マイクロ光造形・鋳型技術の開発と 機能デバイスの創製

丸 尾 昭 二

Development of Functional Devices Using Micro/Nano Stereolithography and Molding Techniques

Shoji MARUO (Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan)

Recently three-dimensional (3-D) printers have attracted much attention due to their abilities to create complex 3-D models with a wide variety of materials. In particular, two-photon microstereolithography using a femtosecond pulsed laser can provide 3-D polymeric microstructures with sub-100 nm feature size. This technique has been applied in wide range of applications such as photonics, biology and micromachines. We have developed optically driven lab-on-a-chip devices such as micropumps and micromanipulators. Recently we have fabricated optically driven metallic micromachines by the combination of two-photon microfabrication and electroless plating. The metallic micromachines can be driven with an ultralow-power laser beam. In addition, we have developed a 3-D molding process using a 3-D polymer mold can provide functional ceramic microdevices. Using this molding process we fabricated several types of functional ceramic microstructures such as transparent silica microchannels, bio scaffolds, and piezoelectric vibration energy harvesters. This 3-D ceramics molding process will make possible to produce complex 3-D ceramics microdevices.

Key Words : Microstereolithography, Ceramics molding, Micromachine, Microfluidic device, Energy harvester, Scaffold

1. は じ め に

光造形法は、レーザー光で光硬化性樹脂を硬化させて三次元モデルを作製する技術であり、1981年に小玉秀男氏によって発明された日本発の三次元造形技術である¹⁾。この技術は、米国の3D Systems社によって実用化され、自動車部品や工業製品の試作などに広く活用されてきた。その後、産業界では製造コストの削減のため、試作レスを目指したため、光造形の活躍の場は縮小傾向にあった。そこで、従来の試作から実際の製品に近い実用モデルを作製する付加製造技術(Additive Manufacturing)へと進化させるために、光硬化性樹脂の特性改良が行われ、機械的強度や透明性、表面精度などを改善した高機能な光硬化性樹脂材料が生まれた。そのおかげで、世界中で3Dプリンターが脚光を浴びている現在でも、最も高精細な3Dプリンティング技術として注目が集まっている。

なかでも、従来の紫外レーザーを用いた光造形法ではなく、近赤外のフェムト秒パルスレーザーを用いる2光子マイクロ光造形法^{2,3)}(以下、2光子造形法)と呼ばれる手法は、0.1 μm 以下の加工線幅で複雑な三次元モデルを作製

することができる。この2光子造形法も、大阪大学の河田聡教授が発明した日本発の技術であり、2光子造形法を最初に実証した原著論文²⁾は1000回以上引用されており、多くの研究者や技術者が活用する超高精細な3Dプリンティング技術に発展している。さらに近年では、この技術の加工分解能の向上に関する研究が活発に行われており⁴⁾、ごく最近報告された例では、レーザー光の波長よりも2桁小さい9 nmの加工線幅も実証されており、更なる高分解能化が加速している⁵⁾。

このため、2光子造形法は単なる三次元高精細モデルの作製だけでなく、ナノ・マイクロ領域の産業応用も検討されている。例えば、光通信分野では、フォトニック結晶と呼ばれる微細で複雑な格子構造や、光ファイバーを接続す

丸尾 昭二；横浜国立大学大学院工学研究院(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)教授 博士(工学)。平成9年、大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。専門は、三次元造形、マイクロマシン工学。

る三次元コネクタの作製などに応用されている^{6, 7)}。機械工学分野では、特異な機械特性を示す複雑な機械部品が作製されている^{8, 9)}。また、我々は、化学分析装置や細胞解析装置を手のひらサイズに小型化したラボオンチップへの応用を目指している。これまでに、光駆動型のマイクロポンプやマイクロミキサー、マイクロピンセットなど高機能マイクロ流体デバイスを開発している¹⁰⁻¹²⁾。

最近では、2光子造形法で作製した樹脂構造体の後処理を加えることで、機能を付与する研究も行われている。例えば、無電解めっきによって樹脂構造を金属化して、立体的なマイクロエレクトロニクスデバイス¹³⁾や、高効率な光駆動マイクロマシンなどが開発されている^{14, 15)}。

