

facebook
"keiokyuri"

新版

K y u r i z u k a i

窮理図解

2019 January
no.

29

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 物理情報工学

量子コンピュータを支える数理工学

物理情報工学科

やまもとなおき

山本直樹

(准教授)



量子を自在に操る制御理論が 量子コンピュータを実現に導く

数理工学と量子力学を融合させた新分野を開拓

量子とは原子や分子、電子、素粒子などの非常に小さな物質や、小さなエネルギー単位のこと。1メートルの10億分の1を下回るような極小の世界で、量子は私たちの身の回りの現象とは違う不思議な振る舞いをする。その性質を利用した超高速コンピュータが、今まさに実用化されようとしている。そこには量子をいかに捉え、どう制御するのかという難しい課題があった。山本さんは20年前からこの課題に挑戦し研究してきた理論家の1人だ。

量子コンピュータの黎明期に 制御理論と情報理論の 数理工学でアプローチ

量子コンピュータのアイデアは30年以上前からあったものの、観測することさえ難しい量子を利用して、実際に計算機を作ることは簡単なことではなかった。1998年、当時カリフォルニア工科大学の研究者だった古澤明さんが、遠く離れた場所へ一瞬で情報を伝える“量子テレポーテーション実験”に成功した頃から、「量子コンピュータを本当に作るぞ、という機運が高まったのです」と山本さん。

このニュースをきっかけに、山本さんは量子力学の分野に踏み出していく。とはいっても、それまで量子力学を専門的に勉強したことはなかった。当時、山本さんは東京大学の計数工学科の学生で、

応用数学系科目を幅広く学んでいた。とくに、甘利俊一博士の著書『情報幾何の方法』にたいへん影響を受けた。卒業研究では人工知能のツールであるニューラルネットを、修士課程では制御理論と情報幾何を研究している。

「甘利先生は統計、制御、最適化などの数理工学を“幾何”という観点からまとめあげました。『情報幾何の方法』ではニューロンや脳科学なども取り上げられていて、すでに量子情報の章もありました」。さまざまな方法論を共通する数学で把握しようとするこの本の精神は、そのまま山本さんの研究スタイルとなり、今に至るまで一貫している。

山本さんは、これまでやってきた制御理論や最適化理論などの数理工学と量子力学を結びつけた新分野を切り開くとい

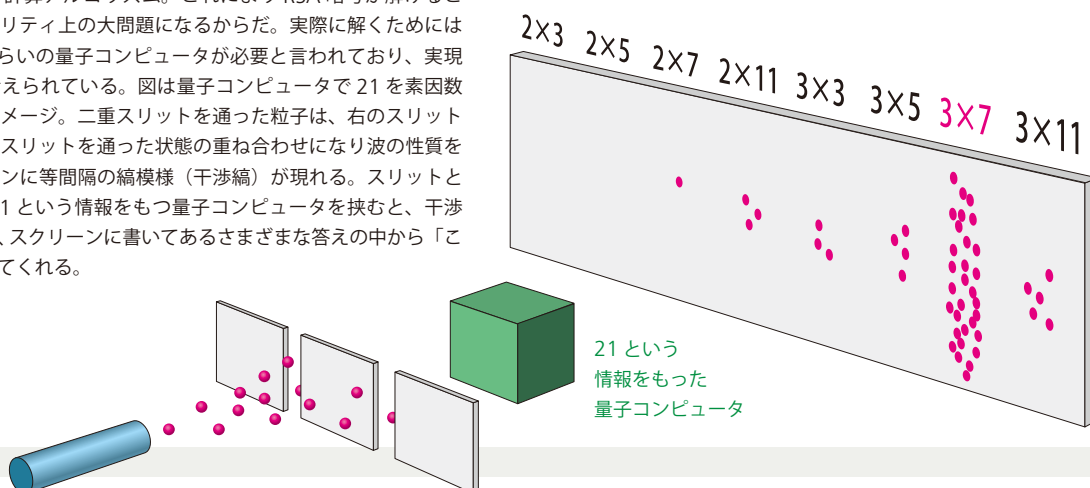
う野望を抱き、自分なりの新しい視点を取り入れて論文を書いた。学位取得後は「量子の制御」に的を絞り、制御工学におけるフィードバック理論（ものの状態を見て操作を加えること）の量子版を手掛けようと、当時この分野で先行していたカリフォルニア工科大学でポスドクとして研究を始める。

