

希少糖含有シロップを使用した佃煮製造のモデル試験（第二報） —佃煮調味液の香り成分の解析—

三好 美玖, 竹歳 麻耶, 稲津 忠雄, 木村 功

希少糖含有シロップ, ぶどう糖果糖液糖及び上白糖を甘味料とした佃煮モデル調味液を調製し, 加熱調理時に生成する香り成分について検討した. ヘッドスペースガスクロマトグラフ質量分析装置による分析結果を多変量解析したところ, 希少糖含有シロップを使用した佃煮調味液にはフラン類が特徴的な香りの成分として生成しており, 当該シロップに含まれる希少糖が風味の形成に関与していることが示唆された.

1 緒言

佃煮は, 水産物や農産物など様々な素材を調味液と煮詰めることから多くの種類があり, 香川県においても特徴のある佃煮が製造されてきた. 一般的に佃煮には調味加工に用いる調味液に多量の甘味料が用いられており, 水分活性の低下や甘味, 香味の付与に効果を及ぼしている¹⁾.

希少糖含有シロップ (Rare Sugar Syrup, 以下, RSS と略す) は, 約 15% の希少糖 (ソルボース, アロース, タガトース及びアルロース (プシコース)) を含み, 血糖値上昇抑制作用²⁾ を有する機能性表示食品として届出が完了した甘味料³⁾ である. また, 機能性表示食品の届出に必要なエビデンスも整っていることから, RSS を適量用いることで健康に配慮した食品の製造が可能となる. さらに RSS には食品に利用した際, コクの向上や風味付与等の効果があり^{4), 5)}, 佃煮の甘味料として RSS を用いることで, 色や香りを短時間で付与できることを報告している⁶⁾.

一方, 希少糖アルロースにはフルクトースよりも特徴的な甘い香りのする成分を多く生成することが報告⁷⁾ されており, アルロースを食品に使用することで有用な風味を付与できることが考えられる. 特に佃煮のような長時間加熱をおこなう調理食品は, メイラード反応によって特徴的な香り成分を多く生成することが考えられ, 風味の改善を目的とした希少糖アルロースの利用が期待される. しかしながら, 4 種類の希少糖 (ソルボース, アロース, タガトース及びアルロース) を含む RSS が食品の香り成分の形成に及ぼす影響については, これまで報告されていない.

そこで本研究では, ヘッドスペースガスクロマトグラフ質量分析装置で上白糖, ぶどう糖果糖液糖及び RSS を使用した佃煮調味液モデルを調製し, 調理過程における香りの形成を網羅的に分析し, RSS に特徴的な風味を付与する効果について検討した.

2 実験方法

2.1 試料

希少糖含有シロップ (松谷化学工業株式会社製, 以下, RSS と略す), 上白糖 (三井製糖株式会社製), 濃口醤油 (盛田株式会社製), アミノ酸調味液 (ダイヤアミ

ノ酸液-低塩 NK-12 (播州調味料株式会社製) は市販品を購入した. また, ぶどう糖果糖液糖は松谷化学工業株式会社より入手した.

2.2 佃煮調味液の調製

RSS, ぶどう糖果糖液糖及び上白糖を用いたモデル試験は, 以下の方法で行った. 佃煮調味液は, 青山ら⁸⁾ の方法に基づいて調製した. すなわち, 醤油 30 g, アミノ酸液 8 g に RSS もしくは上白糖を加え, 最終濃度が Brix18% になるように超純水で 100 g に調製した. バイアル瓶に調製した佃煮調味液 2 ml を分注し, 内部標準液として 2000 ppm の 1-プロパノールを 500 μ l, さらに 5M NaCl 2 ml を添加した後, 密封した.

2.3 香り成分の分析

香り成分の分析は, GCMS-QP2010 Ultra ヘッドスペースサンプラーより構成されたヘッドスペース-ガスクロマトグラフ質量分析装置 (株式会社島津製作所製, 以下, HS-GC/MS と略す) に, キャピラリーカラム SLB-5ms (シグマアルドリッチ製, 膜厚 0.25 mm, 長さ 30 m, 内径 0.25 mm) を装着して実施した.

ヘッドスペースサンプラーの運転条件は, 以下のとおりとした. すなわち, 当該機器に内蔵されたオープンを用いて, 調味液の加熱を行った ($t_F=3$). 香り成分の吸着剤には Tenax を用い, トラップ冷却 50°C, トラップ加熱 200°C, トランスファーライン 150°C とした. また, 調味液を充填したバイアル瓶を 85°C で 60 分間加熱することでモデル調理とした.

ガスクロマトグラフ質量分析装置の運転条件は次のとおりとした. キャリアーガスとして超高純度ヘリウムガスを用い, 一定圧力 37.1 kPa, スプリットレス, オープンは 50°C で 10 分保持した後, 3°C/分で昇温し, 300°C に達した後 5 分間保持した. 質量分析については, スキャンモードで分析をおこない, イオン源 200°C, インターフェース 250°C, 40~400 m/z の質量範囲で, 電子イオン化法 (EI 法) を用いて質量分析した.

成分の同定には, FFNSC2, NIST11 のライブラリーと保持指標 (RI: Retention Index) を活用した. なお, 分析毎に n-アルカン混合標準溶液 (林純薬工株式会社) を標準物質として用い, 溶出時間から保持指標を算出した.

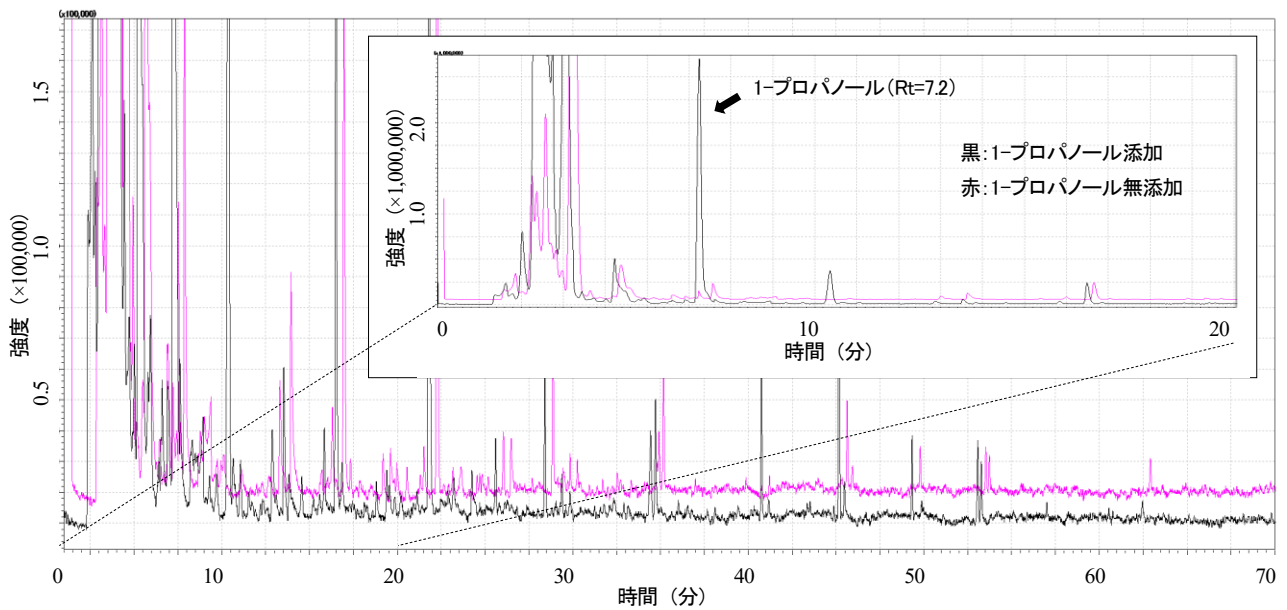


図1 佃煮調味液のトータルイオンクロマトグラム (TIC)

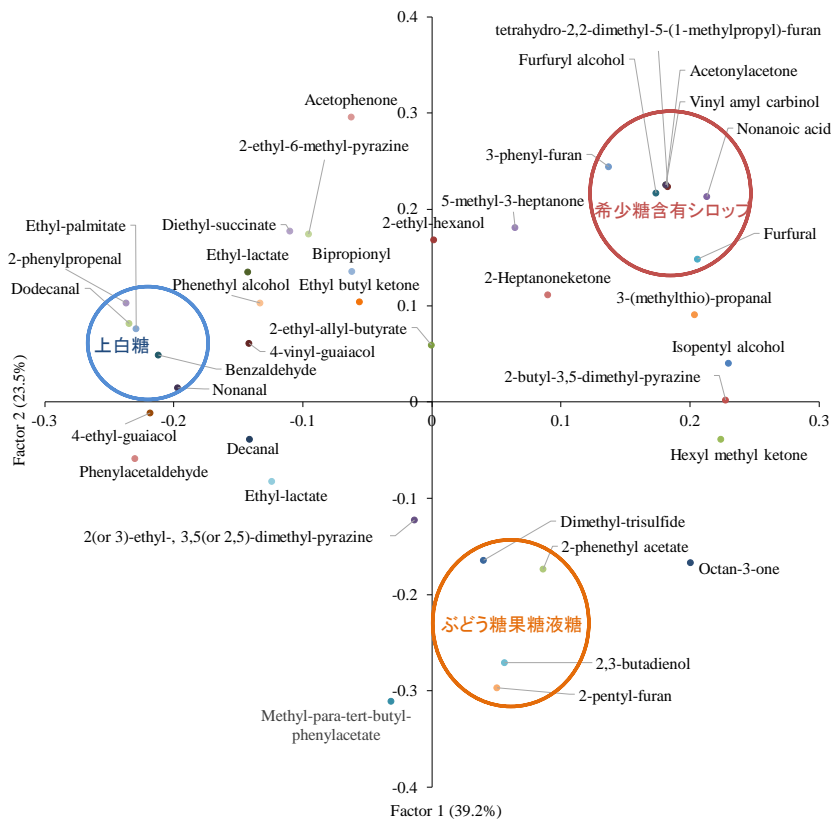


図2 佃煮調味液の香り成分の主成分分析 (40成分、ローディングプロット)

2. 4 分析データの変量解析

HS-GC/MS 分析結果の主成分分析には、Pirouette ver. 4.5 (GL Sciences 株式会社) を使用し、内部標準物質 1-プロパノールのピーク面積に対する検出化合物のピーク面積の比率を算出した数値を相対定量値に用いた。

3 実験結果及び考察

3. 1 内部標準の分析

内部標準物質として、1-プロパノールを用いた。当

該内部標準は保持時間 (Rt) 7.2 分に検出され、佃煮調味液中の香り成分と重複しないことを確認した (図1)。

3. 2 佃煮調味液中の香り成分分析

HS-GC/MS 分析の結果、保持指標及び GC/MS ライブラリーより、総計 40 成分の香り成分が同定できた。これらの香り成分について主成分分析をおこなったところ、RSS を使用した佃煮調味液は、上白糖やぶどう糖果糖液糖を配合した佃煮調味液と比較して、furfural (RI : 825), furfuryl alcohol (RI : 844), 3-phenyl-furan (RI : 1218) 及び tetrahydro-2,2-dimethyl-5-(1-

methylpropyl)-furan (RI1023) のフラン類を特徴的に生成していることが明らかとなった (図 2)。この結果から、RSS を使用した佃煮調味液は調理工程で特徴的にフラン類の香気を形成するとともに、RSS に含まれる希少糖がフラン類の形成に関与している可能性が示唆された。Cho ら⁹⁾ は、グルコース、ガラクトース、フルクトース及びタガトースと数種のアミノ酸をそれぞれメイラード反応させ、タガトースが他の単糖よりも多くのフラン類を生成するとともに、甘くフルーティーでキャラメルのような香りが形成されることを報告している。本試験においても、RSS にはタガトースが含まれており、フラン類を特徴的に生成した要因の 1 つと考えられる。また前報⁶⁾ において、RSS を配合した佃煮調味液は、上白糖やぶどう糖果糖液糖を配合したものと香りが異なっていたことから、香気成分としてフラン類が形成されたことが、香りの差異に関与している可能性が示唆された。

4 結言

HS-GC/MS を用いて上白糖、ぶどう糖果糖液糖及び RSS を使用した佃煮調味液の香気成分を網羅的に分析した結果、RSS を使用した佃煮調味液にはフラン類が特徴的な香気成分として生成しており、RSS には風味を付与する効果があることが示唆された。

今後、匂いかぎ GCxGC-TOFMS を用いて官能評価と香気成分の関係性についてより詳細な検討を行い、希少糖を含む RSS を使用した食品の香気成分の生成機構について明らかにする予定である。

謝辞

本実験を行うにあたり、ぶどう糖果糖液糖を提供いただきました松谷化学工業株式会社様に感謝申し上げます。また、貴重なご助言、ご指導を賜りました、香川大学農学部 田村 啓敏 教授に深謝いたします。

参考文献

- 1) 独立行政法人農畜産業振興機構 HP. しょうゆ業界におけるめんつゆ・たれ類の動向等：<https://sugar.alic.go.jp/japan/user/user0810a.htm> (取得日：2022年3月14日)
- 2) 山田貴子, 新谷知也, 飯田哲郎, 岸本由香, 大隈一裕：ヒトにおける希少糖含有シロップ摂取による血糖応答に及ぼす影響. 日本栄養・食糧学会誌, **70**, 271-278 (2017).
- 3) レアシュガースウィートの機能性表示食品：<https://www.fld.caa.go.jp/caaks/cssc02/?recordSeq=42111010070601> (取得日：2022年3月14日)
- 4) 一般社団法人希少糖普及協会 HP：<https://www.raresugar.org/case/> (取得日：2022年3月14日)
- 5) 内山明子：希少糖含有シロップの味質改善効果. 月刊フードケミカル, **7**, 61-66 (2020).
- 6) 竹歳 麻耶, 三好 美玖, 稲津 忠雄, 木村 功：希少糖含有シロップを使用した佃煮製造のモデル試験(第一報). 香川県産業技術センター研究報告, **21**, 4-5 (2020).
- 7) 田村啓敏, 何森健, 徳田雅明：食品または医薬品の芳香を改善する方法. 特開 2008-48685 (2008).
- 8) 青山康司, 岡崎尚, 米田達雄：昆布佃煮の変敗に及ぼす水分活性 初発酵母菌数及び貯蔵温度の影響, 広島県立食品工業技術センター研究報告, **22**, 7-12 (2000).
- 9) In Hee Cho, Sarah Lee, Hae-Roung Jun, Hoe-Jin Roh, and Young-Suk Kim. Comparison of Volatile Maillard Reaction Products from Tagatose and Other Reducing Sugars with Amino Acids. *Food Sci. Biotechnol.* **19**, 431-438 (2010).

希少糖含有シロップのテリツヤ付与効果

竹歳 麻耶, 稲津 忠雄

食品の外観において、テリツヤはおいしさを感じる重要な要素である。テリツヤは糖類によって付与されることが知られており、今回、希少糖含有シロップ (RSS) を使用して食品へのテリツヤ付与が可能な検討した。テリツヤ調味液において、上白糖やみりん風調味料を RSS で代替することで、光沢度は高くなる傾向であった。官能検査におけるテリツヤの評価でも同様の傾向を示し、RSS の利用用途としてテリツヤ付与の可能性が示唆された。

1 緒言

希少糖含有シロップ (Rare Sugar Syrup; 以下 RSS と略す) は低 GI 甘味料であり、機能性表示食品の展開が見込まれる中^{1,2)}、菓子や総菜をはじめとする食品に広く使われており、風味の向上、塩味の向上、コク味付与、異味のマスキング、酢カドの軽減、卵臭・乳臭の軽減などの味質改善効果も報告され²⁾、用途開発が進んでいる。

一般に料理にテリツヤをつけるためには、ショ糖やみりん、片栗粉 (デンプン) といった糖質系調味料が利用されているが、RSS は希少糖 (プシコース、ソルボース、タガトース、アロース) を 12% 以上含有し、グルコースもフルクトースも含有し、砂糖に似た味質を持つ甘味料であり、テリツヤを出すための調味料として使用できる可能性がある。

そこで本研究では、ショ糖、みりん、みりん風調味料、RSS の配合割合の異なる調味液を試作し、これらのテリツヤの差を光沢計による機器測定と官能検査により比較検証したので報告する。

2 実験方法

2.1 原料

D-グルコース、スクロースは富士フィルム和光純薬 (株) 製の試薬特級、D-フルクトースは (株) ナカライテスク製の特級を使用した。

RSS は松谷化学工業 (株) 製、砂糖は三井製糖 (株) 製の上白糖、醤油は盛田 (株) 製の濃口しょうゆ、みりんは宝酒造 (株) 製の本みりん、みりん風調味料は (株) ミツカン製のほんてりを用いた。

2.2 糖液、テリツヤ調味液の調製

大谷ら³⁾ は、すりガラスの上に 1% 糖液 30 μ l を一定面積に拡げて加熱操作を行い光沢度測定を行ったと報告しているが、表面張力の影響でうまく拡げられず、さらに直ぐに乾燥してしまっただ。そこで、光沢度を測定するのに最適な糖度を調味液組成から推算することとした。調味加熱によく用いられる調味液の容量比 (しょうゆ : みりん : 砂糖)⁴⁾ を参考に調製すると糖度は約 40% であった。そこで糖液の糖度も 40% とし、D-グルコース、D-フルクトース、スクロース、RSS の 4 種の糖液を調製した。テリツヤ調味液の配合は表 1 に示す容量比率で調製した。

表 1 テリツヤ調味液の組成

試作区	A	B	C	D	備考 (Brix)
醤油	60 g	60 g	60 g	60 g	
本みりん	40 g	40 g			44.3
みりん風調味料			60 g		50.3
上白糖液	20 g				50.4
RSS		20 g		60 g	50.3
調味液 Brix	41.0	40.9	42.9	42.3	

2.3 光沢度の測定

光沢度の測定は、大谷ら³⁾ の方法を一部改変して実施した。光沢度測定には光沢計 (株堀場製作所製、IG-331) を使用し、入射光角度 60 度で光沢度を測定した。フロストガラス (松浪硝子工業 (株) 製、S2215) に養生テープ (積水化学 (株) 製、マスキライトテープ、厚さ 0.15 mm) を貼り付け、光度計の照射面積部分の養生テープをくり抜いたところに (8 mm \times 15 mm)、サンプル液 30 μ l を塗布した (図 1)。加熱は、ホットスターラー (アズワン (株) 製、RSH-1DR) を使用し、糖液は 165°C で 30 秒間加熱した。一方、テリツヤ調味液は、焦げやすく測定面の調製が困難であったため、165°C で 10 秒経過時にサンプル液を 30 μ l 補液し、更に 10 秒間加熱した。室温で 30 分放置した後、サンプル液周りの養生テープを取り除き、光沢計により測定を行った (n=3)。

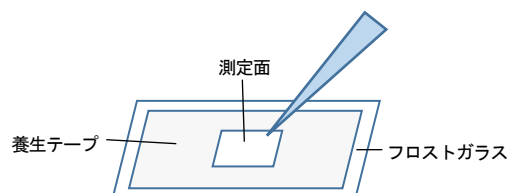


図 1 測定面 (光沢度) 作成イメージ

2.4 実食品モデルでのテリツヤの検証

実食品モデルとして照りこんにゃくを試作した。市販板こんにゃく (ハイスキー食品工業 (株) 製) を使用し、1 cm 角の立方体にカットした後、湯煎して軽く乾煎りを行った。表 1 の配合で調製した A~D の各調味液 50 g、こんにゃく 100 g、水 70 g を片手鍋 Φ 15 cm に入れ、IH 調理器 (Panasonic 製、KZ-PH33) の中火 (レベル 5) で水分が無くなるまで加熱調理を行った。その後、職員 6 名で

試食を行い、5項目（色が濃い、テリツヤが強い、塩味が強い、コンニャクの風味が強い、全体の味）について順位法で評価した。試料間の差の検定は、Newell & MacFarlane の表を用いて行った⁵⁾。

3 結果および考察

3.1 糖液の光沢度測定

糖液の光沢度測定を図2に示す。試料間に有意差は認められなかったが、スクロース以外は少し高い同程度の光沢度を示した。

スクロース溶液は他の糖液に比べて、同一水分でも加熱による泡立ちが早く硬化しやすく、更に蒸発が進むとひび割れや凹凸が生じやすいため、光沢面にムラが生じ光沢度は低値を示したと考えられた。

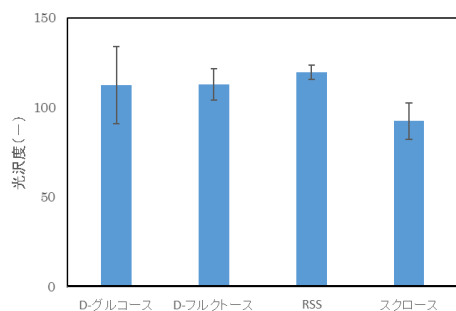


図2 各種糖液塗布面の加熱後の光沢度(糖濃度40%)

3.2 テリツヤ調味液の光沢度

テリツヤ調味液の光沢度測定結果を図3に示す。試料間に有意差は認められなかったが、図3に示すとおり、A・Bは上白糖とRSS、C・Dはみりん風調味料とRSSの比較と考えることができるが、いずれもRSSの方が高い傾向を示す結果であった。

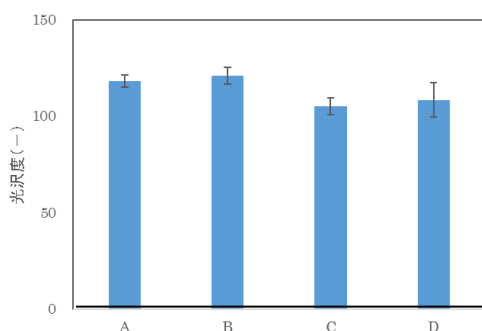


図3 テリツヤ調味液の配合割合の違いが光沢度に及ぼす影響

3.3 実食品モデルでのテリツヤと味の検証

実食品（照りコンニャク）の官能検査結果を表2に示す。Bの色が濃いという評価は、RSSは主に単糖から構成されているため、醤油とみりんに含まれるアミノ酸とメイラード反応を他区と比べ早く進行し褐色化に影響を与えていたためと考えられた。

表2 照りコンニャクの官能検査結果(順位合計)

審査項目	A	B	C	D
色が濃い	13	8	19	20
テリツヤ強い	16	13	18	13
塩味が強い	13	12	15	20
コンニャク風味強い	19	16	12	13
味(好み)	16	17	17	10

数値が小さいほうがその傾向が強いことを示す(例:強い:1、弱い:4)。個々の試料間の差はTukey法(多重比較検定)より、有意差なし

テリツヤ感については、テリツヤ調味液の光沢度の結果と実食品モデルの評価結果が同様の傾向を示し、RSSが食品のテリツヤの向上に影響を与えている可能性が考えられた。

RSSを食品へ利用した場合、砂糖を用いた場合より甘味の切れが早く、すっきりとした甘みを持つことが知られており⁶⁾、素材の後味を感じやすくさせる効果があるといわれている。本研究の味評価(好み)において、統計的に差はみられなかったが、RSSの含有量が多いテリツヤ調味料Dの味評価の良さに影響を与えた可能性が示唆された。

4 結言

RSSを調味液に用い加熱した場合のテリツヤを評価したところ、統計的に有意差は認められなかったが、機器測定による光沢度も官能検査結果もテリツヤの評価が高くなる傾向を示した。

参考文献

- 1) 香月和敬: 低GI甘味料 希少糖含有シロップの利用, 応用糖質科学, **9**, 121-124 (2019).
- 2) 山田貴子, 新谷知也, 飯田哲郎, 岸本由香, 大隈一裕: ヒトにおける希少糖含有シロップ摂取による血糖応答に及ぼす影響. 日本栄養・食糧学会誌, **70**, 271-278 (2017).
- 3) 大谷貴美子, 本田初実, 南出隆久, 片岡あゆみ, 饗庭照美, 光田佳代, 松田秀喜, 森田日出男: つやに関する基礎研究, 日本調理科学会誌, **33**, 441-450 (2000).
- 4) 孟埜, 菅原悦子: 加熱における醤油調味液の香気成分の変化とみりんの役割. 日本醸造協会誌, **111**, 580-585 (2016).
- 5) 畑江敬子: 順位データの検定, 日本調理学会誌, **29**, 251-252 (1996).
- 6) 内山明子: 希少糖含有シロップの味質改善効果. 月刊フードケミカル, **7**, 61-66 (2020).

高機能センサやアクチュエータの開発 — 把持装置における滑り検知センサの試作開発 —

坂東 慎之介, 竹中 慎*, 奥村 仁志*, 高原 茂幸, 小林 宏明, 長谷見 健太郎, 福本 靖彦, 吉村 祥一, 神内 杜夫

産業技術センターでは、産業成長戦略に従い「かがわ Society5.0 (超スマート社会) 推進事業」に取り組んでいる。この取り組みでは、要素技術開発テーマの一つとして、高機能センサやアクチュエータの開発が取り上げられている。

そこで本報では、工作機械やロボットハンド等に搭載される把持装置に着目し、把持対象物が搬送中に滑りを生じた場合の検知手法の構築と、その検出器(センサ)の試作開発を行った事例について報告する。

1 はじめに

産業技術センターでは、平成 29 年度に策定された産業成長戦略に基づき、複数のプロジェクト研究が進められている。このうち、システム技術部門においては、ロボット、センサ、IoT、AI などのキーワードのもと、県内企業におけるスマート工場環境の構築を支援する取り組みを進めている。この取り組みでは、県内企業 60 社が参加するロボット・IoT・AI 技術分科会(以下、単に分科会と記す)において、随時、弊所の取り組み、最新の技術動向を紹介するとともに、会員企業からのニーズを踏まえ、県単独研究、受託研究等も行っている。

本報では、把持装置における把持対象物の滑り検知手法の構築を目的として、専用のセンサを試作開発したので、その概要を報告する。

2 滑り検知のニーズ、既往の開発事例及び課題^{1)~4)}

2.1 滑り検知のニーズ、既往の開発事例

本試作開発の発端は、分科会会員企業である株式会社奥村機械製作所からの技術相談による。同社は、主に押出成形品をはじめとする長尺の素材から、丸鋸を用いて所望の寸法に切断する切断装置(図 1 (a))及びその周辺機器である切断対象物の搬送装置(図 1 (b))等の工作機械を製造、販売している。具体的な切断対象物(以下、ワークと記す)としては、角パイプ、丸棒、アルミサッシの型枠材、リニアスライダのガイドレールなどがあり、ユーザ企業では、1 台の切断機で、断面形状やサイズが異なる部材の切断が行われることも多い。その作業は、図 1 に示した搬送装置に搭載された把持機構(以下、チャックと記す)によって切断対象をつかみ、所定の長さ分だけ搬送、位置決めされた後、丸鋸によって切断、というサイクルを繰り返すものである。

これらのワークは、一般に、長さが数[m]に及ぶ一方、切断時に許容される長さ方向の寸法誤差は 0.1 [mm]程度とされている。しかし、ユーザ企業においては、作業時間の短縮を目的として過大な搬送速度を設定する場合や、薄肉断面形状を有するワークでは、変形を防ぐ観点から小さな把持力で搬送が行われる場合も少なくない。この

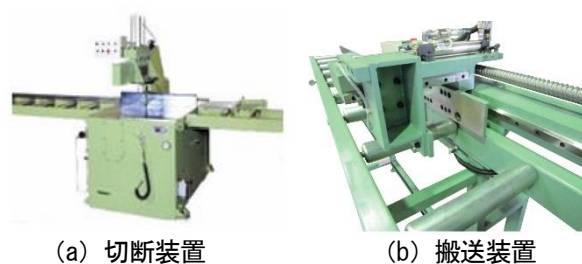


図 1 切断作業用工作機械

ような場合、チャックとワークの間に滑りが生じ、不良品を発生させる原因となる。

株式会社奥村機械製作所からは、この問題に対し、滑りが発生した場合に即時にそれを検知してアラームを発する手法、可能であればその滑り量の測定が可能な手法を構築したいとの要望が寄せられた。

一方で、弊所で取り組む分科会活動に関連して、同様の問題を抱える機構部品に、ロボットハンドが挙げられる。近年、ロボットの活用が進むとともに、作業のタクトタイム短縮のための動作速度の向上や、柔軟物をはじめとする複雑形状のハンドリング性能の向上を目的とした取り組みも進められ、専用のロボットハンド開発、滑り検出手法が提案されている。

例えば代表的なものとして、スクロールチャック状のハンドにおいて、その爪にローラを配置し、ロータリエンコーダでローラの回転量を検出することにより滑りを検出しようとするものがある。また、対向型のハンドにおいては、平面に半球状の突起を多数配置した樹脂製シートを貼り付け、幾つかの突起を代表点として、その変形を基に滑りを検知するものなどがある。ただし、前者は対象となるワークの形状が円筒に限定され、多様な形状のワークには対応できない。また後者は、ワーク形状が矩形断面を有するものに限定されることに加え、代表点に確実にワークを接触させるためには、ワークのサイズにも制約があるといった課題が残る。これらの方法では、切断機が対象とする、大きさ、形状が多岐にわたるワークを把持し、その滑りを検出することが困難である。複数のハンドまたはセンサを用意する方法もあるが、ハンドの取替作業など、工程が増えることに繋がる。

* 香川県 商工労働部 産業政策課

**株式会社奥村機械製作所

2. 2 開発課題の整理

前節で述べた内容をまとめると、把持装置におけるワークの滑りを検出するために求められる性能と課題は、以下になると考えられる。

- (1) ワークの形状、大きさに依らず、滑りを検知、計測することができること
- (2) チャックの把持面内の2次元的な滑りを検出、計測することができること

これらの点を踏まえ、把持装置（チャック、ロボットハンド）の中でも、利用頻度が高いと思われる対向型の把持装置に取り付け可能なセンサの開発を行うこととした。

3 試作センサとその性能⁵⁾

3. 1 試作センサの構造及び動作

前節で整理した課題を解決することを目的として、工作機械の把持・搬送装置に取り付けることを前提としたセンサの試作開発を行った。試作センサの全体構造を示す写真を図2に、また試作センサを搬送装置のチャックに取り付けた様子を図3に、滑り検知センサの動作を表す模式図を図4にそれぞれ示す。

図2に示したとおり、試作センサは、2組の平行ばねA、Bをブロック材でつなぎ合わせた構造を有している。下段の平行ばねAはx-z平面と平行に、上段の平行ばねBはy-z平面と平行になるよう、それぞれ配置している。加えて、平行ばねAには、ワークと接触する接触板を取り付けた。一方、平行ばねBには、その変形や変形速度を検出するための検出素子を貼り付けた。このセンサを図3のように、搬送装置のチャックに取り付けて使用する。取付けにあたっては、センサの接触板が把持面に対して0.5~1.0 [mm]突き出した状態に設定した（図3 (b) y_A ）。

把持動作の際、ワークは、チャックの把持面と同一平面上に位置するまで、接触板を押し込む。このとき、平行ばねAの復元力（反力）が、接触板からワークに伝達されることにより、ワークと接触板の間に摩擦力を生じる。平行ばねを使用しているため、ローバール機構の原理が成立し、ワークが接触板上、z軸方向のどの位置に接触した場合でも、接触板はx-z平面との平行を維持したままy方向へと押し込まれる。この間、x-z平面と直交する平行ばねBは、変形を生じない。

一方、チャックが搬送動作を開始し、滑りが生じた場合には、平行ばねBのみが変形する。このときの平行ばねBの変形量や変形速度をひずみゲージや圧電フィルム等の素子によって電圧信号に変換し、滑りを検出することとした。試作センサの検出素子には、ひずみゲージに共和電業(株)製 KFG-2-120-C1-112M3R を、圧電フィルムに株式会社クレハ製 K0711-40AS-L30 を用いた。ここで、圧電フィルムとは、ポリフッ化ビニリデン (PVDF) に代表されるフィルム状の柔軟な素子である。そのフィルムの変形速度に比例して電圧が発生するものである。

動的な現象である滑りを捉えるには、変形速度を評価する方が有利な場合があるため、静的/動的変形の双方に対応するひずみゲージとの比較を行うこととした。

3. 2 センサの性能

㈱奥村機械製作所が製造する搬送装置に試作センサを取付け、滑り検出性能の評価を行った。ワークには、 $\phi 25$ [mm]中実丸棒、 $\phi 75$ [mm]パイプ、25 [mm]角棒の3種類を

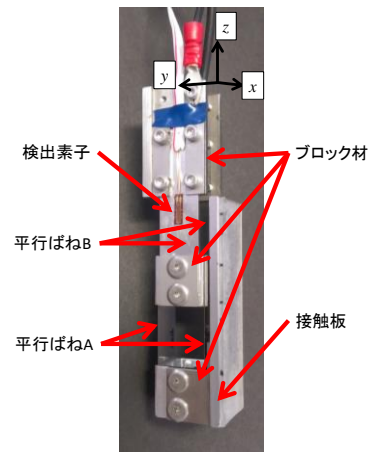
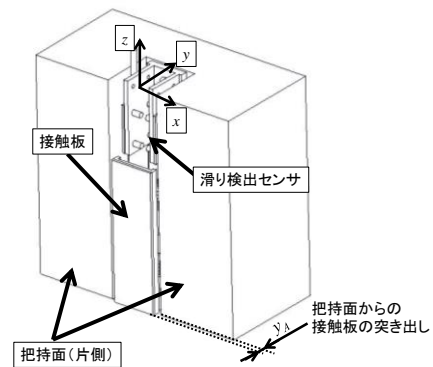


図2 試作センサ全体構造

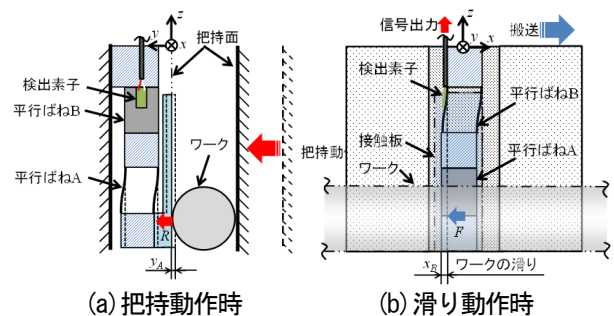


(a) 搬送装置（実機）への取付け状況



(b) 取付け部拡大（模式図）

図3 試作センサの取付け状況



(a) 把持動作時

(b) 滑り動作時

図4 センサの動作（模式図）

用いた。チャックに把持した状態で、一方の端部をハンマで打撃することで強制的にワークに滑りを与え、他端部の移動量をダイヤルゲージにより測定することで、ワークの滑りを定量化した。併せて、滑りを生じたときの各検出素子からの信号波形を採取し、2. 2節に示した課題を解決できるか調査した。

