

令和3年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「高性能モータ用アモルファス箔積層モータコアの

プレスせん断加工量産技術の開発」

研究開発成果等報告書

令和4年5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人 にいがた産業創造機構

# 目 次

## 第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

## 第2章 本論

- 2-1 プレスせん断によるアモルファスの量産加工技術の開発
  - 2-1-1 極小クリアランスのための高精度金型の開発
  - 2-1-2 精度を維持してワークを加熱する温間加工金型構造の検討
  - 2-1-3 量産加工に対応する高耐久金型の開発
- 2-2 コア積層のインライン化及び重ね接着クラッド材による量産性向上の検討
  - 2-2-1 型内積層と重ね接着法の開発
  - 2-2-2 重ね接着（クラッド化）装置の製作
- 2-3 アモルファス積層コアの特性の把握と品質向上の検討
  - 2-3-1 鉄損評価による損失原因の把握と対策検討
  - 2-3-2 アモルファスコアモータの試作とケイ素鋼板コアモータとの特性比較と優位性の評価

## 最終章 全体総括

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

自動車業界では、英国、フランスは2040年までに内燃機関を動力とした自動車の販売禁止を発表するなど、世界各国でEV化、HV化を推進している。国内に目を向けると、国内の電力利用の内訳では、約60%がモータの駆動電力となっているが、「EV化」「動力の電動化」の流れから、モータによる電力消費はさらに増加していくものと予想される。そのような中で、モータの効率化は省エネのための最も有効な手段といっても過言ではない。

モータの効率化は、磁石材料、銅線をはじめとした技術高度化が進められてきた結果、コア損失である鉄損を除いては、飛躍的な改善はもはや困難な段階にきている。一方、鉄損（コア損失）に関しては、低損失材料選択によって劇的な改善が望める。つまり、モータの効率化のためには、より低鉄損の材料への置き換えが有効な手段となる。

アモルファスは、高飽和磁束密度でありながら高透磁率、低損失の軟磁性を示し、数値的には、従来の電磁鋼板などに対し、鉄損が約1/10程度と飛躍的な低鉄損材料であり、モータコア材料として以前から高い期待が寄せられてきた。アモルファスをコアとして採用によるモータの高効率化は、環境、政策、産業界から強く要望されていると同時に、その期待に応えうる最も有効かつ合理的な手段であると言える。

しかし、これまでアモルファスコアが実用化に至っていないのは、塑性加工性が極めて悪く、プレス加工による打ち抜き加工が非常に困難なためである。現在行われているレーザー加工、エッチング加工などのその他の加工法では、設備コスト、加工コストに難点がある。電磁鋼板と同様にプレス量産加工技術が確立できれば、アモルファスコアモータ実用化のブレークスルーになることは確実と考える。

そのため本研究では、上記の課題を解決し高効率モータ用アモルファスコアの量産加工技術を開発することを目的とし、以下をその目標とする。

川下メーカーは新技術であるアモルファスコアモータの開発にあたり、コア損失を従来の電磁鋼板に対し、1/8まで低減することを要求値として示している。これを70WのSRモータでシミュレーションを行うと、50%負荷における効率は6%程度向上し、さらに、負荷が10%から100%までの領域で効率90%以上となる。このような効率向上の数値を高度化目標とし、それを実現するため、アモルファスの低鉄損を増大させないコア形状の打ち抜き技術と占積率を極力低下させない接着積層技術を確立することを目指す。

### 1-2 研究体制

#### 【補助事業者】（事業管理機関）

- ・公益財団法人にいがた産業創造機構

氏名	所属・役職	担当業務（サブテーマ番号）
遠藤 裕	産業創造グループ・次世代産業チーム・マネージャー	事業管理業務
渋谷 恵太	産業創造グループ・次世代産業チーム・シニアエキスパート	事業管理業務
田辺 寛	産業創造グループ・次世代産業チーム・シニアエキスパート	事業管理業務
佐々木 智康	産業創造グループ・次世代産業チーム・チーフ	事業管理業務
石黒 有美	産業創造グループ・次世代産業チーム・事務局員	事業管理業務

【研究等実施機関】

・株式会社山口製作所

氏名	所属・役職	担当業務（サブテーマ番号）
山口 貴史（P L）	代表取締役	【1】 【2】 【3-1】
上村 忠	工場長	【1】 【2】
沢中 純一	製造課長	【1】 【2】
嶋 優仁	プレス製造部	【1】 【2】
阪詰 智裕	金型製造部	【1】
橋本 毅	金型製造部	【1】
佐藤 初恵	金型製造部	【1】
廣井 奈緒子	金型製造部	【1】
山口 晴子	業務管理	事業管理業務全般

・学校法人日本工業大学

氏名	所属・役職	担当業務（サブテーマ番号）
古閑 伸裕	基幹工学部 機械工学科 教授	【1-1】 【1-3】

・新潟県工業技術総合研究所

氏名	所属・役職	担当業務（サブテーマ番号）
阿部 淑人（SL）	研究開発センター長	【1-2】 【1-3】 【2-1】 【3-1】
中川 昌幸	研究開発センター 専門研究員	【1-2】 【1-3】 【2-1】 【3-1】
岡田 英樹	研究開発センター 主任研究員	【1-2】 【1-3】 【2-1】 【3-1】 事業管理業務全般
本多 章作	県央技術支援センター 専門研究員	【1-2】 【1-3】 【2-1】 【3-1】
樋口 智	下越技術支援センター 専門研究員	【1-2】 【1-3】 【2-1】 【3-1】

・国立大学法人長岡技術科学大学

氏名	所属・役職	担当業務（サブテーマ番号）
伊東 淳一	大学院技学研究院 教授	【3-2】
日下 佳祐	大学院技学研究院 助教	【3-2】

【アドバイザー】

・井澤金属株式会社

名古屋支店 次長 前田 拓哉

自動車部品ティア1等のモータに関する市場動向、情報提供について助言、販売協力を行う

- シンフォニアテクノロジー株式会社

電子精機本部モーション機器新市場開発室 室長 村口 洋介

製品評価、市場動向について助言、協力を行う

- ヒムエレクトロ株式会社

代表取締役社長 丸山 春治

アモルファス用途、要求について業界の要求、市場動向について助言、協力を行う

### 1-3 成果概要

#### 1-3-1 プレスせん断によるアモルファスの量産加工技術の開発

高精度加工機の導入、加工・測定環境の整備を行うとともに、加工技術、測定技術の高度化、更には独創的な設計思想、固有の金型組付け技術により、一般的には4  $\mu\text{m}$ が限界と言われている金型のパンチとダイのクリアランスを2  $\mu\text{m}$ 狙いまで追い込んだ超高精度金型の開発に成功した。従来までは、ライフ試験において金型破損までのプレスパンチ数が数千パンチ程度であったのに対し、この超高精度金型を用いた結果、8万パンチ程度と劇的に改善され、超高精度金型の有効性を確認した。

