



## 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム 平成 26 年度技術支援者賞 シリコン深掘りエッチング (Deep RIE) における超精密形状制御

受賞者 東北大学 ナノテク融合技術支援センター 試作コインランドリ 森山 雅昭氏に聞く

文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業（ナノプラットフォーム事業）は、新しい科学技術を創出する研究環境の整備・充実・共用に向け、大学、公的機関、企業の研究者が全国規模で研究ネットワークを構成してイノベーション創出に資することを目指している。設備・装置の有効活用には、設備の整備から装置使用上のノウハウ提供などの技術支援が不可欠である。このため、本事業では、共用施設において実際に支援に携わっている方々の貢献に対して、



(左) 試作コインランドリ MEMS ショールームで賞状を持つ森山氏、  
(右) 「ナノテクの匠」バッジ



平成 26 年度より技術支援者を対象とした賞を設けることとした。ナノテクノロジープラットフォーム事業実施機関に推薦を求め、その中から、東北大学マイクロシステム融合研究開発センター 森山 雅昭氏が選ばれ、技術支援者賞が授与された。授賞テーマは、「シリコン深掘りエッチング (Deep RIE) における超精密形状制御」である。授賞の発表、並びに授賞式は、2015 年 1 月 30 日に東京ビッグサイトで開催された第 13 回ナノテクノロジー総合シンポジウム (JAPAN NANO 2015) で行われ、賞状と副賞の「ナノテクの匠」バッジが、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム運営統括会議代表の大泊 巖 早稲田大学名誉教授より贈られた。この技術支援者賞に関する開発技術、技術支援の経緯などを伺うべく、JR 東北本線仙台駅の西、バス 25 分の青葉台にある西澤潤一記念研究センター内の東北大学 マイクロシステム融合研究開発センター 試作コインランドリに、森山 雅昭 (もりやま まさあき) 氏を訪ねた。

.....



### 1. 授賞の対象となった技術 - シリコン深掘りエッチングにおける超精密形状制御

#### 1.1 シリコン深掘りエッチングプロセス

授賞の対象となった「シリコン (Si) の深掘りエッチング (Deep RIE)」は、マイクロセンサ、マイクロアクチュエータなどの MEMS (Micro Electro Mechanical Systems, 微小電気機械システム) デバイスをはじめ、微小光学素子、LSI 実装における Si 貫通孔など、微小デバイスの加工に不可欠な技術である。これに用いられる反応性イオンエッチング (RIE, Reactive Ion Etching) は、反応室内で高周

波電力などによりエッチングガスをプラズマ化し、陰極となっている試料台に高周波電圧を印加することにより、試料方向に加速されたプラズマ中のイオン種やラジカル種を試料に衝突させてエッチングするものである。イオンによるスパッタリングと、エッチングガスの化学反応が同時に起るため、微細加工に適したエッチングを行うことができる。

しかし反応性イオンエッチングは元来、等方的に進行する。このため、狭く深い、アスペクト比の高いエッチングは難しかったが、これを可能にするプロセスが、1992 年にドイツのボッシュ (Bosch) 社で開発された (ボッシュプロセス)。ボッシュプロセスは、図 1 のように、エッチングとパシベーション (側壁保護膜形成) を繰り返しながら行う切り替えエッチング方式である。Si のエッチン

ゲの場合は、エッチングガスに  $\text{SF}_6$  を用い、レジスト膜の開口部を等方的にエッチングし、 $\text{Si}$  を  $\text{SiF}_4$  などの形で飛散させる。次に、 $\text{C}_4\text{F}_8$  などのテフロン系のガスを用いて、側壁保護膜を形成する。保護膜を形成したら、エッチングガスに切り替え、サンプルにバイアスを掛けてエッチングすることにより底面の保護膜を除去して、露出した底面のエッチングを進める。これを繰り返すことにより、深く、細くエッチングできる。

