

科学の 峰々

101

取材日：2019年6月13日
東京科学機器協会会議室

東京大学名誉教授 独立行政法人 日本学術振興会 理事

いえ やすひろ

家 泰弘 先生に聞く

未来のエレクトロニクスの基礎 低次元電子系の量子輸送現象の研究

下

聞き手：南 明則 日本科学機器協会 広報副委員長

高橋 秀雄 ハ 高橋副委員長

外嶋 友哉 ハ 広報委員

岡田 康弘 ハ 事務局長

(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)

家 泰弘 先生のプロフィール



- 1974年 東京大学理学部物理学科 卒業
- 1979年 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程修了
- 1979年 東京大学物性研究所 助手
- 1981年 アメリカ マサチューセッツ工科大学 客員研究員
- 1982年 アメリカ ベル研究所 研究員
- 1983年 東京大学物性研究所 退職
- 1984年 アメリカ IBMワトソン研究所 客員研究員
- 1985年 東京大学物性研究所凝縮系物性部門 助教授
(1991年～1993年 文部省学術調査官)
- 1994年 東京大学物性研究所凝縮系物性部門 教授
- 1998年 (研究所の改組により)先端領域研究部門 教授
- 2004年 (部門名の変更により)ナノスケール物性研究部門 教授
- 2008年 東京大学物性研究所 所長
(文部科学省 科学技術・学術審議会臨時委員、専門委員)
(日本学術会議 連携会員／会員、第三部部長、副会長)
(日本物理学会 会長)
- 2015年 東京大学 退職
- 2015年 独立行政法人 日本学術振興会 理事

〈受賞〉

- 1993年 日本IBM科学賞
- 2007年 日本物理学会論文賞
- 2008年 千葉県知事表彰



产学官との連携

「量子力学」の分かりにくさ

先生が研究されてきた「量子」とはどういうものか、簡単に教えていただけますでしょうか。

家 量子の世界は日常的な感覚からかけ離れたものなので直感的にイメージしにくいところがあります。ノーベル物理学賞を受賞したリチャード・ファインマンは独自のやり方で量子力学を定式化した立役者ですが、そのファインマン自身が「量子力学を理解している人なんて誰もいない」という言葉を残しています。量子力学が腑に落ちるという人がいたらむしろ異常なので、よく分からなくとも全く大丈夫です（笑）。そうした前提で少しお話します。

量子論のはじまりは20世紀への変わり目の頃です。19世紀末には古典物理学体系が成熟の域に達しました。19世紀の大物理学者、ケルビン卿は1900年に行った有名な講演の中で、「物理学はほぼ完成の域に達したが、気になることが2つある」と述べました。その1つは“光はエーテルを伝わる波であると考えられるのに、エーテルの正体が不明で見つからない”こと。もう1つは“気体の熱運動に関わるエネルギー等分配則の破綻”です。前者は特殊相対性理論に、後者は量子論につながっていきます。

この頃ウェッジウッドに代表される製陶業や、製鉄業などで高温の炉の温度を測定することが重要な課題となり、「物体の温度が高いほど、そこから放射される光のスペクトルが短波長側にずれる」というこ

とが認識されました。黒体放射スペクトルと呼ばれるこのスペクトルの形状について、マックス・プランクという科学者が「光のエネルギーが連続的な値をでなく、振動数に応じたエネルギーの塊を単位とする飛び跳びの値をとるものと仮定すればスペクトルがうまく説明できる」ということを示しました。その“エネルギーの塊”的ことを“量子”と呼びます。

プランク自身はこの量子仮説を、スペクトルの関数形を説明するための便宜的なもの。ないしは概念的なものと考えていた節があるのですが、これがまさしく実体であることを示したのがAINシュタインです。金属に紫外線のような波長の短い光を照射すると電子が飛び出す「光電効果」という現象があります。光電効果では、波長の長い光をいくら強く照射しても電子は飛び出ません。AINシュタインは光が量子であるとするとこのふるまいが自然に説明できることを指摘しました。AINシュタインにノーベル賞が授けられたのは、相対性理論ではなくて、この光量子仮説に対してです。

光量子仮説は“通常は波と考えられている光が粒子のようにふるまう”ということを示しています。そうなると“通常は粒子だと思われている電子も波としてのふるまいを示すのではないか”という考え方方が出てきます。このような考え方方に立って、ニールス・ボアが原子の構造を見事に説明する模型を作り上げたことにより、「量子」という考え方方がゆるぎないものになりました。その後、ボア、シュレーディンガー、ハイゼンベルクといった物理学者たちによって量子

