

## 1章 はじめに

近年、電子デバイスの小型化、高機能化、高密度実装化に伴い、実働状態での検査の要求が強くなっている。これは生体検査と同じく、非破壊・非侵襲での検査が前提となっており、超音波、X線、EMI、磁場などの検出手段が用いられている。中でも磁場を用いた検査は電流動作をするデバイスでは非常に有効な手段であるにもかかわらずデバイスの小型化に対応する高分解能化がはかれていないのが現状である。

本研究では、微小な高感度磁場センサを可動とすることで数少ないセンサ数で多くの観測点を得ることを目的とし、新しいアクチュエーター型マイクロセンサの可能性を研究した。

### 1-1 研究背景

近年の電子機器における小型、軽量化に伴い、内部搭載される回路デバイスも一層の小型化、高密度、多層化が進んでいる。

現在、この小型・高速の回路デバイスの試験評価にはマルチプローブ形のピンテスタが用いられている。これは、回路の要所要所にプローブを接触させるための場所を設け、その場所にプローブを接触させて測定回路に接続するものであるが、プローブには以下の問題がある。

- ・ピンテスタで測定されるのは主に電圧モードの信号であり、電流動作をするデバイスには不適
- ・高速デバイスでは、プローブを当てることで回路の浮遊容量が変化するため、特に高周波での動作が異なってくる。そのため、通常はシミュレーションで評価し、実働状態での評価は困難である。
- ・三次元デバイスでは場所の引き出しが設計上の制約となる。現状の2次元高密度デバ

イスでも困難な場合があり、三次元では任意のデバイスチェック点を引き出すのは不可能に近い。

そのため、動作状態のシステムの状態をモニタリングするには接触方式では限界があり、新しい技術が要求されている。要求される評価技術としては、非接触でモニタリングできることや、立体空間分解能が高いこと、そして電流モード動作が評価できること、である。そのため、非接触で厚さ変化などの抵抗異常も検出できる方法として渦電流法センサの研究が盛んにされており、ミアンダコイルと8の字コイルによるプローブが提案されている。<sup>1)</sup>この方法では検出コイルを配線、つまりは磁場源に沿って走査し、コイルを貫く磁場を検知するものである。しかしこの方法では回路デバイス全体に走査する必要があり、走査時間やセンサの位置決め精度が問題として生じてくると考えられる。

そこで本研究では、新たな回路デバイス中の断線や故障等の異常個所を検出するセンサとして加工の容易さ、感度の面から薄膜磁場センサを取り上げることにした。このセンサも渦電流型センサと同様に回路デバイスの回路に流れる電流に伴った磁場を検出ものであり、非破壊・非侵襲での高感度な測定を行うための磁場センサとして期待できる。

## 1-2 研究目的

本研究で対象とする2次元もしくは3次元空間での高精度な測定を考えた場合、一つのセンサでその空間を補うということは機械的、電気的な処理の面からも非常に非効率的である。そこでセンサシステムを考案する上で磁場センサをアレイ化して全体の走査を少なくし、短時間で広範囲の測定が可能となればその利便性も高まると考えられる。しかし、アレイセンサは、空間分解能を上げるにはセンサ間の距離を近づけなければならないが、同時にセンサ間の距離に依存した干渉を引き起こしてしまう。マトリックス解析<sup>2)-3)</sup>には測定点の数が多いことが不可欠であり、局所的な空間分解能を上げるために個々のセンサを微動できるアクチュエータを考案した。それによりセンサ間の距離を制御することができ、さらに全体のセンサ数も減らせる可能性があると考えられ、アレイセンサの分解能に関する設計制約が緩和されることになる。図1-1にそのモデル例を示す。

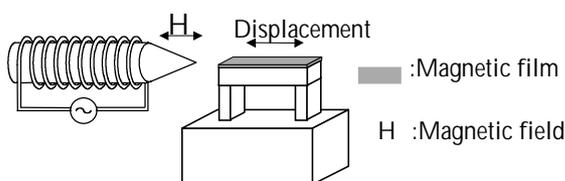


図 1-1 アクチュエータモデル例

このアクチュエータの構成材料は複合材料で、センサとなる Ni-Fe と可動性のある材料から成る。これにより材料特性が任意に変更できる。

本研究では、このセンサー一体型アクチュエータについてその特性を評価し、適用可能性を検討していく。そして、薄膜構造型の磁場センサを作製してその動特性（電気的特性）を解析することを目的としている。その特性

を解析することは、回路基板の欠陥箇所を検出するのに十分なセンサ及びそのシステムの設計を行う上での重要な要素となる。

## 2章 原理

### 2-1 磁場センサの選定及びその原理

#### 2-1-1 磁場センサの選定

磁場センサの特徴としては非接触での検出が可能であるためその用途は様々であり、それぞれの用途に適したセンサが用いられている。本研究でも回路基板中からの磁場を検出するためには感度として  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  [G] の性能が望まれる。そのため、先ず主な磁場センサの種類を挙げ、そこから最適なセンサを適用することにする。

表 2-1 に主な磁場センサの種類とその特性を示す。

表 2 - 1

センサ種類	感度[G]	サイズ	温度特性
HFMR	$10^{-6}$	小	
薄膜 MR	$10^{-4}$	小	
GMR	$10^{-5}$	小	
ホール効果	$10^{-3}$	小	×
コイル	$10^{-6}$	大	
FG	$10^{-6}$	大	
SQUID	$10^{-11}$	大	×

この中でも特に、HFMR、MR、GMR は磁性体を用いたセンサで、ホール効果、コイル、フラックスゲートなどは電磁センサとして分類できる。センサとして最も感度が良いのが SQUID で生体磁気などの非常に微弱な磁場を検出するのに用いられている。しかし、この原理は常温での使用が不可能かつ非常に高価であるため実用的でない。ホール素子センサは安価ではあるが感度が最も低く、原理上素子に磁場を貫通させなくてはならないため、素子面積の大きさによって磁場の減衰を精度良く検出することが困難になる。コイルやフラックスゲートは感度は高いがセンササイズが大きくなってしまい空間分解能の低下は否めない。また、これらは電磁誘導型のセンサで出力電圧は微分的になり、磁束の時間変化

量に比例するため磁気エネルギーの時間的変化が無い場合は、磁場を検出することができない。コイル形状は極力小さなコイルを製作する必要があるため加工に難がある。

HFMR や薄膜 MR はセンサの薄膜微細加工が容易であるため大量生産にも適しており、且つ、感度も良い。目的とするセンサとしては最も適したものであると言える。一方 HFMR の研究<sup>4)-7)</sup>も盛んに行われているが、その多くがアモルファス材料を用いているため高価なものになってしまう。また、その薄膜構成も積層型のセンサが多くを占めている。これらのセンサは磁電変換型であり静磁場での検出も可能である。

以上の観点から本研究では薄膜 MR センサを用いることにし、センサに使用する磁性材料には従来 MR センサで用いられてきた Ni-Fe を用いることにする。また、同じ Ni-Fe で構成する HFMR センサは原理上 MR センサの延長線上に位置するものでもあるため、製作していくセンサが良好な MR 特性を得られれば高価なアモルファスや積層構造のセンサではなく Ni-Fe の単層膜で HFMR 特性が得られる可能性もあり、センサ感度の向上が期待できる。

#### 2-1-2 センサ原理

MR センサの原理である異方性磁気抵抗効果とは強磁性体の一部において観測され、磁場の印加に伴い、自発磁化と電流方向とのなす角度によって抵抗が変化する現象である。この原理を利用した MR ヘッドを例にそれを図 2-1 に示す。

磁化困難軸方向に外部磁場  $H$  が加わると、磁化回転により強磁性膜の電気抵抗が変化する。この時の比抵抗の変化は、電流ベクトルと磁化ベクトルの成す角を  $\theta$  として

$$R=R_0+ R\cos^2 \theta \quad \dots(2-1)$$

$R_0$  : 初期抵抗

と表せる。2-1 式電流ベクトルと磁化ベクトルが平行になった場合が抵抗最大で、直交した場合には抵抗は最小になる。ここで  $R$  は最大抵抗変化率であり、代表的な Ni-Fe では 2~3% 程度である。

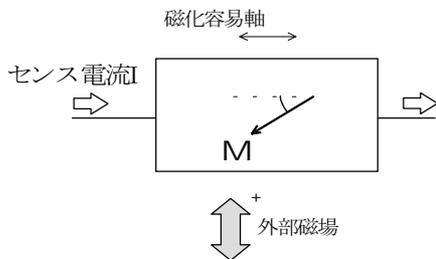


図 2-1 MRヘッド検出原理モデル

次に、本研究で用いる異方性磁気抵抗効果を用いた磁場検出原理のモデルを図 2-2 に示す。

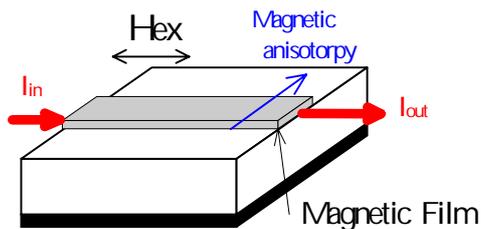


図 2-2 MR センサ

センサ素子の幅方向に容易軸を持つ磁性膜に、長手方向に電流を流し外部磁場  $H_{ex}$  を容易軸と直交する方向に印加する。この時外部磁場に依存して素子の抵抗が変化することにより出力電圧の変化から外部磁場  $H_{ex}$  を検出することができる。なお MR センサには線形性を出すため、直流磁場をバイアスさせて動作させる。また外部磁場の極性についても検出可能である。

