

研究会・学会スケジュール

第7回アジア太平洋輸送ワーキンググループ会合

7th Asia Pacific Transport Working Group Meeting
 開催日：2017年6月5日(月)～8日(木)
 開催場所：名古屋大学
 主催：APTWG組織委員会
 問い合わせ：渡邊智彦 理学研究科 教授
 watanabe.tomohiko@nagoya-u.jp/052-789-3934

第33回化学反応討論会

33rd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics
 開催日：2017年6月7日(水)～9日(金)
 開催場所：名古屋大学 野依記念学術交流館
 主催：第33回化学反応討論会実行委員会
 問い合わせ：菱川明栄 物質科学国際研究センター 教授
 hishi@chem.nagoya-u.ac.jp/052-789-2494

SMCタンパク質：分子から疾患まで

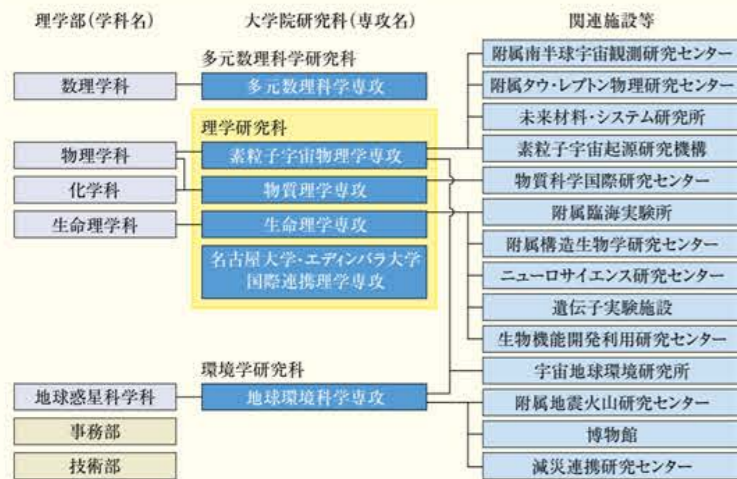
SMC proteins: from molecules to diseases
 開催日：2017年6月13日(火)～16日(金)
 開催場所：山形県南陽市・南陽市文化会館
 主催：新学術領域研究「染色体 OS」
 問い合わせ：西山朋子 理学研究科 准教授
 nishiyama@bio.nagoya-u.ac.jp/052-789-2599

「星間水素」国際ワークショップⅢ

International workshop on interstellar hydrogen Ⅲ
 開催日：2017年9月19日(火)～21日(木)
 開催場所：名古屋市
 主催：名古屋大学大学院理学研究科附属南半球宇宙観測センター
 日本学術振興会科学研究費特別推進研究
 「星間水素の精密定量による新たな星間物質像の構築」
 立原研悟 理学研究科 准教授
 k.tachihara@a.phys.nagoya-u.ac.jp/052-789-2837

組織図

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究所(地球環境科学専攻)



理 philosophia

オリジナルバインダをご用意しました

12冊綴じ・透明樹脂製 1部 790円(送料/消費税込み)

「理」philosophiaをびったり綴じ込むことができるオリジナルバインダをご用意しました。ご希望の方は郵便局備え付けの郵便振替用紙にてお申し込みください。なお、お申し込みから配達まで3週間程度かかりますのでご了承ください。

編集だより

私たちは普段から流れの中にいる。空気を吸い、水を飲み、体の中では血液が流れている。今回の特集のキーワードは「流れ」である。流れにくい極限のガラスと、どこまでも流れる超流動について、物性物理学のお二方から紹介していただいた。さて、この普段よく目にする流れだが、中では小さな原子が押し合いへし合い動いている。実のところ、原子1個の性質はほぼ解明されている。ところが、いっぱい集まると突如として不思議な現象が現れる。そこが物性物理学の面白さであり、ものの多様性の起源でもある。これは多くの世界で共通かもしれない。人も、ひとりではできることは限られるが、皆で協力すればきっといろいろなことができるだろう。本号では、時を語るものではランダムにおける解析の道を開いた飛田博士、理の先端を行くでは素粒子と宇宙における最先端研究について寄稿いただいた。本誌を通じて科学の面白さを感じていただけたなら、広報委員としてこれに勝る喜びはない。(山川洋一)

表紙説明

自然界において水の流れは川となり、空気の流れは風となる。私たちの暮らしでも身近なはずの「流れる、流れない」という現象も現代物理学においては、いまだ解明されえない謎がある。



理 philosophia — No.32
 spring - summer 2017
 2017年4月20日発行

広報委員 杉山 直(研究科長)
 阿波賀邦夫(副研究科長・評議員)
 大隅圭太(副研究科長)
 中島 誠(数理学科)
 福井康雄(物理学科)※委員長
 戸本 誠(物理学科)
 山川洋一(物理学科)
 荘司長三(化学科)
 杉山 伸(生命理学科)
 平子善章(生命理学科)
 林 誠司(地球惑星科学科)
 齋藤勝行(事務長)

編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
 〒464-8602 名古屋市千種区不老町

ご意見、ご感想をお待ちしています。
 本誌の原稿執筆や取材などにご協力いただける方を求めています。
 広報委員会までご連絡ください。
 なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。
 次号は2017年10月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通
 編集協力 株式会社コミネ
 デザイン 株式会社ティ・エム・シー

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。 ISSN 1884-8486

TEL 052-789-2394 FAX 052-789-2800 E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp URL http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/

理

名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報誌
 [理フィロソフィア]
 spring - summer 2017

32

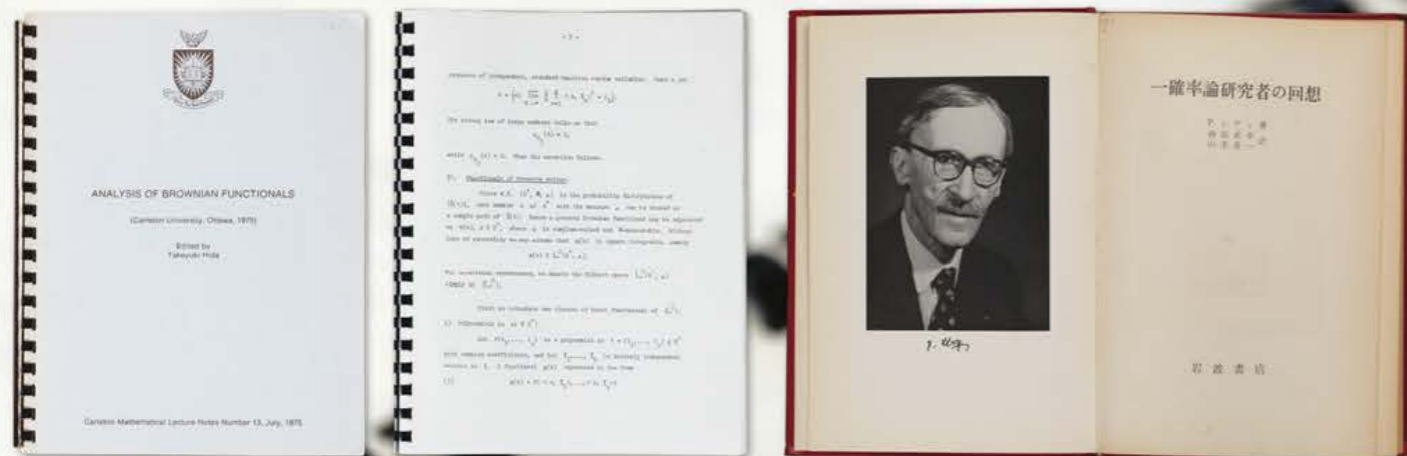
philosophia

特集
 「流れる物理、流れない物理」
 04 ガラスの理論物理学 ◆宮崎州正
 08 超流動の世界を探る ◆和田信雄
 02 時を語るもの(飛田武幸博士) ◆久保 泉
 03 理のエッセイ ◆伊藤由佳理
 12 理の先端をいく ◆居波賢二 / 佐野栄俊 / 日高 洋
 18 理学部交差点

飛田武幸博士 — ホワイトノイズ解析の創始者

刻々と不規則に変化する現象を表す量 $X(t, \omega)$ を確率過程と呼んでいる。ここで t は時間、 ω はランダム性のパラメーターである。これを解析するために時間 t に関する微積分が重要な役割を果たすが、残念なことに一般にその微分 $\frac{d}{dt}X(t, \omega)$ は存在せず、関数であることを諦め、 t に関する超関数と解釈されていた。しかし、それでは時間 t ごとの状態は不明確になってしまう。飛田博士は微分 $\frac{d}{dt}X(t, \omega)$ が t ごとに ω に関する超関数であるという逆転の発想に至った。それにより

解析の自由度が増し、種々の分野で用いられるようになった。理論構築の基礎となるブラウン運動の微分がホワイトノイズとよばれることから、博士は「ホワイトノイズ解析」と名付けたが、我々まわりのものが「飛田解析」とよびその名称が定着した。根底にはポール・レヴィ*1教授の業績に対する博士の深い洞察がある。かつて自宅を訪れ撮影したレヴィ教授の8mm映像を大切にされている様子に、その傾倒ぶりが推し量られる。(久保 泉 広島大学名誉教授)



飛田武幸 (1927-)
名古屋大学名誉教授
第33回中日文化賞受賞(1980)

*1 P.レヴィ (1886-1971)
フランスの数学者。専門は確率論。

◇写真の説明
左は飛田博士の代表的な研究についてまとめた初めての著書「ANALYSIS OF BROWNIAN FUNCTIONALS」。誌面のバックも同書。右はレヴィのエッセイを飛田博士が共著によって翻訳した「一確率論研究者の回想」。人物写真はレヴィ。下は名古屋大学を退官される際の最終講義での飛田博士 (1991年3月)。



数学の楽しみ方

伊藤由佳理 多元数理科学専攻准教授



Illustration: Mari Kaneko

数学は、自分の頭で自由に考えられるところがいい。初等幾何で補助線を引いた瞬間に解決するような快感も楽しいが、1つの事実をいろいろな方法で証明できるのも面白い。数学は無限の自由を与えてくれる学問だ。

ところが、学部1年生に「演習問題の詳しい解答がほしい」とよくいわれる。「高校数学は暗記科目だった」と理学部1年生の口から聞いたときはショックだった。高校でよく使われる問題集は昔と変わらず、例題の詳しい解答と演習問題というスタイルだが、最近は演習問題にも詳しい解答が別冊としてついている。模範解答が手元にあるだけで安心するのもかもしれないが、私は詳しい解答を配らない。その代わりに「自分で考えて、どんどん質問して」というと、友人たちと議論するようになり、講義後に質問に来る学生も増える。

