

研究会・学会スケジュール

第3回トランスフォーマティブ生命分子研究所国際シンポジウムおよび第1回岡崎アワードおよび第11回平田アワード
The 3rd International Symposium on Transformative Bio-Molecules & 1st Tsuneko & Reiji Okazaki Award & 11th Hirata Award
開催日：2015年5月25日(月)・26日(火)
開催場所：名古屋大学豊田講堂
主催：トランスフォーマティブ生命分子研究所
問い合わせ：佐藤綾人 トランスフォーマティブ生命分子研究所 特任講師
ayato-sato@itbm.nagoya-u.ac.jp / 052-747-6856

第13回フレーバー物理とCP対称性の破れに関する国際会議
13th International Conference on Flavor Physics and CP Violation (FPCP 2015)
開催日：2015年5月25日(月)～29日(金)
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館
主催：タウ・レプトン物理研究センター
素粒子宇宙起源研究機構
問い合わせ：飯嶋 徹 現象解析研究センター 教授
ijima@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2893

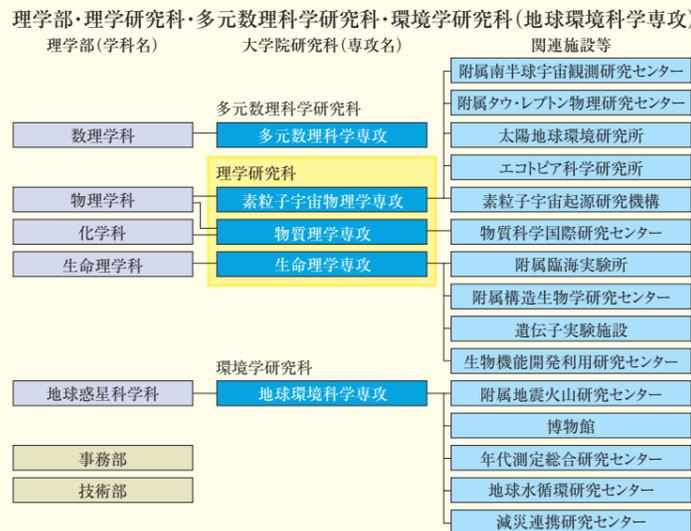
第2回銀河進化研究会
開催日：2015年6月3日(水)～5日(金)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール
主催：第2回銀河進化研究会世話人グループ
問い合わせ：竹内 努 理学研究科 准教授
takeuchi.tsutomu@g.mbox.nagoya-u.ac.jp / 052-788-6182

第16回ナノチューブ科学と応用に関する国際会議
The Sixteenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15)
開催日：2015年6月29日(月)～7月3日(金)
開催場所：名古屋大学豊田講堂
主催：第16回ナノチューブ科学と応用に関する国際会議組織委員会
問い合わせ：篠原久典 理学研究科 教授
nt15@nano.chem.nagoya-u.ac.jp / 052-789-5188

第62回トキシシンポジウム — 伊勢志摩カンファレンス
開催日：2015年7月8日(水)～7月10日(金)
開催場所：エクシード合歓の郷(三重県志摩市)
主催：毒素シンポジウム
問い合わせ：荒木聡彦 理学研究科 講師
saraki@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2514

国際第四紀学連合第19回大会
19th Congress of the International Union for Quaternary Research
開催日：2015年7月27日(月)～8月2日(日)
開催場所：名古屋国際会議場(名古屋市)
主催：国際第四紀学連合・日本第四紀学会・日本学術会議
共催：名古屋大学年代測定総合研究センター・名古屋大学博物館
問い合わせ：中村俊夫 年代測定総合研究センター 教授
nakamura@nendai.nagoya-u.ac.jp / 052-789-3082

組織図



編集だより

今回の特集は地球科学的分野から放射性炭素同位体に関わる研究を紹介した。名古屋大学には特集記事をお願いした二人が所属している研究部門以外にも、年代測定総合センターなどもあり、学内で放射性炭素同位体を利用した先進的な研究が行われていることはかねてから知っていたつもりである。それでも、今回の記事でその面白さや可能性があらためてよくわかった。木の年輪や湖底の泥の薄い層を一枚ずつ調べるといった地味な研究が、さまざまな情報を与えてくれることが読者にも伝わるのではないだろうか。思い起こせば、数十年まえ名古屋大学の学生だったころは、豊田講堂の右手後の山の木々の上に、宇宙線望遠鏡のドームが銀色に輝いていた。現在は高く成長した木々に隠れていて存在を忘れていたことも多いが、今回の「時を語るもの」のドームと特集記事の放射性炭素同位体が宇宙線でつながるものであることは、かつての輝くドームを知るものにとっては、感慨深いものがある。(古本宗充)

表紙説明

自然界に存在する炭素には1兆個に1個だけ放射性同位体である炭素14が含まれている。植物の年輪や湖底の地層に残された炭素14を調べることで宇宙線の変動や気候変動などの地球の物語が解き明かされる。



理 philosophia — No.28 spring - summer 2015 2015年4月25日発行

広報委員 松本邦弘(研究科長)
杉山 直(副研究科長・評議員)
阿波賀邦夫(副研究科長)
加藤 淳(数理学科)
福井康雄(物理学科)※委員長
戸本 誠(物理学科)
加藤祐樹(物理学科)
萩原伸也(化学科)
杉山 伸(生命理学科)
花房 洋(生命理学科)
古本宗充(地球惑星科学科)
斉藤 肇(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2015年10月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通
編集協力 株式会社コミニケ
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/



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 2015

28

philosophia

特集

「炭素14からひもとく万年の物語」

- 04 — 屋久杉の年輪に刻まれた宇宙線の大変動 ◇ 三宅美沙
- 08 — 湖底の地層から炭素14時計を読み解く ◇ 北川浩之
- 02 — 時を語るもの(関戸弥太郎博士) ◇ 福井康雄
- 03 — 理のエッセイ ◇ 大沢健夫
- 12 — 理の先端をいく ◇ 飯嶋 徹 / 八木亜樹子 / 伊山 修
- 18 — 理学部交差点

時を語るもの

関戸弥太郎博士 —— 宇宙線研究の源流をなす

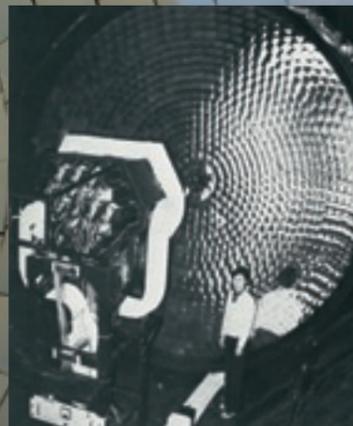


1960年代の名古屋大学の象徴は、キャンパスの小高い丘にたてられた通称「宇宙線ドーム」であった。高い建物もなかった当時、名古屋大学の方向ではドームの存在感がまわりを圧倒していたと聞く。この施設は今年改修を予定されるが、宇宙線分野で一時期を画した壮大な実験の「記念碑」である。地球には多数の宇宙線、つまりエネルギーの高い陽子や電子などの粒子が飛来している。その起源と加速の仕組みを理解することは宇宙物理学研究の大きな課題であった。物理学教室の関戸弥太郎博士は敢然とこの謎に挑戦すべく、独創の宇宙線望遠鏡を開発し、それを擁するこの施設を1958年に創設した。望遠鏡の狙いは、宇宙線の飛来方向を観測で求め、起源となる天体を特定することにあった。宇宙

線が大気中に突入すると、チェレンコフ光とよばれる可視光を生じる。この光をとらえて宇宙線の起源を突き止めようとした。実は宇宙線は電荷をもつために宇宙磁場で進路が曲げられ、よほどの高いエネルギーでないと起源天体を同定することは難しいことがやがて認識された。当時の検出装置ではこのような宇宙線は検出できず、もともとの狙いが達成されたわけではない。しかし、宇宙線望遠鏡をつくった関戸博士の情熱と創意は脈々と次の世代に受け継がれ、名古屋大学を源流とする宇宙線研究の大きな流れを見事にかたちづいたのである。本号の特集記事にもその一端が見てとれる。今後も、ガンマ線観測をはじめ、宇宙線研究の一層の飛躍が期待されている。(福井康雄 附属南半球宇宙観測研究センター長)



関戸弥太郎 (1912-1986)
元名古屋大学理学部教授
第10回中日文化賞(1957)



◇写真の説明

背景と上の写真は宇宙線ドームに設置されていた大気チェレンコフ望遠鏡。パラボラ状に配置された約1200個の小さな凹面鏡から構成され、ミュー中間子が大気に衝突して生み出すチェレンコフ光をとらえる目的で開発された。集光面積は約20m²あり、焦点に集められた光は光電子増倍管で検出される。左の写真は宇宙線望遠鏡施設の全景。宇宙線ドームの左右には中間子モニター、ミュー粒子分光計などが配置されている。写真右の大きな建物が施設のメインオフィス。

◎理のエッセイ

もう一人の数学バカを偲んで

大沢健夫 多元数理科学専攻教授



Illustration: Lisa Tezuka

数学バカとよばれた高校時代、同じくそうよばれた同級生の大川哲介君(昨年広島工業大学に准教授として在職中に他界)と、受験問題を解くだけの授業をサボり、音楽室でゲームをして遊んだことがあった。だれがもち込んだのかそこには碁盤があった。で、最初は連珠をしたが、すぐに飽きてしまい、大川君の提案で新しいゲームを始めた。そのゲームを彼は「六角渡し」とよんだ。黑白交互に打ちながら、簡単な連結性の規則に従い、どちらが対辺を先につなげるかが勝負であった。やってみるとなかなか面白く、数週間はハマったように思う。それから30年以上経って、このゲームがノーベル経済学賞で有名な数学者のナッシュが考案したものであることを知った。数年前、どこでこのゲームのことを知ったのかとメールで尋ねると、「平凡社の国民百科事典」という答えだった。そういえば、昔は方々の応接間にそういうものがあった。「六角渡し」の名はこれの「数学パズル」の項目にあったそうだ。

私の質問への回答ついでに、大川君はこの事典を愛読したころを次のように振り返り、「私は国民百科事典を小説の如く良く読み、特に化学関連の項目は全ての項目を何度も読み返した。自宅には子供向けの化学の本があったので、幼稚園の時に何度も繰り返して読み、元素記号などは自然に全て記憶してしまった。自宅に理科の本があれば自然と理科好きになるんだな」と、示唆に富むコメントをくれた。

