

LIGAプロセスを用いた微細電鋳スプリングに関する研究

Research on Electroformed Micro-Spring with LIGA Process

加藤 文明*

Fumiaki KATO

要　　旨

LIGAはX線リソグラフィと電鋳法を組み合わせて高アスペクト比加工を行うことができるMEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術の一つである。今回LIGAプロセスを用いて線幅20~40 μ m, 高さ200 μ m (アスペクト比最大10) の金属製のマイクロスプリングを製作した。またこの研究においては一般的な電鋳材料であるニッケルに加え、きわめて高い強度が期待されるニッケル-鉄合金でもマイクロスプリングの製作を試みた。これらを評価したところ、Ni-Fe合金製のスプリングはNiのスプリングと比べて極めて高い強度を持つことが確認された。

Abstract

LIGA is one of MEMS (Micro Electro Mechanical System) techniques, which has the machining ability of high-aspect ratio with X-ray lithography and electroforming. We manufactured the metal micro-springs with 20–40 μ m of line width and 200 μ m height (maximum aspect ratio is 10) using LIGA process. Furthermore, in addition to Ni, a common electroforming materials, we tried to manufacture micro springs with Ni-Fe alloy which is expected to provide very high strength. It is found that the Ni-Fe alloy springs have much higher tensile strength than the Ni springs.

* リコーホームエレメント株式会社　技術センター
R&D Center, Ricoh Elemex Corporation.

1. 背景と目的

1-1 背景

精密機械加工技術は中世の頃より時計を中心に古い歴史があり、多くの先人の手によりその技術は進歩してきた。現在においても新たな加工技術の開発などにより、微細化、高精度化技術はさらに進歩を続けているが、一部ではこれらの一般的な機械加工技術では達成できない寸法、形状に関するニーズも増えてきている。

一方でMEMS (Micro Electro Mechanical System) と呼ばれる半導体の加工技術から発展した微細加工技術があり、各種センサーやインクジェットプリンタヘッドなどで特に近年大きな発展を遂げている。MEMS技術は非常に微細で高精度な加工が可能であるが、半導体技術がベースであるがゆえ、そのプロセス技術の多くはシリコン素材に限られている。しかしながらMEMS技術のひとつにLIGAと呼ばれる高アスペクト比（高さと幅の比率）構造体を金属や樹脂など多様な材料で製作できる技術がある。

今回このLIGA技術に注目し、金属製の超小型部品（以下マイクロマシン部品）を製作する技術開発を行った。

1-2 目的

今回LIGA技術を用いて超小型のスプリング（以下マイクロスプリング）を始めとするマイクロマシン部品を製作することに成功した。本レポートでは、この製作技術に関する報告を行う。

またこのマイクロスプリングのねね特性の向上を狙い一般的な電鋳（厚膜電気めっき）材料であるニッケルの他、高い強度が期待されるニッケル-鉄合金¹⁾についても研究開発を行った。これらの材料の機械的特性についても合わせて報告する。

2. 技術

2-1 LIGAプロセス技術

2-1-1 LIGA

LIGAとはX線リソグラフィー、電鋳、成型の3つのプロセスを組み合わせたMEMS技術のひとつであり、1980年代にドイツのカールスルーエ研究所で開発された技術である。そのため各プロセスのドイツ語（Lithographie：リソグラフィー、Galvoformung：めっき、Abformung：成型）の頭文字を取ってLIGA（リガ）と呼ばれる。

この技術の基本プロセスは、リソグラフィーでレジストの加工を行い、このレジストの凸凹を電気めっきで金属に転写する（場合によってはその後転写された金属を金型とした樹脂などの成型加工までを含める）単純なプロセスである。しかしこの技術の最大の特徴は、リソグラフィーにシンクロトロン放射光という極めて輝度が高く、平行度に優れた透過力の高いX線を用いることであり、一般的な紫外線フォトリソグラフィーと比べて、「高さのある」構造体を「垂直に近い形状で」製作することが可能である。

