

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/m2

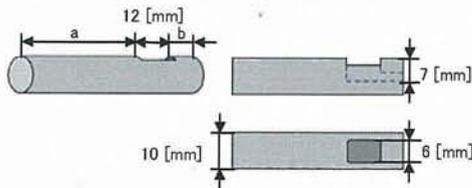


図 B.27 ランジュバン式振動子の全体図と上面図、側面図

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。

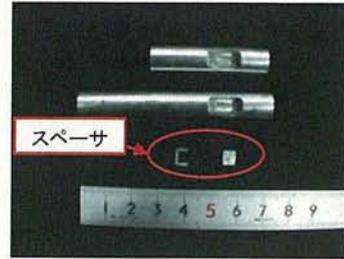


図 B.28 ランジュバン式振動子の概観図



図 B.29 計算での後端長さの変更

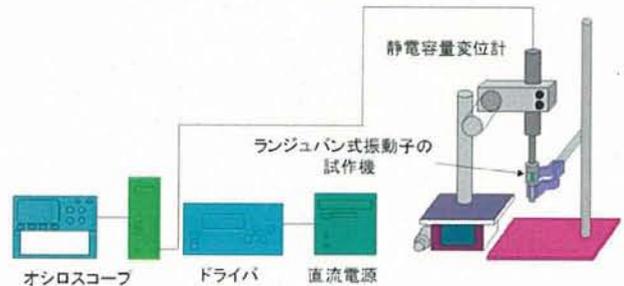


図 B.30 実験装置の概略図

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

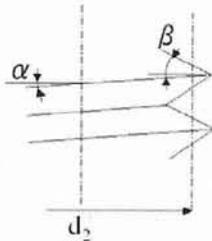
ランジュバン式振動子の piezo素子の固定にはネジを用いているが、このネジの締め付け具合で振動振幅は変化するものと考えられる。ネジの締め付けトルクがどのように振動振幅に影響するかを調べるためにネジの締め付けトルクを変えて振動振幅計測実験を行った。

piezo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 α 、ネジ山の半角 β 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 μ とし、ネジ座部の摩擦係数 μ_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

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

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

d_2 : ネジの有効径 [mm] μ : 摩擦係数 α : リード角
 β : ネジ山の半角 F : ネジにかかる軸力 [N] P : ピッチ

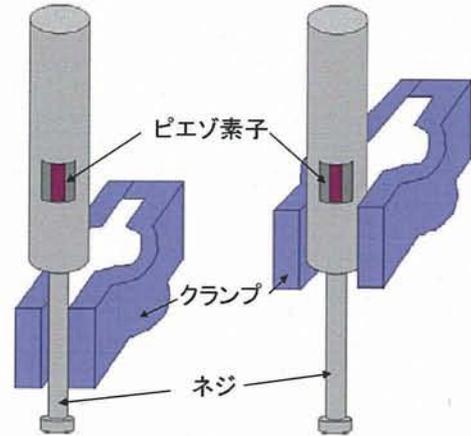


図B.31 ネジのリード角とネジ山の半角

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] $\alpha=3.2^\circ$ $\beta=30^\circ$ 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、ピエゾ素子を押さ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。

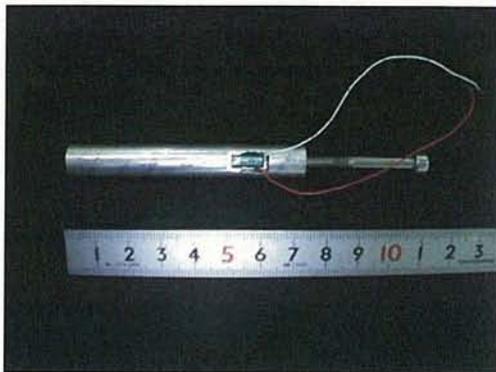


図 B.33 ランジュバン式振動子の試作機(ネジ長さ 50 [mm])



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

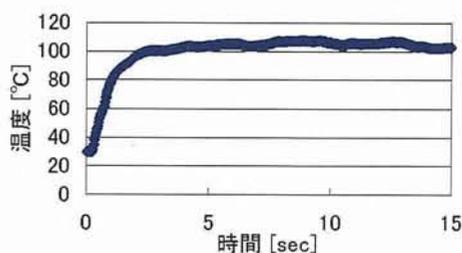


図 C.1 形状記憶合金通電加熱時の温度推移

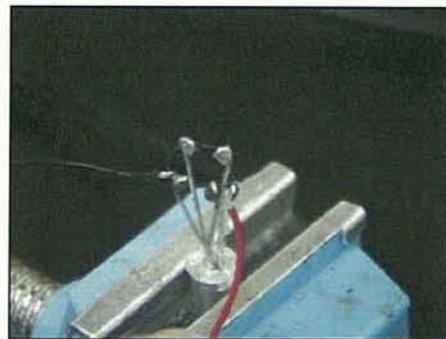


図 C.2 アームの展開の様子

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もとの弾性力が強かったため, たわみ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] でたわみ量小時の 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ことが分かる。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。

