

# 鉄系メタルコンポジット鉄心リーケージトランスを用いた LLC-LC 共振型 DC-DC コンバータの試作

佐藤鴻全, 南澤俊孝, 曾根原誠, 佐藤敏郎  
(信州大学)

Fabrication of LLC-LC resonant DC-DC converter using Fe-based composite magnetic core leakage transformer

K.Sato, T.Minamisawa, M.Sonehara, T.Sato

(Shinshu University)

## はじめに

近年, 高速スイッチング・低 ON 抵抗の特徴を有する SiC/GaN パワーデバイスが注目されており, スwitchング周波数を数 MHz 以上に高周波化することで高効率と小型軽量を両立する DC-DC コンバータの実現が期待されている. しかしながら, 数百 kHz で動作する DC-DC コンバータに使用されているダストコアや Mn-Zn フェライトなどの磁心材料を MHz 帯スイッチングで使用することは適しておらず, Ni-Zn フェライト以外に選択肢がないのが実情である. 筆者らは, 数 $\mu\text{m}$  級微細鉄系アモルファス合金粉と耐熱エポキシ樹脂からなる鉄系メタルコンポジット磁心に着目し<sup>(1)</sup>, 数 MHz 以上の周波数帯域で動作する DC-DC コンバータの磁心材料に使用した. 鉄系メタルコンポジットは Ni-Zn フェライトに比べて, 1 MHz 以上の高周波において飽和磁束密度が 1 T 程度と高い飽和磁束密度値を有し, 鉄損も低いという利点を持っている.

## LLC-LC 共振型 DC-DC コンバータの回路構成

前項で示したように鉄系メタルコンポジットには利点もあるが低透磁率であるためトランスに適用した際に一次と二次巻線間の漏れインダクタンスが大きくなってしまいうためリーケージトランスとして動作する. LLC 共振型コンバータに適用するには二次側漏れインダクタンスの影響を考慮する必要がある.

Fig. 1 に示す LLC-LC 共振型コンバータは一次側の漏れインダクタンスと共振キャパシタ, 二次側漏れインダクタンスと共振キャパシタのそれぞれの直列共振周波数を合わせることで, 二次側漏れインダクタンスによる共振回路の入出力電圧ゲイン

特性への影響を抑える構成となっている. 本研究では, 鉄系メタルコンポジット鉄心を用いたリーケージトランスの試作と LLC-LC 共振型コンバータへの実装を行った. Fig. 2 に LLC-LC 共振型コンバータと一次側のみに共振キャパシタを接続した LLC-L 共振型コンバータのトランスの結合係数と一次側自己インダクタンス  $L_p$  および一次・二次巻き数比  $n$  の関係を示す. Fig. 2 から, LLC-LC 共振型コンバータでは結合係数が変化しても一次自己インダクタンス値および巻き数比がほぼ一定でトランスの設計が容易であるという利点がある.

## 測定結果

前項に示した特性を確認するため, 実際に LLC-LC 共振型コンバータの一次自己インダクタンスを同程度にし, 一次巻線の巻き方を変えることでトランスの結合係数  $k$  を 0.77(Leakage transformer#1)と 0.64(Leakage transformer#2)と変えて実験を行った. Fig. 3 に 3 MHz LLC-LC 共振型コンバータにおいて, 定格出力電圧 380 V, 出力 48 V として負荷を 1~10 [A]と変化させた際の Leakage transformer#1 と Leakage transformer#2 の動作周波数を示す. この結果から, リークエージトランスの結合係数が異なっても一次自己インダクタンス値と巻き数比を同じであれば LLC-LC 共振型コンバータが適正に動作することがわかった. 学術講演会では Ni-Zn フェライトトランスを用いた場合との比較結果についても報告する.

## 参考文献

1) Naoki Yabu *et al.*, *NTERMAG*, Vol 54, No.11, 2801605(2018)

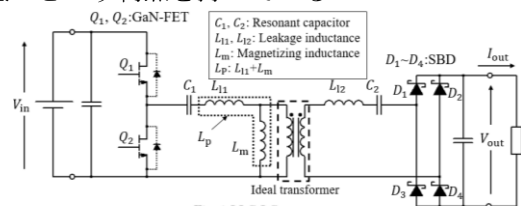


Fig. 1 LLC-LC resonant converter

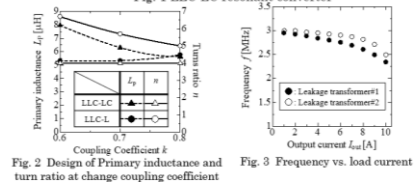


Fig. 2 Design of Primary inductance and turn ratio at change coupling coefficient

Fig. 3 Frequency vs. load current

## 三相ハイブリッド鉄心構造の磁束密度分布に関する検討

小林千絵, 栗田直幸, 小木瑞, 西水亮, 山岸明  
(日立製作所)

Basic Study on Magnetic Flux Density Distribution in Three Phase Hybrid-core Structure  
Chie Kobayashi, Naoyuki Kurita, Mizuki Ogi, Akira Nishimizu, Akira Yamagishi  
(Hitachi, Ltd.)

### はじめに

我々は、低損失なアモルファス材と飽和磁束密度が高い珪素鋼板材を組み合わせた、5 MVA 単相ハイブリッド鉄心変圧器 (Hybrid-core Transformer: HBT) を設計・試作し、同仕様のアモルファス鉄心変圧器に対して 10% の高磁束密度化と 8% の小形化を実証した<sup>1)</sup>。単相 HBT では、アモルファス材と珪素鋼板材の利点を活かした変圧器の成立性が確認されたが、更に大容量化を見据えた場合、三相 HBT の検討が必須である。三相 HBT では、U 相、V 相、W 相の巻線に位相が互いに 120° ずれた励磁電圧が印加されるため、各磁脚に分担される磁束密度  $B$  は複雑な挙動を示し、単相 HBT と同様の設計手法が適用できない可能性がある。そこで大容量化の検討のため、三相五脚 HBT の小形モデル鉄心を製作し、磁気特性を評価した。

### 実験方法

Fig. 1 に、試作した三相五脚小形モデルを示す。鉄心は、アモルファス巻鉄心と珪素鋼板積鉄心の実効断面積比率が約 8:2 のハイブリッド構成である。鉄心の各部位にサーチコイルを巻回し、 $B$  の分布を評価した。また、汎用回路シミュレータである ATP (Alternative Transient Program)<sup>2)</sup> を用いた磁気回路解析により、ハイブリッド鉄心内の  $B$  分布を求め、実測結果と比較した。

### 実験結果

Fig. 2 に、モデル鉄心の励磁磁束密度  $B_m$  に対する各鉄心内の磁脚部における  $B$  の変化を示す。この結果、ハイブリッド鉄心は三相にした場合でも、単相鉄心と同様にアモルファスと珪素鋼板の磁気抵抗に応じて  $B$  が分担されることがわかった。また、解析は実測と良い一致を示し、その有効性を実証した。さらに、ATP を用いて鉄心構造の変更に対する  $B$  の変化を評価し、大容量三相 HBT 向けの構造を提案した。詳細は講演にて報告する。

**謝辞** 本成果は 2015 年度から 2017 年度の環境省 CO<sub>2</sub> 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業における助成のもと得られたものである。

### 参考文献

- 1) N. Kurita et al. : *IEEE Trans. Magn.*, **54**, No.11, 8400604 (2018)
- 2) E. Rosolowski et al.: *IEEE Electric Power Networks*, 19-21, September 2016.

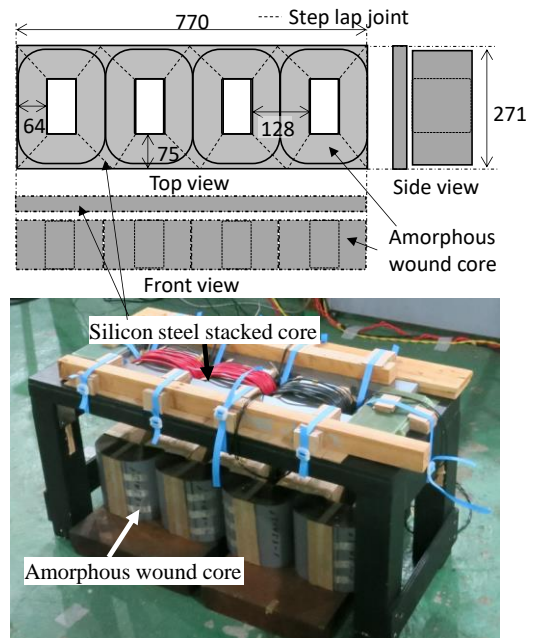


Fig.1 Image and exterior of a hybrid three-phase model core for excitation tests (Unit: mm).

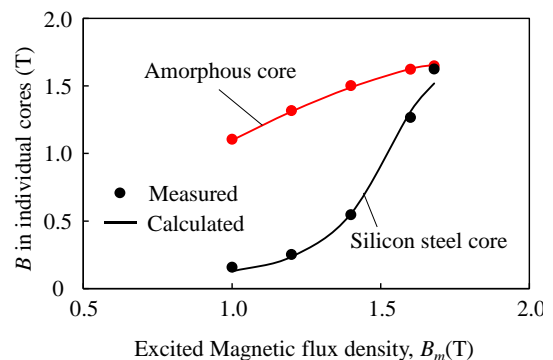


Fig.2 Comparison of measured and calculated  $B$  distribution in a three-phase model core.

# リラクタンスネットワーク解析による 変圧器用鉄心の磁歪力算定に関する一考察

羽根 吉紀, 中村 健二, \*栗田 直幸,  
(東北大学, \*(株)日立製作所)

A Consideration of Magnetostriction Force Calculation for  
Transformer Core by Using Reluctance Network Analysis

Y. Hane, K. Nakamura, and \*N. Kurita  
(Tohoku University, \*Hitachi, Ltd.)

## はじめに

近年、送配電システムで用いられる変圧器の低騒音化が強く望まれている。変圧器の騒音低減のためには、騒音の主要因の一つである磁歪による発生力(磁歪力)を定量的に算定可能な手法の確立が必要不可欠である。そこで本稿では、リラクタンスネットワーク解析(RNA)に基づく変圧器用鉄心の磁歪力算定手法について、検討を行ったので報告する。

## RNAに基づく磁歪力算定結果

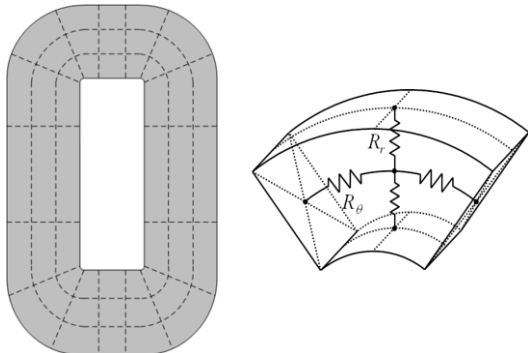
RNAモデルの導出に際しては、Fig. 1(a)に示すように、磁心を複数の要素に分割し、各要素を同図(b)に示すような4つの磁気抵抗からなる2次元単位磁気回路で表す。Fig. 2に、考察に用いたアモルファス金属の巻鉄心の2次元RNAモデルを示す。

次いで、磁歪力の算定に際しては、Fig. 3に示すような、実測より得られた材料の磁束密度-磁歪特性<sup>1)</sup>を基に、RNAモデルの磁束密度分布から各要素の磁歪 $\epsilon$ を求め、次式より磁歪力 $p$ を算出する。

$$p = \int_S D \epsilon dS \tag{1}$$

ここで、 $D$ は弾性係数マトリクスである。

提案手法の妥当性について検証するため、Fig. 4に示すように、RNAと有限要素法(FEM)による、ある一辺にかかる磁歪力の計算結果の比較を行った。このとき、励磁電圧は振幅100V、周波数50Hzの正弦波電圧とした。この図を見ると、両者は良好に一致しており、提案手法の妥当性が了解される。



(a) Division of a wound core. (b) Unit magnetic circuit.  
Fig. 1 Division of a wound core based on RNA.

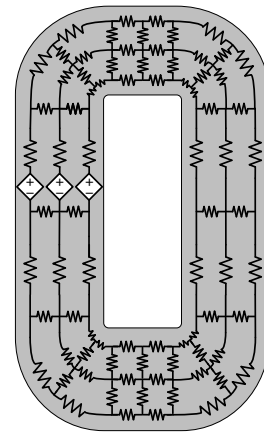


Fig. 2 Two-dimensional RNA model of a wound core of a Fe-based amorphous alloy used for consideration.

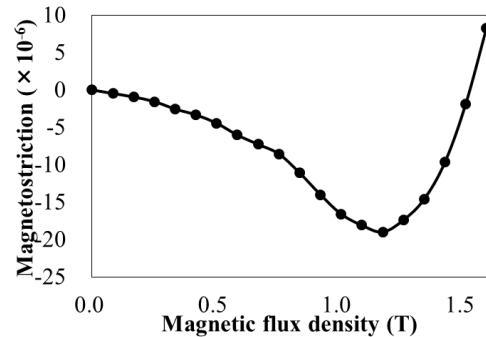


Fig. 3 Magnetic flux density versus magnetostriction.

