

## 研究会・学会スケジュール

素粒子宇宙起源研究機構開所記念国際会議  
KMI Inauguration Conference (KMIIN)  
開催日：2011年10月24日(月)～26日(水)  
開催場所：名古屋大学ES総合館ESホール  
主催：名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構  
問い合わせ：山脇幸一 素粒子宇宙起源研究機構 特任教授  
yamawaki@kmi.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2862

坂田昌一博士生誕100周年記念国際シンポジウム  
Shoichi Sakata Centennial Symposium (SAKATA100)  
開催日：2011年10月27日(木)～28日(金)  
開催場所：名古屋大学ES総合館ESホール  
主催：名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構  
問い合わせ：山脇幸一 素粒子宇宙起源研究機構 特任教授  
yamawaki@kmi.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2862

第34回溶液化学シンポジウム  
34th Symposium on Solution Chemistry of Japan  
開催日：2011年11月15日(火)～17日(木)  
開催場所：名古屋大学ES総合館ESホール  
主催：溶液化学研究会  
問い合わせ：岡崎 進 工学研究科 教授  
高木秀夫 物質科学国際研究センター 准教授  
youeki34@ogmail.apchem.nagoya-u.ac.jp / 052-789-5828

国際シンポジウム「Designing the Circadian Clock」  
International symposium "Designing the Circadian Clock"  
開催日：2011年11月25日(金)～26日(土)  
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館  
主催：グローバルCOE「システム生命科学:生命機能の設計」  
問い合わせ：近藤孝男 理学研究科 教授  
kondo@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2498

グローバルCOE「分子性機能物質科学の国際教育研究拠点形成」国際シンポジウム&平田義正先生追悼記念講演  
Nagoya University Global COE International Symposium on Elucidation and Design of Materials and Molecular Functions & 7th and 8th Yoshimasa Hirata Memorial Lectures  
開催日：2011年11月28日(月)～30日(水)  
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館  
主催：グローバルCOE「分子性機能物質科学の国際教育研究拠点形成」、平田義正先生追悼記念事業会  
問い合わせ：加藤清則 物質科学国際研究センター COE特任准教授  
kato.kiyonori@a.mbox.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2954

代数多様体の自己同型  
Automorphisms of algebraic varieties- dynamics and arithmetic  
開催日：2011年12月19日(月)～23日(金)  
開催場所：ラフォーレ南紀白浜(和歌山県白浜町)  
主催：日本学術振興会科学研究費基盤研究(S)「格子、保型形式とモジュライ空間の総合的研究」他  
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

## 組織図



編集日より

広報委員会の担当を拝命するまで、私にとって『理フィロソフィア』は、広報誌というよりもむしろ書店に並ぶ『日経サイエンス』や『ニュートン』等の雑誌に近い、気分転換として読むのにちょうど良い手軽な冊子であった。しかし、1年半ほど前に委員会のメンバーとして加わって以降、軽くさわやかなイメージだった広報誌は、徐々にではあるが重いものへと変化してきている。

委員会担当を任じられた際、その業務は広報誌作成のお手伝いとうかがっていた。確かに業務内容は間違っていないが、軽く考えていた私の予想より実際は重いことを、身をもって思い知らされている。このギャップは、広報誌がどれほどていねいに、またどれほど多くの先生方と編集スタッフのご協力によりつくり上げられているかを認識していなかった、私の浅はかさにより生じている。原稿執筆および修正作業に関わってていねいに仕上げることの煩雑さ、ならびに何より私が苦手とする先生方との調整と交渉、これらを通して今は良い勉強をさせていただいている。(大木靖弘)

### 表紙説明

触媒は、化学において欠かせない物質であり、化学物質創製のためにさまざまな研究が進められている。1000万回働く触媒、石油化学にかかわって有機材料や医薬品を創製する触媒など、研究の最前線を訪ねた。



**理 philosophia** — No.21  
autumn-winter 2011  
2011年10月15日発行

広報委員 國枝秀世(研究科長)  
篠原久典(副研究科長)  
松本邦弘(評議員)  
栗田英資(数理学科)  
福井康雄(物理学科)※委員長  
中村光廣(物理学科)  
寺崎一郎(物理学科)  
大木靖弘(化学科)  
杉山 伸(生命理学科)  
瀧口金吾(生命理学科)  
ウォリス・サイモン(地球惑星科学科)  
河本達吾(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2012年4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/