力学の体系が築かれていきました。

量子の世界では、“光は波であり粒子である。電子は粒子であり波である”とよく言われます。粒子とはつまり1個1個数えられるようなものです。そして波とは、重ね合わせると強め合ったり打ち消しあったりして干渉するようなものです。量子力学はミクロな世界のふるまいを記述する理論体系で、原子・分子の構造や、固体の中の電子のふるまい、光と物質の相互作用などを理解する基礎となるものです。

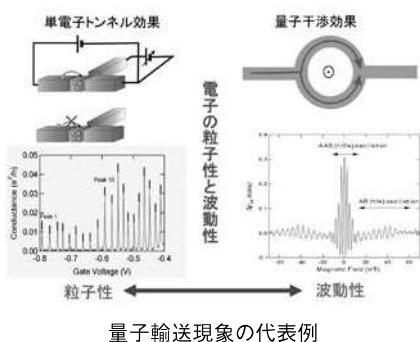
電子が“粒であり波である”というのは、なかなかイメージしにくいですね。

家 現実には、電子がある時には粒になって、ある時は波になって、というような変身が起きているではありません。我々が量子力学的現象を何とか日常語で表現しようとする時に、そういう言葉しか持ち合わせていないということに過ぎないです。

ちなみに電子が粒であり波であるということを可視化した実験として、日立基礎研究所の外村彰博士による「電子による二重スリットの実験」というのがあり、ネイチャー誌が「世界で最も美しい実験」と称賛しました。

固体中の電子でもこれと似たような「量子干渉」の実験を行うことができます。また、量子ドットという構造に電子を閉じ込めると、閉じ込められた電子を1個1個数えるような実験ができます。このように固体中の電気伝導に量子効果が顕著に現れるのが「量子輸送現象」です。

産学官との連携



量子力学は奇妙なことだらけ

家 電子のふるまいは量子力学の基本方程式で記述されますが、量子力学は電子の状態について完全な情報は与えません。量子力学的な状態に対してある測定を行うとある測定値が得られますが、量子力学が与えるのは「同じ状態に対して測定を繰り返した時の測定値の確率分布」であって、個々の測定における測定値を完全に予想することは出来ないのです。

量子力学のコペンハーゲン解釈と呼ばれるものでは、量子力学的状態は、ある測定を行ってある測定値が得られた瞬間にその測定値に対応する量子状態に「収縮」する、という言い方をします。つまり、量子力学的状態の変化は「基本方程式に従った時間発展」と、「測定による状態収縮」という2通りの異質な過程で起こる、というとても奇妙な描像になるのです。アインシュタインは、このような奇妙な世界像は量子力学が不完全な理論体系であることを示しているのだとして、量子力学を受け入れませんでした。

「状態の収縮」という受け入れがたい概念を回避しようとする考え方として「量子力学の多世界解釈」というものも提唱されていますが、これ

はこれで「測定のたびに異なる測定値に対応する世界に分岐して行く」という、まことに凄まじい奇妙さをもつ世界像です。このように、言葉で説明すると奇妙なことだらけになりますが、実際に量子力学を使って計算したものは実験にピッタリ合うので、この世界が量子力学に従っているということは疑いのないところです。

話題の「量子コンピューター」について教えていただけますか。

量子コンピューターは、量子力学特有の「重ね合わせ状態」を巧みに利用して情報処理を行うもので、ある種の問題に対して非常に効率の良い計算が行えると考えられています。しかし、万能ではなく、今の古典コンピューターに取って代わるといったものではありません。

量子コンピューターが威力を發揮する舞台の1つは素因数分解です。現在のインターネットにおける通信のセキュリティは、大きな数の素因数分解が非常に難しいことに依拠しています。量子コンピューターは、素因数分解を古典コンピューターに比べて桁違いに効率よく実行できると考えられています。量子コンピューターはまだ実用化されていませんが、知らないうちに誰かが開発してしまったとすると、セキュリティが破れてしまう可能性があるということで、安全保障の観点からも重要な問題とされているわけです。

量子コンピューターを実現するためには、量子力学特有の難しい課題をいくつもクリアしなければならないのですが、それらの一つ一つが

量子力学の根幹に深く関わっている点が物理として面白いところです。

物性研究所から学術振興会へ

現在理事を務めている日本学術振興会は、どのような活動をされているのでしょうか。

家 2015年10月から日本学術振興会の理事を務めることになり、東京大学を早期退職しました。日本学術振興会（JSPS）は、1932年（昭和7年）に昭和天皇からの御下賜金を元に設立されました。今は文部科学省の監督下の独立行政法人で、我が国の学術研究を支えるファンディング・エージェンシー（研究資金配分機関）です。

