

## B. 2. 3 引張試験

### B. 2. 3. 1 血管の引張試験

血管接着強度の比較データとして、ダンベル型にした血管の引張試験を行った。血管の寸法の概略図を図 14 に示す。把持部で切断されず、かつ、血管の中心で切断されるように血管をダンベル型にした。血管サイズを厳密に計測するため、血管をデジタルカメラによって撮影し、画像ソフト(Scion Image)を用いてピクセル数より血管の幅と厚さを測定した。引張速度は 4mm/min として 5 回の測定を行った。

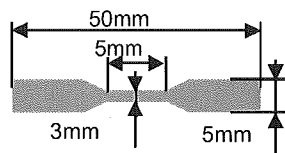


図 14 血管の寸法 概略図

### B. 2. 3. 2 接着させた血管同士の接着強度評価実験

超音波エネルギー、または、温度と圧力とナノ振動により接着させた血管において、接着強さを調べるため、引張試験を行った。引張速度は 4mm/min とした。

## C 実験結果

### C. 1 超音波メスによる血管同士の接着実験結果

接着実験後の血管の概観図を図 16 に示す。血管は 1s から 7s まで 1s きざみで 2 回ずつ測定したときの概観図である。超音波接着の時間に依存し、超音波メスの押し当て部位での変化が見られ、時間の延長に伴い組織損傷が激しくなった。1 秒では、押し当て部位での陥没が見られたが、組織自体の損傷は認められなかった。以後、4 秒までは大きな変化は見られなかった。これは、メスの温度は上昇しているものの、タンパク質変性温度である 80℃ まで上昇していないためであると考えられる。しかし、5 秒以上になると、組織の損傷が激しくなり、6 秒以上では完全に焦げてしまった。これは、80℃ 以上になったためと考えられる。1 回目、2 回目ともほぼ同様の結果であった。超音波による接着実験結果を表 9 に示す。表は荷重、最高温度、接着可能か不可かを示す。荷重は超音波メス押し付け力測定実験より、1.0~4.0N の間の荷重を負荷した。時間が経過するにつれて最高温度が上昇していった。接着について、1s, 2s では接着せず、1s~6s で接着した。しかし、6s では血管に穴が開きはじめ、7s では完全に血

管を貫通してしまった。

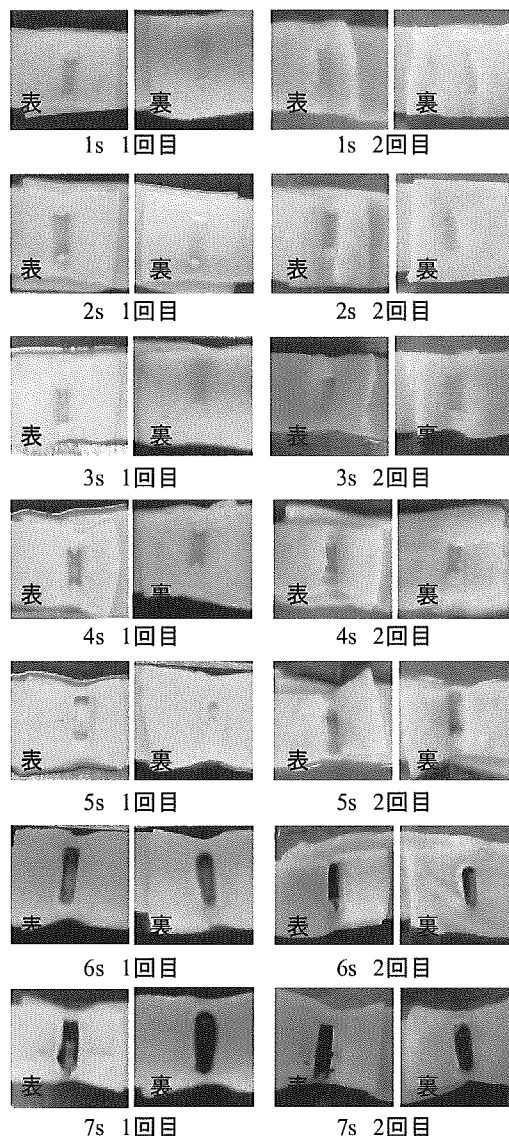


図 16 超音波エネルギーにより接着実験後の血管  
表 9 超音波による接着実験結果

時間 [s]	荷重 [gf]	荷重 [N]	温度 [°C]	接着
1s 1回目	203.498	1.994	52.7	不可
1s 2回目	251.982	2.469	57.7	不可
2s 1回目	217.700	2.133	64.4	不可
2s 2回目	256.161	2.510	54.2	不可
3s 1回目	219.117	2.147	64.8	可
3s 2回目	224.996	2.205	63.0	可
4s 1回目	222.162	2.177	65.1	可
4s 2回目	230.272	2.257	66.7	可
5s 1回目	239.268	2.345	84.6	可
5s 2回目	232.610	2.280	79.7	可
6s 1回目	241.853	2.370	140.0	可
6s 2回目	247.414	2.425	122.8	可
7s 1回目	239.056	2.343	155.3	不可
7s 2回目	243.341	2.385	125.6	不可

### C. 2 温度、圧力負荷と超音波以下のナノ振動負荷による接着実験結果

温度と圧力負荷とナノ振動を与えた場合の接着条件を明らかにするため、押し付け時間を変化させて接着実験を行った。このとき、ナノ振動周波 12kHz, 振動振幅  $1.2\mu\text{m}$ , 電気ごて温度は  $110^\circ\text{C}$ , 押し付け荷重 5N とした。押し付け時間は 1分から6分まで1分刻みで変化させ、3回ずつ行った。また、さらに長時間押し当てたときの影響を見るために、8分と15分の条件においても1回ずつ測定した。接着実験後の血管の概観図を図17に示す。また、接着実験結果を表10に示す。表は時間、実験回数、押し付け開始時の電気ごて先端の計測温度、押し付け荷重、押し付けて期間における電気ごての最高温度、接着可能か不可かを示す。

表10 時間変化における接着実験結果

時間 [min]	回数 [回]	ごて温度 [ $^\circ\text{C}$ ]	荷重 [N]	最高温度 [ $^\circ\text{C}$ ]	接着
1	1回目	110	4.770	114.8	可
	2回目	110	4.780	112.9	可
	3回目	110	4.795	108.4	可
2	1回目	110	4.975	111.9	可
	2回目	110	4.790	110.5	可
	3回目	110	4.530	108.7	可
3	1回目	110	4.755	111.3	可
	2回目	110	4.700	112.7	可
	3回目	110	4.690	111.2	可
4	1回目	110	5.080	109.3	可
	2回目	110	4.740	109.8	可
	3回目	110	4.900	111.5	可
5	1回目	110	4.850	110.1	可
	2回目	110	5.130	111.9	可
	3回目	110	4.320	110.9	可
6	1回目	110	4.750	107.4	可
	2回目	110	4.155	108.0	可
	3回目	110	4.475	111.3	可
8	1回目	110	4.795	112.7	可
15	1回目	110	4.100	117.5	可

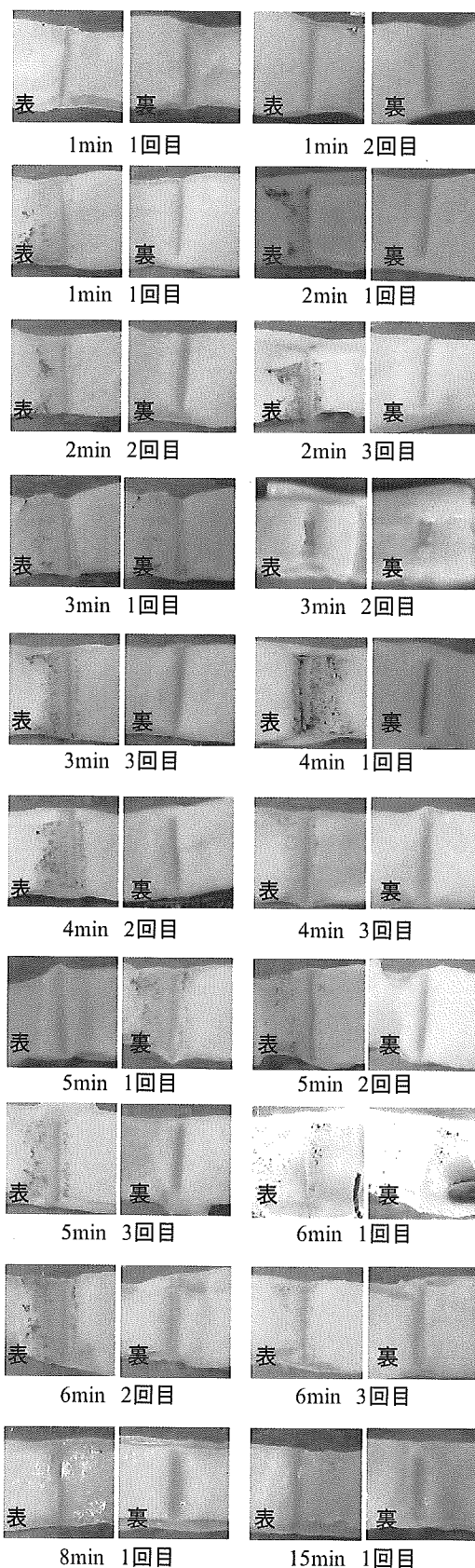


図17 ナノ振動と熱エネルギーによる接着実験後

### C. 3 引張試験結果

#### C. 3.1 血管の引張試験結果

血管接着強度の比較データとして血管自身の引っ張り強さを測定するために、ダンベル型にした血管の引張試験を5回行った結果（荷重—伸び線図）を図18に、最大荷重を表11に示す。グラフは、横軸に伸び[mm]、縦軸に荷重[N]となっている。また、そのときの引張試験結果（応力—ひずみ線図）を図19に、引張強さを表12に示す。グラフは、横軸にひずみ[-]、縦軸に応力[MPa]となっている。動脈血管の最大応力は1MPa程度であった。

