

永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタ

会津翔太, 中村健二, *大日向 敬, *有松健司
(東北大学, *東北電力)

Orthogonal-Core-type Variable Inductor with Permanent Magnets

S. Aizu, K. Nakamura, *T. Ohinata, and *K. Arimatsu
(Tohoku University, *Tohoku Electric Power Co., Inc.)

はじめに

可変インダクタは、電力用コンデンサと組み合わせることで、無効電力補償型の電圧調整装置として応用できる。先に筆者らは、カットコアと積層コアの2種類のコアからなる、新しい直交磁心型可変インダクタを提案した¹⁾。本可変インダクタは両コアの接合面で積層が平行に揃うため、層間短絡が生じない。

本稿では、上述の可変インダクタの直流制御磁束の磁路に永久磁石を挿入することで、無制御時にもある一定の大きさの無効電力の供給を可能にするとともに、制御電流を正負に変化させることで、無効電力を線形かつ連続的に制御可能な新しい可変インダクタについて、リラクタンسネットワーク解析(RNA)を用いて検討したので報告する。

永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタの特性

Fig. 1 に、考察に用いた直交磁心型可変インダクタの諸元を示す。カットコア側に直流制御巻線を配置し、積層コア側に交流主巻線を配置する。

Fig. 2 に、永久磁石を挿入した直交磁心型可変インダクタを示す。カットコア側から生じる直流制御磁束の磁路に対して直列に永久磁石を挿入することで、制御電流がゼロの状態でも、ある一定の大きさの無効電力を発生させることができる。また、直流制御電流の大きさと向きを制御することで、無効電力を増減させることができる。

本稿では、同図(a)~(c)に示すように、3種類の磁石配置について、RNAを用いて無効電力制御特性を算定した。なお、磁石材料はフェライト磁石である。

Fig. 3 に、各磁石配置に対する無効電力制御特性の算定結果を示す。また、磁石の無い従来の可変インダクタの特性も同図中に示す。なお、磁石厚は各配置毎に調整して最適化している。この図を見ると、いずれの配置においても、制御電流が0 Aの点で一定の大きさの無効電力を発生できていることがわかる。また、制御電流を正負に変化させることで、線

形かつ連続的に無効電力を制御できていることが了解される。

参考文献

- 1) 佐藤, 中村, 大日向, 有松, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 6, No. 1, pp. 53-57 (2022)

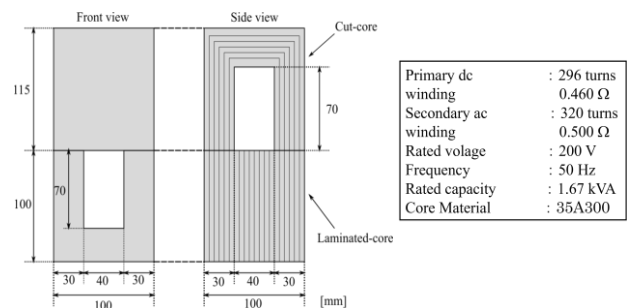


Fig. 1 Specifications of an orthogonal-core-type variable inductor consisting of cut core and laminated core.

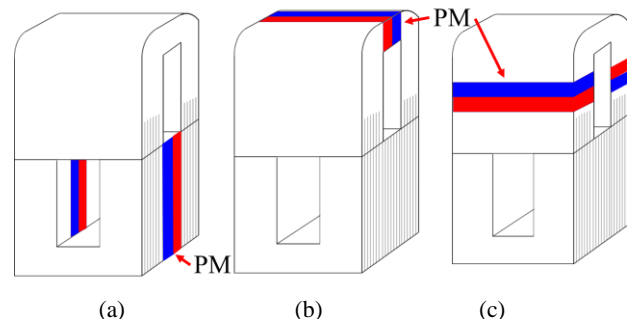


Fig. 2 Three variable inductor models with different magnet arrangements.

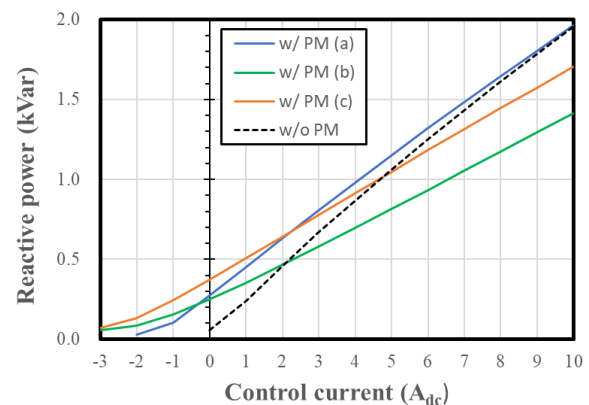


Fig. 3 Comparison of calculated reactive power characteristics of the variable inductors with different magnet arrangements.

倍電流整流回路用結合インダクタの作製

川田奈波, *大山秀樹, 南澤俊孝, 曾根原誠, 佐藤敏郎
(信州大学, *味の素ファインテクノ)

Development of Coupled Inductor for Current-Doubler rectification circuit
Nanami Kawada, *Hideki Oyama, Toshitaka Minamisawa, Makoto Sonehara, Toshiro Sato
(Shinshu Univ, *Ajinomoto Fine-Techno Co.)

1.はじめに

近年, 電子機器の小型化および省電力化に対する要求はますます大きくなっている. それに伴い, 専有面積の大きいインダクタ等の受動素子の小型化および高効率化が期待されている. 筆者らのグループは, これまで, MHz 帯での使用に適した複合磁性材料を用いて, Beyond MHz スイッチング電源用インダクタの開発を試みてきた^[1]. 今回, MHz 帯スイッチング LLC 共振型コンバータの低電圧・大電流出力化に有利な倍電流整流回路の結合インダクタについて, 三種類の磁性材料を組み合わせることで試作を行ったので報告する.

2.実験方法

共振周波数 15 MHz の LLC 共振型 DC-DC コンバータに使用する倍電流整流回路用の結合インダクタを試作した. Fig.1 に作製した結合インダクタの構造を示す. インダクタの導体ラインは四層プリント基板を用いた. 一次側導体と二次側導体を交互に配置することで, 結合係数の向上を図った. 磁性材料には Fe 系ナノ結晶球形粉末/エポキシ樹脂コンポジット材料, Fe-Si 多結晶球形粉末/エポキシ樹脂コンポジットシート, および Ar 中熱処理扁平粉末/エポキシ樹脂コンポジットシート^[2]を使用した. スラリ状のコンポジット磁心材料と 100°C以上の加熱で可塑性を有するコンポジットシート磁心で導体ライン周りに閉磁路を形成し, 高透磁率 Fe 系ナノ結晶扁平粉末シート磁心を最外層に配置することで導体ライン周辺の磁束密度の向上と外部への漏れ磁束の低減を図った. Fig. 1 で示したインダクタ構造を対象に三次元電磁界解析(HFSS Ver.19.2, ANSYS 社)で特性解析を行うとともに試作・評価した.

3.実験結果

Fig.2 に結合インダクタの和動動作時インダクタンスの解析結果と実測値を示す. なお, 実測値の No.1, No.2 は二個のインダクタのデータである. 30 MHz 付近までは解析値と実測値はほぼ一致するが, それ以上の高周波領域においては相違が現れた. 共振周波数は 150~200MHz であり, 実測値の方が鋭い共振を示していることから, 解析で使った磁性材料の損失の違いが影響している可能性がある. 結合係数 k の実測値は約 0.99 であり, 倍電流整流回路用結合インダクタとして十分な結合度を確保した. 現在, 10MHz 帯スイッチング LLC 共振/倍電流整流コンバータへの適用を進めている.

参考文献

[1] S.Kimura, et al., *IEEE Shin-etsu Section Student Branch(SSB) Online Poster Session*, Dec.2021, [2] 梶原あさみ, 令和 2 年度電気学会全国大会, 2-101, 2020 年 3 月.

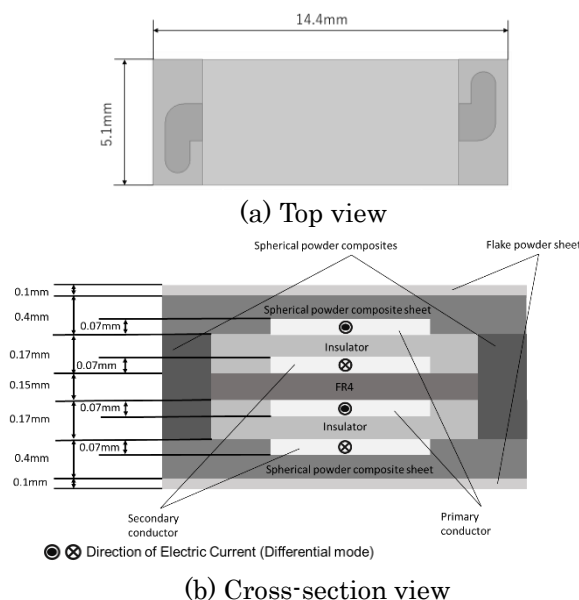


Fig.1 Structure of Coupled Inductor

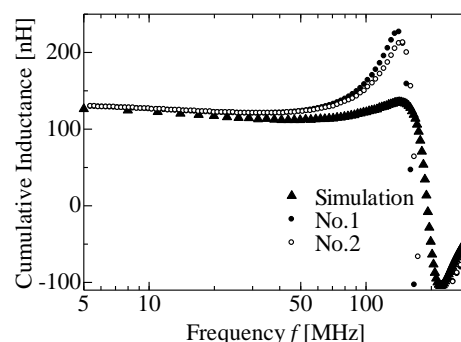


Fig.2 Cumulative Inductance vs. frequency

Beyond 10MHz スイッチング DC-DC コンバータ用 プレーナパワーインダクタの開発

宮田涼平, 木村創一, 川田奈波, 南澤俊孝, 曾根原誠, 佐藤敏郎
(信州大学)

Development of Planer Power Inductor for Beyond 10MHz Switching DC-DC Converter
Ryohei Miyata, Soichi Kimura, Nanami Kawada, Toshitaka Minamisawa,
Makoto Sonehara, Toshiro Sato
(Shinshu University)

1. はじめに

USB PD 用 DC-DC コンバータ (24V 入力, 5~20V 出力) への適用を目的に, プレーナパワーインダクタを試作し, 10MHz 帯スイッチング二相 GaN-FET Buck コンバータに適用した. インダクタには鉄系メタルコンポジット磁心材料と PCB ベースのプレーナコイルを組み合わせた外鉄内部コイル型構造を採用した.

2. プレーナパワーインダクタの試作

Fig.1 に試作したプレーナパワーインダクタの外観と断面構造を示す. インダクタの導体ラインは銅導体厚 $35\mu\text{m}$ の四層プリント基板を用いた. $2.6\mu\text{m}$ 径 Fe-Si-B-C-Cr 系アモルファス球形合金粉末/エポキシ樹脂コンポジット (Fe-AMO) [1], ならびに低保磁力が期待できる $3.5\mu\text{m}$ 径 Fe-Si-B-Nb-Cu 系ナノ結晶球形合金粉末/エポキシ樹脂コンポジット (Fe-Nano) [2] を主磁束磁路に採用して Fig. 1 に示すような閉磁路構造を構成し, コンバータ回路基板実装面側の表面に磁気シールド用として高透磁率 Fe-Si- B-Nb-Cu 系ナノ結晶扁平粉末/シリコンコンポジットシートを配置した.