その名の通り、学術の振興のための活動が使命ですが、大きな柱が3つあります。1つ目が科学研究費の審査・交付・評価を行う「研究助成事業」。2つ目が大学院生やポスドクの特別研究員を採用して援助をする「人材育成事情」。3つ目が「国際交流事業」です。

例えばアメリカであればNSF（National Science Foundation）やNIH（National Institute of Health）、イギリスであればRoyal SocietyやUKRI（UK Research and Innovation）いうように各国の学術組織が私共と協力関係にあり、国境を越えた学問の発展のために交流を進めています。

日本学術振興会は世界の10か所に海外研究連絡センターを持っています。アメリカはワシントンとサンフランシスコ、ヨーロッパはロンドン・

産学官との連携

ポン・ストラスブル・ストックホルム、アジアは北京とバンコク、アフリカはカイロとナイロビです。実はこのうち最も歴史があるのはナイロビで、京都大学の研究者たちが中心となって文化人類学や靈長類研究を行う前線基地として設置されたものです。

分野を特定せず、自由な発想による学術研究を支援

研究者が獲得を目指す科研費を助成しているわけですが、助成の対象にルールはあるのでしょうか。

家 科学研究費（科研費）助成は基本的には大学や公的研究機関に属する研究者を対象にしていますが、民間の研究機関でも一定の条件を満たせば対象となります。毎年行われる公募に対して、10万件にも及ぶ研究計画の応募があります。提出された「研究計画調書」を審査して採択課題を決定し、助成金を配分するわけです。

科研費の審査は「ピア・レビュー（peer review）」といって、研究者の中から選ばれた審査員が審査にあたる、这种方式を採っています。1件ごとに数名の審査員を割り当てます。一人の審査員にあまりに多くの研究計画調書の審査を担当してもらうのでは負担が重くなり過ぎるの

で、10万件の応募を審査するのに7000人を超える審査員が必要になります。審査員は自らも科研費に応募するような現役の研究者たちです。つまり、科研費の審査は、応募書類に書かれた研究計画の学術的価値を、アクティブな研究者たちが評価することにより成り立っています。審査そのものに文科省や学術振興会が口を挿むことはありません。採択されるか否かは、「メリット・レビュー」といって研究計画の学術的価値の評価によるわけです。

このように科研費は研究者からの自発的研究提案に基いて、メリット・レビューにより採否を決めるので、特定の学問分野を重視するとか軽視するといったことはありません。どの分野にどれくらいの予算を配分をするかは、応募の状況に応じて決められます。これを「ボトムアップのファンディング」と表現します。他の資金配分機関では「トップダウン」といって、特定の研究分野や重点研究テーマを設定してファンディングを行うケースが少なくありませんが、学術振興会の科学研究費助成は人文科学・社会科学から自然科学までのあらゆる学問分野を対象としています。そのため、特に、いわゆる「役に立たない」研究を行っている研究者にとっては科研費が唯一の競争的研究資金であり、「命綱」

