

鑄造分野におけるデジタルものづくり（第5報）

久富茂樹*、藤井勝敏*、細野幸太**

Digital manufacturing in the casting field (V)

KUDOMI Shigeki*, FUJII Katsutoshi* and HOSONO Kota**

鑄造製品の品質向上と砂型作製の低コスト化の両立を目指し、砂型 3D プリンタで作製した砂型と樹脂 3D プリンタで作製した樹脂模型を使用した砂型とを組み合わせたハイブリッド砂型による鑄造を試みた。抜き勾配を考慮しない形状でも鑄造が可能で、なおかつ製品部にバリが発生しない鑄造が可能となった。製造コストが高い砂型 3D プリンタで作製する砂型を少なくすることで、砂型作製にかかるコストの抑制も期待できる。また、造形時に発生する積層痕を平滑化する処理を行った樹脂模型を使用して、500 枠の砂型を作製し耐久性を評価した。その結果、樹脂模型に割れなどの欠陥は発生しなかった。平滑化処理を行った樹脂模型の表面状態も耐久性試験前後で差はなく、少ロットであれば、実用に耐え得ることがわかった。

1 はじめに

鑄造の効率化、高品質化を目的として、令和元年度より、県内企業を中心メンバーとした「鑄造分野におけるデジタルものづくり研究会」（以降“研究会”と記す）を設立し、砂型 3D プリンタを活用した鑄造¹⁾、木型代替として樹脂 3D プリンタで作製した鑄造用模型（以降“樹脂模型”と記す）の活用²⁾、鑄造シミュレーションやトポロジー最適化³⁾といった CAE の活用に取り組んでいる。

これまでに、砂型 3D プリンタでは、造形データの配置方向によって積層痕の現れ方や幾何公差が異なること、積層痕は鑄物まで転写されることがわかった⁴⁾⁵⁾。また、トポロジー最適化により設計した形状の鑄造に取り組んだ。従来の鑄造方法では作製が困難であるトポロジー最適化により設計した形状でも、砂型 3D プリンタを使用することで、鑄物の作製が可能であることを示した⁷⁾。樹脂模型では、使用する樹脂 3D プリンタの造形方式、造形条件によって、寸法精度や積層時に生じる積層痕の状態が異なることを確認した⁴⁾。

本年度は、抜き勾配を考慮しない形状のバリレス鑄造と砂型作製コスト削減のために、砂型 3D プリンタで作製した砂型（以降“積層砂型”と記す）と、樹脂模型を用いて作製した砂型（以降“樹脂模型砂型”と記す）を組み合わせ作製した砂型（以降“ハイブリッド砂型”と記す）による鑄造に取り組んだ。製造コストが高い積層砂型を少なくすることで、全体の砂型作製にかかるコストの抑制が可能である。また、樹脂模型砂型について、生産で使用する自動砂型造型機で使った場合の樹脂模型の耐久性を確認したので報告する。

2 ハイブリッド砂型造形

2.1 試験形状

積層砂型は、作製できる形状の自由度が高くなり、従来の鑄造方法では砂型作製が困難であった形状でも可能になることがある。また、抜き勾配の都合上、砂型分割ライン（以降“PL”と記す）を製品部に設定しなければならない場合も多いが、積層砂型では、製品部に PL を設定することなく、バリレス鑄物を作製することも可能である。本研究では、積層砂型の利点を生かすことができる 2 種類の形状データを作成した。図 1 に設計した形状を示す。一つは、水鳥をイメージした、自由曲面が組み合わさった形状（以降“水鳥形状”と記す）で、3DCG ソフトウェア (Blender Foundation 製 Blender) を使用して作成した。もう一つは、車をイメージした、幾何形状を組み合わせた形状（以降“車形状”と記す）で、3DCAD ソフトウェア (ダッソー・システムズ製 SOLIDWORKS) を

