《解説》

マイクロマシン要素技術の動向

—加工・組立, センサ・計測, アクチュエータ—

Trend of Fundamental Technologies for Micromachine
—Fabrication • Assembly, Sensor • Measurement, Actuator—

- 1948年5月生まれ
- 1976年東京大学大学院博士課程修了。同大学工学部を経て1978年工業技術院計量研究所入所。現在同研究所主任研究官。マイクロマシン技術、機械量の計測技術の研究に従事
- 正員、工業技術院計量研究所（〒305 つくば市梅園1-1-4）

梅田 章
Akira UMEDA

1. はじめに

微小化をキーワードにした新しい機械技術がマイクロマシン技術である。サイズの重要度の違いから、通常の機械技術の枠組みをそのままマイクロマシン要素技術の区分とするのは無理であろう。境界線もはっきりしない。ここでは、研究発表の活発な分野を中心に動向について述べたい。

2. 加工・組立

加工を抜きにマイクロマシン研究を進めることは、現状ではほぼ不可能である。加工技術には、シリコンの微細機械加工技術、X線を用いるLIGA (Lithographie Galvanoformung und Abformung) 技術、切削など従来からの機械加工技術、放電加工、ステレオリソグラフィ、ビームを用いる加工技術、光造形法などがある。全体のなかではシリコンが圧倒的に多く用いられている。表面マイクロマシニングとバルクマイクロマシニングに分類されるシリコンの加工技術は、10年単位の歴史を持つ技術であり、センサ分野では多くの実用化がなされつつある。LIGAとは、ドイツ語のリソグラフィ、電鋳、モールディングという3語の頭文字をとった言葉である。

シリコンとLIGAは、加工と組立が同時に進行するバッチプロセスである。その他の加工法は、単品生産の加工方法である。バッチプロセスが重要なのは、組立と加工が同時に進行するために生産効率が高いだけでなく、微小構造の相対的

寸法関係がマスクの中にあらかじめ入力されているからである。この点、単品生産を基本とする加工技術では、まず形状寸法の厳密さと部品のハンドリングによる組立が必要となる。厳密さの程度は組立技術にも依存するであろう。組立が成立するかどうかと部品の概念が成立するかどうかとは1対1の関係にある。経済性を重視しない医療分野は、マイクロサージェリーなどハンドリング・組立技術の開発についての直接的な強い動機を持っている。このような観点から、各種の接合法が広く研究されている。

LIGA技術は、ウラン濃縮のためにドイツで開発されたが、コスト高を理由に他の濃縮方法に取って替わられた技術である。マイクロマシン分野で再び開発が始められ、研究者人口で200人は下らないというドイツが、指導的な立場にある。アメリカ内ではウィスコンシン大学の研究が指導的な立場にある。我が国では本格的なLIGA研究が立ち上がっているとはいいがたい。アメリカではノースカロライナにARPAの後押しで設置されたMCNC (Center for Microelectronic System Technologies) が研究支援を目的に公募による試作をすでに始めている。第1回目の募集を平成5年11月15日に締め切ったところ、25の試作依頼があったそうである。

研究スタイルとしては、シリコン、LIGAなどそれぞれが得意な加工法をベースに研究が展開されているのが、実状である。

シリコンやシリコン基板上に各種の膜を積み上げて構造や機能を創成する際の最大の障害は、設計データが決定的に不足していることである。電

気回路のシミュレーションが実際とよく合うのに対し、微小構造の機械的な性質はほとんど合わないのが実情である。物性が加工条件に大きく依存するため、材料の特性を把握することもさることながら、計測技術の信頼性を高めることが重要である。研究としては、加工条件と機械特性が相互に関係するので、組織的なデータ収集が必要である。

3. 計測, センサ

機械が動力機械, 作業機械, 計算機械, 計測機械に分類される⁽¹⁾とすると, マイクロマシン技術を計測機械を作るための技術と位置付けることは, 現実的には新しいであろう。実際空間的制約条件下での計測ニーズは, 産業機器や医療分野で極めて高く, 計測情報をもとにして次の作業が求められる。従来の機械の設計で第1義的に計測法を考慮することなどは, 従来なかっただろう。機械の主目的は運動や動力の発生であったし, 計測機器の搭載に関して空間的な制約はなかったからである。機械技術と計測技術は独立した分野だったのである。したがって, 計測用デバイスや機器の微小化がマイクロマシン技術の課題となる。今日センサの研究開発が極めて盛んなのはうなずけよう。ただし, 微小化は常に有利ではないことには注意を要する。

