

食品に含まれる希少糖の定量下限値について

三好 美玖, 佐々原 浩幸, 神 幸子, 稲津 忠雄, 木村 功

高感度糖分析システム (Corona HPLC) を用いて, 液体及び固形の食品に含まれる希少糖 (アロース, タガトース及びアルロース) の定量下限値を検討した. 分析値の相対標準偏差が 5% となるアロース, タガトース及びアルロースの定量下限値は, 液体試料 1 g を秤量した場合, それぞれ 70.20, 86.70 及び 51.11 mg/100 g となり, 固形試料 5 g の秤量では, それぞれ 16.68, 24.03 及び 14.35 mg/100 g となった. 煩雑な前処理を伴う固体試料の分析においても, 試料を 5 g 採取することで液体試料と同等以上の定量下限値を算出することができた.

1 緒言

近年, 健康志向の消費者ニーズやセルフメディケーションの意識向上により, 特定保健用食品制度や機能性表示食品制度¹⁾のみならず, 日常摂取する一般食品においても, 健康増進作用を有する成分の含有量表示が製造企業に対して求められつつある.

このような背景の下, 香川県では「せとうち田園都市の確かな創造」を目標とした「みんなでつくるせとうち田園都市・香川」において, 戦略的な産業振興の重点施策として希少糖事業に取り組んできた. 産学官連携によって上市されたアルロースは, 脂肪の燃焼を高める機能や, 糖の吸収を抑えて食後の血糖値の上昇をおだやかにする機能をもつ機能性関与成分²⁾として商品開発が進んでおり, 新たな機能性表示食品開発の素材として活用されつつある.

機能性表示食品制度による機能性関与成分評価の一つとして, 最終製品中の機能性物質の有効量を明らかにしておくことが企業に対して求められている¹⁾. 食品中に機能性関与成分が有効量以上含まれていることを確認するためには, 機器分析による定量が必要であるが, 機器分析には精度よく定量できる限界値が存在することが知られている.

当センターでは, 依頼試験で希少糖 (タガトース, アロース及びアルロース) の定量分析を行ってきた. これまで分析手順の妥当性の確認をはじめ, 希少糖標品の定量下限値等を明らかにしてきたが³⁾, 実食品 (液状や固形の食品) については, その分析操作性も含めて検討してきた. 当センターが希少糖について, より信頼度の高い成績書を企業に提供できれば, 機能性表示食品における届出の促進に繋がることが想定される. そこで本研究では, Corona HPLC を用いて実食品に含まれる希少糖の定量下限値を検討したので報告する.

2 実験方法

2. 1 試薬及び試料

D-アロース, D-タガトース及びD-アルロース (以下, アロース, タガトース及びアルロース) は, 東京化成工業株式会社より購入した. その他の試薬は, 富士フィルム

和光純薬株式会社製の特級試薬を用いた.

液体の食品試料 (以下, 液体試料) 及び固体の食品試料 (以下, 固体試料) は, それぞれ清涼飲料 (豆類加工品) 及び焼き菓子 (ドーナツ) を用いた.

2. 2 定量性の検討

各食品試料に所定濃度の希少糖標準溶液を添加した後, Miyoshi らの方法³⁾に基づいて分析試料を調製した. すなわち, 液体試料は精秤した後, 100 mL に定容し, 各種カートリッジ (Toyopearl IC-SP, DEAE-カートリッジ及びSep pak C18 カートリッジ) で前処理したものを分析試料とした. 一方, 固形試料は, 1 mm 以下に粉碎した試料を 1 g~5 g 精秤し, 石油エーテルで脱脂処理した後, 超純水を加え超音波処理し得られた抽出液を定容した後, 上述のカートリッジで前処理したものを希少糖含量の分析に供した.

2. 3 Corona HPLC による希少糖含量分析

希少糖類の分析は既報³⁾に基づいて行った. すなわち, 配位子交換型カラム (CARBOSep CHO-882×2) を備えた高感度糖分析システム (Corona Veo Ultimate3000 (ThermoFisher scientific 株式会社)) を用い, 超純水を溶離液としてカラム温度 55°C で分析した. なお, メイクアップ液としてアセトニトリルを用いた.

2. 4 定量下限値の算定法

分析装置の定量下限値³⁾から想定された希少糖濃度 (推定定量下限値) を含む食品試料を繰り返し分析し, 得られた分析値 (ピーク面積) を統計処理した. 食品に含まれる希少糖の含有濃度と相対標準偏差の回帰式により, 相対標準偏差 5% を定量下限値 (QL) として算出した^{4, 5)}.

3 結果及び考察

3. 1 液体試料による定量性

推定定量下限値付近の希少糖を含む液体試料 5 点を繰り返し分析した結果, 相関係数 0.957 以上の検量線が得られた (図 1). 各希少糖の定量下限値は, アロース, タガトース及びアルロースで, それぞれ 7.02, 8.67 及び 5.11 µg/mL と算出された (表 1). Corona HPLC の

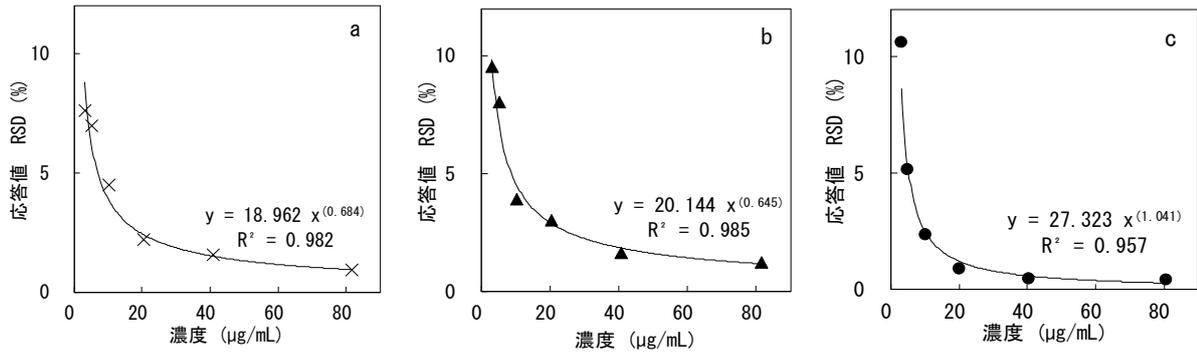


図1 液体試料 1 g 精秤時の各希少糖濃度と相対標準偏差
(a, アロース; b, タガトース; c, アルロース)

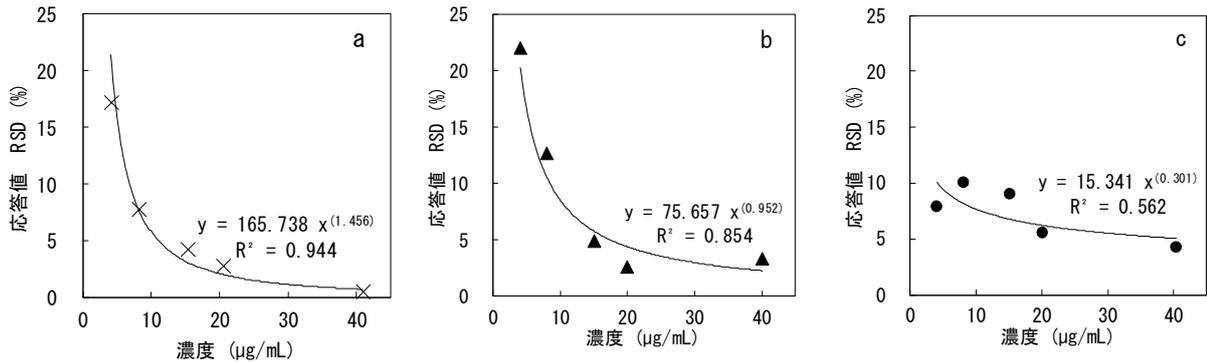


図2 固体試料 1 g 精秤時の各希少糖濃度と相対標準偏差
(a, アロース; b, タガトース; c, アルロース)

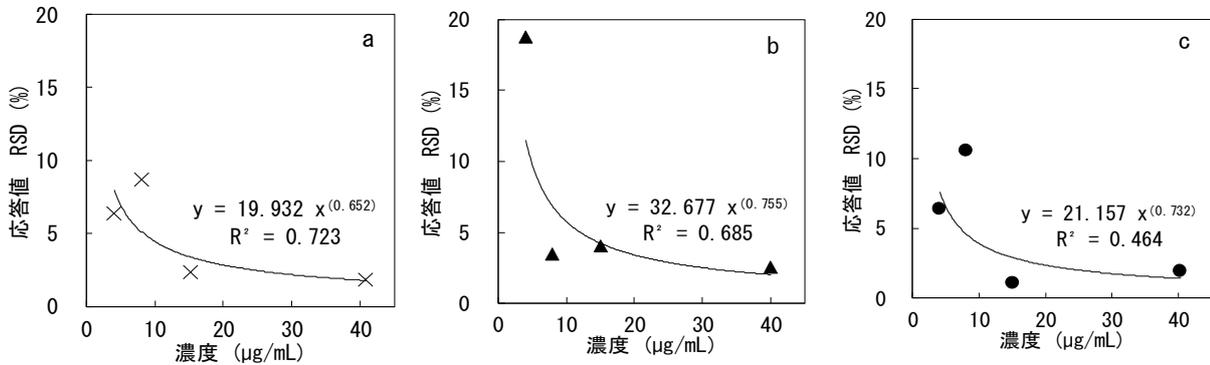


図3 固体試料 5 g 精秤時の各希少糖濃度と相対標準偏差
(a, アロース; b, タガトース; c, アルロース)

表1 各種試料と相対標準偏差より算出された希少糖の定量下限値

	液体試料		固体試料		固体試料	
	QL* ¹ (μg/mL)	分析 QL* ² (mg/100 g)	QL* ¹ (μg/mL)	分析 QL* ² (mg/100 g)	QL* ¹ (μg/mL)	分析 QL* ³ (mg/100 g)
アロース	7.02	70.20	11.07	110.73	8.34	16.68
タガトース	8.67	86.74	17.35	173.53	12.02	24.03
アルロース	5.11	51.11	41.43	414.26	7.18	14.35

QL, 定量下限; *¹, 相対標準偏差 5 % (y=5) のときの定量下限値 (x); *², 処理方法 (1g 精秤、100 mL 定容) に基づいたときの分析定量下限値; *³, 処理方法 (5g 精秤、100 mL 定容) に基づいたときの分析定量下限値

分析値を用いて、液体試料 100 g 当たりの定量下限値を算出すると、アロース、タガトース及びアルロースで、それぞれ 70.20, 86.74 及び 51.11 mg/100 g となった。既報³⁾では、希少糖標品アロース、タガトース及びアルロースを用いて、相対標準偏差 4%における装置の定量下限値を算出し、それぞれ 9.00, 16.02, 9.01 µg/mL と報告している。本実験の定量下限値(アロース、タガトース及びアルロース; 7.02, 8.67 及び 5.11 µg/mL) は、既報の装置の定量下限値よりも低い値であることが確認された。これは Corona HPLC のカレント値が既報の 6 割程度であったことから、低濃度の範囲まで定量できたものと考えられた。

3. 2 固形試料による定量性

推定定量下限値付近の希少糖を含む固形試料 3 点を繰り返し分析し、固形試料 1 g を精秤した場合(図 2) と 5 g を精秤した場合(図 3) の検量線をそれぞれ得た。相対標準偏差が 5%を基準とし定量下限値を算出したところ、1 g 秤量の場合、アロース、タガトース及びアルロースは、それぞれ 11.07, 17.35 及び 41.43 µg/mL となり、5 g 秤量の場合、アロース、タガトース及びアルロースの定量下限値は、それぞれ 8.34, 12.02 及び 7.18 µg/mL となった(表 1)。

Corona HPLC の分析値を用いて、固体試料 100 g 当たりの定量下限値を算出すると、アロース、タガトース及びアルロースにおいて、1 g 精秤した場合には、110.73, 173.53 及び 414.26 mg/100 g となり、5 g 精秤した場合には、それぞれ 16.68, 24.03 及び 14.35 mg/100 g となった(表 1)。固体試料の分析において、採取量が定量下限値に影響を及ぼすことが確認された。これは分析試料の前処理操作において、石油エーテルを用いた脱脂処理を行うため、その過程で食品試料中の希少糖が損失している可能性が考えられた。分析操作性を考慮した場合、試料採取量は可能な限り少量であることが望ましいが、1 g 秤量時の相対標準偏差は 5 g 採取に比較して明らかに高く、より精度の高い分析のためには、5 g を秤量する必要性が示された。

一般的な糖の分析で用いられる示差屈折計では、液体試料(果実飲料)の定量下限値は 0.5 g/100 mL と報告されており⁶⁾、本研究で算定された液体試料のアルロースの定量下限値は、固体試料 5 g 採取時の値よりも高い値であるが、一般的な分析法によるグルコース

よりも 1/10 程度低い濃度となることが認められた。今回、実食品を用いて信頼性の高い定量下限値を設定できたことにより、商品開発段階からメイラード反応等による希少糖の損失量を技術指導できるとともに、より正確な分析結果を関係企業に提供できることが考えられた。

4 結言

Corona HPLC を用いて食品中の希少糖含量の定量下限値を検討した。その結果、アロース、タガトース及びアルロースの定量下限値はそれぞれ、液体試料(1 g 精秤)で 70.20, 86.74 及び 51.11 mg/100 g, 固形試料(1 g 精秤)で 110.73, 173.53 及び 414.26 mg/100 g, 固形試料(5 g 精秤)で 16.68, 24.03 及び 14.35 mg/100 g であった。

参考文献

- 1) 消費者庁：機能性表示食品の届出等に関するガイドライン(令和 5 年 9 月 29 日一部改正)
- 2) 消費者庁：機能性表示食品の届出情報検索 <https://www.fld.caa.go.jp/caaks/cssc01/>(検索日：2024. 3. 19)
- 3) Miku Miyoshi, Isao Kimura, Tadao Inazu, Ken Izumori: High Sensitivity Analysis and Food Processing Stability of Rare Sugars. *Food Science and Technology Research*, **25**, 891-901 (2019)
- 4) 上本道久: 検出限界と定量下限の考え方, *ぶんせき*, **5**, 216-221 (2010)
- 5) サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社：イオンクロマトグラフィーにおけるデータ解析(その 6) 定量下限値の求め方 <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LSG/brochures/DS0015T-JA.pdf>(検索日：2024. 3. 19)
- 6) 紀雅美, 工藤鮎子, 寺谷清香, 山崎朋美, 柿本葉, 新矢将尚：野菜・果実飲料における糖類および糖アルコール分析, 地方独立行政法人大阪健康安全基盤研究所研究年報, **5**, 32-40 (2021)

卵を用いた菓子類の調理や食味に対するアルロース（希少糖）の効果

神 幸子, 三好 美玖

卵を用いた菓子類の糖原料としてアルロースを用い、調理や食味に対する効果を検討した。別立て法と共立て法で調製したスポンジケーキのアルロース量は、焼成後のアルロース含量で比較すると別立て法で有意に減少した。アルロースと各種糖類をそれぞれ使用してメレンゲ及び焼きメレンゲを作製し、物性評価や官能評価を行った結果、アルロースと上白糖を併用したメレンゲでは、個々の糖のみで調製したものと同等の物性を有していた。一方、焼きメレンゲでは、アルロースを併用することにより、艶があり、硬さやくちどけの良さが好まれ、上白糖に次ぐ高い評価を得た。

1 緒言

D-アルロースは様々な研究で、食後血糖改善効果¹⁾や抗肥満作用²⁾が報告されている希少糖である。また、健康志向の消費者ニーズの高まりにより、機能性表示食品の情報検索サイト³⁾において、「アルロース」を機能性関与成分とした機能性表示食品の届け出が25件受理(2024年3月19日現在)されており、菓子、飲料業界などの幅広い食品で機能性をもつ糖として使用されている。

加えて糖の役割として、調理加工時における保水性やメレンゲの泡の安定性を向上させることがあげられる⁴⁾。卵白液を攪拌するとタンパク質が変性してメレンゲとなるが、メレンゲの泡は不安定なため攪拌の途中で糖を加えることで、気泡の膜に溶け込んで水分を引きつけ粘性を高めることにより、気泡が壊れにくくなる⁴⁾。このメレンゲは、スポンジケーキや焼きメレンゲなどに広く利用される。これまで、アルロースとスクロースを併用した際の物性評価については報告⁵⁾されているが、調理工程(共立て法、別立て法)の違いによるスポンジケーキの焼成前後のアルロースの量的な変化や、アルロースと他の糖を比較したメレンゲ・焼きメレンゲの物性などの加工特性や嗜好性については報告されていない。

そこで本研究では、より効果的にアルロースを食品へ使用するために、調理工程の違いがアルロース含量に及ぼす影響やアルロースの調理特性を活かした食品の嗜好性を検討した。

2 実験方法

2.1 試料

アルロース(ASTRAEA アストレア)は松谷化学工業株式会社より供与された。トレハロースは、株式会社富澤商店、エリスリトールはバブルスター株式会社のものを用いた。上白糖(DM三井製糖株式会社)、卵及び薄力粉は県内の商店より購入した。

2.2 食品試料の調製

共立て法によるスポンジケーキは、全卵110gをハンドミキサーTHM26(株式会社テスコム)で泡立て、アルロース30g及び上白糖30gを添加し、最後に小麦粉60gを添加した。得られたケーキ生地をスチームコンベクシ

ョンオープンMIC-6SA3-1(ホシザキ株式会社)にて160℃で24分間焼成した。次に、別立て法として、全卵110gを卵白と卵黄に分け、まず卵白のみをハンドミキサーで泡立て、アルロース30g及び上白糖30gを添加し、次いで卵黄を添加し、最後に小麦粉60gを添加した。得られたケーキ生地を共立て法と同様の条件で焼成した。

メレンゲ及び焼きメレンゲは、卵白60gに、各種糖類60g(アルロース、上白糖、トレハロース、エリスリトール及びアルロース18g+上白糖42g)を各ボウルに入れ、ハンドミキサーを使用して混合し8分間泡立て、メレンゲを調製した。メレンゲは絞り袋に入れて、天板に絞り出し(直径約2.5cm×高さ約1.5cm)、スチームコンベクションオープンにて100℃で8分間焼成した(図1)。

2.3 pH測定

卵(全卵、卵白)のpHは、攪拌により均一化した後、pHメーターS010(株式会社堀場製作所)を用いて測定した。

2.4 糖分析(HPLC-Corona CAD)

糖含量は、コロナ荷電粒子検出器を搭載したHPLC-Corona CAD(高感度糖分析システム)を使用して、Miyoshiらの方法⁶⁾に基づき分析した。すなわち、焼成したスポンジケーキの着色した固い上下部分、側面部を除き、粉碎した試料を精秤し、適量の超純水を添加後、超音波処理によってアルロースを抽出した。抽出液は0.45µmメンブランフィルター、イオン交換樹脂で夾雑物を除去した後、配位子交換型カラム(CARBOSep CHO-882×2)を備えたCorona Veo-Ultimate3000(ThermoFisher scientific株式会社)を用い、超純水を溶離液としてカラム温度55℃で分析した。メイクアップ液としてアセトニトリルを用いた。得られた糖含量は、別に分析し

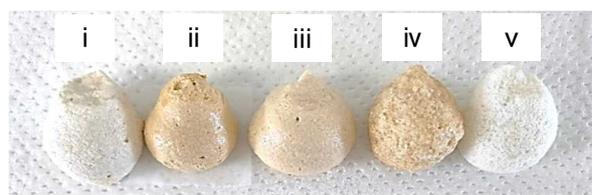


図1 作製した焼きメレンゲ

i, 上白糖; ii, アルロース; iii, アルロース+上白糖
iv, エリスリトール; v, トレハロース

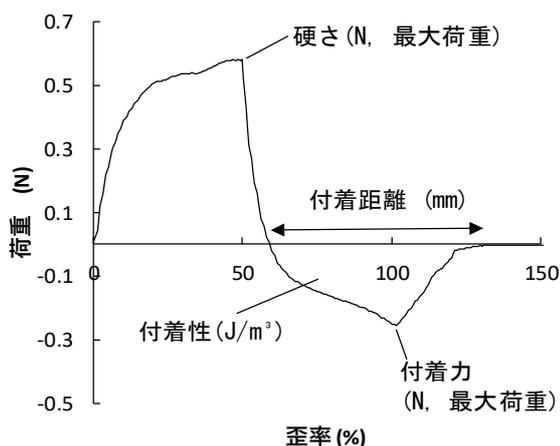


図2 メレンゲのテクスチャー解析 概要

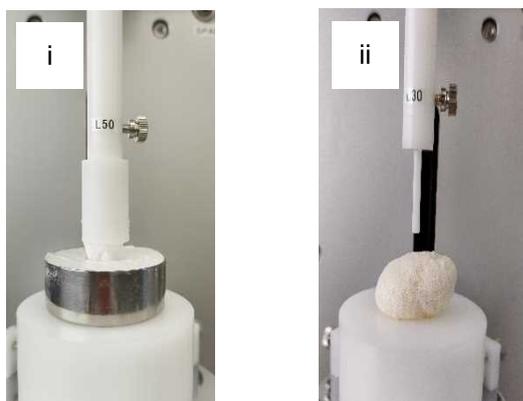


図3 物性評価の測定様子

i, メレンゲ; ii, 焼きメレンゲ

た水分量(減圧加熱・乾燥助剤法)を用いて乾燥重量値に換算した。

2.5 物性評価

レオメーターRE2-33005C(株式会社山電)を使用して、メレンゲ及び焼きメレンゲの物性評価を行った。メレンゲの物性測定は、ステンレスシャーレ(内径40mm×深さ15mm)にメレンゲを充填し、直径16mmの円柱型プランジャー(型番P-3)を上下することで行った。ロードセルは20N、アンプ倍率は10倍、格納ピッチは0.09sec、測定速度は1.00mm/sec、戻り距離は5.00mmに設定した。プランジャーでメレンゲを圧縮した時の荷重を硬さ、プランジャーが圧縮されたメレンゲから離れるまでの荷重を付着力、プランジャーからメレンゲが離れる距離を付着距離、付着距離と付着力の積分を付着性として3回測定した(図2及び図3-i)。

焼成した焼きメレンゲは、試料として直径約2.5cm、高さ約15mmのものを各々5個揃えた。直径3mmの円柱型プランジャー(型番P-4)により刺突することで物性評価した。ロードセルは20N、アンプ倍率は1倍、格納ピッチは0.07sec、測定速度は1.00mm/secに設定し、焼きメレンゲの硬さ(最大荷重)を測定した(図3-ii)。

2.6 官能評価

評点法及び順位法により、焼きメレンゲの官能評価を実施した(20~60代男女17名)。評点法では、試料は4種類で、上白糖、アルロース+上白糖、トレハロース及

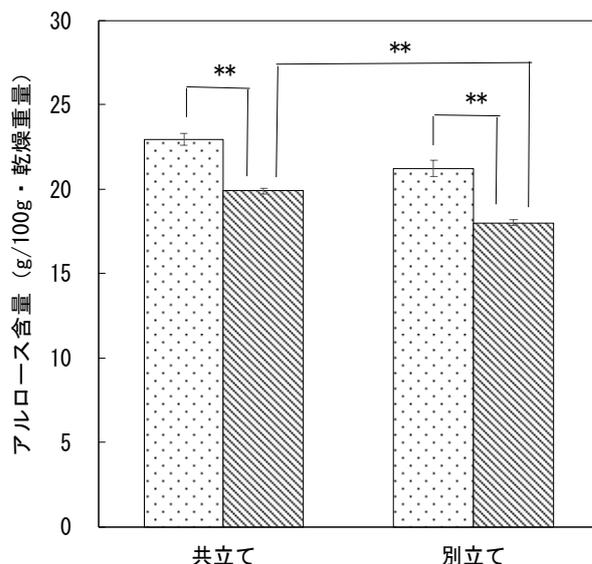


図4 スポンジケーキ焼成前後の糖含量の変化

焼成前(□), 焼成後(■); ** $p < 0.01$

びエリスリトールである。見た目、食感、味など5段階(1~5点)で評価した。

順位法では、試料は評点法の試料4種類にアルロースを加えた5種類で評価した。総合的に好ましい方から順位を付けさせ、この順位和を基に、Kramerの検定表により検定を行った。

2.7 統計解析

得られた糖含量については、スチューデントの t 検定を用いた。また、物性値及び評点法(官能評価)の結果については、一元配置分散分析を用い、有意差が認められた場合にはボンフェローニ法による多重比較を行った。

3 結果及び考察

3.1 製造方法(共立て法、別立て法)が異なるスポンジケーキのアルロース含量変化

焼成に伴うアルロース含量を調べたところ、共立て法では約13% ($p < 0.01$)、別立て法では約15% ($p < 0.01$)が、それぞれ焼成前と比較して減少していた(図4)。Oshimaら⁷⁾も、スポンジケーキの焼成に伴うアルロース量の変遷を検討しており、本実験と同程度の減少率を報告している。共立て法と別立て法を比較すると、焼成前にはアルロース含量の有意差がなかったが、焼成後は別立て法においてアルロース含量が有意に減少(減少量1.9g/100g; $p < 0.01$)していた。スポンジケーキ調製時に、共立て法では全卵(pH 7.2)と糖と攪拌し、別立て法では卵白(pH 8.6)と糖で攪拌してメレンゲを作ることから、卵白のpHがアルロース含量に影響を及ぼしたと考えられた。

3.2 メレンゲ及び焼きメレンゲの物性評価

図5及び図6に、各種糖を使用して調製したメレンゲの硬さ、付着力、付着距離及び付着性の測定結果を示す。上白糖とアルロースを併用したメレンゲは、トレハロース、エリスリトールと比較して硬さ(a,b)、付着力(d,e)では有意な高値、また付着距離(g,h)で有意な低値がみられ、付着性(i)については、エリスリトールと比較して有意な高値が確認された。また、アルロースを使用し

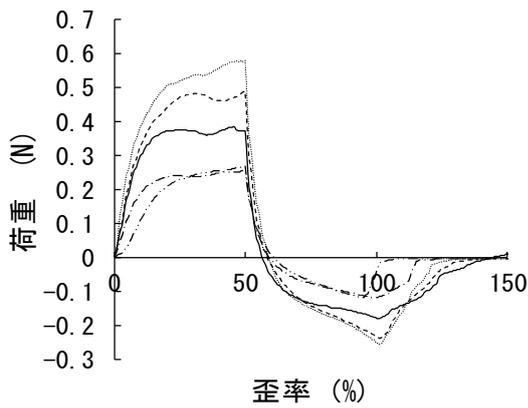


図5 メレンゲの測定図形

....., 上白糖; ----, アルロース+上白糖;
 ——, アルロース; - - -, トレハロース;
 - · - ·, エリスリトール

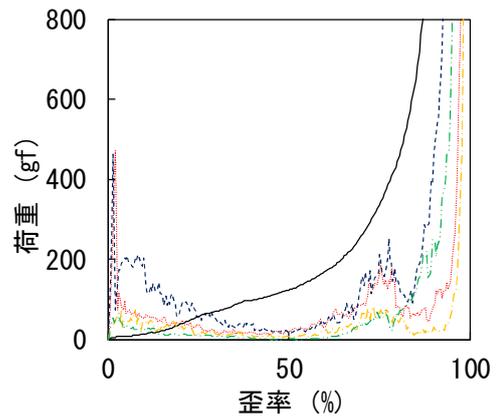


図7 焼きメレンゲの測定図形

- - -, 上白糖; - · - ·, アルロース+上白糖;
 ——, アルロース; - - -, トレハロース;
 - · - ·, エリスリトール

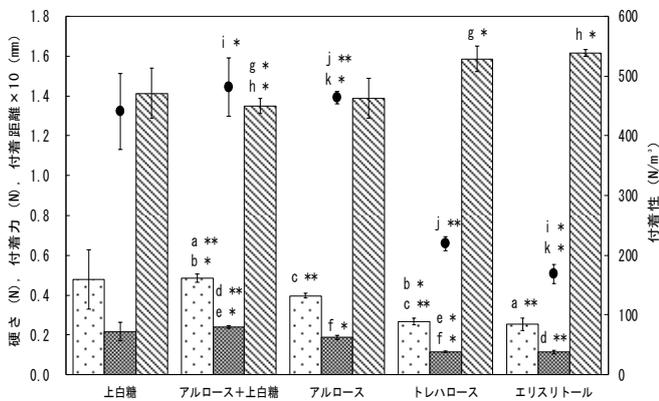


図6 メレンゲのテクスチャー測定値

□, 硬さ; ■, 付着力; ▨, 付着距離; ●, 付着性
 英記号間にて有意差を示す ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

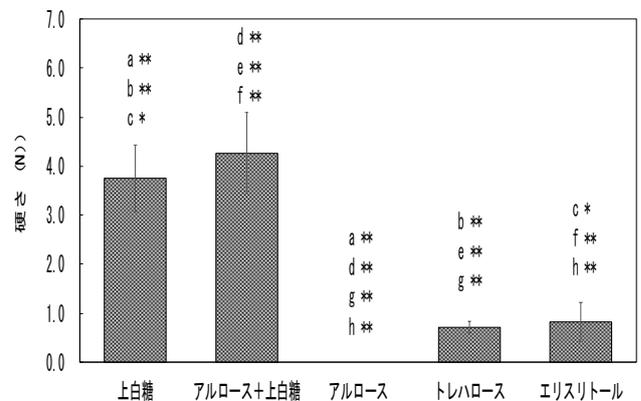


図8 焼きメレンゲの硬さ

英記号間にて有意差を示す ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

たメレンゲでは、トレハロースと比較して硬さ(c), 付着力(f)及び付着性(j)で有意な高値がみられ、エリスリトールと比較すると、付着性でのみ有意な高値(k)が確認された。

これらの結果より、メレンゲにおいて、アルロースは、上白糖や、アルロースと上白糖を併用したメレンゲと同程度の物性であることが示唆された。一方、トレハロースやエリスリトールについては、上白糖やアルロース等の糖と比較すると、メレンゲの硬さや付着力が低く、また付着距離が長いことからメレンゲが変形すると元に戻りにくい性質であることが考えられた。

次に、図7に焼きメレンゲの物性測定結果を示す。アルロースを使用した焼きメレンゲは、キャラメル様で破断点無く、弧を描く上昇曲線となり、焼きメレンゲ特有のサクサク感がなかった(図7)。トレハロースやエリスリトールでは、上白糖やアルロースと上白糖を併用したメレンゲと比較して歪率0~80%における破断荷重が低値であったことから、メレンゲ内部が圧縮の荷重に対して弱い構造を有していることが示唆された(図7)。また、噛み始めの硬さの指標である破断荷重は、歪率が約2%時の上白糖とアルロースと上白糖を併用した焼きメレンゲの硬さにおいて、3.8 N、と4.3 Nと同程度であり、トレハロース0.7 N、エリスリトール0.8 Nと比較して有

意に高値(b, c, e, f)であった(図8)。

これらの結果より、アルロース単体を使用した焼きメレンゲは、焼きメレンゲ特有のサクサク感がなくなるが、上白糖と併用することで、上白糖と似た焼きメレンゲが作製できることが明らかとなった。

3.3 評点法による焼きメレンゲの官能評価

図9に焼きメレンゲの官能検査結果を示す。なお、アルロースを用いた焼きメレンゲについては、前述のとおり他の糖類を使用した焼きメレンゲと物性が明らかに違っていたため、採点法による官能評価からは除外した。上白糖と、アルロースと上白糖を併用した焼きメレンゲの硬さ(図8)は同程度であったが、官能評価時の硬さ(図9)では、アルロースと上白糖を併用した焼きメレンゲの方が硬い評価であった。この差異については、図8では機器測定が噛み始めの硬さを評価しているのに対して、図7における歪率2~15%では、アルロースと上白糖を併用した焼きメレンゲの荷重が200 gf付近を推移しており、上白糖を使用した焼きメレンゲより高値であったことから、アルロースと上白糖を併用した焼きメレンゲは内部が壊れにくく、図9の官能評価では喫食時の焼きメレンゲ全体の硬さを評価したことに起因すると考えられた。

また、上白糖を使用した焼きメレンゲは、アルロー

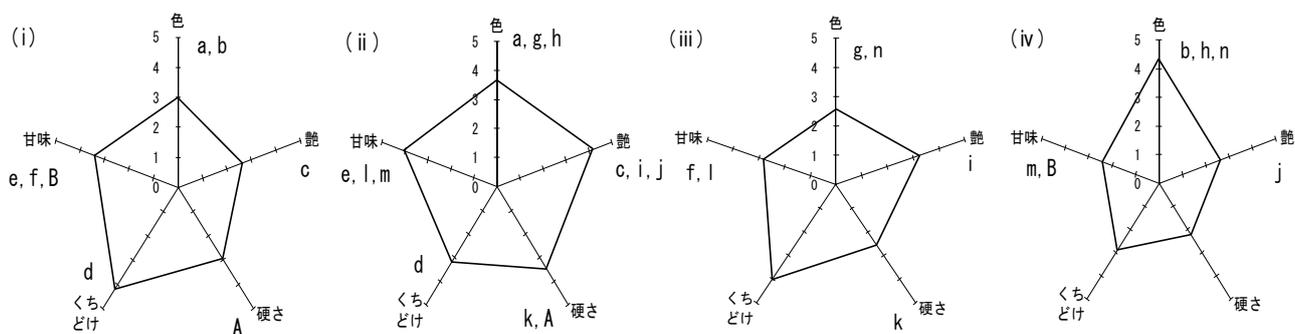


図9 評点法による焼きメレンゲの官能評価

i, 上白糖; ii, アルロース+上白糖; iii, トレハロース; iv, エリスリトール

色, 非常につきすぎ (5点) ~非常に不足 (1点); 艶, 非常にある (5点) ~ない (1点); 硬さ, 非常に硬い (5点) ~非常にやわらかい (1点);

くちどけ, 非常に良い (5点) ~非常に悪い (1点); 甘味, 非常に甘い (5点) ~非常に不足 (1点)

英記号間に有意差を示す. 小文字英記号 (a~n), $p < 0.01$; 大文字英記号 (A, B), $p < 0.05$

スと上白糖を併用した焼きメレンゲに次いで甘味があった (e, f, $p < 0.01$; B, $p < 0.05$). アルロースと上白糖を併用した焼きメレンゲは, 4種類の中で最も艶 (c, i, j, $p < 0.01$) や甘味 (e, l, m, $p < 0.01$) があり, またエリスリトールに次いで色づいていた (a, g, h, $p < 0.01$). エリスリトールを使用した焼きメレンゲは, 4種類の中で最も色づいていた (b, h, n, $p < 0.01$).

