

5) にせん断した試験片での磁気特性を用いてモータ鉄損を計算し、その計算値に及ぼす加工による磁気特性変化の影響を評価した。その結果につ

積されていると考えられるが、打抜き・せん断加工による磁区構造の変化は、板厚の約2倍程度まで生じていて、塑性ひずみが蓄積されている領域から鋼板内部側にも磁気特性に影響する弾性ひずみが付与されている領域があると報告されている^{9,11)}。それにも関わらず、せん断端面のたれ高さや鉄損劣化率の相関がよかった理由としては、鉄損劣化には塑性ひずみの影響が大きいこと、あるいは、加工による塑性ひずみの大小が弾性ひずみの大小にも反映することが考えられる。今後、これらを明確にするために、応力分布の測定や応力解析計算などの検討が必要と考える。

3. IPMSM の鉄損計算に及ぼす 打抜きによる磁気特性変化の影響

が 10 , ヨーク幅が 5.4 4 μB3 M G — It •...D...

3.1 実験方法

検討に用いた IPMSM の諸元を表 1 に示す。ロータ 12 極、ステータ 18 スロットであり、巻線方式は集中巻である。表 2 にステータ鉄心に用いた材料のエプスタイン試験片での磁気特性を示す（圧延方向と圧延直角方向の平均値）。硬さがほぼ同じで板厚が異なる 5 種類の無方向性電磁鋼板を供試材にした。なお、ステータ鉄心素材の影響を明確にするため、ロータはすべての測定を通じて同一のものをを用いた。

ステータは分割コアであり、図 9 に示すように素材の圧延方向（L 方向）がティース径方向と一致するように電磁鋼板を打抜いて使用した。したがって、ヨーク部周方向はほぼ素材の圧延直角方向（C 方向）に対応する。ティース幅

$$P_t = k f B^\alpha K(B) + (\sigma/12 \chi d^2 f/\delta) \int_{1/f}^t (B/t)^2 t + k f \int_{1/f}^t |B/t|^{1.5} t \dots\dots\dots (2)$$

$$K(B) = 1 + (0.65/B) \chi \Delta B_i \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ΔB_i はマイナーループ内での磁束密度の変化、 B は磁束密度の最大値、 f は周波数を示す。 σ 、 δ 、 d は各々、鋼板（鉄心）の電気伝導度、質量、板厚を表す。また、 k と α はヒステリシス損係数、 k は異常渦電流損係数である。回転磁界による鉄損は、モータの周方向と径方向別に鉄損を算出した後、両者を足し合わせることで求めた。

上記の鉄損係数および磁化曲線（ $B-H$ 曲線）は、30幅のエプスタイン試験片、およびステータ形状幅とほぼ同じ試料幅（10、5）の試片から求め、各々の結果を表3に示すように用いた。一例として素材Cの場合に、せん断幅の違いが磁化曲線に及ぼす影響を図11に示すが、せん断幅が狭くなると、低磁場から中磁場にかけての磁束密度の低下が顕著であることがわかる。したがって、鉄損のみではなく磁化曲線の影響を調べるために、上記条件での計算を行った。

また、モータ形状と電磁鋼板の打抜き方向を考慮して、いずれの場合もティース部にはL方向、ヨーク部にはa

参考文献

- 1) 山本, H.; Kato, K.; Hara, H. "Effect of Ductility on the Eddy Current Loss in a Transformer Core." *IEEE Trans. Magn.* 46(10), 299-309, 2010.
- 2) 山本, H.; Kato, K.

外部駆動により 5000 rpm で本モータを回した場合の無負荷トルクを、トルクメータを用いて測定し、無負荷トルクからモータ損失を求め、機械損を差し引くことにより焼きばめ前の無負荷鉄損を求めた。その後、ステータをアルミニウム合金製のケースに焼きばめ代 30 μm で焼きばめ、焼きばめ後の無負荷鉄損を測定した。

焼きばめ前後の無負荷鉄損測定結果を表 4 に示す。磁歪の大きい 3% 鋼では、焼きばめによりモータ鉄損は約 2 割増加した。一方、磁歪がほぼゼロである 6.5% 鋼では、焼きばめによる鉄損劣化がほとんど認められなかった。

以上の結果から、圧縮応力下の鉄損劣化を抑制するためには電磁鋼板の磁歪を低減するのが効果的であることが明らかになった。特に磁歪がほぼゼロになる 6.5% 鋼では圧縮応力付与による鉄損劣化はほとんど認められないことから、今回実験を行なった範囲内の電磁鋼板では、焼きばめなどの圧縮応力が加わるモータ用材料として最適であるといえる。

5. おわりに

モータ設計の高精度化には、モータ製造工程に付随する加工や組み立て時の鉄心の磁気特性劣化を把握すること、モータ効率向上には、その際の劣化量を低減することが必要である。その観点に基づき、本論文では下記を明らかにした。

- (1) せん断・打抜き加工時の鉄損劣化抑制には、無方向性電磁鋼板の高硬度化や薄板化、すなわち高グレード電磁鋼板の適用が有効である。
- (2) 打抜きままの電磁鋼板を鉄心素材として用いる場合、磁界解析を用いたモータ鉄損計算の精度向上には、実際のモータ形状を反映した鉄損と磁化曲線を適用することが必要である。
- (3) 圧縮応力下の鉄損劣化割合は磁歪と相関があり、磁歪を低減することにより、鉄損劣化を抑制することが可能になる。磁歪がほぼゼロである 6.5% 鋼では、圧縮応力付与による鉄損増加は非常に小さく、焼きばめモータでもそのことを確認した。

