

「トポロジカル材料」創出で目指す 省エネ・高速・大容量のデータ処理

世界中で次世代材料の開発が加速する中、注目を集めるのが「トポロジカル材料」だ。数学の位相幾何学の概念を物性物理学に取り込み、近年これまでにない性質を持つ材料が次々と見いだされている。より革新的な機能を持つ材料の開発に挑むのは、東京大学大学院理学系研究科の上田正仁教授だ。基礎から応用まで分野横断で研究者が集い、材料やデバイスを創出することで、誰もが快適に暮らせる超スマート社会の実現を目指す。



うへだ まさと
上田 正仁

東京大学 大学院理学系研究科 教授
2018年よりCREST研究総括

今世紀誕生した絶縁体 物性物理学の新潮流に

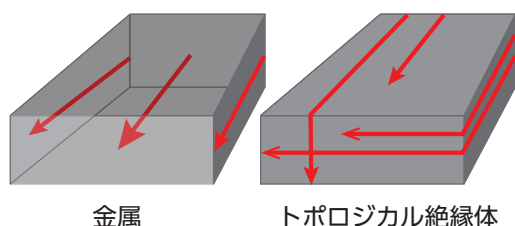
大容量データの超高速通信が求められる中、データ処理に掛かる負荷は増す一方だ。いずれ既存のデバイスでは対応できなくなると予測されている。またこの電力使用や発生する熱の冷却において二酸化炭素が排出され、地球温暖化に拍車をかけているとの指摘もある。そのため、低消費電力で熱を出さず、高効率な次世代材料・デバイスの開発が急務となっている。

そんな中、2005年に提唱されたのが「トポロジカル絶縁体」(図1)だ。表面には電気を通すが、内部は通さないという特徴を持つ、従来の概念を覆す物質だ。数学におけるトポロジーは、図形を連続的に変化させても変わらない性質に着目した幾何学である(図2)。この概念を物質の電子状態にも適用したことから、この名前がついたという。数年後には実験でもその存在が立証され、トポロジーに基づく材料

探索が物性物理学の新潮流となった。

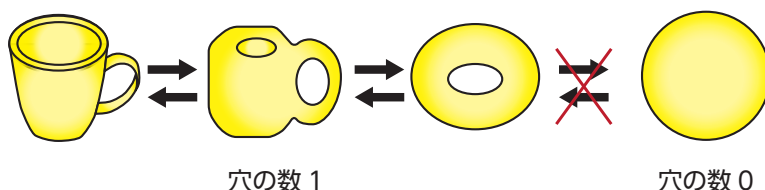
東京大学大学院理学系研究科の上田正仁教授は、CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」研究領域で研究総括を務める。従来の材料では不可能とされた性質が、トポロジーの概念で特徴づけられる材料では実現できるという。「小型化や高速化、低消費電力、強靱性などの特徴を有する革新的なデバイスも作り、超スマート社会の実現を目指します」と目標を語る。

競争相手となる欧米や中国の研究機関では、多額の資金を投入して開発が進められている。「CRESTでは理論から応用まで分野横断で、世界をリードするトップクラスの研究者を集めました。活発な議論が日々行われています」と上田さん。領域アドバイザーからも、高い専門性にに基づいた助言が寄せられ、領域運営全体を後押しする。まだ解明されていないことが多く残る分野でもあり、成果に期待が高まる。



金属

トポロジカル絶縁体



穴の数 1

穴の数 0

図1 金属は表面も中も電気を通す。一方、トポロジカル絶縁体は表面には電気が流れるが、内部は流れない。

図2 トポロジーでは、コーヒーカップとドーナツは穴の数が1つで同じだが、穴のないボールは違うと考える。



なかつじ さとる
中辻 知

東京大学 大学院理学系研究科 教授／
物性研究所 特任教授
2018年よりCREST研究代表者

反磁性体のメモリーを目指すも 磁化が小さく実用化には課題

CREST研究チームの1つを率いるのは、東京大学大学院理学系研究科・物性研究所の中辻知教授だ。物性物理が専門で、新しい機能を持つ磁性材料の開発やメカニズムの解明に取り組んでいる。電子には電気元となる電荷と、磁石元であるスピンという2つの性質がある。電荷を利用した計算処理を行うエレクトロニクスに、スピンの

