

電磁鋼板利用技術のための電磁界解析・モータ計測技術

Electromagnetic Field Analysis and Motor Measurement for Application Technology
of Electrical Steel Sheet和嶋 潔*
Kiyoshi WAJIMA平山 隆
Ryu HIRAYAMA大杉 保郎
Yasuo OHSUGI

抄 録

無方向性電磁鋼板は、小型かつ高効率なモータを経済性良く実現できることから、回転機の鉄心材料として広く使用されている。近年の環境志向、エネルギー高効率利用の要請に従って、高性能な電磁鋼板が開発されているが、このような優れた電磁鋼板の特性を十分に引き出すためには利用技術も重要である。電磁鋼板の利用技術の基盤となるモータの鉄損解析技術、及びモータ評価の事例について紹介した。

Abstract

Non-oriented electrical steel (NO) is widely used as motor cores since it economically meets requirements for size reduction and efficiency improvement of motors. The demand of global environmental protection and economical use of energy has promoted developments of new NO products with improved properties. In order to make full use of the superior characteristics of such products, the application technology is also important. In this paper, we introduce examples of iron loss analysis methods and motor testing as the basis of development of application technology.

1. 緒 言

モータの鉄心材料には、無方向性電磁鋼板 (NO) が多く使用されており、燃料電池自動車や電気自動車の駆動モータやエアコン用コンプレッサモータなど、高性能・高効率モータに対応するための NO 材が開発されている。鉄心材料において、まず要求される代表的な性能は、磁化特性向上と鉄損低減である。NO 材の特性には、合金成分や結晶粒径・方位、鋼材の清浄度、鋼板の内部歪み等が影響するが、これらは往々にして磁化特性と鉄損に対して相反する効果を及ぼす。このため、高性能 NO 材は、磁化特性と鉄損とのバランスを勘案しつつ、複数の金属学的手段を駆使することで実現されている。

一方で、このような電磁鋼板の優れた特性を活用してモータ性能を改善するためには、実際のモータ鉄心の使用状態に起因する様々な劣化要因 (ビルディングファクター) を軽減する利用技術も重要である。鉄損のビルディングファクターには、①磁束分布、②回転磁束、③時間高調波、④空間高調波、⑤重畳磁束、⑥歪/応力、⑦層間短絡、⑧温度が知られている。種々の解析評価技術を用いて、実使

用状態のモータ損失の内訳と発生要因を明確化することによって、機器性能向上のための対策を検討することが電磁鋼板利用技術の要諦である。

本報告では、利用技術を実現するための基盤となる電磁場解析とモータ評価技術を紹介する。第2章では、インバータ駆動モータの鉄損増加要因となる時間高調波と空間高調波の重畳磁束による鉄損を高精度かつ実用的な時間で計算する手法について述べる。モータ電磁場解析手法は、近年、著しい進歩を遂げているが、ビルディングファクター全てを考慮してモータ性能を推定するには、計算コストなど実用上の課題があり、各種 NO 材を適用したモータ特性の最終的な評価には、実測が必要である。第3章では、新しく開発された NO 材を誘導モータに適用評価した事例について述べる。

2. 高調波磁束密度励磁下での鉄損解析方法

IPMSM (埋め込み型永久磁石モータ) をはじめとする高効率モータの磁気回路設計には、今や電磁界解析が不可欠である。モータコアとしての電磁鋼板には、スロット高調波やインバータ電源によるスイッチングなど、様々な高調

* プロセス研究所 計測・制御研究部 上席主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

波磁束が作用する。これらはモータ鉄損の増加要因であることから、モータ電磁界解析技術の研究において、高調波磁束励磁下での鉄損計算高精度化は、重要な課題である。一方、高度設計を目指した精度の高い解析を行う場合、モータコアである電磁鋼板の特性を適正にモデリングすることが重要となる。特に複数周波数の高調波重畳磁束が作用した場合の無方向性電磁鋼板は、磁化挙動が複雑になることから、実測データで検証を行いながら進める必要がある。ここでは実モータに相当する様々な高調波成分を有する磁束密度で励磁されたリング試料の鉄損を実測し、各種鉄損計算手法の精度検証を行った。

2.1 高調波磁束密度励磁下での鉄損測定

図1に示す磁気特性測定装置を用いてモータの空間高調波とインバータ高調波の双方を含む磁束密度波形でリング試料を励磁し、鉄損を測定した。本装置は、任意の励磁電圧波形で試料を励磁することが可能であり、ここでは、電気学会ベンチマーク用Dモデルとして知られる図2に示す

