

JST news

未来をひらく科学技術

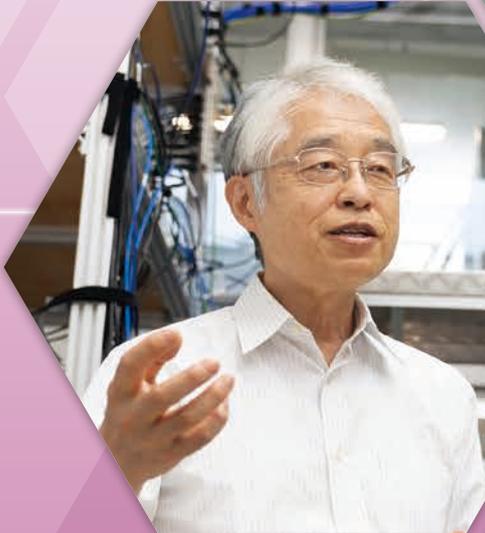
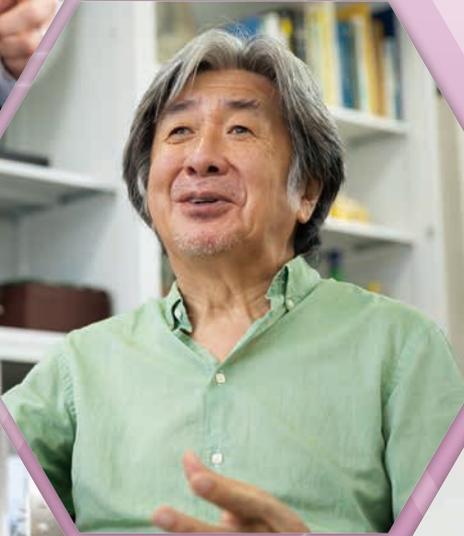
2022

総力特集

量子技術の現在地

9

September



03 – 総力特集 量子技術の現在地 求められる幅広い領域での飛躍的な発展

04 – **超伝導量子**
折り紙構造の新回路で集積化目指す

06 – **半導体量子**
2つの電子スピンを自在に操作

08 – **量子通信**
長距離で中継器の原理実証に成功

10 – **量子計測**
広帯域の強力なもつれ光源を開発



12 – 連載 どうやって実現する? 明るく豊かなゼロエミッション社会 第3回 バイオマスで脱炭素に挑む

14 – NEWS & TOPICS

- ◆ がんが引き起こす肝臓の代謝異常を解明
- ◆ 市販のポリエステルを完全分解

ほか

16 – さきがける科学人

長期的な地域活性化の一助に

金沢大学 理工研究域 地球社会基盤学系 准教授 高山 雄貴

SATREPS・福島大学でウクライナ人研究者を受け入れ、研修を実施

JSTnews2022年2月号特集で紹介しましたSATREPS「チェルノブイリ災害後の環境管理支援技術の確立」につきまして、近況が届きましたのでご紹介します。

2022年2月に勃発したロシア軍によるウクライナ侵攻以来、複数の共同研究機関が大きな被害を受けています。戦争の長期化も懸念されており、ウクライナ国内の研究環境は悪化の一途をたどっています。こうした事態を受け、福島大学環境放射能研究所(IER)では、SATREPSの人材育成事業の一環として、ウクライナ国立科学アカデミー原子力研究所のオレナ・ブルドー研究員の研修を受け入れることになりました。

ブルドーさんは、これまでもプロジェクトの一員として、げっ歯類への放射線影響をともに調査してきました。8月から12月上旬にかけて約4カ月間、日本のさまざまな研究機関にも協力いただきながら、ヒトおよび野生生物への被ばく線量評価の最新技術の習得を目指します。今後ともウクライナの情勢ならびに、SATREPSやIERの活動に関心をお寄せいただければ幸いです。



難波 謙二
福島大学 共生システム理工学類
教授/環境放射能研究所 所長
2016年度よりSATREPS研究代表者



オレナ・ブルドー
ウクライナ国立科学アカデミー
原子力研究所 研究員

【当日のプレスリリースの様子】
<https://www.fukushima-u.ac.jp/news/2022/08/010566.html>

【JSTnews 2022年2月号】
<https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/backnumber/2021/202202/index.html>

JSTは、シンクタンク機能、研究開発、産学連携、次世代人材育成、科学と社会との対話など、多岐にわたる事業を通じて、持続可能な開発目標(SDGs)の達成に積極的に貢献していきます。



▶ P.14上 ▶ P.14上 ▶ P.12 ▶ P.12,P.14下 ▶ P.14下 ▶ P.12

編集長：安孫子 満広
科学技術振興機構(JST)広報課
制作：株式会社エフピーアイ・コミュニケーションズ
印刷・製本：株式会社丸井工文社

総力特集

量子技術の現在地

OVERVIEW ■



量子コンピューターに象徴される量子技術の進化がめざましい。その社会実装には、量子情報処理、量子通信をはじめとした幅広い領域で、量子技術の飛躍的な発展が望まれる。2016年度から始まったCREST研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」の研究総括を務める東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構の荒川泰彦特任教授に、量子技術研究の歩みと今後の展望を聞いた。

荒川 泰彦 Arakawa Yasuhiko

東京大学 ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 特任教授
同機構 量子イノベーション協創センター センター長
2016年よりCREST研究総括

求められる幅広い領域での飛躍的な発展

量子力学誕生から100年余。古典的なニュートン力学では説明できないミクロな現象を解き明かすことに成功した量子力学は、まさに現代物理学の根幹をなす重要な学問だ。また物理学の進歩のみならず、レーザーやトランジスタなど、社会の発展にも大きく貢献してきた。近年注目を集める「量子コンピューター」もその1つだ。1980年代に概念が提唱され、その後、基礎研究が広く静かに進行した。

「2010年代になり、米国でアニーリング方式の量子コンピューターの実機が登場しました。しかし、本格的なゲート型量子コンピューターの実現には、広範な量子技術の進展が必要であると考えられていました。私のCRESTが発足したのは、このような時期でした」と語るのは、CREST研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」の研究総括で、東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構の初代機構長も務めた荒川泰彦特任教授だ。

3次元的に量子を閉じ込める「量子ドット」の概念提唱から、量子ドットレーザーの実用化まで、約40年にわたって第一線で研究を続けてきた荒

川さん。その経験から、CRESTでは「新しい源流の創出」と「革新的システム機能の創成」の2本柱を掲げた。「将来にわたって世界の開発競争をリードするためには、基礎研究だけでなく、将来社会イノベーションを牽引し得る技術の育成も必要でした」と説明する。

採択にあたっては、量子コンピューティング、量子暗号通信、量子計測・センシングのいわゆる3本柱と、新量子技術を加えた4分野を1つの軸とし、一方の軸を量子や材料の種類とするマトリックスを組み立て、このCRESTで量子技術分野全体を俯瞰できることを目指した(図1、2)。「第1期の採択課題は、21年度末に終了しましたが、学術的に優れた成果のみならず、社会実装を展望できる成果を達成しました」と自信を見せる。

量子技術は新たな科学技術フロンティアである。日本が基盤

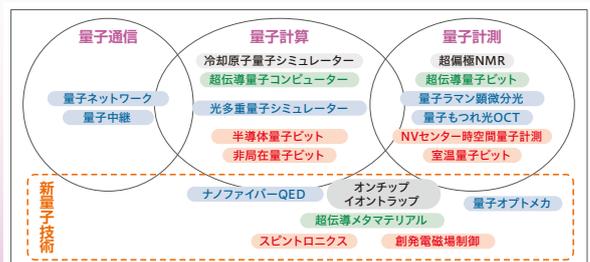
研究と社会実装の両面で世界をリードするには、産学連携による迅速な取り組みが重要だ。「スタートアップ企業や若手の活躍に期待したいです。一般的には実用化まで数十年を要しますが、ビジネスモデルが創造的であれば、ソフトウェアやセンサーなどでの起業も十分可能です」と語る。今回の特集では、量子技術研究の最新成果と展望を明らかにしたい。

(TEXT: 森部信次、PHOTO: 石原秀樹)

図1 JST等が関与する主な量子技術の公募型プログラム



図2 CREST量子技術採択課題のポートフォリオ



黒: 原子・分子、緑色: 超伝導体、青: 光量子、赤: 半導体

量子コンピューターにはいくつかの手法が提案されているが、最も進んでいるのが超伝導方式だ。現在のコンピューター同様、量子コンピューターも量子ビットの集積化が必要だが、周囲の温度や磁気などの影響を受けない入出力配線が大きな課題となっていた。東京理科大学大学院理学研究科の蔡兆申教授は、平面上に素子を並べて配線した後、折りたたむ折り紙構造で集積化を実現する新回路を提案し、量子チップの実装に大きく貢献した。

