

twitter
@keiokyuri

facebook
"keiokyuri"

K y u r i z u k a i

新版

窮理図解

2014 October
no.

17

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>

システムデザイン工学科
かきぬますひろ

柿沼康弘

(准教授)

慶應理工の 精密工学

知能化技術が導く
革新的ものづくり



人の能力を持つ 加工機を目指して

異分野の融合研究が生み出す生産技術

精密工学を専門とする柿沼康弘准教授の研究は、じつに多彩で幅広い。ときには材料工学、またあるときは制御工学、さらにナノフォトニクスまで、異分野との積極的な融合研究を通じて、これまで世界になかった新しい生産技術を次々に生み出し、脚光を浴びている。その精力的な研究への取り組みと成果について、話を聞いた。

応用が期待される 電気で粘着性が変化するゲル

微細加工技術や機械要素開発を軸にした生産工学を専門とする柿沼康弘さん。現在、①電気粘着ゲルを用いた機械要素開発、②“力を感じる”インテリジェント加工機の開発、③硬脆材や弾性高分子材の微細加工、の3つが、研究の柱という。

ユニークなのは、いずれの研究においても他分野の要素を取り入れながら、これまでになかった新しいもののづくりにチャレンジしている点だ。

たとえば「電気粘着ゲル」の場合、電気で粘弾性が変わる「電気粘性流体」(ER流体= Electro-Rheological fluid)をベースにしているが、これは1940年代に発見され、90年代に自動車産業を中心に

応用開発が盛んに進められた機能性流体である。

「ER流体は、電気をかけると、たとえば牛乳がババロアへ、さらにチーズへというように、粘弾性を変えていく物質です。つまり電圧によって硬くなるんですね。そのため、さまざまな分野で応用が期待されているのですが、時間の経過にともなって粒子が沈降・凝集してしまい、効果が薄れることや、液体のため扱いにくいという問題がありました。当初は、このER流体を使った応用デバイスの研究を目指していて、そのためにER流体をより扱いやすいゲル状にしようと、専門外の材料開発にまで踏み込んで研究したところ、思わぬ成果が得られたのです」と柿沼さんは言う。

ある日、ゲル化のための材料の分量を間違えて倍以上投入したところ、ゴム状

に近いゲルが生成されたのだ。この物質の性質を調べたところ、意外にも、電気をかけるとその表面が粘着性を持つようになることがわかった。

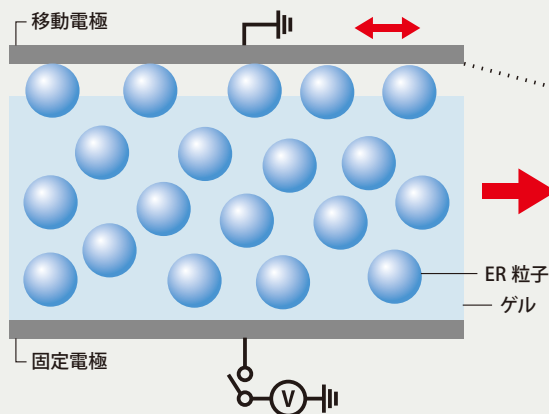
「いうなれば、電気によって、セロハンテープの表面が裏面に変化するようなイメージです。これは、シリコンゲル中に分散しているマイクロ粒子が、電気をかけると凝集し、内部のゲルが表面に押し出されることで粘着性が生じるというもの。専門外ですから、化学メーカーの協力を得て研究していたのですが、既成概念にとらわれなかったことが逆に幸いました」。

電気をかけるだけで粘着性によってモノを固定できることから、現在は、半導体のシリコンウエハーの加工時や搬送時の固定、振動を抑えるダンパー、精密機械のクラッチやブレーキなどへの応用を図っている。