$\text{Si}$  の Deep-RIE に用いる装置は ICP (Inductively Coupled Plasma, 誘導結合プラズマ) -RIE 方式であるが、ボッシュプロセスでは後述の通りエッチング中に絶えずガスや圧力等の切り替え・調整を行う必要があるため、この機能を Deep-RIE 装置は備えている。ボッシュプロセスでは、エッチングを数秒行ったら、パシベーションを数秒行うといったプロセスを繰り返すが、連続的に繰り返すのでプラズマは消えず  $\text{SiF}_4$  と  $\text{C}_4\text{F}_8$  のプラズマの切替えにより色だけが変わる。プロセスで制御するパラメータはガス圧、流量、プラズマのパワー、時間などだが、エッチングとパシベーションそれぞれでパラメータを決めるから、パラメータの数は2倍になる。一つのエッチングの間に他のパラメータを何回も変えることがある。プロセス条件は、 $\text{Si}$  が n 型か p 型かでも変るし、結晶方位によっても変る。時間経過を含めた Deep RIE のプロセス条件をレシピと呼ぶが、目的に合ったレシピ一つを作るのに 1~2ヶ月かかるとのことである。

次に述べる開発例は、技術支援を行う中で共用施設利用者と共同で行ったレシピ作りの結果得られたものである。

## 1.2 SOI ウェハ加工におけるレシピ改良

シリコン酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ ) を  $\text{Si}$  で挟んだ、 $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}$  構造の SOI 基板の表面  $\text{Si}$  の Deep RIE を行うと、 $\text{SiO}_2$  絶縁層界面でチャージアップが発生し、エッチング不良が起る。これを解決するためにエッチング条件を見直し、チャージアップを抑えながら、エッチング不良が起きないレシピを開発した。この新しいレシピによる深掘りエッチングでは、パターン幅によるエッチングレートの差を、通常の深掘りレシピより少なくすることが可能となった (図 2)。この新しいレシピを用いて、SOI 基板上の  $\text{Si}$  を絶縁層までエッチングし、長さ  $6\mu\text{m}$ 、横幅  $8\mu\text{m}$ 、深さ  $50\mu\text{m}$  のトレンチ (溝) を作製した。

## 1.3 高アスペクト比エッチング

構造体が小さくなるにつれ、幅の狭いパターンのシリコン深掘りエッチングが必要となるが、通常の深掘りエッチングレシピを改良することで、幅  $5\mu\text{m}$  においてアスペクト比 26、幅  $2\mu\text{m}$  においてアスペクト比 45 が確保できるようになった。通常の深掘りエッチングでのアスペク

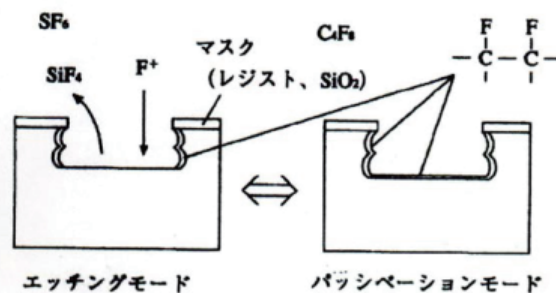
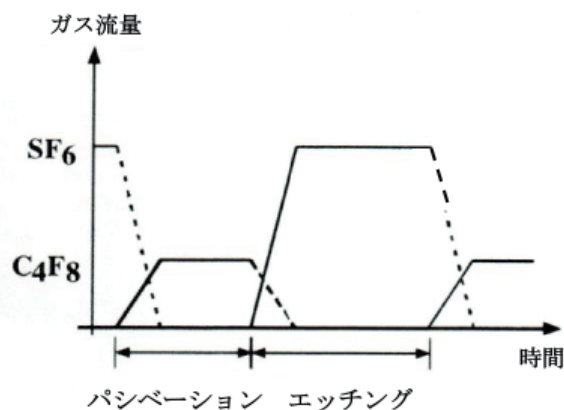


図 1 ボッシュ法による Deep RIE プロセス (“人材育成のための MEMS 集中コース in 大阪”を基に作成)

