

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：平成 16 年度 ～ 平成 20 年度
 課題番号：16078212
 研究課題名（和文） ナノ・マイクロ立体加工技術の開発と次世代マイクロアクチュエータへの展開
 研究課題名（英文） Development of a New Micro-Nano Solid Processing Technology Based on a LIGA Process and a Next-Generation Micro Actuators
 研究代表者
 服部 正 (HATTORI TADASHI)
 兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・教授
 研究者番号：70326297

研究成果の概要：

本研究は、リソグラフィ、金型作製、成形を一連とする LIGA プロセスを基盤としたマイクロ・ナノ立体加工技術の開発と、次世代マイクロアクチュエータへの展開を行うものである。従来のリソグラフィ技術では加工深さ方向に垂直となる 2.5 次元的な構造体しか得られていなかった。しかし、このトータル LIGA プロセスによる加工技術は、機械加工等では達成できない微細領域の加工を可能とする手法であり、超微細立体加工技術のブレイクスルーを生み出す要素技術である。これまでに、3 次元 X 線リソグラフィ技術、平坦性が良く応力の小さなマイクロ金型、ロールホットエンボス技術による微細パターンの量産化技術の開発を進め、精密で高精度な成形品を量産できる技術開発を進めてきた。さらに、X 線リソグラフィにおける露光ステージを多軸化することで円筒形状表面に 3 次元構造を加工する技術を開発し、微細細線となるマイクロコイルの作製へ展開してきた。構造の複雑さ故に小型化に伴い得られる出力が低下する問題を有するマイクロコイルであるが、微細高アスペクト比の細線構造としたマイクロコイルを利用することを提案し、電磁型マイクロアクチュエータのブレイクスルーを目指して研究に取り組んだ。その結果、X 線リソグラフィ技術により微細細線の深溝加工を行い、銅めっきにてコイルラインを形成して、コイルを完成させることが出来た。作製したコイルラインのアスペクト比を向上させるとマイクロコイルの性能は飛躍的に向上することも実証した。今後は更なるプロセス技術開発を進めることでマイクロアクチュエータの新たな展開を行う。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
16 年度	13,900,000	0	13,900,000
17 年度	13,900,000	0	13,900,000
18 年度	13,900,000	0	13,900,000
19 年度	13,900,000	0	13,900,000
20 年度	12,500,000	0	12,500,000
総計	68,100,000	0	68,100,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：LIGA プロセス、X 線リソグラフィ、マイクロアクチュエータ、三次元構造体、高アスペクト比加工、マイクロマシン、マイクロシステム、MEMS

1. 研究開始当初の背景

情報通信, 生命, 医療, 福祉, さらにはロボット分野など様々な分野でセンサ, アクチュエータの小型化, 高性能化に対する強い要求がある. しかし, これまでの機械加工, 半導体加工, レーザ加工では達成できない領域へと進んでおり, μm レベルの精度かつ任意の形状を作製可能なマイクロ・ナノ立体加工技術が求められている. LIGA プロセスは, ドイツ語で Lithographie (リソグラフィ), Galvanoformung (電鑄), Abformung (成形) の略語であり, 微細立体構造体加工の 3つのプロセスのことを指している. この LIGA プロセスは比較的容易にナノレベルの精度でマイクロ構造体を作製出来ることから, 新しいマイクロ・ナノ領域の精密微細加工技術として大きな力を発揮するものと期待されている.

一方で, アクチュエータは産業界の様々な製品の最も基本的なデバイスの一つであり, 産業・技術・科学を飛躍的に展開させる新しい特徴や性能を持ったアクチュエータに対する期待が大きい. 現在のアクチュエータは, エネルギー密度やエネルギー効率において生物の筋肉に大きく劣っているのが現状である. さらに, 近年のマイクロ化・ナノ化の動きに関してアクチュエータの果たすべき役割は極めて高い. 優れた次世代アクチュエータの出現は, 経済産業の発展のみならず, エネルギー消費の 6 割をアクチュエータが占めると言われている中, 地球環境保護や人々の生活文化水準の向上に大きく寄与することが期待されている.

2. 研究の目的

本研究は, リソグラフィによる構造体作製, 電鑄による金型作製, 金型による精密成形を一連とする LIGA プロセスを基盤としたマイクロ・ナノ立体加工技術の開発と, これら技術による次世代アクチュエータへの展開を提案するものである.

LIGA プロセスは, 現在の機械加工技術では到達出来ない数 μm レベルの微細加工技術に対して, シリコンを中心とした半導体微細加工技術に用いられるフォトリソグラフィ技術を導入して, ナノ領域の世界まで踏み込んだ加工技術である. 微細化は X 線リソグラフィが担い, 放射光の高い指向性と X 線の強い透過力を利用して, 最大数 mm までレジストを感光させることが出来る. 一方で量産化

を担うのはマイクロ電鑄技術とマイクロ成形技術である. X 線露光により得られた微細構造体に対して厚膜電気鍍金である電鑄を施し, 形状が反転した金型を作製する. この金型を用いて射出成形やホットエンボス成形を行うことにより, プラスチックやセラミックスの成形品を量産することが可能となる. 本研究では, X 線リソグラフィによる微細レジスト構造体の作製にとどまらず, 平坦性が良く応力の小さな電鑄によるマイクロ金型の作製と, 樹脂材料等による精密成形技術まで含めた 3つのプロセスを一連とするトータル LIGA プロセスとして開発することである.

トータル LIGA プロセスは μm レベルの精度かつ任意形状のマイクロ立体構造体デバイスを作製可能とすることから, 小型化と高精度化の強い要求が実現可能な量産技術として期待されており, これまでに機械加工等では実現出来なかった領域の微細立体加工技術のブレイクスルーを生み出す要素技術として期待できることから, 学術的にも大きな意味を持ち, また特定領域内での研究の有機的な結合により新たな研究の創造も期待できる.

また, このトータル LIGA プロセス技術を基盤として微細な線幅を有するマイクロコイルを作製し, 電磁型マイクロアクチュエータの開発にも展開を図った. 電磁型アクチュエータは低電圧駆動, 高効率, 高出力などの利点があり, 様々な分野で使用されているアクチュエータであるが, 電磁力の発生に不可欠な巻き線コイルが必要であり, その構造の複雑さ故に小型化には不向きとされている. この問題は小型になると通電可能となる電流量が大幅に減少してしまうコイル構造であり, このコイルの小型化が可能となれば一気に実用化レベルに到達するマイクロアクチュエータとなる可能性を秘めている. そこで, トータル LIGA プロセスによる微細立体加工技術を用いてマイクロコイルを作製し, 電磁型マイクロアクチュエータへの展開を進めることとした.

まず, 立体形状に対しての加工を不得意とするリソグラフィ技術において, 多軸稼働となる露光ステージとすることで円筒形状であってもリソグラフィを可能とすることとした. 更に小型化に伴い電流量が減少してしまう問題に対して, コイルラインとなる線幅を小さくするが加工深さを増した高アスペクト比構造とすることで有効断面積を増して許容可能な電流量を増加させる工夫をした. 電磁型アクチュエータの場合, 許容電流

量の2乗に比例して得られる出力が増すことから、高アスペクト比構造マイクロコイルの実現により、小さくても出力の大きな電磁型マイクロアクチュエータが実現可能となる。ここで、リソグラフィ技術によりコイルラインの線幅を決定していることからコイルのライン幅を自由に設計でき、新しいマイクロコイルを生み出す可能性も持っている。

3. 研究の方法

3-1. マイクロ・ナノ立体加工技術の開発

X線リソグラフィにおけるビームラインの光エネルギー特性は重要な要素であり、Si半導体検出器を用いて蓄積電流エネルギーに応じて測定することで光学系を調整し、露光チャンバの多軸ステージのアライメント調整を行う必要がある。これにより、多軸稼働による露光実験が可能となり、平面のみならず円筒形状表面に対してもX線露光が可能となるシステムを構成出来る。

既存のビームラインBL11は多軸稼働露光ステージにより微細三次元構造体を作製することが可能であり、円筒形状表面に対してもX線露光を可能とするシステムを構築し、露光プログラムにより制御可能な構成とした。三次元X線リソグラフィを実現するためには、X線に感光するレジスト材を所望の膜厚で形成する手法が必要となる。そこで、円筒棒形状表面に均一にレジストを塗布する手法の開発も行うこととした。

また、LIGAプロセスの各要素技術開発を進めるために、大面積X線リソグラフィおよび三次元構造体へのX線リソグラフィ技術の開発、内部応力が小さく表面平坦性の良いニッケルマイクロ電鍍金型の開発、マイクロメートルレベルの精度となる成形技術の開発を進め、量産技術として実用に即したトータルLIGAプロセス新たな立体加工技術のブレイクスルーを生み出す。

3-2. 次世代マイクロアクチュエータの作製

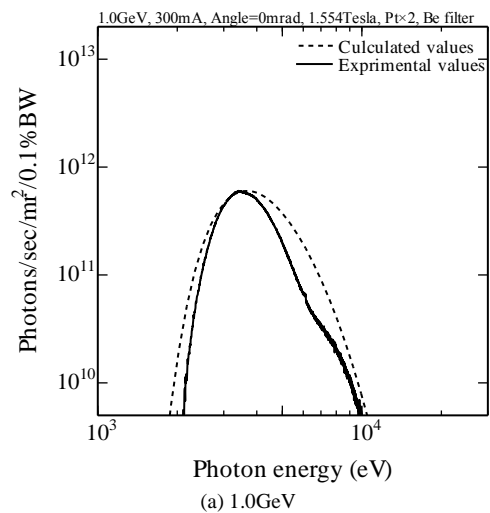
アクチュエータの中でも、低電圧駆動、高効率である電磁型アクチュエータに着目している。マイクロ化に対する一番の課題はその複雑な構造故にコイルの性能が小型化に伴い大きく減少してしまうためである。そこで、まずコイル特性を飛躍的に向上させるために、構造設計から開始した。設計された構造に基づき、各部品の加工プロセスを検討し、作製のプロセスフローを考案した。そして、プロセスフローにおける技術課題を解決すべく要素技術を進展させ、コイルを完成させた。さらに、作製したコイルの性能評価、および電磁型アクチュエータの性能評価のために、作製したコイルを実装可能な評価装置

