

# 新野研究室（応用電気機械システム工学）

## 所在地及び連絡先

東京大学生産技術研究所 新野研究室

TEL: 03-5452-6216 FAX: 03-5452-6214

e-mail: [niino@iis.u-tokyo.ac.jp](mailto:niino@iis.u-tokyo.ac.jp)

URL: <http://niinolab.iis.u-tokyo.ac.jp>

## 概要

新野研では、メカトロニクス特に真空を代表とする特殊物理環境下でのメカトロニクス要素・システムの開発、粉末を用いた積層造形技術、MID 技術の高度化の 3 本柱で研究を行っている。

### 高真空中メカトロニクスの研究

ここ 20 年来継続している半導体の高密度化から、また、近年ではナノテクノロジーへの関心の高まりなどから、微細な加工及び観察技術への要求は永続的に続いており、現在要求される加工分解能は 1 桁ナノメートルのオーダーに完全に突入している。このような高精度・高分解能な加工にはクリーンさらには高真空環境が必要とされることが多く、そのような環境下での物体ハンドリングの必要性が高まってきている。周知の通り大気中のメカトロニクスは非常に進歩している。例えば精密位置決めを例に挙げれば、すでに細線間隔が  $0.1\mu\text{m}$  より小さい露光精度を目指されており、実験室レベルの装置では数 nm オーダーの位置決めが実現されている。一方真空中では、材料の制限（低ガス放出性、耐熱性）、大きな摩擦、速い摩耗などに加えて、荷電粒子ビームを使う用途では、磁気の使用の制限などから、大気中で使用できるような高性能なモータ、センサなどの要素技術をそのまま真空容器内に持ち込むことができない。新野研究室では、このような物理的特殊環境に対応したメカトロニクス要素技術の創出を目標に研究を行っている。

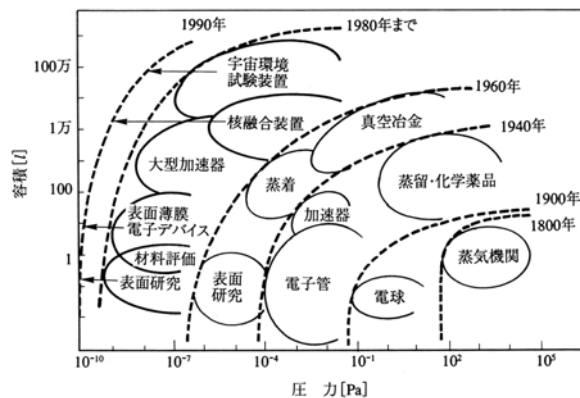
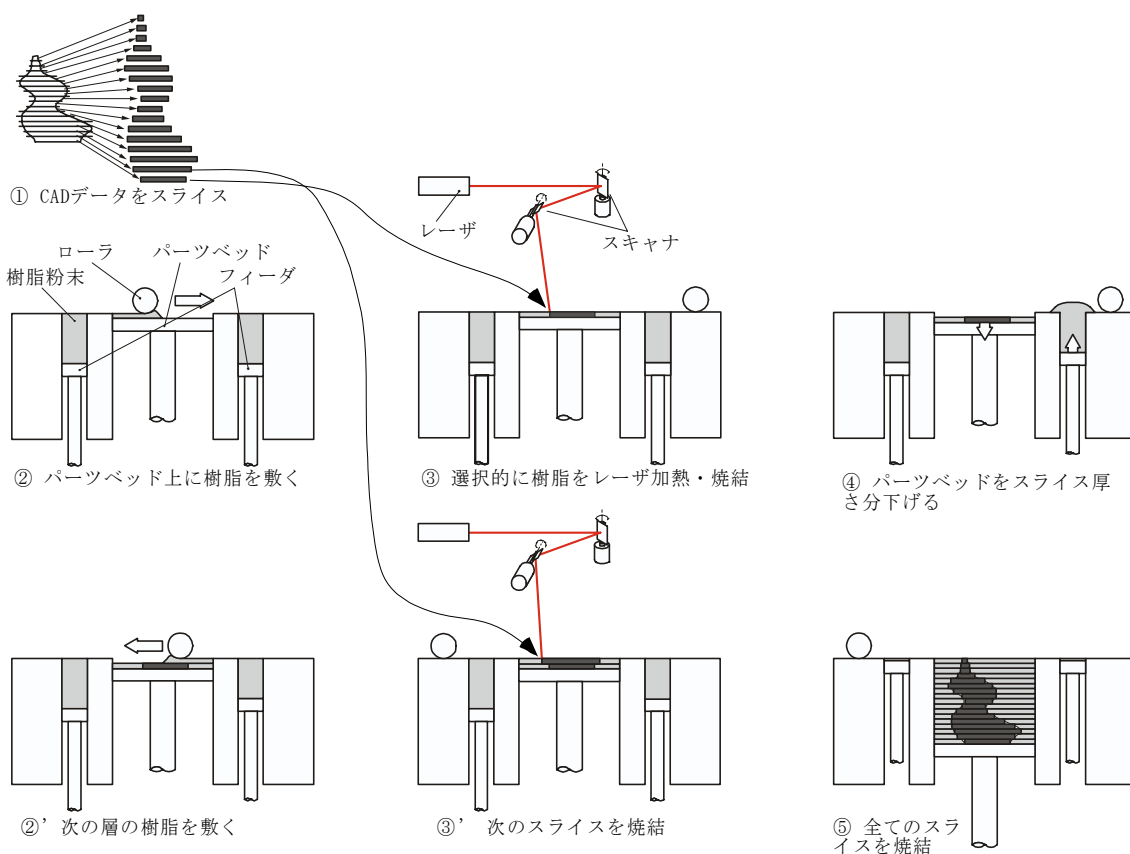