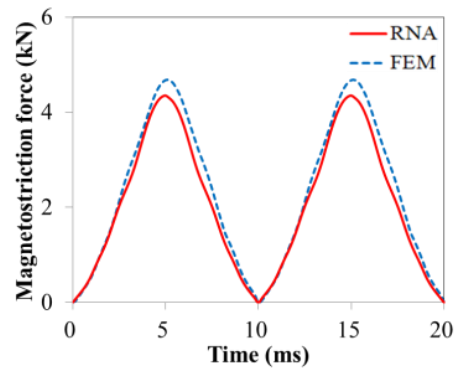


Fig. 4 Comparison of calculation results of magnetostriction force obtained from RNA and FEM.

## 参考文献

1) S. Taguchi, T. Yamamoto, and A. Sakakura, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 10, No. 2, pp. 123-127 (1974).

# 磁束制御による可変変圧器の提案

一ノ倉 理、有松健司\*、大日向 敬\*  
(東北大学、\*東北電力)

A new approach for variable transformer by means of flux control

O. Ichinokura, K. Arimatsu\*, T. Ohinata\*

(Tohoku Univ., \*Tohoku Electric Power Co., Inc.)

## はじめに

太陽光発電や風力発電の増大に伴い、電力系統の電圧変動がますます拡大している。従来、変圧器のタップ切り替えや無効電力補償装置によって系統電圧の調整が行われているが、前者は調整が不連続なことや応答が遅いという問題がある。後者は線路インピーダンスが小さい系統では調整能力が低下するという問題がある。これらの課題を解決するために、ここでは磁束制御を利用した新しい可変変圧器を提案する。

## 基本構成並びに試作器の特性

Fig. 1 に可変変圧器の構成を示す。 $N_1$  が一次巻線、 $N_2$  が二次巻線、 $N_c$  が制御巻線であり、一次巻線と二次巻線は単巻変圧器構成になっている。 $v_{in}$  は交流電源、 $R_L$  は負荷抵抗である。制御巻線は差動結線として直流電源に接続する。 $\phi_1$  は一次磁束、 $\phi_2$  は二次磁束、 $\phi_g$  はバイパス磁路の磁束を示す。主鉄心とバイパス磁路鉄心の間には空隙  $l_g$  が存在するため、制御電流  $I_c$  がゼロの場合の一次磁束は殆どが中央脚を流れる。一方、制御電流を流せば制御磁路部で磁気飽和が生じ、中央脚の磁気抵抗が増加してバイパス磁路側にも磁束が流れ、二次磁束  $\phi_2$  および  $\phi_2$  による二次巻線誘起電圧  $e_2$  が減少する。負荷電圧は  $v_{out}=v_{in}+e_2$  なので、直流制御電流によって  $e_2$  を変えれば出力電圧  $v_{out}$  の制御が可能になる。ここで、磁気飽和に起因する高調波を抑制するために、Fig. 1 に示したように、制御磁路の一部に楔形のギャップを設けている。

Fig. 2 に試作器の外観、Fig. 3 に制御特性を示す。ここで鉄心は無方向性ケイ素鋼板の積み鉄心であり、高さ 170mm、横幅 200mm、積み厚 50 mm、ギャップ長  $l_g=0.5\text{mm}$  である。Fig. 3 を見ると制御電流に対して出力電圧が 10%程度減少することがわかる。これは系統の電圧調整に適用可能な制御特性である。Fig. 4 は出力電圧波形の一例であり、広い制御範囲にわたってほぼ正弦波であることがわかる。

**あとがき** 以上、磁束制御による可変変圧器について述べた。本変圧器は、磁気飽和を利用しているにもかかわらず出力波形歪は小さいことから、三相のみならず単相系統の電圧調整や三相系統の電圧不平衡補償などにも適用可能と考えられ、新たな電力用磁気デバイスとして期待される。

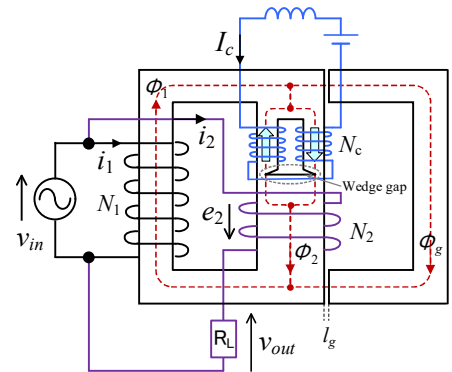


Fig. 1 Configuration of the variable transformer.

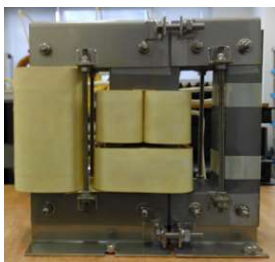


Fig. 2 General view of the variable transformer.

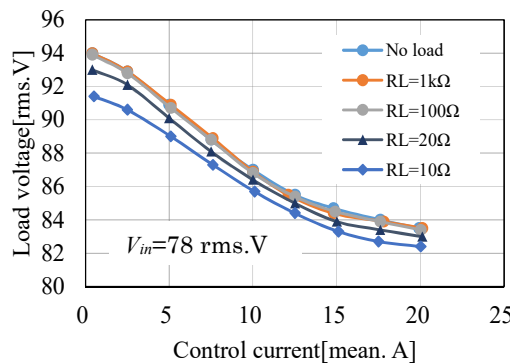


Fig. 3 Control characteristic.

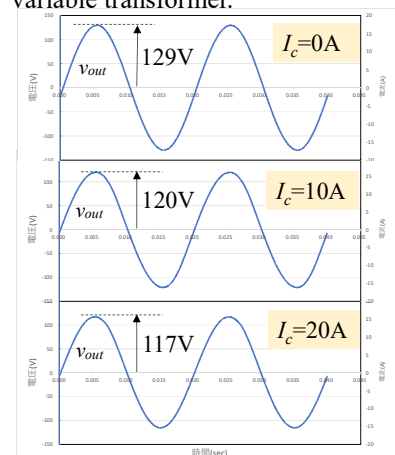


Fig. 4 Observed waveforms of the output voltage at  $R_L=10\Omega$

## 異常放電保護回路用永久磁石式限流器

一ノ倉 理、関本 英雄\*  
(東北大学、\*エイチ・エス・エレクトリック)

Permanent magnet type current limiter for arcing protection circuit

O. Ichinokura, H. Sekimoto\*  
(Tohoku Univ., \*H. S. Electric Co., Ltd.)

### はじめに

筆者らは、HiPIMS法(高出力インパルスマグネトロンスパッタリング法)に適したパルス電源の開発を進めているが、課題としてスパッタ装置内で生じる異常放電(アーキング)対策が挙げられる。異常放電が生じると、ターゲット表面の熔融・飛散による成膜品質の低下や、過電流による装置の焼損を招くため、確実な対策が望まれる。ここでは永久磁石と非線形磁心で構成される限流器の適用について検討を行った。

### 基本構成並びに試作器の特性

Fig. 1にシステムの基本構成を示す。正常運転時には双方向スイッチをオン状態とし、異常放電が生じて負荷電流が許容値を超えたらオフにしてシステムを保護する。ここで、過電流を検出してから双方向スイッチが切れるまで応答遅れが生じる。HiPIMSでは $\mu\text{sec}$ オーダーで1000~1500Vのパルス電圧を印加するので、応答遅れによる電流上昇は無視できない。限流器は応答遅れによる電流上昇を抑制するために挿入するものである。Fig. 2(a)に限流器の構成を示す。巻線と永久磁石はそれぞれの起磁力が逆方向になるように配置する。同図(b)は試作器の鉄心である。鉄心材質は10EX900、永久磁石はネオジム焼結を使用した。巻線側の鉄心断面積を永久磁石側の鉄心断面積の数分の一になるように設計すれば(試作器では1/6)、永久磁石の磁束によって巻線側鉄心が磁氣的に飽和する。巻線電流起磁力が永久磁石起磁力以下の場合は飽和領域で動作するため、限流器は低インピーダンスになる。異常放電が生じて巻線電流起磁力が永久磁石起磁力を超えると、動作点は鉄心の不飽和領域に移り、限流器のインピーダンスが増加して電流が抑制される。Fig. 3(a)に、磁気回路法に基づいて計算した限流器の応答特性を示す。ここで負荷は抵抗とし、パルス電圧ではなくDC電圧をステップ状に印加した。比較のために限流器の代わりに線形インダクタを使用したときの計算波形も示した。これを見ると、限流器によって120Aから220Aの範囲で電流増加が抑制されていることがわかる。Fig. 3(b)は観測波形であり、シミュレーションと同様の傾向が認められる。限流期間 $22\mu\text{s}$ は上記の応答遅れをカバーするために十分な時間であり、限流器を併用することで確実な異常放電保護が実現できることが了解される。

**あとがき** これまでの永久磁石式限流器は大型化する傾向があったが<sup>1)</sup>、本稿のような高周波応用では小型化が可能であり、構成単純でメンテナンスフリーな過電流保護素子として実用化が期待される。

文献1)例えば“実用設計を想定した磁気式限流器磁心寸法の数値解析とその試作”，中道，四辻，山田，岩原，J. Magn. Soc. Jpn., 30, 282-285(2006)

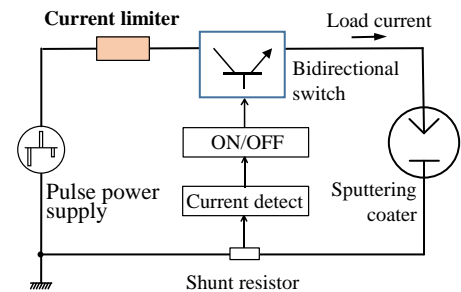


Fig. 1 Basic configuration of the pulse sputtering system.

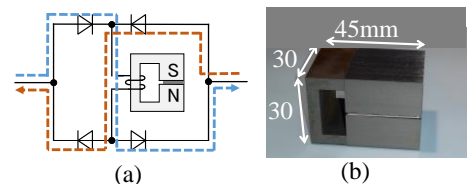
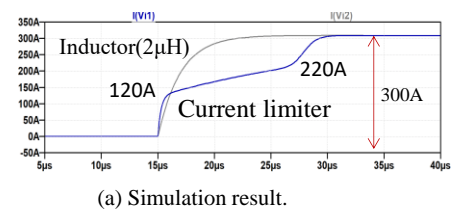
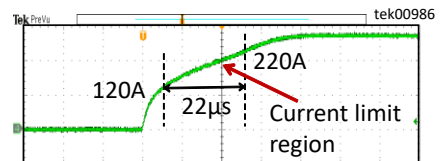


Fig. 2 Structure of the current limiter. (a) Circuit configuration. (b) General view of the magnetic core.



(a) Simulation result.



(b) Measured result.

Fig. 3 Step response of the trial current limiter

# アウターロータ型高速PMモータの試作試験

櫻井 将, 中村健二  
(東北大学)

Prototype Tests of Outer Rotor type High-Speed PM Motor

S. Sakurai, K. Nakamura  
(Tohoku University)

## はじめに

スマートフォンなどの高度通信機器の利用増加に伴い、通信基地局サーバの増強が進んでいる。具体的には、CPUの高周波化や並列処理などが行われているが、これにより、サーバ内では局所的に激しい発熱が生じており、冷却装置の性能向上が喫緊の課題となっている。種々の冷却装置の中でも冷却ファンは、大量生産による低コスト化が可能であることから、幅広く利用されてきたが、従来の冷却ファンの効率は低く、改善の報告も少ない。

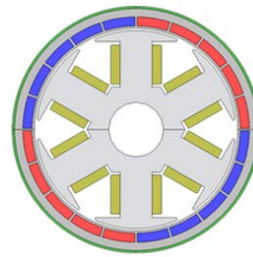
先に筆者らは、ファン用モータの高効率化に関して、アウターロータ型の永久磁石 (PM) モータの回転子構造に着目し、埋込磁石構造 (IPM) とすることで、磁石渦電流損を低減させ、効率を大きく改善できることを示した<sup>1)</sup>。

本稿では、上記のアウターロータ型 IPM モータの試作試験を行ったので報告する。

## アウターロータ型 IPM モータの試作試験結果

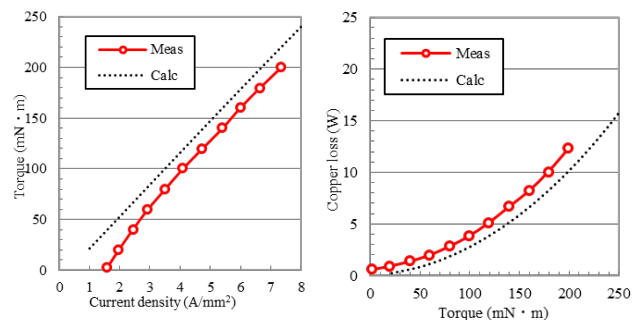
Fig. 1 に、試作したアウターロータ型 IPM モータの諸元を示す。本モータの鉄心材料は厚さ 0.35 mm の無方向性ケイ素鋼板である。磁石材料はネオジウム焼結磁石であり、渦電流損低減のため、1 極当たり周方向に 5 分割している<sup>1)</sup>。

