

facebook
"keiokyuri"

新版

K y u r i z u k a i

窮理図解

2019 March
no.

30

慶應義塾大学理工学部広報誌

<https://www.st.keio.ac.jp/education/kyurizukai/>

English versions are also available:

<https://www.st.keio.ac.jp/en/kyurizukai/>

慶應理工の フィールド ロボティクス

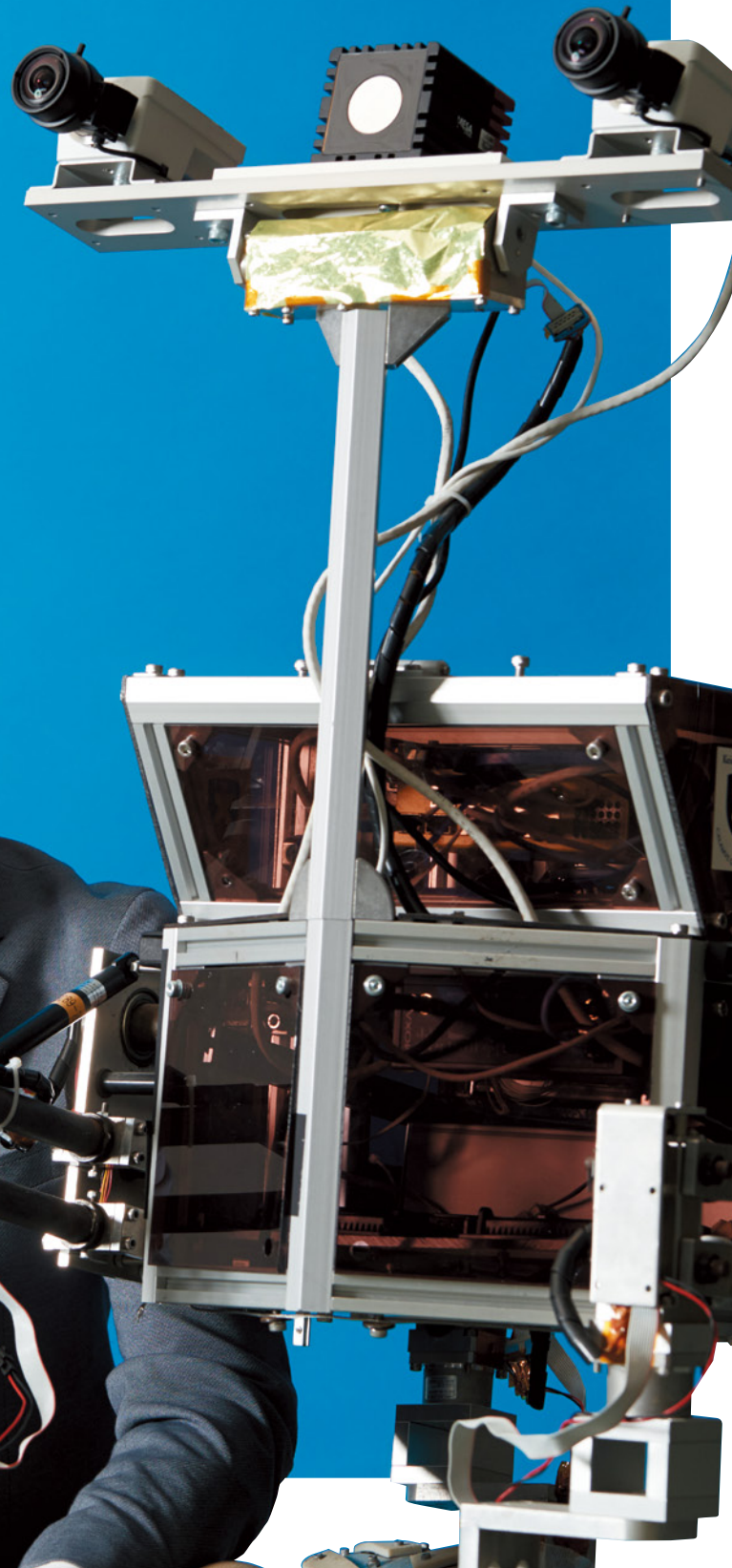
惑星や活火山など極限環境で
活躍するロボット

機械工学科

い し が み げ ん や

石上玄也

(准教授)