図 1 必要とされる真空度の変遷  
(中山：「真空利用技術」日刊工業新聞社)

## 積層造形に関する研究

光造形をはじめとする積層造形装置は、1990年代初頭に上市され、現在では100 $\mu$ mを切るような精度にも対応可能となっている。また、上市直後の主な用途であった単に形状を確認するだけの模型作りから、近年は金型を直接造形したり、部品を造形して機能試験に供するなど、形に加えて材質などさらに高度な機能が求められるようになっており、プラスチックのみならず、金属やセラミックを直接造形する方式が開発されている。新野研究室では、SLS (Selective Laser Sintering) と呼ばれる方式を中心に積層造形の研究を行っている。SLSの造形手順は概略図2の通りである。①3次元CADデータから有る軸に垂直に所定の間隔で切断したときの断面形状（以降スライス）を得る、②スライスの間隔に相当する厚さに粉末を敷き詰め、③粉末表面上をレーザで高速スキャンすることにより粉末の表面を熔融・再固化して、隣接する粉末どうしが結合する。スライスの形状にレーザをスキャンすることによって、粉末をスライスの形状に選択的に固化する、④エレベータを次のスライスの厚さに相当する高さだけ下げ、⑤全てのスライスを固化するまで②に戻る。というプロセスによりCADデータ通りの3次元形状を作成する。

SLSは、造形分解能の最終単位を粉末の径よりも小さくできないため微細性では光造形に劣るが、造形速度が速い点、また、加熱による溶解、再固化というシンプルなプロセスのため、プラスチック、ゴム、一部の金属、セラミックなど幅広い材料に応用可能である点などでは、光造形より優れている。



MID 技術の高度化に関する研究

MID (Molded Interconnect Device) は表面や内部に、配線回路を有する射出成形品の総称である。MID はできあがったものの呼称であり、さまざまな工法が実用化されている。フォイルをスタンプするもの、メッキした表面を選択的にエッチングするもの、また、立体マスクにより、選択的にメッキするものなど、様々なものがあり、自動車部品などを中心に、立体回路基板として広く利用されている。当所 MID はこのような立体回路基板として開発されてきたが、成形品の表面に導電層をある程度自由に形成できることから、導電薄膜の 3 次元形状を自由に定義できることが注目されアンテナやミラーなどの電磁場の形状の制御を行う素子、また、機械的な位置決めと電子部品の実装が同時にできることから小型カメラモジュールのレンズと撮像素子の実装と位置決めなどの、立体基板以外の新しい用途への拡大が進んでいる。さらに当研究室では、様々な特性を有する絶縁材料であるプラスチックを任意の 3 次元形状に高い生産性で加工でき、さらに、導電材料等の機能性材料を表面もしくは内部に形成するための①MID 製造技術、また、このような工法を用いた②メカトロ要素の開発、さらには、プリント基板やベアチップはもちろんのこと、レンズなどの光学部品や MEMS などのメカトロ部品の実装も可能でなおかつそれ自身もメカトロ的な機能を有する③多機能実装ベースシステムの可能性を追求している。

