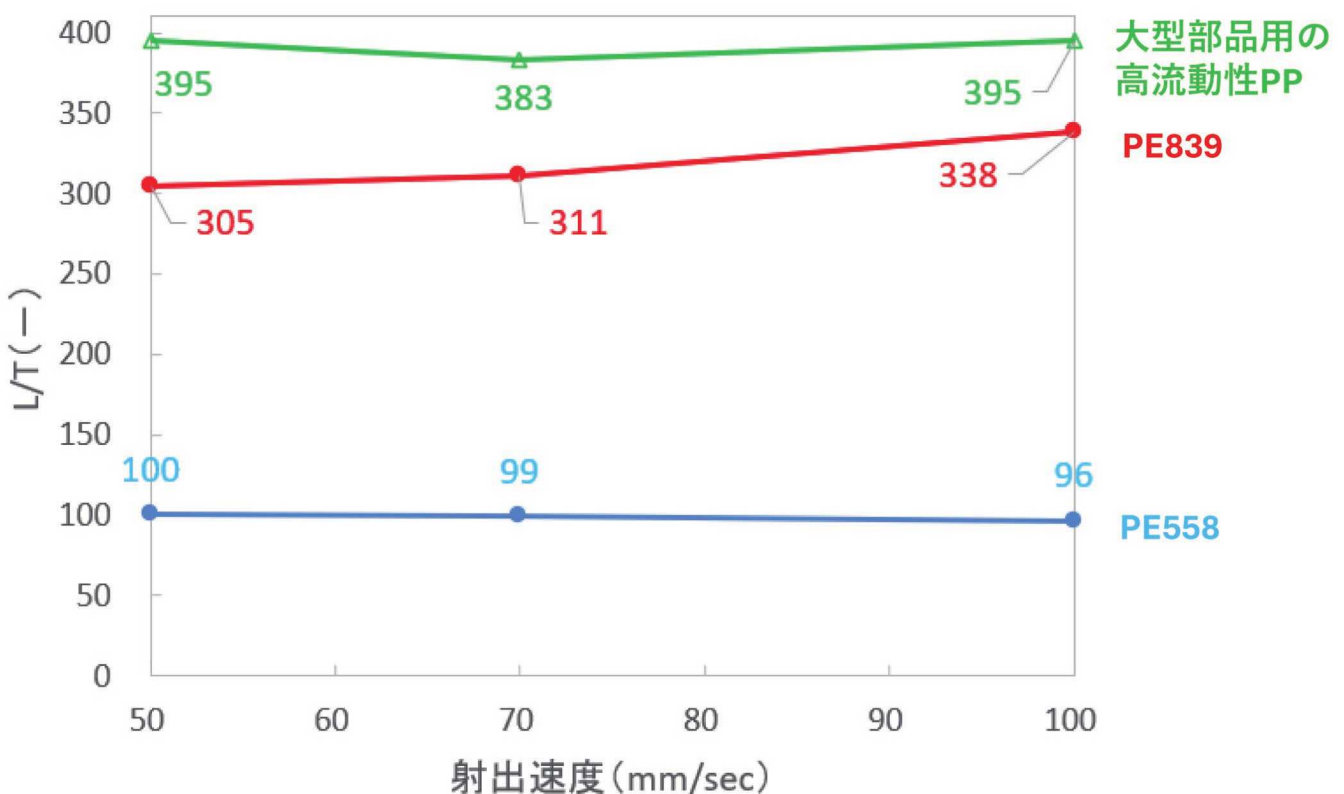


図2 スパイラルフロー金型による流動長測定結果

バイオ度、耐衝撃特性、難燃性、成形加工性を改良し、すべての目標値を達成したセルロース繊維強化プラスチック複合材料の開発に成功した。

3.4 分析機器部品の試作

3.3において得られたPE839と同組成の複合材料ペレットをコンパウンドメーカーの実機を用いて試作した。これを使用して射出成形加工メーカーでの実機による分析機器部品の射出成形加工を行った。

図3及び図4に得られた高速液体クロマトグラフィー(HPLC)用の部品であるトレイ(ラックフロント)及びカバー(ベントファン)の試作成形品を示す。HPLCにおいて、トレイ(ラックフロント)はオートサンプラ内の試料瓶設置用サンプルラックに取り付けられる冷却/加熱板の前面取付部品、カバー(ベントファン)は、オートサンプラ内にある各種ファンによって発生する風を整流するダクト部品になる。図3及び4において(a)は令和6年度(PE558)、(b)は令和7年度(PE839)の複合材料ペレットを使用した成形品である。使用した各々の成形品金型のゲートは、成形加工性の良好な現行PP材料用に狭小に設計されている。特にカバー(ベントファン)の金型は極狭小なピンゲートである。一方、トレイ(ラックフロント)の場合はゲートから成形品末端までの流動距離が長い。したがっていずれの部品の射

出成形においても、セルロース繊維強化バイオPEの熱劣化が懸念される。

図3のトレイ(ラックフロント)では、熔融したセルロース繊維強化バイオPEは狭小なタブゲート(矢印部)から左方向に金型内を流動、充填された。(a)PE558は難燃剤の添加量が多く、マトリックス樹脂の流動性が低いことから、高い成形温度と成形圧力を要するために、セルロースが熱劣化し外観が茶色に変色した。それに対して(b)PE839は、難燃剤添加量を減じ、低粘度バイオPEをブレンドしたことにより、PE558よりも成形温度を10℃低温とし、成形圧力を半減させることができた。これによりセルロースの熱劣化による着色を大幅に抑制できた。

図4のカバー(ベントファン)では、熔融樹脂が成形品中央のピンゲート(矢印部)から放射状に流動、充填された。ピンゲートは極狭小であるために発熱が懸念されたが、ゲートから末端までの流動距離が短いことから熱劣化による着色は、トレイ(ラックフロント)よりも良好であった。ここでもPE558よりもPE839の方が成形加工性に優れることから、着色と成形品表面に形成される波状のフローマークが低減された。このように成形加工性に優れた材料組成を見出したことにより、2種のHPLC用部品において、令和6年度よりも外観を良好にすることができた。



図3 HPLC 部品：トレイ (ラックフロント)
(a) 令和6年度作製 (PE558)
(b) 令和7年度作製 (PE839)

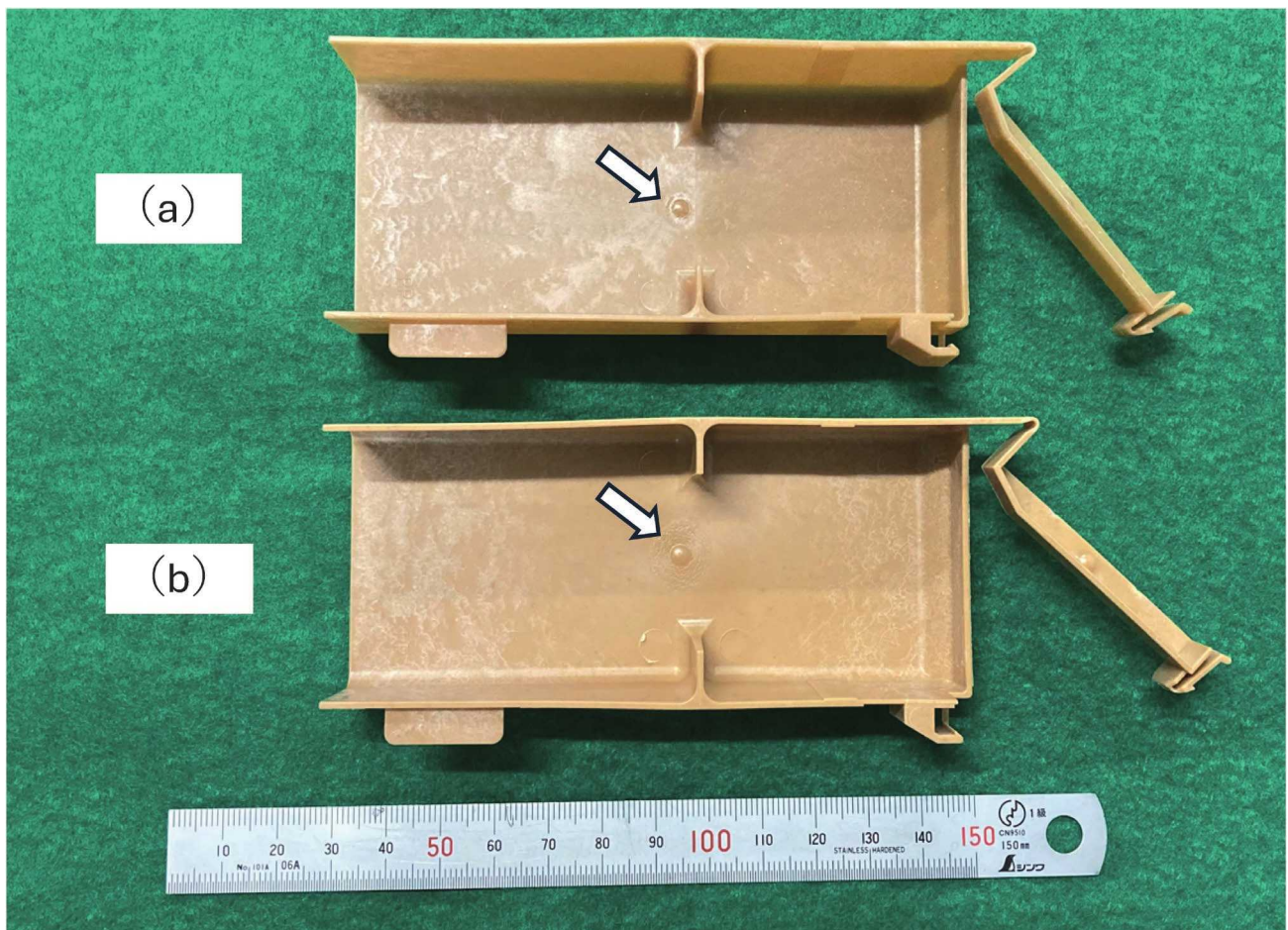


図4 HPLC 部品：カバー（ベントファン）
(a) 令和6年度作製（PE558）
(b) 令和7年度作製（PE839）

4. まとめ

高バイオ度プラスチック複合材料を使用した分析機器部品の創製を目指し、セルロース繊維強化バイオ PE の複合化とその性能を評価した。低粘度バイオ PE の適用やブレンド難燃剤の最適化により、一般に相反する「難燃性」、「力学的特性」、「成形加工性」の高度なバランスを実現した。具体的には、目標とする力学的特性（曲げ弾性率 2000MPa 以上、Izod 衝撃強度 8kJ/m² 以上）を維持したまま、試験片厚さ 2mm での垂直難燃試験の最高グレード（V-0）の難燃性を達成した。さらに、この難燃剤の減量と低粘度樹脂の適用は、熔融流動性の大幅な向上をもたらした。その結果、分析機器部品における射出成形性が向上し、令和6年度の分析機器部品の射出成形品と比較して成形品外観の改善へとつながった。今後は、さらなる難燃剤の減量による高バイオ度化、低コスト化の組成を見出し、実使用における問題点等の検証

を進め、分析機器部品への採用実現を目指していきたいと考えている。

謝辞

本報告は、環境省「令和7年度脱炭素革新素材セルロースナノファイバー普及のための課題解決支援事業委託業務」において、得られた成果である。関係各位に心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 仙波 健 他：京都市産業技術研究所 研究報告, No.15, p.9 (2025).
- 2) 島津製作所：“2023年度-2025年度中期経営計画”，島津製作所，2023-3-22. <https://www.shimadzu.co.jp/sites/shimadzu.co.jp/files/ir/ztlg/b4l9i7v8637vxu8o.pdf>, (参照 2026-07-03).

- 3) 島津製作所プレスリリース：“難燃性高めたセルロースファイバー複合樹脂を巴川製紙所、エフピー化成工業と開発「世界で初めて分析計測機器にセルロースファイバー配合部材を採用」”, 島津製作所, 2023-11-21. https://www.shimadzu.co.jp/news/2023/hj8k_96_g7utd-mg.html, (参照 2026-07-03).
- 4) 玉祖健一 他：ネットワークポリマー, 36, (5), 232-238 (2015).

セルロースナノファイバー強化ポリプロピレンの マテリアルリサイクルが機械的特性及び発泡性に与える影響

材料・素材技術グループ 伊藤 彰浩、仙波 健、野口 広貴

要旨

持続可能な社会を実現する上で資源循環は重要な役割を担う。本研究では、セルロースナノファイバー強化ポリプロピレン (CNF 強化 PP) に対し、マテリアルリサイクルの工程を模擬したプロセス (粉碎、成形) を複数回実施した。4 回のリサイクルの結果、CNF 強化 PP 中の CNF は短繊維化し、曲げ弾性率は 9.4%、曲げ強度は 13.4% 減少したが、依然として繊維のネットワーク構造を保持し、ブランク (非強化 PP) に対して高い性能を示した。さらにリサイクルした CNF 強化 PP の発泡体の気泡構造 (形状、気泡数密度) 及び発泡体密度にも顕著な変化は見られなかった。以上から、CNF 強化 PP は機械的特性だけでなく発泡成形性においても優れたマテリアルリサイクル性を有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、複合材料、マテリアルリサイクル、発泡成形

1. 緒言

従来の大量消費社会の弊害として、資源枯渇や環境破壊など数多くの問題が生じている。これらの解決策となる持続可能な社会の実現には、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルによるプラスチックの資源循環が大きな鍵となる。例えば自動車分野においては ELV (End-of-Life Vehicles) 規制の強化に伴いリサイクルプラスチックの使用が義務化され、これらのリサイクル技術の確立は喫緊の課題となっている。

一方 CNF はカーボンニュートラルな樹脂補強材であり、これまでに樹脂中の CNF の分散性を制御することにより耐熱性、機械的特性の向上を達成してきた¹⁾。加えて、マテリアルリサイクル性が付与されれば資源循環の面でも特徴ある材料とすることができる。マテリアルリサイクル工程では破碎やせん断、熱により材料にダメージが加わるため、機械的特性や流動性の変化を把握することが重要である。機械的特性を把握したりリサイクル CNF 強化 PP に発泡成形を組み合わせることができれば、リサイクル材料でありながら、さらに材料削減や部材軽量化、断熱化による CO₂ 排出量低減効果も期待できる。そこで本研究では、CNF 強化 PP のマテリアルリサイクルがその機械的特性や流動特性、発泡性に与える影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 材料調製

既報¹⁾ の手法に基づき、二軸押出機 (ULT15TWnano-15MGNH-700-KYS、φ15 mm、L/D=45、(株)テクノベル) によりブロック PP に対してマレイン酸変性 PP (MAPP) 5wt%、アセチル化パルプ 7wt%、タルク 10wt% を複合化して、CNF 強化 PP のペレットを作製し、それを短冊形試験片 (80mm × 10mm × 4mm) に射出成形機 (NPX7、型締め力 7 トン、日精樹脂工業(株)) を用いて加工した。この射出成形品に対して粉碎、再成形 (成形温度 190℃、金型温度 30℃) を繰り返すことでマテリアルリサイクル工程を再現した。以降、再成形の回数 (リサイクル回数) n に応じてサンプル名を R_n と記載する。各 R_n の成形品は 190℃ で熱プレスしてフィルムに加工し、正立顕微鏡 (DM4B、Leica Microsystems GmbH) により複合材料中の繊維を偏光観察し、分散性を評価した。また比較としてブランク (PP85wt%、MAPP5wt%、タルク 10wt%) を同様に短冊形試験片に射出成形して評価した。

2.2 機械的特性及び流動性の評価

R_0 、 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 及びブランクについて、3 点曲げ試験及びシャルピー衝撃試験を行い、マテリアルリサイクルによる機械的特性の変化を調べた。3 点曲げ試験は、万能試験機 (オートグラフ AG-X plus、(株)島津製作所) を用いて、試験速度：10 mm/min、支点間距離：

64 mm の条件にて実施した。シャルピー衝撃試験は、シャルピー衝撃試験機（株安田精機製作所）を用いてハンマー容量：2J、ノッチありの条件で行った。また、レオメータ（AR-G2、ティー・エイ・インスツルメント・ジャパン(株)）により、Φ25mm パラレルプレートを用いて、設定温度：200℃、ひずみ：0.03% の条件で複素粘性率の角周波数依存性を測定し、流動性の変化を評価した。

2.3 発泡成形性の評価

R0、R1、R2、R3、R4 の短冊形試験片を 10mm × 10mm × 4mm に切断し、発泡成形用の試験片を作製した。既報²⁾の方法及び条件を踏まえ、試験片をオートクレーブに入れて 160℃、20MPa の CO₂ 雰囲気下で 5 時間保持することにより、材料に CO₂ を溶解した。その後 10MPa/s で圧力開放して、溶けきれなくなった CO₂ を気泡として生成させることで発泡体を成形した。得られた発泡体の密度を、密度計（MSE-224S-100-DU +YDK01、ザルトリウス・ジャパン(株)）を用いてアルキメデス法により測定した。さらに発泡体を液体窒素に浸漬して脆化させた後に破壊することにより得られた断面の気泡構造を走査型電子顕微鏡（SEM、SEM5900LV、日本電子(株)）により観察した。

3. 結果・考察

3.1 マテリアルリサイクルによる CNF 強化 PP の分散性、機械的特性、流動性の変化

R0、R1、R2、R3、R4 の短冊形試験片の偏光観察結果を図 1 に示す。R0 では幅 10 ミクロン程度の高アスペクト比の繊維が分散、配向している様子が確認された。一度のリサイクル（R1）で短繊維化し、繊維の配向性が低下するなどの大きな変化がみられた。さらにリサイクルを繰り返すことで徐々に短繊維化し、配向がランダムになることが分かった。

3 点曲げ試験及びシャルピー衝撃試験の結果と n の関係を図 2 に示す。白抜きのプロットがブランク、塗潰しのプロットが CNF 強化 PP を示している。CNF の複合化により、曲げ弾性率は 1.14GPa (○) から 1.81GPa (●、+59%)、曲げ強度は 24.4MPa (△) から 35.4MPa (▲、+45%) へ大きく向上した。一方、シャルピー衝撃強度はブランクの 54.5kJ/m² (◇) から 5.57kJ/m² (◆) に大きく低下した。この CNF 強化 PP に対してリサイクルを繰り返すことで、曲げ弾性率及び曲げ強度は R2 までに約 1 割低下したが、以降は維持された。これらの変