性質も利用した、これまでにない高機能かつ低消費電力なデバイスの開発に挑む。

スピンは電子の自転運動のことで、上向きと下向きの2種類がある。スピンの向きがそろい、磁石のように強い磁化を示す磁性体を「強磁性体」、反対にスピンの向きが互いに逆方向を向き、磁化がゼロに近い値を示すものを「反強磁性体」という。スピントロニクスの代表例であるハードディスクドライブ(HDD)では、スピンの向きを制御し

て情報を読み書きしている。磁気メモリーは外部から電気を供給しなくても情報を保持できるため、不揮発性メモリーと呼ばれ、これまではコバルト鉄合金などの強磁性体が使われてきた。

一方で、強磁性体の代わりに反強磁性体を使うと、スピンの応答速度が2～3桁速くなることが知られている。加えて反強磁性体の場合、スピンの向きが互いに反対方向を向いているため、強磁性体のような漏れ磁場が発生する心配がなく、より高速な読み書きが可能で大容量の磁気メモリーへの応用が期待されてきた。しかし反強磁性体には磁化がほとんどないため、スピンの向きを用いた情報の読み書きが難しく、実用化には至っていなかった。

マンガン化合物で異常な起電力 仮想磁場に由来する効果を発見

これに対し、中辻さんは15年にマンガンとスズの化合物 Mn_3Sn の反強磁性体が、常温で強磁性体に匹敵するほど大きな「異常ホール効果」を示すことを発見した(図3)。物質に電流が流れると、磁場や電流と垂直方向に起電力が生じる現象を「ホール効果」と呼ぶ。これは互いに垂直に磁場と電流を与えた際に、電流として流れている電子の運動方向が磁場によって曲げられることが原因だ。それに対し磁化を持っている強磁性体の場合、外部から磁場を与えなくてもホール効果が生じる。この現象が「異常ホール効果」だ。

また、17年には Mn_3Sn に「磁気熱電効果」があることも見いだした。磁

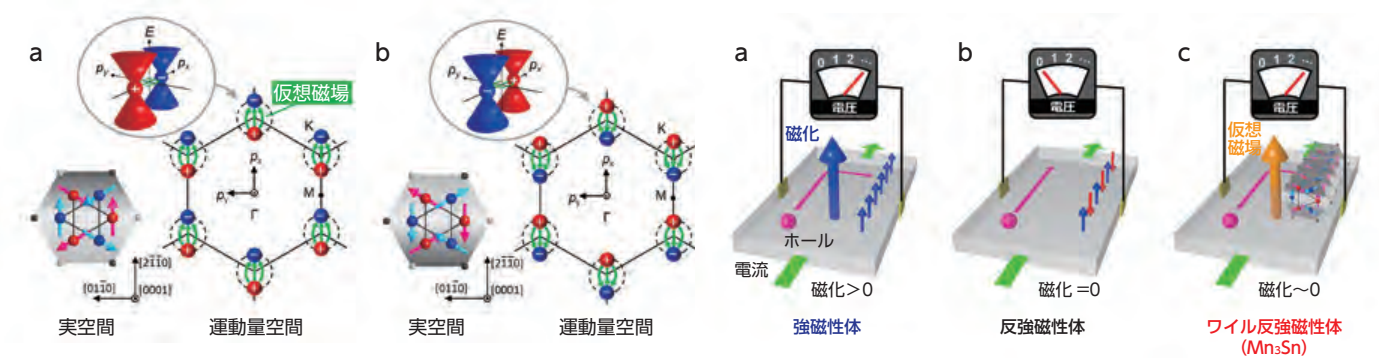


図4 ワイル反強磁性体 Mn_3Sn では、実空間での反強磁性秩序の向きと運動量空間におけるワイル点の対(赤(+)と青(-)の球)、その仮想磁場の向きが対応している。図(a)と(b)は反強磁性秩序を反転させた場合のワイル点と仮想磁場の向きの概要図で、それぞれ逆方向に仮想磁場が向くことがわかる。