なお、実際の切断現場では、滑り量が0.1 [mm]生じると、不良品と扱われる場合もある。このことを踏まえ、0.1 [mm]オーダの滑りの検出が可能かどうかという点についても併せて確認した。

滑り発生時の各検出素子からの電圧出力信号（時刻歴波形）の例を図6に示す。(a)はひずみゲージからの出力、(b)は圧電フィルムからの出力である。図中、変位入力と示している時刻が滑りの発生時刻である。

いずれの素子を用いた場合でも、滑りが生じることによる平行ばねBの変形に伴い、電圧信号を出力できている。ひずみゲージを用いる場合は、平行ばねの変形量に応じた電圧を出力するため、滑りの開始直後から、平行ばねが大きく変形し、ワークが一定量滑った時点で、平行ばねの変形量をそのまま出力し続けるステップ状の波形となった。一方の圧電フィルムを用いる場合は、変形速度に応じた電圧を出力するため、滑りの開始直後に大きな電圧を生じるが、ワークの滑りが止まった時点で速度はゼロに戻ろうとするインパルス状の波形となった。また、いずれの素子を使用した場合でも、滑り動作終了後に残留振動に応じた電圧信号が出力されることが確認された。そこで、それぞれの素子を用いる場合には、個別に信号処理を行うこととした。

ひずみゲージを用いる場合には、DC成分のみを抽出することで、ひずみ量の変化を読み取り、滑り量と対応付けた。また滑り量と滑り速度の最大値には比例関係があることから、圧電フィルムを用いる場合には、 $f_c = 50$ [Hz]のローパスフィルタを用いて、残留振動を含む過渡現象の成分を除去し、フィルタ処理後の変形速度波形のピーク値と、滑り量を対応付けることとした。

このようにして得られた各検出素子からの出力とダイヤルゲージにより実測したワーク滑り量との関係をまとめたものを図7に示す。いずれの素子を用いた場合でも、断面形状の異なるワークの滑りを検出することができた。また、検出素子からの出力値と滑り量の実測値の間で、良好な直線性を示した。特に、ひずみゲージを用いた場合には、測定値のばらつきが小さく、直線性も高い結果となった。ただし、2.2節で述べた課題であるワークの形状や大きさによらず、滑りを定量化できるセンサを提供する点では、いずれの検出素子を用いた場合でも、目的を達することができたと考えられる。加えて、今回実験を行った搬送装置が用いられる切断現場で要求される、0.1 [mm]オーダの滑りを検出するという点においても、課題は解決できているものと思われる。

なお、今回の実験では一方向のみの滑りを検出する実験を実施したものであるが、今回のチャックのような構造においては、対向する把持面に同一のセンサを、互いに直交するように配置することで、把持面内の2次元的な動きも検出することが可能である。

4 まとめ

ロボット構成部品のうち、把持装置において問題となるワークの滑りを検出する手法構築及びセンサの試作開発を、工作機械を対象として実施した。

今後は、実機に搭載しモニタ利用に供することで、改良点の抽出を行うことに加え、ロボットハンド等への応用等を検討していく予定である。

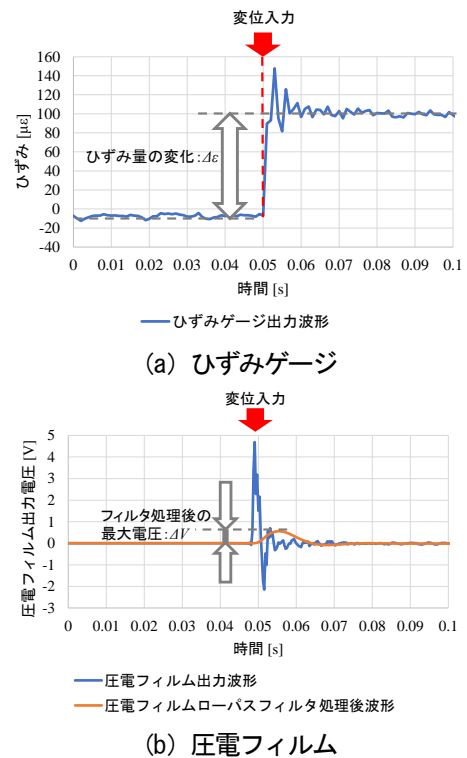


図6 試作センサからの電圧出力波形の例

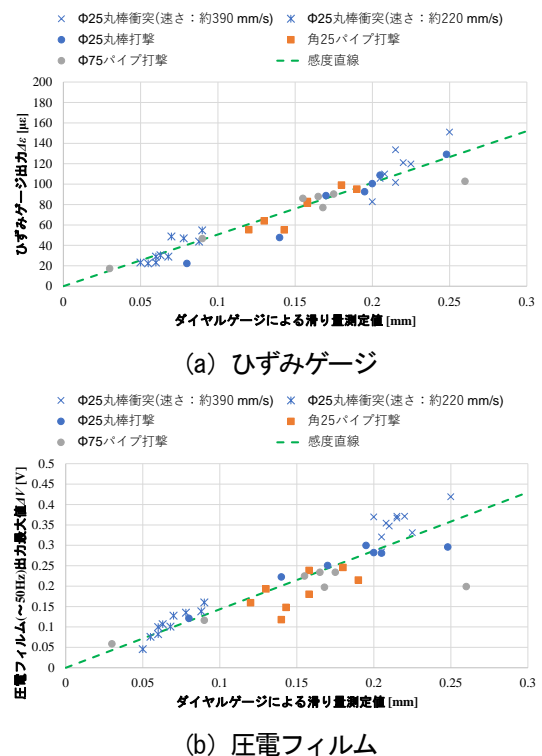


図7 試作センサの出力と滑り量実測値との関係

参考文献

- 1) <https://www.okumurakikai.com/>
- 2) 特開 2019-18253 号。
- 3) 特開昭 60-93932 号。
- 4) 特開 2020-49638 号。
- 5) 特願 2020-206032 号。

AI を用いた高度なロボット制御技術の検討

— 深層強化学習を用いた力制御コントローラの開発 —

神内 杜夫, 福本 靖彦, 小林 宏明, 高原 茂幸, 坂東 慎之介, 長谷見 健太郎, 吉村 祥一

一般に、ロボットを用いて組み立て作業などの物理的接触を伴う作業を行う場合、対象を押しつけすぎないようにするために力制御が用いられる。しかし、従来の力制御手法では対象への接近速度を十分遅くしないと対象の表面でバウンドするなどして安定的な接触が保てないことが知られている。本研究では、ロボットの手先を机に押し当てる動作を対象として、深層強化学習を用いた力制御コントローラを開発し、従来の力制御ではバウンドするような速度でも、バウンドせずに安定的な接触を実現できることを確認した。また深層強化学習に用いるニューラルネットワークには Long Short-Term Memory (LSTM) が適していることが分かった。

1 緒言

現在、我が国では生産年齢人口の減少が問題となっており、製造業においては人手不足への対応が重要な課題となっている。本県では香川県産業成長戦略¹⁾においてロボットの活用をその対策として挙げている。

製造業の中で多く行われている作業として組立作業が挙げられる。このような外界と接触を伴う作業を行う場合、位置誤差を補正するために力制御が行われる。しかしながら、現状ではその性能はヒトの特性には及ばない。例えば、接触対象への接近速度を十分遅くしないと接触対象の表面でバウンドし続けてしまうなどの不具合が生じる。さらに、力制御を利用するためには多くのパラメータを適切に設定する必要があり、専門的な知識が必要で時間もかかるという問題や、誤った値を設定するとロボットが暴走する恐れがあるという問題もある。

現在、広く使われている力制御アルゴリズムであるインピーダンス制御においては、バウンド等のない安定した接触を実現するための手法として、斜めから突き当てを行う手法²⁾が提案されている。パラメータを簡単に設定する手法としては、把持ワークを繰り返し接近させ、ステップ応答の整定時間が最短になるように粘性パラメータを探索的に調整する手法³⁾や、NN(ニューラルネットワーク)を用いたオンライン学習で学習的にパラメータを調節する手法⁴⁾などが提案されている。しかし、従来のインピーダンス制御ではバウンドしてしまうような速い接近速度での接触を自動的に実現した例はない。

また近年、深層強化学習を用いたアプローチにより、従来よりも高い力制御性能を自動的に獲得する手法も提案されている。例えば、Deep Q 学習により従来よりも位置誤差にロバストでより小さなクリアランスのペグ・イン・ホール作業を実現した例⁵⁾や、Soft-Actor-Critic を用いたコンプライアンス制御によって位置誤差にロバストなペグ・イン・ホール作業を実現した例⁶⁾が報告されている。しかし、これらは接近速度を向上させたものではない。

本研究では、高速で接近してもバウンドせず安定した接触を実現するため、深層強化学習を用いた力制御



(a) 全体図 (b) 手先部

図1 突き当て装置



図2 装置構成図

コントローラを構築する。深層強化学習アルゴリズムとして Deep Q 学習を用い、その Q ネットワークとして多層パーセプトロン (MLP) と Long Short-Term Memory (LSTM) の 2 種類を検討する。検証動作には突き当て動作を用いる。

検証の結果、Q ネットワークには LSTM の方が適していることと、Deep Q 学習によりインピーダンス制御を超える良好な性能を持つコントローラが得られることが確認された。

2 装置構成

本研究では、対象物に対して手先を一定の力で押し付ける突き当て動作について検討した。図1に検証で使用した装置の写真を示す。ロボットには MOTOMAN-SDA10F (安川電機) の片腕を用い、図1 (b) に示すように机に向かって腕を動かして押し付けるものとした。

図2は本研究における装置構成である。PC からロボットに対して1時刻後の手先位置の増分値の目標値を指令値として与えることでロボットが動作する。本研究ではこれを速度指令値 $v_{cmd}(t)$ を与えると、ロボットが速度 $\dot{x}(t)$ で動作すると考える。ロボットの手先が机に接触している場合、ロボットは机から力 $f(t)$ を受ける。そしてロボットは速度と力の情報をコントロ

ーラに返す。制御周期 T は4[ms]である。

3 深層強化学習

本研究では深層強化学習として Deep Q 学習を用いる。Q ネットワークに MLP を用いた場合と、LSTM を用いた場合それぞれについて検証を行った。MLP とは最も基本的な NN で、入力層、中間層、出力層の各層間のニューロンが全結合しているものである。LSTM は時系列データの解析でよく用いられる基本的な NN であり、Recurrent Neural Network (RNN) の一種である。時間方向に情報を引き継ぎながら計算を進めることができ、ゲートと呼ばれる仕組みを導入することで必要な情報だけを次の状態に引き継ぐことを可能としている。

行動 a は、ロボットに与える速度指令値とし、定数 v_0 を用いて以下の値を取るものとする。

$$a \in \{v_0, -v_0\}. \quad (1)$$

状態 s は、MLP と LSTM のネットワークの特性を考慮してやや異なるデータを用いるものとして設計した。

MLP を用いる場合の状態 s_{MLP} は、ロボットが受ける力 $f(t)$ 、ロボットの手先速度 $v(t)$ 、および過去の速度指令値 $v_{cmd}(t)$ の m サンプルずつの和を用いて

$$s_{MLP} = \begin{bmatrix} f(t) \\ v(t) \\ \sum_{i=1}^m v_{cmd}(t - iT) \\ \sum_{i=1}^m v_{cmd}(t - mT - iT) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m v_{cmd}(t - (n-1)mT - iT) \end{bmatrix} \quad (2)$$

とした。なお、 n, m は正の定数である。現在の手先情報である $f(t)$ と $v(t)$ に加えて、過去の速度指令値 $v_{cmd}(t)$ を導入することでロボットの応答遅れの影響が補正されることを期待している。ここで、 v_{cmd} に関して和を取っているのは、状態次元を減らしてニューラルネットワークのノード数を減らすことを意図したものである。

LSTM を用いる場合の状態 s_{LSTM} は、 $f(t), v(t), v_{cmd}(t)$ の N サンプル前までのデータを用いて以下の値とした。

$$s_{LSTM} = \begin{bmatrix} f(t) & v(t) & v_{cmd}(t) \\ f(t-T) & v(t-T) & v_{cmd}(t-T) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f(t-NT) & v(t-NT) & v_{cmd}(t-NT) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

なお、 N は正の定数である。MLP の場合との違いとして、過去のデータについて和を取っていないことと、力や速度の過去のデータも用いていることが挙げられる。力や速度の過去のデータは不要かもしれないが、LSTM では過去のデータも考慮される仕組みとなっている。

報酬 r は、押しつけ力の目標値 f_d 、十分大きな正の定数 R 、および十分小さい正の定数 F_l を用いて、以下のように設定する。力の偏差が小さいほど報酬が高くなるようにした。ただし、学習を進みやすくするため手先が机に触れていない間は報酬が小さくなるようにした。報酬のクリッピングは行わない。

$$r = \begin{cases} -(f(t) - f_d)^2, & \text{if } f(t) > F_l, \\ -R^2, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

エピソードは作業開始から 5 秒経過するか、一度対象物に接触したのちに再び手先に作用する力が 0[N] になるか、手先に作用する力が 100[N] を超えた場合、終了するものとする。

学習処理とロボットの制御処理は並列処理とし、学習が終わるたびにモデルを更新することとする。

4 検証条件

本研究では、従来の力制御手法であるインピーダンス制御と、深層強化学習を用いた力制御について比較を行った。以下に各手法での検証条件を記す。

4.1 インピーダンス制御

提案手法の比較対象となるインピーダンス制御での突き当て実験について説明する。インピーダンス制御で目標とするインピーダンス特性は以下のものとした。

$$m\ddot{x}(t) + d\dot{x}(t) = f(t) - f_d. \quad (5)$$

なお、 f_d, m, d はそれぞれ 20[N], 0.001[N/(mm/s²)], 2.25[N/(mm/s)] とし、これを差分法で解いた

$$\dot{x}(t) = \frac{m\dot{x}(t-T) + T(f(t) - f_d)}{m + Td} \quad (6)$$

を速度指令値として実装した。

一般的なインピーダンス制御では剛性項を持っているが、その場合は位置誤差があると力が目標値 f_d に一致しなくなる。また典型的な組み立て作業であるペグ・イン・ホール作業などでは剛性を設定しないケースも多い³⁾。そこで本研究では剛性項を持たない式 (5) のインピーダンス特性を考えることとした。 f_d の値は本ロボットの可搬重量が 10[kg] であることから、10[kgf] 以内の値として選択したものである。 m の値は実験で用いたロボットにおいてメーカーが標準として示している値を採用したものである。 d の値は振動のしやすさと対象物との接近速度のトレードオフを司るパラメータと言えるが、本研究はインピーダンス制御ではバウンドしてしまう状況でもバウンドしないようなコントローラを開発したいというものであるので、あえて対象表面でバウンドするような値として選択した。その結果、対象への接近速度は 8.9[mm/s] となった。

4.2 深層強化学習

F_l, F_u, v_0, R はそれぞれ 1.5[N], 100.0[N], 8.9[mm/s], 100.0 と設定した。 v_0 の値は上記のインピーダンス制御の接近速度に合わせた値である。

Deep Q 学習に使用した各 Q ネットワークについて説明する。MLP には 4 層からなる全結合の多層パーセプトロンを用い、ニューロン数は入力層 10、最初の隠れ層 16、二つ目の隠れ層 16、出力層 2 とした。入力には式 (2) を用い、 m, n はそれぞれ 4, 7 とした。LSTM の隠れベクトル数 H 、及びルックバック数 N はそれぞれ 50, 32 とし、入力には式 (3) を用いた。なお、 N は MLP が最大 32 サンプル前までの過去の速度指令値を用いることと合わせたものである。

両モデル共通で学習率は 0.99 とした。探索には ϵ グリディ法を用い、 ϵ は 1.0 から 0.1 まで 500,000 ステップを経て線形に減少するよう設定した。学習は experience replay により、直近 125,000 サンプルのデータをメモリに保存し、そこから学習のたびにランダムに抽出した 256 データからなるミニバッチを用い

て実施した。ただし、最初に対象物に接触するまでは強制的に $v_{cmd} = v_0$ を与えることとし、この間のデータはメモリに保存しなかった。ターゲットネットワークは20エピソード終わるごとに更新した。エピソードが終わるたびに手先位置を元に戻すなどのリセット動作を行うため、1エピソード5秒に加え、3秒程度のリセット時間を要した。なお、本検証ではリセット作業中は学習を行っていない。学習は20,000エピソード行った。コントローラには Intel Core i7-8700K CPU (3.7GHz) が搭載された Windows PC を用い、UDP 通信によりロボットに速度指令値を与えた。GPU は利用しなかった。なお、実行環境は Python 3.8.8、モデル構築には Tensorflow 2.5.0 を用いた。

5 実機検証

本章ではインピーダンス制御と深層強化学習によるコントローラについて実機で検証を行うが、まず準備として、深層強化学習によるコントローラについて学習を行った。図3はエピソードごとに1秒あたりの平均報酬をプロットしたものである。単調増加の傾向ではないので、単純に学習の最終状態のコントローラを選択すれば良いというものではないことが分かる。そこで、各 Q ネットワークで 20,000 エピソードの学習を行った中で、学習の前半（最初から 10,000 エピソードまで）で 1 秒あたりの報酬がもっとも高かったエピソード終了時のコントローラと、同じく学習の後半（10,001 エピソードから 20,000 エピソードまで）で 1 秒あたりの報酬がもっとも高かったエピソード終了時のコントローラを選択し、それぞれ 10 回の試行を行って性能評価を行うこととした。MLP では 5,200 エピソード目と 13,054 エピソード目が 1 秒あたりの報酬がもっとも高く、LSTM では、6,918 エピソード目と 19,139 エピソード目がもっとも高かったため、これらのエピソード終了時点のコントローラを評価に用いることとした。

インピーダンス制御での結果を図4に、MLP を用いたコントローラでの結果を図5に、LSTM を用いたコントローラでの結果を図6に示す。

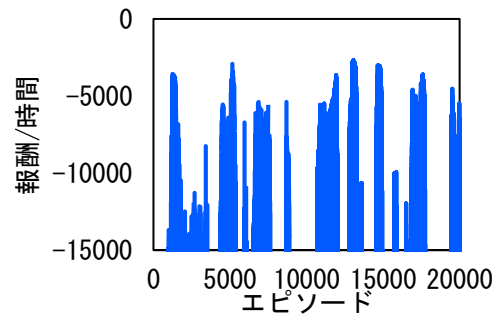
まずインピーダンス制御に着目すると、インピーダンス制御では力が0となる区間があり、手先がバウンドして浮いていることが分かる。また、接触するたびに -70 [N] ほどの（絶対値が）大きな反力が発生しており -20 [N] での押し当てが実現できていない。

つぎに MLP を用いたコントローラに着目すると、5,200 エピソード時点ではバウンドこそ発生していないものの、力が収束しておらず -98 [N] から -37 [N] の間で大きく振動している（図5 (a)）。13,054 エピソードのコントローラは、目標値付近での押しつけ動作が実現できており、バウンドも発生していない。しかし、 -10 [N] から -19 [N] の間で振動が残っている（図5 (b)）。以上のことから、MLP を用いたコントローラは 20,000 エピソード程度の学習を行うことで、目標の押しつけ力に近い力での押しつけを実現することができるが、振動が残ることが分かった。

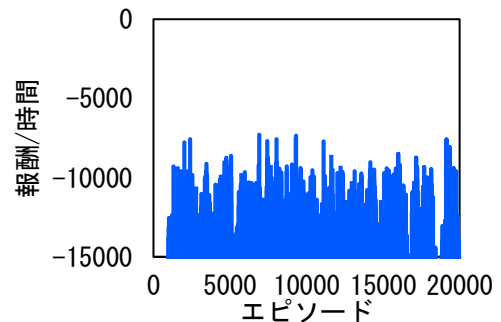
最後に LSTM を用いたコントローラに着目する。6,918 エピソードのコントローラは、目標値の 3.2 倍

のオーバーシュートが生じたあとに少し値が乱れ、その後、もっとも収束が遅いもので時刻 3.287 秒になって目標値付近に値が収束している（図6 (a)）。試行により 4.2 [N] から 7.1 [N] の定常偏差があるものの、手先がバウンドすることなく一定の押しつけ力に収束しており、振動も残定内。良好な振る舞いと言える。対して、19,139 エピソードのコントローラは、オーバーシュートは目標値の 2.4 倍で、時刻 2.113 秒には目標値の付近に値が収束し、定常偏差は最大で -4.7 [N] となっている（図6 (b)）。オーバーシュート、収束速度、定常偏差ともに 6,918 エピソードのコントローラより改善されており、特に収束速度は大幅な改善が見られる。以上のことから、LSTM モデルで得られたコントローラは 10,000 エピソード以内の学習で目標の押しつけ力に近い力での押しつけを実現することができ、20,000 エピソードまで学習を進めるとオーバーシュート、収束速度、定常偏差が改善されて更に良好な性能を実現していることが確認された。

これらの結果を比較すると、以下の3つのことが分かる。(1) MLP を用いたコントローラと LSTM を用いたコントローラのどちらにおいても、インピーダンス制御ではバウンドしてしまうような接近速度で接近し



(a) MLP



(b) LSTM

図3 学習曲線

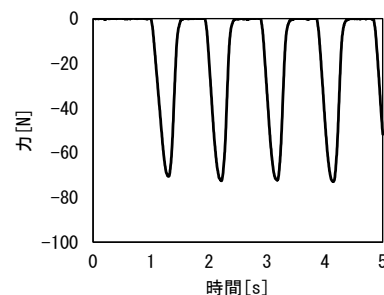
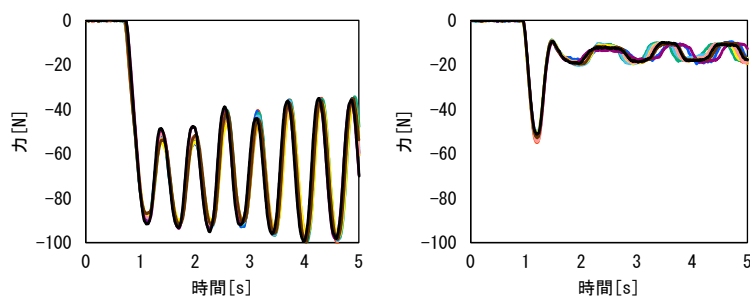
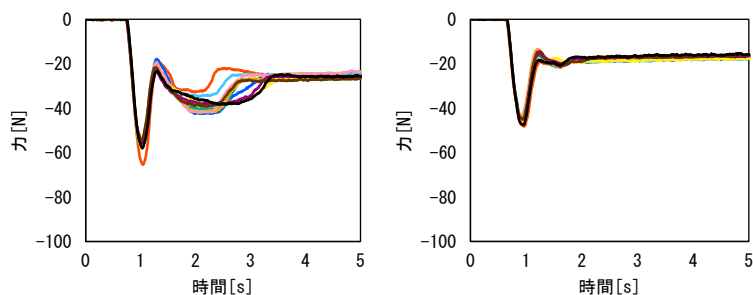


図4 インピーダンス制御を行った結果



(a) 5200 エピソード終了時点 (b) 13054 エピソード終了時点

図5 MLPをQネットワークとした場合のコントローラで10回の試行を行った結果



(a) 6918 エピソード終了時点 (b) 19139 エピソード終了時点

図6 LSTMをQネットワークとした場合のコントローラで10回の試行を行った結果

でも、バウンドが発生しなかった。(2) 目標の押しつけ力に近い力での押しつけを行うには、MLPを用いたコントローラは20,000エピソード程度の学習を要したが、LSTMを用いたコントローラは10,000エピソード以内の学習で十分であった。(3) MLPを用いたコントローラでは、20,000エピソードの学習を行っても押しつけ力に振動が残っているが、LSTMを用いたコントローラは10,000エピソード時点で振動しておらず、20,000エピソードの学習を行うことで押しつけ力がより早く目標値に収束する良好な性能を実現した。

以上より、目標の押しつけ力を -20 [N]、接近速度 8.9 [mm/s]でインピーダンス制御を行うと手先がバウンドしてしまうが、深層強化学習による力制御の場合、バウンドの無い押しつけ動作を行うことができることが確認された。さらに、使用するNNはMLPよりもLSTMの方がより少ない学習回数で良好な定常特性を実現していることが確認された。

6 結言

本研究では突き当て動作における力制御の性能向上、特により速い速度で対象物に接近した場合にも対象物の表面で手先がバウンドしないことと、ヒトがパラメータ調整などをせずに自動的に力制御を行うことを目的とし、深層強化学習による力制御コントローラの構築を行い、実機でその性能評価を行った。検証の結果、インピーダンス制御ではバウンドしてしまう接近速度において、Deep Q学習を用いたコントローラではバウンドすることなく押しつけ動作を行えることが分かった。また、Deep Q学習のQネットワークには多層パーセプトロンを用いるよりもLong Short-Term Memoryを用いる方が押しつけ力の振動が抑制された良好なコ

ントローラをより少ない学習回数で得られることが確認できた。

今後の課題として、Qネットワークの各種パラメータがコントローラに与える影響の調査や、オーバーシユートをより小さくすることなどが挙げられる。また、LSTMを2段重ねたモデルを使用した力制御コントローラ⁵⁾などについても検討したい。

参考文献

- 1) 香川県 商工労働部 産業政策課：香川県産業成長戦略～力強く着実に成長していく香川の経済社会を目指して～(平成30年3月改訂)(2018)。
- 2) 永田ら：多関節ロボットの柔軟な突き当てのための最適速度ベクトル，計測自動制御学会論文集，Vol. 26, No. 4, pp. 435-442 (1990)。
- 3) 安藤ら：組立作業のためのインピーダンス制御粘性パラメータの自動調整，日本ロボット学会誌，Vol. 29, No. 7, pp. 564-572 (2011)。
- 4) 辻ら：ニューラルネットによるロボットインピーダンスのオンライン学習，日本ロボット学会誌，Vol. 17, No. 2, pp. 234-241 (1999)。
- 5) T. Inoue, G. Magistris, A. Munawar, T. Yokoya and R. Tachibana: Deep Reinforcement Learning for High Precision Assembly Tasks, Proc. of 2017 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 819-825 (2017)。
- 6) Cristian C. Beltran-Hernandez, D. Petit, Ixchel G. Ramirez-Alpizar, and K. Harada: Variable Compliance Control for Robotic Peg-in-Hole Assembly: A Deep-Reinforcement-Learning Approach, Applied Sciences, Vol. 10, issue 19, 6923 (2020)。

ロボットによるコンベア上への物体搬送の精度検証

福本 靖彦, 神内 杜夫, 高原 茂幸, 坂東 慎之介, 小林 宏明, 長谷見 健太郎, 吉村 祥一

工場でロボットが使われるシチュエーションとして、動いているベルトコンベア上にものを置く、あるいは動いているベルトコンベアからものを取りといった作業が多く存在する。これを行うためには、ロボットがコンベアと同期して動作する必要があり、通常のピック・アンド・プレイス作業よりも位置決め精度が低下する。本研究ではこのような作業を行ったときに、どれくらいの位置決め精度でものを置けるかを検証した。特に、カメラを使わない場合と、カメラを使った場合の2つのパターンについて検討した。

1 緒言

本県の有効求人倍率は全国平均を上回って推移しており、生産年齢人口の減少による人手不足が顕在化している¹⁾。それに対する対処法の一つとしてロボットの活用を挙げている¹⁾。

ものづくり分野では産業用ロボットや協働ロボットによる自動化が有効と考えられる。これらのロボットを使った典型的な作業に、ベルトコンベア上を流れてきたものの上に別のものを置く作業や、逆にベルトコンベア上を流れてきたものを取って別の場所に置く作業がある。これらの作業では、ベルトコンベアの速度に合わせて動作するコンベアトラッキング(図1)を行う必要がある。コンベアトラッキングを用いたピック・アンド・プレイス作業はコンベアに追従するために生じる誤差の影響で通常のピック・アンド・プレイス作業よりも位置決め精度が低下する。しかしながら、その精度について参考となる値は公開されていない。

そこで本研究では、ベルトコンベア上を流れてきたシートの上にワークを置く動作を例に、その位置決め精度を測定した。コンベアトラッキングには、流れてくるものの状況によって大きく分けて2種類の方法がある。1つはワークの向きや位置が決まっている場合(図2(a))で、これは光電センサなどでワークが流れてきたタイミングを検知して動作するものである。もう1つはワークの向きや位置がばらつく場合(図2(b))で、カメラなどでタイミングとワークの向きや位置の両方を検知する場合である。本研究では光電センサを使う場合とカメラを使う場合の2つの方法について精度検証を行った。

2 コンベアトラッキングを用いたピック・アンド・プレイス作業

コンベアトラッキングを行い、ピック・アンド・プレイス作業を行うには、

- ・コンベアの速度の検出
- ・ワークの流れてきたタイミングの検出
- ・ワークの向きや位置の検出

を行う必要がある。

このうち、コンベアの速度の検出はロータリーエンコーダを用いることが多い。ロータリーエンコーダはコンベアの駆動軸に直接取り付けられる方法と、エンコーダの先にローラなどを取り付けてベルトに当てて転がす方法がある。いずれの場合も駆動軸とベルトの間、あるいはエ

ンコーダとベルトの間でスリップなどの問題が起こると誤差が生じるが、長期間動作させる場合は後者の方法の方が、トラブルが生じやすい傾向がある。

ワークの流れてきたタイミングの検出と、ワークの向きや位置の検出は、前章で述べた通り、光電センサやカメラが用いられることが多い。

コンベアトラッキング機能はカメラやロボットにその機能があらかじめ実装されている場合もあり、手軽に使うことができる。例えば、ユニバーサルロボットの場合は、ロボット自身のデジタル I/O ポートにロータリーエンコーダのパルス信号や光電センサの出力信号をつなぎ、ロボットのプログラム中でエンコーダの分解能やコンベアの流れる方向などを設定し、光電セ

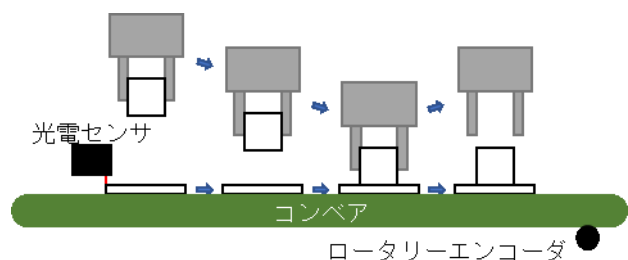
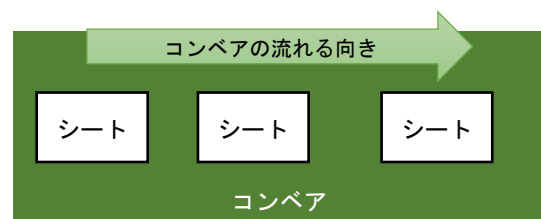
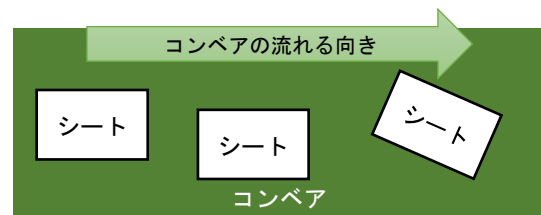


図1 コンベアトラッキングを行い、コンベアで流れてきたものの上にものを置く動作のイメージ。ロボットがコンベアの速度に同期して動く。



(a) 向きや幅方向の位置が一定の場合



(b) 向きや幅方向の位置が異なる場合

図2 コンベア上の物体の流れ方の種類

ンサの信号をトリガーとして標準で用意されている専用の命令を実行するだけで、コンベアトラッキングモードになり、手先にコンベアの速度をオフセットとして与えることができる²⁾。カメラを用いる場合には別途カメラからのトリガー信号や検出した位置を得る必要がある。対応したカメラシステムを導入すれば簡単に実現することができるが、本研究では市販のFAカメラを使い、自作の画像認識プログラムによりこれを実現した。

3 光電センサを使う場合

本章ではロータリーエンコーダと光電センサによるコンベアトラッキングを用いたピック・アンド・プレイス作業を行った場合の位置決め精度を評価する。

3.1 実験方法

本研究では、図3のような実験装置を用いた。それぞれの型番を表1に示す。位置決め精度はコンベアの進行方向と幅方向に分けて指金により0.5 [mm]単位で読み取った。進行方向に生じる誤差がコンベアトラッキングに根本的に起因する誤差と考えられ、幅方向の誤差はロボットがもともと持っている位置決め精度や、ピックアップしたワークの初期位置のばらつきや計測時の読み取り誤差などにより生じる誤差であると考えられる。

ベルトコンベアの速度は公称値で5.5 [m/min]である。また、繰り返し実験する場合のシートの向き等のばらつきをなくすために、コンベアにシートを貼り付けて実験を行った。ワークは紙箱で、これをシート上に置く。なお、誤差要因としてロボットがワークを放す際に生じるズレが想定される。これはワークやハンドが変われば値が大きく変わることが想定されるため、実験では、紙箱の底面に両面テープを貼ってこの影響を排除した場合についても精度評価を行った。

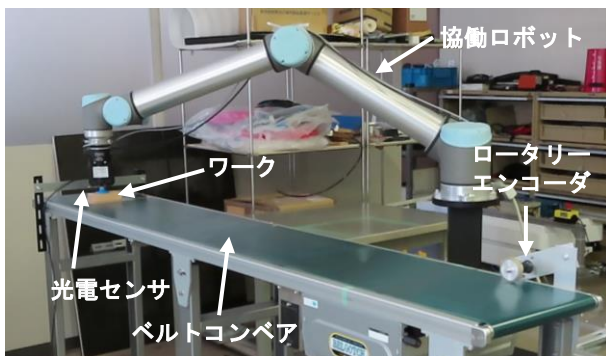


図3 実験系

表1 実験装置

ロボット	UR10 (Universal Robots)
ハンド	E-Pick (Robotiq)
コンベア	Type34-S1-300-2000-T6-A40 (マキテック)
ロータリーエンコーダ	E6B2-CWZ5B 1000P/R (オムロン)
光電センサ	E3Z-D81 2M (オムロン)

今回用いたロボットの位置決めの繰り返し精度の公称値は±0.1 [mm]である。ハンドは吸着タイプのハンドを用いた。ロボットのプログラムは図4のフローチャートのような処理とした。

ロボットが最初に光電センサ近くで待機しているのは、コンベアトラッキングにおける誤差の影響を小さくするためである。例えば、速度に誤差がある場合、移動時間が長くなれば長くなるほど位置誤差が大きくなる。

