

twitter
@keiokyuri

facebook
はじめました!
"keiokyuri"

K y u r i z u k a i

窮理図解

新版

2012 July
no.

10

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/top_eng.html

慶應理工の スピン 動力学

革新的電子デバイス創生
に向けたスピン制御技術

物理学科

の ざ き ゆ き お

能崎幸雄

(准教授)



スピンエレクトロニクスで 電子デバイスに革新を

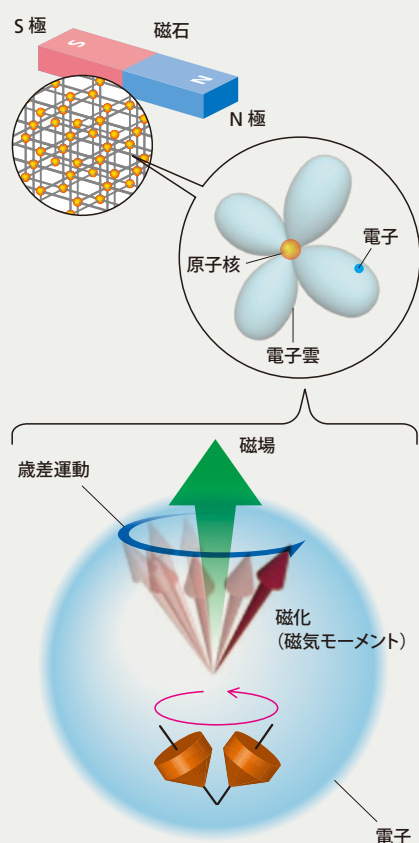
ナノ電子デバイス技術の向上に貢献する

最も小さな磁石、それが電子スピンだ。電子スピンには2種類の向きがあり、この違いが磁石のN極とS極を生み出す。しかも2種類ある電子スピンは磁場や電流の影響を強く受け、その向きが入れ替わることもある。この磁場や電流と電子スピンの関係性に注目しているのがスピンエレクトロニクスだ。比較的若い研究分野だが、世界中の注目を集めている分野でもある。その実用化を目指して研究に取り組む能崎准教授を訪ねた。

磁石の源となる電子スピン

「磁石とは、周囲に磁場を作るN極とS極を持つ物質のことですが、その磁性の源ともいえるのが電子スピンという現象です。このスピン現象により、電子そのものが小さな永久磁石として働くのです」と能崎幸雄准教授が磁石の基本原則を説明する。

では、電子スピンとは何か。ミクロな世界の現象なのでまだ不明確な部分も多



いとしながらも能崎さんは「電子スピンとは、2回転しないと元に戻らないような奇妙な自転運動です。磁気モーメントを持つため、磁場中で歳差運動をします（図1）。イメージとしては、回転するコマが回転軸を傾けて首振り運動をしている様子が近いでしょう。ただし、時間が経つと摩擦により回転が止まるコマとは違い、電子スピンはずっと回転し続けます。これは、電子が波としての性質も持っているからです。その電子スピンの作る磁場が磁性体の磁力の源になっています」と話す。

スピンエレクトロニクスとは、この電子スピンの向きを自在に操る研究分野のことで、電子デバイスの性能を飛躍的に向上させる技術として注目を集めている（図2）。

こうした特徴を持つ電子スピンだが、磁場や電流、電場、熱、マイクロ波などを刺激として与えると歳差運動が大きくなり、スピンの向きが反転してしまう。つまり物質のN極とS極が入れ替わる。この現象は磁化反転と呼ばれ、パソコンなどで使われているハードディスクドライブ（HDD：磁化の向きに1と0を割

図1 電子スピンはミクロな世界の磁石

原子核の周囲にある電子がスピン状態になることで磁化（磁気モーメント）が起こり、1つの永久磁石として振る舞う。電子スピンには上向きと下向きの2種類あり、この向きによってN極とS極が決まる。

