

B.23 にそのイメージを示す。図 B.23 において点線は形状記憶合金が開ききった場合を表している。その力から円形 1/4 長さの血管への接触面積から血管に付加される圧力を求めた。

表 B.11 各形状記憶合金の仕様

線径 [mm]	長さ [mm]	形状回復温度 [°C]	金属組成	Ni 濃度 [at%]
0.2	15.7	50~60	Ti-Ni 合金	50.4~ 50.6
0.3	15.7			
0.5	94.2			
0.8	94.2			

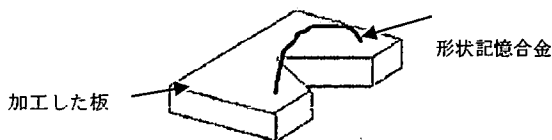


図 B.19 回復力実験の試験片

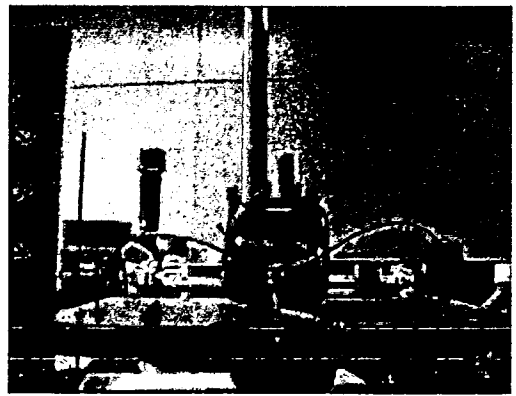


図 B.22 試験片のたわみ

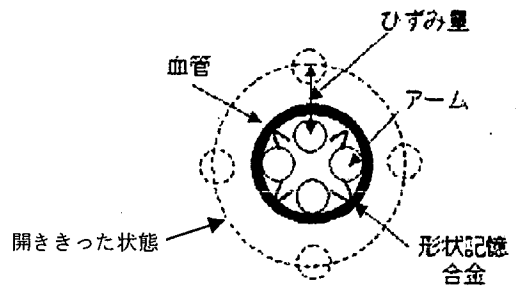


図 B.23 血管に付加される荷重の推定法

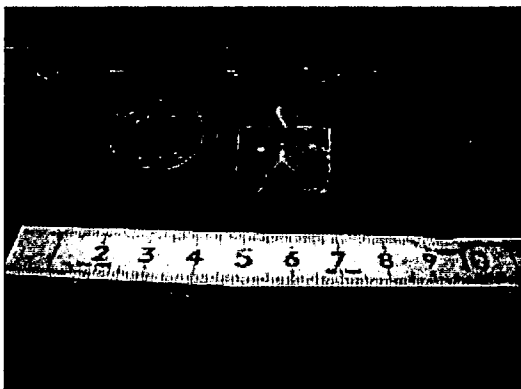


図 B.20 長さ 15.7 [mm] 試験片概観図

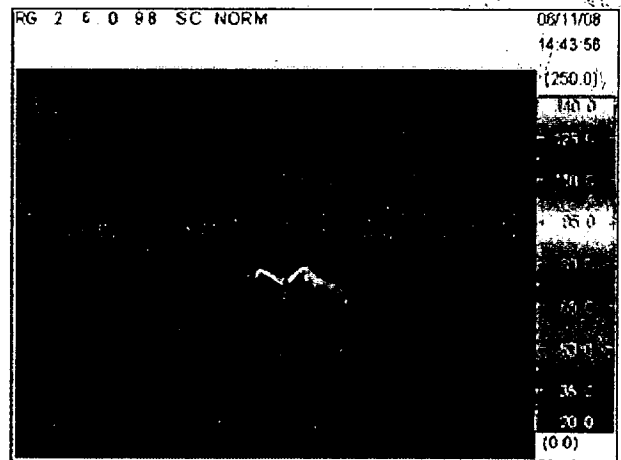


図 B.24 熱画像

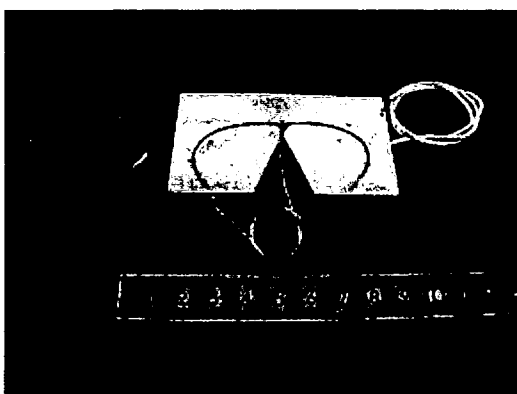


図 B.21 長さ 94.7 [mm] 試験片概観図

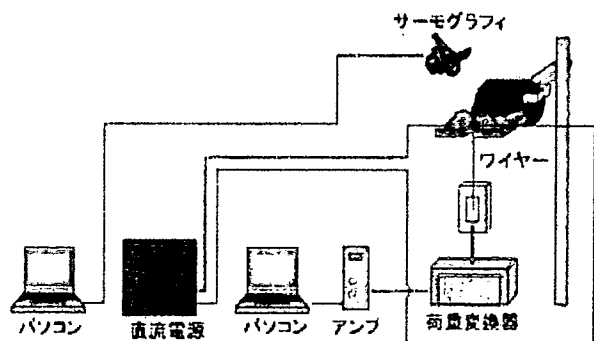


図 B.25 実験装置の概略図

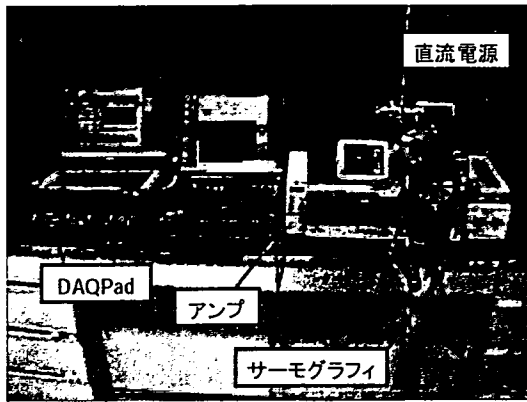


図 B.26 実験装置の概観図

### B. 3. 3 ランジュバン式振動子の試作機振動振幅計測実験

ランジュバン式振動子の実用性を確認するために実際にランジュバン式振動子の試作機を設計、製作し振動振幅計測実験を行った。ランジュバン式振動子の設計については B.1.6 節で述べた通りである。 piezo素子の仕様とランジュバン式を取り入れたマニピュレータ試作機の仕様を図 B.27 と表 B.12 に示す。実験装置の概略図を図 B.30 に示す。

実験は振動周波数 1~18 [kHz] の範囲で行い、オシロスコープで読み取る。また、今回、各実験で得られた結果と計算での結果を比較し、計算方法に正当性があるか確認する。また計算値は今回の実験で先端の振動振幅にはネジ部の影響が大きいとの結果が得られたので図 B.29 のように後端部の長さをネジの長さとして考え求めなおした。



図 B.28 ピエゾ素子の概略図

表 B.12 ピエゾ素子の仕様

変位量 (最大駆動電圧時)	9.1±1.5μm
変位量 (推奨駆動電圧時)	6.1±1.5μm
発生力	200N
共振周波数	138kHz
ヤング率	4.4×1010N/m <sup>2</sup>

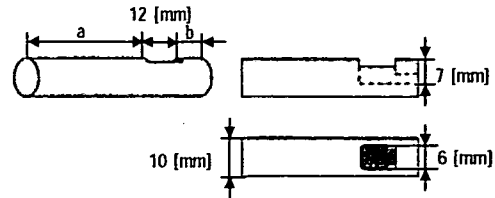


図 2.27 ランジュバン式振動子の全体図と上面図、側面図

実験では  $a=47$  [mm]、 $b=11$  [mm] のものと  $a=20$  [mm]、 $b=10$  [mm] のものを用いる。また、piezo素子は厚さ 1 [mm] のコの字型のスペーサを piezo素子先端に取り付け、後端には厚さ 0.5 [mm] のアルミ板をはさみ固定する。ネジは M4 ピッチ 0.7 [mm] のものを用いる。

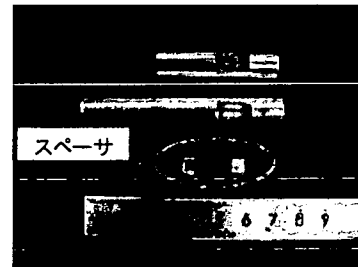


図 B.28 ランジュバン式振動子の概観図



図 B.29 計算での後端長さの変更

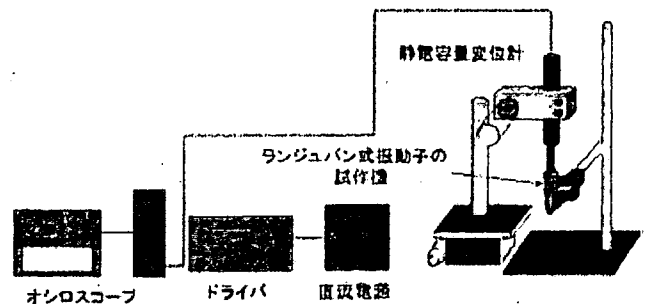


図 B.30 実験装置の概略図

#### B. 3. 3. 1 ネジの締め付けトルク変更による振動振幅への影響

ランジュバン式振動子の piezo素子の固定にはネジを用いているが、このネジの締め付け具合で振動振幅は変化するものと考えられる。ネジの締め付けトルクがどのように振動振幅に影響するかを調べるためにネジの締め付けトルクを変えて振動振幅計測実験を行った。

ピエゾ素子の締め付けトルクはネジのトルク導出式によって求めた。求める式はネジのリード角 $\alpha$ 、ネジ山の半角 $\beta$ を考慮したものと前二つの角度を考慮せずネジのピッチ $P$ を考慮する二つの式があり、トルクの計算は各々の式で求めた。ネジの摩擦係数 $\mu$ とし、ネジ座部の摩擦係数 $\mu_n$ 、ネジの有効径 $d_2$ としたとき、ネジのリード角、ネジ山の半角を考慮した式を(3)式に示し、ネジのピッチを考慮する式を(4)式(12)に示す。ネジのリード角、ネジ山の半角を示した図を図B.31に示す

$$T = F \left\{ \frac{d_2}{2} \left( \frac{\mu}{\cos \beta} + \tan \alpha \right) \right\} \quad \dots (3)$$

$$T = \frac{1}{2} F d_2 \frac{p + \mu \pi d_2}{\pi d_2 - \mu p} \quad \dots \dots (4)$$

