

twitter
@keiokyuri

facebook
"keiokyuri"

K y u r i z u k a i

窮理図解

新版

2014 July
no.

16

慶應義塾大学理工学部広報誌

<http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai>

English versions are also available:

<http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai/english/index.html>

慶應理工の 光物性

テラヘルツテクノロジー
が切り拓く、
新しい物性の観察と制御

物理学科

わたなべしんいち

渡邊紳一

(准教授)

「光」で「物」の「性質」を調べ、 その性質をあやつる

テラヘルツテクノロジーが切り拓く、新しい物性の観察と制御

私たち人類は、古くから周波数（振動数）の異なるさまざまな光を使って物を観察したり、物の性質を変えたり、あるいは光のエネルギーを電気エネルギーに変えたりすることで、生活に役立ててきた。そうしたなか、これまで盛んに利用されてきた「可視光」よりも波長の長い「テラヘルツ光」が注目されている。テラヘルツ光を用いた研究を手掛ける渡邊紳一准教授に、研究室で取り組んでいるテラヘルツテクノロジーの最先端について話を聞いた。

テラヘルツ光とは？

物の性質を調べたり、その性質を変えたりする際に不可欠な光。光を利用した研究は、テクノロジーの進化とともに発展を遂げ、現在では宇宙の起源といった人類最大の謎の解明にまで貢献している。そうした道具としての光のなかでも、近年、とくに脚光を浴びているのがテラヘルツ（テラは10の12乗）光だ。このテラヘルツ光を利用した研究を手掛ける渡邊さんは、その利点を次のように説明する。

「テラヘルツ光は、振動数が可視光の1/100～1/1000であるため、きわめて波長の長い光です。光というのは、X線のように振動数が高い（波長が短い）光

のほうがよりエネルギーが高くなることから、テラヘルツ光はエネルギーが低い光ということになります。X線に比べるとエネルギーがきわめて低いので、それだけ人体に与える影響が少なく、安全だとして期待されているのです。

また、物の性質を調べるというのは、言い換えれば物のエネルギー構造を調べるということ。超伝導のように低エネルギー状態にあるものを光で調べようとすると、テラヘルツ光でしか直接見ることができません。つまり、光の種類によって、それぞれ得意分野があるということですね。

さらに、テラヘルツ光が得意とするのが、可視光を透過しない被服やプラスチックパッケージ、紙を通した観察。セ

キュリティ検査や半導体製品検査、建物などの非破壊検査、さらには医療・創薬など、あらゆる産業分野でその利用が期待されている。ただし、水で吸収されてしまうことと、最近までこの光を効率よく発生することが難しかったことから、未開拓の帯域でもあった。

「テラヘルツ光が興味深いのは、ゆっくり振動するため、空気中を飛んでいる波の形が生で見えること。私の興味は物の性質を見たり、操作したりすることにあります。光が物にぶつかった瞬間に何が起きているのか、その相互作用を直接見てとることができるというのはじつに面白いですね。また、振動数があまりに低いと、電波に近い性質を併せもっており、物質に電極をつけることなく、電場や磁場をかけるのと類似した効果を与えられる点も魅力です」。

