

建築物制振用アクティブ電磁ショックアブソーバシステムの技術基盤構築

Fundamental Technique Construction of Active Electromagnetic Shock Absorber System for Building Vibration Systems

静岡理科大学理工学部電気電子工学科 准教授 青山 真大

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究目的

昨今、世界的な異常気象や自然災害そして我が国においては地震大国であるという社会背景から、建築物の能動的な制振技術が強く望まれている。そのような背景の中、従来は油圧ダンパーや永久磁石を用いた電磁ショックアブソーバなどが開発され採用されてきた。しかしそれらは弾性係数が固定なことや永久磁石式の場合は渦電流ブレーキ式のため、受動式で且つ発熱が問題になるという課題がある。能動駆動タイプは、リニアモータを応用して永久磁石同期式や磁性流体を用いた非同期式が挙げられるが、いずれも前者は脱調による制御オーバーフロー、後者は消費エネルギーが大きという課題がある。それらに対して本研究は新しい磁気回路トポロジーを採用した能動的電磁ショックアブソーバの基礎技術を構築する。高制振力を得ることができる新しいリニア駆動モータの提案と、アルミ粉末混合油を制振力発生の媒体として用いた際の実験評価を行った結果について報告する。

2. 提案する電磁ショックアブソーバ

2.1 電磁ショックアブソーバの構造

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ている。従来はアニュラリニア形構造であるが、本研究ではクローポール鉄心形の新規構造を提案している。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（実験ではアルミ粉末混合油であるが、ここではCAEモデリングの都合上アルミパイプで図示）に多く鎖交するように、コイル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

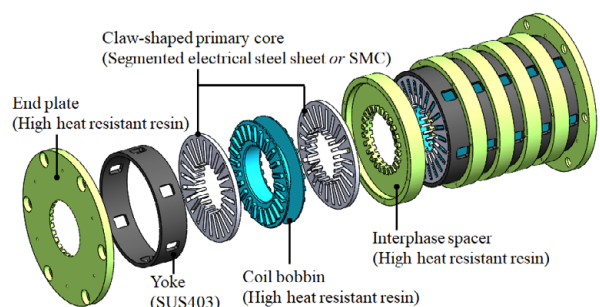
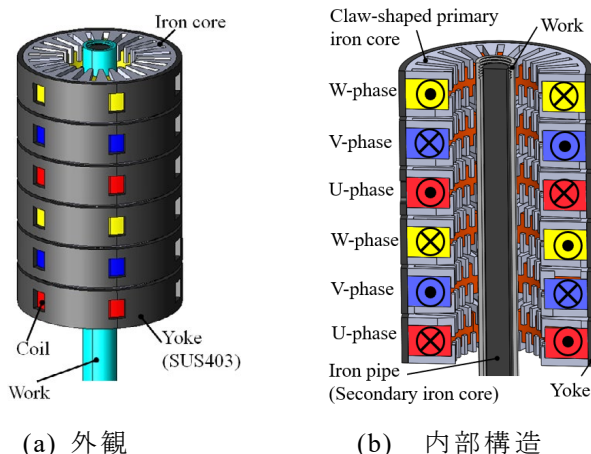