さらに、従来の光造形法と同様に、2光子マイクロ光造形法に適用する光硬化性樹脂そのものを改良して、機能性のある光硬化性樹脂材料を開発し、三次元機能構造体を作製する研究も活発化している。例えば、磁気ナノ微粒子やカーボンナノチューブなどのナノ材料を混合したハイブリッド樹脂が開発されている^{16, 17)}。また、pHに応じて膨潤するゲル材料¹⁸⁾を用いたマイクロバルブや、色素を混合した生体高分子¹⁹⁾を用いたドラッグデリバリーデバイスなども試作されている。また、我々は、熱処理によって樹脂を炭化させて、アモルファスカーボンからなる三次元構造体を形成できる光硬化性樹脂材料を開発している²⁰⁾。

また、我々は、光硬化性樹脂材料に限定されることなく、多種多様な材料を用いて三次元機能構造体を作製する方法として、マイクロ光造形法を用いた三次元鋳型技術を開発している²¹⁾。この鋳型技術では、マイクロ光造形によって作製した三次元樹脂鋳型に、セラミックス微粒子からなる高濃度の懸濁液（セラミックス・スラリー）を注入し、乾燥後に樹脂鋳型を焼失して、セラミックス構造体を形成する。したがって、母型の材料である光硬化性樹脂に制限されることなく、様々な材料を用いて最終製品であるセラミックス構造体を形成できる。これまでに、紫外レーザーを用いたマイクロ光造形や2光子造形法を用いて樹脂鋳型を作製し、シリカ製の三次元流体回路の作製に成功している²²⁾。また、バイオセラミックスを用いた医療用足場²³⁾や、圧電セラミックスを用いた振動発電素子などを作製している²⁴⁾。

このように2光子造形法は、光硬化性樹脂を用いて複雑な三次元マイクロ・ナノ構造体を形成してフォトニクスやMEMS、バイオに応用可能な機能デバイスを開発するだけでなく、樹脂構造体への後処理技術や新規な機能を有する光硬化性樹脂の開発が活発に行われており、それらを用いた新たな機能デバイスの創製が試みられている。さらに、我々は、光造形によって作製した鋳型を用いて、多彩なセラミックス材料を用いて三次元セラミックス構造体を作製する技術の開発と応用にも取り組んでいる。

本稿では、2光子造形法の原理と特徴について述べ、最近の造形技術の進展について紹介する。次に、2光子造形の応用研究の例として、我々が開発している光駆動マイクロマシンを用いたラボオンチップについて紹介する。さらに、シリコン樹脂型を用いたマイクロマシンの複製技術についても述べる。最後に、マイクロ光造形法で作製した三次元樹脂鋳型を用いて、多種多様なセラミックス材料からなる機能デバイスの作製と応用研究について紹介する。

2. 2光子マイクロ光造形法

2.1 原理と特徴

図1に、2光子造形法の原理を示す。この方法では、従来の光造形法で用いられる紫外光による1光子吸収ではなく、紫外光の2倍の波長を持つ近赤外フェムト秒パルスレーザー光による2光子吸収によって液状樹脂を硬化させる。硬化形状は、2光子吸収の発生確率が光強度の2乗に比例するという特性から、光軸方向に長軸を持つ楕円体（ボクセルと呼ぶ）となり、その大きさは集光スポットよりも小さくなる（図1(a)）^{2, 3)}。したがって、レーザー光を液状樹脂の内部で三次元走査することにより、光の回折限界を超える加工分解能で三次元微小構造体を作製できる（図1(b)）。

図2は、我々が2光子造形法を用いて作製した三次元マイクロ造形物の例である。図2左は、レーザー光を液状樹脂の内部で三次元的に走査することによって作製した三次元微細フレームモデルである。このように、従来の積層造形法と異なり、一方向に断面形状を積層するだけでなく、三次元的に焦点を移動させて、自由自在に立体造形を行う

図1 2光子造形法による三次元造形
(a) 集光レーザーによる光硬化性樹脂の硬化
(b) レーザー走査による液状樹脂中での三次元造形

図2 2光子造形によって作製された三次元微小構造体

図3 2光子造形によって作製したマイクロ可動部品
(マイクロタービンとマイクロピンセット)

ことができる。したがって、積層段差が非常に小さく、高精度な造形が可能となる。また、図2右は、毛髪の上に作製したウサギモデルである。このように曲面基板上や光ファイバーの先端、マイクロ流路の内部など、さまざまな場所に三次元マイクロ構造体を付加加工できる。

