

K y u r i z u k a i

新版

# 窮理図解

2023 November

# 39

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 計算固体力学と 情報技術

これからのコンピュータ支援  
エンジニアリング  
(CAE: Computer Aided  
Engineering) とは?



機械工学科

むらまつ まゆ

## 村松真由

(准教授)

# 数値シミュレーションは ものづくりにもっと貢献できる

義足の欠陥検出、金属組織の推薦アプリ、  
量子コンピュータなど広範な分野へ

村松さんは、数値シミュレーションの可能性を広げるため、他の手法と組み合わせたり、量子コンピュータに実装したりする方法を考えるなど、新たな分野に踏み出している。義足の欠陥検出や、金属組織を推薦するアプリケーションの開発、異なる数値シミュレーションをつなぐ方法の提案など、新境地の開拓によって達成した独自の成果について聞いた。

## 「有限要素法」で 物体の変形を究明する

飛行機の翼はどのくらいの荷重に耐えられるか。車のボディは衝突によってどのように壊れるのか。義足の材料内部に異物は混入していないか。安心して暮らすためには、材料について知りたいことがたくさんある。しかし、実際に実験するのは時間的にもコスト的にも難しい場合が多い。このような時に大きな力を発揮するのが、対象となる現象を表現する「数値モデル(方程式)」を利用して、コンピュータ上で模擬実験をする「数値シミュレーション」だ。

対象のスケールによって手法が異なるので、飛行機や自動車の材料を研究する

村松さんは、ミリメートルからキロメートルサイズの現象を扱うことができる「有限要素法」を主に使っている(図1)。この方法は、対象をポリゴン(多角形、表紙参照)に細かく分割し、それぞれのパーツについて運動方程式を解いて、それらを統合して対象全体がどのように変形するかを解析する。この方法は、すでに道路やビルといった構造物の設計などに実際に使われている。

「有限要素法はメインの研究テーマですが、もっと材料のことを詳しく解析できるようになりたくて、さまざまな手法と組み合わせて研究をしています」と村松さん。数値シミュレーションを、材料の開発や解析にこれまで以上に生かしたいと、自分の専門ではない分野へ次々に

飛び込んでいる。

## 義足の欠陥を見つけたい

—機械学習、有限要素法、応用実験を用いて

「有限要素法」に「機械学習(AIの一種)」と「応用実験」を組み合わせることで、義足の欠陥を見つけるアプリケーションだ。

義足は非常に強く軽い炭素繊維強化プラスチック(CFRP)でできている。この素材は飛行機の翼や、バイクのボディにも採用されているが、シート状の炭素繊維クロスを何枚も重ね合わせてつくるため異物が混入してしまうことがあり、それが材料の強度に影響する。そこで現場では、製品の安全保証のために、2人体制で超音波を使った全数検査を行っている。村松さんは、この負担を軽減するために、1人の検査員をAI(人工知能)で置き換えられないかと考えた。

