

着特性評価、平成 19 年度茨城講演会予稿集  
P55-P56 (2007.9.28)

永島勲、佐藤修平、尾関和秀、生体材料を目的と  
した DLC コーティング高分子材料の機械的特性評  
価、第 23 回ライフサポート学会予稿集 P109  
(2007.10.2)

吉原裕貴、尾関和秀、スパッタリング法によるハ  
イドロキシアパタイト薄膜の薬剤吸着特性評価、  
第 23 回ライフサポート学会予稿集 P110  
(2007.10.2)

吉原裕貴、尾関和秀、増澤徹、スパッタ HA 薄膜  
の薬剤吸着特性、第 20 回アパタイト研究会予稿  
集 P42-43 (2007.12.17)

#### **G. 知的財産権の出願・登録状況**

茨城大学から出願準備中

## ナノ振動子と制御回路の設計、製作に関する研究

分担研究者 木村 孝之 茨城大学工学部システム工学科准教授

**研究要旨** 磁気センサは人間の感覚器官では検知できない磁束密度を計測するセンサである。測定対象に永久磁石を取り付けることで位置検出が可能であり、人工心臓の磁気浮上モーターの回転制御などに広く用いられている。半導体を用いた磁気センサにホール効果を利用したホール素子があり、一般的に高感度である InSb や GaAs のバルク材料を使用している。バルク材料を用いたのホール素子により正確な一計測を行うには複数個のセンサが必要であり、製作工程においてコストやスペースが問題となる。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アレイ状に集積化した集積化磁気センサに関する研究が行われている。ホール素子を集積化させた磁気センサはバルク材料を用いたホール素子と比べて多くのメリットが挙げられる。具体的には、前述した問題点は集積化磁気センサチップを用いることで解決可能であり、増幅回路と共に集積化することで低感度である Si を用いたホール素子のデメリットを補うことができる。さらに、ホール素子をアレイ状に集積化することで、これまで『点』で測定していた磁束密度を『面』で計測可能であることから、より精密な磁束密度の計測が可能である。さらに、磁束密度は磁石付近では距離の 2 乗に反比例して低下することから磁石の位置や傾き、形状までワンチップで知ることができる。

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、さらに 2 回の試作を経て  $78081\text{ame}/\text{sec}$  の読み出し速度を実現可能な磁気センサチップを開発した。また 3 次元位置計測を実現するための研究を行った。磁気センサにより、磁石からの磁束分布を測定した。これらの磁束分布から、特徴抽出を行うために閾値を変化させながら 2 値化の操作を行った。さらにパターンマッチングにより楕円と 2 値化した画像の相関をとり、その楕円から磁束分布のひずみ具合を測定した。その結果、傾斜角度  $15^\circ \sim 60^\circ$  の範囲で  $6^\circ$  の分解能を得ることができた。これらの値は磁気センサの画素数からくる制約のもとで理論的な分解能である。以上のように位置計測に必要なセンサの開発と信号処理方法の検討を行い、ステントの位置や向きを同定するために必要な基礎技術の確立を行った。

### 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、ステントの位置や向き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、高速に移動するステントの位置や傾きを遅れなく計測できることのできる磁気センサの開発を行う。これまでの磁気センサでは1000fps程度で速度で測定が可能であった。これよりも早く動く物を計測しようとするとう像がぶれた有り、一計測を正しく行うことができなくなる。この応答速度を、磁気センサの構造や駆動方法、さらに増幅回路を工夫することにより改善する。また、ステントの位置を同定するための信号処理に関して検討を行い、最適な信号処理方法の検討も行う。

## C. 研究結果

### C. 1 集積化磁気センサの構成

#### C. 1. 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1-1に示す。

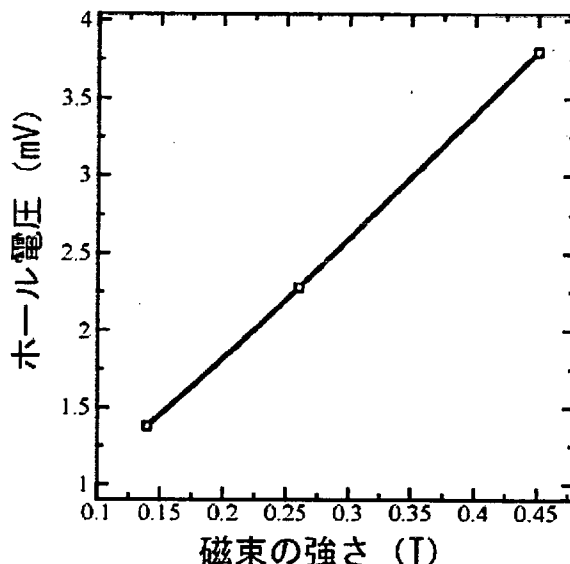


図 1-1 ホール電圧と磁束の関係

この図は磁束の強さが $0.45\text{T}$ 、 $0.27\text{T}$ 、 $0.14\text{T}$ 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. 1. 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1-2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ふ。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。

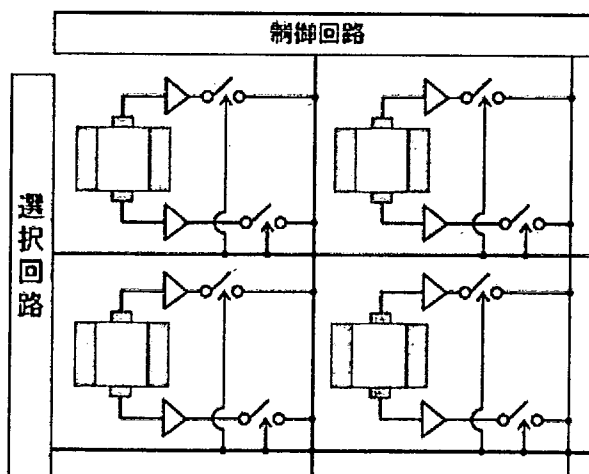


図 1-2 ホール電圧の読み出し方法のブロック図

次に読み出し回路の回路図を図 1-3 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 からのそれぞれの実出力電圧 V1、V2 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、Vbn は  $10\mu\text{A}$ 、Vbp 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。

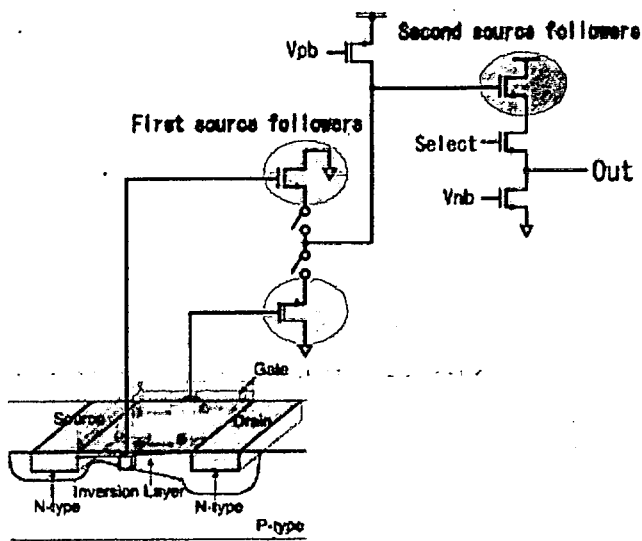


図 1-3 ホール電圧読み取り回路の図

### C. 1. 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 1-4 に示す。試作されたチップのサイズはパッドを含め  $4.9\text{mm}$  角、プロセスは ROHM 社の  $0.35\mu\text{m}$  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  $3.2\text{mm}$ 、横  $3.2\text{mm}$  となっている。

64×64に集積化された磁気センサ

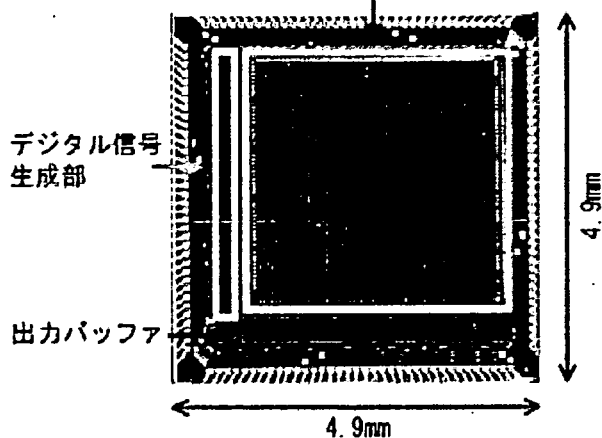


図 1-4 第一次試作のチップ写真

### C. 1. 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 1-5 上に示す。また、A/D コンバータの写真を図 1-5 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「C1.2.4 測定回路の構築」で詳しく述べる。