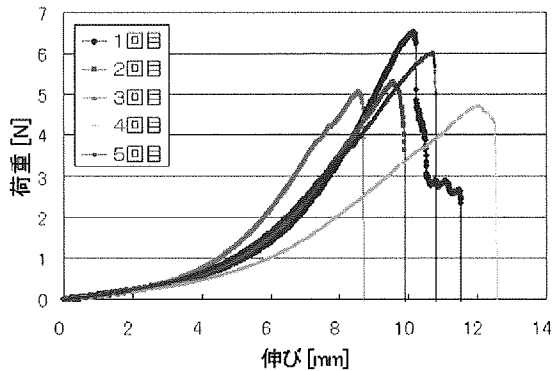


図18 引張試験結果（荷重—伸び線図）

表11 最大荷重

測定回数 (回)	荷重 (N)
1	6.521
2	5.307
3	5.088
4	4.727
5	5.996

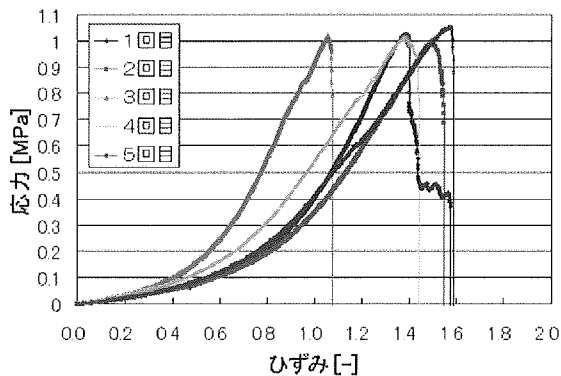


図19 引張試験結果（応力—ひずみ線図）

表12 引張強さ

測定回数 (回)	応力 (MPa)
1	1.025
2	1.001
3	1.018
4	1.014
5	1.051

#### C. 3.2 超音波メスにより接着させた血管同士の接着強度評価実験結果

超音波メスによって接着させた血管同士の引張試験結果（荷重—伸び線図）を図20に、接着強さを表13に示す。グラフは、横軸に伸び[mm]、縦軸に荷重[N]とである。接着した負荷時間3s, 4s, 5s, 6sについて、2回ずつ測定した。接着強さは5sのとき最大となり、0.165MPaとなった。

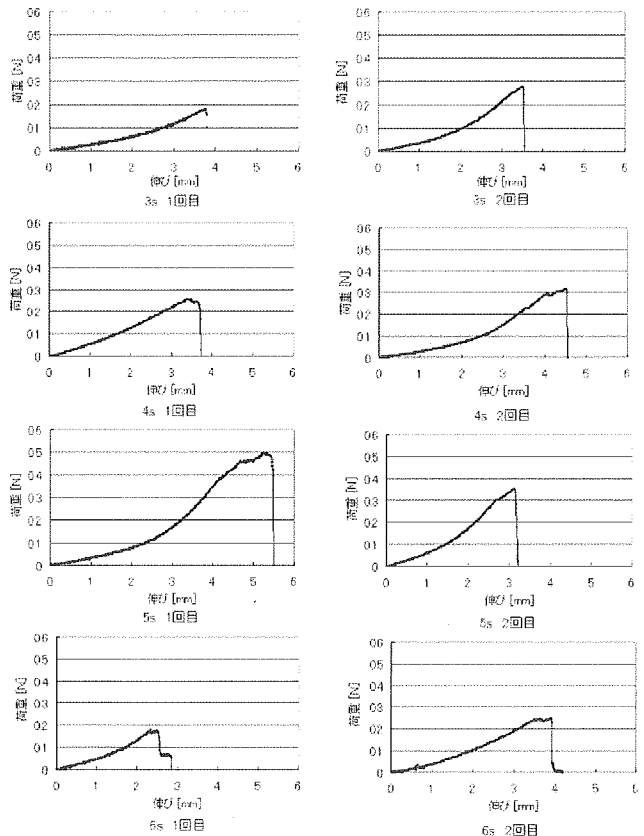


図20 接着させた血管同士の引張試験結果（荷重—伸び線図）

表 13 接着強さ

時間 [s]	荷重 [gf]	荷重 [N]	温 度 [°C]	接着強さ [Mpa]
3s 1回目	219.117	2.147	64.8	0.060
3s 2回目	224.996	2.205	63.0	0.092
4s 1回目	222.162	2.177	65.1	0.085
4s 2回目	230.272	2.257	66.7	0.106
5s 1回目	239.268	2.345	84.6	0.165
5s 2回目	232.610	2.280	79.7	0.117
6s 1回目	241.853	2.370	140.0	0.058
6s 2回目	247.414	2.425	122.8	0.082

C. 3. 3 温度、圧力負荷とナノ振動により接着させた血管同士の接着強度評価実験結果

温度、圧力負荷と超音波以下のナノ振動負荷によって接着させた血管同士についての引張試験結果（荷重—伸び線図）を図 21 に、接着強さを表 14 に示す。グラフは、横軸に伸び[mm]、縦軸に荷重[N] である。接着面積は画像より 1.144mm<sup>2</sup> となった。なお、接着していないものは空欄とした。

表 14 接着強さ

時間 [min]	回数 [回]	最高温度 [°C]	引張荷重 [N]	接着強さ [MPa]
1	1回目	114.8	0.647	0.566
	2回目	112.9	0.742	0.649
	3回目	108.4	0.273	0.239
2	1回目	111.9	0.297	0.260
	2回目	110.5	1.123	0.982
	3回目	108.7	0.000	0.000
3	1回目	111.3	0.707	0.618
	2回目	112.7	0.324	0.283
	3回目	111.2	0.762	0.666
4	1回目	109.3	0.492	0.430
	2回目	109.8	0.704	0.615
	3回目	111.5	0.808	0.706
5	1回目	110.1	0.614	0.537
	2回目	111.9	0.707	0.618
	3回目	110.9	1.174	1.026
6	1回目	107.4	1.045	0.913
	2回目	108.0	1.050	0.918
	3回目	111.3	0.841	0.735
8	1回目	112.7	1.467	1.282
15	1回目	117.5	1.576	1.378

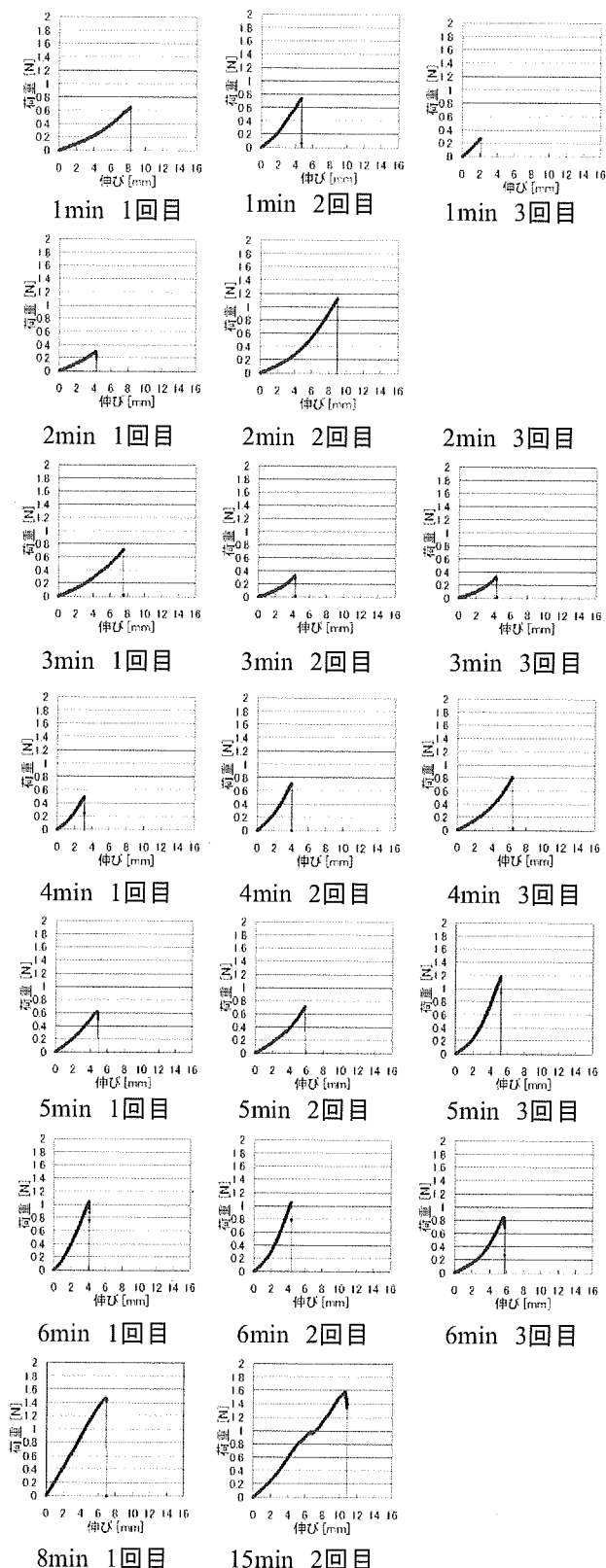


図 21 引張試験結果（荷重—伸び線図）

## D. 考察

### D. 1 超音波メスによる血管同士の接着実験

超音波メスによる血管同士の接着実験を行った。実験結果から3~5sにおいて血管が白く変性し、接着した。5sになると茶色に変性し、6sでは血管に穴が開きはじめ、7sでは完全に貫通してしまうため、負荷時間3~5sが望ましいと考える。

### D. 2 温度、圧力負荷と超音波以下のナノ振動負荷による接着実験

温度と高周波振動による血管の接着が可能か調べるため、温度制御可能な電気ごてとピエゾ振動子による血管同士の接着実験を行った。実験結果より超音波振動でなく、温度と高周波振動で接着することから、接着は熱と振動エネルギーであることがわかった。しかしながら、押し当て時間だけでなく、温度、ナノ振動の振動周波数および振動振幅、押し付け荷重など、パラメータが多いため、接着の条件を明らかにするためには、より詳細な実験が必要であると考えられる。

### D. 3 引張試験

接着させた血管における接着強度を評価するため、引張試験を行った。超音波による接着強さは最大0.165MPaとなった。医用接着剤として、血管にはアルデヒド系の接着剤が用いられており、物質・材料研究機構の研究において、血管の接着強度が最大0.01MPaである。よって超音波による接着は接着剤の10倍以上の強度を実現できることがわかった。

さらに、温度、圧力負荷と超音波以下のナノ振動負荷による接着強さは周波数12kHz、振幅200nm、計測温度110℃、負荷時間6min、荷重5Nのとき最大となり、1.605MPaとなり、熱と高周波振動による接着は、血管自体と同等の強度を実現できるがわかった。

## E. まとめ

ナノ振動によって生体と接着するステントの開発のためには、接着メカニズムを詳細に解析する必要がある。本研究では、生体組織同士の接着性について、基礎的な検討を行うことを目的として、超音波エネルギーと振動エネルギーおよび熱エネルギーによる接着現象の観察を行い、以下のことが明らかとなった。

- 対象物に一定荷重で超音波メスを当てたときの接着温度を評価するデバイスの開発を行った。接着温度60~80℃のとき、血管が良好に

接着した。

- 血管の接着効果を評価するため、生体組織用引張試験機を開発した。超音波による血管接着強度は最大0.165MPaとなり、接着剤の10倍以上の強度を得ることができた。
- 温度、圧力負荷と超音波以下の振動負荷による接着実験では、超音波接着以上の血管接着能を確認した。このことから、接着には温度と振動エネルギーが必要であり、必ずしも超音波が必要ではないことがわかった。

本研究成果を利用することにより、新しい生体組織接着理論に基づくステント等の人工材料と生体との接着の新技术の基礎研究とそれを応用した血管接着性ステントの開発の実現が可能となると考える。

