

研 究 報 告

第 25 号

令和 5 年 2 月



Journal of
Local Independent Administrative Agency
Iwate Industrial Research Institute

Vol.25

地方独立行政法人
岩手県工業技術センター



地方独立行政法人岩手県工業技術センター

〒020-0857 岩手県盛岡市北飯岡 2-4-25

電話：019-635-1115

FAX：019-635-0311

ホームページ：<https://www2.pref.iwate.jp/~kiri/>

電子メール：CD0002@pref.iwate.jp

地方独立行政法人岩手県工業技術センター研究報告

第 25 号

目 次

◆ 電子情報システム部	
1 裸種子対応播種機の小型化に関する研究 （研究事業名：令和 2 年度いわてものづくりイノベーション推進事業） 箱崎 義英、堀田 昌宏、佐々木 崇人	3
2 裸種子対応自走式播種機の実用性の向上 （研究事業名：令和 3 年度いわてものづくりイノベーション推進事業） 箱崎 義英、堀田 昌宏、佐々木 崇人	7
◆ 機能材料技術部	
3 超短パルスレーザーによる表面加工と選択めっきを用いた配線パターンニング技術の開発 【投稿論文再掲】：天田財団 助成研究成果報告書 2022 （研究事業名：2019 年度天田財団 研究開発助成事業 研究開発助成部門 一般研究開発助成 AF-2019206-B2） 目黒 和幸	11
◆ 素形材プロセス技術部	
4 デジタルシボによる南部鉄器製急須の作製 （研究事業名：令和 2 年度いわてものづくりイノベーション推進事業） 和合 健、生内 智、及川 春樹	15
5 長尺測長器の幾何学誤差補正方法の確立 （研究事業名：令和 3 年度技術シーズ創生・発展研究事業 可能性調査研究） 和合 健	21
6 金属粉末積層造形品の仕上げ加工における位置決め方法と削り代 （研究事業名：中東北 3 県公設試技術連携推進事業（5 軸マシニングセンタによる金属積層造形品の仕上げ加工法の確立）） 飯村 崇、黒須 信吾、生内 智、和合 健、池 浩之	26
7 オーステンパ球状黒鉛鉄の衝撃特性に及ぼす銅の影響 （研究事業名：平成 31 年度技術シーズ創生研究事業 発展ステージ） 高川 貫仁	31

8	オーステナイト系ステンレス鋼の鋭敏化度の簡易評価手法 (研究事業名：令和3年度技術シーズ創生・発展研究事業 可能性調査研究) 佐々木 龍徳、桑嶋 孝幸、久保 貴寛、池 浩之・・・・・・・・・・・・・・・・	35
◆ 産業デザイン部		
9	対話的議論により新たな価値を探索するオンライン・ワークショップ手法の導入実証 (研究事業名：令和2～3年度共同研究) 高橋 正明、長嶋 宏之、永山 雅大、手塚 明・・・・・・・・・・・・・・・・	40
◆ 食品技術部		
10	IoT機器を用いた麺の簡易乾燥 (研究事業名：令和3年度技術シーズ創生・発展研究事業 可能性調査研究) 武山 進一・・・・・・・・・・・・・・・・	47

裸種子対応播種機の小型化に関する研究*

箱崎 義英**、堀田 昌宏**、佐々木 崇人***

玉ねぎの増産に向け、農林水産省規格の汎用セルトレイや裸種子を利用可能とする玉ねぎ用播種機の開発を行ってきた。試作した播種機は播種機構以外にセルトレイを搬送する搬送機構が必要となるため装置全体のサイズや重量が大きくなる。そこで、セルトレイを跨ぎながら移動し、播種する門型の自走式播種機とすることでセルトレイ搬送機構を省き、小型・軽量化を実現した。

キーワード：ロボット技術、播種、育苗、タマネギ

Miniaturization of Seeding Machine for Non-coat Seeds

HAKOZAKI Yoshihide, HOTTA Masahiro, SASAKI Takato

Key words : Robot technology, Seeding, Non-coat Seeds, Onion

1 緒言

少子高齢化、生産年齢人口の減少による一次産業衰退の課題をかかえ、その解決のため、国・県はスマート農業を提唱し、ロボット技術や ICT (Information and Communication Technology) による生産性向上に向けた省力化、効率化を進めている¹⁾。

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構では、春まき栽培技術の確立を目指して、「東北・北陸地域における新型開発によるタマネギの端境期生産体系の確立」の研究を行い、収益増加に向けた新たな経営品目の導入を推進している²⁾。また、岩手県では農業振興策として玉ねぎの田畑転換を推奨しており、育苗技術開発・大規模化・高収益化への取り組みが進められている³⁾。

玉ねぎの生産における収益向上のためには丈夫で均一な品質の苗を育てることが重要であり、セルトレイを用いた専用ハウスでの育苗が行われている。セルトレイへの玉ねぎの播種作業は、専用自動播種機を使用している。しかし、既存の自動播種機は、耕地面積が 5 ha 以上の大規模経営体向けの大型装置であり、作業能率は 300 枚/時と高いが、複数名の作業人員を要し、かつ高価である。岩手県は中山間地が多く農家の 7 割は耕地面積が 2 ha 以下となっている。中小規模農家では、播種作業能率が高いことより単独で装置を利用できることが重要であると考えられる。そこで、岩手の現状に合う単独で作業ができる中山間地域向け播種機の開発が望まれている。

上記ニーズを踏まえ株式会社小林精機と共同でロボット技術を活用し、裸種子に対応した玉ねぎ用播種機を開発を行ってきた⁴⁾⁵⁾。試作した播種機を「いわてスマート農業祭」へ出展したところ、小型化のニーズがあること

を確認した。

本研究では、持ち運びが容易となる卓上サイズであり、商用電源がないハウス内でも利用できるバッテリー駆動の自走式播種機の開発を行った。

2 播種機の概要

既存の自動播種機では、扱いやすさから、図 1 に示すような不定形な裸種子を珪藻土等の造粒素材で丸粒状に成形した高価なコート種子を用いている。また、そのため播種機専用のトレイを利用しなければならず、生産コストの低減に課題がある。そこで筆者らは、図 2 に示す農林水産省規格の汎用セルトレイと裸種子が利用できる播種機を開発を行ってきた。セルトレイは 3 タイプあり、野菜の種類により使い分けている。



図1 種子(タマネギ)のタイプ

* 令和2年度 いわてものづくりイノベーション推進事業

** 電子情報システム部

*** 株式会社小林精機

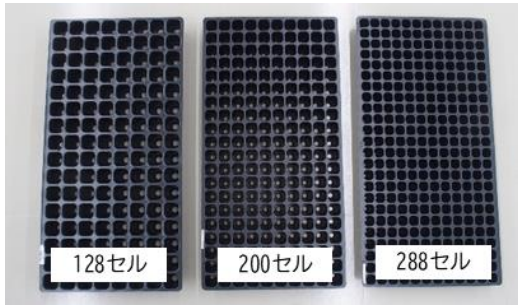


図2 農林水産省規格のセルトレイ



図5 播種スライド板とシューター

2-1 播種機構

図3に播種機構、図4に播種スライド板の種子保持部及び種子のピックアップの原理を示す。

播種スライド板は、ベース板上を同図A-B方向にスライドしながら種子をピックアップするものであり、ピックアップされた種子は、シューターから落下し、セルトレイに播種される。

播種スライド板の種子保持部は、図4に示す様に窪みを設けた特徴ある形状をしている。種子保持部前方に集められた種子群を通過しながら1粒を保持し、トレイ短辺のポット個数分のみ取り出せるようになっている。

図2に示す農林水産省規格のセルトレイには、128セル、200セル、288セルの3種類がある。筆者らは、これらの短辺のポット数である8、10、12に対応する播種スライド板とシューターを開発した。これを図5に示す。播種スライド板とシューターが対になって3種類のセルトレイに対応できるようになっている。

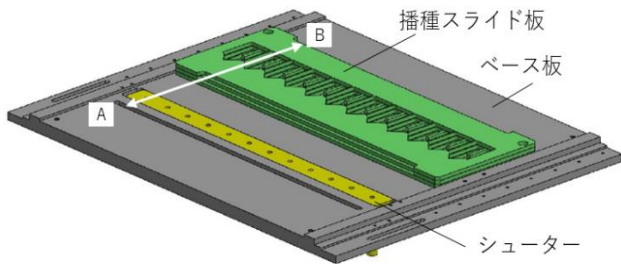


図3 播種機構

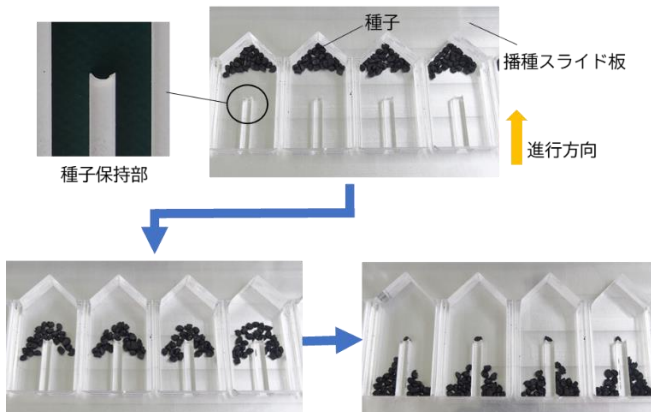


図4 裸種子のピックアップ原理

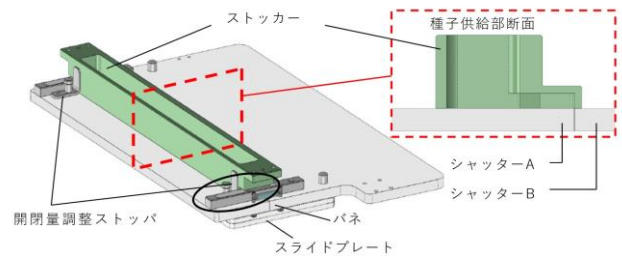


図6 種子供給機構

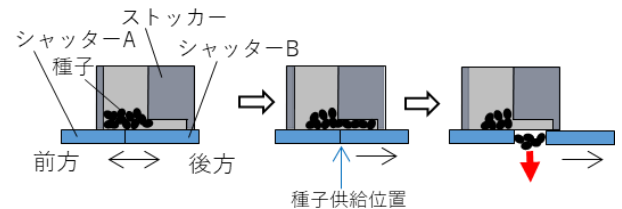


図7 種子の供給方法

2-2 種子供給機構

図6に種子供給機構を示す。種子供給部は播種スライド板へ種子を供給するものであり、シャッター機構及びストックカーで構成されている。またシャッター機構はシャッターAとシャッターBの二枚の板により構成され、バネによりシャッターは閉じた状態を維持しながらスライド動作が可能となっている。

図7に種子の供給方法を示す。ストックカー断面はL字型形状であり、シャッター機構の往復動作によりストックカー後方部へ種子を集める構造となっている。種子供給位置でシャッターAは動作が固定され、シャッターBがさらに後方に動作することでシャッターが開き、種子が落下して播種スライド板へ供給される。シャッターAを固定する位置を変更することによりシャッター開閉量を変え、種子の供給量を調整することができる。

3 播種機の小型化

従来の播種機は、サイズがW1,200 mm×D500 mm×H1,000 mm (脚部除きH300 mm) で商用電源により動作させているため、商用電源がないハウス内での使用は不可能であった。そこで、商用電源がない場所でも利用できるようにバッテリー駆動とし、充電することなく半日程の作業時間となる4時間の稼働を目標とする。また、試

作する播種機は、卓上での利用も考え、1人でも持ち上げることが可能となるように従来のサイズの1/3以下、重量は10 kg以下を目標とする。

3-1 自走式播種機

前回の試作播種機ではセルトレイ搬送をテーブルによる送りを採用していた。セルトレイのサイズ(約600 mm×300 mm)により搬送ストロークが必然的に確定するため小型化への限界があった。そこで、本研究では、作業台の卓上または床面上に載置してあるセルトレイを跨ぎながら移動し、播種する門型の自走式とすることで、セルトレイ搬送機構を省き播種機の小型化を行う。

本試作では、軽量化や構造の単純化のため2個のDCモータを利用し左右それぞれの車輪を独立で駆動させることにした。それぞれのDCモータの回転数を合わせることで前進、後進を行うことが可能である。

前回の試作では、搬送テーブルの駆動にステッピングモータを用い、事前に移動量を設定し播種時のピッチ送りを実現していた。しかし、自走式にした場合、走行面の状態によっては車輪のスリップが発生し、セルピッチ間の車輪の回転量も一定でないため、光電センサにてセルトレイのセルポットを検出し播種機を停止させることにした。従来は、セルピッチ間がそれぞれ異なる3種類のセルトレイに切り替えスイッチにより対応していたが、光電センサを利用することで常にポット位置で播種機を停止させることが可能となるため切り替えが必要ないことになる。図8に装置に組み込んだ光電センサおよびセルトレイを示す。

図9に試作した自走式播種機を示す。サイズはW366 mm×D448.5 mm×H160.5 mmとなり、総重量は6.2 kgとなった。自走式播種機のプロトタイプとして筐体のベースにアルミプレートや市販のアルミフレームを用いたほか、部品の半数以上がアルミ材を用いて試作したが、さらに持ち運びを容易にするため、樹脂系材料に変更することなどを行い、さらなる軽量化は可能であると考えている。

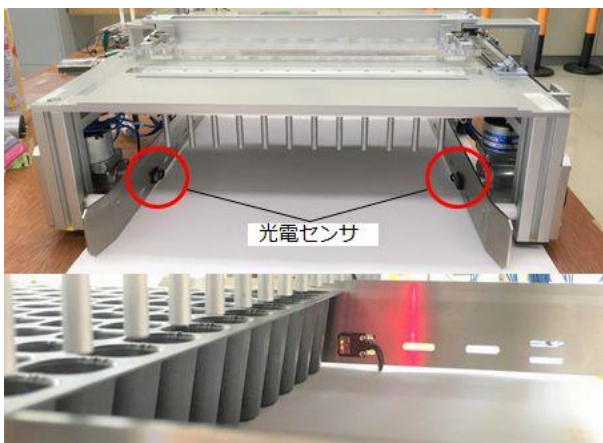


図8 ポット検出センサ

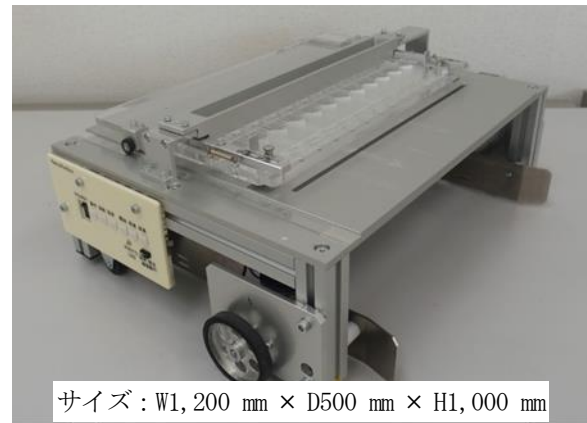


図9 自走式播種機

3-2 制御モジュール

本試作では、電源としてバッテリーを用いること、また、自走式となるため小型化して装置の空きスペースに組み込むことが必要となる。そこで、ラジコン等に使用されるリチウムポリマーバッテリー(11.1 V、1800 mAh、ROBOTIS製)、ワンチップ・マイコンのPIC (Peripheral Interface Controller)、デュアルDCモータドライバのTB6612FNGを用いて専用の制御回路を試作した。試作した制御モジュールを図10に示す。制御モジュールはバッテリーも含め200 mm×150 mm×40 mmのボックスに組み込むことができた。

制御モジュールでは、①走行のみ、②スライド板往復のみ、③播種作業(走行からスライド板往復による播種)の3種類の動作処理を行うことになる。1個のマイコンで3種類の処理を行うにはプログラムが複雑になるため、2個のマイコンを利用し、走行とスライド板往復動作に関する処理を分けることでプログラムの単純化を行った。必要に応じてそれぞれのマイコンで信号をやり取りし、一連の播種作業の動作が実行できるようになっている。走行に関する処理および播種に関する処理のフローを図11に示す。

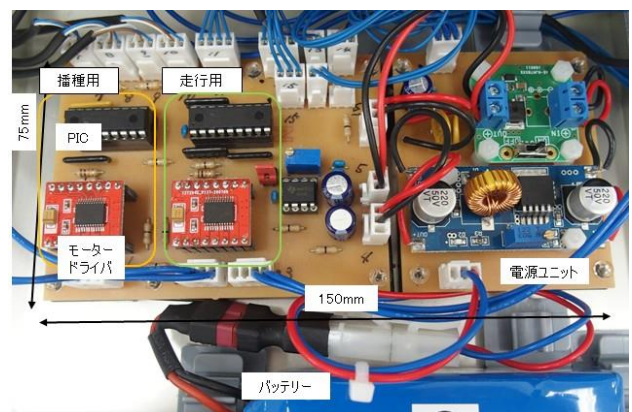


図10 制御モジュール

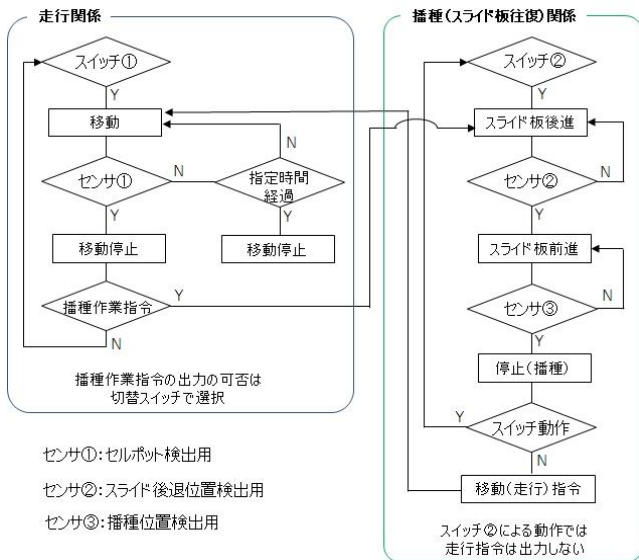


図 11 走行・播種の処理フロー

3-3 走行動作の検証

試作した自走式播種機では、走行用として 2 個の DC モータを利用している。モータに印加する電圧により左右の車輪の回転数が同じになるように調整を行い、走行動作を検証したところ、緩やかなカーブを描くことが分かった。1 m 程度の前後進の往復走行でズレが約 30 mm であった。モータは、播種機に左右対称に組み付けることになるため前進走行において一方は正転、もう一方は逆転の回転方向で動作することになる。そのため、同じ仕様のモータを利用したが、応答や回転数に若干のズレが生じることが原因と考えられる。

次に、1 kg 程度の培土が詰められたものとしてセルトレイに荷重を加えセルトレイを播種機の走行ガイドとして走行動作を検証したところ、播種機は大きなカーブを描くことなく走行することが確認できた。

光電センサを用いたポット検出によるピッチ動作について検証を行った。図 12 に播種機の走行速度を 0.07 m/s、0.085 m/s、0.1 m/s とし、288 セルトレイにおいて播種作業時のピッチ動作における走行距離を示す。288 セルトレイのピッチ 24.3 mm に対して、24.4 mm から 24.7 mm の範囲で走行可能であることが分かった。0.5 mm 程度のズレが生じて、セルの上部寸法が 21.5 mm×21.5 mm であるためほぼ中央に播種が可能であることが確認できた。

玉ねぎの育苗で使用する 288 セルトレイ 1 枚当たりの処理時間を計測したところ約 53 秒となった。従来機の約 64 秒に対して 10 秒程度の短縮となった。また、稼働時間について検証したところ、容量が 1,800 mAh のバッテリーでは約 5 時間の稼働が可能であることが分かった。セルトレイ 1 枚当たり約 1 分程度となるので、1 回の充

電においてセルトレイ 300 枚分の作業が可能である。

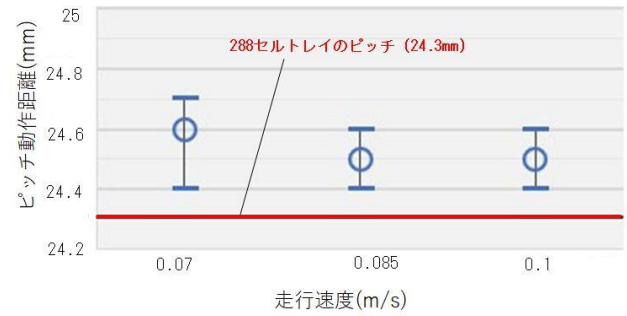


図 12 ピッチ動作精度

4 結 言

本研究では、卓上で使用できる小型の裸種子対応播種機の試作開発を行った。試作した播種機は門型の自走式であり、卓上に載置したセルトレイを跨ぎながら移動し播種するものである。試作した自走式播種機のサイズは、W366 mm×D448.5 mm×H160.5 mm となり、従来機に比べ容積は 1/3 以下にすることができた。また、総重量は 6.2 kg となった。バッテリー駆動となるため商用電源がないハウス内でも利用でき、1,800 mAh のバッテリーで、約 5 時間の稼働が可能となった。

今後、実用化に向け、実際の現場で利用できるように駆動部や制御ボックス等の防塵対策や耐久性について検討していくと同時に、本研究で明らかになった走行の直進安定性について改良を進めていく。

本研究の成果は、農業振興の上でセル育苗の作業標準化や、省力化・自動化による生産性向上につながると期待される。今後、農業分野において広く周知を図ってきたい。

文 献

- 1) 農林水産省：スマート農業の実現に向けた取組と今後の展開方向について、(2016)
- 2) 農研機構：東北・北陸地域におけるタマネギの春まき栽培技術 技術解説編、(2016)
- 3) 岩手県農業研究センター：春まきタマネギ栽培マニュアル、(2020)
- 4) 箱崎義英、長谷川辰雄、高橋強、佐々木宏朋、佐々木崇人、ロボット技術を活用した玉ねぎ裸種子対応播種機の開発、岩手県工業技術センター研究報告 第 22 号、(2020)
- 5) 箱崎義英、堀田昌宏、佐々木崇人、玉ねぎ裸種子対応播種機の性能向上、岩手県工業技術センター研究報告 第 23 号、(2021)

裸種子対応自走式播種機の実用性の向上*

箱崎 義英**、堀田 昌宏**、佐々木 崇人***

これまで、玉ねぎの増産に向け、農林水産省規格の汎用セルトレイや裸種子を利用可能とする播種機の開発を行ってきた。前年度、小型・軽量化を実現するため、セルトレイを跨ぎながら移動し、播種する門型の自走式播種機を試作した。播種機構への種子の供給や播種作業後の余剰種子の回収も自動で行うものとなっているが、使用する前の調整に手間や時間がかかることが分かった。そこで、種子の供給や回収は作業者が手動で行う半自動タイプの播種機とし、より早急に社会実装可能となるよう実用性の向上を目的に新たに播種機を開発を行った。また、実証実験を通して自走式播種機の動作の検証と本播種機構による出芽率を調査した。

キーワード：ロボット技術、播種機、裸種子

Improvement for the Practical Use of Self-propelled Seeding Machine for Non-coat Seeds

HAKOZAKI Yoshihide, HOTTA Masahiro, SASAKI Takato

Key words : Robot technology, Seeding machine, Non-coat Seeds

1 緒 言

国・県はスマート農業を提唱し、農業分野における生産性向上に向けた省力化、効率化を進めている¹⁾。また、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構や岩手県では農業振興策として玉ねぎの田畑転換を推奨しており、育苗技術開発・大規模化・高収益化への取り組みが進められている²⁾³⁾。

野菜栽培では、丈夫で均一な品質の苗を育てることが重要であり、セルトレイを用いた専用ハウスでの育苗が行われている。セルトレイへの播種作業は、専用の自動播種機を使用しているが、既存の自動播種機は、耕地面積が5 ha以上の大規模経営体向けの大型装置であり、作業能率は300枚/時と高いが、複数名の作業人員を要し、かつ高価である。岩手県では、中山間地が多く、農家の7割は耕地面積が2 ha以下となる中小規模農家となっている。中小規模農家では、播種作業能率が高いことより単独で装置を利用できることが重要であると考え、株式会社小林精機と共同で裸種子に対応した播種機を開発を行ってきた⁴⁾⁵⁾。前年度、これまで据え置き型であった播種機の小型化を目的に自走式の播種機を開発を行った⁶⁾。試作した播種機は、播種作業や種子の供給、播種後の余剰種子の回収を自動で行うものとなっているが、各機構の調整に経験と勘が必要となる課題があることが分

かった。

そこで、本研究では、種子の供給や回収は作業者が手動で行う半自動タイプの播種機とし、より早急に社会実装可能となるよう実用性の向上を目的に開発を行った。また、実証実験を通して動作の検証と出芽率を調査した。

2 自走式播種機の概要

図1に播種機の構成、図2に本播種機の特徴となる播種機構を示す。播種スライド板は、スライド機構部によりベース板を同図A-B方向にスライドするものであり、ピックアップされた種子は、シューターから落下し、セルトレイに播種される。また、播種スライド板を任意の位置に移動させ、セルトレイへの播種や、ストッカーからの播種スライド板への種子供給、播種スライド板に残る余剰種子の回収作業を行う。種子供給部は、シャッター機構及び種子ストッカーで構成され、シャッターの開閉量を変えることで播種スライド板への種子の供給量を調整することができる。図3に前年度試作した自走式播種機を示す。播種作業や種子の供給、また、余剰種子の回収を行う位置の検出には、フォトセンサを利用した。

3 自走式播種機の実用性の向上

前年度の試作機では、トレイへの播種作業のほか、播種

* 令和3年度いわてものづくりイノベーション推進事業

** 電子情報システム部

*** 株式会社小林精機

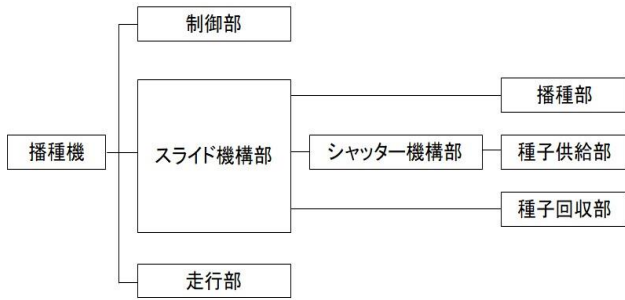


図 1 播種機の構成

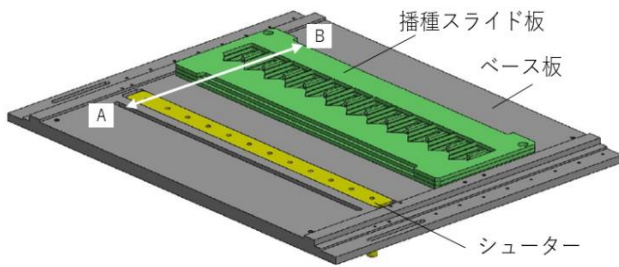


図 2 播種機構

供給方法を示す。種子供給ユニットには、播種スライド板へ一定量の種子を供給できるようにあらかじめ定められた窪みが設けられている。供給方法は次の通りである。まず、供給ユニットを揺すり種子を窪みに落としこみ、溢れた種子はストッカー前方に寄せ、定量以上の種子が供給されないようにする。その後、播種スライド板の上部に供給ユニットを載置し、シャッターを開くことで一定量の種子を供給するものとなっている。