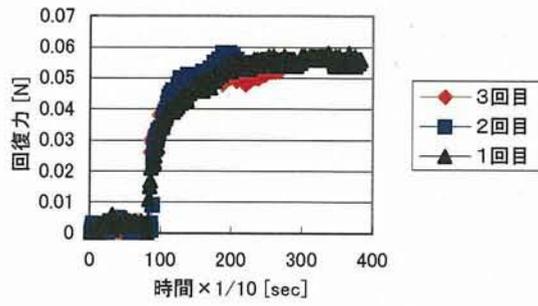


図 C.3 φ0.2 [mm] たわみ量微小時の形状回復力

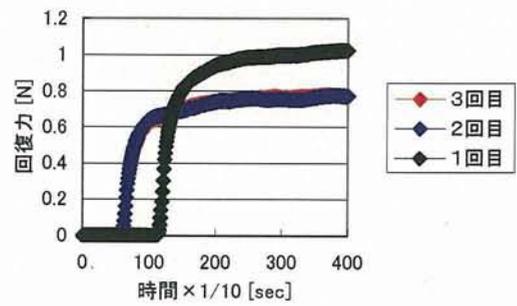


図 C.7 φ0.3 [mm] たわみ量小時の形状回復力

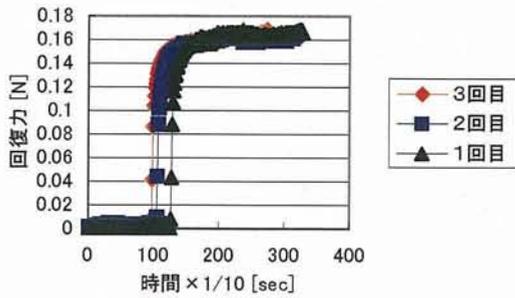


図 C.4 φ0.2 [mm] たわみ量小時の形状回復力

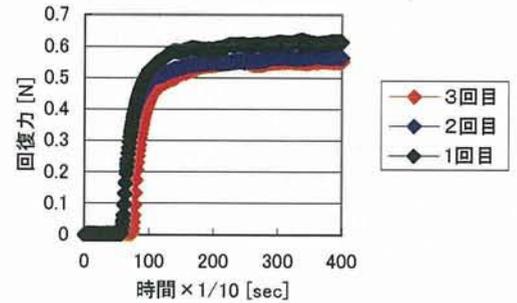


図 C.8 φ0.3 [mm] たわみ量最大時の形状回復力

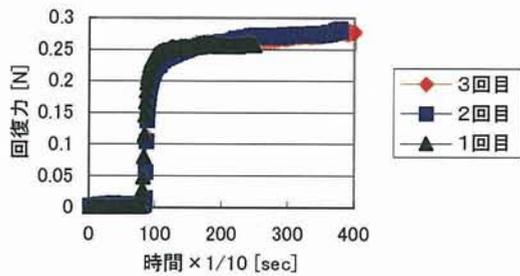


図 C.5 φ0.2 [mm] たわみ量微小時の形状回復力

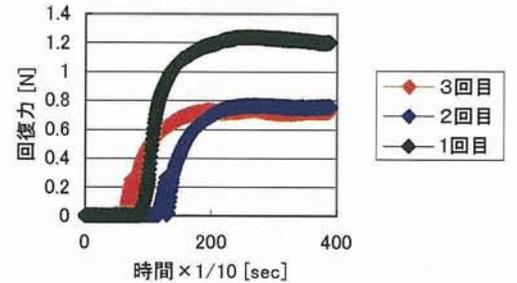


図 C.9 φ0.5 [mm] たわみ量最大時の形状回復力

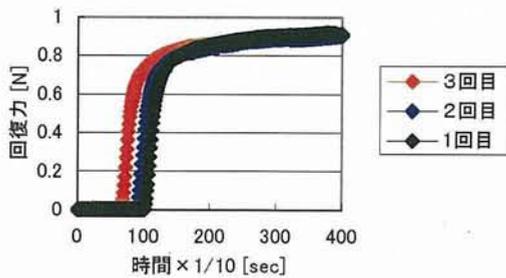


図 C.6 φ0.3 [mm] たわみ量微小時の形状回復力

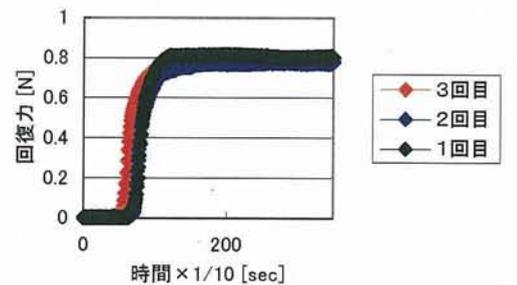


図 C.10 φ0.5 [mm] たわみ量小時の形状回復力

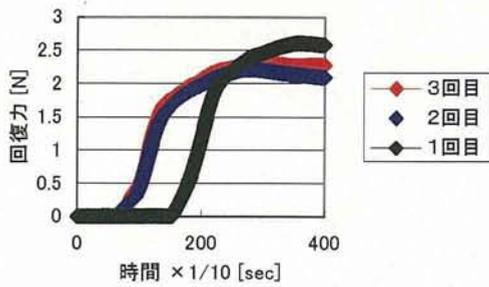


図 C.11 φ0.8 [mm] たわみ量最大時の形状回復力

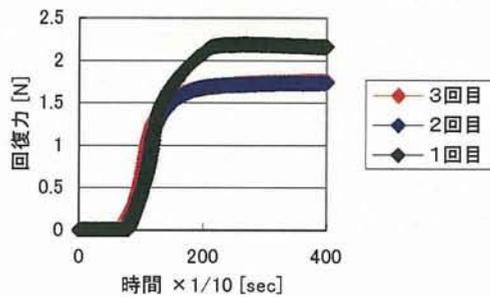


図 C.12 φ0.8 [mm] たわみ量小時の形状回復力

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 [Ω]
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]のランジュバン式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。