## F. 研究発表

- 論文発表  
無し
- 学会発表
  - 吉田典央, 柴田隆行, 堀内宰, 増澤徹, 岸田晶夫, 細胞機能制御のためのMEMS細胞加振デバイスの開発, 電気学会研究会資料, LD-05-44~56, pp57-60, 2005
  - 能田高行, 増澤徹, 樋上哲哉, 岸田晶夫, 佐藤裕一郎, Quick touch 術式効果の工学的評価と超音波メス制御方式の検討, 第3回生活支援工学系学会連合大会講演予稿集, 1P1-31, p42, 2005
  - 増澤徹, 草間淳, 木村孝之, 柴田隆行, 岸田晶夫, 木村剛, ナノ微小振動と細胞, 第3回生活支援工学系学会連合大会講演予稿集, 1A2-A5, p80, 2005
  - Jun Kusama, Takayuki Kimura, Takayuki Shibata, Akio Kishida, Toru Masuzawa, Cell function control by nano vibrations, The First International Student Conference, p211-214
  - 濱口崇志, 能田高行, 加藤綾子, 岸田晶夫, 木村剛, 増澤徹, 超音波メス制御による手術支援に関する研究, 人と福祉を支える技術フォーラム2006, p8, 2006
  - 岸田晶夫, 木村剛, 草間淳, 石丸正臣, 増澤徹, 藤里俊哉, 微小振動による細胞の接

着制御の検討、平成17年繊維学会年次大会  
予稿集、60、41、2005

7) A. Kishida, T. Kimura, T. Furuzono, T. Fujisato, T. Masuzawa, Nano-vibrating cell culture system for tissue engineering, 4<sup>th</sup> Annual meeting of the European tissue engineering society, LII, 2005

8) 伊藤由樹子、大富美智子、草間淳、増澤徹、南広祐、木村剛、藤里俊哉、岸田晶夫、ナノ振動刺激による細胞の接着、増殖、分化への影響、第5回日本再生医療学会、5、p219、2005

9) T. Shibata, Y. Makita, T. Masuzawa, A. Kishida, E. Makino, T. Mineta, Development of bio-microdevice actuated by piezoelectric thin film for cell culture, 5<sup>th</sup> euspen international conference, pp777-780, 2005

10) 伊藤圭介、柴田隆行、水上良明、堀内宰、増澤徹、峯田貴、牧野英司、オンチップ細胞サージェリーシステムのためのナノニードルアレイの開発ーシリコンのドライエッチングの評価ー、2005年精密工学会秋期学術講演会予稿集、p93-94、2005

11) 吉田典央、柴田隆行、堀内宰、増澤徹、岸田晶夫、細胞機能制御のための圧電駆動型バイオマイクロデバイスの開発、2005年精密工学会秋期学術講演会予稿集、pp87-88、2005

12) 高橋洋一、柴田隆行、水上良明、堀内宰、増澤徹、峯田貴、牧野英司、ニッケル電鍍金型を用いたマイクロプリント技術の開発、2005年精密工学会秋期学術講演会予稿集、pp117-118、2005

## G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得  
特願 2006-55619  
特願 2006-55620
2. 実用新案登録  
無し
3. その他  
無し

## ナノ振動子の位置計測を目的とした集積化磁気センサに関する研究

分担研究者 木村 孝之 茨城大学工学部システム工学科助教授

### 研究要旨

現在、磁気センサは磁石を用いた位置検出や回転検出といったモーターの制御に広く使われている。一般的に使われている磁気センサは InSb、GaAs などの材料を使用したホール素子である。これらのセンサを使用して正確な物体の位置計測に関する研究はほとんど行われていない。そこで MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) の反転層を利用した磁気センサを Si 上に二次元に集積化し、ひとつのチップで磁石の位置や回転を検出する方法が考えられている。この方法はコスト、設置スペースの問題を解決しつつ、さらに以下に示す方法によって感度が低いという Si の特性を補うことができる。本研究では Si ウエハ上に集積化した 2 次元磁気センサにより、位置計測を可能とするための研究を行った。初めて試作した磁気センサは 1 個あたりの大きさが  $50\mu\text{m}$  角であり、それらが  $64 \times 64$  のアレイ状に配置された。試作は  $0.35\mu\text{m}$  の CMOS 標準プロセスにより行われた。この磁気センサにより、磁石からの磁束を測定することが出来たが、感度が低く、測定スピードも  $0.047\text{flame}/\text{sec}$  と遅かった。そのため、高速動作に対応できるように読み出し方法や読み出し回路を改良し、2 回目に試作した磁気センサでは  $1647\text{flame}/\text{sec}$  の読み出し速度を実現した。この様にナノ振動子の位置計測を高速に出来るようになったが、感度が小さいため位置計測が出来る範囲が狭いという問題が残った。これは今後の課題となる。

### A. 研究目的

本研究ではナノ振動子を取り付けられたステントが正しく患部に位置しているかを計測するための位置計測システムの構築を目的とする。現在では X 線などにより確認が行われているが、患者への負担や装置規模の点で問題となる。そのため、ステントの位置を磁気センサにより簡便に知ることが出来れば様々な問題の多くを解決できると考えられる。

### B. 研究方法

本研究では、ステントの位置を計測するための磁気センサの特性評価、ならびに改善を行う。センサは CMOS プロセスによる集積化デバイス技術を用いて作成する。さらにその読み出し速度や感度特性の評価を行う。

### C. 研究結果

#### C. 1 ホールセンサの基本動作

##### C. 1. 1 ホールセンサの構造

ホールセンサの構造例として、N 型半導体からホール電圧が得られる過程を図 3-1、3-2 に示す。

まず素子の X 軸方向に電流  $I$  を流して、それとは垂直な Z 軸方向に磁束  $B$  を印加すると、電流と磁束のどちらとも垂直な Y 軸の負方向にローレンツ力  $F$  が発生する。これをホール効果という。電子は素子中を進む過程でローレンツ力をうけながら進むため電子が図 2-1 の出力端子 R 側に集まる。そうするとホール素子の出力端子 R 側は負に帯電し、測定端子 S 側は電子が不足するため相対的に正に帯電する。これにしたがい、ホール素子の出力端子 S と R 側で電位差が発生する。この出力端子 R-S 間の電位差をホール電圧  $V_H$  として測定することによって磁束の強さを測定できる。

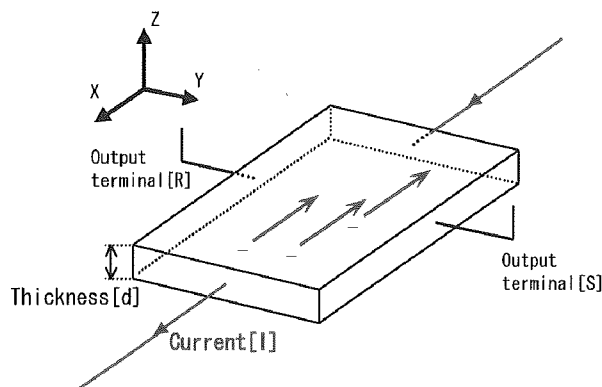


図 3-1 磁束を印加前のホールセンサ

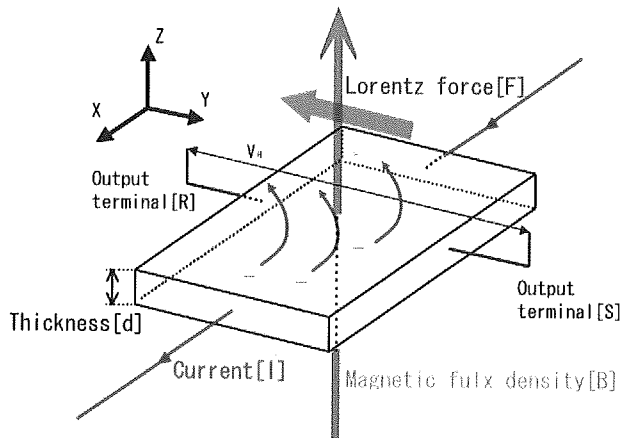


図 3-2 磁束を印加後のホールセンサ

### C. 1. 2 ホール電圧の理論式

ホール電圧を求める式を (1)、(2) に示す。この式よりホール電圧はホール係数、素子に流れる電流、素子にかかる磁束に比例し、素子の厚さに反比例する事がわかる。ホール係数は材料によって決まる値である。ここで磁束の強さ、流れる電流を一定とすれば、素子の厚さが薄いほど高いホール電圧を得られる事が分かる。

次に積感度を求める式を (3) に示す。積感度とは 1mA、0.1T の条件下で何 mV 出力されるかを感度として表したものである。

$$V_H = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{d} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$R_H = \frac{1}{e \cdot n} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$S = \frac{V_H}{I \cdot KB} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$V_H$  : ホール電圧             $S$  : 積感度             $R_H$  : ホール係数  
 $I$  : 素子に流れる電流  
 $B$  : 素子に垂直にかかる磁束             $e$  : 電子素量  
 $n$  : 半導体の電子密度

現在磁気センサに用いられる代表的な材料は InSb や GaAs などである。なぜなら、これらの材料

は非常に感度が良く、特に InSb は温度による影響を受けやすいなどの欠点があるものの単体の磁気センサとして使うには適切な材料である。それに対し Si は電子の移動度が低いため感度が低いという欠点があるが、非常に集積化しやすいという利点から主に増幅回路とともに集積化されたホール IC として使われることが多い。Si はこのようにして増幅回路を組み込む事で出力電圧を上げることができるため、InSb、GaAs などの材料で作製された磁気センサと比べても遜色ない出力を得られると考えられる。

### C. 1. 3 MOSFET の反転層を用いたホールセンサの構造

本研究で使用したホールセンサは MOSFET の反転層を利用した磁気センサを用いている。動作原理はゲート酸化膜界面付近に形成した伝導電子の層である MOSFET の反転層に磁束をかけることによってホール効果を起こし、センサ内の電子の偏りを出力端子 R、S で測定する。このときの出力をホール電圧として定義し、測定している。なお、測定に使われている出力端子 R、S はソースやドレイン領域を作製する際に同時に作製できるので特別なプロセスなどは必要なく、簡単に作ることができる。

ここで説明した構造はつまり、MOSFET の反転層を図 3-1 で示したホール素子として扱う構造である。この構造は式 (1) から分かるように素子の厚さがホール電圧に反比例していることから厚さの薄い MOSFET の反転層をホール素子として扱うことにより Si そのものをバルクとして使用したホール素子と比べ、高いホール電圧を得る事ができると考えられる。MOSFET の種類は N チャネル MOSFET と P チャネル MOSFET の二種類があるが、ここで用いた MOSFET は、より高いホール電圧を得るためキャリアの移動度が高い N チャネル MOSFET を使用している。なおホール電圧はドレインとソースと同じプロセスで作製された端子 S、端子 R で読み出しているため出力端子を作製する際に特別なプロセスなどは必要ない。次に MOSFET の反転層を用いたホールセンサの図を図 3-3 に示す。