#### 1-3-2 コア積層のインライン化及び重ね接着クラッド材による量産性向上の検討

コアの積層に適した接着剤の選定を進め、型内接着工程を開発し、型内積層において占積率96%を達成した。また、重ね接着（クラッド化）について簡易装置による評価を行った。

#### 1-3-3 アモルファス積層コアの特性の把握と品質向上の検討

積層コアの鉄損測定技術を確立し、アモルファスコアの鉄損は電磁鋼板の鉄損の1/8であることを確認した。試作アモルファスコアモータにおいて、50%負荷の効率は8.9p.t.向上、さらに、負荷10%から100%までの領域で、最大効率86.0%を達成した。

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

#### 【PL】

株式会社山口製作所

代表取締役 山口 貴史 (E-mail info@yssmfg.co.jp)

〒947-0101 新潟県小千谷市片貝町 10245-1

TEL 0258-84-2308 FAX 0258-84-2080

#### 【事業管理機関】

公益財団法人にいがた産業創造機構

産学連携グループ 次世代産業チーム

シニアエキスパート 渋谷 恵太 (E-mail k-shibuya@nico.or.jp)

〒950-0078 新潟県新潟市中央区万代島5番1号

TEL 025-246-0068 FAX 025-246-0030

## 第2章 本論

### 2-1 プレスせん断によるアモルファスの量産加工技術の開発

#### 2-1-1 極小クリアランスのための高精度金型の開発（山口製作所、日本工業大学）

精密金型製作の平面度、絶対位置精度の高精度化を図るための高精度工作機械、高精度ワイヤー放電加工機、精密平面研削盤、精密コラム型平面研削盤、ファインダセットを導入した。うち高精度ワイヤー放電加工機を図1に示す。当機は極小クリアランスの高精度金型製作を可能とする、ピッチ精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ の精度を有する。これらを使用してテスト加工を実施したところ、超高精度精密加工であるため、高精度精密測定を担保する必要性が確認された。そのため、新潟県工業技術総合研究所の指導、協力により精密測定方法を確立させた。

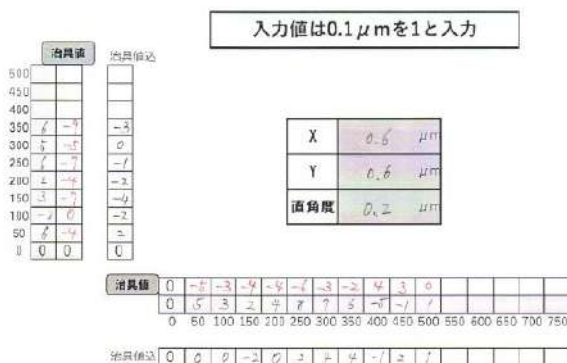
精密測定可能な単発型連結式順送金型の金型構造を検討するとともに、ゼロクリアランスノックピン実現のために、SKD11、超硬合金の熱機械分析による基礎実験を実施し、線膨張係数を実測した。



(a) 装置外観



(b) 装置紹介資料



(c) 本機によるレーザー測定



(d) 使用時の様子

図1 西部電機 精密浸漬型ワイヤー放電加工機 Ultra MM50B

高精度金型の製作に必要となる加工環境や測定環境の構築を行った。また、高精度化に有利であると考え、単発型連結式順送金型を製作した。これを用いて、モータコア、ステータコア 4,000 個を試作し、モータ評価を行う長岡技術科学大学へ供給した。

その他に、ワイヤーカットのアーク放電による高温・高圧によって生じ、高精度金型製作上支障となる加工変質層を除去することによるノックピンの精度向上に取り組んだ。実験の様子を図 2 に示す。



図 2 加工変質層除去実験の様子

高精度加工機の導入、加工・測定環境の整備を行うとともに、加工技術、測定技術の高度化、更には独創的な設計思想、固有の金型組付け技術により、一般的には  $4\ \mu\text{m}$  が限界と言われている金型のパンチとダイのクリアランスを  $2\ \mu\text{m}$  狙いまで追い込んだ超高精度金型の開発に成功した。

#### 2-1-2 精度を維持してワークを加熱する温間加工金型構造の検討（山口製作所、新潟県工業技術総合研究所）

アモルファス箔は加温によって軟化する事は今までの実験で実証されており、温間加工での量産を目指し開発を進めてきた。

当初従来の温間塑性加工にあるように金型のプレートにヒーターを組み込み、金型内に断熱材を施し実験を繰り返してきたが、前述のように金型精度を高め、クリアランスを限りなくゼロに近づけていくためには超精密金型が必要となる一方、その金型をヒーターで加温してしまうと金型部品の熱膨張の差異で精度維持が困難になる。

そこで本研究開発における温間加工のファーストステップは、熱風を材料、ワークに当てサーモグラフィー観察等の検証試験を実施した。（図 3）



図 3 サーモグラフィーによる観察

結果、材料、ワークには十分熱を伝えることができたが、金型でのせん断時には金型に熱を奪われてしまい、思うような結果を得ることができなかった。

そこで金型全体を加熱する方式で金型精度を担保する金型構造を検討した。従来の金型構造の様にケイ酸カルシウム、マイカ板などの断熱材をプレート間に入れる方法では要求している精度を担保できないため、金型全体を同じ温度にし、断熱材を金型外に施工することにより、金型の精度を維持しながらプレス機に熱が伝わらない断熱方式を採用した。

(図 4)

