マイクロマシン技術の中の歯車*

日本機械学会論文集(C編)
65巻636号(1999-8)

矢 田 恒 二^{*1}

Gears in Micro Machine Technology

Tsuneji YADA^{*2}

^{*2} Yada Engineering Consulting Office 2-7-8, Komaba, Toride, Ibaraki, 302-0027 Japan

Key Words: Gear, Micromachine, Non-Traditional Machining, MEMS, Surface Micromachining, Stereo Lithography, Wear Test

1. ま え が き

マイクロマシンは日本で造られた言葉である。同じような技術を米国ではMEMS(Micro Electro-Mechanical System), ヨーロッパではMST(Micro System Technology)などと呼んでいるが, それぞれは微妙にその概念を異にしている。しかしいずれもマイクロメカトロニクスを目指していることに関しては同じである。ところで欧米では基本的にはシリコンプロセスをベースにした技術による, 機械的デバイスを指しているのに対して, 日本でいうマイクロマシンは機械的加工法によるデバイスの製造も視野にいたれた, かなり広い概念で捕らえている。両者とも機械的動作の実現が目標である。したがって動力伝達のデバイスが必要になり, 歯車もそのための道具として使おうとする発想が出てくるのも自然の成り行きといえよう。そのため, マイクロ歯車の製作の試みがこの技術の発生の初期から行われた。当初は単に歯車形状の製作をデモンストレーションとして提示した報告が見られたが, 最近ではその時期を過ぎ, 運転できる歯車の報告が見られるようになってきている。本文ではこのような状況をマイクロ歯車を視点におき, 歴史的経過も含めて展望することにする。

2. 表面微細加工技術

2.1 加工プロセス シリコンプロセスは本来は半導体デバイスを作るために開発された手法である。これをさらに発展させ, 様々な機構部品をシリコン基

盤上に創製する技術が1980年代に開発された。その方法は半導体デバイスを作る方法と基本的には同じである。つまりシリコン基盤の上に, 様々な材料を使って蒸着, エッチング, 電鍍などの様々な工法を織り混ぜて種々の形状を創製する。プロセスの手順は何を作るかによって様々な方法が用いられるので一概にいうことはできない。そのもっとも単純な例をここでは図1に示す。

まず最初にシリコン基盤の上に化学的処理や蒸着, イオン打ち込みなどにより, 薄膜を形成し, その上に感光性機能材料(フォトリソグレイ)を塗り重ねる。その

Fig. 1 Example of basic silicon process

* 原稿受付 1999年4月23日。

^{*1} 正員, 矢田技術士事務所(☎ 302-0027 取手市駒場 2-7-8).
E-mail: NN2T-YD@asahi-net.or.jp

上に必要なパターン形状を持ったマスクを重ね光で露光する。これが図1(a)に示された工程である。

この工程により光化学反応材料の露光した箇所は、露光しない部分と化学組成が変わる。そこで化学溶液あるいは活性ガス中に晒すことによりこの部分を選択的に除去することができる。一種の現像工程で、図1(b)の工程をフォトリソグラフィと呼ぶ。ついで(b)工程で除去された箇所に金属材料等を電鍍処理などで埋め込む(c)。そして再び(b)工程とは異なった化学液などで洗うと金属材料のみが残り、マスクで描かれた形状の金属性部品ができる[(d)の上側の形状]。

このようなプロセス以外に、シリコン基盤はその結晶方位により化学雰囲気による腐食速度が異なることを利用する方法がある。この方法によればシリコンに種々の形態のくぼみを造ることができる[(d)の下側]し、薄膜を溶かす処理をすれば成形された金属材料のみをはがすことができる。この(d)の工程をエッチングと呼んでいる。このような一連の工程によって成型物を作り出す技術を表面微細加工技術と呼ぶ。

図1は基本的なプロセスの一例を示したものであるが、創生されたものが機構部品であるためには機械的に動けることが必要である。そのためには、可動部分が固定部分と空間的に接触のないことが要求される。このような部分を造るためにはプロセスの途中で犠牲層と呼ばれる膜を造り、最終的にはこの層を化学的処理により取り除くことで実現する。複雑な機構部品を造るためにはこのプロセスはますます複雑になっていくことになる。

表面微細加工技術の特徴は小型形状の機械部品を造れることのほかに、機構部品と一体となった電子部品も造り込めることにある。そのためアクチュエータも制御回路も同時に組み込んだデバイスができることが最も大きな特徴である。

