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)*

—情報機器用スピンドルモータの薄形化—

中原裕治**

橋本 昭**

三瓶利正***

花崎伸作†

Study on Manufacturing Technology of Middle and Small Sized Motors with Dividing Stator Cores
 — Development of a Flat Spindle Motor Used for Information Equipment —

Yuji NAKAHARA, Akira HASHIMOTO, Toshimasa SANPEI and Shinsaku HANASAKI

This paper reports study on manufacturing technology of a spindle motor which used for 120MB FDD. This motor is an inner rotor type which is designed a linear shaped dividing block core connected by thin bridges. In coil-winding a linear shaped block core is wound by several nozzles. After winding, the linear shaped block core is bent as a similar conventional circular stator. The influence to the motor characters by the dividing block core with magnetic analysis is invested. The flat spindle motor for 120MB FDD was developed and high manufacture-ability was realized.

Key words: FDD (flexible disk drive), spindle motor, DFM (design for manufacturing), dividing stator core

1. 緒 言

フレキシブルディスク装置(以下 FDD と称す)は、1971 年に米国で登場して以来、記憶媒体が 8, 5.25, 3.5inch と小径化され、利便性が増すとともに装置・媒体が安価となったことからパソコン等に広く普及している。現在、1985 年に発表された 2HD と呼ばれるフロッピー(3.5inch 径、両面で 2MB)を媒体とした FDD が主流であり、さらには画像音声データ等にも対応できる大容量 FDD の新機種投入が活発である^{1)~3)}。

一方、ノート型パソコンに代表される携帯情報機器が急速に普及しており、携帯性を損なうことのない薄形 FDD のニーズが高まっている。FDD 本体を薄くするには、記憶媒体を回転駆動するスピンドルモータの高さが決定的な制約となる。このスピンドルモータには、制御性が良く長寿命かつ低ノイズである DC ブラシレスモータが用いられている。

さて、究極の薄形化とコストパフォーマンスを得るには、薄形モータの機能設計だけでなく、製造方法・生産性を考慮した生産設計を両立させることが不可欠である。生産設計においては、ものづくりのしやすさの観点から、モータの基本原理解・構造にさかのぼって見直し、解析や試作評価の裏付けをもって新構造を提案することが重要といえる。

本論文では、大容量 FDD の構造とスピンドルモータの形態を説明し、巻線工程の製造法に着目した生産設計によってブロック分割鉄心方式のスピンドルモータを実現した経緯を説明する。その中で、従来の一体型鉄心とブロック分割鉄心の磁気的影響の差異を磁界解析と実測結果から考察する。また、ブロック分割鉄心によるモータ製造技術を紹介し、従来の一体型鉄心との生産性の差異について述べる。

なお、本研究の対象は、2MB 容量の FDD 用スピンドルモータを含むが、ここでは 2MB と下位互換できる 120MB 大容量 FDD 用スピンドルモータの事例を述べる。

2. 構 造

2.1 全体の構造

大容量 FDD の基本構造を図 1 に示す。本体フレームのほぼ中央に記憶媒体を回転させるスピンドルモータ、記憶媒体の情報をリード、ライトする磁気ヘッド、その磁気ヘッドを媒体の径方向にシークさせるボイスコイルモータ、基板 IC、ローディングユニットからなる。

このスピンドルモータは、定速回転(720rpm)で用いられており、ワウ・フラッタ $\pm 1\%$ 以下の回転速度精度が求められている。大容量 FDD の場合、高記録密度に対応するために、同期振れ(RRO) $11\mu\text{m}$ 以下と非同期振れ(NRRO) $0.5\mu\text{m}$ 以下の心振れ精度が求められており、2 個のマイクロ玉軸受を予圧してロータ軸を支持している。

本体の厚みを 12.7mm (1/2 inch) と薄くするためには、フロッピー中心部のチャッキング金具と接するロータ上面(ハブ)の高さを本体フレーム下面から 3.5mm 以下とする必要がある。

Fig.1 Structure of 120MB FDD

* 原稿受付 平成 11 年 7 月 2 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)

† 正 会 員 大阪大学工学研究科(吹田市山田丘 2-1)

Fig. 2 Spindle motor types for FDD

2.2 スピンドルモータの形態

一般的な FDD 用スピンドルモータの形態を図 2 に示す。ステータとロータとの相対的な位置関係から、アウトロータ型、面対向型、インナロータ型に分類される⁴⁾。

アウトロータ型は、FDD、HDD、CDROM 等の記憶装置に普及しており、磁極歯が放射状に外周に向かっていてステータにカップ状のロータが覆いかぶさる構造である。また、面対向型は、VTR 等の AV 機器に普及しており、おむすび状コイルが基板上に複数個配置され、円盤状のマグネットと軸方向に対向する構造である。インナロータ型は、一般的なモータとして普及しており、磁極歯が内周に向かっていてステータとその内側にロータが配置される構造である。