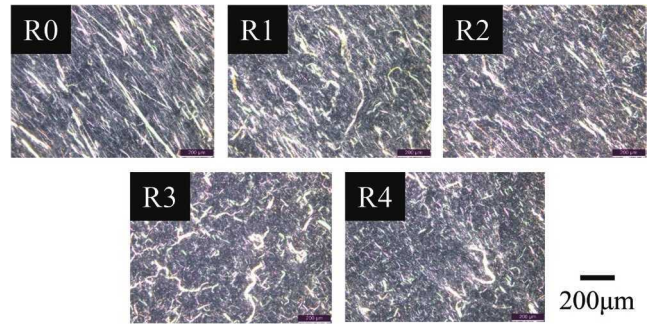


図 1 CNF 強化 PP の偏光顕微鏡画像

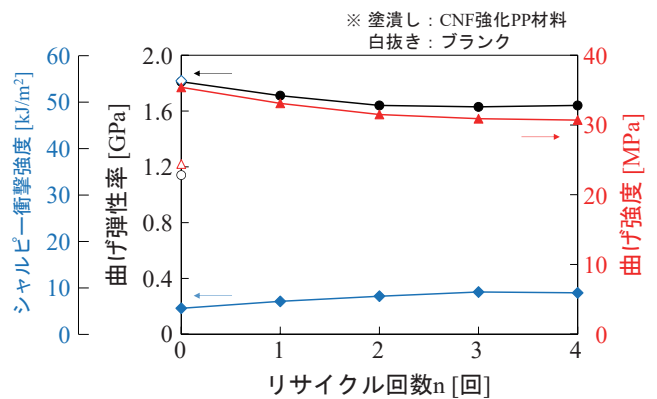


図 2 CNF 強化 PP とブランクの曲げ特性と耐衝撃性

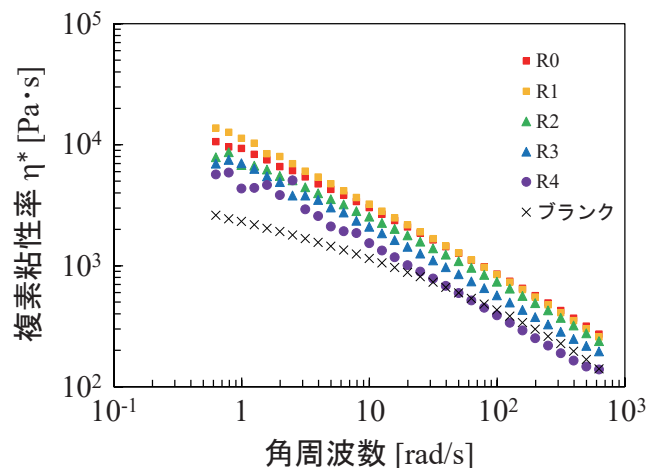


図 3 CNF 強化 PP とブランクの複素粘性率 (200℃)

化は図 1 で確認された CNF の短繊維化に対応する。R4 でもブランクに対して弾性率 +44%、強度 +26% の高い性能を示した。一方でシャルピー衝撃強度は n の増加に対して上昇傾向であった。

複素粘性率の周波数依存性を図 3 に示す。CNF 強化 PP はブランクに比べて周波数依存性が大きく、特に低周波（低速）で高い値を示した。これは、繊維のネットワーク構造に由来すると考えられる。リサイクル回数が

増えると CNF の短繊維化により複素粘性率は若干減少したが、依然として低周波においてブランクよりも高い値を示しており、ネットワーク構造を維持していると考えられる。そのため R4 でもブランクに対して高い曲げ特性を保持したと考えられる。

一方、プラスチックの強化に汎用されるガラス繊維により強化された複合材料では、マテリアルリサイクルを繰り返すと弾性率、強度とともに複素粘性率も大幅に低下することが確かめられている³⁾。これはマテリアルリサイクル時の粉砕によりガラス繊維の切断が生じていることによる。これに対し、CNF はガラス繊維よりも柔軟であるために切断の頻度が低くネットワーク構造が維持される。そのため、リサイクルによる顕著な弾性率、強度低下は認められなかったと考えられる。筆者らは既報^{3, 4)}において、バイオポリエチレンやポリアセタールをマトリックスとした材料でも同様の傾向が得れることを確認し、報告している。

3.2 マテリアルリサイクルによる CNF 強化 PP の発泡成形性の変化

CNF 強化 PP 発泡体の断面 SEM 画像を図 4 に示す。いずれも数十ミクロンの球状の気泡が形成されていた。これら画像から計測した気泡数密度及び発泡体密度と n の関係を図 5 に示す。いずれの n においても気泡数密度(◆)は約 2×10^7 個/cm³、発泡体密度(●)は約 0.6g/cm³ であり、 n に対して明確な変化を示さなかった。図 3 においては n 増加により複素粘性率が低下したが、気泡構造に大きな影響は現れなかった。CNF の短繊維化による複素粘性率の低下は、一般に気泡の粗大化を促進する。一方で、CNF の短繊維化による繊維・樹脂間の界面積増加は気泡生成を促進するため、気泡サイズを維持することができた可能性がある。本結果より、マテリアルリサイクルされた CNF 強化 PP が優れた発泡成形

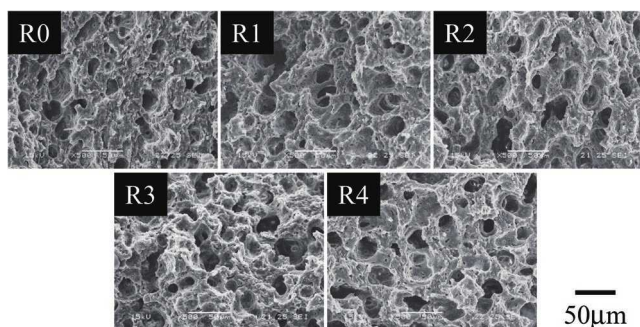


図 4 CNF 強化 PP 発泡体の断面 SEM 画像

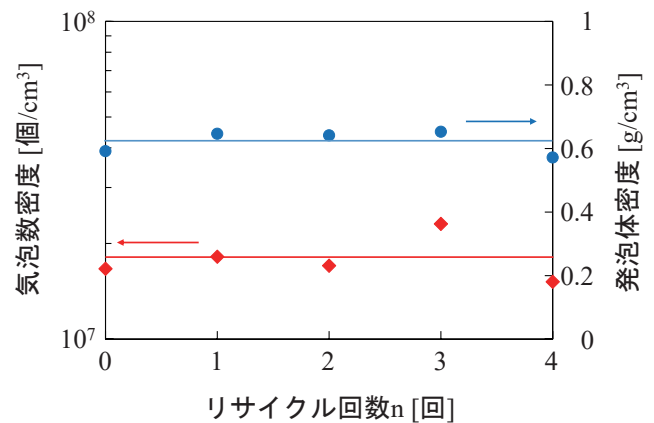


図 5 CNF 強化 PP 発泡体の気泡数密度及び発泡体密度

性を示すことが明らかとなった。

4. 結言

本研究では、CNF 強化 PP について、マテリアルリサイクルによる機械的特性や流動性、発泡性の変化を評価した。再成形(リサイクル)を 4 回繰り返したところ、CNF の短繊維化が進行し、複素粘性率の若干の低下が確認された。しかしながら、依然としてネットワーク構造は維持され、ブランクに対して高い機械的特性を示した。さらに発泡成形体においても、リサイクルに対して気泡構造や発泡体密度に顕著な変化はなく、優れた発泡成形性を保持することが明らかとなった。

本検討から CNF 強化 PP は、優れたマテリアルリサイクル性が期待でき、発泡成形への適性も示された。自動車分野などリサイクル材料の使用や部材軽量化が求められている分野において活用の促進が望まれる。

謝辞

本研究は令和 4 年度 NEDO 特別講座 CNF 先端開発技術者養成に係る特別講座における周辺研究として実施した。本誌面を借りて、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 仙波 健, 他: 京都市産業技術研究所研究報告, **8**, 37 (2017).
- 2) A. Ito et al.: J. Cellular Plast., **55**[4], 385 (2019).
<https://doi.org/10.1177/0021955X19841049>
- 3) 仙波 健, 他: 成形加工, **28**, 232 (2016).
- 4) NEDO 成果報告書: P13006, p.150 (2020).

速度制御熱分析法によるアルミナセラミックス 3D 造形体の 脱脂条件の効率化に関する検討

材料・素材技術グループ 稲田 博文、高石 大吾

要旨

材料押出法 (MEX) によるアルミナ 3D 造形体の脱脂工程の効率化を目的とし、熱分析 (TG-DTA) によるバインダーの熱分解挙動の評価及び速度制御熱分析法 (ダイナミック TG-DTA) を用いた脱脂プログラムの最適化を行った。一定昇温速度での測定から、昇温速度が速いほど単位時間当たりのガス発生量が増加することを確認し、プログラム昇温測定から 230℃ 以上でガス発生量が低下することを明らかにした。さらに、230℃ 以上で質量減少速度を一定 (-0.013%/min) に保つダイナミック TG-DTA 法による測定解析の結果、効率的な温度プログラムを導出した。熱分析により得られた知見を実際の脱脂炉に適用した結果、成形体 (縦 14mm × 横 16mm × 高さ 5 mm) に欠陥を生じさせることなく、500℃ までの脱脂時間を従来の 89 時間から 52 時間へと約 40% 短縮することに成功した。

キーワード：アルミナ 3D 造形体、材料押出法 (MEX)、脱脂工程、有機バインダー、熱分析 (TG-DTA)、ダイナミック TG-DTA、速度制御熱分析法

1. 緒言

ファインセラミックス (先進セラミックス) の製造工程において、成形工程は極めて重要な位置を占める¹⁻²⁾。一般に、成形工程ではセラミック原料粉末に有機バインダーなどの成形助剤を添加し、可塑性とともに、成形体に十分な強度や保形性を付与する。近年普及している材料押出法 (Material Extrusion, MEX) などの 3D プリンターによる造形においても、加熱時の流動性と成形後の強度を確保するために有機バインダーが使用される。

有機バインダーは、目的とする形状を維持するためには不可欠な存在であるが、最終製品には不要であるため、焼成の前段階で除去する脱脂 (脱バインダー) 工程を経る必要がある。この脱脂工程において、加熱によりバインダーが急激にガス化すると、発生したガスが成形体の膨張、クラック、層間剥離といった致命的な欠陥を引き起こす原因となる。そのため、欠陥の発生を防止するべく、実際の製造現場では経験的にゆっくりとした昇温速度が設定されており、製品形状やサイズにもよるが、脱脂に数十時間から数日を要する。この長大な処理時間は、生産性を低下させ、製品のコストダウンを阻む障害となっている。

脱脂工程を効率化するためには、成形体中に含まれるバインダー成分の熱分解挙動を正確に把握し、加熱プログラムパターンを最適化することが不可欠であり、その

評価には熱分析 (示差熱・熱重量同時測定、TG-DTA) が広く用いられている³⁾。さらに近年では、一定の昇温速度で加熱する従来の測定法に加え、試料の重量減少速度 (分解ガスの発生速度) を一定に保つように温度を自動制御する速度制御熱分析法 (Sample Controlled Thermal Analysis, SCTA) が注目されている⁴⁻⁵⁾。速度制御熱分析法を活用することで、急激な分解ガスの発生を抑制しながら均一にバインダー成分を除去できる理想的な加熱パターンを見出すことが可能となり、欠陥発生防止と脱脂時間の大幅な短縮を両立できると期待されている。

そこで本研究では、材料押出法 (MEX) により作製したアルミナ 3D 造形体を対象とし、その脱脂工程の効率化を目的とした。まず、TG-DTA を用いて基礎的な熱分解挙動の評価を行い、続いて速度制御熱分析法を活用して効率的な加熱プログラムを導出した。さらに、得られた知見をもとに実際の脱脂炉に適用可能な昇温プログラムを構築し、成形体の品質を維持しつつ脱脂条件の効率化が図れる可能性について検討した。

2. 実験方法

2.1. アルミナ 3D 造形体の成形

アルミナ 3D 造形体作製用の原料として、市販のアルミナフィラメント (DA-6200D、第一セラモ株) を使用

した。成形機として、材料押出法の3Dプリンター(A1 mini 3D プリンター、Bambu Lab)を使用した。成形条件は、推奨条件である、ノズル径 0.4 mm、ノズルヘッド温度 200℃とした。熱分析用試料として、直径 3.6 mm、高さ 2 mmの成形体を作製した。脱脂炉での評価用試料として、縦 14 mm、横 16 mm、高さ 5 mm の成形体を作製した。

2.2. TG-DTA 測定及び脱脂炉での加熱処理

熱分析測定にはリガク Thermo plus EVO2 TG-DTA Smart Loader (TG 8120) を用いた。測定用容器として白金製容器(外寸φ5 mm × t5 mm)を使用し、試料重量は約 50mgとした。大気雰囲気室温から 1000℃まで測定を行った。脱脂炉としてマッフル炉(300Plus、デンケン・ハイデンタル)を使用し、ハンドリング可能な強度である仮焼体を得るため、1000℃まで大気雰囲気にて脱脂・仮焼処理を行った。

3. 実験結果

3.1. アルミナ 3D 造形体の熱分析

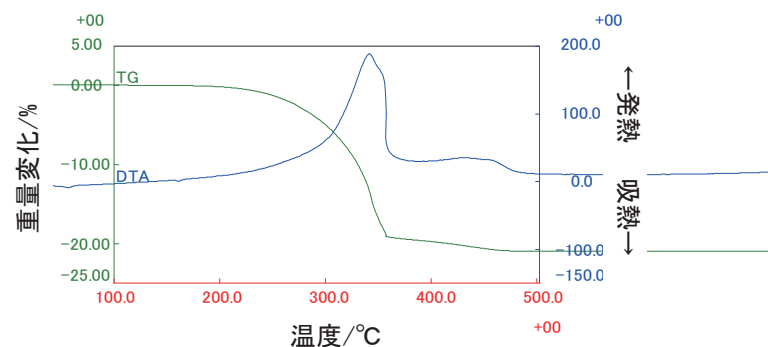
図 1a に、アルミナ 3D 造形体の TG-DTA 測定(100℃～500℃)の結果を示す。昇温速度は、5℃/min (300℃/hour)である。図中緑の線が TG 曲線であり、温度に対する重量変化を示す。温度が高くなるに従い、重量は減少した。重量は 200℃弱から減少し始め、350℃付近まで急激に減少したのちに、500℃付近までなだらかに減少した。図中青の線が DTA 曲線である。上に凸の場合は試料が発熱していることを示す。大きな重量減少を示した温度域で、上に凸のピークを示した。ピーク温度は 340℃であった。また、450℃付近にブロードなピークが検出された。

TG-DTA 測定では、TG 曲線が重量減少を示し、DTA 曲線が発熱を示す場合は、燃焼反応が生じていると解釈できる。よって、TG-DTA 測定結果から、試料中に含まれる有機バインダー等が、昇温に伴い燃焼していることが分かった。DTA 曲線において、複数のピークが観察されたことから、複数の有機成形助剤が試料中に含まれていることが示唆された。3D 造形体から有機バインダー等が焼成時に分解しガスとなって系外に排出される際、その反応が急激に生じると、成形体が崩壊する恐れがある。そこで一般的には、脱脂工程において緩やかに燃焼反応を生じさせるため、昇温速度を遅くする対策が取られる。多量の有機バインダーを含む肉厚のセ

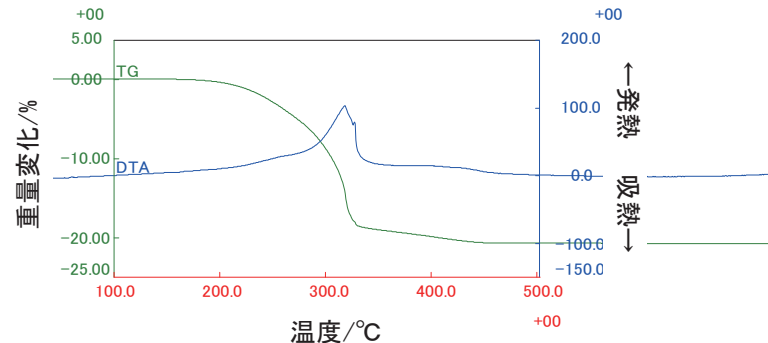
ラミックス成形体を熱処理する場合は、100℃/hour よりも低速で熱処理される。一方、熱分析における一般的な昇温速度は、5℃/min～20℃/min (300℃/hour～1200℃/hour)程度である。そこで、実際の脱脂工程に近い低速昇温での熱分析を行った。

図 1b 及び 1c に、昇温速度を 10℃/hour 及び 100℃/hour としたアルミナ 3D 造形体の TG-DTA 測定結果を示す。100℃から 500℃までの結果をプロットしている。図 1a の 300℃/hour と同様に、大きな重量減少を示した温度域で、DTA が上に凸のピークを示した。一方、

(a) 300℃/h



(b) 100℃/h



(c) 10℃/h

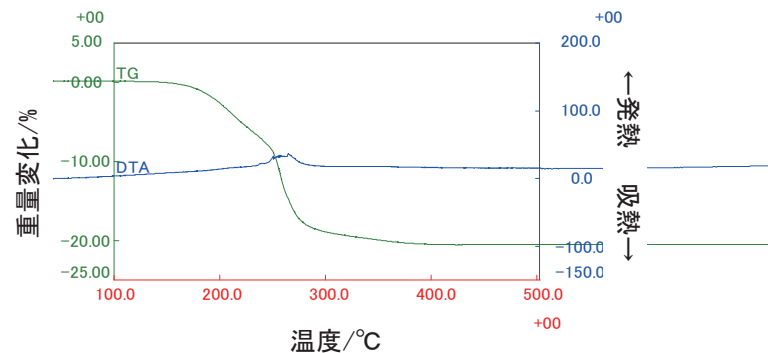


図 1. アルミナ 3D 造形体の TG-DTA 測定
(a) 昇温速度 300℃/h、(b) 昇温速度 100℃/h、
(c) 昇温速度 10℃/h

昇温速度が小さくなるに従い、DTA ピークの位置は低温側にシフトし、そのピークも小さくなる傾向を示した。

図2に、昇温速度を 10℃ /hour から 300℃ /hour と変化させて測定したアルミナ 3D 造形体の TG の結果を示す。縦軸左側は温度に対する重量変化 (TG) で単位は mass% である。縦軸右側は TG の微分曲線 (DTG) であり、単位は mass%/min (単位時間 (分) 当たりの重量変化) である (以降、%/min と表記する)。図中、黒線が 10℃ /hour、緑線が 100℃ /hour、青線が 300℃ /hour の条件で測定した結果である。昇温速度が遅い試料ほど、より低温から重量減少が生じる傾向が見られた。例えば、重量減少率が 0.2% (重量減少量が 100 μg 程度) に達した温度で比較すると、昇温速度 10℃ /hour、100℃ /hour、及び 300℃ /hour において、それぞれ 156℃、187℃、及び 195℃ であった。これらの温度は、いずれも 3D プリンターによる造形時の成形温度 (ノズルヘッド温度) である 200℃ を下回っていた。

本試料において重量減少が生じる原因として、試料中に含まれる有機物の燃焼、昇華・蒸発、分解が考えられ、これらはいずれもガスとなって試料外部へと排出される。この際、試料から急激にガスが発生すると、成形体

の膨張や場合によっては崩壊を引き起こす恐れがある。したがって、単位時間あたりのガス発生量を評価し、これを適切に制御することは、成形体の脱脂工程において極めて重要である。今回の評価により、重量減少が始まる温度が 3D 造形の成形温度よりも低いことが明らかとなった。この結果は、実際の脱脂工程において、成形温度である 200℃ に達する前の低い温度域から低速での熱処理を開始する必要性があることを強く示唆している。

また本実験系において、大きな重量減少速度は試料中に含まれる有機物からの急激なガス発生を意味していると考えられることから、ガス発生量の制御のために DTG を参考にすることは有効である。DTG の最大値は、昇温速度 10℃ /hour、100℃ /hour 及び 300℃ /hour において、それぞれ 0.086%/min (ピーク温度：265℃)、0.86%/min (314℃)、及び 2.6%/min (335℃) であった。DTG 曲線の解析結果より、試料からのガス発生量を制御するには、昇温速度を制御することが有効であることが示された。また、昇温速度が速くなるに伴い、DTG のピーク温度も高温側に変化することから、実際の成形体の脱脂条件に近い条件で分析することが有効であると示唆された。