図5 大きな磁化を持つ強磁性体では異常ホール効果が現れる。一般に、磁化の大きさに比例して異常ホール効果は大きくなる(a)。反強磁性体では磁化が0、もしくは、非常に小さいため、異常ホール効果の測定は困難となる(b)。ワイル反強磁性体 Mn_3Sn では、ワイル点が創出する仮想磁場の効果により、磁化が非常に小さくても、強磁性体に匹敵するほど大きな異常ホール効果が現れる(c)。

気熱電効果は従来の熱電変換と異なり、磁場・温度差と垂直方向に起電力が生じる現象だ。従来は磁化の強い強磁性体でしか実用的な熱起電力を示さないと考えられてきたが、磁化の小さい反強磁性体 Mn_3Sn でも強磁性体と同程度以上の大きな熱起電力が生じることを発見した。

中辻さんらはその後の研究で、これらの効果は物質のトポロジーに由来していることを突き止めた。「実は以前から有名なトポロジカル物質の1つに、素粒子分野で研究されてきたワイル粒子が磁性と伝導を担う新しいタイプの磁性体が理論的に予言されていました。ワイル磁性体では、実空間に換算すると100～1,000テスラに相当する大きな仮想磁場が作られることが知られていました。 Mn_3Sn はまさにワイル磁性体として確認された初めてのケースで、その異常ホール効果はワイル粒子が作る仮想磁場に由来する効果だったのです」と中辻さん(図4)。

これまでの研究では磁場を使ってワイル粒子を制御する方法は知られ

ていたが、電流を使って制御する方法は見つかっていなかった。それに対し20年4月、中辻さんらは Mn_3Sn と非磁性金属であるプラチナやタングステンとの多層膜からなる素子を作り、電流による制御にも成功した(図5)。「この成果はトポロジカル材料を使った超高速・大容量の不揮発性磁気メモリーの実用化に向けた大きな一歩となりました」と語る。

室温・ゼロ磁場で磁気熱電効果 安価な鉄材料で薄膜や大面積化

加えて、中辻さんらは室温で高い磁気熱電効果を発揮するトポロジカル材料の探索も進めていた。20年4月には鉄とアルミニウムの合金 Fe_3Al と鉄とガリウムの合金 Fe_3Ga が、鉄単体よりも約20倍も磁気熱電効果を示すことを発見した(図6)。「トポロジカル材料はやみくもに化合物を作っても、見つかるわけではありません。計算科学を使い、安価で工業的にも利用しやすい鉄材料を中心に探索しまし

た」と中辻さんは振り返る。これらは、ノーダルウェブと呼ばれるトポロジカルな電子のバンド構造に由来する現象であることも明らかにした。

物質の両端に温度差を与えることにより起電力が生じる「ゼーベック効果」では、温度差と同じ方向に起電力が発生するため、モジュール構造は複雑になる。それに対し、磁気熱電効果の場合、温度差と磁化に垂直方向に起電力が発生し、発電方向は磁化の方向で制御できる。このため、印刷技術を使った大面積の薄膜で無接合のモジュール構造が可能だ(図7)。

近年リチウムイオン電池などでは温度上昇による発火が課題となっていることから、熱を伝達しやすい金属の性質を利用した熱流センサーへの応用も検討中だ。「熱流センサーを使って熱の流れをセンシングすることで、化学反応の異常を検知できます。発火を未然に防ぐだけでなく、バッテリーを長寿命化することができると考えています。1日も早い実用化を目指します」と中辻さんは語る。