「積層させることで粘着力を高めたり、より小型化したり、現在は自分の専門の生産工学を生かして応用開発を進めているところですよ」。

(a) 無電界時

粒子が支持 → 電極は移動可能



(b) 電界印加時

ゲルが支持 → 電極は粘着固定

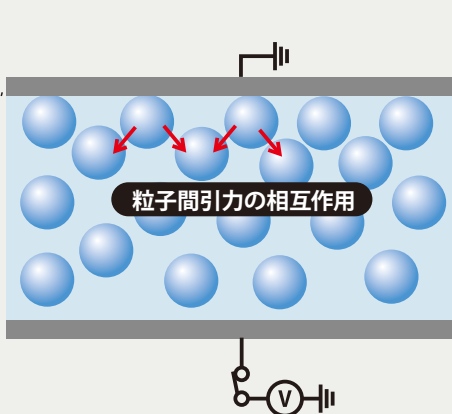


図1 電気粘着効果の発生メカニズム

(a) 無電界時には、ゲル表面より突出したER粒子が移動電極を支えている。ER粒子は滑り特性が良く、移動電極は自由に動かせる。

(b) 電界印加時には誘電分極した粒子が互いに引き合い、表面に突出していた粒子はゲル内部へ移動。一方でゲルが隆起して移動電極に粘着する。

画期的なセンサレスの加工機を開発

一方、2つ目の“力を感じる”インテリジェント加工機の研究では、制御工学の知見を取り入れた。

「これは、サーボ情報を観測し、センサなしに加工力やトルクを自在に制御できるシステムです。その際力ギとなるのが、リニアモータ駆動のテーブルの駆動制御系に、外部からの負荷を監視する『外乱オブザーバ』を応用すること。これは、入力に対して、理論上得られる出力と違う結果が出た際に、外からどのような影響が加わったかを推定する技術になります」。

本来、機械に加えられている力を直接測ろうとすると力センサが必要になるが、外乱オブザーバでは、あらかじめ工作機械に組み込まれている位置決めシステムを利用して、モータに流している電流（入力情報）と出力された回転数もしくは応答位置（出力情報）を読み取ることで、どれだけの力が加えられているかを運動方程式に基づいて割り出すことができる。動的な加工負荷をリアルタイムで推定できるのが特長だ。

「現在では何にでもセンサをつけるのが主流ですが、センサ自体、高価なものもありますし、センサを付けるとどうしてもメンテナンス期間が短くなり、コストがかさみます。したがって、10～20年も使用する工作機械などではセンサレスが求められる。そうしたことからこのシステムは業界からの注目度が高く、数年後の実用化を目指しています」。

さらに柿沼さんは、モニタリングした結果から、加工力を制御する技術の開発にも取り組んでいる。これにより、機械

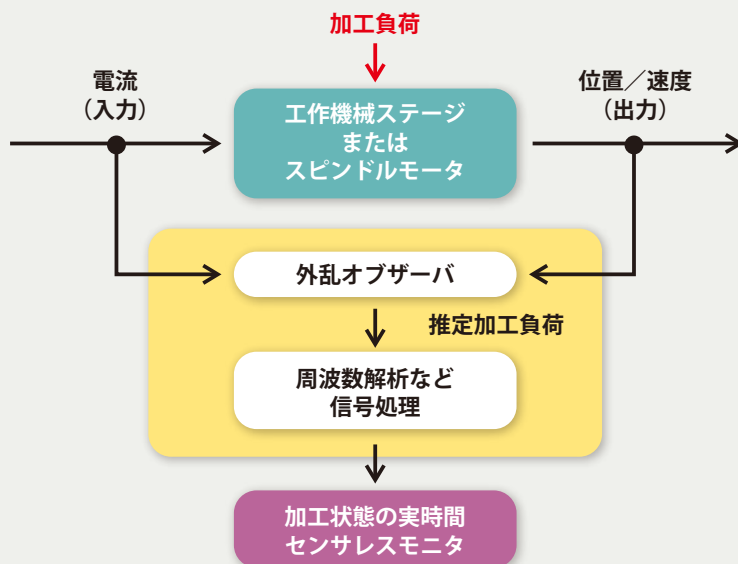


図2 センサレスプロセスモニタリング

外乱オブザーバ理論に基づき、スピンドルモータやステージのサーボモータの入出力情報から加工負荷を推定し、これに周波数解析などの信号処理を施すことで、びびり振動、工具欠損などの異常加工状態を診断する。