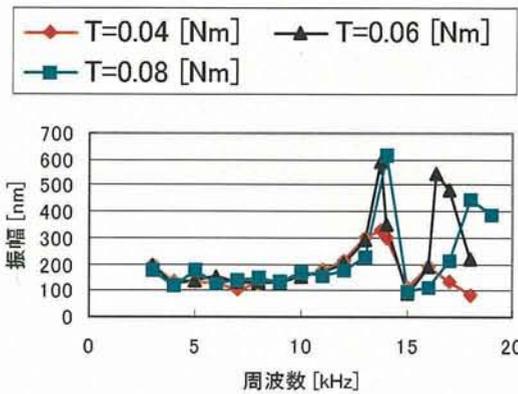


図 C.13 先端 20 [mm] 後端 10 [mm]のランジュバン式振動子のトルク変更時の振幅

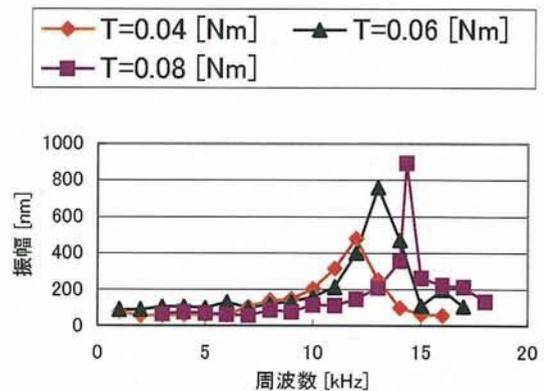


図 C.14 先端 47 [mm] 後端 11 [mm]のランジュバン式振動子のトルク変更時の振幅

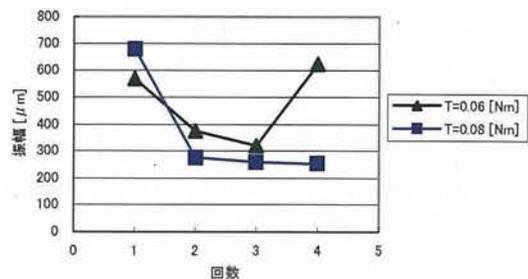


図 C.15 ランジュバン式振動子の振動振幅の再現性

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。

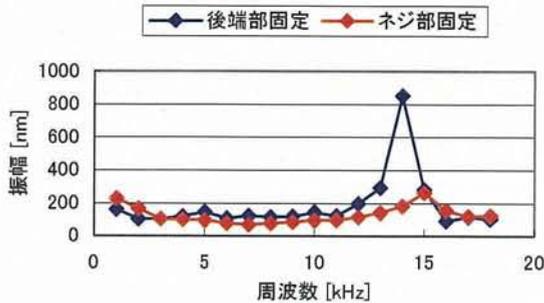


図 C.16 クランプ固定位置変更におけるランジュバン式振動子の試作機の振動振幅

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 求めた実験結果と計算値の比較を図 C.20 に示す。

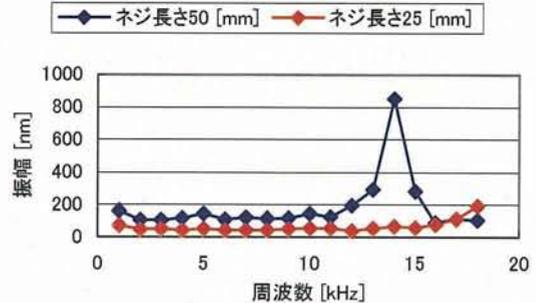


図 C.19 ランジュバン式振動子の試作機のネジの長さ変更における振幅

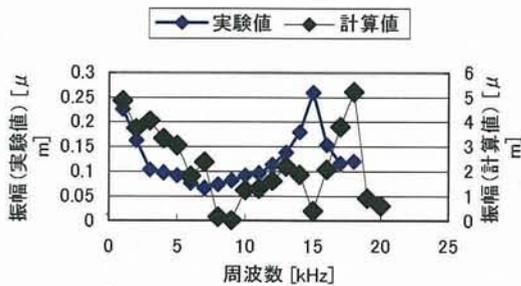


図 C.17 先端 47 [mm] 後端 11 [mm] ネジ部固定時の計算値と実験値

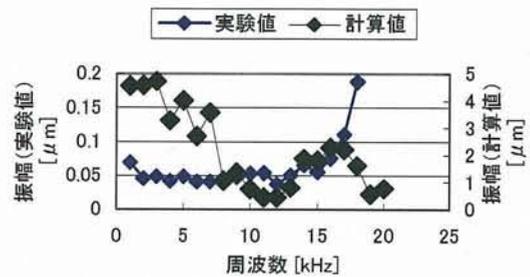


図 C.20 先端 47 [mm] 後端 11 [mm] ネジ長さ 25 [mm]の時の計算値と実験値

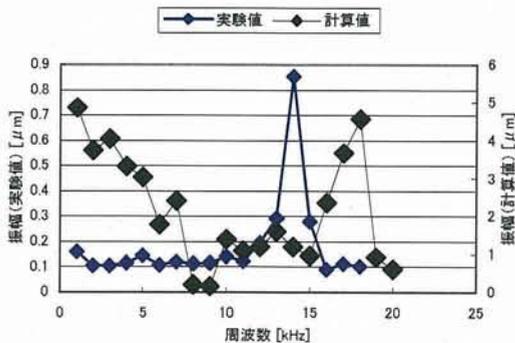


図 C.18 先端 47 [mm] 後端 11 [mm] 後端部固定時の計算値と実験値

C. 3. 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。

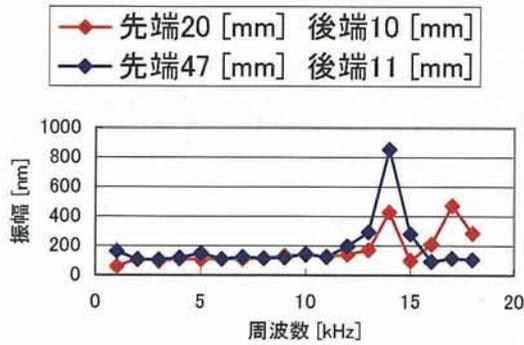


図 C.21 各ランジュバン式振動子の試作機における周波数応答

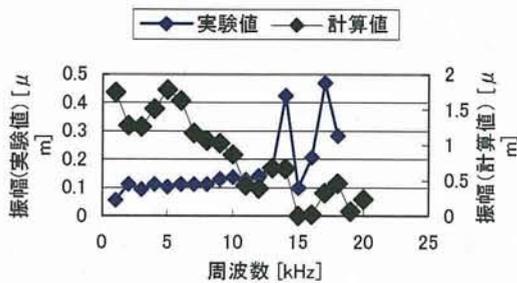


図 C.22 先端 20 [mm] 後端 10 [mm] ネジ長さ 50 [mm]の時の計算値と実験

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ことが分かる。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点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く。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て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ピエゾ素子を使用を検討し、マニピュレータへの組み込みに際し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的设计、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 [μ m]という結果を得た。融着条件が 0.4 [μ 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。

参考文献:

- [1] 国立循環器病センターホームページ:

- <http://www.ncvc.go.jp/res/resj.html>
- [2] 胸部大動脈内ステントグラフト内挿術 北里大学院:
<http://www.khp.kitasato-u.ac.jp/ska/ShinzouK/stntgraft.htm>
- [3] ステントグラフト内挿術:
<http://www.tokyo-med.ac.jp/mit/05.html>
- [4] 大動脈瘤に対する血管内治療の現況と展望:
<http://www.daiichihosp.jp/ronbun/tenbou41/tenbou41.html>
- [5] 日本人工臓器学会編 人工臓器は、いま、はる書房、2003
- [6] 樋上 哲哉:超音波メスによる新しい内胸動脈採取法、金芳堂(2004)
- [7] 能田高行:平成 17 年度修士学位論文 超音波による循環器系治療支援に関する基礎的研究
- [8] 舟木保熙康:形状記憶合金 産業図書 (1984)
- [9] 形状記憶合金とばね製品 株式会社 アクトメント <http://www.actment.com/>
- [10] 藤島啓:ポピュラーサイエンス ピエゾセラミックス、裳華房 (1993)
- [11] 黒木剛司郎:材料力学第 3 版 森北出版 (1999)
- [12] 入江敏博:詳解 工業力学 理工学社 (1983)
- [13] 吉見製作所
<http://www.yoshimi-inc.co.jp/newpage10.htm>

2. 振動・熱・圧力の複合エネルギー利用による生体組織接着機序に関する検討

研究要旨 本研究で提案する、振動・熱・圧力の複合低エネルギー負荷によって生体と接着するステントの開発のためには、接着メカニズムを詳細に解析する必要がある。本研究では、生体組織同士の接着性について、基礎的な検討を行うことを目的として、接着現象の観察を行うための装置を開発し、生体組織同士の接着条件について検討した。その結果、接着時間が長いほど接合強度が高く、温度が高すぎない範囲では、接着温度が高いほど接合強度が高い事があきらかとなった。また、本接着方法を用いたデバイスを設計・試作した。

A. 研究目的

超音波メス、電気メス等の高エネルギーを用いた生体組織接着が試みられているが、生体組織の損傷が問題となっている。そこで、本研究では、低エネルギーの振動・熱・圧力を複合させて生体組織に与えることで、低損傷で接合する新しい技術を提案する。基礎的研究として、豚血管片に振動・熱・圧力を与える接合実験を行い、引張試験によりその接合強さを評価した。

また、この新技术を用いた生体組織接着デバイスのプロトタイプ的设计・製作を行い、その特性試験を行った。

B. 研究方法

B. 1 装置

B. 1. 1 振動・熱・圧力の複合低エネルギー利用による接合実験装置

新たに開発した接合実験装置の概略図を図 B.1 に示す。本装置は接合対象物に振動と熱と圧力を同時に与えることができる構造とした。接合対象物の下からピエゾ素子を用いて振動を与え、接合対象物の上からセラミックヒータを採用した特製電気こてを用いて熱を与える。この特製こてのこて先は各辺 8 [mm] とした立方体の角を押し付ける角型と押し付け面積を 0.5 [mm] × 8 [mm] とした平面型の 2 種類を用意した。さらに、この特製こての取り付け部にリニアスライダ機構を採用することで直動運動させ、ピエゾ素子との間に接合対象物を挟むことで一定荷重を与えることができる構造とした。また、荷重変換器をこて先の直動運動方向に取り付け、荷重を計測できるようにした。さらに静電容量計を用いてピエゾ素子の振動振幅を計測し、サーモグラフィを用いてこて先の温度を計測するものである。サーモグラフィの仕様を表 B.1 に、レンズ仕様を表 B.2 に示す。

B. 1. 2 生体組織融着デバイス

開発した生体組織融着デバイスの概要を図 B.2、図 B.3 に示す。本装置は、振動・熱・圧力の

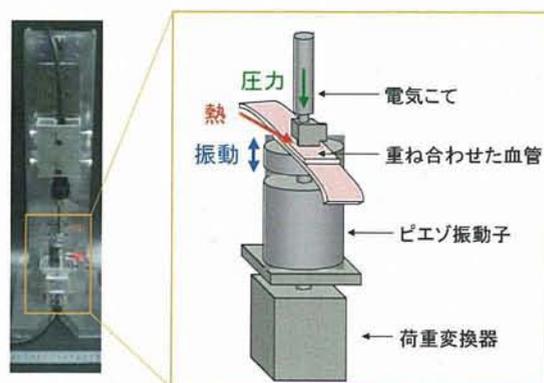


図 B.1 振動・熱・圧力の複合低エネルギー利用による接合実験装置

表 B.1 サーモグラフィ仕様

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

表 B.2 95 μm 近接拡大レンズ仕様

最小分解能	95 μm
焦点深度	±0.2mm

複合低エネルギーを、デバイス先端において、挟まれた試料に対し与えることができるもので、生体組織をデバイス先端で挟んで接合するものである。振動エネルギーは把持部に埋め込まれたランジュバン式ピエゾ振動子の振動波をデバイス先端に伝えることによって与え