そしてこの磁場検出原理から目的とする電流検出を行うには図 2-3 に示す検出原理で検知する。

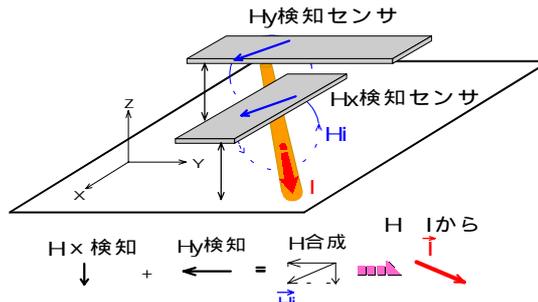


図 2-3 磁場 - 電流検出原理

導線に電流  $I$  が流れていてその電流に伴った磁場  $H_i$  が存在する状態において、ベクトル  $H_i$  をそれぞれ  $H_x, H_y$  方向に感度を持った磁場センサで  $H_i$  の  $x, y$  成分を検知し、合成する事でベクトル  $H_i$  が検知できる。また、電流  $I$  と磁場  $H_i$  は直交関係にあるため導線に流れる電流ベクトル  $I$  が検出できるというものである。

## 2-2 アクチュエータの選定及び動作原理

### 2-2-1 アクチュエータの選定

アクチュエータとして求められることは微小距離をいかに精度良く駆動できるかである。現在ではさまざまなアクチュエータが開発されているが従来からある主なアクチュエータとしては

- 圧電アクチュエータ
- 静電アクチュエータ
- 磁歪アクチュエータ
- 磁気アクチュエータ

等が挙げられる。圧電アクチュエータとはアクチュエータを構成する圧電セラミクスが電場を印加することによって伸縮したりする性質を利用したアクチュエータであり、一般的な特徴としては、変位分解能が高く(数 nm 単位)大きな力が発生でき、応答性に優れる(数 kHz)などが挙げられる。圧電アクチュエータには基本的な動作原理から積層型とバイモルフ型に分けられる。それぞれの特長として

は前者が電圧印加方向と平行方向に伸縮するもので変位量が小さく発生力大きい。後者は電圧印加方向と直角方向の伸縮を利用するもので変位量は大きくとれるが発生力が小さい。

だが、どちらのタイプも駆動電圧が数百 V 程度必要となってしまう。

静電アクチュエータについてはその発生力は極板間距離の 2 乗に反比例し、印加電圧の 2 乗に比例する。この発生力は極板の面積の関数となるため微小化に有効であるが、反面、極板間距離の精度を高めないと高精度な位置決めはできない上、距離を小さくしないと大きな力は得られない。

磁歪アクチュエータについては、磁歪素子は変位量は小さいが、外部の交流磁場の変化によって、非接触で素子に変化を生じさせることができるのでケーブルレスでアクチュエータとして作動するという特徴を有している。しかし、このアクチュエータは磁場方向に伸縮するものであり本研究のアクチュエータとして求める平行移動等の動きには不向きである。

磁気アクチュエータについては圧電方式のような大電圧は必要とせず、静電型のように距離の高精度な位置決めも必要としない。そのためその設計・加工も比較的容易に行える。ただ外部磁場を制御するための磁気回路が必要となるが磁歪方式と同様に非接触で駆動させることができるためアクチュエータの小型化の際にも有効な手段と言える。さらに磁気型にすることのメリットとして、磁場センサとなる磁性体自体を駆動部としても利用することが可能となりアクチュエータの構造が簡略化されることになる。これらの点から、磁気アクチュエータを本研究の方式として取り上げることにした。

## 2-2-2 アクチュエータ動作原理

先ず磁気型アクチュエータの構成については図 1-1 中左側が動力となる交流磁場源、右側に光造形で一体型で製作するポリオールのアクチュエータで上面に磁性材料を貼り付けた構造になっている。動作原理はこの磁性体が磁石の吸引力(2-2-1)で引き寄せられることで駆動するという非常にシンプルなものである。

$$\vec{F} = \vec{M} \cdot \vec{H} \quad \dots(2-2-1)$$

F:力 M:磁化 H:磁場

なお、磁性材部分はスパッタして磁性膜を成膜する。

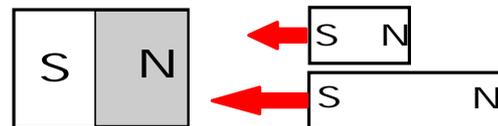


図 2-4 磁性体形状と力の関係

図 2-4 は左側に磁石、右側に磁石によって磁化された磁性体を示す。これは磁性体の長さが長い方が磁場勾配が大きく、反磁界の影響が小さくなるため磁石に引き付けられる力が見かけ上大きくなる。

従って、駆動部構造を設計する際は印加磁場方向の磁性体の長さを最適な長さに設計することに注意すればよい。

### 2-3 光造形の原理及び構造物作成法

本研究で用いるアクチュエータには光造形によって製作する材料を用いる。光造形でアクチュエータを製作する利点としては、3次元構造物が比較的容易に形成できるということが言える。またマイクロアクチュエータの製作等において、単一金属の材料特性を変えるのは困難である。そのため材料を柔らかくしたい部分は薄く、硬くしたい部分は厚く等の設計をしなければならなくなり、それらのことがアクチュエータの設計上大きな制約となり高精度な設計・加工技術が必要になってくる。その点では光硬化性樹脂と金属等との複合材料を用いることで材料特性を任意に変更でき、構造物の設計が容易になる可能性が高い。これらの利点から本研究では光造形による3次元加工技術を利用してアクチュエータを製作することにする。

そこで光造形について、その原理と、構造物の作成法を次に述べる。光エネルギーの作用で液状から固体に変化する（硬化する）合成有機材料を光硬化性樹脂と呼び、この性質を利用して光の照射で成形物を得るとというのが光造形である。硬化作用の光としては紫外線が一般に広く用いられている。

構造物製作にあたっては図 2-4 に示すようなプロセスで製作を行う。これは先ず光造形装置を用いて CAD で構造物の作成を行う。それをコンピュータ側でスライスデータを作成し、実際に構造物を製作する工程ができあがる。そして作成段階では構造物の最下層から一段ずつ光を照射し、硬化させ構造物を作成していく。本研究で用いる光造形装置では光照射用の紫外線レーザーをビームで用いているためその分解能は  $500[\mu\text{m}]$  であるが、さらに微小な構造物を作成したい場合はマイクロ光造形法という、レーザービームを絞り、その焦点で硬化させる方法もある。

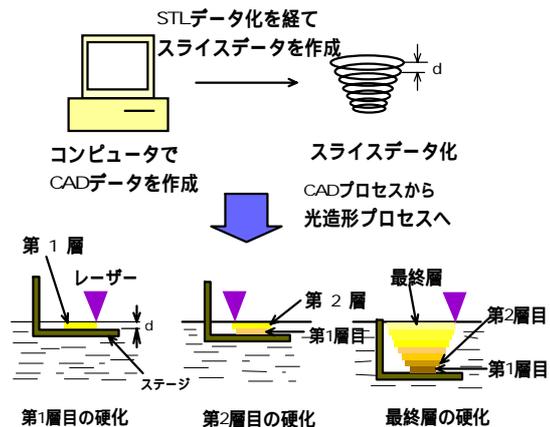


図 2-4 光造形による成形工程

### 3章 アクチュエータ評価実験

#### -アクチュエータとしての特性-

考案したアクチュエータは光造形を用いて作成するので一体型で容易に製作ができる利点があるが、光硬化性樹脂（ポリオール）及び考案したアクチュエータモデルが実際にアクチュエータとして用いることが可能であるのか否か評価を行う必要がある。そこで、評価をするにあたって何が問題で評価すべきなのかその項目を以下に挙げる。

- 1.ポリオールにどうやって磁性膜を成膜するか、またポリオール上に磁気特性の良い膜が付くのか
- 2.光造形で製作したポリオール自体の硬さほどの程度のものなのか
- 3.ポリオールに磁性膜をスパッタして動作させた場合、周波数特性はどのような特性を有しているのか

この3点について実験 3-1~3-3 で評価を行いアクチュエータとしての適用可能性を検討した。

#### 3-1 実験 磁性膜の成膜方法及び磁気特性

薄膜を成膜する手法としては蒸着やスパッタ、化学的気相成長(CVD)などがあり、その中から最適な手法を選ばなければならないが当大学には蒸着装置とイオンビームスパッタ、マグネトロンスパッタ装置しかないためこの中から最適な手法を選ぶことになる。

