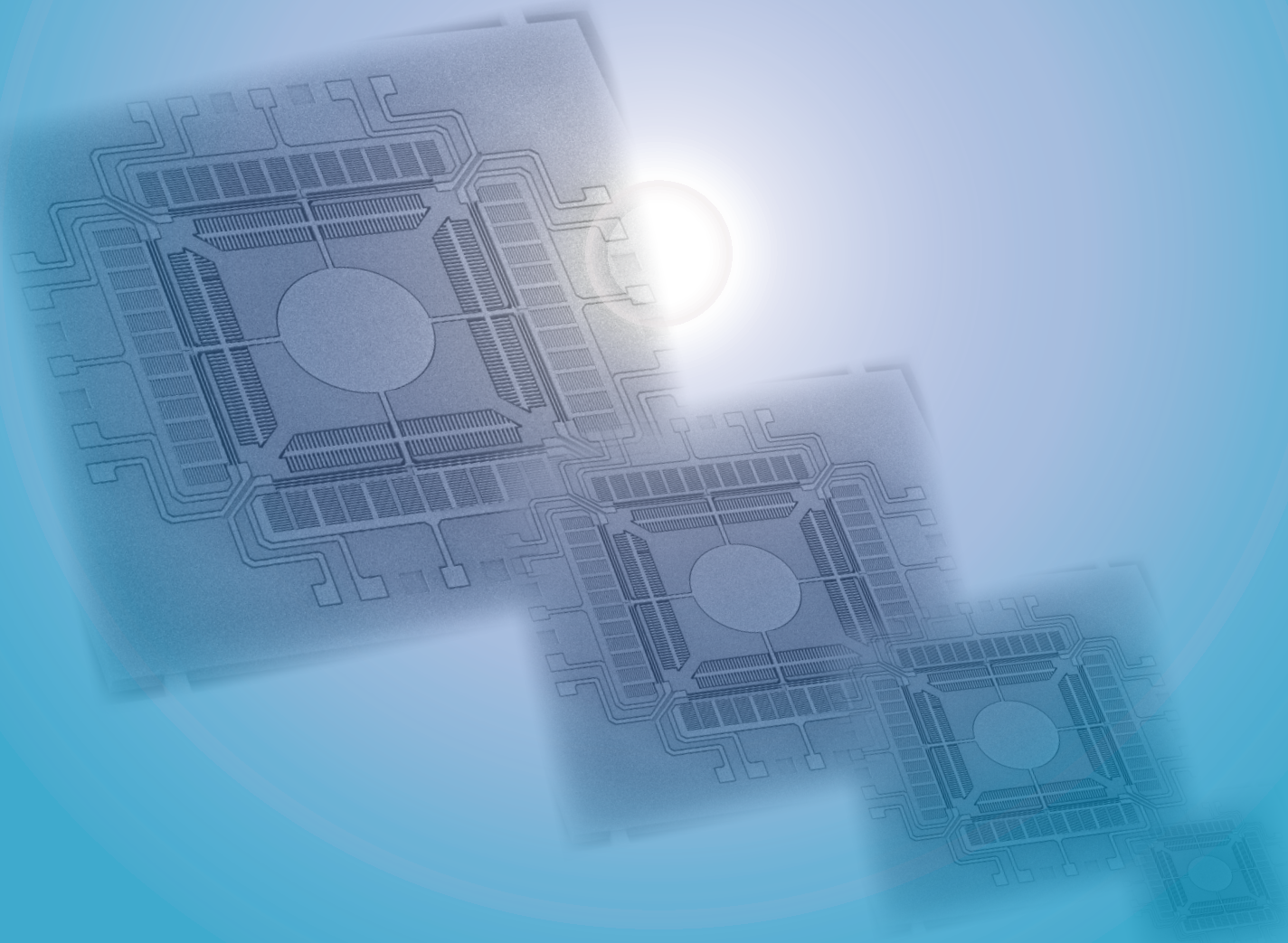


# 香川の MEMS 関連技術

(香川大学の取り組み)

