研究会・学会スケジュール

離散群とモジュライ
Discrete Group and Moduli

開催日：2019年6月17日（月）～20日（木）
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール
主催：金銅誠之（名古屋大学教授）、Radu Laza（Stony Brook University, Professor）、向井　茂（京都大学教授）
問い合わせ：金銅誠之　多元数理科学研究科　教授
kondo@math.nagoya-u.ac.jp／052-789-2815

名大－エジンバラ大ジョイントディグリー研究会「化学と物質科学の新地平」
NU-UoE JD joint workshop on“New Horizon in Chemistry and Materials Science”

開催日：2019年7月1日（月）～3日（水）
開催場所：名古屋大学 物質科学国際研究センター
主催：名古屋大学大学院理学研究科
問い合わせ：阿波賀邦夫　理学研究科　教授
awaga@mbox.chem.nagoya-u.ac.jp／052-789-2487

第9回実験室･宇宙･天体プラズマに関する東アジアスクールとワークショップ
9th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas

開催日：2019年7月29日（月）～8月2日（金）
開催場所：名古屋大学ES総合館ESホール、ES会議室
主催：名古屋大学大学院理学研究科
名古屋大学宇宙地球環境研究所
問い合わせ：渡邉智彦　理学研究科　教授
watanabe.tomohiko@nagoya-u.jp／052-789-3934

第13回分子科学討論会2019名古屋

開催日：2019年9月17日（火）～20日（金）
開催場所：名古屋大学全学教育棟、ほか
主催：分子科学会
問い合わせ：阿波賀邦夫　理学研究科　教授
awaga.kunio@b.mbox.nagoya-u.ac.jp／052-789-2487

錯体化学会第69回討論会

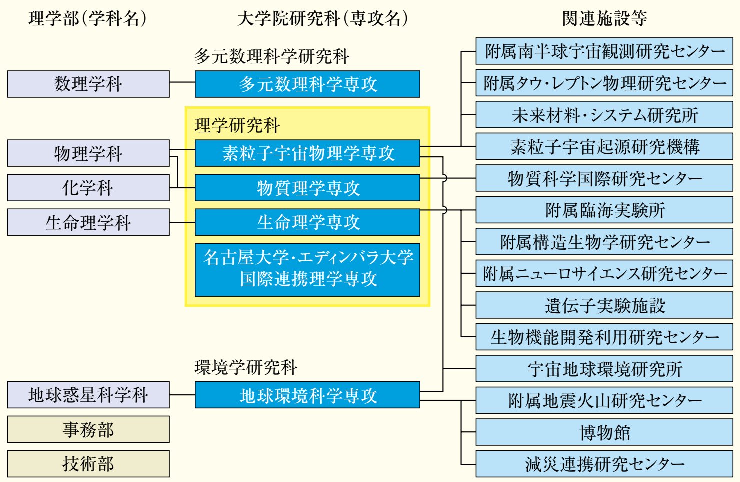
開催日：2019年9月21日（土）～23日（月）
開催場所：名古屋大学全学教育棟、豊田講堂
主催：錯体化学会
問い合わせ：唯美津木　理学研究科　教授
mtada@chem.nagoya-u.ac.jp／052-788-6200

第56回日本細菌学会中部支部総会及び第53回ビブリオシンポジウム

開催日：2019年10月25日（金）･26日（土）
開催場所：名古屋大学ES総合館
主催：日本細菌学会中部支部
名古屋大学大学院理学研究科
問い合わせ：本間道夫　理学研究科　教授
g44416a@cc.nagoya-u.ac.jp／052-789-2991

組織図

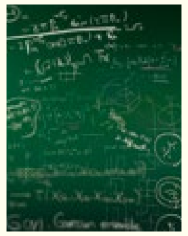
理学部･理学研究科･多元数理科学研究科･環境学研究科（地球環境科学専攻）



編集だより

今回の特集記事は多元数理科学研究科が担当することになった。数学が特集のテーマになるのは久しぶりのようで、また、これまで扱われたテーマは応用数学などの「取っ付きやすい」ものが多かったようである。一方で今回のテーマは純粋数学的なもので、「取っ付き難い」テーマ、より正確には「取りつく島もない」テーマだ。実は、私が特集の担当になった瞬間に、「純粋数学のテーマを真正面から扱う」ことを念頭にプランを組むことにした。というのも、数学以外の分野の特集記事は「取っ付きやすいもの」をテーマにしているようには見えなかったからだ。また、「数学者ってどんなことしているんですか」と高校生くらいの方に聞かれたときに、「まあこんな感じです」と紹介をするのが広報誌の役割だろうから、普段考えていることをそのまま伝えるのが一番だと考えたからだ。このような身勝手な特集担当の依頼を引き受けてくださった植田･松本両先生と、的確な助言をくださった広報委員会の皆さまに改めて感謝申し上げます。（柳田伸太郎）

表紙説明



黒板上で錯綜している数式や図は、1つは素数の分布を、1つはランダム行列の解析を表す。純粋数学は代数･幾何･解析の三分野に分かれるが、異なる分野が相互作用しあって発展してきた。

理 philosophia — No.36
spring–summer 2019
2019年5月7日発行

広報委員　阿波賀邦夫（研究科長）
寺﨑一郎（副研究科長）
嘉村　巧（副研究科長）
柳田伸太郎（数理学科）
飯嶋　徹（物理学科）※委員長
川村静児（物理学科）
谷口博基（物理学科）
多喜正泰（化学科）
杉山　伸（生命理学科）
白石洋一（生命理学科）
城野信一（地球惑星科学科）
齋藤勝行（事務長）

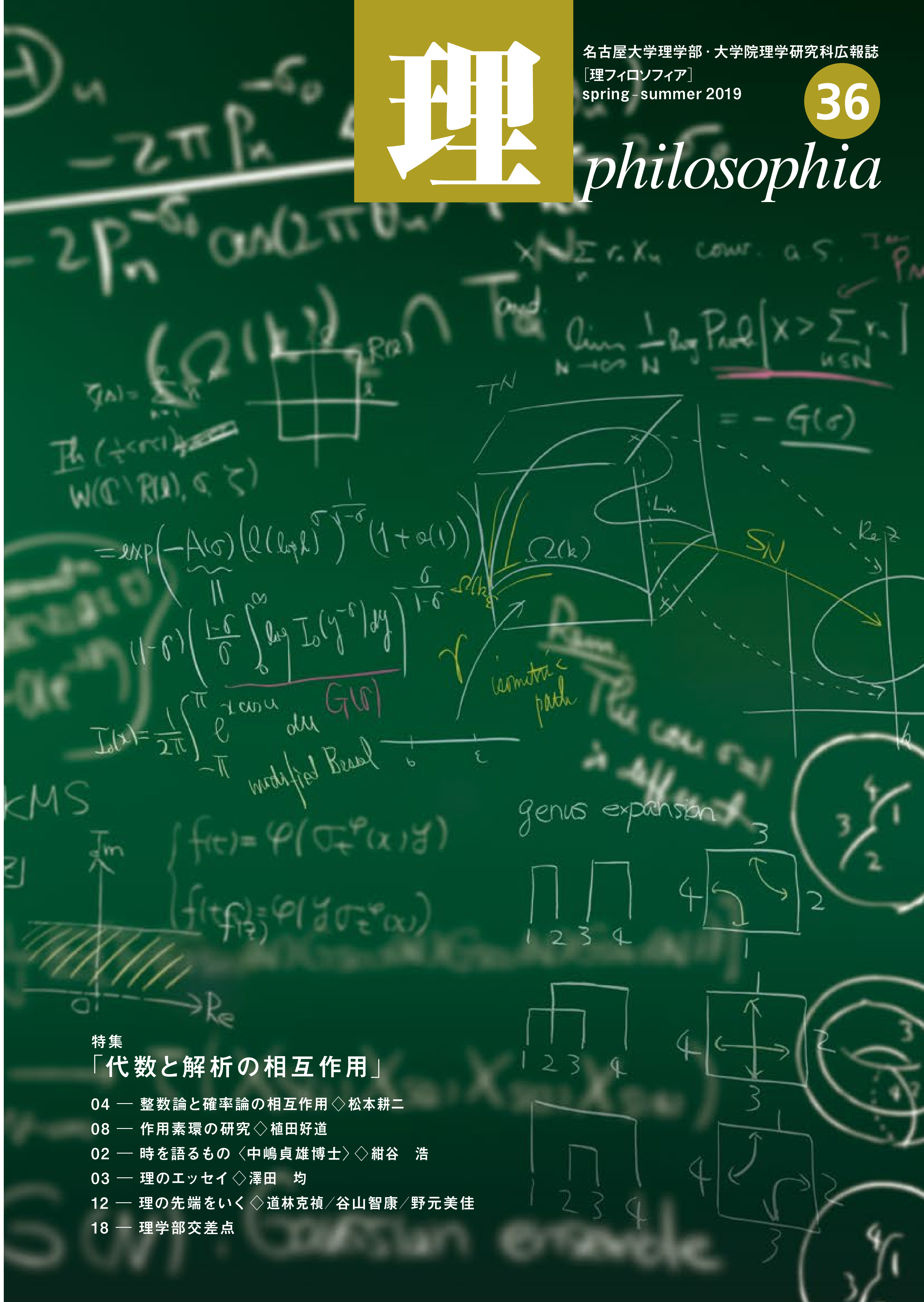
編集発行　名古屋大学理学部･大学院理学研究科広報委員会
〒464-8602 名古屋市千種区不老町

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2019年10月頃発行の予定です。

制作　株式会社電通
編集協力　株式会社エスケイワード
デザイン　株式会社ティ･エム･シー

ISSN 1884-8486

TEL 052-789-2308　FAX 052-789-2800　E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp　URL http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/



理 philosophia

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 2019
36

特集
「代数と解析の相互作用」

中嶋貞雄博士——格子振動がもたらす電子間引力の発見

中嶋貞雄博士は1950年に27歳で名古屋大学物理学教室に助教授として着任した。その後教授昇格を経て、1960年に東大物性研に異動するまでの10年間、超伝導・超流動などさまざまな重要な凝縮系理論をS研究室から発信した。