る。熱エネルギーは温度制御可能なセラミックヒータの加熱により与え、圧力エネルギーは操作者の把持力によって与える。



図 B.2 生体組織融着デバイス概要

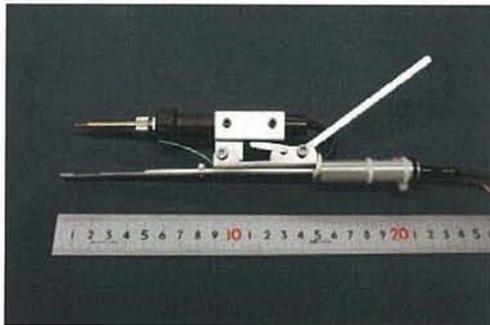


図 B.3 製作した生体融着デバイス

B. 1. 3 ピエゾ素子

開発した振動・熱・圧力の複合低エネルギー利用による接合実験装置および生体組織融着デバイスにおいて、振動を付加する装置として、ピエゾ振動子をケースに封入したオリジナルの振動子を開発した。ピエゾ振動子には P-845.10 (Physik Instrumente 社) を用いた。ピエゾ素子の仕様を表 B.3 に示す。

表 B.3 ピエゾ素子仕様

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	200N
共振周波数	138kHz
ヤング率	4.4×10 ¹⁰ N/m ²

B. 1. 4 引張試験機

血管および血管同士の接着において、引張強さを評価するため、引張試験機を製作した。製作した引張試験機の概略図を図 B.4 に示す。DAQ デバイス PCI-6251 を用い、LabVIEW ソフトウェアで作成したプログラムにより、アクチュエータの移動距離と荷重を自動的に

計測する。仕様を表 B.4 に示す。

選定したアクチュエータの仕様を表 B.5 に示す。血管を引張るため、ステッピングモータにボールネジを組み込んだアクチュエータ (オリエンタルモータ製: DRL28PB1G-03) を選定した。ボールネジの先端にリニアガイドが取り付けられており、モータを駆動させることにより、ガイドが直動運動する。

血管に引張を与えたときの荷重を測定するため、超音波振動子と圧装置で用いた荷重荷重変換器 (NEC 三栄製: T1) を選定した。

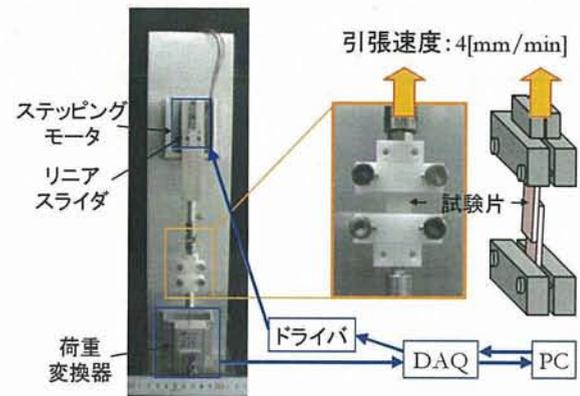


図 B.4 引張試験機 概略図

表 B.4 DAQPad-6051 仕様

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

表 B.5 アクチュエータ仕様

最大速度	24mm/s
位置決め精度	±0.02mm
分解能	0.002mm
リード	1mm
ストローク	30mm
最大可搬質量 (水平方向)	1.0kg
最大可搬質量 (垂直方向)	1.5kg

B. 2 実験方法

B. 2. 1 振動・熱・圧力の複合低エネルギー利用による接合実験

振動・熱・圧力の複合低エネルギー利用による接合実験装置を用いて、血管の接合実験を行った。接合条件と接合強さの関係を確かめるため、豚の大動脈を用い、血管同士の接合を行った。血管は豚の大動脈を使用し、

軸方向に 35 [mm] , 円周方向に 5 [mm] の短冊形試料を切り出した (図 B.5). 振動周波数, 振動振幅, 接合温度, 接合時間, 押付力を変化させながら, 様々な条件下で接合実験を行った.

次に, 接合血管の接合強さを調べるため, 製作した血管用引張試験機を用いて, 引張試験を行った. 引張方向は試料の長辺方向, 引張速度は, 4 [mm/min]とした.

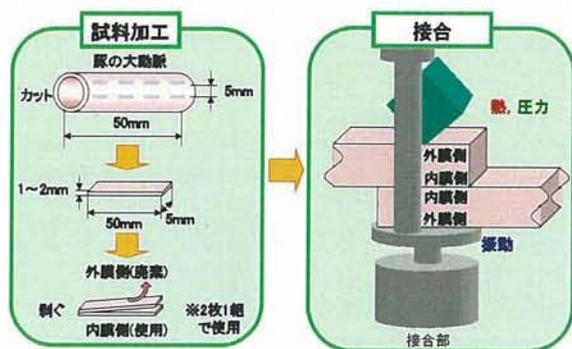


図 B.5 試料の加工方法

B. 2. 2 デバイス性能計測実験

開発したデバイスの振動・熱の負荷性能を計測した. 振動は高速度ビデオカメラを用いて計測した. 振動装置先端部を 32000fps で撮影した画像から, 画像処理により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 0.103 $\mu\text{m}/\text{pix}$ である.

デバイス先端付近の温度は PID 制御されている. 生体組織接合時のデバイス先端での温度変化を調べるため, こて温度が設定温度に到達後に, こて先端を振動子側先端に接触させた場合の温度変化を計測した. 温度はこて先端に取り付けた熱電対を用いて計測した.

C 実験結果

C. 1 温度, 圧力負荷とナノ振動により接着させた血管同士の接着強度評価実験結果

振動周波数 12 [kHz], 振動振幅 2 [μm], 接合温度 110 [$^{\circ}\text{C}$], 押付力 5 [N] において, 接合時間を 30~120 [sec] まで変化させた場合の実験結果を図 C.1 に示す. また, 振動周波数 12 [kHz], 振動振幅 10 [μm], 接合時間 120 [sec], 押付力 4 [N] において接合温度を 50~110 [$^{\circ}\text{C}$] まで変化させた場合の実験結果を図 C.2 に示す. 図 C.1 より, 接合時間を長くすると接合強さが大きくなる傾向を確認した. また, 図 C.2 より, 接合温度を高くすると接合強さが大きくなることを確認した.

この他の実験条件と結果の一覧を表 C.1 に示す.

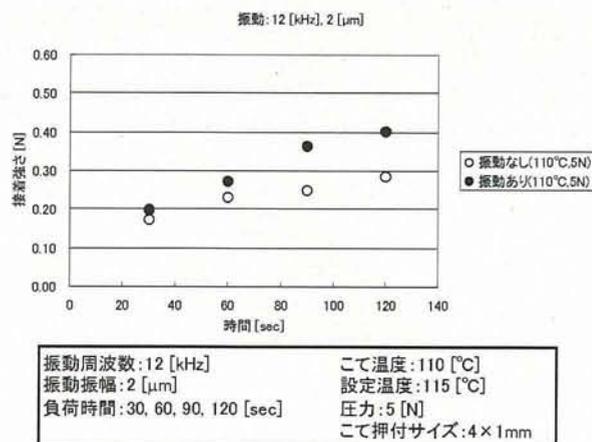


図 C.1 接合時間とと接合強度の関係

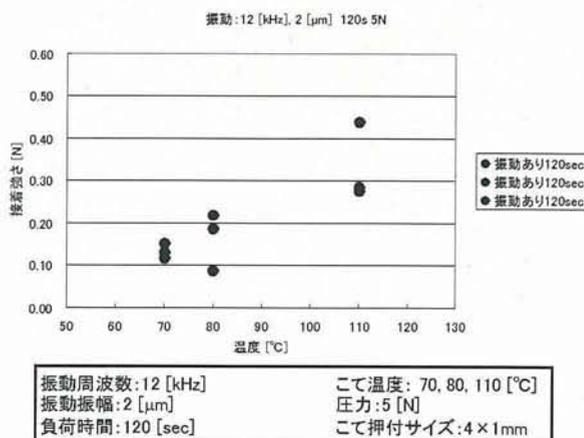
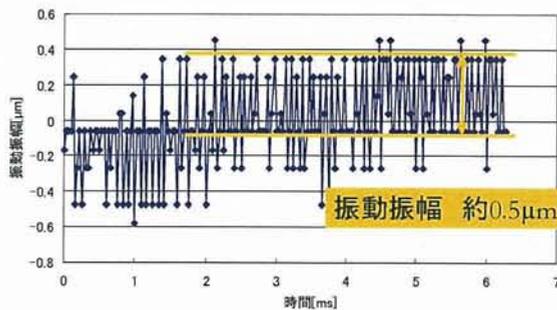


