

## 磁性流体を用いたダイナモの増幅発電

久保田, 淳一 / KUBOTA, Junichi

---

(発行年 / Year)

2007-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2007-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

# 修士論文

磁性流体を用いたダイナモの増幅発電

2006 年度

法政大学大学院 工学研究科

システム工学専攻

05 R6116

久保田淳一

指導教授 渡辺 嘉二郎 教授

# **Abstract**

## **The dynamo amplification power using magnetic fluid**

The dynamo generates the inducement exchange electromotive force by the mutual inducement action between the magnetic rotor and the stator. The leakage magnetic field generates between the rotor and the stator. Therefore, we thought that the inducement exchange electromotive force is amplified by preventing the leakage magnetic field. As an improvement idea, the magnetic fluid is used to reduce the gap between the rotor and the stator. The gap is filled by inserting magnetic fluid between the rotor and the stator, which decreases the leakage magnetic field. This paper describes that amplification power of the dynamo using magnetic fluid.

***Key words:*** *dynamo, magnetic fluid, leakage magnetic field, amplification power*

# 目次

第1章	はじめに	
1.1	本研究の一般的な目的	4
1.2	ダイナモの発電原理	4
1.3	本研究のねらい	8
第2章	対象と問題の記述	9
2.1	問題の対象の記述	9
2.2	仮定	9
2.3	問題の記述	9
第3章	磁性流体とは	10
3.1	磁性流体の構造	10
3.1.1	分散安定性	10
3.1.2	粒子間相互作用	11
3.1.3	ブラウン運動による拡散	13
3.2	磁性流体の特性	15
3.2.1	磁性流体の磁化	15
3.2.2	レオロジー特性	16
3.2.3	磁場の作用する場合	17
3.3	一般的な用途例	18
第4章	磁性流体を用いた発電機の考案	20
4.1	ダイナモに磁性流体を使用する利点	20
4.1.1	漏洩磁界の削減	20
4.1.2	コイル内の磁束増加	21
第5章	ホール素子を用いたガウスメータの製作	22
5.1	ホール素子の原理	22
5.2	ホール素子の特性	23
5.3	回路設計	23
5.3.1	定電流回路の設計	23
5.3.2	インスルツメンテーション・アンプの設計	23

第6章 磁性流体の特性実験	26
6.1 実験システム	26
6.2 実験方法	27
6.3 実験結果	27
6.4 検証	27
第7章 リム・ダイナモ実験	28
7.1 実験システム	28
7.2 実験方法	28
7.3 実験結果	29
7.4 検証	31
第8章 むすび	32
参考文献	33
謝辞	34

## 第1章 はじめに

### 1.1 本研究の一般的な目的

すべての発電機は、回転する磁極ロータとステータ間の相互誘導作用によって誘導交流起電力を発生させ発電している。例として一般的な交流発電機の構造図を Fig.1 に示す。交流発電機の磁極ロータとステータ間には、エアギャップが存在し、磁極ロータから発せられる磁束が漏洩することで、効率化の妨げとなっている。磁極ロータとステータ間の漏洩磁界を防ぐことにより、磁極ロータから発せられる界磁磁束が高まり、ステータコイルを通過する磁束変化量が増加する。これにより、誘導交流起電力が大きくなると考えられる。以上のことから本研究は、安価で手に入りやすい小型発電機あるリム・ダイナモを用いて、漏洩磁界を防ぐ方法を提案し起電力の変化を検証する。

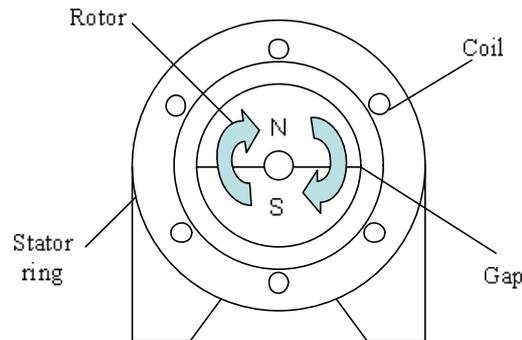


Fig.1 Alternating current dynamo

### 1.2 ダイナモの発電原理

自転車用リム・ダイナモとは発電機のローラをタイヤの側面にばねの力で押し当てて、タイヤの回転でローラを回し、さらに本体の中の発電機構を回して発電する発電機である。

発電原理はコイルに向かって磁石を動かすと、コイルには誘導起電力が発生して電流が流れるという電磁誘導現象が用いられている。Fig.2 にダイナモの発電原理を示す。

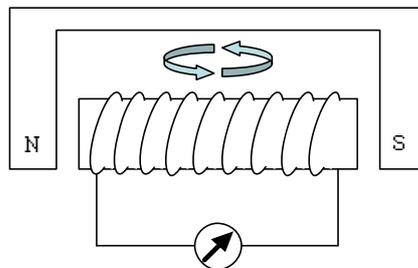


Fig.2 Principle of the dynamo

コイルの近くで磁石を動かすと、コイルを貫く磁束の数に変化が生じるため、コイルに電流が流れる。この現象を電磁誘導といい、流れる電流を誘導電流、この電流を流そうとする起電力を誘導起電力という。

誘導起電力の大きさ $V$ は、コイルを貫く磁束 $\Phi$ の時間的変化割合に比例し、コイルの巻き数 $n$ にも比例する。このときコイルに流れる電流 $I$ は、磁束の変化を妨げるように流れる(レンツの法則)。ファラデーの電磁誘導の法則から

$$V = -n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

という関係式になる。

誘導起電力の向きについてはレンツの法則より「誘導電流はコイルを通る磁束の変化を妨げる向きに流れる」と定められている。コイルにN極が近づくと、これを打ち消すような逆向きの磁束を生じる電流がコイルに流れる。S極が近づくときは、N極の場合とは逆向きの電流が流れる。これは、現状を維持しようとする自然の慣性的性質の表れと見ることができる。

自転車用リム・ダイナモはN極S極の変化を効率よく行うため Fig.3 に示すように車輪の回転運動がシャフトを通じて磁石を回転させ磁界の向きを変化させるため、ユニークな構造となっている。ダイナモはマグネット式モータであり、コイルが回転子を囲むインナーロータ型と、回転子がコイルを囲むアウターロータ型がある。本研究で使用するダイナモは一般的に普及率の高いインナーロータ型となっている。

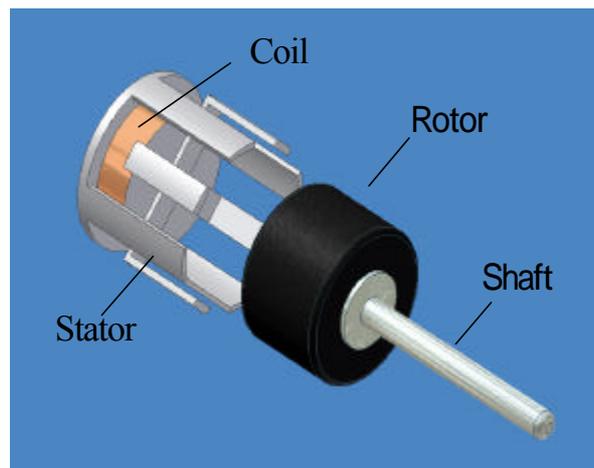


Fig.3 Internal structure of the dynamo

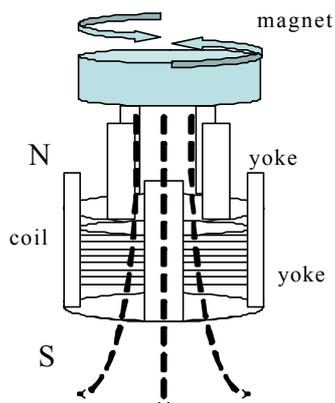


Fig.4 Principle of the dynamo

ダイナモ内の回転子には自転車のような低速走行時でもランプが点灯できるように多極着磁されたフェライト磁石が使われる .Fig.5 と Photo.1 に多極着磁されたフェライト磁石を示す . この構造は極異方性磁石といわれ,極異方性の磁場配向を表し,点線方向に着磁することができる . 一般的に自転車のダイナモでは 8 ポールに極数が決められており磁気エネルギーが極めて高い .