加工の永遠の課題ともいわれる「びびり振動」をコントロールしたいという。

「振動は不良品や、機械の故障につながります。とくに問題なのが、工作機械の動特性と加工プロセスの過程で、ある条件を満たしたときに突然発生する自励振動（系の中で引き起こされる振動）です。自励振動は事前に予測することが難しく、いまのところ画期的な対応策はありません。そこで外乱オブザーバを使って、どういう振動なのかをリアルタイムで検出し、その結果に基づいて力をコントロールできればと考えているのです。いずれは、本当の意味で人間のような能力を持った機械をつくりたいですね」。

光学素子のナノ加工まで手がける

さらに、硬脆材や弾性高分子材の微細加工の研究では、ナノ加工でみられる現

象の解析にまで手を広げる。これに基づいて、微細加工に必要な加工機の開発を行っているという。

「レンズのようなガラスを加工する場合、通常の方法で切り込んでしまうと割れてしまいますが、超音波振動を使ったり、ナノの領域で加工すると割らずに透明なままきれいに加工できるのです。現在は、その現象を解析しています。また、これに関連して電子工学科の先生とともに微小光共振器の開発を手がけています。これは光速で移動する光を一定時間、一定の場所に閉じ込めることで、光による信号処理を可能にする素子になります」。

現状の電気による信号処理ではジュール熱によるエネルギーロスが避けられないが、光による信号処理が可能になれば、エネルギーロスを劇的に減らすことができ、人々を悩ませているバッテリーの持ちを大幅に向上できる。柿沼さんの研究は、光の制御という最先端のナノフォトリクスの領域にまで及んでいるのである。

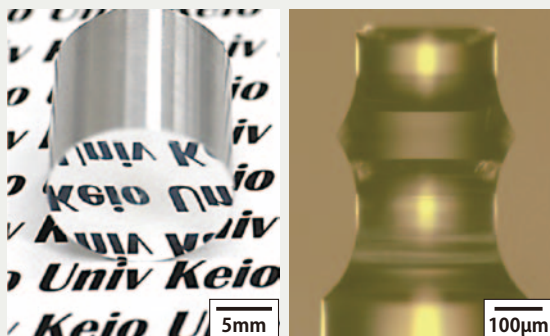
「融合研究では、未知の分野のことを勉強しなければならない大変さがありますが、今は機械と制御の両方に通じることで、これまでになかった成果が得られつつあります。今後も、世の中の役に立つ革新的な研究をしていきたいですね」と、柿沼さんは意気込む。

（取材・構成 田井中麻都佳）

図3 ナノ精度機械加工技術（超精密加工技術）

写真左：学生が試作した超精密加工機で、ダイヤモンド工具を使って鏡面加工した結果。

写真右：結晶異方性を考慮して、超精密加工機で製作した蛍石（CaF₂）の微小光共振器（光を閉じ込める容器）。





新しい分野に 本気でチャレンジしてきたことが、 今の研究人生につながった

医者である父の背中を追って国立医学部を目指し、大学受験に挑むも断念。目標が定まらない大学生活を経て、4年生で研究室に所属したことが、研究の面白さに目覚めるきっかけだったという柿沼さん。挫折とは裏腹に、その後の順風満帆な研究生活の背後にあるのは、自身の心の声のままに、何事にもつねに真剣に取り組んできた姿勢にあるようだ。

——どんな幼少期を過ごされたのですか？

幼稚園から高校までは、私立の一貫校という点で慶應義塾と環境が似ている成城学園に在籍していました。成城学園の教育というのは独特で、とくに初等学校は自然から学ぶことを重視していて、実際のものに触れながら、体感的に理科や数学を学ぶという教育を実践しているんですね。単に机上で勉強を教えるだけでなく、実際になぜそうなるのかということも、体験的に学ばせるというわけです。たとえば、2時間続きの「散歩の時間」というのがあって、校外を散策しながら、草木や虫を手にとって学ぶという、独自のカリキュラムなどがありました。

実は、僕は主要5科目以外はオール5だったんですよ（笑）。今から思うと、成城学園で過ごした幼少期の経験が、ものづくりに関する研究のセンスを身につける上で、非常に役立ったように思います。