量子の世界をガラッと変えた この20年

「制御」とは、ある状態に操作を加えて、別の状態に変えることだが、そのためには対象の状態を見て、把握しなければならない。ロボットにコップを持たせる場合、ロボットがコップの位置や大きさを把握できればうまく持てないだろう。通常のコンピュータでは、ビットが1か0かをまず把握する。ところが量子コンピュータの場合、把握すべきものは1か0かではなく、1と0を重ね合わせた状態（量子ビット）になる。量子力学によればこの状態を見る（観測する）ことはできない。見たとたんに重ね合わせは解消されて、1か0になってしまう

図1 量子コンピュータの仕組み

量子コンピュータ開発のブレイクの一因は、1994年にショアが発見した素因数分解の量子計算アルゴリズム。これによりRSA暗号が解けることになれば、セキュリティ上の大問題になるからだ。実際に解くためには1000量子ビットぐらいの量子コンピュータが必要と言われており、実現は遠い将来の話と考えられている。図は量子コンピュータで21を素因数分解する仕組みのイメージ。二重スリットを通った粒子は、右のスリットを通った状態と左のスリットを通った状態の重ね合わせになり波の性質を示すので、スクリーンに等間隔の縞模様（干渉縞）が現れる。スリットとスクリーンの間に21という情報をもつ量子コンピュータを挟むと、干渉縞の濃淡に差が出て、スクリーンに書いてあるさまざまな答えの中から「この辺だよ～」と教えてくれる。



からだ。

「見る」という行為は、たとえば「もの」に光を当てて、その反射光を計測することでなされるが、量子の大きさになると、光を当てることによりその状態は変化してしまう。つまり状態を変えずに見ることはできないのである。それが量子力学の常識だった。

「見てはいけないものを制御する(笑)。そういう深い問いが隠れているんですね」と山本さん。有名な“シュレーディンガーの猫”の比喻では、猫は寝ている状態と起きている状態の重ね合わせ状態にあり、普通の光を当てる方法でこの猫を見ることはできない。猫に気づかれずに見る方法はないか、研究者たちは頭を悩ませた。しかしついに、この問題を解決するための、特殊な弱い光を生成する方法が開発されたのだという。シュレーディンガーの猫が見えるようになったのだ。この後、さらに、この猫の状態を自由自在にフィードバック制御する方法もわかった。

これらを含む量子制御に関する一連の研究は「量子システムの計測と操作を可能にした実験手法の開発」として2012年のノーベル物理学賞の対象になり、仏高等教育機関コレージュ・ド・フランスのセルジュ・アロシュと米国立標準技術研究所のデビッド・ワインランドの2氏に贈られている。

このように量子システムを観測する技術が1990年代後半ごろから開発され始め、徐々にそれらをフィードバックでうまく動かせるような体系ができあがってきた。山本さんがカリフォルニア工科大学に移った当時、この分野の数学はまったく確立されていなかったが、いくつかの幸運が重なって、世界に先駆けてこの理論を習得することができた。その後、オーストラリア国立大学研究員を経て現在に至っている。

山本さんの論文は、カリフォルニア大学バークレー校の実験チームによって検証されるなど評価されており、「理論家としては非常にうれしいこと」とほほ笑む。「重ね合わせを自由自在に制御するための理論が発展を遂げ、ノーベル賞で認められたりもして、量子の世界が

