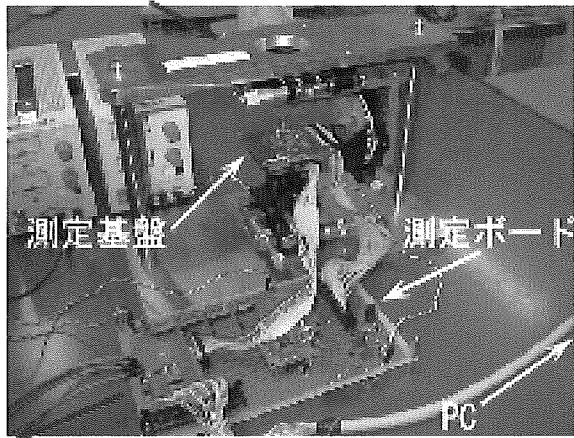


測定器



信号発生器

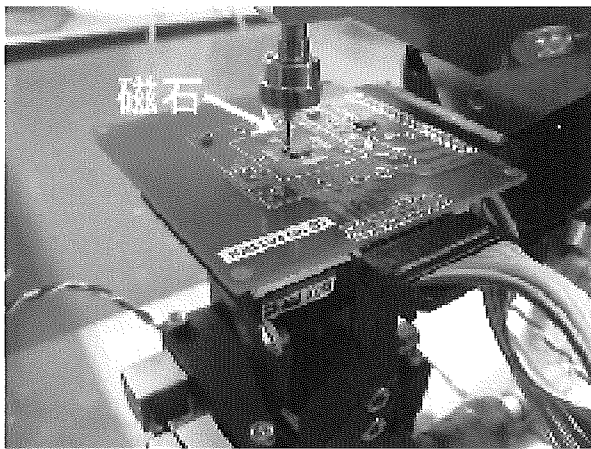


図 5-9 測定風景の写真（上）とチップ付近の拡大写真（下）

C. 3. 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 5-10 に実験で使用した棒磁石の写真と図面を示す。

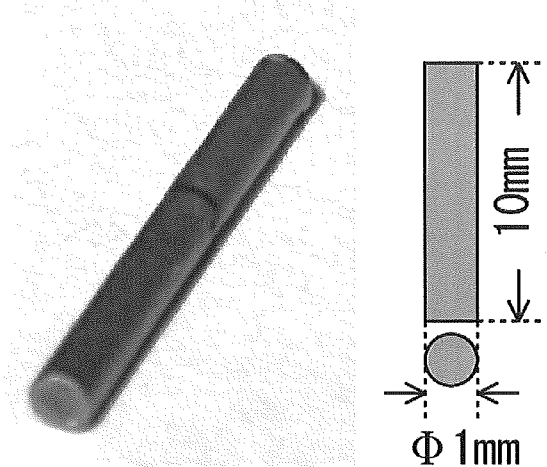


図 5-10 実験に使用した棒磁石の写真(左)と棒磁石の図面(右)

C. 3. 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 5-11 に示す。なお図 5-11 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 frame/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

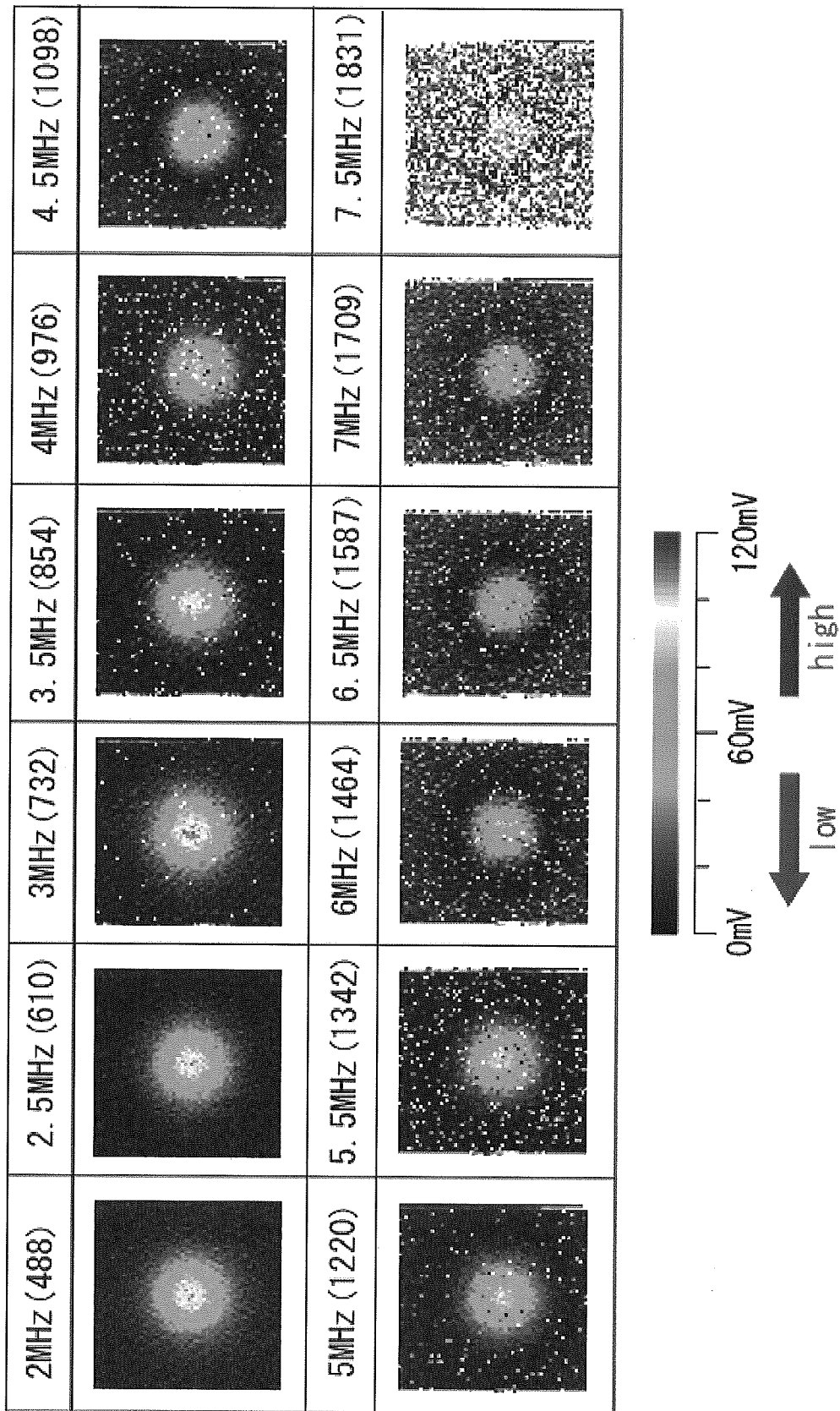


図 5-11 読み出し速度の限界値測定

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

て捉えられなくなりました。

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 1709frame/sec であることがわかった。

C. 3. 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 μ 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 $\pm 25\mu$ 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 μ 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 μ 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 488frame/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 5-12 左に、その図を二値化処理した図を図 5-13 右に、位置計測の精度について調べたものを表 2 に示す。