超伝導量子

折り紙構造の新回路で集積化を目指す

蔡 兆申 Tsai Jaw-Shen

東京理科大学 大学院理学研究科 教授
2016～21年度CREST研究代表者

世界初の超伝導量子ビット実験 電子の自在な行き来を発見

米Googleが2019年にスーパーコンピューターで1万年かかる問題を200秒で解いたと発表し、一気に注目度が高まった量子コンピューターだが、CRESTで「超伝導人工原子を使った光子ベースの量子情報処理」の研究代表者を務める東京理科大学大学院理学研究科の蔡兆申教授は、その特徴をこう説明する。「私たちが現在使っている古典コンピューターに比べ、処理速度が速い、複数の可能性を同時に導き出せる、より多くの情報を扱える、はるかに複雑な問題を解けるといった利点があります」。

この利点は、情報の扱い方に起因する。古典コンピューターでは情報を「0もしくは1」いずれかの状態とするのに対し、量子コンピューターでは「0と1の重ね合わせ」として扱

うのだ。古典コンピューターは1度に1つの情報しか扱えないが、量子コンピューターなら同時にいくつもの情報を扱えるようになり、計算も並列処理できるようになる。蔡さんもこうした量子の面白さに魅了された1人だ。

きっかけは、CREST「金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用」(1996～2001年度)に参画し、金属などを絶対零度(-273.15度)近くまで冷却すると電気抵抗がゼロになる超伝導下で電子の振る舞いを研究していた時だった。「蛇口から水がしたたるように、電子の通るトンネルの径を細く絞って電子を1個1個流していくと、量子状態が現れたり消えたりする現象が起きました。これは面白いと思い、量子ビットに取り組むようになりました」と振り返る。

そして、1999年に当時所属していた日本電気基礎研究所の中村泰信氏(現東京大学先端科学技術研究セ

ンター教授)とともに、世界で初めて超伝導量子ビットの実験に成功したのだ(図1)。超伝導状態の2つの電極を近づけると、接合部分の電子が両電極を自在に行き来する量子状態となる「ジョセフソン効果」と呼ばれる現象が起きる。さらに、外部からマイクロ波のパルスを流すことで量子状態をコントロールしたり、読み取ったりできることを実証した。

「それまで、量子的にふるまうのは原子や分子の世界の話で、金属電極のような大きな物質が量子的なふるまいをすることは常識外のことでしたから、私たちは『巨視的量子コヒーレント状態』と呼びました」。蔡さんたちが開発した超伝導量子ビットは、扱いやすく集積もしやすい固体素子であったため、世界の研究者も超伝導回路方式の量子コンピューター開発を目指すようになった。当時の超伝導量子ビットは不安定で、量子状態を維持するコヒーレント時

間がナノ(ナノは10億分の1)秒レベルだったが、現在では実用に耐えるミリ秒単位近くにまで伸びており、冒頭のGoogleの成果にもつながっている。

発想の転換から生まれた新回路 10量子ビットでの実証にも成功

現在、量子コンピューターは大きく2つに分けられる。1つは組み合わせ最適化問題に特化した量子アニーリング方式、もう1つは古典コンピューターがAND、OR、NOTといったゲートを用いるのと同じように、量子でも計算回路を作って問題を解く量子ゲート方式だ。蔡さんたちが取り組む超伝導方式は、量子ゲート方式の中の1つで、他にも常温で動作する光量子やイオントラップなどの手法がある。商用化ではアニーリング方式が先行するが、ゲート方式は汎用性に優れているため、実用化への期待が高い。

超伝導回路方式における大きな課題は、量子ビットの集積化だ。現在までに開発された超伝導回路方式の量子コンピューターは、100量子ビット程度に留まっている。現行のコンピューターのCPUでも1チップに億単位の素子が集積されていることを考えると、量子コンピューターの集積

度はまだまだ初期段階に過ぎない。

しかも、量子ビットの特性として、周囲の温度や磁気などの影響によりエラーが起こりやすい。そこで、複数の量子ビットが連携して、計算途中の誤りをその都度訂正しながら計算することになる。そのため、高精度の計算を行うには、少なくとも1000量子ビットほどを集積する必要がある。その際に問題となるのが配線だ。

超伝導回路では、平面格子状に量子ビットを配置するが、各量子ビットに制御信号を送り、計算結果の信号を読み取る配線が必要となる。100量子ビットなら10×10の格子だから、垂直方向からでもなんとか配線できるだろう。しかし、900量子ビットとなれば30×30、1万なら100×100への配線を考えねばならない。「外縁部の量子ビットは容易に配線できますが、中心部にある量子ビットの配線がどんどん難しくなるばかりか、配線の影響でエラーも起きやすくなります。そこで、発想を転換し、新しい配線技術を考えました」と蔡さんは課題と解決へのアプローチを説明する。

具体的には、量子ビットの平面格子を折り紙や屏風のように折り畳むことで、全ての量子ビットを外側に出すという着想だ(図2)。これにより配線が容易になるだけでなく、配線

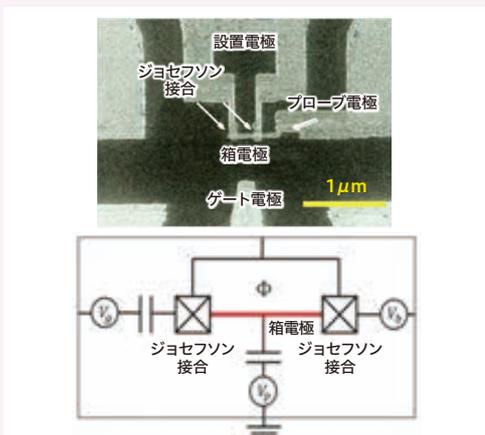
間の混信や損失が低減されるので論理量子ビットの信頼性も向上するという。最大の難関は、折り畳むことで一部の量子ビットをつなぐ配線に交差が生じることだったが、マイクロ波装置などに使われている局所的な立体構造により配線をまたぐ技術を適用することでクリアした。

研究チームは、この新回路方式を実証するため10量子ビットの超伝導回路を実際に試作して検証し、現状の技術を用いても十分に実現可能であることを確かめようとしている。「理論的には、忠実度の高い誤り訂正を行うのに必要な900量子ビット程度まで配線が可能です。そして、900量子ビットを1スロットとして、複数のスロットを連携させることで、1万量子ビット、100万量子ビットの超伝導量子コンピューターも可能になります」と蔡さんは語る。

もちろん、超伝導量子ビットの大規模集積化には、配線だけでなくさまざまな課題がある。それらの課題解決には量子力学、ナノテクノロジー、極低温、マイクロ波のエンジニアリング、低雑音測定といった最先端の技術を集結させる必要がある。蔡さんはそうした異分野との連携も視野に、次なる課題克服へと歩みを進める。

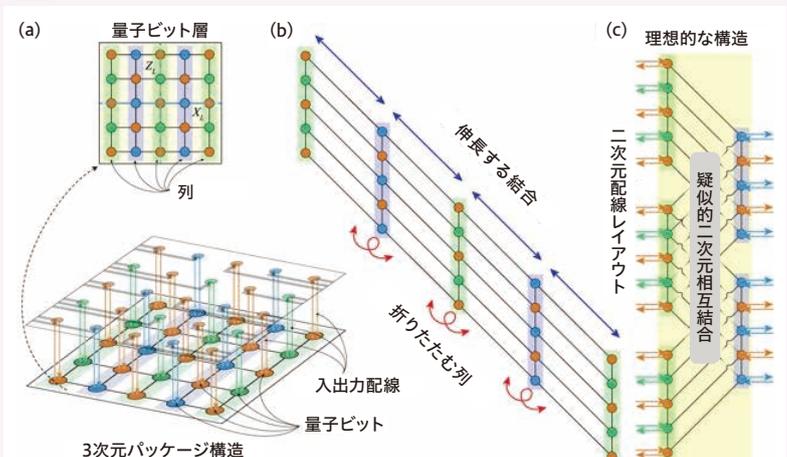
(TEXT:森部信次、PHOTO:石原秀樹)

図1 1999年に開発された超伝導量子ビットの走査電子顕微鏡(SEM)画像と回路図



世界初の超伝導量子ビットは、従来の半導体加工技術を応用し、超伝導-絶縁体-超伝導(SIS)ジョセフソン接合により作製された。

図2 超伝導量子コンピューターの新規回路方式



平面上に並べた量子ビットの配線(a)を(b)のように長く伸ばす。次に量子ビットの各列で、折り紙のように順々に折り返していく。すると(c)のように、量子ビットの列が回路の外側に並ぶ配置となる。