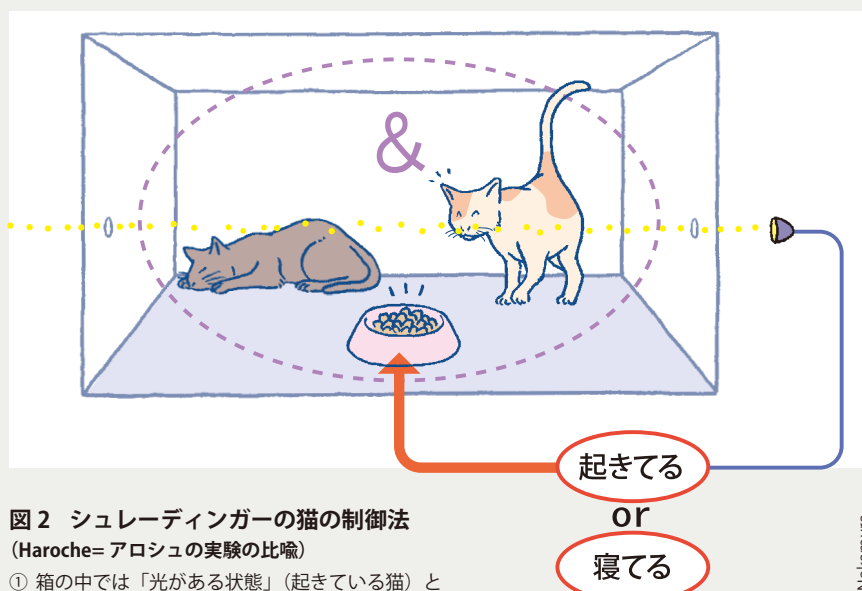


図2 シュレーディンガーの猫の制御法
(Haroche= アロシュの実験の比喻)

- ① 箱の中では「光がある状態」(起きている猫)と「光がない状態」(寝ている猫)が重なり合っている。
- ② 目標は「必ず光がある状態」をつくること。
- ③ 原子を(光の状態を壊さないように弱く)当てる。
- ④ 箱から出てくる原子は、光の状態を教えてくれる。
- ⑤ もし「光がない」という情報が得られたら光を増やす(寝ている猫に餌をあげて起こす)。

illustration : Satoshi Nakamura

ガラッと変わってきた20年でした」と山本さん。今は量子制御理論を応用して、集積化が限界にきている電子回路のフィードバック制御の量子化にも取り組む。次世代コンピュータに必須の技術として期待され、科学技術振興機構(JST)のプロジェクトとして進行している。

世界でヒートアップする 量子コンピュータ研究

量子コンピュータ開発は今、実用化を目指し熱い視線が注がれている。「世界の巨大企業が、量子コンピュータ開発に巨額の資金を投入しています。また、アメリカでは関連したスタートアップ企業やベンチャー企業がどんどん増えており、日本も負けてはいられません」と山本さん。ハードの開発に加え、今は機械学習への応用などを志向するアルゴリズムが盛んに研究されている。

慶應義塾大学では、量子コンピューティングセンターを立ち上げて2018年

5月に「IBM Q Network Hub(※1)」を開設、20量子ビット(※2)の実量子コンピュータを用いた量子アルゴリズム研究に着手した。将来のビジネス化を念頭に企業と連携したプログラムで、山本さんはセンター長として研究の先頭に立つ。

具体的には、迅速な株価評価を行うための高速モンテカルロ積分法や、少ないデータで効率よく人工知能を鍛える量子機械学習の研究を実施している。「私が学部や修士のときに研究していた分野につながっています。ラッキーですね。他にも色々な数理工学の問題にアタックしています。今まで取り組んできた制御や最適化の話も組み合わせ、量子コンピュータの数理工学を展開していきたいと思います」と山本さん。

日々発展する量子コンピュータの世界で、オリジナルの数理工学基盤を打ち立てることができるか、山本さんの挑戦は続く。

(取材・構成 平塚裕子)