そういえば、音楽室のピアノの前でこう聞かれたことがあった。「銅板の上に亜鉛板を重ねて放っておくとどうなるか」。真性の数学バカだった私に答えられるはずはなかったが、「真鍮になるんだよ」という彼の答えに、なんだかはぐらかされたような気がした。しかし、10年に一滴落ちるというタール・ピッチの滴下実験が有名になったとき、プロイラーのように数学の輪から出ずにいた私にも、少しだけ納得がいったのである。

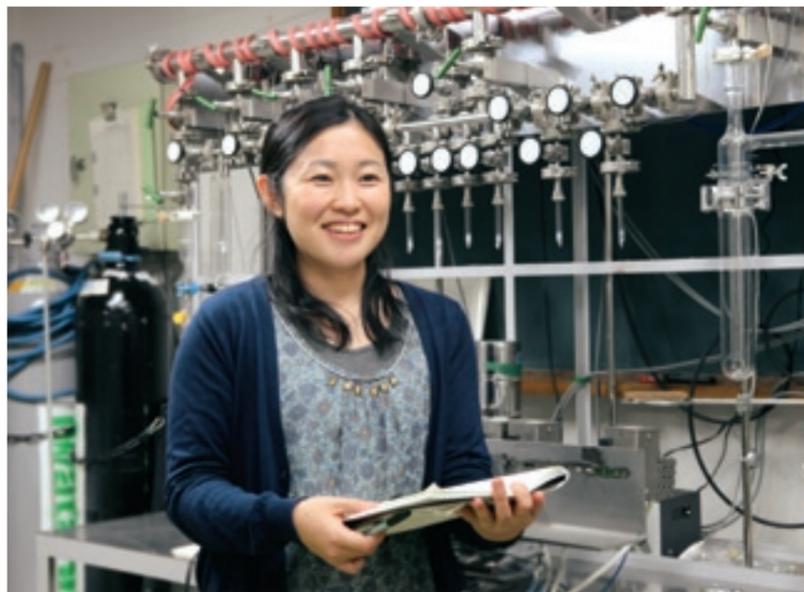
Takeo Obsawa

1951年生まれ。1972年東京大学理科一類中途退学。同年京都大学理学部入学。1978年京都大学数理解析研究所助手。同研究所講師、助教授をへて1991年より名古屋大学教授。博士(理学)。専門は数学。

通常の炭素は6個の陽子と6個の中性子で構成されており、これを炭素12とよぶ。これに対して6個の陽子と8個の中性子で構成される炭素14という原子がある。自然界における炭素14の比率は炭素12の 10^{-12} ほどであることがわかっている。炭素14は自然に崩壊してなくなっていくが、地球に降り注ぐ宇宙線によりつくり続けられているので、この比率になっている。地球上のさまざまなものや場所に残された炭素14を調べることで、宇宙線の変動や気候変動など万年単位の歴史がひもとかれようとしている。

屋久杉の年輪に刻まれた宇宙線の大変動

三宅美沙 高等研究院YLC特任助教



Fusa Miyake

1986年生まれ。2013年、名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程修了。2014年、日本学術振興会育志賞受賞。2014年から現職。専門は宇宙線物理学。

過去の宇宙線強度を探る

地球には宇宙線とよばれる高エネルギー粒子がつねに降り注いでいる。現在、地上や衛星からの観測により、宇宙線の起源や組成等について研究が進んでいる。しかしこのような観測が始まったのはつい最近であり、長期的な変動の理解には過去の情報が必要となる。我々の研究グループでは、樹木年輪を使って「過去」の宇宙線強度変動について調査している。ここでは樹木年輪中の炭素14(^{14}C)を用いた過去の宇宙線強度の測定方法と、奈良・平安時代に見つかった2つの宇宙線急増イベントについて紹介する。

宇宙線の成分は陽子やヘリウム・鉄の原子核などである。宇宙空間を飛び交う宇宙線のエネルギーは非常に高いため、地球に突入すると大気と相互作用を起こしてさまざまな種類の二次粒子が生成される。地球へ入射する宇宙線を一次宇宙線、また大気で生成されたエネルギーの低い二次粒子を二次宇宙線とよび、地上にも多くの二次宇宙線が降り注いでいる(図1)。

二次宇宙線が大気と反応することによって、今回の主役である炭素14が形成される。放射性炭素ともよばれる炭素14は、通常の炭素12(^{12}C)と比べると陽子の数は同じであるが中性子の数が多い。また炭素14は炭素12の約 10^{-12} (1兆分の1)ほどと自然界にごくわずかに

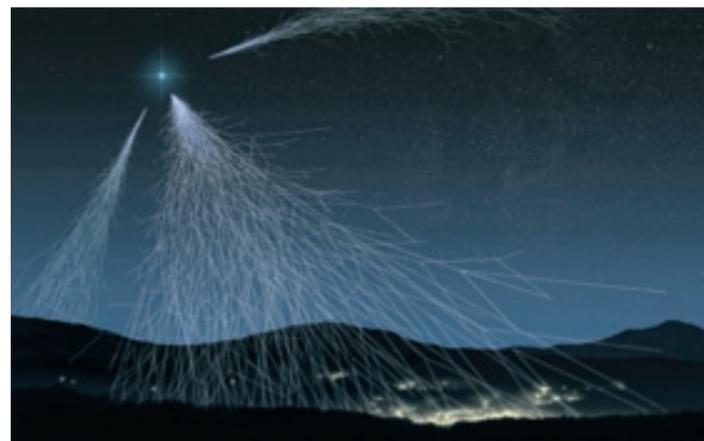


図1 宇宙線シャワーの模式図

大気中で多くの二次宇宙線が生成される。エネルギーの高い一次宇宙線が大気に突入し、大気と次々に相互作用を起こすことで様々な種類の二次宇宙線が生成される。(イラスト© ASPERA/Novapix/L.Bret)

しか含まれていない。いったん炭素14が大気中で生成されると酸化されて二酸化炭素となり、大気中の他の二酸化炭素と混合され大気圏を循環する。大気中の二酸化炭素はやがて海洋や生物に取り込まれ、その一部は樹木年輪中にも固定される。従って地球へ到来する宇宙線強度が大きくなるにつれて炭素14の生成量が増加し、その結果樹木に炭素14が高い濃度で蓄積される。すなわち樹木年輪中の炭素14濃度は、過去の宇宙線強度を「記録」しているのである(図2)。

炭素14濃度の測定手法

過去の宇宙線強度の変動を知るためには、まず年代既知の樹木年輪サンプルが必要である。年輪が形成された絶対年は年輪幅や

酸素同位体の標準パターンと照らし合わせることで決定されている。様々な年代の樹木を年輪幅の共通部分に対応させることによって、現在から過去にさかのぼって長期間の年輪幅のパターンが明らかにされている(図3)。

年輪サンプルの炭素14濃度を測定するためには、いくつかの前処理が必要である。我々の研究室の前処理方法を簡単に紹介する。まず、カッターナイフを用いて年輪サンプルを1年輪ごとに剥離する。1年ごとのサンプルに対して、年輪間を移動しないセルロースを抽出するための化学洗浄を行う。抽出したセルロースを酸化銅とともに加熱して CO_2 化させ、真空ラインを用いて純粋な CO_2 とする。その後、鉄触媒のもとで水素還元を行い、グラファイト(炭素)を得る。このグラファイトを用いて炭素14濃

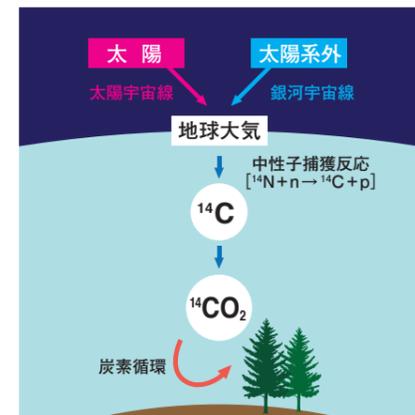


図2 宇宙線と炭素14との関係

宇宙線は、太陽から飛来する太陽宇宙線と、太陽系外からの銀河宇宙線の2つに大別できる。宇宙線と大気との反応によって形成された熱中性子を窒素原子が捕獲することによって、炭素14は生成される。これを中性子捕獲反応とよぶ。

度の測定を行っている。我々は、名古屋大学年代測定総合研究センターの加速器質量分析計を用いて測定している。

炭素14データにみられる太陽活動

これまでに世界各国の研究者によって、北米・ヨーロッパの樹木を用いた過去1万年を超える期間の炭素14濃度測定が行われてきた。その代表的なデータセットはIntCal変動曲線として知られる。過去3000年間のIntCal13の炭素14濃度データを図4に示す。IntCalは10年分の年輪をまとめて削って測定した10年分解能のデータセットであり、宇宙線による数十年より長い変動が現れている。地球へ飛来する宇宙線の大部分は電荷をもつ粒子であるため到来宇宙線量は太陽磁場活動の影響

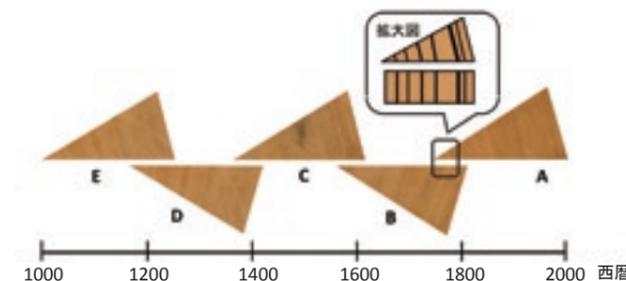


図3 年輪年代法のイメージ

同じ地域で成長した樹木の年輪幅は共通のパターンをもつ。同一地域の異なる年輪サンプルから共通の年輪幅パターンを抽出し(拡大図)、年代を特定する。同様にして複数の年輪サンプルを重ね合わせることで過去にさかのぼり長期間の年代を網羅できる。図の場合A→B→C→D→Eの順で過去にさかのぼっている。