$d_2$ : ネジの有効径 [mm]     $\mu$ : 摩擦係数     $\alpha$ : リード角

$\beta$ : ネジ山の半角     $F$ : ネジにかかる軸力 [N]  
 $P$ : ピッチ

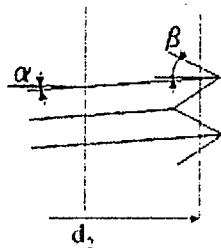


図 B.31 ネジのリード角とネジ山の半角

ここでランジュバン式振動子の試作機に用いているネジは M4 であるため  $d_2=4$  [mm]     $\alpha=3.2$  [°]     $\beta=30$  [°] となる。また、ネジにかかる軸力はピエゾ素子の最大耐久力である 200 [N] とし、摩擦係数は一般用機械用油脂を用いたものとして 0.1、0.2 それぞれで求めた。この計算式を用いて計算したところ(3)式では  $\mu=0.1$  のとき 0.069 [Nm]、 $\mu=0.2$  のとき 0.115 [Nm] となり、(4)式では  $\mu=0.1$  のとき 0.063 [Nm]、 $\mu=0.2$  のとき 0.103 [Nm] となった。これによりピエゾ素子にかけることができるトルクは 0.063~0.115 [Nm] と求められた。実験では二つあるランジュバン式振動子試作機のネジの締め付けトルクを計算により求めたトルクの最大値 0.115 [Nm] 以下である 0.04 [Nm]、0.06 [Nm]、0.08 [Nm] というトルクで固定した。締め付けにはトルクドライバを用いた。ネジは長さ 50 [mm] のものを用いた。

実験では周波数を 3~18 [kHz] に変化させ各周波数の振動振幅を計測し、トルクと振動振幅の関係性を見た。

### B. 3. 3. 2 クランプ固定位置の変更による振動振幅への影響

ランジュバン式振動子を固定しているクランプも振動振幅になんらかの影響があると考えられる。クランプの固定位置の振動振幅への影響を見るためにクランプの固定位置を変えて振動振幅計測実験を行った。ここでは締め付けトルクを一定、ネジ長さも同一の先端 47 [mm]、後端 11 [mm] のランジュバン式振動子試作機のネジ部を固定する場合とランジュバン式振動子の後端部分を固定する場合の二つについての振動振幅を各周波数について計測し、その関連性を見た。

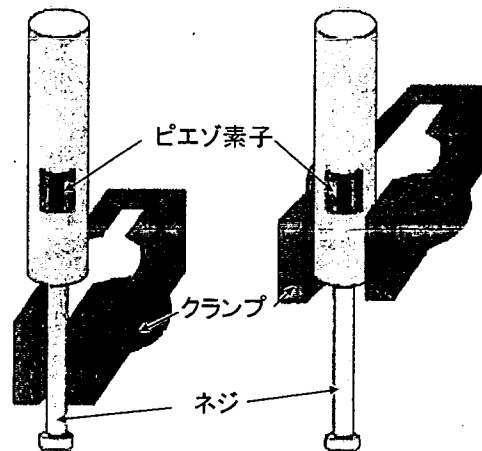


図 B.32 クランプの固定位置の変更

### B. 3. 3. 3 ネジの長さ変更による振動振幅への影響

製作したランジュバン式振動子の振動振幅はランジュバン式振動子の先端部、後端部のみだけでなく、ピエゾ素子を押しえているネジも大きく影響していると考えられる。ネジの振動振幅への影響を調べるため、ネジの長さを変更して振動振幅実験を行った。ここでは締め付けトルクは一定とし、ネジの長さを 25 [mm]、50 [mm] と変え、そのランジュバン式振動子の試作機の各周波数での振動振幅を計測する。そしてネジの長さとの振動振幅の関連性を見る。今回、実験には先端 47 [mm]、後端 11 [mm] の試作機を用い、締め付けトルクは 0.08 [Nm] で締め付けた。

### B. 3. 3. 4 ランジュバン式振動子の寸法変更による振動振幅への影響

そして最後に前述において最も振動振幅する締

め付けトルク、ネジ長さ、クランプ固定位置で、ランジュバン式振動子の寸法の違いによる振動振幅への影響を見るために振動振幅計測実験を行った。先端47 [mm]、後端11 [mm]と先端20 [mm]、後端10 [mm]の二つのランジュバン式振動子の振動振幅を計測し、その結果を比較した。

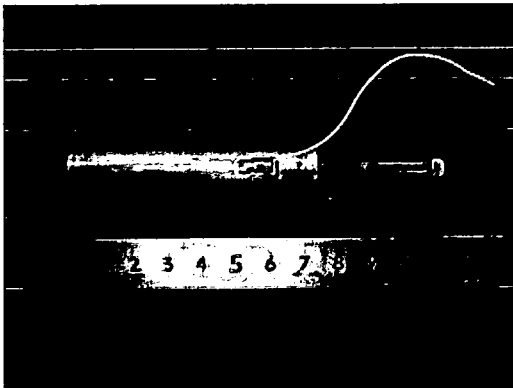


図 B.33 ランジュバン式振動子の試作機 (ネジ長さ 50 [mm])

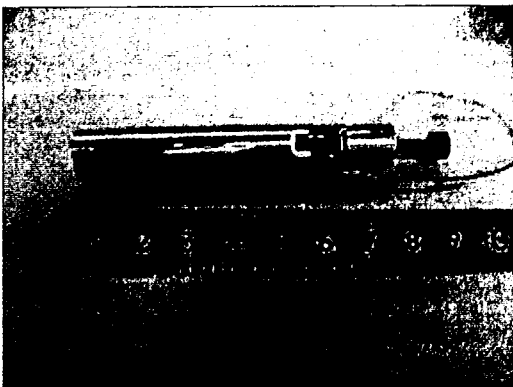


図 B.34 ランジュバン式振動子の試作機 (ネジ長さ 25 [mm])

## C 実験結果

### C. 1 形状記憶合金通電加熱実験

サーモグラフィによる熱画像の解析結果を図 C.1 に示す。図は電流 1.0 [A]、電圧 0.8 [V] の時の結果である。このグラフより電流 1.0 [A] のときに融着に必要な温度である 110 [°C] まで加熱できることが分かった。またアームの展開の様子を図 C.2 に示した。これによりアームの展開が確認できた。

### C. 2 形状記憶合金回復力実験

荷重変換器で計測された回復力を図 C.3~C.12 に示す。また今回の実験で計測できた目標温度 110 [°C] まで加熱できる電流値、電圧値を表 C.1 に示す。ただし  $\phi 0.5$  [mm] と  $\phi 0.8$  [mm] の形状記憶

合金はもともとの弾性力が強かったため、たわみ

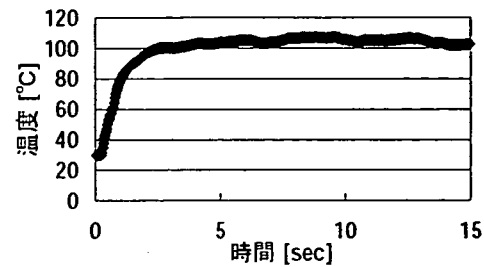


図 C.1 形状記憶合金通電加熱時の温度推移

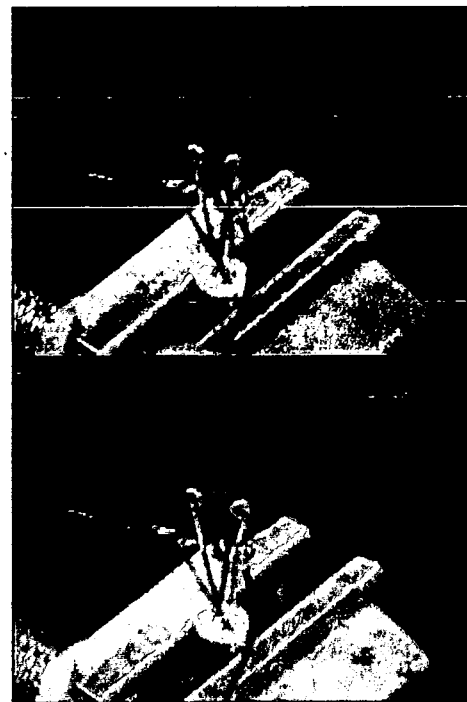


図 C.2 アームの展開の様子

量が微小での計測は行えなかった。また各試験片においての最も大きな回復力から求めた血管に付加されると推定される圧力を表 3.2 に示す。計算においてのたわみ量は  $\phi 0.2$ 、 $0.3$  は通電加熱実験に用いた簡易試作機の形状記憶合金の収縮から展開までのアームの稼動距離 2.5 [mm] とし、 $\phi 0.5$ 、 $0.8$  は血管の内径を 30 [mm] とみため、そこから血管が 60 [mm] まで拡張するときのアームの稼動距離 15 [mm] とした。

回復力は形状記憶合金の長さが違うため 4 つ同時に比較はできないが  $\phi 0.2$  [mm] と  $\phi 0.3$  [mm]、 $\phi 0.5$  [mm] と  $\phi 0.8$  [mm] の比較をそれぞれ行えば前者では  $\phi 0.3$  [mm] でたわみ量 1.02 [N] が最も大きな値となった。後者では  $\phi 0.8$  [mm] でたわみ量最大時の 2.6 [N] が最も大きな値となった。表 C.1 に着目すると径が大きくなると必要とする