図3は、ガラス基板上に作製したマイクロ可動部品の例である。このように、光硬化性樹脂の内部でレーザー光を走査するだけで、シャフトと一体化した微小な可動部品を持つマイクロマシンも一括作製できる²⁵⁾。これは2光子造形に特有な利点である。従来の光造形法では、可動部品を造形するためにサポートと呼ばれる支持構造が不可欠であり、リソグラフィーを基礎とするマイクロマシン作製法でも犠牲層と呼ばれる支持構造が必要であった。一方、2光子造形では、液状樹脂中でレーザー光を三次元的に自在に操作して、任意の三次元形状をサポートなしで造形できる。

2.2 加工分解能と加工速度の向上

現在、2光子造形法の造形技術の向上に関する研究が世界中で活発に行われており、加工分解能と加工速度の向上が大きく進展している。面内および奥行き方向の加工分解能を評価する方法としては、図1(a)に示したボクセルと呼ばれる硬化単位形状を計測する方法や、基板上に細線を描画し、その線幅を評価する方法などが用いられている。河田らは、世界に先駆けて120 nmの加工線幅を実証し、2光子造形法の有用性が世界に広く知られるようになった³⁾。その後も光源の波長の短波長化などによって加工線幅の微細化が行われてきた²⁶⁾。

最近では、液状樹脂を硬化させるレーザー光に加えて、

硬化反応を阻害するレーザー光を同時に照射することで、液状樹脂が硬化する領域を制限し、加工分解能を向上させるナノ光造形法が複数提案されている³⁾。これらの方式では、硬化用レーザーの集光スポットの周囲に、ドーナツリング状の強度分布を持つ硬化阻害用レーザーを重ねて照射することで、ボクセルサイズをより小さくしている。例えば、Wegenerらは、蛍光顕微鏡の三次元分解能を数10 nmまで向上させるSTED (Stimulated Emission Depletion) 法を用いた造形法を開発し、65 nmの加工線幅を実証している²⁷⁾。また、Fourkasらは、特殊な色素を光重合開始剤に用いることで、液状樹脂を硬化させるフェムト秒パルスレーザーと同波長の連続光で光重合反応を阻害できることを実証し、奥行き方向に40 nmの加工線幅を実証している²⁸⁾。さらに、Ganらは、紫外光の阻害レーザー光を用いる手法を開発し、9 nmの加工線幅を実証した⁴⁾。今後、サブ10 nmの加工線幅の再現性が向上されれば、リソグラフィーの代替技術としても活用が期待できる。さらには、二次元的な描画だけではなく、高いアスペクト比を持つ三次元マイクロ・ナノ構造体を自在に作製できるようになれば、ナノフォトニクスやメタマテリアルと呼ばれる新しい三次元マイクロ・ナノデバイスの製造技術として利用も期待される。

一方、加工速度の向上も活発に行われている。例えば、Liらは、高効率な光重合開始剤を開発し、従来法に比べて2桁以上速い80 mm/sの高速描画を達成している²⁹⁾。今後、さらに高速な造形が可能となれば、複雑な三次元構造体の多品種少量生産だけでなく、量産技術としての利用も期待できる。

3. 2光子マイクロ造形法によるラボオンチップの開発

3.1 光制御ラボオンチップ

現在、2光子造形法の応用研究が活発に行われている。主な応用としては、フォトニック結晶や三次元光導波路などの三次元形状を駆使した次世代の光制御デバイスの作製が挙げられる。また、最近では、細胞を所望の位置に高精度に三次元的に配列することが可能な立体的な医療用足場(スキャフォールド)の作製なども活発に行われている。

一方、我々は、2光子造形法を用いて高機能なラボオンチップの開発を目指している。ラボオンチップとは、ガラスやプラスチックの微小な流体回路を用いて、化学反応や細胞分析を行うマイクロ化学分析チップである。分析装置をマイクロ化することで、試薬や試料の低減、分析速度の向上などが期待できる。しかしながら、一般的なラボオンチップは、流路や反応部だけが微小化された単純な流体回路が用いられていることが多く、ポンプやバルブなどの流体制御素子は外付けである。このため、試料や試薬の微量化に限界があり、微小なポンプやバルブを内蔵した高機能

かつ廉価なラボオンチップの実現が期待されている。

そこで我々は、2光子造形法によって、マイクロ流体回路の内部に、マイクロポンプやマイクロピンセットを内蔵させて、これらをレーザー光を用いて遠隔駆動することで、流体制御や生体試料の分析などを行うことができる「光制御ラボオンチップ(図4(a))」を提案・開発している²⁸⁾。レーザー光が微小物体に集光されると、光が屈折・反射する際に光の放射圧と呼ばれる力が働く。この力によって、マイクロ流路内のマイクロマシンが、レーザー光の焦点に引き寄せられるため、レーザー光を操作することで、マイクロマシンを自在に動かすことができる。この原理は「光ピンセット」と呼ばれており、細胞や微粒子の操作に広く活用されている。我々のラボオンチップでは、この光ピンセットの原理を応用して、マイクロマシンを遠隔駆動させる。このため、チップ内部にはマイクロアクチュエータなどの

