

CREST 研究課題「物質のトポロジカル相の理論的探究」について

東京大学大学院数理科学研究科

河東 泰之

私は国立研究開発法人・科学技術振興機構（JST）の CREST 研究費を「物質のトポロジカル相の理論的探究」という題目で研究代表者として取っている。期間は 2019 年秋から 2025 年 3 月までの 5 年半、金額は合計約 2 億円、物理学者の分担者が 2 人いるので私の担当分は約 1 億円である。数学者と物理学者が協同して物理側から見て有益な研究成果を挙げることを目指している。これは数学では比較的珍しい例だと思うので今回その紹介を書くことになった。

まず、JST とか CREST とかいうものに多くの数学者はなじみがないだろうと思う。私も自分が応募するまでよく知らなかったので、その説明から始めよう。数学研究にお金をくれる国の組織としてだれもが知っているのは日本学術振興会である。科研費が代表例でこちらは研究者の自由な発想に基づくボトムアップ型の支援が中心である。これに対し、JST の方はトップダウン的に大学・研究機関等の研究をマネジメントするとされている。国の研究開発戦略上重要と考えられるテーマを JST 側が選んで提示し、それに基づく研究計画を支援するのである。最近話題のムーンショット型研究開発事業も JST が担当しており、「2050 年までに、AI とロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」といった課題が設定されている。CREST というのは JST が実施しているプログラムの一つの名前であり、ほかに、さきがけ、ERATO, ACT-X といったものがある。これらの名前くらいはご覧になったことがある方も少なくないのではないだろうか。この中で CREST は金額も大きめで、主要なプログラムの一つとなっている。その目的では国の政策実現というのが前面に出ており、これが科研費などと大きく違うところである。

CREST は領域と呼ばれる研究テーマごとに分かれており、「異分野融合による新型コロナウイルスをはじめとした感染症との共生に資する技術基盤の創生」といったものが並んでいて、現在全部で 34 領域ある。私が所属しているのは、「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」である。その概要は「本研究領域は、将来の超スマート社会実現に資するため、連続変形に対する不変性に着目した新たな物質観であるトポロジーに着目し、新規な機能発現に関する現象の解明、新規機能・新原理・新規構造に基づいた材料・デバイスの創出に資する研究開発を基礎基盤的アプローチから推進することにより、既存の技術では実現できない革新的機能を有する材料・デ

パイスの創出を目的とします。」となっており、この領域では3回に分けて合計14課題が採択されている。これはトポロジカル物性と呼ばれ、ノーベル物理学賞も出ているホットな話題だが、トポロジカル量子コンピュータの開発を含め、実用的応用が大きく期待されているテーマでもある。各領域には研究総括と呼ばれる人がいて、課題の採択や研究の推進について大きな発言力を持っている。私の領域の研究総括は東大物理の上田正仁氏である。そのほか各領域には10名程度の領域アドバイザーという人たちがいて、採択面接、中間報告などにおいて質問したり、コメントしたり、アドバイスしたりする。この領域では数学関係者として、九大マス・フォア・インダストリ研究所の小磯深幸氏が領域アドバイザーに入っている。

2018年にこの領域の公募が始まった際にある人から応募を勧められた。私のような数学者が応募して通るものなのかどうか全く不明だったが、京都大学基礎物理学研究所の佐藤昌利氏、理化学研究所の古崎昭氏を分担者として応募することにした。この二人は物性物理学の研究者である。2018年には一次審査を通過して面接に進んだのだが、最終段階では落ちてしまった。しかし翌年の応募では最終審査にも通り、この研究費をもらうことができた。私のグループの現在の研究メンバーは小谷元子（東北大）、緒方芳子（東大）、窪田陽介（信州大）、山下真由子（京大）各氏のほか、この研究費で東大数理で雇用しているポスドクと私のところの院生たちである。

さて上の領域の概要を見て、数学者である私が本当にそんな研究をしているのか、と思われた方もいると思う。そこで実際の研究内容を説明しておこう。私の専門は作用素環論とそれに関連する（数学としての）数理論理学だが、カイラル共形場理論、モジュラーテンソル圏、Jones 多項式、gapped Hamiltonian の分類などが関連するキーワードである。Jones 多項式は作用素環論の研究から生じた結び目の多項式不変量だが、Kitaev の提唱したトポロジカル量子コンピュータの数学的基礎になりうるのではないかとということで、Microsoft が組織的に関連した研究を行っている。これは4次元 Poincaré 予想の解決で知られる Freedman が Microsoft の Gates にこの種の数学的研究の必要性を訴えて研究所が作られたことによると聞いている。この研究所の現在のトップである Wang は Freedman の弟子で、もともと4次元トポロジーの人だが、現在はモジュラーテンソル圏や結び目の不変量の研究をしており、私はコンファレンスなどで何度も会ったことがあった。そこでこういう研究であれば私にもできるのではないかと考えたのである。さらに2015年の私の論文の経験もこれを後押しした。これは、Phys. Rev. Lett. に出ている論文を読んでいて、そこに書かれている予想が間違っていることにすぐに気づいたことが始まりである。このジャーナルは多くのノーベル賞論文を載せてきた物理のトップ

