マイクロマニピュレータの力計測・制御[†] ——顕微レーザーラマン分光法による微小力計測と マイクログリッパーの設計——

新井 史人*・野々田 幸雄*・大田 友哉*・福田 敏男*

Force Measurement and Control of Micromanipulator ——Small Force Measurements by Microscopic Laser Raman Spectrophotometer and Micro Gripper Design——

Fumihito ARAI*, Yukio NONODA*,
Tomoya OOTA* and Toshio FUKUDA*

Force measurement of the micro objects is very important for micromanipulation. For high accuracy, stiffness of the finger tip can be reduced for force measurement. However, it is not suitable for manipulation. So we consider to evaluate the stress on the micro structure to measure the force. Advantage of force measurement based on stress information comes up when the structure is miniaturized. This can be shown by the scaling analysis. From this reason, we propose a new force measurement and micromanipulation method using the Laser Raman Spectrophotometer. We design a micro gripper that employs the proposed force measurement method. We show experimental results of force measurement with the analytical evaluation to explain the effectiveness of the proposed system.

Key Words: laser raman spectrophotometer, silicon cantilever, micro gripper, stress measurement, scaling analysis

1. はじめに

医療・バイオ分野における DNA, 細胞などの微小物体の生体関連情報やマイクロマシン分野におけるパーツの構造体評価に力情報は必要である。また、これらの微小物体の力情報の計測には、マイクロマニピュレーションの技術も不可欠である。そこで、多くの種類のマイクロマニピュレータ^{1),4),12)}や、微小力計測法が提案されてきた。しかしながら、マニピュレータの操作性と高精度の力計測の両方を備えたマニピュレータを製作するのは困難である。高精度の力計測には、一般に弾性変形に基づく変位情報をもとに行うものが提案されてきた^{11),12)}。変

位情報を基にしているため高精度の力計測をするためには、構造物の剛性を下げなければならないが、マニピュレータの指先の剛性を下げすぎると、マイクロマニピュレータの操作性が悪くなる。そこで、本論文では、指先の剛性が高く、高精度の力計測が可能な力計測手法を実現するために顕微レーザーラマン分光法(以下レーザーラマン分光法とする)の力計測への応用方法を提案する。

レーザーラマン分光法は、レーザー光を直径 1 μm にまで絞り込み微小領域での結晶の構造解析や単結晶構造物にかかる応力を非接触で測定できることで知られている⁵⁾。しかしながら、従来力計測に利用した例はほとんど見あたらない。われわれはレーザーラマン分光法により非接触で微小領域の応力を計測することに着眼し、これを力計測に応用することを試みた。応力情報に基づく力計測の利点は、構造物が小さくなるにつれて発揮されることがスケーリング則により示すことができた。現状では、リアルタイムの動的な力制御には向いていないが、

[†] 第 34 回計測自動制御学会学術講演会で発表(1995・7)

* 名古屋大学大学院工学研究科 名古屋市千種区不老町 1

* Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya

(Received October 23, 1995)

(Revised March 29, 1996)

微小領域での高精度の力計測が可能である。これによって、レーザーラマン分光法による微小力計測の将来性が見えたため、提案する力計測手法を取り入れ、粗動と微動機構を取り入れたマイクログリッパーを考案する。さらに、われわれの提唱するシステムの有効性を示すため微小物体の把持力測定の実験を行った結果を示す。

2. 力計測法の比較

Table 1 に力計測法の比較表を示す。歪みゲージやシリコンのピエゾ抵抗効果を利用した半導体歪みゲージはリアルタイムの力計測に適しているので、マイクロマニピュレータの力制御に使われてきた^{1),10)}。しかしながら、測定物が非常に小さくなると歪みゲージ自体の製作が困難となる。したがって、ミクロンオーダーの微小領域での力を測定するのには適していない。