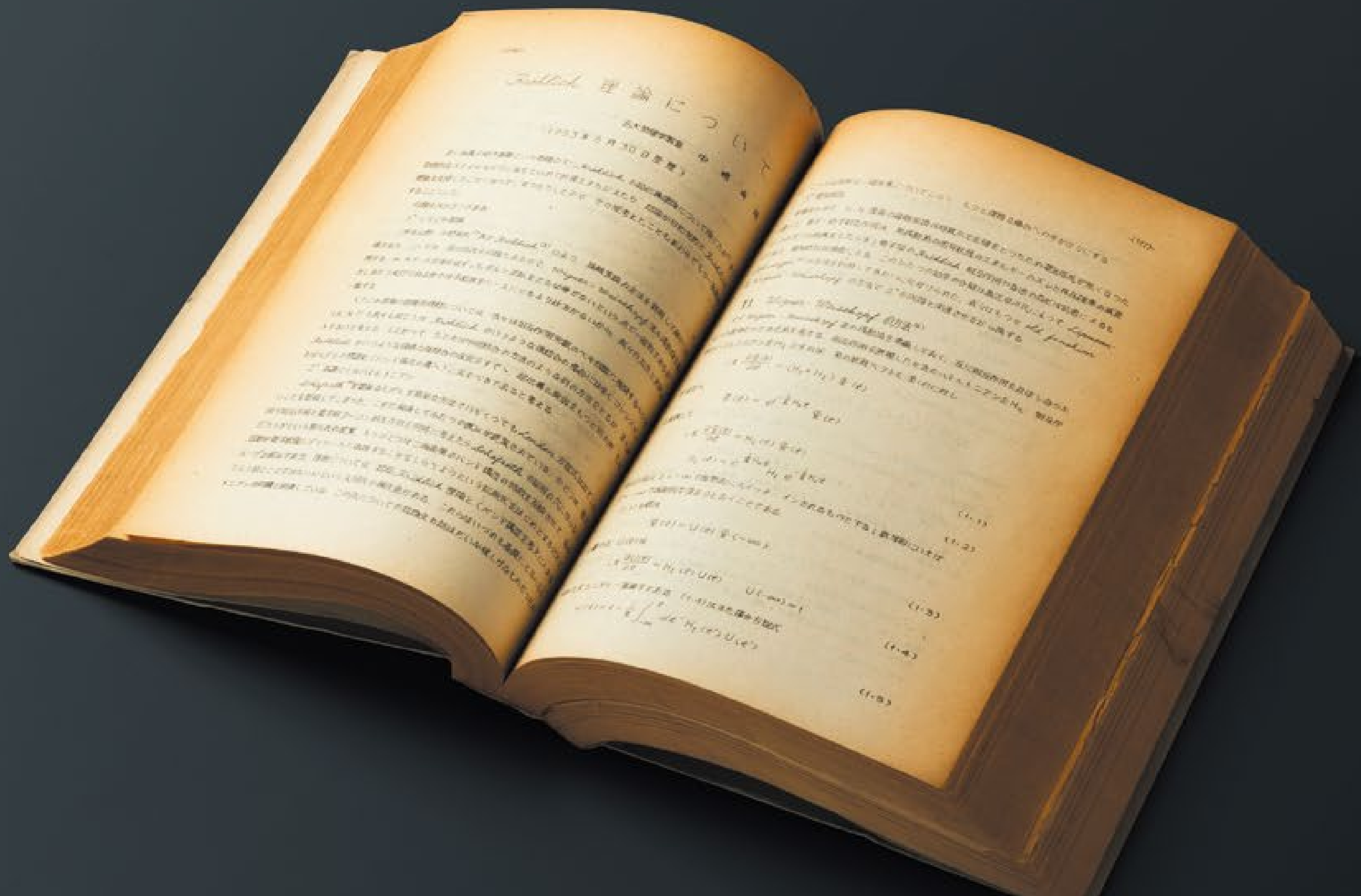
超伝導理論の金字塔である、バーディーン、クーパー、シュリーファーによるBCS理論の完成前夜の1953年、中嶋博士は超伝導の研究に取り組んでいた。粗削りなFröhlichの超伝導理論の問題点を整理し、格子振動とクーロン斥力を同時に考慮した理論を展開し、超伝導の起源である電子間引力が生じることを見出した。折しも京都の国際会議に出席していたバーディーン*は本研究の重要性をいち早く理解し、彼の依頼を受けた中嶋博士は名古屋駅に出向き、東京へと向かう車中バーディーンに論文の別刷りを手渡した。バーディーンたちにより1957年に完成したBCS理論の礎の一つとして、中嶋博士の仕事はBCSの論文に引用されている。

中嶋博士は東京大学物性研究所では所長を歴任するなど、日本の凝縮系物理の指導者として活躍された。超伝導の研究は、1986年の銅酸化物超伝導体の発見や、2008年の鉄系超伝導体の発見を経て、今日まで目覚ましい発展を遂げた。しかし中嶋博士の理論は今日なお輝きを失わない不朽の業績である。

（紺谷　浩　物質理学専攻教授）

中嶋貞雄（1923 - 2008）
元名古屋大学理学部教授

＊ J. バーディーン（1908 - 1991）
アメリカの物理学者。1956年にショックレー、ブラッテンとトランジスタの発明によって、1972年にクーパー、シュリーファーとBCS理論の提唱により、それぞれノーベル物理学賞を受賞。



◇写真の説明
左は中嶋貞雄による論文「Fröhlich理論について」、物性論研究65, 116 (1953)。超伝導の起源である電子間引力が格子振動により生じることを示した。上は中嶋博士とバーディーン博士。1986年5月に東京大学物性研究所で撮影したもの。両博士の友好関係は終生続いた。
（写真提供：福山秀敏）

◎理のエッセイ

菅島臨海実験所の重要性

澤田　均　附属臨海実験所教授

Illustration: Mari Kaneko

理学研究科附属臨海実験所（菅島臨海実験所）は伊勢湾口の西岸に位置する鳥羽市の離島である菅島にあり、アクセスは船に限られる。当実験所は、1939年12月に医学部附属施設として設立され、1942年4月に理工学部から理学部が独立した際に理学部附属施設となった。菅島が選ばれた理由の一つとして、生物相の豊富さが挙げられる。20門160種以上は生息している。なかなかこれだけ多くの生物を見せられる場所はなく、臨海実験所の要と言える。

私が当地に赴任したのは2002年10月。当時は、生化学・分子生物学の研究設備はほとんどなかったが、今ではDNAシークエンサーやタンパク質のアミノ酸配列を決定する質量分析計もあり、充実してきた。ここでは今、ホヤの受精機構の研究を行っている。ホヤ（脊索動物門）は雌雄同体で、精子と卵をほぼ同時に海中に放出するが、不思議なことに自家受精しない。どのようにして精子と卵は自己と非自己を識別しているのだろうか。この問題は、モーガンが1900年代初頭に発見して以来の動物学の大きな謎とされてきたが、当実験所ではその解明を目指している。

一方、教育面では、日本の海洋基本政策に基づき、国内外の学生を対象とした臨海実習を多数行っている。磯場の多様な生物を採集し観察することや、同調して進行するウニの受精発生観察を行うことは、生物学を学ぶ者にとって非常に重要な基礎実習である。図鑑や教科書では絶対に得られない体験と言える。生物相の豊かさを背景に海洋生物学ではパラダイムシフトを生み出すような独創的研究に発展しうる研究が多く、それを支えるのが臨海実験所の使命でもあると考えている。自分もあと1年でこの実験所を去るが、菅島臨海実験所が研究教育施設として一層発展していくことを望んでやまない。

Hitoshi Sawada

1954年生まれ。北海道大学大学院薬学研究科博士課程を修了後、北大薬学部助手、和歌山医大助手、東工大理学部助手・助教授、北大薬学部助教授を経て、2002年10月から現職。専門は動物学・発生生化学。

現代数学は代数・解析・幾何の3つの領域で構成されている。
これらは各々単独に研究されているのではなく、常に相互に影響を与えつつ発展している。
今号では代数と解析の相互作用を、1つは数学最古のテーマともいえる整数論から、
もう1つは比較的新しい研究領域である作用素環論から、眺めていく。

整数論と確率論の相互作用

松本耕二 多元数理科学専攻教授

Kohji Matsumoto

1957年生まれ。東京大学理学部数学科卒（1981）、立教大学大学院理学研究科修了（1986）。理学博士。1987年岩手大学教育学部講師、1990年同助教授、1995年名古屋大学大学院多元数理科学研究科助教授、2001年から現職。専門は整数論。

対極の関係ではない関係

整数論というのは「整数」の性質を研究する分野であり、その対象は簡明で、明確に定義されたものである。もちろん現代の整数論においては、1、2、3…といった素朴な意味での整数だけではなく、そのいろいろな意味での一般化なども考えるので、随分と抽象化された議論も行うが、それでも本来の対象が「整数」という素朴で明瞭なものである、という整数論の特性は今でも生きているように感じられる。

一方で確率論というと、受験数学でよく出てくる「サイコロを振って1の目が出る確率」みたいな、偶然に支配された現象を扱う数学、というのが大方の理解であろう。整数というのは一個一個はっきり決まっていて、偶然が入り込む余地はなさそうであるから、整数論と確率論とは対極にある数学、というイメージをもった人がいてもおかしくはないだろう。しかし実は、確率論的な発想は、昔から整数論の中で頻繁に用いられてきた。この記事ではその類の考察を、いくつかの実例を挙げて紹介したい。

素数定理による予測

まず古典的な一例として、「素数定理」が挙げられる。素数というのは1とそれ自身以外に約数を持たない正の整数のことであるが、素数が整数全体の中でどのように並んでいるか、その規則を発見するのは容易ではない。素数の表をつくってみると、素数の現れ方はまるっきり不規則で、どうにも制御できないような気がして来るであろう。そこで、細かいことは忘れて素数の大局的な分布を調べてみてはどうか、と考えるのは自然な着想である。たとえば、正の数 x 以下の素数の個数を $\pi(x)$ と書いたとき、この $\pi(x)$ の、x が大きくなっていくときの挙動はどうなるであろうか。

19世紀の初頭、ルジャンドルとガウスはそれぞれ独立にこういう考察を行い、$\pi(x)$ が $x/\log(x)$（対数は自然対数）で近似できるであろう、との予測を立てた。約100年後の1896年、この予想はアダマールとド・ラ・ヴァレープーサンによって（やはりそれぞれ独立に）証明され、現在では素数定理と呼ばれている。正確に定式化すれば（式1）のようになる。

