

図1 ホール素子(磁束印加前)

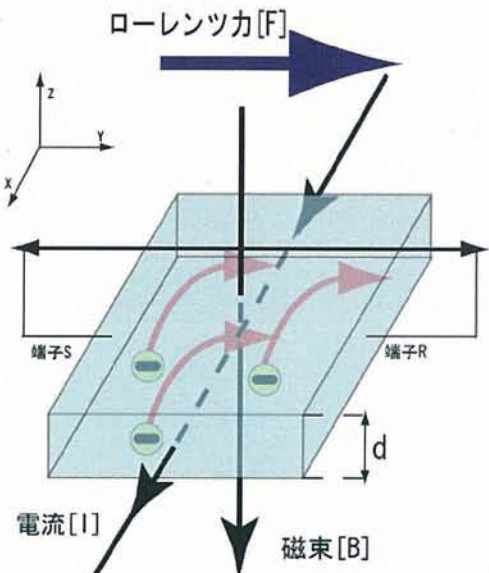


図2 ホール素子(磁束印加後)

ホール電圧 V_H 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ことが分かる。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わかる。

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。

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

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

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

V_H : ホール電圧 R_H : ホール係数 I : 素子に流れる電流 B : 素子にかかる磁束 θ : 磁束の傾斜角度 e : 電子素量 n : 半導体の電子密度 S : 積感度

C. 1. 2 Nチャネル MOSFET を用いたホールセンサ

図3にNチャネル MOSFETの反転層をホール素子として利用したホールセンサを示す。Nチャネル MOSFETを使用した理由として、電子は正孔に比べ易動度が高く、Nチャネル MOSFETはキャリアが電子であるため、より大きな出力電圧を得られるからである。

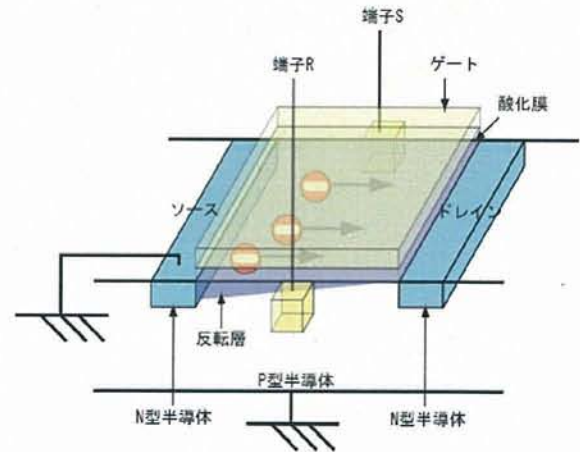


図3 Nチャネル MOSFET

ここでNチャネル MOSFETの反転層がホール素子として動作する過程を説明する。まず、ドレインに電圧 V_D を印加し、ドレイン側の電子が感じるポテンシャルを低くする。その状態で、ゲートに正の電圧 V_G をかけると、基板とゲート酸化膜界面でポテンシャルが下げられ空乏層が形成される。さらにゲート電圧 V_G を高くすると空乏層がますます広まり、閾値電圧 V_{th} を超えたところで酸化膜・基板界面に大量の伝導電子が発生する。この現象を「反転」とよび図3のように反転層が形成される。この反転層がソース・ドレイン間のチャンネルとなり、ゲートに電圧を印加するとチャンネル内を電子がキャリアとなって移動し電流が流れる。また、反転層が形成されたあとには空乏層の伸びがなくなるため、閾値電圧 V_{th} 以上の電圧を印加すればそれに比例した電流を得ることができる。

次に反転層が形成されている状態で図4のよう

に磁束 B をかけ、ホール効果を生じさせる。ローレンツ力によって反転層中の電子が紙面の正面側に曲げられながら進むため、端子 R 、 S 間に電位差が発生する。この電位差をホール電圧として出力する。このように反転層をホール素子として用いることで、式(1)の素子の厚さ d を小さく取ることができるため、より大きな出力ホール電圧 V_H を得ることが可能になる。

また、出力端子 R 、 S はソース、ドレインと同じプロセスで作製できるため、出力端子の設置は容易である。

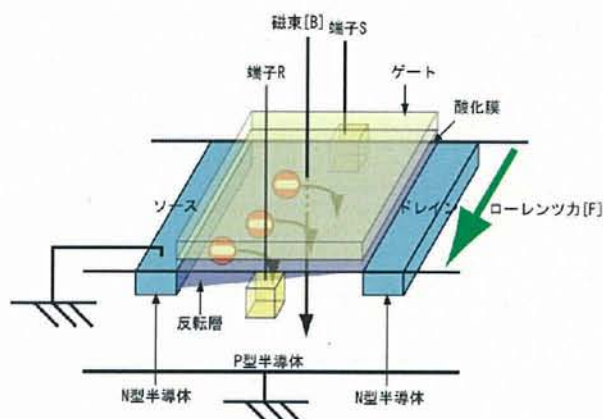
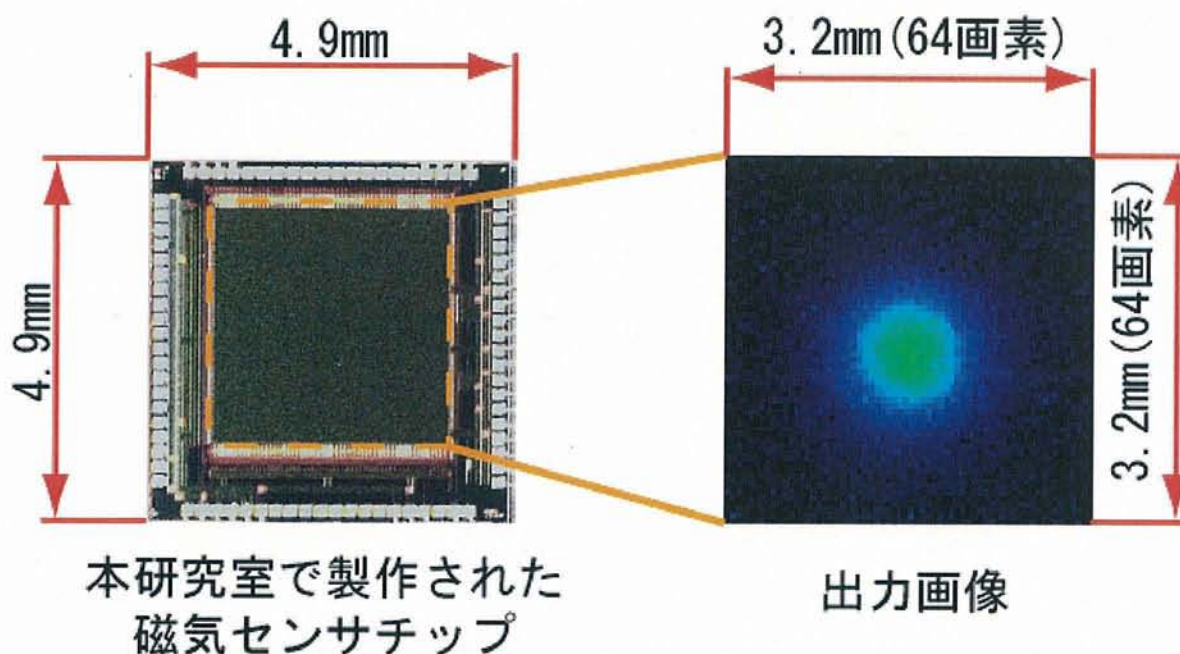


図4 磁束印加時の N チャネル MOSFET

C. 2 磁束分布の測定

C. 2. 1 実験に用いた磁気センサと測定機器

今回測定に使用した磁気センサチップは本研究室で作製されたものであり、サイズが 4.9mm 角、センシングエリア 3.2mm 角である。ROHM 社の $0.35\ \mu\text{m}$ 標準 CMOS プロセスルールで作製され、2層ポリ 3層メタル構造となっている。図5に磁気センサチップと出力画像の例を示す。チップには1画素 $50\ \mu\text{m}$ 角の磁気センサが 64×64 個、アレイ状に集積化されている。



