

トルクリプルを低減するステータ鉄心製造技術

司城大輔* 土屋文昭**
 須藤広一** 田中敏則***
 鈴木啓文**

Manufacturing Technology of Stator Core to Reduce Torque Ripple

Daisuke Shijo, Hirokazu Sudo, Akifumi Suzuki, Fumiaki Tsuchiya, Toshinori Tanaka

要旨

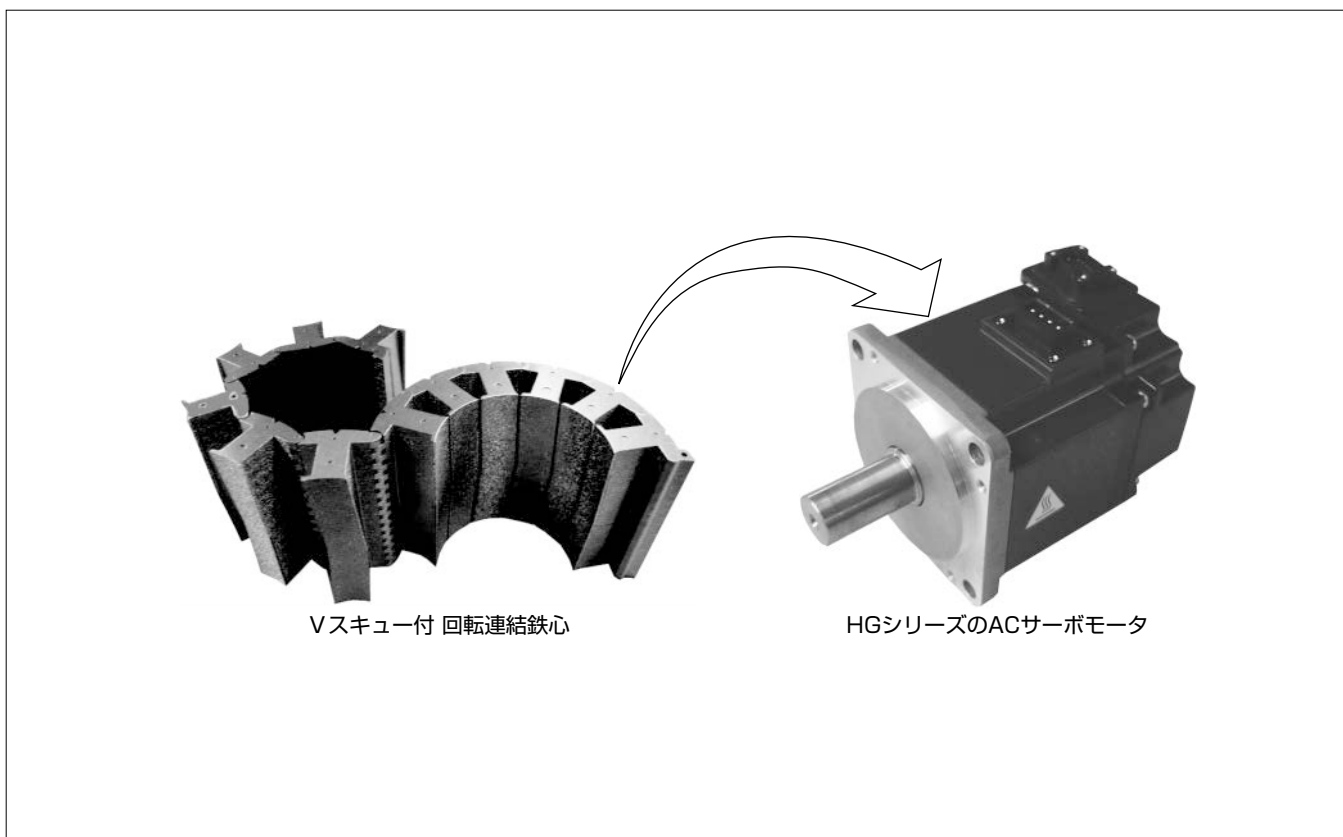
半導体製造装置や射出成形機、ロボット、工作機械等の各種産業機械に用いられているACサーボモータシステムでは、高速・高精度化のニーズに加えて、小型軽量、高機能、高信頼性、制御性向上、省エネルギー等、付加価値の要望が多様化してきている。そこで、三菱電機では2012年に次世代ACサーボモータ“HGシリーズ”とサーボアンプ“MR-J4シリーズ”を開発し、より多くの顧客要望に合致した製品の市場提供を行っている⁽¹⁾。

