

# 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・水江宏・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, Hiroshi MIZUE, Mutsunori OBATA  
Production Engineering Division

### 要 旨

平成 16 年度から、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、モータ鉄心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、試験機 3, 4 号機のモータ鉄心加工を行った。(3 号機は、昨年度製作した 1, 2 号機の改良版。4 号機はデュアル型 (DUAL: モータ鉄心が内側と外側に 2 つある) .)

さらに、加工速度の改善を目的に、加工液のノズル位置と電磁鋼板塊の間隔を小さくする (0.1mm) ことで、約 60% 程度加工速度が向上できた。また、レーザ溶接により、電磁鋼板塊の側面を溶接することで、平均加工電圧が高くなり、加工速度が約 30% 程度向上できることが分かった。リング試料を製作して、磁気特性の評価を行い、レーザ加工より低歪で加工できることが分かった。

### 1. はじめに

平成 16 年度から、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。本研究開発事業では、試験機を 4 種類製作した。試作段階で金型を製作すると、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、任意の形状を製作することができ、金型による製作と比較して、短時間で試験機用モータ鉄心を製作することができる。

また、打ち抜き加工で発生する残留応力歪が鉄心材料の磁気特性を劣化することが知られている。打ち抜き加工では、加工断面から約 250~300  $\mu$ m 範囲に、鉄心材料の硬度変化 (残留応力歪) がある。一方、ワイヤ放電加工による残留応力歪の範囲は、約 30  $\mu$ m 程度であることが報告されている。これは、ワイヤ放電加工では、微小領域を電氣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残留応力が小さくなっていると考えられる。つまり、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、モータ鉄心の製作にワイヤ放電加工を採用した。

### 2. 鉄心加工

今年度は、3 号機、4 号機のモータ鉄心加工を行った。基本的な加工方法は、昨年度と同じである。

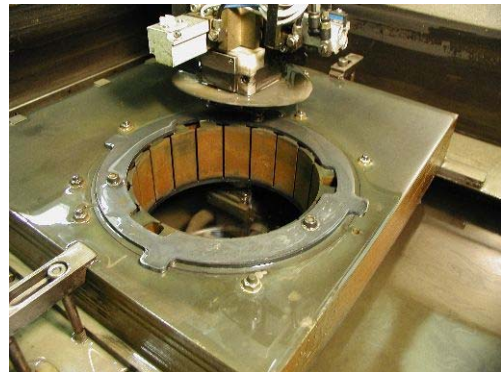


Fig. 1 落下防止版を取り付けた様子

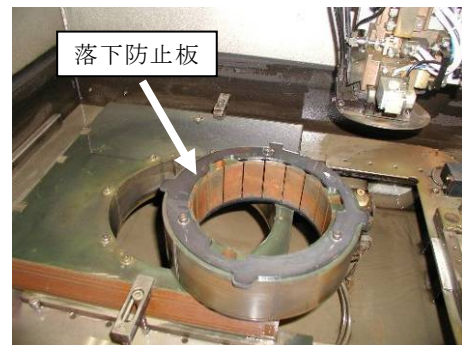


Fig. 2 切り落とし加工後の電磁鋼板塊

縦 400mm × 横 380mm × 厚さ 0.35mm の電磁鋼板を 155 枚重ね、上下の押さえ板 (SS400; 上: 厚さ 4.5mm, 下:

厚さ 6.0mm) を当て、ボルト締めし、厚さ 65mm の電磁鋼板塊とし、ステータ形状を加工した。M6 の締めボルトを加工内周半径 $-12\text{mm}$ 、加工外周半径 $+12\text{mm}$  の位置に  $90^\circ$  ピッチで配置し、締め付けた。形状加工の際、切り落としによる加工品の落下を防ぐため、落下防止板を使用した。形状加工時 2~3 箇所 (3mm 程度) を切り残し、落下防止板を取付けた後、切り落とし加工を行った。工程の写真を Fig. 1, 2 に示す。Fig. 3 は、加工した電磁鋼板 (DUAL 型) を示している。