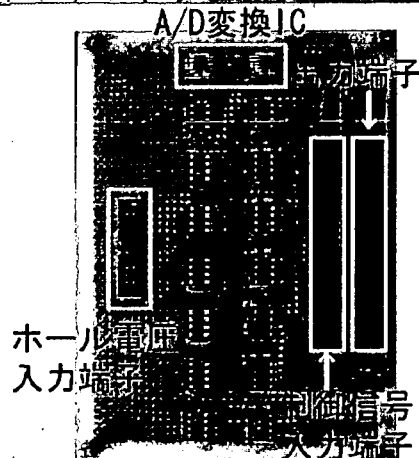
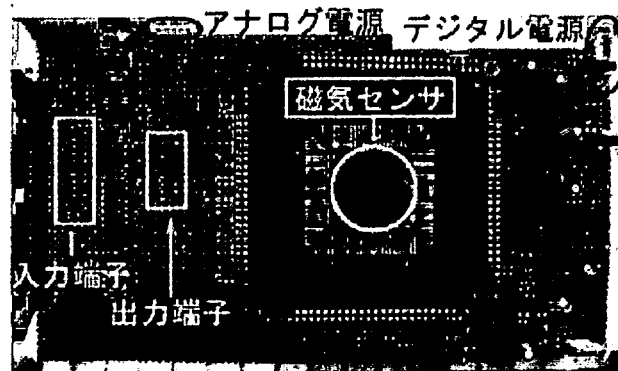


図 1-5 ホール電圧測定ボードと A/D 変換ボード

### C. 1. 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1-6に示す。

まず64列×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わったら、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。

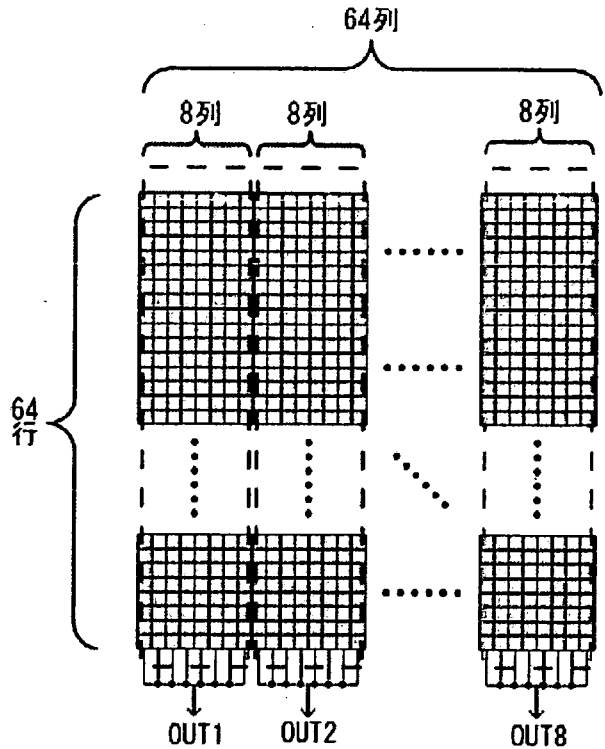


図1-6 回路の読み出し手順

### C. 1. 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1-7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、ケーブルで通して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。

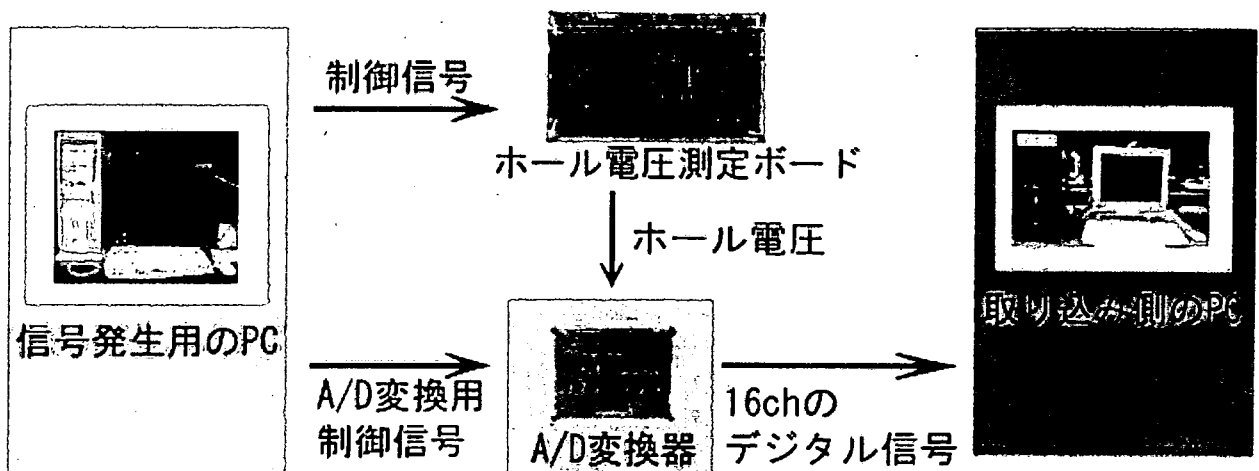


図1-7 測定手順のブロック図

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. 1. 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 1-8 に示す。

この画像を見ると出力がボヤけて非常に見づらくてわかる。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 1-9 に示す。

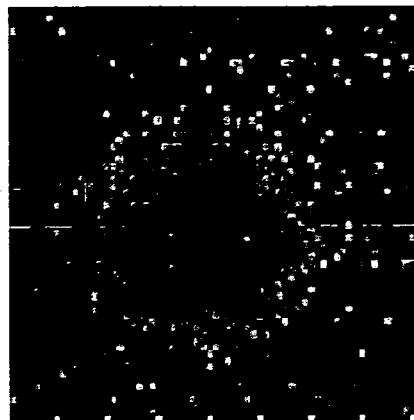


図 1-8 二次元磁束分布図

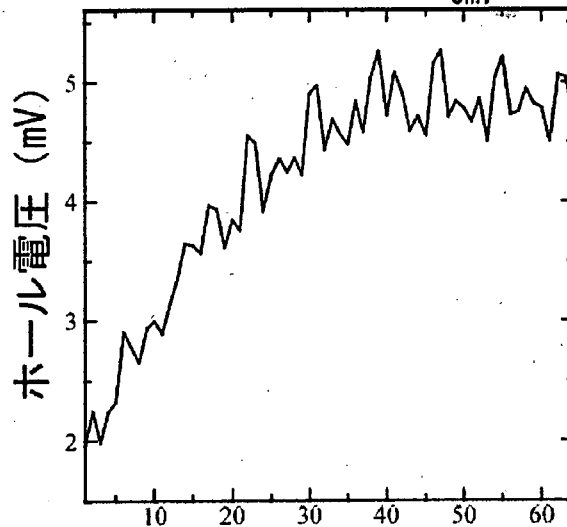
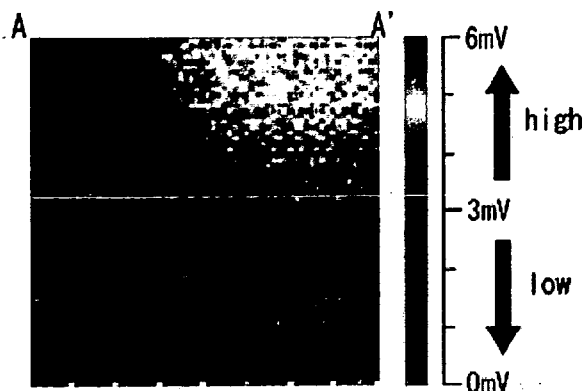


図 1-9 128 回平均化した磁束分布図(上)と A-A' 間の磁気センサの出力グラフ(下)

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 1-10 に示す。

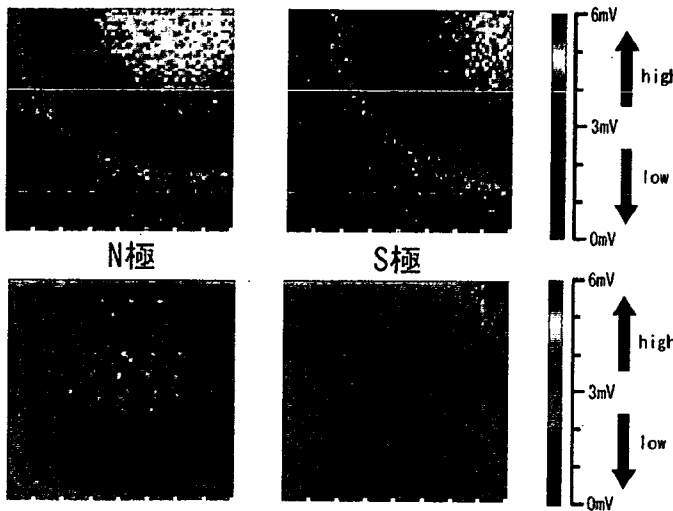


図 1-10 二次元磁束分布測定の結果

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. 1. 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 1-1 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   | 6.1flame/sec   |
| 出力の平均化回数     | 128回           |
| 平均化後の読み出し速度  | 0.047flame/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. 2 二次試作二次元集積化磁気センサ