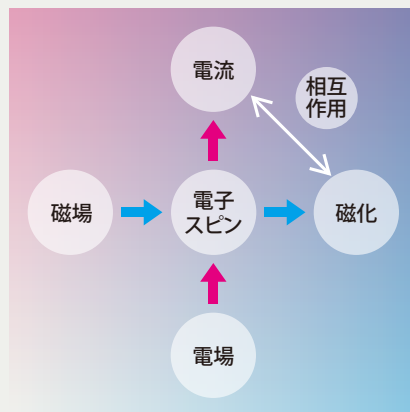


図2 スピンエレクトロニクスの概念

電場が誘引する電流と、磁場が誘引する磁化が、物質中で相互作用する。これを利用して電流で磁化を、磁化で電流を制御できる。

り当てた磁気記録装置）にも応用されている。現在のHDDは、磁場による磁化反転をデジタル情報の書き換えに採用している。しかし、この方法ではHDDの省電力化や高記録密度化などが限界に達しつつあるという指摘もある。そこで能崎さんは、電流による磁化反転に着目し、電子スピンの反転を省エネかつ高速に制御するための研究を進めている。

電子スピン制御の鍵は 4つのトルクの解明

電子スピンを制御する際に鍵となるのが、電子スピンに作用する力（トルク）である。このトルクには、①ダンピングトルク、②歳差運動トルク、③スピントランスファートルク、④非断熱トルクの4つの種類がある（図3）。電子スピンの磁場や電流を刺激として与えた時、この4つのトルクが作用して電子スピンの向きが反転する。このことは理論的に明らかにされており、特に磁場を与えた時のトルクの作用と磁化反転の関係はすでに紹介したHDDの例もあるように、先行研究も多い。「それに対し、電流による磁

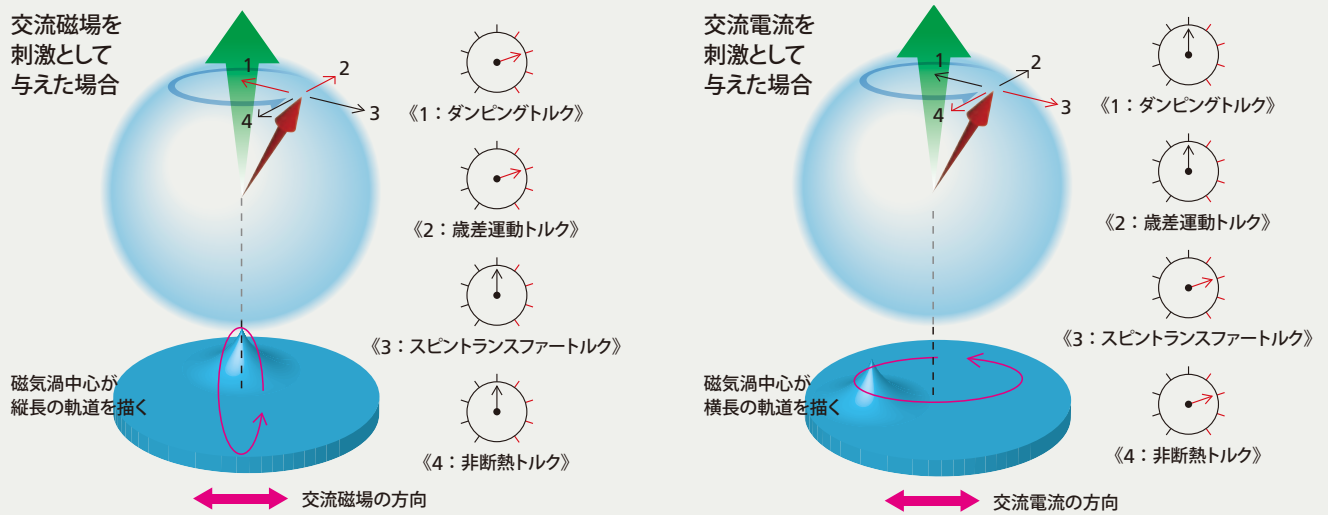


図3 電子スピンの4つのトルク

電子スピンの4つのトルクは、すべて磁気モーメントと直交して作用するため、磁気モーメントの向きや運動を決定する要素とされている。4つのトルクは、すべて磁気モーメントと直交して作用するため、磁気モーメントの向きや運動を決定する要素とされている。4つのトルクは、すべて磁気モーメントと直交して作用するため、磁気モーメントの向きや運動を決定する要素とされている。4つのトルクは、すべて磁気モーメントと直交して作用するため、磁気モーメントの向きや運動を決定する要素とされている。