薄形 FDD の場合、いずれの形態においてもロータ外径あるいはステータ外径は磁気ヘッドと干渉しない寸法に制約される。しかし、ステータ外径は、図 2(d) に示すような磁気ヘッドとの干渉部のステータを切り欠いたインナロータ型であれば本体に収まる寸法までステータ外径を大きくできる。

DC ブラシレスモータのトルクは、マグネットの厚さと極数、コイルの巻数と電流値に比例し、磁極歯が切り欠かれていればその切り欠き比率分減少する。すなわち、切り欠き比率以上に磁極歯を長くしてコイル巻数を多くすれば、切り欠きのあるインナロータ型がモータ性能面で最も有利に設計できる。

3. 巻線性に着目した生産設計

3.1 従来の巻線法

インナロータ型のコイル巻線は、図 3 に示すように一体型鉄心の内側から巻線ノズルを磁極歯まわりに周回させてマグネットワイヤを巻き付けていく。FDD 用スピンドルモータのように、ステータ内径が小径であったり磁極歯が多くなると、巻線装置の構成はさらに難しくなる。整列巻きを必要としない場合であれば、UVW 相の 3 本のノズルをカム駆動で各磁極歯まわりに

Fig. 3 Conventional winding

Fig. 4 Structure of dividing core

周回させ高速巻線することができると、薄形化の達成には整列巻きが必要であるため図 3 のように 1 本のノズルで巻線しなければならない。

3.2 分割鉄心

高密度整列巻きや高速巻きやコイル端末の自動処理等の巻線性を改善する手法として、鉄心を分割し巻線後に鉄心を組み立てる方法が知られている⁵⁾。しかしながら、FDD 用スピンドルモータの場合、図 4(a) のように鉄心を分割すれば、巻線後の鉄心の組立が複雑となり、コイル端末の接続箇所も分割数に応じて増えることとなる。

次に、図 4(b) に示すように、UVW 相の 3 つの磁極歯を 1 つのブロックとする構造とし、ブロック内の UVW 相の磁極歯を各々平行となるような異形スロットの形状とする。分割数が減少したために組立性が改善され、UVW 相の同時巻線も可能となる。しかし、コイル端末の接続箇所の点数が多いことは解決できていない。

3.3 直線状ブロック分割鉄心

図 5 は、分割された 5 つのブロック鉄心とステータ切り欠き部に配置された後述の磁気バランサとを薄肉状の鉄心で直線状に連結した状態を示している。巻線では、直線状鉄心の磁極歯と対面する方向に UVW 相の 3 本の巻線ノズルを配置し、3 本ノズルを一括して駆動しブロック内の巻線を行う。次に、ブロック内の巻線が終われば、隣のブロックに UVW 相の各々の渡り線を切らずに連続して巻線を行う。

すべてのブロックの巻線が終了した後、直線状鉄心の薄肉状の鉄心を順次折り曲げることによって、本来の円筒状のステータを形成する。

この構造によれば、3 本ノズルを一括して駆動させ高速・整列巻きが可能となるとともに、コイル端末の接続箇所削減と部品点数削減による組立性向上が実現できる。

Fig.5 New winding method of a dividing block core

4. ブロック分割鉄心の磁界解析

4.1 ブロック分割鉄心による磁気的影響

分割鉄心では、ステータ鉄心の磁路が分断されることによる磁気的影響が懸念される。従来の一体型鉄心とブロック分割鉄心について、ロータマグネットがステータ鉄心のコイルに鎖交する磁束流れを磁界解析した。図6は、磁路分断の影響が最も大きいロータ回転位置での磁束流れの状態を示している。この状態での一体型鉄心の磁束流れを磁束Aと磁束Bとした場合、ブロック分割鉄心では磁束Aの磁路が分断されることとなるが磁束(A+B)がブロック内で流れている様子がわかる。すなわち、ブロック分割鉄心において、ステータ鉄心のヨーク部で磁気飽和しない寸法を確保していれば、分断による磁気的影響はないといえる。また、実測比較においてもモータの基本特性（回転数・トルクカーブ）の差異は認められなかった。