私自身は学生時代、同級生と理学部自主ゼミ合宿に参加してから、先輩や後輩といっしょに自主ゼミで数学や物理の本を読み、議論するようになった。自分で考えるのも楽しかったし、他の人の異なる考え方を知るのも面白かった。今でも理学部自主ゼミ合宿は続いているが、それを皆に勧めるつもりはない。ただ、インターネットでさまざまな情報が飛び交う今だからこそ、学生には自分でじっくりと考える習慣を身につけてほしい。

私は講義で、定義の意味や原理を伝え、定理の主張がいくつかの方法で得られる例も示し、数学は決して暗記科目でないことを強調する。また「線形代数数学が応用されている例を見つけよ」というレポートも課す。物理学や経済学をはじめ、宅配便の配送やインターネット検索にも行列計算が使われているなど、学生たちはいろんな例を見つけてくる。線形代数数学を学ぶだけで、数学は自由に考えられる学問であり、応用面でも無限の可能性をもつことが実感できる。ただ、その基礎となる「行列」が、文系理系を問わず、高校数学からまったく姿を消してしまったことは非常に残念であり、復活することを願っている。

Yukari Ito

名古屋大学理学部数学科卒。東京大学大学院数理科学研究科修士課程・博士課程修了。日本学術振興会研究員、都立大学理学部助手を経て、2003年より名古屋大学大学院多元数理科学研究科講師、2007年より同准教授。専門は数学。「研究するって面白い!」(岩波ジュニア新書)を編著。

原子や分子は物理法則に従って運動する。
ところが、これらが集まることで個々の性質からは予想もできない不思議が現れる。
日常的に使われる「流れる」「流れない」という現象も、
原子や分子が集まることで通常の物理法則では解決できない謎に満ちた世界になる。
「流れる」と「流れない」の極限状態はどうなっているのか、
物性物理の最先端をのぞいてみる。

ガラスの理論物理学

宮崎州正 物質物理学専攻教授



Kunimasa Miyazaki

1967年生まれ。1995年東京工業大学理学研究科博士課程修了。通産省物質工学工業技術研究所（現国立研究開発法人産業技術総合研究所）、分子化学研究所、デルフト工科大学、ハーバード大学、コロンビア大学で博士研究員。2006年高知工科大学准教授、2008年筑波大学准教授を経て、2013年より現職。専門は非平衡物理学の理論的研究。

ガラスとは何か

「固体は分子が規則正しく並んでいるから流れない。しかし液体は分子がランダムに並んでいるから自由に流れる」。

こんな文章が、高校の理科の教科書に書いてあっても不思議に思う者はいないだろう。この文章は正しいだろうか。それとも間違っているだろうか。今日、この疑問に対する答えを知っている人間はいない。私も知らない。この素朴な疑問こそ、現代物理学の最大の未解決問題の1つ、「ガラス問題」のエッセンスである。私はガラスの理論研究を行っている。この記事の目的は、ガラス問題を中心に、身近な現象の中に科学の未解決問題が隠れていることを実感してもらうことだ。

そもそもガラスとは何だろう。みなさんがまず思い浮かべるのは、窓や食器に使われる透明なガラスだろう。これらはシリケート（ケイ酸塩）を主材料とするガラスの代表格だ。それだけではない。科学的にいうと、ガラスとは「分子や原子などの配置がランダムなまま凍結した物質」のことである。アモルファスとよぶこともある。構成要素が分子である必要はなく、コロイド（微粒子）や高分子のような比較的大きなものであっても、全体が「ランダム」で「流れない」ならガラスとよぶ。こう定義すると、我々の身のまわりはガラスだらけであることに気がつくだろう。ほとんどのプラスチック製品は高分子ガラスだ。歯磨き粉や化粧品、ヨーグルトやマヨネーズなどの食品の多くも、100nm（1mmの10000分の1）程度の大きさのコロイドを

構成要素とするガラスだ。これらは硬くないので「柔らかいガラス」とよばれている。砂山やボトルに入った菓の錠剤も「ランダム」で「流れない」から広い意味でガラスといえるだろう。

さて、中学の理科では、すべての物質は、気体、液体、固体のいずれかに属することを学ぶ。これを物質の三態とよぶ。気体は、密度が小さくて分子が自由に飛びまわっている状態、液体は分子の配置はランダムだが密度は大きい状態である。そして固体は、密度が高く分子が規則正しく並んだ状態だ。結晶ともいう。では、ガラスはこの三態のどれに属するのだろうか。分子が「ランダム」に並んでいるから液体だろうか。それとも「流れない」から固体だろうか。ガラスが本当に流れないなら、最初に書いた「固体は分子が規則正しく並んでいるから流れない」という文章は間違いにならないか。これらの疑問に答えるために、まずガラスのつくり方から話を始めよう。

ガラス工房に行ったことがある人はご存じのように、普通ガラスは、液体を冷やしてつくる。本来ならば、液体の温度を下げると、融点に達したところで結晶化するはずだ。図1に示すように、結晶化と同時に体積は突然減少する（水だけは例外で、凍ると体積が増える）。この結晶化は、相転移とよばれる現象だが、そのからくりは大体のところはよくわかっている。むしろ不思議なのは、融点で結晶になりそこなった液体だ。これは専門用語で過冷却液体とよばれる。過冷却液体の温度をさらに下げると、粘り気（粘性）が増えてきて、

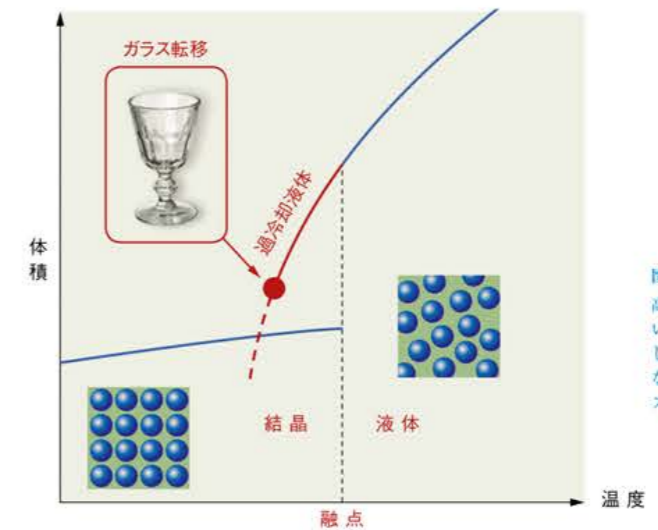


図1 液体の温度と体積の関係
高温の液体から、徐々に温度を下げていくと融点で結晶化する（青線）。しかし、結晶化に失敗すると過冷却液体となり（赤線）、さらに低温でやがてガラス化する（赤い丸）。

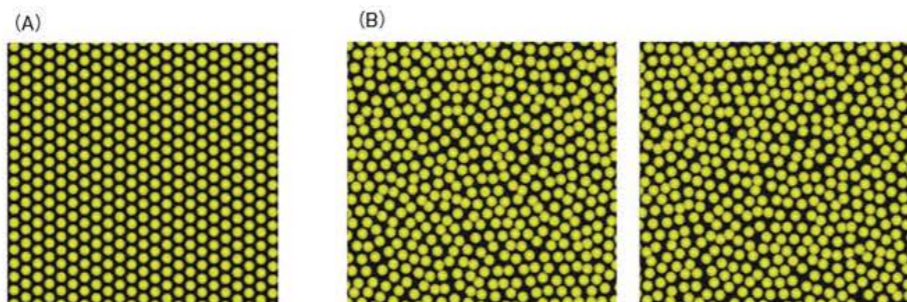
さらさらだった液体がドロドロになる。粘性が大きくなると分子運動も遅くなるから、液体はますます結晶化しにくくなる。この悪循環のため、分子はやがてランダムなまま動けなくなってしまう。こうしてできた状態がガラスで、この変化を「ガラス転移」とよぶ。「冷やせば固まる」といってしまえば、それだけの話で、何の変哲もない現象だ。しかし考えれば考えるほど、我々は何ひとつこの現象を理解していないことに気がつく。そもそも、「流れない」とは正確には何を意味しているのか。結晶は流れない。これはわかる。結晶においては、秩序正しく並んでいる分子を「流す」ために、全体に大きな力をかけて、すべての分子をいっぺんに動かさなくてはいけないからだ。逆にいえば、分子の並び方がランダムなら流れるはずだ。でもガラスをいくら長い時間眺めていても、とても流れるようには見えない。この疑問に対する答えとして、2つの可能性が考えられる。

1つは、我々がガラスとよんでいる物質は、粘性が極端に大きい液体にすぎないという答えだ。夏の間はとろりとした液体だったハチミツは、冬の寒い日は凍ったようになる。しかし何時間も待てばゆっくり流れ

る。窓ガラスやコップだって放っておいたら、いつかは（仮に100万年かかるとしても）流れるかもしれない。

そして、もう1つの答えが、ガラス転移という新しい相転移がおきている、だ。液体でも固体でもない、ガラス状態が存在するのだ。これが本当なら、これからの理科の教科書は「物質にはガラスを含めた四態がある」と書き直されるはずだ。我々はいまだどちらの答えが正しいか知らない。そこで、もう一度図1を見てほしい。液体が結晶化に失敗すると、線は融点を通り越してしまう。この線をそのまま延長していくと、ある温度で結晶の線と交差してしまおうだが、そんなことは決して起こらない。分子がランダムに並んでいる状態が、規則正しく並んでいる状態よりも、体積が小さいわけがないではないか。もしそんなことが本当に起こるなら、あなたの両親は、整理の行き届いたあなたの机の上を見て「そんなに整理したら勉強する場所がないじゃないの。ちゃんと散らかしなさい」と叱るだろう。かくして、我々はこの液体の線は、交差する前に行き止まるに違いないと信じているのだ。そして、この行き止まりの点こそ、ガラス転移点に違いないと信じているのだ。

図2 結晶・液体・ガラスの分子配置の模式図
簡単のために分子は球で表している。(A) 結晶の分子の配置。分子が秩序正しく並んでいることは明らかである。(B) 液体とガラスの分子の配置。左右のどちらがガラスの配置でどちらが液体の配置であるか、一見してもわからない。



