

平成18年度

博士論文

インパクト駆動を用いた超伝導浮上位置決め機構の基礎的研究

Fundamental Study of Positioning Mechanism
for Superconductive Magnetic Levitation System Using Impact Drive

高知工科大学

工学研究科基盤工学専攻

1056014

小松 茂久

目 次

第1章 緒論.....	3
1.1 研究の背景.....	3
1.1.1 超伝導の歴史とその応用.....	3
1.1.2 現在の非接触搬送装置の現状.....	3
1.2 非接触浮上技術.....	6
1.2.1 磁力を用いない非接触浮上.....	7
1.2.2 電磁コイルを用いた磁気浮上.....	8
1.2.3 永久磁石を用いた磁気浮上.....	8
1.2.4 超伝導を用いた磁気浮上.....	8
1.3 超伝導技術を用いた浮上・搬送装置.....	9
1.3.1 ピン止め浮上の特長.....	9
1.3.2 真空チャンバ内搬送機構[29].....	9
1.3.3 磁気浮上搬送車両モデル[30].....	10
1.3.4 縦形構成の磁気浮上搬送装置[31].....	10
1.3.5 ピン止め浮上・反発浮上を利用した搬送装置[32].....	11
1.3.6 ハイブリッド搬送装置[33].....	12
1.4 新しい超伝導搬送機構の提案.....	13
1.5 論文の概要と構成.....	14
第2章 超伝導磁気浮上機構の物理的特性.....	15
2.1 ピン止め力とピン止め浮上.....	15
2.2 第一種超伝導体と第二種超伝導体.....	16
2.3 超伝導状態の力学[2,36,37].....	17
2.3.1 磁束の量子化.....	17
2.3.2 磁場侵入長.....	17
2.3.3 GL理論とコヒーレンス長.....	19
2.3.4 高温超伝導体とピン止め点.....	22
第3章 浮上装置のための磁石と超伝導体の検討.....	25
3.1 超伝導体.....	25
3.2 浮上磁石として採用した磁石.....	26

3.2.1	ネオジム磁石	26
3.2.2	フェライト磁石	26
3.2.3	インパクト実験へのフェライト磁石の採用	27
3.3	磁束密度測定	28
3.3.1	磁束密度測定	28
3.3.2	超伝導体表面を通過する磁束の推定	34
第4章	インパクト駆動を用いた位置決め機構	38
4.1	位置決め原理	38
4.2	実験装置の概要	40
4.3	基礎実験	43
4.3.1	piezoアクチュエータの伸縮性能	43
4.3.2	piezoアクチュエータの発生加速度	45
4.4	移動実験	47
4.5	ピン止めエネルギー測定実験	50
4.6	ピン止め力測定実験	52
第5章	電磁石を用いた移動機構	54
5.1	電磁石と超伝導体を用いた非接触位置決め機構の提案	54
5.2	実験装置	56
5.3	基礎実験	58
5.3.1	浮上確認実験	58
5.3.2	片側固定確認実験	61
5.4	移動実験	63
5.4.1	方形波による駆動実験	63
5.4.2	残留磁気の影響を考慮した入力波形での移動実験	65
5.5	実験結果考察	68
第6章	結論	69

第1章 緒論

本章では、まず本論文の背景として、超伝導技術の開発の歴史と非接触搬送装置の現状について述べ、その後非接触浮上搬送技術と超電導技術を用いた非接触搬送装置についてまとめる。さらに本研究における最終目標を明らかにし、本論文の構成を説明する。

1.1 研究の背景

1.1.1 超伝導の歴史とその応用

1908年にLeiden大学のH. Kamerlingh-Onnesがヘリウムの液化技術を開発し、その3年後超伝導現象を発見した[1]。しかし、超伝導状態を得るためには、液体ヘリウムの沸点である4K(-269)が必要であり、高価で取り扱いが面倒であるなどのために、その利用は限られていた。この後、1986年に、IBMチューリッヒ研究所のBednorzとMullerによってLa-Ba-Cu-Oの組成を持つ高温超伝導体が発見され、さらに、1987年にはChuらにおいて、安価な液体窒素の沸点以上の臨界温度をもつY-Ba-Cu-Oなる高温超伝導体が発見され[2]、応用化に向けての研究が行われるようになって来た。

超伝導体の応用研究を考えた場合、高温超伝導体は、電気抵抗がない、完全反磁性などの本来の超伝導体の性質だけではなく、量子化された磁束をトラップするピン止め効果という他の材料では得られない特性にも着目するべきである。この性質を用いることによってより広い範囲の応用を考えることが可能である。また、超伝導材料を利用するためには、臨界温度のみならず、臨界電流、臨界磁場の限界値が、簡便に利用可能である範囲内にあり、かつ製造のしやすさや経済性において優れた材料であることも考慮する必要がある。

1.1.2 現在の非接触搬送装置の現状

近年の製造業界におけるマイクロ・ナノ技術の進展はめまぐるしく、それに伴い、機械部品の小型化や精度向上が求められ、機械製造メーカーにとっては製造工程の上で種々の問題が生じている。その対策として、製造現場では、生産性の向上や、精度を保つためにロボット(アーム)やコンベア、台車や専用ビークルなどを用いた組立・搬送を行っている[3][4]。また、生産環境においても、塵埃の発生に起因する品質・精度低下を防ぐことを目的としたクリーンルーム工場が増

えてきている[5][6]。

今後機械パーツなどのさらなる小型化や精密化，微細化や要求精度の向上が進むと，現状の搬送システムではクリーン化という点で対応しきれない可能性が考えられる。非接触で搬送ができれば，機械的接触が起因となって発生する塵埃の発生を原理的になくすことができ，塵埃の問題を低減できると考えられる。さらに非接触での作業には，物理的な接触がないため，個体摩擦に起因するエネルギーロス，潤滑の必要性，高速移動が困難なことなどの問題がないため，エネルギー消費の低減，メンテナンスの低減，潤滑剤の不要によるクリーン環境への対応などといった様々なメリットが多くある。また，非接触での作業は高真空中など，特殊環境下でも行うことができる[7][8]。

このような非接触磁気浮上・搬送技術の種々の研究や開発が現在盛んに行われている。例えば，真空ポンプ(Fig. 1-1)，磁気軸受 (Fig. 1-2)やベアリングレスモータなどは産業用機械の分野で応用されており，今後の発展に期待が持たれている[9]~[11]。その他でも，搬送の分野で代表的なものは，リニアモーターカ[12]やリニモ[13]などの磁気浮上電車(Fig. 1-3)の浮上・推進技術，エレベータの非接触案内ガイドなどがある。

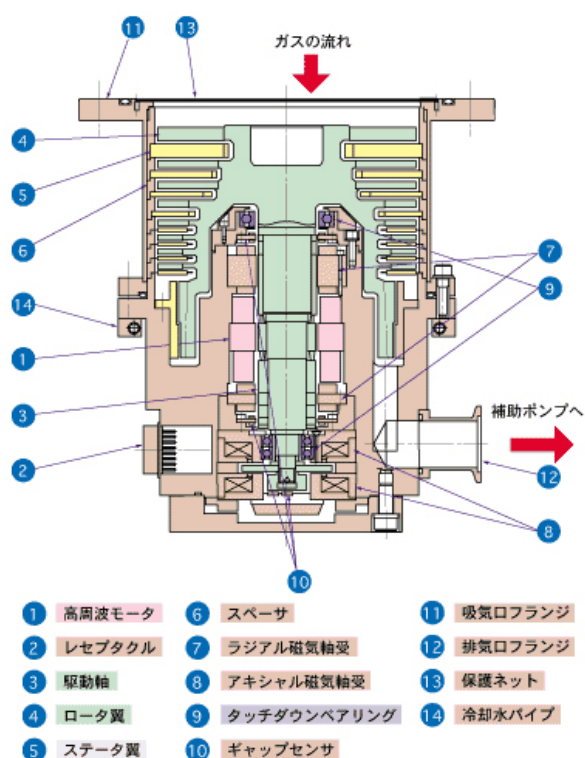


Fig. 1-1 An example of vacuum pump
(Courtesy of SHIMADZU Corporation)
<http://www.shimadzu.co.jp/>

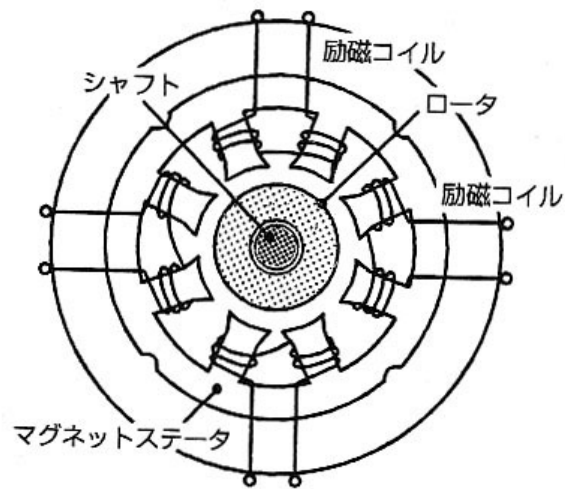


Fig. 1-2 A Example of Magnetic Bearings
 (Courtesy of NEOMAX Co., Ltd.)
<http://www.neomax.co.jp/>



Fig. 1-3 Maglev train (MLX01-1, Linimo and Trans Rapid)
 (Courtesy of Central Japan Railway Company, Aichi Rapid Transit Co., Ltd. and Transrapid International)
<http://linear.jr-central.co.jp/> , <http://www.linimo.jp/> , <http://www.transrapid.de/>

1.2 非接触浮上技術

現在，非接触浮上技術は，種々の利点のために多くの提案・研究が行われている．非接触浮上技術を大きく分類すると，静電気力によるもの，空気圧を利用するもの，磁力(電磁気力)を利用するものになる．これらの浮上原理とその特徴を Table 1-1 に示す．

Table 1-1 Features of Noncontact Levitation System Principle

-	発生力	浮上対象	諸問題
静電気力	弱い	軽量なものに限られる 形状に依存(広面積)	放電破壊 高電圧の能動制御
空気圧	比較的強い	比較的広い面積が必要 形状に依存(広面積)	エアによる塵埃の発生
磁力 (電磁気力)	強い	磁性体に限られる	対象物が限定される

静電気力を用いた浮上では，空気中の放電限界のために印加電圧が制限され発生力を大きくすることができない．よって浮上対象は，軽量でかつ発生力を得やすいように大きな面積を持つ必要がある．例えばシリコンウエハのような形状が望まれる．また静電気力を発生させるために高電圧を制御することが必要である．

空気圧による浮上原理は，エアを噴出しその圧力によって物体を浮上させるものである．強力なエアにより比較的強い発生力を得られるが，エアの噴出により塵埃を巻き上げるためクリーン環境で利用する場合には問題があると考えられる．また，エアを対象物にあてることによる圧力で浮上を行うので，エア圧を受ける比較的広い面積とその部分における非常に精密な加工が要求される．しかし，浮上のためには能動制御を必要とせず簡便な浮上機構を構成できる利点がある．

磁力(電磁力)を用いる浮上(以下，磁気浮上)では，浮上対象は磁性体に限られるが，大きな発生力が可能である．また，塵埃発生の問題もなくクリーン環境への対応もクリアできる．磁気浮上に関しては，古くから発見されていることもあり，種々の研究が行われている．浮上を行うには，磁力を発生する物体同士，または磁力を発生するもの物体と電流あるいは磁力線を通しやすい物体の2つの組み合わせが必要である．この組み合わせによって種々の浮上方式が可能になる．

また，磁力の吸引力と反発力の組み合わせも可能である．その組み合わせを Table 1-2 に示す[14]．尚，いずれかに磁力を発生するものがなくてはならないことより，Table 1-2 より，15 種類の組み合わせが考えられる．

Table 1-2 Classification in Principle of Maglev System[14]

		物体		
		永久磁石	常伝導電磁石	超伝導電磁石
物体	超伝導体	反発力… 吸引力	反発力 吸引力	反発力 吸引力
	強磁性体	吸引力…	吸引力…	吸引力…
	金属導体	反発力 吸引力 * 1	反発力… 吸引力 * 2	反発力… 吸引力… * 1
	超伝導磁石	吸引力 反発力 * 3	吸引力… 反発力 * 3	吸引力 反発力 * 3
	常伝導電磁石	吸引力… 反発力 * 3	吸引力… 反発力 * 3	
	永久磁石	反発力… 吸引力 * 3		

* 1：相対運動を伴う場合

* 2：相対運動を伴う場合，または電流が変化する場合

* 3：反発か吸引かは対向する向きによる

～：代表的使用例があるもの

1.2.1 磁力を用いない非接触浮上

前項でも紹介した通り磁力を用いない非接触浮上機構には，空気圧，静電気力を用いるものがある．空気圧を用いるものは，例えばエアテーブルなどが有名である[15]．これは，テーブルの天板にある無数の穴よりエアを噴出することで，テーブル面上の物体を浮上させるものである．

静電気力を用いるものは，発生力が他に比べ格段と小さいことからあまり応用範囲が広くない．研究としては，シリコンウエハやガラスなどの非接触浮上に関するものがある[16]．

また，超音波を用いて非接触浮上を実現する技術も提案されている[17]．浮上対象は振動板から放射される音波の放射圧によって浮上する．振動板の振動を進行波にすることで，物体(浮上体)の搬送が可能となっている．

1.2.2 電磁コイルを用いた磁気浮上

常電導において、電磁石(電磁コイル)を用い、コイルに流す電流を制御することで、発生力を調整し、浮上を行う研究は古くから発見されていたこともあり、非常に盛んに行われている[18]。また、単に物体を浮上させるのではなく、除振装置への応用[19]、人工心臓への応用[18]、永久磁石を併用し浮上力を補うゼロパワー磁気浮上の提案[20]など様々な研究が行われている。

1.2.3 永久磁石を用いた磁気浮上

永久磁石を用いて磁気浮上を行うと、電磁石を用いた磁気浮上に対しコイル発熱や、消費電力の問題を解決できると考えられる。その中でも様々な浮上機構が提案、研究されている[22]。永久磁石をリニア駆動させて浮上体との空隙を調整することで吸引力を制御する機構[23]~[25]や、固定された永久磁石の磁束を浮上体との間の可動する磁束遮蔽板によって制御し浮上体に流れる磁束を調整する機構[26]、永久磁石の運動制御による反発力を利用した浮上機構[27]など、多くの機構が提案されている。

1.2.4 超伝導を用いた磁気浮上

超伝導を用いた磁気浮上機構は、安定化のためのフィードバック制御が不要という特徴を持つ。また、大きく分けてピン止め効果を用いた浮上機構とそれ以外のものに分かれる。ピン止め効果を用いた非接触搬送機構は、従来の能動型磁気浮上と比べても遜色ない浮上力がえられ、種々の浮上機構が提案されている。これらについては、本論文と密接に関係するため次節にまとめる。

その他の超伝導浮上方式でよく見受けられるものはマイスナー効果を用いたものであるが、この方式は比較的弱い磁界でしか用いられないため、大きな浮上力を得ることが難しく応用を考えた提案は少ない。ピン止め効果を用いない超伝導浮上の応用の代表的なものは、超伝導浮上列車であるリニアモーターカーである。これは超伝導コイルの発生する強力な磁力による誘導電流を用いた浮上方式である。ヌルフラックスによる受動安定により浮上を行っているため、浮上するためにはある程度の速度が必要となっている。また超伝導磁石と鉄との組み合わせによって浮上する装置も提案されている[28]。

1.3 超電導技術を用いた浮上・搬送装置

1.3.1 ピン止め浮上の特長

高温超伝導体などの第二種超伝導体は、内部の析出物や格子欠陥に磁束を補足する性質を持っており、強い磁界を印加した状態で冷却して超伝導状態にすると、冷却前の磁束が捕捉される。これがピン止め効果と呼ばれるもので、条件によってはかなり強い磁場を加えてもこの効果が消滅しない。この磁力を用いた種々の非接触浮上・搬送装置が提案されている。これまでに基礎研究や開発が行われている中で、磁石の磁束と超伝導体のピン止め効果を利用した超伝導磁気浮上搬送システムの主なものの構成と性能を紹介する。

1.3.2 真空チャンバ内搬送機構[29]

旧科学技術庁金属材料研究所のグループは、真空中で非接触走行させることのできる超伝導磁気浮上装置を開発している。従来の接触型駆動搬送方式の問題点である焼き付き、微粒子の発生、およびガス放出をおこさずに清浄な状態での基板搬送が可能となっている。この装置は浮上および走行のためにピン止め効果を利用している。走行には、チャンバ外にある超伝導体を移動させると浮上永久磁石が牽引されて走行するという原理を利用している。

搬送装置は、Fig. 1-4 に示すようにアーム型移動子と真空チャンバから構成されている。移動子はチャンバ内部にあり浮上走行する。移動子の下部にはサマコバ永久磁石円盤が 50cm の間隔で 2 個取付けられ、移動子の一端には基板搭載用アームが取付けられている。永久磁石下部のチャンバ外の冷却槽内には、溶融法により作製した YB2Cu3O7-X (45mmφ×15mm) の超伝導体が置かれている。永久磁石との距離を 12mm とした超伝導体を約 90 K 以下まで冷却し、磁束を

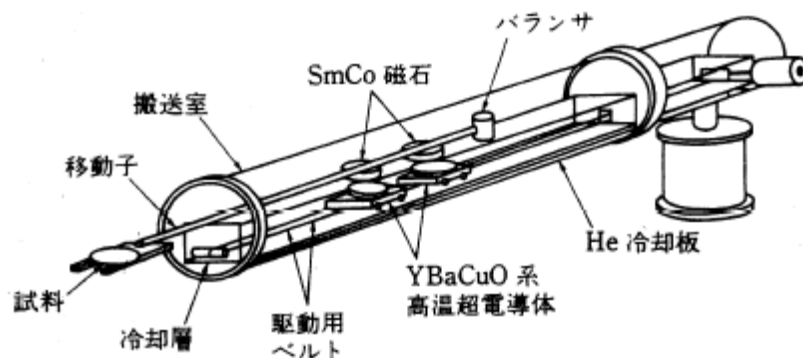


Fig. 1-4 Magnetic levitated transportation system in the vacuum chamber[29]

ピン止めさせることによって搬送機構全体(約 470 g)を冷却槽上 7mm の高度に浮上させることが可能となっている。さらに、移動子に重さ約 50g の基板を搭載させ、真空中で高度約 3mm を保ちながら 70cm の距離を約 3cm/sec の速度で往復走行した、と報告されている。移動子の往復走行は冷却槽内の超伝導体を外部駆動ベルトで駆動することにより行われる。

1.3.3 磁気浮上搬送車両モデル[30]

明石らは、Fig. 1-5 に示すような磁気浮上搬送車両モデルを提案している。軌道にサマコバ系永久磁石を多数敷き詰め、この上に高温超伝導体が入った搬送車を配置し浮上走行させるものである。磁石は、軌道進行方向には隣り合うもの同士が同極に、横方向には異極となるように配置され、進行方向には自由に移動可能で、案内方向(横方向)には拘束されるようになっている。軌道の下にリニアモータの一次巻線を有しており、ここで発生する移動磁界と超伝導体のピン止め磁界とで直接駆動を行い、約 30 gf の推力を発生させている。浮上剛性 16.7 N/mm、案内剛性 6.9 N/mm で、OA 等で用いる小形搬送装置として適用可能ともいえる性能が得られている。

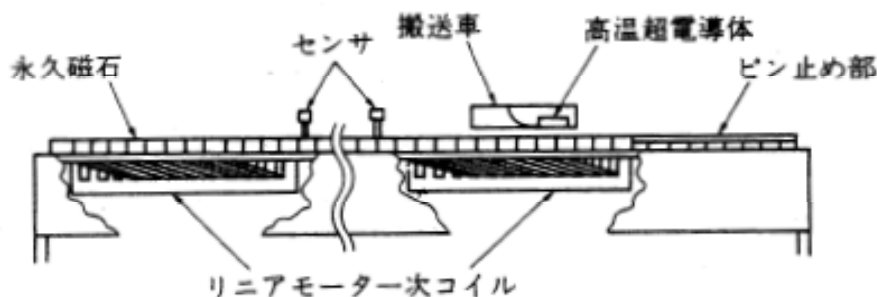


Fig. 1-5 Model of magnetic levitated transportation vehicle[30]

1.3.4 縦形構成の磁気浮上搬送装置[31]

橋本らは、Fig.1-6 に示すような縦形構成の磁気浮上搬送装置を開発している。これは、実用的な立体搬送システムを構成するための一部として水平移動部分を試作したものである。垂直に立った搬送軌条に、Nd-Fe-B 系永久磁石を並べて配置し、4つの高温超伝導体を収めた 2.4 kg の搬送架台(浮上体)を非接触で懸垂支持している。1.3.3 のものと同様、搬送軌条の裏側左右2か所にリニアモータの一次巻線を配置して駆動し、中央部は惰性走行をさせている。大推力を発生させるため搬送架台背面に二次導体を取り付けていることが特徴である。

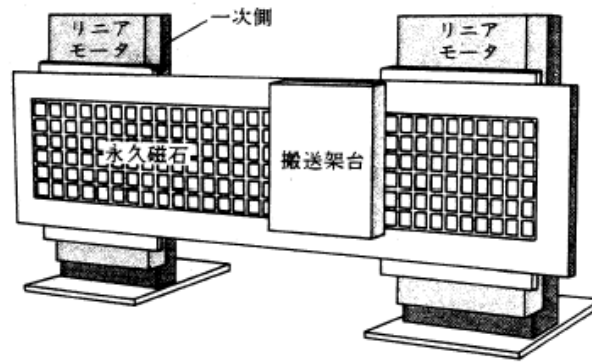


Fig.1-6 Vertical system of magnetic levitated transportation system[31]

1.3.5 ピン止め浮上・反発浮上を利用した搬送装置[32]

より安定である磁気浮上装置を実現するために、ピン止め効果を用いた磁気浮上装置を能動的に制御する報告がある。小森らは浮上物体の変位をホールセンサにより計測し、コイル電流を調整することにより、より短い時間で浮上物体を安定させることを可能とする研究を行っている。浮上のためにピン止めを用い、能動制御を行うために浮上とは逆の磁束を発生し制御している。

装置は Fig. 1-7 に示すようにリング状第2種超伝導体によって円柱型永久磁石をピン止め浮上させ、作業装置内で永久磁石上に物体を載せて搬送するものである。搬送時に生じる振動は、ホールセンサによって計測され、振動を抑制させるための磁界を超伝導体の下側に位置する電磁石から発生させる構造となっている。電磁石から発生する磁束はリング状超伝導体の穴を通過し、永久磁石の浮上力を制御する。試作装置による実験結果およびシミュレーションから、試作機はホールセンサによる位置推定、超伝導体による浮上と電磁石による制御で搬送装置として使用可能である。

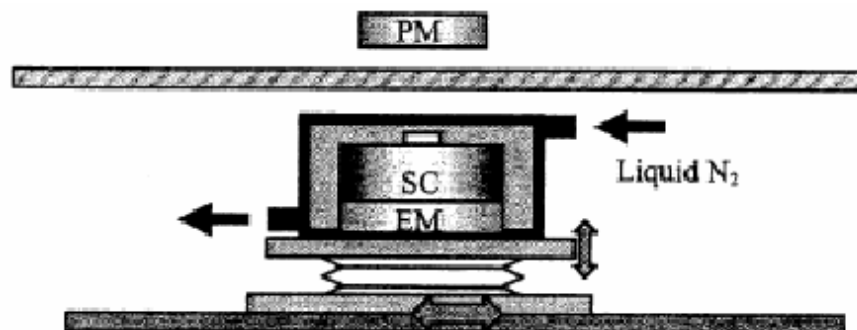


Fig.1-7 Magnetic levitated transportation system using pinning effect and levitation[32]

1.3.6 ハイブリッド搬送装置[33]

大橋らは、HTSC バルク体を用いたピン止め効果と永久磁石の反発力を用いたハイブリッドシステムを提案している。永久磁石の反発力を用いて大きな浮上力を得ることとし、案内方向への安定性を確保するためにピン止め力を利用している。ピン止め効果を併用することで永久磁石の反発力を能動制御なしで安定した浮上を実現可能である。

実験装置は Fig. 1-8 に示すように、地上側に設置された永久磁石の磁気レール部と搬送車から構成されている。搬送車の本体はアクリル製で、HTSC を固定し冷却するための容器が 2 箇所に設置されている。中心部には搬送物を載せる荷台が設置されている。荷台はリニアスライダによって上下方向に自由に動く。また、荷台下部には永久磁石が配置されている。この永久磁石は地上側の磁気レールの磁極と対向させてあり、反発力が発生する。荷重が増えた場合、荷台が下方に沈むことで反発力が増加し、新しい安定位置で均衡する。その結果永久磁石の反発力により大きな浮上力を得ることができ、かつ、搬送車本体の浮上ギャップには影響せず、荷重の増減を行うことができる。