電流も大きくなるのが分かる。推定される圧力は  $\phi 0.8$  [mm] の形状記憶合金での  $0.17$  [MPa] が最も大きくなった。

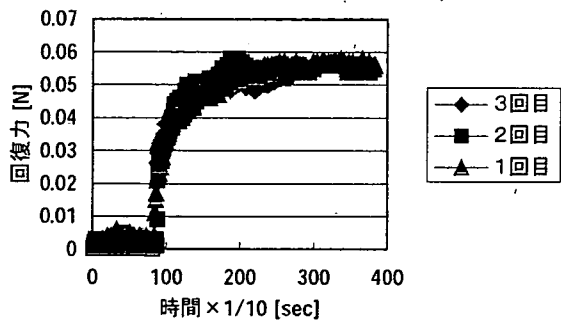


図 C.3  $\phi 0.2$  [mm] たわみ量微小時の形状回復力

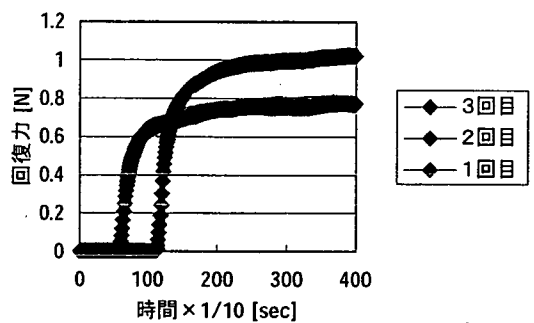


図 C.7  $\phi 0.3$  [mm] たわみ量小時の形状回復力

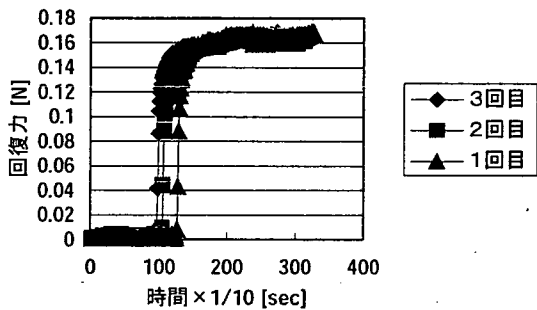


図 C.4  $\phi 0.2$  [mm] たわみ量小時の形状回復力

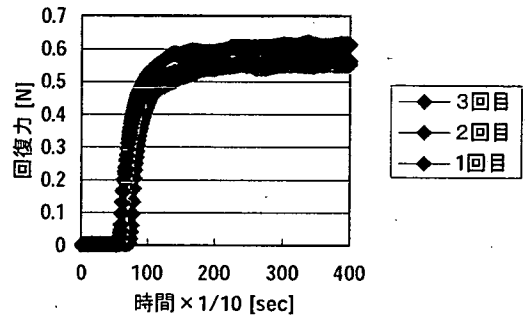


図 C.8  $\phi 0.3$  [mm] たわみ量最大時の形状回復力

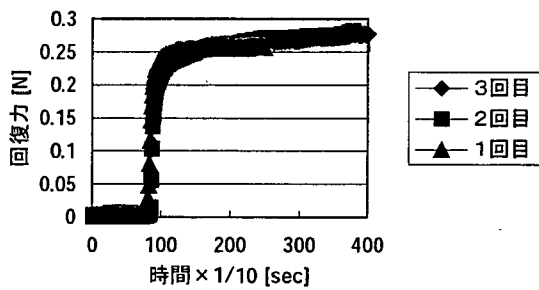


図 C.5  $\phi 0.2$  [mm] たわみ量微小時の形状回復力

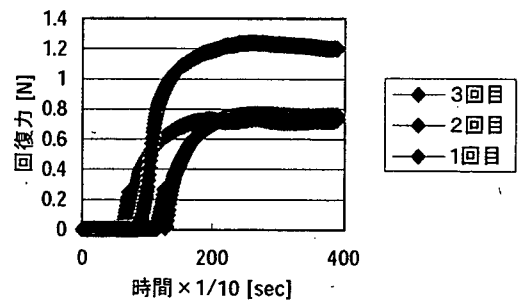


図 C.9  $\phi 0.5$  [mm] たわみ量最大時の形状回復力

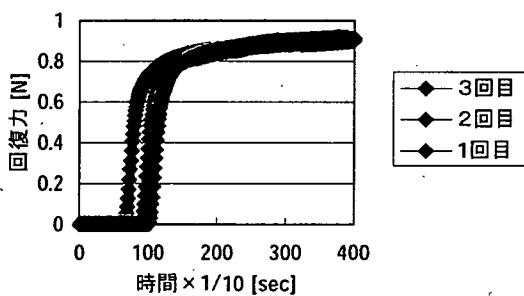


図 C.6  $\phi 0.3$  [mm] たわみ量微小時の形状回復力

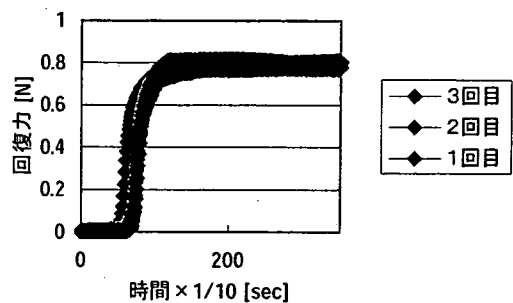


図 C.10  $\phi 0.5$  [mm] たわみ量小時の形状回復力

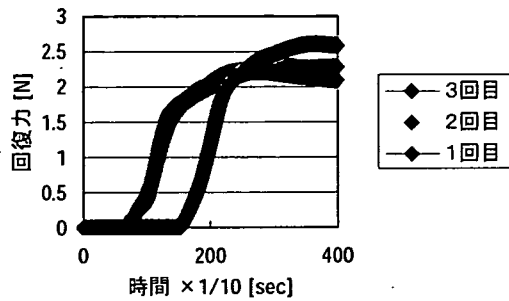


図 C.11  $\phi 0.8$  [mm] たわみ量最大時の形状回復力

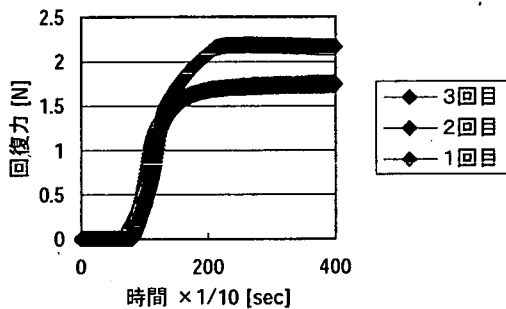


図 C.12  $\phi 0.8$  [mm] たわみ量小時の形状回復力

表 C.1 各形状記憶合金における目標温度まで加熱可能な電流・電圧値

径 [mm]	電流 [A]	電圧 [V]	抵抗 [ $\Omega$ ]
0.2	1	0.7	0.7
0.3	1.1	0.8	0.72
0.5	1.9	1.3	0.68
0.8	3.5	1.5	0.43

表 C.2 各形状記憶合金を装着したマニピュレータにおいて血管に付加されると考えられる圧力

径 [mm]	たわみ [mm]	荷重 [N]	血管に付加される圧力 [MPa]
0.5	13.5	1.2	0.11
0.8	11.5	2.5	0.17

### C. 3 ランジュバン式振動子の試作機振動振幅計測実験

#### C. 3. 1 ネジの締め付けトルク変更による振動振幅への影響

二つあるランジュバン式振動子の試作機の締め付けトルクを変更したときの実験結果を図 C.13~C.14 に示す。また、先端 20 [mm]、後端 10

[mm]のランジュバン振動子の試作機において最も振動振幅する周波数での再現性を見た結果を図 C.15 に示す。どちらのランジュバン式モデルもトルクが 0.08 [Nm]のとき周波数 14 [kHz]で、先端 20 [mm]、後端 10 [mm]のランジュバン式モデルは 610 [nm]、先端 47 [mm]、後端 11 [mm]のランジュバン式モデルは 890 [nm]と振幅が最も大きくなった。再現性を見てみると二つのトルクにおいて再現性はとれなかった。

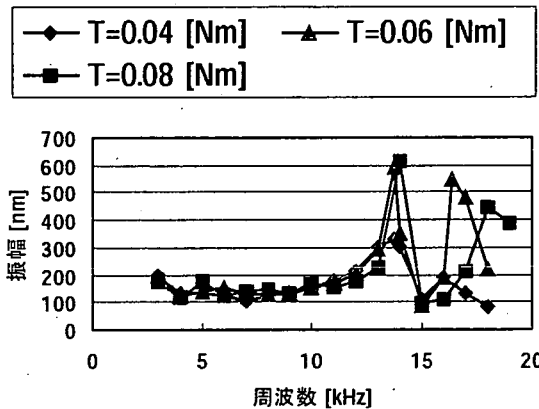


図 C.13 先端 20 [mm] 後端 10 [mm]のランジュバン式振動子のトルク変更時の振幅

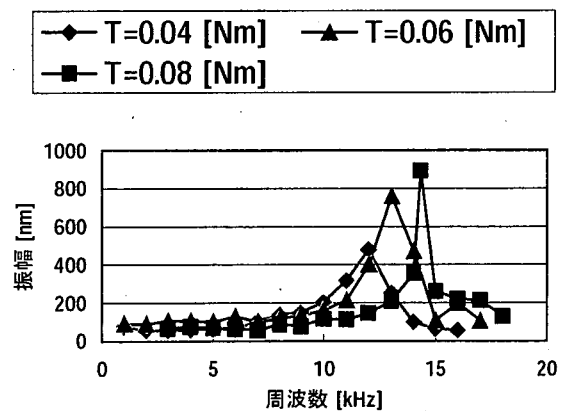


図 C.14 先端 47 [mm] 後端 11 [mm]のランジュバン式振動子のトルク変更時の振幅

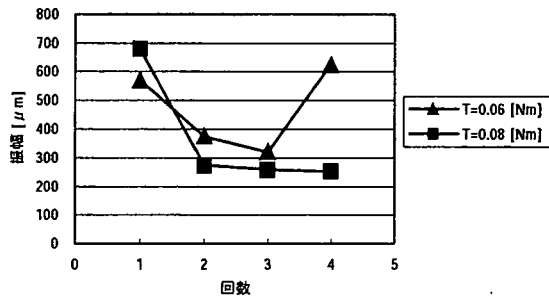


図 C.15 ランジュバン式振動子の振動振幅の再現性

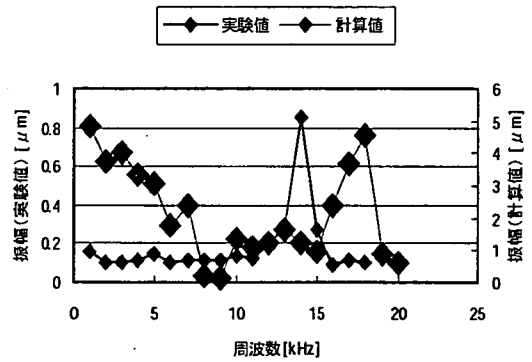


図 C.18 先端 47 [mm] 後端 11 [mm] 後端部固定時の計算値と実験値

### C. 3. 2 クランプの固定位置変更による振動振幅への影響

クランプの固定位置を変えた際の振幅の計測結果を図 C.16 に示す。二つのグラフの周波数応答はそれぞれ最も揺れている周波数が後端固定時は 14 [kHz]、ネジ部固定時は 15 [kHz]とずれている。最大振幅はランジュバン式振動子の試作機の後端部を固定したときのほうが最も大きい 852 [nm]の振幅が計測できた。また固定位置を考慮した計算値との比較を図 C.17~C.18 に示す。