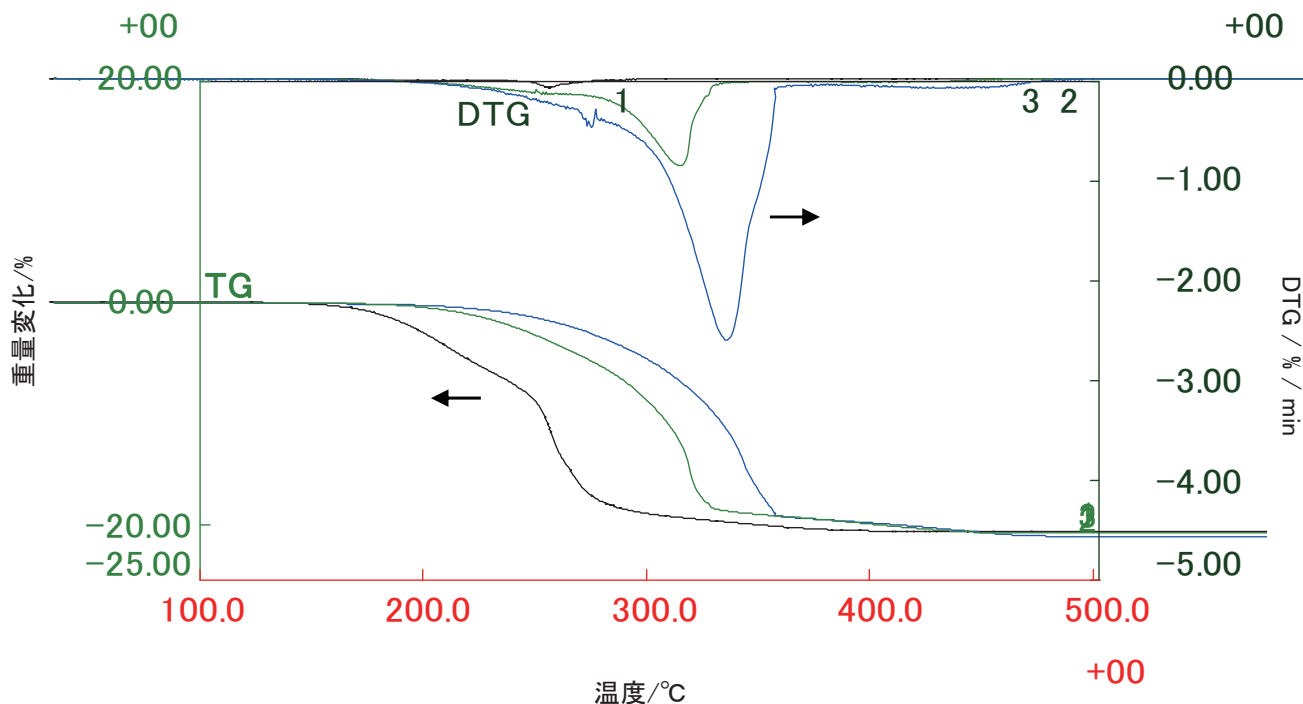


図2. 各種昇温速度で測定したアルミナ 3D 造形体の TG 及び DTG カーブ。
黒：10℃ /h、緑：100℃ /h、青：300℃ /h。

3.2. 昇温速度をプログラム制御したアルミナ 3D 造形体の熱分析

TG-DTA 測定では通常、時間に対して一定速度で温度を変化させるが、任意の昇温速度を組み合わせるプログラム制御での測定も可能である。アルミナ 3D 造形体用原料フィラメントメーカーより提示されている 3D 造形体の脱脂条件例を参考として、産技研で保有する脱脂炉に適用可能な条件を考慮して作成した昇温プログラムにて TG-DTA 測定を行った。図 3 にその結果を示す。赤線は時間に対する温度であり、本測定の昇温プログラムである。作成した昇温プログラムの特徴は、170℃ から 270℃ まで昇温速度 2℃/hour で昇温している点であり、測定時間は 91 時間程度である。実際の試験用脱脂炉で処理する場合は、脱脂後に仮焼のため 1000℃ まで昇温後数時間保持し、室温まで 100～数百℃/hour の速度で降温する必要がある。従って、成形体の脱脂及び仮焼のためには、合計で 100 時間近い時間が必要になる。

図 3 中、緑曲線が TG であり、濃い緑曲線が DTG である。TG 曲線から、重量減少は時間に対して一定でなく変化していることがわかる。DTG 曲線は、その変化量を示しており、2つのピークが検出された。1つ目のピークは 180℃ 付近でブロードであり、その値は、-0.007%/min であった。2つ目のピークは、230℃ 付近に検出され、その値は -0.013%/min であった。なお、DTG 曲線がギザギザした形状になっているのは、昇温速度が非常に遅い条件で測定しているため、微小な重量変動や天秤の時間ドリフト成分が強調されるためである。また、DTG 曲線においていくつか検出されたスパイクピークについては、複数回測定を行ってもその位置（温度）に再現性が認められなかった。このことから、実際の脱脂反応を反映したものではなく、数値解析上の特性に起因すると考えられるため、本稿では考察の対象外とした。

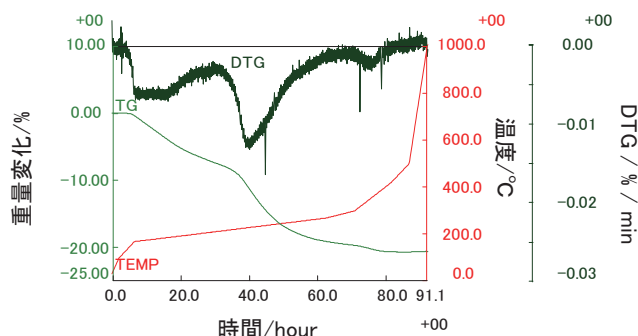


図 3. アルミナ 3D 造形体の TG-DTA 測定
(測定時間、91.1 時間)

本測定試料において TG が減少する原因としては、試料中に含まれる有機物の燃焼、昇華・蒸発、分解が考えられる。230℃ よりも高い温度で、DTG の値が減少したのは、これらの有機物が減少したためと考えられる。従って、230℃ 以上の温度においては、時間当たりの分解ガスの発生量が低下するものと推察される。

3.3. 速度制御熱分析法によるアルミナ 3D 造形体の熱分析測定

図 2 の結果より、昇温速度が速くなるほど、成形体からの単位時間当たりのガス発生量が増加することが明らかとなった。また、図 3 の結果から、230℃ 以上の温度においては、時間当たりのガスの発生量が低下することが分かった。よって、脱脂時間を短縮するための方法として、230℃ 以上の温度域をより早い昇温速度で処理することは有効と考えられる。

従前は、昇温速度を変化させた測定を複数回実施することで脱脂条件を決定していたが、近年の分析装置の進化により、重量減少の速度を制御した熱分析測定が可能となっている。この測定方法は、質量変化をセンサーとし、炉の温度制御にフィードバックする方法で、速度制御熱分析法 (Sample Controlled Thermal Analysis, SCTA) と呼ばれる。本研究で用いた熱分析装置でもフィードバック制御が可能で、「ダイナミック TG-DTA 測定法」と呼ばれている。ダイナミック TG-DTA 法の特徴として、重量減少率の速度を制御できるだけでなく、制御を開始する温度を任意に指定できる点が挙げられる。そこで、230℃～500℃ の温度範囲での質量減少速度値を -0.013%/min と設定し、測定を行った。その結果を図 4 に示す。図中の赤線は、時間に対する温度変化である。230℃ までは図 3 と同じ条件であるため、温度は直線的に変化している。一方、ダイナミック制御を開始した 230℃ 以降は、ギザギザとした曲線的な変化を示している。230℃ から脱脂がほぼ完了する温度として想定している 500℃ までにかかる時間を比較すると、メーカー推奨条件をもとにしたプログラム速度制御条件 (図 3) では 46 時間であるのに対して、ダイナミック制御した条件下では 12 時間であり、34 時間が短縮された。

ダイナミック TG-DTA 測定の結果から、TG を一定の減少率とした場合の時間に対する温度曲線 (TEMP: 赤い曲線) が得られた。この温度曲線を参考にして、急激な発熱や分解ガスによる欠陥の発生を抑止しつつバインダー成分が除去される加熱パターンを見出すことが可

能となるため、脱脂工程の効率化・最適化が期待できる。また、DTG 曲線がギザギザした形状になっていることやスパイクピークが検出されたのは、図 3 と同様、昇温速度が非常に遅い条件で測定している影響と考えている。

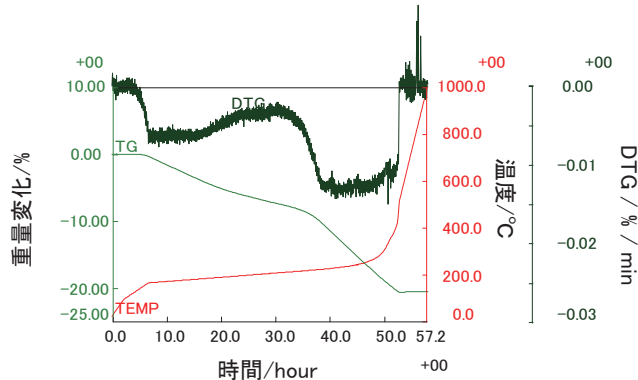


図 4. アルミナ 3D 造形体のダイナミック TG-DTA 測定 (測定時間、57.2 時間)

3.4. 試作アルミナ 3D 造形体の脱脂処理

アルミナ 3D 造形体の脱脂及び仮焼のため、図 5 に示す条件で熱処理を行った。図中黒線は、メーカー推奨の条件をもとに設定した脱脂・仮焼プログラムである。このプログラムの特徴は、3D プリンターの造形温度である 200°C 付近から 400°C までの温度域を、数°C /hour の昇温速度で昇温している点である。図中のオレンジ線は、ダイナミック TG-DTA 測定結果をもとに作成した、230°C 以上の温度域をより高速に脱脂する条件としている。ダイナミック TG-DTA 測定の結果を適用することで、脱脂が完了する 500°C までに必要な熱処理時間が 89 時間から 52 時間と約 40% 時間短縮できる熱処理プログラムとなっている。また比較用に、プレス成形試料の一般的な脱脂条件である 100°C /hour での熱処理も実施した。

図 6 にアルミナ 3D 造形体（成形体）及び各種仮焼体の外観写真を示す。左から、(a) 3D 造形体（成形体）、(b) 500°C まで 5 時間で脱脂した仮焼体、(c) 500°C まで 52 時間で脱脂した仮焼体、(d) 500°C まで 89 時間で脱脂した仮焼体であり、上段は側面から撮影した画像、下段は上面から撮影した画像である。成形体は、厚みを 5.0 mm に設定して 3D 造形を行ったが、ノギスで試料を測長した結果、実測値は 5.1 から 5.2 mm (平均値 5.16 mm) であった。よって、厚み方向に対する成形の精度は数%程度の誤差があることが分かった。仮焼体 (b) の上面は、中央部が膨らんでいた。また、側面の観察から試料に亀裂が生じており、成形体が崩壊していることが分かった。

仮焼体 (c) 及び (d) の試料には、短時間で脱脂・仮焼した試料に生じた欠陥等は観察されなかった。

以上のことから、速度制御熱分析法（ダイナミック TG-DTA 法）の測定結果に基づいて作成した昇温プログラムを適用することで、仮焼工程を含めた全体の処理時間を、推奨条件である 102 時間から 65 時間に短縮しても、外観上欠陥のない仮焼体の作製が可能であることが示された。

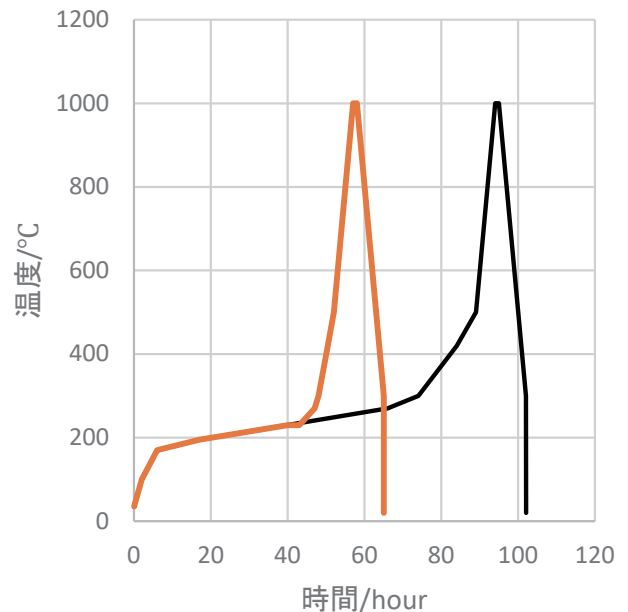


図 5 アルミナ 3D 造形体の脱脂・仮焼プログラム。
黒：102 時間の昇温プログラム、
オレンジ：230°C 以上の温度を短縮した 65 時間の昇温プログラム

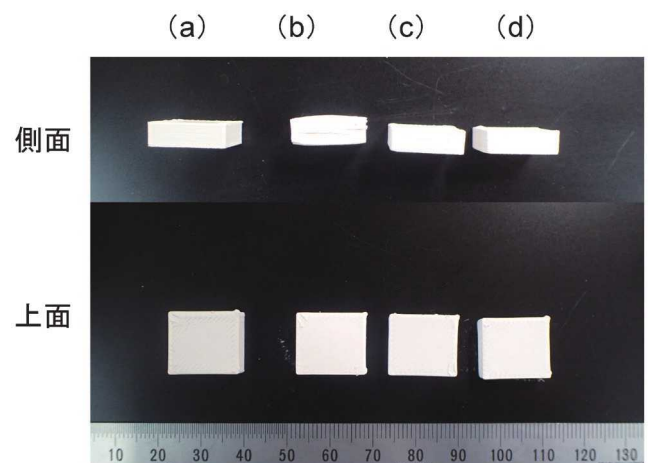


図 6. 各種アルミナ 3D 造形体・仮焼体の外観写真 (側面及び上面)。(a) 3D 造形体（成形体）、(b) 500°C まで 5 時間で脱脂した仮焼体、(c) 500°C まで 52 時間で脱脂した仮焼体、(d) 500°C まで 89 時間で脱脂した仮焼体

4. まとめ

本研究では、材料押出法 (MEX) により作製したアルミナ 3D 造形体の脱脂工程の効率化を目的として、熱分析 (TG-DTA) によるバインダーの熱分解挙動の評価、及び速度制御熱分析法 (ダイナミック TG-DTA) を用いた脱脂プログラムの最適化を行った。まず、一定の昇温速度における TG-DTA 測定を行った結果、昇温速度が速くなるほど単位時間当たりのガス発生量が増加し、DTA の反応ピークが高温側へシフトすることが確認された。これにより、成形体の崩壊を防ぐためにはガス発生量に応じた昇温速度制御が重要であることが示された。次に、実際の脱脂・仮焼工程を想定したプログラム昇温での TG-DTA 測定により、180℃ 付近と 230℃ 付近で大きな重量減少ピークが検出され、230℃ 以上の温度域では分解ガスの発生量が低下することが明らかとなった。この結果を踏まえ、230℃ 以上の温度域において質量減少速度を一定 ($-0.013\%/min$) に保つダイナミック TG-DTA 法を適用し、昇温条件を調べた。その結果、急激なガス発生を抑制しつつ、230℃ から 500℃ までの熱処理時間を 46 時間から 12 時間へと短縮できる温度プログラムが導出された。これらの結果をもとに実際の脱脂炉用の加熱プログラムを構築し、適用したところ、成形体 (縦 14mm × 横 16mm × 高さ 5 mm) において、500℃ までの脱脂時間を従来の 89 時間から 52 時間へと約 40% 短縮することに成功した。以上の結果から、ダイナミック TG-DTA 測定法の活用は、セラミックス 3D 造形体の脱脂工程において、欠陥の発生を抑止しつつ工程の効率化を図るための有効なアプローチであることが明らかになった。

参考文献

- 1) 斎藤勝義: セラミックス, 18, 93 (1983).
- 2) 斎藤勝義: セラミックス, 32, 797 (1997).
- 3) 坂本渉: セラミックス, 53, 17 (2018).
- 4) 有井忠: セラミックス, 53, 4 (2018).
- 5) 高石大吾 他: 京都市産業技術研究所研究報告, No.14, p.19 (2024).

京都市内産ヒノキから得られたおが粉を複合した バイオマスポリエチレンの物性評価

材料・素材技術グループ 野口 広貴、井内 俊文、伊藤 彰浩、仙波 健

要旨

資源循環型社会の実現と化石資源の使用量削減を目的に、樹脂分野においてもバイオマス素材の活用が求められている。その原料となるバイオマス素材については、輸送に関わるエネルギー効率の観点から、地域資源の活用が望ましい。そこで本研究では京都市内産のヒノキから得られたおが粉をバイオマスポリエチレン（バイオ PE）の強化フィラーとして活用した。相容化剤（マレイン酸変性ポリエチレン（MAPE））に加え、複合工程時に尿素をおが粉に含まれるセルロース繊維の解繊促進剤及びセルロース繊維と樹脂の界面改質剤として用いることで複合材料の強度が向上した。おが粉 30 wt% を複合した場合、非強化バイオ PE（ニート）と比較して曲げ弾性率は 3.4 倍（3730 MPa）、曲げ強度は 3.1 倍（70.2 MPa）に向上し、シャルピー衝撃強度も最大で 1.4 倍（4.81 kJ/m²）に達した。本研究は、セルロース繊維を疎水化するための高コストな前処理工程を省くために、樹脂との溶融混練工程内で尿素によるセルロース繊維のカルバメート化を同時進行させるシンプルな複合工程に特徴がある。

キーワード：おが粉、バイオマスポリエチレン、尿素、界面改質、セルロース複合材料、地域資源循環

1. 緒言

近年、環境保全の観点から国際的に資源循環型社会や低炭素社会への移行が進められている。その中で、樹脂の再利用が求められているが、性能が低下したりサイクル樹脂は、補強フィラーを添加することにより性能を補うことが多い。輸送に要するエネルギーを考慮すると、使用済み樹脂を地域内で回収、地域で産出可能なフィラーで補強し、再度地域内で利用する循環システムが理想的である。

一般的に樹脂の補強にはタルクなどの無機鉱物が利用されている。しかし、国内における採掘地域は限られており、タルクの供給は輸入に大きく依存している。一方、国土の約 7 割を森林が占める日本では、各地で木材加工が行われ、副産物として大量におが粉が発生している。そこで本研究では、京都市内でも調達可能なバイオマス素材であるおが粉に着目し、樹脂補強用フィラーとしての有効活用を検討した。

マトリックス樹脂には、未利用資源であるサトウキビの搾りかすを原料としたバイオ PE を選択した。植物の光合成による CO₂ 固定を加味するとバイオ PE の製造における CO₂ 排出は実質ゼロであるにも関わらず、化石資源由来 PE と同等の機械的性能・成形加工性を有する。しかしながら PE であるがゆえの強度や耐熱性の不

足から、用途の大半は包装用途となっている。そこでバイオ PE を地域にある植物資源で高強度化することができれば、用途拡大により地域内での資源循環と低炭素社会に貢献できる。

