

外94-12

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

リニアモータによる
磁気浮上体の駆動特性に関する研究

申 請 者

小豆澤 照男
Teruo Azukizawa

1994 年 7 月

磁気力によって非接触支持された物体をリニアモータで直接駆動するシステムは、磁気浮上システムとリニアモータ駆動システム個々の特徴を互いに活かすことができるものである。すなわち、鉄道輸送システムに応用すると高速化・登坂性能の向上・保守性の向上などが期待でき、搬送システムに応用すると無発塵・静粛・ソフトな加減速などの性能を実現することが期待できる。

リニアドライブシステムと磁気浮上システムは多くの特徴を有する反面、それぞれ、汎用性に乏しい、構成や制御が複雑などの理由から、従来装置・技術と比べてコスト高となり、なかなか普及しない状況にある。

その中で、物体を非接触で支持・駆動する磁気浮上・リニアドライブシステムの真の特徴を生かしたシステムについては、実用化開発が続けられており、一部すでに実用化されているものもある。すなわち、超高速鉄道として超電導磁気浮上・リニア同期モータ(LSM)駆動システムの開発が進められており、半導体工場のクリーンルームでは塵埃を発生しない搬送システムとして常電導吸引式磁気浮上・リニア誘導モータ(LIM)駆動システムが実用に供されている。これらのシステムでは、集電機構を含めて機械的接触部が一切なく、浮上体が完全に非接触で支持・案内・駆動されている。つまり、磁気浮上・リニアモータ駆動の特徴が真に活かされていれば、多少コストが高くても普及する可能性があるといえる。

本研究は、上記システムにおける浮上特性やリニアモータ駆動特性解析手法を明確にするとともに、実用化に際しての課題を明らかにして、その解決策を提案することにより、これら実現性の高い磁気浮上・リニアドライブシステムの一層の普及を図ることを目的とするものである。

第1章はまえがきで、本研究の背景と目的を述べ、従来の主要な研究との対比において本研究の位置づけを述べる。

第2章では、超電導誘導式磁気浮上車を超電導LSMで駆動するシステムにおいて、ビオ・サバルの法則に基づく磁界解析・電磁力特性解析法を提案している。本システムの超電導コイルは、超電導状態を維持するため低温容器に収納されており、電磁力を付与する電機子コイルや浮上コイルとの相対距離が比較的大きくなる。そこで、レーストラック状のコイルを、断面の大きさを無視した1ターン矩形コイルとみなした近似解析法を提案している。そして、相互に作用するコイル間距離が、コイル断面寸法に比して十分に大きい場合には、実用上十分な精度で特性を評価できることを解析により示している。さらに、回転形のLSM試験装置における推力・吸引反発力を測定して、提案したLSM特性計算法が妥当なものであることを示している。

第3章では、超電導誘導式磁気浮上システムにおける浮上特性について検討を行っている。このシステムでは、浮上力を得るための超電導コイルをLSMの界磁と兼用しており、LSMを設計するには浮上特性も十分に把握しておく必要がある。ここでは各種の浮上コイル配置に対する浮上特性解析法を提案し、それに

基づいた数値例により、各パラメータの設計基準を検討している。その結果、超電導コイルの長さを極ピッチの70～75%に選ぶと、推力や浮上力が小さくならない範囲で、高調波成分を低減できること等を明らかにした。

次に、実用化に際しての検討課題である高調波電磁力特性を検討している。まず、浮上コイル電流の作る空間高調波磁界が低温容器の導体部分に誘導するうず電流の解析法を提案している。数値例による検討の結果、外槽容器を低抵抗の材料で構成することにより、内槽のうず電流損失を低減できることを示した。さらに、超電導コイルが作る磁界中で振動する外槽やシールド槽に誘導されるうず電流の解析法を提案している。数値例による検討の結果、シールド槽等の導体が振動すると、内槽にうず電流を誘導して冷却用の液体Heを大量に消費する可能性があることを示している。さらに、低温容器の断面形状を考慮した解析を提案し、内槽のジュール損失を低減させるには、内槽をSUS等の高抵抗材料、あるいはCu等の低抵抗材料で構成することが望ましいこと等の指針を示している。

