

フジシール財団 研究助成事業
成果報告書

公益財団法人フジシール財団
理事長 岡 崎 裕 夫 殿

報告日 2026 年 4 月 1 日

研究課題	ロールトゥロール超微細加工用ガス透過性多孔質金型が導く 易分離を可能とするパッケージ離型技術基盤の確立	助成金額
		300 万円
助成名	研究助成	
ふりがな	たけい さとし	研究助成申請年度
研究者氏名	竹井 敏	2024 年度
所属機関	富山県立大学 工学部 材料成形加工研究室	研究期間
		2025 年 4 月 1 日～2026 年 3 月 31 日
役 職	教授	

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

1. 研究成果の概要

【研究背景と目的】

近年、マイクロ・ナノメートルスケールの微細構造を持つ防汚性パッケージ・容器の需要が急増している。これらの量産にはロールトゥロール超微細加工や精密射出成形技術が適しているが、微細構造の転写において、金型内やキャビティ内に閉じ込められた残留ガスが充填を阻害し、成形不良（充填不足、断熱圧縮による樹脂焼け）を引き起こすことが大きな課題であった。特に、パッケージ・容器の素材として利用が拡大している生分解性ポリマーのポリ乳酸（PLA）は、環境負荷低減材料として期待される一方で、結晶化速度が遅く、成形時にガスが発生しやすいため、従来の金型での精密成形は極めて困難とされてきた。

本研究では、この課題を解決するため、独自の「ガス透過性多孔質金型」の設計技術をロールトゥロール超微細加工や精密射出成形に応用・発展させた。具体的には、ガス透過機能を有する多孔質金属基盤と、ロールトゥロールナノインプリントリソグラフィ（NIL）により微細構造を形成した表層材を接合した「ハイブリッド金型」を開発した。特に、金型耐久性の鍵となる異種材料間の界面密着性を高めるため、アミノ基を導入した新規の「アミン含有ガス透過性ハイブリッド金型」を設計・作製し、難成形材である PLA のロールトゥロール超微細加工を実現することを目的とした（図 1）。

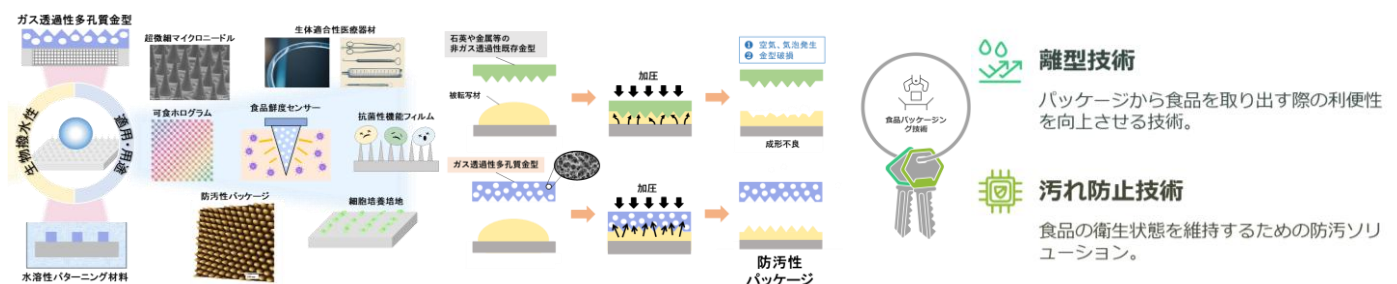


図 1 ガス透過性多孔質金型が導く分離を可能とするパッケージ離型・汚れ防止技術

【実験方法と材料設計】

● アミン含有ガス透過性ハイブリッド金型の作製

ロールトゥロール金型の表層材には、ガス透過性下地（金属）との化学的結合を促進するため、アミノ基を有するシランカップリング剤を導入した 5 成分系ソル・ゲル共重合体を設計した。これに架橋剤と光カチオン重合開始剤を添加し、紫外線硬化型の表層材とした。ロールトゥロール金型の基材となるガス透過性下地には、ハイブリッド金属 3D プリンタを用いて造形したマルエージング鋼の多孔質構造体を使用し、通気性を確保した。金型の成形には NIL 法を適用した。サファイア製マスター金型（底面直径 $2.7\mu\text{m}$ 、高さ $1.2\mu\text{m}$ の微細凹凸構造）を用い、ロールトゥロール金型の下地上に貼り付けた表層材へ加圧・紫外線照射を行うことで、微細パターンを曲面転写・固定化した。

● ポリ乳酸（PLA）のマイクロ射出成形

作製したアミン含有ハイブリッド金型をロールトゥロール超微細加工成形機や精密射出成形装置にセットし、PLA を用いた連続成形を 100 サイクル連続で実施した。成形条件は、熔融温度 210°C 、金型温度 30°C という低温条件下で行い、成形品の転写精度、金型の耐久性、および成形品の表面機能（接触角）を評価した。

【研究成果】

① 金型材料の特性と界面密着性の向上

ロールトゥロール金型用に本研究で新たに開発したアミン含有表層材は、紫外線照射により急速に架橋が進行し、短時間で硬化することが確認された。熱重量分析（TGA）では、 105°C 付近から分解が開始するものの、射出成形における急速な加熱・冷却サイクル下では実用的な耐熱性を有することが判明した。特筆すべき点として、10000 回の連続パターンニング成形後もロールトゥロール金型表層の剥離や目詰まりは確認されなかった。これは、アミン成分の導入により金属基板との界面密着性が劇的に向上し、ロールトゥロール成形時の圧力や離型時の応力に対する高い耐久性が実現されたことを示している。