表 2 に用いられている「等倍」、「2 分割」などの表記は一画素を何分割して中心位置を求めているかである。当然、一画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、一画素を 16 分割して位置検出を行うと 3.1 μ 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 μ m、Y 軸方向の誤差は 16 μ m と算出され、シミュレーションの結果通り $\pm 25\mu$ 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。

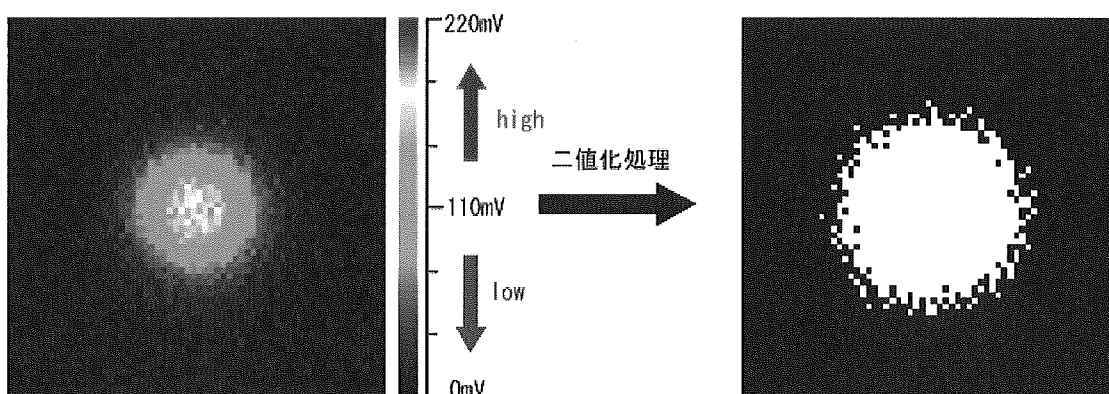


図 3-12 二次元磁束分布図 (左) と二値化処理した後の図 (右)

表 2 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 (μ m)	0 (μ m)	0 (μ m)	0 (μ m)	6 (μ m)	9 (μ m)
Y 軸方向の誤差 (μ m)	0 (μ m)	0 (μ m)	13 (μ m)	13 (μ m)	16 (μ m)

C. 3. 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 $\pm 25\mu$ 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

488frame/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 5-13 に示す。

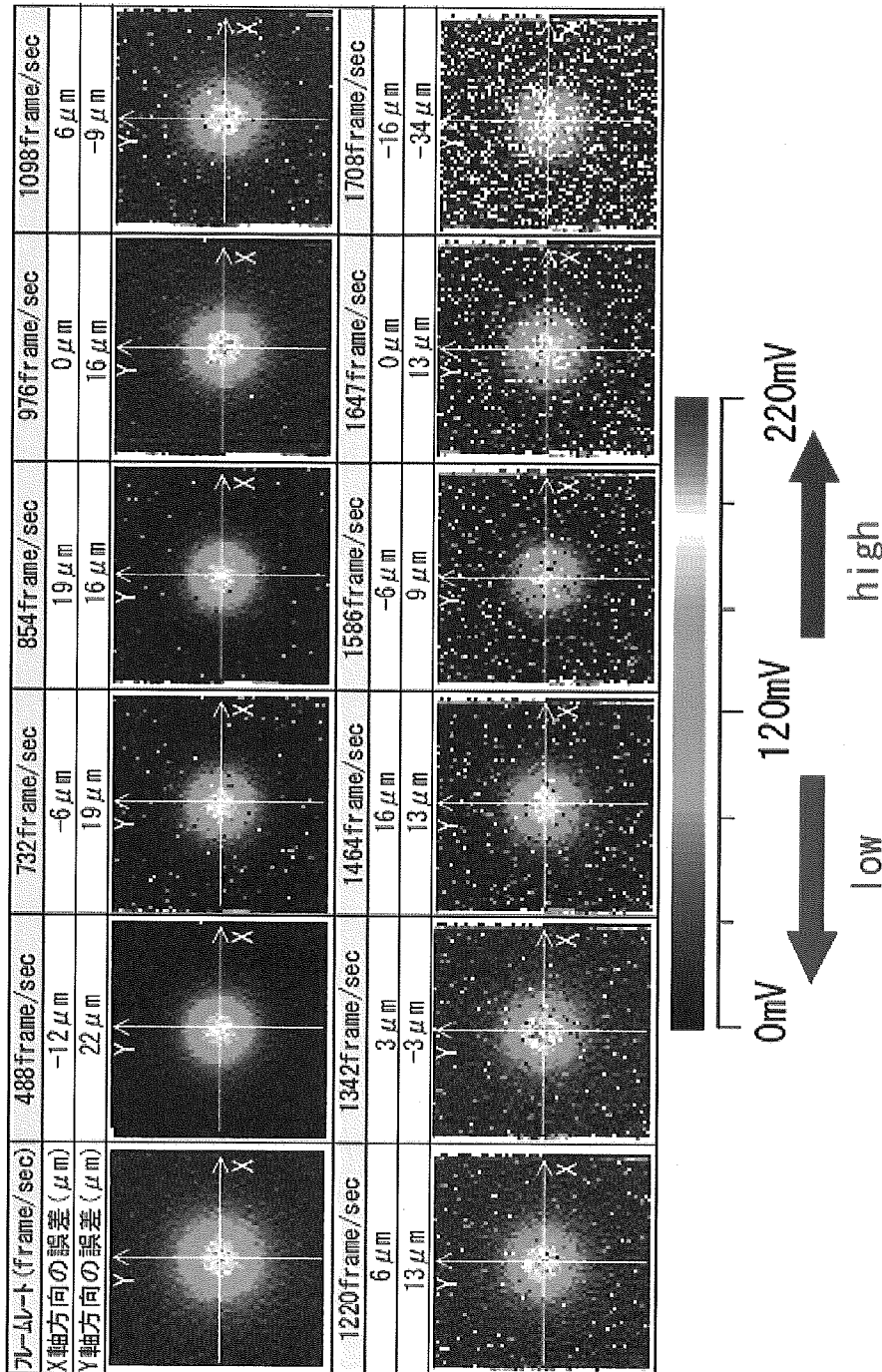


図 5-13 位置測定に関する実験

実験結果から 488~1647frame/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

1647flame/sec であると言える。

C. 3. 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 1647flame/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 5-14 に磁石とセンサ表面との距離の関係を示す。