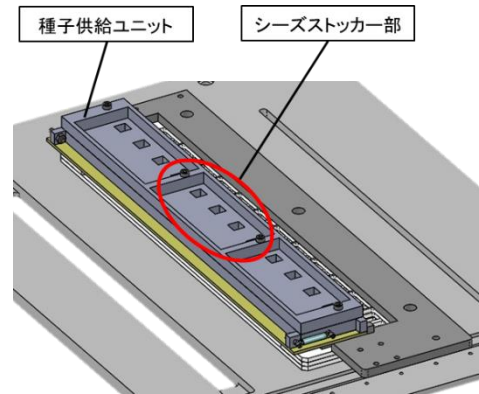


図 4 種子供給ユニット

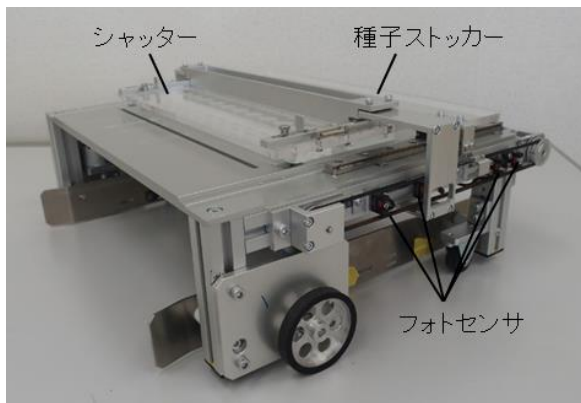


図 3 前年度試作した自走式播種機

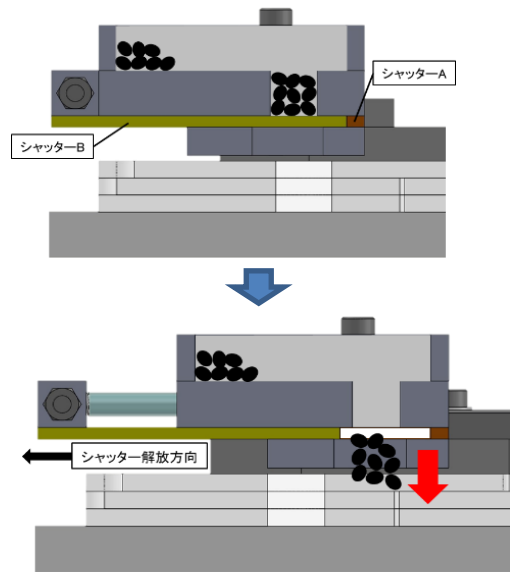


図 5 種子供給方法

スライド板へ種子の供給や余剰種子の回収についても自動で行うようになっている。そのため、実際の播種作業の前に各動作について調整しなければならない、経験者が調整して 10 分から 20 分程度の時間が必要である。そこで、本研究では、種子供給や回収を手動で行う半自動とし、誰でも簡単に調整ができ、実際の作業現場でも容易に利用可能となるように播種機の実用性の向上を図ることとした。

3-1 種子供給ユニット

種子供給機構では、シャッター開閉時における種子の挟み込みや引っ掛かりの発生を防ぐために、シャッター板と種子ストッカーの隙間や、シャッターの開閉量の調整が必要となる。動作を確認しながら調整する必要があり、時間がかかると同時に、経験と勘も必要となってくる。そこで、本研究では、誰でも容易に扱えるようにするため、種子供給ユニットを活用し、手動で播種スライド板へ種子を供給することにした。

図 4 に種子供給ユニット、図 5 に播種スライド板への種子

3-2 播種スライド動作

播種スライド板はベース上を一定の速度で移動し、フォトセンサにより各作業位置を検出している。播種作業時、スライド板は減速しての停止とならないため、停止した際、種子はスライドの種子保持部から慣性により前方に飛び出す状況となる。そのため、その量を加味してスライド板の停止位置を調整する必要がある。

そこで、本研究では、種子の供給や回収作業は手動としたことより、播種スライド板の動作は、播種作業の往復動作のみとなる。このことにより、図 6 に示すようにスライダクランク機構を用い、播種スライド板を減速のある動作をさせ、種子の飛び出しを低減させることにした。調整は、播種スライ

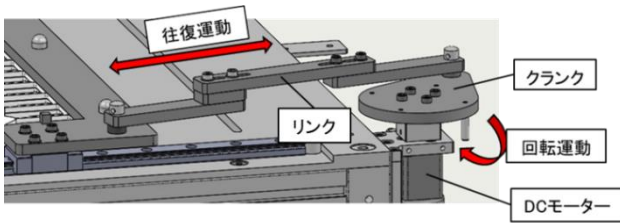


図6 播種スライド動作

ド板の種子保持部の位置をシューターの位置に合わせてリンク長を調整することになり、経験や勘での調整は必要なくなる。

3-3 試作播種機

図7に本試作及び前年度の播種スライド板の速度変化を示す。本試作では、スライダークランク機構を用いてスライド動作を行っているため加減速がある滑らかな動作となっていることが確認できる。種子の慣性による飛び出しも低減されたため安定して播種作業を行えるようになった。セルトレイへの播種を検証したところ、種子の抜けは5%以下であった。

図8に本研究で試作開発した自走式播種機を示す。制御モジュールはベースプレート下面のスペースへ配置し、サイズはW400 mm×D460 mm×H160 mmとなった。本試作では、構成部品の多くがアルミ材を使用しており総重量は6.5 kgとなった。樹脂系材料に変更することでさらなる軽量化は可能であると考えている。また、試作した播種機では、播種作業前の調整は、播種スライド板とシューターの位置合わせであり、5分程度で調整することが可能である。

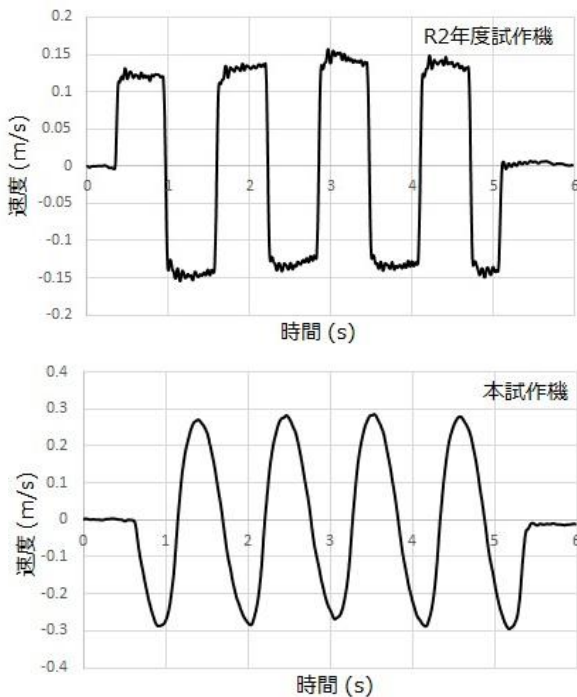


図7 播種スライド板の動作速度

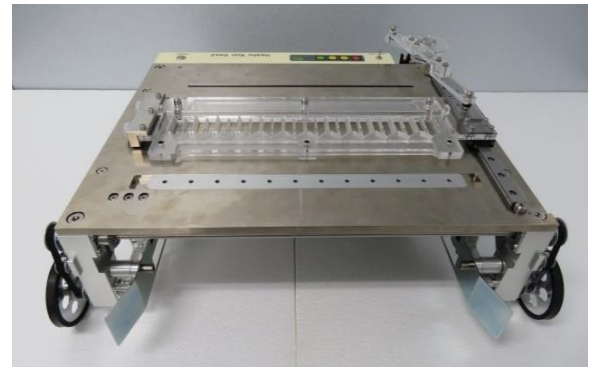


図8 自走式播種機

4 実証実験

岩手県農業研究センター野菜研究室の協力のもと、試作した播種機の実証実験を行った。実証実験では、実作業時における播種機の動作の検証と、試作播種機および人手による裸種子の播種と簡易播種機(ハンディ播種機)によるコート種子について農林水産省規格の288セルトレイ1枚当たりの作業時間と種子抜け箇所および出芽率について調査した。

図9に種子の供給の様子、図10に播種作業の様子を示す。種子供給ユニットにおいて、種子の挟み込みや引っ掛かり等のトラブルが発生することなく安定して種子の供給作業が行えることを確認した。また、1回の供給で288セルトレイ2枚の播種作業が行えることが確認できた。

本播種機は、卓上で利用も可能であるが、今回の実験では、地面上を走行させての播種作業とした。床面は平坦ではなく、培土や粉塵が残っている状況での走行となった。床面がうねっていることやスリックタイヤを使用していたこともあり粉塵や小石によるスリップも発生し直進性が悪くなることが分かった。走行速度を遅くすることでスリップの発生を低減することはできると考えられるが、ブロックタイヤへの変更についても検討する必要がある。



図9 種子供給ユニットによる種子の供給



図 10 育苗ハウス内での播種作業

表 1 育苗試験の結果

播種方法	種子	作業時間 (分)	種子抜け箇所	出芽率 (%) (播種調整後)
試作播種機	裸	0.5	8	93
手播き	裸	12	0	93
簡易播種機	コート	1.5	3	95

播種作業時間や出芽率の結果を表1に示す。播種作業時に生じた種子抜け箇所に対しては人手による播種を行い、2粒以上播種された箇所については1粒となるように調整し、288セルトレイのすべてのセルに対して1粒播種された状態として育苗を行っている。本研究で開発した播種機での出芽率も90%以上と、手播きやコート種子とも同程度であり、本播種機構でも種子を壊すことなく播種が可能であることが確認できた。

玉ねぎのセルトレイ育苗では、288セルトレイの場合、10 aあたり約80枚とされている³⁾。本播種機は、2枚/分であることから、60分以内で作業を終わらせることができる。作業能率は、既存の全自動播種機(300枚/時)の1/3程度であるが、中小規模農家においては十分に対応できるものと考えている。

5 結 言

本研究では、種子の供給や回収を手動で行うこととし、半自動とすることで社会実装し易い自走式播種機の試作開発を行った。

播種スライド板への種子の供給を、種子供給ユニットを用いることにより播種機の供給に関する調整作業を省くことができ、現場でも利用しやすいものとなった。

播種スライド板の動作速度を加減速させるために、スライダクランク機構を用いた。そのことにより、種子の飛び出しを低減させることができ、これまで以上に安定して播種作業を行えるようになった。

岩手県農業技術研究センター野菜研究室の協力のもと、育苗試験を行ったところ、本播種機構でも種子を壊すことなく播種が可能であることが確認できた。

今後、駆動部や制御ボックス等の防塵対策や耐久性について検討し、実用化に向け改良を進めていく。

文 献

- 1) 農林水産省：スマート農業の実現に向けた取組と今後の展開方向について、(2016)
- 2) 農研機構：東北・北陸地域におけるタマネギの春まき栽培技術 技術解説編、(2016)
- 3) 岩手県農業研究センター：春まきタマネギ栽培マニュアル、(2020)
- 4) 箱崎義英、長谷川辰雄、高橋強、佐々木宏朋、佐々木崇人、ロボット技術を活用した玉ねぎ裸種子対応播種機の開発、岩手県工業技術センター研究報告 第 22 号、(2019)
- 5) 箱崎義英、堀田昌宏、佐々木崇人、玉ねぎ裸種子対応播種機の性能向上、岩手県工業技術センター研究報告 第 23 号、(2020)
- 6) 箱崎義英、堀田昌宏、佐々木崇人、裸種子対応播種機の小型化に関する研究、岩手県工業技術センター研究報告 第 25 号、(2022)

【研究報告】

【投稿論文再掲】 本論文は許可を得て、「天田財団 助成研究成果報告書 2022」から転載しました。

超短パルスレーザーによる表面加工と選択めっきを用いた 配線パターンニング技術の開発

地方独立行政法人岩手県工業技術センター 機能材料技術部

上席専門研究員 目黒和幸

(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019206-B2)

キーワード：三次元成形回路部品(3D-MID)、表面改質、無電解めっき

1. 研究の背景と目的

スマートフォンなどの携帯型情報通信機器や自動車および車載機器において、CMOS イメージセンサ、加速度・傾斜センサ、各種 LED などの実装部品点数が増加傾向にある。これらの機器では限られた空間内に効率的に電子回路基板を配置したいというニーズが高まっており、三次元成形回路部品 (3D-Molded Interconnect Device ; 3D-MID)^[1]が解決策の一つとして期待されている。3D-MID は、樹脂成形体表面に金属膜で三次元的な電子回路を形成した機械的機能と電気的機能を兼ね備えた高機能部品であり、一般的なプリント配線板と比較して、省スペース化・軽量化、自由度の高い設計、部品点数および組立工数の削減など、様々なメリットがある。3D-MID の製造方法は各メーカーから様々な工法が提案されているが、三共化成(株)と筆者らのグループで開発を進めてきた SKW-L2 工法^[2]は、樹脂材料へ特殊な添加物の混練あるいは樹脂成形体表面への事前処理を必要とせず、市販されている様々な種類やグレードの樹脂に適用可能なユニークな工法である。SKW-L2 工法は、図 1 に示すように樹脂成形体表面に局所的にレーザー光を照射して表面改質を行い、その後の

湿式処理による選択的な無電解めっきで配線パターンを形成するアディティブ工法である。表面改質用のレーザー光源として超短パルスレーザーを用いることで、可視域で透明な PC(ポリカーボネート)樹脂や難めっき材料である PPS(ポリフェニレンサルファイド)樹脂等への微細配線パターン形成を行うことができる^[3,4]。しかしながら、樹脂表面をレーザー加工するため、現状の SKW-L2 工法では少なからず表面が粗化されており(典型的には Ra 2~5 μm)、金属めっき膜の密着メカニズムは樹脂の表面粗さによるアンカー効果が支配的であるとされている。これからの携帯端末や車載機器では次世代移動通信システム(Beyond 5G/6G)への対応が不可欠であり、3D-MID においても高周波伝送に対応するべく低誘電率・低誘電正接の樹脂材料への適用と、導体損失を低減させるための平滑界面を持つめっき配線技術が求められる。

本研究では、短波長化した超短パルスレーザーによる樹脂表面改質における照射パワーおよびビーム走査速度などの加工パラメータの最適化を検討し、SKW-L2 工法の樹脂表面粗さの低減の可能性を調査した。

2. 実験

実験には、図 2 に示す PPS 樹脂の板材(厚み 2 mm, 東レプラスチック精工 無充填グレード PPS-2000)を用いた。PPS 樹脂は耐熱性・寸法安定性・耐薬品性に優れ、電気自動車関連で 3D-MID 化のニーズが高い。PPS 樹脂試料は中性洗剤、純水、エタノールで脱脂洗浄を行った後、十分に乾

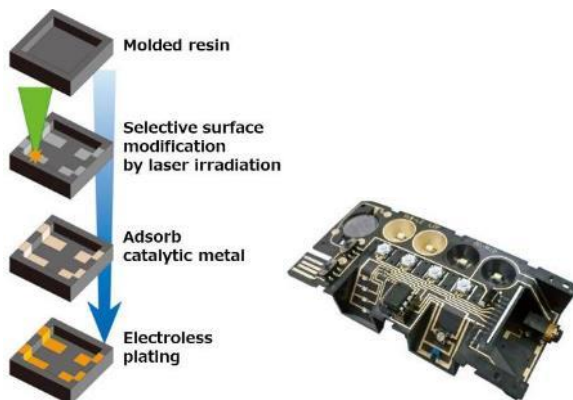


図 1 SKW-L2 工法の工程(左)と 3D-MID 製作例(右)

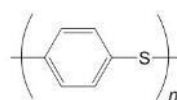


図 2 PPS 樹脂の分子構造(左)と試料の写真(右)

燥させてから使用した。

SKW-L2 工法の光源の超短パルスレーザーには、Light Conversion 社の PHAROS-4W を使用した。このレーザーは、最大出力 4 W、中心波長 1,030 nm の Yb:KGW レーザーである。fs 発振したレーザー光をチャープパルス増幅する際、再生増幅部で繰返し周波数を 1~200 kHz、パルス圧縮器でパルス幅を 260 fs~10 ps の範囲で調整できる。可変アッテネータによるパワー調整と空間フィルターによるビーム整形を行った基本波に対して第二次高調波(SH, $\lambda = 515 \text{ nm}$)を発生させ、自動 XY ステージを用いた加工システムを構築して樹脂の表面改質実験を行った。

レーザーにより表面改質された試料は、表 1 に示す工程で無電解 Cu めっきを行い、局所めっきの可否について評価を行った。

表 1 無電解 Cu めっき工程

アルカリ脱脂	2分
コンディショニング	2分
触媒付与	2分
活性化	1分
無電解 Cu めっき(初期)	15分
無電解 Cu めっき(厚付)	60分 (約 3 μm)

3. 実験結果

3.1 SH 光加工システムの構築

新設した SH 光加工システムの光路図と写真を図 3 に示す。本研究で用いた超短パルスレーザーは、普段は超短パルスレーザー微細加工機として機器開放貸出利用しているため、その性能に影響を与えないように基本波光路上にフリップミラーを設置して必要時のみ SH 光加工システムを使用できる構成とした。基本波を $\lambda/2$ 波長板を通して偏

光状態を整えた後、BBO 結晶(Eksma Optics, BBO-655H)を用いて SH 光を発生させた。基本波 4 W の入射に対して発生した SH 光強度は約 860 mW、変換効率は約 21.5% であった。現状の基本波のビーム径は約 2.5 mm であり、ビームをさらに小さな径にコリメートしてから波長変換すれば効率は向上するが、光学定盤の空間的制限によりコリメータを設置できなかった。発生した SH 光はダイクロイックミラーを使って基本波と分離し、 $f = 100 \text{ mm}$ の平凸レンズを用いて試料表面へ照射する。試料表面での SH 光スポット径は約 35 μm であった。

試料位置は、3 軸自動ステージ(シグマ光機, SGSP20-85 および SGSP40-5ZF)をパソコンおよび PLC を用いて制御を行うことができる。試料移動量は XY $\pm 42.5 \text{ mm}$ 、Z $\pm 2.5 \text{ mm}$ 、試料移動速度は最大 20 mm/s である。なお、試料は真空吸着板で固定する。

3.2 SH 光を用いた SKW-L2 工法の評価

表 2 に示す SH 光照射条件のとおり照射パワーを 7 水準、走査速度を 6 水準の条件で振って試料の表面改質を行った。繰返し周波数は 100 kHz に固定、SH 光のパルス幅については未測定であるが、基本波に対して PHAROS-

表 2 SH 光照射条件

波長	515 nm
レーザーパワー	10, 20, 30, 40, 60, 80, 100 mW
走査速度	0.2, 1, 2, 5, 10, 20 mm/s
繰返し周波数	100 kHz
パルス幅	260 fs (基本波での値)
照射ピッチ	20 μm

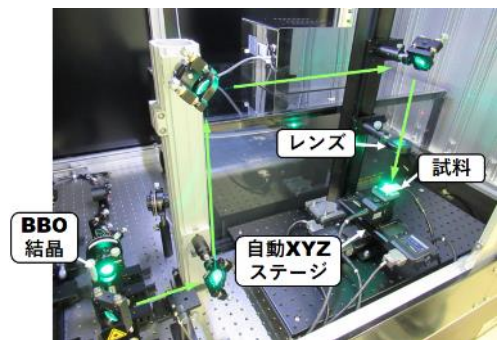
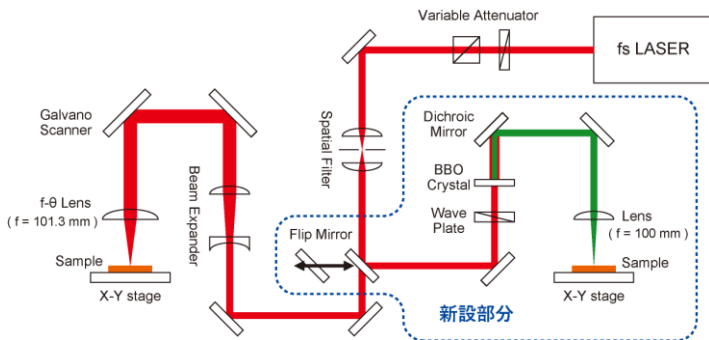


図 3 新設した SH 光加工システムの光路図(左)と写真(右)

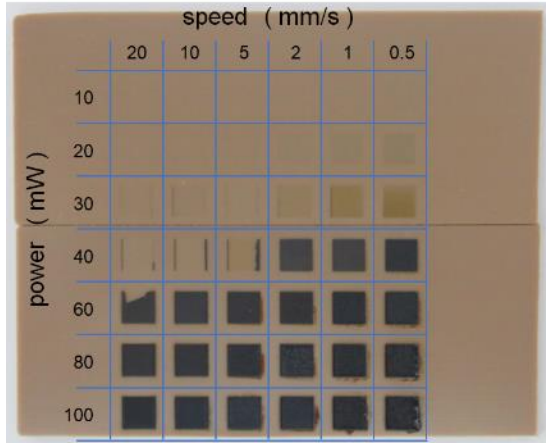


図4 SH 光照射による表面改質を行った結果

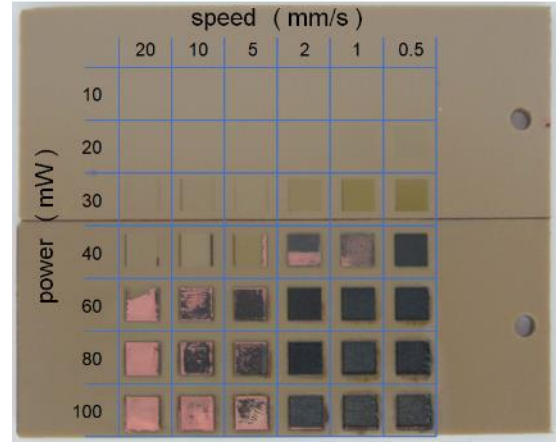


図5 表面改質後に無電解 Cu めっきを行った結果

4W の最短値である 260 fs に設定した。レーザー表面改質する領域は、X 方向(横線)に 3 mm のライン描画を Y 方向に 20 μm ピッチで繰返して 3 mm \times 3 mm の領域を表面改質した。SH 光で PPS 樹脂に表面改質を行った結果を図 4 に示す。照射パワーと走査速度の条件に対して視認しやすいようにマトリクス状に表面改質を行った。図中の左上から右下に向かうに従って、試料表面の 1 点当たり照射されるエネルギーの量が増加する。10 mW \cdot 20 ~ 2 mm/s の領域では試料表面に変色が生じていないのに対して、80 mW \cdot 1 ~ 0.5 mm/s の領域では加工領域の熔融や加工範囲外への変色の広がりが見られた。40 mW \cdot 20 ~ 5 mm/s で顕著に観測されているように、加工領域の左右の端のみ加工される現象がみられるが、これは自動ステージ走査の加減速領域で中央部より SH 光照射量が増加することによるものである。

図 5 に SH 光で表面改質を行った試料に無電解 Cu めっきを行った結果を示す。照射パワー 30 mW 以下の照射条件では走査速度に関わらず全くめっきが析出してない。一方、40 mW 以上では走査速度 2 mm/s 以下の条件でめっきが析出しないことが確認された。表面改質条件の内、60 mW 以上 \cdot 10 mm/s 以上の領域でめっきの選択析出性が確認できるが、概ね走査速度が速い方が良好な様に見える。より詳しくこの差について調査するために、各表面処理後およびめっき後の樹脂表面についてレーザー顕微鏡により観察した結果を図 6 に示す。未処理の PPS 樹脂表面は Ra 0.25 μm で、直径数 μm 程度の穴が無数に空いている。30 mW \cdot 2 mm/s の条件の場合、横線の加工痕は確認できるが溝は浅く、Ra 0.64 μm であった。しかし、この条件の改質箇所は親水性が向上せず、めっきは析出しない。60 mW \cdot 20 mm/s および 80 mW \cdot 20 mm/s の条件では









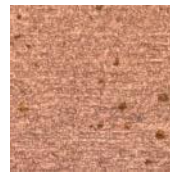
	未処理	30 mW 2 mm/s	60 mW 20 mm/s	80 mW 20 mm/s	80 mW 1 mm/s	(参考) 基本波 での最適条件
表面改質後	 Ra 0.25 μm	 Ra 0.64 μm	 Ra 1.36 μm	 Ra 1.38 μm	 Ra 14.68 μm	 Ra 3.4 μm
めっき後	× (撥水)	× (撥水)			× (撥水)	

図6 SH 光照射による表面改質後およびめっき後の表面状態と粗さ

Ra 1.3 ~ 1.4 μm 程度と加工痕が明確になり親水性が向上し、無電解めっきの析出性も良好である。照射パワー 80 mW の条件では点状にめっき未析出箇所が確認できるが、60 mW の条件では表面改質時に形成された筋状の模様に沿って一様にめっきが析出している様子が観察され、点状欠陥も無く均一な無電解めっきが行えている。80 mW・1 mm/s の条件では、Ra 14 μm 以上の表面粗さがあり、また SH 光照射部は光沢を示していた。これは SH 光の過剰照射により表面の樹脂が変形・溶解を経たことが示唆される。この条件についても改質箇所は撥水性を示していることから、めっきは析出していない。比較として基本波($\lambda = 1,030 \text{ nm}$)による最適条件で表面改質を行った PPS 樹脂の表面状態を示した^[5]。基本波の場合には、ガルバノスキャナと f θ レンズを用いて高速に描画することが可能であり、最適条件の照射パワー 500 mW、走査速度 100 mm/s のとき表面粗さは Ra 3.4 μm であった。基本波の最適条件と SH 光の照射結果を比較すると、表面改質部の表面粗さを低減させる効果があることが明らかとなった。これは PPS 樹脂の近赤外領域と可視域での吸光度および反射率が影響したものと考えられる。

次に、現時点における SH 光の最適条件(60 mW・20 mm/s)でめっきの密着強度について評価を行った。上述の無電解 Cu めっき後に硫酸銅浴による電気めっき(膜厚 25 μm)を行い、90°剥離強度試験を行った。幅 10 mm のパターンを形成した無電解めっき試料と、90°剥離強度試験後の写真を図 7 に示す。めっきの剥離強度は非常に弱く 0.4 N/cm であり、さらにめっき剥離面には電気めっきの際に液の浸透あるいはエッチングされた痕跡が見られた。60 mW・20 mm/s の SH 光改質条件は親水性の向上によりめっき析出はするものの、樹脂表面へめっき金属を強固に結合させるための化学種や物理的アンカー構造を有していないことが示唆される。

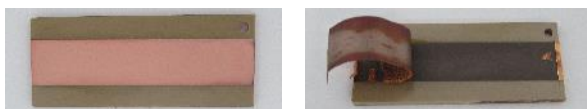


図 7 無電解めっき後(左)、90°剥離強度試験後(右)

4. まとめ

耐熱性や耐薬品性が高く電気自動車関連で 3D-MID 化のニーズが高い PPS 樹脂に対して、超短パルスレーザの第二次高調波による SKW-L2 工法における樹脂-めっき界面粗さの低減の可能性について調査を行った。準備段階として、超短パルスレーザ微細加工機としての性能に影響を与えないように新規に SH 光発生ラインを組上げ、自動ステージ制御で試料を操作できる SH 光システムを構築した。照射パワーと走査速度を複数の条件で振って表面改質の最適条件の評価を行い、照射パワー 60 ~ 80 mW、走査速度 20 mm/s 程度の照射条件の時に樹脂表面粗さ Ra 1.3 ~ 1.4 μm で無電解 Cu めっきに対して良好な選択析出性を確認することができた。これにより従来の基本波による表面改質条件よりも表面粗さを低減させることができた。しかし、表面改質部分へ析出しためっき膜は 90°剥離強度試験で 0.4 N/cm 程度であり、樹脂表面と十分な密着強度を有していないことが明らかとなった。今後は、表面改質箇所への別な化学的修飾手法との併用も検討してめっき密着強度を向上させる試みを行い、高品質な 3D-MID の開発を継続していく予定である。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団 2019 年度一般研究開発助成(AF-2019206-B2)を受けて行われたものです。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 中川威雄, 湯本哲男, 川崎徹, 「MID (射出成形回路部品)」, シーエムシー, (1997).
- [2] 目黒和幸, 村上総一郎, 吉澤徳夫, プラスチックス 65(4), (2014) 67-70.
- [3] 目黒和幸, 日本 MID 協会第 14 回定期講演会 (2016).
- [4] 目黒和幸, 村上総一郎, 吉澤徳夫, 菅野信, 第 84 回レーザー加工学会講演論文集, (2016) 216.
- [5] 目黒和幸, 村上総一郎, 山本角洋, 渡辺浩聡, 吉澤徳夫, 第 32 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会講演論文集 (2017).

