

図 3-24 書き込み動作開始時のシミュレーション結果(ADC 基板)

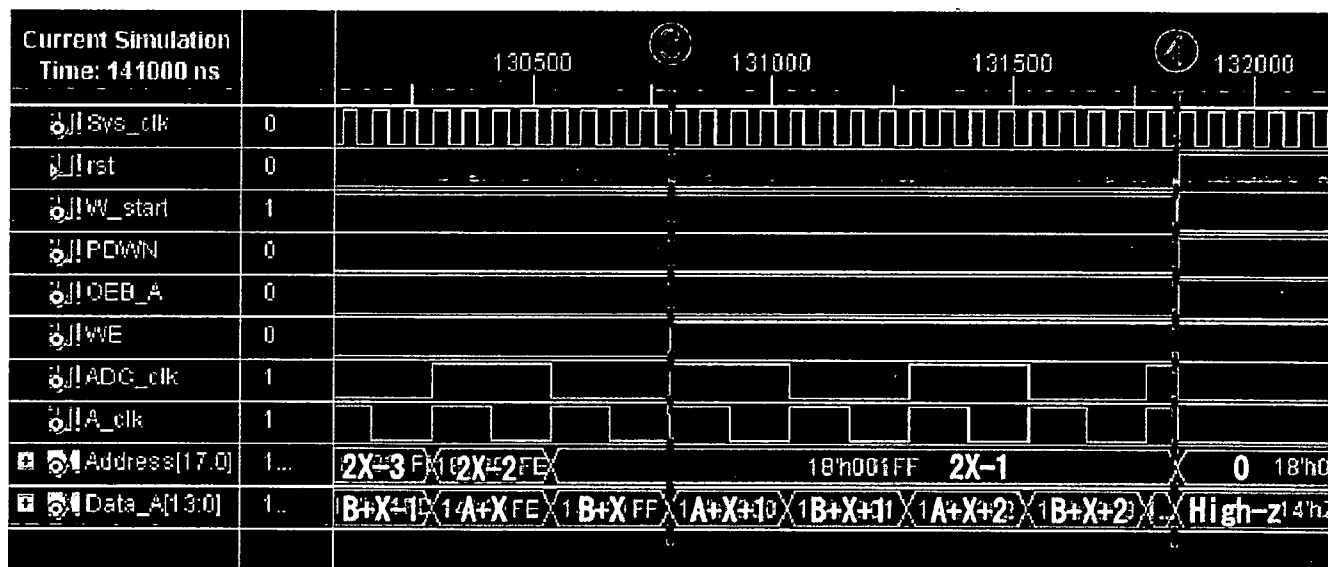


図 3-25 書き込み動作終了時のシミュレーション結果(ADC 基板)

図 3-24、図 3-25 中の Data_A は ADC から CPLD に入力されるデジタルデータを表しており、ADC では 2 チャネルの信号を時分割で 1 チャネルとしている。ADC 基板は W-start が入力されるまで rst によって初期状態を保っており、W-start を入力することで PDWN、OEB、ADC-clk を出力した(図 3-24 中の①)。ADC からデジタルデータが入力されるまで ADC の変換時間による遅延があるので、ADC-clk の 7 波長分経過後に WE を出力した(図 3-24 中の②)。A-clk の

カウント数がデータ数に達すると WE を停止して書き込み動作を終了した(図 3-25 中の③)。その後、W-start が停止されることで rst により初期状態となった(図 3-25 中の④)。図 3-24、図 3-25 から、ADC 基板の CPLD のメモリへのデータ書き込み動作はタイミングチャート通りの動作を示していることがわかる。

次に、ADC 基板のメモリからの読み込み動作のシミュレーション結果を図 3-26、図 3-27 に示す。

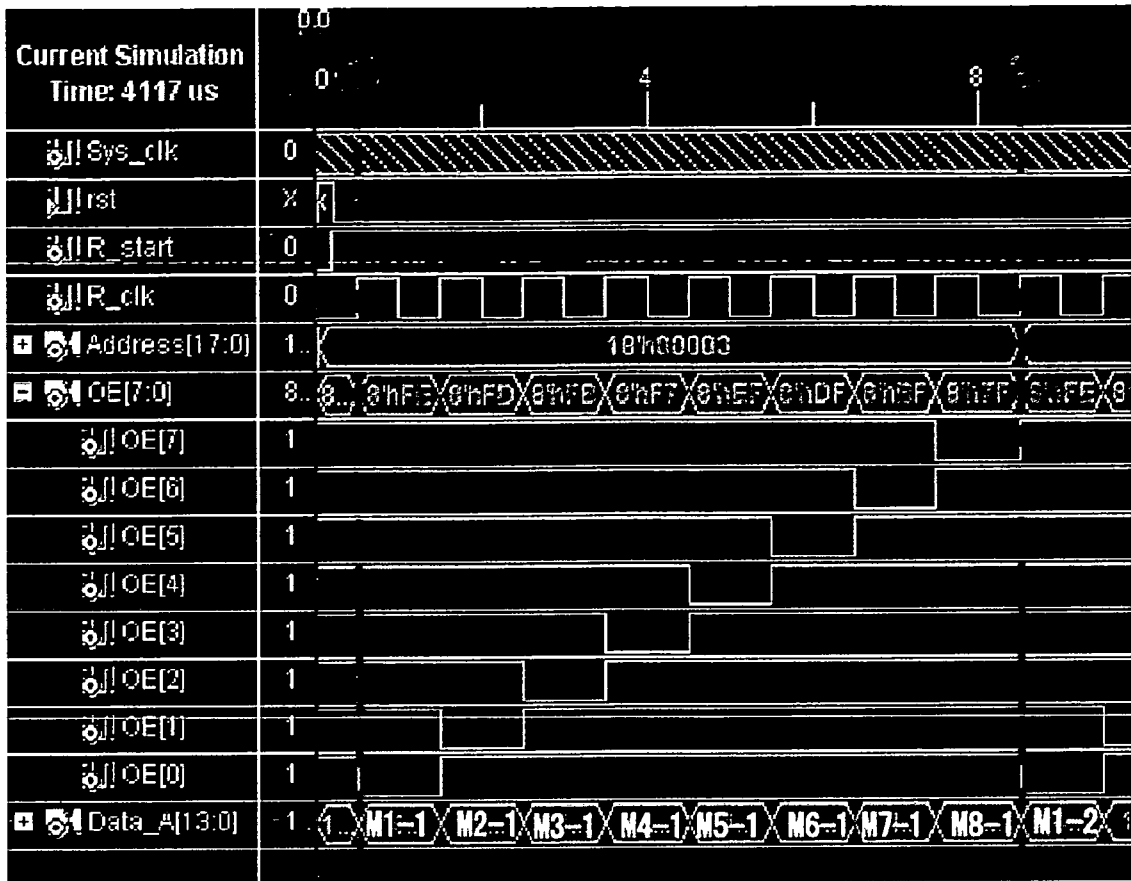


図 3-26 読み込み動作開始時のシミュレーション結果(ADC 基板)

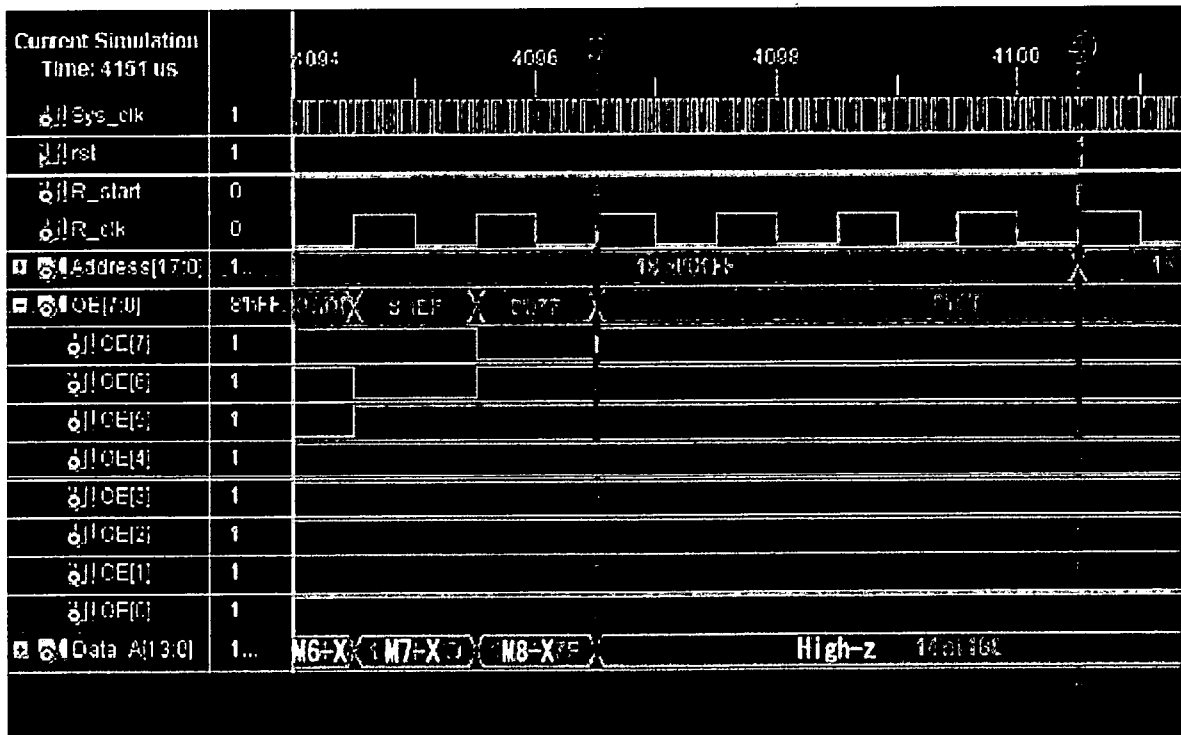


図 3-27 読み込み動作終了時のシミュレーション結果(ADC 基板)

図 3-26、図 3-27 中の Data_A は 8 個のメモリからの出力を表しており、Mx-y は x 番目のメモリの y 番目をデータとする。R-start と R-clk を入力することで OE とアドレスの制御を開始した(図 3-26 中の①)。OE はメモリのアドレスの 1/8

の周期で変化し、8 個のメモリから順次読み出し動作をした(図 3-26 中の②)。その後、R-clk のカウント数がデータ数に達すると OE を停止し(図 3-27 中の③)、W-start が停止されることにより初期状態となった(図 3-27 中の④)。図 3-26、