バイオ PE とおが粉の複合化における課題は、両者の親和性の低さである。おが粉の主成分であるセルロースは親水性（ヒドロキシル基由来）が高く、疎水性のバイオ PE とは親和性が低い。そのためおが粉が樹脂内で凝集して性能低下を招く可能性が高い。しかしながら、分散性を改善するためにおが粉を疎水化処理すると、消費エネルギーや生産コストが増加する。

この課題を解決するため、樹脂におが粉を複合する溶融混練工程時に、相容化剤である MAPE に加え、トリプロピレングリコール（TPG）及び尿素を添加した。TPG はパルプを膨潤させ、樹脂との混練工程における解繊の促進に有効であるという実績がある¹⁾。また尿素は、樹脂とパルプの混練工程中に加熱分解物がパルプを構成するセルロースを疎水化することが知られている²⁾。これらの添加剤を使用することで、高性能なヒノキ由来おが粉強化樹脂を創製することにより、おが粉を単なる樹脂の増量材ではなく、地域産かつ高機能なフィラーとして展開することを目指した。

2. 実験方法

2.1 原料

本研究では、株式会社北桑木材センターより提供を受けたヒノキ由来のおが粉（不定形、図1）を樹脂に添加するフィラーとして使用した。マトリックスとしてバイオPE（SHA7260、MFR 20 g/10 min、バイオマス由来度 94%、Braskem S.A.）、相容化剤として MAPE（SCONATSPE 2102 GAHD、酸含有量 1.5 wt%、ビックケミー・ジャパン株式会社）を使用した。添加剤として尿素（試薬特級、富士フイルム和光純薬株式会社）及び TPG（異性体混合物、試薬一級、富士フイルム和光純薬株式会社）を使用した。



図1 おが粉の外観

2.2 おが粉複合材料の作製

おが粉複合材料は二段階の熔融混練プロセスにより作製した。複合樹脂の組成を表1に示す。第一段階（マスターバッチ（MB）作製）では、バイオPE以外の原料を二軸押出機（ULT15TWNano-15MG-NH-700-KYS、φ 15 mm、L/D = 45、株式会社テクノベル）に投入し、設定温度 130℃、スクリュウ回転数 300 rpm で熔融混練した。第二段階（希釈混練）では、MB とバイオPE を所定の割合で混合し、設定温度 170℃ にて熔融混練することで、おが粉複合材料を作製した。第一段階の温度設定は、おが粉を構成するセルロース繊維間の水分を留去し、尿素もしくは TPG で置換することで、おが粉の分散及び解繊の促進を目的としている。続く第二段階の温度設定は、マトリックス樹脂のバイオPE が十分に熔融することに加え、尿素が分解しイソシアン酸を生成、セルロースのヒドロキシル基と反応しカルバメート基

(-OCONH₂) を形成³⁾ させることを目的とした。なお、セルロースと未反応の尿素やイソシアン酸、TPG は希釈混練時に減圧して除去した。

作製した複合材料は射出成形機（NPX7、型締め力 7 トン、日精樹脂工業株式会社）により短冊形試験片（80 mm × 10 mm × 4 mm）に成形し、3 点曲げ試験及びシャルピー衝撃強度試験に供した。

表1 おが粉複合材料の組成一覧（wt%）

試料	おが粉	MAPE	尿素	TPG*	バイオPE
No.1	10	5	0	0	85
No.2	10	5	0	10→0	85
No.3	10	5	4	0	81
No.4	10	5	4	10→0	81
No.5	30	5	4	0	61
No.6	30	5	4	10→0	61
No.7	0	5	4	0	91

*10→0の表記は最終的に減圧によって除去されることを意味する。

2.3 おが粉の FT-IR 測定

ソックスレー抽出により複合材料からおが粉を分離し、FT-IR 測定装置（Frontier、PerkinElmer Japan G.K.）を用いて、ダイヤモンド ATR 法（積算 16 回）により測定を行った。抽出溶媒にはキシレンを用い、6 時間抽出を継続した。回収したおが粉はトルエン及びアセトンで数回洗浄し、十分に乾燥させた後、測定に供した。なお、本抽出条件は非プロトン性・無水のキシレンを用いており、カルバメート基（ウレタン結合）の加水分解に必要な水分及び酸・塩基触媒を含まないことから、抽出処理がカルバメート基に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、抽出温度はキシレンの還流温度（約 140℃）であり、カルバメート化を行った第二段階の混練設定温度（170℃）を下回ることから、熱的な観点からも抽出中のカルバメート基の分解は限定的であると推察される。

2.4 おが粉の分散状態観察

複合材料中におけるおが粉の分散状態は、正立顕微鏡（DM4B、Leica Microsystems GmbH）を用いた偏光観察により評価した。観察用試料には、複合材料のペレットをスライドガラスに挟み、圧縮成形機（AYS-5、型締め力 5 トン、株式会社神藤金属工業所）にて 190℃、1 MPa で 10 秒間プレスして作製したフィルムを用いた。

2.5 おが粉複合材料の機械的性能評価

おが粉複合材料の曲げ弾性率及び曲げ強度は、万能試験機（オートグラフ AG-X plus、株式会社島津製作所）を用いた3点曲げ試験（試験速度：10 mm/min、支点間距離：64 mm）により測定した。シャルピー衝撃強度は、短冊形試験片の中央部に深さ2 mmのノッチを加工した試験片を用い、シャルピー衝撃試験機（ハンマー容量2 J、株式会社安田精機製作所）により測定した。各試験はn = 5で実施し、その平均値を算出した。

3. 結果と考察

3.1 おが粉のFT-IR 測定結果

図2はNo.5から抽出したおが粉と各原料のFT-IRスペクトルである。抽出したおが粉には、 1706 cm^{-1} に原料のおが粉にはないピークが生じている。このピークは他の原料であるバイオPE（ニート）や尿素のスペクトルにも含まれていない。一般に、セルロースカルバメート（ $-\text{OCONH}_2$ ）のカルボニル基由来の $\text{C}=\text{O}$ 伸縮振動は $1700\sim 1750\text{ cm}^{-1}$ 付近に帰属されることが報告されており、本測定で観測された 1706 cm^{-1} はこれと良く一致する。溶融混練工程を経て尿素とおが粉のセルロースが化学反応し、生成されたカルバメート基に由来するものと考えられる²⁾⁻⁴⁾。

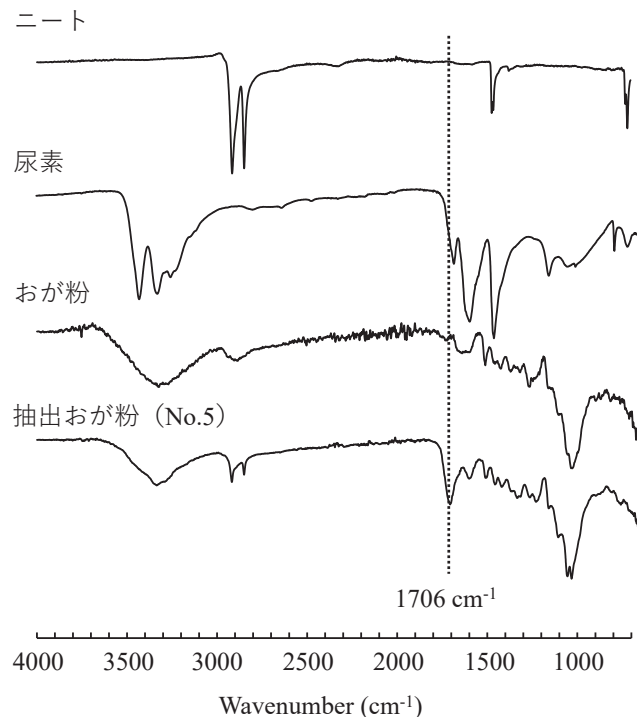


図2 おが粉複合材料から抽出したおが粉及び原料のFT-IR 測定結果

3.2 おが粉複合材料の外観とおが粉の分散状態観察

図3は作製した複合材料及びニートの外観写真である。No.1では分散不良のおが粉が目視で多数観察された。一方、No.2～No.6に関しては、おが粉の粒が目視で観察されたが頻度は減少しており、おが粉の解繊及び微細化が促進されていることが示唆された。また、すべてのおが粉複合材料は、おが粉本来の色よりも濃い茶色となり、特に尿素を含むサンプル（No.3～No.6）では顕著であった。バイオPEに尿素のみを添加したNo.7においても薄い茶色になったが、それ以上に濃色であった。セルロース系材料と尿素を加熱した系では、セルロースの水酸基へのカルバメート化反応に加え、尿素のアミノ基とヘミセルロース等に含まれる還元末端基との間でメイラード反応が並行して進行し、着色（褐変）を生じることが報告されている⁵⁾。本研究で観察された濃色化も、メイラード反応が関与した複合的な要因によるものと考えられる。

図4は、各試料（No.1～No.4）を加熱プレスして作製したフィルムの顕微鏡観察画像である。バイオPEにおが粉とMAPEのみを添加したNo.1では、粗大かつ不均一なおが粉の破砕物が観察された。一方、TPGを添加して混練したNo.2では、No.1と比較して破砕物の明らかな微細化が認められた。また、尿素を添加して混練したNo.3では、より細く長い繊維の分散が観察され、おが粉の解繊が進行していることが示唆された。さらに、TPGと尿素を併用したNo.4では、No.2と同等の繊維幅を有しつつ、No.3と同様に長い繊維が分散している様子が確認された。FT-IRで確認した通り、尿素存在下での混練によりセルロースが化学変性したことで、繊維と樹脂の界面親和性が向上し、結果としておが粉の解繊、分散が達成されたと考えられる。また、おが粉の分散促進に伴って、尿素と反応しうるヘミセルロース等の反応点への接触面積が増大することでメイラード反応や、それらの熱劣化がより進行し、結果として図3に示す通り、おが粉の解繊が進んでいる試料ほど、着色の度合いが高い傾向がみられた可能性がある。

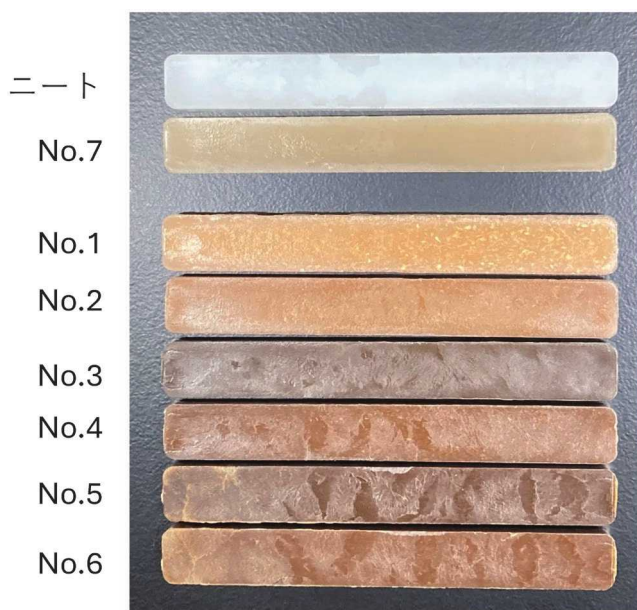


図3 複合材料の外観

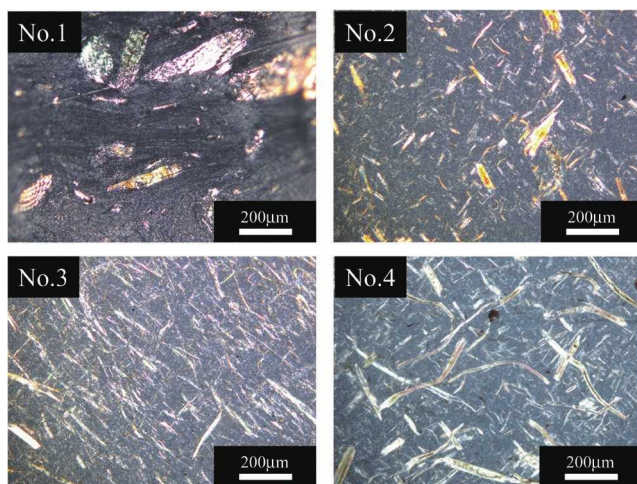


図4 おが粉複合材料の顕微鏡観察画像

3.3 おが粉複合材料の機械的性能

表2におが粉複合材料の機械的性能を示す。おが粉とMAPEのみをバイオPEに複合したNo.1では、曲げ弾性率が1550 MPa（ニートの1.4倍）、曲げ強度が31.2 MPa（同1.4倍）、シャルピー衝撃強度が4.18 kJ/m²（同1.3倍）となった。おが粉の主成分であるセルロースは親水性であり、疎水性のバイオPEと親和性が低い。そのため、おが粉とバイオPEの界面は構造的な欠陥となり得るが、相容化剤として添加したMAPEが2者間の界面接着性を改善したことで、機械的性能が一定改善されたと考えられる。

次に、おが粉の解繊促進剤として混練時にTPGを添

加したNo.2では、おが粉の分散性は向上したが性能はNo.1と同等（曲げ弾性率や強度はやや向上）であった。一方で、TPGではなく尿素を併用したNo.3では、曲げ弾性率が2390 MPa（ニートの2.2倍）、曲げ強度が47.6 MPa（ニートの2.1倍）となり、大きく性能が向上した。加えて、一般的に曲げ弾性率と衝撃強度はトレードオフの関係にあるが、No.3では、曲げ弾性率及び強度がニートよりも大きく向上したにもかかわらず、シャルピー衝撃強度は3.43 kJ/m²（ニートは3.34 kJ/m²）と性能を維持した。これは、FT-IR 及び顕微鏡観察の結果から、尿素によるセルロースのカルバメート化の効果であると考えられる。すなわち、セルロースと樹脂間の親和性向上によりおが粉が切断されることなく長繊維状で分散したことで、応力がおが粉へ効率的に伝達されるようになった結果である。比較試料として、おが粉を含まずMAPEと尿素のみを複合したNo.7では、ニートとほぼ同様の曲げ弾性率1060 MPa、曲げ強度22.2 MPaであった。No.3で観察された飛躍的な性能向上が、尿素の樹脂マトリックスに対する直接的な補強効果によるものではなく、尿素との反応により化学的に変性されたおが粉の存在に由来することを強く示唆している。

No.5はおが粉を30 wt% 複合した試料である。おが粉を10 wt% 添加した場合よりも、さらに性能が向上し、本研究の中で最大の曲げ弾性率3730 MPa（ニートの3.4倍）、曲げ強度70.2 MPa（ニートの3.1倍）を示した。さらに、シャルピー衝撃強度もニートより向上した。また、尿素とTPGを併用したNo.6では、同じおが粉複合率のNo.5と比べ曲げ弾性率や強度がやや劣るがシャルピー衝撃強度は向上し、本研究で最大の衝撃強度値4.81 kJ/m²（ニートの1.4倍）となった。明確な要因は今後検証が必要であるが、図4の顕微鏡観察結果よりTPGと尿素を併用することで、おが粉が衝撃エネルギーの分散に適した繊維長及び繊維幅となった可能性がある。

表2 おが粉複合バイオPEの機械的性能

試料	曲げ弾性率 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	シャルピー 衝撃強度 (kJ/m ²)
ニート	1110	22.5	3.34
No.1	1550	31.2	4.18
No.2	1640	32.0	4.16
No.3	2390	47.6	3.43
No.4	2170	42.2	3.88
No.5	3730	70.2	4.13
No.6	3520	65.1	4.81
No.7	1060	22.2	3.39

4. 結言

本研究では京都市内産ヒノキ由来のおが粉をバイオ PE に複合した材料の開発を行い、以下の知見を得た。

- (1) おが粉の主成分であるセルロースが混練工程中に尿素によってカルバメート化されたことを FT-IR 測定で確認した。
- (2) 尿素を添加した系においては、ニートと比較して、衝撃強度を維持したうえで曲げ弾性率及び曲げ強度はおが粉を 10 wt% 複合した材料で 2 倍以上 (No.3)、30 wt% 複合した材料で 3 倍以上 (No.5) に向上した。
- (3) 混練時に尿素と TPG を併用しておが粉を 30 wt% 複合した場合 (No.6)、シャルピー衝撃強度はニートの 1.4 倍にあたる 481 kJ/m² まで向上した。

本手法は、おが粉をパルプ化や疎水化処理することなく、二段階のシンプルな混練工程によって、バイオ PE の性能を大きく向上できるものである。おが粉の添加による単純な樹脂使用量削減だけではなく、性能向上、コスト・消費エネルギー削減、さらには地域の資源の活用という観点からも優位性がある複合材料を開発できた。今後は複合材料の外観改善（着色低減、おが粉の微細化など）に努めるとともに、バイオ PE 以外の樹脂、例えばリサイクル PP などに本手法を適用し、循環型社会実現への貢献を目指す。

謝辞

本研究は R7-9 年度環境研究総合推進費「成長志向型プラスチック資源循環技術の実用化を促進する多面的実証」の支援を受けて実施した。また、株式会社北桑木材センター及び森の力京都株式会社には木質原料を提供いただいた。関係各位に深く感謝する。

参考文献

- 1) 野口広貴 他：京都市産業技術研究所 研究報告, No.15, p.26 (2025).
- 2) K.Sakakibara et al: ACS Appl.Polym.Mater.,**1**[2],178 (2018).
<https://doi.org/10.1021/acsapm.8b00071>
- 3) M.Bergström et al: Carbohydr.Polym., **87**[1], 2532 (2012).
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.024>
- 4) Cuiyu Yin et al: Eur. Polym. J., **43**[5], 2111 (2007).
<https://doi.org/10.1007/s10570-019-02257-8>
- 5) Olga Ershova et al: Cellulose, **19**, 2195 (2012).
<https://doi.org/10.1007/s10570-012-9791-4>

カッティングプロッタを用いた引箔裁断の 条件最適化と代替工程の構築

加工・製造技術グループ 藪内 快、本田 元志

要旨

伝統産業である西陣織の重要な技法「引箔（ひきばく）」は、職人の高齢化と後継者不足により、裁断工程の維持が極めて困難な状況にある。本研究では、この課題解決に向けてデジタル技術を活用した非熟練型の代替裁断技術の確立を目的とし、カッティングプロッタを用いた裁断工程の構築および実用性の検証を行った。

検討の結果、デジタル技術を用いた代替工程は、熟練技能を要する従来工程と同等の裁断精度および加工の均一性を有することが示唆された。また、箔の固定方法を最適化することで裁断不良を抑制し、製織工程においても現行工程と遜色のない良好な工程通過性を確認し、代替工程としての有効性が示唆された。

一方で、専門家による目視検査により残留空気に起因する微細な視感異常が課題として見出された。今後はその対策を進めるとともに、多種多様な箔への適用性を検証し、引箔裁断工程の維持・継承に向けた技術支援を継続していく。

キーワード：伝統産業支援、カッティングプロッタ、代替工程、引箔技法、製織技術

1. 緒言

伝統産業界では後継者不足に伴い、工程の断絶や部品供給の停滞が深刻な懸念材料となっている。西陣織の重要な技法の一つである引箔においても同様に、生産工程の断絶が危惧されている。現在、引箔の裁断工程に従事する事業者は京都市内で2社にまで減少しており、当該工程の断絶は西陣織における引箔技法の消失に直結する。そのため、引箔裁断工程を維持可能な形態で継承することが業界全体の喫緊の課題となっている。