# 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」  
autumn-winter 2011

21

philosophia

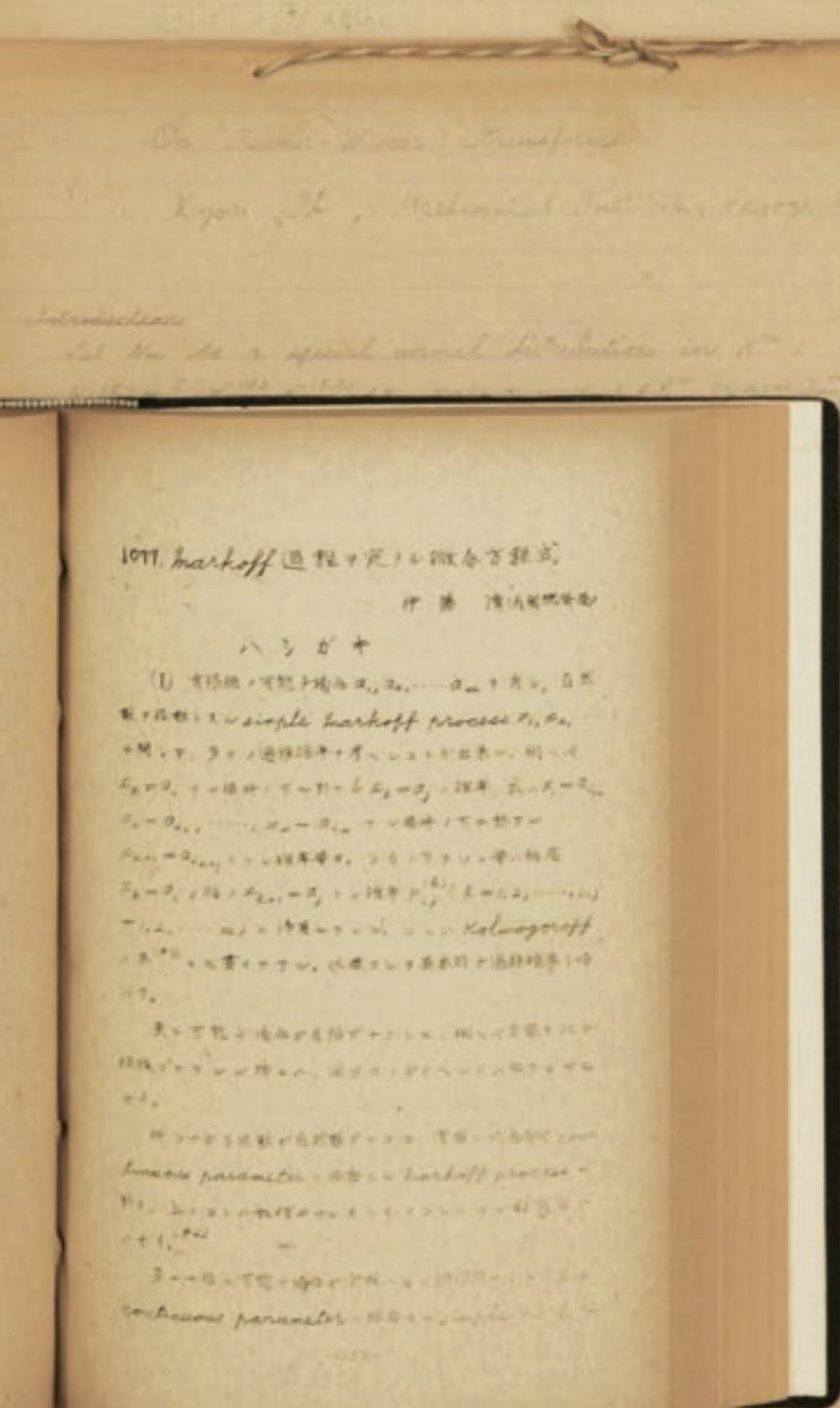
# catalyst

### 特集

「分子触媒が切り拓く新しいものづくり」

- 04 — 不老長寿の触媒を求めて◇北村雅人
- 08 — 脱石油化学に挑む◇斎藤 進
- 02 — 時を語るもの(伊藤 清 博士) ◇白尾恒吉
- 03 — 理のエッセイ◇鷲谷 威
- 12 — 理の先端をいく◇野中千穂/北浦 良/桂木洋光
- 18 — 理学部交差点

# 伊藤清博士—— 近代確率論の開拓者

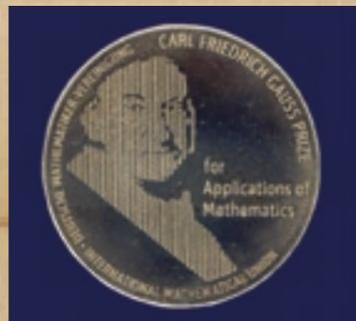


刻々に変化する運動で、現在から  $t$  時間後の状態を推定するのに、確率論ではこれを時間  $t$  と偶然性を表すパラメーター  $w$  の関数と考えて、“ $X(t,w)$ ”と書き、確率過程という。その解析のために伊藤清博士は確率積分、確率微分という概念を導入し、偶然変動を取り入れた新しい微積分学を考えた。その過程で発見された変換公式は、「伊藤の公式」とよばれ、便利な道具として多くの分野でくふつうに使われている。この理論はその後内外の研究者により拡充・発展させられ、現在は“確率解析”とよばれる確率論の新しい分野となっている。またその応用は、数学の分野のみにとどまらず、広く生物学、工学等におよび、さらに近年は金融工学の開発にも大きな役割を担っている。

博士はかつて学生に、「取り組む問題を間違えなければ、満足なことができると思うので、数学は興味深い」といわれたそうである。これは博士の研究生活そのままを述べた言葉のように思える。(白尾恒吉 都留文科大学元学長・東京都立大学名誉教授)



伊藤 清 (1915-2008)  
元名古屋帝国大学助教授  
日本学士院恩賜賞(1978)  
日本学士院会員(1991-2008)  
文化勲章(2008)



◇写真の説明  
左ページ下は、「全国紙上数学談話会」第244号(1942年11月発行)に掲載された伊藤博士の論文。「伊藤の公式」が発表された記念碑的論文であり、謄写版印刷の誌面が時代を物語る。バックは名古屋大学在職中に書かれた直筆の論文。右上は1939年～1943年に勤務した内閣統計局時代の伊藤博士。右下は2006年に第1回ガウス賞を受賞された際に贈られた金メダル。カラーの顔写真は2006年ガウス賞受賞の報の日のもの。

## 群盲、巨象に挑む

鷲谷 威 附属地震火山・防災研究センター教授



Illustration: Mikan Tenmyo

去る3月11日にマグニチュード9の大地震が発生し、巨大な津波で多くの尊い人命が失われ、原子力発電所の重大事故も起きてしまった。一連の災害で、被災地のみならず日本が受けた打撃は計りしれない。こうした巨大地震・津波の発生ポテンシャルを事前に指摘できず「想定外」の事態が生じたことについて、我々地震研究者は真摯に反省しなければいけない。

今回の震源域の主要部は、過去100年以上大地震が発生していない場所で、プレート境界面が普段からずるずるとずれてエネルギーをためず大地震が起きないのだろうと考えられていた。その一方、GPSによるプレート境界の固着状態の推定ではエネルギーの蓄積が示唆され、過去の津波がもたらした堆積物に関する地質学的調査からも巨大な津波が500～1000年間隔で海岸を襲ったことが明らかにされていた。さまざまな事情はあるにせよ、我々は観測や調査で得られた重要な情報を見誤っていたことになる。

こうした状況を振り返ると、子供のころに読んだ盲人と象の寓話を思い出す。盲人たちに象をさわらせてどんな動物かと聞くと、ある者は足にさわって柱のようだといい、耳をさわった者はうちわのようだといい、鼻をさわった者は太い綱のようなのだといい、皆の意見が食い違って言い争いになったという話である。

現在の地球惑星科学は専門化・細分化が進み、日本地球惑星科学連合の加盟学協会は実に48を数える。それぞれの分野内では話が通じやすく居心地が良いかもしれないが、自らの視野を限ってしまうことで、複雑な地球現象の本質を見誤ることにもなりかねない。寓話中の盲人たちが自分の限界を自覚し、断片的な情報をつなぎ合わせる知恵をもてば、象の姿を描き得たかも知れないと同様、地球惑星科学においても、異なる視野から得られる情報を総合することで、初めて真実を見出せる場合も少なからずあるはずである。自分たちが盲者であると自覚し、既存の分野を越えた連携を深め、地球という巨象の真の姿に迫ることが、今回の経験を踏まえて地球惑星科学がとるべき道ではないだろうか。

Takeshi Sagiya

1964年栃木県生まれ。東京大学大学院中退。国土地理院、名古屋大学助教授、准教授を経て2008年より現職。専門は地殻変動学。

「触媒」は特定の化学反応の反応速度を速める物質で、自身は反応の前後で変化しない。また、反応によって消費されても、反応の完了と同時に再生する。化学を語る上で欠くことのできない物質である触媒は、現在、人体や環境に負荷をかけない化学物質創製のため、さまざまな研究が進められている。古くて新しい触媒の世界、その研究の最前線を訪ねる。

## 不老長寿の触媒を求めて

北村 雅人 物質科学国際研究センター教授

<インタビュー> 堀川 絢加 物質理学専攻 博士前期課程1年



1000万回働く触媒を求め、  
とにかくやりつづけること。  
それが研究者の本分です。

Masato Kitamura

1956年生まれ。1978年名古屋大学農学部卒業。1983年同大学大学院農学研究科博士課程修了。同年名古屋大学理学部化学科助手、1990年同大学院理学研究科助教授、1998年同大学物質科学国際研究センター助教授などを経て、同年より現職。