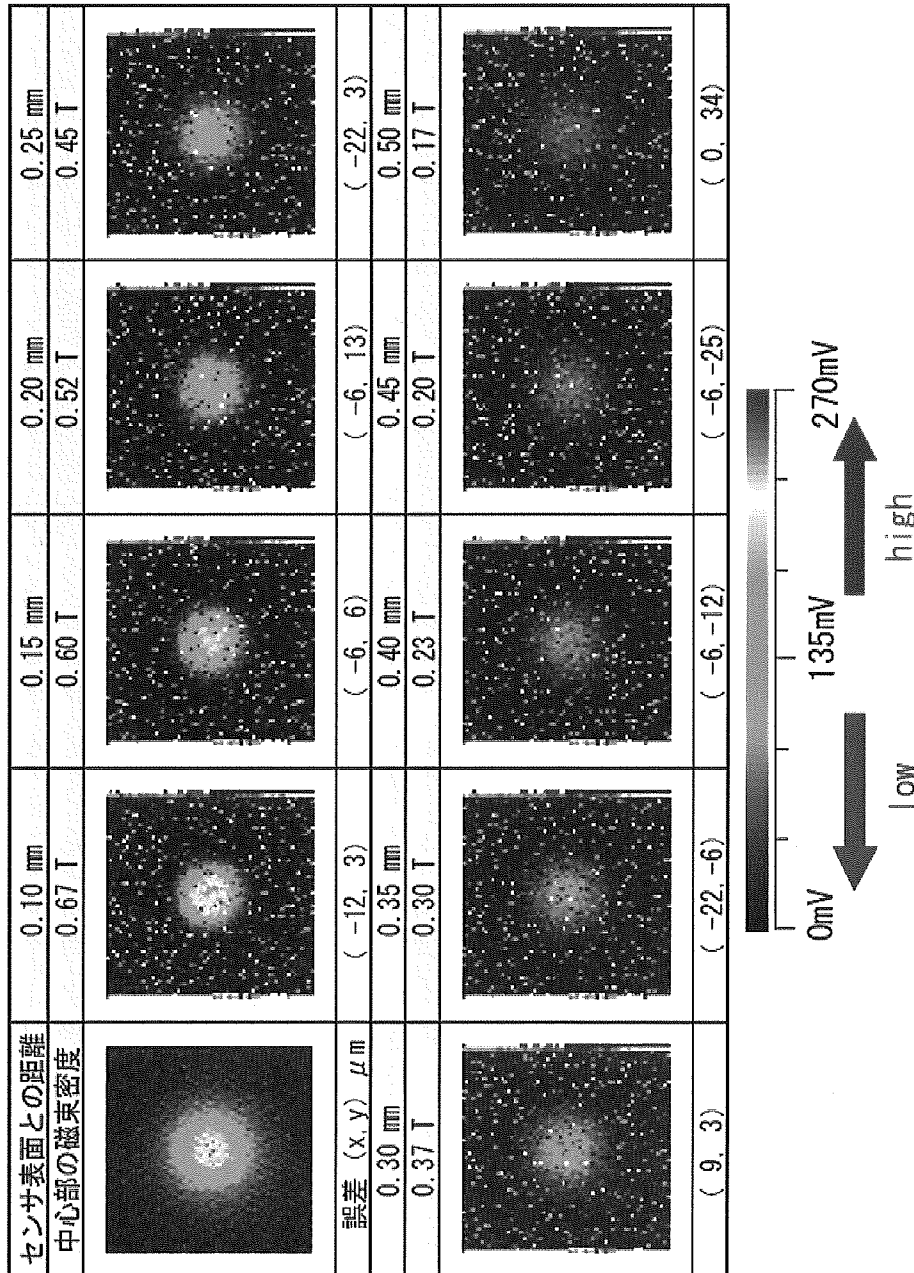


図 5-14 磁石とセンサ表面との距離の関係

図 5-14 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。

測定条件や性能を比較した表を表3に示す。

C. 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

表3 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。

D. 考察 (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 5-15 に示す。

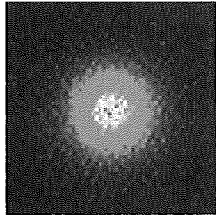
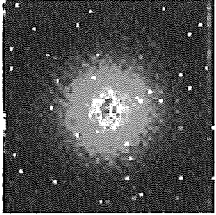
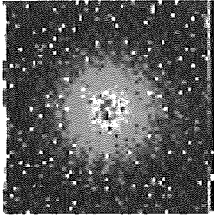
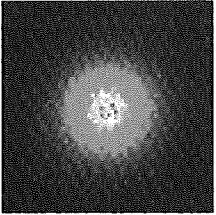
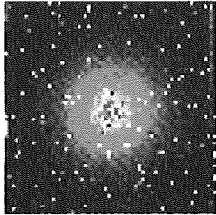
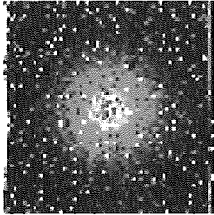
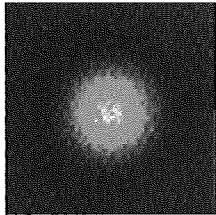
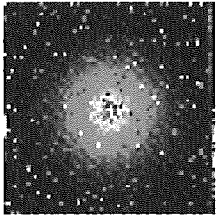
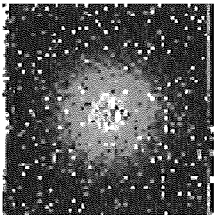
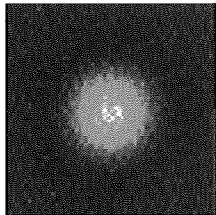
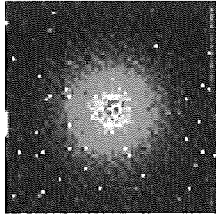
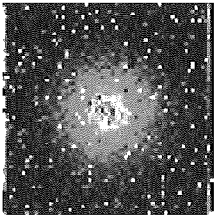
平均化回数	2MHz (488f/lame/sec)	3MHz (732f/lame/sec)	4MHz (976f/lame/sec)
1回			
8回			
16回			
128回			

図 5-15 平均化によるノイズの特性解析

図 3-15 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うのではないかと考えた。これを確かめたのが次に示す図 5-16 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。

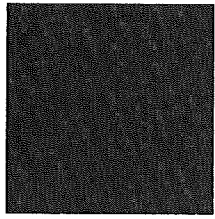
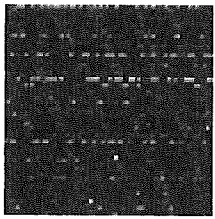
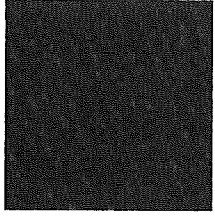
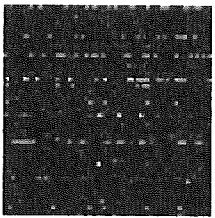
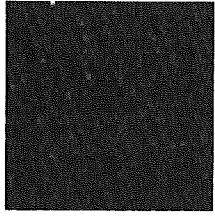
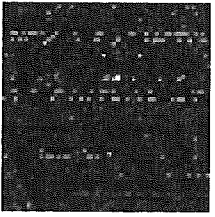
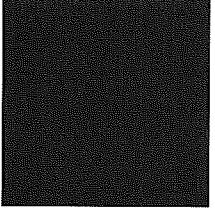
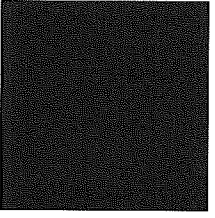
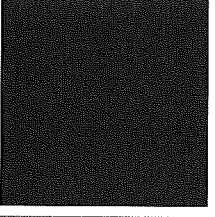
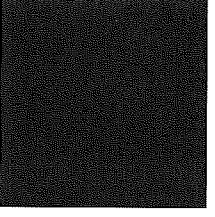
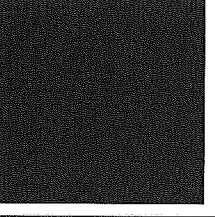
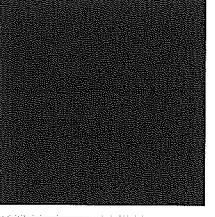
both-sel		
sel-in		
sel-clk		
both-col		
col-in		
col-clk		
	2M	4M