図 C.2 接合時間とと接合強度の関係

C. 2 デバイス性能計測実験結果

振動周波数 12kHz, 駆動電圧 40V, デバイスレバーを手で握ることによりデバイス先端に圧力をかけた場合の振動振幅計測結果を図 C.3 に示す。デバイス先端では、約 0.5 μm の振動振幅で振動していることを確認した。

図 C.4 にそれぞれの設定温度における温度変化を示す。こて先端を振動子側先端に接触させた時刻を 0 とした。全ての設定温度において、温度変化は 5 度以内であり、15 秒以内で設定温度に戻ることがわかった。



振動周波数 12kHz 撮影速度 32000fps
 駆動電圧 40V 解像度 0.103 $\mu\text{m}/\text{pix}$

図 C.3 生体組織融着デバイスの振動振幅

各設定温度に設定後、
 デバイス先端を接触させた場合

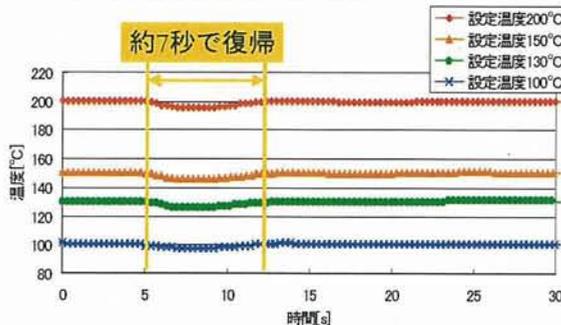


図 C.4 温度応答特性

D 考察

D. 1 温度、圧力負荷と超音波以下のナノ振動負荷による接着実験

振動・熱・圧力の複合低エネルギー利用による接合条件と接合強さの関係を確かめるため、豚の大動脈を用い、血管同士の接合を行った。その結果、接合時間を長くすると接合強さが大きくなり、また、接合温度を高くすると接合強さが大きくなることを確認した。しかしながら、接合時間・接合温度だけでなく、ナノ振動の振動周波数および振動振幅、押し付け荷重など、関

与するパラメータが多いため、最適な接着の条件を明らかにするためには、より詳細な実験が必要であると考える。

D. 2 デバイス性能について

開発したデバイスの振動・加熱の付加性能を計測した。デバイス先端では、約 0.5 μm の振動振幅で振動していることを確認した。また、デバイス先端部において、温度制御が可能であることを確認した。よって、本装置は、本研究で提案する、振動・熱・圧力の複合低エネルギーによる接着可能な性能を有していると考えられる。今後、本デバイスを用いた接着実験を行い、デバイス性能の検証を行う。

E まとめ

ナノ振動によって生体と接着するステントの開発のためには、接着メカニズムを詳細に解析する必要がある。本研究では、生体組織同士の接着性について、基礎的な検討を行うことを目的として、振動エネルギーと熱エネルギー、圧力による接着現象の観察を行い、以下のことが明らかとなった。

- ・ 振動・熱・圧力の複合低エネルギー負荷により、生体組織どうしの接合が可能であった。
- ・ 接合時間が長いほど、また、負荷温度が高いほど（110 度以下では）、接合強度が高くなることが明らかとなった。

本研究成果を利用することにより、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の実現が可能となると考える。

F. 研究発表

2. 学会発表

- (1) 加藤綾子, 増澤徹, 樋上哲哉, 岸田晶夫, 佐藤裕一郎, 超音波メス制御による手術支援, 第 4 回日本生体医工学会大会, 400, 2006
- (2) 増澤徹, 加藤綾子, 草間淳, 木村孝之, 岸田晶夫, 木村剛, 柴田隆行, ナノ振動と細胞機能制御, 第 4 回日本生体医工学会大会, 556, 2006
- (3) Ayako Katoh, Toru Masuzawa, Optimized design for a hybrid magnetic bearing for the artificial heart, Tenth International Symposium on Magnetic Bearings, 187-186, 2006
- (4) 中山直久, 増澤徹, 加藤綾子, 鈴木健一, 人工心臓用磁気軸受の最適設計, 茨城講演会講演論文集, 3-36, 2006
- (5) 橋本健児, 草間淳, 加藤綾子, 岸田晶夫, 木村剛, 木村孝之, 増澤徹, ナノ振動が細胞に与える影響, 第 4

回生活支援工学系学会連合大会講演予稿集, 85, 2006

(6) 濱口崇志, 加藤綾子, 岸田晶夫, 木村剛, 樋上哲哉, 増澤徹, 振動エネルギー利用による生体接合技術の開発, 第4回生活支援工学系学会連合大会講演予稿集, 78, 2006

(7) 濱口崇志, 加藤綾子, 尾関和秀, 岸田晶夫, 木村剛, 樋上哲哉, 増澤徹, 振動エネルギー利用による生体接合技術の開発, 人工臓器, 35, 2, S-101, 2006