「材料には、力を加えて変形させると発熱する性質があります。そこで、サー

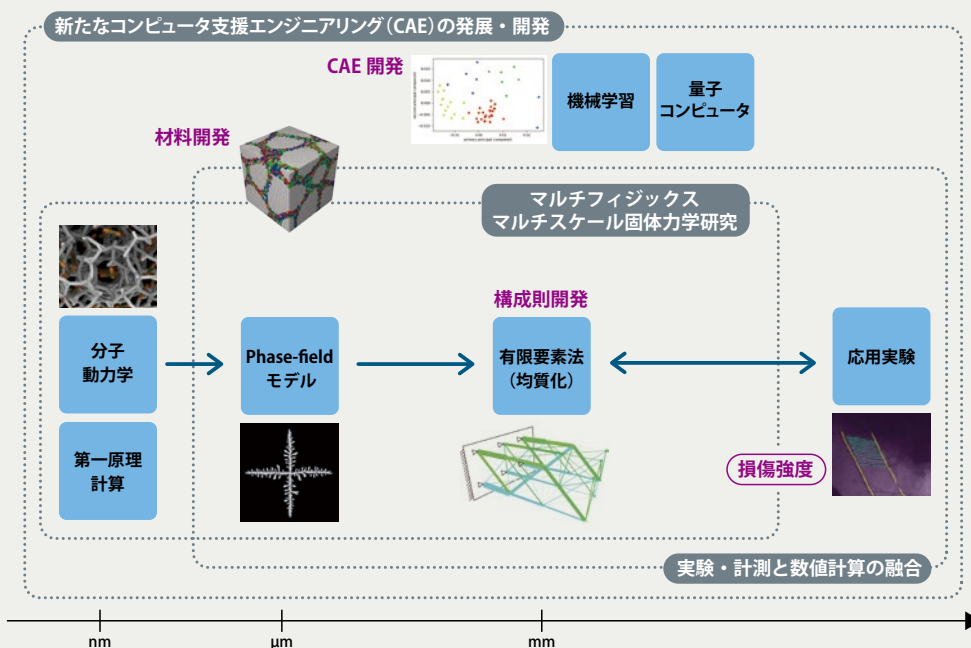


図1 村松さんの材料研究の概要

「有限要素法」を中心に、スケールの異なる数値シミュレーションや、機械学習、量子コンピュータ、応用実験を組み合わせることで、数値シミュレーションの新たな可能性を切り拓いている(灰色の点線囲み)。「マルチフィジックス、マルチスケール固体力学研究」とは、村松さんの材料研究が、熱と変形など複数の現象を組み合わせ、幅広いスケールで行われていることをいう。下部のスケールは、各数値シミュレーションが対象としているサイズに相当する。図中の画像は、各研究手法で得られた多様な研究成果。

分子動力学：原子や分子の物理的な動きの、第一原理計算：基本物理定数以外の実験値を用いない、Phase-fieldモデル：結晶成長の、有限要素法：複雑な形状や材質の物体や構造物それぞれのシミュレーションである。

マルカメラを使えば、材料にかかっている力の分布を温度の分布として捉えられます。この温度の分布が異物の有無により変わることを利用すれば、AIによって異物の混入を突き止めることができると考えました。

技術の実現には、異物の混入とその時の温度分布の「組み合わせデータ」をたくさん用意して、AIに学習させなくてはならない。ところがCFRPは高価なので、このデータのために幾通りもの異物が混入したCFRPを実際に大量に用意するという実験はできない。ここで力を発揮するのが、数値シミュレーションだ。少ない実験データをもとに、さまざまな異物の混入を想定したデータをコンピュータで作ることができるのだ。こうして義足への異物の混入の有無を判定するアプリケーションが誕生した(図2)。

### 材料の性質を決める材料組織を知りたい

—機械学習、有限要素法、Phase-fieldモデルを用いて

「材料内部のマイクロメートルサイズの組織(分離の仕方)によって、その材料の強度や加工性、変形の様式が変わるので、材料がどのような組織になる可能性があるのか、そのパターンを明らかにしたいというニーズがあります。さらに、その組織に力が加わった時の変形の様子が知りたいわけです」。この計算は、従来の数値シミュレーションでも可能だが、非常に時間がかかる。これでは実際の材料開発には役立てられないと考えた村松さんは、機械学習を2回使って問題を解決した。

「1回目の機械学習の使用によって材料の組織のパターンを考えます。2回目の

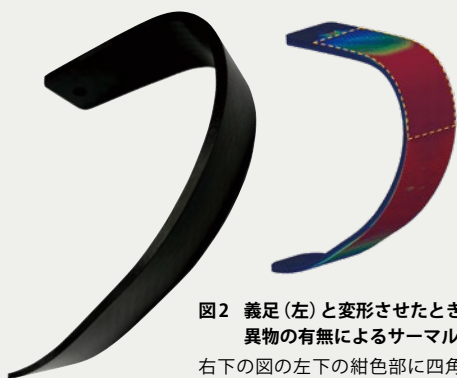


図2 義足(左)と変形させたときの応力分布(中)と異物の有無によるサーマルカメラ画像の違い(右) 右下の図の左下の紺色部に四角い異物が混入している。上の図は異物なし。

