

文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム 令和3年度秀でた利用成果

アートを育み、データでつなぐナノテクの新展開 ～プラズモニック構造を利用したシリコン MEMS モノリシック赤外 SPR 分光センサによる東京大学微細加工拠点「秀でた利用成果最優秀賞」 連続受賞に寄せて～

電気通信大学 菅 哲朗, 大下 雅昭, 安永 竣
東京大学 三田 吉郎



1. はじめに

私事で恐縮ながら、昔、実家の床の間に漢詩の掛け軸が飾ってあった(図1)。

「少年易老学難成 一寸光阴不可輕」

当時小学生の筆者が父親に意味を聞いたところ、「少年老い易く学成り難し 一寸の光陰軽んずべからず」と読み下し、学業は人生よりも長く奥深いものだから、寸暇を惜しんではならないと(待ってましたとばかりに?)教えてくれた。掛け軸には「朱熹」詩とある。朱子学の祖である12世紀の哲学者の詩ということだ(諸説有[1])が、さかのぼること1600年前、紀元前5世紀のギリシアでは、「医学の祖」ヒポクラテスが

「ὁ βίος βραχύς, ἡ δὲ τέχνη μακρὴ [2]」
(Ho bios brakhys, he de tekhnē makrē)

「人生は短かし、医術は長し」と語ったという。現代では



図1 七言絶句漢詩「少年」掛け軸. 李光元による揮毫.

ラテン語の訳文で知られる。

「Ars longa, vita brevis」(Art long, life brief)

artと聞くと、直感的に「芸術」と直訳したくなるが、ヒポクラテスは医師なので、技芸(τέχνη)としての医術を指したと言われている。確かにラテン語では、自然(natura)に対する「技巧、熟練」、要は人間が作りあげるものを「ars」と呼ぶ。「art(英語)」とは古来より「工学」だ、といってもよいだろう。

時はくだって21世紀。2012年から2021年度の10年間にわたって実施された文部科学省事業「ナノテクノロジープラットフォーム」では、日本国中の産学官の研究者が、全国25機関の35実施機関拠点を利用し、年間3000件を超える「state of the art:最先端技術」を生み出した。拠点が推薦した報告書の中から、3つの観点で優れていると有識者会議に認められた研究が「秀でた利用成果」として選定されてきた。

- (1) ナノテクノロジープラットフォームの活用・支援が大きな効果をもたらしたもの
- (2) イノベーションの創出にあたって大きな影響が期待できるもの
- (3) 産業界・大学・公的機関の連携により大きな成果が得られたもの

最終年度(令和3年度)の「秀でた利用成果 最優秀賞」は、筆者の率いる東京大学微細加工拠点が推薦した、菅哲朗准教授(電気通信大学)と大学院生らの研究成果「プラズモニック構造を利用したシリコン MEMS モノリシック赤外 SPR 分光センサ」(図2)。東京大学微細加工拠点にとっては、3年連続の受賞[3][4]、しかも2年連続の最優秀賞という、大変栄誉のある結果である。ナノプラ10年で、秀でた成果に値する「優れたart」を無数に創り出せるようになった東大微細加工拠点。その秘密に、受賞研究の中身とともに、迫ることにしよう。



図2 受賞者の菅 哲朗准教授（中央着席），大下 雅昭氏（左着席），安永 峻氏（右着席），佐藤プログラムディレクター（中央後ろ）と支援チーム。



2. 構想 ～規則的な微細構造で創る新たな物質の性質～

受賞研究は、半導体微細加工技術を使って、100～500nmの大きさの規則的構造を作ること、材料が本来持っている性質（物性）の限界を超え、しかも設計者が描くデザイン（形状）によって物性をデザイン（制御）できる、新しい電気機械素子を創出するという、大学発の研究である。特に今回受賞したのは、赤外線という、目に見える（可視）光よりも波長の長い光を検出・計測するセンサの研究だ。センサの働きを理解するには「プラズモン（共鳴）」と、シリコンによる光センサという、二つの学問を理解する必要がある。理論は奥深いのだが、せっかくの機会なので、極めて簡潔・直感的に解説する。出てくる式は「せいぜい、かけ算」。好奇心のある中学生以上なら十分読める（実験済）。安心して読み進めてほしい。

2.1 シリコンによる光センサ

作りたい素子は、光を当てると電流が流れる、光電変換素子というセンサである。実現のために、「光はエネルギーをもった粒である」という、光子仮説という考え方をを使う。仮説の提唱者は、かの Albert Einstein というから奥が深い。少し回り道になるが、考えを整理しておこう。

光は電界と磁界が互いにかみあって振動する横波であり、光速 c （1秒間に光が進む距離）を、1秒間に電界がプラス・マイナスと振動する回数 ν （ニュー：ギリシャ文字。振動数）で割ると、波長 λ （ラムダ。1回振動するあたり光が進む長さ）が求まる（図3（a））。

