2004 年度　卒業研究　サーフェスモーターの製作（一部改訂版）

要約

近年、リニアモーターの登場など電気磁界を用いた機器が世間一般に浸透してきている。ここではリニアモーターの一種であるサーフェスモーターについての製作を行い駆動を試みた。サーフェスモーターとは平面を自由自在に動くことのできるリニアモーターの一種であり、平面を縦横無尽に動くことのできるもので、実現するとベルトコンベアーなどの代わりに用いることができ、その他にも磁力を用いたゴーカートなどの遊具を作れることも考えられる。非常に便利かつ画期的な機器になり、将来性が期待される。

今回製作するものとして、モーターの基礎となっている直流モーターや１次元リニアモーターを製作しその機器の動作を確認した上でサーフェスモーターを製作する。製作したところ直流モーター、1 次元リニアモーターを駆動させる事に成功した。直流モーターでは磁極に磁石を用いて回転させ、直流分巻式においても回転させ、さらに極を 2 つにすることで回転速度が上がることを確認した。１次元リニアモーターではタイヤを用いて、3 点スイッチを使用した回路を組みスイッチングにより進行方向へ励磁させる事により駆動させることができた。

その後サーフェスモーターの製作に取り掛かった。製作にあたってキャスターに磁石をまたがせて改善し装置を製作し、進行方向へと励磁して力を与えたが進行方向へと進むための力を得ることができなかった。駆動できなかった原因としては、考察でも述べたように１次元リニアモーターに比べてサーフェスモーターの自重が大きいことである、さらにステータ側の永久磁石とムーバ側のソレノイドコイルの磁力が弱いことも考えられる。しかし１次元リニアモーターでは正常に動作したため、自重を減らし磁力を強くする事によってサーフェスモーターも駆動することが十分考えられる。

目次

第一章　　前書き
第二章　　理論
２．１　磁界とは
２．２　コイルの種類
２．３　コイルの測定
２．４　測定による比較・検討
２．５　磁力と離隔距離の関係
第三章　　本論
３．１　直流モーター
３．１．１　モーターとは
３．１．２　直流分巻式モーター
３．２　１次元駆動のリニアモーターの製作
３．２．１　製作
３．２．２　駆動方法と原理
３．２．３　スイッチング方法
３．２．４　結果
３．３　サーフェスモーターの製作
３．３．１　製作
３．３．２　駆動方法と原理
３．３．３　改良
３．３．４　結果・考察
第四章　　あとがき
謝辞
参考文献

第一章　前書き

近年、リニアモーターの登場や、ＩＨクッキングヒータなど電気磁界を用いた機器が世間一般に浸透してきている。ここではリニアモーターの一種であるサーフェスモーターについての研究を発表する。サーフェスモーターとは平面を自由自在に動くことのできるリニアモーターの一種である。リニアモーターには１方向にしか動くことができないがサーフェスモーターは平面を縦横無尽に動くことのできるものであり、実現するとベルトコンベアーなどの代わりに用いることができると考えられ、その他にも磁力を用いたゴーカートなどの遊具を作れることも考えられ、非常に便利かつ画期的な機器になり、将来性が期待される。

今回製作するものとして、モーターの基礎となっている直流モーターや１次元リニアモーターを製作しその機器の動作を確認した上でサーフェスモーターを製作する。サーフェスモーターの構造としてはステータ側には磁石を敷き詰めて、ムーバ側にはソレノイドコイルを固定し、ソレノイドコイルを３点スイッチによりスイッチングしてＳ極、Ｎ極に励磁して駆動させるという方式を考えた。さらにムーバ側にソレノイドコイルを用い、ステータ側に永久磁石を用い駆動を行った。

第二章　理論

２．１　磁界とは

磁界とは当然であるが目には見えないものであり、私たちの生活の中で、至る所に存在している。磁荷に対してもクーロンの法則が成り立つため電界と同じように以下のように定義される。

$$H = \frac{F[N]}{m[Wb]} \ [N/Wb] \qquad (1)$$

定義からもわかるように、磁界の単位としては[N/Wb]が用いられている。ある点の磁界とは、その点に１[Wb]の磁荷を置いた場合その磁荷に働く力である。磁界の様子を磁束線で表したとき、磁界と垂直な面積 S[m²]を貫く磁束線の数Φ[Wb]をこの面積で割ったもの、すなわち、磁界に垂直な単位面積当たりの磁束線の数を磁束密度という

２．２　コイルの種類

ではどのようなコイルをムーバ側に用いればよいのか。コイルとは一体どれくらいの種類があるかをその用途と共に調べ検討する。

２．２．１　チョークコイル

別名を固定インダクタンスという。一般的な用途としては電源のノイズを除去する役目がある。

２．２．２　トロイダイルコイル

直径数 cm のドーナツ型のフェライトにエナメル線を巻きつけたもの。一般的な用途としてはチョークコイルと同様に電源のノイズ除去の役割を持っている。さらに比較的電流量の多い場合に用いられる。最近ではパソコンのマザーボード内の CPU 用電圧を作る回路でよく見かけられる。

２．２．３　ソレノイドコイル

ソレノイドは円筒状に導線を巻いたコイルで、ソレノイド内部の磁束の方向はコイルを構成する電路一本一本に右ねじの法則を適用すると、コイル内の磁束は同一方向に向かう。また磁束の進行方向に対して電流の回転方向が右ねじの法則に適合する。コイル内の磁束密度Ｂ はソレノイドの単位長さ(1m) あたりの巻き線数をＮ とすると電線を筒状に巻いたコイルは右ネジの法則にしたがって磁界が発生する。ソレノイドコイルの中に鉄心を入れると電磁石となる。

２．２．４　空芯コイル

バネの様な形をした最も単純な形状のコイル。高周波回路等に多く使われて、自作も簡単にできる。鉛筆などにエナメル線やスズメッキ線などを巻いてできるものである。線の太さ、巻数、巻く時の隙間等によって値が変わる。

２．３　コイルの測定

今回の実験で使用するものは市販のマグネットやソレノイドコイル、導線を巻いて製作した自作コイル２種類などである。それらの磁力がどれほどのものなのかを測定する。実験装置は図２．１のようにして、それらの値について計測しその値を次の表に示す。実験装置において、ソレノイドコイルや磁石の磁力を測定するが、原則としてプローブとの離隔距離は0mm とし測定する。