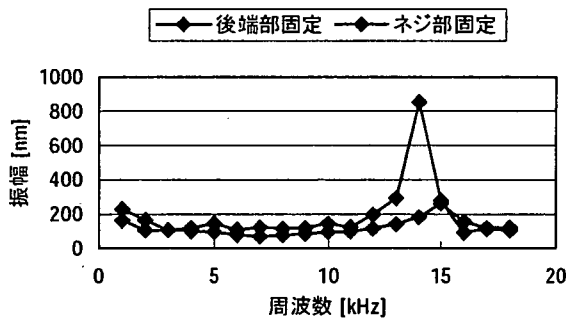


図 C.16 クランプ固定位置変更におけるランジュバン式振動子の試作機の振動振幅

### C. 3. 3 ネジの長さ変更による振動振幅への影響

ランジュバン式振動子の試作機においてネジの長さを変えた際の実験結果を図 C.19 に示す。二つの周波数応答の波形は異なる結果を得た。最も振幅する周波数も異なり、ネジの長さが 50 [mm] のときは、14 [kHz]で 852 [nm]、ネジの長さが 25 [mm]のときは、18 [kHz]で 188 [nm]という結果を得た。またネジ長さが 25 [mm]ということ considering して求めた実験結果と計算値の比較を図 C.20 に示す。

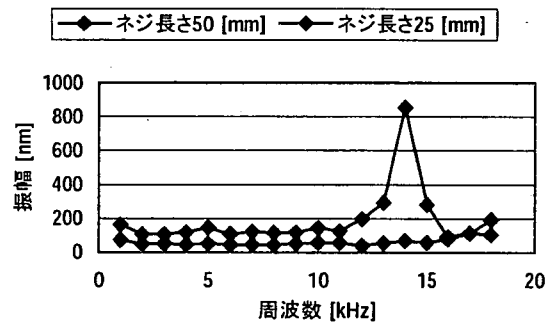


図 C.19 ランジュバン式振動子の試作機のネジの長さ変更における振幅

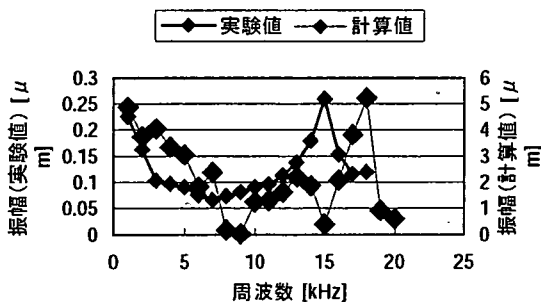


図 C.17 先端 47 [mm] 後端 11 [mm] ネジ部固定時の計算値と実験値

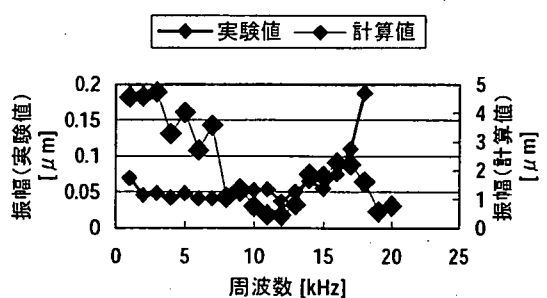


図 C.20 先端 47 [mm] 後端 11 [mm] ネジ長さ 25 [mm]の時の計算値と実験値

### C. 3. 4 ランジュバン式振動子の寸法変更による振動振幅への影響

次にランジュバン式振動子の寸法変更時の実験結果を図 C.21 に示す。また、二つあるランジュバン式振動子の試作機それぞれの計測値と計算値の比較を図に示す。最も振幅しているのは先端 47 [mm]、後端 11 [mm] のランジュバン式振動子の試作機であり、最大振幅は周波数 14 [kHz] のとき 852 [nm] という結果になった。また、先端 20 [mm] 後端 10 [mm] のランジュバン式モデルの計算値との比較を図 C.22 に示す。

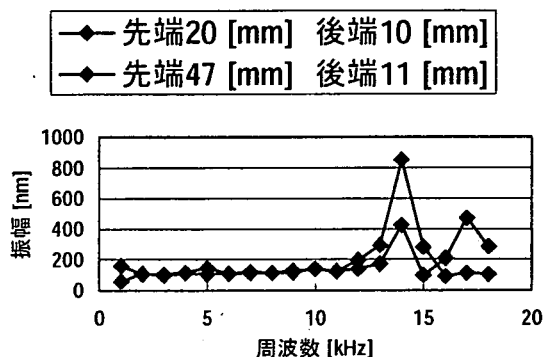


図 C.21 各ランジュバン式振動子の試作機における周波数応答

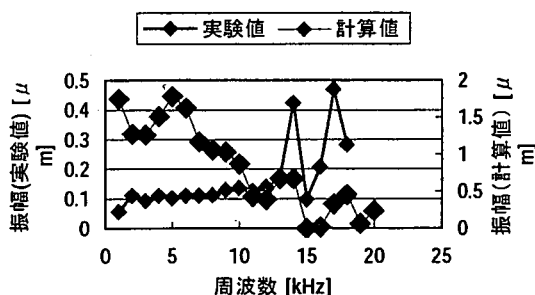


図 C.22 先端 20 [mm] 後端 10 [mm] ネジ長さ 50 [mm] の時の計算値と実験

## D. 考察

### D. 1 形状記憶合金通電加熱実験

実験結果より形状記憶合金の通電加熱が可能であるということが分かった。さらにその方法で目標温度 110 [°C] までの加熱も可能であるということも分かった。この方法はマニピュレータに適用できると考えられる。

### D. 2 形状記憶合金回復力測定実験

形状記憶合金において回復力はたわみ量の大き

さに比例するが、 $\phi 0.2$  [mm] と  $\phi 0.3$  [mm] の比較では最も大きい回復力を計測したのはたわみ量が小さいときであった。このときは前もしくは後に反って形状回復現象が起こったことによって回復力の計測が正確に行われていない可能性が考えられる。このため回復力をより正確に計測できる実験方法の考案を行う必要がある。形状記憶合金の通電加熱において径の大きさとともに必要電力も大きくなるのが分かる。これは形状記憶合金の径が大きくなるほど抵抗が小さくなることを表しており、さらに径の大きい形状記憶合金を今後使用する場合、必要な電力量もその分増えるものと考えられる。計測された回復力より求めた血管に付加される圧力の最大値は 0.17 [MPa] であった。よって形状記憶合金単体では融着条件である 1 [MPa] を満たすことができない。そのため形状記憶合金を 5 重にして使用することで実用可能であると考えられる。

## D. 3 ランジュバン式振動子の試作機振動振幅計測実験

### D. 3. 1 ネジの締め付けトルク変更による振動振幅への影響

実験結果よりどのトルクでも周波数 14 [kHz] で最も振動振幅が大きくなっており、このとき共振が起こっていると考えられる。二つの試作機においてトルクの変化による振動振幅の変化は周波数 14 [kHz] で大きく見られることが共通するが、この周波数での再現性は取れておらず、トルクの振動振幅への影響は少ないといえる。ピエゾ素子を固定するというところに重点を置けばトルクは計算で求めた最大トルクより少し低い 0.08 [Nm] が望ましいと考える。

### D. 3. 2 クランプ固定位置の変更による振動振幅への影響

固定位置の異なる二つの結果よりネジ部を固定したときの振動振幅が後端部での固定時より小さくなっている。また周波数応答にも 1 [kHz] の違いが見られる。これはネジ部での固定位置が振動波の節ではない部分であったという可能性が考えられ、このことが振動振幅、周波数応答に影響したと考えられる。計算値と実験値の比較では振幅が大きく異なっており、周波数応答の比較も先端 47 [mm] のときに似た応答になったものの、先端 20 [mm] の比較は低周波数での特性に違いが見られた。今回の実験結果もふまえランジュバン式振動子の固定位置を考慮した計算式を考える



必要があることが分かった。

### D. 3. 3 ネジの長さ変更による振動振幅への影響

ねじの長さの異なる試作機の周波数応答の特性は異なり、ネジの長さが振動振幅に与える影響は大きいと考えられる。これは振動波がネジにも伝達していると考えられる。また、計算値と実験値の差は大きく、さらに周波数応答の特性も低周波数で最も大きく振幅するなど大きな違いが見られる。ネジの長さは考慮に入れていることから、ネジ部における振動振幅の変化やランジュバン式振動子の先端から後端の振動波を考慮した計算式を考える必要があることが分かった。

### D. 3. 4 ランジュバン式振動子の寸法変更による振動振幅への影響

二つの試作機の周波数応答は低周波数では振動振幅は小さく、周波数 14 [kHz]で最も振動振幅大きくなる特徴は似通っているが、周波数 14 [kHz]以上での応答は異なった。また、周波数 11 [kHz]以上での振動振幅の大きさも異なった。これは二つの試作機における先端の長さの違いが先端の振幅に影響していると考えられる。先端 20 [mm]の試作機の実験値と計算値の違いは他の結果と同様に大きな違いが見られる。よって前節と同じ要因、もしくはまた別の要因を考慮した計算式を考える必要があることが分かった。

