

facebook
"keiokyuri"

新版

K y u r i z u k a i

窮理図解

2015 December
no.

21

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

スピン量子物性

次世代電子技術の物理基盤

物理情報工学科

あ ん ど う か ゅ
安藤 和也

(准教授)



電子の磁石としての性質が生み出す、 スピンの流れを解明する

スピン流を制御する物理基盤を築き、次世代電子技術を切り拓く

スピントロニクスとは、スピンという電子のもつ量子力学的自由度が生み出す新しい物理現象を探索し、電子技術への応用を目指す分野である。安藤和也さんは、電流と変換可能で、エネルギーをほとんど損失することなく情報を伝達できるとして注目されるスピン流を理論的に解き明かすことで、スピントロニクスの発展に役立てようと研究に取り組んでいる。

スピンとは 電子の磁石としての性質

安藤さんが手がけるのは、電子がもつ「スピン」と呼ばれる自由度が生み出す物理現象を解明する、スピントロニクス分野の研究である。

「スピンというと自転と訳されることが多いのですが、むしろ磁石のことなのです。電子が電荷をもつと同様に、電子は磁石としての性質を備えています。ところが、量子の世界ではスピンは上向き／下向きのどちらか2つの状態しかとることができません。たとえば、鉄は強磁性の物質ですが、それは、上向きのスピンと下向きのスピンをもつ電子の量が違う、すなわち不均衡だからです。一方、金や銀は、上向きも下向きも同量のスピンをもつ電子が存在することから、磁石にくっつかないのです」と、安藤さんは説明する。

通常、物質に外から電圧をかけると、上下2つのスピンをもつ電子が同じ方

向へ動くため、スピンの流れは全体として相殺され、電荷のみが動くことで電流が生じる。ところが、2つの電子を逆方向に運動させると、逆に電荷の流れが打ち消されて、スピンの流れだけが現れる。この電子スピンの流れが、スピン流である。

「スピン流の研究における大きな成果としては、2007年にノーベル物理学賞を受賞したフェール（Albert Fert）とグリュンベルク（Peter Grünberg）らが1980年代に発見した、『巨大磁気抵抗効果』があります。これは、強磁性膜と非磁性膜を重ねた多層膜において、スピン流の影響により金属の電気抵抗が大きく変化する現象のこと。この発見により、ハードディスクなど記録媒体の記録容量が劇的に向上しました。この現象は電流に付随したスピン流（スピン偏極電流）により発現するものですが、2000年頃からスピンのみの流れを作り出せるようになり、電荷の流れを伴わないスピン流の研究が盛

んに行われるようになったのです」。

スピン流の最大の利点は、電流で起こる熱によるエネルギー損失がないことだ。つまり、電子の電荷の代わりにスピン流をうまく制御できれば、ほとんどエネルギーを損失することなく、量子情報が伝送できるようになる。この点がスピントロニクスが次世代電子技術として期待される最大の理由である。

スピン流と電流は変換可能

そのスピン流の研究の中で安藤さんが手がけるのが、スピン流の制御に役立つ基礎的な物理現象の解明である。「そのひとつが、『逆スピンホール効果』と呼ばれる現象です。これは、スピン流が流れているときにスピン流と直交する方向に電圧が現れるというもので、2006年から2007年にかけて、金属系において初めて観測されました。

この現象は、アインシュタインが発表したことで知られる特殊相対論から理解できます。特殊相対論では、『動いている物体の長さは縮んで見える』とか、『動いている時計の時間はゆっくり進む』といった不思議な現象が説明されますが、この理論を使うと、動いているスピンの一部は電気分極へと変換されます。このような相対論的現象が物質中で現れているのが逆スピンホール効果です。簡単に言えば、逆向きのスピンをもつ2つの電子が同じ方向に散乱され、電子がたまることで電圧が現れるんですね。

