

圧粉鉄心混合油を用いた制振用

アクティブ電磁ショックアブソーバの技術構築

青山 真大 (静岡理工科大学 理工学部電気電子工学科 准教授)

キーワード：リニアモータ，電磁力，トランスバースフラックス，導電性流体
 (Keywords, linear motor, electromagnetic force, transverse flux, conductive fluid)

1. はじめに

2015 年 9 月の国連サミットで採択された SDGs (持続可能な開発目標) における 17 の大きな目標を達成するために産業用設備においても省エネルギー，省力化そして生産能力の向上や自動化が強く産業界から望まれている。今日，高度化する工業製品に求められる品質を保つために工作センターや工場等で用いられる鉄加工等の大型切削加工機において，その加工精度の向上が産業界から強く望まれている。さらに歩留まり向上や加工精度の向上だけではなく，post コロナ社会や SDGs への貢献などの観点から高度な加工品質を自動的に実現することが望まれる。そのような社会背景のなか，加工機の加工精度を向上させるためには加工機自体の振動または軸振動をアクティブに制御できるショックアブソーバ機能が重要となってくる。従来の油圧による受動的な制振ではなく，加工対象に合わせて自動で制振性能を機能的に調整する電磁サスペンション機能が上記の社会背景において重要となる。油圧から電磁駆動方式に変更することで上記の機能を実現できるが，従来の電磁サスペンションは永久磁石リニア駆動方式が一般的であり，効果で且つコギング力と呼ばれる軸ブレが課題となっていた。永久磁石を用いない方式として磁性流体方式が挙げられるが，磁性流体方式は時定数が大きく，制振性能向上のための課題が多い。

上記のような技術背景のなか，本研究では磁石不要で電磁流体要素による高減衰力を有する電磁サスペンション技術を構築することを最終目標に，本研究助成期間においては導電性金属流体を電磁力で流動制御することを目的とする。リニア誘導モータの構造を応用し，従来構造における二次導体を導電性金属と見立てて技術構築をする。ステータ側から外部磁場を印加することで導電性金属に誘導電流が生じ，ローレンツ力を発生させることができ，その力を持って外乱に対する抑制力を発生できる。

2. 電磁ショックアブソーバの基盤技術構築

〈2-1〉構造上の特徴 Fig. 1 に本研究の電磁ショックアブソーバの基盤となるリニア誘導モータの構造を示す。

リニア誘導モータは主に電磁ポンプとして古くから研究されてきた⁽¹⁾⁻⁽¹⁴⁾。著者は先行研究として，電磁ポンプを用いた鋳造システムの電動化の研究を行ってきた⁽¹⁵⁾。その先行研究で従来のアニュラリニア形よりも高性能化を実現できるクローボール鉄心形を開発してきた⁽¹⁶⁾。環状に巻かれたコイルで発生した磁界が円筒内部のワークに多く鎖交する