デジタルシボによる南部鉄器製急須の作製*

和合 健**、生内 智**、及川 春樹***

南部鉄器製急須を対象として、意匠及び作製工法に進歩的手法を提案することを目的にデジタルシボ技術の応用展開に取り組んだ。意匠ではパラメトリックにパラメータを数値制御して複雑形状が作製できるボロノイ分割を用い、手加工では困難な意匠を実現した。作製工法では、厚みが薄い鉄器蓋を加工時及びマッチプレートで保持するため、パーティングラインで分割した蓋原型下部に円筒つば部を付加した。最終的に蓋原型を3Dプリンタ方式と切削加工方式で比較した結果、鋳造後の蓋は、切削加工方式の方が鋭利なエッジを持つシボ模様が形成されることが分かった。

キーワード：デジタルシボ、南部鉄器、急須、ボロノイ、蓋、金型

Product of Nanbu Ironware Teapot with Digit Shibo

WAGO Takeshi, OBONAI Tomo, OIKAWA Haruki

Key words : Digit shibo, Nanbu ironware, Teapot, Voronoi, Teapod lid, Master die

1 はじめに

昨今、南部鉄器の製造現場においては、原型製作者、プレート製作者の人材及び後継者不足が顕著になっており、新規製品開発が鈍化している。また、古くからある金型は当時の図面や小種等が無く、金型が壊れた場合は、再製作の手立てが無くなる可能性が高く解決策が望まれている。この二つの問題点に対してデジタルシボによる原型製作では、パソコンでシボ模様を持つ3Dモデルが作成できるため、パラダイムシフト（工程改変）の実現による新たな人材発掘が期待できる。またデジタル特有のストレージ（記憶媒体）保存により、原型のアーカイブ化（履歴化）が可能となる。特に、デジタルシボで南部鉄器を製作した先行事例が見当たらないことから、我々は複数の事例提案によるデジタルシボの有用性探索を主目的にして、デジタルシボ応用研究に取り組んできた^{1)~4)}。

ここでは南部鉄器製急須を対象にして、意匠及び作製工法に進歩的手法を提案する。意匠ではボロノイ分割と呼ばれるランダム配置した母点と垂直二等分線の組み合わせから構成される直線的な意匠を試みた。作製工法では肉厚が薄い急須の蓋を対象にして、デジタルシボ及びミーリング加工を利用した蓋マッチプレート金型の作製方法を提案した。

2 意匠設計

2-1 ボロノイ分割

意匠設計の目的は、今までの南部鉄器製急須には見られない意匠を採用して差別化と新鮮さを出すこととし、その実現の手段として、手加工では困難なパラメータの数値を制御しながら、複雑な形状を作製できるパラメトリックデザインを取り入れた。ここでは多くのパラメトリックデザインの中からボロノイ分割¹⁾を選択した。図1にボロノイ分割の概略図を示す。ボロノイ(Voronoi)図は平面上にいくつかの点が配置されているとき、その平面内の点をどの点に最も近いかによって分割してできる図であり、その分割をボロノイ分割という。配置された点のことを母点（図中の黒丸）と呼び、この図での母点数は5であり、ボロノイ領域は5つに分かれている。一般的なボロノイ分割では母点数とボロノイ領域数は一致する。ボロノイ領域の境目の線をボロノイ境界、ボロノイ境界の交点をボロノイ点と呼ぶ。端的にはボロノイ図は、二つの母点の垂直二等分線を引き、複数の垂直二等分線の交点で領域分割して作成したものである。ボロノイ図の作成では3DCAD(型式:Rhinceros、メーカー:Robert McNeel & Associates)とRhincerosに搭載されているビジュアルプログラミングツール(Grasshopper)を使用した。図2にビジュアルプログラミングツールを使用した本体上型の設計過程を示す。各コマンドを線で結び順序立てし、各コマンドに必要なとする数値を入力することで自動的にボロノイ分割が行われる。

2-2 急須への意匠設計

ボロノイ意匠の設計では母点数でボロノイ平面の生

* 令和2年度いわてものづくりイノベーション推進事業

** 素形材プロセス技術部

*** 有限会社及春鋳造所

成数が決定される。そこで複数の母点数を試し、既存の急須と比較して違和感が少ないこと、かつボロノイ意匠として認識できる広い平面を持つことなどから母点数は 50 点とした。最終的な急須のシボ性状はボロノイ分割した面の素地にゆず肌模様を加えた。また本体上型へのゆず肌シボ画像の投影方法は図 3 に示す円柱投影、その他は平面投影とした。図 4 にゆず肌付加前後を、図 5 に完成したボクセル形式の 3D モデルを示す。単にボロノイ分割した無機質な平面にゆず肌を付加することで、有機的な柔らかさがボロノイの意匠に加えられ意匠性が向上した。デジタルシボ技術は平面だけでなく自由曲面にも一定の深さでシボを付加することができるため、一般的な回転形状の急須の他に非対称で不規則な面構成の形状にも対応できる。今回の急須の場合でも細部までムラの無い均一なシボ模様を付加することができた。

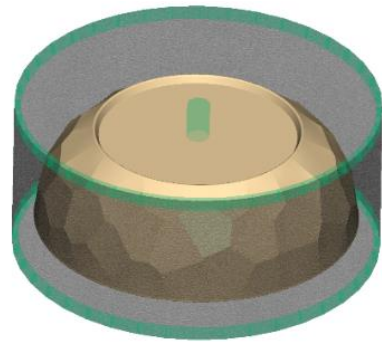


図 3 ゆず肌画像の円柱投影設定

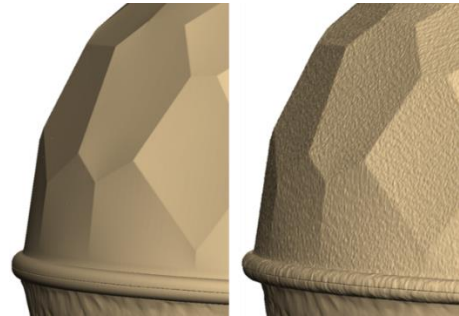


図 4 ゆず肌付加前後
(左：ゆず肌無し、右：ゆず肌有り)

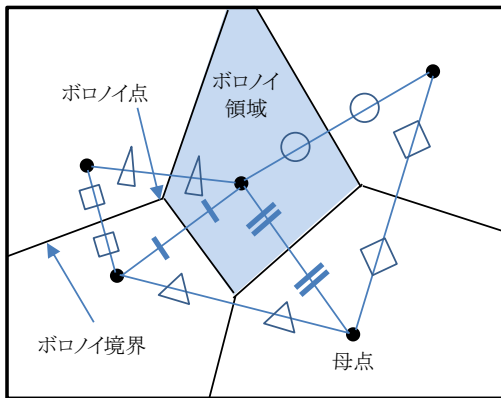


図 1 ボロノイ分割

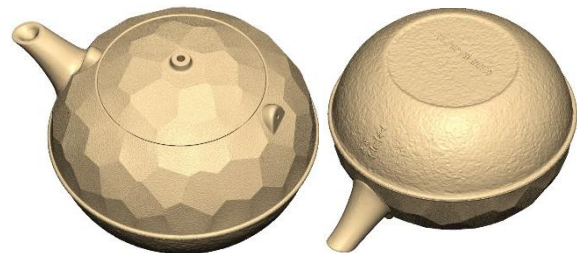


図 5 ボクセル形式の 3D モデル
(左：上部、右：下部)

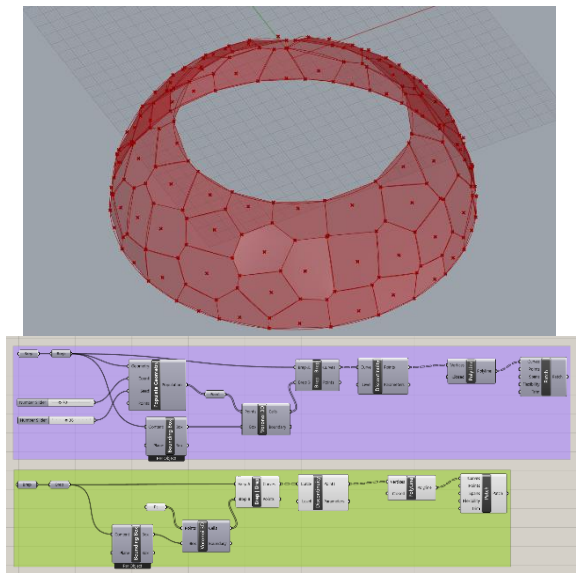


図 2 ビジュアルプログラミングツールを使用した本体上型意匠設計

3 蓋金型の製作

従来のデジタルシボを利用した蓋金型⁴⁾の製作は、図 6 の樹脂 3D プリンタ方式 (以下、工法 1 と記す)で行って来たが工程が多く、さらに外注でしか対応できなかった。これに対して切削加工方式 (以下、工法 2 と記す)は、内製で対応できるが加工方法を新規で作り出す必要があり、今回はそれを試した。工法 1 は蓋の STL 形式モデルを利用して、樹脂 3D プリンタで樹脂製原型モデルを作製し、それを基に蓋用アルミニウム合金製マッチプレートを作製する方法である。工法 2 はブロック状のアルミニウム合金材から切削加工で削り出して、直接プレートに取り付けてマッチプレート金型を作製する方法である。二つの工法を検証するために、両工法でボロノイ意匠の蓋を作製して出来栄を比較した。工法 2 による金型製作を以下に述べる。図 7 に蓋上下分割のパーティングラインを示す。マッチプレートで上下分割するパーティングラインは点線の位置とした。パー

ティンダライン位置の目安は蓋表側で中心位置から傾斜が下り円周部終端となる位置である。蓋表側と蓋裏側には、治具固定部を追加した。蓋原型の表側と裏側をプレートに固定する場合、厚さが薄いため蓋裏側にめねじを切ることができない。そのためマッチプレートに固定する方法は、厚さ10mmのプレートを2枚利用して挟み込む固定方法を考案した。図8のとおり蓋表側と裏側の根本に抜け防止のために約φ90mmの円筒つば部を付け加えた。図9に2枚プレートによる挟み込み固定を示す。この図はプレート断面を切断した模式図であり、蓋表側及び裏側の円筒つばを利用して、プレートからの抜け防止部を形成した。挟み込み方法の考案により蓋部のめねじ加工が不要となり、接着剤を使わず物理的に勘合固定できるため、プレートと蓋原型が容易に取り外せて位置調整等のメンテナンスを行うことができる。

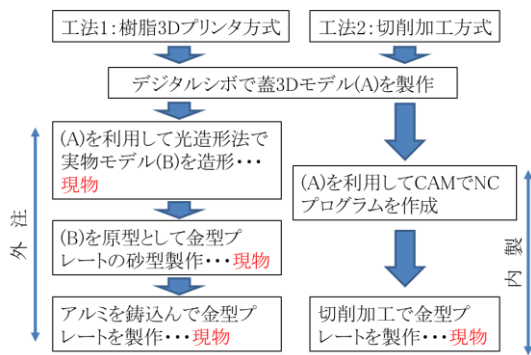


図6 蓋製作の工程

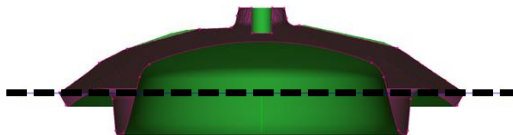


図7 蓋上下分割のパーティングライン

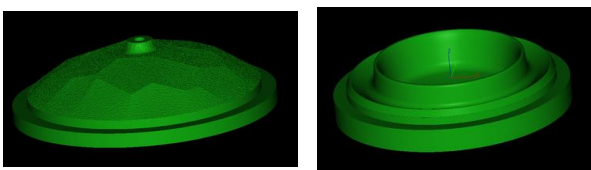


図8 治具固定部の追加
(左: 蓋表側、右: 蓋裏側)

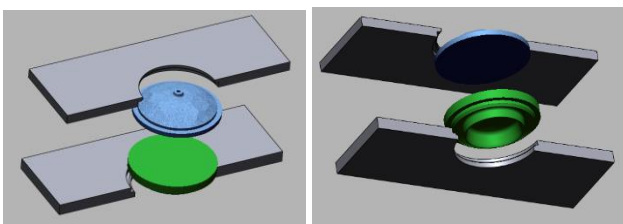


図9 2枚プレートによる挟み込み固定
(左: 上方視点、右: 下方視点)

図10に蓋加工でのシミュレーション結果、図11に蓋仕掛品と面板、図12に加工後の写真を示す。蓋をアルミブロック材からミーリングで削り出すためには、切削力を十分に上回る固定が必要となる。そこで図11のとおり円筒つば部にM6のめねじを60°分割で6か所設定し、面板治具を利用して固定した。つまり、蓋表側及び裏側の下部に形成した円筒つば部が、マッチプレートへの固定と加工時の面板治具への固定の双方で利用され、ここでの蓋部のアルミブロック材からの削り出し加工が可能となった。モデルの座標系配置はリバースCAD(型式: Geomagic DesignX、メーカー: 3D Systems)、CAMはSTL対応3軸CAM(型式: CraftMill、メーカー: C&Gシステムズ)を使用した。加工機械は、治具加工、急須本体及び蓋の仕掛加工の2次元加工に3軸M/C(型式: VS3A、メーカー: 三井精機工業)を使用した。急須本体及び蓋のシボ模様加工では、軸送りの加減速が多用されるため速いサーボ応答制御が行える高速M/C(型式: HSC55linear、メーカー: DMG/MORI)を使用した。

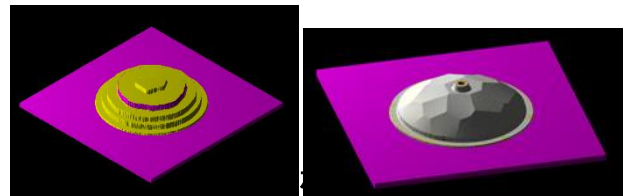


図10 切削シミュレーション
(左: 荒加工(等高線)、右: 仕上げ加工(走査線))

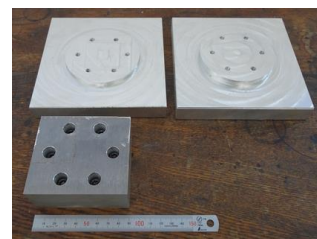


図11 蓋仕掛品(上)と面板(下)

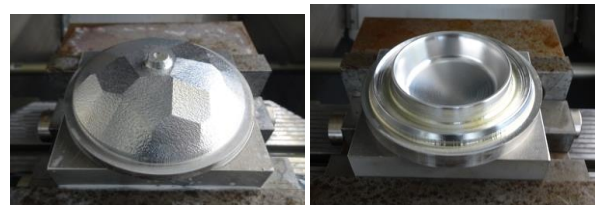


図12 蓋加工後(左: 表、右: 裏)

表1に使用した工具を示す。使用したエンドミルは蓋表側で6本、蓋裏側で5本、最終仕上げは蓋表側でφ2mmボールエンドミル、蓋裏側でφ3mmボールエンドミルとした。表2に蓋原型の加工条件を示す。蓋上側は等高線パスで荒取り加工を行った後、走査線パスで仕上げ加工を行ってシボ模様を削り出した。蓋裏側は2次元加

表1 蓋原型で使用したエンドミル

No.	φ	被膜	刃数	突出 (mm)	刃長 (mm)
T1	FEM12	DLC	3	40	18
T2	FEM10	DLC	3	35	15
T3	FEM6	DLC	3	35	9
T4	BEM6	DLC	2	40	12
T5	BEM3	DLC	2	45	3
T6	BEM2	DLC	2	45	2

FEM: Flat endmill, BEM: Ball endmill



図13 蓋マッチプレート金型の構成

表2 蓋原型の加工条件

番号	1	2	3	4	5	6
工程	荒取り	荒取り	仕上げ	仕上げ	仕上げ	仕上げ
方式	等高線	等高線	等高線	等高線	走査線	走査線
軸切込み(mm)	9.6	5	2.5	0.6	0.075	0.037
径切込み(mm)	2.4	2	1.2	1.2	-	-
回転数(min ⁻¹)	6400	7680	12800	12800	8270	9880
切削速度(m/min)	241	241	241	241	78	62
送り速度(mm/min)	1816	1720	1520	2240	1984	1581
一刃送り(mm/tooth)	0.09	0.074	0.04	0.087	0.12	0.08
仕上代(mm)	0.1	0.05	0.02	0	0	0
角度(deg)	-	-	-	-	45	135

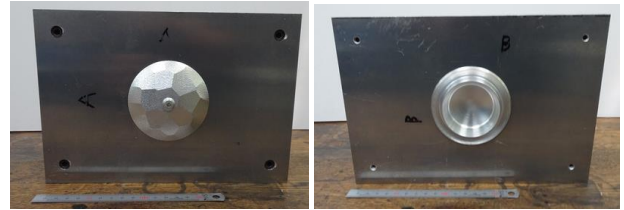


図14 蓋マッチプレート金型
(左: 上側、右: 下側)

表3 蓋原型での加工時間

工程	切削距離 (m)	加工予測時間:a (h:m:s)	加工実時間:b (h:m:s)	b/a
1	28	0:14:22	0:17:00	1.18
2	6	0:03:30	0:04:00	1.14
3	8	0:03:12	0:06:00	1.88
4	12	0:04:53	0:09:00	1.84
5	102	0:51:20	1:11:00	1.38
6	205	2:09:48	2:47:00	1.29
計	360	3:27:05	4:34:00	1.32

※()は予測値

工程	切削距離 (m)	加工予測時間:a (h:m:s)	加工実時間:b (h:m:s)	b/a
1	37	0:19:28	0:22:00	1.13
2	6	0:03:16	0:04:00	1.22
3	8	0:03:24	0:04:00	1.18
4	19	0:08:01	0:08:00	1.00
5	128	1:19:47	(1:30:09)	(1.13)
6	-	-	-	-
計	197	1:53:56	(2:08:09)	(1.12)

※()は予測値

工であったため荒取り及び仕上げとも加工パスは等高線とした。表3に加工時間を示す。ここで加工予測時間とはCAMが計算した工具送り速度と工具経路距離から算出した時間であり、加工実時間は実際の加工時をタイマーで測定した時間である。その結果、総加工時間は蓋表側で4時間34分、蓋裏側で2時間8分9秒となった。加工実時間は、工具の移動軸や進行方向の切り替えのための減速で加工予測時間よりも長くなる傾向にあり、その比を b/a で示した。蓋の表側がシボ模様の加工になるために裏側よりも加工時間が長くなっていた。

図13~15に蓋マッチプレート金型の各要素を示す。加工した蓋表側、蓋裏側及びプレートを組み付けて蓋マッチプレート金型が完成した。蓋マッチプレート金型を目視により外観検査を行った結果、蓋金型の上下のずれ



図15 蓋マッチプレート金型側面
(左: 全景、右: 拡大)



図16 蓋マッチプレートの形状検査
(左: 全景、右: スタイラス部)

表4 蓋部の検査結果

mm						
位置	蓋表側:p	プレートA:q	q-p	要件	結果	
a	5.166	-	2.315	4.982	-2.851	-公差 ○
b	-	1.043	2.667	-	1.624	+公差 ○
c	5.175	-	7.036	-	1.861	蓋裏側と相殺 ○
d	-	-	0.812	-	-	bに依存 -
e	2.984	-	2.197	-	-0.787	-公差 ○
φf	90.128	-	90.286	-	0.158	+公差 ○
φg	80.038	-	80.149	-	0.111	+公差 ○

位置	蓋裏側:p	プレートB:q	q-p	要件	結果	
a	5.132	-	1.768	4.969	-3.364	-公差 ○
b	-	1.487	3.201	-	1.714	+公差 ○
c	9.126	-	7.357	-	-1.769	蓋表側と相殺 ○
d	-	-	1.720	-	-	bに依存 -
e	2.981	-	0.990	-	-1.991	-公差 ○
φf	90.190	-	90.302	-	0.112	+公差 ○
φg	80.154	-	80.204	-	0.050	+公差 ○

位置	c1	c2	c1+c2	公差	結果
h	1.861	-1.769	0.092	+0.2~0	○

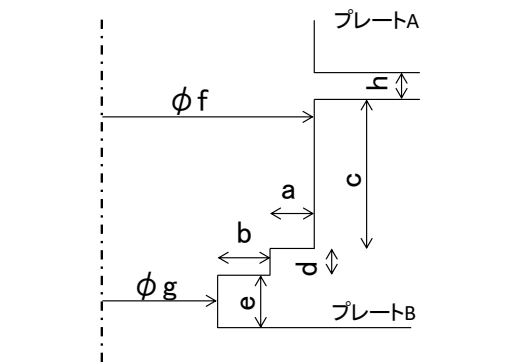
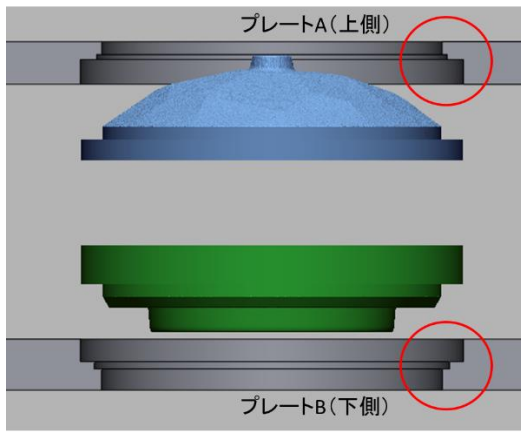


図 17 プレート部の測定位置 (丸囲み部の拡大図)

プヤ傷等の切削不良は見られなかった。図 16 に蓋マツチプレート金型の嵌合部形状検査、表 4 に蓋部の検査結果を示す。図 16 のとおり先端頂角 16° 、先端 R25 μm の円錐スタイラスを利用して、輪郭形状測定機 (DSF600S、小坂研究所) で蓋金型とプレートの勘合部の形状を比較した。測定箇所は図 17 で示した a~h で、各位置で-公差または+公差の要件を持つ。公差の要件は、蓋金型とプレートの嵌合であるため嵌め合いの方向と寸法幅が重要となり、すべての結果が公差要件を満足し、良品と判定された。最終的に 2 枚のプレートを合わせた時の隙間が h となり公差 +0.2~0 mm を狙って作製した結果、h は +0.092 mm となり良品と判定された。

4 鋳造工程

図 18 に工法 1 と工法 2 の鋳造工程の概略を示す。製品の取り数は工法 1 で 6 個取り、工法 2 で 1 個取りとした。工法 1 と工法 2 の二つの方法で作製した鋳物蓋を目視検査で比較したところ、両者とも意図したボロノイ意匠が適正に反映されていた。工法 1 では、僅かであるが積層ピッチ痕が残っていたものの製品不良には該当しない外観であった。これに対して、工法 2 の方が鋳肌面の凹凸が鮮明で輪郭のはっきりして、鋭利なエッジを持つシボ模様が形成されていた。

表 5 に各工法の特長を整理する。工法 1 の優位点は、3D プリンタを利用するため樹脂原型作製が容易、かつ多数個取りに有利。欠点は、外注に頼る必要があるため精

工法 1



工法 2



図 18 鋳造工程とパレル研磨後の鋳造品

表 5 各工法の特長

方式	優位点	欠点
工法1 (3Dプリンタ)	<ul style="list-style-type: none"> 原型作製が容易 多数個取りに有利 	<ul style="list-style-type: none"> 外注必須(外注費、納期長) 外注先の技能に出来が依存
工法2 (切削)	<ul style="list-style-type: none"> 内製化できる(自社管理) エッジが鋭利 	<ul style="list-style-type: none"> 多数個取りでは金型の複数加工必要

度が外注先の技能に依存する、納期が長くなる、外注費用が発生する等である。一方、工法 2 の優位点は、全工程を内製化できるため製品精度を自社の固有技術で管理でき、3D プリンタ方式と比較して鋳肌面の凹凸を鮮明に仕上げられる。欠点は、削り出した蓋金型の個数で取り数が決まるため、取り数に応じた数の蓋金型を削り出す必要がある。両方式ではそれぞれ優位点と欠点を持つため、状況に応じて作製方式を選択する必要がある。

5 結 言

南部鉄器製急須を対象として、意匠及び作製工法に進歩的手法を提案することを目的として、デジタルシボ技術の応用展開に取り組み、以下の結果が得られた。

- (1) 急須の意匠は、パラメトリックにパラメータを数値制御して複雑形状が作製できるボロノイ分割を用いた。ボロノイ分割は手加工では困難な意匠実現に有利であった。加えて、下地にゆず肌のシボ模様を与えることで、無機質な多角形平面パターンに柔らかさが加わった。
- (2) 厚みが薄い鉄器蓋の作製工法は、パーティングラインで分割した蓋表側及び裏側の下部に円筒つば部を

付加することで解決した。円筒つば部がミーリング加工時の面板接続でのネジ部、及びマッチプレート挟み込み固定時の抜け防止の要点となった。

- (3) アルミニウム合金材からの削り出し加工では、2 次元加工による治具加工、及び点切削を多用するシボ模様加工の二つの異なる作業で性能の異なる 2 台のマシニングセンタを使い分けることで作業効率化が図られた。また、マッチプレート金型組み付け後の勘合検査の結果、すべての項目で良品と判定された。
- (4) 蓋金型を樹脂 3D プリンタ方式と切削加工方式で作製した結果、切削加工方式の方が鋳肌面で鋭利なエッジを持つシボ模様が形成されていた。しかしながら、両方式ではそれぞれ優位点と欠点を持つため、状況に応じて蓋金型作製方式を選択することが必要である。