電波のように多くの物質を透過する性質と、可視光のように直進する性質を両方併せもつことで、計測対象に広がりがあることが、このテラヘルツ光の最大の特徴といえる。

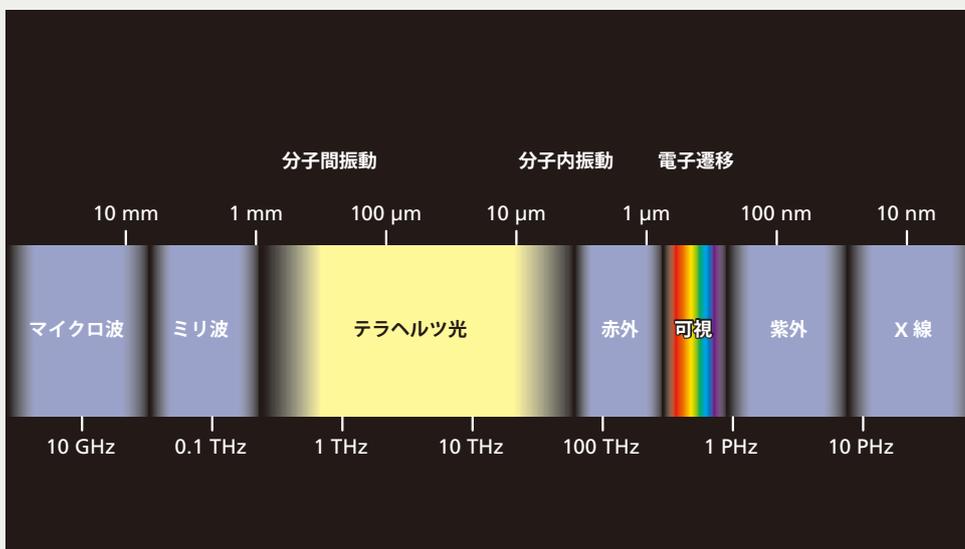


図1 テラヘルツ光とは？

テラヘルツ光は、周波数が 10^{12} ヘルツを中心とした、可視光に比べて波長が100倍～1000倍ほど長い電波と光波の境界に位置する光である。波長が長いということは光子エネルギーが低いということの意味するので、超伝導ギャップや分子間振動などの低エネルギー構造を調べることが可能になる。

「テラヘルツ時間領域分光法」を応用

そうしたなか、現在、渡邊さんの研究室で手掛けるのが、「テラヘルツ時間領域分光法」という手法である。これは、波長の長い「テラヘルツ光」と、波長の短い「近赤外光パルス」を「非線形光学結晶」と呼ばれる透明な物質中でミックスさせることによって、まるでオシロスコープ（電気信号の挙動を観察する波形測定器）のように、テラヘルツ光の波の形がわかるというもの。

「光物性物理学では、光を物に当ててその反射光あるいは透過光の強度がどの程度減るかを見て、その物質のエネルギー構造を調べるのが一般的です。一方、『テラヘルツ時間領域分光法』を用いれば、光強度の変化だけでなく、近赤外光パルスの照射のタイミングをずらすことで、波の『振幅』と『位相』という2つの変化、つまり2倍の情報量を得ることができるのです」。

さらに渡邊さんの研究室では、この手法に工夫をこらし、振幅や位相に加えて、「偏光」の情報を精度よく測ることに成功した。これは、検出に使う半導体結晶を一定の角速度で高速に回転させることにより、テラヘルツ電場ベクトルの大きさと向きを同時に計測できるようにした

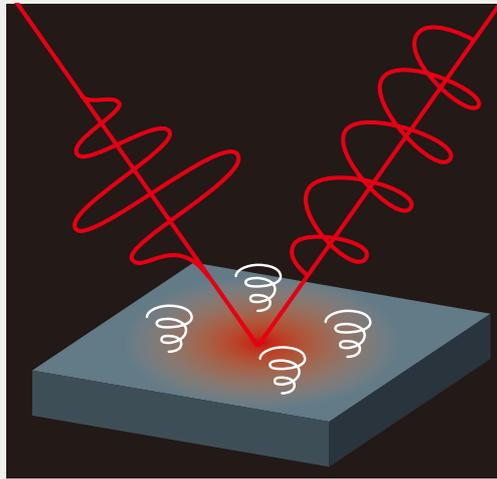


図2 光電場のベクトル波形計測
渡邊研究室では、時間的に振動したり回転したりするテラヘルツ光電場のベクトル波形を、まるで電気信号をオシロスコープで観察するようにコンピュータ上に表示できる。光の「振幅」「位相」「偏光」情報を加えることで、物質の表面形状を細かく観察したり、あるいは物質中の電子スピンの振る舞いや結晶格子の振動の様子など、物質内部の情報を調べることができる。

