

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04332

研究課題名（和文）ロープレスエレベータへの応用を目指した高温超伝導リニアモータの実験的特性評価

研究課題名（英文）Experimental Characterization of High-Temperature Superconducting Linear Motors for Application to Ropeless Elevators

研究代表者

平山 斉（HIRAYAMA, TADASHI）

鹿児島大学・理工学域工学系・助教

研究者番号：60560109

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：次世代のロープレスエレベータへの応用に向けて、高温超伝導リニアスイッチトリラクタンスモータ（LSRM）の特性評価に向けた研究に取り組んだ。まず、有限要素法解析を用いて全長約1.3m、推力10N、速度0.3m/sの実験機を設計し、可動部を除く実験機を作製した。また、インバータおよびDSP制御システムからなる駆動システム、実験により特性を評価するための電力測定システムを作製した。さらに、解析により従来のロープレスエレベータ用常伝導LSRMとの性能比較を行い、効率を改善するためには超伝導コイルの低損失化が必要であるが、常伝導LSRMに比べて推力密度を大幅に改善できる利点を持つことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温超伝導テープ線材をリニアモータのコイルとして応用する例は少なく、本研究によってその特性を一部ではあるが明らかにすることができた。これにより、高温超伝導テープ線材をリニアスイッチトリラクタンスモータへ応用した際の優位性や改善すべき点が明らかになり、リニアモータ開発にとって有用なデータとなる。また、高温超伝導テープ線材をリニアモータに應用する設計が検討されたことで、超伝導応用の分野にも貢献できた。さらに、社会的に改めて検討されつつあるロープレスエレベータの発展にも貢献できるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：I have been engaged in research to evaluate the characteristics of the high-temperature superconducting linear switched reluctance motor (LSRM) for application to the next-generation ropeless linear elevator. First, the experimental machine with a total length of about 1.3 m, a thrust of 10 N, and a speed of 0.3 m/s was designed using the finite element analysis and fabricated excluding the moving part. In addition, the drive system consisting of the inverter system and the DSP control system, and the power measurement system were fabricated to evaluate the characteristics by experiments. Furthermore, the performance was compared with that of the conventional normal-conducting LSRM for the ropeless linear elevator by the finite element analysis, and it was clarified that the superconducting coil needs to be low-loss to improve the efficiency, but has the advantage of significantly improving the thrust density compared to the normal-conducting LSRM.

研究分野：電気機器

キーワード：リニアモータ スイッチトリラクタンスモータ 高温超伝導 リープレスエレベータ 有限要素法 シミュレーション 効率

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、超高層ビルの建設や大深度地下開発が増加している。これらにおいて縦方向輸送システムが重要な役割を果たすが、従来のロープ式エレベータではビルの高層化に伴いエレベータの容量が増加することが問題となっている。リニアモータによって駆動されるロープレスエレベータはこの問題を解決するための魅力的な候補の一つであり、一つのエレベータシャフト内での複数かごの走行や水平移動が可能になることで経済効率を高めることができる。これまでのロープレスエレベータ用リニアモータの研究は、希土類永久磁石を用いたリニア同期モータ (PMLSM) がほとんどである。その主な理由は、PMLSM が他のリニアモータと比較して、高効率、高推力であるためだが、一方でコストが高くなるという大きな問題がある。また近年、電気自動車やハイブリッド自動車の需要が急激に増加しており、希土類永久磁石の他の応用への安定調達の懸念がある。以上のことから、簡単な構造で低コストかつ希土類永久磁石を使用しないリニアモータの開発が望まれる。

希土類永久磁石を使用しない低コストなリニアモータとして、リニアスイッチトリラクタンスモータ (LSRM) の研究が行われた。LSRM は、簡単かつ堅牢な構造、低コスト、耐故障性に優れているといった特長を持つ。先行研究ではロープレスエレベータの要求仕様を満たす LSRM が設計されたが、その際の巻線の損失が非常に大きいという課題があった。