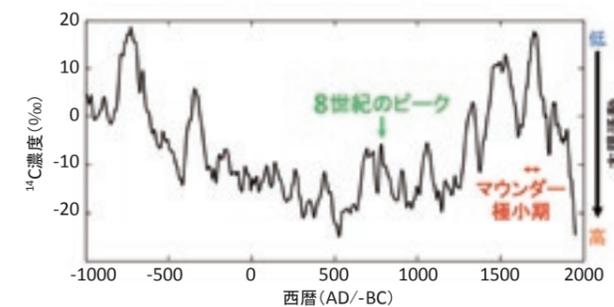


図4 過去3000年間のIntCal13データセット

太陽活動が低くなるにつれて炭素14濃度は増加する。マウンダー極小期(1645~1715年)には、炭素14濃度の大幅な増加がみられる。(Reimer et al. 2013, Radiocarbon, 55, 1869)

を受けており、地球で観測される宇宙線強度と太陽活動との間には負の相関が知られている。つまり太陽活動が高い時には宇宙線強度が低くなる。宇宙線強度に応じて大気中の炭素14濃度も変化するため、図4中では炭素14濃度が増加している期間は太陽活動が弱まっていたと考えられる。

太陽活動の代表的な指標である黒点数の観測は、望遠鏡が発明された西暦1600年頃から開始された。17世紀後半～18世紀初頭にかけては黒点がほとんど現れない時代であったことが知られており、太陽活動が極端に弱まっていたと考えられている。これをマウンダー極小期とよんでいる。マウンダー極小期において炭素14濃度は大幅な上昇を示すが、これは太陽活動と炭素14濃度との関係を示す良い事例である。IntCalデータをみると、マウンダー極小期のような数十年スケールの炭素14濃度ピークが多くみられることから、過去数百年～数千年のスケールでは黒点が消失するような太陽活動低調期が珍しくないことが明らかになった。

宇宙線イベントの探索

炭素14データに太陽活動が現れている一方で、宇宙線を大量に放出するような宇宙

の高エネルギー現象（地球近傍の超新星爆発、ガンマ線バースト、太陽面爆発など）の痕跡も炭素14濃度の急増として記録されている可能性がある。上に挙げたような高エネルギー現象は非常に短い期間に起きることから、炭素14濃度の急増は1年未満であることが期待される。

我々は、そのようなイベントを探索するために屋久杉年輪（図5）を用いた1～2年分解能の炭素14濃度測定を行った。対象にした年代は、IntCalの10年分解能データで増加の傾きが大きい8世紀周辺である。測定の結果、西暦774年～775年にかけての炭素14濃度急増を発見した（図6）。炭素14濃度の増加量は測定誤差に対して明らかに大きく、この結果は1年での炭素14急増イベントをとらえた初めての成功例といえる。また炭素14濃度が増加した後にゆるやかな減衰がみられるが、大気および海洋・生物圏における炭素循環モデルによって予想される変化とよく一致していることが判明した。これらのことから、短期間に大量の宇宙線が地球に降り注ぐことで炭素14濃度が増加し、その後炭素循環によって減衰していったものと考えられる。

この成果の報告後、世界各地（ドイツ、

ロシア、北アメリカ、ニュージーランド）の樹木年輪を用いた炭素14濃度測定が行われ、すべての結果で西暦775年イベントが確認されている。

775年に何があったのか

西暦775年イベントの炭素14濃度増加は、通常の太陽活動による宇宙線変動に比べると約20倍とはるかに大きいため、通常の太陽磁場活動とは異なる現象によって引き起こされていると考えられる。西暦775年の宇宙線イベントの論文発表後、その原因について議論が沸き起こり、いくつかの有力な候補が挙げられた。前述した太陽近傍の超新星爆発や銀河系内のショートガンマ線バースト、太陽面爆発（フレア、コロナ質量放出）によって引き起こされるSPE（Solar Proton Event）、地球への彗星衝突などである。

超新星爆発に関しては、爆発によって発生したガンマ線が地球に到達して炭素14を生成するというアイデアが1960年代から提案されている。通常の超新星爆発が発生すると、超新星残骸とよばれる天体が後に残る。775年イベントを説明するためには、超新星爆発が地球近傍で発生している必要があるがそのような超新星残骸は見つかって

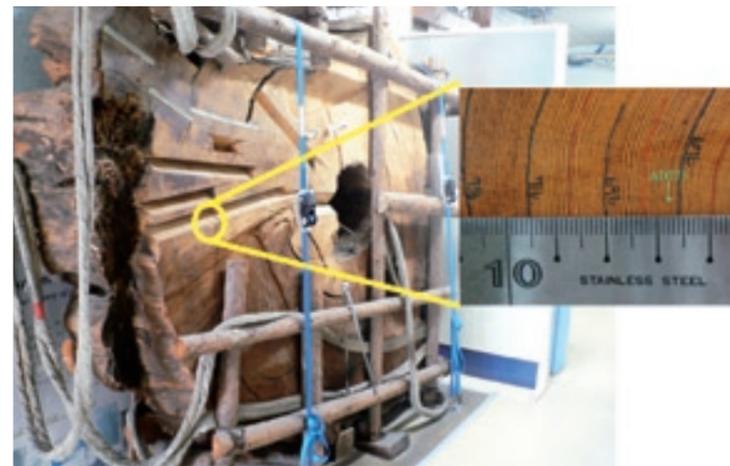


図5 測定に用いた樹齢約1900年の屋久杉の切り株
西暦1956年に伐採され、1996年に宇宙線研究室が研究用に購入した。直径は1.9mと大きく、測定のために木片を切り出して利用する。拡大図：年輪幅は大変細かく、1年輪は1mmに満たないものが多い。写真はTree A。

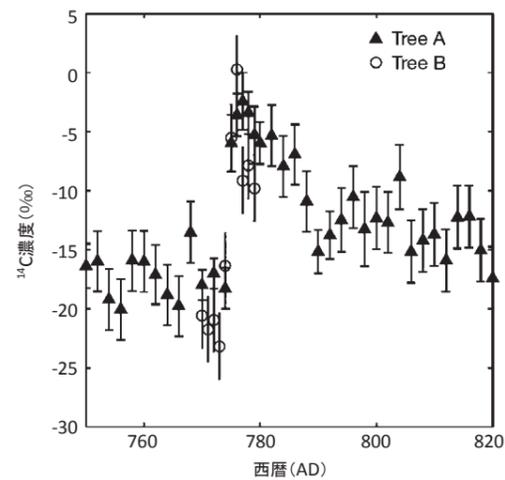


図6 西暦750年～820年までの炭素14濃度の測定結果
TreeA、TreeBはそれぞれ別個体の屋久杉のデータを示しており、西暦774～775年の炭素14濃度増加が再現された。（Miyake *et al.* 2012, *Nature*, 486, 240）

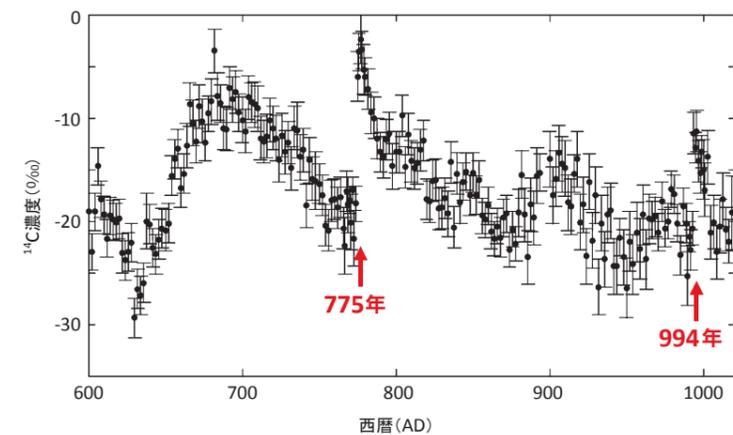


図7 我々のグループで取得した西暦600～1021年までの炭素14濃度の測定結果
775年イベントと994年イベントはよく似た変動を示す。

いない。さらに中国、ヨーロッパをはじめとする古文書にも775年の超新星爆発を示唆するような記述は残っていない。比較的新しく、距離の近い超新星残骸は今でもX線や電波等で明るく輝いているはずであり、超新星爆発が775年イベントの原因とは考えにくい。また、彗星の衝突説についても775年イベントを説明するほどの炭素14増加は起きないと考えられている。以上のことから、775年イベントの原因はSPEもしくはショートガンマ線バーストのどちらかに絞って良いだろう。

SPEが原因の場合、太陽面爆発によって発生した陽子が主に炭素14を生成すると考えられる。775年イベントの炭素14濃度増加量を説明するためには、今までに観測された最大級のSPEより十倍～数十倍も大きい規模のものが起きる必要がある。観測史上最も大きいとされるキャリントンフレアの発生前（1859年）でさえも、炭素14濃度は増加しておらずその変化は測定誤差以下なのである。このようなエネルギーの大きい太陽フレア（スーパーフレア）は、歴史記録がないことや理論的予想から、以前は太陽では起きないと信じられていたが、近年太陽型の星でスーパーフレアが数多く見つかっており、私たちの太陽でも発生する可能性が議論されて

いる。また、大規模なSPEによって引き起こされる低緯度オーロラを示唆するような歴史記録も多数見つかっている。

一方ショートガンマ線バースト説の場合は、超新星爆発と同様にガンマ線による炭素14生成が想定されるが、超新星爆発で問題になっていた超新星残骸が残らない。ただし、銀河系内のガンマ線バーストは稀な現象であると考えられており、約1000年前（西暦775年）に生じていた可能性は低い。従って、775年イベントと同様の炭素14急増イベントがどの程度発生していたかが原因追求のカギとなった。

994年イベントが示すもの

他の炭素14イベントの存在を調べるために、探索年代を広げて炭素14濃度を測定した（西暦600～1021年）。その結果、西暦993年から994年にかけての炭素14濃度の急増とそれに続く減衰が検出された。994年の炭素14増加は775年のものと比べると若干小さいが、測定誤差に対して明らかな増加といえる。また、994年イベントの炭素14濃度変動は775年イベントと非常によく似たかたちをしている（図7）。

これまでいくつかの研究で実施されてき

た炭素14濃度の単年輪測定は、合計すると約1600年間に及ぶ。その中で2つの炭素14イベントが発見された。このことから現時点での炭素14イベントの発生頻度は800年に1度であり、これはガンマ線バーストの予想頻度よりもはるかに大きいと言える。このことから、炭素14イベントの原因として大規模SPEが妥当であると考えられる。