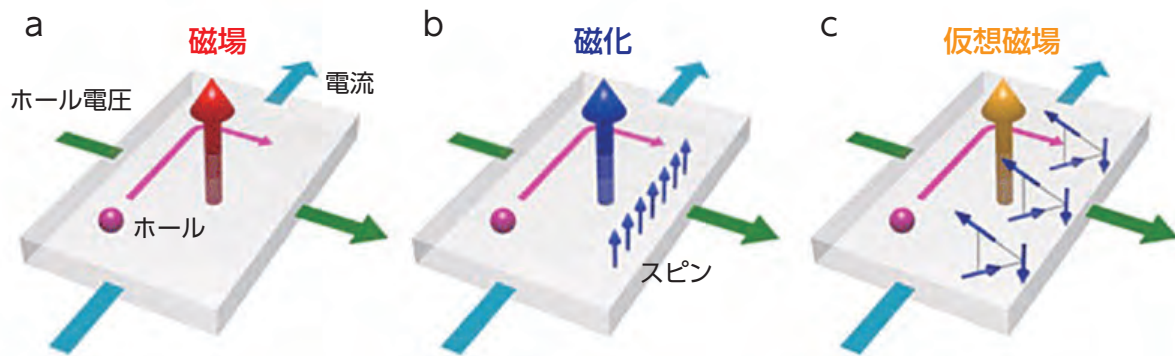


図3 通常のホール効果では、非磁性体金属に電流を流し、電流と垂直に磁場をかけると、電流と磁場の両方に直交する方向に起電力(ホール電圧)が現れる(a)。強磁性体の異常ホール効果では、自発磁化の発生とともにゼロ磁場でホール効果が現れる(b)。トポロジカル磁性体においては自発磁化のない状態(仮想磁場)でも、仮想磁場によりホール効果が自発的に現れる(c)。

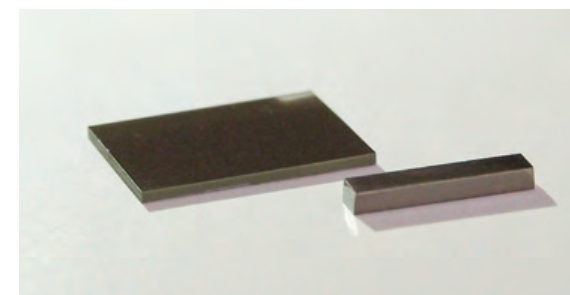


図6 中辻さんが発見した巨大磁気熱電材料 Fe_3Ga の薄膜(左)とバルク結晶(右)