### C. 2. 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. 2. 1. 1 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 2-1 に示す。

図 2-1 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. 2. 1. 2 読み出し回路の構成

読み出し回路の回路図を図2-2に示す。読み出し回路はnチャネルMOSFETを使用したソースフォロアとpチャネル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(LI6200)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点のため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10 $\mu$ mを回路に流すためのバイアス電圧とする。

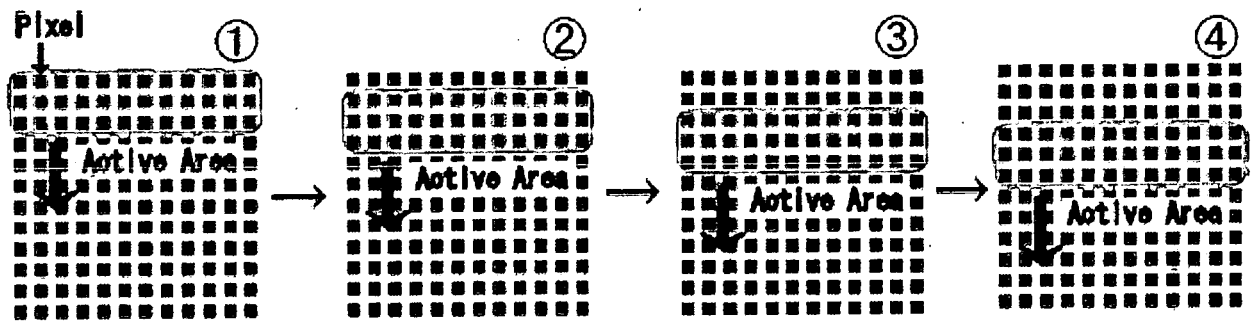


図2-1 ダイナミックドライブ駆動

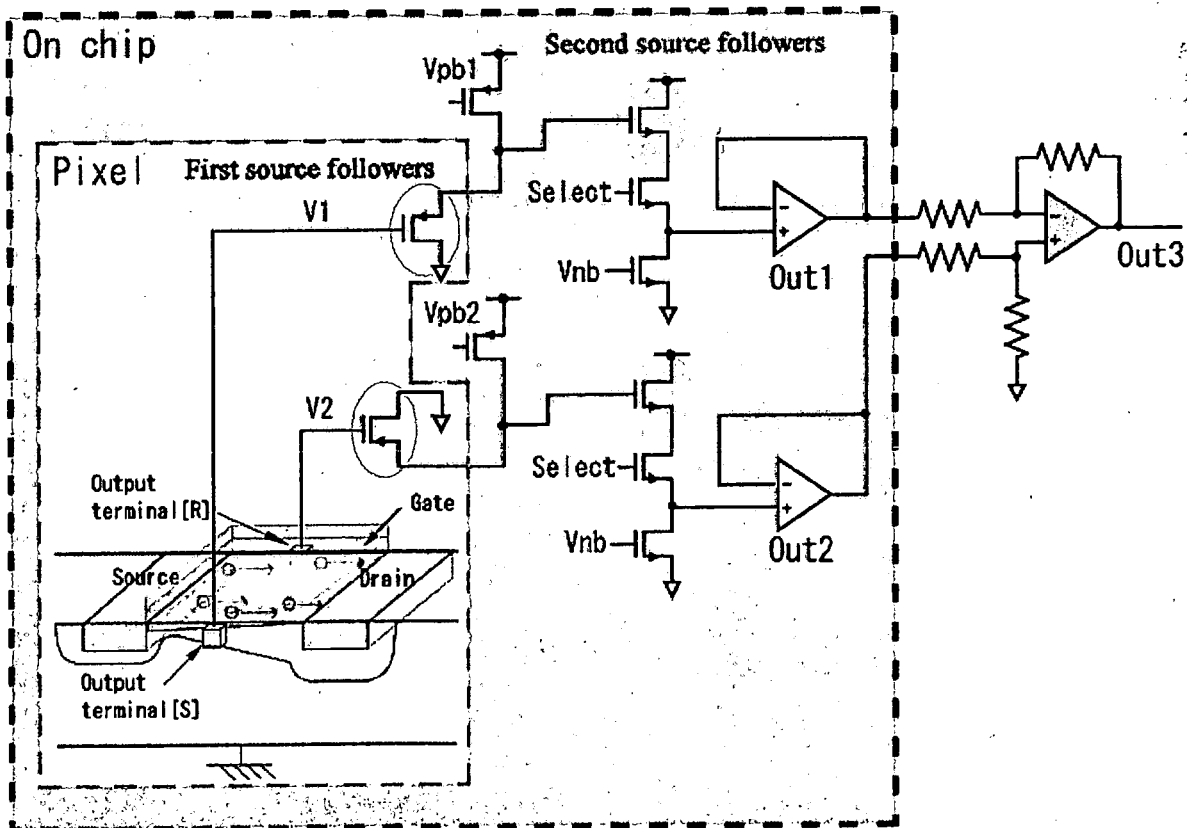


図2-2 ホール電圧の読み出し回路



### C. 2. 1. 3 第二次試作チップの概要

第二次試作チップの写真を図 2-3 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  $0.35\mu\text{m}$  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. 2. 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. 2. 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が、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 2-4 に示す。

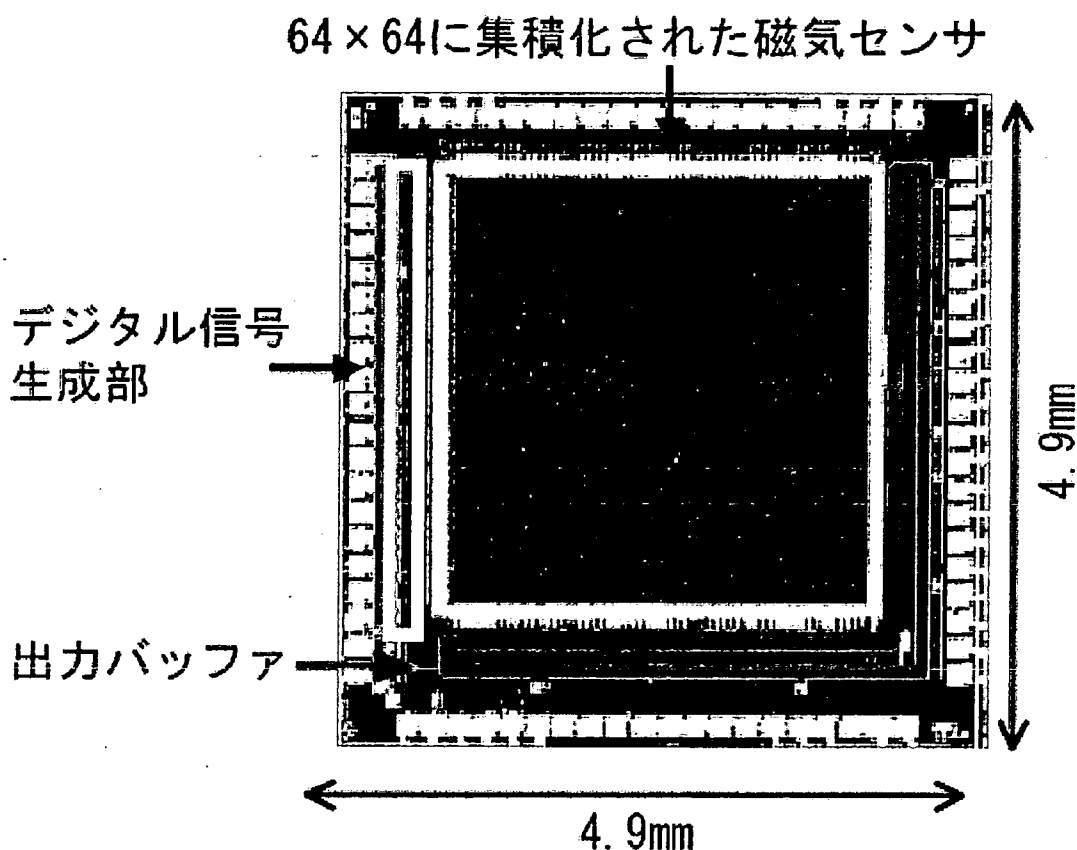


図 2-3 第二次試作のチップ写真

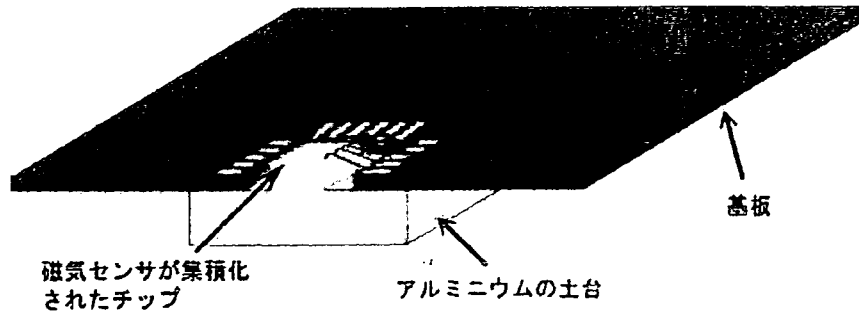


図 2-4 チップと基盤の断面図

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 2-5 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と同じく図 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. 2. 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 2-6 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。

