

twitter
@keiokyuri

facebook
"keiokyuri"

K y u r i z u k a i

新版

窮理図解

2014 November
no.

18

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>

理工学部 機械工学科
よこもり たけし

横森 剛

(准教授)

慶應理工の
燃焼科学

炎を自在に操る



燃焼のしくみを解明し、 環境問題やものづくりに役立てる

CO₂を出さない燃やし方や、燃焼による材料合成の研究

自動車や飛行機などのエンジンをはじめ、発電所の心臓部であるガスタービンなど、内燃機関に欠かせない「燃焼」という現象。古くからある研究分野だが、高効率に、できるだけ環境負荷をかけずに燃やすためには、まだまだ課題が山積している。横森剛准教授は、その燃焼という現象を解明する基礎研究と、燃焼による物質合成という応用研究の両方に取り組む、新進気鋭の研究者である。

燃焼のさせ方により、 効率や環境負荷を改善する

「燃焼」をテーマに研究を続ける横森剛さん。燃焼研究の歴史は古く、とくに18世紀半ばから19世紀にかけて起こった産業革命以降、蒸気機関車や自動車、飛行機、発電機など、さまざまな内燃機関を搭載したシステムが発明され、人類に欠かせないインフラとして活用されるなかで、大きく発展してきた。

「燃焼のエネルギー源のほとんどが化石燃料であり、石油は約50年後に、石炭も約100年後には枯渇すると言われていることから、それらをいかにうまく高効率に使っていくのが、人類の喫緊の課題となっています」と、横森

さんはいう。

たとえば、燃費がいいとされるT社のハイブリッド車ですら、熱効率はいまだ38%程度で、燃料が持つエネルギーの多くは使用されずに排気などから捨てられているため、熱効率の向上はまだまだ大きな課題なのだという。

それと同時に、地球温暖化の原因となるCO₂の排出も、燃焼にまつわる深刻な問題である。また、日本でもかつては大きな社会問題となった大気汚染や、最近では中国を中心に深刻化するPM2.5なども燃焼のさせ方に原因があるといい、燃焼の研究は効率化から環境対策へと課題が広がってきた歴史がある。

「ところが、燃焼で起こっている現象はじつに複雑で、いまだによく分かっ

ていない部分が多いのです」と、横森さん。「燃焼を解明するには、時間とともに変化する空気や物質の流れや拡散、熱の状態を把握し、そこで起こっている化学反応を知る必要があります。いくつもの要素が同時に絡みながら起こるところが、燃焼の難しさです」(図1)。

流体にしろ化学反応にしろ、それぞれの現象に特化した専門分野が確立されていることから分かるように、その解明はけっして容易ではない。それを横森さんは、従来のような経験則ではなく、理論の構築やシミュレーションの活用によって解き明かそうとしているのである。