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

真空中の光速 $c=299,792,458$ m/s（約3億m/秒）（2）

「理科年表」によると [5]、人間の目に見える「黄緑（黄と緑の中間）色」の光は 550nm（図3（b））。「1ナノメートル」は10のマイナス9乗なので、まじめに書き出すと「0.000000550m」となる。目がちかちかして、直感的にわかりにくいので、科学者は「10の何乗」で表記する。

$$\lambda = 550 \times 10^{-9} \text{ m (または } 5.50 \times 10^{-7} \text{ m)} \quad (3)$$

(2) 式の値を (1) 式に代入して整理すると、黄緑色（550nm）の光の振動数は、1秒間あたり

$$\nu = 545,454,545,454,545 \text{ Hz} \quad (4)$$

（有効数字3桁で近似して 5.45×10^{14} Hz）

になる。さらに脱線すると、ハードディスクの容量「テラバイト」で有名になった「テラ」という単位は10の12乗（0が12個並ぶ！）。黄緑の光は545THz（テラヘルツ）の電磁波ということになる。

振動数 ν を持つ電磁波はエネルギーを持つ、と言いだしたのは Max Planck で、その名を取って比例定数のことを「プランク定数」という。

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (5)$$

545 THz の電波のエネルギー E は

$$E = h\nu = 6.63 \times 10^{-34} \times 5.45 \times 10^{14} = 3.61 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (6)$$

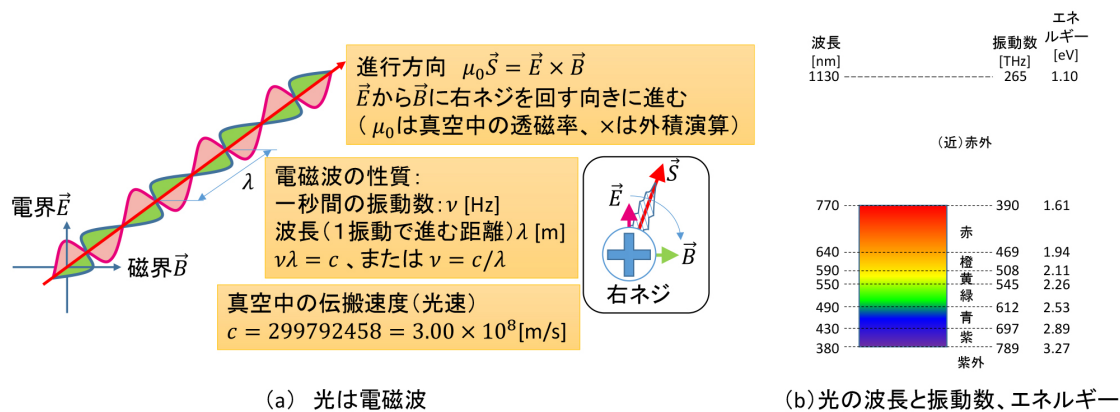


図3 電磁波としての光の基礎知識

アインシュタインの偉大なところは、振動数をもった電磁波は、エネルギーをもった弾のようなもの（光子）だと考えたこと [6]. 「光子」一つのエネルギーは小さいように見えるけれども、「ガツン」と物体にぶつкаると、エネルギーを物体に与えることができる。うまいこと「ガツン」とぶつかって、光子1個のエネルギーが物体中の電子1個に完全に吸収されると、電子はそのエネルギー分「エキサイト」して動きやすくなる。もしも「エキサイト」したエネルギー量が、原子核が電子を束縛しているエネルギーよりも大きくなったときには、電子が物体から飛び出してくる。「光電効果」といい、1921年にノーベル賞を受賞している [7].

電子1個がどのくらいエキサイトしたかを測るわかりやすい単位として、科学者たちは、「1個の電子を1ボルトの電圧で加速したときに変化したエネルギー量」を使う。電子1個 (e) × 1ボルト (V) なので、単位は [eV]: エレクトロンボルト。国際単位の「ジュール [J]」に変換するのも簡単だ。電子1個の持つ電荷の量

$$q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (7)$$

を使って、1eVの電子が持つエネルギー量は、

$$E = qV = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.00 \text{ eV} \quad (8) \quad (\text{変換公式}).$$

式 (6) と (8) をまとめると、黄緑色 (550nm) を照射したときに、物体中の電子エネルギーは、

$$E = (3.61 \times 10^{-19}) \div (1.60 \times 10^{-19}) = 2.26 \text{ eV} \quad (9)$$

