

モータコアのワイヤ放電加工による無歪み加工に関する研究 -モータの高効率・高エネルギー密度化技術の構築-

城門由人・小幡睦憲
生産技術部

Production of Motor Core with Wire Electric Discharge Machining - Development of High Quality Motor-

Yukihito KIDO, Mutsunori OBATA
Production Engineering Division

要旨

環境問題に対応できる小型高効率モータの開発を目的に、県内外6機関による研究開発事業を実施している。当センターは、モータコアのワイヤ放電加工による無歪み加工を担当しており、今年度は、試作モータコアの加工を行った。安定した加工条件を検討するために、予備実験を行い安定した加工条件として、ワイヤ放電電流を小さく設定し、放電回数の頻度を少なくした。また、ワイヤ電極と被加工物とのギャップを大きくするために、加工電圧を高く設定した。また、試作モータでは、直径180mmのモータコアを作成する必要があったため、積層する電磁鋼板の隙間が均一となるように、ボルトによる固定を採用した。また、ワイヤ放電加工の切断による被加工物の落下を防止するために、落下防止板を作製した。この結果、絶縁皮膜を有した薄板（厚さ0.35mm）電磁鋼板の積層加工が安定に実施できるようになった。

1. はじめに

当センターでは、平成16年度から2カ年の予定で、小型高効率モータの開発を目的に、大分大学を中心とする県内外6機関による地域新生コンソーシアム研究開発事業（経済産業省公募事業）を行っている。

当センターは、電磁鋼板モータコアのワイヤ放電加工による無歪み加工法の確立と試作コアの開発に取り組んでいる。

本報告では、研究の概要および、今年度センターで行ったモータコアのワイヤ放電加工について報告する。

2. 研究の概要

環境問題等から、電気機器の小型化・軽量化、省エネルギー化が重要視されるようになってきている。

本研究開発事業では、大分大学榎園研究室の有する電磁場解析技術を基に、小型高効率モータの開発を目指している。

具体的には従来機種と同等重量で出力が1.5倍（3.5kw級を5.5kw級へ）以上の産業用モータを開発し、それに関わる製造・組み立て技術を構築する計画である。

モータの高効率・高エネルギー密度化を実現するため、高性能希土類永久磁石を配した回転子と高性能電磁鋼板を固定子に持つ新たな構造によって、モータの出力に比

例する空隙（エアギャップ）の磁束密度を従来の1.5倍以上とし、この高磁束密度化による損失の増加を防ぎ高効率化するため、新たな構造をもつ固定子への高性能電磁鋼板の有効活用技術を確立することを目的としている。

また、開発設計されたモータの材料磁気特性を損なうことなく製造・組み立てを行うための技術開発を行い、その支援技術として加工・製造過程に発生した応力によって磁気特性が劣化した材料の局所誘導加熱法による磁気特性の回復技術を確立する。

センターでは、電磁鋼板の材料特性を試作機モータコアのワイヤ放電加工を担当し、試作モータコアの加工を行った。

3. モータコアのワイヤ放電加工による無歪み加工

3.1 モータコアの加工

モータの鉄心材料として使用される電磁鋼板は、磁気エネルギーを伝達する機能材料としてモータ効率を左右する。モータは電磁誘導によるエネルギーを機械的なエネルギーに変換するため、鉄心材料として使用される電磁鋼板では、電磁誘導による電流が発生するために起きる渦電流損が問題となる。このため、コア材料には、この電流の流れを防止するために、表面を絶縁皮膜処理し

た薄い鉄板が使用される。

コア材料の加工では、加工による応力や熱の影響で、コア材料の磁気特性の劣化が問題となる。モータコアは、金型による打ち抜き加工によって作成されることが多いが、打ち抜き加工で発生する応力歪がコア材料の磁気特性を劣化させることが知られている。また、試作段階で金型を作成すると、コスト増や開発期間が長くなるなどの問題がある。一方、ワイヤ放電加工は、任意の形状を作製することができ、金型によるモータコア作製と比較して、短時間で試作機用モータコアを作製することができる。また、ワイヤ放電加工では、微小領域を電気的なエネルギーによって加工を行うため、加工によって発生する電磁鋼板の磁気的な特性劣化も少ないことが予測される。このため、本研究開発事業では、モータコアの作製にワイヤ放電加工を採用している。

3.2 モータコアのワイヤ放電加工における課題

ワイヤ放電加工は、導電性の被加工物である金属と黄銅やタングステンなどの細いワイヤ電極とを絶縁する加工液中で、被加工物とワイヤ電極間に電気エネルギーを加え（電圧を印加）、その時に発生する火花エネルギーによって加工を行う。このため、モータコアに用いる絶縁皮膜層を有した薄板の電磁鋼板をワイヤ放電加工で行う場合、次のような課題がある。