次に、光電センサが立ち上がりではなく立ち下がりエッジを見るのも、トラッキング中の誤差を減らすためである。立ち上がりエッジを利用すると図5のように光電センサが邪魔ですぐにワークを置くことができず、ワークが光電センサの下を通り抜けるのを待つ必要があり、その余分な時間の間も誤差が蓄積されると考えられる。

光電センサの検出閾値はワークがある場合の出力電圧とワークがない場合の出力電圧のちょうど中間になるように設定した。閾値の値はワークの有無を判定できるかどうかだけではなく、検出位置のばらつきに影響を与えると考えられる。例えば光電センサの特性が図6のグラフの太線のようにになっているとし、出力電圧に±1 [V]のノイズが重畳する場合を考える。閾値をワークがある場合の電圧とワークがない場合の電圧のちょうど中間となる12 [V]に設定した場合はシートの位置が-0.1 [mm]から0.2 [mm]の間のどこかで信号が

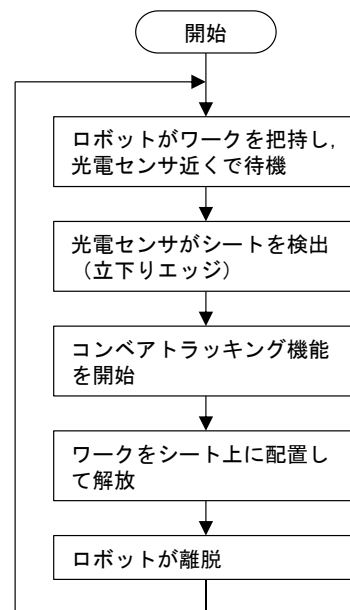


図4 ロボットの動作フロー

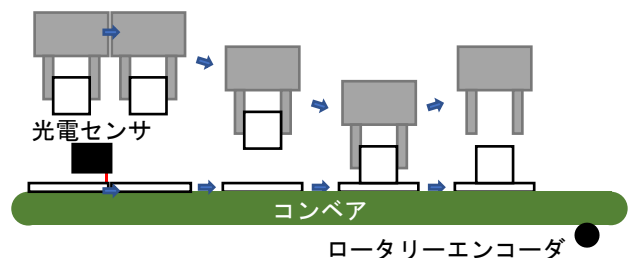


図5 立ち上がりエッジを利用する場合

オフになるので、検出時の位置のばらつきは0.3 [mm]である。一方、閾値を20 [V]と設定すると、ワークがあるかどうかは安定的に判断できるが、信号がオフになるタイミングは-1.9 [mm]から-1.3 [mm]の間のこととなり、検出位置のばらつきは0.6 [mm]となる。以上のことから、検出位置のばらつきを小さくするためには、検出閾値をワークがある場合とない場合のちょうど中間に設定することが望ましいと考えられる。なお、以上の値は仮想的なセンサ特性に基づいたものであるため、本研究では実際に閾値を変えてみたときの影響度合いについても実験で検証する。

最後に、本実験ではロータリーエンコーダにローラを取り付けてベルト上を転がす方法でコンベア速度を測定した。この方式はトラブルが生じやすく、本実験でもエンコーダとローラの間のカップリングが僅かに歪むトラブルが生じた。最後に、このカップリングを正常なものに交換した場合の位置決め精度を評価した。

以上のことを踏まえ、本実験は表2に示す4つの条件での結果を示す。

3.2 実験結果

各条件で30回の試行を行ったときの計測値のばらつきを箱ひげ図(分布の中の特異点、特異点を除いた最大値・最小値, 75パーセンタイル点, 50パーセンタイル点(中央値), 25パーセンタイル点を示すもの)で示したものが図7である。なおここでは、いずれの条件もばらつきを平均をオフセットとしてキャンセルしてプロットしている。これは、ピック・アンド・プレイス作業を行っていく中で目標位置を微調整して理想の位置が平均と一致した状態の性能を示す。

条件1と条件2の差異はロボットがワークを放す際に位置ずれが生じるかどうかであり、両面テープにより位置ずれが生じないようにすると進行方向で2 [mm]、

幅方向で3.5 [mm]ばらつき幅が小さくなっている。幅方向ではこれによりばらつき幅は0.5 [mm]となり計測分解能の最小単位分に収まった。なお進行方向の方がばらつき幅の差が小さいのは特異点に影響を受けているためと考えられる。

条件2と条件3の結果を比較すると光電センサの閾値設定の影響が分かる。コンベアの向きを精度よく設定できていると仮定すると、光電センサの反応位置で影響を受けるのは進行方向だけと考えられるが、本実験の結果でも進行方向だけに影響が生じ、適切に閾値を設定することでばらつき幅を1.5 [mm]小さくすることができた。

条件3と条件4の結果を比較すると、エンコーダとローラのカップリングのゆがみが与える影響を確認することができる。今回の歪みの程度では進行方向のばらつき幅に1 [mm]の影響を与えていたことが分かる。

条件を追い込んだ条件4の結果を見ると、進行方向で1.5 [mm]のばらつき、幅方向で0.5 [mm]のばらつきに収まることが分かった。

3.3 考察

実験の結果、条件を整えると、進行方向で1.5 [mm]、幅方向で0.5 [mm]のばらつきに抑えることができた。これ以上の精度向上の可能性について考察する。

まず、幅方向の精度は既に本実験の計測精度の最小単位に収まっており、これ以上の精度を考えるのであれば計測手段を変える必要がある。ただし、使用したロボットの位置決め繰り返し精度は±0.1 [mm]が公称値となっているので、このロボットを使用した時点で0.2 [mm]のばらつきが下限になる可能性が高い。

続いて、進行方向の誤差について、ロボットの制御周期の問題が影響していると考えられる。本実験で使

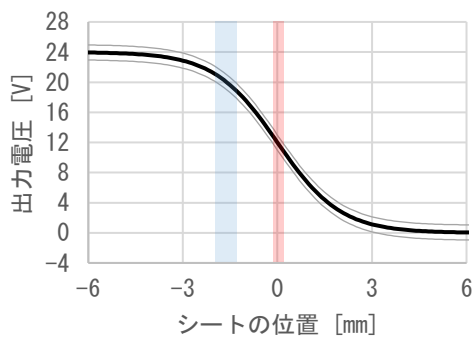
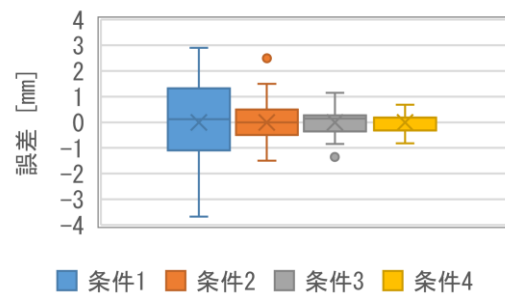


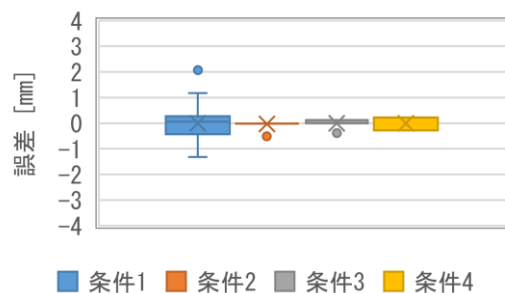
図6 光電センサの特性のイメージ。太線は理想的な特性で、細い曲線は理想から±1 [V]ずれた範囲を示す。

表2 実験条件

	条件1	条件2	条件3	条件4
両面テープ	なし	あり	あり	あり
光電センサ	マージン小	マージン小	中間	中間
エンコーダのカップリング	歪み	歪み	歪み	正常



(a) 進行方向



(b) 幅方向

図7 光電センサを用いた場合の位置決め精度

用したロボットの制御周期は8 [ms]であり、コンベア速度の公称値は 5.5 [m/min]である。このことから光電センサの信号がクロックのタイミングのどちらに振れるかによって0.73[mm]の誤差が生じる。したがって、コンベアトラッキングに由来しない幅方向の誤差0.5 [mm]と、以上の制御周期による誤差を足し合わせると1.23 [mm]であり、幅方向の誤差が計測分解能の問題で十分な精度を持たないとしても現在の精度1.5 [mm]は本ロボットでの理論限界に近いと考えられる。

4 カメラを使う場合

本章ではロータリーエンコーダとカメラによるコンベアトラッキングを用いたピック・アンド・プレイス作業を行った場合の位置決め精度を評価する。

4. 1 実験方法

本研究では、図8のような実験装置を用いた。それぞれの型番を表3に示す。ロボット、ハンド、ベルトコンベア、ロータリーエンコーダは前章の実験と同じものを使用している。カメラは500万画素で、レンズは焦点距離25 [mm]、F値1.4であり、光軸がコンベアに垂直になるよう配置した。このセッティングでは撮影画像の1ピクセルがおよそ0.1 [mm]となった。画像処理プログラムについてはOpenCV-Pythonを用いて自作した。

ロボットでカメラを使用したピック・アンド・プレイス作業を行う場合、カメラの座標系とロボットの座

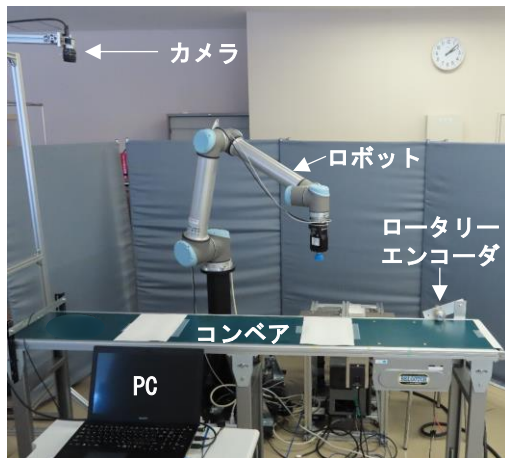


図8 実験系

表3 実験装置

ロボット	UR10 (Universal Robots)
ハンド	E-Pick (Robotiq)
コンベア	Type34-S1-300-2000-T6-A40 (マキテック)
ロータリーエンコーダ	E6B2-CWZ5B 1000P/R (オムロン)
カメラ	acA2500-14gc (Basler)
レンズ	TM2514B1 (Nikon)
画像処理 PC	Windows 8.1, Intel Core i7-3632QM CPU (2.2GHz)

標系の関係を知るためのキャリブレーション作業が必要である。4. 1. 1でこの作業について説明する。その後4. 1. 2で精度評価実験の実験方法の詳細について説明する。

4. 1. 1 ロボット・カメラキャリブレーション

まず、カメラの内部パラメータのキャリブレーションについて、チェスボードとOpenCVの関数calibrateCamera()により実行した。

続いて、ロボットとカメラのキャリブレーションについて、図9のようなフローで実施した。無作為にシートを配置するところでは、様々な位置や角度になるよう意図的に配置しても良い。シート位置のカメラ座標は画像中のシートの中心座標(画素番号)と、傾きである。ロボット座標はUniversal Robotsのベース座標系値を用いた。

カメラ座標とロボット座標を集めた後のキャリブレーションでは以下の式を満たす値を計算した。

$$x_r = a_{11}x_c + a_{12}y_c + b_1 \quad (1)$$

$$y_r = a_{21}x_c + a_{22}y_c + b_2 \quad (2)$$

$$z_r = z_0 \quad (3)$$

$$R_r = R_{r,1}R_z(\theta_c + b_3) \quad (4)$$

なお、 x_r, y_r はロボット座標系の値、 x_c, y_c はカメラ座標系の値、 z_0 はあらかじめ測定しておいたコンベア高さ、 R_r はロボットの姿勢を回転行列表記したもので、 $R_{r,1}$ は初回に記録したロボット座標の回転方向成分を回転行列表記したもので、 $R_z(\theta)$ はZ軸周りに θ [rad]回転させる回転行列である。 θ_c は画像中のシートの傾きである。 a_{11}, \dots, a_{22} と b_1, \dots, b_3 が求めるべき値である。この計算は最小二乗法により計算した。なお、式(4)に関する残差は角度の領域で計算した。すなわち、 $R_{r,1}^T R_r$ を回転ベクトル表記に戻したものを $\Delta\theta_r$ とし、このベクトルの向きがZ軸に一致しているとみなして、この大きさ $\|\Delta\theta_r\|$ と θ_c に対して最小二乗法を適用した。なお回転ベクトルと回転行列の相互変換はOpenCVの場合

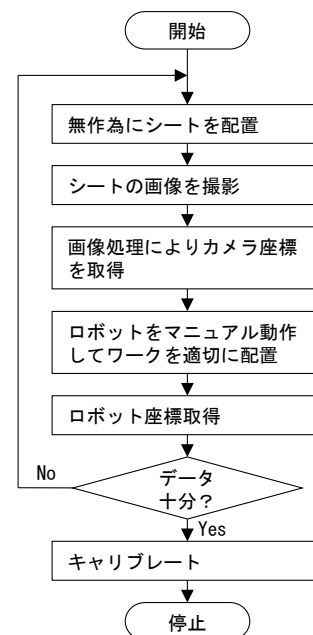


図9 ロボット・カメラキャリブレーション

Rodrigues() で容易に計算可能である。

実際に 10 回分のデータを取得してキャリブレーションを行ったときの残差を図 10 にて箱ひげ図で示す。X 方向、Y 方向ともに ± 0.6 [mm] 以内であり、回転方向も ± 0.9 [deg] 以内であった。

4. 1. 2 精度評価実験

前章ではシートをコンベアに貼り付けていたが、本章の実験ではシートの位置が変動する状況を想定しているのでヒトが適当にコンベア上に置いて流すこととした。ロボットが箱を解放した時に箱がずれないように両面テープを貼る対策は本実験でも行った。

本章の実験では試行のたびにシートの向きも変わるため、進行方向と幅方向を適切に計測するのが前章よりも難しい。そこで、紙箱の対角となる角がシートの所定の位置からどれだけずれているかを計測した。ただし、シートは紙箱よりも 1 [mm] 程度大きく作られており、適切にシート位置を認識できた場合でも計測値は両方の角で 1 [mm] となる。そこで本章では簡単のために、この計測値から 1 [mm] を引いた値を誤差と呼ぶこととする。長さの計測には分解能 0.01 [mm] の電子ノギスを使用した。

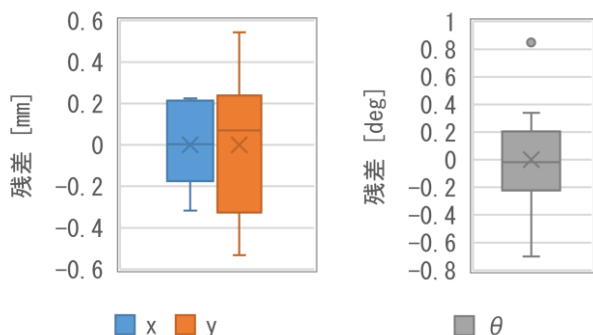
ロボットの動作フローは図 11 に示す。シートの有無は検出されたシートの面積で判定した。また、画像処理の時間のばらつきが影響を与えないよう、画像処理に要した時間は計測しておき、そこにコンベアの仕様の速度を勘案した補正値を与えた。

4. 2 実験結果

30 回の試行のばらつきの値を図 12 に箱ひげ図で示す。1 つの試行で 2 つの値が計測されているが、その両方をまとめた 60 個のデータについてプロットしている。

コンベアを静止させている場合の誤差は最大 1.35 [mm] となっている。これが画像認識とロボットだけの精度と言える。

次にコンベアを動作させてコンベアトラッキングをさせた場合の誤差を見ると、最大で 4.72 [mm] もずれており、非常に精度が悪かった。コンベアを静止させていた時に比べて誤差が大きくなった要因は不明であるが、実験の様子では回転方向の誤差が多く見られたように感じた。コンベア静止時にはほとんど見られない回転誤差がコンベアを動かした際になぜ現れるようになるかについての検証は今後の課題である。



(a) X, Y 方向 (b) 回転方向

図 10 キャリブレーションにおける残差

5 結言

本研究ではコンベアを流れてくるシート上にワークを載せる動作について、精度検証を行った。流れるシートの向き等が一定の場合は光電センサとロータリーエンコーダにより実現可能であり、最大 1.5 [mm] 程度の精度でワークを載せることができた。特に、光電センサの閾値までもが精度に影響を与えることが分かった。一方、流れるシートの向き等が変わる場合にはカメラとロータリーエンコーダにより実現可能である。自作の画像処理プログラムにより検証した結果では最大 4.72 [mm] もの誤差が発生した。

カメラを利用した場合の精度は想定よりも低く、その原因究明と精度向上が今後の課題である。

参考文献

- 1) 香川県 商工労働部 産業政策課：香川県産業成長戦略～力強く着実に成長していく香川の経済社会を目指して～（平成 30 年 3 月改訂）(2018).
- 2) Universal Robots : Conveyor tracking: using encoder with digital pulses, <https://www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/conveyor-tracking-using-encoder-with-digital-pulses/> (2022).

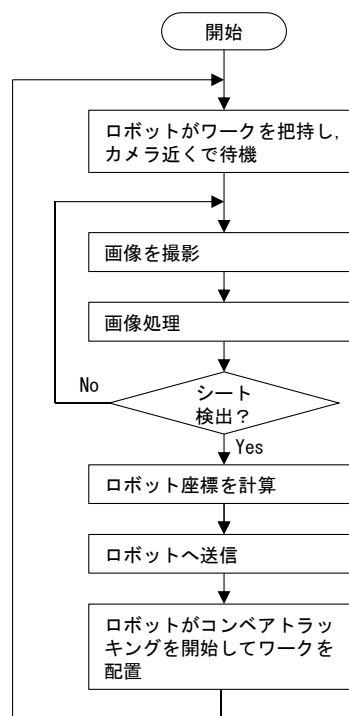
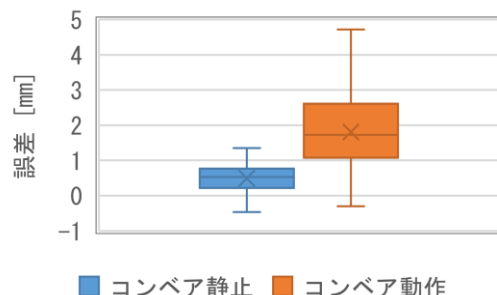


図 11 ロボットの動作フロー



■ コンベア静止 ■ コンベア動作

図 12 カメラを用いた場合の位置決め精度

スマート工場環境の活用と導入・現場実証（第3報）

— 所内IoT化システムの整備・拡充 —

小林 宏明, 長谷見 健太郎, 多田 幸弘, 高原 茂幸, 坂東 慎之介, 福本 靖彦, 吉村 祥一, 神内 杜夫

県内の製造業における生産工程の省力化・省人化や高効率化の支援を目的として産業技術センター内に構築した, 所内IoT化システム (疑似的スマート工場環境) において, アナログメータのIoT化を図るため, 安価なマイコンを利用したアナログメータ読取システムを構築した. 本稿では, 試作した読取システムを紹介するとともに, 実際の加工設備に取り付けられたアナログメータのモニタリング結果に基づく動作検証結果について報告する.

1 はじめに

産業技術センターでは, 平成29年度よりロボット, AI, IoT等の技術を利用した生産工程効率化に関する技術導入支援¹⁾に取り組んでいる. 過去に当センターが独自に行った調査では, 製造現場のIoT化における課題として挙げられているのは, 大きく分けて以下の3つである.

- ① 設備投資コストが高い
- ② 既存設備が古くIoT化への対応が困難
- ③ 専門的な知識 (人材) が不足している

このうち, ①の課題については, 設備導入費用の高さだけが問題ではなく, 事前にどの程度の費用が発生するのか見積り辛いことや, 外部コンサルへの委託費用が高額であることなども要因の一つである. また, ①や③の課題を解決しようとするとも一定以上のコストが発生するのは避けられないため, 潜在的には②の既存設備のIoT化の需要が高いと考えられる. しかし, 独力で設備をIoT化するためには知識や人材が不可欠であり, 結果的にIoTの導入が進まない要因となっている.

これらの課題解消のため, 当センターでは, 導入効果実証環境として, 所内の各種設備のデータ収集やモニタリングを行う所内IoT化システムを構築してきた²⁾. これまでに, 安価なマイコンを利用したIoT化システムを構築するなどして, 古い設備のIoT化の実証を行っており, 光センサとマイコンを利用した三色表示灯のモニタリングシステムや, Webカメラとマイコンを利用したデジタル表示器の読取システム³⁾などを構築し, 安価なシステムでも十分活用できることを実証したうえで, 技術供与できる体制を整えてきた.

今年度は, IoT化システムの対応範囲の拡充を図るため, アナログ式の表示器を読み取り, サーバーへ送信する「アナログメータ読取システム」を構築し, 所内IoTシステムと連携させたので, これらの取組みについて報告する.

2 試作システムの概要

2.1 開発のコンセプト

前章で述べたとおり, 既存設備をIoT化するうえで

高額な費用負担の発生と知識・人材の不足は, 大きな障壁となっている. そのため, IoT化を進めるには, できる限りコストを抑えつつ, 一定の知識があれば運用可能なものであることが望ましい.

アナログメータ読取システムについては, 市販のシステムが多数存在している. 特に, 比較的性能が高いとされているものは, 深層学習 (DL) によるAIを搭載したものが主流となっており, 汎用的に様々なタイプのアナログメータに対応できることから, 専門的な知識がなくとも運用可能である. 一方で, 多くの場合, これらのシステムはクラウド (またはオンプレミス) での運用が前提であり, ランニングコスト (ライセンス料やサーバー利用料など) が必要となる場合が多い. このため, 長期的な運用の観点からは, 信頼性が高く容易に利用可能な市販システムを導入することが望ましいが, 事前検証なしに導入することは現実的ではない.

そこで, 「手軽で安価に事前検証を行えるようにする」というコンセプトのもと, これまでにも活用してきた低価格なマイコンとWebカメラを使った新たなシステムを構築することとした. また, 対象とするアナログメータの形式は, 最も一般的と思われる1針式かつ回転式のものとした.

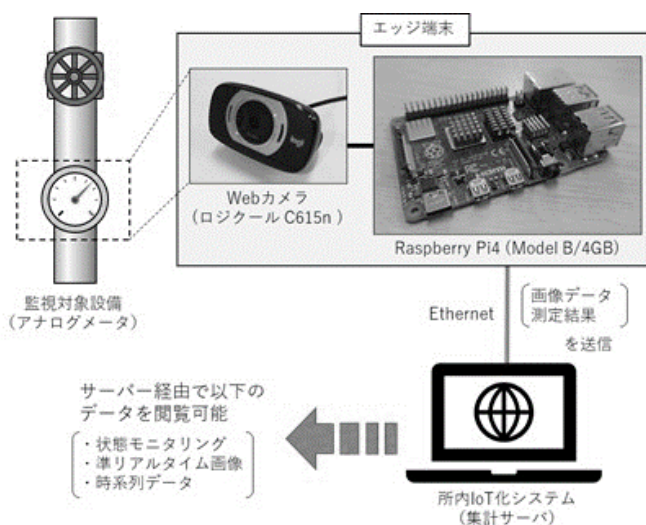


図1 アナログメータ読取システムの構成例

なお、近年のマイコン（シングルボードコンピュータ）は性能が飛躍的に向上しており、単独で一定規模のDLモデル（CNNなど）を運用することも可能となりつつある⁴⁾。しかし、前述のような汎用的な認識モデルを構築するには大量のデータ（この場合はアナログメータ画像）が必要であることから、本研究ではAIではなく、旧来の画像処理手法をベースとしたシステムを構築することとした。

2. 2 ハードウェア構成

試作したアナログメータ読取システムの構成例を図1に示す。ここでは、マイコンとしてRaspberry Pi4(model B/4GB)、モニタリング用のWebカメラにはロジクール社製C615nを例示しているが、マイコン本体については、Arduinoなど、Webカメラと接続可能なマイコンであれば構築可能である。また、Webカメラについても他製品を利用可能であるが、その際は、画像処理工程の安定性を鑑みてオートフォーカス機能や露出補正機能を有するものを選定することが望ましい。

なお、図1中に記載はないが、安定したモニタリングには、カメラの固定方法や照明条件についても吟味する必要がある。特に周囲環境によっては、時間帯により照明条件が異なる（例として、朝夕の時間帯に太陽光が水平方向から差し込むなど）が考えられるため、長時間のモニタリングを行う際は、必要に応じて遮光板の設置や照明を追加するなどして対策することが重要である。

3 読取処理の流れ

図2に試作した読取システムの画像処理の流れを示す。本システムの開発においては、オープンソースのコンピュータビジョンライブラリであるOpenCVを活用した。

まず、図3(a)に示すように、取得したWebカメラの画像から、読取りに必要な領域のみをROI抽出する。このとき、アナログメータの針や背景に色がついている場合は、RGBの各チャンネルに分割し、必要に応じて任意のチャンネル間の差分画像を取得する。対象が有意な色情報を有していない場合は、そのままグレースケール化する。

続いて、エッジ抽出(Canny)と穴埋め処理(Closing)を行うことで図3(b)のように2値化された抽出画

像が得られる。この抽出画像と、予め取得しておいた背景画像(図3(c))との要素積をとることで、針領域を抽出する(図3(d))。その後、主成分分析(PCA)により、第1主成分ベクトルを求めることで、針領域の角度 θ を求めることができる(図3(e))。最後に、角度 θ を次式により読み値 R へと変換する。

$$R = \alpha(\theta + \beta) \quad (1)$$

ここで、 α 及び β は変換係数であり、角度と指示値の関係から予め算出しておくものである。なお、対数表記など、指示値が不等間隔に配置されるものについては、適宜、変換式を定義する必要がある。

取得された指示値を、画像と併せて一定間隔でサーバーへ送信することで、準リアルタイムにメータを監視することが可能である。

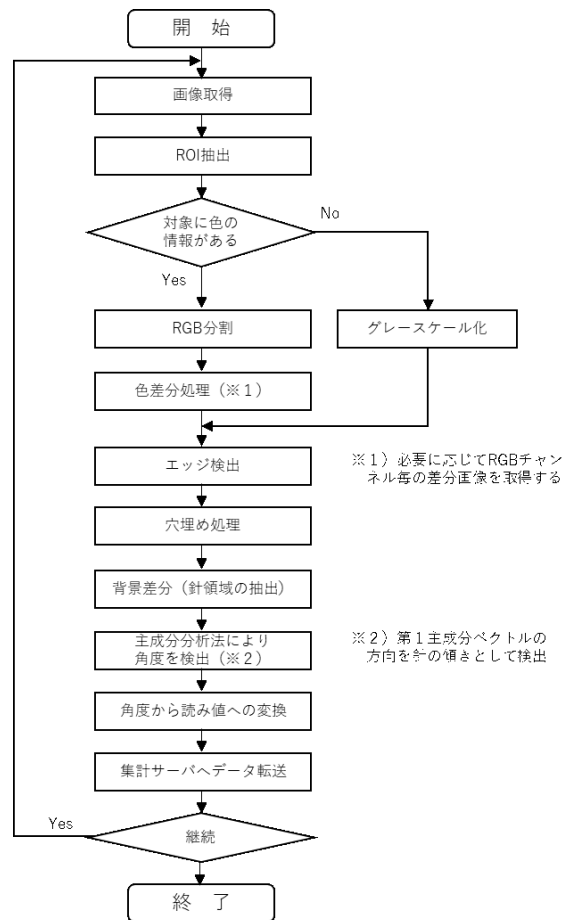


図2 読取処理のフローチャート

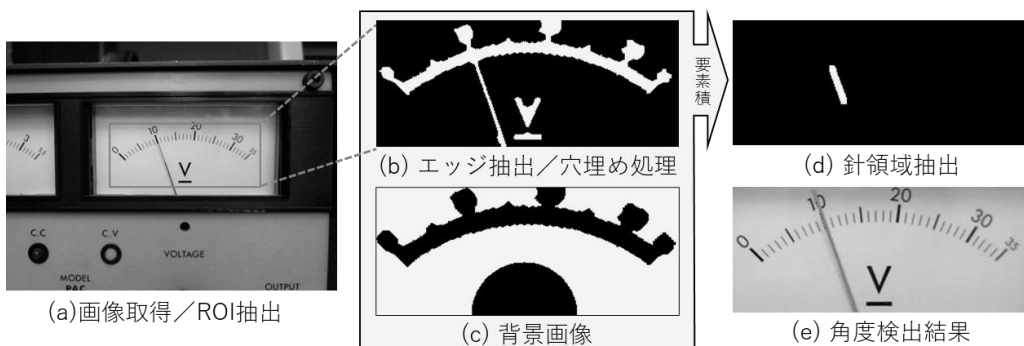


図3 各工程の画像処理結果

なお、事前作業である背景画像の取得については、穴埋めまでの処理を行った後に、ビット反転処理を行っている。その後、針領域を除外する必要があるが、手動で針領域となる部分を消す（1でフィルする）か、針の角度が異なる2枚の画像の論理積をとることで抽出可能である。加えて、読み値変換において、メータの種類によっては、目盛が対数表記や不等間隔になっているものがある。この場合は、適宜、変換式を変更するか、変換テーブルを準備する必要がある。

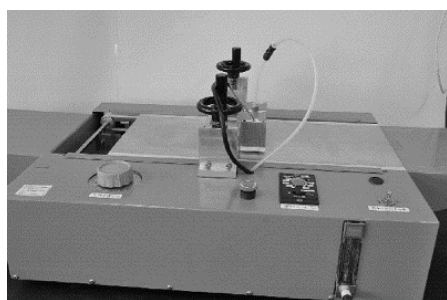
また、Webカメラを利用する際の注意点として、トリガー撮影や各種パラメータの任意調整が行えない点に注意が必要である。特に画像処理側と同期がとれないため、画像の更新タイミングや処理状況によって、サンプリングレートは大きく増減する。試作システムの場合は、サンプリングレートは10~25Hz程度の間でばらつくことを確認している。このため、画像取得間隔をフレームレートに対して、ある程度余裕をみて設定する（ウエイトタイムを設ける）か、複数回の測定結果を平均化するなどして、測定誤差を抑制するなどの対策が必要である。

4 動作検証実験

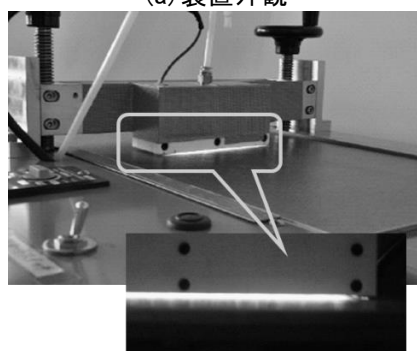
4.1 モニタリング対象

試作システムの動作検証を行うにあたり、アナログメータを有し、時間的な変化を観測できる装置として、**図4**に示す大気圧プラズマ装置⁵⁾を選定した。

本装置は、平行平板電極（**図4 (b)**）にパルス電圧をかけることでプラズマを発生させ、電極間に挿入されたサンプルの表面改質を行う装置である。加工中のプラズマの発生状態は、電極間にかかる電圧・電流だけでなく、電極間の温度や空気流入量、表面改質進度などの影響で逐次変化することが知られて



(a) 装置外観



(b) 処理の様子

図4 大気圧プラズマ装置

いる。特に、プラズマ発生開始直後は電極や気体の温度が低いため、プラズマの発生が不安定になりやすく、一定時間の暖機運転が必要である。一方で、プラズマの発生状態は目視で確認することが難しいうえ、直接プラズマに流れる電流を観測することが難しいことから、代替手段として電源電流の安定性をひとつの指標としている。

本装置はセンターの過去の研究で試作したものであり、電流計はアナログ式である。また、前述のとおり、電流値が不規則に変化をするため、今回の動作検証の対象とすることとした。

4.2 モニタリング結果

動作検証実験として、暖機運転時における大気圧プラズマ装置の電流モニタリングを行った。観測対象は、電極間にかかるパルス電圧を発生させるDCパルス電源（周波数:9.8kHz、約10kV）に流入する電流である。ここで、3章で述べたとおり、試作システムはサンプリングレートが不安定であるため、複数回の測定結果を平均化して出力する方法でモニタリングすることとした。また、電源電流も不規則に振れるが、必要なのは一定時間のトレンド値としての電流である。そこで、本実験ではデータ出力を3秒毎に行うこととし、その間に観測された読取値の平均値を記録することとした。

図5に示すのは、実験時に取得された読取結果の一例である。実際に、プラズマ発生中は、針が不規則かつ小刻みに振れるが、各時間における読取値と取得画像上の針の指示値との間に大きな差は認められず、概ね正しく追従できていることが確認できた。さらに、読取結果の時系列の推移を**図6**に示す。通電開始直後の電流値の急峻な立ち上がりから、電流値が2.8Aに近づくにつれ、徐々に安定していく様子が確認できた。安定するまでに要した時間は約10分であり、担当者が経験的に把握していた所要暖機時間と差異がないことが確認できた。



図5 電流計の読取結果

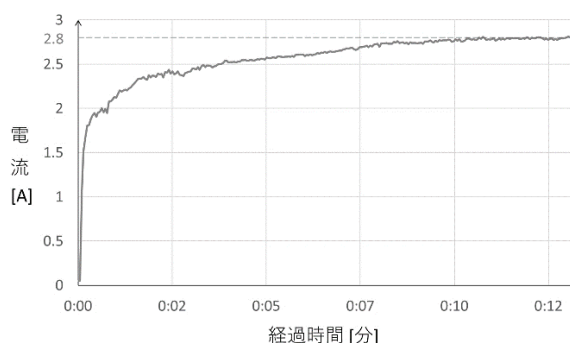


図6 電流モニタリング結果

5 所内IoTシステムとの連携

試作システムと所内IoT化システムとの連携イメージを図7に示す。

現状はモニタリング対象を限定していないため、カメラ画像（準リアルタイム画像）と時系列データを表示するのみとしている。時系列データは読み値を示すものだが、測定対象が取りうる値の範囲が定まっていないと表示が見辛くなる恐れがあるため、読み値を0～100の間で正規化した値を描画している。一方で、実際の読み値が分からないと不便なため、カメラ画像内に撮影日時（左上）、読み値（右下）を表示している。また、数値集計サーバーの仕様上、高速なデータ更新は適さないため、画像及びデータ確認の更新は3秒おきとしている。