式1

$$\lim_{x\to\infty}\frac{\pi(x)}{x/\log(x)} = 1$$

素数定理が証明される約半世紀前、このテーマに初めて理論的成果をもたらしたのはロシアの数学者チェビショフで、彼は $\pi(x)$ が $0.92x/\log(x)$ と $1.11x/\log(x)$ の間にあることを証明した。チェビショフはこれ以外にも、整数論と確率論の双方で大きな業績を挙げた学者であって、彼の影響もあってロシアや東欧諸国では現在に至るまで、伝統的に整数論と確率論は近い分野だと考えられている。確率論的な整数論における標準的な教科書のひとつであるエリオットの“Probabilistic Number Theory”の巻頭には、この分野の代表的な開拓者として4人の数学者の肖像写真が掲げられているが、彼らは4人とも、ポーランド、ハンガリー、リトアニアといった東欧の小国の出身である。

約数の個数と素因数の個数

素数定理のように、細かい挙動を調べるのは難しいので平均的なふるまいを考察しよう、というのは整数論においては頻繁に採用される研究方針である。たとえば正の整数 n の約数の個数 $d(n)$ は、整数論における重要な研究対象の一つだが、n が変化するときのそのふるまいは極めて不規則である。しかしその平均値を考えると、（式2）のようなかたちの簡明な漸近式が古くから知られている。

式2

$$\sum_{n\le x} d(n) = x\log(x) + (2\gamma-1)x + \Delta(x)$$

（ただしγはオイラーの定数、γ=0.57721…で、Δ（x）は誤差項）

誤差項 $\Delta(x)$ が $x^{1/2}$ 程度のオーダーで押さえられることは比較的容易に証明でき、もっと強い誤差項評価も色々と研究されている。上の漸近式は、$d(n)$ の $n\le x$ の範囲での「平均的な大きさ」が $\log(x)$ くらいである、と解釈することもできるであろう。

今度は n の（相異なる）素因数の個数を $\omega(n)$ と書くことにすると、同様にして、その「平均値」が $\log(\log(x))$ くらいであることがわかる。それでは個々の $\omega(n)$ と平均値との「差」はどう評価されるか、言い換えると $|\omega(n)-\log(\log(x))|$ がある与えられた量より小さく（あるいは大きく）なるようなnの頻度はどのくらいであろうか。こうなってくるともう、確率論の問題設定に非常に近づいて来ていることが感じられよう。実際、$\omega(n)$ についてはエルデシュ・カッツの定理と呼ばれる、（定理1）が成り立つ。

定理1

x 以下の正の整数 n で

$$\frac{\omega(n)-\log(\log(x))}{\sqrt{\log(\log(x))}} \le a$$

を満たすものの個数を $N_a(x)$ と書くと、

$$\lim_{x\to\infty}\frac{N_a(x)}{x} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{a} e^{-w^2/2}\,dw$$

確率論をご存じであれば、この式がまさに、確率論の基本定理の一つである

中心極限定理と同じ形をしていることがみてとれよう。素因数の個数の分布は標準的な確率法則に従っているのである。

この種の、整数論の問題に確率論の手法を応用して問題を解いていく研究領域は確率論的整数論とよばれている。次節では少し毛色の違った例を紹介しよう。

正規数であることの証明

実数 t が正規数であるとは、t の小数展開において、任意の数字列の相対頻度がすべて等しくなるようなものをいう。正確にいうと、任意の正の整数 k に対して、0から9までの k 個の数字からなる勝手な文字列が t の小数展開中に現れる頻度が必ず 10^{-k} になる、ということである。これは全く自然な性質だと思われるが、ある具体的な数がこの性質をもつことを証明するのは大変困難で、現在までに正規数であることが証明された数の例はごくわずかしかない。しかし、確率論の立場でこれを眺めると、実はルベーグ測度の意味で、ほとんどすべての（すなわち、ルベーグ測度0の集合を除いた、残りすべての）実数は正規数であることが証明できる。これは20世紀初頭にボレルによって示された結果である。

この種の測度論的な結果は、具体的な構成法を与えないので、いささか「痒いところに手が届かない」感があるのだが、整数の大局的な性質を理解する上では大変強力な手法となっている。

ゼータ関数の役割

それではここで、素数分布の話に戻ることにしよう。上述した素数定理の証明において重要な役割を果たしたのが、リーマンのゼータ関数と呼ばれる複素有理型関数である。その定義は複素数 s に対して（式3）で与えられる。

式3

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s}$$

この（式3）は s の実部 $\Re(s)$ が1より大きい範囲で収束し、さらにその範囲で（式4）の無限積表示が成り立つ。

式4

$$\zeta(s) = \prod_{p} \frac{1}{1-p^{-s}}$$

（pは素数全体に亘る）

この無限積表示は18世紀にオイラーにより発見された。オイラーはこの表示によって、$\zeta(s)$ を使って素数の分布を研究することができるであろう、と正しく推測し、たとえば $s\to 1$ の極限において $\zeta(s)$ が発散することから、素数が無限個ある、という事実が導けることを注意している。素数の無限性そのものはギリシャの昔から知られている事実ではあるが、オイラーの証明は整数論の性質の証明に解析学が用いられた史上最初の例であって、解析的整数論への道を拓いたものである。

こうして $\zeta(s)$ は素数分布の研究に欠かせない道具となってきた。ただ、（式4）、（式4）の表示は $\Re(s)>1$ でしか成立しないが、素数分布論に実際に応用するには、解析接続の手法で $\zeta(s)$ の定義域を複素平面全体に広げておく必要がある。こうした $\zeta(s)$ の複素解析的な研究を開始したのがリーマンである。そして、$\Re(s)=1$ という直線上で $\zeta(s)\neq 0$ という性質が、素数定理を証明する際の鍵となった。

この $\zeta(s)$のより詳しい性質が、素数分布のさらに精密な情報を与えているであろうことは間違いない。事実、$\zeta(s)$ の零点で実数でないものはすべて $\Re(s)=1/2$ なる直線（これを臨界線という）上に乗っているであろう、というのが有名なリーマン予想で、素数定理の精密化と密接な関係がある。そのため整数論の研究者は $\zeta(s)$ の性質の解明を強く望んでいるのであるが、素数分布の性質を内包している関数の研究がそう容易いはずがない。ここでもまた、$\zeta(s)$ の局所的な挙動を精密に解析することは極めて困難である、という壁にぶつかることになる。そしてここでも、それなら大局的な挙動を調べよう、という発想がしばしば実りをもたらす。たとえばランダウ、ハーディ、リトルウッドらの研究以来 $\zeta(s)$ の種々の「平均値定理」が 知られていて、素数分布論のさまざまな問題に有効に応用されている。

ゼータ関数の値分布論

ここでは $\zeta(s)$ の確率論的な値分布論を紹介しよう。これは H.ボーア（有名な原子物理学者 N.ボーアの弟）によって開拓された研究分野である。以下、測度論、確率論の用語をいくつか説明なしで使用するが、ご容赦いただきたい。

リーマン以来、$\zeta(s)$ と $\zeta(1-s)$ を結びつける、関数等式と呼ばれる等式が知られている。したがって $\zeta(s)$ の挙動を調べるには半平面 $\Re(s)\geq 1/2$ で考えれば十分である。このうち $\Re(s)>1$ では、上述した定義式が収束することから、$\sigma=\Re(s)$ を一つ固定したとき、$\{\zeta(s+it) \mid t\in\mathbb{R}\}$ は有界集合になる。では残された $1/2\leq\Re(s)\leq 1$ ではどうなるであろうか。

臨界線 $\Re(s)=1/2$ のところは極めて難しいので除外すると、$1/2<\sigma\leq 1$ のとき、$\{\zeta(s+it) \mid t\in\mathbb{R}\}$ は $\mathbb{C}$ で稠密になる。これがボーアがまず（クーラントとの共著で）得た結果であるが、その後ボーアはこの研究を進めて、イェッセンとの共著で、次のような定理（定理2）に到達した。これをボーア・イェッセンの極限定理という。

定理2

複素平面内の（辺が座標軸に平行な）長方形 R を考え、$V(T,\sigma,R)$ を集合 $\{t\in[-T,T] \mid \log(\zeta(\sigma+it))\in\mathbb{R}\}$ の1次元ルベーグ測度とすれば、任意の $\sigma>1/2$ に対し、極限

$$W(R) = \lim_{T\to\infty} \frac{V(T,\sigma,R)}{2T}$$

が存在する。

ボーアがこの極限値を $\zeta(s)$ の値分布を反映するある種の「確率」と捉えていたことは、ドイツ語のWahrscheinlichkeitの頭文字を取ってこの値を $W(R)$ と書いたことからもわかる。そして今日では、この定理は次のように確率論の言葉で定式化するのが普通である。A を複素平面内のボレル集合とし、$U(T,\sigma,R)$ を集合 $\{t\in[-T,T] \mid \zeta(\sigma+it)\in A\}$ の1次元ルベーグ測度とすれば、$P_{T,\sigma}(A)=U(T,\sigma,A)/(2T)$ は $\mathbb{C}$ 上の確率測度を定めるが、この測度は $T\to\infty$ のとき、ある確率測度 P_σ に弱収束する。

さらに、上の定理における「複素平面」を「正則関数のなす関数空間」に置き換えた、関数空間上の極限定理も得られていて、それはさらにゼータ関数の普遍性理論とも関係することが知られている。普遍性定理というのは、（定理3）にあるような、かなり驚くべき内容の定理である。

定理3

帯領域 $\{s\in\mathbb{C} \mid 1/2<\Re(s)<1\}$ 内の（補集合が連結な）勝手なコンパクト集合 K を取り、$f(s)$ をその上で定義された零点を持たない連続関数で、K の内部では正則なものとすれば、任意の $\varepsilon>0$ に対し、

$$\sup_{s\in K} |\zeta(s+i\tau)-f(s)| < \varepsilon$$

を満たす実数εが存在する（しかもそのような τ 全体の集合は実数の中で正の下極限密度をもつ。

これはボーア・クーラントの稠密性定理の関数空間版、とでもいうべき結果で、正則関数のなす関数空間内で、$\zeta(s)$ の、変数の虚部を動かすことによって得られる軌道が稠密になっていることを示している。この定理は1975年にヴォローニンによって発見され、その一般化や定量化は今日でも盛んに研究されている。これもまた、確率論の色彩が濃厚な結果と言えるであろう。

普遍性定理は、領域 $1/2<\Re(s)<1$ 内における $\zeta(s)$ の挙動が、極めて複雑で捉えがたいものであることを如実に示している結果と言える。この領域で $\zeta(s)\neq 0$ であることを主張するリーマン予想が非常に難しいのも無理はない、と思えてくるであろう。普遍性定理は、リーマン予想を解決するには単純な近似の手法などでは届かず、深い構造論的考察が不可欠であることを示していると思われる。