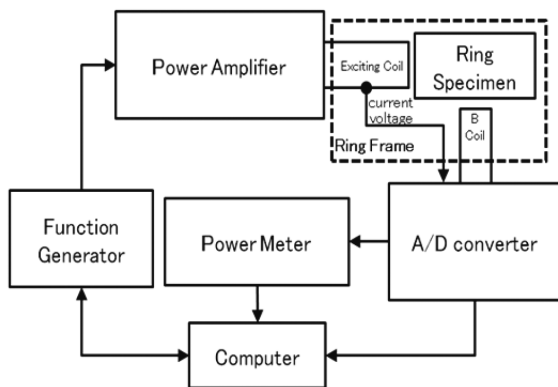


図1 高調波磁束密度励磁リング測定装置概要
Diagram of measurement system of ring core excited by PWM voltage waveforms which causes arbitrary magnetic flux density B waveforms

IPMSMのステータコア磁束密度波形を例に選び、この磁束密度波形に相当する電圧波形でリング試料を励磁することでモータ高調波の影響を考慮した。さらにこの電圧波形にPWM (Pulse Width Modulation) 波形生成ロジックを適用したインバータ電圧でリング試料を励磁し、各種高調波影響を加味した鉄損測定を行った。なおリング試料と実モータコアは磁気回路が異なるため、本測定で得られた鉄損値は実モータとは異なるが、磁気回路中に空隙ギャップのないリング試料の鉄損計算は、空隙の磁気抵抗影響が支配的なモータより電磁鋼板鉄損の計算精度が直接影響するため、計算法の検証には好適と言える。

図3は、歪み波形、及びキャリア周波数5kHz、変調率1.0と0.4のインバータで励磁したJIS 35A300リング試料(外径47mm,内径33mm,コア厚7mm)のヒステリシスである。励磁が歪み波からインバータ高調波、さらに高調波成分の多い変調率0.4インバータとなるに伴い、ヒステリシスループが拡幅し、鉄損が増大している挙動が見て取れる。これは典型的な渦電流による鉄損増加時の挙動であることから、高調波磁束密度下での鉄損増加は渦電流損が主要因と考えられる。検証に用いた磁束密度波形は、様々な周波数成分を含むため、文献²⁾のような二周波法による鉄損分離は行っていないが、インバータ励磁による鉄損評価でもマイナーループによるヒステリシス損失の増加影響は限定的との報告³⁾もされており、渦電流損推定精度を向上させるモデリングを適用することが、高周波磁束励磁下での鉄損計算精度改善には有効と考えられる。

2.2 各種鉄損計算モデルの精度評価

実測結果を検証するため、渦電流のモデリング精度が異なる3種類の鉄損モデル⁴⁻⁶⁾について、高調波励磁リング試料の鉄損実測値と比較した。電磁鋼板はJIS 35A210, 35A300, 50A470, 50A1300の4鋼種、それぞれでリング

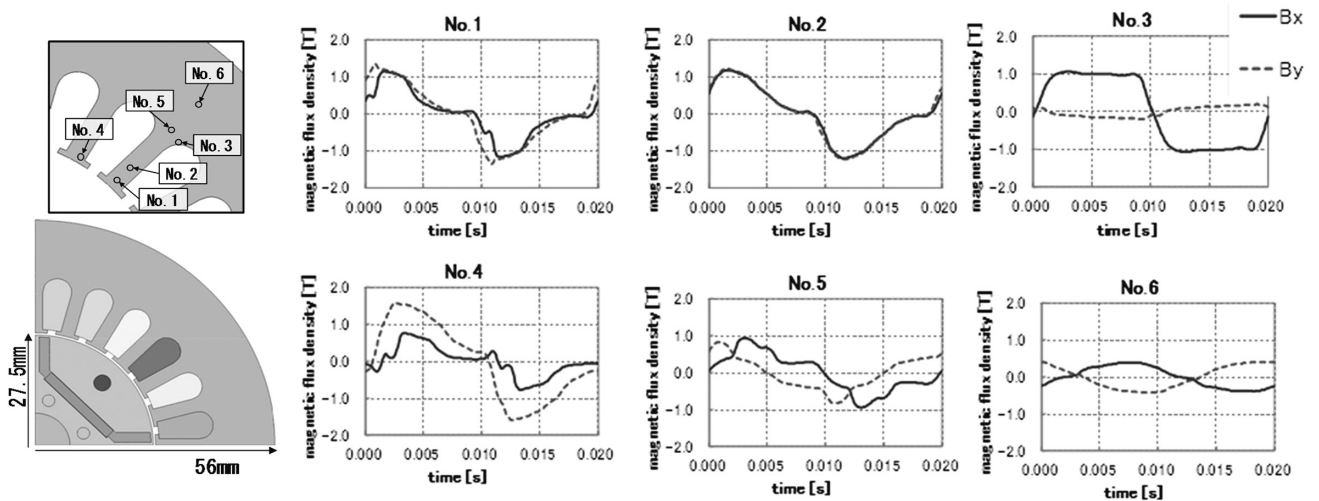


図2 測定に用いた歪み磁束密度波形(電磁場解析による電気学会Dモータコアの推定波形)
Distorted magnetic flux density B waveforms in the stator core of the IPM motor estimated by FEM