上白糖を用いた焼きメレンゲについては, 艶は普通という評価だが, 表面色や硬さ, 甘味も良く, くちどけは非常に良いという高評価を得ている. 被験者からは, 甘味が目立つが美味しく, 食感が一番良いという意見もある. 上白糖が日常的によく使われ, 味に慣れ親しんでいることも高評価の要因と考えられる.

アルロースと上白糖を併用した焼きメレンゲについては, 甘味は少し甘く, 表面色は少しつきすぎているが, 艶は非常にあり, 硬さもくちどけも良いという高評価を得ている. 被験者からは, べたついているという意見があるが, 見た目は一番良く, コクがあり美味しいという意見もあった.

トレハロースを用いた焼きメレンゲについては, 表面色は良く, 艶も少しあり高評価を得ている. 被験者からは, 硬さも良く, くちどけに関してはサクサクしていて良いが, 甘味が少し不足しさっぱりしすぎているという意見もあった. トレハロースは, 生地的水分を保水する効果があるが, 焼きメレンゲの場合は, 水分が少ないため保水性を生かすことができないことが示唆された. 従前の報告どおり, 餅やまんじゅうに使用することで柔らかさと湿度を保ち, でんぷんの老化を抑える⁸⁾ことができる考えられた.

エリスリトールを用いた焼きメレンゲについては, 表面色は非常につきすぎており, 艶 (少しある, ない) や硬さ (少し硬い, 非常にやわらかい) については評価が分かれていた. 被験者からは, ゴツゴツ感があり表面がデコボコしている, くちどけに関してもざらつきが残るなどの意見もある. 甘味は少し不足という評価で, 被験者からは, 冷涼感があり美味しくないと意見が多かったため, 爽やか系のお菓子に使用した方が良いと考えられた. またエリスリトールは, 吸湿性が低く⁹⁾, 焼菓子に使用すると膨らみが悪くなると考えられるため, 上白糖と併用することで食感の改善が示唆される.

3. 4 順位法による焼きメレンゲの官能評価

表1は, 順位法による総合的な嗜好性について, アルロースを含めた5種類の焼きメレンゲについての評価結果を示す. 嗜好性の高い順は, 上白糖, アルロースと上白糖の併用, トレハロース, エリスリトール, アルロースであった. 特に, 上白糖を使用した焼きメレンゲについては, 他の4種類の焼きメレンゲと比較して有意に嗜好性が高く ($p < 0.01$), またアルロースのみ及びエリスリトールを使用した焼きメレンゲは, 他の焼きメレンゲと比較して有意に嗜好性が低い (アルロース, $p < 0.01$; エリスリトール, $p < 0.05$) 結果であった. アルロースと上白糖を併用した焼きメレンゲは, アルロースを使用したことにより, 艶やコクが出て美味しいという意見もあり, 総合的に嗜好性が高い評価を得ている. 今回は焼きメレンゲを作成したが, メイラード反応性や保水性が高い¹⁰⁾アルロースの性質 (コク味の付与, 生地をやわらかくするなど) を生かして,

表1 順位法による総合的な嗜好性評価

サンプル	1位1点 (人)	2位2点 (人)	3位3点 (人)	4位4点 (人)	5位5点 (人)	合計 (点数)	平均 ^{*1} (点数)
上白糖	8	8		1		28 **	1.6
アルロース+上白糖	3	6	8			39 **	2.3
トレハロース	4	3	9	1		41	2.4
エリスリトール	2			11	4	66 *	3.9
アルロース				4	13	81	4.8

*1, 一人当たりの平均値; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

マドレーヌやプリンに使用することで、上白糖とは違った味質のものが作製できると示唆される。トレハロースやエリスリトールにおいても、同様に、他の糖との併用など、それぞれの糖類の特徴を生かしたお菓子に使用することで、品質の向上を図ることができる可能性が考えられた。

4 結言

スポンジケーキを試作し、調理工程の違いによるアルロースの量的な変化を調べた。共立て法と比較すると別立て法が、焼成前後のアルロース減少率が約2%少なく、どちらの調理条件でも8割以上は残存していることがわかった。更に、共立て法より別立て法が焼成後のアルロース含量が有意に減少していた。このことから、調理条件を工夫することでアルロースの規定量を維持できることが示された。

アルロースと上白糖を併用した焼きメレンゲは、アルロースや上白糖をそれぞれ単体で使用したものと比較して、同程度の硬さであった。更に、官能評価では、艶があり硬さもくちどけも良いと高評価を得ることができた。アルロースの特徴を生かしたお菓子に使用することで、上白糖よりもコクがあり、味質の良いものが作製できると考えられた。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、貴重なご助言、ご指導を賜りました、産業技術センター 松原保仁 氏、研究補助に携わった 久保和子 氏に心より感謝いたします。また、官能評価にご協力いただいた方々に深謝いたします。

参考文献

- 1) 豊田行康, 森 茂彰, 梅村展子, 二村由里子, 井上博貴, 秦 毅司, 三輪一智, 村尾孝児, 西山 成, 徳田雅明: 糖尿病ラットへのグルコース負荷試験における D-プシコースの血糖低下作用, 薬理と治療, **38**, 261-269, (2010).
- 2) Matsuo, T., Baba, Y., Hashiguchi, M., Takeshita, K., Izumori, K. and Suzuki, H.: Less body fat accumulation with D-psicose diet versus D-fructose diet, *Journal of clinical biochemistry and nutrition*, **30**, 55-65, (2001).
- 3) 消費者庁: 機能性表示食品の検索, <https://www.fld.caa.go.jp/caaks/cssc01/> (検索日: 2024. 3. 19).
- 4) ムラヨシマサユキ: 家庭のオープンで作る スポンジ生地成美堂出版, pp. 9 (2017).
- 5) O' Charoen, S., Hayakawa, S., Matsumoto, Y. and Ogawa, .: Effect of D-psicose used as sucrose replacer on the characteristics of meringue, *Journal of food science*, **79**, E2463-E2469, (2014) .
- 6) Miyoshi, M., Kimura, I., Inazu, T. and Izumori, K.: High Sensitivity Analysis and Food Processing Stability of Rare Sugars, *Food Science and Technology Research*, **25**, 891-901, (2019)
- 7) Oshima, H., Ozaki, Y., Kitakubo, Y. and Hayakawa, S.: Decrease in the D-psicose content of processed foods fortified with a rare sugar, *Food Science and Technology Research*, **20**, 415-421 (2014).
- 8) 福田恵温: トレハロースの開発とその応用, 吉備国際大学研究紀要, **29**, 41-49 (2019)
- 9) 奥恒行: 低エネルギー糖質甘味料・エリスリトールの体内代謝と食品への応用, 栄養学雑誌, **56**, 189-198 (1998).
- 10) Pocan, P., Ilhan, E. and Ozttop, M. H: Effect of d-psicose substitution on gelatin based soft candies, A TD-NMR study, *Magnetic Resonance in Chemistry*, **57**, 661-673 (2019).

モバイルロボットによる開き戸の開閉のための力制御*

福本 靖彦, 神内 杜夫, 坂東 慎之介, 竹中 慎, 小林 宏明

本稿では協働ロボットを自律移動ロボットに搭載したロボット（モバイルマニピュレータ, モバイルロボット）で開き戸を開閉するための新たな制御則を提案する。提案手法は、手先に受ける力を開き戸の面の法線方向と、協働ロボットの原点を中心とした円の径方向に斜交分解して考えることが特徴であり、これによりロボットの手先に作用する力を効率的に解消しようとするものである。検証実験として、開き戸の押し開け実験を行い、実際にロボットの手先に作用する力が小さくなることを確認した。また提案手法を開き戸の引き閉じ、引き開け、押し閉じに適用する実験も行い、これらの操作が可能であることも確認した。

1 緒言

本県では、人口減少や少子高齢化が全国に先行して進行し、人手不足が大きな課題となっている^{2, 3)}。したがって、今後も従来並みのものづくりを維持するためにはこれまで人間が行っていた作業をロボット等で自動化することが必要である。

これまでロボット化があまり行われていなかった作業の例として、移動を伴う作業が挙げられる。これを実現できるロボットとして、モバイルロボットがある。モバイルロボットは自律移動ロボット（Autonomous Mobile Robot）にアーム型ロボットとして協働ロボット（Collaborative Robot, Cobot）を搭載したものであり、近年、両ロボットが商品化されて市場に浸透してきた中で、柵を設けずに利用できるという特徴を生かした新たな活用法としてメーカー各社が提案しているものである^{4~6)}。実際に実用化事例^{6~8)}も出始めており、今後、有望な選択肢になると考えられている^{6, 9)}。なお、ヒューマノイドも移動を伴う作業を実現できるロボットであり、令和5年には米国で商用ヒューマノイドの大量生産のための工場建設が始まり^{10, 11)}、Amazonでの試験導入が始まる^{10, 12)}など、産業用での実用化の兆しが出てきたところであるが、現時点での選択としては、モバイルロボットの方がより現実的と思われる。

モバイルロボットを工場内で利用するにあたり、工場内で自動ドアではない扉を超えて移動しなければならない場合や、扉のついた倉庫などから物を出す場合も想定されるが、このような扉の操作はロボットにとっては複雑な動作である¹³⁾。そこで、我々はモバイルロボットによるドア、特に開き戸の開閉動作について研究を行っている。開き戸の操作は、(1)開き戸の前に移動する、(2)開き戸のノブを把持する、(3)ノブをひねる、(4)ノブを押して／引いてドアを開く／閉じる、という動作に分割することができる。このうち、(4)は、アームロボットと移動ロボットの協調動作が必要であるため難易度が高く、本研究ではこの動作を実現する方法について検討を行った（図1）。一方、(1)は地図上にあらかじめ位置を登録しておくことで可能であり、(2)は三次元ビ

ジョンセンサ等でノブを認識するか、ドアノブの付近に二次元マーカーなどを貼り付けて単眼カメラで位置計測することで可能であり、(3)は移動ロボットを停止した状態でアームが力制御を行うことで可能である。なお、引き戸は移動ロボットが停止した状態で開閉が可能なものも多く、その場合、アームロボットが力制御を行うことで容易に実現可能である。

我々は前年度にOttらの提案した手法¹⁴⁾を応用し、開き戸の押し開けと引き開けを実現していた¹⁵⁾。ただし、押し開けにおいて、手先に作用する力が過大となり、ロボットが停止してしまうケースがあった。そこで、本研究では、手先に作用する力を小さくするために手法の改善を行った。

Ottらの手法や我々の提案手法では、移動ロボットは単純な直進動作等によりドア枠を通過する経路を走行し、アームロボットは手先に作用する力に応じて手先を適切な方向に動かす受動的な振る舞いを行う。アームロボットの制御について、Ottらの手法や我々の前年度の研究ではロボットの座標系を円筒座標系で考えて、ロボットの手先の位置を径方向はロボットの座標系原点から一定の位置に保つように制御し、周方向は外力に押された方向に動くように制御していた。これに対して本研究では、外力をドアの面の法線方向と、ロボットの円筒座標系の周方向に斜交分解して考え、そのロボットの周方向成分によりロボットの手先位置を制御することとした。前年度と同じロボットとドアを用いた評価実験において、提案手法を用いると前年度の手法よりも手先に作用する力を小さくすることができ、ドアを100%開けられるようになることを示す。また、提案手法は押し開け以外にも、引き開け、押し閉じ、引き閉じにも応用可能であることを示す。



図1 モバイルロボットによるドアの押し開け

* 本稿は Journal of Robotics and Mechatronics 誌に掲載された論文¹⁾を和訳再編集したものである。

本稿では2章でOttらの先行研究と、我々の前年度の手法を説明し、3章で提案手法を示す。4章で実験結果を示し、5章でまとめを述べる。

2 先行研究

先行研究として、我々の手法のベースとなる手法であるOttらの手法と、我々の先行研究の手法を説明する。

2.1 Ottらの手法¹⁴⁾

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau_m + \tau_{ext} \quad (1)$$

とする。なお、 q はアームロボットの関節の角度であり、 $M(q)$ 、 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 、 $g(q)$ はそれぞれ慣性項、遠心力とコリオリ力に関する項、重力項である。 τ_m は関節のアクチュエータが発生するトルクであり、 τ_{ext} は手先に作用する外力の等価トルクである。

Ottらの手法は、移動ロボットをドアの前に停止させ、アームロボットがドアノブを把持し、ドアノブをひねり、アームロボットの関節に以下のトルクを発生させた状態で、移動ロボットを前進させるものである。

$$\tau_m = g(q) - \frac{\partial V(q)}{\partial q}, \quad (2)$$

$$V(q) = \frac{1}{2}k_r(p_r - r_0)^2 + \frac{1}{2}k_z(p_z - z_0). \quad (3)$$

なお、 p_r と p_z は円筒座標系で考えたときのロボットの先端位置の径方向成分と高さ方向成分である。 k_r 、 k_z は剛性係数を表すパラメータであり、設計者が適切な値を決める必要がある。 r_0 と z_0 は剛性の基準位置を表すもので、最初にロボットがドアノブを把持した際の p_r と p_z の値をそれぞれ設定する。座標系の原点は移動ロボット上に固定しており、Ottらはその位置を移動ロボットの前向きとするを推奨している。

このように関節トルクを発生させると、円筒座標系の径方向と高さ方向はロボットの先端の位置が初期位置からほぼ一定となり、その他の方向は外力にしたがって自由に動作するようになる。Ottらのドア開け動作の概念図を図2に示す。実線の円は半径 r_0 の円で、ロボットの手先はほぼこの円上にあると考えられる。破線の円はドアノブが取りうる位置である。ロボットがドアノブを把持しているため、二つの円の交点付近にロボットの手先とドアノブは位置することになる。図2(a)の状態から移動ロボットが前進すると、図2(b)のように交点の位置が移動し、ドアが押し開けられる。

この手法を一般的に産業界で用いられているロボットに実装しようとすると、以下の問題がある。

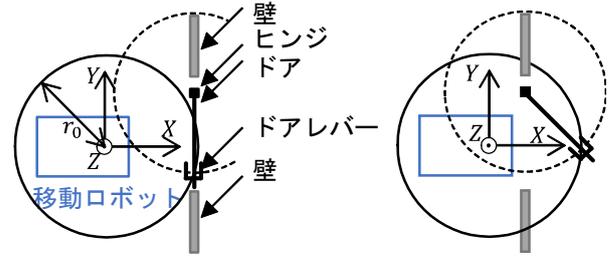
- ・関節トルクを指令値として動作するアームロボットはKUKA社のLBR iiwaや、Franka Robotics社のFranka Research 3ぐらいであり¹⁶⁾、一般的ではない。
- ・ $g(q)$ を計算するために動力学パラメータ（リンクの重量や重心位置など）が必要であるが、一般に公開されているデータではない。

2.2 我々の先行研究の手法¹⁵⁾

Ottらの手法と同様の特性を実現するため、以下のインピーダンス特性をアドミタンス制御（位置制御ベースインピーダンス制御）により実装することとした。

$$\hat{M}\dot{v} + \hat{C}v + \hat{R}(p - p_0) = f_{ext}. \quad (4)$$

ここで、 $p \in R^6$ は直交座標系での先端位置、 $v \in R^6$ は



(a) 初期状態 (b) 押し開け動作中

図2 Ottらの手法の概念図

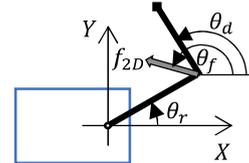


図3 角度の定義

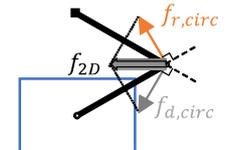


図4 力の斜交分解

表1 実験に用いた装置

装置	型番 (メーカー)
移動ロボット	MIR100 (Mobile Industrial Robots)
アームロボット	UR10 (Universal Robots)
DC/ACコンバータ	FI-S1503A-24VDC (未来舎)
カセンサ	HEX-H (OptoForce/OnRobot)
グリッパ	2F-85 (Robotiq)

先端速度、 $f_{ext} = [f_x, f_y, f_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z]^T \in R^6$ は手先に作用する外力である。 $\hat{M} \in R^{6 \times 6}$ と $\hat{C} \in R^{6 \times 6}$ は設計者の決定するパラメータでそれぞれ慣性係数、粘性係数である。 $\hat{R} \in R^{6 \times 6}$ は剛性係数、 $p_0 \in R^6$ は剛性の基準位置であり、

$$\hat{R} = \text{diag}(k_r, k_r, k_z, 0, 0, 0), \quad (5)$$

$$p_0 = [r_0 \cos(\theta), r_0 \sin(\theta), z_0, 0, 0, 0]^T \quad (6)$$

である。

式(4)のインピーダンス特性とOttらの手法のインピーダンス特性を比べると、慣性項と粘性項の値が異なる。しかし、円筒座標系の径方向と高さ方向は先端の位置が初期位置からほぼ一定となり、その他の方向は外力にしたがって自由に動作するという特性は同様に実現される。

3 提案手法

提案手法は、我々の先行研究の外力項を少し修正して

$$\hat{M}\dot{v} + \hat{C}v + \hat{R}(p - p_0) = f_u, \quad (7)$$

$$f_u = \begin{bmatrix} -a\|f_{2D}\| \sin \theta_r \\ a\|f_{2D}\| \cos \theta_r \\ f_z \\ 0 \\ 0 \\ \tau_z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$a = \begin{cases} -a_{lim}, & \text{if } \frac{\cos(\theta_d - \theta_f)}{\sin(\theta_d - \theta_r)} < -a_{lim} \\ \frac{\cos(\theta_d - \theta_f)}{\sin(\theta_d - \theta_r)}, & \text{if } \left| \frac{\cos(\theta_d - \theta_f)}{\sin(\theta_d - \theta_r)} \right| \leq a_{lim} \\ a_{lim}, & \text{if } a_{lim} < \frac{\cos(\theta_d - \theta_f)}{\sin(\theta_d - \theta_r)} \end{cases} \quad (9)$$

$$f_{2D} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix}, \quad (10)$$

としたものである。なお、 $\theta_r, \theta_d, \theta_f$ は水平面内で見たロボットの手先の方向、ドアの角度、力 f_{2D} の向きであり、**図3**のように定めたものである。 a_{lim} はパラメータであり、設計者が適切な値を設定する必要がある。

提案手法のキーとなるアイデアは、外力をそのまま用いるのではなく、**図4**に示すように、外力の水平面内の成分 f_{2D} をロボットの手先の方向に垂直な成分 $f_{r,circ}$ と、ドアの面に垂直な成分 $f_{d,circ}$ に斜交分解し、 $f_{r,circ}$ だけを制御に用いるというものである。

$f_{r,circ}$ がロボットの手先に作用すると、ロボットは腕を回転させて力を受け流す。一方、 $f_{d,circ}$ がロボットの手先に作用すると、この反作用力 $-f_{d,circ}$ がドアに作用し、ドアが開閉動作を行って受け流す。すなわち、 $f_{d,circ}$ はロボットが何もしなくてもドアにより受け流される成分であるので、ロボットは無視しても良いだろうというのが提案手法の考え方である。

ただし、 $\theta_d - \theta_r = 0, \pi$ のときには $f_{r,circ}$ は値が発散するため、提案手法では**式(9)**により $\|f_{2D}\|$ の a_{lim} 倍をリミットとしてクリッピング処理を行った。 a が**式(9)**の2行目の値を取るとき、 f_u のXY成分は $f_{r,circ}$ に一致する。

4 実験

提案手法の有効性を確認するために二つの実験を行った。一つは、ドアの押し開け動作において先行研究の手法との比較実験を行ったものである。先行研究の手法ではドアの押し開けに失敗することが多かったが、これが改善されたかどうかの確認を行った。もう一つは、先行研究の手法をその他三つのドア操作、すなわち引き開け、押し閉じ、引き閉じにも適用し、これらが実現できるかどうかを確認したものである。

4.1 押し開けにおける比較実験

我々の先行研究では、押し開け動作において、動作途中で手先に作用する力が大きくなりロボットが干渉を検知したり、力センサが定格荷重を超える力を検知したりしてロボットが停止する場合があった。提案手法でこれが解消したかどうかを確認する実験を行った。

4.1.1 実験装置

表1に示す機器を用いてモバイルロボットを構築した。UR10は一般的なティーチングペンダントを用いた教示やダイレクトティーチングも可能であるが、オープン化も積極的に行われており、様々な命令が利用可能であり、8 ms 周期での移動命令を与えることもできるので、本研究の提案手法のようなアドミタンス制御も実装可能である。実装方法の詳細は文献[15]を参照されたい。

なおUR10はやや古いモデルであり、同社の協働ロボットであればより新しいモデルであるeシリーズを選ぶと、MiR100との接続が良い。また同社の協働ロボッ

トには、モバイルロボット構築を想定して小型なコントローラでDC電源駆動としたモデルも存在し^[17,18]、これを用いればDC/ACコンバータを搭載する必要がない。また、カンタム・ウシカタ社ではUniversal Robots社の協働ロボットとMobile Industrial Robots社の自律移動ロボットを組み合わせてモバイルロボットとして構築済みのものも販売している^[19]。

協働ロボットは自律移動ロボットのほぼ中央に配置し、座標系の原点はアームロボットの根本から前方に200 mm ずらした位置とした。アームロボットの座標系は、**図2**と同様に進行方向をX方向、鉛直方向上向きをZ方向とした。Y方向は座標系が右手系になる方向とした。ドアの幅は約900 mm である。ドアノブはレバタイプで、ドアのラッチ部は粘着テープで押さえて無効化し、ドアノブをひねる動作を考慮しなくて良いようにした。

実験は、ドアの手前にモバイルマニピュレータを停止させ、アームロボットがドアノブを把持した状態を初期状態とした。モバイルロボットの初期位置はあらかじめオペレータが決定した位置を記録しておき、各試行の開始時にPTP制御によりその位置へ停止させて位置の初期化を行った。なお、MiR100の位置決め精度は(高精度な位置決めを行うためのマーカーを設置しない場合は)±50 mm である。角度の精度は公開されていないが±5°程度と思われる。アームロボットのドアノブ把持は、実験のたびにオペレータがジョグ操作することで実施した。

以上の初期状態においてアームロボットのアドミタンス制御を開始し、続いて移動ロボットを直進させた。モバイルロボットの走行速度は0.1 m/s に設定し、直進する移動量は今回の初期位置からドア枠を超えられる距離として1.5 m とした。

アドミタンス制御における剛性パラメータは0tt らの利用した1000.0 N/mを用いた。慣性パラメータMと粘性パラメータCは、対角行列とし、ロボットの旋回や手先の向きが軽く動作し、かつ不安定にならない値を試行錯誤で調整した。その結果、慣性パラメータの並進成分は0.1 N/(m/s²)、回転成分は0.001 Nm/(rad/s²)とした。粘性パラメータの並進成分は50 N/(m/s)、回転成分は1.0 Nm/(rad/s)とした。 a_{lim} は2とした。

以上の条件で、提案手法と、我々の先行研究の手法それぞれ10回の試行を行い、成否を確認するとともに、動作中に手先に作用した力を記録した。

4.1.2 実験結果

まず成功率を**表2**に示す。提案手法ではすべての試行で成功したが、先行研究の手法ではほとんどが失敗であった。

提案手法において成功したときの様子を**図5**に、先行研究の手法において失敗したときの様子を**図6**に示す。**図5**では自律移動ロボットが前進するにつれて、協働ロボットが腕を回転させてうまくドアを押し開けていることが分かる。一方、先行研究の手法では途中でロボットが停止している。このとき、手先に作用する力が力センサの定格を超えてエラーを発生したため、ロボットが停止したものである。

続いて、試行中に手先に作用した力のピーク値を箱ひ

表2 成功率

提案手法	先行研究の手法
10/10	2/10



図5 提案手法によるドアの押し開け成功例

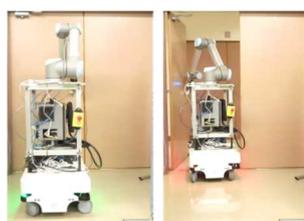


図6 先行研究の手法によるドアの押し開け失敗例

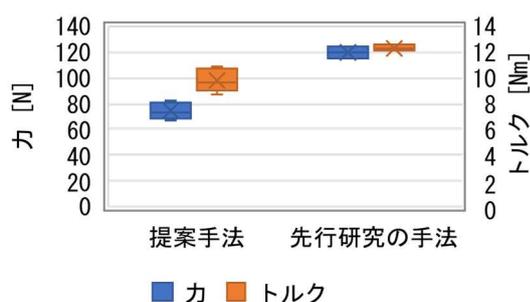


図7 力のピーク値

げ図でプロットしたものを図7に示す。なお、ここでは動作に失敗したデータは用いなかった。したがって、先行研究の手法のデータは実際よりも低い値で分布していると考えられるが、それでも、提案手法の方が力もトルクも小さく、力は平均37.9%、トルクは平均20.7%小さかった。

以上で、提案手法は成功率と、手先に作用する力において、我々の先行研究の手法を上回る結果が確認された。なお、文献1)では更に細かい分析も行っているのので、参照されたい。

4.2 引き開け、押し閉じ、および引き閉じ実験

提案手法により、押し開け動作だけではなく、押し閉じ、引き開けおよび引き閉じ動作を実現可能であることを実験で確認した。実験系とパラメータは4.1節で示したものと同一である。

実験の結果、問題なく引き閉じ、引き開けおよび押し閉じ動作が実現できることが確認された。図8～10に動作の様子を示す。

5 結言

本研究では、モバイルロボットにより、開き戸の開閉、



図8 提案手法によるドアの引き開け



図9 提案手法によるドアの押し閉じ



図10 提案手法によるドアの引き閉じ

特にドアを大きく開く／閉じる工程を行うための新たな制御則を開発した。これはOttらの手法をベースとした制御則であり、特に外力をそのまま制御に用いるのではなく、外力をドアの面の法線方向とロボットの座標系を円筒座標系で考えたときの周方向に斜交分解し、後者の成分のみを制御に用いるという点が特徴である。この制御則により、ロボットの手先に作用する力は低減され、100%の成功率で開き戸の押し開け通過動作を実現することができた。また同手法は開き戸の引き開け、押し閉じ、引き閉じにも応用可能であることを示した。

なお、提案手法にはパラメータがあり、設計者が適切に設定する必要がある。本研究ではこれを試行錯誤により設定したが、この設計法を検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) Y. Fukumoto, M. Jinnai, S. Bando, M. Takenaka and H. Kobayashi: Door Opening and Closing Considering Forces Using a Mobile Manipulator with an Admittance Controlled Arm, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 35, No. 6, pp. 1573-1582 (2023).
- 2) 香川県：みんなでつくるせとうち田園都市・香川実現計画～海と田園と都市の魅力があふれる香川をめざして～ (2021).
- 3) 香川県：「人生100年時代のフロンティア県・香川」実現計画 (2023).
- 4) 古賀達也, 井尻善久: IoTの側面から見た, モバイルロボット・モバイルマニピュレータの現状と今後の展望, 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 8,

- pp. 707-710 (2019).
- 5) 日立製作所が自律移動型の協働ロボットに参入、SLAM 生かしガイドなしで複数箇所巡回し軽作業, 日経ロボティクス, No. 17, pp. 11-13 (2018).
 - 6) 自走し始めたロボットアーム, 活躍の場は工場の外へ 人との協働空間でピッキングと搬送を 1 台でこなす, 日経ロボティクス, No. 41, pp. 5-13 (2018).
 - 7) 自律移動し始めた双腕ロボ, 工場内を自ら回り作業 日本ピストンリングが部品搬送とピッキングに導入, 日経ロボティクス, No. 16, pp. 18-23 (2016).
 - 8) オムロン: 24 時間稼働で設備使用効率を 10%向上させたモバイルマニピュレータ 導入事例:TDK 株式会社様 稲倉工場 東サイト, <https://www.fa.omron.co.jp/product/robotics/lineup/mobile/video/application18/> (検索日: 2024. 3. 11)
 - 9) International Federation of Robotics: Top 5 Robot Trends 2024, <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/top-5-robot-trends-2024> (2024) (検索日: 2024. 3. 11)
 - 10) Year of the Humanoid: Humanoids from Agility Robotics and seven other companies vie for jobs, IEEE Spectrum, Vol. 61, Issue 01, pp. 44-48 (2024).
 - 11) 2 足歩行ロボの Agility Robotics 社, 米国内に量産工場を開設へ, 日経ロボティクス, No. 100, p. 39 (2023).
 - 12) Amazon 社, Agility Robotics の 2 足歩行ロボをテスト導入, 日経ロボティクス, No. 101, p. 43 (2023).
 - 13) 鍋島厚太: ロボットフレンドリーな物理環境, 日経ロボティクス, No. 99, pp. 18-25 (2023).
 - 14) C. Ott, B. Bäuml, C. Borst and Hirzinger: Autonomous Opening of a Door with a Mobile Manipulator: A Case Study, IFAC Proceedings Volumes, Vol. 40, No. 15, pp. 349-354 (2007).
 - 15) 福本靖彦, 神内杜夫, 坂東慎之介, 竹中慎, 小林宏明, 長谷見健太郎, 高原茂幸: 協働ロボットと自律移動ロボットを組み合わせて構築したモバイルマニピュレータによるドア開け動作の検証, 香川県産業技術センター研究報告, No. 23, pp. 9-12 (2023).
 - 16) 山野辺夏樹: マニピュレーションにおける力制御の研究動向, 計測と制御, Vol. 56, No. 10, pp. 741-746 (2017).
 - 17) Universal Robots : <https://www.universal-robots.com/ja/ユニバーサルロボットについて/ニュースセンター/agv> や自律型モバイルロボット向け-dc バッテリー駆動の協働ロボットを発表 / (検索日: 2024. 3. 11)
 - 18) Universal Robots が電池駆動向けに DC 入力ロボ、同じ Teradyne 傘下のデンマーク MiR の AGV に搭載, 日経ロボティクス, No. 54, p. 3 (2019).
 - 19) カンタム・ウシカタ: 自律走行型協働ロボット オートモバイルロボット Actibo(アクティボ): <https://www.kantum.co.jp/product/Autonomous-mobile-robot/Autonomous-mobile-cobots/actibo> (検索日: 2024. 3. 11)

モバイルロボットによる複数台マシンテンディングにおける 工作機械の稼働率計算

福本 靖彦, 竹中 慎, 神内 杜夫

協働ロボットを自律移動ロボットに搭載したものであるモバイルロボットと呼ばれるロボットがある。モバイルロボットの想定用途の一つに複数工作機械のマシンテンディング作業があるが、条件によっては工作機械の稼働率が低くなってしまう可能性があるため、モバイルロボットの導入前に稼働率の事前検討を行うことが重要である。そこで本研究では、シミュレーションを行ったデータから稼働率の計算を行うシミュレータの開発を行った。数値実験により、実際に稼働率を計算できることを確認するとともに、条件によっては工作機械の稼働率が低くなることなどが確認され、事前の稼働率の検討が重要であることが示された。また工作機械の加工時間等のばらつきが小さい場合には、シミュレーションを行わずに精度よく稼働率を試算できること等も分かった。

1 緒言

本県では、人口減少や少子高齢化が全国に先行して進行し、地域の活力維持が大きな課題となっている^{1, 2)}。令和4年度に県が県内事業者を対象に実施したアンケートでは、回答のあった532社のうち44.0%の事業者が現在の経営上の課題として「人手が不足している・確保できない」ということを挙げていた。現在、人間が行っている作業をロボット化する必要性が高まっている状況であり、これまでロボット化が難しかった作業もロボット化していく必要がある。

アーム型ロボットの代表的な用途の一つに、マシンテンディング作業がある。これは工作機械へのワークの脱着作業を行うものであるが、工作機械がワークを加工している間、ロボットはただ加工が終わるのを待つ必要がある。そこで、すべての工作機械にそれぞれアーム型ロボットを設置する代わりに、アーム型ロボットと移動ロボットを組み合わせたロボットであるモバイルマニピュレータを用意して、一台のモバイルマニピュレータが複数台の工作機械のワークの脱着を行うようにするという方法が提案されている^{3, 4)}。これにより、全体としてロボット化のコストを低く抑えることができ、これまでコストの問題で導入が難しかった現場でもロボット化が可能となる可能性がある。

このようなモバイルマニピュレータとして、自律移動ロボット (Autonomous Mobile Robot) に協働ロボット (Collaborative Robot, Cobot) を搭載したタイプのロボットであるモバイルロボットが有望である^{5, 6)}。まず、



図1 モバイルロボット

自律移動ロボットも協働ロボットも人間と隔離せずに利用できるロボットであるため、現在人間が使っている通路や作業スペースをそのまま利用できるのが導入しやすい。また産業界で既に実績のあるロボットであり信頼性もある。更に、今後10年で低価格化も進むと見られており^{7, 8)}、今後広く普及していくと予想されている⁹⁾。