ガラス転移から見えるもの

ところで、なぜガラス転移はおもしろいのだろう。ガラスは結晶化に失敗した状態である。そんな「できそこない」の物質に、なぜ我々はそんなに情熱を注ぐのだろう。第一の理由は、ガラス転移の存在が我々の秩序の概念を覆してしまう点にある。ガラス転移が存在することは、転移点を境になんらかの秩序が生まれることを意味している。しかしどんな秩序だろう。結晶化の場合は簡単だ。図2 (A) は結晶の様子を表したもののだが、規則性すなわち秩序が見える。一方、図2 (B) は液体とガラスを並べたものだが、どちらが液体でどちらがガラスかみなさんはわかるだろうか。私にはわからない。ガラスと液体は違うはずなのに、我々はその違いを見つけられないのは、我々の目が節穴だからだろうか。本当は「ランダム秩序」ともいう

べき、形容矛盾のような規則性がガラスには潜んでいるのではないだろうか。現代の人類の眼をすり抜けている秩序がまだ世の中に存在するなんて、それだけで十分面白いではないか。ここで、ちょっとだけガラス転移が存在する傍証となる研究を1つ紹介しよう。図3を見てほしい。これは私たちが最近行ったコンピューターを使ったガラスのシミュレーションだ。ビー玉のような球を箱の中にデタラメに放り込んでいく(図3 (A))。重力があるから球は箱の中に山積みになる。これもランダムで動けない状態だから、ガラスの一種だ。途中で変な配置に引っかかることもあるので、ときどきガサガサと箱を振ることにする。面白いことに、このようにして得られた密度(正確には、球が空間を占めているかを表す体積率)は、何度やっても64%となる。ちなみに、密度

が最大となるのは、スーパーの果物売り場のリンゴの山のよう規則正しく積み上げた場合であり、このときは74%となる。化学の教科書にでてくる六方細密充填がそれだ。さて、この箱に放り込む球の数を増やしていくと面白いことが起こる。球の密度が箱に対して1%から50%くらいまでだと、最後に得られる密度はいつでも64%程度だが、51%を超えると、最後の密度が64%よりも大きくなるのだ(図3 (B))。皆さんはこの結果をみて、きっとランダムな配置の中に偶然結晶の塊が紛れ込んだのだらうと思うかもしれない。私もそう思った。ところが、結晶の痕跡はどこにも見当たらず、どこをみても完璧にランダムだったのだ。64%よりも密度が高いランダムな状態があることは、我々が見逃している「ランダム秩序」が現れ始めた証拠に違いない。この結果は、最新の理論(ラン

ダム一次転移理論という)の予想とも一致していて、ガラス転移の存在を強く示唆する結果なのだ。この研究のように、デタラメの中に秩序を探る冒険は今ものすごい勢いで進んでいる。

生き物はガラスである

ガラス転移の問題が面白い第二の理由は、その問題の幅の広さだろう。材料工学から情報科学、生物に至るまで、科学のほとんどあらゆる場面にガラス問題は登場する。ガラスは数千年の昔から常に技術の粋を集めた高機能材料であった。スマートフォンのディスプレイや金属ガラスなど次世代の高強度材料はその一例だ。先日、テレビの科学番組で見たのだが、柔らかいガラスの典型であるカスタードクリームは、防弾チョッキとして使えるという。図4を見よ。どろりとしたクリームに強い力が働くと、その瞬間に硬化が起こって固体のようになるのだという。これは、シア・シックニングとよばれる現象で現在最もホットな物理のテーマだ。また、生きた細胞もガラス的なふるまいをするらしい。細胞は時と場合に応じて、液体としての粘性と、固体としての弾性の2つの性質を示すが、その様子はガラスによく似ているのだ。さらに、細胞集団の運動の様子は、ガラス転移点近くの液体のふるまいとそっくりだという研究もある。「ガラスの心」や「硝子の少年」など、歌や文学の世界では、美しく脆い人間の心のメタファー(喩え)としてガラスは登場するが、生き物は本当にガラスそのものなのかもしれない。

身近にある壮大な謎

数学や情報科学においても、ガラス転移と共通した問題が数多く登場する。たとえば、電気や通信の巨大なネットワークは災害やハッキングなどで、突然の大停電やシャットダウンに見舞われることがあるが、これは数学で複雑ネットワークとかパーコレーションの問題などとよばれている。ランダムなネットワークが突然崩壊する様子は、ガラス転移と似ていることがあり、盛んに研究が行われている。また、世の中には、多くの制約のもとでできるだけ多くの人を幸せにしたい、という問題に満ちあふれている。幼稚園児が仲良しどうして座れるような遠足バスの座席表をつくりたい、とか警察署ができるだけコストを抑えつつ交通事故を減らしたい、などの問題がそれである。これらを充足問題というが、条件の数がある値を超えるとたちまち答えを見つけるのにかかる時間が発散する。制約条件の数

を温度に、解を見つける時間を粘性に置き換えると、ガラス転移にそっくりの問題になるのだ。ガラス転移の本質はランダムさとフラストレーションである。この2つのキーワードは我々の生活に満ちあふれている。我々は毎日のように「あちらが立てばこちらが立たない」といった問題に日々頭を悩ませている。人生はガラスそのものなのだ。理論物理学といえ、素粒子や宇宙の壮大な研究を思い浮かべる人が多いだろう。私たちが普段目にしていない身近な現象はもうすっかり理解されていて、物理学者に残された冒険は究極のマイクロやマクロの世界にしかないと思っている人もいるかもしれない。それは間違いで、身近な現象にも最新の物理学の難問はたくさん隠れているのだ。皆さんも新しい視点で身のまわりを眺めなおせば、数えきれないほどわからないことで満ちあふれていることに気がつくだろう。

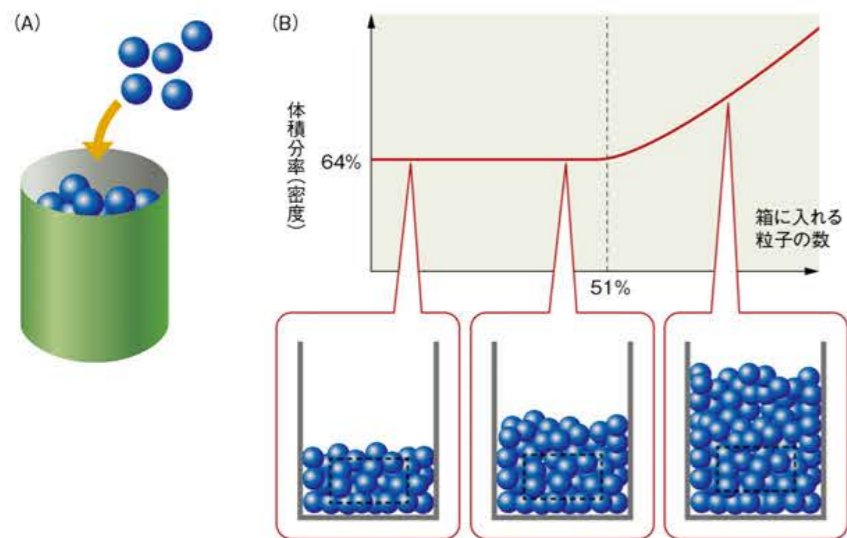


図3 コンピューターを使ったガラスの実験
(A) 大きな箱の中にビー玉のような球を放り込んでいくと、球はランダムな配置のまま積み上がっていく。(B) 最初に箱に放り込んだ球の数(正確には、箱に対する体積比で表した密度)と、箱を揺らした後に最終的に得られるランダムな球の密度(箱の中の破線の四角の中の密度)の関係。最初に放り込む球の数が多くなければ、何度やっても最終的な密度は64%程度なのに、放り込む球の数を増やしていくと、ある値(ここでは50%くらい)を境に突然、球の密度が64%以上になる。

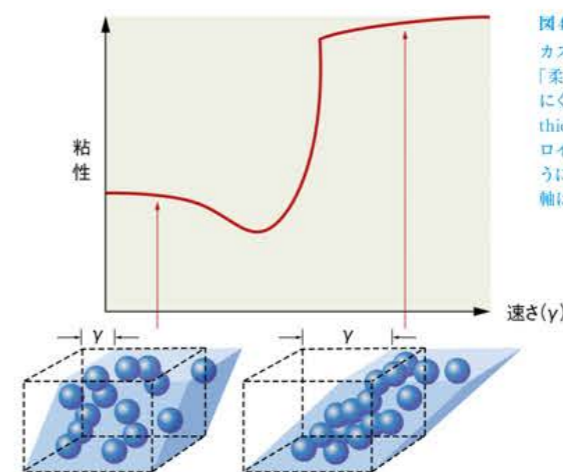
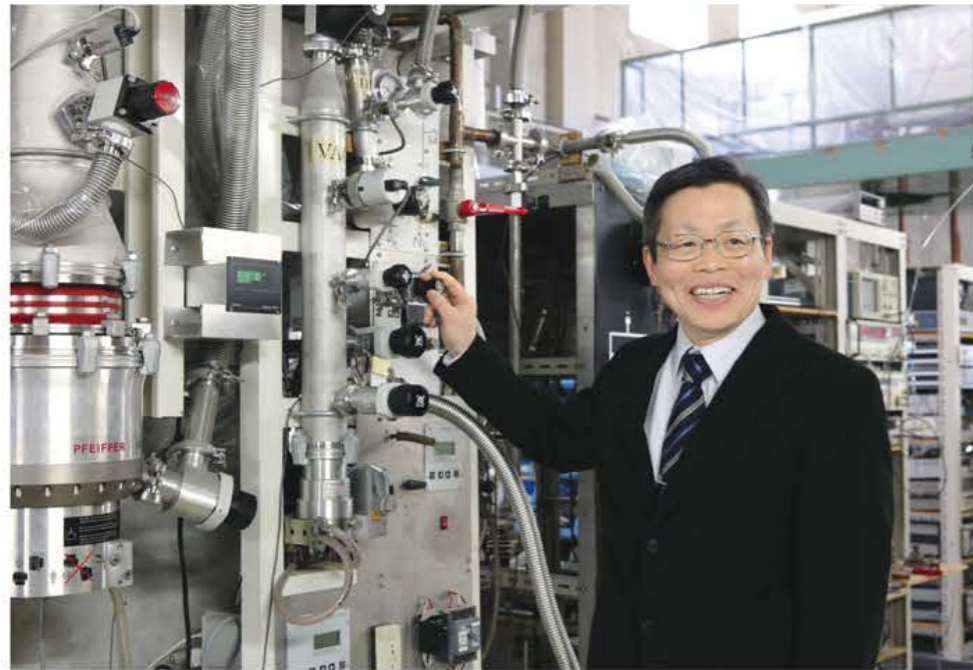


図4 防弾チョッキのつくり方
カスタードクリームやペーストなどの、多くの「柔らかいガラス」は、早く動かすと一瞬流れにくくなる。これは、シア・シックニング(shear thickening)とよばれる現象だ。原材料となるコロイドなどの微粒子(図の青い球)がガラスのように硬くなるために起こる現象である。図の横軸は流れの速さを、縦軸は粘性を表している。