24 年度試行版



平成 25 年 1 月

公益財団法人 かがわ産業支援財団  
微細構造デバイス研究開発フォーラム

# はじめに

最近、日経新聞のような一般紙でも、MEMS（微小電気機械システム）という言葉が1ヶ月に数回見かけるようになりました。自動車のガスセンサ、ゲーム機のモーションセンサ、スマートフォンのマイクロフォン等、MEMS デバイスなくして今日の生活は成り立たなくなっています。

香川大学では、平成17年4月、微細構造デバイス統合研究センターを開設し、地域のものづくり企業とのコラボレーションによるMEMS デバイスの研究開発や明日のものづくりを担う若手リーダーの育成に取り組んできました。

このような技術を地域のものづくり企業に普及・振興するため、当財団では、MEMS 技術に関心がある企業を中心に微細構造デバイス研究開発フォーラムを立ち上げ、技術懇談会、専門家による企業訪問、展示会出展等、積極的に支援してきました。

少子高齢化とともに、IT化が進展する中で、MEMS とその関連技術は、医療、福祉分野を中心に将来的な技術ポテンシャルが指摘されており、香川のものづくり企業においても、更なる導入・普及を目指し取り組みを強化したいと考えています。

本冊子は、その契機とするため、24年度試行版として香川大学におけるMEMS 研究の一端について、できるだけ判り易く紹介しました。香川のMEMS 関連技術について、理解を深めていただければ幸いです。

## 目次

1. MEMS とは.....2
2. 研究紹介①  
「分子標的薬」開発のための調節物質スクリーニングデバイスの開発.....3
3. 研究紹介②  
超厚膜樹脂による高精度・高アスペクト比の構造体加工技術とその応用.....4
4. 研究紹介③  
3次元光加工技術による細胞・染色体解析チップ.....5
5. 研究紹介④  
微小流路に複合機能を集積化する新しいマイクロ加工ツール.....6
6. 研究紹介⑤  
マイクロ加工技術による生体分子計測の高度化.....7
7. 研究紹介⑥  
ナノインプリントによる微細金型創成技術および金型微細表面転写技術.....8

# MEMS とは：産業のマメ

## MEMS : Micro Electro Mechanical Systems

半導体製造技術やレーザー加工技術等、各種の微細加工技術を応用し、微小な電気要素と機械要素をひとつの基板上に組み込んだデバイス/システム（センサ、アクチュエータ等）。

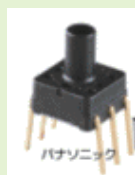
各種の最終製品に組み込まれ高付加価値化のキーデバイスとなっており、最近では産業のマメと言われている。※



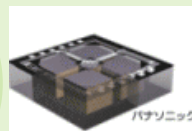
ミラーデバイス



カンチレバー



圧力センサ



加速度センサ



RF MEMS スイッチ

※MEMS は、Micro Electro Mechanical Systems の略で、半導体製造技術やレーザー加工技術等、各種の微細加工技術を応用し、微小な電気要素と機械要素をひとつの基板上に組み込んだセンサ、アクチュエータ等のデバイス/システムのことを指します。

MEMS は各種の最終製品に組み込まれ高付加価値化のキーデバイスとなっており、最近では産業のマメと言われています（半導体は産業のコメと言われています）。

開発・製品例としては、スマートフォン等モバイル機器に用いられるモーションセンサ、自動車用部品などに用いられる圧力センサ、加速度センサ、光通信分野などで用いられる光スイッチ用ミラーデバイス、原子間力顕微鏡に用いられるカンチレバー、また更には無線通信機器などに用いられる RF（Radio frequency：高周波）MEMS スイッチなどがあります。MEMS が産業のマメと称されるのは、体は小さいものの MEMS を組み込んだ製品に素晴らしい効用・機能を与える活力源となっていることに由来します。また、多くの種類の MEMS デバイスがあること、MEMS の応用製品が多岐にわたることもマメに類似しています（マメには大豆、小豆、落花生、グリーンピースなど多くの仲間があり、豆製品も納豆、味噌、豆腐、豆乳、あずき餡など多岐にわたる。）