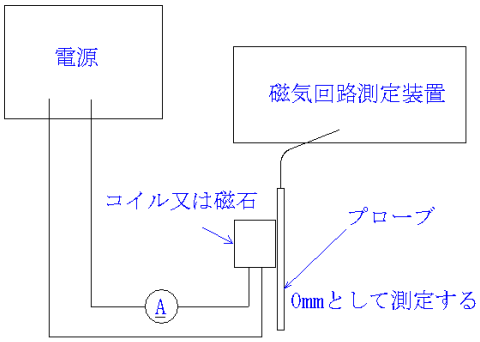

図２．１　　磁気回路測定図

２．３．１　コイルA

図２．２がコイルＡである。巻数は200 回として0.4mm の導線に電流を印加する。磁力が飽和状態に至るまで測定する。測定したところ表のような結果となり、電流に比例して磁力が変化することがわかる。さらに図２．５にグラフ化してみると、比例状態であることが明らかに理解できる。

表１　コイルＡの磁力測定

電流[A]	磁力[Wb/m²]
0. 10	0. 016
0. 15	0. 024
0. 20	0. 032
0. 25	0. 040
0. 30	0. 041

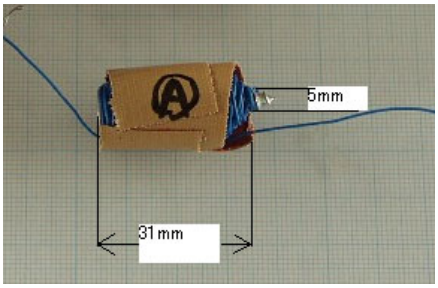

図２．２　コイルＡ

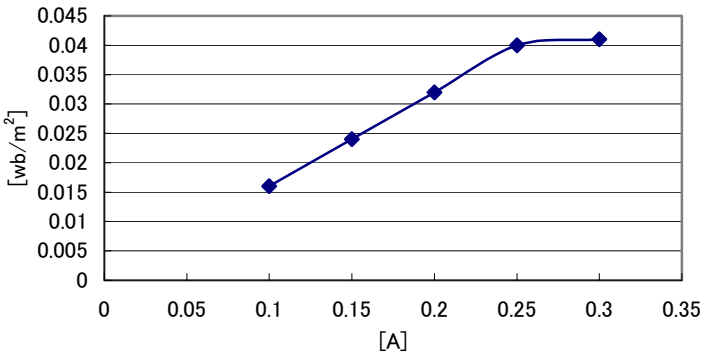

図２．３　　コイルＡの磁力

２．３．２　コイルB

図２．４がコイルＢである。巻数 110 回として 0.6mm の導線に電流を印加する。コイルＢもコイルＡのように電流に比例して磁力が変化することがわる。また電流が一定以上まで達すると磁力の値が飽和していくことも確かめることができる。コイルBにおいても図６のようにグラフで表す。

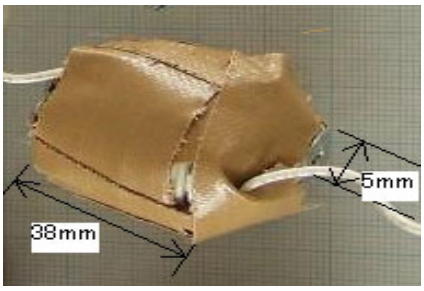

図２．４　コイルＢ

表２　　コイルＢの磁力測定

電流[A]	磁力[Wb/m²]
0.10	0.010
0.15	0.015
0.20	0.021
0.25	0.024
0.30	0.032
0.35	0.036
0.40	0.043
0.45	0.047
0.50	0.048

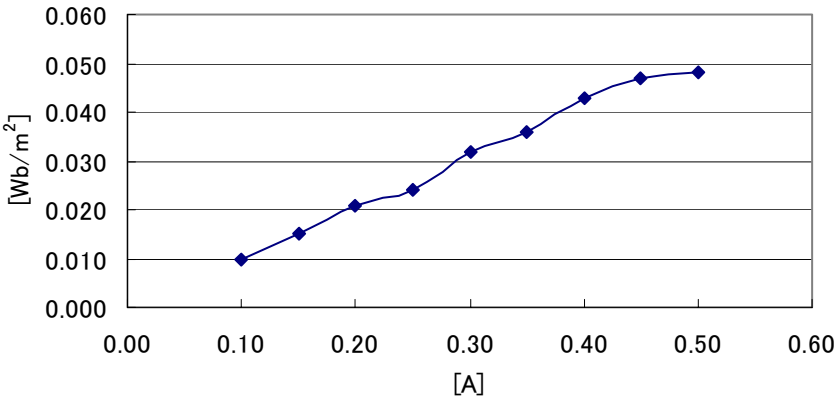

図２．５　コイルＢの磁力

２．３．３　ソレノイドコイル

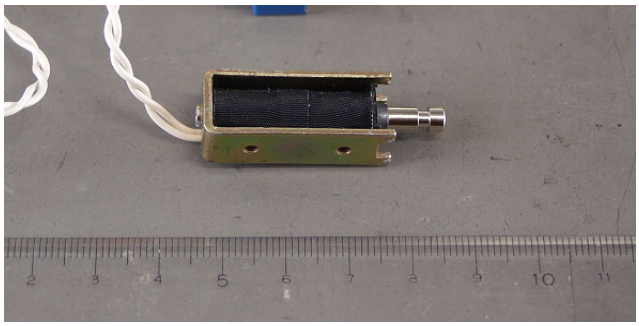

図２．６　ソレノイドコイル

図２．６のようなソレノイドコイルに電流を印加して測定し、さらに離隔距離を変化させて値をとった、離隔距離との関係は２．５に示す。ソレノイドコイルの磁力は表３のようになり特徴は以下のグラフからもわかるようにコイルＡ、Ｂと変わらないことがわる。

表３　ソレノイドコイルの磁力測定

電流[A]	磁力[Wb/m²]
0.07	0.021
0.10	0.031
0.16	0.042
0.20	0.049
0.22	0.060
0.24	0.068
0.30	0.078
0.35	0.090