Fig. 1. 電磁ショックアブソーバの基盤となるリニア誘導モータの構造

Fig. 2. モジュラー構造

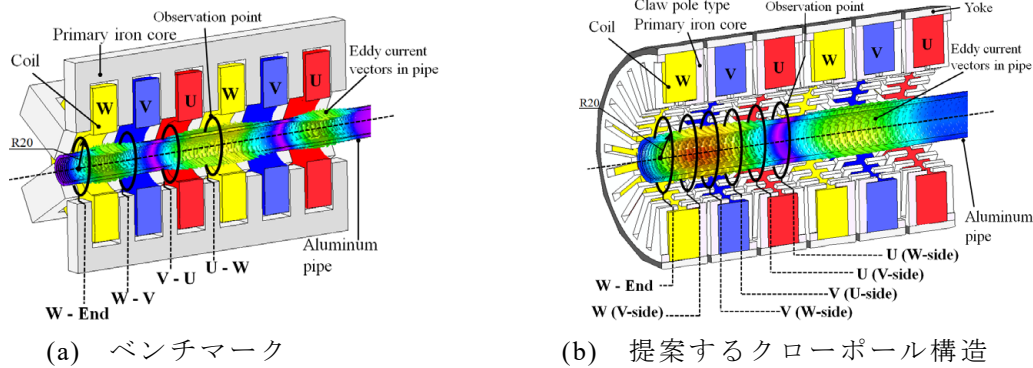


Fig. 3. ギャップ磁束密度の空間分布観測位置

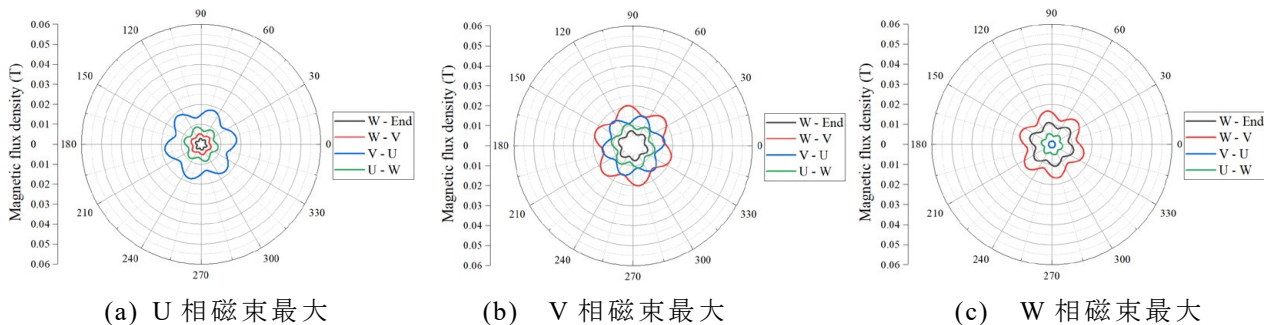


Fig. 4. ベンチマークにおけるギャップ磁束密度の空間分布

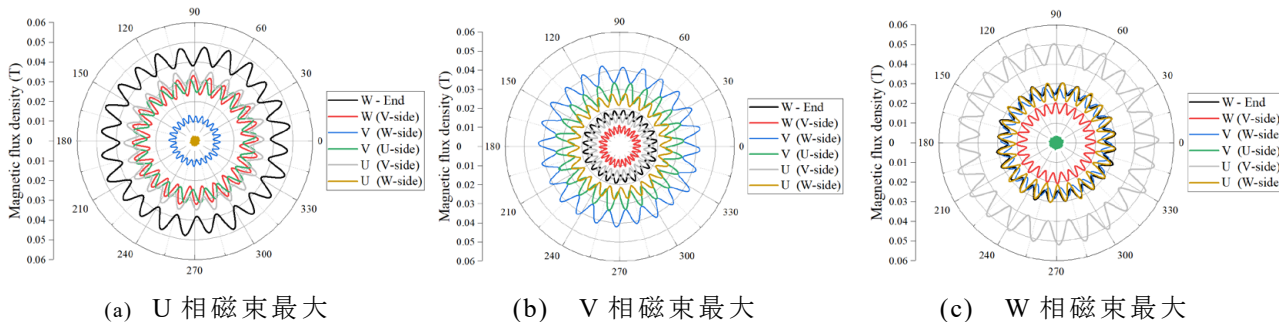


Fig. 5. 提案するクローポール構造におけるギャップ磁束密度の空間分布

うに隣り合う相間を樹脂製スペーサーを介して組付けている。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漏れ磁束を低減する目的で相間ギャップを設けている。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. 2 に示すようにモジュラー構造が採用されている。制振力の向上に対しては、スタック数を増やすことで対応可能である。

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相間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、電磁界解析によって Fig. 3 に示す観測点にてギャップ磁束密度波形の空間分布を評価する。ここでベンチマークはアニュラリニア形の一般的な構造とする。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

