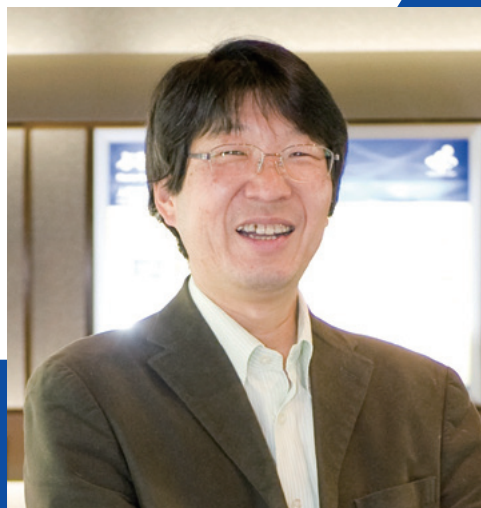


# 挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



山口浩司

NTT 物性科学基礎研究所  
上席特別研究員

## 「人とは違うゴール」 を設定し、ピボット 戦法で臨む

光通信が普及するとともに、その高速性や省電力性を実現するための、光や電気・電子の物性に関する研究の成果が実用化されてきています。光や電気・電子の物性に加えて機械の物性の相互作用により、新たな物理現象が発見・解明されてきています。この比較的新しい研究分野であるナノメカニクスにおける応用技術で、世界初の成果を立て続けに生み出している山口浩司NTT 物性科学基礎研究所 上席特別研究員に、新しい応用技術の研究と研究者としてのあり方を伺いました。



### 材料へのこだわりで新たな 微細機械素子を開発

現在、手掛けている研究について教えてください。

ミクロンスケールの微細な半導体立体構造を作製し、その機械的な機能を用いた新原理の素子開発をめざしています。具体的には、非常に純度の高い半導体結晶を用いて超微細な機械構造素子（例えば板バネの構造を持った素子）をつくり、そこに光・電気・機械の3つの物性を融合することで発生する新しい物理現象を発見・解明し、その原理を応用した新しい素子を開発することをめざしています。半導体材料を用いると、電圧を加えることで物体を膨張・

収縮させることが可能となります。この効果は圧電効果と呼ばれますが、もともと半導体が有している光電的な性質と合わせることで、光、電気、機械振動の3種類の信号の変換が可能になります。光と電気の相互作用に機械的な振動という新たな自由度が加わることで、新しい物理現象が発現し、超高感度の電気・光・分子センサや新しい信号処理技術への応用技術が拓かれます。さらに、電子の量子力学的な性質が出現する量子井戸や量子ドットなどの半導体量子構造との融合により、新しいハイブリッド量子素子への応用も可能になります。

私たちの研究では、機械振動を引き起こす微細構造素子として、学術的かつ実用的な観点両面から注目が集まる

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)\*<sup>1</sup>や微細化をさらに進めたNEMS (Nano Electro Mechanical Systems) を用いることにより新しい応用技術の研究を進めています。これまでに、MEMSに対してレーザに類似した原理を適用することで非常に高精度・高品質な超音波振動を出力できる超音波レーザ (SASER: Sound Amplification by Stimulated Emission of Radiation) (図1) や、機械素子の微細な動きから僅かな重さや電荷の変化を検知できる超高感度センサ (図2)、弾性振動を用いたメモリやプロセッサといった信号処理素子等、さまざまな機能性機械素子を実現してきました。

**世界的な成果を上げていらっしゃるとういきました。ご紹介いただけますか。**

光のフォトニック結晶\*<sup>2</sup>の概念を、物質の弾性振動で

\*1 MEMS: 半導体集積回路を作製する微細加工技術を応用し、数ミリメートルから数ミクロンのサイズの機械構造をチップ上に集積する技術であるマイクロマシンのうち、電気的な機能を含むもの。

