

有機系浮遊粒子状物質を検出する MEMS 形センサの開発 ～長年積み上げた薄膜センサ技術をナノテクプラットフォームで 短期間にデバイス化～

東京電機大学 原 和裕 教授, 東京大学 三田 吉郎 微細加工プラットフォームマネージャに聞く



打ち合わせ室で左から原氏と三田氏 東大微細加工プラットフォームのメンバー

健康被害を及ぼす PM2.5 やハウスダスト, 花粉症の元になる杉花粉などは空気中に浮遊する有機系の微粒子である。これを検出する MEMS 形センサが東京電機大学の薄膜センサ技術を元に, 東京大学の微細加工プラットフォームを利用して開発された。その開発の経緯, ナノテクノロジープラットフォームの活用, 開発内容を伺うべく, 東京大学 本郷浅野キャンパス 武田先端知ビルにある東京大学 微細加工プラットフォームを訪ねた。お話は, 利用者の原 和裕 (はら かずひろ) 東京電機大学工学部電気電子工学科教授と支援者の三田 吉郎 (みた よしお) 東京大学大学院工学系研究科 准教授・微細加工プラットフォームマネージャのお二人から伺った。



1. 東大の微細加工プラットフォームの 成り立ちと共用設備利用 [1]

1.1 共通のクリーンルームを持ちたいという長年の活動が微細加工プラットフォームに結実

東京大学 (東大) は, 文部科学省委託事業「ナノテクノロジープラットフォーム (NPJ)」の 3 つのプラットフォーム (PF): 微細構造解析/微細加工/分子・物質合成のうち, 微細構造解析ならびに微細加工 PF に参画している。東大の微細加工 PF は, 「超微細リソグラフィ・ナノ計測拠点 (東京大学)」と称し, 東大の組織上は東京大学大規模集積システム設計教育研究センター (VDEC) に所属する。

1990 年から工学部共通のクリーンルームを設立しようとの分野運動的活動が始まった。その一方, 大学において集積回路デバイスのデザインを相乗りして試作・評価する道筋をつけようと, 1996 年に VDEC が VLSI 設計教育と先端研究のための全国共同利用センターとして発足した。

これらの動きに続き, 「経済活動で得た富を生活者のための研究活動に還元し, より豊かな社会をつくりたい」という趣旨で, タケダ理研工業 (現アドバンテスト) 創業者武田郁夫氏 (2012 年逝去) の寄付により 2003 年, 東京大学本郷キャンパス浅野地区に「武田先端知ビル」が竣工した。同社は 1954 年に「マイクロ・マイクロ・アンメータ」という独自製品で創業し, 高周波測定器など最先端測定器に事業を展開し, 半導体メモリスタで事業を拡大していた。ビルは地下 3 階, 地上 5 階で, 地

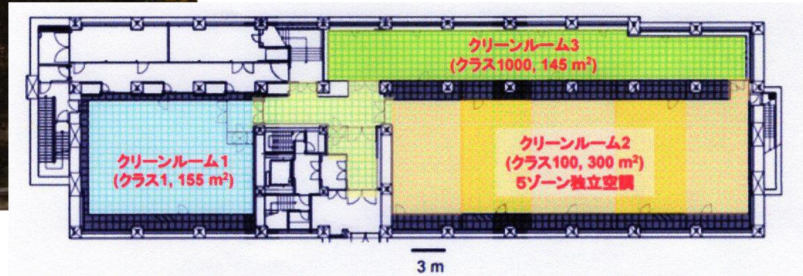
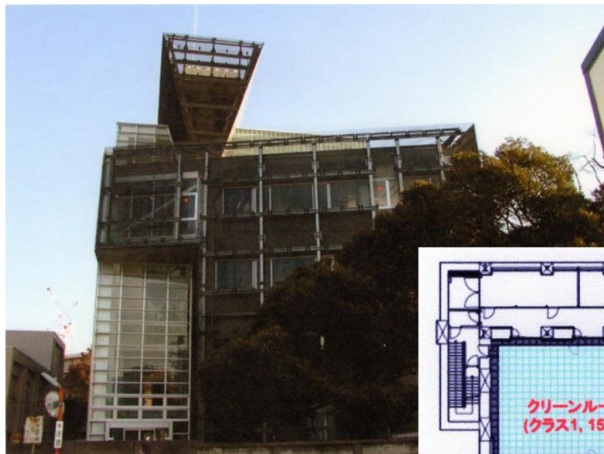


図1 武田先端知ビルと東大微細加工 PF のクリーンルーム

上部分に会議ホールや研究室を置き，地下3階に3層構造完全ダウンフロー型のスーパークリーンルームを整備している（図1）。

クリーンルームには，野村マイクロサイエンス社から寄付された超純水システム，アドバンテスト社から寄付された高速大面積電子線描画装置に始まり，東京大学大学院工学系研究科の電気系や機械系の21世紀COE，ナノテクノロジープラットフォーム，平成24年度補正予算などで装置を導入して，微細加工PF：「超微細リソグラフィー・ナノ計測拠点（東京大学）」が出来上がった。

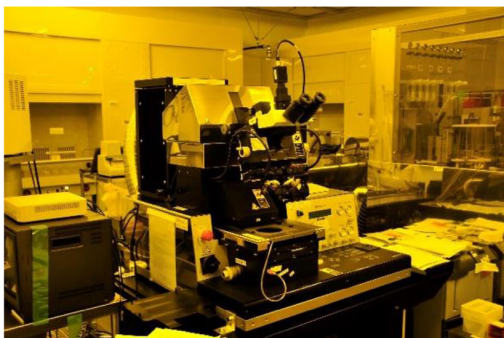
1.2 大微細加工 PF 供用設備の概要

東大の超微細リソグラフィー・ナノ計測拠点（東大拠点）は，1997年よりVDECとして「大面積・高速」を特色とする一流の電子線描画装置等をアカデミックに提供してきたが，2007年度からの文部省委託事業「ナノテクノロジーネットワーク（ナノネット）」への参画に続き，2012年からのNPJに参画している。現在の電子線描画装置は，最大8インチウェハまでの各種サイズ・形状の基板に対応し，可変整形ビーム／キャラクタ（セル）プ

ロジェクション方式により，ウェハ全面への平均描画時間1時間未満という高スループットを実現している。その他，シリコン深掘りエッチング装置でも世界的な競争力を持ち，CMOS-MEMS との融合に展開を図っている。

供用装置は，リソグラフィ・露光・描画，成長・膜堆積，膜加工エッチング，合成・熱処理・ドーピング，表面処理，切削・研磨・接合の各工程をカバーし，形状・形態観察・分析，電気計測，機械計測の測定評価に及ぶ。