確率論の可能性

この記事では、素数の分布の問題に主眼をあてて、エルデシュ・カッツの定理やゼータ関数の値分布に関する普遍性定理といった、整数論と確率論の相互作用によってもたらされた諸結果を紹介した。これらの結果は、冒頭に触れたように整数という素朴で明瞭なものを扱うものだが、整数一つ一つを扱うのではなく整数の集団を統制する理論を考えるという意味で、確率論的な発想を通して初めて得られたものといえよう。このように確率論的な発想や、また確率論の種々の結果は、今や整数論において縦横に駆使され、多くのめざましい成果がもたらされている。整数論における確率論的な考え方の重要性は、今後ますます増大していくことであろう。

松本耕二ウェブページ　http://www.math.nagoya-u.ac.jp/~kohjimat/test.html

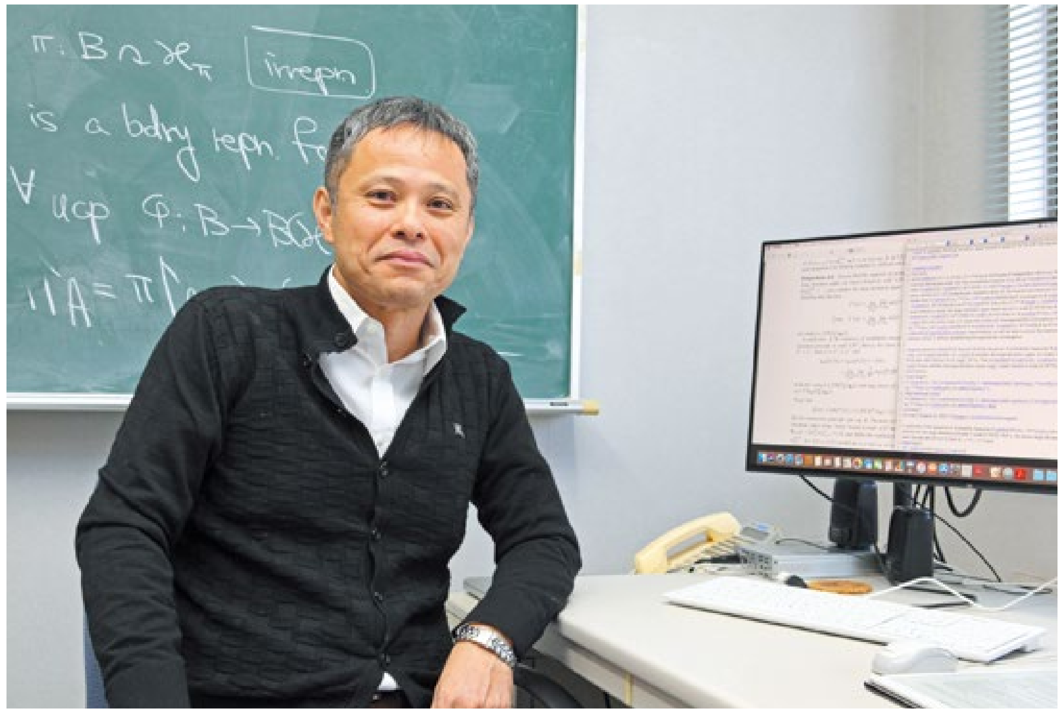
作用素環の研究

植田好道 多元数理科学専攻教授

非可換性が問われる数学

私の研究分野である作用素環論の紹介をしたい。何を問題にしているのかの説明はもちろんのこと、その発展の様子を覗き見することにより、研究発展の生態に思いを馳せたい。

世間には掛算の順序にこだわる人もいるようである。しかし、日常生活で扱う数に対しては掛算の順序が結果を左右することはない。2×3=6=3×2。つまり、掛算の順序は重要ではない。ところが、作用素環論では積の順序に結果が左右する現象「非可換性」が重要なキーワードである。まずこれを説明しよう。関数 $f(x)$ を微分 $f'(x)$ する操作に記号 D を与える。次に関数 $f(x)$ に変数 x を掛ける操作にも記号 M を与えよう。すると式1のような計算ができて、変数 x を忘れると $(DM-MD)f=f$ となる。さらに D,M を数のように考えれば、$DM-MD=1$ なる関係式が得られる。（実はこれがほとんど量子力学に現れる関係式であるが深入りしない）。 つまり、$DM \neq MD$ である。微分したり、変数を掛けたりする操作をあたかも数のように取り扱うと便利だが、掛算の順序にこだわらなければいけないのである。数学の出発点は、物の個数の勘定や土地の面積の測定であった。その後、自然現象や社会現象の記述に有効に使われて今日に至る。すなわち、数学は数量の記述とその論理のための精密言語の役割を果たしている。自然現象を記述すると述べたが、静止した現象を考えるだけでは済まない。すなわち、操作も数学の土俵に乗せる必要がある。ここで、2×3=6 のような形式的な演算を許す数学の利点に注意しよう。すると、操作も、形式的な演算を許すべく、数の一般化として扱いたい。しかし、$DM \neq MD$ のように非可換性を生じる。斯くして、非可換数を考える必然性が生まれる。そこで数学の習慣として、非可換数の集まりといった枠組みを精密に定式化するところから理論構築を試みるのである。これは、数学が個々の現象と切り離されて成立しなければならない故である。



Yoshimichi Ueda

1971年生まれ。1999年3月九州大学大学院数理学研究科博士後期課程単位取得退学。1999年9月九州大学より博士（数理学）取得。1999年4月広島大学理学部助手、2002年4月九州大学大学院数理学研究院助教授（准教授）を経て、2017年10月より現職。

式1

$$(Df)(x)=f'(x), \qquad (Mf)(x)=xf(x)$$

$$((DM-MD)f)(x)=f(x)+xf'(x)-xf'(x)=f(x)$$

$$(DM-MD)f=f$$

$$DM-MD=1$$

関数 $f(x)$ を微分する操作 D と $f(x)$ に変数 x を掛ける操作 M について, $DM-MD=1$ という関係式が成立する。

人類はニュートンの頃から解析学なるものを操り始めた。高校で微分積分を習う際に、初めて極限なる概念に読者の多くも出会ったと思う。極限を考えるのは解析学の第一歩である。極限概念を考え始めると自然に無限の自由度、すなわち、無限次元性に到達する。作用素環論は非可換数に基づく解析学を問題にする。たとえば、変数も値も非可換量である関数を考えるのは自然であるが、その解析学の理論は全く自明でないことに気づく。作用素環とは解析学を展開できる程度に非可換数の集まりを定式化したものであり、その性質を調べるのが狭義の作用素環論である。もちろん、他と切り離して抽象的に研究するのは不健全なので、他の数学の話題（時には物理の話題）を取り込みつつ研究が進んだ。なお、作用素環論の醍醐味は、非可換性と無限次元性の克服である。また、解析と代数の融合であることも忘れてはならない。多くの解析の分野では、不等式を示して終わり、ということも多いが。作用素環論では等式まで示さないとしかるべき評価を受けない。

歴史的には、作用素環の概念は、量子力学と抽象代数に動機付けられて、フォンノイマンが 1930年頃導入した。量子力学では、重要な量（物理量）が線型作用素(演算子)とよばれる無限サイズ行列により与えられる。作用素環の「作用素」はこれに由来する。「環」は代数学で学ぶ「多元環」である。多元環とは、数の集まりを抽象一般化したものと理解してほしい。要は量子力学の記述に必要な非可換数の研究がフォンノイマンの動機だった、こう言うと、作用素環論は量子力学そのものだという誤解を生みかねないが、彼の動機は他にもあった。それらは日本語訳が文庫本で出版されているフォンノイマンと弟子のマレイの論文の冒頭で述べられている。

作用素環論の歴史をたどる

フォンノイマンとマレイの仕事は1930年頃から1940年代中頃に公表された。彼らの仕事は徹底していたので、続く研究は停滞した。同時期に、旧ソ連のゲルファンドとナイマルクがフーリエ変換理論の代数化の観点からフォンノイマンらとは独立の仕事を行った。彼らの仕事は現代数学に「仮想空間」の視点を提供した。これらを作用素環論の出発点とみなすべきであろう。

日本の作用素環論の組織的研究は、私の知る限り、第二次大戦後すぐ、東北大学で始まった。そこから後に分野のリーダーとなる人物たちを輩出するとともに現在に残る基礎的成果を生み出した。少し遅れて、海外では場の量子論の代数的公理化が作用素環論を基礎に生まれた。ハーグや京都大学物理学出身の荒木不二洋などが中心人物である。これはかたちを変えて、フォンノイマンの動機に応えたといえる。当時、アメリカ東海岸とパリが研究の中心だったようだが、現代から見ると、当時の東北大学のグループの存在感は大きい。

私見だが、真にフォンノイマンを凌駕する最初の成果は1960年代後半に現れた九州大学の冨田稔のモジュラー理論である。彼は学生時代に動機を得て思索を始め、20年弱の期間をかけてモジュラー理論に到達したと語っている。高度な内容

なのでモジュラー理論が何かは説明できないが、この仕事は冨田がいなければこの世には現れなかった理論に思える。特に20年弱という時間を強調したい。また、冨田の学生時代の考察において、当時、名古屋大学で活躍した中山正の仕事の影響があったと本人が語っていることもここに書き留めておきたい。私は冨田の定理に敬意を抱きつつ日々使っているが、名古屋大学理学部に所属する者として、このことに喜びを感じる。

式2　冨田の定理

$$\Delta^{it} M \Delta^{-it} = M, \quad JMJ = M'$$

M として時空領域で観測可能な物理量がなす作用素環を取ると、この二つの等式は時空の物理的に意味をもつ変換を実現する。さらに、前者の等式は量子統計力学の文脈での解釈ももつ。純粋数学的動機から得られた冨田の定理は驚異的な深みをもつ。

モジュラー理論は多くの研究者の活躍を促した。東北大学出身の竹崎正道、当時大学院生だったパリのコンヌがその代表である。コンヌは1970年代に快進撃し、冨田の理論を起点に壮大な理論を構築した。結果として研究の停滞を生じたが、作用素環論固有の興味から外れた研究が、停滞を限定的なものに留めた。たとえば、記号力学系の理論はコンピュータの記憶媒体の基礎理論に相当するのだが、1970年代後半に作用素環論経由で導入された高度な幾何学ツール（K-理論）が研究の道具として現在では普通に使われている。このような分野の広がりの中から、作用素環論とは無縁だったルーマニアの（当時の）若手たちが作用素環の研究に参入した。彼らは1980年前後から大活躍し、現在まで作用素環論をリードしている。