多様な領域を研究し 極限環境で活動するロボットを開発

研究成果をもとに、災害や農業、物流などに役立つロボットも

「人を助けるロボットを作りたい」という石上さん。月や火星、災害現場など、人間が行くことの難しい場所で、人間の代わりに調査や活動をするロボットをはじめ、重い荷物を運ぶなど、人間の負担を肩代わりしてくれるロボットの開発も進めている。

ロボット研究の基盤となる 4つの分野

1台のロボットには、機械工学、電子工学、制御工学、情報工学などさまざまな分野の技術が注ぎ込まれている。それぞれの領域に特化する研究者が多いなか、石上さんはロボットの様々な側面について研究開発をしている。

「最初は、“テラメカニクス”という、まさにロボットの足元の力学をやりました」と石上さん。ロボットが月面を走行するとき、その足元は平坦ではない。砂地や岩石が散らばる月面などで車輪はどういう状態になるのか、力学的な考察が必要であった。

足元がわかると、ロボット全体の挙動が気になった。障害物を乗り越えるときにロボット車体がどのように揺れるのか、あるいはひっくり返るのか、そうしたこ

とを解析してコンピュータの中で再現する、“マルチボディダイナミクス”という分野にも取り組んだ。これは、惑星や衛星の表面に探査機が着陸するときのシミュレーションにも使われている。

体の次は知能に関心が向く。「どう動けばいいかをロボット自身が選択できるように」と考え、“自律移動システム”の分野に進む。車輪をコントロールするためにはどうしたらいいか、どの走行ルートを行けば最も安全かなど、自動運転につながるような研究だ。情報学を基盤とする分野だが、それまで扱ってきた力学の知識が役に立ち、効率のよい解析や結果の正確な解釈ができた。

様々な分野を手掛けてきた経験は、知能をもった車輪「センサーホイール」の開発に結実する。それは足の裏のような感覚を持つ車輪で、車輪自身が、地面の固さや自分の沈み具合、滑り具合を認識

することができる。また、走行データを蓄積し機械学習を介することで、走るたびに賢くなっていく可能性がある。これはテラメカニクスの分野では画期的な研究成果として評価されている。

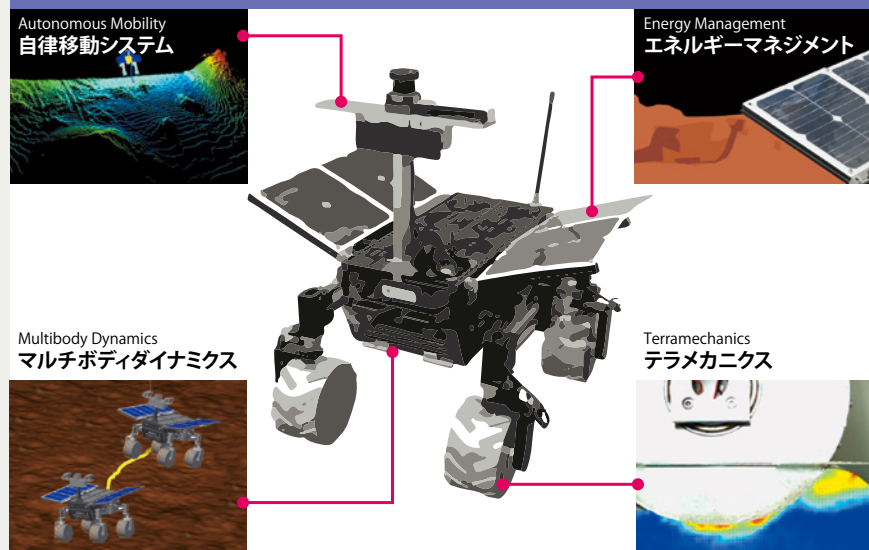
もう1つ欠かせない課題は“エネルギー管理”だ。月面など極限環境では、ロボットの電力消費を抑えて、効率よく動くことが至上命題となる。太陽電池パネルを搭載したロボットの最適な発電制御手法を機械学習で導き出したり、発電量やエネルギー消費量を考えたルートやロボットの動作を生成したりする。エネルギーロスの少ない走行を実現するためには、テラメカニクスの知見が必要で、ここでも石上さんが横断的に研究を進めてきた強みが発揮されている。