文 献

- 1) 和合 健、浅沼拓雄、飯村崇：共焦点顕微鏡を利用したデジタルシボの形状検査、岩手県工業技術センター研究報告第 19 号、(2017)
- 2) 和合 健、浅沼拓雄：合焦点顕微鏡を利用したデジタルシボの形状検査、岩手県工業技術センター研究報告第 20 号、(2017)
- 3) 和合 健、千田 征樹：形彫り放電加工を利用したデジタルシボ製作の検討、岩手県工業技術センター研究報告第 21 号、(2018)
- 4) 和合 健、生内智、及川 春樹：デジタルシボ技術を活用した南部鉄器の作製、岩手県工業技術センター研究報告第 23 号、(2020)
- 5) 鹿児島大学 Web site (kagoshima-u.ac.jp)：ボロノイ図とは

長尺測長器の幾何学誤差補正方法の確立*

和合 健**

長尺測長器の精度向上を図るために、案内ガイド上を走行するキャリジの姿勢誤差補正を行った。姿勢誤差補正方法は、長尺測長器で目盛りとしているレーザ干渉計を利用して、位置決め用光学系から角度用光学系に置き換えてキャリジの姿勢誤差（角度）を測定し、自己補償による結果を利用する方法とした。姿勢誤差補正を適用した結果、測定誤差（標準値との差）は平均値で補正無しが 0.162 mm、補正有りが 0.060 mm に改善した。

キーワード：長尺寸法、姿勢誤差、補正、レーザ干渉計

Study of Compensation of Orientation Error for Long Size Measuring Instrument

WAGO Takeshi

Key words : Long size, Orientation Error, Compensation, laser interferometer

1 はじめに

大型部品及び装置の寸法測定は、大型ガントリー型座標測定機の使用が一般的であったが、最近ではトラック式ハンディ型非接触式スキャナ及び同接触式プローブ（以下、トラック式測定器）を利用した長尺寸法測定器が広く活用されている。トラック式測定器は手軽に長尺寸法測定が実現できる反面、現場環境温度や校正劣化に起因する偏り誤差が生じ易いため寸法標準器により偏り誤差を取り除く必要がある。そこで我々は作業現場での長尺寸法測定時に使用者校正で使用する寸法標準器を提案した¹⁾。提案した寸法標準器は測定部が SUS 材、棒状管体部が CFRP（炭素繊維強化プラスチック）からなる複数の部材で構成されているため、一義的に文献から線膨張係数（以下、CTE）を得ることが出来ず、実際に測定して求める必要があった。CTE の測定は複数の温度域で寸法測定を行う必要があり、我々が開発を進めている図 1 に示す可搬式長尺測長器²⁾（以下、WASUM）は目盛りをレーザ干渉計としたことで温度変動に対して頑健性を持つことから WASUM が CTE 測定に適すると

考え、CTE の値付けを試した。その結果、WASUM の寸法測定性能は正確さとばらつきの双方で更なる精度向上が必要となった。

姿勢誤差を取り除くための一連の補正技術が構築できれば、長尺物の寸法測定での誤差低減が図られ、寸法標準器の CTE 測定での精度向上に繋がることから WASUM の改良を検討した。特に、正確さの向上を目的としてキャリジの走行運動時に生じる姿勢誤差の補正方法を検討した。

2 実験方法

2-1 運動誤差

案内ガイドをキャリジが走行すると案内ガイドの曲がり（非真直性）から運動誤差が生じる。図 2 に直進軸の運動誤差モデル³⁾を示す。キャリジの走行方向を X として E_{XX} を直進位置決め誤差、 E_{YX} 、 E_{ZX} を真直度誤差、 E_{AX} 、 E_{BX} 、 E_{CX} を姿勢誤差という。次に、直進 3 軸の幾何学モデル式³⁾を式(1)～(3)、図 3 に直進 3 軸の軸構成を示す。式(1)～(3)の右辺の項を定めることで、幾何学誤差 e_x 、 e_y 、 e_z を求めることが出来る。

$$e_x(x, y, z) = E_{XX}(x) + E_{XY}(y) + E_{XZ}(Z) + (E_{B(OX)Z} + E_{BX}(x) + E_{BY}(y))z - (E_{C(OX)Y} + E_{CX}(x))y \dots (1)$$

$$e_y(x, y, z) = E_{YX}(x) + E_{YY}(y) + E_{YZ}(Z) - (E_{A(OY)Z} + E_{AX}(x) + E_{AY}(y))z \dots (2)$$

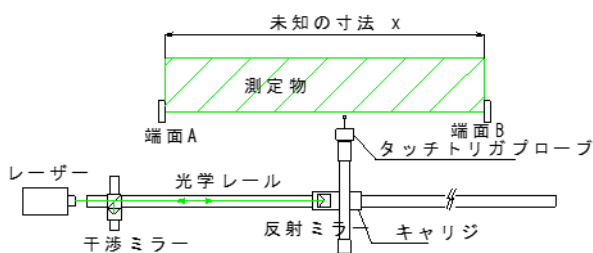


図 1 可搬式長尺測長器 (WASUM) の概要

* 令和 3 年度技術シーズ創生・発展研究事業 可能性調査研究
** 素形材プロセス技術部

$$e_z(x, y, z) = E_{ZX}(x) + E_{ZY}(y) + E_{ZZ}(Z) + E_{A(0Y)Z} + E_{AX}(x)y \dots (3)$$

E_{XZ} : 誤差運動で並進誤差と呼ばれる直進位置決め誤差。添え字の第一列は誤差の方向であり A~C は X~Z 軸周りの姿勢誤差、第二列はどの軸の誤差かを表す。

$E_{C(0X)Y}$: 軸平均線の幾何誤差であり、添え字の第一列は誤差の方向、第二列の「0」は軸平均線の幾何誤差であることを示し、「0」の右隣はどの軸を基準とした誤差かを表す。第三列はどの軸の誤差かを表す。

E_{C0Y} : 軸平均線の幾何誤差であり、添え字の第一列は誤差の方向、第二列の「0」は軸平均線の幾何誤差であることを示す。第三列はどの軸の誤差かを表す。

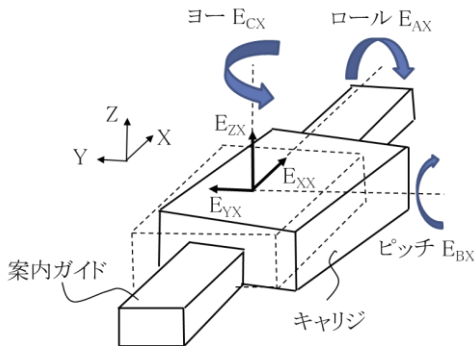


図 2 直進軸の運動誤差

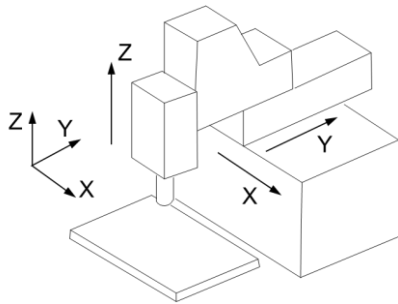


図 3 直進 3 軸の軸構成

2-2 姿勢誤差の測定方法

図 4 に WASUM での光学系配置を示す。長尺物の寸法測定では、位置決め用光学系を取り付けることで反射ミラーの位置から測定物の寸法測定を行う。光学系を角度測定用に置き換えることで、案内ガイドを走行する時のキャリジの姿勢誤差が測定でき、WASUM の自己補償が行える。図 5 に角度測定原理を示す。角度測定は反射ミラーが傾くことで L1 と L2 に光路差が生じ、この光路差から三角関数による計算で角度が算出できる。

角度用光学系にて測定したピッチングを図 6、ヨーイングを図 7 に示す。この測定での繰り返し誤差を求めるために、0~3700 mm の一軸方向位置を 100 mm

間隔で 38 か所を繰り返し 3 回測定した。繰り返し誤差は 1 か所 3 個の分布幅を位置 0 mm を除く 37 個の平均値として求めた。ピッチングは、繰り返し誤差 1.6 μ rad (腕長さ 100 mm で 1.8 μ m)、ばらつきは σ 1.2 μ m、ヨーイングでは、繰り返し誤差 1.3 μ rad (腕長さ 100 mm で 0.5 μ m)、ばらつきは σ 0.6 μ m となった。その結果、各位置でのピッチング及びヨーイングは高い再現性を示し、姿勢誤差補正が適用できることを確認した。

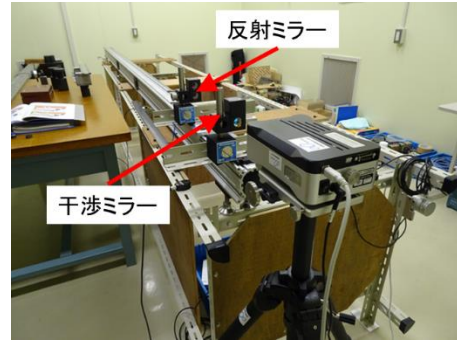


図 4 WASUM の光学系配置

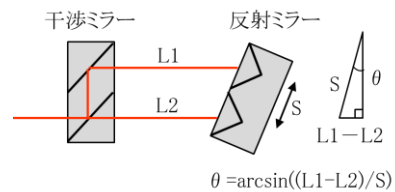


図 5 角度測定原理

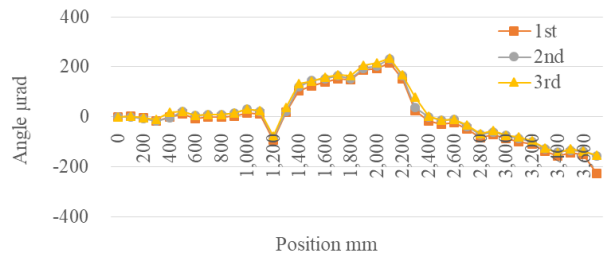


図 6 角度用光学系で測定したピッチング

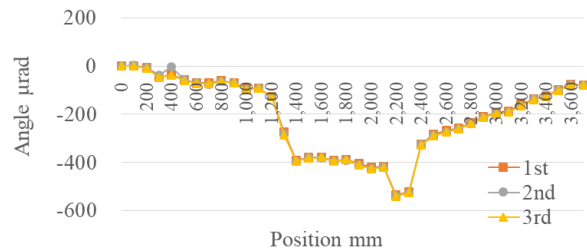


図 7 角度用光学系で測定したヨーイング

2-3 姿勢誤差の補正方法

WASUM は X 軸のみの構成であるため、式 (1) ~ (3) において Y 及び Z 軸の項を除くと幾何学誤差は式 (4) と

なる。

$$e_x(x, y, z) = E_{XX}(x) + E_{BX}(x)z - E_{CX}(x)y \quad \dots (4)$$

ここで $e_x(x, y, z)$ はX軸の誤差、 $E_{XX}(x)$ はX軸の送り方向位置決め誤差、 $E_{BX}(x)z$ はZ軸のB軸回りの誤差(ピッチング誤差)、 $E_{CX}(x)y$ はY軸のC軸回りの誤差(ヨーイング誤差)となる。式(4)をWASUMの場合に置き換えるためにピッチングの姿勢誤差補正方法(図8)とヨーイングの姿勢誤差補正方法(図9)を基に、式(5)~(7)のとおり姿勢誤差補正を定式化した。

$$L_{cp}(i) = x(i) - pi(i) - ya(i) \quad (i=0 \dots 3700 \text{ mm}) \quad \dots (5)$$

$$pi(i) = (L_2 - L_1) \sin \theta_{zx} \quad \dots (6)$$

$$ya(i) = L_3 \sin \theta_{xy} \quad \dots (7)$$

$L_{cp}(i)$: 補正後の測定値(mm)、 $x(i)$: 測定値(mm)、 $pi(i)$: ピッチング(mm)、 $ya(i)$: ヨーイング(mm)

誤差マップの作成方法は図10のとおり、レーザ干渉計の角度用光学系で測定したWASUMのピッチングとヨーイング(μrad)をExcelVBAで作成したマクロプログラムにより長さの単位(mm)に変換する方法とし、得られた誤差マップを図11に示す。制御プログラムへの姿勢誤差補正の組み込みは図12の※部のとおり、制御プログラムの開始直後に補正可否の分岐として組み入れた。

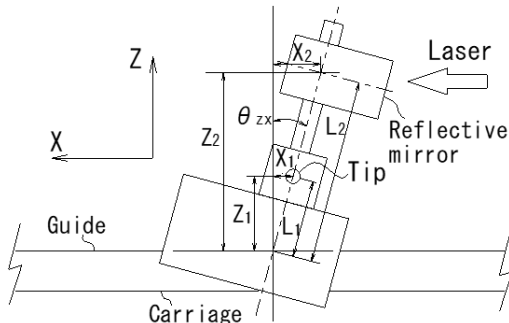


図8 ピッチングの姿勢誤差補正方法

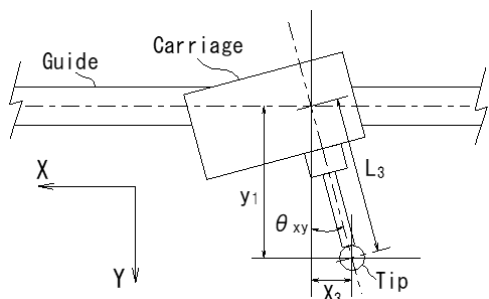


図9 ヨーイングの姿勢誤差補正方法

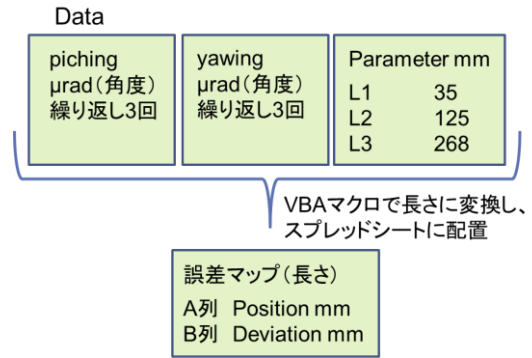


図10 誤差マップの作成方法

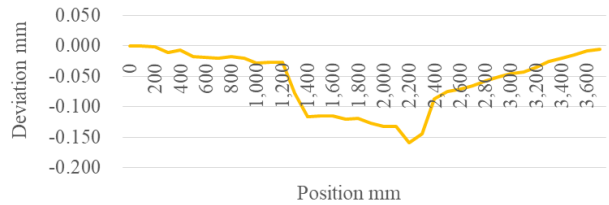


図11 姿勢誤差補正用誤差マップ

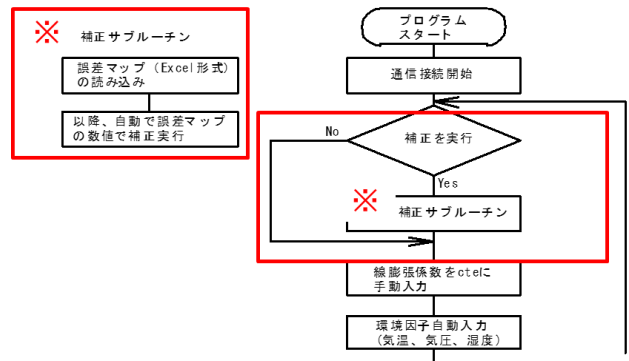


図12 制御プログラムへの姿勢誤差補正サブルーチンの組み込み

3 姿勢誤差補正の検証

3-1 位置での検証

図13のヨーイングが均一な位置A(位置770-1270mm)と変化が大きい位置B(1060-1560mm)で姿勢誤差補正の効果を検証した結果を表1に示す。測定物はブロックゲージ500mm(以下、GB500)とした。表1のdevは標準値との差、 σ はばらつき、nは繰り返し数である。この結果からdev及び σ とも補正

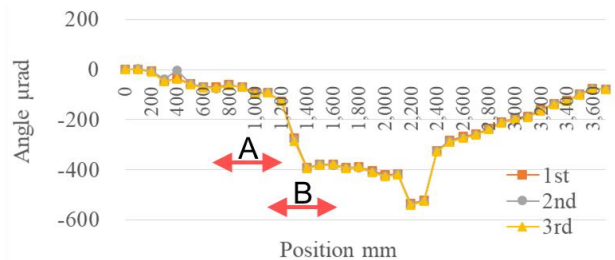


図13 測定位置

表 1 測定位置の違いによる結果

(上 : dev、下 : σ)

dev	n=9				mm
	A: 位置770-1270mm		B: 位置1060-1560mm		
反復	補正なし	補正あり	補正なし	補正あり	
1	0.018	0.000	0.002	0.005	
2	-	0.004	-	-	
3	-	0.003	-	-	
average	0.018	0.002	0.002	0.005	

σ	n=9				mm
	A: 位置770-1270mm		B: 位置1060-1560mm		
反復	補正なし	補正あり	補正なし	補正あり	
1	0.018	0.009	0.005	0.005	
2	-	0.011	-	-	
3	-	0.005	-	-	
average	0.018	0.009	0.005	0.005	

無しでは測定位置による差が見られるが、補正有りでは異なる位置でも良好な結果となり、補正の効果が確認された。

3-2 棒状端度器による検証

棒状端度器 (以下、Cube Bar 850 : CB850) を利用して姿勢誤差補正の効果を検証した。CB850 (測定長さ L=850 mm) は両端に SUS 材の端度器を取り付け、筐体を CFRP (炭素繊維強化プラスチック) で構成した端度器である。測定回数は繰り返し 5 回を 1 セットとして反復 3 回とした。その結果、表 2 のとおり dev は補正無しでは 0.162 mm、補正有りでは 0.060 mm となり姿勢誤差補正の効果が確認できた。 σ は補正の有無による大きな差は見られなかった。

3-3 反復の検証

姿勢誤差補正有りの場合で、反復の誤差を検証した。測定物は GB500 (L=500 mm) として、繰り返し 5 回を 1 セットとして反復 2 回の測定をした。反復の再現性の検証であるため、通常測定時に最初に行う標準器との差をキャンセルする作業前校正は行っていない。表 3 のとおり 1 回目を p、2 回目を q としてその差を求めた。その結果、反復の誤差は 0.038 mm となった。この原因は案内軸のスティックスリップ現象の影響と思われる。

3-4 姿勢誤差補正に係る考察

JIS Z 8103:2000 計測用語で精度は、測定結果の正確さ (かたよりの小さい程度) と精密さ (ばらつきの小さい程度) を含めた、測定量の真の値との一致の度合い、と示されている。ここでの GB500 と CB850 を利用した検証結果から、姿勢誤差補正は dev で示される誤差、つまり正確さの向上に寄与することが確認できた。しかしながら σ で示されるばらつき低減への効果が見られなかった。その理由は、姿勢誤差補正はオフセットによりかたよりの取り除き、その誤差を低減させる方式であるが、ばらつきの原因は他に存在するために σ に変化が見られなかった。実験を行った上で σ の原因を推測すると、WASUM の摩擦滑

り方式案内によるスティックスリップ現象、つまり案内軸上を走行するキャリジの走行運動時に自励振動が生じているため、その振幅が位置決め誤差に関連していると推測した。位置決めのみならず改善が今後の課題として残った。

表 2 CB850 による結果

反復	n=5				std:CMM の測定値	測定位置
	dev		σ			
	補正無し	補正有り	補正無し	補正有り		
1	-	0.056	-	0.038	850.593	814-1665
2	0.162	-	0.010	-	850.593	813-1664
3	-	0.064	-	0.009	850.593	813-1664
average	0.162	0.060	0.010	0.027	-	-

表 3 反復の結果

記号	n=5				std: GB500	測定位置
	dev		σ			
	補正無し	補正有り	補正無し	補正有り		
p	-	-0.252	-	0.013	500.000	823-1334
q	-	-0.290	-	0.013	500.000	824-1334
p-q	-	0.038	-	0.001		

4 結 言

長尺測長器の精度向上を図るために、案内ガイド上を走行するキャリジの姿勢誤差補正を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 姿勢誤差 (角度 μ rad) を正確に測定し、誤差マップが作成できた。その誤差マップを利用した長尺測長器における補正式を定式化し、測定プログラム (VB6.0) を構築した。
- (2) 標準器を GB500 として、姿勢誤差補正の有/無で異なる位置での補正効果を検証した結果、補正有りでは異なる位置で誤差 (標準値との差) が小さくなり、キャリジ姿勢の偶然性が排除されることを確認した。
- (3) 標準器を CB850 (L=850 mm) として、姿勢誤差補正の有/無で測定誤差 (標準値との差) を検証した結果、測定誤差は繰り返し 5 回で補正無しで 0.162 mm、補正有りで 0.060 mm となり、補正効果を確認した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、インターンシップで実験に加わった岩手大学大学院の高橋由紘君と盛田雄斗君には補正アルゴリズムやデータ取得方法にご協力頂いた。ここで感謝の意を表す。

文 献

- 1) 和合健、生内智、磯部和夫 : 可搬式長大寸法測定器用長尺標準器の開発, 岩手県工業技術センター研究報告第 24 号, (2022)

2) 和合健、竹原英樹、辺見誠雄：レーザ干渉計を利用した大型構造体の高精度寸法計測技術の構築、岩手県工業技術センター研究報告第 23 号，(2021)

3) 茨木創一：工作機械の空間精度、森北出版、p14、p41(2017)

金属粉末積層造形品の仕上げ加工における位置決め方法と削り代*

飯村 崇**、黒須 信吾**、生内 智**、和合 健**、池 浩之***

金属粉末積層造形装置は 3DCAD のデータを基に切削加工などでは作製不可能な複雑な形状を作製することが可能だが、形状精度や表面粗さの精密なコントロールが難しく、それらが必要な部分については切削加工などの仕上げ加工を行う必要がある。そこで、造形品の仕上げ加工における位置決め方法を検討した。金属粉末積層造形時の変形を考慮し、仕上げ加工は 3D デジタイザで測定した値を基に、CAD データを適正に修正する必要がある。特に、ベストフィットによる補正は削り残しを無くす上で有効である。また、造形時の変形と位置決め時の誤差を考慮すると削り代は 0.4 mm 以上必要である。

キーワード：金属粉末積層造形、仕上げ加工、位置決め方法、削り代、3D デジタイザ

Positioning Method and Cutting Margin for Finish Milling of Metallic Additive Manufacturing Products

HIMURA Takashi, KUROSU Shingo, OBONAI Tomo, WAGO Takeshi and IKE Hiroyuki

Key words : Metallic Additive Manufacturing, Finish Milling, Positioning Method, Cutting Margin, 3D-Digitizer

1 緒 言

近年、機械部品の作製に金属粉末積層造形装置を使用するケースがみられる。金属粉末積層造形装置は 3DCAD のデータを基に切削加工などでは作製不可能な複雑な形状を作製することが可能だが、金属粉末を $\phi 0.1$ mm 程度のスポット径を持つ電子ビームやレーザービームで熔融させて積み重ねていくため形状精度や表面粗さの精密なコントロールが難しく、それらが必要な部分については切削加工などの仕上げ加工を行う必要がある¹⁾。図 1 に金属積層造形品（以下、造形品と称する）の仕上げ加工を行う場合の手順を示す。仕上げに切削加工を行う場合、加工原点や傾きなどを決定するための基準面が必要となるが、造形品の場合、表面粗さが大きく、基準として使用できる面が存在しない。また、レーザー方式の場合、ベースプレートに造形品を積み上げていくため、ベースプレートの面を利用することが考えられるが、ベースプレートを金属粉末積層造形装置に取り付ける際に位置決め基準が無く、造形品との位置関係やベースプレートの Z 軸周りの回転などを正確に把握できないこと、レーザービームで熔融した際の熱によりベースプレートに反りが発生することなどから、そのままでは位置決め基準とすることができない。さらに、位置決め基準を正確にとら

えずに加工をすると、削り残しや削り過ぎが発生し、製品としての基準を満たさないケースも考えられる。

そこで、本研究では、図 1 赤枠に示す造形品の仕上げ加工における位置決め方法を検討し、それぞれの方法における加工後の表面状態（形状精度、けずり残しの有無など）の調査を行うと共に、削り過ぎ・削り残しを無くすために必要な削り代の調査を行った。

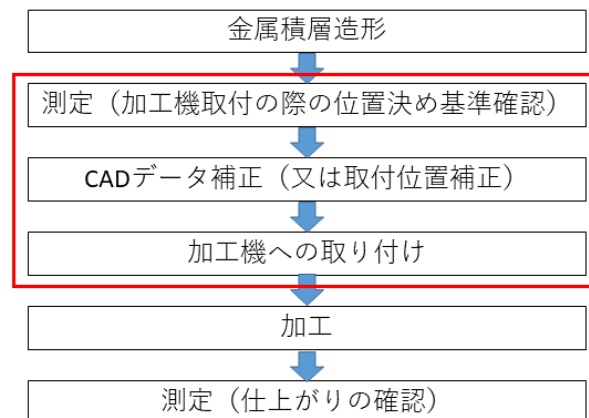


図 1 金属積層造形品の仕上げ加工の手順

* 中東北 3 県公設試技術連携推進事業(5 軸マシニングセンタによる金属積層造形品の仕上げ加工法の確立)

** 素形材プロセス技術部

*** 素形材プロセス技術部 (現：理事兼ものづくり技術統括部長)

2 実験方法

2-1 切削加工用試験片の作製

造形品の形状は、図 2 に示すインペラ形状で、レーザービーム方式の金属粉末積層造形装置 (TRAFAM 製) を使用して作製した。材質はマルエージング鋼で、積層条件は、積層ピッチ 0.1 mm、間隔 0.1 mm とした。

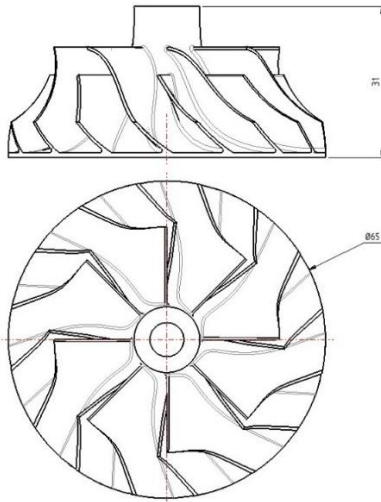


図 2 造形品の形状

造形品は 350×150×30 mm のベースプレート上に 2 個造形し、造形終了後にベースプレートをワイヤ放電加工機で切断し、100×100×30 mm のベースプレート上にインペラ形状の造形品がある切削加工用試験片を 2 セット作製した。試験片をマシニングセンタに固定する際は、ベースプレート部をバイスで把持した。