研究代表者は、これまでに LSRM の損失低減および推力密度向上を目指して、LSRM の巻線に高温超伝導線材を用いた新しい LSRM (HTSLSRM) の実現に向けた研究に取り組み、小型な原理検証用の実験機を作製し、HTSLSRM の簡単な駆動を実証した。しかし、実際の推力、高温超伝導コイルの臨界電流、損失等が不明瞭であり、その実証が課題であった。高温超伝導 LSRM の研究開発において重要なことの一つは、実験機による実証実験や損失等を定量的に評価することである。LSRM は磁場分布が複雑であるため、高温超伝導コイルの臨界電流や損失を解析で正確に把握することは難しく、解析やシミュレーションでの特性解明には限界がある。そこで、実験機を作製して HTSLSRM の動作の原理検証、また推力、臨界電流、損失等を実測することが必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、高温超伝導線材で巻線された HTSLSRM 実験機を作製し、動作の原理検証および推力、損失等を定量的に評価することを目的とした。そのために、まず HTSLSRM 実験機を設計、作製する。また、HTSLSRM の駆動のためのインバータおよび制御方法を検討する。作製した実験システムにより、駆動システムを含めた HTSLSRM の運転特性、推力、損失の定量的評価を行う。さらに、これまでに研究開発が行われたロープレスエレベータ用リニアモータと特性を比較することで、本研究で開発する HTSLSRM の利点や課題を解明する。

3. 研究の方法

本研究は、以下のような方法で行った。

(1) HTSLSRM 実験機の設計および作製

原理検証用として、安価で入手しやすい高温超伝導線材 Bi-2223 を用いた実験機を設計する。設計手順は次の通りである。

一次側として、鉄心を有する高温超伝導コイルまたは空芯の高温超伝導コイルとした HTSLSRM を設計する。また、比較のために常伝導 LSRM もあわせて設計する。

実際にコイルに使用する Bi-2223 テープ線材について、曲げや引っ張り力が臨界電流へ及ぼす影響を実測する。

で測定した Bi-2223 テープ線材の臨界電流特性を利用して、HTSLSRM 実験機の高温超伝導コイルを再設計し、設計を完了する。

で設計した結果を基に、一次側鉄心ありまたは一次側空芯の HTSLSRM、および銅線で巻線された常伝導 LSRM を作製する。

(2) 駆動システムおよび電力測定システムの作製

実験機を駆動するために、インバータシステムおよび DSP 制御システムからなる駆動システムを作製する。また、電流、電圧センサ、I/O デバイスおよび LabVIEW が搭載されたパソコンを用いた電力測定システムを作製する。

(3) ロープレスリニアエレベータ用 LSRM の特性評価

実際のロープレスリニアエレベータを想定して設計した常伝導 LSRM と HTSLSRM の特性を有限要素法解析により算出し、HTSLSRM の優位性や課題を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 有限要素法解析を用いて HTSLSRM 実験機の設計を行った。実験用として Bi-2223 テープ線材 (170A 級@77K, 自己磁場) を使用した一次側鉄心ありおよび空芯の 2 種類の HTSLSRM に加え、

比較のための通常の銅線を使用した常伝導 LSRM の合計 3 種類の LSRM を解析した。一次側に鉄心あり、なしの 2 種類の HTSLRM と常伝導 LSRM それぞれにおいて、4 相 8/6 極機と 3 相 6/4 極機のものを設計した。設計した HTSLRM 実験機の概形図を図 1 に示す。可動子の HTS コイルは冷却容器内の液体窒素で冷却し、HTS コイルおよび冷凍容器からなる可動部はリニアガイドによって支持・案内される。固定子は 3 種類のモデルで共通とし、設置スペースの制約により全長は 1.5m 以内とした。可動子の定格速度は 0.3m/s とし、位置検出は分解能 0.1mm のワイヤ式リニアエンコーダを使用する。一定速度で駆動したときの定常状態での特性を測定するため、定速区間を電気角 2 周期分とれるよう設計した。可動部の重量、リニアガイドの動摩擦力、リニアエンコーダの張力を踏まえ、加速度 0.2m/s^2 を得るために、発生推力を 10N として設計した。

高温超伝導線材は Bi-2223 テープ線材である住友電工製の DI-BSCCO Type HT-NX (幅 4.5mm, 厚さ 0.31mm) を想定して設計した。固定子全長 1.5m 以内で定速区間を機械角 2 周期分確保するために可動部全長を 0.4m に制約した。解析する 8/6 極機では 77K, 自己磁場中の臨界電流が 200A, 6/4 極機では 170A の仕様の Bi-2223 テープ線材で設計を行った。固定子鉄心幅、超伝導コイルの内径および可動子鉄心幅は、得られる推力が最大になるように設計した。図 2 に設計した各 LSRM の外形寸法図を示す。鉄心積厚は 60mm とし、10N の推力が得られるようにコイルの巻数を設計した。表 1 には、各 LSRM の損失およびモータ効率の算出結果を示す。HTSLRM の損失は、常伝導 LSRM に比べ 1 桁程小さく、4 相 8/6 極機, 3 相 6/4 極機のいずれにおいても効率は一次側鉄心あり HTSLRM が最も高いこと、また 4 相 8/6 極機に比べ 3 相 6/4 極機の効率が高くなることわかった。この結果より、3 相 6/4 極機の実験機を作製することに決定した。