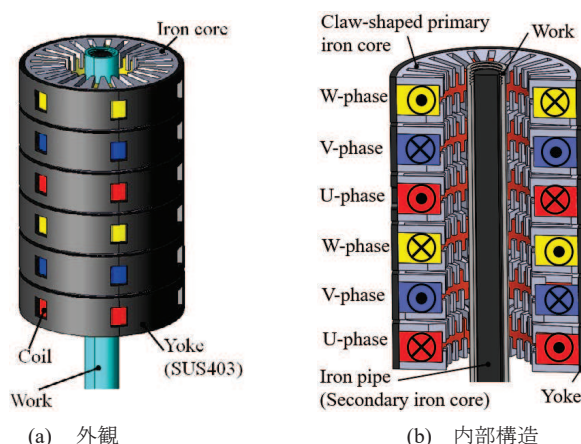


Fig. 1. 電磁ショックアブソーバの基盤となるリニア誘導モータの構造

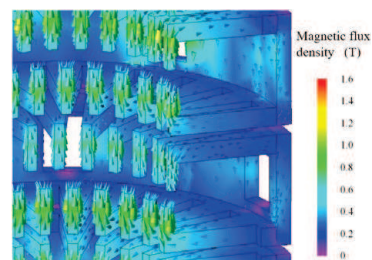


Fig. 2. トランスバースフラックス構造

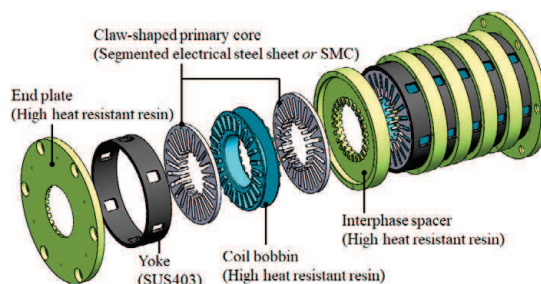


Fig. 3. モジュラー形構造

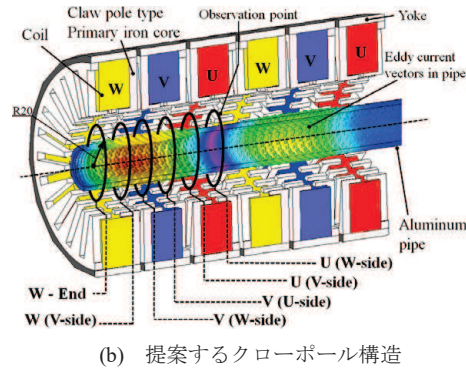
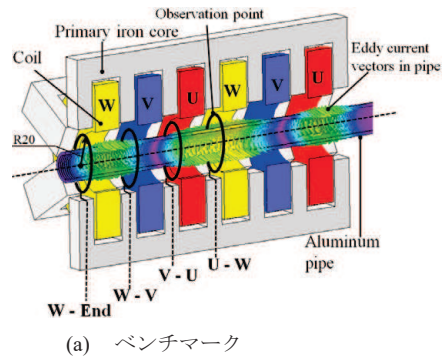