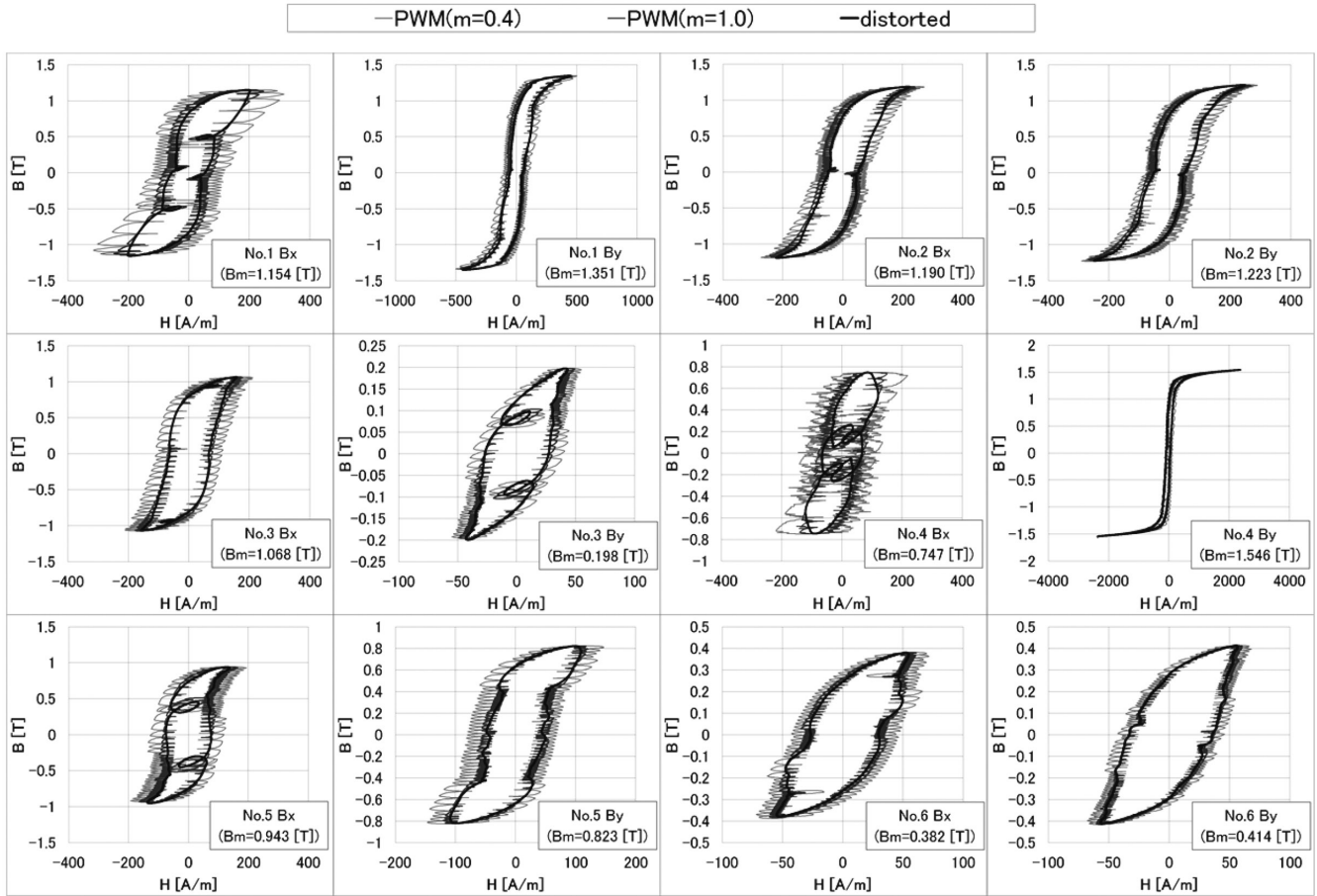


図3 モータ高調波とインバータ高調波重畳波形で励磁されたリング試料 35A300 のヒステリシスループ
Hysteresis loops of 35A300 excited by distorted B waveform and PWM voltage (m=1.0 and 0.4)

を作製し評価している。

精度を評価した鉄損モデルは、以下の通りである。

(a) Model-A: 電磁界二次元解析で各有限要素メッシュの磁束密度波形 B を算出し、ヒステリシス損 W_h は式 (1)、渦電流損 W_e は式 (2) で算出する⁴⁾。なお他の鉄損モデルにおいてもヒステリシス損 W_h は共通して (1) を適用した。

$$W_h = \frac{K_h}{T} \sum_{j=1}^N Bp_j^{1.6} \quad (1)$$

$$W_e = \frac{K_e}{2\pi} \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^2 dt \quad (2)$$