### 1000万回働く触媒

堀川 物理学教室の機能性物質物性研究室で熱電材料の研究をしている堀川と申します。今日は、北村先生が取り組んでおられる研究についてお話をお聞きたいと思います。先生の専門は、触媒を使った反応開発かどうかがありました。

北村 僕が扱っているのは、均一系とよばれる触媒で、人工的につくった分子触媒です。だいたい大きさは分子量1000くらい。とくに右手系と左手系のつくり分けをする触媒を研究しています。

堀川 なぜ均一系の分子触媒を選ばれたのでしょうか。

北村 そもそも、触媒は、かわいそうな存在です。世の中の役に立つ生成物をつくるために働きますが、生成物ができあがった後は、邪魔なゴミになってしまいます。そのためプロダクト・プロセスを考えたら、生成物から簡単に取り除くことができる不均一系触媒の方が優れています。ところが、不均一系は設計するときに分子がどうなっているかを知ることが難しい。それで、新しい触媒をつくる場合には、まず反応を詳細に理解できる均一系触媒

で優れたものを練り上げて、それを溶けない物質と連結して不均一系触媒にすれば良いのではないかと考えています。あるいは均一系であっても、たとえば基質100万個に対して1個の触媒ですべて生成物に変えることができるなら、その触媒は誤差の範囲になって取り除く必要がなくなります。これなら不均一系にする必要がないわけです。

堀川 そんな高性能の分子触媒をつくらうとされているわけですね。

北村 そうです。夢は、不老長寿のようにグルグルと永遠にまわりつづける触媒ですね。現在は、基質1に対して、およそ1万分の1のところまでできています。カタラーゼという酵素なら、1000万回働きますから、分子触媒でも、そこまでの効率を追求したいですね。

### カイコの頭を切れなくて転身

堀川 先生は、最初から有機合成をめざしておられたのでしょうか。

北村 僕は名古屋大学農学部出身です。カイコの脳ホルモンを研究していた後藤俊夫<sup>\*1</sup>先生の「名古屋大学からシルクロードをつくる」という言葉にほれて、絶対天然物をやりたいと、後藤先生のところへ来ました。でも、カイコの頭を切ることができなかった。それで、磯部稔<sup>\*2</sup>先生の指導を受けて、全合成の研究をさせていただきました。全合成とは複雑な天然有機物を多段階で合成することです。今のように懇切丁寧に教えてはくれない時代でしたから、先生や諸先輩から合成の技術や知識を

“盗む”といった感じでした。修士の2年間、まったく論文が書けなかった。それが、修士2年の冬に1つの反応がうまくいったのをきっかけに、ドクターの1年半で一気に全合成を完成させることができました。それでも当時僕は、大学に残る気はなかった。とにかく海外へ出るつもりだったのですが、野依良治<sup>\*3</sup>先生に声をかけていただいて助手になりました。

今では名古屋大学理学部の化学では平田義正<sup>\*4</sup>先生にはじまる天然物の研究系譜がとぎれてしまった。実にもったいないことです。僕らは、人間の英知で分子触媒をつくるなんてかっこいいことをいいますが、人間の考えることなんてたかがしれている。それより何十億年の生命の歴史がつくってきたものの方が、よほど英知が詰まっているのだから、それを取ってくる方がいいに決まっています。

堀川 生物物理の友人がいていました。生物は命がけて進化してきたものだって。

北村 その通り。実は、最近、有機合成の世界で大革命が起きています。昨年11月エリブリンという抗ガン剤がアメリカで承認され、日本でも今年の4月に承認されています。このエリブリンはハリコンドリンというクロイソカイメンに含まれる天然物の右半分を薬にしたものです。不斉点が17個もつながった、結構複雑な化合物なのですが、それを工業的につくることが可能になった。こんなゴツイものが薬として売り出されるなんて、すごいことなのです。さすが岸義人<sup>\*5</sup>先生です。

生命って、強いモノが生き残ったわけではなく、環境に順応したモノが生き残って、ハリコンドリンとかつくるわけです。抽出したのは、平田義正先生と上村大輔<sup>\*6</sup>先生なのですが、生命の歴史がつくりだしたものを取り出して、そこからエリブリンがつくりだされた。このことで僕は、合成に関する価値観が変わったと思いました。膨大な研究費と時間をかけて、何十段階もさまざまな反応を積み上げて全合成した化合物が社会に役立つ実用医薬として上市することができた。このことは大きな転換点になると思います。



### 997回の失敗を乗り越える

堀川 触媒は一定の役割しかしないイメージがありますが、先生の研究スタイルは、それをねらってずっと試行錯誤しつづけるのでしょうか。

北村 きれいなことをいえば、反応の遷移状態を計算して、それに合う分子をコンピューターによって予想を行い、これだったら遷移状態が安定化できるだろうというものをつくっていく、ということなのですが、そんなことは実際には無理。ファクターがあまりにも多すぎるからです。ですから僕は、とにかくたくさんつくる。ですから僕は、とにかくたくさんつくる。有機合成力はあるから、どんな分子でもつくれるので、それに金属をいろいろ組み合わせる。そうするとたまにうまくいくものが出てくる。僕らの世界では、俗に「1000やると3つ当たる」というのですが、つまり997回目まではダメで、998回目初めて成功する。すると、999、1000と次々に成功する。頭を使うのは、実験を始めるときに、凹凸とプラスマイナス、それから遷移状態について考えるときだけ。後はひたすら手を動かします。そして、うまくいく反応が見つかったら、徹底的に機構解明します。そこには高性能な触媒反応のメカニズムがあるはずですよ。

堀川 うまくいく仕組みを解明するということでしょうか。

北村 そうそう。それが、僕らがいう指導原理なのです。その指導原理をもとにして、触媒設計をして、あとはひたすら行列表的に実験していくのです。最初から、こうやったらうまくいこうなんてやっている触媒反応では、面白いのは出てきません。たいていは、今ある

ものの延長にしかありません。

堀川 そうですね。研究するからには、新しいアイデアを提案したいものです。

北村 そうでしょ。その代わり、論文は出ない。だから研究費ももらえない。研究費がもらえないと実験ができなくて潰れていく。

名古屋大学の理学研究科はノーベル賞受賞者を輩出していますが、それは40～50年前の成果であって、あのころは「うまくいかななくてもいいから、ちょっとやってみなさい」という度量が、日本にはありました。今は、その余裕が失われてしまっている。少子化の日本が生き残る道は、ゼロからイチを生み出すことだと思います。80点を90点に上げるようなことは、近隣諸国の人海戦術にはかきませんから。にもかかわらず、今の日本では、「2年後には結果を出しなさい」といわれる。2年で結果が出ることといたら、現状の研究の延長しかありません。僕らも研究費がなければやっていけないから、貴重な時間をそれに