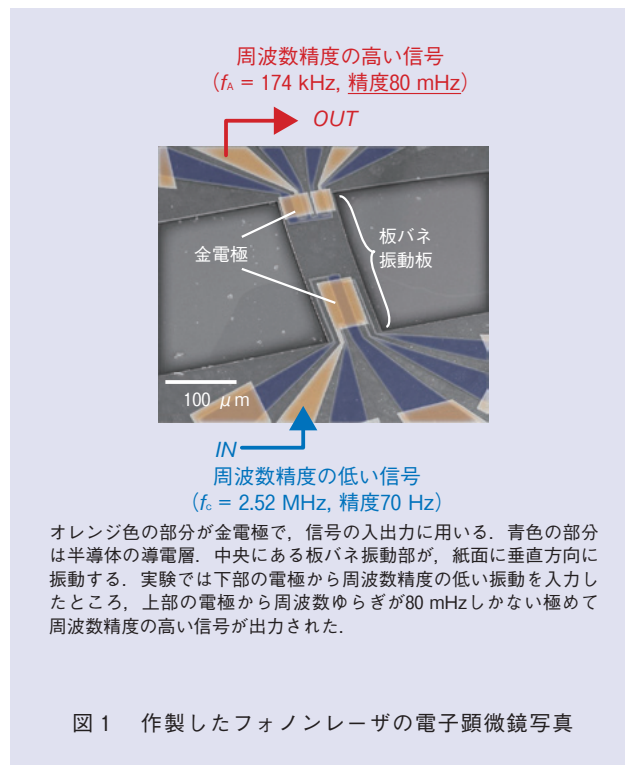
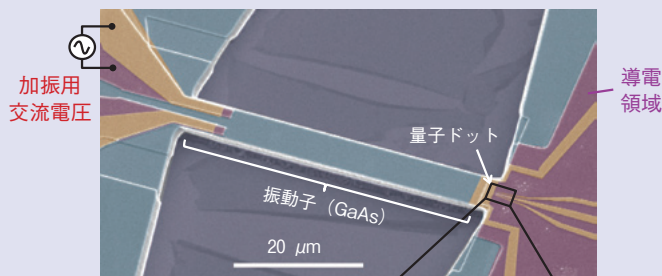


図1 作製したフォノンレーザの電子顕微鏡写真

(a) 量子ドットを用いた超高感度振動センサ。振動子が上下に振動することにより、支持部に組み込んだ量子ドットに歪が加わる。この歪を電流として測定することにより、高い感度の振動検出が可能となる。



