

facebook
"keiokyuri"

新版

K y u r i z u k a i

窮理図解

2016 August
no.

22

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 社会工学

社会システムのモデリングと最適化

管理工学科

た な か け ん い ち

田中 健一

(准教授)



施設配置や運営時間を、 数理モデルで導き出す

社会システムのモデリングと最適化

社会のさまざまな問題について、数理的手法を用いて、合理的に計画を立てたり、解決策を提示したりするオペレーションズ・リサーチ（OR）。田中健一さんは、ORの数理的手法を使って、公共施設や商業施設などの最適な配置や運営時間の設定に役立てる研究を行っている。施設の配置や運営時間しだいで利便性や収益が大きく異なることを明らかにすることで、運営者側の合理的な意思決定に役立てることができる。ORは意思決定の科学や問題解決学とも言われる実践的な研究分野だ。

施設配置の最適化問題に 時間軸を加える

田中さんが所属する管理工学科では、人やお金、情報、インフラなどにまつわる現実の社会的課題を、数理的アプローチによって解決する研究を行っている。扱う対象が社会システム全般と幅広いだけに、関連する分野は多岐にわたり難しい側面もあるが、現実に対応した答えを社会に示すことができる実践的な学問だ。

その中で、現在、田中さんが手がけ

るのは、都市工学分野の「施設配置問題」。自身の研究の特徴を、田中さんは次のように説明する。

「工場などの施設の最適な配置場所を数理的に求める研究は、すでに1世紀以上前に行われていて、“ウェーバー問題”として知られています。その後、施設配置問題は幅広い展開をみせていますが、これまでは基本的に空間配置しか扱ってこなかった。私の研究では、ここに時間軸の概念を取り入れて、限られた時間の中で施設サービスを楽しむ人間の行動を直接モデルに取り入

れた点に特徴があります」。

その一例として、田中さんは社会人大学院の配置問題を提起した。首都圏の企業などに勤める就業者が退社後の帰宅途中で大学院に立ち寄るという場面を想定して、利用人数を最大化するための施設配置と授業開始時刻を導き出し、サービスを提供する主体の意思決定に役立てようという試みである。

「開始時刻が早すぎれば、退社後に授業に間に合う人が少なくなるし、遅すぎれば帰宅できなくなる。その時間軸上のトレードオフに対して、いかに最適な解を導き出すのがポイントになります」（田中さん）。

合理的な計画案の中に、 勘と経験では導けない 意外な答えが

ここで、田中さんが用いたのが、首都圏の通勤・通学の鉄道やバスの利用状況をアンケート調査した『大都市交通センサス』と呼ばれる大規模データである。このデータをもとに、退社後、社会人大学院で3時間授業を受けて、夜11時までに帰宅する場合、首都圏のどこに施設を配置して、何時に授業を開始すれば利用者数が最大になるかを、数理モデルを用いて導き出した。

「ただ、時間を取り込むと、単に場所を選定するよりも、桁違いに情報量が増えてしまいます。数理最適化問題を解くためには、すでにさまざまなソルバー（ソフトウェア）が用意されてい