図 3-27 から、ADC 基板の CPLD の読み込み動作はタイミングチャート通りの動作を示していることがわかる。

以上の結果から、ADC 基板の CPLD の設計は完了したといえる。

C. 3. 7 制御基板の書き込み制御の特性評価

作製された制御基板の書き込み制御の特性評価を行った。測定には PC とロジックアナライザを使用した。PC と制御基板は USB ケーブルによって接続されており、3.3V の電源を 2 つ使用してデジタル部を駆動して測定を行った。測定の概要を図 3-28 に示す。

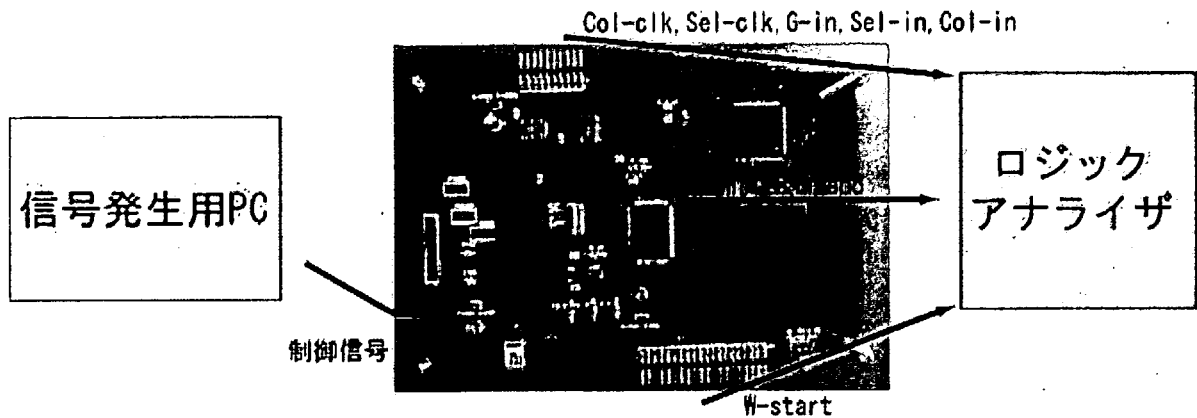


図 3-28 測定の概要

測定は PC から制御基板の USB マイコンに制御信号が入力されることで開始する。制御信号を受けて制御基板の 20 極のコネクタからは Col-clk、Sel-clk、G-in、Sel-in、Col-in が出力され、40 極のコネクタからは W-start が出力される。それらの信号と制御基板上の USB マイコンと CPLD 間

でやり取りされる Write、W-end をロジックアナライザで測定した。また、測定は磁気センサの読み出し速度を 7808fps(CPLD に入力する M_clk を 16MHz)として行った。測定結果を図 3-29、図 3-30 に示す。

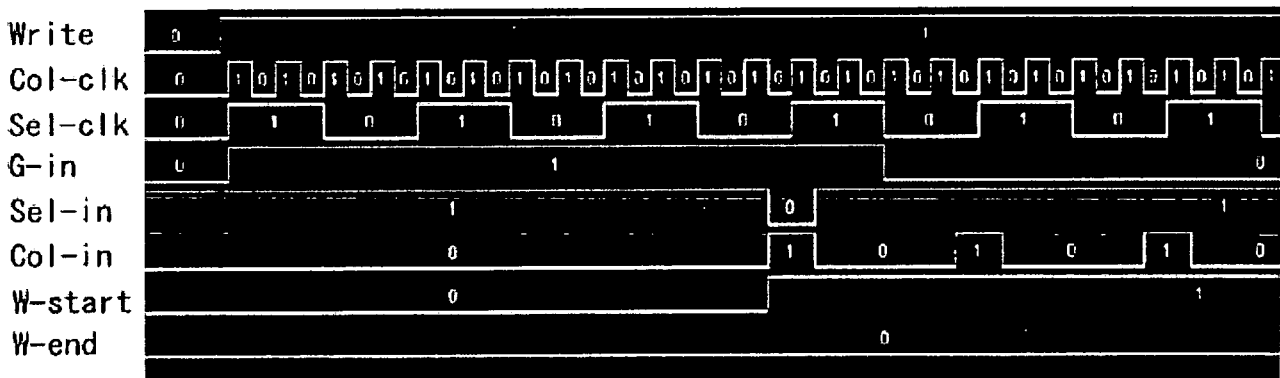


図 3-29 書き込み制御開始時の測定結果

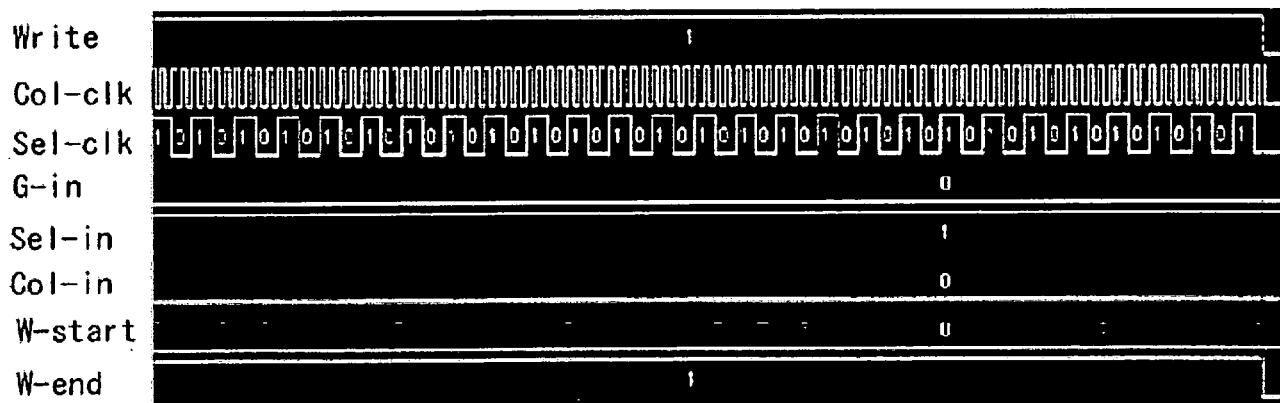


図 3-30 書き込み制御終了時の測定結果

図 3-29、図 3-30 から設計された制御基板は設計通りの動作をしていることが確認できた。測定の結果、オシレータから CPLD に入力される M-clk は 15.99MHz、磁気センサの読み出し速度は 7735fps となり、読み出し速度に 1%の誤差がみられた。

C. 4. 角度判別の検討

C. 4. 1 出力画像の二値化

得られた磁束分布図から傾斜角度を求めるため、まず出力画像の特徴抽出をして、定量的なデータに置き換え、処理のしやすい形式にする必要がある。そこで、特徴抽出の 1 つの方法として二値化を行う。

二値化とは任意の閾値を設定し、出力電圧が閾値より大きければ"1"、小さければ"0"を割り当て、"1" (または"0") の領域の形状から画像の特徴を抽出する処理である。さらに、"1"の場合は"黒"、"0"の場合は"白"としてビットマップ図を作

成する。二値化処理においては、閾値によって出力される画像が変わってくるので、目的に合った閾値を設定する必要がある。

まず、閾値を出力電圧の平均値に設定した。図 9 の出力画像を二値化したものを図 4-1 に示す。閾値が出力電圧の平均値の場合、画像の周囲にノイズが多く出てしまい、また形状の変化も明確に見ることができなかった。

そこで閾値を出力電圧の平均値から 2 倍、3 倍、4 倍としたときの二値化を行った。その画像を図 4-2 に示す。閾値を増加させることによって周囲のノイズが減少し、また図形の変化がより明瞭に見られるようになった。傾斜角度を大きくしていくと、二値画像は円形から楕円形に歪んで行く様子がわかる。よって閾値がある程度高い方が、傾斜角度判別に有効であると考えられる。

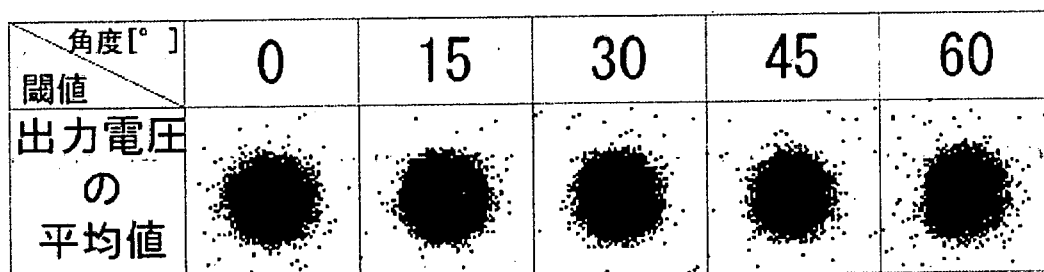


図 4-1 閾値平均値の二値画像

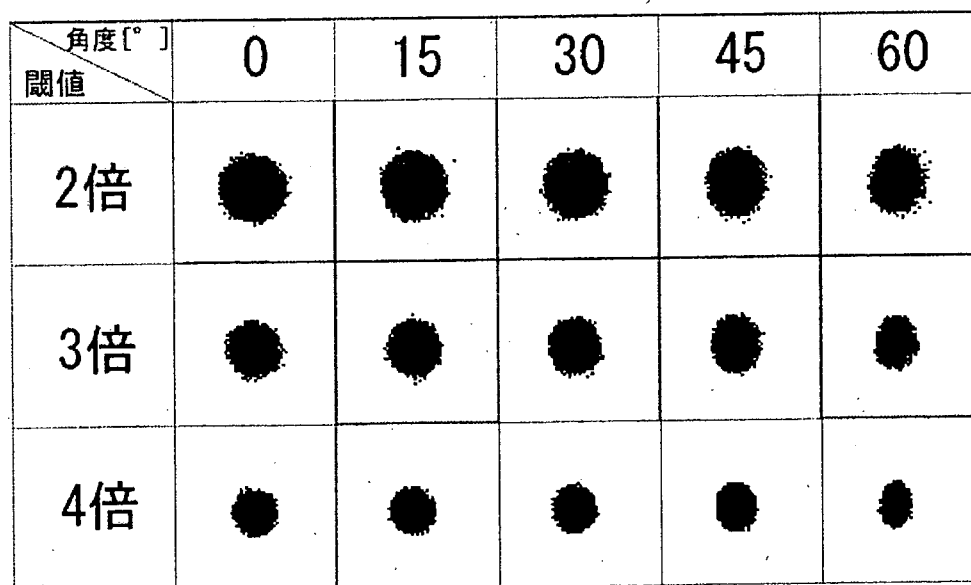


図 4-2 閾値を変化させた際の二値画像

C. 4. 2 傾斜角度の判別方法

図 4-3 に傾斜角度判別の概要図を示す。傾斜角度を大きくすることによって、二値画像は円形から楕円形に歪んでいくことが確認されたので、今

度はその変化を数値的に捉える必要がある。そこで二値画像の長軸 a と短軸 b の比 (b/a) を求め、その値から傾斜測定が可能であると考えた。図 4-4 に閾値と傾斜角度による長短軸比の変化を示す。