火星や月、火山などで 活躍するロボット

石上さんはこれらの4つの基盤研究を様々な応用分野に生かしている。現在携わっている宇宙関係のプロジェクトは3つあるそうだ。1つは宇宙航空研究開発機構(JAXA)が主導する火星探査計画で、この計画では火星表面や表層下(地下)でサンプルを採取して生命の痕跡をはじめ様々な科学探査を立案している。石上さんは、科学探査装置を搭載する移動ロボットの仕様やシステム設計に携わっている。

2つ目は、同じくJAXAの火星衛星探査計画MMX(Martian Moons eXploration)。これは2020年代前半の探査機打ち上げを目指している。フォボスとダイモスと呼ばれる火星の2つの衛星でサンプル採取を行い、小惑星探査機はやぶさのように地球にサンプルを持って帰るプロジェクトだ。石上さんのチームでは、衛星に着陸する際の探査機

ロボット技術の4つの基盤研究



の挙動のシミュレーションを行っているとのこと。

そして、3つ目は月面に発見された縦孔と呼ばれる地下空洞の探査。月面のすぐ下には富士山麓にある風穴のような大きな洞窟がある。将来、人が月に行ったとき、宇宙の放射線を防いでくれる場所として期待できる。この縦孔へ投入する小型ロボットも検討しているとのことだ。

一方、石上さんはこれまでに伊豆大島の三原山や阿蘇山で、移動ロボットを使った火山観測実験も行ってきた。現在は、火山の調査方法として注目されているミュオグラフィ（宇宙空間から降り注ぐ素粒子ミュオンを観測する手法）の観測装置をロボットに搭載して、火山の空洞調査を行うことを検討しているとのこと、これにより火山の水蒸気爆発の規模を推定することが可能になるかもしれない。

災害現場や運搬作業の 負荷軽減に貢献するロボット

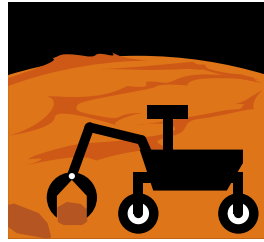
ロボットの遠隔操作技術は災害現場などでも威力を発揮する。内閣府が推進する革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の1つ、「タフ・ロボティクス・チャレンジ」は、人間が近づくことが困難な災害現場で活躍する、タフなロボットの実現を目指すプロジェクト。石上さんは建設車両を使い、災害地での大量の土砂や岩石などの除去作業、震災で倒壊した家屋の屋根を持ち上げて、中の人を救出する作業などのシミュレーション検討を担当している。

このほか自律移動システムを使って農薬の散布や農産物の収穫を補助するロボットも手掛けている。例えば、搭載したカメラで作業者を認識するロボットが、その作業者の後ろについて一定の距離を保って追従し、収穫した農作物を運んでくれるといったものがある。「足場が柔らかく不安定な農場をスムーズに走行させる技術はまかせてほしい」と石上さん。ここでも研究してきた基盤技術が生かせるそうだ。

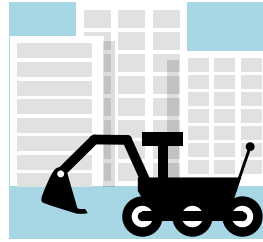
「同じ仕組みは物流倉庫にも使える」という。1人の作業員が1日に何トンもの荷物を運んでいる倉庫で、荷物のピッ