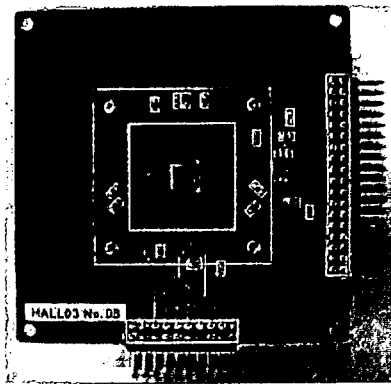
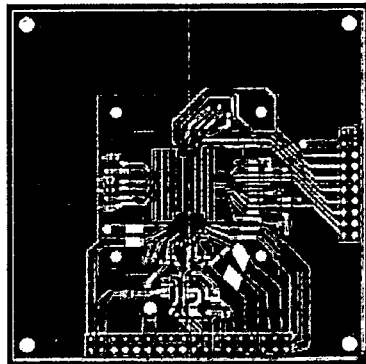


図 2-5 測定基盤の設計図 (左) と完成した基板の写真 (右)

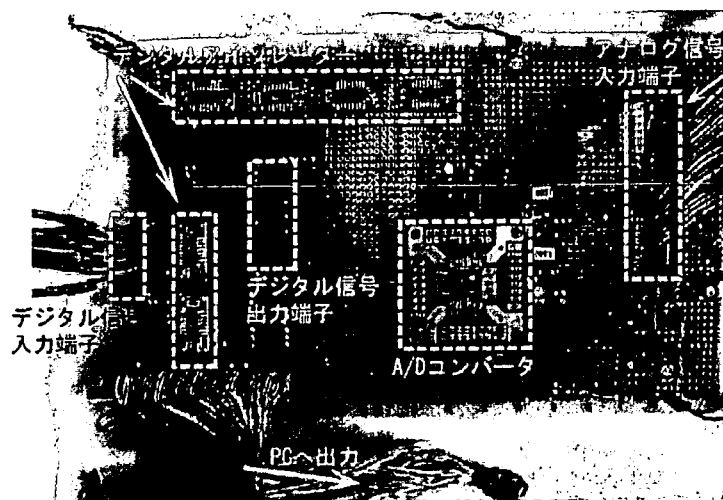


図 2-6 測定ボードの写真

### C. 2. 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 2-7 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う流れである。

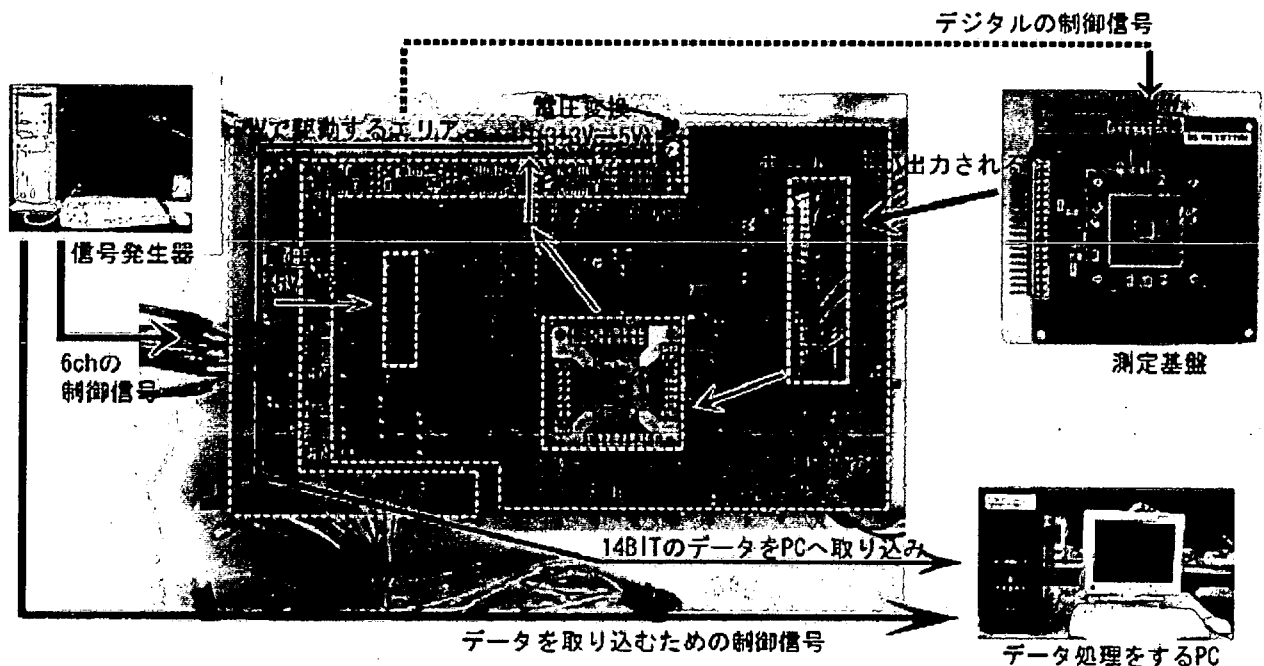


図 2-7 測定手順のブロック図

### C. 2. 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 2-8 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  $10\mu\text{m}$  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  $50\mu\text{m}$  なので精密な測定をするのに十分といえる。測定する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 2-9 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。

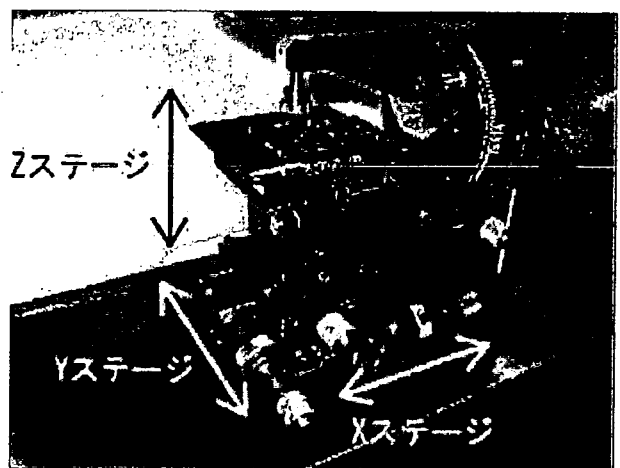
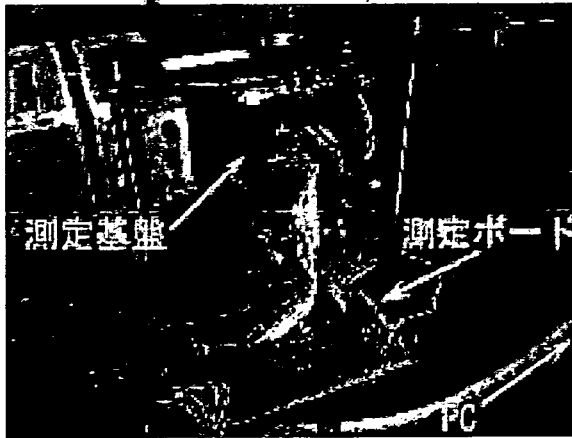


図 2-8 今回の実験で用いた測定器

## 測定器



## 信号発生器

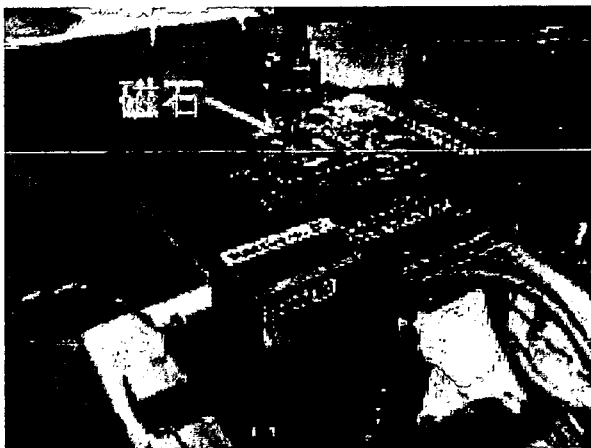


図 2-9 測定風景の写真 (上) とチップ付近の拡大写真 (下)