(8) 伊藤由樹子, 木村剛, 南広祐, 加藤綾子, 増澤徹, 岸田晶夫, 細胞分化への機械的微小振動刺激の影響に関する検討, 第9回組織工学会

(9) 伊藤由樹子, 木村剛, 南広祐, 加藤綾子, 増澤徹, 岸田晶夫, 機械的微小振動刺激の細胞分化に及ぼす影響に関する検討

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得 なし
2. 実用新案登録 なし
3. その他 なし

表 C.1 接着実験結果一覧

周波数 [kHz]	振動 振幅 [μm]	温度 [$^{\circ}\text{C}$]	荷重 [N]	時間 [sec]	アルミ ホイル	接着 強さ [N]	単位長さ あたりの 接着強さ [N/mm]	こて先 形状	単位長さあた りの接着強さ [N/mm]			実験 No.	ID
									0.00	0.20	0.40		
7		110	1.9	180	-	0.74	0.09	角				200606_1_	11
7		110	1.6	180	-	0.55	0.07	角				200606_1_	12
7		110	1.7	180	-	0.32	0.04	角				200606_1_	13
12	0.4	110	4.6	120	-	0.59	0.12	角				200602_2_	27
12	10	110	2.6	180	-	0.33	0.07	角				200602_2_	21
-	-	110	3.2	180	-	0.00	0.00	角				200602_2_	25
12	10	50	4.5	120	-	0.00	0.00	角				200602_2_	19
12	10	70	4.3	120	-	0.20	0.04	角				200602_2_	18
-	-	70	5.1	120	-	0.00	0.00	角				200602_2_	24
-	-	80	4	180	-	0.18	0.04	角				200609_1_	10
-	-	80	4	180	-	0.20	0.04	角				200609_1_	11
-	-	80	4	180	-	0.28	0.06	角				200609_1_	12
12	10	90	4.3	120	-	0.36	0.07	角				200602_2_	17
12	10	90	4.2	240	-	0.57	0.11	角				200602_2_	14
-	-	110	4	10	-	0.00	0.00	角				200609_2_	13
-	-	110	4	20	-	0.00	0.00	角				200609_2_	15
-	-	110	4	20	-	0.00	0.00	角				200609_2_	16
-	-	110	4	30	-	0.04	0.01	角				200609_2_	12
-	-	110	4	30	-	0.00	0.00	角				200609_2_	14
-	-	110	4	30	-	0.00	0.00	角				200609_2_	17
-	-	110	4	30	-	0.00	0.00	角				200609_2_	18
12	2.4	110	4.60-5.04	60	-	0.00	0.00	角				200603_1_	1
12	2.4	110	4.34-4.75	60	-	0.00	0.00	角				200603_1_	3
12	2.4	110	4.80-5.52	60	-	0.17	0.02	角				200603_1_	4
12	2.4	110	4.61-4.98	60	-	0.27	0.03	角				200603_1_	19
12	10	110	4.2	60	-	0.39	0.08	角				200602_2_	13
-	-	110	4	60	-	0.16	0.03	角				200609_2_	11
7		110	6.1	120	-	0.00	0.00	角				200602_2_	11
12	2.4	110	4.81-5.14	120	-	0.30	0.04	角				200603_1_	5
12	2.4	110	4.58-5.01	120	-	1.12	0.14	角				200603_1_	6
12	2.4	110	3.94-5.12	120	-	0.00	0.00	角				200603_1_	7
12	2.5	110	4	120	-	0.70	0.09	角				200603_2_	22
12	2.5	110	4	120	-	0.79	0.10	角				200603_2_	23
12	10	110	5.4	120	-	0.98	0.20	角				200602_2_	12
15		110	3.8	120	-	0.14	0.03	角				200602_2_	4
-	-	110	4.3	120	-	0.00	0.00	角				200602_2_	22
-	-	110	4	120	-	0.23	0.05	角				200609_2_	1
-	-	110	4	120	-	0.76	0.15	角				200609_2_	4
-	-	110	4	120	-	1.11	0.22	角				200609_2_	7
7		110	4.5	180	-	1.00	0.12	角				200606_1_	1
7		110	4.7	180	-	0.16	0.02	角				200606_1_	2
7		110	5.0	180	-	1.19	0.15	角				200606_1_	3
7		110	4.2	180	-	0.24	0.05	角				200602_2_	10

周波数 [kHz]	振動 振幅 [μm]	温度 [°C]	荷重 [N]	時間 [sec]	アルミ ホイル	接着 強さ [N]	単位長さ あたりの 接着強さ [N/mm]	こて先 形状	単位長さあた りの接着強さ [N/mm]			実験 No.	ID
									0.00	0.20	0.40		
9		110	4.6	180	-	0.34	0.04	角				200606_1_	4
9		110	4.6	180	-	1.08	0.14	角				200606_1_	6
9		110	4.6	180	-	0.71	0.09	角				200606_1_	8
9		110	4.6	180	-	0.58	0.07	角				200606_1_	10
12	2	110	4	180	-	0.20	0.03	角				200607_1_	1
12	2	110	4	180	-	0.51	0.08	角				200607_1_	2
12	2	110	4	180	-	0.40	0.07	角				200607_1_	3
12	2	110	4	180	-	0.00	0.00	角				200607_1_	4
12	2	110	4	180	-	0.00	0.00	角				200607_1_	5
12	2	110	4	180	-	0.43	0.07	角				200607_1_	6
12	2	110	4	180	-	0.58	0.12	角				200608_1_	1
12	2	110	4	180	-	0.38	0.08	角				200608_1_	2
12	2	110	4	180	-	0.41	0.08	角				200608_1_	3
12	2	110	4	180	-	0.63	0.13	角				200608_1_	4
12	2	110	4	180	-	0.59	0.12	角				200608_1_	5
12	2	110	4	180	-	0.57	0.11	角				200608_1_	6
12	2	110	4	180	-	0.91	0.18	角				200608_1_	7
12	2	110	4	180	-	1.03	0.21	角				200608_1_	8
12	2	110	4	180	-	1.15	0.23	角				200608_1_	9
12	2	110	4	180	-	0.71	0.14	角				200608_1_	10
12	2	110	4	180	-	0.83	0.17	角				200608_1_	11
12	2	110	4	180	-	0.85	0.17	角				200608_1_	12
12	2	110	4	180	-	0.80	0.16	角				200608_1_	13
12	2	110	4	180	-	0.09	0.02	角				200608_1_	14
12	2	110	4	180	-	0.04	0.01	角				200608_1_	15
12	2	110	4	180	-	0.90	0.18	角				200608_1_	16
12	2	110	4	180	-	1.14	0.23	角				200608_1_	17
12	2	110	4	180	-	0.52	0.10	角				200608_1_	18
12	2	110	4	180	-	1.73	0.35	角				200608_1_	19
12	2	110	4	180	-	0.15	0.03	角				200608_1_	20
12	2	110	4	180	-	0.24	0.05	角				200608_1_	21
12	2	110	4	180	-	0.66	0.13	角				200608_1_	22
12	2	110	4	180	-	0.51	0.10	角				200608_1_	23
12	2	110	4	180	-	0.09	0.02	角				200608_1_	24
12	2	110	4	180	-	0.79	0.16	角				200608_1_	25
12	2	110	4	180	-	1.62	0.32	角				200608_1_	26
12	2.25	110	4	180	-	0.37	0.05	角				200603_2_	13
12	2.25	110	4	180	-	0.87	0.11	角				200603_2_	14
12	2.25	110	4	180	-	1.16	0.15	角				200603_2_	15
12	2.25	110	4	180	-	0.52	0.07	角				200603_2_	16
12	2.25	110	4	180	-	0.71	0.09	角				200603_2_	17
12	2.25	110	4	180	-	0.64	0.08	角				200603_2_	18
12	2.25	110	4	180	-	1.03	0.13	角				200603_2_	19
12	2.25	110	4	180	-	0.88	0.11	角				200603_2_	20