を作製して、シミュレーションとの比較から得られる値の妥当性を評価した。実測値と計算値の整合性をとることで、作製したコイルの信頼性を確保することとした。

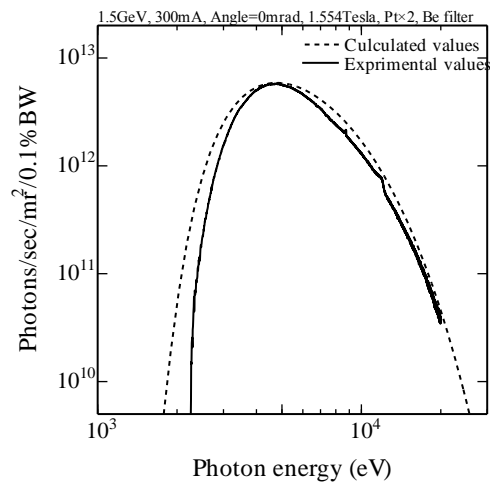
4. 研究成果

4-1. マイクロ・ナノ立体加工技術の開発

新たに設置されたビームラインBL2は10keV以上の高エネルギービームと1-3keVの低エネルギービームの2本を縦型に積層したパラレル構造として製作した。高エネルギービームは蓄積リングから直接ダクトを通して利用し、低エネルギービームはミラーにより高エネルギー成分をカットしてダクトに導く構造となっている。BL2の光エネルギー特性を測定し、光学系の調整・改善を行った。まず、Si固体半導体検出器を用いてスペクトルの測定を行い、計算値と実測値の比較を行った。図1に高エネルギービームにおける比較結果を示す。図1(a)は蓄積電流エネルギー



(a) 1.0GeV



(b) 1.5GeV

図1. 光スペクトル特性

ギーが 1.0GeV の時であり, 図 1(b) は 1.5GeV の時の結果である. これらの図からわかるように, ピーク位置等ほぼ計算通りの結果を得ることが出来た. 同様に低エネルギービームについても比較検討した結果, 良好な結果が得られた. 次に, 得られた光エネルギー特性を図 2 に示す. この図には BL11 の光エネルギー特性も合わせて示してある. 蓄積電流エネルギーは 1.0GeV の時の結果であるが, 1.5GeV の時も同様な結果が得られた. BL2 は高エネルギー放射光の利用のみでなく, ミラーにより光エネルギーを選択する機構を有していることを先に述べたが, 得られた結果から, 2~12keV の光エネルギー領域で可変できることがわかった.

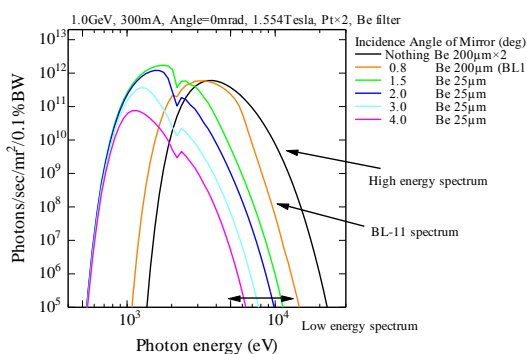


図 2. 1.0GeV の光スペクトル特性

BL2 のビーム幅は 230mm まで広げて取り出しているため, マイクロ・ナノサイズの立体形状でありながらスキャン露光により図 3 に示すように最大 A4 サイズという大面積 X 線露光が可能となるシステムを構築することが出来た. 大面積露光は産業化を目指す時に大きなスループットが生まれコスト低減につながる.

既存のビームライン BL11 を用いて円筒形状に対して X 線露光を可能として, X 線マスクとサンプルとを独立して駆動することで三次元 X 線リソグラフィを可能とするシステムを構築した. 露光チャンバ内の多軸稼働ス

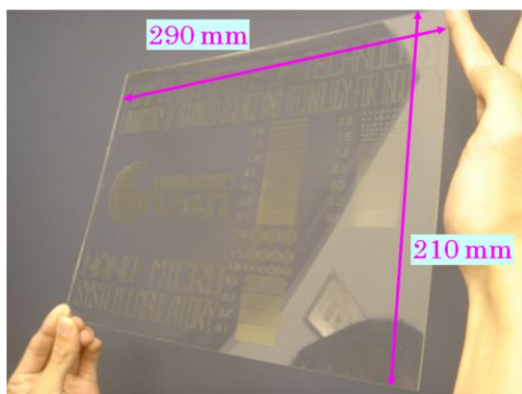


図 3. A4 サイズの露光結果

テージを図 4 に示す. 図に示す 9 軸が稼働することから, あらゆる立体形状に対して X 線露光が可能となった. この技術により螺旋構造体を円筒形状表面に形成することが可能なシステムを構築することが出来た. 同様に BL2 においても図 5 に示すように多軸稼働ステージを設置した. これにより大面積での微細三次元構造体の作製が可能となり, 加工技術のブレイクスルーにつながる要素技術の開発を行った.

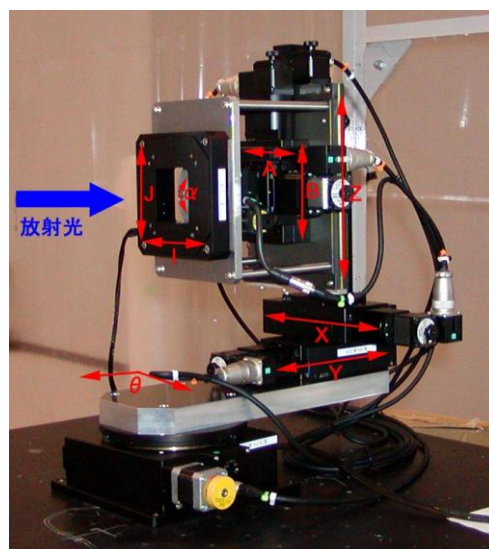


図 4. BL11 多軸稼働ステージ



図 5. BL2 多軸稼働ステージ

X 線リソグラフィには, X 線に感光する材料 (レジスト) の形成方法も重要となる. 特に三次元 X 線リソグラフィ技術に要求されるレジスト材の塗布技術について検討した. 黄銅棒のような金属棒をコイルマスタとして, レジスト材の塗布膜厚を制御すればコイル形状の設計幅は飛躍的に向上することが期

待できる。そこで、円筒形状表面にレジストを塗布する技術として、ディッピング法の開発を行った。ディッピング法のプロセスを図6に示す。このプロセスは、浸漬、引き抜き、乾燥、バイクの4つのプロセスからなり、それぞれの条件を制御することにより、膜厚の制御や均一性を向上させた。必要な膜厚に満たないときは、このプロセスを繰り返すことで厚くすることが出来る。ポリメチルメタクリレート (PMMA) を溶かしてシロップ状にしたものを金属棒にディッピング法を用いて形成した。PMMA の濃度を変化させたときの1回に形成されるPMMA 膜厚の変化を図7に示す。この時の金属棒は、4mm 径の黄銅棒を使用した。PMMA 濃度が増すに従い、黄銅棒に形成される膜厚も向上することがわかった。さらに濃度を増すとPMMA シロップを作製する際に気泡が残り、剥離の原因となることから濃度をあまり高くしすぎるのも問題が生じることもわかった。回転数や黄銅棒の径によっても形成される膜厚は異なることも実験的に調べた。

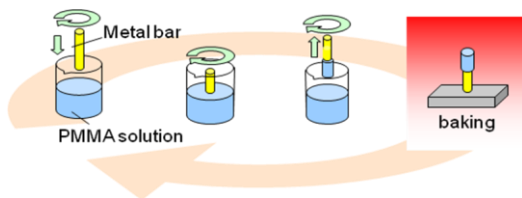


図6. ディッピング法によるレジスト塗布

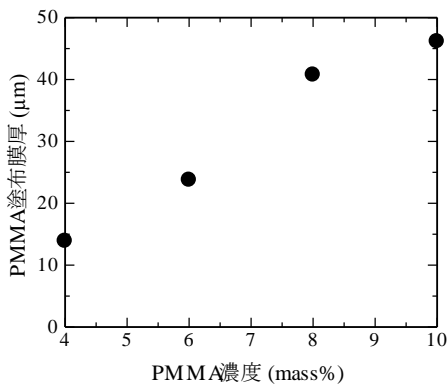


図7. PMMA 濃度による膜厚変化

次に、電铸による金型作製について検討した。マイクロ金型は表面形状の複雑さ故に表面平坦化とひずみの原因となる内部応力を小さくすることが必須である。そこで、ニッケル電铸条件の最適化をはかることとした。シミュレーションによる解析や、電铸のシード層、電流密度分布、浴温度など様々な電铸条件を検討した結果、図8に示すように6インチサイズの電铸金型での反りは50mm の範囲に対して15μm まで減少させることが出来、成形可能なニッケルマイクロ金型を作製

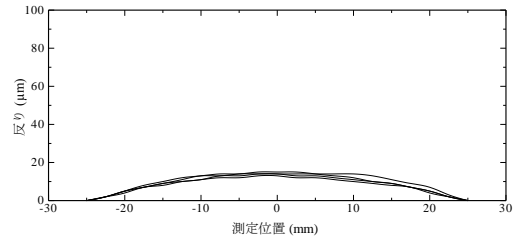


図8. Ni 電铸金型の反り測定結果

することが出来た。さらに、精密成形についてもホットエンボス成形、ロールエンボス成形を行い、作製した電铸金型で良好な転写性を得ることが出来た。

以上の結果より、三次元X線リソグラフィ技術、平坦性の良いマイクロ電铸金型、精密成形が可能となり、トータルLIGAプロセスによる立体加工技術の基礎的基盤を確立し、加工技術のブレイクスルーを生み出すことが出来た。