# ①「分子標的薬」開発のための調節物質 スクリーニングデバイスの開発

嶋本 聖子  
seiko@med.kagawa-u.ac.jp  
香川大学微細構造デバイス統合研究センター  
専任研究員

## 研究のねらい

タンパク質には、特定の分子構造を正確に見分ける「アフィニティ」という特殊な性質がある。例えば、医薬品やホルモン・毒素といった生理活性物質がその機能を発現するためには、一般には、特定のタンパク質が有するアフィニティとの作用が基点となる。このため、基礎研究分野では、生理活性物質が作用するタンパク質の分子レベルでの機能解明が行われており、この知見に基づきガン等に有効な「分子標的薬」の開発に取り組んでいる。

## 研究内容

①分子標的薬とは、図-1のように細胞の特定タンパク質等の「ターゲット」に対し分子レベルで選択的に作用(攻撃)し、治療に結びつけるものである。基礎研究として、ターゲット物質とその機構解明が、Proof of Concept(医薬品の作用モデルの証明)上重要で様々な機関が取り組んでいる。その中で、酵素タンパク質であるプロテインフォスファターゼ5(PP5)は、従来ガン、アルツハイマー病における神経細胞死などに関与することが知られており、この機構を解明し、PP5の活性調節物質をスクリーニング(探索)して、新しい分子標的薬の創出を目指している。

②遺伝子やタンパク質の網羅的解析が世界的規模で進み、疾患や健康に関連した生体の分子レベルの情報が蓄積されてきた。これらの情報を「バイオ MEMS」と融合して、疾患の早期診断・治療・健康予知診断など革新的な技術開発が期待されている。バイオ MEMSとは、図-2のようにタンパク質の特性を1分子レベルで解析するものである。これが開発されれば、①のPP5の1分子酵素活性が測定でき、PP5の活性調節物質のスクリーニングが高感度かつ多検体同時処理できるので、創薬開発が飛躍的に進展する。

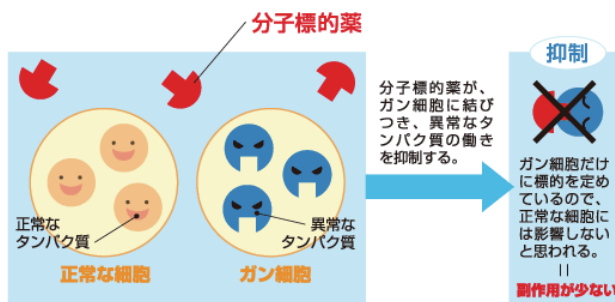


図-1

抗ガン剤の副作用が問題になっているが、「分子標的薬」は、正常な細胞には作用せず、ガン細胞だけに作用し副作用を抑えるもの。

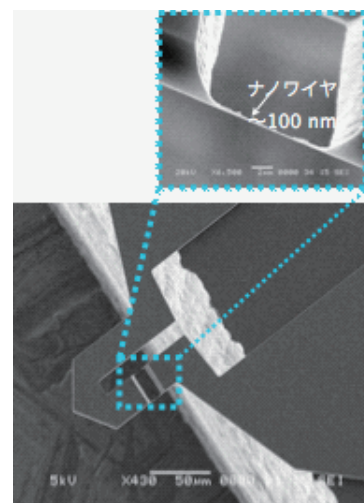


図-2

分子標的薬の候補となる物質を、ナノサイズのピンセットの両端で伸長して、その電気特性を調べて、薬効の事前評価(スクリーニング)をしている様子。(バイオ MEMS)