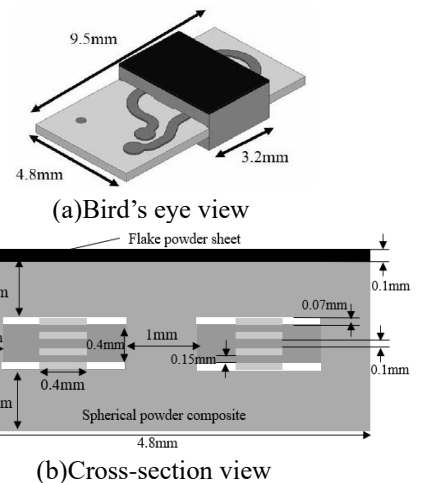


Fig.1 Structure of Planer Power Inductor

3. プレーナパワーインダクタの諸特性とコンバータの効率

Fig.2 に主磁束磁路に Fe-Nano コンポジットを使用して試作したインダクタのインダクタンスと Q 値の周波数特性を示す. 12MHz におけるインダクタンスは 245nH, Q 値は 41 であり, インダクタンスが 10%低下する直流重畳電流は約 4.5A, コイル直流抵抗は $45\text{m}\Omega$ であった. 主磁束磁路に Fe-AMO コンポジットを使用した場

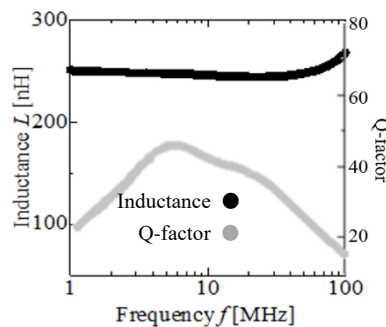


Fig.2 Inductance & Q-factor vs. frequency

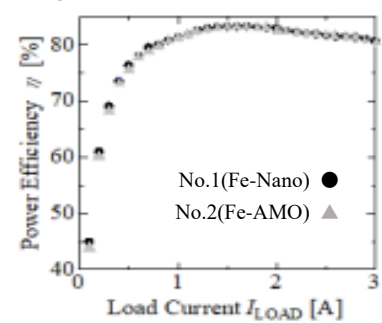


Fig.3 Power Conversion Efficiency.

12MHz におけるインダクタンスは 229nH, Q 値は 48 となった. 4.5A まででは直流重畳特性はみられず, コイル直流抵抗は $36\text{m}\Omega$ であった. Fig.3 に試作インダクタを実装した 24V 入力-5V 出力 12MHz スイッチング二相 Buck コンバータの電力変換効率の出力電流特性を示す. No.1 はインダクタの主磁束磁路に Fe-Nano コンポジット, No.2 は Fe-AMO コンポジットを使用した場合を示している. 最大効率はいずれも負荷電流 1.7A のときに 83.3%となる. それより軽負荷側ではインダクタンスの違いにより, Fe-Nano コンポジット磁心を採用した方が若干効率が高くなっている.

[1] Kanako Sugimura *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, 53, #2801406, 2017.

[2] 木村創一, 他, 第 45 回日本磁気学会学術講演概要集, 02pC-3, 2021.

myRIO を用いたリングコア用磁気特性測定システムにおける 簡易波形制御手法に関する検討

川口正隆, 羽根吉紀, 中村健二
(東北大学)

A Study on Simple Waveform Control Method
in Magnetic-Properties Measurement System for Ring Core Using myRIO

M. Kawaguchi, Y. Hane, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

一般に電気機器の解析・設計においては、鉄心材料の磁気特性の実測データが用いられる。高精度な磁気特性の測定においては、フィードバック制御により磁束正弦波条件を満たすことが求められる。これに対して先行研究では、種々の波形制御手法が提案されてきたが、その多くは特別な機器の使用が必要であり、実装は必ずしも容易ではない。そこで本稿では、多くの高等教育機関で用いられている NI 社製 myRIO を磁束波形制御に用いた磁気特性測定システムを構築するとともに、これをリングコアの磁気特性測定に適用することにより、本システムの妥当性の検証を行ったので報告する。

提案する磁気特性測定システム

Fig. 1 に本稿で提案する磁気特性システムを示す。本システムでは、サーチコイル電圧 v_s を制御量、出力電圧 v_o を操作量とし、myRIO に搭載された FPGA をフィードバック制御に用いて、出力波形をリアルタイムで更新しながら磁束波形制御を行っている。

本稿では、提案システムを用いて、無方向性ケイ素鋼板 (35A300) のリングコアの測定を行うことで、その妥当性の検証を行った。Fig. 2 に、周波数 50 Hz, 最大磁束密度 1.8 T における励磁電圧 v_e , サーチコイル電圧 v_s , 励磁電流 i の各波形を示す。このように、波形制御を行うことで、高磁束密度領域においてもサーチコイル電圧を正弦波に制御可能である。

次いで、上述のサーチコイル電圧波形の時間積分により求まる磁束波形について、Fig. 3 に示すように、制御時と非制御時の各最大磁束密度における歪み率を計算した。同図より、非制御時には高磁束密度において歪み率が著しく増加しているのに対して、制御時にはすべての最大磁束密度において歪み率を 1% 未満にまで抑えられていることがわかる。

今後は、より高い周波数帯や直流重畳時の磁気特性測定に提案手法を適用し、有用性について検証を行う予定である。

なお、本研究の一部は、JSPS 科研費 JP22K14232 およびパワースタディウム研究助成の交付を得て行った。

参考文献

- 1) 中瀬知哉, 他: 電学論 A, Vol. 199, No. 7, pp. 1019-1025 (1999).

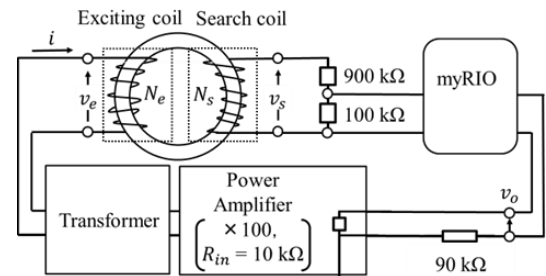


Fig. 1 Proposed magnetic-properties measurement system.

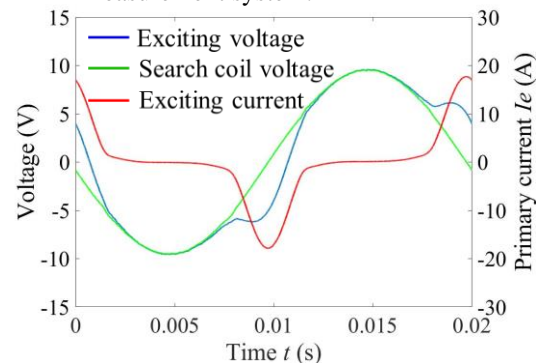


Fig. 2 Each waveform when controlled at $B_m = 1.8$ T and $f = 50$ Hz.

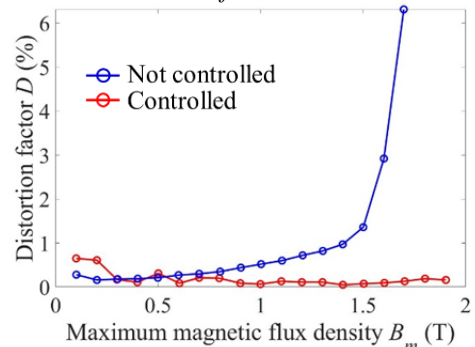


Fig. 3 The distortion factor of magnetic flux density characteristics according to maximum magnetic flux density.

単一アトマイズ粒子の測定のためのトランス結合型透磁率測定装置の感度向上

田丸 慎吾

(産総研 新原理コンピューティング研究センター)

Sensitivity enhancement of transformer coupled permeameter for characterizing a single atomized particle

Shingo Tamaru

(AIST, Research Center for Emerging Computing Technologies)

はじめに

パワエレ回路は、脱炭素社会実現に向けた中核技術の一つとして、その重要性が益々高まっている。現在のパワエレ回路ではインダクタコアの損失が周波数に伴い急激に増加し、高周波限界を決めている。従ってコア用軟磁性材料の高周波における損失機構の解明及びその低減は喫緊の課題となっている。

重要なコア材の一つに、アトマイズ粉をプレス成型した圧粉磁心がある[1]。この材料は数 100 kHz 程度までは優れた特性を示すが、パワエレ回路の高周波化のためには、さらなる高性能化が必要である。これまで透磁率測定はコア最終形状においてのみ可能であったが、粉末状態、理想的には単一粒子の透磁率が測定できれば、高周波特性や損失機構の詳細が明らかになり、高性能な圧粉磁心材料の創成に繋がる事が期待される。我々は高周波透磁率を高感度で測定するトランス結合型透磁率測定装置(Transformer coupled permeameter, TC-Perm)を開発し、これを用いてノイズ抑制シートに含まれる扁平磁性粒子単体の透磁率測定に成功した[2]。本研究では、圧粉磁心用アトマイズ粉の単一粒子測定のために TC-Perm の改良を行った。

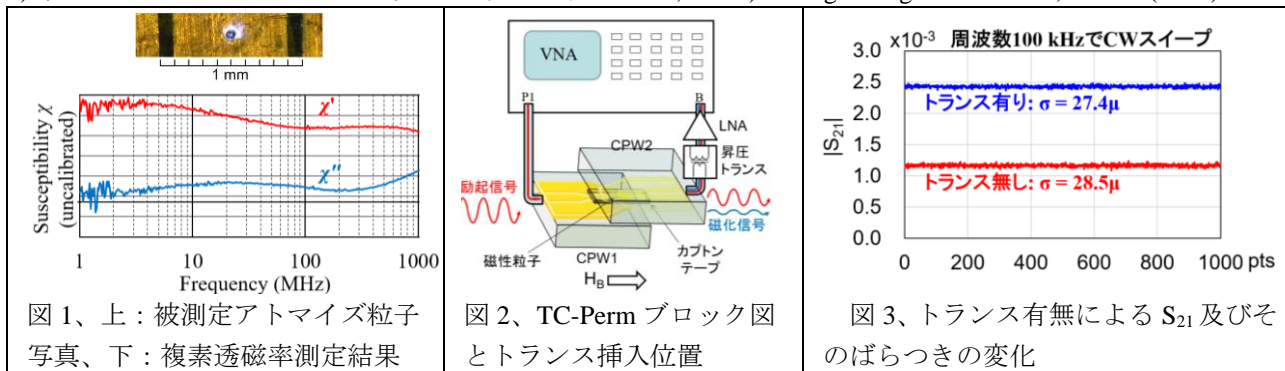
装置改良の概要

図1は、現在の TC-Perm 構成による、直径 50 μm の Fe_2B アトマイズ粒子の透磁率測定結果である。1 MHz 程度までは概ね良好な感度が得られているが、それ以下では感度の低下により測定が困難となってしまう。現在の圧粉磁心の動作周波数は数 100 kHz 以下なため、これでは下限周波数がまだ高すぎる。TC-Perm においては磁束変化の検出に短絡終端された平面導波路(CPW)が用いられ、その出力インピーダンスは非常に低い一方、検出信号は入力インピーダンス 50 Ω の低雑音アンプ(LNA)に送られるため、非常に大きな不整合が生じている。これを解消するため、図2に示すように、CPW と LNA の間に巻線比 1:10 の昇圧トランスを挿入し、100 kHz における透過係数 S_{21} 及びそのばらつきを測定した。その結果を図3に示す。トランス挿入により S_{21} が約2倍に増加したが、標準偏差は全く変化しなかった。このトランスは本来 10 kHz 以下で動作し、またもっと高いインピーダンス間の整合を取るよう設計されているため、トランスを TC-Perm に最適化することにより、更なる感度向上が期待できる。発表では、TC-Perm に合わせたトランスの設計指針やその性能、またトランス導入後の TC-Perm による単一アトマイズ粉の測定結果を報告する。

(謝辞) Fe_2B 粒子をご提供頂いた(株)トーキンの五十嵐利行様に感謝致します。本研究開発は、文部科学省 革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 JPJ009777 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 住友電工テクニカルレビュー、2016年1月号 No.188, 2) J. Magn. Magn. Mater. 501, 166434(2020).