※1 「IBM Q Network Hub」

IBM Corporationがビジネスやサイエンスで応用可能な汎用量子コンピューティングシステムを構築するため、2017年に立ち上げたシステム。米国オークリッジ国立研究所、英国オックスフォード大学、オーストラリアメルボルン大学などがハブとなっており、日本では慶應義塾大学が担う。なお、5量子ビットの量子コンピュータはクラウドベースで自由に使うことができ、次のサイトからアクセスできる。

IBM Q Experience

<https://www.ibm.com/developerworks/jp/cloud/library/cl-quantum-computing/index.html>

※2 「20量子ビット」

1量子ビットは1と0の2つの状態を同時計算できるので、20量子ビットの量子コンピュータは2の20乗、すなわち約100万状態を同時計算できる。量子ビット数が増えると、計算速度は指数的に増大する。



スポ根でがんばったポストク時代 ポジティブ思考で新分野を切り開く

「たまたま楽しんでいたらこうなった」と語るポジティブ思考の持ち主。そして「出会いに恵まれて、ラッキーなことが起こる」というが、それは目の前にいる人の良さや凄さを見抜き、今起こっていることをラッキーと捉える力があるからではないだろうか。いちばん大切なものを決して手放さない覚悟がある。そこに、自分を縛りつけることなく、研究にも遊びにも120パーセントの力を注いで楽しむ自由が生まれるのかもしれない。

——どんな子ども時代を過ごされましたか。

特別に理系の環境の中で育ったわけではありません。子どものころはゲームやファミコン、マンガに野球と、友達といろいろな遊びに夢中になっていました。中学ではテニスをしていたのですが、部活が終わった後は友達の家に入り浸り。5、6人で「信長の野望」などのゲームをひたすらやってました。高校でもテニスをしたかったんですが、強豪部で、テニスをとるか勉強をとるか迫られて、勉強をとりました(笑)。大学入学後はテニスを再開、修士1年まではかなり入れ込んでました。

——研究者を志したのはいつごろですか。

もともと、制御理論や最適化理論の方面で研究者になりたいとは思っていました。そこで「何を研究するか」が大事になるわけですが、量子コンピュータ関係の進展も気になっていました。それで、博士課程から急に量子情報を研究し始めました。先生方からも「好きにしてい」と言われていました。いい意味での放置です。

指導を受ける教員の専門外の分野を手掛けることはリスクでしたが、専門の数理工学を活かしてとは思っていません。博士課程では大きく3つの成果を挙げたのですが、後でかなりの大物(量子コンピュータで有名なマサチューセッツ工科大学のピーター・ショア氏)に論文を引用されるなど、評価されまし

た。学位取得後は「量子制御」に絞って、その分野でトップだったカリフォルニア工科大学(カルテック)に行くことにしたのです。

——カリフォルニアでの生活はいかがでしたか。

最高でした。結婚して渡米したこともあって、業績を挙げることも意識して研究をがんばりました。“スポ根”で論文を通しましたね。

カルテックは世界最高峰の研究機関なので、教員からも、同僚からもすごく刺激を受けました。何より、いい友達に巡り会えたのがラッキーでした。ルーカス・ボーテン(ルーク)という同じ年のオランダ人です。当時、量子観測に関する重要な論文があったのですが、難解で誰も理解できませんでした。でもついに彼が読み解いて、私に直にレクチャーしてくれたのです。おかげで最新の理論を習得することができました。無事にいくつかの論文を出版することもできました。当時、20代でやったことが今でも生きていますし、カルテックで経験したことは大きいです。これが、次のオーストラリア国立大学と慶應大学への就職につながっています。

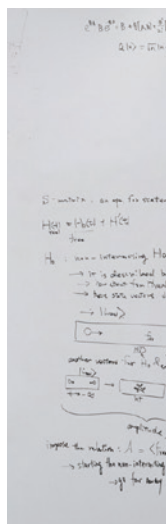
特にルークには感謝しています。アメリカでの最終年度に息子が生まれたのですが、ぜひにと頼んで、「ルーカス」をミドルネームにもらいました。