2-1-2 シンクロトロン放射光

シンクロトロンとは電子加速器の一種である。この電子加速器で光速近くまで加速された電子が磁力でその軌道を曲げられたとき、その接線方向に発生する強い光（電磁波）をシンクロトロン放射光（以下SR光と呼ぶ）と呼ぶ。（Fig.1参照）

SR光は著しい指向性を持つ赤外からX線領域までの連続波長を持つ白色光である。LIGAにおいてはフィルターを介して、1.5~7.3Åの軟X線領域の光をのみを利用している。

本研究では立命館大学の「Aurora」を光源として使用した。

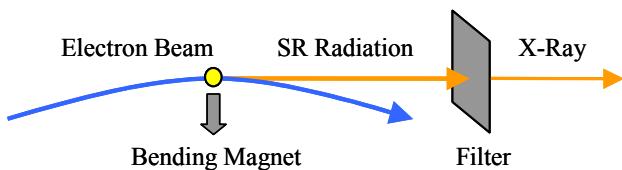


Fig.1 Schematic Image of SR Radiation.

2-1-3 レジスト

リソグラフィーに用いるレジストはPMMA（ポリメタクリル酸メチル）を主成分としている。PMMAはX線を吸収して崩壊反応を起こし、分子鎖が切断される特性があり、およそ分子量20000以下まで分解されるとPMMAは有機溶剤に溶けるようになる。このため、ポジレジストとして利用することができる。²⁾

2-2 マイクロスプリングの製作

2-2-1 マイクロスプリング

本研究で製作したマイクロスプリングの一例をFig.2に示す。マイクロスプリングのばね幅は5~40 μm である。

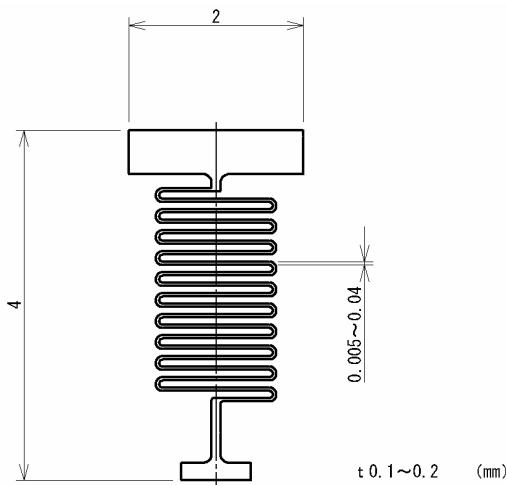


Fig.2 Micro-Spring.

2-2-2 製作プロセス

マイクロスプリングは、下記の手順で製作した。

- (1) シリコンウェハに、めっき電極となる金属薄膜を成膜して、その上にPMMAレジスト膜を接着する。
- (2) X線マスクを通じて、SR光を露光する。
- (3) PMMAレジストを現像液で現像する。
- (4) (1)の金属薄膜を電極として、電気めっきでレジストの凹部が埋まりきるまで金属を電析させる。
- (5) めっき表面を目的の厚さ寸法まで研磨し、最終製品のとなる厚さを調整する。
- (6) 最後にPMMAレジストとシリコンウェハを除去し、電鍍金属部分のみを分離して、マイクロスプリングを完成させる。（Fig.3参照）