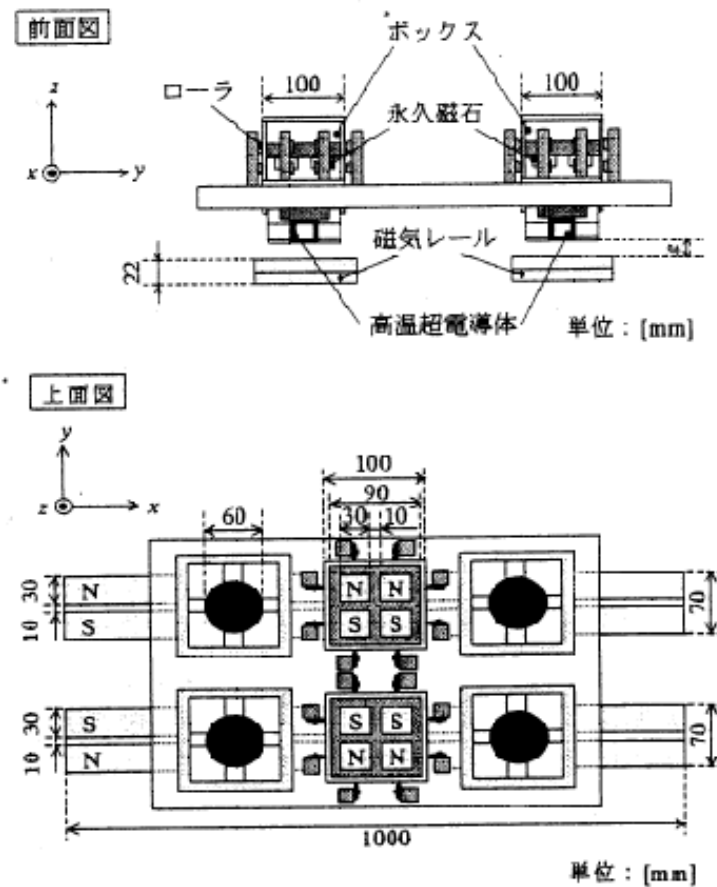


Fig. 1-8 Magnetic levitation hybrid type transportation system[33]

1.4 新しい超伝導搬送機構の提案

従来の常電導磁気浮上機構を利用した搬送機構は、超伝導電磁石や永久磁石から構成され、その浮上高さや走行安定性を保持するために、浮上位置を検出し制御する能動的なフィードバック機構が必要であった。しかし、超伝導体を用いた磁気浮上搬送機構では、完全反磁性を利用する場合、電気抵抗が零となる特性を利用する場合、ピン止め力を利用する場合、ともに浮上に能動制御を必要としない。特にピン止め力を用いる場合には、静的に強固で安定した浮上性能だけでなく、自己位置保持機能を有している[34]。このピン止め力を利用して搬送機構を構成した場合、装置本体が小型単純化できると考えられる。1.3 ではこのようなピン止め効果を用いた種々の搬送装置を紹介した。

本論文は、そのようなピン止め効果を用いた超伝導磁気浮上搬送機構の実現に向けた新しい位置決め機構に関する提案と基礎研究の報告である。ピン止め浮上している浮上体に対し、ピン止め力を超える大きなエネルギーを与えることによりピン止めされている磁束のピン止め点を能動的にずらすという装置を提案している。そのために主にピエゾ素子を用いた急峻な位置変化により磁束を保持しているピン止め点をずらすという超伝導位置決め機構について述べる。

本論文のめざす理想的な搬送機構の一例を、Fig. 1-9 に示す。ピン止め効果を用いて永久磁石の上で浮上する超伝導体を搬送機構として、位置決め・浮上のどちらも非接触かつ精密に行える機構である。提案する位置決め手法が超伝導応用の一つとなることをめざして基礎研究を行った結果を以下に報告する。

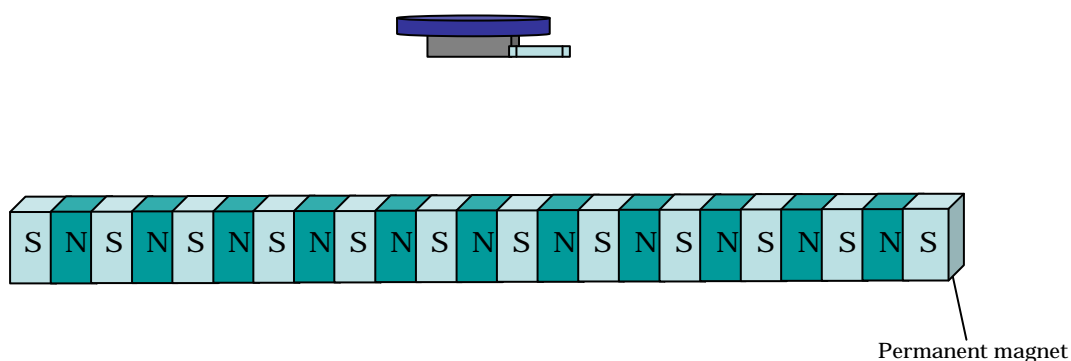


Fig.1-9 Ideal superconductive magnetic levitation transportation system

1.5 論文の概要と構成

本論文は、第1章から第5章までで構成されている。以下に本論文の構成を説明する。

第1章では、緒論を述べた。本研究の背景として超伝導の歴史と現在の非接触浮上技術、および非接触搬送技術について述べた。特に本研究と関連の深いピン止め効果を用いた装置については詳しく紹介を行った。本研究での提案する装置の原理を簡単に述べ、研究がめざす超伝導磁気浮上機構の紹介を行った。

第2章には、本研究が対象とする超伝導磁気浮上機構が持つ物理的特性を説明する。本研究で提案する機構やピン止め浮上状態を微視的に理解するために高温超伝導体を取りまく磁束の状態の理論的特性やピン止め力の発生する機構を述べる。

第3章では、2章で得られた知見により、浮上磁石の選定について述べてある。また実際のピン止め浮上状態における磁束の測定の結果を示している。

第4章では、本研究で提案する磁気浮上機構を紹介する。高温超伝導台の上にピン止め浮上させた永久磁石に対し、 piezoアクチュエータを用いてインパクト力を与えることによる位置決め機構を提案する。またその実験のためのシステムを紹介する。その装置を用いて行われた実験結果の報告および考察を行う。さらに変位発生メカニズムの定式化を提案し、それを実証する実験システムの紹介および実験結果を示す。本実験によって精密位置決め機構の可能性を示す。

第5章では、電磁石を用いたピン止め浮上装置の位置決め方法の提案を行う。ピン止め浮上している電磁石のコイル電流をオンオフすることによりピン止めに制御しインチワーム型の移動機構を提案する。本章においても実験装置を用いて実験を行うことにより提案手法の有効性を述べる。装置の紹介、実験方法、実験結果および考察を述べる。

第6章では、本研究で得られた結果をまとめ、本研究で提案している手法の有効性を示し、今後の応用研究のための課題を述べる。

第2章 超伝導磁気浮上機構の物理的特性

本研究では, Fig. 2-1 に示すようにピン止め効果によって浮上している永久磁石を位置決めすることを提案する[35]. これは永久磁石から出た磁束が超伝導体の内部のピン止め点によって捕らえられて浮上していることを表している. 超伝導体内の点がピン止め点を表している. 2章ではこのピン止め効果を理解するために高温超伝導体と磁束がどのように存在し, どのような力が働くかについて説明する.

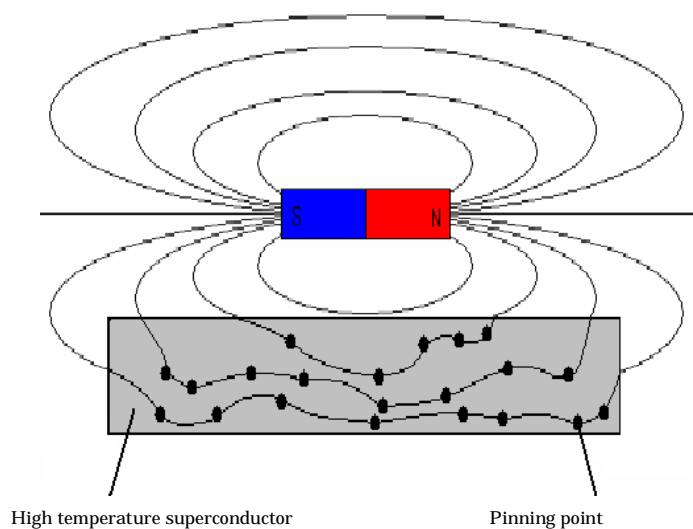


Fig.2-1 Pinning points and superconductive positioning

2.1 ピン止め力とピン止め浮上

第2種超伝導体には Fig. 2-1 のようなピン止め点と呼ばれるものが存在する. ピン止め点は, 欠陥, 結晶粒界, 不純物などが存在する場所であり, その場所は常伝導状態になっているか, 超伝導状態であってもより小さな凝集エネルギーしか持たない[36]. 量子化された磁束が常伝導部分にある場合と, 超伝導部分に磁束がある場合を比較すれば, 磁束が常伝導部分にある場合のほうがエネルギーが小である. したがって, 磁束が常伝導部分から超伝導部分へ移動しようとするとき, 引き戻す力が働くこととなる. これがピン止め効果と呼ばれるものであり, この力をピン止め力と呼び, Fig. 2-1 のような状態をピン止め浮上と呼んでいる. さらに, エネルギー的に安定なことから, この状態で永久磁石は安定に浮上することからピン止め状態は自己位置保持機能を有していると言え, 広い応用範囲が期待できる.

2.2 第一種超伝導体と第二種超伝導体

超伝導体は、磁場に対する振る舞いから第一種超伝導体と第二種超伝導体の二つに区別される。第一種超伝導体では、超伝導体に磁場を加え徐々にその大きさを大きくすると、外部磁場がある値 H_c になるまではマイスナー効果が成り立つ。それ以上の磁場では突然常伝導状態に転移する。このような振る舞いをする超伝導体を第一種超伝導体と呼び、 H_c は臨界磁場と呼ばれる。

一方、第二種超伝導体では、低磁場では第一種超伝導体と同様に完全なマイスナー効果を示すが、 H_c よりも低い磁場で外部磁場が超伝導体内に侵入する。この磁場は下部臨界磁場 H_{c1} と呼ばれる。超伝導体がマイスナー状態を保つためには、磁場を排除するためのエネルギーを必要とするが、第二種超伝導体では、完全に磁場を排除するより一部外部磁場を侵入させることのほうがエネルギー増加を緩和し、系全体として自由エネルギーが低くなるため、安定となる。 H_{c1} より、さらに磁場を大きくしていくと、超伝導体内に侵入する磁場が増えていく。そして、超伝導体が全て通常の磁場で埋め尽くされた時点で常伝導に転移する。この磁場は上部臨界磁場 H_{c2} と呼ばれる。第一種超伝導体と第二種超伝導体の磁場中での応答の概略図を Fig. 2-2 に示す[37]。

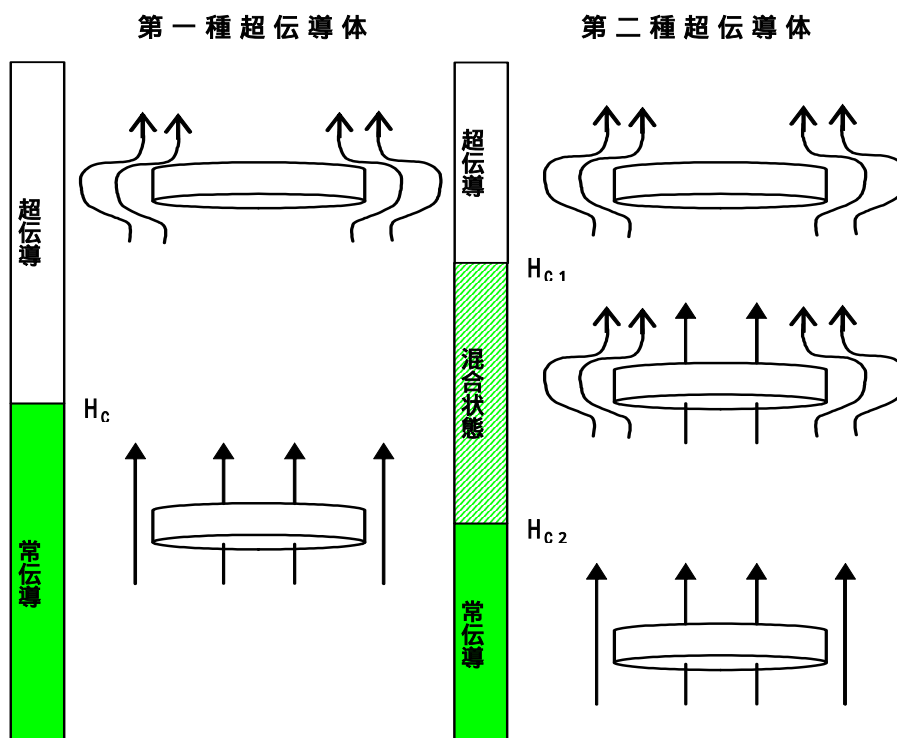


Fig.2-2 Difference of response between type I superconductor and type II superconductor

2.3 超伝導状態の力学[2,36,37]

本節では、ピン止め効果を利用した浮上状態の力学的な考察を行うための基礎知識として、超伝導状態の理論的な説明を行う。

2.3.1 磁束の量子化

原子構造の中で、電子軌道が量子化されているのと同様に、超伝導状態を示す第2種超伝導体を貫く磁束も量子化されていると考えられる。第2種超伝導体において捕捉された磁束周りには超伝導電流が流れることにより磁束が捕捉されると考えら得るからである。今、磁束周りにリングを想定し、超伝導電流がそれに沿って流れることと仮定する。超伝導状態であるためにはリングを1周してもとの位置に戻ってきた電子の位相は、出発点の位相と同じでなければならない。つまり、出発点の位相を θ とすると、一周してきた電子の位相は $\theta + 2n\pi$ (n は自然数) でなければならない。よって超伝導電子の波動関数は、振幅を C とすると

$$Ce^{i\theta} = Ce^{i(\theta+2n\pi)} \quad (2-1)$$

で表される。ここで、リングを一周する積分路に沿った微小ベクトルを dl とすると

$$\oint \Delta\theta dl = 2n\pi \quad (2-2)$$

と、書くことが出来る。つまり、超伝導電流を発生させる磁束は量子化されることとなる。この

量子化磁束 Φ_0 は、 h をプランク定数として、 $\frac{h}{2e}$ を単位として量子化される。

2.3.2 磁場侵入長

超伝導体内での電流密度 J は、超伝導電子の電荷 e^* 、その質量 m^* 、その密度 n_s 、速度 v_s より

$$J = n_s e^* v_s \quad (2-3)$$

と書ける。一方、荷電粒子は電界 E によって力を受けるが、超伝導電子の場合を考えると、電子は散乱・衝突による外部からの力を受けないので、運動方程式は、

$$e^* E = m^* \frac{\partial v_s}{\partial t} \quad (2-4)$$

となる。(2-3), (2-4)式より, $\Lambda = \frac{m^*}{n_s e^{*2}}$ とおくと, 次式が得られる.

$$E = \frac{m^*}{n_s e^{*2}} \frac{\partial J}{\partial t} = \Lambda \frac{\partial J}{\partial t} \quad (2-5)$$

次にマックスウェル方程式の電磁誘導の式

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \nabla \times E = 0 \quad (2-6)$$

に(2-5)を代入すると,

$$\frac{\partial}{\partial t}(B + \nabla \times \Lambda J) = 0 \quad (2-7)$$

となる. したがって,

$$B + \nabla \times \Lambda J = C(x, y, z) \quad (2-8)$$

となる. ここに, $C(x, y, z)$ は時間に依存しない関数である. ロンドンらは, 超伝導状態では, $C(x, y, z) = 0$ と仮定した. すなわち

$$B + \nabla \times \Lambda J = 0 \quad (2-9)$$

である. この (2-9) 式をロンドン方程式と呼ぶ.

次に, アンペールの右ねじ則を考えると,

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (2-10)$$

であり, この式とこれとロンドン方程式 (2-9) から J を消去し, そのベクトルの回転を考えると,

$$B = -\nabla \times \Lambda (\nabla \times B / \mu_0) = -\frac{\Lambda}{\mu_0} (\nabla \times \nabla \times B) \quad (2-11)$$

となる. 公式 $(\nabla \times \nabla \times B) = (\nabla \cdot (\nabla \cdot B) - \nabla^2 B)$ と, 磁荷にはモノポールが存在しないため B の発散 $\nabla \cdot B = 0$ となることを考えると,

$$\nabla^2 B = \frac{\mu_0}{\Lambda} B = \lambda_L^{-2} B \quad (2-12)$$

となる. ここで, μ_0 は透磁率であり, λ_L は次式である.

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{\mu_0}{\Lambda}} = \sqrt{\frac{m^*}{\mu_0 n_s e^{*2}}} \quad (2-13)$$

この λ_L をロンドンの磁場侵入長とよぶ. この磁場侵入長は, 金属の平均的な電子濃度を考えると, 通常数 100[nm]程度となる.

ここで, 簡単なモデルを考えて磁場侵入長を数学的に解いてみる. 今, z 軸方向に磁場 B_0 があり, x の正方向の半無限空間に超伝導体があるものとする. このとき, x 方向の磁場は,

$$\frac{d^2}{dx^2} B_z(x) = \frac{1}{\lambda_L^2} B_z(x), \quad B_z(0) = B_0 \quad (2-14)$$

を解くことになり， x が無限大でも有限な解は，

$$B_z(x) = B_0 e^{-\frac{x}{\lambda_L}} \quad (2-15)$$

で与えられる．これをグラフ化すると，Fig.2-3 のようになる．

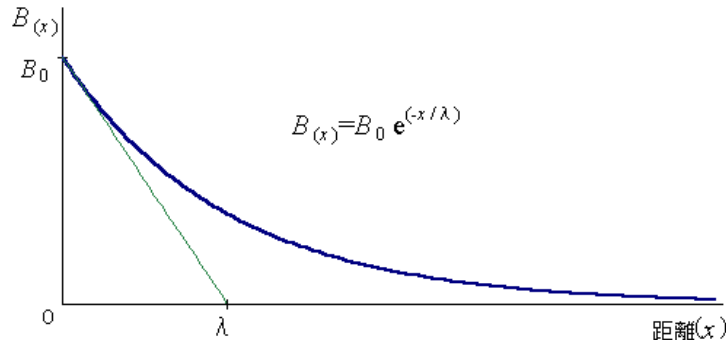


Fig.2-3 Graph of magnetic field penetration depth

このことは，超伝導体の表面では完全な反磁性ではなく，ある程度の磁場が侵入していることを意味する．つまり，超伝導体内の反磁性は，表面の磁場侵入長程度の層によって外部磁場をシールドすることによって実現されるものであると考えられる．

2.3.3 GL 理論とコヒーレンス長

常伝導から超伝導へは熱力学的な相転移であると考えられることができる．超伝導転移温度 T_c では，超伝導におけるギブスの自由エネルギー密度 G_s と常伝導状態における自由エネルギー G_n の間の関係は $G_s = G_n$ であり， T_c 近傍ではその差はごく僅かである．GL 理論は，二相間の自由エネルギーの差が相転移温度近傍において秩序パラメータとよばれる項によって展開できるというものである．

超伝導転移においては自由電子がある種の凝縮状態に落ち込むと考え，秩序パラメータ ψ が超伝導電子密度に直接対応すると考えられる．秩序パラメータ ψ は転移温度 T_c で出現し， T が減少するにつれ増大し， $T = 0$ で完全な秩序状態を表す飽和値を取るとされ，量子力学的性格を持つ複素数であり，通常確率論的な意味合いから $|\psi|^2$ の形で用いられることが多い．ギンツブ

ルグとランダウは、超伝導の相転移の場合として、電子の相対密度

$$|\psi|^2 = \frac{n_s(T)}{n_s(0)} \quad (2-16)$$

を秩序パラメータとして考えた。ここで、 $n_s(T)$ は温度 T における超伝導電子密度、 $n_s(0)$ は絶対温度 0 における超伝導電子密度である。このパラメータに基づいて、 T_c 近傍で超伝導状態のギブスの自由エネルギーは、次式のようにテイラー展開できる。

$$G_s = G_n + \alpha\psi^2 + \frac{\beta}{2}\psi^4 + \frac{\gamma}{6}\psi^6 + \dots \quad (2-17)$$

T_c 近傍では、 $|\psi|^2$ は十分小さいと考えられるので、第 2 項までを考慮すると

$$G_s - G_n = \alpha|\psi|^2 + \frac{\beta}{2}|\psi|^4 \quad (2-18)$$

が得られる。式(2-17) が熱力学的な平衡状態にある場合には、この値は極小値をとると考えられるため、 $|\psi|^2$ は次の条件を満たす。

$$|\psi|^2 = -\frac{\alpha}{\beta} \quad (2-19)$$

これを (2-17)式に代入すると

$$G_s - G_n = -\frac{\alpha^2}{2\beta} \quad (2-20)$$

となる。一方、磁界エネルギーの概念を導入し、第 2 種超伝導体における混合状態の生成機構について考えてみる。まず、常伝導状態の自由エネルギーは、温度 T と磁場 H の関数であり、磁場の有無にかかわらず一定であるから、

$$G_n(T, H) = G_n(T, 0) \quad (2-21)$$

が成立する。次に超伝導状態の自由エネルギーは、外部磁場 H 中における完全反磁性状態を考えると、超伝導体の外に排除される磁場の磁気エネルギー分だけ増加しているといえる。すなわち、

$$G_s(T, H) = G_s(T, 0) + \frac{1}{2}\mu_0 H^2 \quad (2-22)$$

である。さらに、臨界磁場 H_c においては、自由エネルギーが連続であることから

$$G_n(T, H_c) = G_s(T, H_c) \quad (2-23)$$

となることを考慮すると、(2-21)、(2-22)より

$$G_n(T, 0) - G_s(T, 0) = \frac{1}{2}\mu_0 H_c^2 \quad (2-24)$$

を導くことができる。式 (2-20)、(2-24) より次式が成立する。

$$\mu_0 H_c^2 = \frac{\alpha^2}{\beta} \quad (2-25)$$

ここで超伝導状態であるためには、 G_s は、 G_n より自由エネルギーが小さいことが必要であり、そのためには、(2-18)式を考えると

$$\alpha < 0, \quad \beta > 0 \quad (2-26)$$

が必要であることがわかる。

次にポテンシャルが働くときの運動エネルギーを考えると、これは次式で与えられる。

$$E_{kin} = \frac{(p - e^* A)^2}{2m^*} \quad (2-27)$$

ここで、 p は電荷の持つ運動量、 A はベクトルポテンシャルである。運動量は量子力学的な表記をすれば、 $p = -i\hbar\nabla$ であるので、超伝導状態における運動エネルギーの項は、 ψ を用いて、

$$\frac{1}{2m^*} |(-i\hbar\nabla - e^* A)\psi|^2 \quad (2-28)$$

と表せる。さらに、磁場によるエネルギーを考えると、一般的な自由エネルギーは、

$$G_s = G_n + \alpha|\psi|^2 + \frac{\beta}{2}|\psi|^4 + \frac{1}{2m^*} |(-i\hbar\nabla - e^* A)\psi|^2 + \frac{|B|^2}{2\mu_0} \quad (2-29)$$

となる。平衡状態においては ψ の微小な変化に対して G_s が極小値をとるので、(2-29)式を ψ で微分し、零と置くと次式が得られる。

$$\alpha\psi + \beta|\psi|^2\psi + \frac{1}{2m^*} (-i\hbar\nabla - e^* A)^2\psi = 0 \quad (2-30)$$

この式が GL 方程式であり、第 2 種超伝導体の熱力学的性質、磁気的性質をよく表すことのできる式である。

今、式(2-30)の GL 方程式において、 $A = 0$ とし、 $\beta|\psi|^2$ が よりも非常に小さく無視できるとする。同時に、 ψ が x 方向の一次元の関数と考えると、(2-30)式は、

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\psi}{dx^2} = \alpha\psi \quad (2-31)$$

となる。式(2-26)を考慮すると(2-31)式は一般的な波動方程式であり、その解の形は、

$$\psi = \exp(ix/\xi) \quad \text{ただし、} \xi = (-\hbar^2/2m^*\alpha)^{1/2} \quad (2-32)$$