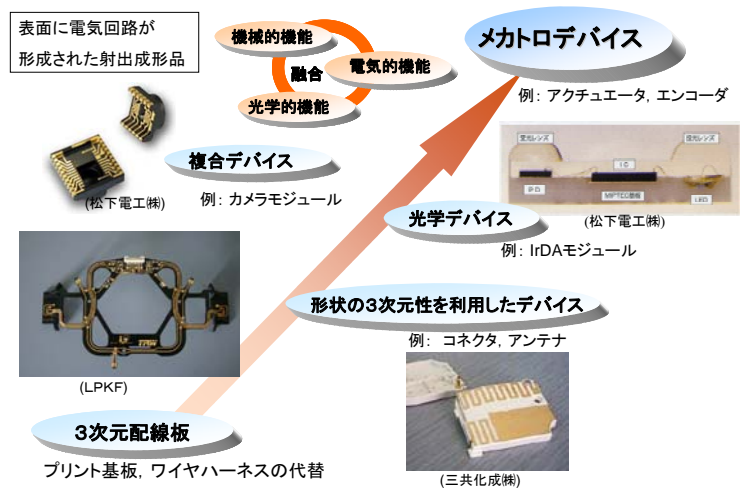


図 3 MID 技術の概要

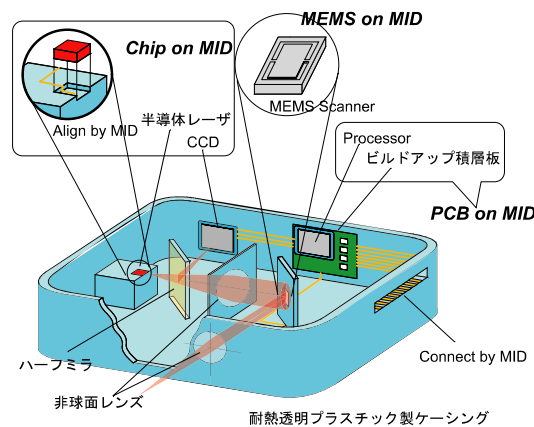


図 4 多機能実装ベースの概念

# 超高真空対応超音波モータ回転導入器の研究

## 目的

真空容器内の気体圧力は容器内におかれた物および容器内壁からのガスの発生速度と真空ポンプの排気速度のバランスによって決定される。超高真空を作り出すには容器内のガス発生源をできるだけ減らす必要があり、樹脂などを多用しているモータを置くことは好ましくない。そのため、モータはチャンバーの外に配置し何らかの方法でチャンバーの中に伝達することが多いが、回転運動に関してはその伝達導入技術が進んでおらず、なめらかな回転を真空チャンバー内に発生することが難しい。新野研ではこの問題を解決するために、チャンバーの外で圧電素子を利用して超音波振動を発生し、真空チャンバー内にリジッドな伝達体を通して振動を導入し、内部で超音波モータの原理を利用して回転運動を発生する新しい回転導入器の開発を行っている。

## 構造と原理

超音波モータ回転導入器の構造は図 5a の通りである。真空容器内に配置する金属以外の部品をできるだけ少なくするために、超音波発生部分である圧電素子を大気中に配置した。圧電素子によって励起された振動は、超音波振動伝導体を介して真空容器内にも導入され、超音波振動伝導体全体が曲げモードの共振を発生する(図 5b)。自由端となっている伝導体の真空側端の振動(首振り振動)から、超音波モータの原理を利用して、回転子を回転させる(図 5c)。図 6に、回転導入器の外観を示す。

加振源にボルト締めランジュバン素子(図 7)を使用し、伝導体に長軸に垂直な2方向に $90^\circ$ 位相の異なる曲げ振動を励起する。モード回転型の超音波モータ(

図 8)の原理を利用することとする。伝導体はフランジに対して溶接されており、真空チャンバの内部と外部とは完全に隔絶される。溶接部が共振の妨げにならないよう、溶接部が定在波の節になるように設計し、真空内部の長さを長くするため、溶接部から自由端までの長さは $5/4$ 波長とした。