これらの仕様は任意に変更可能であり、測定対象によっては、作業者に対し警報や作業指示を与える等の操作も可能である。

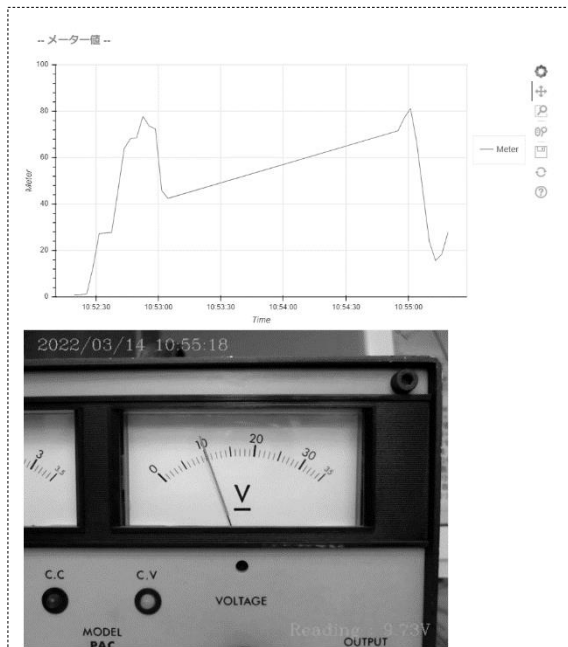


図7 所内IoT化システムとの連携イメージ

6 まとめ

産業技術センター内に構築している所内IoT化システム（疑似的スマート工場環境）の拡充のため、アナログメータ読取システムの試作検討を行った結果について報告した。本システムは、古い生産設備のIoT化を検討するうえで、「手軽で安価に事前検証を行えるようにする」というコンセプトのもとに開発したものであり、中長期的な運用には向かないが、短期間であれば十分な性能を持っていると考えている。一方で、実用性の観点からは、他形式への対応や同時多点計測などの機能拡張を図るとともに、長期的なモニタリングに向けた機能追加が必要と考えている。また、汎用性や外乱への頑健性を考慮すれば、AIの利用についても検討する必要があることから、引き続き、これらの課題についても検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 多田ほか：IoT・AI技術を活用したものづくり支援，香川県産業技術センター研究報告，No. 18，pp. 57-59 (2018)．
- 2) 長谷見ほか：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)．
- 3) 多田ほか：スマート工場環境の活用と導入・現場実証－所内IoT化システムの整備・拡充－，香川県産業技術センター研究報告，No. 20，pp. 9-12 (2020)．
- 4) Machine Learning made easy with Raspberry Pi, Adafruit and Microsoft, <https://www.raspberrypi.com/news/machine-learning-made-easy-with-raspberry-pi-adafruit-and-microsoft/> (2021)．
- 5) 白川：ドライブプロセスによる表面処理方法の検証－UV処理と大気圧プラズマ処理の違いについて－，香川県産業技術センター研究報告，No. 24，p. 16-19 (2011)．

金属粉末レーザー積層造形法のプロセスを利用した組織制御 —SKD61 鋼における層状の局部硬化組織形成の試み—

宮内 創, 松本 洋明*, 横田 耕三

熱間金型鋼である SKD61 材の粉末床溶融レーザー積層造形において、造形条件を一時的に変化させることで、インプロセスで造形体内部に周囲よりも高硬度の層を形成する組織制御手法を試みた。小エネルギーの条件での造形の途中で大エネルギーの条件でのビーム走査を挿入することで、局部的に厚く形成された焼入硬化層が次層以降の積層の熱影響による焼戻し軟化を完全には受けずに残留し、周囲よりも高硬度の領域が意図した位置に中間層として存在する造形体を作製できた。領域間の硬度差には、造形中に生成された残留オーステナイト量の差異も影響を及ぼしていると考えられた。

1 緒言

積層造形技術 (AM: Additive Manufacturing) は、多品種少量品や試作品の製作に適するだけでなく、複雑形状品や難成形材料などの、既存製法では得ることのできない高付加価値品を生み出す新たなものづくり技術として注目されている。AM 技術の活用が有望な分野の一つとして金型部品用途があり、複雑な形状や三次元的な内水冷配管を備えた高機能金型などへの応用展開が盛んに検討されている¹⁾。本研究では、材料粉末の溶融と急冷凝固の繰り返しにより特異的な金属組織および機械的性質が発現され得るという AM 技術の特徴を利用し、金型部品を、形状付与にとどまらず材料物性の制御によっても高機能化することを目的とした。一般に金型用鋼の硬さと靱性は両立が困難なため、強度や耐摩耗性、耐衝撃性などの諸性質のうち最も重視する項目に合わせて、部品全体の熱処理条件や材質が調整される。これらの性質を局部的に制御することができれば、相反する性質を犠牲とすることなく、部品全体として最適な材料物性を造り込むことが可能と考えられる。具体的な試みとして、熱間加工用工具やダイカスト、射出成形用金型に用いられる SKD61 材に注目し、造形体の金属組織と硬さをインプロセスで局部的に変化させようとする方法を検討したので報告する。

2 実験方法

2.1 積層造形プロセスにおける局部的組織制御

本研究で採用する粉末床溶融レーザー積層造形法 (L-PBF: Laser powder bed fusion) では、造形用基板上に材料粉末を敷き、目的形状の二次元スライスデータに基づいてレーザーを走査し、1層ずつ選択的に溶融凝固させる工程を繰り返すことで造形体が作製される。高炭素量の炭素鋼や合金鋼を L-PBF 法により造形した場合、ビーム走査直後の表層部は急冷により著しく焼入れ硬化された状態となり、その後の積層の熱影響により、造形体内部は焼戻しされた状態となる²⁾。もし造形の途中で特定の層を深く焼入硬化させておき、熱影響による焼戻し軟化を避けて残留させれば、造形体内部の任意の層を局部的に硬化させることが可能と考えられる。

2.2 積層造形体の作製

材料粉末として、平均粒径 (D50) 26 μm 、AISI H13 (SKD61 相当組成) の球状ガスアトマイズ粉末 (LPW 社製, LPW H13) を使用した。造形実験には、ファイバレーザー (最大出力 500W、波長 1070 μm 、連続波) を搭載した金属積層造形装置 (赤澤機械株式会社製) を用いた。造形体の設計形状は X10mm \times Y10mm の直方体とし、SUS430 製基板上に高さ 7.5mm 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。雰囲気ガスには窒素を用い、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、走査ピッチを 0.15mm、積層ピッチを 0.030mm に固定し、レーザー出力および走査速度を変化させた。既報^{3, 4)} における予備的な検討の結果、ビーム走査直後の表層部に形成される焼入硬化層の深さは、造形条件により変動可能であり、{レーザー出力 / (走査速度 \cdot 走査ピッチ \cdot 積層ピッチ)} で表される投入エネルギー密度が大きいほど増大することがわかっている。2.1 で述べた原理に基づくインプロセスでの組織制御を実現するため、図 1 に示すように、50 層 (1.5mm) 毎に 1 層のみ異なる条件でビーム走査して造形体を作製した。造形条件の組み合わせとしては、積層途中で深い焼入硬化層を形成させるための大エネルギーの造形条件 (H) と、既造形層に及ぼす熱影響を抑えるための小エネルギーの造形条件 (L) として、表 1 に示す条件を選定した。ここで条件 L は、予備的な検討 (単一条件のもとでの造形) において造形体が最も緻密化された条件であり、条件 H は、L に対してレーザー出力を増加させるとともに走査速度を遅くし

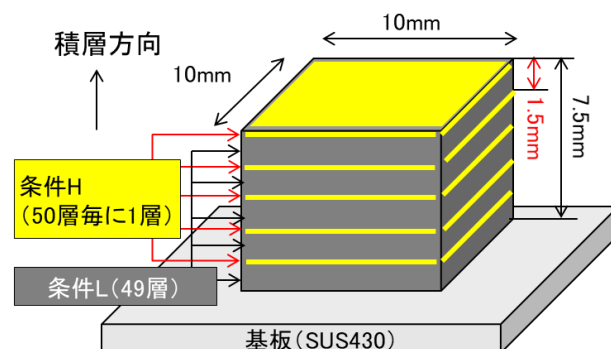


図 1 造形体の作製方法の模式図

* 香川大学創造工学部

表 1 造形条件

条件記号	レーザ出力 P (W)	レーザ走査速度 v (mm/sec)	投入エネルギー密度 E (J/mm ³)
L	150	125	400
H	400	63	2120

て、投入エネルギー密度を 5.3 倍に設定している。造形体の最表層（最終層）は、条件 H で走査した。

2. 3 造形体の評価

作製した造形体に対し、かさ密度（真密度を 7.73g/cm³ とした相対密度）をアルキメデス法により測定した。金属組織の観察は、積層方向に平行な断面を鏡面まで機械研磨した後、10%ナイトール溶液にてエッチングし、光学顕微鏡を用いて行った。組織観察と同じ断面上において、硬さをビッカース硬さ計 (HV0.3) で測定し、構成相を微小 X 線回折 (XRD) にて解析した。

3 実験結果および考察

表 1 の条件で作製された造形体の、積層方向断面の組織写真を図 2 に、最表層から内部方向への硬さ分布の測定結果を図 3 に示す。造形条件を変化させた位置に対応して周期的な金属組織的様相が現れており、硬さもそれに対応して変動していることから、意図したとおりの組織制御された造形体を作製できたと考えられた。なお造形体の相対密度は 99% 以上を示し、ほぼ緻密体であった。金属組織的なエッチングコントラストで区別される生地領域（図 2 の拡大写真における暗い領域）の平均硬さは

638HV であったのに対し、局部的に組織制御した中間硬化層（明るい領域）の平均硬さは 658HV、最大硬さは 682HV（いずれも、造形体に形成された 4 つの中間硬化層における平均値）を示した。中間硬化層は、硬さが生地領域よりも高いが最表層の焼入硬化されたままの領域よりは低いことから、大きな投入エネルギーによって形成された深い焼入硬化層が完全な焼戻しを受けずに残留した状態の、低温焼戻し組織であるとみられた。

造形体の XRD 解析結果を図 4 に示す。測定は、図 2 と同じ断面上において、最表層、中間硬化層および生地領域それぞれの領域毎に、測定領域を限定して行った。主な構成相はマルテンサイト (α') であるとみられ、最表層、中間硬化層、生地領域の各領域における α' (110) のピーク半価幅は、それぞれ 0.72°, 0.60°, 0.52° であった。ピークの広がり大きさは、結晶の格子ひずみを反映しており、マルテンサイト変態により導入された転位の蓄積や、合金元素の過飽和固溶、残留応力などに起因するため、焼入硬化されたままの最表層において最も大きく、熱影響を受けるに従って小さくなる傾向を示したと考えられる。構成相に注目すると、生地領域においては、マルテンサイト (α') とともに残留オーステナイト (γ) のピークが明瞭に存在しているが、最表層では残留オーステナイトのピークはほとんど認められず、中間硬化層においてはわずかに認められる程度であった。一般に SKD61 材の焼入れ状態では残留オーステナイトはわずかにしか存在しないが、L-PBF 法による造形体には多量に存在（約 20%）することが報告されている⁵⁾。この差異の原因として、L-PBF プロセスでは、材料粉末が熔融温度域から急冷とともに焼入れされた後、次層以降の積層の熱影響により繰り返し逆変態される過程で残留オーステナイトが生成、安定化されるとの機構が提案されている⁶⁾。従って、残留オーステナイトは、生地領域には多量に存在してい

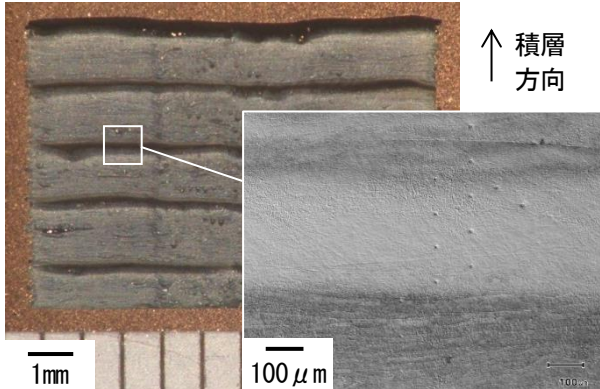


図 2 組織制御された造形体の断面光学顕微鏡写真

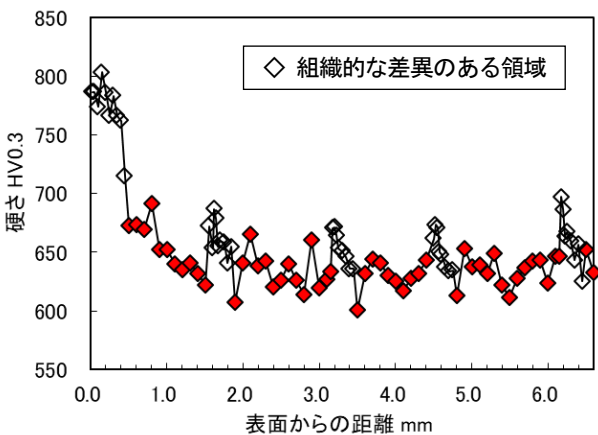


図 3 組織制御された造形体の積層方向断面における硬さ分布試験結果

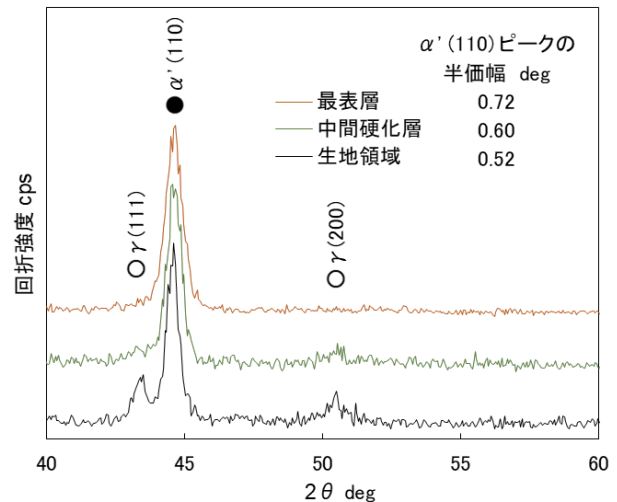


図 4 組織制御された造形体の最表層、中間硬化層および生地領域における X 線回折パターン

るのに対し、焼入硬化されたままの最表層にはほとんど存在せず、生地領域に比べ熱影響の少ない中間硬化層にはわずかに生成されたと推測される。

以上の結果をまとめると、組織制御された造形体の各領域を比較した硬さの差異の要因としては、高転位密度の焼入れマルテンサイト組織の、熱影響による回復の度合いに加え、残留オーステナイトの生成による軟化も影響を及ぼしているものと考えられる。本研究で提案した組織制御手法は、金型部品などの用途において、造形体の強度や耐摩耗性を、想定される負荷に応じて局部的に強化させるなどの応用展開が期待される。

4 結言

本研究では、熱間金型鋼である SKD61 材の L-PBF 造形において、造形条件を一時的に変化させることで、インプロセスで造形体内部に周辺よりも高硬度の層を形成する手法を試みた。得られた主な知見を以下に記す。

1) 小エネルギーの条件での造形の途中に大エネルギーの条件でのビーム走査を挿入することで、局所的に厚く形成された焼入硬化層が次層以降の積層の熱影響による焼戻し軟化を完全には受けずに残留し、周囲よりも高硬度の領域が意図した位置に中間層として存在する造形体を作製できることが示された。

2) 組織制御された造形体の各領域を比較した硬さの差異の要因としては、焼入れにより高転位密度となったマルテンサイト組織の回復の度合いに加え、造形プロセスに起因した残留オーステナイトの生成による軟化も影響を及ぼしているものと考えられた。

(本報告は、他誌に掲載された論文⁷⁾の内容を抜粋、編集したものである。)

参考文献

- 1) E. Sachs, E. Wylonis, S. Allen, M. Cima, H. Guo: Production of Injection Molding Tooling with Conformal Cooling Channels Using the Three Dimensional Printing Process, *Polymer Engineering and Science*, 40, 1232-1247 (2000).
- 2) E.B. Fonseca, A.H. Gabriel, L.C. Araújo, P.L. Santos, K.N. Campo, E.S. Lopes: Assessment of laser power and scan speed influence on microstructural features and consolidation of AISI H13 tool steel processed by additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 34, 101250 (2020).
- 3) 宮内創, 高原茂幸, 横田耕三, 中野禪: レーザ積層造形法により作製した Fe 基合金の金属組織, 香川県産業技術センター研究報告, No. 19, 21-24 (2018).
- 4) 宮内創, 高原茂幸, 横田耕三: 粉体粉末冶金協会 2019 年度秋季大会講演概要集 (2019).
- 5) F. Deirmina, N. Peghini, B. Almangour, D. Grzesiak, M. Pellizzari: Heat treatment and properties of a hot work tool steel fabricated by additive manufacturing, *Materials Science and Engineering A*, 753, 109-121 (2019).
- 6) M.J. Holzweissig, A. Taube, F. Brenne, M. Schaper, T. Niendorf: Microstructural characterization and mechanical performance of hot work tool steel processed by selective laser melting, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 46, 545-549 (2015).
- 7) H. Miyauchi, H. Matsumoto, K. Yokota: Selective laser melting with changing input energy periodically for production of partially hardened laminate structure in H13 steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 73, 839-848 (2022).

材料押出法における三次元セラミックス造形サポート材の検討

片岡 良孝, 横田 耕三

三次元積層造形 (Additive manufacturing, AM) において、オーバーハング等の造形体下部に材料の無い形状では、それを支持する部材 (サポート材) の挿入が必要となる。本研究では、AM の一種である材料押出法におけるセラミックス造形サポートの設計について検討した。セラミックス母材に ZrO_2 を用い、粗大な無機粉体を混合した融着防止層を含む複合サポートを作製し、熱可塑による変形、焼成収縮挙動および母材焼結体界面への無機粉体粒子固着を評価した。無機粉体の種類によらず焼結体界面に固着は見受けられたが、球状粒子は比較的除去しやすい傾向にあった。母材界面には無機粉体粒子の埋没が認められたが、無機粉体を含まない樹脂層の挿入により埋没は防止され、その結果、無機粉体の固着は減少した。

1 緒言

三次元積層造形 (Additive manufacturing, AM) は、三次元 CAD データをもとに材料を付加加工し、立体物を作製する技術である。製造工程の省力化および従来工法では困難な複雑形状の作製等が期待できることから、革新的ものづくり技術として注目を集めており、難研削材であるセラミックスにおいても AM の活用が期待されている。種々の工法において研究が行われており¹⁻⁴⁾、我々は、熱溶解式材料押出法によるセラミックス造形について報告してきたが^{5,6)}、オーバーハングやブリッジのように造形体下部に材料の無い形状を造形するには、他の AM 工法と同様に支持する部材 (サポート材) の挿入が必要となる。サポート材は、焼成工程において、変形、母材との固着、サポート材による母材の焼成収縮阻害が問題となるため、母材と同材料で収縮を追随させつつ、種々の粗大な無機粉体を混合した融着防止層を挿入することで焼結後にサポートを除去しやすくする手法が有効である^{7,8)}。しかし、セラミックスの場合、焼結温度が高いため、母材とサポート材の熱変形および焼成収縮率の差、母材と融着防止層の焼結による固着などの課題があり、セラミックス造形に適合する融着防止層の設計が必要である。

本研究は、材料押出法による三次元セラミックス作製において、熱変形および固着の生じにくい複合サポートの設計を目的とした。 ZrO_2 セラミックスをモデルとし、母材と同材料の収縮追随層と、母材粒子と比較して大きな粒子径を有する SiO_2 粉末または ZrO_2 ビーズを用いた融着防止層で構成される複合サポート材を作製し、熱可塑による変形、焼結による収縮挙動および焼結体界面への粒子の固着性状について評価した⁹⁾。

2 実験方法

原料粉末は、造形体母材に① $3molY-ZrO_2$ 粉末 (平均粒子径 $0.71\mu m$)、融着防止層に SiO_2 粉末 2 種 (平均粒子径② $4.0\mu m$, ③ $40\mu m$)、④ $3molY-ZrO_2$ ビーズ (平均粒子径 $29\mu m$) を用いた。樹脂バインダーは、アクリル系樹脂、エチレン酢酸ビニル共重合体系樹脂およびポリエチレン系樹脂に滑剤および可塑剤を適量加えることで調製した。これに各原料粉末を 40vol% となるよう加え、加熱混練後、直径

3 mm 程度のストランド状に押出成形し、造形原料 (フィラメント) を作製した。樹脂バインダーおよびフィラメントの流動性はキャピラリーレオメータ (株式会社津製作所製, CFT-500) により、ダイ直径 1mm × 長さ 1mm, 試験圧力 9.8×10^5 Pa の試験条件にて評価した。

造形は、2 軸造形機 (武藤工業 (株) 製, MF-2200D) を使用した。図 1 にサポートが必要な形状の例として、ブリッジ形状の造形模式図を示す。フィラメントは押しギヤにより造形ノズルに供給され、加熱溶解した状態で押出される。造形機は 2 つの造形ノズルを備えており、一方からは母材が押出され、もう一方からは融着防止層が押出されることで材料を複合させた造形が可能となる。図 2 に造形モデルを示す。図 2 (a) は、母材と収縮追随層の間に融着防止層を挿入したモデルである。母材および収縮追随層は①のフィラメントを用い、融着防止層は②-④のフィラメントを用いて造形した。図 2 (b) は、造形体母材と融着防止層の間に、無機粉体を含まない樹脂のみの層を挿入したものである。この樹脂層にはポリ乳酸 (武藤工業 (株) 製, PLA) を使用した。造形条件はノズル温度 $120^\circ C$ または $200^\circ C$, 造形テーブル温度 $75^\circ C$, ノズル径 1mm, 押出幅 1mm, 積層ピッチ $200\mu m$, ノズル移動速度 $30mm/s$ とした。複合サポートの変形・収縮挙動は、熱機械分析装置 (ネッチ ジャパン (株) 製, TMA402F1) を用い、 $600^\circ C$ までは N_2 雰囲気、それ以降は大気雰囲気中で昇温速度 $1^\circ C/min$, 荷重 5mN, 試料寸法 3mm 角 × 高さ 5mm の条件で測定した。焼成は、 N_2 雰囲気下にて脱脂した後、大気雰囲気下におい

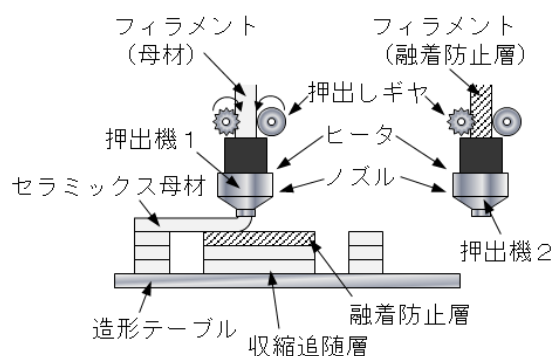


図 1 材料押出法の造形模式図。

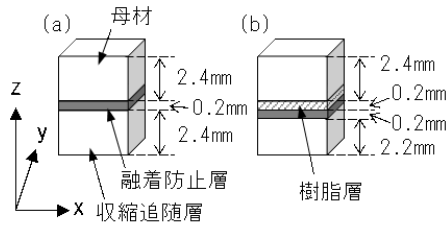


図2 造形模式図。(a)融着防止層挿入モデル、(b)融着防止層および樹脂層挿入モデル。

て1450°C、1時間保持の条件にて実施した。焼成後、焼結体界面を走査型電子顕微鏡（株式会社日立ハイテクノロジーズ製、SU3500）により観察し、結晶構造は、X線回折装置（スペクトリス株式会社製、Empyrean）にてCu管球、40kV、45mAの条件で評価した。

3 実験結果および考察

3.1 フィラメントの流動性

図3に樹脂バインダーおよびフィラメントの温度と見かけ粘度の関係を示す。樹脂バインダーは70°C程度から押出すことが可能な高い熔融流動性を有する。無機粉体を混合したことで、各フィラメントの見かけ粘度は大きくなっている。同質材で比較すると、粒子径の大きい方が見かけ粘度は小さくなっている。各フィラメントの造形温度は、造形時の押出抵抗および保形性の影響を考慮し、安定して造形可能な100-300 Pa·s程度となる120°Cとした。PLAの見かけ粘度は図示しないが、100-300 Pa·sでは造形および保形性に難があったため、約1000 Pa·sとなる200°Cにて造形した。

3.2 ZrO₂焼結体界面の微構造観察

図2(a)のモデルについて、SiO₂フィラメント（平均粒子径②4.0μm、③40μm）を融着防止層に用いて検討を行った。②を用いたときの焼結体界面の微構造写真を図4(a)に示す。暗い色の部分がSiO₂であり、ZrO₂焼結体界面の大部分に粒子の固着が認められる。図4(b)は③を用いた場合の写真であり、固着量は減少したように見受けられるが、母材界面に埋没したSiO₂粒子が認められる。SiO₂粒子は母材粒子より粗大な粒子を用いており焼結されにくいと考えられるが、粒子径がある程度小さいと焼結が進行し、固着すると推察される。

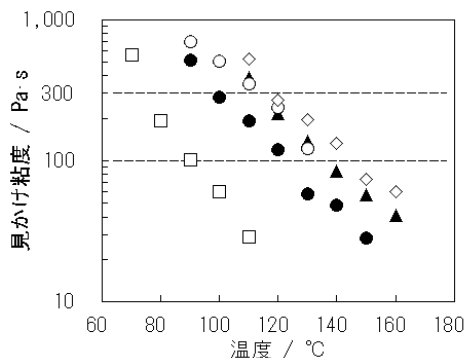


図3 樹脂バインダーおよびフィラメントの温度と見かけ粘度の関係。□：樹脂バインダー、◇：①3Y-ZrO₂母材、▲：②SiO₂ 4.0μm、●：③SiO₂ 40μm、○：④3Y-ZrO₂ ビーズ。

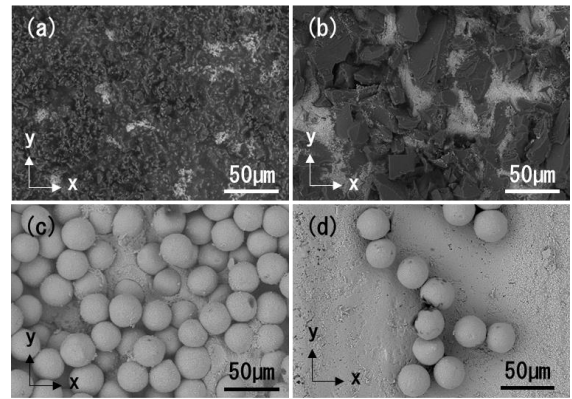


図4 焼結体界面の反射電子像。融着防止層：(a)②SiO₂ 4.0μm、(b)③SiO₂ 40μm、(c)ZrO₂ ビーズ、(d)ZrO₂ ビーズおよび樹脂層。

粒子径が大きい場合は焼結されにくい、粗く尖った形状では、界面に粒子が埋没し除去されにくくなるため、球形に近い粒子形状が適すと考えられる。また、図示しないが、X線回折にて界面を観察したところZrSiO₄の結晶ピークが認められ、ZrO₂とSiO₂の固相反応¹⁰⁾によりZrSiO₄が生成し、固着の原因となっていると推察される。したがって融着防止層は、焼結されにくく、母材と反応しない材料を用いる必要がある。

次に、母材と同材料であるが、粒子径が大きく球形の④ZrO₂ビーズを融着防止層に用いた場合の焼結体界面の微構造写真を図4(c)に示す。SiO₂に比べると付着量は少ない傾向にあったが、ZrO₂ビーズにおいても焼結体界面に固着が認められる。また、球形の場合も焼結体界面に深く埋没している粒子が認められ、固着が生じやすくなる要因になっていると考えられる。

3.3 樹脂層挿入によるZrO₂焼結体界面の性状

粒子埋没は、造形中に融着防止層が母材に接触したときに生じていると考えられ、この課題を解決するため、図2(b)の造形モデルについて検討した。無機粉体を含まない樹脂のみの層を母材と融着防止層の間に挿入することで、母材に融着防止層の粉体が直接接しなくなり、粒子埋没を防止できると予測される。樹脂層にPLA、融着防止層にZrO₂ビーズを用い、同様の手順にて実験を行い、得られた焼結体の界面微構造写真を図4(d)に示す。粒子の埋没による窪みは見受けられず、ZrO₂ビーズの付着量は大幅に減少している。樹脂層挿入により粒子埋没が抑制され、母材とビーズの接触面積が減少したことで固着されにくくなり、粒子が除去されやすくなったと推察される。ただし、一部固着は生じるため、母材と同質材料を用いるのが適切と考えられる。

3.4 複合サポート材の熱変形・焼成収縮挙動

樹脂層の挿入は、焼結体界面の汚染防止に有効であるが、焼成時の熱変形は大きくなると考えられる。図5に母材と複合サポートの寸法変化量の差を示す。本実験では造形および熱機械分析測定の制約から、融着防止層および樹脂層の割合はサポート高さの8%と大きいため、母材との熱変形および焼結による収縮の寸法変化量の差も大きくなっている。しかし、実際の造形では、サポートの高さがより大きい場合や、造形機の

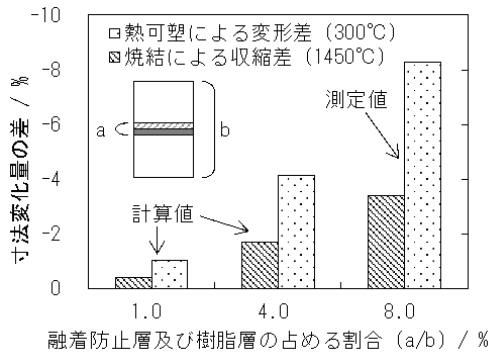


図5 試験片に占める融着防止層および樹脂層の割合と寸法変化量の差の関係。

性能により積層ピッチをより小さくできる場合も多い。したがって、融着防止層はサポートの高さに対してより小さな比率になり、寸法変化量の差も小さくなると推察される。図5の計算値は、複合サポートに占める融着防止層および樹脂層の割合が8%のときの母材との寸法変化量の差の測定値を基準に比例計算した値である。例えば、サポート高さ20mmに対して融着防止層と樹脂層が100 μ mずつ、すなわち1%母材以外の層を含むと仮定した場合、300 $^{\circ}$ Cまでの熱変形による寸法変化量の差は最大で約1%、1450 $^{\circ}$ Cまでの焼結による収縮の差は約0.4%となり、変形や割れを抑制しつつ焼結体を得られると推察される。

4 結論

本研究は、ZrO₂セラミックスをモデルに、熱変形および固着の生じにくい複合サポートの設計を目的とし、熱可塑による変形、焼結による収縮挙動および焼結体界面への粒子固着について調査した。いずれの無機粉体を融着防止層に用いた場合も、母材界面への粒子固着が認められたが、球状粒子の方が比較的除去されやすい傾向にあった。SiO₂はZrO₂と反応し、ZrSiO₄を生成していると推察され、母材と反応しない材料を融着防止層に選定する必要があった。樹脂層を挿入することで、母材への融着防止層粒子の埋没を抑制でき、粒子径の大きな無機粉体を含む融着防止層および樹脂層を含む複合サポートは、母材単体よりも焼成初期の熱可

塑性樹脂に起因した変形量が大きくなり、焼結による収縮は母材単体よりも小さくなったが、サポートに対する融着防止層の高さは、今回のモデル試験より小さな比率に出来る場合も多く、熱変形および焼結による収縮の差の影響は小さいものと考えられた。

参考文献

- 1) J. Deckers, J. Vleugels, J.-P. Kruth: Additive Manufacturing of Ceramics: A Review, J. Ceram. Sci. Technol., 05, 245-260 (2014).
- 2) 横田耕三, 高原茂幸: DLP 光造形法によるアルミナ3次元積層造形体に及ぼすスラリー特性および造形条件の影響, 粉体工学誌, 53, 492-498 (2016).
- 3) K. Yokota, Y. Kataoka: DLP 式光造形法による3次元積層造形 Al₂O₃-ZrO₂-TiO₂ セラミックスの作製, J. Soc. Powder Technol., Japan, 56, 261-266 (2019).
- 4) K. Yokota, Y. Kataoka: Influence of Molding on Characteristics of Alumina Sintered Bodies Fabricated by Digital Light Processing Vat Photopolymerization, J. Soc. Inorg. Mater., Japan, 28, 139-145 (2021).
- 5) 片岡良孝, 横田耕三: 材料押出法によるジルコニア3次元積層造形体の作製, 粉体工学誌, 57, 520-525 (2020).
- 6) 横田 耕三, 片岡 良孝: 材料押出法によるセラミックスの3次元積層造形体の作製, セラミックス, 56, 722-725 (2021).
- 7) 特表 2019-522105
- 8) 特表 2020-501022
- 9) 片岡良孝, 横田耕三: 材料押出法における三次元セラミックス造形に適するサポートの検討, 無機マテリアル学会誌, in press.
- 10) C. E. Curtis, H. G. Sowman: Investigation of the Thermal Dissociation, Reassociation, and Synthesis of Zircon, J. Am. Ceram. Soc., 36, 190-198 (1953).