第4章では、超電導LSMについて、各種電機子コイル配置に対する電磁力特性解析法を提案し、数値例に対する解析結果に基づいて、超電導コイルと電機子コイルに作用する電磁力の特性を精査している。また、電機子コイル電流が発生する空間高調波磁界が超電導コイル低温容器の導体部に発生するうず電流損失の特性を解析し、外槽に抵抗率が小さいものを使用することで内槽部分での発生損失を小さくできることを示した。さらに、LSM駆動電源の特性表現法についても言及し、地上一次式リニアモータに特有のセクション切り替えや、セクション渡り特性を検討して実用化に際しての留意点を示している。

第5章では、超電導誘導式磁気浮上・LSM駆動システムにおける超電導コイルの永久電流変化について検討する。超電導コイルは、自身に鎖交する磁束が一定となるように電流が変化する「定磁束(永久電流)モード」で動作するので、超電導コイルの設計に際しては、使用状態における電流の変化を知っておく必要がある。

浮上コイル電流が発生する磁界による超電導コイルの永久電流の解析法を提案し、数値モデルによりその特性を検討した結果、下記の知見を得た。

(1)通常走行時における永久電流変化は、対向浮上方式の場合初期起磁力(700kA)の2%以下、側壁浮上方式の場合1%以下である。

(2)側壁浮上方式においては、極ピッチの長い方が永久電流の脈動率が小さい。

(3)浮上系異常(案内用ヌルフラックスケーブルの断線・短絡)時の永久電流変化は初期起磁力の5%以下で、外槽等の磁気シールド効果でさらに小さくなる。

また、推進系による永久電流の解析法を提案し、数値モデルによりその特性を検討した結果、下記の知見を得た。

(1)通常走行時の永久電流変化は、初期起磁力(700kA)の1%以下である。

(2)120°ピッチ単層配置より240°ピッチ二層配置の方が永久電流変動が小さい。これらの結果は、浮上式鉄道における超電導コイル電流の変化が超電導磁石の安

定性に影響するものではないことを示すものである。

さらに、通常走行時における浮上系および推進系の電磁力特性が、定電流モード解析により実用上十分な精度で評価できることを示している。

第6章では、ミニコンを使用したLSM駆動制御システムを提案し、LSM走行試験装置に適用してその妥当性を実証している。次に、電算機シミュレーションにより、位置検出精度が速度制御に及ぼす影響を検討し、位置検出信号が割り込む度に演算により求めた速度を過去に遡って平均することにより速度制御性能が向上することを示している。また、速度制御性能を一定に維持するために要求される位置検出用遮蔽板の据え付け精度についても指標を得ている。さらに、連続式周波数変換装置の電力の定義・計算法を提案し、ミニコンを使った電力計測処理システムを製作して浮上式鉄道宮崎実験線での計測結果により、その妥当性を実証している。

第7章では、半導体工場のクリーンルーム内搬送システムにおいて、常電導吸引制御式磁気浮上車を駆動する短一次・短二次型LIMの設計方法と、制御システムについて提案している。まず、分散配置された多数のLIM固定子で、二次導体を搭載した車両を駆動する搬送システムにおいて、所定の走行速度を実現するため、各々のLIM固定子をどのような間隔で設置し、励磁すべきかを決定する一方法を提案した。また、低コストで実現できる位置決め制御システムとして、マイクロコンピュータ、速度・位置センサ、インバータで構成された、LIM駆動ユニットを提案し、実験によりその妥当性を確認した。

第8章では、本研究で得られた成果をまとめている。

本研究は、非接触で物体を支持・駆動する磁気浮上体のリニアモータ駆動システムについて、特に実現性の高い2つのシステムに的を絞り、その基本特性や実用化に際して解決すべき課題について検討を行ったものである。

まず、超電導誘導式磁気浮上鉄道に関して、空心コイルで構成されたシステムの電磁力特性解析手法を確立し、実用化に際して解決すべき課題である空間高調波磁界に起因する諸現象を解明するとともに解決策を提案した。また、LSM制御システムを提案し、試験装置によりその妥当性を実証した。これらの成果は、プロトタイプである浮上式鉄道山梨実験線や実用線モデルの設計に活かされている。

次に、半導体工場クリーンルーム内搬送システムにおける、短一次・短二次型の地上一次式LIM駆動システムに関して、一次側固定子の配置・励磁法に関する一設計法と、簡略な構成の停止位置決め制御方式を提案した。これらの成果は国内数カ所の半導体工場で稼働中のシステムで、その有効性が実証されている。

本研究で得られた成果は、磁気浮上・リニアモータ駆動システムの一層の普及・発展に寄与するものと考えられる。