円筒形状の鉛直方向移動用リニアアクチュエータの開発 (形状が推力特性に与える影響に関する基礎的検討)

野阪肇、小川和輝、内野大悟、加藤太朗、池田圭吾、遠藤文人、成田正敬、加藤英晃
(東海大学、*¹東京工科大学、*²北海道科学大学、*³福岡工業大学)

Development of Cylindrical Linear Actuator for Vertical Transfer
(Fundamental Consideration on Effect on Thrust Characteristics with Shape)

H. Nosaka, K. Ogawa, D. Uchino, T. Kato, K. Ikeda, A. Endo, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ., *¹Tokyo Univ. of Tech., *²Hokkaido Univ. of Sci., *³FIT)

はじめに

超高層ビルなどの大型建造物において人や荷物などを運搬する際にエレベータなどの昇降用デバイスが利用される。このようなデバイスを昇降させるには滑車やタイヤなどを用いてケーブルと接触させることにより発生する摩擦力を利用して昇降する駆動方式が一般的である¹⁾。しかしながらケーブルの摩擦係数が小さい場合は、デバイスの自重を上回る摩擦力を必要とするため、接触面方向の力が増加する。この接触面方向の力の増加は効率の低下や、異物の巻き込みによるケーブルの破損の原因となる。そこで著者らは Fig. 1 に示すような導電体で一様なケーブル (リアクションプレート) を鉛直方向に昇降する円筒型リニア誘導モータ²⁾を用いたアクチュエータを提案する。提案したリニア誘導モータが円筒型であることの利点は、アクチュエータからケーブルに対して磁力を均一に印加できる点である。本報告は、有限要素法による電磁界解析を行い、ケーブルの形状や材質が発揮される推力特性に与える影響について検討を行った。

電磁界解析によるリニアアクチュエータの推力特性

作成した有限要素解析モデルを Fig. 2 に示す。可動子となる 1 次側には、6 個のコイルとコア、ボビンが設置され、導体であるケーブルが固定子となる。コイルは 3 相交流源に接続されており、上から U⁺、W⁻、V⁺、U⁻、W⁺、V⁻相となる。各コイルの巻数は 182 回、電流値は 7.85 A、周波数は 7 Hz とした。ケーブルに使用する材料は銅とし、直径は 30 mm、可動子とのエアギャップは 1 mm とした。以上の解析条件をもとに過渡応答解析を行い、発生する鉛直方向の推力について検討を行った。解析の結果ケーブルの直径を増加させることによって、可動子の重量も増加するが、推力を自重で除した比推力において増加する傾向が得られた。

参考文献

- 1) 松野, 最近のエレベータ制御技術, 計測と制御, Vol. 21, No. 7, pp. 686-689, 1982.
- 2) 森尋, 古関, 正田, 円筒型リニア誘導モータの鉛直移動への応用可能性の検討, 電気学会論文誌 D, Vol. 122, No. 12, pp. 1149-1156, 1991.

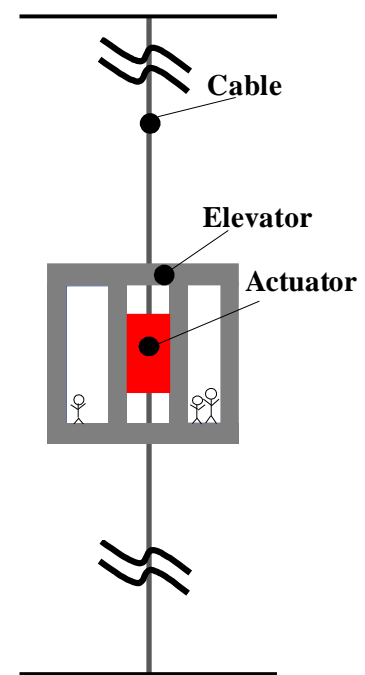


Fig. 1 Schematic diagram of an elevator that omits the counterweight and moves on a single cable.

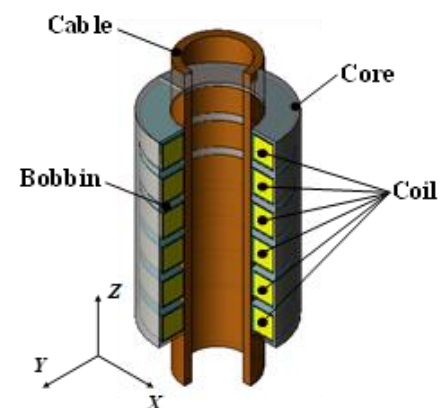


Fig. 2 Analysis model of proposed cylindrical linear induction motor for vertical transfer.

電磁駆動バルブシステムにおけるリニアモータの開発 (アクチュエータ形状に関する基礎的検討)

黒田純平, 木村海斗, 真島悠平, 田中雅人, 内野大悟, 小川和輝,
加藤太朗^{*1}, 池田圭吾^{*2}, 遠藤文人^{*3}, 成田正敬, 加藤英晃
(東海大学, ^{*1}東京工科大学, ^{*2}北海道科学大学, ^{*3}福岡工業大学)

Development of linear motor of electromagnetic valve drive system
(Fundamental consideration on actuator shape)

J. Kuroda, K. Kimura, Y. Majima, M. Tanaka, D. Uchino, K. Ogawa, T. Kato,
K. Ikeda, A. Endo*, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ., ^{*1}Tokyo Univ. of Tech., ^{*2}Hokkaido Univ. of Sci., ^{*3}FIT)

はじめに

先進国ではカーボンニュートラルの実現を目的として自動車の電動化が推し進められている。今後、自動車の動力は電動化が加速するが、内燃機関も引き続き使用されていくものと予想される。エンジンの更なる性能向上を目的にリニアアクチュエータを用いてエンジンバルブを駆動させる方法が検討されている^{1,2)}。しかしながら運転状況に応じて動作タイミングを自在に変化させる手法ははまだ実現していない。そこで当研究グループでは、環境保護を念頭に置いたエンジンの性能向上を目的に、リニアアクチュエータによってバルブを開閉する電磁駆動バルブシステム (EVDS) を用いた吸排気系システムの開発を目指している。

本報告では電磁界解析を利用したアクチュエータ形状が推力特性に与える影響について基礎的検討を行った。

電磁界解析を用いた EVDS の推力に関する検討

Fig. 1 に EVDS の概略を示す。EVDS は永久磁石とコイルで構成されている。駆動方法はローレンツ力を利用している。コイルを通る電流と永久磁石の磁場をコイルに直交させることで可動子が駆動する。バルブの変位量を最大 10mm に設定し、バルブを 1mm ずつ変位させた際の推力を電磁界解析によって求めた。解析によって得られた変位 0 mm における EVDS の磁束密度のベクトルプロットを Fig. 2 に示す。同図より磁束がコイルに直交していることが分かる。このことからバルブの上下運動における推力変化が少なく安定した推力を得ることができた。しかしながらケース中央上部で磁気飽和が発生していることが分かった。

参考文献

- 1) 宇野, 村口, 金野, 岡田, 「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, Vol. 10, (2007), 177-180.
- 2) 柴崎, 岡崎, 小倉, 日本機械学会関東学生支部総会講演会論文集, Vol. 19, (2013), 451-452

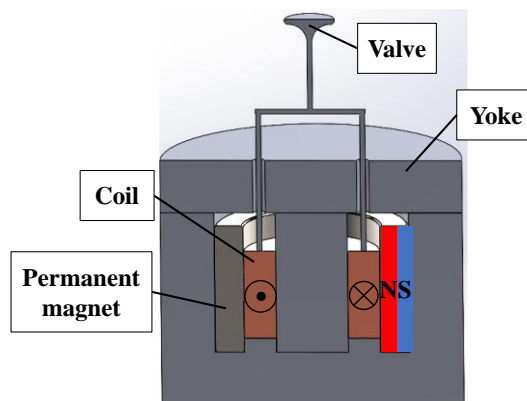


Fig. 1 Analysis model of linear actuator for EVDS.

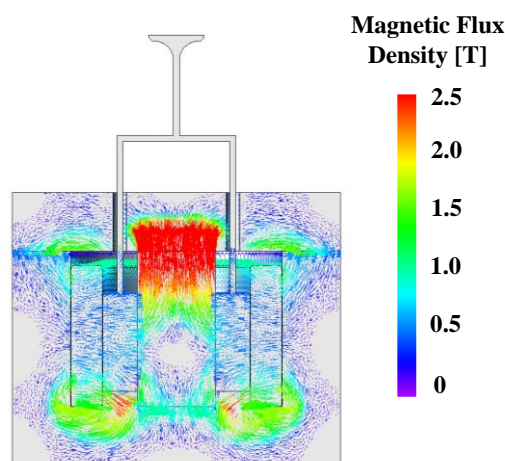


Fig. 2 Vector plot of magnetic flux density

デュアルハルバッハ配列を用いた高速往復運動用 リニアアクチュエータに関する基礎研究 (磁石配列が推力特性に及ぼす影響に関する基礎的検討)

田中雅人、木村海斗、黒田純平、真島悠平、内野大悟、小川和輝、
加藤太朗^{*1}、池田圭吾^{*2}、遠藤文人^{*3}、成田正敬、加藤英晃
(東海大学、^{*1}東京工科大学、^{*2}北海道科学大学、^{*3}福岡工業大学)

A basic study on linear actuators for high-speed reciprocating motion with dual halbach arrays
(Fundamental consideration on effect of magnet arrangement on thrust characteristics)

M. Tanaka, K. Kimura, J. Kuroda, Y. Majima, D. Uchino, K. Ogawa, T. Kato,
K. Ikeda, A. Endo, T. Narita, H. Kato

(Tokai Univ., ^{*1}Tokyo Univ. of Tech., ^{*2}Hokkaido Univ. of Sci., ^{*3}FIT)

はじめに

機械製品を動作させる上で往復運動は様々な箇所に用いられている。一般に往復運動を発生させるためには、カム機構やピストン・クランク機構など、モータやエンジンの回転運動から機構的に変換される場合が多い。しかしながら高精度かつ高速な往復運動を利用する目的で、リニアアクチュエータによるダイレクトドライブが求められている。著者らはより高速な往復運動が可能なりニアアクチュエータの実現を目的として、固定子の永久磁石配列にデュアルハルバッハ配列を用いたリニアアクチュエータを提案し検討を行っている。本報告は、永久磁石の形状を変化させた際に推力特性に与える影響について検討を行った。



(a) Schematic of the actuator (b) Shape of the array at 2:1

Fig. 1 Analysis model of linear actuators with dual Halbach arrays

電磁界解析を用いた永久磁石配列と推力に関する検討

Fig. 1(a)にハルバッハ配列を用いたリニアアクチュエータの概略図を示す。このリニアアクチュエータは永久磁石を配列した固定子と可動子となるコイルで構成され、ローレンツ力により可動子を駆動する。可動子の変位量は最大24mmとし、0.1mmずつ上下方向に変位させた際の推力を電磁界解析によって求めた。ラジアル方向とスラスト方向の永久磁石の寸法の比をRT比とし、ラジアル方向の永久磁石の領域をスラスト方向の2倍としたモデルをFig. 1(b)に示す。解析によって得られた変位0mmにおけるの磁束密度のベクトルプロットをFig. 2に示す。同図より磁束が直交し、安定した推力を発生させることができた。

参考文献

T. Jimbu and Y. Okada: Development of Lorentz force type self-bearing motor using Halbach magnet, 日本機械学会論文集 (C編) 70巻 698号 (2004-10).

