圧入組立構造の分割鉄心を用いたモータ生産工法の開発（第1報）*

— 燃料ポンプ用DCモータの小型軽量化 —

山本一之** 坂井雄作*** 佐武英和*** 宮崎文夫†

Motor Fabrication Process Using Divided Cores
- Development of Compact DC motors for Fuel Pump -

Kazuyuki Yamamoto, Yusaku Sakai, Satake Hidekazu and Fumio Miyazaki

This paper presents the motor manufacturing technology for DC motors which are used for such products as motor vehicles, information machines and equipment, etc. The novel manufacturing technology called Slide-type divided cores has been developed and applied to a DC motor which is used for fuel pump of automobile. Characteristic points of this technology are as follows. (1) One of circular staked cores is slid out in radial direction, as a result, coil winding space is extended and high coil occupancy is achieved. (2) As a stator is assembled by fitting a shaft into a center hole of divided cores, welding process becomes unnecessary. Using this manufacturing technology, the size and weight are reduced more than 40% compared to conventional motors.

Key words: DC motor, divided cores, armature, winding density, motor core, concentrated winding, fuel pump

1. 結 言

自動車機器、家電機器、FA機器、情報機器など、幅広い分野でモータの利用が拡大しており^{1) 2)}、磁石や電磁鋼板などの材料の高性能化^{3) 4)}や磁気回路の最適化⁵⁾などの研究が活発に行われている。また、性能のよい安価なモータを市場に供給する上で必要な「作りやすさ」の向上を目的とした生産技術の開発例も多い^{6) ~11)}。

モータの性能向上のためには巻線の高密度化が有効であるが、それに伴ってコイル線の巻回やコイルの端末処理に時間を要し、巻線機などの高額な設備投資が必要となる。また、コイルの絶縁や端末接続のばらつきは製品の品質に大きく影響を及ぼすため、特に大量生産される中小型のモータに対しては、巻線の高密度化と共に高い生産性と信頼性を実現する工法を開発する必要がある。

ブラシレスDCモータや小型誘導機に対する巻線の高密度化の手法としては、分割した鉄心に巻線した後、鉄心を組立てる工法を採用している例がある^{6) ~11)}。一般に、鉄心を分割するだけでは生産性は低くなるが、製品設計の初期段階から巻線構造に対して十分な生産設計を実施し、それに応じた金型や自動化設備を開発して、従来の工法と同等の生産性が得られている。

本開発の目的は、自動車機器や情報機器に多く用いられるDCモータの小型軽量化を図るために、回転電機子（以降、電機子と呼ぶ）に高密度に巻線できる分割鉄心の工法を確立することである。対象とする電機子は磁極が外周側を向いた構造であり、分割鉄心を採用した例は少ない。これは、分割面がコイルの内周側に位置するため鉄心の組立が難しい¹¹⁾ことが主な要因

であるが、大量生産を可能にするには、分離した磁極にコイル線を連続して巻線したり、分割鉄心の製造を自動化するなど、生産性に関する他の課題も解決する必要がある。

本論文では、まず、電機子に必要なとされる生産性を考慮して、自動化設備による製造が可能なスライド型の分割鉄心を提案する。つぎに、本分割鉄心を燃料ポンプ用DCモータに採用し、鉄心金型や巻線機などを設計し自動化を実施した内容について述べる。最後に、この新しい工法により従来の工法に比べて生産性を損なうことなく、小型軽量化を実証した結果について報告する。

2. 燃料ポンプ用DCモータの構造

燃料ポンプは常時エンジンに燃料を圧送する車載機器であり、車両の燃料タンク内に設置される。図1に本開発で対象とする燃料ポンプ用DCモータの構造を示す。電機子は、コイルが巻かれた鉄心とコイル端末が接続された整流子、鉄心と整流子に固定しているシャフトで構成される。コイル電流とフレーム内

Fig.1 Structure of fuel pump DC motor

* 原稿受付 平成24年3月5日

** 正会員 三菱電機(株) (東京都千代田区丸の内2-2-3)

*** 三菱電機(株)

† 大阪大学大学院 (豊中市待兼山町1-3)

Fig.2 Winding pattern of DC motor armature

側に固定された永久磁石の静磁界の間で生じる電磁力は、電機子を回転させる方向に作用する。整流子はブラシとの接触面で順次コイルの電流方向を切り替え、電機子を一定方向に回転させる。この回転によって、シャフトに直結した羽根車が燃料を吸引し、モータ内部を通過させてエンジン側に吐出する。羽根車で生じる液压とモータが発生するトルクがバランスし、電機子は 4000~6000rpm で回転する。