——最初から工学の研究者を目指していたのですか？

いいえ、父が大学病院の医師であったこともあり、父の背中をみて、中学くらいから自分も将来は医者になりたいとぼんやり思っていました。しかし、成城大学には医学部がありませんから、大学受験は必須だったというわけです。そして、当時、目指すは国立医学部でした。

ところが浪人しても、国立医学部には合格できず、もう一つの道として考えていた慶應義塾大学理工学部に入学することになりました。もっとも、幼い頃から機械いじりが好きでしたし、

一番の得意科目は物理でした。ですので、ポジティブに捉えれば、医学部受験の失敗は必然だったのかもしれません。最終的に自分に適した道に進むことができたのですから。

とくに、理工学部の融合領域の研究に興味があり、その後、システムデザイン工学科に進んだのは正解でしたね。

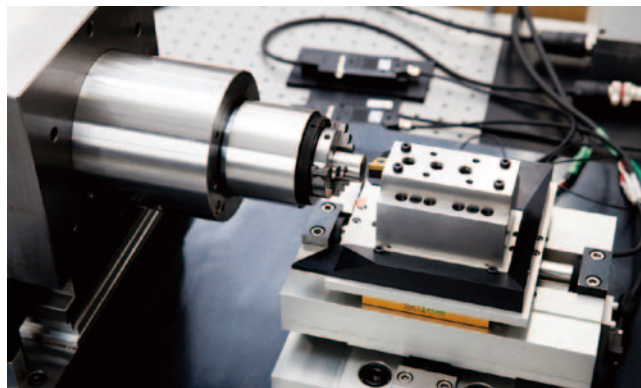
——どんな大学生活を送られたのですか？

正直、学部での1年生、2年生のときはナメた学生だったと思います。当時目標としていた医学部に進めなかったことで将来の目標が定まらず、モチベーションは下がっていました。授業は好きな科目だけ出て、あとはテニスサークルでの活動や家庭教師のアルバイトなどをして過ごしました。

意識が変わったのは、4年生になって青山藤詞郎先生（現・学部長）の研究室に所属してからです。実験を通して実際の現象をひもとくことの面白さや、自分の考えを具現化していくことの楽しさ、難しさに目覚めていきました。

とは言うものの、当初は、電気粘性ゲル（電気粘着ゲルの前身）の研究を始めたばかりで、まったく成果が出なくて、机上の理論と現実にはこんなにも差があるものかと愕然^{がくぜん}としていました。しかも、自分で課題を見つけ、その解決法を自ら導き出しながら、答えが見えない問いに突き進まなければならない。研究の楽しさを感じると同時に、研究者生活というのはこんなに辛いものなのかと、身をもって感じました。

修士課程に進学した際に、テーマを変えたいと青山先生に訴えたところ、「研究は根気」だと諭され、修士でもこの材料の研究を続けることになりました。当初は、材料を応用することが研究テーマでしたが、材料そのものを開発する基礎研究が必要だと訴えたところ、ふところの大きな青山先生は、この訴えを快く認めてくれました。そして、研究にのめり込み、その結果、修士2年の初夏に新機能材料の開発に成功し、共同研究先と特許も申請することができました。すると今度は、ここで手放すのはもったいない、応用研究のステップに^{つな}ぎたい、と欲が出てきたんですね。それまでは就職も検討していたのですが、博士課程に進むことを決めました。



——その段階ではじめて、研究者になろうと思われたと…。

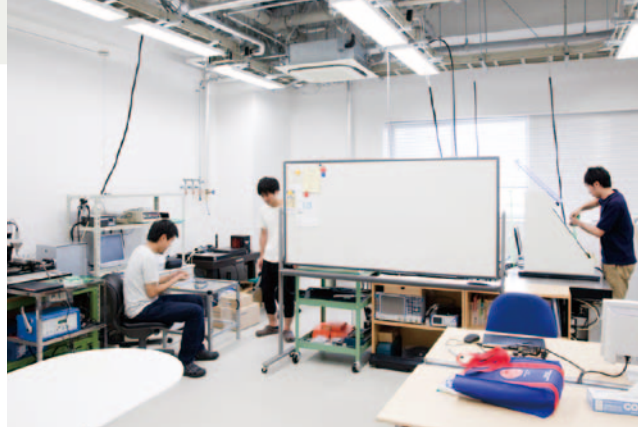
そうですね。青山先生からの勧めもありましたし、親に相談したところ、背中を押してくれました。自分自身、自分らしい道を歩みたいという気持ちを強く持っていました。また、博士課程に進んだ翌年の2005年には、システムデザイン工学科の助手としての採用が決まりました。博士課程での採用は異例のことですし、この分野でトップになってやろうと、研究者としてのモチベーションを新たにしました。