超流動の世界を探る

和田信雄 物質理学専攻教授



Nobuo Wada

1953年兵庫県生まれ。1975年広島大学理学部卒業、1977年大阪大学基礎工学研究科物理系専攻前期課程修了、1980年同大学院後期課程修了。工学博士。日本学術振興会奨励研究員を経て、1981年北海道大学理学部助手、1989年東京大学教養学部助教授、1995年同大学大学院総合文化研究科広域科学専攻基礎科学系助教授、2001年より現職。専門は低温物理学。ナノ多孔体中のヘリウム量子液体や量子磁性体等の超低温物性を研究している。

固体の中の液体・気体

よく知られているように、すべての物質は周期表にある元素からつくられている(図1)。これらの物質を研究する物性物理学は固体物理学(solid state physics)ともよばれているが、それは研究する物質の多くが固体だからである。一見、固体と「流れ」とはまったく関係がないと思ってしまうが、物性物理学によれば固体の中にいくつもの液体・気体が存在し、それらの「流れ」が主要な研究テーマの1つである。たとえば、金属で電気を流す性質は-

の電荷をもつ電子が液体(気体)の状態であり、金属や半導体の研究は電子の流れの学問ともいえる。これらの電子の液体について探求され、今日ではシリコンなどの半導体で電子の「流れ」を任意にデザインすることができるようになった。そして半導体を用いた電気製品やコンピューターにより、今日の我々の生活に革命が起きている。

もう少し、電子の流れについて考えてみよう。我々は体験的に、気体は温度を下げ

ると液体になり、さらに温度を下げると固体になると理解している。しかしながらこの常識とはまったく異なり、金属や半導体の中にある電子の液体は絶対ゼロ度に至る超低温まで液体であり、固体の中を流れることができる。このいわば固体の中の液体を制御することで、我々の身のまわりのすべての電化製品は動いている。たとえば、n型半導体とp型半導体を接合することで、電子の滝をつくることができる。そして、滝を落ちる際のエネルギーは光に変

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																2
2	3	4															10
3	11	12															18
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	36
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	54
6	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
7	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103

図1 周期表
物質の性質が近いものを並べたのが周期表である。周期表の右端は希ガスとよばれるグループで、原子間の結合が弱い。中でもヘリウムは、常圧で絶対零度まで凍らない唯一の物質である。

換されて放出される(図2)。名古屋大学の天野浩先生、赤崎勇先生が開発した青色ダイオードは、まさにこの固体の中で電子の滝をつくったことであり、この功績により2014年にノーベル物理学賞を受賞した。

超低温の液体とその超流動・超伝導

次に、周期表にある物質の液体について考えてみよう。我々に最もなじみの深い液体は水(H₂O)である。H₂Oは良く知られているように、摂氏100℃以上では気体の水蒸気、100℃から0℃では液体のいわゆる水であり、0℃以下で固体の氷になる。このように、物質の状態が変化することを相転移とよぶ。そして、液体は低温で相転移して凍る、というのが我々の常識である。ところが、この常識に反して絶対零度まで凍らない物質がただ1つだけ存在する。それがヘリウム(⁴He)である。周期表の右端

は希ガスとよばれるグループで、物質間で結合する力が弱く、ヘリウムが最も弱い。そのため、まずヘリウムを気体から液体に相転移されるのに4.2K(絶対零度から測って4.2度 = 摂氏-269℃)という極低温が必要であり、さらに冷却しても固体にはならないのである。ヘリウムの液体のふるまいは、我々の常識では理解できず、量子力学を考えねばならない。その液体状態は、固体中の電子液体をもとめて、量子液体とよばれている。

低温で凍らないとなると、もっと冷やしてみたい。液体ヘリウムをさらに冷やしても凍らず流れ続ける。それどころか、T_c = 2.2K(=-271℃)以下では突如として、粘性がゼロという異常な状態へと相転移してしまう。粘性がゼロとは、他の粒子との衝突がないと言い換えても良い。即ち、液体の流れやすさの極限ともいえる状態

であり、超流動状態とよばれている。液体ヘリウムの密度は高く、ぎゅうぎゅうに詰まっている状態である。それにもかかわらず、ヘリウム原子同士が衝突によるエネルギーの損なしに流れる。満員電車を想像してみたい。すし詰めになった人々が、誰も衝突せずに滑らかに動ける世界、それが超流動の世界である。粘性がゼロの超流動ヘリウムの流れは、ミクロな世界の理論と言うべき量子力学に従う運動が、図3のように目で見るスケールで生じる稀有な例である。たとえば、原子が1個でも通れる隙間(~1nm)があれば通り抜けることができるため、チョークのようなもので栓をしてもむだである。また、コップに入れても、壁面をよじ登って外に流れ出てしまう。また超流動ヘリウムをドーナツ状の容器に入れて流してやると、減衰することなく流れ続ける永久流が実現する。

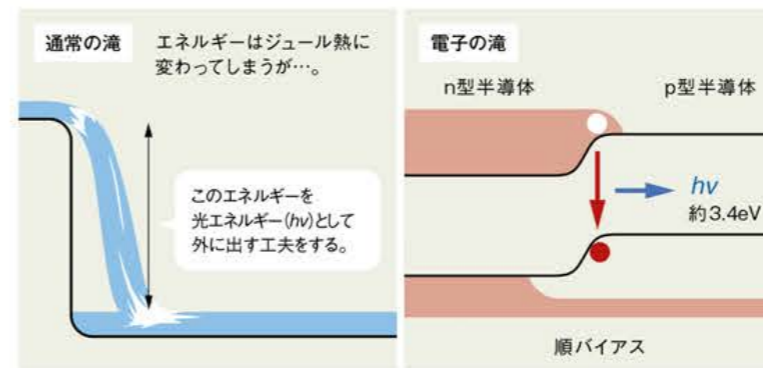


図2 通常の滝と電子の滝
通常の滝は、高い所から低い所に落ちるとき、熱エネルギーや音などにエネルギーが変換される。一方、p型半導体とn型半導体を接合すると、電子のエネルギー差、すなわち電子の滝をつくることができる。電子はこの滝を流れ落ちる際に、エネルギー差を光に変換して放出する。この原理を応用したのが、発光ダイオードである。

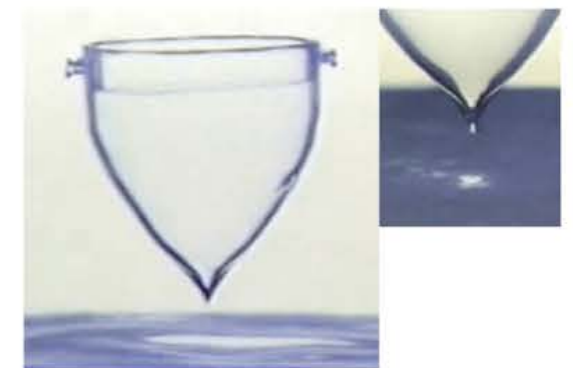


図3 実空間で見た超流動状態のヘリウム
容器に入れられた超流動状態のヘリウムは、見た目はただの透明な液体である。しかしよく見ると、容器の壁面を伝って勝手にこぼれ出て、下の水面に波紋をつくっている。このとき、容器の表面は、通常の液体では不可能な非常に薄い超流動ヘリウムの膜で覆われている。超流動は、ミクロの世界の物理理論である量子力学による不思議な運動が、目で見るスケールで生じる稀有な例である。(画像提供:ビデオ「極限の世界」/監修:東京大学物性研究所/制作・著作:東京書籍)

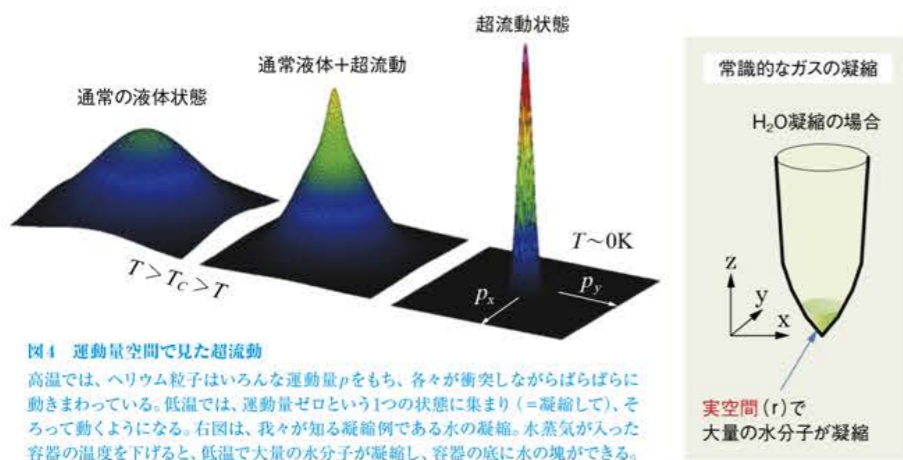


図4 運動量空間で見た超流動

高温では、ヘリウム粒子はいろんな運動量 p をもち、各々が衝突しながらばらばらに動きまわっている。低温では、運動量ゼロという1つの状態に集まり (=凝縮して)、そろうて動くようになる。右図は、我々が知る凝縮例である水の凝縮。水蒸気が入った容器の温度を下げると、低温で大量の水分子が凝縮し、容器の底に水の塊ができる。

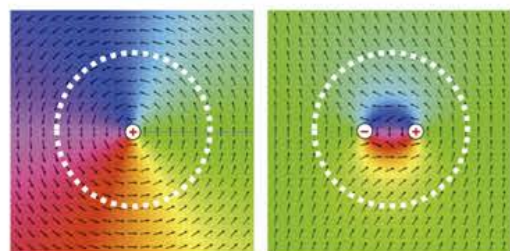


図5 1つの渦と2つの渦による向き(位相)の変化
矢印の色は向きを表す。渦が1つ入っただけで、向きは大きく乱れる。渦のまわりを1周すると向きも一回転する。一方、右向きと左向きの渦が対をつくることにより、向きの変化がキャンセルされる。その結果、渦対のまわりを一回転しても、向きはもとに戻る。トポロジカル量子数でいえば、左図が1、右図は0と区別される。