Fig. 2 にモータの諸特性を示す。計算には 3 次元有限要素法 (3D-FEM) を用いた。同図(a)のトルク特性を見ると、直線の傾きはほぼ等しく、トルクは設計通りであると言える。両者の差は、計算では機械損を無視していることによる。同図(b)は銅損である。同図(c)は銅損以外の損失であり、実測値には鉄損や機械損など、すべての損失が含まれる。一方、計算では鉄損、磁石渦損、ケース渦損は考慮したが、それ以外の損失は無視している。この図を見ると、両者の差は 8 W 程度あり、機械損や漂遊損など、計算ではまだ考慮できていない損失があることがわかる。同図(d)は効率である。実機効率は最大で 89% であった。今後は、目標の 93% を目指し、損失の要因分析とその低減について検討を進める予定である。



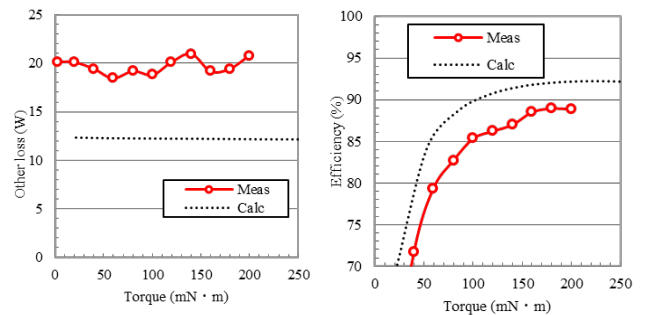
Motor Diameter	54 mm
Rotor speed	12600 rpm
Number of turns/pole	22 turns / pole
Magnet pole pairs	2
Gap length	0.5 mm
Magnet length	2.0 mm
Material of iron core	35H1300
Rated speed	12600 rpm
Rated torque	200 mN·m
Target efficiency	93.0 %

Fig. 1 Specifications of the IPM motor



(a) Torque

(b) Copper loss



(c) Other losses

(d) Efficiency

Fig. 2 Comparison of measured and calculated characteristics of the IPM motor.

## 参考文献

- 1) 櫻井, 中村, 日本磁気学会論文特集号, 4, 72 (2020)

# NANOMET<sup>®</sup>積層コアを用いた高速SRモータの実機評価

永井 歩美, 三ツ谷 和秀, 平本 尚三\*, 中村 健二  
(東北大学, \*(株)東北マグネットインスティテュート)

Prototype Evaluation of High-Speed SR Motor made of NANOMET<sup>®</sup> laminated Core

A. Nagai, K. Mitsuya, S. Hiramoto\*, and K. Nakamura  
(Tohoku University, \*Tohoku Magnet Institute Co., Ltd.)

## はじめに

スイッチトリラクタンس (SR) モータは、鉄心と巻線のみで構成されるため、構造が単純で堅牢、保守性が良好、安価などの特長を有し、高速回転用途に適する。しかしながら一方で、高速回転化に伴う鉄損の増大が課題として指摘される。

そこで本稿では、高飽和磁束密度、低鉄損材として期待されている、NANOMET<sup>®</sup>薄帯の積層コアを用いてSRモータを試作し、実機評価を行った結果について報告する。

## NANOMET<sup>®</sup>積層コアSRモータの特性

Fig. 1 に、先行研究で試作したSRモータの諸元を示す。鉄心材料は、一般的な無方向性ケイ素鋼板 (35A300) である。Fig. 2 に、本稿で用いたNANOMET<sup>®</sup>薄帯の積層コアの磁気特性を示す。比較のため、同図中に35A300の特性も示す。この図を見ると、NANOMET<sup>®</sup>積層コアの飽和磁束密度は35A300に対してやや劣るが、鉄損は極めて低く、優れていることが了解される。

Fig. 3 にトルクの実測値を示す。この図を見ると、両モータのトルク特性はほぼ等しいことがわかる。これは今回実験を行った範囲では、動作磁束密度が最大で1.4T程度であったことに由来する。

Fig. 4 は損失の実測値である。同図(a)の銅損については、両者のトルク特性がほぼ等しいことから、銅損もほぼ同等である。一方、同図(b)の鉄損と機械損の和については、NANOMET<sup>®</sup>積層コアを用いたSRモータの方が顕著に小さい。ここで、両モータのベアリングは同一であり、ケースを含めた構造にも差異は無いことから、両者の差は、鉄損の差と等しいと見なせる。したがって、NANOMET<sup>®</sup>薄帯を積層し、加工して製作したモータは、狙い通り鉄損を大幅に低減できることが明らかとなった。

## まとめ

以上、NANOMET<sup>®</sup>積層コアを用いてSRモータを試作し、実機評価を行った結果について述べた。

なお、本研究の一部は東北大学AIE卓越大学院プログラムにより支援された。

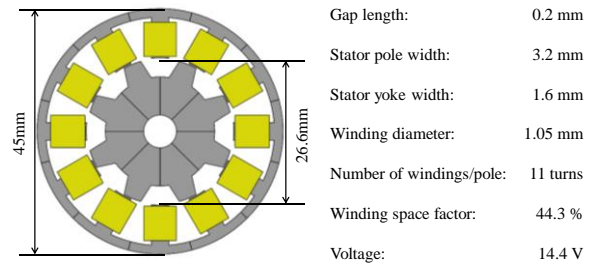
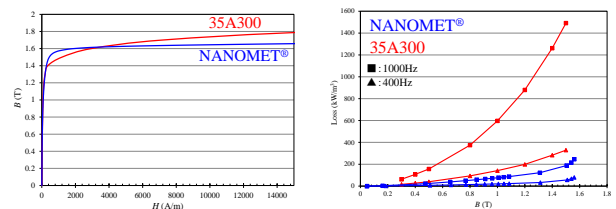


Fig. 1 Specifications of 12/8 SR motor.



(a)  $B$ - $H$  curves (b) Iron loss curves  
Fig. 2 Comparison of characteristics of core material.

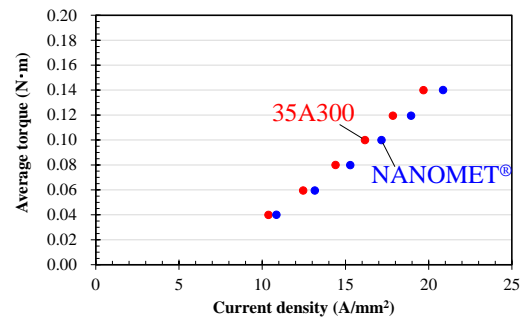
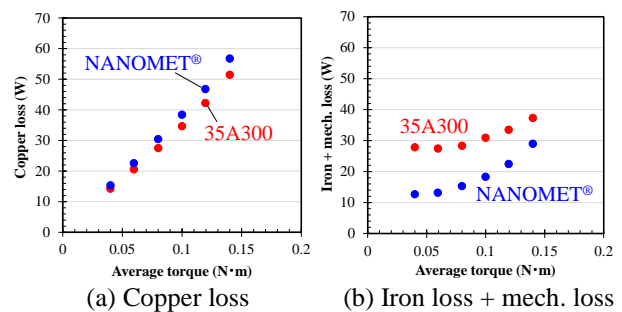


Fig. 3 Comparison of measured current density versus torque characteristics.



(a) Copper loss (b) Iron loss + mech. loss  
Fig. 4 Comparison of measured losses.

## 参考文献

- 1) K. Nakamura, Y. Kumasaka, O. Ichinokura, *Journal of Physics: Conference Series*, **903**, 012040 (2017).

# プレイモデルを組み込んだ磁気回路モデルによる 直流重畳リアクトルのヒステリシス解析

細野 雄也, 羽根 吉紀, 中村 健二  
(東北大学)

Hysteresis Analysis of DC-Biased Reactor by using Magnetic Circuit Model Combined with Play Model

Y. Hosono, Y. Hane, K. Nakamura

(Tohoku University)

## はじめに

磁気デバイスの解析・設計において、ヒステリシス現象まで考慮した鉄損の算定手法の確立が求められている。先に筆者らは、直流ヒステリシスを表現可能なプレイモデル<sup>(1)</sup>を組み込んだ磁気回路モデルを提案し、ヒステリシスループ並びに鉄損を高精度に算定可能であることを明らかにした<sup>(2)</sup>。しかしながら、電源装置等に用いられるリアクトルなど、直流成分が重畳された磁気デバイスの検討は行われておらず、上記手法の算定精度は未知であった。

そこで本稿では、上述のプレイモデルを組み込んだ磁気回路モデルを用いて、直流重畳リアクトルの解析を行い、提案手法の有用性について検討を行ったので報告する。

## 直流重畳リアクトルの解析と実測値との比較

Fig. 1 にプレイモデルを組み込んだ磁気回路モデルを示す。本モデルにおいては、直流ヒステリシスはプレイモデルで、渦電流損失および異常渦電流損失は磁気回路の素子で表現する。

Fig. 2 に、実験に用いた板厚 0.35 mm の無方向性ケイ素鋼板のトロイダルコアの形状・寸法を示す。測定においては、Fig. 3 の測定系を用いた。図中の  $v_1$  は励磁電圧、 $i_1$  は励磁電流、 $v_s$  はサーチコイルの誘起電圧であり、これらを用いて磁界  $H$  と磁束密度  $B$  を求めた。

Fig. 4 に、直流重畳時のヒステリシスループの実測値と計算値の比較を示す。条件は、周波数  $f = 5$  Hz, 最大磁束密度  $B_m = 0.6$  T, 直流磁界  $H_{dc} = 0, 10, 20, 30, 40$  A/m とした。この図を見ると、計算値は実測値とおおそ一致していることがわかる。直流成分が重畳された磁気デバイスのヒステリシスループを解析で模擬することは必ずしも容易ではないが、本提案手法を用いることで、このような直流が重畳された磁気ヒステリシスについても、比較的精度良く模擬できることが明らかとなった。

## 参考文献

- (1) S. Bobbio, G. Miano, C. Serpico, and C. Visone, *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 4417 (1997).
- (2) H. Tanaka, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *Journal of Physics: Conference Series*, **903**, 012047 (2017).

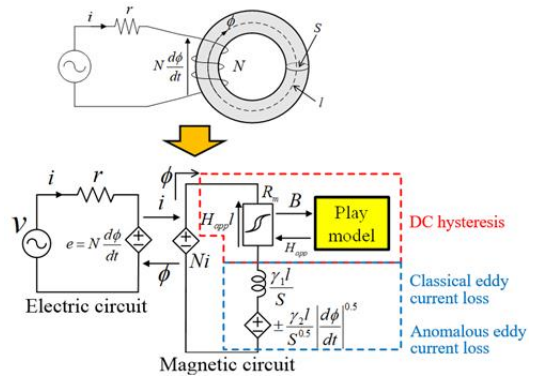


Fig. 1 Magnetic circuit model combined with play model.

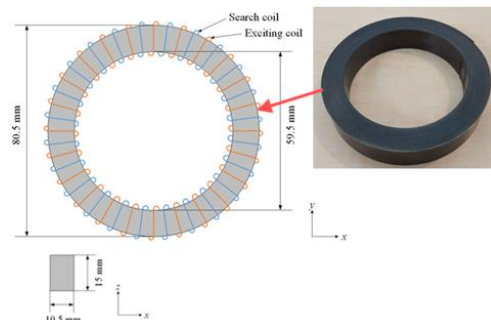


Fig. 2 Shape and dimensions of the ring core.

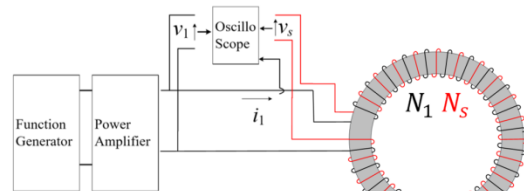


Fig. 3 Measurement system for DC-biased hysteresis loops.

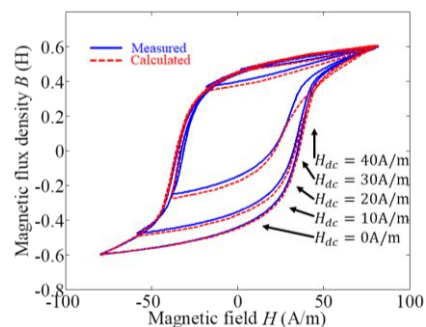


Fig. 4 Comparison of calculated and measured DC-biased hysteresis loops ( $f = 5$  Hz).