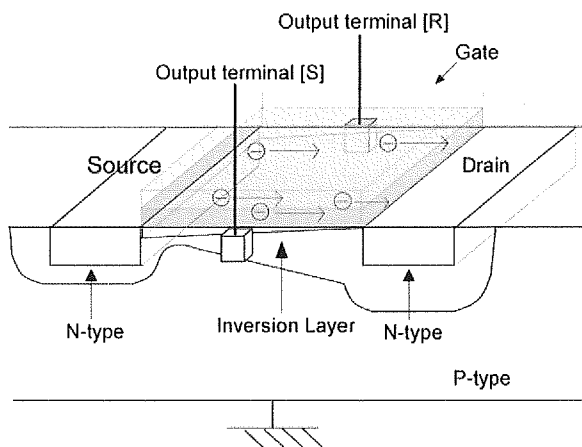


図 3-3 MOSFET の反転層を用いたホールセンサ

図 3-3 を用いて MOSFET が動作する過程を説明する。まず MOSFET のドレイン側に正の電圧を印加するとドレイン側のポテンシャルが低くなる。この状態でゲートに低い正の電圧を印加するとゲート酸化膜界面のポテンシャルが少し低くなり、ソース側にたまっている電子がドレイン側に拡散される。このときはまだゲートにかかっている電圧が低いのでゲート酸化膜界面では空乏層が形成されるにとどまる。さらにゲートに正の電圧を印加して、その大きさがしきい値  $V_T$  以上になるとゲート酸化膜界面付近では P 型シリコンであるにも関わらず伝導電子が大量に発生する現象が起こる。この現象を反転と呼び、この反転した領域は酸化膜界面付近に層状に広がっているため反転層と呼ばれている。この状態の MOSFET を磁気センサとして使用する。

この状態の反転層にはドレインからソースに向かい電流が流れている。このように MOSFET が駆動している時に図 3-4 のように磁束をかけるとホール効果が起こり、ローレンツ力が図 3-4 の手前から奥に向かって発生する。

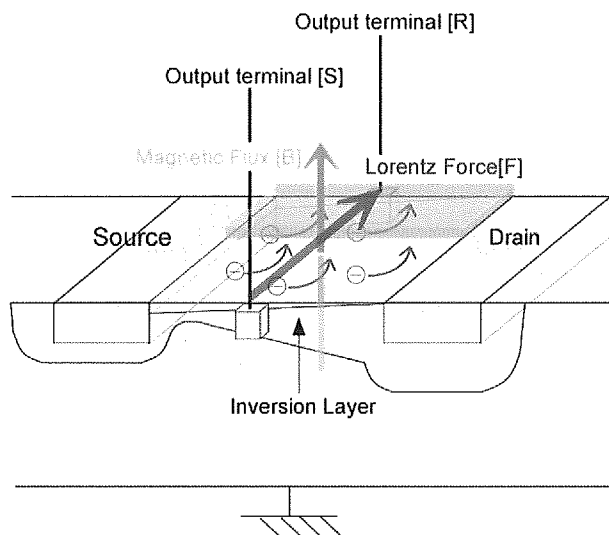


図 3-4 磁束を印加後の MOSFET の動作

すると電子はローレンツ力を受けながら進むため図 3-4 の出力端子 R 側は負に帯電し、出力端子 S 側は電子が不足するため、相対的に正に帯電することになる。これによってホール素子の出力端子 S 側と出力端子 R 側に電位差が発生する。この出力端子 R-S 間の電位差をホール電圧  $V_H$  として測定すれば磁束の強さを逆算することができるので、図で説明した MOSFET を磁気センサとして使用できることがわかる。

#### C. 1. 4 二次元集積化磁気センサの使用例

ここでは今回提案される二次元集積化磁気センサで磁束を測定する例を図 1-5 で紹介する。この例では被計測物体の軸の先端に永久磁石を固定し、磁石の中心位置を求める事で被計測物体の位置計測が可能となる。

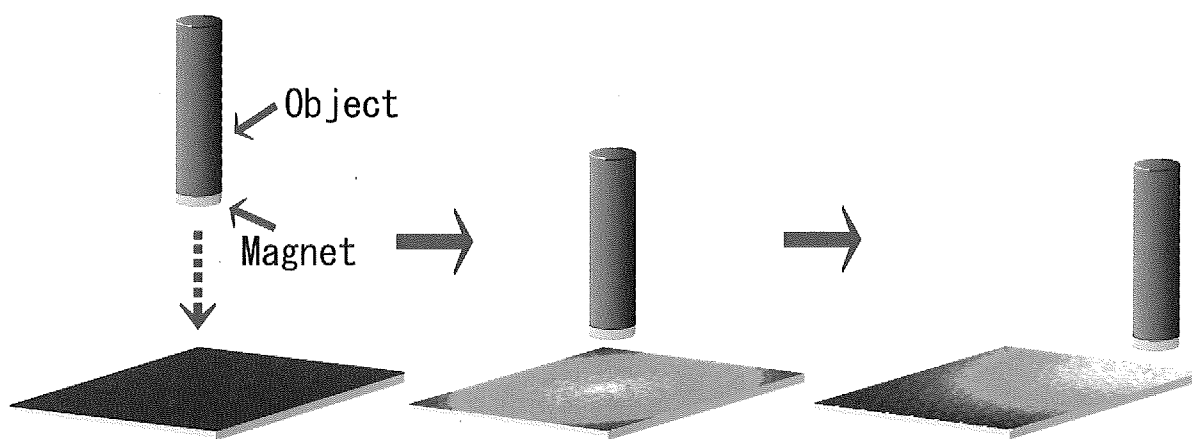


図 3-5 二次元集積化磁気センサの使用例

まず、図 3-5 の左図のように被計測物体の真下に二次元に集積した磁気センサを配置する。次の動作として集積化したセンサ付近に磁石を接近させると図 3-5 の中央図のようにセンサからの出力を一枚の二次元磁束分布図としてコンピュータで処理することができる。出力の強弱は磁束の大きさに比例する、つまり磁石の中心位置に近ければ近いほど強くなり、逆に離れば離れるほど弱くなると予想される。

ここで出力された二次元磁束分布図を元にコンピュータで処理する事によってその図の中心位置、つまり磁石の中心位置を検出することが可能となる。図 3-5 右図のように被計測物体の位置が異なればセンサからの出力される二次元磁束分布図も変化する。この様に一つのチップによって二次元磁束分布図を元に磁石の位置情報を知ることができる。

### C. 1. 5 二次元磁束分布図から磁石の中心位置を検出する方法

次に二次元磁束分布図から磁石の中心位置をどのように検出するかを原理を述べる。まず、出力された画像の特徴を抽出し位置計測に適したデータに変換するために二値化という処理を行う。二値化とは閾値を決めてその値より大きければ 1 (黒)、小さければ 0 (白) の 2 種類の値で画像を表す処理のことである。二値化処理の例を図 3-6 に示す。

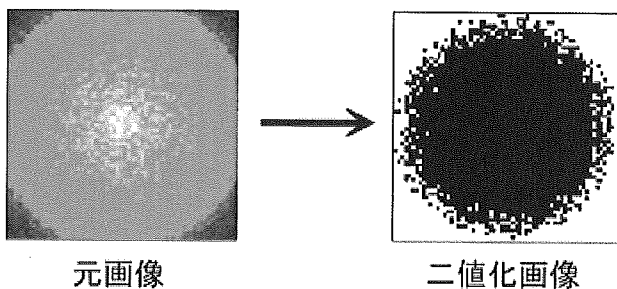


図 3-6 二値化処理

次にパターンマッチングという作業を行う。パターンマッチングとは対象の画像と、それに近いパターンとを比較して合わせこむ作業のことで

ある。今回は磁石の形が円形なので出力される画像も円と仮定して、用意した円形のパターンを用いてパターンマッチングを行った。その様子を図 3-7 に示す。

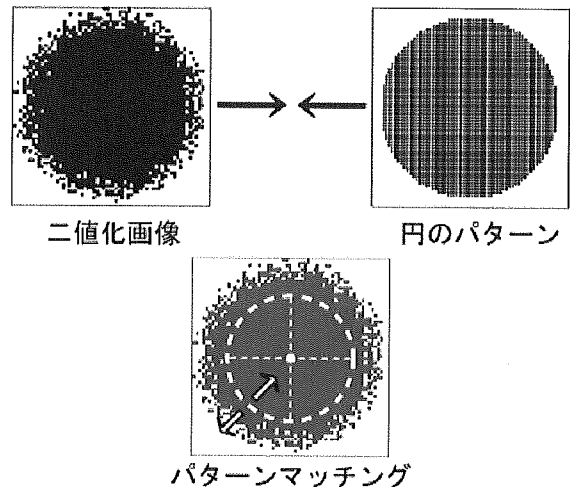


図 3-7 パターンマッチング

まず、二値化画像と円のパターンを比較して仮の中心位置と半径を決定する。その後、半径や中心位置を変えていって最も高い相関係数が出た場所、つまり一番半径と中心位置が一致する点をその画像の中心位置として求めた。これらの処理をコンピュータ上で行い、二次元磁束分布図から中心位置を求めた。なお、このプログラムは我々の研究室で開発したプログラムでありシミュレーションを行った結果、センシングエリアの中心から縦横 $\pm 22$ 画素以内に中心点が位置していれば $\pm 25 \mu\text{m}$ 以下の誤差で中心位置を検出できることがわかっている。

ここまで説明したことを含めて本研究の目標とする値を決定した。まず、二次元磁束分布図を読み出す速度は 1000 frame/sec (1 秒で 1000 枚の図を出力できる速度) にした。そして中心位置測定の精度はシミュレーション値である $\pm 20 \mu\text{m}$ 以内の誤差に収まる程度と設定した。これらの値を本研究で使用されたセンサの目標として実験を行った。

## C. 2 作製した集積化磁気センサの構成

### C. 2. 1 二次元集積化磁気センサの概要

研究室で設計、作製されたチップは Si ウエハ上に MOSFET の反転層を使用した磁気センサを 64 列×64 行に集積化したものであり、二次元磁束分布図を出力することに重点をおいたセンサである。得られた磁気センサの位置情報は A/D コンバータを用いてデジタルデータに変換された後、パソコンに取り込む。そして取り込んだデータはプログラムによって処理され、二次元磁束分布図が出力される仕様である。なお、使用された磁気センサの積感度は  $2.7\text{mV}/\text{mA} \cdot \text{kG}$  である。この MOSFET の反転層を用いた磁気センサ特性を図 4-1 に示す。