② PLA マイクロ構造体の高精度転写

従来の非透過性金型ではガスによる充填阻害が生じやすい PLA において、本金型は顕著なガス排出効果を発揮し、欠陥のない均一なマイクロ構造体の成形に成功した。SEM 観察および寸法測定の結果、マスター金型に対し、成形品の底面直径は $2.8\mu\text{m}$ ($\pm 0.04\mu\text{m}$)、高さは $1.4\mu\text{m}$ ($\pm 0.06\mu\text{m}$) であった。ロールトゥロール金型温度 30°C という低温環境下でも完全な充填が達成されたことは、ガス透過性による内圧緩和が精密成形において極めて有効であることを裏付けている。

③ 表面離型性の制御と機能発現

成形された PLA 表面の接触角を測定した結果、平滑な表面と比較して以下の通り顕著な向上が認められた。

水接触角： 64° から 78° へ上昇（撥水性の向上）

人工血液接触角： 63° から 71° へ上昇（防汚・血液付着抑制）

この結果は、微細構造の付与によりパッケージの易分離性（離型性）や防汚機能を制御できることを実証している。ガス透過性機能と易分離性（離型性）を両立するロールトゥロール金型が、難成形樹脂の精密加工において有効であることが明らかとなった。成功の要因は二点に集約される。第一に、ロールトゥロール金型自体が排気機能を持つため、微細構造の深部まで樹脂が充填されたことである。第二に、アミノ基による化学的相互作用が有機・無機界面の結合を強固にし、量産プロセスに耐えうるロールトゥロール金型寿命を確保したことである。本技術は、既存のロールトゥロール成形インフラを最大限に活用できる点で、産業的なコスト競争力が非常に高い。

【結論】

本研究を通して、アミン含有ガス透過性ハイブリッド金型を用いた生分解性ポリマーの精密射出成形技術を確立した。

- 技術面： 50nm 以下の限界解像度への足掛かりとなる、サブミクロン精度の連続ロールトゥロール成形（10000 ショット）を試作品の小型金型にて達成した。
- 機能面： パッケージ離型に不可欠な撥水性・防汚性の付与を実証した。

今後の展望として、学術的には当初の目的である 50nm 以下の超微細ナノ曲面加工の確立を引き続き目指す。また、パッケージ産業の社会課題の解決のため、産業的にはサブミクロン精度の連続ロールトゥロール成形への実用化展開ができる新たな産学連携体制を構築し、環境配慮型パッケージや次世代医療用デバイスの量産化に貢献できると確信する。本研究成果は、材料設計からプロセス構築、機能評価に至る一貫した技術基盤として、学術的・産業的に極めて重要な意義を持つものである。

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

本研究成果は、急成長する環境配慮型パッケージ産業に対し、高付加価値化と低コスト量産の両立という決定的なソリューションを提供するものである。

最大の強みは、成形難易度の高い生分解性プラスチック（PLA）に対し、薬剤コーティングに頼らず、金型転写によるナノ構造のみで「易分離性（離型性）」や「高度な防汚・撥水性」を付与できる点にある。我々が開発した「アミン含有ガス透過性ハイブリッド金型」は、ガス排出機能により成形不良を根絶するだけでなく、独自の界面接合技術により 10,000 ショットの実用耐久性を実証した。

これは、既存のロールトゥロール製造ラインをそのまま活用し、ナノレベルの機能性パッケージを高速かつ安価に量産できることを意味する。食品ロス削減や高付加価値素材用容器の安全性向上に直結する本技術は、脱炭素社会のニーズと合致し、極めて高い市場競争力を有する。学術的な限界解像度への挑戦に加え、産業実装を見据えたこの技術基盤は、次世代製造プロセスのスタンダードとなり得る貢献の可能性がある。

3. 学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績

- Mano Ando, Naoto Sugino, Yoshiyuki Yokoyama, Nur Aliana Hidayah Mohamed, Satoshi Takei
“Microstructured Coatings and Surface Functionalization of Poly (caprolactone-co-lactide) Using Gas-Permeable Mold.” Coatings, December 20, 2025, 16(1), 10. (Volume 16. Issue 1 January 2026, Cover Article),
- Misaki Oshima, Mayu Morita, Mano Ando, Rio Yamagishi, Sayaka Miura, Arisa Teramae, Yuna Hachikubo, Sen Lean Goo, Hiryu Hayashi, Naoto Sugino, and Satoshi Takei. TiO₂-SiO₂ Radical-Based Gas-Permeable Mold for High-Precision UV Nanoimprint Lithography. Journal of Photopolymer Science and Technology, May 14, 2025, 38(4), 303-314.
- Yuna Hachikubo, Hiryu Hayashi, Mano Ando, Mayu Morita, Misaki Oshima, Abdul Manaf Hashim, Nurul Hanis Azhan, Takayuki Ota, Satoshi Takei. Water-Developable PFAS-Free Glycan-Derived Positive Photoresist Materials for Environmentally Friendly Lithography. 20 October, 2025, Coatings, 15(10), 1228.
- 竹井敏, 安藤麻乃, 「次世代ナノ加工技術を駆使したプラスチックによる高性能“抗菌・撥水・防汚” 食品包装材」 FOOMA JAPAN 2025 アカデミックプラザ, 東京ビッグサイト, 2025. 6. 12.
- 竹井敏, 安藤麻乃, 森田麻友, 大島美咲, 鎌田桃歌, 蔦川梨花, 中川舞桜, 平川千春, 杉野直人, 横山義之
「ガス透過性金型を用いたロールトゥロール微細成形法の開発」北陸技術交流テクノフェア 2025, 福井産業会館, 2025. 10. 23-24.