リソグラフィには，電子線描画装置に加えて，両面，6インチウェハに対応する光（ホト）リソグラフィ装置があり（図2），電機大の本課題に用いられた。成長・膜堆積には，4台のスパッタリング装置を公開し，8インチ汎用スパッタ装置は4インチウェハ8枚の同時堆積ができ，高密度汎用スパッタリング装置は多層膜の堆積において真空を保ったままスパッタリング素材を変更できることから，本課題で重用された。膜加工エッチングにおけるドライエッチングには，高速シリコン深掘りエッチング装置（SPTS MUC-21 ASE-Pegasus）がある。Pegasusタイプは東大拠点の特徴であり，低ダメージ，高速のエッチングが可能のため，本課題のMEMS ダイアフラム作製に活用された。



光リソグラフィ装置 MA-6



高密度汎用スパッタリング装置



高速シリコン深掘りエッチング装置

図2 本課題で用いられた東大微細加工 PF の供用装置

1.3 東大微細加工 PF の利用 – 利用者は PF に研究室を置く

東大微細加工 PF の利用では、「あなたの研究室がここにある」ということを基本にすると三田氏はいう。利用者は研究室を PF に登録する。PF は研究室の一部となり、大学等の利用者が大学等の研究室にある設備と同様に供用設備を使用して、自ら実験する。東大微細加工 PF は、このような利用ができるよう 2007 年のナノネット以来、12 年かけて、このような仕組みを整えてきた。

登録している研究室は 310 になり、多くは大学だが、70 は大企業の研究室である。登録人員は約 700 人で、500 人は実働して、毎年 150 の成果報告が出ている。毎年 30 の新規ユーザーが登録する。利用を止めることもあるが、企業の開発が終わって生産に移行するという“卒業”が多い。

自分で機器を動かすのが原則である。自分でやり、失敗しているうちに上手くなって、好きなようにやれるようになる。研究室によっては、学生の卒業によって技術の途絶えることがある。そのようなときには、研究室の技術の途切れた枝に支援員の技術補助で接ぎ木をし、そこから更に技術を成長させる。

三田氏は 2018 年 8 月末に日刊工業新聞社から「MEMS デバイス徹底入門」という本を出版した [2]。東大拠点で開発・作成した MEMS デバイスを例にとり、MEMS の機能、原理、作り方を解説している。第 3 章「MEMS をつくる」には「3.13 ナノテクノロジープラットフォームへの招待～短期間 MEMS 研究開発へ～」の 1 節を設け、開発のスピードが要求される時代に、ナノテクノロジープラットフォームを利用することで、「自前でインフラを揃えることなく」「最短距離で」「研究の目利き」ができる、新しいアイデアを「まずは試してみる」環境が整った、と

プラットフォームの活用を勧める。

利用者はナノテクというサッカーフィールドのピッチに立っている。PF 利用形態に「機器利用」、「技術代行」、「技術補助」の 3 つがあるが、「機器利用」は利用者が自分でボールを運んでゴールする。自分が未熟なうちは狙い通りに成功しない。「技術代行」は PF のエンジニアがゴールするのを利用者が見ているだけ。「技術補助」は PF のエンジニアのアシストで利用者がゴールを挙げることにあたる。

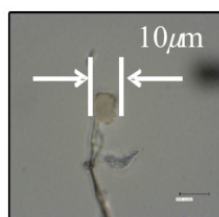
本稿の成果「有機系浮遊粒子状物質を検出する MEMS 形センサ」は、東京電機大学（電機大）の原氏が手持ち装置で遭遇した困難を、東大拠点における「技術補助」によって乗り越えることにより得られたものである。センサ部は原氏が 40 年かけて積み上げてきた薄膜センサ技術で構成される。



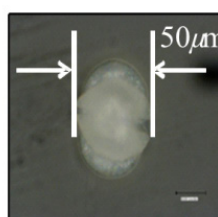
2. 環境汚染有機系浮遊微粒子を検出する薄膜センサ [3][4]

2.1 環境を汚染する有機系浮遊微粒子

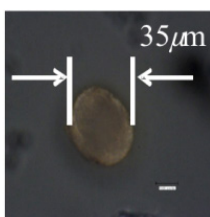
近年、産業活動に伴って発生する様々な物質によって引き起こされる大気汚染が問題になっている。急速に経済成長を進める国々で発生している極端な大気汚染に端を発して、PM2.5 と呼ばれている $2.5\mu\text{m}$ 以下の微小粒子による環境汚染が社会問題となった。大気汚染微粒子はタバコの煙やディーゼルエンジンからも排出される。大気中に浮遊する微粒子は容易に肺に侵入して、喘息や気管支炎を引き起こし、肺がんの発症の可能性もある。一方、家庭内では、カビの胞子（図 3）、ダニの死骸や糞などからなるハウスダストがアレルギー症状を引き起こす。湿



(a) 黒カビの胞子



(b) 松花粉



(c) 杉花粉

図 3 カビの胞子および花粉

気が結露してカビが生えたエアコンから、カビの胞子が室内に放出され、肺炎などを引き起こす。春先に飛散するスギ（杉）花粉による花粉症も悩みの種である。人の鼻は有毒ガスや嫌な臭いを嗅ぎ分けるが、嗅覚では有機系浮遊微粒子を捉えられない。

有機系浮遊微粒子の捕捉・測定には様々な方法が開発されてきた。ガラス板上に集められた花粉等の微粒子を光学顕微鏡下で観察し、浮遊量を粒子数の計数によって評価する方法は、手間がかかる。一方、花粉をレーザー光の散乱で測る方法もあるが、装置は高価になり、粒子サイズの識別は難しい。フィルタ上に捕集した大気中の粒子状物質の質量測定が標準測定法として規定されているが、手間がかかり、連続測定ができない。また、自動測定法として、 β 線吸収法、圧電天秤法が開発されたが、標準測定法との等価性の確認が難しいため、自動測定機の開発、改良が活発に行われている。

2.2 有機系浮遊微粒子を検出する半導体薄膜センサ

原氏はこれまで40年にわたり半導体薄膜ガスセンサの研究を大学で行ってきた [5] [6]。センサの動作原理は検知対象ガスがセンサの半導体表面に吸着した際に、ガスと加熱されたセンサ表面との間で電子の移行が生じ、電気抵抗が変化することにある。

1997年、花粉症患者の増加が社会問題になっていた頃のことである。長期間動作させて、感度が下がってきた半導体薄膜センサを光学顕微鏡で観察すると薄い赤や青の線が見えた。空气中に舞い上がってセンサ表面についた繊維に含まれる無機系の顔料が残留し、有機材料の繊