3. 高密度集中巻きのための生産設計

3.1 巻線構造の比較

図2にDCモータの電機子に採用される2つの巻線構造を示す。同図(a)はコイルを複数の磁極にまたがって配置する分布巻き構造、同図(b)はコイルを1つの磁極に対して巻きつける集中巻き構造である。

分布巻き構造は、フォーマと呼ぶ巻線ガイドを鉄心の周りに配置し、それに沿ってコイル線をスロット内に導いて巻線を行う¹²⁾。巻線アームを高速に回転させてコイルを巻回できるため生産性は高く、量産されている燃料ポンプ用DCモータの主流の巻線構造となっている。しかし、先に巻いたコイルがスロットの一部の空間を塞ぐため、高い巻線密度を得ることは難しく、また、コイル同士が重なるように巻線されるため、電機子の軸方向の寸法が大きくなる。

一方、集中巻き構造は、分布巻き構造に比べてコイル周長が短くなるのでコイル抵抗が小さく、モータの小型軽量化、高効率化を実現できる。しかし、高密度に巻線するためには、磁極の開口部からスロットに差し込んだ巻線ノズルを、隣接するコイルや整流子を避けながら精度よく動かす必要がある。この動作は単純な回転運動にならないため、長方形断面の磁極回りに加減速を繰り返して巻線ノズルを駆動する必要があり、巻回速度は大きく低下して生産性が低くなる。また、図中の太線で示した領域、即ちスロット内の巻線ノズルを動かす空間にはコイル線を巻くことができないため、巻線密度が低下する課題もある¹³⁾。

DCモータの小型軽量化を図る上で、従来の分布巻き構造と

Fig.3 Conventional divided cores for DC motor armature

Fig.4 Wire path of distributed winding pattern

同等の生産性を有し、高密度に巻線された集中巻き構造を実現できる分割鉄心が求められる。

3.2 分割鉄心に必要な生産性

この節では、電機子に採用される分割鉄心に必要な生産性について考察する。

3.2.1 電機子の組立性

分割鉄心が採用されているブラシレスDCモータの固定子は、磁極が内周側を向いた構造が多い。この場合、鉄心の分割部を外周側から溶接した後、固定子を筒状のフレームに焼嵌めて組立てることができる⁹⁾。一方、電機子の場合、磁極が外周側を向いた構造であり、鉄心の分割部がコイルの位置より内周側にある。例えば、図3のように軸穴と共に磁極を分離した構造の分割鉄心を小型のモータに適用すると、細い軸穴内に位置する鉄心の分割部を溶接することは難しく、シャフトを圧入固定するために必要な軸穴径の精度や分割面の接合強度を確保できる工法を確立することが課題となる。

分割鉄心には、鉄心の組立だけではなく、シャフトや整流子を含めた電機子全体の組立を容易にする生産性が求められる。

3.2.2 巻線の連続性

図4に分布巻き構造の電機子に巻かれるコイル線の経路を示す。ひとつのコイルを巻き終わると整流子の端子にコイル線を絡げ、引き続き次のコイルが連続的に巻かれる。全コイルを巻線した後に端子をヒュージング（熱かしめ）し、絡げたコイル線の被膜を溶かして端子と導通させる。この連続した巻線工法は巻線機により自動化され¹²⁾、高い生産性が得られている。コイル末端を一旦切断すると、後に接続する工程が必要になり、また接続のための部品が増えるなど、コスト高や品質悪化を引き起こす要因となる。

分割鉄心を用いた場合でも、磁極毎に巻かれたコイルの末端を途中で切断しない巻線の連続性が求められる。

3.2.3 鉄心の生産性

中小型モータの鉄心は、電磁鋼板を毎分数百ショットの高速なプレス速度で打ち抜き加工し、金型内で積層間をかしめて結合する方法で製造される¹⁴⁾。帯状の電磁鋼板の供給から鉄心の

(c) Slide-type divided cores for fuel pump DC motor

Fig.5 Structure of slide-type divided cores

Fig.6 Winding for slide-type divided cores

Fig.7 Assembled slide-type divided cores (no coil)

取り出しまで全て自動化されている。分割鉄心の製造においても同様の生産性が求められる。

また、図3に示した分割鉄心のように磁極を完全に分離させると部品点数が増え、工程間の搬送や装置内のハンドリングに時間を要し、自動化設備が複雑になる。特に、大量生産されるモータの場合、部品の搬送や供給においても高い生産性が求められる。