本研究室で製作された
磁気センサチップ

出力画像

図5 使用した磁気センサチップと出力画像の例

実験に使用した磁石の概要図を図6に測定器の写真を図7に示す。今回実験に使用した磁石は直径 1mm 、長さ 10mm の円柱状の棒磁石であり、磁気センサチップ表面から磁石先端までの距離が 0.2mm で、磁束密度は 0.52T である。測定器は X 軸ステージ、Y 軸ステージ、Z 軸ステージそれぞれ最小 $10\ \mu\text{m}$ 単位で動かすことができ、これはセンサの1画素が $50\ \mu\text{m}$ であることから十分な分解能であるといえる。また水平方向、垂直方向に 1° 単位で磁石を回転させることが可能である。今回は垂直方向に磁石を傾斜させることによって磁束分布の測定を行う。

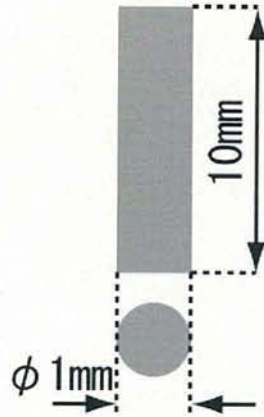


図6 棒磁石の概要

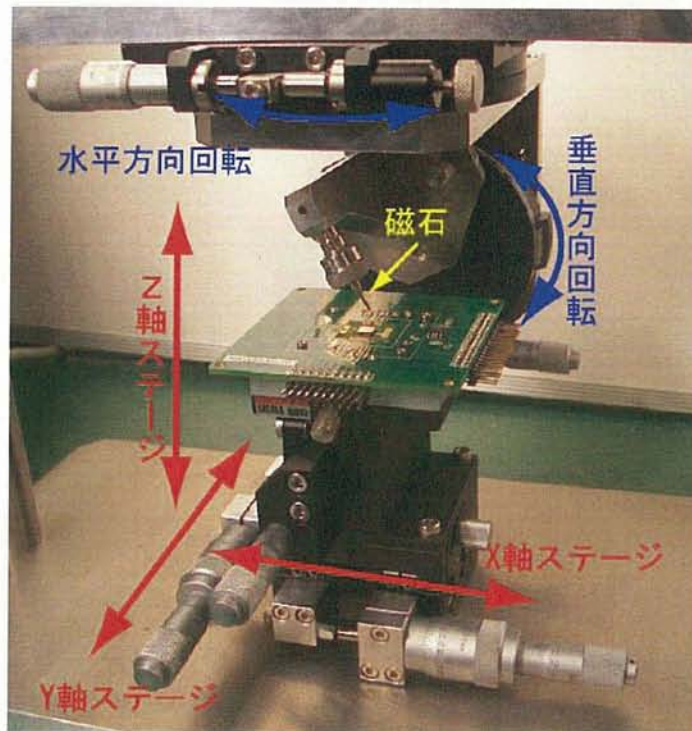


図7 測定器の写真

C. 2. 2 測定方法

測定の概要図を図8に示す。測定は磁気センサチップ表面と磁石先端の距離を0.4mmに固定し、回転の中心を磁石の先端として0°、15°、30°、45°、60°と磁石を傾斜させ各角度でのホール電圧を得る。得られた出力電圧を元にビットマップ図を作成し、磁石を傾斜させた際、磁束分布がどのように変化しているかを調べる。測定は各角度8回ずつ行った。各角度での磁束分布図の例を図3-5に示す。図9は正面から見て左側に磁石を傾

斜させたときの出力画像である。出力電圧を20倍の差動増幅にかけ、電圧が0mVに近ければ黒色、250mVに近ければ赤色となるように設定されている。角度を大きくすると磁束の強い部分が傾斜させた方向に移動し、また磁束分布全体も円形から楕円形に歪んでいく様子がわかる。

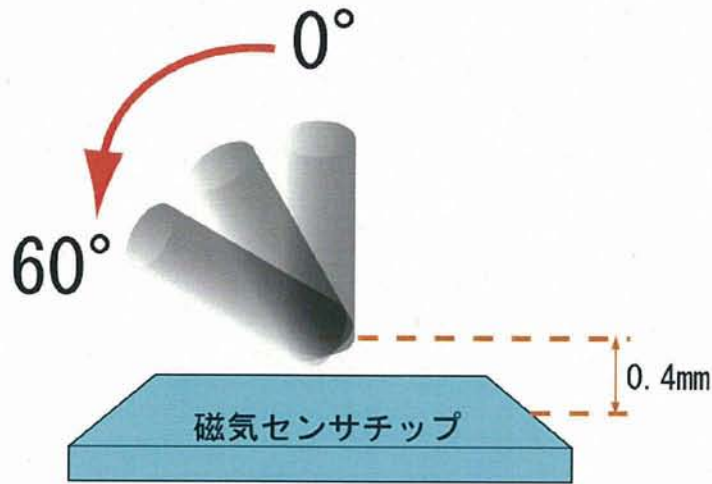


図8 測定概要図

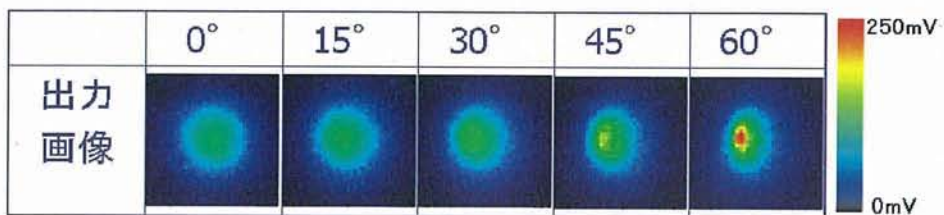


図9 磁束分布の出力画像

C. 3 度判別方法の検討

C. 3. 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10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11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。

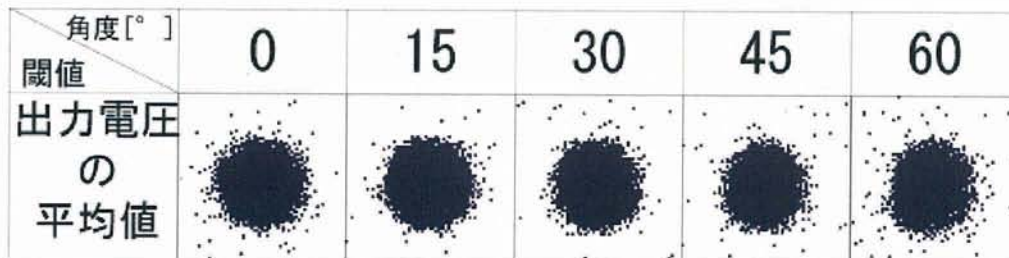


図10 閾値平均値の二値画像

角度[°] \ 閾値	0	15	30	45	60
2倍					
3倍					
4倍					

図 1 1 閾値を変化させた際の二値画像

C. 3. 2 傾斜角度の判別方法

図 12 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 13 に閾値と傾斜角度による長短軸比の変化を示す。図 13 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。