維はセンサ表面で酸素と反応して燃えてなくなったと考えた。花粉をセンサ表面に落とすと同様な変化を起し、その過程で電気抵抗変化が起こるだろうと予想し、実験したところ予想通りの結果が得られた。そこで、薄膜型有機系浮遊微粒子センサの開発を始めた。

薄膜型有機系浮遊微粒子センサの構造例を図4に示す。センサ部は、酸化第二鉄 Fe_2O_3 と酸化第二錫 SnO_2 の2層構造（厚さはともに100nm）で、上層の SnO_2 が検知対象ガスに触れる。 Fe_2O_3 には5mol%の酸化マグネシウム MgO と4mol%の酸化チタン TiO_2 を添加している。 TiO_2 を加えると感度が上がり、 MgO 添加で経年変化を抑制できる。 Fe_2O_3 の感度は低いので、ガスセンサに一般的に使われている SnO_2 との2層構造にして感度を上げている。 SnO_2 には4mol%の五酸化バナジウム V_2O_5 を添加している。ガスに触れるのは SnO_2 だが、バンドギャップが Fe_2O_3 より広いので電流は主に Fe_2O_3 を流れる。この構造にするとクラックが入りにくく、クラックが入っても電流に影響しない。 MgO 濃度をはじめ、添加物の濃度、膜厚などの最適化には何年もかかった。

薄膜センサは、アルミナ (Al_2O_3) 基板上にセンサ電極となる5mol%のタングステンWを含む白金Ptをスパッタ法により堆積し、ホトリソグラフィにより電極パターンを形成する。次に、第一層に Fe_2O_3 系膜、第二層に SnO_2 系膜をスパッタリング法で堆積し、リフトオフ法を用いたホトリソグラフィでパターンを形成した。センサ部の加熱には、市販のセラミックヒータを用いた。

空气中において加熱された $\text{SnO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 金属酸化物 n 型半導体表面には酸素分子 (O_2) が吸着する。酸素は酸化性ガスのため、半導体内の電子を酸素分子が捕獲し、

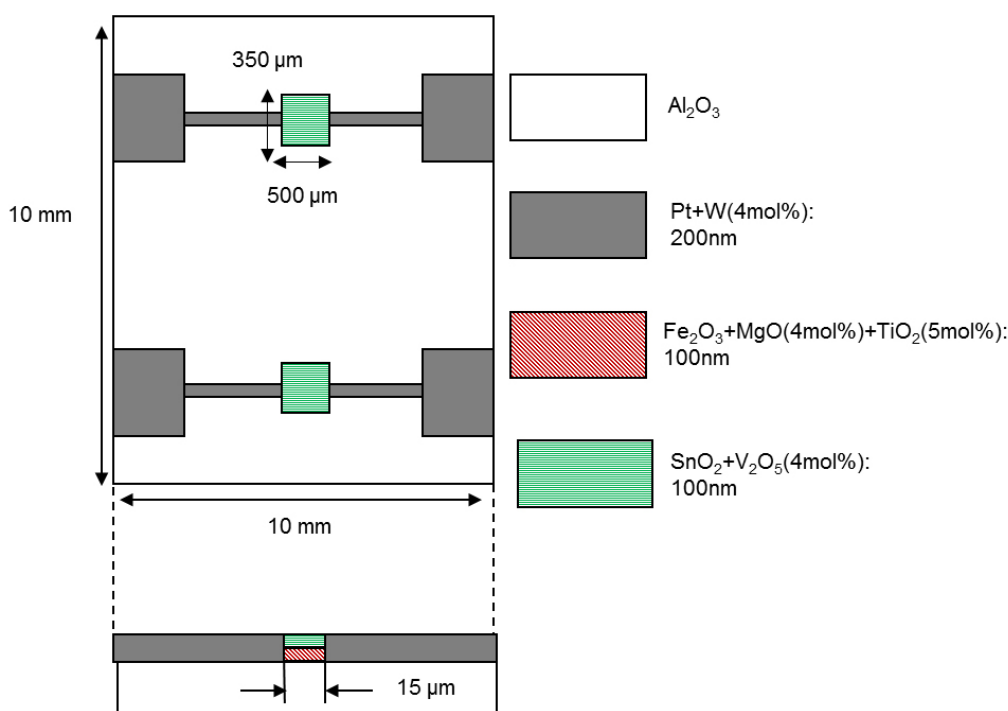


図4 薄膜型有機系浮遊微粒子センサの構造例

表面は電子空乏層となる(図5(a)). このセンサ膜に有機系微粒子(PM2.5や花粉など)が付着すると、水素や炭素などから構成される有機系微粒子はセンサ膜表面の吸着酸素と反応、燃焼し、その結果吸着酸素が捕獲していた電子がセンサ膜へ移動し、半導体の導電率が增加、電気抵抗値が減少する(図5(b)). 有機系微粒子が燃え尽きると、電子供給がなくなるので電気抵抗は一定の回復時間で元に戻る。

この結果、電気抵抗は図6のような時間変化を示す。有機系微粒子の粒径が大きいほど消費する吸着酸素の量が多いため、半導体内へ送り込まれる電子の量が増え、

抵抗値の減少が大きくなる。また、粒径の大きい有機系微粒子ほど燃え尽きるのに時間がかかるので回復時間が長い。有機系微粒子の種類が異なると、大きさや燃焼反応が異なるため、電気抵抗変化量や回復時間が異なる。図には、花粉とカビの胞子を検出した時の抵抗の時間変化を示す。有機系微粒子が付着するごとに抵抗変化を繰り返す。花粉や胞子の大きさは決まっているが、胞子は二つ以上が束になっていることがあり、その時の抵抗変化は大きい。大きさや種類によって抵抗変化が異なるから、有機系微粒子の同定まではできないが、大きさや種類の識別ができる。