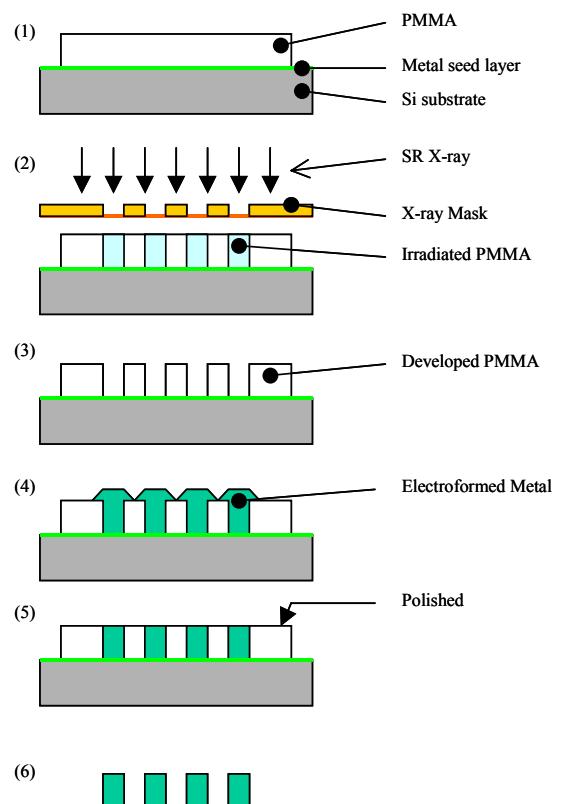


Fig.3 Schematic Image of LIGA Process.

2-2-3 電鋳（電気めっき）

本研究では2種類の材料を用いて実験を行った。

(1) スルファミン酸浴ニッケルめっき

他のニッケルめっき浴と比べて内部応力が小さい特徴があり、DVDディスクの成型金型など広く使用されている最も一般的なニッケル電鋳浴である。今回実験に用いたニッケルめっき条件をTable 1に示す。

(2) ニッケル-鉄合金めっき³⁾

高硬度の電鋳材料として研究が進められている新しいめっき材料である。ニッケル-鉄合金は鉄の含有量が10~25%で硬度が最も高くなる⁴⁾ことが知られており、本実験ではニッケルと鉄がおよそ80:20で共析するよう調整されたものを使用した。今回実験に用いたニッケル-鉄合金めっき条件をTable 2に示す。

Table 1 The Detail of Ni Plating Bath.

浴組成	スルファミン酸ニッケル	450g/L
	塩化ニッケル	5g/L
	ほう酸	30g/L
	pH	4.0
	電流密度	2.0A/dm ²
	温度	50°C

Table 2 The Detail of Ni-Fe Alloy Plating Bath.

浴組成	硫酸酸ニッケル	250g/L
	硫酸鉄	適量
	塩化ニッケル	5g/L
	ほう酸	30g/L
	マロン酸	5.2g/L
	サッカリン	2g/L
	pH	3.0
	電流密度	2.0A/dm ²
	温度	50°C

2-2-4 完成したマイクロスプリング

Fig.4に製作したマイクロスプリング（幅40 μm, 厚さ100 μm）のSEM写真を示す。

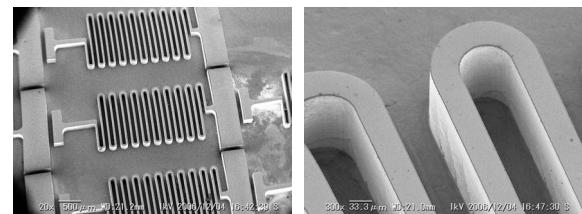


Fig.4 SEM Image of the Micro-Spring.

実験を試みたマイクロスプリングのばね幅は5~40 μmであるが、幅15 μm以下の試作品では部分的にパターンの不完全な個所が発生しており、完全な形状を作成できたものは幅20~40 μm（厚さ100~200 μm）であった。

2-3 加工形状に関する評価結果

2-3-1 形状

製作したマイクロスプリングについてその形状、寸法精度、側面角度に関して評価を行った。その結果をTable 3に記す。また本実験において製作することができた最小幅のマイクロスプリングの写真をFig.5に記す。

Table 3 The Evaluation of the Form.