2-2 切削加工用試験片の測定と加工基準

通常、試験片の位置決めは、基準面を加工機の測定プローブで測定して行う。しかし、表面粗さが Rz100 μm (0.1 mm) 程度の造形品の場合、測定プローブによる測定ではプローブを当てる位置によって 0.1 mm 以上の誤差を生じる可能性がある。そのため今回の加工対象に関しては、ワイヤ放電加工機で切断したベースプレートの切断面と造形品との位置関係をあらかじめ正確に把握したうえで、加工機上ではベースプレートの切断面を使用し、測定プローブによる測定で位置決めした。造形品とベースプレートの切断面との位置関係の把握には測定器を使用するが、3次元測定機のようにプローブ接触による測定では、加工機の測定プローブと同様に造形品表面の凹凸の情報を十分に得ることができず誤差が生じやすくなるため、今回の測定には適さない。一方、一度に多くの点について測定が可能な方法として 3次元デジタイザがある。3次元デジタイザは 0.1 mm ピッチ程度の間隔で、多くの測定点が得られることから、最小二乗法を用いて基準面や円筒・円錐などを求めることができ、造形品の表面の凹凸を無視した本来の位置を知ることが可能である。そこで、3次元デジタイザ (COMET6 Carl Zeiss

社(表 1)) を使用して、造形品の形状とベースプレートとの切断面を測定し、位置関係を正確に把握した。測定結果の一例を図 3 に示す。

表 1 Carl Zeiss 社 COMET6 仕様

測定器名 : COMET6-16M
測定点数 : 約 1,600 万画素 (4,896 × 3,264)
測定範囲 (X × Y × Z) : 274 × 193 × 160 mm
測定点間距離 : 0.056 mm
測定精度 (1 ショット) : ±0.012 mm

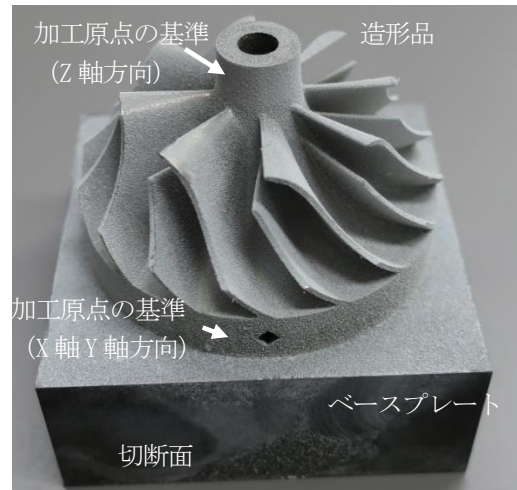


図 3 切削加工用試験片

試験片の加工を行う場合、加工機への固定に必要な要素として、X 軸、Y 軸、Z 軸方向の加工原点と Z 軸周りの回転角がある。加工原点の X 軸、Y 軸方向成分については外周部の円筒を使用し、ベースプレートの切断面からの距離を求めた。加工原点の Z 軸方向成分についてはインペラ形状の一番上にあるシャフト部分の上面を使用し、ベースプレートの試験片に近い部分との距離を求めた。Z 軸周りの回転角については、羽根上部の直線部分を用いて直線を 2 本引き、それらの中間の直線を造形品の基準軸とした。加工機で参照できるのはベースプレートの切断面であることから、切断面と造形品の基準軸がなす角度を求めた。このようにして求めた加工原点と基準軸の回転角を基に CAD データを造形品の中心に移動・回転させたデータを、加工機の基準や CAM による加工プログラム作成に使用した。

2-3 5 軸マシニングセンタによる切削加工

2-2 の測定結果を基に、CAD データの修正と試験片の位置決めを行い、5 軸マシニングセンタ (DMG 社製 HSC55linear) による加工を行う。試験片をバイスに固定した後、試験片のベースプレート切断面を使用して角度の修正と X、Y 軸方向の原点の決定を、ベースプレート上の試験片近傍をベースに Z 軸方向の原点の決定を行った。

加工は 2 個の試験片 A、B を利用し 3 回行った。試験片 A は羽部分のみ +0.3 mm オフセットした形状 (図 4)、

試験片 B は羽部分のオフセット量を 90 度ずつ変えた形状である。オフセット量は 0.2、0.3、0.4、0.5 mm である (図 5)。

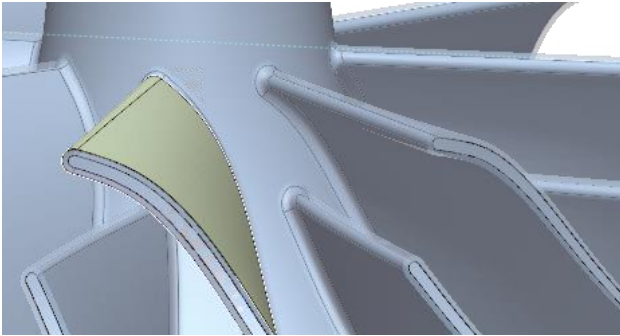


図 4 切削加工用試験片 A の羽部分のみを 0.3 mm オフセット



面オフセット量(mm) ①0.2、②0.3、③0.4、④0.5

図 5 切削加工用試験片 B のオフセット量

① 加工 1 : 試験片 A の 180 度分を加工。うち、90 度は CAD データどおりの形状を、残り 90 度は羽根の部分から +0.4 mm 離れた表面を加工するデータを使用した。+0.4 mm 離れたところを加工する場合、加工代が +0.3 mm の試験片では切り込み量が -0.1 mm となるため、本来であれば加工されないが、位置決めや形状の精度が 0.1 mm よりも悪くなった場合にのみ加工されるため、形状の 0.1 mm 以上のずれを評価する指標とした。

② 加工 2 : 試験片 A のうち、①で加工しなかった残りの 180 度に対し、①の状態から、COMET6 の測定データを基にベストフィット位置決め (CAD データと測定値のズレが最小となるように、測定結果を移動させる処理のこと。) をかけた CAD データを使用して加工を行った。①と同様に 90 度は CAD データどおり、残り 90 度は元の CAD データから +0.4 mm オフセットした面を用いて作成したツールパスで加工を行った。

③ 加工 3 : 試験片 B を CAD データどおりに加工したもの。CAD データにはベストフィット位置決めを反映したデータを使用した。

加工条件を、表 1 に示す^{2),3)}。加工は 5 軸面沿い加工を使用した。ツールパスの作成は、CAM ソフト TopSolid7 を使用して行った。はじめに 3 軸の面沿い加工でツールパスを作成して、そのツールパスを 5 軸加工に変換した。次に、羽根と羽根の隙間に工具が入るように、工具を進行方向に垂直な面上で、加工物に垂直な状態から 80 度傾けた状態で加工を行うよう設定を行った。

表 2 加工条件

項目	条件値
使用工具	ボールエンドミル R0.75 MRB230R0.75×16 (d4) 日進工具
加工速度	60 m/min (12732 rpm)
送り速度	0.02 mm/tooth (509 mm/min)
切込量	0.1 mm
ピッチ	0.04 mm

3 実験結果・考察

3-1 作製した試験片と加工結果



図 6 金属粉末積層造形装置で造形したインペラの表面

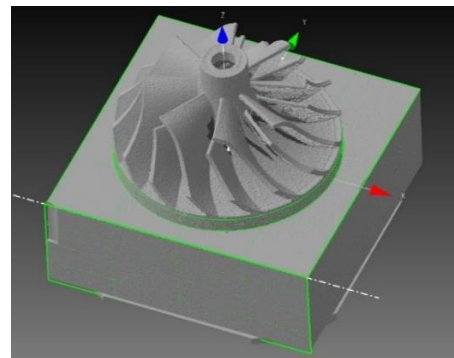


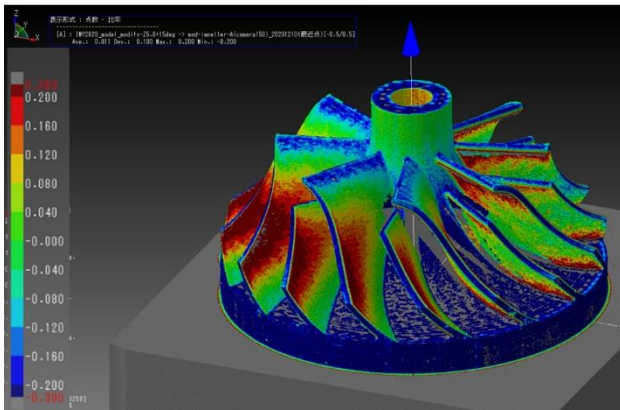
図 7 切削加工用試験片を 3 次元デジタル計測機で測定した形状

金属粉末積層造形装置により造形したインペラの表面の様子を図 6 に示す。これより、造形品特有の凹凸が観察される。図 7 は切削加工用試験片 A を 3 次元デジタル計測機 (COMET6) で測定した結果で、灰色の部分は測定した点を表示したものである。造形物 (インペラ) とベースプレートの形状が、測定データによって再現されていることがわかる。この測定データを用いて、加工機での位置決めに必要なベースプレートと造形品の位置関係を求

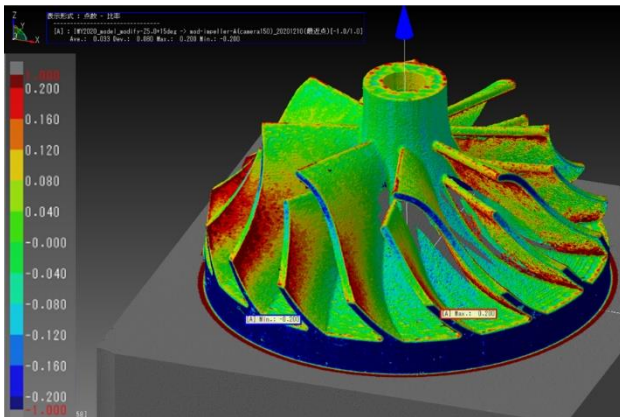
めた。また、試験片 A、B のベストフィット位置決め移動量は、それぞれ表 3 のとおりである。参考までに、試験片 A においてベストフィット位置決めした場合としない場合の測定結果を図 8 に示す。

表 3 ベストフィット位置決め移動量

	回転角度	Z 軸方向の移動量
試験片 A	0.507°	-0.262
試験片 B	-0.421°	-0.185



ベストフィット位置決め無し



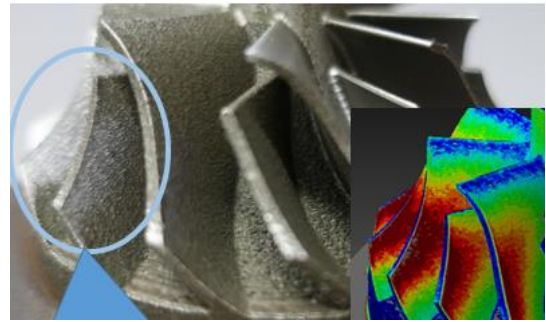
ベストフィット位置決め有

図 8 位置決めの方法と測定結果

測定結果を基に試験片を 5 軸マシニングセンタ (DMG 森精機 HSC-551linear) に取り付けて切削加工を行った。加工した結果および試験片を COMET6 にて測定した結果について述べる。加工 1 (試験片 A、通常的位置決めのみ) では、羽根の先端部分に、面沿い加工の方向とは異なる模様がある (図 9a)。羽根の端部は刃が十分に当たらず、積層の跡が残っていることから、取り代が不十分であることがわかる。製品寸法+0.4 mm の部分を加工した結果については、測定結果に見られる赤い部分 (測定結果がプラスになっている部分) のみが削れており (図 9b)、測定結果と実際の加工の間で相関が取れていることが確認できた。全体的に Z 軸方向の縮小がみられることから、積層の際に Z 軸方向に+0.3 mm よりも厚く肉盛りをする必要があることがわかった。



a) 端面の削り残し



実加工部分

測定結果

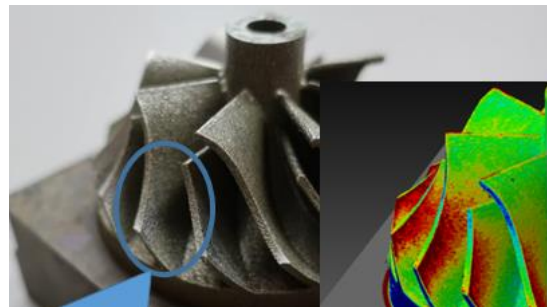
b) 測定結果と加工された部分の比較

図 9 切削加工用試験片 A を通常的位置決めのみで加工 (加工 1) した結果

3-2 ベストフィット位置決め、オフセットの段階的調整による加工精度への影響



a) 羽根全面が加工されている



実加工部分

測定結果

b) 測定結果と加工された部分の比較

図 10 切削加工用試験片 A をベストフィット位置決め有で加工 (加工 2) した結果

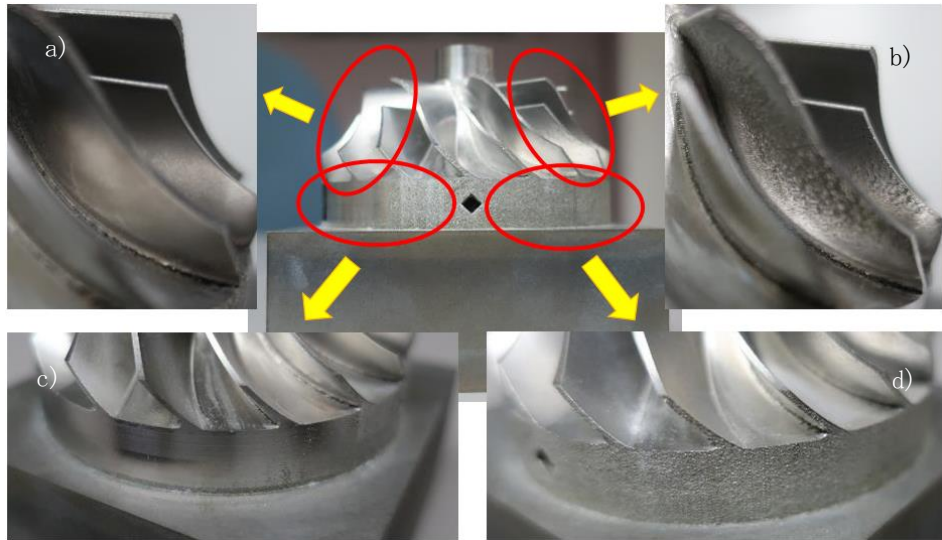


図 11 切削加工用試験片 B (オフセット量を変化させた) をベストフィット位置決め有で加工 (加工 3) した結果

次にベストフィット位置決めおよびベストフィット位置決めとオフセットを段階的に変化させた場合の加工精度への影響について述べる。はじめに試験片 A をベストフィット位置決め有で加工した結果について述べる。図 10 に測定結果を示す。羽根の部分はベストフィット位置決めによって、全面削り残しが無い状態となったが、付け根部分はけずり残しがみられることから (図 10a)、ベストフィット位置決めでずらした 0.29 mm 以上に、Z 軸方向に収縮があると考えられる。製品寸法+0.4 mm の部分については、測定結果に見られる赤い部分 (測定結果がプラスになっている部分) のみが削られており (図 10b)、加工 1 と同様に測定結果と実際の加工の間で相関が取れていることが確認できた。

試験片 B でベストフィット位置決め有とオフセットを段階的に変化させた結果を図 11 に示す。外周部左側は全面加工されているのに対し (図 11c)、右側には加工されていない部分がある (図 11d)。これは、COMET6 にて外周部を測定し X 軸方向および Y 軸方向の中心を定めた際に、表面の凹凸の影響で中心がずれてしまったことが原因と考えられる。削り代 0.4、0.5 mm の羽根は削り残しが無いのに対し (図 11a)、削り代 0.2、0.3 mm の羽根は裏面に削り残しがある (図 11b)。積層時に Z 軸のマイナス方向に変形した試験片を、デジタイジング装置の測定値を基に Z 軸方向に -0.18 mm 移動させた。これにより、Z 軸のマイナス方向にあまり変形していない、積層面に対し垂直に近い部分の、マイナス側の削り代が減少してしまった。その結果、もともと削り代が少ない、削り代 0.2 mm、0.3 mm の羽根の裏側において、削り残しが発生したものと考えられる。このことから、けずり残しを防ぐには 0.4 mm 以上の削り代が必要である。シャフト部分は全面削り残しが無い。Z 軸のマイナス方向へのオフセットによりシャフト部分の削り代が大きくなっていることから、削り残しがなくなったと考えられる。

加工した試験片 B の形状誤差は ± 0.2 mm である。加工後の試験片 B を 3D デジタイザにて測定したところ、羽根の端部近傍で、かつ形状が平面に近い部分に形状精度が悪い部分が集中している。これは加工負荷による羽根の変形が原因であると考えられる。羽根の変形は、一度に全面的加工を進めるのではなく、羽根を 2~3 の部分に分け、端から順に加工していく事や、加工条件を緩くすることで、抑制可能であると考えられる。

4 結 言

金属粉末積層造形品の 5 軸マシニングセンタを用いた切削による仕上げ加工について検討し、位置決め方法と削り代について以下の結論が得られた。

(1) 位置決め方法

金属粉末積層造形時の変形を考慮し、仕上げ加工は 3D デジタイザで測定した値を基に、CAD データを適正に修正する必要がある。特に、ベストフィット位置決めによる補正は削り残しを無くす上で有効である。

(2) 削り代

造形時の変形と位置決め時の誤差を考慮し 0.4 mm 以上の削り代が必要である。

文 献

- 1) 原宣宏, 大西峻太ほか: レーザ溶融積層造形チタン材の仕上げ加工に関する研究, 2019 年度精密工学会春季大会学術貢献会講演論文集, p509-510
- 2) 上田隆司, Abdullah YASSIN ほか: 金属粉末光造形複合加工における小径ボールエンドミルの切削性能, 砥粒加工学会誌, 52, p718-723 (2008)
- 3) 日比野航, 酒井克彦ほか: SLM 法による SUS420J2 造形体の積層高さによる切削特性の変化, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p424-42

オーステンパ球状黒鉛鑄鉄の衝撃特性に及ぼす銅の影響*

高川 貫仁**

銅含有量を 0 から 0.9%まで変化させた球状黒鉛鑄鉄をオーステンパ熱処理し、衝撃特性に及ぼす銅の影響について調べた。銅含有量の増加に伴い不安定オーステナイトは減少し、衝撃吸収エネルギーも銅含有量の増加に伴い向上した。衝撃吸収エネルギーは、銅含有量 0.9%、処理温度 400℃、保持時間 15 分の条件において、最大値 145 J/cm²を示した。

キーワード：オーステンパ球状黒鉛鑄鉄、衝撃特性、銅、不安定オーステナイト

Effect of Copper on Impact Characteristics of Austempered Ductile Cast Iron

TAKAGAWA Takahito

Key words : austempered ductile cast iron, impact characteristics, copper, unstable austenite

1 緒言

近年、鑄鉄部品の軽量化や衝撃荷重に対する安全性の向上が求められており、これに伴い、鑄鉄材料の高強度化のみならず、強じん化も求められている。

高強度の鑄鉄として、オーステンパ球状黒鉛鑄鉄（以下、ADI (Austempered Ductile Cast Iron)と記す）がある。ADI は、球状黒鉛鑄鉄をオーステンパ熱処理することにより得られ、鉄基地組織はベイナイトというじん性のある組織になる。しかしADIの鉄基地組織は、全てがベイナイトから成っているわけではなく、じん性を損なう不安定オーステナイト組織も混在している。そのためADIのじん性の向上には、不安定オーステナイトの制御が重要と言われている^{1), 2)}。

不安定オーステナイトの生成要因として、鉄基地中に固溶する炭素やマンガンなどの合金元素の偏析がある。炭素が偏析することにより、ベイナイト化時において、鉄基地の大部分がベイナイトになったとしても、炭素濃度が低い共晶セル境界は不安定オーステナイトのまま残存する³⁾。

一方で、銅は球状黒鉛周辺に偏析し膜を形成し、黒鉛と鉄基地の炭素の拡散を妨げると言われている⁴⁾。そのため、銅の添加により、鉄基地中の炭素濃度の偏析を制御し、オーステナイト化時の不安定オーステナイトの発生を抑制できる可能性がある。

そこで本研究では、ADIの耐衝撃性を向上させることを目的に、金属組織及び衝撃特性に及ぼす銅の影響を調べた。

2 実験方法

2-1 金属組織の評価

供試材は、目標組成 3.9 mass% (以下、%と記す) C-2.7%Si-0.2%Mn-0~0.9%Cu の黒鉛球状化処理を行った約 5 kg の鑄鉄溶湯を、肉厚 5、10、25 mm、幅 72 mm、全長 75 mm の階段状の CO₂ 鑄型に注湯し作製した。得られた供試材の肉厚 10 mm の部分から 10 mm 角の試験片を 10 個採取し、9 個は熱処理用、1 個は生材の組織観察用とした。熱処理前の組織は、黒鉛、フェライト及びパーライトから成り、銅添加の試料はブルズアイ組織となっている。黒鉛粒数は銅含有量 0、0.5、0.9% の順に、589、519、463 個/mm²、パーライト面積率は 23、56、77% である。

オーステンパ熱処理は、まず 900℃ の大気炉において 30 分保持しオーステナイト化処理を行った後、300~400℃ の金属スズ浴に急冷し、スズ浴にて 15~60 分保持しベイナイト化処理を行なった。ベイナイト化処理後、スズ浴から取り出し空冷した。

得られた試験片について組織観察を行った。なお基地組織の観察は 3% ナイタールで腐食させて行った。

2-2 衝撃特性の評価

金属組織の評価結果を基に、不安定オーステナイトが少なく、微細なベイナイトが得られる熱処理条件を絞り込み、それらの条件で衝撃特性の評価を行った。

供試材は、2-1 と同様に溶製した鑄鉄溶湯を、165×100×18mm の板状の CO₂ 鑄型に注湯し作製した。試験片の黒鉛粒数は、銅含有量 0、0.5、0.9% の順に 378、301、294 個/mm² である。得られた供試材 1 点から、10×10×55 mm の溝無し衝撃試験片を 9 本採取しオーステンパ熱処理を行った。オーステナイト化条件は 900℃ で 1 時間とした。

* 平成 31 年度技術シーズ創生研究事業 発展ステージ

** 素形材プロセス技術部

得られた試料について、300 J のシャルピー衝撃試験機を用いて室温にて衝撃試験を行った。また一部の試験片について、衝撃試験後の端の部分切断し、ロックウェル硬さ試験及び組織観察を行った。

3 結果及び考察

3-1 金属組織の評価

図 1 に、ベイナイト化処理温度 (以下、処理温度と記す) 300℃ でベイナイト化保持時間 (以下、保持時間と記す) 60 分、350℃ で 15~60 分及び 400℃ で 15 分における、銅含有量を変化させた試料の組織写真を示す。主な基地組織はベイナイトであり、共晶セル境界に白く塊状に存在するのが不安定オーステナイトである。処理温度 300℃ では 60 分と長く保持しても、いずれの銅含有量においても不安定オーステナイトは観察された (図中、矢印部)。一方で、400℃ の高い処理温度では、15 分と短い保持時間で、いずれの銅含有量においても不安定オーステナイトは観察されなかった。処理温度 350℃ では、いずれの保持時間においても銅含有量の増加に伴い不安定オーステナイトは減少し、保持時間 30 分の場合は銅含有量 0.9% で、また保持時間 60 分の場合は銅含有量 0.5% 以上で不安定オーステナイトは観察されなくなった。このように銅含有量の増加に伴い不安定オーステナイトが減少した理由は、球状黒鉛周辺に銅が膜をつくり、これによりオーステナイト化時における黒鉛と鉄基地間の炭素の拡散が抑制され鉄基地内の炭素濃度の均一化が進み、不安定オーステナイトの生成が抑制されたと考えられる。

次に、銅含有量 0.9%、処理温度 350℃ における、保持時間 15 分及び 60 分の拡大した組織写真を図 2 に示す。

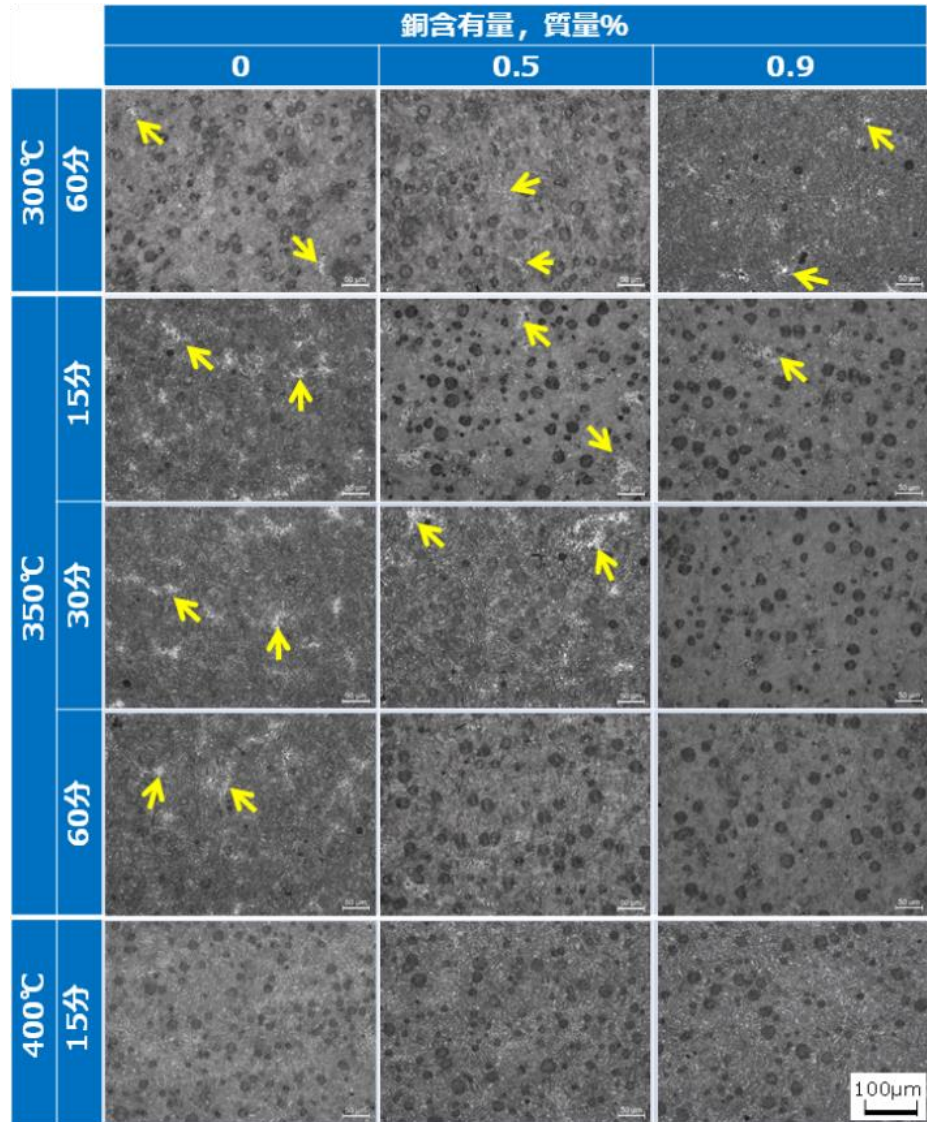


図 1 銅含有量を変化させた組織写真

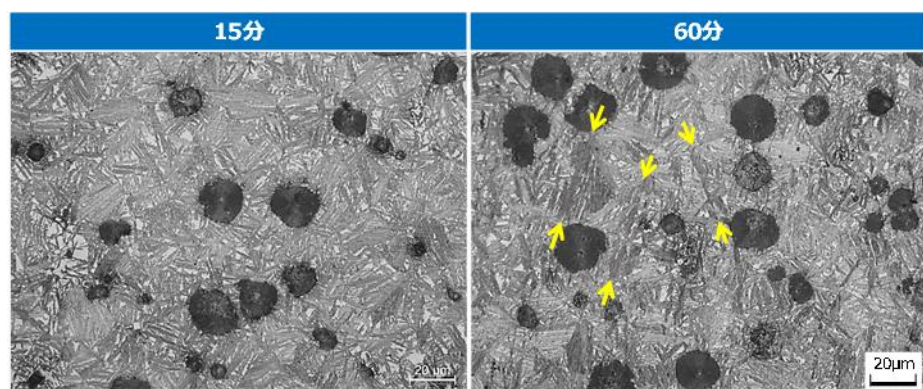


図 2 銅含有量 0.9%、処理温度 350℃ における保持時間 15 分及び 60 分の組織写真

保持時間 15 分では、ベイナイトは、針状の下部ベイナイト及びそれよりも太く先端が丸くなった上部ベイナイトから成るが、保持時間 60 分では大部分が上部ベイナイトであり、さらに長く粗大に成長した上部ベイナイトも混在していた (図中、矢印で挟んだ組織)。