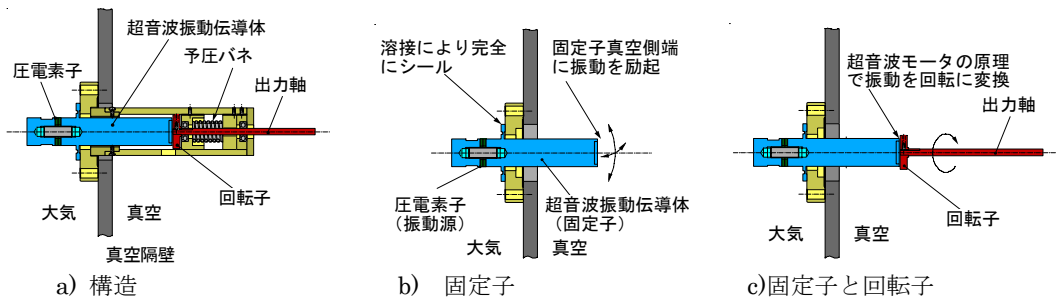


図 5 超音波モータを利用した回転導入器

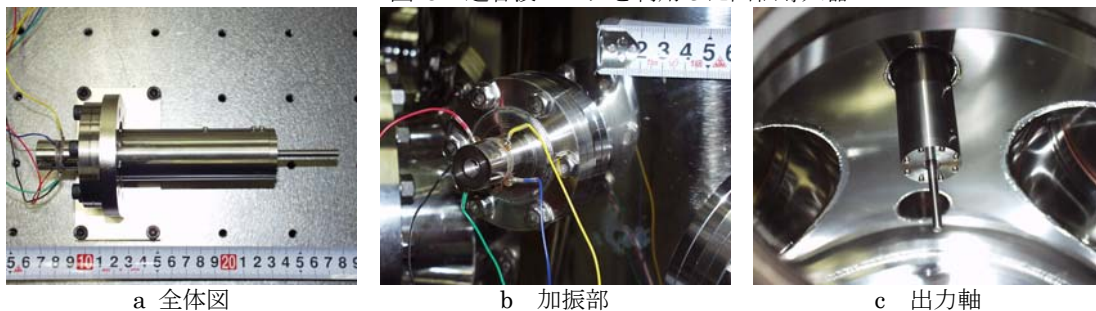


図 6 超音波モータ回転導入器

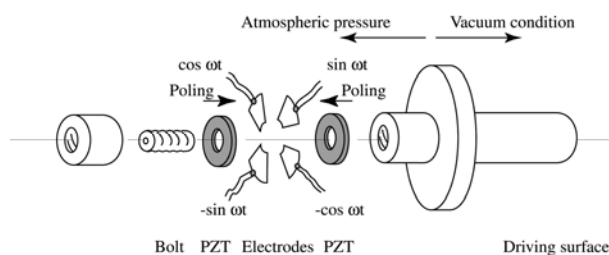


図 7 ランジュバン素子

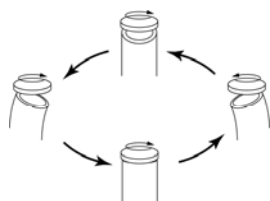


図 8 モード回転型超音波モータ

## 性能

試作超音波モータ回転導入機で得られた性能は以下の通りである。

回転導入器の出力を磁気カップリング式回転導入器を介して、真空容器外へ取り出して動力性能を測定した結果を図 11に示す。駆動条件は電圧 800[V<sub>p-p</sub>],

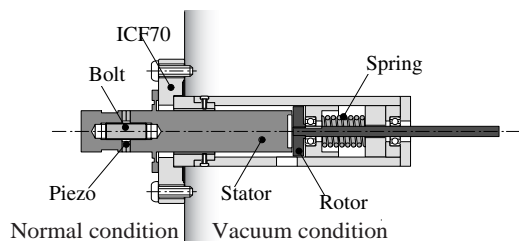
駆動周波数 32.3[kHz], 回転子の固定子への押しつけ力（予圧）は 11.7N とした。試験は本回転導入器を容器を装着した状態で 200℃48 時間のバーク処理を施し、容器内気体圧力を  $4 \times 10^{-8}$  Pa まで排気してから行った。

200℃バーク処理を行い真空容器内圧力が  $3.0 \times 10^{-8}$  Pa に達してから連続駆動試験を開始した。予圧は 11.7N とし、駆動周波数は 31.96~32.37kHz で回転数が最大になるように調整し、印加電圧は回転数が 150rpm となるように、480~800V<sub>p-p</sub> で調整した。駆動中の回転速度と真空容器内圧力を図 10に示す。平均 150rpm で 400 時間の駆動に成功した

## 今後の展開など

これまでの研究の結果、摩擦駆動である超音波モータを利用しても  $10^{-8}$  Pa オーダの超高真空を維持したままメカトロオペレーションを実現可能であることがわかった。従来、超高真空環境中の超音波モータは非常に小さな試料の微小位置決めなど、軽負荷の用途に限られてきたが、テーブルを駆動するなどの重負荷にも対応できる可能性が見えてきたことが本研究のこれまでに得られた最大の成果である。今後は寿命のさらなる延長を目指しつつ、制御などメカトロアクチュエータとして必要になる要件を一つずつ満たしていくための開発研究を行っていく予定である。