周波数 [kHz]	振動 振幅 [μm]	温度 [°C]	荷重 [N]	時間 [sec]	アルミ ホイル	接着 強さ [N]	単位長さ あたりの 接着強さ [N/mm]	こて先 形状	単位長さあた りの接着強さ [N/mm]			実験 No.	ID
									0.00	0.20	0.40		
12	2.25	110	4	180	-	0.58	0.07	角				200603_2_	21
12	2.4	110	4.35-5.16	180	-	0.71	0.09	角				200603_1_	8
12	2.4	110	3.97-5.43	180	-	0.32	0.04	角				200603_1_	9
12	2.4	110	3.79-5.59	180	-	0.76	0.10	角				200603_1_	10
12	10	110	4.5	180	-	0.13	0.03	角				200602_2_	1
15		110	4.5	180	-		0.00	角				200606_1_	5
15		110	4.7	180	-	0.46	0.06	角				200606_1_	7
15		110	4.5	180	-	0.46	0.06	角				200606_1_	9
-	-	110	4	180	-	0.21	0.04	角				200609_1_	4
-	-	110	4	180	-	0.77	0.15	角				200609_1_	5
-	-	110	4	180	-	0.68	0.14	角				200609_1_	6
-	-	110	4	180	-	0.46	0.09	角				200609_1_	19
-	-	110	4	180	-	0.64	0.13	角				200609_1_	20
-	-	110	4	180	-	0.78	0.16	角				200609_1_	21
-	-	110	4	180	-	0.61	0.12	角				200609_1_	22
7		110	4.9	240	-	0.17	0.03	角				200602_2_	23
12	2.4	110	4.54-5.62	240	-	0.49	0.06	角				200603_1_	2
12	2.4	110	4.47-5.01	240	-	0.70	0.09	角				200603_1_	11
12	2.4	110	4.26-5.54	240	-	0.81	0.10	角				200603_1_	13
12	10	110	3.8	240	-	0.97	0.19	角				200602_2_	2
12	10	110	5.4	240	-	1.05	0.21	角				200602_2_	7
12	10	110	5.6	240	-	1.27	0.25	角				200602_2_	8
15		110	3.6	240	-	0.70	0.14	角				200602_2_	3
12	2.4	110	4.20-5.50	300	-	0.61	0.08	角				200603_1_	14
12	2.4	110	4.68-5.58	300	-	0.71	0.09	角				200603_1_	15
12	2.4	110	3.26-5.38	300	-	1.17	0.15	角				200603_1_	16
-		110	4	300	-	0.67	0.13	角				200609_2_	3
-		110	4	300	-	1.33	0.27	角				200609_2_	6
-		110	4	300	-	1.35	0.27	角				200609_2_	9
12	0.2	110	4	360	-	1.13	0.14	角				200603_2_	10
12	0.2	110	4	360	-	0.81	0.10	角				200603_2_	11
12	0.2	110	4	360	-	1.33	0.17	角				200603_2_	12
12	0.4	110	4	360	-	0.72	0.09	角				200603_2_	6
12	0.4	110	4	360	-	1.87	0.23	角				200603_2_	7
12	0.4	110	4	360	-	1.14	0.14	角				200603_2_	8
12	1	110	4	360	-	1.44	0.18	角				200603_2_	3
12	1	110	4	360	-	0.32	0.04	角				200603_2_	4
12	1	110	4	360	-	0.72	0.09	角				200603_2_	5
12	2.4	110	3.88-5.62	360	-	1.05	0.13	角				200603_1_	12
12	2.4	110	3.30-5.01	360	-	1.05	0.13	角				200603_1_	17
12	2.4	110	3.44-5.51	360	-	0.84	0.11	角				200603_1_	18
12	0.2	110	4	480	-	1.76	0.22	角				200603_2_	9
12	2.5	110	4	480	-	1.52	0.19	角				200603_2_	1
12	2.5	110	4	900	-	1.63	0.20	角				200603_2_	2

周波数 [kHz]	振動 振幅 [μm]	温度 [°C]	荷重 [N]	時間 [sec]	アルミ ホイル	接着 強さ [N]	単位長さ あたりの 接着強さ [N/mm]	こて先 形状	単位長さあた りの接着強さ [N/mm]			実験 No.	ID
									0.00	0.20	0.40		
12	10	130	4.4	120	-	0.98	0.20	角				200602_2_	20
-		140	4	180	-	0.90	0.18	角				200609_1_	7
-		140	4	180	-	0.91	0.18	角				200609_1_	8
-		140	4	180	-	0.79	0.16	角				200609_1_	9
9		-	4	180	-	0.00	0.00	角				200609_1_	13
9		-	4	180	-	0.00	0.00	角				200609_1_	15
9		-	4	180	-	0.00	0.00	角				200609_1_	17
12	2	-	4	180	-	0.00	0.00	角				200609_1_	1
12	2	-	4	180	-	0.00	0.00	角				200609_1_	2
12	2	-	4	180	-	0.00	0.00	角				200609_1_	3
15		-	4	180	-	0.00	0.00	角				200609_1_	14
15		-	4	180	-	0.00	0.00	角				200609_1_	16
15		-	4	180	-	0.00	0.00	角				200609_1_	18
7		110	7.0	180	-	0.67	0.08	角				200606_1_	14
7		110	6.9	180	-	0.69	0.09	角				200606_1_	15
7		110	6.9	180	-	0.61	0.08	角				200606_1_	16
-	-	110	4	1	○	0.00	0.00	角				200609_2_	25
-	-	110	4	1	○	0.00	0.00	角				200609_2_	29
-	-	110	4	1	○	0.00	0.00	角				200609_2_	30
-	-	110	4	2	○	0.02	0.00	角				200609_2_	26
-	-	110	4	2	○	0.02	0.00	角				200609_2_	27
-	-	110	4	2	○	0.02	0.00	角				200609_2_	28
-	-	110	4	2	○	0.00	0.00	角				200609_2_	31
-	-	110	4	2	○	0.11	0.02	角				200609_2_	32
-	-	110	4	3	○	0.01	0.00	角				200609_2_	24
-	-	110	4	5	○	0.02	0.00	角				200609_2_	22
-	-	110	4	10	○	0.13	0.03	角				200609_2_	20
-	-	110	4	10	○	0.05	0.01	角				200609_2_	21
-	-	110	4	20	○	0.05	0.01	角				200609_2_	19
12	2	110	5	30	○	0.21	0.05	角				200609_3_	2
-	-	110	5	30	○	0.04	0.01	角				200609_3_	1
12	2	110	5	60	○			角				200609_3_	4
12	2	110	5	60	○	0.21	0.05	角				200609_3_	5
-	-	110	5	60	○	0.12	0.03	角				200609_3_	3
12	2	110	5	90	○	0.28	0.06	角				200609_3_	7
12	2	110	5	90	○	0.21	0.06	角				200609_3_	10
-	-	110	5	90	○	0.47	0.09	角				200609_3_	6
12	2	110	5	120	○	0.31	0.09	角				200609_3_	9
-	-	110	5	120	○	0.61	0.15	角				200609_3_	11
-	-	110	4	120	○	0.71	0.14	角				200609_2_	2
-	-	110	4	120	○	0.77	0.15	角				200609_2_	5
-	-	110	4	120	○		0.00	角				200609_2_	8
-	-	110	4	120	○	0.33	0.07	角				200609_2_	10

周波数 [kHz]	振動 振幅 [μm]	温度 [°C]	荷重 [N]	時間 [sec]	アルミ ホイル	接着 強さ [N]	単位長さ あたりの 接着強さ [N/mm]	こて先 形状	単位長さあた りの接着強さ [N/mm]			実験 No.	ID
									0.00	0.20	0.40		
-	-	110	5		○	0.90	0.19	角				200609_3_	8
-	-	110	5		○	0.54	0.10	角				200609_3_	12
12	2	110	4	180	○	0.47	0.09	角				200608_1_	27
12	2	110	4	180	○	0.50	0.10	角				200608_1_	28
12	2	110	4	180	○	0.60	0.12	角				200608_1_	29
12	2	110	4	180	○	0.65	0.13	角				200608_1_	30
12	2	110	4	180	○	0.51	0.10	角				200608_1_	31
12	2	110	4	180	○	0.58	0.12	角				200608_1_	32
12	2	110	4	180	○	0.97	0.19	角				200608_1_	33
12	2	110	4	180	○	0.52	0.10	角				200608_1_	34
12	2	110	4	180	○	0.84	0.17	角				200608_1_	35
12	2	110	4	180	○	0.72	0.14	角				200608_1_	36
12	2	110	4	180	○	1.04	0.15	角				200608_1_	37
12	2	110	4	180	○	0.20	0.03	角				200608_1_	38
12	2	110	4	180	○	0.68	0.09	角				200608_1_	39
12	2	110	4	180	○	0.85	0.14	角				200608_1_	40
12	2	110	4	180	○	0.69	0.10	角				200608_1_	41
12	2	110	4	180	○	0.85	0.12	角				200608_1_	42
12	2	110	4	180	○	1.01	0.17	角				200608_1_	43
12	2	110	4	180	○	0.64	0.09	角				200608_1_	44
-	-	-	4	5	○	0.00	0.00	角				200609_2_	23