周囲の期待に応えようという気持ちもあって、その後は、死にものぐるいで研究に没頭し2年で博士を取得。2008年に専任講師、2011年に准教授と、とんとん拍子でここまでできた感じです。

ちなみに、青山先生は実に自由にやらせてくださる先生で、材料の次に制御を学びたいと言うと、制御の大家である大西公平先生のゼミに参加させてくださいました。その当時（博士課程の学生の頃）、大西研で同じく博士課程の学生であった桂誠一郎先生と出会い、リニアモータステージの位置制御に関する共同研究を一緒にできたことも大きな財産となっています。今では、二人ともシステムデザイン工学科の准教授ですから面白いですね（笑）。このおかげで、生産工学と制御工学の両方に通じていることが、自分の研究者としての大きな強みになっています。

——現在、柿沼研究室には何名の学生が在籍しているのですか？

博士課程が1人、修士2年が5人、修士1年が4人、学部生が6人の16名です。一緒にゼミを行っている青山先生の研究室と合わせると総勢28名になります。経験豊富な青山先生と、学生の年齢に近い私がいることで、バランスがとれていることもあるのでしょう、青山・柿沼研はとても雰囲気の良い研



究室です。うちの研究室のモットーは、「研究も遊びも本気でやる」こと。学生たちは、メンバー全員仲がよくて、一体感があるのが、うちの研究室のいいところですね。

——研究の合間の息抜きは？

3人の子どもがいるのですが、子どもたちと一緒にアニメを見たり、一緒に遊んだりして、息抜きをしています。とはいえ、今は研究者としてもやりたいことが山積しているので、なかなか思うようにはいきませんね（笑）。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

●年齢が近いせいか、学生との距離が近く、いつも親身になって相談に乗ってくださる先生です。しかも、先のビジョンまで見通して、的確に研究の方向性を指し示してくださるので、とても心強いです。うちの研究室は皆、本当に仲がよくて、楽しいから研究室に来ているといった感じです。だからこそ研究に遊びに、本気で取り組めるんでしょうね。

（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>

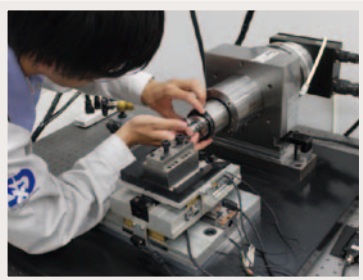
大事なのは向上心と好奇心。
向上心はチャンスを生み出し、
好奇心は新たな発見・発明を
生み出す源です。

柿沼康弘

Yasuhiro Kakinuma

専門はマイクロナノ加工、知能化工作機械。現在の研究テーマは、ナノ精度加工の現象解析、オブザーバ理論に基づく加工機の知能化。基礎研究から機械と制御を融合した応用研究まで幅広く展開している。2006年、博士（工学）を取得。2005年に慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科の助手となり、2008年同大学専任講師、2011年同大学准教授に就任。現在に至る。





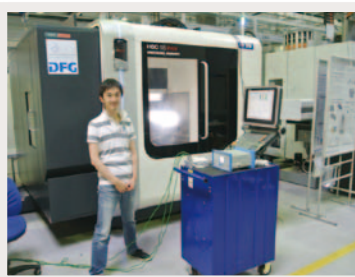
精密機械と実験

新しい提案手法を実証するために、学生達と一緒に設計した精密機械システムを使って実験。CAD 設計、機械製作、システム構築、制御設計、プログラミングまで全て自分達で行って研究しているのが柿沼研の特徴です。



ドイツ留学①

Leibniz Universität Hannover の工作機械研究所 (IFW) にて、Prof. Denkenaのもとで昨年 1 年間、最新のものづくりに関する研究を行ってきました。70 人を超える博士課程の研究者が、一人 1 台の最新工作機械を使って研究していたのには驚きました。