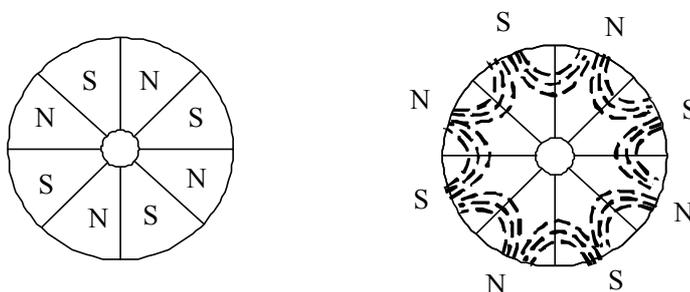


Fig.5 Internal structure of the rotor



Photo.1 Appearance of the rotor

固定子の外形を Fig.6 と Photo.2 に示す .固定子は  $a$  と  $b$  の短冊形の鉄板でできており,  $a$  と  $b$  は嵌め合いで接合されている . 回転子は, N 極と S 極を対として数える 4 極の磁極を持っており, 回転すると,  $a$  と  $b$  の対には N または S が相対することになる . したがって磁路は,  $a \rightarrow b$  と  $b \rightarrow a$  が繰り返され, これによってコイルを貫通するための起電力が得られる .

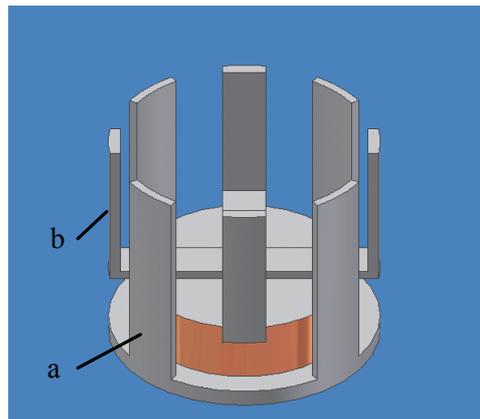
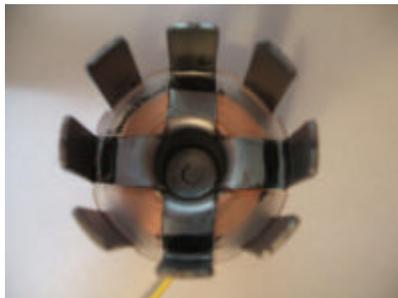


Fig.6 Internal structure of the stator



(a)upper view



(b)side view

Photo.2 Appearance of the rotor

この場合の起電力  $V$  [V]は,

$$V = K\Phi f \sin 2pft \quad (2)$$

周波数は  $f$  [Hz]は

$$f = pN/2 \quad (3)$$

電流  $I$  [A]は

$$I = V/R \quad (4)$$

ただし,  $\Phi$  はコイルを通過する磁束[Wb],  $p$  は極数,  $N$  は回転数[rps],  $R$  は巻き線抵抗[ $\Omega$ ],  $K$  は比例定数とする .

### 1.3 本研究のねらい

1.2より,リム・ダイナモから大きな電圧を取り出すためには

磁石を強くする

回転数を速くする,または極数を多く取り出す

コイルを通過する磁束を高める

以上のことが考えられる。本研究は安価で一般的に手に入り易い市販の自転車用ダイナモを用いることから、の磁石の強化については吸引力が高まり非常に回転しにくくなってしまう。つまり回転に大きな入力が必要となるため効率が落ちると考えられる。は小型の自転車用ダイナモにおいて、これ以上の極数の増加はステータの増加も意味するのでスペースに限界がある。よって、既存の磁石やコイル自体には手を加えず、本研究はについて、磁性流体を用いることで回転子と固定子間での漏洩磁界を防ぎ、ステータコイルを通過する磁束変化量の増加から、起電力を増加させる事がねらいである。

## 第2章 対象と問題の記述

### 2.1 問題の対象の記述

本研究は自転車用発電機であるリム・ダイナモに液体の磁性体である磁性流体を、回転子と固定子間に挿入する事で漏洩磁界を減少させ、起電力の変化を検証する。

### 2.2 仮定

本研究では、研究を進めるに当たり以下のような仮定を設けた。

(A1) 実験環境は磁気の影響のない場所とする

(A2) コイルの長さは挿入する芯の半径に比べて十分に長いものとする

### 2.3 問題の記述

以上のような仮定の下で、以下のような問題を検証する。

(P1) 回転子と固定子間に磁性流体を挿入したときの起電力の増加

## 第3章 磁性流体とは

磁性流体 (Magnetic Fluid) は、マグネタイトのような強磁性体を 100 程度に加工された微細粉末が液体中に均一に分散している複合材料である。通常媒体となる液体 (ベース液) と磁性超微粒子、さらに磁性粒子の表面に強固に化学吸着した界面活性剤の 3 成分よりなる。超微粒子は激しい熱運動と、表面の活性剤層の相互反発力のため凝集することなく安定な分散状態を保っている。ゆえに強磁場下でも粒子の凝集や固液の分離が起こらず、あたかも液体全体が強磁性を持っているかのように挙動する。また、比透磁率を持ち磁石を近づければ磁石に引き寄せられるが、その際、磁石の N 極 - S 極に構成される磁力線に沿って配向しようとする。磁性流体の構造や特徴を以下にまとめる。

### 3.1 磁性流体の構造

#### 3.1.1 分散安定性

強い磁性を有する粒子同士が非常に近くに接近存在したとき、粒子間には磁気力やファン・デル・ワールス力が吸引力として働くため、粒子の合体、凝集が生じ、ついには固体と液体に分離してしまう、これを防ぐために界面活性剤が利用される。

界面活性剤 (オレイン酸) の分子構造は、一般に極性基と無極性基とで構成されている。極性基は水に対して強い親和性を持つもので親水基とも呼ばれ、無極性基は親和性が無く疎水基と呼ばれている。

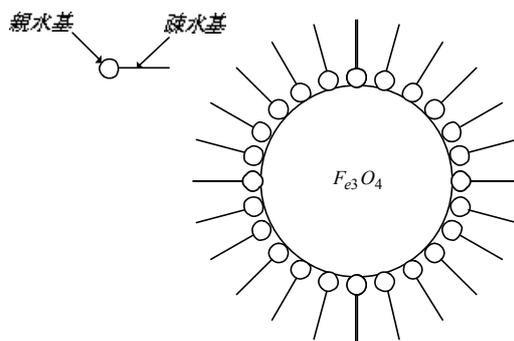


Fig. 7 イソパラフィンベース磁性流体

例えば、マグネタイト粒子を飽和炭化水素 (イソパラフィン) などの極性の小さい溶媒中に分散させる場合には Fig. 7 のように界面活性剤としてのオレイン酸イオンは極性基を固体表面に傾けて化学的に吸着させ疎水基がその周りの溶媒に溶け込んだ状態で粒子と溶媒との間の融合の役割を果たす。

### 3.1.2 粒子間相互作用

安定な分散を得るための基本条件として, 2 個の強磁性粒子間に働く力のつり合いの関係がある.

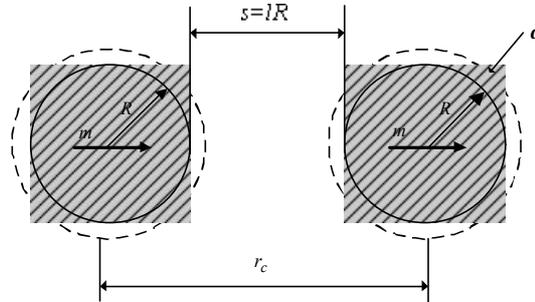


Fig.8 強磁性粒子間の相互作用

Fig.8 に示すように, 2 個の強磁性粒子が中心間距離  $r_c$  だけ離れて存在するものとする. 粒子を単磁区構造の球形微小磁石とみなし, その半径を  $R$ , 磁気モーメントを  $m$  とすれば, 粒子間に働く磁気力は, 磁気モーメントが図のように一直線上に並んでいるときに最大の吸引力となり, そのポテンシャルエネルギー  $U_M$  は

$$U_M = -\frac{m^2}{2\mu_0 r_c^3} \quad (5)$$

で与えられる. ここに,  $\mu_0$  は真空の透磁率 ( $= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ) である.

次に, ファン・デル・ワールスに基づくポテンシャルエネルギー  $U_V$  は

$$U_V = -\frac{A}{6} \left\{ \frac{2}{l(l+4)} + \frac{2}{(l+2)^2} + \ln \frac{l(l+4)}{(l+2)^2} \right\} \quad (6)$$

である. ここに,  $A$  はハーマー定数 ( $\cong 10^{-19} \text{ N}\cdot\text{m}$ ) である. また,  $l = (r_c/R) - 2$  は粒子の表面間の距離の粒子半径に対応する比を表している.