数十万年スケールの研究

775年と994年のイベントはSPEが原因である可能性が高いと考えられるが、これらのイベントは地上の生物に大きな影響を与えないとしても、上述したように非常に大規模なものといえる。この規模のSPEが今日において発生した場合、人工衛星の故障や、通信網の破壊等による現代社会に与える影響は甚大だと予想される。今回の発見は、このようなイベントが将来においても発生する可能性を示したという意味でも重要である。現時点では2つのイベントしか発見されていないが、過去遡るとほとんどの期間は単年で調査されておらず、他にも多くのイベントが隠されている可能性が高い。

今後は、過去1万年間の炭素14濃度単年測定を実施し大規模SPEの正確な頻度や、太陽活動度との関係性について明らかにしたい。そのために、世界各国の研究者と協力していくことが必要になるだろう。樹木年輪中の炭素14濃度の変動は過去1～2万年までしかのぼって調査することが可能である。もっと古い時代のイベントは、極域の水床コア中のベリリウム10（炭素14と同様の宇宙線生成核種）濃度によって調査できる可能性がある。実際に2つの宇宙線イベントは、水床コアのベリリウム10濃度変動にその兆候が現れている。ベリリウム10を使えば、過去数十万年の情報が得られると期待される。現在ベリリウム10の測定を開始したところでは先はまだ長いですが、宇宙線や太陽活動の「歴史」を一步一步読み解いていきたいと思う。

湖底の地層から炭素14時計を読み解く

北川 浩之 地球環境科学専攻教授

先史時代を測る時計

文字による記録が残されていない先史時代の出来事の年代は、どのように決定されるのだろうか。リビー^{*1}は、自然界に存在する炭素にわずか 10^{-12} (1兆分の1)だけ放射能をもつ炭素(炭素14あるいは放射性炭素とよぶ)が含まれていることを突き止め、この炭素を利用した年代測定法「炭素14年代測定法」の開発に成功した。現在、炭素14年代測定法は、先史学にとどまらず広範囲の研究分野で利用されている。

炭素14は、大気上層で高いエネルギーをもった一次宇宙線によって生成される二次宇宙線(中性子)と大気中の窒素原子の核反応で生成される放射性同位体であり、宇宙線

生成核種ともよばれている。炭素14は、生成後に二酸化炭素に酸化されて地球規模の炭素循環に組み込まれ、植物は大気中の二酸化炭素を光合成によって取り込み、動物は炭素を食物連鎖によって取り込む。動植物が死ぬと炭素のやり取りが停止し、遺体に含まれる炭素14は放射性元素の壊変法則に従って時間の経過とともに減少する。その減少の割合から求められる年代が、炭素14年代である。

炭素14年代という時計の仕組み

リビーがノーベル化学賞を受賞した当時(1960年)にすでに、炭素14年代法の致命的な問題が指摘されていた。地球に降り注ぐ

宇宙線の強度変化や地球規模の炭素循環の状態変化によって、植物によって取り込まれる大気中の炭素14濃度(全炭素に対する炭素14の割合)が変化する点である。炭素14年代は、過去に遡っても生体に含まれている炭素14の濃度が一定と仮定して得られるものである。大気中の二酸化炭素の炭素14濃度が変動すると、時計が狂うように、炭素14年代は停止、あるいは時代の進行と炭素14年代の順番が逆になるという事態が引き起こされる。つまり、炭素14年代は、一定の速度で進む暦上の年代と一致しない。

この問題にいかに対処するか。1960年代、スース^{*2}は、この厄介な問題に対処する1つの指針を提案した。シカゴ大学の宇宙化学

教室において、樹木年輪年代学(樹木の年輪パターンを解析することで年代を科学的に決定する方法)で暦上の年代が正確に決定されたアメリカ産松材の炭素14が測定され、現在から遡ること8000年間の炭素14年代と暦上の年代の関係を示す換算表が作成された。これは、「炭素14年代キャリブレーションデータ」とよばれ、炭素14年代から暦上の年代を求める基本データである。その後、イギリス・ベルファストのクイーンズ大学、オランダ・フローニンゲン大学、ドイツ・ハイデルベルグ大学、アメリカ・ワシントン大学の研究グループが中心となり、炭素14年代キャリブレーションデータが整備され、過去1万2500年に関しては、先史時代の出来事を暦上の年代で論じることが可能となっている。

加速器質量分析法の開発

1兆(10^{12})個の炭素原子の中におおよそ1個含まれる炭素14を正確に精度よく測定するのは、分析化学の1つのチャレンジである。当初、炭素14が放射崩壊するときに放出される β 線を検出することで試料の炭素14濃度を測定する放射能計測法が採用された。1970年代になって、カナダ・サイモンフレーザー大学とアメリカ・マックマスター大学の連合チームとアメリカ・ロチェスター大学の研究チームは、炭素14の直接計測法(「加速器質量分析法」あるいは「AMS法」)の実現という挑戦的な研究開発に着手した。1977年には、両グループがほぼ同時にAMS法による天然レベルでの炭素14の測定に成功した。1981~1982年には、名古屋大学理学部地球科学科(現在の地球惑星科学科)にも加速器質量分析装置が導入され、それ以降、炭素14年代測定の世界の代表的拠点としての役割を担っている(図1)。



図1 タンデロン加速器質量分析装置
タンデム型加速器と質量分析装置を組み合わせた高性能な同位体分析装置であり、試料に含まれる3種類の炭素同位体を、正確に、効率よく計測することが可能である。名古屋大学年代測定総合研究センター所有。

AMS法は、1京(10^{15})個の炭素に含まれる数個の炭素14を検出できる感度があり、サブミリグラムの炭素試料でも高精度で炭素14を測定することが可能である。AMS法の実用化で、従来の放射能計測法での炭素14年代測定に必要な試料の量的な制約(放射能計測法では数グラム程度の試料が必要)が著しく緩和された。この革新的な分析技術を有効に利用することで達成された研究の一例は、これから話題とする、炭素14年代キャリブレーションデータの過去への拡張である。

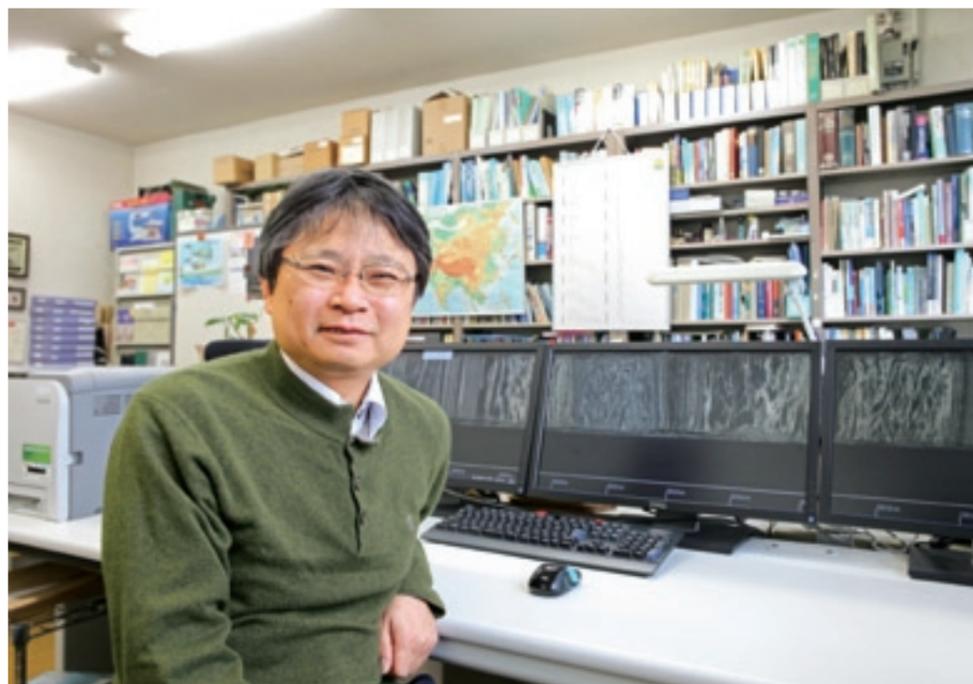
年輪から年縞へ

樹木年輪年代学で年代が正確に決定された木材試料は、炭素14年代キャリブレーションデータを整備する格好の試料であること

には議論の余地はない。しかし、樹木年輪年代法で年代決定が可能で、1万2500年前より過去の木材試料は世界のどこからも未だ発見されていない。炭素14年代キャリブレーションデータを1万2500年前より過去に遡って拡張する手だてがなく、旧石器時代の時代編年に大きな不確かさが残されていた。この問題を解決する材料が思いにもよらず、我々の身近にあったのである。私たちの研究グループは、この問題を解決する新たなアプローチとして、「年縞」に着目した。

*1 W.リビー(1908-1980)
アメリカの化学者。ノーベル化学賞(1960)を受賞。

*2 H.スース(1909-1993)
アメリカの原子核物理学者。



Hiroyuki Kitagawa

1963年滋賀県生まれ。1991年名古屋大学大学院理学研究科博士課程単位取得中退。国際日本文化研究センター助手、名古屋大学大気水圏科学研究所助教授、大学院環境学研究所准教授を経て、2008年1月から現職。専門は同位体地球化学・環境変動解析。現在は、国際陸上科学掘削計画(ICDP)死海深層掘削プロジェクトの共同PIとして、過去の気候変動や地殻変動、自然と人類の歴史の接点を探っている。

1993年、福井県若狭町に所在する三方湖五湖の1つである水月湖の学術掘削ボーリング調査を実施した(文部科学省重点領域研究「文明と環境」プロジェクト)。水月湖の湖底から採集した75メートルの柱状堆積物を半裁すると、明色・暗色の互層が認められた(図2)。その後の顕微鏡や電子顕微鏡を用いた詳細な観察から、互層構造には規則性があること、白色層は珪藻あるいは菱鉄鉱(鉄の炭酸塩)の粒子、暗色層は粘土鉱物から構成されていることが明らかになった。明色・暗色のペアは堆積物の供給源の季節変化を反映した年層であり、それを「年縞」(英語では、スウェーデン語を語源とする varve)と名付けた。水月湖の年縞堆積物には、湖の周辺で生育していた草木の葉や枝、昆虫の化石が多数含まれていた(図3)。

各深度の堆積年代は年縞の枚数を数えることで求め、AMS法により小さな植物化石

の炭素14年代を精確に決定すれば、過去5万年間の炭素14年代キャリブレーションデータが得られるのではないか。このシンプルな思いつきがかきかけとなり、そのアイデアに興味を抱いたオランダ・フローニンゲン大学の同位体科学研究センターの研究グループの後押しもあり、「水月湖年縞プロジェクト」をスタートさせた。

