

技術資料

Technical Data

熱間加工 Nd-Fe-B 磁石の渦電流評価

新谷和也*¹, 森田敏之*², 平岡将宏*¹

Eddy Current Evaluation of Hot-deformed Nd-Fe-B Magnets

Kazuya Shintani, Toshiyuki Morita, and Masahiro Hiraoka

Synopsis

In order to clarify the relationship between the division conditions of the magnets and the eddy currents of the magnets generated at high frequency, a simple method using an LCR-meter to estimate the eddy current was introduced. The estimated eddy currents using this simple method were agreed well with the simulation results.

The eddy current reduced remarkably when the skin depth at applied frequency was larger than one half of the divided thickness of the magnet. On the other hand, the eddy current did not reduce when the skin depth was smaller than that. The effect of eddy-current reduction using magnet dividing did not depend on the contacted electrical resistance of the divided magnet. It became clear that the insulated state at the contact area of the divided magnet is not necessary for eddy-current reduction.

1. 緒言

Nd₂Fe₁₄B 金属間化合物を主相とする Nd-Fe-B 系金属磁石は、高い磁力と比較的良好な価格性能比からモータ、アクチュエータなどに搭載され、家庭用電化製品、情報通信、医療分野で幅広く用いられてきた。また現在のところ、ハイブリッド車、電気自動車用の駆動用モータや風力発電機の小型化、高性能化に必要な高い特性を持つ唯一の磁石であり、CO₂ 低排出化、環境負荷低減に向けて適用が広がっている^{1, 2)}。

ハイブリッド車、電気自動車用の駆動用モータは燃費・コストの観点から小型・軽量化が進んでおり、その一環としてモータを高回転化することで小型でも高い出力を可能とする開発が行われている。しかし、モータの高回転化に伴い、鉄芯や磁石に付与される磁束変化が高周波化するため、渦電流損失が増加するという問題がある。これはモータ効率を低下させるのみならず発熱に

よって磁石を熱減磁させるため、車載向けモータ用磁石において、渦電流損失の低減は重要な課題である。

渦電流損失の低減手法の一つとして、磁石を分割することで渦電流を細分化し、対辺電流との干渉を生じさせる手法がある (Fig. 1)。完全な分割でなく、切り残しが存在するスリットでも同様の効果があるとする報告もある²⁾。また、分割磁石を使用する際、分割部が絶縁されておらず渦電流が流れれば、渦電流損失は減少しないと考えられるが、完全に絶縁されていなくとも、絶縁させたものとはほぼ同等の渦電流低減効果があるとの電磁解析結果も存在する³⁾。しかしながら、磁石の分割状態と渦電流の関係に関する詳細な報告例はない。

そこで本資料では、分割磁石の接触状態、およびスリット導入磁石のスリットの状態が渦電流低減効果に与える影響を明らかにすることを目的として、分割界面の接触状態、およびスリットを変化させて、直流抵抗値と渦電流損失の変化について調査した結果を報告する。

2016年3月7日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

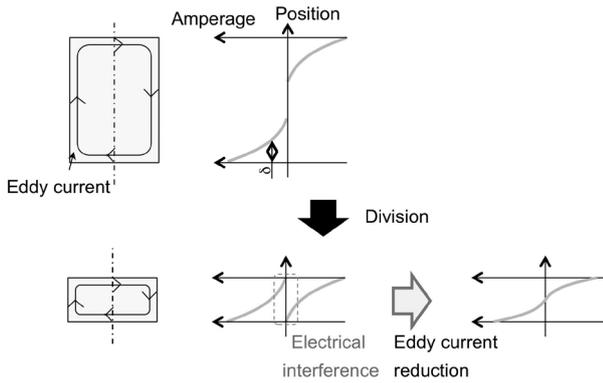


Fig. 1. Schematic images of the eddy current for division samples.

2. 実験方法

2. 1 測定試料

供試材は超急冷法により作製した薄帯を粉砕したものを原料粉として使用した。粉末成分は、 $\text{Nd}_{29.3}\text{Fe}_{\text{bal.}}\text{Co}_{3.5}\text{B}_{0.90}\text{Ga}_{0.50}$ (mass%) である。原料粉末から冷間成形により圧粉成形体を作製し、 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ で熱間加工し異方性 Nd-Fe-B 磁石を作製した⁴⁾。測定試料は、この熱間成形体から放電加工を用いて切出し、耐水研磨紙 (#600) を用いて加工層を除去したものを用いた。Fig. 2 に試料形状および試験水準を示す。ここでは、磁石間に絶縁テープを挟み、金属接触を防止した試料を完全絶縁状態とした (Fig. 2(b))。金属接触をさせた磁石は、分割面に圧力を加え接触抵抗を変化させた (Fig. 2(e))。Fig. 3 に押付け圧 P と接触抵抗値 R_c の関係を示す。接触抵抗は、4端子法を用いて接着層界面に押付け圧力を付与した状態で測定を行った。押付け圧 P の増加に伴い、接触抵抗値 R_c の減少が認められる。これは押付け圧の増加に伴い、接触面積が増加するためと考えられる。