\*1 後藤俊夫 (1929-1990)  
元名古屋大学農学部教授。

\*2 磯部稔 (1944-)  
名古屋大学名誉教授。

\*3 野依良治 (1938-)  
名古屋大学特別教授。  
理化学研究所理事長 (本誌1号P.2参照)。

\*4 平田義正 (1915-2000)  
元名古屋大学理学部教授 (本誌5号P.2、16号P.4参照)。

\*5 岸義人 (1937-)  
名古屋大学特別教授 (本誌2号P.21参照)。

\*6 上村大輔 (1945-)  
名古屋大学名誉教授。  
神奈川大学教授 (本誌12号P.14参照)。

使わざるを得ない。でも、本来はそんなところで勝負をしてはいけぬ。20年30年かかるかもしれないが、やらせてほしい、夢を追わせてほしい、といたいですね。大学の研究者は利益を目的にしていません。その代わり、社会でフルスイングできる人材を育てる。あとでは研究で夢を追うことを許してほしい。でも、今の日本社会は許してくれませんね。

だから、2年後に成果が出る仕事もやるけれども、基本的には、理想反応を決めて、ある指導原理のもとに触媒をつくり、行列式的にスクリーニングして、そして見つける。見つけたら徹底的に機構解明をする。それを繰り返すことが大学に残った研究者の本分だと思っています。

### 環境に負荷を与えない触媒

堀川 先生が理想とする反応とは、どのようなものでしょうか。

北村 近年、ライフ・イノベーションとかグリーン・イノベーションが叫ばれています。有機合成の世界でも、環境に負荷を与えない反応型式のモノを触媒化しようという傾向が出てきています。たとえば、水を出しながら炭素-炭素結合を形成するといったようなことです。堀川 有害なものを出さない反応ということでしょうか。

北村 そう。たとえば医薬品は、100倍の有害なものを出しながら生成物つくっているのが現状ですが、それはもうやめよう、ということです。何とか有害なものを出さないキレイな反応をやりたいですね。もちろん、そんなに簡単にはいきません。でも、僕らは大学にさせてもらっているわけだから、企業よりは長期的な視野に立って研究ができる。だから、いつも夢をもってキレイな反応を不老長寿の触媒でつくりたいとがんばっているわけです。今の有機合成なんて、蒸気機関車の時代だからね。堀川 蒸気機関車の時代とはどういう意味でしょうか。

北村 力づくでやっているといったらいいの

かな。とにかく激しくておおげさなのです。21世紀になったのだから、これからは、環境に調和して毒性物質を出さず、ほしいときにほしいものがほいだけ出てくる、そんなスマートな世界をめざしたいですね。

そういう意味で、先ほども申し上げた水を出しながら炭素-炭素結合をつくる反応、水素を用いる還元、酸素分子を使った酸化、炭素-炭素不飽和結合への水・アルコール・アミン・アンモニアの付加などが今後は重要だと考えています。水素を用いる還元は、野依良治先生のすばらしい成果を基盤に今も研究を進めています。酸素を使った酸化も、まだ酸素を上手に使い切ってはいませんが、ある程度進んできています。この2つに対し、脱水的な炭素-炭素結合形成は、今始まったばかり。現在は、アリルアルコールを使った研究から突破口を見出しつつありますが、いずれ普通のアルコールでできる時代がきっと来るでしょう。



### 理想反応に向かって

堀川 先ほど、「社会でフルスイングできる人材を育てる」とおっしゃいましたが、研究室ではどのような指導をされておられるのでしょうか。

北村 研究室ではうまくいかないことをいっぱい経験して、そしてちょっとだけでも成功体験をしてもらうことを心がけています。

堀川 成功体験したいです。

北村 今、研究で苦しんでいるのでしょうか。

堀川 高温で使える熱電材料をつくりたいのですがうまくいきません。今は光を当ててやってみようということになったのですが、ノイズに

埋もれてまったくシグナルが見えません。

北村 大丈夫。それ、やりつづけなさい。黙々と。絶対うまくいきますから。いつかうまくいったときに振り返ってみると、うまくいかなかったデータがすべていいデータになります。研究というのは、リサーチなわけで、繰り返し探すとのことです。勉強のように、やった量に比例して成果があがっていくのではなく、あるときポントうまくいくことがあります。やっぱり997までやらなきゃいけない。よく似ていますね、僕らのやっていることと。

堀川 買ったサンプルがダメで、指導教官からもらったサンプルもあまりにも抵抗が高すぎてダメで、「どうすればいいですか」ときいたら、「よし、研究室の中で抵抗の高そうなサンプルを手当たり次第やってみなさい」といわれています。

北村 いいですね。僕のやり方とっしょだ。うちも、ここにある金属を手当たり次第試してみる。1つ方向が見えてくると、そこから突破口が開けます。最初は、とにかくやってみるしかない。粘り強さが必要です。

堀川 先生は、アイデアのタネはどこから見つけておられるのでしょうか。

北村 全合成をやったおかげで、反応の種類はいっぱい知っていて、どの反応が使えるとどれが使えないか、身をもってわかっている。そういうベースがあるから、電子の流れ図だけで、うまくいきそうなものを見つかる勘みたいなものがあります。だから、ちょっとした延長の論文ならいくらでも書いてしまえる。しかし僕は、「それはやっちゃいけない」と心に決めていて、理想反応を掲げて、それしかやらないようにしてきた。くじけることもあります。すぐにできるわけがない。理想なのですから。