第1次水月湖年縞プロジェクトでは、1993年に水月湖で学術掘削ボーリング調査を実施し、年縞数の正確な計数を目指した試行錯誤の実験を行い、1998年に炭素14年代キャリブレーションデータを公表した(Kitagawa and van del Plicht, 1998, Science 278, 1187)。その後のより詳細な研究でこのデータは改訂されることになるが、水月湖の年縞堆積物は炭素14年代キャリブレーションデータの整備に格好の研究試料であることが実証された。第2次水月湖年縞プロジェクトは、イギリス・

ニューキャッスル大学の中川毅氏(現・立命館大学教授)が中心となり進められた。2006年に水月湖で学術掘削ボーリング調査を実施し、日本・イギリス・ドイツ・オランダの研究者による国際的な研究チームが組織化され、研究プロジェクトを推進した。第1次と第2次プロジェクトの研究成果は、イギリス・オックスフォード大学の大学院の学生(当時)により1つのデータセットにまとめられた。2012年には、炭素14年代法が適用可能な年代域(過去5万年)を完全にカバーする炭素14年代キャリブレーションデータの公表にこぎつけた(Bronk Ramsey *et al.*, 2013, Science 338, 370)。この約20年間の日本・英国の研究者が先導して進めた国際共同研究が評価され、「大和エイドリ安賞」が授与された。また、水月湖年縞堆積物からの炭素14年代キャリブレーションデータの信頼性が炭素14年代測定法を専門とする研究者

コミュニティによって認められ、炭素14年代を暦上の年代に較正する国際標準データとして採用された(図4)。炭素14年代測定法が開発されて約70年が年月を経て、炭素14年代測定法の問題点を克服することができ、ようやく過去5万年間の正しい年代測定法が確立された。

炭素14変動が示す地球の事件

水月湖年縞堆積物からの炭素14年代キャリブレーションデータは先史学の時代編年の信頼性の向上に貢献しただけでなく、地球システム科学においても有益な情報を提供するものである。図5には、炭素14年代キャリブレーションデータをもとに推定した過去5万年間の大気中の二酸化炭素の炭素14濃度の変化を示す。大気中の二酸化炭素の炭素14濃度は、銀河宇宙線の強度(太陽系外から飛来した高エネルギー荷電粒子)、太陽活動度および地磁気強度(あるいは方位)、また地球規模の炭素循環の状態変化に伴う地球システム内の炭素14の分配の影響を受けることが解明されている。

炭素14濃度の過去に遡るにつれて確認される長期的な増加は、地磁気強度の変化に伴う炭素14の生成量の変化によるものと考えられている。約4万年前の異常な炭素14の増加は、ラシアン・イベントとよばれる地磁気エクスカージョン(地磁気の方向が現在の状態から一時的に大きくはずれる現象)による地球に入射する宇宙線の一時的な強化に伴う炭素14の異常生成によると解釈されている。最終氷期(1万年前以前)の1000年

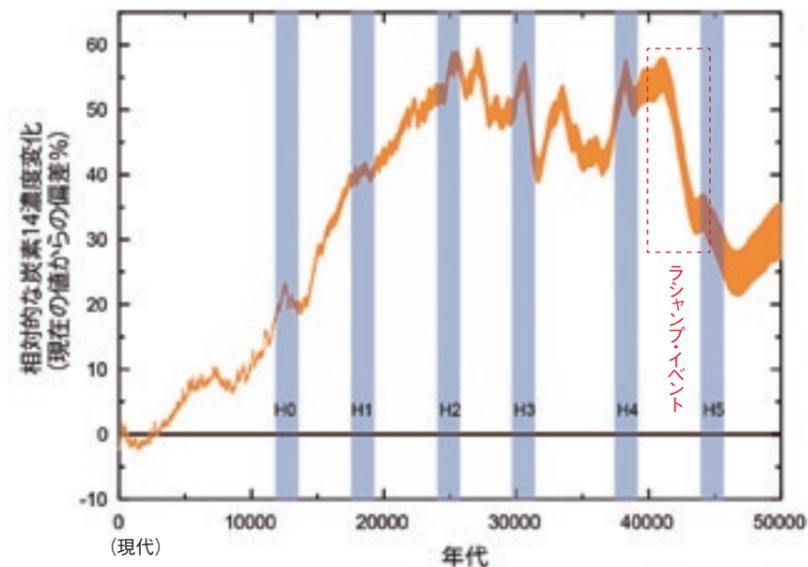


図5 大気中の二酸化炭素の炭素14濃度の変化(IntCal13)
約4万年前の急激な炭素14濃度上昇は、ラシアン・イベントとよばれている地磁気エクスカージョン時に炭素14が異常に生成された1つの証拠である。H0～H5(青色)は、ハインリッヒ・イベントとよばれている大量の氷山が北大西洋に流出して、海洋循環が変化し、さらに気候変動が引き起こされた気候イベントを示す。現在、水月湖年縞堆積物から得られたデータの、地球システム科学的な観点からの詳細な解析を進めている。

スケールの炭素14濃度のゆらぎは、北米大陸の大半を覆っていたローレタイド氷床の北部セクターが崩壊し、大量の氷山を北大西洋に流出させたイベント(ハインリッヒ・イベントとよばれる)と同期している可能性がある。2004年に公開されたSF映画『デイ・アフター・トゥモロー』(地球温暖化により南極大陸の棚氷が融け始めた。棚氷の調査中にそれに気が付いた古気象学者のジャック・ホールは、温暖化による海流の急変が将来的に氷河期を引き起こすことを副大統領に訴えたが相手にされなかった。しかし、数日後から世界各地で異常気象が頻発し始めた…)は、雪氷圏―海洋の相互作用、気候変動と海

洋循環の因果関係について提唱されている古気候学の仮説をもとに制作されたものである。炭素14年代キャリブレーションデータから得られた大気中の二酸化炭素の炭素14濃度の変化と気候変動の関連性は、SF映画で採用されたシナリオと整合的である。炭素14年代キャリブレーションデータは、地球環境の変動を引き起こすメカニズムに関して提唱されてきた多種多様な仮説を検証するうえで重要な情報である。水月湖年縞堆積物から得られた炭素14年代キャリブレーションデータには、地球システムの動態や変遷に関する未だ解明されていない秘密が隠されていることを最後に述べておく。

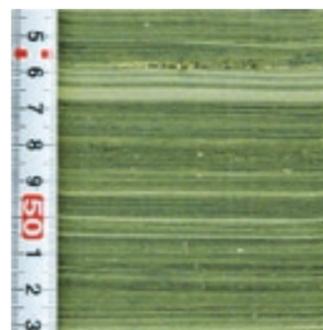


図2 福井県水月湖の年縞堆積物
明色層は珪藻あるいは菱鉄鉱(鉄の炭酸塩)の粒子、暗色層は粘土鉱物から構成されている。明色・暗色のペアは堆積物の供給源の季節変化を反映した年層であり、年縞とよばれている。年縞が認められない均質な粘土層は、過去の洪水や地震によって形成されたと考えられている。



図3 水月湖年縞堆積物に含まれている植物化石
化学的な処理を行った後、加速器質量分析装置を用いて炭素14測定が行われた。

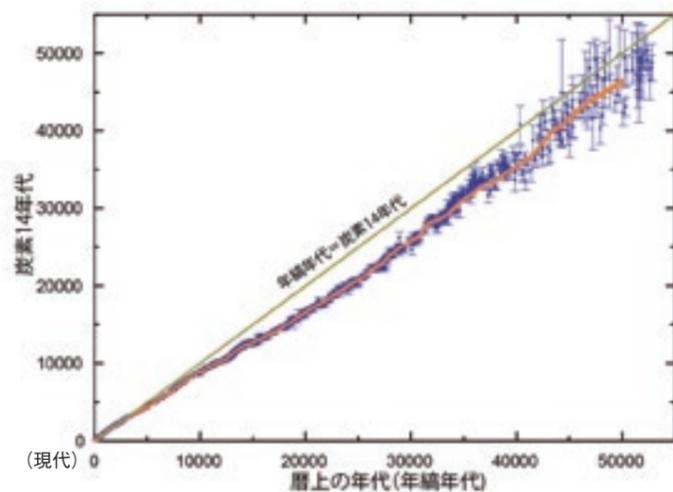
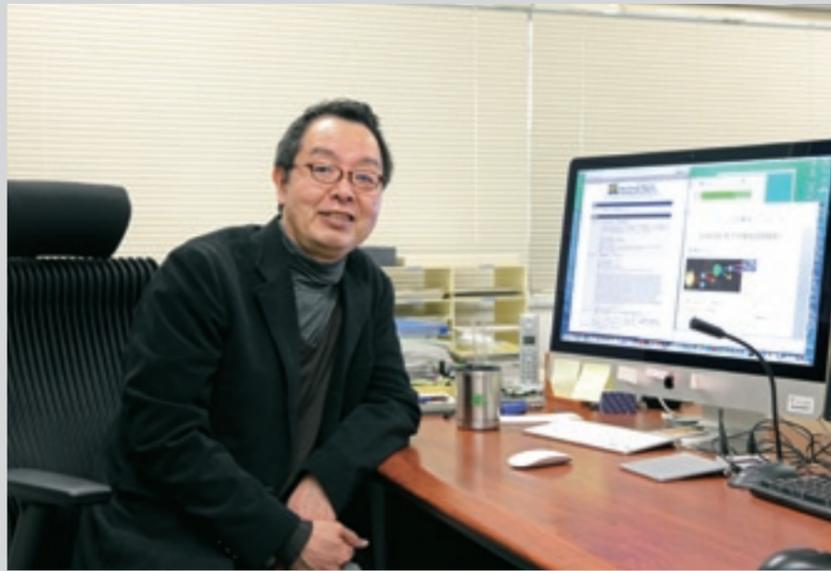


図4 過去5万年間の炭素14年代キャリブレーションデータ
横軸は年縞の計数で求められた。縦軸は植物化石の炭素14年代測定の結果である。曲線は、水月湖年縞堆積物の解析結果等から作成された専門家コミュニティの推奨データ(「IntCal13」とよぶ)を用いることで、過去5万年間の炭素14年代を暦上の年代に較正することが可能である。(Bronk Ramsey *et al.*, 2013, Science 338, 370; Reimer *et al.*, 2013, Radiocarbon 55, 1869)