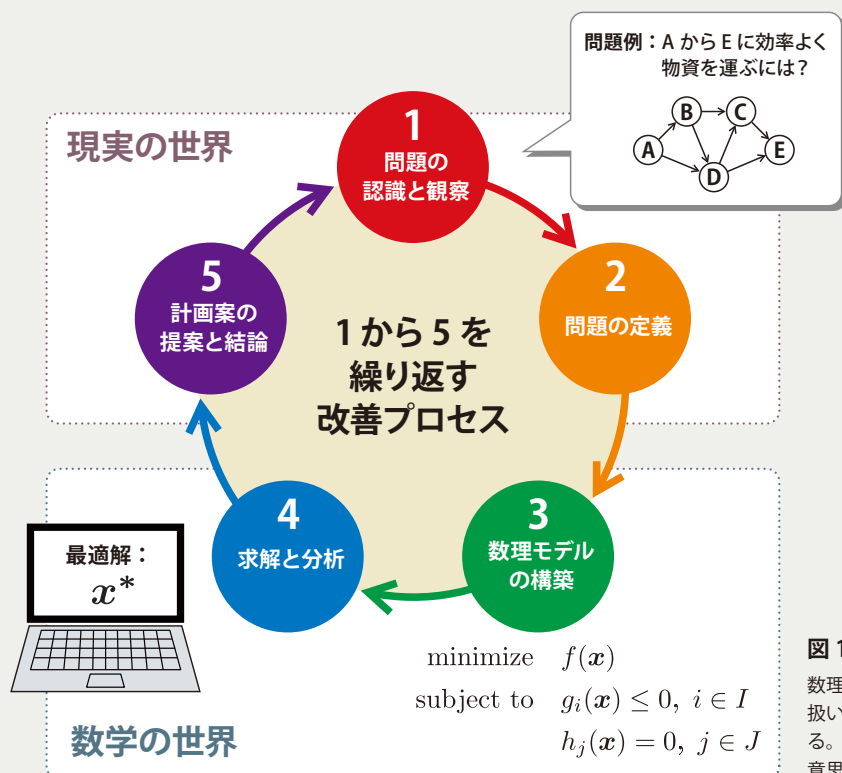
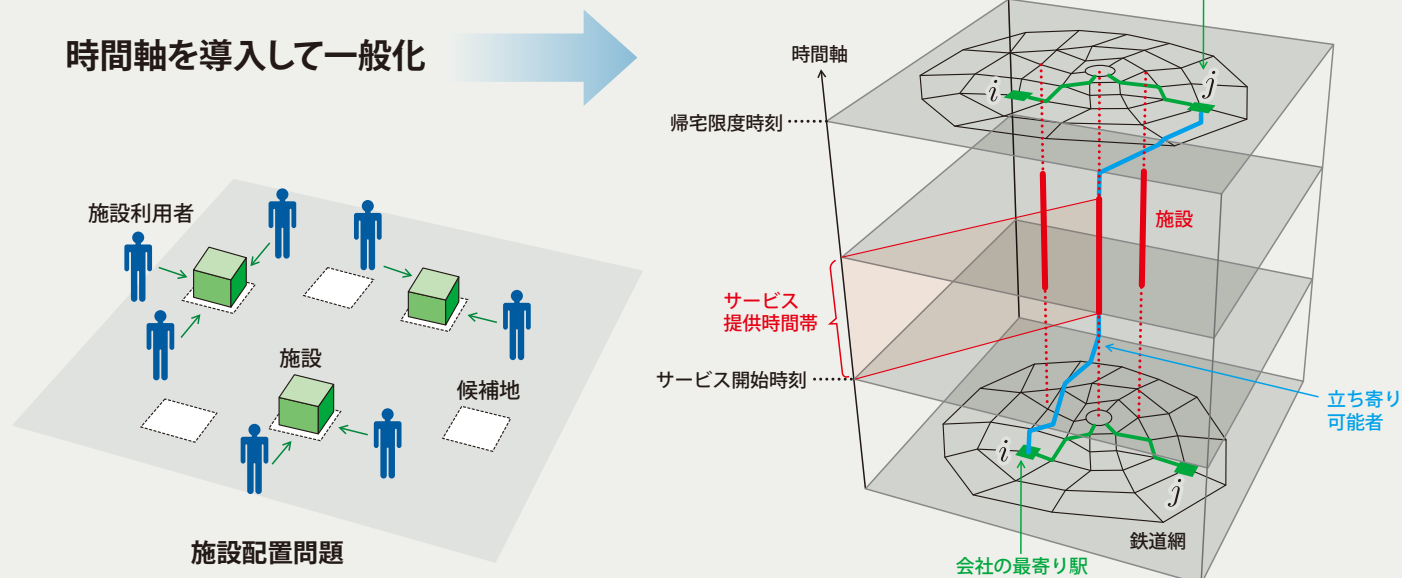


図1 数理モデリングによる問題解決

数理モデル構築の際には、重要な要因のみに着目し、数理的に扱い易い問題として対象をうまく表現することがポイントである。時間やコストの許す限り、1から5の流れを繰り返して、意思決定に役立つ知見を引き出すことを目的とする。

時間軸を導入して一般化



ますが、最新のソルバーを使ったとしても、時間情報まで入れ込むとデータ量が膨大になり計算できなくなる。そこで、モデル化の工夫を行うと同時に、提案モデルの特徴を捉えたアルゴリズムを設計しました」と田中さんは言う。