弾性変形に伴う変位情報を基に加えられている力を評価する方法もある¹⁷⁾。これは、非接触型のレーザー変位計を用いて弾性変形をリアルタイムで測定する方法である。レーザー変位計にかえてレーザー干渉計も変位計として代用できる。これらの測定方法で十分な精度を得るためには、測定物の剛性を落とす必要がある。しかしながら、マニピュレータの指先の剛性を落とすと、操作性が悪くなったり、振動しやすくなるといった問題点が生じる。そのため、微小物体のマニピュレーションには適さない。

そこで本稿では、マイクログリッパーによる力計測を行うためレーザーラマン分光法によるマイクロ構造物の力計測法を提案する。この計測法は、現状ではリアルタイムの動的な力制御には向いていないが、高精度で微小領域での応力情報を得ることが可能である。また、応力情報に基づく測定であるため、マニピュレータの指先の剛性を維持した状態で高精度の力計測をすることが可能である。スケーリング則によれば、応力情報に基づいた

力計測の方が変位情報に基づいたものよりも適していることが示される。したがって、静的な高精度の微小物体の力計測法として提案する。

3. レーザーラマン分光法^{8),19)}

物質に光を入射すると、その散乱光の大半は入射光と同じ周波数(レーリー散乱)をもつ。しかしながら、レーリー散乱に混じって物質に固有の微弱な散乱光が含まれる。これはラマン散乱光と呼ばれ、物質の結晶格子の振動周波数を表わすものである。応力の変化に伴う結晶格子の変化は散乱光の周波数の変化(ラマンシフト)を生み出す。このラマンシフトを測定することによって、微小領域(最小レーザースポット径: 1 μm)での物質に働く応力や結晶構造を評価するのがレーザーラマン分光法である。具体的には、物質に引っ張り応力が働くと低波数側にシフトし、圧縮応力が働くと高波数側にシフトする。応力がかからない状態での単結晶シリコンは 520.5 cm^{-1} にただ一つのラマンピークをもつ。Fig. 1 に応力によるラマンピークのシフトを示す。なお、本論文ではこの手法についてのこれ以上の詳しい説明は割愛するが、詳しくは参考文献 19) のラマン分光法を参照してもらいたい。

4. 力計測におけるレーザーラマン分光法の利点

応力計測に基づく力計測の利点は構造物のマイクロ化によって発揮される。これはスケーリング則によりつぎのように説明できる。カンチレバー(片持ち梁)の先端に力 P を加えた時の最大応力 σ_{max} と最大変位 Y_{max} は以下のように表わされる。

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{6Pl}{tb^2} \quad (1)$$

$$Y_{\text{max}} = \frac{4Pl^3}{Eb^3} \quad (2)$$

ただし、 E : ヤング率 (N/m^2)

l : 梁の長さ (m)

t : 梁の厚み (m)

b : 梁の幅 (m)

単位力あたりに換算すると次式のように変形される。

Table 1 Comparison of force measurement methods

	L. R. S.	Strain gauge	Laser Interference	Deformation
Measurement quantity	Raman shift (Stress)	Resistance Change	Space between Slit	Displacement
Non-contact sensing	excellent	poor	excellent	excellent
Measurement speed	good	excellent	good	excellent
Localized information	excellent	poor	excellent	poor
Measurement accuracy	excellent	excellent	excellent	good

Fig. 1 Shift of Raman peak

$$\frac{\sigma_{\max}}{P} = \frac{6l}{tb^2} \propto L^{-2} \quad (3)$$

$$\frac{Y_{\max}}{P} = \frac{4l^3}{Et b^3} \propto L^{-1} \quad (4)$$

ただし, L : 代表長さ

このように構造物が小さくなるにつれて単位力当たりの応力の方が単位力当たりの変位よりも力計測に適していると言える。

例としてレーザーラマン分光法による力計測精度とレーザー干渉計による力計測精度とを比較してみる。レーザー干渉計の測定精度を 30 nm, レーザーラマン分光法の測定精度を 0.05 cm^{-1} とする。ここでこのラマンシフトの値は, 1 cm^{-1} 当たり $2.5 \times 10^8 \text{ (N/m}^2\text{)}$ であることを利用して^{5),8)} $1.25 \times 10^7 \text{ (N/m}^2\text{)}$ を $\sigma_{\max}$ に代入する。この時, ミクロンオーダーのカンチレバー(幅: $5 \mu\text{m}$, 厚さ: $10 \mu\text{m}$, 梁の長さ: $30 \mu\text{m}$)の同じ剛性の梁で最小測定分解能を計算すると以下ようになる。