放電加工は、導電性材料を加工する技術であり、非導電性材料の加工は本来できないため、電磁鋼板の絶縁皮膜は、ワイヤ電極によって直接破壊しながら或いは、電磁鋼板とワイヤ電極間に生ずる火花エネルギーによる間接的な加工となる。

また、ワイヤ放電加工を用いて、金属材料の薄板を積層して加工する場合、材料製造時の残留応力のため、大きなひずみを生じ、電極ワイヤの断線の要因になる。⁽¹⁾

このため、薄板を重ねて加工する場合、隙間が無いように重ね、厚目の鋼板で上下面から挟み加工する手法をとる必要がある。

3.3 加工条件の検討

積層した電磁鋼板のワイヤ放電加工を安定に自動運転を可能にする加工条件を検討するために、予備実験を行った。ここでいう加工条件とは、ワイヤ放電加工時の加工電気条件および被加工物の固定方法である。

電磁鋼板は、市販モータに使用されている電磁鋼板の中でも最上級とされる鋼板（S9）を使用し、サイズは、縦 200×横 200×厚さ 0.35(mm)とした。

材料の上下面に 4.5mm の鋼板（SS400）を当て、その間に、積層厚が約 41mm の電磁鋼板（117 枚）を隙間無く重ねた。通常、この塊の外周数箇所を溶接して固定するが、予備実験では固定用クリップを独自に製作し固定

した。本研究で試作するモータに使用するステータコアは、直径 180mm の電磁鋼板を使用するため、溶接により固定した場合、取り扱いが困難になることが予想された。また、溶接による側面のみでの固定では鋼板中央部分の隙間を抑えることができなくなり、安定加工に影響を及ぼすことが予測された。そこで、電磁鋼板および押さえ鋼板（SS400）を積層した材料の固定には、ボルトを使用し、切断によりフリーになった部分の固定には、固定クリップを採用した。

当初の予備実験では、金属材料を加工する加工条件で積層電磁鋼板塊を加工した場合、加工状態が極めて不安定となり、電極ワイヤの断線が頻発した。また、被加工物と電極ワイヤの接触頻度が多く、安定した放電現象を誘発できなかった。

このため、電極ワイヤの断線対策として以下を調整した。

調整 1. 単発放電エネルギーが小さくなるようにする（調整項目 放電で流れる電流の大きさを小さめに設定）
調整 2. 放電回数の頻度を少なくする

（調整項目 放電が終了してから再び電圧をかけるまでの時間を長めに設定）

次に、被加工物と電極ワイヤの接触対策として、接触の要因がスラッジ（放電加工後の加工屑）の排出性にあると考え、以下の調整を行った。

調整 3. 電極ワイヤと被加工物とのギャップ（隙間）を大きくする（調整項目 平均加工電圧を高めに設定）

上記の調整を行うことで、加工の途中で電極ワイヤの断線を発生しない、かつ、電極ワイヤと被加工物の接触を起こさない積層電磁鋼板の安定加工条件を得た。この時の加工速度は金属材料加工時の約 50%（1.6mm/min）であった。

4. 試作機モータコアのワイヤ放電加工による加工

4.1 試作機モータコアにおける加工条件の検討

加工形状を Fig.1、2 に示す。（Fig.2 は、加工した電磁鋼板を示している）今年度、設計したモータのステータは、直径 180mm、内径 116mm、高さ 100mm であり、Fig.2 に示す厚さ 0.35mm の電磁鋼板を 100mm に積層することで、モータコアが完成することになる。

予備実験の結果から、100mm に積層した電磁鋼板（286 枚）を 1 回のワイヤ放電加工で加工すると、十分な加工安定性や加工速度が得られないことが予測されたため、積層した電磁鋼板の厚さを予備実験で実施した積層厚と同程度にした。つまり、積層厚さ 50mm 程度として、2 回に分けて、加工することで、モータ 1 機分を作成した。実際には、電磁鋼板の上下面に 4.5mm の押さえ板を配置し、全厚 65mm（電磁鋼板 160 枚）の鋼板塊として加工

した。

また、実際の加工では、予備実験で使用した電磁鋼板の種類、素材サイズ（予備実験 200×200mm に対し実加工 400×250mm&400×380mm）や積層厚さの相違（予備実験 50mm に対し実加工 65mm）から予備実験で得た加工条件のままでは、加工状態が不安定であった。この要因として、鋼板塊のサイズが大きくなることで自重が増し、剛性が低下したため、たわみ量が増大し、内部応力が大きくなったためと考えられる。加工状態を詳しく観察したところ、鋼板塊が大きいたわみ、ワイヤ放電加工機の下部ガイドと強く接触したことで、下部ガイドの鋼板塊底面に傷が入っていた。