4-2. 次世代マイクロアクチュエータの作製

三次元X線リソグラフィ技術を用いて作製したマイクロコイルをアクチュエータに展開して、次世代のマイクロアクチュエータの作製を試みた。電磁型アクチュエータは構成要素のコイルの構造は複雑で既存の機械加工による微細化は困難なこと、大きさに比例して電流路が小さくなることから小型化すると出力の低下が顕著となり、電磁型アクチュエータの小型化には不向きとされてきた。しかし、モータに代表されるように多くの特長を有し、幅広く利用されているため、産業的にニーズも高い。これらの特性を有する電磁型アクチュエータを小型化する際の問題を解決できれば一気に実用化レベルに到達する可能性を秘めている。

4-2-1. 構造設計

そこでまず、電磁型アクチュエータの構造設計を行った。磁気回路を含めて設計したモ

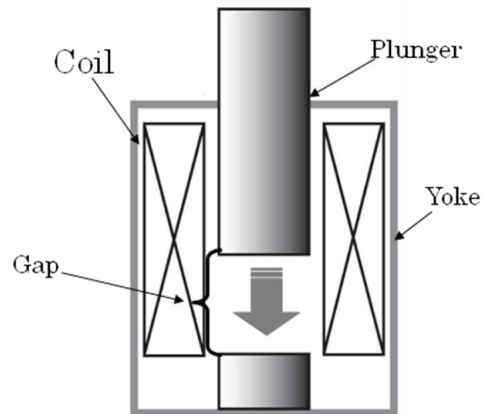


図9. 電磁型アクチュエータのモデル

デルを図9に示す。作製したコイルの交換を容易にするなどの理由から、「オープンフレームソレノイド」と一般に呼ばれる形式とした。磁気回路のプランジャ等の磁性体材料は、高透磁率合金の45パーマロイを使用した。このモデルにおいて、複雑な磁力線を求めるのではなく、大まかな磁路を仮定してパーミアンスの近似値を求める「仮定磁路法」を使用してシミュレーション解析を行った。

我々は、X線リソグラフィ技術により機械加工では困難な線幅の加工を実現してコイルラインを形成するとともに、X線の強い直進性を生かして加工深さを大きくすることを提案している。図10に従来の機械加工で形成するワイヤータイプとリソグラフィを用いて作製する高アスペクト比タイプのコ

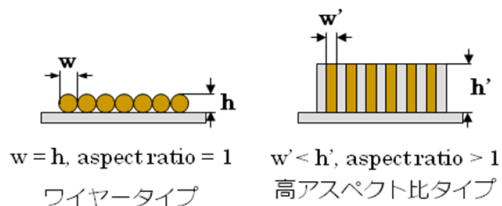


図10. ワイヤータイプと高アスペクト比のコイルイメージ

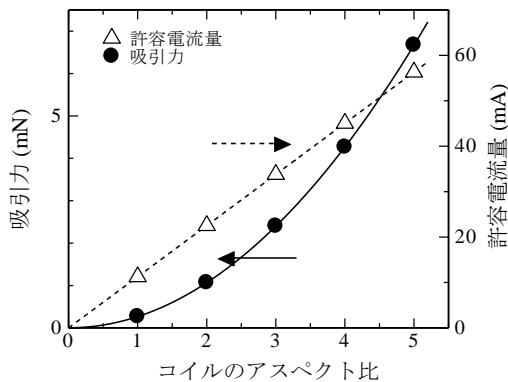


図11. アスペクト比による吸引力と許容電流量の変化

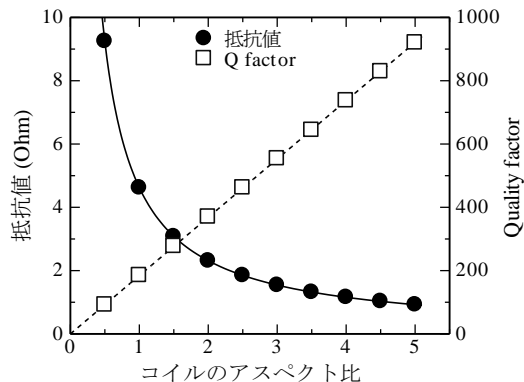


図12. アスペクト比によるQ値と抵抗値の変化

イルラインのイメージ図を示す。ワイヤータイプに比べ、高アスペクト比タイプでは高さを増すことが出来、断面積を大きくすることが可能となる。線幅を10 μm に固定して加工深さを変化させたアスペクト比の違いによる許容電流量を得られる吸引力を計算によって求めた。その結果を図11に示す。またコイル単体での性能について調べるために、アスペクト比を変化させたときのクオリティファクタと抵抗値を計算で求め、その結果を図12に示す。ここでも、コイルの線幅は10 μm に固定して加工深さを変化させて計算した。これらの図から、アスペクト比を大きくすれば電流路の断面積が大きくなり、通電可能な電流量が増大することがわかる。よって、コイルとしてはQ値が上昇し、得られるアクチュエータの吸引力も電流値の2乗に比例して大きくなることから、大きな吸引力が得られることがわかった。これにより、コイルラインのアスペクト比を増すことで、小型でも大きな吸引力となる電磁型アクチュエータが期待できる。

4-2-2. コイル作製プロセス

通常使われている被服銅線は微細化が困難であるが、リソグラフィ技術によって作製するコイルラインでは、コイルライン幅を自在に設計できることから、次世代のマイクロコイルを生み出す可能性を秘めている。微細高アスペクト比構造となるコイルラインをX線リソグラフィ技術とメタライズプロセスにより作製した。図13に作製プロセスを示す。X線リソグラフィによりねじ溝構造体を形成するプロセス、電気めっき用のシード

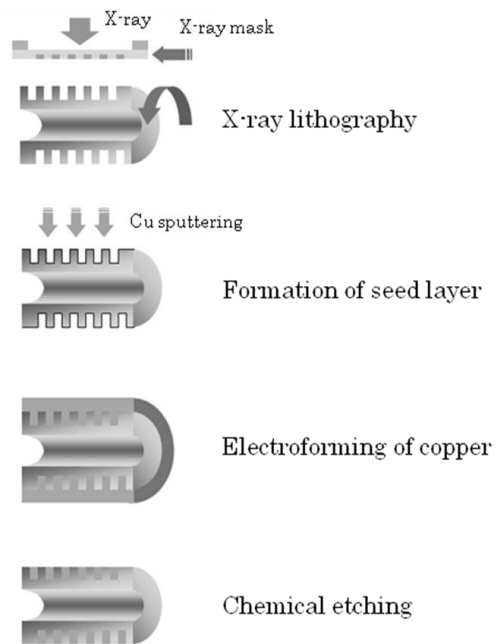


図13. コイル作製プロセス

層を形成するプロセス、銅めっきプロセス、不要部分を除去するプロセスの4つである。アスペクト比の違いによる性能を検証するために、外形5mmの亚克力樹脂パイプを用いてコイルの作製を行った。亚克力樹脂はX線により感光するため、表面に直接ねじ溝状構造を形成することが可能である。円筒形状に対して露光を可能とするために、取り付け部の治具を組み替え、回転軸にコレクトチャックを取り付けて円筒表面一周を露光できるシステムを組んだ。これにより、マスクとパイプは独立して駆動できる。さらに軸ぶれを抑えるために、電気式マイクロメータを使用した。

まずX線リソグラフィに使用するX線マスクを作製した。作製プロセスを図14に示す。黄銅板にレジストを塗布してパターンニングし、X線の吸収体となる金をめっきにて形成した。レジストを除去し、メンブレンを形成し、フレームを貼り付けて最後に基板を除去した。金の吸収体膜厚は20 μm に設定し、パターンサイズは15mm角の格子状とした。様々なパターンの格子を作製したが、10 μm と30 μm のライン&スペースパターンを主として利用した。完成したX線マスクの写真を図15に示す。

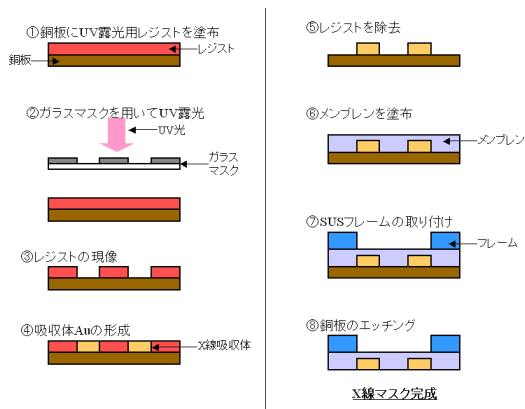


図 14. X線マスクの作製プロセス

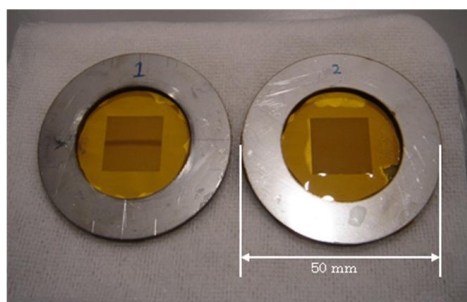


図 15. 作製した X線マスク

4-2-3. X線リソグラフィプロセス

まず、パイプを90°回転させて露光する4

回露光を試みた。図16に4回の露光後に現像して得られたSEM写真を示す。この図からわかるように、コイルラインとなるねじ溝状構造体には露光のつなぎ目でずれが生じていることがわかった。X線マスクの角度をどれだけ調節してもこのずれを解消することは出来なかった。この理由は、4回の露光では亚克力樹脂パイプの表面に投影される像が真らせんではなく、疑似らせんであることが原因とわかった。疑似らせんの場合、曲率の異なる線を無理につなげようとするため、ずれを解消できなかつたと考えられる。そこで、新しく露光プロセスを検討し表面に対して連続露光となるように改良した。放射光を照射する位置は常にパイプの中心位置を保ち、一度に回転させる角度は6°とし、60回の露光を繰り返すことにした。その際、X線マスクも周期の1/60分だけ送り、60回の一周露光が終了するときにねじ溝状構造が全周でつながって得られるように制御した。図17に露光のイメージ図を示す。図18に露光により得られるコイルラインのイメージ図を示しており、いわば一筆書きの要領でね