1980年代に入ると、幾何学者の学生であったジョーンズが、コンヌの影響の下で作用素環の研究に参入し、フィールズ賞受賞につながる画期的な研究を行い、広大な研究テーマを生み出した。同時期に，ポーランドのボロノヴィッチは作用素環論の立場から「仮想的な対称性」の研究を企てた。これは1980年代後半に特殊関数の研究と大きな接点をもつとともにジョーンズの路線ともつながった。この特殊関数の研究では当時の名古屋大学の研究者を含む日本人研究者らの重要な貢献があったことを指摘しておきたい。私はその経緯を聞いたことがあるが、研究のダイナミズムを感じるものであった。ジョーンズ、ヴォロノヴィッツの路線は1980年代後半からの無限可積分系と総称される数学研究のムーブメントの一部となって、分野の裾野を大きく広げた。それらとは別に、ルーマニア出身のヴォイクレスクは1980年前半に確率論のアイディアを作用素環論にもち込み、1990年頃、ランダム行列との接点を見出し、極めて斬新な手法を編み出した。ここで、ランダム行列というのは行列に値を取る確率変数のことであり、その研究は統計学や原子核物理から生まれたことを指摘しておく。以上のようにして、作用素環論は1990年頃には数学の広い分野に関連するようになった。ちなみに私の院生・助手時代の仕事の一部（1996—2000年）はこれら三つの路線の融合として得られた。当時、ジョーンズ、ヴォロノヴィッツの路線に比べて、ヴォイクレスクの路線がマイナーだったのが私にチャンスを与えた。

以上の歴史の仔細に意味を見出すのは我々だけだろうが。一般論として学べることがあると思う。

(1) 徹底した壮大な仕事は直後の停滞を生む。
(2) 研究上の田舎（東北大学、九州大学、ルーマニア、ポーランド…）から新しい発展が生まれる。多様性の重要性を示している。
(3) 画期的な仕事には長い時間が必要である（冨田の理論）。さらに、個々の成果を見ると次のことに気付く。
(4) 火のないところに煙は立たない。フォンノイマンの仕事や冨田の理論さえ背景をもつ。

現状とこれから

近年、ワイルドな数学的対象が積極的に取り上げられるが、「対称性」はその典型的発生源である。対称性は変換とよぶ操作の集まりとして与えられる。ゆえに、すでに説明したように非可換性を有する。作用素環は非可換量を解析学的に扱う枠組み（少し知識のある人向けにいえば、無限次元解析学のための線型代数）であるから、そのようなワイルドな数学的対象を扱うのに適当である。実際、私を含む多くの作用素環研究者はこの視点に立って研究を進めている。

私自身はランダム行列の行列サイズ無限大極限が生み出す作用素環も研究している。その目的は、ランダム行列の行列サイズ無限大極限に対する解析学の展開である。その研究の醍醐味は、高度な確率解析学の技術と作用素環論の技術の融合である。しかし、通常の確率解析学と比較して、作用素環論に基づく研究はまだ初歩的レベルに留まっている。私はこの問題意識の下で、行列値確率過程の行列サイズ無限大極限の研究に多くの時間を割いている。ただ、狭義の作用素環研究者の間ではこの手の話題は依然マイナー扱いである。同様に、一つひとつの線型作用素自体の個性に着目した作用素環の研究もマイナー扱いであるが、作用素環論の立場からもっと注目する必要があると思う。（図1・2）

我々は歴史から自由ではない。ゆえに、歴史的経緯や流行に左右された研究も多い。ゆえに、多様性が必要である。私自身は常に「まわりがやらないこと」にこだわった。最近は、作用素環から自由になるべきだと考えている。他方で、多数派は正しくて、作用素環論固有のテーマが今後も重要と考えることもある。ところで、作用素環が名古屋大学で研究され始めたのは最近のことである。歴史に拠るとマイナーな地から新しい風が吹いたのだから、見習いたいと思う。

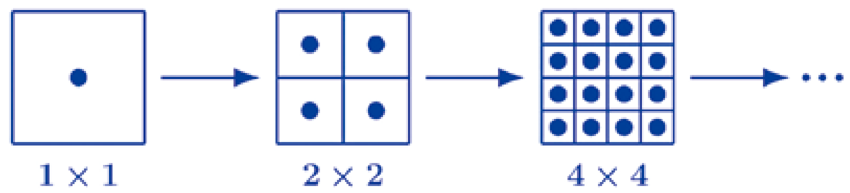


図1　ランダム行列のイメージ図
黒丸はランダムに値を取る変数(確率変数)。メッシュサイズを細かくする方向の極限として興味深い非可換量が現れる。イメージに合わないが。確率論のアイディアに基づき 3×3 など中途半端なサイズも間に入る。

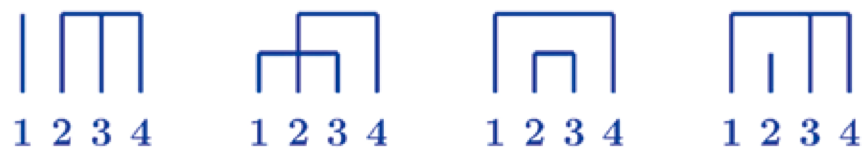
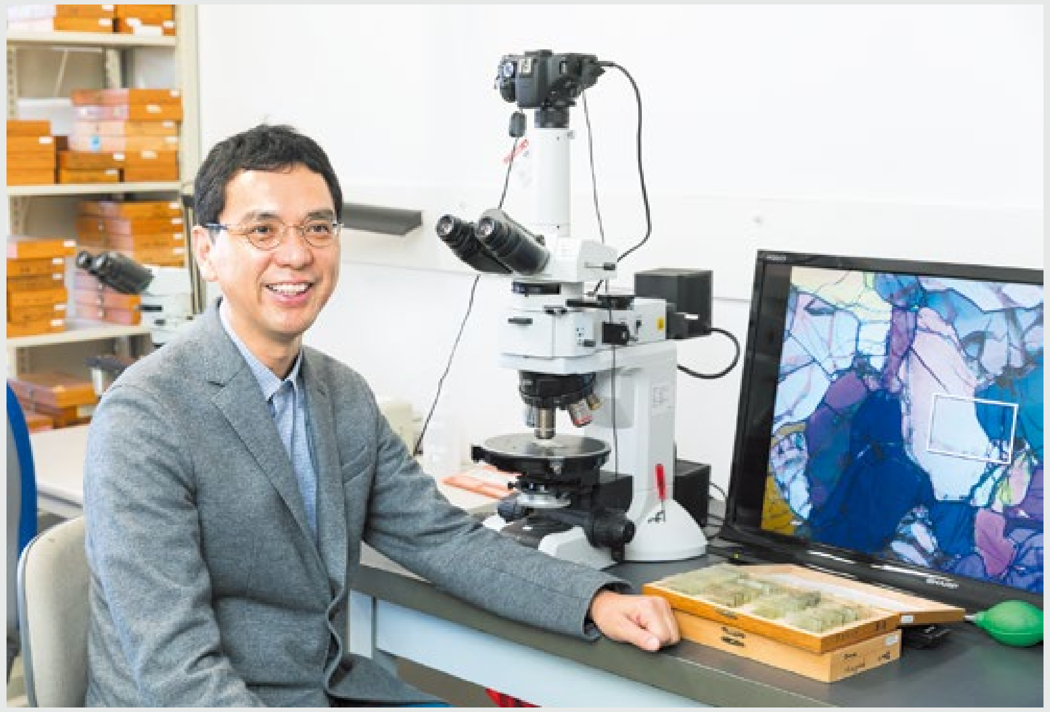


図2　ランダム行列の解析のイメージ
非可換量に対する解析学が十分に整備されていないため、ランダム行列の研究は上のような図を操って愚直に数え上げる手法に基づくことが多い。

植田好道ウェブページ　https://www.math.nagoya-u.ac.jp/~ueda/index-j.html

マントルとジオコスモスの探求

道林克禎　地球環境科学専攻教授



Katsuyoshi Michibayashi

静岡県生まれ。1994年オーストラリア・ジェームズクック大学でPh.Dを取得後、東京大学理学部地質学教室博士研究員、静岡大学理学部地球科学科助手、フランス・モンペリエ大学博士研究員、静岡大学理学部准教授、教授、研究フェローを経て、2018年より現職。専門は構造地質学、岩石鉱物学。

マントルの地質学

マントルは地球の80%以上を占めるほぼ地球そのもので、主にカンラン岩（とその高圧相）で構成された岩石層である（図1）。マントルは上部マントル、遷移層、下部マントルの3層に分かれており、地球中心核の熱を地表に放出しながら1億年の時間スケールで対流している。このうち上部マントルの対流は、カンラン岩の主要鉱物であるカンラン石のクリープとよばれる温度1000℃以上のゆっくりとした固体流動が担っている。

私はマントルを研究している地質学者である。地質学は基本的にフィールドサイエンスであり、地球表層を卵の殻のようにマントルを覆っている地殻の地層や岩石を直接観察して、それらがなぜどのような過程でその場所に存在するのか46億年の地球史の上で理解していく学問である。そのため、単純に考えれば地質学によるマントル研究は不可能である。しかし、実際の地球表層にはマントル断片であるカンラン岩体を観察できる場所がわずかに存在しており、その野外観察と採取したカンラン岩の組織構造や化学成分からマントルの固体流動の性質を研究している。これをマントル構造地質学とよんでいる。地質学によるアプローチはまるでマントルを直接観察しているような感覚があって面白い。

マントルの断片（カンラン岩）を手に入れるために、これまで日本列島をはじめとして，北米大陸、アフリカ大陸、アラビア半島などの大陸調査を行ってきた。さらに、マントルの断片探しの対象を海洋底にまで広げている。海洋底は地球表層の70%を占めているだけでなく、海洋地殻はわずか6km程度の厚さで陸上よりもかなり薄く、マントルが断片ではなく直接海底に露出している場所まで見つかっている。最近はほぼ毎年太平洋やフィリピン海へ研究航海に出かけて、有人潜水調査船しんかい6500（図2）に乗船して水深6000mの深海底でマントルの痕跡を探している。