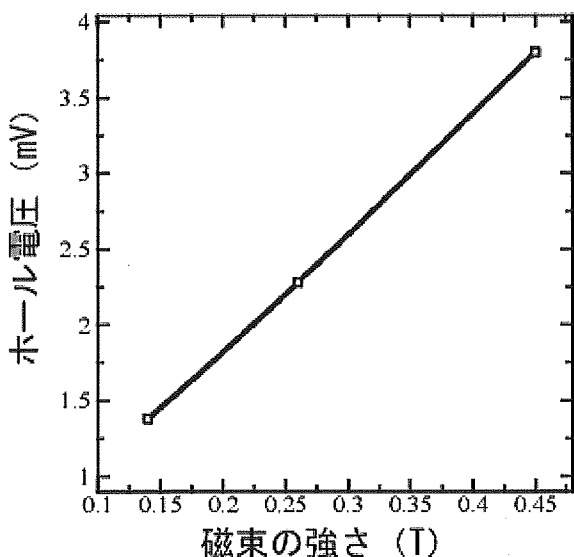


図 4-1 ホール電圧と磁束の関係

この図は磁束の強さが 0.45T、0.27T、0.14T の三点で測定したホール電圧を調べたものである。グラフからホール電圧はほぼ磁束の強さに比例していることがわかり、線形性が良いセンサであることが確認できた。

#### C. 2. 1. 1 読み出し回路の構成

今回用いたホール電圧の読み出し回路のブロック図を図 4-2 に示す。ホール電圧を読み取るためには電圧の差を測る必要があるため信号線が

二本必要となってしまいます。しかし信号線を増やすと集積化したときにチップ面積が大きくなるという問題が生じる。そこで読み出しの信号線は制御回路スイッチを切り替える事により時分割で信号を読み出す方式とした。読み出しの順番は出力をスイッチングにより時分割で、さらに一番上の行から各行一斉に（以下、列並列とする）読み出している。二次元に配列された磁気センサの各行を列並列で順番に読み出し、最終行まで測定を行った時点で読み出し操作が完了する。

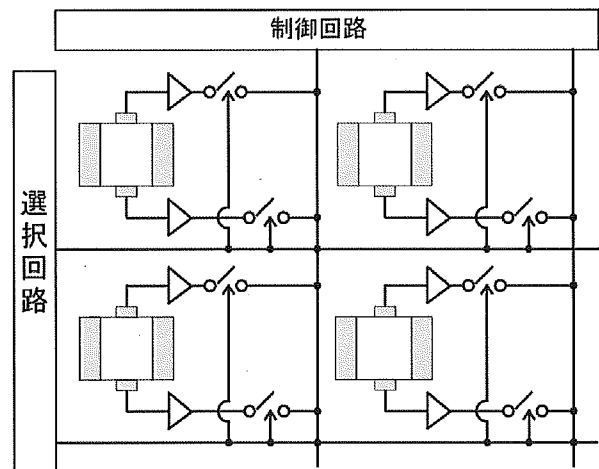


図 4-2 ホール電圧の読み出し方法のブロック図

次に読み出し回路の回路図を図 2-3 に示す。読み出し回路は n チャンネル MOSFET を使用したソースフォロアと p チャンネル MOSFET を使用したソースフォロアの 2 段の増幅回路からなっている。ソースフォロアとは信号電圧の損失が無視できるようにする電圧バッファのことである。

ホールセンサの端子 R、端子 S からのそれぞれ出力電圧  $V_1$ 、 $V_2$  とする。これらの出力をスイッチ切り替えによって時分割で列並列に読み出している。ここで示したのは一画素の構造であり、同じ構造の画素が縦 64 列、横 64 行に集積化されている。なお、 $V_{bn}$  は  $10\mu\text{A}$ 、 $V_{bp}$  は  $1\mu\text{A}$  をこの回路に流すためのバイアス電圧としている。

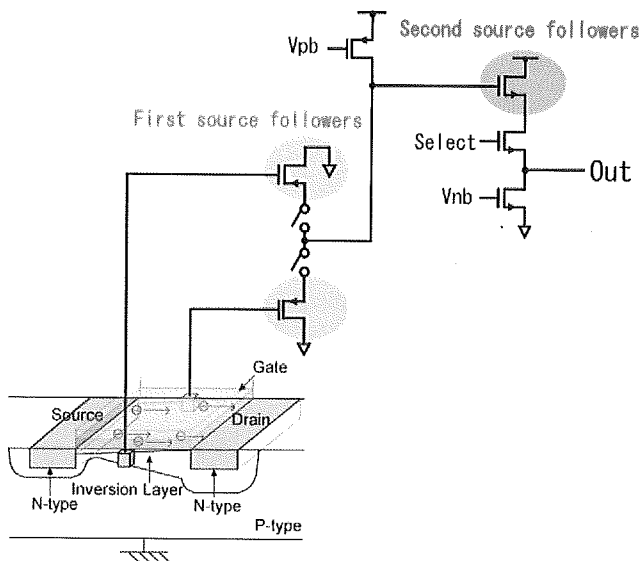


図 4-3 ホール電圧読み取り回路の図

### C. 2. 1. 2 チップの概要

以下に集積化磁気センサである第一次試作のチップ写真を図 4-4 に示す。試作されたチップのサイズはパッドを含め 4.9mm 角、プロセスは ROHM 社の 0.35 $\mu$ m 標準 CMOS プロセスルールであり 2 層ポリ 3 層メタル構造である。右上のエリアが磁気センサを二次元 (64 列 $\times$ 64 行) に配置してあるエリア、左のエリアがデジタルの信号を生成し、磁気センサを制御するエリア、最後に下のエリアが磁気センサの出力を制御するエリアである。ここで説明した磁気センサを配置してあるエリアを以後センシングエリアとする。このエリアの大きさは縦 3.2mm、横 3.2mm となっている。

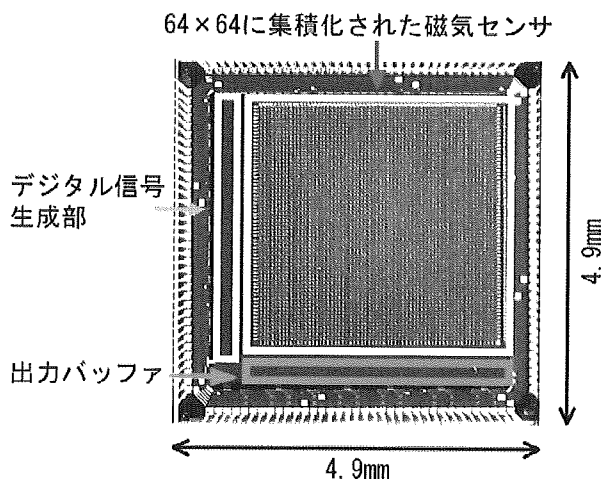


図 4-4 第一次試作のチップ写真

### C. 2. 1. 3 測定ボードの作製

今回設計、製作をしたホール電圧測定ボードの写真を図 4-5 上に示す。また、A/D コンバータの写真を図 4-5 下に示す。磁気センサ、A/D コンバータは研究室で試作されたものを使用している。なお A/D 変換 IC は測定の関係上 8 ブロック必要になるため、A/D 変換 IC も 8 つ必要になる。その理由は後術の「4. 2. 4 測定回路の構築」で詳しく述べる。

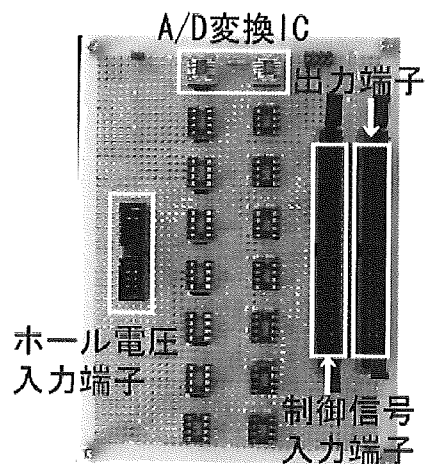
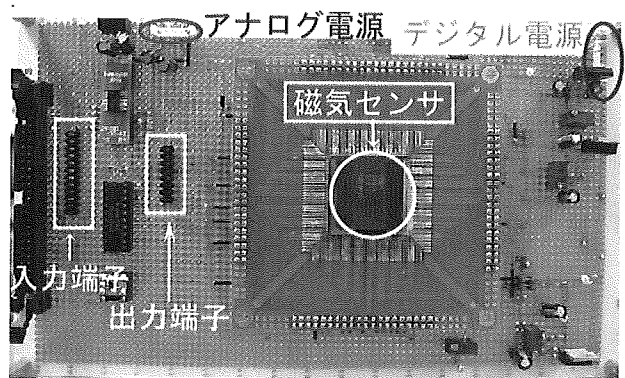


図 4-5 ホール電圧測定ボードと A/D 変換ボード

### C. 2. 1. 4 測定回路の構成

二次元磁束分布測定を行うにあたり、64 列 $\times$ 64 行の磁気センサからのホール電圧の読み出しは次のように行った。最初に読み出し方法の説明図を図 4-6 に示す。

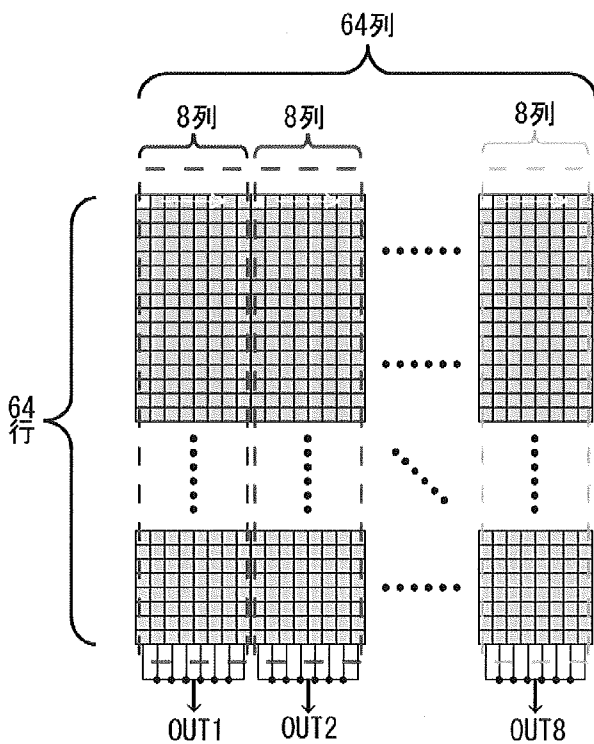
まず 64 列 $\times$ 64 行の磁気センサを 8 列で 1 ブロックとして 8 ブロックに区切る。その後、各ブロックの最も左上の磁気センサからの出力を読み出す。このとき各ブロック列並列に読み出しているので OUT1 から OUT8 に、それぞれのホール電圧

が出力されている。これらの出力を読み出し終えたら、次に先ほど測った磁気センサの右隣に位置する磁気センサの出力を読み出し、次は2回目に読み出した磁気センサの右隣に位置する磁気センサの出力を読み出す。といった作業を繰り返し、各ブロック8列の読み出しが終了すると1行目から2行目に読み出しの対象が移動する。そして各ブロックの2行目の最も左に位置する磁気センサから出力を読み出し、次はその右隣の磁気センサから出力を読み出す。このように読み出しを繰り返していき、各ブロック64行目の最も右に位置する磁気センサからの出力を読み出し終わったら読み出し作業は終了である。