同様に、逆の現象も起こります。つまり、電流を流すことで2つの電子が逆方向に散乱されて、垂直方向にスピン流が発生する。これが、2004年に複

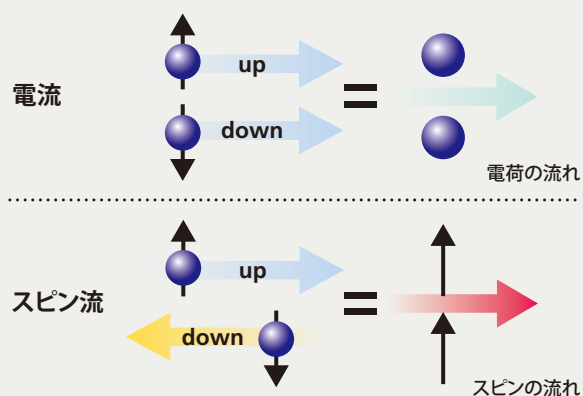


図1 「スピン」の流れ

上向きスピンを持った電子と下向きスピンを持った電子が同じ方向に運動していると、電荷の流れが現れる。これを電流と呼んでいる。一方で、もしこの2種類の電子が互いに逆方向に運動していると、スピンの流れが現れる。このような電子スピンの流れがスピン流である。

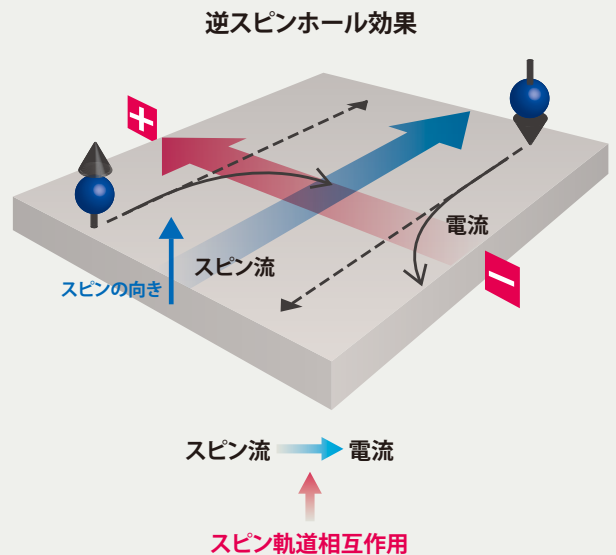
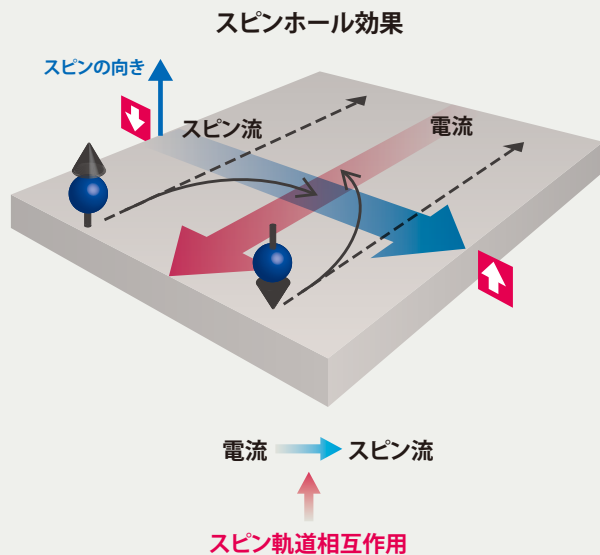


図2 スピンホール効果・逆スピンホール効果

数のグループでほぼ同時に実験的に観測された、スピンホール効果です」。

こうした物理現象を理論的に解き明かすことで、磁性体を使わずにスピン流をつくったり、スピン流と電流を変換したりできるようになり、スピン流の研究が一気に加速した。安藤さんはこうした知見に基づき、現状は数%というスピン流と電流の変換効率を上げる試みや、物質界面の相対論的效果の制御など、日進月歩で進展する研究テーマに取り組んでいるところだ。

さまざまな物質におけるスピン流

ここで安藤さんの研究で特筆すべきなのが、スピンの揺らぎがつくる「マグノン」と呼ばれる粒子の研究である。

「実はスピン流というのは、電荷が流れていなくても発生するんですね。つ

まり、絶縁体の中でもスピン流は流れる。この絶縁体中のスピンの流れを担うのが、スピンの揺らぎであるマグノンです。量子力学では、ゆらぎ（波）というのは、粒子と見なすことが可能で、スピンの波の粒子としての振る舞いがマグノンであり、この性質により絶縁体においても情報の伝送が可能になるのです」。