ドイツ留学②

最新の 5 軸加工機を改良して、至るところにマイクロセンサを組み込んだ“フィーリングマシン”の開発研究を行ってきました。研究をサポートしてくれる技術者もたくさんいて、本当に助かりました。



国際会議と学会発表

生産工学の国際的組織である CIRP (国際生産工学アカデミー) で、世界の若手研究者らと、未来の生産工学に関するディスカッションを行うのは刺激的。学生も研究成果を国際学会で発表して、今までにない刺激を受けます。



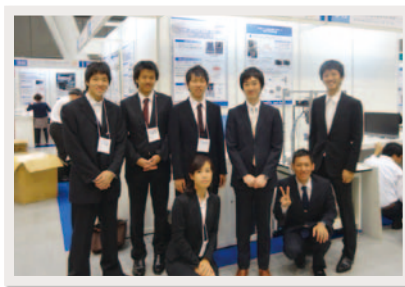
Chair Secretary Vice chair

国際会議の夜

国際会議中の夜は、世界の仲間とディナーをとりながら、盛り上がります。写真はフランスのビストロにて CIRP 若手組織のボードメンバーと一緒に撮った 1 枚。ディナーの後はバーに行って、時にはダンスも。

柿沼康弘の ON と OFF

ドイツでの在外研究の紹介も交えて、柿沼研のみんなで頑張る研究室ライフ (ON) とみんなで楽しむアフターワーク (OFF) を紹介します。



展示会での成果発信

大学見本市である「イノベーションジャパン」や、慶應義塾の理工学部が主催する「テクノモール」に毎年出展しています。実物を展示してデモをしながら、産業界に研究成果を発信しています。



ドイツ留学③

IFW では、月から木曜までは朝 8 時から午後 5 時まで、金曜は午後 3 時までがワーキングタイム。金曜の研究後は、仲間たちとバーベキュー、パーティ、バイクツアーなどをしてリフレッシュ！



研究室同窓会

ドイツから帰国後に研究室 OB・OG が同窓会を開いてくれました。学生時代と変わらず、みんなパワフル。これからの成長が楽しみなばかりです。私も負けてはいられません！

私の 本棚

My favorite books



● MANUFACTURING AUTOMATION

機械加工の永遠の課題と言われているびり振動の回避方法を含め、機械加工システムの自動化技術に関して述べた本。プロセスや工作機械を数学モデルで表すことの面白さを味わえます。著者はThe University of British ColumbiaのProf. Altintas.

● Basic of Cutting and Abrasive Processes

留学したLeibniz Universität HannoverのProf. TönshoffとProf. Denkenaの著書。帰国する前にProf. Tönshoffから直々に頂いた大事な一冊。ものづくりのバックボーンである切削加工と研削加工に関して、基礎理論から最新技術までまとめた本。

● 応用制御工学

システムデザイン工学科の大西公平先生と東京大学の堀洋一先生が執筆された本。少し難しいですが、現代制御から始まり、外乱オブザーバに基づくモーションコントロールまで学べます。制御工学をこれから始めたい人には、京都大学の松原厚先生の書いた「精密位置決め・送り系設計のための制御工学」もお勧め。

● ノルウェイの森

スペインの研究者に勧められて読んだ一冊。「生は死の一部である」という世界観を舞台に、生死を象徴するヒロイン2人と主人公ワタナベ君との恋愛小説。欧州でも読まれるだけあって、深いです。登場人物によって名前をカタカナと漢字で表しているのですが、英語ではどのように表現しているのでしょうか？

● 機械加工システム

慶應理工学部元学部長である稲崎一郎先生が執筆された機械加工システムの本。切削・研削プロセスの基本から、機械要素設計、自動化や知能化技術に至るまでわかりやすく書かれています。この本をきっかけに知能化工作機械の研究を始めました。

● the PATH of PRECISION

UC BerkeleyのProf. Dornfeldが書いた絵本のような参考書。前半は、工作機械の変遷と発展について絵を使いながら、わかりやすく説明され、後半は、多軸加工機や超精密加工について技術的内容にも触れています。本のデザインがおしゃれです。