## E. まとめ

本研究では、胸部および腹部大動脈瘤のカテーテル手術支援の一環として血管とステントグラフトを融着するマニピュレータ製作についての検討を行った。融着面に熱、荷重をかける部分として形状記憶合金の使用を検討し、通電加熱が可能かどうか、目標温度までの加熱は可能かを調べ、形状回復の際に発生する回復力の測定を行った。その回復力からマニピュレータでの血管に付加する力を推定した。また振動振幅を付加するために piezo 素子に使用を検討し、マニピュレータへの組み込みの際にランジュバン式の採用を検討した。そして波動方程式を用いて寸法を決定し、製作した。このランジュバン式振動子の固定方法やネジのトルクの変更、ネジの長さの変更など、各種条件を変更し振動振幅を計測し、計算結果との比較を行った。その結果以下のことが判明した。

- ・ 形状記憶合金の通電加熱は可能であり、この

方法による目標温度 110 [°C]までの加熱も可能であった。よってマニピュレータの形状記憶合金部における加熱法として通電加熱は実用性があると考えられる。

- ・ 形状記憶合金の回復力実験の結果から推定された血管に付加される圧力は最大で  $\phi 0.8$  [mm]のとき 0.17 [MPa]であった。よって、 $\phi 0.8$  [mm]の形状記憶合金を 5 重に設置することで融着条件の 1 [MPa]を満たし実用可能であると考えられる。
- ・ ランジュバン式振動子の試作機の設計、製作を行い、試作機を用いた振動振幅計測実験を行った。この実験で最大振動振幅 0.9 [ $\mu\text{m}$ ]という結果を得た。融着条件が 0.4 [ $\mu\text{m}$ ]であることからランジュバン式振動子はマニピュレータに実用可能であると考えられる。

## 【平成 19 年度分】

### A. 研究目的

本研究の目的は、ステントグラフト手術の後に起きるステントグラフトの位置のずれやエンドリークを防止するカテーテル型ステント融着マニピュレータの開発である。このデバイスによって、血管にステントグラフトを融着し、ステントグラフトの位置のずれとエンドリークを防止する。

現在利用されている生体の融着をできる医療器具に、超音波メスがある。超音波メス（ジョンソン・エンド・ジョンソン株式会社、Harmonic Scalpel）は、先端を約 55kHz で振動させており、融着を起こしている。しかし、超音波メスが生体組織に与えるエネルギーは生体にとって高いものであるため、生体組織を損傷してしまうことがある。また、超音波メスの他に融着させる医療器具に、電気メスがある。電気メスは人体に電極を貼り付けて、メスの先端から高周波電流を流すことで生体組織の電気抵抗によって 100℃以上の熱を発生させて、融着を起こす。しかし、融着時の温度が生体にとって高温であるため、電気メスによって融着した後の生体組織は著しく損傷している。そこで、融着のために生体に与えるエネルギーを低くして、低損傷な生体融着を行うことのできる機能を目指したデバイスの開発を行う。

本研究では、生体組織に振動と熱、圧力の3つのエネルギーを同時に加えることで、損傷の低い融着を行うことのできるデバイスの開発を行う。一昨年の豚の大動脈融着実験において、豚の大動脈に振動、熱、圧力を与えることで融着している。昨年度の研究で製作されたデバイスの性能は、周波数 12 kHz において振動振幅 0.1 μm、最大温度 110℃、圧力 0.17MPa であり、昨年度の研究におけるデバイスの目標値である周波数 12kHz において振動振幅 0.4 μm、温度 110℃、1MPa より振動振幅と圧力が低かった。そこで、本年度の研究では振動振幅と圧力の発生装置の改良を行うことで、カテーテル型ステント融着マニピュレータの実現を目指す。振動を発生させる装置にはボルト締めランジュバン式振動子（Bolt clamped Langevin type Transducer : BLT）を用い、ボルト締めランジュバン式振動子を有限要素法による解析を利用して設計することで大きな振動振幅を発生させることを目標とする。また、熱と圧力の発生には形状記憶合金(Shape Memory Alloy : SMA)を用いる。形状記憶合金の形状記憶や線材の太さの違いによる形状回復力の変化を見るこ

とで、大きい形状回復力を発生する形状記憶合金を製作することを目標とする。

### B. 研究方法

#### B. 1 カテーテル型融着マニピュレータと融着原理

##### B. 1. 1 カテーテル型ステント融着マニピュレータの構成

新たに考案したカテーテル型ステント融着マニピュレータの構成図を図 1 に示す。カテーテル型ステント融着マニピュレータはボルト締めランジュバン式振動子と形状記憶合金の2つから構成される。

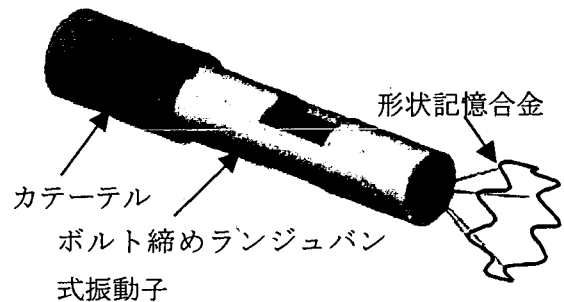


図 1 カテーテル型ステント融着マニピュレータの構成

##### B. 1. 2 融着方法

本研究では、融着後の生体組織の損傷を低くするために、振動、熱、圧力を同時に生体を与えて融着する。一昨年行われた豚大動脈融着実験より生体組織に振動、熱、圧力を与えることで融着できるということが確認されている。

ステントグラフトと血管を融着するために与える振動と熱、圧力の大きさは、本研究と平行して行われている豚大動脈融着実験より得た結果を元に決定した。融着条件を表 1 に示す。ここでは、全振幅とは片振幅の2倍の値とする。

表 1 融着条件

全振幅 [ μm ]	2
温度 [ °C ]	130
圧力 [ MPa ]	0.75

カテーテル型ステント融着マニピュレータによる、ステントグラフトと血管の融着までの流れを図 2 に示す。まず、図 2(a)に示すように患部にステントグラフトを装着したあと、マニピュレー

タを患部まで移動させる。そして、図 2(b)のように形状記憶合金を加熱し形状記憶合金を展開し、融着面に圧力と熱を加える。このとき、根元部のピエゾ素子を振動させ融着面に振動を伝荷する。

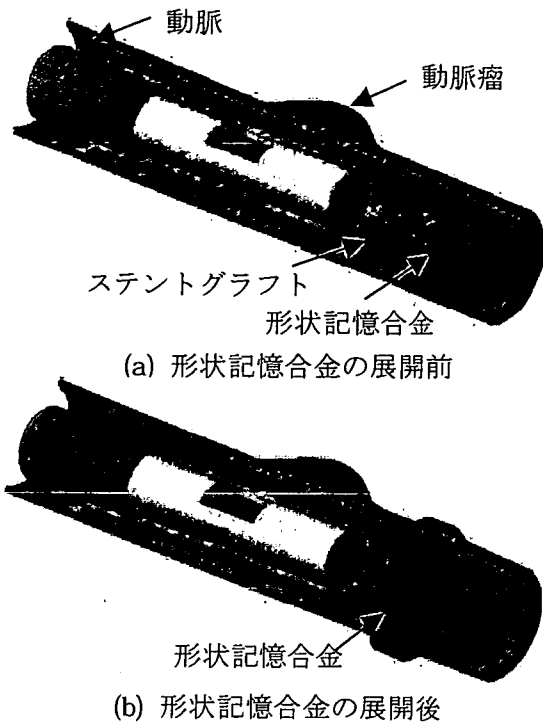


図 2 カテーテル型ステント融着マニピュレータによる融着の流れ

**B. 1. 2. 1 振動の伝達理論**

振動はボルト締めランジュバン式振動子を用いて発生させる。ボルト締めランジュバン式振動子に組み込んだ圧電セラミックスに交流電流を加えることで、圧電セラミックスが伸び縮みし、ボルト締めランジュバン式振動子が振動する。

図 3 のような両端自由端の長さ  $l$  の棒に対して、 $x=0$  から波長  $\lambda$ 、振幅  $u_0$  の振動を加えたとき、棒の先端  $x=l$  における振動振幅  $u$  は次式で表される<sup>7)8)</sup>。

$$u = u_0 \cos\left(\frac{n\pi l}{\lambda}\right) \quad (n=1,2,3,\dots) \quad \dots (1)$$

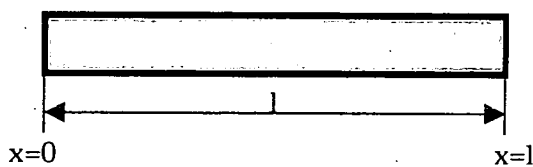


図 3 両端自由の棒

このとき、図 3 の棒を伝わる縦波の音速を  $c$  としたとき、棒の共振周波数  $f_n$  は次の式で表される。

$$f_n = c / \lambda \quad \dots (2)$$

この棒は両端自由であるため、棒の全長  $l$  が縦波の 1 波長分の長さと同じときに共振する。このことから、次の式が成り立つ。

$$f_n = c / l \quad \dots (3)$$

**B. 1. 2. 2 ボルト締めランジュバン式振動子の締め付けトルク**

ボルト締めランジュバン式振動子の圧電セラミックスはねじによって締め付けられて与圧がかかっている。ボルト締めランジュバン式振動子に使用する圧電セラミックス (NEC TOKIN 社、AE0203D08) にかける与圧の最大値は圧電セラミックスの発生力 200 N の 50 % である 100 N が、NEC TOKIN によって上限とされている。このことから、圧電セラミックスへの与圧を 100N とし、ねじを締め付けるトルクをねじのトルク導出式によって求めた。トルクを求める式にはねじのリード角  $\alpha$ 、ねじ山の半角  $\beta$  を考慮したものと前二つの角度を考慮せずねじのピッチ  $p$  を考慮する二つの式があり、トルクの計算は各々の式で求めた。ねじの摩擦係数  $\mu$  とし、ねじ座部の摩擦係数  $\mu_n$ 、ねじの有効径  $d_2$  としたとき、ねじのリード角、ねじ山の半角を考慮した式を(4)式に示し、ねじのピッチを考慮する式を(5)式に示す。ねじのリード角、ねじ山の半角を図 4 に示す。

$$T = F \left\{ \frac{d_2}{2} \left( \frac{\mu}{\cos \beta} + \tan \alpha \right) \right\} \quad \dots (4)$$

$$T = \frac{1}{2} F d_2 \frac{p + \mu \pi d_2}{\pi d_2 - \mu p} \quad \dots (5)$$