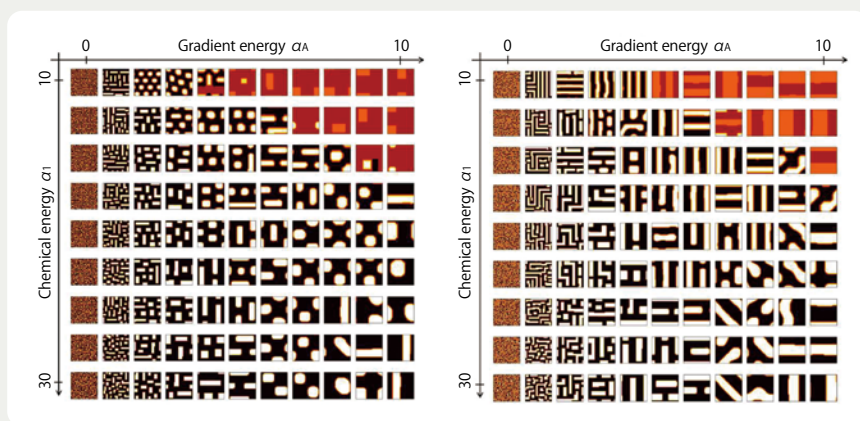


図3 量子コンピュータが導き出した材料組織のパターン

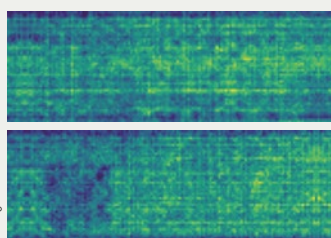
2種類の材料がどのような材料組織(分離の仕方)となるかを計算した。右に行くほど温度が高いなど材料が混ざりやすい条件の場合、下に行くほど2種類の材料の性質が異なり、混ざりあいにくい場合。左図は、2種の材料が7:3の場合、右図は6:4の場合。

機械学習の使用によって、加わった力に対してその組織がどのくらい伸びて衝撃を吸収でき、材料として強いのかを予測します。こうして望みの性質をもつ組織のパターンを推薦してくれるのです。

### 数値シミュレーションに新たな展開を

義足の欠陥を見つけたり、材料の組織を推薦する技術は、どちらも「数値シミュレーションで得られたデータをもとに生かしたい」という思いから誕生したものである。

村松さんは、さらにもっと先を見据えた研究にも取り組んでいる。ひとつは、「分子動力学」と「有限要素法」をつなごうとするもの。「有限要素法で材料を解析する時、その材料が金属なのかプラスチックなのか、セラミックスなのかを指定します。材料の特性が違くと、それを解くための方程式(構成則)が違います。そのため構成則が存在しないまったく新しい材料は解析できません。しかし、そもそも構成則は分子動力学による分子スケールのシミュレーションから導き出されます。それなら、分子動力学と有限要素法を直接つないでしまえばいいのでは



ないだろうか…。構成則を介さずにスケールの異なるシミュレーションをつなごうという大胆なアイデアは、すでに一部は成功しているという。

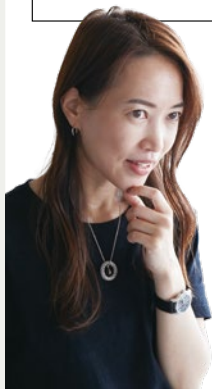
さらに、これらの数値シミュレーションを、次世代のコンピュータとして注目される量子コンピュータで実行できるようなアプリケーションの開発を進めている。量子の性質を利用する量子コンピュータは、私たちが今使っている古典コンピュータとは動作の原理が異なるため、まったく新しいアプリケーションを開発しなければならない。

こうした課題に挑めるのも、慶應義塾大学に在籍しているからこそだという。

「まず、伊藤公平塾長が量子コンピュータの研究者ですし、2018年に慶應義塾大学は、米国IBMの量子コンピュータ実機「IBM Q」の最新版にアクセスできるアジア初のハブになる(『新版 窮理図解』29号)など、量子コンピュータには強い大学です。計算力学でも使えないかと考えました」。

まだ解像度は粗いものの、いろいろな材料をブレンドしてできる組織のパターンを1秒ほどで算出できる。これまでは20分かかっていたというから、これは非常に大きな進歩であり、量子コンピュータの高精度化・実用化が待たれる(図3)。

村松さんの研究は実に幅広く、この紙面だけではとても紹介しきれない。その上、これから何の研究をするかも予想できないので、村松さんの動向から目が離せない。(取材・構成 池田亜希子)



## これまでの経験のすべてが 今の幅広い研究を支えている

高校時代に「力学の法則」に感動して以来、村松さんの力学への興味は尽きることがない。計算力学\*の研究を続ける中で、力学が社会に必要とされる学問であり続けるように、研究を継続して常に新たな展開を模索し、後進の育成に力を注いでいる。