となる。この ξ はコヒーレンス長と呼ばれ、 ψ が空間的に変化できる大きさを与える。つまり、超伝導の電子の波動関数は、この ξ 程度の空間的な広がりを持つことになり、この長さの範囲では一様なベクトルポテンシャルとなることを表している。第一種超伝導体では、侵入深さよりコヒーレンス長のほうが大きいので超伝導体内に磁束が入り込むことができず、第二種超伝導体

では、侵入深さのほうがコヒーレンス長より大きいので超伝導体内に磁束が入り込めると考えられる。

2.3.4 高温超伝導体とピン止め点

超伝導体の混合状態において、磁束が自由に動くとなると、電流が流れたときに量子化磁束が動き回り、電気抵抗がゼロにならない。よって超伝導体内の磁束の運動を阻止する働きをもつものが必要である。これがピン止め点と呼ばれるものであり、非超伝導層を微細に分散した組織などによって作ることができる。臨界電流を高めるためには、組織制御によって積極的にピン止め点を導入したり、より強い捕捉力を持ったピン止め点を作る必要がある。以下では、この高温超伝導体のピン止め点について簡単に説明する。

第2種超伝導体に磁場を与えていくと、磁束が侵入を始める。これは、磁束の侵入を許したほうが、エネルギー的に有利であるからである。今、超伝導体に xy 平面を考え、その座標を (x, y) としする。また、各ピン止め点が許容する磁束を $B_c(x, y)$ 、空気中の透磁率を μ とする。超伝導体に磁束が λ だけ侵入しているとすると、各ピン止め点では、マイスナー効果で磁束を排除するのと比較すれば

$$E_n = \frac{\lambda^2 B_c(x, y)}{2\mu} \quad (2-33)$$

だけ、エネルギー的には得をしている。一方、この部分はコヒーレント長さ ξ だけ、凝集エネルギーを損をしており、これは、

$$E_s = \frac{\xi^2 B_c(x, y)}{2\mu} \quad (2-34)$$

で表される。これらのエネルギーの収支を考えると、

$$E = E_n - E_s = \frac{(\lambda^2 - \xi^2) B_c(x, y)}{2\mu}$$

となり、第2種超伝導体では、 $\lambda > \xi$ であるためトータルとしてエネルギー的に低いので、磁束を侵入させた方がより安定となる。

次にピン止め力がどの程度の大きさかを見積もってみることにする。今、Fig.2-4 に示すように、厚さ d の第2種超伝導体を半径 r の量子化磁束が貫いているとする。このとき、磁束を移動させようとするピン止め力が働く。これは、常伝導部分（ピン止め点）にある量子化磁束を超伝導部分へ移動させるということは、この磁束が交錯していた体積分だけ新たに超伝導を壊す必要があり、これには余分なエネルギーが必要であるからである。つまり、量子化磁束は常伝導介在

物と交錯したままのほうが安定であり，また，引力相互作用が働く．これが，ピン止め効果であり，ピン止め力である．

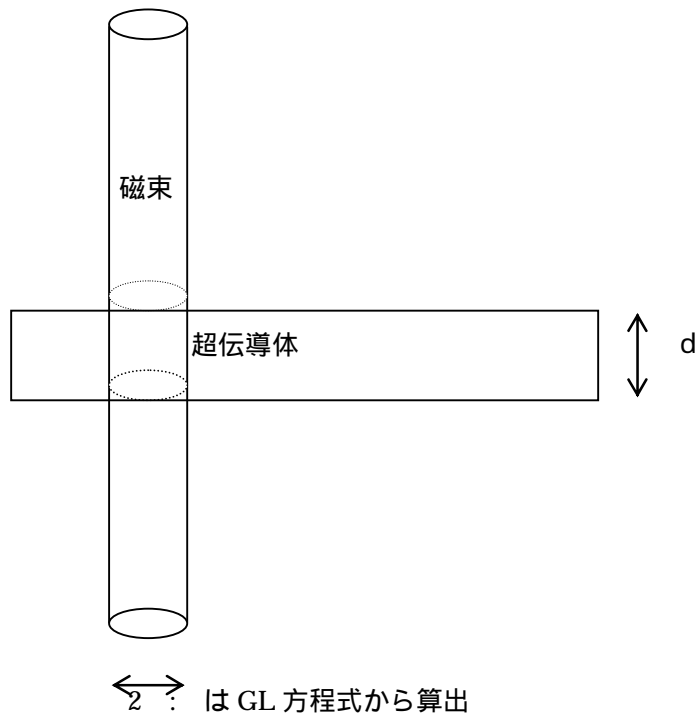


Fig.2-4 Floxoid going through high temperature superconductor

まず，1 点のピン止め点を通過する磁束を移動させる場合のピン止め力 f_p について考える．
 Fig. 2-4 において，量子化磁束が超伝導状態を破壊して移動したとすると，超伝導部分を $\pi\xi^2 d$ だけ壊す必要がある．そのエネルギーの大きさは

$$U_p = \pi\xi^2 d \cdot \frac{B_c^2}{2\mu_0} \quad (2-35)$$

である．よって，1 点のピン止め点を通過する磁束が発生するピン止め力は，

$$f_p = \frac{dU_p}{dx} \cong \frac{U_p}{\xi} = \pi\xi d \frac{B_c^2}{2\mu_0} \quad (2-36)$$

となる．

いま，浮上磁石から超伝導体表面を通過する磁束密度を $B(> B_c)$ である場合を考える．この場合には磁束が通過するピン止め点が複数になると考えられ，ピン止め力はそのピン止め点の数に比例すると考えられる．ピン止め点の個数は，

$$N = \frac{B}{B_c} \quad (2-37)$$

であるので

$$F_p = N \cdot f_p = \frac{B}{B_c} \pi \xi d \frac{B_c^2}{2\mu_0} \quad (2-38)$$

とピン止め力を求めることができると考えられる。

第3章 浮上装置のための磁石と超伝導体の検討

本研究では超伝導体、永久磁石などの装置で使う材料が重要な役割を果たす。よってこの章では、それらの材料の紹介と基礎的な実験結果を述べる。

3.1 超伝導体

今回の実験では、第二種超伝導体のもつ量子化された磁束が貫く不完全なマイスナー状態（ピン止め浮上）を対象とし、イットリウム系酸化セラミックス（ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ）を使用した。このイットリウム系酸化セラミックスは-181（ ）で超伝導状態となる。このイットリウム系酸化セラミックスを液体窒素（沸点:-195.802 ）を用いて冷却して超伝導状態を実現し、その直上に永久磁石を浮上させた。

3.2 浮上磁石として採用した磁石

3.2.1 ネオジム磁石

希土類磁石の一つで、ネオジム・鉄・ホウ素を主成分とした成形焼結品である。高い特性と主原料が比較的豊富なネオジムと鉄のため、将来の資源的問題もなくコスト比較的安くできることが大きな特徴である。一方、耐食性が悪いために錆びやすく、高温多湿の環境で使用する用途に対しては、表面処理が必要であり、他の磁石と比べて温度変化に弱いので使用温度と動作点については注意が必要である。機械的強度が高いために、欠けや割れが少なく、機械加工や着磁後の取り扱いが容易であり、比重も低いため、小型化や軽量化にも対応可能であり、強度の高さや比重の低さなどから、大小いろいろな形状のモーター、磁気軸受、医療器具、装飾品、電子部品など、様々な精密機械の部品に使われている。

3.2.2 フェライト磁石

酸化物磁石の一つで、酸化鉄を主原料にバリウムやストロンチウムを微量加えたものを成型し焼結し、電磁石によって着磁して製造する。磁気特性が安定し高い磁場を必要としない場合に使われる安価な磁石であり、他のあらゆる磁石と比較しても、価格/特性のコストパフォーマンスの点で優位性を有しており、焼結前は粉末のため自由な形に成形できる特長も有している反面、硬度は高いが割れやすい面も有している。酸化物で陶磁器に近い性質なので、耐食性に優れ、高い電気抵抗を持っており、さらに製鉄の副産物が主原料として使えるメリットを有している。他の磁石と比して、残留磁束密度は低く、保磁力は大きく減磁しにくい。そのすぐれたコストパフォーマンスや耐食性により、吸着用・鉄粉除去用・磁化水用・鳥害対策用・モータ用・発電機用・スピーカ用・磁気健康器具用など、様々な分野で使用されている。これらをまとめて Table 3-1 に示す。

Table 3-1 Characteristics of magnets using in this experiment

	単位	ネオジム	フェライト
残留磁束密度 Br	mT	1,170 ~ 1,430	210 ~ 220
保持力 HcB	kA/m	859 ~ 955	144 ~ 152
最大エネルギー積 BHmax	kJ/m ³	223 ~ 374	8.0 ~ 8.8
密度	g/cm ³	7.5 ~ 7.6	4.6 ~ 4.9
抗折強度	N/mm ²	245	29 ~ 68

3.2.3 インパクト実験へのフェライト磁石の採用

インパクト実験を行っていたところ、たネオジウム (d=8, l=8) の動きが悪いことが確認された。具体的には 100[V]の電圧でインパクト実験を行ったが、インパクトによる明確な動きが確認できなかった。そのために、磁束とピン止め力の関係から下記のような検討を行った。

移動の機構として浮上磁石に加わる加速度 a は系に加える電圧に起因しており、電圧に比例すると考えられる。ここでインパクト力による慣性力がピン止め力と等しい場合には次の式が成り立ち、これより慣性力が大きい場合に移動する。

$$F = ma = \left(\frac{B}{B_c}\right)\pi\xi d\left(\frac{B_c^2}{2\mu_0}\right) \quad (3-1)$$

つまり、各磁石固有の係数 B/m がより小さい値であるほうがよい。

Table.3-2 に、 B_o/m の係数の比較を検討した。極から発生した磁束は球状に放射され、球の表面積で除したもので比較・検討しなければならず、浮上距離が未知の場合は本質的に検討することはできないが、ネオジウム(d=8, l=8)の値を 100 として比較することによりその他の磁石の傾向がわかると判断した。同じネオジウム磁石でも大きいネオジウム(d=10,l=10)が 53.3、フェライト(d=10,l=10)が 27.4、フェライト(d=15,l=8)が 13.8 であり、フェライト磁石や他のネオジウム磁石を用いて実験するほうが良い結果が期待できることがわかった。

また、浮上について試したところ、ネオジウム磁石は当然として、フェライト磁石 2 種類も浮上には問題はなかった。このためめフェライト系の磁石をインパクト実験に採用した。

Table 3-2 Comparison with magnetic characteristics using in experiment

磁石の種類	質量：m (g)	表面磁束密度：Bo(mT)	Bo/m	比率
ネオジウム (d=8,l=8)	3.00	485	161.9	100
ネオジウム (d=10,l=10)	5.85	505	86.3	53.3
フェライト (d=10,l=10)	3.61	160	44.3	27.4
フェライト(d=15,l=8)	6.50	145	22.3	13.8

3.3 磁束密度測定

3.3.1 磁束密度測定

超伝導体を冷却して超伝導状態を実現し、永久磁石をピン止め浮上させた。永久磁石には直径 8 mm，長さ 8 mm のネオジウム製のものを用いた。この状態で Fig. 3-1 に示すような座標系を設定して磁束密度測定を行った。

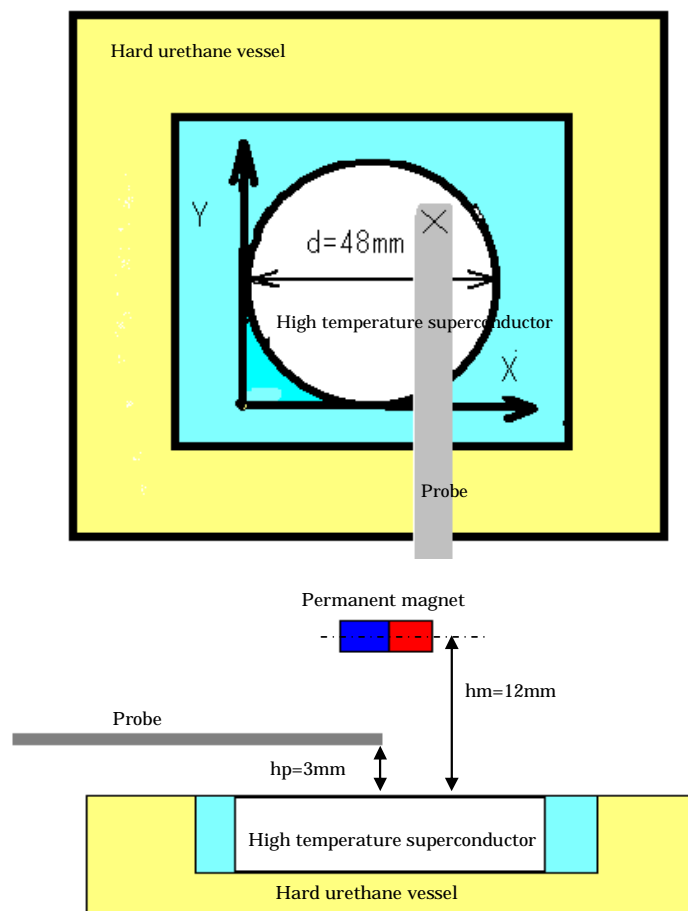


Fig. 3-1 Experiment for measurement of magnetic flux density

磁束密度測定には東陽テクニカ社 F.W.BELL MODEL 6 0 1 0 とそれ専用の Probe を用いた。この Probe は Probe 平面を通過する 1 方向のみの磁束を測定するタイプのものであり、幅 3 mm，厚さ 1 mm であった。本来、磁束密度は 3 次元で測定するべきであるが、3 次元磁束密度を測定可能な Probe が直径 8 mm であり、浮上距離が小さく十分な測定余地を持たないこの実験には不

向きであった。そこで、本実験には上記の一方向のみ測定可能な、非常に薄いタイプのものを用いた。さらに、Probe をできる限り超伝導体の直上におき、永久磁石から発生する超伝導体を貫く磁束密度を測定したかったが、実際には超伝導体の直上 3 mm のところで測定した。これは、冷媒として用いる液体窒素が超伝導体の表面まで冷却することと永久磁石からの超伝導体を貫く磁束測定という相矛盾する 2 つの条件のどちらも損なわない範囲を選択し、また、1 mm ではあるが Probe の厚みを考慮しての最低値である。また、永久磁石と超伝導体の距離、すなわち、永久磁石の浮上距離は、永久磁石の中心で 12 mm であった。磁束密度測定実験中の写真を Fig.3-2、Fig.3-3 に示す。

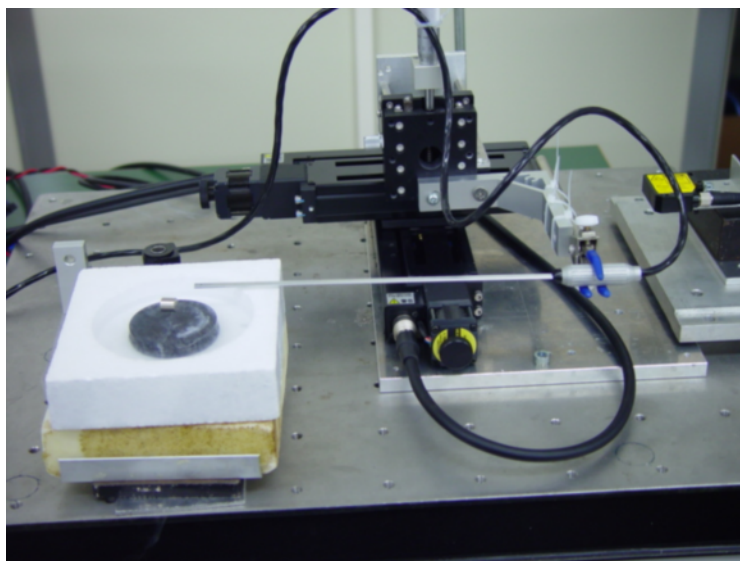


Fig. 3-2 Experiment for measurement of magnetic flux density

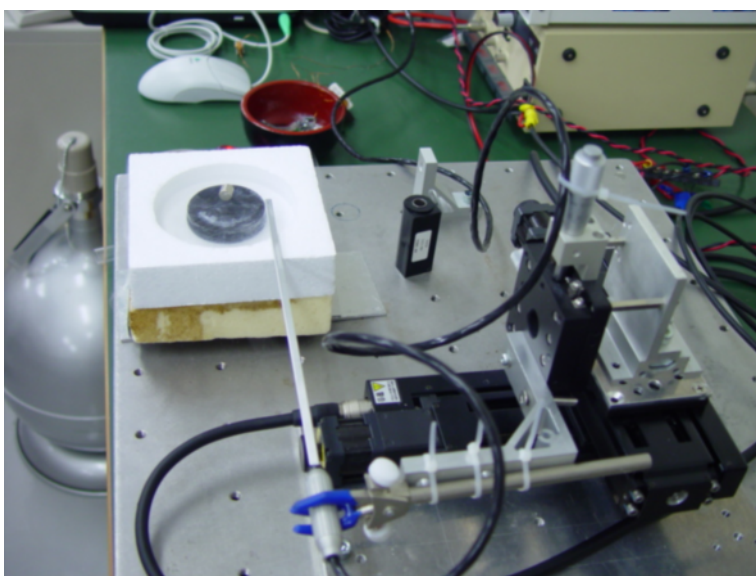


Fig. 3-3 Experiment for measurement of magnetic flux density

磁束密度計測は、Fig. 3-1 に示す座標軸の 座標の 0 , 5 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 35 , 40 , 45 , 50 (mm) の 5 mm 間隔を Y 軸方向に 0 ~ 50 (mm) を Probe の走査による磁束密度の変化がないように、0 . 1 (mm/s) で走査した . 測定結果を Fig. 3-4 ~ Fig.3-14 に示す .

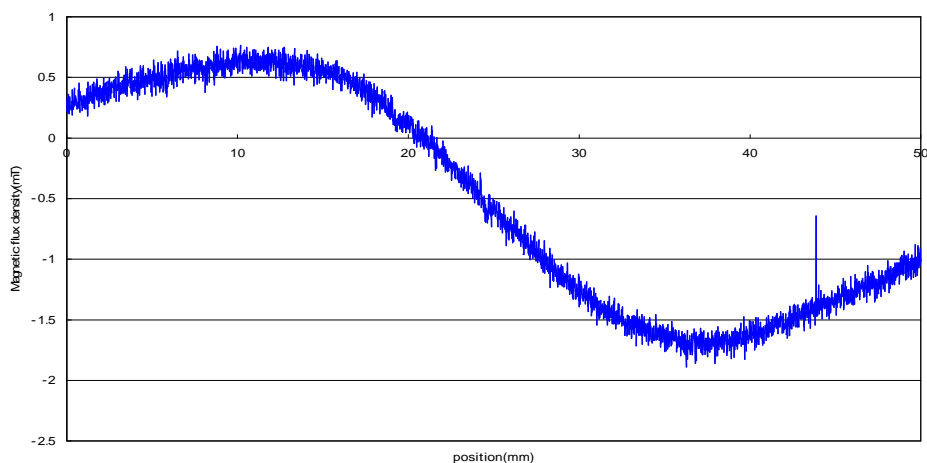


Fig. 3-4 Magnet flux density at X=0 (mm)

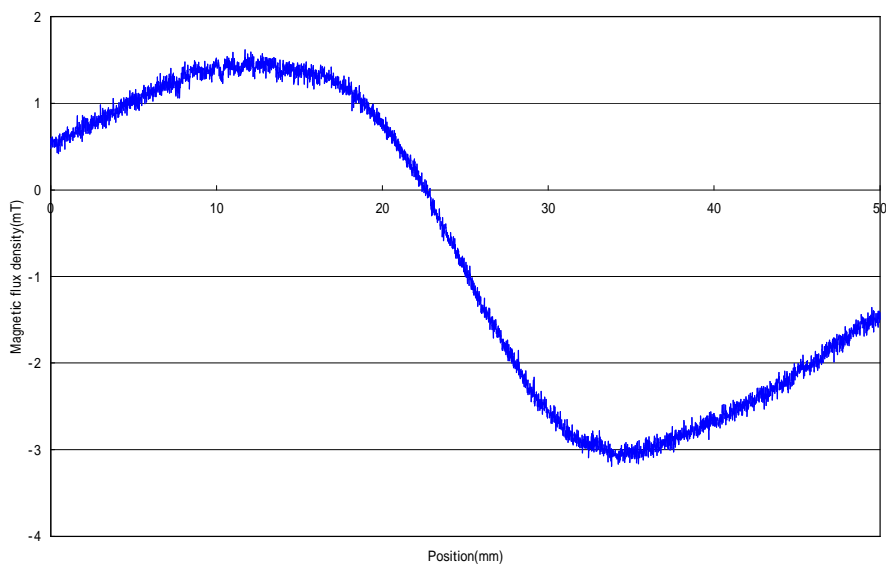


Fig. 3-5 Magnet flux density at X=5 (mm)

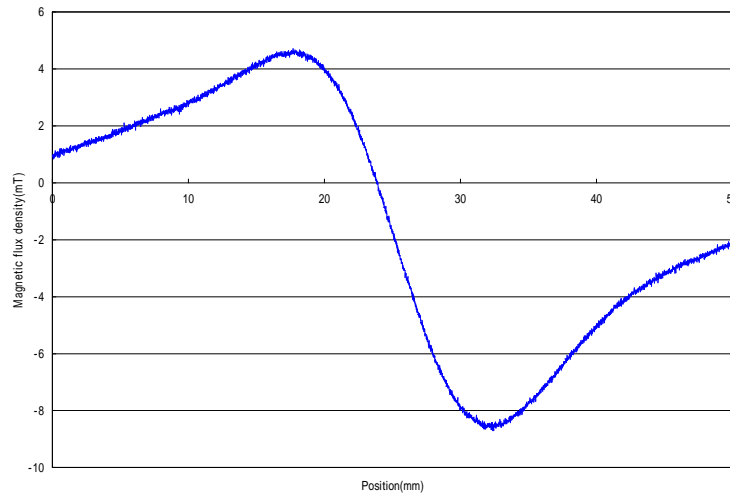


Fig. 3-6 Magnet flux density at X=10 (mm)

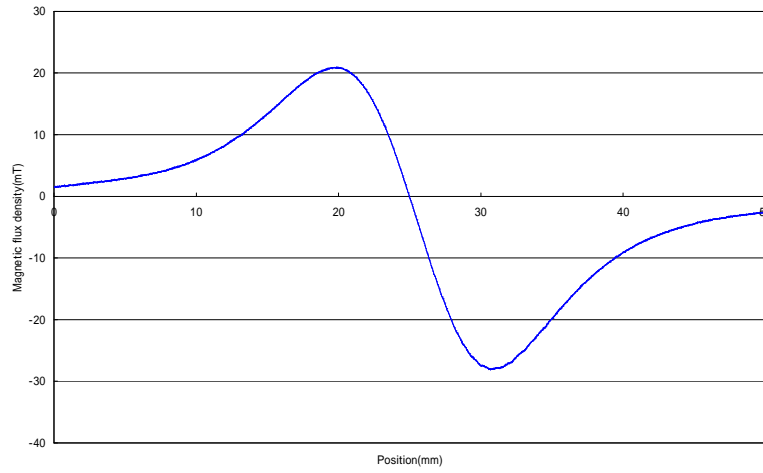


Fig. 3-7 Magnet flux density at X=15 (mm)

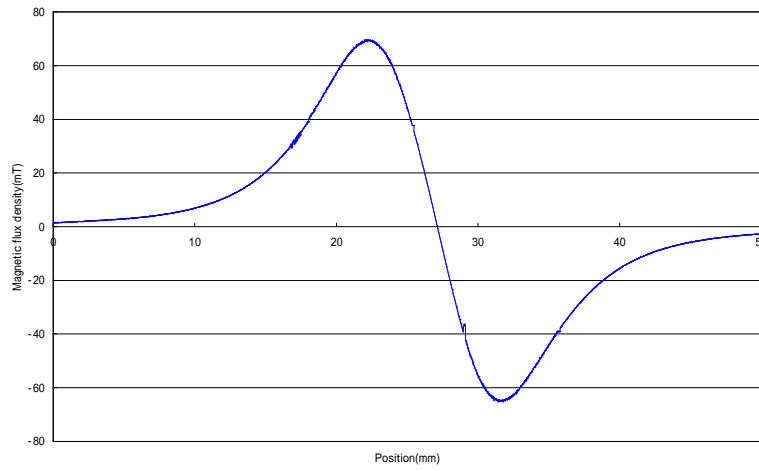


Fig. 3-8 Magnet flux density at X=20 (mm)