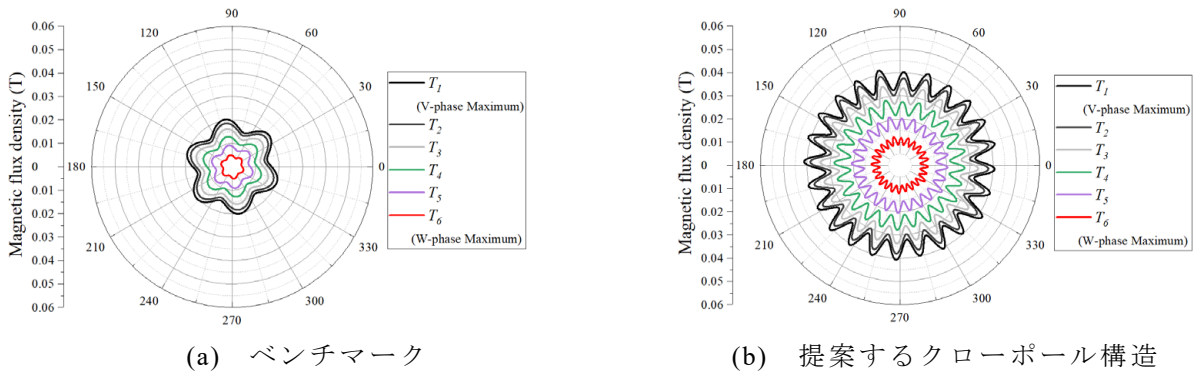


Fig. 7. ギャップ磁束密度の空間分布の時間変化

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. 4 および Fig. 5 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 に対するギャップ磁束密度 B_g の θ_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相磁束が最大時の計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, 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に磁化するため, 同極の磁化6カ所とギャップ6カ所が空間的なパーミアンス分布となる。一方, 提案モデルは24スロットを有しているため, 同様の考え方により空間平面位置において同極の磁化24カ所とギャップ24カ所が空間的なパーミアンス分布となる。この空間分布波形はFig. 6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。ここで同図におけるT1~T6は電気角30deg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磁化変化が大きい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。

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 電磁力による導電性液体の流動

3.1 導電性金属粉末の混合油

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討として, 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で構成される構造に対して, 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確認ため, 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

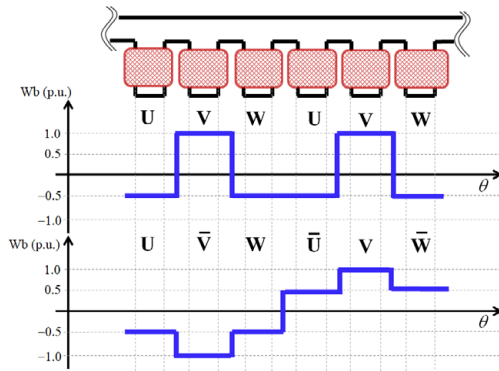
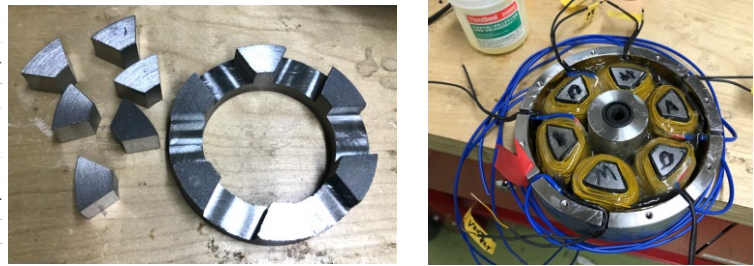