\*「計算力学」とは、実験ではなくコンピュータシミュレーションで力学を理解する分野です。

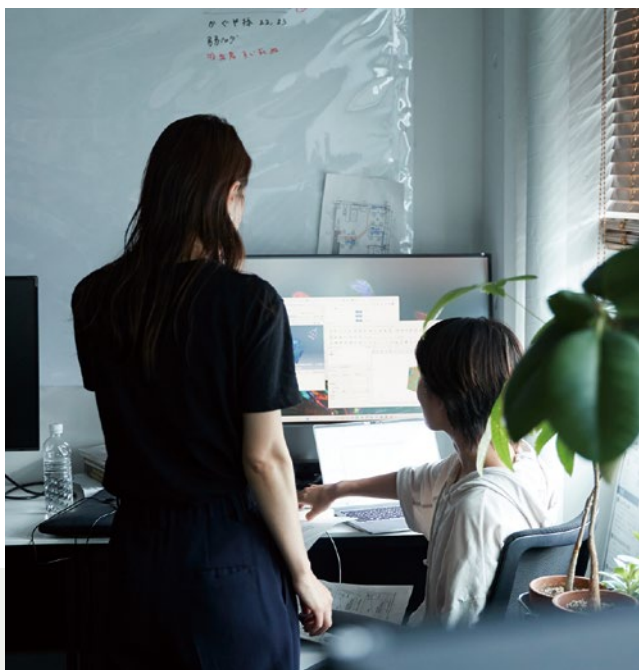
### ——子供の頃から数学や理科が好きだったのでしょうか？

まったくそんなことはありません。普通に定期テストのために勉強はしていましたが、ほかの教科より特に好きというわけではありませんでした。むしろ本を読むのが大好きで、小学生の頃は、休み時間にみんながドッジボールなどをしているのに、1人だけ図書室に行っていました。

数学や理科の面白さに気付くきっかけは、高校の物理でした。みなさんも覚えているかもしれませんが、物を投げると、それが重ければ近くに落ちて、軽いと遠くまで飛ぶという現象を学びます。「それはそうだろう」と思うわけですが、それが物理法則の数式で表わされるのです。すごくキレイだと感じて、誰がつくったか知りたいと思いました。こうして力学を学びたいと思うようになり、大学は機械工学科に進学しました。

### ——慶應義塾大学の理工学部のご卒業ですね。

そうです。両親も妹2人も文系でしたが、祖父が醤油など農学系の研究をしていたので、時々、化学とか生物を教えてもらっていました。私は定期テストに出ることが聞きたいのに、絶対にテストに出ないようなことまで教えてくれました(笑)。その祖父が、私が慶應義塾大学の理工学部に進学したことをとても喜んでくれました。



力学の面白さは、飛行機の翼に力がかかるとどれだけ変形するかが見られるように、生活の中で実感を伴うことだと思います。さらに、数式をコンピュータシミュレーションで解いてみると、実際の現象とよく合致します。より高度な力学を学び続けたいという思いから、卒業後は研究の道を選びました。

### ——卒業後は、研究所の研究員や大学の教員の経験をされたそうですね。

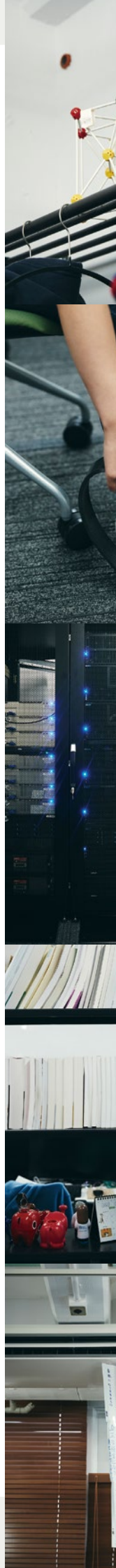
卒業後は、つくばにある産業技術総合研究所(産総研)で2年間、その後の4年間は仙台にある東北大学で過ごしました。自分は“先生というタイプではない”と研究所を選びましたが、実際に行ってみたら、私にはすごく寂しく感じられて、学生がいるところでなくてはダメだと思いました。研究所は基本的に自分の研究をする場所ですから仕方ないのですが、仲間と一緒に勉強するようなこともありませんでした。

それで東北大学の寺田賢二郎先生からポスドク研究員のお誘いを受けたのです。ずっと関東にいた私にとって、東北行きは人生をリセットするような気がして、ちょっと勇気のいる決断でした。しかし、行ってみたらとても素晴らしい研究環境で自由に数値シミュレーションの研究ができましたし、学生との交流も楽しくできました。また、寺田先生と沢山お話をして大きく影響を受けました。こうして「仙台は第二の故郷」になりました。