超流動状態で何が起きているのか。これを解明したのが、ボース^{*1}とアインシュタイン^{*2}である。個々のヘリウム原子は、高温ではバラバラな速度でバラバラな方向に動くだろう。ところが低温では、多数のヘリウム原子が運動量ゼロという同一の状態に“凝縮”し、足並みそろえて集団運動するようになる。これが、量子力学ではボース・アインシュタイン凝縮とよばれており、超流動転移の正体である。図4はその模式図である。“凝縮”のイメージとしては、容器に入った高温水蒸気が、低温では容器の底に水の塊ができることである。また、そろった運動の例としては、波の位相がそろったレーザー光がある。凝縮したヘリウム粒子も、“位相”という足並みをそろえることで、互いに邪魔されず流れるのである。これは満員電車を例にすれば、すべての人々がそろって

一斉に動けば滑らかに動くことができるのと似ている。

さきほど、固体の中の電子も量子液体であると述べた。実は、電子も粘性=電気抵抗ゼロで流れる場合がある。最初の発見は水銀で、 $T_{sc}=4.1K$ 以下で電気抵抗がゼロになることが報告された。これは電子の超流動と考えられ、超伝導とよばれている。超伝導体でつくったコイルなら、電流は電気抵抗なしに永久に流れ続けるため、エネルギーロスの無い強力な電磁石をつくることができる。リニアモーターカーに使う電磁石は超伝導コイルである。

2次元や1次元ヘリウム液体の新しい相転移

超流動の発見は20世紀前半である。では、超流動研究は100年も昔に終わってし

まったのだろうか。いや、そうではない。2016年のノーベル物理学賞は、トポロジカル相転移の理論研究ということで、コストリッツ^{*3}、ホールデン^{*4}、サウレス^{*5}の3人に与えられたことをご存じだろうか。実は、新しい相転移であるトポロジカル相転移の最初の実例が、2次元の超流動転移なのである。ところが、テレビ等で解説を聞いてもあまり良くわからない。トポロジカル相転移は、物理学者でもきちんと理解している人はあまり多くない、難しい概念なのである。ここでは、2次元の超流動におけるトポロジカル相転移を紹介し、近年における発展と進捗について簡単に述べる。

2次元の超流動転移と簡単にいったが、物理学者にとっては大問題である。そもそも物理学ではマージン・ワグナーの定理という、2次元系では物質全体でそろった相転移は存在しないという証明がある。具体的に考えてみよう。仮に2次元ヘリウム液体の個々の元素が、低温で運動量ゼロに“凝縮”したとする。ところが、2次元系は安定性が弱い。本(3次元系)を貫通する穴をつくるのは大変だが、紙1枚(2次元系)に穴をあけるのは簡単だろう。不安定な2次元系の超流動では、図5の左図に示すような“位相”の渦(量子渦とよぶ)が簡単にできてしまう。すると図からもわかる通り、たった1個の渦が入っただけで、全体にわたって向き(超流動状態の位相)が乱され、一方向にそろわない。従って2次元系では、足並みそろった運動であるところの超流動は存在しないはずだった。

ところが、コストリッツとサウレスは、図5の右図のように逆向きの渦が対をつくれれば、この位相の乱れがキャンセルされることに気づいた。さらに、高温ではバラバラな渦が、低温では渦対を形成するであろうことを理論的に予言した。渦1個のまわりを一周すると、位相が360度回転する。ところが渦対ならば、その周りを一周しても位相はもとに戻る。従って、渦1個と渦の対は、1回転と0回転とで明確に区別できる。このように、対称性から1と0のように区別できる離散量をトポロジカル量子数、その間を移り変わることをトポロジカル相転移と呼ぶ。

理論予想されたとなれば、次は実験である。2次元ヘリウム液体は、原子1個レベルで平坦という非常に滑らかな物質上にヘリウムをのせる事で実現された。この2次元ヘリウム液体を冷やしたところ、予言どおり2次元の超流動状態への相転移が、トポロジカル相転移として観測されたのである。図6は実際の実験結果であり、上段が3次元ヘリウム液体、中段が2次元ヘリウム液体の超流動成分の温度依存性である。3次元では、液体ヘリウムが運動量ゼロに“凝縮”する温度 T_c で通常の液体から超流動状態へ相転移する。一方で2次元では、バラバラだった渦が対を作って“位相”がそろった温度 T_{KT} で超流動に転移した(KTはコストリッツとサウレスの頭文字)。即ち、2次元系での超流動状態への変化は、“凝縮”した量そのものではなく“位相”が主役となった新しい種類の相転移である。さらに、局所的な位相はそろっているが、渦対が微妙に邪魔して全体の位相はそろわない。故に、

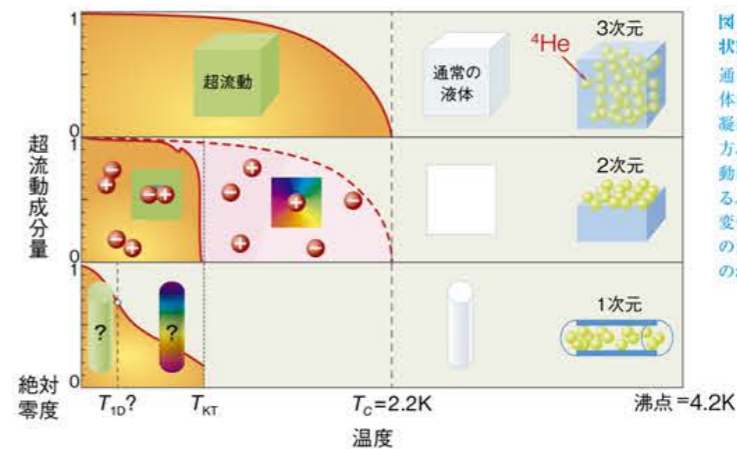


図6 さまざまな次元における超流動状態の実験結果
通常の容器に入った3次元ヘリウム液体は、 T_c 以下でボース・アインシュタイン凝縮を起こして超流動状態に移る。一方、2次元のヘリウム液体の場合、超流動になる温度は、渦対ができる T_{KT} である。また、1次元系の超流動と思われる変化が温度 T_{1D} で観測され、現在も議論の渦中にある。最近の理論では、位相のねじれが生じているともいわれている。

2次元系で物質全体がそろうのは不可能とするマージン・ワグナーの定理を破らず、従来の物理学とも矛盾しないのである。

2次元超流動から始まったトポロジーの研究は、特にこの10年で爆発的に発展し、現在では最も盛んに研究されている分野の1つとなっている。物理学では、表面しか電子が動けないトポロジカル絶縁体や、マヨラナ粒子とよばれる特殊な素粒子を持ったトポロジカル超伝導などが精力的に研究されている。さらに工学の分野では、省電力デバイスや機能性材料、量子コンピューターの素子としての応用が期待されている。2016年のノーベル物理学賞の受賞は、トポロジーという新しい世界の礎を築いたことが評価された。

さて、ここで生じる素朴な疑問は、3次元、2次元と来たら、1次元の超流動転移はあるのか。もしあるとしたら、何が起きているのか、という問いである。1次元の超流動には、2次元よりさらに新しい物理が隠れているかも知れない。その答えを求めて、現在も精力的に研究が行われている。1次元の超流動研究が解決すべき最初の課題は、1次元のヘリウム液体の実現である。そこで我々は、最近のナノテクノロジーの成果の1つである、ナノ多孔体に着目した。我々が用いたFSM (Folded Sheets Mesoporous Material) とよばれるナノ多孔体は、長さ約300nm、直径わずか3nmの細い管の集合体である。2017年現在の最先端の半導体製造プロセスは約10nmだが、FSMの直径はそれ以下で制御できる。1gのFSMの管の総延長は、なんと地

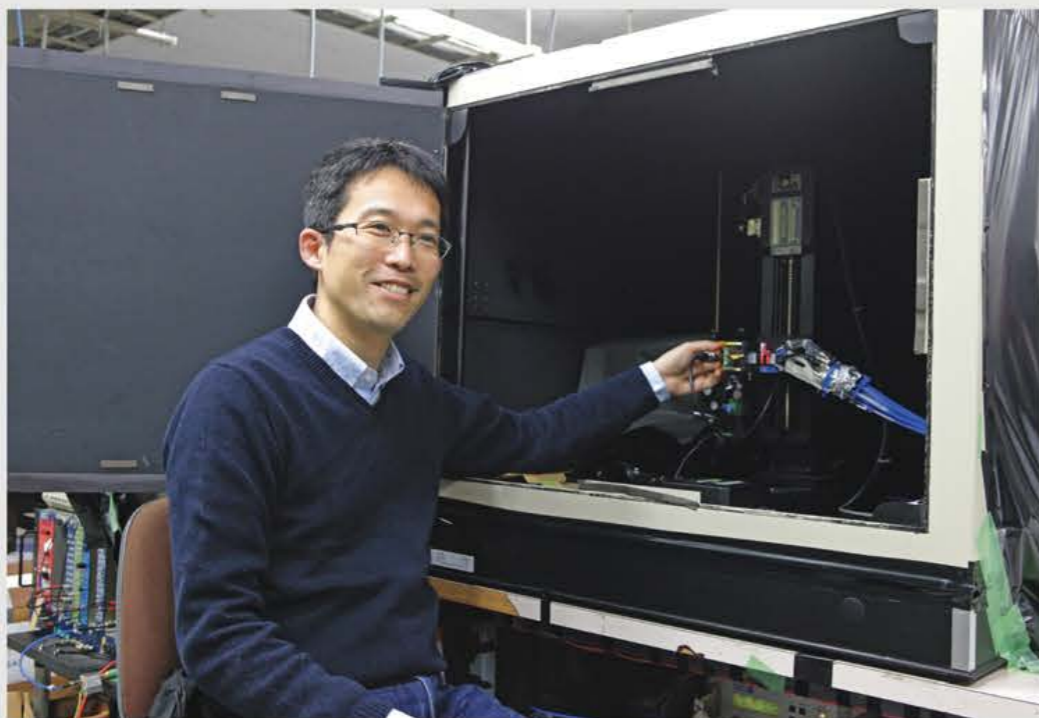
球と月の距離を優に超える。我々は、この細長い管にヘリウムを流せば、1次元のヘリウム液体、さらには超流動が得られるのではと考えた。測定結果が、図6の下段である。我々は1次元の超流動と言える相転移を観測した。ただし得られた結果は、3次元や2次元の実験結果とは異なっている。これが本当に1次元の超流動なのか、そこで何が起きているか等については、まさに研究の最中にある。

我々の常識では、温度を冷やすと物体は凍る。ところが、量子液体である金属中の電子や液体ヘリウムは絶対零度でも凍らない。さらには、極低温では抵抗無しに流れ続ける超伝導・超流動といった、常識では考えられないような性質を示す。その流れの制御は、半導体デバイス等で応用され、我々の世界を非常に豊かにした。さらには、2次元の超流動からはトポロジカル相転移という新しい概念が誕生し、基礎・応用研究の両面で大きな広がりを見せた。このように、流れの物理学は多彩な現象の宝庫である。今後も、誰も予想しなかった新しい世界の誕生が期待される。