4.2 磁気バランサの効果

ステータを切り欠いた構造とすると、ステータ鉄心とロータマグネットの磁気吸引力がアンバランスとなり軸受に過大なラジアル負荷がかかり短寿命の原因となる。また、ロータの回転方向にも微小回転角ごとに磁気吸引力のアンバランスが生じ、コギングトルクによる回転速度むらの原因となる。

これらの現象を補償するために、ステータの切り欠き部に磁気バランサを設ける。磁気バランサの形状は、径方向の厚みの寸法を、順送金型で安定して抜ける0.5mmとし、磁気バランサの位置は、ロータとステータのエアギャップ量の倍の0.5mmとしている。

図7は、微小回転（0.1875°）ごとの磁界解析により求めたロータマグネットと鉄心の磁気吸引力によるトルク変動値を周波数分析した結果である。1152Hzは、720rpm（12Hz）においてロータの極数（32）とステータのスロット数（24）の最小公倍数（96）に起因するコギング周波数であり、この値を1として各トルク変動成分を正規化している。ステータの切り欠きによるコギングトルクはロータの極数32、対極数16に起因する192Hz、384Hzにおいて大きな数値が表れる。磁気バランサの有無で比較すれば、これら数値が磁気バランサ有りで減少し

Fig.6 Result of magnetic analysis

(a) Without a magnetic balancing core

(b) With a magnetic balancing core

Fig.7 Spectrum of cogging torque

ており、その効果は明らかである。回転速度のワウ・フラッタの実測値においては、磁気バランサ有りでは磁気バランサ無しの約半分に減少しており、W/F値は0.4~0.5%であった。

Fig.8 Press flow

5. ブロック分割鉄心のモータ製造技術

5.1 鉄心プレス

鉄心材料は、0.35mm 厚のけい素鋼板 (35A440) である。直線状のブロック分割鉄心は、その長手方向を順送プレスの送り方向と直角に配置して打ち抜かれ、複数個の抜きかしめ用ダボによって3枚ごとに積層固定される。

鉄心とコイル間の絶縁をエポキシ系の電着でコーティングしており、ステータの厚みを抑えている。けい素鋼板を通常にプレス抜きすれば部材の角にバリやかえりが生じて、これらが電着膜を突き破れば鉄心とコイル間の短絡を起こす。

そこで、図8に示すプレス工程によって、磁極歯のコイル巻線部の角に丸み付けを行う。その工程とは、①の工程で磁極歯間のスロット部を半抜き状態とし、②の工程でスロット部を平打ちし、③の工程でスロット部を抜き落とし、④と⑤の工程で磁極歯の角をR0.15の金型で面打ちするものである。

図9は、巻線後のステータ鉄心の断面である。磁極歯の角にR面が形成され、約30 μ mの電着膜を介して鉄心とコイル間の絶縁ができています。

5.2 コイル巻線

巻線では、先述のように直線状鉄心にUVW相の3本ノズルが対向して一括駆動して行われる。図10は、ブロック鉄心の磁極歯部と素線径0.2mmのマグネットワイヤを4層に整列巻きしたコイルと、UVW相の3本ノズルの巻線時の軌跡を示している。ノズル軌跡は、円とした場合にコイル最外周とノズルとのクリアランスが十分得られないため、長方形の角に丸みを付けた軌跡としている。

図11は、巻線装置の機構を模式的に示している。2枚のカムを1200rpmで駆動し、リニアベアリングでフローティングされたノズル取付板にカムフォロアを介して伝達することで、前述のノズル軌跡を高速に得ている。また、直線状鉄心と巻線装置のノズル駆動部が対面配置となることから、従来の一体型鉄心の巻線装置に比べると機構が簡素化できる。そのため、複数個のステータを一括して巻線することが可能となり、一括して駆動されるノズルの本数に比例して生産性が向上する。

Fig.9 Cross section of core

Fig.10 Track of winding nozzles

Fig.11 Mechanism of winding machine

(a) Conventional stator

(b) Block dividing stator

Fig.12 Result of winding

図12において、従来の一体型鉄心とブロック分割鉄心の巻線状態を比較しており、ブロック分割鉄心では整列巻きが実現できていることがわかる。

5.3 鉄心折曲げ

直線状のブロック分割鉄心を折り曲げて所望の真円度を確保するためには、鉄心の最適な寸法設定と鉄心の薄肉部折曲げを線対称とする必要がある。鉄心寸法は、図13に示すように薄肉部の塑性変形領域での中立軸を考慮し、式(1)によりブロック間ピッチを設定する。

$$P = 2(h + t \cdot e) \tan(\theta/2) \quad (1)$$

P : ブロック間ピッチ, h : 中心から薄肉部までの距離,
 t : 薄肉部厚さ, e : 中立軸比率, θ : ブロック角度

中立軸は $e=0.5$ から塑性変形に伴い内径側に移動することから、 $e=0.3$ として P の値を決定している。

また、折り曲げにおいては、各ブロックを保持するジグに $e=0.3$ の位置まわりに回転する拘束を設けることで線対称曲げを実現し、従来の一体コア同等の真円度を確保している。