これらの組織観察結果より、まず不安定オーステナイトはじん性を低下させるため、銅含有量を変化させても不安定オーステナイトが観察された 350°C で 15 分の熱処理条件及び処理温度 300°C の全条件は、衝撃特性の評価対象から外すこととした。また粗大な組織はじん性に悪影響を及ぼすため、ベイナイトが粗大に成長する保持時間 60 分の熱処理条件も衝撃特性の評価対象から外すこととし、衝撃特性の評価を行う熱処理条件は、処理温度 350°C で保持時間 15 分、処理温度 400°C で保持時間 15 分及び 30 分とした。

3-2 衝撃特性の評価

図 3 に衝撃試験片の代表的な組織写真を示す。ベイナイト組織は、いずれの銅含有量においても、処理温度 350°C では緻密な針状の下部ベイナイトが主であり、400°C では針状から太く丸みを帯びた羽毛状の上部ベイナイトになっていた。また銅無添加では、いずれの処理条件においても白色の不安定オーステナイトが共晶セル境界に観察されたが(図中、矢印部)、銅添加試料では不安定オーステナイトは観察されなかった。また図には示さないが、不安定オーステナイト組織は、金属組織の評価結果と同様に、処理温度の上昇及び処理時間の経過とともに減少した。

図 4 にロックウェル硬さに及ぼす銅含有量の影響を示す。硬さは全ての銅含有量において、処理温度 350°C の方が 400°C に比べて HRC で 7~8 高い値を示した。これは図 3 より、処理温度 350°C のベイナイト組織が、400°C で生成した羽毛状の上部ベイナイトよりも硬い緻密な針状の下部ベイナイトが主であるためと考えられる。一方、銅含有量の増加に伴う硬さの上昇は処理温

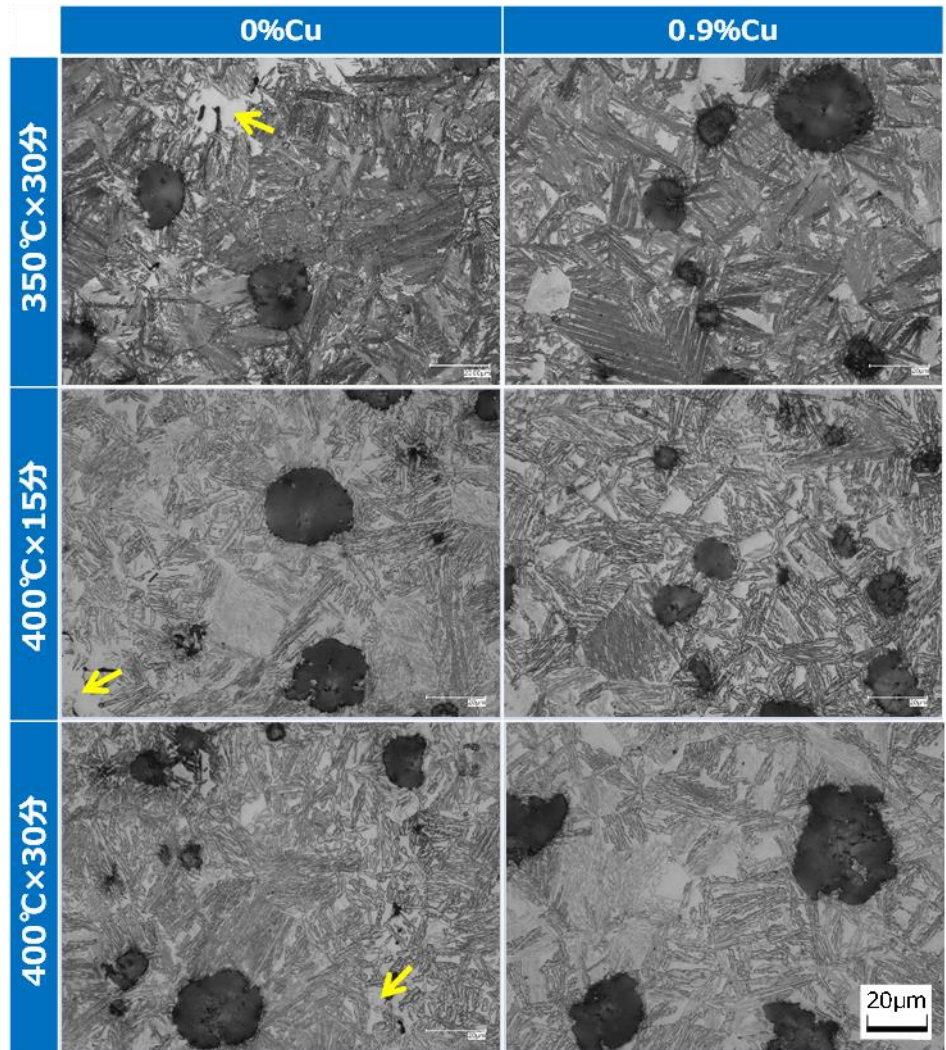


図 3 衝撃試験片の代表的な組織写真

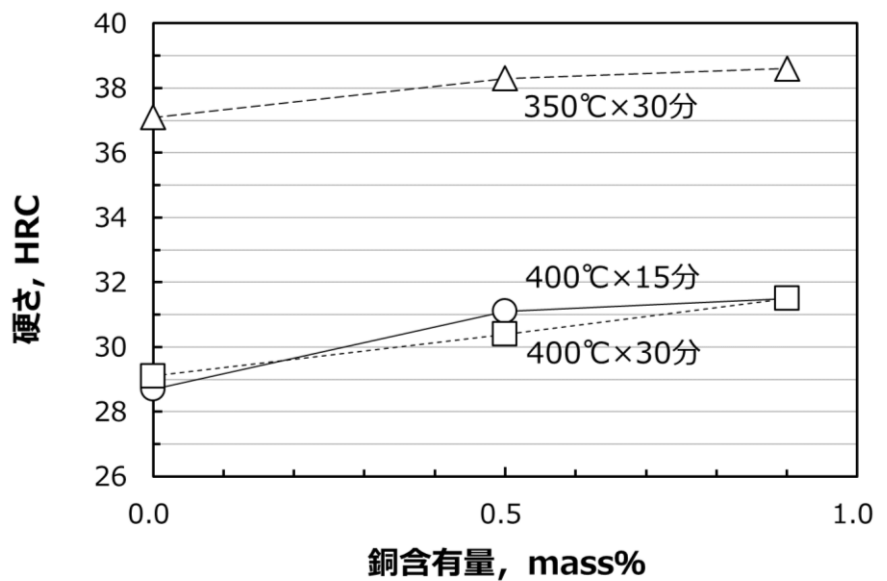


図 4 ロックウェル硬さに及ぼす銅含有量の影響

度の違いほど顕著でなく、また保持時間による差は認められなかった。

図5に衝撃吸収エネルギーに及ぼす銅含有量の影響を示す。衝撃吸収エネルギーは、いずれの熱処理条件においても銅含有量の増加に伴い向上し、処理温度400℃で保持時間15分の条件において、最大値145 J/cm²を示した。

衝撃吸収エネルギーは処理温度400℃よりも350℃の方が低かったが、これはまず図3より350℃で30分の組織には、靱性を損なう塊状の不安定オーステナイトが400℃よりも多く存在すること、また350℃のベイナイト組織は図3及び図4より針状の硬い下部ベイナイトが主であり、針状組織は先端に応力集中しやすく、き裂の起点となりやすいため、羽毛状の上部ベイナイトよりも硬くてもろい組織であるためと考えられる。

また処理温度400℃において、衝撃吸収エネルギーは保持時間15分よりも30分の方が低かった。これは図3より、保持時間の経過に伴いベイナイト組織が粗大に成長し、き裂が伝播しやすくなったためと考えられる。

また衝撃吸収エネルギーは、いずれの熱処理条件においても銅含有量の増加に伴い向上した。これは図3より、銅含有量の増加に伴い不安定オーステナイトが減少したことと、銅により鉄基地が固溶強化されたためと考えられる。

4 結 言

銅含有量を0から0.9%まで変化させた球状黒鉛铸铁をオーステンパ熱処理し、衝撃特性に及ぼす銅の影響について調べた。得られた結果は以下のとおり。

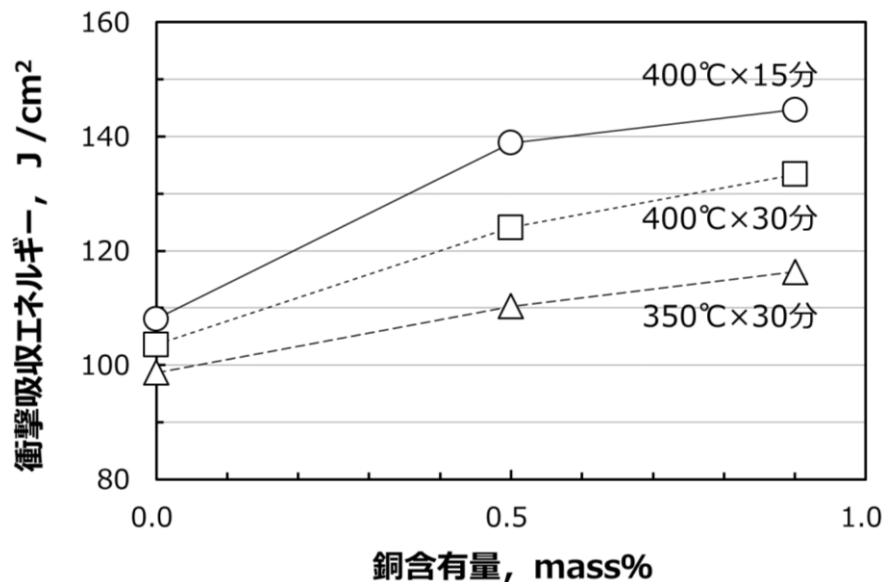


図5 衝撃吸収エネルギーに及ぼす銅含有量の影響

- (1) 不安定オーステナイトは、処理温度が高くなるほど減少した。また処理温度350℃においては、保持時間が長くなるほど、銅含有量が増加するほど減少した。
- (2) ベイナイトのサイズは、保持時間が長くなるに従い粗大になった。
- (3) 硬さは、銅含有量の増加に伴い増加した。また処理温度350℃の方が400℃より硬かった。
- (4) 衝撃吸収エネルギーは、銅含有量の増加に伴い向上し、銅含有量0.9%、処理温度400℃、保持時間15分の条件において、最大値145 J/cm²を示した。

文 献

- 1) 青山正治、小林敏郎、松尾國彦：鑄物62(1990)7、517
- 2) 矢島善次郎、岸陽一、清水謙一、望月栄治、吉田敏樹：鑄造工学77(2005)7、445
- 3) 柳沢平、矢野哲夫、福原宏之：熱処理28(1988)5、314
- 4) 邹莹、駒田賢一、中江秀雄：鑄造工学83(2011)7、378

オーステナイト系ステンレス鋼の 鋭敏化度の簡易評価手法*

佐々木 龍徳**、桑嶋 孝幸**、久保 貴寛***、池 浩之****

4種類のオーステナイト系ステンレス鋼の鋭敏化度を評価するため、加熱温度と保持時間等を変化させて熱処理を行った。そして、熱処理後の観察組織画像を2値化処理することで鋭敏化度を数値化した。その結果、加熱温度や保持時間を変化させると、各材種によって鋭敏化度のピーク値が変化することを確認した。これにより、ステンレス鋼の金属組織の2値化処理による鋭敏化度の評価は、簡易的なスクリーニング方法として有用な手段であることが示唆された。

キーワード：オーステナイト系ステンレス鋼、熱処理、鋭敏化度

Evaluation for Sensitive Degree of Austenitic Stainless Steels

TATSUNORI Sasaki, TAKAYUKI Kuwashima, TAKAHIRO Kubo and IKE Hiroyuki

Key words : Austenitic stainless steel, Heat treatment, Sensitive degree of metal material

1 緒 言

オーステナイト系ステンレス鋼は、耐食性や耐熱性に優れる材料であるため、石油・化学工業、エネルギー産業等の装置や設備用材料として多く使用されている。しかし、ステンレス鋼は、常用使用温度以下でも使用条件によっては短寿命となる事例がある。これは、鋭敏化(結晶粒界に炭化物が析出し、粒界近傍の Cr 濃度が低下する現象)によって粒界腐食と応力腐食割れ等が発生するためと云われている¹⁾。このステンレス鋼の鋭敏化は古くから知られている現象である¹⁾²⁾が、この鋭敏化が原因と考えられる損傷事例が未だに多く報告されている¹⁾²⁾。

一方で、ニッケルやモリブデン等のレアメタルを多く含むステンレス鋼は比較的高価な材料であり、使用環境に合わせた材種を選定する必要がある。しかし、高温環境下では、使用される雰囲気、温度、時間そして材料に加わる応力等により材料の耐久性が変化するため、材種の選定が難しく、経験則で選定されることが多い。一方で、ステンレス鋼は、使用温度や保持時間を変化させた場合の鋭敏化度や、耐食性の変化を示す文献が少ないのが実状である。また、鋭敏化度の測定方法は JIS で数種類規定されている⁴⁾⁻⁹⁾が、いずれも分析に時間を要する。そのため材種を選定するためには簡易的なスクリーニング方法が必要となっている。

そこで、本研究では、4種類のオーステナイト系ステンレス鋼材を加熱温度と保持時間を変化させて熱処理を

施したのち、各試験片の組織観察を行った。そして、観察組織を2値化したデータから鋭敏化度を求め、加熱温度と保持時間等との関係性を評価した結果について報告する。

2 実験方法

2-1 供試材および試験片形状

本研究では4種類のオーステナイト系ステンレス鋼材(SUS304、SUS304L、SUS316、SUS316L)を用いた。それぞれの供試材の化学成分を表1に示す。ここで、SUS304系とSUS316系のステンレス鋼を供試材として用いた理由は、いずれも産業用として一般的な耐食性、耐熱材料として多用されていることと、モリブデン添加の影響や炭素量の影響による差を確認することができるためである。4種類の供試材は、いずれも寸法φ10mm×L50mmに切断して熱処理用試験片とした。

表1 各供試材の化学成分 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS304	0.050	0.20	1.33	0.035	0.025	8.13	18.6	-
SUS304L	0.016	0.21	1.88	0.037	0.015	9.04	19.4	-
SUS316	0.040	0.22	1.30	0.034	0.027	10.07	16.9	2.04
SUS316L	0.009	0.20	1.62	0.028	0.012	12.02	16.8	2.00

2-2 熱処理条件

各試験片は、あらかじめ固溶化熱処理(1150℃×3 min、水冷)した後に、加熱温度550~950℃、保持時間1~72

* 令和3年度技術シーズ創生・発展研究事業 可能性調査研究

** 素形材プロセス技術部

*** 素形材プロセス技術部(現:企画支援部)

**** 素形材プロセス技術部(現:理事兼ものづくり技術統括部長)

h、処理回数 1～5 回で熱処理を行った。ここで熱処理回数を 1～5 回と変化した理由は、実環境下では、繰り返しの熱影響を受けることが多いため、ヒートサイクルによる鋭敏化度の違いを評価するためである。熱処理には Nabertherm 社製電気抵抗式加熱炉 (LH60/14) を用いて、大気中で熱処理を行った。熱処理後は試験片を炉中から取出し速やかに水冷処理を行い、組織観察用試験片とした。

2-3 組織観察方法

熱処理後の各試験片は、長さ方向の中央部を切断し、樹脂埋めした後、研磨紙およびダイヤモンドペーストを用いて鏡面仕上げした。そして JIS G0571-2003「ステンレス鋼のしゅう酸エッチング試験方法」の試験条件(10% シュウ酸水溶液中、電流密度 1 A/cm²、90 s)にて電解腐食後、キーエンス社製顕微鏡 (VHX-7000) により断面中央部の組織観察を行った。そして、顕微鏡で良好に観察可能な 400 倍の倍率で 3 視野の金属組織を撮影した。その後、撮影した画像を 2 値化した後に、画像に観察される黒色面積を計測し、3 視野の平均値を鋭敏化度とした。また、組織撮影時の照度、2 値化の閾値はすべての試験片において同様とした。さらに顕微鏡による組織観察と併せて、SUS316、SUS316L 材については FE-EPMA (日本電子(株):JXA-8530F) を用いた面分析も行った。

3 実験結果・考察

3-1 作製した試験片と加工結果

図 1 は SUS304 材を 650 から 850℃の加熱温度で保持時間 1 h として、熱処理回数を 1 から 5 回と変化した時の顕微鏡による組織観察結果を示す。これより SUS304 材の場合、650℃と 850℃の加熱温度 1 回の処理では、結晶粒界が連続していない部分 (図中矢印部) も観察されるため JIS G 0571-2003 の「混合組織」に分類した。一方 750℃の加熱温度では、全て結晶粒界が繋がっており「溝状組織」に分類される。そして熱処理回数が増えるに伴い、混合組織に分類された 650℃と 850℃の組織においても、粒界部が濃くなり、粒界が連続して観察されることから「溝状組織」と分類した。また「溝状組織」に分類した 750℃では、処理回数が増えるほど、より結晶粒界に沿って黒色部が増加した。

図 2 は図 1 と同様に SUS316 材で加熱温度と熱処理回数を変化させた時の組織観察結果を示す。SUS316 材で 1 回処理の場合は、650℃から 850℃の全ての加熱温度で粒界が連続していない部分が散見されるため、「混合組織」に分類した。そしていずれも熱処理回数が増えるにつれて、「混合組織」から「溝状組織」となり、結晶粒界の黒色部が増加していることが確認された。

表 2 には、保持時間 1 h と処理回数 1 回一定とし、熱処理温度を変化させた時の各材種の JIS G 0571-2003 の

組織分類結果を示した。ここで、As received は固溶化熱処理のみで加熱処理していない試験片 (以下未処理という) の組織観察結果であるが、全ての材種で炭化物等が固溶している「段状組織」を示した。また 550℃の加熱でもいずれの材種で段状組織となり、650℃から 850℃の加熱温度では、炭素量が少ない SUS304L 材と SUS316L 材では「段状組織」となることが分かった。そして 950℃の加熱ではいずれの材種も結晶粒の成長が観察されるものの「段状組織」に分類されることも分かった。

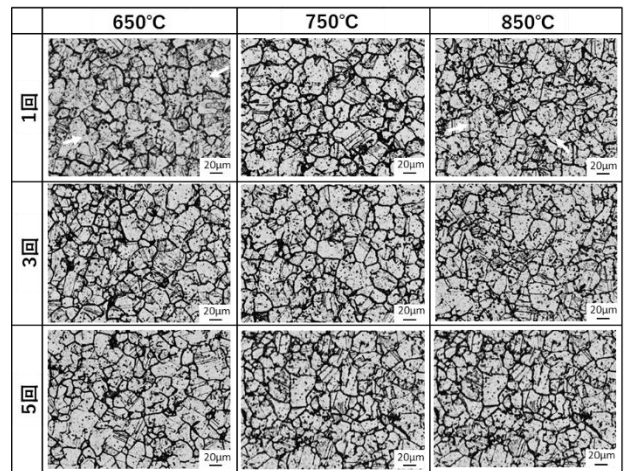


図 1 SUS304 材について加熱温度を変化させて熱処理した時の腐食後の組織 (1 h、1～5 回)

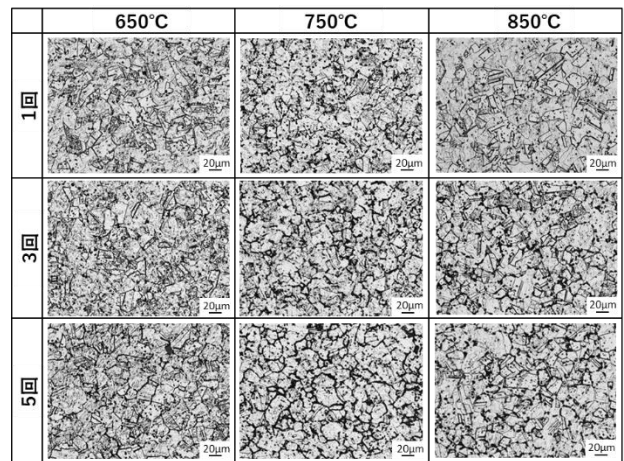


図 2 SUS316 材について加熱温度を変化させて熱処理した時の腐食後の組織 (1 h、1～5 回)

表 2 各材種の熱処理後の組織分類結果 (1 h、1 回)

供試材	As received	550℃	650℃	750℃	850℃	950℃
SUS304	段状組織	段状組織	混合組織	溝状組織	混合組織	段状組織
SUS304L			段状組織			
SUS316			混合組織			
SUS316L			段状組織			

前述したように SUS304L、SUS316L の場合はすべての温度において、「段状組織」を示した。そこで図 3 には各材種について、加熱温度 750℃、保持時間 1 h 一定として、

処理回数を1回または5回としたときの熱処理後の組織を示す。これより、SUS304L、SUS316Lでは750°Cで加熱処理すると微小な析出物が結晶粒内に点在することが分かる。そしてこの析出物の量は少なく、結晶粒界をすべて取り囲むほどではなかったが、熱処理回数が増えると析出物が増加することが分かる。次に図4には各材種を950°Cで加熱した場合と未処理の場合の組織を比較して示す。いずれの材種において未処理でも950°Cでも「段状組織」を示すことが分かる。そして950°Cと高温で加熱すると結晶粒が粗大化していることも分かる。この結晶粒が粗大化する理由は、高温での加熱により炭化物が基地中へ固溶したためと考えられる。ステンレス鋼の場合、基地中へ析出した炭化物を固溶させる目的で、固溶

化熱処理が行われる。この固溶化熱処理は、JISでは加熱温度1010~1150°Cで、基材の厚みに応じて保持時間を変化させて処理する。本結果より950°Cの温度においても、炭化物は基地中へいくらか固溶する⁹⁻¹⁰⁾ことが分かった。

次にSUS316とSUS316L材を、750°Cで熱処理した試験片のFE-EPMAによる面分析結果を図5に示す。SUS316ではC及びCrが結晶粒界上に偏析することが確認された。またSUS316Lでは図中矢印で示すように、わずかに粒界上にもC及びCrが検出されるが、SUS316と比較してその量は少ないことから、材料中の炭素量が鋭敏化に影響していると考えられた。

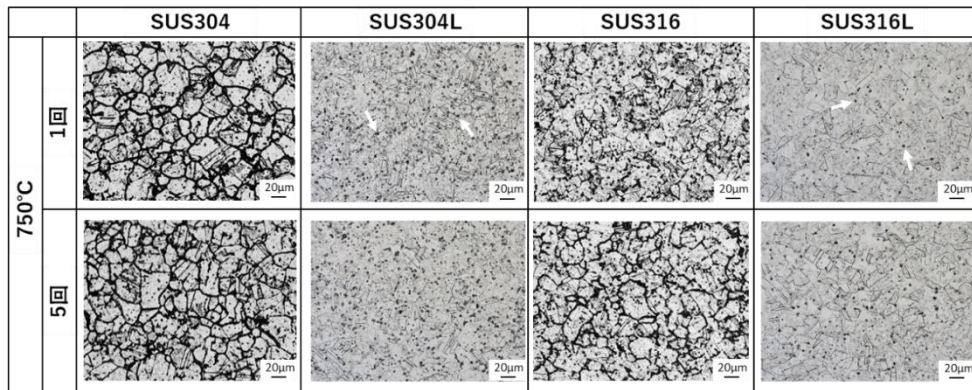


図3 SUS304L材とSUS316L材を加熱温度750°C、処理時間1hで熱処理回数を変化させた時の腐食後の組織

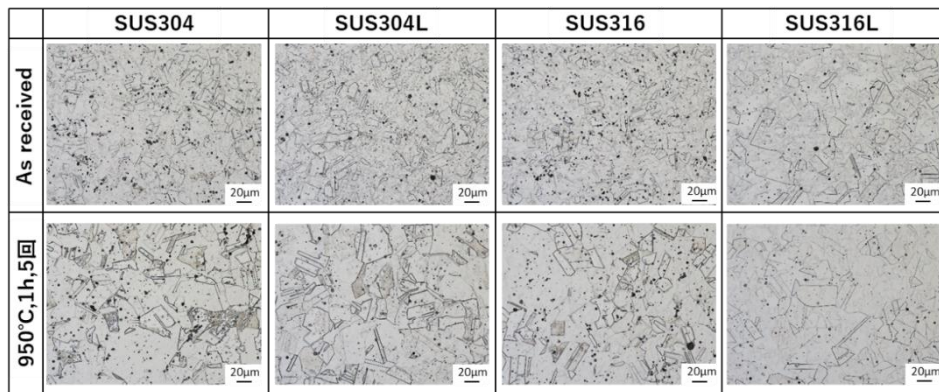


図4 各材種について、未処理品と加熱温度950°C、1h、5回で熱処理した時の腐食後の組織比較

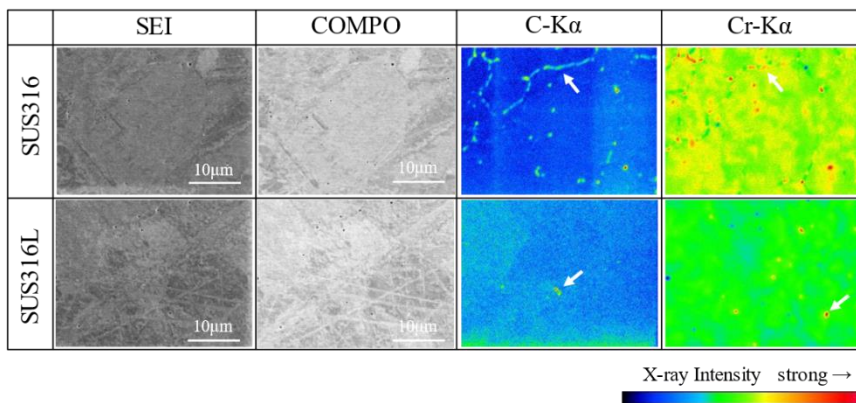


図5 SUS316、SUS316L材を750°C、1h、5回で熱処理した時のFE-EPMA面分析結果

3.2 熱処理条件の鋭敏化度への影響

SUS316 材を 750℃の温度で 72 h 熱処理した時に観察された画像と、本組織を 2 値化した画像を図 6 に示す。本画像を基に画像処理で黒色部を数値化することで、鋭敏化度を測定した値は 32%であった。このような方法により各条件で熱処理した試験片の鋭敏化度を求めた。そして保持時間 1 h で熱処理温度を変化させた時の材種ごとの鋭敏化度を表した結果が図 7 である。これより熱処理時間 1 h、1 回処理では、各材種とも 750℃で鋭敏化度がピークを示すことがわかる。そして、図 8 には図 7 と同様に 5 回熱処理した結果を示したが、SUS304 は 850℃でピークを示しその後低下した。一方、SUS304L の場合は 650℃にてピークを示した。これは SUS304L 材の特徴であり、鋭敏化を加熱温度と保持時間の曲線 (TTS 線図)³⁾に示した時、炭素の含有量により鋭敏化のピークが異なることが知られている。すなわち、同じ保持時間でも低炭素であるほど、鋭敏化が起こる温度が低温側にシフトすることが示されており、本研究でも同様の傾向を示した。図 8 の結果で SUS304 と SUS304L、SUS316 と SUS316L のピークを比較すると、いずれも低炭素材の方が鋭敏化度が低い傾向にあることがわかる。また、SUS304L と SUS316L を比較すると後者の方が鋭敏化する温度帯が高温側にシフトしており、モリブデンが添加された SUS316L の材料は、750℃以下の低温度領域でより鋭敏化しにくいことがわかった。