*1 ボース (1894-1971) インドの物理学者。
*2 アインシュタイン (1879-1955) ドイツの物理学者。ノーベル物理学賞 (1921) を受賞。
*3 コステリッツ (1942-) アメリカの物理学者。ノーベル物理学賞 (2016) を受賞。
*4 ホールデン (1951-) イギリスの物理学者。ノーベル物理学賞 (2016) を受賞。
*5 サウレス (1934-) アメリカの物理学者。ノーベル物理学賞 (2016) を受賞。

最先端粒子検出装置が見つめるもの

居波賢二 素粒子宇宙物理学専攻准教授



Kenji Inami

2003年名古屋大学大学院理学研究科修了。博士(理学)取得。同研究科研究員、助手・助教を経て、2009年より現職。専門は高エネルギー素粒子実験。加速器による粒子衝突で起こる素粒子反応から物理を探究する。本研究により2016年度高エネルギー加速器科学研究奨励会小柴賞を受賞。

新たな素粒子実験が始まる

素粒子物理の高精度測定と新たな現象の発見をめざして、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構において次世代Bファクトリー実験であるSuperKEKB/Belle II実験の本格的な運転が始まろうとしている。本実験はノーベル賞を受賞した小林益川理論を検証したKEKB/Belle実験の次世代実験である。Belle II実験では、増強されたSuperKEKB加速器が引き起こす超高頻度の電子陽電子衝突によって生み出される素粒子対の様子を精密に測定することで、今までになかった物理現象を発見することを試みる。測定器の重要な改良ポイントの1つとして、 π 中

間子とK中間子の識別性能向上がある。我々は、新しいアイデアにもとづく検出原理を利用した粒子識別装置を考案し、実用化に向けた開発研究を行ってきた。

実験の中核を担う新型粒子識別装置

Belle II実験では、世界最高輝度実験であるBelle実験より20倍以上多い頻度で荷電粒子が測定器に飛び込んでくるが、その環境下でも高性能を発揮する測定器が必要になる。我々は、その中核を担う新型粒子識別装置を開発してきた。この装置はTOPカウンターとよび、光速の99.9%以上の速度で通過する荷電粒子が石英ガラス内でつくるチェレンコフ光の様子を測定す

ることで、その粒子のわずかな速度の違いを見分けることができる。従来の測定器より、判定を間違える確率を5分の1に低減させることが可能となっている。発光の早いチェレンコフ光を用いることで、高頻度の荷電粒子飛来に耐性をもつこともできる。

TOPカウンターは、高精度に研磨された大型の石英ガラス板(大きさ45cm×270cm×2cm、平面性10 μ m以下)と、それを支えるハニカム製構造体、MCP型光検出器および高速読み出し回路から構成される(図1)。粒子がガラスを通過すると微弱なチェレンコフ光を放出する。その光がガラス内を全反射しながら伝わり、端面に取りつけられた光検出器で電気信号に

図1 TOPカウンター測定原理の概念図

荷電粒子が石英ガラスを通過した際に、チェレンコフ光が発生する。光はガラス内を全反射しながら端面まで伝えられ、光検出器に到達する。側面図に示すように、粒子種が異なるとチェレンコフ光のかたちが違うため、光検出器に到達するまでの光路に差が生じる。到達した光を時間的・空間的に測定することで、チェレンコフ光のかたちを再構成し、粒子種を判別する。

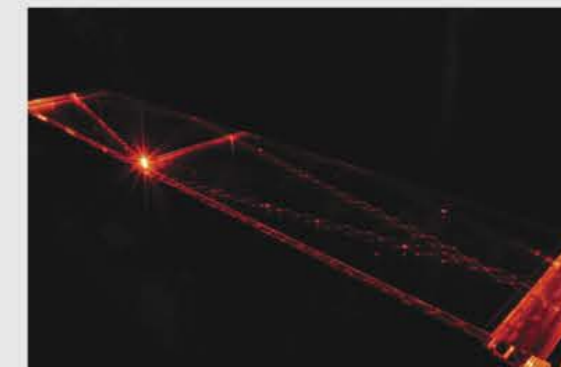
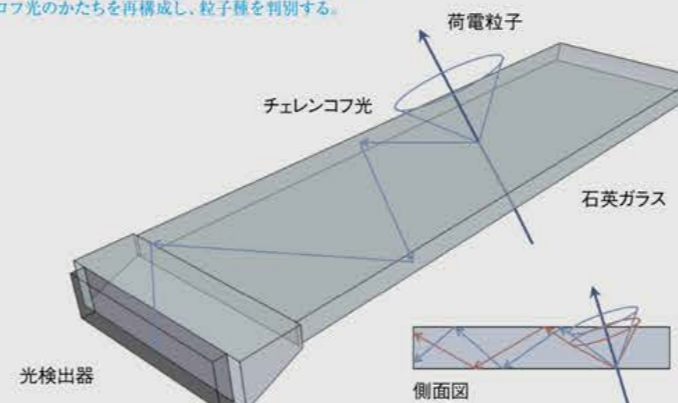


図2 石英ガラス内をレーザーが伝播する様子

各パーツの接着が終わった石英ガラス内をレーザーが伝播する様子を長時間露光撮影した。チェレンコフ光も同様に、上下面で多数反射しながらガラス内を伝播する。

変換される。新規開発したMCP型光検出器は1光子の検出が可能で、それを50ピコ秒を切る時間精度で測定ができる。50ピコ秒は光の速度で15mm程の差である。

国際的な研究体制による建設作業

我々名古屋大学グループはTOPカウンターの測定原理を提案し、若手研究者・大学院生を中心に、10年以上にわたってさまざまな試作機による原理検証を行い、開発研究および建設の全体を精力的に行ってきた。TOPカウンターの高性能の鍵となる光検出器を浜松ホトニクス社と共同で開発研究を行い、10年以上にわたる開発によ

り、名古屋大学にて全数について多角的な性能測定を行った後、TOPカウンターへと搭載した。

同時に、予備を含めた17台のTOPカウンターを1年以上にわたって建設を行った。名古屋大学の若手研究者、大学院生、技術職員をはじめとし、高エネルギー加速器研究機構やアメリカ、イタリア、スロベニアなどの多くの国際的な研究機関が携わり、高精度に研磨された石英ガラスの接着、支持構造体への封入、光検出器と読み出し回路の設置後、レーザーパルスや宇宙線を用いて性能評価を行ってきた。

いよいよ近づく実験開始

TOPカウンターはBelle II測定器内部で樽状に連結して強度を高めるが、できるだ

け大きい有感領域をえるべく測定器を隙間なく並べるために、狭い場所へ精度よくインストールする必要があった。そのための装置を数年かけて製作・テスト・調整を繰り返してきた。その甲斐があり、インストールは計画どおり順調に進み、大きなトラブルなく完了することができた。すでに読み出しケーブル等を接続し、レーザーや宇宙線を用いたデータの取得に着手しており、計画している粒子識別性能に到達すべく調整を進めている。

加速器・測定器とも順調に調整を進めており、2018年に本格実験を開始し、1年後には従来の実験を超えるデータ量を蓄積する予定である。より高精度化した測定データの解析により、新しい素粒子像の発見が期待されている。



図3 組み立てを終えた光検出器モジュール
4つの光検出器を1つのモジュールとし、8モジュールを1台のTOPカウンターへと搭載する。



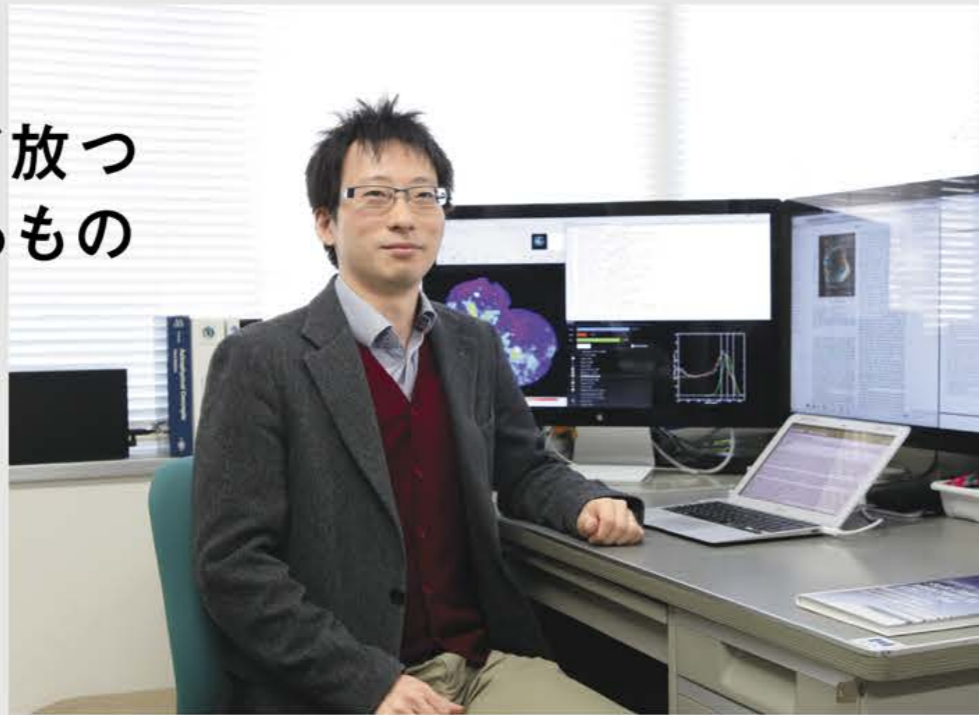
図4 組み立てを行ったクリーンルーム内の様子
右の台の上に石英ガラスが置かれており、左の台の上に、支持構造体と製作装置が設置してある。



図5 Belle構造体へ設置完了後の様子
円筒状に16台が設置され、支持用トラスが内側に見える。この後、トラスを取り除いて完成した。

超新星爆発が放つ X線から見えるもの

佐野 栄俊 高等研究院特任助教



Hidetoshi Sano

1986年神奈川県生まれ。東邦大学理学部卒業(2009)、名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程修了(2014)。専門は電波天文学と高エネルギー宇宙物理学。超新星残骸と相互作用する星間物質の研究を通して、宇宙線の起源解明に挑んでいる。