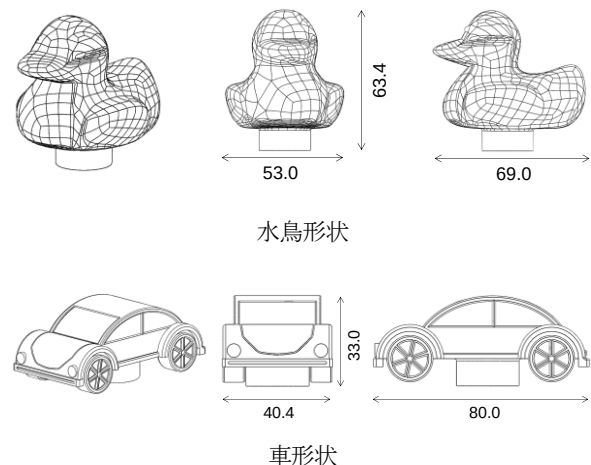


図 1 試験鑄造形状

* 情報技術部

** 金属部

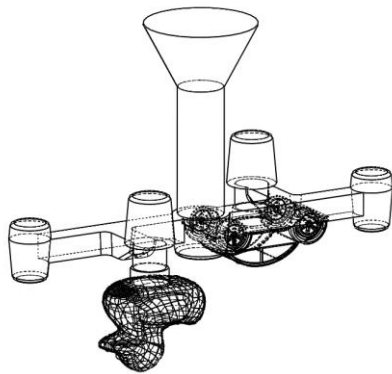


図2 鑄造方案

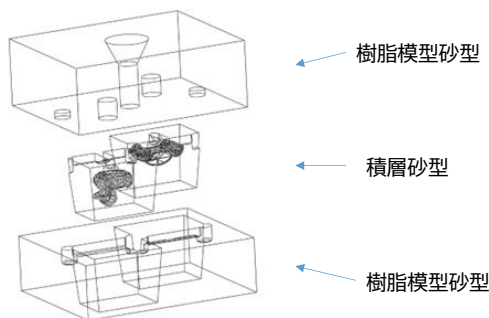


図3 ハイブリッド砂型

使用して作成した。これらに湯口、湯道等を加えて、鑄造方案を作成した。図2に作成した方案を示す。鑄造欠陥の発生率を下げるように、鑄造シミュレーション(クオリカ株式会社製 JSCAST)にて、確認しながら方案を設計した。

2.2 ハイブリッド砂型

積層砂型は、前述のようなメリットがある反面、従来の砂型作製方法に比べて作製コストが高い。試作での利用であれば、許容される場合もあるが、少ロット品やカスタマイズ品では、製品価格に転嫁されてしまう。そこで本研究では、積層砂型と樹脂模型砂型を組み合わせたハイブリッド砂型を試みた。図3にハイブリッド砂型の作製方法を示す。製品形状部を囲む領域は、積層砂型で作製する。これにより、製品形状の自由度が高く、製品部にPLが入らない鑄造が可能になる。その他の部分の砂型は、樹脂模型砂型で作製する。砂型は2分割で作製し、下型部には、キャビティ部を設け、製品部の積層砂型を組み込めるようする。ハイブリッド砂型では、作製コストが高い積層砂型を少なくできるため、作製コストを抑制することが可能である。また、積層砂型では、キャビティ部に未硬化の砂が充填された状態で造形されるため、この砂を除去(以降“排砂”と記す)する必要がある。砂型全体を積層砂型にすると、体積、重量が大きくなり、排砂にかなりの労力が必要であるが、製品部の