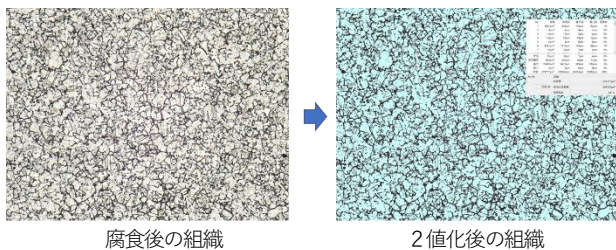


図 6 SUS316 材を 750℃、72 h、1 回で熱処理した時の腐食後の組織と 2 値化後の組織 倍率 x400

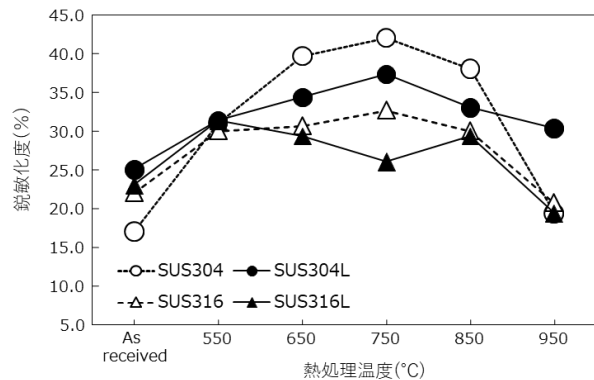


図 7 各材種の熱処理温度と鋭敏化度の関係 (1 h、1 回)

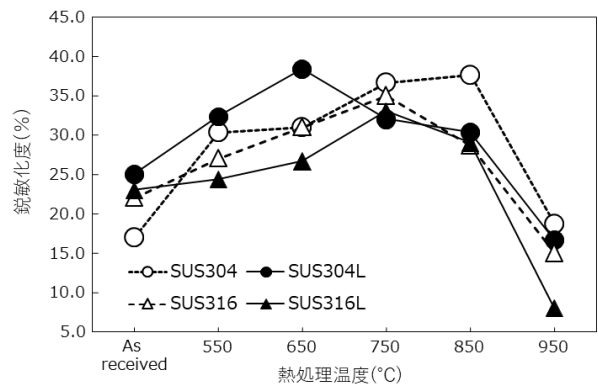


図 8 各材種の熱処理温度と鋭敏化度の関係 (1 h×5 回)

次に熱処理温度 750℃、1 回処理で保持時間を 1 h、3 h、72 h と変化させた時の鋭敏化度の結果を図 9 に示す。SUS304、SUS304L は、3 h の保持時間では鋭敏化度が一度減少する傾向を示したが、72 h 処理を行うと鋭敏化度が増加する傾向にあることが分かった。一方 SUS316L は、3 h、72 h において鋭敏化度に差異がほとんどないことが分かった。

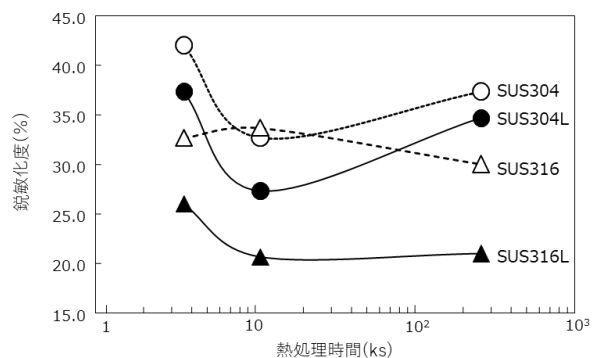


図 9 各材種の熱処理時間と鋭敏化度の関係 (750℃×1 回)

4 結 言

4 種類のオーステナイト系ステンレス鋼について熱処理条件を変化させた組織観察用試験片を作製し、その金属組織を観察するとともに、観察した金属組織画像を 2 値化し鋭敏化度を数値化し比較した。その結果以下のことが分かった。

- (1) SUS304、SUS316 は熱処理時間及び熱処理回数により、鋭敏化組織が増加し JIS の分類では「混合組織」から「溝状組織」へと変化する。
- (2) SUS304L、SUS316L の熱処理後の組織は、いずれも「段状組織」を示すが、650℃、750℃では微小黒点が結晶粒内に点在し、熱処理回数増加とともに増加する。
- (3) 今回調査した全ての材種において 1 h、1 回の熱処理条件では、750℃にて鋭敏化度がピークを示す。
- (4) 1 h、5 回の熱処理条件では SUS304 等の鋼材は 750℃で鋭敏化度のピークを示すが、その後低下する。一方で SUS304L 材は 650℃にて鋭敏化度のピークを示す。

文 献

- 1) 日本規格協会編：「J I S使い方シリーズ ステンレス鋼の選び方・使い方」、日本規格協会（1994）
- 2) 日本溶接協会特殊材料溶接研究会編：「ステンレス鋼トラブル事例集」産報出版（2003）、193.
- 3) 腐食防食協会 63-2 分科会（ステンレス鋼の鋭敏化曲線評価分科会）：「ステンレス鋼の鋭敏化曲線の収集と解析」（1990）
- 4) 日本規格協会：「ステンレス鋼のしゅう酸エッチング試験方法」（JIS G0571-2003）
- 5) 日本規格協会：「ステンレス鋼の硫酸・硫酸第二鉄腐食試験方法」（JIS G0572-2006）
- 6) 日本規格協会：「ステンレス鋼 65%硝酸腐食方法」、（JIS G0573-1999）
- 7) 日本規格協会：「ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法」、（JIS G0575-1999）
- 8) 日本規格協会：「ステンレス鋼の電気化学的再活性化率の測定方法」、（JIS G0580-2003）
- 9) ステンレス協会編：「ステンレス鋼便覧」、日刊工業（1995）
- 10) ステンレス協会編：「ステンレス鋼データブック」、日刊工業（2000）

対話的議論により新たな価値を探索する オンライン・ワークショップ手法の導入実証*

高橋 正明**、長嶋 宏之**、永山 雅大**、手塚 明***

デザイン思考による手法と道具であるデザインブレインマッピング (DBM) を活用したオンライン・ワークショップ手法は、岩手県内企業等が抱える課題の解決に有効な手法と考える。そこで、当該手法を活用して岩手県内産業の関係者を対象とした参加者公募型のオンライン・ワークショップを設計及び開催することにより実証を行った。その結果、当該手法が有効であることを確認し、設計及び開催の手法や実証事例の蓄積を行うことができ、当該手法の活用により有効となる様々な知見を得た。

キーワード：デザイン思考、テレワーク、デザインブレインマッピング

Demonstration of Introduction of Online Workshop Methodology for Exploring New Value through Interactive Discussion

TAKAHASHI Masaaki, NAGASHIMA Hiroyuki, NAGAYAMA Motohiro
and TEZUKA Akira

Key words : design thinking, telework, design brain mapping

1 はじめに

近年の製品市場では、製品の同質化 (コモディティ化) が進み、品質や機能のみで競争優位を確保することが難しくなった。そのことから、経済産業省と特許庁は2018年5月に「デザイン経営」宣言を公表し、その中でデザイン経営は、ブランドとイノベーションを通じて、企業の産業競争力の向上に寄与することを提言した¹⁾。

(地独) 岩手県工業技術センター (以下「当センター」という) においても、2019年4月にデザイン支援拠点として IIRI DESIGN LAB²⁾ (以下「デザインラボ」という) を設置し、岩手県内の製造事業者及びデザイナー等の商品開発への支援を行っている。

デザインは、かつてモノの色や形など有形なものを対象としていたが、その対象が今日では企業活動や社会などの無形なものまで拡大しており、それらが抱える課題の解決手法として、デザイナーの創造的な思考方法を方法論化したデザイン思考が注目されている³⁾。

また、近年の働き方改革や新型コロナ対策等により、テレワークのニーズが高まっている⁴⁾。さらに、岩手県は大都市圏との物理的な距離があり、かつ県土が広く、テレワークは地域企業の活性化のために有効な手段であると考えられる。しかし、一般的に、オンライン環境ではインフォーマルなコミュニケーションが発生しにくく、知識創造が行われにくい⁵⁾。

これらのことから、岩手県内企業等が抱える課題の解決において、デザイン思考による手法と道具であるデザ

インブレインマッピング⁶⁾ (以下「DBM」という) を活用したオンライン・ワークショップの手法を用いることが有効であると考えた。

DBM は国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (以下「産総研」という) が開発を行っており、令和元年度に、当センターにおいて、DBM の活用に関するセミナー及びワークショップ (全3回) をオンサイト形式で開催している^{7) 8)}。ワークショップ (第2回及び第3回) に参加した企業9社のうち製造業の7社にその後の活用について調査したところ、5社から回答を得たが、組織的に活用していた企業は1社であった。活用していない理由としては、DBM を体験しその有用性は感じているものの、取り組んだワークが一般的な課題を想定したものであったこと等から、実務でどのように活用して良いのか分からない等が挙げられた。

そこで、DBM を活用したオンライン・ワークショップの手法についての知見を得るため、令和2年度及び令和3年度に岩手県内産業の関係者を対象としたワークショップを設計及び開催することにより実証を行った。その結果、設計及び開催の手法に関する知見や実証事例の蓄積を行うことができ、当該手法の活用にあたって有効となる様々な知見を得たので報告する。

2 研究方法

2-1 DBM を活用したオンライン・ワークショップの手法

本研究では、デザイン思考の手法としてDBMを用いた。

* 令和2～3年度共同研究

** 産業デザイン部

*** 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

デザイン思考の手法は様々なものがあるが、DBM はダイバーシティを活かしたワークショップ形式の対話的議論により新たな価値を探索し、課題の解決に向けた活発な議論を行うことができる。さらに DBM を活用したワークショップ^{注1}では、参加者が一か所に集合して行うオンサイトのワークショップと同様に、ウェブ会議システムを利用したオンライン・ワークショップでも創造的な議論を活発に行うことができる^{注2}。

2-2 研究体制

本研究は当センターと産総研との共同研究として実施し、当センター研究員が主にワークショップの開催に関する設計を担当し、産総研研究員が主に議論内容に関する設計を担当した。

また、参加研究員によるオンラインでの打合せを定期的に行い、お互いにフィードバックを行いながら、ワークショップの設計についての検討や開催に向けた準備を進めた。打合せは、令和2年度は原則週1回のペースで計36回実施し、令和3年度は原則隔週として計27回実施した。

なお、DBM ソフトウェアは、産総研から当センターに試用版の提供があり、参加者へは当センターから配布した。

2-3 ワークショップの設計

一般的に、ワークショップは事前の設計が重要であり、設計にあたっては次の3つのデザインに着目した。

- (1) 企画のデザイン … ワークショップのコンセプトや目的、想定参加者の設定
- (2) 議論メニューのデザイン … 有効な対話的議論を行うためのテーマや内容のデザイン及び議論の状況に応じたカスタマイズ
- (3) 実施のデザイン … 参加者の各種リテラシーに合わせた資料の作成や実施環境の準備

なお、オンライン・ワークショップでは、参加者への直接的なトラブル対応が行えないため、「実施のデザイン」が特に重要となる。

3 結果

3-1 企画のデザイン

実証として開催するワークショップは、より多くの企業での有効性を確認することと、当該手法の活用促進を図るため、当センターが主催する講習会として参加公募型で行った。

令和2年度は、デザインラボの主な支援対象である工業系事業者と工芸系事業者を対象とした。当センターから産総研に岩手県内産業の状況等について情報提供を行い、対象業種や参加想定メンバー等を提案した。産総研から当センターへは、ワークメニュー案や岩手県内産業の状況や県民気質等を考慮した募集方法(タイトルや周知文)等が提供された。

工業系事業者を対象としたワークショップ(以下「工

業WS」という)は「組織内の連携による人的、知的リソースの活用」をテーマとし、全3回をオンラインで開催した(表1)。参加者は経営層、中堅、若手等、計16名であった。

工芸系事業者を対象としたワークショップ(以下「工芸WS」という)は、「岩手の工芸の持続的発展」をテーマとし、予想される参加者のパソコン操作等のリテラシーを考慮し、第1回を当センターに集合してのオンサイトで、第2回及び第3回をオンラインで開催した(表2)。参加者は作り手、支援者等、計10名であった。

令和3年度は、DXや脱炭素など、今後の企業活動に関わる多くの課題に対し、持続可能な開発目標(SDGs)を設定することが必須になることから、SDGsの認識と企業活動の中長期展望を意識するきっかけのためのワークショップ(以下「SDGsWS」という)を実施した。予想される参加者のパソコン操作等のリテラシーへの考慮と併せ、講師と参加者が1度面会することによりワークショップが円滑に進行すると考え、全3回のうち第1回をオンサイト開催とし、第2回及び第3回をオンライン開催とした(表3)。幅広い業種から計17名の参加があった。

3-2 議論メニューのデザイン

各議論で用いるワークは、いずれも第1回は現状を把握するワークを行い、第2回以降は講師が議論の状況や後述するアンケートの結果を見ながら作成した。

工業WSでは、企業課題の解決に向けて組織の知恵の結集することを目標として、表4の各ワークを用いて議論を行った。

企業内において縦連携や横連携を図る上で、各メンバーが課題として感じていること等を外在化することにより、立場の違いによる課題意識の違いをメンバー間で共有することができた。さらに、知恵を結集する方法についての議論を行い、周囲に理解者を増やしながら企業内でのコミュニケーションの機会を設けていくこと等の提案があった。

なお、参加者へのアンケートでは、ワークショップ終了後も企業内でのコミュニケーションツールとしてDBMを活用していきたいとの意向も聞かれたが、企業内での当該手法の説明の難しさが課題であると感じている参加者も多かった。

工芸WSでは、岩手の工芸を盛り上げて継続的に発展させていくことを目標として、表5の各ワークを用いて議論を行った。

工芸の作り手、売り手、支援者等のそれぞれの立場からの考えを外在化することにより、日常生活で工芸品を使う機会が少ないことや、情報発信がお互いに人任せになっていること等、現状の課題を共有することができた。さらに、継続的な発展に向けての議論を行い、モノとしての価値だけではなく、工芸品に触れる体験機会を提供することで体験価値を伝えていくことや、100年後の伝統工芸の在り方を考えていくこと、ステークホルダーを

表1 工業WS (令和2年度・工業系事業者)

参加対象	工業系事業者
タイトル	チーム間に新しい流れを創るデザインブレインマッピング (DBM) よりよいビジネスモデルや商品企画に向けて 組織の知恵を結集するリモートワークショップを体験しよう
開催日	第1回 令和2年10月28日(水) オンライン開催 第2回 令和2年11月04日(水) オンライン開催 第3回 令和2年11月11日(水) オンライン開催
講師	国立研究開発法人産業技術総合研究所 手塚 明氏
運営	当センター研究員が講師と連携し、参加者募集及び個人ワーク支援、ワークのまとめ、リモート運営等を実施。
参加者	16名(経営層、中堅、若手等)
議論のテーマ	組織内の縦連携及び横連携により、人的、知的リソースを効果的に活用するには

表2 工芸WS (令和2年度・工芸系事業者)

参加対象	工芸系事業者
タイトル	工芸に新たな流れを起こすデザインブレインマッピング (DBM) 岩手ならではの工芸を盛り上げ、その持続的発展に繋げるために 異なる立場からの知恵を結集するワークショップを体験しよう
開催日	第1回 令和2年12月16日(水) オンサイト開催 第2回 令和2年12月23日(水) オンライン開催 第3回 令和2年01月13日(水) オンライン開催
講師	国立研究開発法人産業技術総合研究所 手塚 明氏
運営	当センター研究員が講師と連携し、参加者募集及び個人ワーク支援、ワークのまとめ、リモート運営等を実施。
参加者	10名(作り手、支援者等)
議論のテーマ	岩手の工芸を盛り上げ、その持続的発展に繋げるためには

表3 SDGsWS (令和3年度)

参加対象	製造業の中小企業、金融機関、行政機関、知財活用支援機関、など
名称	SDGs への向き合い方 超攻略を考える -建前のSDGsから現実のビジネスSDGsへ-
開催日	第1回 令和3年11月12日(金) オンサイト開催、セミナー併催 第2回 令和3年11月26日(金) オンライン開催 第3回 令和3年12月10日(金) オンライン開催
講師	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 手塚 明氏 11月12日セミナー講師：株式会社 メンバーズ 原 裕 氏
運営	前年度同様、当センター研究員が講師と連携し、参加者募集及び個人ワーク支援、ワークのまとめ、リモート運営等を実施した。
参加者	17名(金属製品製造業、食料品製造業、家具製造業、運輸業、印刷業、行政機関など)
議論のテーマ	SDGsに関わる自社のこれからに向けて、組織の知恵を結集する方法

表4 工業WSのワーク (令和2年度・工業系事業者)

回数	ワーク	テーマ	内容
第1回	ワーク1	認知バイアスの違いを知ろう!	企業内での連携について、重要度-実現容易度の軸にプロットする。
	ワーク2	コミュニケーション上の課題の把握	「定量論者-定性論者」と「技術起点部署」-「顧客接点部署」の軸上にコミュニケーション上の課題を記述する。
	ワーク3	課題意識のセンシング	組織の知恵の結集について、現状と理想を見える化し、理想に至らない阻害要因を考える。
第2回	ワーク1	スコープやネットワークの拡大	自分が関係する(したい)機関や部署を外在化する。
	ワーク2	因果関係推論による原因特明	組織の知恵の結集を阻害する要因について、その原因を掘り下げる。
	ワーク3	ネガ→ポジのワーク	組織の知恵の結集に関わるネガを吐き出し、ポジに向かうためのアイデアを考える。
第3回	ワーク1	駆動目的を考えるための準備	知恵を結集する方法を組織内に展開しようとした時の賛成派と反対派のコメントを想像する。
	ワーク2	周りを巻き込む駆動目的を考える	大目的「よりよいビジネスモデルや商品企画に向けた組織の知恵の結集」を実現するための駆動目的を考える。
	ワーク3	ジャーニーマップ	駆動目的に至る道筋とは波及効果について考える。

表5 工芸WSのワーク (令和2年度・工芸系事業者)

回数	ワーク	テーマ	内容
第1回	ワーク1	ネガを吐き出し、ポジに向かう	岩手の工芸分野に関わるネガを吐き出し、ポジに向かうアイデアを考える。
	ワーク2	課題意識の可視化	岩手ならではの工芸を盛り上げ、その持続的発展につなげるための項目について、重要度-実現容易度の軸にプロットする。
	ワーク3	気がついていない価値を考えよう	他県からみた岩手の工芸を考え、日頃当たり前と見逃している価値を探る。
第2回	ワーク1	因果関係推論による原因への気付き	岩手の工芸の課題に対する原因(未来への阻害要因)を掘り下げる。
	ワーク2	お互いに期待すること	作り手・売り手・支援者が相互に期待することを外在化・可視化する。
第3回	ワーク1	工芸が生活にもたらす変化を考える	工芸品が人と生活にもたらす変化、人と生活の関係性にもたらす変化を考える。
	ワーク2	駆動目的を考える	工芸分野の未来を俯瞰的に考え、チーム化するために、関係者を巻き込むための駆動目的を考える。
	ワーク3	ジャーニーマップ	岩手の工芸の未来について、駆動目的に至る道筋と波及効果について考える。

表6 SDGsWSのワーク (令和3年度)

回数	ワーク	テーマ	内容
第1回	アイスブレイキングワーク	認知バイアスの違いを知ろう!	SDGsについて、自分や所属組織の課題意識の高低をプロットする。
	ワーク1	関係性の変化を考えてみよう!	SDGs改革で「社会・生活・人々」-「ビジネス」-「会社・組織」間の関係性がそれぞれどう変わるのかを考える。
第2回	ワーク1	ネガポジワーク	SDGsへの向き合い方に関係する職場の意識改革や事業再構築について、ネガを吐き出し、ポジに向かうためのアイデアを考える。
	ワーク2	SDGsに関わる企業変革でお互いに期待すること	企業変革について「経営者・事業決定層」-「中堅層」-「若手又は間接部門」間でお互いに期待することを考える。
	ワーク3	根っこの原因を考えてみよう	企業変革への阻害要因と根っこの原因を掘り下げる。
第3回	ワーク1	SDGs実施のための why-how-what	ビジネスに関わるSDGs実施を why-how-what で分解して考える。
	ワーク2	周りを巻き込む駆動目的を考えよう	ビジネス視点のSDGsへの取組みに向けて、周りを巻き込む駆動目的を考える。
	ワーク3	駆動目的に至るジャーニーマップ	駆動目的に至る道筋と波及効果について考える。

表7 実施のデザイン

項目	工夫
参加マニュアル	推奨機材や作業手順をまとめたマニュアルを作成し参加者に配布
事前準備	オンライン又はオンサイトで DBM の使用体験も含めた事前説明を実施
	ウェブ会議システムでのマイク音声やオンラインストレージでのファイル共有等の事前確認を実施
議論サポート	参加者のチーム議論に当センター研究員を配置
アンケート	ワークショップに参加しての気付きや感想、今後への期待等の設問を設け、回答しながら振り返りができるアンケートを作成

巻き込んだ議論の場を設けることが必要である等の提案があった。

SDGsWS では、ビジネスで SDGs に取り組むことを目標として、表6の各ワークを用いて議論を行った。

各企業や組織での SDBs への取組状況について各メンバーの考えを外在化することにより、組織内にやらされ感があることやフラットな議論の難しさ等、現状の課題を共有することができた。さらに、SDGs への取り組みに向けての議論を行い、世の中から自分たちに求められていることが不確実であり、SDGs に対する自らの考えを積極的に情報発信していくことが新たなビジネスチャンスを引き寄せるのではないかと、日本の文化の中に SDGs の考え方と共通するものがあるのではないかと等の意見が出され、今後も議論を行っていくことが必要である等の提案があった。

3-3 実施のデザイン

ワークショップの参加者には、ワークショップへの参加が初めての方や IT 機器の操作に不慣れな方も少なかつたため、ワークショップの実施にあたっては、いずれの方も円滑に参加できるように工夫した(表7)。

(1) 参加マニュアル

参加者には、準備する機材、ウェブ会議システムの使用方法、オンラインストレージでのワークファイルの共有方法、DBM ソフトウェアの使用法等を掲載した参加マニュアルを作成し、事前配布した。それにより、参加者の接続環境整備や事前課題への取り組みが円滑に進められた。

(2) 事前準備

第1回のワークショップの前に、オンライン又はオンサイトで DBM の使用体験も含めた事前説明を実施した。

工業 WS では、全3回をオンラインで実施したことから、第1回の約1週間前に接続テストを行った。接続テストは参加企業毎に行い、参加者及び当センター研究員が実際に参加する環境でウェブ会議システムに接続し、適切な環境が整っているかを確認するとともに、参加方法等を説明した。具体的には、DBM ソフトウェアの操作説明や事前ワークの取り組み方、ワークファイルの共有方法、ワークの画面共有の方法等である。

これらの事前準備により、本番でのトラブルを軽減できたことで進行がスムーズになり、参加者も議論に集中

することができた。

(3) 議論サポート

DBM ワークショップのチーム議論では、原則としてファシリテーターは必要とせず、チームメンバーの1人が司会者役となって進めていく。しかし、ワークショップの経験のない参加者もいたことから、各チームに当センターの研究員を1名ずつ配置した。メンバーの発言が少なくなった際には、研究員が一般的なワークショップのファシリテーション手法⁹⁾を参考に助言することにより、議論が活性化した。

(4) アンケート

ワークショップのアンケートは、参加者の議論の深化の状況を把握することができるものであり、次回の議論の内容を検討する資料として重要な役割を担う。

毎回のワークショップの後に、参加者へのアンケートを実施した。アンケートは、講師の助言を受けながら当センター研究員が作成し、ワークショップに参加しての気付きや感想、今後への期待等の設問を設け、参加者が回答しながら議論の振り返りができるものとした。その結果、回答率も高く、自由記述欄への回答が多く見られ、議論による参加者の気持ちの変化が見える化することができた。

4 考 察

全てのワークショップにおいて、ワークショップの体験が初めてという参加者も少なくなかったが、ワークショップへの参加経験を問わず、議論ではいずれの参加者も積極的に発言していた。企画のデザイン、議論メニューのデザイン、実施のデザインのそれぞれが有効であったことから、参加者が議論の内容を自分事として捉えることができ、議論が活発になったものと思われる。このことにより、岩手県内企業等が抱える課題の解決をテーマとした議論においても、DBM を活用したオンライン・ワークショップ手法が有効であることが確認できた。

特筆すべき点としては、個人で取り組んだ事前ワークについて、どの参加者のワークにおいても書き込み量が多く見られたことが挙げられる。現状把握、課題発見、課題解決といった問題解決の各フェーズに応じて思考を深化させることができる適切なワークを提供できたことで、参加者の考えが外在化しやすくなり、議論に参加す

る思考の整理や発言の準備が整ったことによるものと思われる。

また、技術的なトラブルへの対応も行うことができた。令和2年度の工業系事業者を対象としたワークショップでは、第1回を開始した直後に、参加者のマイクのトラブルで一時進行を止める場面があった。そのことから、第2回以降は接続後の開始直前に全員に一度画面とマイクの動作を確認する接続確認を行うことにより、同一のトラブルは軽微なものを除いては無くなった。さらに、令和3年度のワークショップの第1回では、オンラインストレージの使用に慣れていない参加者がいたため、使用方法の説明に時間を要したことや、作業したワークのファイルが保存できない等のトラブルが発生した。岩手県内の製造業を対象とした場合、普段の業務でIT機器を使用する機会が少ない参加者も多い。これらの技術的な課題については、ワークショップ毎に参加者のリテラシーに合わせた対応が必要であるという知見を得た。