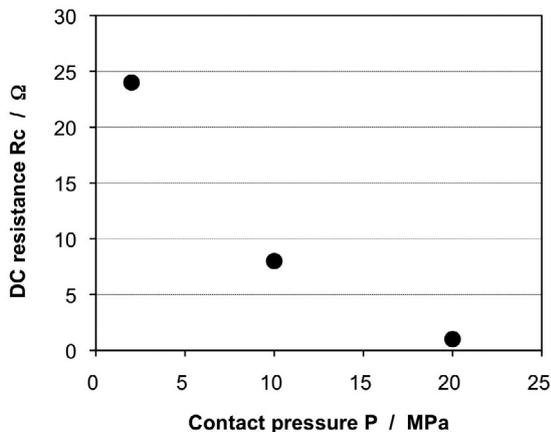


Fig. 3. Relationship between the pressure P and contact resistance R_c .

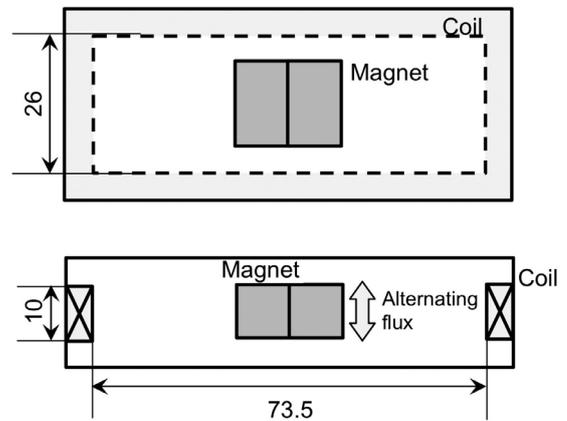
Condition	Shape of samples	
Basic samples	(a) Without division 	(b) Insulated
	(c) With 3 mm of slit 	(d) With 6 mm of slit
Slitted samples		
Compression test samples	(e) With compression 	

$P = 2, 10, 20\text{ MPa}$

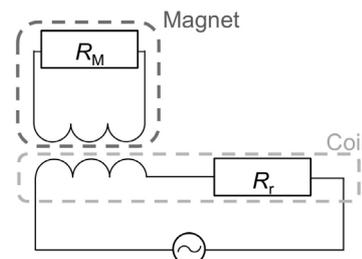
Fig. 2. Experimental condition and shape of samples.

2. 2 渦電流損失測定方法

渦電流損失測定は、Fig. 4(a) に示す空芯コイル中心に磁石を配置し、周波数 $5 \sim 100\text{ kHz}$ 、ピーク電流 10 mA の電流により交流磁界を印加した際のコイルの交流抵抗値 R_s を LCR メータにより測定した。Fig. 4(b) に回路図を示す。交流抵抗値 R_s は磁石の渦電流および磁石のヒステリシスの影響を受ける。そこで、着磁した試料を用い、透磁率 $\mu \approx 1.0$ とすることでヒステリシスの影響を低減するよう工夫した (Fig. 5)。



(a) An eddy current loss measuring equipment.



(b) A circuit diagram of the measurement.

Fig. 4. Schematic image of the experimental method.

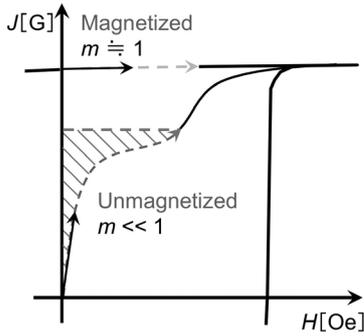


Fig. 5. Changes in permeability of magnets due to magnetization.