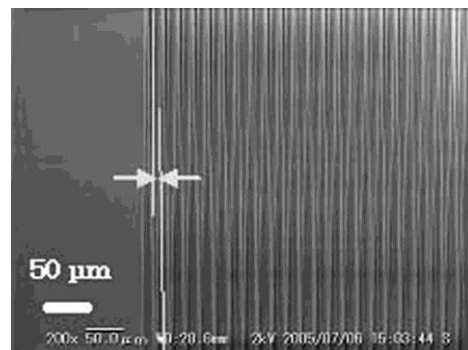


図 16. 4回露光によるねじ溝構造体のずれ

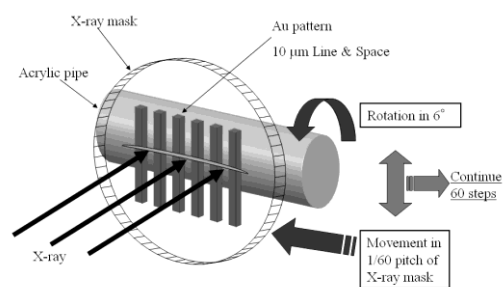


図 17. 改良した X線露光プロセス

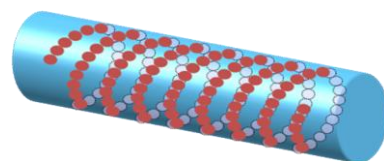


図 18. 露光により得られるコイルラインのイメージ

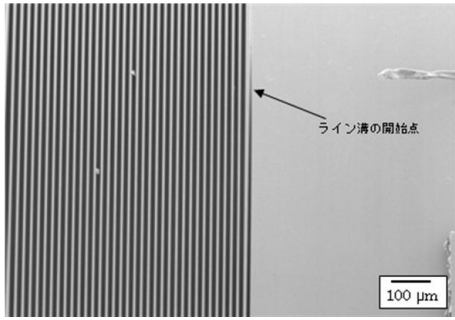


図 19. ねじ溝構造体のずれが解消された SEM 写真

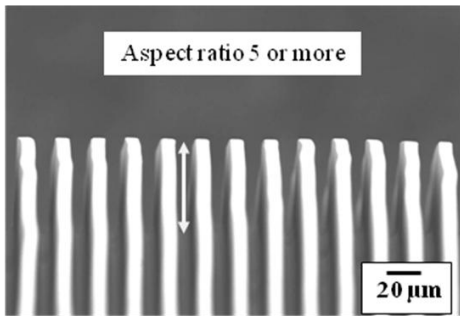


図 20. ねじ溝構造体の SEM 写真 (10μm 線幅 : アスペクト比 5)

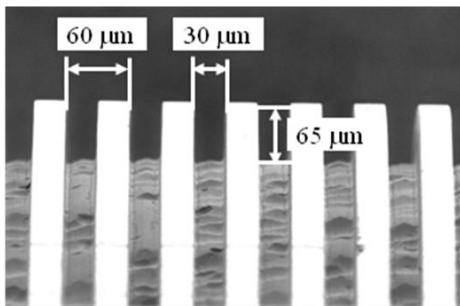


図 21. ねじ溝構造体の SEM 写真 (30μm 線幅 : アスペクト比 2)

じ溝状構造を刻むため、一周露光後に生じていたずれは解消された。図 19 に示すように、露光が終了した後に現像することで、パイプ表面にずれのないねじ溝状構造を形成することに成功した。図 20 に作製した構造体の SEM 写真を示す。10μm の線幅に対しておよそ 50μm の加工深さを実現しており、アスペクト比 5 となるコイルラインベース作製することが出来た。また、30μm 幅となる X 線マスクを使用したときは、図 21 に示す SEM 写真のように、アスペクト比 2 を超える 65μm の加工深さを形成することが出来た。X 線リソグラフィによるアクリルパイプの加工深さを調べるために、図 22 に示すように現像時間と加工深さを変化させた。この条件では加工深さ約 130μm を実現した。照射する X 線量が多いほど、現像時間が長いほど加工深

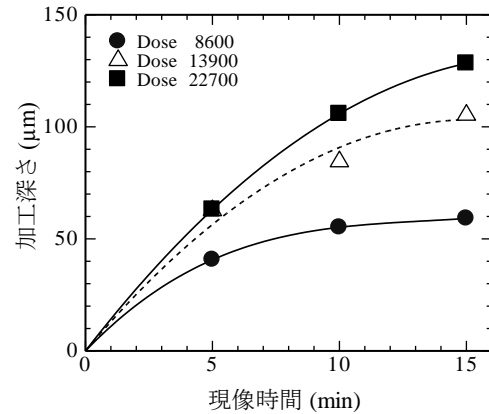


図 22. 現像時間と加工深さの関係

さが増加することがわかり、この 2 つの条件により加工深さを制御することが可能なのことがわかった。

4-2-4. 銅めっきプロセス

次に、X 線リソグラフィにて作製したねじ溝状構造体間に銅めっきで埋めるプロセスを行った。使用したアクリル樹脂は不導体であるため、まずシード層を形成する必要がある。ねじ溝状構造体の底部までシード層を形成しなければならないため、スパッタリング法を用いて銅薄膜の形成を行った。さらに、周方向に対して均一に成膜するために、スパッタ中にパイプを回転させながらパイプ位置も移動させることでアスペクト比が大きくてもシード層が形成できるように工夫した。これらにより、図 23 に示すようにアクリルパイプ表面に均一な銅シード層を形成することが出来た。



図 23. シード層を形成したパイプ

上記のように形成したシード層を用いて銅めっきを行った。銅めっき浴には硫酸銅系を用い、構造体角部への電解集中を抑制するためにレベルング剤を添加して表面を平坦化させる工夫をした。さらに、均一にめっき膜が形成できるように、めっき時にも回転機構を取り入れた。シード層の不良やめっき前

処理が不十分な時は、銅めっきが形成されていないボイドが多数発生した。図 24 にボイドが発生して銅めっきのコイルラインが空洞化した例を示す。銅めっきコイルラインは空洞化しており、良好な電流路を形成できなかった。また、めっき膜の膜厚分布があればラインが全体に形成できないことから、めっきの均一電着性を改善することとした。まず図 25 に示すめっき浴装置を取り入れて、めっき液を均一に攪拌出来るようにした。さらに、微細な構造体であるため、気泡が残留することがあるため、真空脱法によるめっき前処理を行った。他にも微細構造体間に新規の

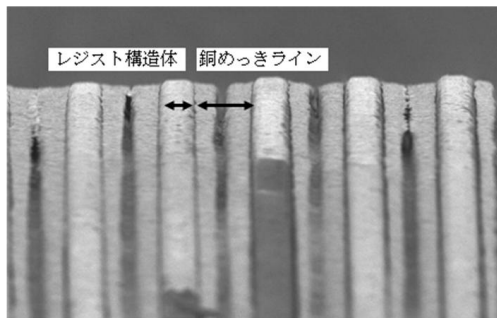


図 24. 銅めっき不良によるコイルライン

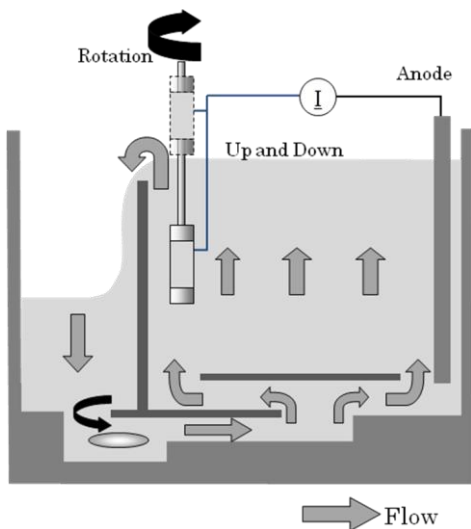


図 25. 改良しためっき装置

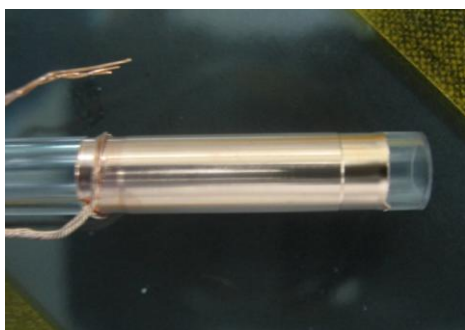


図 26. 銅めっき後の写真

めっき液を交換する工夫を行うことで、ボイドのない銅めっき膜を形成することに成功した。銅めっき後の写真を図 26 に示す。完全にねじ溝状構造体を埋めることが出来た断面の SEM 写真を図 27 に示す。この図からわかるように、 $30\mu\text{m}$ 幅に対してアスペクト比 2 を超えるコイルラインの形成に成功した。微細なねじ溝状構造体であり、アスペクト比が増すとめっきは難しくなるが、さらに狭所高アスペクト比構造体に対してめっきの形成を可能とする方法の確立が必要である。

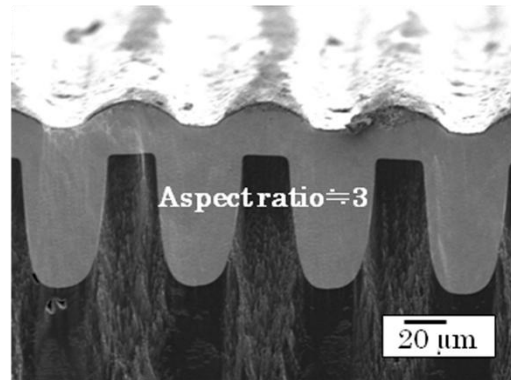


図 27. めっき後の断面 SEM 写真

4-2-5. エッチングプロセス

次に形成した銅めっきを分離してコイルラインとする必要がある。ねじ溝状構造体高さまで銅めっきで埋めてコイルラインとすれば良いが、アクリルパイプの場合、シード層が構造体表面すべてに形成されているため、コイルラインを分離するアクリル樹脂上にもめっき膜が成長してしまう。そこで、銅めっき膜は図 27 に示したようにねじ溝構造体からあふれさせて、後から不要部分の銅を除去してコイルラインを分離することとした。この除去方法は銅エッチング液による化学エッチング処理と、超精密切削処理の 2 通りについて検討した。まず切削処理による結果を図 28 に示す。コイルライン全体に渡って