### ——研究所と大学はかなり違うのでしょうか。

私の専門は数値シミュレーションですが、産総研ではサーマルカメラの実験をするように言われました。まったく未知の分野だったので、論文を書けるような新規性のあるテーマを見出して研究し、成果を出すのはとても大変でした。しかし、東北大学に移ろうと思った頃には、結構、いい業績を上げていました。

当時は、自分が海の物とも山の物ともわからずに、将来への焦りがありました。でも今では、産総研でいろいろな経験をして、アイデアも得られたからこそ、幅の広い研究ができていると思っています。実際、今も産総研で義足などの実験をさせてもらっていますし、サーマルカメラを活用した研究も続けています。



——2018年に母校の慶應義塾大学に戻られました。

戻ってきていちばん変わったのは、研究室を主宰するようになったことです。私は、それまで人前でスピーチをしたり、何かのリーダーになったりした経験がまったくありませんでした。これは大変だということで、スポーツの監督さんの著書をいろいろ読みました。研究のゴールが論文を発表することだとしたら、スポーツチームも研究室もチーム戦でありながら、個人の能力や個性も関わる個人戦でもあるわけです。その点で両者は似ていると思うのです

私の研究を面白いと共感してくれた学生に、どう個人技を磨かせるか。そしてその学生を、私はどうブランディングして世の中に出してあげられるかを考えます。特に、博士課程に進む学生は、生涯にわたる研究仲間になるのですから、研究コミュニティを自らの力で歩いていけるように、道筋をつけてあげたいと思っています。

こんなふうに思うのは、私が計算力学の研究を面白いとっていて、この分野を大切に思っているからです。300年後にはどのみちほとんどの人が忘れられ、私も例外ではありません。今の私の学生たちが同じ志を持ち、未来のこの分野をより進化させ、つないでくれると嬉しいです。

——起業にも関心をおもちだそうですね。

これまで起業には縁のない研究の道を歩んできましたが、自分の研究を社会に役立てるには、社会に実装することが大事だとずっと考えてきました。そう考えていたところ、学生から勧められて、大学院の「アントレプレナー育成講座」を受講することになりました。

慶應義塾の学生は自立をしていて、いい意味で「大人の言い

なりになりません」。代わりに、自分が納得して興味のあることには夢中で取り組みます。自分で新たな研究のアイデアを仕入れてくる学生もいますし、研究紹介でお話した「義足の欠陥検出技術」で起業したいと考えている学生もいます。

成功する人は、本能的にタイミングを逃さない能力を備えているように思います。そこを鍛えることが大事かもしれませんが、それには誰かと会って話すことが重要だと思います。ただし、起業でも研究でも「日々自分のやるべきことをやり、いずれ来るタイミングに備える」そして「億劫がらずにいろいろな人と会う」の両方をバランスよくこなうことが大切です。学生たちには「貴重な大学時代を有意義に過ごしてほしい」と願っています。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

●私はずっと複雑な人間社会の仕組みを単純化する「モデル化」に興味がありました。授業で、材料にもモデル化があることを知り、面白そうだと思いました。研究室を決める際に、村松先生に「社会学などにも興味があって勉強を続けたい」と話したところ、「いろいろな経験が研究に生きる」と言っていただき、研究室を選ぶ決め手になりました。新型コロナウイルス感染症が収まり、大学に来ていろいろな人と接するようになって、高校生の頃とは比べものにならない広い世界があることを知りました。先生は、研究や日々の生活を通して私に知らない世界を見せてくださる方です(学部4年生)。

(取材・構成 池田亜希子)

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

## 大好きな計算力学のバトンを 若い人たちへつなぐ!!

### 村松眞由

Mayu Muramatsu

専門は計算力学、固体力学、材料工学。2007年慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業。2011年慶應義塾大学理工学部機械工学科志澤一之研究室にて博士号(工学)を取得。慶應義塾大学理工学部機械工学科助教(大村亮研究室)を経て、2012年(独)産業技術総合研究所研究員。2014年東北大学助教。2018年4月慶應義塾大学機械工学科専任講師に着任。2022年4月より准教授となり現在に至る。