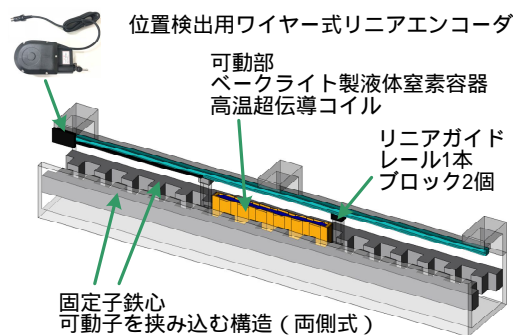


図 1 高温超伝導 LSRM 実験機の概形図

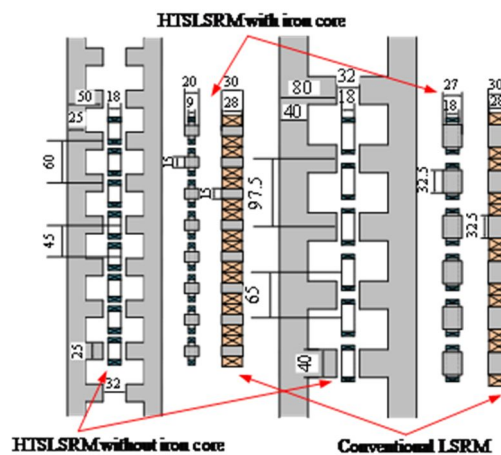


図 2 設計した LSRM の外形寸法 (単位 mm)

表 1 設計した各 LSRM の損失と効率

	four-phase 8/6 pole			three-phase 6/4 pole		
	HTSLRM without iron core	HTSLRM with iron core	Conventional LSRM	HTSLRM without iron core	HTSLRM with iron core	Conventional LSRM
Loss @ 10N, 0.3m/s	3.67 W	1.84 W	16.9 W	1.53 W	0.33 W	14.4 W
Motor efficiency @ 10N, 0.3m/s	25.20%	34.70%	8.40%	39.40%	49.40%	9.60%

回路 - 磁場連携解析により、3 相 6/4 極 LSRM の駆動特性のシミュレーションを行った。磁場解析には JSOL 社製の JMAG-Designer を使用し、回路シミュレータにはアンシス・ジャパン社製の Simplorer を使用した。LSRM の非線形性を考慮するために、各可動子位置における電流に対する鎖交磁束および推力の特性を磁場解析により算出し、算出したデータをテーブル化して LSRM 本体モデルを作成した。加速度 0.2m/s^2 、一定速度 0.3m/s、インバータの直流電源電圧 20V としてシミュレーションを行った。その結果、加速区間において電流の制限値内で指令通りに加速できることが確認できた。また、可動子移動距離は 0.82m となり可動子の長さを考慮しても必要な固定子長さは約 1.3m となり、全長 1.5m の制約内で実験機が作製できることがわかった。

次に、実験機作製用として購入した Bi-2223 テープ線材の臨界電流を測定した。その結果、77K, 自己磁場中で 190A であった。また、コイルを巻線するときの線材の曲げや線材を引っ張る力による臨界電流の低下を実験により調べた。まず、コイルボビンの模型を用いて、巻線時に線材に加える引っ張り力がコイル形状に及ぼす影響を調べた。その結果、引っ張り力 700g 以上で巻線時のコイルのふくらみ幅がほぼ一定になることがわかった。次に、曲げや引っ張り力が臨界電流に与える影響を調べた。図 3 にコイルの曲げ直径に対する臨界電流の変化を示す。先に設計した 3 相 6/4 極機の HTSLRM では、コイルの曲げ直径を 40mm で設計している。図 3 より、曲げ直径 40mm では臨界電流が約 93% に低下することがわかった。また、図 4 に曲げ直径 40mm において引っ張り力に対する臨界電流の変化の測定結果を示す。図より、引っ張り力を 0 から 700g に変化させても臨界電流は劣化しないことがわかった。従って、巻線時は多少の余裕をとって 600g