CO₂やNO_xを出さないための 燃焼方法を探る

なかでも、横森さんが手掛ける研究の大きなテーマが、CO₂をできるだけ排出しない燃焼のさせ方だ。

「化石燃料を燃やせば必ずCO₂が排出されますが、そのCO₂を大気中に出さ

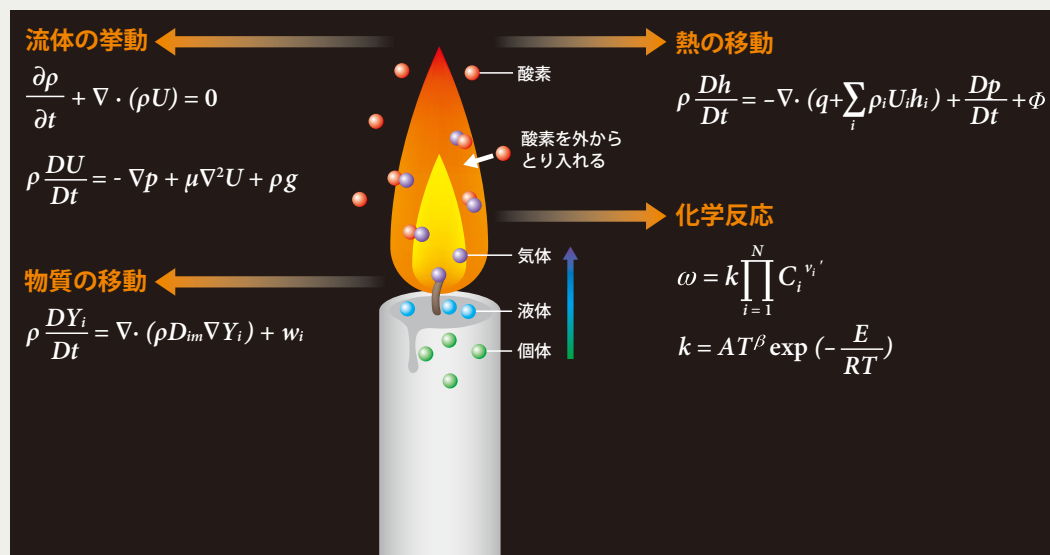


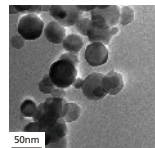
図1 燃焼の難しさ

燃焼を解明するには、流体の挙動、熱の移動、物質の移動、化学反応といった要素を同時に解く必要があり、研究すべきことはまだまだある。

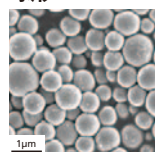
図2 研究室で合成された粒子の例

横森研では、燃焼研究の知見をもとに、さまざまな用途で使える nm、 μm レベルの微細な物質をつくっている。右のような装置によって、左のような多様な物質ができる。

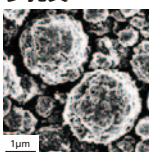
ナノ粒子



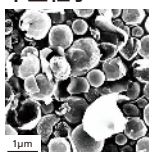
球形



多孔質

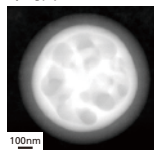


中空粒子

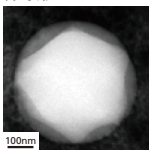


コアシェル構造粒子

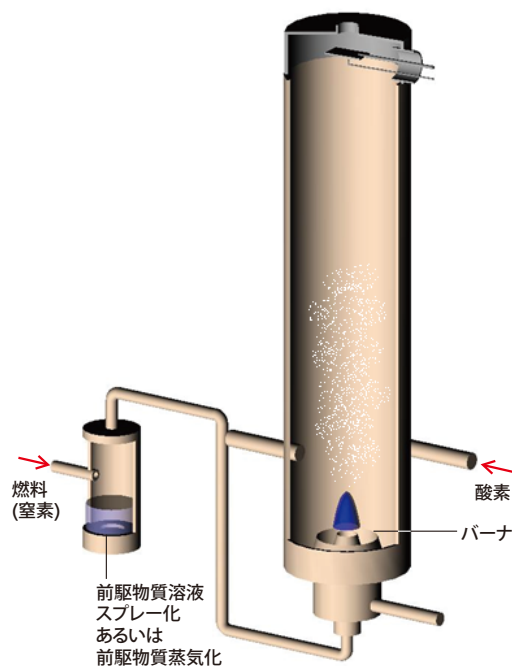
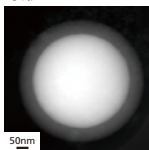
不均質



非球形



球形



ない方法を試行しています。具体的には燃焼に空気ではなく、純粋な酸素を使うのです」と横森さんは説明する。

空気には窒素が含まれるが、酸素を使えば、排出されるのは CO_2 と水 (H_2O) だけになる。そこで、燃焼ガスを冷やして、凝結した水を取り出せば、 CO_2 だけが回収できるというわけだ。現在、回収した CO_2 を圧縮して液体状にし、深海底に貯留するなどして大気に出さない方法が検討されていることから、横森さんの研究にも注目が集まる。