化反転はまだ研究も少なく、始まったばかりの分野です。しかし電流は磁場と違い、単一の磁性体素子に直接アクセスできるので効率が良く、数十GHzの高速動作を小さい消費電力で実現できるので」と能崎さんは電流による制御のメリットを話す。

能崎さんが取り組んでいるのも電流を刺激として使った時に生じる各トルクを定量化する研究だ。狙いは単にスピンを反転させるだけでなく、より高速に、そしてより小さな刺激で効率的に反転させることにある。

そこで電流を刺激として与えたとき、4つのトルクがそれぞれどのように磁化反転に効いているのかを明らかにしようとした。しかし、個々の電子スピンの変化を観測し、4つのトルクの働きそれぞれについて解析するにはあまりに対象が

小さすぎる。そのため、複数の電子スピンによって作られる磁気構造に注目し、その特徴を活用したという。

「隣り合う電子スピンの間には、互いの向きを平行に保とうとする相互作用が働いています。そのため、磁性体素子をナノメートル規模にまで小さくすると、全体の振る舞いから1つの電子スピンの振る舞いを解析できるようになります。例えば、材料を100ナノメートル程度の大きさにすると、すべての電子スピンの同調して動くマクロスピンを実現できます。また、円盤状にすると、電子スピンの互いに調和を取ろうとして一塊の磁気渦を形成します」。これらの磁気構造は極めて安定性が高く、与えた刺激に対してシンプルでリニアな反応を見せるので、4つのトルクの解析もしやすくなる。ただし、サイズが10マイクロメートルを超えると、スピンの複数の場所で異なる安定構造を取ろうとするため、構造が複雑になってしまうという。

応用先は磁気メモリから論理演算デバイスまで

マクロスピンや磁気渦に関する研究は日々進展しており、電子スピンの振る舞いが解明されつつあると能崎さんは笑顔を見せる。

「例えば、磁気渦に交流電流を刺激と

して与えると、磁気渦の中心が共鳴し、同心円状に回り出します。この時の共鳴スペクトルの線幅が①ダンピングトルクと、共鳴周波数が②歳差運動トルクとそれぞれ強い関わりがあることはよく知られていました。しかし最近、刺激として与える電流の周波数を大きく変えると、渦の軌道が同心円状から楕円状に変化することを発見したのです。さらに、詳しい計算の結果、楕円軌道の形状から③スピントランスファートルクと④非断熱トルクを求めることができることが分かりました（図3）。今はこの理論の検証実験を進めているところです。

これら4つのトルクと刺激との関係が明らかになると、電流による磁化反転が定量的に解明されるだけでなく、磁気メモリの高速化や、書き換え可能なスピン演算デバイスの開発といった新たな応用にもはみがつく（図4）。

「電子スピン制御の高度化が進むと、電流をON/OFFするミクロなスイッチとしても利用できるようになります。情報の保存だけでなく、様々な機能に書き換え可能な万能型電子回路が実現できるなど、ポスト半導体デバイス技術としても期待されています」。

画期的なデバイスの開発につながる技術として、電子スピンの注目が集まっている。（取材・構成 渡辺 馨）

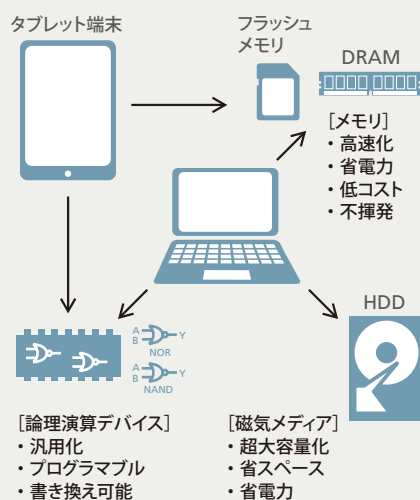


図4 電子スピンのデバイス応用

電子スピンは、待機電力がほぼゼロになる磁気メモリや様々な機能に書き換え可能な電子デバイスへの応用が期待されている。

突き詰めることで 面白さが見えてくる

高校時代は物理より化学の方が好きだったという能崎さん。恩師である宮島先生に師事し、大学時代の友人や海外の研究者らとの交流を通して、物理の面白さに目覚めたという。しかも、教壇に立って教えることで分かってくる物理の奥深さにも改めて気付かされ、物理への関心は深まるばかりだ。そんな能崎さんを学生たちは厳しくも優しい先生と慕う。