その結果、ある想定の下では、開始時刻を10分刻みで設定した場合、施設を1つだけ置くのであれば、社会人大学院を新宿に設置して、7時10分に開始するのが最適であることが導き出された。2位以下は、渋谷、表参道、原宿、代々木の順となっていて、直感とのズレはさほどない。

面白いのは、施設数を2つ以上に増やしたときである。施設が2つの場合、開始時刻を施設ごとに独立に設定できる場合には、新宿と青山一丁目で、7時30分と7時に開始するのが最良となった。さらに、同一時刻に授業を始める場合は、神保町と菊名（横浜市）に施設を設置して、7時10分に開始するのが最良という答えが導き出された。

「各施設の開始時刻を独立に設定できる場合には、都心に複数の施設を同時配置して、時刻をずらしたほうが有利だし、開始時刻が同一の場合には、都心だけでなく、サービス享受者の自宅に近い住宅街にも施設を設置したほうがいい。状況設定に応じて、結果に大きな差が出るんですね。このように、勘や経験則だけではたどり着けないよ

うな、合理的な答えを導けるところに、数理モデルによる分析のリアリティと面白みがあります」。

汎用モデルを提示して、さまざまな場面に役立てたい

もっとも、社会人大学院の設置問題は、あくまでも一例であって、田中さんの狙いは、さまざまな場面に適用できる汎用的なモデルをつくることにある。

「このモデルも、利用者の施設への立ち寄り方や施設の運営方法などの条件を変えることで、スポーツクラブや映画館、コンサート、各種イベントなどの幅広い対象に適用できます。また、保育園、図書館などの既存施設のサービス時間帯の見直しや改善など、一見異なる状況にもモデルを少し変更すれば応用できます。つまり、私の目標は、汎用的なモデルをつくり、分析のためのフレームワークを提示することにあるのです」と田中さんは強調する。田中さんの研究テーマが多岐にわたる理由である。

たとえば、最近では、安全性の高い集団下校ルートに関する共同研究といったテーマも手がけている。下校途中の児童が事故や事件に巻き込まれないように、できるだけ1人で歩く距離を減らし、なおかつ全児童の学校から

図2 時間軸を導入して一般化した施設配置問題

施設配置問題では通常時間軸は無視される。しかし、都市に施設を配置してそれらを運営していくためには、時間的な要因が重要になる。図では、鉄道網や道路網を表す物理的な都市空間に垂直に時間軸を導入して状況を一般化している。この時空間領域内で、人の流れ（利用者の施設への立ち寄り行動）を表現し、施設サービスを最適化する状況は、身の回りの様々な場面に現れる。汎用的な枠組みの構築を目指して研究を行っている。

家までの移動距離の合計を短くすることを課題にした。その結果、単独で歩く距離を6割に減らし、かつ移動距離の合計は1%程度の増加に抑えることができた。この成果は歴史ある国際雑誌に採択された。

さらに最近では、交通手段選択を考慮した省エネルギー都市設計、老朽化に着目した都市インフラの維持・管理モデル、火山噴火時における避難施設の適正な配置計画など、現場で求められる問題から出発して、新しい数理モデルの開発とその応用のための研究を行っている。

「数理的な手法を用いることで、意外な気づきがあり、よりよい社会の構築に役立ちます。これからも、世界に向けてインパクトのある研究成果を発信することを目標に、日々研究に取り組んでいきたいと思います」と、田中さんは目を輝かせた。

（取材・構成 田井中麻都佳）



研究者の道を選んだのは、 管理工学との出会いがきっかけ

幼い頃から、自然の中で遊ぶことが好きで、探究心が旺盛だったという田中さん。ただ、幼い頃は、研究者になろうとは夢にも思わなかった。運命を変えたのは、管理工学の研究分野との出会いだった。社会の複雑な事象についてモデルを構築して課題解決を目指すアプローチは、現実問題への具体的提案を行う工学的迫力と、自然現象をシンプルな法則で記述する物理学にも通じる理学的な面白さを兼ね備えた魅力があるという。