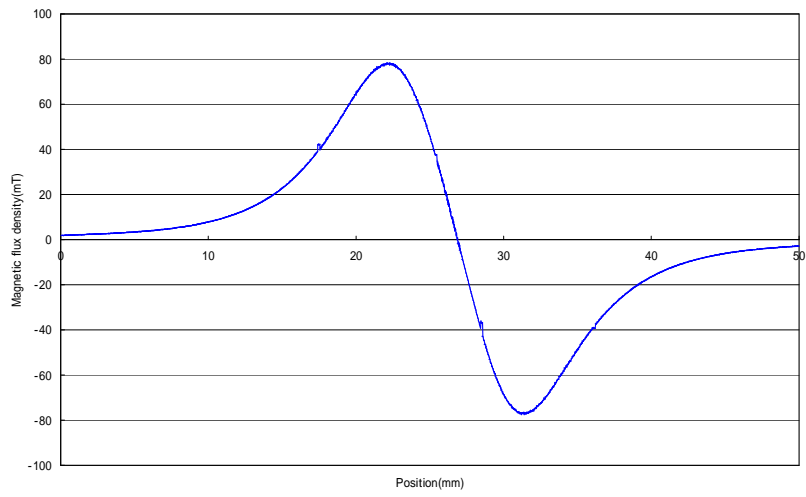


Fig. 3-91 Magnet flux density at X=25 (mm)

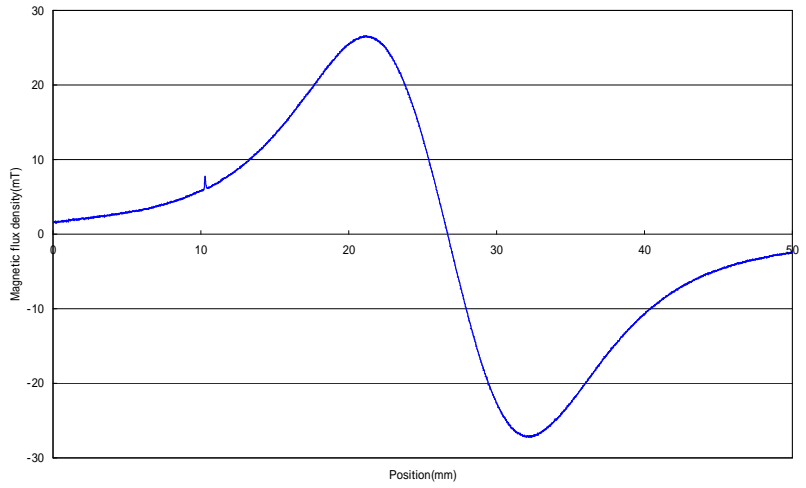


Fig. 3-10 Magnet flux density at X=30 (mm)

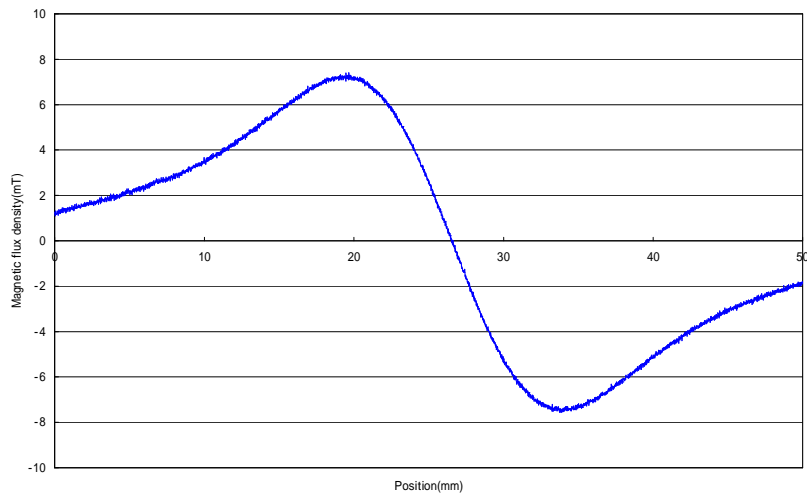


Fig. 3-11 Magnet flux density at X=35 (mm)

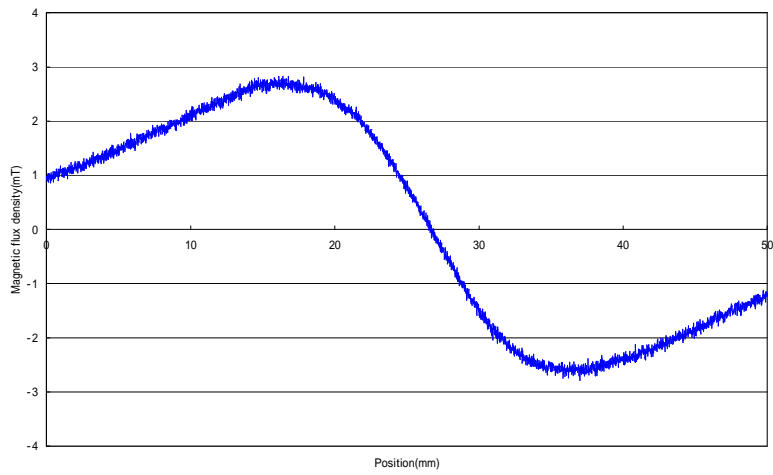


Fig. 3-12 Magnet flux density at X=40 (mm)

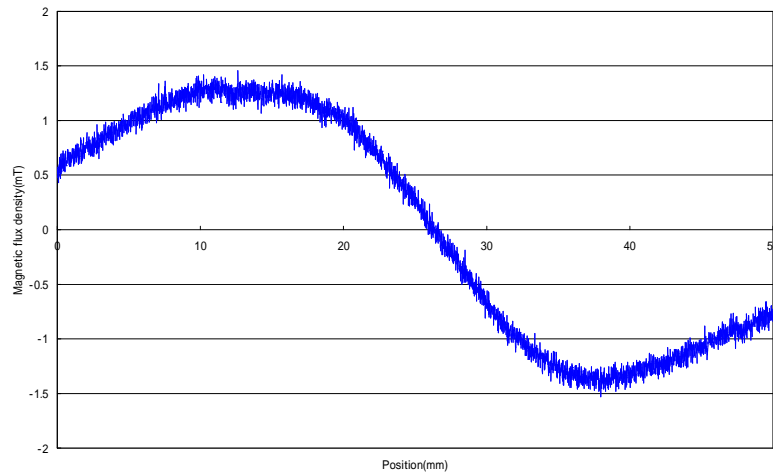


Fig. 3-13 Magnet flux density at X=45 (mm)

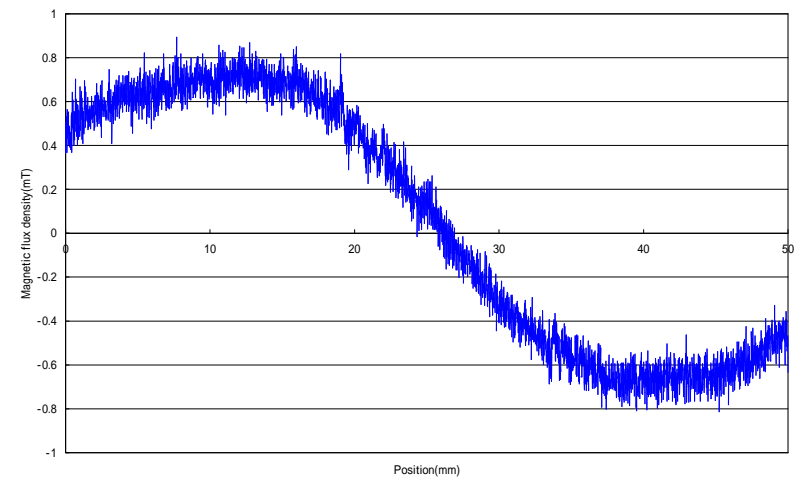


Fig. 3-14 Magnet flux density at X=50 (mm)

Fig. 3-4 ~ Fig. 3-14 において，磁束密度計測値が Y 座標値約 25 mm の地点でほぼ 0 の値を取っている．これは，この地点で Probe が浮上永久磁石の直下を通過しており，このような計測結果を示している．また，測定値が徐々にプラス側で上昇し，その後 0 を通過してマイナス側に転じているが，これは，超伝導体の端から Probe がスタートし，最初は N 極の影響を受けながら浮上永久磁石に近づき，永久磁石の直下を通過した後に S 極の影響を受けている結果と考えられる．

3.3.2 超伝導体表面を通過する磁束の推定

前節の実験結果は，X 座標を変化させながらグラフ化しているが，これは超伝導体の直上 3 mm の測定値である．ピン止め力は超伝導体を貫いている磁束密度に関係していると考えられており，ピン止め力の大きさを考える場合は，これらのデータから超伝導体を実際に貫く磁束密度を想定する必要がある．そこで，Fig. 3-15 を考えて測定値の修正を行うものとする．

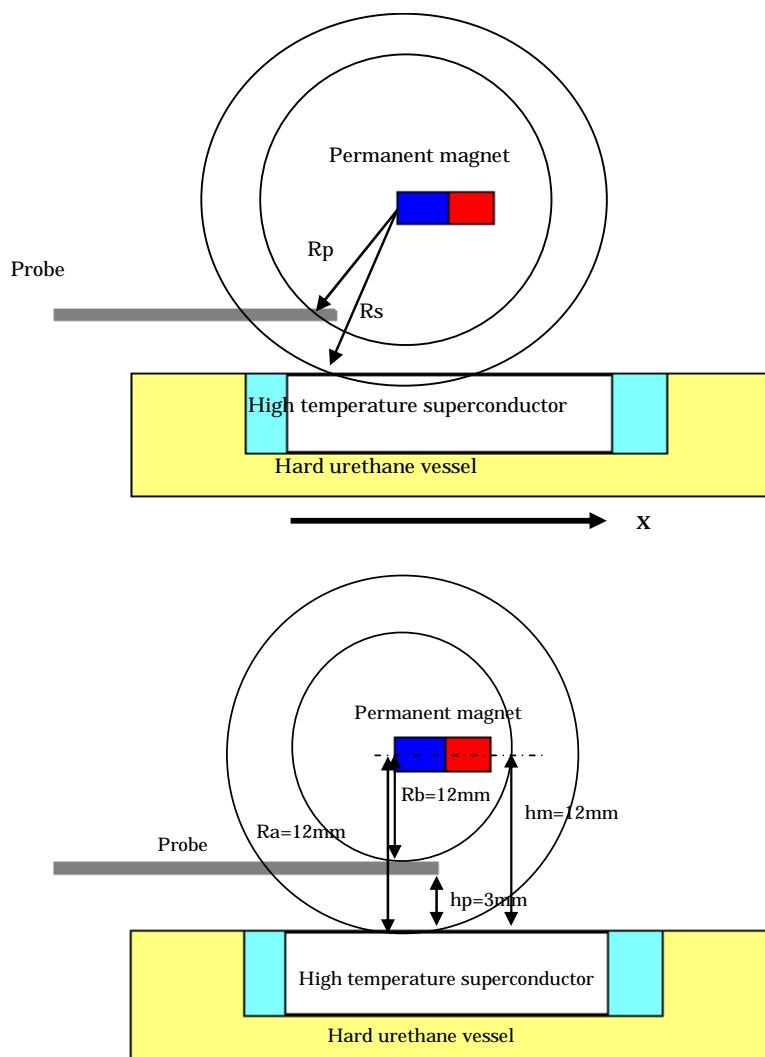


Fig. 3-15 Method for correction of magnetic flux

浮上磁石の中心から Probe までは 9 mm であり，浮上磁石の中心から超伝導体の表面までは 12 mm であった．つまり，既測定値は半径 9 mm の球の表面と Probe との接する面を通過する磁束密度を測定していたことになる．この値を球の表面積である $4 R^2$ ($R=9$) を乗じると，磁極の発生源の磁束密度が計算される．計算された磁極の発生源の磁束密度をやはり $4 R^2$ ($R=12$) で除すると，超伝導体表面を通過する磁束密度となる．これと同様の方法で，を各 X 座標における磁束密度の修正を行う．Fig. 3-16, Fig. 3-17 の幾何的な関係を用い，浮上永久磁石からの発生磁束はそのまま使用するものとするものとして修正する．

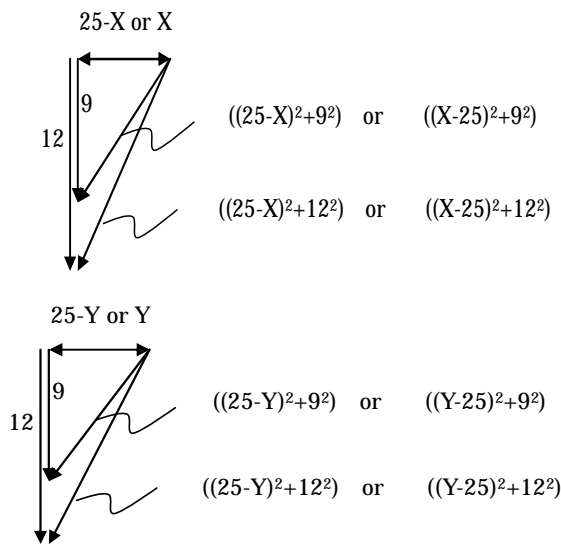


Fig. 3-16 Two dimensional geometric method for correction of magnetic flux

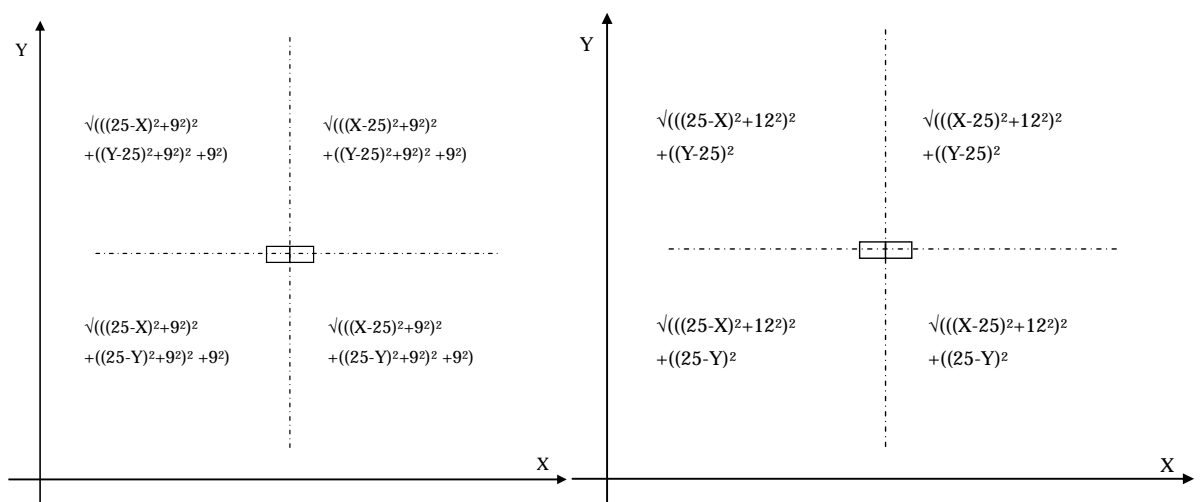


Fig. 3-17 Three dimensional geometric method for correction of magnetic flux

この方法で、各 X 座標ごとに Y 軸方向に 50 mm 走査したデータの修正前のデータを Table 3-3 に、修正後のデータをしたものを Table . 3-4 に示す。また修正後のデータをグラフ化したものを Fig. 3-18 に示す。

Table 3-3 Real values by flux density

	Y	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
X												
0		0.218	0.492	0.619	0.639	0.163	-0.627	-1.393	-1.761	-1.650	-1.373	-1.008
5		0.476	1.031	1.440	1.396	0.793	-1.000	-2.567	-3.102	-2.583	-2.119	-1.496
10		0.909	1.817	2.737	4.126	3.979	-1.734	-7.851	-7.681	-5.066	-3.146	-2.234
15		1.436	2.849	5.963	13.330	20.761	0.032	-27.533	-19.789	-9.109	-4.459	-2.547
20		1.377	2.940	6.915	20.293	57.010	44.632	-55.225	-44.315	-15.508	-5.895	-2.761
25		1.877	3.412	7.887	22.852	63.992	45.981	-68.674	-48.599	-16.460	-6.042	-2.813
30		1.603	2.805	5.753	13.255	25.526	12.914	-22.645	-22.697	-10.648	-4.884	-2.416
35		1.254	2.119	3.479	5.808	7.236	2.563	-5.372	-7.240	-5.154	-3.126	-1.837
40		0.972	1.436	2.150	2.757	2.368	0.742	-1.476	-2.626	-2.384	-1.873	-1.194
45		0.476	1.035	1.329	1.337	1.063	0.194	-0.678	-1.210	-1.309	-1.031	-0.778
50		0.504	0.651	0.702	0.659	0.476	0.079	-0.409	-0.476	-0.686	-0.742	-0.635

Table 3-4 Correction value by geometric method

	Y	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
X												
0		0.2003	0.4461	0.5583	0.5770	0.1475	-0.5693	-1.2626	-1.5912	-1.4888	-1.2449	-0.9251
5		0.4317	0.9120	1.2489	1.2037	0.6860	-0.8665	-2.2193	-2.6741	-2.2398	-1.8731	-1.3564
10		0.8196	1.5758	2.2700	3.3158	3.1749	-1.3854	-6.2643	-6.1724	-4.2011	-2.7283	-2.0149
15		1.2974	2.4553	4.7919	9.8884	14.6730	0.0222	-19.4594	-14.6796	-7.3202	-3.8436	-2.3008
20		1.2482	2.5417	5.5173	14.3422	35.7770	26.8387	-34.6566	-31.3200	-12.3735	-5.0971	-2.5036
25		1.7044	2.9572	6.3024	15.9959	38.4808	25.8990	-41.2958	-34.0191	-13.1533	-5.2370	-2.5548
30		1.4532	2.4251	4.5898	9.3680	16.0187	7.7653	-14.2112	-16.0414	-8.4959	-4.2225	-2.1906
35		1.1325	1.8261	2.7961	4.3085	5.1144	1.7940	-3.7965	-5.3709	-4.1415	-2.6946	-1.6593
40		0.8768	1.2455	1.7831	2.2158	1.8897	0.5928	-1.1775	-2.1106	-1.9772	-1.6239	-1.0772
45		0.4317	0.9155	1.1526	1.1524	0.9193	0.1685	-0.5865	-1.0430	-1.1354	-0.9120	-0.7052
50		0.4626	0.5901	0.6335	0.5949	0.4317	0.0721	-0.3705	-0.4301	-0.6191	-0.6728	-0.5828

磁束が量子化されていることは、理論的にはすでに示したとおりであるが、1961 年にはアメリカ・スタンフォード大学において実験で確かめられている。ここで、今回の実験において超伝導体表面における通過磁束を全て量子化されていると考えてると、何本に相当するかを計算してみると、

$$n = \frac{41.3 \times 10^{-3}}{2.068 \times 10^{-18}} = 20.0 \times 10^{15} \quad (\text{本} / \text{m}^2)$$

という結果となる。量子化された磁束は、互いに反発するため、規則正しく並んでいるはずであり、通常磁束間の距離は 1 μm 程度であると言われている。いま、1 辺が 1 m の正方形のなかに 20.0×10^{15} 本の量子化磁束を配置するとすれば、1 辺には 1.41×10^8 個の量子化磁束を配置し

なければならない。1 μm ごとに格子点を配列していくと、1 mの縦と横一列に、 10^6 個が並ぶこととなる。ここでは、磁束密度が最大の地点では、計算上1個のピン止め点には141本の量子化磁束が侵入しなければならない計算となる。これから考えても、浮上磁石の極の直下では各ピン止め点に複数本の量子化磁束がかなり密に侵入していることが想像される。

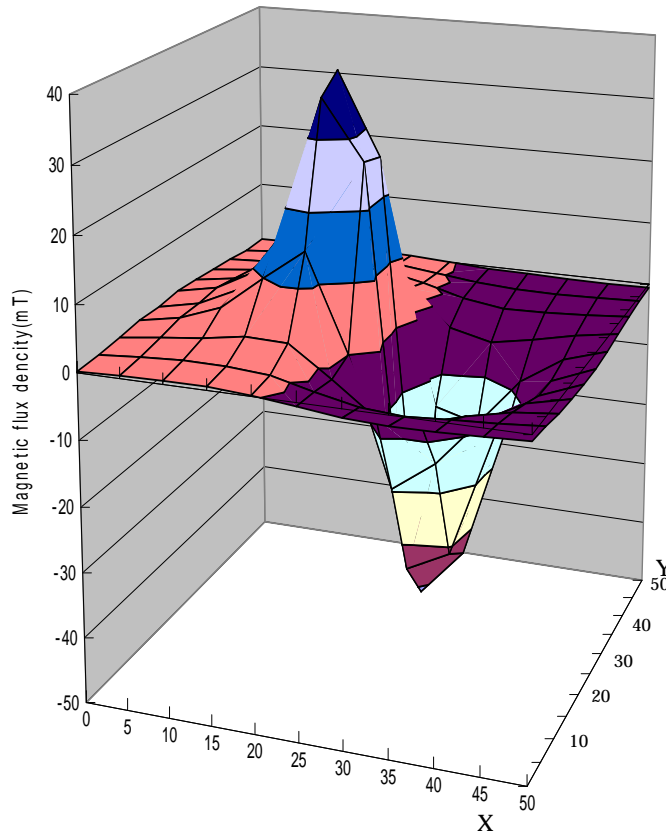


Fig. 3-18 Estimation result by geometric correction of magnetic flux

第4章 インパクト駆動を用いた位置決め機構

4.1 位置決め原理

もし、系にピン止め力を超える大きなエネルギーを与えることができれば、ピン止めされている磁束のピン止め点をずらし、能動的な位置決めをする可能性があると考えられる。本研究では、インパクトメカニズムによる駆動を行うことによって大きなエネルギーを発生させて、磁束を保持しているピン止め点をずらすという超伝導位置決め機構[38]について提案・考察する。

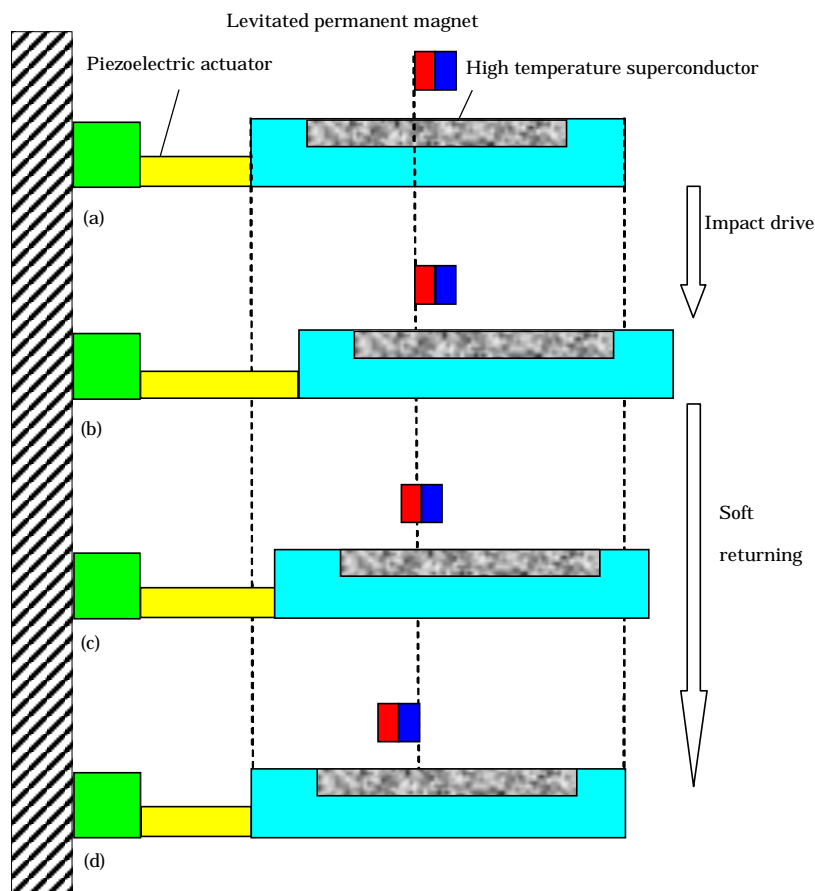


Fig. 4-1 Proposed principle of noncontact positioning mechanism with pinning effect

Fig. 4-1 のように高温超伝導体の上で永久磁石が非接触で安定に浮上しているものとする。高温超伝導体に対して右方向にインパクト力を加えると、高温超伝導体は Fig. 4-1 (b) のように瞬間的に右方向に移動する。このとき高温超伝導体が保持している磁束のピン止め点がずれること