### C. 2. 3 第二次試作センサを用いた実験

第二次試作センサを使用して位置計測に関する実験を行った。まず、第一次試作で問題になっていた読み出し速度の遅さが改善されているかどうかの実験、次に二次元磁束分布図を元にプログラムを用いて位置測定を行い、実際の磁石の位置とどのくらいの精度で同定できるかの実験を行った。次に読み出し速度と位置計測の精度の関係を調べ、最適な読み出し速度を求める実験を行った。次に磁石のセンサとの距離がどの程度離れていても測定できるかを調べる実験を行い、最後に磁石の固定位置を変更した場合でも問題なく位置計測を行えるかの実験を行った。

実験で使用した磁石は円柱状の磁石であり、直径 1mm、磁気センサとの距離が 0.2mm で 0.52T の棒磁石を使用している。図 2-10 に実験で使用した棒磁石の写真と図面を示す。

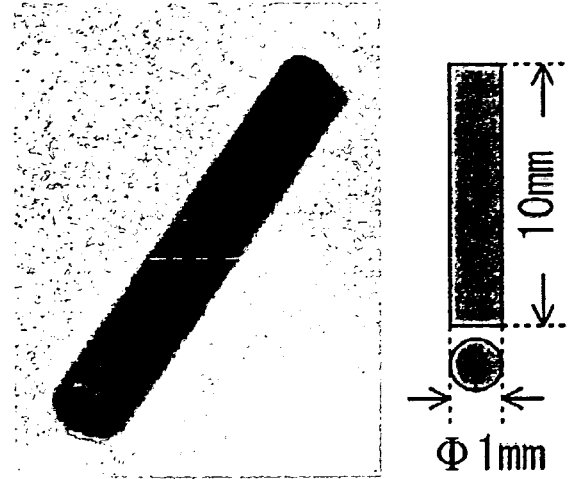


図 2-10 実験に使用した棒磁石の写真(左)と棒磁石の図面(右)

### C. 2. 3. 1 測定的高速化に関する実験

まず、読み出し速度に関する実験を行った。与える信号の最高周波数である水平読み出し周波数を 2MHz から 0.5MHz ずつ順に上げていき、どの周波数まで二次元磁束分布が測定可能かを調べた。磁石はセンシングエリアの中央に固定して測定を行った。そのときのセンサ表面と磁石の距離は 0.4mm であり、磁束密度は 0.29T であった。読み出し速度の限界値を調べた図を図 2-11 に示す。なお図 2-11 の周波数の隣に記載されている数字は読み出し速度の指標となるフレームレートであり、単位は flame/sec である。なお、今回の実験では出力電圧の平均化はしておらず、測定回数是一回である。

この実験結果をみると周波数が 3.5MHz (854flame/sec) からノイズが多少出始める。4MHz (488flame/sec) 以上の周波数で駆動させた場合にはノイズが非常に多く、出力画像がぼやけてしまっている。さら周波数を上げていくと 7.5MHz (1831flame/sec) の時点で、ほぼ画像として捉えられなくなってしまった。

この結果から二次元磁束分布図を測定できる水平方向読み出し周波数の最高値は 7MHz であり、フレームレートに換算すると 1709flame/sec であることがわかった。

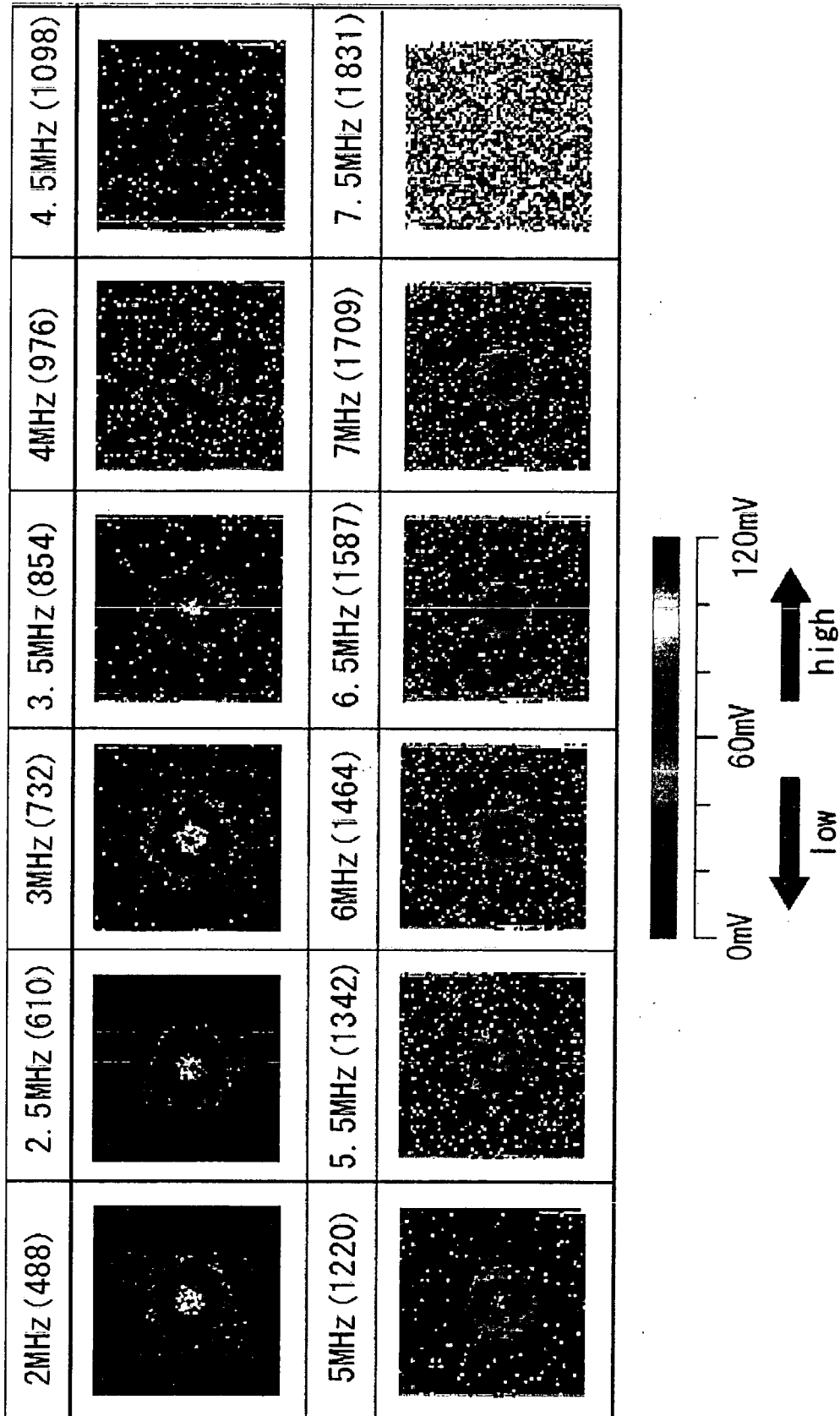


図 2-11 読み出し速度の限界値測定

### C. 2. 3. 2 位置測定の精度に関する実験

次の実験では測定した二次元磁束分布図を元に研究室で作製した位置検出プログラムを使用し、どのくらいの精度で位置計測を行えるかを調べた。使用したプログラムは最大、 $3\mu\text{m}$  オーダーで磁石の中心位置との同定をとることができ、シミュレーション上では位置測定の際に発生する誤差を $\pm 25\mu\text{m}$ 以内に抑えられることが確認できている。ここで表現されている「誤差」とは、磁石を固定してある位置とプログラムで算出した位置情報とのズレを、X軸方向の誤差とY軸方向の誤差に分け、それぞれの値を $\mu\text{m}$ オーダーで表したものである。実験には5.3.1の実験で用いた磁石と同じ物を使用した。磁石が固定されている位置はセンシングエリアの中央であり、この時のセンサ表面と磁石との距離は $0.2\mu\text{m}$ に固定した。この実験では安定した読み出し速度ができる

488flame/secの読み出し速度で測定した。測定した二次元磁束分布図を図2-12左に、その図を二値化処理した図を図2-13右に、位置計測の精度について調べたものを表2-1に示す。

表2-1に用いられている「等倍」、「2分割」などの表記は一面素を何分割して中心位置を求めているかである。当然、一面素を多く分割したほうが分解能が高くなるので詳細な値を求めることができる。今回使用したプログラムでは「16分割」が最大の分解能であり、一面素を16分割して位置検出を行うと $3.1\mu\text{m}$ オーダーで磁石の中心位置を検出とれる。