応用研究の6分野

宇宙探査



建設ロボット



火山観測



スマート農業



倉庫内搬送ロボット



サイバスロン（電動車いす）



この6つの応用研究それぞれどれも、4つの基盤研究に支えられている。

クアアップや運搬をロボットが手伝え、負荷軽減、人手不足の解消にもつながる。このようなロボット導入は、ときとして「人の仕事がロボットに奪われる」と警戒されるそうだ。そのようなとき石上さんは、「人から仕事を完全に奪うのではなく、人が出来ること、ロボットが出来ること、それぞれを協調して仕事を効率化する、それを実現していくことがロボットのあるべき姿になる」と伝えているそうだ。

電動車いすの技術を競う 国際大会に出場

電動車いすの開発は、さらに積極的に人を助ける研究である。ある日、理工学部長の伊藤公平教授と偶然同じ電車に乗り合わせたときのこと。「石上さん、サイバスロンに出てみない？」と教授から持ち掛けられたのがきっかけだ。サイバスロンは、障がい者に対してロボット技術を役立てることを目的とした国際コンペティション大会で、電動車いすレースがある。

このレースの課題は、「狭いところを走る（スラローム走行）」「坂を登る」「車いすに乗ったままロボットアームが自動でドアを開ける」「車道から段差のある歩道に上がる」など、車いすを使う人が

直面している現実的な問題を障害物とするものだった。石上さんはその場で参加を決断、2019年5月に開催される電動車いすシリーズ日本大会に出場することになった。

“研究のための研究”に 終わらせてはならない

「ロボットの研究者が気を付けなければならないのは、研究のための研究だけであってはならないということです」と石上さん。基盤研究を大事にしつつも、自分の研究が実際の現場でどう使われるかまで見据える必要があるといい、研究室の学生にも、研究の背景を常に意識するように指導している。

それを強く意識したきっかけは、東日本大震災だった。福島第一原子力発電所の事故が起きたとき、日本製の探査ロボットはすぐ実働できる状況にあったにもかかわらず、最初に探査に入ったのはアメリカ製の軍用ロボットだった。技術的にはアメリカ製よりも日本製が優れていたのに、すぐに貢献できるはずのタイミングを失い、多くのロボット関係者が歯がゆい思いで見守っていたそうだ。

石上さんが作りたいのは、実際の現場で人の役に立つ、人を助けるロボットだ。

（取材・構成 平塚裕子）



「はやぶさ」のカプセル回収の感動を 若い人たちと共有したい

JAXA の研究員のキャリアをもつ石上さん。現在も、火星やその衛星の探査計画プロジェクトに参加しているが、JAXA の研究員になった直後に経験した、小惑星探査機「はやぶさ」のカプセル回収で味わった感動は忘れられないという。それは研究者たちの情熱が成し遂げた快挙だった。「研究者としての喜びと感動を、次世代の人たちにも味わってほしい」と石上さんは話す。

——どんな子ども時代を過ごされたのですか。

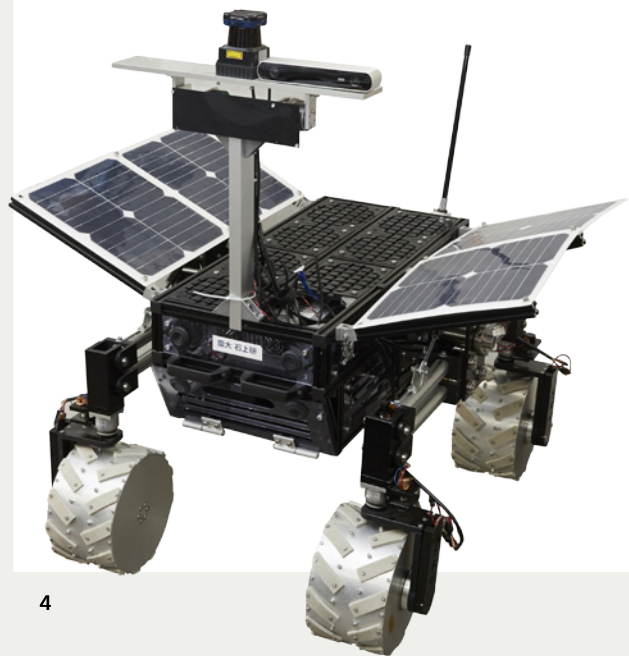
小学生の頃は外でよく遊んでいました。一方、家の中では、二槽式洗濯機の渦や、お風呂の水を抜くときにできる波形などをじっと見ていましたね。父と物置を作ったとき、砂を叩いて地盤を固くしたり、土台を水平にするために水準器を使ったりしたのは楽しい思い出です。