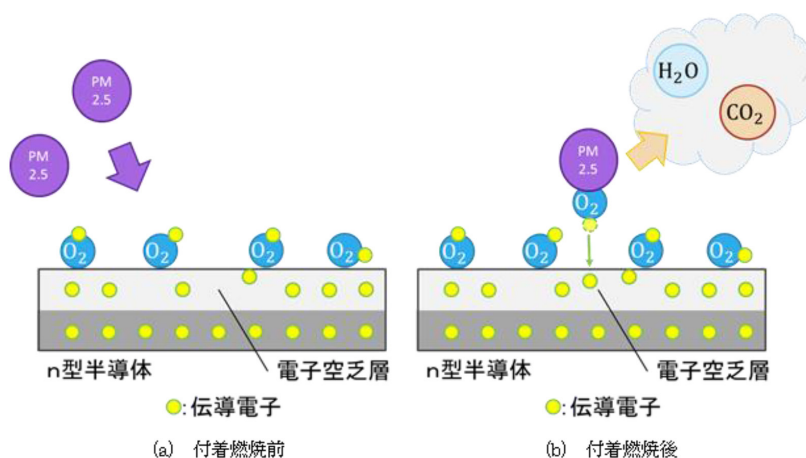
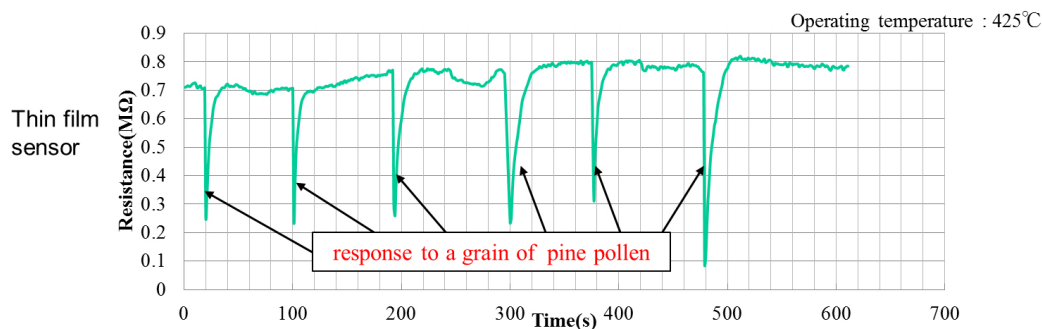


図5 半導体薄膜センサの動作原理模式図

松花粉に対する応答



黒カビの胞子に対する応答

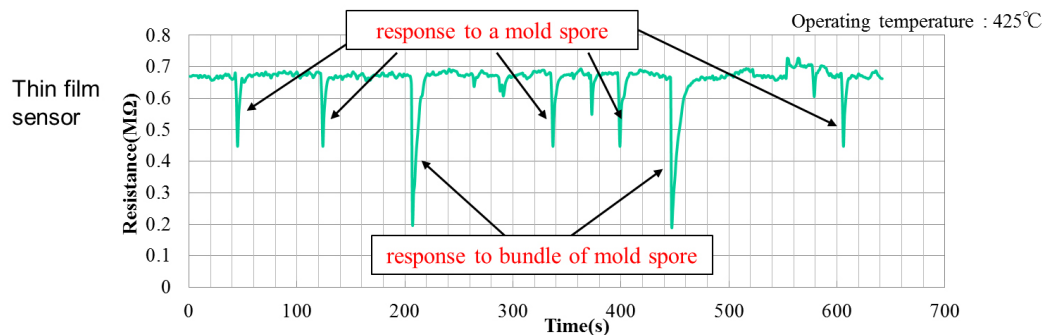


図6 半導体薄膜センサのPMに対する応答



3. 有機系浮遊粒子状物質を検出する MEMS 形センサの開発 [4][6][7][8]

3.1 有機系浮遊粒子を検出する MEMS 形センサの設計

半導体薄膜センサは加熱した状態で動作するから、センサデバイスとしては加熱ヒータが一体化されていることが望ましい。前章で用いた市販のセラミックヒータの長さは短いもので 10mm であるから、この構成をそのまま一体化したら大きくなりすぎる。一方、粒子が付着した膜部分の導電率が変化するから、電気抵抗変化率はセンサ面積と粒子の大きさが近い方が大きい。2.1 の図 3 に示したように検出する粒子の大きさは高々 50 μm なので、センサ膜の感応部分を、例えば、電極間のギャップ

15 μm 、幅 100 μm とした。この部分を加熱し、他の領域が加熱されないよう断熱を図り、ダイアフラム上に形成したマイクロヒータをセンサ部分に対向させた MEMS 形センサを設計した (図 7)。センサとヒータを一体化したセンサデバイスである。

MEMS 形センサは 20 年前から研究を始めたが、2 年前、図に示すような断面構造のセンサを設計した。酸化シリコンと窒化シリコンを積層した $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 被膜を設けたシリコン (Si) 基板を用い、Si の深掘りエッチングを行って、Si 基板に支えられた $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ ダイアフラム構造を 2 つ作る。その一方にマイクロヒータを、他方にセンサを設け、金 (Au) 線を介して両者を向かい合わせに組み立てる。断面図の中央にある白い部分が Au 線によって制御される約 50 μm の空隙でここから検出対象の微粒子がセンサ部分に侵入、付着する。図 4 と同様、センサは TiO_2 と MgO を添加した Fe_2O_3 に V_2O_5 を添加し