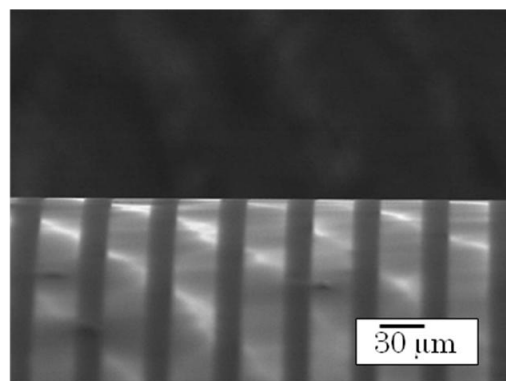


図 28. 切削加工によるコイルラインの形成

切削加工が出来、コイルラインの形成に成功した。しかし、切削加工ではコイルベースとなるアクリル樹脂も銅ラインと共に切削されてしまうためリソグラフィにより作製した加工深さから減少してしまうため、加工深さの制御が難しくなる。一方で、化学的にエッチングして除去する方法は、レジスト構造体は溶解しない薬液にて銅のみを除去できるため、設計した通りに作製しやすい特長がある。銅めっき後におよその不要膜厚を見積もっておき、観察しながらエッチングを進めることで銅ラインを完全に分離することに成功した。図 29 に完成したコイルの外観写真を示す。エッチングにより完成したコイルラインの SEM 写真を図 30 に示す。アスペクト比 2 程度までは設計したターン数全体にわたりコイルラインを完成させることが出来た。



図 29. 完成したマイクロコイル

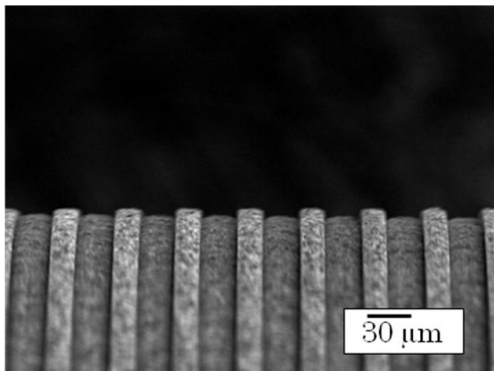


図 30. エッチングにより形成したコイルラインの SEM 写真

4-2-6. 性能評価

一方で、設計した電磁型アクチュエータの性能評価をする装置の開発も行った。作製したコイルを実装し、コイルによる電磁力で発生した吸引力をレーザ変位計によって測定する簡単な構造とした。図 31 に作製した装置の外観写真を示す。作製した評価装置の信頼性は、シミュレーションによる計算値と手巻き被覆銅線によるコイルの実測値を比較

することで検討した。コイルを形成したアクリルパイプに $50\mu\text{m}$ の被覆銅線を手巻きしてサンプルを作製した。測定して得られた結果を図 32 に示す。隙間が小さいところでは値にずれが生じているが、これはシミュレーションによる計算ではパーミアンスの近似値を求めており、隙間が狭くなるほど実際の磁力線の分布が異なるためである。それ以外のギャップ距離ではよく一致している結果を得たと言える。

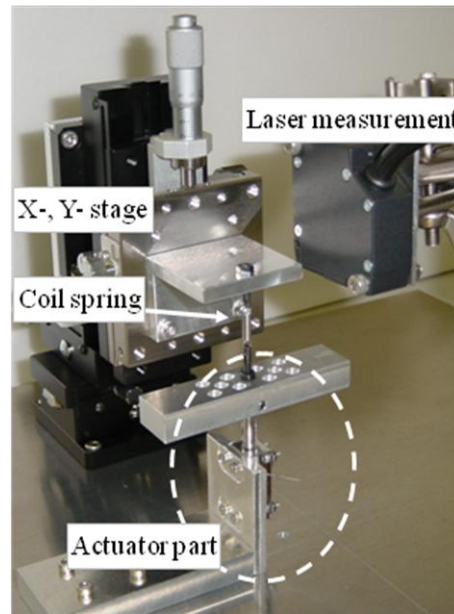


図 31. 製作したアクチュエータの測定系

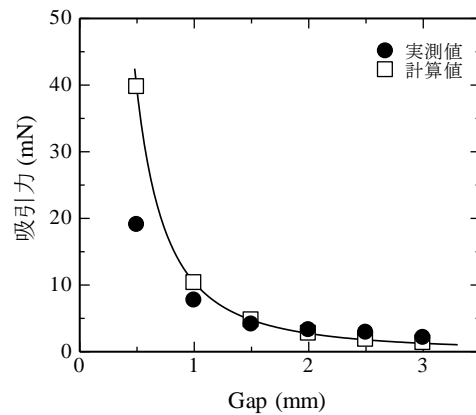


図 32. 吸引力測定結果と理論値との比較 (手巻き被覆銅線)

次に、実際に作製したコイルを実装して測定を行い、同様にシミュレーション結果と測定した値を比較した。使用したサンプルは、直流抵抗値 29Ω 、ラインの線幅 $30\mu\text{m}$ 、加工深さ約 $60\mu\text{m}$ となるコイルラインであり、アスペクト比では 2 となるコイルを使用した。同様にギャップ間距離を変えて測定した結果を図 33 に示す。この場合も先ほどの結果

と同様に、隙間が小さいところでは値にずれが生じているが、おおよそ一致する結果が得られた。以上の結果から、微細なコイルラインでありながらアスペクト比2程度となるコイルを設計通りに作製できていることがわかった。さらにアスペクト比の異なるコイルにて評価を進めている。

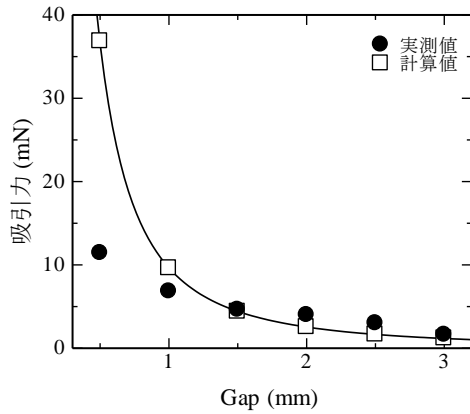


図 33. 吸引力測定結果と理論値との比較
(作製したコイル：アスペクト比2)

4-2-7. 小型化の検討

これまでの結果はコイルベースに直径5mmの亚克力パイプを使用してきた。しかし、このままではコイルそのもののサイズを小さくすることは出来ない。そこで、コイルベースを金属棒にして、X線リソグラフィを行うためにレジストを塗布したものを用いることで、さらなる小型化の検討を行った。金属棒をベースとした作製方法を図34に示す。X線リソグラフィによりねじ溝形状を作製し、めっきにより電流路となる銅を埋め込む手法は同じであるが、レジストをディッピング法により形成することと、金属棒が残っているとコイルラインが分離されないため、最後に除去する必要があることが図13に示したパイプをベースにした作製プロセスと異なる点である。

X線リソグラフィを行うためにディッピング法により黄銅棒にレジストを形成した。ディッピング法の手順は図6に示してある。形成した膜厚が加工深さを決めるため、均一に塗布することが重要となる。また、金属棒とレジストとの剥離が生じたため、アセトンによる超音波洗浄等の洗浄工程にも工夫を加えた。ディッピングの条件により、およそ150 μm のレジストを塗布することが可能となった。図35と図36に4mmの黄銅棒を用いてX線リソグラフィを行ったねじ溝構造のSEM写真を示す。図35では20 μm レジストライン幅に対しておよそ120 μm の加工深さを実現し、アスペクト比にすると6を達成している。図36では、レジスト構造体幅

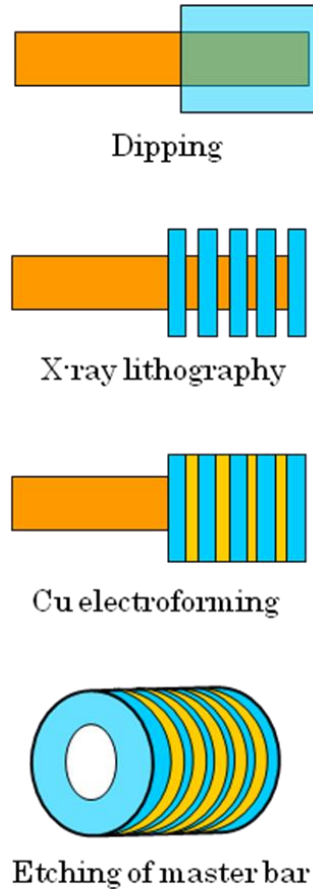


図 34. ディッピングによるマイクロコイル作製プロセス

に比べて銅めっきにて埋める幅を広くして作製した例であり、リソグラフィによってコイルラインを自在に設計できることを示した結果である。図37に示したレジスト構造体のSEM写真は直径1mmの黄銅棒を用いて形成した結果である。30 μm のライン幅を用いた結果であるためアスペクト比としてはあまり大きくないが、パイプを用いた場合に比べて直径を1/5まで小さくすることが出来ることを示せた。以上の結果から、ディッピング法によりおよそ100 μm のレジスト塗

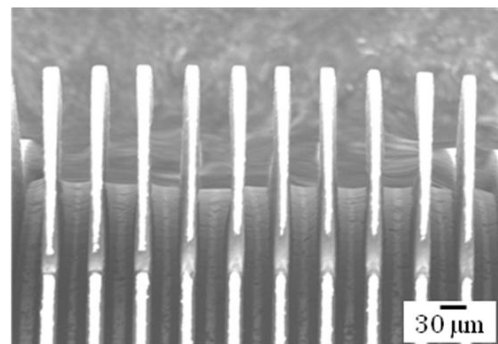


図 35. ねじ溝構造体のSEM写真 (アスペクト比6)

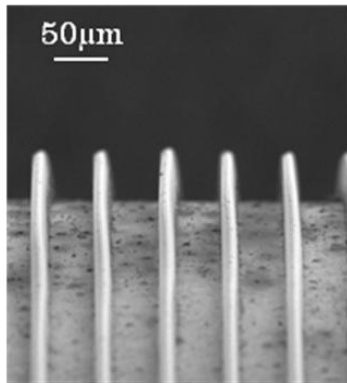


図 36. ねじ溝構造体の SEM 写真 (ラインとスペースが異なる例)