「ただし、燃焼に酸素を使うと約 3000°C と高温になることから、現状の燃焼装置ではそれに耐えられません。そこで、燃焼温度を現状の $1500 \sim 2000^\circ\text{C}$ 程度に保つため、排出された CO_2 を炉に戻して循環させ、酸素濃度を下げる工夫をしています。これは従来にはなかった手法で、現在、燃焼学会内の研究会などでも取り組んでいるテーマです」。

その際に、酸素と CO_2 の濃度をどれくらいに保てば最適な燃焼になるかを、実験とシミュレーションによって探っているのだという。

「燃焼の要は、炎の根本にあります。この部分に適度に酸素を供給しないと、炎が吹き飛んで消えてしまうため、その制御がカギを握ります。火力発電所などの大きなプラントでは炎が消えて

しまうことはあってはならないため、非常に重要な課題の1つです」。

また、燃焼の際に NO_x (窒素酸化物) を出さないための研究も手掛けている。これは、とくに飛行機など、重量やスペースの関係から NO_x 回収のための後処理装置が付けられないシステムにおいて、求められる技術だ。

「燃焼の際に NO_x が出やすいのは、窒素が多く、炎の温度が 1800°C と高くなる場合です。そこで、空気と燃料の量を、つねにアンバランスになるように制御するのです。具体的には、温度をあまり上げないように燃料を多く入れ、その後、余った燃料に多量の空気を吹き込んで再び燃焼させるという、二段階方式を採用することで、温度と燃焼をコントロールします」。

本来なら、高い温度で燃焼させれば効率がよくなることから、環境負荷をできるだけかけずに、いかに効率を上げるかが大きな課題なのだという。

燃焼による物質合成で、さまざまな酸化物をつくる

もうひとつ横森さんが取り組んでいるのが、構造体として利用されるセラミック材料や、光触媒などに使われる酸化チタン、LED やバイオマーカーなどさまざまな用途に使われる蛍光体と

いった「酸化物」の合成である。

「酸化物の結晶は高温の酸化反応を利用するとつくりやすく、燃焼研究の知見が生かせるのです。そこで、さまざまな用途に使えるような $\text{nm} \sim \mu\text{m}$ 程度の微細な物質をつくっています。特長は、純酸素を使い、 $2500 \sim 3000^\circ\text{C}$ の高温で物質を生成すると、きれいな結晶をつくり出せることにあります。また、燃焼の仕方や材料の配合を変えるだけで、簡単に多様な物質がつくり出せるところも大きな利点です」(図2)。

燃焼による物質合成は珍しいが、結晶構造のいい機能性材料などの生成方法として期待されており、酸化チタンを中心に、企業からの引き合いがきているという。

「ただ、このような高温の燃焼を利用した合成では、化学反応や物質の結晶化が数ミリ秒程度の非常に速い時間で起こってしまうため、狙った物質をつくりだすためにはその過程やメカニズムをよく理解して制御することが必要となります。この部分はまだまだ未解明が多く、研究対象として非常に面白いところです」。

「燃焼の理論構築をベースにしながら、物質合成などの応用にも手を広げ、社会に役立つ技術開発をしていきたい」と、横森さんは目を輝かせる。

(取材・構成 田井中麻都佳)



研究に没頭できる環境に身を置き、 努力を積み重ねて得たもの

ロケット好きだった少年が、長じて出会った「燃焼研究」の世界。勤勉な友人や研究室の優秀な先輩たち、さらには国際色豊かな教授との出会いや海外留学を経て、研究者として身につけたのは、日々の努力を怠らない姿勢だった。うまくいかないときでも、「コツコツ努力をすれば、必ず出口は見えてくる」と横森さんは力強く語る。

——どんなお子さんだったのですか？

スペースシャトルなどのロケットが大好きな少年でした。ロケットが空へ飛んでいく際に、お尻のところにエンジンから吹き出された炎がぼおっと光って見えますよね。その迫力に魅せられて、興味を持つようになったのです。今から思えば、当時から燃焼に興味があったのかもしれませんね（笑）。