一方, 表面に長い吸収分子をもつ粒子が互いに接近して, Fig.8 に示すように, 界面活性剤層同士が接触し合っている場合を考えると, 粒子間に反発力が作用することになる.

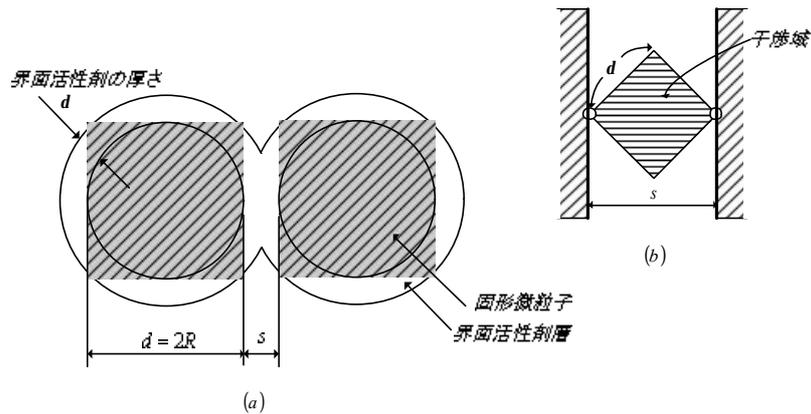


Fig.9 界面活性剤層の重なり合いにより生ずる粒子間相互作用

いま, Fig.9(b)に示すように, 界面活性剤を長さ  $d$  のロッドの一端がジョイントで自由回転しうる状態で固定されていると仮定すると, その反発力のポテンシャルエネルギー  $U_R$  は

$$U_R = 2pR^2NkT \left\{ 2 - \frac{l}{t} - \frac{(l+2)}{t} \ln \left( \frac{1+t}{1+l/2} \right) \right\} \quad (7)$$

で求められる. ここに,  $N$  は単位面積あたりの吸収分子数,  $k$  はボルツマン定数,  $T$  は温度, また  $l$  は界面活性剤層の厚さと粒子半径との比  $d/R$  である.

以上の三つのポテンシャルエネルギー  $U_M, U_V$  および  $U_R$  との粒子間距離の無次元表示  $l$  との関係を探ってみると, Fig.10 の曲線が得られる. この計算結果は粒子径 10nm のマグネタイト粒子が  $d=2\text{nm}$  および  $0.5\text{nm}$  の解明活性剤分子で覆われていた場合で  $N=10^{18}$  分子/ $\text{m}^2$  を仮定している. 図中の破線が式 (1) + (2) + (3) の合計を表している. また, ポテンシャルエネルギーの負の値が吸収力の働く場合に相当している.

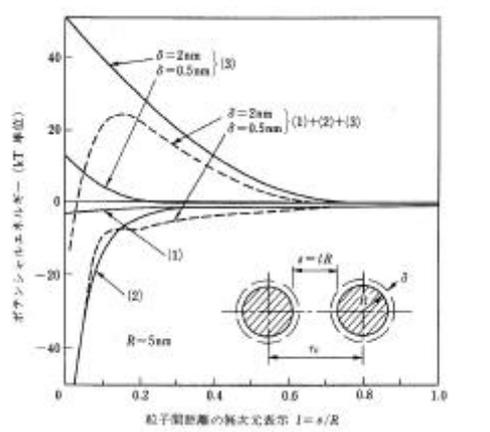


Fig.10 粒子間のポテンシャルエネルギー

これより界面活性剤層の厚さの値が  $0.5\text{nm}$  と短い場合には吸収力に対するポテンシャル障害が生せず、粒子間同士が合体してしまうが、厚さが  $2\text{nm}$  程度の界面活性剤を吸収させた場合には粒子同士の合体を防ぐのに十分な反発力が得られる。

### 3.1.3 ブラウン運動による拡散

粒子同士の合体を防ぐために界面活性剤で被覆された強磁性の微粒子を重力や強い磁場勾配の作用する溶媒中に多量に分散されて場合の安定性について考えてみる。

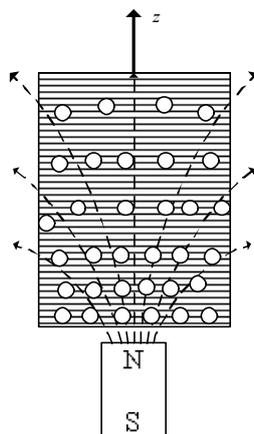


Fig.11 非一様磁場下の粒子の分散

Fig.11 に示すように、溶媒中の粒子が重力の作用により沈降したり、非一様磁場中で強い磁場の方向に粒子が吸引され、粒子の密度分布の片寄りが生じるのを防ぐ必要がある。

いま、簡単のために、静止流体中を半径  $R$  の球形粒子が沈降する際、速度をストークスの抵抗則が成立すると仮定してみる (Fig.12)。ストークスの抵抗則は、粘度  $h$  の流体中をあまり速くない速度で運動する球体に働く抵抗力が速度  $u$  に比例し、その比例係数が  $6\pi h R$  で与えられるというものである。

具体例として、水中にあるマグネタイトの微粒子の沈殿速度を求めてみると、Table1 のようになり、粒子径を小さくすると液体中の滞留時間が粒子径の 2 乗に反比例して長くなることがわかる。また、粒子径を小さくすると、液体分子の乱雑な熱運動によって粒子はランダムな運動を始めるようになる。いわゆるブラウン運動である。最終的には微粒子は全く方向性をもたない複雑な運動を繰り返し、沈降しなくなる。

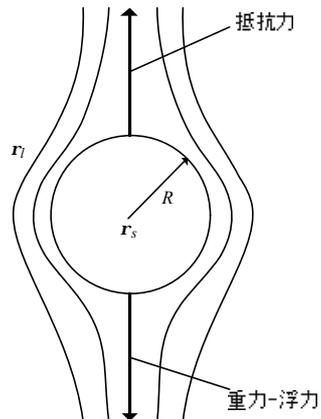


Fig.12 液体中を沈降する球に働く力

Table1 粒子の沈降速度と所要時間

粒子径 (m)	沈降速度 (m/s)	所要時間
$10^{-5}$	$2 \times 10^{-4}$	50 秒
$10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	1 時間 23 秒
$10^{-7}$	$2 \times 10^{-8}$	5.8 日
$10^{-8}$	$2 \times 10^{104}$	580 日

流体中に多数の微粒子を分散させた状態で、粒子の沈降がブラウン運動による粒子の拡散とつりあった定常状態での高さ方向の粒子の数密度分布  $N(z)$  をアインシュタインの関係式を用いてみると

$$\frac{dN(z)}{dz} = \frac{\rho d^3 (r_s - r_l) g N}{6kT} \quad (8)$$

が得られる。ただし、 $d$  は粒子径、 $g$  は重力加速度、 $r_s, r_l$  は粒子と液体の密度、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は温度である。

式(8)より粒子の数密度分布が高さ  $z$  にわたりほぼ一様になる条件、すなわち  $dN/N \leq 1$  を満たす粒子条件は

$$d^3 \leq \frac{6kT}{\rho (r_s - r_l) g z} \quad (9)$$

となる。

つぎに、Fig.11 に示したように強磁性体の粒子が磁場の作用下におかれている場合は、重力のほかに磁気力による粒子の密度の片寄りについて考慮しなければならない。

簡単のために、強磁性粒子が単磁区構造をもつ微小永久磁石とみなすと、粒子には粒子の

飽和磁化と体積,それにその位置での磁場勾配に比例する磁気力が作用することになる.したがって,非一様磁場中で粒子の数密度分布がほぼ一様になる条件は式(9)の重力の代わりに磁気力を用いればよいことになる.前と同様の条件で,通常の永久磁石の影響下にあるマグネタイト粒子(飽和磁化  $M_d = 4.4 \times 10^5 \text{ A/m}$ )を考え,磁場勾配が  $\nabla H = 8 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  となると,安定な分散を得るためには  $d \leq 6 \text{ nm}$  必要となる.逆に,  $10 \text{ nm}$  の粒子が安定に分散するための磁場勾配の許容量を求めると  $\nabla H \leq 10^6 \text{ A/m}^2$  でなければならないことになる.

以上のように,磁場中での粒子の安定な分散を保つためには,粒子径が  $5 \sim 10 \text{ nm}$  のオーダの超微粒子である必要があることが分かる.