——子どもの頃、好きな遊びや熱中していたことがありますか？

母に言わせると、ものを分解するのが好きな子どもだったみたいです。わが家は両親が自営業をしていたので留守がちで、1人っ子ということもあり、1人で遊ぶことがほとんどでした。そんなある日、母が仕事から帰ってみたら私がカメラを分解して遊んでいたというのです。

今思えば、私はカメラを分解したかったのではなく、その仕組みを知りたかっただけだと思います。カメラの中にどんな仕掛けがあって写真を撮れるのか。そして、シャッターボタンを押すと音がするのはどんな仕組みによるのか。そんなことを不思議に思い、疑問を感じていたことを覚えています。おそらくカメラの内部を見ようと裏ぶたを開け閉めするうちに何かが取れたか壊れたかして分解が始まり、母が帰ってくる頃にはネジや部品になっていたんでしょう。ひどく怒られましたね。

そんなこともあって、母は私のことを理系向きだと思っていたようです。そしてそれ以後は、何かを壊されるよりはとプラモデルを与えられるようになり、壊すだけでなく、作る方にも興味を持つようになりました。

——学校の勉強も理系が好きだったのですか？

どうでしょうか。理系が好きというよりは文系に対する苦手意識が先にあったように思います。その場で考えれば答えが出る算数とか理科は好きでしたが、暗記ものなど、日々の地道な

勉強が必要な科目は苦手でした。漢字の書き取りなどは全滅でした。それでも中学くらいまでは試験前の一夜漬けでなんとかりましたが、高校になるとそれも通用なくなり、文系科目を遠ざけ、数学や化学といった理系科目に傾倒していきました。ただ、物理だけは別でした。現実感がないというか、その面白さがあまり分からなかったのです。

それに比べて化学は、化学式で記述した通りに薬品を組み合わせると目の前で化学式通りの反応を再現することができます。化学の方がリアルというか、当時の私には面白く思えたのです。

——現実世界を説明できるところが面白いということですか？

そうですね。どこか現実離れた印象がある物理に比べて化学はシンプルで、原因と結果が直結するすっきり感もありました。それが高校時代の私には面白く感じられたのだと思います。物事の本質をつかんでいる感覚さえありました。

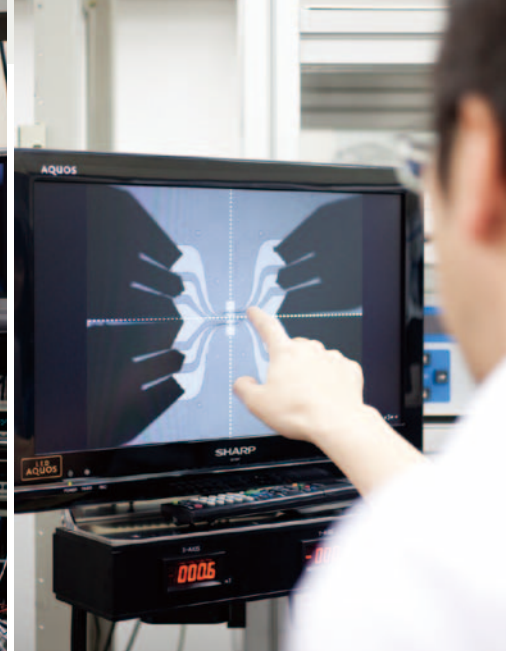
実は、私が物理の面白さに気付いたのは大学に入ってからです。きっかけは大学で出会った友人で、とにかく物理が面白い、物理以外は学問じゃないと力説する彼に感化されたんです。とりあえず選択肢に残しておこうというくらいの気持ちでした。それを決定的にさせたのが、今は名誉教授になられている宮島先生の電磁気学の授業です。先生の授業にはそれまで物理に感じていた非現実感がなく、わかりやすく、面白くさえありました。物理って楽しいかもと思えたんです。大学2年のことでした。本音をいえば、もう少し早く気付きたかったですね。