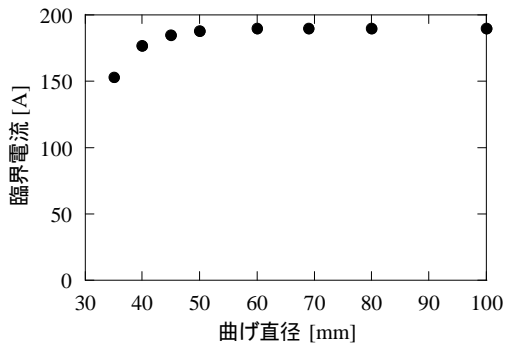


図3 Bi-2223 テープ線材の曲げ直径に対する臨界電流の変化

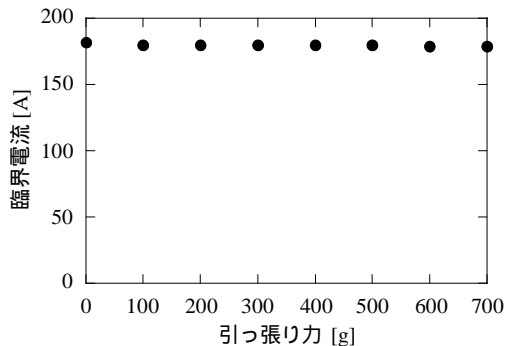


図4 Bi-2223 テープ線材の引っ張り力に対する臨界電流の変化(曲げ直径40mm)

のテンションを線材にかけて巻線することに決定した。また、実測した Bi-2223 テープ線材の臨界電流値を用いて HTSLSRM を再設計した結果、ターン数を 56 から 48 に変更した。

最終設計した結果を基に、実験用 LSRM の高温超伝導コイルおよび冷却容器を除く部分の実験機の作製を完了した。作製した全長約 1.3m の実験機の写真を図 5 に示す。

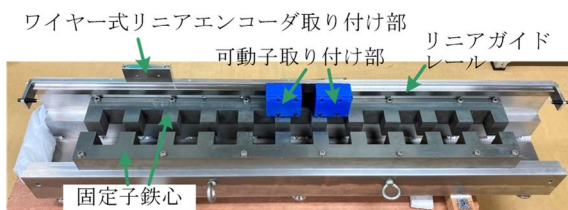
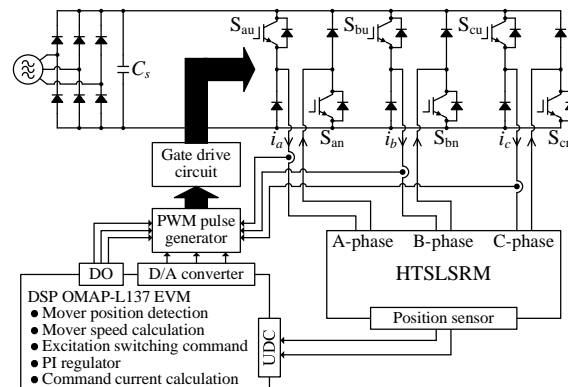


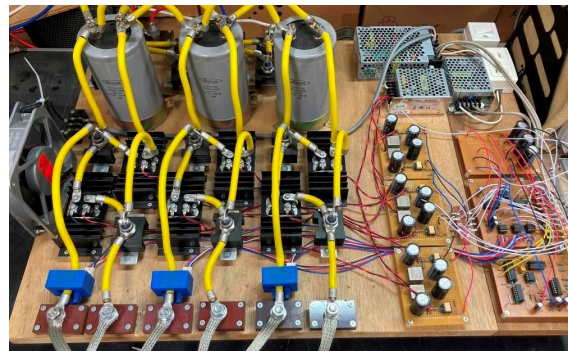
図5 作製した実験機の写真

固定子鉄心は厚さ 0.35mm の電磁鋼板 35A300 を 60mm 積層しており、固定子鉄心の全長約 1.1m を 1 枚の電磁鋼板で作製している。また、可動子に使用する鉄心の加工も完了した。現在、冷却用の液体窒素容器および超伝導コイルの作製を進めている。2022 年中に実験機全体を完成させ、実験による HTSLSRM の特性を測定していく予定である。