## 3.2 磁性流体の特性

### 3.2.1 磁性流体の磁化

磁性流体は強磁性体の微粒子を溶媒中に多量に分散させたコロイド溶液であり,その磁化特性は磁性微粒子自身の磁化特性に依存するほか,微粒子の流体中でのミクロな振る舞いに関係している.さきにブラウン運動について説明したが,溶媒中の懸濁粒子は,並進ブラウン運動以外に,ランダムな回転運動をしている.したがって臨界直径  $d_p$  よりも大きくて粒子内の磁化方向は固定されており,微小永久磁石とみなされる場合でも,粒子自身の回転ブラウン運動により磁化はその方向をランダムに変えていることになる.この状態は臨界直径以下の粒子群が示す超常磁性の状態と同様であり,粒子自身は強磁性の微小永久磁石の状態であっても磁性流体全体としてみれば超常磁性を示す事になる.

磁性流体の磁化についての詳細な理論的考察によると,常磁性体の磁化  $M$  はブリュアン関数を使って表される.

$$M = NmB_J \left( \frac{m_0 m H}{kT} \right) \quad (10)$$

$$\text{ここに, } B_J(x) = \left( \frac{2S+1}{2S} \right) \coth \left( \frac{2S+1}{2S} x \right) - \frac{1}{2S} \coth \left( \frac{x}{2S} \right)$$

(ブリュアン関数)

この式は磁場の作用下で磁気モーメント  $m$  の方向が量子化され,磁場  $H$  とのなす角  $q$  がとびとびの値として求められたものである.式(10)の  $S$  は原子の電子スピンの量子数で,磁気モーメントは  $(2S+1)$  個の方向のみをとることができる.

式(10)において  $S \rightarrow \infty$  の極限をとると,ブリュアン関数はランジュバン関数となり以下の式が求まる.

$$M = NmL \left( \frac{m_0 m H}{kT} \right) \quad (11)$$

$$\text{ここに, } L(x) = \coth x - \frac{1}{x} \quad (\text{ランジュバン関数})$$

ランジュバン関数は磁性流体のような超常磁性を示す粒子の集合体の場合に適用できる

式である。

Fig.13 に磁性流体の磁化特性を示す。(今回使用する磁性流体は,サンプルのため N504 のものと,近い成分で構成されている)

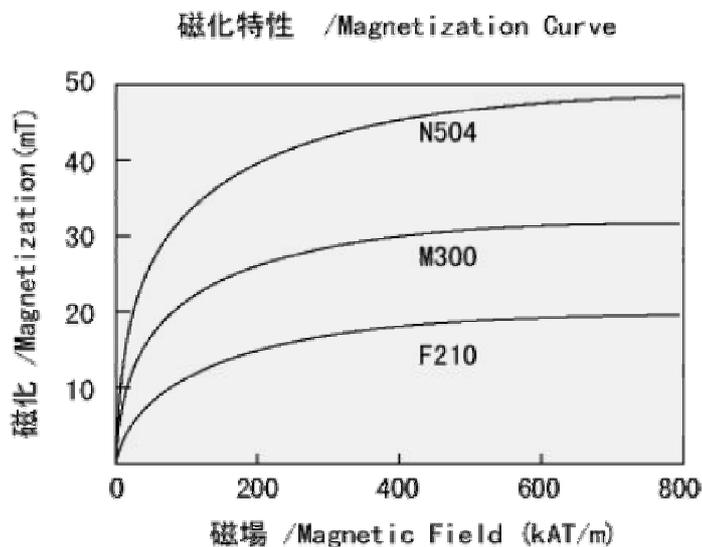


Fig.13 磁性流体の磁化特性<sup>[4]</sup>

磁性流体の磁化特性は式 Fig.13 により定性的に説明できる。すなわち,磁化曲線はヒステリシスを示さず,また,容易には飽和に達しない。

### 3.2.2 レオロジー特性

水や油などの低分子の流体はレオロジー的性質がニュートンの粘性法則によく従うのでニュートン流体と呼ばれている。

ニュートンの粘性流体とは, Fig.14 に示すように,流動する流体中の二つの液面間に作用するせん断応力とずり速度との間に比例関係が成立することを言い,その比 $\eta$ を流体の粘度と定義する。

磁性流体は一種の懸濁液であり,その溶媒は主として水や油などのニュートン流体が用いられるが,界面活性剤として高分子溶液が用いられている上に,磁場の作用下では粒子の振る舞いが流れに影響を及ぼすため,そのレオロジー特性は複雑なものとなる。

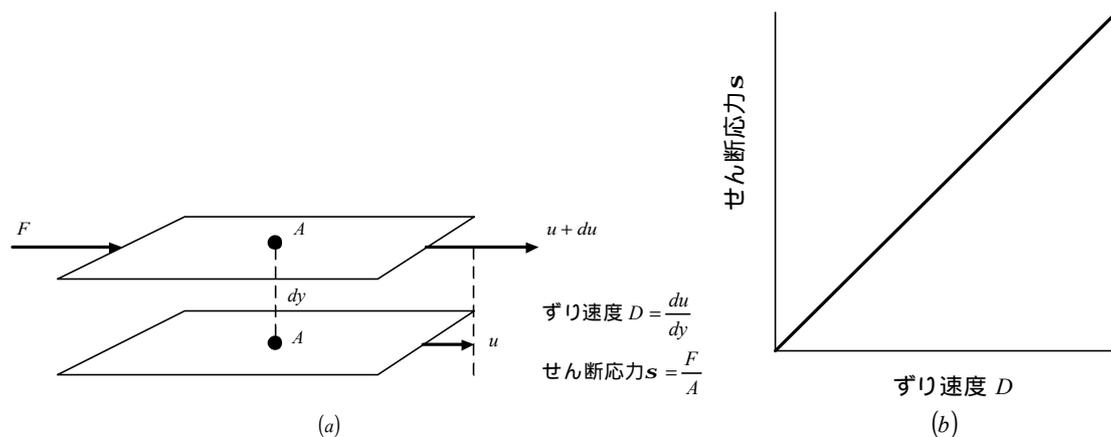


Fig.14 ニュートンの粘性法則と流動曲線

### 3.2.3 磁場の作用する場合

磁場の作用下での磁性流体の粘度は、磁場の作用しない場合に比べ増大する。そこで、粘度増加への影響を明らかにするために、粒子間の相互作用の影響が無視しえるほどに体積濃度が小さい場合を考え、せん断流中で回転している磁性粒子への磁場の影響について考えてみる。(Fig.15)

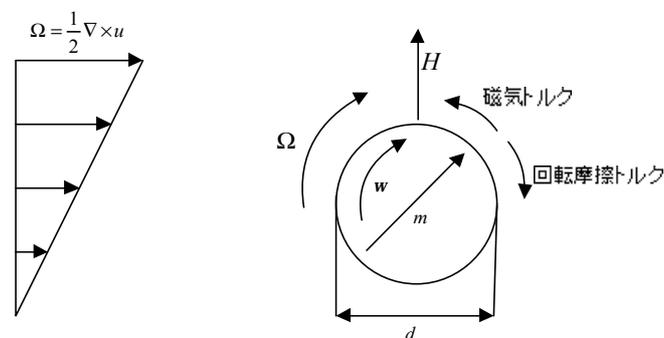


Fig.15 せん断流中の粒子の回転

いま、流体の一様なせん断流（回転角速度 $\Omega$ ）中に磁気モーメント $m$ をもつ直径 $d$ の粒子があり、流体の粘性力のみが作用しているとする、粒子は流体と同じ回転角速度（ $w = \Omega$ ）で回転すると考えられる。しかし、磁場 $H$ がFig.15のように角速度ベクトル $\Omega$ に直交して作用すると、微粒子には磁気モーメント $m$ と磁場 $H$ とのベクトル積に等しいトルクが作用し、粒子の磁気モーメントは $H$ の方向を向こうとするため、粒子の回転が流体の回転に追従できなくなる。その結果、1個の粒子あたり $pd^3h_0(\Omega - w)$ の回転摩擦トルクが発生し、流体内に新たな粘性散逸が生じるため、見かけ上、磁場中では流体の粘度が増加するに相当する。この見かけ上の粘度の増加量は

$$\nabla h = \frac{3}{2} f h_0 F(\mathbf{x}, \Omega_{tB}) \sin^2 b \quad (12)$$

ここに,  $\mathbf{x} = m_0 m H / k T, t_B = 3V h_0 / k T$  は回転ブラウン運動の緩和時間,  $b$  はベクトル  $H$  と  $\Omega$  とのなす角である.