そこで、たわみによる、鋼板や加工機への損傷を防ぐために、加工する鋼板塊と加工テーブルの間隔を 12mm として固定した。これにより、鋼板塊をボルトで固定することで鋼板塊下面に生じるボルトヘッドやナットの突起とワイヤ放電加工の下部ガイドが接触しないようになった。

さらに、安定した加工を実施するために、予備実験で調整した項目について再度見直しを行った。具体的には、放電回数の頻度をさらに少なくし、平均電圧を高くした。

これにより、加工速度は、予備実験で得た値の 20～30% 程度に低下し、0.3～0.5mm/min となった。

4.2 加工手順の検討

Fig.2 で示すように、モータコアは、内周部分と外周部分の 2 箇所をワイヤ放電加工する必要がある。

加工は、まず内周部分の加工を行い、内側の不要部分の切り落とし加工を実施して、次に外周部分の加工を行い、モータコアを作製した。

内周部分、外周部分の加工において、そのままワイヤ放電加工を実施すると、切り離される部分の支えがなくなって、落下してしまう。このため、最初に、3 箇所を切り残して加工を行い、次に落下防止板の取り付け、最後に、切り残した部分の加工を行うことで、切り離される部分が落下しないようにした。

4.3 内周部分の加工

まず、Fig.3 に示すように、電磁鋼板と上下押さえ板で、65mm に積層した電磁鋼板を挟み、固定ボルトと固定用クリップで固定した。ワイヤ放電加工にかかる前に形彫放電加工機により、イニシャルホール及びボルト固定用の貫通穴の加工を行った。

※イニシャルホール・・・ワイヤ放電加工時、電極ワイヤを通すための穴

薄板の積層物をワイヤ放電加工する場合、積層板間に隙間を生じないようにして、加工を安定させる必要がある。そこで、積層板に隙間を生じさせないように、ステ

ータ形状に干渉しない位置に、数箇所固定できるようにした。

次に、落下防止板の取り付けを実施した。具体的には、内側の加工終了後に鋼板塊が落下しないように、3 箇所（120° 毎 2.5mm 程度）切り残し加工を行い（Fig.4 参照）、その後、落下防止板を取付け、切り落とし（3 箇所残した部分）加工を行った。切り落とし加工では、落下防止板による固定に加え、切断の際加工液圧などにより鋼板塊が動かないように強力なマグネットで保持した。（Fig.5 参照）

Fig.6 は、内部の不要部分の切り落とし加工が完了した状態を示している。

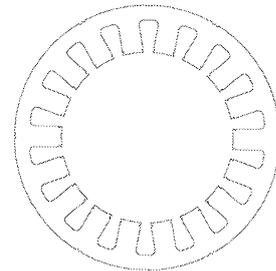


Fig.1 加工形状

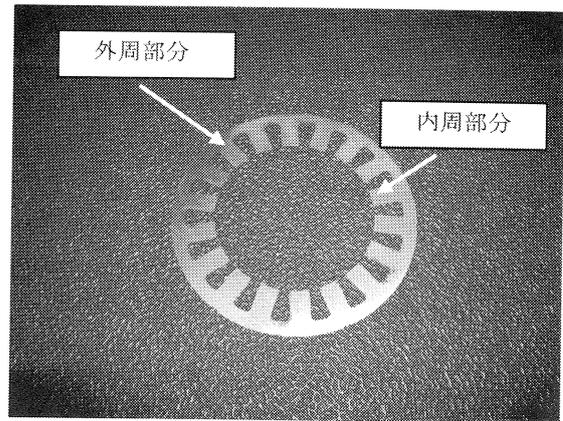


Fig.2 加工形状 (加工した電磁鋼板)