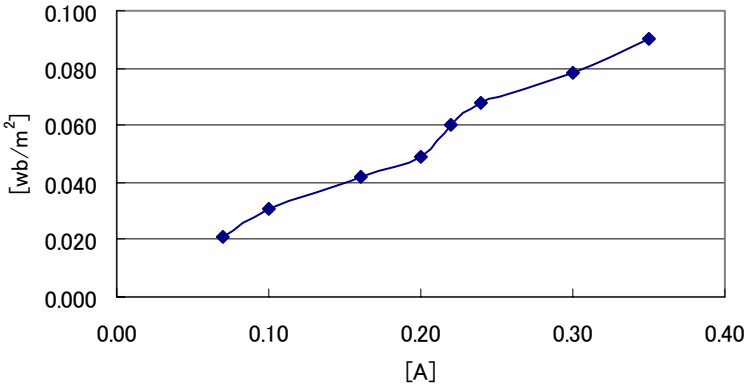

図２．７　ソレノイドコイルの磁力

２．３．４　市販のマグネット

市販のマグネットの磁力はどれくらい強いのかを測定した。測定した値は最大で 0mm のときに 0.144wb/m² となりソレノイドコイルや自作コイルよりも明らかに大きい値である。

２．４　測定結果による比較検討

コイルA、Bとソレノイドコイルを比較したところ以下のようなグラフとなる。グラフによってわかるように市販のソレノイドコイルの方が明らかに自作の手巻きコイルよりも能力が高いことがわる。これはソレノイドコイルに鉄心が入っていることと巻数が自作コイルよりも多いことが考えられる。また巻数は性能を左右する重要な因子である。このグラフからもわかるように今回の実験ではソレノイドコイルを使用することが望ましいと考えられる。

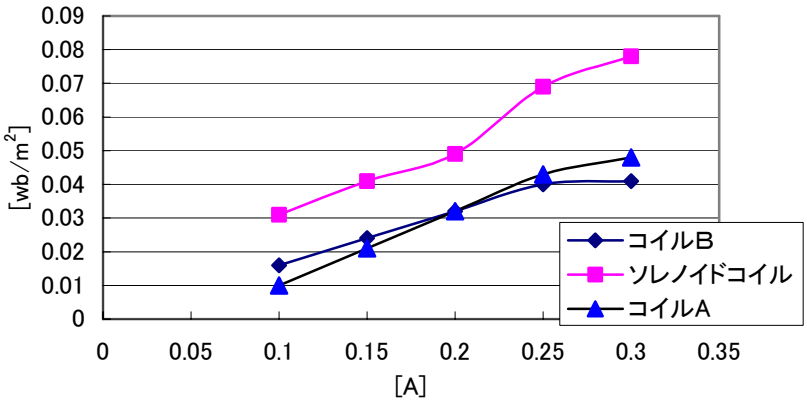

図２．８　それぞれの磁力比較

２．５　磁力と離隔距離との関係

磁力の強さは磁力線の密集している場所ほど高いといえる。つまりコイルから距離を空けるほどに磁力線の密集は少なくなり磁力は弱くなることがわかる。今回の実験において使用するソレノイドコイルと永久磁石については離隔距離を 5mm とし、そこから 1mm ずつ近づけていき離隔距離と磁力の関係を表した。どれほどの差があるのかを測定し、離隔距離と磁力との関係を表４に示した。さらにグラフによって以下に表した。その結果、離隔距離を２mm 以上空けると極端に磁力が弱くなることがわかった。磁力とは磁束密度が密集しているほど高くなるので、離隔距離が２mm を越えたあたりから磁束の集まりが少なくなっていることがこのグラフから読み取れる。つまり本研究において、離隔距離をなるべく小さくした駆動装置を作らなければならないと考えた。

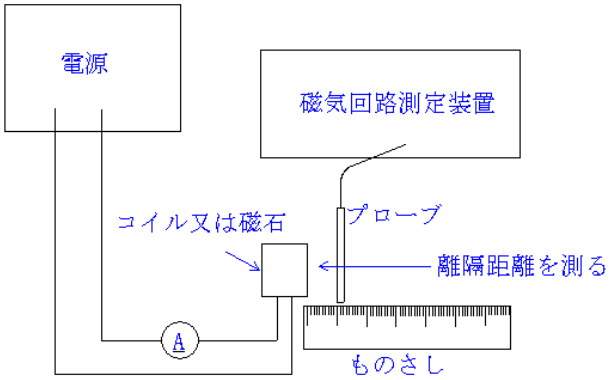

図２．９　離隔距離と磁力の関係を測定する

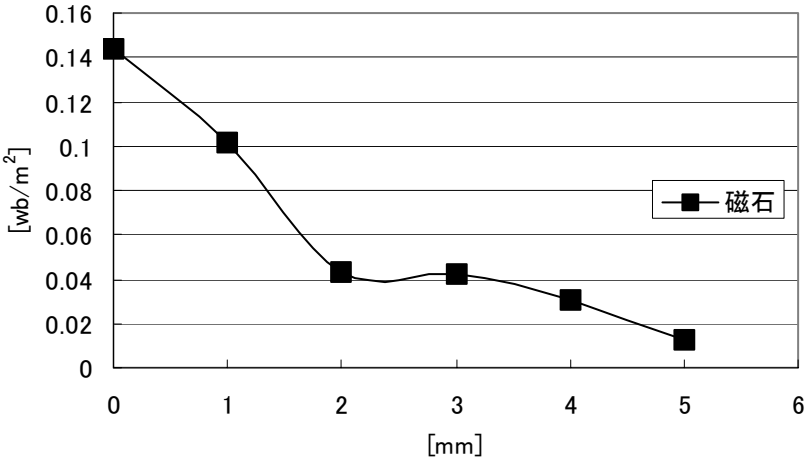

図２．１０　離隔距離と磁力の関係

第三章　本論

３．１　直流モーター

３．１．１　モーターとは

モーターには直流モーターと交流モーターの２種類がある。どのようなモーターであっても駆動巻線に流れる電流は絶えず変化している。つまり、駆動巻線には断続的な電流が流れていることが分かる。