$d_2$  : ねじの有効径 [mm]、 $\mu$  : 摩擦係数、  
 $\alpha$  : リード角、 $\beta$  : ねじ山の半角、  
 $F$  : ねじにかかる軸力 [N]、 $p$  : ピッチ

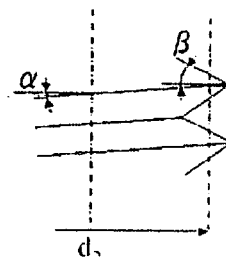


図 4 ねじのリード角とねじ山の半角

ここで、製作するボルト締めランジュバン式振動子に用いるねじは M5 のねじであるため  $d_2=4.48$  [mm]、 $p=0.8$  [mm]、 $\alpha=3.2$  [deg]、 $\beta=30$  [deg] となる。また、ねじにかかる軸力  $F$  は 100 N とし、摩擦係数は一般用機械用油脂を用いたものとして 0.15 で求めた。上記の 2 つの式を用いて締め付けトルクを求めると、(4)式では締め付けトルクは 0.051 [Nm] となり、(5)式では 0.052 [Nm] となった。ここでは、安全のために圧電セラミックスにかかる力が小さくなるように、締め付けトルクを 0.051 Nm とする。

### B. 1. 2. 3 熱および圧力の発生方法

熱と圧力は形状記憶合金を用いて発生させる。形状記憶合金に電流を流し形状記憶合金の電気抵抗によって熱を発生させる。さらに、発生した熱によって形状記憶合金を形状回復させて、圧力を発生させることで生体組織に圧力と熱を与える。形状記憶合金は図 5 のような蛇腹形状を形状記憶させて形状回復前に径方向に縮めるように変形させおくことで、形状回復したときの形状記憶合金が全体的に径方向に拡大、軸方向に縮小し、径方向へ圧力を与える。また、マニピュレータの動作環境を血管内と想定しているため、形状回復温度を体温以上の温度に設定する必要がある。

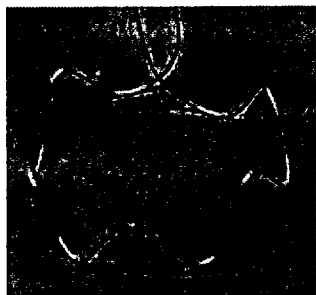


図 5 形状記憶合金の記憶形状

形状記憶合金の組成は主に Ti-Ni 合金に代表される Ti 系のものと Cu-Al-Ni 合金などの Cu 系のものがあり、本研究では、各種製品等に用いられ実用的に優れているといわれている Ti-Ni 合金を用いる。この Ti-Ni 合金の形状回復温度は、形状記憶させる際の熱処理温度によって Ni の割合を変化させて操作する。Ti-Ni 合金における Ni 濃度と変態温度の関係を図 6 に示す。

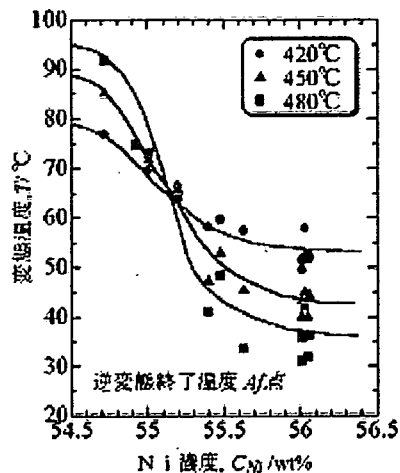


図 6 熱処理における Ni 濃度と変態温度 (形状回復温度) の関係

### B. 2 ボルト締めランジュバン式振動子の振動解析

ボルト締めランジュバン式振動子の設計を行うにあたって、共振周波数を利用して大きな振動振幅を発生する振動子を設計することを考えて、ボルト締めランジュバン式振動子の振動解析を行った。振動解析には汎用有限要素法解析ソフト ANSYS を用いた。

#### B. 2. 1 圧電セラミックスを組み込む位置に関する解析

ボルト締めランジュバン式振動子の圧電セラミックスを組み込む位置の検討にあたって、ボルト締めランジュバン式振動子の振動解析を行った。表 2 に解析条件を示し、図 7 に解析モデルを示す。圧力を図 7 に示す  $2 \times 3$  mm の面積を持つ平行な 2 面に負荷する。ここでは、圧電セラミックスを組み込む位置となる空洞部分を 5~30 mm の位置にずらしたモデルの解析を行った。

表 2 解析条件

解析モデルの特性	メッシュ手法	フリーメッシュ
	要素タイプ	10 節点 4 面体
	節点数	約 20000 点
	材料特性	ヤング率 70.3MPa、 ポアソン比 0.345、 密度 2690kg/m <sup>3</sup>
解析条件 1	解析タイプ	周波数応答解析
	周波数間隔	1kHz
	解析周波数	1~60kHz
解析条件 2	解析タイプ	モーダル解析
	抽出モード数	50
	解析周波数	1kHz~100kHz
境界条件		① 振動子の両端は自由端 ② 圧力 $P = 4.45\sin(2\pi f t)$ [MPa] (f: 周波数、t: 時間)

表 3に解析条件を示し図 8に解析モデルを示す。圧力を図 8に示す2×3mmの面積を持つ平行な2面に負荷する。ここでは、振動子の全長を30~7mmに変更したモデルの解析を行った。

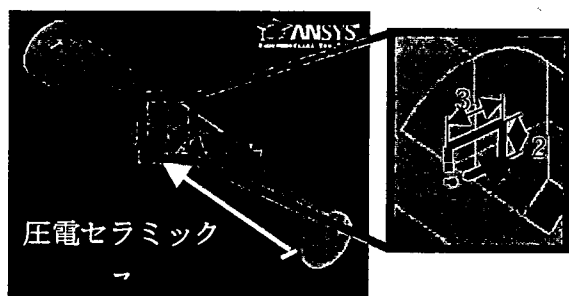


図 7 圧電セラミクス位置の検討の解析モデル

### B. 2. 2 振動子の全長に関する解析

ボルト締めランジュバン式振動子の全長の検討にあたって、ボルト締めランジュバン式振動子の振動解析を行った。

表 3 解析条件

解析モデルの特性	メッシュング手法	フリーメッシュ
	要素タイプ	10 節点 4 面体
	節点数	約 20000 点
	材料特性	ヤング率 70.3MPa、 ポアソン比 0.345、 密度 2690kg/m <sup>3</sup>
解析条件 1	解析タイプ	周波数応答解析
	周波数間隔	1kHz
	解析周波数	1~60kHz
解析条件 2	解析タイプ	モーダル解析
	抽出モード数	50
	解析周波数	1kHz~100kHz
境界条件	① 振動子の両端は自由端 ② 圧力 $P = 4.45\sin(2\pi f t)$ [MPa] (f: 周波数、t: 時間)	

表 4 解析条件

解析モデルの特性	メッシュング手法	フリーメッシュ
	要素タイプ	10 節点 4 面体
	節点数	約 20000 点
	材料特性	ヤング率 70.3MPa、 ポアソン比 0.345、 密度 2690kg/m <sup>3</sup>
解析条件 1	解析タイプ	周波数応答解析
	周波数間隔	1kHz
	解析周波数	1~60kHz
解析条件 2	解析タイプ	モーダル解析
	抽出モード数	50
	解析周波数	1kHz~100kHz
境界条件	① 振動子の両端は自由端 ② 圧力 $P = 4.45\sin(2\pi f t)$ [MPa] (f: 周波数、t: 時間)	

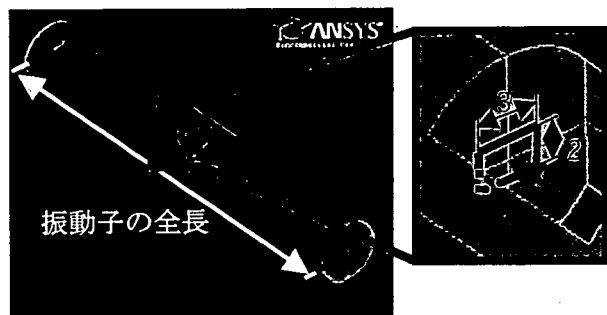


図 8 振動子全長の検討の解析モデル

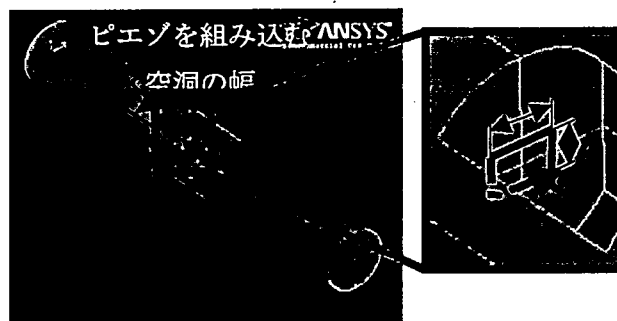


図 9 ピエゾを組み込む空洞の幅の解析モデル

### B. 2. 3 圧電セラミックスを組み込む空洞部分の大きさに関する解析

ボルト締めランジュバン式振動子の圧電セラミックスをはめる空洞部分の大きさの検討にあたって、ボルト締めランジュバン式振動子の振動解析を行った。表 4 に解析条件を示し、図 9 に解析モデルを示す。圧力を図 9 に示す平行な 2×3mm の面積を持つ 2 面に負荷する。ここでは、圧電セラミックスを組み込む空洞部の幅を 3~8mm に変更したモデルを解析した。

