

外 99-27

早稲田大学審査学位論文(博士)の要旨
早稲田大学大学院理工学研究科 2999

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

常電導吸引式磁気浮上システムの
省電力化に関する研究

(Power Saving Electromagnetic Suspension System)

申 請 者

森 下 明 平

Mimpei Morishita

1999 年 12 月

1 研究の背景

交通・輸送システムへ適用される常電導吸引式磁気浮上技術についてこれまで多くの研究がなされている。常電導吸引式磁気浮上技術をはじめとする非接触支持技術を交通・輸送システムに適用すると超高速で移動する浮上体の騒音・振動の大幅な低減が可能となる。一方で、1980年代には半導体製造工場においてウェハの自動搬送需要が高まりを見せた。従来、非接触支持技術の適用の目的は超高速・低騒音・低振動の実現であったが、ここに来て新たに、無発じん・低コストの実現を目的として非接触支持技術の搬送システムへの適用を図る研究が開始された。

無発じん搬送システムには、搬送経路の拡張性（分岐等）、ウェハに電磁界が作用しない（周囲環境の保存）、高スペース効率など半導体製造設備としてこれまでにない要求や制約がある。これらの要求・制約に応えられる非接触支持技術としては空気浮上と常電導吸引式磁気浮上方式がもっとも有望と考えられる。空気浮上方式は浮上原理は単純であるが、軌道の拡張性の点で常電導吸引式磁気浮上方式が搬送システムとしてより優れていると思われる。

交通・輸送システムに適用された常電導吸引式磁気浮上技術の無発じん搬送システムへの転用を考えると、集電機構の存在が発じん源として浮かんで来る。集電機構に代えて車載電源や非接触給電装置を用いて浮上電力を供給することも考えられるが、電磁石励磁電流を抑えて必要な浮上力を得るためには浮上ギャップ長を小さくすることが必要であり、浮上ギャップ長が小さくなるとガイドレールの取付けに高精度が要求され、コストが上がるという問題が生じる。

こうした状況下で本研究が着手されたが、それを加速させたのが永久磁石性能の飛躍的向上である。1980年代にこれまでのフェライト磁石に比し5倍のエネルギー積を持つサマリウム・コバルト（Sm-Co）系の磁石が量産され簡単に入手できるようになったのに加え、1990年代にはSm-Co磁石より安価でエネルギー積が2倍のネオジウム・鉄・ボロン（Nd-Fe-B）系磁石が量産されるようになった。高性能永久磁石は、モータをはじめあらゆる電磁力応用機器の性能を向上させたが、非接触支持技術においても常電導吸引式磁気浮上にとどまらず、高温超電導体のピン止め効果を利用して浮上体を非接触支持する場合のピン止め磁束の磁束源として使用され、非接触支持技術を大きく発展させている。

2 本研究の目的と概要

本研究は、浮上体を非接触支持して移動させる搬送システムにおいて車両および浮上用アクチュエータのコンパクト性、浮上電力の削減、周囲環境の保存、低コスト性、信頼性を満足できる常電導吸引式磁気浮上技術を創出し、非接触支持技術の

発展と産業への振興を図ることを目的とするものである。

本研究は、従来の常電導吸引式磁気浮上技術に用いられる電磁石と高性能永久磁石を組合わせた新たな浮上用アクチュエータの構成を提案し、永久磁石吸引力を電磁石で制御して浮上用電力を最小化する車両の構成方法および制御方法を検討したものである。

第1章は序論とし、研究の背景と目的を述べ、非接触支持技術としての常電導吸引式磁気浮上システムの位置づけと新たな技術開発の意義を明確にするとともに、本研究で検討する常電導吸引式磁気浮上システムの省電力化技術の内容と必要性を明らかにする。

第2章では、従来形の電磁石を用いた常電導吸引式磁気浮上システムにおいて浮上系に加えられる外力を推定し、外力推定値を電磁石制御電圧に帰還することが浮上電力の低減に有効であることを示す。外力を推定する手段としては状態観測器を用いることが一般的であるが、ここでは定常浮上状態において状態観測器と等価な外力推定が可能な一次遅れフィルターを提案する。この一次遅れフィルターを等価オブザーバと名付け、等価オブザーバの適用についてその効果を検証する。