# デューティ比の異なる方形波電圧励磁に対応した鉄損算定式の各種鉄心材への適用性評価

畠山 智行, \*中村 健二  
(株式会社 日立製作所, \*東北大学)

Applicability Study of Iron Loss Calculation Methods for Various Core Materials  
under Rectangular Voltage Excitation with Various Duty Ratios  
Tomoyuki Hatakeyama, \*Kenji Nakamura  
(Hitachi, Ltd., \*Tohoku University)

## はじめに

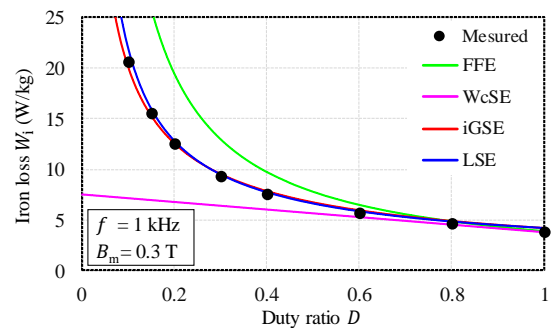
一般に鉄損算定式として知られる Steinmetz の実験式は、フルブリッジ型 DC-DC コンバータに用いられる高周波変圧器の励磁条件である、デューティ比が変化する正負対称の方形波電圧励磁下の鉄損を精度良く算定できない。この課題を解決するため、先行研究において種々の鉄損算定式が提案されてきたが、鉄心材に関する適用可能性の評価が十分とは言い難い。本稿では、4種の鉄損算定式を考察対象に挙げ、各種鉄心材に対する適用可能性について評価する。

## 評価方法

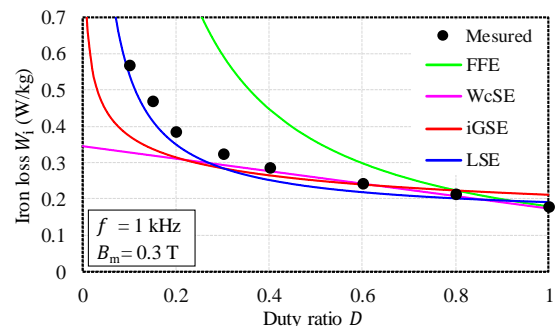
評価対象の鉄損算定式は次のとおりである。はじめに、Improved Generalized Steinmetz Equation (iGSE) は、Steinmetz の実験式の変数である周波数 $f$ と最大磁束密度 $B_m$ の代わりに、磁束密度変化率 ( $dB/dt$ ) を変数とする鉄損算定式である。次いで、 $dB/dt$ の波形率を用いる方法 (Form Factor Equation: FFE) は、Steinmetz の実験式に $dB/dt$ の波形率で決まる係数を乗じて鉄損を求める方法である。Waveform coefficient Steinmetz Equation (WcSE)も同様であり、Steinmetz の実験式に磁束密度波形で決まる係数を乗じる方法である。最後に、鉄損を発生要因毎に分離して計算する方法 (Loss Separation Equation: LSE) は、鉄損をヒステリシス損、渦電流損、異常渦電流損の3つの要因に分離し、それぞれを別々に算出して足し合わせる方法である。以上4種の鉄損算定式を用いて、デューティ比が変化する正負対称の方形波電圧励磁時の各種鉄心材の鉄損を算定するとともに、実測値と比較した。なお、実験に用いた鉄心はカットコアであり、鉄心材によらず形状、寸法は等しい。

## 評価結果

Fig. 1 (a), (b)に、3%方向性ケイ素鋼板、ナノ結晶軟磁性材における鉄損の実測値および計算値を示す。同図において、横軸はデューティ比 $D$ 、縦軸は単位重量あたりの鉄損 $W_i$ であり、デューティ比が小さくなるほど鉄損が増大することがわかる。本評価から得られた知見は次のとおりである。FFEは、算定精度が低く、デューティ比が変化する方形波電圧励磁時の鉄損の算定には適さない。次いで、WcSEは、簡便性に優れているが、鉄心材によってはデューティ比が小さい場合に誤差が大きくなる。iGSEは、算定精度と簡便性のバランスが取れており、鉄心材がケイ素鋼板の場合には有用である一方で、ナノ結晶軟磁性材のような薄板材の場合には、デューティ比が小さい場合に算定精度が悪化する。最後に、LSEは、鉄損の算定に鉄心材の高周波鉄損曲線が必要となるものの、鉄心材、デューティ比によらず算定精度が高い。



(a) 3% grain-oriented silicon steel



(b) Nanocrystalline soft magnetic material

Fig. 1 Comparison of calculated and measured iron losses.

# リッツ線の分割構造に着目した損失解析

朝雛 えみり\*, 上田 祐資\*, 永井 歩美\*\*, 石飛 学\*  
(奈良高専\*, 東北大学\*\*)

High-Frequency Loss and split structure of Litz Wire

E.Asahina, A.Nagai, Y.Ueda, M.Ishitobi

(National Institute of Technology, Nara College Tohoku University)

## はじめに

リッツ線は、銅損を抑制する構造をもつため、非接触給電や誘導加熱といった高周波コイル用巻線として汎用されている。一方で、素線径によって単線以上の発熱も確認されており<sup>(1)</sup>、適切な素線径の選択が重要である。そこで、本研究ではシンプルな構造の損失解析モデルを提案し、発熱の原因である誘導電流と素線構造の関係について、分析を試みている。

## リッツ線における損失

Fig.1 に提案する損失解析モデルを示す。リッツ線の断面が点対称であることから、半径方向と円周方向の分割数および絶縁被膜の厚さと材質をパラメータに設定し、モデリングを行っている。

Fig.2 に円周方向の分割に対する解析モデルと損失特性を示す。ここで、内径 1.1[mm]、外径 1.2[mm]、導体間距離を 5[ $\mu$ m]とし、内径外径分割数を 1~12 に可変させている。また入力電流を 2[A]、1[MHz]とし、電磁場解析にはムラタソフトウェア製の Femtel<sup>®</sup>を用いている。Fig.2(b)から損失は円周方向の分割数に依存しないことがわかる。

Fig.3 に半径方向の分割に対する解析モデルと損失特性を、Fig.4 に分割数 4, 9, 17 の電流密度分布を示す。解析条件は、円周方向の分割数に対する解析と同様である。ただし、分割数を 1~30 に可変しつつ、導体の最大半径を 1.2[mm] に統一するため、分割数の変化に伴って導体厚さを増減させている。Fig.3 から分割数 9 のとき、損失のピークが確認できる。このとき、導体の厚さは 1[MHz]における表皮深さ  $\delta$  (0.066[mm]) の 2 倍程度となっている。一方で Fig.4 より、順方向と逆方向の交互に流れる誘導電流が確認できる。この交互の電流は、素線を通る平均電流に対して無視できない大きさを持ち、発生回数が分割数とともに増加している。また、交互電流の振幅は分割数が多いほど減少傾向を示している。特に分割数が 17 以上 (導体の厚さ  $\delta$  以下) のとき、逆方向電流の消失が確認できる。これは、導体が薄くなるほど正負の交互電流が干渉し、振幅を抑制できたと考えられる。したがって、素線径の小さいリッツ線ほど銅損が抑制され、特に  $\delta$  以下であると効果が高い。

## 参考文献

(1) 水野勉, 他: 日本 AEM 学会誌, Vol.18, No.3, pp.300-305 (2010)

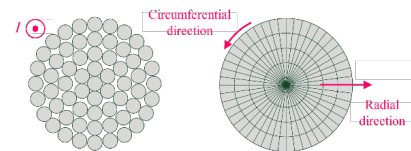
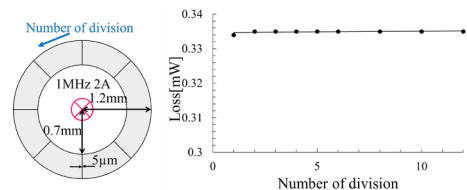
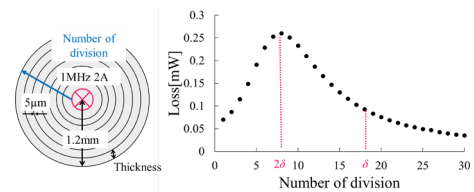


Fig. 1 Analysis model of litz wire



(a) Analysis model (b) Loss characteristics

Fig. 2 Analysis of circumferential direction



(a) Analysis model (b) Loss characteristics

Fig. 3 Analysis of radial direction

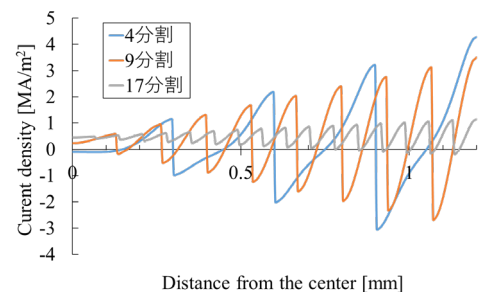


Fig. 4 Current density distribution on each thickness

# 弾性板の羽ばたきを利用した磁気駆動マイクロポンプの接続方法

福田匠磨、本田崇  
(九工大)

Connecting method for magnetically driven micropump using flapping wings

T. Fukuda, T. Honda  
(Kyushu Inst. Tech.)

## はじめに

著者らは、放熱効率の高い小型液冷システムのノート PC 等への応用を目指し、弾性板の羽ばたきを利用した磁気駆動マイクロポンプの開発を進めている。本研究では、複数ポンプを直列接続した場合の接続方法に着目し、従来のストレート型から U 字型に変更した。その結果、U 字型が従来と同等の性能であり、全長の短縮化も容易であることがわかった。

## 素子構成

Fig. 1 にポンプ単体(a)、ストレート型 2 連結(b)、U 字型 2 連結(c)の構造を示す。可動子は、厚さ方向に着磁された 2 個の NdFeB 磁石 ( $\phi 4\text{mm} \times 1\text{mm}$ ) の間に、NdFeB 磁石 ( $\phi 1\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ ) を 2 個重ねたものを両端の 2ヶ所に配置し、その一方の磁石間に厚さ  $50\mu\text{m}$  の PI フィルムを挟んで構成する。PI フィルムは、幅が  $4\text{mm}$ 、長さが  $6\text{mm}$  の長方形である。この可動子を固定子内に、回転軸を介し取り付けてポンプを構成している。同図(a)には動作原理も示している。長手方向に交流磁界を印加すると、磁石は磁気トルクを受け回転振動し弾性板を揺動せることで液体を送り出す。今回提案する U 字型では、流路を U 字に屈曲させ 2つの可動子を回転軸を共通として一体化した構造になっており、ストレート型と比較して全長を 47%短縮している。

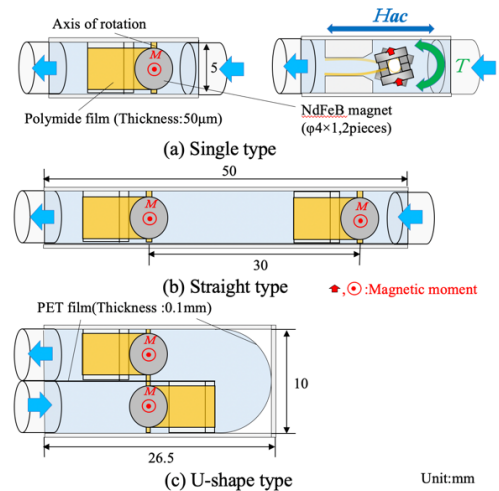
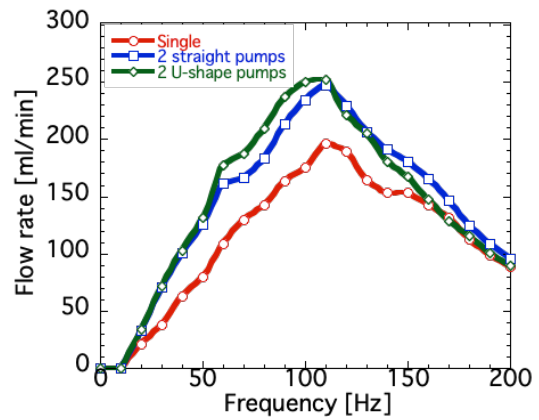
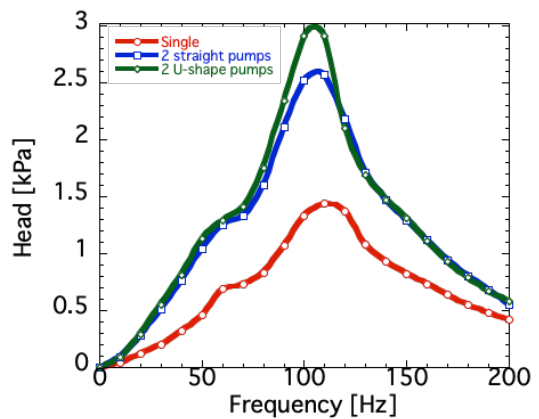


Fig.1 Structure of micropump.



(a) Flow rate



(b) Head

Fig. 2 Frequency characteristics.

