フレキシブルマイクログリッパの開発*

Development of Flexible Microgripper

鈴木美彦**

Yoshihiko SUZUKI

Key words: micro-electro-mechanical system, microfinger, microcoil, Lorentz force, bimorph, microgripper, micromanipulation, microhandling

1. はじめに

顕微鏡下で観察される細胞、原生動物、あるいは微小機械部品等の μm サイズの試料を、日常の感覚で人間が操作できたらなんと便利なことであろうか。残念ながらこの要求に対して我々が持っている現在の道具は、細く引き延ばしたガラスの棒や管である。このガラス棒や管は必要によっては、曲げたり、接着したりするなどの工夫をして、保持具、注入器、フック、力計測のためのばね、さらにはカッター等として用いられている。

しかしながら近年、半導体製造技術を基盤技術としたマイクロマシニング法により、様々な微小電気機械システム (Micro Electro Mechanical Systems : MEMS) を実現する試みがなされており、微小物質を把持する μm サイズのグリッパに関しても、いくつかの進展があった。ここでは、マイクロマシニング法を用いて著者が開発した、マイクログリッパ (Flexible Microgripper : FMG) について解説する。

2. 研究の歴史

マイクロマシニング法により微小物質を把持する要素は 1988 年に Bell 研究所の Mehregany ら¹⁾により提案されたのが初めてである。この要素は、直動スライド機構を外力により動作させ、ギア伝達で長さ $300\ \mu\text{m}$ の 2 本のアームを回転運動させたものである。その後 1989 年に、Cornell 大学の Chen ら²⁾により静電気駆動型のマイクログ

リッパが発表された。このマイクログリッパは、長さ $150\ \mu\text{m}$ の 2 本のタングステンフィンガで構成され、両フィンガ間の静電力により駆動し、 $2\ \mu\text{m}$ の開閉動作に $150\ \text{V}$ の電圧を要した。同様の駆動方式では 1990 年から、くし歯型静電アクチュエータを一体形成した長さ $400\ \mu\text{m}$ のマイクログリッパが California 大学の Kim ら^{3,4)}により報告され、 $45\ \text{V}$ の駆動電圧により $10\ \mu\text{m}$ の開閉動作が可能となり、低駆動電圧化の試みがなされてきた。しかしながら、海水中や生理食塩水中でのマイクログリッパの利用を考慮すると、より一層の低駆動電圧化の努力が必要である。また、静電方式では微小な駆動電極間隔を要するため、微細な粒子などが混入した環境下では利用しにくい等の、駆動方式からくる構造面の改良が必要である。

その後 1994 年になり、著者^{5)~11)}によりローレンツ力 (電磁駆動) とバイモルフ (熱駆動) の両方で動作する新しいタイプのマイクログリッパ (FMG) が開発され、少ない動作環境制約や、 $1\ \text{V}$ 程度の低い駆動電圧という特徴を活かし、顕微鏡下での水中物質の操作に、世界で初めて成功するにいたっている。

3. FMG の駆動原理と仕様

図 1 に FMG の概略構造を示す。FMG は、シリコンからなる支持体と窒化けい素薄膜からなる薄膜フィンガとで構成される。この薄膜フィンガは、金からなるマイクロコイルと、フィンガ先端には把持性能を向上させるための複数のマイクロチップが一体形成された構造を持つ。駆動のため、この構造体はフィンガとほぼ平行な磁場下に設置される。

FMG は前述のように、電熱的なバイモルフによる駆動と、電磁気的なローレンツ力による駆動で動作するマイクログリッパであり、以下にそれぞれの駆動方法について説明する。

FMG のバイモルフ^{12),13)}による駆動は、フィンガの構成

* 原稿受付 平成 7 年 5 月 9 日。1994 年度 (第 14 回) 精密工学会技術賞受賞業績

** 正 会 員 (株)ニコン中央研究所 (東京都品川区西大井 1-6-3)

1981 年日本大学理工学部精密機械工学科卒、1986 年新技術事業団吉田ナノ機構プロジェクト研究員、1991 年 (株)ニコン入社。微小電気機械およびマイクロ計測デバイスの研究開発に従事、応用物理学会正会員、電気学会 MEMS 協同研究委員会委員

図1 FMGの概略構造図

材料（窒化けい素と金）の線膨張係数に差があることに起因し、マイクロコイルへの通電により発生した熱により個々の材料の膨張量に差が生じ、常にフィンガを閉じる方向に変形することを利用している。この方式は、良く知られているバイメタルスイッチと同様の駆動方式である。