水深6000mよりも深い海は「超深海帯」と呼ばれており、生命誕生の場として近年大いに注目されている。マリアナ海溝のように世界最深の海底に露出したカンラン岩は地下2900kmまで続くマントルそのもので、マントル直接研究として最適な場所である。水深6000mから、しんかい6500が浮力で静かにいっきに離底するとき、海底が少しずつぼやけて見えなくなる。地質学による最上部マントルの研究が、惑星探査みたいなフィールドサイエンスだと体感する瞬間である。

ジオコスモスの探求

地質学によるマントル研究は地球のラストフロンティアを探っている感覚があって面白い。しかし、マントル全体を直接地質学的に研究することは不可能であり、地震波観測など地球物理学的な方法が必要である。そうではあるけれども、地質学的に得られるカンラン岩の物性は、物理探査によって得られる地球深部のマントルの情報を解釈するために重要である。

我が国では、マントルに直接到達するために建造された地球深部探査船「ちきゅう」（図3）があり、将来水深3000mの海洋底から6km掘削してマントルに到達する国際共同プロジェクト「マントル掘削計画」が進められている（図4）。私もプロジェクトリーダーの一人として参加しているが、その実現には予算的にも技術的にも多くの課題が残されている。もし計画通りにマントルに到達できたら私たちの地球観は大きく変わることだろう。究極のマントル直接研究である。

地質学的にカンラン岩から地球深部のマントルを探る研究は地球科学の醍醐味である。それは紀元前からはじまり中世のデカルトやライプニッツも取り組んだ「大地の世界（ジオコスモス）」の探求である。興味は尽きない。

図1　カンラン岩の薄片組織
岩石を30μmまで薄くすると偏光顕微鏡で鉱物の光学的性質を観察できるようになる。この岩石はトンガ海溝の水深9700m付近から回収された世界最深のカンラン岩である。上部マントルの主成分であるカンラン石は偏光顕微鏡下で観察される干渉色で最も色彩豊かな鉱物である。これほど状態の良いカンラン岩が超深海になぜ露出しているのか未解決の問題でもある。

図2　有人潜水調査船しんかい6500（海洋研究開発機構）
これまでに1500回以上の潜航に成功している日本の誇る潜水調査船。

図3　地球深部探査船ちきゅう（海洋研究開発機構）
水深3000メートルの海底から6キロメールを掘削する能力をもつ世界最大の科学掘削船。究極の目標はマントル掘削である。

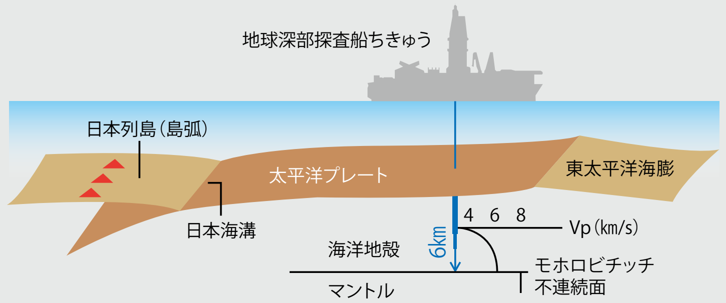
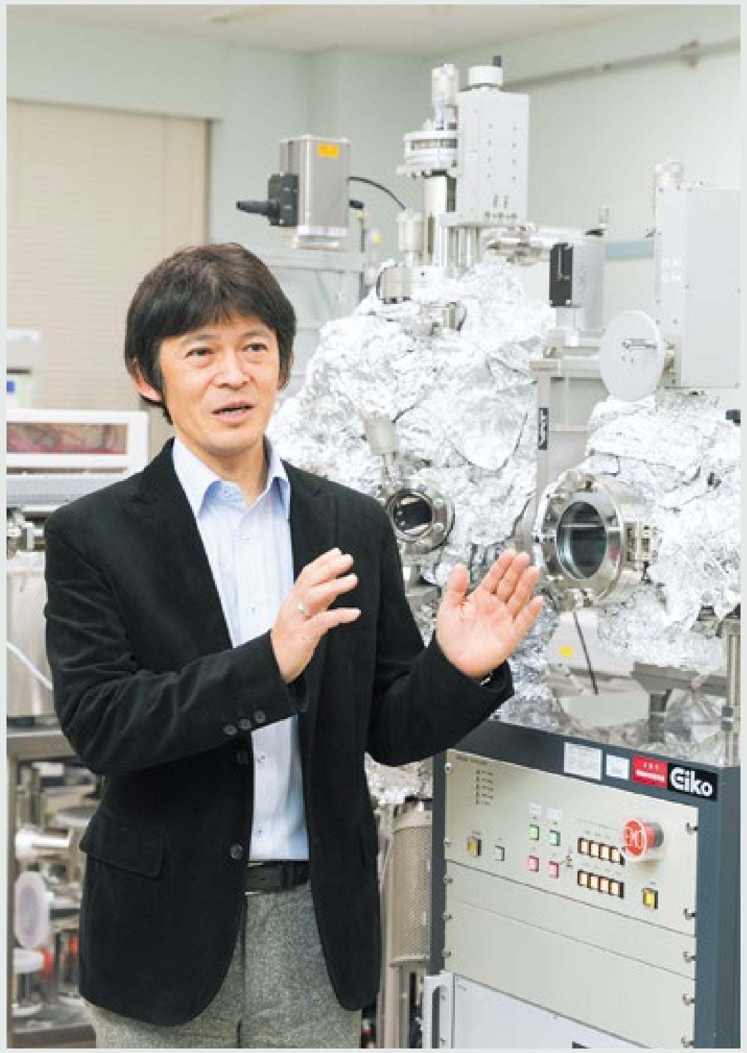


図4　マントル掘削計画
地球深部探査船ちきゅうによって水深3000mから海洋地殻6kmを掘削して地震波速度の境界であるモホロビチッチ不連続面（モホ面）を貫通して最上部マントルの物質を直接観察研究する計画。1960年前後にアメリカ合衆国で計画されたが、ちきゅうのような掘削船を建造する前に中止された。2012年にマントル掘削に向けた掘削概要書が日本の研究者を中心として新たに提案された。10年後の実現を目指して準備が進められている。

岩石鉱物学研究室　ウェブページ　http://www.eps.nagoya-u.ac.jp/~ganko/

スピン流とナノ磁性、その操作

谷山智康　物質理学専攻教授



Tomoyasu Taniyama

1968年東京都生まれ。1997年慶應義塾大学より博士（工学）取得。1996年科学技術庁金属材料技術研究所特別研究員。1998年東京工業大学大学院総合理工学研究科助手、2001年ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所客員研究員、2004年東京工業大学応用セラミックス研究所（フロンティア材料研究所）講師、助教授（准教授）を経て、2018年より現職。専門はナノ磁性・スピントロニクスの実験研究。ナノ磁性とスピン流との相関、界面マルチフェロイクスなどの研究に従事。2005年文部科学大臣表彰若手科学者賞。

スピントロニクスとスピン流

電子は時計回り、反時計回りに自転することに対応したスピン角運動量を持つ。スピントロニクスとはこのスピン角運動量を操作するための物理・デバイス応用を包括する研究分野であり、従来のナノ磁性分野と半導体スピン物性分野が融合するかたちで誕生した。特に、スピン流という概念の創出は、この分野の潮流を大きく変えた。同じ方向のスピン角運動量をもつ電子の流れは電荷とスピン角運動量の双方の流れ（スピン偏極電流）を表すのに対して、スピン流は、電荷の流れを伴わないスピン角運動量だけの流れを指す（純スピン流とも言う）。直感的には、電荷の拡散現象と対比して考えるとわかりやすい。電荷が局所的に蓄積すると電荷密度を一様にするように電荷は拡散する。一方で、電荷密度は一様であるが、時計回り、反時計回りに対応するスピン角運動量をもつ電子数が局所的に異なる場合には、電荷は一様であるから、電荷の拡散は生じないが、スピン角運動量は拡散して一様になろうとする。結果、スピン角運動量だけの流れが生じる。これがスピン流である（図1）。

磁性とスピン流

スピン流の物理にそれほど大きな関心がもたれていないころ、筆者はスピン角運動量の流れと物質中に存在する原子の磁気モーメントがいかに相互作用するかという問題に興味をもっていた。金属中に磁気モーメントが希薄に存在する希薄磁性合金では、伝導電子のスピン角運動量と原子の磁気モーメントが反対向きに結合したスピン一重項とよばれる状態を形成する。この現象は近藤効果とよばれ、半世紀以上にわたり固体物理の中心的な研究対象であった。この状態にスピン角運動量の流れが外部から注入されると、近藤効果はどのような変調を受けるだろうかという問いが当時の興味であった。スピン偏極電流を注入する技術が産声をあげ、ようやくその実験研究が可能になってきたころであったが、筆者らは、スピン偏極電流を注入することで近藤効果が抑制される現象を見出した。しかし、純スピン流を注入することはできなかった。

それから15年、微細加工技術の進展とハーフメタルとよばれる物質の高品質形成技術を契機に近藤効果を示す物質へのスピン流の注入実験が大きく動き出した。電荷の流れである電流と対照的に、スピン流は電子のスピン角運動量の反転に伴い消失する非保存量である。そのため、スピン流を計測するためにはマイクロメートル以下の領域でのスピン計測を可能にするデバイス技術が必須である（図2）。さらに、注入されるスピン角運動量が少ないとスピン流による起電力が小さくなり計測が難しくなるため、微小な領域に多くのスピン角運動量を注入する必要がある。15年前に筆者らがスピン偏極電流を注入する研究を開始したころは、近藤合金でのスピン流の計測は不可能であったが、ハーフメタルとよばれるスピン角運動量の配向度の大きな物質の高品質形成技術によって、ついにスピン流を近藤合金（近藤効果を示す希薄磁性合金）に注入することが可能になった。そして筆者らは、近藤効果の起源であるスピン一重項の形成過程を電気計測に基づいて、見てきたように観測することに成功した（図3）。スピン流の注入は、物質の磁気秩序にも大きな影響を与える。筆者らは、FeRh規則合金にスピン偏極電流を注入することで強磁性体に変化させることができることも実証し、スピン流は今やさまざまな分野での応用が期待されている。

スピン波

以上の議論は伝導電子によるスピン流に関する話題であったが、磁石を構成する磁気モーメントが波のように伝播する現象はスピン波とよばれ、この状態もまたスピン流を生成することが知られている。スピン波スピン流は、強磁性と強誘電性が共存するマルチフェロイク物質などにおいて、スピン流とフォノンの結合等の現象を通して新しい機能の創出へとつながると期待される。筆者は目下、スピン流の研究を更に展開し、界面に形成されるマルチフェロイク状態に着眼することで、スピン流とフォノンとの間の相関の物理に興味をもち研究を推進している。今後の展開が楽しみである。