引箔とは、多様な手法で意匠を施した箔を裁断し、そのまま織物に織り込む技法である。意匠を正確に再現するためには、裁断後も箔糸の配列順序を厳密に保持する必要がある、箔の両端に余白を残して裁断し、かつ裁断不良が発生することは許されない（図1）。この要求される裁断精度を実現するため、従来はギロチン式裁断機が用いられてきたが、その運用には高度な熟練技能を要

し、それが後継者確保の障壁となっている。

これに対し京都市産業技術研究所（以下、当研究所）では、デジタル技術を活用した非熟練型の生産技術確立し、引箔生産工程の継続性を確保するための検討を行った。当研究所では既に、型友禅に用いる型紙の彫刻においてカッティングプロッタを活用した実用的な生産工程を構築し、市内企業への技術移転を実現している^{1)、2)}。これらカッティングプロッタに関する知見から、引箔裁断においても十分な加工精度が得られると予測されるため、本研究ではカッティングプロッタを用いた引箔裁断の代替工程構築について検討した。

本報では、裁断条件の検討および試織試験の結果を報告し、代替工程としての妥当性と、裁断した引箔の品質評価について述べる。

2. 実験方法

2.1 箔

裁断工程の検討には、和紙に対してアルミ蒸着を行い表面に着色加工などを施した箔（幅約450 mm、長さ約600 mm、厚さ約70 μm）を使用した。

2.2 加工機

カッティングプロッタは、ロールタイプのミマキエンジニアリング製CG-75FX-IIを使用した。



図1 裁断した箔のイメージ

2.3 裁断代替工程の検討

裁断工程の検討は上記の箔を用い、実際の生産規模に準じ、箔一枚分を対象に実施した。引箔は箔の意匠をそのまま製織する技法であるため、裁断工程における一箇所不良や箔糸の欠損は当該箔全量の廃棄に直結する。このような損失を回避するため、代替工程においては「箔一枚分の加工における裁断不良ゼロ」を完遂すべき目標として設定した。

この目標を達成するため、箔の固定手法をはじめとする各種裁断条件の最適化について検討を行った。

2.4 裁断精度の評価

裁断精度の評価においては、裁断後の箔をデジタルマイクロスコープにより観察し、裁断ピッチの定量的測定を実施した。評価指標として裁断ピッチの標準偏差（ばらつき）を用い、従来工程による裁断製品と比較して、同等以上の加工精度および均一性を確保することを本研究の目標とした。

2.5 試織

裁断した引箔の試織は織物工場に協力を依頼し、自動引き箔装置で行った。試織した布帛に対して、工程通過性のチェックと専門家による目視検査を実施し、実用に耐える性能を有するか評価した。

3. 実験結果

3.1 裁断代替工程の検討

引箔の裁断工程では、1 寸（約 30.3 mm）あたりの裁断数によってピッチが定義される。現在、最も汎用的な裁断密度は 90 本 / 寸（約 337 μm ）であるため、本検討では当該ピッチにおける裁断結果を精度評価の対象とした。本検討では箔一枚を加工する場合、550 mm の長さを裁断しており、約 1600 本の箔糸を裁断していることになる。裁断工程における諸条件を検討したが、本報では特に重要性が高い「箔の固定方法」を中心に報告する。

箔の全面を固定しない手法では、図 2 に示す通り、既に裁断済みの箔糸を損傷させる裁断不良が確認された。この不良の発生は箔糸の欠損を招き、箔一枚全ての損失に直結する。この不良の要因として、裁断に伴う箔の微小な伸縮が推察される。固定が不十分な場合、この伸縮を抑制できず、箔に「たわみ」が生じることで二次的な切断を誘発するものと考えられる。

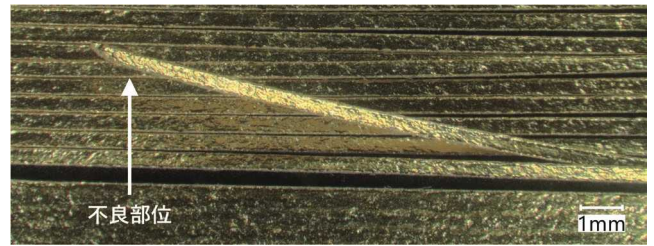


図 2 裁断不良部分

一方、箔全面をフィルム等で固定した場合には、箔糸の損傷を回避し、箔一枚分を裁断した場合も裁断不良が発生しない良好な裁断結果を得た。しかし、後述の通り、残留空気に起因する製織後の視感異常（品位欠点）が発生することが判明しており、実用化にあたっては残留空気の完全な除去が不可欠であることが示唆された。

3.2 裁断精度の評価

図 3 にデジタルマイクロスコープによる裁断した引箔の表面観察像を示す。評価にあたっては、図中に示す箔糸の幅 w を測定対象とした。従来工程および本研究で検討した代替工程により裁断された各箔糸について、それぞれ $n=150$ の測定値から算出した標準偏差を指標とし、カット精度の比較評価を行った（図 4）。

測定の結果、従来工程による箔糸カット幅の標準偏差が 10 μm であったのに対し、代替工程では 8 μm を示した。この結果から、デジタル技術を用いた代替工程が、熟練を要する従来工程と同等程度の裁断精度および加工の均一性を有することが示唆された。

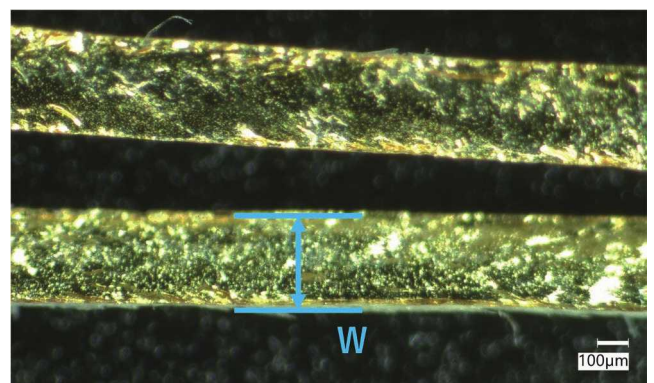


図 3 箔糸のデジタルマイクロスコープでの観察像

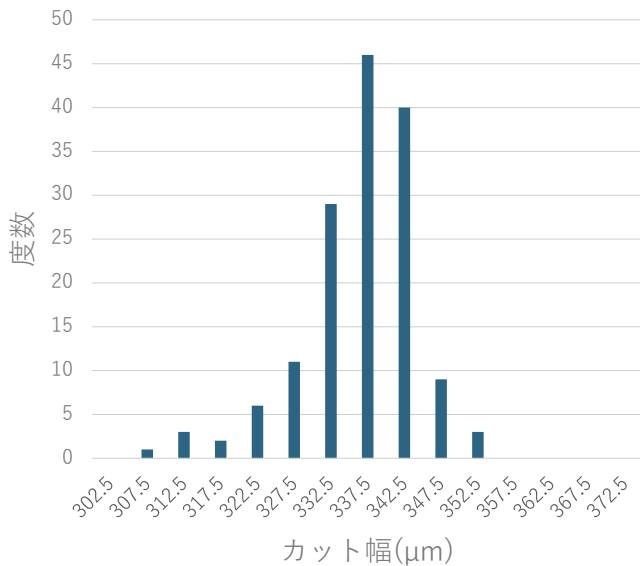


図4 代替工程における箔系カット幅のヒストグラム

3.3 試織による品質確認

代替工程により裁断した引箔を用い、実際の生産現場の製織機にて実証試験を実施し、工程通過性および製織布の品質を評価した。

検証の結果、製織工程における不具合（断糸や供給トラブル等）は認められず、現行工程と同等の工程通過性を有することが確認された。

図5に作製した布帛の外観写真を示す。専門家による目視検査の結果、光の入射角によって一部に微細な円状の痕跡が視認された（青円部）。製織前の引箔に空気残留が確認された位置に痕跡が認められることから、空気



図5 代替工程で裁断した箔の試織結果
(青円部は視感異常の発生箇所)

残留が影響を及ぼしている可能性が示唆される。

今後、得られた生地の詳細な解析を通じ、課題解決に向けた対策を検討する予定である。

4. まとめ

本報では、カッティングプロッタを用いた引箔裁断の代替工程について検討し、以下の知見を得た。

- ・ カッティングプロッタを活用した代替工程により、引箔の裁断が可能であることを実証した。
- ・ 裁断幅の偏差を調査した結果、熟練技能を要する従来工程と同等以上の精度で裁断可能であることを確認した。
- ・ 製織工程における適用性を確認した結果、重大な工程トラブルは認められなかったが、残留空気に起因する視感異常が一部で発生する課題を見出した。

以上の通り、デジタル技術を用いた代替工程は引箔裁断において十分な実用可能性を有することが示された。今後は、残留空気の排除対策、量産時における品質安定性の検証、および多種多様な箔への適用性の拡大についてさらなる検討を進める。当研究所では、これら残された課題の解決を通じ、引箔裁断工程の維持・継承に向けた代替工程の確立と技術支援を継続していく。

参考文献

- 1) 藪内快 他：京都市産業技術研究所研究報告、No11, p63 (2021)
- 2) 京都市産業技術研究所：“型彫り職人の後継者不足を自動作成システムで補う”，京都市産業技術研究所, 2023-09-13. <https://tc-kyoto.or.jp/case/case-1242/>, (参照 2026-05-22).

指 導 事 例

油滴天目釉の生成過程考察のための各種分析結果について

材料・素材技術グループ 鈴木 芳直

要旨

本研究では、油滴天目釉の形成メカニズムを解明するため、異なる焼成条件で作製した試料の微細構造観察および結晶相の同定を行った。分析の結果、1240℃で焼成した試料は、気泡の浮上と破裂に伴う「発泡系油滴」のプロセスで釉全体に油滴が形成され、 Fe_3O_4 が析出した可能性が高いことが判明した。一方、より高温で焼成した試料は、碗の見込みに油滴が生じない「建窯系油滴」の様相を呈し、表面において $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の析出を確認した。最高焼成温度や冷却時の還元雰囲気の違いが、アノーサイトの晶出や鉄結晶の形態に影響を及ぼすことが示唆され、陶磁器製造における技術指導の高度化に寄与する知見が得られた。

キーワード：油滴天目釉、油滴形成、 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、SEM-EDS、XRD

1. 緒言

油滴天目釉は、漆黒の下地の表面に油滴と呼ばれる斑紋が浮かび上がった外観をもつ釉薬である。中国福建省の建窯で焼かれた油滴天目（建盞）の中には、国宝に指定されているものもあり、京都の陶磁器業界においても人気が高く、再現や新規開発への要望が強い釉薬の一つである。しかしながら、天目釉は発色が極めて不安定な釉薬として知られており、当研究所にも地元の事業者からしばしば技術相談が寄せられている。このように、日常の技術指導対応において課題意識が高まっていることから、再現性の高い製造プロセスの確立に向けた知見の蓄積が強く求められている。

一般に油滴天目は、昇温過程において、釉中の酸化鉄が熱還元されて発生した気泡が釉表面に浮上し、気泡が破れた後に結晶が集まったものであると説明される¹⁾（以下、発泡系油滴とする）。しかしながら、伝統的な油滴天目の中には、碗の見込み（内側の底）部分に油滴が見られないもの（以下、建窯系油滴とする）など、この単純な発泡モデルだけでは説明が困難な釉薬も存在する。また、建盞の断面観察において、気泡が釉表面に浮上した後、アノーサイト（灰長石）の結晶化に伴ってガラスの分相が起り、分相後に結晶化する様子が観察されたとの報告も存在する²⁾。

このように文献によって様々な形成過程が言及されていることに加え、古代の建盞を焼いた窯は「龍窯」と呼ばれる薪窯であったと考えられており³⁾、現代の一般的な電気窯やガス窯とは構造や熱履歴が大きく異なると推

察される。そのため、現代の製造現場において的確な技術指導を行うためには、現代の焼成環境下で作製された油滴天目釉の形成挙動を把握し、具体的な事例を蓄積することが重要である。

そこで本稿では、電気窯を用いた多様な焼成条件で作製した試料について微細構造や結晶相の分析を行い、現代の焼成条件における油滴形成の特徴を整理するとともに、今後の技術指導に資する知見を取りまとめたので報告する。

2. 実験方法

油滴天目釉の油滴形成メカニズムを考察するため、既存の油滴天目釉の作製報告⁴⁾を参考に、碗の見込み部分の様子についても観察を行うために、碗型試料を作製した。作製した碗型試料の写真を図1に、各試料のゼーゲル式および焼成条件を表1に示す。また、冷却還元焼成の焼成グラフを図2に示す。なお、表1における炭還元焼成とは、サヤ鉢の中に試料と市販の切炭（一般社団法人 岩手県木炭協会製）を入れ、14時間かけて1265℃で焼成したことを指す。

作製した試料を切断し、断面の研磨を行った後、釉薬表面及び釉薬断面に対して、走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）による観察と元素マッピングを行った。また、表面の油滴が観察された箇所について、X線回折（XRD）測定を行い、析出した結晶相を同定した。

3. 実験結果と考察

3.1 外観観察による油滴の分類

図1に示すように、焼成条件により油滴の外観や発生場所に差異が見られた。高温焼成(1320℃)のT1～T3はいずれも見込みに油滴が発生しない「建窯系油滴」となった。その外観は、T1で茶色の油滴、T2で不明瞭な油滴、T3で銀色がかった明瞭な油滴が観察された。一方で、1240℃焼成のT4は、見込みを含む釉全体に油滴が確認された。

3.2 各試料の微細構造と油滴形成プロセスの考察

図3に各試料の釉薬表面および断面のSEM画像を、図4,5にそれらのEDSマッピング画像を示す。また、図6に各試料の油滴付近におけるXRD測定結果を示す。

SEM観察およびEDSマッピングの結果から、T4は、釉薬断面の気泡周囲へのFe偏析や表面の楕円型のシワが見られたことから、従来言及されてきた気泡の浮上・破裂に伴う「発泡系油滴」のメカニズムで形成されたと考えられる。

一方、建窯系油滴のT1～T3は断面に気泡がなく、表面にSi、Ca、Alの局所分布が見られたことから、発泡系油滴とは異なる複雑なメカニズムが示唆された。これは高温焼成により鉄分が釉中に溶解しやすかったためと考えられる。

1回焼成のT1は、表面のSi・Al-rich領域とFe-rich領域の重なりが小さいことから、鉄分が溶解しつつある過渡的状态と推察される。また、複数回焼成のT2・T3は、表面がSi-rich領域とそれ以外に分かれていた。

さらに、T3では断面にCa、Alの偏析が見られ、図6のXRD測定においてアノサイトが同定されたことから、アノサイト析出による釉薬組成変化を伴う複雑なプロセスをたどったと推察される。

3.3 焼成・還元条件が結晶相に与える影響

本実験において、還元条件によって結晶相が変化した。分析の結果、建窯系油滴のT1、T3では ϵ -Fe₂O₃が確認され、発泡系油滴のメカニズムと合致するT4ではFe₃O₄が確認された。強い還元環境で ϵ -Fe₂O₃から α -Fe₂O₃への相転移が抑制されるとの報告がある⁵⁾ことから、焼成の最高温度や還元濃度、焼成回数は結晶相へ影響を与えられ、鉄の挙動は油滴形成と深く関連しており、技術指導において温度条件や冷却還元濃度の精密な制御が重要であることが示唆された。

4. 結論

油滴天目釉を様々な焼成条件で作製した試料について、SEM-EDSやXRDによる分析を行った。

比較的高温で焼成された釉薬や、その釉薬を炭還元した試料は、見込みの部分に気泡が見られない建窯系の油滴となった。一方、1240℃という比較的低温で冷却還元焼成を行った場合は、釉薬の見込みを含む全体に油滴が観察され、鉄分による気泡生成と表面での破裂に伴う油滴形成が示唆された。

最高焼成温度や冷却時の還元雰囲気の違いによって形成プロセスが変化した可能性が高く、油滴天目釉に関する技術指導において、より適切な考察に資する知見を得ることができた。今後は、釉薬組成や還元条件が油滴形成に及ぼす影響に加え、見込み部分における発泡現象との関係についても検討を進め、油滴形成メカニズムの理解を深めていく予定である。

5. 謝辞

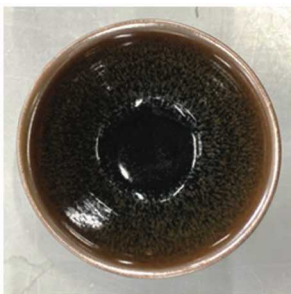
油滴天目釉の作製や油滴形成メカニズム等について、貴重な助言をいただいた(地独)京都市産業技術研究所名誉研究フェローの横山直範氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 小山富士男: “天目”, p.110, 平凡社 (1974)
- 2) Weidong Li et.al., Ceramics International, 34 (2008) 1473-1480
- 3) 西田宏子, 佐藤サアラ: “中国の陶磁 6 天目” p.122 長谷部楽爾 監修, 平凡社 (1999)
- 4) 横山直範 他: 日本伝統文化研究 研究論文, 日本伝統文化学会設立記念号, p.27 (2016)
- 5) Catherine Dejoie et.al., Sci. Rep. 4, 4941 (2014).