——慶應義塾に来られての印象はいかがですか。

今年で10年になり、東京大学で過ごした9年を超えました。人生でいちばん長い時間を過ごしている組織です。学生は素直でスマートな子が多いですね。授業の後、鋭い質問に来る学生もいます。教員も事務の方もみなさん親切で仲がいいですよ。慶應イズムの良さを感じます。父が商学部出身で慶應の雰囲気を知っているせいか、就職が決まると報告したときはずいぶん喜んでいました。

——IBM Qプロジェクトは、これまでの研究とは違う大変さがあるのでは？

まさかセンター長を務めることになるとは思わず、最初は軽い気持ちでお受けしました。



参加企業の研究者が大学に常駐しているので、金融、AI、化学など多分野に渡る刺激的な話題に毎日接しています。やっていること自体は普段とそう大きく変わりません。けれども「どのようにして将来的にビジネスに結び付けるか」という視点で研究をするのは初めてです。ビジネスが絡むと注目度が違いますね。

——センターの概観は斬新なデザインですね。

米国・東京IBM研究所の事業開発の方々、ロンドンのデザイナーと毎週話し合いを持ちました。私もいくつかアイデアを出したのですが、採用されませんでした(笑)。でもデザインは嫌いではないので、楽しかったですね。

実は母方の祖父が画家なのです。母も叔父も叔母もみんな芸大出身で、芸術一家なんです。私も、中学の写生大会では1年から3年まで、毎年、賞を取りました。絵と数学は一見関係なさそうですが、面白い数学はやはりきれいに構築されていて、感動します。だから、きれいなものを作ろうという感覚は近いのかもしれません。

——研究に打ち込んでいる研究室の学生さんに応援メッセージを。

自分自身、いろいろ楽しんでいたらこうなったので、「こうしたらいい」というアドバイスはあまりできません。でも、打算的にならなくても、その場その場で真剣に考えて努力すれば、そのうちに道が開けるのではないかと思います。

私自身はあまり戦略を立てませんでした。周りを見渡すとたくさんすごい人がいましたから、そういう人たちをロールモデルにしてきたように思います。良い研究をするのはもちろん、

生き方の姿勢に感銘を受けた方もたくさんいます。身近に良いロールモデルを見つけること、というのが1つのアドバイスになるかもしれません。

——ご自身はどんな先生を目指されていますか。

楽しそうにしているのが大事かなと思います。学生に対してはあまり「あれしろ、これしろ」とは言わないようにして、代わりにほめます。たまにいいアイデアをもってることがあるんですよ。「こういう計算をしてみたら、こんな結果が得られたのですが、どう思いますか」と。そのときは、かなりほめます。

慶應の学生はみんな地頭が良いので、自分から考えて行動してくれるようになったら、あとは細かい軌道修正だけで十分ですね。議論の相手をするだけで成長していきます。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

●山本先生は「教授」という固いイメージではなく、どちらかというと学生に近い感じです。気さくで、何でも許してくれて、私たち学生の自主性を重視してくれるのありがたいです(学部4年生)。

●やたらに「あれやれ、これやれ」と言われたいのいいところ。普通、研究室にはいろいろなルールがあって、「君はこの係をやってくれ」と決められたりするのですが、そういうことが一切ありません。本当に1人ひとりが自由にやっている。自分の中でルールを作って、自主的にやっています(修士1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/>

打算的にならなくても、
真剣に考えて行動すれば、
そのうちに道は開けるもの。
良いロールモデルを見つけてほしい。

山本 直樹

Naoki Yamamoto

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科准教授。博士(情報理工学)。専門は量子制御理論、量子情報理論。1999年東京大学工学部計数工学科卒業。2004年同大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。2004年から2006年まで米国カリフォルニア工科大学博士研究員。2007年から2008年までオーストラリア国立大学博士研究員。2008年から現職。2018年から量子コンピューティングセンターセンター長を兼務。