$\Omega_{tB} \rightarrow 0$  で

$$F(\mathbf{x}, 0) = \frac{(\mathbf{x} - \tanh \mathbf{x})}{(\mathbf{x} + \tanh \mathbf{x})} \quad (13)$$

式中の  $F$  は  $\mathbf{x}$  と  $\Omega_{tB}$  の複雑な関数で与えられるが,  $\Omega_{tB} \leq 1$  の場合には,  $\Delta h$  は流体のずり速度に依存しなくなるのでニュートン流体としての粘度特性を示すことになる<sup>[3]</sup>.

以上のことから, 磁性流体の特徴をまとめると以下のようなになる.

流動性をもつ液体の磁性体

磁化された磁性流体は容易に飽和磁化に達しない

強磁場下では磁力線に沿って配向し, ある厚みをもつ

強磁場下では粘度特性を有する

### 3.2.4 一般的な用途例

磁性流体は, その形状からさまざまな応用が考えられ, 代表的なものとして下記の項目が挙げられる.

#### (1) 磁性流体シール

原則的には磁性流体が「磁石にくっつく」という性質を利用したものである. 磁石によって回転軸(シャフト)と磁極片の間に構成される磁力線に沿って磁性流体が保持され, 磁性流体のシール膜が形成されことにより, 軸受けから発生するオイルミストなどが出力軸側に飛散することを防止する.

#### (2) 物体の比重選別(物体の浮揚力)

磁性流体に磁界を加えると, その位置に応じた磁場フィルタを形成する. これは一種の物理的透過膜のようなもので, この中に非磁性体を浮遊させると, その比重に応じて物体を選別することができる. これを積極的に応用したものが, 磁性流体による比重選別機である.

#### (3) 磁性インク印刷

磁性流体を磁性インクと混ぜ合わせ, これをインクジェット印刷などに利用することができる.

#### (4) 磁気回路内の性能向上

モータおよびスピーカ等の駆動部,またはダンパー部に磁性流体を用い,任意の静動力を与える一種の可変ダンパーとして利用することができる. なお,磁性流体は発熱部の熱放散ようとして使うことも可能である.

#### (5) 磁性流体シート(磁気センサシート)

磁性流体をフィルム状のシート内に分散させたもので,商品名としてはマグネット・スコープ(Magnet Scope),マグネチック・ビューワー(Magnet Viewer)などと呼ばれていて,多極着磁されたマグネットの着磁パターンを表す. なお磁性流体を応用した磁気センサは視覚的に磁気エネルギーの存在を確認することができる<sup>[3]</sup>.

### 本研究で使用する磁性流体

本研究は株式会社シグマハイケミカル社が製造・サンプル販売している磁性流体(イソパラフィンベース)50ml(¥6000円)の物を使用する. また,サンプル品のため正確な比透磁率等のデータがないため,本研究で行う実験により明らかにする.

## 第4章 磁性流体を用いたダイナモの考案

### 4.1 ダイナモに磁性流体を使用する利点

#### 4.1.1 漏洩磁界の削減

漏洩磁界が減少する原理を Fig.16 と Fig.17 に示す。回転子・固定子間のギャップに磁性流体を挿入することでギャップの距離が縮まるため、エネルギー密度が大きくなる。そして磁性流体は比透磁率をもつので磁路を形成し、空気中と比べ漏洩磁界が減少する。磁石を近づければ磁石に引き寄せられるが、その際、磁石のN極 - S極に構成される磁力線に沿って配向し回転子の磁化力がある限り吸着し続け、メンテナンスフリーとなる。

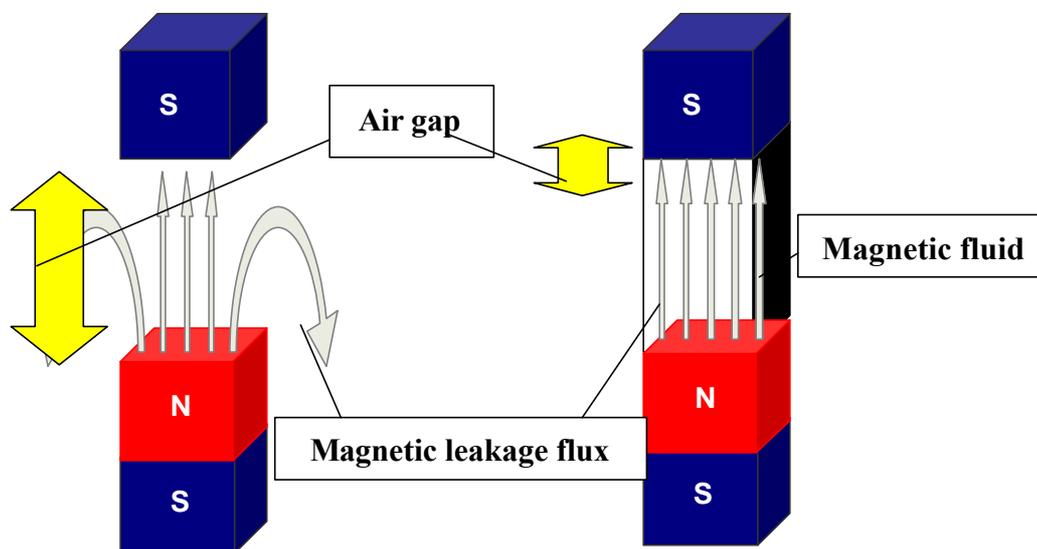
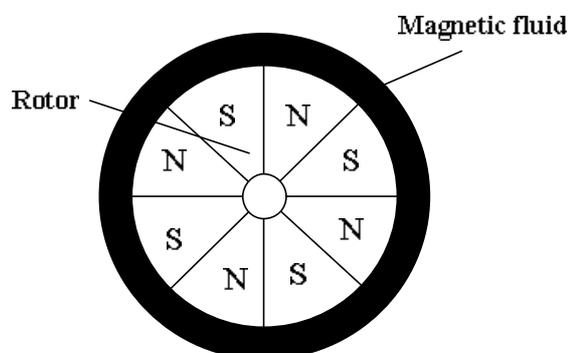


Fig.16 Increase of magnetic flux density



#### 4.1.2 ステータコイル内の磁束増加

コイル内を通過する磁束を高めるためには,1.3 で述べたように回転子と固定子間の磁束を高める必要がある。固定子の磁化を高めるためには,回転子から発せられる漏洩磁界を減少させる必要がある。

固定子に回転子から発せられた外部磁界

$$B_0 = \mu_0 H \quad (14)$$

を与えたとき,固定子の磁化は外部磁界  $B_0$  に比例すると考えて,次の関係が定義できる。

$$J = c \mu_0 H \quad (15)$$

このとき  $J$  を磁化の強さ,比例定数  $c$  を磁化率という。固定子は強磁性体の鉄であるから,磁化率が非常に大きい。固定子内の磁束密度  $B$  は外部磁界  $B_0$  と磁化の強さ  $J$  から,次のような関係式になる。

$$B = \mu_0 H + J = \mu_0 H + c \mu_0 H = (1 + c) \mu_0 H \quad (16)$$

ところで,磁束密度  $B$  と磁界  $H$  の間には次のような関係があるので

$$B = \mu H \quad (17)$$

式(16)をこの式と対応させて,次の関係式が求まる。

$$\mu = (1 + c) \mu_0 \quad (18)$$

つまり  $(1 + c)$  が磁性流体の持つ比透磁率  $\mu_r$  となり,固定子の磁束密度は

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (19)$$

となる<sup>[5]</sup>。このような関係から回転子と固定子の間に比透磁率をもつ磁性流体を挿入する事で固定子内の磁束密度が高まると考えられる。

4.1 と 4.2 から本研究は,ダイナモ内の回転子と固定子の間に磁性流体を挿入する事で,回転子から発生する漏洩磁界を減少させ,コイル内を貫く磁束が高まることにより,起電力  $V$  が増加すると考えた。

## 第5章 ホール素子を用いたガウスメータの製作

漏洩磁界の減少を検証するため、ホール素子を用いたガウスメータを製作した。

### 5.1 ホール素子の原理

ホール素子は、磁界を電圧として出力する半導体磁気センサである。Fig.18にホール素子の原理図を示す。半導体に電流を流すと、内部の電子は電流の方向と逆方向に移動する。ここで外部から磁界を加えると電子に電磁力が作用し運動方向が曲げられる。この電磁力をローレンツ力と呼ぶ。