駆動源が不要であり、電気配線や電源供給を行うことなく、レーザー光による遠隔操作が可能となるため、すべてが樹脂でできた廉価で高機能なラボオンチップを実現できる。

図4(b)、(c)に、我々が開発したマイクロポンプの例を示す。図4(b)は、2つのロータを噛み合わせて液体を輸送するロープ型ポンプであり、レーザー光を時間分解して、2つのロータに交互に照射させて、同時に回転させている¹⁰⁾。また、我々は、1つの微小な円盤をU字型流路の内部で回転させるだけで、液体や細胞を搬送する粘性型ポンプも提案・開発している¹¹⁾。図4(c)は、この粘性型ポンプの改良型として、2枚のらせん状ブレードを持つ高速回転マイクロロータを開発し、このロータを2つ内蔵させたタンデム型マイクロポンプを実証した例である¹²⁾。このようなポンプは、細胞を搬送するセルソータなどへの応用が期待できる。

3.2 シリコン樹脂型を用いたマイクロマシンの複製

前節で紹介した光駆動マイクロポンプなどのマイクロ可動部品は、2光子造形によって直接造形されている。このため、1つの素子を造形するのはわずか数分で完了するが、大量生産する場合には長時間を必要とする。そこで、我々は、シリコン樹脂を用いた転写技術によってマイクロマシンを複製する技術を確認した³¹⁾。図5に、シリコン樹脂を用いたマイクロ可動部品の複製方法の概略を示す。この方法では、2光子造形によって作製した三次元樹脂モデルを母型として、ポリジメチルシロキサン(PDMS)を用いて鋳型を作製し、三次元微小構造体を複製する。このとき、可動部を円筒薄膜状の支持膜で支えた構造体を母型に用いることで、PDMSが可動部を包含することを防ぎ、PDMS型の離型が可能となる。離型後に、PDMS型を撓ませながら、可動部の空洞にのみ光硬化性樹脂を充填し、紫外線露光を行うことで、可動部を硬化させる。最後に、PDMS型を離型すれば、シャフトに拘束された可動部品を複製できる。実際に、この方法を用いて、マイクロギア、ピンセットなどの可動部品の複製に成功している³¹⁾(図6)。この転写技術を活用すれば、複数のマイクロポンプや

図4 光制御ラボオンチップ

(a) 概念図 (b) ロープ型マイクロポンプ
(c) スパイラルロータを用いたタンデム型ポンプ

図5 PDMS型によるマイクロ可動部品の複製方法

図6 PDMS型による複雑な微小構造体の複製
(a) マイクロギア (b) マイクロピンセット

バルブを内蔵した高機能なラボオンチップや、さまざまなマイクロマシンも量産できる。

3.3 無電解めっきによる金属化マイクロマシンの開発

これまで紹介した光駆動マイクロマシンは、すべて光硬化性樹脂から形成された透明な樹脂構造体であった。このような透明な樹脂構造体は、光ピンセット技術によってレーザー光の焦点に捕捉し、自由自在に駆動することが可能であった。しかしながら、これらを駆動するには、1W程度の高出力レーザーが必要であった。そこで我々は、2光子造形で作製した樹脂構造体に無電解めっきを施し、金属で表面をコーティングすることで、駆動力を向上させる研究を行っている^{19, 20)}。金属化することで、これまで可動部品を透過していたレーザー光は、すべて反射されるため、可動部品には大きな反発力が作用する。この反発力を利用して、マイクロマシンを高効率に駆動できる。

図7に、金属化マイクロローターの試作例を示す。図7(a)は、2光子造形で作製した樹脂製のアンカー付きマイ

図7 金属化マイクロマシンの作製例
(a) アンカー付きローターの造形 (b) レーザーアブレーション後の銅めっきされたローター

クロローターの電子顕微鏡写真である。このアンカー付きローターに無電解銅めっきを施したのち、レーザーアブレーションによってアンカーを除去することで、金属化マイクロローターが作製される。図7(b)は、アンカー除去後の金属化マイクロローターの光学顕微鏡写真である。ローターの羽根を破損することなく、アンカーのみが除去されていることがわかる。実際に、本手法で作製した金属化マイクロマシンを、1 mW程度の微弱なHe-Neレーザー光で回転駆動させることに成功している¹⁹⁾。このような2光子造形と無電解めっきを組み合わせた融合技術は、マイクロマシンだけでなく、立体的なエレクトロニクス部品¹⁸⁾など機能構造体の作製手法として多方面への応用が期待される。