図 4-4 より傾斜角度を増加させると、長短軸比は変化、減少することが分かる。また閾値を大きくすると長短軸比の変化も大きくなり、閾値を高く設定することにより二値画像の変化を明確に見ることができる。

よって、二値画像の長短軸比を求めることにより傾斜角度を判別が可能である。

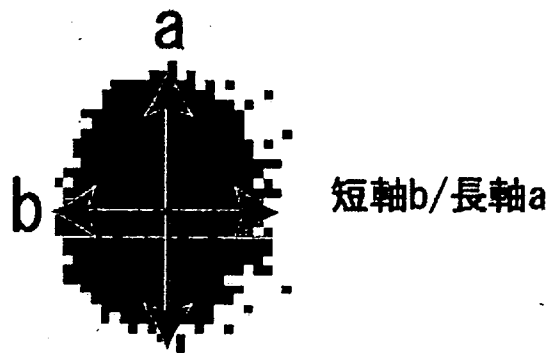


図 4-3 傾斜角度判別の概要

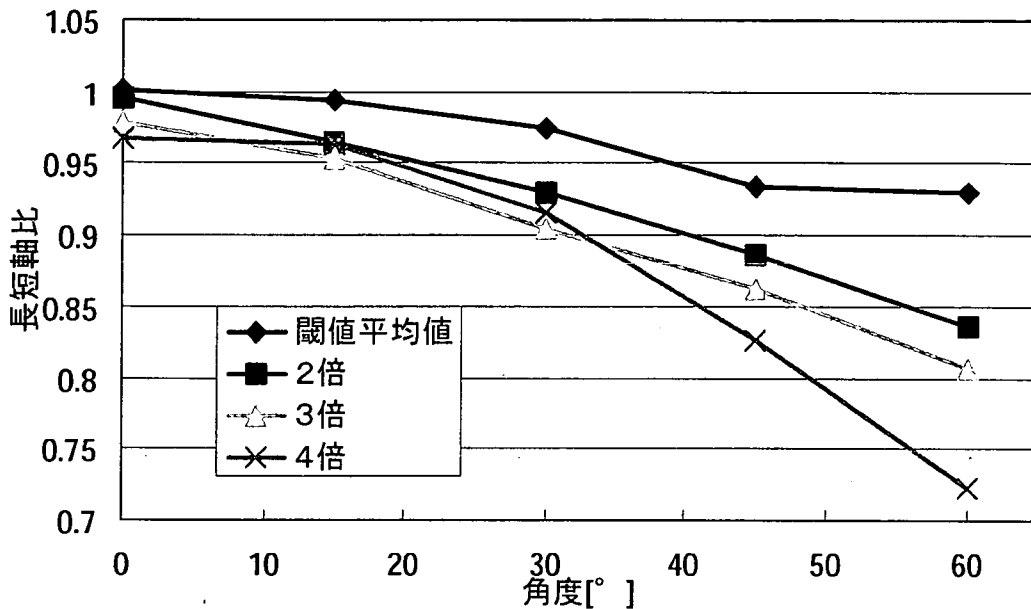


図 4-4 傾斜角度による長短軸比の変化

C. 4. 3 パターンマッチングを用いた傾斜角度判別

C. 4. 3. 1 パターンマッチング

パターンマッチングとは比較対象となる入力画像と比較するパターン画像を合わせ、最も似ているパターンを認識結果とする処理のことである。この合致の判定には相関係数を用いる。相関係数を求める式を (2) 式に、相関係数の評価を表 4-1 に示す。表 4-1 より相関係数が "1" に近いほど、比較する画像は似ていることになる。

$$\gamma = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad \dots (2)$$

n : 全体の数 (X の総数または Y の総数)

X_i : i 番目の X \bar{X} : X の平均

Y_i : i 番目の Y \bar{Y} : Y の平均

表 4-1 相関係数の評価

$0 \leq \gamma \leq 0.2$	ほとんど相関がない
$0.2 \leq \gamma \leq 0.4$	やや相関がある
$0.4 \leq \gamma \leq 0.7$	かなり相関がある
$0.7 \leq \gamma \leq 1$	強い相関がある

C. 4. 3. 2 パターンマッチングを用いた傾斜角度判別の方法

二値画像のまま長短軸比を求めるとノイズの影響を大きく受けてしまい、また画素数も 64×64 のためこれ以上の精度で角度判別が行えないと

という問題が出てきてしまう。そこでパターンマッチングを用いた傾斜角度判別を行う。その概要図を図4-5に示す。磁石を傾斜させたときの二値画像が楕円形に近いことから、擬似的な楕円パターンを作成し、その楕円パターンの中心位置やサイズを変化させながら二値画像とパターンマッチングを行う。そして最も相関性の高い楕円パターンの長短軸比から傾斜角度の判別をする。これに

よって二値画像のノイズの影響を抑えられ、また正確な楕円の軸長を用いて測定を行えるようになる。

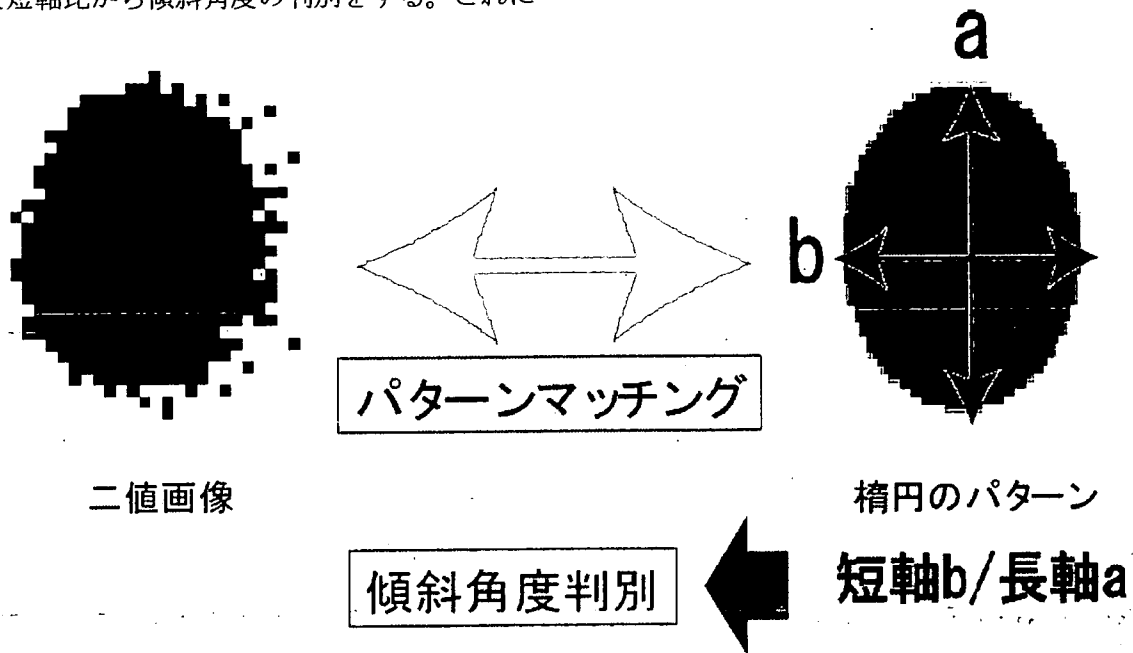


図4-5 傾斜角度判別の概要

また精度の問題を解決するために、擬似的に楕円パターンの画素の分割を行う。図4-6に画素の一边を2、4、8分割し作成した楕円パターンを示す。画素を分割することによって、処理前と比べ周囲がより滑らかな楕円パターンを作成することができた。ここで、画素を8分割した場合は6.25

μm 単位で楕円パターンの中心位置やサイズを変化させることができ、より精度の高いパターンマッチングを行うことができる。

これら一連の処理を自動で行うプログラムの作成を行い評価、改善をする。

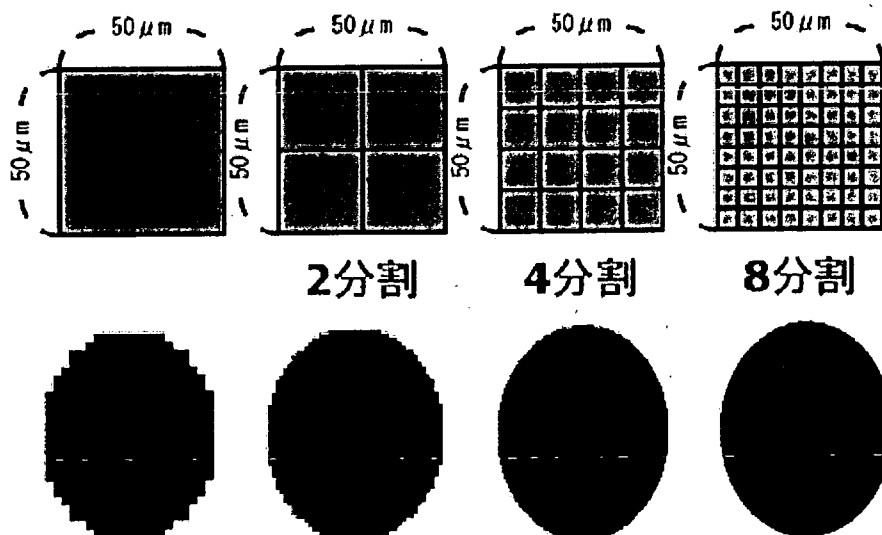


図4-6 楕円パターンの画素の分割

C. 4. 4 プログラムの作成
 C. 4. 4. 1 プログラムの流れ

長短軸比を自動で求めるプログラムの流れを
 図 4-7 に示す。

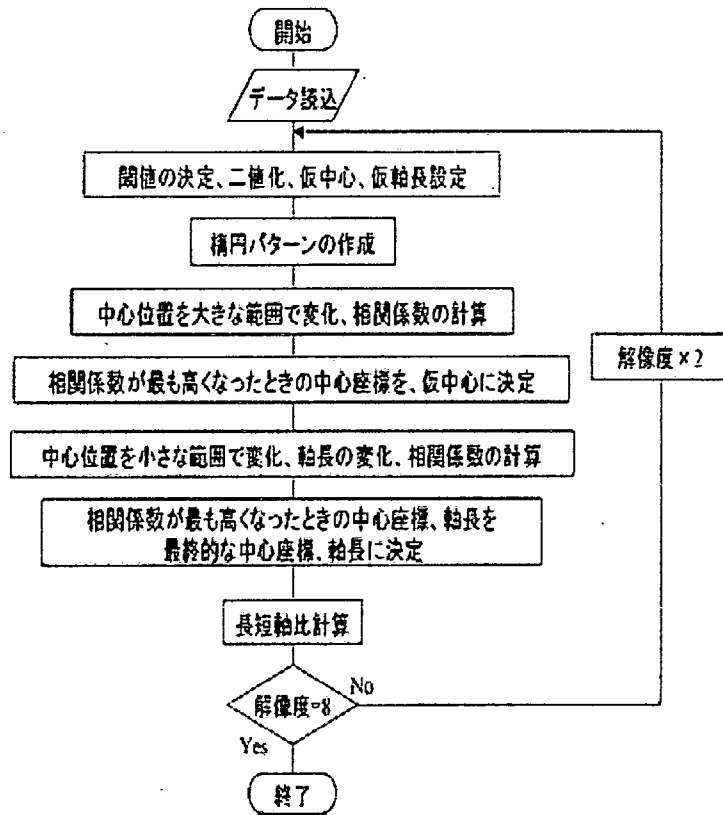


図 4-7 プログラムの流れ

プログラムは C 言語を用いて作成された。まず、出力電圧のデータを 64×64 の配列に読み込み、閾値を設定する。設定した閾値から、二値化を行い仮中心と仮軸長を設定する。

