放射光を用いたマイクロコネクタの開発

羽賀 剛*, 奥山 浩*, 平田 嘉裕*, 芳賀 孝吉*, 高田 博史*

Development of Micro Connector Using Synchrotron Radiation

Tsuyoshi HAGA*, Hiroshi OKUYAMA*, Yoshihiro HIRATA*, Koukichi HAGA* and Hiroshi TAKADA*

*住友電気工業株式会社播磨研究所 (〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都3-12-1)

*Harima Research Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd. (Harima Science Garden City, 3-12-1 Kohto, Kamigori-cho, Akoh-gun, Hyogo 678-1205)

概要 マイクロマシンに搭載しマシン同士を連結するためのマイクロコネクタ (直径2.5mm, 厚さ2mm) を開発した。このマイクロコネクタは幅7 μ m, 高さ80 μ m, 長さ300 μ mの片持ち梁構造の端子を24本有し, 端子はシンクロトロン放射光のX線を用いたディープX線リソグラフィ技術と微細めっきを組み合わせることで製作した。われわれは, 結晶子サイズを小さくし, 結晶子サイズや配向をめっき成長方向に揃えることで, Niめっき構造体のヤング率および靱性を高くし, 端子製作に適用した。マイクロコネクタの電気的特性を測定し, マイクロマシンからの要求仕様を満たすことを確認した。

Abstract

We developed micro connectors for chain-type micromachines those inspected the outer surface of tubes in the heat exchanger of power plants. The micromachines are linked to each other via the micro connectors. The diameter and thickness of the micro connector are 2.5mm and 2mm, respectively. The electrical terminals (width : 7 μ m, height : 80 μ m, length : 300 μ m) were designed to minimize the friction force during connection/disconnection and were fabricated using deep X-ray lithography and micro Ni electroplating. To obtain a desirable characteristic as a terminal spring, we developed Ni electroforming technique that realized the small grain size (10nm) and the preferred orientation of the grain (111). Therefore, the Young's modulus and elastic limit of this Ni structure are very high (250MPa and 1000MPa, respectively). We confirmed the electrical tests of micro connectors and the automatic connection and disconnection between the micromachines.

Key Words: LIGA, Micromachine, Connector, Electroforming, Grain Size, Young's Modulus

1. 緒 言

マイクロマシンはその小さなサイズによる制限から1台当たりの出力や機能に限界がある。このため, 多数のマイクロマシンを集団で動かし, より大きな出力やより高度な機能を取り出す多数分散型マイクロマシンシステムが提案されている。

その例として, 通産省工業技術院のマイクロマシンプロジェクトの1つである「細管群外部検査用試作システム」がある (Fig. 1)^{1,2)}。これは, 発電施設の熱交換器のような林立する細管の外部損傷の有無を検査するためのマイクロマシンシステムである。狭い細管間を通過可能のように小型で, かつ, ある程度大きな検査領域を確保し, 多くの機能 (探傷機能, 通信機能など) を満足することが要求されており, これら相反する要求を満足させるため, 小さなマイクロマシンごとに必要最小限の機能を分散させ, 作業は多数のマイクロマシンを連結して行う。

マイクロコネクタはこれらマイクロマシンを機械的・電氣的に連結する機能を担っており, Fig. 2³⁾に示すように

Fig.1 Schematic view of the system for inspection on the outer surface of tubes

Fig.2 Prototype of component micromachine

マシンの上部両側に配置されている。マイクロマシン同士の連結／分離は、人の手の届かないところで行う必要があることから、マイクロコネクタは電磁アクチュエータによる自動着脱機能を有している。また、きわめて小さな領域に多数の電極端子を配置し、かつ確実な電気的な接触を確保するため高精度に端子を製作する必要から、放射光のX線を用いたリソグラフィ（Deep X-ray Lithography：DXL）技術を端子製作に適用することを試みた^{3)~5)}。本論文では、めっきによる微細端子の製作を主に、マイクロコネクタの基本設計および製作プロセス、電気的な特性の測定結果について報告する。