Fig. 3 加工した電磁鋼板 (DUAL 型)

### 3. モータ鉄心のワイヤ放電加工における課題

#### 3.1 放電加工への影響及び対策

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、モータ鉄心に用いる絶縁被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。

- ①電磁鋼板は上下面に絶縁被膜を有するため、本来ワイヤ放電加工する場合、一部の絶縁膜を破壊し、被膜間にある鋼板とワイヤ放電加工機の加工テーブルとを電気的な接続状態にする必要がある。
- ②電磁鋼板を積層した場合、電磁鋼板間は絶縁被膜同士が接するため、それぞれの電磁鋼板は絶縁状態である。つまり、放電加工する場合、電磁鋼板同士及び加工テーブルが電気的な接続状態となるようにする必要がある。
- ③絶縁被膜を上下面に有する電磁鋼板をワイヤ放電加工する場合、ワイヤ電極を電磁鋼板の断面にアプローチし、加工テーブルと電気的に接続した鋼板部分が加工されるようにする。
- ④鋼板部分は放電現象により加工が進行されるが、絶縁被膜部分はワイヤ電極により切裂きながら進行すると考えられる。このため、積層する電磁鋼板の隙間が均一になるように、ボルトによる固定を実施した。また、電極ワイヤの断線対策として、ワイヤ放電加工機を以下のように調整した。

- ①単発放電電流を小さく設定
- ②放電間隔を大きく設定
- ③電極ワイヤと被加工物の間隔を大きくするため、平均加工電圧を高め設定した。

上記に調整を行うことで、電磁鋼板の絶縁被膜を未処理のまま、安定な加工条件を得ることができた。電磁鋼板の絶縁被膜を未処理のまま加工できた要因として、

- ①絶縁被膜層が非常に薄いため、トンネル効果により放電現象が発生した。
  - ②放電エネルギーにより、絶縁被膜が破壊された。
  - ③加工粉末及び加工液の分解による炭素が絶縁被膜表面に付着して導電性が得られた。
- などが考えられる。

#### 3.2 加工液による加工速度の改善

浸漬法でワイヤ放電加工する場合、被加工物を加工液中に浸漬し、加工時にはワイヤ電極の上下ノズルから加工液を加工部位に噴きつける。これにより、加工屑の排出性が増し、加工が安定する。加工液による効果を確認するために、上下のノズル位置と電磁鋼板塊との間隔を 10mm と 0.1mm の 2 種類について、評価試験を行った。

その結果、上下のノズル位置と電磁鋼板塊との間隔隙間を 0.1mm にした場合は、隙間 10mm の場合に比べ、加工速度を 60% 程度向上することができた。

#### 3.3 レーザ溶接による加工速度改善の検討

モータ鉄心となる電磁鋼板を積層し、ワイヤ放電加工により切断する場合、積層された鋼板の隙間に加工粉が滞留することや鋼板間の電気抵抗の安定性などの原因により、ワイヤの断線や、加工速度が不安定となる現象が発生する。そこで、積層された鋼板の側面をレーザー溶接により接合し、ワイヤ放電加工時の加工特性の変化について検討した。

レーザー溶接は、他の溶接方法と比べて溶接幅が狭く溶接深さが大きいという特徴があり、切断加工と並んで多くの産業分野で活用されている。最近では、高出力炭酸ガスレーザー溶接 (40kW 級) において溶け込み深さ 35mm (炭素鋼材) の溶接事例なども見られる。本実験では、三



Fig. 4 レーザ溶接した試料 (10 箇所)