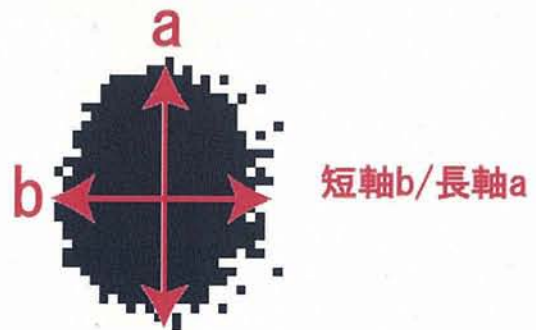


図 12 傾斜角度判別の概要

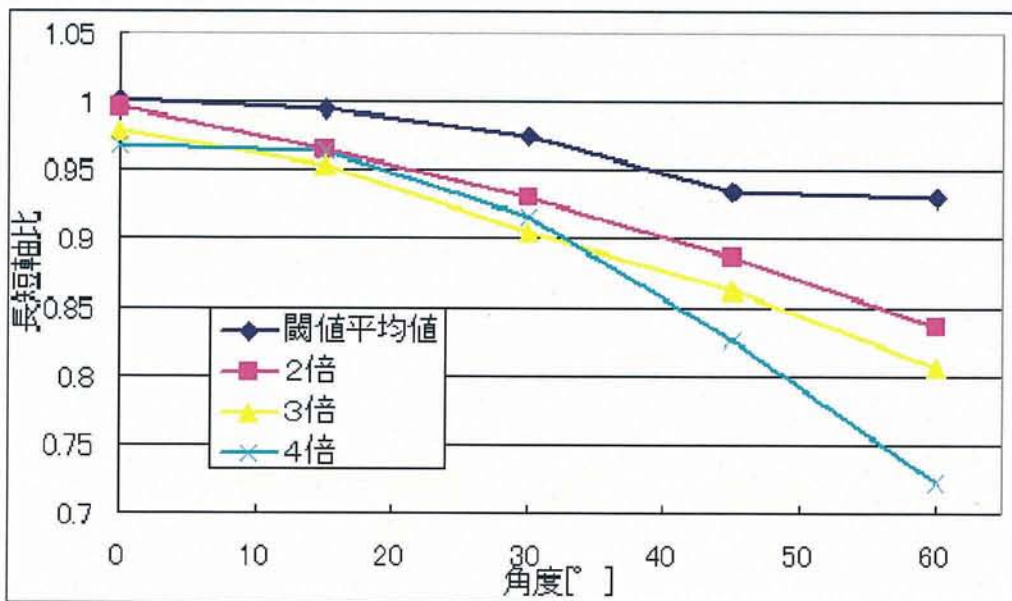


図 13 傾斜角度による長短軸比の変化

表 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. 3. 3 パターンマッチングを用いた傾斜角度判別

C. 3. 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(4)式に、相関係数の評価を表1に示す。表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。

$$\gamma = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \dots (4)$$

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

C. 3. 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14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。

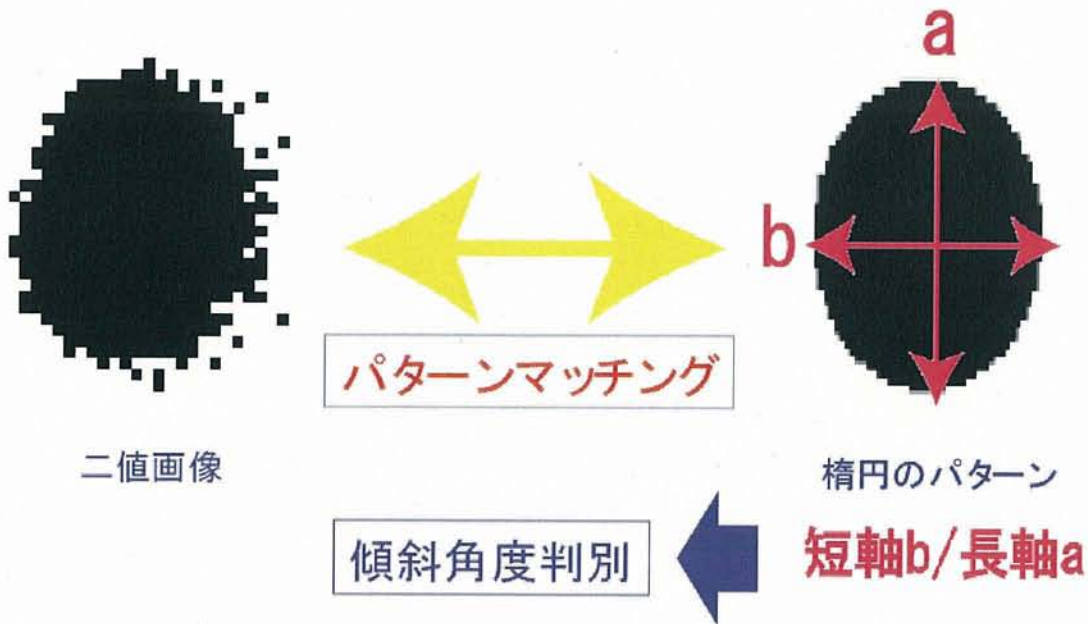


図 14 傾斜角度判別の概要

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 15 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。

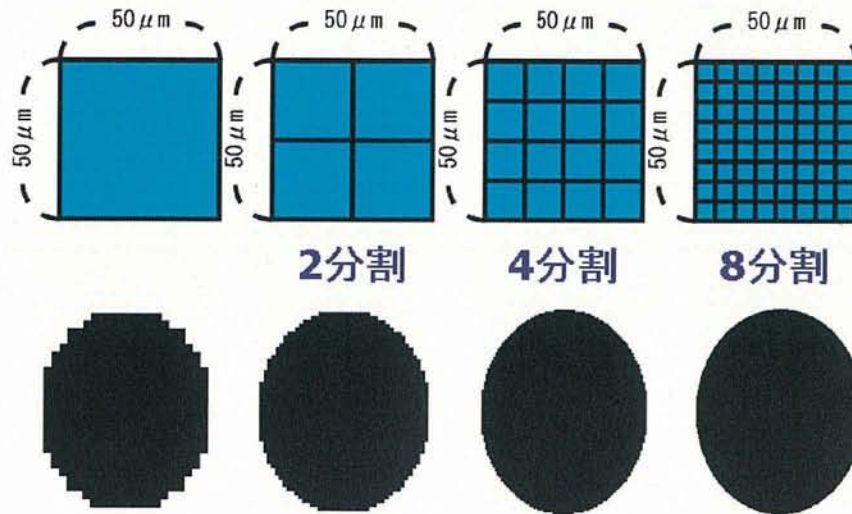


図 15 楕円パターンの画素の分割

C. 4 プログラムの作成
C. 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 16 に示す。

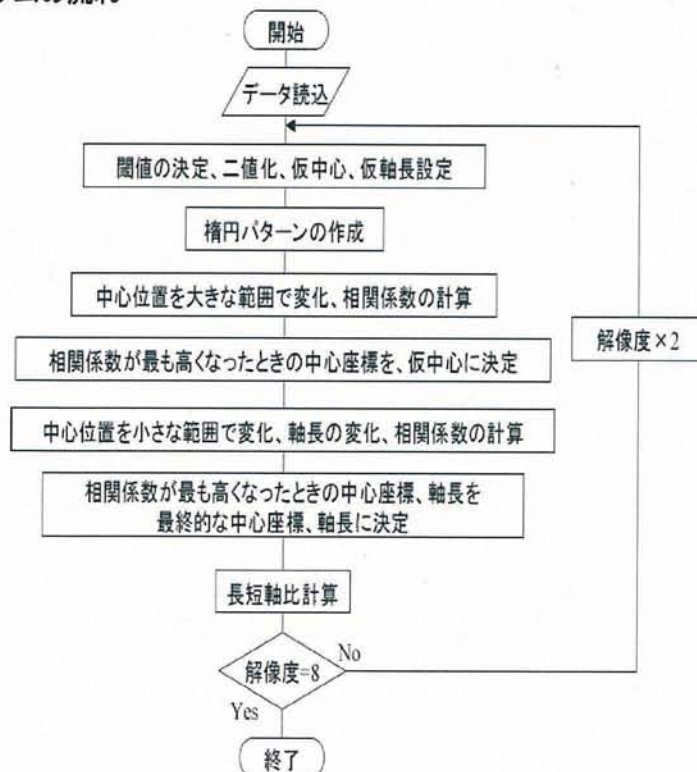


図 16 プログラムの流れ

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°のデータを試行したものを例としてあげる。図17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2に示す。

表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、画素を分割することによって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。