蒸着法の場合、蒸着時のエネルギーが低いためその接着強度は低く基板からの剥離も起き易い。一方スパッタはそのエネルギーが蒸着に比べ非常に高く剥離は起き難い。また、スパッタの方が均一な膜ができること、合金や化合物のターゲットの組成比をほぼ保ったまま成膜できるということからスパッタの方が成膜方法としては最適である。イオンビーム

とマグネトロ方式との比較ではイオンビームはイオン源が分離しているので低温でのスパッタが可能だが、付着速度はマグネトロンスパッタの方が速い。本研究では Ni-Fe を成膜させるため付着速度が遅いとスパッタ中の酸化の影響を受けやすくなるため望ましくないがマグネトロだと基板が非常に高温になってしまうためポリオールのような材料では変形の恐れがあるため適さないとと言える。そこで付着速度は遅いが比較的低温でスパッタできるイオンビームスパッタで膜形成を行うことにする。図 3-1 にイオンビームスパッタの概略図を示す。

イオンビームスパッタとはターゲットにイオンビームを照射しスパッタすることで成膜する方法である。これは、イオン源において、イオンビームとなる Ar は、Ar ガスに熱電子(約 100V で加速)を衝突させて Ar をイオン化する。そしてこの Ar<sup>+</sup>をイオンビームとして引き出すために電位差を与えターゲットに照射させるというものである。

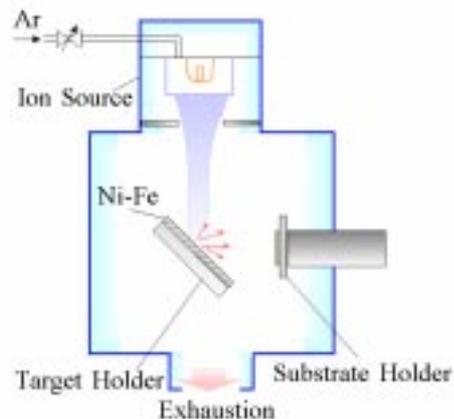


図 3-1 イオンビームスパッタ

従来、スパッタ等の薄膜作成手法ではシリコン基板やガラス基板等の硬く、平滑度の高い基板上に成膜されてきた。だが本研究ではそれらに比べ遥かに平滑度が低く、柔らかいポリオールを用いるため先ずポリオール基板上に磁気特性のとれた膜が成膜できるのか確認

する必要がある。

そこで、比較用としてのガラス基板とポリオール基板上に Ni-Fe をそれぞれ成膜して基板の違いによる磁気特性を評価した。磁気特性の測定には自作した B-H トレーサーを用いた。なお使用するポリオールの特性は以下の通りである。

ポリオール 比重 1.11[g/cm<sup>3</sup>]

変形温度 54

#### 実験方法

成膜方法はポリオールの変形温度を考慮して比較的常温に近い状態でスパッタできるイオンビームスパッタ方式を取り上げた。スパッタの原理については図 3-2 に示す。なおこの装置は本来エッチング用の装置であるためターゲットの設置角度を 45 度に変更し、傾いたターゲットの延長線上に基板を設置した。基板を設置するホルダーは予め製作しておき、ホルダー面 (100×100mm) 領域でスパッタした際どのくらい膜厚分布があるのか測定し最も厚く付く領域を以降の実験では用いることにした。(付録参照)

実験で用いたガラス基板は 18×18×0.1mm 寸法のマイクロスライドガラスで、ポリオールはマイクロスライドガラス上に硬化前の液体状のポリオールを垂らし薄く広げ、紫外線を約 45 分照射し硬化させたものを使用した。

これらの基板をホルダー上に隣接させて設置しスパッタした。スパッタ時間については準備実験としてスパッタレートを求めてあり、約 0.5[μm/h] (出力 25W) である。(付録参照)

その際のスパッタ条件を表 3-1 に示す。

なお、表中、ビーム電圧/電流はイオンを照射する電圧/電流で、加速電圧は Ar のイオン化の際に衝突させる電子の電圧である。

表 3-1 スパッタ条件

到達圧力	2×10 <sup>-6</sup> [Torr]
出力	25[W]
ビーム電圧/電流	500V/60mA
加速電圧	100[V]
アノード電圧	40[V]
カソード電流	14[A]
ニュートライザ電流	2[A]
Ar ガス圧	2×10 <sup>-4</sup> [Torr]
スパッタ時間	2 時間、3 時間

以上の条件でガラス、ポリオール基板上にそれぞれ膜厚 1、1.5[μm]の 2 種類の Ni-Fe を成膜し、その磁気特性を自作した B-H トレーサーで測定した。製作した B-H トレーサーの詳細については次項で記述する。

#### 実験使用器具

スパッタ：イオンビームミリング装置

磁気特性評価：B-H トレーサー(自作品)

基板：マイクロスライドガラス 18×18mm

スライドガラス 26×76mm

光硬化性樹脂：Somos8110 ポリオール

膜厚測定：触針式膜厚計

TENCOR INSTRUMENTS

Alpha-step200

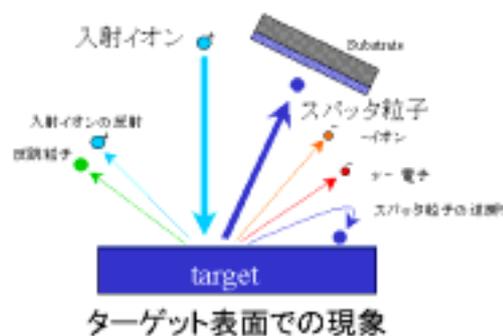


図 3-2 スパッタ原理

#### 実験結果 3-1 と考察

表 3-2 に結果を示す。

表 3-2 基板の違いによる磁気特性

Thickness[ $\mu\text{m}$ ] / Board	Hc[Oe]	S*
1/Glass	1.4	0.8
1/Polyol	3.3	0.7
1.5/Glass	2.2	0.4
1.5/Polyol	3.0	0.5

この結果からポリオール基板上にでもある程度磁気特性のとれた磁性膜が成膜できることが分かった。しかし角形比 S\* については測定装置の不具合から精度良く測れず測定毎に多少のばらつきがあり、厳密さを欠く。また、まだ磁気特性が良いとは言えないが成膜条件や熱処理によって特性向上の可能性はあると考えられる。

### 3-1-1 磁化測定装置(B-H トレーサー)の製作

磁性体の磁化特性を評価する主な方法としては振動試料型磁力計 (Vibrating Sample Magnetometer:VSM) や BH トレーサーが挙げられる。現在最も一般的なのが VSM でこれは試料を振動させ、試料の磁化によって生じる磁束の時間変化を傍らに置いたコイルに生じる誘導起電力として検出するものである一方 BH トレーサーは試料に直接もしくは間接的にコイルを巻いて、外部磁界を掃引した時に生じるコイルの誘導起電力を積分することによってコイルを貫く磁束を求め、試料の B-H 曲線を得るものである。本研究では比較的製作の容易な B-H トレーサーを製作することにした。図 3-3 にその構成図を示す。正弦波発振器の発振周波数は約 77[Hz]に設計した。これは雑音抑制のため電源周波数と整数比関係にない周波数にしたかったためである。しかし磁場及び磁束検知コイルで使用したコイルの巻き数が不明なものを使っているため理論計算から試料の BH カーブを求めることができない。そこで山形大学の石井教授に依頼してスパッタした Ni-Fe サンプルの磁気特性を VSM で測定して頂き、そのサンプルを製作した B-H トレーサーの校正に利用した。

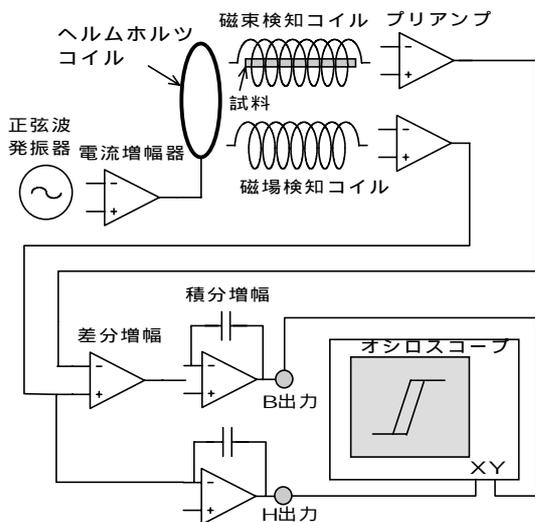


図 3-3 B-H トレーサー構成図

次にヘルムホルツコイル部については製作当初空芯のコイルを用いて磁場を発生 (7 ~ 8 [Oe]) させていたが VSM で測定して頂いた際のサンプルの特性が悪く空芯コイルで発する磁場では校正ができなかった。また、コイルに使用したエナメル線自体も抵抗が2つで 20[ ]と高い値であったため電流があまり流れず結果大きな磁場がでないという問題を抱えていた。そこでこの解決策として鉄芯を用いて磁場を増大させることにした。その構造を図 3-4 に示す。

これにより発生磁場が最大 50[Oe]まで増大した。これでも大きい磁場とは言い難いがコイルには交流を流しているため渦電流の影響によって直流電流を流す場合に比べ極端に磁場が減少してしまう。しかしながら本研究で目指す磁気特性としては 50[Oe]以下で飽和できない膜はセンサとしても期待できないと言える。