図 5-15 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。

E. 結論

ひとつのチップ上に二次元に集積化された磁気センサで位置計測を行い、測定精度と読み出し速度を高めるための検討を行った。本論分で目標として1000flame/secの読み出し速度と測定誤差 $\pm 25 \mu\text{m}$ に設定した。

本研究ではチップ上に磁気センサを二次元に集積化したセンサを作製する際に材料としてSiを使用した。Siは出力が低いがMOSFETの反転層を利用した構造を用いることで材料そのものを磁気センサとして使用するより高い出力が得られる。同時にオペアンプなども一緒に集積化できるというSiのメリットを生かせば出力の高いGaAsやInSbなどの材料を使用した磁気センサと比較しても十分な結果が得られると予想できる。

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0.23flame/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1647flame/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。この結果から第二次試作センサの実験で得られた読み出し速度と位置計測精度の値は本論文で目標としていた値に達していると言える。

更に今回の実験で発生したノイズの原因を考察したところ、読み出し回路の水平読み出しを切り替えているトランジスタの駆動力不足が原因であると特定できた。よって、駆動力の高いトランジスタを使用することにより、さらに読み出し速度の向上が期待できる。

F. 研究発表

1. 論文発表

無し

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

一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)

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。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。

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開発した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、切断した方をつまんで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[μm]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[μm]で調整可能である。両チップは付け替え可能である。

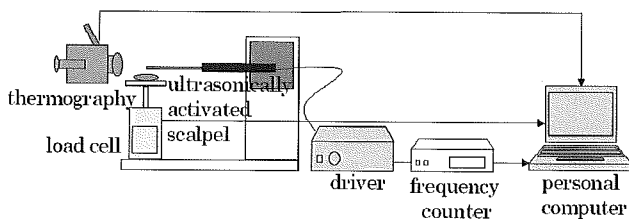
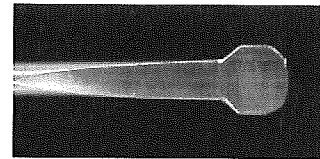


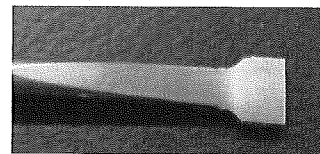
図1 超音波試験装置 (水平方向)



(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[kΩ]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。

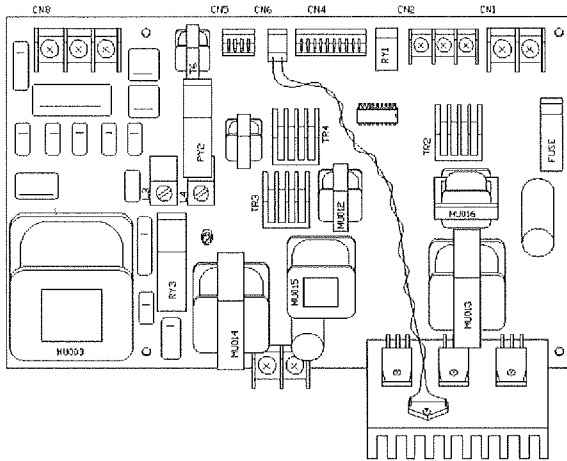


図3 超音波発振回路

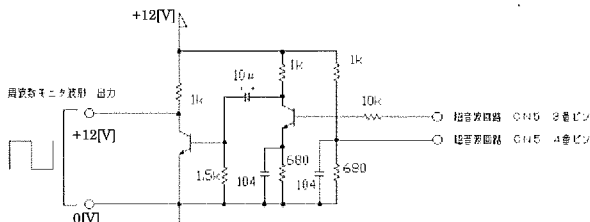


図4 共振周波数測定回路

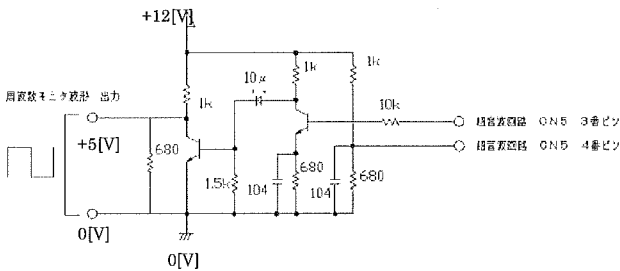


図5 周波数測定回路

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。

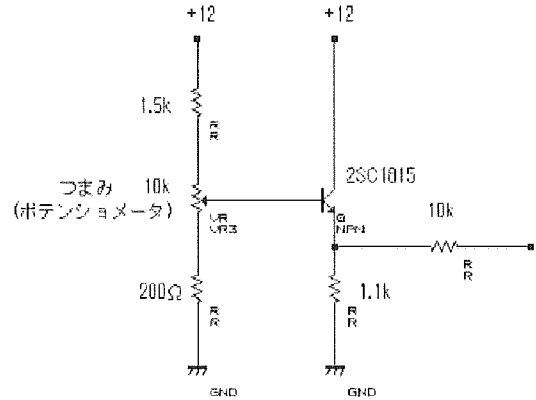


図6 PWM発生IC入力電圧調整回路

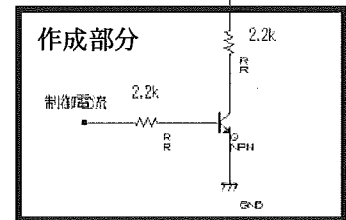
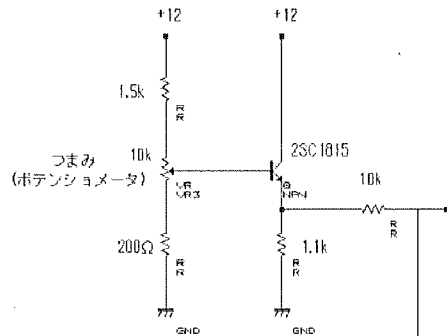


図7 PWM発生IC入力電圧調整回路（制御回路作成後）

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着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E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 $4.428 [\text{g}/\text{cm}^3]$ 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。

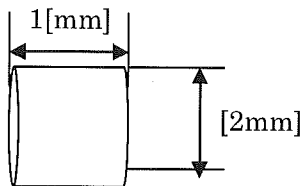


図8 温度とヤング率の関係

表2 各パラメータ

線膨張係数 $[\text{cm}/\text{cm}/\text{°C}]$	0.0000086
半径 $[\text{cm}]$	1.000
長さ $[\text{cm}]$	1.000
体積 $[\text{cm}^3]$	6.283
密度(室温) $[\text{g}/\text{cm}^3]$	4.428
質量 $[\text{g}]$	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 $[\text{cm}]$	0.999785	1.000	1.001505
長さ $[\text{cm}]$	0.999785	1.000	1.001505
体積 $[\text{cm}^3]$	6.279	6.283	6.312
密度 $[\text{g}/\text{cm}^3]$	4.431	4.428	4.408
密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	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λ=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 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	音速 $[\text{m}/\text{s}]$	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を追従しているのだから、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。