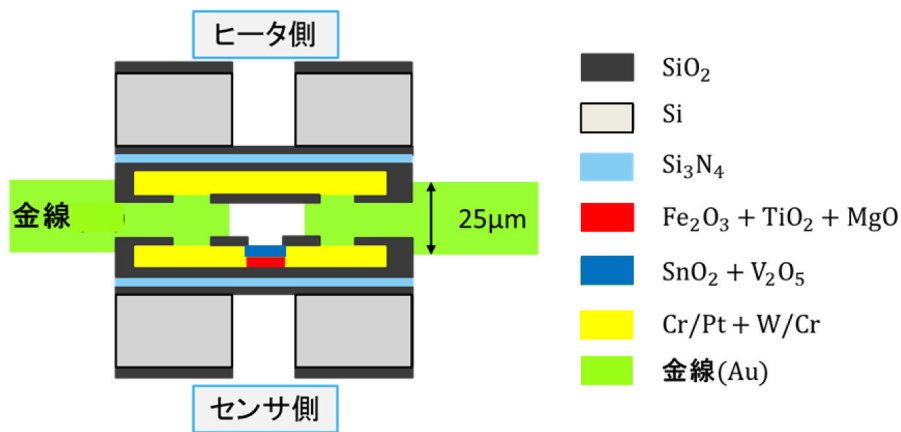


図 7 MEMS 形センサの断面図

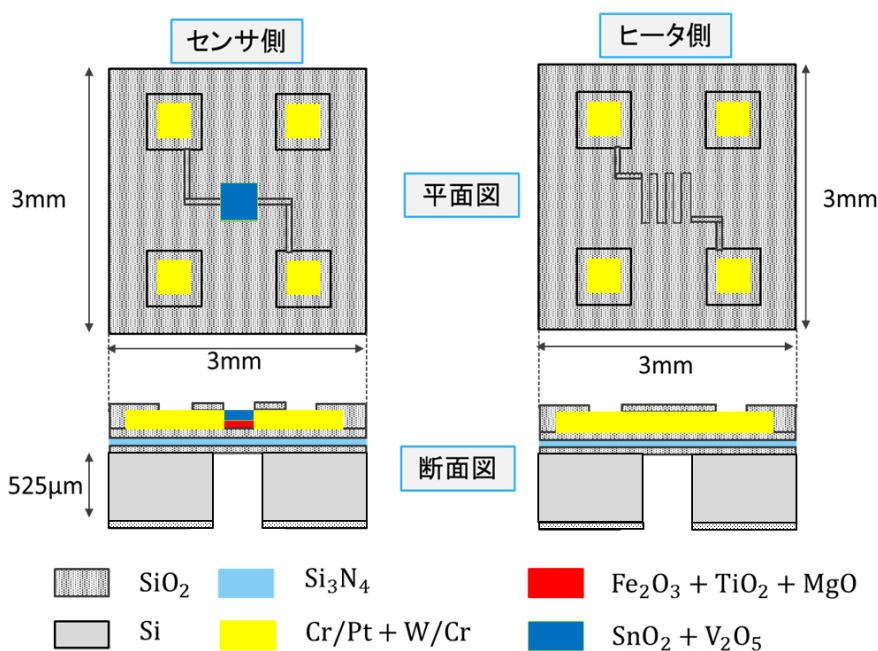


図 8 MEMS 形センサにおけるセンサ部 (左)・マイクロヒータ部 (右) の構造図

た SnO₂ を重ねた 2 層構造である。電極とマイクロヒータはタングステン (W) 添加の白金 (Pt) を用い、SiO₂ との接着性を高めるためクロム (Cr) を挟んでいる。センサとマイクロヒータは対向状態で動作させ、基板をダイヤフラム構造にすることにより、マイクロヒータの熱を効率的にセンサ部に伝える事ができる。また、Au 線の太さによりセンサ部とマイクロヒータ部の空隙を調整して、センサ膜に付着する粒子の大きさを選ぶことができる。Au 線は外部機器への接続にも用いられる。図 8 にはセンサ側、ヒータ側、それぞれの構造図を示した。

3.2 MEMS 形センサの作製工程

MEMS 形センサは図 9 に示す工程で製作した。枠内には下線をつけて工程名を記し、その下に工程内の主要プロセスを記した。センサ部作製の中のリフトオフはホトレジスト加工の一つで、被膜の不要領域をエッチングで除く代わりに、被膜の下にパターン形成したホトレジストとともに引き剥がして除くものである。またホトリソグラフィの中には、エッチングやリフトオフのための窓を設ける SiO₂ のスパッタリング、エッチング工程が含まれる。

3.3 ナノテクプラットフォームを利用して MEMS 形センサを作製

MEMS 形センサ作製工程において主要なプロセスは、ホトリソグラフィ、スパッタリング、基板のエッチングである。薄膜形センサは、ホトリソグラフィとスパッタリングで作られ、プロセスを自前の装置で行った。MEMS

形では深掘りエッチングが加わり、チップの対面固定のためにホトリソグラフィの精度は厳しくなる。装置作りが必要になり、初め、自前の装置で MEMS 形センサの作製に挑戦した。

顕微鏡下でマスク合わせをしてホトレジストのマスク露光を試みた。一辺 30cm の箱の上部に置いた紫外線ランプからの光で露光した。しかし、この手作り露光装置では石英製ホトマスクとウェハの位置合わせを目視で行っていたため、パターンの位置ズレや失敗が多かった。

スパッタリングには、電機大の研究室にあった小型研究用装置を用いたが、4cm 角程度の基板にしか堆積できず、多層膜の堆積には堆積する膜が変わるごとに真空を破る必要があったため、作製に長時間を要した。

ダイヤフラム作製のためのシリコン基板エッチングは、例えば直径 0.3mm の穴を垂直に短時間で開けたい。電機大研究室ではウェットエッチングを用いたが、異方性エッチングのため、穴がテーパを持って広がるのでデバイスを大きくする必要があった。エッチングレートが低く、1 日がかりになった。

原氏は、毎年秋に開催される電気学会主催の「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウムの企業展示でナノテクプラットフォーム共同利用のパフレットを見つけた。2016 年 5 月に打ち合わせを申し込み、6 月末に装置を視察し、7 月に利用を始めた。スパッタリング装置の利用から始まった。利用形態は技術補助で、原氏が大学院生と東大拠点を訪れ、デバイス作製を行った。主に水島彩子氏の技術補助を受けた。