$$\text{Raman} \quad P_R = \sigma_{\max} \frac{tb^2}{6l} = 1.74 \times 10^{-5} \text{ (N)} \quad (5)$$

$$\text{Interference} \quad P_I = Y_{\max} \frac{3Et b^3}{4l^3} = 6.60 \times 10^{-5} \text{ (N)} \quad (6)$$

したがって, この場合ラマン分光法の方が測定精度が高いことがわかる。この時, 梁の微小変形での等価バネ定数は以下のように計算される。

$$K_R = \frac{3Eb}{2\sigma_{\max} l^2} P_R = 1.27 \times 10^8 P_R \text{ (N/m)} \quad (7)$$

$$K_I = \frac{1}{Y_{\max}} P_I = 3.33 \times 10^7 P_I \text{ (N/m)} \quad (8)$$

以上より, 測定精度が同一 ($P_R = P_I$) のとき, $K_R > K_I$ となることから, ラマン分光法による測定の方が梁の剛性が高くなる。ここで力測定精度を(5)式の値とするには $K_R = 2210 \text{ (N/m)}$, $K_I = 579 \text{ (N/m)}$ となり, レーザー方式では元のバネ定数の 26% まで減少させなくてはならない。つまり, バネの剛性を落とす(柔らかくする)必要性がある。

5. シリコンカンチレバーの製作

レーザーラマン分光法による応力評価の原理は結晶格子の振動エネルギーに基づいている。単結晶シリコンはラマンピークが単一で鋭いピークをもつため, 内部応力

Fig. 2 Configuration of the Silicon cantilever

の測定をするのに適した物質である。そこでわれわれはグリッパーの指先に単結晶シリコンを用いることにした。力計測のためのシリコンカンチレバーの外観図を Fig. 2 に示す。シリコンは圧縮応力に強く, 引っ張り応力には弱い⁶⁾ため, 形状的に圧縮集中が起こりやすく, 引っ張り破壊が起きにくい構造にした^{6),7)}。加工には微細放電加工機を使用し [100] 面シリコンウエハを加工した。Fig. 3 にシリコンカンチレバーの SEM 写真を示す。

6. シリコンカンチレバーの力計測

微小物体にかかる力を測定する前に, シリコンカンチレバーにかかる応力とラマンシフトとの関係を同定しなければならない。そのため, 歪みゲージを利用した力センサーを微細放電加工機で製作した^{13),14)}。この力センサーについては, あらかじめ電子天秤(AND 製, HR-200, 分解能: 0.1 mg)を使ってキャリブレーションをとっておき, その校正データを利用して測定に使用した。Fig. 4 にその実験結果を示す。加える力に対して歪みゲージの出力電圧が比例して出ており, 逆に出力電圧から加える力を知ることができる。実験は Fig. 5 に示すようにシリコンカンチレバーをジグで固定し, マイクロ力センサーで水平方向から力を加え, レーザーラマン分光計でカンチレバーの R 部分の応力情報を測定した。今回利用したレーザーラマン分光計は, 日本分光工業(株)製の NR-1800 型で, 分光方式としてフォトマル方式を使った波数

Fig. 3 SEM photograph of the Si cantilever

Fig. 4 Experimental result of micro force sensor

Fig. 5 System configuration for calibration

Fig. 6 Measurement points of the stress

分解能が 0.2 cm^{-1} のものである。なお、入射レーザー光は発振波長が 514.5 nm のアルゴンレーザーで、レーザー出力を 100 mW にして使用した。測定スポット径は、局所的な温度上昇によるラマンシフトが起きにくいよう $5 \mu\text{m}$ で行い、測定点は、Fig. 6 に示すようにカンチレバーの応力集中の起きやすい根本の R 部分の中で最も応力集中率の高い所を選んだ。なお、図に示した矢印は各測定点での応力値を半径方向に表示したものである。