B. 3 クイックタッチ観察

B. 3. 1 クイックタッチ荷重測定実験

クイックタッチの際にどのくらい荷重がかかっているのか測定するため、電子秤を用いて図9のように試料をおき、クイックタッチ荷重測定実験を行った。測定者1人につき30回測定を計2人行った。超音波メスの電源は入れずに行った。

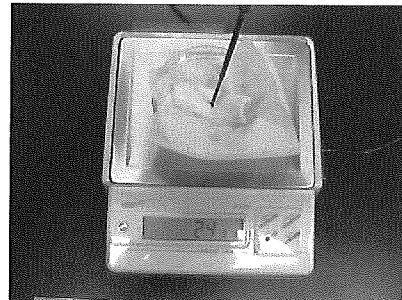


図9 クイックタッチ荷重測定風景

B. 3. 2 クイックタッチ温度確認実験

温度制御するにあたって、実際のクイックタッチの温度を確認するためクイックタッチ温度確認実験を行った。

冠動脈バイパス手術をサーモグラフィとデジタルビデオカメラで撮影した。使用した超音波メスはジョンソン・アンド・ジョンソン社製ハーモニックスカルペルである。刃先形状はフック型のものを用いた。サーモグラフィで撮影する際、超音波メスの刃先温度が反射によって正しく認識できないため、刃先にサージカルテープを貼ることを試みたが、超音波メスが正しく動作しなかったため、何も貼らず撮影を行った。サーモグラフィの熱動画はパソコンに取り込んだ。

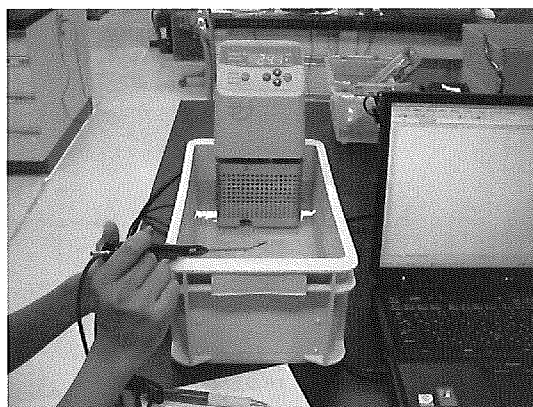


図 11 無負荷現象観察実験の様子

B. 4 圧力負荷が無い場合の温度と動作周波数の関係

B. 4. 1 超音波メスが水中にある場合

荷重がかかっていない状態での周波数と温度の関係を確認するため、周波数温度比較実験を行った。超音波メス無負荷現象観察システムを構築した。超音波メス無負荷現象観察システムは超音波メスを恒温槽(EYELA NTT-2200)の中に入れることで、超音波メス刃先がある温度のときの動作周波数を測定出来る。動作周波数は周波数カウンタ(Pendulum CNT-90)によって測定し、パソコンに取り込み、刃先温度は恒温槽内の水温とした。全体の構成を図 10 に、実験風景を図 11 に示す。

超音波メスのチップ部分を水道水の入った恒温槽に入れ、各温度での周波数を確認した。温度は 30℃～70℃まで、10℃毎に設定し、各温度で 10 秒間測定した。超音波メス刃先の温度は恒温槽の設定温度とみなした。

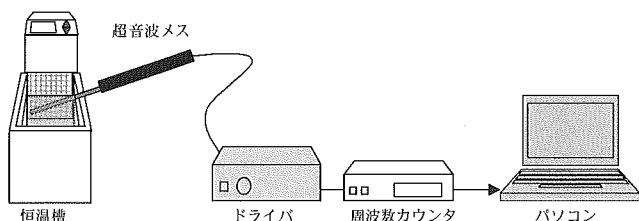


図 10 超音波メス無負荷現象観察システム

B. 4. 2 超音波メスが大気中にある場合

恒温槽を用いた実験では、ブレードを黒く塗装したとしても、恒温槽内に数十秒間超音波メスを入れるとブレード部分の塗装が落ちてしまうので、サーモグラフィを用いて温度を測定することは出来ない。そこで、サーモグラフィを用いてブレードの温度分布を観察するため、大気中でブレードを黒く塗装し、遠赤外線ストーブを用いてブレードを加熱し(図 12)、少量の水をかけることでブレードの各部分を冷却した。冷却ポイントは図 13 に示す根元、節、節と刃先の間、刃先の 4 点である。超音波メスは常に ON のまま周波数を測定し、温度と周波数の関係を求めた。

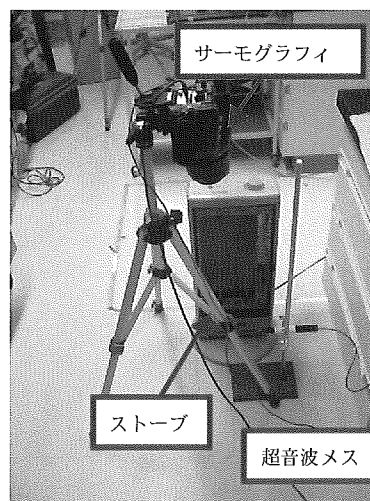


図 12 実験装置

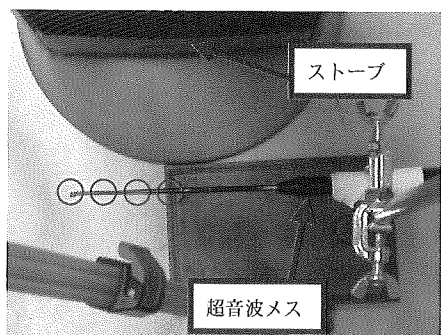


図 13 ハンドピース拡大

B. 4 圧力負荷がある場合の温度と動作周波数の関係

B. 4. 1 水平方向負荷実験

水平方向超音波振動子と圧装置を用いた超音波メス現象観察システムで実験を行った(図 14)。試料には豚(赤身)を用いた。超音波メス治具にかける荷重は 100gf・200gf・300gf の 3 パターンで、当てる時間は 10s とし、それより前に完全に切断された場合はその時点で実験を終えた。温度測定範囲は図 15 に赤枠で示した範囲とした。

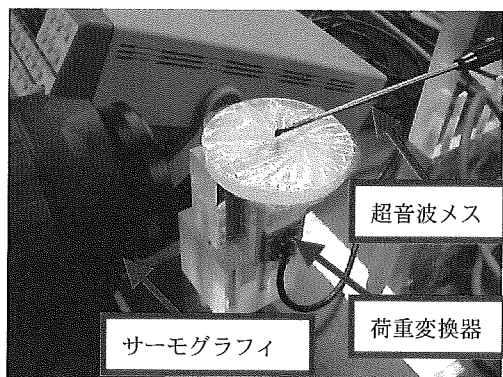
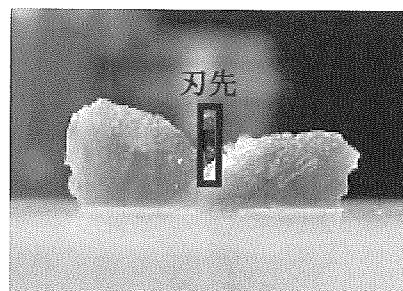