よって直流モーターにも交番電流が流れている。直流モーターと呼ばれていても連続的な電流だけではモーターは機能しないことが言える。

まずはすべてのモーターの基礎となっている直流モーターの理解を深めるために製作し、駆動実験を行う事にした。磁石や鉄棒、木版を用いて装置を製作した図３．１において、磁極部分には磁石を用いて電池を直流電源として、コイルを回転させた。

さらに正常に回転することも電流を流す事により確認した。直流電源は電池として使用しているため、電流が流れるとすぐにコイルが回転することが確認された。

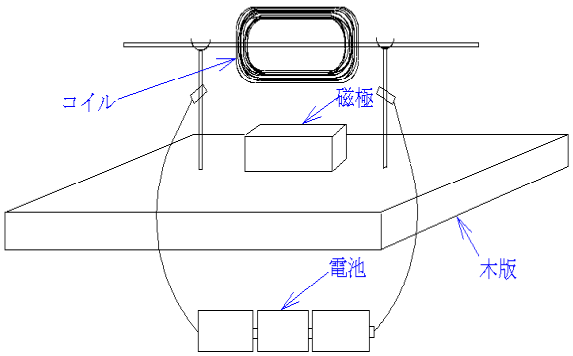

図３．１　直流モーター駆動実験装置

３．１．２　直流分券式モーター

次に図３．１の直流モーター駆動装置において、磁極部分をコイルにして直流分券式回路によって駆動させる事にした。その実験装置を図３．２に示す。電源を接続したところ磁極部分のコイルを同極にして２ヶ所にする事により回転速度を上げる事に成功した。実験装置に加えて簡単な回路図を以下に示す。

直流モーターを平面に展開した図がリニアモーターとなっているため、次のリニアモーターの製作に取り掛かる。

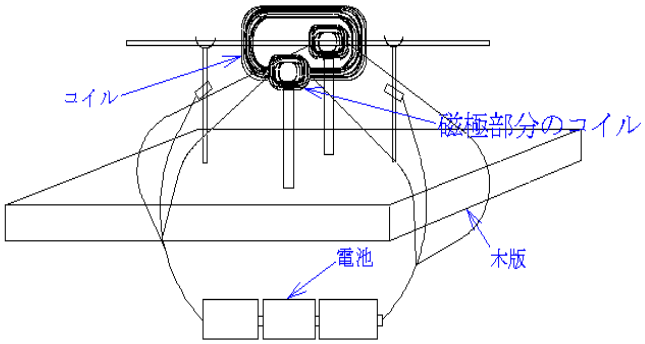

図３．２　直流分券式モーター

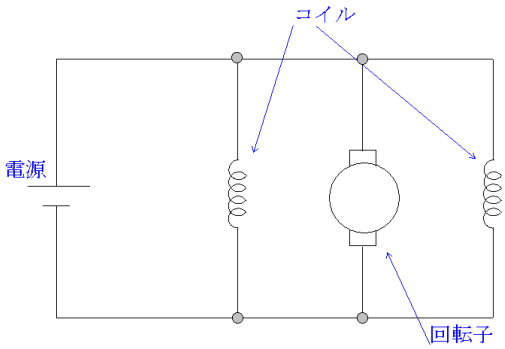

図３．３　直流分巻式モーターの回路図

３．２　１次元リニアモーターの駆動実験

３．２．１　１次元リニアモーターの製作

２次元のリニアモーターに入る前に、１次元リニアモーターについての製作を行った。製作に当たっての材料はミニ四駆の部品や２．１で用いたソレノイドコイルなどを用いて駆動装置を製作した。

図３．４　１次元リニアモーターの駆動装置の概要図

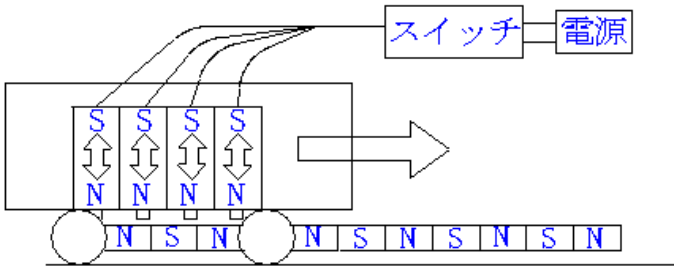

図３．５　１次元サーフェスモーターの横断面図

駆動装置は図のようになる。プラスティックの板でソレノイドコイルを挟んで、ステータ側の磁石と限りなく近づける。さらにミニ四駆のシャフトとタイヤを使いできるだけタイヤやシャフトの摩擦を少なくすることを心がけた。この状態からでは分かりづらいため横からの断面図を紹介する。以下の図からも分かるように接続した回路に電流制御を行う事によってソレノイドコイルの磁力をＳ、Ｎ極または磁力を持たない状態に変換し、進みたい方向へと極を替えていく事にする。

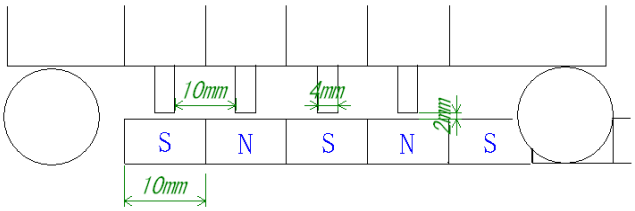

図３．６　コイルと磁石の間隔

３．３．２　駆動方法と原理

３点スイッチを用いて回路を作り、電源を２つ用意して２方向からソレノイドコイルに電流を流す。そしてスイッチングによりＳ極、Ｎ極、無極に変換することで進行方向へと力を与えられるようにする。回路図を以下に示す。本研究においては手動によりスイッチングする。