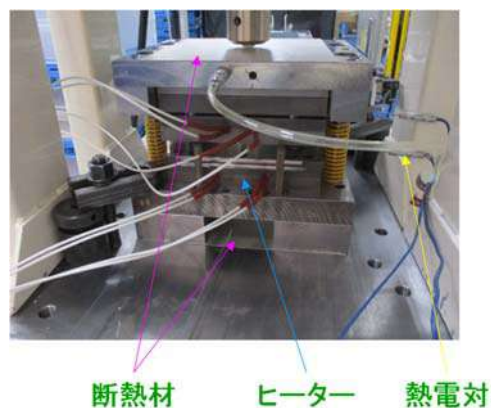


図 4 断熱材を金型外に施工

その結果、上下の金型の温度差が無ければ高精度を担保できることを確認できた。

具体的目標の5℃以内を達成するため、金型の上型、下型の温度差を無くすことに注力する事にし、ヒーター、熱電対の位置を検討に入った。試行錯誤の末、最終的には金型温度差1℃以内を達成する事に成功した。(図 5)

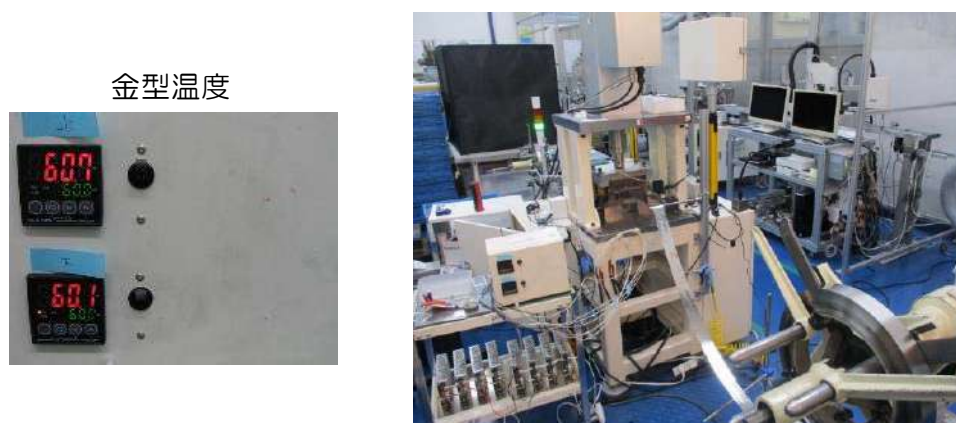


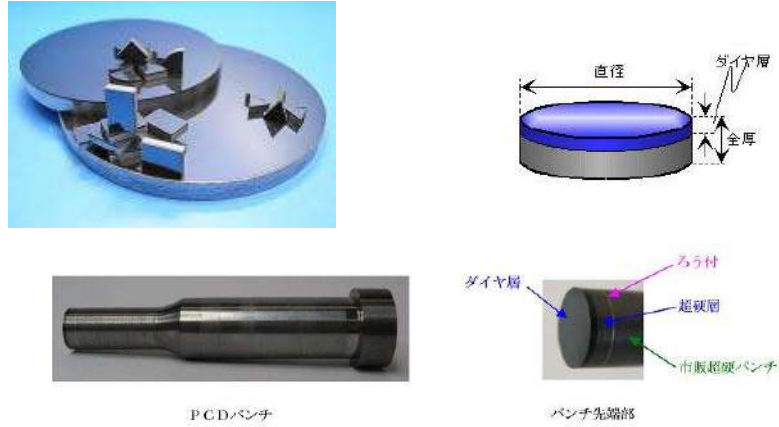
図 5 金型温度

### 2-1-3 量産加工に対応する高耐久金型の開発 (山口製作所、日本工業大学、新潟県工業技術総合研究所)

本研究開発の対象材料であるアモルファス箔は、高硬度脆性材料で硬度はHV900と一般的な金型材料 SKD11 のHV697よりも硬いため、金型主要せん断工具 (パンチ) に最も硬度の高いダイヤモンド材料を検討した。

以前より研究を進めてきたPCD（多結晶焼結ダイヤモンド）に加え、超合金切削ツールでは実績を積んでいるダイヤモンドコートであるUDC（ULTRA DIAMOND COAT）で実験を進めた。（図6）

### PCD



### HDC



図6 PCD、HDC

ダイヤモンド工具を採用し量産耐久試験結果を試みたところ、PCDパンチ、HDCパンチともに同様に剥離の様な事象となり、数百パンチ程度で金型破損となった。（図7）

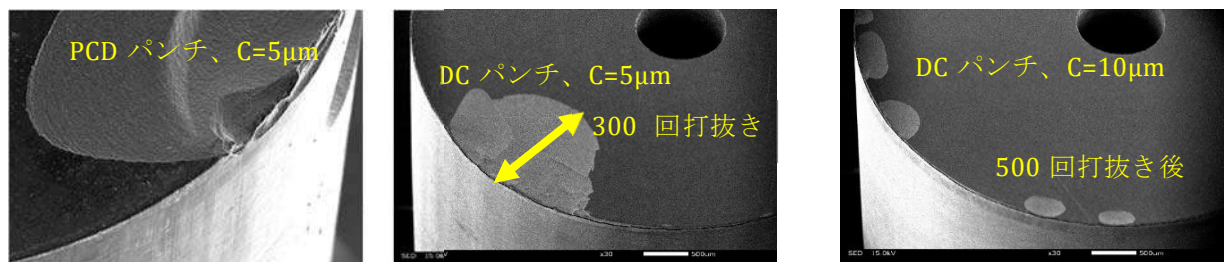


図7 剥離したダイヤモンド工具

これらの原因は、当初打ち抜き終わったパンチが材料から抜ける際に作用するストリッピング力ではないかと考え、ストリッピング力を低減できる仕様の金型に設計変更し、再度実験を繰り返したが結果に変化は見られなかった。

その後検証を繰り返したところ、剥離とされていた現象が高硬度材料の切削において背分力が非常に高くなり、切れ刃に圧縮応力を生じさせ工具が欠ける、フレーキング現象ではないかという結論に達した。その解決方法、改善方法が確立できるまでは、ダイヤモンド工具での検証は困難であると判断し、他の金型材料、コーティング等を視野に入れ研究を進めていたが、同時進行していた金型の超高精度化が大きく進展し、当初クリアランス5  $\mu\text{m}$ の金型製作を目論んでいたが、2-1-1で記した通りクリアランス2  $\mu\text{m}$ 狙いの超高精度金型の確立を実現した。その超高精度金型でライフ試験をしたところ8万パンチまで飛躍的に耐久性が上がり、金型の高精度化の有効性を確認した。(図8)