ものである。これにより、反射波の電場ベクトル成分の方向を精度よく解析することが可能になった。

この半導体結晶の回転に伴う信号の解析には高度な計算が必要だが、当時、学部4年生だった安松直弥さんが膨大な計算を担い、実現に漕ぎ着けた。

「この手法を用いて、高さの違う2点から反射したテラヘルツ電磁波パルス光のある決められた時刻における電場ベクトルの向きの情報を高精度に計測できるようになり、金属などの輪郭や表面の粗さを高精度に検査できるようになりました。その結果、波長の1000分の1以下の深さまで凹凸が識別できるようになりました。この成果は、2012年米国光

学会レター誌『Optics Letters』オンライン速報版に掲載されました」。

今後は、より波長の短い赤外光や可視光の領域までこの手法を拡張していき、より応用分野を広げていきたいと渡邊さんは意気込む。

振幅の大きいテラヘルツ光で物性を変える

さらに渡邊さんは、波の振幅が非常に大きなテラヘルツ光を物質に照射し、その状態を変えるという研究も手掛けている。

「本来、半導体の電子を励起（基底状態から高エネルギー状態への移行）するには可視光くらいエネルギーが必要ですが、テラヘルツ光でも振幅をきわめて大きくすることで、それが可能になります。しかも、波の形が見えるので、どの時点で電子がどういう状態になったのかをつぶさに観察できるのです」。

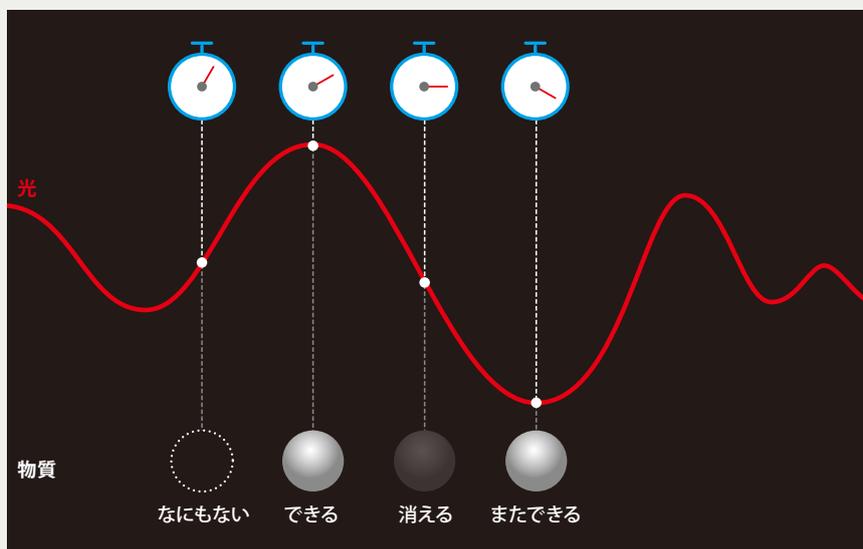
また、テラヘルツ光は物質を構成する分子の振動の共鳴周波数に近いため、共鳴させやすく、格子を大きく揺らすことで構造変化を起こすことも期待できる。これにより、物の性質を自在に変化させることができるため、新しい物質科学への応用に期待が集まっています。今後は物質制御の画期的な新手法を確立していきたいと思っています」。

まだまだ大きな可能性を秘めているテラヘルツ光研究の今後に着目していきたい。

（取材・構成 田井中麻都佳）

図3 光波の1サイクル内での物理現象を調べる

光物性の研究では、物質に光を照射したとき、究極的に短い時間スケールでどのような光と物質の相互作用が起こるかに興味がある。きわめて時間幅の短い「超短パルスレーザー」と「テラヘルツ光発生技術」を組み合わせると、テラヘルツ光を物質に照射したときに、どのタイミングで新しい状態ができ、そして消えるのかといった詳しい物理現象が分かるようになる。





「物事の真理を解き明かしたい」 という思いを胸に、 世界一の研究を目指す

理科ぎらいだった少年を変えたのは1冊の本との出会いだった。真理を探究する研究者たちの人間味あふれる姿に共感し、研究者の道へ。競争が激しい研究者の世界で、過去の偉大な研究者や海外留学で出会った研究者たちがどのように振る舞い、どのように研究テーマを見つけ、研究を続けてきたかを見聞したことが、今も、渡邊さんの人生に大いに役立っているという。