Fig. 4. ギャップ磁束密度の空間分布観測位置

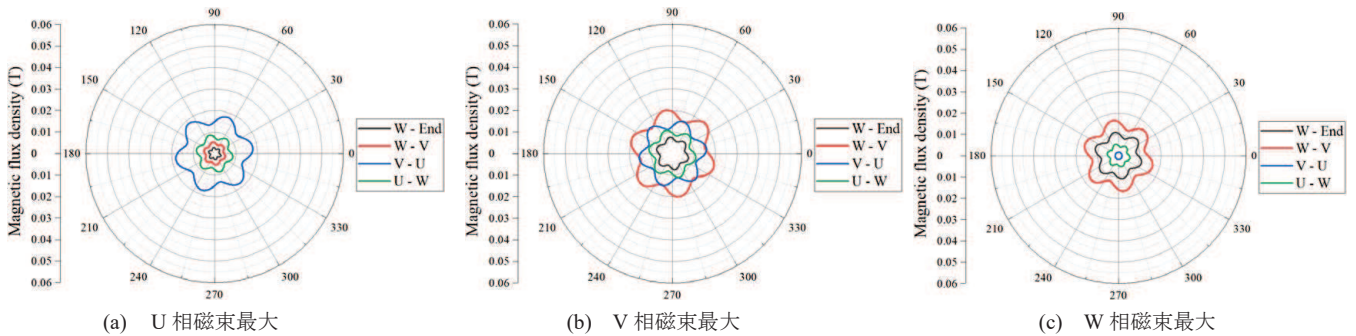


Fig. 5. ベンチマークにおけるギャップ磁束密度の空間分布

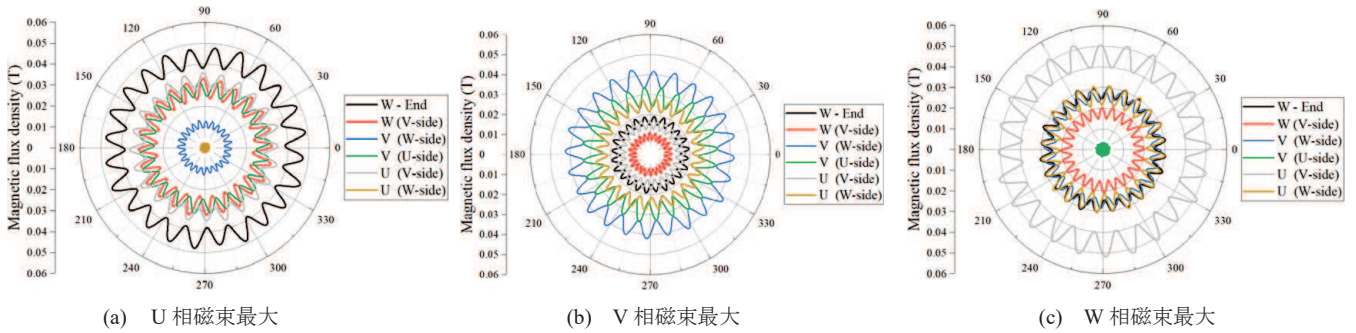


Fig. 6. 提案するクローポール構造におけるギャップ磁束密度の空間分布

ように、コイルの両側から鉄心で挟み込み、閉磁路形成用磁性リングが外周部に嵌合されている。Fig.2 に示すように、環状コイルに通電することによって生じる磁束がトランスバースフラックス磁路を形成する特長を有する。クローポール形一次鉄心 (Fig.1 (b)における“Claw-Shaped primary iron core”) は多数スリットが入った構造となっているが、次節にて理由を説明する。隣り合う相間は Fig. 3 に示すように樹脂製のスペーサーを介して組付けられている。ローレンツ力を作用させる対象 (Fig. 1 では”Work”が該当) に磁束を多く鎖交させながら相間で短絡する磁束を低減する目的で相間ギャップが設けられている。アプリケーションに要求される制振力に合わせて電磁ショックアブソーバの制振仕様を調整できるように、Fig. 3 に示すようにモジュラー形構造が採用されている。制振力を向上させたい場合は、スタック数を増やすことで対応可能となる。

〈2-2〉磁気回路上の特徴 一次鉄心に多数スリットを設けたクローポール構造とすることで従来構造の磁気性能を低下させる原因であった隣り合う各相電機子磁束の打ち

消し合いを低減させることに主眼を置いた磁気回路設計としている。隣り合う相間にギャップ(今回の設計では 2 mm)を設けて空間的に位相角を有することで各相閉じた磁路を形成させる。その結果、従来構造の課題であった隣り合う各相電機子磁束の磁気干渉の影響を排除することが可能になる。提案するクローポール鉄心構造の効果を検証するために、Fig. 4 に示す観測点にてエアギャップ磁束密度波形の空間分布を評価する。半径 R20 の円周上にてベンチマークの場合、”W-End”, ”W-V”, ”V-U”, ”U-W”の 4 カ所の空間平面位置、提案モデルの場合、”W-End”, W (V-side), V (W-side), V (U-side), U (V-side), U (W-side)の 6 カ所の空間平面位置にて観測する。Fig. 5 および Fig. 6 にそれぞれベンチマークと提案モデルにおける空間位置 θ_g に対するギャップ密度 B_g の $\theta_g - B_g$ 円軌跡を示す。両図ともに U 相磁束が最大時、V 相磁束が最大時、W 相磁束が最大時の 3 つのタイミングにおけるギャップ磁束密度の空間分布を示している。両図より、最大ギャップ磁束密度が約 2.5 倍異なり、提案モデルのほうがギャップ磁束密度が高いことが確認でき

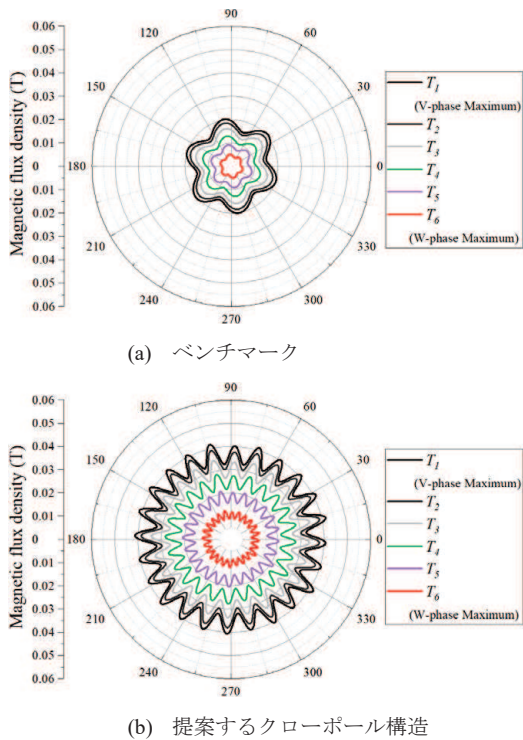


Fig. 7. ギャップ磁束密度の空間分布の時間変化

る。このことから、制振する電磁力の向上が期待される。次に空間分布波形を比較すると、ベンチマークは12カ所の脈動を確認できるのに対して、提案モデルは48カ所の脈動を確認できる。ベンチマークは周方向の6カ所に放射状にヨークが配置されており、空間平面位置においては鉄心が同極性の磁化するため、同極の磁化極6カ所とギャップ6カ所が空間的にパーミアンス分布することになる。一方、提案モデルは24スリット有しているため、同様の考えにより空間平面位置において同極の磁化極24カ所とギャップ24カ所が空間的にパーミアンス分布する。さらにクローボール構造によってN極とS極が形成されるため、例えば“W-End”がN極に磁化しているときは“W(V-side)”はS極に磁化する。その結果、両空間平面におけるギャップ磁束密度波形の空間分布は電氣的に180度位相差を有する。この空間分布波形はFig. 7に示すように時間変化に伴って同一空間平面位置において振幅が増減する交番磁界となり、その結果、励磁周波数の進行磁界が生じることになる。同図における $T_1 \sim T_6$ は電気角30 deg ずつ時間変化させている。ここで、制振力となる電磁力はワーク内で生じる渦電流の大きさに左右される。ワークに鎖交する磁束の時間変化が大きいかほど渦電流が増加するため、提案モデルのように多極の空間分布を有するギャップ磁束密度波形のほうが高電磁力を期待できる。したがって、提案モデルは高いエアギャップ磁束密度を発生させることができ且つ、多極の空間分布を有するギャップ磁束密度波形を得ることができる2つの利点による高電磁力化が可能になる。