まで高くなる、ということがわかる。不思議なようで、本当の話。

デジカメやスマートフォンの中に入っている「CMOS撮像素子」も、この物理法則を使っている。図4 (a) のように、半導体で出来た撮像素子（昔のカメラでいう「フィルム」）に光が当たり、電子がエキサイト（専門用語で「励起」という）したときだけ電流が流れるような仕組みを作り、それを沢山並べることができれば、エキサイトした電子の個数を数えることで、光の強弱を測定することができる（ピクセルという「点の集まり」でデジタル画像は作られる）。物体は原子と、原子に囚われ勝手に動いてゆかない「価電子」で構成されるが、励起した電子が十分エネルギーを持つと、自由に動けるようになり（自由電子）、電流となる（図4 (b)）。半導体の中で電子が自由になれるために必要なエネルギーは、使っている材料の性質で自動的に決まってしまう。現在、世界で一番売れているセンサは「シリコン半導体」を使っており、シリコンの持っている素材としての性質により、バリアのエネルギーはおおよそ「1.1eV」と決まっている。対応す

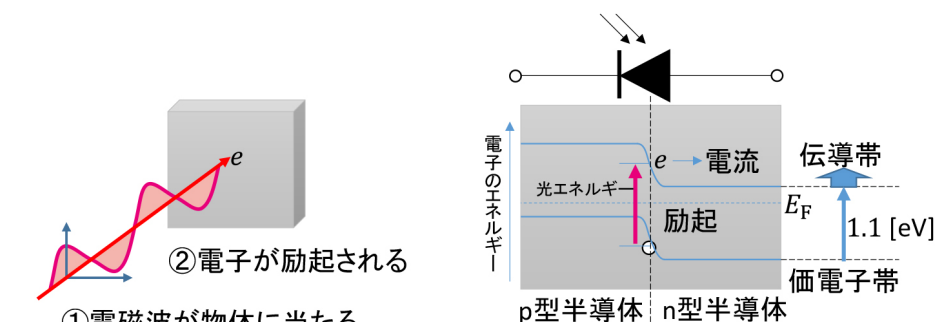


図4 光センサの仕組み：物体（半導体）に光を当てて、電子にエネルギーを与えると電流になる。

る光の波長は $1.13\mu\text{m}$ (1130nm) となり、それよりも波長の長い光（赤外線、図 3 (b)）では、光子 1 個が「ガツン」とぶつかるエネルギーがバリアを超えられなくなり、電流として取り出せなくなる。（これは「透ける」ということとも表裏一体で、シリコンを赤外線で見ると、透けて見えるのだ！）。

2.2 プラズモン増強とショットキー接合による新規センサ

以上、簡潔にまとめると、

- ・光エネルギーを価電子に与え、「バンドギャップ」を超えると、自由電子になり、電流として取り出せる（光電流）。
- ・光の波長に反比例して、与えられるエネルギーが小さくなる。
- ・シリコンの物性から決まる必要エネルギー値よりも小さくなると、電流を取り出せなくなる。
- ・シリコンで必要なエネルギーのしきい値は 1.1eV 程度 $\Rightarrow 1.13\mu\text{m}$ (1130nm)。
- ・これよりも波長が長い「赤外線」を照射しても、シリコンは光電流として反応できない。

重要（深刻）なことは、バンドギャップはシリコンの物性値、ということだ。物性値は材料自身が持っている「自然の宿命」であって、たとえ神が存在したとしても、同じ材料を使う限り物性値そのものを改変することは不可能だ。「シリコンを使って、特定の波長の赤外線に感度のあるセンサを作りたい」この、自然の宿命に反する無理難題に対して、菅先生、大下君、安永君のチームは、どんな art を使った（そして勝った！）のだろうか？

「愛情の反対は無関心
(Opposite of love is indifferent [8])」

という。関心のあるものに人は「共鳴」する。光の世界でもこの原理は有効だ。上手にセンサの表面に「秘密の機構」を作り込み、光に共鳴してエネルギーを効率よく電子に与えられれば、バリアを超えた電流を検出できるだろう。しかし、「そんな超絶技巧みたいなこと」、都合よくできるのだろうか？

答は Yes である。

【秘密 1】特別な秘密として、微細に加工した金属の構造を使う。「光は電磁波」なので、電界の振動で電子を「揺さぶる」ことができる。冬の乾燥した日に、こすったプラスチックの下敷で髪の毛を引っばった遊びと同じようなことを、振動する電界が行なうわけだ。1 秒あたりの振動数は前節で計算したように「数百 THz」。揺さぶられた電子は、その近くの電場を変調する。空間には飛んでゆ

かない、「表面プラズモン」といわれる電場の振動だ。

【秘密 2】更に、「振動のあるところに共振あり」という原理を使う。振動・共振（共鳴ともいう）を利用する身近な器具といえば、楽器。バイオリン、ピアノ、…、全ての楽器には「共振構造」が仕込んである。ピアノの鍵を弾くと、張った弦をハンマーが叩き、振動する。振動数は材料の性質、寸法（弦の太さと長さ）、そして張力で決まる。ピアノを分解して中を覗くと、ピアノ線が 88 鍵分、ぎっしりと張ってある。同じように、光の世界でも共振器を作ることができる。特定の寸法に微細加工した金属構造に光を照射すると、材料と寸法で決まる振動数の光で、電場を大きくすることができる。これを「表面プラズモン共鳴 Surface Plasmon Resonance (SPR)」という（図 5 (a)）。楽器の場合は響板を使って部屋に響く大きな音を発生するのが目的だが、菅先生のセンサの場合は、増強された電場で素子中の電子を効率よくエキサイトして伝導電流に変換する。めでたし、めでたし、である。しかも、楽器の弦では固有振動数を寸法で調整できるのとまったく同じく、共鳴する光の周波数は加工寸法で調整できる。まさに、