工作機械や組立て装置を駆動させるACサーボモータでは、滑らかな運転と高速・高精度な位置決めを実現するため、トルクリプルの低さが一つの訴求点となる。

今回、ロータとステータ間の磁束変化を滑らかにし、トルクリプルを低減するために、ステータ鉄心にVスキューを形成する製造技術を開発し、HGシリーズへ導入した。

従来、積層ごとに異なる形状の鉄心を順送金型で成形するのは困難であったが、金型加工に柔軟性を持たせる可動金型技術の開発と、ACサーボモータシステムによる高速・高精度な駆動制御によって、高い生産性と寸法精度を確保したVスキュー鉄心の製造が可能となった。

この技術は、コイル占積率と組立て性を向上させる当社独特のステータ構造である“回転連結鉄心”と相乗的に利用できるため、当社モータの更なる高品位化が実現できる。



ACサーボモータ“HGシリーズ”に導入したVスキュー鉄心

モータの制御性を阻害するトルクリプルは、ロータの永久磁石とステータの磁極ティース間の磁気回路が急峻(きゅうしゅん)に切り替わることで発生し、磁極ティース先端部の形状や磁石の着磁パターンなどに起因する。今回開発したVスキュー鉄心で、ロータの回転に伴う磁極ティース先端部と磁石の対向面積の変化を連続的にすることができるため、磁束の変化が滑らかになりトルクリプルの低減が可能である。

1. ま え が き

半導体製造装置や射出成形機、ロボット、工作機械等の各種産業機械に用いられているACサーボモータシステムでは、高速・高精度化のニーズに加えて、小型軽量、高機能、高信頼性、制御性向上、省エネルギー等、付加価値の要望が多様化してきている。そこで、当社では2012年に次世代ACサーボモータ“HGシリーズ”とサーボアンプ“MR-J4シリーズ”を開発し、より多くの顧客要望に合致した製品の市場提供を行っている。

工作機械や組立て装置を駆動させるACサーボモータでは、滑らかな運転と高速・高精度な位置決めを実現するため、トルクリプルの低さが一つの訴求点となる。トルクリプルの発生はロータとステータ間の磁束変化に起因する。具体的には、ステータの内径形状のひずみによって磁気抵抗が不均一となることや、ロータの磁極とステータの磁極ティース間の磁気回路が急峻に切り替わることなどが挙げられる。本稿では、HGシリーズに搭載したトルクリプル低減技術の一つとして、磁気回路の切り替わりを滑らかにするステータ鉄心の構造とその製造方法について述べる。

2. トルクリプルを低減するモータ構造

2.1 ステータ・ロータの構造

図1と図2に従来のステータとロータの構造を示す。当社ではステータ鉄心に集中巻き用の回転連結鉄心を採用している。これは、各磁極ティースの外径付近にヒンジ構造を設けることで、磁極ティースを相互に回動可能とした鉄心である。マグネットワイヤをこの鉄心に巻線する際、対象となる磁極ティースだけを突出させるように姿勢変形ができるため、隣接する磁極ティースや既に巻線されたコイ

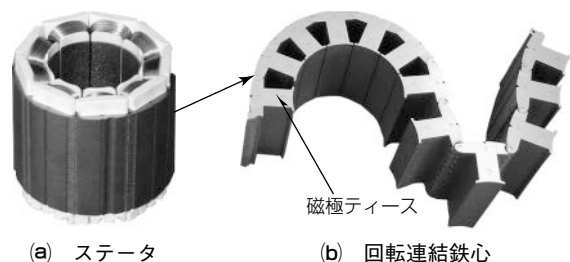


図1. ステータの構造

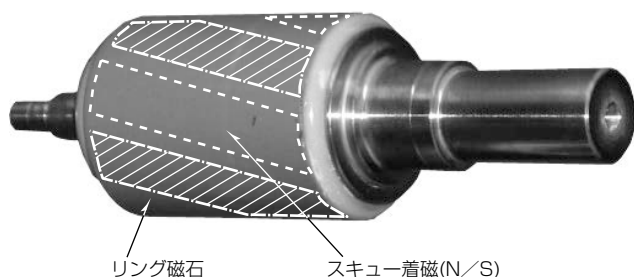


図2. ロータの構造

ルなどが巻線作業を阻害することなく、高い占積率で巻線することができる。これによってモータの高トルク化に寄与できる。また、各磁極ティースを連結していることから、一体的にステータを取り扱うことができるため、部品の搬送や組立てが容易であり、生産性も向上できる⁽²⁾。

