

# 高速・高精度加工自動化システム とEV部品加工事例の紹介\*

Introduction of High-Speed, High-Precision Processing Automation Systems and Examples of EV Component Processing

舟木 厚司<sup>1)</sup> 山口 赴仁<sup>2)</sup> 加藤 伸明<sup>3)</sup> 鶴 沙緒里<sup>3)</sup>  
Koji Funaki Takehito Yamaguchi Nobuaki Kato Saori Tsuru

The changes in powertrains due to the shift to electric vehicles have increased the needs for new metal processing and challenges. There is a particular demand for improving productivity and adapting to more complex component shapes. For this reason, stamping press processing, wire forming processing, and laser processing are attracting attention. This article introduces the latest automated systems that achieve high-speed, high-precision processing and processing case studies of a motor for electric vehicles as an example.

**KEY WORDS****Production • Manufacture, Equipment**

Stamping Press, Wire Forming, Laser Welding [D4]

## 1 はじめに

持続可能な社会の実現に向け、脱炭素に関する取り組みが世界中で本格化している。なかでもEVシフトは社会の脱炭素化に大きな役割を果たすと考えられており、乗用車だけでなく、二輪車、バス、トラック、建設機械、農業機械などのあらゆる乗り物の電動化が進んでいる。このEVシフトは製造業、そして工作機械業界へ大きな影響を与える可能性がある。

EV化によるパワートレインの変化に伴い、エンジン、エンジン部品、トランスミッションを中心に、全体の約35%の自動車部品が影響を受けるといわれている。これらの部品は主に鋳造品、鍛造品を機械加工してつくられる。自動車1台当たりに使われる工作機械の金額をガソリン車とEVで比較すると、EVでは約45%減少するとの試算もある<sup>(1)</sup>。このように完全にEV化が進んだ場合の影響は、工作機械業界にとって非常に大きなものである。

EVではバッテリー、モータ、インバータの3部品が重要部品となる。これらの部品を構成する

バッテリーケース、モータコア、電源の接続に使うバスバーなどはプレス加工で製造され、高い生産性と複雑化する部品形状への対応が求められている。さらに一部の部品では設計変更や小ロットに対応するため、金型製作が不要な板金加工へ置き換えたいとの要望もある。また、バッテリーケースのシーム溶接、モータコイルの被覆剥離およびヘアピン溶接、バスバーの溶接などは、生産性向上を狙いレーザー加工技術の適用が注目されている。素材はモータコイルや各種配線に使用される銅の需要が急激に高まっている。また、車体を軽量化し航続距離を伸ばすため、高張力鋼板、アルミ、マグネシウム、チタンなどのより軽量な材料への代替と、個々の特性を生かすため異種材を接合・接着するマルチマテリアル化が検討されている。

当社は金属加工機械のグローバルメーカーとして、主に下記の四つの事業を通して、商品の開発とサービスの提供を行っている。

**【板金事業】**

- ・ブランクマシン、バンディングマシン、溶接マシン、ソフトウェア、自動化装置、汎用マシン

**【微細溶接事業】**

- ・レーザー溶接機、レーザー加工機、抵抗溶接機、システム

**【切削・研削盤事業】**

- ・鋸盤、鉄構加工機、ブレード、新素材加工機、研削盤、流通向け商品

\* 2024年4月5日受付

1) (株)アマダ レーザ要素開発部門プロセス要素技術開発部 (259-1196 伊勢原市石田200)

2) (株)アマダプレスシステム MECばね成形機部門開発課 (333-0845 川口市上青木西1-17-24)

3)・4) 同社 国内営業部門エンジニアリング部 AGIC推進課 (259-1196 伊勢原市石田200)

【プレス自動化ソリューション事業】

- ・プレスマシン，プレスシステム，プレス周辺装置，ばね成形機

EV化に伴う新たな金属加工のニーズや課題に対し、当社が積み上げてきた技術と事業活動を通じて新たなモノづくりのあり方をお客さまとともに創り上げ、産業の発展や社会生活の向上に貢献できると考えている。本稿では、当社最新の高速高精度加工を実現した自動化システムと、EV用モータを例とした加工事例を三つ紹介する。