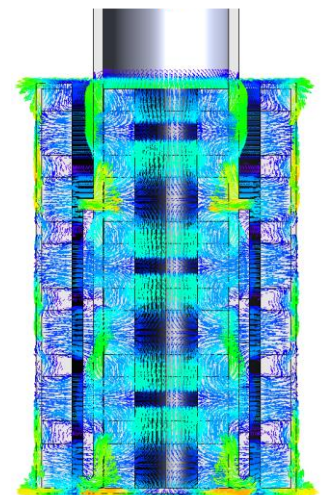


Fig. 3 Vector plot of magnetic flux density

小型化した磁気駆動マイクロポンプの冷却性能

田中龍之介、本田崇
(九工大)

Cooling performance of a miniaturized magnetically driven micropump

R. Tanaka, T. Honda
(Kyushu Inst. Tech.)

はじめに

著者らは、ノート PC 等に搭載する液冷システムへの応用を目指し、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、磁石サイズを見直すことでポンプの低背化を図るとともに、直列接続した場合の液冷システムの冷却性能を評価したので報告する。

素子構成

Fig. 1(a)にポンプ単体の構成と動作原理を示す。可動子は、厚さ方向に着磁された2個のNdFeB磁石($\phi 3\text{mm} \times 1\text{mm}$)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、その磁石間に厚さ $50\mu\text{m}$ のPIフィルム(幅 3mm 、長さ 6mm)を挟んで構成した。この可動子を固定子内に回転軸を介して取り付けた。ポンプの厚さは 5.5mm である。ポンプ長手方向に交流磁界 H を印加すると、磁石の磁気モーメント M が磁気トルク T を受け、磁石は回転軸を中心に回転振動する。それに伴い弾性板が揺動し液体を送り出すことでポンプとして機能する。

本研究では、ポンプ性能向上のため、2つのポンプを直列接続したストレートポンプ(同図(b))、U字ポンプ(同図(c))を作製し評価を行った。

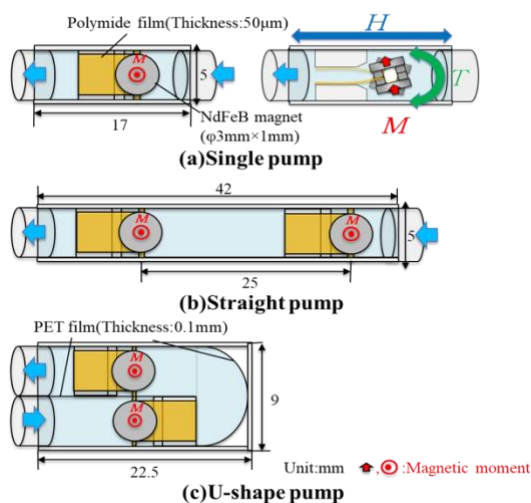


Fig.1 Structure of micropump

実験結果

Fig. 2に 4kA/m の交流磁界印加時における無負荷流量の周波数特性を示す。但し、濃度 20% に水で希釈した不凍液を使用し、駆動はソレノイドコイルによって行った。流量はいずれのポンプも 170Hz で最大値を示す周波数特性となった。その最大値は単体に対し、直列接続することで 40% 程度向上した。

Fig. 3に各ポンプをノート PC を模した自作の冷却システムに組み込んだ際の冷却性能を示す。但し、ヒーター出力を 50W とし、測定開始 60 分後までのヒータープレート表面温度を評価した。ストレートポンプ、U字ポンプにおいて目標温度である 55°C 以下を満たすことができた。この結果より、小型化したポンプにおいても連結することで冷却システムへの応用が可能であることがわかった。

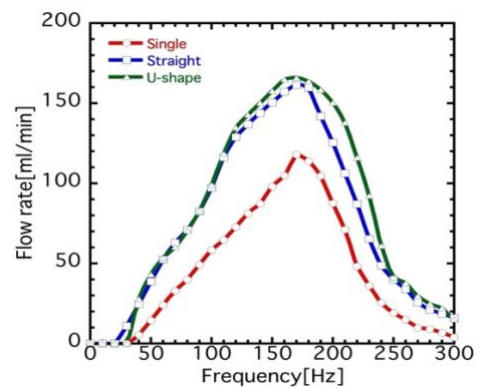


Fig.2 Frequency characteristics of flow rate

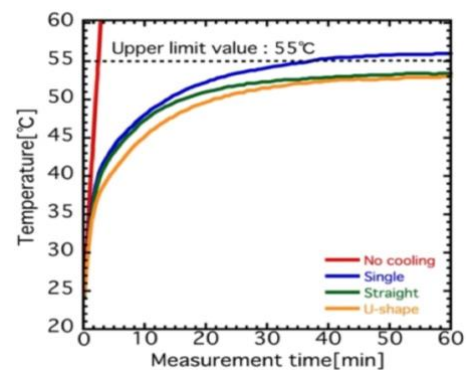


Fig.3 Cooling performance

磁気駆動羽ばたき PAV における推力と翅構造の関係

上原 健太郎、本田 崇
(九工大)

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

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

はじめに

超小型飛翔体における最小の分類として PAV(Pico Air Vehicle)がある。PAVに関する先行研究では、圧電素子による羽ばたき PAV があるが、駆動にはケーブルによる給電が必要であった。これに対し本研究では、永久磁石を素子に搭載し、外部磁界を印加することで羽ばたき飛翔を行う PAV の開発を進めており、交流磁界中においてワイヤレスでの飛翔に成功している。しかし、課題として翅の設計指針が確立できていなかった。本報告では、基準となる翅構造を新たに選定し、推力増大のための指針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、厚さと形状の異なる 2 種類の PI フィルム(25 μm 厚,125 μm 厚)を重ね合わせた構造で、左右に露出した厚さ 25 μm の PI フィルム(4.5mm 長)が捻りバネとして機能する。この捻りバネの中央部分に NdFeB 磁石($\phi 1 \times 2\text{mm}$)を極性が逆になるように配置した。翅は長方形の PI フィルム(5 μm 厚)であり、その上に V 字形の棒(PEs)を配置し、翅の根元部分のみで接着した。なお、翅フィルムの翼弦方向へのたわみを防ぐため、従来の翼弦 10mm から 6mm へと基準を変更した。Fig.2 に動作原理を示す。外部から交流磁界を印加することで、素子に搭載した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。このとき打ち上げと打ち下ろしで翅形状が変化することで抗力差が発生し上向きの推力となる。

実験結果と考察

本実験では、捻りバネ幅を 0.50mm から 1.00mm の 4 種類、翼長を 3mm から 9mm と条件を変えて推力の測定を行った。駆動する磁界強度は 4kA/m とした。Fig.3 は横軸に翼長、縦軸に各素子の最大推力を示した周波数をプロットしたものである。とくに 0.45mN 以上の高推力(自重は 0.35mN)が発生した点を赤色で示した。また、捻りバネ幅 0.50mm、1.00mm における V 字型の棒と磁石による羽ばたき運動の共振周波数の計算値を実線で表し、両者に囲まれる範囲をグレーで着色した。各素子の最大推力を示した周波数は羽ばたき運動の共振周波数の近傍にあり、バネ幅が長く翼長が短いほど高周波数となった。ここで高推力の赤色に着目すると、長い翼長では羽ばたき運動の共振周波数の低周波側、短い翼長では高周波側で発生する傾向が見られる。この赤点を累乗近似すると青色の破線のように翼長の -2 乗の曲線が得られた。この結果は羽ばたきの共振と翅フィルムの曲げ共振が一致する条件で高推力が得られることを示唆している。この知見から翼長を短くする小型化には、捻りバネのバネ定数を高くし羽ばたき運動の共振周波数を高めるか、翅フィルムの曲げ共振の周波数を低下させる必要があると考えられる。

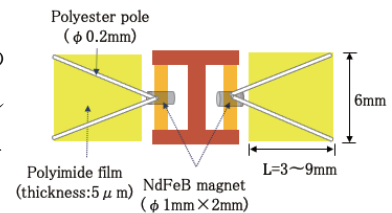


Fig. 1 Structure of flapping mechanism

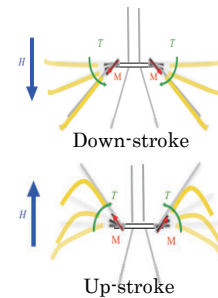


Fig. 2 Actuation principle

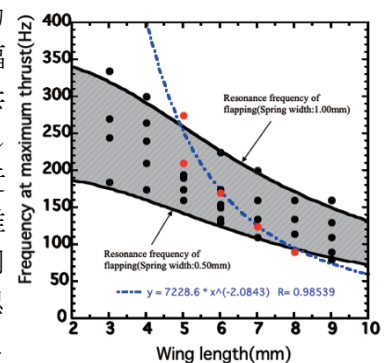


Fig. 3 Relation between frequency at maximum thrust and wing length

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 (永久磁石配置が浮上性能に与える影響に関する実験的検討)

嘉山周汰、市川優介、長吉竜也、川村慎太郎、小川和輝、内野大悟、
池田圭吾*¹、加藤太朗*²、遠藤文人*³、成田正敬、加藤英晃
(東海大学、*¹北海道科学大学、*²東京工科大学、*³福岡工業大学)

Development of electromagnetic levitation system for thin steel plate with
electromagnets and permanent magnets

(Experimental consideration of the effect of permanent magnet arrangement on levitation performance)

S. Kayama, Y. Ichikawa, T. Nagayoshi, S. Kawamura, K. Ogawa, D. Uchino,
K. Ikeda*¹, T. Kato*², A. Endo*³, T. Narita, H. Kato

(Tokai Univ., *¹Hokkaido Univ. of Sci., *²Tokyo Univ. of Tech., *³FIT)

はじめに

冷間圧延されたベルト状の薄鋼板は切断されて切板の状態となり、ローラによって接触搬送される。このとき薄鋼板表面のめっきの傷や剥がれといった、表面品質の劣化が問題となる。そこで当研究グループでは、長方形薄鋼板の磁気浮上装置を用いた非接触磁気浮上搬送制御の検討を行い、これまでに安定した浮上に最適な永久磁石の配置の検討を、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて静的な鋼板のたわみを抑制する配置を探索し、浮上安定性を向上することを確認している¹⁾。さらに、浮上方向に加えて水平方向電磁石を設置した磁気浮上システムにおいて、水平方向電磁石中心間距離を変化させた際の永久磁石の最適配置の GA 探索を行った²⁾。しかし、水平方向電磁石中心間距離を変化させた際の永久磁石最適配置による、妥当性の検証は行われていない。そこで本報告では、水平方向電磁石を設置した磁気浮上システムについて、GA による探索で得られた永久磁石の最適配置による浮上実験を行い、妥当性の検証を行った。

磁気浮上装置

Fig.1 に浮上装置の概略図を示す。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (SS400) を使用する。浮上した鋼板のエッジに対して水平方向電磁石ユニットによる吸引力を加え、鋼板の相対する 2 辺に沿って電磁石を 2 個ずつ設置している。水平方向位置決め制御は各電磁石表面から鋼板エッジまでの距離を 5 mm になるように制御を行う。Fig.2 に永久磁石と鋼板の距離 (GAP) の概略図を示す。GAP を 40 mm から 75 mm まで変化させて、GA による探索で得られた永久磁石の最適配置による浮上実験を行った結果、今回の実験条件の範囲においては、GAP が増加すると鋼板の浮上方向の変位標準偏差が減少する傾向を示した。

参考文献

- 1) 石井宏尚, 成田正敬, 加藤英晃, “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 (磁場の相互作用を考慮した最適配置探索に関する基礎的検討)”, 日本 AEM 学会誌, vol. 24, no. 3, pp.149-154, 2016.
- 2) 嘉山周汰, ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ, 椎名敦紀, 遠藤文人, 成田正敬, 加藤英晃, “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 (遺伝的アルゴリズムを用いた永久磁石の最適配置に張力印加位置が与える影響に関する基礎的考察)”, 日本磁気学会論文特集号, vol. 6, no. 1 pp.93-99, 2022.