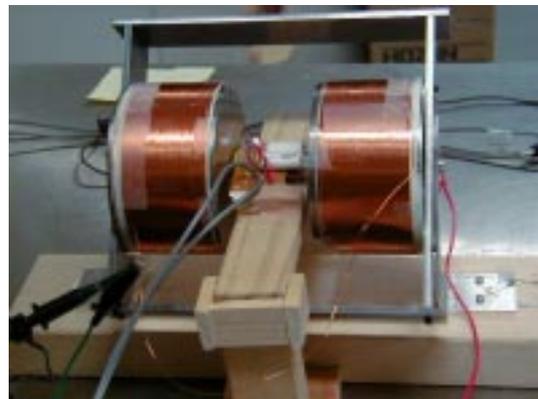


図 3-4 ヘルムホルツコイル

(B-H トレーサー回路図は付録参照)

### 3-2 実験 ポリオールの材料特性

光硬化性樹脂のポリオールがどの程度材料としての強度を有しているのか今後のアクチュエータ設計においても明確にしておく必要がある。そこでこの材料の縦弾性率(ヤング率)を算出する。

実験で用いたサンプルは単純梁の大型モデルである。これは計算の容易さと誤差を小さくするためである。

#### 実験方法

図 3-5 に示すような片持ち梁のポリオールサンプル(断面 2.6×0.7mm,長さ 5mm)を光造形で作製し、これにボイスコイルモータ(VCM)に取り付けた針で荷重を加えていく。加える荷重については、予め VCM に流れる電流とその時の荷重の関係を求めており、加える荷重が既知な条件下、サンプルに徐々に荷重を加えていきその時のたわみをたわみ測定装置の顕微鏡で目視により測定する。なお、このたわみは理論的に次の式より求まる。

$$y = -\frac{Wa^2}{6EI}(2a + 3b)$$

y はたわみ、W は荷重、a は梁の根元から荷重を加えた地点までの距離、b は荷重を加えた地点から梁の先端までの距離、E は縦弾性率、I は慣性能率である。

a と b についても顕微鏡でその距離を測定しておく。

慣性能率 I は  $bh^3/12$  で表されるがここでの b はサンプルの断面の幅で h は高さである。これにより、各測定値をたわみの式に代入して縦弾性率を求める。

なおサンプルの形状には若干のばらつきがあったため、それぞれに各寸法を測り、測定は 5 回行いその平均値をサンプル材料の縦弾性率とした。(測定データは付録参照)

#### 実験使用器具

たわみ測定：たわみ測定装置(マイクロ工学研究室製作)

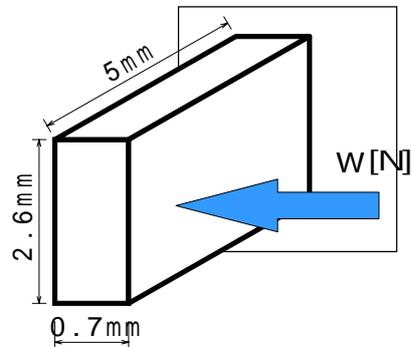


図 3-5 片持ち梁サンプル

#### 実験結果 3-2 と考察

表 3-3 にその結果を示す。

表 3-3 縦弾性率 (E)

Sample Number	E [N/m <sup>2</sup> ]
1	2.49 × 10 <sup>7</sup>
2	2.47 × 10 <sup>7</sup>
3	1.94 × 10 <sup>7</sup>
4	1.20 × 10 <sup>7</sup>
5	1.78 × 10 <sup>7</sup>
Average	1.99 × 10 <sup>7</sup>

5 回の測定の結果、平均縦弾性率が約 2 × 10<sup>7</sup> [N/m<sup>2</sup>]であった。ここで平均を採ったのは縦弾性率のオーダーに注目したかったからである。なお、当初 10<sup>8</sup> オーダーではないかと予想していたが、それよりも約 1 桁低い値となり、この材料が非常に柔らかい材料であることが分かった。

比較:(ペットボトル材料 : 5 × 10<sup>8</sup> [N/m<sup>2</sup>])

そのため、大きな走査が必要なアクチュエータへの適用でも可動に適した材料である。

### 3-3 実験 縦弾性係数の周波数特性

ポリオールのようなプラスチックは一般に

粘弾性物質と呼ばれる物理的性質を持っていて金属とは応力に対する挙動が本質的に違ってくる。すなわち金属の挙動が弾性要素（バネでモデル化）で説明できるのに対し、プラスチックは弾性要素と粘性要素（ダッシュポットでモデル化）両方の性質を持っている。

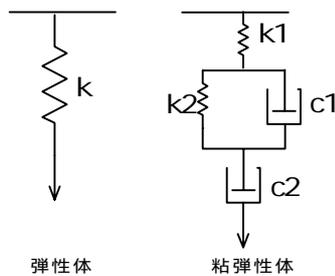


図 3-6 弾性体・粘弾性体のモデル化

それにより、粘弾性体には応力緩和やクリープといった現象があり、ヒステリシス特性をもつ粘弾性体であれば減衰要素は抵抗力が変位、速度に対して線形関係で変化しない等の弾性体とは異なった性質を持っている。そのためポリオールがアクチュエータとして適用可能か否か評価しなくてはならない。

そこで、アクチュエータとしての評価をするにあたってポリオールに外力として正弦波歪を加えた時の弾性率の変化を見ることでその特性を評価することにした。

#### 実験方法

実験用として図 3-7 に示すような片持ち梁のモデルを作製した。

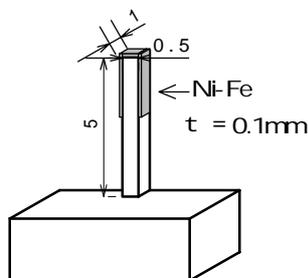


図 3-7 サンプル梁

このモデルは光造形で製作したポリオールのアクチュエータ構造基材の梁上側に、実際の

使用状態に合わせ、厚さ  $1 \mu\text{m}$  の Ni-Fe 膜をスパッタし、さらにその上から厚さ  $0.1\text{mm}$  の Ni-Fe のバルク材を付着したものである。バルク材を付けたのはサンプルが大きいためスパッタした分の Ni-Fe だけでは磁場を印加してもその振動が非常に微小であり測定が困難であるからである。

また同様な理由から、サンプルは単純梁の大型モデルを使用した。

そしてこれに振幅一定の正弦波の交流磁場 ( $10\sim 3\text{kHz}$ ) を印加することで駆動させ、サンプルの振動を LDV (レーザドップラー速度計) で測定した (図 3-8 参照)。LDV で測定したのは非接触で高分解能な測定を行う必要があるからである。なお交流磁場源側にはパイラス直流磁場を印加している。

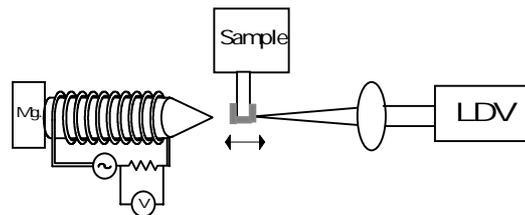


図 3-8 振動測定系

これは交流磁場のみを印加してしまうと Ni-Fe の磁気特性からサンプルの梁が印加磁場周波数の 2 倍の周波数で振動してしまうため直流磁場で Ni-Fe の磁化を飽和させ、向きを一方向に固定させて印加周波数と同じ周波数で振動させるようにしている。もう一つの狙いは Ni-Fe の磁化を飽和させることで磁気力を最大にさせ歪を大きくし、測定誤差を低減させることである。また、Ni-Fe のバルク材が梁を覆う構造になっている点については、本来は磁場方向と直交する方向へは磁性体は必要ないわけだが、LDV でポリオールにビームを照射すると反射光が返ってこないため Ni-Fe で反射板の代わりとしている。

#### 実験使用器具

振動測定：レーザドップラー速度計

入出力値測定：オシロスコープ (BRINGO)

交流発信器：ファンクションジェネレータ

電流調整：ボリュームアンプ

### 実験結果 3-3 と考察

測定結果を図 3-9 に示す。

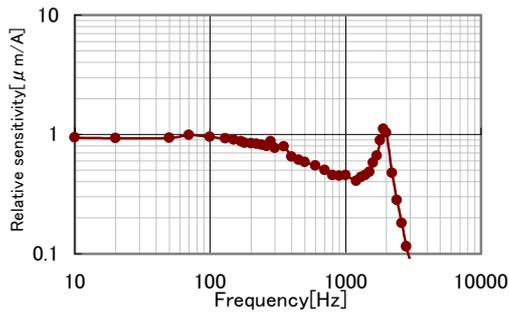


図 3-9 サンプルの周波数特性

この図は、縦軸に相対感度[ $\mu\text{m}/\text{A}$ ]、横軸に周波数[Hz]を示す。この周波数特性において、正弦波状の外力に対し 100[Hz]強程度まで一定の振幅で振動していることからポリオールは減衰が小さく弾性要素の大きい材料であることが分かった。また、このサンプルの場合、帯域は約 400[Hz]であり、このままでもアクチュエータとして十分な帯域を有していると言える。また、このグラフは周波数の増加と共に一度減衰し、その後、共振周波数約 1.9kHz を示し、それ以降急激に減衰する特性を持っている。本来減衰が小さければ相対感度一定を保つものと考えられるが実際減衰しているため、これはサンプルの共振を持った振動と周波数の増加に伴って減衰する外部強制振動の積で表される周波数特性であると考えられる。この事を確認するためにシミュレーションを行った。シミュレーション時のパラメータの数値は予測で与えてある。その結果を図 3-10 に示す。