第3章では、無発じん搬送システムに常電導吸引式磁気浮上技術を適用する際の従来技術の問題点を述べ、その解決策として電磁石で浮上力の安定化を図るとともに車両重量の変化に拘らず永久磁石の吸引力のみで車両の全重量を支持するゼロパワー制御を提案する。さらに、電磁石と永久磁石の構成についてゼロパワー制御を施すための必要条件を明らかにし、この必要条件を満たす浮上用アクチュエータとして電磁石と永久磁石とを組合わせた複合磁石（Hybrid Magnet:以下HMと略す）を提案する。

ゼロパワー制御を実現するための手法には、HMの電磁石コイル電流とその目標値（零）の偏差を積分器を介して電磁石励磁電圧（制御電圧）に帰還する電流積分帰還方式、状態観測器で外力を推定しこれを制御電圧に帰還する外力帰還方式、積載重量の変化で生じる浮上ギャップ長の変動を一次フィルターを介して制御電圧に帰還するフィルタ方式の三つが考えられる。本章ではまず、4点支持式磁気浮上車両を例にとり、上述の各方式によりゼロパワー磁気浮上が実現できることを示し、各方式の特徴を比較検討する。そして、荷物の積載等による制御対象のパラメータ変化が無視できない場合について、ゼロパワー磁気浮上制御系の設計方法の一例を示し、シミュレーションと実験によりその妥当性を確認する。

次に、ゼロパワー制御で浮上する車両の磁気浮上制御系に外力補償制御を施すと低ゲインのゼロパワー制御でも外乱の衝撃力に対して浮上ギャップ長の変動が抑制されることを示し、シミュレーションと実験でその効果を確認する。

そして、ゼロパワー制御下で車両が軌道に接触すると再び浮上状態への復帰が困難なことを示すとともに、外力補償制御とゼロパワー制御を切り替えることで浮上状態への復帰が可能となるだけでなく、ガイドレールに吸着して休止状態にある車

両の浮上開始および浮上状態から休止状態への移行が滑らかに行われることを実験により確認する。

第4章では、浮上車両の案内について従来の常電導吸引式磁気浮上技術の問題点を述べ、搬送システムに適した案内方式として案内用の磁石およびセンサを使用しない浮上案内干渉制御方式を提案する。磁気浮上搬送システムの場合、分岐等の存在や車両の小形化・軽量化が必須であるため、車両の案内はHMがガイドレールの中心に戻ろうとするならい力を利用している。ならい力で車両を案内する場合、車両の横方向の揺れが浮上方向への外乱となるため、横揺れの持続は電力消費に影響する。このため、車両の横揺れを速やかに減衰させる浮上案内干渉制御方式は電力消費の低減に有効な手段となる。

浮上案内干渉制御方式を搬送システムに適用する場合、浮上体の質量やモーメントの変化に対する磁気浮上制御系のロバスト性が重要となる。本章では、HM磁石ユニットとガイドレールの位置関係について浮上案内干渉系を構成するための必要条件を明らかにする。そして、磁気浮上搬送システムを例に浮上案内干渉系の精度の高いモデルを示すとともに、ロバスト安定化を図るために車両が備えなければならない構成要件を示す。さらに、浮上案内干渉制御系の設計法を提案し、実験結果により浮上案内干渉制御の妥当性、有用性を明らかにする。

第5章では、第3章で提案したゼロパワー制御の浮上原理を再確認し、制御軸数と磁石ユニット数の一致がゼロパワー制御を適用する際の必要条件であったことを述べる。そして、ゼロパワー制御の浮上原理を発展させることで制御軸数より磁石ユニットの数が多い場合でも、すべての磁石ユニットの励磁電流をゼロに収束させるゼロパワー制御が実現可能なことを明らかにする。さらに、制御軸数より磁石ユニット数が多い場合でも第4章で提案した浮上案内干渉制御が適用できることを示すとともに、余った磁石ユニットに関する案内系についてギャップセンサからの情報を使わず、励磁電流から案内系の状態量を推定して車両を案内するいわゆるセンサレス磁気浮上の適用が可能なことを示す。最後に、実験結果により制御軸数より磁石ユニット数が多い場合でもゼロパワー制御が可能なことおよび浮上用磁石ユニットによる案内制御が可能なことを実証する。

第6章は結論とし、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の見通しについて私見を述べる。