ただし、モバイルロボットによる複数工作機械のマシンテンディング作業にも課題がある。例えば、2台の工作機械の加工が同時に完了すると、モバイルロボットが一方の工作機械のワーク脱着をしている間、もう一方の工作機械はモバイルロボットを待つ状況となり、工作機械の稼働率を落としてしまうというデメリットがある。したがって、自社の工場にモバイルロボットを導入しようとする際には、工作機械の稼働率がどれくらいになるかを事前に検討したり、逆に、一定の稼働率を越えられるようにモバイルロボットが担当する工作機械の台数を決定したりするような工程設計が必要となる。しかし、このような検討を行うためには、稼働率を事前に計算する必要があるが、いつ工作機械からの呼び出しが発生するかを考慮しての計算は複雑であり一般解を得ることは容易ではない。

そこで本研究では、シミュレータを開発し、シミュレータ上でモバイルロボットや工作機械の振る舞いをシミュレートして得られたログデータから最終的な稼働率を計算することとした。なお、限られた条件を満たす場合にはシミュレーションを行わずに稼働率を推定できる場合もあったので、これについても説明する。

2章ではマシンテンディング作業について説明する。3章では理論的な解析結果を示し、シミュレーションを行わずに分かることを説明する。4章では構築したシミュレータの実装の概要を説明する。5章では数値実験により、シミュレータを用いた稼働率計算が実際に可能であること、パラメータによって稼働率が複雑に変動すること、3章の理論解析の結果が数値例で当てはまっていることを確認する。6章でまとめを述べる。

2 モバイルロボットによるマシンテンディング

本稿では、加工前のワークを工作機械のチャックにセットする作業と、加工済みのワークを工作機械から取り出す作業を合わせてマシンテンディング作業と呼ぶ。なお、ローダーやアンローダーが取り付けられている工作機械のローダーへのワークの供給や、アンローダーからのワークの取り出しについては、マシンテンディング作業とは見なさず、搬送作業の一部と見なすこととする。

本章ではモバイルロボットによる複数台の工作機械のマシンテンディング作業の性質を説明する。続いて、本研究の問題設定を説明する。

2. 1 マシンテンディング作業の性質

複数工作機械のマシンテンディング作業は、小さな自動化タスクが様々な場所に点在するタスクであり、モバイルロボットを適用するのに向いている作業であると言える¹⁰⁾。ただし、時間の制約が強いという特徴がある。

例えばモバイルロボットを用いて搬送作業を自動化した事例^{5, 11, 12)}があるが、これらの搬送元や搬送先にはストッカーなどのバッファが存在する。したがって搬送元のバッファが満杯になる前に搬送を開始し、搬送先のバッファが空になる前に搬送を終えれば、基本的に価値は一定である。そして搬送元のバッファが満杯になった場合や搬送先のバッファが空になった場合には、それぞれ搬送元や搬送先の作業が停止して利益が生み出せない時間ができてしまい、価値が下がる。ここで重要なのは、十分なバッファを用意していれば、モバイルロボットの到着が多少ばらつく場合でも価値を落とすことなく運用が可能であるということである。このようにシステムを組むことができれば、費用対効果の計算は比較的行きやすい。

一方、マシンテンディング作業の場合、工作機械の加工が完了するとすぐに工作機械が止まってしまい、その間は利益を生み出せない。すなわち価値が一定で保たれる期間がない。したがってモバイルロボットの到着するタイミングが工作機械の稼働率に直結し、費用対効果の計算が複雑になる。

2. 2 本研究におけるマシンテンディングの条件

本研究におけるマシンテンディング作業では、モバイルロボットは1台の場合のみを想定する。工作機械は n_m 台あるとし、1から順に番号が振られているものとする。

工作機械の加工が完了したタイミングで工作機械がモバイルロボットを呼びだすものとする。なお、加工が完了するタイミングを予測してモバイルロボットが工作機械に移動を開始すれば、より効率的な運用が可能であると考えられるが、本研究では実装がよりシンプルになる上記の問題設定で検討を行うものとした。なお、加工が完了するタイミングを予測してモバイルロボットの移動を開始する形に問題設定を修正しても、考え方については同様の考え方で扱えるものと思われる。本研究ではモバイルロボットのスケジューラは最も単純なスケジューラであるFIFO (First In, First Out) を用いることとし、呼び出しが発生した順番に処理するものとする。なお、工作機械にほとんど待ち時間が発生しないように設計するならば、スケジューラの自由度はほとん

どなく、どのようなスケジューラであっても性能差はあまりないと考えられる。同時に複数の工作機械からの呼び出しが発生した場合は、工作機械の番号の若い工作機械からの呼び出しを先にFIFOに入れることとする。また、FIFOに複数の呼び出しがある場合や、モバイルロボットが移動中あるいはワークの脱着中に呼び出しが生じた場合を、同時呼び出しが発生していると呼ぶこととする。

時刻 0 sではすべての工作機械からの呼び出しが同時に発生するものとする。また、時刻 0 sにおけるモバイルロボットの位置は工作機械 n_m の前であるとする。

また、検討を行う時間の最終時刻については、加工途中であっても良いとする。稼働率の計算においても最終時刻までの稼働状況により計算するものとする。

続いて、本稿で用いる文字を定義する。

$t_t(i, j)$: モバイルロボットが工作機械 i から工作機械 j へ移動するのに要する時間 (単位: [s])。なお $t_t(0, 1) \equiv t_t(n_m, 1)$ とする。

$t_e(i)$: モバイルロボットが工作機械 i でワーク交換に要する時間 (単位: [s])。 $i = 1, \dots, n_m$ 。

$t_m(i)$: 工作機械 i がワークを一つ加工するのに要する時間 (単位: [s])。 $i = 1, \dots, n_m$ 。

3 稼働率に関する理論的な検討

稼働率を計算するにあたり、各工作機械の動作が周期的であると考えやすくなる。そこで、以下の停止時間を導入する。モバイルロボットが工作機械 j から工作機械 i へ移動し、工作機械 i のワークを脱着した後に、工作機械に $t_w(j, i)$ [s]の停止時間を持たせてから加工を開始するものとする。なお、 $t_w(0, 1) \equiv t_w(n_m, 1)$ とする。また、上記の停止時間は工作機械にのみ与えるものであり、モバイルロボットは停止時間を持たずに、ワーク脱着が終わると即座に次の工作機械に向けて移動可能とする。このとき、停止時間を適切に設定すればすべての工作機械で加工サイクルを一定にすることができて、容易に稼働率を計算することができる。

定理1 (停止時間により定周期化した場合の稼働率)

ある正の数 T が存在して、すべての $i \in \{1, \dots, n_m\}$ について以下の二つの条件

$$t_t(i-1, i) + t_e(i) + t_w(i-1, i) + t_m(i) = T \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{n_m} (t_t(i-1, i) + t_e(i)) \leq T \quad (2)$$

がともに成り立つならば、時刻 T [s]以降の稼働率 $r(i)$ は

$$r(i) = \frac{t_m(i)}{T} \quad (3)$$

である。

この直感的証明を付録Aに示す。

ここでの停止時間は実際に工作機械を停止しても良いが、稼働率を見積もるためだけに仮想的に設定しても良い。ただし後者の場合は見積もった稼働率と実際の稼働率は一般には一致せず、概算値としての意味しか持たない。なお、実際には停止を行わない場合と、実際に停

止を行う場合で、どちらがより稼働率が高くなるかは明らかではない。

またモバイルロボットが工作機械を回る順番は FIFO (スケジューラ) が決めるが、式(1)と式(2)ではモバイルロボットが工作機械の番号が若い順に回ることを想定しているように見える。これは今回のスケジューラの設定において定理1の仮定を満たす場合には、結果的にそのような経路となるためである。一般に経路によって移動時間が異なるので、ナンバリングが変わると結果として得られる稼働率の値も変動することに注意が必要である(図2)。

ここで、稼働率の上界について考える。工作機械*i*の稼働率*r(i)*は

$$r(i) \leq \frac{t_m(i)}{t_m(i) + \min_{(j \neq i) \wedge (j \in \{1, \dots, n_{mt}\})} t_t(j, i) + t_e(i)} \equiv r_{max}(i)$$

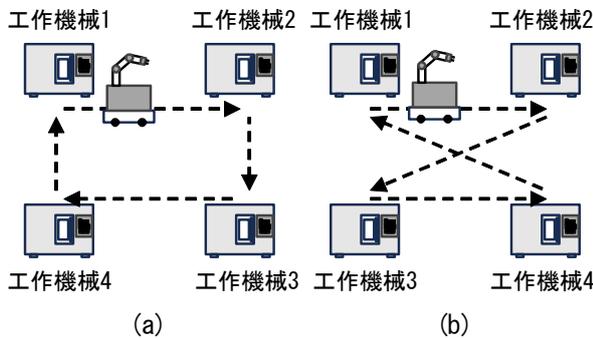


図2 工作機械のナンバリングを変えると移動経路が変わり、移動時間が変わる

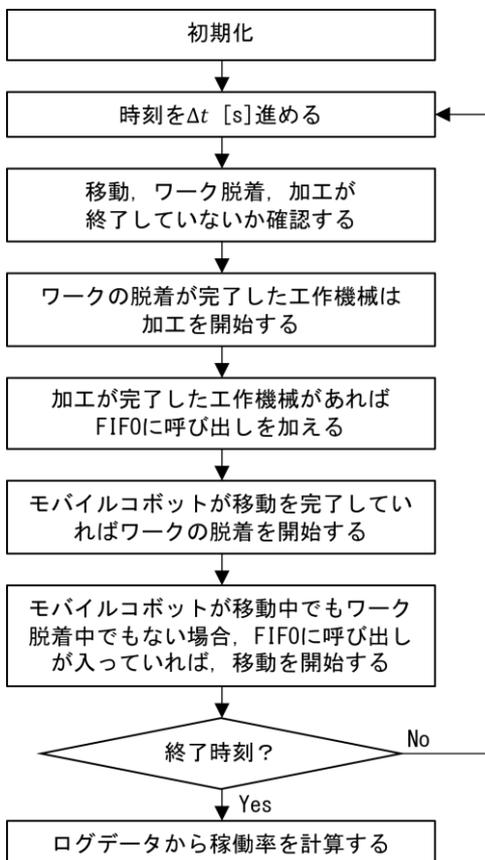


図3 シミュレータのフローチャート

(4) で制約されることが明らかである。 $r_{max}(i)$ を理論上の最大稼働率と呼ぶこととする。定理1を応用すると、これを実現するための十分条件を得られる。証明は自明であるので省略する。

系1 (理論上の最大稼働率を実現するための十分条件) ある正の数*T*が存在して、すべての $i \in \{1, \dots, n_m\}$ について

$$t_t(i-1, i) + t_e(i) + t_m(i) = T \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{n_m} (t_t(i-1, i) + t_e(i)) \leq T \quad (6)$$

$$t_t(i-1, i) = \min_{(j \neq i) \wedge (j \in \{1, \dots, n_{mt}\})} t_t(j, i) \quad (7)$$

が成り立つならば、時刻 *T* [s]以降の稼働率*r(i)*は

$$r(i) = r_{max}(i) = \frac{t_m(i)}{T} \quad (8)$$

である。

また、理論上の最大稼働率を実現するための必要条件として、以下の二つの条件が存在する。

定理2 (理論上の最大稼働率を達成するための必要条件1)

すべての工作機械が理論上の最大稼働率を実現するならば、以下の条件を満たす。

$$\bigcup_{i=1}^{n_m} \operatorname{argmin}_{(j \neq i) \wedge (j \in \{1, \dots, n_m\})} t_t(j, i) = \{1, \dots, n_m\}. \quad (9)$$

定理3 (理論上の最大稼働率を達成するための必要条件2)

すべての工作機械が理論上の最大稼働率を実現するならば、以下の条件を満たす。

$$\sum_{i \in \{1, \dots, n_{mt}\}} (1 - r_{max}(i)) \leq 1. \quad (10)$$

定理2はモバイルロボットの経路に関する条件であり、必ずすべての工作機械を通る必要があることから自明である。定理3はモバイルロボットの稼働率が100%を越えないことから自明である。いずれも必要十分条件に近い条件とは言えないが、理論上の最大稼働率を達成できない場合を容易にスクリーニングするのに有用と思われる。

本章では、以下のことを行った。

- ある停止時間を設定して定周期化した場合の稼働率を定式化した。(定理1)
- 理論上の最大稼働率を定義した。(式(4))
- 理論上の最大稼働率を達成するための十分条件を示した(系1)
- 理論上の最大稼働率を達成するための必要条件を二つ示した(定理2, 3)

以上の結果により、系1の仮定を満たす場合や、定理1の仮定を満たし実際に工作機械に待ち時間を設定する場合には、シミュレーションを行うことなく容易に稼働率を見積もることができるようになった。一方

で、それ以外の場合に正確に稼働率を計算することは依然難しい。

4 シミュレータの構築

稼働率の計算のためのシミュレータを Python で構築した。処理の概要を図3にフローチャートで示す。

5 数値実験

数値実験を行い、4章のシミュレータによる稼働率の試算を行う。これにより実際に稼働率を試算できることを確認するとともに、稼働率の事前検証が重要であることを確認する。また、3章の理論解析が数値例で適切に当てはまっているかどうかについても確認する。

5.1 実験条件

数値実験の条件は表1の通りである。 $t_t(i, j)$, $t_e(i)$ は工作機械によらずに一定値とした。 $t_m(i)$ は工作機械2~5は一定値とし、工作機械1については15パターンの値を試した。これは $t_m(1)$ と稼働率の関係から、問題の複雑性を確認することを意図したものである。なお、初回のワーク脱着時には工作機械内にワークは入っていないことが自然であるが、初回のワーク脱着時も2回目以降と同じだけの時間が生じるものとしてシミュレーションを行った。

5.2 理論解析の結果

まずシミュレーションを行う前に3章の理論解析から分かることを確認する。本数値実験では移動時間は一定としたので、定理2の理論上の最大稼働率を実現するための必要条件を満たしている。また定理3からは、 $t_m(1) \geq 120$ のときに最大稼働率を実現するための必要条件を満たしていることが分かり、逆に $t_m(1) < 120$ の場合はモバイルロボットの稼働率が高くなり工作機械の稼働率が十分に高くないことが予想される。系1により $r_m(1) = 300$ のときの稼働率は理論上の最大稼働率 83.3%となることが分かる。 $t_m(1) < 300$ の時に工作機械1に停止時間を仮に設定し、 $t_m(1) > 300$ の時に工作機械2から5に停止時間を仮に設定することで定理1により見積もった稼働率は図4のようになった。なお、定理1で設定した停止時間は図4の見積もりをするために仮に設定したもので、シミュレーションにおいては停止を行わない。

本節で得られた結果については、5.3.3項でシミュレーション結果との比較により評価する。

表1 シミュレーションの条件

モバイルロボットの数	1台
工作機械の数	5台
モバイルロボットの 工作機械間の移動時間	20 s
モバイルロボットが ワーク交換に要する時間	40 s
工作機械1の加工時間	60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420, 450, 480 s
工作機械2~5の加工時間	300 s
シミュレーション期間	8 h
スケジューラ	FIFO

5.3 シミュレーション結果

4章のシミュレータを用いたシミュレーションを行った結果、稼働率を実際に求めることができた。それぞれの条件においてシミュレーションデータを用いて計算された稼働率を図5に示す。また、稼働率 $r(i)$ を理論上の最大稼働率 $r_{max}(i)$ で割ったものをエフォートと呼ぶこととし、図6に示す。

5.3.1 主要な結果

まず、 $t_m(1) < 180$ のときの工作機械1は稼働率が60%を割り込んでいて非常に低い稼働率となっている。したがって条件によっては工作機械の稼働率が著しく低い値になる場合があり、事前に十分な検討を行うことが重要であると考えられる。なお加工時間が短い場合に著しく低い稼働率となるのは、加工時間が短いと頻繁に呼び出しが発生するので同時呼び出しが生じやすいためと考えられる。また、 $r_{max}(i)$ では $t_m(i)$ について単調増加であるので、同時呼び出しが生じない場合であっても $t_m(i)$ が小さいと $r(i)$ は小さくなりやすいことも影響していると思われる。

次に、工作機械のエフォートが100%になっておらず、モバイルロボットの稼働率も100%になっていない場合がある。モバイルロボットに余裕があるのであれば、工作機械に移動してワークを脱着し、工作機械の加工を開始すれば良いようにも思われるが、実際にはモバイルロボットに余裕があるタイミングと工作機械が加工を終えるタイミングにミスマッチがあるため、上記のような状況に陥っている。バッファのある搬送作業ならば、このタイミングのミスマッチをバッファで解消することを期待できるが、メンテナンス作業の場合はバッファがなく、解決が困難である。

また、稼働率、エフォートともにグラフは単調ではなく、複雑に変動しているということが挙げられる。本問題が非常に複雑な問題であることが伺えるが、本研究で用いたシミュレーションベースの手法では問題なく稼働率の値を計算することができた。より細かい解析は次項にて記す。

5.3.2 複雑な振る舞いの例

$t_m(1) = 300$ のときと $t_m(1) = 480$ のときはすべての工作機械でエフォートがほぼ100%である。このときのガントチャートの一部を図7(b)と(c)に示す。完全に100%になっていないのは、シミュレーション開始時に順番に加工を開始していることと、シミュレーショ

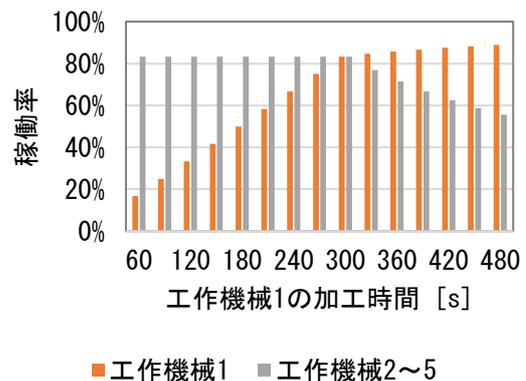


図4 定理1と系1により見積もった稼働率

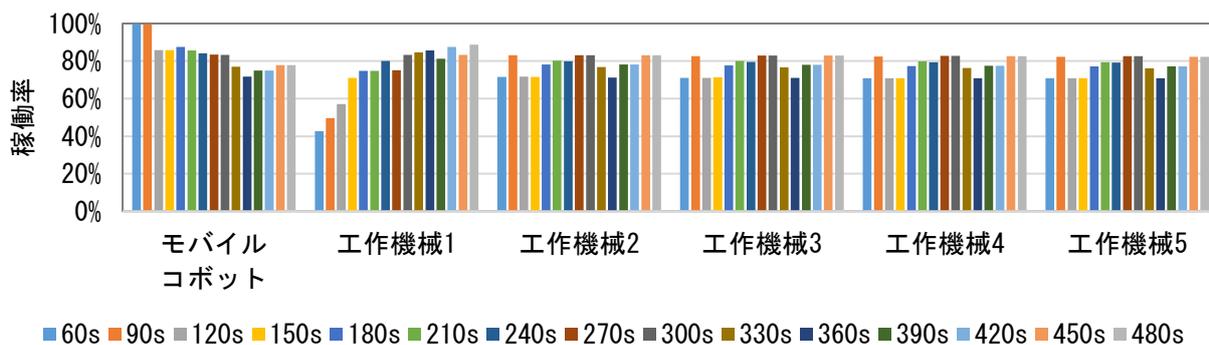


図5 工作機械1の加工時間とモバイルロボットおよび各工作機械の稼働率の関係

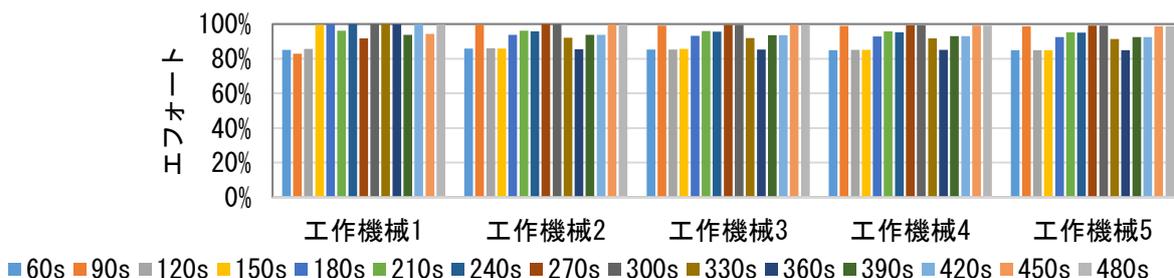
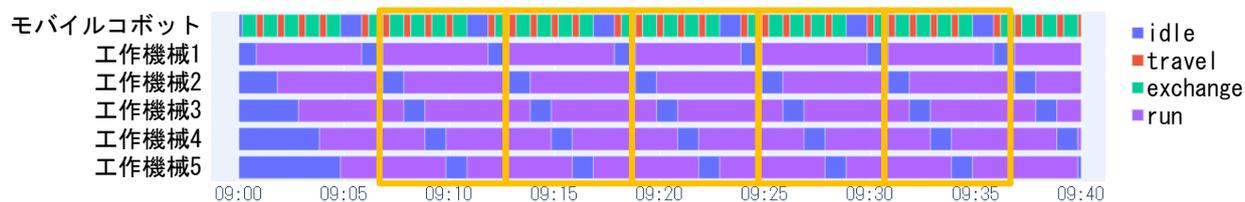


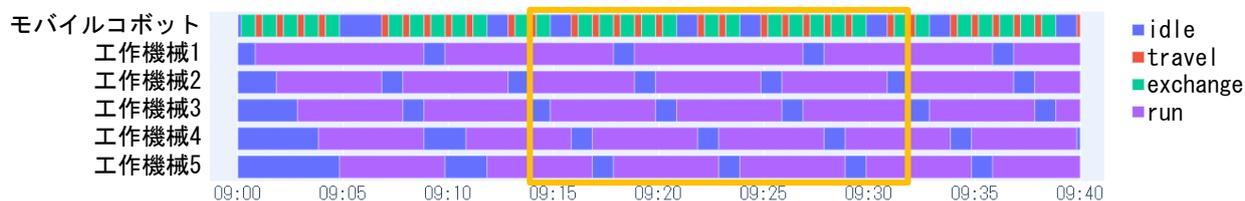
図6 工作機械1の加工時間と各工作機械のエフォートの関係



(a) $t_m(1) = 90$



(b) $t_m(1) = 300$



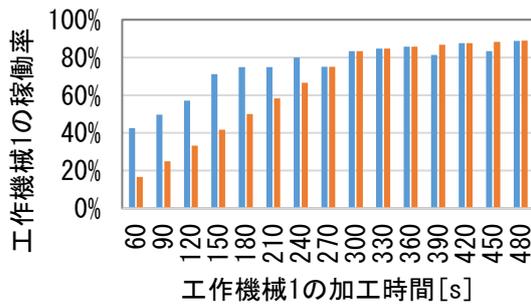
(c) $t_m(1) = 480$

図7 ガントチャート

ン期間の最後が必ずしも加工終了のタイミングと一致しないことによる。ガントチャートから、 $t_m(1) = 300$ のときは 360 s 周期でうまくタスクが実行できていることが分かる。 $t_m(1) = 480$ のときは 1080 s 周期で工作機械1が2回加工する間に工作機械2~5がそれぞれ3回加工を行う形で、うまくタスクが実行できていることが分かる。

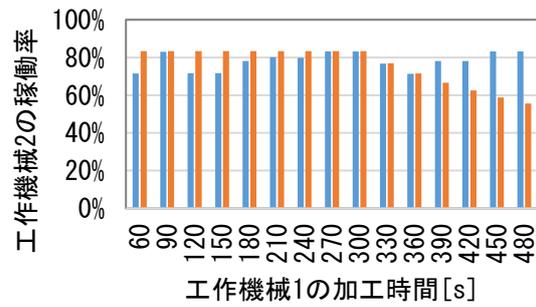
$t_m(1) = 90$ のときは少し特徴的な結果となっている。

工作機械1の稼働率やエフォートは低いが、工作機械2~5のエフォートはほぼ100%である。このときのガントチャートの一部を図7(a)に示す。360 s 周期で、工作機械2~5が1回ずつ加工する間に工作機械1が2回加工を行い、うまく同期している。ただし、工作機械1が加工を終えたタイミングには毎回他の工作機械のワーク脱着作業を行っているので、工作機械1は待ち時間が発生して稼働率が低くなっている。このような複雑



■ シミュレーションで計算 ■ 定理・系で計算

(a) 工作機械 1



■ シミュレーションで計算 ■ 定理・系で計算

(b) 工作機械 2

図 8 シミュレータ上で計算した結果と、定理 1 および系 1 で計算した結果の比較

な振る舞いはシミュレーションなしに予見することは難しい。

$t_m(1) = 360$ のときには工作機械 1 のエフォートは 100% であるが、残りの工作機械の稼働率は低くなっている。このとき、

$$t_m(1) = t_t(1,2) + t_e(2) + t_m(2) \quad (11)$$

となっているので、工作機械 1 が加工を終わるタイミングには必ず工作機械 2 が同時に加工を終えることになり、必ず同時呼び出しが発生する。本研究のスケジューラは、同時に発生した呼び出しは番号の若い工作機械の呼び出しを先に FIFO に入れることとしているので、工作機械 1 の方が優先されて工作機械 1 のワークの脱着が先に行われるが、これが終了したタイミングで工作機械 3 の加工が終了し、また同時呼び出し状態になる。このような現象が連鎖し、工作機械 2 から 5 の稼働率は、待ち時間を考慮した稼働率

$$r(i) = \frac{t_m(i)}{2(t_t + t_e) + t_m(i)} = 0.714 \dots, i = 2, \dots, 5 \quad (12)$$

まで低下してしまっている。これも複雑な現象であり、シミュレーションなしに予見することは容易ではない。

5. 3. 3 理論解析の結果とシミュレーションの結果の比較

最後に、シミュレーションで得られた値と、あらかじめ定理 1、系 1、定理 3 により見積もった値の比較を行い、これらの理論解析結果が適切であることを確認する。なお、上述の通り、定理 1 では工作機械の停止時間を設定しているが、シミュレーションでは停止時間は設定していない。

まず工作機械 1 と工作機械 2 について、シミュレーションで得られた図 5 の値と定理 1 と系 1 を用いて得られた図 4 の値を比較する。なお比較しやすいよう、これらの値をまとめたものを図 8 に示す。 $t_m(1) = 300$ の時は系 1 により稼働率が正確に見積もられ、工作機械 1 の稼働率については完全に一致している。工作機械 2 の稼働率については、シミュレーション開始時に順に工作機械の加工を開始することや、シミュレーション終了時にちょうど加工が終了しないことにより、少し差異が見られるものの、その差は 0.2 ポイントであった。 $t_m(1) = 270, 330, 360$ の場合も両者の差は非常に小さく、その差は高々 0.2 ポイントであった。その他の $t_m(1)$ について

は、両者の差が大きくなってきている。特に $t_m(1) < 180$ の工作機械 1 の稼働率や、 $t_m(1) > 450$ の工作機械 2 の稼働率は 20 ポイント以上の乖離がある。つまり、仮想的な停止時間の値が小さい場合には精度よく稼働率を見積もれており、定理 1 による見積もりが有効であり、仮想的な停止時間を大きく設定しないと見積もれない場合にはシミュレーションを行うことが重要であることが分かった。

理論上の最大稼働率という言葉については、図 6 の通りエフォートが 100% を越えることがなかったことから適切に定義されていると考えられる。

系 1 では先に述べたように $t_m(1) = 300$ における最大稼働率の達成を予見できた。一方で、 $t_m(1) = 480$ における最大稼働率の達成は予見することが出来なかった。このときの振る舞いは複数周期の動作が同期するより複雑な振る舞いであり、系 1 の範疇には収まらないものである。複数周期の最大公倍数を定周期にする等して定理 1 と系 1 を拡張して対応できる可能性もあるが、現状ではシミュレーションに頼る必要がある。

定理 3 により、 $t_m(1) \geq 120$ で最大稼働率が達成され得ることを予見しており、実際にすべての工作機械で最大稼働率が達成された $t_m(1) = 300$ と $t_m(1) = 480$ はこれを満たしている。また $t_m(1) < 120$ ではモバイルロボットの稼働率の観点からすべての工作機械が理論上の最大稼働率を達成するということが不可能であることが予見されていたが、実際に、 $t_m(1) < 120$ ではモバイルロボットの稼働率が 100% となり、工作機械の最大稼働率は達成できていないことが確認された。

5. 3. 4 数値実験のまとめ

本章では、シミュレーションでの計算結果により稼働率の見積もりを行う数値実験を行った。いくつかの条件で計算を行った結果から、条件によっては 60% を割るような著しく低い稼働率となる工作機械が出るということが確認され、稼働率を事前に見積もることが重要であることが示された。また工作機械の加工時間を変えると稼働率が非常に複雑に変動することが観測された。稼働率の計算という問題が非常に複雑な問題であることが伺えたが、シミュレーションベースの手法では問題なく計算が可能であった。また、3 章で示した定理が数値実験と矛盾のない結果を示していることを示すと同時に、工作

機械ごとの処理時間のばらつきが十分小さい場合には、**定理 1**は正確に稼働率を見積もれることも分かった。

なお、本数値実験では移動時間やワークの脱着時間は工作機械によらず一定であるとし、加工時間も5台ある工作機械のうち4台は同じであるという比較的単純な場合を想定したが、現実的には様々な工作機械で様々な品目を生産している状況も想定される。そのような場合にはこれらのパラメータ値は本数値実験以上のばらつきが存在し、稼働率の値は更に複雑な振る舞いをする事が予想される。しかしそのような場合であっても、シミュレーションベースの手法であれば本例題と同じ難易度で計算可能である。

6 結言

協働ロボットを自律移動ロボットに搭載したロボットであるモバイルロボットの適用先として、複数台の工作機械のマシンメンテナンス作業がある。マシンメンテナンス作業にモバイルロボットを適用した場合、モバイルロボットの移動時間、ワークの脱着に要する時間、工作機械の加工時間、工作機械の台数などのパラメータによっては、工作機械の稼働率が著しく低くなる場合もあるため、これをあらかじめ試算することが必要である。そこで本研究では、シミュレータを構築し、シミュレーションのログデータから工作機械の稼働率を試算するという試算方法を示した。また、理論的な検討により、停止時間を設定して定周期化すればシミュレーションを行うことなく稼働率を概算できることを示すとともに、理論上の最大稼働率を得られるための必要条件や十分条件を導出した。最後に数値実験により、稼働率を事前に試算することの重要性を確認した。また稼働率の計算が複雑な問題であることが示唆されたが、シミュレーションベースの手法であれば問題なく稼働率の計算が行えることを確認した。そして理論検討の結果が妥当であることを確認した。

今後の課題として、本数値実験の $t_m(1) = 480$ の場合のような複数周期の動作をうまく解析する方法の検討、複数台のモバイルロボットを用いる場合の解析、モバイルロボットを活用することを前提とした生産計画、モバイルロボットを適用することによるコストメリットの解析などが挙げられる。

最後に、本研究のシミュレータはモバイルロボットの導入前や、導入後に生産品目を変更した場合などに行うオフラインでの稼働率試算を想定して開発したが、オンラインでの活用も考えられる。例えば、人間とモバイルロボットが協調してマシンメンテナンス作業を行う場合において、リアルタイムでシミュレーションを行い、一定時間以上の待ちが生じることが予見された工作機械のワークの脱着を人間に依頼するという使い方が考えられる。なおこのような運用を行うには、現実世界の情報をシミュレータにフィードバックする仕組みが必須である。つまり、本シミュレータをデジタルツイン化する必要がある。これは、人間の手でワークの脱着を行ったり、モバイルロボットが移動中に人間を回避する動作を行って移動時間が通常よりも長くなったりしたことで現実とシミュレーションに乖離が生じた場合に、現実とシミュレーションを合わせる必要があるためである。これを実現する際、工作機械の加工の

開始や完了の情報の取得を行った我々の先行研究¹³⁾の技術も活用できる。

参考文献

- 1) 香川県：みんなでつくるせとうち田園都市・香川実現計画～海と田園と都市の魅力があふれる香川をめざして～ (2021).
- 2) 香川県：「人生 100 年時代のフロンティア県・香川」実現計画 (2023).
- 3) FANUC America: Have You Considered Mobile Cobots for Machine Tending?, <https://www.fanucamerica.com/news-resources/articles/have-you-considered-mobile-cobots-for-machine-tending> (2023) (検索日: 2024. 03. 11)
- 4) DMG 森精機：自律走行型ロボット WH-AMR10, <https://www.dmgmori.co.jp/sp/automation/lineup/products/whamr5.html> (検索日: 2024. 03. 11)
- 5) 自走し始めたロボットアーム, 活躍の場は工場の外へ 人との共同空間でピッキングと搬送を1台でこなす, 日経ロボティクス, No. 41, pp. 5-13 (2018).
- 6) 古賀達也, 井尻善久: IoTの側面から見た, モバイルロボット・モバイルマニピュレータの現状と今後の展望, 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 8, pp. 707-710 (2019).
- 7) 矢野経済研究所: 2023 年版 協働ロボット市場の現状と将来展望 (概要版) (2023).
- 8) 価格・品質で中国製品に負けない協働ロボ 韓国 Rainbow Robotics 社 CEO に聞く, 日経ロボティクス, No. 103, pp. 24-25 (2024).
- 9) robot digest : [2023 国際ロボット展リポート vol.13] 協働ロボットの普及はまだまだ“初期段階” / ユニバーサルロボット ステイシー・モーザー CCO, <https://www.robot-digest.com/contents/?id=1702533348-005257> (2023) (検索日: 2024. 03. 11)
- 10) Robotiq: How to Decide If You Need a Mobile Cobot, <https://blog.robotiq.com/how-to-decide-if-you-need-a-mobile-cobot> (2018) (検索日: 2024. 01. 26).
- 11) 自律移動し始めた双腕ロボ, 工場内を自ら回り作業 日本ピストンリングが部品搬送とピッキングに導入, 日経ロボティクス, No. 16, pp. 18-23 (2016).
- 12) オムロン: 24 時間稼働で設備使用効率を 10% 向上させたモバイルマニピュレータ 導入事例: TDK 株式会社様 稲倉工場 東サイト, <https://www.fa.omron.co.jp/product/robotics/lineup/mobile/video/application18/> (検索日: 2024. 3. 11)
- 13) 長谷見健太郎, 高原茂幸, 坂東慎之介, 竹中慎, 福本靖彦, 多田幸弘: 高度要素技術の生産工程効率化システムへの導入・現場実証— 所内 IoT 化システムの構築—, 香川県産業技術センター研究報告, No. 19, pp. 11-14 (2019).