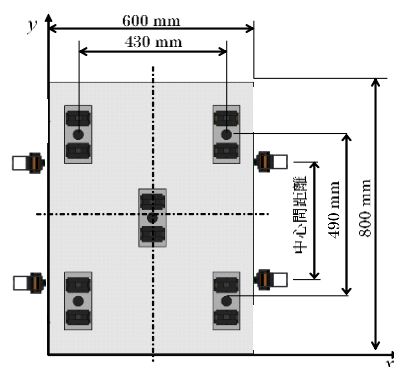


Fig.1 Electromagnetic levitation system

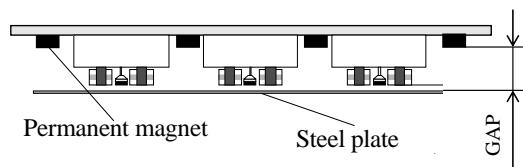


Fig.2 GAP between permanent magnets and steel plate

湾曲させた柔軟鋼板の磁気浮上搬送システムの開発 (鋼板の把持位置が浮上性能に与える影響に関する基礎的検討)

川村慎太郎、市川優介、長吉竜也、嘉山周汰、小川和輝、内野大悟、
池田圭吾*¹、加藤太朗*²、遠藤文人*³、成田正敬、加藤英晃
(東海大学、*¹北海道科学大学、*²東京工科大学、*³福岡工業大学)

Electromagnetic levitation and transportation system for bent flexible steel plate

(Fundamental consideration on effect of gripping position for steel plate on levitation performance)

S. Kawamura, Y. Ichikawa, T. Nagayoshi, S. Kayama, K. Ogawa, D. Uchino, K. Ikeda*¹, T. Kato*²,
A. Endo*³, T. Narita, H. Kato

(Tokai Univ., *¹Hokkaido Univ. of Sci., *²Tokyo Univ. of Tech., *³FIT)

はじめに

工業製品に広く使用され、薄鋼板の製造において、各工程へと搬送する際は、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。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してきた²⁾。しかし、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エッジ部に設置した電磁石と鋼板の把持位置を変更した際の浮上安定性の評価について十分な検討が行えていない。そこで本報告では、鋼板の把持位置が浮上性能に与える影響について実験的検討を行った。

磁気浮上搬送システム

実験装置の写真を Fig.1 に示す。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。浮上用電磁石ユニットは 2 基の電磁石と薄鋼板までの変位を測定するための渦電流式非接触センサを中央に電磁石で挟むように配置して構成されている。アルミフレーム製装置内に設置した 5 箇所の浮上用電磁石ユニットを用いて鋼板を非接触支持するため、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する。変位、そのデジタル微分値である速度、電磁石コイル電流をフィードバックし、鋼板の端部が各電磁石表面から 5 mm の距離を保つように制御を行う。また、薄鋼板を湾曲浮上させるために周囲の電磁石には傾斜ステージを取り付け、電磁石を任意の角度に傾ける。さらに、中央に設置してある電磁石には高さが調整可能なステージを取り付けた。これらを用いて薄鋼板を任意の角度に湾曲させながら浮上できる機構となっている。さらに、浮上制御用電磁石ユニットと水平方向位置決め制御用ユニットの配置を Fig.2 に示す。図中の電磁石の角度と水平方向電磁石ユニットの中心間距離 a を 400 mm、500 mm、600 mm に変化させて実験を行った。

参考文献

- 1) 孫鳳, 岡宏一, 円盤磁石を用いた可変磁路制御機構による磁気浮上(二つの鉄球同時浮上実験), 機論 C 編, vol.78-792, pp2771-2780, 2012.
- 2) 椎名敦紀, 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, エッジ方向からの磁場による湾曲磁気浮上薄鋼板の振動抑制効果(浮上性能に関する基礎的検討), 日本 AEM 学会誌, vol. 29-1, pp. 111-117, 2021.



Fig. 1 Photograph of conveyance system of the steel plate

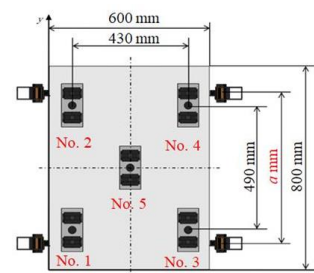


Fig. 2 Layout of electromagnetics for levitation control and horizontal positioning control

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 (電磁石の制振効果に関する実験的検討)

大久保貴之、加納蓮、加藤英晃、内野大悟、小川和輝、池田圭吾*¹、
加藤太朗*²、遠藤文人*³、成田正敬

(東海大学、*¹北海道科学大学、*²東京工科大学、*³福岡工業大学)

Development of electromagnetic guideway for seamless ultra-thin steel plate

(Experimental consideration of damping effect from electromagnet)

T. Okubo, R. Kano, H. Kato, D. Uchino, K. Ogawa, K. Ikeda*¹, T. Kato*², A. Endo*³, T. Narita

(Tokai Univ., *¹HUS., *²TUT., *³FIT)

はじめに

鋼板を製造するラインでは、鋼板とローラによる接触支持搬送が行われている。この間、鋼板はローラとの接触支持搬送により生じる摩擦が原因で鋼板の表面品質の劣化が問題視されており、高品質な製品の実現には鋼板とローラの接触を避ける必要がある。この問題点を解決するために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てきたり。また、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非接触案内制御用電磁石の制振性能に関する検討および最適な電磁石の配置位置に関する検討を行った²⁾。しかし、電磁石の制振性能に関する実験的検討は行われていない。そこで本報告は電磁石の定常電流を変更した際に鋼板に外乱が入力されたときの制振効果について検討を行った。

非接触案内形成装置

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、Fig. 1 に示す連続鋼板の進行方向部分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。また、Fig. 1 に示すようにプーリから下に 500 mm、鋼板の面外方向に 50 mm 離れた箇所に外乱用電磁石、図中の 0° の点に制御用電磁石を設置した。なお、この点は電磁石を設置しない場合に振動が大きい点である。

外乱入力時における制振性能の実験

Fig. 1 に示す位置に制御用電磁石を設置した。制御用電磁石に与える定常電流は 0.5 A とし、測定角度は 0°、45°、90°、135°、180° とした。実験により得られた鋼板面外方向の変位標準偏差を Fig. 2 に示す。同図中には同等の定常電流を設定して行ったマルチボディダイナミクスの結果を重ねて表示している。同図より進行方向変更部の 0° に制御用電磁石を配置することで高い制御抑制効果を得ることができ、この結果はマルチボディダイナミクスの結果と比較して同様の傾向であることが確認できた。

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) 中須賀, 奈良輪, 石原, 山口, 小川, 成田, 加藤, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 5, No. 1, (2021), 37-43.

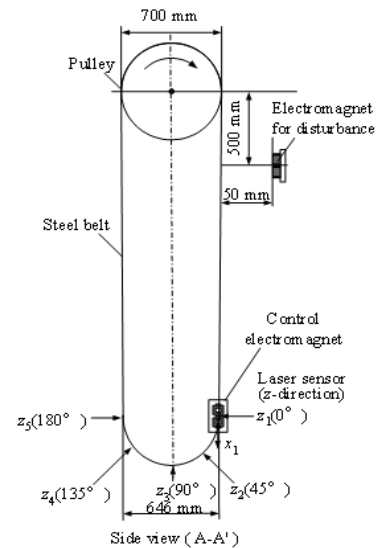


Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic guideway for seamless thin steel plate.

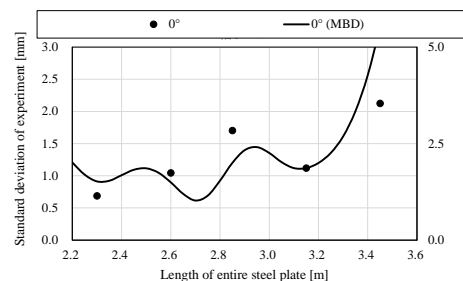


Fig. 2 Experimental results of changing the position of the electromagnet.

柔軟鋼板の湾曲磁気サスペンションに関する研究 (浮上中の鋼板の動的挙動に関する基礎的考察)

宮崎陸、内田大日、船田孔明、小川和輝、内野大悟、池田圭吾*¹、加藤太朗*²、遠藤文人*³、
成田正敬、加藤英晃

(東海大、*¹北海道科学大、*²東京工科大、*³福工大)

A study on bending magnetic suspension for flexible steel plate

(Fundamental consideration on dynamic behavior of steel plate during levitation)

R. Miyazaki, Y. Uchida, K. Funada, K. Ogawa, D. Uchino, K. Ikeda, T. Kato, A. Endo, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ., *¹Hokkaido Univ. of Sci., *²Tokyo Univ. of Tech., *³FIT)

はじめに

電磁石の吸引力を利用した非接触支持を行うため、磁気浮上技術の検討が盛んにおこなわれている¹⁾。当研究グループでは、過去に磁気浮上による非接触搬送の実現性を確認している²⁾。また薄鋼板を対象とする場合には、鋼板を塑性変形しない範囲で曲げた状態で浮上させる湾曲磁気浮上を考案した³⁾。しかし、磁気浮上中の鋼板振動については、詳しく検討されていない。そこで本報告では、有限差分法を用いた数値解析を用いて湾曲磁気浮上を行った際の鋼板振動について検討を行った。

湾曲磁気浮上シミュレーション

Fig. 1 に湾曲磁気浮上装置の概略図を示す。本報告では、有限差分法を用いて数値解析によって湾曲磁気浮上シミュレーションを行った。浮上対象は長方形鋼板(長さ $a = 800$ mm、幅 $b = 600$ mm、厚さ $h = 0.19$ mm)とした。湾曲磁気浮上装置は、5か所の電磁石ユニットによって薄鋼板を磁気浮上させることができる。シミュレーションでは、実機の装置構成を再現できるようにプログラムを設計した。磁気浮上シミュレーションでは、鋼板全体の初期位置を制御点より 1 mm プラス方向に与え、制御点へ鋼板変位が収束するときの変位を観測した。Fig. 2 に湾曲磁気浮上シミュレーションの結果(鋼板の変位時刻歴)、Fig. 3 に解析によって得られた鋼板形状($t = 1$ s)を示す。

参考文献

- 1) 油野他, 日本磁気学会誌, Vol. 35, No. 2, (2011), pp. 123-127.
- 2) 丸森他, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, (2015), 14-00471.
小川他, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 3, No. 1, (2019), pp. 101-106.