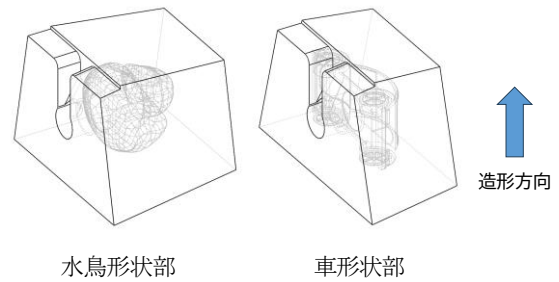


図4 砂型積層造形方向

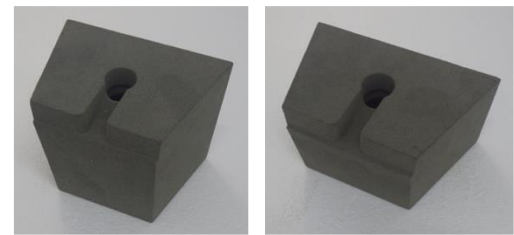
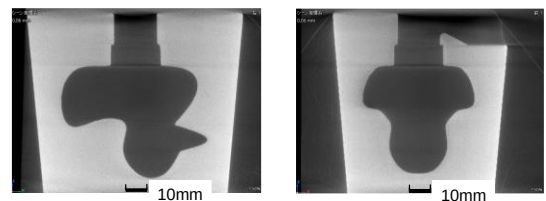
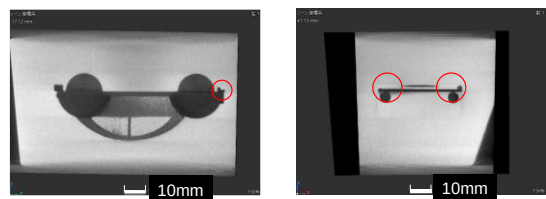


図5 製品部の積層砂型



水鳥形状部



車形状部

図6 砂型のX線CT観察

みを積層砂型にすることで、取り扱う砂型が軽量化され、排砂の作業性も向上する。

積層砂型では、積層の痕(以降、“積層痕”と記す)が表面に現れることがある。予備実験で砂型の造形方向を検討した結果、今回の形状では、図4に示す方向で造形すると、積層痕の影響が比較的小さいことがわかったので、この方向で造形を行った。製品部の積層砂型は、砂型3Dプリンタ(CMET製SCM-800II)で作製した。図5に作製した製品部の積層砂型を示す。非接触三次元形状測定機(GOM製ATOS Compact Scan)で外形を測定し

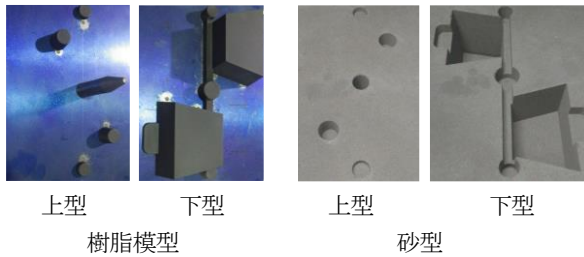


図7 樹脂模型と砂型

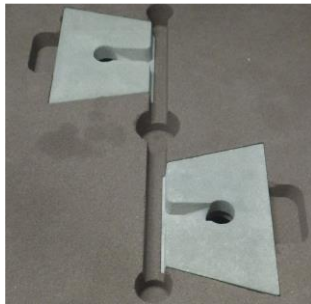


図8 ハイブリッド砂型

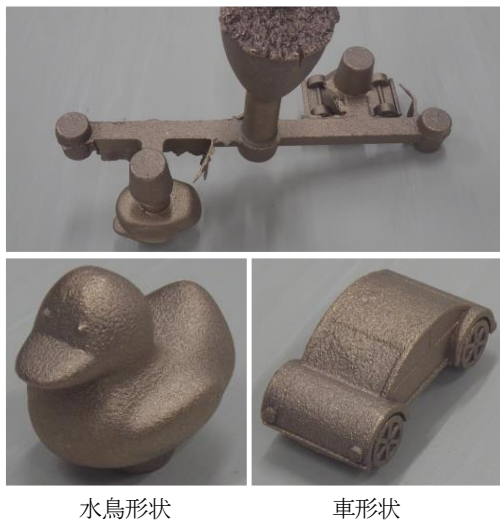


図9 作製した鋳造品

た後、形状評価ソフトウェア(GOM 製 ATOS Professional)を使用して、測定データと設計データを、ベストフィットにて位置合わせを行い、偏差をカラーマップ表示する形状偏差評価を行った。その結果、側面の一部が 0.1mm 程度小さく造形されていた以外は、概ね設計値どおりに造形できていた。また、排砂作業実施後の状態を確認するため、X 線 CT(東芝 IT コントロールシステム株式会社製 TOSCANER-32300 μ FD)にて、内部状態を観察した。図 6 に観察結果の一例を示す。水鳥形

状は概ね排砂ができていたが、車形状では、フロントバンパーの一部の排砂ができなかった(赤丸印部)。この部分は、形状の先端部分で、排砂の際にエアが直接届きづらい位置にあり、さらに、幅 1mm、奥行き 2mm の細かく、アスペクト比の大きな形状であったため、排砂ができなかったものと推察される。