この表からX軸方向の誤差は $9\mu\text{m}$ 、Y軸方向の誤差は $16\mu\text{m}$ と算出され、シミュレーションの結果通り $\pm 25\mu\text{m}$ の精度で磁石の中心位置を検出できたといえる。このことから二次元磁束分布図を用いた位置計測を行えることがわかった。

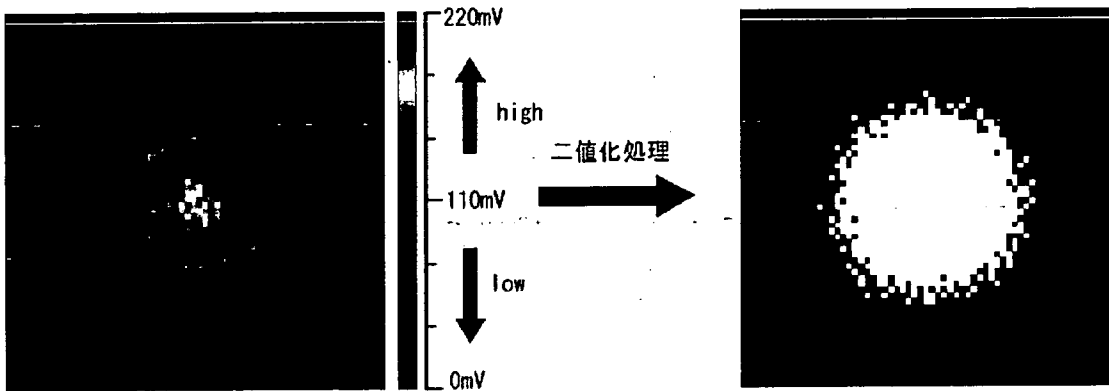


図 2-12 二次元磁束分布図(左)と二値化処理した後の図(右)

表 2-1 位置計測の精度

|                           | 等倍                 | 2 分割               | 4 分割                | 8 分割                | 16 分割               |
|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 相関係数                      | 0.9                | 0.899              | 0.899               | 0.899               | 0.899               |
| X 軸方向の誤差( $\mu\text{m}$ ) | 0( $\mu\text{m}$ ) | 0( $\mu\text{m}$ ) | 0( $\mu\text{m}$ )  | 6( $\mu\text{m}$ )  | 9( $\mu\text{m}$ )  |
| Y 軸方向の誤差( $\mu\text{m}$ ) | 0( $\mu\text{m}$ ) | 0( $\mu\text{m}$ ) | 13( $\mu\text{m}$ ) | 13( $\mu\text{m}$ ) | 16( $\mu\text{m}$ ) |

### C. 2. 3. 3 位置計測に行える最速の読み出し速度

前回の実験では $\pm 25\mu\text{m}$ 以内の誤差で位置計測ができることがわかった。そこで次の実験では位置計測の精度を保てる最速の読み出し速度を求める実験を行った。実験の内容は読み出し速度を488flame/secから順に上げていくと同時に、それぞれの読み出し速度で測定した二次元磁束分布図を元に位置計測を行っていくというものである。位置計測の精度は算出した中心位置の誤差が

それぞれX軸方向とY軸方向で $\pm 25\mu\text{m}$ 以内であれば位置測定に用いることができると判断し、それ以外の結果が出た時点でこの実験を終了する。「 $\pm 25\mu\text{m}$ 以内」という値はシミュレーション上の位置測定の上限值であるため、この値を採用した。磁石の固定位置や磁石とセンサ表面の距離も同じ条件で実験を行った。読み出し速度と測定精度の関係を調べたものを図2-13に示す。

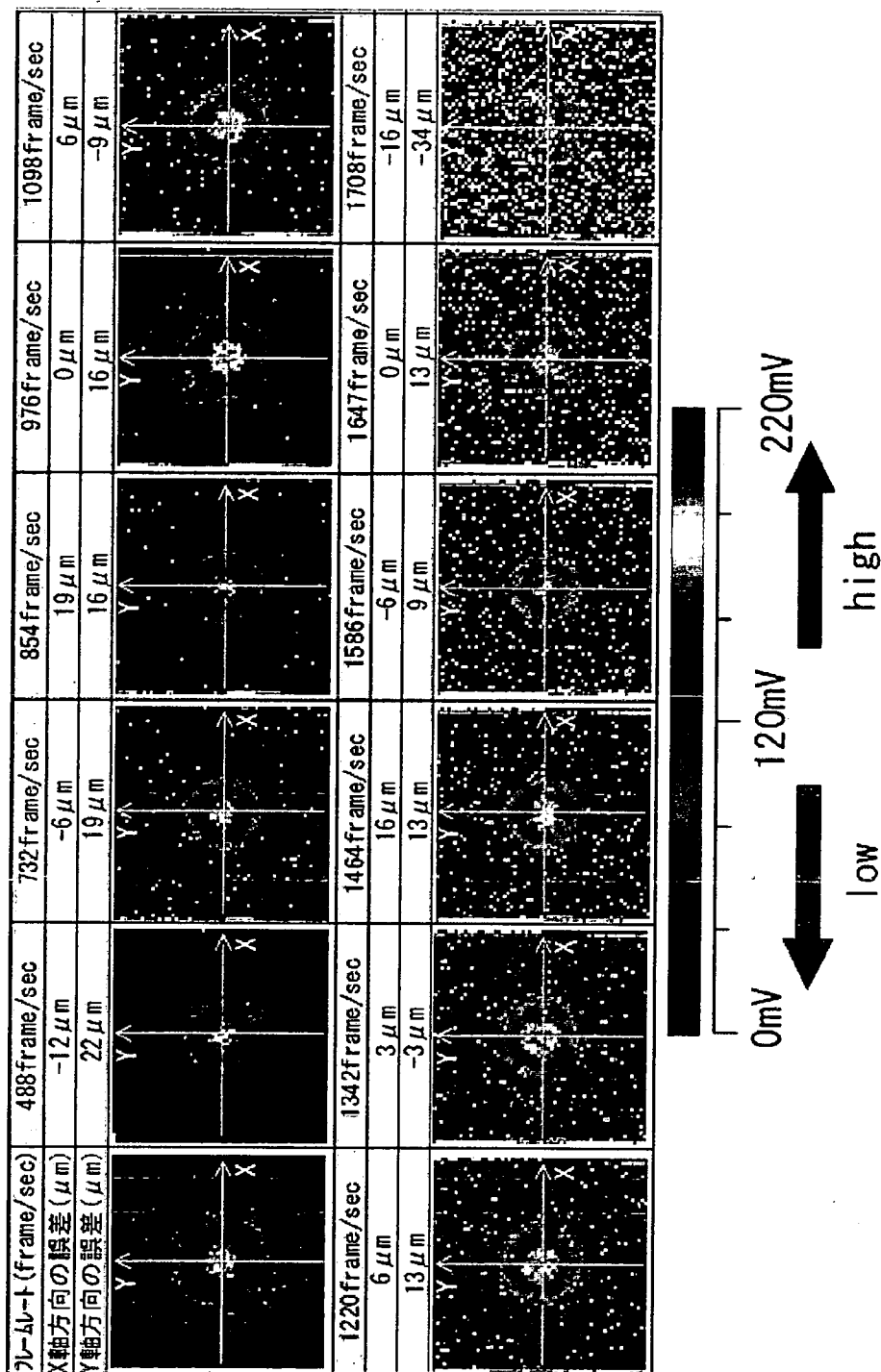


図 2-13 位置測定の精度に関する実験

実験結果から 488~1647 frame/sec の読み出し速度で測定した二次元磁束分布図を元に位置計測を行えば  $\pm 25 \mu\text{m}$  以内の精度で磁石の中心位置を測定できることがわかった。このことから第二次試作センサの読み出し速度の最適値は  $\pm 25 \mu\text{m}$  の精度で読み出せる最速の値である 1647 frame/sec であると言える。

### C. 2. 3. 4 測定できる磁束密度のダイナミックレンジ

今回の実験ではどのくらいの磁束密度であれば測定できるか、磁石とセンサ表面との距離がどの程度離れていても位置計測ができるかを調べた。内容は磁石とセンサ表面との距離を 0.1mm から 0.05mm ずつ離していき、それぞれの時に測定した二次元磁束分布図を元に位置計測を行い、中心位置が  $\pm 25 \mu\text{m}$  の誤差以内で検出できれば位置計測を行えたと判断し、それ以外の結果が出た時点で実験を終了する。二次元磁束分布図の読み出し速度は前回の実験で得た最速の値である 1647 frame/sec で測定し、磁石の固定位置はセン