——研究者になろうと決心したのはいつ頃でしょうか？

私が研究者になろうと真剣に考えたのは宮島先生の研究室に所属し、修士課程に入ってからでした。私が研究テーマを探していた頃、助手をしていた先生が研究のために夏休みにフランスに行くことになり、一緒に行って現地で研究を手伝ってくれる学生を探していたんです。その話を聞くなり、面白そうだと手を挙げたところ、他に適任者も現れず、フランス行きが決まりました。

フランスという異国で、しかも高いモチベーションを持った





研究者に囲まれて研究に没頭する日々を通して、集中して研究することの面白さに気付きました。手伝いでも十分面白いんだから自分の研究だったらどうなんだろうと考え、研究者の道を選びました。

——研究とプライベートの区別は難しいですか？

結婚するまでは研究三昧でした。でも結婚を機にそれを改め、子どもが生まれてからはちゃんと切り分けられるようになりました。講義の準備が大変なので、家に持ち帰ることもあります。子どもと一緒にいるときは完全にプライベートですね。実際、子どもを前にするとそれだけで手一杯で、物理どころじゃないというのが正直なところ。子どもは何を考えているのかさっぱり分かりませんし、少しもロジカルではない。でも、その分からない感じと手に負えない感じが相まって面白いんでしょう。現在、プライベートの最大の関心事は子どもであることは間違いありません。

迷い、悩んだ時こそ集中し、
一点突破で解決しよう！

——学生には何を学び取って欲しいと考えていますか？

私自身の経験を踏まえたアドバイスをするのなら、どんな研究分野でもいいので、自分が面白いと思える対象に出合っ^{まいしん}て欲しいと思います。すでに見つけている方はそのまま邁進してください。そして、まだ出合えてない方はあれこれ目移りしてしまう気持ちをぐっと抑えて、とりあえずでよいので、何か1つに集中することをお勧めします。

勉強以外にやるべきことも多く、大変とは思いますが、迷いがある時ほど何かに集中してみてください。それまでの疑問や謎といったいろいろなことがつながり、納得できる瞬間が必ず訪れます。その瞬間をぜひとも捉えて欲しいと思います。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

●一般教養の講義ではただの厳しい先生という印象でしたが、研究室に入って一変しました。研究で分からないことを質問した時も、単に答えを教えてくださいでなく、疑問を解決するためのステップを細かく刻んで、僕らに考えさせながら理解の階段を上っていくように説明してください。質問者だけでなく、ゼミに参加する全員がなるほど、そういうことだったんですかとうなずくことも少なくありません。難しいことをごまかすことなく、難しさはそのまま、ちゃんと理解できるようになりました。

(取材・構成 渡辺 馨)

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

能崎幸雄 Yukio Nozaki

専門はスピンダイナミクス、スピンエレクトロニクス。現在の研究テーマは、強磁性金属中において電子系やフォノン系と強く結合するスピン角運動量のダイナミクスの制御。基礎研究から実用を想定した応用研究まで幅広く展開している。1998年、博士（理学）を取得後に九州大学大学院システム情報科学研究院助手となり、2006年同大学准教授に就任。2010年に慶應義塾大学理工学部准教授に就任。現在に至る。

能崎幸雄 研究者への軌跡

高校卒業から慶大に入学し、学位を取得して
九大助手になるまでの9年間を振り返ってみました。



高校時代

高校では、好きな科目（数学と化学、少しだけ物理）以外ほとんど勉強しなかった。周りの友人と同じく医学部志望だったが、理系科目だけで合格できるほど甘いわけがなく、進路を迷っていたとき、学校の掲示板で慶大理工学部の指定校推薦を見つけた。これが慶應人生の始まり。

慶大入学、
友人に誘われ物理学科へ

バブル経済全盛期で、日吉キャンパスは華やかな雰囲気だった。誘われるまま入ったテニスサークルで物理学科志望の友人と出会い、気がつけば物理学科に進学。専門科目のレポートに追われながら、週2回の物理学実験の後はいつも「ひょうら」で反省会（飲み会）。



宮島研究室に配属

電気抵抗ゼロや磁気浮上など面白い現象を示す「超伝導」に興味をわき、「超伝導・磁性」を専門とする宮島研究室へ。卒論提出前にカラオケに行き、肺に穴が開き、入院・手術を余儀なくされるものの、恩師・先輩・友人そして両親の温かいサポートにより無事卒業。