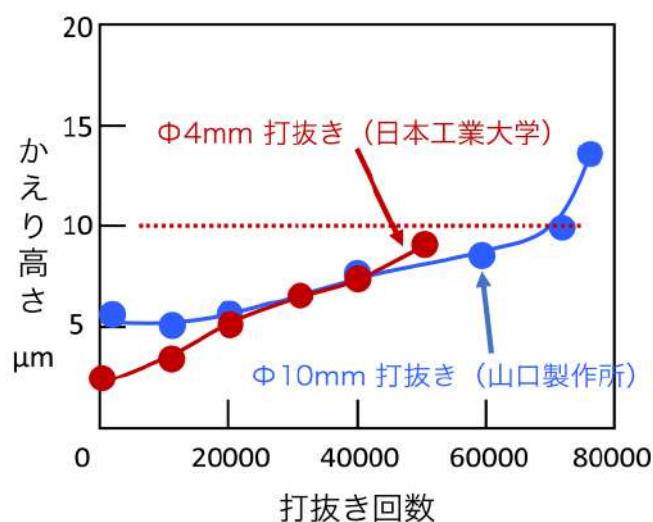


図8 ライフ試験結果

金型の高精度化により8万パンチ前後の再現性は担保できたが、その先はやはり当初から考えていた高硬度金型工具材料の適用が必須となる。今後更なる新材質、コーティング、新工法などの高硬度金型工具材料の開発を目指し更なる高耐久化を狙っていく。

## 2-2 コア積層のインライン化及び重ね接着クラッド材による量産性向上の検討

### 2-2-1 型内積層と重ね接着法の開発 (山口製作所、新潟県工業技術総合研究所)

型内積層工程の開発に向けて、インライン接着積層に適した接着剤の選定を行った。評価項目として、引張せん断接着強さ、接着剤のガラス転移点評価、接着断面の電子顕微鏡観察を行った。

図9に各接着剤の引張せん断接着強さを示す。引張せん断接着強さは、一液加熱硬化型接着剤(フィラー無)が最も高く、それ以外はほとんど変わらなかった。フィラー入の一

液加熱硬化型接着剤については、フィラーの除去を目的として溶媒希釈を行ったが、引張せん断接着強さには影響がないことが確認できた。

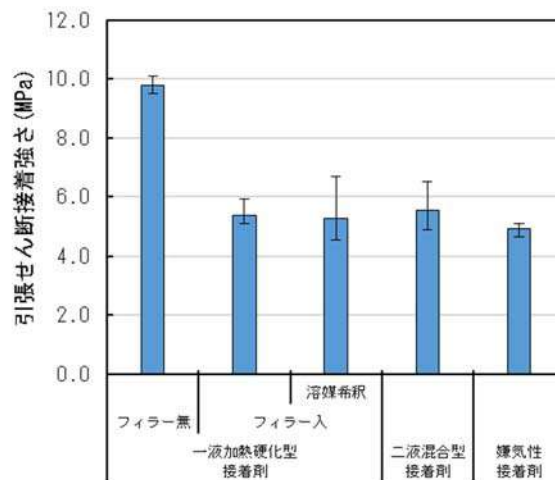


図9 各接着剤の引張せん断接着強さ

図10に各接着剤のガラス転移点を示す。ガラス転移点については、一液加熱硬化型接着剤(フィラー入)が190℃と高く、次いでその溶媒希釈が150℃、嫌気性接着剤が144℃、一液加熱硬化型接着剤(フィラー無)が139℃、二液混合接着剤が87℃であった。

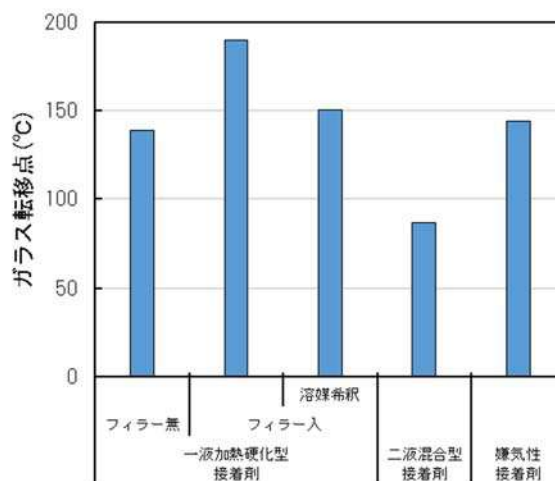
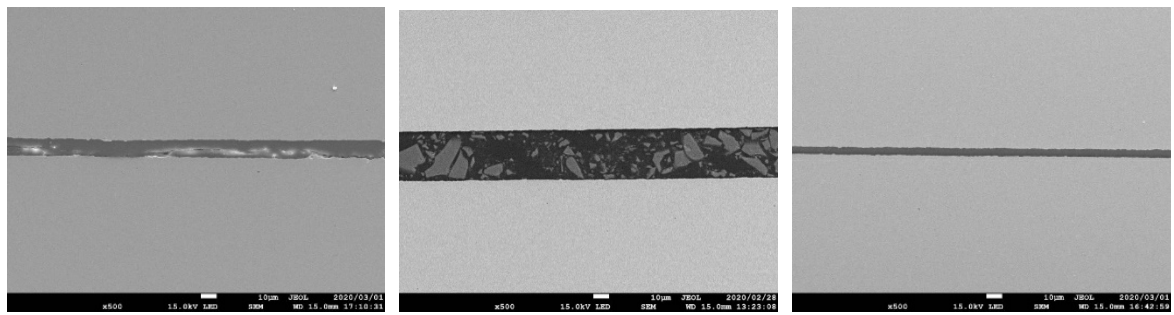


図10 各接着剤のガラス転移点

図11に接着層断面の観察結果を示す。接着厚さは、一液加熱硬化型接着剤(フィラー入)(溶媒希釈)が5μmと薄く、溶媒希釈していないものが30μmと最も厚かった。他は9μmであった。