仮中心、仮軸長とは、パターンマッチングを行う際に作成する最初の擬似楕円パターンの元になる値である。 64×64 の二値データ 1 列の合計を計算し、64 列の中で最も大きな値を縦方向の仮軸長に、その列を仮中心の x 座標に設定する。同様に 1 行の合計を計算し、64 行の中で最も大きな値を横方向の仮軸長に、その行を仮中心の y 座標に設定する。

まずは仮中心、仮軸長をもとに作られた楕円パターンの軸長を固定し、大きな範囲で中心位置を変化させ、相関係数を計算する。相関係数が最大のときの中心座標を再度、仮中心とする。次に小さな範囲で中心位置を変化させ、それと同時に軸長の変化も行い、相関係数を計算する。相関係数が最大のときの中心座標、軸長を測定結果とし長短軸比を求める。同様の流れで画素を分割した際も実行する。傾斜角度 0° のデータを試したものを例としてあげる。図 4-8 にデータの出力画像を、また閾値が出力電圧の平均値の場合の実行結果を表 4-2 に示す。

表 4-2 より、まず問題となっているのは処理時間である。画素 4 分割で約 380[秒]かかってしまい、画素 8 分割の場合は測定できなかった。このアルゴリズムでは、最初の擬似楕円パターン作成の元となる仮中心、仮軸長の設定が重要となる。しかし使用するデータによっては実際の値と大きくずれることがあり、そのためパターンマッチングでの中心位置変化を大きな範囲で実行しなければならない。そのため、画素を分割するごとに計算量が膨大に増えてしまい処理時間がかかってしまった。



図 4-8 プログラム実行に用いた出力画像

表 4-2 実行結果

画素	長短軸比	相関係数	処理時
----	------	------	-----

			間[秒]
等分割	1.028571	0.874581	0.80
2分割	1.014286	0.874190	17.68
4分割	1.043478	0.871118	379.39

C. 4. 4. 2 処理時間の短縮

次に、処理時間を短縮するアルゴリズムを考案した。フローチャートを図 4-9 に示す。青色の四角で囲まれた部分に変更した個所である。

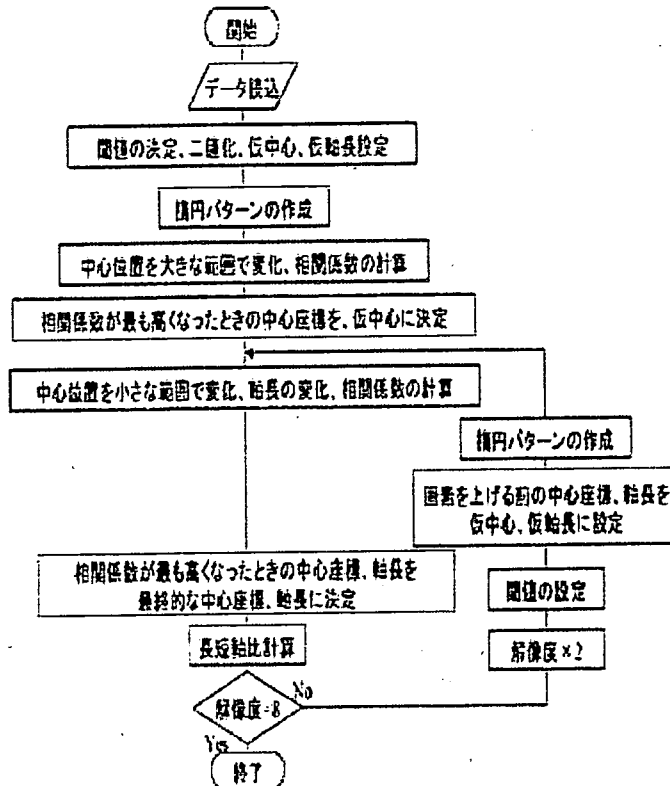


図 4-9 処理時間を短縮するアルゴリズム

パターンマッチングの際中心位置変化の範囲が大きかったため、画素を分割するごとに処理時間がかかっていた。そこで画素 2 分割以降において、その画素の最終的な中心座標と軸長を、次の画素の仮中心と仮軸長に設定することにした。画素 64×64 の場合でも結果として出力される中心座標と軸長が、実際の値と大きく異なることはない。よって中心位置変化の範囲を最小限に抑えることができ、その後のパターンマッチングにおける計算量を減少させることが可能となる。プログラム変更前と変更後の処理時間を表 4-3 に示す。

画素 2 分割の場合には約 10 秒、処理時間が短縮し、画素 4 分割の場合は変更前の 10 倍以上の速度で処理が可能となった。また 135 秒と処理時間はかかるが画素 8 分割での計算も行えるようになった。

	処理時間 (変更前)[秒]	処理時間 (変更後)[秒]
画素等分割	0.80	0.97
2 分割	17.68	6.76
4 分割	379.39	30.01
8 分割	—	125.38

C. 4. 4. 3 精度の向上

C. 4. 4. 3. 1 平均値フィルタ

平均値フィルタは画像中の高周波成分をカットすることで、ノイズ成分を除去し階調が変化している部分をぼかす機能がある。例えば図 19 に示されるような注目画素 (i, j) の値を決定する際には、この画素を中心とした任意の平方領域における各画素の平均値を求め、それを新たな注目画素の値に設定する。図 19 のような 3×3 の領域に平均値フィルタをかけるならば、(i, j) は式 (3) に示される値となる。

表 4-3 処理時間の比較

$$(i, j) = \{(i-1, j-1) + (i-1, j) + (i-1, j+1)\}$$

$$\begin{aligned}
 &+ (i, j-1) + (i, j) + (i, j+1) \\
 &+ (i+1, j-1) + (i+1, j) + (i+1, j+1) \} \\
 &\times \frac{1}{9} \dots \dots (3)
 \end{aligned}$$

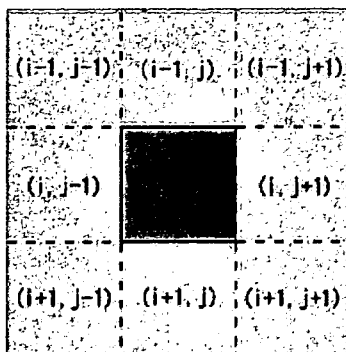


図 4-10 3×3 領域の注目画素と近傍画素

C. 4. 4. 3. 2 平均値フィルタを用いた処理

より精度の高い測定を行うため、出力画像に平均値フィルタをかける。出力画像でそのまま処理を行うとノイズがのっているため、正確なパターンマッチングがされているとは言えない。そこで出力画像も擬似楕円パターン同様に画素を分割し、さらに平均値フィルタをかけることによってノイズの影響を軽減し、滑らかな磁束分布図を用いてパターンマッチングができると考えられる。

本研究では注目画素の±50μmの範囲にフィルタをかけた。図 4-11 に元の出力画像と平均値フィルタを施した画像を示す。図より出力画像の階調の荒さが取れノイズが軽減されていることが分かる。また画像をぼかすことができるので、画素を分割し、細かい範囲に平均値フィルタをかけることによって、より周囲の滑らかな磁束分布図を作成することができた。

表 4-4 に平均値フィルタをかける前と後の相関係数を示す。まず閾値が出力電圧の平均値の場合、従来だと図 4-5 にあるようにノイズが二値画像に多く残っているため、相関係数はその分低くなっていた。しかしフィルタリング後は相関係数の値が約 0.8 改善し、他の閾値の場合と同じような値をとるようになった。このことから、平均値フィルタによってノイズの影響を小さくできたことが分かる。また他の閾値においても一様に相関係数が上昇している。よって、従来より正確なパターンマッチングによって長短軸比の測定が可能となる。

図 4-12 に最終的なプログラムの流れを示す。赤い四角で囲まれた部分がフィルタ処理を行う

部分である。このプログラムを用いて長短軸比の測定を行う。

表 4-4 フィルタ処理による相関係数の変化

閾値	フィルタ処理前	フィルタ処理後
平均値	0.888573	0.961298
2 倍	0.946958	0.97825
3 倍	0.950802	0.976531
4 倍	0.954913	0.97456


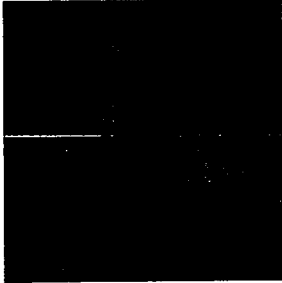
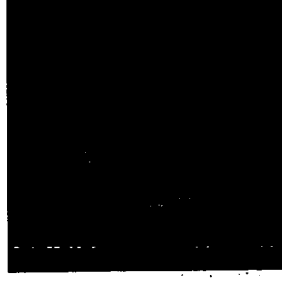
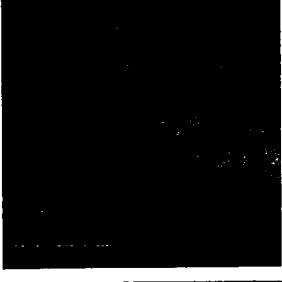
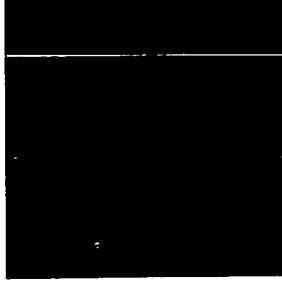
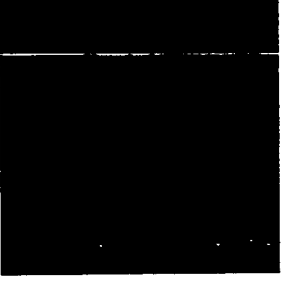
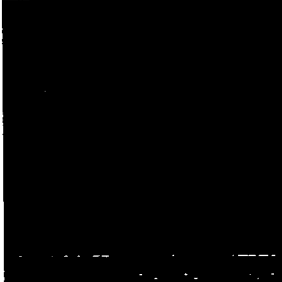
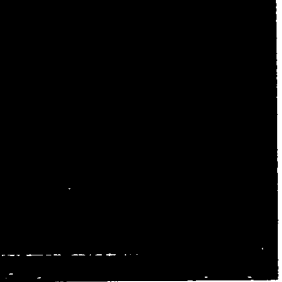

