

わたしたちの研究 (10) ナノ・マイクロシステム工学研究室

土屋智由 (H3/1991卒)



1. 自己紹介

生まれは神奈川県横浜市です。横浜いいですね、と言われ、金沢区でふつうの町ですよという、八景島とかあっていいところですよと返されます。東大の理1から精密機械工学科に進み、研究室は須賀唯知先生の研究室に入りました。須賀先生は表面活性化常温接合の研究で知られていますが、私は3年先輩の伊藤寿造さん（現在東大精密機械工学教授）とともに原子間力顕微鏡（AFM）の自己検出型微小力センサをテーマとしました。当時は1986年にノーベル賞が授与されたAFMも面白そうでしたし、半導体全盛期だったので微細加工でセンサを製作するという研究が興味を引きました（実はちょっと違い、これを話すとまた長くなるので、そういうことにしておきます）。まだ、大学には微細加工の設備などはありませんでしたので、研究室に入ったとたんに週3回、国分寺にある日立製作所の中央研究所に通うことになりました。ここから修士の途中まで約2年間通い、微細加工技術を一から学びました。図1は卒論で製作したZnOを用いた圧電薄膜自己検出型微小力センサです。修論では圧電膜にチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）圧電膜を用いることになり（成膜装置もなかったの）ゾルゲル法での成膜プロセスを検討していました。成膜だけでなく物性の測定、センサだけでなくアクチュエータの応用などほとんどすべて自分で立ち上げて研究を進めていました。この時の経験が今でも役に立っています。

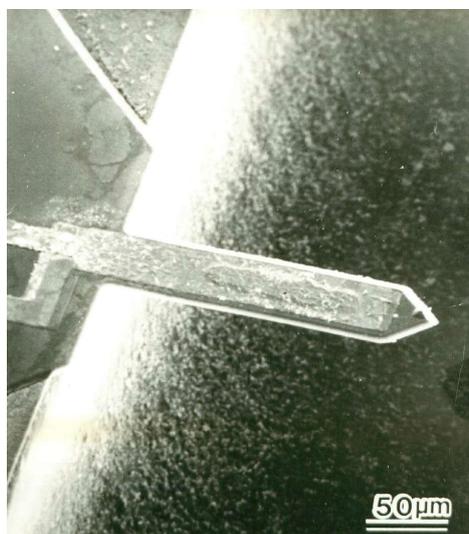


図1 圧電薄膜自己検出型微小力センサ

博士前期（修士）課程修了後、[株式会社豊田中央研究所](#)に就職しました。きっかけは須賀先生が主宰されていた研究会で副所長の五十嵐伊勢美さんとお会いし、その研究と人柄に惹かれ、豊田中研って面白そうと思ったこと。また、長距離通学に疲れて首都圏を離れたくなったこともあります。約11年勤めましたが後述する微小電気機械システム（MEMS）センサ、アクチュエータの研究とマイクロスケールの材料の機械特性評価の研究を中心にしていました。途中、株主会社の製品開発への協力や新規テーマの開拓なども実施、社内ベンチャーの提案もしました。1999年から3年間、国内留学の制度を使い名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻で社会人博士課程に入り、学位を取得しました。指導教員は[佐藤一雄](#)先生です。佐藤先生は日立製作所のご出身で私が学生の時に通っていた部署のリーダーだったという縁で指導いただきました。

そして、2004年3月に京都大学に機械工学専攻の助教授として採用されました。きっかけは当分野の前任の教授である[田畑修](#)先生（現京都先端科学大学工学部長）に声をかけていただいたのですが、その田畑先生は豊田中研に私が就職した時の最初の直属の上司でした。声がかかるまではまさか京大にお世話になるとは全く想像もしていなかったので採用がほぼ決まった2004年1月に吉田キャンパスを訪れるまで一度も京都大学のキャンパスに来たことがありませんでした。2019年9月にマイクロエンジニアリング専攻構造材料強度学講座の教授に昇任し、2020年2月に現分野に配置換えされました。京大機械系にお世話になってもうすぐ18年になります。

教授になるとともに京都大学の微細加工設備の共用施設である学際融合教育研究推進センター・[ナノテクノロジーハブ拠点ユニット](#)のユニット長も務めています。ナノ・マイクロ加工の設備を学内外に広く共用している施設です。装置導入から関わらせていただき、10年経ちました。宣伝になりますが最先端の装置と優秀なスタッフで幅広い分野でニーズが高まるデバイスの作製、ナノ材料の創製、加工の支援をしておりますので、ぜひご利用ください。