一方、本研究で実証した手法を活用し、企業自らでワークショップを設計及び開催することには課題がある。当該手法を活用するためには、その企業の人材が活用に必要な知識やスキルを有することが求められる。DBMを活用したワークショップの設計及び開催の手法については書籍⁶⁾に示されているものの、より効果的なワークショップを設計及び開催するためには、実証により蓄積された知見が必要となる。

本実証を通して、センター研究員は、講師の設計手法を観察することにより、DBMの手法におけるフレームデザインの特徴やカスタマイズ手法等についても知見を得ることができた。そのことから、デザインラボにおいて、企業の個別課題に応じてワークショップの設計及び開催を伴走型で支援するメニューを構築するとともに、企業単独でも活用できるような導入支援を行うことが望ましいと考える。

5 おわりに

本研究では、講師と当センター研究員との協働により、計3回のワークショップを開催した。それにより、本研究で実証したオンライン・ワークショップ手法が岩手県内企業等が抱える課題の解決手法として有効であることが確認できた。また、当センター研究員がデザインラボのデザイン支援で当該手法を活用するために必要な設計及び開催の手法に関する知見や実証事例の蓄積を行うことができた。

今後も、オンライン・ワークショップ手法についてさらに活用スキルを高め、デザイン支援の充実を図りたい。

謝 辞

本研究は、地方独立行政法人岩手県工業技術センターと国立研究開発法人 産業技術総合研究所との共同研究「テレワークのためのデザインブレインマッピング・ワ

ークショップの手法化に関する研究」として実施した。

令和2年度のワークショップは国立研究開発法人 産業技術総合研究所 東北センターのTAIプロジェクトEBISワークショップとして当センターとの共催で開催した。また、経済産業省東北経済産業局に後援いただいた。

関係各位に深く感謝申し上げたい。

注

1) ワークショップの議論は、1チームを4名前後に編成し、チーム毎に議論を行い、その後参加者全体で議論内容を共有する。議論には専用に開発されたソフトウェア(DBM)を使用する。参加者へは事前にワークと呼ばれる宿題が出題され、ワークショップでは各メンバーが事前に取り組んだワークを見ながら議論が進行する。なお、それぞれのワークには議論の内容に応じて設計されたフレームが用いられる。1回のワークショップでは複数題のワークにより議論が行われ、複数回のワークショップを開催して、メンバーが腹落ちする結論を見つけ出していく。

2) 産総研が運営するコンソーシアムの1つである「構想設計コンソーシアム」では、毎月会合を開催している。2020年4月からはオンラインで開催しており、各界で活躍されている方からの話題提供と併せ、話題提供のテーマに関するDBMワークを用いてワークショップ形式の議論を行い、メンバー間での相互理解や新たな気付きが生まれている。構想設計革新イニシアティブ ウェブサイト「構想設計コンソーシアム 活動報告」, http://monozukuri.org/tide/index.html#katsudo_houkoku-sp

文 献

- 1) 経済産業省, 特許庁:「デザイン経営」宣言(2018)
- 2) 地方独立行政法人岩手県工業技術センター デザインラボ ウェブサイト, <http://www2.pref.iwate.jp/~kiri/designlab/>
- 3) 田中一雄: デザインの本質, ライフデザインブックス(2020)
- 4) 総務省: 令和3年通信利用動向調査, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/statistics05.html>
- 5) 中山駿, 永吉実武: オンライン会議環境での知識創造の阻害要因と克服策 -リサーチ・デザインの構築, 経営情報学会 2017年春季全国研究発表大会, p9-12(2017)
- 6) 手塚明, 大場智博, 山村真一: デザインブレインマッピング, 丸善出版(2019)
- 7) 地方独立行政法人岩手県工業技術センター デザインラボ ウェブサイト「【産総研×IIRI DESIGN LAB(De. i)】2019年度産総研東北センター TAIプロジェクト~EBISワークショップ「チームの創発力・実現力を引き出すデザインブレインマッピング(新規事業創出に向けて)」~

開催のご案内 (11/13 開催)」, <http://www5.pref.iwate.jp/~kiri/designlab/news-detail.php?id=31>

8) 宮城の新聞 ウェブサイト「チームの創発力・実現力を引き出すデザインブレインマッピング～新規事業創出

に向けて～」, https://shinbun.fan-miyagi.jp/article/article_20200105.php

9) 山内祐平, 森玲奈, 安斎勇樹: ワークショップデザイン論 [第2版], 慶應義塾大学出版会 (2021)

IoT 機器を用いた麺の簡易乾燥*

武山 進一**

小規模での乾麺製造における麺の調湿乾燥に、家庭用除湿機等の機器を用いる方法を検討した。シングルボードコンピュータ Raspberry Pi で、各種センサーからの情報を収集しながら、除湿機および加湿器の運転を制御することで、麺の変形を抑えるための緩慢乾燥を可能とし、簡易的な麺の乾燥方法を確立した。

キーワード：IoT 機器、Raspberry Pi、麺、簡易乾燥

Simple Drying of Noodles Using IoT Devices

TAKEYAMA Shinichi

Keywords: IoT devices, Raspberry Pi, Noodle, Simple Drying

1 はじめに

乾麺の製造には通常、調湿機能を有する乾燥設備が必要であるため、当センターでの麺に関する試験研究は生麺にとどまり、乾麺に関しては行なえない状況にあった。常温での麺の乾燥に関しては、いかに緩慢な調湿乾燥を行えるかが重要であり、単純にエアコンを除湿モードで稼働させて麺の乾燥を行なうと、乾燥途中で麺線が大きく変形してしまい市販品の様な直線状の麺線にならないことは経験済みであった。湿度を徐々に低下させる手段をネックと考えていたところ、IoT (Internet of Things) 機器の一種で、無線方式でスイッチ操作する機器の存在を知る機会があった。これを温湿度センサーが接続可能なシングルボードコンピュータと組み合わせることで、除湿機等の機器の運転操作をプログラム化し、麺の調湿乾燥に利用できると考えた。

シングルボードコンピュータ Raspberry Pi4 (以下、Raspberry Pi4) はその基盤上に GPIO (汎用入出力) ポートが設けられ各種センサー部品の接続が可能で、その具体的な方法に関しては各種書籍の他にインターネットブログ等で多数紹介されている。また、無線方式で家電製品等のスイッチ操作が行える機器に関しては、スマートフォン(アプリ)等からの操作が一般的ではあるが、Raspberry Pi4 から操作するためのプログラムソースがブログ等で紹介されている。これらの情報をもとに、両者を組み合わせることで、目的とする機器類の運転制御が可能になると考えた。

本研究では、一般向け家電製品である衣類乾燥用除湿機ならびに加湿器を用い、その運転制御に安価な IoT 機

器として関心が高まっている Raspberry Pi4 を利用することで、湿度制御による自然乾燥法で麺の乾燥方法を検討した。

2 実験方法

2-1 製麺方法

麺の原料は、小麦粉「オリンピック」、岩手県小麦粉「ゆきちから」、「銀河のちから」(いずれも府金製粉株式会社製)を使用。原料粉 3 kg ないし 1 kg スケールで、食塩 2% (対粉)、加水率 31~34% の配合とし、切刃 16 番角、麺帯 1.3~1.4 mm 厚でロール製麺した。なお、食塩量は、冬期においては、4% (対粉) に変更して製麺した。

製麺後の麺は直ちに竿(ステンレス製パイプ)に掛け、その竿を大型のステンレス製室内物干しに固定し、その際に麺線の長さを約 3 m (片側約 1.5 m) に調整して麺を切断した。

2-2 実験環境

乾燥室には、広さ 21 m² (約 13 畳) の実験室を充てた。窓(南西側)はカーテンで直射日光が射し込まない様に対策するとともに、天井に設けられた通気用開口部 2ヶ所は段ボールで塞ぎ、通気を遮断した。

麺の乾燥に要する時間は 10 数時間以上に及ぶことから、作業効率を考慮し製麺を午後に行い、直ちに乾燥を開始し翌朝迄行なうこととした。この夜間乾燥時の室温については、その日の天候や季節の影響を受けることとなった。特に、秋後半~冬の期間中は 20℃ を下回る低温と低湿度の環境となった。このため冬期においては、室温確保のため実験室備え付けのエアコンで暖房(室温設

* 令和 3 年度技術シーズ創生・発展研究事業 可能性調査研究

** 食品技術部

定 23℃) するとともに、その風が直接麺に当たることを回避するため、乾燥に用いる物干しを高さ 1.8m のパーティションで囲みそれをポリエチレンシートで覆うことでビニルハウス状態とし、機材類はその内部に設置した。

試験は、6 月から開始しており前記した冬期間対策前迄を常温環境、それ以降を冬期環境と区別し、それぞれの実施内容を記すこととする。

2-3 水分測定

原料の小麦粉と麺の水分測定は、水分測定用アルミ製容器を用いる方法により 135℃、1 時間乾燥、茹でた麺の水分測定は、アルミ箔袋を用いる方法¹⁾により 135℃、2 時間乾燥で測定した。

2-4 湿度調整用の機器

除湿には、サーキュレーター衣類乾燥除湿機 IJDC-K80 (アイリスオーヤマ製) を用いた。その除湿機操作パネル部の運転ボタン、風力切替えボタン部分には、無線式スイッチ操作機器 SwitchBot ボット (SwitchBot 株式会社製) を取付け、機器制御用コンピュータから無線 (Bluetooth 方式) でそれらのボタンを操作した。

加湿には、気化ハイブリッド加湿器 HVH-700R1 (アイリスオーヤマ製) を用い、除湿機同様に電源ボタン、モード選択ボタン部分には無線式スイッチ操作機器を取付け、遠隔操作した。

2-5 機器制御用コンピュータ及び各種センサー

機器制御用コンピュータには、Raspberry Pi4 Model B(4GB) を用いた。OS 及び必要とするソフトウェア、ライブラリ類はインターネット接続してインストール、ならびに環境整備した。

Raspberry Pi4 には、温度湿度測定のための高精度温度湿度センサー SHT31 (SENSIRION 社製)、麺の乾燥時の麺重量測定のための 2 kg 用ロードセル (シングルポイント、ビーム型、Sensor and Control Company Limited. 製) を、それぞれ GPIO ポート経由で接続し、また麺の乾燥状態撮影用として C270n HD ウェブカメラ (ロジクール製) を USB 接続した。接続構成を図 1 に示す。

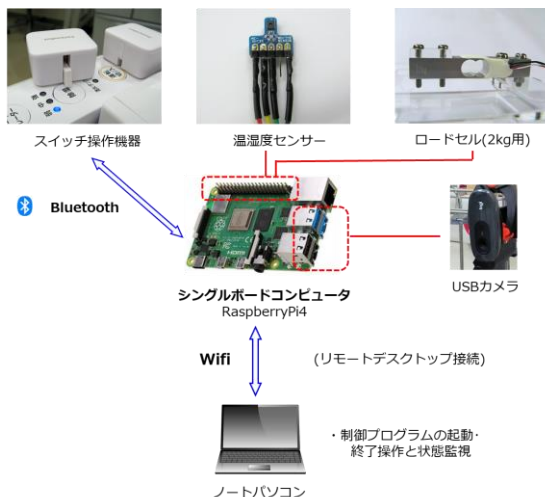


図1 接続構成

2-6 機器制御用プログラム

各種センサー類を Raspberry Pi4 で利用するにあたりこの用途で標準的に使用されているプログラム言語 Python (パイソン) で、麺の乾燥制御用プログラムを自作した。センサー類を取り扱うためのソースコードは、書籍や各種のインターネットサイトでサンプルとして公開されているものを参考とし適宜引用利用した。

作成したプログラムの処理概要ダイアグラムを図 2 に示す。処理内容としては、①温度湿度測定データ、②麺(一竿分)の重量測定データを Excel 形式で、③麺の乾燥状態を撮影した画像ファイルとして保存しながら、収集した湿度値と予め設定しておいた設定値 (目標湿度) を比較して、④除湿機能の ON/OFF 制御を行うというもので、一連のすべての処理を 1 分間隔で実行させている。また、麺を乾燥する場合、乾燥が急すぎると麺線を変形させてしまうことから、測定湿度が設定値を下回った場合に除湿機能を止め、浅野らが行った乾燥法²⁾を参考にして、一定の待機時間 (1 ないし 2 時間) 後に除湿機能を再開するという処理ロジックとした。このための設定項目は、目標湿度 (% 値) と待機時間 (分数) であり、それらをステップと称し (奇数ステップは湿度値、偶数ステップは分数)、湿度を徐々に低下させる内容での設定組合せを CSV ファイルとして作成しておき、プログラム開始時に読み込ませる方式とした。この様にして、乾燥時の湿度制御をその日の天候 (気温・湿度) に応じて柔軟に行える様にした。

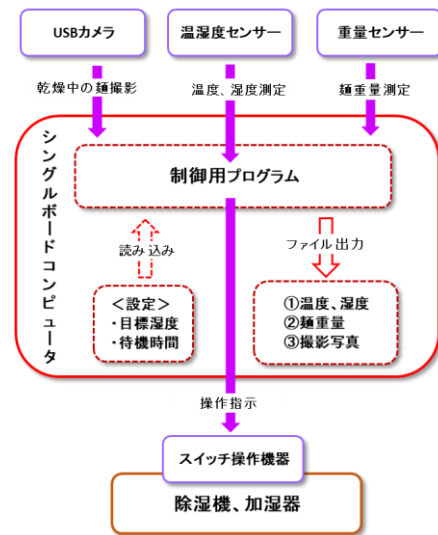


図2 処理概要ダイアグラム

2-7 麺乾燥状態の観察

乾燥中の麺線を 1 分間隔で撮影した画像ファイルは、乾燥終了後に早送り動画 (タイムラプス動画: 12 時間分を 30 秒で再生) に合成し、乾燥中の麺線状態 (収縮、変形) の観察・評価に用いた。

3 結果及び考察

3-1 常温環境での麺の乾燥

3-1-1 最低湿度の検討

原料粉 3 kg の麺生地を製麺して竿掛けすると約 30 分程度で、麺線周辺の湿度は 80%前後に上昇した。そこから徐々に湿度を低下させ翌朝（約 15 時間後）に麺の乾燥を終了させることを目標とした。この最終段階で目標とする湿度（以下、最低湿度）の検討から開始することとした。過乾燥は麺線の変形を起こすことから、乾燥終了段階ではその湿度を維持することになる重要な設定と考えた。試験では、出来るだけ緩慢な乾燥を行う様にした上で、最低湿度を 50%、60%、65%に設定した麺の乾燥を実施した。このとき、湿度を 5%刻みで 60 分ずつ待機しながら低下させることで、麺線の状態（変形の有無）を観察した。

その結果、最終段階の湿度を 65%に設定した場合に、麺線の変形を最小限にとどめ（写真 1）、終了時（約 15 時間後）の麺水分量が目標（14%以下）に達することが出来た。この検討により、最低湿度の設定を 65%とすることにした。



写真 1 乾燥終了後の乾麺
（左：最低湿度 55%設定、右：最低湿度 65%設定）

3-1-2 湿度制御の検討

麺線の変形を抑えるための湿度制御による緩慢乾燥条件を検討した。麺の乾燥は表面から進行し、乾燥速度が速過ぎると表面ばかり先に乾いて内部の乾燥が遅れる結果、形状が曲がったり、乾燥中に脆くなって折れたりする³⁾。そのため乾燥を緩慢に行う必要があり具体的には、除湿による乾燥を間欠的に行ない麺線内の水分が均一化（麺線内部から表面への水分移動）する時間をとることとした。乾燥制御プログラムに読み込ませる設定（設定湿度、待機時間）の一例を表 1 に示す。開始直後は 30 分の待機時間を設け湿度の上昇を待たせた。その後設定した湿度（表 1 の場合、76%）に達する迄、除湿機を作動させて除湿を開始し、設定湿度に達した時点で次の待機時間に移行させた。この時、湿度が設定値（76%）を下回っていた場合には、除湿を開始することなく次の待機時間に移行させる処理とした。麺乾燥時の水蒸気に伴う

湿度上昇のみならず、その日の天候に由来する湿度の影響や、夜間の室温低下に伴う湿度上昇等、外部環境要因の影響が多いことから一様な結果は得にくい状況ではあったものの、表 1 に示す様な設定によりほぼ安定した緩慢乾燥が行えるようになった。

ステップ No.	設定値		湿度
	待機時間(分)	目標湿度(%)	
0	30		
1		76	
2	60		
3		74	
4	60		
5		72	
6	60		
7		70	
8	60		
9		69	
10	60		
11		68	
12	60		
13		67	
14	60		
15		66	
16	60		
17		65	
18	60		
19		65	
20	60		
21		65	
22	60		
23		65	
24	120		
25		65	
26	120		
27		65	
28	120		

表 1 湿度、待機時間の設定例

乾燥時の温度、湿度変化記録結果の一例を図 3 に示す。この時の湿度の設定は、76→70%間は 2%、70→65%間は 1%間隔で下げる設定とし、各設定到達後に待機時間（除湿 OFF）時間を 60 分保持した。乾燥終了時の麺線に変形はなく、麺の水分は 14.1%であり、目標とする緩慢乾燥が行えた。

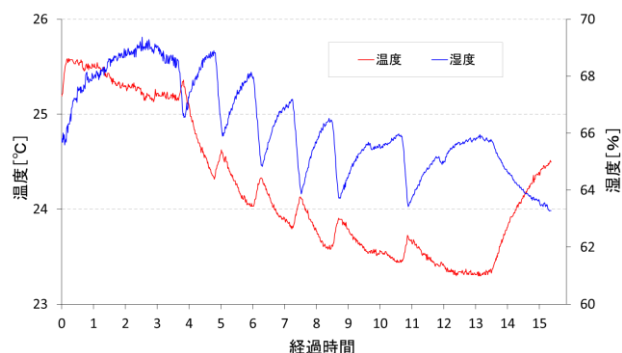


図 3 麺乾燥時の温度・湿度変化（時期：6月下旬）
最低湿度（乾燥最終段階の湿度）設定 65%

3-1-3 乾燥状況の把握

緩慢乾燥を行い最終的な湿度を 65%迄下げることで、麺線の変形を抑えた乾麺の試作が行えるようになったが、乾燥終了の判断は麺の乾燥状態を触感で判断していたため、出来上がりの乾麺の水分量はバラつくこととなった。本来、乾燥終了判断は麺水分量で判断すべきであることから、乾燥中の麺重量をリアルタイム測定することを検討した。具体的には、重量センサー（ロードセル）を導入し、それに一竿分の麺線（約 800 g）を吊り下げ（写真

2)、1分間隔で重量を測定するというもの。重量センサーには2kg用を用いたが、重量値が温度の影響を受け易いことが確認されたため、両者の関係性を調査した上で補正式求め、温度に依存しない重量値を得ることとした。

乾燥開始～終了迄の麺重量データと実測麺水分量から、乾燥中の麺水分量を計算し、湿度と麺水分の関係プロットした結果を図4に示す。

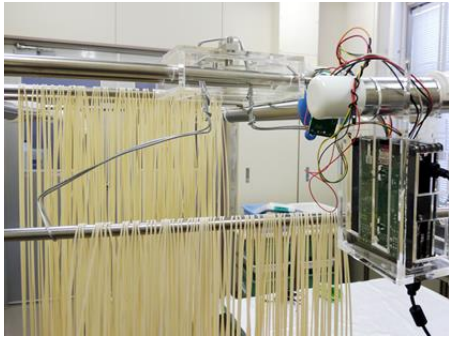


写真2 乾燥中の麺線重量測定の様子

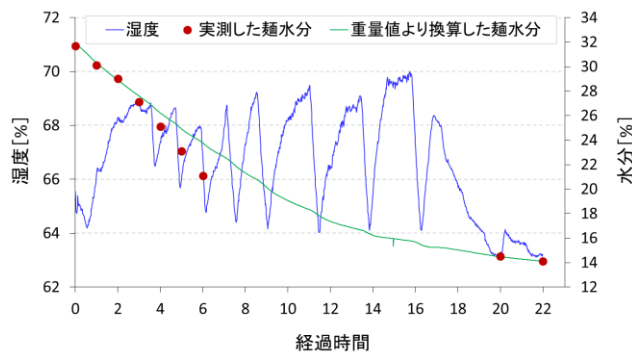


図4 乾燥時の湿度と麺水分量の変化

グラフで示した麺水分量は、乾燥終了時の実測水分値を基にした計算値だが、乾燥開始時の実測水分値とも一致した。ただし乾燥途中段階（この場合、3～6時間経過時）では、実測値と一致しない場合があった。これは、乾燥途中では、麺線のサンプリング場所で水分量に差があるため（麺線の上部より下部の方の水分値が高い）、一致しないものと考えられた。

以上より、乾燥開始時の麺の水分量（実測）から、乾燥中の正確な麺水分量が算出可能となり、乾燥終了の際の判断（麺水分量14.0%）に用いることとした。

3-2 冬期環境での麺の乾燥検討

3-2-1 麺線の縦割れ現象対策

9月頃からの乾燥し易い天候に入ると、麺線が縦割れする現象が発生するようになった（写真3）。乾燥後の麺を切断する際の衝撃で割れる場合や、ポリエチレン製袋での保管中に割れが進行することも確認した。このことに関しては、食塩の配合割合（対小麦粉）を2%から4%に増加させることで、麺線の割れが発生しなくなった。乾燥は食塩が多いと乾き難くなるため、湿度が低く表面乾

燥が早過ぎる時は食塩量を増やす事が行われており³⁾、その効果を確認することとなった。なお、乾麺は本来長期保管に向けた食品であることから、冬の低湿度期間を考慮すれば、年間を通し食塩配合量を4%に設定すべきと判断した。

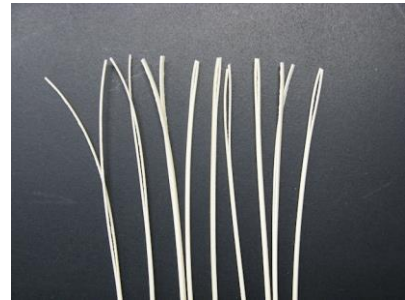


写真3 縦割れした麺線

3-2-2 室温ならびに低湿度への対策

10月下旬頃になると夜間の室温は20℃を下回るようになり、乾燥開始16時間経過しても麺水分は15%台と、麺の乾燥に長時間を要する様になった。また、湿度も40～50%と、乾燥開始時から65%未満の状態となりこれまで通りの調湿による乾燥が行えなくなった。乾燥を促すためには、液体の水から気体の水蒸気に気化させるための潜熱が必要になることから、室温を上げる必要がある。このとき温度に比例する形で飽和水蒸気量が大きくなることで相対湿度は低下し、さらに乾燥した低湿度環境となる。このような状況で湿度制御を行うには強制的に湿度を上げる必要があるため、加湿器を併用することにした。

暖房は部屋に備え付けのエアコンを稼働させるだけであつたが、天井部分から吹き出す温風の影響を回避するため、乾燥に用いる器具及び機器類全体をシートで被い密閉に近い状態にし（容積約3.2m³）、その中で麺の乾燥を行うこととした（写真4）。



写真4 全体をシートで覆い密閉環境にした乾燥設備

乾燥室に暖房（エアコン23℃設定）を入れ、加湿に関しては加湿器を湿度60%未満で作動させ、湿度65%に達したら停止させるという制御をプログラムに追加した。

この設定は、湿度 65%を維持するにあたり除湿機と加湿器が同時に作動すること(競合状態)を回避するために、加湿のための湿度設定を下げたもの。

密閉した環境で麺の乾燥を行った際の、湿度ならびに麺の重量変化の記録結果を図5に、また乾燥終了時の乾麺の写真5に示す。

除湿機で湿度を緩やかに低下させ、最終設定湿度に達してからは、加湿器でその湿度を維持させるという湿度調整によって、冬期においても麺線がほぼ直線状態の乾麺の試作が安定して行えるようになった。

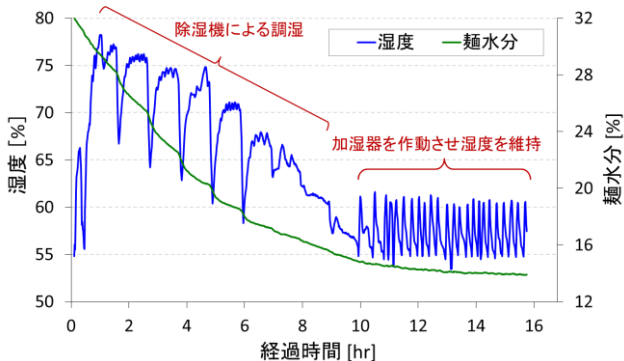


図5 密閉環境で乾燥した場合の湿度と麺水分量の変化



写真5 密閉環境で乾燥した乾麺
(左:乾燥終了時の麺、右:切断した麺)

4 結 言

小規模での乾麺製造における麺の簡易乾燥方法を検討した。乾燥は調湿による自然乾燥で行い、その為の機器として、家庭用の除湿機・加湿器を用い、またその制御にIoT機器を利用した。

乾燥中の麺の変形を抑えるために緩慢乾燥が必要とされたが、天候や気候の影響を受ける環境での検討であったことから、乾燥条件に関する以下の知見を得た。

- 1) 常温環境では、待機時間をとりながら、湿度を2ないし1%ずつ、65%迄低下させることで麺水分量14%迄乾燥出来た。
- 2) 冬期環境では、乾燥設備を密閉状態にした上で室内暖房(23℃設定)を用い、且つ低湿度対策として加湿器を併用し、湿度65%を維持する必要がある。

以上により、オールシーズン対応の“簡易設備による乾麺乾燥システム”を確立した。本システムは、容易に入手可能な家電製品による構成で、費用面でも安価(10万円以下)なのが特徴といえる。

麺に関する試験研究を行う場合に乾麺での評価が可能となると共に、乾麺製造を考える小規模事業者(麺の製造販売者)には技術面での対応が可能となった。

また、今回の手法での調湿乾燥は、麺以外にも適用可能と考えられることから、今後は他の食品を対象とする検討も実施していきたい。

謝 辞

本研究の実施にあたり、株式会社小山製麺 代表取締役 高橋政志様、工場長 宍戸千秋様より乾麺製造に関する貴重なご助言をいただきましたことを感謝いたします。

文 献

- 1) 小麦の品質評価法—官能検査によるめん適性—:農林水産省食品総合研究所, 昭和60年11月
- 2) 浅野松夫、可知正夫:農業機械学会誌, 20, p129-131(1958)
- 3) 小田聞多著:新めんの本, 食品産業新聞社(1994)

地方独立行政法人岩手県工業技術センター研究報告

令和5年2月 第25号

Journal of Local Independent Administrative Agency
Iwate Industrial Research Institute
2023 February Vol.25

発行 令和5年2月6日

地方独立行政法人岩手県工業技術センター

〒020-0857 岩手県盛岡市北飯岡 2-4-25

電話：019-635-1115

FAX：019-635-0311

ホームページ：<http://www2.pref.iwate.jp/~kiri/>

電子メール：CD0002@pref.iwate.jp