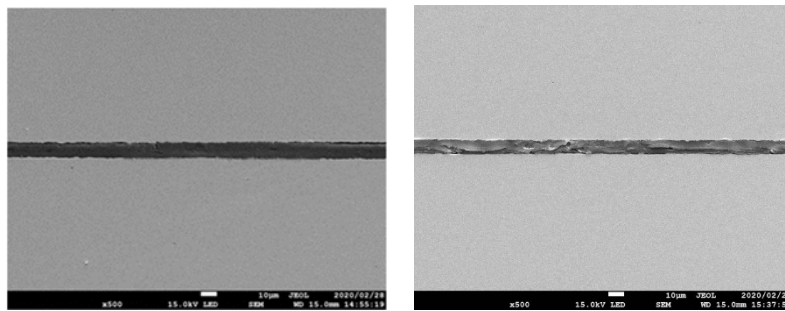


フィラー無

フィラー入

フィラー入 (溶媒希釈)

一液加熱硬化型接着剤



二液混合型接着剤

嫌気性接着剤

図 11 各接着剤の接着層断面の電子顕微鏡観察

インラインで使用するためには硬化速度が速いことも求められる。次項の重ね接着においても接着剤の硬化速度は重要な因子であることから硬化速度についても検証した。図 12 に各接着剤の硬化時間を示す。嫌気性接着剤が 15min と最も速く、最長は一液加熱硬化型接着剤（フィラー入）で 467min であった。接着層の厚さとも関係することも確認されている。

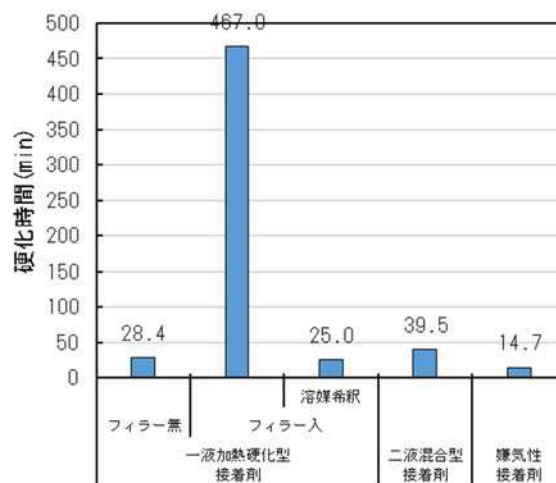


図 12 各接着剤の硬化時間

以上の結果から、引張せん断接着強さは一液加熱硬化型接着剤（フィラー無）、耐熱性に関しては一液加熱硬化型接着剤（フィラー入）、接着厚さは一液加熱硬化型接着剤（フ

ィラー入）（溶媒希釈）、硬化時間は嫌気性接着剤が優れていることがわかった。しかしながら、型内積層やモータ性能向上の観点で、接着剤として考慮すべきポイントは、

- ① 占積率を高めるために接着厚さを極薄にできること
- ② モータの発熱に耐える耐熱性
- ③ プレス時に積層が可能な短い硬化時間

の3点になる。加えて、加熱硬化型接着剤は積層後に加熱工程が必要となる。工場内で希釈に用いた溶媒を使用するためには様々な対策が求められる。得られた接着剤の物性と型内積層工程における使いやすさから総合的に評価し、嫌気性強力封着剤が接着剤として最適と判断した。

選定した接着剤による接着積層テスト、接着剤塗布方法の接着積層工程の工程設計を行った。設計した型内接着積層工程の概要を図 13 に示す。アモルファス箔積層コアの接着積層の概要としては、①内形抜き工程、②接着剤塗布工程、③外形抜きと積層を兼ねた工程の3工程で構成される。

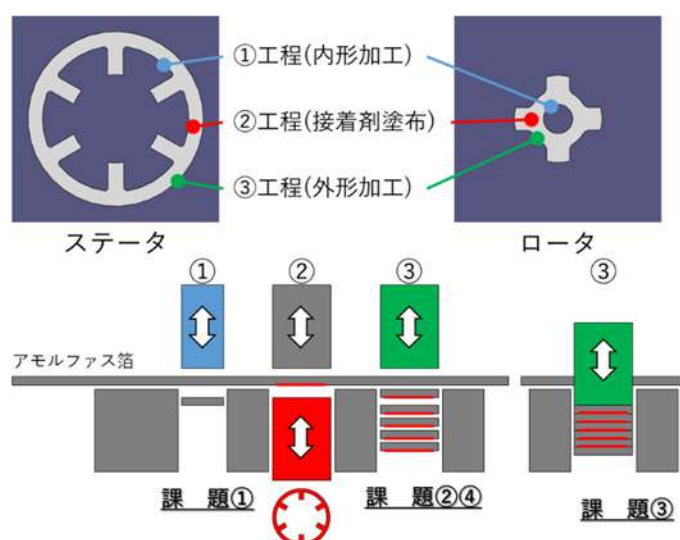


図 13 積層接着工程の概要

接着積層工程で想定される技術的な課題は以下のとおりである。

- 課題① 接着剤の効率的な塗布方法
- 課題② 打抜いたワークの位置合わせ
- 課題③ 硬化反応の制御
- 課題④ ワークと治具の接着

それぞれの課題の対策について検討した。

接着剤の効率的な塗布方法として、スタンプを用いた塗布方法を採用した。図 13 の赤の位置にスタンプを設置して使用することを想定し、接着剤の塗布や積層の状態を確認した。スタンプは、ケースを 3D プリンタで造形し、後加工によって微調整した。印面はレーザー加工機で加工した。図 14 に製作したスタンプを示す。

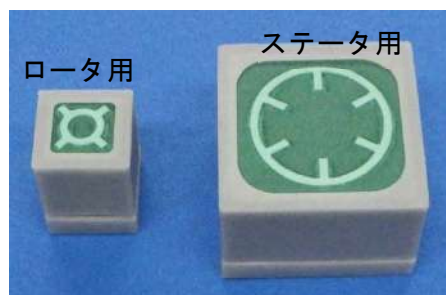


図 14 製作したスタンプの外観

図 15 に塗布の安定性試験の結果を示す。連続で押印して 100 回、400 回、700 回、1000 回で押印の状態を確認したが、塗布量、形状ともに安定して塗布できることが分かった。