量子コンピューターでは計測や計算中にエラーが生じやすいため、これをいかに解決するかが大きな課題の1つとなっている。これに対し、理化学研究所量子機能システム研究グループの樽茶清悟グループディレクターは、シリコン量子ドット中に閉じ込めた2つの電子スピンを誤り訂正が可能な高い精度で自在に操作することに世界で初めて成功した。これにより、長年培われてきた半導体技術を生かした、半導体量子コンピューターの実現への道を拓いた。

半導体量子

2つの電子スピンを自在に操作

樽茶 清悟 Tarucha Seigo

理化学研究所 創発物性科学研究センター 副センター長・量子機能システム研究グループ グループディレクター
2016~21年度よりCREST研究代表者

装置故障から思わぬ成果に 世界初の「人工原子」を作製

量子コンピューターの開発では、超伝導回路方式やイオントラップ方式が先行しているが、現行のコンピューターの論理素子やメモリなどに利用されている半導体技術を活用した高集積な量子コンピューターを実現しようというのが半導体方式だ。CREST「スピン量子計算の基盤技術開発」の研究代表者を務める理化学研究所量子機能システム研究グループの樽茶清悟グループディレクターは、1996年に円盤状の回転対称性を持つ微小な量子ドットを世界で初めて作製し、これをきっかけにして半導体スピン量子コンピューターの研究をリードしてきた。

学生時代から半導体の光物性を研究してきた樽茶さんは、日本電信電話公社(現NTT)の武蔵野通信研究所で光通信の要となる光導波路や量子井戸レーザーとも呼ばれる2次元半導体レーザーなどの研究を行ってきた。その後、電子は1個でも波の性質があることに注目し、最小単位の情報デバイスとなる量子ドットの研究を開始した。「電子はスピンといって、磁石のような性質を持っています。上向きと下向きの2種類の状態があり、この上向き下向きの状態を『0』『1』の情報単位とするのが半導体スピン量子ドットです」と説明する。

樽茶さんは、半導体レーザー開発で培った量子井戸技術を使って薄膜の層に電子を閉じ込めることで、原子と同じ構造を持つ半導体スピン量

子ドット(人工原子)の作製に世界で初めて成功した。「実は全く違う研究をしようとしたオランダのデルフト工科大学に行ったのですが、装置故障で計画が白紙になったんです。そこで、空いた時間に密かに温めていたアイデアを試したところ、思わぬ特性が見つかり、人工原子の誕生につながりました」と振り返る。

さらに、2つの量子ドットをつなぐ人工分子の開発にも成功した。その頃、国内外で量子コンピューターの理論提案が盛んに行われるようになり、樽茶さんは人工原子や人工分子を使って量子コンピューターが実現できるのではと考えた。そのためには、量子ドットの電子の数やスピンの方向などを高精度かつ自在に制御・操作・測定することが必須とな

る。「難しいチャレンジではありませんが、なじみのある半導体技術を活用することで高集積・高速な量子コンピューターを実現できると考え、半導体スピン量子ドットに関する基礎実験を続けました」と語る。

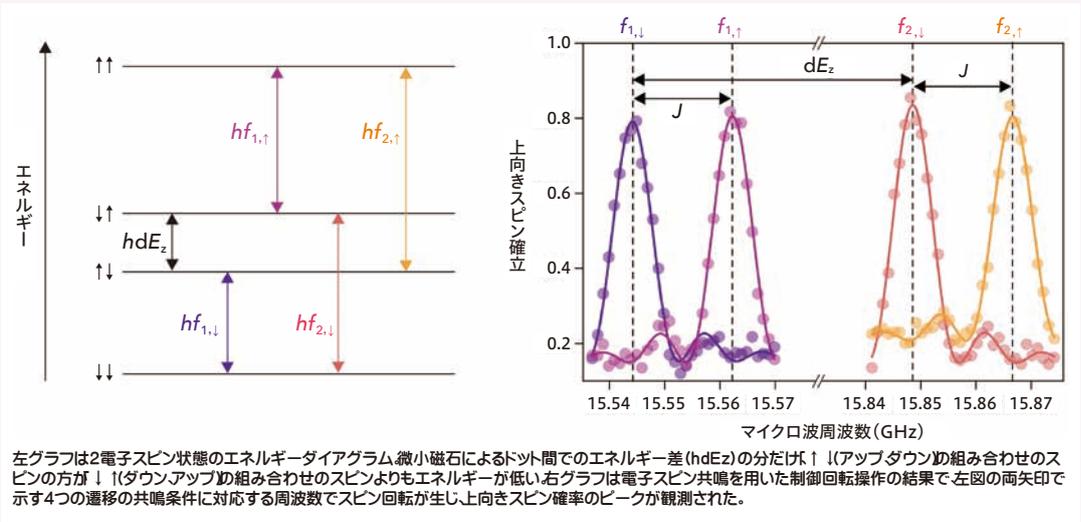
ゲート型の量子コンピューターでは、2個の量子ドットをつないだ論理

ゲートを基本とし、計算を行う。樽茶さんは人工原子1個の操作に続き、2個をつないだ2重量子ビットを作製し、高精度に操作する手法を究めていった。半導体方式は、半導体に含まれる不純物や温度などの影響を受けるため、量子情報を保持できる量子コヒーレンス時間が極めて短く、操作・測定中にエラーが起きやすいことが最大の問題であった。当初、樽茶さんは半導体レーザー研究などで使い慣れたヒ化ガリウム(GaAs)半導体基板を材料としていたが、GaAsの核スピンの影響が無視できないため、シリコン半導体へ切り換えることにした。

99パーセント以上の正確さ達成 将来は1チップに1億ビットも

CRESTではまず、シリコン材料を検討し、核スピンを持たないシリ

【図1】 単一量子ビット回転によるユニバーサルな2量子ビット操作



コン同位体 (^{28}Si) の高純度結晶を基板に採用した。そのうえで、Siをシリコンゲルマニウム (SiGe) でサンドイッチした量子井戸に対して、アルミニウム微細ゲート電極から正電圧を加えることによって面内に電子を閉じ込め、かつ電子スピンを制御・操作できる量子ドットを作製した。これにより磁場雑音も低減され、量子コヒーレンス時間をマイクロ秒レベルに伸ばすことができた。

操作・測定中に生じるエラーを修正する誤り訂正においては、論理ゲートの基本である1、2量子ビットのユニバーサル操作の高精度化を進めることで、読み出し、初期化など全ての工程において99パーセント以上の正確さを達成した。これがユニバーサル操作における「誤り耐性閾値」の条件をクリアした瞬間だった

(図1)。「シリコン量子ドットにお

いて高精度で誤り訂正が可能なることを実証したことに加え、2量子ビットを用いて高い精度で量子計算が行えることも実証しました。これらの成果から、誤り耐性を有するシリコン量子コンピューターが

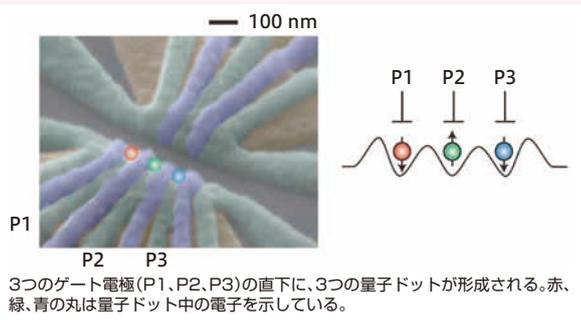
実現可能であることを示すことができました」と語る。

さらに、樽茶さんのグループは新たな量子技術としてシリコン系では初となる3重量子ビットも実現した。2つ以上の量子状態に現れる相関である量子もつれを、この3重量子ビットを使って制御する手法を開発している(図2)。さらに、隣接していない量子ドット間で量子もつれを生成し、入力した量子もつれ情報を他の量子ドットに転写する「量子テレポーテーション」の原理を実証するなど、半導体量子コンピューターに欠かせない基盤技術の開発・実証にも成功した。

「シリコン量子コンピューターは、既存の半導体集積回路技術と相性が良いことから、将来的に1チップに1億ビットを集積した大規模量子コンピューターの実現も夢ではありません。今後は、数十量子ビット規模での動作確認を目指すとともに、半導体メーカーなどとも連携しながら研究を深化させていきたいですね」と樽茶さんは展望を語る。日本は半導体微細加工技術において、世界最先端の立ち位置を築いている。今後もその基盤を生かして、シリコン量子コンピューターで世界をリードしていくことが期待される。

(TEXT: 森部信次, PHOTO: 石原秀樹)

【図2】 3重量子ビットの電子顕微鏡写真



量子コンピューターが実現すると、それらの端末同士を量子ネットワークで結ぶことにより、膨大な情報の送受信が可能になるとともに、総体としての量子コンピューター群の能力は指数関数的に高まる。この実現に向けて、すでに世界中に張り巡らされた光ファイバーを使った量子通信技術の開発が進む。大阪大学量子情報・量子生命研究センターの井元信之特任教授(現東京大学特命教授室特命教授)は、光子の量子状態を長距離でも光損失による伝送速度の低下を抑えて配信する量子中継器の原理実証に成功し、「グローバル量子ネットワーク」実現に向けて着実に歩み続けている。