## 実験結果

ポンプの駆動はソレノイドコイルによって行い、流量と吐出圧力を評価した。作動流体には、水で 20%に希釈した不凍液を使用した。

Fig. 2 に 50 Oe 印加時における無負荷時の流量(a)と吐出圧力(b)の周波数特性を示す。流量・吐出圧力ともストレート型と U 字型の差はほとんどなく、流路を屈曲させた影響は無視できることがわかった。これより、提案する U 字型の連結方法が有用であることを実証した。この結果を受け、本 U 字型ポンプを 50W クラスのノート PC を模した液冷システムに組み込み、十分な冷却性能を得ることを確認した。

# 磁気駆動羽ばたき PAV における推力と翅構造の関係

平野 滉大、本田 崇  
(九工大)

Relationship between thrust and wing structure for magnetically driven wing Pico Air Vehicle

K. Hirano, T. Honda  
(Kyushu Inst. Tech.)

## はじめに

ドローンに代表される小型飛翔体より格段に小さな昆虫サイズの超小型飛翔体(PAV, Pico Air Vehicle)が注目されている。PAV に関する先行研究<sup>1)</sup>では、圧電素子による羽ばたき機構があり、ケーブルによる給電ではあるが飛翔に成功している。これに対し著者らは、永久磁石を内蔵した羽ばたき機構を外部磁界で駆動する方式について検討し、ワイヤレスかつバッテリーレス化を図るとともに飛翔にも成功した<sup>2)</sup>。本報告では、更なる小型化を図るための翅の設計指針の確立を目指し、推力と翅構造の関係を実験的に考察した。

## 素子構成と動作原理

Fig. 1 に素子の上面図を示す。胴体部は、厚さの異なる 2 種類の PI フィルム(25 $\mu$ m 厚,125 $\mu$ m 厚)を貼り合わせた構造で、左右に 25 $\mu$ m 厚の PI フィルム(4.5mm 長)による捻りバネを有する。捻りバネには NdFeB 磁石( $\phi$ 1mm $\times$ 2mm)を極性が逆になるよう配置した。翅は、V 字形に配した棒(PI, PS)の裏側に、長方形の PI フィルム(5 $\mu$ m 厚、10mm 幅)を根本部分のみ接着し構成した。Fig. 2 に動作原理を示す。交流磁界により、磁石は磁気トルクを受け捻りバネを中心に回転振動し羽ばたき運動が起こる。このときの打ち上げと打ち下ろしの翅形状に起因する抗力差が上向きの推力となる。

## 実験結果と考察

本実験では、捻りバネの幅を 0.75mm、0.625mm、0.50mm、翼長を 4mm から 9mm と変えて推力の測定を行った。その際、V 字に配した棒の材質と長さを変え、羽ばたきの周波数特性の調整を行った。磁界強度は 4.8kA/m とした。Fig. 3 は、横軸に翼長、縦軸に各素子の最大推力を発生した周波数をプロットしたもので、各点の最大推力をカラーで示している。傾向を調べるためにすべての条件のデータを載せている。最大推力を発生した周波数は、羽ばたき運動の共振周波数とほぼ一致し、翼長が短くなると慣性モーメントが低下するため上昇した。ここで、推力が 0.5mN 以上の赤色の点に着目すると、同じ翼長でも、翼長が長い場合は周波数の分布の低いところにあるが、翼長が短くなると周波数の分布の高い方にシフトする傾向が見られる。これは推力の増大する条件が羽ばたき運動の共振だけでなく、翅の PI フィルムの曲げ振動の共振も関係しているためと考えられる。

## 参考文献

- 1) R.J. Wood, et al., Int. J. Robot. Res., Vol.31, pp.1292-1302, 2012.
- 2) 大村修平, 東優樹, 本田崇, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016(0), 1A1-12b2, 2016.

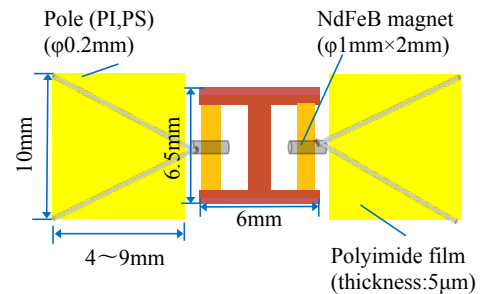


Fig. 1 Structure of flapping mechanism

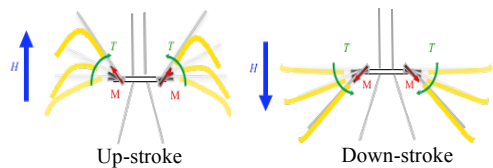


Fig. 2 Actuation principle

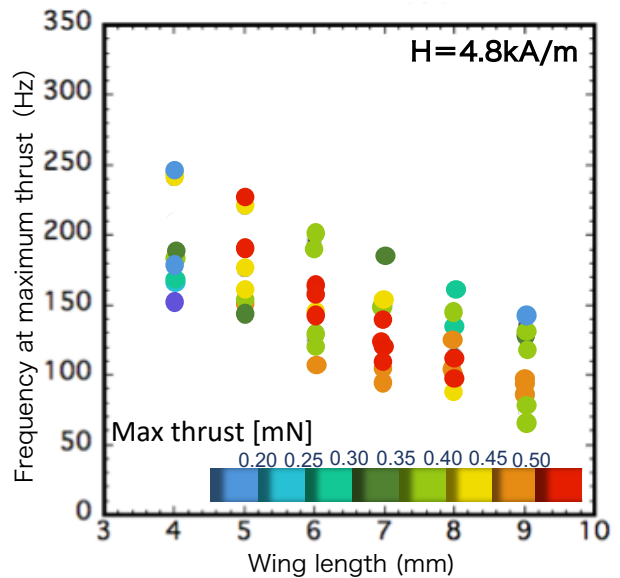


Fig. 3 Relation between frequency at maximum thrust and wing length.

# 永久磁石と電磁石を併用した薄鋼板の磁気浮上装置の開発 (電磁力の印加箇所に対する永久磁石配置の最適化)

ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ、嘉山周汰、椎名敦紀、小川和輝、  
遠藤文人、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学)

Development of electromagnetic levitation system for thin steel plate with electromagnets and permanent magnets (optimization of permanent magnet arrangement for applied position of electromagnetic force)

M. N. Hakimi, S. Kayama, A. Shiina, K. Ogawa, A. Endo, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ.)

## はじめに

薄鋼板は搬送工程において通常ローラによる接触搬送が行われ、ローラとの接触による傷やめっき不良など表面品質の劣化が問題となっている。当研究グループでは、電磁石を設置していない部分に永久磁石を設置し、これらの磁力を浮上安定化のために有効利用した電磁石・永久磁石併用型薄鋼板磁気浮上搬送システムを提案している。一方、鋼板の浮上安定性が最良となる永久磁石の配置を実験的に求めることは、設置パターンが膨大にあるため不可能である。そこで、遺伝的アルゴリズムを適用し、鋼板の浮上安定性が向上する永久磁石配置の探索を行った<sup>1)</sup>。さらに著者らは鋼板のエッジ部に電磁石を設置した磁気浮上の搬送システムに対して永久磁石の設置による浮上補助を行い、配置の最適化を行っている<sup>2)</sup>。しかしながらエッジ部に設置した電磁石からの吸引力の印加位置に関する検討は行われていない。そこで本報告はエッジ部の電磁石位置を変更した際の永久磁石の最適化について検討を行った。

## 水平方向の位置決め制御システム

浮上した鋼板のエッジに対して水平方向から電磁石による吸引力を加え、非接触位置決め制御を行う。鋼板エッジ部の水平方向の変位計測にはレーザ式センサ(帯状のレーザ光の遮断量で変位を計測)を用いる。また、電磁石は浮上制御システムで使用したものと同一のものを使用する。鋼板の相対する2辺に沿って2個ずつ設置されており、各電磁石表面から鋼板エッジまでの距離を5mmに非接触位置決め制御する、水平方向位置決め制御用電磁石はFig. 2のように水平方向位置決め制御ユニットを可動することができる。そこで、水平方向電磁石の設置位置を変化させて最適化を行い、最適な永久磁石配置を遺伝的アルゴリズムによって探索した。

## 参考文献

- 1) 成田, 長谷川, 押野谷, 永久磁石を用いた薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システム, *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol. 37 (2013), No. 2, pp. 29-34
- 2) 鈴木, 木田, 小田, 成田, 加藤, 森山, 浮上方向と水平方向に設置した電磁石と永久磁石による薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システムにおける永久磁石の最適配置に関する研究, *日本 AEM 学会誌*, Vol. 26 (2018), No. 1, pp. 191-197

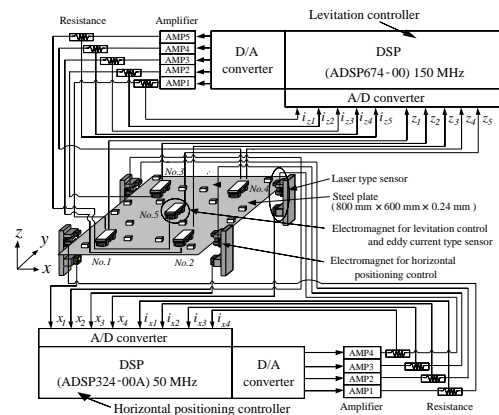


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system for steel plate with permanent magnet.

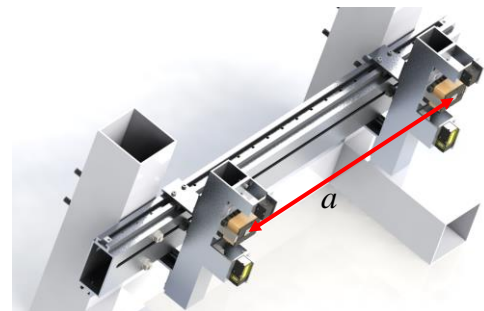


Fig. 2 Slide mechanism of electromagnet for horizontal positioning control.

# 湾曲させた柔軟鋼板の磁気浮上搬送システムの開発 (湾曲方向が搬送中の浮上性能に与える影響)

椎名敦紀、嘉山周汰、ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ、小川和輝、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学)

Electromagnetic levitation and transportation system for bent thin steel plate  
(effect of bending direction on levitation performance during transportation)

A. Shiina, S. Kayama, M. N. Hakimi, K. Ogawa, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ.)

## はじめに

薄鋼板の製造ラインではローラによる接触搬送が行われている。しかし、ローラとの接触により傷や凹凸が生じ表面品質の劣化が問題となっている。そこで、電磁石の吸引力を利用した薄鋼板の非接触磁気浮上搬送が提案されている<sup>1,2)</sup>。当研究グループでは、これまでに、水平方向位置決め制御システムと湾曲磁気浮上システムを併用した磁気浮上システムの浮上性能について検討を行ってきた<sup>3)</sup>。本報告では板厚 0.24 mm の薄鋼板を浮上対象とし、薄鋼板の湾曲方向を変えて湾曲浮上させ、水平方向からの磁場による張力が薄鋼板に与える影響について実験的に検討を行った。

## 実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。薄鋼板は、Fig. 2 に示す通りフレーム内に設置された磁気浮上システムを装置ごとリニアモータで搬送させる。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm、厚さ 0.24 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (材質 SS400) とする。鋼板をアルミフレーム製装置内に設置した 5 か所のペアの電磁石を用いて非接触支持するために、鋼板の変位を 5 個の渦電流式非接触変位センサにより検出し、非接触位置決め制御を行う。鋼板水平方向 (x 方向) の位置決めは Fig. 1 に示した通り、電磁石を鋼板端部の相対する 2 辺に対向するように 4 か所配置し、レーザ式センサを利用することによって水平方向の変位を非接触に測定する。

## 搬送実験

水平方向位置決め制御システムと湾曲磁気浮上システムを併用した磁気浮上システムが、薄鋼板の湾曲方向を変えて湾曲浮上させた際、浮上性能にどのような影響を与えるかの検証をするため、各電磁石がそれぞれ独立して制御をするような 1 自由度モデルを構築し、搬送実験を行った。このとき、水平方向電磁石に印加する定常電流値を 0.5 A、水平方向電磁石中心間距離を 550 mm とした。実験結果より、湾曲方向を変えて湾曲浮上させることで、薄鋼板の浮上特性が変化することを示した。

## 参考文献

- 1) 高林他, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79 (2013), No. 801, pp. 1483-1494
- 2) 松島他, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20 (2012), No. 1, pp. 220-225
- 3) 伊藤他, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 1 (2018), No. 1, pp. 95-100

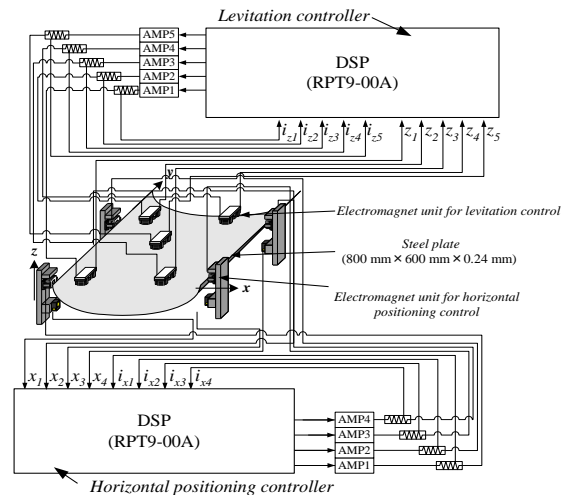


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.

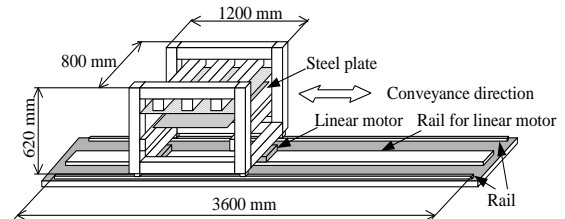


Fig. 2 Conveyance system of the steel plate.