が期待できる。同時に永久磁石は、超伝導体の運動による磁束の運動により力を受け、超伝導体の運動を追従すると考えられるが、ずれた磁束の影響でわずかながら超伝導体より移動量は少ないと考えられ、すべりが起こる。次に、再びピン止め力により捕捉された (STICK) 後、Fig. 4-1 (c) のようにゆっくりした運動により高温超伝導体を元の位置に戻すと、Fig. 4-1 (d) のように永久磁石は相対的にわずかに左に移動したことになる。この動作を繰り返すことによって位置決めが可能であると考えられる。

以上、理想的状態の位置決めについて説明してきたが、永久磁石の浮上高さ、浮上磁石の傾き、高温超伝導体の種類などは位置決めに影響を及ぼすと考えられる。しかし今回の実験では、提案する磁気浮上装置の実現可能性を見極めるために、高温超伝導体にはピン止め点(欠陥)を意識的に数多く分散させることをしていない YBCO 超伝導体を用い、床に平行な平面内のみの測定を行った。

4.2 実験装置の概要

本実験では、インパクト力発生源として圧電素子を使用した。これは圧電素子が持つ以下の特長に着目したからである。

- 安価で、入手しやすい。
- 比較的小型・軽量・扱い簡単。
- 0.1 μm 単位の高精度位置決めが可能。
- 伸長・収縮時共に 100 μs 以下の高速応答を行う。
- 付加電圧の幅が 0~150V と広いレンジで動作させることができる。

さらに、本実験装置には変位拡大機能が付与されているものを用いた。Fig. 4-2 に本実験で用いた装置の概型図を示し、Fig. 4-3 に実際のインパクト力発生装置の写真を示す。

Fig. 4-3 の写真の真ん中の円柱をしたものが圧電素子であり、上部が変位拡大機構となっている。変位拡大機能は、この原理を応用したものが直線で指し示す近傍にそれぞれ配置されている。支持の方法として、銅製の半球を3個取り付けて、3点支持で運動することを可能とし、摩擦の変動を少なくするようにした。ここで、圧電素子、変位拡大機能及び3点支持半球付ステージをピエゾアクチュエータと呼ぶこととする。

Fig. 4-2 に示すように、変位拡大機構付きピエゾアクチュエータの上に熱伝導率の小さな硬質ウレタンの容器を載せ、その中で高温超伝導体を液体窒素で冷却し、その上に永久磁石を浮上させる。そして、ピエゾアクチュエータの出力端を固定端とし、ピエゾアクチュエータにステップ

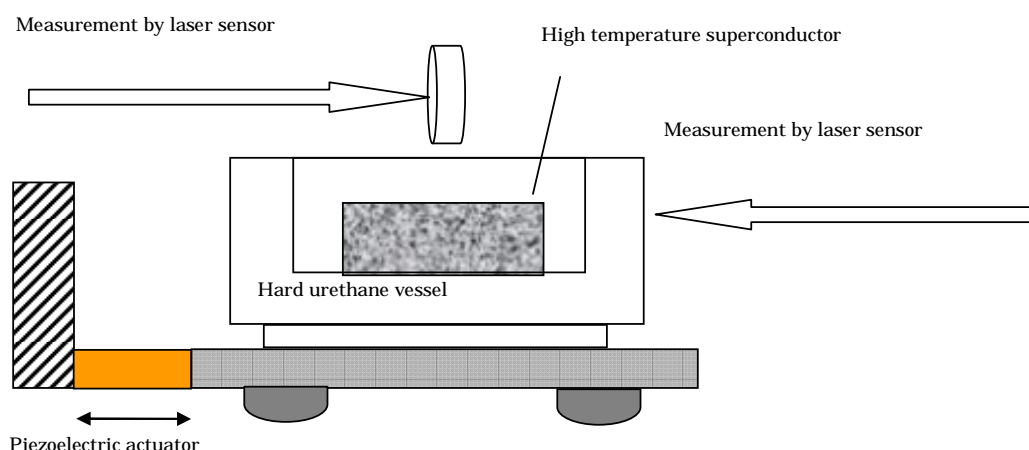


Fig. 4-2 Impact driving experiment system

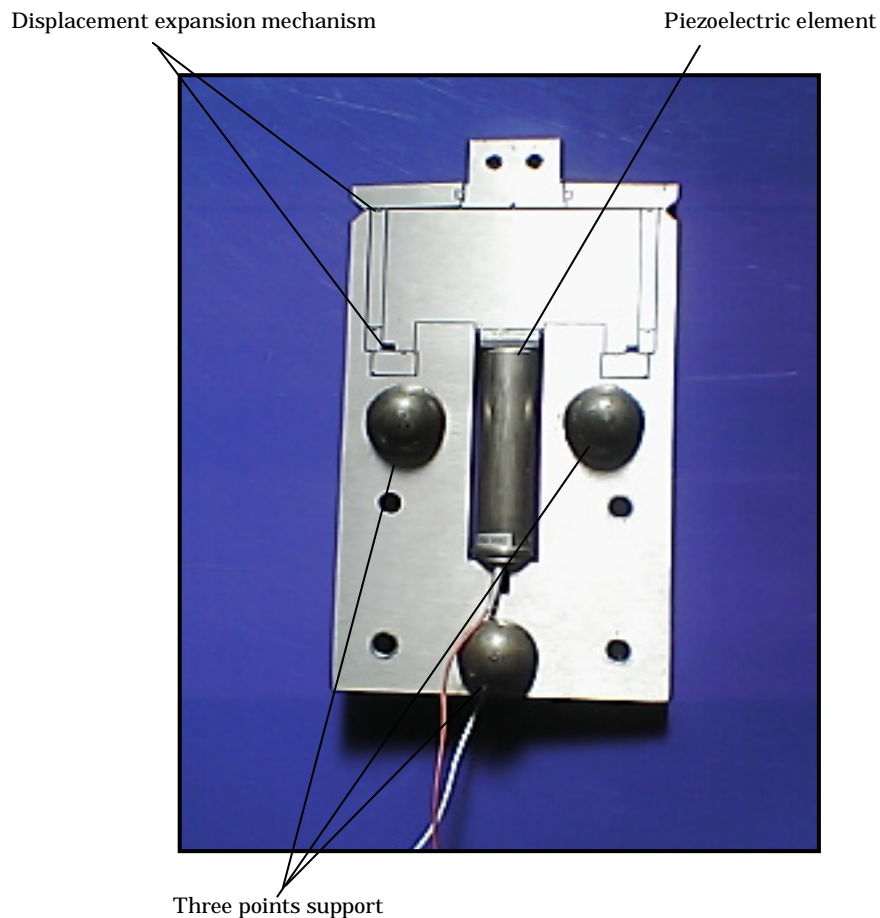


Fig. 4-3 Piezoelectric actuator with displacement expansion mechanism

電圧を加えると、 piezoelectric actuator は急速に伸び、超伝導体がインパクト駆動される。

Fig. 4-4 に本実験装置全体のシステム図を示す。本実験においては、全ての信号の生成及び測定を 1 台の PC から行った。生成された波形信号は、d - SPACE(DSP)を介しアンプ (NF 製 HSA4012)へ入力される。アンプで増幅された信号は piezoelectric actuator に入力される。実際に動いた距離は、高温超伝導体の動き及び浮上永久磁石の動きを 2 台のレーザーセンサでそれぞれ測定した。測定した電気信号は d - SPACE(DSP)を経由してコンピュータに取り込まれ処理される。本来、この piezoelectric actuator は最大 150V まで使用できるが、用いたアンプの容量の関係上、本実験では最大電圧を 130V とした。

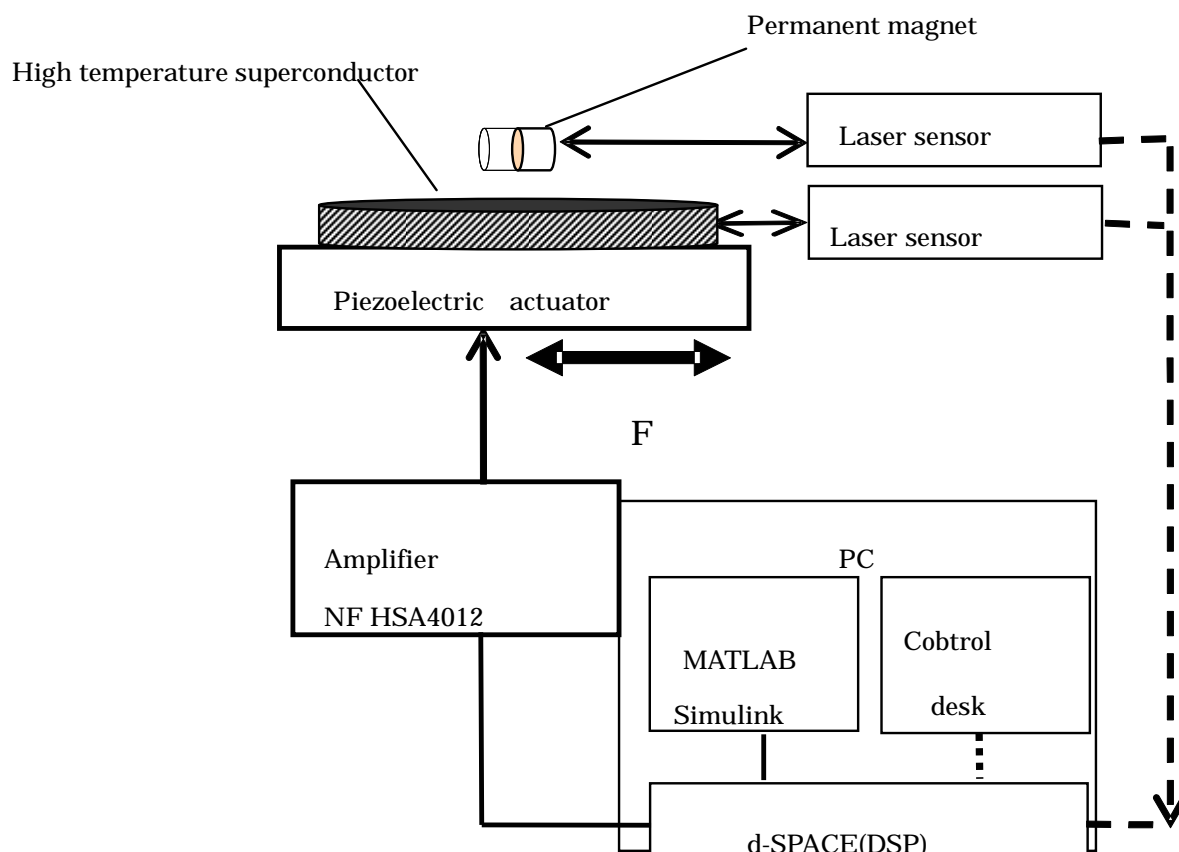


Fig. 4-4 Signal flow and measurement system

今回の実験では、磁石の種類の違いによる応答の相違を観察することを目的とし、Table. 4-1 に示すフェライト($d=10$, $l=10$)とネオジウム($d=8$, $l=8$)の2種類を用いた。Table. 4-1 はそれぞれの磁石と磁束密度の関係を距離をパラメータに計測したデータである。

Table 4-1 Magnetic flux density of 2 kinds of magnet

distance(mm)	ferrite $d=10$ $l=10$	neodymium $d=8$ $l=8$
0	124	477
5	30	100
10	10	25
15	5	10
20	3	5

(unit:mT)

4.3 基礎実験

4.3.1 ピエゾアクチュエータの伸縮性能

ピエゾアクチュエータに静的に電圧を印加していった場合の伸びのデータを Fig. 4-5 に示す。印加電圧の最大値：130V まで，印加電圧と伸びはほぼ線形の関係であることを示している。このピエゾアクチュエータに用いた圧電素子は，単独で，100V において約 20 μm の変位を生じる。この実験では，静的に 100V を印加した場合は，275 μm の変位が生じており，インパクト時においては，平均 267 μm である。この結果から静的，インパクト時にほぼ同等の変位を示しており，印加電圧 100V における変位拡大機能は，長さ方向の変位で約 13.8 倍であった。

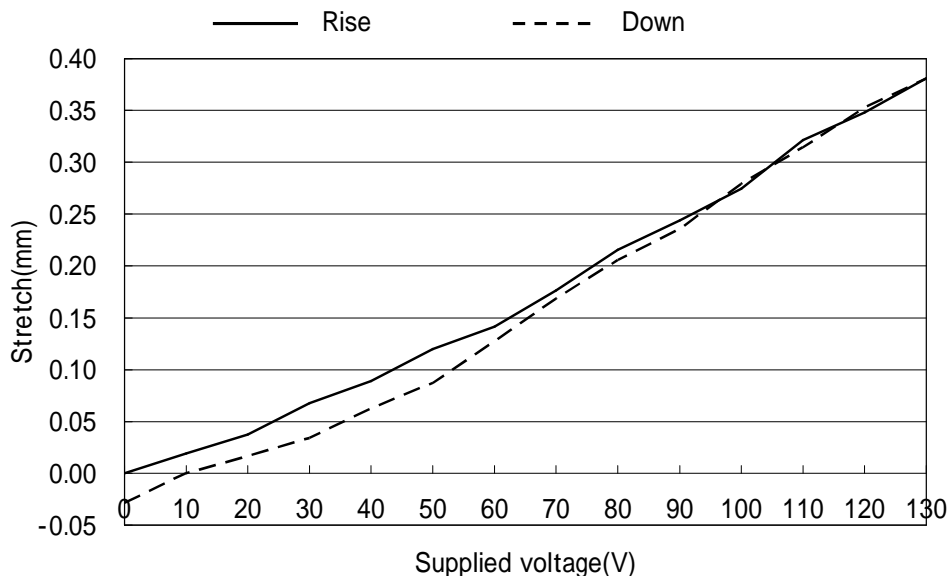


Fig. 4-5 Relation between supplied voltage and stretch

ピエゾに電圧をかけると伸びが生じる。片端は固定されているので，ピエゾは変位拡大機能側に伸びる。Fig. 4-6 に変位拡大機能を拡大し，図面化したものを示す。てこの原理を用いた変位拡大機能部が 2 箇所あるが，上部の拡大機能部を U 部，下部の拡大機能部を L 部とし，その詳細を Fig. 4-7，Fig. 4-8 に示す。さらにこれが伝播し F2 点に図で上向きの力，変位として入力される。F2 点に入力された力，変位は S2 点は動かないので最終出力端 E2 点に出力される。同様にてこの原理を適用し，S2 点を支点，F2 点を力点，E2 点を作用点とすると，S2F2：3 mm，S2E2：25 mm であるので， $m_2 = \frac{25}{3} = 8.33$ となり，F2 への入力を力は 0.12 倍，変位を 8.3

3倍として、E2点から出力する。このように2段階に拡大された変位は、計算上 $m3 = 3.2 \times 8.33 = 26.67$ 倍に拡大されることとなるが、実験上では13.8倍の変位拡大率となっている。

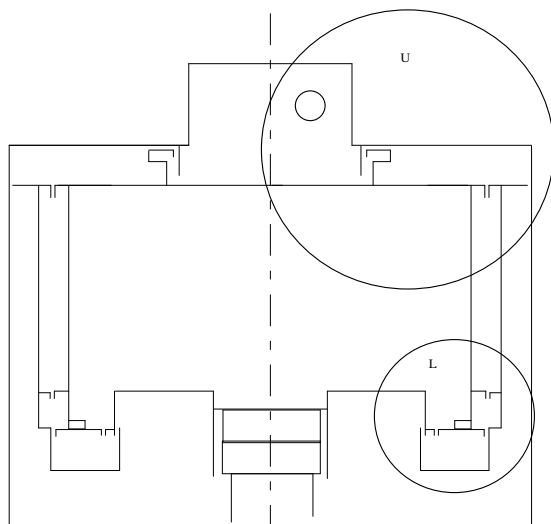


Fig. 4-6 Drawing of expansion mechanism

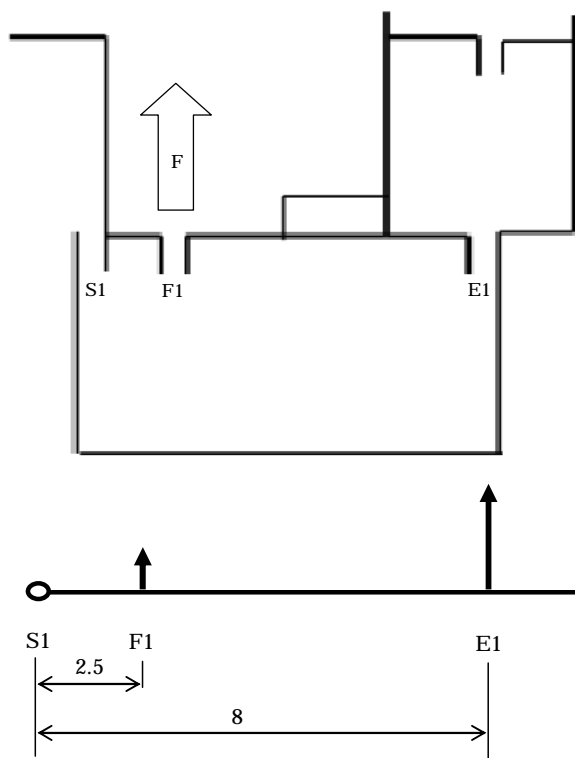


Fig. 4-7 Expansion mechanism detail of “L” part

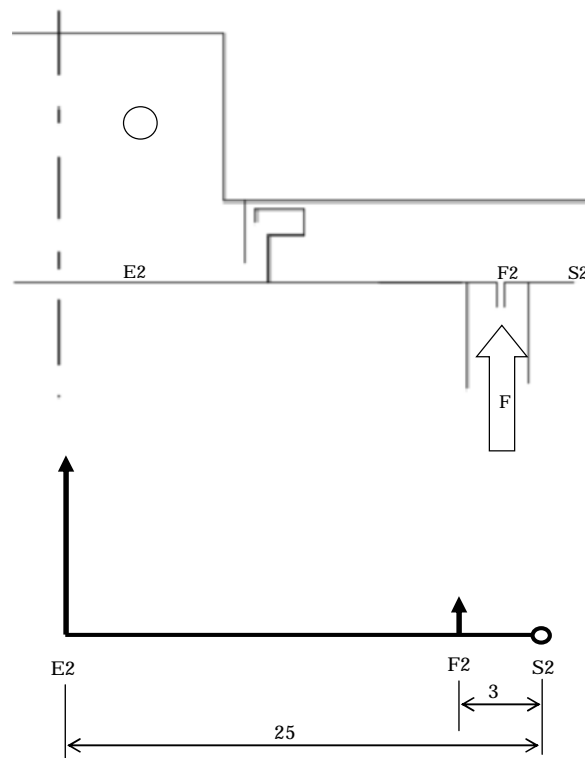


Fig. 4-8 Expansion mechanism detail of “U” part

4.3.2 ピエゾアクチュエータの発生加速度

インパクト発生時における加速度を電荷型加速度計並びにオシログラフ(100MHz)を用いて、各電圧で5回計測した。計測した波形(100V)を Fig. 4-9 に示す。印加電圧が10V~70Vの区間

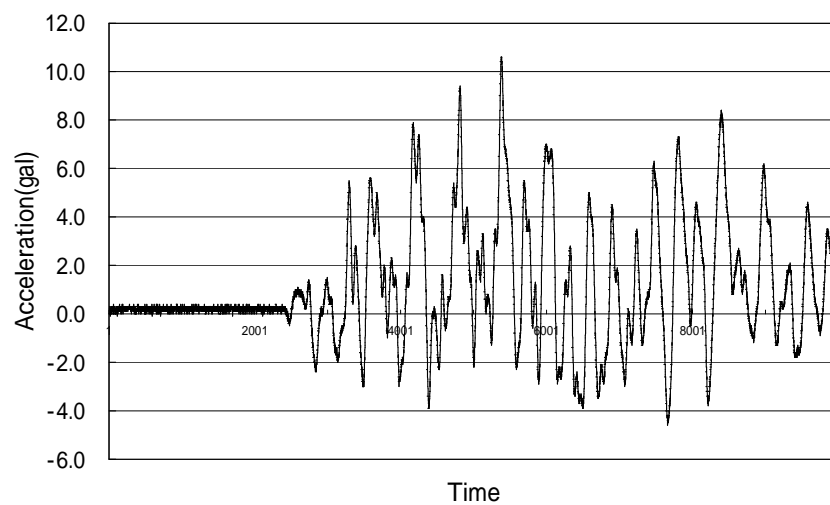


Fig. 4-9 Example of acceleration wave(100V)

では、最大加速度の値は印加電圧に比例して大きくなっていくが、70V で最大値をとり、100V まではほぼ一定の値であり、100V を越してからは、小さくなっていく傾向がある。一方、時間 0.1(ms)の平均加速度の値は、印加電圧の上昇に伴い大きくなっている。Fig. 4-10 に各電圧における最大加速度を、Fig. 4-11 に各電圧における加速度の平均値を示す。

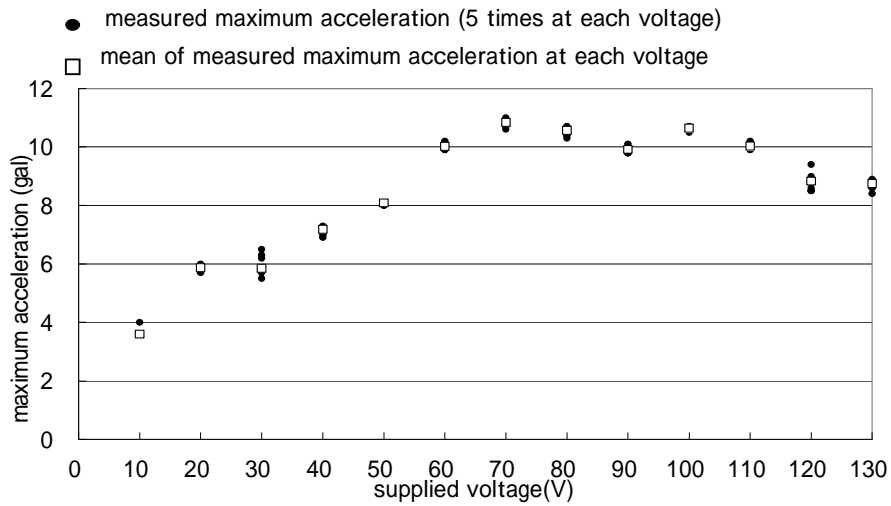


Fig. 4-10 Relation between supplied voltage and measured maximum acceleration

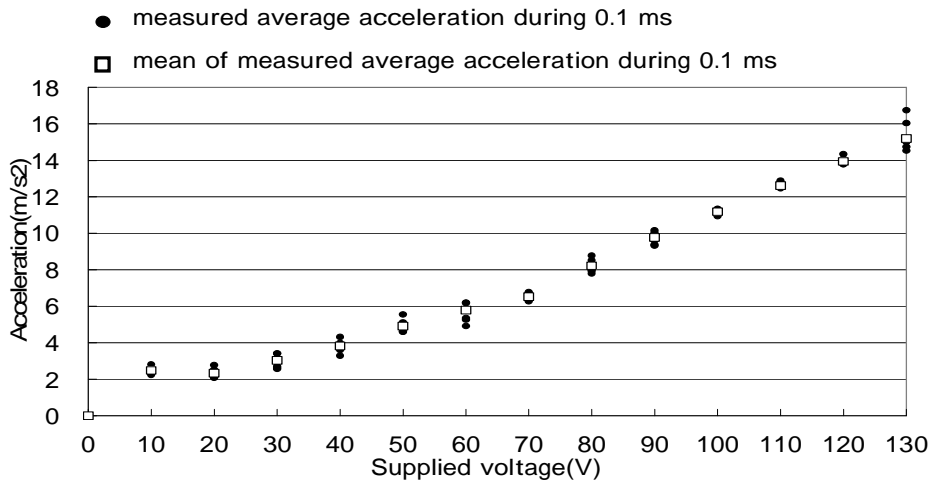


Fig. 4-11 Relation between supplied voltage and measured average acceleration

4.4 移動実験

まず，超伝導体の上で永久磁石をピン止め浮上させ，次に，PC 内で信号生成し piezoアクチュエータにノコギリ歯状の電圧をかけ，インパクト駆動させた．印加電圧は，10V ~ 130V の間で 10V 刻みで変化させ，インパクトの周期は 5 秒とした．計測時間は全て 100 秒とし，フェライト($d=10, l=10$)は，30V 以下では 3 ~ 5 回，40V 以上では各電圧 10 回，ネオジム($d=8, l=8$)では，40V 以下各電圧 3 回，50V 以上 80V 以下では各電圧 5 回，90V 以上では 10 回計測した．