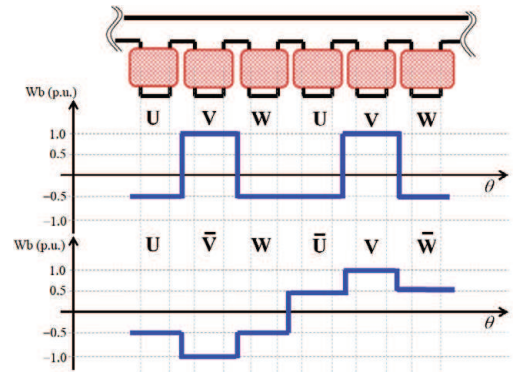
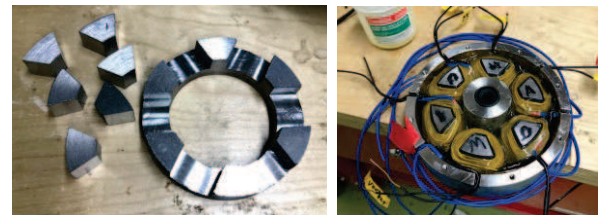


Fig. 8. 集中巻ステータの結線違いによる起磁力波形比較



(a) ステータ (b) 電磁スターラ

Fig. 9. 電磁流動検証用電磁スターラの試作

3. 電磁力による導電性液体と流体の流動

〈3・1〉導電性金属粉末混合油 本研究では電磁流体をローレンツ力で流動させることで制振力を作用させる電磁ショックアブソーバの構築を目指している。本節では第一の基礎検証として、リニア誘導モータにおける二次導体に対して流体要素を考慮した実験を行う。一般的には固体のアルミニウム製二次導体をアルミ粉末混合油に置き換えたときにローレンツ力が作用するかどうかを実験的に確認する。本節における検証はローレンツ力によるアルミ粉末混合油の流動を検証するため、Fig. 1のリニア誘導モータではなく、流動の様子を観測しやすいうようにアキシアルフラックス構造の電磁スターラを試作して検証することとした。集中巻ステータ構造の場合、結線方法の違いによって起磁力波形に高調波成分が重畳してしまう。一般的な2:3系列ではなく1:3系列の結線方法にすることでFig. 8に示すように正弦波に近い起磁力波形を得ることができる。電磁スターラによって回転磁界を発生させ、その回転磁界が導電性流体に鎖交することで流体内に渦電流が生じる。その渦電流と回転磁界との相互作用によってローレンツ力が発生し、導電性流体に流動が生じる。したがって、誘導モータと同じ原理で流体が流動することになるが、高調波成分が重畳していると高調波成分によっても渦電流が生じることになる。本節ではローレンツ力による流動に着目した検証のため、高調波成分の重畳が少なくなる1:3系列の巻線結線方式としている。Fig. 9に試作した電磁スターラを示す。三次元磁路を構成するため、圧粉鉄心材をコアに採用している。Fig. 10に電磁スターラによって導電性液体(アルミ粉末混合油)を流動させている様子を示す。同図において、