3.3 スライド型分割鉄心の構造と特徴

3.2節で考察した電機子に求められる生産性を実現する鉄心構造として、スライド型分割鉄心を提案する。

図5に提案する分割鉄心の構造を示す。同図(a)に示すように、6つの磁極と中央に軸穴が形成された鋼板は、各磁極が分離できるように①～⑥の鋼板片に分割されている。各鋼板片は同一面内で径方向に移動できるよう分割され、そのうち一つの鋼板片①は軸穴を含む形状である。同図(b)に示すように、分割され

Fig.8 Force to hang to each pole while rotating

Fig.9 Analysis model and specification

た鋼板を、磁極間の角度である60度ずつ下の層に対して位相をずらしながら積層して鉄心を構成する。各磁極には①～⑥の形状の鋼板片が順次積層されることになり、積層間のかしめによって結合させる。同図(c)は燃料ポンプ用DCモータに対して製作したスライド型分割鉄心である。各層の分割位置が隣接する層と異なるため、各磁極の軸穴周辺部が重なり、磁極がつながった構造になる。また、各磁極を径方向に引き出し分離することができる。

図6に本鉄心に対してコイル線を巻回している様子を示す。スライド型分割鉄心は各磁極の引出し、押し込みができる特徴を有する。そのため、巻かれるコイル線が両隣の磁極に干渉しない位置まで磁極を引出し、高速に回転させた巻線アームによって高密度に巻回することができる。また、引き出された磁極は他の磁極と層間の重なりを保っており、巻回後に容易に押し込んで元の位置に戻ることができるため、図4に示したように整流子の端子に絡めながら連続して巻線することが可能である。なお、同図に示す鉄心にはコイルとの短絡を防止するために、各磁極に樹脂製のインシュレータが装着されている。

また、図7に示すように、各磁極には軸穴を含む鋼板片①を複数配置しているため、軸穴にシャフトを圧入するだけで分割鉄心を組立てることができる特徴も有する。溶接や焼嵌めによる組立に比べて、生産性の高い分割鉄心の組立が可能である。

4. スライド型分割鉄心の設計

4.1 磁極の強度検討

図8にシャフトが圧入されたスライド型分割鉄心のひとつの磁極の構造を示す。磁極を構成する鋼板片の一部の層だけが軸穴を有し、シャフトが圧入固定されている。各磁極には、回転に伴う遠心力と永久磁石の吸引力を合わせた力が径方向に作用するため、圧入された軸穴周りの薄肉部に応力が集中する。この薄肉部が破壊しないように軸穴のしめ代やシャフトの寸法を決める必要がある。

図9に開発対象である燃料ポンプ用DCモータの鉄心仕様を示す。回転中に薄肉部に発生する応力を求めるために、有限要素法で弾塑性解析を行った。磁極は半抜きしたかしめで各鋼板片が結合し、軸方向にコイル線で縛られているため、積層間を一体化した固まりとしてモデル化し、コイルや鋼板片が回転数6000rpmで回転して遠心力を発生させることを考慮した。軸穴周

(a) Example of stress distribution (b) Influence of interference of shaft hole

Fig.10 Analysis result

りに発生する応力分布を図10(a)に示す。発生する最大応力は薄肉部の外周側に発生する。

図10(b)にシャフト径を3, 4, 5mmとした場合に、軸穴のしめ代を3μmから18μmまで変化させたときの最大応力を計算した結果を示す。全てのシャフト径でしめ代を大きくすると薄肉部の一部が塑性変形し、発生する応力は電磁鋼板の破断限界の8割程度で一定となる。シャフト径が細い場合、圧入時に座屈しシャフトに曲がりが生じたためシャフト径は4mmを選択した。この径のシャフトの保持トルクは、しめ代が3μmでもモータの発生トルクと比較して十分大きいことが解析と実験より確かめられたため、本モータの場合しめ代を3~9μmになるように部品寸法を設定した。

5. スライド型分割鉄心を用いた電機子製造工法

5.1 鉄心製造工法

図11にスライド型分割鉄心を製造するために開発した順送金型の打抜きレイアウトを示す。同図(a)に示すように磁極数に相当するトリム工程と、ベンド工程、カット工程、ブランク工程を設ける。まず、トリム工程のパンチは、同図(b)に示すように各磁極を軸心から外側に離れた位置に配置し、分割部と軸穴を同時に打抜く形状とする。この形状のパンチを磁極間の角度ずつ位相を変えて配置する。鋼板の送り動作に合わせてこれらのパンチによる打抜きを間欠的に実施することにより、各層に異なる分割形状を形成できる。