(日本セラミックス協会 2022 年年会において一部発表)

ものづくり基盤技術高度化支援プロジェクト —令和3年度の活動—

熱田 俊文, 宮内 創, 松島 康晴, 新名 楓, 山下 雅弘

ものづくり基盤技術関連企業の成長分野等への進出を促進する目的で、「機械加工技術」、「溶接技術」等の基盤技術の高度化を支援するための技術支援・研究開発を実施した。具体的には、ものづくり基盤技術高度化分科会の開催、各専門分野のアドバイザーによる巡回技術指導、分科会のワーキンググループにおける勉強会の実施、溶接技量訓練装置を用いた人材育成支援等の活動を行った。さらに、基盤技術の高度化を支援するための研究開発や個別の技術支援も実施した。

1 緒言

当センターでは、平成29年度から「ものづくり基盤技術高度化支援事業」を開始した^{1)~4)}。この事業は、ものづくり基盤技術関連企業の成長分野等(健康医療分野、航空宇宙分野、自動車関連分野など)への進出を促進するため、各基盤技術における共通課題を抽出し、その解決のための技術支援・研究開発を実施することで、コア技術をより一層強化することを目的としている。

具体的な内容として、平成29年度に基盤技術である「機械加工技術」および「溶接技術」の高度化を支援するための分科会を立ち上げ、2つのワーキンググループ(機械加工技術の高度化WG、溶接人材育成WG)を設置した。今年度も、この分科会での活動を中心として、各WGにおける勉強会・練習会の開催、技術アドバイザー巡回による現場の課題改善、溶接マイスターによる現地実技セミナー、溶接技量訓練装置を用いた人材育成支援等を実施し、県内企業の基盤技術の高度化を支援した。また、機械加工技術・溶接技術の高度化に資する研究開発の実施や個別の高度化支援等も実施した。本報ではこの事業の5年目の活動内容について報告する。

2 ものづくり基盤技術高度化分科会

分科会の構成員は、企業28社(加工15社、溶接19社、重複含む)と業界1団体、当センターである。この分科会において、各WGでの勉強会・練習会の開催、技術アドバイザー(機械加工・溶接等、計4名を委嘱)による巡回指導、加工事例・人材育成・技能伝承等に関する会員相互の情報交換を行った。

2.1 開催

今年度は2回の分科会を開催した。それぞれの概要を以下に示す。

○第1回

日時：令和3年5月10日(月)

議事：(1)今年度の実施計画
(2)今年度のアドバイザー紹介

○第2回

日時：令和4年2月17日(木)

議事：(1)情報提供
工作機械の技術動向について
(2)今年度の実施報告・来年度の計画報告

(3)意見交換

第1回分科会は、新型コロナウイルス感染拡大防止の観点から、電子メールでの書面開催とし、今年度の実施計画やアドバイザー紹介等の報告を行った。

第2回分科会はwebで開催し、工作機械の技術動向に関する情報提供や今年度の活動実績の報告などを行った。

2.2 アドバイザー

今年度は各専門分野のアドバイザーとして、機械加工技術分野：香川県職業能力開発協会 佃 昭 氏、元香川高等専門学校 岩田 弘 氏、溶接技術分野：香川高等専門学校 正箱 信一郎 氏、徳島県鉄骨構造協同組合 奈須 善彦 氏をそれぞれ委嘱した。各アドバイザーは、会員企業を訪問し、現場の課題改善のための指導や情報交換等を行った。図1にアドバイザーの巡回指導の様子を示す。今年度は延べ14社を訪問した。機械加工技術分野では、FSMによる生産システムの効率化、三次元CAD/CAMや多軸加工によるデジタルものづくり、スマート工場関連、工場の5S、精密測定機器の活用方法、金型の機械加工などについての指導を実施した。溶接技術分野では、超音波探傷による溶接割れの検査、マクロ試験による溶接の溶け込み評価、大型部材の溶接における歪み対策、溶接ヒューム法改正に伴う作業環境測定方法などについての指導を実施した。

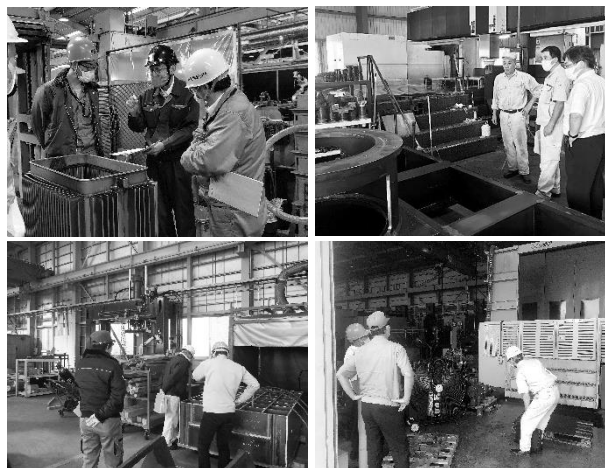


図1 アドバイザーの指導事例

2. 3 ワーキンググループ (WG)

今年度のWGは、以下のとおり計 14 回開催した。

○機械加工技術の高度化WG①

日 時：令和 3 年 11 月 9 日 (火) 13:30～15:30

場 所：web 開催

タイトル：「溶接・熱処理・切削・塑性加工などの
総合加工シミュレーションツールの紹介」

講 師：(株) ヤマナカコーキン 安達 和貴 氏
佐野 友洋 氏

参加者：42 名

○機械加工技術の高度化WG②

日 時：令和 4 年 2 月 9 日 (水) 14:00～15:30

場 所：web 開催

タイトル：「化成処理の基礎と最新動向」

講 師：日本パーカライジング(株) 鈴木聡一郎 氏

参加者：23 名

○機械加工技術の高度化WG③

日 時：令和 4 年 2 月 17 日 (木) 14:00～15:30

場 所：web 開催

タイトル：「工作機械の最新動向、省人化、IoT」

講 師：ヤマザキマザック(株) 福田 憲治 氏

参加者：39 名

○溶接人材育成WG①

日 時：令和 3 年 6 月 20 日(日), 7 月 4 日(日),
8 月 1 日(日), 10 月 3 日(日), 11 月 7 日
(日), 11 月 21 日(日), 12 月 5 日(日),
令和 4 年 1 月 16 日(日)

各 9:00～13:00

場 所：産業技術センター実験棟 表面改質試験室

タイトル：「溶接マイスター指導による溶接技量訓練
装置を使った個別練習会」

講 師：(株)タダノ 大澤 兼治 氏

参加者：延べ 40 名

○溶接人材育成WG②

日 時：令和 3 年 12 月 3 日 (金) 14:00～15:30

場 所：web 開催

タイトル：「溶接ヒューム法改正のポイントとケース
スタディ」

講 師：関西環境科学(株) 中家 隆博 氏

参加者：68 名

○溶接人材育成WG③

日 時：令和 4 年 3 月 9 日 (水) 13:00～15:20

場 所：web 開催

タイトル：「溶接技術講習会～四国で行われている最
新研究発表～」

講 師：新居浜工業高等専門学校 永易 照正 氏
他 7 名

参加者：28 名

○溶接人材育成WG④

日 時：令和 4 年 3 月 12 日 (土) 8:30～12:50

場 所：ポリテクセンター香川 (高松市)

タイトル：「溶接技術コンクール事前講習会」

実技講師：6 名

参加者：20 名

機械加工技術の高度化WG (図 2) では、加工シミュレーションツール、化成処理および工作機械に関する

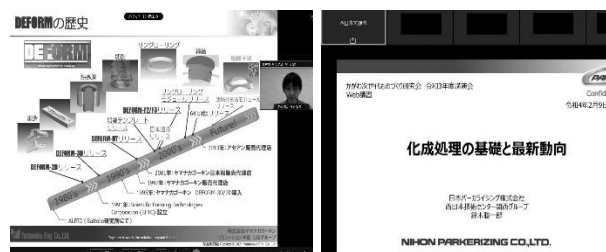


図 2 機械加工技術の高度化WG

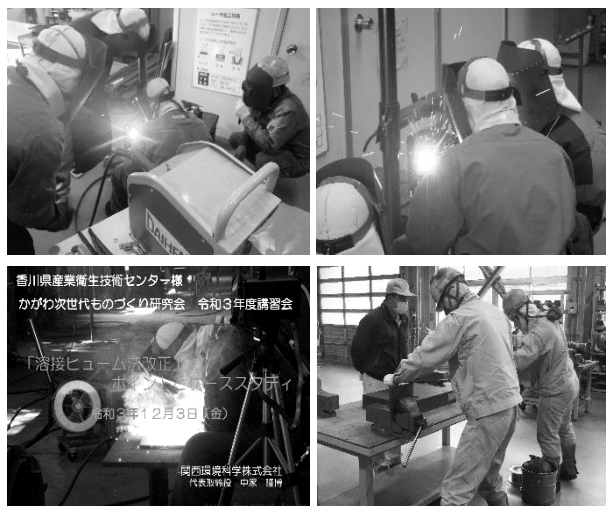


図 3 溶接人材育成WG

る勉強会を開催した。「溶接・熱処理・切削・塑性加工などの総合加工シミュレーションツールの紹介」では、製造工程におけるシミュレーションツール導入のメリットや溶接・熱処理・切削・鍛造などに対する具体的な活用事例を紹介した。「化成処理の基礎と最新動向」では、下地処理の一つであり高い耐食性を有するパーカー処理について紹介するとともに、化成処理工程の現場で起こりやすいトラブルとその対策について詳しく説明した。「工作機械の最新動向、省人化、IoT」では、工作機械の技術動向や IoT 技術、自動化技術を活用した生産性向上のための具体的な事例紹介を行った。

溶接人材育成WG (図 3) では、平成 29 年度に導入した溶接技量訓練装置を用いて 8 回の個別練習会を開催した。個別練習会は、日本溶接協会マイスターである(株)タダノの大澤氏を指導者として、各企業ごとに溶接動作や適切な溶接条件などに関する個別指導を行った。溶接の初心者から JIS 検定合格や熟練工を目指す参加者などのそれぞれの技量・目的に応じた指導内容で好評であった。また、「溶接ヒューム法改正のポイントとケーススタディ」では、溶接ヒュームが令和 3 年 4 月 1 日より特定化学物質として規制対象となったことを受けて、金属アーク溶接等の作業を行う場合に講じなければならない措置や経過措置などについて詳しく説明した。「溶接技術講習会～四国で行われている最新研究発表～」では、四国で行われている大学・高専の溶接技術に関する最新研究について、8 件の事例紹介を行った。耐食性が高く利用が進みつつある二相ステンレスに関するもの、新しい溶接法であ

るパルスガス MAG 溶接に関するもの、部分焼入れを可能とするレーザー焼入れに関するものなど幅広い内容であった。「溶接技術コンクール事前講習会」では、溶接技術コンクールへの参加予定者向けに課題内容や溶接手順、減点ポイントなどについて説明し、また溶接マイスター四国の認定者や指導経験豊富な溶接技術者を講師として個別に実技指導を行った。

3 高度化支援

基盤技術の高度化を支援するための研究開発や個別支援を実施した。これらについては、別途報告を行う。

4 結言

今年度は、ものづくり基盤技術高度化分科会において、2回の分科会を開催し、延べ14社のアドバイザー巡回指導を実施した。また、各ワーキンググループにおいて、加工シミュレーションツール、化成処理、工作機械、溶接ヒューム法改正、溶接の最新研究動向に関する勉強会、溶接技能向上を目的とした練習会などを開催した。併せて、基盤技術の高度化を支援するための研究開発や個別の技術支援も実施した。

事業の最終年度である令和4年度も、引き続き今年度と同様の活動を実施し、機械加工技術および溶接技術を中心とした県内企業の基盤技術の高度化を支援していく予定である。

参考文献

- 1) 山下雅弘, 熱田俊文, 松島康晴, 中原理栄:ものづくり基盤技術高度化支援事業, 香川県産業技術センター研究報告, No. 18, pp. 45-47 (2017).
- 2) 山下雅弘, 熱田俊文, 松島康晴, 中原理栄:ものづくり基盤技術高度化支援プロジェクトー平成30年度の活動ー, 香川県産業技術センター研究報告, No. 19, pp. 27-29 (2018).
- 3) 山下雅弘, 熱田俊文, 松島康晴, 新名 楓, 中原理栄:ものづくり基盤技術高度化支援プロジェクトー令和元年度の活動ー, 香川県産業技術センター研究報告, No. 20, pp. 23-24 (2019).
- 4) 大北一也, 山下雅弘, 熱田俊文, 松島康晴, 新名 楓:ものづくり基盤技術高度化支援プロジェクトー令和2年度の活動ー, 香川県産業技術センター研究報告, No. 21, pp. 20-21 (2020).

二つのインサートを用いた旋削加工のびびり振動抑制

熱田 俊文, 吉村 英徳*, 松村 隆**

本研究では、工具シャンクに二つのインサートを取り付けて同時切削することで、旋削における再生びり振動の発生を抑制する方法について提案する。提案する手法は、刃先高さの異なる二つのインサートを用いて、外側波（主に切削を行うインサートが振動のため一回転前に削り残した起伏）を時間差で切削することにより、再生効果を乱してびびり振動を抑制しようとするものである。本報では、外周旋削を対象にまずこの方法によって再生びり振動を抑制する手順と原理について説明した。次に、単純化した理論モデルを用いてシミュレーションを行い、提案手法で再生びり振動を抑制するための条件を示した。さらに実際に剛性の低い被削材に対する旋削実験を行い、再生びり振動が抑制できることを確認した。

1 緒言

旋削加工中に発生する再生びり振動は、主軸一回転前までに加工面に転写された振動による起伏が現在の切削に関与することで起こる自励振動であり、仕上げ面の悪化や工具損傷を招く有害な現象である。このため、その対策については従来から多くの研究がなされてきた。しかしながら、長尺物や薄肉円筒物などの剛性の低い被削材を旋削加工する際には、現在でも再生びり振動の発生が問題となる場合があり、未だ多くの課題が残されている。

一方、再生びり振動については、工具が被削材の同一箇所を相次いで切削する間の振動の位相を乱す操作を加えれば、再生効果が攪乱されて振動が抑制されることが知られている¹⁾。この原理を応用した代表例は、不等ピッチや不等リードをつけたエンドミル²⁾であるが、旋削加工においても主軸回転速度を常時変動させる変速切削法^{3,4)}により実用されている。この変速切削法は、装置の大型化や工程数の増加といった問題が生じることがない上、被削材の形状が限定される加工方法ではないため、剛性の低い被削材の旋削に対しても有用なびり振動対策の一つである。ただし、主軸モータの高応答な速度制御が必要となるため、普通旋盤をはじめ、加工現場で一般に保有している工作機械では適用できない場合も多い。一方、この再生効果の攪乱によるびり振動の抑制効果を、旋盤の主軸機能ではなく工具の機能によって実現できれば、必要な付加装置もなく加工現場でも比較的容易に再生びり振動の対策が行えるが、そのような機能を有する旋削用工具は見当たらない。

本研究では、通常の旋削用工具シャンクに二つのインサートを取り付けて同時切削することで、再生効果を乱してびり振動を抑制する方法について検討する。この方法では、切削を担う片方のインサートが振動のため一回転前に削り残した起伏を、所定の量だけオフセットして配置したもう片方のインサートで先に削る。すなわち、工具側で再生効果によって生じる切削厚さ

変動の周期性を崩すことでびり振動を抑制しようとするものであり、インサートの配置とクランプに調整を要するが、特別な付加装置は必要としない。

本報では、外周旋削加工を対象に、まずこの方法によって再生びり振動を抑制する手順と原理について説明した。次に、単純化した理論モデルを用いてシミュレーションを行い、再生びり振動を抑制するための条件を示した。さらに実際に剛性の低い被削材に対する旋削加工実験を行い、再生びり振動が抑制できることを確認した。提案する方法を用いる場合、ごく小径の被削材に対しては刃先の芯高調整ができないことが課題であるが、加工現場でも比較的容易に行える再生びり振動の対策であると考えられるため、以下にその内容について報告する。

2 提案手法

本研究で提案する加工方法では、図1に示すように通常の旋削用工具シャンクに同じインサートを二つ取り付けて旋削加工を行う。その概要および手順は以下のとおりである。

- (1) インサート A を工具シャンクの着座面にねじ止める。この A は、通常どおりの切削を行うことになる。
- (2) A の上部に、シムを介してインサート B を押さえ具で固定する。この際、B は A に対して送り方向で図中の p mm だけ後方に配置する。このオフセット量 p は、主軸一回転あたりの送り量 f mm/rev に応じて調整するパラメータである。
- (3) A と B の切込み方向の位置は同じとなるように調整する。

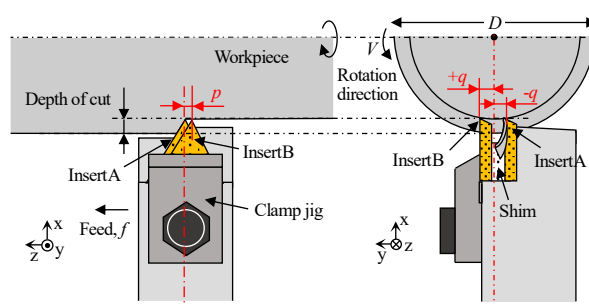


図1 提案手法

* 香川大学創造工学部

** 東京電機大学工学部

(4) 芯高調整は、被削材の回転中心に対してそれぞれの刃先高さ位置が上下対称（図中の±q mm）に配置されるように行う。

上記のように二つのインサートを配置した場合、送り量 f に対するオフセット量 p の設定によって、インサート B の切削への関与が以下のように変わる。ここで、 D mm は被削材直径である。

(a) $p > f - (2q/\pi D)f$ の場合：B の横切れ刃が切削に関与することはない。厳密には、B は刃先で A が創成した仕上げ面の表面粗さによる僅かな凹凸分を削ることになるが、その影響は小さいものと考え、A のみで切削する場合とほぼ同じ状態になる。

(b) $p = f - (2q/\pi D)f$ の場合：もしも振動が全く生じなければ B の横切れ刃は切削にほぼ関与しない。しかし、振動が生じると B の横切れ刃は、切削を担う A の横切れ刃が振動のため一回転前に削り残した起伏（外側波）の近傍に対して作用することになる。そして両インサートの位置関係から、B は A による切削の外側波の一部を A よりも先に削ることになる。この点については次章で詳しく述べる。

(c) $p < f - (2q/\pi D)f$ の場合：この場合、B の横切れ刃からも厚みを持った切りくずが排出される。例えば、 $p = 0.5f$ とした場合、両インサートからそれぞれ同程度の厚さの切りくずが分岐して同時に排出される。ただし、インサート B における作用逃げ角が小さいと被削材と B の前逃げ面が干渉する危険があるため、本研究では (c) の場合については議論の対象から除外している。

本研究で提案する手法は、この図の (b) $p = f - (2q/\pi D)f$ に調整して再生びり振動を抑制する方法である。すなわち、切れ刃が被削材の同一箇所を相次いで切削する際の外側波の一部を別の切れ刃で先行して削ることで、再生効果によって生じる切削厚変動（切削力変動）の周期性を崩して振動を抑制しようとするものである。ここで、再生びり振動は、振動系（本報においては被削材系）のコンプライアンスの大きい共振近傍の周波数で発生する。そのため、共振周波数に依存して加工表面に生成されるびり振動の周期的特性（波長や現在と一回転前の振動における位相差）は変わる。提案手法により再生効果を実質的に緩和し、びり振動を抑制できるか否かは、鉛直方向のオフセット量 $2q$ が振動の周期的特性に及ぼす影響によって決まるが、この点については、次章以降で単純化した理論モデルを用いて説明する。なお、使用するインサートの厚さに依存するが、インサート A のすくい面から切りくずが流出するスペースが必要であるため、設定できる q の値には下限がある。一方、切れ刃高さが下がるにつれてインサート A におけるすくい角が低下することになるため、 q の値が過度に大きい場合も切削ができない。したがって、現実的に設定できる q の範囲は広くはないが、本報では厚さ 2.38mm、すくい角 30° 、逃げ角 7° のインサートを用いて、切りくず流出スペースが十分確保され、かつ良好に切削可能であった $q = 2.0$ mm とした場合を例に、提案手法の概念説明を行う。

3 再生びり振動のモデル化

本章では、外周旋削加工を対象に、提案手法による

再生びり振動のモデル化を行い、通常の旋削における振動モデルとの比較から、びり振動に影響する因子について述べる。モデル化においては、工具系の剛性は被削材系に比べ十分高いとし、被削材のみが振動する系で再生びり振動が発生するものと仮定した。

3.1 通常の旋削加工における振動モデル

一般に被削材の振動方向は切込み方向（ x 方向）あるいは切削速度方向（ y 方向）の一方向に限られるものではないが、振動系を単純化し、特に切削厚変動（切削力変動）の周期性の違いによる影響に注目することを意図して、切込み方向の振動の自由度のみを抽出した形でモデル化を行った。図 2 (a) は通常の旋削における振動系のモデル図である。図示のとおり、 x 方向の振動に起因して被削材がびり振動を起こすものとし、かつ切削力は x 方向においても切削断面積に比例するものとする、この系の運動方程式は次式で示される。

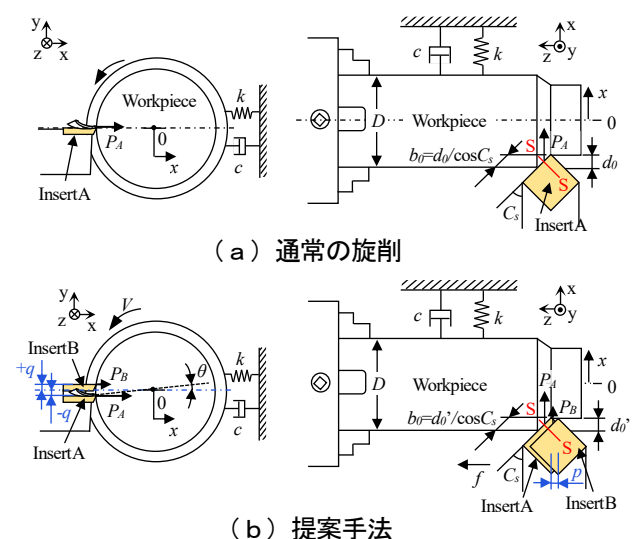
$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = P_A(t) = K_0 b(t) h_A(t) \quad (1)$$

ここで、 t ：時間 sec, $x(t)$ ：被削材の x 方向の振動変位 mm, $P_A(t)$ ：背分力 N, K_0 ：切れ刃高さを被削材中心とした場合の背分力の比切削抵抗 N/mm^2 , $b(t)$ ：切削幅 mm, $h_A(t)$ ：切削厚さ mm, m ：被削材系の x 方向の等価質量 10^3 kg, c ：被削材系の x 方向の等価減衰 Ns/mm , k ：被削材系の x 方向の等価剛性 N/mm であり、 m , c , k , K_0 は実験で同定するパラメータである。

再生びり振動は、現在の刃先の振動（内側波）と主軸一回転前までに被削材表面に転写された起伏（外側波）によって切削厚さが変動することで生じる。図 3 (a) に切削表面のモデル（図 2 (a) の S-S 断面）を示す。図示のとおり、切削状態を横切れ刃に垂直な面内で二次元切削と近似し、主軸回転周期を T sec, 工具横切れ刃角を C_s deg とすると、外側波は $x(t-T)\sin C_s$, 内側波は $x(t)\sin C_s$ で表され、切削厚さの変動分は $\{x(t-T) - x(t)\}\sin C_s$ となる。平均切削厚さは、定常送りを f mm/rev として $h_0 = fc\cos C_s$ であり、時刻 t での切削厚さ $h_A(t)$ は次式で示される。

$$h_A(t) = fc\cos C_s + \{x(t-T) - x(t)\}\sin C_s \quad (2)$$

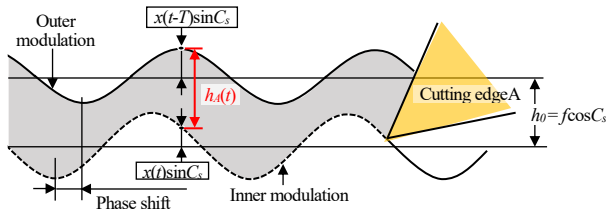
ここで、 D ：被削材直径 mm, V ：切削速度 mm/sec とすると、主軸回転周期は $T = \pi D/V$ で表される。切削幅は外側波の影響を受けず、切込み量を d_0 mm とすると、



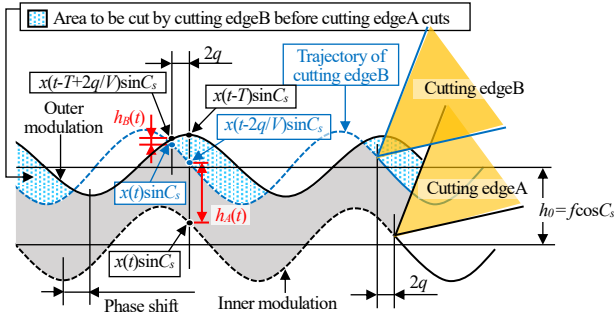
(a) 通常の旋削

(b) 提案手法

図 2 振動系のモデル



(a) 通常の旋削



(b) 提案手法

図3 切削表面モデル

定常状態では $b_0 = d_0 / \cos C_s$ で与えられる。ただし、 $x(t)$ によって $-x(t) / \cos C_s$ だけ変化するため、時刻 t での切削幅 $b(t)$ は以下のように表される。

$$b(t) = \begin{cases} \{(f/T \sin C_s) t - x(t)\} / \cos C_s, & \text{定常状態まで} \\ \{d_0 - x(t)\} / \cos C_s, & \text{定常状態に達した後} \end{cases} \quad (3)$$

式(1)～(3)を数値解析で解き、 $h_A(t)$ 、 $b(t)$ 、 $x(t)$ を微小時間毎に求めることで、通常の旋削における被削材の振動を時間領域でシミュレーションすることができる。

3.2 提案手法における振動モデル

前項と同じく1自由度系を考えると、提案手法における振動系のモデルは図2(b)で表され、運動方程式は次式で示される。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = P_A(t) + P_B(t) \\ = K_{-q}b(t)h_A(t) + K_qb(t)h_B(t) \quad (4)$$

ここで、 $P_B(t)$ N はインサートBから生じる x 方向の力であり、 $K_{-q} N/mm^2$ 、 $K_q N/mm^2$ は、インサートの切れ刃高さをそれぞれ被削材中心から $-q$ mm、 $+q$ mm とした場合の背分力の比切削抵抗である。これらの比切削抵抗の値も切削実験から同定する。

図2(b)において $p = f - (2q/\pi D)f$ とした場合、主に切削を担うAの横切れ刃に垂直な面内(S-S断面)では、図3(b)に示すようにBの切れ刃が作用する。被削材が振動しなければ、Bは切削表面を削ることなくなぞるだけである。しかし、被削材が振動する場合、Bは切削厚さの方向に $h_0 (=f \cos C_s)$ だけ離れた位置で、Aの現在の刃先の振動である $x(t) \sin C_s$ と同期して動き、切削表面を削ることになる。ただし、Bの方がAよりも切れ刃高さが $2q$ だけ高いため、切削速度方向ではBは $\Delta t = 2q/V$ sec の時間差分だけAとは位相がずれた位置を削る。すなわち、外側波の一部をAよりも先に削る。同図から考える時刻 t におけるインサートBによる切削の切削厚さ $h_B(t)$ は、以下のように表される。

$$h_B(t) = \begin{cases} \{x(t-T+2q/V) - x(t)\} \sin C_s \\ \quad : x(t-T+2q/V) > x(t) \text{ の場合} \\ 0 : x(t-T+2q/V) < x(t) \text{ の場合} \end{cases} \quad (5)$$

なお、式(5)で $h_B(t) = 0$ となるとときには、Bの切れ刃は

外側波から離脱しており切削に関与しない。上記のようにBの切れ刃が作用することで、Aによる切削の切削厚さ $h_A(t)$ は、外側波 $x(t-T) \sin C_s$ とBの移動軌跡 $x(t-2q/V) \sin C_s$ との関係によって変わる。具体的には、図示されているように $x(t-T) > x(t-2q/V)$ の場合に、AはBによって新たに被削材表面に転写された振動の起伏を削ることになる。このため、時刻 t におけるインサートAによる切削の切削厚さ $h_A(t)$ は、以下のように表される。

$$h_A(t) = \begin{cases} f \cos C_s + \{x(t-2q/V) - x(t)\} \sin C_s \\ \quad : x(t-T) > x(t-2q/V) \text{ の場合} \\ f \cos C_s + \{x(t-T) - x(t)\} \sin C_s \\ \quad : x(t-T) < x(t-2q/V) \text{ の場合} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)から鉛直方向のオフセット量 $2q$ が再生効果によって生じる切削厚さ変動に影響を及ぼす因子であることがわかる。すなわち、インサートBの存在によって切削厚さおよび切削力変動の周期性が崩れる。

切削幅 $b(t)$ は、提案手法でも式(3)で計算されるが、図2(a)のモデルとは切れ刃高さに違いがあるため、径方向の切込み量を同じにするには x 方向の切込み量を補正して与える必要がある。切込み設定時に刃先と被削材の接触により切込み参照点を決めて、それから切込み量を設定する作業では、図3(b)に示すように被削材中心と刃先との傾斜角を $\theta = \sin^{-1}(q/0.5D)$ とし、 $d_0' = d_0 / \cos \theta$ の切込み量を与えることになる。数値解析でも式(3)中の d_0 を d_0' に置き換えて計算する。ただし、後述する本報の q 、 D 、 d_0 の範囲内では、 d_0' と d_0 の差異は μm オーダーと微小である。式(3)～(6)を数値解析で解くことで、提案手法における被削材の振動をシミュレーションすることができる。

4 再生びり振動の解析

4.1 解析条件

3章で述べた二つのモデルによるびり振動の解析を図4に示す長尺物(S45C)の外周旋削に適用してみる。この被削材の系は、後述の切削実験で使用したものであり、直径 D (45mm) に対する突出し長さ L が大きく支持剛性が低いため、安定限界が過大にならずに被削材系で再生びり振動を生じる。この被削材の系において、 $L = 315 \sim 495$ mm (7D \sim 11D) の範囲で通常の旋削と提案手法による旋削のびり振動の解析を試み、安定限界を比較した。数値解析の解法には4次のルンゲ・クッタ法を用いた。提案手法の q の値は 2.0mm とした。

表1にインパルス応答法で調べたこの系の固有振動数と振動定数の推定値を示す。解析を行った切削条件は表2のとおりであり、これも後述の切削実験と同じ条件である。3章で述べた方法で解析するには、式(1)、式(4)において比切削抵抗 K_0 、 K_{-q} 、 K_q が必要となるため、実験で用いたインサートで表3のとおり刃先高さ毎に比切削抵抗を同定した。 K_0 、 K_{-q} ($q = 2.0$ mm)、 K_q ($q = 2.0$ mm) はシャンクにインサートをつつだけ取り付け、刃先高さを被削材中心から 0mm、 -2.0 mm、 $+2.0$ mm とした場合のそれぞれについて、びり振動の生じない条件で切削幅 b_0 、切削厚さ h_0 を変えて切削したときの背分力の測定値から求めた。表3からわかるように、提案手法では切削力の値自体は通常の旋削よりも大きくなる。

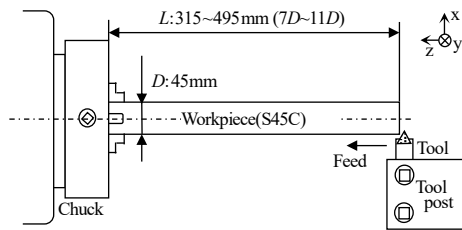


図4 被削材系の模式図

表1 被削材系の振動特性

Distance from chuck L [mm]	Natural Frequency [Hz]	Vibration constants in x		
		m [kg]	c [Ns/mm]	k [N/mm]
315(7D)	223	1.4	182×10^3	2.7×10^3
360(8D)	186	1.4	178×10^3	1.6×10^3
405(9D)	143	1.5	114×10^3	1.2×10^3
450(10D)	120	1.4	111×10^3	0.8×10^3
495(11D)	103	1.4	69.3×10^3	0.6×10^3

表2 切削条件

Cutting speed, V	85 m/min (1,416 mm/s)
Feed rate, f	0.1 mm/rev
Depth of cut, d_0	0.2~1.2 mm

表3 切れ刃高さ毎の比切削抵抗

K_0 [N/mm ²]	$K_q (q=20)$ [N/mm ²]	$K_q (q=20)$ [N/mm ²]
780	862	910

4. 2 解析結果

図5, 図6は通常の旋削と提案手法による旋削のそれぞれについて, $L=315$ mm ($=7D$)の条件で切込み量 d_0 を変化させたときの被削材の振動変位を解析した例である。被削材の振動がどの程度以上であれば不安定とするかの安定限界の定義には議論があるが, 本報の解析では切削開始から5秒後の振動変位 $x(t)$ の両振幅が $20 \mu\text{m}$ 以下であれば安定, $20 \mu\text{m}$ 以上であれば不安定びり状態と判断した。この振幅のびり痕は肉眼でも十分識別できる。両図から, 通常の旋削の場合には切込み量 d_0 が 0.7mm を超えると振幅は発散するが, 提案手法では通常の旋削よりも切削力が若干大きくなるにも拘わらず, $d_0=0.9\text{mm}$ 程度まで振動の成長が抑制され, 安定限界が向上していることがわかる。

図7は, 図5(e), 図6(e)でそれぞれ被削材の振

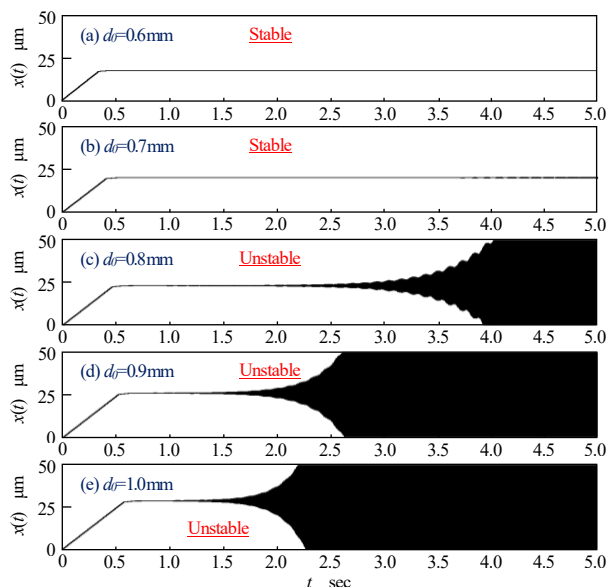


図5 通常の旋削に対する解析結果 ($L=315\text{mm}$)

動が増幅し始めたびり振動の発生段階における切削力の変動を比較したものである。図7(a)は通常の旋削の場合, 図7(b)は提案手法の場合の結果である。また, 図7(c)には, 提案手法においてインサートAとBから発生する切削力を別々に表示してある。図7(a)から通常の旋削では, 赤い破線(振動の包絡線)で示されるように主軸一回転毎(主軸回転周期 $T=0.1\text{sec}$)に切削力の振幅が急速に増大していく様子がわかるが, 図7(b)に示す提案手法では振幅の増加が緩やかである。振幅の増加速度が低いことは, 図7(c)から確認されるように, インサートBによって外側波の一部が位相のややずれた位置で先行除去され, 切削力変動(切削厚さ変動)の周期性が乱されることで, 再生効果の影響が実質的に緩和されていることを示している。

一方, 図8は図5(e)の表示を拡大し, 通常の旋削におけるびり振動時の内側波 $x(t)$ の波形に外側波 $x(t-T)$ の波形を重ねたものである。グラフの横軸は切削速度方向の距離に換算してある。同図からこの $L=315$ mm, $d_0=1.0$ mmの条件で発生するびり振動の波長 λ_1 は 6.1mm 程度であり, 内外波の切削速度方向の距離差 λ_2 は 1.1 mm程度(内外波の位相差 $\phi=360 \times \lambda_2/\lambda_1=64.9^\circ$)である。今, 提案手法で $2q=\lambda_1-\lambda_2(=5.0\text{mm})$ となる q の値を与えた場合, 外側波とインサートBの移動軌跡は, その位相差を ε として $\varepsilon=360^\circ \times (2q+\lambda_2)/\lambda_1=360^\circ(=0^\circ)$ となり, 図9に切削表面のモデルを示すように位相がほぼ同期することになる。この場合の例として, 提案手法において, $L=315$ mm ($=7D$), $q=2.5$ mmの条件で切込み量 $d_0=1.0\text{mm}$ を与えたときの被削材の振動を解析した結果を図10に示す。厳密には, 切れ刃高さの変更に伴って $q=2.5\text{mm}$ に対応した比切削抵抗 $K_q(q=2.5\text{mm})$, $K_q(q=2.5\text{mm})$ を用いる必要があるが, ここでは表3に示した $q=2.0\text{mm}$ での比切削抵抗値を用いて解析した。図10と図5(e)を比較すると, $q=2.5$ mmの場合では, 主軸一回転毎のうなりの節がより明瞭に現れており, 通常の旋削よりも振動が急速に増加する結果となっている。このことから, 外側波とインサートBの移動軌跡との位相が同期する条件(位相差