図 4-6 回路の読み出し手順

### C. 2. 2 測定方法と測定手順

次に二次元磁束分布計測手順をブロック図として図 4-7 示す。測定に使用するのは磁気センサが搭載されているホール電圧測定ボード、A/D コンバータである。今回使用した A/D コンバータは入力された 8ch のアナログ信号をデジタル信号に変換する装置であり、ケーブルを通して PC に信号を転送している。次にホール電圧測定ボード、A/D コンバータへ制御信号を出力するパソコン (以下パソコン A)、A/D 変換されたホール電圧値を取り込むパソコン (以下パソコン B)、それぞれのパソコンとホール電圧測定ボード、A/D コンバータを繋ぐインターフェイスとして最大 50ch 転送可能なケーブルを使用した。



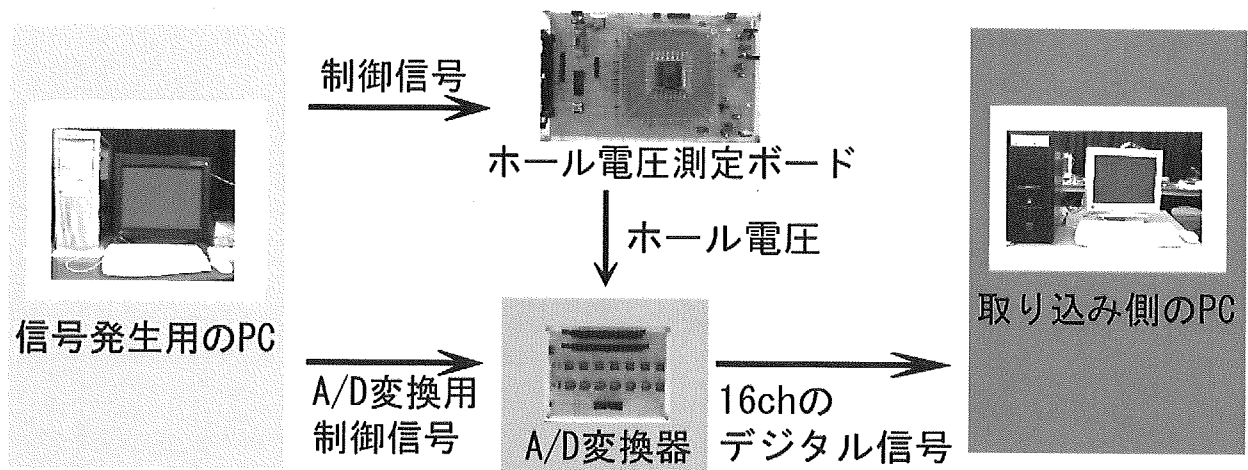


図 4-7 測定手順のブロック図

測定の流れはまず、パソコン A からホール電圧測定ボード、A/D コンバータへ制御信号が入力される。これを受けて磁気センサから 8 個の出力端子へホール電圧が出力される。この出力端子から 8 チャンネル分のホール電圧がケーブルを通して A/D コンバータへ転送される。A/D コンバータによりホール電圧が A/D 変換されデジタル信号になると、このデジタル信号はケーブルを通してパソコン B へ取り込まれる。以上が二次元磁束分布測定の流れになる。パソコン A からホール電圧測定ボードへ入力される制御信号は最初から最後まで 0, 1, 0, 1... を繰り返す CLK と測定開始点を知らせる RES の 2 つである。次にパソコン A から A/D コンバータへ入力される信号はホール電圧測定ボードから入力されたアナログ信号を取り込む信号 TCONV、アナログ信号をデジタルに変換する STCLK、CLK と周期を合わせるための信号 ST1, ST2 の 4 種類である。しかし TCONV と STCLK は 8 ブロック分必要なので合計 10 チャンネルの信号が出力されている。

### C. 2. 3 二次元集積化磁気センサを用いた磁束分布図測定実験

製作した二次元磁束分布計測システムを用いて二次元磁束分布図の測定を行った。測定には N 極の磁石を使用し、磁石の中心がおおよそセンシングエリアの中心に、チップと磁石の距離は約

1mm になるように人の手で固定した。磁石の形状は円柱状であり、直径は 5mm、磁束の強さは磁気センサと磁石の距離が約 1mm の状態で 0.45T であった。出力された画像を図 4-8 に示す。

この画像を見ると出力がボヤけて非常に見づらいことがわかる。これは出力が低く、ノイズの影響を受けやすいためだと思われる。よって画像を多く取り、それらを平均化してやればノイズの影響が少ない画像が出力されるのではないかと考えられる。そこで出力の平均化回数を 1 回から 128 回に変更して測定した。その際、磁石はセンシングエリアの右上隅(点 A') になるようにし、磁石とチップとの距離は 1mm になるように固定した。新たに測定した画像を図 4-9 に示す。

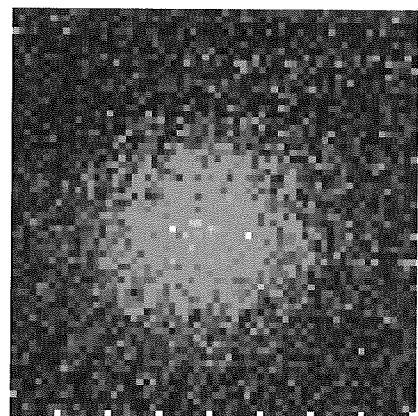


図 4-8 二次元磁束分布図

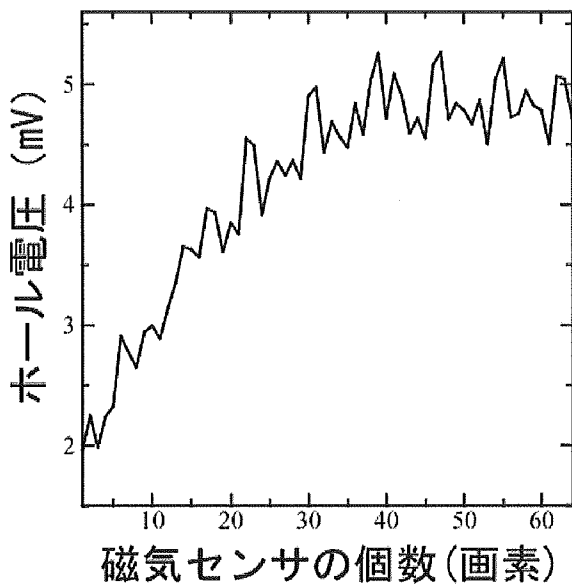
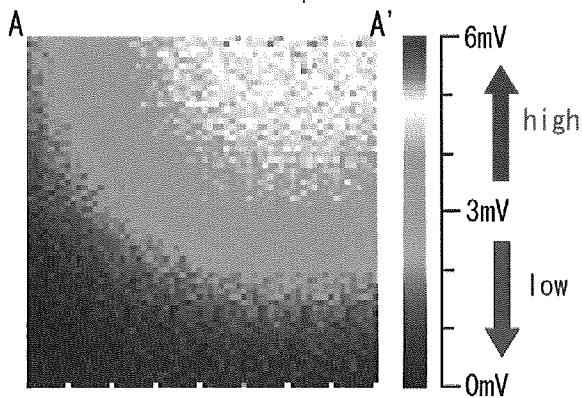


図4-9 128回平均化した磁束分布図(上)とA-A'間の磁気センサの出力グラフ(下)

測定された二次元磁束分布図をみるとホール電圧が非常に綺麗な円の形に出力されていることがわかる。これらの図をみると円形の磁束分布が見てとれる。これは磁石の形状と磁石の中心付近の方が強い磁束が発生し、そこから離れるにしたがって弱くなる特性によるものと思われる。この結果から今回作製された二次元集積化磁気センサで磁束分布図をとる場合、128回平均化処理すれば綺麗な画像を得ることができることが確認できた。

なお、この時の点 A-A' 間の出力を縦軸に、画像の左の画素をから右の画素までを横軸にとったグラフを図 4-9 に示す。このグラフから最高出力は約 5.3mV であり、磁石の中心から離れるにしたがって出力が極端に下がることから理論とおりの結果が得られたと言える。

次の実験に N 極、S 極、二つの磁石を使用し、それぞれチップの中心、右上端の二つの位置パターンで測定した。左の図が N 極の磁石で測定した画像、右の図が S 極の磁石で測定した画像である。なお、出力画像は 128 回平均化したものである。今回の実験でも磁石を人の手で固定して計測したので磁石の位置精度はおおよそのものになっている。

実験の結果を図 4-10 に示す。

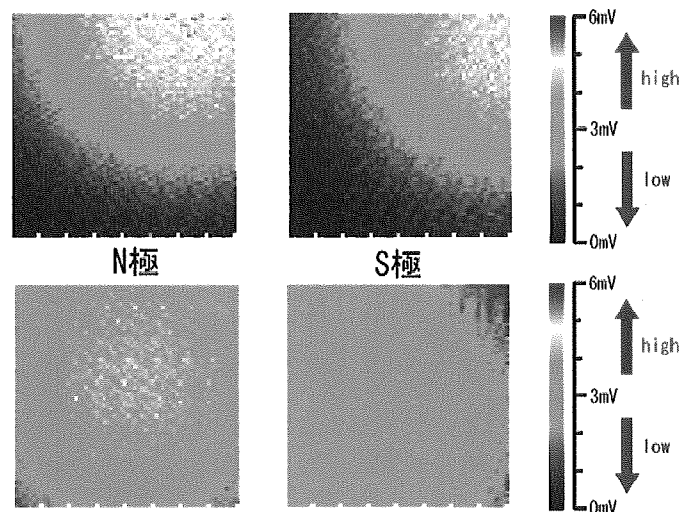


図 4-10 二次元磁束分布測定の結果

これらの図をみると前回の実験と同じく、円形の磁束分布が見てとれる。出力電圧も前回と同じく、最も強い部分で約 5~5.3mV という結果になった。

今回の結果から測定には N 極、S 極磁石でどちらでも計測可能であり、磁石の中心位置がセンシングエリア付近にあれば、どこでも測定可能ということが確認できた。出力電圧は前回と同じく、もっとも強い部分で約 5~5.3mV という結果になった。

#### C. 2. 4 実験結果と考察

今回試作されたセンサの実験では、ひとつのチップで二次元の磁束分布図が測定可能だということがわかった。さらに第一次試作の性能を検討するために今回の実験を行った環境を表として

示す。

表 1 第一次試作の性能と測定環境

回路全体で消費される電力	2.7W
磁気センサの感度	2.7 mV/mA・kG
全画素を読み出す速度	6.1 flame/sec
出力の平均化回数	128回
平均化後の読み出し速度	0.047 flame/sec
1画像の処理にかかる時間	42sec
水平読み出しの周波数	250kHz

第一次試作の欠点として挙げられるのが画像を読み出す速度の遅さである。その原因として考えられるのは128回という平均化回数である。これは出力が最大5mVと低いのでノイズの影響を受けやすいという点を補うための処置である。出力をこれ以上にしようとするとチップが熱によって破壊されてしまう可能性が高くなるので第一次試作ではこれが限界である。この問題を受けて第一次試作の改良版の磁気センサを研究室で設計した。