量子通信

長距離で中継器の原理実証に成功

井元 信之 Imoto Nobuyuki

大阪大学 量子情報・量子生命研究センター 特任教授
(現東京大学 特命教授室 特命教授)
2016~2021年度CREST研究代表者

英国で概念誕生に立ち会う
厄介者が可能性を拓くカギに

今日の情報社会を担っているのは、インターネットに象徴される情報通信の発展だ。とりわけ、大容量・高速に情報を伝送できる光ファイバーネットワークが大きな役割を果たしている。一方で情報社会の進展につれて、セキュリティー性の高い通信手段として量子通信に対する関心が高まっている。

量子通信では、量子力学に基づく「0であり1」でもあるという重ね合わせた状態を情報単位である量子ビットとして扱う。この量子ビット間では、片方の状態が決まると他方もそれに応じて状態が確定するという量子力学特有のエンタングルメントと呼ばれる現象があり、それを基にして量子情報が伝送される。そのため、光ファイバーを使った量子ネットワークを構築するには、これまでの光通信技術に加え、量子情報に対応

した新たな技術が必要となる。

具体的には、距離の離れた送信側と受信側を短い区間に分け、各区間の両端に配したエンタングルメントを量子中継で繋いで行くことにより送信側と受信側に長距離エンタングルメントを形成し、それをを用いて送信側の量子情報を一気に受信側にテレポートするものである。ここで、全ての区間でエンタングルメントが同時形成されるまで繰り返すと、無中継の場合と同様、距離の指数で待ち時間が増えてしまう。しかし、成功した区間はエンタングルメントを保存し、そうでない区間だけ形成を繰り返すようにすれば、距離の多項式まで次数を下げるができる。

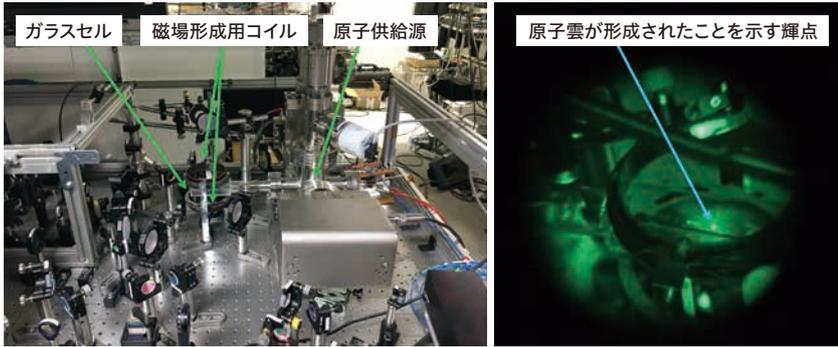
これを行うには量子情報を壊さずに光で読み書きする技術、伝送の途中でエンタングルメントを一時保管する量子中継器、情報を受け取る量子受信機など、現行の光通信設備とは全く原理の異なる機器・システムが必要となる。こうした「長距離量子

ネットワーク」の研究を進めてきたのが、大阪大学量子情報・量子生命研究センターの井元信之特任教授(現東京大学特命教授)だ。

井元さんは、1977年に日本電信電話公社(現・NTT)に入社し、武蔵野通信研究所で光通信の研究に取り組んできた。NTTは80年代半ばから光ファイバーネットワークを整備してきたが、井元さんは光波長多重通信などの技術革新を通じて情報ネットワークの高度化に貢献してきた。そして、85年頃から光通信における量子雑音の悪影響について研究するようになった。

量子による悪影響を解決しようとしていた井元さんが、本格的に量子の世界に飛び込むきっかけとなったのは、90年に滞在了英国工セックス大学での出来事だったという。「幸運にも量子コンピューターと量子暗号の概念の誕生に立ち会いました。学生時代から量子力学には関心がありましたが、改めてその面白さに気づき、

図1 ルビジウム原子雲量子ドット発生装置(左)と電子雲の形成を示す輝点(右)



実験装置には量子ビットとして用いるルビジウム原子雲のトラッピング(真空中捕獲)を行うガラスセルと、捕獲のための磁場形成用コイル、原子供給源を備えている(左)。真空ガラスセル中に原子雲が形成されたことを示す輝点を、赤外線カメラで撮影した様子(右)。この光る小さな雲がひとつの量子ビットとして働く。今後はもっと微小な雲を多数捉える「アトムチップ」として、多量子ビットの集積化が図られる。

量子情報処理の研究を始めました」。厄介者だった量子がむしろ、新たな光通信の可能性を拓くカギになった。2004年には大阪大学の教授に就任し、長距離量子ネットワークを実現するための基礎研究を続けてきた。

光通信に適した波長へ変換 10キロメートルの伝送に成功

研究実績を基に、井元さんは大阪大学を中心とする研究チームを組織し、16年からCRESTで「グローバル量子ネットワークの実現」をテーマとした研究プロジェクトをスタートした。大きな目標は、長距離量子ネットワークのカギとなる「量子中継」に関する要素技術を究めることだ。現行の長距離光ファイバーネットワークでは、数十キロメートルごとに中継器を設置しており、伝送されてきた情報を保管しつつ減衰した光を増幅して送り出している。量子通信では、この中継器を量子通信に交換しなければならない。

量子中継で情報をためる役割を担う量子メモリーへの情報の読み書きには、780ナノ(ナノは10億分の1)メートルの可視光付近の短い波長の光が使われる。しかし、そのままファイ

バーで伝送すると光が急速に減衰してしまうことが大きなネックとなっていた。

そこで研究チームは、量子メモリーから情報を読み取った可視光を、量子情報を壊さずに光通信に適した1522ナノメートルの近赤外光に変換する高性能の波長変換器を開発した。16年には冷却ルビジウム原子の量子メモリーを使って量子情報を近赤外光に変換し、光ファイバーに流すことで、量子情報を維持したまま読み書き伝送できることを確認した(図1)。

さらにこの成果を発展させ、18年には波長変換器と光干渉計を一体化させることにより、光子の偏光状態を変えずに通信波長帯に波長変換できる「偏光無依存型波長変換器」を実現した(図2)。また、カルシウムイオンから発する光子を波長変換し、その量子性を保って当時の世界最長記

録となる10キロメートル以上の長距離量子通信を達成した。「これにより、光ファイバーネットワークを活用して、遠く離れた原子メモリー間で量子ネットワークを形成し、長距離セキュリティ通信ができることを実証できました」と井元さんは語る。

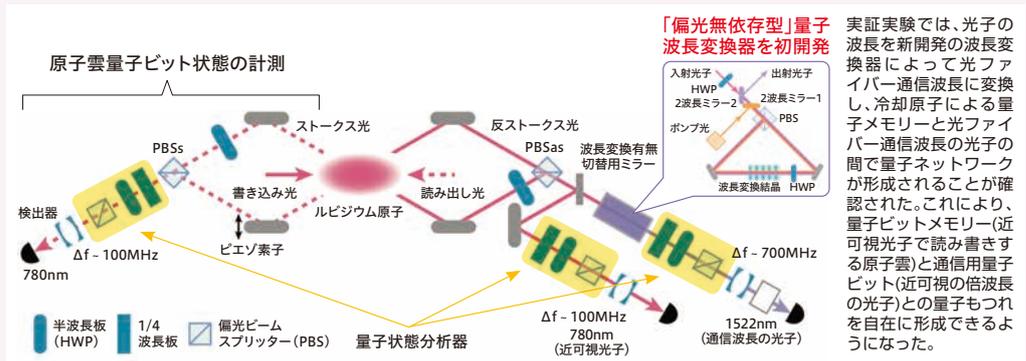
続く19年には、光デバイスだけで構成された「全光量子中継」の原理検証実験に世界で初めて成功し、高速かつ低消費電力の「グローバル量子ネットワーク」の実現につながる大きな成果となった。また量子もつれによって初めて可能となる「時間反転」という全く新しい原理を実証するとともに、量子中継において必須となる2つの粒子が取り得るもつれ状態の中でどの状態が最大かを問う「適応ベル測定」を、世界で初めて実施したことから大きな反響を呼んだ。

「ネットワークアーキテクチャーや損失のない集積光学回路と量子もつれ光源の研究開発、高効率通信に対応する量子受信機などの課題が数多くありますが、一連の研究がグローバル量子ネットワークへの大きな一歩となったと確信しています」と井元さんは総括する。

量子通信は、光ファイバーネットワークのみならず衛星通信など無線通信においても、ドラスティックな革新をもたらす技術革新だ。すでに量子暗号通信が実用化されつつあるが、今後、社会インフラを支える技術として重要性は一層増していくことだろう。