	最高値	完全な形状
最大厚さ	200 μm	200 μm
最小幅	5 μm	20 μm
最大アスペクト比	40	10
精度	—	±0.5 μm以下
側面角度	—	89.8°

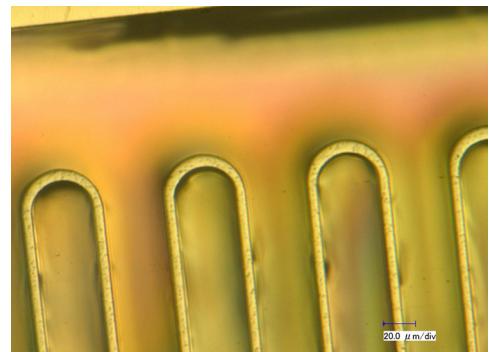


Fig.5 The Micro-Spring with Width 5 μm.

2-3-2 表面粗さ

製作したマイクロスプリングの側面を微細形状測定装置 (KLA-Tencor社アルファステップ) を用いて表面粗さを測定した。側面の顕微鏡写真をFig.6に示す。

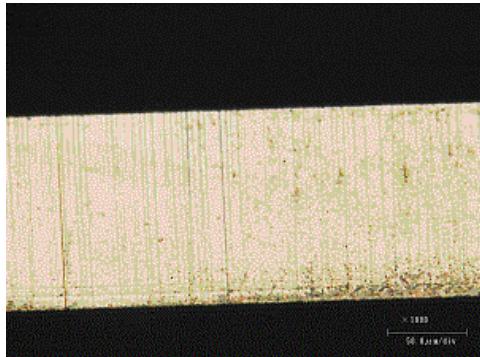


Fig.6 The Side of the Micro-Spring.

表面粗さは垂直方向 (Fig.6の縦方向) でRa0.018, 水平方向 (同横方向) でRa0.120と水平方向の方が大幅に高くなっている。また縦方向に平行のスジが見られるが、これはマスクの凸凹がそのままレジストに転写されたもので、このスジのため水平方向の表面粗さが高くなつたと考えられる。つまりLIGAプロセスは、数10nmというマスクの凸凹すら高精度で転写できる能力があることを示している。

2-4 材料特性試験

本研究に使用した2種類の電鋳材料の特性を評価するため、引張試験片を用いて、硬度、引張強度、伸びについて測定を行つた。

また試験片は電気炉で熱処理 (200~400°Cで2時間保持) を行ったものについても同様の試験を行い、高温での機械的性質の変化についても評価した。

2-4-1 引張試験片

引張試験片の形状をFig.7に示す。この試験片はマイクロスプリングと同様のプロセスで製作している。

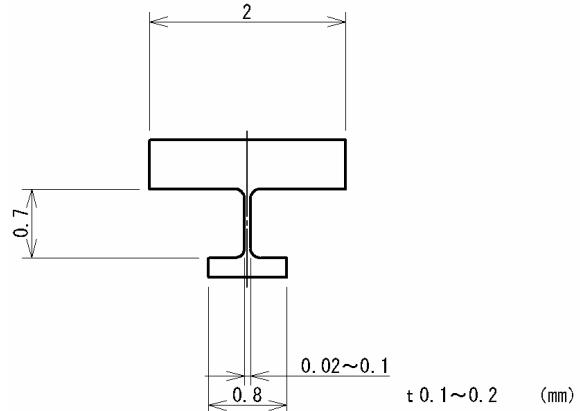


Fig.7 Tension Test Piece.

2-4-2 硬度

マイクロビックカース硬度計 (明石製作所HM103) を用いて、材料試験片の硬度を測定した。この結果をFig.8にまとめると。

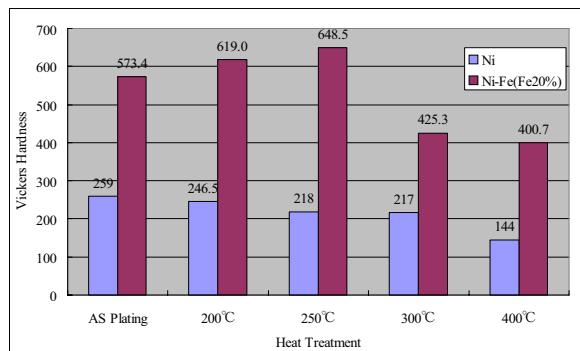


Fig.8 Vickers Hardness.