樹脂模型砂型で使用した樹脂模型は、樹脂 3D プリンタ(Markforged 製 Mark Two)を使用して作製した。研究会参加企業にて、これらの模型を型枠に取り付け、生産で使用している自動砂型造型機で砂型を作製した。図 7 に型枠に取り付けた樹脂模型と作製した砂型を示す。最後に、図 8 に示すように、樹脂模型砂型(下型)に製品部の積層砂型を組み込んで、ハイブリッド砂型とした。

2.3 注湯試験

作製した砂型を使用して、研究会参加企業にて、注湯試験を実施した。材料は青銅合金 CAC406、注湯温度は約 1,200℃、注湯時間は約 2 秒であった。冷却後、砂型を崩壊して鋳造品を取り出し、ショットブラストを行って、表面の砂や汚れを除去した。

図 9 に作製した鋳造品を示す。積層砂型と樹脂模型砂型との境界部分にバリが発生した。製品領域部の樹脂模型の形状測定では、設計データと比較して、0.2mm ほど大きく造形されている部分があった。製品領域部の樹脂模型は、製品部の砂型外形に対して 0.2mm 大きくなるように設計しているため、造形された樹脂模型は、製品部の積層砂型外形設計値に対して、0.4mm 大きい部分があることになる。また、製品部の積層砂型は、前述のように、0.1mm 小さくなっている部分もあったため、樹脂模型砂型(下型)のキャビティ部の外形は製品部の積層砂型外形に対して最大 0.5mm 大きいことになる。そのため、組み込んだ砂型の隙間が大きくなり、溶湯が流れ込んだものと推察される。使用する 3D プリンタの造形精度に応じた、設計寸法の調整を行うことで、バリの発生を低減できると思われるが、現状でも製品部分にはバリは発生しておらず、バリレス鋳物の作製という目的は達成できた。

水鳥形状の鋳造品の非接触三次元形状測定を行い、設計データとベストフィットにて位置合わせをした後、形状偏差を調べた結果、 $\pm 0.5\text{mm}$ の偏差があった。位置合わせ方法を変えて調べると、胴体部の下半分(湯口に近い側)の形状が小さく鋳造されていた。砂型の X 線 CT 撮影では確認できなかったが、この部分は砂の除去を行う際に、エアが届きづらい位置にあたるため、砂の除去が不十分であったと推察される。

車形状の鋳造品では、概ね $\pm 0.2\text{mm}$ の偏差で鋳造できていたが、砂型の X 線 CT 観察で砂の除去が不十分であることが確認されたフロントバンパーの一部は形成できておらず、形状偏差は 2mm ほどになった。また、フロントガラスの一部が最大 1mm ほど盛り上がったようになっていた。あらためて、砂型の X 線 CT の

観察画像を見直すと、その部分で砂型が欠けていることがわかった。

铸造品の形状が微細になると、砂型 3D プリントを使用しても、完全な状態で砂型を作製することは困難なため、排砂を考慮した形状設計が必要である。

3 樹脂 3D プリントを使用した樹脂模型の耐久性

砂型 3D プリントを使用しない従来の铸造方法では、製品形状の木型を砂に転写することで砂型を作製する。しかし、近年、木型を製作する職人の減少および高齢化が進んでおり、その代替技術が必要となりつつある。これまでに、樹脂 3D プリントで作製した樹脂模型の木型代替としての活用について検討した⁹⁾。本年度は、樹脂模型の耐久性評価を実施した。

3.1 樹脂模型の造形

図 10 に樹脂模型の形状を示す。角度の異なる斜面で構成された形状とした。この形状の三次元データを作成し、樹脂 3D プリントを使用して、表 1 に示す条件で造形した。

3.2 樹脂模型の表面平滑化

樹脂 3D プリントを使用した造形でも積層痕が表面に現れることがある。特に、材料押出方式の樹脂 3D プリントは、装置価格が比較的安価で、取り扱いも容易であるが、積層痕が生じやすい造形方式である。積層痕が原因の砂型不良の心配は少ないと考えられるが、意匠面での課題があるため、樹脂模型表面の平滑化について検討してきた⁹⁾。本研究では、既報で検討した表面平滑化のうち、ポリエステルパテ、光硬化樹脂、サンドペーパー研磨により、表面の平滑化を行った。