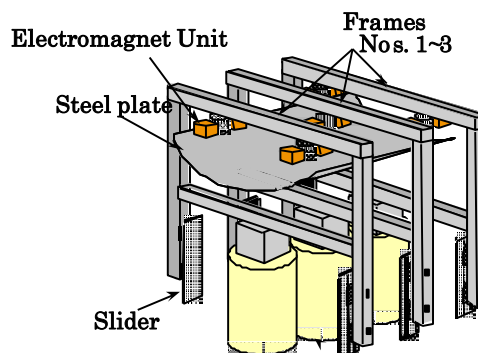


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus

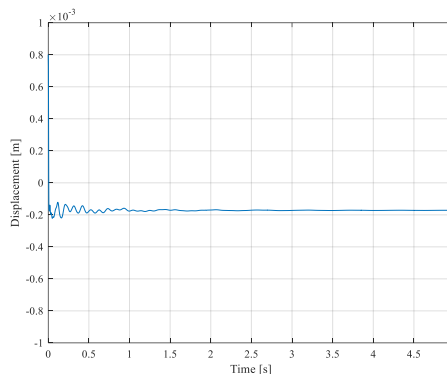


Fig. 2 Time history of displacement in levitated steel plate

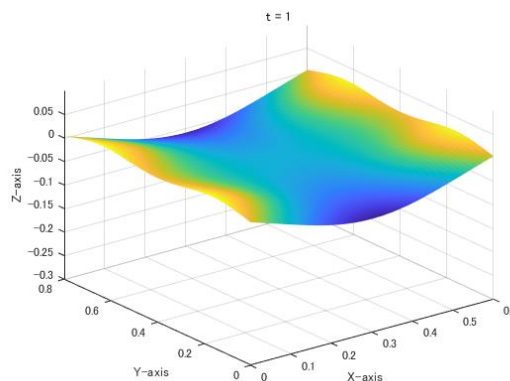


Fig. 3 Motion of levitated steel plate ($t = 1$ s)

ボンド磁石を用いた非対称磁極構造 IPM モータの実機評価

塚田裕太*、吉田征弘、半田修士、田島克文
(秋田大学)

Prototype Test of Asymmetric Pole Structure IPM Motor Using Bonded Magnet

Y.Tsukada, Y.Yoshida, N.Handa, K.Tajima
(Akita Univ.)

研究背景・目的

我が国の交流電動機生産台数のうち永久磁石 (PM) モータは 50%以上を占めるに至っている¹⁾。PM モータの多くは、現在最も強力な磁力を有するとされているネオジウム焼結磁石が用いられている。しかしながら、ネオジウム焼結磁石の原料となるジスプロシウム (Dy) は重希土類であり、高コスト、供給が不安定、採掘や精錬に環境破壊を伴うといった問題が指摘されてきた。筆者らは、ボンド磁石を用いた非対称磁極構造の IPM モータの検討を進めており、先行研究において提案された非対称磁極構造 IPM モータは、トルク性能を維持したまま Dy フリーな磁石への材料置換が可能であることが解析により示された²⁾。

本研究では Fig.1(a)に示す Dy フリーであるサマリウム鉄素磁石を使用した非対称磁極構造を有する回転子を試作し、実測値と解析で得られた諸特性を比較評価した。同時に、同図(b)に示す同体格のネオジウム焼結磁石を使用した従来 IPM モータと比較し、非対称磁極構造の効果を検証したので報告する。

結果

Fig.2 に、本研究で使用した非対称磁極構造 IPM モータの 1/4 解析モデルを示す。固定子は両モデルで同じものを使用し、固定子一回転子間のギャップは 0.5 mm、積厚は 30 mm である。

Fig.3 に相電流振幅が 4 A、回転速度 1500 rpm における電流位相角 β 対トルク特性の実測値を示す。実測値において非対称磁極構造 IPM モータのトルク最大値は、従来 IPM モータと比較すると 0.1 N·m 向上しているのが分かる。また、トルクが最大となる電流位相角は、従来 IPM モータが $\beta=20^\circ$ 付近で最大になるのに対し、非対称磁極構造 IPM モータは 40° 付近で最大となり、 20° 程度進角していることが分かる。この結果から、実機においても非対称磁極構造 IPM モータの特徴である、マグネットトルクをリラクタンストルクが最大となる位相付近まで進角し、トルク向上が可能であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 経済産業省生産動態統計調査 https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html
- 2) 柳沢敏輝, 吉田征弘, 田島克文:「ネオジウムボンド磁石を用いた IPM モータの非対称磁極構造に関する研究」, Journal of the Magnetics Society of Japan, No.44, pp.45-51 (2020)



(a)Asymmetric IPM (b)Conventional IPM
Fig.1 Appearance of the rotors.

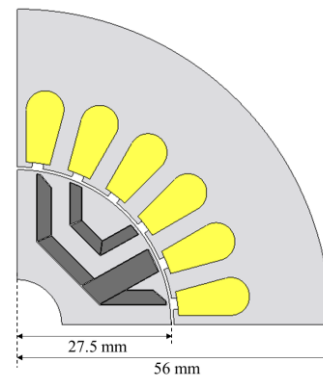


Fig.2 1/4 calculation model of asymmetric IPM

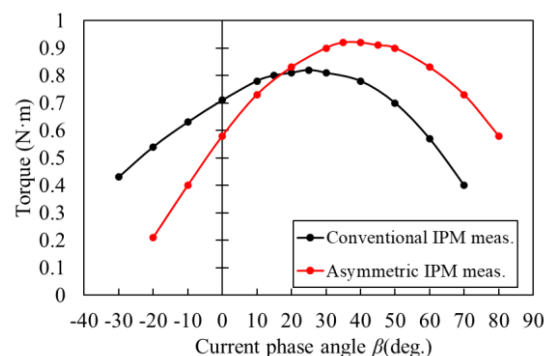


Fig.3 Comparison of measured torque characteristic

セグメント構造アウターロータ型 高速 PM モータの効率改善に関する検討

櫻井 将, 中村健二
(東北大学)

Efficiency Improvement of Outer-Rotor-type High-Speed PM motor with Segmented-shaped Rotor
S. Sakurai, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

情報通信技術の発展と共に、大容量の情報を高速に処理する必要性から、サーバ等の増強が進められている。一方、サーバの小型化や CPU の高性能化に伴い、発熱の増大が顕在化し、冷却装置の性能向上が喫緊の課題となっている。

先に筆者らは、冷却ファン用モータに関して、リラクタンストルクの活用と磁石渦電流損の低減を狙った、セグメント構造のアウターロータ型永久磁石モータ (以下、Segment PM モータと称す) を提案し、従来機よりも高性能であることを実証した¹⁾。しかし、試作機効率が設計値を下回ったことから、原因の解明と効率の改善が必要不可欠である。そこで本稿では、Segment PM モータの機械損の要因分析と、これに基づく効率改善について検討したので報告する。

Segment PM モータの機械損分析と効率改善

Fig. 1 に、試作した Segment PM モータの諸元を示す。本稿では、機械損は軸受けにかかる荷重に比例すると仮定し、①シャフト (10.3 g) のみ、②シャフトとケース (44.9 g) のみ、2 種類の回転子の機械損を測定し、それらの差分から荷重と機械損の関係を求めた。

Fig. 2 に、上記①および②の機械損の実測値と、そこから推定した試作機の機械損を示す。また、回転子の各パーツの重量で按分した機械損の内訳を示す。この図を見ると、30,000 rpm 時の推定機械損は約 15 W であること、また、ケースと回転子鉄心で損失の 8 割を占めることから、両部品の軽量化が高効率化につながる事が了解される。

上述の考察に基づき、Fig. 3 に回転子ケースをステンレスから CFRP に置き換えた場合の効率の試算結果を示す。ケース材を CFRP にすることで約 38 g 軽量化し、これにより約 1% 効率が向上した。

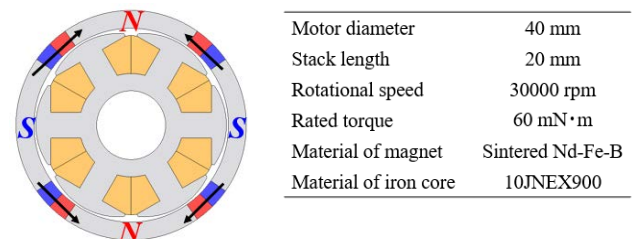


Fig. 1 Specifications of a prototype segment PM motor.

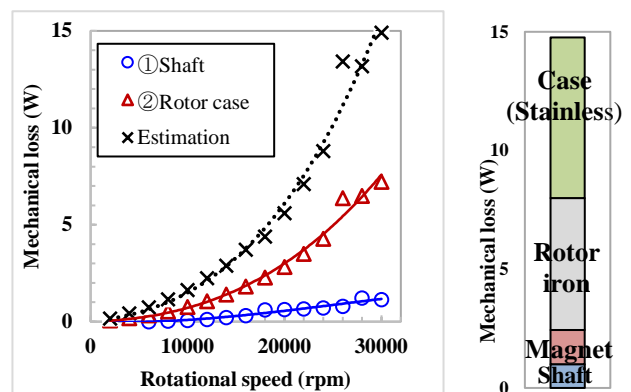


Fig. 2 Estimated mechanical loss and its breakdown.

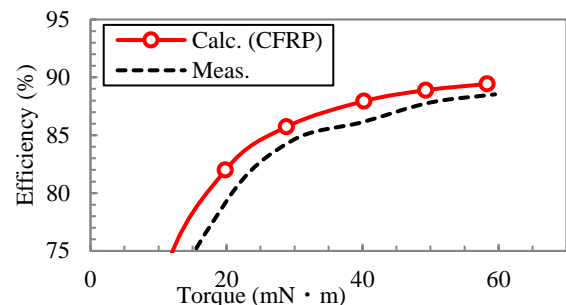


Fig. 3 Estimated efficiency.