表 1 各試料のゼーゲル式および焼成条件

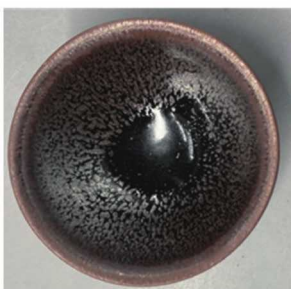
試料名	ゼーゲル式 (モル比)	焼成条件	炭還元条件
T1	0.25 KNaO 0.85 Al ₂ O ₃ 0.45 CaO 5.0 SiO ₂ 0.20 MgO (外割：黒浜 8%)	1回焼成 1320°C冷却還元	—
T2	T1と同様	2回焼成 ①1320°C冷却還元 ②1265°C炭還元	サヤ鉢：直径約11 cm 高さ約8cm 炭：12 g
T3	T1と同様	3回焼成 ①1320°C冷却還元 ②1265°C炭還元 ③1265°C炭還元	サヤ鉢：T2と同様 炭：②12 g、③8g
T4	T1と同様	1回焼成 1240°C冷却還元	—



T1



T2



T3



T4

図 1 種々の条件で作製した碗型試料の外観比較

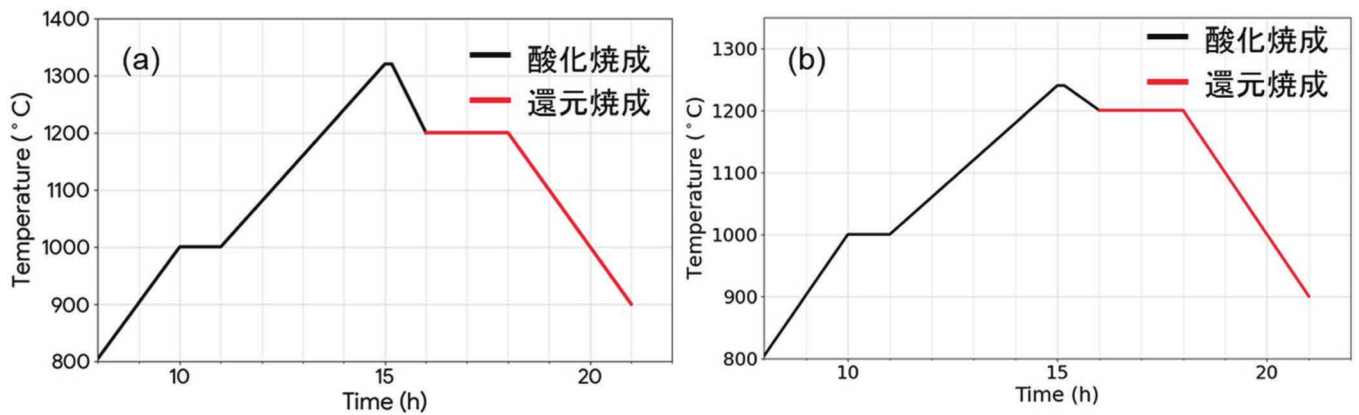


図2 冷却還元焼成条件 (a:1320 °C, b:1240 °C)

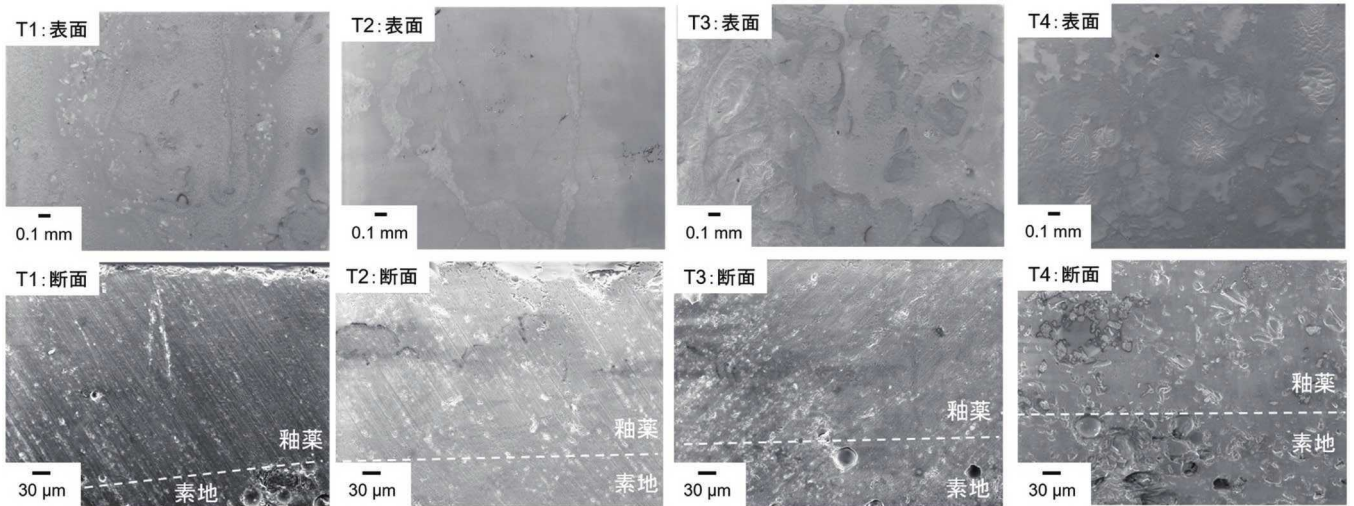


図3 各試料の表面及び断面のSEM画像

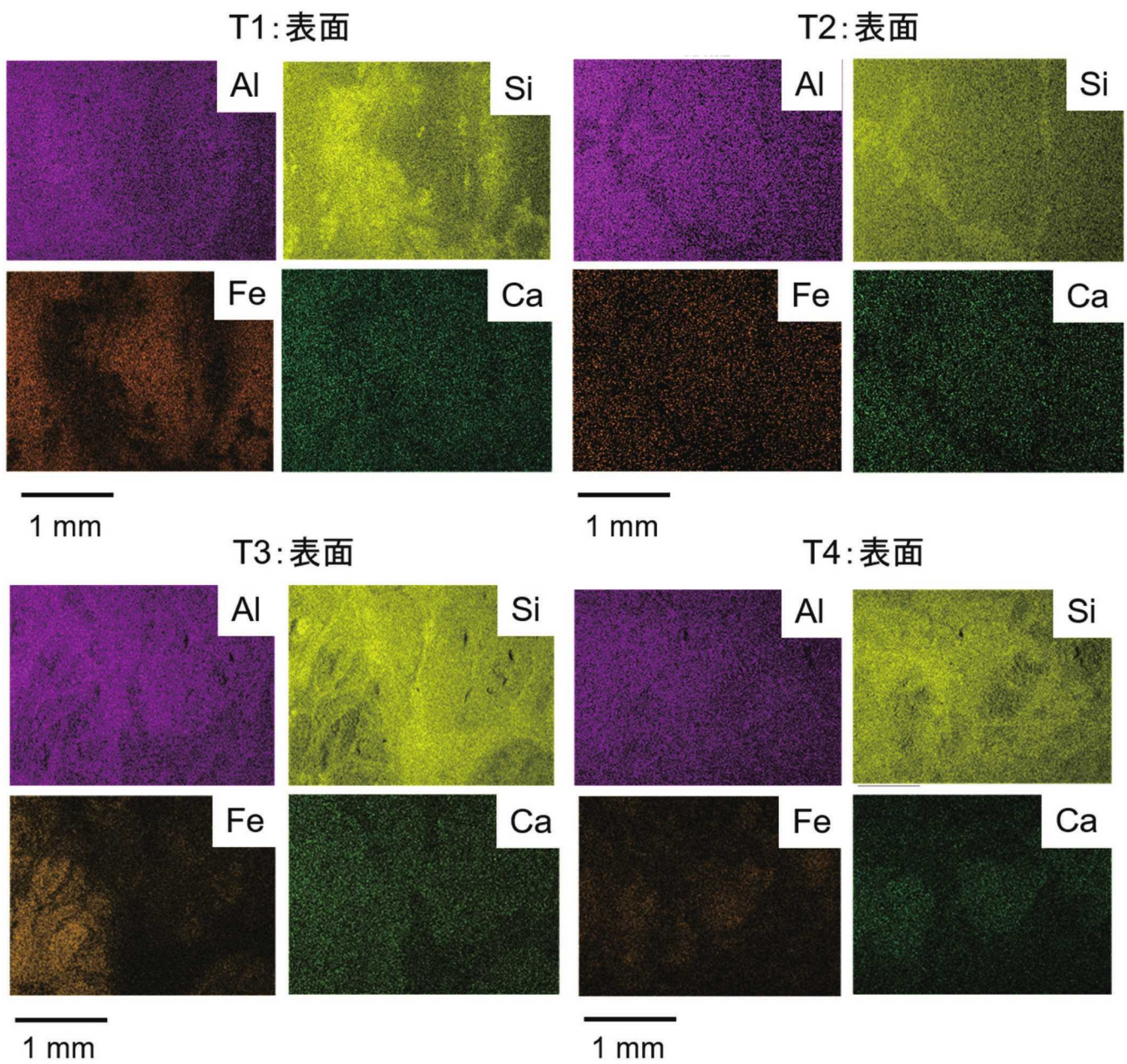


図4 各試料の釉薬表面における主要な元素のEDSマッピング画像

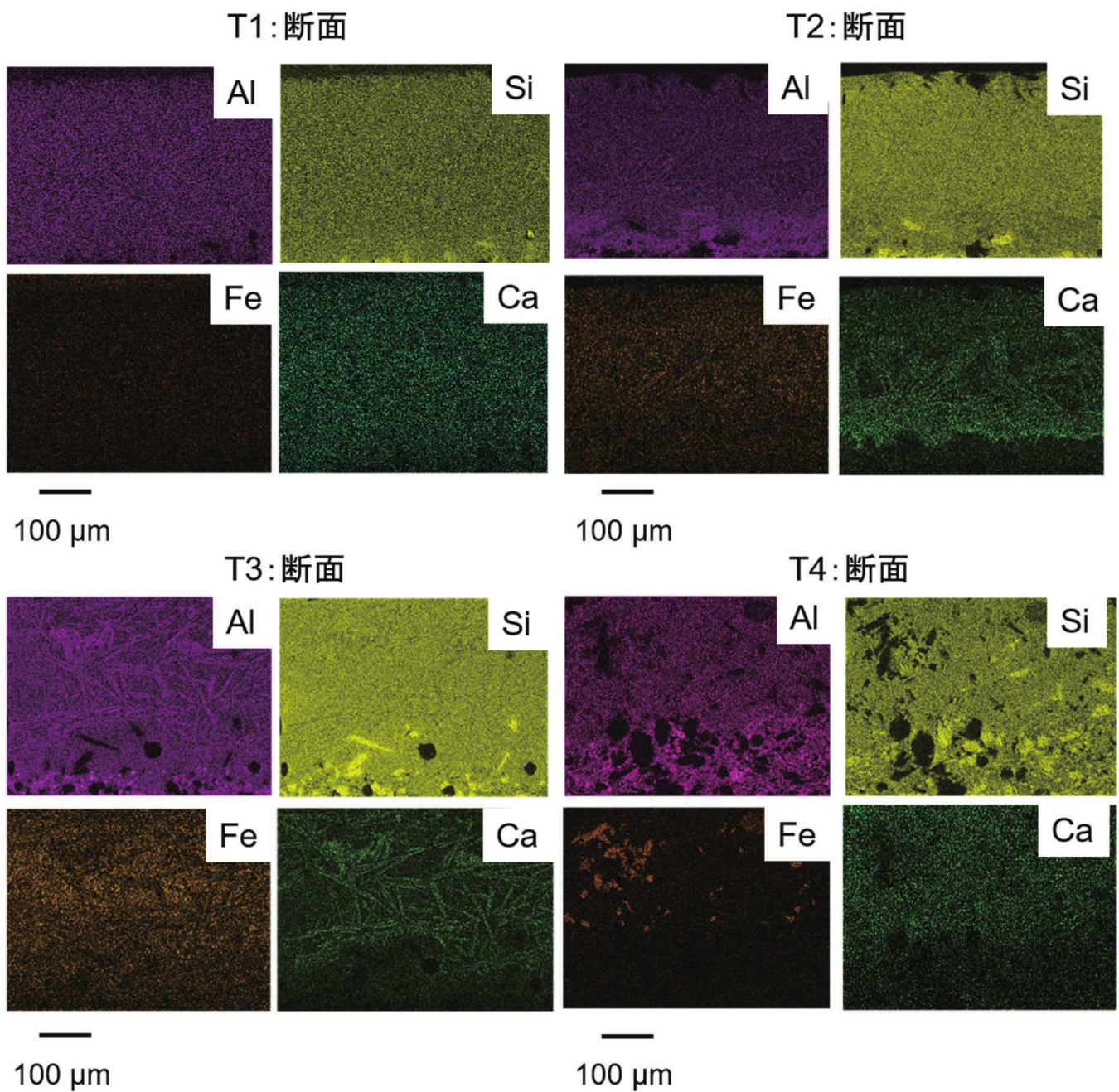


図5 各試料の油葉断面における主要な元素のEDSマッピング画像

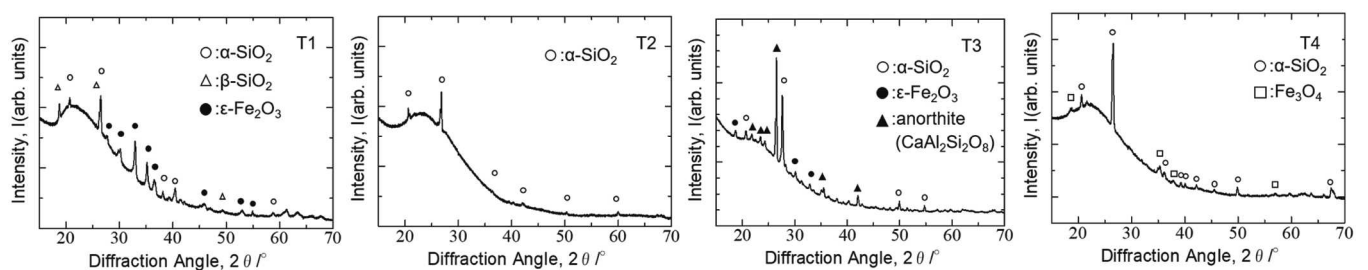


図6 各試料の油滴付近におけるXRD測定結果

京都工芸研究会 異業種コラボレーション商品開発事業 「こうげい組体操 2」

製品化・人材育成支援グループ 竹浪 祐介、松原 剛

要旨

京都市産業技術研究所（以下、産技研）が事務局として運営を担う「京都工芸研究会」では、令和5年度に実施した異業種コラボレーション商品開発事業「こうげい組体操 1」が会員内外から高い評価を得た実績を受け、令和7年度には規模や内容を拡充した続編「こうげい組体操 2」を実施した。本稿では「こうげい組体操 2」で導入したマッチング手法や、新たな企画の成果について報告する。また、本事業がメディアの注目と多様なバイヤーとの商談に大きく寄与した点について、前回の振り返りを交えながら検証する。

キーワード：伝統工芸、京都工芸研究会

1. はじめに

京都工芸研究会は、旧京都工芸研究会が2015年に京都竹工芸研究会、京都金属工芸研究会と統合して現在の体制となった。金工、漆器、団扇、竹工、茶道具、陶磁器、内装工芸、版画、仏壇・仏具、人形、表装、木工、香、染織といった多岐にわたる伝統的工芸分野の交流団体である。産地見学会やトークイベント、SNSでのインタビュー記事連載など、会員間の技術交流や情報発信を継続的に行っており、アフターコロナにおける活動再開の起爆剤として、令和5年度に異業種コラボレーション新商品開発事業「こうげい組体操（以下、組体操 1）」を実施した。本事業の反響は大きく、会員から継続を望む声も強かったことから、統合10周年の記念事業として、令和7年度に続編となる「こうげい組体操 2（以下、組体操 2）」を開催するに至った。本報では、主に「組体操 2」における取り組みを述べつつ、随所で「組体操 1」にも言及しながら、本事業で実施した新たな商品開発のアプローチについて報告する。

2. 事業の背景

2.1 事業コンセプト

前述の通り、工芸研究会は多様な工芸分野の作り手が集う交流団体だが、ものづくり（商品開発）において異業種が協業することは少なかった。本事業名である「こうげい組体操」は、異なる工芸分野の作り手が互いの技術や素材を組み合わせ、新しい商品を創り上げることを、運動会等で見える「組体操」に見立てたネーミングである。

京都の伝統的工芸が持つ重厚なイメージと「組体操」という言葉の軽い語感とのギャップによって、会員内外を問わず本事業に広く興味を持っていただくことが狙いである。図1にキービジュアル（コンセプトを伝える画像）を示す。



図1 こうげい組体操 2 キービジュアル

2.2 「こうげい組体操 1」の成果と課題

令和5年度の「組体操 1」では20社が参加した。約1年にわたる制作期間を経て35点のコラボ商品が開発され、それらを令和6年3月に開催された第5回京都インターナショナル・ギフト・ショー（以下、京都ギフトショー）に出展した。2日間の来場者はのべ約300社に上り、十分な成果を得た。また、成果物の中から商品化されたものもあった。しかし、実施プロセスにおいて「誰とコラボを組むか」というマッチング成立までに長時間を要して着手が遅れたペアも多く、商品の完成度を高め

るための修正・改善期間が短くなったことが課題として残った。

3. 「こうげい組体操2」における 開発・制作プロセスの改善

こうげい組体操2では、マッチングの成功率を向上させることで異業種間によるスムーズな商品開発を目指した。図2にスキームを示す。

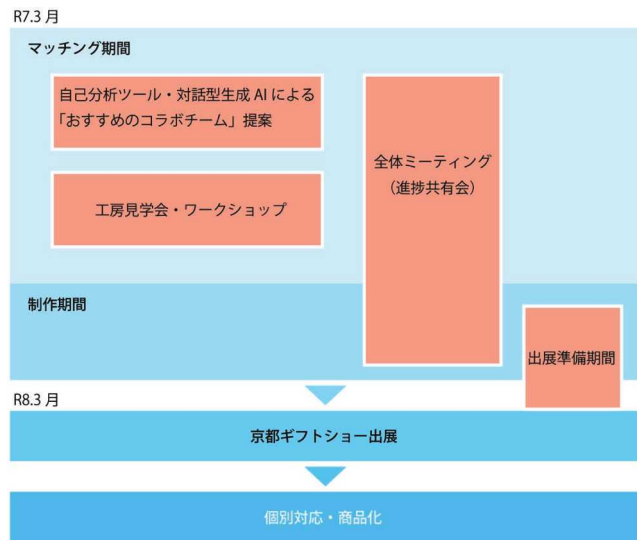


図2 こうげい組体操2 実施スキーム

3.1 新たなマッチング手法

「組体操1」でのマッチングの遅れや、既存の人間関係に依存した組み合わせ（マンネリ化）を防ぐため、「組体操2」では「セレンディピティ（予想外の発見や嬉しい偶然）」の創出を目的とした新たなマッチング手法を導入した。具体的には、性格傾向や行動パターンを分類する自己分析ツールを事前に実施し、その結果を対話型生成AIに入力することで「おすすめの組み合わせ」を提案させ、そのペアもしくはトリオでアイデア発想法を試みた。第三者（対話型生成AI）の意見を取り入れる方法は、近年のAI普及と関心の高まりも相まって、普段交流の少ない異業種間のコミュニケーションを活性化させるきっかけ作りとして有効であった。結果として、従来の発想にはなかった新鮮なマッチングが早期に実現し、商品開発の初動を早めることに成功した。また、全体会議は1年間で5回行い、参加者同士の連絡にはグループLINEを用いて、常に進捗状況やアイデアの共有ができる体制をとった。図3に全体会議の様子を示す。



図3 全体ミーティングの様子

3.2 「スゴプロジェクト」の企画立案

参加者から、コラボレーションだけでなく新たなテーマ性を持った商品開発を希望する声もあり、制作意欲を高めるため、「組体操2」では新機軸として、参加者が「一辺45mm（一寸五分＝スゴ）」という立方体の寸法規格に沿って、各々の得意とする工芸技術を用いたアイデアを持ち寄る企画「スゴプロジェクト」も追加で立案した。サイズに制約を設けたことが会員の創作意欲を刺激し、自社のみで開発できる着手ハードルの低さから、ペーパーウェイト、香立て、サイコロ、小型のアロマディフューザーなど、多様な作品が生まれ、バラエティに富む「競作という組体操」として展示ブースの統一感を演出することができた。図4に作品例を示す。



図4 スゴプロジェクトで制作された商品（一部）

3.3 工房見学会による技術交流

開発期間中には参加者の工房を巡る見学会を実施し、鑄造・鋳金具・薫香・樹脂成型等、普段は目にすることのない制作工程などを実際に体験・視察する機会を設けた。互いの技術を体感することで、新たな商品のヒントを得るだけでなく、参加メンバーのモチベーション向上にも大きく寄与した。図5にその様子を示す。



図5 和銅寛での鑄造工房見学・体験会

3.4 新技法の開発及びブラッシュアップ

「こうげい組体操」では、異業種の素材や技法を組み合わせる過程で、新たな技法の開発にも繋がり、事業を継続することで商品力を向上することができた。例えば、陶器の素地に七宝の加飾を施す「陶胎七宝（図6）」は、焼成時の収縮率が素材ごとに異なるという課題があったが、これを克服する過程で特殊なノウハウが蓄積された。また、錫と石材を組み合わせる「リアルロックガラス（図7）」は「組体操1」での好評を受け、テストマーケティングと異素材接合の改良を繰り返し、「組体操2」では