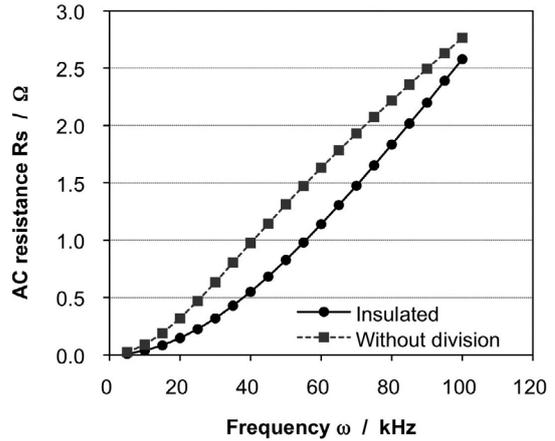
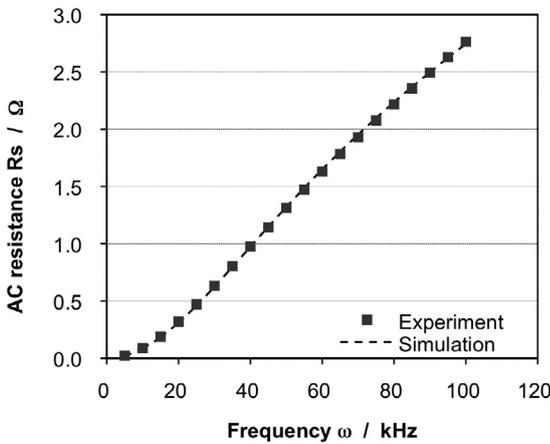
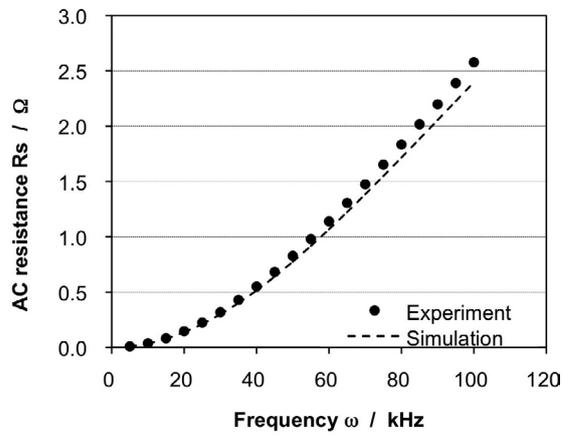


Fig. 6. Changes in AC resistance due to division.



(a) Without division



(b) Insulation

Fig. 7. Comparison between experiments and simulated results.

2. 3 シミュレーション手法

試験の妥当性検証のための電磁解析は、電磁解析ソフトウェア JMAG を用いて行った。シミュレーションの条件を Table 1 に示す。

Table 1. Simulation conditions.

Relative permeability μ (Magnet)	1.05
Number of turns (Coil)	120 turns
Current	10 mA

3. 実験結果および考察

3. 1 分割磁石の渦電流損失調査およびシミュレーション結果

Fig. 6 に完全絶縁した分割磁石と一体磁石の交流抵抗測定結果を示す。また、Fig. 7(a)(b) に各実測値とシミュレーション結果との比較結果を示す。各水準共に、シミュレーションとよく一致していることから、実験の妥当性が確認できる。

完全絶縁した分割磁石の R_s は一体型の交流抵抗値 R_{s1} よりも低い⁵⁾が、周波数の増加とともにその差が小さくなる。Fig. 8 に、分割による交流抵抗の減少率 ΔR_s を一体磁石の交流抵抗値 $(R_s)_w$ と分割磁石の完全絶縁品の交流抵抗値 $(R_s)_1$ を用いて式 (1) のように定義し、渦電流の表皮深さ d との関係を示す。表皮深さ d は電気抵抗率 ρ 、透磁率 μ を用いて式 (2) で表せる。

$$\Delta R_s = \frac{(R_s)_w - (R_s)_1}{(R_s)_w} \quad (1)$$

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2)^{5)}$$

表皮深さ $d = 2.5$ mm 付近において ΔR_s が急激に減少し、分割による渦電流低減効果が消失する傾向が認められる。表皮深さ $d = 2.5$ mm が分割磁石の分割長さ $L = 5.0$ mm に対して、 $L/2$ 付近であることから、対辺電流との干渉が生じなくなることが原因であると考えられる。