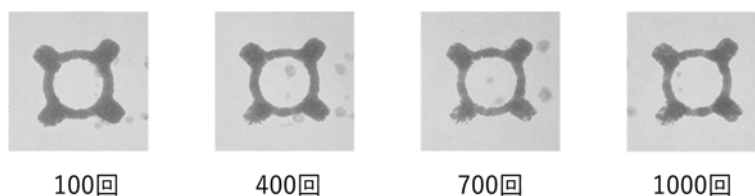


図 15 接着剤塗布の安定性確認

型内積層したコアを図 16 に示す。型内積層においては専用の治具を製作し、積層後の接着剤が硬化する際のズレを防止した（課題②）。図 16 のコアはモータ特性試験用に高さ 40mm まで積層したものであるが、接着剥がれや層ズレなどなく安定して積層できていることが確認できた。



図 16 型内積層ロータコアの外観

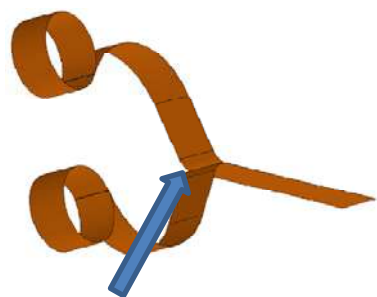
課題③硬化反応の制御は、加熱によって硬化反応が促進されるか検討したところ、加熱することで硬化時間を短縮できることが分かった。課題④ワークと治具の接着については、コーティングや離型剤について確認した。

## 2-2-2 重ね接着（クラッド化）装置の製作（山口製作所）

複数のコイルから材料を引き出し、接着剤を塗布し重ね合わせた状態で加熱ローラーによって加熱圧着することによりクラッド化させる機構の自動化を検討した。

クラッド化に求められる接着剤は、硬化に時間を要すると工程全体に遅れが生じるため、硬化に時間を要しないものが望まれるものの、型内積層で求められる性能と同様の要求を満たす必要がある。動的粘弾性測定により、供試接着剤の標準的な硬化条件下において90%の弾性率が得られる時間を測定して硬化時間を評価した結果も踏まえ、クラッド化用の接着剤には積層接着工程と同様に、嫌気性強力封着剤を選定した。

図17左及び中央に示すような、ベルトフィーダーの直前に接着工程を設け、嫌気性接着剤を塗布した後、ローラーで材料同士を密着、加圧し金型へ供給する簡易装置を製作して実験を行った。図17右に示すように、得られたクラッド材サンプルは理論通りバリが少なく、クラッド化の有効性を確認することができた。



嫌気性接着剤



簡易装置による実験の様子



クラッド化サンプル

図17 クラッド化の方法、製作した簡易装置及びクラッド化サンプル

## 2-3 アモルファス積層コアの特性の把握と品質向上の検討

### 2-3-1 鉄損評価による損失原因の把握と対策検討（山口製作所、新潟県工業技術総合研究所）

リング状のコアをトランスに見立てた電力測定による鉄損評価は、渦電流損とヒステリシス損の切り分けができるため、鉄損増大の原因を、積層時の絶縁不良に由来する渦電流損か、接着ひずみによるヒステリシス損かを推定することができる。

試料の作製条件を表1に示す。各試料の積層枚数及びコイルの巻数は、励磁電圧・電流、消費電力に影響するため、測定装置の測定レンジに合うように加減している。加熱硬化型接着剤と嫌気性接着剤を使用して手作業で積層したコアと2-2-2で確立した型内接着による積層コアの鉄損の比較を行った。

表 1 アモルファス積層ステータコアの鉄損評価

試料名	加熱接着	嫌気性接着積層	型内積層
材料	アモルファス合金板		
単板形状	ステータコア形状		
加工方法	プレス加工 ⇒接着剤塗布 ⇒加圧加熱接着	プレス加工 ⇒接着剤塗布 ⇒加圧接着	プレス加工&接着積層
積層枚数	201 枚		
層間絶縁	加熱硬化接着剤	嫌気性接着剤	
占積率	95%	90%	91%
コイル巻数	一次側：120 回、二次側：120 回		

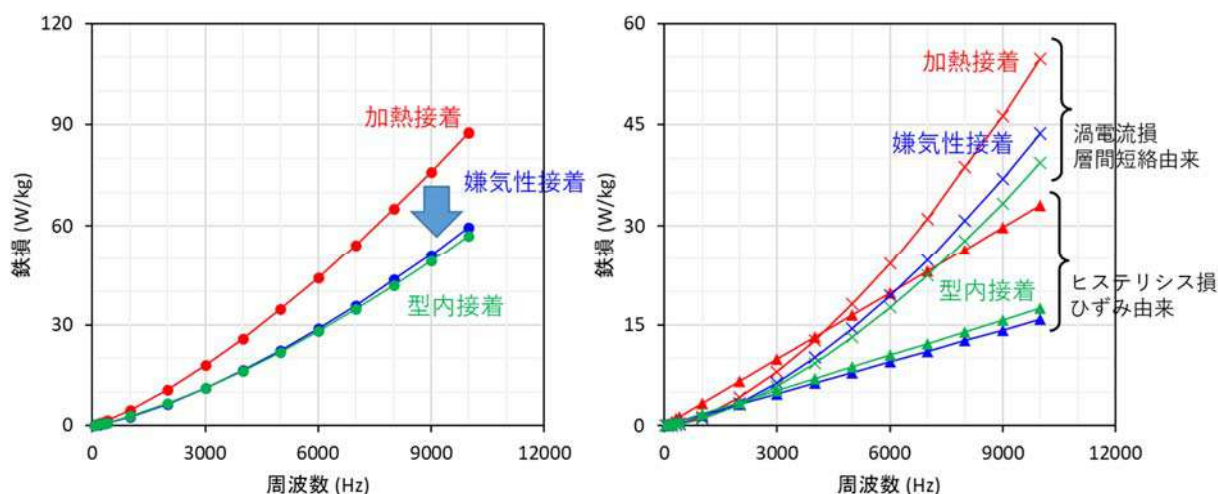


図 18 アモルファス積層コアの鉄損に及ぼす周波数の影響

図 18 に鉄損評価の結果を示す。嫌気性接着剤を使った積層コアの鉄損は加熱接着積層コアの鉄損よりも 50~70%小さくなった。渦電流損を比較すると、嫌気性接着積層は加熱接着積層のおよそ 80%となった。嫌気性接着積層は加熱接着積層よりも占積率が低いため、接着層が厚いと考えられることから、接着層が厚いことによって層間の短絡が抑えられていると考えられる。