2. マイクロコネクタの設計

マイクロコネクタの構造をFig.3^{3),4)}に、本マイクロマシンシステムからのマイクロコネクタの要求仕様をTable 1に示す。マイクロコネクタの電極端子はアルミナ絶縁基板上に製作し、アルミナ基板内の貫通電極を介して基板背面

Fig.3 Schematic view of the microconnector

Table 1. Microconnector requirements

Connection/Disconnection	Automatic (remote control)
Connectable Distance	>500 μ m
Thickness	< 2 mm
Diameter	<2.5mm
Electric line	7
Current rating	150mA/line
Voltage rating	60V
Frequency range	DC~ 1 MHz

でFPC(Flexible Printed Cable)と接続している。この構成を用いることで配線スペースを最小限にした。FPCと貫通電極との接続は、FPC側に高さ80 μ m程度のバンプを設け導電性接着剤を用いて接続している。

2.1 アライメントシステム（自動着脱システム）

マイクロマシン同士が連結する際にマシン間の位置ずれがある程度大きくてもコネクタ側で吸収できることが求められており、自動着脱可能な裕度（ギャップばらつき、角度ばらつき等に対する裕度）が大きいコネクタを製作する必要があった。このため、コネクタの端子とテーパを有するガイドを環状に配置することで、あらゆる方向からの挿入に対応できるようにするとともに、中心に永久磁石を置くことでコネクタ同士の傾きを自動的に補正できる構造としている（Fig.4）。コネクタの駆動力は電磁石によって発生し、コネクタが近づくにつれて永久磁石同士の吸引力が増し、電磁石による駆動力の減少を補う。連結は永久磁石の吸引力のみで保たれ、連結中の電力消費はない。コネクタの分離は電磁石を逆励磁することで中央の永久磁石を分離し磁石の吸引力を弱め、ばねの反発力によってコネクタを外すことで複数個のコネクタを一括して着脱することが可能になる。

2.2 端子構造の設計

微細な端子を製作する場合、その構造はできるだけ単純なほうが好ましい。しかし、大気中に曝されているコネクタの電極端子は、たとえ表面が金でコーティングされていても端子の汚染を防ぐことは困難であり⁶⁾、端子接触には単純な突き合わせではなく、端子表面の汚れを拭い去る効果（ワイピング効果）が期待できる構造が求められる。そこで、マイクロコネクタには、構造が単純な片持ち梁構造の端子と固定端子を用い両者を差込む方式を採用した。また、コネクタ面あたりの端子密度を下げずに150mA/線の大電流通電を実現するため、端子の高さ方向に接触面積を稼ぐ構造とした。

コネクタの自動着脱を実現し駆動アクチュエータのサイズをできるだけ小さくするには、挿抜抵抗となる端子の接

Fig.4 Principle of rectification force generation

触圧力を低くする必要があった。微細な模擬端子を用いた予備実験から、金-金接触において安定した接触電気抵抗が得られる端子の接触荷重は0.5mN以上であり、この結果よりマイクロコネクタ1端子の設計上の接触荷重を0.5mNと決めた³⁾。安定した電気接触が得られる限界の接触荷重値を選んだため、接触荷重のばらつきによる接触不良の発生を抑える必要から、端子のばね定数に高い精度が必要であった。また、片持ち梁構造において曲げに対する発生荷重は端子幅の3乗に比例するため、端子幅には $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下の寸法精度が必要となった。そこで、われわれはこの端子の製作に高精度高アスペクト（高さ／幅）比微細構造体製作が可能なDXL技術を採用した。DXL技術による端子製作の詳細については次章で述べる。所望のばね特性を得られる片持ち梁構造端子の寸法は、有限要素法による解析結果とDLX技術によって製作した模擬端子を用いた実測結果を元に設計を行った³⁾。