Fig. 2 Micro gear in the first stage^{(1),(2)}

2・2 演習問題として試作された歯車 表面微細加工技術によって造られた最初の歯車は図2のようなものであった^{(1),(2)}。この最小歯車の直径は125 μm 、その厚みは3 μm である。歯車の形状はただの突起があるだけであり、機構学的な観点から見れば稚拙な構造といえよう。これは一つのデモとして造られた気配が濃厚で実際に動いたかどうかは定かでない。

その後、このプロセスによっていろいろの歯車が造られ、その歯形も機構学に基づいた曲線が採用されるようになってきている。図3はその例⁽³⁾でインボリュート(a)とサイクロイド歯形(b)を製作した。いずれの歯形もピッチ円付近での歯厚は10 μm 、造られた歯車の最小のピッチ円直径75 μm である。歯幅の記述はないが3 μm 程度と思われる。この歯車はワブルモータのトルクを測定するために造られた。そのため連続回転状態での記述はない。

さらに図4⁽⁴⁾は米国サンディア国立研究所で造られた歯車である。ここではいろいろな歯車を表面微細加工で造っているが図はそのうちの一例で、歯数19枚、外形76 μm 、厚みの数字はほかの論文から推測すると2 μm 程度と思われる。歯形は完全なインボリュートであるとしている。しかしその測定法は不明である。この図4において、それぞれの歯車の上にあるホイール状のものは、歯車が噛み合って回転したときに軸から抜けて飛び出さないようにするためのリテーナである。

Fig. 3 Involute tooth (a) and cycloid tooth (b)⁽³⁾

Fig. 4 Geartrain developed by Sandia National Laboratories⁽⁴⁾

2.3 LIGA プロセス シリコンプロセスのフォトリソグラフの光源としては紫外線をはじめとする波長の短い光線が使われる。しかし光線がマスクのような隙間を通過すると、マスクからの距離が大きい部分では干渉が生ずるので、溝の壁面を垂直に造ることが難しくなる。つまり垂直な壁面の高さや上面の幅に制約が出てくる。この(壁面の高さ/上面の幅)をアスペクト比と呼んでいる。

アスペクト比を大きくするためには光源の波長を短くすることが一つの解決法である。ベルリンのフランクフォフ研究所ではサイクロトロンから出る X 線をこの光源として使う方法を開発した。これを LIGA (Lithographie Galvanoformung und Abformung) プロセスと呼んでいる。このドイツ語からもわかるように、リソグラフィ、電鋳、モールドイングの意味である。線幅 1-10 μm 、高さ 100 μm 程度の高アスペクト比の構造体が高精度に造ることが可能である(図 5⁽⁵⁾)。

プロセスは図 1 の場合と基本的には同じで、レジストとして例えば PMMA のような高分子材料が使われる。そして X 線の照射部分を除去した後に電気メッキにより金属構造体を作る。これを雌型としてモールドイングを行うことによって一括して多量の機構部品の製作が可能である。モールドイング材料としてはプラスチック、金属、セラミックといった多様な材料を選択できるし、シリコン半導体素子などと組み合わせることができるのが特徴である。

図 6 は LIGA プロセスで造られたと思われる遊星歯車機構である。この例はドイツのシンポジウムの論文募集広告⁽⁶⁾に載っていたのでその大きさは定かでない。左上方に見えるマッチの先端の大きさから推測して全体の直径が 1.5 mm 程度であろう。これが実際に動いたかどうかはわからない。しかし図 7⁽⁶⁾の遊

星歯車の仕様はもう少し具体的である。これも LIGA プロセスで製作されたもので外形 1.77 mm、モジュール 38 μm 、減速比=3:1 で NiFe 製である。この外形は 2 mm で、出力トルク 5 μNm 、回転速度 20 万 rpm で回転する永久磁石モータの減速機として造られた。

3. 精密加工技術

3.1 放電加工 放電加工は電極とワークの間の放電現象を利用することにより加工するもので、通常の大きさの部品に対しても精密加工法として良く知られている。ワイヤ放電加工と形彫り放電加工の 2 種類に大別される。この方法によって工業的にマイクロ歯車の加工を行った例は珍しいことではない。例えば時計用歯車としてはモジュール 40 μm のプラスチック製のものがあり、その金型加工に放電加工が使われている。これに対して実験室的に作られたものとしては次に述べるモジュール 24 μm の歯車がある⁽⁸⁾。その仕様を表 1 に示す。

3.1.1 ワイヤ放電加工 この加工法でインポリ

Table 1 Specification of fabricated gear by wire electric discharge machining⁽⁸⁾

Module	0.024 mm
Number of teeth	9
Diameter of tip cylinder	0.28 mm
Diameter of root cylinder	0.172 mm
Face width	0.3 mm