周波数 [kHz]	振動 振幅 [μm]	温度 [°C]	荷重 [N]	時間 [sec]	アルミ ホイル	接着 強さ [N]	単位面積 あたりの 接着強さ [N/mm]	こて先 形状	単位面積あ たりの接着 強さ [N/mm]			実験 No.	ID
									0.00	0.20	0.40		
-	-	110	4.1	30	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200609_3_	21
12	2	110	4.2	120	○	0.30	0.13	8×0.5mm	■			200609_3_	13
12	2	110		120	○	0.25	0.05	8×0.5mm	■			200609_3_	15
-	-	110	5.2	120	○	0.22	0.11	8×0.5mm	■			200609_3_	14
12	2	50	5	10	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	31
7		60	5	10	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	20
12	2	60	5	10	○	0.03	0.01	8×0.5mm	■			200610_2_	21
	2	60	5	10	○	0.03	0.01	8×0.5mm	■			200610_2_	23
-	-	60	5	10	○	0.02	0.01	8×0.5mm				200610_2_	11
-	-	60	5	10	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	12
-	-	60	5	10	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	13
-	-	60	5	10	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	22
-	-	70	5	10	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	14
-	-	70	5	10	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	15
-	-	70	5	10	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	16
12	2	80	5	10	○	0.03	0.01	8×0.5mm	■			200610_2_	32
-	-	80	5	10	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	17
-	-	80	5	10	○	0.02	0.01	8×0.5mm	■			200610_2_	18
-	-	80	5	10	○	0.02	0.01	8×0.5mm				200610_2_	19
12	2	110	5	2	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	25
12	2	110	5	2	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	35
-	-	110	5	2	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	1
-	-	110	5	2	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	6
-	-	110	5	2	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	7
-	-	110	5	3	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	4
-	-	110	5	3	○	0.02	0.01	8×0.5mm	■			200610_2_	5
12	2	110	5	5	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	26
-	-	110	5	5	○	0.00	0.00	8×0.5mm				200610_2_	2
-	-	110	5	5	○	0.04	0.02	8×0.5mm	■			200610_2_	3
7		110	5	10	○	0.08	0.03	8×0.5mm	■			200610_2_	29
9		110	5	10	○	0.05	0.02	8×0.5mm	■			200610_2_	33
12	2	110	5	10	○	0.02	0.01	8×0.5mm	■			200610_2_	24
15		110	5	10	○	0.05	0.02	8×0.5mm	■			200610_2_	30
-	-	110	5	10	○	0.04	0.01	8×0.5mm	■			200610_2_	8
-	-	110	5	10	○	0.09	0.03	8×0.5mm	■			200610_2_	9
-	-	110	5	10	○	0.06	0.02	8×0.5mm	■			200610_2_	10
12	2	110	5.1	30	○	0.14	0.06	8×0.5mm	■			200609_3_	19
12	2	110	5.3	30	○		0.00	8×0.5mm				200609_3_	23
12	2	110	5.2	30	○	0.14	0.05	8×0.5mm	■			200609_3_	31
12	2	110	4.9	30	○	0.08	0.04	8×0.5mm	■			200609_3_	34
12	2	110	5.0	30	○	0.07	0.03	8×0.5mm	■			200609_3_	42
12	2	110	4.9	30	○	0.07	0.03	8×0.5mm	■			200609_3_	43
12	2	110	4.9	30	○	0.03	0.01	8×0.5mm	■			200609_3_	45

周波数 [kHz]	振動 振幅 [μm]	温度 [°C]	荷重 [N]	時間 [sec]	アルミ ホイル	接着 強さ [N]	単位面積 あたりの 接着強さ [N/mm]	こて先 形状	単位面積あ たりの接着 強さ [N/mm]			実験 No.	ID
									0.00	0.20	0.40		
12	2	110	5.0	30	○	0.14	0.06	8×0.5mm				200609_3_	46
12	2	110	5.1	30	○	0.20	0.10	8×0.5mm				200610_1_	2
12	2	110	7.0	30	○	0.13	0.08	8×0.5mm				200610_1_	10
12	2	110	5.6	30	○	0.15	0.08	8×0.5mm				200610_1_	18
12	2	110	5.2	30	○	0.15	0.07	8×0.5mm				200610_1_	27
-	-	110	5.2	30	○	0.22	0.10	8×0.5mm				200609_3_	17
-	-	110	5.9	30	○		0.00	8×0.5mm				200609_3_	22
-	-	110	4.8	30	○	0.08	0.04	8×0.5mm				200609_3_	32
-	-	110	4.7	30	○	0.08	0.04	8×0.5mm				200609_3_	33
-	-	110	5.0	30	○	0.14	0.07	8×0.5mm				200610_1_	1
-	-	110	5.1	30	○	0.19	0.09	8×0.5mm				200610_1_	9
-	-	110	3.7	30	○	0.09	0.04	8×0.5mm				200610_1_	17
-	-	110	5.0	30	○	0.17	0.07	8×0.5mm				200610_1_	19
-	-	110	5.4	30	○	0.12	0.06	8×0.5mm				200610_1_	26
12	2	110	5.6	45	○	0.09	0.04	8×0.5mm				200609_3_	18
12	2	110	5.2	60	○	0.17	0.10	8×0.5mm				200609_3_	25
12	2	110	4.9	60	○	0.04	0.02	8×0.5mm				060928_3_	36
12	2	110	4.9	60	○	0.26	0.10	8×0.5mm				200609_3_	41
12	2	110	5.1	60	○	0.15	0.07	8×0.5mm				200610_1_	4
12	2	110	5.3	60	○	0.19	0.09	8×0.5mm				200610_1_	12
12	2	110	5.3	60	○	0.15	0.07	8×0.5mm				200610_1_	21
12	2	110	5.3	60	○	0.29	0.11	8×0.5mm				200610_1_	29
-	-	110	5.2	60	○		0.00	8×0.5mm				200609_3_	24
-	-	110	5.1	60	○	0.08	0.04	8×0.5mm				200609_3_	30
-	-	110	5.1	60	○	0.14	0.07	8×0.5mm				200609_3_	35
-	-	110	5.3	60	○	0.11	0.06	8×0.5mm				200610_1_	3
-	-	110	6.1	60	○	0.18	0.09	8×0.5mm				200610_1_	11
-	-	110	5.1	60	○	0.26	0.12	8×0.5mm				200610_1_	20
-	-	110	5.5	60	○	0.17	0.08	8×0.5mm				200610_1_	28
12	2	110	5.0	90	○	0.18	0.08	8×0.5mm				200609_3_	27
12	2	110	4.8	90	○	0.20	0.09	8×0.5mm				200609_3_	38
12	2	110	4.8	90	○	0.27	0.11	8×0.5mm				200609_3_	44
12	2	110	5.9	90	○	0.48	0.23	8×0.5mm				200610_1_	6
12	2	110	6.6	90	○	0.19	0.11	8×0.5mm				200610_1_	14
12	2	110	5.4	90	○	0.40	0.17	8×0.5mm				200610_1_	23
12	2	110	5.5	90	○	0.61	0.26	8×0.5mm				200610_1_	31
-	-	110	5.2	90	○	0.20	0.09	8×0.5mm				200609_3_	26
-	-	110	4.7	90	○	0.27	0.14	8×0.5mm				200609_3_	37
-	-	110	5.6	90	○	0.22	0.13	8×0.5mm				200610_1_	5
-	-	110	5.7	90	○	0.46	0.19	8×0.5mm				200610_1_	13
-	-	110	5.4	90	○	0.44	0.19	8×0.5mm				200610_1_	22
-	-	110	5.0	90	○		0.00	8×0.5mm				200610_1_	30
12	2	110	5.0	120	○	0.84	0.32	8×0.5mm				200609_3_	20
12	2	110	5.4	120	○	0.28	0.15	8×0.5mm				200609_3_	29