Toru Iijima

1964年生まれ。1987年京都大学理学部卒業、1994年京都大学大学院理学研究科物理学第二専攻単位取得退学、1995年博士(理学)。1994年 高エネルギー物理学研究所(現・高エネルギー加速器研究機構)助手、2002年名古屋大学大学院理学研究科助教授(准教授)を経て、2010年より現職。専門は素粒子物理学実験。

「クォーク模型」を超える 新しいハドロン世界の探求

飯嶋 徹 現象解析研究センター教授

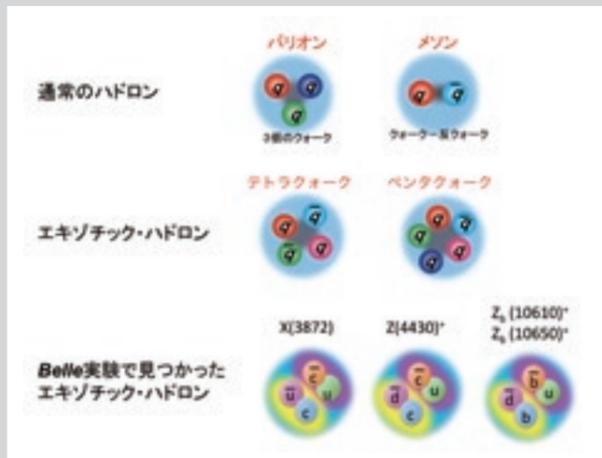


図1 ハドロン粒子

上: 通常のハドロンは、3個のクォークでできたバリオンとクォーク・反クォーク対でできたメソンに分類される。中: これに対して、4個のクォークでできたテトラクォークや5個のクォークが束縛したペンタクォークなどはエキゾチック・ハドロンとよばれる。下: Belle実験で見つかったエキゾチック・ハドロン。括弧中の数字は粒子の質量をメガ電子ボルト(MeV)単位で表している。

エキゾチックなハドロン粒子

物質世界を構成する最も基本的な粒子であるクォークは単体では存在できず、複合粒子として「ハドロン」に閉じ込められる。これまでの研究から数百種類に及ぶハドロン粒子の存在が知られているが、それらはすべて、クォーク(q)3個でできたバリオン(qqq)とクォーク(q)と反クォーク(\bar{q})の対で構成されるメソン($q\bar{q}$)に分類されてきた。たとえば、陽子はアップ・クォーク2個とダウン・クォーク1個が強い力で束縛した複合粒子であり、湯川秀樹が予言したパイ中間子はアップまたはダウン・クォークとその反粒子の複合粒子として解釈できる。このハドロン描像は「クォーク模型」として知られ、1964年にマレー・ゲルマンが提唱して以来、50年にわたって受け入れられてきた(図1上)。

ところが、クォークに働く「強い相互作用」の基礎理論である量子色力学から、いかにして「クォーク模型」が導かれるかは未だに不明であり、実際に、量子色力学は、上記のバリオンやメソン以外の構造をもつハドロン粒子の存在を禁止していない。たとえば4個のクォークでできたテトラクォーク($qq\bar{q}\bar{q}$)や5個のクォークでできたペンタクォーク($qqqq\bar{q}$)とよばれる粒子は存在しないのだろうか(図1中)。こうしたエキゾチックなハドロン粒子の存在は長く議論され、多くの探索実験も行われてきたが、なかなか確たる証拠は得られなかった。筆者自身も6クォーク状態($qqqqqq$)の探索実験を行ったが、やはり発見することはできなかった。

Bファクトリーの発見

この状況を打開したのが、Bファクトリー実験(Belle実験)である。Belle実験は、我々が、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の電子-陽電子コライダー(KEKB)で行った実験で、素粒子宇宙物理学専攻の高エネルギー素粒子物理学研究室はこの国際共同実験の主要グループである(図2)。2003年に最初に発見した粒子は、

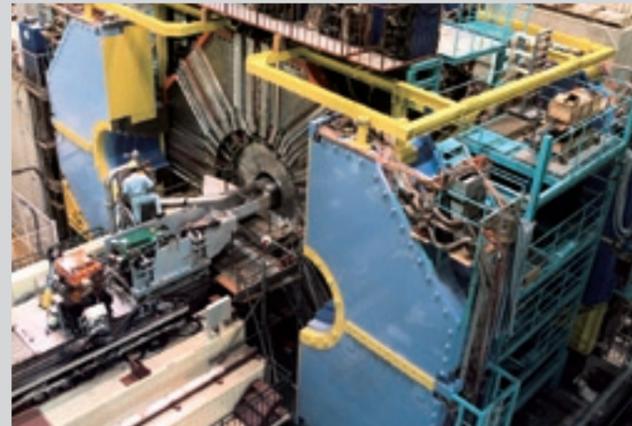


図2 Belle 測定器

電子と陽電子ビームの衝突点を取り囲み、衝突で生成される粒子の運動量、速度やエネルギーを精密に測ることができる。

3872メガ電子ボルト*(MeV)の質量を持ちX(3872)と命名された。この質量は、チャーム・クォークとその反粒子で構成できるメソン($c\bar{c}$)を仮定してクォーク模型から予想される質量とは大きく異なるが、チャーム・クォークを含むメソンであるD中間子($c\bar{u}$)2個分の質量に近いと、4クォーク状態として解釈され注目を浴びた。さらに2008年にはZ(4430)⁺とよばれる電荷をもつ同様の粒子を発見した。電荷を有するこの粒子は、決して $c\bar{c}$ の組み合わせでは構成できず、 $c\bar{c}u\bar{d}$ など少なくとも4個のクォークを構成子として含むことが確実である。図3にZ(4430)⁺粒子が生成される様子とデータを示す。2011年には、5番目のクォークであるボトム・クォークを含む2種類の4クォーク状態であるZ_b(10610)⁺およびZ_b(10650)⁺、2013年にはZ(3895)⁺など、これまでに15種類以上のエキゾチック・ハドロンの発見が相次いでいる(図1下)。また、これらの発見の多くはLHC実験などの他の実験においても再確認され、4クォーク状態の存在は確実となった。現在のところ、この4クォーク状態がどのような構造をもっているのかはまだ不明で、さまざまな理論的考察が行われている段階である。

これからの展開

Belle実験は、粒子と反粒子の対称性の破れを説明する小林・益川理論の検証を行った実験として知られているが、同実験の相次

ぐ発見によって、クォーク模型の“綻び”が明らかになり、新しいハドロン粒子の研究分野を開拓することができた。現在、KEKB加速器の40倍の輝度をめざす SuperKEKB加速器の建設と測定器の改造を進めており、2016年からBelle II実験として新実験を開始する予定である。この新実験が始まれば、さらに多くの新粒子を発見するとともに、見つかった粒子の大きさやスピン、パリティなどの性質からその構造や4クォークの相関に関する情報を得ることができる。また、これまでに発見された粒子はすべて強い相互作用で崩壊する不安定な粒子であるが、弱

い相互作用でしか崩壊できない安定な粒子はないのだろうか、という疑問が湧く。もし存在すれば、物質の新しい存在形態として非常に興味深い。今後の研究では、こうしたエキゾチック状態を含むハドロン粒子の全貌を明らかにし、クォーク模型を拡張した新しいハドロンの模型構築やその存在形態の解明につなげたいと考えている。

* メガ電子ボルト

自由空間内で電子1つが1Vの電圧で加速される時のエネルギーを1電子ボルト(1eV)とよぶ。素粒子の質量の単位としても使われる。1メガ電子ボルトは1電子ボルトの10⁶倍。

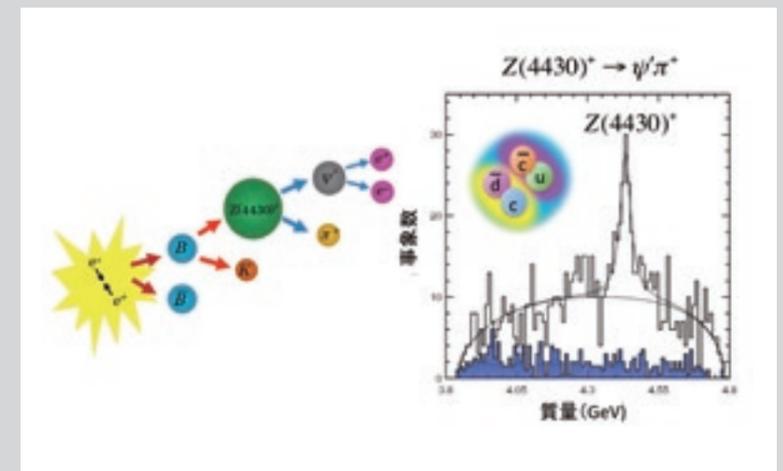


図3 Belle実験でエキゾチック・ハドロンZ(4430)⁺が生成される反応の模式図

Z(4430)⁺は、電子-陽電子衝突で大量に生成されるB中間子の崩壊に見えられた。右のヒストグラムは、B中間子の崩壊で放出された荷電パイ中間子(π^+)とブサイプライム中間子(ψ')の親粒子の質量推定値の分布を示したものである。4.4ギガ電子ボルト(GeV)付近のピークがZ(4430)⁺の信号を示す(1GeVは1000MeV)。

高エネルギー素粒子物理学研究室ウェブページ <http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/>

合成化学が拓く分子ナノカーボンの世界

八木 亜樹子 物質理学専攻博士後期課程3年

混ざり物の科学

我々の住む世界は、「分子」という小さい構造単位の働きによって成り立っている。したがって、現象や物質について詳細に知るためには分子レベルでの理解が必要となるが、すべての物質で分子レベルの科学が展開されているわけではない。カーボンナノチューブやグラフェンなどのナノカーボンとよばれる炭素材料の科学は、その代表例である。ナノカーボンはほぼ炭素原子のみから構成されるため、軽く、柔軟性の高い物質である。一方で、炭素の織りなす構造が生み出す機械的強度は金属のそれに匹敵する。また構造によって導電性にも半導体性にもなることができる、きわめてユニークな物質である。次世代材料として注目を集めているが、現在の物理化学的製法で得られるナノカーボンはさまざまな構造のものの混合物であり、最先端の手法を用いて分離・精製を行っても完全に純粋な分子として得ることは困難である。そのため現在のナノカーボン科学は依然として「混ざり物の科学」であり、一つひとつの構造、すなわちそれぞれの分子が秘める性質は、いまだに理解・活用されていない(図1)。