——どんな幼少期を過ごされたのですか？

東京都武蔵野市の出身で、自宅から数キロの範囲に、野川公園や小金井公園、井の頭公園などがありました。また、父が、休日や夏休みに車で山梨県や長野県など自然豊かな場所へ連れていってくれたこともあり、屋外で遊ぶのが好きでした。よく友達と昆虫採集をしていました。なかでもクワガタが好きでした。天体や星座にも興味があって、宇宙の果てがどうなっているのかを考えて、眠れなくなったこともあります（笑）。というわけで、小中学校を通じて自然科学に興味を持っていた子どもでした。

一方、幼い頃からピアノを習っていました。中学時代には、音楽学校への進学を目指して、音大の先生に師事していたこともあります。ただ、いろいろと迷った結果、ピアノは途中で辞めてしまいました。残念ながら、いまはピアノから遠ざかっていますが、いつか趣味として再開したいと思っています。

そうしたわけで、高校は地元の都立高校に進学しました。数学の面白さに目覚めたのは、この頃です。とくに曲線に囲まれた領域の面積が積分という操作で求められることを知ったときは、本当に驚きました。数学を魅力的な学問だと感じた瞬間です。いまから振り返ると、自然科学や数学の面白さを知覚する感性はもっていたのだと思います。だからといってこれらの成績が良かった訳ではありませんでしたが（笑）。

——それで大学は、生物系ではなく、理工系へ進まれたのですか？

そうですね。慶應義塾大学理工学部は、大学2年生のときか

ら学科に所属するシステムになっているのですが、管理工学科へ進んだのは、人間や都市、社会などの多様な領域をカバーしていてなんとなく面白そうだったからです。実際の講義が始まると、社会の課題や人間の行動といった、複雑でやわらかい対象を数学的に表現し、背後にある構造を明らかにするというアプローチに面白さを感じました。当時は物理に興味があって、シンプルな法則で世界を記述できるところに魅力を感じていましたが、実社会の問題にも同じようなアプローチが可能なのだと、授業を受けてみてはじめて実感した部分が大きく、運が良かったと思います。

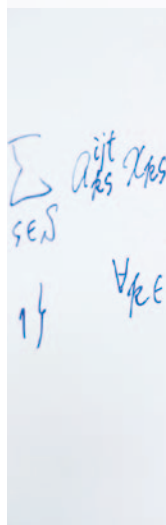
——管理工学科に進んだ時点で研究者を目指そうと思われたのですか？

いいえ、自分が研究者になるなんて、当時は、夢にも思っていませんでした。大学3年生までは、とくに学業に熱中するという感じでもなく、塾の講師のアルバイトをしたり、バスケットやバドミントン、さらにはアウトドアサークルに入ったりして、学生生活を楽しんでいました。

学問の面白さに目覚めたのは、大学4年生のときに、都市空間の数理的分析を手がけてこられた栗田治先生（現管理工学科教授）の研究室に所属してからです。栗田先生の話をついて、知識の幅広さと社会のさまざまな問題を数理モデルを用いて分析していく力強さに圧倒され、先生の下で研究したいと強く思いました。都市や地域のように空間的な構造をもった対象に、数理的に迫っていくという先生の研究スタイルは、現在の私の研究に大きな影響を与えています。

ただ、研究生生活自体は大変な側面もありました。研究室のポリシーとして、学生が自らテーマを見つけるプロセス自体に重点を置いているためです。当時はまだ研究の入り口に立ったばかりでしたから、非常に苦労しました。試行錯誤の末、苦労してテーマを設定し、ゼロからモデルをつくったという経験が、いまの自分の研究者としての原点です。振り返ると懐かしいですね。

それから、現実のどのような構造に着目するかは人それぞれ



社会に関わるモデル作りはとても面白い。 自分ならではのモデルを発信していきたい。

田中 健一

Ken-ichi Tanaka

東京都出身。専門はオペレーションズ・リサーチ、社会システム工学。2000年、慶應義塾大学理工学部管理工学科卒業。2005年同大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻博士課程修了、博士（工学）。東京理科大学工学部第一部経営工学科助手・助教、電気通信大学電気通信学部システム工学科助教、同大学情報理工学部総合情報学科助教を経て、2014年4月より慶應義塾大学理工学部管理工学科専任講師。2016年4月より現職。