菱電機株式会社製炭酸ガスレーザー加工機 806T (3 kW) を使用した。電磁鋼板を積層し、押さえ板でサンドイッチ構造とした被加工材をレーザー工機テーブル上に立てて固定し、材料端面と平行にレーザーヘッドを直線走査し、溶接実験を行った。Fig. 4 は、レーザー溶接評価試料を示している。今回の実験では、積層鋼板間の電気伝導度の確保が目的であるので、巻き込みや引け(アンダーカット)などの溶接不良が若干生じたとしても、溶融断面積(溶け込み面積)を重視し、加工条件を設定した。通常の切断では、金属の燃焼と吹飛ばしを促進するために、酸素や空気をレーザースポットに高压で吹き付けるが、溶接の場合は、アルゴンガスを低圧で吹き付け、溶接部を不活性ガスで覆うことで酸化を防止するようにした。Fig. 5 は、各条件による溶融断面の写真を表している。レーザー出力が 1300W では、かなりのひげが生じた。また、ガス流量 20L/min では、巻き込みによる空隙が多く観察された。レーザー出力が 1300W では、表面が荒れ深い「ひげ」が生じているが、ひげ量を差し引いても最大の溶融断面積・溶融深さを示した。

Fig. 6 にレーザー出力、ガス流量と溶融断面積・溶融深さの関係を示す。レーザー出力 1000W 加工速度 700mm/min の場合は、ガス流量が少ないほうが良好な結果が得られた。また、レーザー出力 800W 加工速度 500mm/min の場合、ガス流量が多いほうが、わずかに良好な結果が得られた。また、今回の溶接加工では、同一条件での加工状態のばらつきが大きく、特にレーザー出力が大きいほどまた、ガス流量が大きいほどこのばらつきが大きくなる傾向が観察されたので、最終的にワイヤーカット加工試験に使用するレーザー溶接条件は、レーザー出力 800W、加工速度 500mm/min、ガス流量 13L/min とした。

得られたレーザー溶接条件により、電磁鋼板塊側面をレーザー溶接した。レーザー溶接数をなし、1、5、10 箇所を試料を作成して、ワイヤ放電加工機で加工を行い、溶接数の及ぼす影響について調べた。Fig. 7 は、同じ加工条件での、側面の溶接数とワイヤ放電加工機の平均加工電圧を示している。溶接数が増大するに従い、加工電圧が高くなっていることが分かる。ワイヤ放電加工では、一般的に、安定した一定の加工電圧(平均的目安: 35~45V の範囲でほぼ一定の値)で加工することから、加工電圧が高い値を示す場合、加工速度を早く設定することができる。つまり、電磁鋼板の側面を溶接により、電気的に接続することで、加工速度の向上を図れることが明らかになった。