2 順送プレス加工自動化システムと加工事例

2.1 モータコアの動向

EV用モータのカギを握るモータコアは、高性能で付加価値の高い設計および製造技術が重要なポイントとなってくる。モータコアの素材は軟磁性をもつ電磁鋼板が用いられ、従来は板厚 0.5 mm のものが多く使用されていた。この薄板をプレス加工で打ち抜き、一定数積み重ねてつくられる。モータコアを図 1 のような積層構造にする理由は、鉄損となる渦電流を低減するためであり、この鉄損をいかに抑制できるかが、EV用モータの高効率化に寄与する要因の一つである。

近年では鉄損をより少なくするため薄板化が進み、板厚 0.2 mm 前後へシフトしている。一般的なモータコアを加工する金型のパンチ、ダイのクリアランス（隙間）は材料の板厚に対して 5% といわれている。板厚 0.5 mm の場合、クリアランスは 0.025 mm である。薄板化が進む現在、より高精度な金型製作と高剛性で高精度に打ち抜けるプレスマシンが求められている。

2.2 順送プレス加工自動化システムの開発経緯と特長

EV化に伴い、モータコアだけではなく、複雑形状のバスバー、バッテリーケース、防爆弁など、厳しい精度を要求される車載電装部品の需要も急増している。こうした高い要求に応えるために開発したデジタル電動サーボプレスが「SDEW-1613 iIII GORIKI」である（図 2）。ダブルクランク機構を採用し、ワイドなスライドエリアを備えた本製品の特長は剛性と生産性である。

前面フレーム上部の山型構造と、ベッド前面板の切り欠きを減少させたソリッドコラムフレーム構造の採用により、縦剛性を強化。当社同等機種

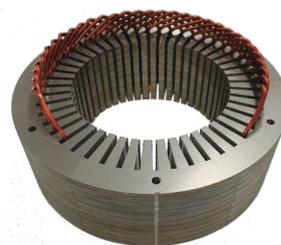
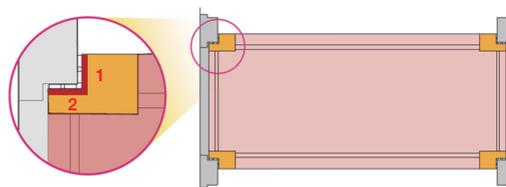


図 1 積層モータコア試作品



図 2 SDEW-1613iIII GORIKI



スライド上面から見た図

図 3 8面ギブガイド

に比べ、フレームの伸びを約 21.4% 抑制した。さらに、スライド部の水平方向の剛性は、8面ギブガイドを採用したことで、左右はもちろん前後方向への偏心荷重にも強く、製品精度の向上、金型の長寿命化に貢献する（図 3）。さらに第 3 世代の「i III」制御を搭載、サーボプレスならではの「高速振り子モーション」を使用することにより、従来のメカプレスと比較し約 1.5 倍生産性が向上した。さらにラインスピード最大 90 m/min を実現した「ALFAS-03ARZ-LS」と組み合わせることで、さらなる高生産が可能となる（図 4）。

2.3 ステータ分割加工事例

EV化に伴い、パワートレインが多様化している。大型の専用プレスマシンではなく、前述した汎用プレスマシンで加工が可能になれば、設備投資が容易となり、小ロット、低コストが要求されるEV用モータをターゲットに新規参入が可能となる。