ですから、モデリングという行為には、主観が入るんですね。よくモデリングはアート＆サイエンスと言われます。モデルをつくる人の世界観が反映された作品性を備えているところに面白みがある。特に人間や社会の問題は、物理学の世界のように厳密な法則に支配されているわけではないので、複数の異なるモデルが共存しても良い。そんなところにも、研究の魅力を感じました。

修士のときに、就職するかどうか迷った時期もありましたが、結局、もっと研究を続けたいと思うようになり、博士課程へ進学し、栗田先生に引き続きご指導いただきました。

——卒業後はどのような経験を積まれたのですか？

2005年3月に博士課程を修了して、運良く、4月から東京理科大学に助手として採用されました。さらに、2008年10月に電気通信大学へ異動しました。現在の研究の核となる仕事に取り組んだのはこの時期です。このときの研究や研究に対する新しい着想が、いまの自分の大きな財産になっています。

電気通信大学で5年半ほど教育・研究に携わった後、2014年に慶應義塾大学に戻ってきました。

——現在、研究室の体制は？

3年目ということもあり、現在は修士課程1年生が2名、学部生が5名という比較的少人数の研究室です。興味あるテーマに主体的に取り組むことを重視しているため、学生の研究テーマもスポーツチームのランク付けの問題から都市景観の数理的分析まで、実に多岐にわたっています。社会のさまざまな課題に数理モデルをつかって切り込んでいくことに、皆、面白さを感じてくれているようです。

——休日はどうに過ごされていますか？

小学2年生の息子ともうすぐ2歳になる娘と妻の4人暮らしで、家族で水族館や博物館に行ったり、旅行をしたりすること

が、いい気分転換になっています。家族からパワーをもらうことが多いですね。

とくに妻は、よき相談相手です。新しい研究テーマについて話をすると、あれこれ意見を言ってくれます。まずは、妻を納得させられないようでは、社会的にインパクトのある研究にはなり得ませんからね（笑）。

——慶應義塾大学の良さについて教えてください。

教職員や学生が慶應義塾という組織に強い愛着を持っていること。「慶應義塾から世界に向けてインパクトのある研究成果を発信する」、「慶應義塾をより良い組織にするためにはどうすればよいか」といったことを、皆が、それぞれの立場で考えて実践しているのが素晴らしいことだと思います。

また、理工学部全体としては、とくに若手の活躍を支援する空気があります。若手のための研究資金、海外派遣などの制度についても、学部全体でサポートしていくという気運がある。そうした雰囲気の中で研究と教育に携われるのは、本当に幸せなことだと感じています。組織としての一体感を強く感じることもできるのも、慶應義塾の大きな強みでしょうね。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

●何を聞いても、真摯に、ていねいに、そしてわかりやすく答えてくださる、やさしい先生です。とにかく知識の幅が広く、話題も豊富で、とても勉強になります。ここでは、皆がパソコンを使ってプログラムを組んだりしていますが、行き詰まったときも、ちゃんと面倒をみてくださる。それでいて、研究のテーマ選びは学生に主体性を持たせるなど、厳しい一面も。ちなみに、先生のプライベートは謎に包まれています（笑）。

（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>

田中 健一の ON と OFF

学生時代から教員時代までの ON と、
昨年夏の家族との OFF を紹介します。

国際会議発表



初めて英語で研究発表を行った 2003 年の写真です。発表の準備は自分のペースでできますが、どのような質問が来るかは蓋を開けてみなければ分からないので、発表が終わっても気が抜けません。いまでは英語での発表は普通のことですが、このときは自分の発表が始まるまで、かなり緊張したことをはっきり覚えています。

OR 学会の論文賞の授賞式



2012 年に日本オペレーションズ・リサーチ学会から論文賞をいただいたときの表彰式での写真です。運の良いことに、表彰状を渡して下さったのは、当時 OR 学会の会長で、私の恩師の栗田治先生の大学・大学院時代の指導教官である腰塚武志先生です。受賞論文のテーマは本誌で紹介された内容です。その後の研究の基礎となる成果を評価され、大変励みになる受賞でした。