今回の実験結果から、試料の電磁鋼板塊の場合、溶接数を 10 箇所にした場合、30% 程度の加工速度の向上が可能であることが分かった。

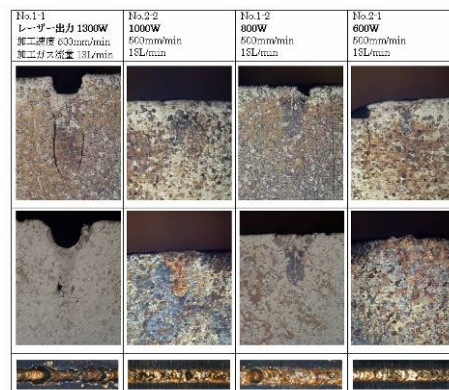


Fig. 5 溶接条件と溶接断面写真

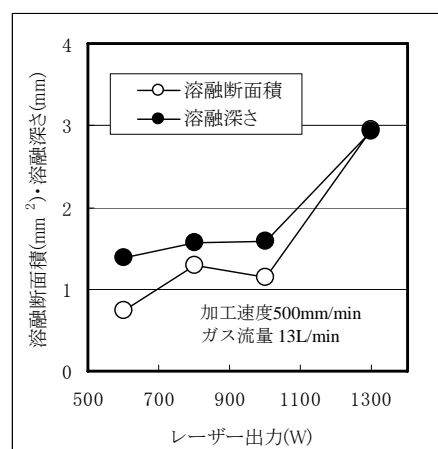


Fig. 6

レーザー出力と溶融断面積・溶融深さの関係

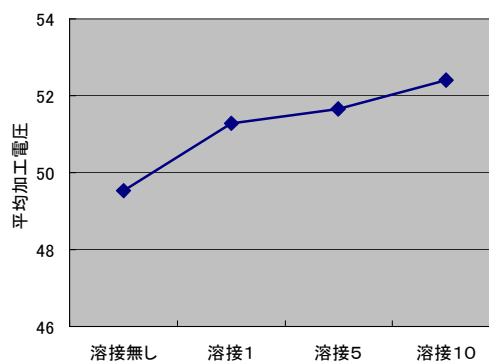


Fig. 7 側面の溶接数と平均加工電圧の関係

#### 4. ワイヤ放電加工による磁気特性評価

ワイヤ放電加工による磁気特性評価をするために、リング試料による磁気特性評価を行った。電磁鋼板をリング状に幅を変えてワイヤ放電加工し、磁気特性変化を測定した。

内径 30mm、リング幅 0.5mm、1mm、2mm、5mm の試料を製作して、周波数 60Hz の交流電源によって、磁化を行い、発生する誘起電圧を測定して、磁束密度を求め



た. Fig. 8 は, 製作したリング試料を示している. リング試料を 28 枚積層して製磁気特性測定試料を製作した. コイルの巻数は, 入力側, 誘起電圧側, それぞれ, 40 回巻とした.

磁化は, 交流電源 100V をスライドトランス (TYPE RAS-20 東京理工舎製) により交流電圧の調整を行い, コイルに電流を流すことで行った. コイル電流は, 抵抗 4Ω を入力コイルに直列に入れ, 抵抗 4Ω の両端電圧を測定することで求めた. 電圧測定には, HIOKI8825 MEMORY Hi CORDER(日置電機社製)を使用した.

Fig. 9 は, 磁気特性測定回路を示している.

励磁用電源により, リング試料に巻いた巻線数  $N_1$  回の 1 次コイルに電流  $I$  を流すと, この電流により発生する磁界力  $H$  (A/m) は,

$$H = N_1 I / L \quad L: \text{磁路長}$$

巻線数  $N_2$  回の 2 次コイルに誘起される電圧  $V$  は

$$V = N_2 S \cdot (dB / dt)$$

$S$ : 試料の断面積  $B$ : 磁束密度

この電圧  $V$  をコンデンサ  $C$ , 抵抗  $R$  の積分回路に入力すると, 出力電圧  $V_2$  は,

$$V_2 = 1 / (RC) \cdot \int V dt = N_2 SB / (RC)$$

電圧  $V_2$  は, 磁束密度に比例した量となる.

磁気特性の測定では, 電流  $I$ , 電圧  $V_2$  を測定して,  $B-H$  曲線を求めた.

Fig. 10 は, 磁気特性の測定結果を示している. リング幅 5mm で得られた磁束密度(磁化力 1000 A/m時)と基準して(100%として), リング幅 2mm で 95%, リング幅 0.5mm で 70%の磁束密度が得られた.

レーザ加工による磁気特性<sup>(3)</sup>との比較を行った. 測定装置, 測定条件, 測定に使用した電磁鋼板が異なるため, リング幅 5mm で得られた磁束密度を基準として, 各リング幅で得られた磁束密度の割合で比較評価を行った.

加工による影響が無ければ, リング幅を変更しても磁気特性は変化しない. しかし, 実際には, 加工端面から一定の範囲に, 加工による残留応力の影響により, 磁気特性の劣化する領域が発生する. このため, リング幅を小さくするほど, 磁気特性の劣化が発生する領域が, リング全体に占める割合が増加するため, 得られる磁束密度は低下する.

このため, 比較評価では, リング幅 5mm を基準として, リング幅 2mm, 0.5mm で得られる磁束密度の割合で評価を行った. 割合と値が大きいほど, 加工による影響が小さいことになる.