図 14 押し付け部拡大



RG: 2 E: 0.98 SC: FAST EL: TA F: 1/30 05/10/27 01:13:50

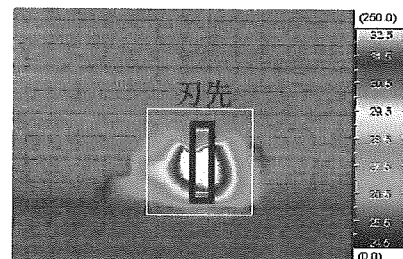


図 15 温度測定範囲

B. 4. 2 予熱なし超音波メスによる垂直方向負荷実験

垂直方向超音波振動子と圧装置を用いた超音波メス現象観察システムにて垂直方向負荷実験を行った(図 16)。対象物には豚(赤身・厚)を用いた。クイックタッチ荷重測定実験より、メス治具にかける荷重は 10gf, 20gf, 50gf とし、各 3 回実験を行った。当てる時間はそれぞれ 10s とした。温度測定範囲は超音波メスチップ全体とした。

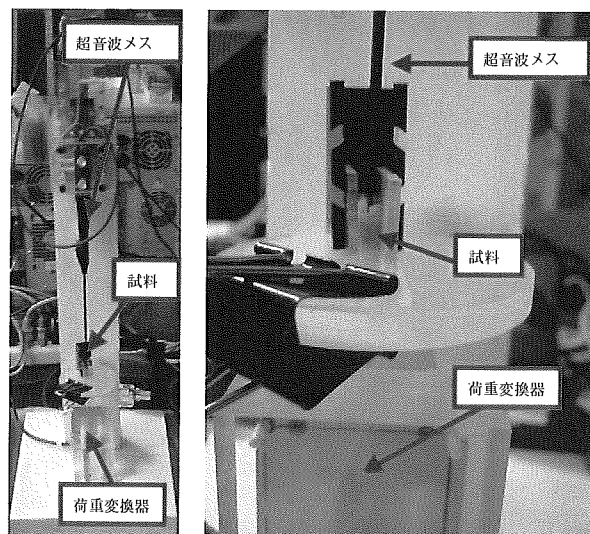


図 16 実験装置および試料部分の拡大図

B. 4. 2 予熱した超音波メスによる垂直方向負荷実験

前節の実験では、電源 ON 後に超音波メス全体の温度が上昇する温度に応じて動作周波数が変化したので、負荷大小による温度上昇変化の様子

を観察するため、実験毎にあらかじめ超音波メスを ON にし、チップ温度を安定させた。その後、垂直方向超音波振動子与圧装置を用いた超音波メス現象観察システムにて垂直方向負荷実験を行った。押し付け開始時における超音波メス全体の温度分布を図 17 に示す。対象物には豚（赤身・厚）を用いた。クイックタッチ荷重測定実験より、メス治具にかかる荷重は 10gf, 20gf, 50gf とし、各 3 回実験を行った。当てる時間はそれぞれ 10s とした。温度測定範囲は超音波メスチップ全体とした。

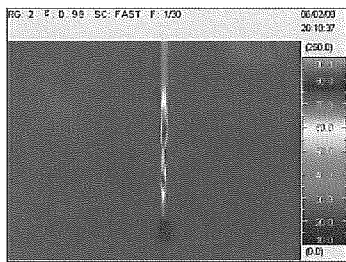


図 17 初期温度分布

B. 5 温度制御実験

B. 5. 1 無負荷温度制御実験

超音波メスチップ温度を目標温度以下に制御可能か確認するため、無負荷制御実験を行った。測定範囲はチップ全体とし、その平均温度を求めた。また、あらかじめ、超音波メスを動作させ、チップ温度を安定させた後、実験を行い、振動振幅を最小に制御した場合と P 制御をかけたとき、振動振幅を最大に制御した場合の 3 パターンの温度変化の違いを観察した。

B. 5. 2 振動振幅比例制御実験

超音波メスの振動振幅を 25.072~25.078 [Hz] の共振周波数範囲で比例制御した。この制御では、共振周波数が 25.072 [Hz] 以下のとき振動振幅最小となり、25.078 [Hz] 以上のときは振動振幅最大となるようにした。温度測定範囲はチップ全体温度と刃先温度の 2 つをサーモグラフィで測定した。この 2 つの温度はそれぞれの測定範囲内の温度を平均して求めた。共振周波数は、超音波メスドライバより出力された信号を、周波数カウンタを通して USB で LabVIEW に取り込んだ。同時に、荷重変換器より出力される信号を、USB-DAQ を通して LabVIEW に取り込み、周波数・荷重・制御信号を同時に収録した。

C. 研究結果

C. 1 クイックタッチ荷重測定実験

クイックタッチ荷重測定実験の結果を図 18 に

示す。測定者 A の平均荷重は 17.1 [gf]、測定者 B の平均荷重は 15.5 [gf] で全体の平均荷重は 16.3 [gf] であった。

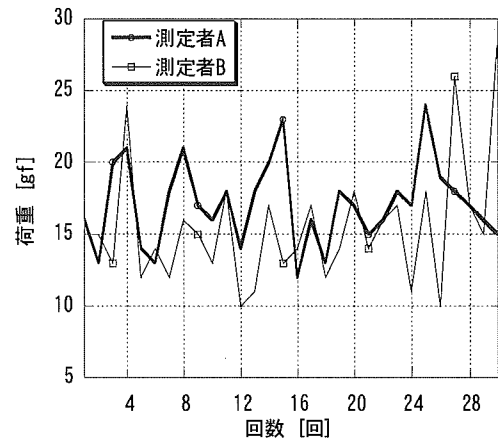


図 18 クイックタッチ荷重推移

C. 2 クイックタッチ温度測定実験

サーモグラフィを用いて測定したメルティングカットの刃先温度推移を図 19 に示し、クイックタッチの刃先温度推移を図 20 に示す。図 19 に示すメルティングカットでは、3 秒で最高温度に達し 77.2 [°C] であったのに対して、図 20 に示すクイックタッチでは 14 秒間ほぼ一定の温度を保ち、最高温度 61.7 [°C] であった。サーモグラフィによる温度測定の結果、クイックタッチ時には超音波メス刃先温度が 65 [°C] を超えなかった。一方、メルティングカットの際には 65 [°C] を超えることが確認出来た。同じクイックタッチでも、血管付近とそうでない部分では、当てる時間(約 0.2 秒)を使い分けていることが分かった。