現在主流のステータとロータの同時抜き加工で



図4 SDEW-1613iIII GORIKI + ALFAS-03ARZ-LS

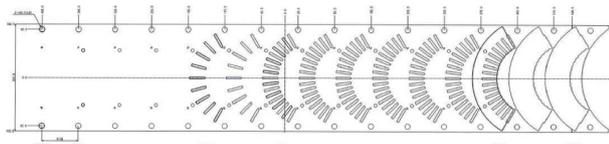


図5 スタータ3分割加工金型

は、金型左右寸法が大きく汎用プレスマシンでは対応できない。そこで、ロータとスタータを別々で加工し、さらにスタータを分割して加工し金型を小型化することで、汎用プレスマシンでの対応が可能となる(図5)。3分割加工金型を使用し、汎用プレスマシンで加工した場合、生産数は $80\sim 100\text{ min}^{-1}$ と想定される。この金型製作には、プロファイル研削加工ではなく、ワイヤ放電加工で十分に対応できるという見解もある。このようなことから、金型の製作、メンテナンス費用も大幅に削減できる可能性がある。また、リング形状から三日月形状になるため、コイル幅の見直しと歩留まりの向上により、素材あたりの生産数が34%向上する。

### 3 セグメントコンダクタコイル加工機と加工事例

#### 3.1 EV用モータ巻き線の動向

近年EV用モータは、動力性能の維持と限定されたスペースに搭載可能な軽量小型化が求められる。要求を実現するにはコアスロット内の占積率向上とモータコアからのコイルエンドの高さの低減が必要になる。

巻き線方式は集中巻きと分布巻きがあるが、動力性能、損失、振動が優位な分布巻きが採用されている。分布巻きは丸銅線の同心巻きスタータと、平角銅線を松葉形状に成形したセグメントコンダクタコイルを使用した波巻スタータがあり、平角銅線セグメントコンダクタコイルを採用したスタータが主流になっている(図6)。これは平角銅線を



図6 平角銅線セグメントコンダクタコイル



図7 ES-1A

使用することで占積率を大幅に向上でき、所定のセグメントに分割された平角銅線を挿入後、端部を溶接することで、コイルエンドの高さも低減できるためである。

#### 3.2 セグメントコンダクタコイル加工機の開発経緯と特長

スタータの生産ラインでは、高い生産性と平角銅線セグメントコンダクタコイルがコアスロットへ容易に挿入できるよう、厳しい加工精度が要求されている。

スタータを構成するセグメントコンダクタコイルは複数種類ある。一般的な金型成形は種類ごとに金型を用意する必要があり、金型交換による段取りが発生する。段取り替えなしを実現するには、種類ごとに成形装置を設置する必要があり、装置の設置面積が広がってしまう。このような問題と要求品質を実現するために、小～大規模生産ラインに投入可能な48軸制御セグメントコンダクタコイル加工機「ES-1A」を開発した(図7)。

本製品は自動段取り替え機能で最大20品種の生産ができる。セグメントコンダクタコイルの成形順序は以下の3工程であり、

- ・定尺材成形「真直度矯正」「被膜剥離」「切断」
- ・平面曲げ成形「フォーミング成形」
- ・湾曲クランク部成形「プレス成形」

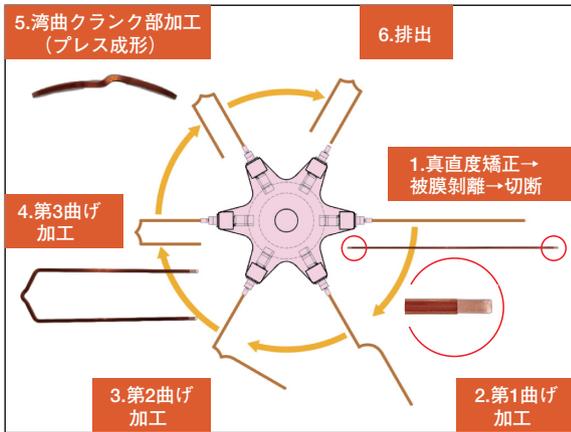


図8 トランスファシステムを採用した加工プロセス図

定尺材成形1ステージ，平面曲げ成形3ステージ，湾曲クランク成形1ステージ，排出1ステージの計6ステージから構成される装置(図8)となる。

1.8 s/pcsを切る生産速度で精度を担保するには、フォーミング平面曲げ成形時の加工速度に比例して、平角銅線(以下ワーク)が自身の慣性モーメントで変形してしまう問題を解決する必要があった。そこで、セグメントコンダクタコイルのコイルエンド部の最低3カ所の曲げ部を3ステージに分割した。平面曲げ成形加工速度を抑えることで生産速度を維持しつつ、ワークの変形を解決した。各ステージは4~5軸で構成され、数値変更のみで形状変更が可能となる。