「神は物質に自然の特性（natura）を与え、
人類は微細加工で特性を創り出す（ars）」

と言い切っても過言ではないだろう。

【秘密 3】話はさらに続く。菅研究室では、エキサイトされた電流を取り出すための工夫として、「金属 - シリコンの接合」を利用した。工夫の「売り」を一言で言うと「増強と取り出しの一石二鳥」を狙ったもので、「プラズモン共鳴」のために製膜・加工する金属膜と、母材のシリコ

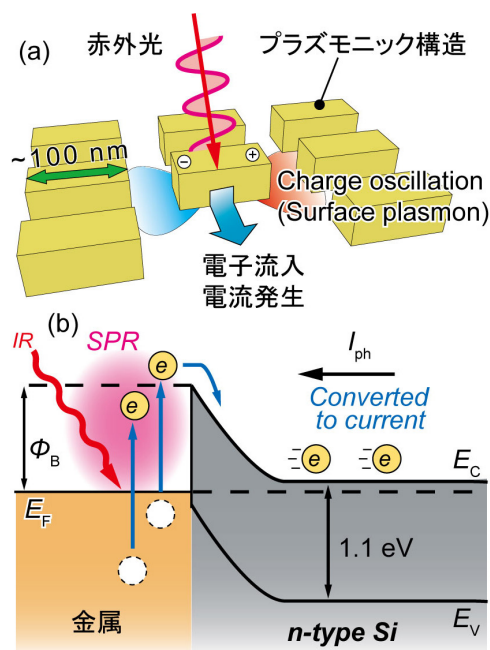


図 5 表面プラズモン共鳴 (SPR) と、それを利用した光センサの仕組み

ンとの物性によって、金属―半導体の界面に自動に出来るバリア（ショットキー接合と呼ばれる）を利用してダイオード構造を作るという工夫である（図5（b））。今回の実験で使った素材（銅や金）では0.6～0.8eVの障壁となり、検出限界の振動数を下げる、すなわち、より長波長の赤外線まで感度を伸ばすことができる。材料と構造の競奏で、「材料だけでは実現できなかった」機能が発現されるのだ。



3. 実現・検証

シリコンに細くて深い穴を無数に開け、金属を斜めに蒸着する。シリコンの表面、穴の壁面、底面に綺麗に製膜できれば完成だ。菅先生のパターンのキモは、直径100nm（0.000000100m）、深さ500nmの微細な孔を、500nmおきにシリコンウエーハの全面に加工するというものだった。日曜大工だったら「ドリル」の出番だろうが、人類は髪の毛の1000分の1の細さのドリルを未だ持たないし、例えば素子の寸法を5mmの正方形として、孔を全面敷きつめると孔の数は $(5\text{mm}/500\text{nm})^2=1$ 億個！となる。ドリルで1穴1秒ずつ開けるとしたら、休みなしで1157日（3年超）も！かかってしまう。「一つひとつ、いちいち穴を開けているヒマは無い」。いくら構想が素晴しくても、作れなくては意味が無い。「絵に描いた餅みたいなこと」は、果たして出来るのだろうか？

答はYesである。

しかも、東京大学微細加工拠点を頼ることで「普通に」「簡単に」出来てしまったのだ。

東京メトロ千代田線根津駅徒歩5分の、「弥生式土器発掘ゆかりの地」、東京大学本郷キャンパス（浅野地区）に2003年12月に竣工した東京大学武田先端知ビルは、「経済活動で得た富を生活者のための研究に還元し、豊かな社会を創りたい」という、武田郁夫氏（現 株式会社アドバンテスト創業者）の多大な寄附で立てられた。地下3階部分の600平米に、連邦規格クラス1という、「山手線内で最も清浄な（＝ホコリの無い）」スーパークリーンルームを備え、合計70台に数える一流の半導体微細加工装置（価値総額38億円超）を導入して、「世界一の、あなたの研究室が、常にここにあります」をモットーとし、「価値観を共有する者」が集う互助会方式で運営している。2012年から本稿執筆時点（2022年2月22日）までの利用登録（賛同）研究室は、「456研究室」で、「東京大学内部：東京大学以外の大学・国研：企業の研究室」が「1:1:1」という、真に広く開かれた、世界と互角に戦える一大拠点である。