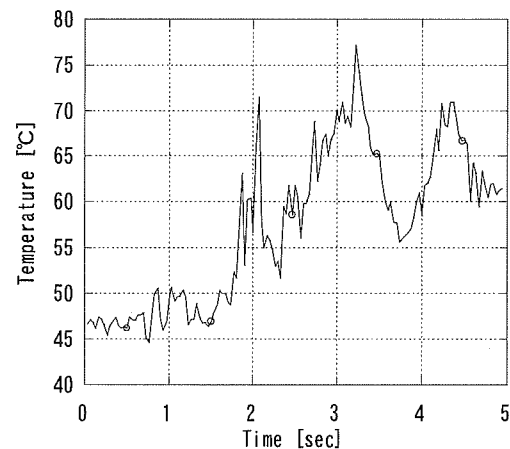


図 19 メルティングカット温度推移

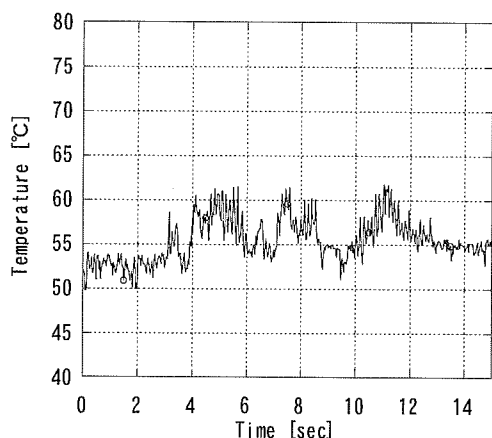


図 20 クイックタッチ温度推移

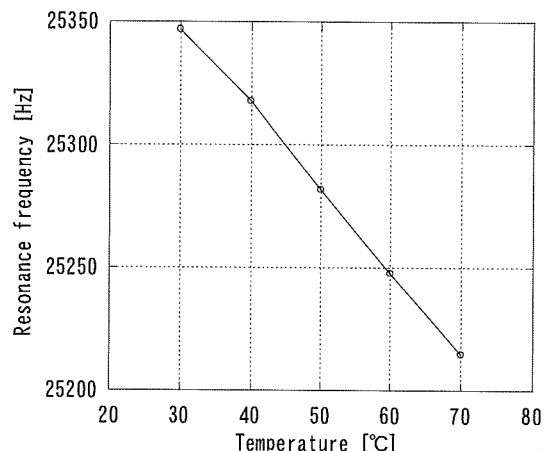


図 22 刃先温度と共振周波数の関係 (恒温槽)

C. 3 圧力負荷が無い場合の温度と動作周波数の関係

C. 3. 1 超音波メスが水中にある場合

周波数カウンタより測定した共振周波数を図 21 に示す。共振周波数は各温度でほぼ一定であった。負荷がないときのチップ温度と共振周波数の関係を図 22 に示す。温度変化があった場合と同様に、チップ温度と共振周波数の関係は比例していた。チップ温度に対する共振周波数の変化割合がほぼ一定であり、温度変化実験の変化割合が、1 [°C] あたり 3.34 [Hz] 下がる結果となった。

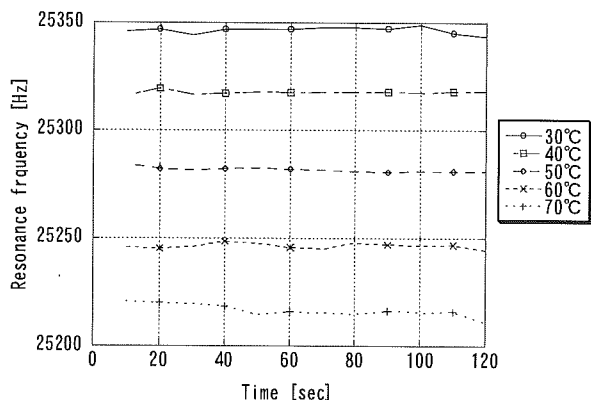


図 21 刃先温度と共振周波数の関係 (恒温槽)

C. 3. 1 超音波メスが大気中にある場合

大気中での無負荷実験の結果として、共振周波数推移を図 23 に、平均温度推移を図 24～図 28 に示す。共振周波数が上昇すると、チップ平均温度推移が下降していた。

温度と周波数の関係を図 29 に示す。また、超音波メス全体の温度が安定状態になったところで、チップの根元から刃先の各部分に水をかけ、部分的に温度が下がった場合の周波数の変化を観察した。チップ温度と共振周波数の関係より、チップ温度が上昇するときと下降するときの共振周波数の変化割合は、チップ温度が上昇するときのほうが大きくなったが上昇時、下降時共に変化割合が一定でなかった。