堀川 やはり経験が大切ということでしょうか。

北村 経験というより、むしろ失敗の回数でしょうね。997まで、ひたすらやりつづけなさい。むだにはなりません。

堀川 997ですね。わかりました。本日もありがとうございます。

## 研究ノート

# ドナー・アクセプター二官能性触媒の可能性

インタビューでふれたハリコンドリン等、生理活性を示し創薬の鍵となる有機物の多くは、大きく複雑な三次元骨格からなり、多数のキラル（不斉）中心を併せもつ。多段階の反応でこれらを合成する際、用いられる主な反応ツールは「炭素-炭素結合の形成、酸化や還元、C=O部位に代表される官能基の変換」であり、中でも選択的にキラル（不斉）中心を生み出しつつ炭素-炭素結合を形成する反応への期待は非常に高い。この反応を高効率化するには、“真に優れた”触媒、すなわち「反応性、選択性、生産性」がいずれも高く、取り扱いが容易で安全性や環境調和性に優れた触媒の開発が求められる。加えて、実践の場である多段階合成をイメージし、ある段階の反応生成物が次の反応に供される複雑な状況下に置かれることを念頭に置いて、信頼性が高い触媒反応を開発することが重要である。我々はこの観点から、信頼性に優れた有機合成に広く用いられてきたアリル基（-CH<sub>2</sub>-CH=CH<sub>2</sub>）を利用する触媒反応を出発点として考えた。しかし、現状の反応は操作が煩雑である上に、多段階反応に適さない要素、たとえば反応物やほしい生成物を分解させる可能性がある強塩基や強酸を使う、また生成物と関係のない塩を発生させる、等の問題点を含んでいる(図1)。裏を返せば、強酸や強塩基を用いず、塩の代わりに「水」を発生させることができれば、理想的な反応へと変貌を遂げる可能性がある。具体的には、これまでハロゲン(X)、金属(M)、およびアリル基や任意の有機基(RやR')を用いて R-X + M-R' → R-R' + M-X の様式で炭素-炭素結合を形成していたのを、R-OH + H-R' → R-R' + H<sub>2</sub>O の様式に切り替えれば良いのであるが、いかにしてこの理想反応を実現するか、が新たな課題である。ここで、我々が基本かつ重要と考えてきたコンセプトが役に立つ。それは、金属イオンやH<sup>+</sup>等の電子不足な点(アクセプター)と還元状態の金属やアニオン等の電子密度が高い点(ドナー)の2つの官能点を使うことであり、実際、2つを併せもつ「ドナー・アクセプター二官能性触媒」のコンセプトに沿って、我々は図2に示す4つに代表される触媒をこれまでに見出し、たとえば図2のAではアルデヒド類からは二級アルコールの不斉合成を、Bではケトン類の不斉水素化を達成している。この統一コンセプトに従って、AやBで確立した指導原理をアリルアルコール(HOCH<sub>2</sub>-CH=CH<sub>2</sub>)の反応へ展開したのがC、Dである。これらの触媒はキラル中心をもつ炭素-炭素結合の形成のみならず、炭素-窒素結合、炭素-酸素結合をもつ化合物の不斉合成においても極めて強力な触媒として働き、たとえば図3に示すように複雑な天然有機物合成への展開が期待できる。これらの触媒が高い反応性や高い不斉発現能を示す原理を解明することで、“真に優れた”触媒を極めることが可能になるであろう。(北村雅人)

## インタビューを終えて 刻まれた言葉



堀川 絢加 Ayaka Horikawa  
物質理学専攻博士前期課程1年

他学部や他学科の学生の方と話す機会は今までに何度かあったが、他学科の先生と話をすることはあまりなく、よい経験ができた。北村雅人教授は指針や研究に対する思いといった研究に関することをはじめ、理想の学生像、ご自身の学生時代の話など、多岐にわたる話をしてくださった。研究指針や研究姿勢の話の中には、「とりあえずやってみる」「できないことの言い訳するために口を動かすくらいなら手を動かせ」「成功するまでやり続ける」など、今後の自分に生かしていきたいと思う言葉がいくつもあった。また、教授はご自身の経歴について、

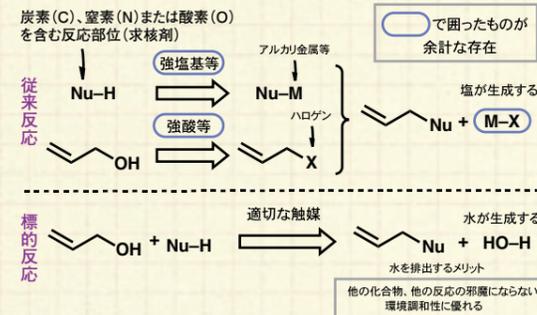


図1 一般的なアリル基の変換反応(上段)と、開発した反応(下段)の模式図

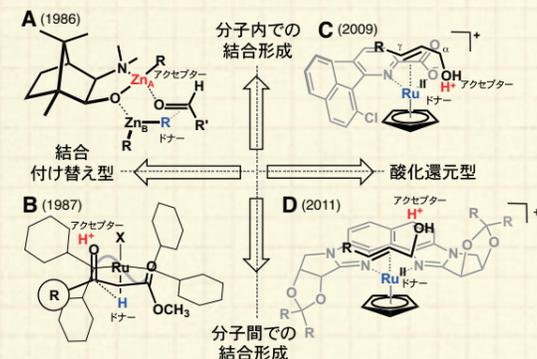


図2 「ドナー・アクセプター二官能性触媒」のコンセプトに沿って開発した触媒群。縦軸は分子内あるいは分子間での結合形成反応、横軸は結合付け替え型の反応と酸化還元型の反応、で区分してある。

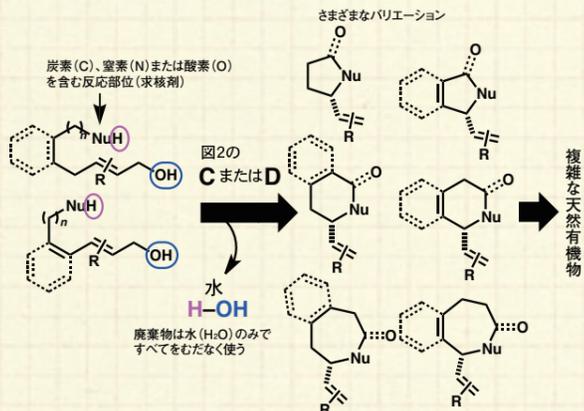


図3 アリル基を用いる脱水型不斉炭素-炭素(窒素、酸素)結合形成反応がもたらす展開

# 脱石油化学に挑む ― 水を生じるもの“hydro-gen”と新触媒

齋藤 進 物質理学専攻(高等研究院)准教授

<インタビュー> 小山昌子 生命理学専攻博士後期課程3年

## 名古屋の有機化学にひかれて

小山 はじめまして。生命理学専攻の小山と申します。本日は他学科の先生とお話できるということで、楽しみにしてまいりました。どうぞよろしくお願いいたします。まず、齋藤先生が化学を専攻された経緯について、お話いただけますでしょうか。

齋藤 高校生のときはアインシュタインに憧れ宇宙に興味があったので、最初は物理を専攻しようと考えていました。ところがある人に「物理は天才しか成就しないから、やめた方がいい」といわれ、もう1つ興味のあった

化学に進路を変えました。高校では、有機化学の授業はほとんどありませんでしたが、世の中のいろいろなもの、我々の体も医薬品も、有機物質でできていることを知って、化学をやるなら有機化学だと決めました。そして、有機化学ならば名古屋大学が一番だと父の友人である玉尾皓平\*1先生に教えていただき、そのとき、野依良治\*2先生と工学部の山本尚\*3先生をはじめ素晴らしい先生方がいらっしゃることを知りました。そして名古屋大学で学びたいと強く思いました。当時名古屋大学工学部にあった推薦入試制度という

道で、工学部で学ぶ機会をいただきました。小山 研究室に入ってからは、どんな研究をされていたのでしょうか。

齋藤 学生時代は、山本研究室の丸岡啓二\*4先生にいただいたテーマである、アルミニウムを使ったさまざまな有機合成反応に取り組みました。具体的には、医薬品や天然物の3次元骨格をつくるために必要な合成反応の開発です。たとえば、FK506という免疫抑制剤の部分骨格を、いかに3次元構造を制御してつくるかといったことをやっていました。