## ②超厚膜樹脂による高精度・高アスペクト比の構造体加工技術とその応用

下川 房男  
simokawa@eng.kagawa-u.ac.jp  
香川大学工学部 教授

### 研究のねらい

半導体製造に用いる「フォトリソレーション技術」をベースとする MEMS は、加工精度が極めて優れており、「小型化」を得意とする技術でもある。例えば、インドアゲーム機のモーションセンサに用いる加速度センサの大きさは、わずか約2mm角のチップである。このような高精度化を背景に、厚膜樹脂を用いて「精密な構造体の作り込み」が試みられている。構造体の厚みは、従来は数十～数百 $\mu\text{m}$ 程度であったが、本研究ではミリオーダーで作り込む技術を開発した。これにより、高精度で光軸調整を要する光学式ガスセンサを手のひらサイズに小型化できる。

### 研究内容

①通常の紫外線を用いたフォトリソグラフィにより、厚膜樹脂(SU-8)を用いて裏面露光など露光方法の工夫や、露光条件を最適化するなどして、図-1のように数mm厚の樹脂構造体を製作した。構造体は、壁面角度:89°以上の垂直性を有し、側壁粗さは約0.1 $\mu\text{m}$ 以下で平滑性も良好で、更に目標寸法値に対する加工誤差も5 $\mu\text{m}$ 程度である。

②この技術を用いて図-2のような数cm角の「マイクロ光学ベンチ」を試作した。光学式ガスセンサは、一般に多数の光学部品を要し、しかもそれらは相互に光軸調整が必要なため、小型化に限界があった。試作した光学ベンチでは、高精度な外形寸法で出来上げたフェルール付きファイバやボールレンズなどの光学部品を超厚膜樹脂構造体に挿入するだけのパッシブアライメント法により、極めて高精度に実装(位置ずれ量は最大でも10 $\mu\text{m}$ 以下)が可能なことを確認し、組み込み後に光軸調整を要さない小型ガスセンサを実現した。

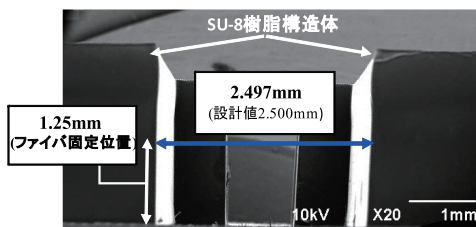


図-1

超厚膜樹脂により製作された高精度構造体の電子顕微鏡写真。

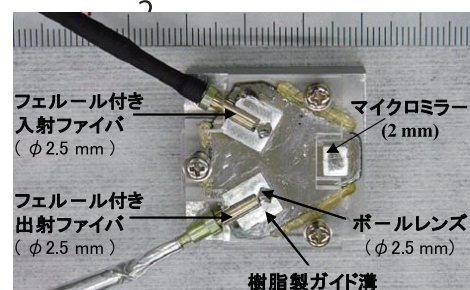


図-2

「マイクロ光学ベンチ」上に光学部品を実装した小型光学式ガスセンサの外観写真。

# ③ 3次元光加工技術による細胞・染色体解析チップ

鈴木 孝明  
suzuki@eng.kagawa-u.ac.jp  
香川大学工学部 准教授

## 研究のねらい

半導体製造技術をベースとするマイクロ・ナノ加工技術は、薄膜形状を積層することによって、微細な複雑形状を高精度に加工する方法が一般的であるが、出発点となるフォトリソグラフィ用マスクの作製から最終の組み立てまでの各加工プロセスに対する深い知識やノウハウが求められる。そのような専門知識やノウハウがなくても微細構造を加工できる方法として、複数のプロセスと機能を集積化することで、単一のマスクパターンからアセンブリ(組立工程)フリーで加工する3次元微細加工技術を開発した。従来法では作製困難な3次元複雑マイクロ構造を、紫外線露光をベースとする簡単な操作(回転傾斜露光)で作製できる。マイクロデバイスを初めとして、医療、バイオテクノロジー、電子・光学材料製造など様々な分野への応用を検討している。

## 研究内容

### ①細胞チップ

再生医療や農業で必須の遺伝子組換え技術として、生体細胞を自由に配置・個別刺激・応答計測を可能とする細胞チップを開発した。数mm角のエリア内で数万個の細胞(直径 $10\mu\text{m}$ 程度)をアレイ状に固定し、薬剤刺激などによる応答を細胞個別認識しながら観察するアレイデバイスを開発した。細胞能力の評価、細胞組織の再構成、ES細胞の分化誘導、細胞への遺伝子導入などを高効率に行うことが可能なマイクロシステムへの応用を検討している。(図-1)