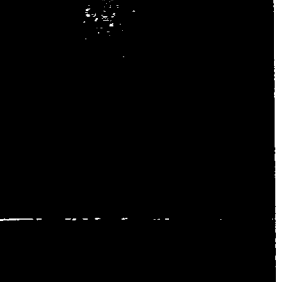
元の画像		
画素等分割		
画素2分割		
画素4分割		
画素8分割		

図 4-11. フィルタをかけた出力画像 (上) と
その一部を拡大した画像 (下)

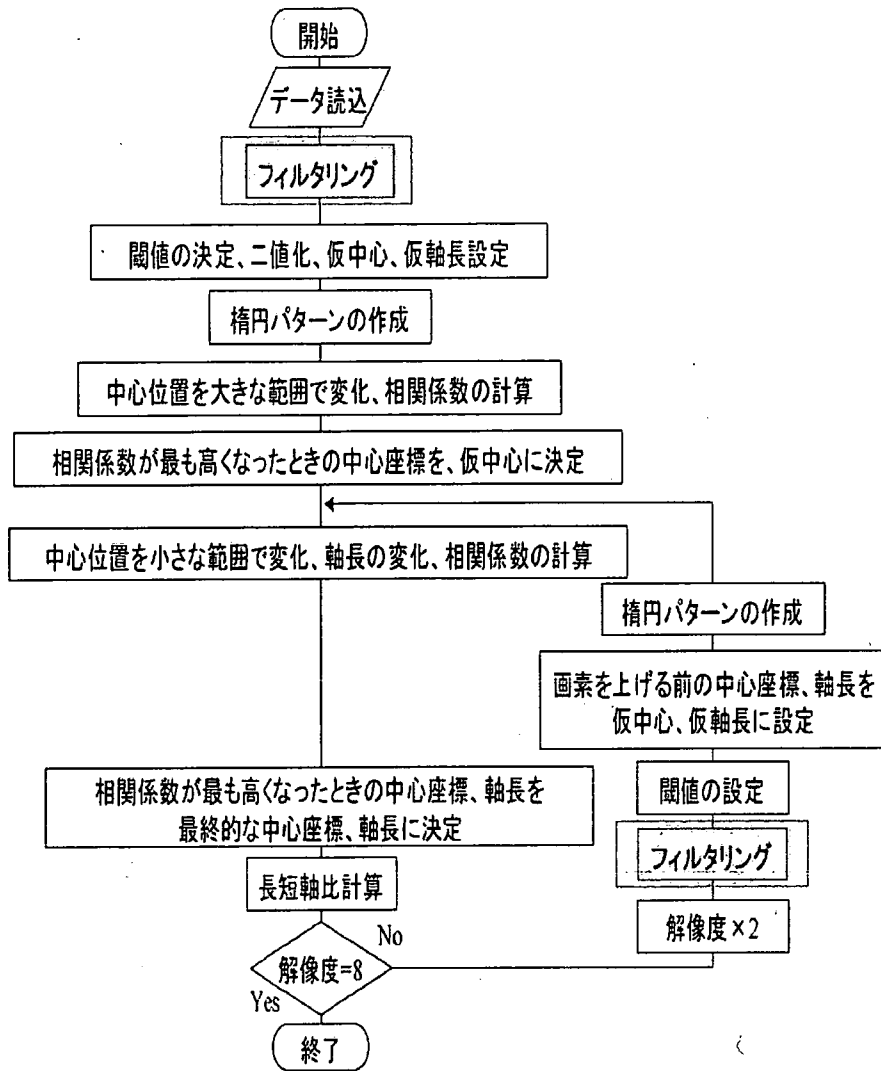


図 4-12 最終的なプログラムの流れ

C. 4. 5 プログラムの結果及び評価

C. 4. 5. 1 プログラムの結果

8 回測定を行った出力電圧の平均をとった画像を用いてプログラムを実行した。画素等分割、2 分割、4 分割、8 分割の場合の長短軸比変化を図 4-13～図 4-16 に示す。図に示されている長短軸比は、二値画像と擬似楕円パターンの相関係数が最も高かった時の値を、プログラムによって求めたものである。

図より画素が等分割の場合はグラフが波打ってしまい、角度ごとの長短軸比の変化が明確に捕らえにくくなっているが、画素を上げていくと一様に右肩下がりになるグラフを得られた。また全ての画素、閾値において傾斜角度が小さい場合、長短軸比の変化は少なかった。一方、傾斜角度が大きい場合、閾値電圧を大きくした方がより長短軸比の変化も顕著に表れる事がわかった。ここで画素 8 分割の場合を例に挙げる。閾値が出力電圧

の平均値のとき、傾斜角度が 0° から 60° となる間に变化する長短軸比は約 0.13 であるのに対し、閾値が平均値の 4 倍の場合、長短軸比は約 0.27 变化する。よって閾値をある程度大きく設定した方が長短軸比の測定に適している。