従来の電流による情報処理では、半導体などの電気伝導性をもつ物質が不可欠だったが、絶縁体で情報処理ができれば、材料として使える物質の幅が大きく広がることになる。

「しかも、電気伝導性をもつ物質ではスピン流はわずか数ナノメートルから数百ナノメートル程度で消えてしまうのですが、絶縁体中では数ミリメートルと桁違いの距離をスピン流は伝導する。また、金属と絶縁体の界面では、スピン流を運ぶキャリアが伝導電子からマグノンへと変換されるのですが、その際に、このマグノンの寿命が変換効率の鍵を握ることを最近、突きとめました」と、安藤さんは言う。この画

期的な発見は、2014年12月に『Nature Communications』に掲載された。

さらに、マグノンの分裂・結合が引き起こす非線形物理の解明にも挑む。

「マグノンというのは、いきなり2つに分裂したり、2つのマグノンが1つに結合したりと電子とは違う性質をもちます。そうした動きを、外から制御したり、スピントロニクス現象に与える影響を明らかにしようとしています。スピントロニクスに使える材料が広がったり、スピン流を自在に制御できたりするようになれば応用につながるわけですが、そのための基礎的な物理を解き明かすのが私の研究の目的です」。

さらに最近では、有機物におけるスピン流の研究も手がけている。有機物中における電流からスピン流への変換効率は低いですが、スピン流の寿命はマイクロ秒と比較的長く、スピントロニクスにおける新たな材料としての可能性を探りたいと安藤さんは展望を語る。

「磁性の研究は日本が強い分野なのですが、次世代メモリとして注目されるホットな研究だけに、企業も含めてライバルが非常に多いのです。その中で、マグノンや有機材料など、未踏の分野を自らの手で切り拓いていきたいと思っています」。

(取材・構成 田井中麻都佳)

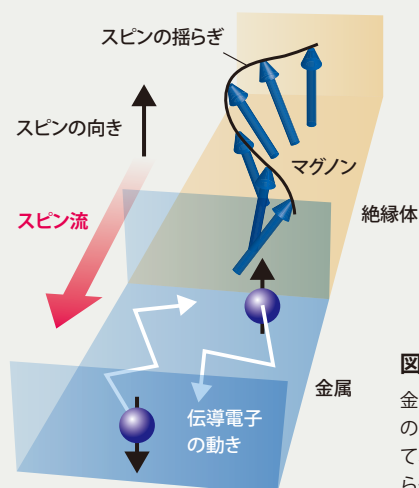


図3 固体中の非線形角運動量変換

金属と絶縁体の界面では、伝導電子とマグノン間でスピンの受け渡しが起こる。これによって、界面ではスピン流を運ぶ粒子がマグノンから伝導電子へと変換される。



最先端の研究の面白さに取りつかれ、研究者の道を突き進む

「逆スピンホール効果」というスピントロニクス発展に欠かせない現象を発見した齊藤英治先生のもとで、とびきり優秀な仲間とともに、研究に没頭した学生生活。その研究生活の支えとなったのが、先生や仲間とのディスカッションだった。それは現在の安藤さんの研究においても、学問を究めるうえで欠かせない重要な柱となっている。

——どんな幼少期を過ごされたのですか？

両親も妹も、親戚も、理系にはまるで縁のない一家に育ちましたが、なぜか幼い頃から図鑑が好きな、マニアックな子どもだったようです。覚えているのは、ミニカーを集めていたことです。とにかく車が好きで、通りすぎる車の車種をすべて言い当てるのができたと親が言っていました。ハマったら熱中するタイプの子どもだったようです。

それから、小学生の頃から理数系が得意で、夏休みの宿題は友達と分担して、自分は理科と算数を担当していました。ただ、実験はあまり好きではありませんでした。どちらかというと、頭で考えることが好きだったのかもしれない。