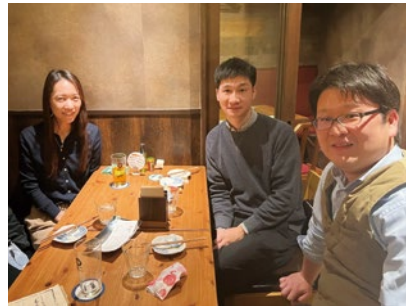


**研究室**

2023年の研究室メンバー。春と冬の「研究室温泉旅行」は恒例。今年の冬は銀山温泉に行くらしい。

**村松真由の  
ONとOFF**

連続的な日常



**機械工学科同期**

機械工学科同期くらいの先生達との飲み会(飲んでばかり)。



**理工学部同期**

2018年一緒に着任した理工学部同期の先生達と飲み会。

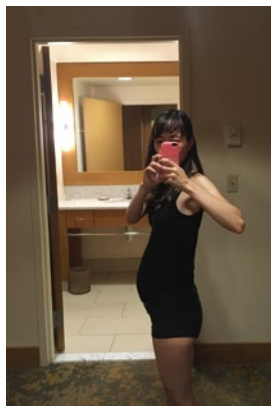


**Varvara**

仲の良いEindhoven工科大学のVarvara Kouznetsova先生。2023年夏は慶應義塾に滞在してくれた。

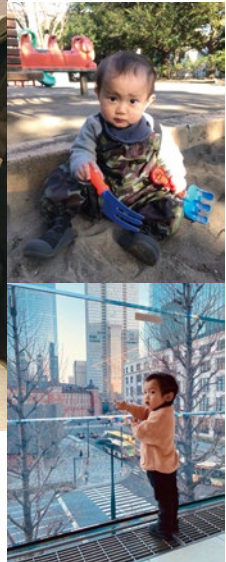
**妊娠**

2019年にワシントン大学で仕事中に臨月。



**息子**

問題なく生まれてすくすく育ってくれる息子に感謝。どんな大人になっていくのか楽しみ。



### ●『菊と刀』

(ベネディクト 著 角田安正 訳 光文社古典新訳文庫)

第二次世界大戦中の米国戦時情報局による日本研究が記されている名著。研究をしていると、世界の中での自分や日本人の立ち位置を嫌でも考えさせられる。日本人の本質は何かと考えていた時に大村亮先生が読んでおられた『古事記』とともに読んだ。自分や日本人を海外の人がどのように見ているか、客観的に考えるヒントをくれる。

### ●『ゴールは偶然の産物ではない』

FCバルセロナ流世界最強マネジメント』

(フェラン・ソリアーノ 著 グリーン裕美 訳 アチーブメント出版)

博士課程修了後、研究機関や他大学を転々としていた。その後、慶應義塾に戻って初めて自分の研究グループを持つことが決まったとき、スポーツチームの運営本をたくさん読んだ。これはそのうちの一冊。「ゴールは偶然の産物ではない」という言葉どおり、個人技、メンバー構成のみならず、クラブの金銭面、スポンサーシップ、ブランド、ありとあらゆることが1つのゴールにつながっていると主張している。