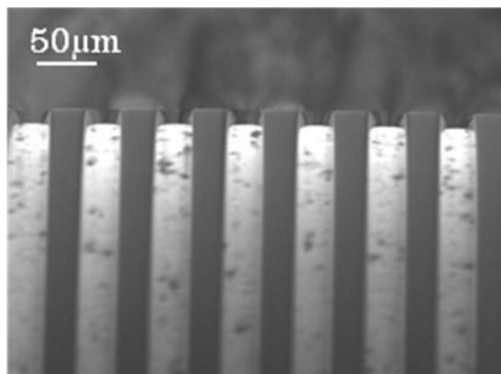


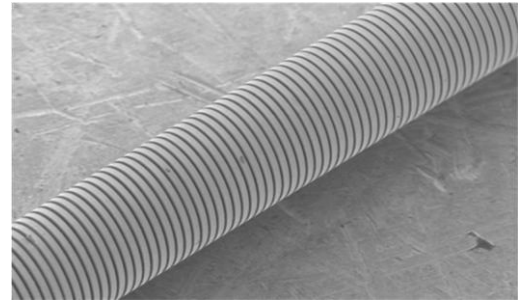
図 37. ねじ溝構造体の SEM 写真 (1mm 径に作製したコイルライン)

布は可能となっており、線幅を小さくすればそれだけアスペクト比も大きくなるコイルラインが形成できることがわかった。

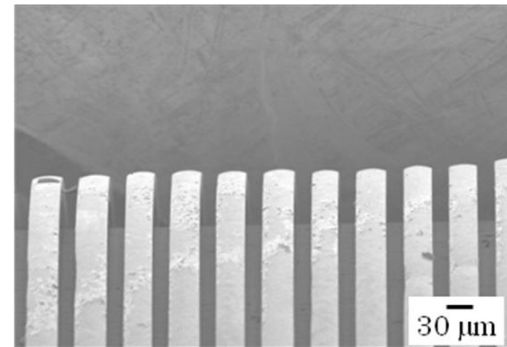
次にめっきにより電流路を形成した。金属棒がシード層の役割をはたすため、めっきは底部より成長するから微細な構造体であってもボイドの発生を抑えながら形成することが出来た。ねじ溝状構造高さを超えないところでめっき膜を形成した。得られた銅めっきによる電流路の高さを測定するために、形成したねじ溝状構造となるレジストを除去して SEM により観察した。図 38 に得られたコイルの SEM 写真を示す。図 38(a) に示すように一部分ではなく、全体的に良好に形成できていることがわかる。図 38(b) は銅めっきにより形成したねじ溝状構造の SEM 写真である。この図からわかるように、 $30\mu\text{m}$ のライン幅に対して、アスペクト比 2 となる電流路を 1mm 径の黄銅棒に形成することに成功した。図 39 に今回作製した 1mm 径コイルと 5mm 径パイプを使用したコイルを比較した。この図からも明らかなように、微細細線を有するマイクロコイルを作製することが出来た。

4-2-8. 結言

以上の研究結果から、アスペクト比を大き



(a) 全体像



(b) パターン部の拡大写真

図 38. コイルライン形成後の SEM 写真



図 39. 完成した 1mm 径マイクロコイルと 5mm 径マイクロコイル

くしたコイルは許容電流量が増し、コイルの性能向上に大きく寄与することがわかり、さらなる小型高アスペクト比となるマイクロコイルの作製方法を確立してゆきたいと考える。また、リソグラフィ技術による作製技術を生かし、様々な形状でのコイルが提案できることから、電磁型マイクロアクチュエータのみならず、多くの応用が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 24 件)

1. H. Mekar, S. Kusumi, N. Sato, M. Yamashita, O. Shimada, and T. Hattori, "Fabrication of Mold Master for Spiral Microcoil Utilizing X-Ray Lithography of Synchrotron Radiation", Japanese

- Journal of Applied Physics, Vol.43, pp.4036-4040 (2004.6). 査読有
2. O. Shimada, S. Kusumi, H. Mekar, N. Sato, M. Yamashita, and T. Hattori, "Fabrication of Spiral Micro-Coil Utilizing LIGA Process", Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 2004, pp.553-556 (2004.7). 査読無
 3. 服部正, "世代マイクロアクチュエータと超微細 3次元加工技術", 機械の研究, Vol.57, pp.527-534 (2005.5). 査読有
 4. H. Mekar, S. Kusumi, N. Sato, M. Yamashita, O. Shimada, and T. Hattori, "Development of Three Dimensional LIGA Process to Fabricate Spiral Microcoil", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, pp.5749-5754 (2005.7). 査読有
 5. O. Shimada, S. Kusumi, H. Mekar, N. Sato, M. Shimizu, M. Yamashita, and T. Hattori, "Fabrication of Spiral Micro-Coil Utilizing LIGA Process", JSME International Journal, Vol.49, pp.74-78 (2006.1). 査読有
 6. 服部正, 野田大二, "マイクロアクチュエータの製造技術", 日本 AEM 学会誌, Vol.14, pp.174-179 (2006.6). 査読有
 7. 服部正, "マイクロ 3次元構造体の加工と今後の展開", 電気学会論文誌 E センサ・マイクロマシン準部門誌, Vol.126, pp.211-215 (2006.6). 査読有
 8. Y. Matsumoto, S. Yamashita, D. Noda, and T. Hattori, "An Electromagnetic Actuators Using a Cylindrical Coil Created with 3D X-ray Lithography and Metallization Techniques", Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, pp.143-148 (2006.11). 査読無
 9. 服部正, "マイクロアクチュエータの超微細三次元加工技術", 月刊 MATERIAL STAGE, Vol.5, pp.43-48 (2006.12). 査読有
 10. D. Noda, Y. Matsumoto, S. Yamashita, M. Setomoto, and T. Hattori, "Fabrication of High Aspect Ratio Coil for Microactuators using LIGA Process", Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineering, Vol.6414, pp.64141H1-64141H8 (2006.12). 査読無
 11. 銘苺春隆, 久住真治, 佐藤憲昭, 清水正巳, 山下満, 嶋田修, 服部正, "LIGA プロセスの三次元化とスパイラル型マイクロコイルの作製", 電気学会論文誌 C 電子・情報・システム部門誌, Vol.127, pp.160-166 (2007.2). 査読有
 12. H. Mekar, S. Kusumi, N. Sato, M. Shimizu, M. Yamashita, O. Shimada, and T. Hattori, "Fabrication of a Spiral Microcoil Using a 3D-LIGA Process", Microsystem Technologies, Vol.13, pp.393-402 (2007.3). 査読有
 13. 服部正, 野田大二, "電磁型マイクロアクチュエータ用マイクロコイルの製作", 電気学会誌, Vol.127, pp.288-290 (2007.5). 査読有
 14. 服部正, 野田大二, "電磁型マイクロアクチュエータ用マイクロコイルの製作", 日本設備管理会誌, Vol.19, pp.9-14 (2007.5). 査読有
 15. H. Mochizuki, H. Mekar, S. Kusumi, N. Sato, M. Shimizu, M. Yamashita, O. Shiada, and T. Hattori, "Design of Solenoidal Electromagnetic Micro-actuator Utilizing 3D X-ray Lithography and Metallization", Microsystem Technologies, Vol.13, pp.547-550 (2007.5). 査読有
 16. D. Noda, Y. Matsumoto, M. Setomoto, and T. Hattori, "Fabrication and Estimation of Microcoils Using LIGA Process", Proceedings of the 24th Sensor Symposium on Sensors, Micromachines, and Applied Systems pp.161-164 (2007.10). 査読無
 17. D. Noda, Y. Matsumoto, M. Setomoto, and T. Hattori, "Fabrication of Coil Lines with High Aspect Ratio for Electromagnetic Actuators", Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, pp.436-441 (2007.11). 査読無
 18. D. Noda, S. Yamashita, Y. Matsumoto, M. Setomoto, and T. Hattori, "Fabrication of High Aspect Ratio Microcoil Using Dipping Method", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.2, pp.174-179 (2008.4). 査読有
 19. M. Setomoto, Y. Matsumoto, S. Yamashita, D. Noda, and T. Hattori, "Fabrication of Spiral Micro Coil Lines for Electromagnetic Actuators", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.2, pp.238-245 (2008.4). 査読有
 20. D. Noda, Y. Matsumoto, M. Setomoto, and T. Hattori, "Fabrication of Microcoils Using X-ray Lithography and Metallization", IEEEJ Transaction on

Sensors and Micromachines, Vol.128, pp.181-185 (2008.5). 査読有

21. Y. Matsumoto, M. Setomoto, D. Noda, and T. Hattori, "Cylindrical Coils Created with 3D X-ray Lithography and Metallization for Electromagnetic Actuators", *Microsystem Technologies*, Vol.14, pp.1373-1379 (2008.10). 査読有
22. D. Noda, M. Setomoto, and T. Hattori, "Fabrication of Microcoil with Narrow and High Aspect Ratio Lines for Electromagnetic Actuators", *Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science*, pp.219-224 (2008.11). 査読無
23. D. Noda, M. Setomoto, Y. Kobayashi, and T. Hattori, "Fabrication and Estimation of Electromagnetic Type Micro-Actuator with Microcoil", *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineering*, Vol.7268, pp.7268021-7268028 (2008.12). 査読無
24. 野田大二, 服部正, "高アスペクト比マイクロコイルの作製と電磁型アクチュエータへの展開", *日本 AEM 学会誌*, Vol.17, pp.162-167 (2009.3). 査読有

[学会発表] (計 71 件)