一方、ロータには軸方向に対して傾斜させた着磁パターン(スキュー着磁)のリング磁石を用いて、ロータとステータ間の磁気回路の切り替わりを滑らかにし、トルクリプルを低減している。

2.2 スキュー鉄心と構造の比較

トルクリプルを低減する技術として、スキュー着磁のほかに、ステータ鉄心をスキューさせる方法がある(スキュー鉄心)。スキュー鉄心は、ステータ鉄心の磁極ティース先端部にあたるポール部の位置を周方向にずらすことで、相対的にスキュー着磁と同様の効果を得るものである。したがって、スキュー鉄心は軸方向の各断面で異なる形状とすることが必要である。

一般に、ステータ鉄心は電磁鋼板からプレス金型で所定の形状の鉄心シートを打ち抜いた後、それらを積層して製造される。プレス加工は、一定形状を精度良く高速に大量生産できる一方で、類似する形状であっても、金型の段取りが必要な堅固な加工方法である。これに対し、金型に柔軟性を持たせてスキュー鉄心を形成する技術として可動金型技術がある。

図3は2種類の金型の刃物を自動的に切り替えて、ポール部の長さが異なる鉄心シートを積層した段スキュー鉄心を示す。図4は1枚の鉄心シートを積層するごとに、既に

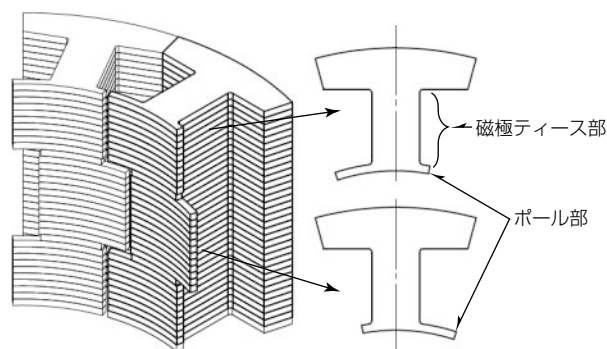


図3. 段スキュー鉄心

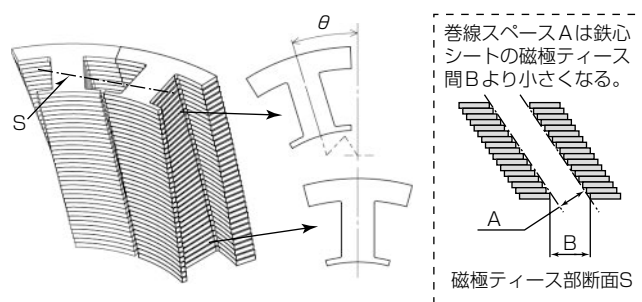


図4. 回転積層スキュー鉄心

積層済みの鉄心が格納されている金型部品を一定角度ずつ回転させて積層した回転積層スキュー鉄心を示す。

段スキュー鉄心は、トルクリプルの低減に関して一定の効果が得られるが、その形状からロータ回転時の磁束の変化は断続的であり、トルクの小さい小容量のモータでは、無視できないトルクリプルとして現れる。

一方、回転積層スキュー鉄心は、連続的なスキューが得られるが、磁極ティース部もスキューしていることから、図4右のように傾斜した領域にコイルが配置されるため、巻線スペースが減少しモータのトルク低下を招く。

そこで、今回は鉄心の軸方向における各断面(各鉄心シート)で磁極ティース部の形状は一定で、ポール部だけが連続的にスキューする鉄心の製造技術開発に取り組んだ。

3. スキュー鉄心製造技術

3.1 金型の構造と製造工程

金型の設計にあたっては、各鉄心シートで形状が共通な部分とそうでない部分に分別した。このスキュー鉄心は、磁極ティース先端のポール部の周方向長さだけが段階的に変化し、他の形状は共通である。したがって、ポール部を形成する刃物を鉄心シートごとに角度位相を変えながら加工することで、Vスキュー鉄心の形成が可能となる⁽³⁾。図5にスキュー鉄心を製造する順送金型の構造を示す。各鉄心シートにおける共通形状部分を形成する刃物を備えたメイン金型の内部に、ポール部の周方向長さを可変させて形成する回転可動金型を設置した。この回転可動金型は、メ