# シームレスな極薄鋼板の磁気ガイドウェイシステムの開発 (外乱振動の入力に対する振動抑制効果)

中須賀峻、奈良輪祥泰、石原宙、山口遼、小川和輝、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学)

Development of electromagnetic guideway for seamless ultra-thin steel plate  
(effect of vibration suppression against input vibration disturbance)

R. Nakasuga, Y. Narawa, S. Ishihara, R. Yamaguchi, K. Ogawa, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ.)

## はじめに

製鉄所における連続鋼板製造ラインは長さ数 km にもおよび、その間連続鋼板はロールによる接触支持搬送されている。このようなロールによる連続鋼板の搬送ラインにおいて、鋼板とロールの接触による表面品質の劣化などの問題点が挙げられる。この問題を解決するため、当研究グループでは走行する連続鋼板のエッジ近傍に電磁力を印加することで鋼板の振動を抑制する非接触案内を検討した<sup>1)</sup>。また、有限要素法を用いてモード形状を算出し、モード形状の腹となる箇所にも永久磁石を配置してその有効性を検討した<sup>2)</sup>。しかし、電磁石に与える定常電流値を変更したときに連続鋼板がどのような振動特性を示すのか十分な検討は行われていない。そこで本報告では、電磁石に流す定常電流を変更した際の連続鋼板の振動特性について、マルチボディダイナミクスを用いて鋼板に外乱が入力された際の応答から検討を行った。

## 非接触案内形成装置

Fig. 1 に示すように電磁石を用いた非接触ガイドウェイの振動抑制効果を評価するため、連続鋼板の進行方向を模擬した装置を用いて検討を行った。長さ 6894 mm、幅 150 mm、厚さ 0.3 mm のステンレス鋼材製ベルトを溶接した連続鋼板を直径 700 mm、幅 154 mm のプーリから吊り下げた。このプーリをブラシレス DC モータで駆動することで、鋼板が走行する状況を再現することができる。また Fig. 2 に示すように、2 個の電磁石ユニットを連続鋼板に対抗するよう設置した磁気ガイドウェイを構築した。

## 鋼板形状解析

定常電流を変更した際の振動特性を評価するため、Fig. 1 の進行方向変更部に配置した制御を行う電磁石の定常電流を変更させて解析を行った。このとき電磁石が設置される位置のボディに電磁石ユニットからの復元力と減衰力が加わるとし、プーリの中心から 500 mm の位置にあるボディを 50 mm 変位させた状態から制御を行った際の応答から検討を行った。解析結果より電磁石のばね定数を増加させた場合に入力した外乱が短時間で収束したが、連続鋼板に高周波の振動が定期的発生した。これは電磁石の復元力の増加によって鋼板と電磁石の固有振動数が変化したためと考えられる。

## 参考文献

- 1) 柏原, 押野谷, 石橋, 日本 AEM 学会誌, Vol. 11, No. 4, (2003), 235-241.
- 2) Bessho, T., Ishihara, S., Narawa, Y., Yamaguchi, R., Narita, T., Kato, H., Actuators, Vol. 7, Issue3 (2018), 47.

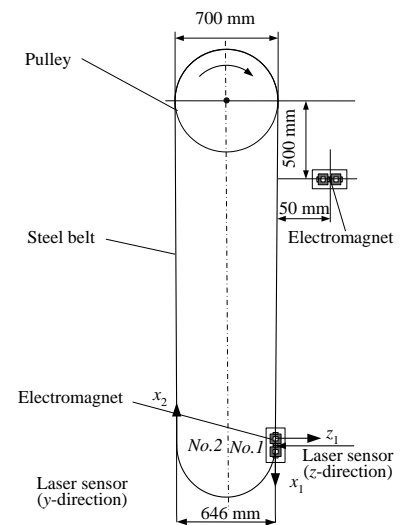


Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic guideway for seamless ultra-thin steel plate

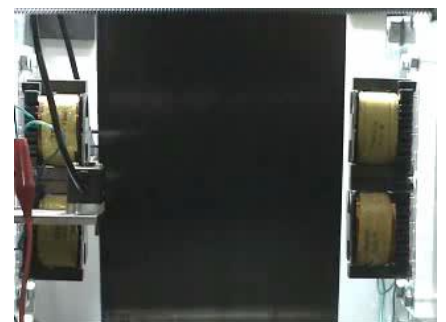


Fig. 2 Photograph of electromagnet for electromagnetic guideway

# 有限差分法を用いた湾曲薄鋼板の磁気浮上システムの動的解析に関する検討

船田孔明、宮崎陸、小川和輝、成田正敬、加藤英晃  
(東海大学)

Consideration on dynamic analysis of electromagnetic levitation system for bent thin steel plate with finite difference method

K. Funada, R. Miyazaki, K. Ogawa, T. Narita, H. Kato  
(Tokai Univ.)

## はじめに

薄鋼板は自動車、電化製品、缶などの製品として広く使用されており、近年、様々な産業の要請により表面品質向上が強く求められている。この要求に応じるために、鋼板生産ラインの搬送システムに磁気浮上を利用した非接触搬送技術の研究が活発に行われている<sup>1,2)</sup>。柔軟鋼板を磁気浮上させる場合、鋼板の自重によるたわみや、鋼板の復元力などによって弾性振動が発生し、これが安定した浮上を妨げる要因となる。著者らはこれまで磁気浮上システムにおける薄鋼板のたわみを求め浮上性能との関係性を明らかにしてきた。本報告では、浮上性能との関係性を明らかにするために、有限差分法を用いた湾曲浮上中の薄鋼板の静的解析手法について整理した上で、これを応用した湾曲磁気浮上鋼板の動的挙動に関する解析手法の構築を試みた。

## 有限差分法を用いた動的解析

Fig. 1 に鋼板と電磁石位置の関係を示す。浮上対象は、長さ  $a = 800$  mm、幅  $b = 600$  mm、厚さ  $h = 0.18$  mm の長方形の鋼板である。

湾曲磁気浮上システムの動的解析を行う前に、浮上中の鋼板の静的形状を解析した。解析によって得られた磁気浮上中の鋼板形状を Fig. 2 (電磁石角度  $0^\circ$ ) と Fig. 3 (電磁石角度  $13^\circ$ ) に示す。この解析では、5 点の電磁石部分を単純支持としてモデル化した。Fig. 3 より磁気浮上時の鋼板の形状を確認することができた。この鋼板形状解析のシミュレーションモデルに慣性項と減衰項の時間変化を加え、シミュレーションモデルを作成し、動的解析を行った。

## 参考文献

- (1) Matsumoto, S., Arai, Y., Nakagawa, T., IEEE Trans. Magn., Vol. 50, No. 11 (2014)
- (2) 米澤, 丸森, 成田, 加藤, 日本 AEM 学会誌, Vol. 24, No. 3 (2016), 137-142

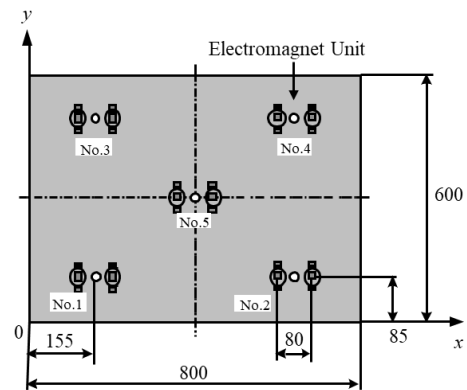


Fig. 1 Analysis model of electromagnet and steel plate

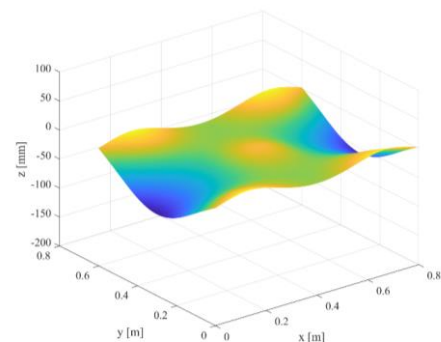


Fig. 2 Analysis result without bending levitation  
(Electromagnet angle  $0^\circ$ )

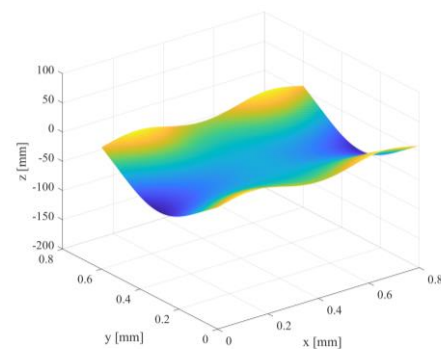


Fig. 3 Analysis result with bending levitation  
(Electromagnet angle  $13^\circ$ )



# 壁面振動を利用した超小型モビリティの騒音制御システムの開発 (超磁歪アクチュエータの性能に関する基礎的検討)

加藤太朗、北村拓也、前原史弥、中山弘也、池田圭吾、遠藤文人、加藤英晃、成田正敬  
(東海大学)

Development of noise control system for ultra-compact mobility by plate vibration  
(fundamental consideration on performance of giant magnetostrictive actuator)

T. Kato, T. Kitamura, F. Maehara, H. Nakayama, K. Ikeda, A. Endo, H. Kato, T. Narita  
(Tokai Univ)

## はじめに

1人から2人乗りの超小型モビリティはあらゆる世代の新たな交通手段として注目されており、地域の活性化や自動車市場の新たな需要創出への貢献が期待される。しかしながら超小型モビリティは走行中にロードノイズや風切り音などの騒音により車内の快適性欠如が問題となっている。当研究グループでは超小型モビリティの限られた車内スペースで車内騒音制御を行うため、図1のように車体の壁面に超磁歪材料を用いたアクチュエータを設置し、壁面振動によって2次音源を付加することで騒音低減を図るアクティブノイズコントロール(以下ANC)の研究を行っている<sup>1,2)</sup>。アクチュエータによる壁面振動を利用した閉空間内のANCシステムを構成する場合、アクチュエータを設置する壁面の振動特性や設置位置による壁面の振動モードを考慮する必要がある。これまでに壁面から放射される制御音波と騒音からなる閉空間内の音場について検討してきた<sup>3)</sup>。

しかしながらアクチュエータ自体の固有振動数や出力特性もシステムの性能に影響を与える要因となる。そこで本報告では上記に示した要因の中から超磁歪アクチュエータの性能に着目し、検討を行った。既存の超磁歪アクチュエータをモデル化して電磁界解析によってアクチュエータの磁歪力と周波数特性の関係を明らかにし、超小型モビリティ搭載用の新たな超磁歪アクチュエータの設計の基礎的検討を行った。

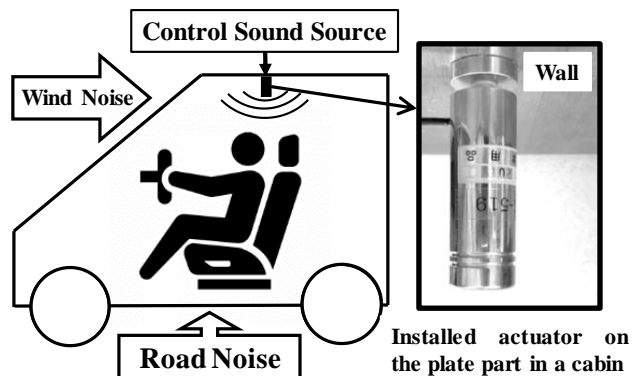


Fig. 1 Design of ANC system for ultra-compact EV by using giant magnetostrictive actuator

## 超磁歪アクチュエータの性能評価

超磁歪アクチュエータのコイルに電流を流した際における磁歪力と周波数応答について電磁界解析を用いて検討を行った。超磁歪アクチュエータは人の可聴域より20 Hzから2 kHzの振動を発生する必要がある。電磁界解析では、図2に示すように超磁歪アクチュエータをモデル化した。アクチュエータの過渡応答を確認するためにコイルに1 Aの電流をパルス状に入力し、同図に示すように磁歪力を算出した。

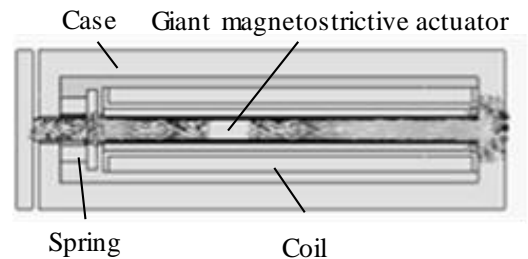


Fig. 2 Model of actuator by electromagnetic field analysis

## 参考文献

- 1) 石塚, 加藤, 加藤, 成田, 小島, 森山, 日本 AEM 学会誌, Vol. 25, No. 2, (2017), 88-93.
- 2) T. Kato, R. Suzuki, R. Miyao, H. Kato, T. Narita, Actuators, 7, 49, (2018).
- 3) T. Kato, R. Suzuki, T. Narita, H. Kato, Y. Yamamoto, IJAEM, Vol. 52, No. 1-2, (2016), 153-160.