1. 佐藤憲昭, 清水正巳, 銘苺春隆, 久住真治, 山下満, 嶋田修, 服部正, "ウォーム成形技術の LIGA プロセスへの応用" 日本機械学会第 4 回機素潤滑設計部門講演会, ホテル大観, 201 (2004.4).
2. O. Shimada, S. Kusumi, H. Mekar, N. Sato, M. Yamashita, and T. Hattori, "Fabrication of Spiral Micro-Coil Utilizing LIGA Process", *The International Conference on Electrical Engineering 2004*, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, OH4-1 (2004.7).
3. 望月浩晃, 服部正, "ソレノイド型マイクロアクチュエータの製作", 日本設備管理学会 2004 年度第 2 回ナノマイクロ加工研究会, (独) 産業技術総合研究所つくば東事業所 (2004.10).
4. H. Mekar, S. Kusumi, N. Sato, M. Shimizu, M. Yamashita, O. Shimada, and T. Hattori, "Development of 3D-LIGA Process to Fabricate Spiral Microcoil", 2004 International Micro processes and Nanotechnology Conference, Hotel Hankyu Expo Park, Osaka, Japan, 29A-11-3 (2004.10).
5. 銘苺春隆, 久住真治, 佐藤憲昭, 清水正巳, 山下満, 嶋田修, 服部正, "3DLIGA プロセスによるスパイラル型マイクロコイルの作製", 第 18 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, サンメッセ鳥栖, 9C10 (2005.1).
6. 望月浩晃, 銘苺春隆, 服部正, 久住真治, 嶋田修, 佐藤憲昭, 山下満, "円筒型コイルを利用した電磁駆動ソレノイド型マイクロアクチュエータの製作", 平成 17 年電気学会全国大会, 徳島大学, 3-121 (2005.3).
7. 木村太郎, 中郷直樹, 竹田博昭, 服部正, "Ni 電鍍法によるマイクロ金型の製作", 平成 17 年電気学会全国大会, 徳島大学, 3-135 (2005.3).
8. 銘苺春隆, 久住真治, 佐藤憲昭, 清水正巳, 山下満, 嶋田修, 服部正, "LIGA プロセスによるスパイラル型マイクロコイルの試作", 精密工学会春季大会学術講演会, 慶應義塾大学, A76 (2005.3).
9. 望月浩晃, 銘苺春隆, 服部正, 久住真治, 嶋田修, 佐藤憲昭, 山下満, "円筒型コイルを利用した電磁駆動ソレノイド型マイクロアクチュエータの製作", 日本設備管理学会 2004 年度第 5 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県立先端科学技術支援センター (2005.3).
10. 木村太郎, 中郷直樹, 竹田博昭, 服部正, "Ni 電鍍法によるマイクロ金型の製作", 日本設備管理学会 2004 年度第 5 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県立先端科学技術支援センター (2005.3).
11. 山下修平, 瀬戸本豊, 植田寛康, 糸魚川貢一, 奥田孝一, 服部正, "H₂O イオンによる照射によるフッ素樹脂の表面改質", 日本設備管理学会 2004 年度第 5 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県立先端科学技術支援センター (2005.3).
12. H. Mekar, S. Kusumi, N. Sato, M. Shimizu, M. Yamashita, O. Shimada, and T. Hattori, "Fabrication of Spiral Microcoil Utilizing 3D-LIGA Process", 6th International Workshop on High-Aspect-Ratio Micro-Structure Technology, Hotel Hyundai, Gyeongju, Korea, PD01 (2005.6).
13. H. Mochizuki, H. Mekar, S. Kusumi, N. Sato, M. Yamashita, O. Shimada, and T. Hattori, "Design of Solenoidal Electromagnetic Microactuator utilizing 3D X-ray Lithography and Metallization", 6th International Workshop on High-Aspect-Ratio Micro-Structure Technology, Hotel Hyundai, Gyeongju, Korea, PD03 (2005.6).

14. O. Shimada, S. Kusumi, H. Mekar, N. Sato, M. Shimizu, M. Yamashita, and T. Hattori, "Fabrication of Spiral Micro-Coil Utilizing LIGA Process", The 2nd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing 2005, Seattle, Washington, USA, NTM-03 (2005.6).
15. 木村太郎, 服部正, "Ni 電鍍によるマイクロ金型の作製", 日本設備管理学会 2005 年度第 2 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県先端科学技術支援センター (2005.10).
16. 山下修平, 服部正, "円筒マイクロコイルのマイクロコイルライン作製", 日本設備管理学会 2005 年度第 2 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県先端科学技術支援センター (2005.10).
17. 望月浩晃, 服部正, "円筒コイルを用いた電磁型アクチュエータ", 日本設備管理学会 2005 年度第 2 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県先端科学技術支援センター (2005.10).
18. 服部正, 佐藤憲昭, 山下満, 島田修, "マイクロコイルの製作", 日本設備管理学会平成 17 年度秋季研究発表大会, 四国電力(株)総合研修所, C1.1 (2007.11).
19. 望月浩晃, 久住真治, 佐藤憲昭, 清水正己, 山下満, 嶋田修, 野田大二, 服部正, "円筒コイルを用いた電磁型アクチュエータ", 第 19 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 名古屋大学, 8P127M (2006.1).
20. 山下健治, 北谷武, 服部正, "電鍍によるマイクロ金型作製", 日本設備管理学会 2005 年度第 3 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県先端科学技術支援センター (2006.3).
21. 望月浩晃, 野田大二, 服部正, "円筒コイルを用いた電磁型アクチュエータ", ニューズパルセミナー 2006, イーグレ姫路 (2006.3).
22. 山下修平, 植田寛康, 糸魚川貢一, 野田大二, 奥田孝一, 服部正, "イオン照射による PTFE と Cu 薄膜の密着力向上", 平成 18 年電気学会全国大会, 横浜国立大学, 3-128 (2006.3).
23. 松本吉史, 望月浩晃, 野田大二, 服部正, "シミュレーションによるマイクロ電磁弁の吸引力向上", 平成 18 年電気学会全国大会, 横浜国立大学, 3-138 (2006.3).
24. 望月浩晃, 松本吉史, 野田大二, 服部正, "円筒コイルを用いた電磁型アクチュエータ", 平成 18 年電気学会全国大会, 横浜国立大学, 3-139 (2006.3).
25. T. Hattori, D. Noda, and H. Ishigaki, "Development of a New Nano-Micro Solid Processing Technology Based on a LIGA Process and a Next-Generatic Micro Actuator", The 1st International Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, Makuhari Prince Hotel, Chiba, Japan, A02-1 (2006.4).
26. 野田大二, 松本吉史, 服部正, "高アスペクト比を有する円筒型電磁アクチュエータの作製", 第 18 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 神戸国際会館, B2A14 (2006.5).
27. 野田大二, 松本吉史, 服部正, "LIGA プロセスによる電磁アクチュエータの作製", 日本機械学会第 6 回機素潤滑設計部門講演会, ホテル松島大観荘, 2305 (2006.5).
28. D. Noda, H. Mochizuki, Y. Matsumoto, S. Kusumi, N. Sato, M. Shimizu, M. Yamashita, O. Shimada, and T. Hattori, "Fabrication of High Aspect Ratio Micro Coil for Microactuators using Three-Dimensional X-Ray Lithography Technique", 10th International Conference on New Actuators and 4th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, Bremen Convention Center, Bremen, Germany, P061 (2006.6).
29. S. Yamashita, S. Kusumi, O. Shimada, K. Okuda, D. Noda, and T. Hattori, "Fabrication of Cylindrical Microcoil Line Through Surface Modification for Microactuators", 10th International Conference on New Actuators and 4th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, Bremen Convention Center, Bremen, Germany, P065 (2006.6).
30. N. Shibano, Y. Konishi, H. Ishigaki, and T. Hattori, "Measurement of Friction Characteristics by an Inertia Drive System and Optimum Design of Piezoelectric Impact Drive Mechanism", 10th International Conference on New Actuators and 4th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, Bremen Convention Center, Bremen, Germany, P072 (2006.6).
31. 服部正, 野田大二, 嶋田修, 佐藤憲昭, 清水正己, 山下満, 銘苺春隆, "電磁型マイクロアクチュエータ用マイクロコイルの製作", 平成 18 年電気学会産業応用部門大会, 名古屋工業大学, 3-O3-3 (2006.8).
32. 野田大二, 松本吉史, 山下修平, 服部正, "高アスペクト比コイルを用いた電磁型アクチュエータ", 日本機械学会年次大会,