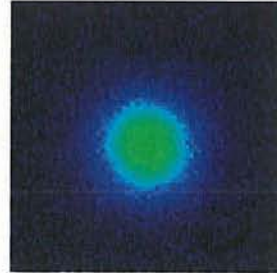


図17 プログラム実行に用いた出力画像

表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. 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18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。

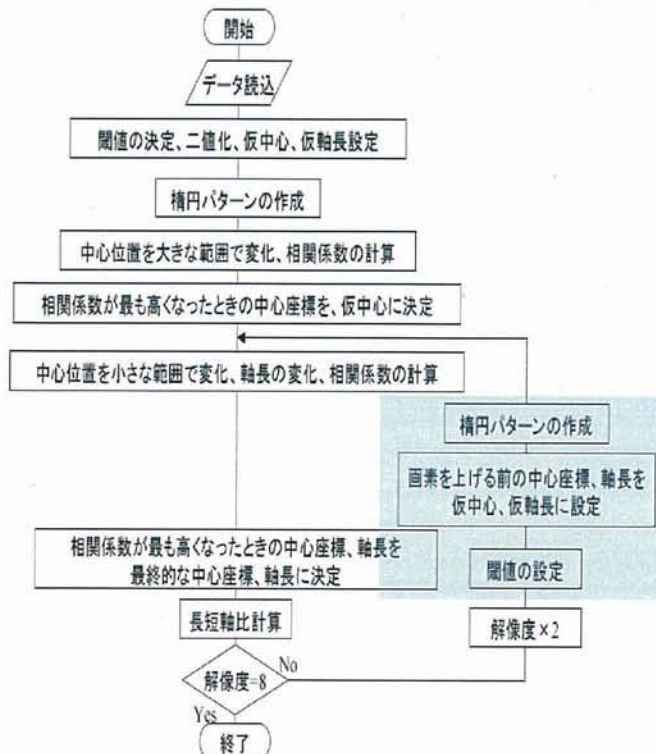


図18 処理時間を短縮するアルゴリズム

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。

表3 処理時間の比較

	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. 3 精度の向上

C. 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(5)に示される値となる。

$$(i, j) = \left\{ \begin{aligned} &(i-1, j-1) + (i-1, j) + (i-1, j+1) \\ &+ (i, j-1) + (i, j) + (i, j+1) \\ &+ (i+1, j-1) + (i+1, j) + (i+1, j+1) \end{aligned} \right\} \times \frac{1}{9} \quad \dots (5)$$

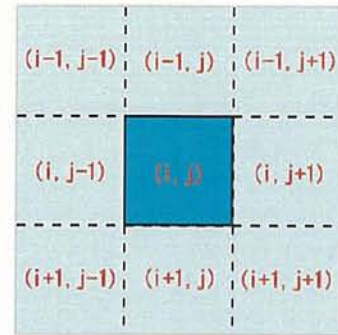


図19 3×3領域の注目画素と近傍画素

C. 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20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10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21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 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

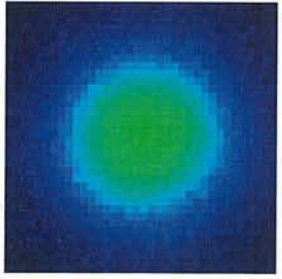


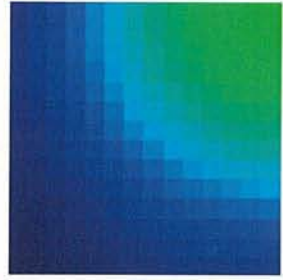

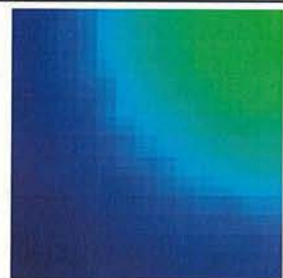
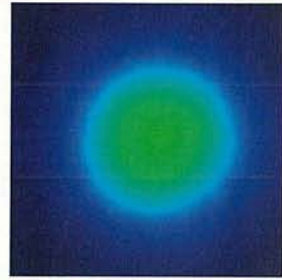
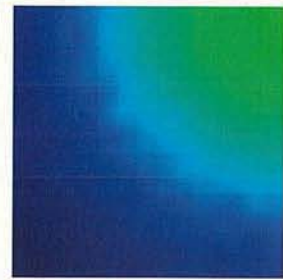