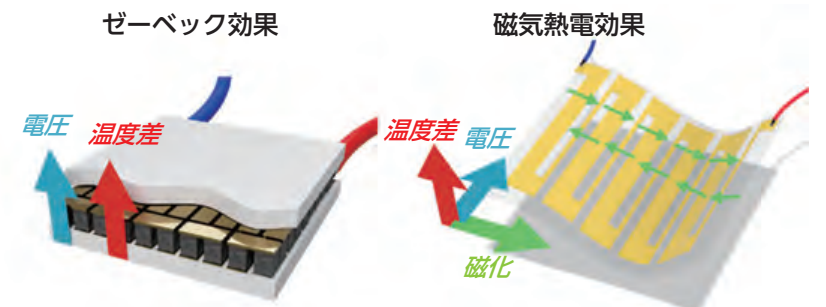
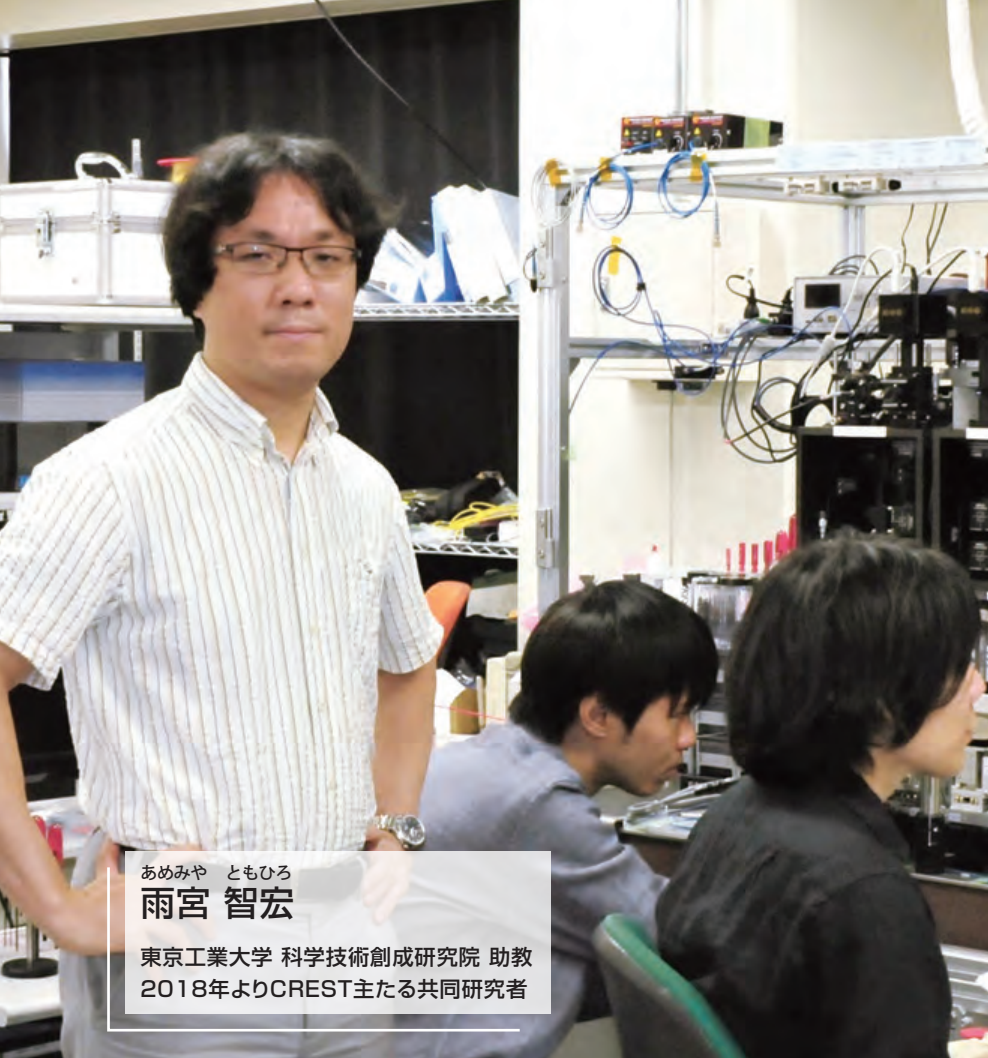


図7 従来のゼーベック効果を用いた熱電変換モジュール(左)。磁気熱電効果を用いた無接合フレキシブル熱電変換モジュール(右)



光集積回路に適応 円偏光や光渦を利用

物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点の胡曉主任研究者の下で、フォトニクス分野から研究を進めるのは、東京工業大学の雨宮智宏助教だ。光通信を専門とする雨宮さんは、トポロジーを利用することで、大量のデータを高速で処理できる光集積回路の開発を行っている。現在の情報化社会では、データの伝送には光ファイバーが用いられているが、その両端で情報の送受信を担うのが半導体による光集積回路だ。これはワンチップ上に無数の光学素子を集積することで、全体として必要な機能を果たすようにしたものであり、現代社会を支えるコア技術の1つである。