この研究で、アルミニウムのまわり<sup>かさ</sup>に嵩高い構造や空洞構造をもたせるとさまざまな分子の違いが識別できることがわかり、「これは面白い」と、嵩高さをあれこれ変えて、さまざまなアルミニウム反応剤をつくりました。今まで有機合成が困難といわれていたものも成功させることができ、これまでになかった充実感を味わいました。その後、山本尚先生の研究室の助手になりました。

ところが、山本先生が米国シカゴ大学へ移ることになり、次のステップを探していたときに、偶然というか運命というか、野依先生に温かいお声をかけていただき、2002年から理学研究科でお世話になることになりました。

## 4つの「水」とは

小山 野依先生の研究室に移られてからは、どんな研究をされたのでしょうか。

齋藤 当時、僕は「水」に興味をもっていました。きっかけは、小さな有機分子の水素結合が生み出す触媒作用にとって水が非常に重要な存在であることに気づいたことです。それで水1分子を化学修飾した分子性の触媒(分子触媒)をつくりはじめました。

もう1つが水素結合です。水素結合は、

化学結合の視点からいうと、ついたり離れたりがダイナミックで魅力的なものです。ボランにアミンを配位させ、水素結合と共有結合と配位結合が組み換わるような面白い分子触媒をつくり、化学スイッチによって触媒活性のオン・オフの切り替えに成功しました。

そのうちにだんだんと自分にとって大切な研究のキーワードが増えてきました。まずは「水」と「水素結合」。そして、「水素移動」と「水素化」。水素化は野依先生のど真ん中のテーマですが、野依触媒では絶対にできないことをやれと野依先生に背中を押していただきました。

小山 「水」「水素結合」「水素移動」「水素化」、いずれも水素にかかわることですね。齋藤 そう。「水を生じるもの“hydro-gen”」を含む4つのキーワードです。この4つの「水」が、今、僕がもっとも興味をもっていることです。水素はこれまで、有機化合物のなかでもむしろ脇役だと思われてきました。しかし、同時に不可欠なものでもあるのです。たとえば有機化合物が燃焼すると水と二酸化炭素になります。つまり、有機化合物の骨格には、炭素と水素が列記として組み込まれているわけです。炭素に注目するだけではなく、水素の切り貼りを反応の前後でちゃんと考えコントロールしなければ、有機合成は発展しません。

また、水素に焦点を当てた研究は、省エネ・省資源の問題にも関係してくるだろうという直感もありました。なぜなら、ある出発物質から水素が移動するだけで生成物ができれば、廃棄物をゼロにできるのです。古くから有機合成は、1モルの有機化合物の炭素-水素結合の水素を1モルの金属に置き換えてきたので、その金属による1モルの塩副生物が大量の廃棄物となっていました。それなら水素を金属に置き換えず最初から出発物質の水素を生成物の水素へと移動させたいのではないかと、水素移動に興味をもったのです。同じように、水素化も、原理的には廃棄物ゼロの反応です。

小山 なるほど、その原理で有機合成ができたなら、とても素晴らしいことですね。先生

は現在、「脱石油化学」をテーマに研究されているということですが、ここでも水素移動や水素化が重要になってくるのでしょうか。

齋藤 脱石油化学というのは、ようするに生物がやっている還元反応とは違ったかたちで、なんとか高い酸化状態にある安定な物質から有用な有機物質を、還元を通して合成していくことへの挑戦です。生物は、Zスキームを使った光合成(還元)などによって有用な炭素物質をつくりだします。一方、人工的な還元方法の代表例が水素化です。人類は光合成のまねはとてできないので、生物が何億年もかけて還元してできた石油を見つけて、以来、石油に含まれる炭化水素やその混合物を酸化して有機材料や医薬品を得てきました。しかし石油は限りある資源です。いずれ、再生可能な自然界の化合物を原料として使えるようにする方法が必要になるでしょう。脱石油化学の世界は、50年後でも実現できるかどうかわかりませんが、せめて石油がなくなる10~20年前くらいには代替りのものを提示できる学術的な基盤をつくりたいですね。0から1を生み出すには、まずは理学的なアプローチが必要です。

## 脱石油化学への手がかり

小山 脱石油化学を実現するための研究を進める上で手がかりになるものはあったのでしょうか。

齋藤 まずはルテニウム触媒に注目しました。2001年ノーベル化学賞に輝いた野依先生はルテニウム触媒を用いてケトンの不斉水素化に成功しました。一方、自然界に豊富に存在するカルボン酸やエステル、アミドなど安定な物質を水素化するには、もっと高温高压下でも働く強い触媒が必要でした。それで、配位子の元素の組み合わせを変えて、熱や圧力に耐える金属錯体をつくってみようと考えました。まずルテニウムに配位しているリンとアミンを、リン同士、アミン同士ではなくリンとアミンで結合させました。さらに、リンを嵩高くし、ルテニウムに配位する力を強くすることで、構造的に安定した触媒が誕生したのです。

これにより、いままで水素化を受けつけなかったアミドやウレタン、ウレアなども水素化できるようにになりました。

このルテニウム錯体の分子デザインに関する基本的な考え方は、先ほどふれた4つの「水」の制御にも使えますし、二酸化炭素の還元にも使えると思います。また、非常に安定な官能基をたくさんもつバイオマスの化学変換にも応用できると思います。石油になる前の中間剤であるアルコールを用いる増炭反応にも活用し、これらを統合して新しい物質生産体系のようなものをつくりたいというのが、これからの夢です。天然資源や二酸化炭素から石油に戻すわけではなく、ポイントは石油になる前の中間剤をそのまま塩廃棄物がでない方法(水素移動や水素化など)で有用化学物質の生産に利用できるかどうか、です。

小山 二酸化炭素の還元は、まだできないのでしょうか。

齋藤 二酸化炭素を1回水素化するとギ酸ができます。しかし、簡単にいえばギ酸そのものは二酸化炭素に対して不安定なので、安定に取り出すためにカルボン酸塩として落とさなくてははいけない。これは野依触媒でも問題となった部分です。ただ、このカルボン酸塩を落とす前にギ酸にさらにもう1個水素分子を付加させホルムアルデヒドにしてさらにもう1個付加させて一挙にメタノールにしたら、大丈夫。ということは、カルボン酸を水素化できないとダメなのです。ところがカルボン酸を有効に水素化できるものは、まだいいものがない状況です。それさえできれば、たぶん省エネルギーで二酸化炭素をメタノールまで還元できるでしょう。



「脱石油化学」というテーマに  
巡り合えたことで、  
研究に対する  
迷いがなくなりました。

Susumu Saito

1969年生まれ。1993年名古屋大学工学部応用化学科卒業。1998年名古屋大学博士(工学)取得。ハーバード大学化学科訪問研究員、名古屋大学大学院工学研究科助手などを経て、2002年名古屋大学大学院理学研究科および高等研究員助教授。2004年より現職。