元の画像		
画素等分割		
画素2分割		
画素4分割		
画素8分割		

図 20 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）

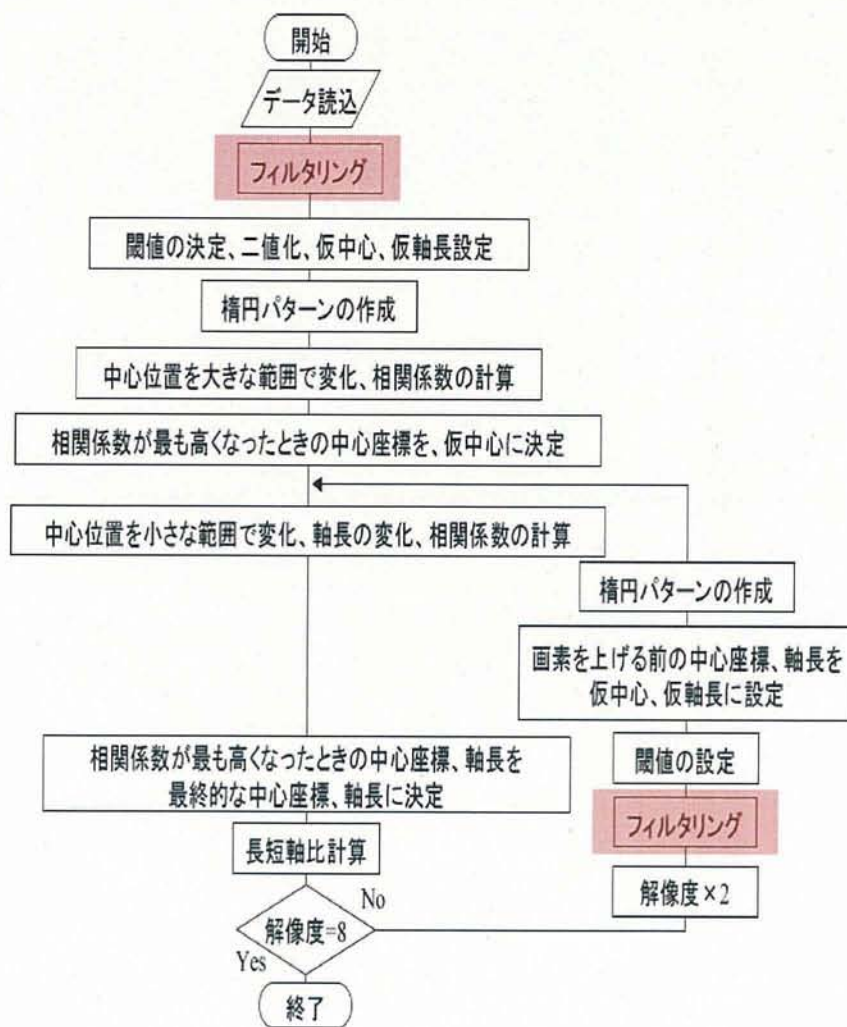


図 21 最終的なプログラムの流れ

C. 5 プログラムの結果及び評価

C. 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 22～図 25 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。

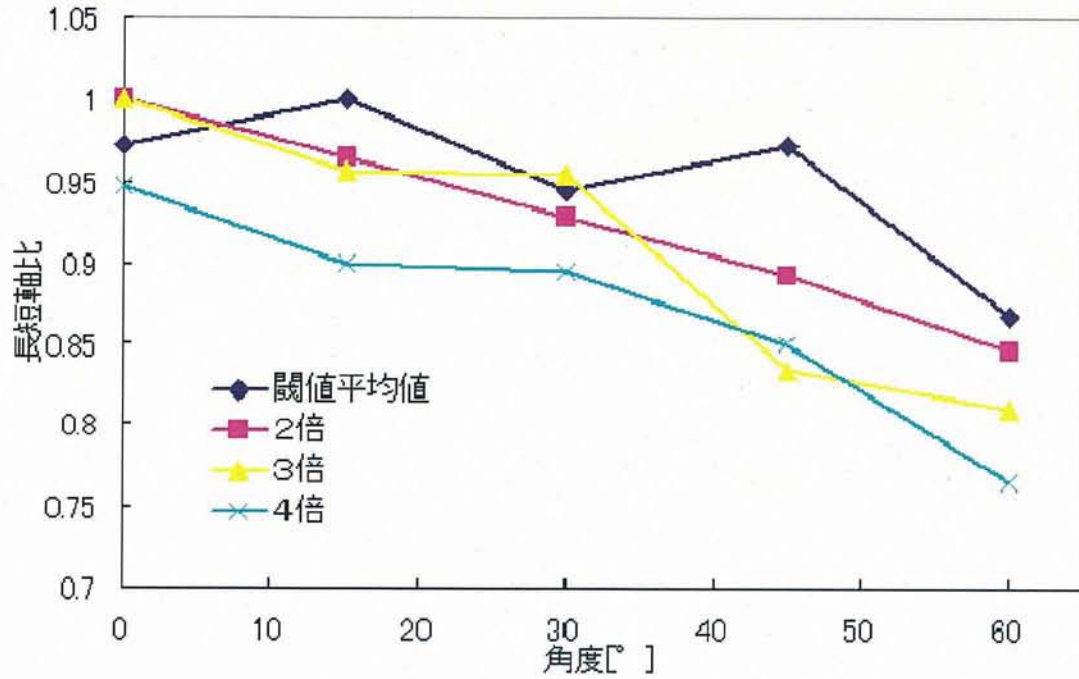


図 22 画素等分割(64×64)の長短軸比変化

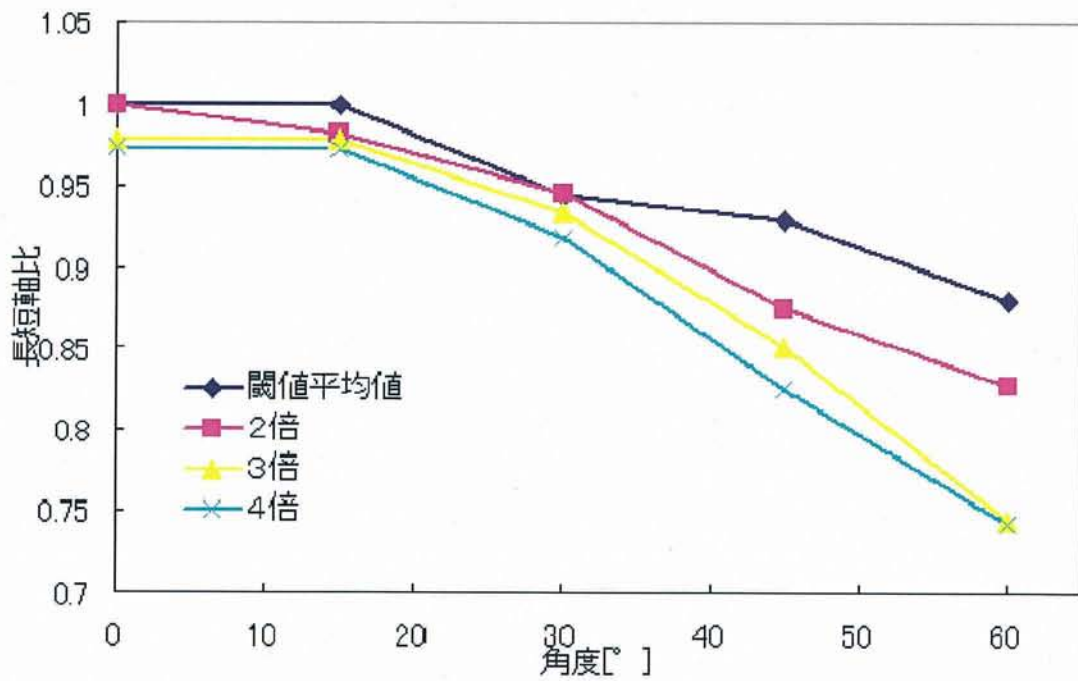


図 23 画素2分割(128×128)の長短軸比変化

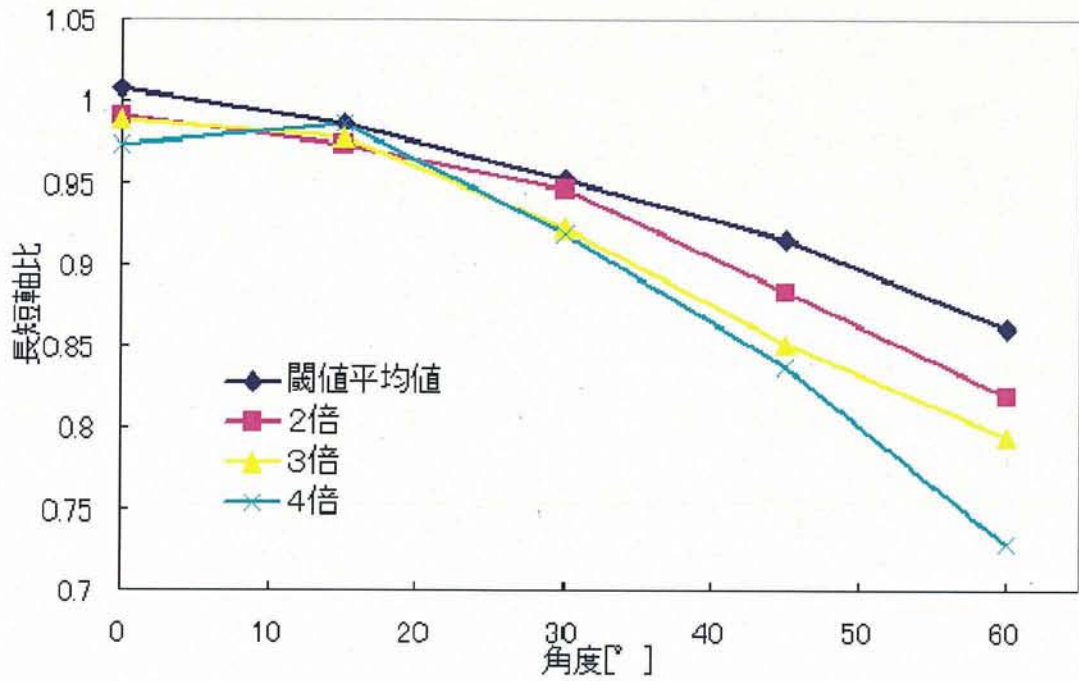


図 24 画素 4 分割(256×256)の長短軸比変化

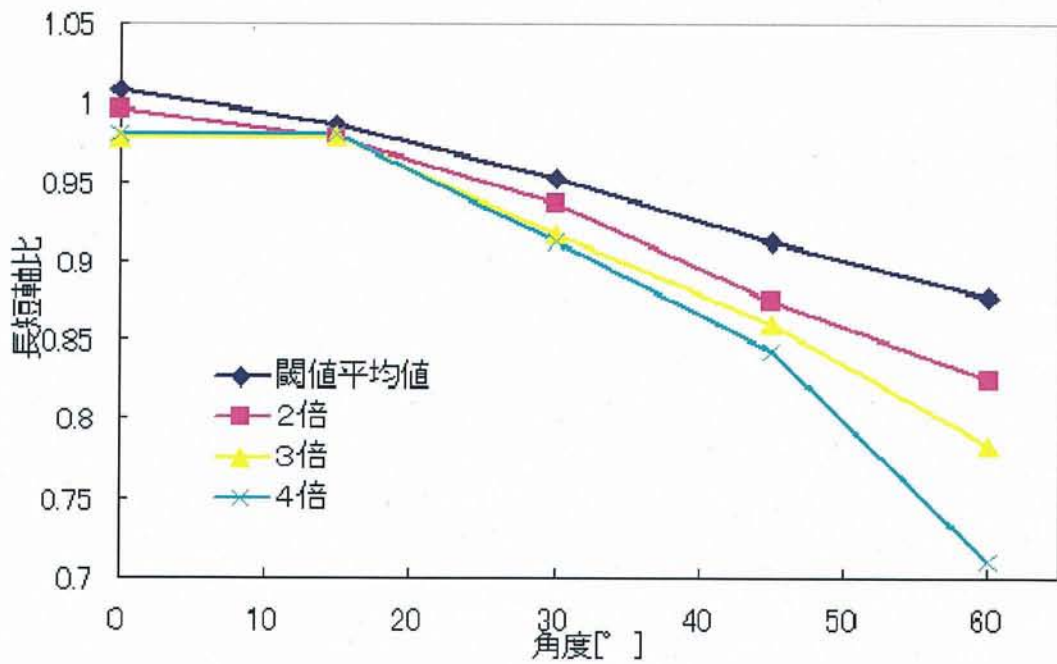


図 25 画素 8 分割(512×512)の長短軸比変化

C. 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6に、それをグラフにしたものを図26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、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