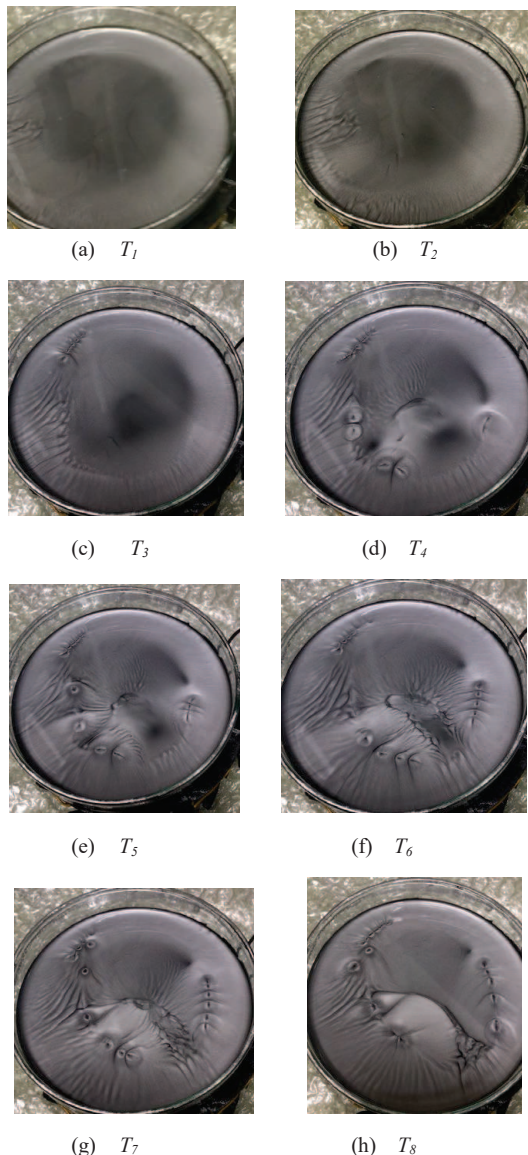


Fig. 10. ローレンツ力による導電性液体の流動

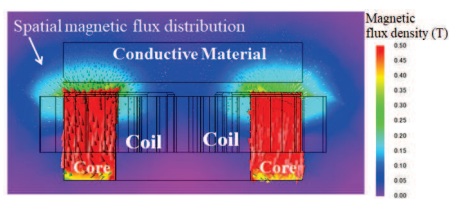


Fig. 11. 電磁スターラによる磁束密度分布

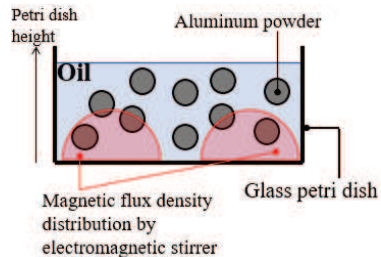


Fig. 12. アルミ粉末混合油内の粉末空間分布と鎖交磁界の関係

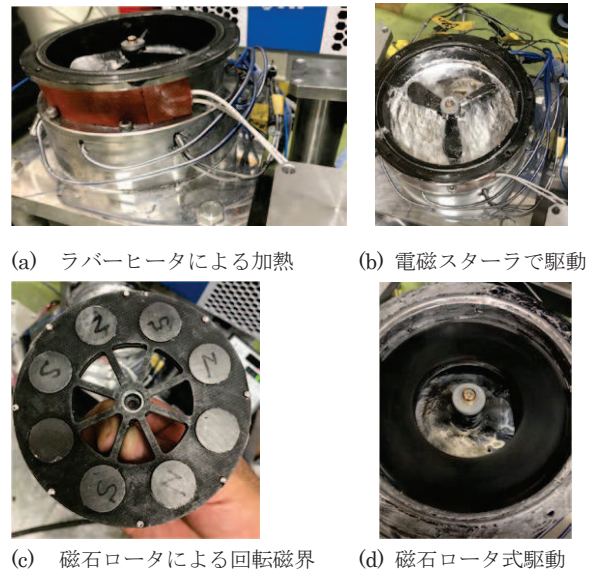


Fig. 13. ローレンツ力によるガリウムの流動

$T_1 \sim T_8$ は時間推移を表しており、 T_1 は電磁スターラ駆動開始直後の時間である。同図より、時間推移とともにアルミ粉末混合油が流動していることを確認できる。局所的に渦が生じていたり、湧き出るような流動が生じている箇所が確認された。アルミ粉末を油に混合した溶液の場合、コロイド状態になっており、Fig. 11 および Fig. 12 に示すように磁界分布中に存在するアルミ粉末のみにローレンツ力が作用する。さらに粒子同士は絶縁されているため、溶液内のアルミ粉末の空間分布密度にも起因した流動が生じる。したがって、次節では低温融点導電性金属のガリウムで実験を行うこととした。