Fig.13 Sharpness of a core

Fig.14 Built-in structure of a spindle motor

Table 1 Specification of a spindle motor

Stator	15 (=24-9) slots
Rotor magnet (Nd-Fe-B)	32 poles
Stator diameter	57 mm
Rotor diameter	32 mm
Motor height	3.5 mm
Air-gap distance	0.25 mm
Rotary speed	720 rpm
Starting torque	Above 0.01 Nm
Constant load torque	Above 0.004 Nm
Rotary accuracy W/F	Below 1%

6. 評価結果

図 14 は、12.7mm の本体厚さである大容量 FDD に搭載されたスピンドルモータの様子である。ロータとステータの各々が本体フレームに固定されるビルトイン構造としている。また、ステータの 2 と 4 番目のブロックのコイルは 2 層巻きであり、1, 3, 5 番目のブロックは 4 層巻きである。4 層巻きのコイル部は本体フレームとステータを保持する樹脂部材に窓があけられ、2 層巻き部は本体フレームの軸受支持メンバとなっている。このように 4 層巻きコイルと 2 層巻きコイルを混合することで、フレーム強度を必要十分に維持しながら総コイル巻数を

増やしている。このスピンドルモータは、表 1 に示すスペックを満足した。

7. 結 論

大容量 FDD 用スピンドルモータの開発において、薄形化と高生産性の両立を実現するため、つくりやすさの観点からモータの基本構造にさかのぼった生産設計を行った。そして、磁気ヘッドとの干渉部を切り欠いたインナロータ型ステータで、UVW 相の 3 つの磁極歯ごとにブロック分割し、ブロック間を薄肉部で連結した直線状鉄心の構造を見出した。製造においては、直線状鉄心に対向して UVW 相の 3 本ノズルでブロック間の渡り線を切らずに連続的に巻線し、巻線後に薄肉部を折り曲げて円筒状とする方法とした。

本研究から下記に示す結果を得ることができた。

- (1) 磁界解析と実測値からブロック分割鉄心と従来の一体型鉄心との磁気的影響の差異は無かった。
- (2) ステータ切り欠きによるロータマグネットと鉄心との磁気吸引力のアンバランスを磁気バランスによって補償し、回転速度精度 W/F 値 0.4~0.5% を得た。
- (3) 直線状鉄心への巻線は、巻線装置と鉄心が対向配置となるため、一体型鉄心の場合と比較して、整列巻きを一括して駆動できるノズルの本数に比例して生産性が良くなる。
- (4) 直線状鉄心のブロック間ピッチの寸法設定と線対称の折り曲げ法によって、一体型鉄心と同等の真円度を得た。
- (5) 2 層巻きと 4 層巻きを混合したステータを本体フレームへビルトインすることで、3.5mm 高さのスピンドルモータを得た。

なお、この方式は、大容量 (120MB) FDD と普及機種 (2MB) FDD のスピンドルモータに導入されている。

謝 辞

本研究にあたりご指導いただきました岩田一明大阪大学名誉教授 (現、高知高専校長) に感謝の意を表します。また、ご助言いただきました三菱電機(株)ディスクドライブ統括事業部、先端技術総合研究所、情報技術総合研究所、生産技術センターの方々にお礼申し上げます。鉄心金型を製造していただきました三井ハイテック(株)諫山常務取締役等に謝意を表します。

参 考 文 献

1) 寺田 猛:多様化するリムーバブルメディアの変遷, bit, 28, 8 (1996) 4.
2) 山浦征支郎:超小型 FDD 用モータの動向, モータ技術シンポジウム, 東京 (1992) 1.
3) 山本正樹ほか:120MB FDD 完全下位互換磁気ヘッド, 信学技報, Technical Report of IEICE, MR95.68 (1995) 1.
4) 谷腰欣司:図解モータのしくみ, 日本実業出版社 (1995) 29.
5) 武内 学:産業機器用サーボモータの開発動向, Mechatronics, 3 (1994) 14.
6) 梶本浩二:中大容量 AC サーボモータ, オートメーション, 40, 12 (1997) 14.