2. ナノ・マイクロシステム工学分野

当分野は1994年の大学院重点化改組時に機械工学専攻に機械設計制御工学講座マイクロマシン分野として新設され、2005年の改組時にマイクロエンジニアリング専攻ナノシステム創製工学講座ナノ・マイクロシステム工学分野となり、現

在に至ります。教授は1996年より鷲津正夫先生が6年間、2003年から田畑修先生が18年間在籍しておられました。現在の教員は教授の土屋、昨年（2021年）12月に着任した准教授の廣谷潤先生、外国人教員の講師、Amit Banerjee先生の3名です。今カバーしようとしている研究テーマを図2に示しました。廣谷先生は九州大学の高橋厚史先生の研究室でカーボンナノチューブの熱物性測定で学位を取得し、その後名古屋大学で助教を務め、フレキシブルトランジスタの研究を大野雄高先生の研究室で行い、最近では2次元材料を用いた熱流束の制御デバイスの提案をしています。Amit Banerjee先生はインド工科大学カンプール校で集束イオンビーム（FIB）加工で製作したナノ振動子の研究で学位を取得し、香港城市大学でダイヤモンドナノ構造の強度評価の研究を行ったのちに、現在ではナノ共振子の研究、ガスセンサへの応用を行っています。詳しくは研究室のウェブサイトをご覧ください。以下は土屋の研究紹介というよりは雑感に近いところです。

研究室構成員



教授 土屋 智由



准教授 廣谷 潤



講師 Amit Banerjee

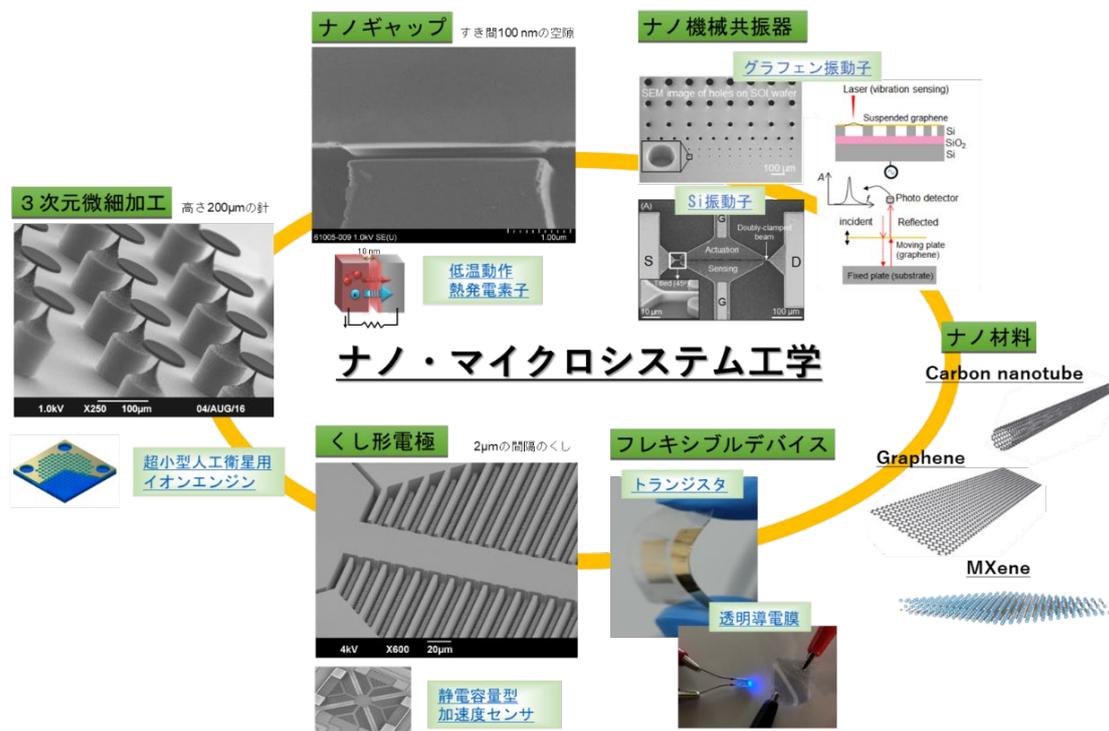


図2 ナノ・マイクロシステム工学分野

3. MEMS

MEMSとはひらたく言えば微小な機械システムなので、電氣的な入出力があつて機械的な要素が何かあつたらなんでも含まれるという認識でよいと思いますが、1990年代に米国政府機関の出資で設置された機関World Technology Evaluation Centerが1994年に実施した“Microelectromechanical Systems in Japan”の[調査報告書](#)の定義が一文ですべての要件を表し、私の感覚では最もフィットしています。

"MEMS" means batch-fabricated miniature devices that convert physical parameters to or from electrical signals and that depend on mechanical structures or parameters in important ways for their operation.