従来の光集積回路では、光の強度、位相、波長などを用いることで、情報を制御してきた。「光集積回路にトポロジカル構造を入れることで、円偏光や光渦といった光のトポロジー

するためには、これらの情報をうまく利用することが不可欠です」と雨宮さんは語る(図8)。胡さんの理論に基づいて、実際にトポロジカル構造と呼ばれる三角形を組み合わせた微細構造を光回路に導入し、トポロジカルな情報をチップ上で制御することを目指している。

トポロジカル構造をもつ光学材料において、その特性を決める重要な指標の1つがフォトニックバンドダイアグラムだ(図9)。これを評価することで、構造内の光学現象をある程度予想することができる。従来のフォトニックバンドダイアグラム測定では、特定の方向から光を入射し、それらの透過や反射特性を評価していた。しかし、この方法はサンプルに合わせた光学系を組む必要があり、事前の設定から測定までかなりの時間を要していた。「ものづくりでは、作って評価して改良するというサイクルが非常に重要です。大学では毎年新しい学生が入ってくることもあり、誰でも使えて、すぐに結果がわかる評価装置が必要でした」と雨宮さんは強調する。

に起因した情報も扱えるようになります。より大量のデータを高速に処理

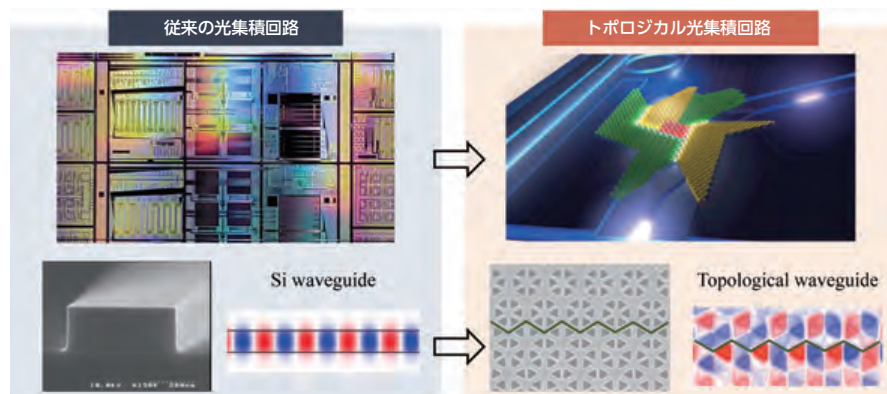


図8 従来の光集積回路では導波路が単純な構造で、規則的な信号が送られる(左)。トポロジカル光集積回路では、円偏光や光渦などの情報も1チップ上で処理できる(右)。

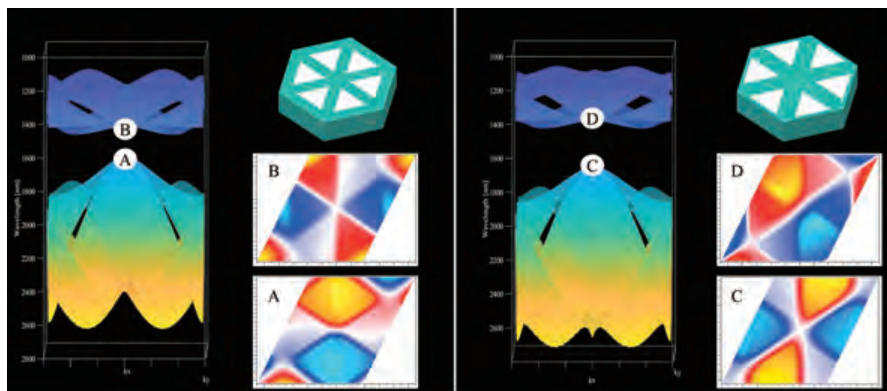


図9 三角形を端に寄せて配置することでトポロジーに起因する特性が現れる。



図10 フォトニックバンドダイアグラム顕微鏡『FA-CEED』の外観

走査電子顕微鏡像

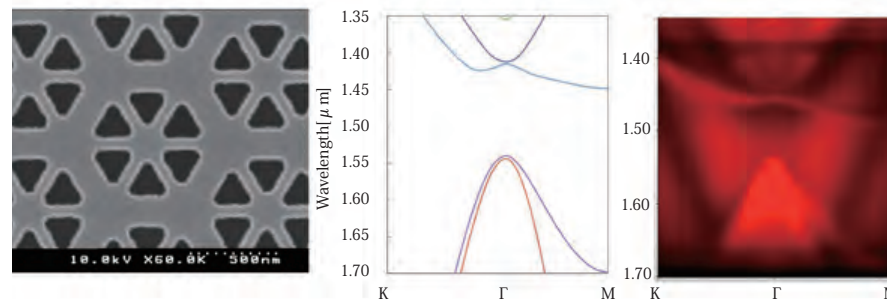


図11 トポロジカル構造を『FA-CEED』で観察した結果、理論解析結果(中央)と顕微鏡による観察結果(右)では同じバンド構造が見られた。

企業と共同で評価機器を開発 既存の技術を使いコスト削減

自分が必要な装置なら、他でもニーズがあるだろうと考えた雨宮さん。大学と共同で機器開発を手がけた実績も豊富な東京インスツルメンツ(東京都江戸川区)と、フォトニックバンドダイアグラム顕微鏡の開発に乗り出した。サンプルにさまざまな波