Fig. 8 製作したリング試料  
(左 リング幅 0.5mm 右 リング幅 1mm)

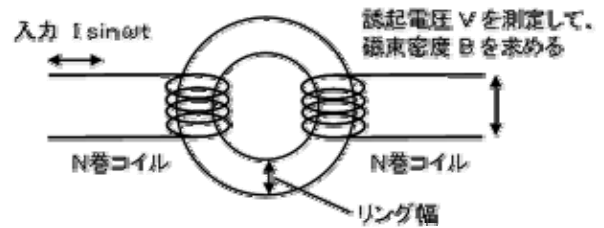


Fig. 9 磁気特性測定回路

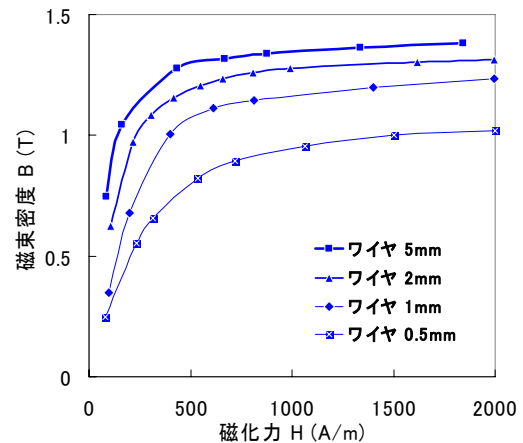


Fig. 10 ワイヤ放電加工による磁気特性の測定結果

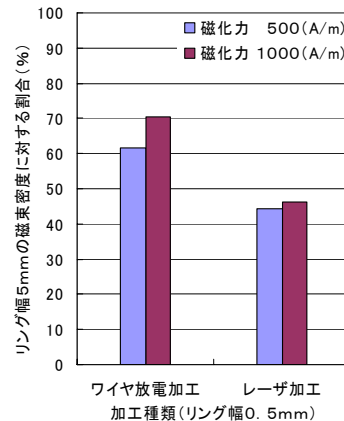


Fig. 11

ワイヤ放電加工とレーザ加工の磁気特性の比較

Fig. 10 は、磁気特性の測定結果を示している。リング幅 5mm で得られた磁束密度（磁化力 1000A/m 時）を基準として（100%として）、リング幅 2mm で 95%、リング幅 0.5mm で 70%の磁束密度が得られた。

レーザー加工による磁気特性との比較を行った。測定装置、測定条件、測定に使用した電磁鋼板が異なるため、リング幅 5mm で得られた磁束密度を基準として、各リング幅で得られた磁束密度の割合で比較評価を行った。

加工による影響が無ければ、リング幅を変更しても磁気特性は変化しない。しかし、実際には、加工端面から一定の範囲に、加工による残留応力の影響により、磁気特性の劣化する領域が発生する。このため、リング幅を小さくするほど、磁気特性の劣化が発生する領域のリング全体に占める割合が増加するため、得られる磁束密度は低下する。

Fig. 11 は、その比較結果を示している。磁化力が 500A/m、1000A/m 時に、リング幅 5mm で得られた磁束密度を基準（100%）として、リング幅 0.5mm で得られた磁束密度の割合で比較を行った。

ワイヤ放電加工の方が、レーザー加工より高い値（割合）を示しており、加工による磁気特性の劣化が小さいことが分かる。リング幅 0.5mm では、約 25%（磁化力 1000A/m）高い値が得られた。

## 5. まとめ

小型高効率モータの開発を目的に、モータ鉄心のワイヤ放電加工による無歪み加工を行い、試作モータ 3,4 号機の鉄心加工を行った。

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 のモータ鉄心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の落下防止するために、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。

加工速度の改善を目的に、加工液のノズル位置と電磁鋼板塊の間隔を小さくする（0.1mm）ことで、約 60%程度加工速度が向上できた。また、レーザー溶接により、電磁鋼板塊の側面を溶接することで、平均加工電圧が高くなり、約 30%程度の加工速度向上ができることが分かった。

リング試料を作成して、磁気特性の評価を行い、レーザー加工より低歪加工ができることが分かった。

## 参考文献

- (1) 河野 雅昭, 千田 邦浩, 早川 康之: 川崎製鉄技報 35 (2003) 1, 1-6
- (2) 向山 芳世, 緒方 勲, 日原 政彦: 電気加工技術, 第 21 巻 No.24(1986)
- (3) 桐山 博之他: 松下テクニカルジャーナル Vol.44 No2 pp.121 ,Apr (1998)