よって、渦電流損失の低減を目的として磁石の分割を行う際、使用環境下の表皮深さよりも小さく分割する必要があることが分かる。

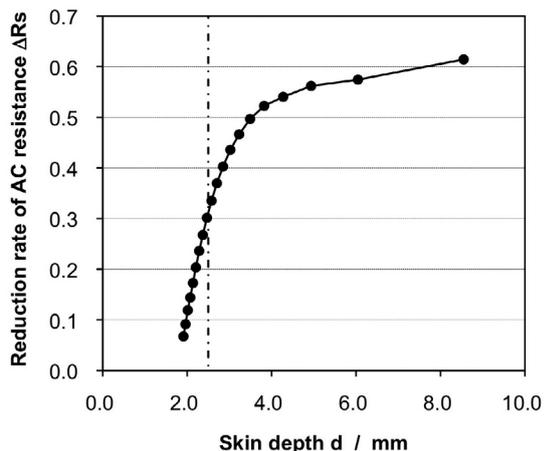
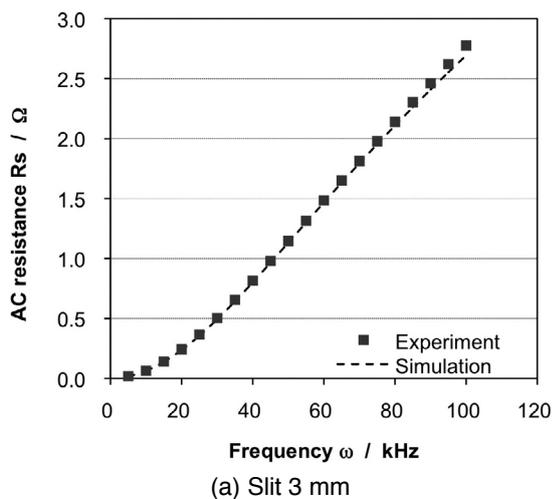


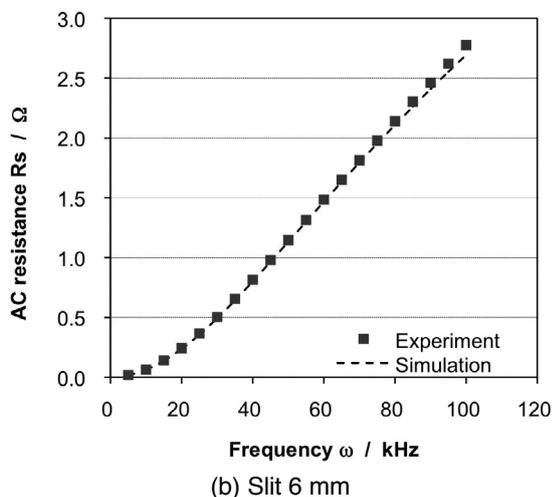
Fig. 8. Relationship between ΔR_s and skin depth d in insulation samples.

3. 2 スリットを導入した磁石の渦電流損失とシミュレーション結果

Fig. 9(a)(b) にスリットを導入した磁石の実測値とシミュレーション結果との比較を示す。各水準共に、シミュレーションとよく一致していることから、実験の妥当性が確認できる。



(a) Slit 3 mm



(b) Slit 6 mm

Fig. 9. Comparison between experiments and simulations in slit samples.

Fig. 10 にスリット導入による交流抵抗の減少率 ΔR_s を一体磁石の交流抵抗値 $(R_s)_w$ とスリット導入磁石の交流抵抗値 $(R_s)_s$ を用いて式 (3) のように定義し、渦電流の表皮深さ d との関係を示す。

$$\Delta R_s = \frac{(R_s)_w - (R_s)_s}{(R_s)_w} \quad (3)$$

グラフ中には完全絶縁した分割磁石の渦電流減少率 ΔR_s も併記した。スリット長さの増加に伴い交流抵抗の減少率 ΔR_s は増加し、6 mm のスリットでは完全絶縁した分割磁石に近い値となる。これは、Fig. 11 に示すようにスリット残り部で対辺電流との干渉が起こっており、スリットをまたぐ渦電流が流れにくくなり、渦電流が細分化されたと考えられる。このため、完全に分割をしない状態でも渦電流を低減することは可能であり、スリットは残りを小さくして対辺電流との干渉を促進するほど渦電流の低減効果が高まると予想される。

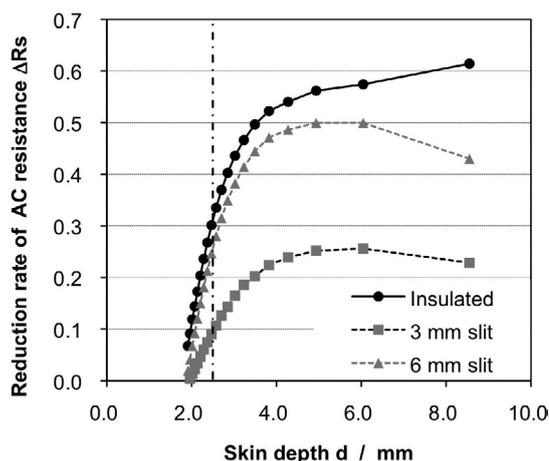


Fig.10. Relationship between ΔR_s and skin depth d in slit samples.