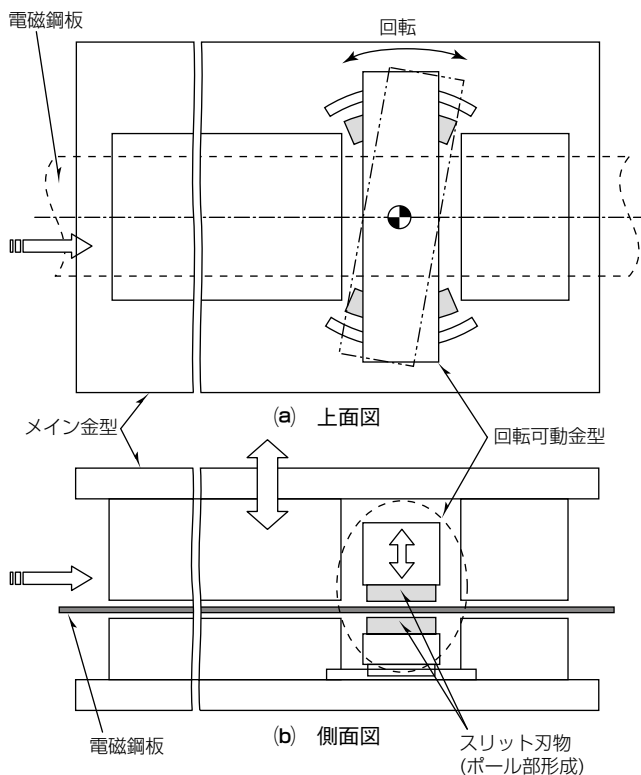


図5. 回転可動金型の構造

イン金型に設置したACサーボモータによって高速・高精度に回転位置を制御する。この駆動システムをプレス装置の動作と同期させることで、従来鉄心の場合と同等の打ち抜き速度での運転を可能とし、高い生産性を確保した。

次に、この金型を用いたスキュー技術を回転連結鉄心に適用した場合の製造工程を具体的に示す(図6)。電磁鋼板の加工位置決め基準となるパイロット穴を開けた後、工程①～⑩の順に加工を行う。

- ①内径トリム
- ②磁極ティース間とヒンジ部外径側のトリム
- ③ヨーク部の分断(左凸形状)
- ④ヨーク部の分断(右凸形状)
- ⑤ヒンジ部及びびかしめダボ部のピアス
- ⑥ヒンジ部ダボ及びびかしめダボの成形
- ⑦アイドリング工程
- ⑧隣接ポール部間のトリム
- ⑨アイドリング工程
- ⑩鉄心シート全体の打ち抜きと積層

工程⑧では、メイン金型が開いて電磁鋼板を次工程に送る間に、回転可動金型が所定の角度回転し、その後に両方の金型が同時に閉じることで加工される。ここで、回転可動金型は対向する各ポール間のスリットを打ち抜く刃物を周方向に複数配置した構造とし、各刃物が相対的な角度位相を確保したまま、回転して打ち抜きを行うため、各鉄心シートにおけるポール部の周方向長さがばらつかず、高精度に加工することができる。最終的に工程⑩で、成形された鉄心シートを下側のメイン金型の内部に抜き落として格納し、工程⑥で成形したダボによって鉄心シート間を結合して積層する。図7は、これらの技術によって開発した金型全体の外観であり、点線で示した箇所が回転可動金型である。

3.2 Vスキュー鉄心と巻線性

3.1節に述べた手法を用いて、製造した鉄心を図8に示す。今回、ロータの軸方向に加わる磁気吸引力をバランスさせるため、軸方向の中央面に対称となるV字状のスキューを形成した。ポール部を形成する回転可動金型はサーボ