(a) Structure



(b) Vibration mode

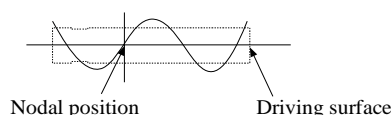


図 9 振動モード

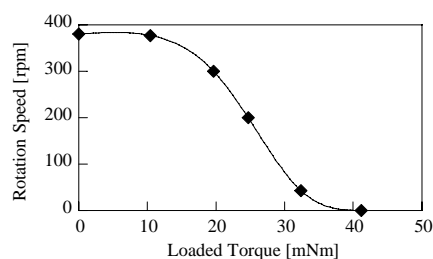


図 11 回転数と負荷の関係

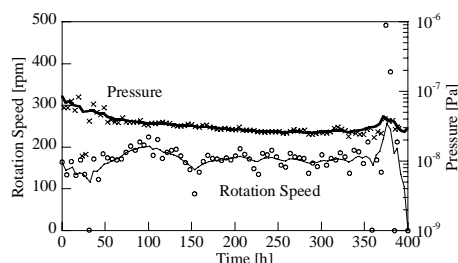


図 10 超音波モータの超高真空中での運



# SLS 造形品の透明化に関する研究

## 目的

薄い粉末層を積層し選択的に焼結する作業を繰り返すことにより 3 次元形状を造形する SLS(Selective Laser Sintering)法は、光造形に対して焼結条件さえ整えばより多くの種類の材料で造形できるなどの特長があり、樹脂のみならず金属やセラミックへも応用されている。しかし一方、造形品が多孔質になる等の問題点があり、これまで透明部品の造形はできなかった。本研究では SLS 造形品に屈折率調整された樹脂を含浸することによって透明にする方法を開発している。

## 原理・方法

SLS に限らず、粉末を利用した RP 手法ではモデルが多孔質になることがほとんどである。部品が多孔質となった場合、たとえ透明な樹脂粉で造形したとしても、透明樹脂とその隙間にある空気屈折率の差により、樹脂と空気の界面の至るところで光の屈折、散乱が起こってしまうため造形品は透明にならない(図 12a)。このような、屈折や散乱が起こらないようにするには、粉体の大きさを光の波長より短くするか、造形品内部の屈折率を何らかの方法で均一化する以外にはない。

現在、SLS に商業的に用いられている粉体の代表寸法は小さくても 20 $\mu\text{m}$  程度であり、可視光波長よりもはるかに大きい。そこで、SLS 造形品を透明にする方法として、SLS 造形品内部の空孔に硬化後の屈折率が造形材料に等しい液体樹脂を含浸することにより、造形品内部の屈折率を均一にする方法(図 12b)を提案している。

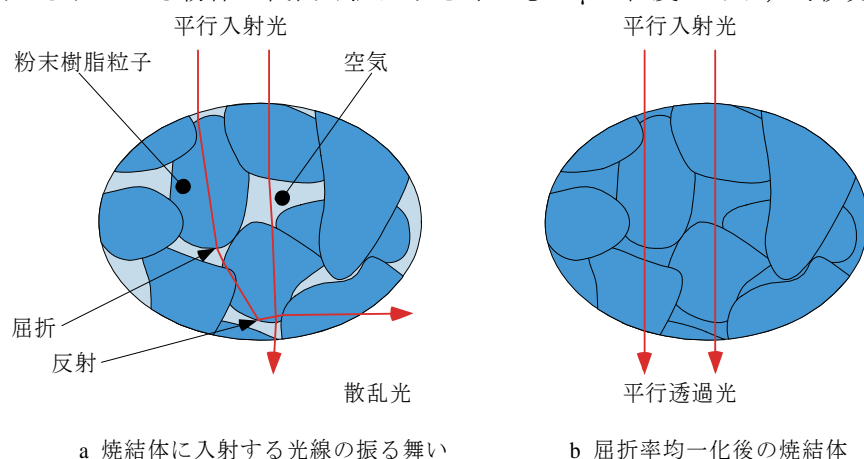


図 12 多孔質体を通過する光線

## 成果と今後の予定

これまでに基礎実験として、SLS 用粉末材料として利用されているポリスチレンにメタクリレート共重合体 (MAS) 粉末を厚さ 5mm に粉末焼結積層造形し、硬化後の屈折率が前述した MAS と同一となるようなエポキシ樹脂を調合、含浸、硬化することによって、曇度 20 % 以下の透明体を得ることができた (図 13)。現在、MAS よりも耐衝撃性、耐熱性の高い材料による造形、透明化の検討を行っている。

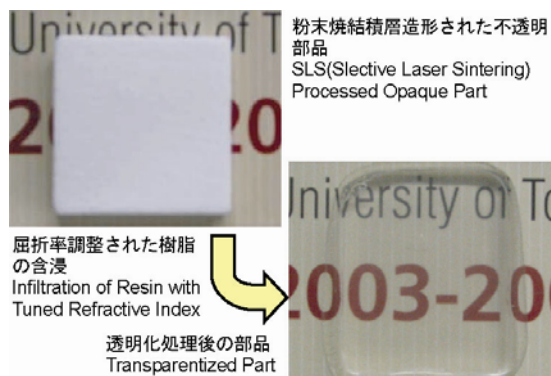


図 13 含浸前後の焼結体 (左含浸前、右含浸後)