ホトマスクの位置合わせと露光では、PF の光リソグラフィ装置 (マスクアライナ) MA-6 を用い、ホトマスクとウェハの位置合わせを正確に行えた。

ダイヤフラム及び絶縁膜用 SiO₂ 膜の堆積には PF の高

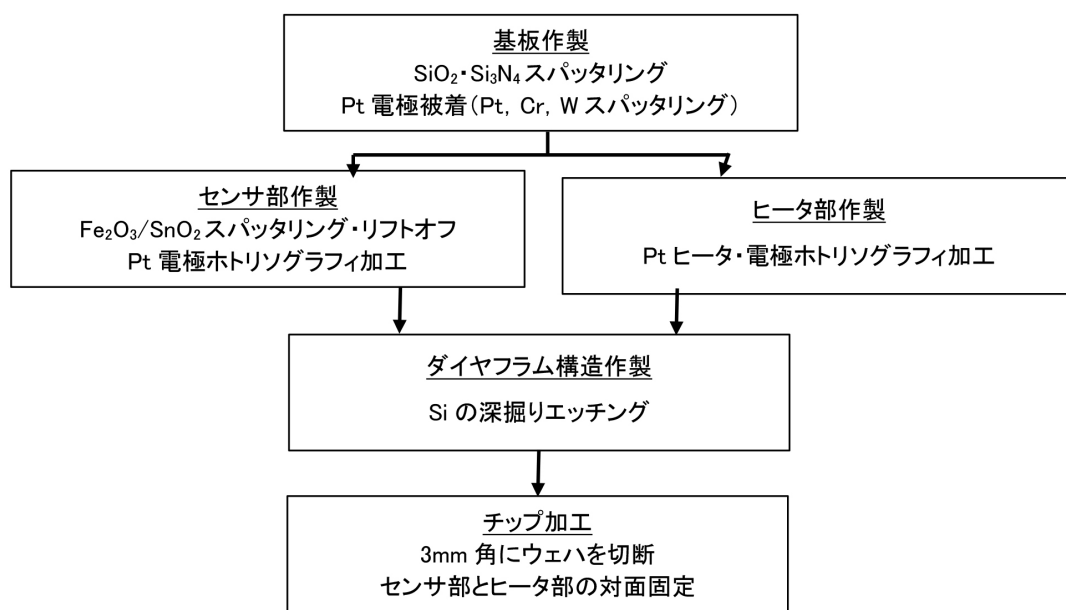


図 9 MEMS 形センサの作製工程

周波スパッタリング装置（8インチ汎用スパッタ装置）ULVAC SIH-450 を利用し、4インチウェハ8枚に同時に堆積できるため、作業時間を短縮できた。また、ダイヤモンド用 Si_3N_4 膜、 Fe_2O_3 センサ膜、ヒータ用の $\text{Cr}/\text{Pt}/\text{Cr}$ 膜の堆積には、高周波スパッタリング装置（高密度汎用スパッタリング装置）芝浦 CFS-4ES を用い、4インチウェハ2枚を同時に堆積できるだけでなく、真空を保ったままターゲットを交換できるため、格段に作業時間が短縮された。多種の材料を使うが、PFには、退職した先生から引き継いだものが豊富にあった。足りない材料は、電機大で用意した。利用にあたってはPFからレシピまで教えて貰い、最適に近い条件から始められた。ホトレジスト除去がうまく行かない時にドライエッチングによる除去法を教えられた。

ダイヤモンド作製のためのシリコン基板エッチングでは、シリコン深掘りエッチング装置 MUC-21 ASE Pegasus を用いた。ドライエッチング（RIE、反応性イオンエッチング）のため、垂直に掘り込めるのでデバイスサイズを小さくできる。チップサイズは薄膜形の10mm角から3mm角になった。

製作のほとんどのプロセスは、東大拠点のクリーンルームで行った。電機大の研究室にはクリーンルームがないため、ほこり、ゴミの付着によるデバイスの不良が多かった。クリーンルームの利用により、歩留まりが向上した。

この結果、ヒータ内蔵の浮遊微粒子を検出する最新型のセンサデバイスが2017年はじめに出来上がった。平成29年度のナノプラット利用成果発表会の資料集に支援員の水島氏は、「原先生自ら学生を引率して実験を行われ、極めて短時間に実測を含む研究成果を得られたという点、研究室の装置とナノプラットフォームの装置を補完的に

利用して成果を得たことが特筆すべき点です。」と記している [8]。

3.4 有機系浮遊粒子状物質を検出する MEMS 形センサの特性

有機系浮遊粒子センサの特性では、容量 5.4L の密閉容器内にセンサを設置し、直流電源によりヒータを加熱する。密閉容器上部からカビの胞子や花粉などの有機系浮遊微粒子を少量ずつ落とし、センサ膜に付着した時の抵抗値の変化をデジタルマルチメータにより測定した。MEMS 形センサでは、ヒータ部とセンサ部の間にある $50\mu\text{m}$ の空隙が上下に貫通するようセンサを垂直に置く。薄膜形センサの動作温度は 425°C に設定した。MEMS 形センサの場合は対向させているマイクロヒータを $550^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ に加熱し、センサ部は $330^\circ\text{C} \sim 360^\circ\text{C}$ で動作していると見積られる。

2.2 節で、薄膜形センサの応答が検出粒子により変わることを示したが、図6のカビ胞子に対する薄膜形センサの応答に MEMS 形の応答を追加して、センサの応答を比較した（図10）。カビの胞子がセンサに付着すると抵抗値が急激に減少し、その後、センサ表面でカビの胞子が燃失することにより、元の抵抗値まで回復する。薄膜形センサの抵抗値減少率が約 34.2% であるのに対し、MEMS 形では 69.3% と大きくなった。一方、回復時間は 3.2s から 29.5s となった。同様の測定を松花粉について行って比較した結果を纏めて表1に示した。MEMS 形では抵抗減少率が大きく、回復時間が長い。MEMS 形はセンサ膜が小さく、粒子サイズにより適した大きさであるため応答が大きくなり、加熱温度が低いいため燃失に時間

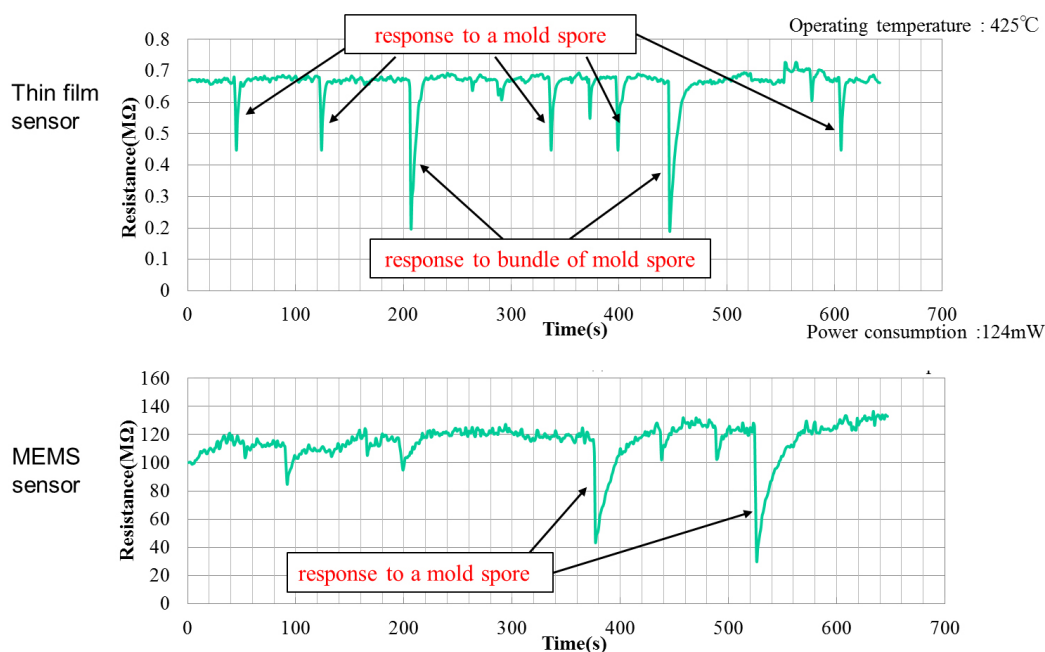


図10 カビ胞子に対するセンサ応答の薄膜形と MEMS 形の比較

表 1 薄膜形センサと MEMS 形センサの比較

	抵抗減少率 (%)		回復時間 (s)	
	薄膜形	MEMS 形	薄膜形	MEMS 形
浮遊粒子				
カビの孢子	34.2	69.3	3,2	29.5
松花粉	65.9	95.1	9.5	99