——何か、スポーツなどはされていたのですか？

ええ。小学校のときはサッカーをやっていたし、中学のときはバレーボール部に所属していました。ただ、中学の部活の先生がとても厳しくて、それで嫌になってしまい、高校では部活には入らずじまいでした。そもそも、愛知県の公立高校は勉強重視で、厳しかったですからね。とはいえ、熱心に取り組んでいたのは、相変わらず数学と物理でした。その頃から、漠然と研究に憧れはもっていたように思います。

本来なら、そのまま地元の名古屋大学を目指すのが普通なのですが、どうしても親元を離れて一人暮らしがしてみたかったこともあって、大学は慶應大学理工学部に進学しました。そして、2年からは物理情報工学科へ。当時はまだ、何の研究をやりたいのかよくわからなかったのですが、物理学科と比較して、物情のほうが将来の選択肢の幅が広くて、なにかすごいことができそうな気がしたのです。和気あいあいとした学科の雰囲気も進学を決め手になりました。

——研究室への配属のときに、研究の方向性を決められたのですか？

実はふたたび物理熱が高まって、最初は物理の佐藤徹哉先生の研究室に入ったのです。ところが、4年の4月に、物理学科の助手から物理情報工学科の専任講師に着任された齊藤英治先

生が新しく研究室を立ち上げられることになり、第一期生として入れてもらうことになりました。ちょうどその直前に、齊藤先生は逆スピンホール効果という現象を見つけられたばかりで、スピン流という新しい研究テーマに興味を惹かれたからです。さらに、翌年の2007年には、スピントロニクス分野の研究者がノーベル物理学賞を受賞したこともあって、一気に研究にのめり込んでいくことになりました。

研究室に入ってまず驚いたのが、齊藤先生の物理に対する情熱と理解の深さです。つねに新しい研究にキャッチアップしつつも、何かを知っているという程度ではなく、深く理解して、自分の言葉で話をされる姿勢に、たいへん感銘を受けました。

そのほか、研究室には齊藤先生について物理学科から移ってきた先輩や、「実験が趣味」という後輩など、とびきり優秀な研究仲間が揃っていて、大いに刺激を受けました。

ただし、研究室はできたばかりで、実験装置がなかったため、他の施設を使わせてもらっていたこともあり、実験をするのは土日に限られていました。必然的に、平日は勉強したり、セミナーをやったり、議論に明け暮れたりしていたのですが、それが研究のアイデアを探ったり、考えを深めたりするうえでは、かえってよかったように思います。

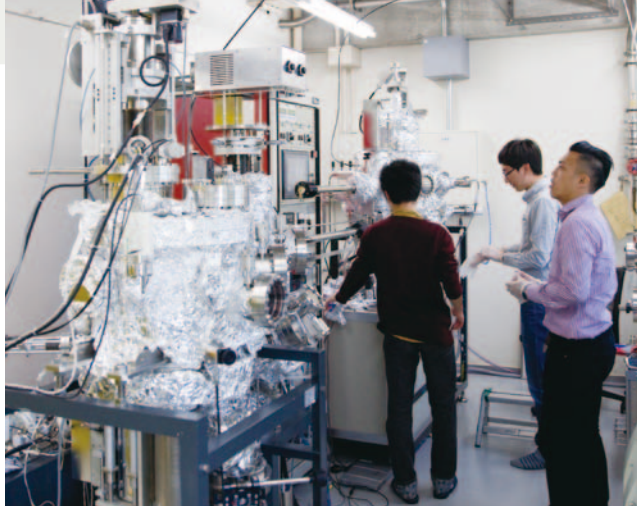
——サークルなど、研究以外の活動はされていなかったのですか？

入学当初、テニスサークルに一瞬入りましたが、すぐに辞めてしまいました。また、研究室に入る前は塾講師や家庭教師などのアルバイトをしていましたが、研究室に入る際に、勉強に集中しようと辞めました。もちろん、息抜きで、学部の子供学生実験グループの仲間や研究室の仲間と飲みに行くことはありましたよ。