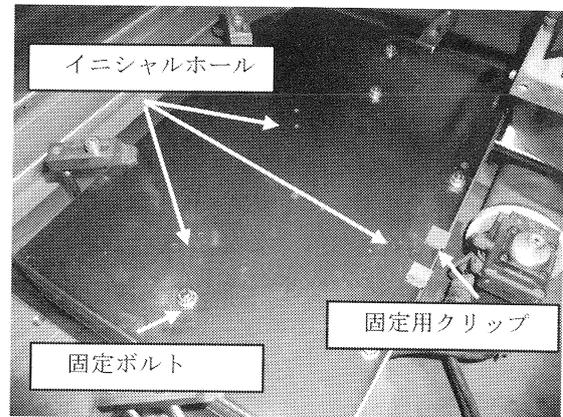


Fig.3 ボルト、固定クリップで固定された電磁鋼板



Fig.4 3箇所切り残し加工後の状態

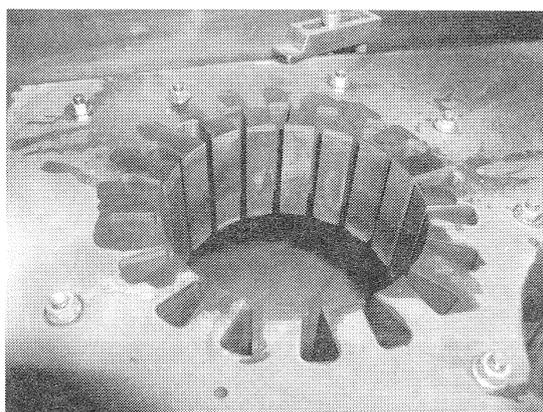


Fig.7 外周加工前

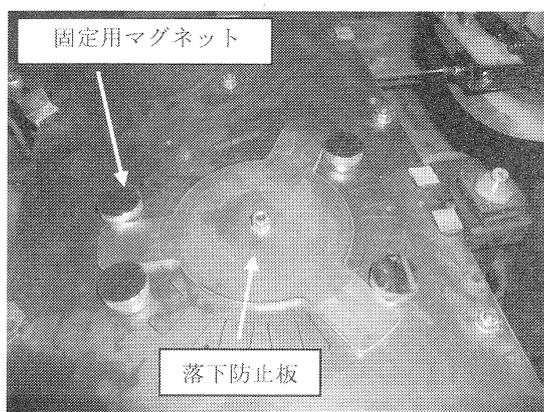


Fig.5 落下防止板を取り付けた状態



Fig.8 3箇所切り残し加工後の状態

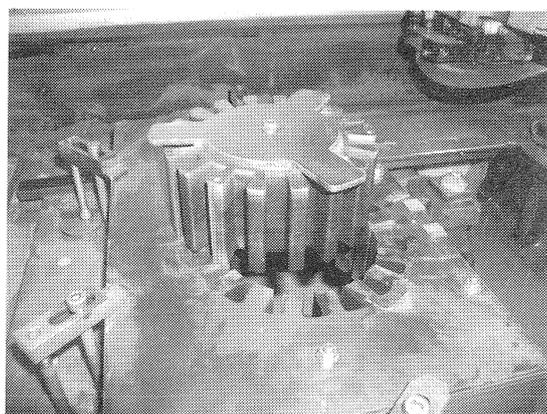


Fig.6 内部の不要な部分の切り落とし加工



Fig.9 落下防止板を取り付けた状態

外周部分の加工

4.3 の内周部分の加工で切り落とされた部分の切断面は、加工液の循環等により、各鋼板が振れ、加工が安定しない。これを防止するために、新たに作製したクリップを取り付けることで、加工液の循環等による影響を少なくした。さらに、固定用のクリップでは、挟み込める部分が切断部近傍に限られるために、外周切断部近傍ま

で固定できる押さえ板を取り付けた。これにより、断線が発生することなく、安定なワイヤ放電加工ができるようになった。

Fig.7, 8, 9, 10 は、外周部分の加工手順を示している。基本的な手法は、内周部分の加工と同じである。

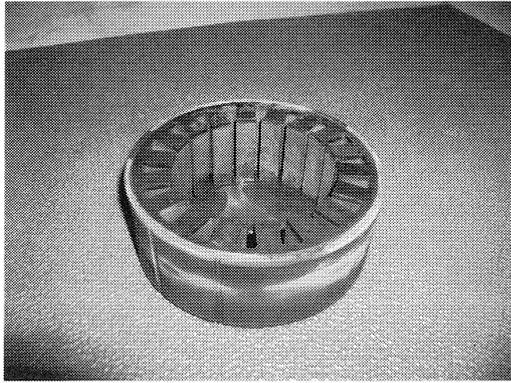


Fig.10 試作機のモータコア加工が完成した状態

5. まとめ

小型高効率モータの開発を目的に、モータコアのワイヤ放電加工による無歪み加工を行い、今年度は、試作モータコアの加工を行った。

安定な加工を行うために、ワイヤ放電電流を小さく設定し、放電回数の頻度を少なくした。また、ワイヤ電極と被加工物とのギャップを大きくするために、加工電圧を高く設定した。

また、試作モータでは、直径 180mm のモータコアを作製する必要があったため、積層する電磁鋼板の隙間が均一となるように、ボルトによる固定を採用した。また、ワイヤ放電加工の切断による被加工物の落下を防止するために、落下防止板を作製した。

この結果、ワイヤ放電加工による、絶縁皮膜を有した薄板（厚さ 0.35mm）電磁鋼板の積層加工が安定に実施できるようになった。

参考文献

- (1) 三菱電機株式会社 加工技術ノウハウシートSPW 5007