それから、父親が都内で電気工事の会社を経営していて、よく現場に遊びに連れて行ってもらいました。中学くらいからは現場で配線工事や機器の取り付け工事などの手伝いもするようになり、自然と理系に染まっていった感じです。

一方、小学生の頃から学習教室に通い、そこで数学の問題を

解く面白さに目覚めました。小学6年生の頃には、すでに大学の数学の問題まで進めていて、表彰されたこともあります。それでますます数学が好きになりました。僕は、褒められて伸びるタイプなんですね（笑）。親もわかっていたようで、「勉強しろ」と言われたことはありません。

将来を意識し始めたのは高校3年になってからでしょうか。父の仕事の影響で、電気工学科か機械工学科に進めたらいいなあ、と考えていました。浪人も覚悟していましたが、無事、慶應義塾大学理工学部で合格し、機械工学科に進学しました。

——どんな大学生活を送られたのですか？

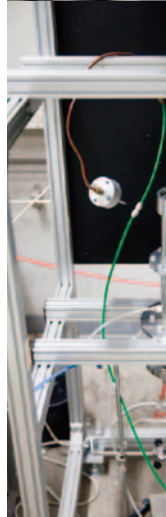
高校までは部活中心の生活でしたが、大学に入ってからガラリと意識が変わって、勉強中心の生活を送るようになりました。友人に恵まれて、互いに切磋琢磨しながら勉学に励んでいたのも、勉強自体は苦ではありませんでした。友人たちは皆、優秀で、私を含めて4人中3人が博士課程に進んだほど。もちろん、勉強だけでなく、一緒に遊んだり、成人してからは、週末ごとに飲んで過ごしたのは、今となってはいい思い出です。

——なぜ、燃焼の研究に進まれたのですか？

燃焼の研究をされている溝本雅彦先生の研究室を見学した際に、先輩たちから話をお聞きして、興味をもったのがきっかけです。研究室に入ってから、燃焼の魅力にすっかり取りつかれて、研究にのめり込んでいきました。

燃焼の研究というのは、実に奥が深いのです。たとえば、燃焼の事象をシミュレーションしようとする、流体、熱、物質の拡散、化学反応といったさまざまな要素を同時に解く必要があり、対象によってはスーパーコンピュータを使っても1カ月以上かかります。基礎理論の構築にも、まだまだやるべきことがあるというのが、燃焼の基礎研究の面白さといえます。しだいに基礎寄りの研究をしたいと思うようになり、博士課程に進むことにしました。

その後、2003年9月から東北大学でポスドクとして働き始めたのですが、ここでの経験が大きな転機となりました。とい



研究のアイデアは
突然生まれるものではなく、
1つひとつ積み重ねていくことで
形になるものです。

横森 剛

Takeshi Yokomori

埼玉県出身。1998年、慶應義塾大学理工学部 機械工学科卒業、2003年同大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻博士課程において単位取得満期退学。2004年3月博士（工学）。東北大学 流体科学研究所産学官連携研究員、日本学術振興会 特別研究員、米国・プリンストン大学 航空宇宙・機械学科客員研究員を経て、2007年4月より慶應義塾大学 理工学部 機械工学科専任講師。2013年4月より現職。



うのも、研究室のボスの丸田薫先生は国際色豊かな方で、研究室に海外の著名な研究者がしょっちゅう訪ねて来るのです。そこでグローバルなコミュニケーションの大切さを学び、一気に視野が広がりました。

そして、海外留学を決意し、日本学術振興会のポスドクとして2005年4月から1年間、プリンストン大学へ留学することにしたのです。

——海外での研究生生活はいかがでしたか？

大変でしたね。最初は住む所も決まっていなくて、2週間くらいは先生などのお宅を転々としながら住まい探しからスタートしました。当時は英語もたどたどしい状態でしたし、わずか2週間でホームシックにかかったほどです（笑）。銀行口座ひとつ作るのにも苦労した思い出があります。