—どんな幼少期を過ごされたのですか？

東京都中野区にて、電気工事業を営む両親の長男として生まれました。実家が電気屋だったため、ワープロやパソコンなどが身近にある子供時代を送り、早くからコンピュータ・プログラミングなどに興味をもちました。

—勉強は好きでしたか？

高校時代までは数学と世界史が好きでしたが、理科は苦手でした。理科というのは、複雑で多様性のある自然現象を相手にするため未解明のこともあり、数学のように厳密な理屈が成立しないことが多く、教科書の説明にどこか「ごまかし」を感じていたためです。丸暗記しなければいけない部分もあって、無味乾燥に思えたんですね。

ところが、高校3年生の時に近所の図書館で、『X線からクォークまで』という本を借りて読んで以来、物理が好きになりました。これは、どのようにして20世紀を代表する学問である「量子力学」という美しい学問体系ができたかを躍動的に描いた本です。登場する物理学者がみな個性的でかきわめて人間臭く、こういう人たちと友達になって一緒に仕事をしたいと思いました。

—で、東京大学に入学された後は、3年から物理学科に進学されたわけですね。

ええ。まわりにとっても優秀な人たちが多くて、ともに勉強できることに幸せを感じていました。一方で、自分がこの世界でプロとして生き残るためには、優秀な友人と同じことをしてはダメだ、とつねに感じていました。

そこで大学院では、多くの人が素粒子や宇宙物理学を専攻するなかで、私はデバイス物理学を研究しようと、今は柏にある東大の物性研究所に進学しました。さらに、ポスドクはスイス連邦工科大学に留学するといった具合で、できるだけ独自の道を進むようにしてきました。

じつは学科を選択する際に「物理学科」にするか「応用物理学科」にするかで迷ったんですね。というのは、「実社会への

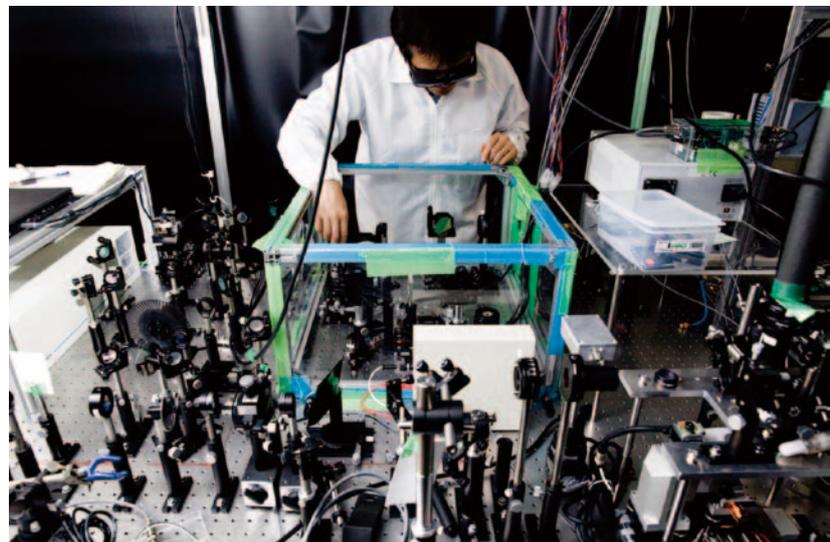
応用に根ざした学問に進みたい」と感じていたからです。しかし「根源を知りたい」という思いもあったので、あれこれ迷ったあと、最終的には物理学科に進学することにしました。そうした中で、「光学」と出会いました。特に光の波動性を活用したホログラフィーの発明によりノーベル物理学賞を受賞したガボール（Dennis Gabor）の研究に触れ、自分もこういう研究者になりたいという思いから、光科学に進むことにしました。