一方, 微小構造やデバイスの計測評価装置では微小化は絶対の条件ではない。マイクロ化は, 運動の高速化, 形状の微細化, 新しい加工法, 各種のセンサやコンポーネントの特性評価, 微小領域での新しい機械工学的現象の発見等との関連で, 測定量の範囲を拡大させる。一方, 計測技術の基本的考え方では, ① SI 基本単位や工業量標準の必要とする範囲での国際的な確立, ② 計測機器を標準にトレースする技術の国際的確立, ③ 現象の正しい理解, により信頼性の高い結果が得られるのであるから, 計測評価技術の重要性は極めて高くなる。事実, シリコンでセンサやアクチュエータを作ったけれども特性が測れない, 材料定数が分からない, 材料の機能が測れない, 測定装置の良いものがない, といった声が現場からあがっている。マイクロマシンを原動力として開発さ

れた計測技術が, 従来の機械工学で未解決の課題を解決する可能性が高いと言えよう。

筆者のグループでは, 課題の一つに微小構造の計測評価技術をあげており, 微小構造の運動発生法として, 多少まとまりつつある手法を開発したので紹介させていただく。微小構造の計測では, 以下の項目を考慮する必要があるであろう。

- (1) 固有振動数が高いこと。
- (2) 慣性が効く運動を発生させるためには, 大きな定量的な加速度が必要であること。
- (3) 現状のマイクロアクチュエータでは十分なパワーがでないこと。
- (4) 非接触で運動が測定できること。
- (5) アクチュエータを組み込むといった余分な加工をせずに, そのままで微小構造内部に運動を発生させる方法が必要であること。
- (6) 材料に依存せず, また電場とか磁場を使わないことが望ましいこと。

耐震試験と同様な実験を微小構造ではどうやれば良いのか, という問題とも言える。シリコンの微小構造では, 固有振動数が 100 kHz を優に越えており⁽²⁾, 振動台ではせいぜい振動数で 10 kHz 程度までであり微小構造用としては帯域が狭い。したがって衝撃が好ましいのであるが, 発生は容易であっても定量性を持たせることは困難

図 1 デービス棒による計測の原理 (加速度計への応用例)

であった。

この問題に対し、図1に示す方法を考案した。飛しょう体が棒の端面に衝突するとパルス状の弾性波が発生し他端に向かって進み、到達して反射する際に、パルス状の変位が端面に発生する。入射パルスと反射パルスを分離できる位置にひずみゲージを貼り、ひずみゲージ出力を ϵ とすると端面の運動加速度 $a(t)$ は次式で表される。

$$a(t) = 2C \dot{\epsilon} \left(t - \frac{L}{C} \right) \quad (1)$$

C は棒中の縦弾性波の伝ば速度、 ϵ はひずみの時間微分である。発生加速度のレベルは、飛しょう体の衝突速度、棒の材料などで変化するが、ピークで $5 \times 10^2 \sim 10^6 \text{ m/s}^2$ の範囲、周波数領域も棒のサイズと材質に依存するが、500 kHzは可能である。また端面の運動速度をレーザ干渉計で測定しておき、求められるひずみとひずみゲージ出力を比較して補正関数を求めておけば、レーザ干渉計と同じ精度で微小構造に加えた加速度をゲージ出力から推定することが可能になる。

図2 加速時計の特性評価の実験結果(加速時計は Bruel kjaer 社の 4393 型)

本手法の第1の利用方法は加速度計の特性評価である。加速度の標準は振動で実現されており、国際的な標準では加速度レベルで 100 m/s^2 、周波数レベルで10 kHz程度であったのに対し、市場で入手できる加速度センサはこの領域をはるかに越えている。加速度計を購入しても、位相特性までも含めた周波数特性データが添付されることはないのが実状である⁽³⁾。

加速度計の伝達関数は、次式で表される⁽⁴⁾。

$$G(s) = \frac{\text{Laplace transform } [a_0(t)]}{\text{Laplace transform } [2C \dot{\epsilon}]} \quad (2)$$

分子の $a_0(t)$ は加速度計の出力である。一般に、既知の動的信号を物理的に作ることは困難な場合が多い。図2は、加速度計の周波数特性評価結果である。衝撃加速度の一次標準はドップラシフトのレーザ干渉計⁽⁵⁾による計測で実現し、二次標準は補正データ付きの棒で実現することを、ISO/TC 108/SC 3に提案したところ、文書化作業を開始することが1993年3月に正式に承認された⁽⁶⁾。

次の利用法は、ひずみゲージ周波数特性⁽⁷⁾の導出である。干渉計による端面運動の測定から入射ひずみパルスを求め、Skalak⁽⁸⁾の解析を用いるとゲージを貼った地点を通過するひずみパルスが求まるので、式(2)と同じ原理でゲージの周波数

図3 ゲージ長をパラメータにしたひずみゲージ出力と干渉計計測から導かれるゲージへの入力ひずみの比較(ゲージ長が長くなるにつれ、応答が遅れることが認められる)

応答を求めることが可能になる。現在の上限 200 kHz は増幅器の帯域からきており、増幅器の改良により早い現象の計測も短いゲージ長のゲージで可能になることがわかると同時に、補正関数を求めることの妥当性の検証にもなっている（図 3 参照）。