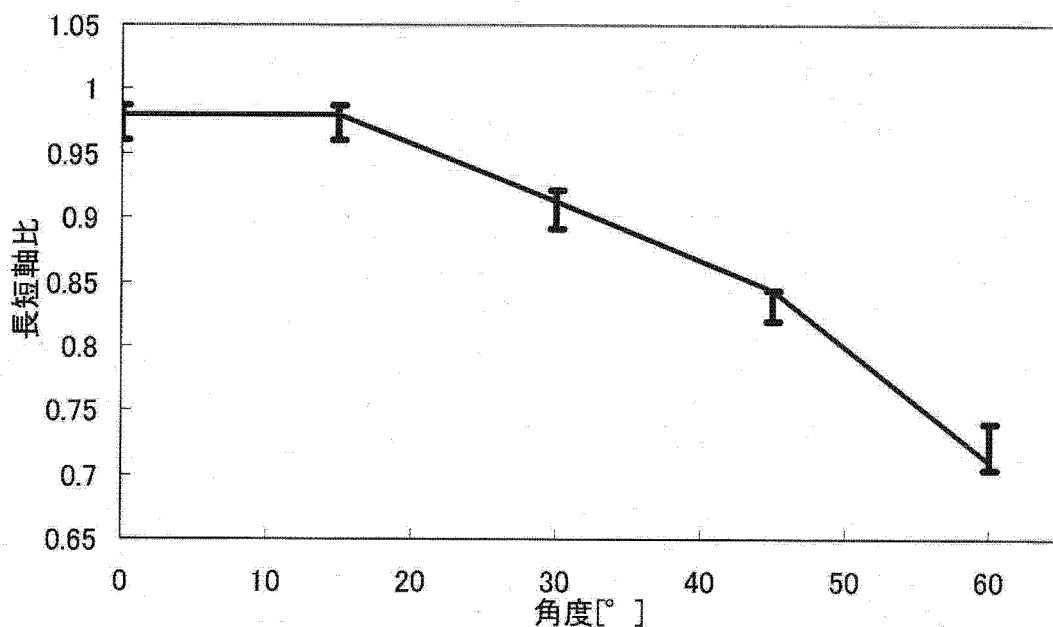


図26 測定誤差のグラフ

D. 考察

本研究により傾斜角度 $15^\circ \sim 60^\circ$ 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。以上の結果から、 1° 程度の分解能で磁石の傾斜を測定するためには、磁気センサの大きさを現在の $50 \mu\text{m}$ 角から $10 \mu\text{m}$ 角程度まで小さくすればよいことがわかる。現在、磁気センサを作成しているプロセスは $\text{CMOS} 0.35 \mu\text{m}$ であるので、これを 90nm 程度のプロセスまで製造プロセスを縮小すれば実現可能になる。ただ、そのためにはコストがかかるため、現在、 $0.18 \mu\text{m}$ のプロセスで、画素サイズを小さくした磁気センサの製造を検討している。画素サイズと出力電圧はトレードオフの関係があるため、適切なサイズを選択する必要がある。

E. 結論

本研究では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) 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)

2) 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)

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

厚生労働科学研究費補助金（身体機能解析・補助・代替機器開発研究事業）
分担研究報告書

ナノ振動波動装置と超音波試験装置に関する研究

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 本研究では、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。

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手法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している。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振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の検証、接着メカニズムを詳細に解析するために、生体組織として血管同士を接着するための装置の開発を行った。

さらに開発した血管接着デバイスを用いて振動周波数と振幅、温度と接着強度の関係を検証した。

これまでの生体組織の接着技術としては、科学的な接着剤を用いる方法、超音波、電気メス、レーザーなどの高エネルギーを用いた組織融着が試みられている。化学的接着剤に関しては生体適合性の観点から、その素材の選定、開発が行われているが、血管縫合に耐えうる接着強度を実現する

接着剤はいまだ開発されていない。また超音波を用いた融着デバイスは血管切断兼止血装置として製品化されているものがあるが、エネルギー量が大きいため、融着部分の熱損傷回避が問題となっている。電気メスはよりエネルギーが高いため、融着部分の炭化、炭化部分の脱落による出血が問題となっている。また、生体組織に通電するため、脳手術などの神経系の手術には利用できないという欠点がある。レーザー融着に関しては、多くの施設で融着に冠する研究がなされているが未だに実用に供すことが可能なデバイスは開発されていない。血管縫合技術に関しては、術者が糸を使って手縫いする方法が主である。一方、金属針を利用したステイプル方式のものが使われているが、大まかな縫合が目的であり、血管縫合では手縫い以外の技術は導入されていない。そのため、本研究で開発した血管縫合技術は非常に有用である。

B. 研究方法

B. 1 血管融着デバイス

B. 1. 1 血管融着デバイス概要

超音波振動、熱エネルギー、圧力負荷による接着メカニズムを解明するために血管融着デバイス

を開発した。装置全体を図1に示す。血管融着ハンドピース部には超音波振動を発生させるピエゾ素子が内蔵され、レーザーを用いた熱エネルギーを伝送する中空ファイバー、温度を測定するための熱電対が取り付けられている。ピエゾ素子は超音波振動ドライバ、中空ファイバーにはレーザー装置が接続され、それぞれエネルギーを血管融着部へ伝え、熱電対はデータロガーに接続されている。