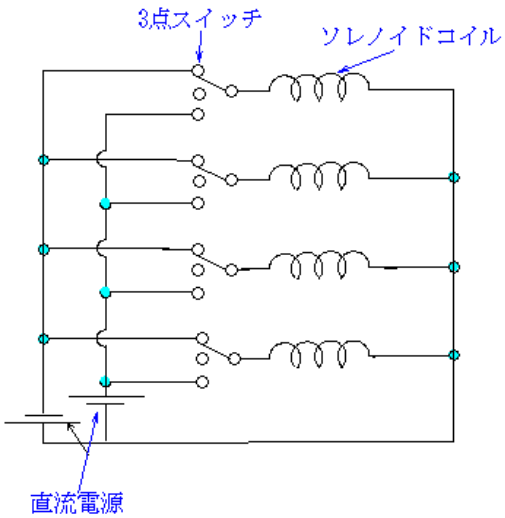

図３．７　３点スイッチを用いた回路図

３．２．３　スイッチング方法

はじめに次のようなドライブ方法を考えた。まずムーバを図３．８のようにコイルを励磁する。するとステータとの反発力・吸引力によって右方向に進む。そして図３．９の位置まで進むと、吸引力だけになり止まるので、電源をオフにする。すると慣性の法則によってムーバは止まることなく進みつづける。

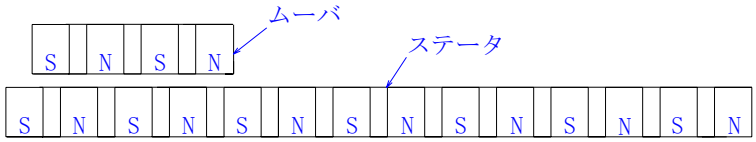

図３．８　理想ドライブ方法（１）

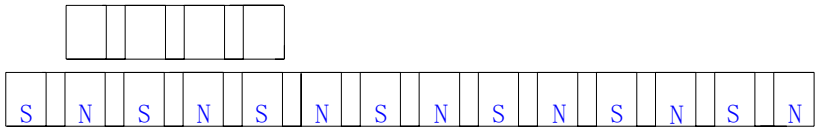

図３．９　理想ドライブ方法（２）

この状態からさらにムーバが進むと、図３．１０の位置まで進む。ここで図３．１０のようにコイルを励磁すると、また反発力・吸引力が発生するので、ムーバは進む。そしてまた電源をオフにして図３．１１のようする。

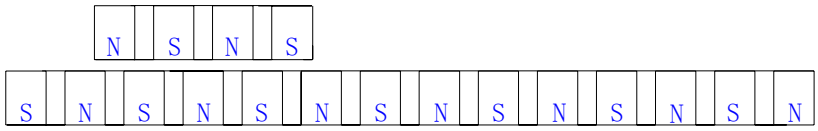

図３．１０　理想ドライブ方法（３）

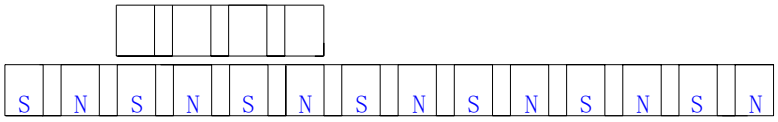

図３．１１　理想ドライブ方法（４）

以上を１サイクルとし、駆動させようとした。しかし、この方法では絶妙のタイミングでスイッチングを行わなければならないため、実際に駆動させることは難しいよって、次の方法を考えた。

〇実際のドライブ方法

一次元移動するリニアモーターのドライブ方法を次に示す。

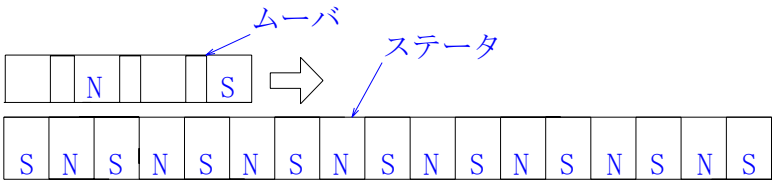

図３．１２　実際のドライブ方法（１）

まず、ステータ側の永久磁石のＳ・Ｎによって、ムーバのＳ・Ｎを決める。図３．１２のようにすると、ムーバは右方向に進む。ムーバの何も書いていない空白の部分は、オフになっている。その理由としては、２個のコイルでムーバを動かすことができるので、吸引力だけの発生を防ぐためである。

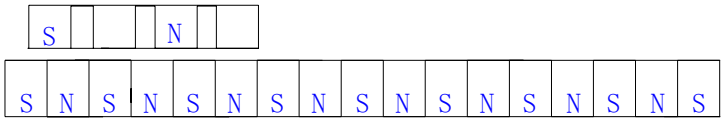

図３．１３　実際のドライブ方法（２）

図３．１３のようにムーバを励磁すると、図３．１４の位置まで進む。そこで次に、図３．１５のように励磁する。

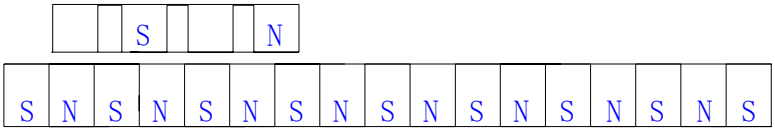

図３．１４　実際のドライブ方法（３）

すると図３．１４のようになり、

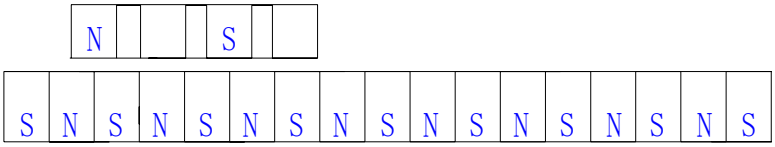

図３．１５　実際のドライブ方法（４）

図３．１５の位置まで進む。これが１サイクルとした。次は図３．１２のようにムーバを励磁すると進み、図３．１３、図３．１４と続いていく。実際のスイッチングではこの方法を用いる。

３．２．４　結果

以上の（１）～（４）の動作を繰り返すことにより、進行させたい方向へとスイッチング処理を行う。１ 次元リニアモーターではスイッチングにより駆動させることができた。

ここで駆動させることが分かったためどれほどの力を加える事によって１次元リニアモーターが動作するのかをばねばかりによって調べる事にした。測定は図３．１６のように行い、静止した状態からどれほどの力を加える事によって動作を開始するのかを測定した。測定したところばねばかりの値は７g 重となった。７g 重をニュートン（N）で表してみる。９．８Nで1kg 重となるため１０００g 重＝９．８Nである