熱処理前のニッケル-鉄合金はHV573とニッケルのHV259と比べ大幅に硬いことが確認された。この硬度は析出硬化系ばね用ステンレス鋼 (JIS G 4315 SUS631-CSP : HV530以上) に匹敵する。

またニッケルは加熱により徐々に軟化するのに対し、ニッケル-鉄合金は250°Cまでは逆に硬度が上昇することが認められた。ただしニッケル-鉄合金も250°Cを超えるとニッケルと同様に軟化が始まると。

2-4-3 引張強度および伸び

引張強度および伸びはFig.9のような荷重試験機と治具を用いて引張試験を行い、その最大荷重と試験片破断までの伸び量を測定した。なお荷重試験機はインストロン社5848を使用した。

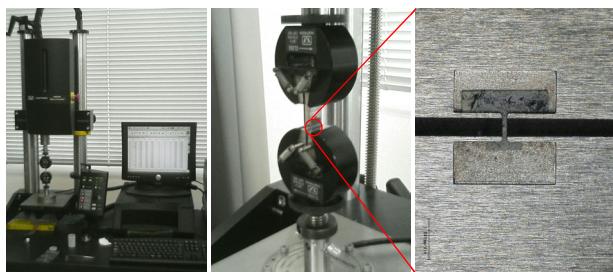


Fig.9 The Tension Tester and the Jig.

測定した引張強度と伸びをFig.10およびFig.11に示す。

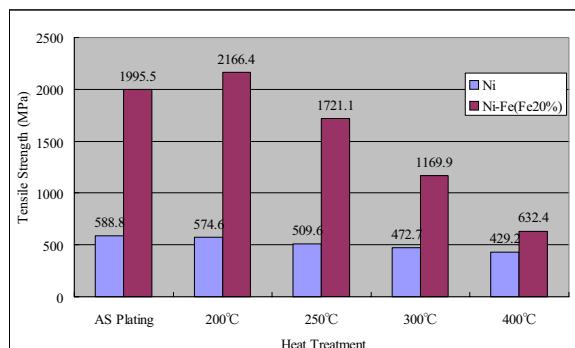


Fig.10 Tensile Strength.

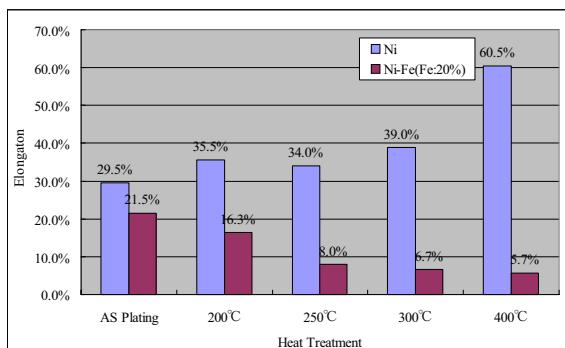


Fig.11 Elongation.

熱処理前のニッケル-鉄合金の引張強度は1996MPaとニッケル589MPaの3倍以上の強度を示した。また200°C

までは引張強度は上昇するが、それ以上の温度では強度は低下することも確認された。

また伸びについてはニッケルが温度の上昇とともに伸びが上昇する傾向があるが、ニッケル-鉄合金は低下し、まったく逆の傾向を示すことがわかった。

2-4-4 考察

ニッケル-鉄合金はニッケルと比較して、硬度と強度に優れている。耐熱性もニッケルよりやや高い傾向があるが、200°Cを超えると引張強度と伸びが低下して脆くなり、さらに250°C以上では硬度の低下も認められる。このため熱が加わる環境下での使用には注意が必要である。