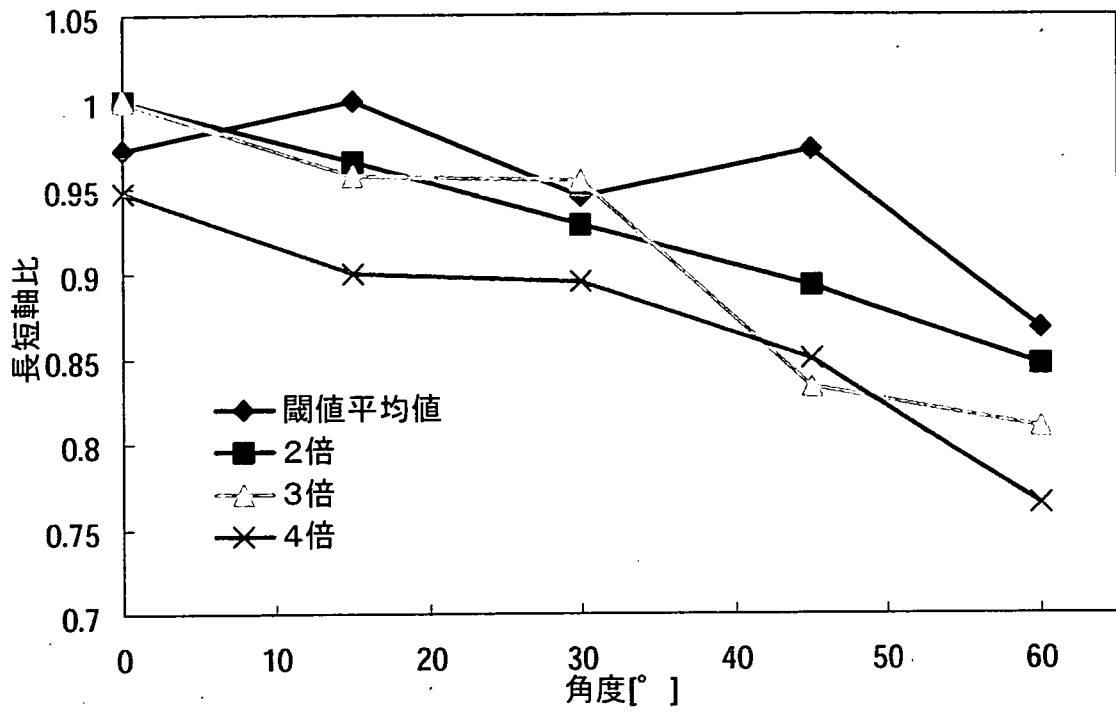


図 4-13 画素等分割(64×64)の長短軸比変化

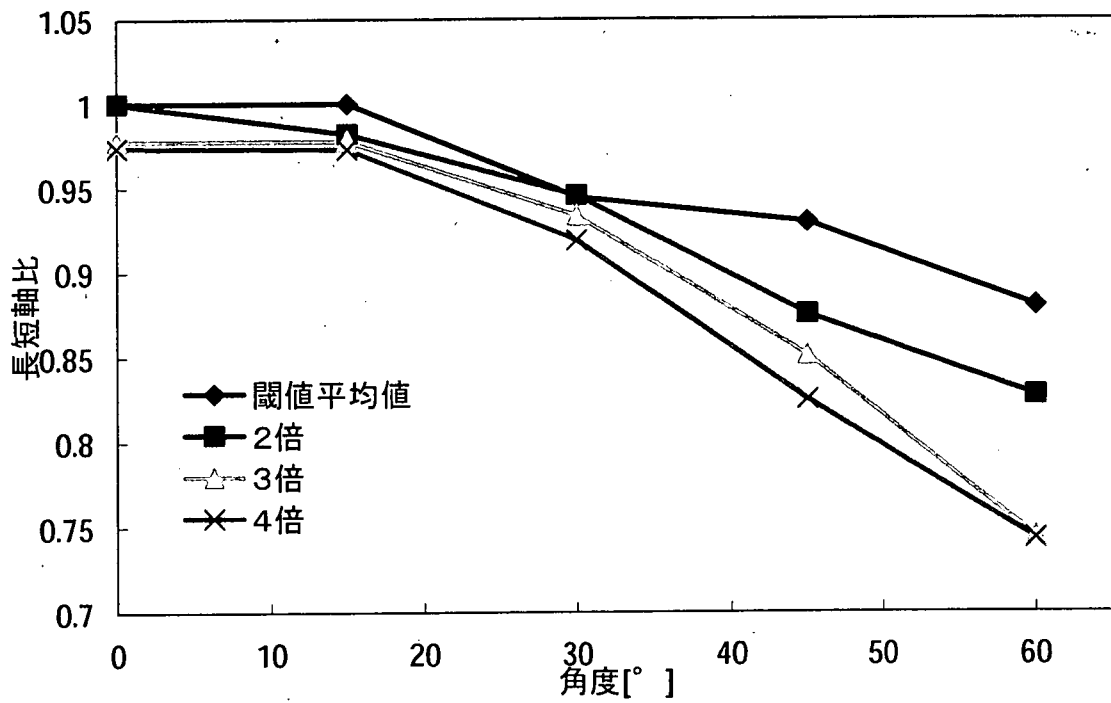


図 4-14 画素2分割(128×128)の長短軸比変化

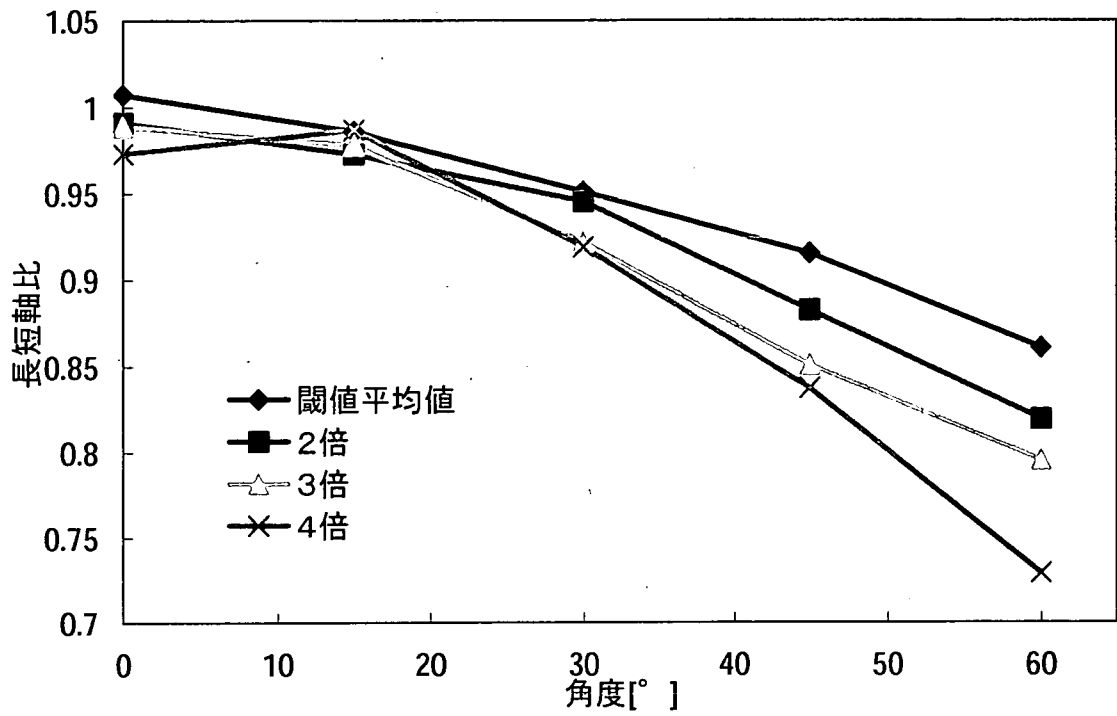


図 4-15 画素 4 分割(256×256)の長短軸比変化

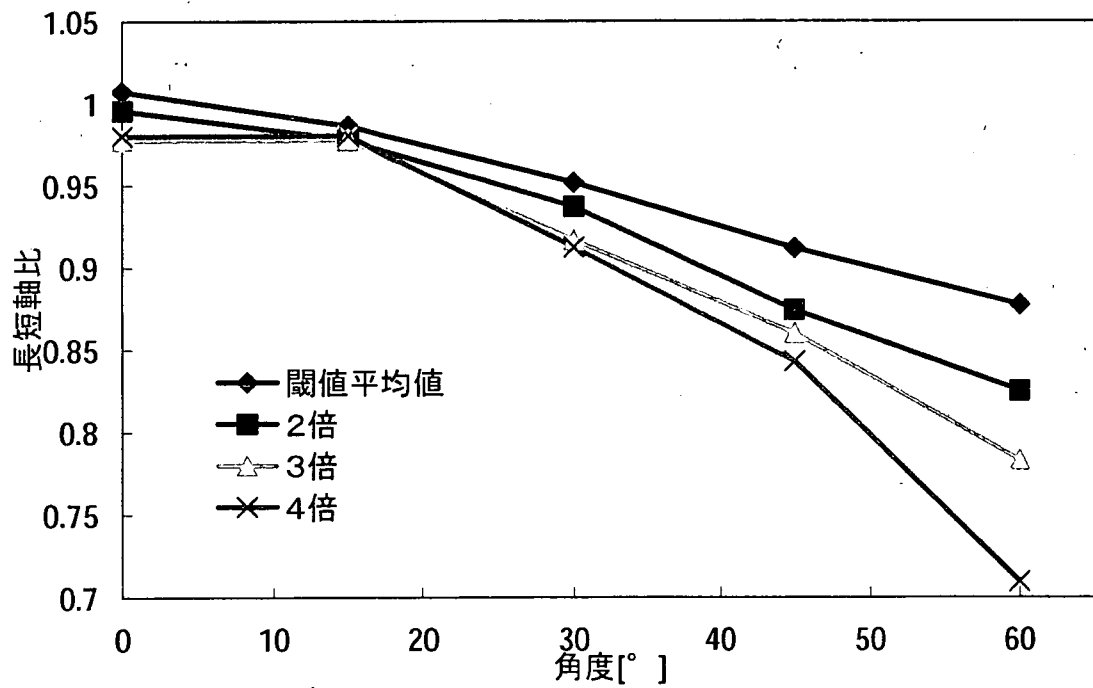


図 4-16 画素 8 分割(512×512)の長短軸比変化

C. 4. 5. 2 測定誤差

同じ傾斜角度の出力画像でプログラムを実行しても、画像ごとで長短軸比の値に差が出てしまった。そこで長短軸比の最大値と最小値の差を計算しそれを測定誤差として求めた。画素、閾値ごとに測定誤差の平均値を計算したものを表 4-5 に示す。画素別に比べると、画素等倍よりも 2 分割、4 分割、8 分割とした時の方が測定誤差は小さい傾向にあった。また閾値別に比べると、出力電圧の平均値に設定した場合、測定誤差は大きかった。閾値を上げると値は減少するが 2 倍、3 倍、4 倍とした時の値はほとんど変わらず、特徴的な傾向は見られなかった。

例として、長短軸比の変化が大きくまた誤差も比較的小さい画素 8 分割、閾値 4 倍の場合の測定誤差を表 4-6 に、それをグラフにしたものを図 4-17 に示す。表より最小で約 0.024、最大で約 0.036 の誤差が発生した。

ここで同じ画素 8 分割、閾値 4 倍という条件で傾斜角度 0° の場合、二値画像の軸長はおよそ 18 画素 ($900 \mu\text{m}$) である。そこで短軸、長軸どちらかが 1 画素 ($50 \mu\text{m}$) 変化すると長短軸比は約 0.056 の変化する。よって今回プログラムによって求めた長短軸比の測定誤差は、その範囲に収まっていることになる。

また、このとき傾斜角度 $15^\circ \sim 60^\circ$ で長短軸比は約 0.27 変化するので測定誤差を最大値の 0.036 とすると、約 6° の分解能を得ることができる。一方、傾斜角度 15° 以下の場合には、長短軸比の変化が測定誤差より小さく角度の判別が難しいことが分かった。

表 4-5 画素、閾値による測定誤差

	閾値平均値	2 倍	3 倍	4 倍
画素等分割	0.071162	0.05044	0.033856	0.086232
2 分割	0.060722	0.038983	0.039912	0.046961
4 分割	0.053492	0.034177	0.033739	0.038022
8 分割	0.045316	0.026135	0.026551	0.028472

表 4-6 画素 8 分割、閾値 4 倍の測定誤差

	0°	15°	30°	45°	60°
測定誤差	0.027196	0.026141	0.029161	0.023874	0.035989

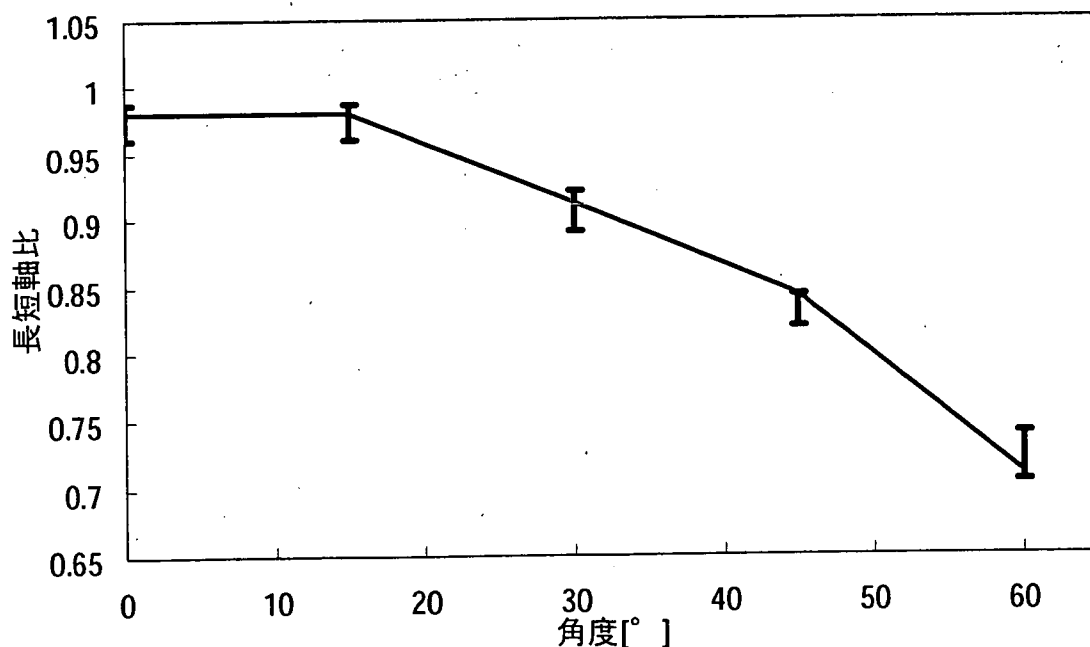


図 4-17 測定誤差のグラフ

D. 考察

新しい読み出し方法の提案や駆動回路の工夫をすることによりノイズを増やさず読み出し速度の向上をはかることができた。3回の磁気センサの試作を行うことにより、7808fpsの読み出し速度が実現可能となった。

また、2次元磁束像から磁石の位置や傾きを求める方法に関して検討した。その結果傾斜角度 $15^{\circ} \sim 60^{\circ}$ で約 6° の分解能を得ることができるようになった。一方、傾斜角度 15° 以下の場合、長短軸比の変化が測定誤差より小さく角度の判別が難しいことが分かった。