● BRUTUS (GOOD COFFEE)

私の研究室は、なぜかコーヒー好きが多い。ランチ後は、必ずコーヒーを淹れます。3時くらいにもなんとなく、みんなでコーヒブレイク。毎年、ドイツに2〜3名が留学して、ドイツからも2〜3名留学生がくるので、ドイツスタイルが広まったようです。ドイツのコーヒーと言えば、Dallmayer。おいしいです。

自分を高めてくれる人との繋がり

柿沼康弘

大学時代の財産といえば、もちろん世界で活躍されている教授の講義を通して得た知識もありますが、異なるバックグラウンドを持つ才能ある人々との出会いや交友関係の広がりがあります。特に研究室で苦楽をともにした友人、先輩、後輩との関係は強く、今でも年に数回は集い、会った時にはまじめな話からくだらない話までとことんします。こういう談笑の中から不思議と自分の研究のたねが湧いてきたり、教育に大事な視点まで見えてきたりします。人からの刺激というのは化学の触媒みたいなもので、その刺

激が自分の中に隠れていた発想を呼び起こすのかもしれない。

自分が大学生の頃を思い起こすと、自分で勉強すれば何でも解決できると信じていましたし、自信もありました。読者の皆さんの中にも、私の学生の頃と同じく自分一人で何でもできると考えている人がいるかもしれません。確かに大学までの勉強であれば、どの問題にも必ず解があり一人で解くことができます。ところが「研究」になると、そうはいきませんでした。勉強しても勉強しても解が存在するかどうかともわからない……。こうすれば解ける！という鉄則もないのです。そのような中、私が修士課程で、電気粘着ゲルの開発に成功したのは、当時の研究室の同期、先輩、後輩が異なる観点

からの刺激を与えてくれたおかげでした。ここで一つ言いたいことは、ただ相手の意見を求めるだけの他力本願はだめです。まず大事なのは、自分の意見を持つこと、その上で相手の意見を尊重して聞くことです。他者の意見を真剣に考えることは、新しい刺激となり、自分の中に新しい視点や発想を生みだしてくれます。

福澤先生は、本を読むばかりでなく人と接して談笑する間に、互いに知識を交換しあうことも大事だと述べています。ですので、慶應義塾に入学した皆さん、また入学志望の皆さんには、ぜひ人々との繋がりを大事にして、良い交友関係を築いて広げ、知識の交流を楽しみながら自分自身の可能性を高めていってほしいと願っています。

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」

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）

入場無料 ※すべてのイベントで事前登録は不要です。

詳細：<http://www.kll.keio.ac.jp/ktm/index.html>

理工学部創立75年記念特別プログラム

今回は、特別プログラムとして多彩なイベントプログラムをご用意いたしました。様々な分野から魅力的なゲストをお迎えして、熱く語っていただきます。ぜひ、ご参加ください。

10:30 - 11:15	基調講演 「大学発ベンチャー 37 年 _ 夢とうつつ」
KIF (慶應義塾イノベーションファウンダリー) 設立記念イベント	
11:25 - 12:10	基調講演 「日本経済の展望：科学技術のイノベーションと産学連携」
KIF (慶應義塾イノベーションファウンダリー) 設立記念イベント	
13:30 - 15:00	トークセッション 「真に社会が求める革新的産官学連携の姿：実学（サイヤンス）実践のイノベーション拠点」
15:40 - 17:00	ラウンドテーブルセッション 「病気になるための健康社会～テクノロジー・イノベーション～」

編集後記

今回の表紙の写真は、手に持って皆様に研究のイメージが伝わるものがないとことで、機械と人物を別々に撮影し、合成するという新たな試みをいたしました。撮影中はどんな画像になるのかわかりませんでしたが、ご覧いただいたとおり、柿沼先生の研究内容がわかる、素敵な表紙に仕上がりました。

研究室での撮影では、研究室の学生が大勢見学し、先生とも気さくに話をしており、柿沼先生の穏やかな人柄が研究室の雰囲気反映されているな、と感じました。また、機械を実際に動かしていただき、取材スタッフも興味津々で目を輝かせていました。

(松林真奈美)



新版 窮理図解

No.17 2014 October

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>