- 熊本大学, 4101 (2006.9).
33. 松本吉史, 野田大二, 山下修平, 服部正, “3次元 X線リソグラフィ及びメタライズによる円筒型コイル作製”, 日本機械学会年次大会, 熊本大学, 4102 (2006.9).
 34. 野田大二, “ACTUATOR2006 動向調査報告”, 日本設備管理学会 2006 年度第 2 回ナノマイクロ加工研究会, 神戸市産業振興財団 (2006.9).
 35. Y. Matsumoto, S. Yamashita, D. Noda, and T. Hattori, “An Electromagnetic Actuators Using a Cylindrical Coil Created with 3D X-ray Lithography and Metallization Techniques”, 2006 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, Nagoya University, Nagoya, Japan, MP1-2-5 (2006.11).
 36. D. Noda, Y. Matsumoto, S. Yamashita, M. Setomoto, and T. Hattori, “Fabrication of High Aspect Ratio Coil for Microactuators Using LIGA Process”, SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano- and Micro-Smart Systems, University of Adelaide, Adelaide, Australia, 6414-63 (2006.12).
 37. 山下修平, 野田大二, 服部正, “高アスペクト比マイクロコイルおよびアクチュエータの作製”, 日本設備管理学会 2006 年度第 4 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県先端科学技術支援センター (2007.3).
 38. 松本吉史, 瀬戸本勝, 山下修平, 野田大二, 服部正, “電磁型アクチュエータ用高アスペクト比コイルの作製”, 先端技術セミナー2007, イーグレ姫路 (2007.3).
 39. 瀬戸本勝, 松本吉史, 山下修平, 野田大二, 服部正, “電磁駆動アクチュエータ用立体コイルラインの形成”, 平成 19 年電気学会全国大会, 富山大学, 3-125 (2007.3).
 40. 山下修平, 松本吉史, 瀬戸本勝, 奥田孝一, 野田大二, 服部正, “円筒型マイクロコイルラインの高アスペクト比化とソレノイドアクチュエータへの応用”, 精密工学会春季大会学術講演会, 芝浦工業大学, L76 (2007.3).
 41. 野田大二, 山下修平, 松本吉史, 瀬戸本勝, 服部正, “高アスペクト比マイクロコイルの作製と電磁型アクチュエータへの展開”, 第 19 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 早稲田大学, B324 (2007.5).
 42. Y. Matsumoto, M. Setomoto, D. Noda, and T. Hattori, “Cylindrical Coils Created with 3D X-ray Lithography and Metallization for Electromagnetic Actuators”, 7th International Workshop on High-Aspect-Ratio Micro-Structure Technology, CCI Doubs, Besancon, France, P084 (2007.6).
 43. D. Noda, S. Yamashita, Y. Matsumoto, M. Setomoto, and T. Hattori, “Fabrication of High Aspect Ratio Microcoil Using by Dipping Method”, 2nd International Conference on Machine Design and Tribology, Hokkaido University, Sapporo, Japan, B01 (2007.7).
 44. M. Setomoto, Y. Matsumoto, S. Yamashita, D. Noda, and T. Hattori, “Fabrication of Spiral Micro Coil Lines for Electromagnetic Actuators”, 2nd International Conference on Machine Design and Tribology, Hokkaido University, Sapporo, Japan, B02 (2007.7).
 45. 野田大二, “次世代アクチュエータ”, 日本設備管理学会 2007 年度第 1 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県先端科学技術支援センター (2007.7).
 46. 野田大二, 山下修平, 松本吉史, 瀬戸本勝, 服部正, “高アスペクト比コイルを用いた電磁型アクチュエータ”, 日本機械学会年次大会, 関西大学, 2901 (2007.9).
 47. 松本吉史, 瀬戸本勝, 野田大二, 山下修平, 服部正, “高アスペクト比コイルを用いた電磁型アクチュエータ”, 日本機械学会年次大会, 関西大学, 2902 (2007.9).
 48. 野田大二, 松本吉史, 瀬戸本勝, 服部正, “LIGA プロセスによるマイクロコイルの作製と評価”, 第 24 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, タワーホール船堀, Po-04 (2007.10).
 49. D. Noda, Y. Matsumoto, M. Setomoto, and T. Hattori, “Fabrication of Coil Lines with High Aspect Ratio for Electromagnetic Actuators”, 2007 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, Nagoya University, Nagoya, Japan, TA2-2-4, (2007.11).
 50. 野田大二, 松本吉史, 瀬戸本勝, 服部正, “LIGA プロセスによる微細ラインマイクロコイルの作製”, 第 15 回機械材料・材料加工技術講演会, 長岡技術科学大学, 116 (2007.11).
 51. 木村太郎, 佐和吉敬, 山下健治, 北谷武, 山下満, 野田大二, 服部正, “多層ニッケル電鍍による高強度金型の作製”, 第 15 回機械材料・材料加工技術講演会, 長岡技術科学大学, 117 (2007.11).
 52. 佐和吉敬, 木村太郎, 山下健治, 北谷武, 山下満, 野田大二, 服部正, “二層ニッケル電鍍法による高強度マイクロ金型の作製”, 日本設備管理学会平成 19 年度秋季研

- 究発表大会, 神戸市産業振興センター, A3.2 (2007.11).
53. 野田大二, 松本吉史, 瀬戸本勝, 越智大介, 服部正, “マイクロコイルを用いた電磁型アクチュエータの作製”, 先端技術セミナー2008, イーグレ姫路 (2008.3).
 54. 松本吉史, 瀬戸本勝, 越智大介, 野田大二, 服部正, “円筒型マイクロコイルを用いた電磁ソレノイドの作製”, 日本設備管理学会 2007 年度第 4 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県先端科学技術支援センター (2008.3).
 55. 木村太郎, 山下健治, 西田諭史, 北谷武, 佐和吉敬, 野田大二, 服部正, “大面積電鍍装置の開発と大面積金型作製技術”, 日本設備管理学会 2007 年度第 4 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県先端科学技術支援センター (2008.3).
 56. 松本吉史, 瀬戸本勝, 越智大介, 野田大二, 服部正, “円筒型マイクロコイルを用いた電磁駆動型アクチュエータの作製”, 精密工学会春季大会学術講演会, 明治大学, H19 (2008.3).
 57. 瀬戸本勝, 松本吉史, 越智大介, 野田大二, 服部正, “ディッピング法を用いた立体マイクロコイルラインの形成”, 平成 20 年電気学会全国大会, 福岡工業大学, 3-117 (2008.3).
 58. 越智大介, 瀬戸本勝, 松本吉史, 野田大二, 服部正, “X 線リソグラフィによるマイクロコイルの製作”, 平成 20 年電気学会全国大会, 福岡工業大学, 3-118 (2008.3).
 59. 木村太郎, 佐和吉敬, 山下健治, 北谷武, 山下満, 野田大二, 服部正, “二層ニッケル電鍍による高強度マイクロ金型の作製”, 平成 20 年電気学会全国大会, 福岡工業大学, 3-119 (2008.3).
 60. D. Noda and T. Hattori, “Development of a New Nano-Micro Solid Processing Technology Based on a LIGA Process and a Next-Generation Micro Actuators”, The 2nd International Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, APA Hotel & Resort Tokyo Bay Makuhari, Chiba, Japan, B3-1 (2008.4).
 61. 野田大二, 松本吉史, 瀬戸本勝, 服部正, “LIGA プロセスによる電磁アクチュエータの作製”, 日本機械学会第 8 回機素潤滑設計部門講演会, 倉敷アイビースクエア, 1301 (2008.4).
 62. 野田大二, 松本吉史, 瀬戸本勝, 服部正, “高アスペクト比マイクロコイルの作製と電磁型アクチュエータへの展開”, 第 20 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 別府ビーコンプラザ, 23B3-1 (2008.5).
 63. D. Noda, Y. Matsumoto, M. Setomoto, D. Ochi, and T. Hattori, “Fabrication of Narrow Pitch and High Aspect Ratio Microcoil for Electromagnetic Micro-actuators”, 11th International Conference on New Actuators and 5th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems (Actuator 2008), Bremen Convention Center, Bremen, Germany, P065 (2008.6).
 64. M. Setomoto, Y. Matsumoto, D. Noda, and T. Hattori, “Fabrication of Spiral Micro Coil Lines for Micro Actuators Using X-ray Lithography and Metallization”, 11th International Conference on New Actuators and 5th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, Bremen Convention Center, Bremen, Germany, P066 (2008.6).
 65. 野田大二, 松本吉史, 瀬戸本勝, 服部正, “マイクロコイルの作製と電磁型アクチュエータへの展開”, 日本機械学会年次大会, 横浜国立大学, 3203 (2008.8).
 66. D. Noda, M. Setomoto, and T. Hattori, “Fabrication of Microcoil with Narrow and High Aspect Ratio Lines for Electromagnetic Actuators”, 2008 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, Nagoya University, Nagoya, Japan, SA2-1 (2008.11).
 67. 佐和吉敬, 山下健治, 北谷武, 野田大二, 服部正, “無電解ニッケル-ホウ素めっき法を用いた高硬度金型の作製”, 日本設備管理学会平成 20 年度創立 20 周年記念大会, パシフィコ横浜, OS2-4 (2008.12).
 68. D. Noda, M. Setomoto, Y. Kobayashi, and T. Hattori, “Fabrication and Estimation of Electromagnetic Type Micro-Actuator with Microcoil”, SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano- and Micro-Smart Systems, RMIT University, Melbourne, Australia, 7268-01 (008.12).
 69. 小林雄貴, 瀬戸本勝, 山下健治, 野田大二, 服部正, “無電解めっき法によるマイクロコイル用シード層の検討”, 日本設備管理学会 2008 年度第 4 回ナノマイクロ加工研究会, 兵庫県先端科学技術支援センター (2009.3).
 70. 野田大二, 服部正, “次世代アクチュエータ研究の成果”, 先端技術セミナー2009, イーグレ姫路 (2009.3).
 71. 野田大二, 瀬戸本勝, 小林雄貴, 服部正, “マイクロコイルの作製と電磁型アクチュエータへの展開”, 先端技術セミナー2009,

イーグレ姫路 (2009.3).

〔図書〕 (計 2 件)

1. 服部正 (分担執筆), “アクチュエータ工学”, アクチュエータシステム技術企画委員会編集, 株式会社養賢堂発行, pp.171-180 (2004.12).
2. 野田大二 (分担執筆), “微細転写・加工技術全集”, 片岡大企画編集, 株式会社技術情報協会発行, pp.261-266 (2008.8).

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

日本機械学会講習会「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ」, (機素潤滑設計部門企画)

1. 服部正, “マイクロアクチュエータの加工方法”, 東京工業大学 (2005.5).
2. 服部正, “マイクロアクチュエータの加工方法”, 神戸国際展示場 (2005.6).
3. 服部正, “マイクロアクチュエータの加工方法”, 北九州国際会議場 (2006.7).
4. 服部正, “マイクロアクチュエータの加工方法”, 名古屋大学 (2006.7).
5. 服部正, “マイクロアクチュエータの加工方法”, 慶應義塾大学 (2007.6).
6. 服部正, “マイクロアクチュエータの加工方法”, (財) 京都教育文化センター (2007.6).
7. 服部正, “マイクロアクチュエータの加工方法”, アクトシティ浜松研修交流センター (2008.5).
8. 服部正, “マイクロアクチュエータの加工方法”, 名古屋大学 VBL ベンチャーホール (2008.5).

表彰

野田大二, “高アスペクト比コイルを用いた電磁型アクチュエータ”, 日本機械学会 機素設計潤滑部門 一般表彰 (優秀講演) (2007.7).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

服部 正 (HATTORI TADASHI)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・教授

研究者番号 : 70326297

(2) 研究分担者

石垣 博之 (ISHIGAKI HIROYUKI)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 40081244

内海 裕一 (UTSUMI YUICHI)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・准教授

研究者番号 : 80326298

銘苅 春隆 (MEKARU HARUTAKA)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門

研究者番号 : 30321681

野田 大二 (NODA DAIJI)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・助教

研究者番号 : 00378267