このローレンツ力はフレミングの左手の法則に従い、半導体内部で移動する電子に電磁力が作用すると、電流と磁界の双方に垂直な方向に電圧が生じる。

この現象を「ホール効果」(Hall effect)、この電圧を「ホール電圧」と呼び、ホール電圧 $V_H$ は、磁界の方向が逆になれば極性も逆になる。

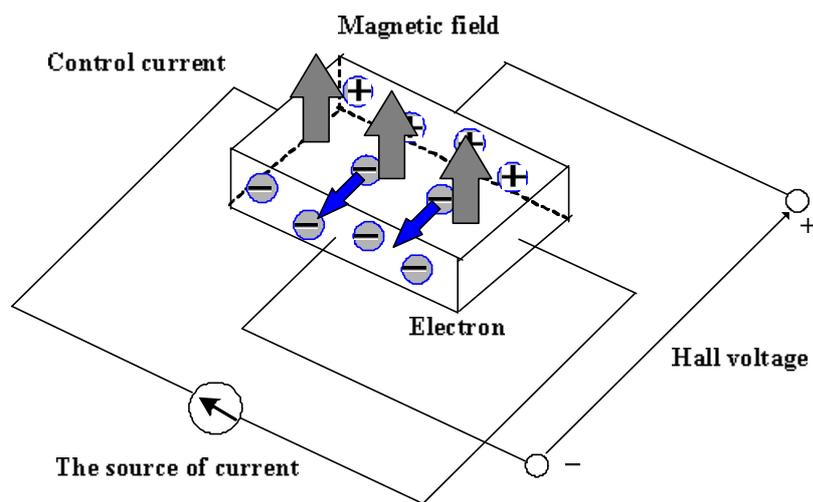


Fig.18 Principle of hall device

## 5.2 ホール素子の特性

本研究で使用するホール素子THS119のホール電圧 $V_H$  [V]と制御電流 $I_C$  [A]の関係は電流の増加とともに電子の密度が増加し, $V_H$ は $I_C$ に比例して直線的に増加する。そして, $V_H$ と磁束密度 $B$  [G]の関係は磁束密度の増加にともない,電子にローレンツ力がより強く働き, $V_H$ は $B$ に比例して直線的に増加する。

以上からホール電圧は制御電流と磁束密度に比例し,次式で表される。

$$V_H = k_H I_C B \quad (20)$$

ここで, $k_H$ を積感度と呼ぶ。ホール素子の材質や形状によって決まる比例定数である。ちなみに単位は[mV/mA・kG]である。

## 5.3 回路設計

ホール素子を使用したガウスメータの回路図をFig.18に示す。磁気の変化によってホール電圧が変化し,その電圧変化をインスツルメンテーション・アンプで増幅して出力する回路となっている。また,ホール素子に一定の制御電流を流すため,定電流回路を使用している。

出力電圧 $V_{out}$  [V]と磁束密度 $B$  [G]との関係は, $V_{out} = 1000 B$ となっていて,出力1Vが1000Gに相当する。また,この回路はマイナス電源によってマイナス電圧も出力できるため,磁界の強弱だけではなく磁極の判別も可能である。

### 5.3.1 定電流回路の設計

定電流回路はOPアンプ $I_{C1a}$ とPNPトランジスタ $T_{r1}$ , $R_1$ で構成されている。一定の電流が $R_1$ から $T_{r1}$ のコレクタを通して流れる。また,バーチャル・ショートにより

$$I_C = (V_{CC} - V_{ref}) / R_1 \quad (21)$$

となる。

THS119の入力端子間の内部抵抗はロットによってばらつきがある。データシートに記載されている制御電流の推奨値は5mAであるが,3Vで駆動するには電流値が大きすぎるため,本回路では推奨値の1/2と設定した。

### 5.3.2 インスツルメンテーション・アンプの設計

ホール素子の变化を増幅する回路として,インスツルメンテーション・アンプ(instrumentation amplifier)を使用した。このアンプは,計装用増幅回路とも呼ばれている。高入力インピーダンスであるため,信号源抵抗の高いセンサ出力などの信号を高精度に増幅する。

入力電圧( $V_H$ )と出力電圧 $V_{out}$  との関係は,次式で示される .

$$V_{out} = \frac{R_a}{R_c} \left( 1 + \frac{2R_a}{R_b} \right) V_H \quad (22)$$

ところで,  $k_H = 1.6\text{mV/mA} \cdot \text{kG}$ ,  $I_C = 2.5\text{mA}$ ,  $B = 1000\text{G}$ として(20)に適用すると,  $V_H = 40\text{mV}$ となり,(22)から,  $R_c = R_d = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_a = 12\text{k}\Omega$ ,  $R_b = 1\text{k}\Omega$ と設定すれば,アンプの増幅度が25になり,ちょうど磁束密度が  $B = 1000\text{G}$ のとき出力電圧 $V_{out}$  となる . 動作時には磁界の値がゼロの場合には,ホール電圧が生じないことが望ましい . しかし,実際には形状のずれなどから多少の不均衡電圧が生じる .

また,OPアンプのオフセットや,インストルメーション・アンプを構成する抵抗のばらつきなどからも電圧が生じる . 磁界がゼロのとき,半固定抵抗  $V_{R_1}$  によって出力電圧 $V_{out}$  を0Vに調整する必要がある<sup>[6]</sup> .

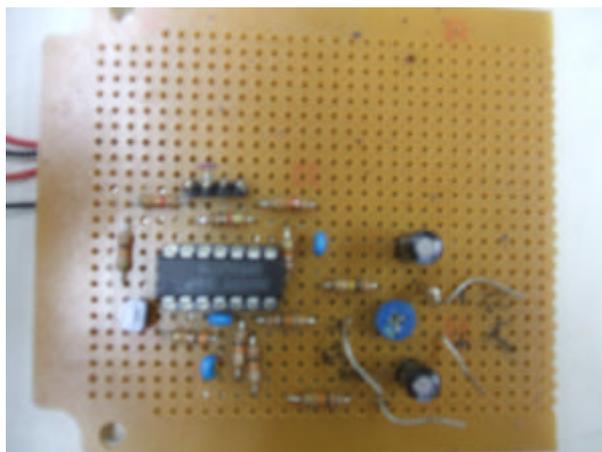


Photo.3 Manufactured gauss meter

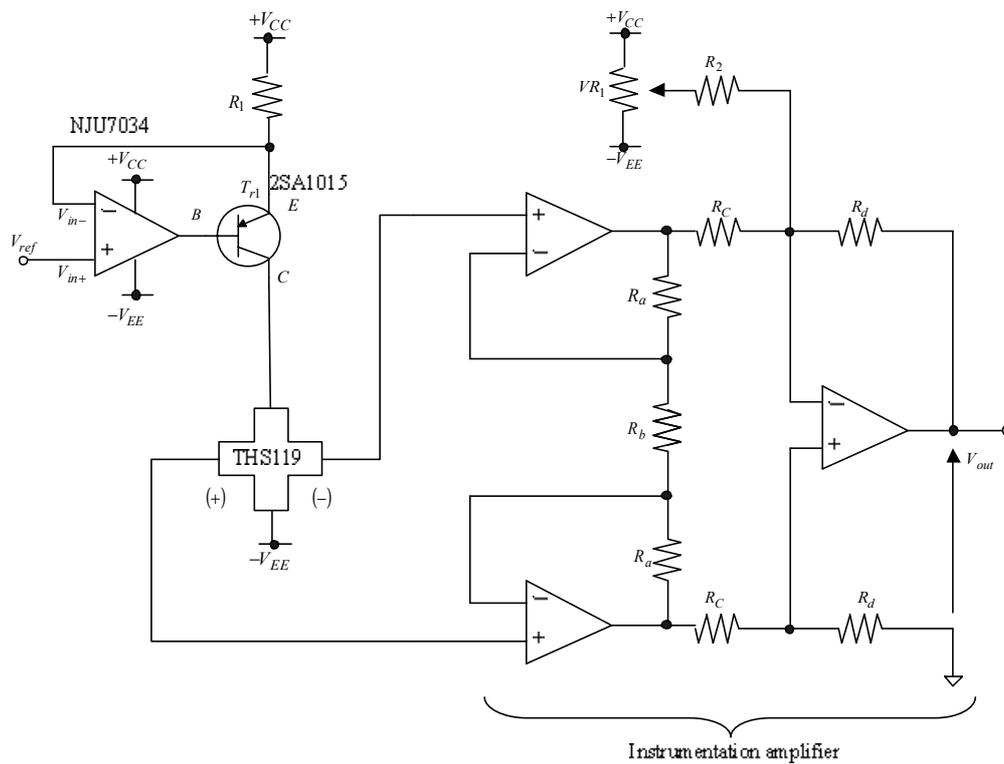


Fig.19 The circuit diagram of the developed gauss meter

## 第6章 磁性流体の特異実験

### 6.1 実験システム

4.2で示した回転子と固定子の間に磁性流体を挿入する事で磁束密度の向上を検証するために,シグマハイケミカル社がサンプル販売している磁性流体の特性を 5.で作製したガウスメータを用いて調べる.