また、コア挿入が容易になるように高精度な曲げ加工が必要だが、一般的な曲げ加工はサーボモータエンコーダの位置のみを管理しており、ワークの曲げ位置は管理されていなかった。そのためバラツキが発生していた。そこで「BSセンサシステム」を開発した(図9)。本システムは曲げ動作中にリアルタイムにセンサ計測を行い、設定した位置まで線材を曲げることを可能にする。このシステムにより曲げ精度が50%以上改善した。

また湾曲クランク成形ステージは、最大8金型を取り付けることができ、プログラムによる自動交換が可能である。

トランスファシステムにより、各ステージ間でワークが移動する際に発生する振動は、制振制御を行うことで速度を犠牲にすることなく抑制した。

真直度に影響するバックテンションを均一化するために、加工機と同期して線材をスムーズに送り出すことが可能な、専用アンコイラ「TY-

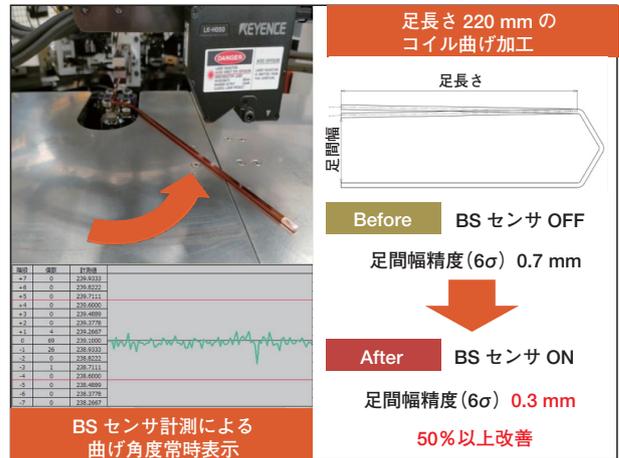


図9 BSセンサシステム

500AE」を使用することで安定した成形を実現する。

### 3.3 セグメントコンダクタコイル加工事例

線材アスペクト比1.8倍で展開長520~490 mm、コイルエンド部曲げ点5カ所のセグメントコンダクタコイル6品種からなるステータを例に説明する。6品種の加工速度は1.8 s/pcs台でコア挿入時に重要なコイル足間幅精度は6σで約0.3 mmであり、開発要求精度0.5 mmを大きくクリアした。また、一般的な金型成形は30分程段取り替えの時間が必要だが、自動段取り替え機能により、品種切り替えを20秒以下で行える。これにより稼働率が向上することで、生産性向上に寄与する。

## 4 3次元レーザ統合システムとヘアピン溶接事例

### 4.1 EV化による素材・加工方法の動向

EV化の加速に伴い、電気を流すための銅部材の使用量が増加している。銅の使用量はガソリン車の約4倍ともいわれている。銅は導電性に優れるが比重が大きく高価であり、車の限られたスペースに搭載するため、コンパクト化、軽量化しつつ高性能化を実現しなくてはならない。銅だけでなくアルミや異種金属の接合など、多様化する素材への対応や、形状、加工方法などの見直しによる工法改革のニーズが非常に多く、低コストかつ高品質で安定した新たなモノづくりの手法が求められている。