Fig. 6 Example of constructed planetary gear mechanism⁽⁶⁾

Fig. 7 Section of planetary gear system⁽⁷⁾

Fig. 5 Sectional view having high aspect ratio by LIGA process⁽⁵⁾

ユート歯車を作る場合、歯溝の最奥部では、歯数が小さいときにはワイヤが歯底に届かず、すみ肉部分と歯底部分に取り残しが発生する。そのためワイヤはより深く歯底方向に送る必要が出てくる。しかしこれを過度に行くと切下げが発生するので許容値の範囲内にとどめる必要がある。ここではその許容値を頂げきの1/10以下とした。

図8はこのようにして加工された歯車の例である。この例は放電加工法で造られた歯車としては最小の部類に属するが、ワイヤ放電加工の限界を検証するために行われた実験例であり、実際に運転されたかどうかは定かでない。

3・1・2 総型放電加工 ワイヤ放電加工法で歯車を加工するには大変時間がかかるので、総型電極を用いた放電加工ならばその加工時間を短縮できる。そこでこの放電電極をLIGAプロセスを用いて製作し、この電極を用いて目的とする歯車を製作した例が報告されている。この方法で製作される歯車は電極構造を反転した形となる。

この方法で内歯歯車をアレイ状に並べた電極をLIGAで製作し、タングステンカーバイトの素材を順番に通すことによってアスペクト比の大きい外歯歯車を製作している。図9⁽⁹⁾はその例を示す。この歯車の外形は200 μm 、歯数12枚で歯幅1 mmであった。このように大きなアスペクト比の加工ができることによって、加工時間も格段に短縮されたが、外形は軸方向

Fig. 8 Tooth profile fabricated by wire electrical discharge machining⁽⁸⁾

Fig. 9 Example of large face width gear⁽⁹⁾

に4 μm の寸法の変動があったと報告されている。このことからわかるように、この方法は電極の磨耗や、電極と素材との隙間のために、電極形状が正確に転写されない弱点がある。このことは軸のような単純な形状のものなら良くても、形状精度が厳しく要求される歯車にとってはかなり大きな障害といえよう。

放電加工法によって造られた特殊な歯車としては図10のような傘歯車⁽¹⁰⁾の例がある。これは直径150 μm のタングステン電極を用いてシリコンウエファ上に造ったものである。直径4.3 mmであり、上述の基準からいえば決してマイクロとは呼べないが、シリコンプロセスのようなエッチング工程を経ることなく、ウエファ上に機構部品を造ったところに意味があるといえよう。

3・2 光造形法 光硬化性樹脂の一部をレーザー光で硬化させて型板形状を製作し、それを積層させることにより三次元形状を得る方法を光造形法と呼んでいる。この方法を用いれば、複雑な立体物を短時間でできることが特徴である。複雑な形状の金型の製作などに使われ始めている。しかし樹脂に対する光の透過深さの制御が難しいことと、薄い層を積層するために、壁面が斜になっているような形状では、端面をなめらかに作ることが難しいなどの欠点を持っている。現在市販されている装置では1枚の積層部分の厚みはせいぜい数十 μm である。

ところで、光リソグラフィではアスペクト比が大きくても、軸付の歯車をこの方法で作ろうとすると、プ

Fig. 10 Fabrication example of bevel gear⁽¹⁰⁾

Fig. 11 Gear with shaft fabricated by stereo lithography⁽¹¹⁾

ロセスが複雑になり簡単ではない。図 11⁽¹¹⁾ はエポキシ系のレジスト材 SU 8⁽¹²⁾ で軸付の歯車を造った例である。これの製作には 2 段階のプロセスが採用された。まず LIGA プロセスを用いて SU 8 で歯車を造る。次にその歯車を SU 8 の中に浸けて、歯車の上に光造形法で同一材料の軸を成長させ、軸付の歯車としたものである。

4. 運転試験例

マイクロマシン歯車が造られる動機は、歯車が機械らしいイメージをもつことと、平歯車に関していえば二次元データさえあれば製作が容易なためと思われる。このような動機では歯形曲線はそれほどうるさく吟味する必要がない。試作品を動かしても噛み合っただけで回ったかどうかを見てみるまででとどまっている例が多い。その中で次の 2 例は運転試験をしたという観点から興味のある知見を与えてくれる。