シングエリアの中央に固定して実験を行った。図 2-14 に磁石とセンサ表面との距離の関係を示す。

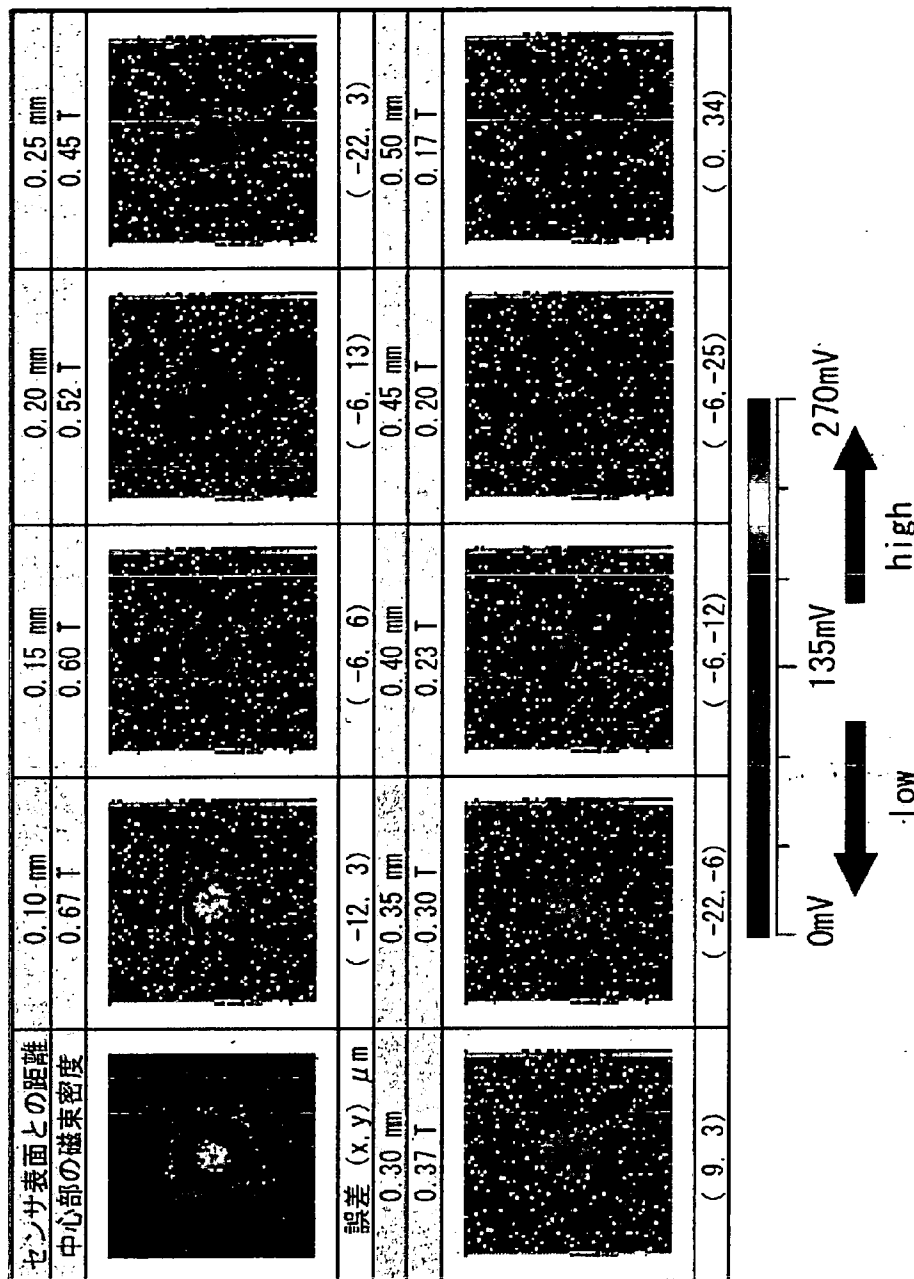


図 5-14 磁石とセンサ表面との距離の関係

図 2-14 をみると磁石とセンサ表面との距離が 0.45mm、磁束密度に置き換えると磁束分布図の中心付近の磁束密度が 0.20T までであれば 1647flame/sec の読み出し速度と  $\pm 25\mu\text{m}$  の精度で位置計測ができることがわかり、第二次試作センサが測定できる磁束密度のダイナミックレンジを調べることができた。

#### C. 2. 4 実験結果と考察

実験結果とそれに対する考察を行うにあたり、今回の第二次試作チップと第一次試作チップの測定条件や性能を比較した表を表 2-2 に示す。



表 2-2 第一次試作と第二次試作の比較

|               | 第一次試作センサ       | 第二次試作センサ      |
|---------------|----------------|---------------|
| ひとつのセンサに流せる電流 | 0.2mA          | 0.4mA         |
| 出力の大きさ        | 5mV            | 10mV (200mV)  |
| 水平読み出しの周波数    | 250KHz         | 6.75MHz       |
| 平均化の回数        | 128回           | 1回            |
| 平均化後の読み出し速度   | 0.047flame/sec | 1647flame/sec |

この表を参考に今回の実験でわかったことをまとめた。まず読み出し速度の面について述べる。読み出した画像は水平読み出し周波数が高くなるにつれてノイズが混じってしまうが、最速で1831flame/secのフレームレートによる二次元磁束分布図の測定が可能であることが確認できた。ノイズが混じらない画像が必要な時は読み出し速度を610flame/sec以下に設定して測定すればよい。

次にわかったことは出力電圧の平均化回数についてであるが、第一次試作センサと比べ第二次試作センサでは平均化の必要がなくなったことが大きな違いである。これはひとつあたりのセンサに流せる電流が二倍になったためノイズの影響を受けづらくなり、平均化の必要がなくなったと考えられる。

次に位置測定の可否とその精度についてである。測定した二次元磁束分布図を元に位置検出プログラムを使用して位置計測を行ったところ、シミュレーション上の値である $\pm 25\mu\text{m}$ 以内の誤差で磁石の中心位置を測定できることが確認できた。

次に読み出し速度と位置計測の精度の関係である。実験の結果、610~1647flame/secのフレームレート間で測定した二次元磁束分布図を元に位置情報を算出すれば、どのフレームレートにおいても $\pm 25\mu\text{m}$ 以内の誤差で磁石の中心位置を測定できることがわかった。つまり位置計測に用いることができる最速の読み出し速度は

1647flame/secである。この値から第二次試作センサでは第一次試作センサと比較して約35000倍の高速化に成功したといえる。

最後に第二次試作センサで測定できる磁束密度のダイナミックレンジは0.20Tであり、今回の実験で用いた磁石であればセンサ表面と磁石の距離が0.45mm以内に固定されていれば位置計測が可能であることがわかった。

今回目的とした値は読み出し速度が1000flame/sec、測定誤差 $\pm 25\mu\text{m}$ であるのに対して、実験の値を比べてみると、読み出し速度は1647flame/sec、位置計測の誤差が $\pm 25\mu\text{m}$ であり、この値は目標値を十分に満たしていると言える。

### C. 2. 5 高フレームレートにおけるノイズの原因についての考察

ここでは第二次試作センサにおいてフレームレートが高い時に発生したゴマ粒状のノイズの原因を検討し、改善するための考察を行った。まず、ノイズの特性を把握するために出力電圧の平均化を行った。平均化回数を1回、8回、16回、128回と増やしていき、同時に水平読み出し周波数も上げていきノイズの特性を調べた。実験には3.3.1~3.3.4で使われた磁石と測定器を使用し、固定位置はセンシングエリアの中心とした。実験した図を図2-15に示す。



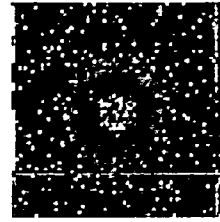
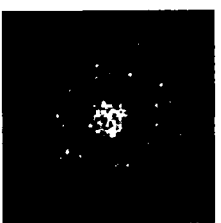
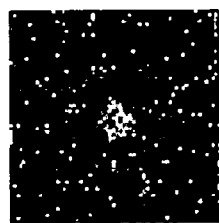
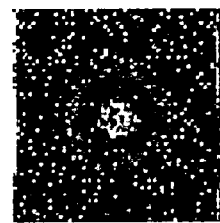
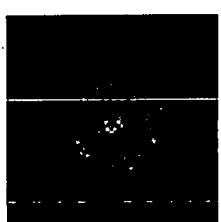
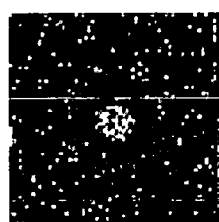
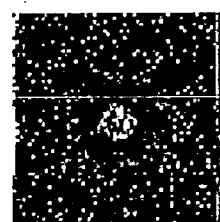