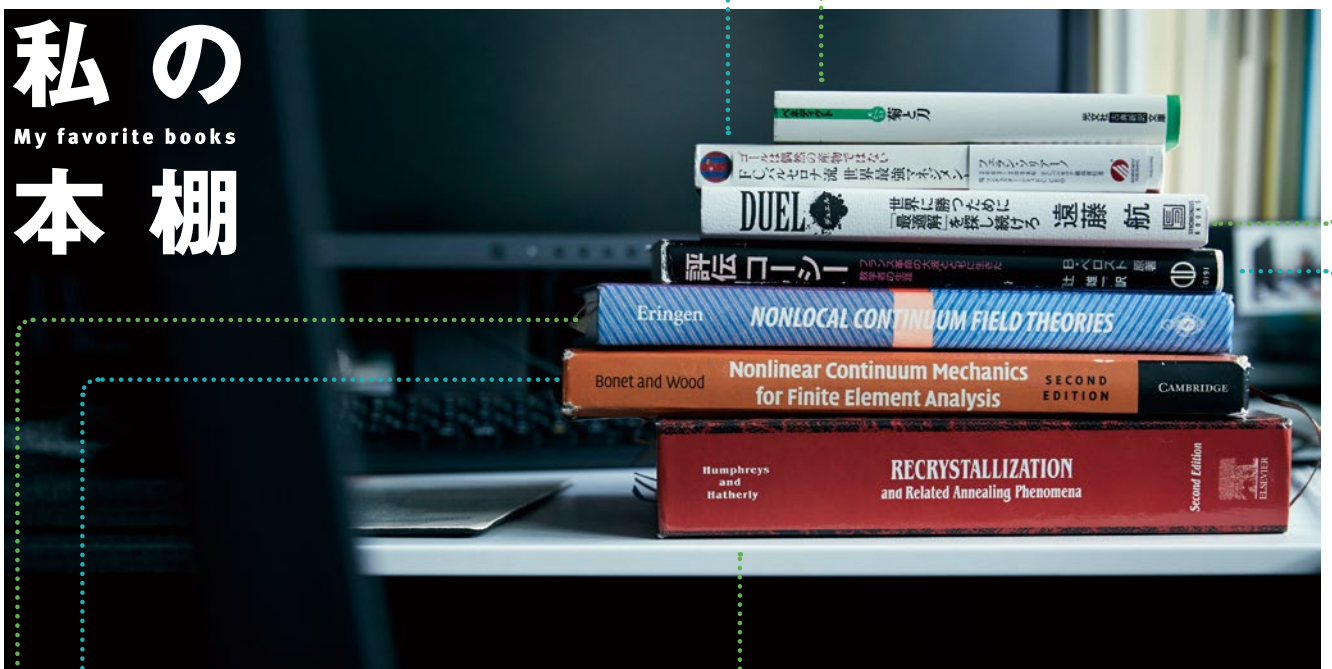
### ●『DUEL 世界に勝つために』

『最適解』を探し続ける』

(遠藤航 著 日本ビジネスプレス)

Jリーグの湘南ベルマーレを応援している私が、昔からウォッチしていた遠藤航選手の著書。遠藤は、かつてのベルマーレの専監督により「特別目立つテクニクがあるわけではないし、背も高くないが、前を見て走れる子供で、そういう子はあまりいない」という絶妙なユース抜擢をされた。しかしながら、ベルマーレ、(浦和)レッズを経て、サッカー選手としては高齢とされる24歳で海外挑戦をはじめ、シントトロイデン、シュツットガルト、リバプールと、驚くようなキャリアを歩んでいる。遠藤が、何を大事にしながらこれまでサッカーを続けてきたのか、よくわかる。

## 私の My favorite books 本棚



### ●『Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis』

(Javier Bonetら著 Cambridge University Press)

日本の“計算固体力学”に携わる研究者は、誰もが読むであろうたいへん有名な教科書。連続体力学よりは固体力学に特化した記述になっている。先日、本書を執筆されたBonet先生にご挨拶した際、「本書を毎年自分の研究室の輪講に使わせてもらっています」とお伝えしたら、英語の原典を読んでいるということ喜んでくださった。(ちなみに本書の日本語翻訳本もあるが、それらもたいへん分かりやすい!)

### ●『Nonlocal Continuum Field Theories』

(A. Cemal Eringen 著 Springer-Verlag New York)

学位を取得した研究テーマである「一般化連続体力学」に関する教科書。指導教員の志澤一之教授が、先生オリジナルの資料を使って、マンツーマンでマイクロポーラー理論を伝授してくださったときは、博士進学を選択をしたことをとても幸運に感じた。基礎的なことはほぼその時に教わったが、原典に戻りたいときはEringen先生の本を開く。

### ●『Recrystallization and Related Annealing Phenomena』

(F.J.Humphreysら著 Elsevier)

金属の相変態の実験によって得られる知見からそれらに対する数値シミュレーションまで、幅広くカバーした教科書。現在、研究室では様々な構造材料(金属、高分子、セラミックス)の研究を行っているが、私が最初に研究を始めたのは金属だった。また、博士課程の学生のときに、初めて自分の研究費を使って購入した教科書で、当時は洋書の価格の高さに驚いた。(2023年9月現在の価格:3万2846円)

### ●『評伝コーシー』

『フランス革命の大波とともに生きた数学者の生涯』

(ブリュノ・ペロスト 著 辻雄一 訳 森北出版)

Augustin-Louis Cauchyの伝記。固体力学では、コーシー(Cauchy)といえば「コーシー応力」であるが、彼の名前を冠した数学理論は多数ある。コーシーには、投稿されたガロアの論文を放置したという有名なエピソードがあるが、本書を読むと気難しい人だったということがわかる。

## わたしの趣味は YouTube (2023)

村松真由

以前は読書が趣味の私だったが、2023年9月現在、よろしくないことにYouTubeが私の趣味の時間をかなり侵食している。

よく見るのは、ウクライナ戦争とヒップホップである。前者は開戦当時(2014年のクリミア併合ではなく2022年2月のロシアの侵攻)からほぼ毎日ウォッチしており、かなり最先端の情報をおさえているが、文章に残すと問題がありそうなので、ここでは後者について書いてみようと思う。