ここで K_h , K_e はスタインメッツ係数, Bp はメジャーループ及びマイナーループ磁束密度振幅, T は基本周期である。本手法は、電磁鋼板の板厚方向に渦電流に様に分布するとした最も基本的なモデリングである。

(b) Model-B: 電磁鋼板を板厚方向にも要素分割して、三次元渦電流場解析を行い、鋼板内の磁束密度と渦電流密度 J_e を算出して式 (3) で渦電流損を算出する⁹⁾。本手法は、精度は厳密である反面、計算コストが掛かる点が課題である。

$$W_e = \kappa W_e' = \kappa \frac{1}{T} \int_0^T \int \frac{J_e^2}{\sigma} dV dt \quad (3)$$

ここで κ は異常渦電流損係数で、二周波法で推定された渦

電流損実測値と古典渦電流損の比から求められる。また σ は電磁鋼板の導電率である。

(c) Model-C: 二次元電磁界解析で求めたベクトルポテンシャル A を境界条件に式 (4) の板厚 z 方向一次元方程式を解いて A の板厚方向分布を推定し、電磁鋼板の渦電流密度は式 (5) の一次元方程式で算出する⁹⁾。渦電流損は式 (5) で得られた J_e を式 (3) に代入することで算出する。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (4)$$

$$J_e = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (5)$$

ここで μ は電磁鋼板の透磁率であり、(4) の計算においては板厚方向に様に仮定されている。実際のインバータ励磁下の電磁鋼板では透磁率は板厚方向にある程度分布していると推定されるため、仮定が計算値に及ぼす精度影響を実測と比較評価することが必要である。

図4に各鉄損モデルによる計算鉄損と実測値の散布図を示す。最も鉄損増加量が多いインバータ変調率 0.4 の場合を記載している。様々なグレードの電磁鋼板及び波形の組み合わせにおいても、Model-A は相対的に誤差が大きく、Model-B 及び C は精度が高いことが確認できる。図5は、マイナーループや飽和波形、モータ高調波成分など複雑な

波形で励磁された場合について各鉄損モデルの実測との誤差を整理したものである。Model-Aは鉄損値を過大評価しており、このモデルでは考慮されていない電磁鋼板内の表皮効果の影響が無視できないことを示している。Model-Bは一貫して高い精度を維持しており電磁鋼板内の渦電流挙動の正確な推定が鉄損の高精度化に有効であることを実証する結果が得られた。Model-Cは実用的には十分な精度を有しており、計算時間の観点からも検討した3つの手法の中で、実モータ解析に最も実用的なモデルと言える。

この取り組みを通して、インバータ駆動モータコアの鉄損推定には、電磁鋼板の渦電流損の計算モデルが重要であり、評価した3つの鉄損計算法の中では、計算精度と計算

時間の観点から、二次元静磁場解析と一次元渦電流計算の併用法である Model-C が実用性が高いことが確認できた。

3. 高磁束密度電磁鋼板の誘導モータ評価

世界電力の約半分はモータで消費され、その大半は産業用モータが占める。このため、例えば日本では2015年4月より、産業用に多い三相誘導モータのトップランナー規制が開始されるなど高効率化が要求されている。誘導モータでは、永久磁石を使用しないため、トルク発生に必要な機内磁束を全て巻線電流による励磁から発生しなければならない。したがって、誘導モータ用の電磁鋼板には、磁束密度特性が優れた材料が要求されるとともに、経済性も重視される。このような背景の下、誘導モータの効率改善に寄与できる材料として、図6に示す高磁束密度 NO 材が開発されている⁷⁾。同等の鉄損値 W15/50 を有する JIS グレードの従来材⁸⁾と比較して、新開発材では磁界強度 5000 (A/m) を印加した条件下の磁束密度 B50 が 0.02 ~ 0.05 (T) 高い特性を有しており、少ない電流で高い磁束密度を得ることができる。これら新開発材料のモータ適用効果を確認するため、誘導のステータコア材料を変更してモータを作製し、モータ試験装置にて各誘導機の効率を評価した⁹⁾。

3.1 試験装置及び実験方法

表1に供試モータ仕様を示す。供試モータは、三相かご型誘導機とし、かご型の二次導体は、アルミニウムで作製して、エンドリングとロータバーを、ろう付けにより接合している。ロータコアの電磁鋼板は、図6に示す 50H-CH を使用した。ステータは、開発材である 50H-CL、50H-CH と比較材として JIS グレード材 50H470 の3台を製作し、試験を行った。実際に、モータ作製に用いた材料の諸特性