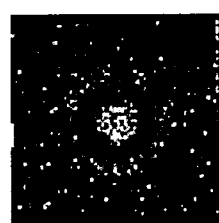
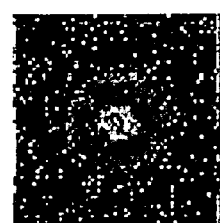
| 平均化回数 | 2MHz (488flame/sec)   | 3MHz (732flame/sec)   | 4MHz (976flame/sec)   |
|-------|---|---|---|
| 1回    |    |    |    |
| 8回    |    |    |    |
| 16回   |    |    |    |
| 128回  |  |  |  |

図 2-15 平均化によるノイズの特性解析

図 2-15 の結果から、発生したノイズは平均化することにより改善できないことがわかる。この点からゴマ粒状のノイズが信号の転送途中で発生したランダムノイズであるとは考えづらく、なんらかで固定されたノイズであると予想される。更にノイズの多さが読み出し速度に依存していることから、このゴマ粒状のノイズの原因は駆動系にあるのではないかと予想できる。つまりチップの駆動力に問題があり読み出し速度を速くしていくと信号にノイズが混じってしまい、最終的にはセンサを駆動できずに信号そのものを読み出せなくなってしまったのではないかと考えた。

これを確かめたのが次に示す図 2-16 である。この図はセンサを駆動させるための信号を一部だけ停止させることによって、どの信号がノイズの原因になっているかを調べたものである。調べた信号は最大の周波数で駆動している水平読み出し成分の col-in、col-clk、それらの 64 分の 1 の周波数で駆動している sel-in、sel-clk について調べた。実験ではこれらの信号を順に停止させていき、ノイズの原因を調べている。測定時に設定した水平読み出し周波数はノイズが全くでない 2MHz と多少のノイズが出る 4MHz の二種類で測定した。

|  |          |    |    |
|--|----------|----|----|
|  | both-sel |    |    |
|  | sel-in   |    |    |
|  | sel-clk  |    |    |
|  | both-col |    |    |
|  | col-in   |    |    |
|  | col-clk  |    |    |
|  |          | 2M | 4M |

図 2-16 ノイズの原因になる信号の特定

この実験ではノイズが入っていないなら出力された画像は一面黒であり、ノイズが入っていればそれらが表示される仕様である。実験結果から、最も高い周波数である水平読み出し成分の信号 col-in、col-clk が駆動している時にだけゴマ粒

状のノイズが出力されている。この点からノイズの原因は駆動系のトランジスタの駆動力不足であり、周波数が高くなると、これらのトランジスタがノイズを生み出し、ゴマ粒状のノイズが出力されていたといえる。

この問題はトランジスタの駆動力を上げることで改善され、この点に注意すれば、今後作製する二次元集積化磁気センサでは更に読み出し速度を上げることができると考えられる。

### C. 2. 6 磁気センサの応答速度の調査

測定対象が高速に移動した場合の測定画像がどの程度ゆがみ、測定の精度への影響について調査をした。

#### C. 2. 6. 1 磁束印加装置

実験で使用した磁束印加装置のX-Y-Zステージに基板を固定した写真を図 2-17 に示す。この磁束印加装置はXステージ、Yステージ、Zステージの3軸にそって最小  $10\mu\text{m}$  単位で動かすことができる。今回測定を行う集積化磁気センサチップにおける1つのPixelの大きさは  $50\mu\text{m}^2$  であるため十分な精度といえる。

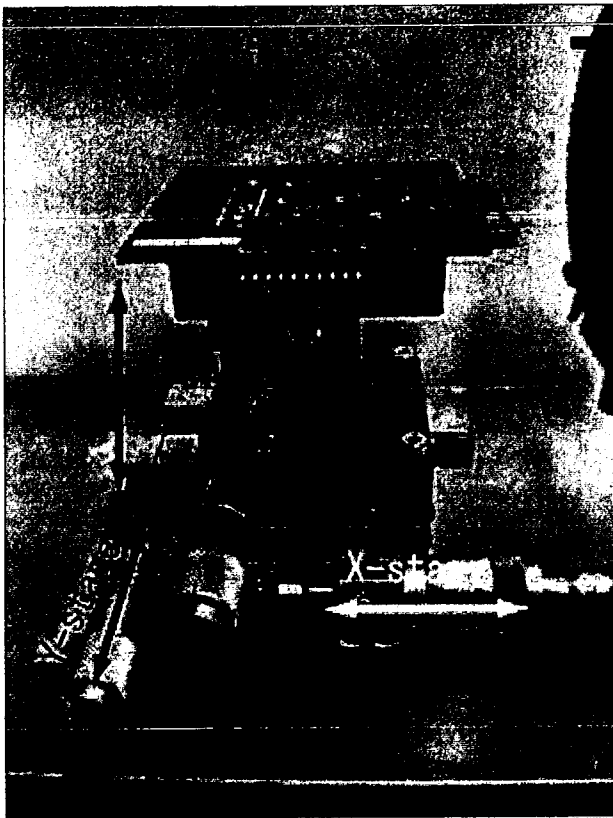


図 2-17 磁束印加装置のステージ

図 2-17 にある磁束印加装置に回転数を制御可能なモーター設置し、その軸に磁石を取り付けて二次元集積化磁気センサチップの上で回転させることで測定を行う。モーターを設置した磁束印加装置の写真を図 2-18 に、図 2-18 の基板を拡大した写真を図 2-19 に示す。また、モーター軸に取り付けた磁石は直径 1mm の円柱状の磁石であり、軸の中心から 1mm 偏心させた位置に取り付けられている。磁石からチップまでの距離は

2.95mm であり、磁石の中心における磁束密度は 0.48T である。モーターはデジタルメーターにより最小 1rpm 単位で制御でき、最大 3000rpm での動作が可能である。

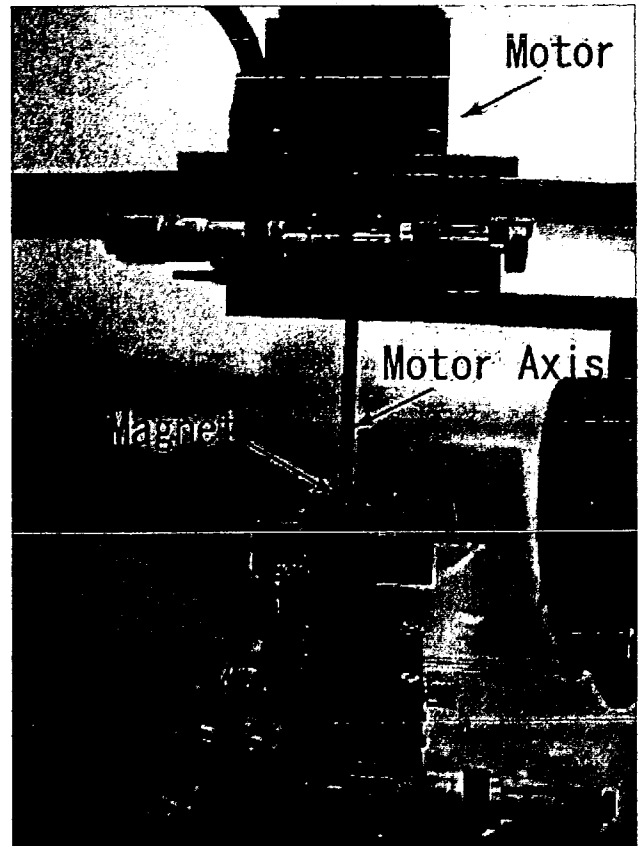


図 2-18 モーターを配置した磁束印加装置

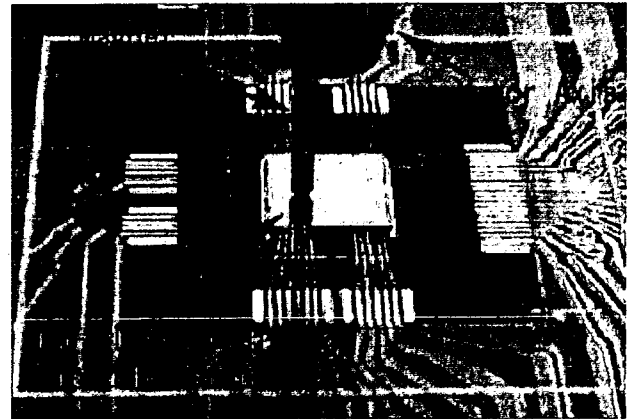


図 2-19 モーターを配置した時のセンサ基板の拡大図

#### C. 2. 6. 2 二次元磁束分布図の読み出し方法

集積化磁気センサチップのデータの読み出しはローリングシャッター方式で行われている。ローリングシャッター方式とは読み出すPixelを選択し、1行ごとにデータを蓄積し、1つのPixelずつ順番にデータを取得する読み出し方法である。読み出しのイメージを図 2-20 に示す。