# 高代謝速度組織再構築用担体の SLS 造形に関する研究

## 目的

生体適合性確保の困難、高次機能の欠如やドナー不足などの問題を抱える人工臓器や生体臓器移植に対して、自分の細胞を開始点として培養を行い、病気や事故による、あるいは先天性の機能不全をかかえる臓器を置き換えようとする再生医療は、新しい医療としてこれまで大変注目されてきた。一般に再生医療は、培養の開始点となる細胞をどうするかという問題、また、その細胞をどのように培養するかという培養条件、さらには再生される組織に形状を案内しつつ細胞が増殖する場所を付与するための多孔質体の足場（担体）をいかに作るかという3つの要素技術から構成される（図14）。これまでに、組織の形状が2次元的で、代謝速度の小さい皮膚においては、自家細胞による再生医療が実用化されているが、3次元的な内臓組織では、構造、代謝速度以外にも解決しなくてはならない様々な問題が残されており、実用化にはまだまだ研究を必要とする。

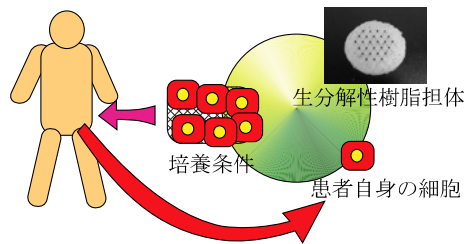


図14 再生医療の3要素

当研究室では比較的再生能力が旺盛であると言われている肝臓の再構築を目的とした担体の造形に関する研究を行っている。担体は培養される細胞の位置を案内すると同時に増殖する場を与えるために用いられる。したがって、臓器の再構築後は速やかに消滅することが望ましく、担体の作製には生体吸収性の材料を用いなくてはならない。また、前述したように担体内部には細胞が培養される空孔がなくてはならず、空孔率は90%以上となることが望ましい。また、培養の過程において担体内が細胞で満たされてくると、酸素の供給が少なくなる部分において壊死が発生する。これを防ぐために、担体内には網の目状に張り巡らされた流路を配置し（図15）、担体内のどの位置においても比較的近い場所に流路があり、細胞はそこから酸素の供給を受けられるようにしなければならない。このような要請に応えるため、当研究室では担体の製造方法として材料選択の自由度が大きく、オーバーハングのある形状も容易に造形できる粉末焼結積層造形法を（図2）利用した担体の造形に関する研究を行っている。

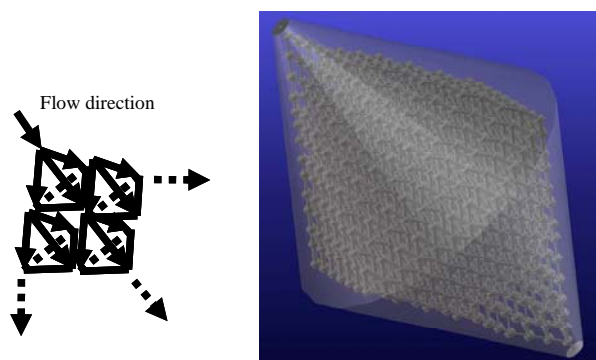


図15 流路ネットワーク

## 水溶性フィラーを用いた粉末焼結積層造形

粉末焼結積層造形法では、レーザ露光して固体化した部分では粉末が詰まって見かけの密度が増加する。造形装置で粉末を敷いたときの粉末の充填率は約40%であり、この時点で60%以上の空孔率は得られないことになる。本研究では、要求されている90%以上の空孔率を得るために、担体の