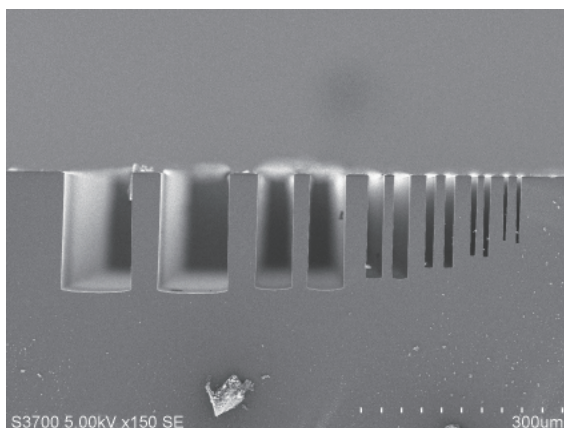


図 2 パターン幅を変えた深掘りエッチング (左から、エッチング幅 100, 50, 20, 10, 5,  $2\mu\text{m}$  が 2 本ずつ)

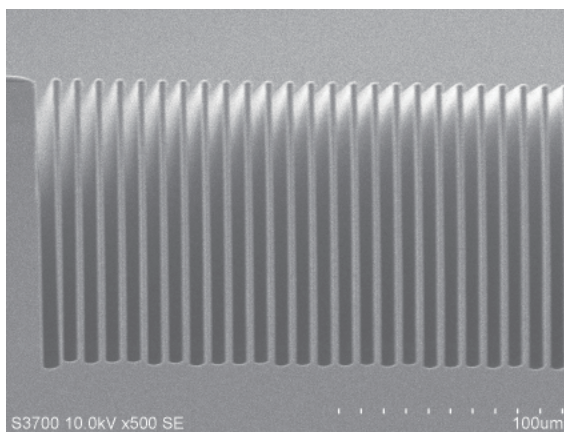


図 3 高アスペクト比エッチング (幅  $5\mu\text{m}$ 、深さ  $130\mu\text{m}$ 、アスペクト比 26)



ト比は 10 ~ 20 が普通だが、改良したレシピでは 135 というチャンピオンデータも得られている。図 3 はシリコン深掘りエッチング技術を示す典型的なものである。

#### 1.4 金型のためのテーパエッチング

Si ウェハをナノインプリント用の金型として用いる場合、樹脂を金型から抜けやすくするためには金型に滑らかな「抜きテーパ」がついている必要がある。通常のボッシュプロセスでは、側壁が垂直になり、ガスの切り替えのため側壁に周期的な段差のあるスキヤロップ形状ができる。このままでは抜型として使用できないので、ボッシュプロセスを使用しないレシピを組んだ。ボッシュプロセスを使用しない従来のレシピでは、エッチング断面形状が、表面や底面より中間が横方向に深くエッチングされ、太鼓状になる。これに対し、プラズマ発生の ICP パワー、エッチング試料室のプラテンパワー、エッチング圧力、ガス流量を調整した新しいレシピにより、表面から底面に向かって滑らかに横方向エッチング幅が小さくなる逆台形状に制御できるようになった。流量を制御し、圧力を 5Pa から 1Pa に徐々に下げて行くというランピング制御を行う。このやり方を論文から見つけ出し、条件出しを何度も行った結果、最後には希望したテーパ角のついた側壁が得られた (図 4)。このテーパレシピのノウハウを使用することで、はじめてマイクロ流路のナノインプリント用金型を Si を用いて製作できた。

この金型は、6 インチウェハが 1 つのデバイスになるため、6 インチ・Si ウェハ全体で一つの金型になるものだった。1 枚の大きなウェハに多くのチップを形成する経験はあったが、6 インチ全体で 1 チップは初めての経験で、1 か所でもリソグラフィに欠陥があると金型として使用できないため、リソグラフィの工程が大変だったという。

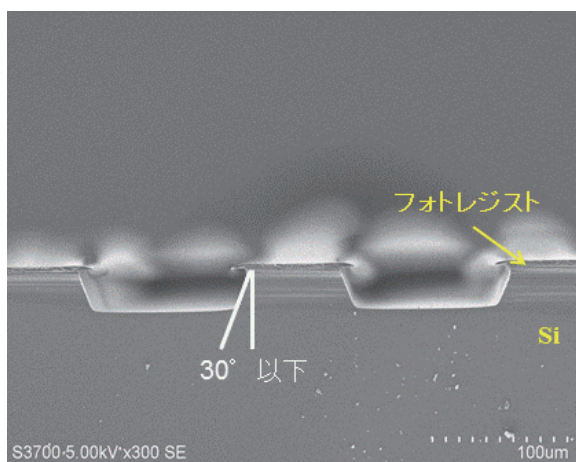


図 4 テーパ角が制御された Si エッチングの断面 SEM 写真

それでも、フォトリソグラフィを繰り返し試すことにより、20µm 幅でテーパの付いた溝をウェハ全面に作る事ができた。Si のエッチングで金型を作ると切削加工よりはるかに安くでき、精度も上がる。RIE で作った Si の金型から Ni の電鍍でナノインプリント用の型を作る。