中学、高校時代はバスケットボールと勉強をがんばっていました。ところが高校3年生の春、大学生との練習試合で足の靭帯を切ってしまいました。6月の最後の大会に向けて出場を目指してがんばっていたときだったのでショックでしたね。

——大学で宇宙ロボットの研究室に入られるんですね。

高校時代は特に映画が好きだったので、実はコンピュータグラフィックス(CG)制作関係の道に進みたいと思っていました。当時、1990年代の後半はCGの発展期で、カリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)に留学しようと思ったのです。奨学金のことも考えてかなり綿密に計画を立ててから両親に話をしました。が、やはり、費用の面での難しが多く、断念しました。

そこで大学受験を考えたときに、地元の東北大学に宇宙ロボットの研究室があることを知り、そこを目指すことにしました。指定校推薦で東北大学に合格し、そして学部3年生のとき、志望した吉田和哉先生の研究室に入ることができました。



驚いたことに研究室には“3ds Max”というCGソフトがありました。映画会社が実際に使っている高級なソフトなので嬉しかったですね。

——研究者の道に進もうと決意されたのはいつですか。

修士2年の4月に吉田先生から、「博士に進学しないか」というお話をいただき、これがターニングポイントになりました。吉田先生が私のことを評価してくださったという安心感がありましたね。また、修士1年の間に自分自身がすごく成長したとを感じる出来事がたくさんありました。

例えば、春休みにオーストラリアのニューサウスウェールズ大学に短期留学をしたとき、自分の研究が思った以上に現地の先生や学生に評価されたこともありました。

——博士号を取得した後、マサチューセッツ工科大学(MIT)に移られましたね。

MITのKarl Iagnemmaさんが書かれた論文がどれも素晴らしく、ぜひこの人と一緒に仕事をしたいと思っていたのです。

Karlさんも私のことをご存知だったらしく、私の申し出に対して「現時点では給料の半分ならMITから出せよう」という返事をもらいました。そこで残り半分の給与相当として奨学金をいろいろ探し、村田海外留学奨学会の奨学金を得ることができました。その最終面接官のおひとりに慶應義塾大学の吉田和夫先生がいらっしゃりとても緊張したのを覚えています。

——MITでの研究生生活はいかがでしたか。

今までの人生の中で一番やせていた時期ですね(笑)。最初の3カ月は苦しかったです。思ったより家賃や税金が高くて、お昼はベーグル1個、というようなサバイバル生活をしていました。さらに、英語はできるとかかをくくっていたのですが、甘かったです……。

ただ、研究室全体がどちらかというと理論派でしたので、Karlさんは実装や実験寄りの研究者として私を評価してくれました。2年目になると企業へのコンサルティングも含めて、4つくらいのプロジェクトを掛け持ちしました。

忘れられないのは、アメリカ国防高等研究計画局(DARPA)



関連のプロジェクトです。あるとき、アフガンで遠隔操縦ロボットが爆弾を処理している際、その爆弾が爆発してしまう事故がありました。その後に開かれたDARPAの学会に私も参加することが出来たのですが、そこで軍の高官が「ロボットのおかげで兵士3人の命が助かった」とスピーチしたところ、スタンディングオベーションが起きたのです。研究の成果が人の命に置き換えられた現場に初めて遭遇し、人の命を助けるためのロボットはヒーロー扱いされるのだと衝撃を受けました。