(b) 支持部に埋め込んだ量子ドットの拡大図。黄色に見える部分は表面に蒸着した金電極で、この電極に負電圧を印加することにより、量子ドットを形成する。

図2 超高感度センサ

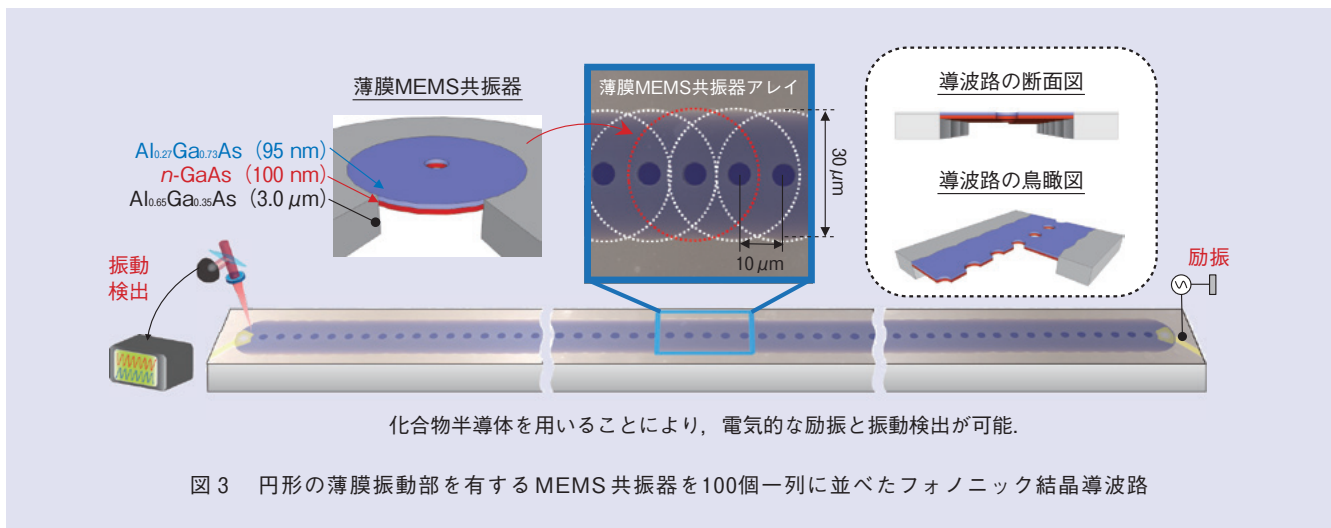


図3 円形の薄膜振動部を有するMEMS共振器を100個一列に並べたフォノン結晶導波路

ある「フォノン（音や振動，熱の媒体）」の制御に応用した「フォノン結晶」と呼ばれる人工結晶は，フォノンが伝搬を担っている音や振動，熱等を制御できる新しいカテゴリーの機能素子として注目されています。このフォノン結晶は，異なる弾性体をマイクロスケールで周期的に配列した人工構造（図3）ですが，従来のフォノン結晶ではその動作を外部から電氣的に制御することが困難であったことから，動的デバイスとしての応用は限定されてきました。私たちは振動特性の電氣的制御が可能な半導体MEMS共振器をフォノン結晶の基本素子として用いることにより，フォノンの伝搬を電氣的に制御することに世界で初めて成功しました。この成果は2014年に英国科学雑誌『Nature Nanotechnology』に掲載されました<sup>(1)</sup>。また，2018年には，超音波振動の「流れ」を操ることができるフォノン結晶を用いて，波形圧縮による信号の増幅動作を実証しました。この成果は英国科学雑誌『Nature Communications』のオンライン版に公開されました<sup>(2)</sup>。超音波信号を活用する素子は携帯端末などにおいて広く使われていますが，その高度制御が可能となれば，さまざまな新しい応用技術が広まるものと期待しています。

こうした成果をさらに発展させ，最近では，素子の非線形効果を活用したカオスやソリトン<sup>\*3</sup>の生成をはじめとするより高度な超音波振動の制御技術に取り組んでいます。また，素子の微細化・高速化を進め，ギガヘルツ（GHz）の高周波数振動で動作するフォノン結晶素子の実現にも成功しています。

カオスやソリトンの生成など，非線形性によって出現する新しい機能は，機械素子の機能を大幅に拡張できる可能性を秘めています。例えばソリトンは光ファイバにおいて生成されることが知られていますが，伝搬により形状が変化しない特殊な波として注目されています。このような超音波信号を機械素子によって生成できれば，高効率に信号処理ができる半導体素子が開発できる可能性があります。また，機械素子によるカオスの応用についてですが，最近では機械学習を効率的に行える可能性が注目されており，その制御手法が盛んに研究されています。これらの技術は，

\*2 フォトニック結晶：屈折率が光の波長と同程度の長さで周期的に変調された構造を持つ物質。

\*3 ソリトン：伝搬の過程においてもその波形が乱れない孤立波（基本ソリトン），または波形が周期的に圧縮と拡大を繰り返すソリトン（高次ソリトン）。

携帯電話をはじめとする移動体通信システムやIoT技術など、低消費電力化や、小型・集積化が必要となる場面で幅広く活用できることが期待されます。

今後は機械素子の最大の弱点である速度の遅さの克服や、化合物半導体を用いて行ってきた実証実験をより優れた特性の他の材料に展開することにも注力していきたいと考えています。物性や応用物理の専門家でないとも材料を変えることの重要性や実現が困難な部分に分かりにくいかもしれませんが、少し材料が変わるだけでも作製方法やその効果が全く違います。しかしながら一方では、異なる材料によりベストな成果を生み出すにはそれなりの時間を必要とします。私たちは基礎研究を担っているので息の長い話になりますが、3年から5年くらいをかけて新しい材料による技術を粘り強く研究していきたいと考えています。



## アンテナを高く・広く張る、 電波を飛ばす、電波をキャッチする

世界初を連続して出すというのはどのようなお気持ちでしょうか。

世界初というものは、すなわち誰も過去に主張していないことを発表するわけで、当然ですが、最初に発表するにはそれなりの覚悟がいります。最初であるがゆえ、解釈が間違っている場合もありますし、多くの反論も予想されますが、これにひるむことなく発表しようとする決断が大事です。もちろん、反論に対する準備もある程度整えておくことも必要です。フォノンが有する多様なダイナミクスを活用したフォノンレーザの実現に関する研究発表をした2013年のことです。化合物半導体から作製されたMEMSはその振動応答に非線形な効果が現れるのですが、この非線形現象を活用すると異なる振動モード間の相互作用が誘起され、高品質な超音波振動の出力が可能になることを見出しました。この原理は光のレーザに類似したものであったため、私たちはフォノンのレーザと呼んで発表しましたが、私たちの成果を「レーザとみなしてよいのか」につ