### ②染色体チップ

チップ上で、細胞の固定から染色体DNAの展開、伸張、懸架・固定、観察までを行う染色体評価技術を構築し、バイオや医療の研究開発向け汎用キットを開発した。ヒト病理モデル細胞を用いた遺伝子異常(転座)の検出性能などを評価している。(図-2)

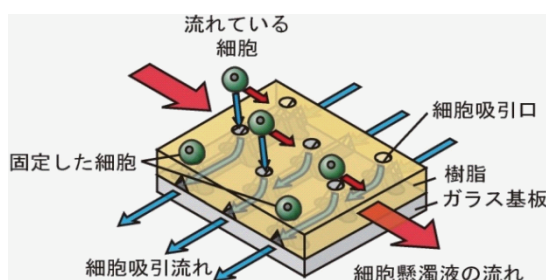


図 - 1

「3次元光加工法」により作成した微細流路の流れの様子

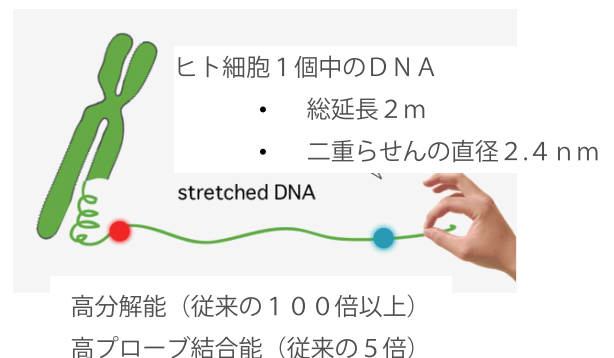


図 - 2

2重らせん状のDNAを開発した特殊円盤上で遠心力により伸長して、遺伝子の異常を調べている様子

# ④ 微小流路に複合機能を集積化する 新しいマイクロ加工ツール

高尾 英邦  
takao@eng.kagawa-u.ac.jp  
香川大学工学部 准教授

## 研究のねらい

半導体材料のシリコンは、加工精度が極めて優れており、これを利用して超精密なマイクロデバイスが開発されている。例えば、微細なインクを吐出するインクジェットプリンターのインクヘッドやインドアゲーム機のモーション(加速度)センサーなど。この微細加工技術により微小流路が形成できれば、プラズマ照射等従来なかった機能を有する画期的なマイクロデバイスが実現できる。

## 研究内容

①例えば、図-1のように開発した精密なベンチュリ型流路では、流路内部の圧力をコントロールすることで微量の混合物を生成したり、複数の液体を精密な割合で混合し、気体中に霧化させて噴出したりすることが可能である。このノズルアレイの幅は0.1mm程度で、ベンチュリ型霧化器が一体形成されている。また2次元パターンを立体化した疑似的3次元構造などパターン設計により自在な構造が可能で、機能を集積化できる。さらに、流路の本数も自在で、液体の混合比の変化も容易に行える。

②そして、微小流路を形成できるだけでなく、各種電気素子との一体化も可能である。例えば図-2のように、流路内に形成した電極と電極の間に高電圧を印加し、アルゴンガスを通じて放電させることで流路内のガス気流をプラズマ流(プラズマジェット)に変化できる。微小空間内における微量化合物の生成、プラズマジェット照射による表面改質、高温プラズマによる表面の微細加工、マイクロ溶接、プラズマ発光による微小分析光源の実現等、従来にない精密スケールの加工により新しいツールが出現可能である。放電は、微小流路内でその影響が限定され、また、複数の流路を集積し、異なる種々のガスを放電させることで、複数種のプラズマ発生も可能である。