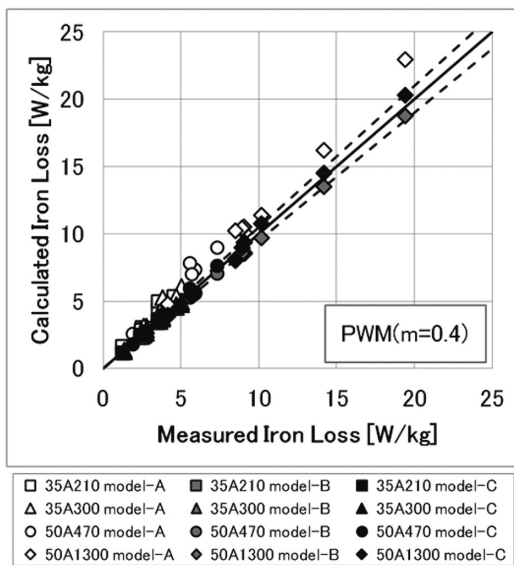


図4 鉄損計算値と実測の散布図 (変調率 0.4)
Measured and calculated iron losses excited by PWM voltage waveform (m=0.4)

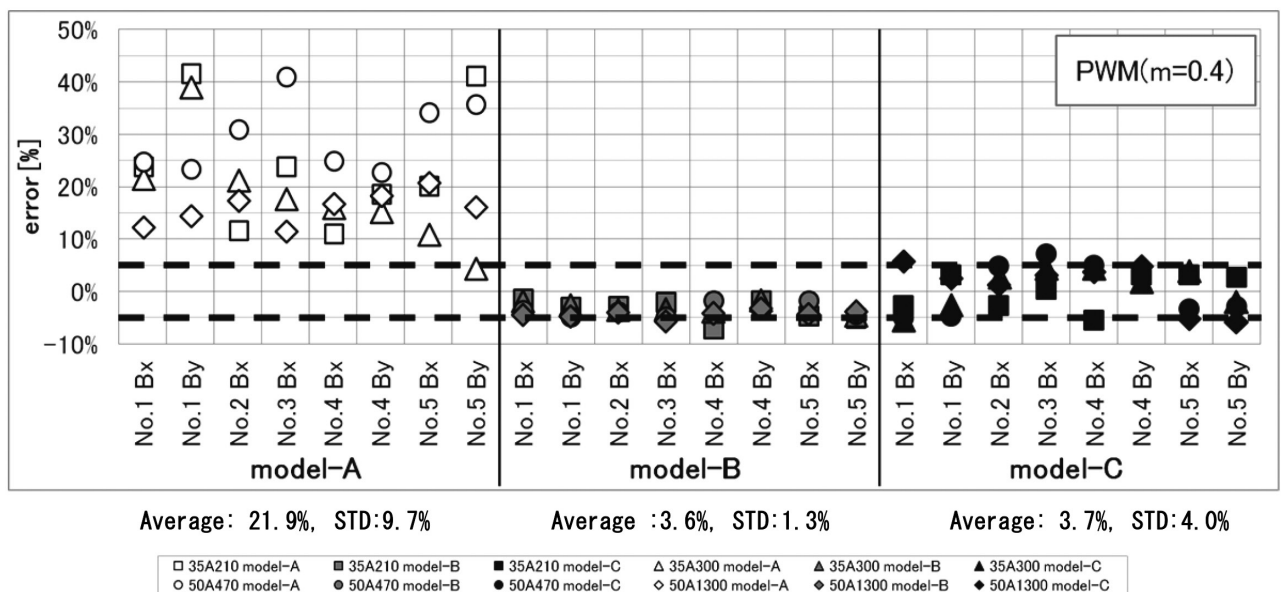


図5 各鉄損計算モデルの誤差 (インバータ波形率 0.4 の場合)
Calculation errors of each iron loss model. Iron losses excited by PWM voltage waveform (m=0.4)

を表 2 に示す。

図 7 に試験装置の構成図を示す。インバータ電源より三相交流を印加し、供試モータを駆動する。モータ出力の算出に必要な回転数とトルクは、トルク計で計測する。誘導機への入力電流、電圧を測定し、電力計に入力する。供試モータステータ巻線には、熱電対を 1 箇所備え付け、銅損測定のための温度測定を行った。