物性研究所では、秋山英文先生のもとで半導体レーザー構造の基礎物理について研究しました。

スイスに行ったのは、計測だけでなく、「ものづくり」も学ばなければならないと考えたためです。カポン（Eli Kapon）先生のもとで、世界最高品質の量子ドットの作製に携わることができ、世界各国の個性的なポスドク仲間と一緒に研究できたことは楽しい思い出です。

その後は助教として東京大学大学院の島野亮先生の研究室で、現在の研究につながる「テラヘルツ電磁波を用いた物性研究」を手掛けました。

こうした経験から、「光計測」と「サンプル作製」の両方において、世界一の技術をもつ研究室で経験を積むことができたというのが、私の研究者としての大きな強みになっています。





学生のみなさんには、
積極的にいろいろな経験をすることで
広い世界を知ってほしいと思います。

渡邊紳一

Shinichi Watanabe

1974年東京都生まれ。1997年東京大学理学部物理学
科卒業。1999年東京大学大学院理学系研究科修士課
程修了（東京大学物性研究所秋山研究室）。2002年同
大学院理学系研究科博士課程修了（東京大学物性研
究所秋山研究室）。博士（理学）。日本学術振興会特別研
究員、日本学術振興会海外特別研究員、スイス連邦工
科大学ポスドク研究員、東京大学理学部物理学科助手
（島野研究室）、同助教を経て、2011年より現職。



——研究者として進む方向を決め、研究テーマを探すというの は容易ではありませんね。

研究者の世界は競争が激しいため、今でも、どうすれば生き
残れるかを必死に考えています。そういう意味で、「今はやり」
といわれている研究はやりたくない。「はやり」に飛びつく、
結局、自分がこの世界で何を残したのか不明確になってしま
います。もっとも、「テラヘルツ光」は「はやり」の分野なので
矛盾しますが、自分なりの切り口でオリジナルな研究をして
いるつもりです。

ちなみに、慶應義塾大学物理学科の4年生の必修科目に「論
文講読発表」という、古今東西の英語原著論文を読んで解説す
るという授業があります。その中で過去の有名な研究者がどう
いう戦略で自分の学問領域を切り拓いてきたのかを、学生と一
緒に学んでいます。研究に必要な「新しい発想」を生むために
は、過去の人間の努力の足跡を学ぶことが一番の近道です。過
去の偉人の戦略に学び、世界中の人をあっという間に驚かせる研究成果
を出せるように日々努力しているところです。

——今後はどのような研究をしていきたいですか？

私は、自然現象というのは一見複雑に見えても、問題をばら
していけばシンプルなものになるはずだと思っています。その
「わかりやすい理屈」を世界で最初に解き明かしたいですね。

未解明の真理を見つけるためには、自分たちにしかできない
実験技術を磨くのが一番です。実験結果には、自然現象を解き
明かすさまざまなヒントが詰まっていますから…。ヒントをも
とにパズルを解いていくのは、とても楽しい作業です。

これからも、世界一の技術を使って未知の物理問題を解決し
ていきたいですね。

——研究の合間はどんなふうに過ごされているのですか？

中学時代から現在まで、アマチュアの吹奏楽団に参加して
チューバを吹いています。

ちなみに、好きな曲の多くは行進曲（マーチ）です。チュー
バは単調なテンポしか刻まないの、よく人からは「つまらな
いでしょ？」いわれますが、むしろ単純なのに感動的な曲が多
いということが面白い…。研究と一緒に、わかりやすいものが
好きなんです。

——慶應義塾大学のどんなところに良さを感じますか？

着任したときの第一印象は、とにかく効率的な運営をして、
教育も研究も、みんなで協力して最高の成果を上げていこうと
いう意識が非常に強いことでした。とても働きやすい環境です。

また、充実した教育環境のせいか、学生さんの基礎学力およ
び学習意欲が極めて高く、一緒に勉強や研究をするのがとても
楽しい。教職員と学生の協力による相乗効果で、質の高い研究
ができる環境が整っていると思います。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