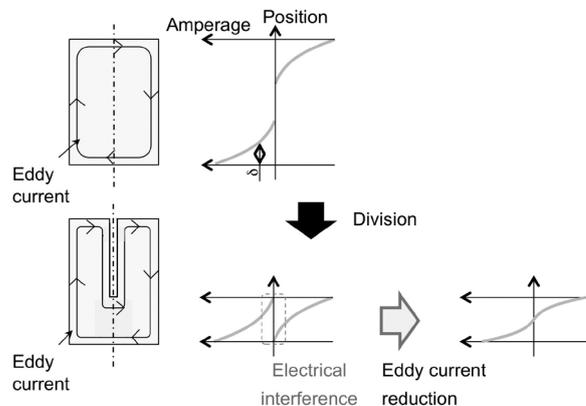


Fig. 11. Schematic image of the eddy current in slit samples.

3. 3 分割磁石の接触抵抗(押付け圧)と渦電流損失の関係

Fig. 12 に完全絶縁した分割磁石および押付け圧力を変化させた金属接触状態の分割磁石の交流抵抗を示す。交流抵抗値 R_c は押付け圧 P によらず、顕著な差は認められない。これは磁石同士の接触が基本的に点接触であるため接触面積が小さく、このことが渦電流の抵抗になるためであると考えられる。

よって、過去の報告結果と同様に、渦電流損失の低減を目的として磁石を分割する場合、直流抵抗に依存せず個々の磁石が機械的に分断されていれば渦電流損失の低減が期待される。ただし、磁石同士を高精度に仕上げるなどして接触面積が大きくなった場合には、注意を要する。

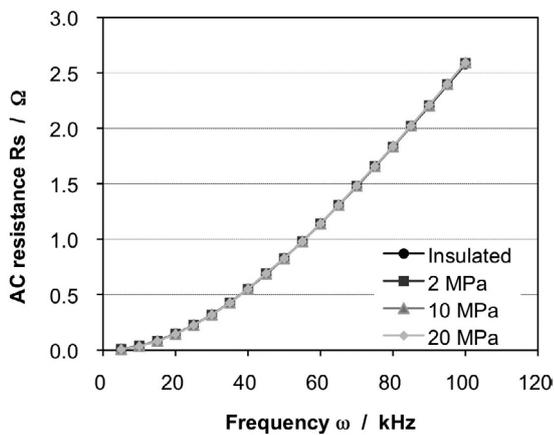


Fig. 12. Changes in AC resistance due to compression pressure P .

4. まとめ

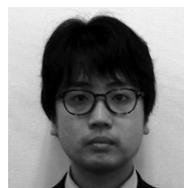
本資料では、簡便な渦電流損失評価方法を考案・実施して、以下の知見を得た。

(1) コイルと LCR メータを用いた渦電流損失評価方法の測定結果は、全ての水準においてシミュレーションと良い一致が認められ、渦電流評価方法として妥当であると考えられる。

- (2) 分割による渦電流の低減効果は、使用時の印加周波数の表皮深さが分割寸法の半分以上である領域でのみ効果があり、それ以下では効果がない。
- (3) スリットを導入した磁石はスリット深さが深いほど渦電流低減効果大きい。
- (4) 分割磁石の接触抵抗が渦電流に与える影響は小さく、渦電流低減のためには分割磁石は機械的に分割されていれば十分である。

(文 献)

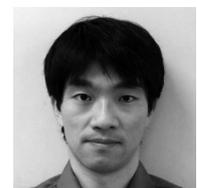
- 1) 佐川真人: 永久磁石 -材料科学と応用 -, アグネ技術センター。
- 2) 佐川真人: ネオジム磁石のすべて , アグネ技術センター。
- 3) M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto and Y. Matsuura : J. Appl. Phys., 55(1984), 2083.
- 4) 電気学会マグネティクス技術委員会 編「磁気工学の基礎と応用」コロナ社 p.46.
- 5) 品川博史, 宮城大輔, 高橋則雄, 土井祐仁, 宮田浩二: 電気学会研究会資料, MAG-08-36, SA-08-24, RM-08-24(2008)。
- 6) 塩井亮介, 宮脇寛, 森田敏之: 電気製鋼, 82(2011), 31.
- 7) Oliver Heaviside, Electrical Papers, vol. I・II, Macmillan, London, 1892; reprint, Chelsea-AMS, 1970.



新谷和也



森田敏之



平岡将宏