付録A 定理1の直感的証明

工作機械がモバイルロボットを呼び出した時に、モバイルロボットが即座に移動を開始できれば、工作機械はモバイルロボットの移動待ち、ワークの脱着待ち、停止時間の経過待ち、加工を周期 T [s] で繰り返すことができれば稼働率が式(3)のようになる。よって、工作機械がモバイルロボットを呼び出した時に、モバイルロボットが即座に移動を開始可能であることを示す。

時刻 0 s から時刻 T [s] までを一周期目と呼ぶことにすると、一周期目にはモバイルロボットは時刻 0 s から工作機械のワーク脱着を順に行うが、式(2)の制約により、時刻 T [s] までにすべての工作機械のワーク脱着が可能である。また、式(1)の制約により、どの工作機械も加工が完了するのは時刻 T [s] 以降である。よって、時刻 0 s から時刻 T [s] までの間に工作機械は順に加工を開始してモバイルロボットは呼び出しをすべて消化した状態で一周期目を終える。

二周期目についても、以上のモバイルロボットの振る舞いは同じであり、時刻 T [s] 以降、工作機械1から順に加工が完了し、呼び出しが発生するが、すべて一周期目にモバイルロボットが移動を開始してから T [s] 後である。したがって、呼び出しと呼び出しの間に、モバイルロボットの移動とワーク脱着を完了できる。したがって、呼び出しが発生した際にモバイルロボットは即座

に移動を開始可能である。また、式(1)の制約により、どの工作機械も2回目の加工が完了するのは時刻 $2T$ [s] 以降になり、二周期目には以上で考慮した以外の呼び出しは発生せず、モバイルロボットはすべての呼び出しを消化した状態で二周期目を終える。

三周期目以降は二周期目と同様である。よって、二周期目以降では、すべての工作機械が T [s] 間の間にそれぞれ $t_m(i)$ [s] 間加工を行っているの、工作機械 i の稼働率は式(3)のようになる。

なお、以上の証明は厳密ではない箇所がある。式(2)で等号が成立する場合、もし一周期目を $[0, T)$ と定義すると、時刻 T [s] に工作機械 n_m のワーク脱着を完了するので、「モバイルロボットは呼び出しをすべて消化した状態で一周期目を終える」と言えない。一周期目を $(0, T]$ と定義すると、時刻 T [s] に工作機械1からの呼び出しが発生するので、「モバイルロボットが呼び出しをすべて消化した状態で一周期目を終える」ことにならない。このような点において、本証明は「直感的」証明に留まる。一方で、時刻 T [s] に工作機械1がモバイルロボットを呼び出した際にモバイルロボットが即座に工作機械1に向かって移動を開始できないかという、即座に移動を開始可能であることは自明である。

シリコン樹脂を用いた薄型ソフトグリップの形状設計に関する基礎検討

神内 杜夫, 小林 宏明, 竹中 慎, 福本 靖彦, 長谷見 健太郎, 坂東 慎之介

柔軟な材料で構成されたソフトグリップを用いることで、高剛性なグリップに比べて簡単に柔らかく壊れやすい物体や不定形な物体を把持することが出来る。薄型かつ接着強度の高いソフトグリップを作製する手法として、シリコン樹脂を用いて内部の骨格部材と一体成型することで接着工程を不要とする手法が提案されている。しかし先行研究ではグリップの形状設計に関する指針は示されていない。本研究ではグリップの形状設計による把持力や変形量の制御を目的とし、グリップの形状が把持力や変形にどのように影響するかについて基礎実験を行った結果を報告する。

1 緒言

近年、我が国では少子高齢化に伴った生産年齢人口の減少が進み、製造業やサービス業など様々な業種で人手不足が顕著な問題となっている^{1, 2)}。そのため、人口減少などによる人手不足への対策として、ロボットを活用した作業の効率化や省力化への取り組みが重要な課題となっている。

食品製造業などの柔らかな物体や不定形な物体を扱う現場では、従来の高剛性な部品で構成されたグリップを用いて把持を行う場合、対象物に応じたグリップの専用設計や制御条件の細かな調整が必要となる。そのため、開発コストがかかってしまい、ロボットの導入が進まない要因の一つとなっている。

そこで、上記の問題を解決するグリップとして、柔軟な材料で構成されるソフトグリップがロボット業界で注目を集めている。ソフトグリップは、従来の高剛性なグリップと比較して、把持力や位置精度は劣るものの、周囲の物体と接触してもグリップが柔軟に変形し接触応力を分散させるため、接触対象を傷つける危険性が低い。また、把持対象物の形状に沿ってソフトグリップ自身が変形するため、柔軟物や不定形物を安定的に把持できることに特長がある。

ソフトグリップの動作原理は製品ごとに様々だが、最も単純な方式としてグリップ内部を中空にし、内部を加圧または減圧することで変形させるものがある。このとき、グリップの硬度や構造を部分的に変えることで膨張率に差が生じ、変形方向や変形量を任意にコントロールすることが出来る。中空構造体の成型方法として、2つ

のパーツに分けて成型した後、接着する方法がよく用いられる^{3, 4)}が、接着部分の強度が低いため、空気加圧時に裂けやすいという問題がある。

解決策として、川島らは内部に骨格部材を入れ一体成型する手法を提案している^{5~7)}。中空構造にあたる部分に、シリコン樹脂と接着しない材質で構成された骨格部材を入れることで一体成型を可能にし、2枚のパーツの接着工程を省くことが出来る。この結果、真に中空構造ではなくなるが、骨格部材とシリコン樹脂は接着しておらず、それらの隙間に加圧した空気が入ることで屈曲動作が可能となる。他の手法として、平井らは中空部分にゼラチン等を充填し、成型後に溶かして取り出す手法を提案している⁸⁾。この手法も川島らの手法と同様に接着工程が存在しないため、従来手法より強度の高いグリップが作製可能である。

これらの薄型ソフトグリップは強度面の課題を克服できており、実際に食品の箱詰めや取出し等の作業を行う際に、隣接するワークへ干渉しないハンドリングを実現している⁶⁾。一方で、これらの先行研究では、グリップの形状設計に関しては触れられておらず、グリップの構造や形状が動作にどのように影響するかは示されていない。形状を適切に設計することで把持力や変形量をコントロールできる可能性がある。

そこで、本研究では川島らの手法に基づき、加圧により変形する突起部分及び骨格部材の形状が異なる2種類のグリップを作製し、空気加圧時の動作にどのような違いが現れるか検証を行った。

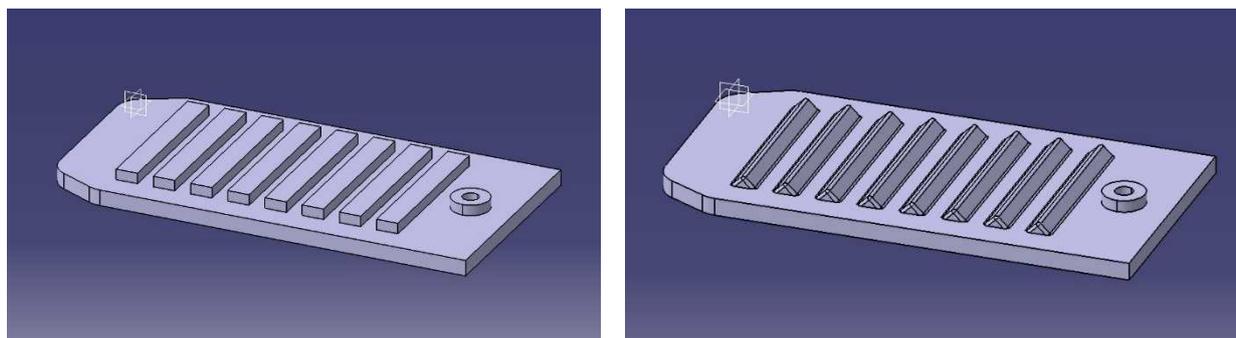


図1 作製するグリップの三次元モデル

2 グリッパ作製

2.1 グリッパの設計

本研究では比較用に図1に示す2種類のグリッパ形状を試作し、性能の比較を試みた。図2には突起部の断面を示す。先行研究では、図1、2の左図のように突起部に四角形状が用いられていた。この理由については明記されていないものの、最も単純な形状であるためと考えられる。本研究では突起部の形状がグリッパの発生する力にどのような影響を与えるか実験的に調べるため、基本的な図形として三角形形状を用いて比較を行った。

グリッパは長手方向に80 mm、短手方向に40 mm、厚み方向に5 mmとなるように設計し、突起部は7 mm間隔で8つ配置した。また、壁厚は1 mmとなるように設計した。骨格部材についても内部に埋め込めるよう、図2に示す内部形状に合わせて隙間なく設計した。

2.2 作製方法

グリッパの作製方法を図3に示す。本研究では、先行研究^{5~7)}と同じくシリコン樹脂による2段階の成型方式で作製した。

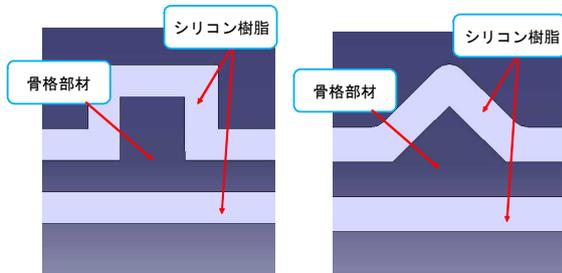


図2 突起部の断面モデル

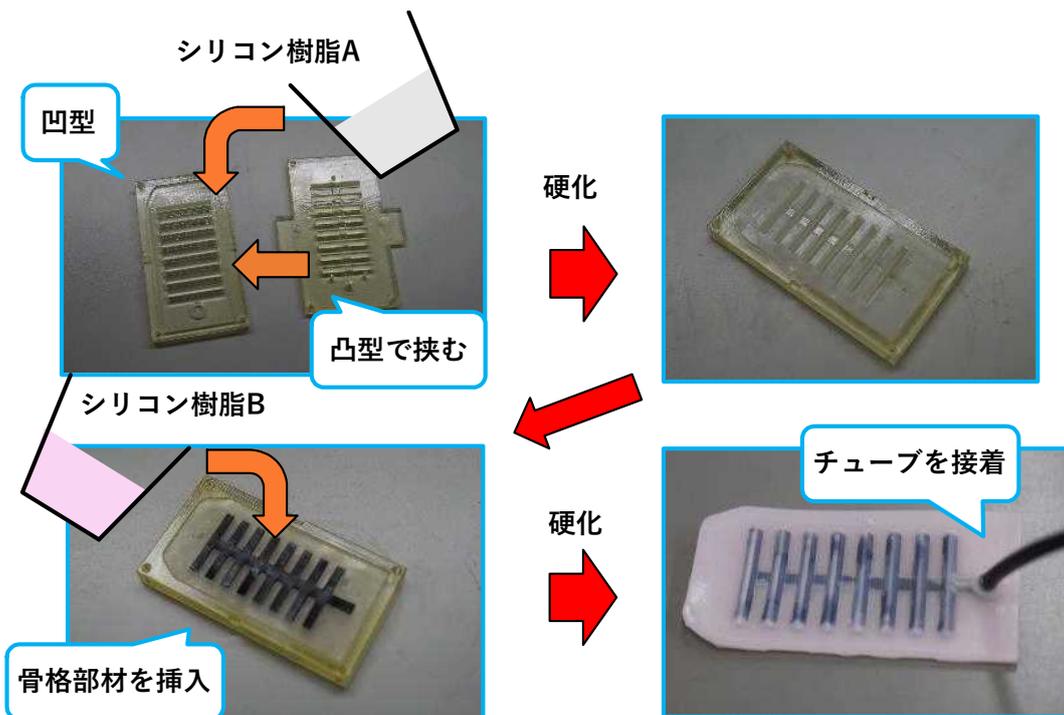


図3 グリッパ作製手順

まず、3DCAD ソフトを用いてグリッパの型と骨格部材の3Dモデルを作製し、三次元造形機 Objet260 Connex1 (Stratasys) により凹型と凸型を造形し、骨格部材をゴムライク樹脂 TangoBlackPlus で造形した。凹型にシリコン樹脂 Dragon Skin20 (Smooth-on) を流し込み、凸型で挟み込んで硬化させる。硬化後、凸型を取り外して骨格部材を内部にはめ込み、より硬度の高いシリコン樹脂 Smooth sil940 (Smooth-on) を被せて硬化させた。最後に、型から取り外したグリッパにエアチューブを取り付けた。

先行研究では型の作製に熱溶解積層方式の三次元造形機を用いていたが、本研究では、インクジェット方式の三次元造形機を用いた。これにより、寸法精度の高い型や骨格部材が作製できたものの、光硬化樹脂に含まれる成分によってシリコン樹脂が硬化不良を起こすことがあった。そのため、型や骨格部材に剝離剤であるバリヤーコート No.7 (信越シリコン) を塗布し、シリコン樹脂と接触しないようにすることで、硬化不良を防いだ。また、先行研究⁵⁾では骨格部材の作製にHP フィラメントスーパーフレキシブルタイプ (HottyPolymer) を用いていたが、本研究ではより剛性の低いゴムライク樹脂 TangoBlackPlus を用いた。

3 評価方法

作製したグリッパ内にチューブを介して空気を加圧し、グリッパの突起形状の違いが把持力や変形にどのような影響を及ぼすか評価した。図4および図5に、それぞれ把持力の計測に使用した治具の模式図及び実験状況を示す。本研究では、ロードセル LVS-200GA (共和電業) の端部に取り付けたプレートを押す力を把持力とみなして計測した。図4に示すように、グリッパとロードセルに取り付けたプレートの間には1 mmの

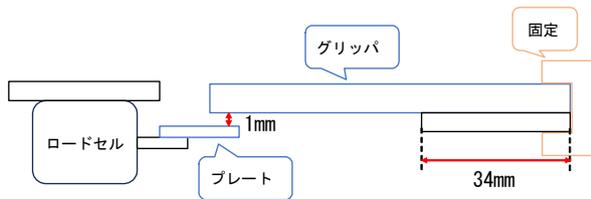


図4 把持力測定治具の模式図

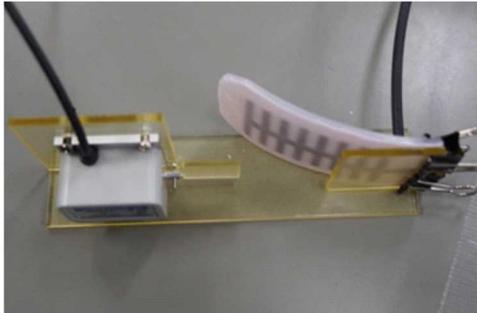


図5 ロードセルを用いた把持力測定治具

隙間を設けた。ロードセルからの信号はEDS-400A（共和電業）を用いてPCに取り込み計測した。グリッパ内部に加圧するエアは、電空レギュレータITV-0050-0BS（SMC）を用いて、0.05 MPa～0.10 MPaの範囲で圧力を制御し、グリッパの内圧によって把持力がどのように変化するか計測した。図5において、グリッパに反りが見られるが、これは成型後のシリコン樹脂の収縮によって生じたものである。

4 結果

図6に2種類のグリッパについて、グリッパ内圧と把持力の関係のグラフを示す。図6において、把持力が0.00 Nの区間があるが、これは成型後に生じたシリコン樹脂の収縮によってグリッパに反りが生じており、プレートに接触していないためである。なお、突起部が四角形状のグリッパでは、内圧が高まるにつれ内側に巻き込むような方向に変形が発生し、今回用いた治具では0.08 MPa以上の圧力で把持力が計測出来なかった。

2つのグリッパの反り量の違いなども影響するため、把持力の数値を単純に比較することは出来ない。そこで、グリッパがプレートに接触した時のグリッパの内圧を基準として、プレート接触後の把持力の変化を図7に示す。図7より、把持力の差は最大で0.03 N程度しかなく、プレート接触後の把持力はほとんど同じである。把持力の最高値に着目すると、突起部が四角形状のグリッパは0.22 N、三角形形状のグリッパは0.20 Nと大きな差は見られなかった。

図8および図9に、四角形状グリッパと三角形形状グリッパについてそれぞれ0.10 Nの把持力が発生するよう内圧を調整した際のグリッパの変形の様子を示す。図8と図9を比較すると、突起部が四角形状のグリッパは内側に巻き込むような方向への変形が大きいように見える。これは、ワークを抱え込むような把持を行う際には有利に働くと考えられる。また、グリッパの

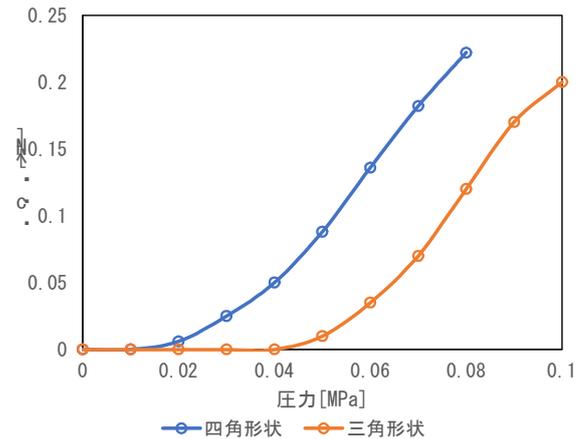


図6 グリッパ内圧と把持力の関係

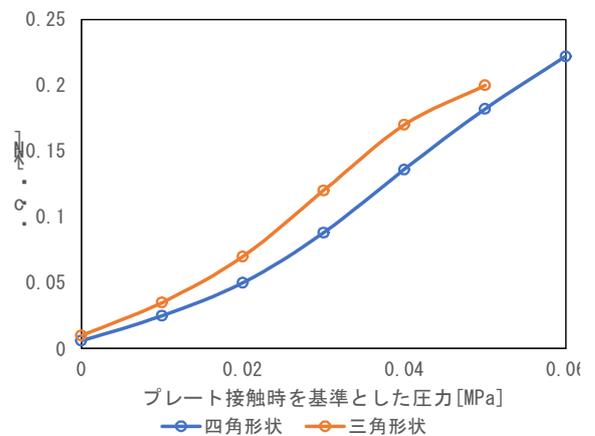


図7 プレート接触後のグリッパ内圧と把持力の関係

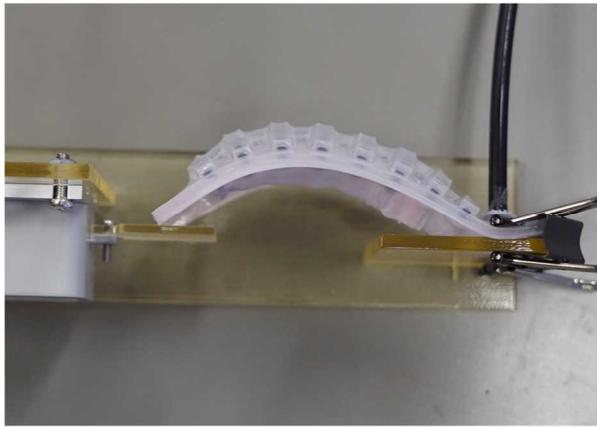
厚み方向への膨らみに着目すると、突起部が三角形形状のグリッパの方が厚み方向への膨らみが小さかった。これは、隣接するワークに干渉しにくいというメリットとなりうる。

以上より、本研究で作製した突起部が四角形状のグリッパと三角形形状のグリッパにおいては、プレート接触後の把持力に大きな差は見られなかった。一方で、突起部が三角形形状のグリッパは厚み方向への膨らみが小さいという特徴が確認され、食品の盛り付けや梱包などのタスクを行う際に、ワーク同士の間隔が狭い場合でもグリッパとワークの干渉が起きにくいといった優位性があると考えられる。

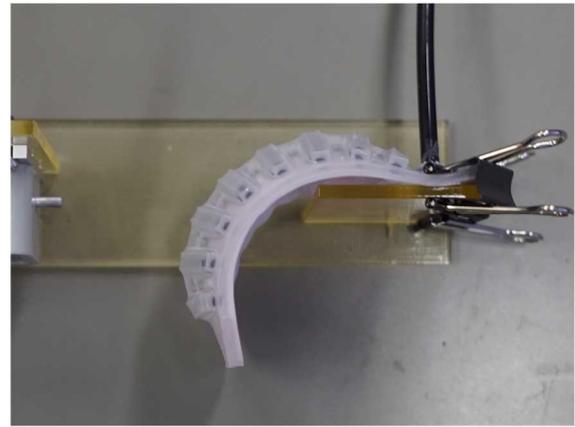
5 結言

本研究では川島らの先行研究で提案された、内部に骨格部材を埋め込む薄型ソフトグリッパの作製手法に基づき、突起部の形状が異なる2つのグリッパを作製し、その動作について評価を行った。その結果、2つのグリッパの把持力に大きな差は見られなかった。また、突起部が三角形形状のグリッパは厚み方向への変形が小さいため、ワーク同士の間隔が狭い場合でも干渉することなく作業ができるという薄型グリッパのコンセプトに有利な特徴を持つこと確認した。

今後の課題として、任意の把持力や変形を実現するための形状設計手法を構築することが挙げられる。ま

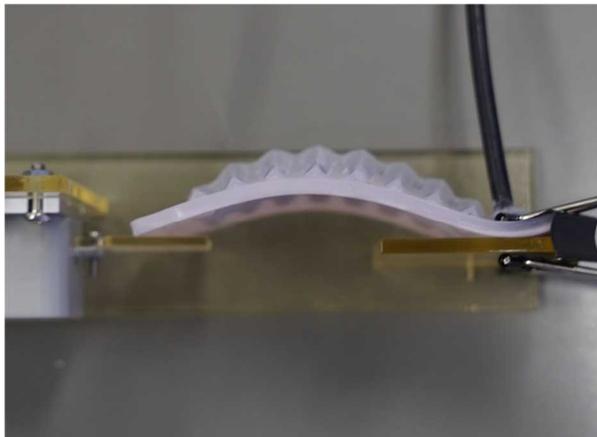


(a) プレートあり

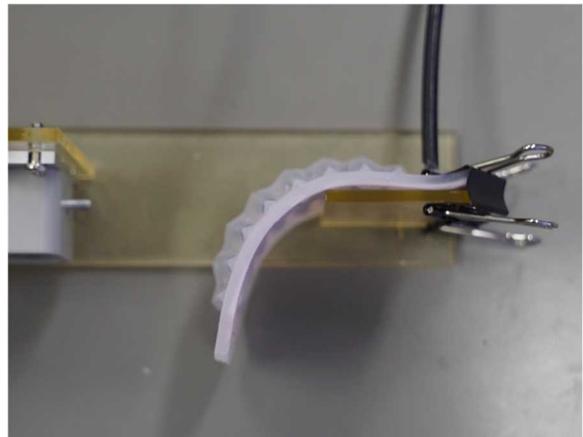


(b) プレートなし

図8 四角形状グリッパの変形の様子



(a) プレートあり



(b) プレートなし

図9 三角形形状グリッパの変形の様子

た、今回は片指のみの試作であったが、もう片方の指も作製することでグリッパとして使用できるようにし、把持可能な物体の重量や有効なタスクなどについて検証する予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、薄型ソフトグリッパの作製手法について多大なご指導を賜った、北海道立総合研究機構工業試験場の川島圭太氏、井川久氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 香川県 政策部 政策課：「人生100年時代のフロンティア県・香川」実現計画 (2023) .
- 2) 経済産業省：2023年版ものづくり白書 (2023) .
- 3) 竹林龍之介, 松野孝博, 杉野卓司, 堀内哲也, 物部浩達, 平井慎一：IPMCセンサ内蔵ソフトフィンガを用いた把持物体の大きさ推定, 第41回日本ロボット学会学術講演会, 1E2-02 (2023) .
- 4) 犬飼智博, 平井慎一：潜り込み機能を有するソフトグリッパによる平坦食品の把持, 第37回日本ロボット学会学術講演会, 2D1-05 (2019)
- 5) 川島圭太, 平井慎一, 王忠奎：カットケーキの箱詰め作業を可能とする薄型ソフトロボットハンドの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022 in Sapporo, 2A1-J01 (2022) .
- 6) 井川久, 川島圭太, 宮島沙織, 中西洋介：多様な食品に対応したハンドリング技術の開発, 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No. 321, pp. 25-30 (2022) .
- 7) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構, 学校法人立命館：把持装置およびその製造方法, 特開2023-136282, 令和5年9月29日.
- 8) 宮下まどか, 松野孝博, 王忠奎, 平井慎一：ケーキトッピングのための非接着式ソフトグリッパ, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023 in Nagoya, 1A3-I08 (2023) .

レーザー粉末床溶融結合法により作製された AlSi10Mg/SiC 複合材の組織と機械的性質に及ぼす繰り返しビーム走査の影響

宮内 創, 松本 洋明*, 横田 耕三

レーザー粉末床溶融結合法を用いた AlSi10Mg (Al-10 mass%Si-0.35 mass%Mg) 合金基 SiC 粒子複合材の製造において、同一層への繰り返しビーム走査が造形体の密度、金属組織および機械的性質に及ぼす影響を検討した。層毎に 1 回のビーム再走査を加えて造形すると、特に 200 J/mm³ 以下の低い投入エネルギー条件において、造形体の密度が顕著に向上した。造形体の微視組織に粗大化は認められなかった一方で、SiC 粒子の分解反応が進行し、生地領域の硬さが増加した。約 166 J/mm³ 以下の低エネルギー条件下では、ビーム再走査によって、造形体は微細な組織形態を保ったまま緻密化が促進され、700 MPa 以上の高い圧縮強度を示した。

1 緒言

金属基複合材料 (MMC: Metal Matrix Composite) は、金属のみでは実現できない高い比強度や剛性などの特長を有しているが、一般に複雑形状の付与や二次加工が困難であるため、ニアネットシェイプでの製造が可能なレーザー粉末床溶融結合法 (Laser Powder Bed Fusion: L-PBF) の応用が注目されている。本研究ではこれまで、AlSi10Mg 合金粉末と SiC 粒子の混合粉末を原料とした L-PBF 造形において、造形体の密度や微視組織、機械的性質および、それらが造形条件や後熱処理に及ぼされる影響を詳細に検討してきた^{1, 2)}。本報告では、L-PBF 造形された AlSi10Mg/SiC 複合材の機械的性質の向上を図るため、L-PBF 材の造形欠陥を低減させる効果が報告されている、同一層に複数回のビーム走査を行う手法³⁾ の適用を試み、その影響を評価した。

2 実験方法

材料粉末として、球状の AlSi10Mg (Al-10 mass%Si-0.35 mass%Mg) ガスアトマイズ粉末 (Carpenter Additive 社製, 平均粒径 (D₅₀) 41 μm) および不定形状の SiC 粉末 (フジミインコーポレーテッド社製, 平均粒径 (D₅₀) 32 μm) を用いた。これらを体積比 9:1 (11.86 mass%SiC) に調製し、回転容器にて 300 rpm×3 h 混合して供試材料とした。実験には、ファイバレーザ (最大出力 500 W, 波長 1070 nm) を搭載した L-PBF 方式の金属積層造形装置を用いた。造形体の設計形状は 10 mm (X) × 10 mm (Y) の直方体とし、A5052 アルミニウム合金製基板の上に高さ 7.5 mm (Z) まで積層させた。ビーム走査パターンは矩形とし、1 層毎に走査方向を 90° 回転させた。本稿では、**図 1** に示すとおり、層毎に 1 回のみビーム走査して作製した造形体を Single Scan (SS) 材と呼称し、90° 回転させたビーム再走査を 1 回加え計 2 回ずつ走査して作製した造形体を Double Scan (DS) 材と呼称する。雰囲気ガスにはアルゴンを

用い、造形中のチャンバ内酸素濃度を 0.1% 以下に保持した。造形条件は、**表 1** に示すとおり、レーザ出力および走査ピッチ、積層厚さを一定とし、走査速度を変化させることで、投入されるエネルギー密度を制御した。

作製した造形体に対し、真密度を 2.71 g/cm³ とした相対密度をアルキメデス法により測定した。積層方向に平行な断面を鏡面まで機械研磨した後、撮影した光学顕微鏡写真を画像解析して SiC の面積率を測定した。さらに、フッ酸-硝酸-塩酸水溶液 (Keller 試薬) にてエッチングし、光学顕微鏡ならびに走査型電子顕微鏡を用いて金属組織の観察を行った。機械的性質を評価するため、組織観察と同じ断面のビッカース硬さ (HV0.3) を測定した。さらに、Z 軸を積層方向に平行として 3 mm (X) × 3 mm (Y) × 6 mm (Z) に機械加工した試験片を、万能材料試験機にて Z 軸負方向に 1.65 mm/min の速度で圧縮試験した。

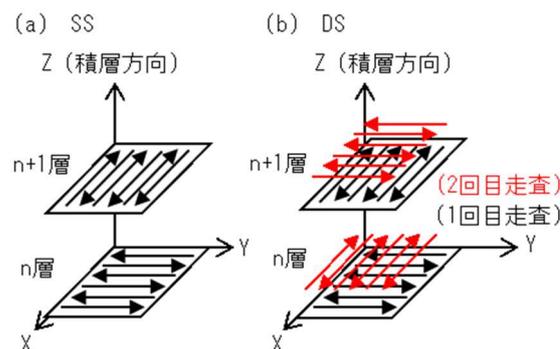


図 1 ビーム走査方法の模式図

表 1 造形条件

レーザ出力 P	400 W
XY 走査速度 v	133~889 mm/sec
XY 走査ピッチ s	0.15 mm
積層ピッチ t	0.03 mm
投入エネルギー密度 E _d E _d =P/(s·v·t)	100~500 J/mm ³
繰り返しビーム走査回数 n	1 回 (SS), 2 回 (DS)

*香川大学創造工学部

3 実験結果および考察

3.1 造形体の緻密化挙動

図2に、エネルギー密度およびビーム再走査の有無を変化させたときの、造形体の相対密度との関係を示す。SS材の相対密度は、エネルギー密度の増加（走査速度の低下）とともに顕著に上昇したが、約200 J/mm³以上では、約98%のまま変化が小さかった。DS材の相対密度は、SS材よりも高い最大値を示すとともに、特に約200 J/mm³以下の低エネルギー条件にてSS材よりも顕著に上昇する傾向であった。図3は、低エネルギー条件の100 J/mm³で造形されたSS材およびDS材の中心部の断面写真であるが、SS材にて散在している不規則で粗大な空隙欠陥がDS材には観察されない。これは、ビーム再走査により、融合不良箇所や未熔融粉末が再熔融されることや、被ビーム走査面の平滑化により粉末供給が安定化する作用³⁾が顕著に現れたものと考えられる。高エネルギー条件では、SS材にても欠陥が少ないため、DS材の密度上昇は相対的に小さくなるが、結果としてDS材では、広範囲の造形条件において、欠陥がほとんどない高密度体が得られた。

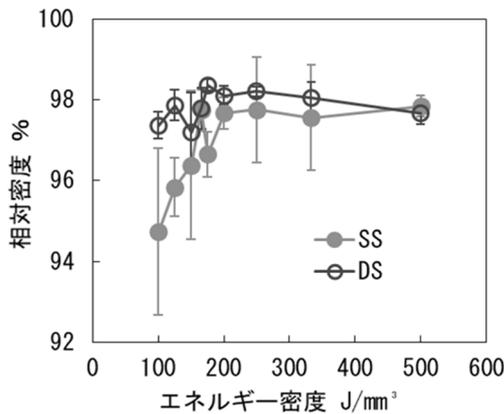


図2 造形体の相対密度とビーム走査回数および投入エネルギー密度との関係

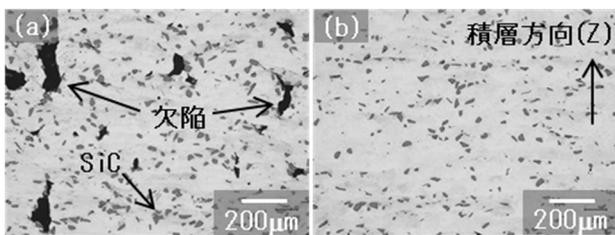


図3 エネルギー密度100J/mm³にて造形されたSS材(a)およびDS材(b)の断面光学顕微鏡写真(ノーエッチ)

3.2 造形体の微視組織

造形体の最表層を含む断面を光学顕微鏡観察した結果を、エネルギー密度250 J/mm³の造形条件を代表として図4(a, b)に示す。SS材とDS材を比較すると、いずれの造形体においても、レーザー走査に由来する鱗状の熔融凝固痕が観察され、それらの形態に顕著な差異は認められなかった。同図中に示した、最表層における熔融凝固痕(DS