いてはさまざまな意見がありました。世界初の成果を発表することは、こうした反論も含めて物議を醸すということでもあり、そこにあえて飛び込んでいくには勇気がいります。ただ、恐れてばかりではせっかくの成果も発表できずに終わってしまいますから、どこかで決断をしなくてはなりません。実はこのフォノンレーザの発表は、その後、米国物理学会において、“2013 Highlights of the Year”と題した年間ベスト11論文の1つに選出され、幅広い物理学のあらゆる分野からもっとも反響のあった成果の1つとして紹介されました。そういう意味では、学会の多くの研究者に広く受け入れられた成果だったと思っています。新しい成果であればあるほど、多少の異なる意見があっても思い切って自分の考えで発表することは、とても大事なように思います。

研究をする際、一番大切にされてきたことは何でしょうか。

私は研究者として、人と違うゴールを設定することを一番の基本としてきました。同じゴールを描いていると、研究の目的を説明するのは容易になるのですが、ほかの研究者との方法論において差を見出すことになってしまい、残念ながら研究自体の選択の幅は狭まってしまいます。ゴールが広く注目される研究分野においては、世界中の主要研究機関が多額の研究費を使い、優秀な研究者を束ねて競争をしています。学生のレベル1つとっても、海外の有名大学の学生は自主性と知識、能力のすべてにわたり極めて優秀で、そのような学生が束になって同じゴールをめざして競争しているわけです。確かに日本の学生も優秀ですし、私が教えている学生も頑張っていますが、やはり、なかなか確実に勝負に勝つということは難しいといわざるを得ません。こうした状況において、私たちはむしろゴールを設定すること自体をも研究の目的に含めて戦うということの方針としています。研究を始めた当時、ほとんど誰も手掛けていなかったナノメカニクスを選択し、超音波素子による信号処理を目的においたことは、他の研究者とは違うゴー



ルを設定した事例だと思っています。最初は誰も見向きをしませんでしたが、その後、私たちの論文を引用した多くの関連研究が現れました。私たちが新しいゴールをつくり上げようとしたからこそ、私たちはトップランナーとして新しい研究分野をけん引できたのではないかと思います。

ところで、ゴールを設定するときはあまり情報収集をしすぎないほうが良いと思っています。正確にいうと、情報を集める際には自分の分野で狭く深くではなく、他の分野も含めて広く浅く集めるようにしています。例えば、私はナノメカニクスに取り組むにあたり、光技術の視点を活かしています。先ほどの話に非線形という言葉が出てきましたが、非線形については光技術において随分研究が進んでいますから、それをナノメカニクスでできないだろうかと分野横断的に考えてみるのです。あるいは半導体の分野で昔から取り組まれているトランジスタをナノメカニクスに導入できないかとか、あらゆる分野から着想を得てゴール設定に活かすことが大事です。

そのような意味で、自分と異なる分野に進出していくことは大事なのですが、その際に自分の持ち味は何かをしっかり把握してそこに軸足をおき、もう片方の足を別の研究分野へ踏み出してみるという手順が大事だと思います。そこでゴールの方向性が合えばそちらの方向に進み、もし方向性が合わなければ、軸足を起点として別の分野に方向転換して新たな一歩を踏み出し、これを繰り返すことで少しずつ足固めをして、新しいゴールを設定していくというアプローチです。これはバスケットボールにおける「ピボット」と呼ばれるステップに似ていますね。このような、いってみれば「ピボット戦略」を用いると、自分の持ち味を活かしながら新しい方向に研究を進めていけるのです。

アンテナを高く・広く張って情報収集を行い、さらには電波を飛ばす（情報を発信する）うえで、やはり学会の役割というのは極めて重要です。私の年代になると外部の委員会や国際会議といった外部での仕事が増えて、もっとも忙しい時期には1年の3分の1以上出張しているときもあ

りました。このような仕事においては自分と異なる研究分野の話を受けないといけないことも多くあります。最初は自分とは関係ない話ということで、あまり集中して聞くこともなかったのですが、機会を重ねるうちに、意外に自分の研究にも活用できる部分が結構あることに気がきました。他の分野の研究者の話を受けないことは、自分の分野の研究を新しく展開していくうえでも、とても重要であることをこのような機会学びました。

他の組織の研究者はライバルであると同時に良き協力者でもあります。ライバルだからと研究成果や持論をすべて隠してしまうと話が進みません。話さなければアイデアを盗まれることはありませんが、聞くだけではなく話をするので、ライバルと信頼関係を築き、その関係を維持することができます。こうしたコミュニケーションは非常に重要だと思います。もちろん、その際には自らの研究成果が相手にとって価値や意味のあるものでなければなりません。自分も成長しつつ成果を少しずつ増やして、お互いに情報交換してさらに次の成果をねらうという良い協力関係を築きたいですね。