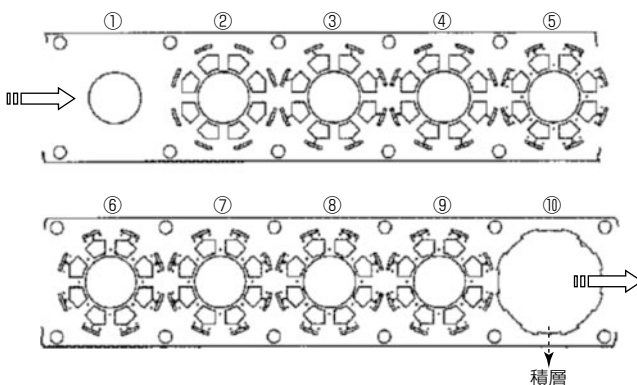


図6. 鉄心の製造工程

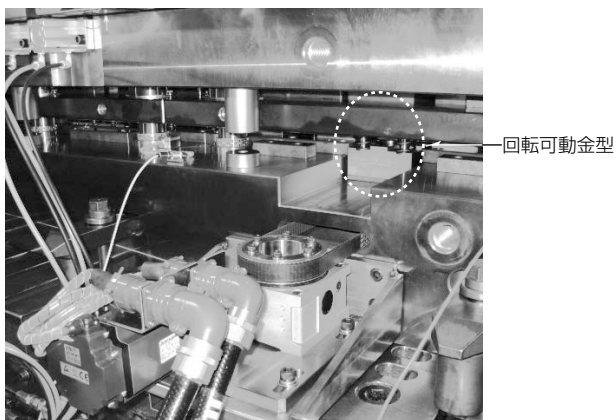


図7. Vスキュー金型の外観

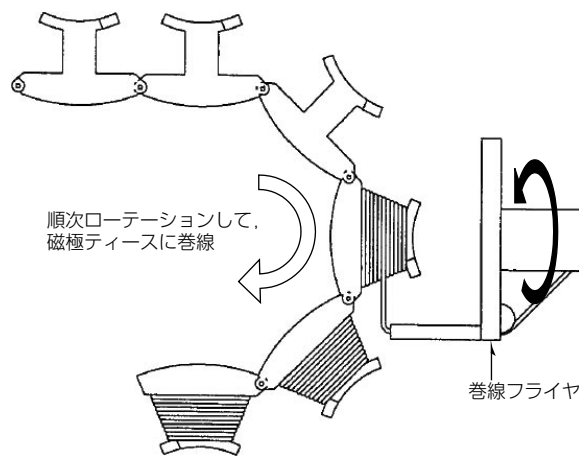


図10. 回転連結鉄心への巻線



図8. Vスキュー鉄心

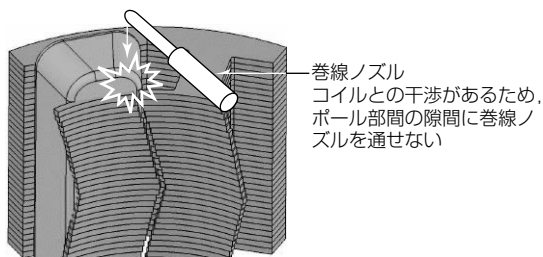


図9. 一体型鉄心への巻線



図11. HGシリーズのACサーボモータ

システムで制御しているため、任意のスキュー形状が設定できることもこの技術の特長であり、製品仕様に最適なスキューを金型の段取りなしで成形可能となる。

次に、Vスキュー鉄心への巻線性について述べる。一般的な一体型鉄心にVスキューを適用した場合、図9に示すように巻線ノズルと既に巻線済みのコイルとの干渉を回避する必要があることから、スキュー角度が大きすぎて、トルクリプルの低減効果が制限されてしまう。当社では、独特の鉄心構造である回転連結鉄心を用いており、図10のように巻線対象となる磁極ティースを突出させて巻線可能であるため、所定のスキュー角度を持つ鉄心であっても、高速・高占積率に巻線することが可能となる。

3.3 Vスキュー鉄心の効果

図11にVスキュー鉄心を適用したHGシリーズのACサーボモータを示す。このモータの特性を評価したところ、スキューなしの鉄心のものに比べ、無通電時トルクリプルを約25%低減できた。また、この鉄心はロータの磁石にスキューを形成する方法と同様の効果が得られる上、磁石と磁極ティースの対向面積を大きくとれることから、誘起電

圧が向上し、モータ単位体積当たりのトルクを向上させることができた。さらに、スキュー着磁では困難であったスキューのV字化によって、ロータに加わる軸方向の磁気吸引力を解消でき、モータの機械的信頼性を一層向上させることができた。

4. む す び

“製品性能と生産性を両立する”という生産コンセプトのもと、モータの高品位化を追求したVスキュー鉄心を考案し、それを量産可能とする可動金型技術を開発した。その結果、ACサーボモータの基本機能の一つである低トルクリプル化と同時に高速プレス加工と高速巻線を実現した。このような要素技術はACサーボモータ以外のモータ製品にも適用可能な共通基盤技術であり、車載機器や家電機器向けに展開を図り、より多くの製品の高機能化を推進する。

参 考 文 献

- (1) 川尻清成, ほか: 次世代ACサーボアンプ“MR-J4シリーズ”・サーボモータ“HGシリーズ”, 三菱電機技報, **86**, No.4, 211~214 (2012)
- (2) 秋田裕之, ほか: エアコン用圧縮機モータの省エネルギー・高効率化, 三菱電機技報, **75**, No.10, 655~658 (2001)
- (3) 山村明弘, ほか: ステータおよびその製造方法, ならびにステータのコア部材の製造装置, 特許第4121008号