印加電圧が 10V，20V のときには，浮上中の 2 種類の永久磁石の動きははっきりとは確認できなかった．30V において，ネオジム($d=8, l=8$)には 5 秒間隔で周期的な動きが見られたが，フェライト($d=10, l=10$)ではその動きは確認できなかった．30V 印加時の浮上磁石の動きを Fig. 4-12 に示す．上段がネオジム($d=8, l=8$)，下段がフェライト($d=10, l=10$)の動きである．ネオジム($d=8, l=8$)の動きのほうが，piezoアクチュエータの動きを忠実に反映している．これは，ネオジム($d=8, l=8$)のほうが，ピン止め力が大きいことを示している．

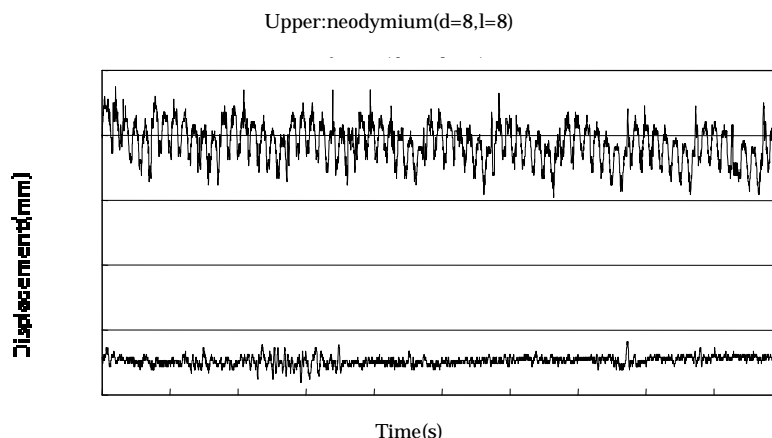


Fig. 4-12 Difference of response at 30V

駆動電圧を横軸に，駆動距離を縦軸にした結果を Fig. 4-13 および Fig. 4-14 に示す．Fig. 4-13 にはフェライト($d=10, l=10$)，Fig. 4-14 にはネオジム($d=8, l=8$)の各印加電圧における変位をそれぞれ示している．各印加電圧 10 回の試行であり，黒丸は全ての計測データを表し，中抜き四角はその平均を表している．Fig. 4-13 のフェライト磁石の結果の図からわかるように，フェライト($d=10, l=10$)においては，40V 印加時に，ピン止め力が外れて動いていることが 10 回試行の中で 5 回確認され，50V 印加時に 10 回試行のうち 7 回，60V 以上印加時には全ての試行というように，印加電圧上昇とともにその回数が増加する傾向で永久磁石の動きが確認された．その

変位量においても 120V から 130V の変化時を除いては印加電圧の増大とともにインパクトあたりの変位量は大きくなっている。

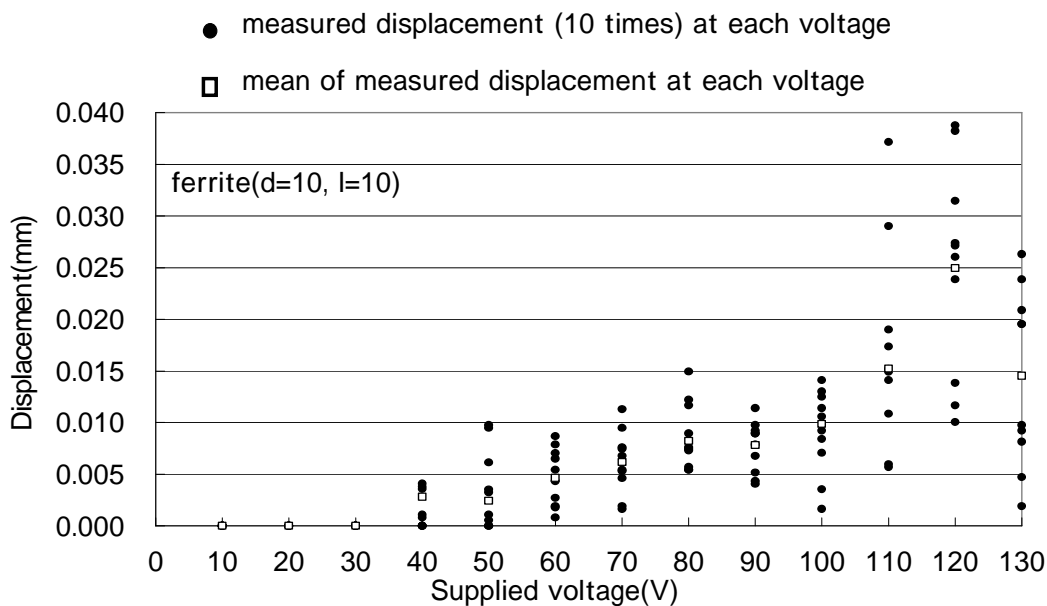


Fig. 4-13 Displacement by 1 impact (ferrite(d=10,l=10))

一方、ネオジウム(d=8, l=8)においては、50V から 80V の間ではそれぞれ 1, 2 回ピン止め力が外れた挙動を示したが、その変位量も平均 2 ミクロン程度であった。90V 4 回、100V 6 回、110V 8 回、120V 9 回、130V で 5 回の試行で変位が確認された。1 インパクトあたりの変位は 110V、120V の両電圧で一番大きい平均 4 ミクロンであった。

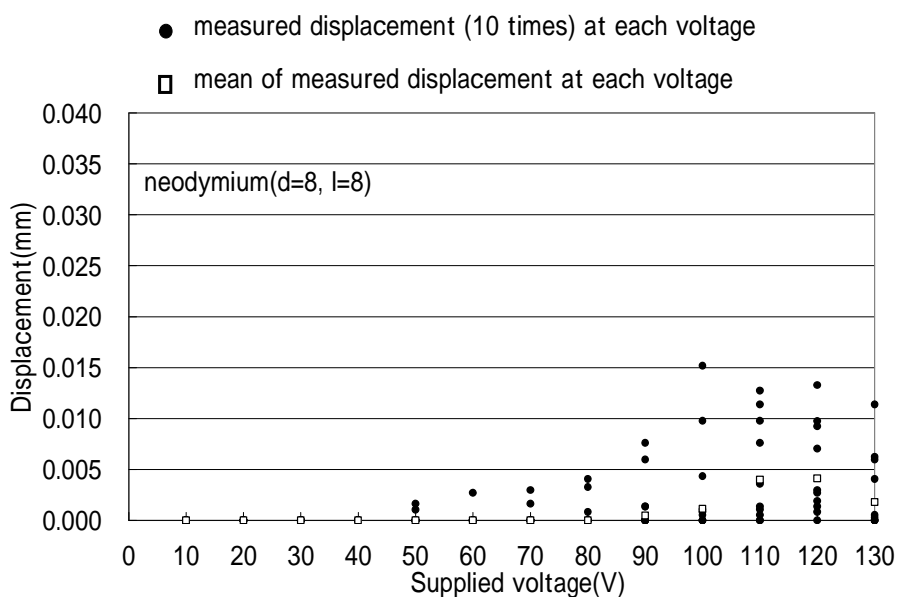


Fig. 4-14 Displacement by 1 impact (neodymium(d=8,l=8))

フェライト($d=10, l=10$)において, 印加電圧 110V における電圧信号, 超伝導体の動き, 浮上磁石の動きを Fig. 4-15 に示す. 電圧上昇・降下の繰り返しに対して, 高温超伝導体は往復動を繰り返していることを示している. この時, フェライト($d=10, l=10$)は時間の経過とともに左へ移動しており, 提案とおりの動きを示していることがわかる.

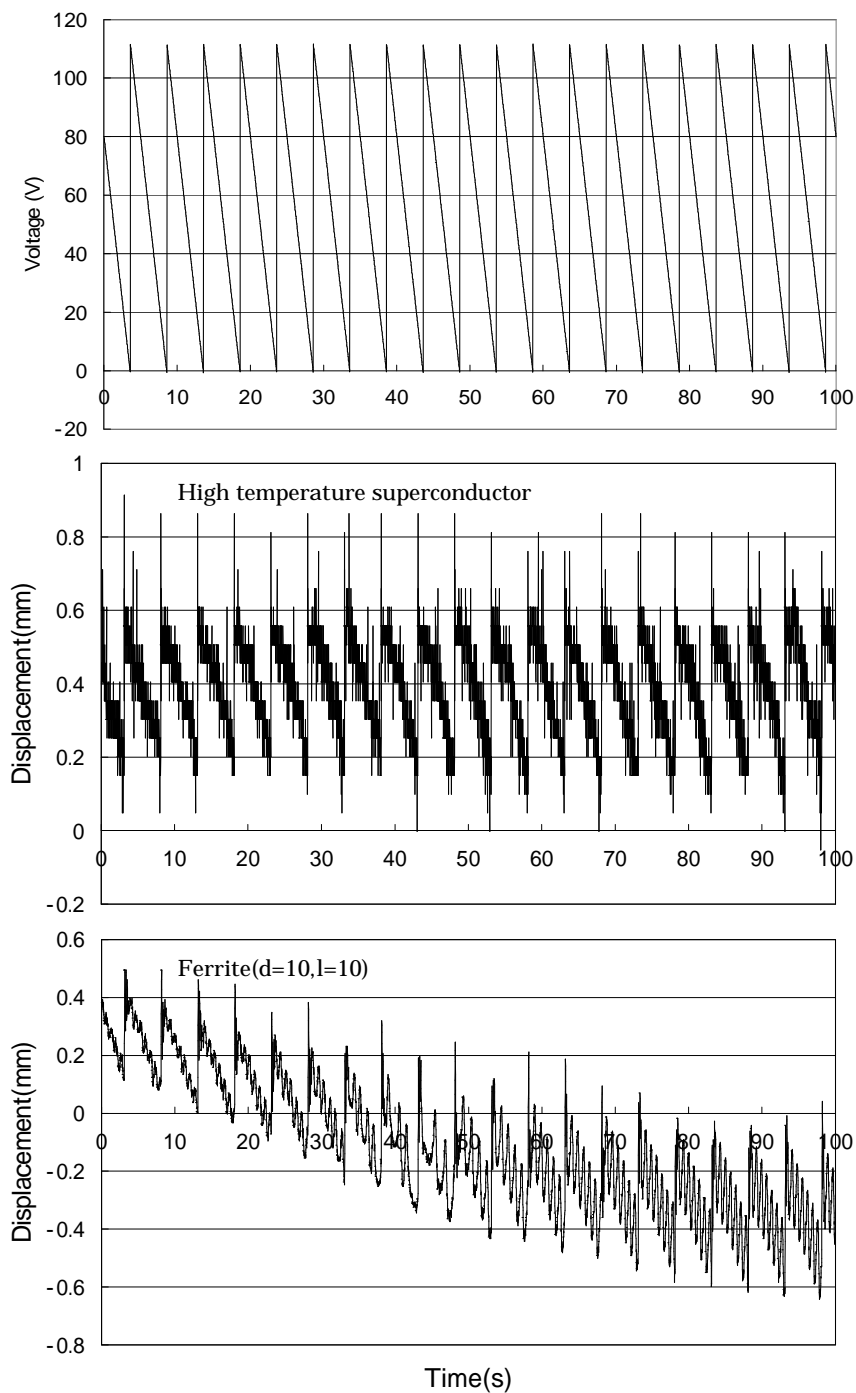


Fig. 4-15 Supplied voltage, Displacement of superconductor and displacement of ferrite ($d=10, l=10$)

4.5 ピン止めエネルギー測定実験

提案した位置決め原理のメカニズムを数値的に解明し、インパクト力と浮上磁石の変位の関係を予測可能とするために実験を行う。Fig.3-16 に実験装置の外観を示す。実験システムは、高精度な動きをするステージと微小な荷重を測定することが出来るロードセルから構成されており、ロードセルはステージに固定されている。

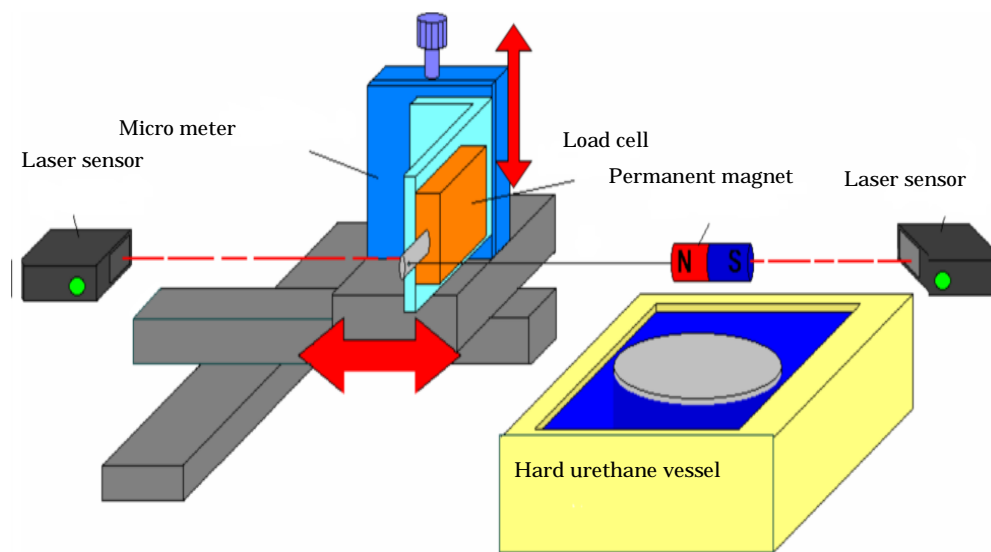


Fig. 4-16 Pinning energy measurement system

冷却された高温超伝導体の直上に永久磁石を浮上させ、ステージに直結したロードセルで糸を用いて変位を与え、浮上磁石が元の位置に戻る限界の変位を測定する。このとき、変位した地点を x 、その地点における力を $f(x)$ 、変位の限界を a とすると、ピン止めエネルギー E は

$$E = \int_0^a f(x) dx \quad (4-1)$$

で求めることができる。

インパクト実験で用いたフェライト ($d=10, l=10$) において、ピン止めエネルギーを測定し考察した。実験を行ったところ、フェライト ($d=10, l=10$) の変位限界は 1.25mm であった。Fig. 4-17 に実験時の磁石に対する力および挙動を示す。グラフから 20 秒間に約 1.25mm の変位から元の位置に戻っていることがわかる。以上から、(4-1) 式にしたがって A 点までのエネルギーを計算すると、 $1.2218 \times 10^{-5}(\text{J})$ となる。Fig. 4-11 における $0.1(\text{ms})$ の平均加速度と Fig. 4-5 におけるピエゾア

クチュエータの伸びを掛け合わせると, Fig. 4-18 に示すエネルギーがインパクトにより各電圧で発生していたこととなる. ここで Fig. 4-13 及び Fig. 4-18 を見ると, フェライト($d=10, l=10$)のピン止めエネルギー 1.2218×10^{-5} (J) は, 40V - 50V 間で発生されていたこととなる. これは, Fig. 4-13 に示すフェライト($d=10, l=10$)のインパクト実験結果, 40V で 10 回試行中 5 回, 50V で 7 回移動したという実験結果と一致している

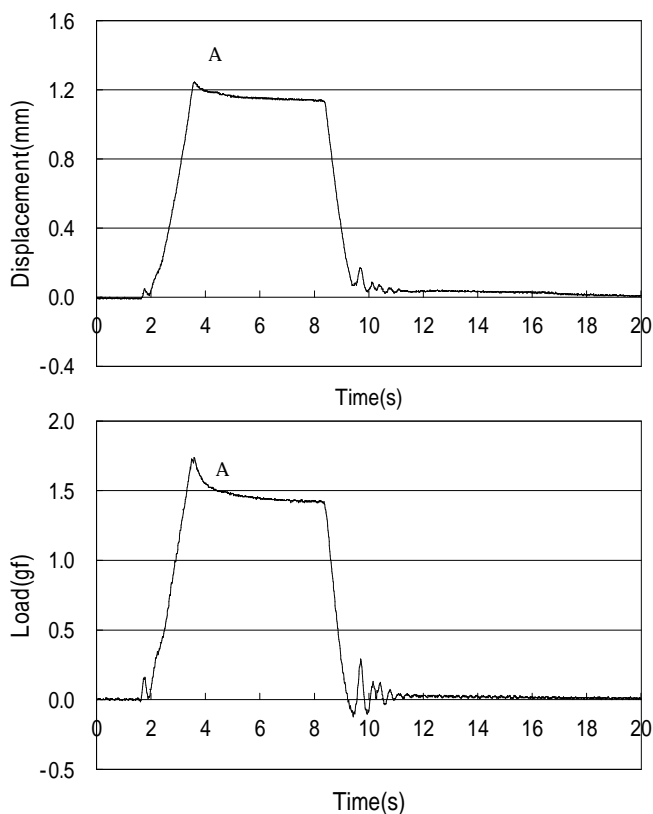


Fig. 4-17 Pinning energy measurement (ferrite($d=10, l=10$))

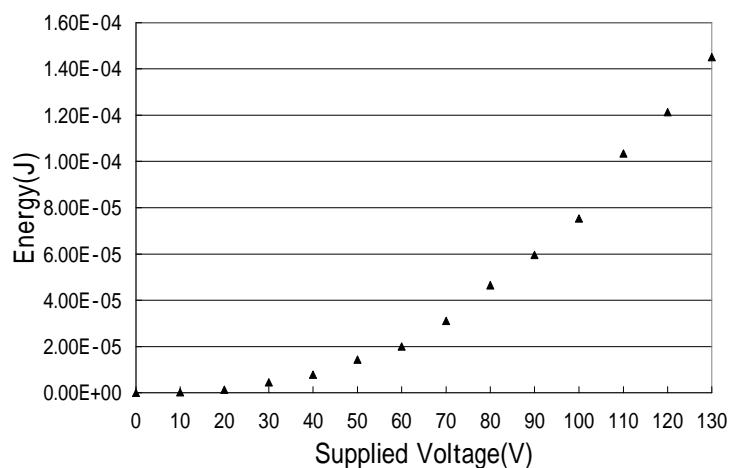


Fig. 4-18 Relation between supplied voltage and energy

4.6 ピン止め力測定実験

ピン止めをずらしながら位置決めしていく機構にとっては、ピン止めエネルギーの影響は非常に大きいものであるが、ピン止め力もその位置決めに非常に重要な要素となる。ここでは、ピン止め力を実験的に求めることを行った。磁石には、フェライト2種類、ネオジム2種類を用いてピン止め力測定実験を行った。実験システムは、ピン止めエネルギーを測定したものと同様のものを用いた。

実験方法は、以下の通りである。冷却された高温超伝導体の直上に永久磁石を浮上させ、ステージに直結したロードセルで糸を用いて変位を与える。超伝導体の端近傍では、ピン止め力が安定しないためか安定に浮上しない。そこで、直径方向の右 1/4 から左 1/4 間での約 25mm において、ステージによる牽引力を測定し、これをピン止め力とした。

浮上永久磁石には、フェライト ($d=15, l=8$)、フェライト ($d=10, l=10$)、ネオジム ($d=8, l=8$)、ネオジム ($d=10, l=10$) の4種類を用いて、それぞれをステージでロードセルを介して牽引し、ロードセルにかかる力を測定した。測定結果をグラフ化したものを Fig. 4-19 に示す。

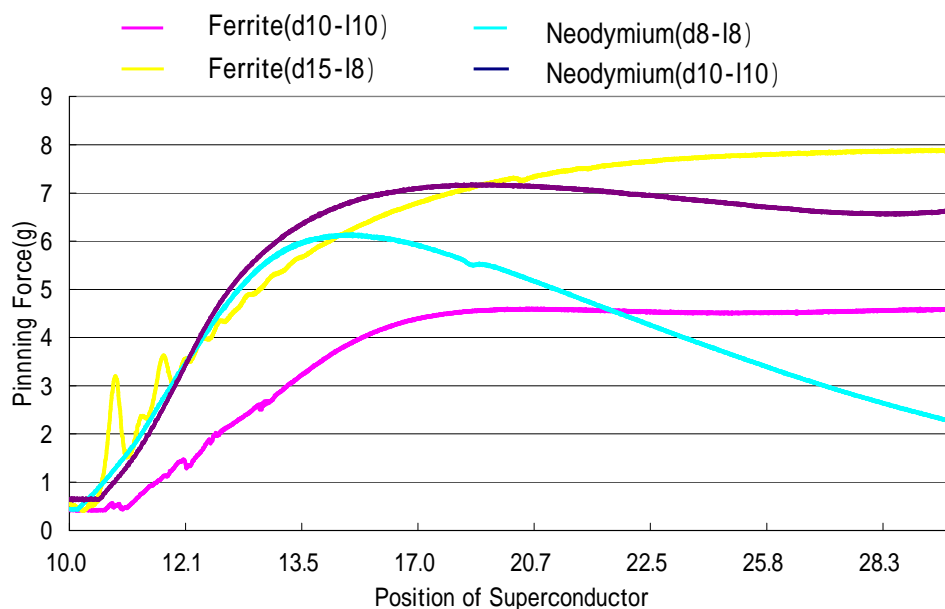


Fig. 4-19 Results of measurement of pinning force

Fig. 4-19 のグラフを見ると、ピン止め力の最大値はフェライト ($d=10, l=10$) が 1 番小さく

4.58(gf)である．続いてネオジウム(d = 8 , l = 8)が小さく 6.14(gf)である．ネオジウム(d = 10 , l = 10)が 7.16(gf)であり，一番大きな値はフェライト(d = 15 , l = 8)で 7.88(gf)である．

フェライト磁石 2 種類のピン止め力が漸増傾向を示しているが ,ネオジウム磁石 2 種類のそれは , 1 度ピークを迎えてから減少する傾向にある．さらに , フェライト磁石 2 種類のカーブは , ネオジウム磁石 2 種類のカーブと比して緩やかであることがわかる．この事実から , ピン止め力をバネに例えると , フェライトのそれは柔らかいバネであり , ネオジウムのそれは硬いバネであると言えることができる．また , ピン止め力とそれぞれの磁石の質量との関係を Table 4-3 に示す．

Table 4-2 Relation between pinning force and mass

	Ferrite (d10-l10)	Ferrite (d15-l8)	Neodymium (d8-l8)	Neodymium (d10-l10)
pinning force(gf)	4.58	7.88	6.14	7.16
mass(g)	3.77	6.79	3.00	5.85
pinning force(gf)/mass(g)	1.21	1.16	2.05	1.22

ピン止め力を質量で除した値は , $a = F / m$ より , 加速度の単位であり , インパクに要求される加速度と考えられていたが , 本研究では移動するか否かは , ピン止めエネルギーに依存しているという結論になっている．

第5章 電磁石を用いた移動機構

5.1 電磁石と超伝導体を用いた非接触位置決め機構の提案

本章では、従来まで一般的に行われている永久磁石と超電導体を用いた磁気浮上技術から、電磁石と超電導体を用いた磁気浮上技術に応用を行う。この電磁石を用いるメリットとして、浮上と制御の安定性が挙げられる。本章では、移動機構の実現を目標としているのだが、永久磁石を用いた場合、移動を行うための装置が必要となる。また、装置を取り付けたとしても、ピン止め点に保持された磁束を外す力が必要となり、別のシステムが必要となる。しかし、この永久磁石を電磁石に変更することにより、電流の制御（ON/OFF）により、ピン止め浮上、すなわちピン止め点での保持を制御することが可能となる。本章では、移動機構ということで永久磁石より制御のできる電磁石に変更し、電磁石を使った場合の非接触位置決め機能の可能性を検討した。

まず、電磁石の基本性能として電磁石の磁束密度を測定した。6.0mm×6.0mm のボビンにエナメル線を150回巻き、フェライトコアを取り付けた電磁石の磁束密度を Fig. 5-1 に示す。電磁石を固定し、マイクロメータにガウスメータを取り付け、エアギャップ1mmごとの磁束密度を測定した。また、電磁石への印加電流は0.5A、1.0A、1.5A、2.0Aとした。