4.1 サンディア国立研究所の例 サンディア国立研究所は歯車アクチュエータを駆動源として、スキャナミラーを動かす装置を研究している。図 12⁽¹³⁾ はこのシステムの構成を示す。図 12 の左方に斜めに傾いているのがスキャナミラーで、右下に延びているバーにラックがついている。また右端にある 2 本の棒の先に直線方向に動く歯車直線モータの出力端がそれぞれ結合されている。この棒の結合点にある歯車は、丁度、時計のガンギ車のような機構によって棒の直線運動を回転運動に変える役割をしている。さらに歯車の運動は歯車列とラックを介してミラーのバーを直線運動に変えるので、アクチュエータの動きによりミラーの傾き角を制御することができる。これらの装置はミラーも含めて、一体としてシリコン基盤上に表面微細加工技術で造られている。このシリコン基盤の上にはこのような機構部品ばかりでなく、モータを制御する電子回路部分も一体として造り込まれている。マイクロマシンの特徴の良く表れた例ともいえる。

この組み合わせでは駆動歯車に噛み合っている、直径

800 μm の大歯車は、歯幅が 2 μm である。運転試験の結果、この小歯車は 100 000 rpm で回転し、 10^8 回の起動停止を行っても問題なかった。最近のホームページのデータでは、新たに実験を行い小歯車に関しては 300 000 rpm で回転させて 8×10^8 以上の寿命があるといっている。

また発表時のデモ用ビデオではこの歯車列に小さな虫をのせて回転させ、最後には虫が歯のかみ合い部分に脚を挟まれて動けなくなっている状態を写し出していた。このことはただ回転するだけで良としていたそれまでのこの種の歯車から一歩踏み出し、それなりのトルク容量を持つようになった例といえよう。

同じグループはポリシリコン製の 2 μm の半径を持つ垂直円筒面と、 $2.5 \times 1.8 \mu\text{m}$ の断面を持つビームとを交差接触させた場合の摩擦を考察した⁽¹⁴⁾。それによると、片方を完全に乾燥状態にした面と、ODT (octadecyltrichlorosilane) でコーティングした面を摺動させた場合、コーティングしない面同士の場合よりも 3 倍の寿命があり、その摩擦係数は 0.14~0.16 であったとしている。

4.2 マイクロマシンプロジェクトの例 次の例⁽¹⁵⁾ は磨耗試験まで行われた例である。この歯車は通産省のマイクロマシンプロジェクトの一環として製作されたもので、マイクロ放電加工機により製作された。これにより 3 K 型遊星歯車機構を構成している。その仕様を表 2 に示す。

この歯車では形状誤差も測定されているが、歯車に必要な寸法としては太陽歯車のまたぎ歯厚が 1 箇所測られているのみで、その誤差量の大きさは 1.3 μm であった。このような小さな歯車の計測法が未確立のた

Table 2 Specification of 3 K type planetary gears⁽¹⁵⁾

Module : 30 μm , Material: SUS304, Reduction ratio: 115

	Sun gear	Planetary gear	Fixed Internal gear	Movable Internal gear
Number of teeth (mm)	12	23	57	60
Diameter of tip cylinder (mm)	0.47	0.76	2.2	2.56
Face width (mm)	0.55	0.5	0.25	0.25

Fig. 12 Scanner mirror⁽¹³⁾

Fig. 13 Result of tooth wear test⁽¹⁵⁾

Table 3 Specification of 2K-H type micro planetary gears⁽¹⁶⁾

Reduction ratio	Housing		Output torque (μ Nm)	Input revolutional speed (rpm)	Efficiency (%)
	Out side diameter (mm)	Length (mm)			
3.6	1.9	2.14	50	20000	88

め、やむをえないことではあるが、マイクロ歯車の測定法の確立は今後の課題として残されている。

歯車はすべてステンレス鋼で造られたが、組立て後、太陽歯車軸回転速度 1 000 rpm で無潤滑、無負荷運転試験を行った。運転後 SEM によって太陽歯車の歯面性状を観察し、その歯厚の変化状態を観察している。図 13 はその結果を示す。これによれば 10 万回転までに 4 μ m 程度の初期磨耗が発生し、その後 300 万回転までは磨耗の進展は 1 μ m 以内にとどまっている。この種の 3 K 型遊星歯車機構では内歯歯車、とくにこの仕様の歯車では固定内歯車に、負荷状態では過大な力が発生する。そのためこの無負荷運転状態の結果をそのままこの機構の負荷性能の評価につなげることは無理がある。また磨耗の原因として歯車のどの誤差が支配的なのかもここでは不明のままである。歯車技術からの観点からいえば、現状ではこの種の歯車を組立てるのが精一杯ということであろう。