一括加工のために人類が発明した道具は、「写真技術」である。シリコンウエーハの表面に、（厚み100nm～

1μm）感光性の有機薄膜（レジスト材）を薄く塗布する。毎分数千回転という高速でウエーハを回して、レジストを遠心力で飛ばすことで均一に塗布できる。薄膜の上に、原版のパターンを「描画」して局所的な化学変化を起こし、薬品で現像して一気に取り去るという方法を使う（図6（a））。量産工場では光で原版を縮小投影するため「フォトリソグラフィー」と呼ばれるが、今回のパターンは「100nmのホール形状」。紫外線（350nm）でも波長が長すぎて間にあわない。そこで東京大学では「高速電子線描画装置（図6（b））」を利用する。工場での量産を意識して開発された超高速な描画装置を、大学での研究向けに改造した「世界一の装置」。1億個のナノパターンも、「たったの7分30秒」で描画してしまう。設定時間も含め、「たかだか20分」の高速描画だ。

描画現像したレジストパターンを、ホットプレートで焼き固め、シリコンの一括加工にかかる。「エッチング」という、美術の時間に聞いたことのある方法を使用する。美術では、腐食液に銅板をひたす「ウェットエッチング」を使うが、ナノメートルの加工では、真空中での放電で作る「プラズマ」を使う。東京大学では、誘導結合プラズマ（ICP）という、高密度なプラズマ装置（図6（c））を公開している。最大3kWの投入電力により、細く深い構造の奥底まで、十分な量のプラズマ種が供給され、安定した「深掘りエッチング（Deep RIE / DRIE）」が保証される。加工したナノホールを薬品で丁寧に洗浄し、真空蒸着装置で、金属の薄膜を製膜したら完成だ。

作製した素子の写真を図7（a）に示す。期待どおり、ナノホールの側壁と底部に電極が製膜されている。シリコン（金属製膜面と反対）側から赤外光を照射したときだけ電流が観測された（図7（b））。「研究の本質は比較

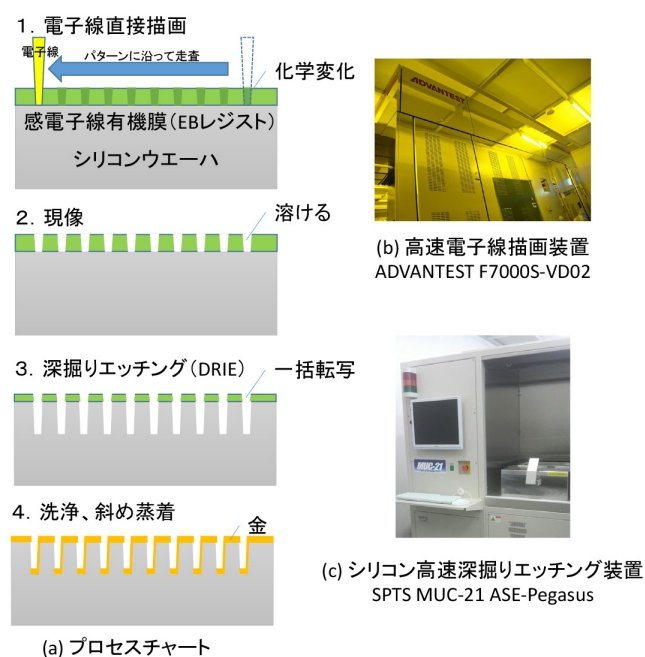


図6 素子作製手順と、利用した主な装置

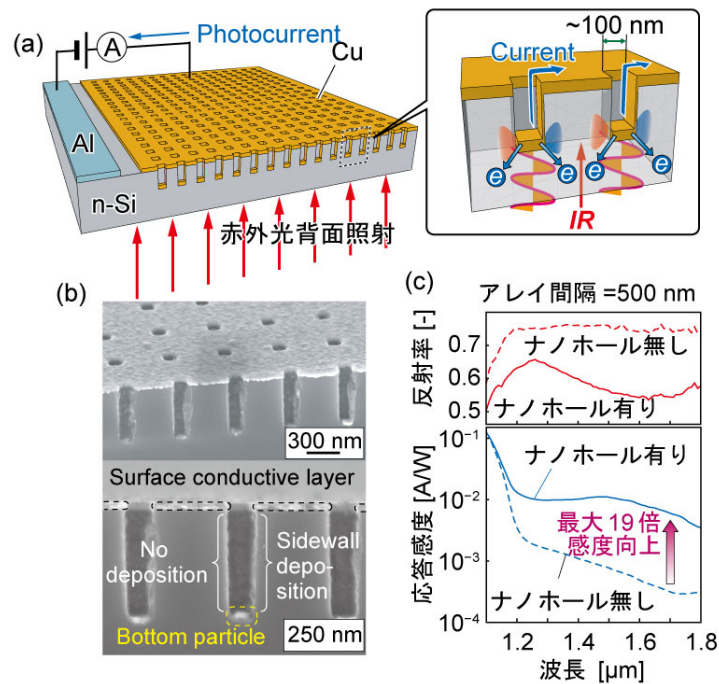


図7 作製したナノホール赤外センサとその動作 [9]