材では、2回目のビーム走査に伴うもの)の深さに注目すると、本報告の条件範囲では、同じエネルギー密度のSS材とDS材にて、ほぼ同程度であった。このことから、本報告におけるDS材の造形過程では、1回目のビーム走査で熔融されたのとはほぼ重なる領域が、2回目のビーム走査により再度熔融され、その結果としてDS材の組織は、2回目のビーム走査で形成された熔融凝固組織から構成されていると考えることができる。生地領域を電子顕微鏡観察すると(図4(c, d)), Al相(灰色部)とSi濃化相(白色部)からなる微細セル状の共晶組織が観察される。このセル状組織のサイズは、凝固過程における冷却速度に依存しており、エネルギー密度が増加するほど大きかったが、同じエネルギー密度のSS材とDS材では同程度であり、ビーム再走査によって組織の粗大化は生じないことがわかった。

電子顕微鏡写真にて観察される比較的粗大な針状相は、ビーム走査時に式(1)の反応により生成したAl₄SiC₄相であるが、この反応の進行度を定量的に評価するために、SiCの面積率を測定した結果を図5に示す。ここでは、式(1)から

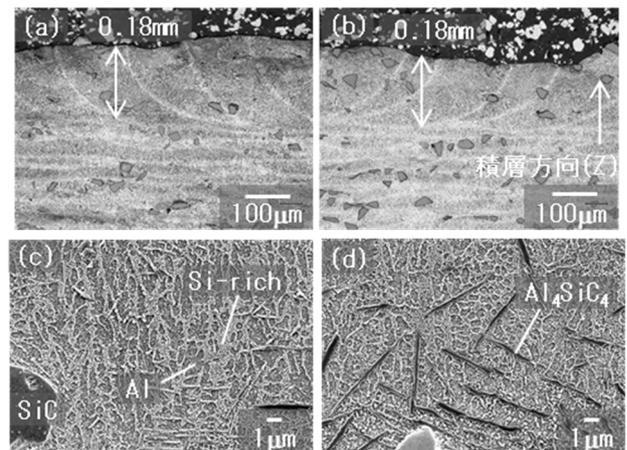


図4 エネルギー密度250J/mm³にて造形されたSS材(a, c)およびDS材(b, d)の、表層部を含む断面の光学顕微鏡写真(a, b)および電子顕微鏡写真(c, d)

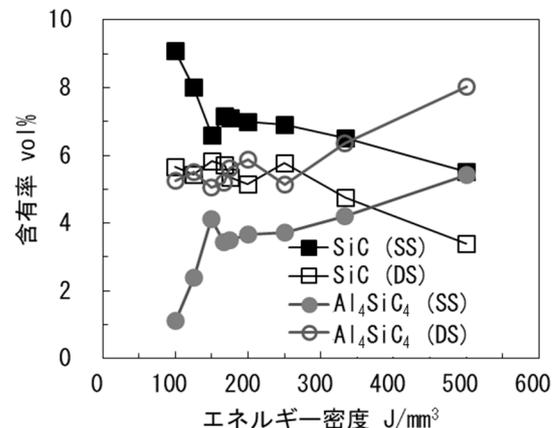


図5 造形体に含有されるSiCおよびAl₄SiC₄相の体積分率と、ビーム走査回数および投入エネルギー密度との関係

見積もられた Al_4SiC_4 の含有率も併せて示した。



エネルギー密度の増加および、ビーム再走査の採用に伴って SiC 含有率が減少する傾向が認められるが、概ね 250 J/mm^3 以下の低エネルギー条件を採用した場合には、DS 材にても 5~6 vol% の SiC が残存すると見積もられた。

3. 3 造形体の機械的性質

図 6 に、造形体の生地組織 (SiC 粒子を除く領域) におけるピッカース硬さ測定結果 (a) および圧縮試験における最大応力 (b) を示す。図 6 には比較として、ほぼ 100% に緻密化される条件 (エネルギー密度 83 J/mm^3) にて造形された AlSi10Mg 材の測定結果¹⁾ を併せて示している。SS 材と比較して DS 材の硬さは、全てのエネルギー密度においてやや上昇する傾向を示した。この原因としては、SiC の界面反応に伴い Si 分率が増加したことによる強度上昇¹⁾ および、Al-Si 共晶相よりも高硬度である¹⁾ Al_4SiC_4 相の増加 (図 5) の影響が考えられる。一方で、エネルギー密度が増加することによる硬さの変化は小さかったが、これは上述した構成相の変化の影響による硬化が、セル状組織の粗大化の影響による軟化で相殺されたためと推測される。

造形体の圧縮強度は、 166 J/mm^3 以下の低エネルギー条件にて DS 材は SS 材に比べ顕著に高い値を示した。SS 材の場合、エネルギー密度が増加すると緻密化に伴いマクロ的な強度は顕著に向上するが、緻密化において必要以上のエネルギーを投入すると、SiC 含有率の減少の影響が大きくなり、強度が減少に転ずる¹⁾。これと前節の組織解析結果から、低エネルギー条件におけるビーム再走査による強度上昇は、SiC 含有率が過度に低下せず、生地組織が微細な状態を維持して緻密化が促進されたことによると考えられる。 250 J/mm^3 を超える高エネルギー条件では、DS 材の強度は、SS 材との密度の差異が小さいために、SiC 含有率の減少の影響を受け、やや小さくなったものと推測される。DS 材の最大圧縮応力は、SS 材よりも大きく 700 MPa 以上を示し、AlSi10Mg の緻密な L-PBF 造形体の約 500 MPa (図 6 (b)) や、10 vol% SiC 粒子を複合した A6061 熱間押し出し材の約 450 MPa ⁴⁾ と比較しても大幅に高い値であった。

4 結言

AlSi10Mg (Al-10 mass%Si-0.35 mass%Mg) 合金に SiC 粒子を 10 vol% 混合した粉末のレーザー粉末床熔融結合法 (L-PBF) による積層造形において、繰り返しビーム走査の手法を採用し、造形された複合材の密度や微視組織、機械的性質に及ぼす造形条件の影響を検討した。層毎に 1 回のビーム再走査を加えて造形すると、特に低エネルギーの造形条件 (約 200 J/mm^3 以下) において造形体の密度が顕著に向上した。ビーム再走査を加えた造形体の微視組織に粗大化の傾向は認められなかったが、SiC 粒子の分解反応が進行し、生地領

域の硬さが増加した。またこのビーム再走査の影響で、造形体の圧縮強度は、特に低エネルギーの造形条件 (約 166 J/mm^3 以下) において顕著に上昇し、最大圧縮応力は 700 MPa 以上を示した。

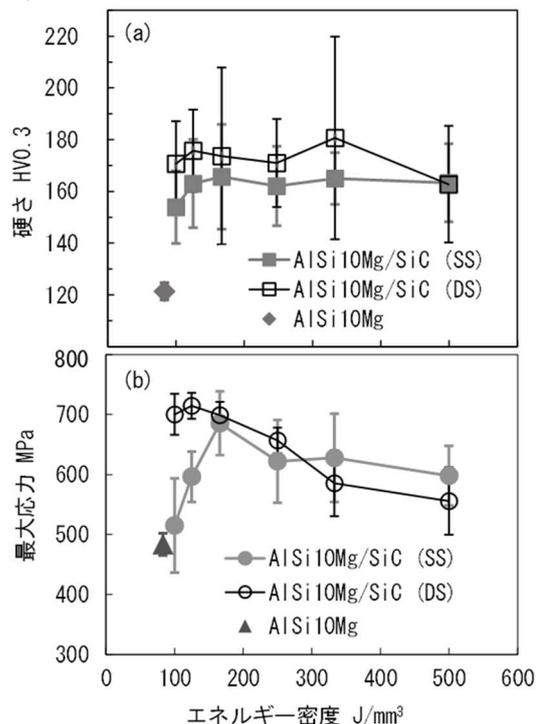


図 6 造形体の断面硬さ (a) および最大圧縮応力 (b) と、ビーム走査回数および投入エネルギー密度との関係

参考文献

- 1) Y. Yanase, H. Miyauchi, H. Matsumoto, K. Yokota: Hierarchical Analysis of Phase Constituent and Mechanical Properties of AlSi10Mg/SiC Composite Produced by Laser-Based Powder Bed Fusion, *Materials Transactions*, Vol. 64, No. 6, pp. 1125-1134 (2023).
- 2) 柳瀬裕太, 宮内創, 松本洋明, 横田耕三: 金属粉末レーザー積層造形により製造された Al-10Si-0.4Mg/SiC 複合体の熱処理と微細組織変化, *軽金属*, Vol. 72, No. 3, pp. 88-90 (2022).
- 3) E. Yasa, J-P. Kruth: APPLICATION OF LASER RE-MELTING ON SELECTIVE LASER MELTING PARTS, *Adv. Prod. Eng. Manag.*, Vol. 6, No. 4, pp. 259-270 (2011).
- 4) 古田敏康, 牛込進, 山本君二, 副田知美: SiC 粒子分散強化金属複合材料, *材料システム*, Vol. 7, pp. 73-79 (1988).
- 5) 宮内創, 松本洋明, 横田耕三: レーザ粉末床熔融結合法により作製された AlSi10Mg/SiC 複合体の組織と機械的性質に及ぼす繰り返しビーム走査の影響, *日本金属学会誌*, Vol. 87, No. 12, pp. 319-326 (2023). (本報告は、他誌に掲載された論文⁵⁾の内容を抜粋、編集したものである.)

3D プリンタ（材料押出法）を活用したいぶし瓦製品の開発

片岡 良孝, 牧田 弘美*, 大川 由里子*, 大川 隆利*, 横田耕三

3D プリンタ等デジタルものづくり技術を活用した、家紋瓦および園芸向け民芸品のいぶし瓦製品の開発を検討した。3D スキャナおよび 3D CAD により、いぶし瓦製品の形状データを設計し、3D プリンタ（材料押出法）により元型を樹脂で造形後、それを転写した石膏型を作製することで、従来のプレス成形用の金型の代わりとした。これを用いて陶器質粘土の練土をプレス成形し、燻化焼成して得られた焼結体は、概ね設計通りの形状であった。本工法により型の供給安定化や成形工程の効率化を実現し、安価かつ短納期にオーダーメイドの家紋瓦等いぶし瓦製品を作製することが可能となった。

1 緒言

香川県は粘土瓦の産地であり、日本伝統の屋根材であるいぶし瓦の生産が行われているが、近年は価格競争等の影響から施工件数が減少傾向にあり、その美しい景観が失われつつある。いぶし瓦の魅力を再認識してもらうため、屋根瓦に限らない魅力あるいぶし瓦製品を展開する必要があり、その例として、屋根の棟や玄関の装飾に用いられる家紋瓦等の役物瓦および園芸用品などが考えられる。しかし、これらの製品は、個々に形状の異なる多品種少量製品であるため、それぞれの形状ごとに金型を作製する必要があり、金型の製作コストが高い、大量の型を保管するための設備投資の負担が大きい、型を作製する技術者の高齢化および技術継承者の不足といった課題が見受けられる。特に型が供給されなくなると生産が出来なくなるため大きな問題となっている。このような課題に対し、我々はこれまでに、3次元積層造形技術（Additive Manufacturing）の中でも比較的安価な工法である材料押出法を型の作製に活用し、植木鉢製品の開発が可能であることを報告している¹⁾。また、3D スキャナや 3D CAD 等のデジタルものづくり技術を活用することで、従来形状のデータ化による形状の保存や、形状の微調整が容易になり短納期化するなどの効果が期待される。

本開発は、家紋瓦および園芸向け民芸品のいぶし瓦製品を、デジタルものづくり技術を活用し、設計から型作製までの成形プロセスの一部をデジタル化することで、従来に比べ安価かつ短納期なプロセスを実現し、魅力あるいぶし瓦製品の普及を目指すものである。

2 開発内容

2.1 成型型作製のデジタル化

本開発におけるいぶし瓦製品の作製手順を図 1 に示す。その手順は、①3D スキャナによる既存製品の形状スキャン、②3D CAD 上での形状調整、③3D プリンタで樹脂型を造形、④樹脂型の形状を転写した石膏型を作製、⑤フリクションプレス成形、⑥燻化焼成によりいぶし瓦製品を得る、というものである。従来、フリクションプレス成形の金型を職人の手により作製していたところを、①～④のようにデジタルものづくり技術

* 有限会社大川瓦店

を活用して代替することを検討した。また、既存製品が無くとも、3D CAD 上で種々の形状をデザインすることで、新たな形状の製品を作製することが可能である。

2.2 樹脂型の造形および石膏型の作製

3D スキャナ（Shining 3D 製、EinScan-SE）により既存製品の形状をスキャンし、3D CAD ソフトウェアにて形状を調整した。これをスライスソフトウェアにて G-code ファイルに変換し、3D プリンタ（Raise3D 製、Raise3D E2）を用いて樹脂型を造形した。造形材料にはポリビニルブチラール（PVB）系樹脂（Polymaker 製、Polysmooth）またはポリウレタン（TPU）系樹脂（Polymaker 製、TPU95-HF）を使用した。主要な造形条件を表 1 に示す。

はじめに、造形した PVB 製樹脂型を用い、石膏型の作製を検討した。図 1 のような比較的単純な形状では、石膏型および樹脂型を破損させずに脱型することが可

表 1 樹脂型の造形条件

	PVB 系樹脂 (Polysmooth)	TPU 系樹脂 (TPU95-HF)
ノズル径 (押出幅)	400 μm	
積層ピッチ	100 μm	
ノズル移動速度	30~60 mm/s	
内部充填率	15%	
ノズル温度	190°C	200°C
テーブル温度	一層目 70°C, 二層目以降 50°C	

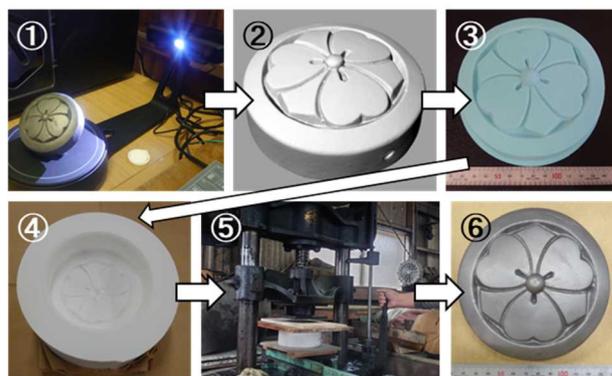


図 1 いぶし瓦製品作製手順（例：家紋瓦）



図2 複雑な形状の家紋瓦の例(上がり藤に橘形状, STLデータ)

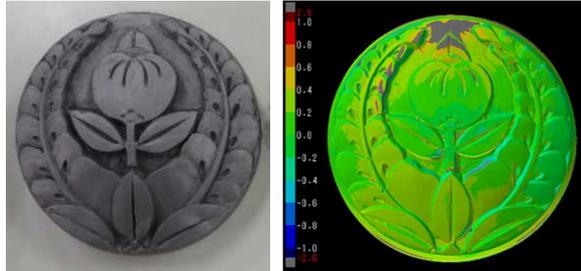


図3 家紋瓦焼結体写真と STL データとの形状比較

能であった。しかし、図2に示すような複雑形状では、型の取外しが困難であり、樹脂型および石膏型に破損が見られた。そこで、軟質なTPU系樹脂を選定し造形したところ、若干の弾力を持つ樹脂型となった。これを用いて石膏型を作製した場合、脱型しやすい傾向にあり、型の破損はほとんど認められなかった。したがって、TPU製樹脂型は複雑形状にも対応した、繰り返し使用可能な樹脂型として有効であると考えられる。

2.3 原料粘土の物性

原料粘土には、淡路産陶器質粘土を使用した。原料粘土の粒度分布および化学成分は、既報¹⁾と同様の方法で評価した。原料の淡路産陶器質粘土の粒度分布と化学成分を表2に示す。粘土分およびシルト分を多く含む比較的細かな粒度分布の粘土であり、表面が滑らかな成形体の作製が期待される。化学成分は、SiO₂を多く含む、図示しないがX線回折チャートにおいて石英のピークが認められたことから石英が主成分と考えられる。また、Al₂O₃、K₂O、Na₂Oが比較的多く長石のピークが確認されたことから長石成分を多く含む、900~1000℃の比較的低温で焼成可能な粘土と推察される²⁾。

2.4 フリクションプレス成形

上記の原料粘土に、水を適量混合し、真空土練機により押出した練土を石膏型に充填し、フリクションプレス機(図1⑤)を用いて、プレス成形試験を行った。石膏にはヌレ圧縮強さ17MPa(メーカー製品情報より)のものを使用した。過剰な圧力を加えると石膏型が破損するため、慎重に操作する必要はあるが、適切な荷重にて成形を行うことで、石膏型を破損させず、ひび割れの無い滑らかな成形体を得ることが可能であった。

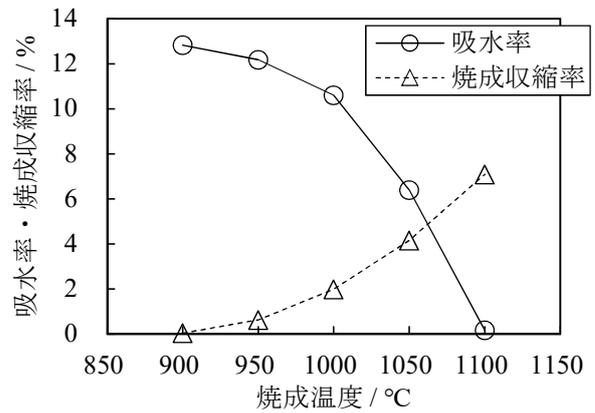


図4 焼成温度と24時間吸水率および焼成収縮率の関係

2.5 焼結体の評価

成形体を自然乾燥し、表面に光沢を出すためのはけ土を塗布して更に乾燥させたのち、燻焼成炉にて最高970℃で焼成することで、表面に銀光沢の炭素被膜を形成させた焼結体を得た。家紋瓦焼結体の形状スキャンデータとSTLデータを比較したところ、乾燥と焼成時の収縮を合わせた全収縮率は約7.5%であった。焼結体写真および形状比較結果を図3に示す。一部評価できていない部分もあるが、細かな紋様を設計通り作製出来ている。焼結体の24時間吸水率は約12%を示し、一般的ないぶし瓦と比較して若干大きい傾向にあった。吸水率(開気孔率)が大きいと凍害を受けやすくなるため、寒冷地で使用する場合は吸水率を下げる必要がある。図4に焼成温度と24時間吸水率および焼成収縮率の関係を示す。今回使用した原料粘土は、焼成温度1000~1100℃にかけて急激に焼成収縮率が増加するとともに吸水率が低下し、焼締まる傾向が見られる。よって、寸法精度を加味しながら1000℃以下で焼成温度を調整することで、所望の吸水率に制御しやすいと考えられる。想定と焼成収縮率が大きく異なる場合でも、3D CADで大きさを調整することで短期間での修正が可能である。

3 結言

本開発で作製したいぶし瓦製品の例を図5に示す。家紋瓦は、細かな紋様を持つ種々の形状が作製可能となった。本稿では家紋瓦について報告したが、園芸向け民芸品についても、3Dプリンタで樹脂型を造形し、成形に用いることで、お皿のような形の製品を作製可能となった。手作業で一から成形する場合に比べ、作業量を大きく減少させ、省力化を実現するとともに一定の品質での成形が可能である。3Dプリンタ等のデジタルものづくり技術を活用することで、型の供給安定化や成形工程の合理化を実現し、今後、安価かつ短納期で多様な形状の製品ニーズに応えることが可能となった。

本製品を普及させ、いぶし瓦をより身近なものとし、そ

表2 原料粘土の粒度分布および化学成分

平均粒径 μm	粒度分布 / mass%				化学成分 / mass%							
	粘土分 5μm以下	シルト分 5~63μm	粗粒分 63~500μm	粗大粒分 500μm以上	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	
11.5	20.3	72.4	6.7	0.5	60.6	19.3	5.2	2.8	1.1	1.8	3.3	

の魅力再認識頂くことで、いぶし瓦屋根の施工件数の増加に波及し、県内の日本瓦メーカーおよび施工業者の活性化につながることを期待する。



図5 開発したいぶし瓦製品例

本研究は、有限会社大川瓦店が採択された、かがわ産業支援財団の地域資源ブランド化・販路拡大支援事業「デジタルものづくり技術を活用したいぶし瓦製品の開発」に係る受託研究にて取組み、造形、成形および焼成試験等は、有限会社大川瓦店にて実施した。

参考文献

- 1) 片岡 良孝, 横田 耕三: 材料押出法による樹脂型の作製および植木鉢試作検討, 香川県産業技術センター 研究報告 No. 20, 20-22 (2020).
- 2) 片岡 良孝, 横田 耕三: 香川県産窯業原料粘土の物性調査および原料選定の検討, 香川県産業技術センター 研究報告 No. 16, 30-33 (2016).

ものづくりデジタル化推進事業

一切削加工におけるデジタルツイン適用事例の検討ー

熱田 俊文, 吉村 祥一, 山下 雅弘, 宮内 創, 新名 楓

「ものづくりデジタル化推進事業」における取り組みの一環として、県内企業への技術情報の提供を目的に、近年注目されつつあるデジタルツインの生産工程での適用事例について検討を行った。本報では、重要な切削工程の一つである旋削加工を対象に、デジタルツインによって切削温度をリアルタイムで推定するバーチャルセンサを構築し、工具摩耗状態の把握などへの活用を試みた内容について報告する。

1 緒言

産業技術センター・生産技術部門では、令和5年度から「ものづくりデジタル化推進事業」を開始した。この事業では、県内企業のものづくりおよび人材育成のデジタル化を促進するため、(1)講習会による関連技術情報の提供、(2)溶接技量訓練装置を活用した溶接技術者の技量向上支援、(3)3D加工・計測・CAD/CAM技術を活用したデジタルエンジニアリングに関する試作支援、(4)加工シミュレーションを援用した切削工程改善に関する検証、(5)生産工程におけるデジタルツイン適用事例の検討などの取り組みを進めている。これらの取り組みの中で、本報では、産業技術センターにおけるデジタルツインに対する取り組みについて報告を行う。

近年、ものづくりのデジタル化が推進されている中、デジタルツインというワードを目にする機会が増えている。デジタルツインとは、実在する機械の情報と解析モデル情報を組み合わせて、精度の高い将来予測などに活用する技術¹⁾であり、デジタルツインの活用はそのままDXの推進にも繋がると期待されている。一方で、生産現場においては、「デジタルツインがどのようなものかイメージできない」「何から始めたらよいかわからない」といった声も聞く。そこで本取り組みでは、県内企業への技術情報の提供を目的に、デジタルツインの生産現場での適用事例について検討した。本報では、最も重要な切削工程の一つである旋削加工を対象に、デジタルツインによって切削点の温度をリアルタイムで推定するバーチャルセンサを構築し、工具摩耗状態の把握などへの活用を試みた内容を報告する。なお、本取り組みは、当該技術に精通しているサイバネットシステム(株)の支援のもと実施したものである。

2 旋削加工におけるバーチャルセンサの構築と活用

2.1 取り組みの背景および目的

近年、切削加工を見える化するために、工作機械や工具に各種のセンサを搭載する動きが活発化している。例えば、工作機械のサーボモータやスピンドルに取り付けた電流センサの値の変化から工具や加工の状態を監視する²⁾、主軸に内蔵した加速度センサでびびり振動の発生を検出する³⁾、ツールホルダに力センサを組み付けて、加工中の切削力を検出する⁴⁾など、切削の現場でも様々なセンサを活用するケースが増えている。

しかし、一般的に加工部すなわち切削点から離れた位置にセンサを設置せざるを得ないため、切削現象に対する感度が低くなり、ユーザの求める状態把握(工具摩耗状態の把握など)ができない場合も多い。そのため、切削点により近い位置にセンサを設置できれば、切削状態をより高感度で把握することが可能になると期待されるが、切削の邪魔になる、作業性が低下する、物理的に困難であるといった問題がある。

一方、近年、デジタルツインの一つの形態として、バーチャルセンサの活用が期待されている。バーチャルセンサとは、実センサでは直接計測が困難な状態量や実センサが直接設置できない位置の物理量などを、他の位置に設置した実センサ情報と解析モデル情報を用いて検知する仮想センサである⁵⁾。検知とはいえ、シミュレーションと組み合わせてリアルタイムで推定する手法になるため、リアルタイム計算が必要であり、その技術的背景には、ROM(Reduced Order Model)と呼ばれる解析モデル低次元化技術⁶⁾の進化によるシミュレーションの高速化がある。近年、様々な産業でこのバーチャルセンサの利用が検討されつつある中⁶⁾、切削の分野でも今後、その利活用が期待されている。

以上のような背景のもと、本報では、代表的な切削工程の一つである旋削加工を対象に、デジタルツインによって切削点の情報をリアルタイムで推定するバーチャルセンサを構築し、工具摩耗状態の把握などへの活用について検討した。切削点の情報として、本報では切削点の温度(切削温度)を取り上げた。工具摩耗と切削温度との間には良好な対応があることが知られており⁷⁾、一般的に、切削温度が高くなる条件で切削すると工具摩耗が速く進行し、同じ切削条件でも工具摩耗が進行すると切削温度が高くなる。一方で、切削点近傍の温度測定(放射温度計や熱電対埋込み工具の使用など)は比較的容易であるが、切削点そのものの温度(切削温度)を測定することは一般的に難しい。したがって、実センサでは直接計測が困難な切削温度をバーチャルセンサで検知(推定)できれば、工具摩耗状態をリアルタイムかつ精度良く把握できる可能性がある。

2.2 実施内容の概略

切削中の切削温度を実測することは困難であるが、切削点から離れた位置の温度はリアルタイム測定が比較的容易である。そこで、切削点から離れた位置に設

置した実センサの値をもとに、切削温度をリアルタイム推定するバーチャルセンサについて検討した。実施内容の概略を図1に、使用機器類の一覧を表1に示す。

具体的な内容は次節で説明を加えるが、大まかな流れとして、まず使用するインサート、工具ホルダ、工作物の組み合わせで旋削実験を行い、切削中の切削温度と切削点から離れた位置（数か所）の温度に関する実験データを取得した。切削温度の実測は一般に困難であると述べたが、実験的には測定する手法がある。得られた実験データをもとに、実測値と解析値が一致するように各種の解析パラメータを同定することで、上記旋削加工に対応した3D CAEのシミュレーションモデルを作成した。ただし、3D CAEモデルは計算コストが膨大であり、そのままでは切削温度をリアルタイム推定するバーチャルセンサに応用できない。そこで、3D CAEモデルの縮退化を行い、リアルタイムでシミュレーションを実行可能な1Dモデル（ROMモデル）を作成した。そして、作成したROMモデルをノートPCに実装し、以下のようにNC旋盤における実加工に適用した。

- ・切削点から離れた所定の位置（1か所）に取り付けた実センサの温度をデータロガーで収集し、PCへ送る。
- ・実センサの値を入力として、ROMモデルの計算を行い、切削温度を推定する。同時に、切削温度の推定値をリアルタイムでPCのモニターに逐次表示する。
- ・上記をPythonのプログラムで実行する。

バーチャルセンサの検証実験として、種々の切削速度で切削温度がリアルタイム推定できるか、工具摩耗による切削状態の変化が切削温度の推定によって把握できるかなどを検証した。以上が実施内容の概略であり、次節では個々の具体的な内容について説明する。

2. 3 バーチャルセンサ構築のための準備

2. 3. 1 切削温度の実測データ取得

図2に示すとおり、工具・工作物熱電対法⁸⁾により切削中の切削温度すなわちバーチャルセンサ位置の温度



図1 実施内容の概略

表1 使用機器類の一覧

用途	型式等
切削実験	<ul style="list-style-type: none"> ・工作機械：NC旋盤（株滝澤鉄工所，TAC510 L10） ・工具：インサート（住友電工ハードメタル株）：SNMG120408N-UZ 超硬P30 工具ホルダ（株タンガロイ：PSBNR2020） ・工作物：ステンレス鋼（SUS304）
3D CAE解析	有限要素法解析ソフトウェア（Ansys社，Ansys Mechanical）
1D CAE解析/ROMモデル作成	線形モデル低次元化ソフトウェア（CADFEM社，Model Reduction inside Ansys）
温度計測	<ul style="list-style-type: none"> ・温度センサ：ガラス被覆K熱電対（株佐藤商事，K10G） ・データロガー（日置電機株，LR8450）
データ処理（切削実験時）	ノートPC：富士通株 LIFEBOOK WS1/B1 corei7-7500U，RAM 12GB

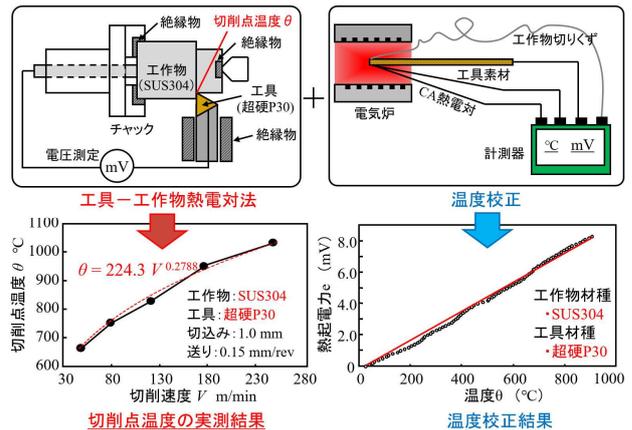


図2 切削温度の実測データ

の実測データを取得した。この方法は、工具と工作物で熱電対を構成して、切削中に両者の間で生じる熱起電力を測定することで切削点の温度を調べる方法である。あらかじめ、電気炉などを用いて、使用する工具材質と工作物材質の組み合わせによる熱起電力-温度の校正曲線を取得しておけば、切削時に測定した熱起電力から温度に換算することができる。同図には、切削速度をパラメータとして切削温度を測定した結果も示している。工作物が熱伝導率の低いSUS304であるため、切削温度は条件によっては1000°Cを超えており、旋削中の工具刃先温度は非常に高温になることがわかる。本来であれば、摩耗状態の異なる工具での切削温度も実測すべきであるが、本報では、まずはバーチャルセンサ構築の方法について検討することを目的に、摩耗していない未使用工具による温度測定のみを実施した。

2. 3. 2 切削点から離れた位置の温度データ取得
切削温度の実測と並行して、切削点から離れた所定の位置の温度データも実測した。測定箇所は図3に示されている4か所であり、市販の熱電対式温度センサ（素線径：φ0.1mm）を貼り付けて、切削速度毎に温度測定を行った。図4に、切削開始からの各点温度の時系列データを取得した例を示す。なお、実験では、次項

図3 測定箇所
図4 各点温度の実測例

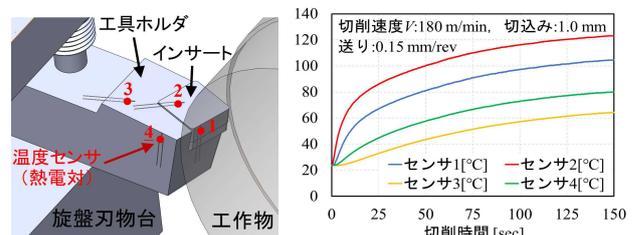


図3 測定箇所

図4 各点温度の実測例

で 3D CAE のシミュレーションモデルを作成するうえで精度向上を目的に、4 か所の温度を取得したが、バーチャルセンサの運用時には、工具ホルダ側の 1 か所（図 3 中の位置 4）のみに温度センサを取り付け、そのセンサ値を入力データとして切削温度を推定する。

2. 3. 3 3D CAE のシミュレーションモデル作成

図 5 に示すように有限要素法解析ソフトウェア (Ansys Mechanical) を使用して、上記の旋削加工に対応した 3D CAE のシミュレーションモデルを作成した。入熱量や熱伝達、接触熱伝導率などの解析パラメータは、実測と熱解析結果が一致するように合わせ込むことで同定した。なお、入熱量（熱源範囲は切削実験後の工具刃先の観察結果から推定）とインサート・工具ホルダヘッド部の熱伝達は、切削速度毎に同定した。

図 6 は、解析で得た切削温度および所定位置の温度の時刻歴応答を実測データと比較した例である。実測値を実線で、解析値を破線で表示しているが、実測とほぼ同じ解析結果が得られている。

2. 3. 4 3D CAE モデルの縮退化 (ROM モデル化)

バーチャルセンサに応用するには、計算時間の短縮が必要となるため、CADFEM 社製のモデル低次元化ソフトウェア (Model Reduction inside Ansys; MRiA) を使用して、3D CAE モデルの縮退化を実施した。MRiA は、Ansys のシミュレーションモデルから比熱マトリクスや熱伝導マトリクスなどを取得することでモデルの縮退化が可能な Ansys Mechanical のアドオンツールである⁹⁾。関連部位の計算のみに限定することで、入出力の動的関係を保持しながら、図 7 に示すような自由度

を数十自由度まで低減した“状態空間モデル”と呼ばれる線形 1D モデル (ROM モデル) に変換することができる⁹⁾。本報では、前項で 3D CAE モデルを作成した切削速度条件毎に、MRiA で状態空間マトリクス (図中の A, B, C) を取得し、3D モデルの ROM 化を行った。入力である熱流 (工具入熱量) に対する出力としては、工具刃先温度と図 3 の位置 4 における温度の 2 つであり、入熱と熱伝達を与えれば、この ROM モデルで切削温度とセンサ位置 4 の温度を計算することができる。