### B. 2. 4 製作するボルト締めランジュバン式振動子に関する解析

製作するボルト締めランジュバン式振動子について解析を行った。

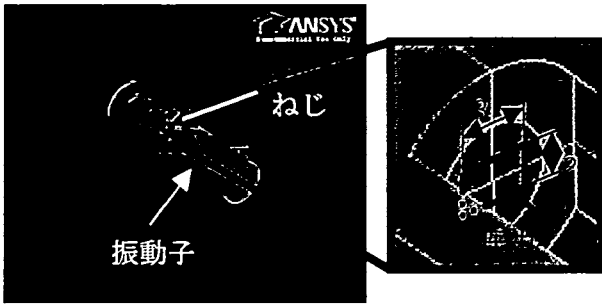
表 5 に解析条件を示し、図 10 に解析モデルを示す。圧力を図 10 に示す  $2 \times 3 \text{mm}$  の面積を持つ平行な 2 面に負荷する。

表 5 解析条件

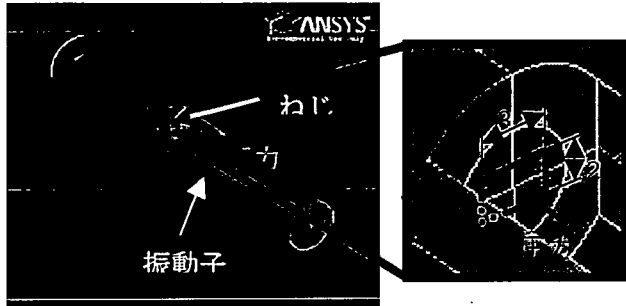
解析モデル の特性	メッシュ 手法	フリーメッシュ
	要素 タイプ	10 節点 4 面体
	節点数	約 20000 点
	材料 特性	振動子部分： ヤング率 70.3MPa、 ポアソン比 0.345、 密度 $2690 \text{kg/m}^3$ ねじ部分： ヤング率 200MPa、 ポアソン比 0.291、 密度 $7860 \text{kg/m}^3$
解析 条件 1	解析 タイプ	周波数応答解析
	周波数 間隔	1kHz
	解析 周波数	1~60kHz
解析 条件 2	解析 タイプ	モーダル解析
	抽出 モード数	50
	解析 周波数	1kHz~100kHz
境界条件		① 振動子の両端は自由端 ② 圧力 $P = 4.45 \sin(2 \pi f t)$ [MPa] (f: 周波数、t: 時間)

表 6 形状記憶合金の仕様

線材の径 [mm]	長さ [mm]	形状回復温度 [°C]	金属組成	Ni 濃度 [at%]
0.5	415	50~60	Ti-Ni 合金	50.4~50.6
1.0	415			



(a) 振動子 type1



(b) 振動子 type2

図 10 解析モデル

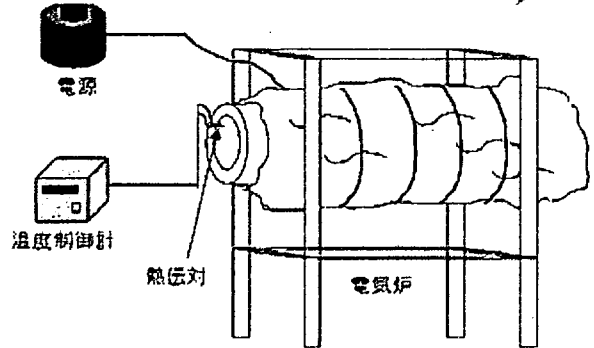


図 11 電気炉

### B. 3 実験装置

#### B. 3. 1 形状記憶合金

使用する形状記憶合金には図 11 に示す電気炉を用いて、次の熱処理<sup>20)</sup>に従って、形状回復温度の調節と形状記憶を行った。熱処理する形状記憶合金は線材であり、表 6 にその寸法と金属組成を示す。また、熱処理後の形状記憶合金を図 14 に示す。

1. 図 12 の鉄製のジグを用いて、形状記憶合金の線材を形状記憶させる形状に図 13 のように固定する。
2. 電気炉を図 11 のように接続する。
3. 電気炉を 500°C まで加熱した後に、炉内にジグに固定した形状記憶合金を入れ断熱材で入り口を閉じる。
4. 500°C で 40 分、400°C、350°C でそれぞれ 2 時間、300°C で 1 時間熱処理を行う。
5. 熱処理終了後、電気炉の電源を切り炉の入り口を開放し、合金を空冷する。

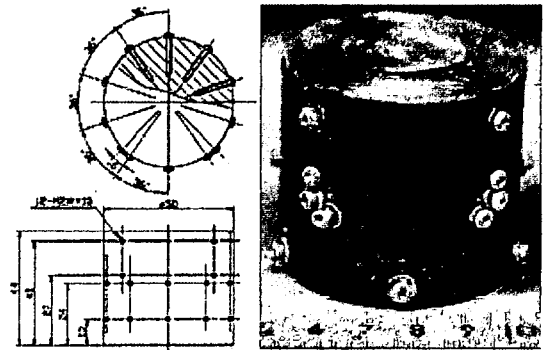


図 12 形状記憶作業用ジグ

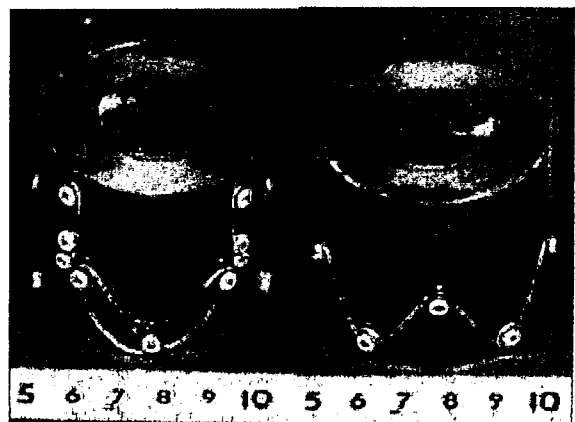
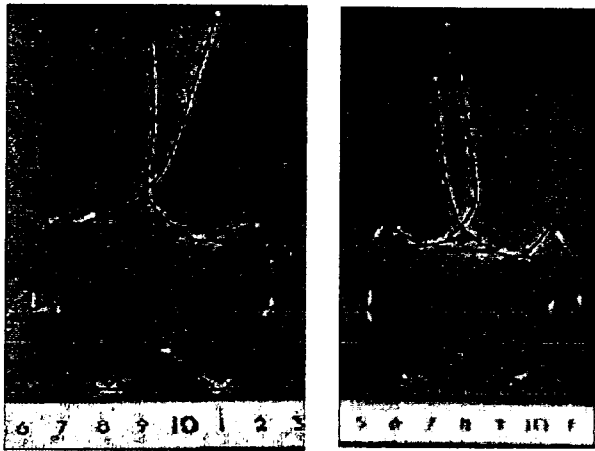


図 13 形状記憶合金をジグに取り付けた様子





(a)  $\phi 0.5\text{mm}$  の形状記憶合金 (b)  $\phi 1.0\text{mm}$  の形状記憶合金

図 14 形状記憶合金の記憶形状

### B. 3. 2 形状記憶合金の通電加熱装置

図 15 に形状記憶合金の通電加熱装置の概略図を示す。形状記憶合金に電流を流したとき発生する温度を計測するための装置を構築した。本装置は、直流電源（菊水電子工業株式会社、PAK35-10A）と形状記憶合金を接続して通電したときに発生する最高温度をサーモグラフィ（NEC 三栄 TH9100ML）によって測定する。また、形状記憶合金は空气中で加熱する。使用する形状記憶合金の仕様を表 7 に示す。また、使用する直流電源とサーモグラフィを図 16、図 17 に示し、それらの仕様を表 8、表 9 に示す。

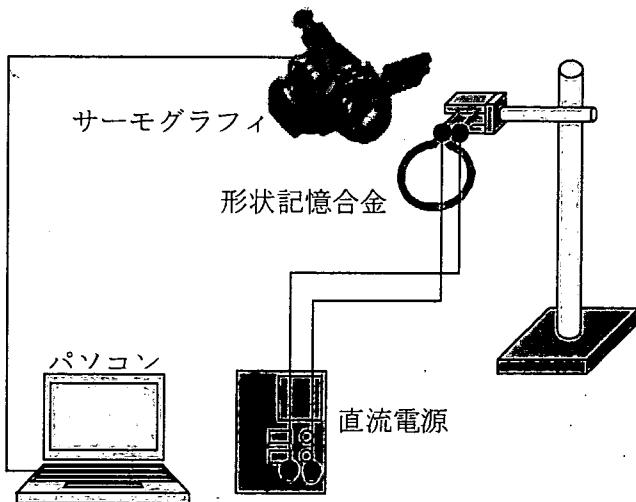


図 15 形状記憶合金への通電加熱装置

表 7 形状記憶合金の仕様

径 [mm]	長さ [mm]	形状回復温度 [°C]	金属組成	Ni 濃度 [at%]
0.5	415	50~60	Ti-Ni 合金	50.4~50.6
1.0	415			

表 8 直流電源の仕様

出力	電圧	0~35 V
	電流	0~10 A
定電圧特性	電源変動	5mV
	負荷変動	5mV
定電流特性	電源変動	5mA
	負荷変動	5mA

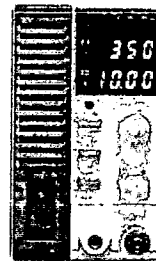


図 16 直流電源

表 9 サーモグラフィの仕様

温度範囲	-20°C~250 °C
最小検知温度差	0.04 °C
測定精度	±2 %
フレームタイム	1/60sec
焦点距離	30 cm 以上
画像データ画素数	320(H)×240(V)



図 17 サーモグラフィ

### B. 3. 3 形状記憶合金の形状回復力計測装置

形状記憶合金の形状回復力計測装置のための予備実験用の装置を構築した。図 18 に予備実験の装置の概略図を示す。本装置は形状回復力計測装置に用いる内径 12.7mm、外径 15.9mm のチューブ (NALGEN、PREMIUM TUBING NON-TOXIC AUTOCLAVABLE LAB/FDA/USP VI GRADE 1/2ID) に断面積  $1 \times 20\text{mm}$  の板で圧力を加えて、チューブ内の圧力を圧力計で計測した。チューブ内は水で満たした。本装置に使用する圧力計 (NEC 三栄株式会社、9E02-P13-2) とストレンアンプ (NEC 三栄株式会社、AS2503)、DAQ デバイス (NATIONAL INSTRUMENTS 社、NI DAQPad-6015) を図 19~図 21 に示し、それらを表 10~表 12 に示す。

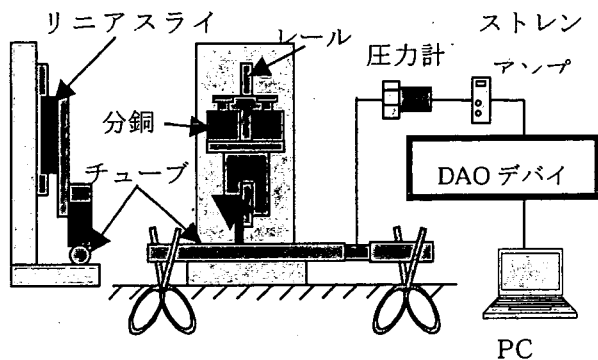


図 18 圧力計測システム

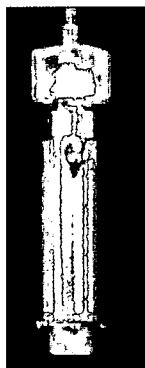


図 19 圧力計

表 10 圧力計の仕様

定格容量	2 kgf/cm <sup>2</sup>
定格出力	1.498 mV/V
非直線性	0.2 %F.S.
ヒステリシス	0.2 %F.S.
許容過負荷	150% F.S.