大学にも、日本人はほとんどいなくて、別の学科に1人いたくらいだったでしょうか。むしろ中国から来ている留学生を多く見かけましたね。実は私の指導教官も Yiguang Ju 教授という中国の方です。この先生は、理路整然と考えて物事を進めることができるたいへん頭のいい方でした。性格もとてもよくて、研究者として憧れの存在です。

——やはり海外に出ることは必要でしたか？

ええ。四六時中研究のことばかり考えている研究者たちとつねにディスカッションをして、皆で考えていくスタイルを経験できたのはよかったと思います。現在の私の研究室も、プリンストン方式を踏襲しています。

研究者であれば、できるだけ早めに、30歳くらいまでには一度、海外へ出たほうがいいでしょうね。

——研究者として大切にされている信条はありますか？

研究のアイデアというのは、ある日突然、突拍子もないところから生まれてくることはありません。1つひとつ積み重ねて、はじめて形になるものだと思います。もちろんうまくいかないこともあります。がんばっていればいつか出口は見えてくるもの。そうやって何かをつかむことができれば、大きな達成感を得ることができる。それこそが研究者としての醍醐味でしょう。

ちなみに、慶應の学生は、スマートな人が多いという印象があります。悪く言えば要領がいいんですね。そこに努力が加われば、怖いものナシでしょう。ぜひ、そういう力を身につけてほしいですね。

——休日はどのように過ごされていますか？

よく友人たちと温泉に出かけます。先日も、福島県の岳温泉というところに行ってきました。強い酸性のお湯が特徴の温泉で、最高でした。後は、ときどき日本酒を飲むことでしょうか。学生たちとも、たまに飲んでストレスの発散をしています。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

●どんなに忙しいときでも、困ったときには相談に乗ってくださる、真面目で頼りがいのある先生です。ただ学生を甘やかすのではなく、学生が自立できるように仕向けてくださるところは、先生ならではの。研究には厳しい方ですが、飲み会のときなどは、学生と一緒にあって思いっきり騒ぐ、意外な一面もあります。