重い星の最期

重い星がまわりの宇宙空間に与える影響は大きい。ここで「重い」というのは、太陽の8倍以上の質量の星である。重い星は一生の最期に大爆発を起こす。これが超新星爆発である。爆風は毎秒1万キロメートル近い高速度で星間空間を突き進み、衝撃波をつくる。この衝撃波の上流と下流の間で電子や陽子は、ほとんど光速にまで加速される。これが宇宙線となって、地球にも降り注いでいる。陽子が宇宙線の主要成分である。一方、電子は陽子の100分の1と量は少ないが、情報が豊かである。ここでは、電子の放つX線から読み取られる、超新星爆発の実体を解説しよう。

X線で見た超新星残骸

X線でみた超新星残骸の一例を図1に示す。銀河系内の超新星残骸RX J1713.7-3946だ。シェル半径はざっと30光年である。この超新星残骸は、西暦393年に

爆発したことが中国の歴史書「宋書」に記されている。つまり爆発は今から1600年ほど前に起こった。半径30光年を伝わった速度は、ほぼ毎秒4000キロメートルと計算される。ここで不思議なのは、X線が一様ではなく、とくに右上が明るいことである。爆発の強さが方向によって違うのだろうか。だとすると、超新星爆発は、非対称に起きたことになる。

これを解く手がかりが、星間物質にある。名古屋大学が南米チリ共和国に設置した口径4メートルのなんてん電波望遠鏡により、2003年、分子雲の殻状構造が発見された(図1)。X線の強い部分に、濃い分子雲が存在している。同時に距離も正確に求められた。それ以前は、地球から2万光年の距離にあると思われていたが、実はたったの3000光年。西暦393年の爆発と矛盾しないことも確かめられた。

これまで、X線と分子雲は無関係と思われていた。しかし、実際は違う。2005年にJAXAが打ち上げたすざくX線衛星の

良質なデータを用いることで、すべての分子雲周辺でX線が増光していることが明らかになった。驚くことに、このX線の光度は、分子雲の質量に比例していた。さらに、分子雲周辺では、電子の最大エネルギーも上昇していることを突き止めた。これらは、

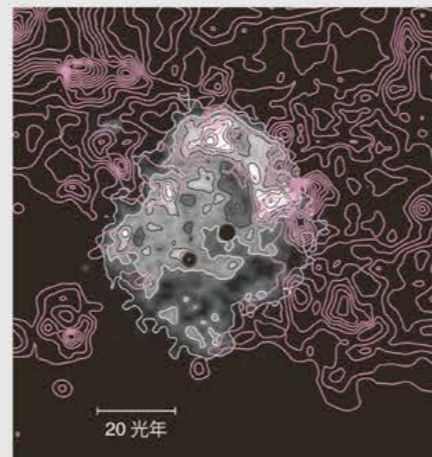


図1 X線で見た超新星残骸
超新星残骸RX J1713.7-3946における、X線画像(グレースケール)に、分子雲の分布を等高線で重ねた。等高線が密なほど、分子雲が多く存在する。X線の強い右上(白色)では、分子雲も非常に濃くなっている。(Fukui et al. 2003, PASJ 55, 61)

X線と分子雲が密接な関係にあるゆるぎない証拠である。

それでは、何がX線を増光を引き起こしているのか。答えは、衝撃波と分子雲の衝突にあった。分子雲と衝突した衝撃波は、急激に減速される。一方、分子雲周辺の低密度領域では、衝撃波は減速されない。その結果、分子雲まわりで衝撃波に速度差が生じ、無数の渦が発生する。この渦が磁場を強めることで、X線を増光を引き起こしたのである。

アルマ望遠鏡で見てきた世界

さらに最近、マゼラン雲のかじき座星雲30Cでも、同じ傾向が見いだされた。かじき座星雲30Cは、数発の超新星爆発によって形成された、超新星残骸複合体である。図2左下に示すX線シェルの半径は、140光年にもなる。今でも40を超える重い星を内包している。

これまでの観測では分解能が粗く、X線シェルと分子雲分布の詳細な比較は行えなかった(図2右下)。そこで筆者らは、X線で最も明るい右上領域について、世界最高の分解能をもつアルマ電波望遠鏡(図3)による観測を行った。図2上は、その解析結果である。X線シェルに見事に沿った、紐状の分子雲がみとれる。RX J1713.7-3946と同様に、分子雲を取り囲むように、X線が増光している。この増光の空間スケールは、RX J1713.7-3946のそれとほぼ等しい。地球から16万光年離れた銀河で、超新星爆発の素顔がいよいよ明らかになってきた。

衝撃波と分子雲の相互作用の研究から、電子のふるまいやX線について理解が得られた。これら電子から得られた知見は、陽子についても適用できるはずである。近い将来、チェレンコフ・テレスコプ・アレイという大型ガンマ線望遠鏡が本格稼働を始める(本誌24号P.8参照)。これは、陽子から放射されるガンマ線をとらえることができる。宇宙物理学100年来的謎である宇宙線陽子誕生の様子が、解き明かされる日も近い。

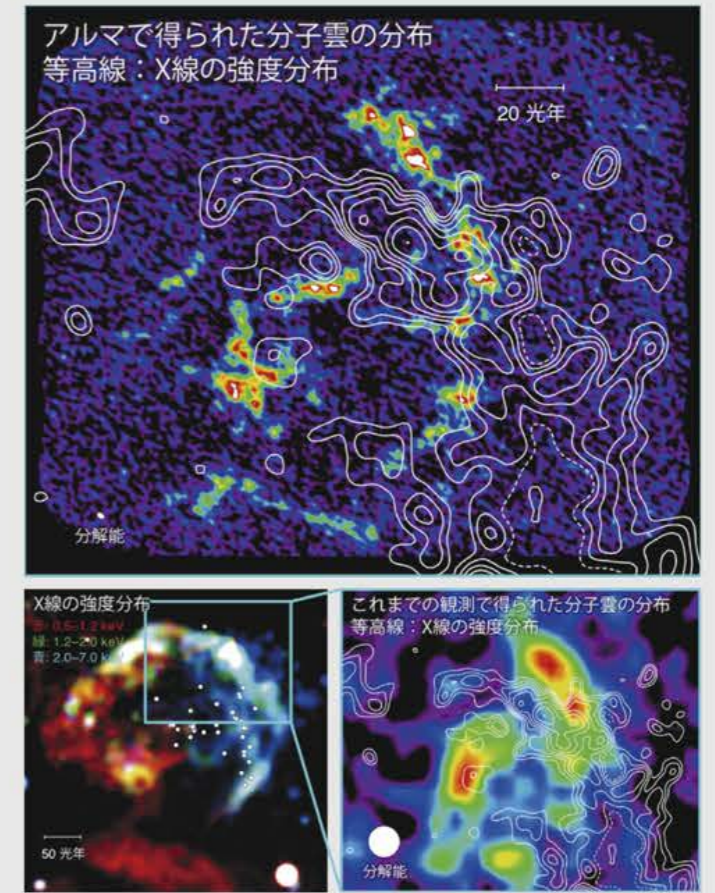


図2 アルマが捉えたかじき座星雲30Cの紐状分子雲
(上) アルマ電波望遠鏡によって得られた分子雲の分布(カラースケール)に、電子からのX線を等高線で重ねた。分子雲は赤いほど濃く、青いほど薄い。分子雲のまわりでX線が増光している。(左下) チャンドラX線天文衛星によって得られたX線画像。電子からのX線は、青色に対応する。丸印は重い星の位置を示す。(右下) これまでの分子雲の観測結果。分解能が粗い。(Sano et al. 2017 in preparation)



図3 アルマ電波望遠鏡
(左) 60台の電波望遠鏡を配置し、1台の巨大望遠鏡として運用している。(右) アルマと、なんてんを高精度にしたNANTEN2電波望遠鏡の位置。どちらも南米チリ共和国の北部、標高5000メートルの高地に設置されている。

天体物理学研究室ウェブページ <http://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/ae/>

隕石に刻まれた太陽系形成の歴史

日高 洋 地球環境科学専攻教授



Hiroshi Hidaka

1986年東京大学大学院理学系研究科化学専攻修士課程修了。博士(理学)。(株)東芝総合研究所、熊本大学工学部、東京大学理学部、東京都立大学(現首都大学東京)理学部、広島大学大学院理学研究科を経て、2016年3月より現職。専門は同位体宇宙地球化学。

太陽系始原物質と先太陽系物質

太陽系物質の進化過程を物質科学的に研究するうえで隕石は必要不可欠な対象である。隕石はその組成の違いによりいろいろな種類に分類されるが、それは太陽系内における惑星物質の進化過程を反映している。太陽系最初期に形成された物質(太陽系始原物質)は星雲ガスから固化し、それから46億年を経た現在でもほとんど物理化学的に変成をしていないため、その中には星雲ガスに紛れ込んだ太陽系形成前の星間塵(先太陽系物質)がごく微量ながら現存している。

これら先太陽系物質は、太陽系物質を構成している主な元素成分とはまったく別の過程で合成されているため、たとえば、太陽系始原物質中のある元素の同位体組成を非常に丁寧に調べると、先太陽系物質が混入している影響により地球物質中のそれとは違いが見られる。これら先太陽系物質については、古くは1960年代半ばごろから、隕石の同位体研究者が原因不明の異常値を検出することが報告されており、その存在が示唆されていた。その後、1980年代後半にシカゴ大学グループが太陽系始原物質の1つであるマーチソン隕石(炭素質コンドライト)から先太陽系物質を化学的に単離することに成功し(図1)、以来、先太陽系物質の同位体分析を含めたさまざまな物質科学的研究が展開されるようになった。



図1 マーチソン隕石から単離された先太陽系物質
太陽系始原物質の1つであるマーチソン隕石(炭素質コンドライト)から得られた炭化ケイ素微粒子の電子顕微鏡写真(ワシントン大学甘利幸子教授提供による)。写真中のスケールバーは1µmを示す。

太陽系始原物質の同位体科学

ここでは、近年私たちが行った研究の1つとして、太陽系始原物質の中のバリウムの同位体組成を非常に正確に測定することによって先太陽系物質による影響を見出した試みを紹介する。バリウムには質量数の異なる7つの安定同位体が存在する。鉄より重い原子核が合成される主過程にはs-過程、r-過程、p-過程の3種類があることが知られている。あらゆる元素の原子核を構成する中性子の数を横軸に、陽子の数を縦軸にとって図示する核図表を用いて、バリウムの周囲の原子核がどのような過程で合成されていくかを図2に示す。面白いことにバリウムの7つの安定同位体にはs、r、pの3つの過程で合成される原子核がほぼ