モータ特性の測定は、インバータ電源駆動による負荷試

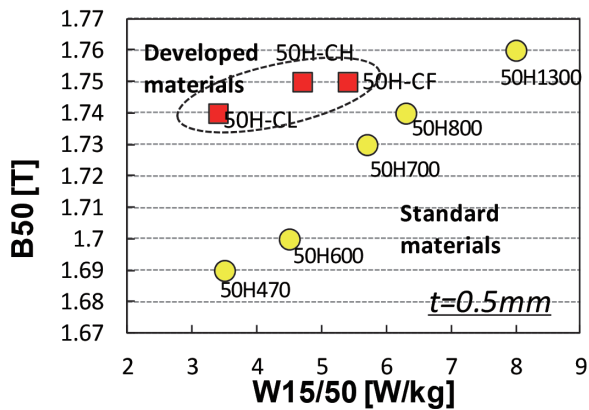


図 6 高磁束密度無方向性電磁鋼板の鉄損、磁束密度 Iron loss and magnetic flux density of the newly developed non-oriented electrical steel sheets and the conventional standard materials

表 1 試験用誘導モータの仕様 Specifications of tested induction motor

Number of phases	3
Number of poles	4
Rated output	500 W
Voltage	200 V
Number of slots	Stator: 24, Rotor: 19
Stator slot shape	Open
Rotor slot shape	Semi closed
Skew	Non skewed
Connection of stator coil	Star

表 2 モータ試作材の諸特性 Material properties for tested core materials

	Density (kg/dm ³)	W15/50 (W/kg)	B50 (T)	Hardness
50H-CL	7.80	3.48	1.74	127
50H-CH	7.80	4.33	1.75	114
50H470	7.70	3.45	1.70	155

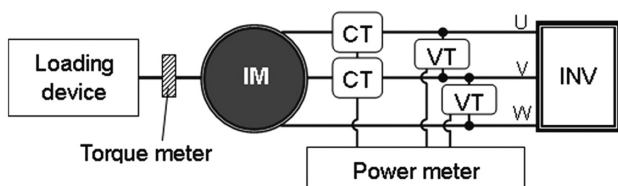


図 7 モータ試験装置の構成図 Composition of measurement system

験にて実施した。入力 P_{in} (W) は、電力計の電圧と電流の積から算出し、出力 P_{out} (W) は、トルク計で計測される回転速度 N (rpm) とトルク τ (Nm) の積から算出する。一次銅損 W_1 (W) は、20℃で測定したステータコア内部抵抗値 R_1 (Ω) をベースに、熱電対により測定された一次巻線温度 t (℃) を考慮して補正した。

鉄損 W_{iron} (W) と二次銅損 W_2 (W) の和は、入力から出力、一次銅損、機械損 W_m (W) を減ずることで求められるので、次式により算出した。

$$W_{iron} + W_2 = P_{in} - P_{out} - W_1 - W_m \quad (6)$$

なお機械損は、別途測定を行った結果、1500 rpm にて 1.9 W であった。

試験評価は、商用周波数で駆動される産業用モータを想定して、回転数 1500 rpm 一定 (= すべり 0 の同期運転の場合、電源基本周波数は 50 Hz)、トルクを 0.5 Nm (低トルク)、2.5 Nm (定格トルク)、4.0 Nm (高トルク) の 3 水準で実施した。試験に際しては、出力すなわち回転数を 1500 rpm 一定とするため、トルクに応じて励磁周波数を変更した。

3.2 実験結果と考察

図 8 に各トルク条件におけるモータの一次電流値を示す。高磁束密度の特性を有する 50H-CL は、50H470 に対して 3.1 ~ 4.6% 低い電流で同一のトルクを出力可能である。これは、銅損換算で 6.9 ~ 9.0% の改善に相当する。同様に 50H-CH は、50H470 に対して 1.9 ~ 4.9% 低い電流で同一モータ出力を実現可能であり、銅損換算で 3.7 ~ 9.6% であった。これは図 6 に示す磁化特性の改善によるものであり、新開発高磁束密度材が、モータの一次銅損低減でモータ効率改善できることを示している。

次に各トルク条件において 50H470 コアモータを基準として、50H-CL コアモータ及び 50H-CH モータの効率改善量を評価した結果を図 9 に示す。縦軸の値が正の場合 50H-CL 及び 50H-CH モータの効率が 50H470 コアモータより高いことを意味している。50H-CL は、50H470 に対して、0.9 ~ 3.2% の改善が確認できた。特に、低トルク域で 3.2% と大きな改善である。また 50H-CH モータも、50H470 に対