——帰国後のJAXAでの仕事はいかがでしたか。

JAXAでは積極的に働きました。火星着陸探査計画では、参加2回目のミーティングで「私はこういう貢献ができます」とプレゼンさせていただきました。その結果、チームの一員として認められ、数年後のミッション審査会では発表の機会もいただきました。

着任直後の2010年6月には、小惑星探査機「はやぶさ」のカプセル回収隊にも加えていただきました。無事カプセル回収を終えた翌朝、「はやぶさ」のイオンエンジンの開発者で、回収隊隊長だった國中先生の熱いスピーチに感銘を受けました。様々な研究者の世代を経て30年近くかかってきたミッションが完遂していく感動を共有させていただきながら、このような経験を次世代の若い方々にも経験してほしいと強く思いました。

それが慶應義塾大学への志望につながりました。実はJAXA在籍時から今でもたいへん世話になっている研究者の方も、吉田和夫先生のお弟子さんだったこともあり、慶應義塾大学とのお縁を感じています。

——どのようなところに慶應義塾大学の良さを感じますか。

教職員が一丸となって同じ方向を向いて仕事ができることは、

素晴らしいと思います。前例がない案件であっても「できません」ではなく、「こうしてみたらどうですか?」とか「これでやってみましょう!」と一緒に解決策を探してくれます。

それから、学生と教員との距離が近いことも慶應の魅力だと感じます。着任後しばらくして、福澤諭吉先生の「半学半教」という言葉を知り、言い得て妙だなと思いました。私も教える立場にありながら、学生からも教えられる、学ぶ立場でもあることを実感しています。

——研究で大事なことはなんでしょうか。

学生さんには「受け身にならないで」とよく言っています。誰かの指示を待っているようでは、いい研究はできないでしょう。私がJAXAで火星探査ミッションのプレゼンをしたように、自らアピールして仕事を取る姿勢も必要です。自発性をもって能動的に動いてほしいですね。

もう一つは取り組んでいる研究が、「社会にとってどういう意味やインパクトを持っているか」を考えながら取り組むという視点も必要ですね。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

● すぐくユーモアのある先生です。博識で、得意な分野がたくさんあるので、どんな研究をしても、的確なアドバイスをくださいます。一緒にソフトボールをしてくださる一面もあって、なんでも話せる先生です(学部4年生)。

(取材・構成 平塚裕子)

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

研究は受け身にならないで。
自発的に能動的に動くことが
チャンスをつかむ極意だ。

石上玄也

Genya Ishigami

慶應義塾大学理工学部機械工学科准教授。博士(工学)。専門はフィールドロボティクス、宇宙探査工学、テラメカニクス、自律移動システム。2003年東北大学工学部機械航空工学科卒業。2008年同大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻後期博士課程修了。マサチューセッツ工科大学博士研究員を経て2010年独立行政法人(現国立研究開発法人)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所研究員。2013年より慶應義塾大学理工学部専任講師、2017年から現職。宮城県出身。