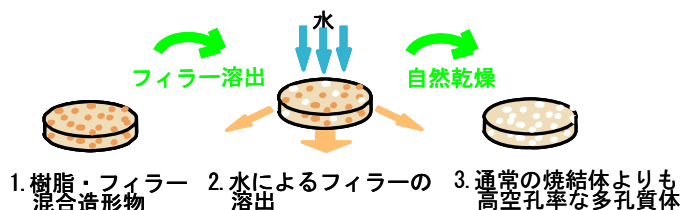


図16 フィラーを用いた空孔率の向上

材料となる生分解性プラスチックの粉末と水溶性の無機材料の混合粉末を粉末焼結積層造形し、造形後に無機材料のみを溶出することによって高い空孔率を得る。

### 造形実験および評価

足場の材料には生分解性樹脂のひとつであるポリカプロラク톤を使用した。これを平均粒径  $50\mu\text{m}$  の球状に加工し、粒径  $100\mu\text{m}$  ～  $150\mu\text{m}$  に篩った食塩粉末を水溶性フィラーとして、カプロラクトン 1 に対して食塩 4 の重量比で混合し、粉末焼結積層造形の材料として利用した。粉末焼結積層造形には開発中の試作装置を利用した。造形した足場及び流路の設計形状を図 18 に示す。各流路の径及び長さはそれぞれ  $1\text{mm}$  と  $4\text{mm}$ 、上下各 6 段に積層された四面体の辺の部分に配置されている。足場は紡錘形状をしており、全体の体積は  $13\text{cm}^3$  である。に造形した足場を示す。足場の質量は  $1.7\text{g}$  であり、空孔率は  $89\%$  となった。フィラーとして用いた食塩は、2 時間浸した純粋中の塩分濃度が生理的食塩水のそれの 3 万分の 1 以下まで低下する程度まで除去することができた。X 線透過像 (図 19)、X 線 CT 像 (図 20) に示されるように、流路内の粉末は完全に除去されていることが確認された。また、通常の手作業では破壊しない程度の強度が得られた。

これまでに、この方法によって製作された足場を用いた培養により生体肝の  $10\%$  程度までの細胞密度が得られている。また、流路の無い場合にくらべて 4 倍程度の細胞密度が得られており、流路の必要性が確認された。

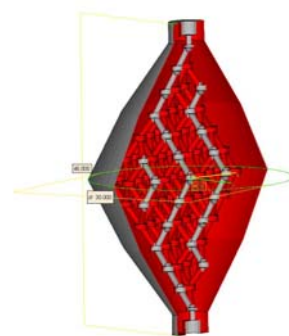


図 18 足場と流路のデザイン



図 17 足場と流路のデザイン

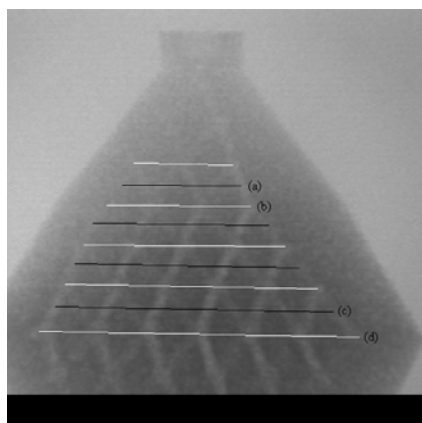


図 19 足場の X 線写真

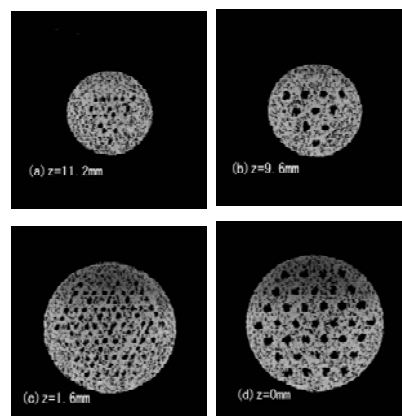


図 20 CT 再構築画像

### 今後の展開など

試作した、流路ネットワークの微細性は生体肝と同等の細胞密度を得るにはまだ不十分な値であり、現在その微細性をさらに向上するための研究や、フィラーの混合量や粒径の最適化の研究も行っている。



# MID 部品内面へのワンショット法による回路形成

## 目的

既に述べたように、当研究室では MID のメカトロ部品等への応用を目指し、工法、デバイス、システムについての研究を行っている。

MID の工法には様々なものがあり、中でもスパッタ蒸着された金属薄膜をレーザ加工することによって回路を形成するワンショットレーザ法(図 21)は回路の微細性の面で最も優れているが、レーザ照射時に陰になる管等の内面には回路形成ができない。内面への回路形成が可能となれば、図 22に示すようなアクチュエータやエンコーダ等のメカトロデバイスとしての応用も期待できる。当研究室では、円筒管等の射出成形品内面への回路形成を目指して、成形品の素材に光吸収の少ないものを用いて、成膜していない面からレーザを照射し、その透過レーザ光により成膜面へ回路を描画する方法を開発している。

## 蒸着金属膜の非成膜面からのレーザ加工

図 23に示されるように、透明プラスチック平板の表面に金属膜を蒸着し、非成膜面側からの平板を通してこの蒸着膜を加工した。平板の材料には、近年光学素子の材料として注目されている環状オレフィンと直鎖オレフィンのコポリマー(COC)を用い、レーザ光には波長 351nm の THG-YAG レーザを用いた。図 24に示されるように、加工の微細性に関しては、裏面から加工した場合でも成膜面側から加工した場合と同等の性能が得られた。レーザ強度を大きくすると図 25に示されるようなダメージが確認されたが、このダメージが発生した場合でも膜の加工に変化はなかった。また、レーザ強度を小さくすることによってこのダメージは回避することができ、そのような強度でも膜の加工を行うことができた。さらに、レーザが透過した跡の所々に図 26に示されるようなダメージも観測された。このダメージは薄膜の加工に影響を及ぼし、レーザ強度を小さくすることによって、ダメージの発生頻度を低下させることは可能であるが、消滅させることはできなかった。なお、本ダメージはレーザの波長を長くすることや、