加えられた力を計算するにあたり、シリコンは異方性物質であるが単純にするため、均一性があり結晶方位は無視できるものとして取り扱う。この場合、力の計算式はつぎのように書かれる。

$$F = \frac{tb^2\sigma_{\max}}{6la} \quad (9)$$

ただし、 a ：応力集中係数

t ：厚み (m)

b ：梁の幅 (m)

$\sigma_{\max}$ ：最大応力 (N)

応力集中係数はカンチレバーの形状に依存するので、あらかじめ Fig. 2 の形状での応力集中係数を計算した結果、応力集中係数は 1.23 であった¹⁸⁾。ラマンシフト 1 cm^{-1} 当たり $2.5 \times 10^8 \text{ (N/m}^2\text{)}$ であることを利用して^{5), 8)} 加えられた力 F を計算することができる。

7. 力計測の実験結果

Fig. 7 に力計測の実験結果を示す。横軸は、Fig. 4 に示

Fig. 7 Experimental result of force measurement

した実験結果をもとにマイクロ力センサーにより加えられた力を示し、縦軸は、測定によって得られたラマンシフトをもとに計算した力を示した。理想的には、この両軸の値が同一で $Y=X$ の関係になるのが望ましいが、今回はほぼ同じ傾向を示すことがわかった。また、今回の測定の誤差に関しては、波数分解能が低いため図に示すように非常に大きな値となってしまった。これは、現在使っているレーザーラマン分光計 (NR-1800 型、フォトマル方式、波数分解能： 0.2 cm^{-1}) よりも測定精度の良いもの (マルチスキャン方式、波数分解能： 0.05 cm^{-1}) を使うことによって改善されるであろう。これ以外の誤差原因としては、つぎのようなことが考えられる。

(1) シリコンは異方性物質であるのに単純にするため、均一性があり結晶方位は無視できるものとして取り扱い力学計算をしたこと。

(2) 二次元的な応力の場合のラマンシフト、 1 cm^{-1} 当たり $2.5 \times 10^8 \text{ (N/m}^2\text{)}$ を三次元的な応力の場合にも適用したこと。

(3) シリコンカンチレバーの製作精度に起因する誤差が存在したこと。

(1)、(2)の問題に関しては、今後の研究課題として取り扱っていかねければならない。(3)に関しては、従来のシリコンプロセスを利用して高精度のシリコンカンチレバーを製作することで改善されると思われる。なお、今回使用したシリコンカンチレバーとマイクロ力センサーのパネ定数を計算したところ、それぞれ $4.61 \times 10^4 \text{ (N/m)}$ 、 $7.87 \times 10^2 \text{ (N/m)}$ になり、シリコンカンチレバーの方が約 60 倍硬いことがわかった。これによりレーザーラマン分光法の方が剛性の硬い状態で力計測ができることがわかる。

以上より、シリコンカンチレバーがマイクロマニピュレーションのための力計測に利用できることがわかる。以下ではレーザーラマン分光法による力測定を行うためのマイクログリッパーの設計と製作について述べる¹⁵⁾。

8. マイクログリッパーの設計と製作

8.1 マイクログリッパーの設計

Fig. 8 にマイクログリッパーの外観図を示す。レーザーラマン分光法により微小物体の把持力を測定するため、マイクログリッパーの先端にシリコンカンチレバーを取り付ける構造にした。粗動と微動の機構を取り入れ、顕微鏡下での作業を精密に行える構造にした。

アクチュエータは高い位置決め精度と大きな力を出せる PZT (Pb(Zr, Ti)O₃) を使用し、使う用途に応じて 2 種類のものを用意した^{4),9)}。粗動には 10×2×3 mm³ のものを、微動には 5×2×3 mm³ のものを使う。変位量は、印加電圧 150 V でそれぞれ 8 μm, 4 μm の変位しか得られないため、この原理に基づく拡大機構を利用した。粗動は、微小物体を把持するための大まかな位置決めをするための機構で変位量を稼ぐため 2 段式の拡大機構にした。微動は、微小物体の把握および力計測に使用するため 1 段式の拡大機構にした。Fig. 9 にマイクログリッ