#### 1.5 低スキヤロップエッチング

ボッシュプロセスを用いた Deep RIE ではエッチングで側壁に周期的な段差形状のスキヤロップが形成され、これが光学デバイスの特性劣化につながる。そこで、スキヤロップを抑制するレシピを開発した。エッチングとデポジションのそれぞれをできるだけ短時間に切り替えを行うことで、スキヤロップの大きさを抑える。さらに、Deep RIE 後に Si の熱酸化を行うとスキヤロップが多少なだらかになり、その熱酸化膜を BHF (緩衝ふっ酸溶液) 等でエッチングすることで、Deep RIE 直後のスキヤロップに比べるとその大きさを抑えることができる。これらの技術を組み合わせた結果、スキヤロップの高さを 30nm 以下 (10 ~ 20nm) にすることに成功した。本技術は次世代リソグラフィ光源として期待される EUV 光源から生じる赤外光を遮断するフィルタグリッドの作製に利用され (図 5)、99% 以上の赤外光を遮断することに成功した。この場合も、ナノインプリント用 Si 金型同様、6 インチウェハで 1 デバイスの設計であった。

#### 1.6 Deep RIE 技術の展開・活用

Deep RIE 装置を用いて、シリコン酸化 (SiO<sub>2</sub>) 膜、窒化 (SiN<sub>x</sub>) 膜、アルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 等のエッチングを行いたいという利用者からの要望は多い。これに対し、ガスを変え、流量、RF パワーなどのパラメータの調整を行い、

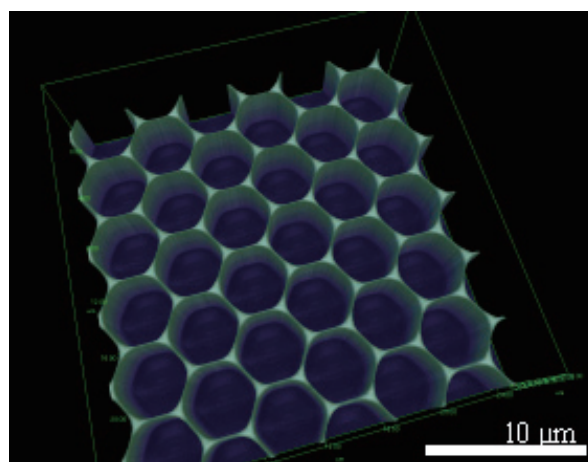


図 5 赤外線遮蔽 EUV 透過光学フィルタ (グリッドピッチ: 4.5µm, 幅: 0.35µm, 厚: 5µm)  
引用元: Y. Suzuki, K. Totsu, M. Moriyama, M. Esashi, S. Tanaka, "Free-Standing Subwavelength Grid Infrared Rejection Filter of 90 mm Diameter", Proc. IEEE MEMS 2014, 482-485

それぞれに適したレシピを開発して要望に応えると共に、Deep RIE 活用対象を拡大した。

一連の技術開発は、様々なデバイス開発に活かされている。一例を挙げれば、MEMS 技術を用いた小型マイクロフォンの製作に用いられ、「シリコンエレクトレットマイクロフォンの開発」として、「平成 24 年度秀でた 6 大利用成果」最優秀賞に選ばれた。その詳細は、NanotechJapan Bulletin の企画特集「ナノテクノロジー EXPRESS 第 22 回」(<http://nanonet.mext.go.jp/magazine/1123.html>) に掲載されている。