# スポーク形埋込磁石磁気ギヤの性能向上に関する検討

水穴裕真, 中村健二, \*鈴木雄真, \*大石悠平, \*立谷雄一, \*操谷欽吾  
(東北大学, \*㈱プロスパイン)

## Performance Improvement of Spoke-shaped Interior Permanent Magnet Magnetic Gear

Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, K. Kuritani

(Tohoku University, \*Prospine Co., Ltd.)

### はじめに

磁気ギヤは非接触で動力を伝達できるため、機械式ギヤと比べて振動・騒音が小さく、保守性に優れる。その中でも磁束変調型磁気ギヤは、他の磁気ギヤと比べてトルク密度が高い<sup>1)</sup>。磁束変調型磁気ギヤの実用化には、さらなるトルク向上と損失低減が必要である。先に筆者らは、回転子の埋込磁石 (IPM) 構造化<sup>2)</sup>、磁気ブリッジの位置変更<sup>3)</sup>、アモルファス合金の適用<sup>4)</sup>により、トルクと効率を向上させた。

本稿では、IPM 磁気ギヤの高トルク化・高効率化を目的として、軸方向漏れ磁束を相殺可能な磁石を新たに提案するとともに、これまでに提案したすべての改善策を取り入れた IPM 磁気ギヤの解析設計および試作試験を行ったので報告する。

### 高トルク化・高効率化に関する検討

Fig. 1 に、IPM 磁気ギヤの諸元を示す。同図(a)の従来機は、ギャップ側に磁気ブリッジが設けられており、回転子鉄心およびポールピースの材料はそれぞれ無方向性ケイ素鋼板 (35A250) と圧粉磁心 (SMC) である。一方、同図(b)の提案機は、バックヨーク側に磁気ブリッジが設けられており、回転子鉄心とポールピースの材料はアモルファス合金である。また、軸方向の漏れ磁束を打ち消すため、漏れ磁束と逆方向に着磁された厚さ 5 mm のネオジウムボンド磁石が内側回転子側面に取り付けられている。

Fig. 2 に、内側回転数 300 rpm におけるトルクの測定結果を示す。同図より、外側回転子の最大トルクは、従来機が 13.9 N・m であるのに対し、提案機は 20 N・m であり、トルクが約 44% 向上していることがわかる。

Fig. 3 に、内側回転数 300 rpm および 100 rpm における効率の測定結果を示す。同図を見ると、提案機の効率は従来機と比べて大幅に向上していることがわかる。また、提案機の最大効率は 99.85% (内側回転数 100 rpm) を達成した。

本研究の一部は東北大学 AIE 卓越大学院プログラムにより支援された。

### 参考文献

- 1) K. Atallah and D. Howe, *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2844 (2001).
- 2) T. Ikeda, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **33**, 130 (2009).
- 3) Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, and K. Kuritani, *T.Magn. Soc. Jpn. (Special issues)*, **3**, 74 (2019).

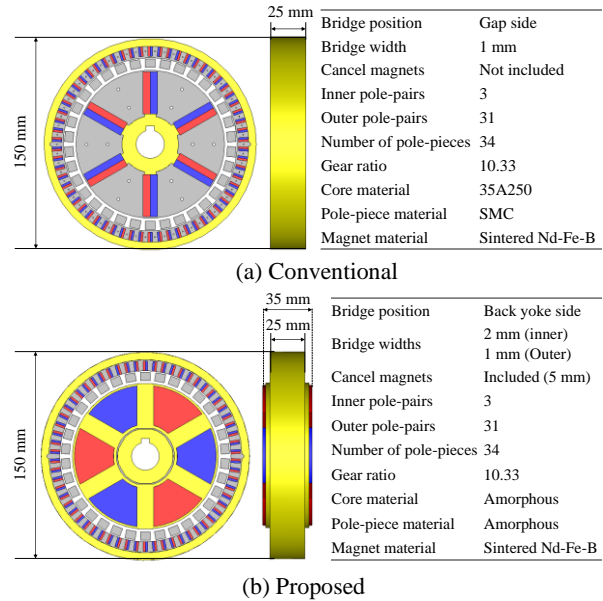


Fig. 1 Specifications of IPM magnetic gears.

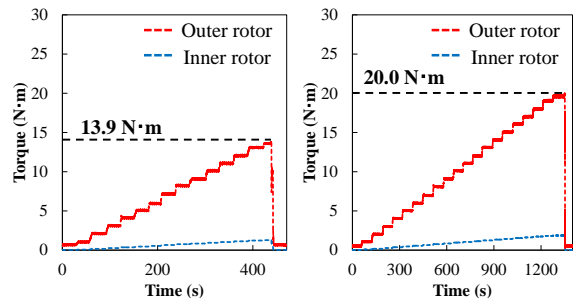


Fig. 2 Comparison of measured torque behavior of the prototype IPM magnetic gears (left: conventional, right: proposed).

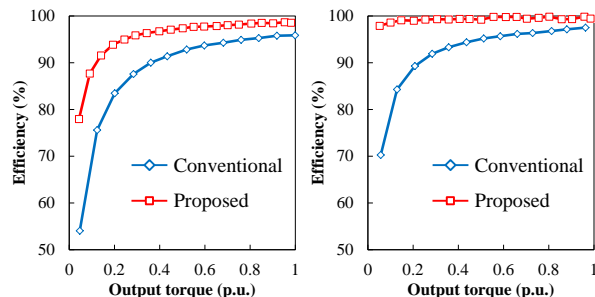


Fig. 3 Comparison of measured efficiency of prototype IPM magnetic gears (left : 300 rpm, right : 100 rpm).

- 4) Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, and K. Kuritani, *T.Magn. Soc. Jpn. (Special issues)*, **4**, 52 (2020).

# 磁気トルクによる磁石振動を用いた触覚提示手法の検討

佐野友輝, 栢修一郎, 石山和志  
(東北大学 電気通信研究所)

Study of wireless haptic display using magnetic torque with magnet vibration

Y. Sano, S. Hashi, K. Ishiyama

(Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University)

## はじめに

近年、バーチャルリアリティ技術の応用として視覚や聴覚だけでなく、指に対して触覚を再現する手法が提案されている。しかしながら提案手法にはいずれも欠点がある。例えばアクチュエータの振動により触覚を再現する手法では自然な触覚を再現できるが、配線やバッテリーが必要となる。超音波による音響放射圧で押し力を作り出す手法<sup>1)</sup>では非接触で触覚を感じることができるが、超音波振動子と指の間に遮蔽物があると触覚を感じることができない。磁場勾配により手に付けた磁石に静的な力を作る手法<sup>2)</sup>では一軸方向の力のみしか作れない。そこで本研究ではこれらの欠点を解決するため、ワイヤレス、かつバッテリーレスで、遮蔽物の影響を受けず、指の姿勢も問わない手法として、指先に貼付した永久磁石に外部から磁場を加えることで、永久磁石に磁気トルクを発生させ、永久磁石の振動により指先に触覚を提示することを提案する。

## システム構成

本研究で用いた装置の構成図を図1に示す。3次元磁場ベクトル制御のための3軸正方形コイル(x軸1辺: 260mm, y軸1辺: 475mm, z軸1辺: 370mm, x, y, z軸それぞれの各コイル間隔: 204mm)と、ファンクションジェネレータ計3ch, バイポーラ電源3台, および指の位置検出のため光学式モーションキャプチャのLeapMotionを使用した。触覚提示のために人差し指先に円盤形ネオジウム磁石(直径10mm, 厚み2mm)を両面テープにて張り付けた。LeapMotionにより指の位置を検出し、常に任意の磁気トルクを生成できるようLabVIEWによるプログラミングを行った。

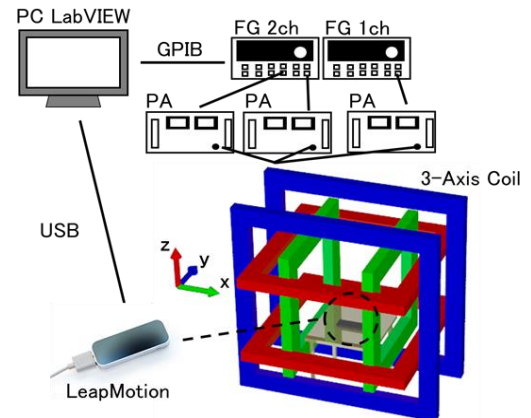


Fig. 1 Device configuration.

## 結果

まずコイル中央付近に指を配置し, x軸コイル(図1: 緑)に基本的な4種類の波形の交流電流を通電した。それぞれの通電波形において指先が振動を感じる磁界の閾値を測定した結果を図2に示す。250Hz付近で閾値は最小となり, 得られた閾値曲線は一般的に知られている触覚の閾値曲線<sup>3)</sup>と一致した。次に指をコイル内で動かし, 動かした指の位置情報から速度を検出し, 速度と位置に応じて通電電流の周波数, 振幅を高速に変化させた。これにより指先が仮想的な凸凹表面をなぞっている感覚が得られた。この感覚を用いることで仮想的な物体の表面形状の再現ができ, よりリアルに物を触っている感覚を得ることが期待される。

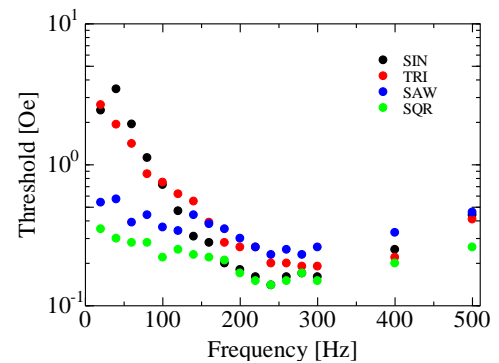


Fig. 2 Frequency response of threshold.

## 参考文献

- 1) T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda: *IEEE Trans. Haptics.*, **3**, 155 (2010).
- 2) Q. Zhang, H. Dong, and A. E. Saddik: *IEEE Access.*, **4**, 299 (2016).
- 3) S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and C. M. Checkosky: *J. Acoust. Soc. Am.*, **85**, 1680 (1998).

## フレキシブル基板を用いた高周波磁化測定用励磁コイルの開発

森賢太郎、萬年智介、磯部高範、柳原英人 (筑波大学)

Development of excitation coils for high-frequency magnetization measurement using a flexible substrates

K. Mori, T. Mannen, T. Isobe, H. Yanagihara (Univ. of Tsukuba)

はじめに

SiC や GaN パワーデバイスの登場によって数MHz 以上の高周波で高効率なパワーエレクトロニクス機器への関心が高まっている[1]。一方でインダクタ等の受動部品品の磁心材料の損失評価の問題が顕在化しており、現在数MHz を超える高周波電力用磁心を動作環境に近い高磁場下で評価する装置や手法が確立されていない。我々は、プリント回路基板(PCB)を用いて多段の直列共振回路を構成して励磁用コイルとすることで高周波、高磁場下での軟磁性材料の測定の実現を目指し、まずはリジッド多層基板を用いた励磁用コイルの作成を試みた[2]。磁化測定を行う際には、励磁用コイルに加え磁束変化を捉えるピックアップコイルも組み込む必要があるがリジッド基板では設計を柔軟に変えることが困難であり、試作の効率が悪い。そこで今回は1層ずつフレキシブル基板を積み重ねることにより任意の層にピックアップコイルを配置できるようにした。

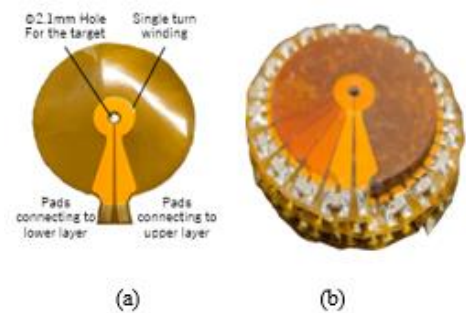


Fig.1 (a) one-turn excitation coil

(b) 60-layer excitation coil

実験方法

Fig.1(a)に試作した一層分の励磁用コイルを示す。これを18度ずつずらしながら接着し、60層の励磁コイルを作製した(Fig.1(b))。一層毎に積層セラミックコンデンサを挿入した60段のLC直列共振回路とし、共振周波数が4MHzとなるように積層セラミックコンデンサを適用した。このコイルにFig.2のようにハーフブリッジ回路に接続して測定を行った。

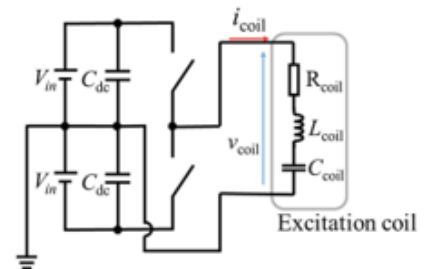


Fig.2 Experimental circuit

結果

インバータ出力電圧を  $V_{in}=163.8V$  としてコイルに流れる電流をデジタルオシロスコープで観測した波形を Fig.3 に示す。この際測定全体で数  $\mu s$  程度の動作で済むので発熱によるコイルの破損は問題にならない。今回の実験ではコイルに最大23Aの電流を流すことができ、これはコイル中心に0.21Tの磁場が発生していることを意味する。本手法を用いることでコイルの磁場発生部分に高周波かつ大振幅の磁場を発生させることができることが確認された。今後は実際に励磁コイルにピックアップコイルを実装し、ピックアップコイルを用いた磁化測定について検討を進める。

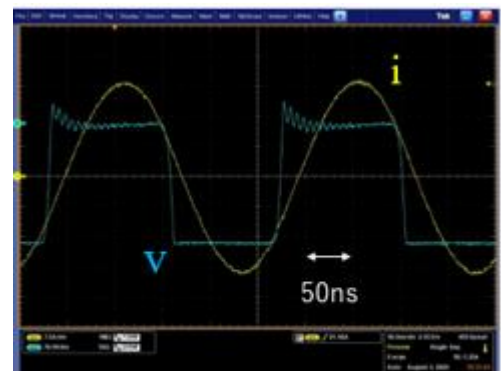


Fig.3 Result of current waveform

参考文献

- [1] Han, Yehui, Grace Cheung, An Li, Charles R. Sullivan, and David J. Perreault. IEEE Trans. Power Electron. Vol. 27, No. 1, pp. 425-435, Jan. (2012).  
 [2] Koichi Yoshida\*, Takanori Isobe, Hideto Yanagihara 平成31年電気学会全国大会 セッション A210-3 講演番号 4-039

# GGA+ $U$ 法によるSmFe<sub>12</sub>における Smの軌道モーメントの理論的評価

山下祥吾<sup>1,2</sup>、吉岡匠哉<sup>1,2</sup>、土浦宏紀<sup>1,2</sup>、Pavel Novák<sup>3</sup>

(東北大工<sup>1</sup>、ESICMM<sup>2</sup>、チェコ科学アカデミー<sup>3</sup>)

Theoretical study for the orbital moment of the Sm ions of SmFe<sub>12</sub> with GGA+ $U$  method.