図6 陶胎七宝技法の展示



図7 リアルロックガラスのブラッシュアップ



図8 アルミ削り出しの香立て

商品バリエーションを増やして出展でき、事業を継続した成果が実証された。「アルミ削り出しの香立て（図8）」は、線香の燃え残りを極限まで減らし、詰め替えを容易にした工夫で実用新案を出願することができた。

4. 京都ギフトショー出展と波及効果

4.1 ブースデザイン・コンセプト

本事業は令和8年3月11～12日にみやこめっせ（京都市勧業館）にて開催された「第7回京都インターナショナル・ギフト・ショー」に出展した（組体操1は令和6年3月に出席し、2年ぶり2回目の出席）。最終的に21社の参加となり、21種45点のアイテムを開発・展示することができた。

ブースの空間デザインは「組体操（異業種コラボレーション）」のコンセプトと、従来の伝統的工芸品にはない斬新さを表現するため、壁面には組体操を示すピクトグラムを配した。また、木製のキューブに「木」「漆」「竹」などの文字をレーザー刻印し、商品の傍らに積み上げて組体操を視覚的に表現した。加えて、来場するバイヤー

へのタッチポイントを増やすため、各商品はSNS (Instagram、X、Facebook) にも掲載した。図9にブース全景を、図10にディスプレイの一部を示す。



図9 こうがい組体操2 ブース全景



図10 木製キューブとのディスプレイ (一部)

4.2 メディア等でのPR活動

「こうがい組体操2」が出展した京都ギフトショーのブースには、前回は上回る約400社が来場した。「工芸」と「組体操」という耳慣れない単語の組み合わせがバイヤーをブースに誘引するきっかけとなり、接客時の対話の糸口を増やす効果が得られ、工芸になじみの薄い企業の新事業参入部署など、新たな顧客層へのPRに繋がった。さらに、本事業のタイトル及びコンセプトの新規性はメディアの関心も惹きつけ、会期初日に地上波TVのニュース番組で取材・放送されたほか、京都府知事・京都市長の公式SNSでも広く紹介されるなど、認知度の向上が実現できた。図11にその様子を示す。



図11 京都ギフトショーでの接客の様子

4.3 商品化への発展

「組体操1」では「翠簾+織物」のハンドバッグや、竹編組のディスプレイが商品化された。バッグは神祇工芸である御簾に新たな付加価値を創出したことが海外でも高く評価され、改良とブランド化が進められている。図12に展示試作品を示す。

前述の「金属工芸+京石工芸」のロックグラスも、今までにない斬新な素材の組み合わせと重量感が海外のバイヤーから好意的な評価を受け、改良を加えて展示した「組体操2」においても好評だった。



図12 翠簾+織物のハンドバッグ

5. 検証と課題

5.1 事業成果

本事業を通じて、性格分析等を応用したマッチングが初期段階の心理的ハードルを下げ、新しいコラボレーションの推進に寄与することが実証された。また、「スングプロジェクト」のような寸法規格の統一は、作り手のクリエイティビティを刺激しつつ展示空間に統一感をもたらす有効な企画であった。グループLINEでの日常的な情報交換・共有は、異業種会員間のチームビルディングとしても高い効果を発揮した。

5.2 課題

「組体操1・2」を通じて、2社以上の異業種の制作者が関わることによる商品価格の上昇が解決すべき課題として残った。

展示の統一感については、「組体操2」はスングプロジェクトによって一定の演出はできたものの、商品群に共通するシーン設定が設けられず、やや散漫な印象を与えたことは否めなかった。メインとなるコラボレーション商品群においては、それらが実際の生活空間のどのような場面（リビング、アウトドア、寝室など）で機能するのかという明確な「ライフスタイル提案」が求められた。バイヤーに訴求する展示・演出力の向上が、見本市出展における今後の重要な課題である。

6. まとめ

令和5年度の「こうげい組体操1」から令和7年度の「こうげい組体操2」に至る一連の商品開発事業は、伝統産業における異業種コラボレーションの有効性を示すモデルケースとなった。今回得られたマッチングの工夫、統一規格による展示の知見、そして浮き彫りとなった「シーン設定」などの課題は、京都工芸研究会における今後の新商品開発や見本市出展に向けた貴重な経験となった。「こうげい組体操」をひとつのブランドとして育てることも視野に入れ、京都工芸研究会の活動を通じた次世代の工芸の可能性の追求と、技術支援・交流促進を継続して図っていききたい。

調 査

デザイン分野における生成 AI 活用に関する調査研究

知恵産業推進グループ 沖田実嘉子、竹浪 祐介、松原 剛

要旨

本研究では、デザイン分野における生成 AI 活用について、その動向を調査するとともに、京都市内のデザイン事業者および伝統産業事業者を対象としたアンケート調査とヒアリング調査を実施し、活用実態と課題を把握した。その結果、生成 AI は企画段階において広く活用される一方、制作段階での活用は部分的であり、精度や再現性を要する製造工程への適用は困難であることが確認された。また、生成物の取捨選択や再構成、意味設計や文脈構築、価値への変換には人間の関与が不可欠であり、活用範囲は工程や業務特性に応じて異なる。特に伝統産業分野では、生成 AI の導入が表現や制作姿勢そのものに関わる問題と捉えられており、出力品質や法的リスクへの不安が課題となっている。今後は、一律の活用促進だけでなく、個々の業務特性に応じた適切な活用に導く技術支援が求められる。

キーワード：生成 AI、デザイン開発プロセス、伝統産業

3. 緒言

日本におけるデザインの役割は、社会経済環境の変化に伴い拡張してきた。従来は製品の外観や形状を整える意匠設計が中心であったが、消費の高度化やデジタル化の進展により、顧客体験やサービス、さらには社会的価値を含めた仕組み全体を対象とするものへと変化している。こうした役割の拡張に伴い、デザイン開発において扱う情報量や検討対象は増加し、プロセスは複雑化している。これまでのテクノロジーは、コンピューターや CAD の普及に見られるように、制作段階のデジタル化と効率化を通じて、既存のものづくりプロセスを高度化してきた。一方で、近年の生成 AI は、アイデア創出やビジュアル生成といった企画段階を含むデザイン開発プロセス全般に関与する点に特徴がある。従来は人間の思考や経験に依存していた領域に対しても活用が進みつつあり、デザイン開発プロセスの企画段階を含め、全体に影響を与える技術として位置づけられる。しかしながら、その具体的な活用方法や適用範囲については十分に整理されておらず、業務特性に応じた実態把握と課題整理が求められている。

2. 調査目的

ものづくりの各プロセスにおいて、AI を活用したデザイン開発技術への期待がこれまで以上に高まっている。そこで、京都地域企業のものづくりにおいても、付加価値創造（新製品開発、ブランディング、生産性向上

等）につなげるため、以下の3項目について調査を行い、デザイン開発技術における生成 AI 活用の有用性・有効性を検証する。

- ①デザイン分野における生成 AI 活用事例調査
- ②生成 AI 活用における知的財産権等の課題調査
- ③京都市内ものづくり企業・工芸作家・デザイン系企業を対象とした活用ニーズ調査

さらに、本調査研究により得られた成果をもとに、京都地域企業の競争力強化と持続的な成長に寄与することを目的とした技術支援策につなげる。

3. 調査概要

生成 AI の活用は、デザインの企画段階から制作段階、さらには非制作業務（事務作業等）に至る広範な領域に関係し得る一方、その活用状況や定着度は業務特性によって異なると考えられる。このため本調査では、特定の分野や工程に限定せず、デザイン分野全体の動向と京都市内のデザイン事業者および伝統産業事業者における実態を整理し、その特徴と活用上の課題を抽出することとした。

本調査では、文献および展示会・セミナー等の視察調査と、京都市内の事業者を対象とした実態調査（アンケート・ヒアリング）を並行して実施した。本章では、これらの調査結果の全体像を俯瞰するため、デザイン開発プロセスにおける活用状況をまとめた「生成 AI 活用マッ

デザイン開発プロセス

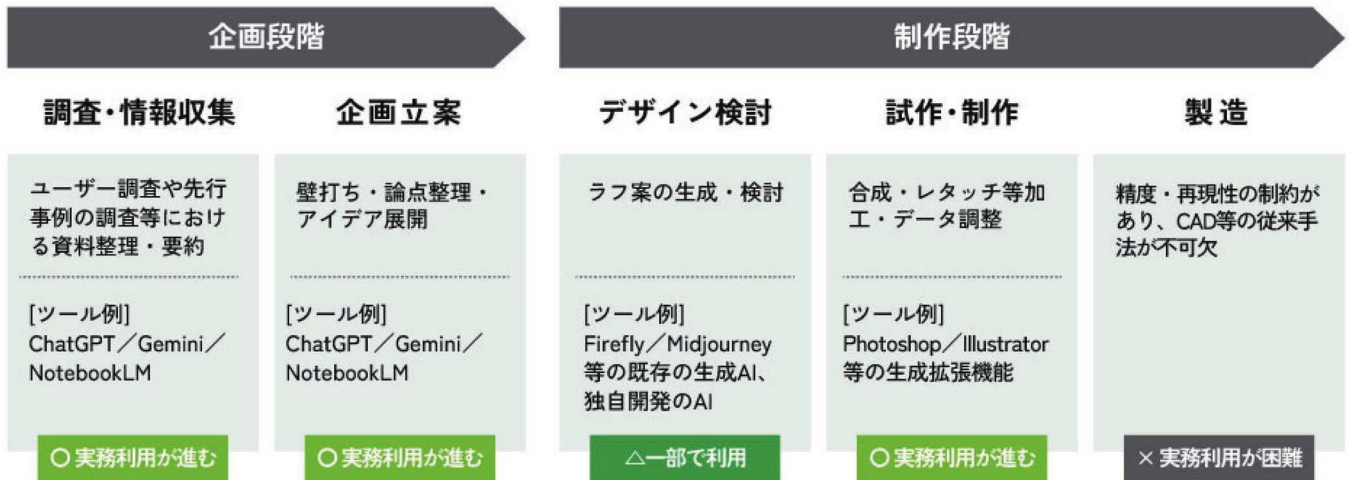


図1 デザイン開発プロセスにおける生成 AI 活用マップ

「図1」をまず提示する。デザイン分野全体の動向や各事業者の活用実態の詳細については、次節以降で記述する。

3.1 デザイン分野における生成 AI 活用の動向調査

文献調査および展示会・セミナー等の視察から、デザイン分野における生成 AI の活用は、主として企画段階の各工程（調査・情報収集工程、企画立案工程）および非制作業務（事務作業等）を中心に進展していることが確認された。一方で、制作段階のうち3Dモデリングを前提とした製造工程においては、現時点での実務適用に一定の制約が存在する。

生成 AI の導入により、従来は多大な工数を要していた調査・情報収集工程の負担が軽減されている。例えば、ユーザー調査の会話データの整理においては、生成 AI を用いた文字起こしや要約、簡易的な傾向整理が可能となっており、発想の前段階に位置する調査・情報収集工程の効率化が進んでいる¹⁾。

また、企画立案工程においては、対話型 AI を用いた反復的な対話により課題設定や論点整理を行い、人間がそれらを精査・再構成することで発想の幅を拡張する活用が見られる。具体的な事例としては、既存の思考法（例：「行為のデザイン思考法²⁾」）のフレームに沿って設計したプロンプトを用い、AI にユーザーの行動上の課題を抽出させ、その結果をもとに人間がアイデアを精査し、解決策を AI と壁打ちしながら検討していくプロセスが実践されている。

さらに、近年の事例では、生成 AI により生成された素材に対して、人間の視点による選定や編集、再構成を行い、コンテンツとして展開するプロセスも実践されている³⁾。これらの事例においては、生成結果に対する意味設計や文脈構築が、人の関与により付与される形で運用されている。

デザイン検討、試作・制作工程においては、画像生成や動画生成を用いたラフ制作およびビジュアル検討への活用が進んでいる。複数案を短時間で生成し、人間が選定・編集する制作フローが一般化しつつあり、制作工程の効率化に寄与している⁴⁾。映像制作分野では、複数の AI ツールを組み合わせることで、従来より少人数で制作を行う事例が報告されている⁵⁾。

また、画像編集ソフトに実装された生成 AI 機能（例：Adobe Photoshop の生成塗りつぶし機能等）を用いた切り抜き、合成、補完といった編集・仕上げ作業においても活用が進んでおり、従来は高度な技能と時間を要した作業の負担が軽減されている。

近年では、既存の生成 AI サービスを利用するだけでなく、生成 AI を含む AI 技術を用いて、各分野が保有する図案・文様・作品データを制作支援や技能継承に応用する研究や実証の取り組みも見られる。例えば、西陣織の図案データを機械学習により分析・生成し、生成された図案を人間が着色する取り組みや、既存の文様を基に新たな織物柄を生成する取り組みが報告されている⁶⁾。

プロダクトデザイン領域においては、生成 AI により初期のモデル案を生成し、その後人間がスケッチの精緻化や3Dモデリングを行うプロセスが確認されている⁷⁾。また、過去の作品データをもとに LoRA 等の技術を用いてモデルを構築し、作り手自身の造形傾向や表現の特徴を参照しながら、ラフ案生成や造形検討に活用する試みも見られる⁸⁾。

一方で、製造工程においては、精度や再現性、構造的合理性が求められるため、生成 AI の出力をそのまま実務に適用することは難しいとの意見をヒアリングで確認した。これらのことから、現時点では製造工程への生成 AI の適用は困難であり、CAD 等の従来手法が不可欠であると考えられる。

3.2 京都市内で活動するデザイン事業者の活用実態

京都市内で活動しているデザイン事業者（京都デザイン協会会員、及び市域のデザイン事業者等約 56 社）を対象としたアンケート調査（回答数 20 件、回収率 36%）およびヒアリング調査（15 名）を実施した。

利用頻度については、「毎日利用」が 65.0%、「週に数回以上」を含めると 85.0%となっている（図 2）。主な利用ツールとしては、ChatGPT を中心に、Adobe 系ソフトに組み込まれた AI 機能や NotebookLM などが併用されている（図 3）。

活用用途としては、「コンセプト立案・キーワード抽出（壁打ち）」が多く、企画立案工程の思考整理や発想支援として利用されている。また、「画像生成・レタッチ」「カンパ・ラフ作成」といった試作・制作工程での活用も見られる。加えて、調査・情報収集工程や非制作業務（事務作業等）における利用も確認された（図 4）。

デザイン検討工程においては、生成 AI による画像出力をそのまま最終成果物として用いる事例は少なく、ラフ案として生成した後に人間が調整・再制作を行う利用形態が多く見られた。また、著作権リスクへの配慮や出力品質に対する懸念から、最終成果物への直接的な適用を避ける対応が確認された。制作段階のうち 3D モデリングを前提とした製造工程についても、精度や構造的合理性が求められるため、生成 AI の出力を直接適用することは難しいとする回答が多く得られた。生成結果に関しては、既視感のある表現や制作意図との乖離が生じることがあるとの指摘もあり、独自性の確保に苦慮している状況が伺える。

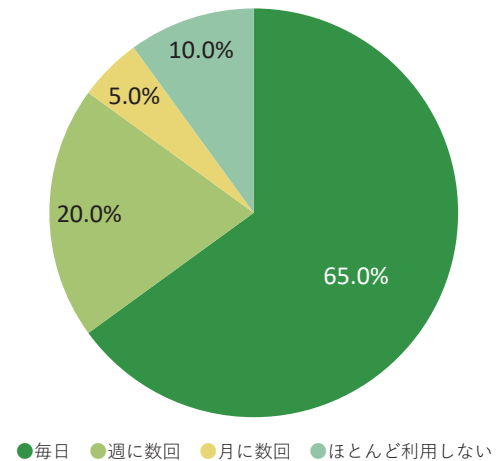


図 2 生成 AI の利用頻度

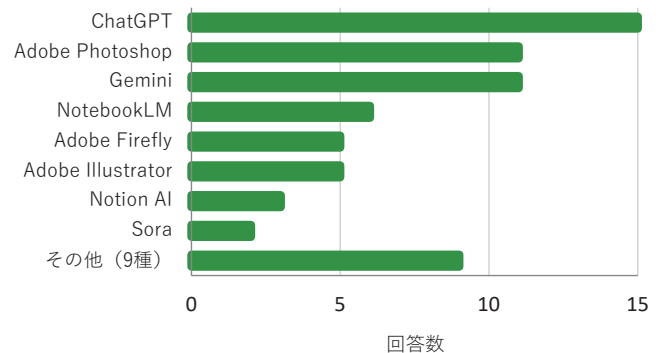


図 3 生成 AI の主な利用ツール

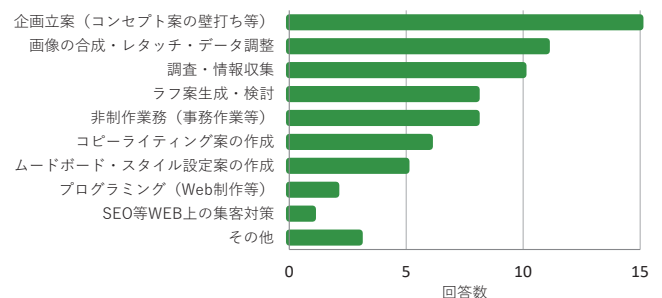


図 4 生成 AI の活用用途

3.3 伝統産業事業者の活用実態

伝統産業事業者（伝統産業系研究会会員（京都工芸研究会／京都陶磁器研究会／西陣織物研究会／京染・精練染色研究会）及び京もの担い手プラットフォームメンバー、伝統産業技術後継者育成研修修了生（陶磁器・漆工・京友禅（手描）コース）等延べ417人（一部重複あり）を対象としたアンケート調査（回答数71件、回収率17%）およびヒアリング調査（18名）から、生成AIの活用状況を把握した。

利用頻度については、「月1回以上利用」が61.8%である一方、「ほとんど利用していない」「全く利用していない」とする回答も38.2%存在し、活用状況にばらつきが見られる（図5）。

主な利用ツールとしては、ChatGPTが最も多く、次いでGemini、Copilotが続いた（図6）。上位を占めるのはいずれも汎用的な対話型AIであり、情報収集や文章作成の補助として導入しやすいツールを中心に利用が進んでいる。一方で、Adobe FireflyやMidjourneyなど、画像・映像・3D生成に関わるツールの利用は一部にとどまっている。このことから、伝統産業事業者における生成AIの活用は、現時点では制作段階に直接関わる用途よりも、非制作業務（事務作業等）を支援する汎用的な利用が中心であることがうかがえる。

活用用途としては、「文章作成・校正」が多く、広報、メール対応、申請書作成等の業務で利用されている。また、「調査・情報収集」や「アイデア出し」といった用途での利用も見られる（図7）。制作段階（デザイン検討、試作・制作、製造工程）に関しては、生成AIを直接用いる事例は限定的であり、「自分の表現に関わる部分には使わない」といった使い分けが見られる。ヒアリングにおいては、手仕事の価値や表現の独自性との関係に言及する意見もあった。一方で、制作活動を支える非制作業務（事務作業等）においては、生成AIの利用が見られ、SNS運用、広報、情報発信といった業務において活用されている事例が確認された。