4. セラミックスを用いた機能構造体の創製

これまで紹介した研究例では、最終的な機能構造体の材料として、光硬化性樹脂あるいは後処理を行った樹脂材料が用いられていた。このため、機能構造体の物性が原材料である光硬化性樹脂に大きく依存するという本質的な課題がある。そこで、我々は、光硬化性樹脂に限定されことなく、さまざまなセラミックス材料を用いて三次元微小構造体を作製できる鋳型技術の開発に取り組んでいる(図8)²⁰⁾。本手法では、光造形で樹脂鋳型を作製し、セラミックス微粒子からなる高濃度スラリーを型に注入し、これを乾燥する。そして、樹脂鋳型を熱分解によって除去した後、焼結することで、鋳型の反転形状をもつセラミックス構造体を形成する。

この方法を用いて、これまでにシリカ微粒子(平均粒径: 340 nm)を用いて作製した高濃度スラリーを使用し、透明なマイクロ流体回路を作製することに成功した^{21, 22)}。図9は、2光子造形によって作製した樹脂鋳型と、この樹

図8 マイクロ光造形を用いたセラミックス構造体の作製プロセス

図9 シリカ微粒子を用いたマイクロ流体回路の作製
(a) 樹脂鋳型 (b) シリカ製マイクロ流体回路

脂鋳型を焼失して作製したシリカ製マイクロ流路の例である。このように、本手法を用いれば、2光子造形によって作製した樹脂鋳型の反転形状を有する微細な流体回路を作製することが可能である。

本手法にバイオセラミックスを使用すれば、歯や骨を再生するための足場も作製できる。図10は、2光子造形ではなく、紫外レーザーを用いたマイクロ光造形法によって作製した樹脂モデルを鋳型として、バイオセラミックス(β -リン酸三カルシウム)を用いて作製した耳小骨モデルである²³⁾。樹脂鋳型によって最終製品の形状を規定できるため、後加工無しで複雑なセラミックス構造体を一体成形できた。このような三次元CADモデルから作製可能なバイオセラミックス構造体は、テーラーメイド医療への応用が期待できる。

また、最近では、圧電セラミックスを用いてスパイラル形状の振動発電素子の開発にも取り組んでいる(図11)²⁴⁾。従来の圧電セラミックスを用いた振動発電素子の多くは、二次元的な片持ちはり構造が主流であり、1方向の振動エネルギーしか利用できないが、スパイラル型発電素子は三次元的な振動エネルギーを電気エネルギーに変換できるため、発電効率の向上が期待できる。今後、圧電素子の形状や電極配置の最適化によって発電効率のさらなる向上が期待できる。

図10 バイオセラミックス構造体の作製
(a) 樹脂鋳型 (b) バイオセラミックス構造体

図11 スパイラル型振動発電素子の作製
(a) CADモデル (b) ポリマー鋳型
(c) 乾燥体 (d) 焼結したスパイラル型振動発電素子

5. ま と め

2光子造形法の進展と三次元セラミックス鋳型技術を用いた機能デバイスの作製について、我々の研究を中心に最新成果を報告した。今後も、新規な機能を有する光硬化性樹脂の開発が活発に行われるとともに、後処理や付加加工との融合によって、電極やセンサー、アクチュエータなどの機能を付与した三次元機能デバイスが創製されることが期待される。また、我々が提案・開発しているセラミックス鋳型技術を用いれば、複雑な三次元形状を有する樹脂鋳型を用いて、さまざまなセラミックス材料を鋳込み材料として高機能なセラミックス構造体を形成できる。今後、2光子造形法と三次元セラミックス鋳型技術は、フォトリソ、医療、環境エネルギーなど幅広い分野に応用展開が期待できる。