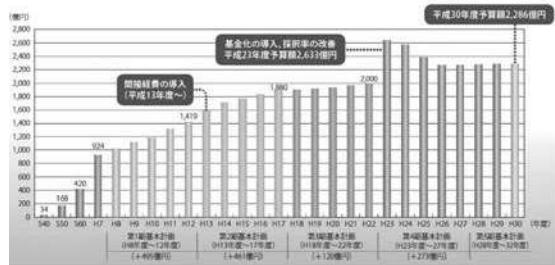
と表現されるものになっています。

科研費のあり方は様々な議論がありますが、直近での課題はありますか。

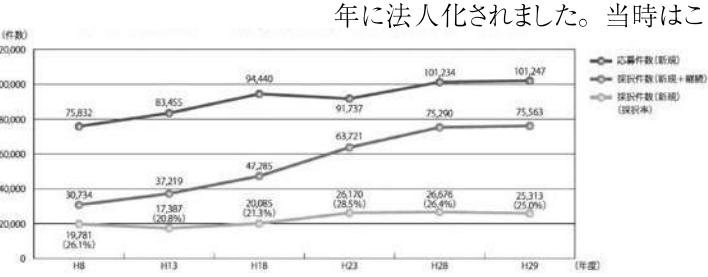
家 我々が力を入れているのが科研費の基金化です。これにより、研究費の使い方の自由度が高くなり、科研費がより有効に活用が出来るようになるのです。国からの補助金という形ですと、基本的に各年度ごとに締めを行わなければなりません。最近では簡単な手続きを行えば次年度への繰り越し出来るようになっていますが、そういう手続きさえもしなくて済むようになるのが基金化なのです。基金の助成金ならば年度毎に無理に使い切る必要がなくなるので、余ったら翌年に繰り越し、逆に予定より研究が進んだら次年度の分を前倒しで使うこともできるなど、研究の進捗に応じて柔軟に研究費を使用することができます。科研費の一部の種目では既にこうしたことが可能になりましたが、科研費全体の基金化をぜひとも進めたいと思っています。

科学研究および科学産業発展のために、どんなことが大切ですか。

家 改めて研究現場の実状をお話しますと、日本の国立大学は2004年に法人化されました。当時はこ



科学研究費：予算の推移「科研費 KAKENHI2018」
(文部科学省、日本学術振興会)



科学研究費：応募件数と採択件数の推移

産学官との連携

れで大学は自由度が増えるという名目だったのですが、それ以降大学への運営費交付金は毎年1%ずつ削減されました。それが15年続いたので研究現場は非常に疲弊しています。特に人件費に皺寄せが行なったため、定年延長と相俟って、若い人のポジションが少なくなるという深刻な状況を生みました。

科研費に関して言えば、1980～90年代には右肩上がりで毎年10%ほど予算が伸びた時代もありましたが、その後は伸び悩んでいます。現在は科研費の新規採択率は27%程度ですが、これを何とか33%程度にしたいというのが一つです。

しかし、私がより重要と考えるのは、国立大学法人化以降削減され続けた運営費交付金を回復させることです。大学など研究機関の運営に必要な基盤的経費が担保されてこそ、科研費などの競争的資金が活きます。現状は、基盤的経費の不足分を競争的資金で補おうすることに多くの研究者が労力を使うことになっています。最近、「日本の研究力が低下した」ということが盛んに言われています。私は決してそんなことはないと思っていますが、若い人たちが「研究する人生」に魅力を感じなくなるような状況が続ければ衰退につながると憂慮しています。

先ほどお話をしたように、科学研究費はあらゆる学問分野を助成対象としていますが、近年、「国民の税金を投資するのだから、投資効果を考えるべきだ」として、「出口を見据えた」研究テーマに集中投資すべきだとする論調もあります。そのようなファンディングもあって良いとは思

いますが、それ一色になっては国の品位が損なわれます。どう社会に役立つか、現時点では予測がつかないものの、未知の新しい現象を長期的に突き止めいく基礎研究は非常に大切です。これがとても行き難くなっています。

かつては、別に「こんな研究をする」と宣言することなしに萌芽的なアイデアを試してみることもある程度は可能でした。今はちょっとしたアイデアを試してみるにも、それに必要な研究資金は研究計画調書を書いて競争的資金を獲得しなければ始まりません。基盤的経費をきちんと担保することによって自由な発想を羽ばたかせるような研究環境を用意することが大事だと思っています。

家先生が、いま取り組んでおられる研究について教えていただけますか。

家 2015年に学術振興会に移ることになって、物性研の研究室は店舗舞いしました。学術振興会では、理事としての役割を果たすための勉強をしていますが、それとともに以前から興味をもっていた科学史や科学哲学の勉強を進めています。物理屋仲間には、「自分は文転（文科系に転身）したんだ」と言っています。

科学史の中でも、私が興味を持っているのは、近代科学よりもっと前の時代です。古代ギリシャ以前の科学から始まり、ルネッサンスから近代科学革命あたりのことを一通り学んでいます。特に、中世期におけるイスラム科学について文献を読み漁っています。それが一通り終わったら、中国をはじめとする東アジア

の科学史を調べようと思っています。

日本の江戸時代の科学も、調べてみると非常に興味深いものです。日本の科学としては和算が有名ですが、市井の武士や商人にも数学好きがたくさんいて、そういう人が数学の問題をつくってそれを神社などに掲げ、腕に覚えある人がそれを解いたら、今度はその人が新たな問題を作り出していくといった「算額」という競い合いがあったようです。連歌と同じような知的競技として楽しまれたようです。そういった日本の庶民の知的レベルの高さが、明治初期に欧米の先進技術を素早く取り込む下地となつたと思われます。科学史・科学哲学の勉強は老後の趣味として（笑）続けたいと思っています。