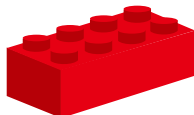


山本直樹の OFF 時間



完成の記念写真

子供達と一緒に、レゴで“野獣の城”（左）と“砦”（右）を作ってみた。子供達のアイデアを父親が修正しまくり夢中になるという予想通りの展開であった。どちらの城も構造は完全オリジナル。大満足の娘。写真を撮ったのは息子。



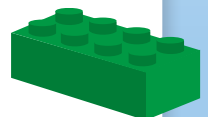
野獣の城 上から

3階が“ベルの部屋”。左手2階が食堂。1階には暖炉とソファ付きの居間、おび庭園。屋根はレスキューヘリのものを使ってみたところ、非常に良くマッチした。



砦正面

建物の角に入り口を配置した。不気味な雰囲気が出せたと思う。最上階の赤い屋根をもつ小部屋がポイント。手前の傾斜屋根は中世教会の雰囲気を出せればと工夫してみた。



野獣の城開くの写真

開いて遊べるようにした。すべての部屋は階段と廊下でつながっている。“ベルの部屋”にくっつけている空中ブランコは娘のアイデア。

砦開くの写真

こちらも開いて遊べる。右手前の塔3階部分は牢屋になっている。最上階の部屋以外は階段と廊下でつながっている。傾斜屋根の部屋は教会ではなく集会室。



私の 本棚

My favorite books



歴史小説で気合い注入

●真田太平記

池波正太郎著。大学の合格発表当日に全12冊を買って一気に読んだ、思い出ある書物。実際、これにはまると試験（今の僕の場合は論文とかグラントとか）なんぞで人間性を判定されてたまるかといった反骨精神に陥る（場合がある）ので、読む際には時期に注意。軽快で引き込まれる文章のお手本としても参考になる。

理想的研究

●情報幾何の方法

甘利俊一・長岡浩司著。統計理論、機械学習、制御理論、通信理論、最適化理論などの広範囲の数理工学を、「情報」と「幾何」に基づく統一的な視点で捉え、見通しよく再構築し、新しい方法を与える体系が情報幾何学。その最初の教科書。理系センスが溢れ出る書。こういう研究がしたい。

天才に悩み相談をすると

●ファインマンさん 最後の授業

レナード・ムロディナウ著。「何で食っていくか」は人間の永遠の悩み。研究者は「何を研究するか」で悩む。本書はカルテックの物理学部でポスドクを始めた著者の回想記で、同様に、研究に、人生に、悩む。そして著者はファインマンに相談する。自分の身に重ね合わせつつ、ファインマンの言葉に期待しながら読んだ。

大学人の心の声

●喜嶋先生の静かな世界

森博嗣著。元大学教員ならではの格言多数。自分の研究は単なる自己満足で価値がないのではと悩む卒論生（本書の主人公）に、博士課程の先輩がアドバイスするくだり：「自己満足できたら、それはもの凄く良い状態だね。自分で満足できるなんて、そんな素敵なことはない。それは価値が大ありだ」。

Why を考える

●物理学対話

砂川重信著。仕事でも勉強でも「なぜそれを行うのか」という動機をはっきりさせて挑むと効率が格段に上がる。このことを問答形式で明快に示す良書。以前、『複素関数論』の本を書いた際、ずいぶん参考にした。日本人はHowには強いがWhyに弱いと言われる。ハウツー本で溢れかえる昨今こそオススメしたい。

どうでもいい話

山本 直樹

2018 年は報告書作成や事務打ち合わせといった非研究系の仕事が増え、これはイカン研究時間確保せねばと思っており、それと矛盾するようだが気分転換にゲームを買った。

テニスをしたいんだが、同年代のテニス仲間も同様に何やら忙しく、時間が合わない。それで、息子が PS Vita というポータブルゲーム機をもっていて、そういえばと思ってツタヤに行ったら昔やりたと思っていた FF10 (※) があったのでつい買ってしまった次第。