- ・ 小さな素子
- ・ 一括加工 (batch fabrication) (≡半導体微細加工) によって製作
- ・ 電気信号を入出力し、これを物理量に (いずれかの方向に) 変換
- ・ 機械構造や機械量がその動作原理

小さいということで特に製作技術がいわゆる機械とは異なり、別扱いされていますが本質は機械システムであり、マイクロ・ナノスケールでの機械工学の理解が求められています。

その代表例が各種センサです。特に、角速度センサである振動型ジャイロ스코ープ (以下ジャイロ) は常時一定振動する振動子に作用するコリオリ力を検出する精緻な機械システムであり、その加工、動作、制御に機械工学の知識を広範に、また深く理解していることが必要です。近年では自動運転車への適用を目指して、バイアス安定性が $0.1\sim 1^\circ/\text{hr}$ であることが要求されています。地球の自転速度が $15^\circ/\text{hr}$ であることを考えるとその精度がわかると思います。さて、ジャイロを振動の制御として考えると今そのセンサの機械構造に求められている精度としては考えられないほどに高いものになっています。つまり、一定振動の振幅に対して、コリオリ力で発生する振動の振幅はフルスケールでその1000分の1以下であり、上記のバイアス安定性を実現するには100万分の1以下の振動、pm以下の振幅を制御しなければならないとされています。

私は車載用の低コストでほどほどの精度が要求される[ジャイロの研究](#)からスタートして、現在では高価格ですが高精度が得られる光ジャイロと同程度の性能を車載応用適用なレベルでの価格で実現するための研究を行っています。ジャイロ

の性能の鍵は振動の安定性と出力の大きさです。これを高いQ値と高い電気機械結合係数を有する単結晶の圧電材料であるニオブ酸リチウムで実現する研究を企業との共同で進めています。単結晶材料は機械的損失が小さいことが期待されますが、一方でジャイロとしては振動特性の等方性が必要であるので材料特性の異方性が課題になります。そこで、最適な結晶方位を探索し、圧電定数、電気機械結合係数を大きくするための電極配置の工夫をして、[図3](#)に示すような[ディスク型の振動子を試作](#)しました。たった1枚のディスクですが、多自由度の振動子であり、圧電アクチュエータ、センサであり、電極配線が行われています。設計にはこれらすべてを考慮しながら、外部の回路、制御系の設計が必要であり、研究としてまた将来の応用デバイス開発として今なおとても面白い対象だと思って研究しています。



[図3](#) ニオブ酸リチウム単結晶を用いた圧電ディスク型ジャイロスコープ

4. シリコン

MEMSで構造材料といえばシリコンです。その優れた機械的特性（高い比弾性率、熱伝導率、低熱膨張率）は鉄鋼材料を凌駕するものです。ただ、脆性材料です。シリコンとても高い降伏応力を示しますが、降伏＝破壊であり、それはcatastrophicな現象です。自動車会社の研究所に務め、MEMSの研究をする立場ではこの問題を解決しなければ前に進めないことは明らかでした。そこでシリコンの機械的信頼性評価の研究をセンサ開発と同時にすることになりました。引張試験や疲労試験の手法開発から、強度、信頼性データの解析までこれも幅広く行いました。やってしまえば当たり前ですが、[シリコンの破壊](#)はほとんどの場合で表面の加工粗さに支配されており、その加工粗さがばらつきを持つので統計的解析を行います。ですので、破壊は確率論で、絶対に壊れないとは言えないです。特に、疲労試験、つまり繰り返し荷重による強度低下、長期の信頼性をいかに保証

するか、そもそも疲労破壊のメカニズムはなどの疑問についてはいまだに答えを出すことができていません。十分に高い安全率を見込めば長い時間を動作させることは可能であるとの理解はされましたが、近年では過酷な環境で使用されるデバイスについてもシリコンの構造体を使いたいという要求も多いです。特にこれも自動運転車で注目されているLiDAR (light detection and ranging) に用いられる光スキャナは従来にない大きなひずみを構造に加えることとなります。そのような中で[シリコンの信頼性](#)向上の手段、またメカニズムを明らかにしたいと今でも考えています。