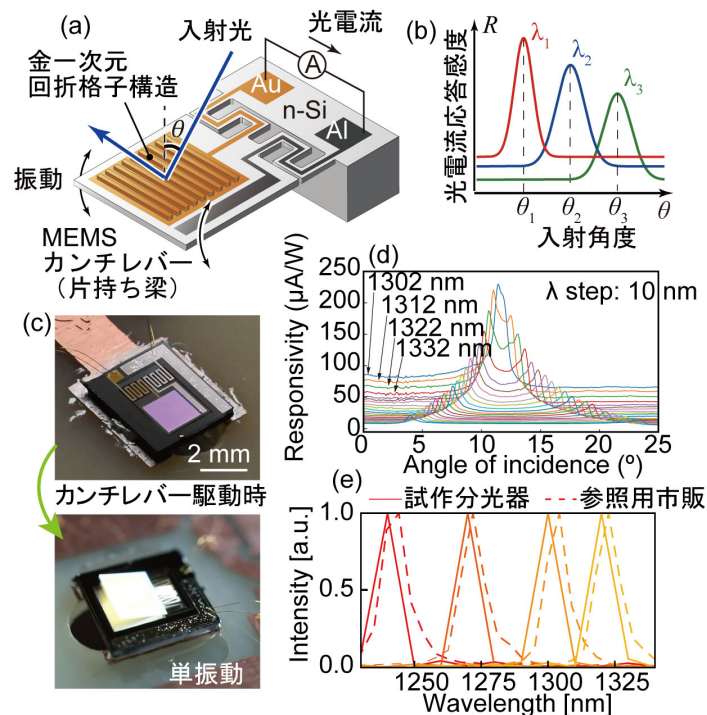


図8 MEMS（機械）構造と組み合わせた小型分光器

に在り」ナノホールの無い構造も同時に作って電流を比べると、「最大19倍の感度向上」が実験で示された [9]。

Yes！大成功である。

ひとたび成立性が確認されれば、あとはお楽しみ。デザイン設計によって自由自在に性能をコントロールして、役立つ素子を次々と発明する。例えばセンサ面を加工し

て機械的に回転動作（あおり）できるようにして、入る光との角度を調整すれば、プラズモン共振の波長調整できる。世界最高級にコンパクトな赤外分光器（図8）の出来上がり [10] だ。菅研究室では、一連の成果を「世界一、世界初」の研究成果が集うトップ国際会議（例えば Transducers 国際会議など）で成果を発表 [11] するとともに、企業との共同研究や、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の助成金を受けた展開研究を行ない、

人体（血中酸素濃度センサ）から環境（ガスセンサ）まで、まことに幅広い分野で研究を展開している。



4. 成功への最短距離～武田先端知に集うノウハウ

「言うは易く、行なうは難し」が世の摂理。少しでも半導体微細加工を行なったことのあるエンジニアであれば、「あまりにも簡単・カジュアルに」最先端の研究成果が出たことに、驚かれることと思う。そう、「極めて短期間に、世界一流の成果を、高信頼に創出」できるのが東大拠点の特長なのだ。理由は二つ、拠点が誇る「エンジニアチーム(図9)」と、「国際ネットワークも使った先端知の集積化」である。

「少しのことにも、先達はあらまほしきことなり」

と、兼好法師のいみじくもおっしゃるとおり [12] で、多くの事は「わかっていれば一瞬」だが、とにかく初心者は道を誤りがちなもの。東京大学武田先端知では、先端研究を通じて得られた知識とノウハウ (Intellectual Property: IP と呼んでよいだろう) を、専門のエンジニ

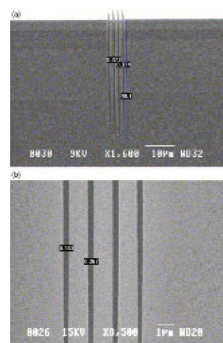
アを通じて分かちあう、「技術補助」という仕掛けが来ている。一流のエンジニアの指南を受けることで、短期間に成果を得つつ自分自身も上達できる。ナノテクノロジープラットフォームで雇用された技術支援員や、プロジェクト雇用を経てフルタイムとなった技術専門職員、大学院博士学生「卓越 RA」の「プロセス家庭教師」、および学部4年～修士2年生の「学生技術補佐員」がそれぞれ得意な分野でお相手をする。

東京大学拠点長の三田（筆者）は、電子回路と融合した微小電気機械システム（集積 MEMS 分野）の研究者として、フランス共和国立科学研究センター（CNRS）が東京大学生産技術研究所内に世界で最初に作った海外研究所「集積化マイクロメカトロニクス研究センター LIMMS」の受入教官を20年にわたり務め、共同研究・技術交流を盛んに行なってきた。ネイティブに鍛えられた、「気持ちは通じる（実は文法間違いだらけの）」サバイバルフランス語を駆使して、フランス共和国のクリーンルームエンジニアと本音で語り、彼の国の良い仕組みだけを輸入し、日本の良い仕組みと融合することで、クリーンルームの新しいエコシステムを創成している。