ヒステリシス損では、嫌気性接着積層は加熱接着積層のおよそ 50%となった。嫌気性接着では、加熱接着時よりも加圧力を大きく下げて接着したこともあり、ひずみが低減したものと考えられる。また、接着時の温度変化や接着層の厚さも歪みの発生に関係しているものと推定される。

同じ嫌気性接着剤でも工程が手作業か型内かでも鉄損に影響があり、型内積層は手作業による積層に比べて、ヒステリシス損が大きいものの渦電流損は小さくなっており、層間短絡は抑制されているが、加工によるひずみは大きくなっていることを示唆している。各層間の接着剤が安定的に塗布されているものの、積層時の加圧力が高く、コアにひずみが

入ってしまったものと推定される。

電力測定による鉄損評価は接着工程の違いによる鉄損の変化を確認し、その影響を切り分けることができた。本方法はモータに実装することなく作製した接着積層コアの品質を簡便に評価できるため、事業化に向けてより良い品質の接着積層コア製造に向けた品質管理方法として活用する。

### 2-3-2 アモルファスコアモータの試作とケイ素鋼板コアモータとの特性比較と優位性の評価（山口製作所、長岡技術科学大学）

図 19 に打ち抜いたアモルファスをコアとして用いたスイッチトリラクタンスモータ（SRM）の完成品を示す。今回、ケイ素鋼板コア SRM と特性を比較し、優位性を評価するため、20HX1300（板厚 0.20mm）のケイ素鋼板 200 枚、2605SA1（板厚 0.025mm）のアモルファス合金 1600 枚をそれぞれ打ち抜きし、積層することで、積厚 40mm のモータコアを試作している。定格出力は 70W とし、アモルファスの低鉄損特性による効率改善を図るため、10000r/min の高速モータを設計した。

図 20 に製作した評価ベンチを示す。今回、試作した SRM の効率特性および損失特性を評価するため、負荷モータおよびトルクメータからなる評価ベンチを製作した。負荷モータは、外部システムにより速度制御をすることで、試作した SRM の一定速度での負荷試験が可能である。一方、トルクメータにより、SRM の軸出力を測定することで、SRM の効率特性および損失特性を評価可能である。なお、SRM の入力電力は、パワーメータにより測定している。



図 19 試作したアモルファスコア SRM

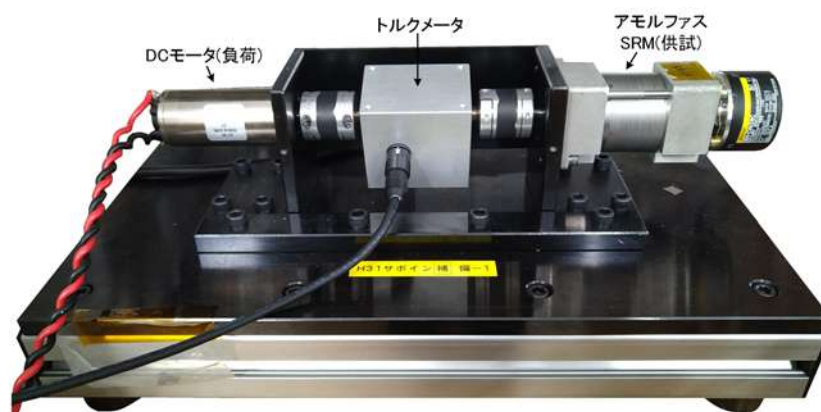


図 20 評価ベンチ

図 21 に 10000r/min でのケイ素鋼板 SRM (SS-SRM) とアモルファス SRM (AA-SRM) の効率比較を示す。なお、(a) は機械損を軸出力と見なさない効率、(b) は機械損を軸出力と見なした効率である。(a) は通常効率、(b) はファンなどの空気を送り出すための機器の効率を表す。(a) より、通常効率は 80% 前後であり、最大効率は 86.0% に達している。一方、(b) より、機械損を軸出力と見なした効率は、50% 負荷において 8.9p.t. 向上している。さらに、負荷 10% から 100% までの領域で 90% 前後であり、最大効率は 90.9% に達している。

図 22 に 10000r/min、定格出力 70W での SS-SRM と AA-SRM の損失分離結果を示す。図より、ケイ素鋼板と比較してアモルファスの適用により鉄損を約 1/4 まで低減していることがわかる。上記の結果より、アモルファスの低鉄損特性により、ケイ素鋼板 SRM と比較して、損失の低減および効率の改善することが確認でき、打ち抜きアモルファスの優位性を示せた。

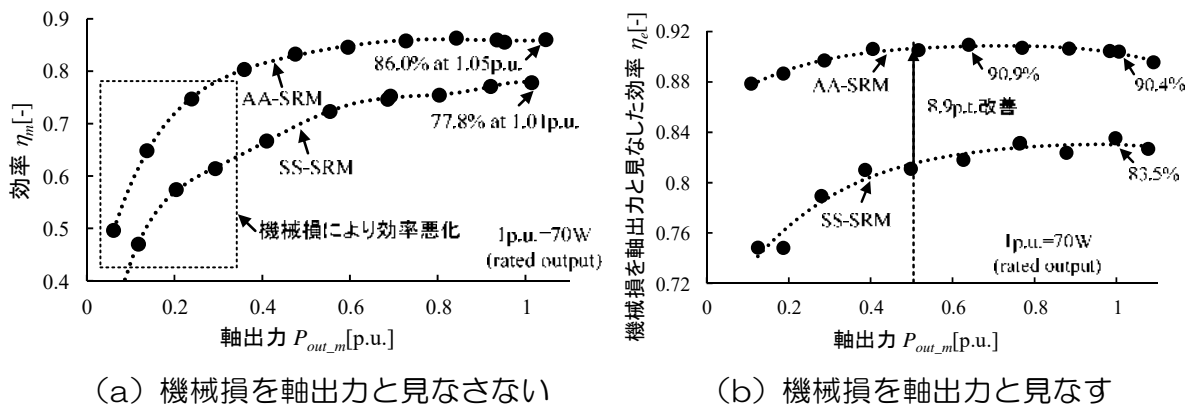


図 21 10000r/min での効率比較  
(SS-SRM: ケイ素鋼板 SRM, AA-SRM: アモルファス SRM)