3. 電極端子およびガイドの製作

DXLはシンクロトロン放射光リングからの高輝度、高透過性（短波長）で指向性良いX線の特徴を利用し、高精度に製作した等倍転写型X線マスクを用いて、高アスペクト比構造体を高精度加工する技術である⁷⁾。先に述べたように、高い精度と高アスペクト比構造が要求されるマイクロコネクタの電気端子はDXL技術を用いて製作した。また、コネクタガイド部もコネクタの位置決めや端子の保護のため、高い寸法精度と高アスペクト構造が要求されるので、DXL技術を用いて端子とともに一括して製作した。さらに、DXLによってできたレジスト構造体の間にめっきを行い、その後レジストを除去することで金属構造体の端子およびガイドを製作する（LIGA-like Process）。

3.1 電気端子の製作方法

片持ち梁構造の端子はLIGA-like Processと犠牲層プロセスを組み合わせることで製作した（Fig. 5）。このようにする

Fig.5 Flow of one-layer sacrificial process for cantilever terminals

Fig.6 SEM micrographs of cantilever terminals (Female connector)

ことで支持部に支えられた片持ち梁はばねとして働くことができる。めっき金属としてはヤング率が高く内部応力の発生が少ないことから電解Niめっきを採用した。われわれの行った犠牲層プロセスは、“密着層”と“犠牲層”の2種類の層を有する一般的な犠牲層プロセス⁸⁾とは異なり、スパッタリングで製作したTi層1層に密着層と犠牲層の両方の機能を持たせた。このようにすることで、密着層や犠牲層のパターンニングが不要となり、製作プロセスの大幅な簡素化を行うことができた。犠牲層プロセスを用いて製作した片持ち梁構造の端子をFig. 6に示す。アルミナ基板上に製作した $2\mu\text{m}$ 厚のTi層上にLIGA-like Processを用いてNi構造体を製作し、ウエットエッチングにより一部のTiを除去し、可動部を製作する。製作した片持ち梁の寸法は、幅 $7\mu\text{m}$ 、高さ $80\mu\text{m}$ 、長さ $300\mu\text{m}$ である。端子のばね定数に大きく影響する端子幅の製作精度は $\pm 0.5\mu\text{m}$ である。次に、製作した片持ち梁の端子がばねとしての機械的特性に大きく影響するめっき金属の結晶構造と密度分布について述べる。

めっき金属の機械特性は結晶子の配向性や結晶子サイズが大きく影響する^{9),10)}。そのため、LIGA-like Processで製作したNiめっき片持ち梁には、面方向だけでなく特にめっき成長方向の配向性や結晶子サイズが均一であることが要求される。めっき初期の配向性や結晶子サイズは一般的に下地膜の影響を受けやすく、成長方向に分布を持つことがある。また、めっき条件や添加物によって配向性や結晶子サイズは大きく変化する。すでにわれわれがLIGA Processの金型として用いていたNiめっき⁷⁾は結晶粒サイズが数 100nm と大きく、そのため弾性限界が約 500MPa とばね材としては低く脆いことに加え、Fig. 7 (a)に示すように結晶粒の配向もめっき成長方向に分布していたため高アスペクト構造のばね材として好ましくないことがわかった。

LIGA Processに適用可能なめっきとしては、高アスペクト比のレジスト構造体間でも液の置換が可能なほどめっき液の粘性が低く、かつ厚着けしてもマイクロクラックを生じないめっきとしてNiやCuが一般的に用いられている。しかしCuは硬度が低く、コネクション時のガイド同士の衝突および摩擦で容易に変形または磨耗するため好ましくなかった。また、近年MEMS用めっきとしてNi-Wが提案されているが¹¹⁾、現時点ではめっき液管理が難しいため、

Fig. 7 Variation of preferred orientation of the Ni grains
(a) Normal Ni electroforming for LIGA mold.
(b) Ni electroforming for cantilever terminal.
(Both the orientations were measured by XRD)