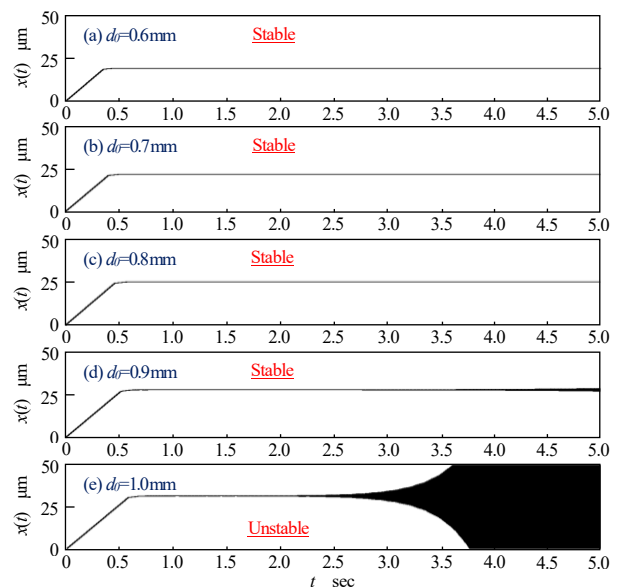


図6 提案手法に対する解析結果 ($L=315\text{mm}$, $q=2.0\text{mm}$)

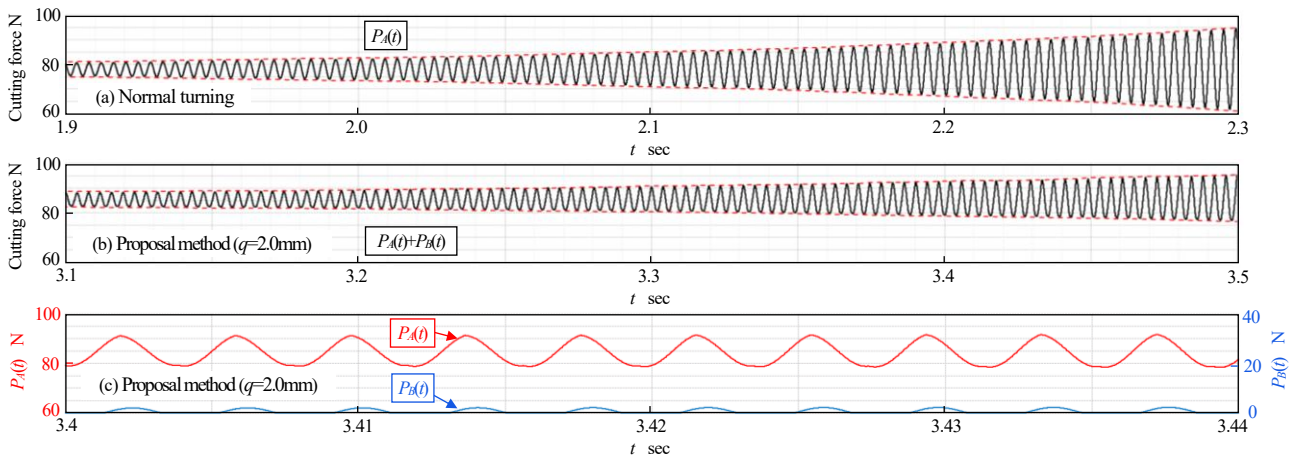


図7 びびり振動の発生段階における切削力の変動状況 (L=315mm, d₀=1.0mm)

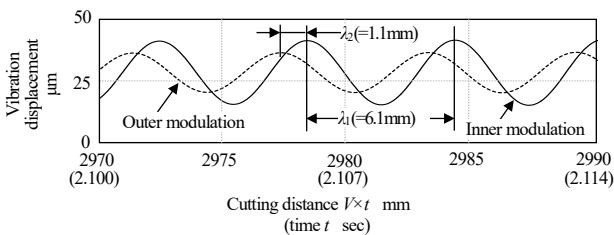


図8 通常の旋削におけるびびり振動時の内外側波の波形 (L=315mm, d₀=1.0mm, V=1,416mm/s)

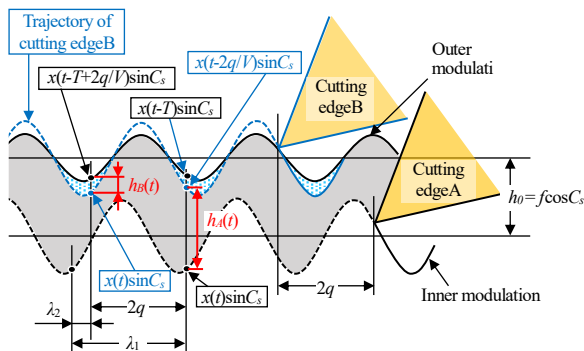


図9 インサートBの移動軌跡と外側波の位相が同期するときの切削表面のモデル

ε が小さい条件) では、切削力の周期的変動と切削厚さの周期的変動の相互作用が互いに強め合い、かえって振動の成長が助長される可能性がある。したがって、このような位相の一致は避ける必要がある。

図11は L=315~495mm (7D~11D) の範囲で安定に加工できる最大の切込み量 (以下、「安定限界切込み量」) をそれぞれ解析した結果である。表4には参考値として通常の旋削で各Lにおいて安定限界切込み量よりも若干大きな切込みを与えた場合に生じたびびり振動の波長 λ_1 、内外波の切削速度方向距離の差 λ_2 、内外波の位相差 ϕ の解析値を示した。同表にはこれらのびびり振動の条件下において、提案手法で $q=2.0\text{mm}$ とした場合の外側波とインサートBの移動軌跡との位相差 ε の計算値も示してある。表4からL=315~495mm (7D~11D) では、6.1~13.2mm程度の波長の異なる再生びびり振動が生じるが、図11よりいずれのLの場合でも提案手法 ($q=2.0\text{mm}$) を用いることでびびり振動に対する安定性の向上が期待できることがわかる。なお、Lが大きくなると系の剛性が低下するにも拘わらず、この範囲

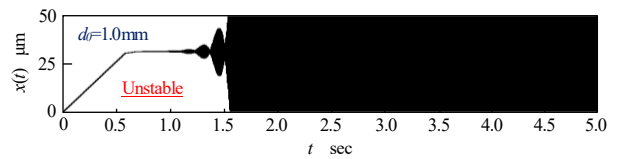


図10 提案手法に対する解析結果 (q=2.5mm)

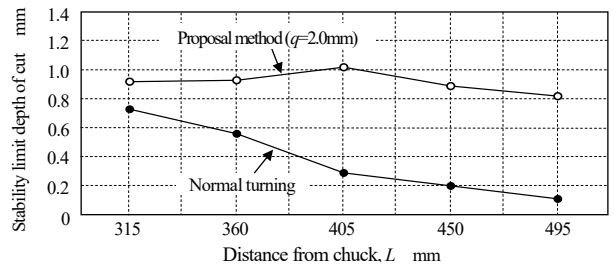


図11 各Lでの安定限界切込み量の解析結果

表4 各Lでのびびり振動の周期的特性

L [mm]	λ_1 [mm]	λ_2 [mm]	ϕ [deg]	ε (when $q=2.0\text{mm}$) [deg]
315 (7D)	6.1	1.1	64.9	59.0
360 (8D)	7.5	1.9	91.2	76.8
405 (9D)	9.4	2.7	103.4	103.4
450 (10D)	11.0	3.2	104.7	124.4
495 (11D)	13.2	3.6	98.2	152.7

で提案手法における安定限界切込み量はあまり変化していない。そのためLが大きい条件ほど相対的にみてびびり振動抑制の効果は高くなっている。これは表4に示されるように、この範囲ではLが大きい条件ほど ε が大きくなっていることから、外側波とインサートBの移動軌跡との位相差が、切削厚さ変動(切削力変動)の周期性をより乱し、振動の成長を抑制するのに有利な位相差であったためと解釈される。

5 切削実験

5.1 実験装置および実験方法

図12に試作した工具の外観を示す。同図(a)は通常の旋削に用いた工具であり、実験では刃先高さを被削材中心に合わせて切削を行った。同図(b)は提案手法に基づいて試作した工具であり、シムを用いてオフセット量 q は2.0mmに調整した。切削条件は表2に示したとおりであり、送り量 f の設定条件である0.1mm/revに合わせて、オフセット量 p は $0.097\text{mm} (= f - (2q/\pi D)f)$ に調整した。この調整は、測定顕微鏡(株式会社ミツトヨ, MF-A2010C)の下で行った。ただし、 $\pm 5\mu\text{m}$

程度は調整の誤差が存在している可能性がある。工具シャンクは炭素鋼 S50C（調質材）で製作した。インサートには A, B ともに同じ超合金 P20 種スローアウェイチップ（厚さ：2.38mm, ノーズ R: 0.2mm）を用いた。工具諸元は、刃先高さを被削材中心に合わせた場合ですくい角 30°, 横切れ刃角 30°, 逃げ角 7° である。

切削実験には普通旋盤（株滝澤鉄工所, TAC510-L10）を使用した。びびり振動安定限界の特性は、図 4 で示したように旋盤のチャックに炭素鋼 S45C の磨き丸棒（HBW229, 直径 D: 45mm）を取付け、心押し台を使用せずに片持ち支持にして長手外周旋削する方法で調べた。既述したように、被削材の突出し量 L によって支持剛性を調整し、通常の旋削と提案手法による旋削のそれぞれについて、L=315~495 mm (7D~11D) の範囲での安定限界切込み量を調べた。なお、切削実験においてはびびり振動に関する切削状態を以下のように判別した。

- ・不安定：振動が急速に増大し、加工が困難となる。
- ・臨界：長手方向 20mm の切削を安定して行うことが可能であるが、切削面に微かにびびり痕が観察される。
- ・安定：長手方向 20mm の切削を安定して行うことができ、かつ肉眼では切削面にびびり痕が観察されない。

5. 2 実験結果

図 13 に被削材の突出し量 L に対する切削状態の実験結果を示す。不安定となるびびり振動はいずれの実験でも被削材系で発生した。同図からいずれの L の場合も提案手法を用いることで通常の旋削と比較して安定限界切込み量は大幅に増大しており、再生びびり振動の抑制に本手法が有効であることを示している。切削後の加工面、切りくずの例として、図 14, 図 15 に L=450mm, $d_0=0.5$ mm での結果を示す。この条件で通常の旋削を行うと切削開始直後から激しいびびり振動を生じるが、提案手法の場合ではびびり振動が発生しない。なお、提案手法では図 15 (b) に示されるようにインサート B の切れ刃が関与して微細な切粉が生じる。

図 11 と図 13 を比較すると、通常の旋削においても提案手法においても実験での安定限界切込み量の方が小さくなっている。実際の切削では工具形状にノーズ R 部が存在するため、切削状態を切削幅全域にわたって一様であると仮定して得た解析結果よりも安定限界は小さくなるものと考えられる。しかしながら、通常の旋削に対する効果として、定性的には解析結果と同様の実験結果が得られており、提案手法によって実際に再生びびり振動が抑制されることが示された。なお、提案手法に対する解析では、この範囲で L が大きくなっても安定限界切込み量はあまり低下していないが、実験では被削材の剛性が低下するにつれ安定限界切込み量は如実に低下しており、この点の傾向は若干一致していない。この要因として、オフセット量 p, q の調整誤差や、切削力による被削材の y 方向への逃げに起因した両インサートの実切込みの差異などが影響した可能性が考えられるが、現時点では定かではない。この点については、今後これらの影響も考慮した理論モデルを構築するなどして検証していきたい。

6 まとめ

低剛性の被削材の旋削加工において、インサートを二つ用いることで再生びびり振動を抑制する方法につ

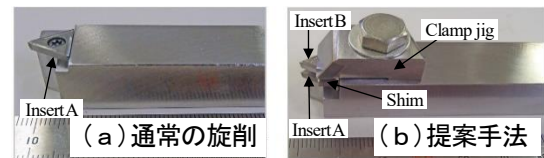


図 12 試作した工具

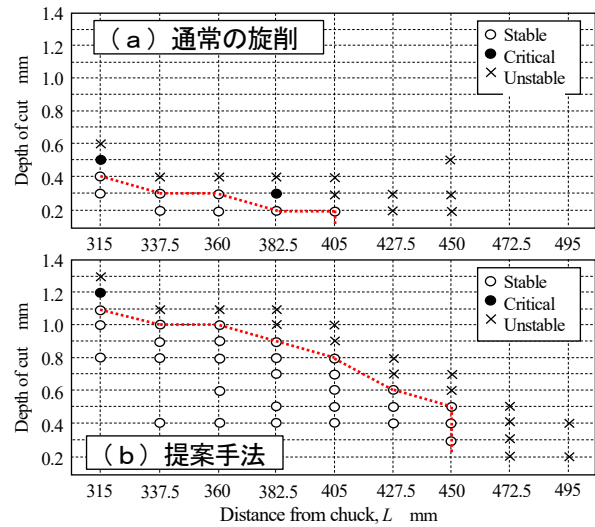


図 13 実験結果

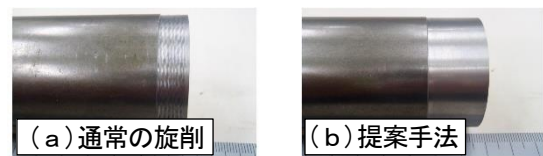


図 14 加工面の例 (L=450 mm, $d_0=0.5$ mm)

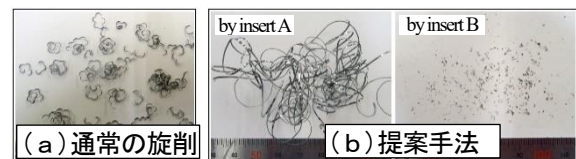


図 15 切りくずの例 (L=450 mm, $d_0=0.5$ mm)

いて提案した。本報では提案手法の手順とインサートの配置について説明し、単純化した理論モデルを用いて再生びびり振動に及ぼす効果を考察した。またシミュレーションによって本手法で再生びびり振動が抑制できることを示し、実際に剛性の低い被削材に対する旋削加工実験を行ってその有効性を確認した。提案手法に基づく工具は、現場でも比較的容易に作製できるものであり、インサートの配置に調整を要するものの特別な付加装置も必要としないため、加工現場におけるびびり振動防止に寄与するものと考えられる。

参考文献

- 1) 星鐵太郎：びびり現象，工業調査会，(1977)。
- 2) 小島拓也ほか：不等ピッチ／リードエンドミルによるびびり振動の抑制，2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2011) 315。
- 3) Otto A: Application of Spindle Speed Variation for Chatter Suppression in Turning. Cirp J Manuf Sci Technol 2013;6:102-9.
- 4) 田中貴暁：工作機械の振動と対策「加工ナビ」の使用によるびびり解消・生産性向上の事例，ツールエンジニア，58,11 (2017) 28。

摩擦特性を付与した表面テクスチャリングの検討（第1報）

松島 康晴

表面テクスチャリングとは本来の表面状態とは異なる特性付与や視覚品位向上などを目的とした技術であり、工業にとどまらず、さまざまな分野で適応が行われている。そこで本研究では、同技術によるパターン形状が摩擦特性に与える影響を調べるため、複数のパターンモデルのサンプルを作製し、乾式および潤滑条件下での摩擦試験による基礎データを取得した。その内容について報告する。

1 緒言

物体の接触には必ず摩擦が存在しており、固体だけでなく流体中でも同様である。摩擦特性を最も端的に表すのが摩擦係数であり、特に運動中のものは動摩擦係数と呼ばれる（以下、摩擦係数は動摩擦係数を指す）。要求される摩擦係数の値は使用用途によって異なり、摺動部は低摩擦が望まれている一方で、タイヤのブレーキパッドには動きを制御できる高摩擦が必要とされている。摩擦係数の最適化には、材料変更や熱処理、コーティング等が有効であるが、仕様変更や外注先の増加などの観点から、ハードルが高い場合が多い。

一方で、表面テクスチャリングは機械要素の表面改質技術の1つとして位置付けられ、最もシンプルな表面処理プロセスである¹⁾。同技術により摩擦係数を最適化することができれば、製造工程において工程追加のみで部品の性能向上につながることを期待できる。

ここで、金属同士の摩擦を考えた場合、摩擦で発生した摩耗粉の接触面への停滞が凝着あるいは焼付きを引き起こす²⁾との報告がある。そこで接触部表面にあらかじめ、摩耗粉を排出できる凹凸を付与することで凝着や焼付きの抑制が期待できる。一方で、金属間の接触面積の減少により、接触面圧が増大し、摩耗促進やローレット模様で見られる食い付きによる摩擦係数の上昇も考えられる。加えて、実際の摺動部には潤滑剤が存在するため、現象は極めて複雑である。そのため、摩擦特性を把握するには実測データが必要不可欠である。

本研究では、表面テクスチャリングを金属平面に施し、周期的なパターン形状が摩擦係数と摩耗に与える影響について基礎的な知見を得るため、実験および検討を行った。

2 実験方法

2.1 サンプル加工

パターン形状はディスク状の平板表面（材質 SUS304 ブリネル硬さ HBW=155）に対し、切削加工によって作製した。2×2mmの単位セルとし、異なる3種類のパターンモデルをCADで作成後、CAMにて加工パスを生成した。使用したシムテムはそれぞれ、hyperCAD, hyperMILL (OPEN MIND 製) である。図1にCAD上の四角錐から成るパターンモデルを示す。サンプルサイズは30×30×5mmであり、超硬ボールエンドミル（φ4mm, φ2mm, φ1mm）を用いて荒・中・仕上げの3工程に分けて加工した。図2に切削加工後の各サンプルの代表箇所を接触式の表面粗さ・輪

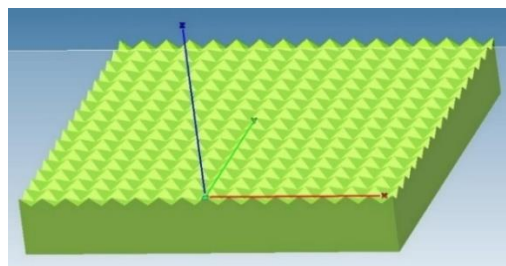


図1 四角錐状のパターンモデル

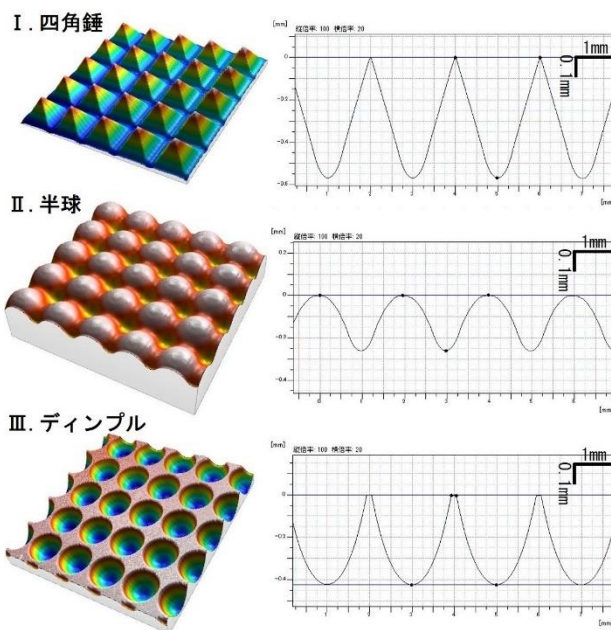


図2 作製サンプルの三次元輪郭形状と断面形状

郭形状測定機（東京精密製 Surfcom-Crest）で測定した三次元輪郭形状とそれぞれの断面形状を示す。

2.2 摩擦試験方法

作製したサンプルに対し、摩耗試験機（オリエンテック製 EFM-III-EN）を用いてリングオンディスク方式で摩擦試験を行った。相手材料はS45C（ブリネル硬さ HBW=179）で、リング形状とし、JIS K 7218（3. 摩擦試験方法の種類 A 法）に準拠したサイズである。接触面は80番のサンドペーパーで研磨し、Ra 0.8 μm 程度に調整した。試験条件は表1のとおりである。摩擦係数は、鉛直方向の負荷荷重と水平方向の摩擦力を各々のロードセルから 1Hz

周期でサンプリングし、算出した。摩擦試験前後でのディスクとリングの重量変化を電子天秤で計測している。摩擦試験の潤滑方法は乾式と潤滑の2方式で行い、使用した潤滑剤は極圧添加剤を含まない潤滑油(粘度 VG 68)を約1ml、試験前に塗布して行った。

表 1 摩擦試験条件

回転数	500 min ⁻¹
試験時間	900 s
摩擦距離	537 m
負荷荷重	9.8 N(1.0 kgf) ※1
接触面圧	0.124 MPa ※2
潤滑方法	①乾式 ②潤滑 (パラフィン系潤滑油 VG 68)

※1 治具重量除く、※2 リングの断面積より算出

3 試験結果

図3に摩擦試験で得られた摩擦係数の時間推移を示す。比較のため、凹凸形状をつけていないサンプル(切断砥石の切断面 Ra 0.3 μm, 以下、切断面と表記)も加えた。図中の太線部は10点移動平均値である。乾式条件では摩擦係数は0.5~0.7程度であり、潤滑条件では0.1~0.2の範囲であった。

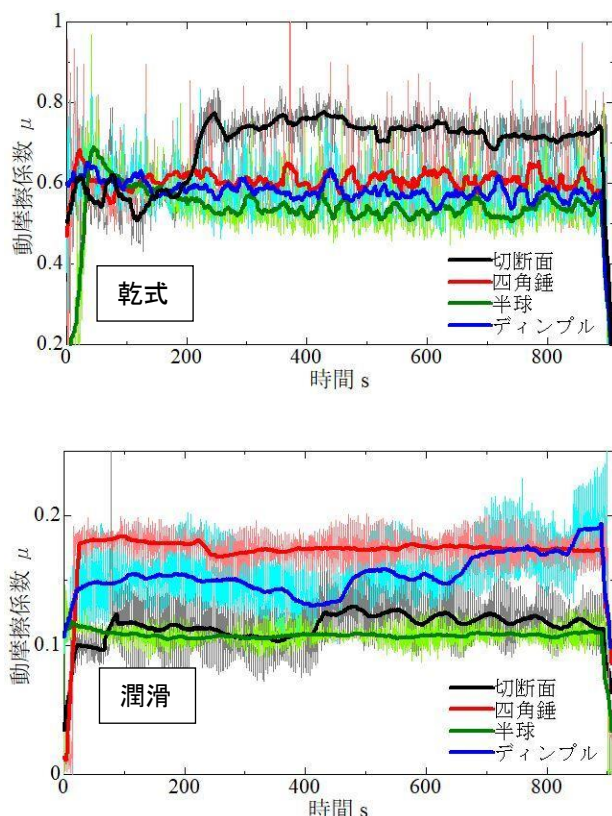


図3 リングオンディスク試験での摩擦係数の推移 (上段: 乾式 下段: 潤滑)

つぎに各サンプルのディスクとリングの摩擦試験前後の重量減少量を図4にまとめる。乾式での重量減少量は潤滑時に比べて、2桁の開きがあった。

4 考察

4.1 乾式

表面テクスチャを施したいずれのサンプルも切断面よりも摩擦係数が低い状態で推移し、切断面のみでディスク側、リング側ともに焼付きが発生した。その観察画像が図5【a】である。摩擦試験では試験開始より約200秒後、摩擦係数が増加していることから、焼付きが発生し始めたかと推察される。

一方で、摩擦による重量減少量がいずれの表面テクスチャのサンプルでも切断面と比べ、1桁程度大きい結果となった。図5【b】に示すように深いリング摩擦痕が入り、テクスチャ形状が大きく削り取られている。乾式条件では表面テクスチャの有無によって摩擦形態が異なることを示唆している。つまり表面テクスチャによる接触面積の減少により、面圧が高くなり、硬度差の小さいリング、ディスクとも摩擦が急激に進行した。一方、切断面では摩擦粉が摩擦面に滞留することで焼付きの発生へと至ったと考えられる。パターン形状で比べると摩擦特性に明確な差は現れなかったが、四角錐が最も摩擦係数が高く、半球が最も低い摩擦係数となった。

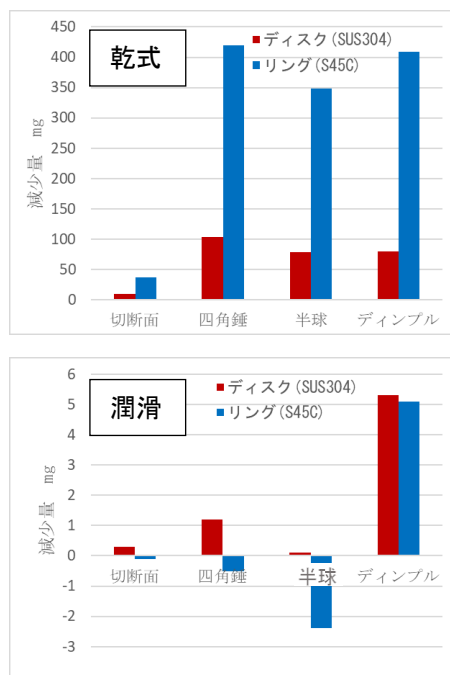


図4 各試験体の摩擦試験前後の重量減少量 (上段: 乾式 下段: 潤滑)

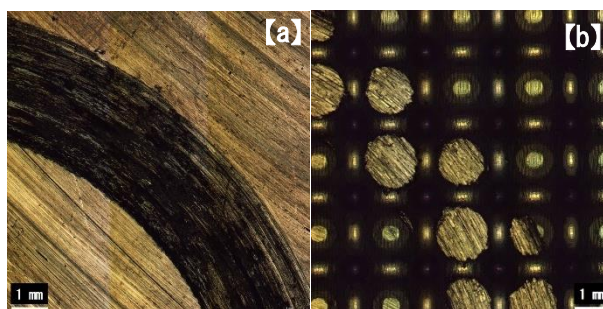


図5 乾式摩擦試験後のディスクの表面状態 (【a】切断面 【b】半球)

4. 2 潤滑

摩擦係数は全サンプルで四角錐が最も大きくなった。潤滑剤を塗布した場合、リングとディスクは接触している境界潤滑であるが、摩擦面と潤滑剤との相互作用により、四角錐部が弾性変形挙動することで、摩擦抵抗となって表れたと推察される(図6)。プラスチックの低荷重域において摩擦特性は塑性的接触変形とするよりも弾性的接触変形とした方がより明快に説明できるという報告³⁾もあり、軟質で高延性な金属の錘状部では、前述と同様の現象が起きた可能性がある。

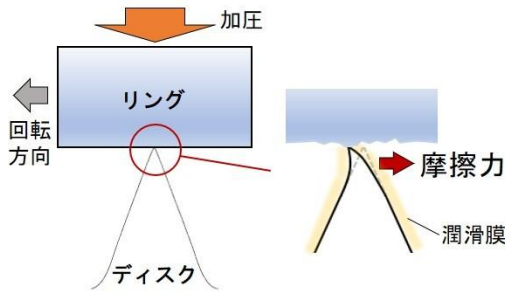


図6 潤滑摩擦時における四角錐接触部の模式図

つぎにディンプルのパターンではディンプル部が油膜に対し、著しく深い形状であったことから、油溜まりとしての作用よりも、過剰に油や摩擦粉を保持してしまい、潤滑油の循環や摩擦粉の排出性を悪くした一因によるものと考えられる。重量減少量も他のサンプルに比べ、最も大きい結果であった。

最後に半球では、潤滑油、摩擦粉ともに自由に動けるクリアランスが十分に確保され、かつ四角錐よりも変形しにくい形状をしていることから、試験全体を通して、最も低い摩擦係数で推移したと推察される。切断面と比べて摩擦係数の振幅成分も小さい、安定した状態であった。

5 まとめ

SUS304 表面に表面テクスチャリングを施し、S45C に対するリングオンディスク方式での摩擦係数測定を行った結果、下記の知見が得られた。

- ・乾式の摩擦測定においては、表面テクスチャリングを施すことで、凹凸なしの切断面よりもいずれも摩擦係数は低く、焼付きの発生を抑えられた。一方で、接触面積が減少したことによる面圧増加で切断面に比べ、摩擦量はディスク・リングとも大幅に増加した。
- ・半球状のテクスチャリング形状は乾式、潤滑のいずれも未加工や他のパターン形状と比較しても最も低い値で推移することが判明した。特に潤滑状態では振幅成分も少ない安定した状態であった。

参考文献

- 1) 佐々木信也;潤滑経済, 2010年10月号 (No. 542), 2(2010)
- 2) J. C. Enthoven and H. A. Spikes; Visual Observation of the Process of Scuffing, Tribology Series, **30**, 487-494(1995).
- 3) K. V. Shooter and D. Tabor ; Proc. Phys. Soc., **65 B**, 661 (1952)

摩擦攪拌点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) の薄板適応に関する基礎的知見を得るため、板厚 0.1 mm の薄板 (SUS304) に対する突合せ点接合条件の検討を行った。その結果、接合には成功したが、荷重が過度に上昇して接合部に穴が空く場合が多くあるなど、接合の成否は不安定であった。そして、接合の成否に関わらず、攪拌発生時にはツールへの供試材の凝着が観察され、この凝着が接合時の荷重上昇に影響を及ぼしているものと考えられた。そこで本報では、前報とはツールの材質を変更して実験を行い、凝着の発生が接合に及ぼす影響を検討した。その結果、攪拌時の過度な荷重上昇は凝着の発生に起因するものであり、凝着の生じにくい材質のツールを用いることで、安定した接合ができることがわかった。また、接合時の温度についても検討した結果、薄板の接合では数百度程度の低い入熱量で接合が可能であることがわかった。

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て攪拌し、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、熔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・スパッタが発生しないことなどが挙げられ、鉄道や航空機などの分野で実用化されている¹⁾。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。

そこで前報²⁾では、FSW による薄板の突合せ接合に関する基礎的知見を得るため、板厚 0.1 mm の薄板 (SUS304) に対する突合せ摩擦攪拌点接合の条件を検討し、接合が可能であることを示した。しかし、接合の成否は不安定であり、攪拌が起こっても荷重が過度に上昇して接合部が欠落する場合が多くあった。そして、接合の成否に関わらず、攪拌発生時にはツール (SKH51) への供試材の凝着が観察された。この凝着の発生は、接合時の荷重上昇に影響を及ぼしているものと考えられる。そのため、接合の安定性を向上するには、接合時の凝着の影響について検討することが不可欠であった。

そこで本報では、ツール材に供試材 (SUS304) との凝着が発生しにくいと考えられるタングステンを使用し、前報のツール材である SKH51 と比較することで、凝着の発生が接合に及ぼす影響について検討した。また、前報では検討していない接合の重要な要素として、温度がある。一般に鉄鋼材料の FSW では、摩擦熱でツール先端が 1000°C を超える高温となることが知られており、ツールの激しい損傷が問題となっている。また、接合時の温度を知ることは、凝着の影響を検討するうえでも重要である。そこで本報では、接合時の温度測定についても検討を試みた。

2 実験方法

2.1 接合実験

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 1 に示す。ツール先端に攪拌による材料の盛り上がりを抑制するため、半径 15 mm の球頭部を設け、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 SKH51 およびタングステンの 2 種類であり、いずれも直径 10 mm の丸棒から試作した。供試材として、板厚 0.1mm 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 2 に示すとおりであり、マシニングセンター (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、接合実験を行った。供試材の継手形状は突合せ形状とし、裏当て材には供試材との凝着防止のため、アルミナ製のセラミックプレートを使用した。セラミックプレートの下部にロードセル (エー・アンド・デイ, LC1205-K100) を設置し、接合時の荷重データを測定した。ツールの位置合わせは、ツールを静止状態で供試材に接触させ、規定の初期荷重が発生するまで下降した位置を原点とした。そして、一度ツールを供試材から離れたのち、回転させ、原点まで再び下降して摩擦攪拌点接合を行った³⁾。接合実験における接合の成否は目視で判断した。突合せ面が接合され、接合部に大きな穴が空いていないものを「接合」、接合部に大きな穴が空いた場合を「接合部の欠落」、突合せ面にツールの接触した痕はあるが、変形が見られない、または接合はしたが、自重で破断した場合を「攪拌不足」とした。接合条件は表 1 に示すとおりである。なお、本報では実験の再現性の向上を図るため、前報では管理していなかった押さえ治具固定ボルトの締め付けトルクを一定に制御した。締め付けトルクは、回転数 6000 rpm、初期荷重 50 N、ツール材質 SKH51 の条件で最も実験の再現性が高かった 17kgf/cm に統一した。

2.2 温度測定

図 3 に温度測定方法の模式図を示す。接合時の温度は、工具-被削材熱電対法を用いて、接合時に発生するツール-供試材間の熱起電力を測定し、温度に換算することで求めた。ツール (SKH51) と供試材 (SUS304) で熱電対を構成するため、ツール-チャック間および供試材-供試材固定治具間は絶縁物を介して電氣的に絶縁した。回転しているツール側からの熱起電力の取り出しは、ツ

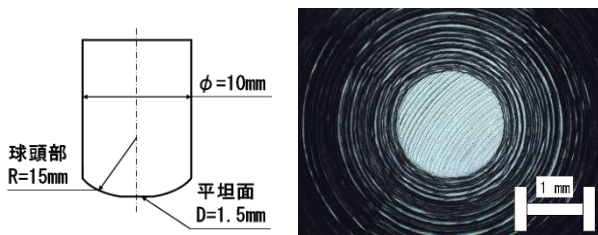


図1 ツール形状および平坦面拡大図

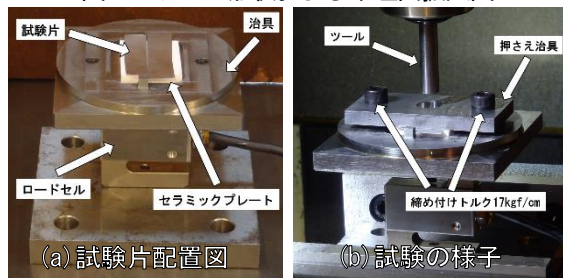


図2 接合実験の方法

表1 接合条件

主軸回転数 rpm	3000, 4500, 6000
初期荷重 N	25, 75, 100 (3000rpmのみ) 125 (4500, 6000 rpm)
押し込み速度 mm/min	0.5
接合時間 sec	1.5
締め付けトルク kgf/cm	17
ツール材質	SKH51 タングステン