3.3 樹脂模型の耐久性

既報では、樹脂 3D プリントで作製した樹脂模型が 15 枠分の砂型造形に耐え得ることを示したが、より造型回数を増した場合の耐久性を、平滑化処理を行った表面の状態も含めて確認した。実験は、表面平滑化処理を行った 3 種類の樹脂模型と未処理の模型について、中央の平面部に識別用の番号マーカを貼付し、湯口、湯道などの方案とともに自動砂型造形機(コーヨー製 SM-60V-S A Type)の型枠に取り付け、500 枠分の砂型を造形した。造形前後に、非接触三次元形状測定機で測定した後、前章と同様の方法で形状偏差評価を行った。

図 11 に、試験前の樹脂模型の外観と形状偏差を示す。表面平滑化の未処理の試料では、10 度の斜面上に、造形時の積層痕が顕著に現れている。ポリエステルパテによる処理を行った試料は、10 度の斜面における積層痕がやや残っているものの全体的に形状偏差が小さい結果であった。光硬化樹脂による処理を行った試料は、樹脂の塗りムラが生じた部分もあるが、積層痕はなくなり、平滑な面が得られている。サンドペーパー研磨による処理を行った試料は、エッジ付近で研磨量が大きくなり、形状偏差が大きくなった。

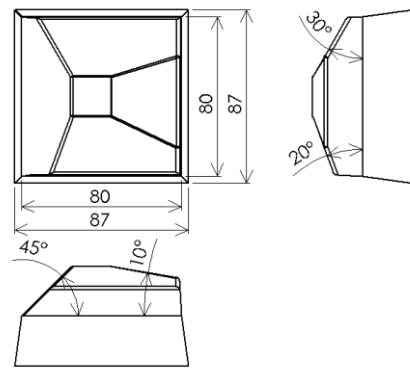
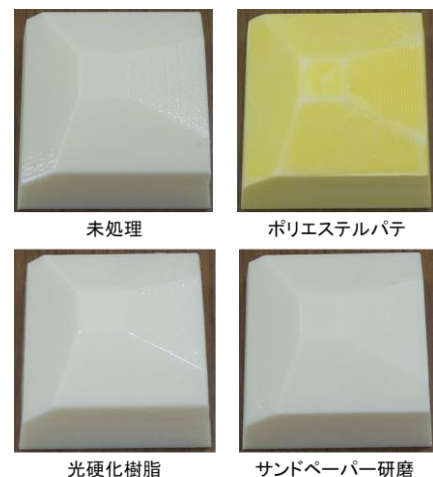