つぎに、ベンド工程では積層間を結合させるかしめを設ける。燃料ポンプ用DCモータの場合、各磁極の中央部に断面がV字状となるかしめをひとつ設けた。V字状のかしめは丸状のかしめに比べて強固な結合が得られ、層間に数μmの隙間が確保される¹⁴⁾。この隙間によって、巻線時に磁極を引き出したり元に押し込んだりする動作を滑らかにさせる。

カット工程では、1台分の積層枚数毎に1回かしめを取り除く打ち抜きを実施し、鋼板を連続して積層しながら、1台分の鉄心を順次分離して取り出せるようにする。

最後に、ブランク工程では分割部と軸穴以外の外周形状を打抜いて鋼板から抜き落とされ、分かれた磁極が下方のダイに順次積層し、各かしめを結合させて鉄心が形成される。

図12に示すように、このレイアウトによりブランク工程下方のダイから、各ティースが外側に引き出され軸穴周辺部が重なった状態の分割鉄心が順次取り出される。取り出された鉄心は、各磁極が完全に離れないよう軸穴に棒状の治工具を通して保持される。

提案した順送金型により分割鉄心の製造を自動化して、通常の中小型モータの鉄心と同等の生産性を得ることが可能となる。

(a) Stamping die layout

(b) Trimming punch form

Fig.11 Stamping die for slide-type divided cores

Fig.12 Handling of slide-type divided cores from stamping die

Fig.13 Winding process for slide-type divided cores

また、金型から取り出された鉄心は、分割鉄心でありながら各磁極がつながったひとつの鉄心として扱えることから、プレス以後の工程における搬送や供給においても良好な生産性を得ることが可能となる。

5.2 巻線工法

図13にスライド型分割鉄心に対して連続的にコイル線を巻線する巻線工法を示す。巻線機にはシャフトを挿入していないスライド型分割鉄心が固定され、その軸方向近傍に整流子が配置される。

他の磁極と軸穴周辺部の重なりを保ち、コイル線が両隣の磁極に干渉しない位置まで、磁極を引き出して巻回する。コイルを巻回した後に磁極を押し込み、巻線アームを動作させて整流子の接続端子に絡める。絡めたコイル線が外れないように鉄心と整流子を同時に回転させ、引き続き隣の磁極を巻回する。以後同様に、全ての磁極に対してコイル線を切断することなく連続した一筆書きの巻線を行う。巻線完了後は、磁極を押し込

Fig.14 Wire connection for fuel pump DC motor

Fig.15 Developed winding machine

Fig.16 Shaft Inserting process for slide-type divided cores

だ際に生じたコイル端末の弛みを取るために、整流子を鉄心に対して回転させてコイル端末に張力を与え、整流子と鉄心を共に保持して次の組立の工程に搬送する。

図14にこの工法で巻線された燃料ポンプ用DCモータの電機子の結線図を示す。本モータはフレーム内周に4極の永久磁石を配置したため、同図(a)に示すように整流子の対向の極を内部で連結して、同図(b)に示す3相巻線と等価の回路を構成し、4極6スロットの集中巻構造とした。

図15に本巻線工法を実証するために開発した巻線機を示す。巻線アームの回転軸内に磁極を把持して引出す機構を付加し、また、サーボモータを用いて整流子や鉄心を同期して動かすことで連続の巻線動作を実現した。本巻線工法を採用することで、分割鉄心でも連続した巻線が可能となり、従来の電機子と同等の生産性が実現できた。

5.3 電機子組立工法

図16に巻線された分割鉄心にシャフトを圧入して組立てる工程を示す。同時に整流子も圧入されたシャフトに固定されるため、鉄心と整流子の回転方向の位相はシャフトの圧入前に調整される。軸穴より若干小径のシャフトを通し、各磁極の面内の位置ズレを修正した後にシャフトを圧入して鉄心の組立精度を

Fig.17 Comparison of winding density

Fig.18 Comparison of the size of an armature

	Conventional fuel pump	Developed fuel pump
Height	92mm	65mm
Diameter	$\phi 38\text{mm}$	$\phi 35\text{mm}$
Weight	320gf	190gf

Fig.19 Comparison of fuel pump

確保する。鉄心の分割による磁気特性の劣化を考慮し、組立後の各層の分割部の隙間が最大 $5\mu\text{m}$ 以下になるように鉄心の形状公差を設定した⁸⁾。シャフト圧入後は、従来の電機子と同様に端子をヒュージングして整流子とコイル線を導通させ、電機子が完成する。

6. 評価結果

図17(a)に燃料ポンプ用DCモータの従来の分布巻構造の電機子、同図(b)にスライド型分割鉄心を用いた集中巻構造の電機子の巻線の状態を示す。提案した集中巻構造の電機子は整列した巻線が可能となり、スロット内の巻線密度（スロット内のコイル線断面積×本数/有効スロット断面積）を、35%から80%に約2倍向上することができた。