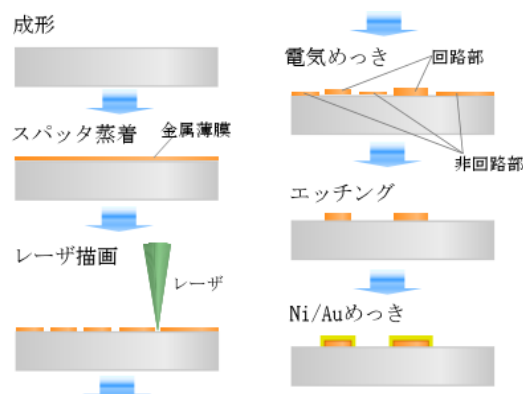


図 21 ワンショットレーザ法

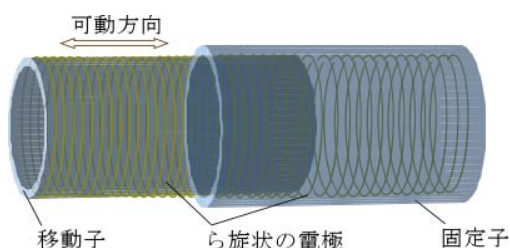


図 22 円筒形静電アクチュエータ

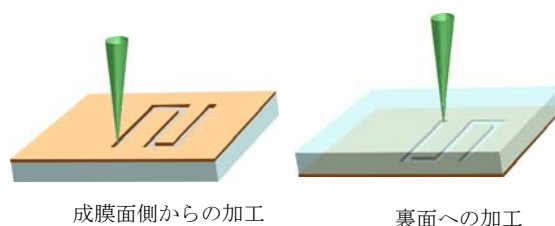


図 23 平板上の蒸着薄膜の加工試験

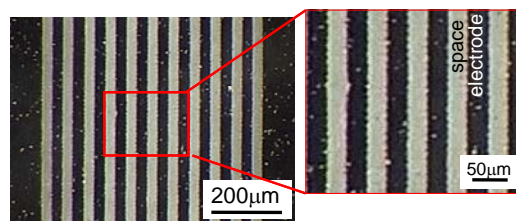


図 24 裏面から加工結果

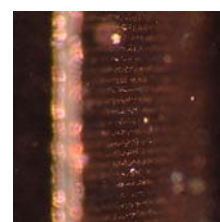


図 25 回避可能なダメージ

紫外線の吸収が非常に小さい PMMA を用いることによって完全に回避された。

### 円筒管内面へのレーザ加工

遠心成形により、外径 12mm、内径 7.8mm の熱硬化型アクリル樹脂を円筒形状に加工した。内面には無電解銅メッキを施した。ステッピングモータによる回転と水平移動を備えた装置（図 27）を用いて、レーザの照射位置を固定して、ワークを動かすことにより銅薄膜上でレーザを走査させた。

図 28 は内面に螺旋状のレーザ加工を行ったものである。ピッチ  $960\mu\text{m}$  の螺旋パターンを  $320\mu\text{m}$  ずつオフセットし 3 相の螺旋を描画した。図 28 (b) は円筒を分割し、内部を直接観察したものである。線幅、スペース幅それぞれ  $100\mu\text{m}$ 、 $220\mu\text{m}$  のパターンニングが可能であった。



図 26 回避不能なダメージ

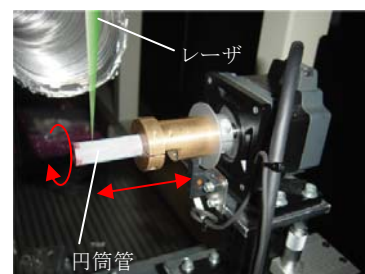
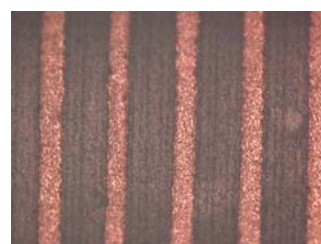


図 27 レーザ加工装置



(a) レーザ加工，電気めっき後の外観

(b) 電気めっき後の螺旋電極部

図 28 円筒間の内面加工

### まとめと今後の展開

本研究では、様々な MID の製造方法の中で最も高い分解能が得られるワンショットレーザ加工法に関して、陰になっている部分へのストラクチャリングが可能な加工法を提案して、実際に円筒管の内面への加工にも成功した。今後は、透明な樹脂のみならず、曇はあるが透過率が得られる樹脂などへの応用も検討する一方、モータやエンコーダへのアプリケーション展開も行っていく予定である。