Fig. 8. 集中巻ステータの結線違いによる起磁力波形比較



(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



(a) T_1 (b) T_2 (c) T_3 (d) T_4 (e) T_5 (f) T_6 (g) T_7

Fig. 10. ローレンツ力による導電性液体の流動

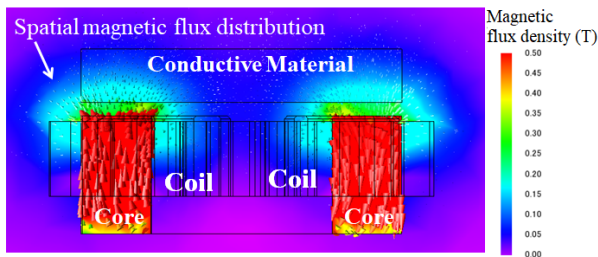


Fig. 11. 電磁スターラによる磁束密度分布

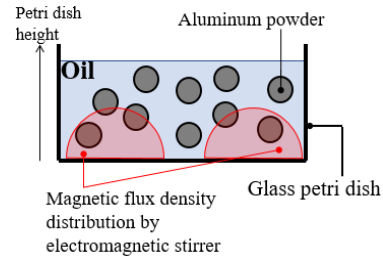


Fig. 12. アルミ粉末混合油内の粉末空間分布

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生じ、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た。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、 $T_1 \sim T_7$ は時間推移を示しており、 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。局所的に渦電流が生じていたり、湧き出るような流動が生じている箇所が確認された。アルミ粉末混合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、次節では低融点導電性金属のガリウムで実験を行うこととした。