図18(a)に分布巻構造の電機子、同図(b)に集中巻構造の電機子の外観を示す。スロット外のコイル端部の高さが低くなり、また巻線の高密度化により鉄心長も短くなって、電機子の軸方向の寸法を約40%短くすることができた。

図19に従来の分布巻きの電機子と提案したスライド型分割鉄心を用いた電機子を組み込んだ燃料ポンプの寸法、及び重量を示す。両方のポンプとも60L/hのポンプ性能を有する機種であ

る。提案した電機子を用いた燃料ポンプは従来機種に比べて、体積、重量ともに約40%低減させることができた。また、消費電流値も約35%低減し、高効率化も実現した。

7. 結 言

DCモータの小型軽量化を目的として、電機子にコイル線を高密度に巻線できるスライド型分割鉄心を提案した。本分割鉄心を燃料ポンプ用DCモータに採用して、従来の電機子と同等の生産性を有することを確認し、以下に示す結果を得た。

- (1) スライド型分割鉄心は、巻線後にシャフトを圧入するだけで、整流子の固定とともに分割鉄心の組立を行うことができた。
- (2) 回転に伴う遠心力と永久磁石の吸引力によって発生する薄肉部の応力を考慮し、軸穴とシャフトのしめ代を $3 \sim 9 \mu\text{m}$ に設定し、組立時のシャフトの曲がりと薄肉部の損傷を防止することができた。
- (3) スライド型分割鉄心を高速なプレス加工で製造するため、各磁極を軸心から外側に離れた位置に配置した打抜きレイアウトを考案し、磁極が分離していても従来の鉄心と同等の生産性を実現した。
- (4) 分離した磁極間を連続して巻線できる巻線工法を提案し、本工法がコイル線の接続箇所を増やすことなく製造できることを実証した。
- (5) 提案したスライド型分割鉄心を燃料ポンプ用DCモータの電機子に採用し、巻線密度は従来機種の分布巻き構造の電機子に比べて約2倍上昇し、本電機子を用いた燃料ポンプは約40%の小型軽量化を達成した。

なお、本方式は中大型2輪用の燃料ポンプの量産に採用されている。

参 考 文 献

- 1) 車載モータ市場の最新動向と将来展望, 矢野経済研究所 (2011).
- 2) 注目されるモータの最新市場動向と中期展望, 矢野経済研究所 (2000).
- 3) 山下文敏: 高効率小型磁石モータの開発動向, 電気学会誌, **128**, 11 (2008) 752.
- 4) 河野雅昭, 千田邦浩, 早川康之: 自動車電装品の小型化, 高機能化に貢献する打抜き加工性に優れた電磁鋼板, 川崎製鉄技報, **35**, 1 (2003) 1.
- 5) 大穀晃裕, 山口信一, 都出結花利, 藤原耕二, 高橋則雄: 無方向性電磁鋼板の磁気異方性に起因する永久磁石モータのコギングトルクの検討, 電学論 D, **126**, 12 (2006) 1712.
- 6) M.Yamane, T.Kishi, and Y.Hisamoto: AC Servo "MINAS Z Series", Matsushita Technical Journal, **44**, 2 (1998) 43.
- 7) 中原裕治, 橋本昭, 三瓶利正, 花崎伸作: 分割鉄心による中小型モータ製造技術に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, **66**, 1 (1999) 102.
- 8) 中原裕治, 米谷晴之, 池田洋一, 岩間俊樹, 花崎伸作: 分割鉄心による中小型モータ製造技術に関する研究 (第2報), 精密工学会誌, **66**, 7 (2000) 1125.
- 9) 中原裕治, 秋田裕之, 三宅展明, 川口仁, 川口進, 花崎伸作: 分割鉄心による中小型モータ製造技術に関する研究 (第3報), 精密工学会誌, **67**, 3 (2001) 456.
- 10) 木下治雄, 三宅展明, 山口秀哉, 川杉直喜: 換気扇用小型モータの量産ライン構築, 三菱電機技報, **81**, 12 (2007) 791.
- 11) 榎本裕治, 北村正司, 茂木康彰, 安藤隆司, 落合誠, 虻川俊美: 新焼結方法を採用した外転型磁石モータの小型・高効率化, 電学論 D, **124**, 6 (2004) 529.
- 12) 小田原エンジニアリング, 特開平 8-223874.
- 13) 日特エンジニアリング, 特開 2001-339917.
- 14) モータコア 50 年史, 財団法人三井金型振興財団, 三井ハイテック発行 (2000).