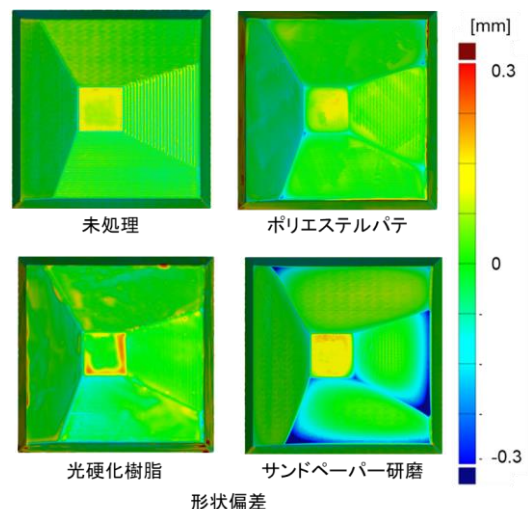
図 10 樹脂模型形状

表 1 樹脂模型の造形条件

3Dプリンタ	Stratasys製 Fortus360mc-L
造形方式	材料押出
造形材料	ABS
積層ピッチ	0.254mm



外 観



形状偏差

図 11 試験前の樹脂模型の外観と形状偏差

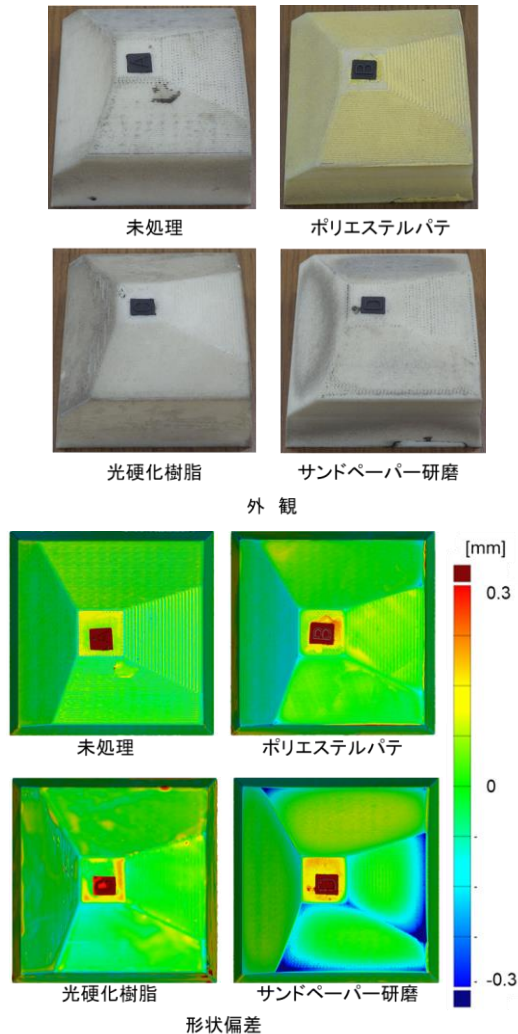


図 12 500 枠造型後の樹脂模型の外観と形状偏差

図 12 に、500 枠の造型後の外観と形状偏差を示す。造型後も樹脂模型に割れなどの欠陥はなかった。平滑処理を施した表面も、砂による汚れはあったが、平滑処理用樹脂が剥がれ落ちたり、大きく摩耗したりすることはなかった。形状偏差評価においても、砂型造形前後で差はなかった。造型した砂型を用いて鋳造した鋳造品を観察した結果、未処理の試料とポリエステルパテ処理の 10 度の斜面にやや積層痕が転写されていたが、その他の鋳造品の斜面は実用に耐え得る鋳肌であった。これらの結果から、500 枠程度の少ロット製品であれば、樹脂 3D プリンタで作製した樹脂模型が、表面平滑化処理を含めて、実用に耐え得ることがわかった。

4 まとめ

鋳造において、製品形状の自由度の向上やバリレス化と砂型作製の低コスト化の両立を目指し、積層砂型と樹脂模型砂型を組み合わせたハイブリッド砂型による鋳造を試みた。抜き勾配を考慮しない形状でも鋳造が可能で、なおかつ製品部にバリが発生しない鋳造が可能であ

った。製造コストが高い積層砂型を少なくすることで、砂型作製にかかるコストの抑制もできる。ただし、砂型 3D プリンタで造形後の排砂が困難であったり、不良が生じたりする課題もある。排砂状態の確認は、X 線 CT による内部観察により行っているが、より手間をかけず、迅速に確認できる手法が望まれる。

また、従来の鋳造工程で使用する木型代替として、樹脂 3D プリンタを使用した樹脂模型の耐久性について評価した。樹脂模型の造形時に発生する積層痕を平滑化する処理を行った試料を使用して、500 枠の砂型造形を行い、耐久性を評価した。その結果、樹脂模型に割れなどの欠陥は発生しなかった。平滑化処理を行った樹脂模型の表面状態も耐久性試験前後で差はなく、少ロットであれば、実用に耐え得ることがわかった。

【謝 辞】

本研究で作製した試料の一部は、公益財団法人 JKA の補助事業で導入した三次元造形機(3D プリンタ)で作製しました。

本研究を遂行するにあたり、砂型 3D プリンタの造形指導及びアドバイスをいただいた三重県工業研究所金属研究室の皆様、砂型造形、注湯試験に協力していただいた、株式会社 KVK の皆様、株式会社 マツバラの皆様、有限会社岐南鋳造所の皆様、株式会社 瓢屋の皆様、鍋屋バイテック会社の皆様に感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 岡根ら, 鋳造工学, 第 90 巻, 第 6 号, pp266-273, 2018
- 2) 金森ら, 三重県工業研究所研究報告, No.40, pp61-66, 2016
- 3) 西脇ら, トポロジー最適化, 丸善出版, 2013
- 4) 久富ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告, No1, pp17-20, 2020
- 5) 久富ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告, No2, pp27-30, 2021
- 6) 久富ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告, No3, pp23-26, 2022
- 7) 久富ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告, No4, pp7-10, 2023