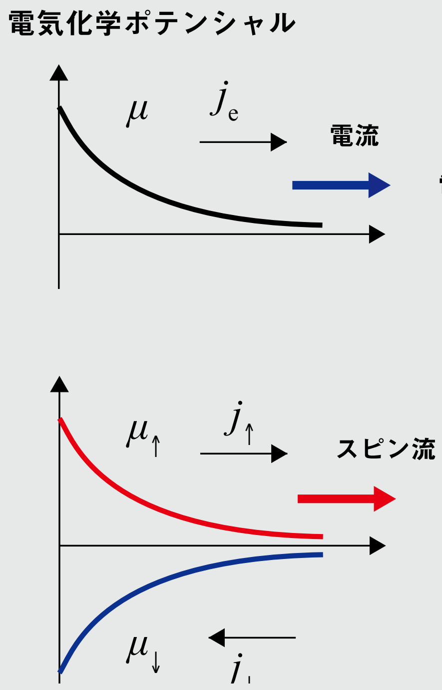


図1　伝導電子スピン流の生成
電子に対するポテンシャル（電気化学ポテンシャル）の勾配が電流を生み出す。スピン依存したポテンシャルの勾配はスピンに依存した電流を生み出し、その結果、電荷の流れを伴わないスピン角運動量の流れ-スピン流-が生じる。

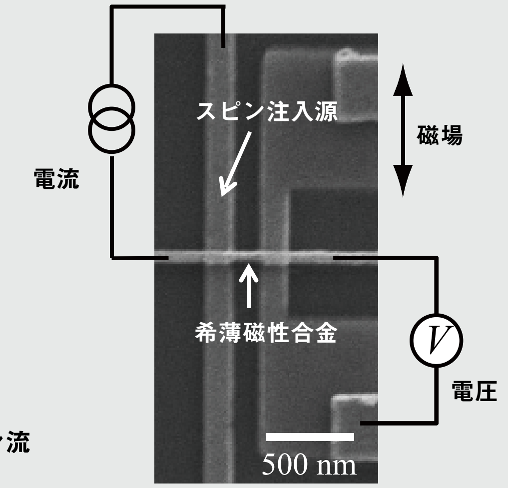


図2　スピン流計測デバイス
電流が流れていない電圧端子間にスピン流に起因する非局所的に電圧が生じる。

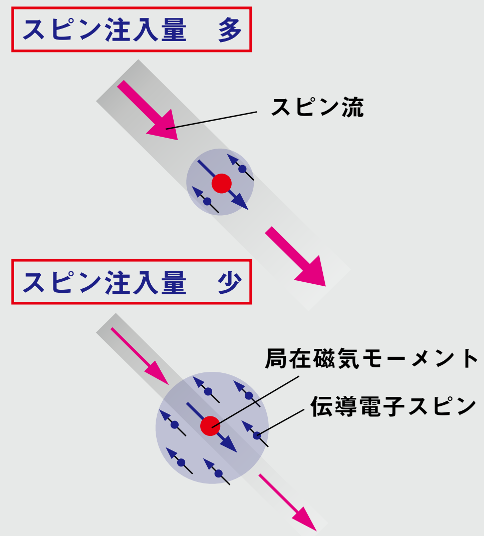


図3　近藤合金へのスピン注入
近藤合金にスピン流を注入するとスピン一重項の形成が抑制される。スピン流の大きさが増すとその効果はさらに顕著になる。

ナノ磁性・スピン物性研究室　ウェブページ　http://www.j-group.phys.nagoya-u.ac.jp/

植物ホルモンが制御する植物の疾病防御応答

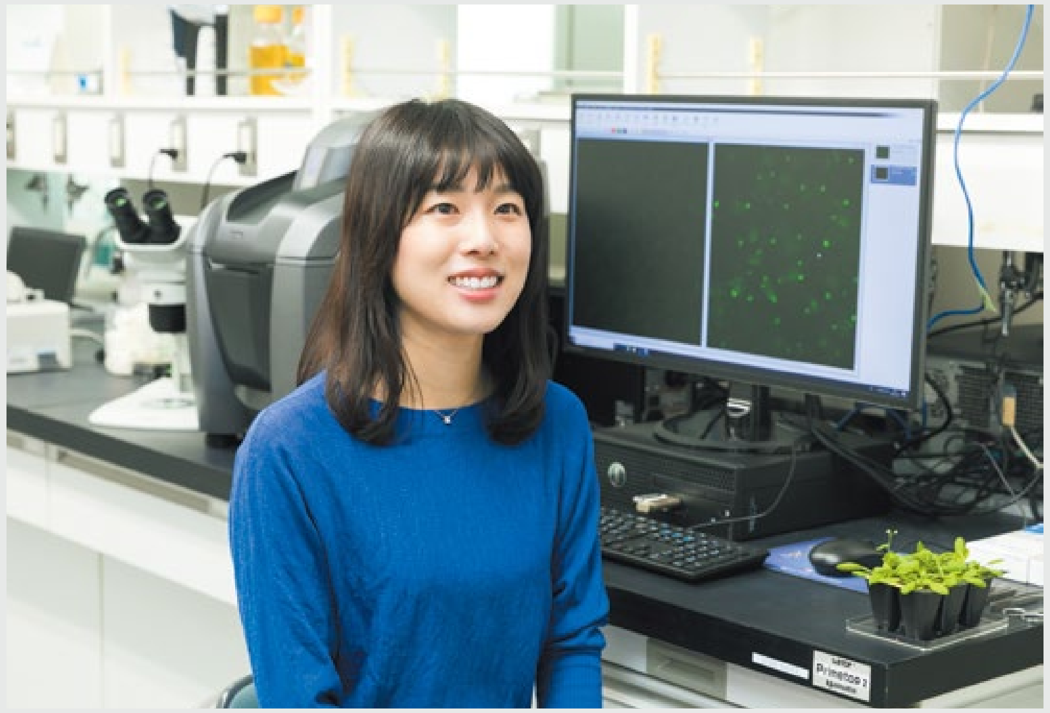
野元美佳　遺伝子実験施設助教

植物の免疫が害虫の被害を増大させる

根を下ろして生活を営む植物は、病原菌や昆虫などの生物的ストレスから逃げることはできない。それらに対応して生存するために、動物と類似した自然免疫、植物固有の免疫システムや虫害抵抗性を高度に発達させてきた。

たとえば、植物は病原菌を認識すると、植物ホルモン[*1]の一種であるサリチル酸（SA）を合成し、SA応答性の疾病防御関連遺伝子群を発現することによって病原菌の感染を阻止する。一方、昆虫による食害を受けると、植物ホルモンであるジャスモン酸（JA）を合成し、JAは消化不良を引き起こすようなタンパク質分解酵素阻害剤や忌避物質の誘導を介して、被害の拡大を防いでいる。

ところが、病原菌に対するSA応答性の植物免疫が活性化すると、JA応答が強く抑制され、虫害の拡大や作物の矮化などの負の影響を及ぼすことが古くから知られている。実際に、屋外で栽培したキュウリ、イチゴ、バラなどでは、うどんこ病の発生に伴いSAシグナルが活性化し、ハダニ類が増加する被害が報告されている（図1）。しかし、その分子機構は不明であった。このSAシグナルの誘導には、転写補助因子[*2]であるNPR1タンパク質の活性化が必須であり、NPR1はSA応答性遺伝子群の98%以上を制御することが知られている。モデル生物であるシロイヌナズナのNPR1欠損変異体では、このSAによるJAシグナル（虫害抵抗性反応）の抑制（クロストーク）が生じないことから、NPR1が本応答に関与することが示唆されている。そこで私たちは、NPR1はJA応答性遺伝子の発現を誘導する転写因子[*3]を標的とすることで、JAシグナルを抑制しているのではないかと考えた。つまり、NPR1の相互作用因子を同定できれば、なぜ植物は病原菌や昆虫に対して防御応答を同時に活性化することができないのか、さらには、その打開策をも提示できるのではないかと考えた。



Mika Nomoto

1988年生まれ。2011年香川大学農学部応用生物科学科卒業、2013年香川大学大学院農学研究科生物資源利用学専攻修士課程修了、2018年名古屋大学大学院理学研究科生命理学専攻博士後期課程修了。博士（理学）。日本学術振興会特別研究員（DC1）を経て、2018年より現職。2018年ロレアル-ユネスコ女性科学者日本奨励賞受賞。2019年ロレアル-ユネスコ女性科学賞国際新人賞受賞。2016年名古屋大学発のベンチャー企業NUProtein株式会社（http://nuprotein.jp/）を設立し、取締役として就任（～2018年）。現在は社外アドバイザーとして関与。

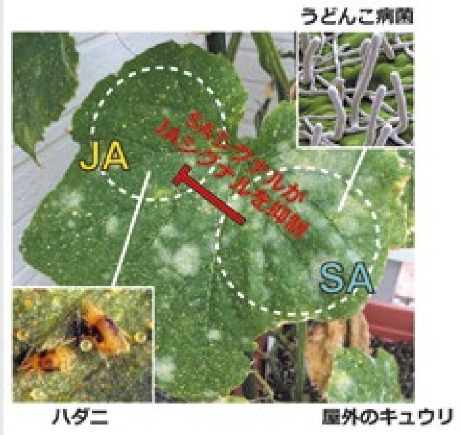


図1　サリチル酸とジャスモン酸シグナルのクロストーク
屋外で栽培したキュウリの葉を示す。うどんこ病を認識すると、植物はサリチル酸（SA）応答性の免疫を活性化する。一方、ハダニなどによる傷害に対して、植物はジャスモン酸（JA）を合成し、JA応答性の防御応答を活性化する。SAシグナルは、JAシグナルを抑制するため、ハダニなどの害虫による被害が増大する。

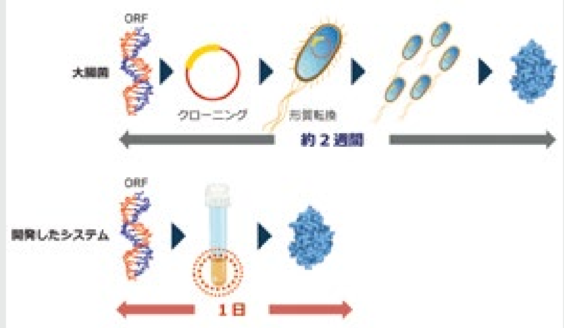


図2　無細胞タンパク質合成系の模式図
大腸菌を用いた発現系では、目的遺伝子のクローニングからタンパク質を精製するまで約2週間かかる。私たちが開発したコムギ胚芽由来の無細胞タンパク質合成系は、PCR法によって1日でタンパク質合成を可能にする。