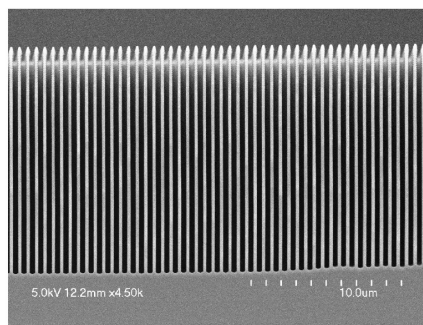
実際、2005年当時、世界でも珍しかった最高級の「シリコン深掘りエッチング(図10)」で発表した国際共著論文 [13] は、2022年の現在でも引用件数が増えている。



図9 東京大学微細加工拠点の誇るエンジニアチーム



(a) 2005年当時「世界最高級」シリコン深掘りエッチング。幅: 深さ1:107 [8]



(b) 東大拠点の装置を利用して作製したシリコンフィン構造。白い所がシリコン

図10 シリコン深掘りエッチングの「先達」の例

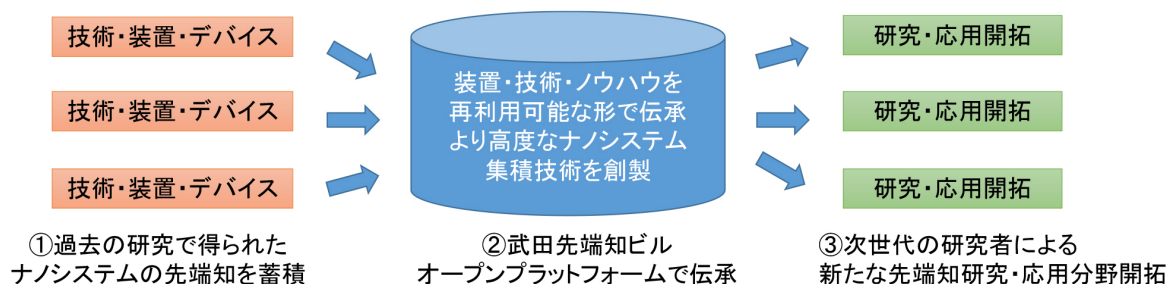


図 11 武田先端知スーパークリーンルーム「第三章」の目指す「ナノシステム先端知の集積」モデル

この交流でつちかった深掘りエッチングのレシピは、直接には菅先生の研究とは関係が無いけれども、東京大学拠点の標準レシピとして、クリーンルームに来れば誰でも使えるように整備してあるだけでなく、結果改善のためのアドバイスも行なう。もちろん、「世界で初めて」の研究をするのだから、「ABSOLUTELY NO WARRANTY（完全無保証）」であるが、「As-is available(手に入たとおり)」の「最新の」レシピを使うことができ、「試して学ぶ」ことによって、短期間に上達するのだから、使わない手は無い。



5. 結び～機器共用から、データ創出・人材輩出への展開～

古代ギリシアのユークリッドは、エジプトのプトレマイオス王に

「学問に王道無し」

と語ったという [14]. 対して 21 世紀の我々 @ 東京大学武田スーパークリーンルームは、

「半導体・微細加工に王道有り」

と胸をはって言えるまでに成長した。本「秀でた成果 最優秀賞」は「年間 160 件」を超える最先端研究成果の「ほんの一部」を切りとっただけ！という事実がポイントで、東京大学武田微細加工拠点長を 10 年間勤めた結果、半導体微細加工工学を基礎とした、毎年 160 件超「量子からバイオ、プラズモニクス」まで、多岐にわたる最先端の科学・技術に触れ、多くの仲間が成功する中、筆者はただ「褒めるだけ」で良いという、まことに幸せな時代が到来した。

国家プロジェクトとしてのナノテクノロジープラットフォームは 2022 年 3 月に終了するが、「ナノプラの価値観」は永遠に受けつがれる。2031 年まで続く新規「マテリアル先端リサーチインフラ」事業では、装置共用事業を受けつぎ、「Digital Transformation (DX)」を取りこんで新たな展開を迎える。東大拠点も、我々微細加工拠点、

「原子のみならず、電場・磁場まで見える」構造解析拠点（工学系研究科総合研究機構ナノ工学研究センター）、「データ活用社会創成プラットフォーム mdx」大型コンピュータ拠点（情報基盤センター）の 3 部署が「ハブ拠点」を形成し、スポークとして広島大学、日本原子力研究開発機構 (JAEA) と「ファイブスターのワンチーム」を構成し、エネルギーを中心として共用事業をさらに展開し、あわせてデータの蓄積と利用のエコシステム構築を狙う。