０．００７×９．８＝０．０６９Nとなる

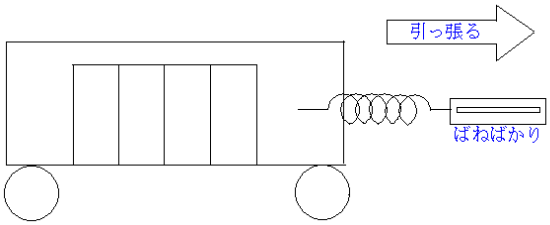

図３．１６　ばねばかり測定図

３．３　サーフェスモーター

３．３．１　サーフェスモーターの製作

サーフェスモーターとは、可動子（ムーバ）、固定子（ステータ）をそれぞれ電磁石と永久磁石により構成し平面的に自由に動く機器である。このサーフェスモーターは、X-Y の２方向動作に加え、回転動作もでき、３自由度の運動が可能である。

直流モーター、１次元リニアモーターの製作、駆動実験を行った。その結果いずれも駆動する事に成功した。

製作に当たってどのように作るかを考えた。まず図３．１７に示すようにステータ側の磁石の上にアクリル板をひいてその上にキャスターを用いたムーバを置いて駆動させる事にした。

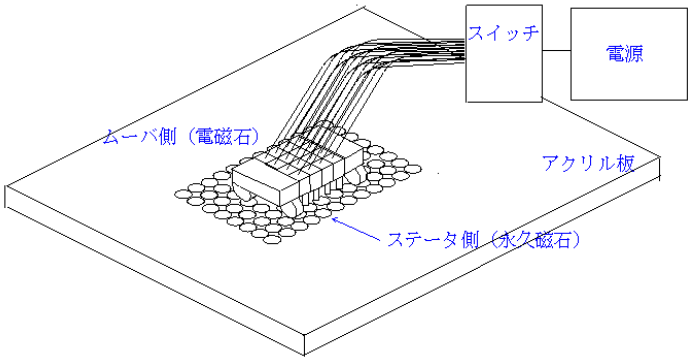

図３．１７　サーフェスモーター製作計画図

図３．１７のように設計し製作する事にしたが、横からの断面図を見たときに図３．１８のように、アクリル板の厚さが１mmとなっていることがわかった。そのため離隔距離の検討でも分かるように十分な磁力が得られないことが考えられた。よって別の方法を考える事にした。

図３．１９に示すようにキャスターに磁石をまたがせてコイルと磁石の距離をさらに近づけるという方法である。これによって可動範囲は狭くなるが図３．１７のサーフェスモーターに比べて進行方向への磁力が強くなることが考えられ、製作を行う事にした。

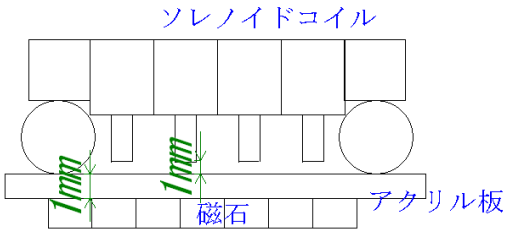

図３．１８　アクリル板を引いたときの断面図

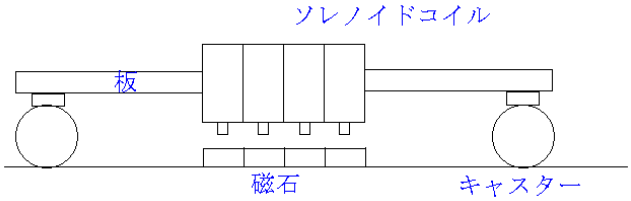

図３．１９　改善した製作図

ここで、製作においてムーバ側に永久磁石を使用しステータ側に電磁石を用いる方法もあるが、本研究においてはムーバ側に電磁石を使用しステータ側には永久磁石を用いてキャスターを使い動作させる。なぜそのようにしたかは以下のとおりである。

（1）電磁石よりも市販のマグネットのほうが容易に手に入れる事ができる。使用数の多いステータ側に向いている。

（2）電磁石をステータ側に用いた場合には、電流で制御しなければならない物が多くなりすぎて手間が掛かってしまう。

以上の事によって分かるように本研究においてはムーバ側に電磁石を用いてステータ側に磁石を用いる事に決定した。

それらを考えた上で製作する概要図については以下に示す。

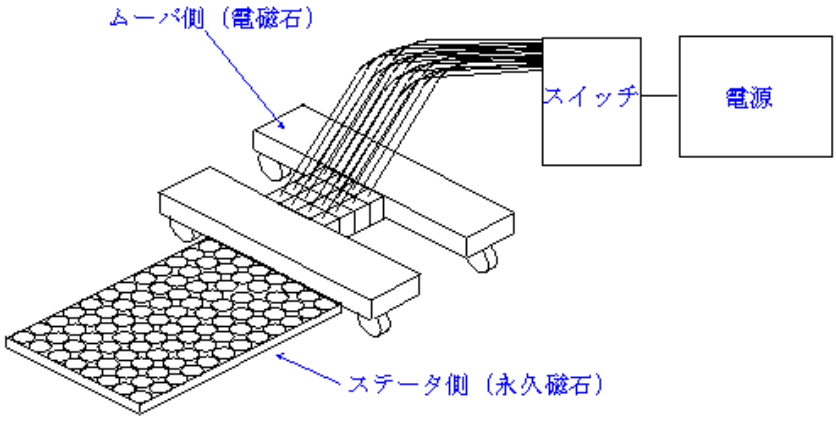

図３．２０　サーフェスモーターの概要図

これまでの１次元サーフェスモーターは１方向にしか動かないためミニ四駆のタイヤを使用する事によって解決することができた。今回は二次元方向への動作も行うためタイヤの部分をキャスターに替えることにする。本研究で使用するキャスターは運搬台車に使用される中荷重用ブレスキャスターで、取り付け高さ 34㎜、軸径 6㎜ となっている。
完成した製作図を次に示す。簡単な製作図は図３．２１に示したがムーバ側におけるさらに詳しい図を以下の図３．２２のように示す。