## 2. 技術支援はどのように進められたか —試作コインランドリと利用者への対応

### 2.1 技術支援を行う施設 - 試作コインランドリ

東北大学には、学部や研究所と並ぶ組織として、江刺正喜教授をセンター長とするマイクロシステム融合研究開発センター (μSIC: Micro System Integration Center) があり、その取組みの一つが試作コインランドリである。ナノテクノロジープラットフォーム微細加工分野の参画機関となっていて、分野責任者は試作コインランドリ戸津 健太郎准教授である。

試作コインランドリは、2010 年 4 月に発足し、半導体・MEMS 開発のための装置開放を開始した。東北大学西澤潤一記念研究センター内に設置されている。この場所にあった半導体研究所が財団の解散に伴い、その設備は東北大学に移管された。これに FIRST プログラム (最先端研究開発支援プログラム「マイクロシステム融合研究開発」、中心研究者: 東北大学江刺正喜教授, 2009 ~ 2013 年度) にて、試作コインランドリを立ち上げた。

試作コインランドリのクリーンルームは 1,800m<sup>2</sup> の面積に、洗浄・乾燥、フォトリソグラフィ、酸化拡散・イオン注入・熱処理、成膜、エッチング、接合・研磨・パッケージング、測定に分類された装置約 100 台が設置されている。MEMS の試作開発で主に利用されているが、半導体研究所では SIT (静電誘導トランジスタ) などデバイス開発も行っていたのでイオン打込み装置も残っている。このためピエゾ抵抗素子や、加速度センサなどのデバイス開発も行える。スタッフには、大学教員の戸津准教授、森山 雅昭助手、鈴木 裕輝夫助手に半導体研究所以来の技術者などが加わった 8 人である。この 8 人のスタッフで利用者からの技術相談を受けたり、公開していない装置も含め 100 台以上の維持管理に当り、利用者に装置の原理や使い方を指導している。エッチングに分類された装置の中に Deep RIE 装置 4 台がある (図 6)。内 1 台は購入、1 台は学内からの移設、残りの 2 台は企業から譲渡されたものという。森山氏はこの 4 台の Deep RIE 装置の運用・維持管理に当るほか、圧電薄膜である PZT (チタン酸ジ

ルコン酸鉛) の成膜に関わる 3 台の装置など数多くの装置を担当している。

試作コインランドリの装置使用料は、装置簿価、電気代などを基に計算し、メンテナンス費用を乗せて決める。運営は利用料収入とナノテクノロジープラットフォーム (NPF) からの運営費で行っている。

### 2.2 支援スタッフの役割

支援スタッフは、利用者への装置の操作方法を教えるばかりでなく、その装置がどのような原理に基づいているのか等も教えており、一つのプロセスだけでなく、利用者が試作を行いたい全体のプロセスの相談に応じている。その際に利用者や相談しながらプロセス条件の設定を行う。また、支援スタッフは装置の維持管理も行っており、常に使用可能な状態に保つようになっている。Deep RIE の場合、森山氏は次のような役割を果たしている。

Deep RIE 装置は利用の多い装置であり、利用件数はこの 2 年半で 600 件を超えている。森山氏は装置の立ち上げから担当しており、装置の維持管理、および、譲渡された装置で当初不具合が多かった装置の修理の一部を率先して行って迅速な立ち上げに貢献した。また、最高のパフォーマンスが得られるような環境構築を行う。例えば、利用者の要望に応じて 4 インチから 8 インチまでのウェハインチ径変換作業を行い、複数の利用者がスムーズに加工できるように環境を整える。Deep RIE 装置の試料室には反応生成物による汚れが付きやすく、かつ、その汚れがプロセスに与える影響が大きいので、クリーニングなどの維持管理がとくに重要である。森山氏は利用状況を把握しながら、定期的に試料室を開けて各部位の汚れを拭き取るクリーニングを行い、劣化した消耗品の交換などを行ってきている。この緻密な維持管理により、Deep RIE 装置は 4 台とも常に目的の加工が行える最適な状態に保たれている。