めっきごとの機械特性のばらつきが大きく、また、めっきの内部応力が大きいと端子可動部の反りが予想されたので、今回は使用しなかった。そこで、われわれは今まで使用してきたスルファミン酸Niめっき液にサッカリンやブチンジオール等の添加剤を加えることによって、結晶粒サイズの小さく化およびめっき成長方向に対する配向性および結晶子サイズの均質化を図り、ばね性の向上を試みた。Fig. 7 (b)およびFig. 8にマイクロコネクタ端子製作に用いたNiめっきの配向性と結晶子サイズの厚さ方向分布を示す。なお、配向性と結晶子サイズはX線回折測定により求めた。測定結果からわかるように(111)配向性を持っており、Wilson法にて求めた結晶子サイズは10~12nmであった。また、めっき開始面から高さ200μmまで、めっき成長方向において配向性、結晶子サイズともきわめて一定であり、結晶構造的に均質であることが確認できた。さらに、(111)配向であることはヤング率が高くなる傾向であること

Fig. 8 Average grain size variation of Ni fabricated using LIGA-like Process

とを示しており、また結晶子サイズが小さいことはHall-Petchの関係から、硬く靱性の高い材料であることを示している。このことはLIGA-like Processで製作した模擬端子のヤング率が250GPa (Ni圧延材：約200GPa)と高く、弾性限界も1000MPaと高い値を有していることとも一致する³⁾。高いヤング率を有することで微細な端子でも十分な接触圧を得ることが可能となり、また弾性限界もばね材として十分であることから、本めっきは微細端子製作に適していると言える。

次にLIGA-like Processで製作したNi構造体の密度分布の測定結果について述べる。測定は大型放射光装置“SPRING-8”から得られる12.0keVの高輝度単色X線を用いて測定した。測定サンプル形状は断面が1辺20μmの正方形で高さ200μmまでNiめっきを成長させた角柱を使用した。測定に使用したX線ビームのサイズは0.5μm×1.8μm(FWHM)まで集光している。Fig. 9に示すように、密度ばらつきは測定サンプル全体で6%以内であり、均一であることが確認できた¹²⁾。

3.2 ガイドの製作方法

コネクタの端子のスムーズな接続やコネクタ間の位置ずれの補正を行うため、雄側のコネクタの端子およびガイドにはテーパ構造を設けている。端子挿入の際にこのテーパ構造端子によって片持ち梁端子を挿入方向に対して垂直に変位させながら挿入するため、テーパ部から加わる力によって方持ち梁がしなりながらたわみ、複雑な応力が負荷されることになる。また、テーパ角が大きいと方持ち梁の挿抜方向の変形量が大きくなり、端子可動部と基板の接触を生じ端子の動きを妨げる可能性がある。こうした端子の詳細挙動を評価するため3次元モデルでのFEM解析を行いテーパ角を決定した。解析結果をFig.10に示す。なお、端子に生じる応力の最大値は繰り返し挿抜にも耐えうる寿命を考慮し、弾性限界の1/5の200MPa以下となるよう設計を行った。端子挿入時に生じる応力が挿入後の最大応力とほぼ等しくなるテーパ角は15度以下で、さらにこのときの方持ち梁先端の挿抜方向の最大変形量も0.88μmと犠牲層厚さ2μmに比べ十分小さかったことから、テーパ角を15度とした。

LIGA-like Processは垂直な側面を有する2.5次元構造を高精度に製作するには最適であるが、垂直構造とテーパ構造が混在するような複雑な3次元構造を製作することは難しい。そこで、テーパ構造は、LIGA-like Processとマイクロ放電加工(μ-EDM)を組み合わせることで実現した。

Fig. 9 Measured density variation map of a electroformed rectangular prism of Ni (20μm×20μm×200μm)

Fig.10 Taper angle dependence of bending stress of cantilever terminal (Results of FEM analysis)

Fig.11 SEM micrographs of tapered guides and terminals (Male connector)