ROM モデルの精度検証のため、入力として刃先に各切削速度に対応した入熱を与え、センサ位置 4 における温度の時刻歴応答を調べた結果を図 8 に示す。同図には、実測結果および Ansys による解析結果も示しているが、いずれも結果はほぼ同じであり、ROM モデルでの 1D 解析結果も Ansys による 3D 解析結果と精度的にほぼ同等であることが確認できる。なお、同図は加工開始から 150 秒までの時刻歴応答を計算したものであるが、3D CAE モデルでは計算時間が約 50 秒であったのに対し、ROM モデルでは計算時間が 0.1 秒以下であり、処理が大幅に高速化されていることも確認できた。

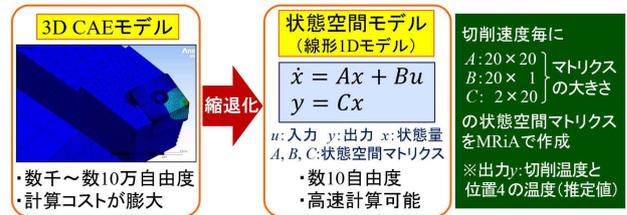


図 7 状態空間モデル (線形 1D モデル) の説明図

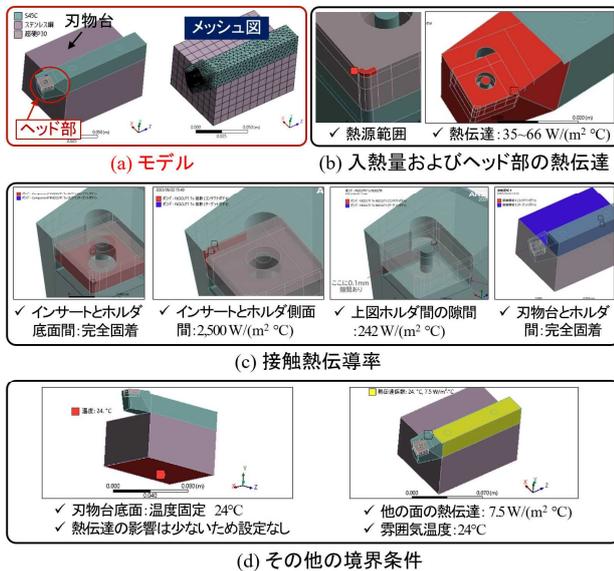


図 5 3D CAE のシミュレーションモデル

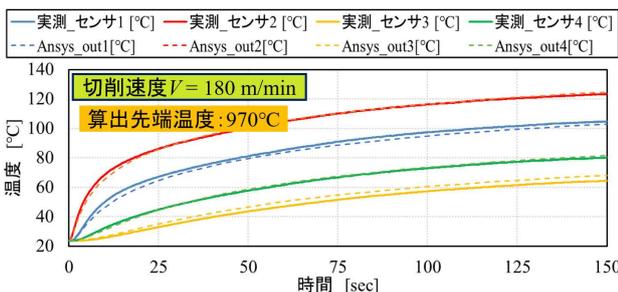


図 6 実測結果と Ansys による解析結果の比較

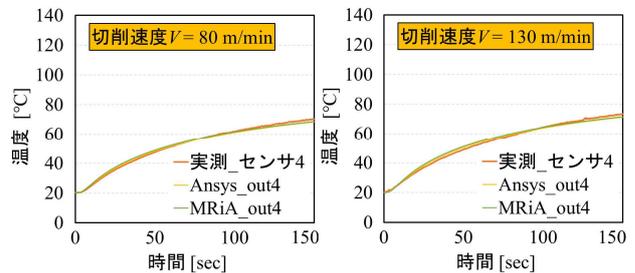


図 8 ROM モデルによる 1D 解析結果の例

2. 3. 5 実加工時の工具入熱量の推定について

以上により作成した ROM モデルであるが、解析時の入力は工具入熱であり、出力は切削温度とセンサ位置 4 の温度 (推定値) である。一方で、実加工時にリアルタイムで測定できるのは、センサ位置 4 の温度 (実測値) であり、工具入熱量は不明である。したがって、バーチャルセンサとして活用する場合には、センサ位置 4 の温度 (実測値) を入力として、まず工具入熱量を推定し、そこから ROM モデルの計算を行って切削温度とセンサ位置 4 の温度 (推定値) を求めることになる。この点に関して本報では、エンドミル加工における先行事例¹⁰⁾と同様に、図 9 に示す状態フィードバック制

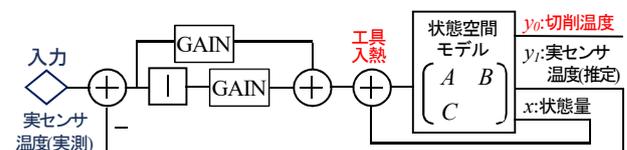


図 9 状態フィードバック制御のブロック線図

御¹⁰⁾による処理をpythonで実装し、計測したセンサ位置4の温度データから工具入熱量を推定するといった逆問題に対応している。

2. 4 検証実験

構築したバーチャルセンサをNC旋盤における実加工に適用し、動作確認とその活用についての検証実験を行った。実験方法および実験装置の構成は、2.2節で既に記載したとおりであり、切削点から離れた工具ホルダに取り付けた実センサ(1か所)の温度データをもとに、切削中の切削温度をリアルタイムで検知する。

まず、切削速度を変えて外周旋削加工を行い、それぞれの条件で切削温度が推定できるかどうかを確認した。切削条件は、切削速度50, 80, 130, 180 m/min, 切込み量1.0 mm, 送り量0.15 mm/revとし、実験にはそれぞれ未使用(工具が摩耗していない状態)のインサートを使用した。図10に、各切削速度で2分間切削したときの切削温度(推定値)の時系列データを取得した結果を示す。なお、これらの切削温度の推定値は、実際の切削中にはリアルタイムでPCのモニターに表示(グラフ化)され、作業者が確認できる。同図から、いずれの切削速度でも、2.3.1項で実測した切削温度とほぼ同じ温度となっており、切削条件に応じて妥当な切削温度の推定値が得られている。

図11は、同じ切削条件(切削速度130 m/min)で工具摩耗状態の異なるインサートにより切削したときの切削温度(推定値)を比較した結果である。この条件では、工具摩耗が進行していない状態(同図(a):初期)での切削温度は約800°Cであるが、ある程度摩耗が進行した状態(同図(b):逃げ面摩耗0.2 mm)では、約890°Cまで温度が上昇しており、切削温度の推定値から工具摩耗による切削状態の変化が判断できる。一般的な荒加工の工具寿命(逃げ面摩耗0.4 mm)に対し、同図(b)のインサートはまだ工具寿命には達していないが、バーチャルセンサで検知した切削温度に適切な閾値を設定することによって、工具寿命をリアルタイムで判定できる可能性があることがわかった。

3 結言

デジタルツインの適用事例として、旋削加工におけるバーチャルセンサの構築と活用について検討を行った。その結果、構築したバーチャルセンサによって旋削加工中の切削温度をリアルタイムで推定できること、切削温度の推定値から工具摩耗による切削状態の変化をリアルタイムで把握できる可能性があることなどがわかった。ただし、現時点では、工具の温度がシミュレーションモデルを構築した室温付近である状態からの切削のみ切削温度推定が可能である。切削開始前の工具初期温度が異なる状態からの切削への対応については今後の課題としたい。また、本報では切削加工を対象にデジタルツインの適用事例を検討したが、今後、溶接など他の生産工程における事例についても検討を進める予定である。

謝辞

本報における取り組みを実施するにあたり、サイバネットシステム(株)喜多雅子様、宮内隆太郎様、北川智也様、北嶋和美様には、進め方の協議から、解析、実装に至

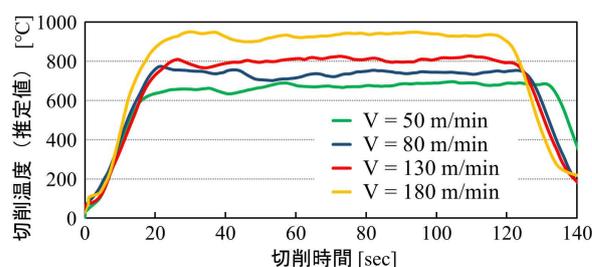


図10 各切削速度における切削温度の推定結果

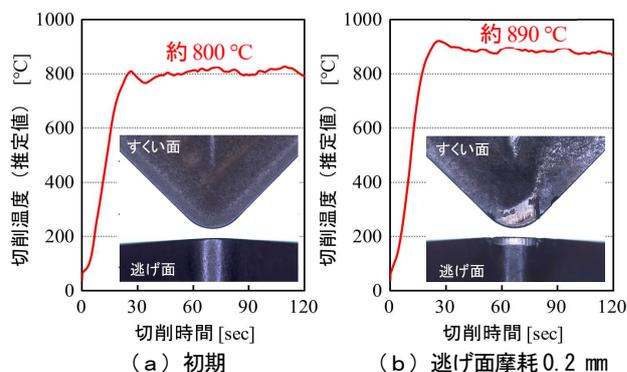


図11 工具摩耗進行による切削温度の変化

るまで、多大なる御協力をいただきました。ここに心からの感謝の意を表します。

参考文献

- 1) サイバネットシステム: デジタルツインとは? 5つのメリットを徹底解説, <https://www.cybernet.co.jp/iot/column/digital-twin> (閲覧日: 2024. 3. 6).
- 2) Mazin: 切削工具監視 AI アプリ, <https://lp.mazin.tech/cut-tool/cut-tool> (閲覧日: 2024. 3. 6).
- 3) ヤマザキマザック: スムース AI 主軸, <https://www.mazak.jp/machines/technology/smooth-ai-spindle> (閲覧日: 2024. 3. 6).
- 4) 福田交易: spike センサ内蔵ツールホルダ, <https://www.fukudaco.co.jp/products/types/measuring/cutting-force> (閲覧日: 2024. 3. 6).
- 5) サイバネットシステム: 3D-CAE モデルを活用したバーチャルセンサ構築手法, <https://www.cybernet.co.jp/ansys/case/analysis/453> (閲覧日: 2024. 3. 6).
- 6) Mordor: 仮想センサ市場規模, <https://www.mordorintelligence.com/ja/industryreports/virtual-sensors-market> (閲覧日: 2024. 3. 6).
- 7) 竹山秀彦, 村田良司: 工具摩耗の温度依存性, 精密機械, Vol. 27, No. 312, pp. 33-38 (1961).
- 8) 細川晃: 加工点温度の計測研究総覧, 砥粒加工学会誌, Vol. 66, No. 6, pp. 310-313 (2022).
- 9) 喜多雅子: 大規模解析の計算コスト削減に寄与する「高速シミュレーションのためのモデル低次元化ツールのご紹介」, 第28回計算工学講演会論文集, vol. 28, B-05-01 (2023).
- 10) サイバネットシステム: 工作機械のデジタルツイン適用にむけた取り組み, <https://www.cybernet.co.jp/ansys/download/wp/202202/mcwpp202202-0170> (閲覧日: 2024. 3. 6).

摩擦攪拌接合の薄板適応についての検討（第2報）

新名 楓, 熱田 俊文, 吉村 英徳*

前報では、摩擦攪拌接合（FSW）の適用範囲拡大を目的に、板厚 0.1 mm の薄板（SUS304）に対して FSW を実施し、接合速度が接合部に及ぼす影響について検討した。その結果、接合速度を適切に設定することにより、比較的良好な継手が得られることが分かった。しかしながら、接合線の始点近傍が接合されていない、継手に微細な欠陥が認められるなどの品質面における課題もあった。そこで、本報では、これらの課題を改善できると考えられるツール挿入後の保持時間および前進角について検討した。その結果、保持時間が長すぎる場合、入熱量が過剰になり、接合部に欠陥が生じた。また、ツールに前進角を与えた場合、接合線の前半部分では、ツールおよび供試材の接触面積の減少により、突合せ面が変形しづらくなり、接合が困難になった。後半部分では、接合することはできたものの、欠陥を抑制するには至らなかった。

1 緒言

摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding：FSW）は、回転させたツールを材料に押し付け、塑性流動させることで材料同士を接合させる手法である。特徴として、溶融溶接法よりも熱影響による強度低下が小さいこと、ヒューム・スパッタ・紫外線が発生しないことなどが挙げられ、鉄道車両などの分野で実用化されている¹⁾。FSW の対象となる材料はアルミニウム合金などが多いが、炭素鋼やステンレス鋼などでも接合の報告例がある。しかし、薄板の接合に関する報告は少なく、特に突合せ接合の報告例はほとんど見当たらない。

そこで本研究では、FSW の適用範囲拡大を目的に、板厚 0.1 mm の薄板（SUS304）に対する突合せ FSW について検討を行っている。FSW で健全な継手を得るためには、適切な入熱量の制御が特に重要である。そこで、前報²⁾では、この入熱量に大きく関与する接合速度（ツールの移動速度）の影響について検討した。その結果、接合速度を適切に設定すれば、図 1 に示すように、板厚 0.1 mm の薄板に対しても比較的良好な継手が得られることを示した。一方で、前報で得られた継手には、図中で示されるように接合線の始点近傍が接合されていない、継手に微細な欠陥が認められるなどの品質面における課題もあった。接合線の始点近傍が未接合状態となることは、始点における入熱量が不足しているためと考えられる。このため、供試材へのツール挿入後から移動開始までの間に設ける保持時間を管理すれば、均一な接合部を得られる可能性がある。また、通常、FSW では、ツールを接合進行方向に対して数度傾斜させる前進角を与え、攪拌時の塑性流動に影響をもたらすことにより、継手内部の欠陥を生じにくくさせる^{3), 4)}。そのため板厚が 0.1 mm の薄板に対しても、微細な欠陥の発生を抑制できる可能性がある。そこで、本報では、薄板の突合せ FSW における継手品質の向上を目的に、保持時間および前進角の影響について検討を行った。

2 実験方法

実験に使用したツールの形状および平坦面の拡大図を

* 香川大学創造工学部

図 2 に示す。ツール先端に攪拌による材料の盛り上りを抑制するため、半径 15 mm の球頭部を設けた。さらに、球頭部先端には攪拌を行うため、直径 1.5 mm の平坦面を設けた。ツールの材質はタングステンとし、直径 10 mm の丸棒から試作した。供試材は、板厚 0.1 mm のオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）を用いた。

実験の方法は図 3 に示すとおりである。マシニングセンタ（ヤマザキマザック、VERTICAL CENTER NEXUS 430B-II HS 型）の主軸に試作したツールを取り付け、FSW の接合実験を行った。供試材の継手形状は突合せ形状とし、接合距離は 16 mm とした。裏当て材には、供試材との凝着を防止するため、アルミナ製のセラミックプレートを使用した。また、前進角を与える際には、ツールを進行方向とは逆向きに傾斜させる。しかしながら、本実験で使用したマシニングセンタは、主軸に取り付けたツール角度を任意に変更できない。そこで、裏当て材をツール進行方向に対し、鉛直下向きに傾斜させ、前進角を与えた⁵⁾。裏当

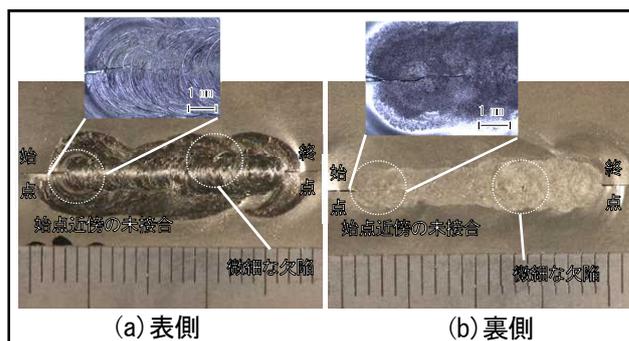


図 1 前報の試験片外観（回転数 6000 rpm, 保持時間 3 秒, 前進角 0°, 接合速度 300 mm/min）

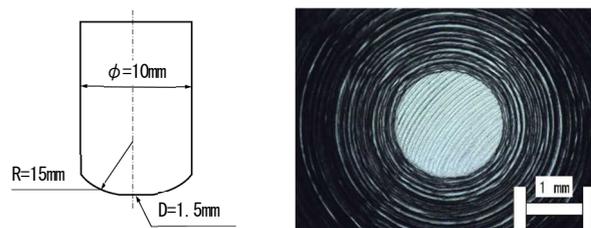


図 2 ツール形状および平坦面拡大図

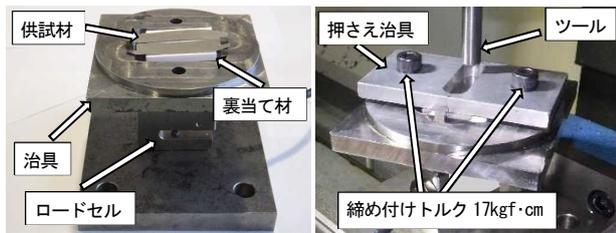


図3 接合実験の方法

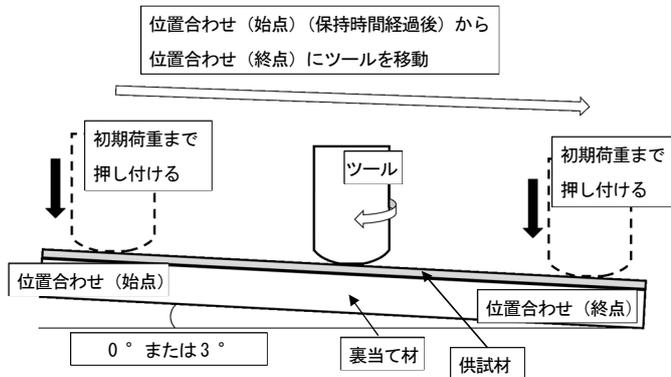


図4 位置合わせ模式図

表1 接合条件 (保持時間についての検討)

主軸回転数 rpm	6000
初期荷重 N	125
ツール前進角 °	0°
押し込み速度 mm/min	0.5
保持時間 s	3, 6, 9
接合速度 mm/min	300

て材の下部に設置したロードセル (エー・アンド・デイ, LC1205-K100) で測定される荷重により, ツールと供試材の位置合わせを行った. 位置合わせの模式図を図4に示す. 接合線の両端のそれぞれにおいて, 静止状態のツールを供試材に押し付け, ロードセルの測定荷重が所定の初期荷重 (125 N) となるツール先端位置を求め, 接合の「始点」および「終点」として設定した. そして, ツールを供試材から離れた後, 回転させながら始点まで下降し, 保持時間を設けた. その後, 終点まで所定の接合速度 (300 mm/min) でツールを移動させ, FSW を行った. 本実験では, 保持時間および前進角をパラメータとし, 接合実験を行った. 保持時間について検討した接合条件を表1に, 前進角について検討した接合条件を表2に示す. 本報では, 接合後の供試材において, 主にツール平坦面によって, 攪拌が生じた箇所を「接合部」としている.

3 実験結果と考察

3.1 保持時間についての検討

保持時間を図1の3秒から延長し, 6秒とした場合の試験片外観を図5に示す. 接合線の大部分を接合可能であったが, 微細な欠陥が発生していた. また, 図5(b)で示されているように, 裏側における接合部の幅は始点より終点の方が広がるが多かった. これは, ツールの移動に伴う接合時の温度上昇により, 攪拌される領域が広がっており, 接合距離が長くなるほど, 品質に影響を及ぼ

表2 接合条件 (前進角についての検討)

主軸回転数 rpm	7500
初期荷重 N	125
ツール前進角 °	3
押し込み速度 mm/min	0.5
保持時間 s	6, 9, 12
接合速度 mm/min	300

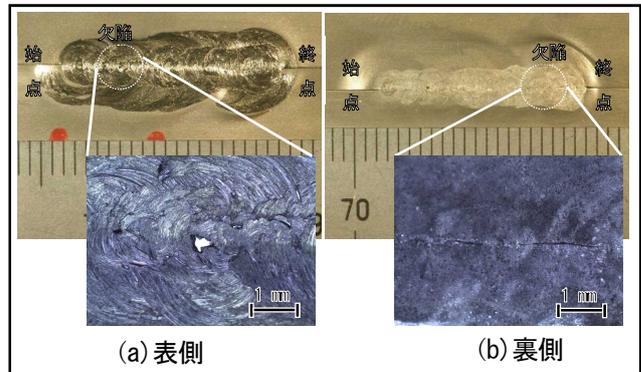


図5 試験片外観

(回転数 6000 rpm, 保持時間 6 秒, 前進角 0°)

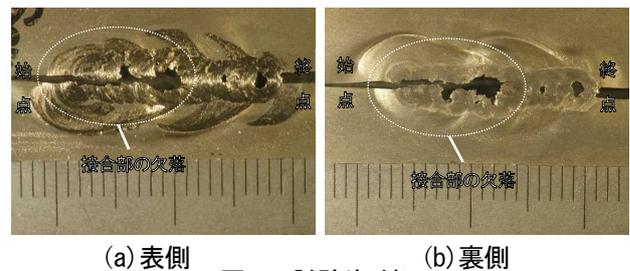


図6 試験片外観

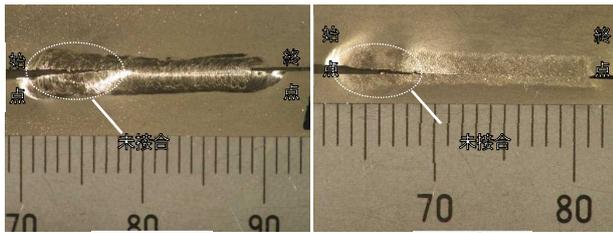
(回転数 6000 rpm, 保持時間 9 秒, 前進角 0°)

すことが考えられる. また, 図1のような接合線の始点近傍が未接合となる状態が発生する場合も依然としてあった. この要因としては, 板厚 0.1 mm の薄板の場合, 一般的な FSW に比べ, 材料にツールを挿入する量を極端に小さくしなければならないため, 本報で実施した接合条件では, 材料の裏面までを十分に攪拌させることが難しかったことが考えられる. 図6に, さらに, 保持時間を伸ばし, 9秒とした場合の試験片外観を示す. 接合線の半分程度が欠落しており, 過剰な入熱量のため, 材料が攪拌されすぎたことが要因として考えられる. これらのことから, 保持時間のみの検討では, 改善が困難であった.

3.2 前進角についての検討

予備実験として, 3.1節と同様の条件 (回転数 6000 rpm, 保持時間 6 秒) に前進角を与えた場合の試験片外観を図7に示す. 接合線の前半部分は, 突合せ面がほとんど変形せず, 接合していない. また, 前進角を与えていない図5と比較してみると顕著であるが, 後半部分についても接合が困難になっていることがわかる. この理由として, ツール平坦面および供試材の接触面積が大きく減少したため, 入熱量が減少し, 塑性流動が発生しにくくなっていることが考えられる. そこで, 始点の接合状態を確認するため, 図7と同回転数条件において保持時間経過後, ツールを上昇させ, 加工を終了する点接合を実施した. 保

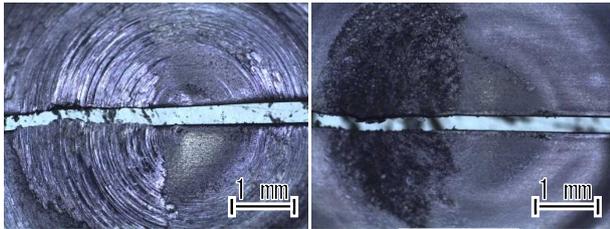
持時間



(a) 表側 (b) 裏側

図7 試験片外観

(回転数 6000 rpm, 保持時間 6 秒, 前進角 3°)



(a) 表側 (b) 裏側

図8 試験片外観 (点接合)

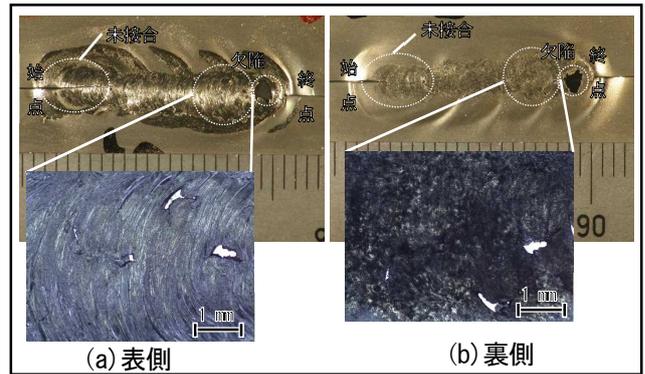
(回転数 6000 rpm, 保持時間 6 秒, 前進角 3°)

6 秒とした場合の外観を図8に示す. 同図より, ツール平坦面は, 供試材に半分程度しか接触していないことがわかる. また, 突合せ面についてもほとんど変形せず, 接合には至らなかった. 保持時間を長くすることで, 接合する場合もあったが, その頻度は少なく, 試験体の持ち運び時に破断してしまうほど, 強度が低下していた. 接合した場合も表側の攪拌面積は, 図8と同様に大きく減少しており, 裏側では, ほとんど突合せ面が変形せず, 接合している箇所はわずかであった. 以上のことから, 接合線の前半部分では突合せ面が変形せず, 接合していない状態でツールが移動している. もしくは, 始点では接合したが, ツールの移動に伴い, 破断してしまったことが考えられる.

そのため, 本節では, 塑性流動を発生させやすくするため, 回転数を 7500 rpm として接合実験を行った. 3. 1 節と同様に保持時間を 6 秒とした外観を図9に示す. 図7と同様に接合線の前半部分は接合せず, 後半部分については, 接合部に微細な欠陥が発生していた. また, 保持時間を 12 秒とした場合の外観を図10に示すが, 接合線の終点付近では, 接合部が大きく欠落し, 入熱量が過剰となった. 通常, 前進角は, 攪拌時の塑性流動に影響し, 継手内部の欠陥を生じにくくさせる. しかしながら, 板厚 0.1 mm の薄板の場合, 材料に対するツールの挿入量が極端に少ないため, 前進角で期待される欠陥の抑制よりも, ツール平坦面および材料の接触面積の減少による影響が大きいことがわかった.

4 結言

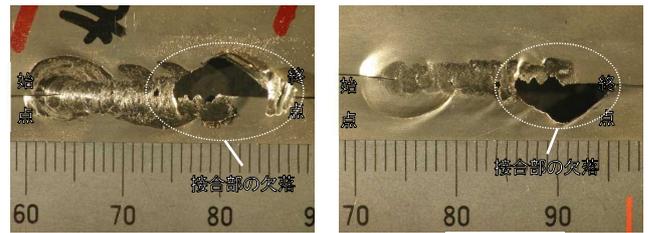
板厚 0.1 mm の薄板 (SUS304) に対し, FSW を試み, 前進角および入熱量が接合部に及ぼす影響について検討した. その結果, 以下の知見を得た.



(a) 表側 (b) 裏側

図9 試験片外観

(回転数 7500 rpm, 保持時間 6 秒, 前進角 3°)



(a) 表側 (b) 裏側

図10 試験片外観

(回転数 7500 rpm, 保持時間 12 秒, 前進角 3°)

- (1) 接合線の始点での保持時間が長すぎる場合, 入熱量が過剰になり, 接合部に欠陥が生じる.
- (2) 前進角を与えた場合, ツール平坦面および供試材の接触面積が減少することにより, 接合線前半部分では, 入熱量が不足し, 接合が困難になった. 後半部分では, 接合することができたが, 欠陥を抑制するには至らなかった.

参考文献

- 1) 社団法人 溶接学会編: 摩擦攪拌接合—FSW のすべて—, 産報出版株式会社 (2006).
- 2) 新名楓, 熱田俊文, 吉村英徳: 摩擦攪拌点接合の薄板適応についての検討 (第1報), 香川県産業技術センター研究報告, No. 21, pp. 36-38 (2020).
- 3) 熊井真次, 若菜剛介, 山脇正人, 李光鎮, 佐藤彰一: 摩擦攪拌接合した 6061 アルミニウム合金薄板の組織と力学的性質, 軽金属, 第53巻 第11号, pp. 542-547 (2003).
- 4) 青田欣也, 池内建二: プローブ無しツールを用いたアルミニウムの重ね摩擦攪拌接合, 溶接学会論文集, 第26巻 第4号, pp. 284-291 (2008).
- 5) 安井利明, 柳玉恒, 福原俊昭, 山口修平, 廣澤堅, 森達也: 薄鋼板とアルミニウム合金薄板の摩擦攪拌重ね接合における接合ツール的前進角と押し込み量の影響, 鉄と鋼, Vol. 108, No. 12, pp. 979-990 (2022).

可食原料を利用したフィルムの試作(第三報)

—米粉フィルムへの粉末セルロース添加効果—

大西 茂彦, 久保 和子, 浅井 貴子, 松原 梓, 西村 冨加

米粉フィルムの性能向上を目的として, 粉末セルロースの添加効果を検証した. 米粉の 20%相当量の粒子径の異なる 3 種類の粉末セルロースを添加して米粉フィルムを調製したところ, いずれの試験区においてもフィルムを調整することができた. 調製したフィルムの性能を評価した結果, 粒子径の最も大きい W-50 (粒度 50 メッシュパス) 添加区は, 突き刺し強度, 引張強度および引張弾性のいずれの試験でも, 粉末セルロース無添加区, W-400G (粒度 400 メッシュパス) 添加区および W-10MG2 (平均粒子径 約 10 μm) 添加区より高い値を示した.

1 緒言

石油を原料とするプラスチックは, 我々の生活に高い利便性を与えているが, 自然界での分解性が低く海洋等の環境汚染が世界的な問題となっている. この問題を解決するため, 環境負荷の低いプラスチック代替素材の開発が試みられている¹⁾. 筆者らはこれまでの研究で, 77%の糖質(大半がでんぷん)と 6%のたんぱく質を含む高分子複合体である米を代替素材として選択し, トランスグルタミナーゼとクエン酸を添加することにより, 厚さ 0.16 mm, 突き刺し強度 2.9 N, 引張強度 7.1 N の米粉フィルムの調製が可能であることを報告している²⁾.

本研究では, 米粉フィルムのさらなる性能向上を目的として, 粉末セルロースの添加効果を検証した.

2 材料と方法

2.1 材料

米粉の原料として, 香川県産米(平成 30 年度産)を使用した. 米粉の作製は既報²⁻³⁾に準じ, ふるい(目の開き 100 μm)を通過した米粉を試験に供した.

可塑剤は, D-ソルビトール(試薬一級, 富士フィルム和光純薬((株)))を使用した.

使用した粉末セルロース W-50 (粒度 50 メッシュパス), W-400G (粒度 400 メッシュパス), W-10MG2 (平均粒子径 約 10 μm) は, 日本製紙 (株) から提供を受けた. 粉末セルロースの顕微鏡観察にはシステム生物顕微鏡 ((株) エビデント BX53) を使用した.

2.2 フィルム作製

フィルムの作製方法は既報²⁻³⁾に準じた. 米粉 7.5 g, D-ソルビトール 3 g, 添加剤 1.5 g, 蒸留水 138 g を 300 mL 容三角フラスコに秤量して 90°C の湯浴中で糊化させて得られたゲルを 45°C に冷却し, 真空条件下で脱気した後, アクリル板 (200 mm x 200 mm, 5 mm 厚) に乗せ, 200 mm 幅の膜圧調整機能付きフィルムアプリータ (064-10, オールグッド) で 1.8 mm の厚さに引き伸ばし, 70°C のオーブンで 2 時間乾燥させてフィルムを作製した. 試作したフィルムは剥離後, 性能試験に供するまで, 飽和臭化ナトリウム水溶液で相対湿度 57% (25°C) に調整したデシケータ内で保管した.

2.3 フィルムの性能評価

フィルムの厚さ測定には, シックネスゲージ (0.001 mm 単位) (SM-1201L, テクロック) を使用した. 5 か所の厚さを測定し, 平均値をフィルム厚さとした.

フィルムの突き刺し試験は既報²⁻³⁾に準じ, 5 か所からサンプリングしたフィルムを測定し, 平均値を突き刺し強度とした.

フィルムの引張強度および引張弾性は, 日本工業規格 JIS Z 1707:2019 の方法に従い, クリープメーター (RE-33005, 山電), 平行締付タイプ引張型チャック (TJ-3305-2030, 山電) および破断強度解析ソフトウェア (BAS-3305W, 山電) を使用して測定した. 使用した試料は, 幅 10 mm, チャック間の初期距離 100 mm とし, 引張強度は速度 5 mm/sec, 引張弾性率は速度 0.1 mm/sec で測定した. 測定試料はキャスト方向に垂直のものを 5 か所切り出し測定し, 平均値を求めた.

3 結果と考察

本研究では, 食品添加物グレードで粒度サイズの違う粉末セルロース 3 種類を使用した. 粉末セルロースの顕微鏡写真を図 1~3 に示した. 米粉の 20% に相当する粉末セルロースを添加して米粉フィルムを調製し, 粉末セルロースの粒子サイズと米粉フィルムの強度の関係を調査した.

粉末セルロースを添加した米粉フィルムは, 乾燥後にアクリル板から問題なく剥離することができた. 調製した米粉フィルムの性能等を表 1 に示した. 調製した 4 種類のフィルムのうち, 粉末セルロースを添加したものは無添加区と比較して引張弾性率が大きく向上していた (3.2~4.5 倍). また, 引張弾性に影響を受けると考えられる引張強度も無添加区と比較して 1.4~1.7 倍向上していた. 3 種類の粉末セルロースのうち, 粒子径の最も大きい W-50 (粒度 50 メッシュパス) 添加区は, 突き刺し強度, 引張強度および引張弾性のいずれの試験でも, 他の試験区と比較して高い値を示した. 顕微鏡観察からも明らかのように, W-50 は長い繊維長を有しており, 米粉フィルム中に分散されることにより機械的強度を付与しているものと考えられた.