\*1 玉尾皓平(1942-) 理化学研究所基幹研究所所長。京都大学名誉教授。

\*2 野依良治(1938-) 名古屋大学特別教授。理化学研究所理事長(本誌1号P2参照)。

\*3 山本尚(1943-) 米国シカゴ大学教授。名古屋大学名誉教授。

\*4 丸岡啓二(1953-) 京都大学教授。元名古屋大学助教授。



感謝から貢献へ

小山 ルテニウム錯体から発展させた触媒が将来、廃棄物ゼロのクリーンな有機合成と石油に頼らない新しい社会をつくるかもしれないのですね。

齋藤 そうだといいですね。ただ、脱石油化学の旗をふっても、先駆者がいないので研究が論文というかたちになるのに時間がかかります。僕たちの世界は、総じて論文を書かないと、研究費がもらえないことが多い。

小山 それでも、脱石油化学をテーマにされたのはなぜでしょうか。

齋藤 前人未踏でも学術的・社会的な価値が高いテーマだと心躍ったからです。研究費の面で断念したら、自分の人生、後悔するじゃないですか。人生を振り返ったときに「自分は一体何を残せたのだろうか」というふうにはなりたくないと思ったのです。

こういう考え方は、実は野依先生との一期一会で芽生えたものです。ここに来るまでは、どちらかというと社会貢献は二の次でした。しかし、野依先生に「今の時点での価値はわからなくても、将来価値が出るだろうと、自分自身が信じられるものを見つけて時間をかけてでもやりなさい」と教えていただきました。そういうわけで僕は、未熟な自分では考えが及ばなかった部分について、ことあるごとに教え導いていただけたことに感謝しています。だから、野依先生は僕にとってかけがえない恩師なのです。そしてその気持ちから今度は自分が社会に貢献できるようにすることをしたいと強く考えるようになりました。

小山 先生にとって脱石油化学というテーマは、どんな存在でしょうか。

齋藤 「やっど巡り会えたどうしてもやりたいテーマ」です。将来、化学産業や我々の生活の生命線になるかもしれません。このテーマをきっかけにモチベーションがものすごく上がり、研究に対して迷いがなくなりましたね。

出会いが人と価値をつくる

小山 研究の価値といっても、見極めが難しいと思うのですがいかがでしょうか。

齋藤 おっしゃる通りですね。今は存在しないけれど、将来価値をもつものを自分としては見つけたい。新しい発見ならいくらでもあるでしょうが、そこに高い価値が潜むかどうかを見抜かなくてははいけません。そのために必要なのは、違った分野の人とも「自由闊達にざっくばらんに話をすること」だと思います。そうすると、自分のもっていない価値観に出会えるため、新しい価値を見つける確率は高くなるでしょう。

とくに、考え方や知識と知恵の範囲が違う産業界の方との交流は、刺激になります。たとえば、僕は今、可視光を使わないと本当に新しい有機合成は出てこないと予想していて、それが実現すれば、4つの「水」をもつと制御できるようになると思うのですが、そのシステムは、ハイサイエンスであると同時にローテクノロジーでなければ、社会に貢献する研究になりにくい。いかにシンプルでローテクノロジーにするかを考えるとき、企業の方の発想や視点はとても参考になるのです。

小山 なるほど。先生にとっては、やはり野依先生との出会いが、大きなターニングポイントだったのですね。

齋藤 そうですね。高校のとき野依先生と山本先生に憧れて故郷岡山から参りましたが、両先生に師事できるという当時の夢を

かなえられてこのうえない喜びを感じています。ノーベル化学賞受賞者というだけではなく、野依先生は人間的にもたいへん大きな方だと感じています。自分はなんて幸せなのだろうとつくづく思います。

小山 そうですね。私も、尊敬する素晴らしい研究者の方々に出会ってきたからこそ、今、アカデミックな研究者の道を選んでいる自分がいると思っています。

齋藤 以前、米国プリンストンの高等研究所の運営方法を見学したとき、副所長に「インシュタインは天才だから、一人でやっていたのでしょ」と聞くと、「いや、そんなことはない。実際には相当いろいろな人とディスカッションしていた」というのです。あの天才インシュタインでさえもと考えたら、やはり人生には、よい出会いが大切なのだと実感しました。

小山 研究者としては、先生のように高くモチベーションをもちつづけられる素晴らしいテーマに出会えたら幸せですね。

齋藤 僕も、いろんな人に出会い、導いていただき、長い時間をかけてようやく自分の人生を賭けてもいいと思えるものを見つけたところです。

小山 私も、今は目の前の実験などで精一杯なのですが、そろそろ研究者として将来どうするかということも真剣に考えていきたいと思っていたところでした。今日はとても参考になるお話をお聞きすることができました。ありがとうございました。

研究ノート

多彩な能力を秘めた「強い」ルテニウム錯体の創成

野依教授のルテニウム錯体(1)では、ルテニウムのまわりが特殊な2種類の金属配位子で化学的に修飾されている。そのうちの1つはノーベル化学賞研究に大きく貢献したかの有名なBINAP(バイナップ)。リン原子を2つもつ配位子である。これら2種類の配位子はそれぞれ窒素と窒素、リンとリンでつながれている。ここから窒素と窒素のつながりとリンとリンのつながりを両者とも切断し、窒素とリンを新たにつながり合わせる。すると高熱や高圧でも安定に存在する「強い」ルテニウム錯体(2)ができあがる(図1)。

このルテニウム錯体(2)自体は触媒活性をもたない「触媒前駆体」。その固体は空気中や室温でも安定で、通常の試薬棚などでも容易に保存できる。ところがこの安定な錯体(2)に、ある物質を添加剤として加熱をかけると触媒活性をもつルテニウム錯体へと変身する(図1右)。添加剤によって違った反応性をもつルテニウム触媒となるため、多彩な反応に利用できる。たとえば添加剤として水素化ホウ素ナトリウム(NaBH<sub>4</sub>)を加えた場合、またはアルカリ金属アルコキシド(NaOR: Rは任意の炭素鎖)を加えた場合、前者はエステルの水素化、後者はアミドの水素化に効果的である。

ちなみに、ルテニウム錯体(2)は水素があれば水素化触媒だが、水素がなければその逆の反応「脱水素化」の触媒に変わる。このことを利用して、アリセプト®(アルツハイマー型認知症進行抑制剤)や医薬品世界売上高第1位をここ7年以上更新し続けているリビトール®(コレステロール合成酵素阻害剤)などを、金属塩廃棄物を最小限に抑えてつくこともできる(図2)。反応後に金属塩を取り除く処理も必要としないため、これまで4つの反応容器に分けて行う合成ルートが、1つの反応容器ですんだりする(図2上)。反応容器から取り出すことが難しい不安定なアルデヒドを取り出さずにそのままその反応容器内で次の反応に使うこともできるようになる(図2下)。いろいろな反応や有機化合物に使えるということは、触媒が死ににくい(分解しにくい)ことを意味する。原理的に金属塩廃棄物を出さない方法であるためクリーンでグリーンなシステムに自然とつながる。