Fig. 8 Configuration of the micro gripper

Fig. 9 Photograph of the micro gripper

パーの写真を示す。本体の材質は SUS 304 を使用し、主要部分の加工はワイヤ放電加工機で行った。

8.2 拡大機構のモデル

拡大機構はヒンジの弾性変形を利用している。Fig. 10 に粗動の拡大機構を簡略化した図を示す。PZT の変位はヒンジ部を中心とした回転によって拡大される。ヒンジ部分の機構を Fig. 11 のようにモデル化した場合、ヒンジ部分のバネ定数 K は以下のように表わされる。

$$K = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi r^{1/2}} \quad (10)$$

ただし、 E : ヤング率 (N/m²)

回転角が非常に小さいとき、A 点、B 点の回転角 θ_a , θ_b はつぎのように書くことができる。

$$\theta_a = \frac{X}{l_1} \quad (11)$$

$$\theta_b = \frac{l_2}{l_1} X \cdot \frac{1}{l_3} = \frac{l_2}{l_1 l_3} X \quad (12)$$

B 点回りのモーメントの釣合いから (13) 式が得られる。

$$K_b \theta_b = f_1 l_3 \quad (13)$$

同様に、A 点回りのモーメントの釣合いから (14) 式が得られる。

X: Displacement of the PZT, $l_1 \sim l_4$: Lengths of the beams.
($l_1=2.25\text{mm}$, $l_2=14.95\text{mm}$, $l_3=3.45\text{mm}$, $l_4=41.55\text{mm}$).
 F_r : Total reflection force, F: Force of the PZT actuator

Fig. 10 Magnification mechanism for large movement

t: Width of hinge, r: Radius of curvature,
b: Thickness, θ : Rotational angle

Fig. 11 Model of the hinge mechanism

$$F_r l_1 = K_a \theta_a + f_1 l_2 \quad (14)$$

全反力 F_r は(11), (12), そして(13)式よりつぎのように書かれる.

$$F_r = \left\{ \left(\frac{1}{l_1} \right)^2 + \left(\frac{l_2}{l_1 l_3} \right)^2 \right\} K X \quad (15)$$

PZT によって与えられる力 F は(16)式のように書かれる.

$$F = K'(X_m - X) \quad (16)$$

ただし, K' : PZT のバネ定数, X_m : PZT の最大変位 (m)

$F_r = F$ の時, PZT の変位 X は $7.93 \mu\text{m}$ となった. 同様に, 微動の PZT の変位 x は $3.99 \mu\text{m}$ となった. ここで粗動の拡大倍率は 50.7 倍, 微動の拡大倍率は 24.7 倍である. よって, 粗動の先端の最大変位 (印加電圧 150 V) の理論値は $402.05 \mu\text{m}$, 微動は $98.55 \mu\text{m}$ となる.

8.3 マイクログリッパーの特性

電圧をかけたときの粗動と微動の先端の変位をレーザー変位計 (KEYENCE 製, LC-2420 型, 分解能: $0.01 \mu\text{m}$) を用いて測定した結果を Fig. 12 に示す. 電圧制御のため, 粗動・微動共に PZT のヒステリシスを反映した結果になった. これは, 電荷制御にすることによって取り除くことができる. 粗動最大変位は印加電圧 150 V で $212.83 \mu\text{m}$, 微動最大変位は $84.95 \mu\text{m}$ であった. それぞれ理論値の 52.9% と 86.2% という結果になった. どちらも理論値よりも小さい値になったが, これには大きく分けてつぎの二つの理由が考えられる.

- (1) 単純なモデル計算をしたこと.
- (2) ヒンジ部の剛性がわれわれが考えていた以上に大きく完全な回転変形をしなかったこと.