——とはいえ、ほぼ研究一筋の学生生活を送られていたのですね。

運が良かったというのもあるのですが、できたばかりの研究室で好きなように研究ができたことに加えて、新しい研究分野





で次々に成果が生まれ、とにかく研究が面白かったのです。年に1回くらいは予想もしなかったようなデータが出てくるのがあって、その意味するところを理解した瞬間の、霧が晴れていくような爽快感はたまりませんでした。

修士2年のときには、自分で仮説を立てて実験し、理論模型までつくって独力で論文にまとめることができ、大きな達成感を味わうこともできました。こうしたことがきっかけとなって、しだいに研究者としてやっていく自信がついたように思います。

結局、4年から博士課程までに、共著も含めて十数本の論文を書き、修士・博士課程を3年間と、短期間で修了しました。

——それは異例の早さですね。その後、東北大学の金属材料研究所に助教として赴任されたのですね。

博士を修了する少し前に齊藤先生が東北大学に移られていたのですが、声をかけていただき、ふたたび先生の下で研究することになりました。その後、慶應大学から声をかけていただき、2013年4月からこちらで研究室をもつようになりました。

あまりにトントン拍子だったこともあって、実は海外留学には3週間しか行ったことがないのです。英会話を学んだのは、齊藤先生の研究室にケンブリッジ大学から来ていたポスドクと

一緒に実験をした3カ月間くらいですね。学会などで発表もするので専門の会話には困りませんが、今も、日常会話は少々苦手です（笑）。

——プライベートはどのように過ごされているのですか？

慶應大学に戻ってきた年に研究室の後輩と結婚したのですが、妻は名古屋で就職したこともあって、結婚した当初からずっと別居生活をしています。

そんなわけで大学入学以来、一人暮らしなので、得意な料理で息抜きをしています。たとえば、海外のお土産でもらった缶詰やパエリアの素みたいなもので、創作料理をつくってみたり、クックパッドを愛用しつつ、実験のようにあれこれ試して、楽しみながら料理をしています。

また、研究に行き詰まったときは、机を離れて、歩いてリフレッシュするようにしています。学生たちと議論するのも、発想の転換になります。研究室では学生と同室なので、齊藤研のときと同じように、「何かいいことない？」と言っては、暇な学生をつかまえてディスカッションをするのが日課になっています。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

● 安藤先生はまだ30歳ととても若く、つねに学生目線で接してくださるので、気兼ねなくなんでも相談しています。研究のことで悩んでいるときも、ディスカッションを通じて一緒にアイデアを練ってくださったり…。とくにスピントロニクスの研究は新しい分野なので、新規の発見のチャンスも多くエキサイティングで、大きなやりがいを感じています。

（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>

今まで誰も知らなかったことを、
自分が初めて解明する。
これがサイエンスの醍醐味。

安藤 和也

Kazuya Ando

専門は、スピントロニクスを中心とした物性物理学。2007年 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科卒業。2008年 慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻修士課程修了（早期修了）。2010年 慶應義塾大学大学院基礎理工学専攻博士課程修了（早期修了）。博士（工学）。2010年 東北大学金属材料研究所助教、2013年 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科専任講師を経て、2015年より現職。2013年より科学技術振興機構さきがけ研究員を兼任。



安藤 和也の ON と OFF

2013 年 4 月に立ち上げた安藤研究室。
それまでの道のりを振り返ります。



誕生日

修士 2 年生だった 2008 年の春から夏にかけ、当時ケンブリッジ大学博士研究員だった Theo（写真右端）が研究室に滞在しており、研究室のメンバーで彼の誕生日を祝ったときの写真です。Theo とは光学系を使って半導体のスピン流に関する実験と一緒に進めていました。議論するとき私の英語はめちゃくちゃだったと思いますが、辛抱強くつきあってくれたのを思い出します。写真中央の黒い服を着ている中山くんは、現在私の研究室で特任助教として活躍しています。



イギリス

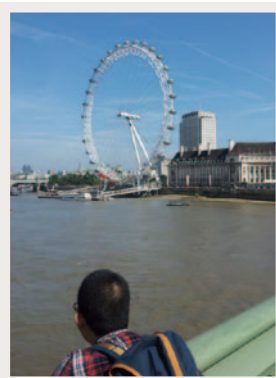
慶應義塾大学で博士を取得してからは、東北大学に移転していた齊藤研究室に助教として着任しました。