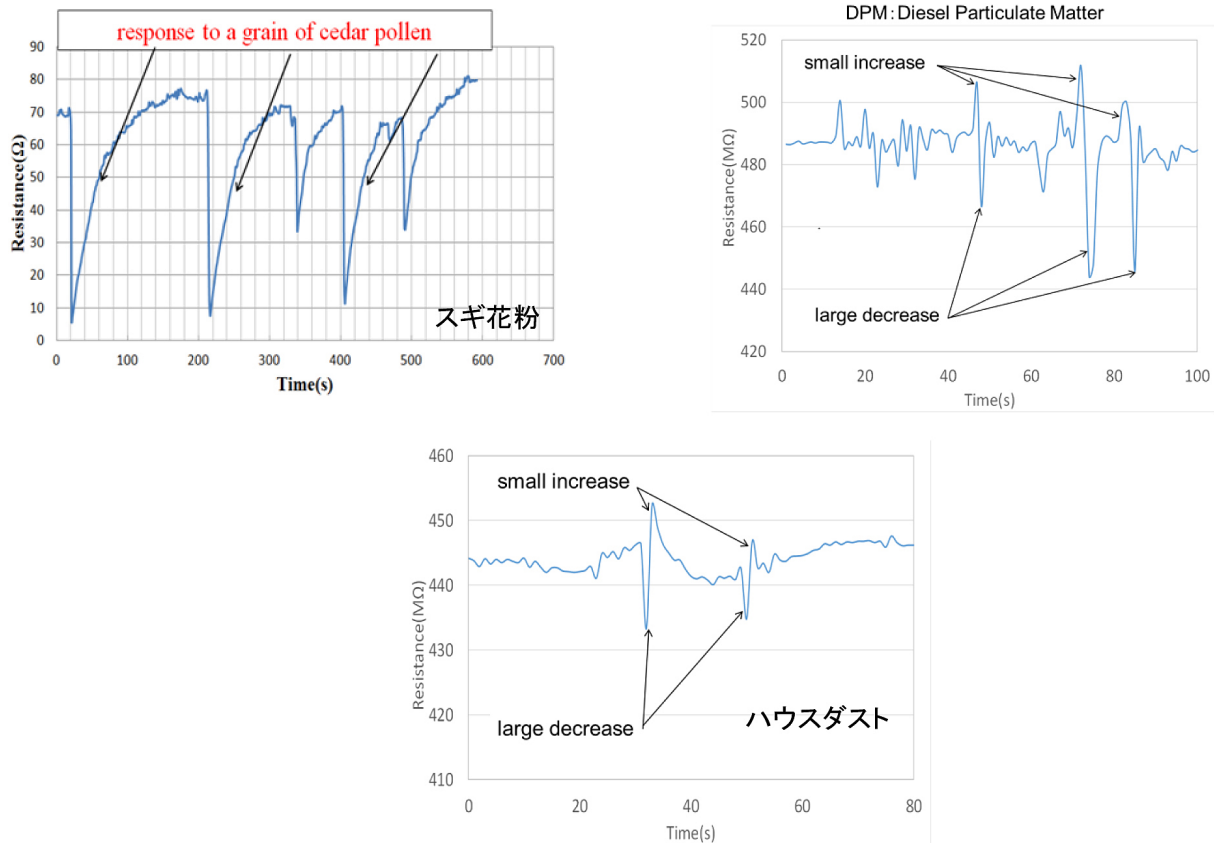


図 11 MEMS 形センサによるスギ花粉 (左上), DPM (右上), およびハウスダスト (下) の検出

がかかるため回復時間が長くなっている。

応答の大きい MEMS 形センサができたので、測定微粒子の種類を広げた。図 11 上段にはスギ花粉と、ディーゼルエンジン排気ガス (DPM, Diesel Particulate Matter) の例を示す。スギ花粉では、松花粉同様 88.9% の大きな抵抗減少率が見られた。DPM では抵抗値が一瞬下がる花粉と同様の応答に加え、逆に一瞬上がる応答が見られた。前者は有機浮遊粒子によるもの、後者は DPM に含まれる硫酸塩等によるものと考えられる。ハウスダストでも同様の検出ができた (図 11 下段)。



4. 今後の展開 ～センサ材料開発・計測・洗練されたデバイス・応用展開～

原氏は長年にわたりガスや微粒子を検出するセンサ材料を開発してきた。WO₃ 系センサ材料を開発し、水素ガ

スの高感度センサを開発している [9]。本稿の微粒子検出には Fe₂O₃/SnO₂ を開発・適用したが、SnO₂ 系は水素を含む多種多様なガスに対する感度が高く、測定環境によっては有機系微粒子の測定に影響を及ぼす可能性がある。そこで ZnO 薄膜センサを開発した [10]。アルミナ基板上に 5mol% の TiO₂ と 3mol% の Cr₂O₃ を添加した ZnO を 250nm 堆積させた。TiO₂ はドナーとして働き、Cr₂O₃ は焼結性を抑制する。ZnO 薄膜センサは、図 12 左のようにスギ花粉に対して Fe₂O₃/SnO₂ センサと同等の応答を示し、ガス中に対する大気中の電気抵抗の比で定義されるガス感度は多くのガスで 1.1 以下と小さいことを確認した (図 12 右)。

図 11 に示したスギ花粉、DPM、ハウスダストの検出における電気抵抗の変化は、検出対象ごとに異なる特徴が見られる。スギ花粉では抵抗が減少するのみであるのに対し、DPM では抵抗減少の前に一旦増加する。DPM の中心部は花粉同様、C で構成されるが、周縁部に S や

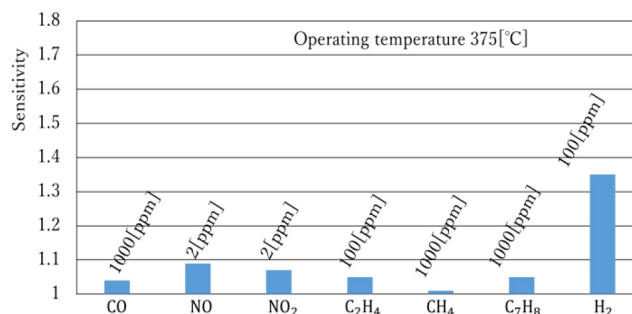
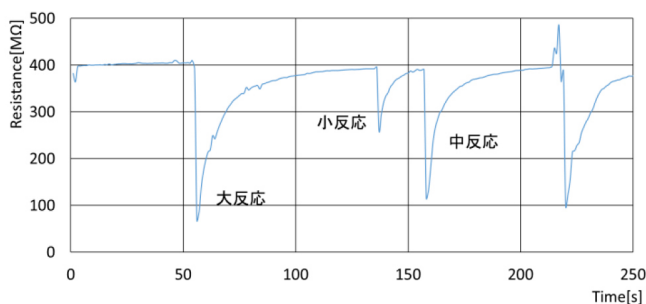