よく含まれており、いずれかの同位体存在度に異常が見つかるのであれば、それは太陽系外からの物質の混入の可能性を示唆することになる。図3に太陽系始原物質の1つとして知られるタギッシュレイク隕石中のバリウム同位体組成の変動パターンを示す。本隕石試料全体の同位体変動パターンからも標準値からのわずかなずれが認められるが、さらに試料に化学的前処理をほどこした酸不溶成分からはより大きなずれが認められ、酸不溶成分に先太陽系物質が濃集していることがわかる。先太陽系物質としてこれまで確認されている主な物質は炭化ケイ素、ダイヤモンド、グラファイトなどを主成分としているものであり、これらの物質が物理化学的に安定で耐久性に秀で

ていることを考えると本研究結果は極めて理にかなっている。

タギッシュレイク隕石の7つのバリウム同位体のうち、¹³⁵Baと¹³⁷Baが標準値のそれに対して顕著に欠乏している変動パターンは原子核合成におけるs-過程合成成分の過剰によるものと考えられる。その他、これまでの先太陽系物質の同位体科学研究から総合的に判断すると、この変動をもたらす物質の起源は主としてs-過程核種を合成することのできる赤色巨星に由来すると考えられる。このように、隕石の中に含まれる構成成分を詳細に調べることにより、物質科学的見地から太陽系内惑星物質の進化およびその周囲の物理化学的環境を考察するために有益な情報がもたらされる。

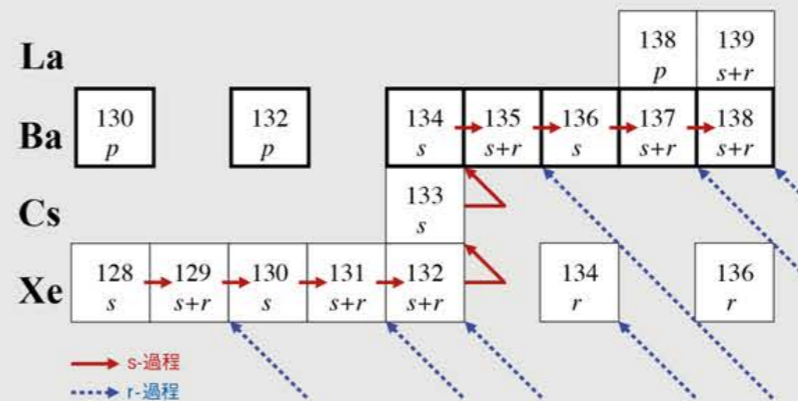


図2 バリウム近傍の元素の原子核の構成を表した核図表の一部
それぞれの四角の中に記された数字とアルファベットは各々同位体の質量数と原子核の合成過程を表している。図中の赤い矢印および青い矢印はそれぞれs-過程およびr-過程による原子核の合成経路を示す。

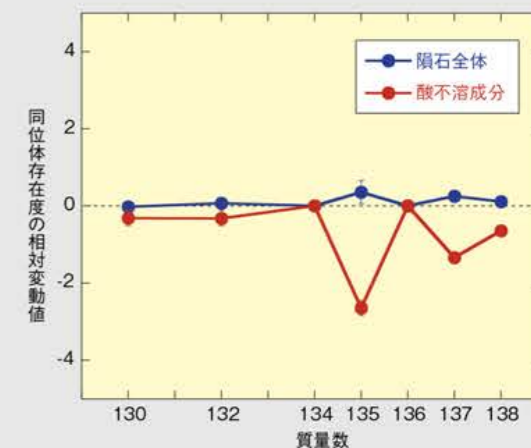


図3 タギッシュレイク隕石中のバリウム同位体組成の変動パターン
太陽系始原物質の1つであるタギッシュレイク隕石(炭素質コンドライト)中のバリウム同位体組成について、横軸はバリウム同位体の質量数、縦軸は各々のバリウム同位体存在度についてタギッシュレイク隕石と標準物質との間の相対的なずれを一万分率の単位で見ている。●は隕石全体、●は隕石試料中の酸不溶成分の値を示す。同位体測定の手法として¹³⁵Baと¹³⁷Baの同位体存在度を用いて全体を規格化しているため、これら2つの同位体組成変動は0となっている。

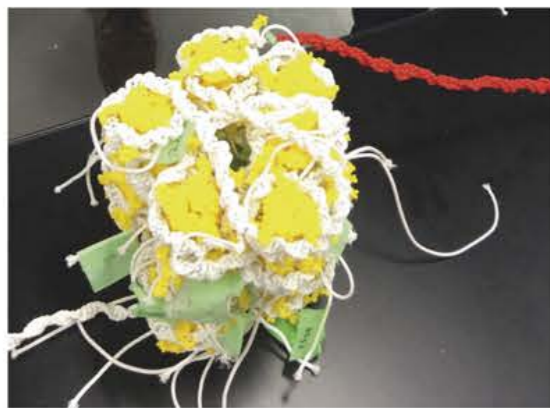
同窓生から

生命科学を「モノ」を通して伝える

立教大学理学部特任准教授
工藤光子 (Mitsuko Kudo)

院生時代から研究を伝える側になりたかったが、当時はメディアか出版社しか道はなかったように思う。そんな中、JT生命誌研究館に拾われ「科学を演奏する」という考えに出会った。それから20年、一貫して生命科学の研究成果を展示・グッズ・HP・イベントなどさまざまな媒体で伝えている。気がつけば日本で最古のサイエンスコミュニケーターである。出産・育児で5年ほど休んでいたが、2010年に立教大学で社会復帰し、サイエンスコミュニケーションを教えるかたわら、研究者とともに伝えるモノづくりに励んでいる。サイエンスコミュニケーションというと科学を面白おかしくわかりやすく伝えると思われがちだが、要求されるのは本質を描き出すことに尽きると思っている。音楽では楽譜を音に替えるが、科学では言葉でつむがれた論文をビジュアルに替えると思ってもらえれば良い。

対象が目に見えた分類学や形態学の時代には最先端の内容を容易に伝えられたのではないかと思う。だが、現在の生命科学の研究対象は、細胞やDNAなど目に見えないレベルが圧倒的多数である。ビジュアル化のヒントは、教科書や論文の図版だ。しかし、意外にも役に立たない。当然わかっていない部分は省略されているので、全体像を描こうとすると、不完全もしくは不正確になる。そんな時に私が頼ったのは、専門家の頭の



500万倍の NANOG 遺伝子 (ヒト) の拡大模型

中である。現在は、科学の演奏とは脳内イメージのビジュアル化なのだと思う。

広報を担当している新学術領域「植物細胞壁の情報機能」の研究グループでは、ビーズで細胞壁の模型をできる限り正確に再現した。細胞壁はさまざまな多糖類が織りなす複雑かつ組織だった構造だが、顕微鏡で拡大しても残念ながら多糖類のそれぞれの性質・機能の違いは観えてこない。そこで、それぞれの多糖のつなぎ方を変え、観て区別できる状態にした。その上で成分比を守りながら、全体像をつくり上げたのである。

今春から始まる国立科学博物館の「卵からはじまる形づくり—発生生物学への誘い」展では500万倍に拡大した遺伝子をヒストンに巻きつけて展示する。DNAはもちろん手編み、長さ約12メートル。エビジェネティクスを伝えたいからである。こちらも拡大して見るだけではわからない情報を、色や素材で意図的に加えた全体像である。

研究者にとっては、イメージしていたモノを俯瞰的に見る初体験。人間の脳は立体を完璧に再現するにはできていないのか、新鮮な驚きがあるようだ。非専門家も初めて見るモノなので、何これと面白がってくれる。一石二鳥の「モノ」づくり。これが私の20年の活動を支えてきた原動力だ。(1996年修士(理学)名古屋大学)



講義中の筆者

キャンパス通信

ジョイント・ディグリープログラム
開設記念シンポジウムを開催

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科
教務学生係専門職員
近藤邦弘 (Kunihiro Kondo)

2016年10月5日、理学南館坂田・平田ホールにおいて「The Nagoya-Edinburgh Joint Degree Program Symposium」が開催された。このシンポジウムは名古屋大学大学院理学研究科と英国エディンバラ大学が、共同で単一の学位「ジョイント・ディグリー」を授与するプログラムである「名古屋大学・エディンバラ大学国際連携理学専攻」を2016年10月に博士後期課程に設置したことに伴い催されたものであった。エディンバラ大学は、世界トップレベルの教育・研究業績を誇る大学の1つであり、電磁気学のマクスウェルや進化論のダーウインを輩出したことで知られる。

当専攻では両大学の強みを生かした共同研究に基づく学位プログラムを設け、単独の大学では提供できない高度な教育の提供を可能にする。これにより、国際的次世代研究者の養成が期待されるだけでなく、両大学の研究の充実が期待される。すでに化学、生命理学、物理学の専攻で合わせて5つの研究グループがエディンバラ側の研究室との連携を実施している。

シンポジウムでは、松尾清一総長の挨拶に始まり、名古屋大学、エディンバラ大学関係者の講演、文部科学省やブリティッシュ・カウンシルからの祝辞、国際連携理学専攻の第1期生となる学生からの抱負が述べられた。当日は、学内外から200人を超える学生・教職員等が集まり、プログラムやエディンバラ大学における研究や生活の様子について質問応答がなされた。



書籍紹介

『僕はこうして科学者になった
—益川敏英自伝』

地球環境科学専攻講師
林 誠司 (Seiji Hayashi)

本書は益川敏英先生の最新エッセイ集である。副題に「自伝」とあるとおり、幼少時から現在に至るまでのエピソードや所感が、益川先生らしい軽妙な語り口で綴られている。私は主に地方ニュースから先生の情報を得ていたため、京大・東大時代については存じ上げないことが多く、愛猫との交流や、オープンリールのテープレコーダーでクラシックに傾倒したことなど初めて知ったことも多かった。「ばかやろう」という章があり、恐ろしい逸話を連想したが、散歩中にアイデアを練る習慣があり、没頭するあまりダンブにひかれそうになって運転手に怒鳴られた、という顛末だった。

先生はノーベル賞受賞講演をきっかけに、「戦時体験を語る最後の世代」という認識を新たにし、お話をされる機会が多くなったという。最近では戦時体験のみならず、昭和20~30年代の理学部の熱い雰囲気、先達の肉声を通して聞くことが少なくなった。若い方には本書をぜひ手に取って、それを感じてもらいたい。

一連の著作で繰り返し主張されていることだが、先生は「フラフラ別の分野に首をつっこめ、あちこちぶつかりながらドンキホーテの如く前へ進んでいけ」と説く。研究職はより狭き門となり、科学者をめざす若者には余裕がなくなりつつあるが、そういった「自由闊達」な精神も忘れないようにしたいものである。



『僕はこうして科学者になった
—益川敏英自伝』
益川敏英
(Toshihide Maskawa) 著
文藝春秋/2016年7月発行
1300円(税別)