シリコン微小構造の直接的計測の応用例として、両端支持はりの固有振動数測定がある⁽⁹⁾。図 4 は、両端支持はりを棒端面に接着し、はり中央の運動変位を干渉計で測定した結果得られる固有振動数と計算値の比較を示している。理論値より若干値が低いのは、はり周辺が理論上の境界条件と一致しないためだと考えられる。以上の 3 例から示されるように、補正関数を伴った棒は、微小機械関連の計測分野では従来の振動台に代わる手法として、有用であると主張したい。棒について

は、金属丸棒内部の弾性波伝ばの理論の検証のために、端面の運動をコンデンサで計測した研究者にちなんで、デービス棒と呼ぶことにしている。

シリコンによるセンサ開発は極めて活発で、機械量センサに限ると、圧力センサは運動靴底や自動車エンジンなどで広く実用化をみるに至っている。加速度センサも実用化は近いであろうが、特性評価が難しいとの声が高い。ジャイロについては、研究成果はこれからであろう。

4. アクチュエータ

1988 年夏大々的に報道された静電マイクロモータは、まだ実用化が図られていない。論点の一つは、そもそもシリコンがマイクロアクチュエータに適しているのかどうかである。

微小領域では、静電気のほうが有利であるとい一般的に言われてきたが、最近ではポリイミドの厚膜を露光し、パターンニングし、電気めっきで構造を創成するいわゆるプアーマンス LIGA⁽¹⁰⁾による電磁モータ、本物の LIGA⁽¹¹⁾によるモータの試作など、電磁応用のマイクロアクチュエータの開発の方も目立っている。

1 個の微小なアクチュエータに大きな出力を求めるのか、そこそこの出力のアクチュエータの集合体に機能を持たせるのかで、マイクロアクチュエータの考え方も大きく変化する。後者の例は、静電気力で動く鏡の集合体による映像形成である⁽¹²⁾。また、マイクロ流体回路用の弁やポンプの研究はかなり盛んであることをつけ加えておきたい。

5. む す び

静電気力でマイクロコロボを転がす研究が発表されたのは 1987 年であるが、紀元前 3000 年のピラミッド建設ですでにコロボは使われていた。ギリシャ神話以来の夢であった飛行では、“羽ばたき”からの決別に長い時間がかかった。マイクロマシンの夢の実現には時間がかかるかもしれない。現実には、単純でもよいから微細加工技術による有用な製品を、着実に産み出すことが求められているのではないだろうか。

はりの固有振動数（実験値および解析値）

試料	各部寸法 μm			固有振動数 kHz	
	l	h	w	実験値	解析値
No. 1	3 300	50	560	37	39
No. 2	3 330	85	610	63	65
No. 3	3 300	80	610	59	62
No. 4	3 430	85	580	58	61
No. 5	3 400	80	600	57	59

図 4 両端支持はりの形状、寸法と固有振動数測定結果と理論値の比較

文 献

- (1) 渡辺, 機構学講義 (II), (1961), 共立.
- (2) Judy, M.W. and Howe, R.T., Polysilicon Hollow Beam Lateral Resonators, *IEEE-MEMS*; 93, (1993) 265.
- (3) 梅田, 動的力計測の現状と問題点, 計測と制御, 27-6 (1988), 69.
- (4) 梅田, 特許衝撃加速度計の動的応答特性測定法, 平 1-203501.
- (5) 上田・梅田, デービス棒による加速度計の特性評価方法に関する研究 (第 2 報動的変位測定用レーザ干渉計の開発), 機論, 59-567, C (1993), 3452.
- (6) ISO/TC 108/SC 3/N 212 March 1993, ISO/TC 108/SC 3 N 212 n ANNEX DRAFT MINUTES FROM THE MEETINGS OF ISO/TC 108/SC 3/WG 6.
- (7) 梅田・上田, デービス棒とレーザ干渉計によるひずみゲージの動特性に関する研究, 機論, 59-559, A (1993), 566.
- (8) Skalak, R., Longitudinal Impact of a Semiinfinite Circular Elastic Bar, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 24-1 (1957), 59.
- (9) Umeda, A.ほか 2 名, Generation of Motion in Microstructure by Using the Reflection of Pulse Elastic Waves, *Proc. ASME-WAM DSC-Vol. 40* (1992), 69.
- (10) Allen, M.G., Polyimide-Based Processes for the Fabrication of Thick Electroplated Microstructures, *Proc. Transducers '93* (1993), 60.
- (11) Guckel, H.ほか 4 名, Design and Testing of Planar Magnetic Micromotors Fabricated by Deep X-ray Lithography and Electroplating, *Proc. Transducers '93*, (1993), 76.
- (12) Sampel, J.B., The Digital Micromirror Device and Its Application to Projection Displays, *Proc. Transducers '93*, (1993), 24.

(原稿受付 1994 年 1 月 12 日)