(TEXT: 森部信次、PHOTO: 石原秀樹)

図2 偏光無依存型波長変換器により形成された量子ネットワーク



医療から宇宙観測に至るまで幅広い応用が期待できる計測やセンシングでも、量子技術の活用が期待されてきた。しかし、実際に計測技術として社会実装するためには、理論の検証だけでなく、デバイスや検出器などの開発が不可欠である。京都大学大学院工学研究科の竹内繁樹教授は、広帯域周波数量子もつれ光の光源を開発するとともに、それを組み込んだ量子光干渉断層計(量子OCT)を実現した。光子1つ1つを制御し、これまでにない高い精度で計測技術の確立を目指す。

量子計測

広帯域の強力なもつれ光源を開発

竹内 繁樹 Takeuchi Shigeki

京都大学 大学院工学研究科 教授
2016～2021年度CREST研究代表者

コメの非破壊観測で実績「さきがけ」の研究に没頭

汎用型量子コンピューターの開発にはまだかなりの時間を要するといわれているが、量子技術の中でも社会実装が先行している領域もある。その1つが量子計測だ。例えば、量子状態は外部からのわずかな影響でも壊れてしまうが、裏を返せば量子状態を見れば外部環境が変化したことを捉える高精度なセンサーに応用できる。こうした量子特有の性質を利用した革新的な計測技術の開発が見込まれている。

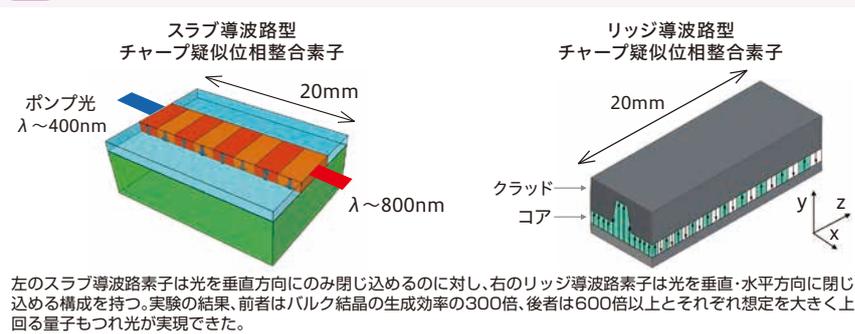
中でもCREST「大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用」で研究代表者を務める京都大学大学院工学研究科の竹内繁樹教授は、量子もつれ光子を使った新たな量子光計測技術の確立を目指している。大学院で超伝導素子によるフォノンの発生・検出の研究を行い、量子デバイスの研究を志して1993年に三菱電機に入社。そこで最初に与えられた課題は「新研究テーマ」の探索、そして新事業探索の

一環として「初年度はコメに関連した研究もすること」だった。

全く縁の無いコメの研究だったが、炊飯過程の解明を決意した竹内さんは、コメ1粒が炊ける専用のガラスチューブやホルダーを自作した。「産学共同研究で当時日本に2台しかなかった核磁気共鳴(NMR)マイクロイメージング装置を利用させていただくことが叶い、コメ内部ででんぷんの糊化が進む様子を非破壊リアルタイムで観測することに成功しました」。コメの研究は、三菱電機の電気釜にある「うまみ炊きボタン」の実装にもつながった。

「量子とは一見何の関係もないようですが、核スピンの制御や位相緩和による高速イメージングを実現した経験が、今の研究にも役立っています」と語る。その後95年に、「新研究テーマ」として定めた光子を使った量子コンピューター開発を提案。史上最年少の27歳で「さきがけ」に採択され、念願だった量子研究に没頭する日々が始まった。「統括の吉森先生をはじめ素晴らしい先生方が結集され、たくさんの助言をいただきました。当時は制度がなかった海外滞在なども、支援いただきました」。そして、98年に世界初となる単一量子で

図1 「広帯域周波数もつれ光」光源の開発



左のスラブ導波路素子は光を垂直方向にのみ閉じ込めるのに対し、右のリッジ導波路素子は光を垂直・水平方向に閉じ込める構成を持つ。実験の結果、前者はバルク結晶の生成効率の300倍、後者は600倍以上とそれぞれ想定を大きく上回る量子もつれ光が実現できた。

の量子アルゴリズムを実証すると、その後も2つの光子のもつれ状態を維持したまま取り出す光子回路「量子もつれフィルター」や高輝度の単一光子源の開発など、着実に成果を重ねた。

社会のニーズに合わせた開発 眼底検査装置の高速化を達成

光子を実験的にも狙い通り扱えるようになってきた竹内さんが、次に狙いを定めたのは量子計測への応用だ。従来の光を使った計測では、高分解能で詳細に測定しようとする、強い光を当てる必要があるが、それでは試料が壊れてしまうため、弱い光で長時間かけて計測する他になかった。「光計測では、光量が多いほど精度は高まりますが、理論上、究極的には量子光を用いると古典光の10億分の1の光で同じ精度を実現できる可能性があります。そこまできなくとも、より短時間で高分解能の解析が可能になる可能性はあります」と説明する。

まず「屈折率」や「厚み」の違いによる光の経路差を検出し、透明な試料の観察に用いられる微分干渉顕微鏡の照明光として、量子もつれあい状態の光子対を利用する「量子もつれ顕微鏡」を開発・実現すると、原子100個程度の厚みが検知できることを実証した。その後、量子もつれ光を利用した光計測のさらなる可能性を探ったところ、眼底検査などで網膜の断層画像を撮影する光干渉断層計(OCT)が浮上したという。

OCTは眼底の観察に広く用いられているほか、製造ライン中での検査などにも活用されている。一方で、既存OCTでは、眼球組織などの媒質中を通過する際に、光の進行速度が波長により異なるため、分解能が大きく低下するという問題があった。しかし、量子もつれ光を光源として利用する量子OCTでは、分解能劣化がないと理論的に考えられていた。

竹内さんらは世界最大の周波数帯域を持つ量子もつれ光を実現し、基礎的な実験で既存OCTの分解能記録の0.75マイクロ(マイクロは100万分の1)メートルを上回る0.54マイクロメートルという高い分解能を達成可能であることを示した。また、量子OCTでは分散の影響をほとんど受けないことも確認した。「期待通り高分解能の量子OCTができましたが、画像1枚撮るのに8時間もかかりました」と笑う。広い周波数帯域で存在できる量子もつれ光子対の生成量が不足していたためだ。

これでは実用化は難しい、と2016年に立ち上がったCRESTで、より強力な量子もつれ光源の実現、そして革新的な量子光計測技術の確立を目指した研究を開始した。より効率的に量子もつれ光を発生させるため、光を平面的に閉じ込めたスラブ導波路型チャープ疑似位相整合素子、ならびに水平・垂直方向にも閉じ込めたリッジ導波路型チャープ疑似位相整合素子の開発を進めた。

その結果、スラブ素子でバルク結晶の生成効率の300倍、リッジ素子でも同600倍以上という、2種類の高効率量子もつれ光源を開発した(図1)。さらに、開発した量子もつれ光源のほか、超伝導光子検出器を利用した高速計数システムを組み込んだ量子OCTを開発し、高分解能を維持しながら、画像取得時間を約90秒と300倍以上の高速化を実現した。

さらに、量子OCTシステムを既存OCTに組み込んだハイブリッドOCTシステム

も試作した(図2)。「ハイブリッド化することにより、分解能は高くないものの速度の点で優位な既存OCTで目的のサンプルを広い領域で観察した後、特に高分解能で観察したい場所を狙って量子OCTで精査することが可能になります」と竹内さんはハイブリッドOCTシステムの有用性を語る。

研究チームの成果は、学術分野だけにとどまらない。科学技術イノベーションへの貢献では「オンチップ超広帯域周波数量子もつれ光源の実現と制御技術」が挙げられる。研究チームは、シリコンと有機ポリマーのハイブリッドデバイスとして、オンチップ高非線形性リング共振器とオンチップ高周波数変調器を新規開発した(図3)。この光源により量子センシング、量子通信装置の飛躍的な小型化が期待される。今後、理論の実証や社会実装に向けた耐久性の向上など、さらなる深化を期待したい。

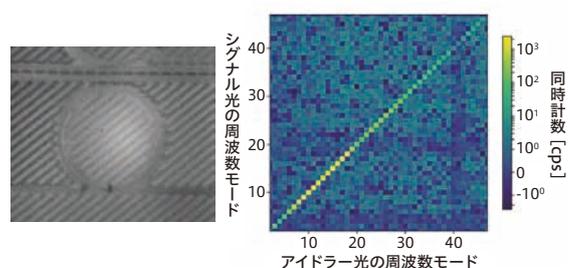
(TEXT:森部次次、PHOTO:石原秀樹)