実験に用いる装置は以下の通りである

- ・ 磁性流体 (シグマハイケミカル社)
- ・ ガウスメータ
- ・ ケース (ステンレス製)
- ・ DC電源 (KENWOOD製PR36-1.2A)
- ・ オシロスコープ (YOKOGAWA製DL1540CL)
- ・ プローブ: 1本
- ・ ワニ口クリップ: 2個

### 6.2 実験方法

Photo.4に実験の様子を, Fig.20に装置の配置を示す.装置の配置は永久磁石から発せられた磁界が磁性流体中を通過し,ホール素子により磁束を検出できる配置にしてある.

ちなみに磁性流体は液体であるので磁界の影響を受けないケース内に挿入した.5.で作製したガウスメータを用い出力電圧を検出することで,磁性流体の有無での磁束密度を比較する.

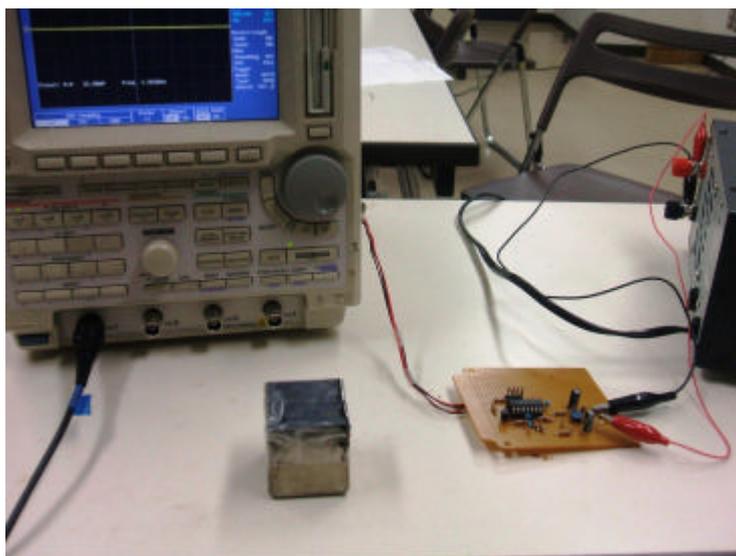


Photo.4 Experimental situation

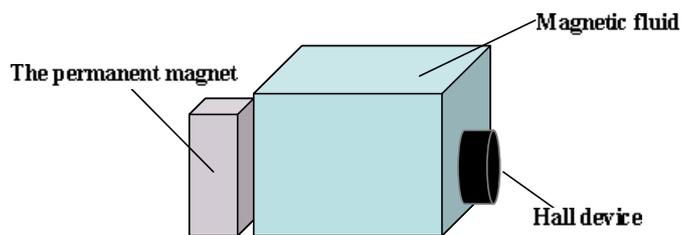


Fig.20 Experimental situation

### 6.3 実験結果

磁性流体の有無での出力電圧を比較した結果を Table2 に示す。磁性流体を挿入したときの出力電圧値は無いときと比べ約 1.5 倍となった。

Table2 Comparison between magnetic fluid is and none

	None	Magnetic fluid
Output Voltage[mV]	70	110

### 6.4 検証

4.1 で見込んでいたとおり、磁性流体を挿入する事で、漏洩磁界を防ぎ磁束密度を高めた。永久磁石である回転子から発せられた磁界がギャップ間に挿入されている磁性流体中を通過する事で空気中と比べ磁束を高める事が言える。ゆえに、固定子中を通過する磁束が向上し、起電力が増加すると考えられる。

## 第7章 リム・ダイナモ実験

### 7.1 実験システム

本研究はリム・ダイナモ内の回転子と固定子間に磁性流体を挿入することで発電量の検証を行う。

実験に用いる装置は以下の通りである。

- ・ 磁性流体（シグマハイケミカル社製サンプル）
- ・ リム・ダイナモ（株式会社サギサカ製6V2.4W）
- ・ 卓上ボール盤（RYOBI TB-1131K）
- ・ DC 電源（KENWOOD 製PR36-1.2A）
- ・ ワニ口クリップ：2個
- ・ オシロスコープ（YOKOGAWA製DL1540CL）
- ・ プローブ：1本
- ・ 万力：2個
- ・ セメント抵抗（0.1,0.2,0.5,2,5,10,15,30,50,100,150,200,500,1k,2k）

### 7.2 実験方法

リム・ダイナモの回転軸と卓上ボール盤を接続することで、卓上ボール盤からの回転をリム・ダイナモに伝達し発電させる仕組みとなっている。卓上ボール盤の回転速度は可変式になっている。回転数と出力電圧との比較実験では、リム・ダイナモの仕様はJISによれば定格負荷は150とされているので、これに基づき負荷抵抗値を150と定め、回転数を変化させ起電力を比較する。

また、発電量を比較するため V-I 特性実験を行う。リム・ダイナモの回転速度を最も低速な  $510\text{min}^{-1}$  の速度で回転させた。これは自転車が時速 5 キロほどの速度で走っているとき、ほぼ同じ回転数である。リム・ダイナモの発電量（V-I 特性）を得るためにリム・ダイナモの出力先である抵抗器は可変とする。Fig.21 に回路図を示す。回転子と固定子間に磁性流体を挿入したリム・ダイナモと、挿入していないものとの V-I 特性から発電量を比較検討する。

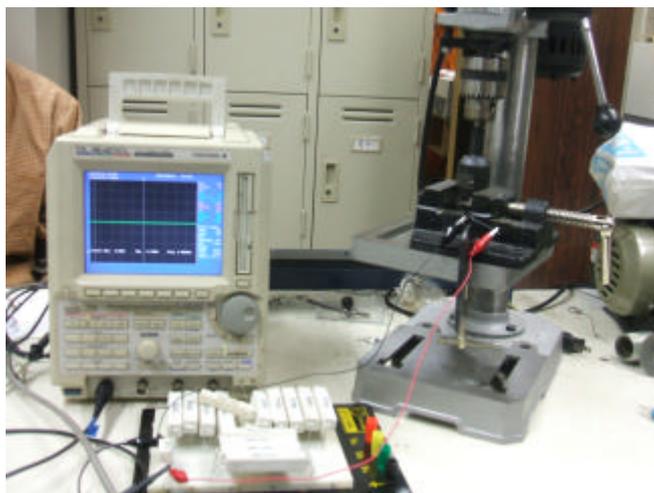


Photo.5 Experimental situation

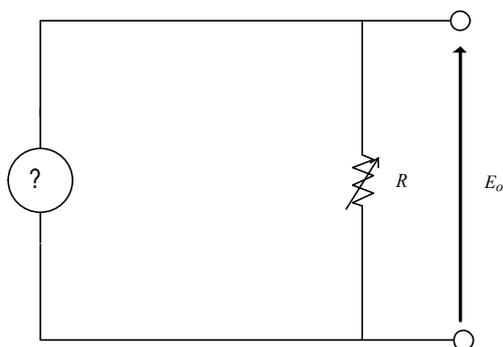


Fig.21 Experimental situation

### 7.3 実験結果

回転数の比較と V-I 特性の表とグラフを Table3, Fig.22 と Table4, Fig.23 に示す. 回転数と出力電圧の結果では, 磁性流体が挿入されているリム・ダイナモは回転数が増すに連れて飽和に達してしまった. また, V-I 特性のグラフから発電量の変化は見られなかった.