S. Yamashita<sup>1,2</sup>, T. Yoshioka<sup>1,2</sup>, H. Tsuchiura<sup>1,2</sup>, P. Novák<sup>3</sup>

(Department of Applied Physics, Tohoku Univ<sup>1</sup>, ESICMM<sup>2</sup>, Academy of Science of the Czech Republic<sup>3</sup>)

## はじめに

Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bをはじめとした、希土類永久磁石は現代のテクノロジーに欠かせない高機能材料の1つである。その中でもNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bに変わる材料として近年、SmFe<sub>12</sub>に注目が集まっている。SmFe<sub>12</sub>は単位格子内に含まれる希土類に対するFeの割合が大きくなることから、高い飽和磁化が期待でき、かつ、格子内の空隙が大きいことから、Smイオンは孤立した状態をよく保っており、磁気異方性に有利であると考えられている。しかし、この物質は熱力学的に不安定であり、バルクではSm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>に変形してしまい、薄膜でしか合成できないという欠点も抱えている。本研究では、薄膜の安定相での構造を仮定し、第一原理電子状態計算を行った結果について報告する。

## 計算手法

Smの4*f*電子は局在性が強く、電子間相互作用の影響が強いと考えられるため、本研究においては電子相関の影響を考慮することのできるGGA+ $U$ 法を用いた計算を行う。しかし、*f*電子系に+ $U$ 法を適用する場合、*f*軌道占有状態に対する初期条件によっては、正しい基底状態が得られないことがある。そのため、初期条件を変化させ、最もエネルギーの低くなる状態を探索し、その状態における*f*電子相互作用を解析する。

## 計算結果

Fig 1.に各初期条件における軌道磁気モーメントとトータルエネルギーの*U*依存性を示す。

この図からは軌道磁気モーメントとして、どの*U*の値においても、3.0  $\mu_B$ 程度を与える初期条件が最もエネルギーが低くなり、基底状態、もしくはそれに近いエネルギーに収束していると考えられる。SmにおいてはHundの第2則から5.0  $\mu_B$ 程度の軌道磁気モーメントが期待できるが、本計算結果ではそれを下回る値が得られており、Smサイトにおける強い結晶場の効果により、部分的なクエンチングが起き、Hund第2則の破れを示唆していると考えられる。

## 参考文献

- 1) Y. Hirayama, Y. K. Takahashi, S. Hirose, K. Hono, Scripta Mater. **138** (2017) 62-65
- 2) Y. Harashima, K. Terakura, H. Kino, S. Ishibashi and T. Miyake, JPS Conf. Proc. **5** 011021 (2015).
- 3) P. Larson, I. I. Mazin, D. A. Papaconstantopoulos, Phys. Rev. B **67**, 214405 (2003).

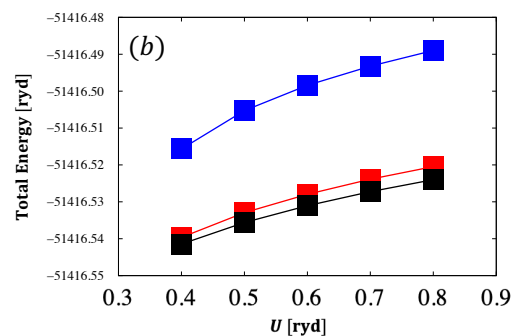
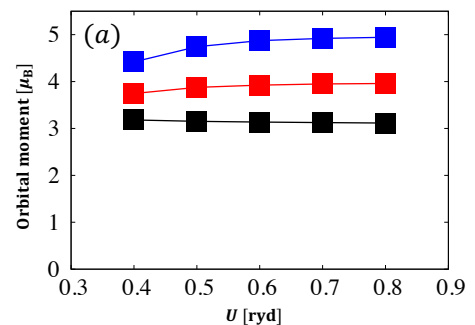


Fig. 1 各初期条件における(a)軌道磁気モーメント (b)トータルエネルギーの*U*依存性

## Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub>系薄膜の軽元素添加による構造と磁気特性

神林守人<sup>1</sup>、加藤大夢<sup>1</sup>、森裕一<sup>1</sup>、土井正晶<sup>1,2</sup>、嶋敏之<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>東北学院大工、<sup>2</sup>元素戦略磁性材料研究拠点)

Structure and magnetic properties of Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> thin films by the addition of light elements

M. Kambayashi<sup>1</sup>, H. Kato<sup>1</sup>, Y. Mori<sup>1</sup>, M. Doi<sup>1,2</sup>, T. Shima<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Tohoku Gakuin Univ., <sup>2</sup>ESICMM)

### はじめに

ThMn<sub>12</sub>型構造を有する RFe<sub>12</sub>系化合物は高い飽和磁化及び異方性磁界を有することが報告されている。中でも、MgO(100)単結晶基板を用いて V 下地層上に作製した Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> エピタキシャル膜は室温において飽和磁化  $M_s = 1416 \text{ emu/cm}^3$ 、異方性磁界  $H_A = 120 \text{ kOe}$ 、キュリー温度  $T_C = 586 \text{ }^\circ\text{C}$  を示し、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 相よりも優れた磁気特性を示すことが報告されている<sup>1)</sup>。そのため、Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> 化合物は Nd-Fe-B 焼結磁石に替わる高性能永久磁石材料として期待され、精力的に研究が行われている。先行研究において、RFe<sub>12</sub>系化合物に軽元素である N を添加することで磁気特性の向上が報告され<sup>2)</sup>、我々はこれまでに、100 nm の膜厚の Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> 薄膜において B 添加により 12 kOe もの大きな保磁力が得られることを報告した<sup>3)</sup>。微細構造解析の結果、主層は柱状構造を形成し、B が粒界相近傍に存在することでシェル状構造を有することが確認された。これより、主層内の僅かな組成の違いが磁化反転強度に差を生じさせ保磁力向上に起因するものと推察される。以上の結果から、Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> 薄膜へ軽元素である B の添加は磁気特性向上に有効であることが確認された。本研究では、Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> 薄膜に B や N 等の軽元素を添加した試料を作製し、その構造および磁気特性への影響を詳細に調べることを目的とした。

### 実験方法

試料は超高真空多元スパッタ装置を用いて MgO(100)単結晶基板上に作製した。最初に、基板クリーニングのために 550 °C の基板温度で 20 分間の熱処理を行い、その後 325 もしくは 350 °C の基板温度において下地層として V 層を 20 nm 成膜し、続けて主層として Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub>-X 層 (X=B, C, N) を軽元素の添加量を変化させ、 $t_{\text{SFCX}}$  nm 成膜した。最後に、酸化防止層として V 層を 10 nm 成膜した。作製した試料の構造は X 線回折装置(XRD)を用いて、磁気特性は超伝導量子干渉磁束計(SQUID)を用い、室温下で ±70 kOe の範囲で磁場を印加し評価した。

### 実験結果

磁化測定の結果より、Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> 薄膜に B を添加した試料では顕著に保磁力が増加する傾向が確認された。また、X 線回折パターンより B 及び N を添加した場合は、主相の(002)および(004)ピークが高角側へシフトしていることから  $c$  軸が縮小すると考えられる。これに対して C の場合は上記の主相のピークが低角側へシフトしていることから  $c$  軸が伸長していると推察される。講演では、B、C 及び N の添加量の変化による構造および保磁力を含む磁気特性の変化を詳細に報告し、Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> 薄膜に対する軽元素の影響を比較する。

### 参考文献

- 1) Y. Hirayama, Y. K. Takahashi, S. Hirose, K. Hono, *Scr. Mater.*, **138**, 62-65, (2017).
- 2) Y. Hirayama, Y. K. Takahashi, S. Hirose, K. Hono, *Scr. Mater.*, **95**, 70-72, (2015).
- 3) H. Sepehri-Amin, Y. Tamazawa, M. Kambayashi, G. Saito, Y. K. Takahashi, D. Ogawa, T. Ohkubo, S. Hirose, M. Doi, T. Shima, K. Hono, *Acta Mater.*, **194**, 337-342, (2020).

# 高濃度La-Co置換M型Srフェライトの単相化に関する研究

羽仁健登、和氣剛、田畑吉計、中村裕之  
(京都大)

Study on single phase of high concentration La-Co substituted SrM type ferrite

K. Hani, T. Waki, Y. Tabata, H. Nakamura  
(Kyoto Univ.)

## 1.はじめに

M型フェライト( $A\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $A = \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Pb}$ )は低価格・化学的安定・資源豊富などの理由から広く普及している永久磁石材料である。高性能フェライト磁石の母材としてLa-Co置換SrM<sup>1)</sup>( $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ )が用いられている。Co<sup>2+</sup>の軌道モーメントによって一軸異方性が増大し、保磁力の向上が知られている。現在商用のものでは、Co<sup>2+</sup>の最大置換量は0.3程度とされている。電荷補償の観点から $x = y$ と設計されるが、実際にはFe<sup>2+</sup>発生により $x > y$ となっていることが判明しており、Fe<sup>2+</sup>発生を抑制すれば、Co<sup>2+</sup>高濃度化が期待できる。我々の先行研究<sup>2)</sup>により、合成時の酸素分圧を上げるとFe<sup>2+</sup>が抑制され、Co<sup>2+</sup>高濃度なM相を合成できることが報告されており、 $P_{\text{O}_2} = 1.0 \text{ atm}$ でCo<sup>2+</sup>最大置換量が0.7程度、 $P_{\text{O}_2} = 387 \text{ atm}$ では1.0程度まで可能となる。しかし単相化には至っておらず、詳細な磁性解明ができていない。本研究では、高濃度La-Co置換SrM試料の単相化を目的とし、反応条件の探索を行った。

## 2.実験方法

$\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$  ( $0.5 \leq x = y \leq 1.0$ ) 多結晶を固相反応法により合成した。所定の組成になるように $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ を秤量、混合の後、ペレット状にし、 $P_{\text{O}_2} = 10 \text{ atm}$ 下で、 $1300^\circ\text{C}$ で12時間焼結した。反応を十分進行させるため、粉末化と焼結を数回繰り返した。 $P_{\text{O}_2} = 10 \text{ atm}$ 下での合成には内熱式高圧雰囲気電気炉を用いた。得られた試料についてXRDを用いて相同定を行い、波長分散型X線分析装置(WDX)を用いて組成分析を行った。

## 3.実験結果

XRDの結果、全ての組成においてM型フェライト相が確認された。 $x = y \leq 0.6$ の組成では不純物のピークがなく、SEM像を確認してもM相単相であった。WDXでの元素分析の結果、これらにおいて $x = y$ が確認された。 $0.6 \leq x = y$ の組成では $x, y$ が大きくなるにつれてXRD上で $\text{LaFeO}_3$ などの不純物のピークが見られた。WDXでM相を元素分析した結果、 $x$ は仕込み組成通りとなる一方、 $y$ は $x$ に伴い増加しているものの仕込み組成よりも小さくなった。これは $P_{\text{O}_2} = 1.0 \text{ atm}$ でも見られた傾向であり、部分的にCo<sup>2+</sup>が置換されず、その代わりにFe<sup>2+</sup>が発生し電荷補償となっていると考えられる。仕込み組成 $x = y = 1.0$ のM相の組成分析より、 $P_{\text{O}_2} = 10 \text{ atm}$ ではCo<sup>2+</sup>が $y = 0.8$ まで置換できることが分かった。

## 参考文献

- 1) K. Iida et al., J. Magn. Soc. Jpn. **23**, 1093 (1999)
- 2) T. Waki et al., Mater. Res. Bull. **104**, 87 (2018)