最後に、スイスの商社が市販している 2 K-H 型マイクロ遊星減速機の仕様を表 3⁽¹⁶⁾ に示す。これは図 7 で示した技術を使ったと思われるもので、すべてがプラスチックでできている。3 段までタンデムにつながれたものまで製品化している。この大きさは前述の 3 K 型遊星歯車機構よりも寸法は小さい。

5. 今後の課題

通常の大きさの歯車はいい加減なものでも、その寸法の外形に対する相対精度は 10^{-3} より悪いものはない。したがって同じ程度の相対精度を外形 1 mm の歯車に要求するとすれば、1 μ m 以下の誤差が要求されることになる。しかし現在造られているマイクロ歯車の精度は、測定法そのものがないためとはいえ、それほど高いとはいえない。歯車は軸心の精度、ピッチ誤差、歯形誤差などが相互に絡み合って、始めてなめらかに回転を伝えることができる。したがってマイクロ歯車で外見上歯車らしい形をしていたとしても、かみ合いの成立条件から見れば似て非なるものである可能性が高い。

また噛み合い部分では、潤滑が必要なのかもどうか現在のところ明確ではない。寸法が小さくなると等身大の機械では無視できた表面張力や、ファンデルワールス力の影響が大きくなるため、これらが噛み合いに

対してどのような影響を持ってくるかは現在のところわからないといったほうがよい。このような分野をマイクロ理工学とっている。しかし噛み合い条件そのものは幾何学的に決まるものであり、この条件を満たさないものでは滑らかな噛み合いを期待できない。歯車精度を吟味した上で、使える限界はどのへんまであるのか、興味のある課題である。伝動装置とマイクロマシンの関係については詳しい報告⁽¹⁷⁾がある。

このようにマイクロ領域での歯車の成立条件は未知の部分が多い。しかし現実には無負荷 100 000 rpm、起動トルク 7.5 μ Nm、最大出力 340 mW のモータに繋がれた、遊星減速機⁽¹⁶⁾が商品化されていることを考えると、この限界は更に小さな領域まで延長できるのかも知れない。

文 献

- (1) Mehregany, M., Yu-Chong Tai, *J. Micromech. Microeng.* 1(1991), 73-85.
- (2) Mehregany, M., Gabriel, K., Trimmer, W. S. N., *IEEE Trans. Electron Devices*, 6(1988), 719-723.
- (3) Stark, K. C., Mehregany, M., Philliops, S. M., *Proc. IEEE, 10th Micro Electro Mechanical Syetem, Nagoya*, Jan. 26-30(1997), 221-226.
- (4) Rodger, M. S., Sniegowski, J. J., Miller, S. L., Barron, C. C., McWhorter, P. J., *Proc. of SPIE*, 3224(1997), 120-130.
- (5) Ueno, H., Hosaka, M., Tabata, O., Konishi, S., Sugiyama, S., 電気学会論文誌 E, 119-E 4(1999), 229-235.
- (6) Messe Stuttgart Micro Engineering 99, (1999), Invitation for exhibitors.
- (7) Lehr, H., Abel, S., Ehrfeld, W., Germer, M., Hagemann, B., Kaemper, K. P., Michel, F., Nopper, M., Loewe, H., Thueringen Ch., *Proc. Europe-Asia-Workshop on Mechatronics*, Sep. 29(1995), 21-26.
- (8) 堀光平, 村田義晴, 機論, 60-579, C(1994), 3957-3962.
- (9) Takahara, K., Shibata, N., Guckel, H., *Proc. MEMS* (1999), 238-243.
- (10) Reynaerts, D., Meeusen, W., *Sensors and Actuators*, A 67(1998), 159-165.
- (11) Bertsch, A. Lorenz, H., Renaud, P., *Proc MEMS* (1998), 18-23.
- (12) Lorenz, H., Despont, M., Fahrni, N., Brugger, J., Vettiger, P., Renaud, P., *Sensor and Actuator*, A 64, (1998), 33-39.
- (13) Miller, S. L., Vigne, G. La., Rodger, M. S., Sniegowski, J. J., Water, J. P., Whorter, P. J., *Proc. of SPIE*, 3224 (1997), 24-30.
- (14) Senft, D. C., Dugger, M. T., *Proc. of SPIE*, 3224, (1997), 31-38.
- (15) Shimizu, N., Asai, K., Aoki, S., Shibaike, N., *Proc. The 4th International Micromachine Symposium, Micro-machine Center*, Oct. 29-30(1998), 177-185.
- (16) System Faulhaber カタログ, 光進ミニモディビジョン (1998).
- (17) 日本機械学会, RC 132 伝動装置の現在技術の限界とその克服に関する調査研究分科会報告, (1997), 309-325.