ゼミ合宿

これまで洞窟探検、トレッキング、釣り、ラフティング、パークゴルフ、蕎麦打ちなど、毎年、様々なイベントを学生さんが企画してくれます。



贈り物

研究室を旅立っていった卒業生からの贈り物を飾っています。ロボットのスケールモデルや私のイラストシールなどを学生さんが手作りしてくれました。

石上 玄也の ON と OFF

ON でも OFF でもアウトドア派に見えますが、インドアも大好きです



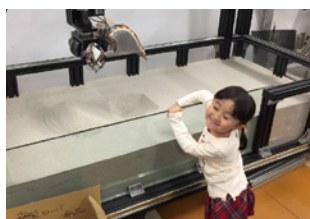
フィールド試験

屋外でのロボット試験は、天候や気温などかなりタフなときもありますが、学生時代から数多くのフィールドを制してきました。



MIT/JAXA 時代

様々なことを経験し、視野が一気に広がった5年間で。



家族との時間

慶應着任と同時に娘が生まれ、最近では「パパはロボットを作っている人」という認識のようです。子供をこっそり研究室に連れてくることもあります。

キャンプ＆コーヒー

姉家族と一緒にいくことが多く、自然の中で時間を全く気にせず、ゆったりできるのが魅力です。早朝のコーヒーも格別です。



グランドサークル

日本縦断相当の距離をドライブし、文字通り大いなる自然を目の当たりにしました。次は子供を連れて巡りたいです。



私の 本棚

My favorite books



テラメカニクスの必携書

● Theory of Ground Vehicles

不整地を走行する車両の力学について、特に機械と地面との接触問題 (Terramechanics) を中心に扱っている教科書です。基本的な数式導出から実際の現場を想定した例題や応用事例、数値解析など、幅広い内容を包含しています。初版は 1978 年ですが、近年の研究の潮流や成果を取り入れて版を重ねている良書です (写真は 4th Edition)。

研究員へと導いたモノグラフ

● Mobile Robots in Rough Terrain

私の MIT 時代のボスだった Karl Iagnemma 氏が、自身の博士論文をもとに 2004 年に出版された本です。私は修士 2 年の時にこの本を読み、その文章の明快さと論旨の構成力、広範な研究の内容に凄まじい衝撃を受けました。「この人と一緒に働きたい」と思った一冊で、文字通り自分を研究員へと導いたと言えるモノグラフです。英語論文執筆のための具体的な参考書としても非常に重宝しています。

熟慮断行

● 坂の上の雲

登場人物とほぼ同じ 20 代後半に読破するというタイミングが良かったのか、あるいは、列強に立ち向かうと尽力した当時の日本と、宇宙開発という場で追従すべく奮闘している現在の日本を重ね合わせているのか、何度も読んでしまう作品です。「熟慮断行」という登場人物の生家に飾ってある彼の揮毫による書にも小説のイメージそのままの力強さを感じました。

宇宙機のための図鑑

● Space Flight

この本は、ボストンのダウンタウンの書店で見つけ、思わず衝動買いした一冊です。宇宙＝天文学という図鑑が多い中、この図鑑は、ロケットや探査機といった機械を中心として、宇宙開発の黎明期から現代に至るまでの歴史を綴っています。非常に読み応えがあり、記述も精細であることから、講義でもたまに使用しています。

研究室運営のバイブル

● 独創はひらめかない

画像処理をはじめ多分野で著名な金出先生のモットーや問題解決アプローチなどを知ることができる素晴らしい本です。まるで、本の向こう側から金出先生が話しかけているような錯覚を感じることができます。研究室の運営などにおいて教員が感じる「あるある」が各所に散りばめられているので、私としては楽しく読むと同時に、時に身の引き締まる思いもする本です。

まさに父から息子へ

● ビジネスマンの父より息子への 30 通の手紙

この本は、私が父親から「お前が 30 歳になったら渡そうと思っていたものがある」と言われ、譲り受けた一冊です。著者が自分の息子に当てた手紙をまとめた内容となっており、哲学書のような雰囲気だったり、若干、面映い部分もあったりしますが、物事の捉え方や取り組み方を考えさせられる本です。特に、同書中で著者がシェイクスピアから引用した一節は、私のモットーにもなっています。

潮流を捉える

石上 玄也

シェイクスピアの作品『ジュリアス・シーザー』の一節に、「人の世には潮があつて、満潮に乗り出せば幸運をもたらし、無視すれば、その航海はすべて浅瀬に乗り上げ不幸になる」というものがあるそうです（「私の本棚」にて紹介した本より引用）。これは簡単に解釈すると、良きタイミングを見極めて物事を実行せよ、という意味になるかと思えます。英語の「潮」にあたる単語「Tide」には、形勢や好機という意味もありますし（香りの強い洗濯洗剤も Tide です）、日本語でも好機のことを「潮時」というように、人生の然るべきタイミングやその流れを、古の人たちが潮の満ち引きに形容させたというのは、人類の生活と海には