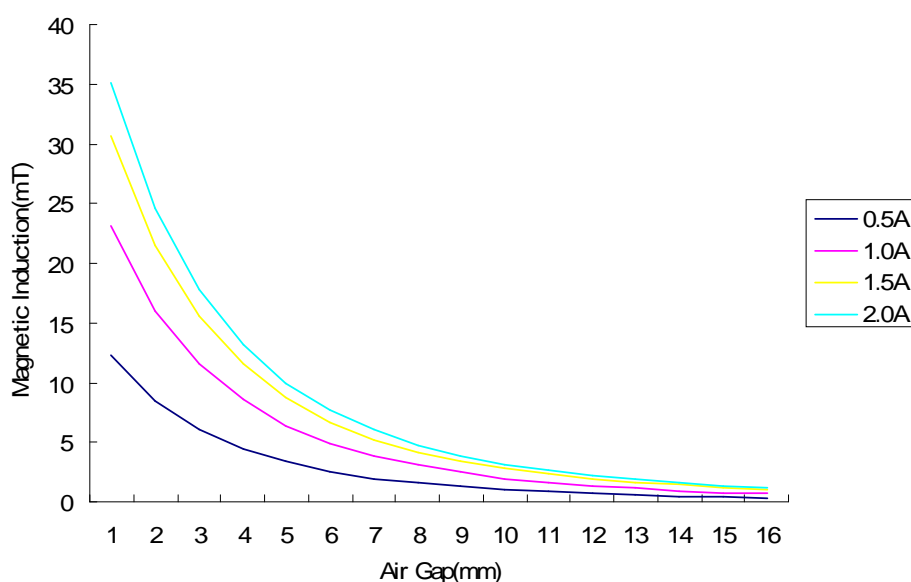


Fig. 5-1 Magnetic flux density of electromagnet

電磁石を用いたときの非接触位置決め機構の位置決め原理を Fig. 5-2 に示す。まず、高温超電導体の上で 2 つの電磁石がともに電流が流れている状態 (ON 状態) で安定に浮上しているものとする。最初に、右側の電磁石の電流を切り (OFF 状態) し、ピン止めを外す。そして、アクチュエータを短縮すると、右側の電磁石は左方向に引っ張られる。次に、右側の電磁石を ON に戻す。左側の電磁石を OFF にする。そこでアクチュエータを伸長させる。左側の電磁石を左方向に移動させ ON に戻す。この動作を繰り返すことによって位置決めが可能であると考えられる。

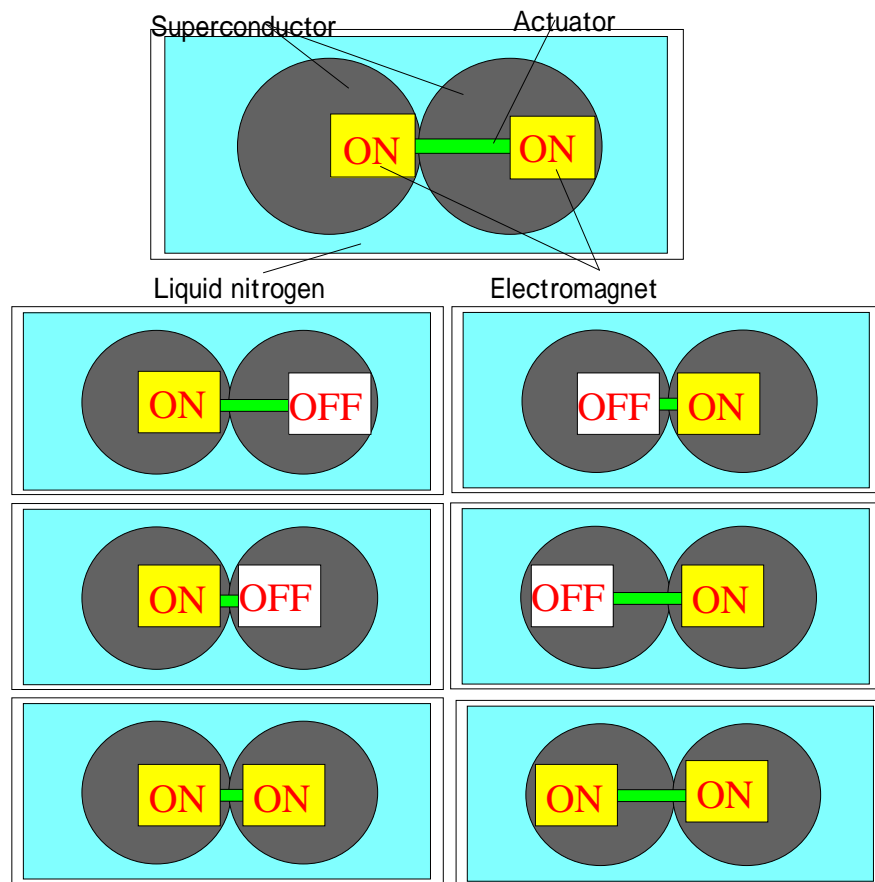


Fig. 5-2 Movement principle of superconducting magnetism surfacing that uses electromagnet

5.2 実験装置

試作した実験装置の全体写真を Fig. 5-3 および Fig. 5-4 に示す．また本研究でのキーワードとなる電磁石，アクチュエータの写真を Fig. 5-5，Fig. 5-6 に示すとともに，仕様や詳細を述べる．用いた超電導体は，3章の実験と同じものであり，YBCO の直径 4.8 mm，厚さ 1.0 mm のものを使用した．

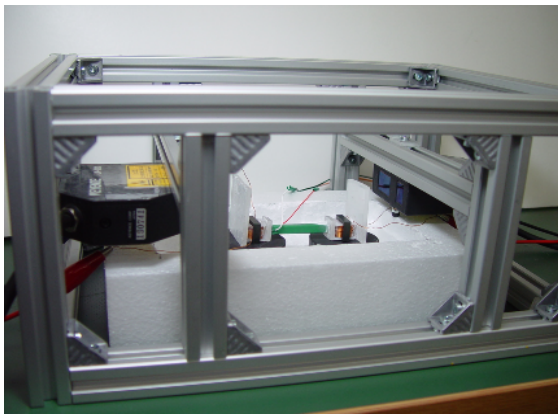


Fig. 5-3 Experimental apparatus

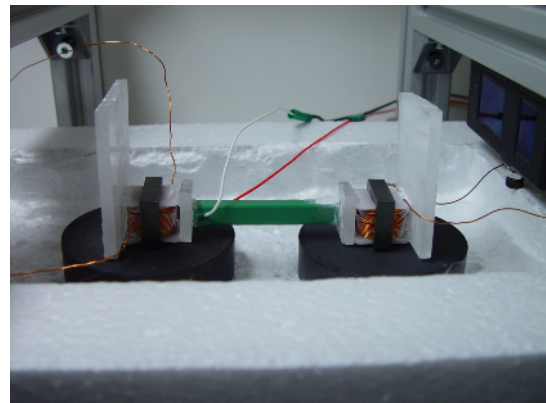


Fig. 5-4 Experimental apparatus

Fig. 5-5 に示す電磁石は，6.0mm×6.0mm のボビンにエナメル線を 150 回巻いたものである．150 回という巻き数は，6mm×6mm のボビンよりエナメル線がはみ出ない限界回数である．コアとしては NEC トーキン(株)製のフェライトコア (MOFe_2O_3) を使用した．このフェライトコアは飽和磁束密度が大きいこと，金属磁性材料と比較し，固有抵抗が多きいという特徴を持っており，また，鉄心などの金属磁性材料よりも軽量という利点がある．

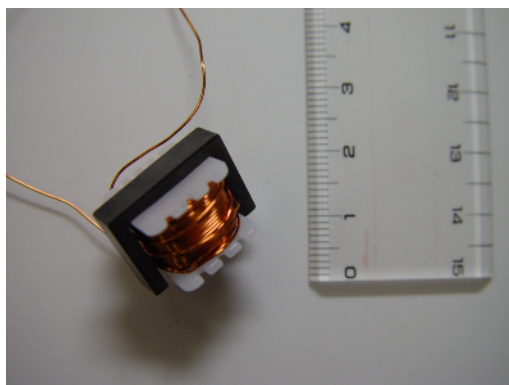


Fig. 5-5 Photograph of electromagnet

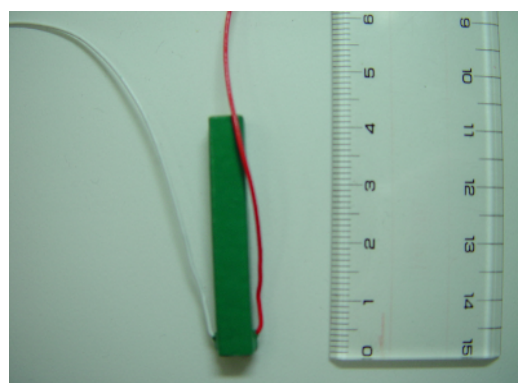


Fig. 5-6 Photograph of actuator

Fig. 5-6 に示すアクチュエータは、NEC トーキン(株)製の積層圧電アクチュエータである。圧電アクチュエータを利用した理由は、軽量であり発生力が大きいためである。このアクチュエータの仕様を Table 5-1 に示す。

Table 5-1 Specification of actuator

型番	AE0505D44H40F	
変位量 [μm]	最大駆動電圧 (150V _{DC})	42.0 \pm 6.6
	最大駆動電圧 (150V _{DC})	28.0 \pm 6.6
発生力 [N]	850	
共振周波数 [kHz]	3 4	
静電容量 [μF]	3.4	
絶縁抵抗 [M Ω]min.	5	
全長 [mm]	40	

浮上体である電磁石の移動量を測定するために、(株)キーエンス製のレーザセンサを用いた。仕様については Table 5-2 に示す。

Table 5-2 Specification of laser sensor

形式	センサヘッド	LK-030
	アンプユニット	LK-2000
基準距離	30mm	
測定範囲	$\pm 15\text{mm}$	
直線性	$\pm 0.1\%$ of F.S.	
分解能	1 μm	
サンプリング周期	512 μs	

5.3 基礎実験

5.3.1 浮上確認実験

永久磁石に比べて電磁石は磁力質量比が小さい .このことは浮上力の不足が問題となる可能性を示唆している .そのために本節では電磁石を使ったときの浮上が実際にどの程度のものであるかを確認するための実験を行った .まず , Table 5-3 に本実験室にある永久磁石と電磁石の質量と磁束密度を示す .この表からわかるように ,電磁石は永久磁石と比較すると重さが約 4 倍であるのに対し ,磁束密度が約 1 / 7 である .

Table 5-3 Comparison of permanent magnet and electromagnet

	重さ (g)	磁束密度 (mT)
永久磁石 (円柱型ネオジ) 8 × 8mm	2 . 9	4 2 0
電磁石 (フェライトコア) 6 × 6mm , 150 回巻 (2 A)	1 1 . 2	6 0

実験方法は ,液体窒素にて超電導状態にした電磁石の上に励磁していない電磁石を置く .電磁石の上方向からレーザセンサにて電磁石の様子を測定する .電磁石へ 2A の電流印加の ON/OFF 制御を行い ,電磁石のピン止め浮上を測定する .Fig. 5-7 に実験装置の写真を示し , Fig. 5-8 に浮上実験のシステム図を示す .

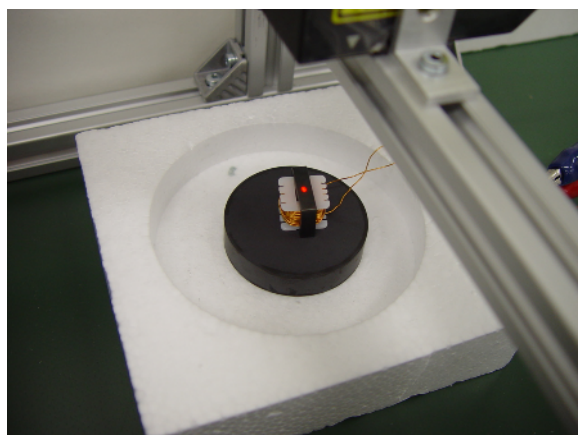


Fig. 5-7 Photograph of levitation experimental setup

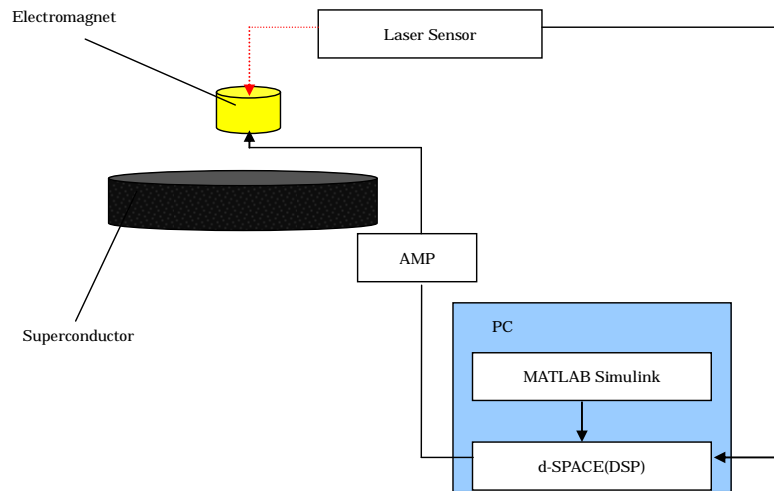


Fig. 5-8 System chart of levitation experiment

浮上確認実験の結果を Fig. 5-9 , Fig. 5-10 に示す . Fig. 5-9 は , 実験の結果を 10 秒間記録したもので , 駆動電流波形も記録した . Fig. 5-10 は , 上下方向の変位を 60 秒間記録したものである . Fig. 5-9 から電磁石の浮上が確認できる . 電流印加を行った時 (電流印加を ON にした瞬間) に一番高い点まで変位し , その後 0.1mm 程度のギャップで浮上の維持が行われている .

また , Fig. 5-10 から , 電流印加ごとに毎回同じ浮上力でないことがわかる . これは使用している超電導体内のピン止め点での浮上力の差が現れていると考えられる . あるピン止め点で保持された後に電流印加を止めた時に , 浮上体が横方向に動くことが確認された . その後浮上させると別のピン止め点による浮上となるため , 浮上力に変化が現れていると考えられる .

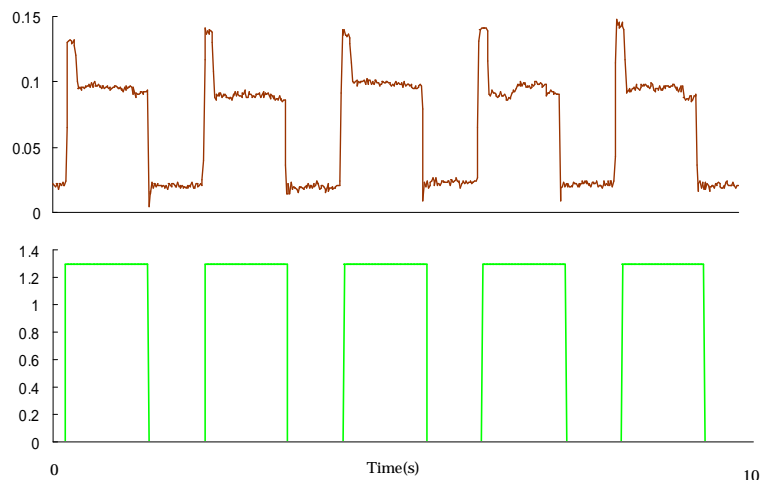


Fig. 5-9 Experiment result (10s)

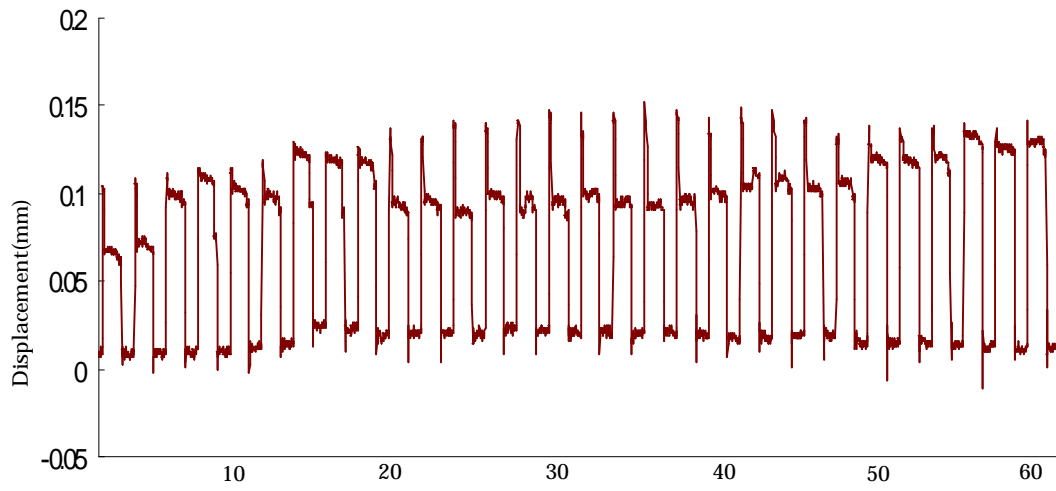


Fig. 5-10 Levitation experiment result (60s)

5.3.2 片側固定確認実験

移動実験での前段階の2つめの実験として、片側の電磁石には常に電流印加を行いピン止めさせた状態にしておき、もう一方の電磁石は電流印加を行わずにアクチュエータの伸縮を行う実験を行った。これは片側の電磁石を動かすときに、電流が印加されている電磁石がアンカーの役割を果たすことができるかを確認する実験である。この実験のシステム図を Fig. 5-11 に示す。実験方法は、左側のみの電磁石に電流印加を続けた状態で、アクチュエータの伸縮を繰り返し、その水平方向の動きをレーザーセンサで測定するものである。

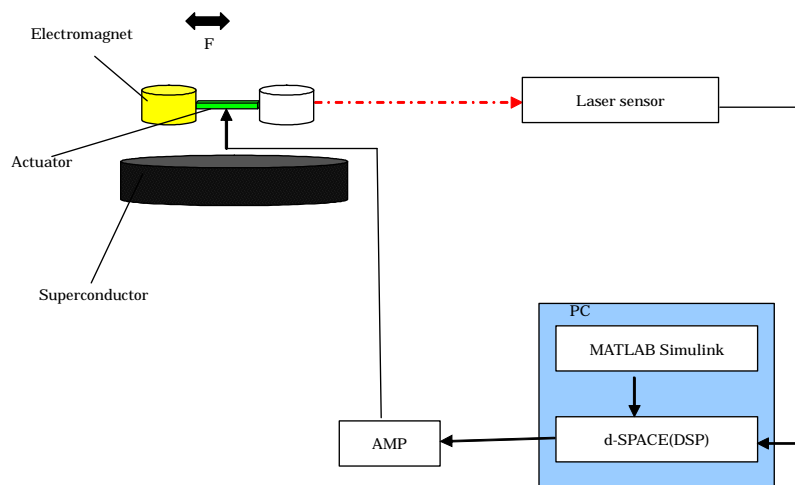


Fig. 5-11 System chart of one side fixation experiment

このときの結果を、Fig. 5-12 に示す。図から分かるように、左側の電磁石は同じ位置で留まり、右側の電磁石はアクチュエータの動きと同じ動作を繰り返していることが分かる。この結果により、ピン止め浮上が行われている電磁石はアクチュエータの伸縮によってピン止めが外れることはなく、アンカーの役割を果たしていることが確認できた。

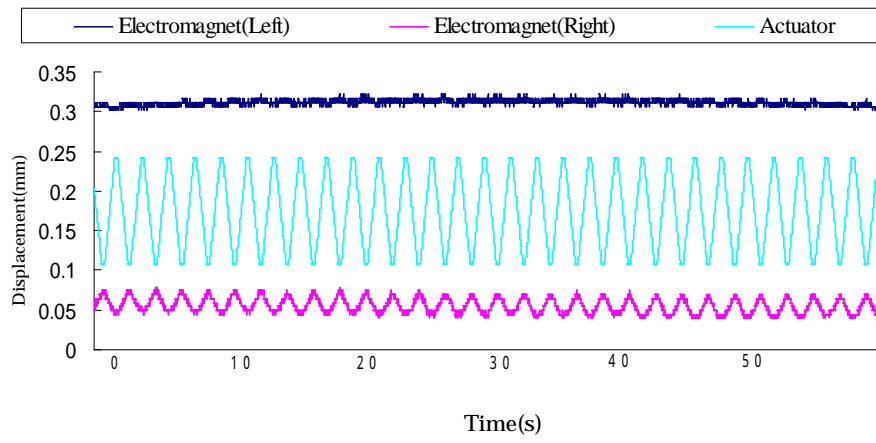


Fig. 5-12 One side fixation experiment result

5.4 移動実験

5.4.1 方形波による駆動実験

前節での浮上確認実験での電磁石での浮上の確認、片側固定確認実験でのピン止め力による電磁石のアンカリングが確認できたので、ここでは目標の非接触位置決め機構をめざした移動実験を行う。実験方法は、 piezoアクチュエータによって連結された2つの電磁石を用いて、電磁石およびアクチュエータの電源をオンオフ制御することによって移動させるものである。この電流印加とアクチュエータの伸縮はパソコンにより制御され、自動的に行われるようにした。このときの電磁石の水平方向の変位をレーザセンサを用いて測定した。実験のシステム図は、Fig. 5-11と同じものであり、移動を確認するためのセンサは片側だけの電磁石の変位だけを計測するシステムとなっている。

移動実験の結果を Fig. 5-13 に示す。図は上から右側電磁石の水平方向変位、右側電磁石駆動波形、左側電磁石駆動波形、アクチュエータ駆動電圧となっている。Fig. 5-13の結果から分かるように、右側の電磁石の電流印加を OFF の状態にし、左側の電磁石のみでピン止め浮上をさせ、アクチュエータが縮まっている時に、緩やかな移動が行われていることが分かる。これは電磁石

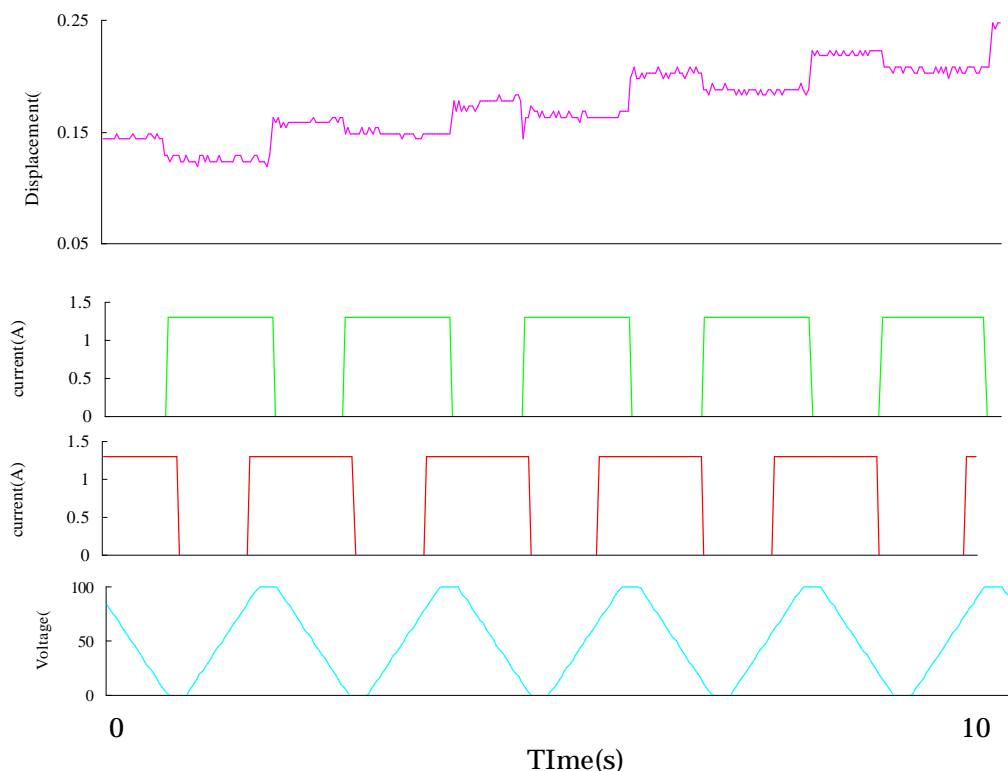


Fig. 5-13 Positioning experiment result (10s)

よりも、右側の電流印加の ON と OFF の時に大きな移動として現れていることも確認できた。これは、ピン止め浮上が行われる時や、浮上している状態から落ちる時に現れる揺れ、落下位置からくるピン止め点での違う点での保持が原因の他に、残留磁気の影響も原因であることが考えられる。

この残留磁気の影響を検討するために、Fig. 5-14 のモデルを構築した。この図は黄色又は白色が電磁石を表しており、黄色の時は ON、白のときは OFF である。また真ん中の緑はアクチュエータを表しており、バネはアクチュエータと電磁石を接着している接着剤をバネとして考えた。また、これは右側の電磁石が移動を行う場合のモデルである。電磁石の電流印加を OFF にしても残留磁気があるので、すぐにはピン止めが外れないと考えられる。この状態でアクチュエータを伸縮させても電磁石はその場で留まると考えられる。その後、電流印加を行うと発生した磁力により摩擦がなくなり水平方向の移動が行われると考えた。