9. マイクロマニピュレーションのための力計測

Fig. 13 に力計測のためのシステムの外観図を示す. このシステムはレーザーラマン分光計, モニター, パソコンで構成されている. 測定方法としてはまず最初に, 顕微ラマン室の中に微小物体とマイクログリッパーをセットする. つぎにモニターを見ながらマイクログリッパーの粗動を使って微小物体を把持するための大まかな位置

Fig. 12 Performance of large and small movement

決めを行う. ここでストレスフリーの状態のシリコンカンチレバーのラマンピーク値を測定しておく. そして微動を使って微小物体を正確に把持し, カンチレバーの根本の R 部分の最大応力を発生する位置にレーザースポットを当て応力の変化によるラマンピーク値を計測する. Fig. 14 に微小物体を把持した状態でのマイクログリッパーの先端図を示す. このラマンピーク値の検出に関しては, パソコンに内蔵されているローレンチャンフィッティングで行う. こうして得られたデータをもとにラマンシフトを計算し, (9) 式を利用することによって微小物体の把持力 F を計算することができる.

10. 把持力測定の結果

今回, 微小物体として直径 $125 \mu\text{m}$ の銅線を用いた. Fig. 15 にこれを把持した状態でのラマンシフトの測定結果と把持力の計算結果を示す. 測定は Fig. 11 に示すような PZT のヒステリシスを考慮して, 入力電圧を増加する場合のみで行った. 把持力は, 印加電圧 50 V で 2.70×10^{-2} (N), 100 V で 5.30×10^{-2} (N), 150 V で

Fig. 13 System configuration for force measurement

Fig. 14 Tip of the micro gripper

Fig. 15 Measurement result of Raman shift

6.00×10^{-2} (N) となった。しかしながら、もっとカンチレバーを小さく高精度で製作できるなら、力計測精度は μN 程度に小さくすることができるであろう。一般にシリコンカンチレバーはケミカルエッチングによって容易に小さくすることができるので¹⁶⁾、高精度を得るための計測材料として十分に期待できる。

11. おわりに

本稿において、われわれはレーザーラマン分光法を用いた新しい力計測方法を提案し、その有効性をスケールリング則により示した。これにより、カンチレバーを小さく高精度で製作すれば、力計測精度は μN 程度に小さくできる可能性を示した。さらに実験により、シリコンカンチレバーに加えられた力とレーザーラマン分光法により測定された力とがほぼ同一の関係を示すことがわかり、ラマン分光法による力計測のためのマイクログリップを提案した。一般に、シリコンカンチレバーはケミカルエッチングによって容易に小さくすることができるので、将来的に高精度の力計測も十分に期待できる。

現在、レーザーラマン分光装置は、物質の構造解析などさまざまな用途に使うため大がかりで高価な装置である。したがって、今回のような力計測に的を絞った計測システムにすれば、卓上サイズの大きさになり、価格も3分の1程度になる。将来的に結晶構造の解析、微小領域での正確な力計測、および他の力センサーのキャリブレーションなどの静的な高精度の力計測の需要が期待できるので、さらに小型化、低価格化、高精度化になると思われる。

参考文献

- 1) 福田, 田中, 中村, 江刺, 庄子: マイクロ・マニピュレータの制御 (第3報, マイクロ・アクチュエータの機構と制御), 日本機械学会論文集 (C編), **56**-526, 126/130 (1990)
- 2) T. Fukuda and T. Tanaka: New Mechanism and Dynamic Control Method of Micro Electrostatic Actuator with Three Degrees of Freedom, Proc. IEEE Int'l. Conf. on Robotics and Automation, **2**, 1610/1615