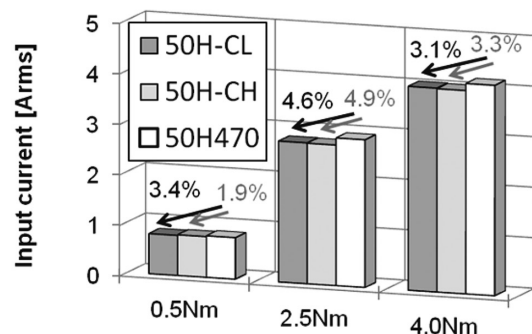
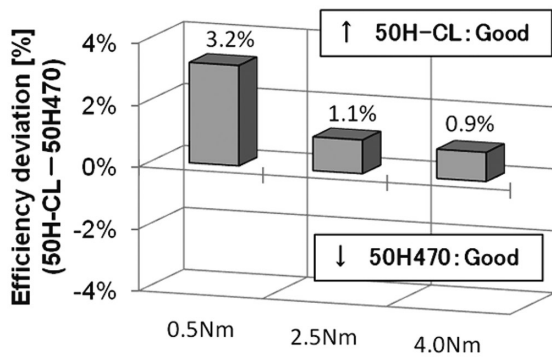
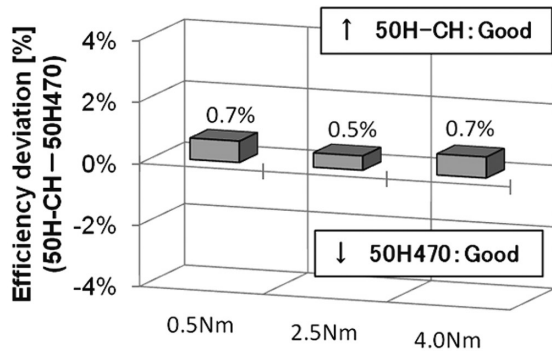


図 8 ステータコア材によるモータ一次電流の推移 Comparison of excitation currents in primary winding of test motors



(a) Efficiency improvement of motor using 50H-CL



(b) Efficiency improvement of motor using 50H-CH

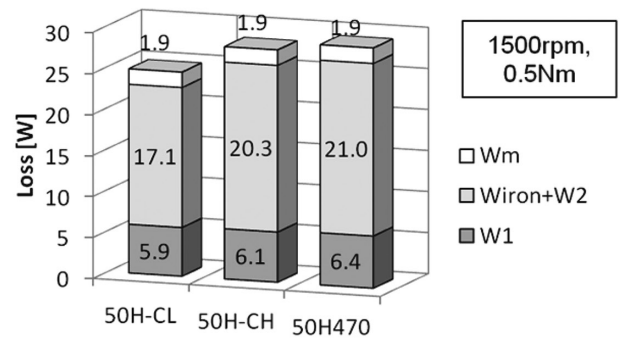
図9 高B材適用によるモータ効率の改善量
Improvement of motor efficiency using the new material core at each operating condition

して、全トルク領域で効率が改善する結果が確認できた。

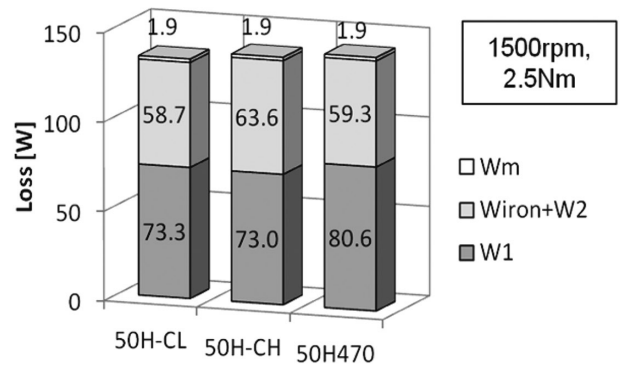
各トルク条件におけるモータ損失の内訳を図10に示す。本実験では、同一のロータを使用し、回転数は一定のため、機械損 W_m は全ての条件で1.9 (W) とした。50H-CL, 50H470 とともにトルクの増加とともに損失の総和が増加する。一次銅損 (W_1)、鉄損+二次銅損 ($W_{iron} + W_2$) ともに増加しているが、特に一次銅損の増加が顕著である。全損失における一次銅損の占める割合は、低トルク (0.5Nm) では20%強であるが、定格トルク (2.5Nm) や高トルク (4.0Nm) では、55%を占める。したがって、定格トルクから高トルクの動作領域におけるモータ効率改善は、この領域で高い割合を占める一次銅損が、高磁束密度特性を有する50H-CL及び50H-CHの適用で低減することが主要因であることが分かる。

一方、低トルクの動作領域では、50H-CLモータは、鉄損+二次銅損 ($W_{iron} + W_2$) が大きく低減し、また鉄損特性値が50H470よりも大きい50H-CH材モータでも改善効果が確認できる。これは、高磁束密度特性によって、ロータの二次銅損が低減する効果が寄与していると考えられる。50H-CL材の場合は、さらに図6に示す低鉄損特性との相乗で大きな改善効果が得られたものである。