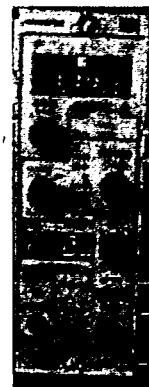


図 20 ストレンアンプ

表 11 ストレンアンプの仕様

チャンネル数	1ch/ユニット
ブリッジ抵抗	60~1000Ω
ゲージ率	2.00
ブリッジ電源	DC2V、3V、5V、9V、10V
非直線性	±0.01%
周波数特性	DC~500Hz
出力	OUTPUT1 ±10V ±5mA
	OUTPUT2 ±10V ±10mA
デジタル表示	4桁

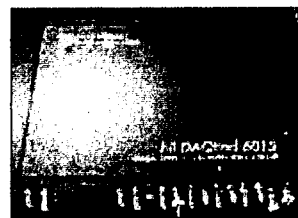


図 21 NI DAQPad-6015

表 12 NI DAQPad-6015 の仕様

アナログ入力	16ch
アナログ入力 分解能	16 bit
アナログ出力	2ch
出力分解能	16 bit
最大出力レート	300 Sa/s

形状記憶合金の形状回復力を測定するための計測装置を構築した。図 2.3.3.5 に形状回復力計測装置の概略図を示す。本装置は 4 本のチューブと 1 つの圧力変換器を三方活栓で連結したものを 2 組使用しており、1 つの圧力計で 2 本のチューブの内圧の変化の合計を計測した。チューブ内は水で満たした。本装置には圧力計 (NEC 三栄株式会社、9E02-P13-2) とストレンアンプ (NEC 三栄株式会社、AS2503)、DAQ デバイス (NATIONAL INSTRUMENTS 社、NI DAQPad-6015)、直流電源 (菊水電子工業株式会社、PAK35-10A) を使用した。

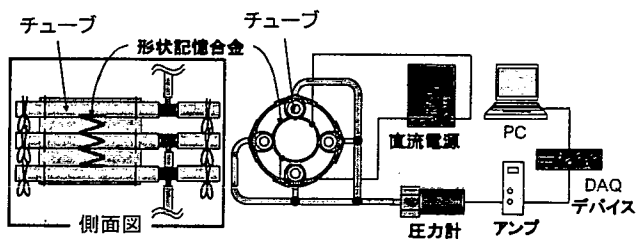
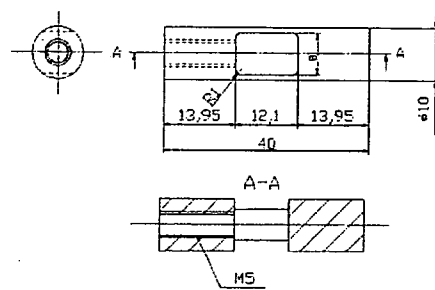


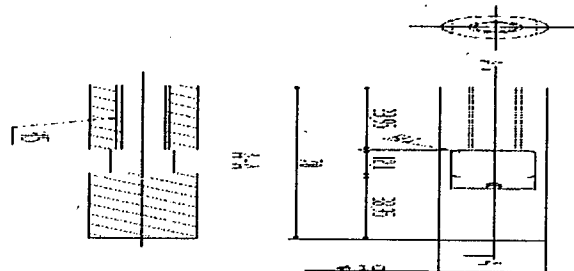
図 22 圧力計測装置の概略

### B. 3. 4 製作したボルト締めランジュバン式振動子

製作した 2 つのボルト締めランジュバン式振動子の寸法を図 23 示す。図 24 のように、振動子 type1 には長さ 15mm の M5 の鉄製のねじで圧電セラミックス (NEC TOKIN 社、AE0203D08) をトルクドライバ (東日製作所、RTD15CN) でねじを締め付ける。図 25 のように、振動子 type2 には、30mm の M5 の鉄製のねじで圧電セラミックス (NEC TOKIN 社、AE0203D08) を締め付ける。そのとき、ねじと圧電セラミックスの間には図 26 に示す 2×6×6 のアルミ板をスペーサとして挟み、0.051 Nm のトルクでねじを締め付けて、図 27 のように組み立てた。ボルト締めランジュバン式振動子に組み込む圧電セラミックス (NEC TOKIN 社、AE0203D08) を図 28 に示し、その仕様を表 13 に示す。また、使用したトルクドライバを図 29 に示し、トルクドライバの仕様を表 14 に示す。



(a) 振動子 type1 の寸法



(b) 振動子 type2 の寸法

図 23 製作したボルト締めランジュバン式振動子の寸法

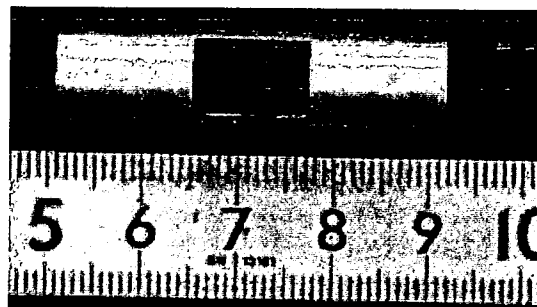


図 24 製作した振動子 type1

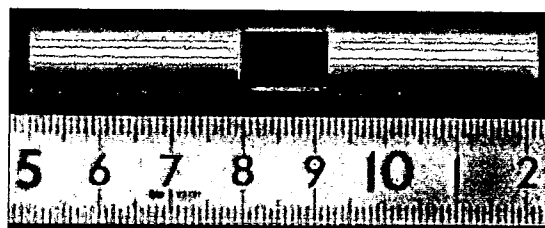
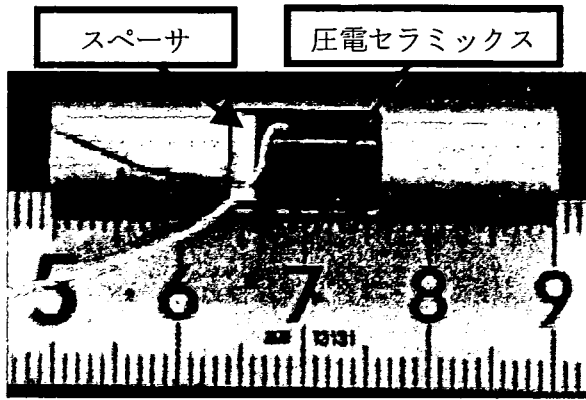


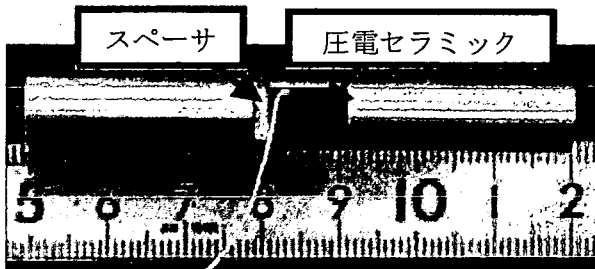
図 25 製作した振動子 type2



図 26 スペーサ



(a) 組み立て後の振動子 type1



(b) 組み立て後の振動

図 27 組み立て後の振動子



図 28 圧電セラミックス

表 13 圧電セラミックスの仕様

変位量 (最大駆動電圧時)	9.1±1.5 μm
変位量 (推奨駆動電圧時)	6.1±1.5 μm
発生力	200 N
共振周波数	138 kHz
ヤング率	4.4×10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup>
幅×高さ×長さ	2×3×10 mm

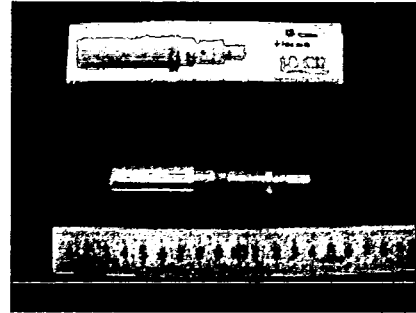


図 29 トルクドライバ

表 14 トルクドライバの仕様

トルク調整範囲	0.2~1.5 Nm
トルクの最小調整量	0.01 Nm
設定トルク精度	±3%

### B. 3. 5 ボルト締めランジュバン式振動子の振動振幅計測装置

製作したボルト締めランジュバン式振動子の振動振幅を計測するための計測装置を構築した。図 30 に振動振幅計測装置の概略図を示す。ボルト締めランジュバン式振動子を糸でつるすことで、振動子が自由端振動するようにした。静電容量変位計（岩崎通信機株式会社、ST-3512/プローブ ST-0535A）を用いて、ボルト締めランジュバン式振動子の端面の中心の軸方向の振動振幅を計測した。

圧電セラミックスに電圧を負荷するために使用する直流電源（菊水電子工業株式会社 PMC70-1A）と振動ドライバの外観と仕様を図 31、図 32、表 15、表 16 に示す。また、静電容量変位計が出力した電圧の変化の計測に使用するオシロスコープ（アジレントテクノロジー株式会社 54641A）を図 33 に示し、その仕様を表 17 に示す。振動子の振動振幅を計測するために使用する静電容量変位計を図 34 に示し、仕様を表 18 に示す。