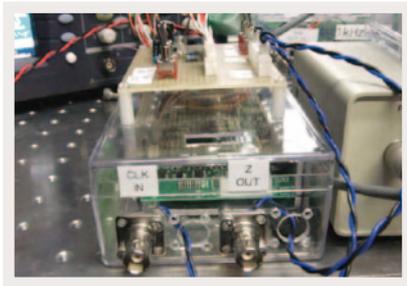
●うちの研究室の学生の多くは、先生の人柄にひかれて入った
といってもいいほど。とてもやさしくて、面倒見のいい先生で
す。学生それぞれに合った課題をつねに与えて、きちんとフォ
ローもして下さいます。研究室の雰囲気もとてもよく、居心
地のいい研究室です。

(取材・構成 田井中麻都佳)

さらに詳しい内容は
<http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai>

渡邊研の風景 1

渡邊研究室の実験室内にはたくさんのレンズやミラーがあります。このような光学部品はほこりを嫌うので、クリーンブースを設置しています。スペースがしだいに足りなくなり、棚を作るなどして実験場所を確保しています。



渡邊研の風景 2

渡邊研究室の隠れた強みは、複雑な電子回路を自分たちで設計・組み立てができるところです。そのおかげで思いついたアイデアをすぐに実験検証できます。まずは結果を出して、その後に高性能な市販装置で置き換える作戦をとっています。

CLEO 国際会議

アメリカで開かれるレーザー関連の CLEO 国際会議によく参加します。世界中の元気な研究者が成果を楽しそうに発表する姿がたいへん印象的です。この会議参加がきっかけで、博士課程に進む決心をしました。写真は恩師である秋山先生と。

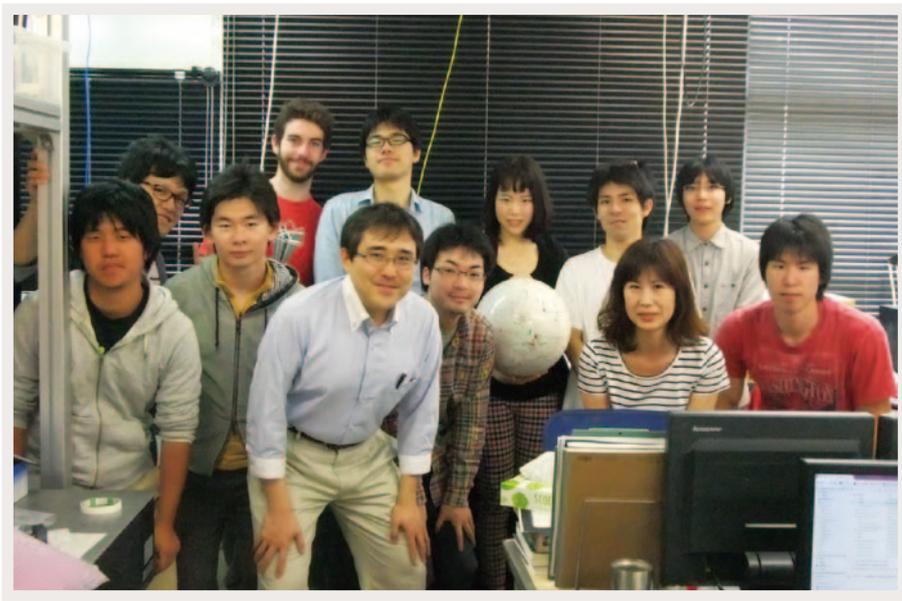


渡邊紳一の ON と OFF

渡邊研究室の ON 時間と渡邊の ON 時間・OFF 時間の様子を、現在・過去の写真とあわせてご紹介します。

渡邊研メンバー 2014

2014 年度の渡邊研究室のメンバーです。2011 年度の研究室立ち上げから 3 年間で、優秀なメンバーと協力して様々なスペクトル計測装置・イメージング装置を作り上げてきました。今後の渡邊研の活躍にぜひご期待ください。