### C. 3 改良された二次元集積化磁気センサ

#### C. 3. 1. 1 改良された集積化磁気センサの概要

本論文で提案する二つ目の集積化磁気センサ（以下、第二次試作）は第一次試作の欠点である読み出し速度を向上させることに重点をおいたセンサである。第二次試作の特徴はダイナミックドライブ駆動という駆動方式とオペアンプによる出力の増加である。どちらも第一次試作の欠点である読み出し速度の遅さを十分に補える。

#### C. 3. 1. 2 ダイナミックドライブ方式

第二次試作の駆動方式であるダイナミックドライブ方式が第一次試作の駆動方式であるスタティックドライブ駆動と異なる点は、スタティックドライブ駆動が常時すべてのセンサが ON にな

っている状態であるのに対し、ダイナミックドライブ駆動は必要な場所だけ駆動させて消費電力を抑えることができる駆動方式である。この駆動方式により消費電力が大幅に減らす事ができる。例として4行駆動の場合を挙げると従来の16分の1にまで消費電力を減らす事ができる。消費電力が減ると言う事はつまり、第一次試作よりも大きい電流を流す事ができ、問題となっていたノイズなどの影響を受けづらくなると考えられる。ダイナミックドライブ駆動の例を図5-1に示す。

図5-1の例では3行駆動させた例である。①の左上の画素から右へ順次読み出していき、一行すべてが読み出しを完了次第、②に移行する。そして2行の目の左上から右へ読み出していく。このような操作を③、④へと繰り返す。本研究では3行～9行の間で駆動させるのが適切だと判断し、これら値の行数で駆動させた。

#### C. 3. 1. 3 読み出し回路の構成

読み出し回路の回路図を図5-2に示す。読み出し回路はnチャンネルMOSFETを使用したソースフォロアとpチャンネルMOSFETを使用したソースフォロアの2段の増幅回路からなっている。ソースフォロアとは信号電圧の損失が無視できるようにする電圧バッファである。

第二次試作の読み出し回路の構成が第一次試作と異なる点は読み出し線をスイッチングで切り替えるのではなく、2本の信号線を使用している点である。これはホールセンサの端子R、端子Sからのそれぞれの出力電圧V1、V2を内部に集積化したオペアンプをバッファとして使い信号を強化したあと、オペアンプ(LT6200)を差動増幅器として使用することで二つの電圧(OUT1、OUT2)の差を20倍にして出力するためである。これにより第一次試作で問題になっていた出力が低い場合ノイズの影響を受けやすい点を改善できるのでデータの平均化回数も大幅に減らし、読み出し速度の高速化に繋がると考えられる。なお、Vbn、Vbpは10μmを回路に流すためのバイアス電圧とする。



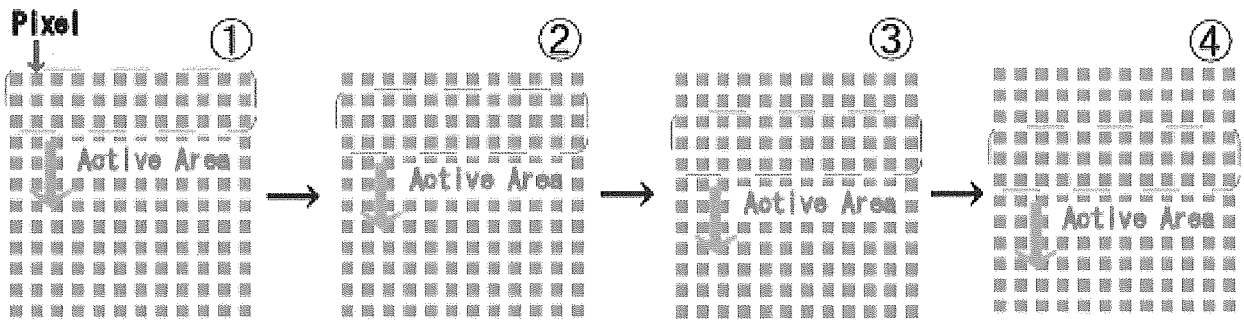


図 5-1 ダイナミックドライブ駆動

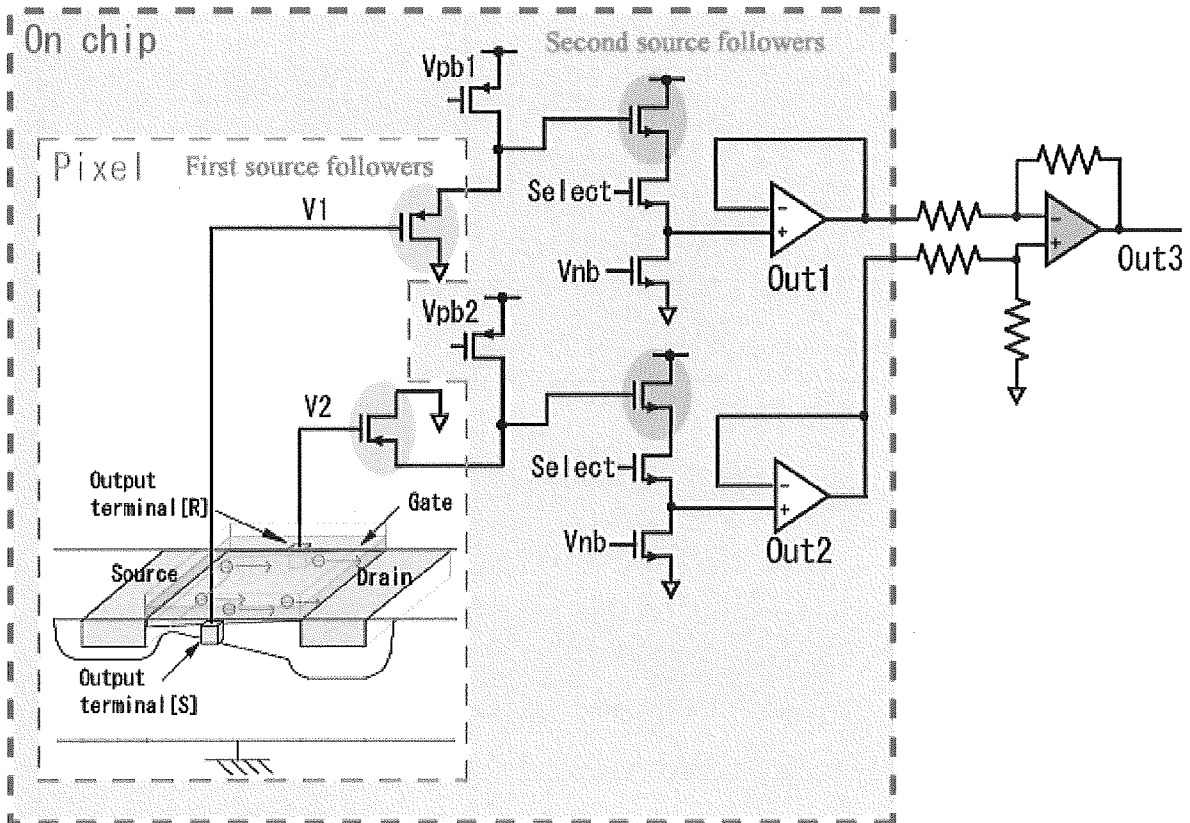


図 5-2 ホール電圧の読み出し回路

### C. 3. 1. 4 第二次試作チップの概要

第二次試作チップの写真を図 5-3 に示す。試作されたチップのサイズはパッドを含め 4.9mm 角、プロセスは ROHM 社の 0.35 $\mu$ m 標準 CMOS プロセスルールであり 2 層ポリ 3 層メタル構造である。

磁気センサ第一次試作と比べ第二次試作で改

良してある点はデジタル信号生成部の駆動力が第一次試作と比べ 1.3 倍してある点、チップ内にオペアンプを集積化しバッファとして使用している点である。このオペアンプでは出力信号をインピーダンス変換しているため、微弱な出力信号でも次段以降の回路へ確実に伝達できるという利

点があり、ノイズ除去に期待が持てる。

### C. 3. 2 測定用基板、測定ボードの作製と測定方法

ここでは私が作製した測定用基板と測定ボードの構成を述べる。その際により高速で精密な測定ができるようにした工夫などふまえて説明してゆく。その後、測定の手順と方法を実際の測定風景を交えて説明する。

#### C. 3. 2. 1 測定用基板の設計と作製

二章の実験では磁石を人の手で固定していたため、正確な磁石の中心位置を測定することができなかった。第二次試作の測定では、 $10\mu\text{m}$  単位で動かすことができる測定器を設計し、それを用いて精密な位置測定を行った。第一次試作では一般的に使われている基板を使用した。第二次試作チップの測定では基板を数 $\mu\text{m}$  の誤差精度で測定器に固定するため、基板をアルミニウムの土台で固定し測定器に固定できるような設計をした。チップを基盤の断面図を図 5-4 に示す。