2-5 ばね試験

製作した2種類の材料のマイクロスプリングに錘を付けその伸び量をFig.2に示す通りマイクロスコープで測定し、その測定結果をFig.13にプロットした。

なおこの試験には、ばね幅40 μm 、厚さ100 μm のマイクロスプリングを使用した。(Fig.2参照)

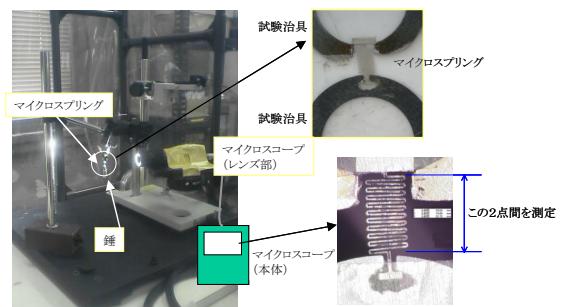


Fig.12 The Test Method of the Spring Test.

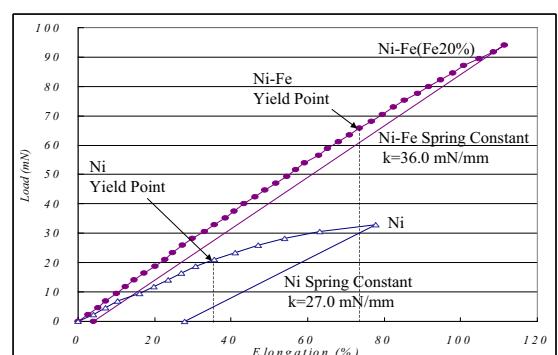


Fig.13 The Result of the Spring Test.

ニッケル-鉄合金のマイクロスプリングは同形状のニッケルの試料よりばね定数が30%ほど高く、また降伏荷重は3倍以上とばねとして優れた性質を示した。

特にばねの弾性伸びが70%と高く、大きな出力が必要とされるマイクロアクチュエーターなどに有効な材料になると考える。

3. 成果

LIGAを用いて幅 $20\mu\text{m}$ までのマイクロマシン部品を製作する生産技術を確立するとともに、ニッケル-鉄合金電鋳を始めとする素材に関する要素技術の蓄積を行うことができた。

また研究で培った評価技術も含めて、これらの技術は今後の新技術、新商品の開発の礎となると考える。

4. 今後の展開

高強度で耐熱性のあるニッケル-鉄合金は従来ニッケルで製作されていた成型金型の寿命の向上や、複雑な形状での製品精度の向上が期待される。今後、金型に要求される品質を確保するため、LIGAプロセス技術の細部条件の最適化による精度の向上、成型金型へ展開するための周辺技術の開発を行う。

また一方で、ばね試験でも明らかなようにLIGA技術とニッケル-鉄合金電鋳技術の組み合わせは、MEMSアクチュエーター部品としても期待でき、金型以外の商品、部品への展開を検討する。

謝辞

本研究にあたりLIGA技術のご指導をいただいた立命館大学杉山進教授、電鋳開発で協力いただいた清水長金属工業（株）様、京都市産業技術研究所様に深く感謝いたします。

また、本研究は「平成18年度文部科学省のナノテクノロジー総合支援プロジェクト」を通して実施されました。

参考文献

- 1) 水谷泰、永山富男：MEMS のためのめっき・電鋳技術、表面技術、Vol.55 No.4 (2004), pp.237-241
- 2) M. J. Madou : MEMS HANDBOOK, CRC PRESS, (2002), pp.17-21
- 3) 永山富男 他：ニッケル-鉄合金めっき皮膜の熱膨張特性、表面技術、Vol.57 No.10 (2006), pp.733-737
- 4) 榎本英彦、小見栄：合金めっき、日刊工業新聞社, (1987), p.128