### オタク×オリンピック選手＝研究者？！

**研究者人生の中で印象に残る出来事をお聞かせください。**

オプトメカニクスの研究をしていたときのことです。私は東北大学の客員教授でもあるのですが、あるとき、研究に携わっていた私の研究室の学生さんが、「先生、測定できません」というのです。「測れないって何それ？やり方がまずいんじゃないの？」と聞くと、「測ろうとすると素子が勝手に震えちゃうんです」と。「そんなことないだろうもう1回やってみろ、何か間違ってるでしょ」と言って再度測定をすると、確かに大きな振動を起こして測れなくなります。ところが条件を少し変えてみると測れるのです。この現象を突き詰めて調べてみると、光と電子、さらには機械振動が関係した全く新しい素子の動作原理になること

が明らかになり、米国物理学会においてもっとも権威のある学術誌の1つであるPhysical Review Lettersに発表することができました。もしこの結果が、実験技術が不十分な学生が得た何かの間違いだ、として見過ごしていたら論文は書けませんでした。偶然であろうとわずかな変化でも大切に作る姿勢は本当に重要だと実感した出来事でした。後から考えると、素直に私に報告してくれた学生のキャラクターが功を奏したわけですが、同じように優秀な学生であっても、自分で何とかしようとする性格だったら報告されずに終わっていたかもしれません。だからこそ、研究者の性質や性格も多様性を重視すべきかもしれません。異なるキャラクターや視点を持つ研究者が集まって初めて新しい進展が得られるケースも多いのではないのでしょうか。

私は研究者とは「オタク」だと思うのです。非常に特殊な存在だと思います。世の中一般の人は、私たちのように物理学に没頭する人を「なんでそんなに難しいことが楽しいの?」と思うこともあるのではないのでしょうか。しかし、私たちは難しい研究をさらに深めていくことが楽しいのです。ある意味「オタク」の世界なのです。そして、一方で研究者はオリンピック選手のような側面も備えていると思います。国内のトップになることで満足せずに、世界の舞台でトップをめざして競っているのです。自分の競技を追究しているという意味ではオリンピック選手もオタクかもしれません。いずれにしても、自分の好きなことを追究できることは幸せです。一方で妥協は許されず、極めることを求められていますから、苦労もプレッシャーもたくさんあります。頂点をめざして世界中の研究者と競っているわけですし、若い人は押しつぶされそうになることもあるのではないのでしょうか。

#### 後輩の研究者の皆さんに一言お願いいたします。

押しつぶされそうになる、あるいは思うような成果が得られないことは必ずありますが、経験を積んでくると少しずつそれにも慣れてきます。私は入社当時、自分に与えら

れた研究テーマの面白さが分からなかったことがあり、そのときは同期の研究者たちに愚痴を言っていました。そして、上手くいかない苦しさを上司に話して、別の研究に携わらせていただきましたが良い結果にはなりません。そんなとき、私は与えられたテーマに自信が持てない中で、自分の特色を出さなければまずいと思っていたことに気がきました。こうした経験をして、非常に面倒見の良い上司にも恵まれて、違和感のあったテーマにも正面から取り組むようになりました。すると、だんだん面白さが分かってきました。石の上にも三年と言いますが、本当にそうだと思います。3年くらいは敷かれたレールを進む、軌道に乗ったほうが良いと思います。研究者は独自性が大切だから、自分以外の人でもできるようなことをやりたくないという気持ちも分かります。自分らしい研究は経験を積んでいけばそのうちできますから、最初は与えられたところで頑張ってみてください。そのうちにしっかりと自分の味が出てきます。

それから、基礎研究においてマネジメントをする立場の方は指導者としてのプレッシャーを感じるかもしれませんが、優秀な研究者は放っておくことも大切だと思います。やりたいようにさせてやって自分はサポートに徹することです。直接的に指導をしないことで不安になると思いますが、若手の自主性を育ててほしいと思います。同時に、これまで手取り足取り育ててこられた日本の社会の習慣から、若手研究者も脱皮できるように心掛けないといけないかもしれません。将来の不安もあるかもしれませんが、日本での研究環境は昔に比べて自由度も高くなっていますし、活躍の場も多いと思います。プレッシャーを跳ねのけて楽しんでいきましょう。

#### ■参考文献

- (1) <https://www.ntt.co.jp/news2014/1406/140613a.html>
- (2) <https://www.ntt.co.jp/news2018/1804/180406a.html>