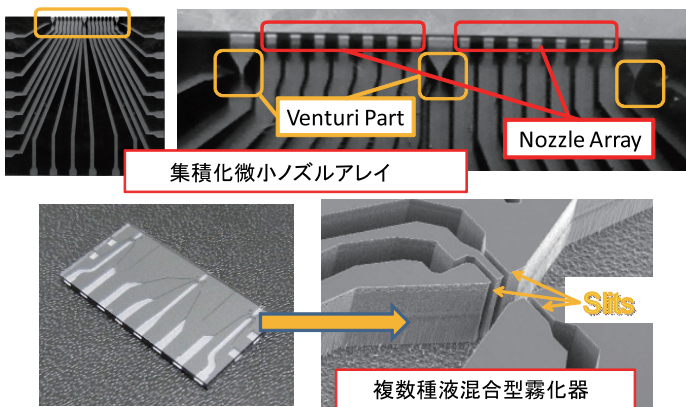


図-1

開発したベンチュリ型流路の出口部の様子。

複雑な流路も精密に加工できる。



図-2

図-1の流路に電気的な素子を付加してプラズマを発生させ、「プラズマジェット」で表面改質している様子。

# ⑤ マイクロ加工技術による 生体分子計測の高度化

寺尾 京平  
terao@eng.kagawa-u.ac.jp  
香川大学工学部 助教

## 研究のねらい

病気等生体変化の捉え方として、個体行動、身体組織、細胞、タンパク質、遺伝子の各レベルがある。中でも変化の初期を捉える目的でタンパク質レベルによるバイオセンサが注目されている。

原理は、一般的には、特殊な生体分子を固定した薄い「基板」をセンサ部として、その基板と親和性をもった試料中の生体分子を接触・吸着させ、基板の表面状態の変化量を計測することで、濃度等を把握する。

表面プラズモン共鳴 (SPR (Surface Plasmon Resonance)) という手法では、タンパク質を高感度に検出可能である。これに用いる基板 (センサチップ) の表面を、半導体微細加工技術により特殊な微細構造を形成することで、従来にない高機能なセンサチップを実現した。

## 研究内容

### ① フィルタ SPR センサチップ

バイオセンサでは、一般には測定試料の前処理として、フィルタなどにより異物除去の必要があり、煩雑な操作と高価な装置を要する。そこで、図-1のようにチップ上に微細なスリット構造を設け、異物がセンシング領域に入らないようにしたチップを開発した。このチップを用いると試料を滴下するだけで分離と計測が可能のため、短時間で低コストな検出が可能である。血液検査や食品検査への応用が考えられる。

### ② 金黒 SPR センサチップ

センサ感度が向上すれば、より微量な物質が検出可能になり、基礎研究への貢献だけでなく、血中に微量にしか存在しない「がんマーカー」の検査など医療診断への応用も期待される。このため、図-2のように基板上に「金黒」と呼ばれる金のナノ構造を形成することでセンサ感度の向上を図った。