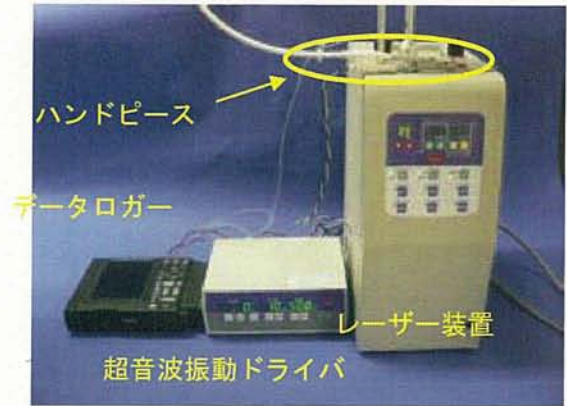


図1 装置全体

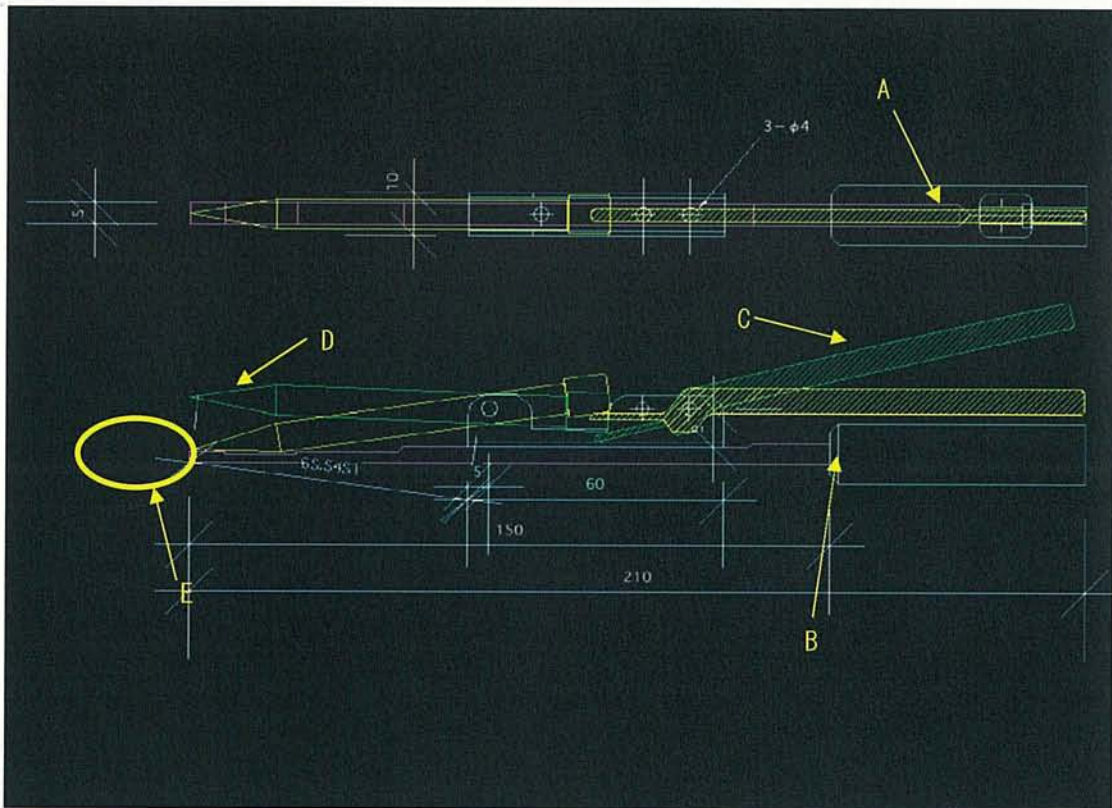


図2 ハンドピース部図面

B. 1. 2 血管融着ハンドピース部

血管融着ハンドピース部の図面を図2に、写真を図3に示す。図2においてB内部のAの部分ピエゾ素子（NEC トーキン社製）が組み込まれハンドピースを超音波振動させる。D の内部にはレーザーを導光するファイバーが通され、その先端部を短時間で目標温度まで加熱する。さらに熱電対（LABFACILITY 社製：XS-342-RS）が銀ロウ付

けされている。D はCのハンドルにより上下に動き、ハンドピース先端Eの部分で血管を挟み込みに、超音波振動並びに熱エネルギー、圧力負荷を与える。

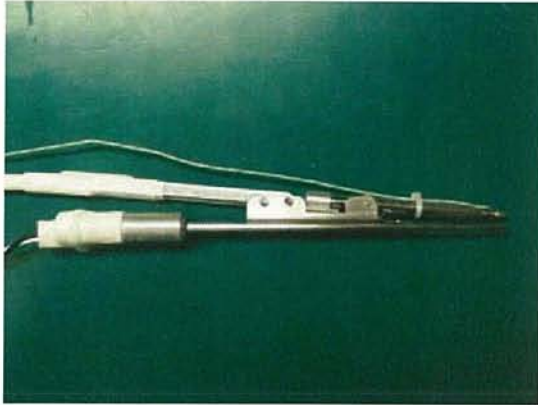


図3 開発した血管融着デバイス

B. 1. 3 超音波振動ドライバ

血管融着ハンドピース部に内蔵されたピエゾ素子を駆動するためのドライバ装置である。振動周波数は100Hz～30KHzの範囲で設定、振幅はピエゾ素子に inputsする駆動電圧を数十段階にコントロールすることで行う。

B. 1. 4 CO2レーザー装置

血管融着ハンドピース部先端を数秒で目標温度まで加熱させるために、本デバイスでは炭酸ガスレーザー（波長：10.6μm）を用いて行った。炭酸ガスレーザー装置（ミワテック社製）は、CW発振にて最大4Wのエネルギーを血管融着ハンドピース部先端に送ることができる。導光には直径1.2mmのプラスチック赤外中空ファイバー（Polymicro Technologies社製：HWCA7501200）を使用した。

B. 1. 5 温度測定データロガー

血管融着ハンドピース部の先端に取り付けた熱電対より先端部の温度を測定するためにデータロガー（HIOKI社製：8420）を使用した。

B. 2 血管融着デバイスの性能試験

開発した血管融着デバイスの性能を確認するため、加熱応答特性と振動振幅を計測した。

本装置の特徴である、CO2レーザー加熱による血管融着ハンドピース部先端での温度上昇の過

渡応答を調べるために、入力エネルギーを0.5W～3Wの間で変化させ、その時の温度上昇を計測した。温度は血管融着ハンドピース部先端に取り付けた熱電対の出力をD/A変換してPCに取り込んだ。

振動は高速度ビデオカメラを用いて計測した。ハンドグリップ部を固定した状態で12kHzで振動させながら、高速度ビデオカメラでハンドピース先端を拡大撮影した。撮影は32000fpsで行った。画像処理により血管融着デバイス先端位置の移動幅を計測することにより、振動振幅を算出した。画像解像度は0.103μm/pixである。

C. 結果

C. 1 血管融着デバイスの性能試験結果

血管融着デバイスの加熱時の過渡応答結果を図4～図17に示す。時間軸上の赤点は、CO2レーザーによる加熱を開始した時点と終了した時点を示す。これより、本装置の温度上昇は1次の過渡応答特性を示すことが明らかとなった。また、CO2レーザーの電力によって、上昇温度の最大値が変化した。時定数は10秒前後であった。これらの結果をまとめたものを表1に示す。温度上昇がプラトーに達した後、温度変動が見られる場合があるが、CO2レーザーの出力が変化したためであり、フィードバック制御により、抑えることが可能であると考える。