これらの研究により、ステントの位置計測のための基礎技術を確立することができたが、精度の面でデバイス構造や信号処理方法を改善する必要がある。

E. 結論

第一次試作では二次元磁束分布図を出力することに重点をおいて作製された。まず、磁束を測定するためのシステムを構築し、第一次試作チップを使用して磁石から発生する磁束の二次元分布図を出力させた。その結果、N極、S極、両方の磁石で理想的な二次元磁束分布図を得ることができたが、読み出し速度が0.23frame/secと致命的に遅いという欠点があった。

第二次試作ではこの欠点を改善するためにダイナミックドライブ駆動を採用し、トランジスタの駆動力を第一次試作の1.3倍にするなどの対策を施した。その他にもオペアンプをバッファとして使用することで出力にノイズが混じることを防ぎ、他の場所ではオペアンプを作動増幅機として使用して出力電圧を増幅することによって更なる読み出し速度の向上を図った。そして第二次試作の実験からは $10\mu\text{m}$ 単位で磁石を固定できる測定器を作製し、この測定器を用いて測定した二次元磁束分布図を元に位置計測を行い、それらの精度を測定した。位置計測には研究室で開発した位置計測プログラムを用いて行った。

実験の結果、画質が少々劣化するが最大で1647frame/secの読み出し速度で二次元磁束分布図を得ることができ、この時の測定誤差は $\pm 25\mu\text{m}$ であった。さらにこの磁気センサチップ上で磁石を回転させたときの二次元磁束分布図から応答速度の算出及び実測を行い、読み出し速度の目標値を算出した。その結果、一次試作の読み出し速度の限界(976fps)では400rpmで回転するモーターに取り付けられた磁石の二次元磁束分布図における像の誤差が1画素($50\mu\text{m}$)以下となるため、400rpmで回転するモーターまで制御可能であることがわかった。人工心臓に用いられる磁気

浮上モーターは3000rpmで回転するため、制御を行うには一次試作磁気センサチップの約8倍の読み出し速度が必要であることが明らかになった。よって、7808fpsの読み出し速度を読み出し速度の目標値とし、高速読み出しに重点を置いた三次試作の磁気センサチップの設計を行った。

三次試作の磁気センサチップは、ホール素子の構造の最適化と出力バッファの増強によりノイズ対策を施し、並列読み出し方式(16チャンネル)を採用することで読み出し速度の改善を図った。信号を高速に処理するために、読み出した出力をメモリに一時的に保存する読み出しシステムを構築した。制御基板とADC基板のCPLDの各動作におけるシミュレーションを行った結果、制御基板とADC基板のCPLDはタイミングチャート通りの動作を示した。制御基板の特性評価を行った結果、7735fpsの読み出し速度で設計通りの動作を示した。この結果から、並列読み出し方式の制御を行う基板を完成することができた。

さらに集積化磁気センサを用いて磁石を傾けた時の磁束分布を調べ、傾斜測定方法についての検討を行い、プログラムの作成を行った。

磁束分布図を二値化し長短軸比を求めることによって傾斜角度の判別が行えることがわかった。しかしノイズや解像度の問題があったので、パターンマッチングを用いて長短軸比の測定することにした。

検討を元に、擬似楕円パターンを中心座標、軸長を変化させ、パターンマッチングを行い、二値画像と最も相関性の高かった時の楕円パターンの長短軸比を出力するプログラムをC言語で作成した。アルゴリズムを改善し画素8分割まで処理ができるようになり、またフィルタ処理を行うことによって相関係数の向上を図ることができた。プログラムの結果からも、傾斜角度を増加させることによって長短軸比が変化したので角度の判別が行えることが分かった。また測定結果から誤差は1画素の変化内に収まり、傾斜角度 15° 以上では約 6° の分解能を得られたが、 15° 以下では傾斜角度の判別ができなかった。

F. 研究発表

1. 論文発表

1) T.Kimura, K.Takasaki, T.Masuzawa, " Characteristics of Two-Dimensional Integrated Magnetic Sensor for Position Sensing and Motor Controlling"、IEEJ Trans. Vol. 1, pp. 188-193, (2006)

2. 学会発表

1) K. Takasaki, T. Kimura, and T. Masuzawa, " Development of Two- Dimensional Magnetic Sensors for Characterization of Magnetic Levitated Motors" Proceedings of The First International Student Conference at Ibaraki University, July 13-15, 2005, Ibaraki, Japan, pp 219-222, (2005)

2) 高崎慶吾、木村孝之、増澤徹、" 磁気浮上モーターの特性評価を目的とした二次元磁気センサの計測" 電気学会 Linear Drive 研究会、LD-05-50、(2005)

3) 高崎慶吾、木村孝之、増澤徹、" モーターの制御を目的とした二次元集積化磁気センサ読み出し速度の向上に関する研究" 電気学会東京支部茨城支所研究発表会、pp. 75、(2005)

4) 石沢泰輔、高崎慶吾、木村孝之、増澤徹、" 集積化磁気センサにおけるホール素子の構造改善による出力向上" 電気学会東京支部茨城支所研究発表会、pp.46、(2006)

5) 石沢泰輔、高崎慶吾、木村孝之、増澤徹、" 二次元集積化磁気センサのホール素子構造の改善" 映像情報メディア学会、情報センシング研究会、(2007)

6) 石沢泰輔、木村孝之、増澤徹、" 二次元集積化磁気センサの応答速度の検討" 電気学会東京支部茨城支所研究発表会、PB13、(2007)

※本発表により優秀発表賞を受賞した

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

無し

2. 実用新案登録

無し

3. その他

無し

ナノ振動波動装置と超音波試験装置の製作に関する研究

分担研究者 山本 芳郎 株式会社ミワテック主任研究員

研究要旨 ナノ振動によって生体と融着するステントの開発のために、まず融着現象について基礎的な検証を行い、接着メカニズムを詳細に解析するために、超音波メスと現象観察システムから構成される超音波試験装置の開発を行った。さらに開発した超音波メスにより生体組織を接着させるためには、超音波メスの制御方式の開発が必要である。そこで、本研究では、超音波メス制御方式を検討するために、樋上が開発したクイックタッチ術式を実現するような超音波メス制御方式について検討した。共振周波数を利用する超音波メス刃先の温度推定方法を提案し、刃先温度と共振周波数の関係を検証した。共振周波数をもとに振動振幅を調節することで、刃先温度制御が可能であることを確認した。

平成 18 年度には、前年度に明らかとなった、超音波振動と熱エネルギー、圧力負荷による生体組織同士の接着性について検証を行い、接着メカニズムを詳細に解析するためのシステムの開発を行った。本研究では、生体組織として血管を用いて実験を行うために超音波振動、熱エネルギー、圧力負荷を同時に血管に与えるための装置を開発し、超音波振動周波数、振動振幅、血管に与える温度と接着強度との関係を検証した。振動周波数と振幅、温度を調整することで生体組織同士の接着が可能であることを確認した。

平成 19 年度には、超音波振動と熱エネルギー、圧力負荷による生体組織同士の接着性について検証を行い、接着メカニズムを詳細に解析するためのシステムとして、前年度の装置よりも振動エネルギーが大きく与えられ、また、温度制御可能なデバイスを新たに開発した。生体試料と人工材料の融着実験、動物実験により、融着が可能であることを確認した。

【平成 17 年度】

A. 研究目的

本研究事業では、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を目的とする。基盤となる生体組織接着理論は、申請者の岸田と分担研究者の増澤の共同研究から導き出された多孔質構造基材とナノ振動による生体組織誘導法と、分担研究者の樋上が提唱する超音波波動によるタンパク質変性による生体接着を組み合わせたものである。

本研究では、超音波波動による生体組織同士の接着性について基礎的な検証を行い、接着メカニズムを詳細に解析するために、超音波メスと現象観察システムから構成される超音波試験装置の開発を行った。

さらに開発した超音波メスにより生体組織を

接着させるためには、超音波メスの制御方式の開発が必要である。本研究では、超音波メス制御方式を検討するために、樋上が開発したクイックタッチ術式を実現するような超音波メス制御方式について検討した。

クイックタッチ術式は、冠動脈バイパス手術において、内胸動脈を剥離するために用いられる超音波メスの使用方法である。冠動脈バイパス手術はグラフトと呼ばれる血管を用いて、正常に血液が流れている位置からつまっている位置より下流に直接繋ぐ手術方法である。ただし、壊死している部分は治癒しないので、壊死していない部分や壊死しそうな部分に繋ぐ。グラフトには、内胸動脈・胃大網動脈・橈骨(とうこつ)動脈・大伏在(だいふくざい)静脈が用いられる。近年では、内胸動脈の下流一箇所だけ切断し、切断した方をつまっている位置より下流に繋げる手術方法が好成績

を収めている。内胸動脈を冠動脈バイパス手術のグラフトの代用として用いるには、そのままでは体内に埋まっているため剥離が必要である。しかし、剪刀や電気メスを用いた剥離ではとても時間がかかる。そこで、超音波メスを用いたクイックタッチ術式が使用される。クイックタッチ術式は周波数 5Hz・振幅 10mm で超音波メス刃先を手動で振る術式である。このクイックタッチ術式により、血管を損傷させずに剥離することが可能となる。しかし、このクイックタッチ術式は、術者の熟達が必要であり、誰にでも行えるわけではない。

B. 研究方法

B. 1 超音波試験装置

B. 1. 1 超音波メス現象観察システム

超音波波動による接着メカニズムを解明するために、生体組織に超音波波動を与えた場合の上昇温度や押し付け荷重などを計測できる、超音波メス現象観察システムを開発した。超音波メス現象観察システムは観察したい現象によって2通りのパターンをとる。1つ目は図1に示すように超音波メスが水平に試料に当たるシステムで、2つ目は超音波メスが垂直に試料に当たるシステムである。水平方向、垂直方向共に荷重変換器(NEC三栄 T1-1000-240 定格容量 1000gf)によって超音波メス刃先荷重を測定し、サーモグラフィ(NEC三栄 サーモトレーサ TH9100 ML)によって超音波メス刃先温度および対象とする生体組織の温度を測定し、周波数カウンタ(Pendulum CNT-90)で超音波メス動作周波数を測定する。超音波メス現象観察システムは刃先荷重、刃先温度、共振周波数の3種類の測定を同時に行うことが出来るものとした。データ収集はA/D変換ボードを介して、パーソナルコンピュータで行った。

B. 1. 2 超音波メス

超音波メスは振動子、ホーン、チップから構成される。振動子には電圧をかけることで伸縮する piezo 素子が用いられ、振動子で発生した振動をホーンで増幅しチップに伝える仕組みをとっている。チップは両端とも自由端で振幅はチップの先端で最大値をとり、チップの端からチップの長さの 1/4 の位置と 3/4 の位置は節であり振幅ゼロである。チップの先端を常に振幅最大とするため、ドライバより出力される電圧は共振周波数を追従するように制御するものとした。本超音波メスは、共振周波数約 25kHz である。超音波メスの全体図を図 2(a)に示す。図 2(b)は振動振幅が 30~