Theo を頼ってケンブリッジに滞在し、実験していた頃の写真です。このときの実験は思ったようには進みませんでしたが、次の研究につながる出会いがありました。



共同研究

写真に写っているのは当時ケンブリッジ大学博士研究員だった渡邊峻一郎さん。滞在中に知り合い、週末にロンドンに連れて行ってもらいました。この滞在中には一緒に実験はしませんでした。新しい研究の可能性を 2 人で議論し、仙台に帰ってからはこのときの議論をベースにした研究と一緒に進めることになります。



仙台

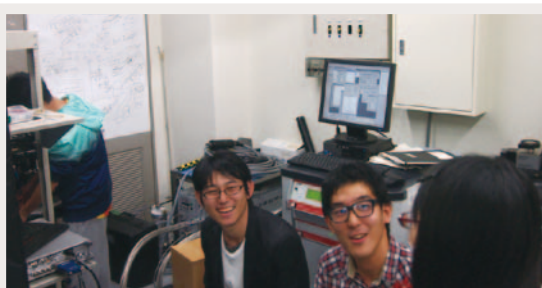
学部 4 年生のとき、慶應義塾大学に出来たばかりの齊藤研究室に第 1 期生として入りました。2006 年に新しく立ち上がった齊藤研究室ですが、私が東北大学を離れる前年の 2012 年には写真のような大きな研究室に成長していました。



独立

2013 年 4 月、自分が卒業した物理情報工学科の教員として慶應義塾大学理工学部に戻って

きました。学部 4 年生で新しい研究室に入ったときと同じく、何も無い部屋からもう一度スタートです。写真は着任時と 3 カ月後の実験室の様子。



引っ越し

最近も新しい実験装置の搬入が続いているので、部屋のレイアウトを時々見直しています。写真は実験装置の引っ越しの 1 コマです。装置を動かすために黙々と準備を進める学生と、それが終わるのを待つで雑談している学生達。