図2 ハイブリッドOCTシステム



既存のOCTシステムに量子OCTを組み込んだ、高速・高分解能のOCTハイブリッドシステム。通常の分解能でのスキャンを古典OCTで高速広範囲に実施し、特定の箇所をOCTによる超高分解能断層撮影を行う。

図3 広帯域オンチップ量子もつれ光源



オンチップリング共振器による世界最大の帯域とモード数をもつ量子もつれ光源を実現した。開発した窒化ケイ素(SiN)オンチップリング共振器は直径約300マイクロメートル(左)。グラフの縦軸はシグナル光の周波数モード、横軸はアイドラー光の周波数モードを示している(右)。これらがちょうど一致したところで、量子もつれ光子対が発生していることがわかる。オンチップリング光源から発生したもつれ光子対としては、世界最大の帯域となる全幅100ナノ(ナノは10億分の1)メートルを実現した。

どうやって
実現する？

明るく豊かな ゼロエミッション 社会

連載
【第3回】

岩崎 博 Iwasaki Hiroshi

低炭素社会戦略センター 特任研究員

河原崎 里子 Kawarasaki Satoko

低炭素社会戦略センター 研究員



バイオマスで 脱炭素に挑む

若手商社員・皆川豊を主人公としたストーリー仕立てで、低炭素社会戦略センター(LCS)が発行する提案書を読み解く連載の第3回。前回、LCSの磐田朋子客員研究員に「個人ができる脱炭素への貢献」の話からバイオマスについてのヒントを受けた皆川。今回はLCSでバイオマス廃棄物のメタン発酵最適化を手掛ける岩崎博特任研究員、そして木質バイオマス生産コスト低減を手掛ける河原崎里子研究員に、バイオマスを活用した脱炭素への取り組みについて聞いた。

生き物由来の資源を発酵 資源価値の高いメタンへ

皆川:今日はバイオマスについてお話を伺いに来ました。太陽光や風力、水力などの再生可能エネルギーに比べ、比較的なじみが薄いように思いますが、バイオマスとはどのようなものを指すのでしょうか？

岩崎:バイオ=生物、マス=質量で、生物由来のモノ全般を指します。そういった意味で私たちの体もバイオマスですが、「資源」という文脈では、稲わらやパーム油の搾りかす、食品生産時に排出される残りかす、家庭や店から出る生ごみ、人間や家畜のし尿、それに木材などが含まれます。ちなみに石炭や石油も、数千万～数億年前に暮らしていた生き物由来の資源ですが、これら化石燃料はバイオマスには含まれません。

皆川:化石燃料もバイオマスも、燃やせば二酸化炭素(CO₂)を排出する点では同じだと思うのですが、なぜバイオマスだけが再生可能エネルギーに含まれているのですか？

河原崎:バイオマスのエネルギーは、元をたどれば全て植物の光合成によって固定された太陽エネルギーです。光合成で吸収したCO₂を燃焼時に排出するので、差し引き排出ゼロになるわけです。一方、化石燃料は何億年という時間スパンで植物がCO₂を固定したものなので、人間生活の時間スパンでは燃やせば燃やすほど大気中のCO₂を増やしてしまいます。

皆川:岩崎さんはそんなバイオマスの中でも、メタン発酵の研究をされているんですね。

岩崎:はい、主に下水の汚泥や家畜のし尿などから、微生物の働きによって取り出す有用なガス資源はバイオガスと呼ばれます。その中でも特に扱いやすく、資源としての価値が高いメタンを取り出す研究をしています。湿原や沼で泡がポコポコ湧いているのを見たことがありませんか？あれは水の底に溜まった有機物を微生物が分解する際に生まれるガスです。あの働きを人工的な環境でコントロールして、高効率でメタンを集めることが研究テーマです。

野生の嫌気性菌が働く 経済的な方法を探索中

皆川:微生物の働きとのお話ですが、何か特別な菌を使うのでしょうか？

岩崎:原料となる汚泥には炭水化物や有機酸をはじめとした非常に多種多様な有機物質が含まれています。それぞれの物質に対して、その分解を得意とする微生物種が存在しており、ある菌が分解した物質をさらに別の菌が分解するというように、汚泥の中では物質と微生物の複雑な生態系ネットワークができています。そして最終的にメタンを作るのは、メタン生成菌です。

皆川:働いている菌に共通の特徴はありますか？

岩崎:嫌気性菌といって、酸素がな

い環境でも生活できるという特徴があります。全て汚泥中にもともと存在している野生の菌で、お酒などの発酵食品を作るときのように、培養した菌を添加することはありません。

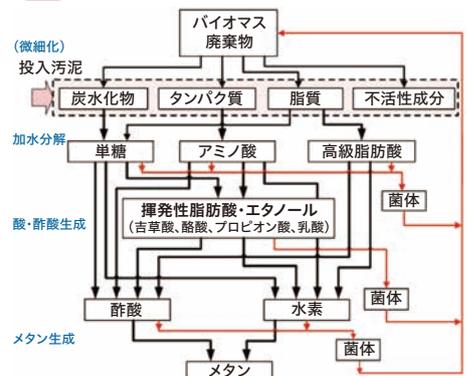
皆川:メタンは、私たちが普段使っている天然ガスの主成分ですよね。コストはどちらの方が安いのでしょうか？

岩崎:残念ながら現状では天然ガスの方が、はるかに安価です。ですから、もっと効率的なメタン発酵を実現すべく、汚泥の濃度や温度、pHなどをコントロールして、最も経済的な発酵方法を探っているところです。ちなみにpHがアルカリ性寄りだとメタンが、酸性寄りだと水素がより多く発生するんですよ(図1)。

皆川:水素をメインターゲットにする計画もあるのですか？

岩崎:確かに水素は燃料電池や工業用途などに非常に有用ですが、現状ではメタンの方が貯蔵や輸送などの

図1 メタン発酵・水素発酵 素反応



出典:バイオマス廃棄物のメタン発酵(Vol.4)—発酵槽の2段化などの合理化と水素発酵の検討—(fy2019-pp-10図1)

点で扱いやすいため、今のところメタン生成に注力しています。

**木質のコストは北欧の6倍
事業規模と集約化・高効率化が課題**

皆川：続いて、河原崎さんに木質バイオマスについてお伺いします。岩崎さんと同じくバイオマス資源のコスト低減の研究をされているそうですが、同じバイオマスでも、メタン発酵とは随分勝手が違いそうですね。

河原崎：はい、木質バイオマスは、他のあらゆるエネルギー源と比べても、かなり性質が異なります。エネルギーとしてだけではなく、材料としての価値もとても高いですね。

皆川：昔ながらの材木や製紙はもちろん、最近ではプラスチックや水素の原料にもなるそうですね。しかし日本の林業は、担い手の高齢化や放置された山林など、ネガティブなニュースを聞くことが多い気がします。

河原崎：戦時中に大量伐採され、その後の拡大造林期に植林された木々が伐採時期を迎えています。しかし、この資源が十分に活用されているとは言えません。本質的な問題はコストです。植林から下刈や間伐の管理、伐採、輸送に至るまでのコストが高く、輸入材に対して価格競争力がありません。するとビジネスとしての魅力が弱く、従事者や資金が集まらないという流れになっています。

皆川：逆に、林業の競争力が強い国はどんな感じですか？

河原崎：いい質問です。世界でも有数の林業国のスウェーデンと北海道の丸太生産量あたりのコストを比較してみました(図2)。

皆川：北海道のコストは約6倍ですか！勝負にならないわけですね。北欧という人件費が高そうなイメージですが、どうしてこんなに差がついてしまったのですか？

河原崎：事業規模の差と、集約化・高効率化の徹底です。スウェーデンでは大きな資本が中心で、民間的林業請負会社が巨大で高機能な林業機械を用いて、24時間交代制で効率よく作業しています。機械のオペレーション室は快適で、労働生産性が非常に高く、従業員の給料も良いです。会社は山林所有者からの発注を受け、山林の維持から木材の伐採・運搬・販売に至るまでサプライチェーンの多くを担っています。

皆川：なぜそれほど資本が集まるのでしょうか。

河原崎：投資が集まる要因の1つは先ほどお話した収益性の高さ、そしてもう1つは長期的な見通しの立てやすさです。特に後者は、持続的な林業を推進するために、長期的な計画に基づいて森づくりを行ってきた結果です。近年では資源量を常に把握した計画的な林業が定着し、資源量は一定で推移しています。

皆川：サステナビリティがビジネス上の大きな魅力になっているのですね。

**社会的制約を乗り越えて
持続するシステムづくりを**

皆川：日本にも十分な資源量があると思うのですが、日本も同じように

はできないのでしょうか。

河原崎：日本の山林は急斜面が多いといった自然の制約もありますが、一番のネックは社会的な制約ですね。日本の人工林の約半分が個人所有で、しかも50ヘクタール以下の小規模なものが7割です。大規模で集約的な林業を行う資金も、それに見合う森林もありません。