図 3-10 周波数特性のシミュレーション

図 3-10 は縦・横軸それぞれ振幅、周波数を規格化したものです。なおこの曲線は以下に示す 2 つの強制振動の式の積；

$$\frac{m\omega_0^2}{F} A = \frac{1}{\sqrt{(1-\xi^2)^2 + 4\gamma_1^2 \xi^2}} \times \frac{1}{\sqrt{(1-\xi^2)^2 + 4\gamma_2^2 \xi^2}}$$

$$\xi = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \gamma = \frac{k}{\omega_0}$$

にそれぞれの減衰比

サンプル： $\gamma_1 = 0.15$  外部振動： $\gamma_2 = 1.3$  を代入して表される。シミュレーション結果から、実験結果とほぼ同様な傾向になり、サンプルの一次振動以外にも外部から何らかの強制振動が加わっているということが言える。このグラフから一次振動と減衰の大きい外部振動を分割して考えると梁の共振倍率は約 4 で、その振動の減衰比は  $\gamma = 0.12$  ぐらいであり非常にダンピングの小さな特性が得られている。

このサンプルにおける外部振動に関しては、推測段階ではあるが梁の根元もポリオールできているため土台が柔らかくこれが抵抗となって減衰比が非常に大きい外部振動として現れている可能性が高いと考えられる。

これらの結果から材料としては少なくとも数 kHz の帯域を持つアクチュエータ構成材料として使用可能である。

## 4章 磁場センサとしての特性評価

### センサの電気的特性

センサの動特性は磁性膜の磁気特性に大きく依存することは既に知られている。つまり磁性膜の磁気特性を上げることでセンサの特性を向上させることが可能となる。

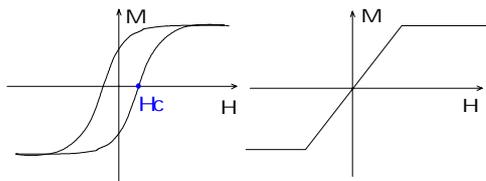


図 4-1 M-H 特性モデル

磁気特性が向上するとセンサとしての特性が良くなるというのは図 4-1 の M-H 特性から、保磁力  $H_c$  が大きいと磁性体に磁場を印加して磁化  $M$  を飽和させ、その後印加磁場を 0 に向け小さくしていくと M-H カーブは非可逆なカーブを描いてしまう。一方右側の特性は保磁力が極めて小さい磁性体の場合で印加磁場の強弱に対し、線形でほぼ可逆な変化をしている。本研究で扱う磁気抵抗効果では磁化回転、つまり磁化されやすさがセンサ感度に影響を及ぼすことや印加磁場の極性や磁場変化に対して対称性をもった出力特性を得るためにも磁性膜の磁気特性を上げること（特に保磁力  $H_c$  の低減）が必要となる訳である。そのための主な手段として、スパッタ時の真空度を上げることや成膜後の熱処理が考えられる。そこでこの 2 つの要因についてそれぞれ条件を変えて実験を行い特性の変化を測定した。

またセンサとしての特性評価として Ni-Fe 膜の MR 効果について評価を行った。

### 4-1 実験 真空度の違いによる保磁力変化

スパッタはイオンがターゲット表面に叩きつけられ、それによってターゲット表面の原子・分子が外へ弾き飛ばされるという原理であるということは前にも述べた。スパッタの際、チャンバー内は高真空であるため高速でイオンや原子が飛び交っている。そのためチャンバー内の真空度が悪いとそれだけ酸素などの不純物の混入が多くなり膜への不純物の混入、酸化、スパッタ効率の低下などが考えられる。よって、これらが磁性膜の磁気特性に影響を及ぼす要因の一つではないかと考え、異なる真空度 ( $2.0 \times 10^{-6}$  と  $5.0 \times 10^{-6}$  Torr) でスパッタ実験を行い磁気特性の比較を行った。

磁気特性の測定には B-H トレーサーを用いて行った。

#### 実験方法

実験はガラス基板で行っている。また、スパッタ時に膜面平行に磁場を印加して幅方向を容易軸とする一軸異方性を付与し、膜厚 1 [ $\mu\text{m}$ ] の成膜を行った。

真空度以外のスパッタ条件はこれまでのものと同じで、条件を下の表 4-1 に示す。

表 4-1 スパッタ条件

到達圧力	$2.5 \times 10^{-6}$ [Torr]
出力	25 [W]
ビーム電圧/電流	500V/60mA
加速電圧	100 [V]
アノード電圧	40 [V]
カソード電流	14 [A]
ニュートライザ電流	1.4 [A]
Ar ガス圧	$2 \times 10^{-4}$ [Torr]
スパッタ時間	2 時間

#### 実験使用器具

スパッタ：イオンビームミリング装置

基板：マイクロスライドガラス 18×18mm  
基板：光硬化性樹脂 Somos8110 ポリオール

磁気特性評価：B-H トレーサー

膜厚測定：触針式膜厚計

TENCOR INSTRUMENTS alpha-step200

#### 実験結果 4-1 と考察

表 4-2 に真空度の違いによる保磁力の変化を示す。測定は容易軸方向

表 4-2 真空度による保磁力変化

真空度[Torr]	保磁力[Oe]
$2.0 \times 10^{-6}$	1.4
$5.0 \times 10^{-6}$	2.2

この結果からスパッタ時の真空度が磁性膜の磁気特性に影響していると言える。また、高い真空度に  $2.0 \times 10^{-6}$ [Torr]を選んだのは、このイオンビームスパッタ装置の性能としては本来  $10^{-7}$ [Torr]オーダー程度までは真空引き可能なのだが、それは装置の可動部や開閉部分等から空気のリークがない状態でないとは不可能であり、常時使用しているとなかなか良好な状態を保つことが出来ないため、通常真空引き可能な真空度として  $2.0 \times 10^{-6}$ [Torr]を選んだ。

#### 4-2 実験 磁界中熱処理

磁気特性を上げるもう一つの方法として磁界中熱処理が挙げられる。磁界中熱処理とは回転磁場 (70[Oe]) を印加しながらアニールを行う方法で、膜の機械的な歪を除去するのに有効な方法である。回転磁場を加えるのは熱処理中、磁性膜の膜面全方向に磁歪による伸縮を引き起こさせ、膜の応力を均等に緩和させるためである。これは通常の金属であれば十分焼きなましされているような欠陥が取り除かれてあるものと異なり、薄膜は製作時極めて急速に冷却されるためいろいろな欠陥、

歪などを含んだままになっている。このようにスパッタした膜には内部応力が残っていることが多く、アニールによってそれが除去もしくは低減できれば磁性膜の磁気特性の向上も期待できる。

#### 実験方法

実験にはガラス、ポリオール両方の基板で行った。ポリオール基板は実験 3-1 と同様にマイクロスライドガラス上にポリオールを垂らし硬化させたものである。

磁性膜のスパッタ条件は実験 4-1 と同じで行った。容易軸は幅方向である。

また、ポリオールの規格が変形温度 54 であったためこの実験の前にポリオールの耐熱温度を測定した。測定の結果、約 170 前後であるためガラスとポリオール基板とでは熱処理の温度と時間を変えている。熱処理には図 4-2,3 に示す装置を製作した。この装置の熱源には 12V のハロゲンランプを用いており、230[ ]程度まで加熱可能である。熱処理中は回転磁場約 70[Oe]を印加しながら行った。

熱処理の条件を以下に示す。

##### ・熱処理条件

ガラス	: 215	15分、30分
	170	60分
ポリオール	: 170	30分
	180	10分

ガラス基板はこの装置においては温度の制約がないため、装置が安定してだせる温度 215 を選んだ。そしてこの温度で 15分、30分と時間を変えることで時間依存を評価できる。もう一つの 170 で 60分のものはポリオールの温度条件と合わせるためである。