図1 粉末セルロースの顕微鏡写真 (W-50)



図2 粉末セルロースの顕微鏡写真 (W-400G)



図3 粉末セルロースの顕微鏡写真 (W-10MG)

4 結言

米粉と粉末セルロースを原料としてフィルムを調整した。3種類の粉末セルロースを比較した結果、粒子径(長)が大きい(長い)ものがフィルムの物理強度の改善効果が高かった。使用した粉末セルロースはいずれも食品添加物グレードであり、試作した米粉フィルムは可食フィルムとして利用可能である。今後、昨年までの試験で米粉フィルムの物性改善に有効であることが確認されているトランスグルタミナーゼを併用することで、さらなる性能向上を検討する予定である。

参考文献

- 1) A. D. Bartolo, G. Infurna, N. T. Dintcheva: A Review of Bioplastics and Their Adoption in the Circular Economy, *Polymers*, **13**, 1229-1254 (2021).
- 2) 大西茂彦: 可食原料を利用したフィルムの試作(第二報)-米粉フィルムの厚膜化-, 令和4年度香川県産業技術センター研究報告, 41-43 (2022).
- 3) 大西茂彦: 可食原料を利用したフィルムの試作(第一報)-米粉フィルム作製方法の確立とその性能評価-, 令和3年度香川県産業技術センター研究報告, 44-45 (2021).

表1 粉末セルロースを添加した米粉フィルムの物性等

	厚さ(mm) (±標準偏差)	突刺し強度(N) (±標準偏差)	引張強度(N) (±標準偏差)	引張弾性率(Mpa) (±標準偏差)
粉末セルロース 無添加区	0.116 (±0.007)	1.804 (±0.235)	6.090 (±0.127)	9.818 (±1.040)
W-50	0.133 (±0.005)	2.589 (±0.353)	10.248 (±0.390)	43.928 (±8.585)
W-400G	0.117 (±0.002)	1.952 (±0.147)	8.404 (±1.976)	31.502 (±5.161)
W-10MG2	0.109 (±0.002)	1.726 (±0.441)	9.032 (±1.976)	32.018 (±1.610)

グルコマンナンの農業用資材等への応用検討

藤本啓資, 白川寛

プラスチックが引き起こす環境汚染の解決は喫緊の課題であり、自然界へ残留するごみの削減を目的とした天然素材の活用は重要な取り組みの1つである。本研究では、天然素材を用いた資材の開発支援の1つとして、グルコマンナンの農業用資材への応用について検討を行った。その結果、グルコマンナンを凍結乾燥させることで、柔軟性と頑丈さを兼ね備えた成型体を作製することができ、得られた成型体は水を含むことで容易に分解される特徴があることが分かった。また、グルコマンナンをアセチル化することで生分解性を抑制可能であると考えられた。

1 緒言

プラスチックは私たちの生活に欠かせないものとして、様々な分野で利用されている。しかし近年、ゴミとして排出されたプラスチックが長期間環境中に残留し、自然環境を汚染することが問題視されるようになってきた¹⁾。その対策の一つとして、生分解性プラスチックの開発や天然素材を使用した資材の開発などが行われている²⁾。

グルコマンナン(以下GMと記載する)は、サトイモ科の植物であるコンニャクイモから生成される、**図1**のようにグルコースとマンノースからなる物質である³⁾。GMは天然の多糖類であることから、自然環境中で容易に分解し、また食品の原料として利用されていることから資源としても豊富な物質である。このような利点に着目し、本研究ではGMの農業用資材への応用について検討を行った。

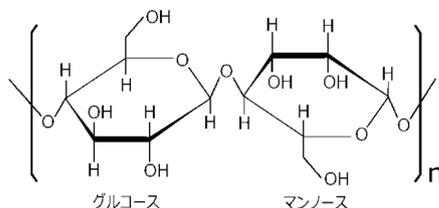


図1 グルコマンナンの典型的な部分構造

2 実験

2.1 研究方針

GMの農業用資材への応用にあたって、まず育苗ポットの作製を目標として研究を行うこととした。育苗ポットとは、野菜や稲などの種を播き、一定の大きさになるまで育てるための容器のことである。ある程度大きくなった苗は、土ごとポットから取り出して畑に植え替えられる。一般にはポリエチレン製のものが市販されており、これをGM製の育苗ポットで代替できればプラスチック削減に大きく貢献できる。また、GM製のポットに苗を入れた状態で畑に植えることが可能になれば、省力化できるという点で消費者側にもメリットが見込める。このような理由からGMを用いた育苗ポットの作製を検討することとした。

作製する成型体の要件は以下の3点であると考えた。

- ①最低6カ月間の保管が可能であること
- ②柔軟で破損しにくいこと
- ③育苗する作物に応じた適当な期間で分解すること

①について、育苗ポットのように大量に使用する資材は、あらかじめ大量に購入したものを保管しておき必要な時に取り出して使う、といった取り扱い方が一般的であると考えられる。よって作製する成型体は未使用状態で長期間変質しないことが望ましい。保管可能期間の一つの目安として、一般的な農作物では2月から4月ごろに育苗を開始することが多い。また、製造から流通、販売までにおよそ2か月かかるものと仮定する。よって、例えば1月に資材を購入しておき、2~4月に順次育苗を行う、といった扱い方ができるように最低6カ月間保管状態で変質しない成型体の作製を目標とする。②について、育苗ポットは通常の農作業に耐える必要があり、多少粗く扱っても破損しない程度の強度と柔軟性を持った成型体を作製することが望ましいと考えられる。そこでPE製育苗ポットのように、折り曲げたり丸めたりしても破損しないような強度と柔軟性を持った成型体の作製を二つ目の目標とした。③について、スイカやキュウリなどの一般的な作物では1カ月前後期間の育苗を行う。よって作製する育苗ポットは最低でも1か月分解しないことが求められる。また、ナスやトマトなど、より長期間の育苗期間が必要な作物もあるため、分解にかかる日数を任意に調節できることがより好ましいものと考えられる。以上の3要件を満たす育苗ポットの作製を目的として実験を行った。

2.2 GM成型体の作製・製法の検討

GMは通常の状態では粉末であり、多糖類であるためにプラスチックのような加熱溶解成型を行うことは難しい。一方でGMは水に溶けてゾルを形成する。このゾルに対して適量のアルカリを加えて加熱すると、柔らかいゴムのようなゲル状の固体に変性する。これはGMから食品用のこんにやくを作製するとき用いられる一般的な製法である。このようにしてGMは粉末状から固形状に加工することが可能であり、加熱時に適当な型に入れることで任意の形状に成形できる。しかし、この方法で得られた成型体は多量の水分を含んでいるためカビや腐敗に弱く、長期保管には不向きであり資材としての利用方法が限定される。そこで食品用こんにやくの製法を改良することで、水分を含まない、長期保管可能な成型体を作製する方法について検討を行った。

2.2.1 成型体の作製

従来の食品こんにやくを作る製法で成型体を作製し、水分を除去するために乾燥させた。作製手順は以下の通りである。

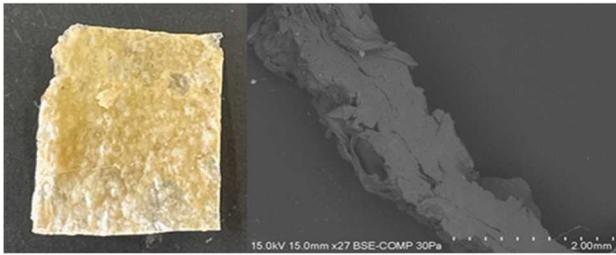


図2 作製した成型体(左)と断面 SEM 画像(右)

1. 蒸留水 300 ml に対して, 9 g の精粉された GM を加えて攪拌した.
2. 10 ml の蒸留水に分散させた水酸化カルシウム 0.45 g を 1. の溶液に加えて攪拌した.
3. 攪拌した溶液を 50 mm×50 mm×10 mm の板状に成形し, 沸騰した湯浴中で 2 時間加熱した.
4. 成型体を取り出し, ドラフト中で 7 日間乾燥させることで図 2 (左) のような成型体が得られた.

前述の 3 要件について, まず得られた成型体が要件①の 6 か月以上保管可能であるか調査した. 成型体を屋外の直射日光下で放置したところ, 6 か月間外見や性状が変化せず, 安定していることが分かった. 次に要件②の成型体の柔軟性について調査したところ, 硬質であり引張に対して高い強度を持っていることが分かった. 一方で成型体を折り曲げると容易に亀裂が発生し破損することから, 変形に弱く柔軟性に乏しいことが分かった.

成型体断面について走査電子顕微鏡 (SU3500, 株式会社日立製作所, 以下 SEM と記載) 観察を行った結果を図 2 (右) に示す. 成型体は隙間のない密な構造を取っており, 約 1.1mm と比較的厚い膜厚だった. この結果から, 成型体の厚みを薄くすることで柔軟性を向上させることができるのではないかと考え, 膜厚の薄い成型体を作製した. しかし, 実験の結果, 成型体を薄くすると柔軟性は向上したが, 軽く爪で引っ掻くと破れる程度に強度・硬度が低下した. また, 膜厚を変えて何点か試作を行ったが, 柔軟性と丈夫さを両立した成型体を作製することはできなかった.

以上の結果から, 従来製法を用いて要件②を満たす成型体を作製することは難しいことが分かった.

2. 2. 2 多孔質な成型体の作製

前項の結果から, 成型体の膜厚を厚くすると丈夫さは十分だが柔軟性が低下し, 膜厚が薄くなると丈夫さは失われるが柔軟性が向上することが分かった. そこで食器用スポンジから着想を得て, 膜厚の厚い成型体を多孔質化することで柔軟性と丈夫さを両立した成型体を作製できないか検討を行った.

以下の手順で成型体を作製した.

1. 蒸留水 300 ml に対して, 9 g のグルコマンナンを加えて攪拌した.
2. 10 ml の蒸留水に水酸化カリウム 1.2 g を溶かし 1. のゲルに加えて攪拌した.
3. 攪拌したゲルを適量金属バットの上に取り, 50 mm×50 mm×10 mm の板状に成形した.
4. 金属バットごと, ゲルを冷凍庫に入れ -20 °C で 24 時間冷凍した.

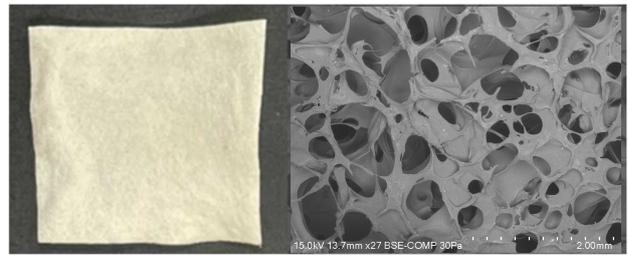


図3 作製した多孔質成型体(左)と断面 SEM 画像(右)

5. 凍結したゲルをドラフト中で自然解凍後, 24 時間乾燥させることで図 3 (左) のような成型体が得られた.

得られた成型体は比較的柔軟であり, 小さく丸めても割れやヒビは発生しなかった. 成型体を電子顕微鏡で観察したところ, 図 3 (右) のように 100~500 μm の気孔が多数確認できた. 気孔は成型体全体で確認することができ, 成型体がスポンジのような多孔質構造をとっていることが分かった. これらの気孔は, ゲルを冷凍した際にできた氷によるものと考えられる. 図 4 に成型体の多孔質化の概略図を示す.

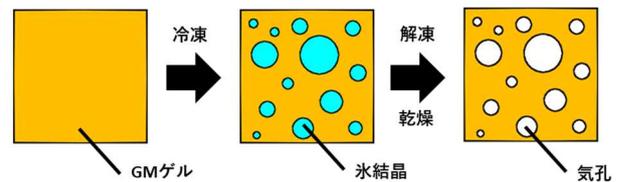


図4 成型体の多孔質化機構について

水を 0 °C 以下の低温で急冷すると小さな氷の結晶が多数発生する. 発生した氷の結晶は周囲の水分子を取り込んで大きく成長していく. また, 低温環境における GM ゲルの硬化時間は経験上約 24 時間程度であり, 水は 4~5 時間程度で凍り始めることが経験的に分かっている. よって, 発生した氷の結晶は周囲の GM ゲルを押しよけながら成長すると考えられる. GM ゲルが完全に硬化した後, 解凍, 乾燥させると, 氷結晶のあった部分がそのまま気孔として残る. このようにして, 成型体が多孔質化したものと考えられる.

以上の結果より, GM ゲルを凍結させることで②の要件を満たす柔軟性のある成型体を作製することができた. そこで, 次に要件③の成型体の分解性について調査するための実験を行った

2. 3 成型体の生分解性について

前項までの結果から, 成型体を多孔質化することで①②の要件を満たす成型体を作製できた. 次に要件③の成型体の生分解性について確認するために, 以下のような土中埋没試験を行った.

前項で作製した多孔質成型体を 30 mm×30 mm の小片状に切り取り, メッシュの PE 製小袋に入れた状態で, 腐葉土の中に埋没させた. 試験片を入れたビーカーは, 恒温恒湿機 (35 °C, 75 %RH) で保管し, 1 週間ごとに小片を取り出し変化を観察した. 試験の概略図を図 5, 試験片の変化を撮影した結果について図 6 に示す.

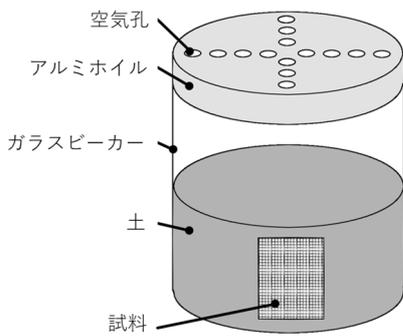


図5 土中埋没試験 概略図

埋没させた日数が経過するごとに小片表面が変色し、試験片が微細に崩壊していくことが分かった。特に試験開始から21日経過後は小片全体がバラバラになるほど分解が進行していた。28日以降については袋中から小片が消失しており、より微細に分解していったものと考えられる。以上の結果から、作製したGM成型体は土中で生分解性を示すことが分かった。

次に、より実用的な環境における生分解性について調査するために、育苗ポットの試作と土中埋没試験を行った。育苗ポットは多孔質成型体と同じ方法で調製したGMゲルを、容器形状の型に入れて凍結・乾燥させることで作製した。作製した育苗ポット成型体に市販の野菜の苗と腐葉土を入れ、日当たりの良い花壇に埋没させた。埋没させた苗には毎朝200 mlの水やりを行い、その後ポットの変化を確認した。

実験の結果、観察開始から5日で育苗ポット型成型体は完全に分解した。ポットは前述の埋没試験で使用した小片と同じ製法で作製されているにもかかわらず、生分解速度に大きな違いが発生した。このことについては水分量の違いが影響しているものと考えられる。小片の埋没試験では、小片を土の中に埋め、恒温恒湿機(35℃, 75%RH)の中に入れて試験を行った。この時の土の様子を観察すると、表面はわずかに湿っているものの、土の中はほとんど乾燥している状態だった。一方でポットの試験の場合は、24時間ごとに水やりを行っていたため、ポットを含めて周囲の土は常に湿っている状態だった。このように、水分を含んだ状態だと成型体の分解が促進されるのではないかと考え、花壇の土を10 wt%混ぜた水に成型体を浸漬させて保管したところ、4~5日前後で成型体が分解した。このように、GM成型体は水分を含んだ状態だと急激に分解が促進されることが分かった。

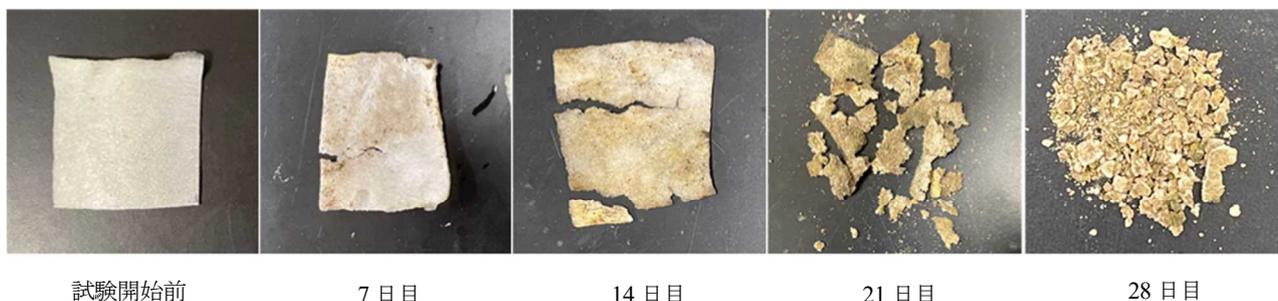


図6 : 成型体の土中埋没試験

2. 4 成型体の生分解度の抑制 GMのアセチル化

前項の結果から、GM成型体が水分を含むと分解が促進され、用途が限定されるということが分かった。この課題を解決するために、増粘剤や安定剤などの添加剤の利用を検討したが、良い結果を得ることができなかった。そこで、GMが分解されるプロセスに着目して対策を行うことにした。GMを含む高分子多糖類は主に微生物が生成する酵素によって分解される⁵⁾。鍵穴と鍵の関係でよく知られるように、酵素反応は特定の分子構造を持った物質を認識して反応が進行する⁶⁾。そこで、GM分子中の水酸基を適当な官能基に置換できれば、酵素による生分解速度を抑制できるのではないかと考え、以下の実験を行った。

1. 粉末のGM1gを蒸留水9 mlで膨潤させた。
2. 膨潤したGMを金属バットに移し、50 mm×50 mm×1 mmの板状に成形した。-20℃の冷凍庫で、この成型体から完全に水分がなくなるまで凍結乾燥させた。
3. 乾燥した板状の成型体をミキサーで粉末状にしたものを50 mlの無水酢酸と10 mlの酢酸の混合液に加えた。さらに触媒として2滴の硫酸を加え、湯浴90℃で4時間還流を行った。
4. 反応溶液を300 mlの蒸留水に加え生成した沈殿物をろ取、乾燥させることで白色の粉末生成物が得られた。

得られた生成物について、ATR法でFT-IR (ALPHA, ブルカー・オプティクス株)で分析を行った結果を図7に示す。生成物について通常のGMと比較すると、3000-3400 cm⁻¹付近の水酸基(-OH基)を示すブロードなピークが消失し、1800 cm⁻¹付近のカルボニル基(C=O基)を示すピークが大きく増加していることが分かった。また生成物は水に対して不溶化しアセトン、クロロホルム等の有機溶剤に対して可溶化した。これらのことから得られた生成物はGMの水酸基がアセチル化された、アセチル化グルコマンナ

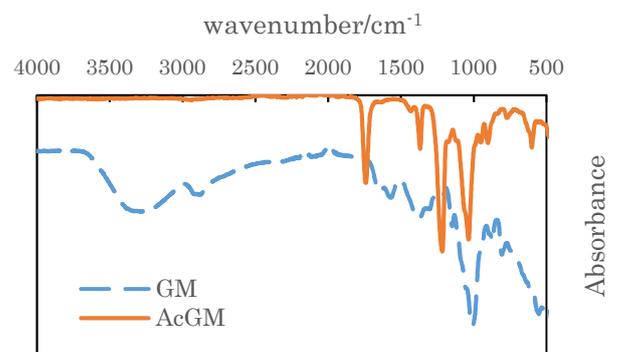


図7 : GMと生成物(AcGM)のFT-IR

ン（以下 AcGM と記載）であると考えられる。

合成した AcGM の生分解度について調査するために、BOD 測定器(Oxitop ,WTW 社)を用いて生分解試験を行った。BOD とは、有機物が微生物によって分解された際に消費された酸素の質量濃度である。測定した BOD 値と試料の分子量から、試料の生分解度を計算で求めることができる。BOD 値の測定による生分解度測定方法のメリットとして、試料が微量でも生分解度の測定が行える点がある。合成によって得られた AcGM は約 0.5 g であり、土中埋没試験による試料の変化を観察することが困難であったため BOD 試験による生分解度測定を行った。測定は JIS K 6950 の試験規格に従って以下の手順で行った⁷⁾。

植種希釈水 200 ml(植種源濃度 30 mg/l)を、510 ml の試験用褐色瓶に測り取り、試料 20 mg を加えた。試験瓶の口に、二酸化炭素吸着材として顆粒の水酸化ナトリウム 3 粒を加えたゴムスリーブを取り付け、その上から閉鎖呼吸計を取り付けて試験瓶を密栓した。試験瓶を 22 °C に設定した恒温機の中で攪拌し、40 日間 BOD 値の測定を行った。植種源は下水処理場から採取した活性汚泥を含む一次処理水を用いた。試料として、AcGM 20 mg、比較対象として GM 成型体の小片 20 mg を用いた。また生分解度既知の標準試料として粉末セルロース 20 mg を、空試験としてブランクについて同様の測定を行った。

試験結果について、図 8 に示す。

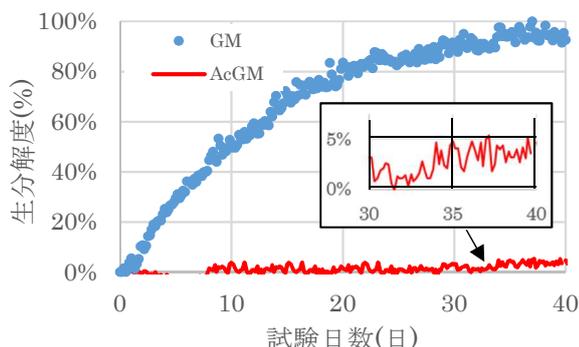


図 8 GM, AcGM の生分解試験

GM が 40 日で約 90 % 分解されたことに対して、AcGM は 40 日で約 5 % の分解度であり生分解度が大きく抑制されていることが分かった。前述の通り、高分子多糖類は微生物が生成する酵素によって分解される。また、酵素は特定の分子構造を持った物質に対して選択的に作用する。FT-IR の結果は合成した AcGM が水酸基を持たないことを示しており、通常の GM とは異なる分子構造を持っている。

このことが AcGM の生分解が抑制された原因であると考えられる。

以上の結果から、GM をアセチル化することで生分解度を大きく抑制することができるということが分かった。さらなる生分解性の抑制方法等については今後の課題として調査を行う予定である。また、より大スケールでの AcGM 合成についても検討中である。合成に用いる試料の量を等倍してスケールアップを試みたが、GM のアセチル化反応が進行しなかったため、適切な反応条件を見つけることが今度の課題である。

3 まとめ

本研究では、天然素材の農業用資材等への応用検討として、GM を用いた成型体の試作を行った。作製する GM 成型体は、以下の 3 要件を満たすものを目標とした。

- ①最低 6 か月間の保管が可能であること
- ②柔軟で破損しにくいこと
- ③育苗する作物に応じた適当な期間で分解すること

その結果、GM ゲルを凍結乾燥させることで多孔質な成型体を得ることができた。得られた成型体はある程度の柔軟性と丈夫さを併せ持っており、乾燥状態で 6 か月間性状に変化が無く、要件①②を満たすものであった。一方で、水分を含む環境下では急激に分解が進行し約 1 週間で完全に分解することが分かった。対策として GM をアセチル化したところ、通常の GM が 1 か月で約 90 % 分解されることに対して、AcGM は 1 か月で約 5 % の分解度であり、生分解度が大きく抑制されることが分かった。

今後の課題として、長期間(1 か月以上)での AcGM の生分解度の確認と、AcGM の大スケールでの合成方法について検討を行う予定である。

4 参考文献

- 1) 環境省, 海洋プラスチックごみに関する既往研究と今後の重点課題(生物・生態系影響と実態), pp. 1-71 (2020) .
- 2) 経済産業省, 海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップ(2019) .
- 3) 宮越 俊一, こんにちはとグルコマンナンの化学, 化学と教育 64 巻 6 号(2016) .
- 4) Kenji MAEKAJI, The Mechanism of Gelation of Konjac Mannan, Agr. Biol. Chem., 38, 315 (1974).
- 5) 微生物による多糖の合成と分解, 杉本 要, 高分子 26 巻 2 月号(1977) .
- 6) 辻 孝三, 中江 裕子, 高分子の微生物分解, 高分子, Vol. 22, No. 258, 1973.
- 7) 日本工業規格 JIS K 6950 (2019) .

セロファンフィルムの表面へのヒートシール性付与に関する研究

高橋 おしえ, 白川 寛

プラスチックごみの増加による環境汚染問題が深刻化しており, 世界で脱プラスチックの動きが加速している. 本研究では, プラスチック削減につながる素材として生分解性のセロファンフィルムに注目し, これに熱融着性を付与する表面処理を行い, 熱融着性評価を実施した. その結果, セロファンフィルムの透明性を維持したまま, 熱融着性を付与することができ, さらに塗工液に抗菌剤を添加することで, 抗菌性も付与できることを確認した.

1 緒言

プラスチックは安価で自由に成型加工できるため, 私たちの日常生活に欠かせない材料となっている. しかし, 近年世界ではプラスチックごみの増加による環境汚染問題が深刻化しており, 脱プラスチックの動きが加速している. 日本でも, 2020 年からレジ袋の有料化が始まり, 2022 年 4 月には「プラスチック資源循環促進法」が施行され「3R+Renewable」の基本原則が示された. これに伴い, プラスチックフィルムの削減につながる代替素材として生分解性素材が再び注目されてきている. そこで我々はパルプ由来で透明性が高く, 環境負荷が少ない材料であるセロファンフィルムについて検討を行うこととした. セロファンフィルムの特徴として, 高温下でも寸法が変化せず耐熱性を有する点があるが, セロファンフィルム同士を熱融着させることができないというデメリットを有する. したがってセロファンフィルムに熱融着性が付与できれば, 既存設備のヒートシーラーで熱融着することが可能となり, 生分解性という機能面から需要が高まる可能性が期待できる. 本研究では, セロファンフィルムにヒートシール性を付与する表面処理の検討を行い, 引張試験によりシール強度を確認したので報告する. また塗工液に抗菌剤を添加することで, 抗菌性の付与についても検討したので, あわせて報告する.

2 実験方法

2. 1 塗工液について

セロファンフィルムにヒートシール性を付与するため, 表 1 に示す熱可塑性ポリマーを含有する 5 種類のヒートシール剤を選定し, コート剤と混合することで塗工液を作製した. なお, No. 1~4 はエマルジョン系, No. 5 は溶剤系である.

表 1 使用したヒートシール剤の一覧

No	メーカー	製品名
1	(株) RESONAC	ポリゾール L-9700
2	住友精化 (株)	ザイクセン-A
3		セポルジョン VA406N
4	東洋モートン (株)	EA-H700
5	大阪印刷インキ (株)	PTCE-HS 剤

2. 2 塗工方法

表 1 に示すヒートシール剤を用いて作製した塗工液をセロファンフィルムに滴下し, 図 1 に示すようにパーコーター (#4) を用いて塗布した後, ヒートガン (No. 882, 日光 (株)) で乾燥させ表面塗工を行った.



図 1 パーコーターを用いた塗工試験

2. 3 塗工評価

各々のヒートシール剤を乾燥固化させたものを, FT-IR (ALPHA, ブルカー・オプティクス (株)), ATR 法, ダイヤモンドプリズム) で赤外吸収スペクトルを測定し, ヒートシール剤に含まれる熱可塑性樹脂の化学組成を確認した.

また塗工後のセロファンフィルムの透明性を確認するため, それらの透過率を自記分光光度計 (U-4000, (株) 日立製作所) により測定した.

次に塗工処理したセロファンフィルム同士を熱融着させた試料を作製し, 引張試験機 (AG-50KND, (株) 島津製作所) を用いて引張試験を JIS Z 0238 (1998) に準拠して実施した¹⁾. その最大荷重 (N/15 mm) を引張強度として比較を行った. さらに接着部の剥離状態を確認するため, 破断面を走査型電子顕微鏡 (SU3500, (株) 日立製作所, 以下 SEM と表記) で観察した.

3 結果および考察

3. 1 外観および透過率測定結果

ヒートシール剤 No. 1~4 を水系コート剤 (アクリル系) と混合し水系塗工液を調製した. これらをそれぞれ塗工したが, いずれも塗工液に含まれる水がセロファンフィルムに吸収されシワが発生し, フィルムとし

て使用することが困難となった。

そこで塗工液に含まれる水のセロファンフィルムへの吸収を防止しシワの発生を抑える目的で、アルコール系の塗工液を調製することとした。ヒートシール剤と混合する溶剤には、水と共沸するイソプロピルアルコール（以下、IPAという。）を用いた。そしてヒートシール剤 No. 1～No. 4 と IPA の重量比が 1：1 となるように混合することで塗工液 No. I～No. IV を調製した。またヒートシール剤 No. 5 と IPA を主成分とする溶剤を混合して、塗工液 No. V を調製した。

これらの塗工液をそれぞれ 1 回塗工したフィルムについて、その外観を図 2 に示す。なお塗工液 No. III を塗工したフィルムの外観は以下に示す塗工液 No. IV を塗工したフィルムと外観が同様であったため省略した。

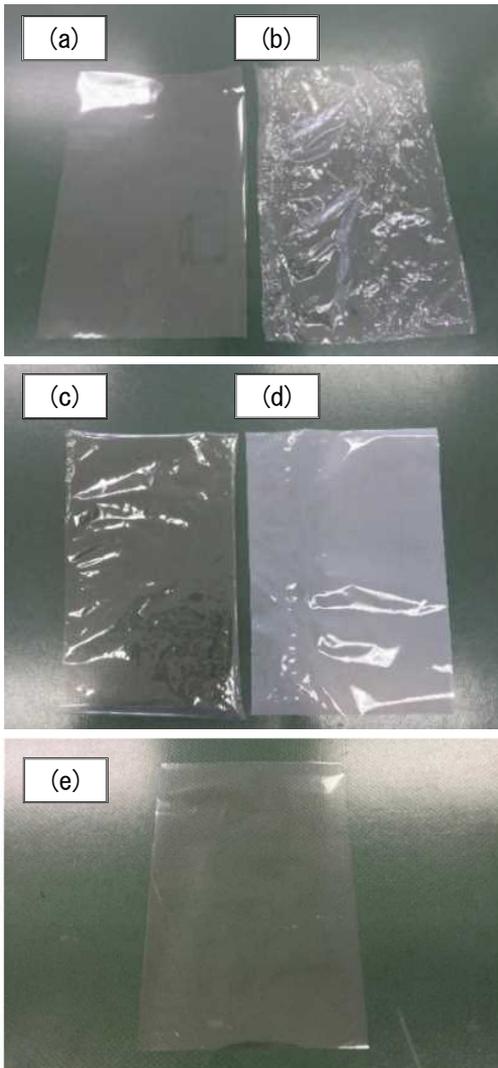


図 2 塗工後のフィルムの外観

(a) 未塗工, (b) 水系塗工液, (c) 塗工液 No. II
(d) 塗工液 No. IV, (e) 塗工液 No. V

ここでは塗工液の調製条件によって生じる塗工フィルムの外観の差異について比較する。(a) は未塗工のセロファンフィルム, (b) は水系塗工液を用いたフィルムの外観である。(b) は塗工液中の水がセロファンフィルムに吸収されてシワが発生している。(c) および (d) は溶剤に IPA を使用した塗工液 No. II および

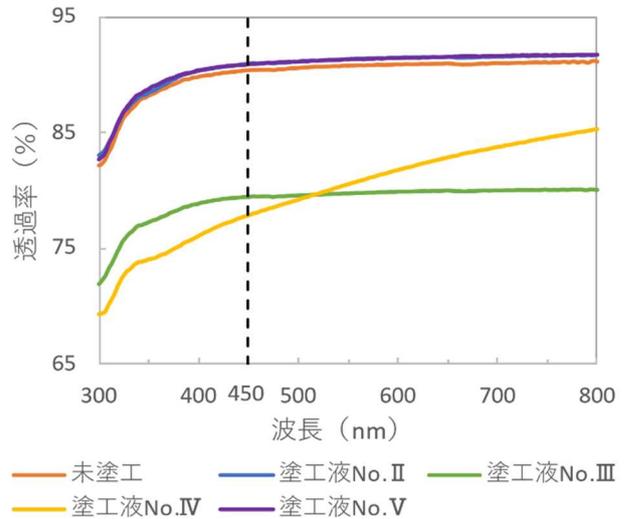


図 3 塗工後のフィルムの透過率

表 2 塗工 1 回あたりの推定膜厚

塗工液	No. II	No. III	No. IV	No. V
膜厚 (μm)	1	2	2	1

No. IV を用いたフィルムの外観であり, (b) の水系塗工液を用いた場合に比べて, シワの発生が抑制されている。また (e) に示した塗工液 No. V を用いたセロファンフィルムではシワは発生せず, (a) の未塗工フィルムと比較しても外観に大きな違いは認められない。

次に塗工液 No. II～No. V をそれぞれ 1 回塗工したフィルムの透過率を図 3 に示す。これを用いて塗工後のフィルムの透明性を比較する。450 nm の波長において, 塗工液 No. III を塗工したフィルムの透過率は未塗工に比べて 12% 減少し, 塗工液 No. IV を塗工したフィルムでは 14% 減少している。これは塗工液 No. III および塗工液 No. IV がともに白色であることに起因すると考えられる。一方, 塗工液 No. II は無色透明, 塗工液 No. V は淡白色半透明であり, その塗膜の透過率は未塗工フィルムと同程度であった。

また一般的に塗膜の膜厚が大きくなると透過率は低下するため, それぞれの推定膜厚を塗工量から算出し比較することとした。算出した塗工 1 回あたりの推定膜厚を表 2 に示す。透過率が未処理フィルムと同程度であった塗工液 No. II および塗工液 No. V を用いた塗膜は比較的膜厚が薄く, これらの透明性は塗工液の透明性に加えて膜厚に起因する可能性が高いと考えられる。