長の光を当て、その散乱光のフーリエ画像を観測し、バンドダイアグラムを再構成する設計にした。「アルゴリズムのみを新しく考え、装置自体は既存の技術の組み合わせで開発しました。おかげでコストも時間もあまりかからず、安定した品質の装置ができました」と笑顔を見せる。

完成した装置は、『FA-CEED』の製品名で既に21年6月から販売も開始

しているが、その特徴は何ととっても簡易かつ高速なことにある(図10)。試料ホルダーにサンプルをセットするだけで、短時間で自動的にデータがとれる。実際に『FA-CEED』を使ってトポロジカルフォトニック材料のバンドダイアグラムを観察したところ、理論解析を裏付ける観察結果を得ることができた(図11)。この装置により実験効率が向上したことで、今後は歩留まりよくトポロジカル構造を作り、効率的に光集積回路に組み込む段階に進むことができそうだという。

これまでの研究者は専門性を磨いてきたが、全く新しい概念に立ち向かうためには分野横断が欠かせないと中辻さんは強調する。「違う研究室の学生同士で議論している風景が当たり前になってきました。今後はいくつもの分野に軸足を置いた研究者が活躍していくでしょう」。

雨宮さんもプロジェクトがきっかけで、世界が広がったと口にする。「胡先生とは分野が違うということもあり、このプロジェクトにお声掛けいただく前は、学会で1度お話をさせていただいた程度で、ほとんど面識がありませんでした。今は毎週のようにオンラインでミーティングをしており、多くのことを学ばせていただいています」と語る。

上田さんは研究者同士が互いに協力し、気持ちよく研究できる体制が整えば、結果はついてくると自信を見せる。トポロジカル材料の可能性が大きく広がり、その重要性は一層高まっている。超スマート社会の実現に向けて、上田さんたちは着実に道を切り開いていく。

CREST/ さきがけ「トポロジー」領域 連携公開シンポジウム 「トポロジカル科学の現在と未来」を開催します。ぜひ、ご参加ください。

開催日時：2021年9月28日(火) 10:00~16:00

開催形式：オンライン開催 (Zoom Webinar)

参加費：無料 (事前登録制)

開催概要：下記HPをご覧ください。

https://www.jst.go.jp/kisoken/sympo/topology_03_poster.pdf

参加申込：下記の参加登録フォームよりお申し込み下さい。

https://zoom.us/webinar/register/WN_caY3gaktTi-lwqoyrggr8Q