ポリオールについては、耐熱温度を考慮して 170 でその分時間を延ばし 30分行うものと 180 に上げて時間を 10分にしたものを

行った。

なお、熱処理用サンプル寸法は 12 × 12mm で行っており、B-H トレーサーで測定の際には幅 1mm、長さ 12mm の形状にしている。



図 4-2 磁界中熱処理装置

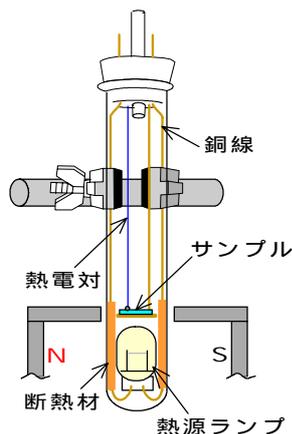


図 4-3 磁界中熱処理装置拡大図

熱処理温度は熱源ランプにかける電圧で決まるため電圧制御をするために変圧器を介して 10 ~ 12V の範囲で電圧調整を行い、温度調整を行った。

#### 熱処置装置使用器具

- 試験管： 30 × 200mm
- 熱電対温度計： -200 ~ +1250
- 熱源ランプ： スタンレー電気 12V 21/5W
- 断熱材： Holts グラスファイバーマット
- 電線： 銅針金 1.2mm
- モーター： SAYAMA GEARED MOTOR

変圧器： TOKYO RIKOSHA

input100V output100 ~ 130V Max10A

真空ポンプ： Sunhayato Model -4000

#### 実験結果 4-2 と考察

表 4-3 にその結果を示す。

表 4-3 熱処理による保磁力変化

	ガラス基板		
処理前 Hc[Oe]	2.2	1.15	1.0
処理温度[°C]	215	215	170
処理時間[分]	15	30	60
処理後Hc[Oe]	1.5	1.58	1.75

	ポリオール基板	
処理前 Hc[Oe]	3.0	2.2
処理温度[°C]	170	180
処理時間[分]	30	10
処理後Hc[Oe]	1.6	2.2

(B-H 特性図は付録参照)

ガラス基板について 215 °C での 15 分と 30 分の熱処理時間を比較すると 15 分行った方は保磁力の低減ができたが 30 分行った方は逆に保磁力が増加してしまった。また、170 °C の低い温度で 60 分という長い時間処理したのも保磁力が増加してしまった。増加の原因は明確ではないが特性向上には温度と時間が重要な要素であり、適切な範囲での高い温度で比較的短時間で熱処理することが磁気特性向上に効果があると判断できる。

ポリオール基板については 170 °C で 30 分行ったものが保磁力の低減が図れたが 180 °C で 10 分行った方は保磁力の変化が見られなかった。このことから温度を高くしても時間を短くしすぎると磁気特性の向上には効果がないということが言える。

従ってその基板にあった最適な熱処理温度と時間で行うことが磁気特性向上の面からは重要である。

しかしこの結果からはまだ期待する特性値  $H_c < 10\text{Oe}$  には達していない。また、ここで記述した以外に行った熱処理実験では、先の実験で用いたポリオール基板よりも薄い基板で熱処理した際、熱処理中ガラス基板からポリオールが剥離してしまうことがあった。この剥離は約 130~160 の間で起こった。その原因としてはポリオール基板の厚さが薄かったことで変形しやすくなり、さらにガラス基板上にポリオールを付けているため両者の熱膨張率の違いから、ポリオールの伸縮のみが大きく現れる形になり剥離したのではないかと考えられる。なお、表 4-2 に示しているポリオール基板のものは厚さが剥離したものより厚く、他のいくつかの剥離が起きなかったサンプルも剥離したものに比べると厚みがあった。そのため熱に比較的弱いポリオールを熱処理するには基板を厚くして熱処理時の高温に絶え得るようにする必要がある。

まだサンプル数が少ないこともあり熱処理の最適な条件を定量的に選定することができないが、この実験結果からは保磁力向上に効果のある熱処理条件は 210 以上で 15 分程度行うことが望ましいと言える。ポリオール基板については現状では温度を 200 以上に上げるのが困難なため、基板厚さを変えたりして工夫する必要があるが、熱処理に拘らず、それ以外の方法を模索していく必要がある。

### 4-3 実験 Ni-Fe 膜の抵抗変化

イオンビームスパッタで成膜した Ni-Fe 膜が MR センサとして機能しているのか、直流外部磁場を印加し、抵抗変化を測定することでその MR 特性の評価を行った。測定に用いたサンプルの基板にはポリオールとガラス基板を用いてその比較をし、さらにガラス基板では熱処理前と熱処理後の膜における特性評価も行った。

熱処理条件は先の実験から求めた

ガラス基板 215 で 15 分で行った。

### 実験方法

実験で使用する Ni-Fe 膜のスパッタ条件及び膜の保磁力を表 4-4 に示す。

表 4-4 スパッタ条件と磁性膜保磁力

到達圧力	$2.5 \times 10^{-6} [\text{Torr}]$
出力	20[W]
ビーム電圧/電流	500V/50mA
加速電圧	130[V]
アノード電圧	40[V]
カソード電流	5.8[A]
ニュートライザ電流	2.7[A]
Ar ガス圧	$2.0 \times 10^{-4} [\text{Torr}]$
スパッタ時間	2.24 時間
膜厚	1 [ $\mu\text{m}$ ]

(ガラス、ポリオール共に同じ)

	ガラス基板	ポリオール基板
熱処理前 $H_c$	3.39[Oe]	2.15
熱処理後 $H_c$	2.69[Oe]	

(測定方向 困難軸)

(B-H 特性図は付録参照)

Ni-Fe 膜の MR 測定は図 4-4 に示す装置で行った。

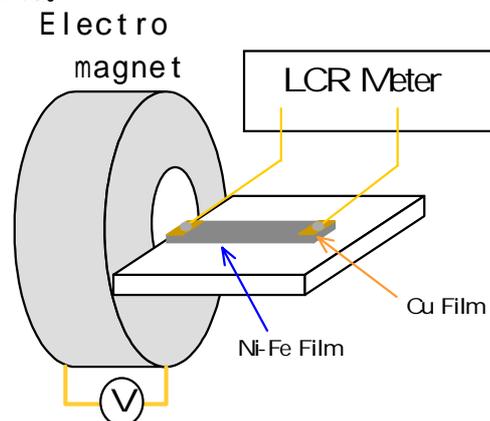


図 4-4 MR 測定装置

図中左側に電磁石を、それに隣接させて表 4-5 に示す寸法の Ni-Fe 膜を設置し、その両端に配線を施しはんだで接着した。

なお、はんだ付けが可能となるように Ni-Fe 膜両端 2mm に Ni-Fe 膜の上から Cu をスパッタして膜厚約 1.6 [ $\mu\text{m}$ ] を成膜している。

( 図 4-5 参照 )

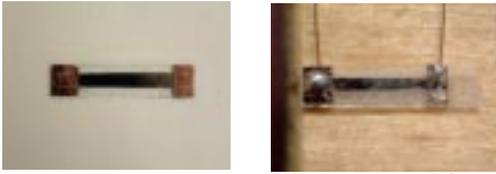


図 4-5 両端 Cu スパッタサンプル  
( 左:はんだ付け前 右:はんだ付け後 )

この Ni-Fe 膜は素子幅方向に容易軸を付与したものである。そして電磁石に 0 ~ ± 3 [A] の電流を流し直流磁場を素子長手方向に印加し、LCR メータで素子長手方向に微弱な電流を流し、磁場に依存した Ni-Fe 膜の抵抗変化を測定した。

表 4-5 Ni-Fe 膜寸法

幅[mm]	1
長さ[mm]	10
厚さ[ m]	1

電磁石の磁場 - 電流特性は図 4-6 に示す。

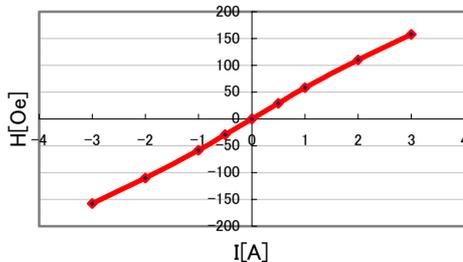


図 4-6 電磁石 磁場 - 電流特性  
(H-I)

実験使用器具

- ・電磁石
- ・電源 KENWOOD PR18-5A
- ・LCR メータ  
ANDO ELECTRIC CO.,LTD

実験結果 4-3 と考察

図 4-7 にポリオール基板の Ni-Fe 抵抗 - 磁場特性を、図 4-8 にポリオール基板の Ni-Fe 抵抗変化 - 磁場特性を示す。

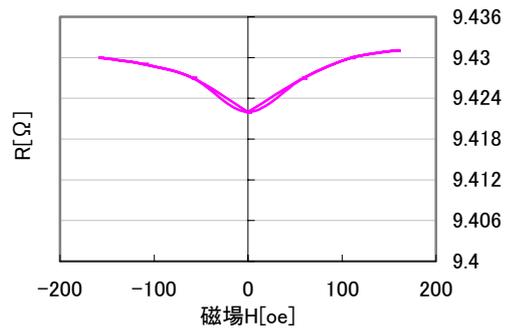


図 4-7 抵抗 - 磁場 ポリオール  
(R-H)

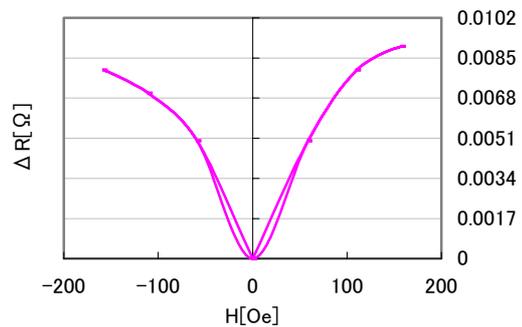


図 4-8 抵抗変化 - 磁場 ポリオール  
( R-H)