180[μ m]で調整可能な刃先である。図 2(c)は刃先を鏡面加工したもので、振動振幅は 30~180[μ m]で調整可能である。両チップは付け替え可能である。

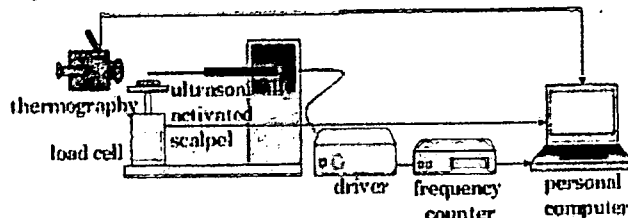
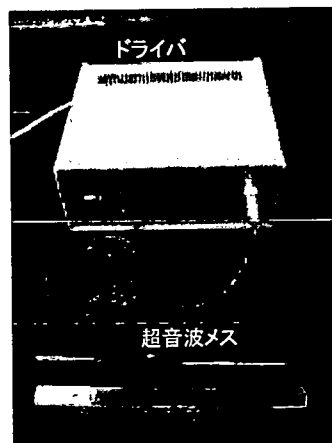
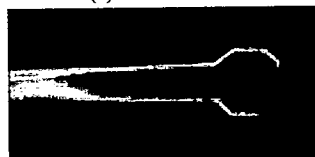


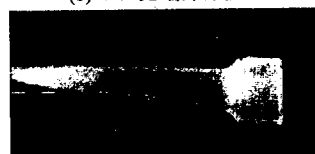
図1 超音波試験装置 (水平方向)



(a) 超音波メス



(b) メス先端部分拡大



(c) メス先端部分拡大 (鏡面加工)

図2 開発した超音波メス

B. 1. 3 共振周波数測定回路

超音波メスの共振周波数を測定するため、共振周波数測定回路を作成した。共振周波数測定回路には、図3に示すCN5の3、4番ピンより出力される信号を入力する。共振周波数測定回路の回路図を図4に示す。12[V]電源は超音波メスドライバ内の電源よりとる。図4の共振周波数測定回路では出力が 12[V]なので、出力電圧を分圧し 5V にするには、出力の 12[V]側と 0[V]側の間に抵抗を入れればよい。図4の 12[V]電源と出力にある抵抗値は 1[k Ω]なので、左側のトランジスタのベース

電流が流れないとき、この抵抗に流れる電流は次式となる。

$$\frac{(12-5)}{1000} = 0.007[A] \quad \dots (式 2.3)$$

5V の出力と 0V の出力の間に入れる抵抗には 0.007A 流れるので抵抗値は、次式となる。

$$\frac{5}{0.007} = 680[\Omega] \quad \dots (式 2.4)$$

よって、作成した共振周波数測定回路の回路図を 図 5 に示す。

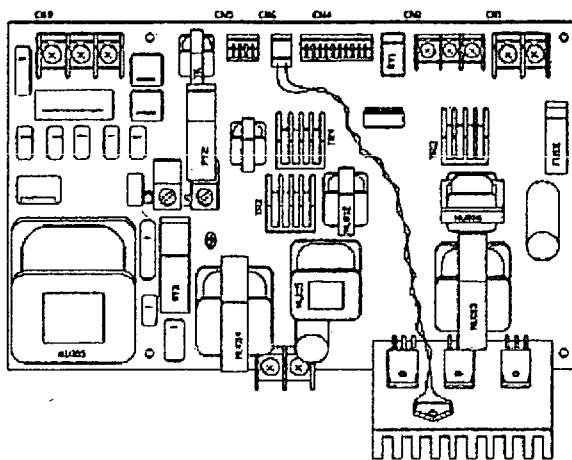


図 3 超音波発振回路

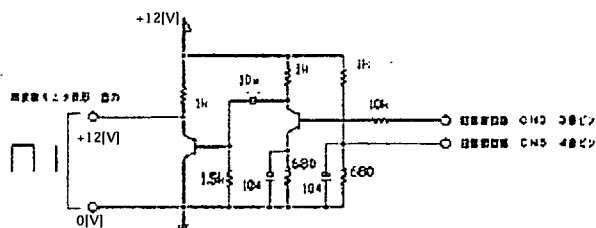


図 4 共振周波数測定回路

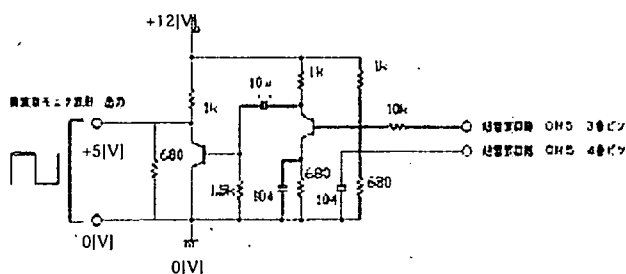


図 5 周波数測定回路

B. 1. 4 振動振幅制御回路

超音波メスの振動振幅を制御するため振動振幅制御回路を作成した。振動振幅制御回路の回路図を 図 6 に示し、作成した振動振幅制御回路を 図 2.38 に示す。振動振幅制御回路は制御ソフトウェ

アで制御された信号を入力とし、信号が入力されると振動振幅調整回路より出力された信号を GND におとし、振動振幅を最小にする回路である。

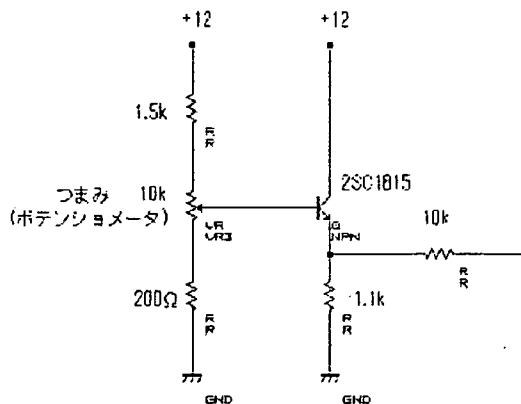


図 6 PWM 発生 IC 入力電圧調整回路

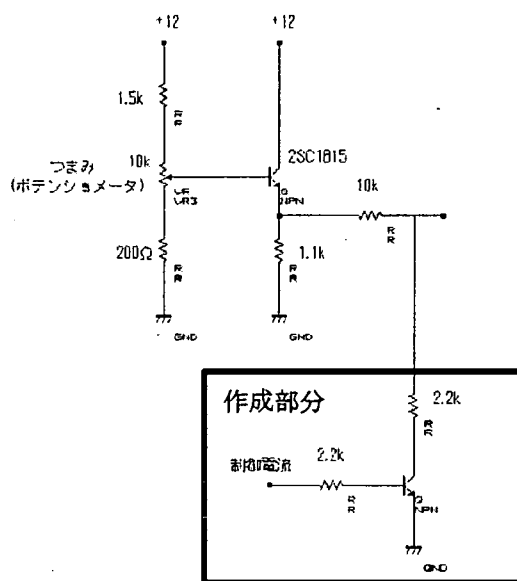


図 7 PWM 発生 IC 入力電圧調整回路 (制御回路作成後)

B. 1. 5 振動振幅測定装置

超音波メスの実際の振動振幅を測定するため振動振幅測定装置を作成した。振動振幅測定にはレーザ変位計(KEYENCE ヘッド部 LK-G10 & コントローラ部 LK-GD500 電源ユニット KZ-U3)を用いた。

B. 2 超音波メス制御方式の提案

生体組織を損傷せずに超音波メスによる接合を実現するためには、超音波メスにより生体組織に与えられるエネルギーを制御することが必要である。生体組織の損傷には熱が与える影響が大

きいため、温度制御を行うことを考えた。

本研究で開発した超音波メスのチップの材質はTi-6Al-4Vであり、Ti-6Al-4Vは温度によってヤング率が変化する。そこで、チップ内の音速Cは、ヤング率E、密度 ρ とすると

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots (式 2.1)$$

で表せる。

この式においてEと ρ は温度に依存する。温度とEの関係を表1に示す。

表1 温度とヤング率の関係

温度 [°C]	ヤング率 [GPa]
0	105
200	94.7

また線膨張係数は $8.6 \times 10^{-6} [\text{cm}/\text{cm}/\text{°C}]$ であり、室温のとき密度 $4.428 [\text{kg}/\text{m}^3]$ があるから、室温を $25 [\text{°C}]$ とした場合、図8のような丸棒を考えれば表2、表3のようになる。

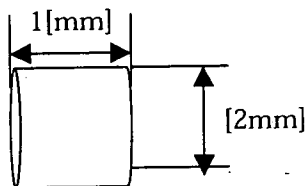


図8 温度とヤング率の関係

表2 各パラメータ

線膨張係数 [cm/cm/]	0.0000086
半径 [cm]	1.000
長さ [cm]	1.000
体積 [cm ³]	6.283
密度(室温) [g/cm ³]	4.428
質量 [g]	27.822

表3 温度と各パラメータの関係

温度 [°C]	0	25(室温)	200
半径 [cm]	0.999785	1.000	1.001505
長さ [cm]	0.999785	1.000	1.001505
体積 [cm ³]	6.279	6.283	6.312

密度 [g/cm ³]	4.431	4.428	4.408
密度 [kg/m ³]	4431	4428	4408

温度とEの関係を線形近似し、温度とcの関係をだす。

また、このときの共振周波数fは、波長 λ とすると

$$f = \frac{c}{\lambda} \dots (式 2.2)$$

で表せる。

波長 $\lambda = 19.15$ で一定の場合の温度とヤング率E、密度 ρ 、音速c、共振周波数fの関係を表4に示す。

表4 温度とヤング率の関係

温度 [°C]	ヤング率 [Pa]	密度 [kg/m ³]	音速 [m/s]	周波数 [Hz]
0	1.05E+11	4430.9	4868.0	25448.0
10	1.04E+11	4429.7	4856.7	25388.8
20	1.04E+11	4428.6	4845.3	25329.4
30	1.03E+11	4427.4	4833.9	25269.8
40	1.03E+11	4426.3	4822.5	25210.1
50	1.02E+11	4425.2	4811.0	25150.2
60	1.02E+11	4424.0	4799.5	25090.1
70	1.01E+11	4422.9	4788.0	25029.9
80	1.01E+11	4421.7	4776.5	24969.4
90	1.00E+11	4420.6	4764.9	24908.8
100	9.99E+10	4419.5	4753.2	24848.0

よって、波長 λ が一定の場合、温度が上昇すると、共振周波数fが下がる。

超音波メスは、波長 λ を一定にし、共振周波数fを追従しているのので、超音波メスの動作周波数を測定すれば、温度を推定できると考えた。