FMGのローレンツ力による駆動は、磁場中の電流成分が力を受けるというFlemingの法則に従った駆動方式である。図1において、フィンガと平行な磁場下においてマイクロコイルに通電すると、フィンガ先端の磁場と直交したコイル部（長さ L_c ）のみに、フィンガを開閉する方向にローレンツ力 F_L が発生し、この力を用いてマイクロフィンガを駆動することが可能となる。一方、磁場と平行なコイル部には初期段階においては力は発生しないが、マイクロフィンガにたわみが発生すると、磁場と直交した電流成分が生じるためにローレンツ力 F_w が発生する。しかしながらこの場合のローレンツ力の方向は図から明らかのように、マイクロフィンガを駆動する方向に作用しない。

FMGの駆動に関する理論的な検討¹⁾²⁾から、マイクロフィンガの駆動量すなわちたわみ d は、以下の単純な式で表記できることが明らかになった。

$$d = \frac{L^2}{2r} + BiLc \frac{4L^3}{Ebt^3} \\ = K_B \frac{V^2}{R} + K_L \frac{V}{R} \quad (1)$$

ここで、 E, b, t, L, r はそれぞれ、フィンガのヤング率、幅、厚み、長さ、バイモルフカンチレバーの曲率半径¹⁴⁾である。また、 k_B, k_L, R, V はそれぞれ、バイモルフ駆動の係数、ローレンツ力駆動の係数、マイクロコイルの抵抗値、駆動電圧である。また、以上の検討から厚みが一定で外形形状が相似的に変化したマイクロフィンガにおけるたわみ d は、バイモルフ駆動ではフィンガ長の自乗に比例し、ローレンツ力による駆動ではフィンガ長の3乗に比例するというスケールファクタを有していることが明らかになった。

このような駆動方法により動作し、フィンガ長が200 μm から1000 μm のマイクロフィンガを設計した。表1に、これらのマイクロフィンガの機械的特性を示す。

4. 製作方法

マイクロマシニング技術を用いて上述のマイクロフィン

表1 マイクロフィンガの機械的特性

タイプ	10 L	8 L	6 L	4 L	2 L
フィンガ長 L (μm)	1000	800	600	400	200
フィンガ幅 b (μm)	200	160	120	80	40
フィンガ厚 t (μm)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
ばね定数 ($\times 10^{-3}$ N/m)	3.36	5.25	9.34	21.0	84.0
共振周波数 (kHz)	0.4	0.6	1.1	2.5	10.1

図2 マイクログリッパのSEM観察写真

ガを製作した。出発原料として3インチの(100)面方位シリコンウエハを用い、最初に窒化けい素膜を全面成膜した後、部分的に5 μm 角の開口部を設けシリコンを露出する。次に、露出したシリコン部を異方性エッチング液によりエッチングし、(111)面で構成されるピラミダルな複数のトレンチを形成する。その後、再び窒化けい素膜を全面成膜した後、フィンガ形状、支持体形状のパターニングを窒化けい素膜に施し、この上にリフトオフ法によりマイクロコイルを形成する。最後に、不要部分のシリコンを異方性エッチング液により除去し、マイクロコイルと複数のマイクロチップを一体化したマイクロフィンガが形成できる。この方法によれば、1枚のウエハ内に数百本のマイクロフィンガを一括製作することが可能である。図2は、製作したFMGのSEM観察写真であり、薄膜フィンガにマイクロコイルとマイクロチップがうまく一体形成されていることがわかる。

5. 実験装置

図3に、FMGによる物質操作で用いたシステムの概略図を示す。製作したFMGは油圧駆動型の三次元マニピュレータに搭載され、顕微鏡下で視野内を三次元に移動可能である。ローレンツ力による駆動を実現するために、顕微鏡のステージ背面にNdFeB系の永久磁石を固定し、ス

図3 実験装置の概略図

ステージとはほぼ平行な磁場環境を実現した。磁束密度は、ステージの10 mm 上部で約0.1 Tである。駆動電源として信号発生器または低電圧DC電源を用い、FMGのマイクロコイルへ通電して、駆動特性の評価を行った。また、物質の操作にあたっては、顕微鏡ステージ上に純水または海水を満たしたピーカを設置し、直径80 μm のポリスチレン球や直径100 μm のウニの卵子を試料として用いた。また個々のフィンガの開閉動作は、ポテンショメータを2つ取り付け付けたマスタフィンガを用い、簡易的なマスタスレーブ方式を採用した。

6. 実験結果

6.1 大気中、水中の駆動特性

図4、図5にマイクロフィンガの代表的な駆動特性を示す。

図4は、大気中における最長フィンガ ($L=1000\mu\text{m}$) の駆動特性を示した図であり、負のたわみはフィンガが開く方向のたわみを意味し、負の電圧はローレンツ力がフィンガを開く方向に動作する極性を意味する。この図から明らかなように、従来の方式のマイクログリッパに比較し、低電圧で大きなフィンガ変位が得られていること、全体の特性カーブがhyperbolicな特性であることから、大気中の駆動では電力に比例するバイモルフ駆動が支配的になっていること、さらに、式(1)を用いて計算から求めたたわみ(実線)は、実験結果を良く説明していることが明らかになった。ここで、高電圧側では、温度上昇に伴うマイクロコイルの抵抗値変化(増加)に起因する、計算値とのずれを考慮する必要があることがわかった。