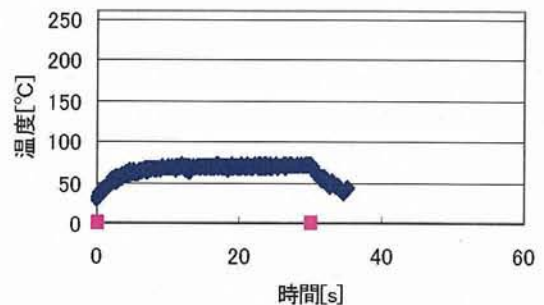


図4 CO2レーザー0.5Wの場合の温度上昇

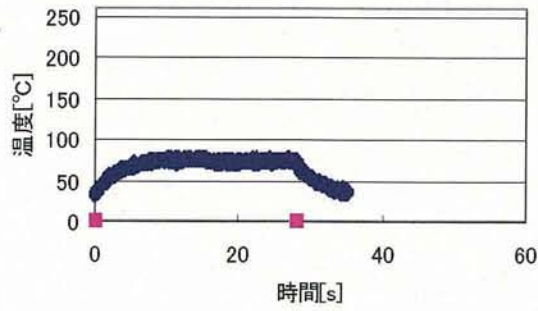


図5 CO2 レーザ 0.6W の場合の温度上昇

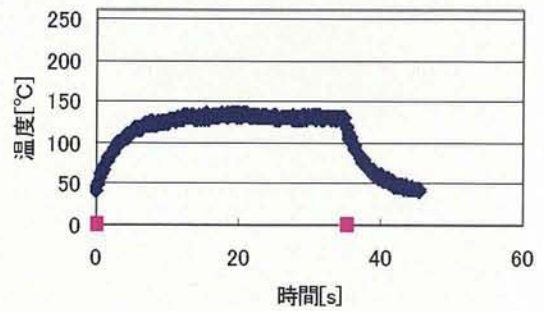


図9 CO2 レーザ 1.4W の場合の温度上昇

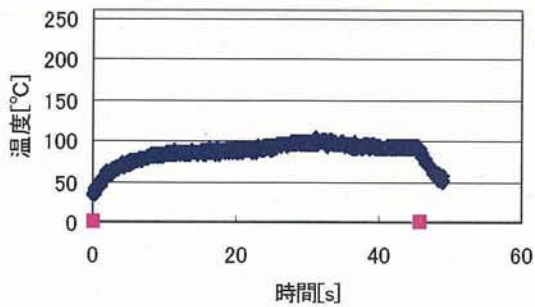


図6 CO2 レーザ 0.8W の場合の温度上昇

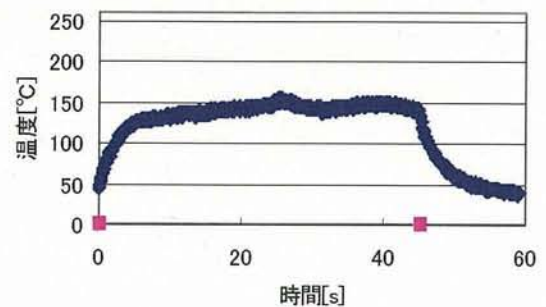


図10 CO2 レーザ 1.6W の場合の温度上昇

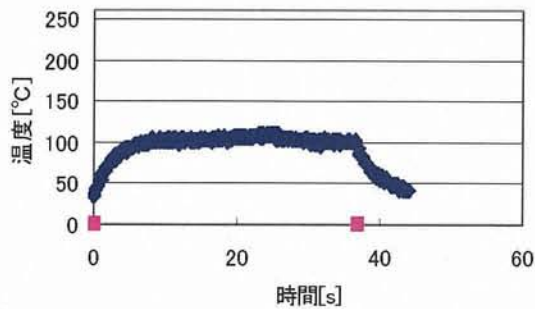


図7 CO2 レーザ 1.0W の場合の温度上昇

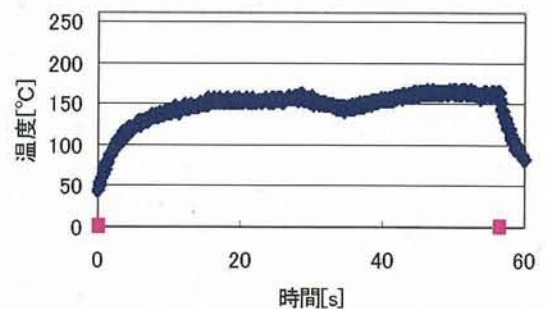


図11 CO2 レーザ 1.8W の場合の温度上昇

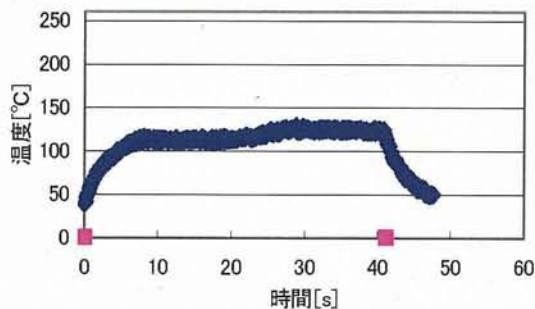


図8 CO2 レーザ 1.2W の場合の温度上昇

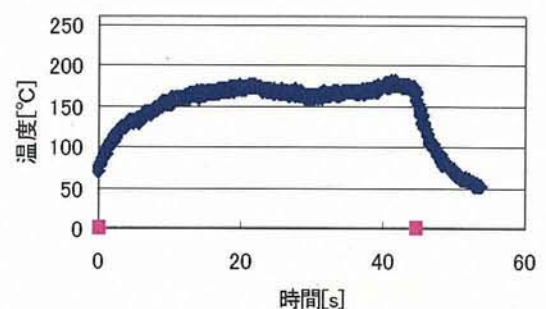


図12 CO2 レーザ 2.0W の場合の温度上昇

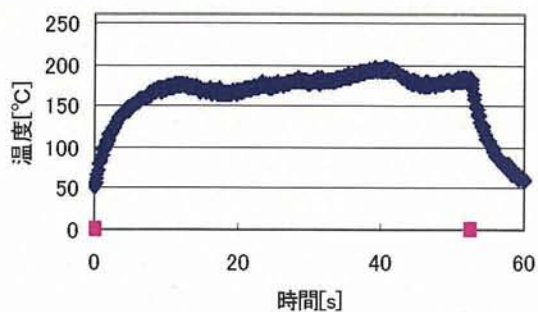


図 1 3 CO2 レーザ 2.2W の場合の温度上昇

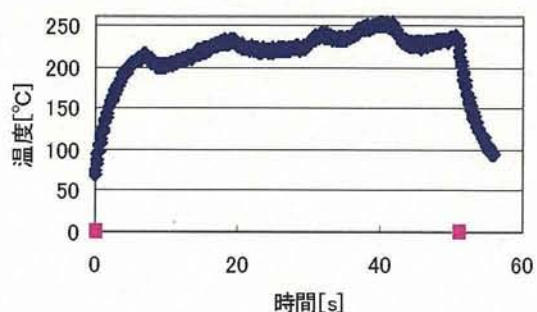


図 1 7 CO2 レーザ 3.0W の場合の温度上昇

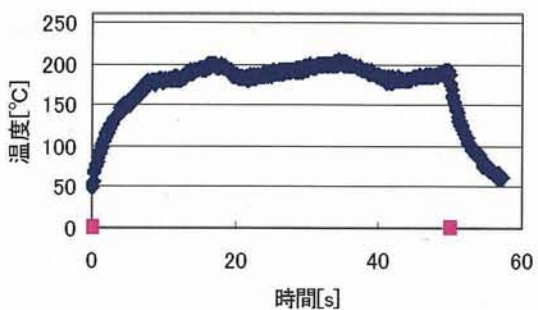


図 1 4 CO2 レーザ 2.4W の場合の温度上昇

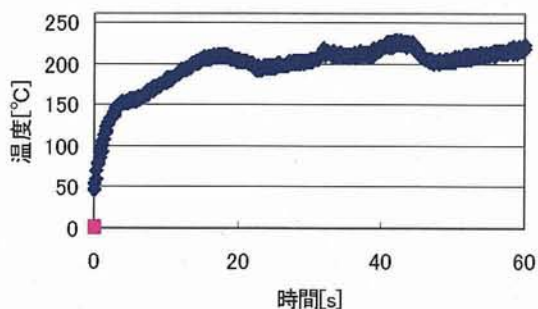


図 1 5 CO2 レーザ 2.6W の場合の温度上昇

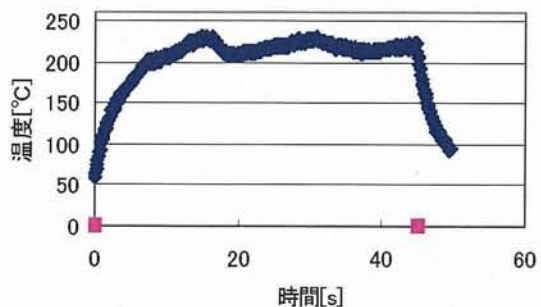


図 1 6 CO2 レーザ 2.8W の場合の温度上昇

表 1 温度上昇特性

入力電力[w]	到達温度[°C]	時定数[s]
0.5	68	6.1
0.6	74	7.7
0.8	92	10.8
1.0	103	7.6
1.2	118	9.0
1.4	131	10.7
1.6	144	7.2
1.8	155	18.0
2.0	168	16.6
2.2	178	13.6
2.4	189	9.6
2.6	207	16.6
2.8	217	9.4
3.0	226	8.3

図 1 8 に振動振幅の測定結果を示す。12kHz、40V で駆動した場合、最大で 51pixel の先端部の移動があった。画像解像度は $0.103\mu\text{m}/\text{pix}$ であることから、最大で $5.1\mu\text{m}$ の振動振幅であることがわかった。