### 4.2 3次元レーザ統合システムの開発経緯と特長

レーザ加工は非接触で加工対象物を局所的に溶融することができるため、余計な熱や応力が加わりにくく、微細かつ複雑な形状の加工に適してい

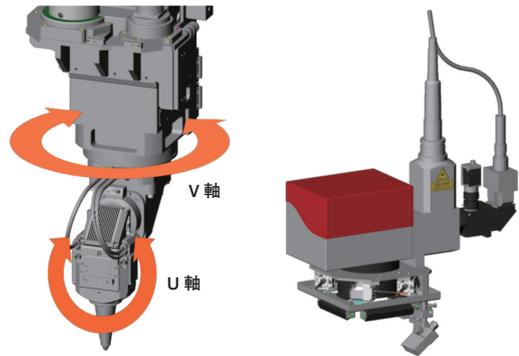


図10 ALCIS-1008e

る。主な加工用途として、切断、溶接、マーキング、表面改質そしてAM（アディティブ・マニファクチャリング）が挙げられ、多くの加工工程でレーザーが活用されている。しかし、加工システムを構築するには、レーザー発振器、加工装置、加工ヘッド、周辺機器など多くの要素が求められる。また、工程ごとに高価なレーザー加工機を設備しなくてはならないことも、従来からの大きな課題であった。

そこで当社は、さまざまなレーザー加工を簡単に行える3次元レーザー統合システム「ALCIS-1008e」（アルシス）を開発した（図10）。レーザー発振器は、銅に対してレーザー吸収特性が優れるブルーレーザーと、ファイバレーザーの二つの発振器を搭載した。ブルーレーザー発振器は出力3kWまたは4kWと高出力で、モータのヘアピン溶接やバスバーの溶接など、さまざまな銅製品の溶接をスパッタレスかつ短時間で行うことができる。また、ファイバレーザー発振器は出力3kWで、高輝度な光によりプレス成型品など鋼板の高速切断が可能である。素材や加工用途に合わせてどちらか、または両方のレーザーを選択できるようにした。

システム本体はX、Y、Zの3軸直交駆動で、送り速度は各軸50mm/minである。多関節ロボットと比較し、加工ヘッドを高速かつ高精度に軌跡動作できるようにした。各軸の軸移動量はX1,000mm、Y800mm、Z500mmである。加工ヘッドは加工用途に応じて、3Dヘッドとスキャナヘッドを選択できる（図11）。V軸（±370°）、U軸（±135°）で構成された3次元ヘッドはヘッド先端のトーチを交換することで、溶接、切断、積層造形の加工を行うことができる（図12）。溶接時の生産性を重視する場合はスキャナヘッドを推奨している。本製品はX、Y、Z軸を有してい



3Dヘッド スキャナヘッド  
図11 3Dヘッド、スキャナヘッド

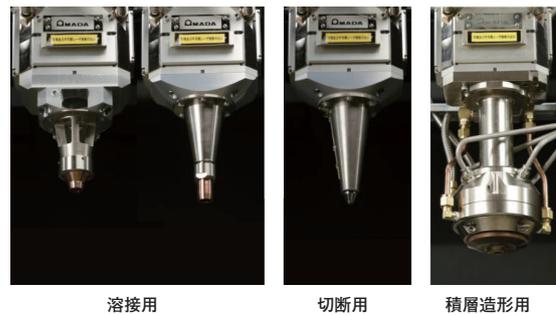


図12 3Dヘッド各トーチ

るため、スキャナヘッドの加工エリアより広い加工対象物も円滑に溶接することができる。

加工テーブルは立体物の加工に適した2軸ポジションテーブル、平板切断テーブル、パイプ加工用のパイプインデックスへ容易に変更可能とした（図13）。

また、CAD/CAMソフトウェア「VPSS 4ie」で簡単にオフラインプログラムが作成可能である。また、カメラで撮影したワーク画像からAIと画像処理によりワークの位置ずれを自動補正する「AI溶接位置センシング」、溶接品質の測定、良否判定、記録を行うレーザーウエルドモニタ「MM-L400A」も搭載している。さらには、ユーザフレンドリでスキルレスな新NC装置「AMNC 4ie」を搭載、多様な加工を簡単に行うことを目指した。