修士課程

助手の大谷先生が夏期休暇中にフランスの国立研究所（グルノーブル）へ実験に行くと聞き、迷惑を顧みず一緒に連れて行ってもらった。先生の友人の研究者たち（写真）と共同生活をしながら、超伝導薄膜を用いた実験結果の解析に没頭。将来、研究者になりたいと固く決心。



貴重な恐怖体験

グルノーブルは、周囲が岩山だらけでロッククライミング天国。大の高所恐怖症だが、フランス人研究者から毎日ロッククライミングに誘われた。最後は、フランス滞在の記念にと雪山登山。彼曰く初心者向きの山らしいが、本当に死ぬかと思った。忘れられない思い出だ。



博士課程

研究者として目標にしていた大谷先生が転任。これを期に、新しい研究テーマに取り組む。多くの失敗を積み重ねながら、強磁性薄膜の微細加工に成功。その磁気構造解析の研究で学位を取得。研究がうまく行かないとき、一緒に“焼き肉食べ放題”に行ってくれた後輩たちに感謝。

私の 本棚

My favorite books



● **スピントロニクス一次世代メモリ MRAM の基礎** スピントロニクス（スピンエレクトロニクス）という新技術をわかりやすく解説した本。難しい式があまり出てこないで、高校生でもこの新しい研究分野の雰囲気を感じることができると思います。

● **（番外①）動物のお医者さん** 描かれている大学の研究室と、学生時代の研究室の雰囲気（特に指導教員の雰囲気）がそっくり。ドキュメンタリーに近いかも。世の中はこんな研究室ばかりだと思っていましたが、決してそうではないことが卒業後にわかりました。

● **（番外②）聖飢魔IIの解散黒ミサ（コンサート）のDVD** デモン小暮閣下率いるバンド、聖飢魔IIが1999年12月に行った解散黒ミサを完全収録したDVD。学生時代から閣下の信者（ファン）で、オールナイトニッポンは欠かさず聴いていました。おかげで火曜日の朝は必ず寝不足でした。いまでも気分転換によく見ています。家族には良さが理解できないようですが…。

● **本多光太郎傳** 「鉄」の神様と呼ばれた本多先生の伝記。ある先輩から「研究室運営の参考になるからぜひ読むように!」と貸していただきました。日本における磁気学の黎明期、本多先生が磁性研究をリードしながら多くの後進を育てた過程が描かれています。未知の世界を拓く実験に努力を惜まず、近道をせず、正道を歩む姿勢に感銘を受けました。研究者を目指す学生にはぜひ読んでもらいたいです。「人間磁気」と呼ばれた本多先生のような魅力あふれる人間性を身につけたいですね。

● **スピンはめぐる** 磁石の源である電子スピンの発見された経緯が書かれた本。後にノーベル賞を受賞するパウリ、ディラック、ハイゼンベルグなどの天才たちが原子の内部構造の解明に立ち向かった様子が、生き生きと描かれています。「スピンは電子の自転」という相対論的に矛盾する仮定が論文として発表された経緯など面白いエピソードがたくさん載っています。

● **Spin Dynamics in Confined Magnetic Structures I ~ III** 私の専門である「スピンダイナミクス」の最近のトピックスが丁寧にまとめられているシリーズです。ギガヘルツからテラヘルツ帯の高速なスピン運動を、周波数領域・時間領域で測定する新しい技術が紹介されています。

● **物理数学の直観的方法** 九州大学で初めて講義を担当した際、「電磁気学は超不人気科目で、数学的技法がハードルとなって単位を落とす学生が多い」と聞いていました。ベクトル解析やフーリエ解析、テーラー展開などの教え方に悩んでいたとき、隣の研究室の教授から紹介してもらった本です。丸暗記していた公式がどのような意味を持っていたのかを改めて理解でき、「目から鱗」でした。数学の迷路に迷い込んでいる学生は必読。

● **磁気工学の基礎・強磁性体の物理** 磁性物理学の初学者にとって、バイブル的な教科書。研究室に配属された4年生には、まずこの教科書を勉強してもらいます。物質の磁性を学ぶには、量子力学、統計力学、電磁気学の複合的な知識が必要なのですが、とてもわかりやすく説明されています。