皆川：それならば、どうにか資金を調達して大規模な事業体をつくって、パッチ状に所有者が分かれた森をひとまとまりで扱えば良いのでは？

河原崎：まさにそれが私たちの考えていることです。森林の成長と資源分布、地形などを考慮に入れ最適化した、集約的で持続的な林業システムをつくりたいと考えています。

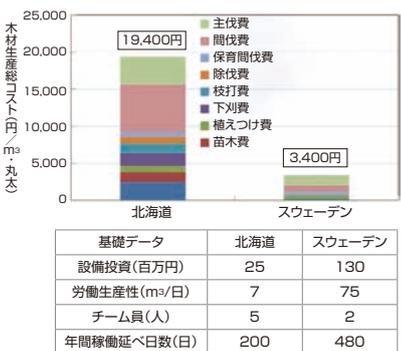
岩崎：社会的な制約がネックになっているのはバイオガスも同じですね。規模を大きくしないと価格競争力を得るのは難しいですし、行政や民間からの支援も必要です。それに、メタン発酵ではなかなか都市ガス並みのメタン濃度を得るのは難しく、そのままでは既存のガス機器で利用できません。バイオガスだけでも使える機器環境がそろえば、普及が進む可能性はかなり高まるはずですよ。

皆川：他の再生可能エネルギーも同様だと思いますが、科学技術だけではなく、それを取り巻く社会的・経済的環境が大事なんですね。「環境」を守るためには「環境」が大事、我が社のビジネスにもつながりそうです！今日はありがとうございました。

ーなお、物語は取材を元にしたフィクションである。

(TEXT・PHOTO: 福井智一)

図2 丸太生産各プロセスのコスト比較 (主伐量150m³/ha)



出典:木質バイオマス燃料のコスト低減-林業素材生産コストの機械化推進による低減効果-(fy2015-pp-06 図1)



広島大学 大学院先進理工系科学研究科 教授
松村 幸彦

ワンポイントアドバイス

脱炭素社会では太陽光や風力の余剰電力を水素にして有効利用することで、従来よりも格段に安価な水素を利用することができます。この提案は、メタン発酵で副生し、通常は有効利用されない二酸化炭素も、水素を用いてメタンに変えることで、有効利用を行うもので、微生物を使うために温和な条件で実現できるメリットがある新奇的なプロセスです。脱炭素社会を支える技術の1つとして検討の余地のある技術です。

研究成果

創発的研究支援事業

研究課題「がん起因する宿主の多細胞連関の異常に関する統合的研究」

がんが引き起こす肝臓の代謝異常を解明

全身の不調を強力に抑える方法論の開発に活路

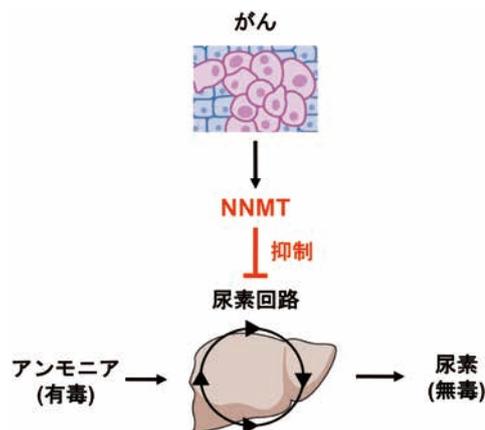
がんは食欲減退や肝臓・脂肪組織の代謝異常、体重の減少など、体にさまざまな悪影響を及ぼします。がんが離れた位置にある宿主臓器や細胞にも作用できる点が原因として挙げられていますが、この作用は極めて複雑で、その実態は十分に理解されていません。

東北大学加齢医学研究所・京都大学医生物学研究所の河岡慎平准教授らの共同研究チームは、このメカニズムを解明するために、がんがもたらす肝臓の異常に着目しました。乳がんや大腸がんを持つマウス個体の肝臓では、ニコチンアミドメチル基転移酵素(NNMT)が多く発現します。研究チームは、NNMTを持つマウスと持たないマウスへがんを移植し、肝臓で起こる異常とNNMTとの関連を検証しました。

その結果、NNMTを持たないマウスは、がんによって肝臓に生じる異常の一部が緩和されることがわかりました。特に顕著な効果が見られたのは、肝臓の代謝回路の1つで、有毒なアンモニアを無毒な尿素にして体外へ排出する尿素回路です。がんを持つ個体では尿素回路が抑制されますが、NNMTの欠損がこれを緩和していることがわかりました。

がんが宿主のNNMTを介して肝臓の代謝異常を引き起こすことが示されたことで、がんによる不調の複雑な全体像をNNMTという視点から整理する道筋を作ることができました。今後は、NNMT以外の異常に関わる分子も明らかにし、がんによる異常の全容解明に力を入れます。また、全身の不調を強力に抑える方法論の開発につなげるなど、臨床応用に向けた取り組みが望まれます。

がんがNNMTを介してもたらす肝臓の代謝異常



肝臓の重要な代謝である尿素回路はたんぱく質やアミノ酸の分解で生じたアンモニアを尿素へと変換し、体外へ排出する。マウスに移植されたがんは、NNMTを介することで離れた位置にある肝臓の代謝異常を引き起こすことがわかった。

研究成果

創発的研究支援事業

研究課題「スパース非線形低次元モデルによる複雑流動場の先進フィードバック制御」

戦略的創造研究推進事業CREST

研究課題「次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析」

戦略的創造研究推進事業ACT-X

研究課題「データ駆動型スパースセンシングによる航空宇宙開発の飛躍」

自動車表面の風圧分布・風向を瞬時に推定

重大事故の回避、燃費の向上に期待

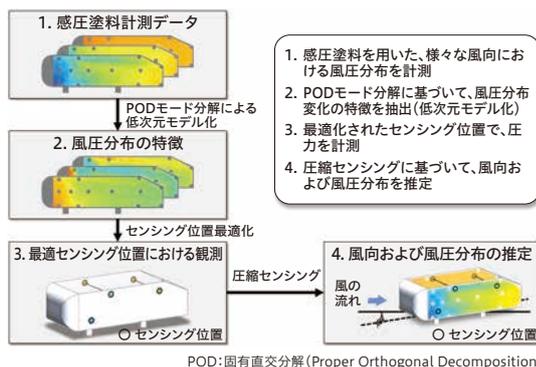
走行中の自動車の周りには、対向車とのすれ違いや追い越し、突風などにより、絶えず複雑な風の流れが発生しています。これらの風圧や風向を瞬時に把握できれば、安全かつ安定的な自動運転の実現に近づきます。しかし、車体に多数の半導体圧力センサーを埋め込む従来の圧力検知方法は、コストの面からも市販車への実装が困難でした。

東北大学大学院工学研究科の野々村拓准教授らの研究グループは、圧縮センシングと周囲の圧力に応じて発光強度が変化する「感圧塗料」による計測を組み合わせ、自動車表面の風圧分布・風向を瞬時に推定する技術を開発しました。研究グループはまず、感圧塗料でさまざまな風向きにおける風圧分布を計測しました。次に、自動車表面の風圧分布変化の特徴を抽出し、複雑な現象を大まかな特徴に限定して表現する低次元モデル化を行いました。得られたデータを基に、半導体圧力センサーの設置位置を最適化しました。これらを組み合わせた結果、風圧分

布の平均誤差を2.6パーセント、風向の平均誤差を3.4パーセントという高い精度で推定できるようになりました。

新手法では多数のセンサーを車体に埋め込む必要がないので、市販車にも実装しやすくなると考えられます。また、風圧分布などの情報を基に運転制御することで、風の影響による横転などの重大事故の回避が期待できます。その他にも、空気抵抗が小さくなるよう自動運転車の隊列形態を最適化できれば、燃費向上などにもつながる可能性があります。

感圧塗料による風圧計測と半導体圧力センサーの個数と位置の最適化



研究成果

戦略的創造研究推進事業CREST

研究領域「分解・劣化・安定化の精密材料科学」

研究課題「機能集積型バイオベースポリマーの創製・分解・ケミカルリサイクル」

市販のポリエステルを完全分解

プラスチックを削減、新物質の創出にも挑戦

「プラスチック問題」は、世界が直面している大きな社会課題の1つです。日本におけるプラスチックのリサイクル率は86パーセントとされているものの、その多くは燃料として再利用されており、原料として再び利用されるケミカルリサイクルは、わずか3パーセントほどに過ぎません。