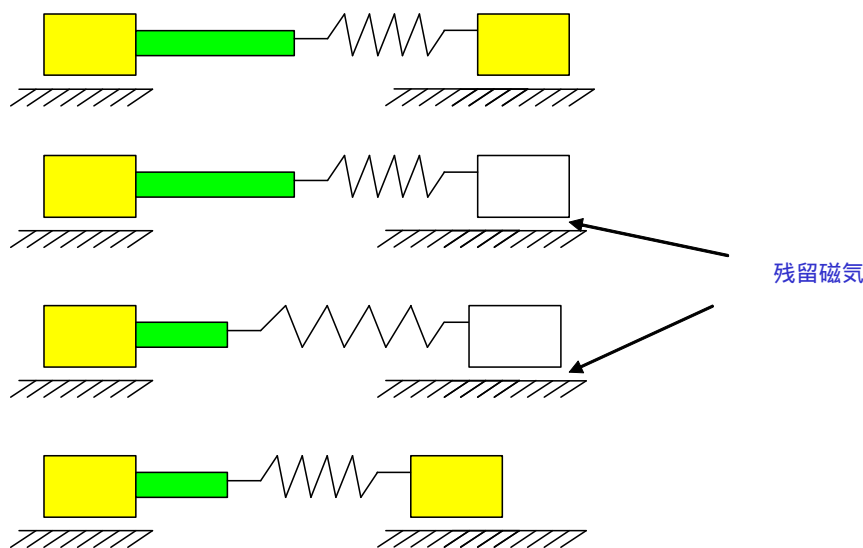


Fig. 5-14 Movement model

残留磁気の影響を実証するために、電磁石を初期状態から ON OFF を繰り返したときの電磁石と超電導体の間の磁束密度を測定した。測定結果を Fig. 5-15 に示す。Fig.5-15 から分かるように、電流印加を行う前は約 1mT ほどであった磁束が、電流印加を行った後の OFF の状態では 2mT と磁束が増えている。この結果により電磁石の ON OFF を繰り返す場合には残留磁気の影響を考慮する必要があることがわかった。

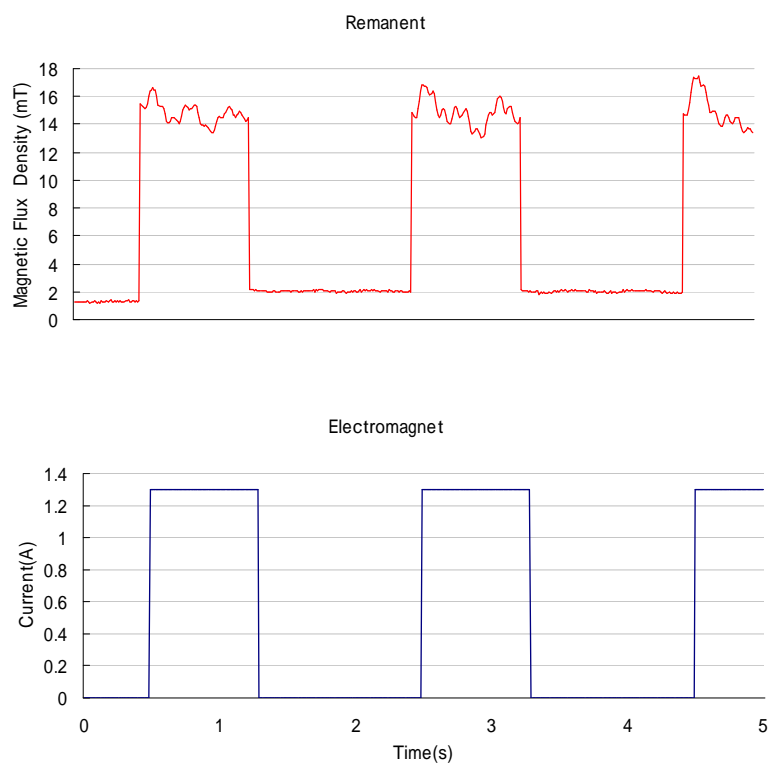


Fig. 5-15 Magnetic flux density

5.4.2 残留磁気の影響を考慮した入力波形での移動実験

残留磁気の影響が確認されたので、残留磁気をなくするために電磁石への電流印加の波形を変更した。これはマイナスの電流を流すことにより、残留磁気を完全に排除するためである。また、入力時により大きな電流を流すことにより、より強力にピン止め点での保持が行わせることができると考えられる。

実験結果を Fig. 5-16 に示す。図に示すように左右の電磁石の波形は、残留磁気の影響を排除する目的で ON OFF の切り替え後の少しの間だけ通常より大きな値を出力することとした。これにより、現在のピン止め磁束の影響を低減できると考えた。図の一番上にある右側の電磁石の運動を観察すると、電磁石への印加電流時の影響が現れることなく、右側の電磁石の印加電流が OFF の時でアクチュエータの縮んだ時のみ、緩やかな移動が確認できる。これにより、提案原理は移動機構に有効であると考えられる。

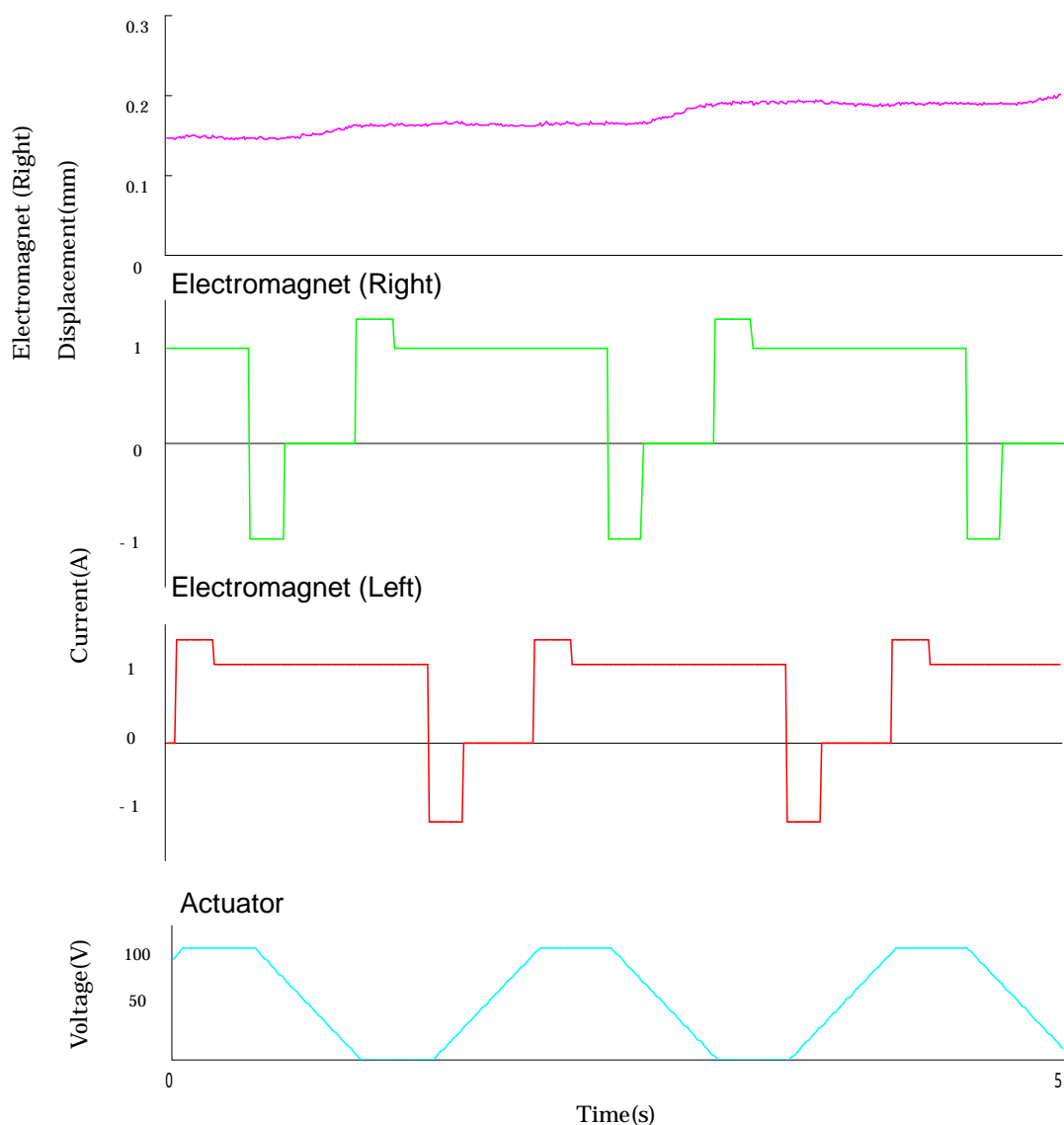


Fig. 5-16 Positioning Experiment Result in Input Crimp Change (5s)

Fig. 5-17 は変更された駆動波形を用いて 30 秒間駆動した場合の右側電磁石の変位を記録したものである。この結果、提案原理どおりに一定方向への移動が確認できた。しかし、移動時の波形を見ると常に変位の長さが同じではない。これは種々の原因が考えられるが、超電導体内のピン止め点と同間隔にあるわけではないことも一因と考えられる。

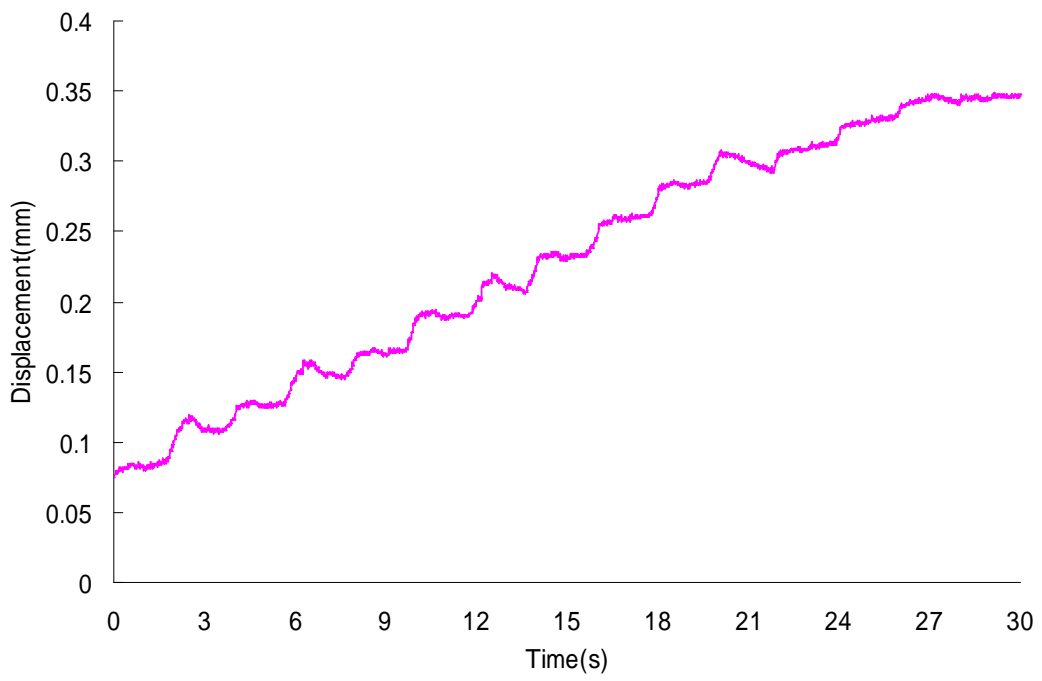


Fig. 5-17 Positioning Experiment Result in Input Crimp Change (30s)

5.5 実験結果考察

インパクト駆動を用いた場合のような浮上体に従来の永久磁石を用いていた方法から、電磁石への変更を行い、この電磁石を用いた場合の移動原理を提案した。また、この提案原理に沿って実験装置を作成し、実験を行った。また、実験を行い問題となった浮上力を確認するために、浮上実験を行い、電磁石での浮上の確認を行った。最後に、提案原理どおりの実験を行い、移動の確認を行い、提案原理の実証を行った。しかし、実験を重ねるにあたり、電磁石での浮上力の微小さや、移動変位の拡大の必要性、同変位ではない移動などの問題点も見つけることができた。浮上力の拡大、すなわち磁束密度の拡大方法としては、電磁石自体の大きさを変える方法や、コイルの巻き数を多くする方法がある。しかし、どちらの方法もそれにともない質量が増加してしまう。今後、軽量かつ高い磁束密度を持つ物質の発見を期待するか、質量と磁束密度の関係から、より浮上に適した中間点部分の見極めをする必要があると考えられる。また、移動変位の拡大であるが、これは現在のアクチュエータをより高変位のタイプに変更するか、形状記憶合金などの別の物を採用することが考えられる。

第6章 結論

本研究では、高温超伝導体を用いたピン止め浮上状態において、移動を行うことについて2つのことを提案した。

1つには、浮上側に永久磁石を用い、インパクト力により永久磁石の磁束が保持されているピン止め点をずらすという原理であり、この原理に基づいて実験を行った。実験結果から、強いインパクト力を繰り返しかけることにより永久磁石が一定方向に移動することが確認でき、インパクト力により、ピン止め力を外すことが可能であることを実証した。さらに、ピン止めエネルギーを想定し、それを測定する実験を行い、変位限界を測定してエネルギーを算出したところ、実験結果と一致する結果となっている。

以上2点がインパクト駆動を用いる場合について新規に提案をしたものであり、それについての実験結果は良好であった。

2つには、浮上する側に電磁石を用い、2個の電磁石とその間にあるピエゾをアクチュエータに用い、アクチュエータの伸縮と2個の電磁石をON/OFFすることにより、ピン止め力を利用しながらあたかも尺取虫のような動きによって移動する原理を提案し、実験を行った。実験結果から、浮上力が弱いという欠点を持つものの、ピン止め力を有効に利用しながら移動することを確認でき、提案を実証することができた。

以上、永久磁石と電磁石を用いて高温超伝導体上にピン止め浮上させた状態で2つの移動方法を提案し、実験結果から実証した。また、数点の問題点が見つかった。たとえば、両移動方式に共通するのは、1回あたりの移動距離のばらつきである。これがなぜ起こるのかは現時点では断定できないが、ピン止め点の分布が関係していることが予想される。

今後は、高温超伝導体自体を製作することを試み、2つの提案移動原理をさらに微視的に追求することにトライしようと考えている。

参考文献

- [1] 宮健三, 吉田義勝編著, 超伝導の数理と応用, 養賢堂, (1997)
- [2] 村上雅人, 高温超伝導体の材料科学, 内田老鶴圃, (1999)
- [3] 牧野洋, 新井民夫, 自動組立システムの動向, 精密工学会, 精密工学会誌, Vol.63, No.11(1997), pp.1503-1509
- [4] 榊原伸介, 組立システムにおける制御技術, 精密工学会, 精密工学会誌, Vol.63, No.11(1997), pp.1510-1514
- [5] 大見忠弘, 寺本章伸, 次世代半導体プロセスにおけるウルトラクリーンテクノロジー - 全くゆらぎのない半導体製造プロセス -, 精密工学会, 精密工学会誌, Vol.68, No.9(2002), pp.1144-1149
- [6] 村田耕一, スーパークリーンルーム技術, 精密工学会, 精密工学会誌, Vol.68, No.9(2002), pp.1150-1154
- [7] 小豆澤照男, 磁気浮上を利用した搬送技術, 精密工学会, 精密工学会誌, Vol.63, No.7(1997), pp.938-942
- [8] 松村文夫, 磁気浮上・磁気軸受の研究動向, 精密工学会, 計測と制御, Vol.38, No.2(1999), pp.83-86
- [9] 岡田養二, 磁気浮上・磁気軸受の制御, 精密工学会, 精密工学会誌, Vol.64, No.5(1998), pp.664
- [10] 岡田養二, 磁気浮上モータ(セルフベアリングモータ), 精密工学会, 計測と制御, Vol.38, No.2(1999), pp.97-100
- [11] Chen Li, Hironobu Aratani, Koichi Oka, Analysis of Bearingless Motor with Rectifier Circuits, Proceedings of Tenth International Symposium on Magnetic Bearings Abstracts, (2006), pp.111-112 & CD-ROM
- [12] 高橋潔, 超伝導磁気浮上式鉄道(JR-Maglev), 日本 AEM 学会, 日本 AEM 学会誌, Vol.13, No.1(2005), pp.3-6
- [13] 工藤健一, 実用線としてとして開業を迎える磁気浮上式鉄道「リニモ」(HSST)の概要, 電気学会, 電気学会誌, Vol.124, No.8(2004), pp.506-510
- [14] 電気学会 磁気浮上応用技術調査専門委員会 編, 磁気浮上と磁気軸受, コロナ社, (1993)
- [15] 株式会社 工藤鉄工所, 製品カタログ エアテーブル
- [16] 樋口俊郎, 静電浮上, 精密工学会, 計測と制御, Vol.38, No.2(1999), pp.101-104
- [17] 橋本芳樹, 小池義和, 上羽貞行, 近距離音場浮上を利用した非接触物体搬送, 精密工学会, 計測と制御, Vol.38, No.2(1999), pp.105-108
- [18] 松村文夫, 磁気浮上・磁気軸受の研究動向, 精密工学会, 計測と制御, Vol.38, No.2(1999), pp.83-86
- [19] 水野毅, 零パワー磁気浮上を利用した除振装置, 電気学会, 平成 17 年度 電気学会産業応用部門大会講演会講演論文集, 3-S7-4(2005)
- [20] 山城直人, 岡田養二, コンシークメント型アキシヤルセルフベアリングモータの開発と応用, 日本 AEM 学会, 日本 AEM 学会誌, Vol.14, No.1(2006), pp.2-7
- [21] T. Mizuno and Y. Takemori, Transfer Function Characterization of Virtually Zero-Power Control for Electromagnetic Suspension, Proceedings Asia-Pacific Vibration Conference '99, Vol.2(1999), pp.1146-1151
- [22] 岡宏一, 電磁コイルを用いない能動浮上方式, 平成 17 年度 電気学会産業応用部門大会講

演論文集， pp.III-83 ~ pp. III-88(2005)

- [23] Takeshi Morita, Katsumi Shimizu, Masayuki Hasegawa, Koichi Oka, Toshio Higuchi, A Miniaturized Levitation System With Motion Control Using a Piezoelectric Actuator, IEEE TRANSACTIONS OF CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL.10, No.5, IETTE2(2002), pp.666~670
- [24] K.Oka, T.Higuchi, Magnetic Levitation System by Reluctance Control Levitation by Motion Control of Permanent Magnet, International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, Vol.4, No.4(1994), pp.369-375
- [25] 岡宏一，永久磁石の運動制御による磁気浮上機構，東京大学，博士論文(1997)
- [26] T.Mizuno, H.Hoshino, M.Takasaki and Y.Ishino, Flux Path Control Magnetic Suspension, Proceedings 9th International Symposium on Magnetic Bearings,(1994), P69 & CD-ROM
- [27] 水野毅，関口秀樹，荒木獻次，永久磁石の運動制御を利用した反発型磁気軸受けに関する研究，，日本機械学会，日本機械学会論文集(C編)，Vol.64，No.628(1998)，pp.4717-4722
- [28] 筒井幸夫，樋口俊郎 高温超伝導体を利用した搬送技術，精密工学会誌 Vol.63.No.7.951-954(1997)
- [29] 極高真空装置内用の超伝導磁気浮上搬送装置を開発，超伝導コミュニケーションズ，超電導情報研究会発行，4.3(1995)4
- [30] 明石征邦，森下明平，笠原紀子，小豆沢照男，萩原宏康，高温超電導体を用いた磁気浮上搬送車両の浮上案内特性，電気学会リニアドライブ研究会資料，LD-91-111(1991)127
- [31] 磁気浮上搬送装置の開発，超電導コミュニケーションズ，超電導情報研究会発行 3.5(1994)6
- [32] 鴨川元一，森貴史，小森望充，超電導磁気浮上搬送装置の試作，日本機械学会，No.04-251，第16回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集，(2004)
- [33] 大橋俊介，百々太樹，永久磁石 高温超電導バルク体ハイブリッド磁気浮上搬送システムの浮上案内特性，電学論 D.126.11.1557-1562(2006)
- [34] 電気学会，超電導工学，オーム社(1988)
- [35] 岡宏一，小松茂久，インパクト駆動を用いた超伝導浮上位置決め機構における提案，電気学会資料 19-22 (2003)
- [36] 御子柴宣夫，鈴木克生，超伝導物理入門，培風館(1995)
- [37] 村上雅人，やさしい超伝導のはなし 5
- [38] 小松茂久，岡宏一，田口寛貴，坂本真人，インパクト駆動を用いた超伝導浮上位置決め機構の基礎研究，第15回 MAGDA コンファランス in 桐生 318-323(2006)

本研究に関する公表論文

[原著論文]

- [1] 小松茂久, 岡宏一, 田口寛貴, 坂本真人, インパクト駆動を用いた超伝導浮上位置決め機構の基礎的研究, 日本 AEM 学会誌, Vol. 15-2, pp. 138 ~ 143, (2007)

[国際学会]

- [2] Shigehisa Komatsu, Koichi Oka, Hiroki Taguchi, Masato Sakamoto, Positioning Mechanism for Superconductive Levitation System, Proceedings of the Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Sydney, (2006)
- [3] Shigehisa Komatsu, Koichi Oka, Hiroki Taguchi, Masato Sakamoto, Possibility of Positioning Mechanism for Superconductor Levitation System Using Stick-Slip Mechanism, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems, Nagasaki, (2006)

[国内学会]

- [4] 小松 茂久, 岡 宏一, 田口 寛貴, 坂本 真人, インパクト駆動を用いた超伝導浮上位置決め機構の基礎的研究, 第 15 回 MAGDA コンファレンス in 桐生, (2006)
- [5] 田口寛貴, 岡宏一, 小松茂久, 坂本真人, 電磁石を用いた超伝導浮上ピン止め移動の提案 実験によるピン止め移動の確認, 第 7 回 (社) 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門, (2006)
- [6] 坂本 真人, 岡 宏一, 小松 茂久, 田口 寛貴, 超伝導体におけるピン止め磁束の微視的計測, 日本機械学会中四国学生会 第 36 回学生員卒業研究発表講演会, (2006)
- [7] 田口 寛貴, 岡 宏一, 小松 茂久, インパクト駆動を用いた超電導浮上位置決め機構による提案, 平成 16 年度電気関係学会四国支部連合大会 (2005)
- [8] 田口 寛貴, 小松 茂久, 岡 宏一, 坂本 真人, インパクト駆動を用いた超電導磁気浮上位置決め機構の開発, 日本機械学会中四国学生会 第 35 回学生員卒業研究発表講演会, (2005)
- [9] 田口 寛貴, 岡 宏一, 小松 茂久, 坂本 真人, インパクト駆動を用いた超伝導浮上位置決め機構による提案, 第 14 回 MAGDA コンファレンス in 岐阜, (2005)

謝辞

小生は、高知県の公立高等学校の教員として、高知県教育委員会事務局高等学校課、高知県教育センター、須崎工業高等学校で勤務しながら、博士後期課程を修了することができました。社会人として時間等の制約の多いなか修了することができました。

的確な指針とアドバイスを与えてくれた知能機械システム工学科 岡宏一助教授 温かく接していただき、どうもありがとうございました。

実験を一緒にしてくれたり、データを共有してくれた知能機械システム工学科岡研究室超伝導研究チームの田口寛貴君、坂本真人君、どうもありがとうございました。

私は在学中の平成15年10月に高知工科大学内で脳内出血をおこしてしまい、3カ月間の闘病生活を余儀なくされました。そのとき大学内での私の行動がおかしいのにいち早く気づき、適切な処置をしていただき、本論文の審査もしていただいた 高知工科大学名誉教授 河田耕一先生 どうもありがとうございました。

また本論文の審査をしていただき多数の貴重なご助言をいた高知工科大学井上喜雄先生、竹田史章先生、前田敏彦先生、谷脇雅文先生、どうもありがとうございました。

その他多くの皆様がたの協力、励ましがあってのこの度の修了と考えています。

今後は、この修了によって与えられる称号に恥じぬよう、研鑽・修練に励み、教育者として 科学技術創造立国 日本を支えてくれる、担ってくれる若者を育てるべく、毎日を励んでいきたいと思えます。

今後とも、皆様の更なるご指導をよろしくお願いいたします。