実家の風景

実家が電気工事業を営んでいたこともあり、無線で動くロボットや、壁に沿って動くネズミなどのおもちゃがたくさん転がっていました。電子回路製作にアレルギーが少ないのはこのためかもしれません。



楽器練習風景

中学生時代に吹奏楽を始めてもう 25 年以上になります。担当はチューバです。最近ではなかなか練習する時間がとれず腕も落ちていく一方ですが、細々と続けさせていただいています。



ローザンヌ近郊の風景

スイス・ローザンヌにある EPFL (スイス連邦工科大学ローザンヌ校) にてポストドク時代を過ごしました。2 年半の間にチーム内でとてもよい信頼関係が生まれ、多くの成果をあげることができました。

私の My favorite books 本棚



● **小説「十八史略」** 学生時代にふと見かけて読んでみたところたいへん面白く、全6巻を読破しました。中国の歴史上の人物がどのような作戦で天下を取ったのか、また天下を取った後にどのような苦勞をしたのか、といった内容がいきいきと描かれています。文化の違いで苦勞したポストク時代にどのような作戦をとればよいか学ぶため、何度も読み返したことを覚えています。

● **量子力学** 量子力学の定番の教科書です。基礎から光と物質の相互作用の量子論に至るまで解説されています。光物性を理解するための基礎知識が丁寧に書かれているため、学生時代より何度も読み返しています。日本には、日本の先生が日本語で書いた良い教科書がたくさんあり、他のアジア圏出身の友人からよくうらやましがられました。母国語で勉強できるのはすばらしいことです。

● **固体物理学** 固体物理学の基礎概念が分かりやすく解説されています。この本は、他の教科書では一般的な結晶構造から入らず、プロッホの定理（結晶中の電子の波動関数の性質）の話から始まります。私は物理を専攻する学生にはこの導入のほう物が物性物理学の世界に入りやすいと感じており、私が担当する「物性物理学第1」の講義で参考にしてしています。助教時代に友人に勧められ、一緒に勉強会をしました。

● **光物理学の基礎** 学部の基礎科目から大学院の光物性専門科目へと進むときに、なるべく飛躍がないように説明をつなげるのは大変です。そのため、基礎的な部分から最先端研究をつなぐ本を探していたところ本書に出会いました。電磁気学の基礎の内容から光パルス伝搬に関する最近の研究に関する話題まで、広いテーマを非常に分かりやすく解説しています。光物性物理学の講義を行うにあたり参考にしています。

● **光エレクトロニクス** 非線形光学の物理とその応用技術について、非常に分かりやすく解説されています。私は第二高調波やテラヘルツ波発生など、非線形光学効果を利用した周波数変換技術を解説するときには、いつもこの教科書の記述を参考にしています。光エレクトロニクスは物理学科ではあまり取り扱わない話題ですので、物理学専攻の私にとってこの教科書は貴重です。

● **X線からクォークまで** 20世紀初頭に活躍した有名な物理学者たちが、どのような苦勞をして歴史的な仕事を成し遂げていったのかを、彼らの人間性にも触れながら克明に描いた本です。写真もふんだんに掲載されているので、学生さんで物理が苦手な人にはぜひ読んで欲しいと思います。私も高校生時代に読んだこの本がきっかけで物理学に興味をもつようになりました。

● **光学の原理** 光学分野の代表的な教科書です。日本語版は3冊に分かれています。英語の原書はたいへん分厚く、光学に関する基礎知識がもれなく説明されているという安心感があります。最近、光の波動的な性質を詳しく理解する必要が生じ、いつも参考にしています。私は学生時代に買った日本語版と、原著の英語版の両方を持っていますが、英語版では最近の話題を取り入れてアップデートしているようです。

「型」がわかれば恐くない

みなさんは人前でアドリブの挨拶をしたり、アドリブのスピーチをしたりすることが苦手ですか、それともあまり苦になりませんか。

この号で研究生活の様子を紹介して下さった渡邊准教授は、アドリブのスピーチ、とくに人前での原稿のないスピーチは苦手だそうです。しかし、「学会発表は得意です」といわれます。それは、学会発表には「型」があり、それがわかっているのだから、その型に合わせて原稿を準備し何回も繰り返して十分に練習することができるからだそうです。