まず、垂直なNi構造体をLIGA-like Processを用いて製作し、その構造体に対して放電加工で追加工した。製作したテーパ構造をFig.11に示す。放電加工面の表面荒さは50nm (Ra) 以下であり、加工精度も $\pm 1 \mu\text{m}$ を達成することができた。また、放電加工時の熱による加工面の変質は、放電加工条件を最適化することによって加工変質層厚さを $1 \mu\text{m}$ 以下にし、その影響を最小限に抑えた⁵⁾。マイクロな3次元構造体を製作する手法としてLIGA-like Processと μ -EDMの組み合わせはきわめて有効である。

4. 微細端子表面への金コーティング

低い端子間接触荷重でも安定した電気的な接続を得るため、マイクロコネクタ端子への金コートを試みた。金コート方法としては、端子部のみをコートする必要からめっきによって行うこととした。これまで、LIGA構造体を電気端子として使用した例は少なく、その表面に金等の表面コートを施した例はほとんどない。マイクロコネクタの電気端子のような高アスペクト比構造体への金コートでは高さ方向の厚さの均一性が悪いことが予想され、またコネクタとして十分な耐摺動磨耗性を持っているかが懸念された。そこで、無電解めっきと電解めっきの比較を行った。

耐摺動磨耗性が期待できる $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 厚さの金めっきを試みた。AFM測定による金被膜の表面荒さは30nm (Ra) 程度であり、めっき前のNi表面と同等の粗さであった。

Fig.12 Uniformity of the Au layer

金被膜の厚さの均一性をFig.12に示す。電解めっきでは、端子の基板側とで極端に厚さに差が出た。この原因は、高アスペクト比端子を高密度で配置したことによる高さ方向の電界分布の影響と思われる。これに対し無電解めっきでは、端子表面の洗浄不良により金めっきが形成されていない個所が若干見られたが、厚さが比較的均一であり必要な金めっき厚さも得ることができた。均一性や寸法精度という観点からは無電解めっきのほうが良く、高アスペクト微細構造体への表面コーティングめっきとしては無電解の方が好ましいことがわかる。なお、耐摺動性の測定結果については次章で述べる。

5. マイクロコネクタの電気的特性評価

製作した雄・雌のマイクロコネクタ間の端子導通を得ることに成功した。FPCを介した端子間の接続抵抗は $3.6 \Omega/\text{線}$ 以下であり、FPCを除いた端子部のみの接続抵抗は $1.2 \Omega/\text{線}$ 以下であった (Fig.13)。測定は四端子法で行った。マイクロコネクタの周波数特性はネットワークアナライザ (HP 8753D) を使用し測定した。伝送損失はDC $\sim 130\text{MHz}$ まで2.5dB程度でフラットであり、検査マシンに搭載する周波数1 MHzの探傷デバイスの信号を十分伝送可能なことを確認できた (Fig.14)。

犠牲層プロセスのTiのウエットエッチングによりセラミックス基板の絶縁劣化が懸念されたため、端子間の絶縁性能の測定を行った。ギャップ $40 \mu\text{m}$ で隣り合う端子間の

Fig.13 V-I characteristic of the microconnector

Fig.14 Attenuation characteristics of microconnector

絶縁抵抗は電圧250V (DC) 以下において2000M Ω 以上であり、大気中での絶縁破壊電圧は370Vであった。これはマイクロマシンに搭載するデバイス (アクチュエータ、センサ、モータ等) を駆動するに十分な電圧である。

端子の金コートの耐摺動性について、マイクロコネクタを繰り返し挿抜して調べた結果、100回程度の繰り返し挿抜では各層抜ごとの接続抵抗の変動は $\pm 0.4\Omega$ 以内で、接続抵抗の増大の傾向は見られなかった。さらに、試験後のコネクタ端子表面をSEMにて観察したところ金コートのはがれや端子の変形は観察されなかった。