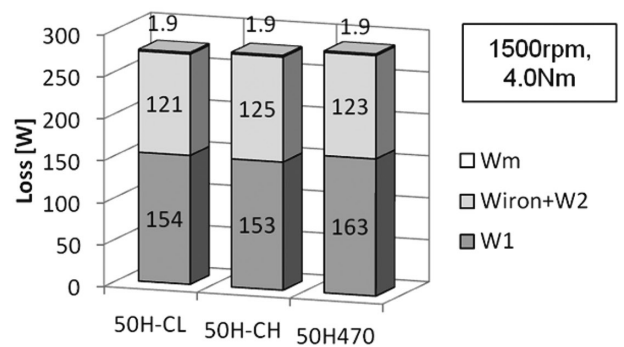
以上、新日鐵住金(株)で開発した高磁束密度-低鉄損材を、産業用モータを想定した商用周波のインバータ駆動テストモータにて評価した結果、より少ない電流で同一のモータ



(a) Motor losses (0.5 Nm / low torque)



(b) Motor losses (2.5 Nm / rated torque)



(c) Motor losses (4.0 Nm / maximum torque)

図10 インバータ駆動誘導モータの損失比較
Comparison of detail of motor loss of test inverter-fed induction motors

タ出力が得られることが確認できた。この銅損低減を主たる改善要因として、各トルクにおいて効率改善していることを確認しており、産業用モータの効率改善に寄与する効果が期待できる。

4. 結 言

本報告では、電磁鋼板利用技術の基盤となる技術の事例紹介として、電磁界解析を応用した鉄損解析技術、及び新開発電磁鋼板の誘導モータ評価について述べた。現在、各社が精力的に開発に取り組んでいる燃料電池自動車や電気自動車の駆動モータを始めとして、今後さらにモータの適用範囲が拡大すると思われる。電磁鋼板は、その優れた特性と経済性からモータコアの代表的な素材であり続けることは間違いなく、モータ側の高度かつ多様な要求特性を満

たすべく、材料及び利用技術の双方で研究開発が推進されていくと考えられる。

謝 辞

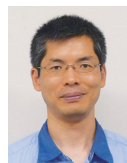
本研究開発を進めるにあたり、数値計算の実行及び実験のサポートをいただいた日鉄住金テクノロジー(株)吉田峻氏に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 和嶋潔, 藤原耕二: Evaluation of Iron Loss Calculation Models for NO Electrical Steel Sheets Excited by PWM Voltage of Distorted Flux Density. 電学マグネティクス/リニアドライブ合同研資 MAG-15-190/LD-15-100, 2015
- 2) 乙女大三郎, 小関祐生, 宮城大輔, 中野正典, 高橋則男, 赤津観, 塩崎明, 河邊盛男: PWM インバータ励磁下における無方向性電磁鋼板の鉄損測定. 電学マグネティクス・静止器・回転機合同研資 MAG-10-32 /SA-10-32 /RM-10-32, 2010
- 3) 小田原峻也, 藤崎敬介, 松尾哲司: 数値解析によるインバータの半導体特性を考慮した磁気特性評価. 電学マグネティクス研資 LD-14-026, 2014
- 4) Domeki, H., Ishihara, Y., Kaido, C., Kawase, Y., Kitamura, S., Shimomura, T., Takahashi, N., Yamada, T., Yamazaki, K.: Investigation of Benchmark Model for Estimating Iron Loss in Rotating Machine. IEEE Trans. Magn. 40 (2), 794-797 (2004)
- 5) Kawase, Y., Yamaguchi, T., Sano, S., Igata, M., Ida, K., Yamagiwa, A.: 3-D Eddy Current Analysis in a Silicon Steel Sheet of an Interior Permanent Magnet Motor. IEEE Trans. Magn. 39 (3), 1448-1451 (2003)
- 6) Yamazaki, K., Fukushima, N.: Iron Loss Model for Rotating Machines Using Direct Eddy Current Analysis in Electrical Steel Sheets. IEEE Trans. Energy Conversion. 25 (3), 633-641 (2010)
- 7) Patent WO 2013-069754-A1. 2013
- 8) Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation Catalog, "Electrical Steel Sheets". <http://www.nssmc.com/en/product/sheet/index.html>, 2013
- 9) 平山隆, 藤倉昌浩, 堀紘二郎, 和嶋潔: 高磁束密度 - 低鉄損無方向性電磁鋼板の誘導機適用の効果. 電気学会マグネティクス/リニアドライブ研究会 MAG-14-215/LD-14-107, 2014



和嶋 潔 Kiyoshi WAJIMA
プロセス研究所 計測・制御研究部
首席主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



大杉保郎 Yasuo OHSUGI
プロセス研究所 計測・制御研究部
主幹研究員



平山 隆 Ryu HIRAYAMA
プロセス研究所 計測・制御研究部
首席主幹研究員 博士(工学)