ルに同材質 (SKH51) の板材を接触させ、その板材から導線を引き出すことを行った⁴⁾。板材が接触しやすいように、温度測定用のツールは図3のような段付き形状とした。ツール先端側の直径は9 mmであり、2.1節で使用したツールと同様に、その先端には半径15 mmの球頭部と直径1.5 mmの平坦面を設けた。熱起電力-温度の校正は、SKH51 および SUS304 の切りくずを用いて予め電気炉で行った。温度測定を行った接合条件は、主軸回転数 4500 rpm、初期荷重 75 N であり、その他の条件は、表1と同様である。本来であればタングステンについても温度測定を実施すべきであるが、本報では、まずは接合時の温度測定方法を確立することを目的に、SKH51 についてのみ実験を行った。

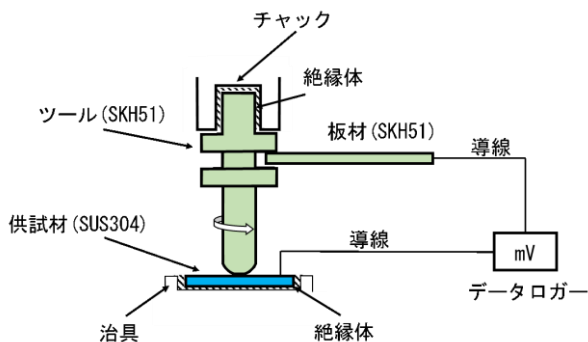


図3 温度測定の模式図

3 実験結果と考察

3.1 接合実験の結果

図4は、いずれのツール材を用いても接合に成功した場合の代表例として、回転数 4500 rpm、初期荷重 75 N の条件における接合実験後のツール外観をそれぞれ示したものである。同図 (a) は SKH51 であり、同図 (b) はタングステンである。前報でも示したように SKH51 の場合には、ツール先端への供試材の凝着が顕著であり、また平坦面だけではなく、球頭部においても広い範囲で供試材との接触痕が見られる。一方、タングステンの場合には、凝着の発生が大幅に減少しており、SKH51 で見られるような球頭部の接触痕も観察されない。図5は、このときの接合部の外観をそれぞれ示したものであるが、同図 (a) に示す SKH51 の場合には、凝着およびツール球頭部の接触に起因して、接合部の面積がツール平坦面よりかなり大きくなっている。これに対して、同図 (b) に示すタングステンの場合の接合部の面積は、ツール平坦面とほぼ同じであり、攪拌がほぼ平坦部のみでなされていることがわかる。図6は、このときの接合時の荷重を比較した結果である。タングステンにおける接合時の荷重は、SKH51 に比べて非常に小さく、安定した接合がなされていることが確認できる。特に SKH51 の場合には、この図で時間が 2 秒を超えたあたりで荷重が急激に上昇している。

これらのことから、接合時に荷重が上昇して接合が不安定となる主な要因は、ツールへの供試材の凝着に起因するものと考えられる。そして、凝着が発生して荷重が過度に上昇することで、攪拌時の供試材自体の変形も大きくなり、SKH51 の場合で見られるようなツール球頭部への広い範囲での供試材の接触が生じるものと推察される。したがって、安定した接合を行うためには、凝着が発生しない条件を選択する必要がある。

前述した内容を補足する結果として、図7 (a), (b) に回転数 6000 rpm、初期荷重 125 N の条件における接合実験後のツール外観を比較した結果を示す。図8 (a), (b) はこのときの供試材の接合部の外観を比較したものである。いずれの図も (a) は SKH51 の結果、(b) はタングステンの結果を示している。また、図9にこのときの接合時の荷重を比較した結果を示す。この接合条件は、先ほど結果を示した条件よりも回転数および初期荷重が高く、攪拌が起こりやすい条件であるが、この条件で接合を行うと SKH51 の場合には凝着の発生に伴い、荷重が過度に上昇して接合部中心に穴が空いた。これに対してタングステンの場合には、この条件においても安定した接合がなされていることが確認できる。

一方で、タングステンでは接合しないが SKH51 では接合がなされる条件もあった。前報でも示したように、初期荷重が特に低い条件では接合の必要条件である攪拌が発生しない、または攪拌が不足し、突合せ面が接合しない傾向があった。このような初期荷重が低い領域では、SKH51 のみ接合が可能な条件がいくつか見られた。この場合の例として、回転数 4500rpm、初期荷重 25N における接合実験後のツール外観および接合部外観を比較した結果を図10 (a), (b)、図11 (a), (b) にそれぞれ示す。ここでも各図の (a) は SKH51 の結果、(b) はタングステンの結果を示している。荷重測定結果の図示は省略する。

両図から、両ツールとも攪拌が発生したと考えられるが、SKH51 の場合のみ接合し、タングステンの場合は、突合せ面がほとんど変形せず、接合しなかった。また、この条件においても、SKH51 の方が、タングステンに比べ、ツール先端への供試材の凝着量が多い。したがって、このような攪拌が起こりにくい条件では、凝着が発生して凝着物が存在することで、かえって攪拌が促進され、接合が成功しやすい傾向がある。しかしながら、凝着が生じたツールで安定な接合を継続することは困難であると考えられることから、良好な接合がなされたとは言い難い。

本報で実施した全ての接合条件における SKH51 およびタングステンでの接合の成否を図 1 2 にまとめる。先ほど述べたように初期荷重の特に低い領域で SKH51 のみ接合に成功したケースもあったが、基本的には、凝着の発生しにくいタングステンを用いることで安定した接合を行うことが可能であった。

以上のことから、接合の安定性を向上するためには、凝着が発生しにくいツール材質や条件の選択が重要であると考えられる。この点については今後、供試材である SUS304 との親和性が特に低いチタン合金をツール材として取り上げるなどして、さらに検討を進める予定である。

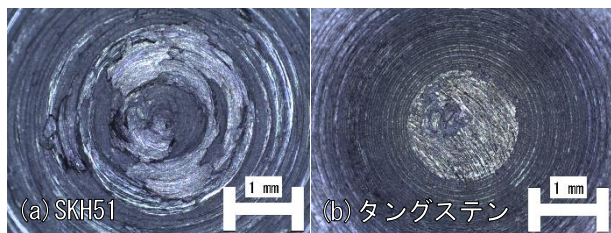


図 4 ツール拡大写真
(回転数 4500 rpm, 初期荷重 75 N)

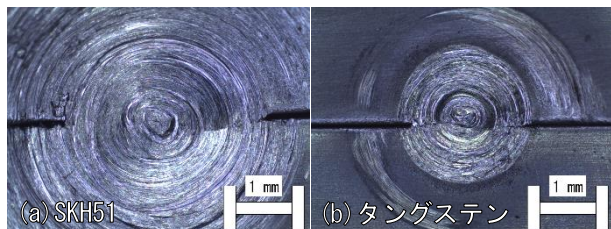


図 5 接合部拡大写真
(回転数 4500 rpm, 初期荷重 75 N)

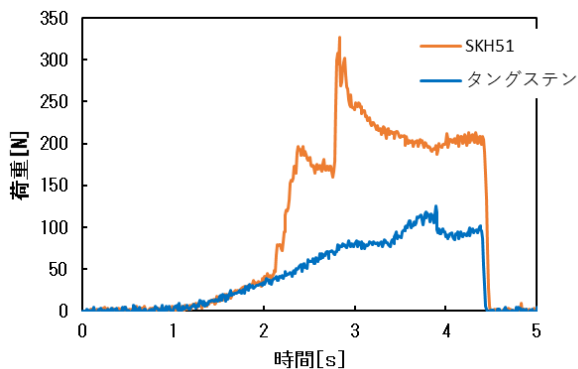


図 6 荷重測定結果 (回転数 4500 rpm, 初期荷重 75 N)

3. 2 接合時の温度

図 1 3 に、ツール材として SKH51 を用いたときの接合

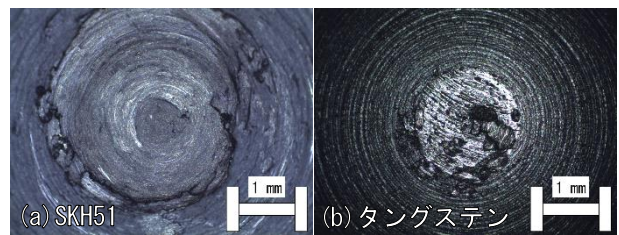


図 7 ツール拡大写真
(回転数 6000 rpm, 初期荷重 125 N)

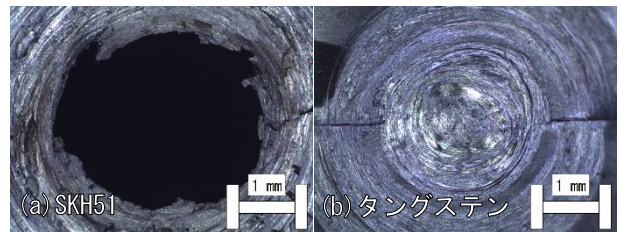


図 8 接合部拡大写真
(回転数 6000 rpm, 初期荷重 125 N)

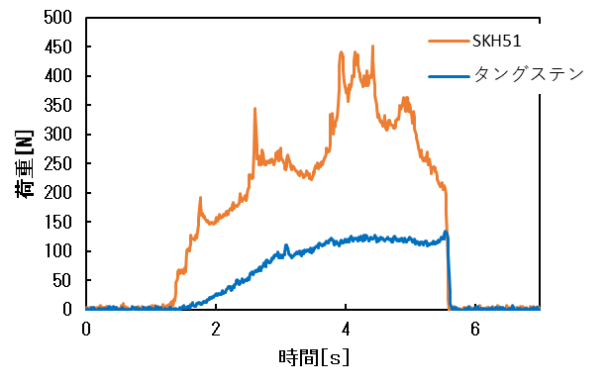


図 9 荷重測定結果 (回転数 6000 rpm, 初期荷重 125 N)

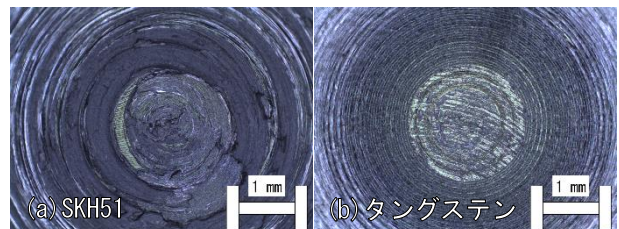


図 10 ツール拡大写真
(回転数 4500 rpm, 初期荷重 25 N)

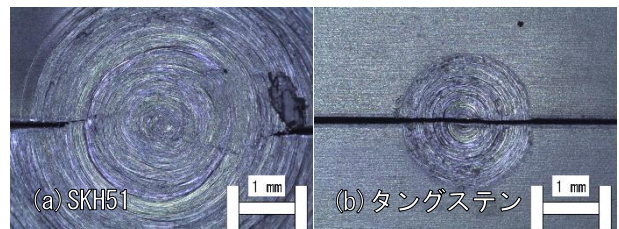


図 11 接合部拡大写真
(回転数 4500 rpm, 初期荷重 25 N)

時の温度変化を示す。接合の条件としては、図 6 で荷重測定を実施した条件と同じである。図より、接合時の温度は 250 °C 程度であった。一般に鉄鋼材料の FSW では、ツール先端が 1000 °C を超える高温に晒されることが知られているが、板厚が 0.1 mm の薄板の場合では、大幅に低い入熱で接合が可能であることがわかった。

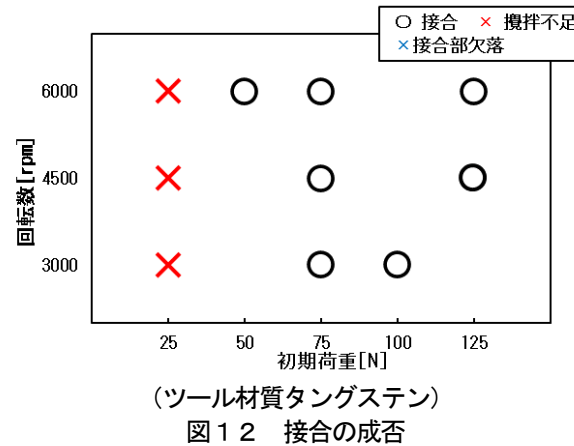
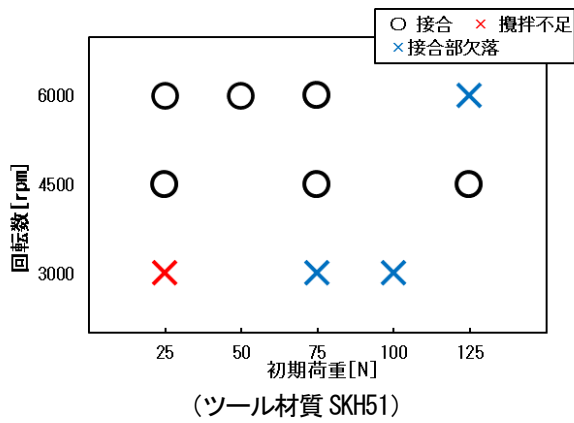


図 12 接合の成否

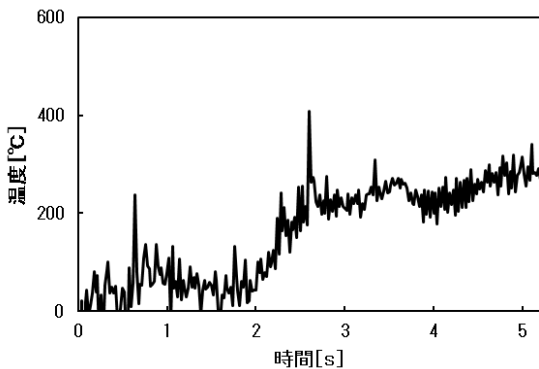


図 13 接合時の温度

(回転数 4500 rpm, 初期荷重 75 N, ツール材質 SKH51)

したがって、薄板の場合では、鉄鋼材料の FSW で通常問題となるツールへの熱的負荷が小さく、適用できるツール材質などの自由度は比較的高いと考えられる。

4 結言

FSW による板厚 0.1 mm の薄板(SUS304)に対する突合せ点接合について、凝着の発生が接合に及ぼす影響を検討した。また、接合時の温度についても検討を行った。本報で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 攪拌時に荷重が過度に上昇して接合が不安定となる要因は、ツールへの供試材の凝着である。
- (2) 凝着が発生しにくいツール材質を選択することで、安定した接合を行うことができる。ただし、攪拌が起こりにくい条件では、凝着の発生によって、かえって接合しやすいつ場合がある。
- (3) 板厚 0.1 mm の薄板を接合する場合には、数百度程度の低い入熱量でも接合が可能であり、FSW で通常問題となるツールへの熱的負荷は小さい。

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, p36-p38, (2020)。
- 3) 村岡稔基：薄板オーステナイト系ステンレス鋼の突合せ摩擦攪拌点接合，(2020)。
- 4) 小川崇之，八代毅，笹原弘之：CFRP の高速エンドミル加工における切削温度と工具摩耗，2010 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，p283-p284, (2010)。

可食原料を利用したフィルムの試作(第一報)

—米粉フィルム作成方法の確立とその性能評価—

大西 茂彦

石油由来のプラスチックフィルムの代替として、米粉を原料とした可食フィルムの作成を試みた。米粉を水に懸濁して加熱・糊化させたゲルを、フィルムアプリーケーターを使ってアクリル板上で0.6 mm厚に引き伸ばし、60°Cで乾燥させ米粉フィルムを作成した。この方法で作成したフィルムは脆く、アクリル板からの剥離が難しかったため、可塑剤の使用を検討ところ、D-ソルビトールの添加が剥離性と突き刺し強度の改善に有効であった。次に、たんぱく質を架橋するトランスグルタミナーゼ製剤を添加してフィルムを作成したところ、突き刺し強度が無添加区と比較して1.9倍向上した。以上の結果から、米は可食フィルム原料の候補として有望であることが確認できた。

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、自然界における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⁾。研究されている代替素材の中で、炭素循環に組み込まれ、再生可能資源である農産物は、環境上の利点と持続可能性を兼ね備えており注目されている²⁾。

農産物由来の多糖やたんぱく質は、鎖状分子構造を持つ高分子化合物で、フィルム形成能を有するものが多い。また、摂食可能で、環境中でも速やかに分解されるという利点がある。このような食品のうち、でんぷんは代表的な植物性多糖類であり、その豊富さ、安価さ、優れた製膜能力から、フィルムの開発に広く利用されている²⁾。

本研究では、可食フィルムの原料として、でんぷんを主成分とする米を選択した。米は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り、でんぷんと同様フィルム作成が可能と考えられた。フィルムに使用する米は、砕米のような付加価値の低いもので十分であり、価格や供給量の面から石油の代替原料として有望であると考えられる。本報告では、米粉フィルムの作成条件、可塑剤の選択およびトランスグルタミナーゼ添加の効果について報告する。

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。精米した米500 gを2時間水道水に浸漬後、ざるで水切りし、これを食品乾燥機(TTM-435, 東明テック)で45°C, 24時間乾燥した。乾燥した米を卓上型製粉機(A-8型, 國光社)で製粉し、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、富士フィルムと光純薬製のグリセロール(試薬特級)、トレハロース(試薬特級)、およびソルビトール(試薬一級)を使用した。トランスグルタミナーゼ製剤は、アクティブコシキープ(STG-M, 味の素)を使用した。

2.2 フィルム作成

米粉5 gを200 mL容三角フラスコに入れ、水を加えて100 gとした。可塑剤を添加するときには、米粉秤量時に1.5 gを加え、可塑剤の重量分、水の添加量を減じた。マグネティックスターラーで三角フラスコ中の米粉懸濁液を500 rpm, 1時間攪拌後、三角フラスコを95°Cの湯浴中に移し、1時間加熱・糊化(ゲル化)させた。糊化後、三角フラスコを45°Cの湯浴に移し、2時間保温した。トランスグルタミナーゼ製剤を使う場合は、45°Cの湯浴中1時間保温した米粉ゲルに添加し、さらに45°C1時間マグネティックスターラーで攪拌して酵素反応させた。次に適量の米粉ゲルをアクリル板(250 mm x 250 mm, 5 mm厚)に乗せ、0.6 mm厚に調整した200 mm幅の膜圧調整機能付きフィルムアプリーケーター(064-10, オールグッド)(図1)で引き伸ばし、60°Cのオーブンで乾燥させてフィルムを作成した。試作したフィルムは、性能試験に供するまでシリカゲル乾燥材を入れたデシケータ内で保管した。

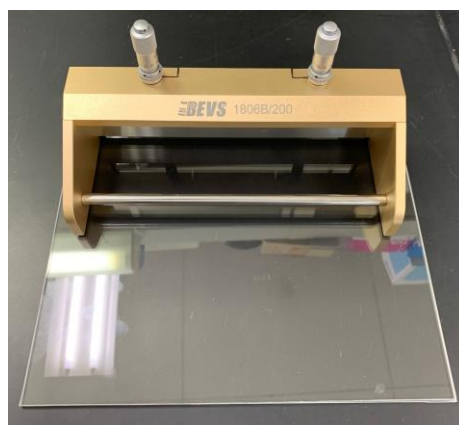


図1 キャスティングナイフとアクリル板

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。

突き刺し試験は日本工業規格 JIS Z 1707:2019 の方法に従い、クリープメーター(RE2-3305B, 山電)およびシー

ト突き刺し試験治具(RP-01, 山電)を使用して測定した(図2). 5か所からサンプリングしたフィルムを測定に供し, 平均値を突き刺し強度とした.

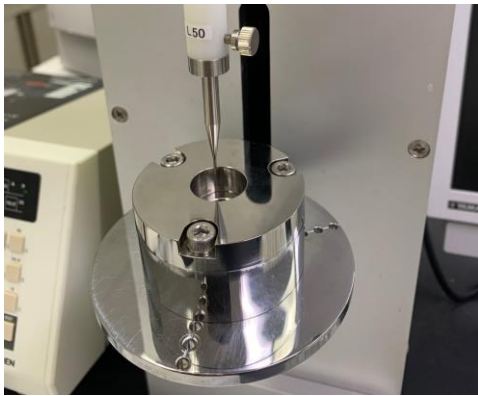


図2 突き刺し試験用治具 RP-01 (山電)

3 結果と考察

米粉を加熱・糊化して0.6 mmの厚さに引き伸ばして乾燥することで, 米粉フィルムを作成することができた. しかし, 米粉のみで作成したフィルムは脆く, アクリル板から剥離させにくかったことから, 可塑剤の使用を検討した.

可塑剤として, でんぷんフィルムの研究で汎用されているソルビトールとグリセロール^{2,3)}に加え, トレハロースの使用を試みた. 可塑剤の添加量は, 米粉の30% (米粉5 gに可塑剤1.5 g)とした. 3つの化合物のうち, トレハロースはゲルを乾燥した時点で, うろこ状の亀裂が入り, アクリル板から剥離することができなかった. グリセロールおよびD-ソルビトールはフィルム形成できたが, グリセロール添加区のフィルムは破れやすく, やや剥離が難しかった. 一方, D-ソルビトールを添加したフィルムは容易に剥離することができた. グリセロールおよびD-ソルビトールを添加したフィルムの厚さと突き刺し強度を表1に示した.

表1 可塑剤添加フィルムの厚さおよび突き刺し強度

可塑剤の種類	膜厚(mm) (±標準偏差)	突き刺し強度(N) (±標準偏差)
グリセロール	0.065 (±0.002)	0.098 (±0.051)
D-ソルビトール	0.062 (±0.002)	0.354 (±0.051)

フィルムの厚さは, グリセロール添加区とD-ソルビトール添加区で大差はなかったが, 突き刺し強度はグリセロールと比較してD-ソルビトールが3.6倍強かった. でんぷんベースのフィルムはグリセリンを用いて最も効果的に可塑化されるとの報告³⁾があるが, 今回の研究では異なる結果が得られた. 前述の通り, 米粉はでんぷんとたんぱく質からなる複合体であり, でんぷんのみからなるフィルムとは異なる挙動を示した可能性がある. 以上の結果から, 今後の研究には可塑剤としてD-ソルビトールを採用することにした.

次に, 米粉フィルム作成へのトランスグルタミナーゼの使用を検討した. トランスグルタミナーゼは, たんぱく質中に存在するグルタミンの γ -カルボキシアミド基

とリジンの ϵ -アミノ基を架橋して重合化する酵素であり, たんぱく質フィルムの性能向上に利用されている⁴⁾. 米粉は, でんぷんとたんぱく質からなる糖質たんぱく質複合体であり, たんぱく質を架橋するトランスグルタミナーゼを作用させることで米粉フィルムの強度向上が期待される. トランスグルタミナーゼ製剤100 mgを添加し, 45°C1時間酵素反応させ作成したフィルムと無添加区フィルムの厚さと突き刺し強度を表2に示した.

表2 トランスグルタミナーゼ添加効果

試験区	膜厚(mm) (±標準偏差)	突き刺し強度(N) (±標準偏差)
対照区	0.063 (±0.003)	0.342 (±0.073)
添加区	0.072 (±0.003)	0.636 (±0.036)

作成したフィルムの厚さは, トランスグルタミナーゼ製剤を加えたものが14%厚くなっていた. また, 突き刺し強度は1.9倍と大幅に向上していた. このことから, トランスグルタミナーゼの添加は, 米粉フィルムの強度向上に有効であることがわかった.

今後は, さらに強度等の性能向上を検討し, 食品包装フィルムに必要とされる性能を有する米粉フィルムの開発に取り組みたい.

4 結言

石油由来のプラスチックフィルムの代替として, 米粉ベースの可食フィルム作成を試みた. 可塑剤としてD-ソルビトールを添加し, 米粉を加熱糊化して成形することで米粉フィルムを得た. 次に, たんぱく質を架橋するトランスグルタミナーゼ製剤を添加してフィルムを作成したところ, 突き刺し強度が無添加区と比較して約2倍向上することを確認した.

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) R. Thakur, P. Pristijono, C.J. Scarlett, M. Bowyer, S.P. Singh and Q.V. Vuong: Starch-based films: Major factors affecting their properties, *Int. J. Biol. Macromol.*, **132**, 1079-1089 (2019).
- 3) M. E. Kramer: Chapter 4 Structure and Function of Starch-Based Edible Films and Coatings, in "Edible Films and Coatings for Food Applications," ed. by M.E. Embuscado and K.C. Huber, Springer, New York, pp.113-134 (2009).
- 4) N. Benbettaieb, J. P. Gay, T. Karbowiak and F. Debeaufort: Tuning the Functional Properties of Polysaccharide-Protein Bio-Based Edible Films by Chemical, Enzymatic, and Physical Cross-Linking, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **15**, 739-752 (2016).

ポリエチレングリコールを用いたセルロース微細繊維とプラスチックの複合化に関する研究

宇高 英二

ポリエチレングリコール (PEG) を利用して簡便にセルロースナノファイバー (CNF) と相溶化剤の複合化を行う方法を検討し、本実験の範囲において PEG 中の CNF の割合が 5 wt%以下の配合や、相溶化剤中の CNF の割合が 5 wt%以下になる配合が CNF の凝集抑制に望ましいとの知見を得た。また、作製した CNF と相溶化剤の複合体を LDPE と熔融混練して引張試験を行ったところ、前報に比較して弾性率、最大応力、最大応力時のひずみとも、ほぼ同等の結果が得られた。

1 緒言

近年、陸上生活のプラスチックごみがマイクロプラスチックとして海洋に放出される海洋プラスチックごみ問題が注目され、様々な企業でプラスチック使用量の削減や、生分解性材料への変換等の取り組みが行われている。身近な生分解性材料のひとつに、セルロースが挙げられる。セルロースは古くから紙やセロファンに使われ、最近では洗顔料や歯磨き等に含まれるマイクロプラスチックビーズの代替材料としても用いられている²⁾。また、プラスチックの使用量削減のために、セルロースをフィラーとして利用する取り組みは、WPC (Wood Plastic Composite) における木粉や、パルプ繊維をプラスチックに複合化する形で行われているが、近年ではパルプをさらにナノレベルまで解繊したセルロースの微細繊維、すなわちセルロースナノファイバー (以下 CNF) が新規材料として注目されている。CNF を上手く複合化させるとプラスチックの強度が向上する³⁾。これは、強度が向上した分だけ薄肉化を行い、同じ強度であればプラスチックの使用量を削減できることに繋がる。

これまで、CNF とプラスチックの複合化について、界面活性剤や固相せん断処理、エマルジョン等を用いた方法を検討し^{4)~6)}、前報⁷⁾では市販 CNF の水をポリエチレングリコール (以下 PEG) と置換して、市販の相溶化剤との複合化を試みたが、工程が煩雑で大量の処理には不向きであった。

そこで本報告では、PEG を用いたより簡便で CNF から水を取り除き、相溶化剤との複合化を行う方法について検討を行った。

2 試験方法

2.1 供試材料

前報⁷⁾同様、CNF にはビンフィス (WMA-10010, (株)スギノマシン)、相溶化剤にはハイワックス (1105A, 三井化学(株))、PEG には分子量 400 の PEG (ポリエチレングリコール #400, ナカライテスク(株)) を用いた。

2.2 CNF と PEG の混合・乾燥、及び相溶化剤との加熱混練

水を乾燥した後の CNF の割合が 5, 10, 20, 30, 50, 100 (PEG なし) wt%になる配合で、CNF10 wt%水懸濁液と PEG の合計が 20 g になるように 100 ml のディスポカップに

入れ、自転公転式ミキサーのマゼルスター (KH-V350, (株)クラボウ) で攪拌混合を行った。プログラムは自転 9, 公転 9, 時間 60 秒の条件である。

混合物を直径 100 mm のガラスシャーレに 10 g 入れて薄く全面に広げた後、60 °C に設定した熱風循環式の恒温器 (MOV-202F, サンヨー(株)) で 24 時間乾燥した。

乾燥した混合物をそれぞれ 0.1 g ずつ新しいシャーレに取り、相溶化剤 (以下、1105A) を 1 g 加え、盤面温度 160 °C に設定したホットスターラー (CHPS-170DFD, アズワン(株)) で加熱しながら、ステンレススプーンを使い、手で 10 分間混練した。

2.3 ニーダーによる CNF/1105A 複合体の作製

少量の混合や手による加熱混練で得た条件を基に、CNF/1105A の複合体をラボニーダーミル (TDR100-3, (株)トーシン) で作製した。CNF/PEG の混合物は、それぞれ 50g ずつを 370ml のカップに入れて自転 9, 公転 9, 時間 300 秒の条件でマゼルスターを用いて混合し、ステンレスバットに薄く広げて 60 °C の恒温器中で 24 時間乾燥した。CNF/PEG の混合乾燥物と 1105A は、ラボニーダーで加熱混練した後に、家庭用ミキサー (SKR-T, タイガー魔法瓶(株)) で水と攪拌混合してから減圧濾過器で水と分離する操作を 3 回繰り返して PEG を除去し、CNF/1105A の複合体を得た。

2.4 CNF/1105A 複合体と LDPE の加熱混練、及び試験片の作製

ホットスターラーで加熱したガラスシャーレ内でステンレススプーンを使い、手で CNF/1105A の複合体 0.2 g と 1.8 g の LDPE を 10 分間混練した。混練物 1 g を小型熱プレス機 (H300-01, アズワン(株)) により 0.6 MPa で加熱圧縮して厚さ 90~110 μm のシートを作製し、打ち抜きカッター (SDMP-1000, (株)ダンベル) と打ち抜き機 (SDL-200, (株)ダンベル) を用いて JIS K6251 のダンベル状 7 号形試験片をシートから打ち抜いて引張試験に供した。

2.5 複合体の評価

CNF/PEG の混合物や CNF/PEG/1105A の加熱混練物、PEG を水洗で除去した CNF/1105A の複合体、さらに LDPE を加えてシート化した試験片は、デジタルマイクロスコープ (KH-2700, (株)ハイロックス) で観察を行った。マイクロスコープには観察物の上下に偏光板を配置し、透過光で観察を行った。また、プレパラートで挟んだ試料をホット

スターラーで加熱して手早く移動し、溶融から凝固する過程を動画でキャプチャーし、その後静止画を編集することでCNFの分散状態の画像を得た。

引張試験にはオートグラフ (AG-50kND, 株島津製作所) を使用し、つかみ具間距離 20 mm, 試験速度 10 mm/min の条件で実施し、制御PCで弾性率と最大応力、及び最大応力時のひずみを求めた。なお、試験片数は5個である。

3 結果と考察

3.1 CNF/PEGの混合物、及びCNF/PEG/1105Aの加熱混練物

乾燥した各割合のCNF/PEG混合物は、図1に示すように、CNFの割合が高くなるほど乾燥収縮によるひび割れが発生し、100 wt%はシャーレから剥がれる程収縮した。マイクロSCOPEで観察したところ、CNFの割合が高いほど繊維の確認が困難になった。図2に5 wt%と50 wt%の観察画像を示す。5 wt%のようにCNFの割合が低いほど、CNF同士の間には存在するPEGが多くなり、CNF同士の凝集が

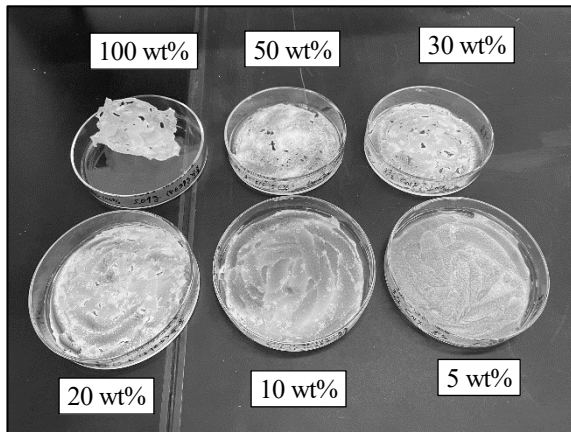


図1 CNF/PEG混合物の乾燥状態

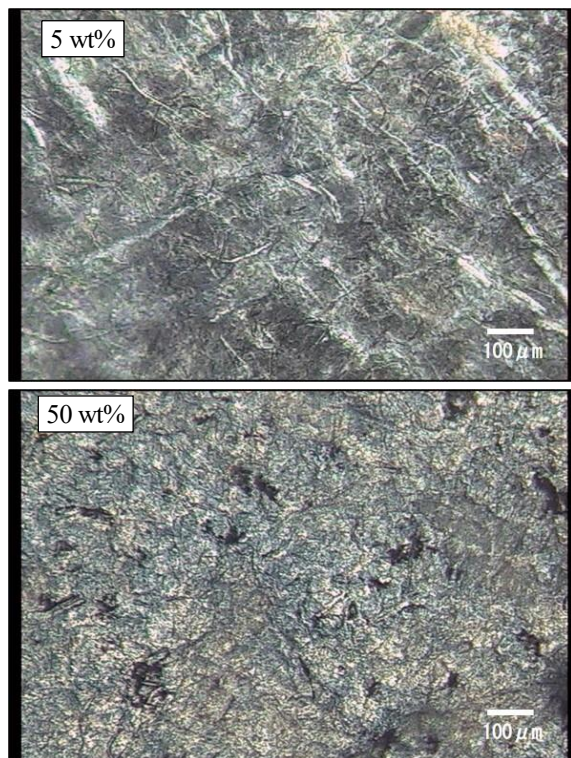


図2 乾燥後のCNF/PEG混合物

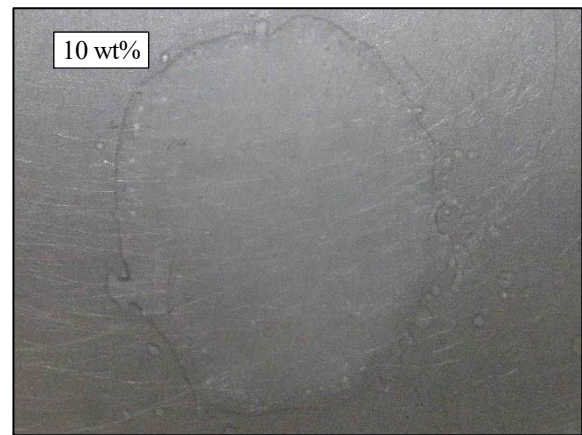
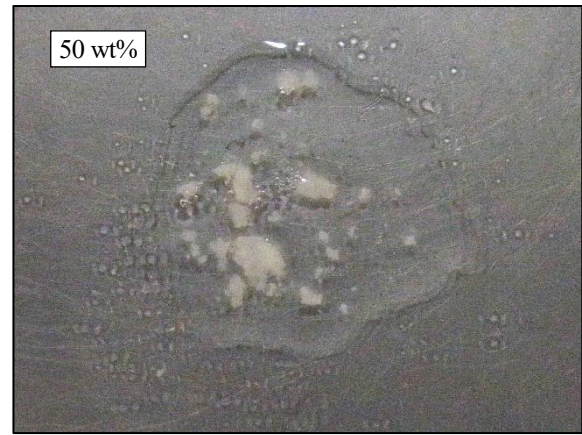