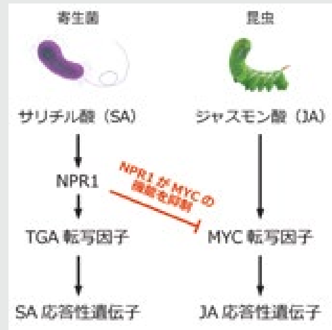


図3　サリチル酸とジャスモン酸シグナルのモデル
寄生菌を認識すると、植物はサリチル酸（SA）を生成し、SA依存的にNPR1を活性化する。NPR1はTGA転写因子と相互作用することでSA応答性遺伝子の発現を誘導する。一方、傷害に対して、植物はジャスモン酸（JA）を合成し、MYC転写因子を介して防御応答を活性化する。今回私たちは、NPR1は、JA応答性遺伝子の発現を抑制するためにMYC転写因子を標的とすることを明らかにした。

試験管内で人工的にタンパク質を合成する

まず私たちは、NPR1の制御因子を網羅的に同定するための基盤技術として、試験管内でタンパク質を合成するシステムとその転写鋳型作製方法を開発した（図2）。この実験システムは、生きた細胞に含まれるタンパク質合成システムを抽出し、目的のタンパク質をコードするDNAやmRNAを基に試験管の中で機能性タンパク質を合成することから、無細胞タンパク質合成系ともいわれている。従来の無細胞タンパク質合成系では、翻訳反応に使用するmRNAを安定化するために、オープンリーディングフレーム（ORF）[*4]の直後に1000塩基以上の長い3プライム非翻訳領域[*5]を付加する必要があった。そのため、転写鋳型の作製は煩雑であり、その配列によってはタンパク質の合成効率は著しく低下する。私たちは、mRNAを安定化する短い3プライム非翻訳領域を同定し、PCR法によって同配列をORFに付加する技術を構築した。これにより、遺伝子組換え技術を用いることなく簡便にタンパク質を合成でき、網羅的なタンパク質の機能解析を可能にした。

病原菌と虫害に強い植物を

次に私たちは、無細胞タンパク質合成系を用いて、NPR1とJAシグナル関連タンパク質をはじめとした疾病防御応答関連タンパク質を網羅的に合成し、NPR1はどの転写因子と結合するのかを調査した。その結果、NPR1はJAシグナルを正に制御するMYC転写因子を標的とし、その転写活性化能を阻害することでJA応答性遺伝子の発現を抑制することを明らかにした（図3）。

私たちの研究によって、基礎研究のみならず応用研究としても極めて重要な課題である、「植物免疫が、虫害の被害を増大させてしまう機構」を明らかにすることができた。今後、人為的にNPR1タンパク質の機能を調節する物質をみつけることによって、環境と人の健康にやさしい方法で病原菌と虫害の両環境ストレスに強い植物を栽培できる可能性を秘めていると考えている。

*1　植物ホルモン
植物自身がつくり出し、微量で作用する生理活性・情報伝達物質で、植物に普遍的に存在し、その物質の化学的本体と生理作用が明らかにされた物質。

*2　転写補助因子
転写因子と結合し、ゲノムDNAからRNAへの転写を制御するタンパク質。

*3　転写因子
DNAのプロモーター（転写制御領域）上の特異的な配列に結合し、転写反応を促進、もしくは抑制するタンパク質の一群。

*4　オープンリーディングフレーム（ORF）
DNAまたはRNAをアミノ酸に翻訳した場合に、タンパク質をコードする終始コドンを含まない塩基配列。

*5　3プライム非翻訳領域
mRNAの下流（3プライム側）にあるタンパク質に翻訳されない領域。

植物分子シグナル学グループ　ウェブページ　http://www.bio.nagoya-u.ac.jp/laboratory/pm.html

同窓生から

ソフトウェア開発の現場から

アイシン精機
ソフトウェア技術部 ソフト基盤戦略主査
間瀬順一 (*Junichi Mase*)

今、私は、自動車に搭載されている機器のソフトウェアを開発している。自動車で動作するソフトウェアというと、一昔前ではカーナビ、最近、話題になっている自動運転などを思い浮かべる方が多いと思うが、現在の自動車は、エンジン、ブレーキ、トランスミッションなど多くの基本的なシステムにおいてもソフトウェアで動作を制御している。また、これからの自動車は、ソフトウェアにより、高機能化、差別化がされると多くの関係者が予測している。

私の経歴を記す。名古屋大学理学部数学科（現在は数理学科）から理学研究科に進学して、1994年に修士号をいただき、その後も理学研究科で数学を研究して過ごした。その後、1998年4月に民間企業に入社して、ソフトウェア技術者に転身した。転身した理由は、数学の研究について自分の中で限界を感じたからだ。職場環境、特に上司や同僚に恵まれ、ソフトウェア技術者として、一人前になることができた。

優れたソフトウェア技術者は、異なるレベルの抽象的なオブジェクトについて考えを切り替えながら、知的生産をしていると捉えている（たとえば、大規模なサブシステムの切り分けから、マイクロプロセッサで動作する動作レベルまでを同時に考える）。また、私の場合は、自動車部品という具体的な「もの」を制御対象とするが、ソフトウェア自体は、抽象的かつ観念的な記述となる。

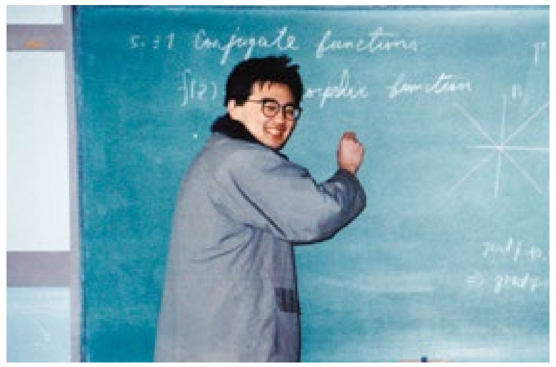
ある程度以上の分量となるソフトウェアは、構造化（部品を階層的に組み合わせてソフトウェアを構築）やオブジェクト指向（自律的な部品の集合としてソフトウェアを構築）などのソフトウェア的な設計手法を用いて、人間が把握できるような難易度に落とし込んでからソフトウェアを実装する。

ソフトウェア技術者としては、数学の研究成果を直接使うことはなかった。一方、抽象化した概念を取り扱う場合や、設計手法を用いて複数の概念を組み合わせる場合に、数学を研究していたことが、能力的な基盤として役立っていると考えている。多くの優れたソフトウェア技術者が数学の素養をもっていることが、それを裏付けている。

学生時代を振り返ると、一人ひとりのお名前や細かな思い出を挙げることは避けるが、お世話になった先生方の純粋に数学の真理を追究している姿を忘れることはできない。また、事務や図書室の司書の方々からていねいなサポートをしていただき、今でも感謝している。どちらも職業人としての私に良い影響を与えていただけた。

上記のような理由で、名古屋大学で数学を学んで良かったと思っている。大学で企画していただいた学生の就職支援のイベントに参加する形式ではあるが、在学生を応援している、この活動は、今後も続けていきたい。

（1994年修士（理学）名古屋大学）



学部4年生時の筆者

多元数理科学研究科の企業研究セミナーにて

キャンパス通信

日常と理学を結ぶ「なぜ」の連鎖

素粒子宇宙起源研究機構広報室研究員
南崎　梓（*Azusa Minamizaki*）

多くの人に理学の魅力を伝えるため、理学部・理学研究科広報委員会で制作していたビデオが完成した。

理学研究の成果は、すぐに社会に役立つわけではない。その代わり、ニュートン力学がスペースシャトルを正確に飛ばし、アインシュタインの相対性理論がGPS衛星の精密時計を制御するように、次世代のテクノロジーをつくり出すことができる。その意味で、100年先の社会に役立つ学問である。

しかし、そのような素晴らしい有用性も、理学研究においては副産物という位置付けかもしれない。理学の駆動力は、好奇心である。純粋な「なぜ」を追求するのが理学である。この世界の「美しさ」に没頭するのが理学である。「我々はどこから来たか、何者か、どこへ行くのか」と自分の存在に迫るのが理学である。そして、その好奇心の火種である「謎」は、私たちの身のまわりにあふれている。

ビデオの中では、一人の若い女性の一日と理学の研究が同時に描かれる。遠く離れているように思われるこの2つの世界が、コーヒーに溶けるミルクや天気の変化などのちょっとしたきっかけで互いに入れ替わる演出だ。なぜなら、なんの変哲もない日常の風景も、研究者の目には謎だらけ、「なぜ」だらけだからだ。

私たちのワクワクを伝えたい。ビデオはそんな思いを込めて制作した。一人でも多くの人に届けたい。

撮影風景

書籍紹介

『重力波とは何か』

生命理学専攻講師
杉山　伸（*Shin Sugiyama*）

この本は面白い。わかりやすいし、数式は登場せず、例えや思考実験で解説され、楽しい挿絵で説明されている。物理に関する知識があまり無くともストーリーが理解できる。

地球の重力という現象の扱いを私は高校の力学で学んだが、どういう性質の力なのか電磁気力と比べてわかりにくかった印象がある。アインシュタインの一般相対性理論（1916年）が重力を説明し、「重力波」の存在を予言した。しかし、それが初めて実際に測定されたのがごく最近の2015年であり、この本はその物語である。著者はアインシュタインの「最後の宿題」と書いているが、私も重力に関してやっと自分なりに納得できた。

測定される重力波の発生源はブラックホール連星の合体などの遠い宇宙の現象、検出に使う装置は長さ数kmのレーザー干渉計。著者は装置のノイズを減らして感度を稼ぐ「ノイズハンター」として米国で活躍した後、岐阜県の神岡鉱山内で建設中のKAGRAにも貢献した。重力波を検出する当事者の興奮が伝わってくるのもこの本の大きな魅力である。「重力波」の存在が確認され、次はどうするのかと思いながら読んだが、光を含めた電磁波の望遠鏡ではわからない宇宙の誕生直後の現象などの観測が重力波に期待されている。重力波天文学という新興分野を知るためにもこの本を勧める。

『重力波とは何か』
川村静児（*Seiji Kawamura*）著
幻冬舎新書／ 2016年 9月発行
780円（税別）