References

- 1) Kodama, H.: *Review of Scientific Instruments*, **52**, 1770 (1981)
- 2) Maruo, S.; Nakamura, O.; Kawata, S.: *Optics Letters*, **22**, 132 (1997)
- 3) Kawata, S.; Sun, H.B.; Tanaka, T.; Takada, K.: *Nature*, **412**, 697 (2001)
- 4) Fischer, J.; Wegener, M.: *Laser & Photonics Reviews*, **7**, 22 (2013)
- 5) Gan, Z.; Cao, Y.; Evans, R.A.: *Nature Communications*, **4**, 2061 (2013)
- 6) Cumpston, B. H.; Ananthavel, S. P.; Barlow, S.; Dyer, D.L.; Ehrlich, J.E.; Erskine, L.L. et al.: *Nature*, **398**, 51 (1999)
- 7) Lindenmann, N.; Balthasar, G.; Hillerkuss, D.; Schmogrow, R.; Jordan, M.; Leuthold, J.; Freude, W.; Koos, C.: *Optics Express*, **20**, 17667 (2012)
- 8) Bückmann, T.; Stenger, N.; Kadic, M.; Kaschke, J.; Frölich, A.; Kennerknecht, T.; Eberl, C.; Thiel, M.; Wegener, M.: *Advanced Materials*, **24**, 2710 (2012)
- 9) Kadic, M.; Bückmann, T.; Stenger, N.; Thiel, M.; Wegener, M.: *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 191901 (2012)
- 10) Maruo S.; H. Inoue: *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 144101 (2006)
- 11) Maruo S.; H. Inoue: *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 084101 (2007)
- 12) Maruo, S.; Takaura, A.; Saito, Y.: *Optics Express*, **17**, 18525 (2009)
- 13) Wang, J.; Xia, H.; Xu, B.-B.; Niu, L.-G.; Wu, D.; Chen, Q.-D.; Sun, H.-B.: *Optics Letters*, **34**, 581 (2009)
- 14) Ushiba, S.; Shoji, S.; Masui, K.; Kuray, P.; Kono, J.; Kawata, S.: *Carbon*, **59**, 283 (2013)
- 15) Kaehr B.; Shear, J. B.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **105**, 8850 (2008)
- 16) Pitts, J. D., Campagnola, P. J.; Epling, G.A.; Goodman, S.L.: *Macromolecules*, **33**, 1514 (2000)
- 17) Daicho, Y.; Murakami, T.; Hagiwara, T.; Maruo, S.: *Optical Materials Express*, **3**, 875 (2013)
- 18) Farrer, R.A.; LaFratta, C.N.; Li, L.; Praino, J.; Naughton, M.J.; Saleh B.E.A.; Teich, M.C.; Fourkas, J.T.: *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 1796 (2006)
- 19) Ikegami, T.; Stocker, M.P.; Monaco, K.; Fourkas, J. T.; Maruo, S.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**, 06FL17 (2012)
- 20) Ikegami, T.; Ozawa, R.; Stocker, M. P.; Monaco, K.; Fourkas, J. T.; Maruo, S.: *J. of Laser Micro/ Nanoeng.*, **8**, 6 (2013)
- 21) Maruo, S.: *Funtaijijyutu*, **5**, 638 (2013)
- 22) Inada, M.; Hiratsuka, D.; Tatami, J.; Maruo, S.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**, 06FK01 (2009)

- 23) Torii, T.; Inada, M.; Maruo, S.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**, 06GL15 (2011)
- 24) Monri K.; Maruo, S.: *Sensors and Actuators A*, **200**, 31 (2013)
- 25) Maruo, S.; Ikuta, K.; Korogi, H.: *J. of Microelectromech. Syst.*, **12**, 533 (2003)
- 26) Haske, W.; Chen, V. W.; Hales, J. M.; Dong, W.; Barlow, S.; Marder, S. R.; Perry, J.W.: *Optics Express*, **15**, 3426 (2007)
- 27) Fischer, J.; Freymann, G.; Wegener, M.: *Advanced Materials*, **22**, 3578 (2010)
- 28) Li, L.; Gattass, R. R.; Gershgoren, E.; Hwang, H.; Fourkas, J.T.: *Science*, **324**, 910 (2009)
- 29) Li, Z.; Pucher, N.; Cicha, K.; Torgersen, J.; Ligon, S.C., Ajami, A. et al.: *Macromolecules*, **46**, 352 (2013)
- 30) Maruo, S.: *Kikainokenkyu*, **58**, 735 (2006)
- 31) Maruo, S.; Hasegawa, T.; Yoshimura, N.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**, 06FH05 (2009)

日本語表記参考文献

- 21) 丸尾昭二：粉体技術, **5**, 638 (2013)
- 30) 丸尾昭二：機械の研究, **58**, 735 (2006)

*

*

*

*

*