長野県の黒姫高原に行ったときの写真です。息子は網の中のバッタを確認しているようです。夜はクワガタを探しに行き、スジクワガタやミヤマクワガタなど都心ではあまり見られない種類のクワガタを採集することができました。スジクワガタはコクワガタとよく似ていますが、大アゴの形に大きな特徴がある、とても美しい種です。1 年以上経ったいまもわが家で元気に過ごしています。



家族との写真



種類が多く個性豊かでカッコイイものがたくさんいます。矢上キャンパス周辺には緑が多く、これまで数種類のカミキリムシを見つけました。

大学院生の頃は研究室に夜遅くまで残って研究を進めることがよくありました。当時は夜の方が断然研究が進んだように記憶しています。さすがに大学教員になってからは、朝型の生活をしていますが、いまでも研究の新しいアイデアは夜に浮かぶことが多いように思います。



学生時代



学生の頃、研究室から見た風景です。写真は晴れた日に内陸方向を撮ったものですが、遠くに富士山が見えます。研究室は南向きで横浜方面にはランドマークタワーなども見えました。よく研究の息抜きに、甘いものを食べながら窓の外の景色をボーッと眺めていたものです。なお、現在の私の研究室は北向きで、東京の都心部が一望できます。

卒業式の後の記念撮影



研究室の第一期生のうち 5 名と一緒に撮った写真です。研究室運営 1 年目ということもあり、試行錯誤の 1 年でした。後から振り返って思い出に残る 1 年になるでしょう。私の研究室で OR を学んだ学生が、社会の様々な分野で活躍してくれることを楽しみにしています。

私の 本棚

My favorite books



● **Urban Operations Research** 大学院時代に出会った本です。オペレーションズ・リサーチの幅広い分野で卓越した業績を挙げた2人の著者による教科書です。都市や地域の問題に、数理モデルを構築して切り込んでいく面白さが十分に味わえます。特に、待ち行列モデルをはじめとする様々な確率モデルを空間的な状況設定において展開している部分は、オリジナリティが高く大変迫力があります。この本が最初に出版されたのは1981年ですが、その魅力とインパクトは35年経ったいまでも全く変わりません。

● **Network and Discrete Location** 施設配置問題に関する専門書や教科書は、海外ではかなりの数が出版されています。そのなかで、最も気に入っているのが本書です。著者はこの分野をリードする世界的な研究者ですが、教科書を書くセンスも抜群であり、数理モデル化のプロセスにも重点を置いた記述スタイルは本書の大きな特徴です。英語もとても読み易く、施設配置モデルを勉強する最初の本としてお勧めです。

● **The Structure of Scientific Revolutions, 物理学と神** 人類が、太古の昔から現在に至るまで、身の回りの世界をどのように認識してきたのか、また世界観の変革を迫るような出来事がどのようにして起こったのか、というテーマは大変興味深い話題です。最初の本は、科学の発展が直線的なものではなく、パラダイムの変革を迫る「科学革命」が大きな役割を演じてきたことを様々な実例とともに示しています。「物理学と神」は、物理学の進展を、神の姿の変容という視点から捉えたユニークで読み易い本です。身の回りの世界を、数理モデルで表現しようとする私にとって、こうした問題に思いを馳せるのは楽しいだけでなく、研究活動の一部と言えるかもしれません。

● **世界のクワガタムシ、きらめく甲虫** 硬い体をもつ甲虫は、昆虫のなかでも特に種類が多く、とても魅力的な存在です。気の遠くなるような長い年月をかけて獲得された彼らの個性あふれる姿を、この2冊は、美しく迫力のある写真で紹介しています。小学2年生の息子も夏休みの旅行先で出会う昆虫を楽しみにしています。

● **線型代数入門** 今年で出版から50年になる線型代数の名著です。私が大学教員になったのは2005年の4月ですが、初めて担当した「数学演習」という科目の参考書に指定されていたもので、授業の準備のために読んだ本としては第一号です。論理展開は非常に明快で、いくつかの準備を経て美しい定理が証明される様は見事です。ややレベルの高い部分もありますが、理工系のあらゆる分野の学生にお勧めの一冊です。

● **最大値と最小値の数学** 慶應義塾大学に異動して、研究室の学生と一緒に、輪講のテキストとして読んだ最初の本です。最適化問題が数学や物理学や工学の分野でどのように用いられてきたかを、数千年前にさかのぼり、現代に至るまで時代を追って紹介した好著です。フェルマー、デカルト、ニュートン、オイラー、ラグランジュなど、偉大な物理学者・数学者が取り組んだ歴史上の重要な問題も多数紹介されています。こちらは訳書ですが、原著者は数多くの魅力的な本を執筆しており、この本をきっかけにファンになりました。