図 12 ガスの影響の少ない ZnO 花粉検出センサ (抵抗変化 (左) とガスの感度 (右))

N を含む層を伴う。吸着酸素との反応の結果生じる SO_2 , NO_2 は酸化性ガスであるので、初め、電子を奪って抵抗が上がる。DPM が外側から酸化した後、中心部の C が酸化するとセンサ膜に電子を与え抵抗が下がる。ハウスダストにはダニの死骸が含まれ、死骸内部のたんぱく質中のアミノ酸が燃える。こういった違いがあるので、粒子のサイズだけでなく粒子の区別ができ、同定までは行かないが、スクリーニングにはなる。時系列データから判別するためにはソフトウェアの開発も必要になる。

MEMS 形センサは絶縁体のダイヤモンド上にセンサまたはヒータが載り、断熱性が優れ、丈夫で作りやすい。小型・安価なセンサができたが、センサ部とヒータ部は別チップで構成され、一体化できていない。プラットフォームには良い装置があるので一体化に再挑戦している。実用化にはセンサの容器や空気の流れを考えたデバイス構造が必要になる。さらに、センサにはヘッドアンプをつけて検出信号を増幅するなど測定器としてまとめることも必要になる。

本成果の意義は、これまでに知られていなかった原理を利用した小型・安価なセンサで、有機系浮遊粒子を検出できることである。WHO は汚染された空気を吸う結果、毎年、700 万人が死んでいると報告し、空気中に浮遊する微粒子の簡単なセンサに関心が高まっている。身の回りをモニタするようセンサをスマホに付けたり、家庭の空気清浄機に組み込むこともできよう。インフルエンザウイルスは飛行機で運ばれるという。入国管理の際にサーモグラフィで発熱した感染者を見つけようとしている。本研究のセンサで最終的にはウイルス検出まで進みたいという。ウイルスを痰から分離して浮遊微粒子として検出する。バイオテロの早期発見にも使えるだろうと、様々な期待を原氏は語られた。開発したセンサには 10 社近いメーカーが関心を寄せているという。応用展開の進展が期待される。



東京電機大学における原氏の、長年積み上げてきた酸化半導体センサ技術が、LSI 教育研究に向けて整備され

た東大拠点において培ってきた三田氏の MEMS 技術の支援により、有機系浮遊粒子状物質を検出する MEMS 形センサという実用に向かい得るデバイスとして実を結んだ。東大拠点の微細加工プラットフォームに整備された、大学の 1 研究室では持ち得ない、最先端の設備や多数の装置を、プラットフォームメンバーの支援のもとに活用することによって得られた成果である。開発されたデバイスは、PM2.5、スギ花粉、ハウスダスト、さらには国外から持ち込まれるウイルスなど、環境を汚染し健康被害を及ぼす浮遊粒子の小型、安価な検出器となる。保健機関などの関心は表立っていないが、メーカーは興味を示し始めた。デバイス化の成功は、センサ開発の夢をさらに膨らませている。健康的な大気環境をもたらすのに必要な大気中浮遊微粒子センサの開発の進展を期待したい。



- [1] 超微細リソグラフィー・ナノ計測拠点 (東京大学): <https://www.nanonet.go.jp/ntj/insti/u-tokyo/nf/>
<http://nanotechnet.t.u-tokyo.ac.jp>
- [2] 三田吉郎, 「MEMS デバイス徹底入門」, 日刊工業新聞社 2018 年 8 月 29 日発行
- [3] 水流添 圭, 笹川 大輔, 山口 富治, 原 和裕, 「カビの胞子および花粉を検出するリアルタイムモニタリング用マイクロセンサの研究」, 第 32 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 29pm3-PS-85 (2015 年 10 月)
- [4] Kei Tsuruzoe and Kazuhiro Hara, "Micro Sensors for Real-Time Monitoring of Mold Spores and Pollen", Proceedings of the 8th International Conference on Biomedical Electronics and Devices, pp. 174-179 (January, 2015)
- [5] 「半導体 IC 技術を用いた環境計測用センサの開発」電子応用研究室 原 和裕 教授, 東京電機大学工学部電気電子工学科 HP <http://www.eee.dendai.ac.jp/eee/labo/hara/hara.html>
- [6] 「半導体薄膜を用いた有機系浮遊微粒子, およびガス, においセンサの研究」原 和裕, 第 63 回化学セン

サ研究発表会, 特別講演 2, 平成 30 年 3 月 10 日;
Chemical Sensors, Vol. 34 Supplement A (2018) pp.
76-78

[7] Naomichi Jimbo, Ren Horiuchi, Tomiharu Yamaguchi,
and Kazuhiro Hara, "MEMS-Based Conductometric
Sensors for Organic Airborne Particles", Proceedings
of 17th International Meeting on Chemical Sensors -
IMCS 2018, pp. 570-571 (2018-07-15 - 2018-07-19)

[8] 「有機系浮遊粒子状物質を検出する MEMS 形センサ
の開発」 東京電機大学大学院工学研究科 原 和
裕, 神保直道 文部科学省ナノテクノロジープラト
フォーム 平成 29 年度 利用成果発表会資料集 p.22
(2017.10.20)

[9] 「空隙のある多層薄膜を用いた高感度ガスセンサ」
東京電機大学 工学部 電気電子工学科 教
授 原 和裕 新技術説明会 2017.1.31 (H₂ 検
知, WO₃ 系センサ): [https://shingi.jst.go.jp/var/
rev0/0000/6703/2016_chizaigun_1-1.pdf](https://shingi.jst.go.jp/var/rev0/0000/6703/2016_chizaigun_1-1.pdf)

[10] 堀内 蓮, 山口 富治, 原 和裕, 「花粉を検出する
ZnO 薄膜センサの研究」, 第 35 回「センサ・マイク
ロマシンと応用システム」シンポジウム (2018 年
11 月 1 日)

(図はすべて原氏と三田氏から提供された)

(古寺 博)



【お問い合わせ】

微細加工プラットフォーム

東京大学

☎ 03-5841-1506

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

ホームページ

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