2年くらい前に、学生から「舐達磨」とい

うヒップホップクルーのBUDS MONTAGEという曲を紹介してもらってから、毎日YouTubeでヒップホップを聴いている。唾奇、Awich、Monyhorse、LANAなど色々聴く。ついでにMCラップバトルやラップスタア誕生も見る。

ヒップホップに限らずもともと音楽は何でも好きで、人から勧められるがままに聴くが、しばらく音楽を聴くことから離れていたのが新鮮を感じる。音楽は、やっぱり楽しい。

YouTubeで動画(特にMV:ミュージックビデオ)を見てると、供給する側が制作物にかかるコストと、それらを消費する側が費やすコストとがいかに非対称かに驚く。供給側では楽曲およびビデオ制作に膨大な時間と費用が費やされているであろう。それに対して、消費者である私は通信料をわずかに払い、無料のYouTube

でたった3~4分ほど視聴するのみである。有り難がってしっかり視聴しなければいけないと思うが、質の高い動画を気楽に視聴できるところがYouTubeの良さでもある。

先日やっと、阿川尚之先生の『憲法で読むアメリカ史』という本を読み終えた。最近YouTubeばかり見ている私には、久々の一冊読了である。読書はYouTubeに比べると、消費者側のコストを費やす娯楽であると感じる。したがって、読み終えたときには、こちらにも一定の達成感がある。本書の冒頭はなかなか読み進めることができなかつたが、読み終える頃には主張がよく理解できるようになった。

ところが、私の頭の中のアメリカ史には、南北戦争あたりにYouTubeで見たドントテルミー荒井による解説の記憶も混在しているように思われる。結局、YouTubeからは抜け出せないのである。

## 理工学 Information

### KEIO TECHNO-MALL 2023 (第24回慶應科学技術展)

「新たなコラボレーションを創出する「人間交際」の場—大変革時代におけるチャンスとチャレンジ—」

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。

慶應義塾が誇る最先端の技術や独創的なアイデアにふれて、さまざまな可能性を探ってみてはいかがでしょうか。

日時: 2023年12月15日(金) 10:00~18:00

場所: 東京国際フォーラム地下2階(ホールE2)

参加受付・詳細: ホームページ (<https://www.kll.keio.ac.jp/ktm/>)

よりご確認ください。

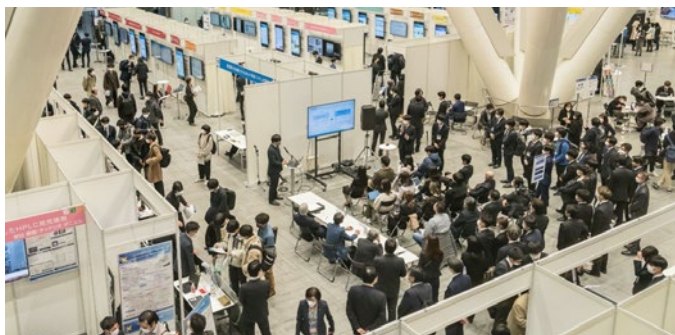
〈シンポジウムセッション〉

- ・慶應義塾の研究と挑戦
- ・ジェントロジーと科学技術の関係を考える
- ・革新的薬物送達システムの開発に向けた医工業および産学連携
- ・AIフロンティア: 基盤モデルが切り拓く未来

〈特別講演〉

- ・新たな価値の創造とグローバルサステナブル社会の実現 -IOWN-

※テーマは変更となる可能性がございます。



<https://www.kll.keio.ac.jp/ktm/>



## 新版 窮理図解

No.39 2023 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 村上俊之  
 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](mailto:kyurizukai@info.keio.ac.jp)  
 問い合わせ先 (産学連携)  
[kll-liaison@adst.keio.ac.jp](mailto:kll-liaison@adst.keio.ac.jp)

web版

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

### 編集後記

この『新版 窮理図解』39号では、「計算固体力学」を研究されている村松真由准教授を特集しました。お気に入りのサッカーチームの名前をサーバー名に採用されるなど、親しみやすい一面を取材の際に覗かせていただきました。

研究の説明を伺うまでは、「新素材の強度予測」というと物理シミュレーションを想像していました。より効率的で計算コストがかからない機械学習による代替計算をされているという先生の研究は、目からウロコでした。多岐にわたる応用分野の一部も、この号で紹介していますので、ご一読ください。 (中山翠)

今号の表紙: 構造物を有限個の要素に区切って数値解析する有限要素法のイメージとともに。