〈3・2〉 ガリウム 低融点導電性金属のガリウムは、溶解した状態であれば、導電性流体として扱うことができ、渦電流経路は流体内を自由に流ることができる。したがって、外部磁場以外に存在するガリウム以外にも渦電流が流れ、ローレンツ力が作用する。前節の実験で用いた電磁スターラによってガリウムの流動を行う。ガリウムの融点は約 30 度弱のため、融点以上の温度を保つために Fig.13 (a) に示すようにラバーヒータをハウジング外周に設置して加熱しながら実験することとした。Fig. 13 (b) にラバーヒータでガリウムの融点以上になるように加熱しながら電磁スターラ駆動によるガリウム流動実験をした様子を示す。同図においてプロペラが取り付けられているが、本検証では使用していない。実験の結果、ラバーコートでハウジング表面層を絶縁保護した後の肉厚が 15mm と厚かったため、電磁スターラの許容電流密度内ではガリウムを駆動することができなかった。ラバーコートは、ガリウムが金属と反応することを防ぐ目的で塗布している。本節では、導電性流体を電磁力で流動させることを目的としているため、Fig. 13 (c) に示すように磁石ロータを製作し、DC モータで外部から回転させることで回転磁界を形成し、ガリウムの流動実験を行うこととした。Fig. 13 (d) に実験の様子を示す。磁

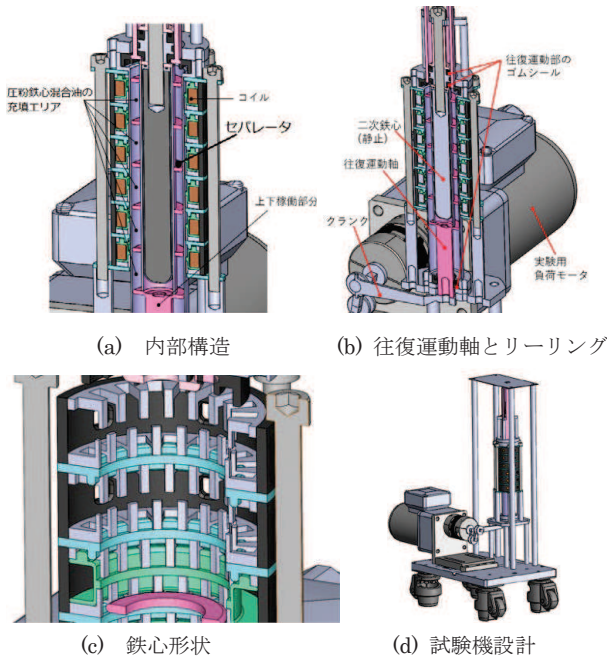


Fig. 14. 電磁ショックアブソーバの設計

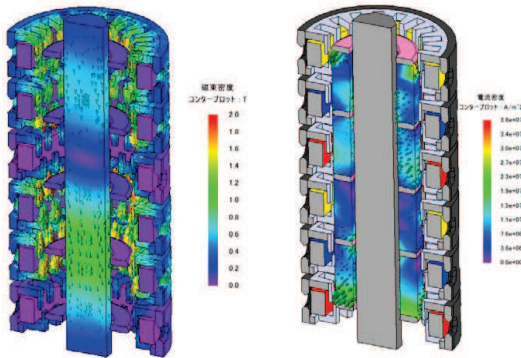


Fig. 15. 電磁ショックアブソーバの電磁界解析

石ロータの回転によって形成される回転磁界が溶解したガリウムに鎖交することでガリウム内に渦電流が流れてローレンツ力が発生し、流動していることを確認できた。

4. 電磁ショックアブソーバ

〈4・1〉 構造設計 2章の基盤技術をもとに、磁気回路設計と構造設計した電磁ショックアブソーバを Fig. 14 に示す。基本設計は同じであるが、小径化と小型化をしている。クローポール鉄心は三次元磁路を形成するために、圧粉鉄心(SMC)を用いている。導電性流体は圧粉鉄心混合油とし、制動力を往復運動軸に効率的に伝達させるために往復運動軸に5つのセパレータを設けている。電磁ショックアブソーバによって圧粉鉄心混合油に作用した流動をセパレータで受けることで往復運動軸に必要な制動力を作用させる構造である。本実験では外乱として電磁ショックアブソーバの下部の往復運動軸にクラック構造を介して負荷モータが接続されている。負荷モータを回転させることでクラ