- (1991)
- 3) C. J. Kim, A. P. Pisano and R. S. Muller: Overhung Electrostatic Micro Gripper, Transducers '91, 610/613 (1991)
- 4) 福田, 藤吉, 新井, 松浦: マイクロ・マニピュレータの制御 (第4報, 6自由度マイクロ・マニピュレータの試作と動作実験結果), 日本機械学会論文集 (C編), **56**-532, 127/133 (1990)
- 5) Y. Inoue, T. Nishimura and Y. Akasaka: Polarization selective Raman Microspectroscopy, Technical Report, Mitsubishi Electronic ADVANCE, **28**/31 (1987)
- 6) R. E. Peterson: Stress Concentration Design Factors, Jhon Wiley & Sons, Inc. (1953)
- 7) F. Ericson and J. Schweutz: Micromechanical Fracture Strength of Silicon, Journal of Applied Physics, **68**-11, 5840/5844 (1990)
- 8) 池田照樹: 顕微ラマン分光法による Si のストレス評価, Jasco Report, **31**-3, 15/20 (1989)
- 9) T. Fukuda, A. Kawamoto, F. Arai and H. Matuura: Steering Mechanism of Underwater Micro Mobile Robot, Proc. Int'l Conf. on Robotics and Automation, **2**, 363/368 (1995)
- 10) M. Kimura, M. Fujiyoshi and T. Fukuda: Force Measurement and Control of Electrostatic Micro-actuator, Proc. Second Int'l Symp. on Micro Machine and Human Science (MHS '91), **119**/124 (1991)
- 11) T. Sato, J. Ichikawa, M. Mitsuishi and Y. Hatamura: A New Micro-Teleoperation System Employing a Hand-Held Force-Feedback Pencil, Proc. Int'l Conf. on Robotics and Automation, **2**, 1728/1733 (1994)
- 12) 鈴木美彦: フレキシブルマイクログリップ (FMG)—第1報: 試作と大気中駆動評価の結果—, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, **991**/992 (1994), —第2報: 水中駆動特性と物質操作結果—, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, **917**/918 (1994), —第3報: 把持力解析と試作と生物操作結果—, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, **527**/528 (1995)
- 13) 福田, 新井, 大田, 野々田: マイクロ構造物の力計測・制御 (第1報: レーザーラマン分光法による微小応力の計測に基づくシステム設計), 日本機械学会, ロボット・メカトロニクス講演会 '95, **1392**/1393 (1995)
- 14) 新井, 安藤, 福田, 野々田, 大田: Micro Manipulation Based on Micro Physics—Strategy Based on Attractive Force Reduction and Stress Measurement, IROS '95, Vol. **2**, 236/241 (1995)
- 15) 新井, 野々田, 大田, 福田: マイクロ構造物の力計測・制御 (第2報: レーザーラマン分光法による力計測のためのマイクログリップの設計), 第34回計測制御学会学術講演会予稿集, **2**, **819**/820 (1995)
- 16) S. Johansson: Fracture Testing of Silicon Microelements in Situ in a Scanning Electron Microscope, J. Appl. Phys., **63**, 4799/4803 (1988)
- 17) 嶋本伸雄: ナノバイオリギー入門, 講談社サイエンティフィック, **98**/100 (1994)
- 18) 西田正孝: 応力集中 (増補版), 森北出版, **637**/639 (1973)
- 19) 浜口, 平川: 日本分光学会測定法シリーズ **17**, ラマン分光法, 学会出版センター, **15**/35 (1988)

~~~~~

[著者紹介]

新井 史 人 (正会員)

1988年東京理科大学工学研究科修士課程修了, 90年名古屋大学工学部助手, 93年工学博士(名古屋大学), 94年より名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻講師, おもにマイクロシステム, システムの知能化の研究に従事。

野々田 幸 雄 (正会員)

1994年名古屋工業大学工学部機械工学科卒業, 96年名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻修了, 工学修士。おもにマイクロシステムの力計測と制御に関する研究に従事。

大 田 友 哉

1995年名古屋大学工学部機械学科卒業, 96年名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻入学, 現在に至る。おもにマイクロ構造物の構造解析, 計測・制御に関する研究に従事。

福 田 敏 男 (正会員)

1977年東京大学大学院博士課程修了, 工学博士。通産省機械技術研究所, 東京理科大学を経て, 90年名古屋大学工学部教授, 94年より名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻教授。ロボット工学の研究に従事。95年 SICE フェロー。

~~~~~