Akiko Yagi

1988年愛知県生まれ。2011年名古屋大学理学部化学科卒業。同年名古屋大学大学院理学研究科博士前期課程入学。2013年名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程進学。同年日本学術振興会特別研究員(DC1)。2014年ロレアル-ユネスコ女性科学者日本奨励賞受賞。

ナノカーボンの精密合成

ナノカーボン科学を分子レベルで理解することができれば、ナノカーボン材料の応用可能性の拡大を含め、広くナノカーボンの世界にプレイクスルーをもたらすことができる。そ

でその実現には、望みのナノカーボンを純品で得る必要がある。産学問わず世界中で研究が行われている中、私が所属する伊丹研究室ならびにJST-ERATO伊丹分子ナノカーボンプロジェクトでは、ナノカーボンの精密

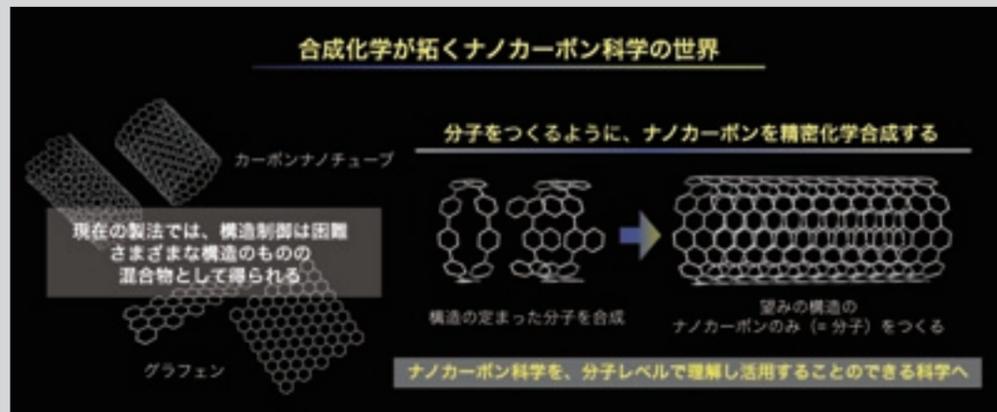


図1 合成化学が拓くナノカーボン科学
混ざり物の科学であるナノカーボン科学を、合成化学のチカラを用いて単一分子の科学へと変える。ナノカーボンを分子レベルで理解し、活用することをめざす。

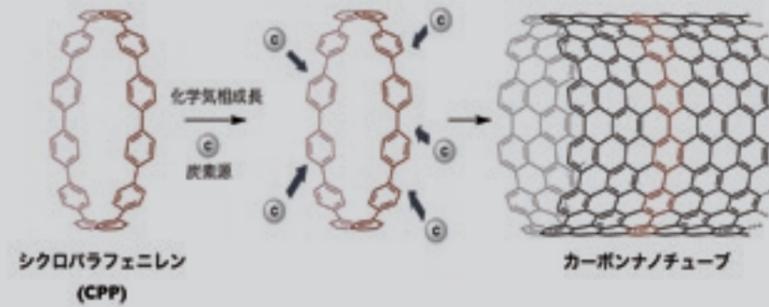


図2 シクロパラフェニレン(CPP)を種として用いたカーボンナノチューブの精密合成
シクロパラフェニレン(CPP)を塗布した基板を加熱し、炭素源となるアルコールガスと反応させることでCPP上に炭素骨格が成長し、カーボンナノチューブとなる。このとき、得られるカーボンナノチューブは用いたCPPにほぼ対応した直径と構造をもつ。

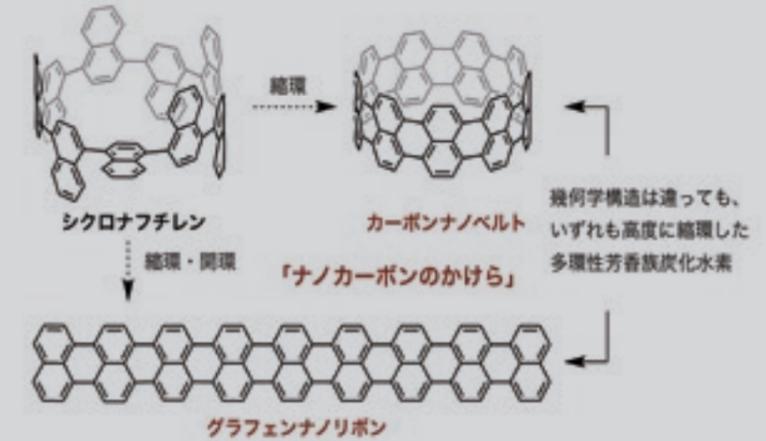


図3 シクロナフチレンを用いたカーボンナノベルトおよびグラフェンナリボンの合成
シクロナフチレンの縮環によってカーボンナノベルトが、また縮環と開環によってグラフェンナリボンが得られると期待できる。

ボトムアップ合成に取り組んでいる。精密に分子を構築するようにナノカーボンを構築する試みは、これまでのナノカーボン合成にない新規合成方法を提案するとともに、新奇ナノカーボンの創出をもたらすと期待できる。その第一歩として当研究室では、カーボンナノチューブの精密合成を指向し、その最短部分骨格であるシクロパラフェニレン(CPP)*1の化学合成を達成した。そしてCPPを種として化学気相成長*2を施すことで、用いたCPPにほぼ対応する直径および構造をもつカーボンナノチューブを得ることに成功した(図2)。

本手法の開発によって、カーボンナノチューブの精密合成に向け大きく前進することができた。今後のさらなる検討によって、これまでにない純粋なカーボンナノチューブの合成、およびその性質評価が初めて可能になると考えている。

ナノカーボンのかけら

カーボンナノベルトやグラフェンナリボンといったナノカーボンは、それぞれカーボンナノ

チューブやグラフェンの部分構造をもち、それらの分子科学的展開を可能にする分子として興味もたれている。科学者の合成標的となってからすでに30年近くになるが、これらの分子の精密合成は達成されていない。私はこれらの未知なる可能性を秘めた「ナノカーボンのかけら」がナノカーボン科学の新境地を拓くと期待し、その合成に挑戦している。カーボンナノベルト、グラフェンナリボンは筒状およびシート状という幾何学構造こそ異なるものの、高度に縮環した多環性芳香族炭化水素であることは共通している。そこで私はCPP合成で培われた知見をもとに、小さな多環性芳香族炭化水素であるナフタレンで構成されたリング分子、シクロナフチレンの合成を行った。シクロナフチレンのユニークな対称構造に起因するさまざまな特異な光物性などを明らかにすることもできた。さらに、シクロナフチレンは隣接するナフタレン同士を縮環すればカーボンナノベルトに誘導でき、また縮環に伴って開環を起こさせれば、対応する構造をもつグラフェンナリボンになる(図3)。

現在、シクロナフチレンの縮環・開環方法を検討しており、未だ確信をもって発表できる段階にはないものの、期待できるデータを手にしつつある。

分子構造と分子機能の追求は、物質科学の進展に貢献する。したがって分子を生み出す合成化学には、他の物質科学分野において不可能とされていたことを可能に変えるチカラがある。この度ロレアル-ユネスコ女性科学者日本奨励賞をいただいたのも、本研究の発展、すなわち合成化学とナノカーボン科学によるシナジーが創る未来に対し、大きな期待をもたれているためであると感じている。今後もより一層研究に精進し、分子ナノカーボンの世界を切り拓いていきたい。

*1 シクロパラフェニレン(CPP)
ベンゼンがバラバラで環状につながった化合物(本誌 24号 P.12参照)。

*2 化学気相成長
物質の薄膜を形成する蒸着法の一つ。加熱された基板物質と薄膜の成分を含む気体との化学反応により膜を堆積する方法。

有機化学研究室ウェブページ <http://synth.chem.nagoya-u.ac.jp/>



Osamu Iyama

1973年生まれ。京都大学理学部卒業(1994)、京都大学大学院理学研究科数学・数理科学専攻修了(1998)。博士(理学)。2002年姫路工業大学(現・兵庫県立大学)大学院理学研究科講師、2005年名古屋大学大学院多元数理科学研究科助教授、2007年名古屋大学大学院多元数理科学研究科准教授、2009年から現職。専門は環論、表現論。

先人たちの忘れ物

伊山 修 多元数理科学専攻教授

没後20年の記念集会

2014年11月にドイツのビーレフェルト大学で開催された研究集会に出席した。これは代数学分野の業績で著名なアウスランダー^{*1}の没後20周年を記念する集会である。彼の最大の功績は、関手の手法に基づいて「環の表現論」を研究する新分野を創立した点である。集会はアウスランダーの長年の共同研究者であったライテン^{*2}による概説講演に始まり、計15名の研究者による講演があった。3日間という短期間だったが充実した集会であり、アウスランダーの研究成果

の影響を再確認する良い機会であった。「環」とは数の体系の一般化であり、足し算、引き算、掛け算のできる集合のことである。整数が環の代表例であるが、実数や複素数をはじめ、多項式や行列などさまざまな例があり、現代数学の基本概念的1つとなっている。大学1年の線形代数では実数のなす環に対してベクトル空間を調べるが、一般の環に対してベクトル空間に相当するものを「加群」とよび、加群を調べることを環の表現論とよぶ。この分野はアウスランダー、ライテンらによる圏論的手法や、籠(クイバー)に

よる組み合わせ論的・幾何学的手法などの新発見を契機として1970年代に成立した。1つの環はさまざまな加群をもつが、その全体は圏という美しい数学的構造を形成する。1970年代に展開されたAR(アウスランダー・ライテン)理論は、籠によって圏の構造を図示することを可能とした。「次元」は数学的対象の大きさや複雑性を表す数値である。代数学における重要な次元として大域次元とクルル次元があり、これらの間には密接な関連がある。AR理論を一言で表すと「加群圏の構造が本質的に2次元である」