図3 溶融時のCNF/PEG/1105Aの加熱混練物

抑制されたと考えられる。

各割合のCNF/PEGの混合物に1105Aを加えて加熱混練すると、CNFの濃度が高いほど溶融した1105A中に凝集物が生じた。溶融しているCNF/PEG/1105Aの様子を図3に示す。

溶融状態においてCNFの割合が20 wt%以上では、目視で凝集物が確認できたが、5 wt%と10 wt%では全体が白く濁り、CNFが均一に分散していると考えられた。そこで、各試料を1mgずつプレパラートで挟み、加熱して溶融した状態と、冷えて凝固した状態を観察したところ、5 wt%ではCNFが比較的単独で存在しているが、10 wt%以上の濃度では高濃度ほどCNFが密集している様子が認められた。5 wt%と10 wt%の溶融状態と凝固状態を図4と図5に示す。溶融時は1105Aが融けてCNFのみが観察できるが、冷えて1105Aが凝固するとCNFが隠れ、観察できる量は少なくなる。加熱したプレパラートを手早くマイクロSCOPEに移動して観察することで、CNFの分散状態が確認できた。

以上の結果から、本実験の範囲においては、水懸濁液の状態であるCNFから水を乾燥するためにPEGを混合する場合、CNFの割合はPEG中で5 wt%以下にすれば、乾燥時の凝集を抑制し、目視可能な凝集物が生じない1105Aとの加熱混練が可能と判断した。また、1105Aに対するCNFの含有割合は5 wt%以下が望ましいと判断した。

3.2 ニーダーによるCNF/1105Aの複合体の作製

CNF/1105Aの複合体では、3.1でCNFの含有割合は5 wt%以下が望ましいと判断したが、前報⁷⁾の結果と比較するため、10 wt%で複合体を作製した。

いためか、図5のCNF/PEG/1105Aの溶融時よりもCNFが分散していることが確認できるが、部分的にCNFが密集している様子も見られる。

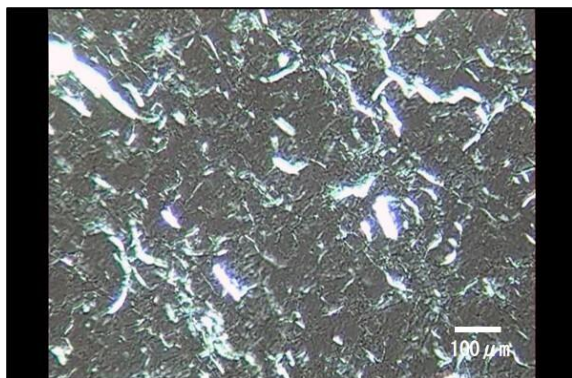


図8 LDPE+CNF/1105A 複合体溶融時のCNF分散状況

4 結言

前報よりもより簡便にCNFと相溶化剤の複合体を作製する方法として、PEGとCNF水懸濁液を自転公転式ミキサーで混合してから乾燥し、ニーダーで乾燥物と相溶化剤を加熱混練し、水洗してPEGを除去する方法を検討した。

本実験の範囲において、乾燥後のPEGに対するCNFの濃度は5 wt%以下が望ましく、相溶化剤とCNF/PEGの乾燥物を加熱混練する際は、相溶化剤に対してCNFの濃度が5 wt%以下が望ましいとの知見を得た。また、ニーダーで相溶化剤とCNF/PEG混合乾燥物を加熱混練した後、ブレードの回転数を変化させながら冷却すると、容易に水と懸濁できる状態のCNF/PEG/相溶化剤の加熱混練物が得られるこ

とが分かった。

得られたCNF/相溶化剤の複合体をLDPEと混ぜて引張試験を行ったところ、弾性率、最大応力、最大応力時のひずみとも、前報とほぼ同等の結果を得た。

より高濃度のCNF/相溶化剤の複合体の作製や、PEGの除去等の課題はあるが、比較的簡便な方法でCNFと相溶化剤を複合化する手法について知見を得ることができた。

参考文献

- 1) セルロースのおもしろ科学とびっくり活用，セルロース学会編，講談社，p. 32 (2012).
- 2) CLOMA VISION，クリーン・オーシャン・マテリアル・アライアンス CLOMA 事務局，p. 14 (2019).
- 3) セルロースナノファイバーの調整，分散・複合化と製品応用，技術情報協会，pp. 247-283 (2016).
- 4) 宇高英二：CNFとポリエチレンの複合化に関する研究，香川県産業技術センター研究報告，No. 18，pp. 34-37 (2017).
- 5) 宇高英二，藤澤茜：CNFとポリエチレンの複合化に関する研究(Ⅱ)，香川県産業技術センター研究報告，No. 19，pp. 39-42 (2018).
- 6) 宇高英二，森川彩花：CNFとポリエチレンの複合化に関する研究(Ⅲ)，香川県産業技術センター研究報告，No. 20，pp. 35-38 (2019).
- 7) 宇高英二，森川彩花：CNFとポリエチレンの複合化に関する研究(Ⅳ)，香川県産業技術センター研究報告，No. 21，pp. 23-26 (2020).

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） －屋外暴露試験およびUVB 促進暴露試験による耐候性評価－

森川 彩花, 横田 耕三

海洋プラスチックごみ問題は世界の喫緊の課題であり、二次マイクロプラスチック発生抑制のため、マイクロ化に至るまでのプラスチックの劣化挙動を把握することは重要である。本研究では、紫外線等の環境要因によるプラスチックの劣化機構に関する基礎的知見を取得するため、屋外暴露試験および紫外線促進耐候性試験機による促進暴露試験を実施し、耐候性評価を行った。その結果、特にPP、ABSでは、いずれの試験においても顕著な変化が認められ、環境要因によって劣化が起りやすいことが示唆された。また、促進暴露試験では、ほとんどの試料で屋外暴露6ヶ月と同程度の劣化を約160時間以内で再現することができた。

1 緒言

プラスチックは日常生活において欠かすことのできない材料であるが、適切に処分されず海洋に流出すると長期間にわたり環境中にとどまることとなり、海洋プラスチックごみ問題は世界の喫緊の課題となっている。2016年に世界経済フォーラム（ダボス会議）が発表した報告書によると、毎年約800万トンのプラスチックが海洋に流出しており、このまま対策が取られなければ、2050年までに海洋中のプラスチックごみが魚の重量を上回ってしまうという予想も示されている¹⁾。

国内では、持続可能な開発目標（SDGs）実現のため、2019年に開催されたG20大阪サミットにおいて、2050年までに海洋プラスチックごみによる追加的な汚染をゼロにすることを目指す「大阪ブルー・オーシャン・ビジョン」が宣言されるとともに²⁾、政府においてもプラスチック資源循環戦略が策定され、「3R+Renewable」の基本原則が示されたところである³⁾。また、2020年7月から廃プラスチック削減に向けた具体的アクションとして、全国でレジ袋の有料化も開始されている。

また、5mm以下の微細なマイクロプラスチックについては、海洋生物の誤食や吸着した化学物質が食物連鎖に取り込まれることによる生態系への影響が懸念されており¹⁾、環境省においても日本周辺海域等におけるマイクロプラスチックの分布状況や吸着するPCB等の有害化学物質の量について調査が実施されている⁴⁾。マイクロプラスチックは、洗顔料や歯磨き粉等のスクラブ材のように、製造段階からマイクロサイズである一次マイクロプラスチックと、プラスチックが自然環境中で破碎・細分化されて生成する二次マイクロプラスチックに大別される。前者は初めから微細なため自然環境中での回収は難しいが、後者は廃棄物管理やリサイクルの促進のほか、マイクロ化する前段階での回収も効果的である¹⁾ことから、二次マイクロプラスチック発生抑制のため、紫外線等の環境要因によるプラスチックの劣化機構を知ることは重要である。

既往の研究において、耐候性試験によるPE、PP等一部のプラスチックを例とした劣化に関する調査は報告されている⁵⁾⁻⁷⁾が、日常生活で広く使用されている種々

のプラスチックについて、幅広く劣化機構を比較検討した研究例は少ない。本研究では、汎用的に使用される7種類のプラスチックを用いて屋外暴露試験および紫外線促進耐候性試験機による促進暴露試験を行ったので報告する。

2 実験方法

2.1 試料

表1に示す厚さ1mmのプラスチック製板材7種を実験に用いた。

表1 試験に用いたプラスチック一覧

種類	略称	色	メーカー
高密度ポリエチレン	HDPE	白色	昭和電工
ポリプロピレン	PP	白色	マテリアルズ
ポリエチレン テレフタレート	PET	無色透明	住友ベーク ライト
ポリカーボネート	PC	無色透明	タキロン
ポリ塩化ビニル	PVC	無色透明	シーアイ
アクリロニトリル ブタジエンスチレン 共重合体	ABS	白色	東レプラス チック精工
ポリメタクリル酸 メチル	PMMA	無色透明	住化アクリル 販売

2.2 屋外暴露試験

香川県産業技術センター屋上で2021年6月上旬から6ヶ月間、屋外暴露試験を実施した。期間中の高松市の平均全天日射量および降水量、平均気温を図1に示す⁸⁾。期間中の合計日射量は約2700 MJ/m²であり平年並みであったが、8月の日射量は平年よりも15%程度少なく、降水量が多く、気温も低い傾向が見られた。

なお、試験状況を図2に示すが、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25~50cmの高さになるよう設置した。

2.3 促進暴露試験

促進暴露試験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 7350-3（C法）に準拠して実施した。試験条件を表2に示す。この条件は、UVB-313ランプによる8時間の照射（ステップ1）と4時間の凝

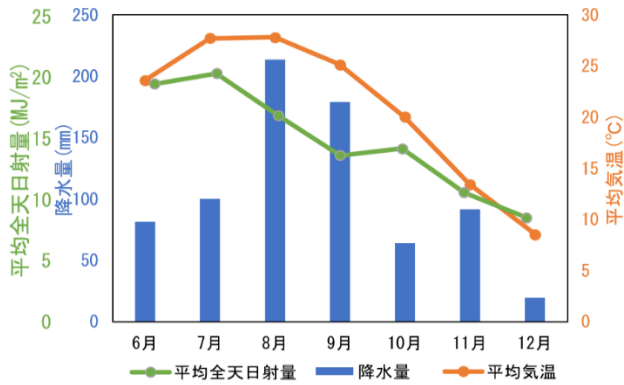


図1 屋外暴露試験期間中の高松市の気象データ



図2 屋外暴露試験の実施状況

表2 促進暴露試験における暴露条件

ステップ	暴露サイクル	ランプ	放射照度 (W/m ² /nm)	BP 温度 (°C) [※]
1	8時間照射	UVB-313	0.48	70
2	4時間凝縮	—	暗黒	50

※ブラックパネル (BP) 温度: 試料の表面温度を代表する温度

縮 (ステップ 2) を交互に繰り返すものである。なお、放射照度は 310 nm における値である。

2. 3 耐候性評価

色差 (ΔE^*_{ab}) は色彩測定装置 (SE7700, 日本電色工業(株)) により測定し、透過率は自記分光光度計 (U-4000, (株)日立製作所) により測定した。

また、試料表面を走査型電子顕微鏡 (SU3500, (株)日立製作所) で観察し、FT-IR (ALPHA, プルカー・オプティクス(株)) で赤外吸収スペクトルを測定した。以下、電子顕微鏡を SEM と表記する。

3 結果および考察

3. 1 外観変化および色差測定結果

屋外暴露試験を 6 ヶ月、促進暴露試験を 168 時間実施した各試料の外観変化を図 3 に示す。PP ではいずれの試験後も白変が見られ、PET, PC, PVC, ABS では程度に差はあるものの、いずれも黄変が認められる。PE, PMMA では顕著な変化が見られなかった。

黄変が認められた PET, PC, PVC, ABS について、試験前の試料を基準とした屋外暴露試験および促進暴露試験後の色差測定結果を図 4 に示す。促進暴露試験では PVC が最も大きく変化し、168 時間の試験で ΔE^*_{ab} の

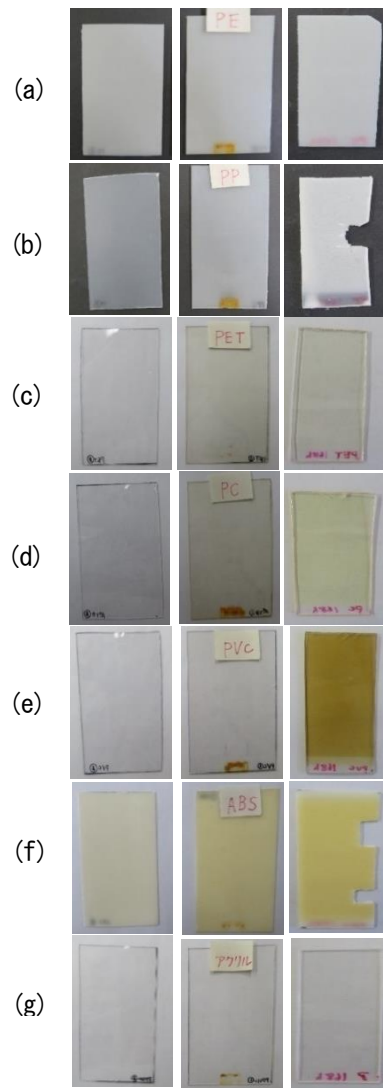


図3 外観変化

(a) HDPE, (b) PP, (c) PET, (d) PC, (e) PVC, (f) ABS, (g) PMMA
左から試験前, 屋外暴露 6 ヶ月, 促進暴露 168 時間

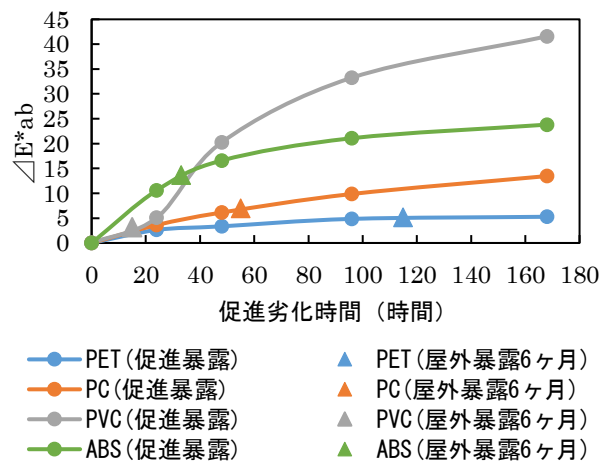


図4 色差測定結果

値が 40 を超えており、次いで ABS の変化が大きくなっている。

試料の黄変原因として、PC は光フリース転移によりジヒドロキシベンゾフェノン構造を生成したため⁹⁾,

PVC は脱塩化水素が連続して発生し、共役二重結合連鎖であるポリエンを生成したため¹⁰⁾、また、ABS はブタジエン部分で生成したラジカル種がポリスチレン部分の酸化を誘起し、着色物質が生成したため¹¹⁾と考えられる。

屋外暴露試験を6ヶ月行った場合の色差と同程度になる促進暴露試験時間は、PETでは110~120時間、PCでは50~60時間、PVCでは10~20時間、ABSでは30~40時間と推定される。

3.2 透過率測定結果

屋外暴露試験および促進暴露試験を実施した試料の透過率測定結果のうち、特に特徴的で異なる挙動の見られたPP、PCの結果を図5に示す。PPでは、いずれの試験後も紫外領域から可視領域まで幅広く透過率が低下しているのに対し、PCでは主に紫外領域で透過率の低下が認められる。

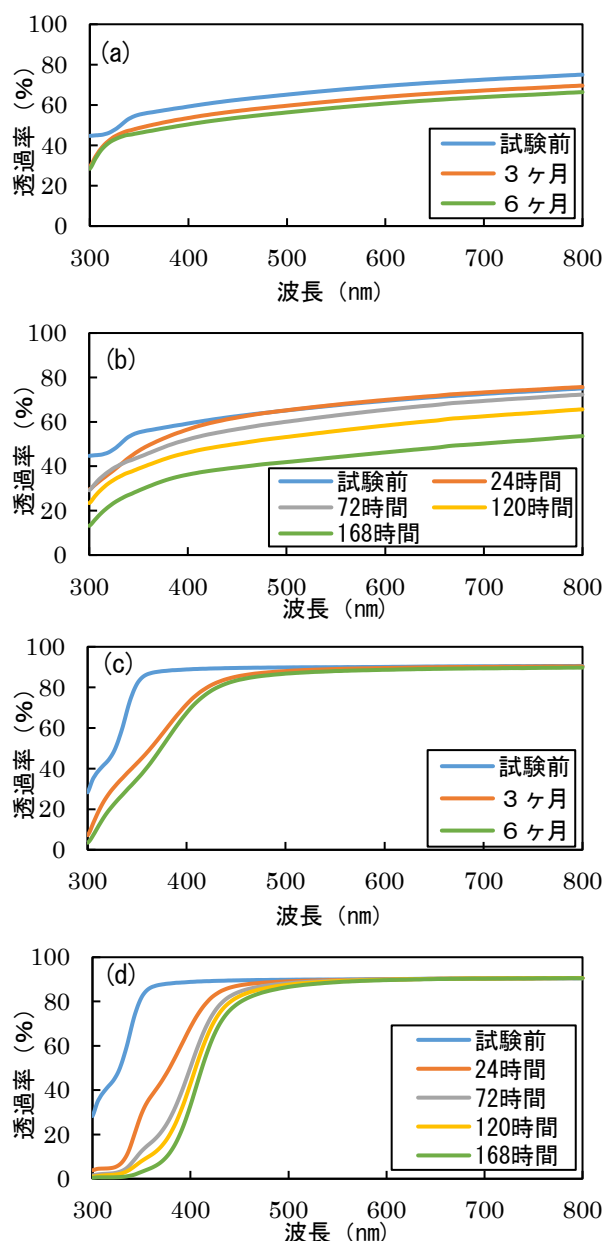


図5 透過率測定結果

- (a) PP (屋外暴露), (b) PP (促進暴露)
 (c) PC (屋外暴露), (d) PC (促進暴露)

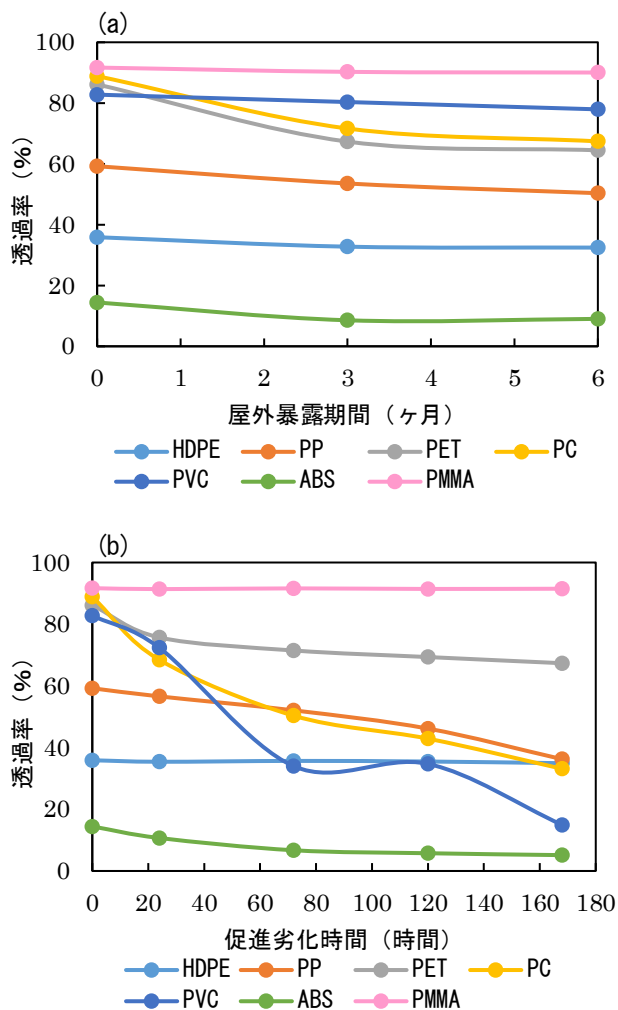


図6 400 nmにおける透過率測定結果
 (a) 屋外暴露試験, (b) 促進暴露試験

また、すべての試料について、全波長域の中で特に透過率の変化が大きかった400 nmにおける透過率測定結果を図6に示す。屋外暴露試験ではPET、PCの透過率変化が大きく、いずれも25%程度低下している。一方、促進暴露試験ではPC、PVCの変化が大きく、PCでは65%程度、PVCでは80%程度低下している。

屋外暴露試験で顕著な変化が見られなかったPVCの透過率が促進暴露試験では大きく低下した理由として、70℃の高温環境下で紫外線が照射されたことで、より酸化劣化が促進され、生成したポリエンが黄色、さらには褐色まで変色が進んだため¹²⁾と推察される。

屋外暴露試験を6ヶ月行った場合の400 nmにおける透過率と同程度になる促進暴露試験時間は、PPでは72~96時間、PETでは168時間以上、PCでは24~48時間、PVCでは12時間未満、ABSでは24~48時間と推定される。

3.3 SEM 観察結果

屋外暴露試験を6ヶ月、促進暴露試験を168時間実施したPP、ABSのSEM観察結果を図7に示す。PPでは、いずれの試験後も方向性のあるクラックが認められ、特に促進暴露試験後により深くクラックが発生している。ABSでは、いずれの試験後も凹凸の発生が見られ、屋外暴露試験後の方がその程度は大きくなっている。PP、ABS以外の試料では、いずれの試験後も変化が観察

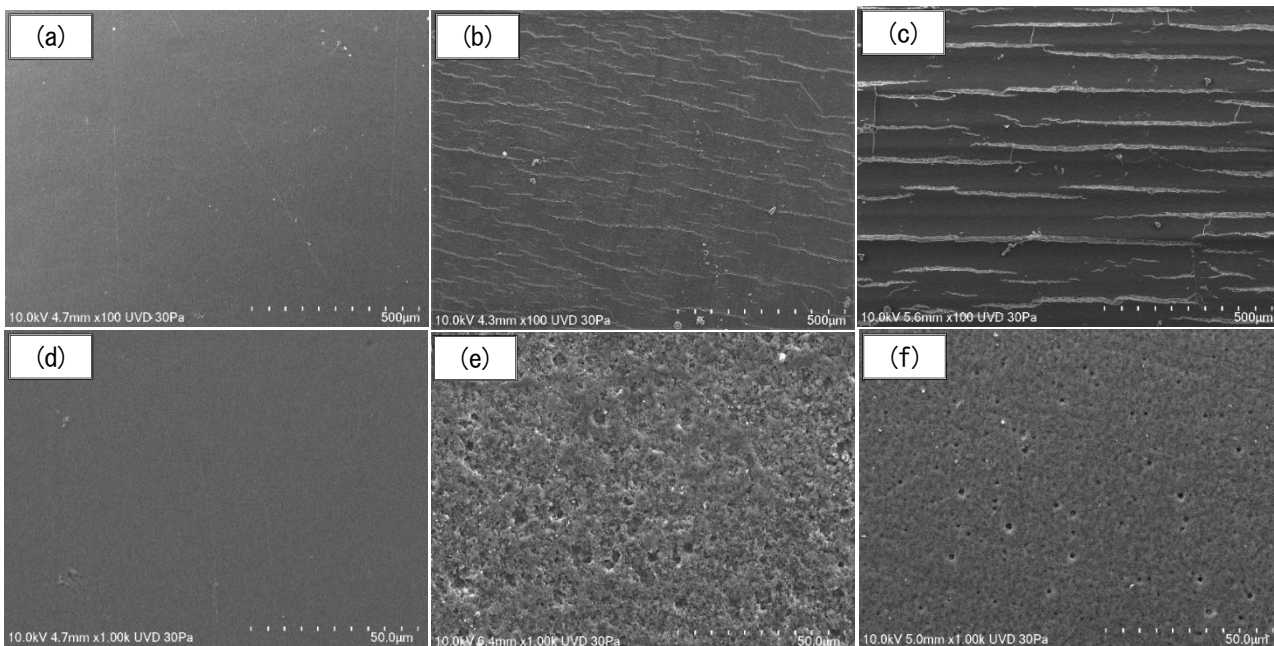


図7 SEM 観察結果

(a) PP(試験前), (b) PP(屋外暴露6ヶ月), (c) PP(促進暴露168時間)
 (d) ABS(試験前), (e) ABS(屋外暴露6ヶ月), (f) ABS(促進暴露168時間)

されなかった。

PPは結晶性プラスチックであり、分子が規則正しく配列した結晶領域とランダムに配列した非結晶領域があるが、劣化は非結晶領域で優先的に発生する⁹⁾。

X線回折測定を行ったところ、試験前後で結晶性の変化は確認されなかったが、発生したクラックに方向性が見られた理由として、非結晶領域の連続層が酸化されたため⁹⁾であると考えられる。また、細かいクラックの発生により、図3のような白変が生じたものと考えられる。

ABSはスチレン、アクリロニトリル、ブタジエンの重合体であり、このうちゴム成分のブタジエンから酸化劣化が誘発される⁹⁾。試験後に凹凸の発生が見られたのは、ブタジエンの一部で結合が切れ、分子が小さくなったためであると推察される。

3.4 FT-IR 測定結果

屋外暴露試験を6ヶ月、促進暴露試験を168時間実施したPP、ABS、PETのFT-IR測定結果を図8に示す。PP、ABSでは、いずれの試験後も1715 cm⁻¹付近のC=Oの吸光度が増加している一方で、PETでは低下が見られる。

PP、ABSでは、酸化劣化によりカルボニル基が生成し、PETではエステル結合の加水分解が発生したため⁹⁾と考えられる。なお、PCではいずれの試験後も炭酸エステルの低下および水酸基の生成が認められ、PVCでも水酸基の生成が見られた。一方で、HDPE、PMMAでは変化が認められなかった。

次に、PP、ABSのカルボニルインデックス(C.I.)計算結果を図9に示す。カルボニルインデックスは、酸化劣化により生成するカルボニル基の量を相対的に評価する指標となっており、1715 cm⁻¹付近のカルボニル基の吸光度を1455 cm⁻¹付近のCH変角振動の吸光度で除算した値を用いた。

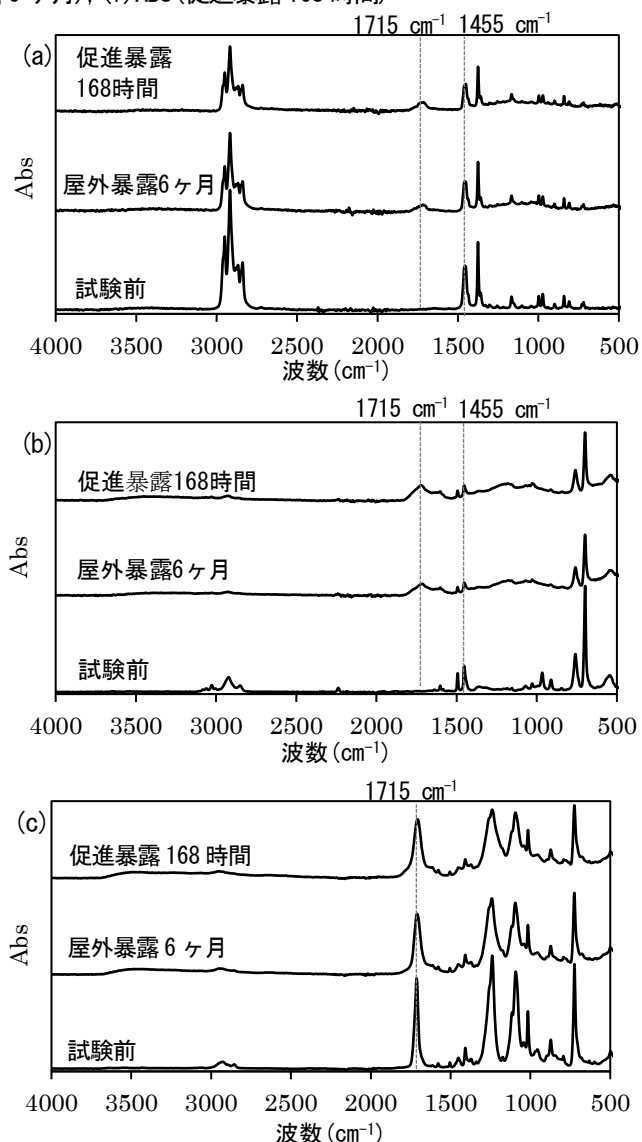


図8 FT-IR 測定結果 (a)PP, (b)ABS, (c)PET

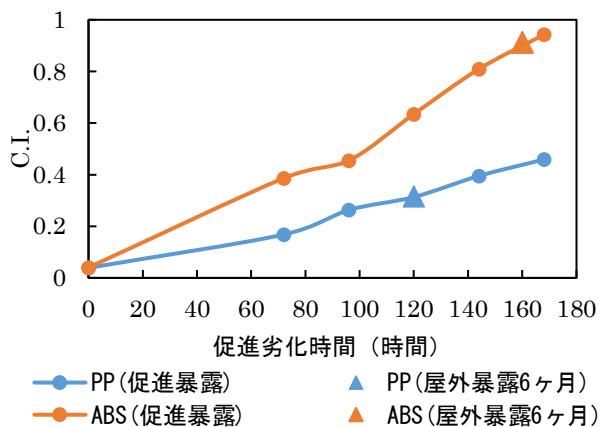


図9 カルボニルインデックス計算結果

屋外暴露試験を6ヶ月実施したPPのカルボニルインデックスは約0.3、ABSでは約0.9となり、この値と同程度になる促進暴露試験時間は、PPでは約120時間、ABSでは約160時間と推定される。

光源は異なるが、キセノンウェザーメーター（放射照度180 W/m²、BP温度83℃）でPPの耐候性試験を500時間実施した研究では、カルボニルインデックスが約1.5となり、シャルピー衝撃強度が約80%低下したと報告されている⁷⁾。今回実施した168時間の促進暴露試験では、PPのカルボニルインデックスが約0.5となったが、継続して試験を実施することで、さらに劣化挙動を確認する必要がある。

3.5 各プラスチックの劣化機構と今後の課題

屋外暴露試験および促進暴露試験により、HDPE、PMMAでは顕著な劣化傾向は見られなかったが、その他のプラスチックでは変色や赤外吸収スペクトルの変化等が確認された。特にPP、ABSでは、いずれの試験においても顕著な変色や表面形状の変化、カルボニルインデックスの増加が見られ、紫外線等の環境要因によって劣化が起りやすいことが示唆された。

また、促進暴露試験では、ほとんどの試料で屋外暴露6ヶ月と同程度の変色や透過率の変化、赤外吸収スペクトルの変化を約160時間以内で再現することができた。なお、今回用いたUVB-313ランプは313nm周辺にピークがあり、太陽光に存在する波長よりも短い波長が大半を占めることから、屋外暴露試験とは劣化メカニズムが異なるという報告がある¹³⁾。そのため、340nm周辺にピークがあり、屋外暴露試験との相関性がより高い¹³⁾ UVA-340ランプを用いた試験も実施し、耐候性を評価する必要がある。

海洋プラスチックごみを削減するためには、今後も引き続き廃棄物の適正管理やプラスチック製品の3Rの徹底が必要である。廃プラスチックの中で特に多いのが包装・容器等やコンテナ類であり、材質としてはPE、PPが半数以上を占めている¹⁴⁾ことから、これらの使用後の適切な処理が特に重要である。また、官民一体で連携し、プラスチック代替材料としての生分解性プラスチック等の開発、導入普及を促進していくことが求められている。

4 結言

プラスチックの屋外暴露試験および促進暴露試験を

実施し、各種分析機器を用いて耐候性評価を行った。その結果、特にPP、ABSでは、いずれの試験においても顕著な変化が認められ、紫外線等の環境要因によって劣化が起りやすいことが分かった。また、促進暴露試験では、ほとんどの試料で屋外暴露6ヶ月と同程度の劣化を約160時間以内で再現することができた。

今後も屋外暴露試験を継続して実施するとともに、UVAランプを用いた促進暴露試験等を実施することで、プラスチックの劣化機構に関する知見をさらに深め、海洋プラスチックごみ削減に繋げていきたい。

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) 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) .
- 3) 消費者庁、外務省、財務省、文部科学省、厚生労働省、農林水産省、経済産業省、国土交通省、環境省：プラスチック資源循環戦略、pp. 1-10 (2019) .
- 4) 九州大学、愛媛大学、東京海洋大学、東京農工大学：沿岸から大洋を漂流するマイクロプラスチックの動態解明と環境リスク評価、pp. 1-96 (2018) .
- 5) 府川伊三郎：浮遊するPE・PPマイクロプラスチックの生成と行方、pp. 1-58 (2018) .
- 6) 尾形正岐、長田和真、阿部治、石黒輝雄、山田博之、八代浩二：プラスチック材料の耐光性評価に関する研究、山梨県産業技術センター研究報告、No. 2, pp. 135-140 (2019) .
- 7) 飯塚智則、大武義人、田中敬二：光と熱の相乗効果がポリプロピレンの劣化に与える影響、材料、Vol. 66, No. 3, pp. 238-243 (2017) .
- 8) 気象庁ホームページ
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 9) 大澤善次郎：高分子劣化・長寿命化ハンドブック、丸善出版、pp. 15-19, 231-233, 296-303, 310-318 (2011) .
- 10) 大勝靖一 監修：高分子の劣化機構と安定化技術、シーエムシー出版、p. 139 (2005) .
- 11) 山野井博：高分子材料の劣化・変色メカニズムとその安定化技術、マテリアルライフ学会誌、Vol. 19, No. 3, pp. 103-108 (2007) .
- 12) 下里直子：工業材料の光劣化による色彩変化に関する研究、長野県工業技術センター研究報告、No. 16, pp. 13-17 (2021) .
- 13) AMETEK ホームページ
<https://www.ametek.co.jp/atlas-testing-guide/weathering-test-guide3>
- 14) 一般社団法人プラスチック循環利用協会：2020年プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況（マテリアルフロー図）
<https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf2.pdf> (2021) .