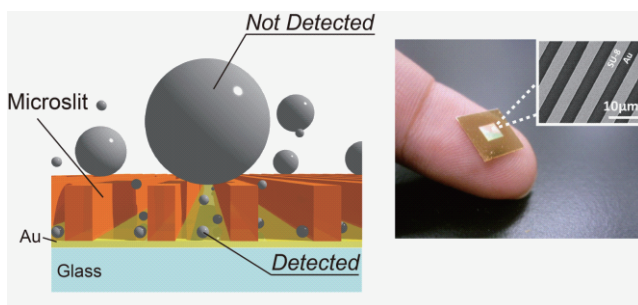


図-1

「フィルタチップ」では、その表面に微細な凸凹を形成させ、測定対象外の大きな粒子はセンサ部に直接接触しない様に排除できるので、前処理が不要になる。

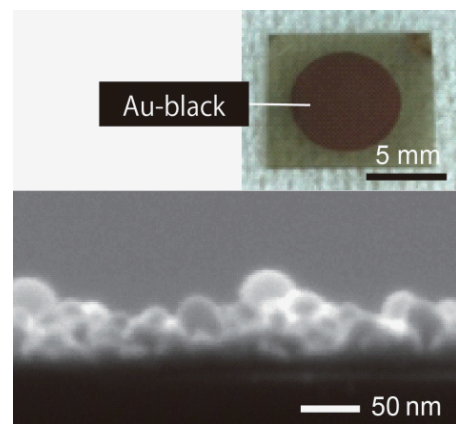


図-2

金黒という特殊処理したチップの様子。表面が極めて微細に処理されており、検出感度が向上する。



# ⑥ ナノインプリントによる微細金型創成技術 および金型微細表面転写技術

吉村 英徳  
yosimura@eng.kagawa-u.ac.jp  
香川大学工学部 准教授

## 研究のねらい

MEMS デバイスは、一般にゲーム機の加速度センサチップのようにシリコンを材料としてフォトリソグラフィにより加工することから、量産向け技術とされている。一方、図-1のように金型を高温に加熱しながら高精度に型押しを制御する「ナノインプリント技術」を利用したデバイスも、量産に適している。微細表面形状を持つ金型を使用し、部品に適した種類の樹脂の表面にその形状を転写する技術だが、微細加工を必要とする金型の形成方法、金型のコストダウン化、各樹脂材料に応じた金型温度や圧印時間などの加工条件など課題が少なくない。

微細金型の製造技術として、機械加工のほか、フォトリソエッチング・メッキ加工、そして、それらにマイクロ塑性を併用したハイブリッド加工も開発した。そして、様々な樹脂材料について、金型を加熱して樹脂のプレート等に押しつけ、融点近くで樹脂を軟化もしくは溶かして転写するノウハウも得た。

## 研究内容

### ① 痛くないマイクロ針

大きな金属針を深く刺したり、全身に成分が行きわたるような経口で薬剤を投与するのではなく、ワクチンや局所麻酔用向けに刺しても痛みがなく表皮を破る程度に加工した微細な針を開発した。図-2のように十分な投薬量や投与範囲に適したデバイスとするため剣山のような形状とし、個々の微細な針が痛みがなく折れずに刺さりやすいよう高さ0.4~2mm程度、平均太さ0.1mm前後のテーパ形状に加工する技術を開発した。なお、材料に生体分解性樹脂を用いれば、折れても体内で安全に分解できる。

### ② ハイブリッド型マイクロ金型創成技術

複雑なマイクロ・ナノ表面構造を持つ金型では、機械加工やフォトリソエッチング技術ではコスト面などに限界がある。安価に大量に作るにはマイクロ塑性加工を併用したハイブリッド加工技術が重要であり、上記の剣山形マイクロ針金型では、パンチ工具によるテーパ孔加工技術を開発した。

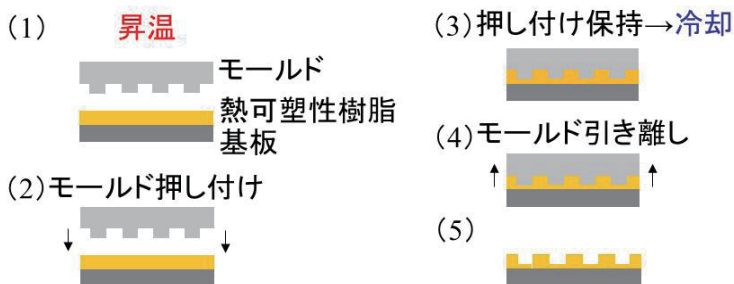


図-1

金型を昇温しながら高精度に型押しを制御する「ナノインプリント技術」のプロセスの様子

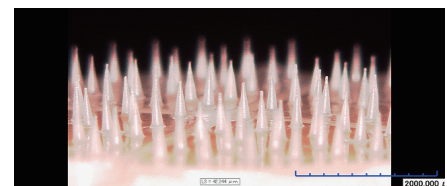


図-2

ナノインプリントにより型押し成形されたマイクロ針  
(高さ約 600 μm、根本径約 200 μm)

公益財団法人

かがわ産業支援財団 微細構造デバイス研究開発フォーラム