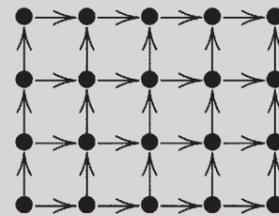


図1 加群圏の圏構造

図は、加群圏の圏構造を表すAR籠の基本単位である2次元格子である。これは関手圏における単純対象の射影次元が、特定の有限個を除いて2となることを反映している。

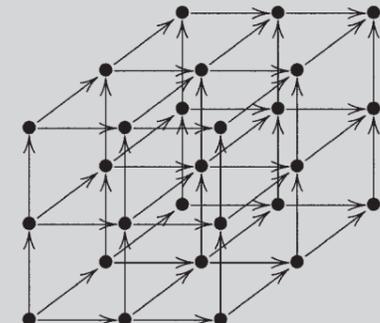


図2 n-傾部分圏の圏構造
特別なn-傾部分圏の圏構造の基本単位はn+1次元格子で与えられる。図はn=2の場合である。

ことに集約される(図1)。その原型はアウスランダー対応という、加群を本質的に有限個しかもたない有限表現型の環と、ある種の2次元の環の間の一対一対応に見られる。また環が2次元の場合に加法圏はとくに対称性の高いものとなり、例えば商特異点では2次元のときに有限表現型となる。

AR理論の高次元化

それではなぜ、環の表現論において2次元がかくも特別なのであろうか。漠然とした問いだが、これを説明することがポストク時代の長期目標だった。その頃はアウスランダーの遺した論文を読み解くことに明け暮れていた。そこからこの問いに対する試行を読み取ることができ、あたかも彼の遺した課題のようにも思えた。数年間の考察の末、加群圏の特別な一部分に着目すると、ここではAR理論の高次元類似が展開できることに気がついた。そのような一部分をn-傾部分圏とよぶ(論文では別名を用いているが、下記の団理論との関連からこのようによぶ)。その構造は本質的にn+1次元となる。ここでnは自然数であり、1-傾部分圏は加群圏全体のことであり、つまり表現論における2次元の特殊性は、加群圏が1-傾部分圏であることにほかならない。またn+1次元の孤立商特異点は、有限表現型のn-傾部分圏をもつ。以上をまとめた論文が2004年に完成したが、AR理論から30年経て次の段階にたどり着いたように感じた(図2)。

今世紀初頭にフォンミン^{*3}、ゼルピンスキー^{*4}によって団代数(クラスター代数)が導入され、続いて2004年には団圏がライテンたちによって導入された。団代数はさまざまな

数学に現れる組み合わせ論的構造を统一的に扱うものであり、団圏は団代数に圏論的な基礎づけを与えるものである。そこにも2-傾部分圏に相当するものが現れることを知ったときは驚いたものだ。まったく異なる文脈で同じ概念が重要な役割を果たしていたのである。これを契機として自分も団理論に積極的に関わることとなり、変異理論をライテンや吉野^{*5}と構築した。また、さまざまな特異点上の加群圏と団圏の間の同値を構成し、2次元の場合の古典的事実を拡張した。

非可換特異点解消の概念が代数幾何学で提唱されたのも今世紀初頭である。上述したように環がn+1次元の場合にn-傾部分圏は高い対称性を有するが、これは非可換特異点解消に表現論的な基礎づけを与える(図3)。ビーレフェルトの集会では、2-傾部分圏と3次元の極小モデルプログラムの関係が、イギリスの新進気鋭の若手研究者の講演で解説された。

最近では、表現論でよく知られている重み付き射影直線を高次元化した、GL射影空間を導入した。ビーレフェルトの集会では、それへの高次元AR理論の応用を講演した。

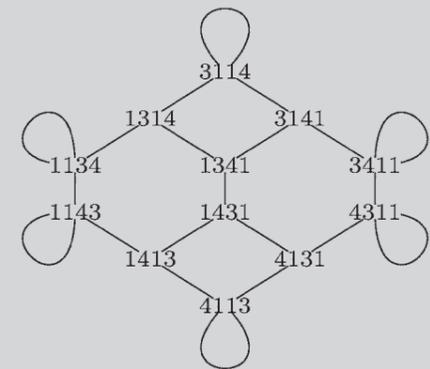


図3 2-傾部分圏の変異グラフ

ある3次元超曲面特異点は12個の2-傾部分圏をもち、それらは変異によって図のように関係している。

ポストクの頃は、アウスランダーの数学が少数の専門家以外に理解されていないことを嘆いていた。しかしそれは確かに、少しずつ諸分野に浸透しつつある。

研究で新しいことを見つけたとき、なぜそれが先人によって見つけられなかったのか、不思議に思うことがある。高次元AR理論や、最近ライテンと見つけた⁶傾理論がそれである。そのようなものを「先人たちの忘れ物」とよんでいる。何であれ数学の発見は時を忘れさせてくれるが、そのようなものを見つけたときの感慨には格別のものがある。

*1 M.アウスランダー(1926-1994) アメリカの数学者。

*2 I.ライテン(1942-) ノルウェーの数学者。

*3 S.フォンミン(1958-) アメリカの数学者。

*4 A.ゼルピンスキー(1953-2013) アメリカの数学者。

*5 吉野雄二(1954-) 岡山大学大学院自然科学研究科教授。

同窓生から

科学と非科学の二足の草蛙

高エネルギー加速器研究機構研究交流推進室員
オペラ講座講師
大須賀 関雄 (Tokio Osuka)

50年近く前のことだが、学生であった私は名古屋大学物理部の教育委員会のメンバーでもあった。当時はゼロックスコピー機が超貴重品の時代であり職員以外は使用禁止となっていた。しかしセミナーで使われる資料の多くが洋書であり、しかもその本の中の1章程度のみがセミナーで取り上げられたので、学生にとってそれらの洋書を購入するのは大変であった。費用はきちんと払うからゼロックス機を使わせてほしいと私は教育委員会で訴えた。その翌日「一番ゼロックスを必要としているのは学生であるとわかったのだから、以降学生は無料でゼロックス機を使用して下さい」という坂田昌一先生の言葉が私に伝えられたときは驚いた。

我々学生たちはゼロックス機の使用量を最低限に止めるため最大限の自主努力をした。正しいことを正しいと認知し行動することを教えてくれた最初の人が坂田先生であった。科学のみならず生き方まで我々は名古屋大学で学んだ。思えば私たちはとても好運であった。苦勞して外国語の教科書を読み解いていったことは日本の外に出たときにとっても役に立った。

10代の頃放送局でクラシック歌手として活動していたお陰で、シカゴで2年間オペラ演出家特別養成コースに招かれオペラにも出演した。とはいえ後に200年以上の歴史をもつチェコの劇場でオペラ演出家として雇われたのは予想もしていない展開であった。

カナダのカールトン大学で博士号を取得しマサチューセッツ工科大学やフェルミ国立加速器研究所で働いてきた私が、招かれて日本に来たとき、バブルの時代の後遺症なのか日本人の心が随分荒んでいて信じられない事件が多発していた。その頃は高エネルギー加速器研究機構ではトリスタン計画の立ち上げで超多忙であったが、要請されたとはいえオペラ講座の講師を引き受けたのは、何かせねばならないという強い思いがあったからだ。科学の力は大きいが、科学自体からは心の優しさは帰納されない。いわば科学と芸術は相補的な立場にある。どちらか一方だけでは人間としてバランスを欠くと私は考えている。新しい発想を導入するために、つくばの国際化のために頑張ったことで総務大臣表彰もいただいた。長年科学と文化の双方に足を突っ込んできたことは、ポーランドの大学で教育や科学、技術に関する講演をすることにつながり、ポーランド国会内の特別なEUの集まりで法律についてお話する機会もいただいた。マサチューセッツ工科大学時代のボスで長年の友人でもあるフリードマン教授は、私をルネサンスマンとよぶ。一分野に特化しないことを選んだことを後悔はしていない。広い視点でものを見ることができるようになった。私はこれからも二足、三足の草蛙を履き続けていくことであろう。もう70歳近くになった私からの次世代への遺言のつもりだ(1970年修士課程物理学専攻修了)。



2007年チェコでオペラ「夕鶴」の演出を担当



主役のカテリーナ・クラモリシヨヴァと

キャンパス通信

多元数理科学研究科
設立20周年にあたって

多元数理科学研究科長
菅野 浩明 (Hiroaki Kanno)

大学院多元数理科学研究科は、大学院重点化の流れの中、1995年4月に独立研究科として設立された。研究科では設立20周年を記念し、昨年11月19日に講演会および祝賀会を開催した。研究科の名称である「多元数理」は英語では Polymathematics となるが、名詞 A polymath には、レオナルド・ダ・ビンチに代表されるような、数多くの異なる分野の専門知識を身につけ問題解決にあたる人という意味がある。現代では専門分野が細分化され一人の人間がカバーできる知識は限られるが、ネット上では数年前から多くの数学者が協同して問題を解こうとする Polymath Project なるものが存在する。

さて、数学には大きく分けて「問題解決」の文化と「理論構築」の文化があるといわれている。問題解決という視点から見た多元数理の意義が上で述べたことにある一方で、数学を単なる知識や道具の寄せ集めに終わらせないために、それらを統一的にとらえる理論を探究することも多元数理の大切な目標である。実際、まったく無関係と思える物事の間を見出すことが数学の進展をもたらしてきた。研究科では設立20周年を機に外部評価を実施し、貴重な助言をいただいた。これを踏まえて「問題解決」と「理論構築」の両面で「多元数理」の名に恥じない研究科とする取り組みを続けていきたいと思う。



向井茂京都大学教授による講演

キャンパス通信

居心地の良い学びの場所

理学部A館1階、理学図書室の向かいにそのスペースはある。「理学部学生向け学習室・ラウンジ」という案内に導かれて中に入ると、左右に丸テーブルとチェアのセットが配置され、さらに進むと今度はローテーブルとソファがならぶカフェのようなスペースになっており、その奥には会議テーブルとホワイトボードのある部屋が続く。ここまではコーナーごとにパーテーションや自動ドアによって分けられた比較的オープンなスペースになっている。一番奥の一室は、隣席との間に間仕切りが設けられた机が用意された、正に学習室らしい雰囲気がただよう。

もともとはこの場所は、2008年にノーベル物理学賞を受賞した小林誠博士、益川敏英博士、ノーベル化学賞を受賞した下村脩博士の業績や研究内容について紹介されたノーベル賞展示室だった。2001年のES総合館竣工に伴い展示室は同館に移転され、現在の施設に改装された。

私語禁止の図書室に対して小さな声なら話ができる。雰囲気の違うテーブルが選べるなど、リラックスして勉強ができる空間として学生たちの人気を集めており、試験が近づくとノートやパソコンを囲む学生たちで満席になる。図書館では堅苦しい、カフェはお金がかかる、友だちとはゆるやかに繋がっていたい、そんな今時の学生たちにとって、このスペースは気持ちよく勉強ができる場所になっているようである(K)。