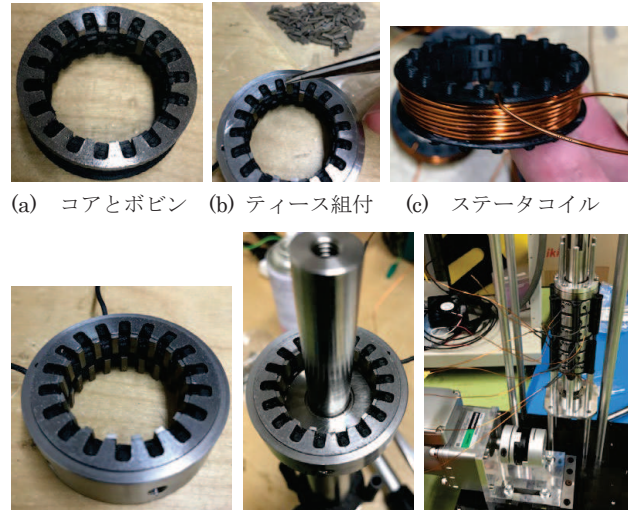


Fig. 16. 電磁ショックアブソーバの試作

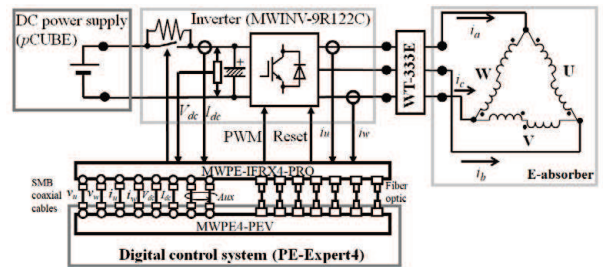


Fig. 17. 電磁ショックアブソーバの駆動システム

ック構造を介してショックアブソーバの往復運動軸を上下させ、その上下運動に対して反力を発生させることで制動力の検証実験を行うシステム構成である。Fig. 15 に磁気回路設計時の電磁界シミュレーションを示す。2章の基盤技術と同様に往復運動軸の内側に静止させている二次鉄心を有する。この二次鉄心は一次鉄心と二次鉄心間の磁気結合を向上させ、制動力を発生させる役割をする圧粉鉄心混合油に鎖交する磁束量を増加させる役割をしている。Fig. 15 (b) に圧粉鉄心混合油をソリッドモデルで近似したときの溶液中に生じる渦電流ベクトル分布を示す。同図に示すように、ステータで発生した移動磁界に応じて導電性流体に渦電流が生じることでローレンツ力が生じ、セパレータへの面圧力を介して往復運動軸に対して力を伝達することができる。

〈4・2〉 試作 実機検証を行うために、電磁ショックアブソーバの試作を行った。三次元磁路を形成するためにクローポール鉄心は圧粉鉄心(SMC)を用いているが、試作コストの都合上、円柱形のプレス成形品から切削加工して試作を行った。SMCの切削加工性の問題上、Fig. 16 (a), (b) に示すようにクローティース部分は分割形状とし、コイル用ボビンに位置決め溝を設けることで組付けた。コイルは Fig. 16 (c) に示すように AIW 素線径φ0.8の丸線を1ボビンあたり42ターン巻きつけている。Fig. 16 (d) に閉磁路形成用のヨークを組付けて1極分ステータとして完成さ

せた試作機を示し、同図(e)にアセンブリの様子、同図(f)に試験機試作の写真を示す。

〈4・3〉実験システム Fig. 17 に実機駆動システムを示す。試作機は Myway プラス社製のデジタル制御システム (PE-Expert4) を使用してインバータ駆動とした。電源は Myway プラス社製の pCUBE を用いて、48V_{dc}とした。電機子巻線は同図に示すようにΔ結線とし、電磁ショックアブソーバは V/F 制御駆動で実験を行った。

実験の結果、電磁ショックアブソーバを電流密度 20 A_{rms}/mm²の励磁条件下において往復運動軸を無負荷で駆動させることができた。しかしながらこの電流密度の駆動条件の場合、ステータコイルの発熱が大きく、駆動時間は 1 分以内程度に限定されてしまう。想定よりも往復運動軸を駆動させるのに電流値が必要になった理由として、導電性流体を封入した際に液漏れしないようにオイルシールをしているが、そのオイルシール部分の摩擦抵抗が非常に大きいということが考えられる。今後、摩擦抵抗が低いシーリング材の選定が重要となる。加えて、Fig. 14 に示すように制動力向上用に二次鉄心を内蔵しているが、この保持機構のために構造が複雑化している。二次鉄心のストローク長を見直し、往復運動軸とともに往復運動しても必要な軸長が確保されていれば性能低下を引き起こさないと考えられる。二次鉄心の静止保持機構を簡略化できればシーリング箇所を削減できるため、シーリング部の摩擦抵抗低減にも大きく寄与できる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、磁石不要で電磁流体要素による高減衰力を有する電磁サスペンション技術を構築することを最終目標に、本研究助成期間においては導電性金属流体を電磁力で流動制御することを目的として研究を進めた。結果、電磁力で同先生金属流体を流動させられることを実証した。加えて、電磁ショックアブソーバの電磁気および構造設計を行い、試作をした。試作機では電流密度 20 A_{rms}/mm²の励磁条件下で往復運動軸を無負荷駆動できることを確認できた。