理工学分野における産学連携

かつては優れた科学者・技術者個人の努力によって、新しい概念や商品が生まれていました。しかし、現在は個人の時代は終わり、産学連携、産官学連携など共同での研究開発が盛んになっています。

この号に登場した能崎准教授は、現在、記録密度が1平方インチ当たり1テラビット(10^{12} ビット)を超える次世代ハードディスクの実現に向けて企業と連携し、新しい記録方式の動作検証を行っています。量産されているハードディスク媒体を用いた動作テストでは、研究中の記録方式の有効性が確かめられています。そして今後は、より小さな磁気ビット記録が可能な

次世代記録媒体について、実験を進める予定です。

実現すれば、スーパーハイビジョン画像(解像度が現行フルHDの16倍)の長時間録画が可能な次世代レコーダの開発に弾みがつくだけでなく、さまざまな企業が膨大なデータの保存に利用しているデータセンターの小規模化・省電力化が期待できるので、注目を集めています。

能崎准教授は、「研究中の新しい記録方式を次世代ハードディスクの標準方式として普及させるためには、記録再生ヘッドだけでなく、記録媒体、信号処理技術の開発も必要です。今後は、これらの企業を巻き込んだ形で研究を行い、実用化を目指したいですね」と抱負を語っています。

理工学部・理工学研究科では、こうし

た連携活動を推進するため、産官学連携の窓口として慶應義塾先端科学技術研究センター(KLL)を設置して、理工学研究の技術シーズの発信だけにとどまらず、このケースのような研究者の実用化への思いと産業界の連携ニーズに基づいた共同研究プロジェクトを推進しています。

さらに、KEIO TECHNO-MALL(慶應科学技術展)や産学連携セミナーなど産業界との交流の場を設けており、これらのイベントをきっかけに、企業からの連携の申し入れがあり、新たな研究プロジェクトも誕生し、具体的な活動につながっています。

その成果として、2011年度には300件を超える産官学連携プロジェクトが実現しています。

理工学 Information

「イノベーション創出戦略マネジメント講座(ソニー寄附講座)公開シンポジウム2011 人類・社会の新たな発展を目指してⅢ」所眞理雄(ソニーコンピュータサイエンス研究所会長)編 8月31日発売

<http://www.keio-up.co.jp/>

2009年に開始された、慶應義塾大学とソニー株式会社による次世代技術系人材育成協働プロジェクトによる連続公開シンポジウム「人類・社会の新たな発展を目指して」。2011年度に開催された全4回のシンポジウムをまとめた書籍化最終巻が刊行され、ついにシリーズが完結します。慶應義塾大学出版会ホームページからご注文いただけます。

今後のイベント

- 2012年10月19日(金) 第15回 KLL 産学連携セミナー
 - 2012年12月7日(金) 第13回 KEIO TECHNO-MALL
 - 2013年2月22日(金) 第16回 KLL 産学連携セミナー
- 詳細は順次、慶應義塾先端科学技術研究センター(KLL)のwebサイト(<http://www.kll.keio.ac.jp/>)にアップされます。

編集後記

2009年より発行している本誌も、はや10号となりました。今号から少しだけ変化があります。そのひとつは、研究者に何かを持ってもらった写真を表紙にすること。今回は、「スピン」にちなんで、地球ゴマを選びました。

撮影では、能崎准教授みずから、コマに糸を巻いてくれました。その姿は、一心にコマ遊びをする少年さながら。自然と雰囲気やわらぎ、能崎准教授らしい、リラックスしたやさしい表情が撮れました。

能崎准教授は、私が抱いている本学理工学部の研究者たちのイメージそのままのような気がします。まじめで温厚で、教育も研究も一生懸命。いつも研究室にいるから、電話するとすぐに出る。締め切りを守るけれどあんまり忙しいと忘れてしまい、督促されてあわてて対応…。

既刊10号に、12人の研究者が登場しました。個性も研究内容もばらばらですが、集まるとやはり、矢上キャンパスの風を感じます。ぜひ読み返して、風を身近に感じていただければ幸いです。「新版 窮理図解」は、これからも研究者の魅力的な素顔を紹介していきます。

(平良沙織)



慶應義塾大学出版会刊行

新版 窮理図解



No.10 2012 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>