若い世代の研究者に伝えたいことはございますか。

家 私はいわゆる“実験屋”として物理の研究に携わってきましたが、駆け出しの頃は研究資金もあまりないこともあって、実験装置はとにかく手作りでした。旋盤や溶接は大好きで得意でもありました。自分の子供と同世代の大学院生が入ってくるようになると、怪我されても困ると思って、旋盤をやらせるのも躊躇しました。最近の実験室には、とてもよくできているが高価な実験装置が溢れています。それらがブラックボックス化していることに危惧を覚えます。測定プログラムも機器メーカーから提供されたものをそのまま使うことが普通になりました。

メーカーが作ったソフトウェアを使

産学官との連携



科学研究費は、あらゆる分野の学術研究を対象とする競争的研究資金で、ピア・レビューによる審査によって採否が決定されます。

うと、効率良く測定データが得られますが、それらのデータをはじき出したハードウェアやソフトウェアの中身を理解しないまま、結果のデータを鵜呑みにしてしまう学生達が増えていることに危惧を覚えています。いまさら手作りの時代に戻れとは言いませんが、ブラックボックスの中身には関心を持ち続けてもらいたいと思います。

また最近、日本の若い研究者が海外に出ることを躊躇する傾向が顕著になっています。これは一面では、それだけ日本の研究環境が良くなったことの反映なのですが、若いうちに研究における異文化体験の機会を持つことはとても重要なことです。原因は様々にあると思いますが、一つには海外に行くことによって日本とのつながりが薄れてしまうことを心配しているように思います。そうしたことを考慮し、日本学術振興会としても、若い研究者の海外経験を後押しするようなプログラムを実施しています。

研究者として生きていく中で、海外などで落ち着いて研究に没頭する時間は非常に大切だと思います。私がアメリカに行った80年代初めは、もちろんまだインターネットもなく、国際電話をするのも大変高額でしたので日本とは手紙やせいぜいテレックスでやり取りをするしかありません

でした。今はインターネットやメールで多くの情報が入りすぎるために却って浮足立ってしまい、落ち着いて研究できないような状況があるように思います。情報に流されずに腰を据えて研究に向き合うことは大切だと思います。

小中高生への理科教育について、どのように思われますか。

家 中学生くらいまでは男女を問わず理科好きの子供は多いのです。しかし高校2年くらいで受験を意識するようになると文系か理系かを選ばされてしまうところがあり、理科離れが起きてしまいます。こうした文系、理系の区分をつけてしまう傾向はどこかで見直しが必要だと思います。

東大物性研が柏に移転してから、私は夏休み科学教室や小学校での出前授業などを行ってきました。その際には、実は付添いで来られるお母さんたちもターゲットとしていました。お母さんが「科学って面白い」と思ってくれれば、子供には自然と伝わります。

2022年に、世界のトップクラスの高校生たちの科学コンテストである「国際物理オリンピック」を日本で開催することになっています。組織委員長はノーベル物理学賞の小林誠先生で、私が実行委員長を務

めることになっています。

国際物理オリンピックは1967年にポーランドで開催されて以来ほぼ毎年開催され、徐々に世界に広がっていました。日本は2006年の第36回大会から毎年参加しています。各国から最大5名の高校生の代表選手が参加し、理論問題と実験問題に挑戦してメダルを競います。金メダルは成績上位8%程度の選手たちに贈られます。日本の代表選手も好成績を収めていますが、中国、韓国、ロシア、シンガポールなどは代表選手5人全員が金メダルを獲得するような気合の入れようです。

日本代表は毎年約2000人の応募者から、国内予選（全国物理コンテスト「物理チャレンジ」）のプロセスを経て選出されます。

国際物理オリンピック2022日本大会を成功させたいと願っていますが、目下の最大の課題は資金集めです。

この紙面をお借りして恐縮ですが、この記事を読まれている企業・団体の皆様にも日本の科学の未来を担う高度人材を応援するイベントへのご支援をお願いいたく思います。

皆様からの寄付やご支援の方法については「国際物理オリンピック2022日本大会」のウェブページ iphoto2022.jp をご覧ください。次代の日本の科学の発展のために、家先生のますますのご活躍を期待しております。

次号「科学の萌芽」は、
琉球大学 理学部 海洋自然科学科
池田 譲先生にお話を伺います。