マイクロコネクタの自動着脱機能試験は、まずあらかじめコネクタの対向角や軸の調整を行った状態で行った。電磁アクチュエータを励磁し (122AT, 0.1秒), 端子間ギャップ600 μm での着脱が可能であることを確認した。また、コネクタ間の角度ずれの補正可能な角度は、ギャップ500 μm において $\pm 5^\circ$ であった。さらに、マイクロマシンに搭載しマシン同士の連結分離が可能であることを確認した²⁾。

6. 結 言

DXL技術とめっき技術を組み合わせたLIGA-like Processを用いマイクロコネクタを製作した。LIGA-like Processによりきわめて微細な端子構造を高精度に製作することが可能である。微細端子製作のためにわれわれが開発したNiめっきは、ヤング率および弾性限界とも高くばね性に優れ、Niの密度分布も構造体全体にわたって均一であることを確認できた。また、LIGA-like Processと犠牲層プロセス、 μ -EDMを組み合わせることで、片持ち梁構造やテーパー構造を製作することができる。金コートした微細端子間の導通特性や絶縁性を測定し、マイクロマシンのデバイスを駆動するに十分な性能を有したコネクタであることを確認した。LIGA-like Processを用いることでばね性を有する微細な金属端子構造を高精度で製作できることから、マイクロコネクタだけでなく高集積化が求められている実装や検査の分野において様々な箇所へ適用できる技術と考えられる。

謝 辞

本研究開発は工技院産技プロジェクトの一環として、NEDOから委託を受けたマイクロマシンセンターの再委託業務として実施したものである。

(2000.8.30-受理 2000.12.4-再受理)

文 献

- 1) H.Narumiya: "Experimental Chain-Type Micromachine Inspection on Outer Surface of Tubes", The 3rd Int. Micromachine Symp., Tokyo, p.141, 1997
- 2) M.Takeda, K.Namura, K.Nakamura, N.Shibaike, T.Haga and H.Takada: "Development of Chain-Type Micromachine for Inspection of Outer Tube Surfaces (Basic Performance of the 1st Prototype)", 13th IEEE Int. Conf. on MEMS, Japan, p.805, 2000
- 3) H.Okuyama, T.Haga, K.Emura and H.Takada: "Development of Microconnector with Automatic Connecting/Disconnecting Mechanism", 12th IEEE Int. Conf. on MEMS, USA, p.257, 1999
- 4) T.Haga, H.Okuyama and H.Takada: "Development of microconnector with an Automatic Connecting/Disconnecting Mechanism", Microsystem Technologies, Vol.6, No.4, p.157, April, 2000
- 5) 羽賀 剛, 奥山 浩, 平田嘉裕, 高田博史: "ディープX線リソグラフィを基本とする3次元微細加工を用いたマイクロコネクタの開発", 電学論E, Vol.120, No.7, p.363, July, 2000
- 6) たとえば, 真野国夫: "接触部品の信頼性", 電子総合出版, 1976
- 7) H.Takada, Y.Hirata, H.Okuyama and T.Numazawa: "Development of LIGA Process Using a Superconducting Compact synchrotron Light Source", Electrical Engineering in Japan, Vol.120, No.1, p.40, 1997
- 8) P.Bley and J.Mohe: "The LIGA Process", FED J., Vol.5, Suppl., 1, 1994
- 9) G.Carneval and J.B.de Cusminsky: "The Influence of the Anion on Copper Electrocrystallization", J.Electrochem. Soc., Vol.128, p.1215, 1981
- 10) たとえば, 電気鍍金研究会編: "めっき教本", 日刊工業新聞社, 1986
- 11) 池田英広, 井奥 淳, 藤田孝之, 前中一介, 前田宗雄: "MEMS材料としてのNi-W合金めっき膜", 電学論E, Vol.119, No.11, p.598, 1999
- 12) K.Haga and H.Okuyama: "Characterization of LIGA-Based Microstructures Using an X-ray Microprobe", SPring-8 User Experiment Report, 2000A, No.5, p.379, 2000