図 6 試作コインランドリの中の Deep RIE 装置



エッチング対象材料は利用者によって異なり、エッチングパターンやこれに使うマスク材料も異なる。RIE 装置は同じ型式や仕様であっても、装置ごとの加工特性に若干の違いがある。4 台の装置の特性を把握し、利用者の加工目的に応じて最適な装置を紹介する。加工に当っては、装置の機差、対象材料、ウェハ径等を考慮した運用方法を装置 4 台すべてについて発案し、これを利用者へ周知し、最適な状態で加工が行えるように指導する。加工法が既知であっても、既知のプロセス条件で目的の結果の得られることは少ない。対象や目的に合ったプロセス条件、レシピを利用者と一緒になって工夫することは支援スタッフの重要な役割である。

レシピは絶えず変わっている。標準レシピで掘ってみて、SEM による断面観察などで、加工の結果を見ながら条件を変える。1～2ヶ月にわたる試行錯誤の連続である。当初、レシピは 2 つ程度しかなかった。その後、100 以上試して、今は 10 数種の標準レシピが用意できた。最初に試すレシピの選択の幅が広がり、目的に合ったレシピを効率よく見つけられるようになった。

### 2.3 設備の利用と利用者への対応

ナノテクノロジープラットフォーム事業が開始されてから、Deep RIE 装置には 600 件以上の利用があった。その中で、最近 3 年間の「シリコン深掘りエッチング」に関する支援課題実績は下表のようになる。

最近 3 年間の「シリコン深掘りエッチング」に関する支援課題実績

年度	大学等	企業	計
平成 24 年度	16	12	28
平成 25 年度	16	13	29
平成 26 年度 (11 月まで)	12	13	25



図 7 利用者への Deep RIE の説明

試作コインランドリの利用、支援の依頼は、試作コインランドリのプロモーションなどで、利用者がある存在に気づいて行われることが多い。また、利用者の共同研究先の先生から紹介されるなど、利用のきっかけは様々である。

利用や技術相談では、加工の目的、どんな形状にするか、全体像を尋ね、全体を通したプロセスを聞いた上で、アドバイスする。失敗するケースで多いのは、全体プロセスの中の一つだけを採り上げ、その部分のみ利用する単発の場合である。作りたいがどうしたら良いかわからないという相談もあるが、プロセス全体を踏まえての相談が成功する確率を上げるために望ましい。また、MEMS の形状によっては、加工後に応力で可動部を保持できないこともあるから、パターンを見て設計自体を変えることもある。このように構造的な設計も含めてアドバイスを行うことでうまく行く場合も多い。

試作内容、加工方針が明確になったら、利用者自ら試作をしてもらい、目的に合ったレシピを開発する (図 7)。「利用者には、技術を直接自分の身につけて頂き、会社に持ち帰って頂きたい。」これが大きなポイントである。利用者が試作開発を民間のファウンドリに依頼する場合、依頼した側にはノウハウが残らない。しかし、試作コインランドリでは利用者が直接試作を行うので、利用者やその属する組織の知識・ノウハウとなり、人材育成の場も兼ねている。利用者が試作のノウハウを身につけて会社に戻れば、設計者にプロセスのフィードバックができるようになるから、デバイス設計の改良にも繋がる。

また、個別のプロセスの利用のほかに、MEMS パーク  
コンソーシアム主催の人材育成事業プログラムの実施箇  
所となっている。この人材育成事業プログラムでは、開  
発を行いたい企業の研究者が、約3ヶ月仙台に滞在し、  
設計からプロセス、評価まで一通りの試作まで行うこ  
とが可能である。この人材育成事業プログラムで開発した  
MEMS スイッチをさらに社内で開発を進め、量産を行  
い始めた参加企業の例もある。

利用者が試作コインランドリを利用して支援スタッフ  
と共に開発したレシピやノウハウは、共有のレシピ・ノ  
ウハウとして残していただき、他の利用者にも使用して  
頂くことをお願いしている。そのようにする事で、新規  
の利用者にはそのレシピ等を使用して頂くことで、支援  
スタッフの負担が減り、その分を新たな支援や開発のリ  
ソースに当てることができ、スタッフ、利用者共により  
循環が可能となる。また、過去の失敗も共有することで、  
別の利用者が同じ失敗を繰り返すリスクを低減している。  
開発された共有のレシピやノウハウは Wiki に入力して、  
試作コインランドリの予約状況確認用ホームページに載  
せ、センター内で公開することを始めている。蓄積され  
たノウハウで成果を出し、次のノウハウを産み出すとい  
う良い循環になることを、森山氏は期待している。