興味深いことに半導体微細加工で製作された単結晶シリコンの部品は今では腕時計のムーブメントの[ギヤ](#)、[がんぎ車](#)、[ひげゼンマイ](#)に用いられています。つまり数mmの機械部品に使うことはある範囲で可能であるということです。cm、mスケールの部品がシリコンで作られることは当面ないと思いますが、シリコンウエハから一括で多数得られる寸法での機械部品としての応用はまだまだ広がると期待し、機械加工でシリコンインゴットからエンジンでも作れたら面白いなあと妄想しています。

5. これから

上記の研究は振り返ってみると豊田中研時代に始めてかれこれ30年近くやっていることとなります。様々な発見、理解がMEMSの幅広い応用に展開されればと祈りながら研究を進めています。その中で今行っている新たな展開として2つのテーマを紹介いたします。

一つは、MEMSを計測装置として用いることです。それってセンサのこと？と思われるかもしれませんが、そうです。ですが、物理量の測定ではなく、物理現象の測定に使いたいと思っています。大学に来てから、[ナノ材料の引張試験](#)というのをまず手掛けてきました。最近ではナノスケールの空間の物理現象を測定する実験をしています。数~100 nmくらいの隙間 ([図4](#)) を作って、熱、電子などのエネルギーキャリアの輸送を計測できたら面白いかなと思っています。ポイントは面積をなるべく大きくしたい、隙間は均一で極限まで小さくしたいということで、単結晶シリコンの梁を(111)面でへき開破壊してコンフォーマルなギャップを作り、この間隔をMEMSで制御しながら、温度、電流、力、変位などを測定して、[熱輸送の近接場効果](#)、[電子放出](#)、カシミール効果などを調べています。

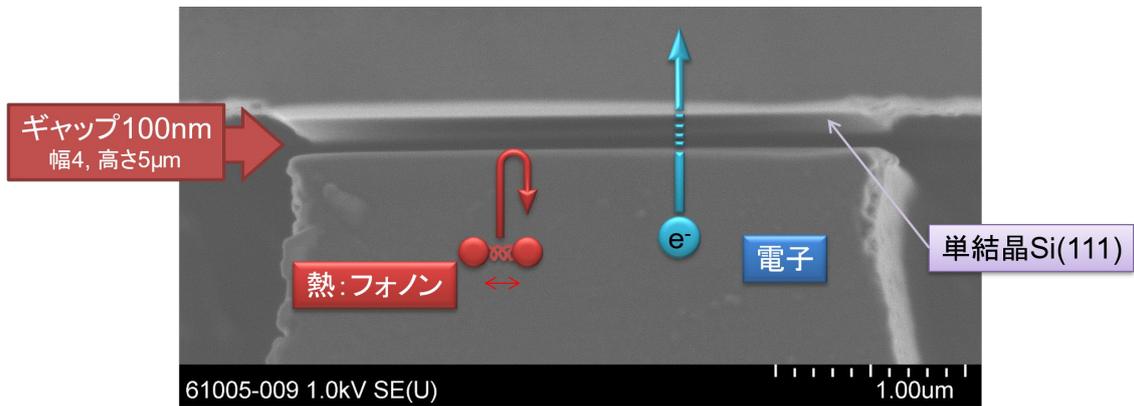


図4 単結晶シリコンのへき開により作製した大面積ナノギャップ

もう一つは機械学習です。いわゆる神経回路網（neural network; NN）をMEMSの機械構造で実現することをめざしています。NNの実装の一つとしてリザーバーコンピューティング（reservoir computing; RC）が注目されています。ここでは再帰型NNの中間層を様々な非線形物理現象で実装するもので、これを物理リザーバーと呼びます。物理リザーバーをMEMSで作製し、同時にセンサと一体化することができれば、物理量の検知だけでなく、認識や分析、さらにはこれらに基づく判断、行動までを機械構造のみで実現できる、実現したいというのが究極の目標です。現在は加速度センサを用いたMEMS-RCを試しているところです。これこそ真の機械システムかなと思ってしばらく頑張ってみたいと思っています。

6. 最後に

教授になり、研究室を主宰して2年が過ぎスタッフもそろいましたので、これから勝負だと思っています。スタッフそれぞれの強みを生かし合い、また、学内外の研究者との協力を進めながら我々にしかできない研究を進めていきたいと考えています。