3. 2 引張試験結果

ヒートシール強度を調べるため, 表 3 に示すサンプル ①～⑤の 5 種類を作製して引張試験を行った。得られた引張強度は, 合紙とプラスチックフィルムを接着剤で接着させた現行品と比較した。

サンプルの作製条件として, 用いた塗工液および塗工回数を表 3 に示す。なおヒートシール加工時間は推定で 0.4 秒から 0.9 秒の間で実施し, 加工温度はいずれも 230℃とした。この試験結果を図 4 に示す。

表3 サンプルの作成条件

サンプル No.	被接着素材	塗工液	塗工回数
①	セロファン-セロファン	No. II	1
②	セロファン-セロファン	No. V	1
③	セロファン-セロファン	No. V	3
④	セロファン-合紙	No. II	3
⑤	セロファン-合紙	No. V	3

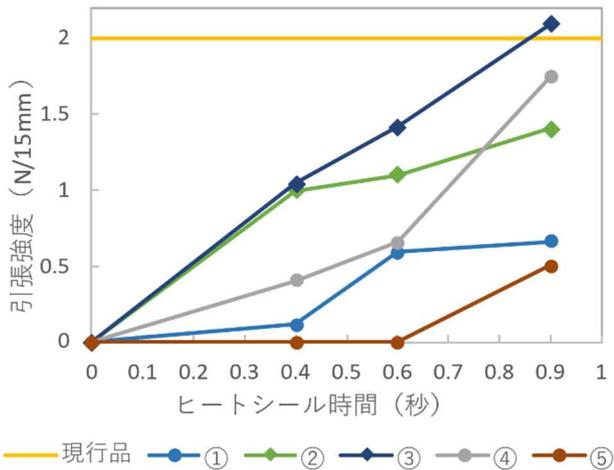


図4 塗工フィルムおよび現行品の引張強度

いずれのサンプルも塗工回数およびヒートシール加工時間が増加すると引張強度は高まる傾向が見られる。

まずセロファンフィルム同士で熱融着させたサンプル①, ②, ③について, ヒートシール強度を比較する。0.9秒熱融着させた場合の引張強度は①0.7 N/15mm, ②1.4 N/15mmであり, サンプル②の引張強度が高く, セロファンフィルム同士を熱融着させた場合は塗工液 No. Vを使用したサンプルが優れていることがわかる。また0.4秒熱融着させた場合の引張強度は②, ③ともに1.0 N/15mm, 0.6秒の場合は②1.1 N/15mm, ③1.4 N/15mmであり, ヒートシール加工時間が0.6秒以上でサンプル③の引張強度が高くなっている。このことから0.6秒以上熱融着することで塗工回数が多いほど接着強度が上昇すると考えられる。さらに0.9秒熱融着させた場合の③の引張強度は2.1 N/15mmであり, 現行品の引張強度2.0 N/15mmをわずかに超えている。

次にセロファンフィルムと合紙を熱融着させたサンプル④, ⑤についてヒートシール強度を比較する。サンプル④を0.9秒熱融着させた場合の引張強度は1.7 N/15mmであり, サンプル⑤はヒートシール加工時間が0.6秒以下では密着性を示さず, 0.9秒間熱融着させた場合においても引張強度は0.5 N/15mmであり, 十分なヒートシール性は示さなかった。以上のことから, セロファンフィルムと合紙を熱融着させた場合, 塗工液 No. IIを使用したサンプルが優れているが, その引張強度は接着剤で接着した現行品より低くなった。

また十分な引張強度を発現させるためには, 3回塗工することが必要であることが明らかとなった。

3. 3 FT-IR 測定結果および破断面の観察

引張試験において現行品と同程度のヒートシール性を示した図4の③および④について, 高い密着性を示した要因を調べるため, ④に使用したヒートシール剤 No. 2 および③に使用したヒートシール剤 No. 5 をそれぞれ乾燥固化させたものを, FT-IR で測定し, 熱可塑性樹脂の化学組成を確認した。その測定結果を図5に示す。

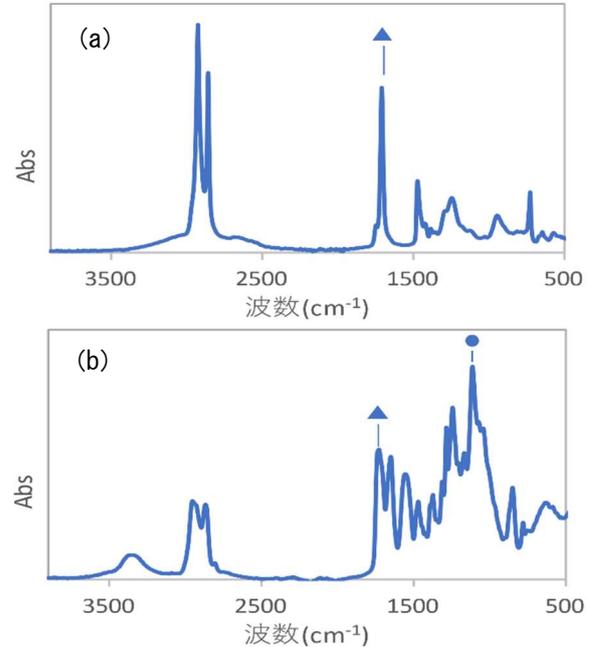


図5 FT-IR 測定結果

(a) ヒートシール剤 No. 2, (b) ヒートシール剤 No. 5

(a) より, ヒートシール剤 No. 2 はチャート中に▲で示すC=O結合に由来する1725 cm⁻¹付近の吸収が見られ, カルボニル基を有していることが推察できる。また (b) より, ヒートシール剤 No. 5 はチャート中に▲で示すC=O結合に由来する吸収に加え, ●で示すC-O結合に由来する1145 cm⁻¹付近の吸収も見られ, カルボキシル基を有していることがわかる。一般的にカルボニル基やカルボキシル基が存在する場合, セロファンフィルムの水酸基と親和性が高いため強固に密着すると思われる。また230℃で熱融着後もこれらの化学構造に変化は見られず, フィルムとの高い密着性が発現したものと推察される。

次に接着部の剥離状態を確認するため, 現行品およびセロファンフィルムと合紙を0.9秒間熱融着させた④を引張試験により融着面を剥離し, フィルム側に残る合紙の繊維をSEMで観察した結果を図6に示す。

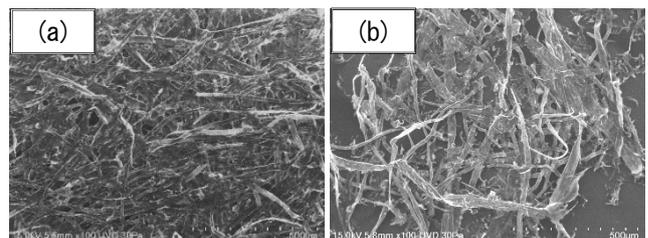


図6 SEM 観察結果

(a) 現行品 (b) 0.9秒間熱融着させた④

現行品および0.9秒間熱融着させた④のいずれも合紙自体が破断していることがわかる。さらに現行品はフィルム側に合紙繊維が均一に付着していることから、フィルムと合紙が接着剤によって十分に接着されており、高い引張強度を示したものと考えられる。一方、0.9秒間熱融着させた④は現行品と比較すると、フィルムへの合紙繊維の付着が少なくまばらであることがわかる。ヒートシール剤の表面塗工では塗工量が少ないため接着強度が十分ではなく、現行品の引張強度を越えなかったものと推察される。

また引張試験で密着性を示さなかった⑤については、合紙と密着性を発現するためには、ヒートシール時間をさらに長くすることが必要であると考えられる。

3. 4 抗菌性の付与

セロファンフィルムに抗菌性を付与するため、食品添加物から作製した抗菌剤を塗工液に添加する検討を行った。

今回使用した抗菌剤は水に不溶であるため、ヒートシール剤 No. 5 を用いた IPA 系塗工液に、熱融着成分と抗菌剤の重量比が 10 : 1 となるよう混合し、抗菌塗工液とした。この抗菌塗工液を 1 回塗工したフィルムについて、黄色ブドウ球菌の抗菌試験をボーケン品質評価機構に依頼し実施した。5 cm×5 cm の試験片に試験菌液を 0.4 ml 滴下し 35°C、90%RH 以上で 24 時間培養させ、培養後の生菌数から活性を求めた。なお試験は、JIS Z 2801(2012)に準拠して実施²⁾ され、24 時間

培養後の黄色ブドウ球菌の数が 99.99%減少しているという結果が得られた。

4 結言

ヒートシール剤を用いて、セロファンフィルムに表面塗工し、各種分析機器を用いて評価を行った。その結果、溶剤系ヒートシール剤を用いて IPA 系の塗工液を調製し塗工することでセロファンフィルムの透明性を維持し、かつシワの発生を抑えながら熱融着性を付与することができた。これは、溶媒を水だけではなく水と共沸する IPA との混合溶媒とすることでセロファンフィルムへの水の浸透が抑制されたためと推察された。また引張試験では、この IPA 系塗工液を 3 回塗工したセロファンフィルム同士を 0.9 秒間熱融着させることで、現行品と同程度の引張強度が得られた。これは、セロファンフィルムと密着性のよいヒートシール剤 No. 5 をヒートシール剤として用いてヒートシールを行ったためと考えられた。さらに IPA 系に限られるが、塗工液に生分解性抗菌剤を添加することで、黄色ブドウ球菌に対して抗菌性を付与できることが確認できた。

5 参考文献

- 1) JIS Z 0238 (1998)
- 2) JIS Z 2801 (2012)

生分解性プラスチックの屋外曝露試験および紫外線耐候性試験について

藤本 啓資, 白川 寛

屋外曝露試験, および紫外線促進耐候試験による生分解性プラスチックの劣化に関する基礎的なデータの蓄積を目的として研究を行った. PLA, PBS 等の市販されている 6 種類の生分解性プラスチックについて試験を行い, 電子顕微鏡 (SEM), 赤外分光計 (FT-IR), 分子量測定 (GPC) による試料の劣化を観察したところ, 試料表面のクラックの発生やカルボニル基を示すピークの増減などの変化が確認できた. また, 屋外曝露試験 6 か月と同程度の劣化を紫外線促進耐候試験 1 か月以内で再現することができ, 2 つの試験の再現性・相関性を確認することができた.

1 緒言

プラスチックは我々の生活に欠かせない材料であり様々な分野で応用されている. しかし近年, 海洋プラスチックごみ問題等で取り上げられているように, 長期間分解されずに残留することで環境を汚染するとして問題視されるようになってきた¹⁾. その対策として生分解性プラスチックの研究開発が行われており, 自動車メーカーや家電メーカーで少しずつ実用化されるようになってきている.

生分解性プラスチックは土中やコンポストなどの適当な環境下に曝すことで迅速に分解が進行し, その分解挙動については多数報告されている^{2)~5)}. 一方で, 屋外環境に曝した場合の分解性に関する報告は少ない. そこで本研究では, 生分解性プラスチックの劣化に関する基礎的なデータの蓄積を目的として屋外曝露試験 (以下, 曝露試験と記載) を実施した. しかし, 曝露試験は評価に 1 年から 2 年程度の長い時間を要する点, 試験を実施する場所によって結果が左右される点で課題があり, より短時間で画一的な試験を行えることが望ましい. そこで, 同じ試料について紫外線促進耐候性試験機を用いた促進試験を並行して行い, 曝露試験の結果との相関性, および再現性を確認したのでその結果について報告する.

2 実験方法

2.1 試料

表 1 に示す生分解性プラスチック 6 種を実験に用いた.

表 1 試験に用いたプラスチック一覧

No.	試料名	形態	略称	色
(a)	セルロース	不織布	-	白色
(b)	ポリプロピレン	不織布	PP	白色
(c)	ポリブチレン サクシネート	フィルム	PBS	白色 透明
(d)	ポリエステル	不織布	PET	白色
(e)	セロハン	フィルム	-	透明
(f)	ポリ乳酸	不織布	PLA	白色

2.2 屋外曝露試験

香川県産業技術センター (高松市) 屋上で 2021 年 6 月

から試験を実施した. 試験状況を図 1 に示す. 試料は南向きで水平面からの角度は約 45°, コンクリート面から約 25~50 cm の高さになるよう設置した.



図 1 曝露試験の実施状況

2.3 紫外線耐候試験

紫外線耐候試験 (以下, UV 試験と記載) は紫外線促進耐候性試験機 (UV TEST, アトラス社) を用いて, JIS K 7350 (2008) に準拠して実施した⁶⁾. 装置の外観を図 2 に, 試験条件を表 2 に示す.



図 2 紫外線促進耐候性試験機 UV TEST

表 2 UV 試験における曝露条件

	サイクル	ランプ	放射照度 (W/m ²)	BP 温度
1	8 時間 UV 照射			60°C
2	0.25 時間 UV 照射及 び水噴霧	UVA-340	0.76	制御なし
3	3.75 時間 暗黒	なし	なし	50°C

この条件は、UVA-340 ランプによる 8 時間の紫外線照射 (ステップ 1)、0.25 時間の紫外線照射および水噴霧 (ステップ 2)、3.75 時間の暗黒 (ステップ 3) を 1 サイクルとして繰り返すものである。なお、放射照度は 340 nm における値である。

2. 4 機器分析

試験前、試験後の試料について、FT-IR (ALPHA, ブルカー・オブティクス)、走査型電子顕微鏡 (SU3500, 株式会社日立製作所) で分析を行った。以下、電子顕微鏡を SEM と記載する。

3 結果および考察

3. 1 外観変化

曝露試験、UV 試験を実施した各試料の外観変化を図 3 に示す。横に 3 つ並べた試料のうち、左が試験前、中央が曝露試験後、右が UV 試験後の試料である。

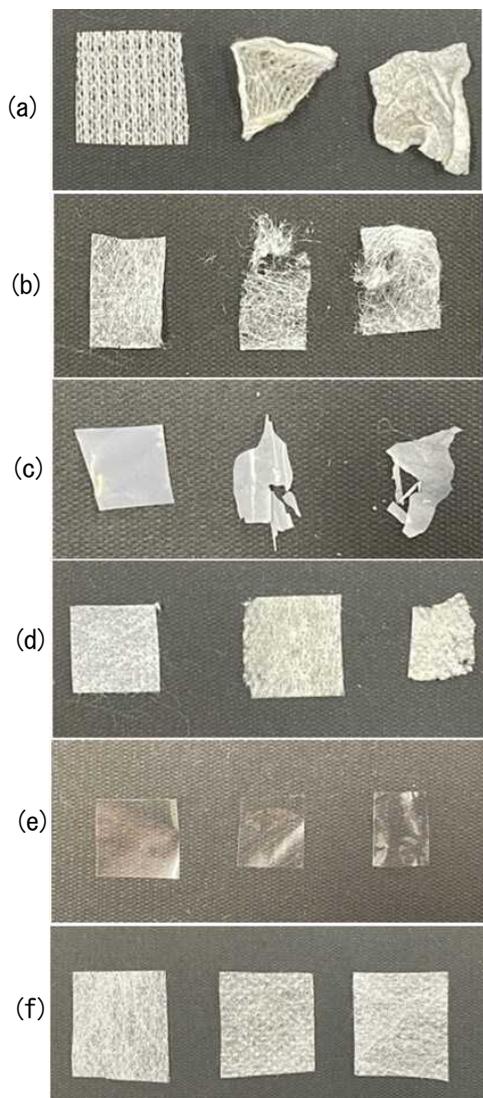


図 3 試験後の試料の外観変化

- (a) セルロース, 曝露試験 24 か月後, UV 試験 4 か月後
- (b) PP, 曝露試験 24 か月後, UV 試験 4 か月後
- (c) PBS, 曝露試験 6 か月後, UV 試験 7 日後
- (d) PET, 曝露試験 9 か月後, UV 試験 1.5 か月後
- (e) セロハン, 曝露試験 9 か月後, UV 試験 1.5 か月後
- (f) PLA 曝露試験 6 か月後, UV 試験 14 日後

(a)セルロースでは、試験後の試験片の大きさが 1/3 程度に収縮している。これはセルロースの高い吸湿性によるものと考えられる。曝露試験では試験片が雨水に、UV 試験では水噴霧に曝されるために試験片の収縮が起こったものと考えられる。一方で繊維のほつれや破損などの劣化は見られない。(b)PP, (c)PBS, (d)PET では、試験片の脆化が認められる。特に PP では、指で軽く触れると微細な粉末状に崩壊するほど顕著に脆化している。また、PBS では試験片の白変が、PET では黄変が見られる。(e)セロハン、(f)PLA では、顕著な外観の変化は認められない。

3. 2 SEM 観察結果

曝露試験後、UV 試験後の (b)PP, (c)PBS, (d)PET, (e)セロハンの SEM 観察結果を図 4 ~ 7 に示す。(a)セルロース、(f)PLA は、いずれの試験後も変化が観察できなかった。

試験前

曝露試験
6 か月

UV 試験
7 日

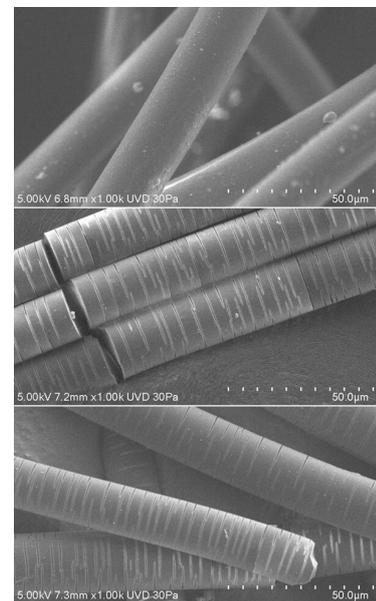


図 4 (b)PP の SEM 観察結果

試験前

曝露試験
6 か月

UV 試験
14 日

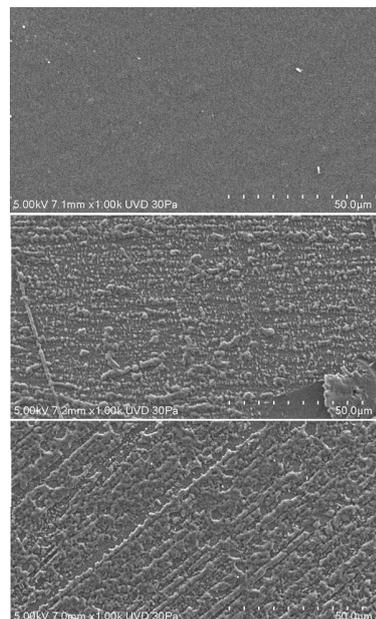


図 5 (c)PBS の SEM 観察結果

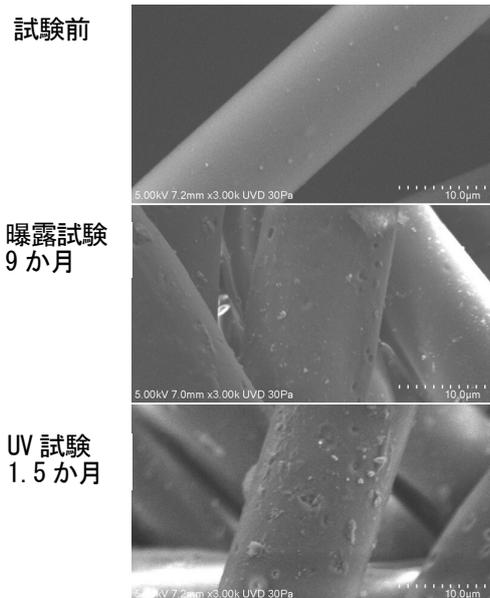


図 6 (d) PET の SEM 観察結果

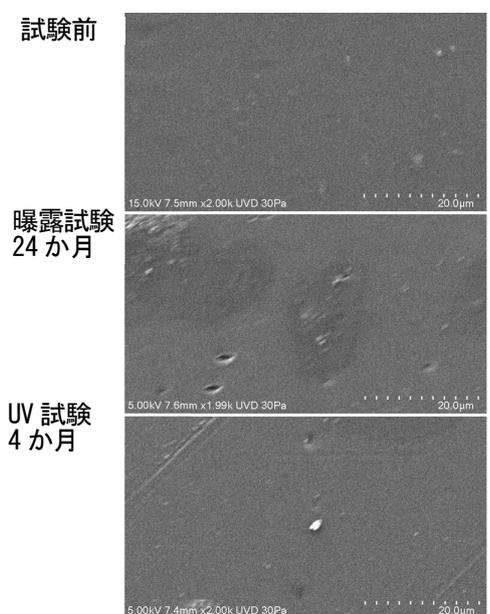


図 7 (e) セロハンの SEM 観察結果

図 4 から (b) PP では繊維の表面にクラックが発生している。クラックは観察箇所に依らず、繊維の伸長方向に対して常に垂直方向に発生している。図 5 から (c) PBS ではフィルム表面の凹凸の発生が認められる。凹凸はフィルムに対して特定の方向に延びており、異方性が見られる。また、試験時間が長くなるにつれ凹面の占める面積が増加する傾向にあり、PBS の外観観察において白変が見られたことは、これらの凹凸による光の散乱によるものではないかと考えられる。図 6, 7 から (d) PET, (e) セロハンでは、試料表面が抉れたような欠陥が認められる。この欠陥の発生箇所は無作為的であり、PP や PBS のような方向性は見られない。

3. 3 FT-IR 測定結果

試験前、曝露試験後 UV 試験後の (a) セルロース、(b) PP、(c) PBS、(d) PET、(e) セロハン、(f) PLA、の ATR 法による FT-IR 測定結果を図 8 に示す。

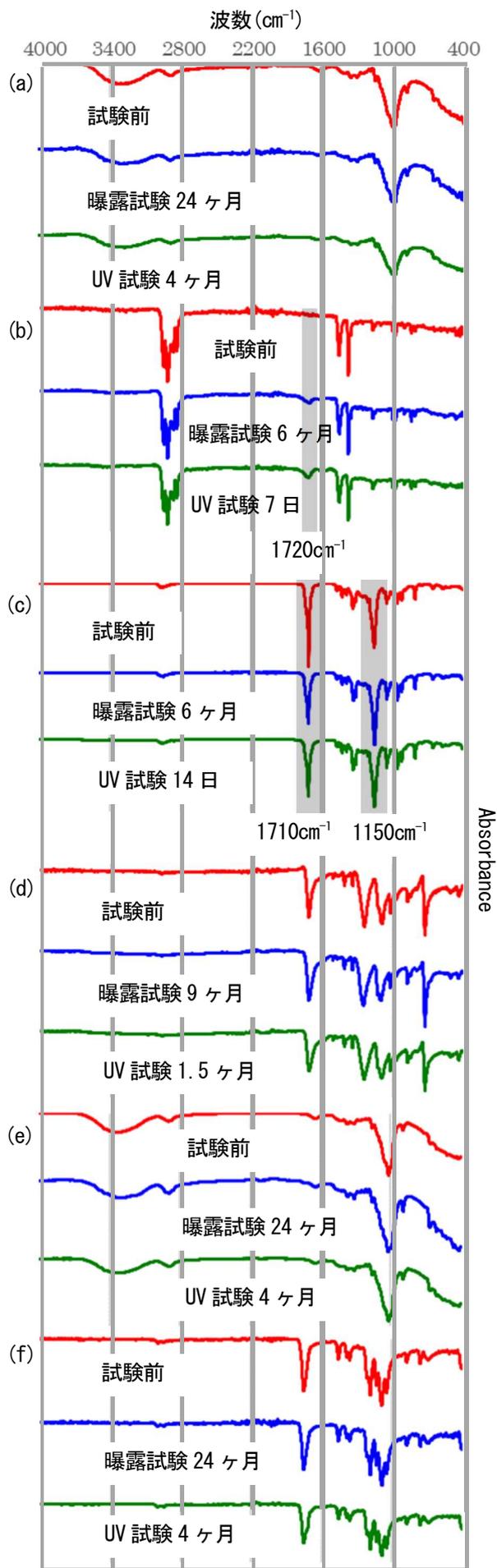


図 8 FT-IR 測定結果 (a) セルロース、(b) PP、(c) PBS、(d) PET、(e) セロハン、(f) PLA

(b)PP ではいずれの試験後も、1720 cm^{-1} 付近にカルボニル結合を示すピークの発生が認められる。このピークは試験期間が長くなるにつれて強度が増加していく傾向にある。既往の研究から、PP のような飽和炭化水素は紫外線によって光酸化されることが知られている。即ち、光酸化反応では紫外線によってラジカルが発生し、そこに大気中の酸素が反応してペルオキシドが生成する。ペルオキシドは不安定な化合物であるため、ケトンとラジカルに、もしくはアルデヒドと末端メチレンラジカルに分子鎖が切断される^{7,8)}。前述したPPの脆化およびクラックの発生とカルボニル基を示すピークの増加は、紫外線によってこれらの反応が引き起こされていることを示していると考えられる。(c)PBS ではいずれの試験後も 1150 cm^{-1} 付近のエーテル結合を示すピークに対して、1720 cm^{-1} 付近のカルボニル基を示すピーク強度の相対的な減少が認められる。このことは、PBS のエステル結合が加水分解によって減少したためではないかと考える^{9,10)}。それ以外の(a)セルロース、(d)PET、(e)セロハン、(f)PLA ではいずれの試験後もスペクトルに変化は認められない。

3. 4 分子量測定

PLA はコンポスト中で通常 1 か月前後で分解が始まるとされているが、いずれの分析においても試料の変化は認められなかった。そこで、試験前と曝露試験後、UV 試験後の PLA について GPC 法による分子量測定を行った。分析は(株)東レリサーチセンターに依頼した。表 3 に測定結果を示す。

表 3 PLA の分子量測定結果

試料	重量平均分子量	数平均分子量	z 平均分子量
試験前	79700	33100	131000
曝露試験 24 カ月	73400	33500	120000
UV 試験 4 カ月	73400	31400	121000

いずれの試験後も重量平均分子量が約 1 割減少しており、曝露試験、UV 試験によって PLA がわずかに分解していることが確認できた。

3. 5 曝露試験と UV 試験の再現性・相関性

曝露試験、UV 試験後の試料の分析結果についてまとめたものを表 4 に示す。各分析において、明確な試料の劣化が認められたものを“○”，認められなかったものを“×”とした。またセルロースでは、外観観察において試験片の収縮は見られたが、繊維の破断や脆化などの劣化が認められなかったため×に分類した。

表 4 から、セルロース以外の試料について、曝露試験および UV 試験による試料の劣化が発生することが分かった。また、曝露試験および UV 試験で発生した試料の劣化の様態はほとんど同じであり、これら 2 つの試験に再現性があることが確認できた。

次に、試験期間の相関性について調査するために、UV 試験何カ月で曝露試験と同等の試料の劣化を再現できるのか調査した。表 5 に各試料の曝露試験期間と UV 試験

表 4 曝露試験、UV 試験後の試料の劣化

No.	試料名	外観変化	SEM	FT-IR	分子量測定
(a)	セルロース	×	×	×	—
(b)	PP	○	○	○	—
(c)	PBS	○	○	○	—
(d)	PET	○	○	×	—
(e)	セロハン	×	○	×	—
(f)	PLA	×	×	×	○

表 5 各試料の曝露試験期間と UV 試験期間

No.	試料名	曝露試験日数	UV 試験日数
(a)	セルロース	24 ヶ月	4 カ月
(b)	PP	6 カ月	7 日
(c)	PBS	6 カ月	14 日
(d)	PET	9 カ月	1.5 ヶ月
(e)	セロハン	24 カ月	4 ヶ月
(f)	PLA	24 ヶ月	4 カ月

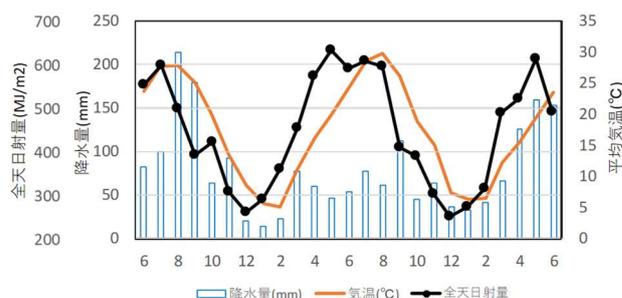


図 9 屋外曝露試験期間中の高松市気象データ

期間を示す。特に劣化が顕著だった PP と PBS を除き、曝露試験期間は UV 試験期間の約 6 倍に相当しており、曝露試験と UV 試験の比率が 6 : 1 の関係にあることが確認できた。この曝露試験と UV 試験の相関性について、太陽光と紫外線蛍光ランプの露光量の観点から考察を行った。図 9 に曝露試験期間中の高松市の全天日射量および降水量、平均気温を示す¹¹⁾。曝露試験 2 年間の合計全天日射量は約 11200 MJ/m^2 であり、ほぼ例年並みの日射量である。太陽光の紫外線 (300~400 nm) の構成比を 6.8 % とすると紫外線の放射露光量は 761.6 MJ/m^2 である¹²⁾。また UV 試験に使用した紫外線蛍光ランプは、波長 340 nm にピークを持つ 300~400 nm の紫外線を発する。今回実施した UV 試験では、8.25 時間の紫外線照射と 3.75 時間の非照射を 1 サイクルとして試験を行っており、波長 340 nm における放射強度が 0.76 W/m^2 である場合の UV 試験 1 日当たりの放射露光量は約 2.38 MJ/m^2 である。それぞれの放射露光量の比から、曝露試験 2 年に相当する UV 試験期間は約 320 日であると計算される。よって、曝露試験と UV 試験の試験期間の比率は、約 2.4 : 1 の関係にあることが求められた。しかし、これは表 5 から得られた結果とは異なる値であり、実際はより短時間の UV 試験で試料の劣化が再現されてい

る。UV 試験では試料を 60 °C の高温下に置き、12 時間ごとに水をスプレー噴霧することで試料は常に水に濡れている状態だった。高温高湿環境においてはプラスチックの劣化が促進されることが経験的に知られており、これらの紫外線以外の劣化要因が影響したことで、試料の劣化が計算値よりも促進されたものと考えられる^{13)~15)}。

また、PP や PBS のように、UV 試験において特に劣化が促進されやすい試料があることが分かった。類似の例として、森川らは、ポリエチレンや ABS といったエンジニアリングプラスチック 7 種について、UV 試験 7 日以内で曝露試験 6 か月と同等の劣化を再現できること、プラスチックによって UV 試験の日数が異なることを報告している¹⁶⁾。これらのことから、露光量の観点から曝露試験期間と UV 試験期間の相関性を画一的に見積もることは難しく、UV 試験を用いて曝露試験の劣化予測を行う場合には、それぞれのプラスチックについて事前にデータを収集しておくことが不可欠であると考えられる。

4 結言

生分解性プラスチックの曝露試験および UV 試験を実施し、SEM, FT-IR を用いて試料の劣化状態の変化について評価を行った。その結果、PP, PBS, PET, セロハンでは、いずれの試験においても顕著な変化が確認できた。また、屋外曝露試験 6 か月と同程度の劣化を紫外線促進耐候試験 1 か月以内で再現することができ、2 つの試験の再現性・相関性を確認することができた。今後も UV 試験を用いたプラスチックの劣化に関するデータ蓄積を実施し、プラスチックごみ削減につなげていきたい。

5 参考文献

- 1) 環境省：海洋プラスチックごみに対する我が国の取組と「プラスチック・スマート」、ちょうせい, No. 105, pp. 16-19(2021)。
- 2) 辻秀人, 植物由来ポリ乳酸の分解機構および速度, 色材協会誌, 81 巻, 2 号, pp. 548-60(2008)。

- 3) 水野渡, 川口真知子, 猿倉薫子, 沢瀉いづみ, 竹内茂彌 射出成形した生分解性プラスチックの土壌・水中での分解性, 高分子論文集, Vol. 53, No. 9, pp. 513-521(1996)。
- 4) 落合知, 金子栄廣, 田中靖浩, コンポスト中における生分解性プラスチックの分解, 第 17 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 431-433(2006)。
- 5) 恵谷浩, 尾辻幸枝, 永井達夫, 服部公治, 微生物合成ポリエステル中の生分解性とコンポスト化, 高分子論文集, Vol. 54, No. 8, pp. 463-470(1997)。
- 6) 日本工業規格 JIS K 7350 (2008)。
- 7) Scott, G, Polymer News 14, pp. 169-176(1989)。
- 8) 角岡 正弘, 高分子劣化のメカニズム, 日本ゴム協会誌, 68, pp. 274-283 (1989)。
- 9) 桜井亮一, 梶浦淳資, 風間清司, ポリエチレンテレフタレート劣化, 高分子, 11 巻, 6 号, pp. 438-444(1962)。
- 10) 藤本悦子, 藤巻隆, 脂肪族ポリエステルと芳香族ポリエステル FT-IR-ATR, GPC, および DMA 測定による光分解機構の解析, 高分子論文集, Vol. 52, No. 6, pp. 378-387 (1995)。
- 11) 気象庁ホームページ
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 12) CIE Publication on No. 85 1st Edition (TC2-17) Table. 4 AML. 0.
- 13) 澤田祐子, 越前谷大介, 温度と湿度による樹脂材料の強度低下の予測, 日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 875 (2019)。
- 14) 山田和志, 高分子材料の耐熱性・耐久性評価法, 成型加工, Vol. 29, No. 8, 20(2017)。
- 15) 富板崇, 発展型アレニウスモデルと環境劣化因子データベースを結合した特性変化シミュレーション手法, マテリアルライフ学会誌, 14[3], pp. 134-140(2002)。
- 16) 森川彩花, 横田耕三, マイクロプラスチック化に及ぼすプラスチック劣化機構の評価検討(第 1 報), 香川県工業技術センター研究報告, No22, pp. 50-54(2021)。