図5は、水中におけるマイクロフィンガ ($L=800\mu\text{m}$, $1000\mu\text{m}$) の駆動特性を示す図であり、明らかに大気中と異なった特性を有している。水中環境下では大気と比較して熱伝達率が大いいため、マイクロフィンガの温度が上昇しにくくなる。このためバイモルフ駆動の効果が大気中の10%程度に低下し、結果的にはローレンツ力による駆動が支配的になることが明らかになった。また、式(1)を用いて計算したたわみ(曲線)は、大気中と同様に実験結果を良く説明しており、温度上昇による抵抗増加が少ない

図4 フィンガ長1000 μm のマイクロフィンガの大気中における駆動特性図

図中の実線は式(1)により計算したたわみを示す。

図5 フィンガ長が800 μm と1000 μm のマイクロフィンガの、水中における駆動特性図

図中の実線は式(1)により計算したたわみを示す。

ため高電圧側でも良くフィットしていることがわかる。

6.2 物質操作結果

以上のように水中下でも十分な動作が得られることがわかったので、溶液下での物質操作を実施した。この操作ではフィンガ長800 μm のFMGを用い、1.4 Vの最大駆動電圧で動作させた。純水中に分散させた直径80 μm のポリスチレン球(質量約0.3 μg)を把持・輸送・リリースすることが確認できたので、これらの配列を試みた。図6はFMGによりN字状に配列したポリスチレン粒子を示す図である。

図7、図8は、海水中でのウニの卵(直径100 μm)の操作結果を示す図である。生体試料の把持、輸送、リリースが良好に行われることがわかった。またこの操作において、強く試料を把持すると卵は変形した。この変形量と卵の機械的特性¹⁵⁾から、本操作でのFMGの最大把持力は約10 nNであることが明らかになった。

図6 ポリスチレン微粒子の操作結果

図8 FMGにより把持されたウニ卵子

予定である。

参 考 文 献

- 1) M. Mehregany, K. J. Gabriel and W. S. Trimmer : Integrated Fabrication of Polysilicon Mechanisms, IEEE Trans. Electron Devices, **35**, 6, (1988) 719.
- 2) L. Y. Chen, Z. L. Zhang, J. J. Yao, D. C. Thomas and N. C. MacDonald : Selective Chemical Vapor Deposition of Tungsten for Microdynamic Structures, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, IEEE, Salt Lake City, (1989) 82.
- 3) C. J. Kim, A. P. Pisano, R. S. Muller and M. G. Lim : Polysilicon Microgripper, Proc. IEEE Solid-State Sensors and Actuator Workshop, IEEE, Hilton Head Island, (1990) 48.
- 4) C. J. Kim, A. P. Pisano and R. S. Muller : Silicon-Processed Overhanging Microgripper, J. Microelectromech. Syst., **1**, 1, (1992) 31.
- 5) Y. Suzuki : Fabrication and Evaluation of Flexible Microgripper, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, 4 A, (1994) 2107.
- 6) Y. Suzuki : Fabrication of Flexible Microgripper, Proc. 2nd Japan-France Congr. Mechatronics, Kagawa Univ., Takamatsu, (1994) 284.
- 7) Y. Suzuki : Underwater Performance of Flexible Microgripper, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, 10, (1994) 6056.
- 8) 鈴木美彦：フレキシブルマイクログリッパ（第1報）——試作と大気中駆動評価結果，1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1994) 991.
- 9) 鈴木美彦：フレキシブルマイクログリッパ（第2報）——水中駆動特性と物質操作結果，1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1994) 917.
- 10) 鈴木美彦：フレキシブルマイクログリッパ（第3報）——把持力解析と生物操作結果，1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1995) 527.
- 11) Y. Suzuki : Flexible Microgripper, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., **29**, 1, (1995) 10.
- 12) W. Benecke and W. Riethmuller : Application of Silicon-Microactuators Based on Bimorph Structure, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, IEEE, Salt Lake City, (1989) 116.
- 13) W. Riethmuller and W. Benecke : Thermally Excited Silicon Microactuators, IEEE Trans. Electron Devices, **35**, 6, (1988) 758.
- 14) S. P. Timoshenko : Analysis of Bi-metal Thermostats, J. Opt. Soc. Am., **11**, 3, (1925) 233.
- 15) Y. Hiramoto : Mechanical Properties of Sea Urchin Eggs, Exp. Cell. Res., **32**, (1963) 59.

図7 ウニ卵子の海水中の輸送操作結果

7. ま と め

新しい駆動方式を採用したマイクログリッパ (FMG) について解説した。本稿により FMG の駆動特性，応用の可能性についてご理解頂けたら幸いである。また今後は，FMG の高機能化や，新たな操作要素の研究開発を進める