密接な関わりがあることを想起させます。

小学校で習うように、地球の潮の干満は月の天体運動によって引き起こされ、これが生命を育み、そして潮見表によって、漁獵に最適な時期を示してくれます。私にとっては、潮干狩りの恩恵に預かり、家族サービスをすることができ、一方、世の中の潮の満ち引きを見極めることは容易ではありません。シェイクスピアの時代よりも潮の干満が速い現代ではなおさらです。特に、ここ数年はかなり拡大解釈されてしまった AI・人工知能という圧倒的な潮流を見ない日はなく、またインターネットクラウドでは、多くのコンテンツが拡散・消費され、そして、モノの開発と淘汰は凄まじい速度で満ち引きを繰り返しています。これらの潮流がどこへ向かっているのか、今は上げ潮なのか引き潮なのか。複雑なうねりを生じているように思えます。

大学は、言わば、世の中の潮見を解析予測し、その流れに乗る舟を編み出すシップヤードであり、特に学生さんにとっては、学部から修士、博士、社会人という、いくつものダイナミックな潮目を経験するのではないのでしょうか？ 私は学生時代にスキューバダイビングをしており、潮の流れに乗って潜るドリフトダイビングというのを何度か経験しました。ほとんどは潮の流れに身を任せてダイビングを楽しむものなのですが、場合によっては流れに抗う必要があり、そのスキルも要求されます。

最近の私は、日々の事柄に流されがちだなぁと自省しています。世の潮に流されるままにならず、エネルギーに満ち溢れた先駆的な流れに乗り、時には流れに抗って新しい潮流を創出する、そのような気概でこれからの航海を進めていきたいと思っています。

理 工 学 Information

「矢上 AI・高度プログラミングルーム」を開設

慶應義塾大学理工学部は、矢上キャンパス 34 棟 407 号室に「矢上 AI・高度プログラミングルーム」を開設しました。ここには、最先端の AI 研究やプログラミング実装技術の活用を進めるため、AI や高度プログラミングへの取り組みを望む学生が最新の高度 AI マシンを共同で利用できる環境が整備されています。この環境の下で、AI・高度プログラミング関連の研究を行う学生同士が自由に交流や議論を行うことができ、大学や研究室という枠を超えた情報、アイデアの交換ができます。さらに、学部 3・4 年生向けの AI 入門コースも開講しました。ここには、AI・高度プログラミング相談員が常駐していますので、いつでも相談することができます。

また、2019 年 4 月 1 日より「AI・高度プログラミングコンソーシアム」を発足します。このコンソーシアムには企業も参加しますので、大学教職員・全学部の学生だけではなく、メンバー企業の社員も含めた交流ができるようになります。今後は、AI コンテストをはじめメンバー企業とともに多彩なイベントを企画したり、メンバー企業による講演会も開催する予定です。

「AI・高度プログラミングルーム」は、日吉キャンパス（藤山記念館 F11 号室）にも同時に開設していますが、それぞれのキャンパスの特徴に合わせた形で、信濃町、芝共立、湘南藤沢、三田キャンパスへと順次展開していきます。

編集後記

石上准教授が進めておられるロボット開発の話を伺うと、ロボットと人間の共存は映画の世界を飛び出して、あたたかみをもってとても身近に感じられました。柔らかな物腰のなかにも、人や社会に貢献するロボット開発への熱意と広範な知識・経験をあわせもつ先生ゆえに、尊敬と親しみを込めて学生さんから「石上さん」と慕われるのも納得です。

今年行われる電動車いすシリーズ日本大会への出場までのいきさつも、先生の研究者としての思いを知ると偶然というより運命のようなものを感じました。（福元麻美）



新版 窮理図解

No.30 2019 March



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 伊藤公平
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
<https://www.st.keio.ac.jp/education/kyurizukai/>
facebook
<https://www.facebook.com/keiokyuri>