(2) 実験機の駆動用に、可動子位置に応じた 50A 振幅の方形波電流を一次巻線に供給するインバータシステムおよび DSP を用いた制御システムを構築した。図 6 に作製した駆動システムの構成略図およびインバータシステムの写真を示す。インバータ本体は、LSRM で従来から利用されている非対称 H ブリッジインバータとした。DSP 制御システムにはエムアイエス社製の SBOX II を用いた。ワイヤー式リニアエンコーダの信号をカウンタ(UDC)によりカウントして DSP に取り込み、可動子位置に応じた LSRM 各相の励磁指令を作成して、デジタル出力(DO)から励磁指令を出力する。また、速度制御を行う際には、DSP で PI 制御によって演算された指令電流を D/A コンバータより出力する。



(a) 駆動システムの構成略図



(b) インバータシステムの写真

図6 実験機駆動システム

本研究では、LSRM 実験機用の電力計測システムの作製も行った。本システムは電流、電圧センサ、I/O デバイスおよび LabVIEW が搭載されたパソコンから構成される。インバータから出力される電流および電圧を I/O デバイスによりパソコンに取り込み、LabVIEW によって電力を計測するシステムとなっている。

(3) 有限要素法解析を用いて、実際のエレベータ用 LSRM として検討されている常伝導 LSRM との性能比較を行った。図 7 に、

3 種類の LSRM の推力 F 、コイルの損失 P_c 、鉄損 P_i 、モータ効率 η_m および高温超伝導コイルの冷却電力を考慮した効率 η_s を算出し、比較した結果を示す。この結果より、高温超伝導コイルの冷却を含めた効率は常伝導 LSRM の半分以下であり、高温超伝導コイルの低損失化が必要であることがわかった。ただし、HTSLSRM は従来の常伝導 LSRM と比べて推力密度を大幅に改善できる利

点を持つことがわかった。

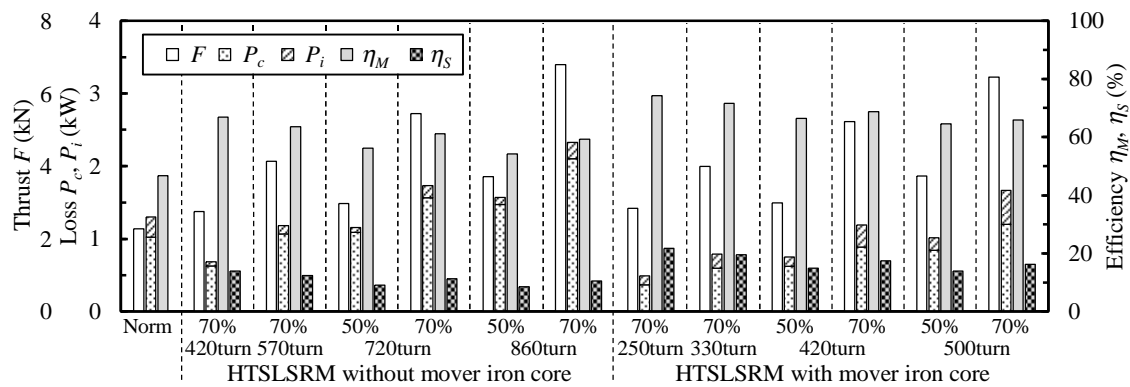


図7 ロープレスエレベータ用の3種類のLSRMの推力，損失，効率の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tadashi Hirayama, Shuma Kawabata	4. 巻 -
2. 論文標題 Characteristic Evaluation of Linear Switched Reluctance Motor with High-temperature Superconducting Excitation Windings for Application to Ropeless Linear Elevator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. the 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022 -ECCE Asia-)	6. 最初と最後の頁 589 ~ 594
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 江原功, 平山斉, 川畑秋馬
2. 発表標題 エレベータ用高温超伝導リニアスイッチトリラクタンスモータの特性評価用実験機の設計
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江原功, 平山斉, 川畑秋馬
2. 発表標題 高温超伝導巻線を用いたリニアスイッチトリラクタンスモータの特性評価用実験機の設計
3. 学会等名 交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

国立大学法人鹿児島大学研究者総覧
https://ris.kuas.kagoshima-u.ac.jp/html/100005328_ja.html?k=%E5%B9%B3%E5%B1%B1
鹿児島大学工学部先進工学科電気電子工学プログラム川畑研究室ホームページ
<https://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~kawabata/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------