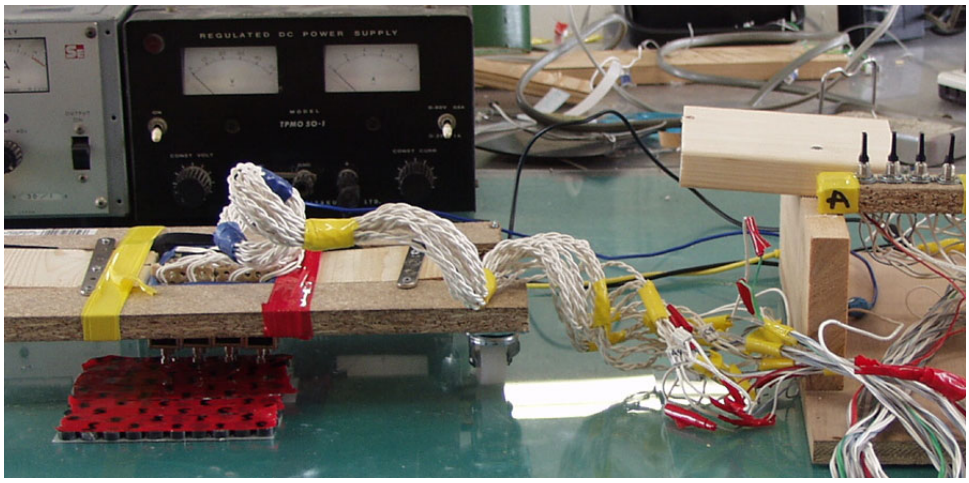

図３．２１　サーフェスモーターの製作図

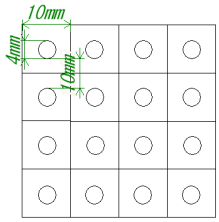

図３．２２　ムーバの寸法図

３．３．２　駆動方法と原理

今回は２次元サーフェスモーターにおいてもスイッチング処理を行う事にした。スイッチングについては先ほどの１次元サーフェスモーターでも述べたのと同様な方法をとる。図３．７で示した３点スイッチ回路を用いて、スイッチング箇所を

４箇所から１６箇所に替えて回路を組む。この時に１次元リニアモーターと比べてスイッチングする箇所が多くなり励磁するコイルも増えるため電源は電流容量の大きいものを使用する。詳しい駆動原理については以下の図に示す。

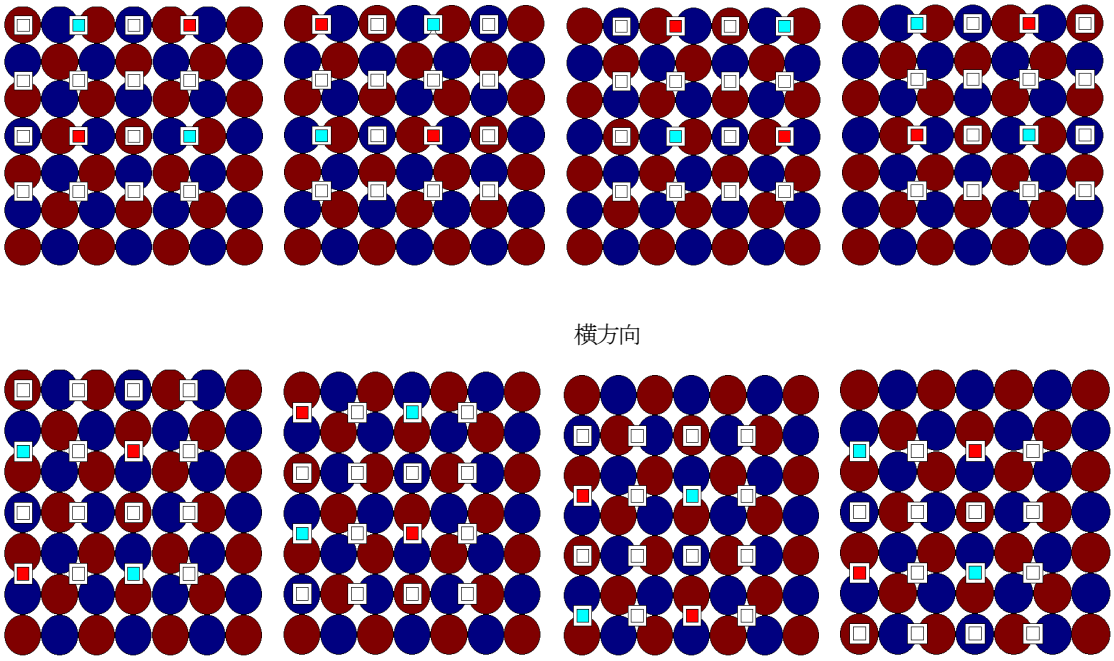

図３．２３　サーフェスモーターの駆動原理

３．３．３　改良

以下の図３．２４のような回路を作製しスイッチング処理を行ったところ全く駆動することができなかった。そこでムーバ側の装置を軽量化して製作した。改良した装置を図３．２５に示す。

３．４　結果・考察

サーフェスモーターは駆動させることができなかった。しかし装置を改良する事により磁石半個分の動作に成功した。１次元リニアモーター、サーフェスモーター共に１０V、０．２A を印加して励磁を行った。表３からも分かるようにソレノイドコイルには０．２A印加する事により０．０４９[Wb/m²]の磁力が発生した。