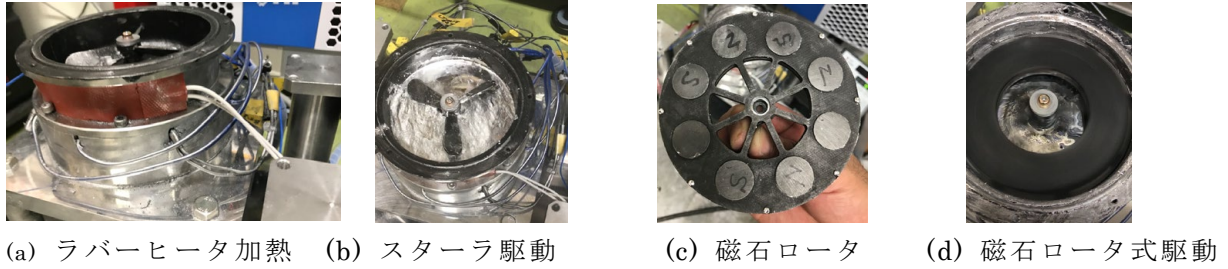


Fig. 13. ローレンツ力によるガリウムの流動

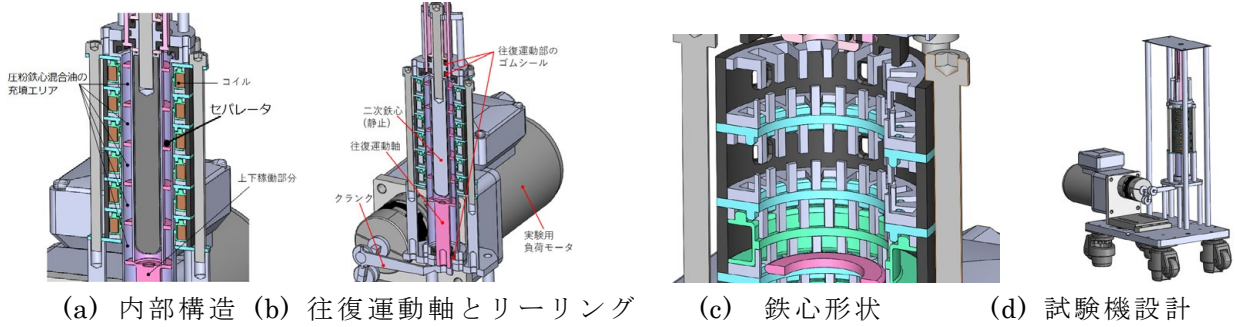


Fig. 14. 電磁ショックアブソーバの設計

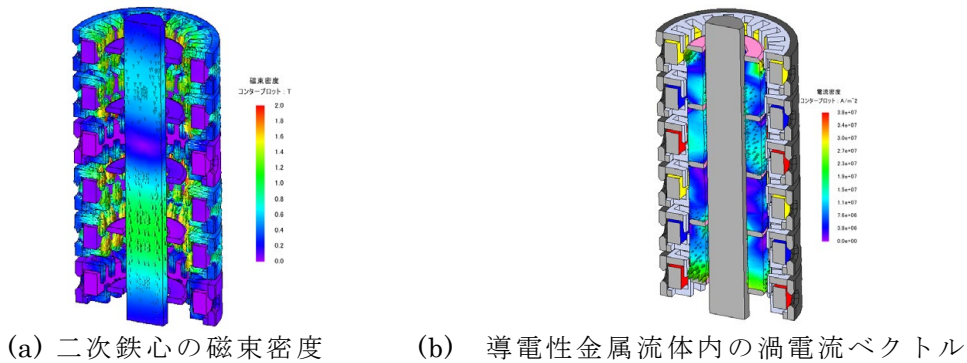
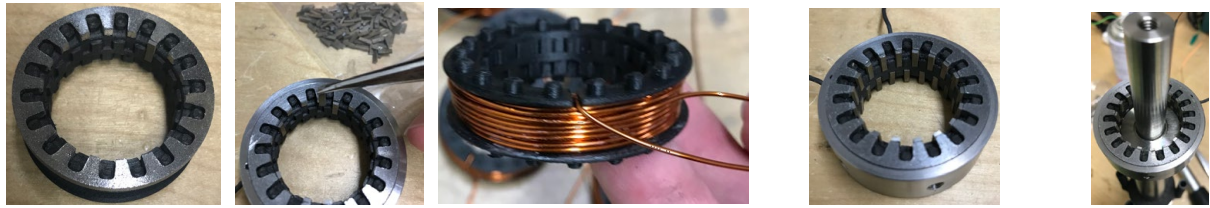


Fig. 15. 電磁ショックアブソーバの電磁界解析

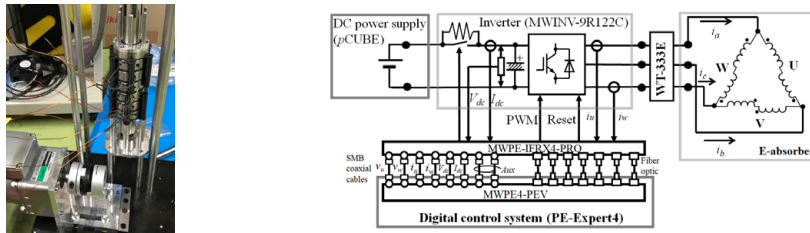
3. 2 ガリウム

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部を自由に流れることができる。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 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を行った。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流動実験を行った様子を示す。同図においてプロペラが取り付けられているが、本実験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の絶縁保護した後の肉厚が 15 mm と厚かったため、電磁スターラの許容電流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試作し、DC モーター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った。Fig.13(d)に実験の様子を示す。磁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作用し、流動していることを確認できた。



(d) コア (b) ティース組付 (c) ステータコイル (d) 1極分ステータ (e)ステータ組付

Fig. 16. 電磁ショックアブソーバの試作



(a) アッセンブリ

(b) 駆動/制御方式

Fig. 17. 電磁ショックアブソーバの駆動システム

4. 電磁ショックアブソーバ

4. 1 構造設計・試作

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 Fig.1 と同じであるが、小径小型としている。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同軸にクラン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ンク構造を介してショックアブソーバの往復運動を上下させ、その上下運動に対して反力を発生させることで制動力検証実験を行うシステム構成である。Fig. 15 の電磁界シミュレーションにより磁気回路構築を行い、Fig. 16 に示すように試作を行った。

4. 2 実験システム

Fig.17 に実機駆動システムを示す。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 20A/mm の励磁条件下において往復運動軸を無負荷で駆動できた。しかしながらステータコイル発熱が大きく、駆動時間が 1 分以内に限定されてしまう。オイルシール部分の摩擦抵抗が大きいたことが主原因である。

4. 3 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、実機駆動を確認できた。今後はシーリング部分の摩擦低減可能な構造検討と実機制御モデルの改良が必要である。

(発表論文)

現在、論文作成中