このような支援活動に対するユーザ意見が刊行物に  
載っている。いずれも第1.6節で触れた「シリコンエ  
レクトレットマイクロフォンの開発」に関するものである。  
JST News の2015年1月号 ([http://www.jst.go.jp/pr/jst-news/pdf/2014/2015\\_01\\_p03.pdf](http://www.jst.go.jp/pr/jst-news/pdf/2014/2015_01_p03.pdf)) では、利用者  
であるリオン株式会社の伊藤 平氏が「何か技術的な課題  
があると、すぐにプラットフォーム内の先生方や技術者  
の方々に相談できるのが心強い。経験が一切なかったと  
ころから、MEMS を応用したマイクロフォンチップがで  
きたのはプラットフォームのおかげです」と語ったと記  
されている。また、第1.6節で挙げたナノテクノロジー  
EXPRESS 第22回の「6. おわりに」には、「微細加工プ  
ラットフォームを利用したことにより、MEMS プロセス  
に関する技術者教育も行うことができた。(途中省略)こ  
の成果を活かし、より完成度を高めるために現在も試作  
を継続している。」と書かれている。森山氏の語った利用  
者への対応と期待が現実のものとなっていることが、利  
用者の言葉で示されている。



### 3. 技術の普及と今後の展望

支援の依頼は、MEMS 技術のプロモーションで気づかれ  
たり、口コミがきっかけになることが多い。MEMS につい

ては、2014年8月に、「人材育成のための MEMS 集中コー  
ス in 大阪」が  $\mu$ SIC を主催者の一つとして関西大学千里山  
キャンパスで開かれ、200人くらいの参加者があった。

また、仙台市主催の MEMS 講習会がある。東北大学で  
は MEMS の研究開発が盛んであることより、仙台市が企  
画した地場産業振興、人材育成のためのもので、市内の  
企業は無料で参加できる。一昨年からは、毎週1日、2ヶ  
月間のコースを設けた。毎年参加者は5人程度で、リ  
ソグラフィからエッチングまですべてのプロセスを体験  
してもらった。今年は力(ちから)センサを作る。森山  
氏は、講習会の中心として、カリキュラム作成・実施、  
装置使用法の指導を他の支援者と分担して行っている。

このような普及活動はあるものの、学内でも試作コ  
インランドリを知らない人がいるという。広く知ってら  
われないと共有が広がらない。微細加工プラットフォーム  
に気づき、積極的に使ってほしいと森山氏はいう。そこ  
には、共有されたノウハウが、蓄積されており、公開さ  
れている。企業にとって核になる技術やノウハウは自前  
開発になるだろうが、周辺領域は共用で開発し、無駄な  
重複は避けたい。共用施設に蓄積している技術やノウ  
ハウで補完することにより、効率的に技術が発展するだ  
ろう。森山氏は、技術支援により蓄積されたノウハウで  
成果を出し、次のノウハウを産み出すという、研究開発  
の良い循環が拡大することを期待して、積極的に技術支  
援を行っている。



### おわりに

平成26年度技術支援者賞の対象となった「シリコン  
深掘りエッチング (Deep RIE) における超精密形状制御」  
は高いアスペクト比の深掘りやテーパ状のエッチング  
など様々な形状制御を可能にするものである。この技術  
は、技術支援者による共有設備の立ち上げ、維持管理の下、  
蓄積されたノウハウを基にした支援者と利用者の共同開  
発で生み出された。この技術は、デバイスや製品開発に  
活かされ、ナノテクノロジープラットフォームの共有設  
備に蓄積されて、さらに高度な技術、新しい技術を生む  
元になっている。共用設備利用、技術支援は人材育成に  
もなる。これらの共用設備の効用は、支援者によって支  
えられていることを深く認識させられるインタビューで  
あった。今後、共有設備が周知、活用され、蓄積された  
技術が新しい技術の発展を促す良い循環が進むことによ  
り、支援者の苦勞が報いられることを期待したい。

(古寺 博)