#### 4.3 ヘアピン溶接加工事例

ブルーレーザーの加工事例として、EV用モータの平角銅線セグメントコンダクタコイルのヘアピン溶接（拌み溶接）について紹介する。

EV用モータは一つのモータ当たりの接合点数が多い。また高電圧の電気を流すため、必要な接合強度等の要件を満たしたうえで、安定した加工とスパッタレスが求められる。

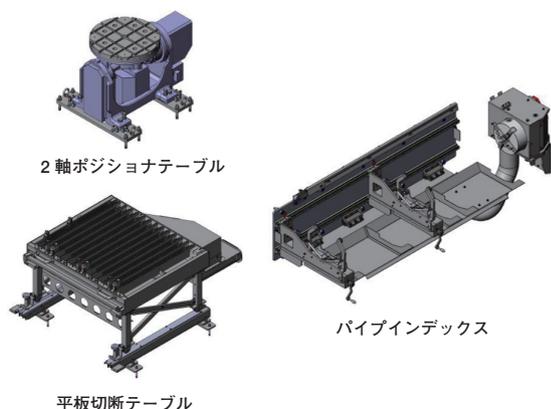


図13 加工用途に応じたテーブル選択

ブルーレーザは常温の銅に対しても優れた吸収特性があり、銅の溶融初期の安定性はファイバレーザよりも格段に優れる。しかし、銅は熱伝導が高いため、低い出力で長時間ブルーレーザを照射しても熱影響エリアが広がるだけで、適切な溶融を得ることができない。レーザ集光径を小さくしエネルギー密度を高めることで、レーザ照射点での銅の溶融を行うことはできるが、溶融池が狭くなり溶融金属の流動性が阻害されるため、スパッタが発生しやすくなる。

また、平角銅線の絶縁被覆を剝離した部分をヘアピン溶接するため、少なくとも絶縁被覆の厚みの2倍の隙間が平角銅線間に生じる。この隙間は、平角銅線先端の向きの変化により大きくなる。このようなバラツキに対して、安定した溶接が求められる。

本製品はブルーレーザ発振器の高出力化と適切なビーム制御により、広い隙間でもスパッタレスで溶接できる(図14)。また、平角銅線の先端位置を「AI溶接位置センシング」で認識することにより、高速かつ安定して加工できる(図15)。

## 5 おわりに

EV化のみならず脱炭素社会への対応や、労働力・熟練技能者不足、さらには情報技術の進展によるAI・DXの活用・推進は、モノづくりの現場でも直面している喫緊の課題である。アマダは、2023年2月3日に神奈川県伊勢原市の本社

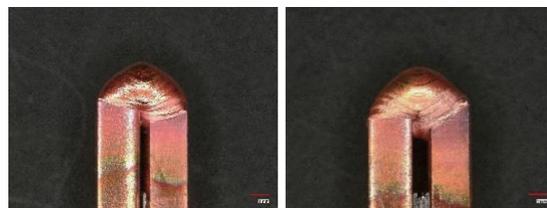


図14 ヘアピン溶接事例

図14 ヘアピン溶接事例

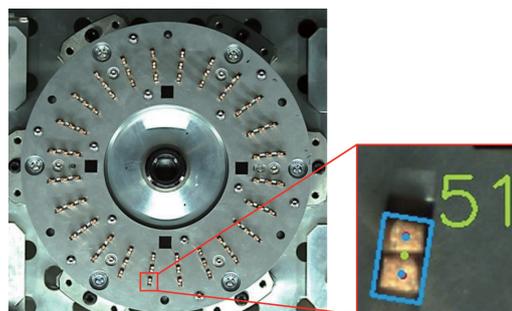


図15 AI溶接位置センシング

内に自社展示施設「AMADA Global Innovation Center (AGIC)」をオープンした。「お客さまとともに金属加工の未来(あす)を共創する空間」というコンセプトのもとに、お客さま専用のラボスペースである「Innovation LABO」、90機種を超える最新商品群のマシンとテクノロジーを体感いただく「Innovation SITE」など、多彩な環境と機能を完備している。お客さまとともに山積する課題を解決し、モノづくりを探求することで、未来志向のモノづくりのあり方とイノベーションの創造に向け取り組んでいく。

記事のご感想をお願いいたします [アンケートはこちら](#)

## フェイス



舟木厚司



山口赴仁



加藤伸明

## 参考文献

(1) 日本政策投資銀行：EV化の進展と工作機械業界への影響 2018