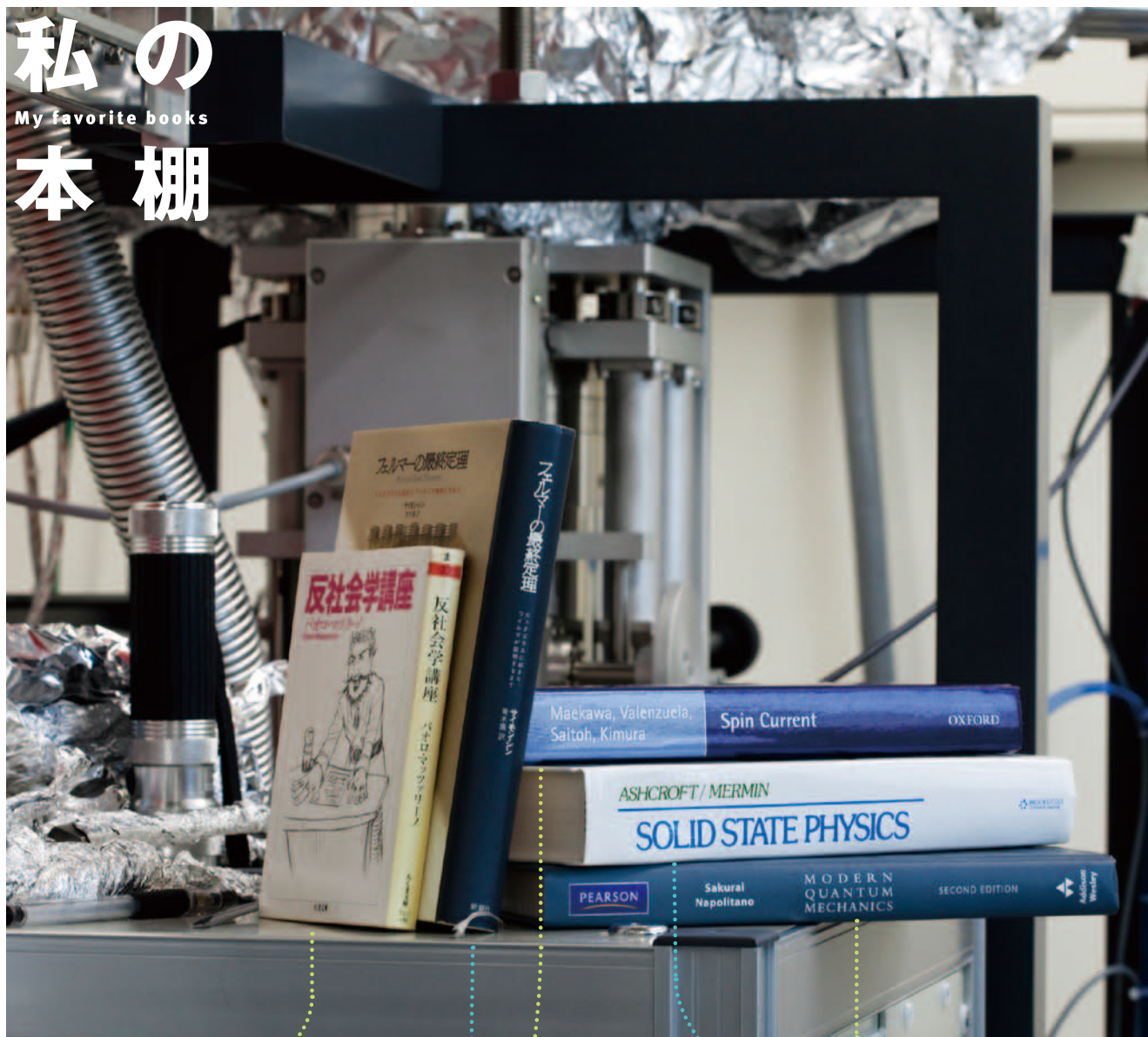
歓迎

2015 年に入ってから、フランスからの留学生 Amine と中国からの博士研究員の安さんが合流し、国際色豊かな研究室になりました。学生のアイデアで、自分で焼けるお好み焼き屋さんにて 2 人の歓迎会を開催しました。



私の 本棚

My favorite books



● **反社会学講座** 世の中にあふれている情報・常識は本物か。自称イタリア人の著者パオロ・マッツァリーノが、世間に流布するもっともらしい主張は、主観にまみれた都合のよいデータ解釈によるものだという観点から斬り捨てていきます。

真面目に読むような本ではありませんが、与えられた情報を鵜呑みにせず、自分で考えることの重要性を説いています。この本に書かれている内容はどこまで信じてよいのか。それは自分で考える必要があるでしょう。

● **フェルマーの最終定理** 17世紀の数学者フェルマーが残した難問が、360年の時を経て完全に証明されるまでの数学者たちの苦闘・軌跡を描いたノンフィクションです。あらゆる科学研究に共通する、閃きの瞬間と問題が解決されたときの爽快感、学問形成の過程で繰り広げられる躍動感を生き生きと感ずることができる一冊で、数学に縁のない人にもお勧めです。同じ著者の「暗号解説」も面白いです。

● **Spin Current** スピン流に関する専門書で、私もいくつかのチャプターの執筆を担当しました。日本語によるスピントロニクスに関する本はまだ数冊しかありませんが、英語で書かれたものはたくさんあり、本書は其中でも比較的新しい1冊です。スピン流の基礎的な物理から最近の研究進展まで幅広い内容が取り扱われています。

● **Solid State Physics** 物質中の物理現象を取り扱う物性物理学の代表的な教科書です。出版されたのは1970年代とかなり昔ですが、現在でも最もスタンダードな1冊です。分厚い（日本語版だと全部で4冊!）ですが、そのぶん解説は詳しく、

わかりやすい記述なので、学生のころから他の本を読むときの参考にもしています。

● **Modern Quantum Mechanics** スピンの存在を明らかにするシュテルン・ゲルラッハの実験にはじまり、現代的な視点で量子力学を構築しています。学部生の時に日本語版を読み、特に第1章、第2章のわかりやすさに感動した覚えがあります。いまは、砂川先生の『量子力学』やShankarの"Principles of Quantum Mechanics", Griffithsの"Introduction to Quantum Mechanics"とあわせて授業の参考にしています。