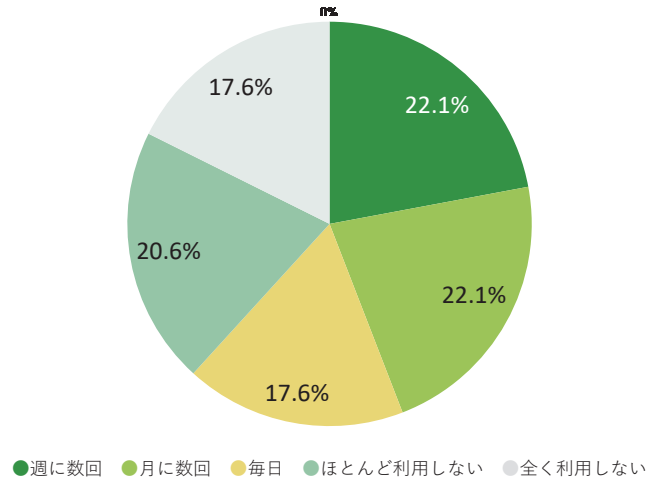


図5 生成AIの利用頻度

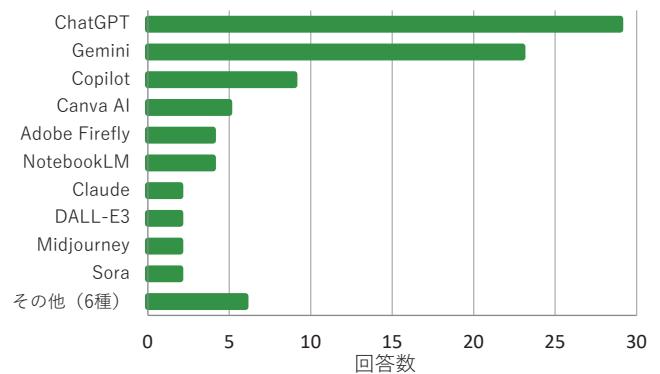


図6 生成AIの主な利用ツール

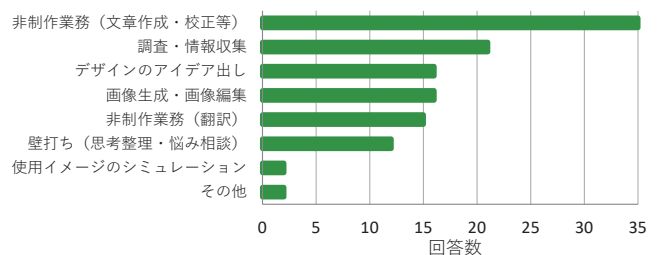


図7 生成AIの活用用途

4. 考察

第3章の調査結果を踏まえ、本章ではデザイン開発プロセスにおける生成AI活用の課題を技術特性、出力品質、法的リスクの3つの観点から整理する。

4.1 生成AIの技術特性と適用範囲

生成AIは、企画段階（調査・情報収集工程、企画立案工程）において広く活用されている一方で、制作段階

における適用は、デザイン検討工程や試作・制作工程での部分的な活用に留まり、製造工程への適用は実務利用が困難な状況にある。この適用の差異は、生成 AI が情報の生成や補完処理には適する一方、精度や再現性、構造的合理性が求められる工程には適用しにくいという現時点での技術特性に起因している。

また、調査・情報収集工程の効率化に生成 AI が大きく寄与する一方で、企画立案工程における中核的な思考プロセス、すなわち「誰に・何を・どう伝えるか」といった意味設計や文脈構築を生成 AI が担うことは困難であり、依然として人間がその役割を担っている。

このように、生成 AI は業務全体に一律に適用できる技術ではなく、工程ごとに適用可能性が異なるとともに、生成された情報に意味を与えるプロセスは人間に依存している。そのため、技術的な適用可能性に加え、どのような文脈で活用するかを設計する視点が課題となる。

4.2 出力品質と独自性の確保

生成 AI の出力については、既視感のある表現や制作意図との乖離が生じる傾向が確認されている。そのため、制作現場では、生成結果をそのまま最終成果物として用いるのではなく、人間による調整や再制作を前提として利用している。

特にデザイン分野においては、独自性の確保や制作意図の精緻な制御が求められるため、生成 AI の出力品質がそのまま業務に適用可能かどうかの判断が重要となる。初期案の生成には有効である一方で、最終的な設計や造形の決定には人間の関与が不可欠である。

さらに、生成 AI の活用が進む中で、生成された素材を単に調整するのではなく、目的や背景に応じて取捨選択し、再構成することで価値として成立させるプロセスの重要性が指摘されている。生成 AI の活用においては、出力の特性を踏まえた上で適用工程を判断することに加え、新たな価値に転換するプロセスを担うことこそが、AI 時代におけるデザイナーの重要な役割として位置づけられる。

4.3 知的財産権およびリスク認識

生成 AI の活用においては、著作権をはじめとする法的リスクが広く認識されている。特に、「学習」と「生成」の各段階における法的解釈については文化庁⁹⁾や経済産業省のガイドライン¹⁰⁾において基本的な考え方は示されているものの、個別事案に関する判例が少ないため、

慎重に判断せざるを得ない。入力情報や用途の制御といった対応が行われているが、これらは個人・職場など実務環境での判断に依存している状況にある。

このように、生成 AI の進歩の速さから、法制度の整備が実務に追いついておらず、知的財産権の適切な保護に課題が残されている。

5. まとめ

本研究では、デザイン分野および伝統産業分野における現時点での生成 AI の活用状況を調査し、その特徴と課題を明らかにした。

その結果、生成 AI は、企画段階（調査・情報収集工程、企画立案工程）において広く活用されている一方で、制作段階における適用は、デザイン検討工程や試作・制作工程での部分的な活用に留まり、製造工程への適用は実務利用が困難であることが確認された。このように、生成 AI は工程や業務特性に応じて適用範囲が大きく異なる。

また、生成 AI の活用においては、生成された素材をそのまま利用するのではなく、人間による取捨選択や再構成を経て成果物へと展開するプロセスが一般的である。すなわち、意味設計や文脈構築、価値への変換といった中核的な役割は、引き続き人間が担っていることが示された。

以上の結果から、生成 AI の活用は単なる作業効率化にとどまらず、業務プロセスの構成や役割分担の再整理を伴うものとして捉えられる。特に、制作行為が作り手の思想や技能、表現の独自性と密接に結びついている伝統産業分野においては、生成 AI の導入が表現や制作姿勢そのものに関わる問題と捉えられている点に留意する必要がある。そのため、今後の支援にあたっては、出力品質の確保や法的リスクへの不安といった共通の課題に対し、専門家と連携した実務解説や具体的な活用方法の検討を進める必要がある。その上で、一律に活用を促すだけでなく、場合によっては適用しない選択も含め、具体的な活用事例紹介や事業者間の対話を通じて、個々の業務特性に応じて適切に支援していくことが重要である。本調査で得られた成果を今後の実証検討の基礎とし、京都地域のデザイン事業者並びに伝統産業事業者の競争力強化と持続的な成長に寄与する実践的な技術支援策につなげる。

注及び参考文献

- 1) toitta: “AIを活用したインタビュー分析 SaaS”,
toitta,<https://ja.toitta.com/> (参照 2026-05-12).
- 2) 村田智明, 問題解決に効く「行為のデザイン」思考法,
CCC メディアハウス (2015)
- 3) GKkyoto: “和歌山市の AI キャラクター活用事業を
再構築「AI 生成」に人が価値を与える新プロジェ
クトを始動”,GKkyoto,[https://www.gk-kyoto.com/
topics/3353](https://www.gk-kyoto.com/topics/3353) (参照 2026-05-12).
- 4) 越智純平: “MIXIDESIGN の AI 実践を加速するた
めに。生成 AI ガイドラインをアップデートした狙い
について”, Cocoda, [https://cocoda.design/junpeiuchi/
p/plabc21d2de5a](https://cocoda.design/junpeiuchi/p/plabc21d2de5a), (参照 2026-05-12).
- 5) 株式会社 GenCraft: “AI だけでは、本物の CRAFT
は完成しない。”, GenCraft,
<https://gencraft.jp/>, (参照 2026-05-12).
- 6) 京都芸術大学広報課: “西陣織の老舗「細尾」の帯
図案を AI で学習、着彩。「MILESTONES – 余白
の図案」”, 瓜生通信,[https://uryu-tsushin.kyoto-art.
ac.jp/detail/998](https://uryu-tsushin.kyoto-art.ac.jp/detail/998), (参照 2026-05-12).
- 7) 尾形美幸: “日南クリエイティブベースが進める、
工業デザイン分野での未来を見据えた AI 活用”,
CGWORLD.jp,[https://cgworld.jp/article/202501-
nichinan.html](https://cgworld.jp/article/202501-nichinan.html), (参照 2026-05-12).
- 8) DESIGNARTTOKYO2025: “渡辺佑介 /WD | UNT
ITLEDIMAGECLUB”,DESIGNARTTOKYO2025,
[https://www.designart.jp/designarttokyo2025/
exhibitions/10857/](https://www.designart.jp/designarttokyo2025/exhibitions/10857/), (参照 2026-05-12).
- 9) 文化庁: “AI と著作権について”, 文化庁,
[https://www.bunka.go.jp/seisaku/chosakuken/
aiandcopyright.html](https://www.bunka.go.jp/seisaku/chosakuken/aiandcopyright.html), (参照 2026-05-12)
- 10) 経済産業省: “AI 利活用における民事責任の解釈適
用に関する手引き”, 経済産業省 ,[https://www.meti.
go.jp/press/2026/04/20260409001/20260409001.
html](https://www.meti.go.jp/press/2026/04/20260409001/20260409001.html), (参照 2026-05-12).

研 究 抄 録

茜色素およびその誘導体における染色条件に依存した金属錯体形成： 耐光性および発色特性への影響

(原題：Dyeing Condition-Dependent Metal Complex Formation in Madder and Its Derivatives: Effects on Lightfastness and Color Properties)

材料・素材技術グループ 井内 俊文、野口 広貴、伊藤 彰浩、仙波 健

要旨

近年、持続可能な繊維産業の在り方が模索される中、自然由来の色材を利用した天然染料による染色が改めて注目されている。しかしながら天然染料は一般的に耐光性が低く、さらにその染着機構は複雑であり、色材に応じた適切な染色方法についての化学的知見は依然として限られている。そこで本研究では、アリザリンおよびプルプリンといった茜色素に着目し、各種金属 (Mg, Al, Fe, Cu, Zn) に対する錯体形成および耐光性について、染色条件との相関を調査した。

染色試験の結果、染料と金属イオンの錯体形成は染色時の pH 環境に強く依存しており、中性から塩基性条件下では錯体形成が促進される傾向を確認した。また、同一の金属を媒染剤として用いた場合であっても、染色した生地 of 耐光性や発色特性が変化しており、例えばプルプリンの場合は、いずれの金属媒染剤においても塩基性条件で染色することで耐光性が向上した。以上の結果から、同じ色材であっても染色条件によって形成する錯体に変化し、耐光性や光化学的性質に差異が生じることが明らかとなった。このことから、適切な染色条件を選択することで、茜染めの耐光性を向上させ得る可能性が示唆された。

キーワード：茜染め、日本茜、天然染料、媒染、耐光性

(本研究は JSPS 科研費 JP24K05542 の助成を受けたものである。Jornal of Fiber Science and Technology, Volume 82, 43-50 (2026) に掲載された。)

<https://doi.org/10.2115/fiberst.2026-0007>

厚膜化したポーラス型アノード酸化皮膜の安定製造プロセスの確立

(原題：Stable fabrication methods for thick porous anodic aluminum oxide films)

加工・製造技術グループ 山梨 眞生

要旨

高度な X 線光学素子への応用が期待される数百マイクロメートル以上の膜厚を有するアルミニウムのポーラス型アノード酸化皮膜の作製において、長時間プロセスに伴う電圧上昇や膜厚の不均一性の解消は極めて重要な課題である。本研究では、電解液添加剤であるエチレングリコールがもたらす正負両面のメカニズムを分離・解析することで、その時間依存的なトレードオフ関係を体系的に解明した。検討の結果、エチレングリコール添加の最大の利点は濡れ性の向上による細孔底部からの酸素気泡の離脱促進であり、これが局所的な反応の不活性化を抑制して膜厚の均一性を向上させる支配要因となっていることを見出した。一方で、エチレングリコールの添加は粘度の増大を招き、細孔内部におけるイオン輸送を阻害するという負の側面を有する。その結果、細孔底部で濃度分極が生じ、長時間の反応において律速段階となる顕著な電圧上昇を引き起こすことが示された。さらに、この濃度分極による課題は、主電解質であるシュウ酸の濃度を高めて反応物の拡散フラックスを増大させることで緩和できることを明らかにした。以上の知見に基づき、利点である均一性維持と課題である分極抑制を両立させる安定な動作条件を定義することで、焼損を伴わない均一な超厚膜皮膜の安定作製手法を確立した。本技術は、X 線光学分野をはじめとする多様な領域への応用展開を切り拓くものである。

キーワード：アノード酸化、ポーラス型アノード酸化皮膜の厚膜化、シュウ酸、エチレングリコール、X 線光学素子

(本研究は Journal of Solid State Electrochemistry 30, 1321-1331 (2026) に掲載された。)

リン酸塩・モリブデン酸塩系中性液による工具鋼からの CrN コーティングの選択的電解剥離技術

(原題: Selective electrochemical stripping of chromium nitride coatings from tool steels using a neutral phosphate-molybdate electrolyte)

加工・製造技術グループ 山梨 眞生

要旨

工業用工具のリユースにおいて硬質コーティングの剥離技術は極めて重要な役割を担うが、従来の強酸あるいは強アルカリ溶液を用いた化学的剥離法では、基材の過腐食や表面粗化を招きやすく、基材の健全性維持が大きな課題であった。本研究では、この課題を解決するため、アノード防食理論に基づき、リン酸塩・モリブデン酸塩・タングステン酸塩を主成分とする中性に近い電解液を用いた窒化クロム (CrN) コーティングの高選択的電気化学的剥離プロセスを提案する。開発したプロセスは、リン酸イオン、モリブデン酸イオン、およびタングステン酸イオンによるアノード防食効果を剥離工程に導入したものであり、鋼基材表面に安定な不動態皮膜を形成させる一方で、コーティング層の酸化溶解のみを選択的に促進する機能を備えている。定電位条件下でのクロノアンペロメトリーによる評価の結果、コーティングの溶解に伴う電流密度の変化を指標とした正確な終点検知が可能となり、基材への過腐食を厳密に抑制しながら被膜を完全に除去できることが実証された。表面分析の結果、合金工具鋼および高速度工具鋼のいずれにおいても、表面粗さや機械的硬度を含む基材本来の表面健全性が剥離前後で良好に維持されていることが確認された。本技術は、環境負荷の大きい従来法に代わる安全かつ低ダメージな剥離プロセスとして、高付加価値な工業用工具の再コーティング性向上や高度なライフサイクル管理への応用が期待される。

キーワード: 電解剥離、リユース、CrN コーティング、工具鋼、アノード防食

(本研究は Transactions of the IMF 104, 172-177 (2026) に掲載された。)

信号蓄積型イオン感応性電界効果トランジスタ (SA-ISFET) と 免疫測定法を組み合わせた新規な簡易細菌検出システム

(原題: Novel simple bacteria detection system combining signal accumulation type of ion sensitive field effect transistor (SA-ISFET) and immunoassay)

加工・製造技術グループ	泊	直宏
プロジェクト推進室	山本	佳宏
佐々木化学薬品株式会社	北脇	優香
株式会社メイベル	高木	由美
株式会社バイオエックス	谷	敏夫
独立行政法人製品評価技術基盤機構	高橋	幹男
摂南大学理工学部	西矢	芳昭

要旨

本研究では、信号蓄積型イオン感応性電界効果トランジスタ (SA-ISFET) と免疫測定法を組み合わせることにより、細菌検出のための新規な半導体イオンセンサーシステムを開発した。大腸菌 (*Escherichia coli*) に対する一次抗体および西洋ワサビペルオキシダーゼ (HRP) 標識二次抗体を用いた。標的細菌に結合した抗体複合体を除去した後、未結合の HRP 標識二次抗体の酵素活性を SA-ISFET により測定した。

SA-ISFET は、測定信号を繰り返し蓄積することにより出力を増幅できるため、酵素活性のわずかな変化であっても高感度に検出することが可能である。その結果、HRP 酵素活性をセンサー出力として測定することにより、 5.0×10^5 cfu/mL 以上の濃度の大腸菌の存在を検出することに成功した。

さらに、環境試料から高頻度に分離される 10 種類の細菌に対して有意な交差反応性を示す、広範な特異性を有する抗体を見出した。この広範な反応性を示す低特異性抗体を活用することにより、SA-ISFET システムによって複数の細菌種を検出できることが示された。

キーワード: 信号蓄積型イオン感応性電界効果トランジスタ (SA-ISFET)、センサー、イムノアッセイ、抗体、細菌

(本研究は *International Journal of Analytical Bio-Science* 13[3], 33-45 (2025) に掲載された。)

ミミズ (*Eisenia fetida*) 抽出物中の α -アミラーゼ阻害剤 2'-デオキシグアノシンの同定及び ブタ膵臓 α -アミラーゼに対する阻害活性の特性評価

(原題: Identification of 2'-deoxyguanosine for an α -amylase inhibitor in the extracts of the earthworm *Eisenia fetida* and characterization of its inhibitory activity against porcine pancreatic α -amylase)

ワキ製薬株式会社	小笠原昌子、芳井 克洋、井上 國世
製品化・人材育成支援グループ	和田 潤
プロジェクト推進室	山本 佳宏

要旨

ブタ膵臓 α -アミラーゼ (PPA) に対する阻害活性がミミズ (*Eisenia fetida*) の水抽出物に見出された。これらの阻害活性は、主に分子量 3 kDa 未満の低分子量化合物を含む画分 (U3EE) 中に回収された。そこで、U3EE を 85% エタノールで処理し、得られたエタノール抽出物を固相抽出法に供した。固相抽出法の水溶出により阻害活性画分 AI を、更に 5% エタノール溶出により画分 AI* を得た。これまでの研究では、固相抽出法の水溶出画分 AI から PPA 阻害剤としてグアニン (Gua)、グアノシン (Guo)、イノシン (Ino) を単離している。本研究では、固相抽出法の 5% エタノール溶出画分 AI* 中の阻害活性を調べ、逆相液体クロマトグラフィーにより新規阻害剤である 2'-デオキシグアノシン (2'-dGuo) を単離した。2'-dGuo は混合型阻害形式を示す阻害剤であり、pH 6、37℃において、 IC_{50} (半数阻害濃度) の値は 0.7 ± 0.1 mM、阻害定数 K_i と K_i' はそれぞれ 2.0 ± 0.5 mM と 0.9 ± 0.2 mM であった。U3EE の PPA 阻害剤は、阻害効率の順に $Gua > 2\text{'-dGuo} > Guo > Ino$ であった。本研究では、核酸関連化合物が PPA 阻害剤となり得ることを示した。これらの阻害剤には、U3EE と同様に、肥満や 2 型糖尿病の予防に役立つ機能性食品素材としての可能性が期待される。

キーワード: ミミズ、 α -アミラーゼ、酵素反応、阻害剤、機能性食品

(本研究は *Enzyme and Microbial Technology*, **185**, 110604 (2025) に掲載された。)

令和8年10月 発行

京都市産業技術研究所研究報告

Bulletin of Kyoto Municipal Institute of
Industrial Technology and Culture

地方独立行政法人

京都市産業技術研究所

〒600-8815 京都市下京区中堂寺栗田町91番地

電話 (075) 326-6100 (代表)

FAX (075) 326-6200