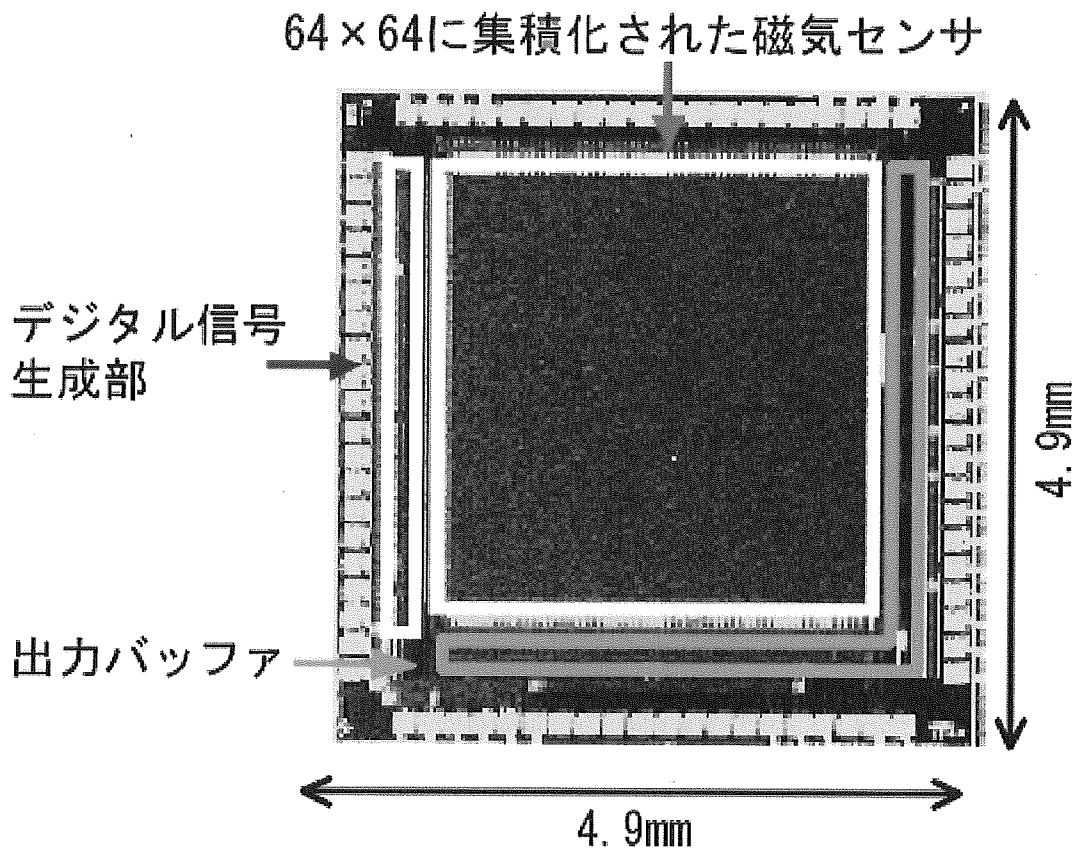


図 5-3 第二次試作のチップ写真

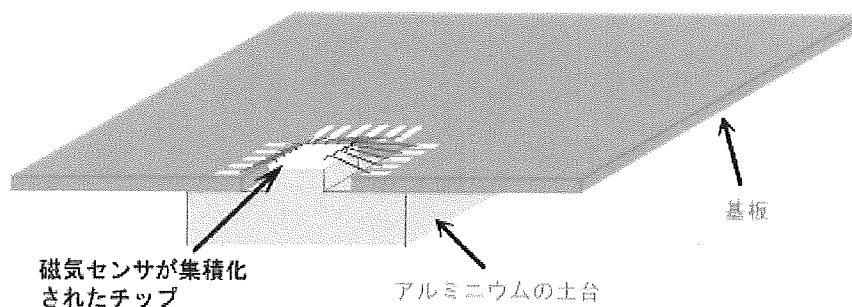


図 5-4 チップと基盤の断面図

さらに既存の基板では鉄などを含む材料が使われており、それらの材料が磁化されて磁束の測定に悪影響を及ぼした可能性があった。そこで今回設計した基板では非磁性の材料のみを用いて作製した。

第二次試作チップを測定するために設計した基板の設計図を図 5-5 に示す。なお、この設計図は CADLUS X という CAD ソフトを使用して設計した図である。この設計図をもとに作製された測定基板の写真を同じく図 5-5 に示す。この写真の基

板には測定に必要なオペアンプや抵抗、コンデンサを取り付けてある。

### C. 3. 2. 2 測定ボードの設計と作製

今回私が設計と製作をした測定ボード兼 A/D 変換ボードの写真を図 5-6 に示す。このボードは 5V の電源 2 つ、3.3V の電源 1 つ、合計 3 つの電源で駆動し入力信号を与えてやれば自動でホール電圧を A/D 変換し、PC に取り込むことができる。

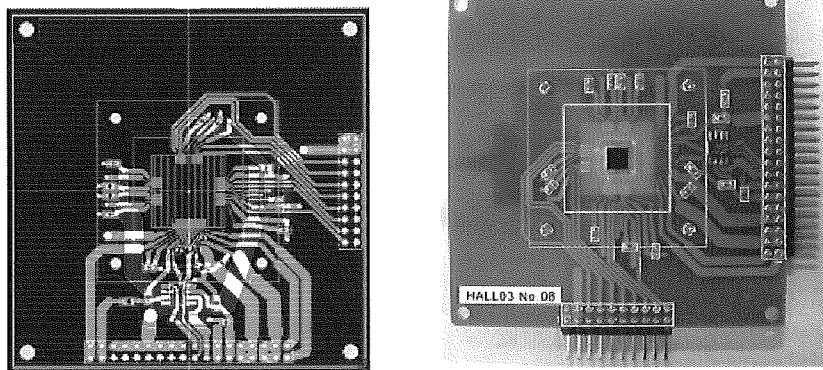


図 5-5 測定基盤の設計図 (左) と完成した基板の写真 (右)

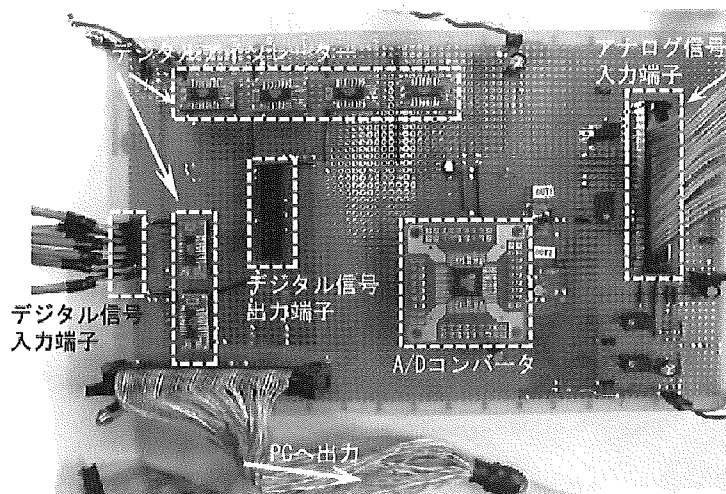


図 5-6 測定ボードの写真

### C. 3. 2. 3 測定手順

次に二次元磁束分布計測手順をブロック図にして示す。測定に使用するのはまずホール電圧測定ボード、今回の測定用に開発した  $10\mu\text{m}$  単位で磁石を動かせる測定器、データを取り込む PC と信号発生器である。なお、ホール電圧測定ボードから PC へ繋ぐインターフェイスとして最大 50 チャンネル転送可能なケーブルを使用した。以下に測

定手順のブロック図を図 5-7 に示す。

測定の流れはまず、信号発生器からホール電圧測定ボード兼 A/D コンバータへ制御信号が出力される。この制御信号はノイズを抑えるためにデジタルアイソレータを通して 5V から 3.3V へ電源変換される。ケーブルを通して測定基板へ出力され磁気センサが駆動し、ホール電圧が出力される。このホール電圧は測定基板上で 20 倍に差動増幅

される。この信号はケーブルを通して再び測定ボードへ戻ってくる。そして測定ボード上にあるA/Dコンバータへ転送しアナログ信号からデジタル信号に変換される。この信号はデジタルアイソ

レータにより 3.3V から 5V に電圧変換された後、ケーブルを通して PC へ取り込まれる。その後、PC 上でデータ処理され二次元磁束分布図が出力されるといふ流れである。

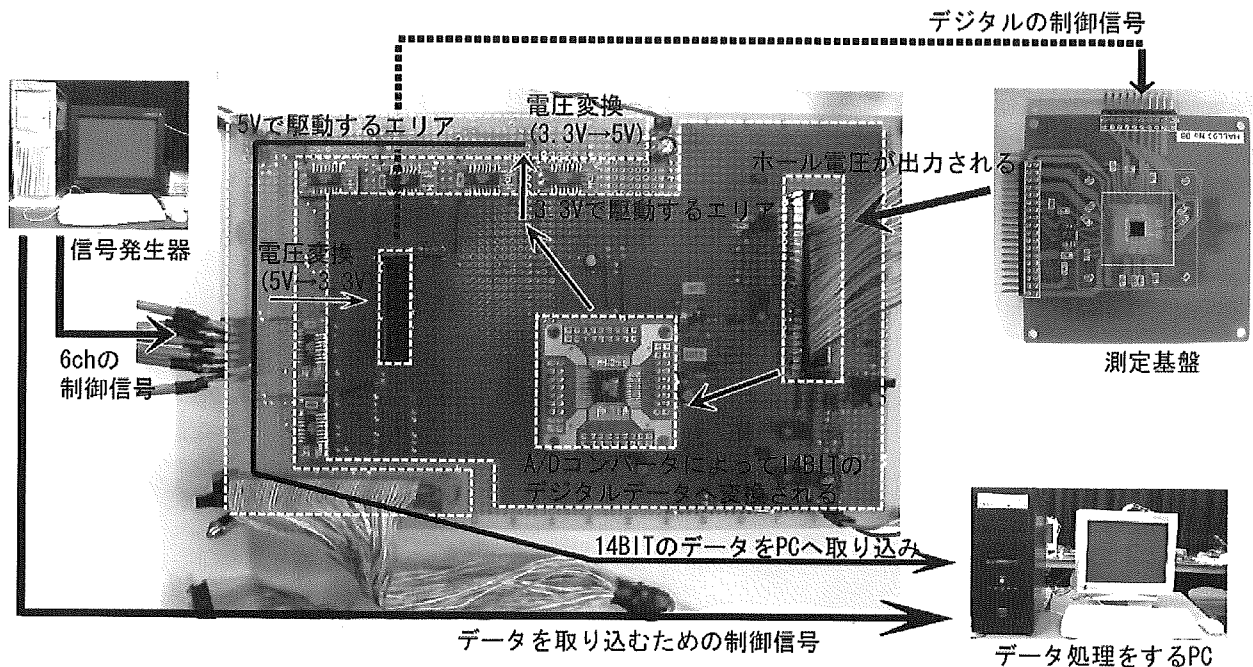


図 5-7 測定手順のブロック図

### C. 3. 2. 4 測定機器と測定風景

今回の実験で使用した基板、磁石を固定する測定器の写真を図 5-8 に示す。この測定器は X ステージ、Y ステージ、Z ステージの三種類の軸にそって最小 10 $\mu$ m 単位で動かすことができる。今回のチップに集積化されている磁気センサは 1 画素の大きさが 50 $\mu$ m なので精密な測定をするのに十分といえる。測定する際にはステージ上に基板を固定し、ステージを動かすことで任意の画素上に磁石の中心位置を固定し、二次元磁束分布図を測定する。

図 5-9 に実際に二次元磁束分布測定を行っている様子を示す。左の写真が測定器、測定ボードを含めた測定系の写真、下の写真は基板を固定して磁石を近づけた時の拡大写真である。

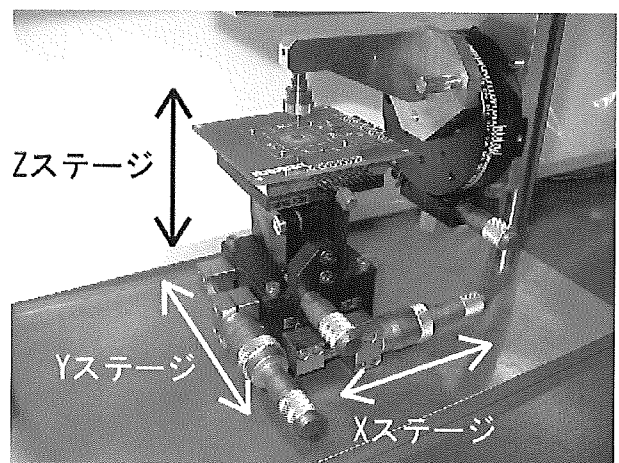


図 5-8 今回の実験で用いた測定器