この結果、印加磁場が無い場合のポリオール基板上の Ni-Fe 膜の抵抗は  $R_0=9.422[ \ ]$  である。抵抗変化は最大でも約  $0.009[ \ ]$  であった。また、抵抗変化の特性については変化量が小さいため誤差が含まれているものと考えられる。

次に図 4-9 にガラス基板上的 Ni-Fe 抵抗 - 磁場特性を、図 4-10 にガラス基板上的 Ni-Fe 抵抗変化 - 磁場特性を示す。

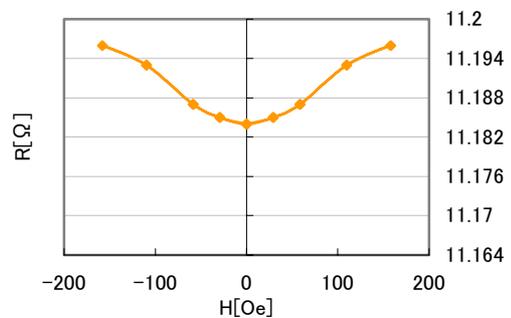


図 4-9 抵抗 - 磁場 ガラス  
(R-H)

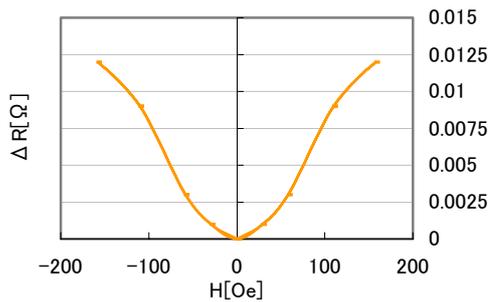


図 4-10 比抵抗変化率 - 磁場 ガラス  
( R-H)

印加磁場が無い場合のガラス基板上的 Ni-Fe 膜の抵抗は  $R_0=11.184[\ ]$  である。抵抗変化  $R$  は最大でも約  $0.012[\ ]$  であった。

これらポリオールとガラス基板の結果、ばらつきは多いものの、抵抗値はポリオール基板上の方が低く、 $R$  はガラス基板上の方が大きいと言える。この原因は不明であるが柔らかいポリオール上の膜では応力による粒界に生じる微小なクラックが入りにくいものの、配向性が悪いためと考えられる。この原因を解析するには、更に格子間隔の異なる基板材料を使ったり、温度変化させる必要がある。

次に図 4-11 に熱処理後のガラス基板上的 Ni-Fe 抵抗 - 磁場特性を、図 4-12 に熱処理後のガラス基板上的 Ni-Fe 抵抗変化 - 磁場特性を示す。

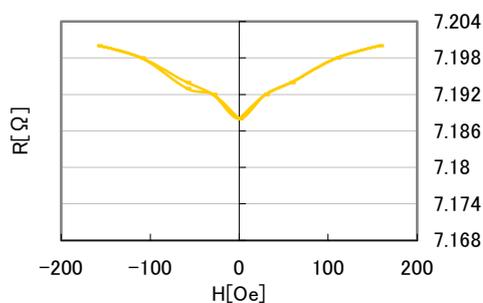


図 4-11 抵抗 - 磁場 熱処理後ガラス基板  
(R-H)

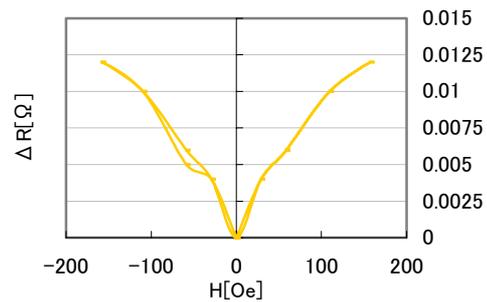


図 4-12 抵抗変化 - 磁場 熱処理後  
( R-H) ガラス基板

印加磁場が無い場合、熱処理後のガラス基板上 Ni-Fe 膜の抵抗は  $R_0=7.188[\ ]$  である。抵抗変化  $R$  は最大でも約  $0.012[\ ]$  であり、熱処理前と最大変化量は変わっていないが、初期抵抗が下がったことで、これが膜の抵抗の低下であれば変化率は増加していることになる。なぜ熱処理によって膜の抵抗が下がったと考えるかという、熱処理することで膜内部にあった応力や歪みが緩和され、膜内部の分子・原子はストレスを受けず安定に近い状態になるため抵抗が下がるものと考えられるからである。もう一つ熱処理前と変わった点は最大印加磁場以下での磁場に対して熱処理した方が抵抗変化が大きいことから膜の応力が緩和され特性が向上したものと考えられる。

図 4-7 と 4-9 のポリオール、ガラス両基板上の Ni-Fe 膜の抵抗 磁場特性を見て分かるように膜の抵抗  $R$  が  $9[\ ]$  以上と高い値になってしまっている。しかし、配線前の磁性膜単体の抵抗値はテスターで測定すると約  $6[\ ]$  であった。この差は配線用導線の抵抗が  $0.1[\ ]$  程度であったため、配線時のはんだ部分での抵抗が大きく現れていると言える。導線とセンサの接着は他にも銀ペーストを用いて行ってみたが接着部分が非常に小さいため、導線とセンサの密着度を高めて接着するのが困難であった。また、それで接着したセンサ

の抵抗は、はんだ付けした場合よりも大きく、抵抗値のばらつきも大きかった。

他の原因としては膜の表面の状態が考えられる。そこで顕微鏡を使って膜表面の観察を行ってみた。すると特に抵抗の高い膜などは膜表面の所々に亀裂が入っていたりしたことが分かり、これがセンサの抵抗を上げてしまっている原因の一つと考えられる。この亀裂は特にポリオールの方に多く見られることから、スパッタ時の温度上昇等によってポリオールが柔らかくなる、もしくは変形を起こして応力が大きくなってきて成膜後の膜に歪や亀裂を生じさせているのではないかと考えられる。応力に関して言えば熱処理によって緩和できるが、スパッタ中に入ってしまった亀裂は直しようがない。そのため、熱処理をするにしても表面に亀裂の入らないような低い抵抗の膜を作ることが必要である。

#### 4-4 実験 Ni-Fe 膜の抵抗変化

##### - Ti 膜層の付与

Ni-Fe 膜表面の観察から、応力による膜表面の亀裂が見られたことでこれが抵抗を高くした原因の一つであると考えた。この亀裂はスパッタ時の温度上昇によって発生しているものであり、ポリオール基板に所定の膜厚をスパッタするには条件にもよるが使用している装置では最低 2 時間はスパッタする必要があるため、比較的低温でスパッタできるとはいえ温度の上昇は避けられない。またポリオールの耐熱性の問題から、極力熱処理を施さずに特性の良好な、低い抵抗の膜を作る手段を見出す方が望ましいと言える。そこで亀裂が入ってもそれをある程度補える可能性がある方法を考案した。それはポリオール基板と Ni-Fe 膜の間に導電性のある材料の薄膜を挟み込むことである。下地を敷くことでポリオールからのガスなどの放出を防げるということと、全体の抵抗を下げるできるので

はないかと考えた。反面、抵抗が変化しない材料が入る事で抵抗変化率は下がってしまうことも考えられるが、それ以上の効果が期待できるのではないかと考えた。なお、挟み込む材料として Ti を選択した。

Ti はその上にスパッタされる材料の結晶成長を良くする働きがあり、微視的に見たときの応力発生を抑える効果もある。これは Ti を下地に敷くことで、その上にスパッタされる分子・原子が飛んできた時にその場にすぐ付着するのではなく、Ti 膜上を動き回り、分子・原子同士が安定な状態になってから付着することによる。

そこで、ポリオール基板上に、先ず Ti 膜を成膜して、その上に Ni-Fe 膜を成膜する。

##### 実験方法

ポリオール基板上に先ず Ti を約 0.2[ $\mu\text{m}$ ] 成膜する。そしてその上から Ni-Fe を 1[ $\mu\text{m}$ ] の厚さで成膜し、さらに膜両端に Cu を約 1.6[ $\mu\text{m}$ ] の厚さで成膜する。実験で使用する Ti, Ni-Fe, Cu 膜のスパッタ条件を表 4-6 に示す。

以上の条件の下、実験 4-3 と同様に Ni-Fe 膜の MR 測定は図 4-3 に示す装置で行った。

表 4-6 Ti, Ni-Fe, Cu 膜のスパッタ条件

	Ti	Ni-Fe	Cu
到達圧力 $\times 10^{-6}$ [Torr]	2.0	2.0	2.0
出力[W]	20	20	20
ビーム電圧/電流[V/mA]	500/48	500/53	500/39
加速電圧[V]	120	100	100
アノード電圧[V]	50	40	42
カソード電流[A]	5.0	5.0	6.0
ニュートライザ電流[A]	2.9	2.4	2.7
Ar ガス圧 $\times 10^{-4}$ [Torr]	2.0	2.0	2.0
スパッタ時間[Hour]	0.25	2.24	2
膜厚[ $\mu\text{m}$ ]	0.2	1	1.6