あわせて、微細加工拠点では、産業的に成功した利用者からの「還元」を元に、新たな展開が幾つも企画されている。①これまでの研究活動で培われた先端知を蓄積し、②拠点で「常に再利用可能な形」で蓄積深化し、それを③応用分野の専門家と一緒にあって展開を開拓するという仕組み(図 11)である。武田 CR を通じて育った「先達」から「知恵・装置・資金」が還流し、大きな潮流となって次世代を育てる「エコシステム」の構築が期待できる。思い立ったが吉日だ。「こんなことがやりたい」「こんな技術を伝承したい」東京大学拠点を通じ、個々人の夢が百花繚乱、最短距離の成功につながることを願ってやまない。

「武田先端知 SCR は、成功の可能性を提供します」



参考文献

- [1] https://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/ja/list/HU_journals/AN00090146/--/185/item/21421
- [2] <http://data.perseus.org/citations/urn:cts:greekLit:tlg0627.tlg012.perseus-grc1:1.1>
- [3] 三田吉郎（筆）[21 世紀の「黄金の国ジパング」を目指して ～ナノテクノロジープラットフォーム東京大学微細加工拠点による光触媒・超親水性機能融合反射防止多層膜材料の開発～] *Nanotech Japan Bulletin*, Vol. 13, No. 6 (2020.06.30), https://www.nanonet.go.jp/magazine/content/files/mag_pdf/Exellent_pdf/MajorResults2020_3.pdf
- [4] 「熱アシストハードディスク用微小光熱源ナノヒーター」 © 株式会社イノバステラ 栗山和巳氏、杉浦聡氏、豊橋技術科学大学 八井崇氏、ナノフォトニ

クス工学推進機構 橋本 和信氏, 東京大学 微細構造解析プラットフォーム 三田 吉郎氏, 水島 彩子氏, 落合 幸徳氏に聞く」, *NanotechJapan Bulletin*, Vol.14, No.1 (2021.02.26), https://www.nanonet.go.jp/magazine/content/files/mag_pdf/Exellent_pdf/MajorResults2021-2.pdf

- [5] 国立天文台編「理科年表 2002 年」「光と電磁波 (物 7 9)」 p.445 (2002.11.30)
- [6] A. Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" [On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light] (PDF). *Annalen der Physik* (in German). Hoboken, New Jersey (published 10 March 2006). 322 (6), pp. 132-148. doi:10.1002/andp.19053220607
- [7] The Nobel Prize in Physics 1921. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2022. Mon. 21 Feb 2022. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/>>
- [8] Eile Wiesel, in U.S. News and World Report (1986.10.27), in *Oxford Essential Quotations* (4 ed.)
- [9] Shun Yasunaga, Hidetoshi Takahashi, Tomoyuki Takahata, Isao Shimoyama, and Tetsuo Kan, "Densely Arrayed Active Antennas Embedded in Vertical Nanoholes for Backside-Illuminated Silicon-Based Broadband Infrared Photodetection", *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7, p. 2001039. doi: 10.1002/admi.202001039
- [10] Masaaki Oshita, Hidetoshi Takahashi, Yoshiharu Ajiki, and Tetsuo Kan, "Reconfigurable Surface Plasmon Resonance Photodetector with a MEMS Deformable Cantilever", *ACS Photonics*, 2020, 7, pp.

673-679 doi: 10.1021/acsp Photonics.9b01510

- [11] Shun Yasunaga, Tetsuo Kan, Hidetoshi Takahashi, Tomoyuki Takahata, Isao Shimoyama, "Infrared Photodetector with Copper Resonator in Silicon Nanohole Array", *20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems and Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS 2019 and EUROSENSORS XXXIII)*, 2019, pp. 633-636, 2019. doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808478
- [12] 吉田兼好「徒然草」第 5 2 段 <http://iwashimizu.or.jp/story/kj.php?seq=17&category=1> (岩清水八幡宮 Web ページ)
- [13] F. Marty *et al.*, "Advanced Etching of Silicon Based On Deep Reactive Ion Etching For Silicon High Aspect Ratio Microstructures And Three-Dimensional Micro- And NanoStructures", *Microelectronics Journal, Circuits and Systems section*, 36, pp.673-677 June (2005.06) doi: 10.1016/j.mejo.2005.04.039
- [14] スレンドラ・ヴィーマ／安原和見訳『ゆかいな理科年表』2008 ちくま学芸文庫 p.30

(東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 准教授 (兼) 附属システムデザイン研究センター 基盤デバイス研究部門長 三田 吉郎)

電気通信大学 菅研究室

URL: <http://www.ms.mi.uec.ac.jp/index.html>

東京大学 武田先端知ビルスーパークリーンルーム

URL: <https://nanotechnet.t.u-tokyo.ac.jp/>

東京大学 三田研究室

URL: <https://www.if.t.u-tokyo.ac.jp/>



【お問い合わせ】

微細加工プラットフォーム

東京大学 超微細リソグラフィ・ナノ計測拠点

☎ 03-5841-1506

E-mail nanotech@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

ホームページ

<https://nanotechnet.t.u-tokyo.ac.jp/>