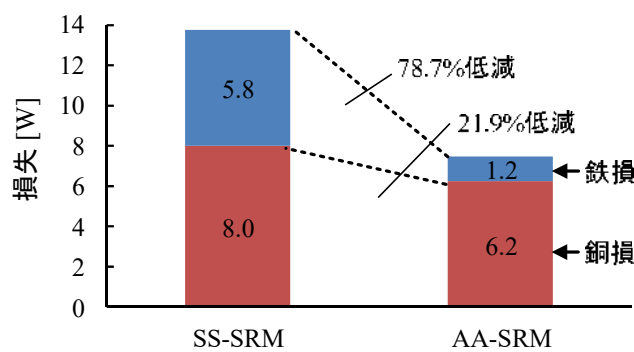


図 22 10000r/min, 定格出力 70W での損失分離結果

## 最終章 全体総括

令和元年度に戦略的基盤技術高度化支援事業に「高性能モータ用アモルファス箔積層モータコアのプレスせん断加工量産技術の開発」が採択されて以降約 3 年、開発に取り組み、多くの成果を得ることができた。

高精度加工機の導入、加工・測定環境の整備を行うとともに、加工技術、測定技術の高度化、更には独創的な設計思想、固有の金型組付け技術により、一般的には  $4\ \mu\text{m}$  が限界と言われている金型のパンチとダイのクリアランスを  $2\ \mu\text{m}$  狙いまで追い込んだ超高精度金型の開発に成功した。従来までは、ライフ試験において金型破損までのプレスパンチ数が数千パンチ程度であったのに対し、この超高精度金型を用いた結果、8 万パンチ程度と劇的に改善され、超高精度金型の有効性を確認した。また、それにおいて必要となる金型構造、遮熱構造の開発においては、当初目標のパンチ、ダイの金型温度差を  $1\ ^\circ\text{C}$  以内に収めることに成功した。

型内接着積層とクラッド化に使用する接着剤の選定を行い、適切な嫌気性接着剤を使用することで、型内積層では占積率 96% を達成した。また、クラッド化については簡易装置を作製して実験を行い、クラッド化がバリの低減に有効であることを確認できた。

鉄損評価については、電力計法による測定方法を確立し、層間短絡と加工ひずみの影響を切り分けて評価することが可能となった。これによってアモルファス材では電磁鋼板の鉄損の  $1/8$  であることを確認できた。

アモルファスコアモータを用いたモータを試作し、実測により、50% 負荷における効率は 8.9p.t. 向上、さらに、負荷が 10% から 100% までの領域で、機械損を軸出力とみなした効率 90% 前後（最大効率 90.9%）、通常効率 80% 前後（最大効率 86.0%）を達成したことを確認した。

上述の技術的成果の多くは、事業開始時の想定どおり基礎技術の積み重ねによるものだが、アモルファス材の積層方法に関しては革新的な技術、製造手法を見い出すに至ったため、以下の特許出願も行うことができた。

出願番号：特願 2021-150168 発明の名称：積層鉄心の製造装置及び製造方法

このように本事業を通して技術ノウハウの継続的な蓄積と知財保護を適切に講じてきたことにより、株式会社山口製作所におけるものづくりの基盤技術高度化は十分に図ることができた。

アモルファスコアモータの実現によるモータの省エネ化・高効率化は注目度が高いため、本研究開発の内容は基本的に非公開としていたにも関わらず、論文を読まれた等により、複数のアプローチを既に受けている状況である。川下製造事業者からは更なるコストダウンへの要求が強く、温間加工や高硬度材料の採用による金型の高耐久化、クラッド化による加工回数低減など、量産体制確立に向け、事業化のためには追加的な研究開発が必要である。それに向け、研究等実施機関、協力モータメーカ等と共同研究実施に向け現在準備

を進めている。このような取組を推進し、有望技術として本技術を待望する川下製造事業者に向け、早期の事業化実現を図っていく。

最後に、本プロジェクトのアドバイザーからの講評を以下に記す。

・井澤金属株式会社

名古屋支店 次長 前田 拓哉 氏

有望技術であり、今後の開発スキームについて非常に興味がある。アモルファスモータの需要は山口製作所単独のプレス加工で対応できる規模を超えると想定されるため、商社としての立場から、本技術については今後のライセンス供与の可能性も含め関心を持って見ている。

・シンフォニアテクノロジー株式会社

電子精機本部モーション機器新市場開発室 室長 村口 洋介 氏

モータは、あらゆる分野で使用されており、今や自動車も電動化してモータで駆動するという流れになっている。

また、SDGs など持続可能なモノづくりや環境負荷低減と言った課題や、燃料高騰に対してさらなる高効率化が求められている。モータメーカーは多数あり、各社1%の効率改善のために何ができると取組んでいるが、モータはすでに成熟しており革新的な技術もあまりないという状況である。

そのような中、本研究ではプレス加工の難度が高いアモルファス箔の積層加工にトライし、産学連携によりそれぞれが課題を解決され、当初の目的を概ね果たしたと思われる。

しかし、現行の生産方式と比べ生産効率は劣ると思われるため、この技術を生かせる用途を検討することが重要と思われる。この技術を活用したモータとそのアプリケーションをどう開発していくかは我々メーカーに課せられる課題である。

高精度の金型技術や、スタンプ式の接着積層の技術が、低コストや安定性の面でメリットがあれば、現行モータの生産にも活用できる技術であると期待される。

これからも引き続き研究を継続され、成果が世に出ることを期待している。

・ヒムエレクトロ株式会社

代表取締役社長 丸山 春治 氏

金型クリアランス  $2\mu\text{m}$  には感動した。これを精度良く制御できる技術が確立すればモータコアに限らず他分野への用途展開も期待できる。また、積層は時間を要する工程であるため、型内で積層が可能という内容には非常に興味を惹かれている。

プレス等の加工方法が精度向上し製品特性のバラつきをなくすことができればかなりコストダウンにつながる技術と期待できるので、今後の開発進捗を楽しみにしている。