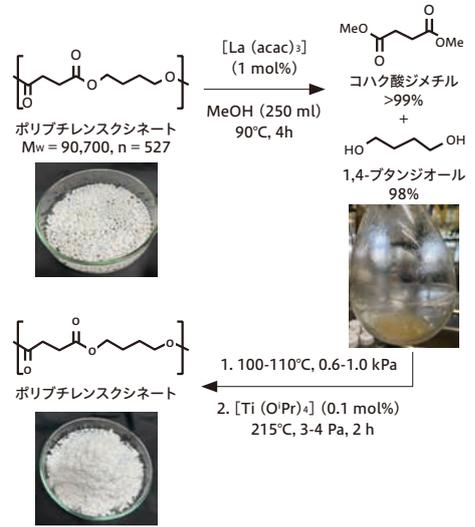
市販のペットボトルなどに使用されているポリエステルは、両端にカルボン酸を持つ単量体と両端にアルコールを持つ単量体から合成される「エステル構造」を繰り返しています。このエステル構造を切断すれば原料に戻すことができますが、環境負荷の高い塩基や添加剤を用いた化学反応が必要なため、ケミカルリサイクルはなかなか浸透していませんでした。

東京都立大学大学院理学研究科の野村琴広教授、東京農工大学工学府の安倍亮汰大学院生、同工学研究院応用化学部門の小峰伸之助教、平野雅文教授らの研究チームでは、これまでの植物油のトランスエステル化分解や低分子化合物のエステルの触媒的結合切断に関する知見などから、ポリブチレンスクシネート(PBS)の分解に希土類元素「ランタン」

の錯体が有効であることを見いだしました。この研究では反応温度90℃、反応時間4時間でPBSを定量的に分解できるだけでなく、市販のペットボトルも完全分解して原料に戻すことを確認しました。

今後は社会実装も視野に入れた触媒活性種の解明を行い、より安価で温和な条件下での分解反応の構築を目指すとともに、分解前のプラスチックよりもさらに価値ある化学物質の創出にも挑戦していきます。

ポリブチレンスクシネート:PBSの分解と再重合



希土類元素のランタンの錯体を触媒としたところ、メタノール中の触媒濃度1モルパーセント、反応温度90℃、反応時間4時間でPBSをポリエステルの原料であるスクシネ酸ジメチルと1,4-ブタンジオールに分解できた。

研究成果

戦略的創造研究推進事業さきがけ

研究領域「数学と情報科学で解き明かす多様な対象の数理構造と活用」

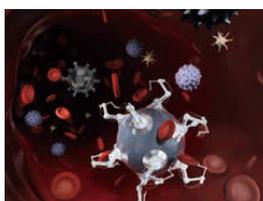
研究課題「生命ダイナミクスのための流体数理活用基盤」

自ら泳ぐ「奇弾性体」の理論を発見

自律的なマイクロマシンの開発・実現に道

「水中を泳ぐ」という行動は、身体と流体の力学的絡み合いから生み出されるもので、極小微生物の遊泳も例外ではありません。特に物体が柔らかい弾性体の場合は、変形と遊泳が切り離せないため、一般的な遊泳公式が長らく未解明でした。

京都大学数理解析研究所の石本健太准教授らの研究グループは、弾性体の拡張概念である「奇弾性」に注目しました。奇弾性とは、生物や物体が自発的に変形することにより、エネルギー保存則が成立しない状態を科学的に示したもので、これまで弾性体理論では存在し得ないとされていました。



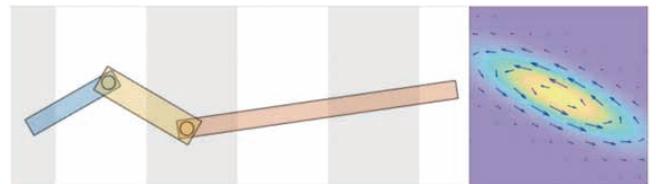
自律的に体内や血管内を移動するマイクロマシン

今回、研究グループは最も基本的な遊泳の数理モデルである「パーセル・スイマー」に奇弾性を導入し、流体計算を行いました。その結果、奇弾性体の内的なゆらぎがスイッチのように働き、自律的でしなやかな遊

泳運動が生まれることを見いだし、これまで全く異なる概念とされてきた既存の遊泳法則と、奇弾性体における力と変形の法則が、ともに形状空間内の確率的な流れとして表現できることを見だし、遊泳公式を導くことにも成功しました。

今後は実際の微生物がどの程度の大きさの奇弾性を持っているかを調べるとともに、体内や血管内を移動する自律的なマイクロマシンの開発および実現に向けて、基礎と応用の両面で貢献することが期待されています。

パーセル・スイマーの模式図(左)と形状空間における確率的な流れの様子(右)



微小遊泳の数理モデルである「パーセル・スイマー」に、奇弾性を取り入れた流体数値シミュレーション。外部からの入力・制御がなくても、ひとりで泳ぐ。



「パーセル・スイマーの模式図」を用いた遊泳動画はこちらからご覧いただけます。

https://www.youtube.com/watch?v=M_JSq7s569A

さがける 科学人

vol.119

高山 雄貴 Takayama Yuki

金沢大学 理工研究域 地球社会基盤学系 准教授

Profile

広島県出身。2005年東北大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。鉄道会社にて勤務後、11年に東北大学大学院情報科学研究科で博士(情報科学)を取得。愛媛大学大学院理工学研究科助教などを経て、16年より現職。22年より創発研究者。



研究合宿や合同BBQなど、研究室を超えた情報交換やコミュニケーションを大切にしています。新たな発見やリフレッシュの場にもなっています。

Q1. 研究の道に進んだ経緯は？

A1. 現実とのギャップから就職実務を経験し再び大学院へ

社会基盤の整備に興味を持ち、東北大学で土木計画の研究室に所属しました。しかし、数理的に都市や地理を考える研究をする中で、現実とのギャップを感じていました。実務を経験したいと思い、博士前期課程修了後は鉄道会社への就職を決めました。修士論文を作成する中で、研究内容への理解が深まり、就職活動前よりも研究が楽しく感じられました。

会社で働き続けるか、それとも大学に戻るか、入社後の3年間で方向性を決めることにしました。実務では新駅開発・輸送改善などの面白い業務に関わることができました。しかし、少し引いた目線で地方の将来の形を考えたいと思い、最終的には博士後期課程への進学を選びました。

Q2. 具体的な研究内容を教えてください

A2. 「空間経済学」の数理的構造に着目政策分析に使える手法へ発展

大都市Aと地方都市Bを結ぶ道路ができると、短期的にはBの経済が活発になります。しかし、Aに働きに行く人が増えたりすると、長期的にはAに人や企業が吸い取られてしまう「ストロー現象」が発生し、Bが衰退してしまうことがあります。既存の政策効果分析では、この現象が起こらないという前提で、短期的な視点の枠組みが使われてきたので、私は長期的な成長やリスクを適切に評価できる方法論を作りたいと考えました。

そこで「空間経済学」に着目しました。この学問は、産業の立地や交通網などの地理的側面から、地域や都市の形成を分析するものです。構造力学などの他分野における数理的な構造が、空間経済学にも共通することを発見しました。これらを組み合わせることで、政策的に使える手法へと発展させることができました。

しかし、実際の都市の人口分布などを説明することもまだ容易とはいえません。都道府県単位の情報を簡単に使える都市ごとのデータにする、シミュレーションを作る、モデルとデータを組み合

わせるなど、各ステージで大きな壁があります。それぞれの部品を整備してパッケージ化し、長期的な都市変化を踏まえた政策分析手法の確立への貢献を通じて、効果的な地域活性化の一助になりたいです。

Q3. これから研究者を目指す人にひと言

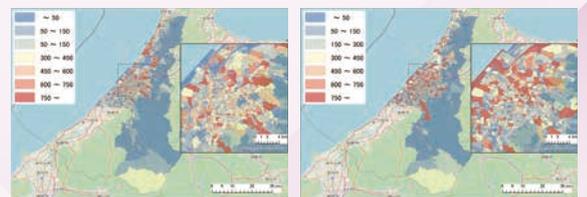
A3. 考えるという行為は案外難しい「おもろい！」ことに全力で挑戦

実は研究者を志したことがありません。面白いと思ったことを続けようと努力してきた中で、いろいろな運・縁に恵まれ、結果として研究者になっていました。

例えば大学では、じゃんけんに勝って土木計画系の研究室に所属が決まりました。その後の個別の研究室への配属は第一希望ではありませんでしたが、当時の研究が今につながっています。

考えるという行為は案外難しいものです。だからこそ、自分が興味深いと感じる理由を一生懸命考えながら「おもろい！」と思うことに全力で挑戦してってください。

(TEXT:横井まなみ)



居住地別の労働者数

就業地別の労働者数

金沢都市雇用圏の都市経済モデルによるシミュレーション。人口や物流の変化などのデータを組み合わせて、地域・都市政策の長期的効果を分析する手法を構築します。

長期的な
地域活性化の一助に