一般に、さまざまな研究に必要な「新しい発想」は、ゼロの状態から生まれて

くることはありません。必ず先人が積み重ねてきた英知の上に、新しい研究成果を付け加えることで生まれてきます。したがって、「新しい発想」を生み出すには、先人の努力や苦勞の足跡を学ぶことがいちばんの近道です。「私が過去の人物伝のような書物が好きなのは、先人たちがどんな苦勞をして革命的な新しい発想を生み出してきたのかを勉強できるからです」と渡邊さんはよく話されます。

「現在の学生さんはみんな優秀で、こうした『新しい発想』を生み出す基礎学力は身につけています。そのため私は、研究室の学生さんには、物理学の知識を教えるよりは、研究の『型』を伝えて、一緒に勉強させてもらう時間のほうが長いように感じています」と渡邊さんはいいます。

研究の「型」としては、「新しい発想」を生み出すための、①情報収集のやり方、②実験データのとり方、③学会発表のやり方、④論文の書き方などがあります。「これは学生さんの倍ほど長く生きてきて、いろいろな経験をしてきた私だからこそ伝えることができるものです」と渡邊さんは学生指導の一端を明かしてくださいました。

このような「型」を身につければ、旺盛な学習意欲と豊富な知識をもつ学生は、いろいろな新しい情報を集め、それを「新しい発想」にもつなげていくようになるそうです。そうした学生との研究活動について、渡邊さんは「意欲的な若い人たちと一緒に研究できるのは、非常に楽しいことです」とうれしそうに話っていました。

理工学 Information

KEIO TECHNO-MALL 2014

第15回 慶應科学技術展「育てる産学、育つ夢」

毎年12月に東京フォーラムで開催している KEIO TECHNO-MALL (慶應科学技術展) は、慶應義塾大学理工学部・理工学研究科の研究成果を広く発信し、共同研究や技術移転など、産官学連携のきっかけとなる出会いの場を提供するイベントです。

出展ブースでは、教員のほか、各研究室の学生が実物展示やデモンストレーションを通じて、来場者に研究成果のプレゼンテーションを行っています。毎年、企業や官公庁、他大学などから、多数ご来場いただいています。

日時：12月5日(金) 10:00～18:00

場所：東京国際フォーラム地下2階(展示ホール2)

内容：実物・実演重視の展示と魅力的な企画を予定

入場無料 ※事前登録が必要です。



©慶應義塾大学



編集後記

第10号から、何かを手に持った写真を表紙にしていますが、渡邊准教授が用意された赤い棒(簡易波動実験器)はとてもインパクトがあり、説明を受けるまで何をするものかわかりませんでした。写っているのはごく一部分ですが、実際はもっと長く大きなものです。表紙は合成ではなく、人が端を持ち微妙な波を作り出して何枚も苦勞して撮影したうちの1枚です。

事前に取材メモをたくさん用意していただき、取材では言葉を慎重に選んで穏やかに話され、学生さんの多くが先生の人柄にひかれて研究室に入ったと話すように、印象どおりの真面目で優しい先生でした。(中野祐子)

今号の表紙

赤い棒で構成された器械は「簡易波動実験器」で、横波が伝わる様子を観察するために用いるものです。目に見えないテラヘルツ光の電場波形を再現するために表紙に採用しました。

新版 窮理図解

No.16 2014 July

編集 新版窮理図解編集委員会
 写真 邑口京一郎
 デザイン 八十島博明、石川幸彦 (GRID)
 編集協力 サイテック・コミュニケーションズ
 発行者 青山藤詞郎
 発行 慶應義塾大学理工学部
 〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1
 問い合わせ先 (新版窮理図解全般)
 kyurizukai@info.keio.ac.jp
 問い合わせ先 (産学連携)
 kll-liaison@adst.keio.ac.jp

web版 http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai
 twitter http://twitter.com/keiokyuri
 facebook http://www.facebook.com/keiokyuri