Table3 Comparison between rotational speed and output voltage

Rotational speed [rpm]	Magnetic fluid	None
0	0	0
515	5.12	5.6
915	7.6	8.4
1430	10.2	11.6
1950	11.8	13.8
2580	11.8	16

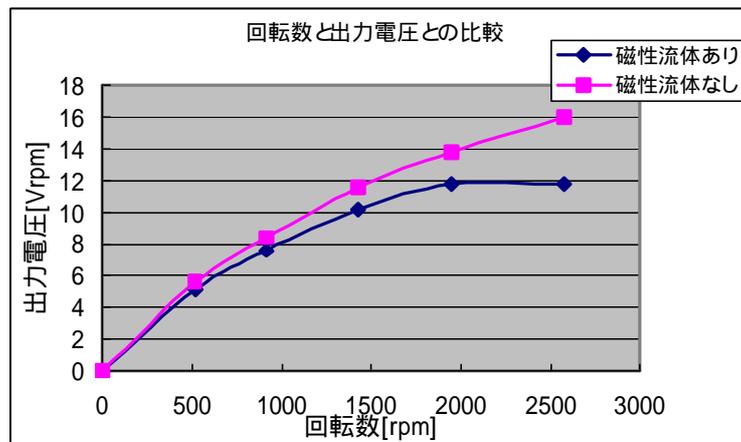


Fig.22 Comparison between rotational speed and output voltage

Table4 V-I characteristic

R[O]	None		R[O]	Magnetic fluid	
	V[V]	I[A]		V[V]	I[A]
0.1	0.1393	1.3933	0.1	0.1373	1.3733
0.2	0.2883	1.4417	0.2	0.2643	1.3217
0.5	0.6867	1.3733	0.5	0.6507	1.3013
2.0	2.1867	1.0933	2.0	2.0600	1.0300
5.0	3.6267	0.7253	5.0	3.6933	0.7387
10.0	5.0533	0.5053	10.0	5.0533	0.5053
15.0	5.6867	0.3791	15.0	5.5600	0.3707
20.0	5.9200	0.2960	20.0	5.8533	0.2927
30.0	6.4267	0.2142	30.0	6.2533	0.2084
50.0	6.6000	0.1320	50.0	6.5333	0.1307
100.0	6.9333	0.0693	100.0	6.9600	0.0696
150.0	7.1333	0.0476	150.0	7.0000	0.0467
200.0	7.1333	0.0357	200.0	7.0333	0.0352
500.0	7.2000	0.0144	500.0	6.9933	0.0140
1000.0	7.3333	0.0073	1000.0	7.0267	0.0070

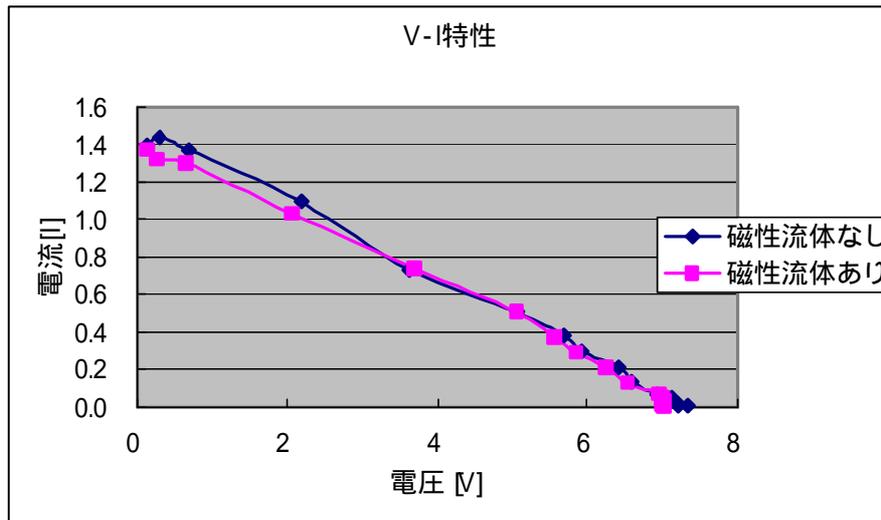
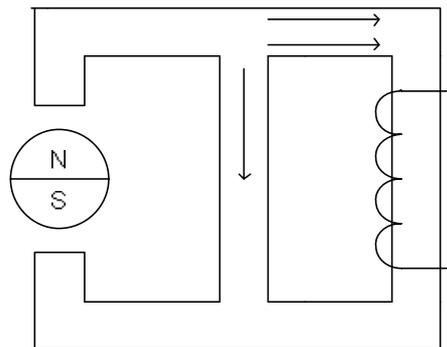


Fig.23 V-I characteristic

#### 7.4 検証

7.3 より磁化された磁性流体は,ある程度の粘度性を有し磁束に沿って形を維持する事が出来るが,回転子が高速回転することにより,吸着力が遠心力に耐えられず,磁性流体の分布の偏りや飛散が起きてしまった. Fig.24 に磁気回路の短絡を示す. 飛散した磁性流体により固定子同士が磁気回路的に短絡し,コイル内へ通過するはずだった磁束が漏洩する事で,起電力が低下してしまったと考えられる.



## 第8章 むすび

7.3 よりリム・ダイナモの回転子と固定子間の漏洩磁界を削減するため、磁性流体を挿入し、起電力の検証を行ったが、磁性流体を挿入すると起電力が低下してしまった。低下した原因としては回転子に付着した磁性流体が飛散し、Fig.2 で示した固定子側の  $a$  と  $b$  の磁極同士が磁気回路的に接触をしてしまった結果、相殺されて起電力の低下をまねいたと考えられる。つまり、回転時の磁性流体の分布の偏りや、磁性流体と回転子間で吸着力より回転による遠心力が上回ると流体が飛散し、新たな漏洩磁界が発生してしまったと考えられる。

また、磁性流体はスパイク現象を引き起こす。Photo.6 にスパイク現象を起こした磁性流体を示す。6.2 では磁性流体とホール素子の隙間が無かったため、磁性流体は磁性体としての役割を果たし、磁束の増加がみられた。しかし、磁性流体とホール素子内に空間があった場合、スパイク現象から新たな磁路が形成され、磁界の漏洩が発生し、磁束の低下につながる。そのため、回転子と固定子間は磁性流体で満たす必要がある。つまり、固定子同士が磁気回路的に短絡しないようシールド等で覆い、磁性流体を満たす事で、コイルを貫く磁束の増加が見込まれる。



Photo.6 Magnetic Fluid

## 参考文献

- [1]竹川敏夫：永久発電機を考える,pp41, 2002
- [2]漆谷正義：自然エネルギーの活用にチャレンジ,トランジスタ技術,Vol.493, pp203-204, 2005
- [3]神山新一：磁性流体入門,pp12-19
- [4]シグマハイケミカル社ホームページ:  
[http://www.sigma-hc.co.jp/magnetic\\_fluid.html](http://www.sigma-hc.co.jp/magnetic_fluid.html)
- [5]粉川昌己：電磁気学の基本マスター,電気書院,pp20-22
- [6]島田義人：ホール素子を用いたガウスメータの製作,トランジスタ技術,Vol.465, pp108-110, 2003

## 謝辞

本研究を進めるにあたり,多大なるご指導及び貴重な助言を頂きまして渡辺嘉二郎教授,小林一行助教授,笹野睦雄講師に深く感謝いたします。特に指導教授でもある渡辺嘉二郎教授には,多くの叱咤激励を頂きました。私の力が足りないが故に研究だけではなく家庭環境についても助言して頂きました。最後まで,ご迷惑をお掛けして申し訳ありませんでした。この大学院生活は,今後私が生きていくうえで大変大きな経験となると思います。有難うございました。

そしてM2の同級生達!大変お世話になりました。私の個人的な理由で多くの仲間には迷惑をかけてしまったと思います。もっと沢山の付き合いの場で一緒に話せたらと,今更ながらに悔やんでいます。今後はその時間を取り戻すかのごとく,色々話せたら幸いです。今まで本当にありがとう。これからも宜しくお願いします。

私に関わってきたロボット班・ビークル班の仲間達,ありがとう。最後まで諦めない精神力は,この場で身についたのだと思います。同じ目標に向かって,時には意見がぶつかったり,時には励ましあったり...言葉では表現しきれないほど,沢山の経験をさせてもらいました。一緒に成し遂げた仕事は,これからも永遠に私の自信と力になると思います。

最後に,特に一緒にいた時間が最も長かったと思われる蛭田君,本当にお世話になりました。研究のことだけではなく,私生活の面でも沢山話し明かしましたね。ここまでやってこれたのは,蛭田君の支えがあったからです。苦境に立ったときは,いつも蛭田君が励まし,勇気付けてくれました。はた目から見たら少し変わったコンビでしたが,最高のコンビでしたよ。本当にありがとう。