今後は、さらに回転子鉄心の削減による軽量化と高効率化について検討を行う予定である。

参考文献

1) 櫻井, 内山, 中村, 日本磁気学会論文特集号, 6, 69 (2022)

超高速磁気ギヤの試作試験

朝雛えみり, 三ツ谷和秀, 中村健二, *立谷雄一, *鈴木雄真, *操谷欽吾
(東北大学, *(株)プロスピイン)

Prototype Tests of Ultra High Speed Magnetic Gear

E. Asahina, K. Mitsuya, K. Nakamura, *Y. Tachiya, *Y. Suzuki, *K. Kuritani
(Tohoku University, *Prospine Co., Ltd.)

はじめに

近年, 出力密度向上を目的に超高速モータの開発が盛んに行われているが, これを減速する機械式ギヤには摩耗や発熱の問題が生じる。そこで本稿では, 非接触で増減速可能な磁気ギヤ¹⁾に着目し, 80,000 rpm で動作可能な磁束変調型磁気ギヤの試作試験を行ったので報告する。

提案する磁気ギヤード SRM の特性算定結果

Fig. 1 に, 試作した磁束変調型磁気ギヤの諸元を示す。本磁気ギヤのギヤ比は 6.667 であり, 入力軸は内側回転子, 出力軸はポールピースである。また, 入力側の最高回転数は 80,000 rpm である。

Fig. 2 に, 試作した超高速磁気ギヤの外観を示す。ポールピースホルダやケースなどは, 漏れ磁束などによる渦電流の発生を防ぐため, すべて CFRP (炭素繊維強化プラスチック) で製作した。

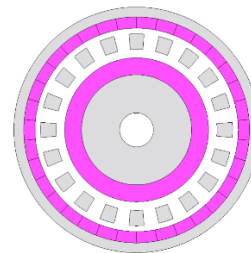
Fig. 3(a)に, 入出力速度特性の実測値を示す。この図より, 速度比は設計通り 6.667 になっていることがわかる。なお, 最大入力トルクの実測値は 85 mN·m であった。

Fig. 3(b)に, 速度対効率特性を示す。このときの入力側のトルクは 83 mN·m である。この図を見ると, 低速側では最大で約 95%の効率を達成していることがわかる。一方, 高速側は徐々に効率が低下していくが, 最高回転数の 80,000 rpm においても 80%以上の効率を達成できたことがわかる。

高速側での効率低下要因を明らかにするため, 試作した磁気ギヤの無負荷損失を測定するとともに, 未着磁ロータを用いて軸受け損を測定した。

Fig. 4(a)に無負荷損失の実測値を示す。また, 同図(b)は入力トルク 83 mN·m, 回転数 80,000 rpm 時の損失内訳である。この図を見ると, 全損失の約 77%が軸受け損であり, この低減が最も重要であることがわかる。

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。



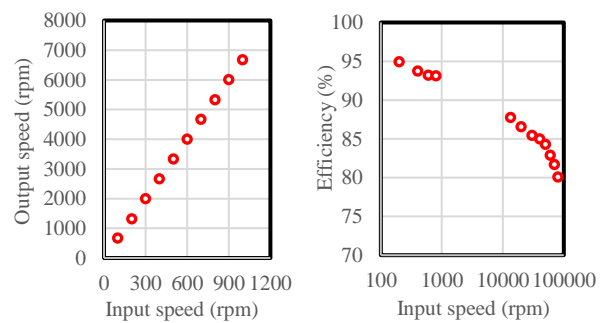
Gear ratio:	6.667
Axial length:	20 mm
Diameter:	44 mm
Shaft diameter:	6 mm
Inner gap length:	1.5 mm
Outer gap length:	1 mm
Material of inner magnet	Sintered Nd-Fe-B
Material of outer magnet	Bonded Nd-Fe-B

Fig. 1 Specifications of an ultra high speed magnetic gear.



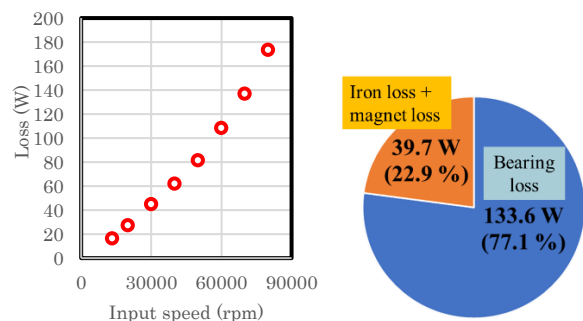
(a) Inner rotor (b) Pole-pieces (c) Magnetic gear

Fig. 2 Appearance of the prototype magnetic gear.



(a) Input vs. output speed (b) Efficiency vs. speed

Fig. 3 Characteristics of the prototype magnetic gear.



(a) No-load loss (b) Loss breakdown at 80 krpm.

Fig. 4 No-load loss and loss breakdown of the prototype magnetic gear.

参考文献

- 1) K. Nakamura, M. Fukuoka, O. Ichinokura, *Journal of Applied Physics*, **115**, 17A314 (2014).

アルミコイルを適用した SR モータに関する基礎検討

朝雛えみり, 中村健二, *柳沢恭平, *古屋勇太
(東北大学, *(株)アスター)

Basic Examination of SR Motor with Aluminum Coils
E. Asahina, K. Nakamura, *K. Yanagisawa, *Y. Furuya
(Tohoku University, *Aster Co., Ltd.)

はじめに

スイッチトリラクタンس (SR) モータは、鉄心とコイルのみで構成されるため、構造が単純で堅牢、保守性が良好、安価などの利点を有する。しかしながら、永久磁石 (PM) モータと比べて出力密度が小さく、低効率であるという課題がある。そこで筆者らは銅コイルと比べて、軽量のアルミコイルに着目した。本稿では、Fig. 1 の SR モータを考察対象とし、アルミコイルの適用について 3次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて検討を行ったので報告する。

アルミコイルを適用した SR モータの基礎特性

Fig. 2 に、従来の銅コイルの巻線配置と、本稿で着目したアルミコイルの巻線配置を示す。アルミは銅と比べて柔らかいため、同図のように巻線の断面積は一定のまま、アスペクト比を 1 ターン毎に変えることができる。これによりデッドスペースを極限まで減らし、巻線の占積率を高め、トルクを増大することができる。

Fig. 3 に銅コイル (占積率 44%) と、アルミコイルの占積率を 50, 60, 70, 80, 90% と変化させた際の巻線電流密度対トルク特性を示す。この図を見ると、占積率の向上に伴い、トルクが増大していることが了解される。

次いで、Fig. 4 に銅損対トルク特性を示す。この図を見ると、占積率 70% までは銅コイルと比べて、アルミコイルの銅損が大きいものに対して、占積率が 70% を超えると、銅損においても優位性を示すことがわかる。つまり、アルミコイルの使用において最も懸念される導電率の低下に伴う銅損の増大は、占積率を向上させることで改善することができる。

以上、アルミコイルを適用した SR モータの特性について検討を行った。今後はモータ形状や鉄心材料についても検討を行い、さらなる高トルク化と高効率化を図る。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。

参考文献

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

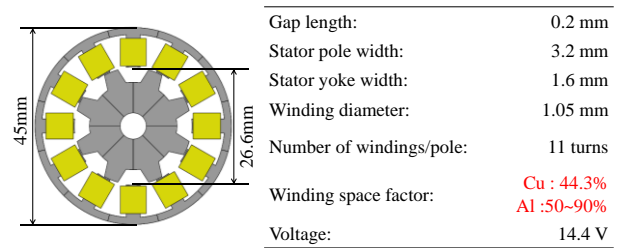


Fig. 1 Specifications of a 12/8 SR motor ¹⁾.

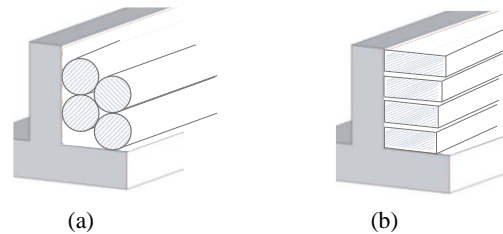


Fig. 2 Comparison of winding arrangements; (a) conventional copper coil, (b) proposed aluminum coil.

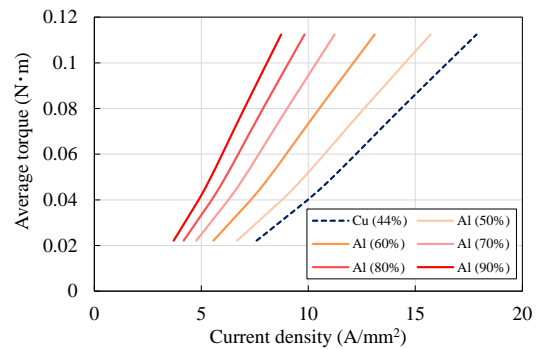


Fig. 3 Comparison of torque characteristics of copper coil and aluminum coil with different winding space factors.

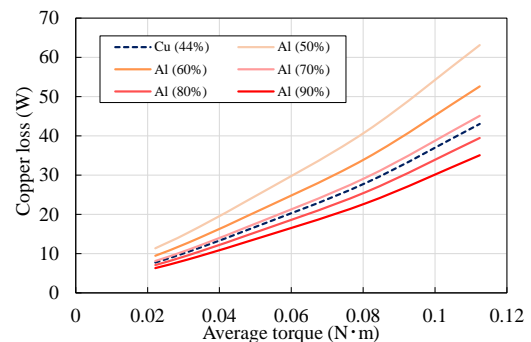


Fig. 4 Comparison of copper loss characteristics of copper coil and aluminum coil with different winding space factors.

小型 EV 用インホイール磁気ギヤード SR モータの提案

伊藤亘輝, 中村健二
(東北大学)

Proposal of Magnetic-Gear SR Motor for In-wheel Drive type Compact EV

Koki Ito, Kenji Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

ダイレクトドライブモータや磁気ギヤードモータはトルク密度が高いことから、電気自動車 (EV) のホイール内に収めたインホイールモータへの応用が期待されている^{1),2)}。しかし、上述のモータは一般に表面磁石型であることから、弱め界磁制御の効果が得にくく、移動体モータに要求される低速・大トルクと高速・低トルクの両立が困難である。

そこで本稿では、磁気ギヤとスイッチトリラクタンス (SR) モータを一体化した新しい磁気ギヤードモータについて検討を行ったので報告する。

提案する磁気ギヤード SR モータの特性

Fig. 1 に、提案する磁気ギヤード SR モータ (MG-SRM) の諸元を示す。MG-SRM は磁束変調型磁気ギヤの内側に SR モータが組み込まれた構造を有し、磁気ギヤ部は 8 極対の高速回転子 (HSR), 82 極のポールピース (PP), 74 極対の低速回転子 (LSR) で構成される。SR モータ部は 4 相 16 スロット集中巻のステータと 20 極の HSR で構成され、磁気ギヤ部と SR モータ部で 1 つの HSR を共有している。

Fig. 2 に、比較用に設計したダイレクトドライブ PM モータの諸元を示す。比較用の PM モータは、ダイレクトドライブモータとして一般的な表面磁石型のアウトロータ構造である。また、分数スロットを採用し、16 極 18 スロット (16p18s)、並びに 32 極 30 スロット (32p30s) の構成とした。なお、MG-SRM と PM モータで直径、積み厚、磁石使用量を統一し、直流電源電圧 48 V、電流実効値上限 30 A_{rms} の条件で特性の比較を行った。

Fig. 3 に、有限要素法による特性算定結果を示す。電流密度対トルク特性の図より、MG-SRM は SR モータと磁気ギヤを組み合わせたことで PM モータと同等のトルクが得られていることがわかる。次いで、速度対トルク特性の図から、PM モータは低速側で 100 N·m 以上のトルクを達成可能である一方、弱め界磁制御を用いても最高速度が 300 rpm 未満である

ことがわかる。これに対して、MG-SRM は低速側で 100 N·m を達成可能、かつ 500 rpm まで駆動できることがわかる。したがって、提案する MG-SRM は移動体モータに要求される低速・大トルクと高速・低トルクの両立が実現できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) K. T. Chau et al., *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 6 (2007).
- 2) S. Chung et al., *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **63**, 1 (2016).