昔というのは実際かなり昔で、このゲームは 20 年くらい前に発売されてい

る。何を隠そう僕は FF1 から FF9 までプレイした筋金入りで、しかし 10 の発売時期が博士課程とかぶっており当時は自制したのである。今でも自制せえとある筋からは言われそうだが、ともあれ今回 4 ヶ月くらいかけてこれをクリアしたのだが、めちゃ面白かった。

トータル 60 時間くらいかかっている、ひと作品に費やす時間という意味で映画とかコミックと比べると対費用効果が悪い気もするが、消費時間に比例して感動度は上がるもので、満足度は高かった。とくにあるイベント後に訪れるナギ平原という場所で流れる曲が最高で、最近はそれをリピート再生で聴きながら仕事をしている。実際 youtube でこの曲を 30 分リピートし続けるという動画があがっており、同士がいるじゃないかと気分が良くなる。聴くのは多分

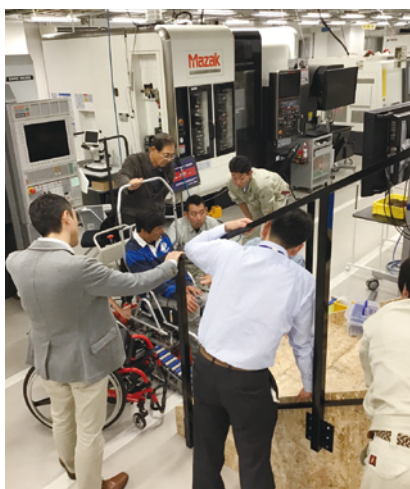
おっさん達だろう。

あとだだっぴろい平原を歩くのは気分が良くなるに違いなく、実際昔やっていたんだが、本郷から九段下まで週 1 回歩いている。もっぱら研究のことを考えながら 40 分くらい歩くんだが、いいアイデアが思いつきそうで気分が良い。そういえば僕の研究室の学生から神保町にボンディという美味いカレー屋があると聞いていて、なので途中寄って食ってみたら確かにうまいんだが、せまいテーブルで目の前おっさんと相席というのがポイント減であった。

ということでどうでもいい話をつらつら書きました。執筆時間 10 分程度と高効率でした。駄文を読んで頂いた方々たいへん失礼しました。

(※) FF10: ファイナルファンタジー 10

理 工 学 Information



サイバスロン電動車いすプロジェクトが始動しました

2020 年、慶應義塾大学理工学部では、最新技術の実生活への応用を目的として、障がい者と技術の融合をめざす国際的な競技大会であるサイバスロンに参加します。

サイバスロンとは、ロボット工学等の最先端技術を障がい者が利用する機器に応用し、障がい者と技術の融合を競技形式で競い合う国際大会です。サイバスロンの競技は全 6 種あり、慶應義塾大学理工学部では、電動車いすレース (Powered Wheelchair Race) に挑戦します。電動車いすレースは、日常生活において車いすの移動に困難を伴うと想定される、テーブルにつく、スラローム、上り坂+ドア開閉+下り坂、凸凹道、傾いた道、階段昇降という 6 つの障害物に対し、走破した障害物と要した時間を競うレースです。

そこで、まず 2019 年に行われるサイバスロン車いすシリーズ日本大会をめざし、電動車いすの研究・開発を開始しました。本プロジェクトでは最新技術を応用して、バリアフリーに頼らない世界の実現をめざします。



KEIO FORTISSIMO
keio-fff
CYBATHLON PROJECT

編集後記

山本准教授の研究は、ロボットのように目に見える形のモノを作ったり、実験装置を使った研究をしているわけではないため、どのような表紙にするか悩みながらの撮影となりました。当日は、モデルのようにいろいろなパターンの写真を撮影しており、表紙に採用された 1 枚しかお見せできないのが残念です。Quantum (量子) の “Q” をモチーフにした表紙になりましたが、いつも笑顔で接してくれる山本准教授の雰囲気を感じ取っていただけるものができたのではないかと思います。

(萩原いずみ)

新版 窮理図解

No.29 2019 January



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>