深く、深く理解する 安藤 和也

何かを理解したと言えるのはどういうことでしょう。物理の勉強をしていると、式展開を追うことができれば理解したという錯覚に陥ってしまふことがあります。あるいは、教科書に書いてあること、先生が言っていることは正しいんだと鵜呑(うの)みにしてしまふ。これは何かを理解したと言えるのでしょうか。

The Feynman Lectures on Physics という有名な本の中で、リチャード・ファインマンは、物理学者ポール・ディラックの言葉を引用して、次のように書いています。「What it means really to understand an equation—that is, in more than

a strictly mathematical sense— was described by Dirac. He said: "I understand what an equation means if I have a way of figuring out the characteristics of its solution without actually solving it." つまり、物理を理解するとは、現象を記述する方程式を実際に解かないでも、与えられた状況の下で何が起こるべきかが分かっていることだということです。計算するとうなるんだ! というのは、残念ながら何かを理解したことにはならないのです。

学校では、正解のための道筋が分かっている問題を、決められた時間内に1人で早く解くことが要求されています。これを達成するためには、ファインマンやディラックが定義したような「理解」は必要なかったかもしれません。しかし、研究

や実社会で直面する問題はほとんどの場合これとは真逆で、誰も答えを知らない問題の解を見出すことが常に求められます。研究では、何が起きているのか分からない現象を様々な方法で調べ、その答えを見つけるためのヒントを集めていきます。正解までの道筋が手の届く範囲にあるかどうか分かりません。調べればどこかに答えが載っていた試験問題と比べれば、これほどの難問はないでしょう。しかし、私たちには、偉大な先人達が長い年月をかけて築いた膨大な知識の結晶があり、自分の知らないこと、不得意なことを補ってくれる仲間がいます。制限時間はありません。このような中で次の時代につながる科学・技術を切り拓くためには、何かを深く「理解」している必要があるのです。

理 工 学 Information

先端材料評価センターのご紹介

本年10月に、“先端材料評価センター”を開所いたしました。このセンターは、経済産業省補助事業「地域イノベーション協創プログラム補助金」により、新規材料の評価技術の開発と提供を地域関連企業に対して円滑に行うことを目的としております。

下記の先端材料加工・評価装置を導入しており、皆様からの活用をお待ちしております。

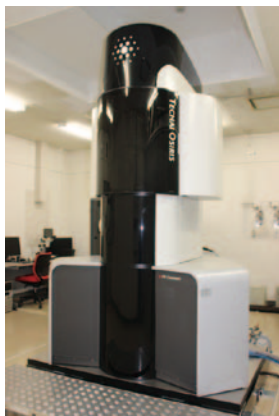
導入装置

- 多次元イメージング解析システム Tecnai Osiris (FEI)
右上の写真です。
- アプレシブジェットカッター Varuna (スギノマシン)
右下の写真です。
- 多目的マイクロ元素分析システム M4 TORNADO (Bruker)

利用時間：平日 午前 9:00 ～ 17:00

その他、使用料金、予約方法など詳細な情報につきましては、下記 Web ページをご覧ください。

Web：http://www.sfr.st.keio.ac.jp/aerospace.html



編集後記

安藤先生は30歳とお若く、表紙の写真にあるようにセーターを着て研究室で学生の中に混ざっていると誰が先生かわからないほど、親しみやすい雰囲気をお持ちです。インタビューでも見た目の雰囲気そのまま、飾らずに気さくに話をしてくれました。

コラムにある、“深く、深く理解する”は、本の紹介にある“反社会学講座”にもつながっており、安藤先生が一番大切にしているモットーではないかと思ひます。筆者も思いを新たにしようと思うコラムでした。皆さんの心にも響きましたでしょうか？

(松林真奈美)

新版 窮理図解

No.21 2015 December

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 サイトテック・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
facebook http://www.facebook.com/keiokyuri