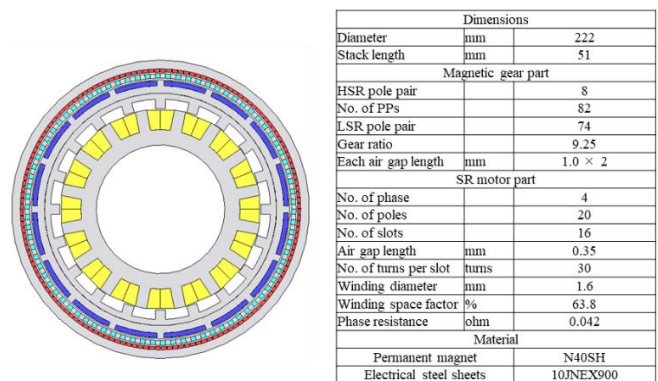


Fig. 1 Specifications of a proposed magnetic-gear switched reluctance motor (MG-SRM).

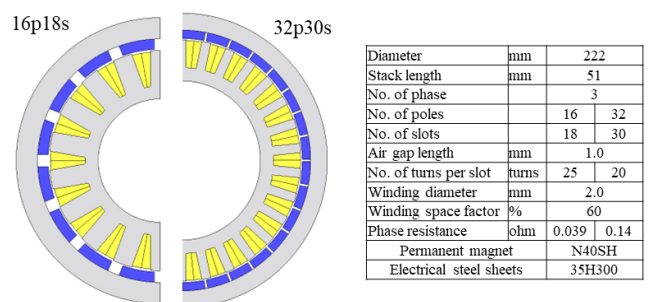


Fig. 2 Specifications of outer-rotor direct-drive permanent magnet motors.

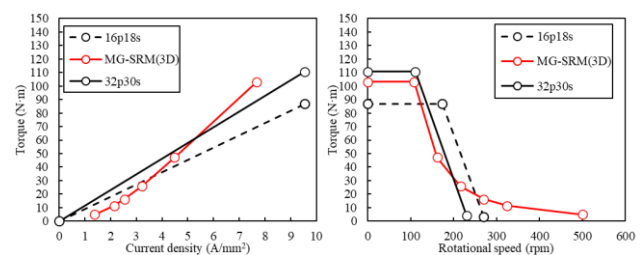


Fig. 3 Comparison of current density vs. torque and rotational speed vs. torque characteristics.

横方向磁束型 SR モータの電流アンバランス改善に関する検討

永井歩美, 中村健二
(東北大学)

Improvement of Current Unbalance of Transverse-Flux-type SR Motor

A. Nagai, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

先に筆者らは、スイッチトリラクタンス (SR) モータのトルク向上を目的として、横方向磁束型の SR モータ (TFSRM) を提案したり。しかしながら一方で、磁気回路の非対称性などに由来する電流アンバランスの問題が明らかとなった。

そこで本稿では、電流アンバランスの解消を狙い、TFSRM の相数を 3 から 2 に変更した場合の特性について、3次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて検討を行ったので報告する。

2相 TFSRM による電流バランス改善

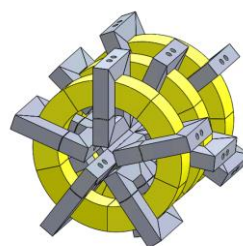
Fig. 1(a)に、先行研究で試作した3相 TFSRM を示す。同図に示すように、TFSRM の各相の固定子、回転子はともにカットコアで構成され、固定子カットコアの内側にトロイダル状のコイルが収められている。これらを軸方向に3段積み重ねることで、3相機となる。TFSRM のコイルはトロイダル状であることから、一般的な SR モータと比べて、巻線占積率を高くすることができる。加えて、鉄心材料に方向性ケイ素鋼板を採用できるため、動作磁束密度も高くなり、トルクや効率が向上する。

しかしながら一方で、互いに隣接する相に磁束が流入するため、1段目と3段目に対して、2段目の磁気回路が異なることや、さらに磁気飽和の影響を受けて、各相の電流にアンバランスが生じる。Fig. 2に、3相 TFSRM の各相の電流波形を示す。電流のアンバランスはトルクのアンバランスに直結するため、振動や騒音などの原因となる。

そこで本稿では、Fig. 3の2相 TFSRM について検討を行った。同図からわかるように、2相機では1段目と2段目の磁気回路は対称になる。

Fig. 4に、3D-FEM で計算した電流波形を示す。この図を見ると、軽負荷時も高負荷時も電流のアンバランスが解消されていることが了解される。

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。



Core material	23Z110
Diameter	96.0 mm
Axial length	90.0 mm
Gap length	0.3 mm
Pole width	10.0 mm
Winding diameter	1.3 mm
Number of turns/phase	75 turns

Fig. 1 Specifications of a prototype 3-phase TFSRM.

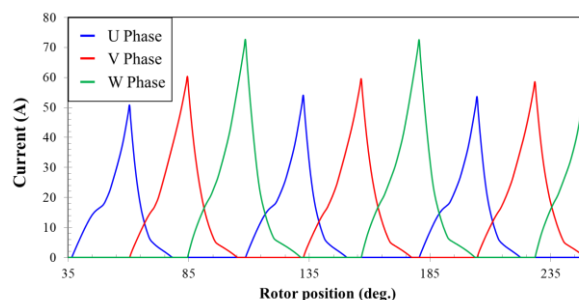
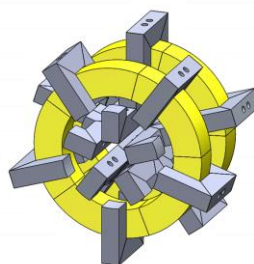
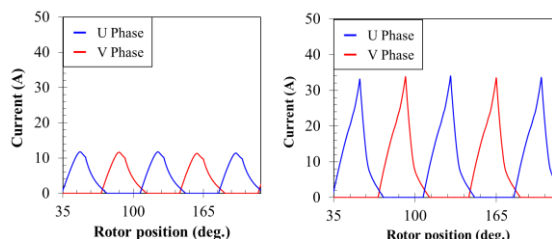


Fig. 2 Current waveforms of the 3-phase TFSRM.



Core material	23Z110
Diameter	96.0 mm
Axial length	60.0 mm
Gap length	0.3 mm
Pole width	8.0 mm
Winding diameter	1.3 mm
Number of turns/phase	75 turns

Fig. 3 Specifications of a 2-phase TFSRM.



(a) Light load (b) Heavy load
Fig. 4 Current waveforms of the 2-phase TFSRM.

参考文献

- 1) T. Komoriya, Y. Ito, K. Nakamura, *J. Magn. Soc Jpn. Special Issues*, **3**, 58 (2019).

クロスポール型フラックスリバーサルモータに関する基礎検討

于 越, 中村 健二 (東北大学)

Basic Examination of Cross-pole-type Flux-Reversal Motor

Y. Yu, K. Nakamura (Tohoku University)

1. はじめに

フラックスリバーサル (FR) モータ¹⁾は、二重突極機²⁾の一種である。永久磁石が固定子側に配置されるため、二重突極永久磁石 (DSPM) モータ²⁾と構造的特徴が似ているが、DSPM モータは固定子ヨークに永久磁石が配置されるため、巻線鎖交磁束の変化はユニポーラとなる。一方、FR モータは、Fig. 1(a)に示すように一対の磁石を固定子極先端に配置するため、巻線鎖交磁束の変化はバイポーラとなる。これにより、FR モータは一般的な永久磁石 (PM) モータと同等の出力が期待される。また、回転子に磁石を配置しないため、イナーシャが小さく、高速応答に優れる。しかしながら一方で、固定された磁石に電機子磁束が直接流入するため、磁石渦電流損の発生が指摘される。

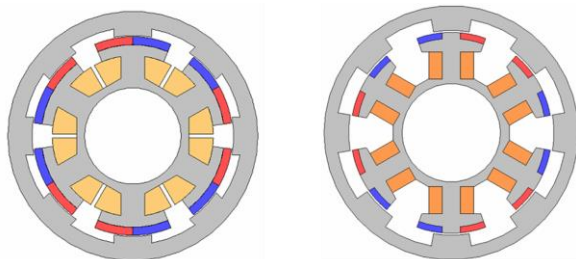
そこで本稿では、固定子極形状を工夫し、電機子磁束が磁石に流入し難い、新しい構造の FR モータについて、有限要素法 (FEM) を用いて検討したので報告する。

2. クロスポール型 FR モータの特性

Fig. 1(b)に、本稿で提案するクロスポール型 FR モータを示す。固定子極の形状を十字形にすることで、電機子磁束がより透磁率の高い鉄心を流れ、磁石への流入を防ぐ効果が期待される。

Fig. 2 に、モータの諸元を示す。本モータは 3 相 6 スロット 8 極機であり、定格回転数は 18,200 rpm、定格トルクは 290 mN·m である。

Fig. 3 に、電流密度対トルク特性の比較を示す。この図を見ると、従来の FR モータとほぼ同等のトルク特性が得られていることが了解される。



(a) Conventional-type (b) Cross-pole-type

Fig. 1 Conventional and proposed FR motors.

Fig. 4(a)に、磁石渦電流損の計算値を示す。同図(b)は効率である。同図(a)を見ると、提案機は磁石渦電流損を 60% 近く削減していることがわかる。これにより、効率も約 10% 向上した。

今後は実機の試作と実証実験を行う予定である。

参考文献

- 1) R. P. Deodhar, S. Andersson, I. Boldea and T. J. E. Miller, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **33**, 925 (1997).
- 2) Y. Liao, F. Liang, and T. A. Lipo, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **31**, 1069 (1995).

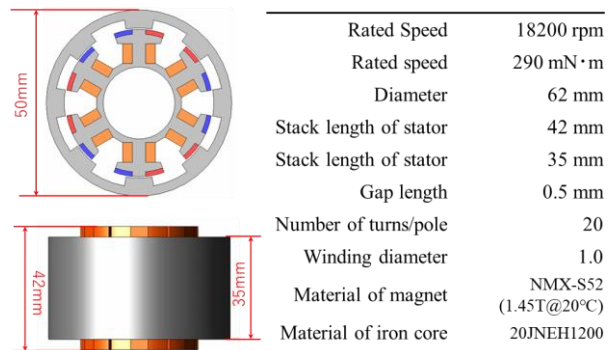


Fig. 2 Specifications of the cross-pole-type FR motor.

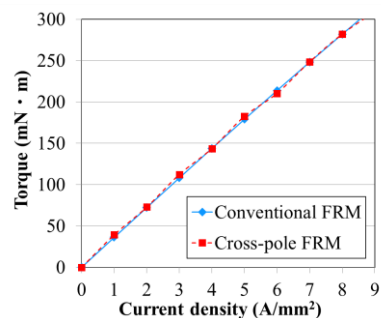
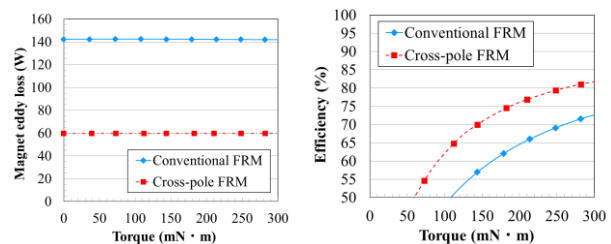


Fig. 3 Comparison of torque characteristics.



(a) Eddy current loss in magnets

(b) Efficiency

Fig. 4 Calculated characteristics of the conventional and proposed FR motor.