今後の課題として、シーリング部分の摩擦抵抗が大きいため、シーリング部の摩擦抵抗低減を検討することが重要となる。加えて、導電性流体に鎖交する磁束量を増加させる目的で内容されている二次鉄心の保持機構が複雑なため、シーリング部品が増加し、摩擦抵抗の増加に大きく影響している。二次鉄心の最適なストロークを確保することで往復運動軸内に二次鉄心を内包させることができる。二次鉄心を往復運動軸に内包することで常に静止ではなく、軸に連動して駆動することになる。その結果、シーリング部分を 2 ヶ所削減でき、摩擦抵抗の低下が期待できる。

謝辞

本研究は、公益財団法人大畑財団の研究助成を受けて実施されたものです。心より感謝申し上げます。

文 献

- (1) T. Tanahashi: "Theory and Application of Thermo-Magneto Hydro Dynamics (II)," The Iron and Steel Institute of Japan. Lecture., vol. 79, no. 4, pp. 263-281 (1993) (in Japanese)
- (2) V. C. A. フェラロ・C.プロントン共著, 桜井明等訳:「電磁流体力学・プラズマ入門」, 東京電機大学出版部 (1963)
- (3) 村上貴裕・荒関英夫:「大容量電磁フローカプラーの電磁流体解析—誘導磁場を考慮した機器効率の評価—」, 電力中央研究所報告, No. N04017 (2005)
- (4) 荒関英夫・村上貴裕:「環状流路の誘導型電磁ポンプの効率評価」, 電力中央研究所報告, No. N05004 (2005)
- (5) 荒関英夫:「環状流路の誘導型電磁ポンプの圧力脈動とその低減方策」, 電力中央研究所報告, No. U98020 (2003)
- (6) 助川電気工業株式会社 HP ; http://www.sukegawadenki.co.jp/products/cast_tyuuzou.html
- (7) 菊池新喜:「電磁ポンプの新しい応用について」, 電学誌, vol. 97, no.9, pp. 796-799 (1977)
- (8) 山田一・海老原大樹・脇若弘之・川西利昌:「実用化が進むリニア電磁アクチュエータ」, 電学誌, vol. 106, no.8, pp. 791-798 (1986)
- (9) I. Onaka and K. Chijiwa: "A Study of an Automatic Pouring Machine Utilizing Conduction-Type Electromagnetic Pump," Japan Foundry Engineering Society, vol. 44, no. 12, pp. 1072-1079 (1972) (in Japanese)
- (10) T. Kawase and Z. Sawai: "Fundamental Studies on the Design of an Electromagnetic Runner," IEEJ-D, vol. 121, no. 8, pp. 908-909 (2001) (in Japanese)
- (11) 正田英介・海老原大樹:「小特集:産業界におけるリニアモータ・アクチュエータの利用動向と展望 I. 産業界におけるリニアモータの応用 [総論]」, 電学誌, vol. 109, no. 9, pp. 689-693 (1989)
- (12) S. Nonaka: "Linear Drive and its Application," IEEJ Trans. IA, vol. 112-D, no. 12, pp. 1134-1140 (1992)
- (13) P. R. Austin and A. R. Eastham: "Helically Wound Linear Induction Pump for Molten Nonferrous Metals," IEEE Trans. on IA, vol. IA-21, no. 4, pp. 738-748 (1985)
- (14) T. Akinbiyi, P. E. Burke, and J. D. Lavers: "One-Dimensional Model for the Single-Sided Linear Induction Pump for Molten Metal," IEEE Trans. on IA, vol. IA-19, no. 4, pp. 625-632 (1983)
- (15) M. Aoyama, Y. Kohori, and K. Nishimura: "Adjustable Frequency Characteristics of Alternative Equipment with Aluminum Pipe Lifting for Electromagnetic Pump in Molten Aluminum Lifting Applications," IEEJ Trans. on IA, vol. 141, no. 1, pp. 1-14 (2021)
青山真大・小堀幸伸・西村浩治:「アルミニウム浴湯揚程を想定した電磁ポンプにおけるパイプ揚程代替実験時の可変周波数駆動特性」, 電学誌 D, vol. 141, no. 1, pp. 1-14 (2021)
- (16) M. Aoyama, Y. Kohori, and K. Nishimura: "Alternative Equipment with Aluminum Pipe Lifting for Electromagnetic Pump with High Electromagnetic Force Design," IEEJ Trans. on IA, vol. 141, no. 11, pp. 865-878 (2021)
青山真大・小堀幸伸・西村浩治:「アルミニウム自動注湯用電磁ポンプの高電磁力化とパイプ揚程代替実験による実機検証」, 電学誌 D, vol. 141, no. 11, pp. 865-878 (2021)