（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>



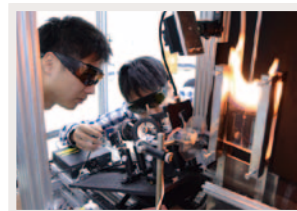
皆で撮影

研究室メンバー全員で撮った集合写真です。横森研究室は機械工学科植田研究室と連携して活動しているため、植田先生および植田研のメンバーも一緒に写っています。



研究室ゼミ（勉強会）

研究室では、週に2回のゼミ（勉強会）を開いています。担当の学生が講師となって各自の研究に関連した様々な内容を講義し、全員で活発な議論を展開します。



研究の風景

燃焼の研究を行うに当たり、レーザー計測などの最先端の実験を行っています。学生と共に試行錯誤を繰り返しながら、新たな発見に向けて日々努力しています。

横森研の四季 ON と OFF

横森研の ON 時間・OFF 時間を、四季折々のイベントの様子を交えながらご紹介します。

春「お花見」

4月、桜がきれいな時期に皆でお花見に出かけます。4年生の新研究室メンバーも加わり、新しい1年間の始まりとして春の息吹を感じるイベントです。



夏「合宿」

毎年、1泊2日で山や海へ合宿に出かけます。スポーツやバーベキュー・キャンプなどを皆で楽しんで、研究室メンバーの絆が深まっていきます。



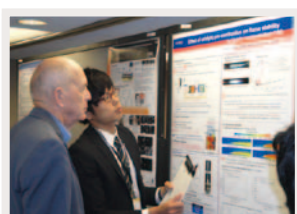
冬「鍋パーティ」

寒い冬には鍋が一番です！醤油・味噌・塩味など、各チームごとに選りすぐりの味付けを施した鍋を作って競い合います。美味しくできるかどうか、それは鍋奉行次第？



秋「秋の味覚会」

秋は美味しい食材が盛り沢山です。美味しいものを食べながら皆でワイワイと盛り上がり、日々の疲れを癒しながら年末に向けての鋭気を養います。



国際会議発表

研究室では、日頃の研究成果の発表の場として国際会議へ参加することを推奨しています。各国で活躍する研究者らと活発な議論を交わし、国際交流の経験も積んでいきます。



研究室見学会

オープンキャンパスなどで研究室見学会も随時開いています。大きな炎が燃えている様子など、普段あまり目につくことのない実験風景に驚かれることもしばしば？



卒業

3月、学部生・大学院生が卒業を迎えます。そのまま進学する、企業へ就職するなど進む道は様々ですが、それぞれが輝かしい未来に向かって飛び立っていきます。



日本酒

ある意味、研究室活動での燃料として活躍します。日本全国の銘酒を飲むことが楽しみで、研究室の学生も次第に銘柄などの情報に詳しくなっていきます。

私の 本棚

My favorite books



● **深夜特急** 沢木耕太郎が自身のバックパッカーとしての体験を綴った旅行記です。放浪する形で各国を渡り歩く際の面白さ・苦難・周囲の熱気などが強烈に伝わってきて、読んでいると旅に出たくなります。私もこの本を読んで「旅」がたくなり、大学生の春休みにバックパックを背負ってエジプトなどに行きました。

● **Combustion, Flames and Explosions of Gases -Third Edition-** 燃焼というものを現象論的に捉えて体系化した参考書で、様々な実験データをもとに燃焼現象が分かりやすく詳細に説明されています。燃焼の実験研究者のあいだではバイブルとなっており、発刊から30年近くたった今でもその内容・データは色あせることなく広い分野の研究で使用され続けています。

● **Combustion Theory -Second Edition-** 燃焼現象を理論的・数学的に詳細に解説した名著です。燃焼を反応性流体力学という観点から捉え、各現象について数式を駆使して記述・理解する形が取られており、多少難解ですがその表現方法は美しくもあります。燃焼を理論的に理解する上で最も重要な参考書です。

● **Combustion Physics** 国際燃焼学会元会長のC. L. Law 先生が、Princeton 大学でのご自身の講義で作成・使用していた教科書を2006年に出版したものです。化学反応などの基礎的内容から最新の燃焼理論まで多岐にわたって丁寧に分かりやすく解説されており、現在、世界的に最も広く使用されている燃焼教科書の一冊です。

● **燃焼現象の基礎** 日本の燃焼学の発展のために、日本における著名な多くの燃焼研究者が力を合わせて執筆した燃焼工学の入門書です。燃焼現象の基礎的な理解を主眼に置きながら最新のトピックまでもが織り込まれており、これから燃焼研究に携わる方には是非とも最初に読んでいただきたい一冊です。

● **H-II ロケット上昇** 日本国産ロケット「H-II」について、その開発に携わっていた技術者・研究者の方々が、多くの苦勞と失敗を乗り越えて打ち上げ成功に至るまでの道のりを、様々な資料を駆使して詳細に記述している読本です。私が今の道に進んだ理由の1つに、この本を読んで研究者・技術者は“カッコいい”と思ったことが挙げられます。

コツコツが必要で大事

横森 剛

私の研究対象としている燃焼は、ご存じのように人類が太古の昔から生活の中で使い続けてきた最も身近な技術です。

もしかすると皆さんも経験があるかもしれませんが、例えば、古代人のように何も無いところから火を起こすとすれば、藁の上で木の棒を一生懸命回転させて摩擦熱で着火させるといったように大変な労力を要します。しかし、今やその現象は、手軽な家庭用のガスコンロ、宇宙ロケットのように何千トンもの推力を発生させる巨大な炎、1分間に何千回転もする自動車エンジン内での燃焼など様々なところで利用されています。ここに至るまでには、多くの研究者や技術者が幾重にも