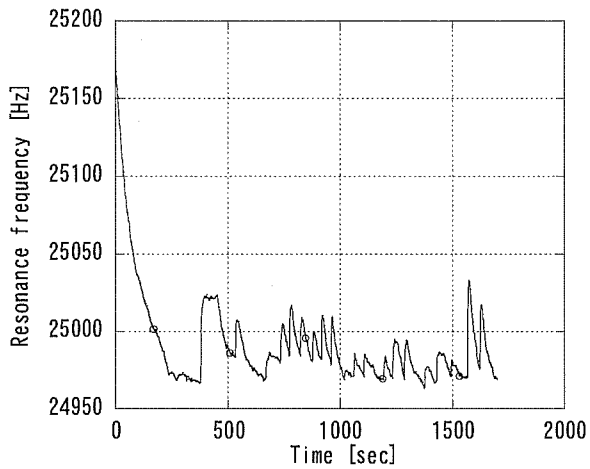


図 23 共振周波数推移

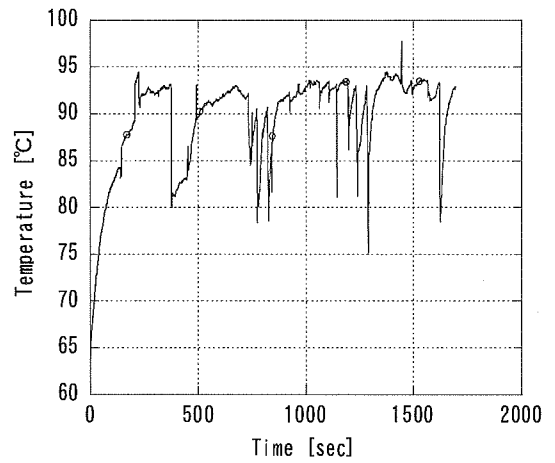


図 26 節と刃先間の平均温度推移

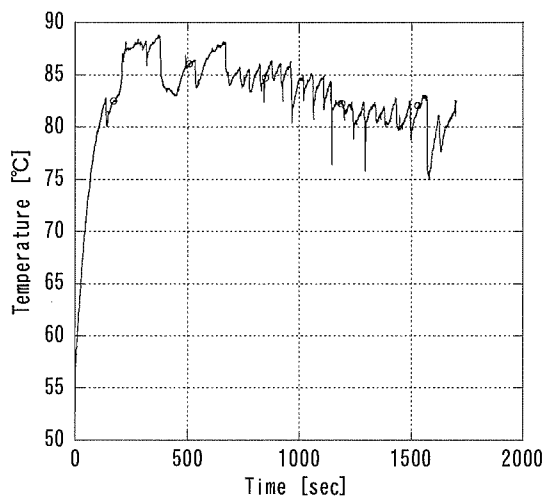


図 24 チップ平均温度推移

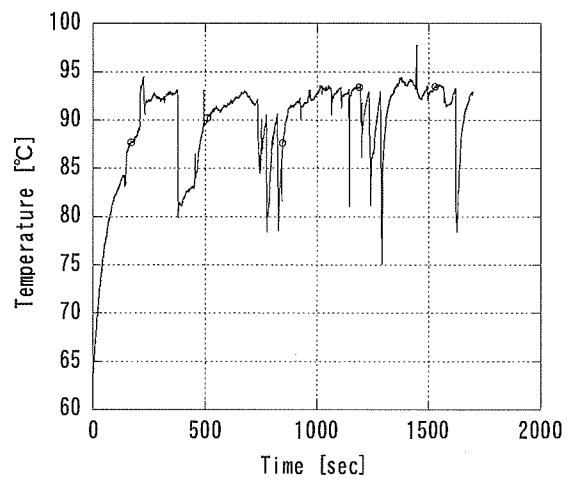


図 27 節平均温度推移

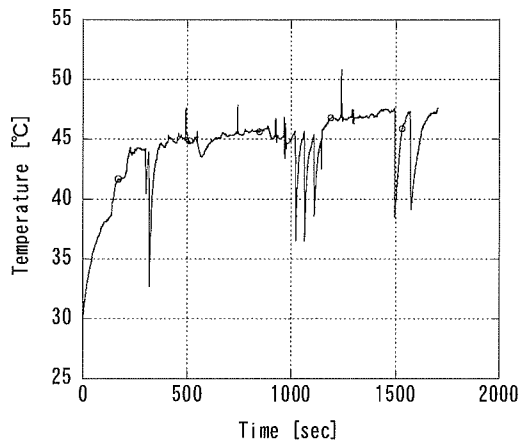


図 25 刃先平均温度推移

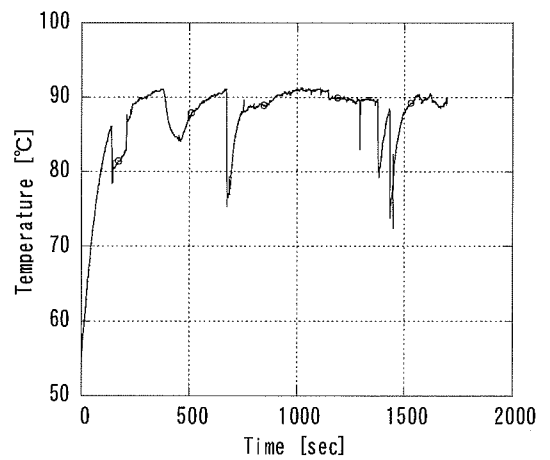


図 28 根元平均温度推移

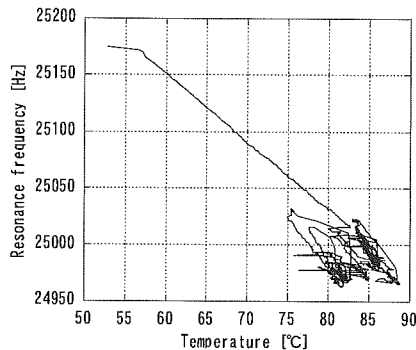


図 29 チップ温度と共振周波数の関係

C. 4 圧力負荷がある場合の温度と動作周波数の関係の実験結果

C. 4. 1 水平方向負荷実験結果

水平方向負荷実験の結果として、荷重温度周波数推移を図 30～図 32 に示す。刃先平均温度と共振周波数の関係を図 33 に示す。各負荷での推移において、共振周波数はほぼ一定の割合で下がっていた。図 3.19 より負荷が大きくなる程、共振周波数が低くなっていた。また、刃先平均温度が上昇するにつれて共振周波数は低くなっていた。

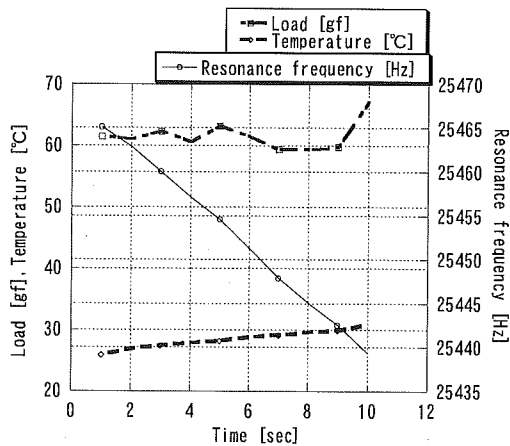


図 30 荷重温度周波数推移(100[gf])

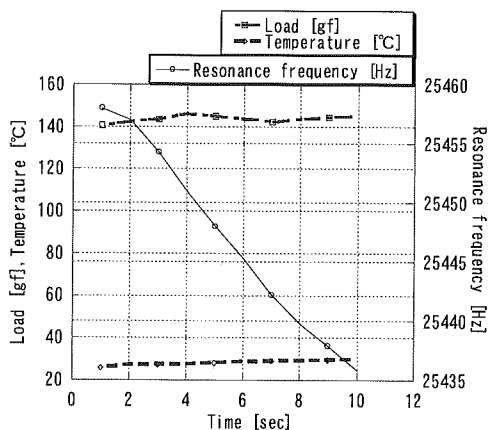


図 31 荷重温度周波数推移(200[gf])

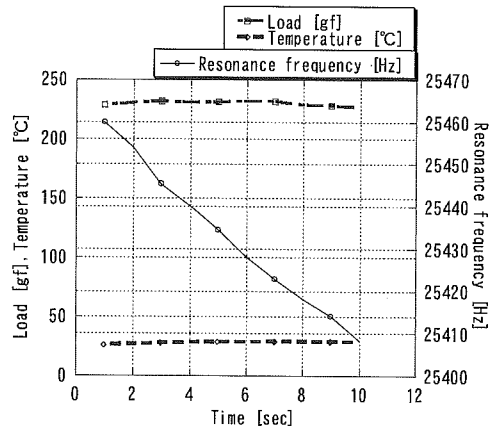


図 32 荷重温度周波数推移(300[gf])

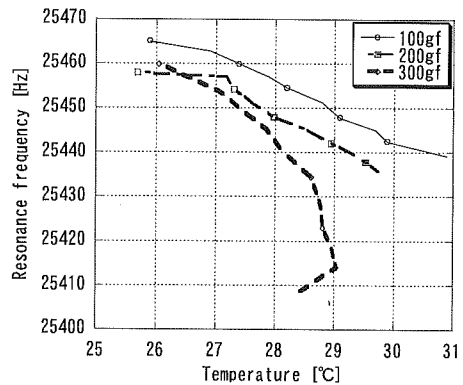


図 33 刃先平均温度と共振周波数の関係

C. 4. 2 予熱なし超音波メスによる垂直方向負荷実験結果

チップ温度が常温状態から開始した負荷実験の結果として、荷重温度周波数推移を図 34～図 41 に示す。チップ平均温度と共振周波数の関係を図 42 に示し、刃先平均温度と共振周波数の関係を図 43 に示す。チップ平均温度と共振周波数の関係より、チップ平均温度が上昇すると共振周波数は比例して下降した。一方、刃先温度に対する共振周波数の変化割合は一定でなかった。

C. 4. 3 予熱した超音波メスによる垂直方向負荷実験結果

予め、チップ温度を安定させた状態で負荷実験を行った結果として、荷重温度周波数推移を図 45～図 58 に示す。図 59 に温度と周波数の関係を示す。各荷重のときの推移より、多くの荷重の場合でチップ平均温度と刃先温度は比例関係にあった。チップ温度と共振周波数の関係を求めた結果、負荷にかかわらず、 $(\text{共振周波数}) = -4.3 \times (\text{チップ温度}) + 25329$ の直線に沿っていた。また、チップ温度と刃先温度の関係を求めた結果、多くの荷重で $(\text{刃先温度}) = 0.13 \times (\text{チップ温度}) + 53.8$ の直線に沿っていた。