基板：ポリオール

保磁力  $H_c$  : 2.15[Oe] (測定方向 困難軸)

(B-H 特性図は付録参照)

#### 実験結果 4-4 及び考察

図 4-13 に膜の電気抵抗 磁場特性を、図 4-14 に抵抗変化 磁場特性を示す。

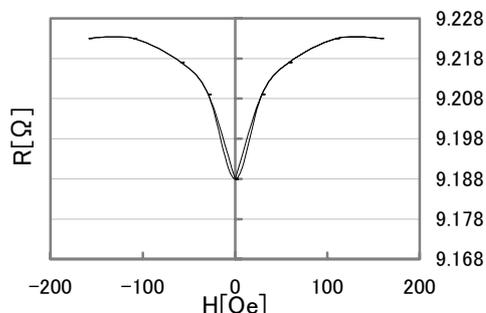


図 4-13 抵抗 - 磁場 ポリオール(Ti 付)

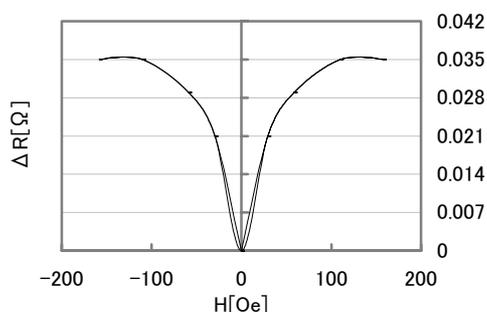


図 4-14 抵抗変化 - 磁場 ポリオール(Ti 付)

この結果、印加磁場が無い場合のポリオール基板上的 Ni-Fe 膜の抵抗は  $R_0=9.188[\Omega]$  である。抵抗変化は最大で約  $0.035[\Omega]$  であった。

この実験では Ti 層を付ける事で抵抗の低減をはかれるのではないかと考えていたが、実際はほとんど低減できなかった。この原因は Ti をスパッタする際、Ti ターゲットの表面の皮むきがまだ不十分で酸化している部分が残っていたのではないかとと思われる。これについては Ti ターゲット表面の皮むきを十分にいき、不純物の少ない状態にしてスパッタすればまだ抵抗の低減の可能性はある。他の原因としては接続部の抵抗が大きいのではないかとと思われる。これについても抵抗が極力増えないように接続する必要がある。

抵抗変化については Ni-Fe のみをスパッタした膜に比べて約 4 倍も増加した。また、ポリオール、ガラス基板に Ni-Fe のみを成膜したものでは印加磁場を最大の  $158[\text{Oe}]$  にしても、若干抵抗変化が飽和しきれていないように見てとれるが、Ti 膜を付けた方は  $110[\text{Oe}]$  あたりで抵抗変化が飽和している。これはつまり単位磁場あたりの抵抗変化が大きくなったということであり、センサの MR 効果の感度が高くなったということを示している。抵抗変化が増加した理由は不明であるが、Ni-Fe 膜に亀裂が入っていてもその下地に Ti 層があるため亀裂部分では電流はそちら側に流れ、Ni-Fe が付着している所で Ni-Fe にも電流が流れるということになったため、安定した電流が流れ、抵抗変化が増加したのではないかと考えられる。

この実験の測定では抵抗の絶対値の変化とその変化量を求めた。一般的には MR 材料の評価の目安としては磁気抵抗係数  $\alpha$  が用いられる。なお、この  $\alpha$  は  $R/R_0$  に等しい。そこで本研究でも磁気抵抗係数を求めて、成膜した Ni-Fe の評価をする必要がある。成膜した Ni-Fe の初期抵抗  $R_0$  はその値そのものが Ni-Fe の抵抗ではなく他の接続部の抵抗であったりするためその分の抵抗値を取り除く必要があるが、それを正確に求めることが出来ないため初期抵抗  $R_0$  は MR 素子の電気抵抗の式

$$R_0 = L/TD \quad \dots(4-1)$$

:比抵抗  $L$ :素子長さ  $T$ :素子厚さ  $D$ :素子幅

に、代表的な Ni-Fe の比抵抗  $0.16[\mu\Omega/\text{m}]$  と実験で用いた素子形状

$L=10^{-2}[\text{m}], T=10^{-6}[\text{m}], D=10^{-3}[\text{m}]$  を代入して  $R_0$  を求めた。その結果  $R_0$  は  $1.6[\Omega]$  であった。一方、磁気抵抗係数の  $R$  は最大抵抗変化値で Ti を付与した Ni-Fe 膜の  $R$  は  $0.035[\Omega]$  である。これより初期抵抗が理想的な値とし

た場合、成膜した Ni-Fe 膜の磁気抵抗係数は約 2 % 程度である。この目安として代表的な Ni-Fe の磁気抵抗係数が 3 ~ 4 % 程度であり、まだ磁気特性等の課題の多い状態ということ を考慮すると決して悪い値ではない。しかし 全体の抵抗が高いため、MR 素子としてはまだ改善の必要がある。

## 5章 結論

本研究では非接触で、電流動作をするデバイスの実働状態での検査を目的としたセンサとして、新しいアクチュエータ一体型マイクロセンサを考案し、その可能性を検討するために、アクチュエータとセンサについて実験的に評価を行った。

アクチュエータとして可動する材料にマイクロな任意形状形成の可能な光造形基材(ポリオール)を選択してその機械特性を調べた。その結果、材料自体は非常に柔らかく可動しやすいという特徴を持っていて、膜付与時の機械特性も減衰が非常に小さく、帯域も実験で用いた形状のサンプルでは約 400[Hz]であり、このままでもアクチュエータとして十分な帯域を有している。さらに材料の形状や質量を変えていくことで共振点を引き上げる事ができ、少なくとも数 kHz の帯域を持つ構成材料として使用可能であり、マイクロデバイスで要求される高周波メカニカル動作が可能である。

センサ材料としては薄膜ヘッド等で一般に実績のある Ni-Fe を選択し、その MR 効果を用いることとして光造形基材上でのセンサ構成の可能性を研究した。

その結果、イオンビームスパッタを用いた低温基板スパッタでは融点の低いポリオール上での膜作成が可能であることと、抵抗の低い膜が作れることが分かった。ただ、本研究で製作したセンサでは初期抵抗が大きくばらつく。これには膜の抵抗以外にも接続部分の抵抗が大きく出ていると思われるがこれを極力低減させないと MR 素子の評価の目安である磁気抵抗係数を正確に求める事ができない。さらに印加磁場が大きいこと、変化率が小さいことから、センサの高感度化の為に成膜条件の抽出が必要である。

また、センサとして特性を向上させるため

に熱処理を施した。その結果、保磁力の低減は図れたが MR 特性にはあまり効果が表れなかった。また、ポリオール基板では耐熱性の問題から熱処理の条件が厳しく、熱処理で特性改善を行う従来の方法は使用し難い。

スパッタのみの状態で特性改善を行うためポリオールと磁性膜の間に結晶成長を制御する下地膜を挿入することを考えた。一般的に効果があるとされている Ti 膜を選択し、実験した結果、抵抗変化がポリオール基板で約 4 倍増加することが分かった。今後は Ti 膜の厚さを変えることや、酸化の影響を極力低減させて Ti 膜を成膜することで特性向上が可能になると期待される。

## 参考文献

- 1) 山田外史, 岩原, “プレーナ形マイクロ  
うず電流プローブによる探傷技術の動向”,  
日本応用磁気学会誌, vol.23, No.7, 1999
- 2) T.F.Budinger, G.T.Gullberg, “Three-  
Dimensional Reconstruction in Nuclear  
medicine Emission Imaging”, IEEE  
Trans. Magn., vol.NS-21, pp2-20, June  
1974
- 3) Z.H.Cho, “ General Views on 3-D Image  
Reconstruction and Computerized  
Transverse Axial Tomography”, IEEE  
Trans. Magn., vol.NS-21, pp44-71, June  
1974
- 4) N.Jiang, K.Yamakawa, N.Honda,  
K.Ouchi, “A New Giant Magneto-  
Impedance Head using Magnetic  
Microstrip Lines”, IEEE Trans. Magn.,  
vol.34, No.4, pp1339-1341, July 1998.
- 5) M.Senda, Y.Koshimoto,  
“High Frequency Signal Response of  
Impedance Matched UHF Type Head”,  
IEEE Trans. Magn., vol.33, No.5,  
pp3379-3381, September 1998.
- 6) S.Iida, D.Suzuki, S.Kambe, O.Ishii,  
“Enhancement in the Magneto-  
Impedance(MI) Effect of Multi-  
Ribbon”, IEEE Trans. Magn., vol.36,  
No.5, pp3361-3665, September 2000
- 7) M.Takeza, H.Kikuchi, M.Yamaguchi,  
K.Arai, “Miniaturization of High-  
Frequency Carrier-Type Thin-Film  
magnetic Field Sensor Using  
LaminatedFilm”, IEEE Trans. Magn.,  
vol.36, No.5, pp3664-3666, September  
2000