コツコツと積み重ねてきた知識・技術から成り立っているのです。

私の燃焼研究との関わりは、大学4年生の研究室配属の際に、本塾理工学部機械工学科溝本雅彦教授の燃焼研究室の門戸を叩いたのが最初です。研究室配属当初から、研究というものには強い興味を持っていましたが、それまでの大学での講義や実験授業の経験から最初は研究もまあやれるかな?程度に軽く考えていました。しかし、いざ研究活動に携わってみると、実際はそんなに甘くはありませんでした。

私が研究対象としている燃焼は、多岐にわたる学問的要素(流体力学、熱力学、化学反応など)を含み、また、先に述べたような長い歴史的背景、先人達が蓄積してきた多くの知識・技術があります。ですので、研究として今までにない新し

いアイデアを生み出すこと、またその内容を周囲に説明して納得してもらうためには、ベースとして非常に多くの知見が必要になります。ただ、その必要とされる知見の量は膨大ですし、当然一朝一夕に得られるはずもなく...地道な勉強の積み重ねしかないと感じてからは、本当に日々努力の毎日です。

研究や技術開発の分野に限らず、例えばスポーツ選手や企業家など第一線で活躍されている多くの方々は、日々コツコツと積み重ねた絶え間ない努力によって成功を収めていることは皆さんもご存じだと思います。

何かを成し遂げるためには、大小にかかわらず日々の地道な努力は絶対に欠かせないでしょう。まだまだ未熟な自分ですが、これからもコツコツと努力を怠らずに頑張っていきたいと思っています。

理 工 学 Information

慶應義塾の「博士課程教育リーディングプログラム」のご紹介

「博士課程教育リーディングプログラム」は、俯瞰力と独創性を備え、グローバルに活躍するリーダーを育てることを目的とした、文部科学省の事業です。

超成熟社会発展のサイエンス ～次代の高度博士人材を育成・輩出する～

骨太の主専攻を基盤に、本格的な文理融合と産業界・行政との密な連携による革新的な教育環境の中で、来るべき超成熟社会の持続的発展をリードできる次代の高度博士人材の育成・輩出を目指します。

- 特長:**
- ① 本学13研究科から幅広く選抜されたRA(リサーチアシスタント)を修士の段階から雇用(早期からの職業履歴として将来アピール)
 - ② 本格的な文理融合環境で履修(「ジョイントディグリー制度」を制定)
 - ③ 日本を代表する企業等のメンターによる指導(部長クラスが対応)
 - ④ 海外インターンシップ・短期留学
 - ⑤ 「水飲み場」効果(多種・多様な人々が拠点に毎週集い多くの気付きを得る)

グローバル環境システムリーダープログラム

～環境科学技術開発力・社会ルールの立案力を持ち、国際社会をリードするグローバル環境システムリーダーの育成～

地球規模での環境の永続的維持と改善の実現をリードするために必要な意識、知識、技能を有し、地球規模の環境を対象とした技術的システム、社会的システムを設計・構築する「グローバル環境システムリーダー」の養成を目指します。

- 特長:**
- ① 国際産・学・NPO連携研究指導体制(国際的な3名以上の教員・専門家チームを構成)
 - ② 国際トレーニング制度(海外フィールドワークとインターンシップ)
 - ③ 遠隔コラボレーションシステム(Web上で直観的に3Dデータを操作・編集できるシステムと遠隔会議システム、マルチメディア共有・分析・可視化システムを活用)

編集後記

取材中、目をキラキラと輝かせて話をされている横森先生の姿が、少年のようでとても印象的でした。はじめは少し緊張されているようでしたが、研究内容を話されているうちにだんだんとエンジンがかかり、インタビューでは笑顔も交えながら、特に海外へ視野を向けることの大切さを熱く語っていらっしゃいました。

研究室には、横森先生が学生の頃に単管パイプで組み上げた実験スペースがまだあり、懐かしい雰囲気が漂っていました。カメラマンも「すごくいい雰囲気ですね」と興奮してシャッターを切っていました。また、真っ暗闇の中に浮かび上がる燃焼炉の炎はとても幻想的で、表紙にも使用しています。

(松林真奈美)



新版 窮理図解

No.18 2014 November

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)
kl-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