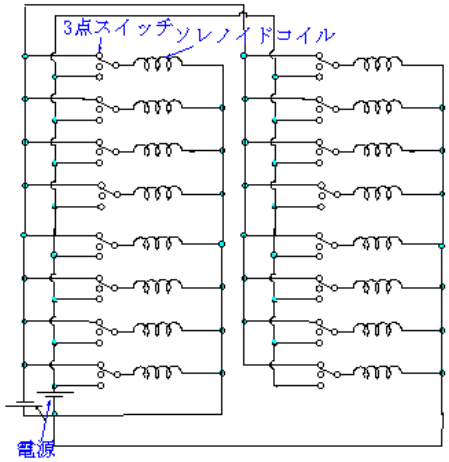

図３．２４　サーフェスモーターのスイッチング回路図

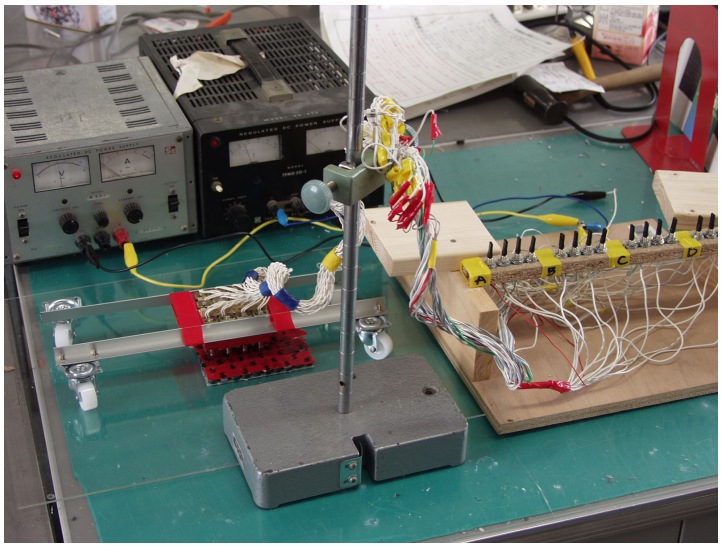

図３．２５　改良したサーフェスモーター

２つの違いについてそれぞれ比べてみる。

（1）自重の違い

まず１つめの理由として自重の違いが考えられる。そこで２つの装置についての自重を計量し表４に表した。表からも分かるように明らかに２次元のサーフェスモーターの自重が大きいことが分かる。よって０．０４９[Wb/m²]の磁力により１５３．１ｇのリニアモーターの駆動が可能だとわかった。しかし９２４．４ｇを駆動させるには磁力不足であることがいえる。

表４　自重の計量

装置	重さ[g]	駆動
１次元のリニアモーター	１５３	○
サーフェスモーター	９２４	×
改良サーフェスモーター	５５０	×

（2）磁力の強さ

１次元リニアモーターでは励磁時に発生する進行方向への力が、自重とタイヤの摩擦の力よりも大きいため駆動することができた。しかしサーフェスモーターの場合、励磁時に発生する進行方向への力よりも自重とキャスターの摩擦が大きいために駆動することができなかったと考えられる。

進行方向への力を強くするための方法としてムーバ側、ステータ側の磁力を強くすることが考えられる。では、どのように強くするかというと、ムーバ側に用いているソレノイドコイルを巻数が多く磁力が強いものを選定する。さらにステータ側に用いる永久磁石を磁力の強いものに替えるなどが考えられる。

（3）どれほどの磁力によって駆動できるかについての実験を行った

１次元リニアモーターをそれぞれの電圧で駆動させ、動作できるかどうかを調べた。その実験結果を表５に示す。

表５の○印は、リニアモーターが駆動し進んだことを表している。△印は、振動のように行ったり来たりしていた様子を表している。×印は、まったく動作をしなかったことを表している。ムーバでは５ボルトから動作するようになった。５ボルトでは０．０２８[Wb/m²]の磁界が発生した。つまり１５３ｇの１次元リニアモーターを動作させるためには０．０２８[Wb/m²]が必要である。

５．今後の課題

結果として、駆動は成功せず、自重が大きくなりすぎたことや、磁力不足が原因であると考えた。改善方法としてムーバ

表５　動作実験

電圧(V)	動作
1	×
2	×
3	△
4	△
5	○
6	○
7	○
8	○
9	○
10	○

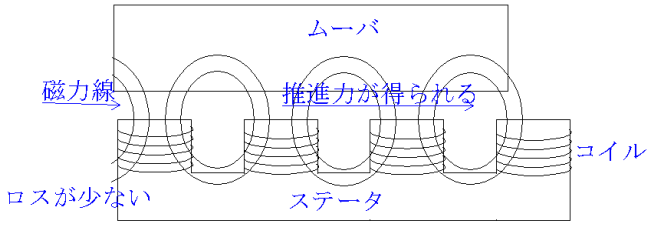

図５．１　理想の構成図

の軽量化や、ソレノイドコイルを磁力の強いものに替えるということが考えられる。さらに本研究においてステータ側には磁石を敷き詰め、ムーバ側にソレノイドコイルを用いて駆動を行った。この構成ではムーバ側であるソレノイドコイルは個々に磁力を放っており、磁力のロスが大きくなってしまうことが考えられる。よって磁力のロスをなくすため図５．１のような装置を作ることが理想であると考えた。

ステータ側には手間が掛かるが、磁束がより密集し、市販のマグネットよりも大きい磁力を得られることができる。

第四章　あとがき

本研究では直流モーター、１次元リニアモーターを製作し駆動させる事に成功した。直流モーターでは磁極に磁石を用いて回転させ、直流分巻式においても回転させ、さらに極を２つにすることで回転速度を上げることを確認した。直流モーターを平面に展開したものが１次元リニアモーターである。１次元リニアモーターではタイヤを用いて、３点スイッチを使用した回路を組みスイッチングにより進行方向へ励磁させる事により駆動させた。

その後サーフェスモーターの製作に取り掛かった。製作にあたってサーフェスモーターの製作計画図でも述べたようにアクリル板を用いて、キャスターを使って動作させる事を考えたのだが、アクリル板の厚さによって磁力が働かないことが分かったため、キャスターに磁石をまたがせて改善した製作図に示すような装置を製作した。３点スイッチ駆動原理を元に、１次元リニアモーターと同様な回路を組んだ。ここでスイッチの制御が４箇所から１６箇所となり、また同時に励磁するコイルも増えるので電源は電流容量の大きいものを使用した。ムーバのソレノイドコイルに電流が導通し磁力が働いていることを確認した上で駆動実験を行ったが進行方向へと進むための力を得ることができなかった。

駆動できなかった原因としては、考察でも述べたように１次元リニアモーターに比べてサーフェスモーターの自重が大きいことである、さらにステータ側の永久磁石とムーバ側のソレノイドコイルの磁力が弱いことも考えられる。しかし１次元リニアモーターでは正常に動作したため、自重を減らし磁力を強くする事によってサーフェスモーターも駆動することが十分考えられる。

参考文献

１．成田 鉱一 著「電気磁気学」
２．野中 作太郎 著 森北出版社 「電機機器(１)」