モデリングの魅力

田中 健一

オペレーションズ・リサーチ (OR) は分野横断的で幅広い応用をもつ学問です。特に、数理モデルを構築して現実社会の問題解決を目指す点は OR の大きな特徴であり、このプロセスを「モデリング」といいます。

モデリングでは、「対象の本質的な部分のみを抽出して他の部分は無視」します。複雑な現実を複雑なまま相手にしては何も見えてこないからです。現実のどの部分を「本質的」と見なすかは、分析者によって異なるため、分析者の数だけモデルが存在するといっても過言ではありません。特に、人間や社会が関わる問題は、物理法則のような厳密性をもって記述することは不可能です。複雑でやわらかい

対象だからこそ、切り口に応じた多様な捉え方があり、モデル構築の方法には無限の可能性があるといえます。私は、OR や管理工学が対象とする学問分野の魅力はこの点にあると感じています。

近年の、コンピュータの性能向上、効率的なアルゴリズムの開発、電子地理データの整備には目を見張るものがあります。現実世界の大規模な問題に対して具体的な解決策を提示できる環境が整いつつあるのです。こうした状況の下では、価値ある問題を見出し、問題を数理的に扱いやすい形でモデル化するセンスが問われます。OR において、モデリングの存在感は今後さらに増していくでしょう。

モデリングが有効な場面は研究に限られません。「対象の本質的な部分を抽出する」、「問題の性質を構造的に把握する」、「異なる対象の間に同一の構造を見出す」という姿勢は、日常生活上の問題をうまく

く解決したり、社会で創造的な仕事をしたりする際にも、様々な形で役立つことでしょう。慶應義塾大学理工学部が創立時から大切にしてきた伝統の一つに「基礎理論の重視」があります。私は、基礎理論とは上記のようなことを指すのだと考えています。大学時代という贅沢な時期に、こうした力を身に付けておくことには大きな価値があるでしょう。

今回の取材をきっかけに、これまでの道を振り返り、将来を展望する機会をいただきました。研究者は、「どんなことを研究しているのですか?」とよく質問されます。私は、「数学を用いて都市や社会の問題を研究しています」と答えることが多いように思いますが、一言でいえば、やはり「モデリング」なのでしょう。これからも、魅力あるモデルを発信していくことを目標に、教育・研究を続けていきたいと考えています。

理 工 学 Information

KEIO TECHNO-MALL 2016

第 17 回 慶應科学技術展「育てる産学、育つ夢」

KEIO TECHNO-MALL (慶應科学技術展) は、慶應義塾大学理工学部・理工学研究科の研究成果を広く発信し、共同研究や技術移転など、産官学連携のきっかけとなる出会いの場を提供するイベントです。大学最大規模の 100 件を超える実演中心の展示と、研究者による技術セミナー・ラウンドテーブルなどを実施し、毎年、企業や官公庁、他大学などから、多数ご来場いただいています。

日時: 2016 年 12 月 16 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 E2)
内容: 実物・実演重視の展示と魅力的な企画を予定
入場無料 ※ すべてのイベントで事前登録は不要です。
詳細: www.kll.keio.ac.jp/ktm/



〈トークセッションイベント〉

1. 「コンピュータに騙される人間の脳
ーコンピュータビジョンとロボットに見る」
ゲスト: 茂木 健一郎氏
2. 「東京オリンピックでのスタジアム設計に見る、
建物、街作りの日本らしさ、美しさ、快適さ」
ゲスト: 隈 研吾氏

編集後記

管理工学科は慶應理工の伝統ある学科ですが、窮理図解への登場は 6 年ぶりとなります。今回、田中准教授の社会工学研究をご紹介しましたが、いかがでしたでしょうか。人間社会を科学的に捉える研究は、今後ますます重要になってきます。取材を通し、先生の人柄や慶應理工らしい研究室の雰囲気もしっかり伝わってきました。

(小林健治)



新版 窮理図解

No.22 2016 August

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>