ジャーナルであり、たとえば最近の重力波検出論文もここに載っている。また著者はトポロジカル物性で極めて有名な大物物理学者であるのだが、論文の中核的内容はモジュラーテンソル圏に関する数学的予想であり、そんな予想が成り立つはずがないことは、作用素環やそれに関連するモジュラーテンソル圏のことをよく知っていればすぐにわかるのであった。すでに知られている範囲に簡単な反例があるはずだと思って探したところすぐに見つかった。そこで短い論文を書いたのだが、著者たちは予想が間違っているにもかかわらずあまり気にしていないようだった。しかしとにかく、私が研究しているようなことと近い問題意識を持った物理学者がたくさんいるということを知ったのは良い経験だった。またもう一つ、gapped Hamiltonian の分類と呼ばれる物理学の重要問題があるのだが、これを数学的に研究するに際し作用素環論を用いる方法があり、それを東大数理の同僚の緒方芳子氏が精力的に研究していることも助けになった。この流れで上記の Microsoft の Wang には私の計画の海外アドバイザーというものになってもらっている。Jones 多項式の元祖の Jones にも海外アドバイザーになってもらっていたのだが、大変残念なことに彼は 2020 年に急病で亡くなってしまった。

さて実際の活動内容だが、数学と理論物理でこんなに大きな金額をもらって何をしているのかと思われる方もいるであろう。実際の研究活動は次の私のウェブページに書かれているが、この研究費の使い道はほぼ人件費と旅費である。人件費はかなり額が大きいのでそれを除けばそんなにたくさんの研究費を使っているわけではない。

<https://www.ms.u-tokyo.ac.jp/~yasuyuki/crest.htm>

私のグループではこれまでイタリア人とアメリカ人のポスドクを雇用しており、また院生を何人か RA に採用している。ポスドクの採用に当たっては4回の公募を行い、物理出身者と数学出身者を半分ずつ採用している。この研究費は一応毎年更新の承認を受けるという形になっており、理論的には打ち切りや減額がありうると言われている。実際にやってみて周りの様子を見たところでは、そういうケースは実際上ほぼないと思うのだが、研究費で人を雇うにはこれが難点となる。そのため私のグループでは1年更新の特任研究員という形にしているのだが、他の CREST グループを見ていると特任助教などにしているケースも多いようで、いろいろ工夫すれば数年の任期として運用することは可能であるようだ。なお新型コロナウイルスのためこの研究員雇用にも多くの問題が起きている。最初のポスドクはすでに日本で働いていたので影響がなかったが、次のアメリカ人はビザの申請を開始してから日本に入国できるまで半年以上待たされてしまった。この次のポスドク研究員も海外にいる外国人の採用が内定しているのだが、いつ実際に入国できるのか極めて不透明である。また旅費の方も海外からの入国は全面的にス

トップしているし、予定していた国際コンファレンスも全部オンラインでしか開催できない状況である。このため計画の実施にはいろいろと困難が生じているのが現状である。なお研究総括からは「数学と物理の両方を理解できる若手を育ててほしい」と言われており、通常のコンファレンスのほかに、教育的なワークショップをこれまで3回開いている。2020年1月の1回目は対面開催だったが、その後はオンラインである。ここでは院生や若手研究者が学べるように解説的な長い講演をいくつも入れている。その一部についてはビデオも公開している。このほか、数学と物理の双方の研究者を対象に、月に一度のオンラインセミナーも開催している。これらの経験を通じて、私が理解できている物理学者、私の研究していることに興味を持ってくれる物理学者がたくさんいるということがわかったのは個人的に大きな収穫であった。私の数学的な研究は数理論理と言っても物理から影響を受けた数学の研究のことだが、このCRESTの研究では実際にチームとして物理学者たちと組んで研究を進めることが期待されている。

普通の科研費では年度末の報告書以外は特に現状を報告したりフィードバックを受けたりすることはないが、CRESTでは領域総括やアドバイザーを相手にした報告会、領域全体のメンバーを対象にした領域会議、一般向けの領域公開シンポジウムなどが次々あり、しょっちゅう研究内容を報告したり、それについてコメントを受けたりしている。そういうところに行くとほかの人たちは、Natureに論文を載せました、特許を取りました、プレスリリースを出して新聞に載りました、といった話をしており、私の分だけかなり毛色が違っていてこんなところにいていいのかと思うのだが、私もこれに混ぜてもらっているのはありがたいことである。なお私のほか、お茶の水女子大物理の出口哲生氏もこの領域の研究費をもらっており、同氏はかなり数学的な研究もしていて私は昔から知っているが、その他はかなり応用寄りの研究をしている方々である。

この領域会議では「新しい量子計算アルゴリズムを開発して見せるといった大目標はないのか」といった厳しいコメントも浴びたことがある。一般に物理の人の方が「そんなことを研究しても意味がない」といった厳しいことをいうことが多いように感じる。それでも研究総括やアドバイザーなどから「あなたはほかの人と違ってよいので、理論として価値のある研究を目指してください」といったありがたい励ましの言葉をいただいてこの研究が進んでいる。私は作用素環の数学的な研究も普通に続けているので、CRESTの研究はそれなりに大変なところであり、私の分担者たちのグループとの協同をもっと増やすようにというコメントも受けているが、物理学者との交流をさらに深めて進んでいきたいと考えているところである。