以上のように添加剤をかえるだけで同じルテニウム錯体から多彩な触媒機能をつくり出せる。「強い」触媒はカルボン酸やCO<sub>2</sub>の水素化にも応用できる可能性を秘めている。(齋藤進)

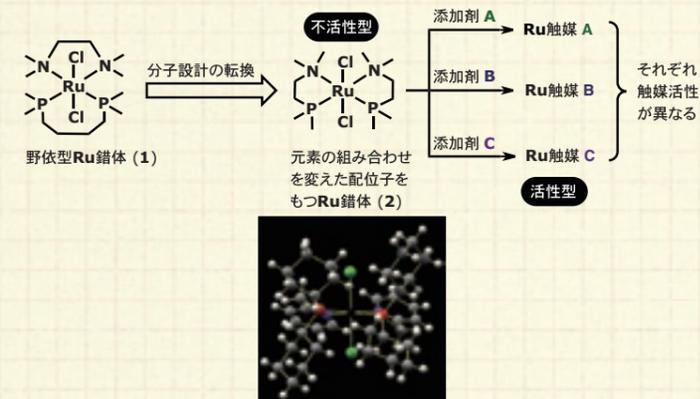


図1 野依型錯体からの転換による「強い」ルテニウム錯体の創成

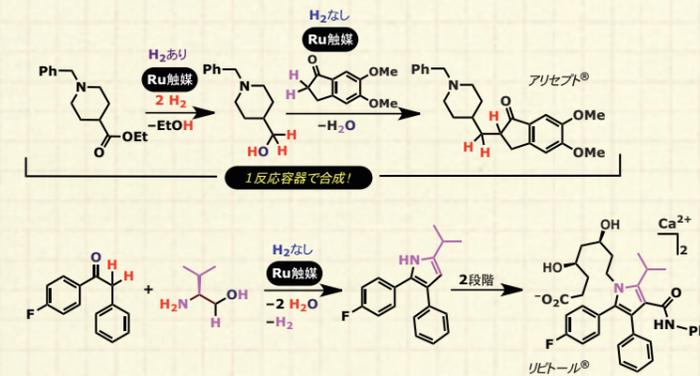


図2 多彩な水素化・水素移動で可能となるアリセプト®とリビトール®の合成

インタビューを終えて 「出会い」を生かす



小山昌子 Masako Koyama  
生命理学専攻博士後期課程3年

今回、齋藤進先生にインタビューするという大変貴重な機会に恵まれたが、先生は研究に対するモチベーションが大変高く、お話をうかがっていてその熱意が伝わってきて、とても大きな刺激を受けた。「廃棄物を出さないクリーンな有機合成」を研究の軸とし、さらにそれを生かすテーマとして「脱石油化学」をめざす。将来的には二酸化炭素やバイオマスを原料にすることをめざしておられるということで、まさに現代社会が抱えるさまざまな環境的、経済的問題に一挙にメスを入れる、大変やりがいのある研究であると、お話をうかがっていて私自身もとてもわくわくした。

私の場合、研究に対するモチベーションは、生命現象の奥に潜む根本的な原理を解明したい、という知的好奇心が大きい。研究者の数だけ、価値観がある。私も、たくさんの人との出会いを大切に、そこからオリジナルな価値観を育て上げ、齋藤先生のように「人生を賭けてもいい」と思えるような研究分野を開拓していきたい。それができたら、なんて幸せな研究人生だろうと思う。「人生には、よい出会いが大切」。今回のインタビューを通して齋藤先生とお会いしお話をできたことは、私の研究人生にとって、とても刺激的な「よい出会い」であったと確信している。



Chiho Nonaka

1971年生まれ。広島大学大学院理学研究科博士課程修了。米国デューク大学研究員、海外特別研究員（米国ミネソタ大学）などを経て現職。専門はハドロン物理学。現象論的模型や格子QCDによりQCD相図の解明を進める。

## 物質の高密度極限に迫る ——“クォーク・グルーオン”プラズマの探索

野中千穂 基礎理論研究センター(素粒子宇宙物理学専攻)助教

### “クォーク・グルーオン”プラズマとは

宇宙はビッグバンから始まった。誕生直後の宇宙では、物質は極端に高い温度をもっていたはずである。そのような高温の物質のふるまいが、一步一步、解き明かされつつある。この原稿の依頼があった2011年6月、筆者は国際会議「クォークマター2011」に参加しLHC\*1重イオン衝突実験からの充実した実験結果に驚き興奮している最中であった。

我々の体は、陽子や中性子などの素粒子できている。これらの粒子は、クォーク\*2と、それをつなぐグルーオン\*3できていることが知られる。LHC実験の目的は、クォークと

グルーオンを取り出し、“クォーク・グルーオン”プラズマ（QGP）がどのような性質をもつかを明らかにすることである。

QGPは、通常は陽子などの中に閉じ込められているクォークやグルーオンが自由にふるまう新しい物質相として予想され、ビッグバン後10万分の1秒後、温度が2兆度という世界に存在したと考えられる。

QGP研究の難しさは、クォークやグルーオンを直接観測できないことに由来し（図1）、「QGPシグナル」をいかにうまく見つけるかが、研究者の腕の見せどころである。QGPの生成に初めて成功したのは、2000年に稼働

したブルックヘブン国立研究所の金イオン同士の衝突型加速器（RHIC\*4）である。

### 強結合QGP生成の成功

RHICが稼働し、まず多くの研究者を驚かせたことは、多くの理論的予想に比べて「楕円フロー\*5が大きい」という、意外な兆候が見えたことである。この楕円フローをうまく説明できたのは、相対論的流体模型\*6のみであった。それまでは自由に飛びまわると考えられていたクォークとグルーオンが、強く結合して流体のようにふるまう兆しが見えてきたのである。これを「強結合QGP」

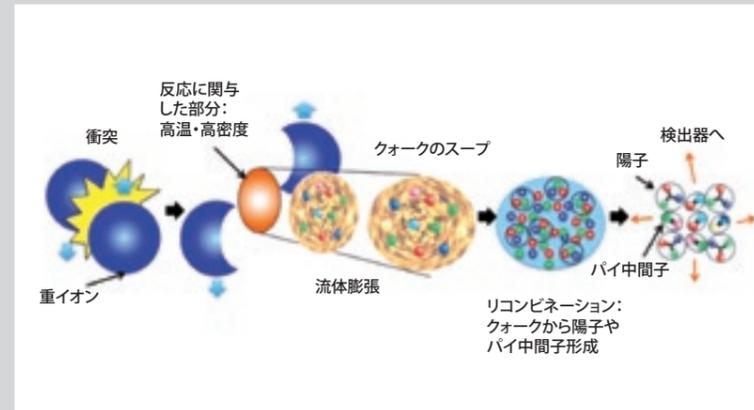


図1 時間経過でみる高エネルギー重イオン衝突実験

左側の図からそれぞれ次の様子を表す。(1) 2つのイオンが衝突する；(2) 反応に関与した部分で高温・高密度が生成し、クォークのスープができ、それが流体膨張をする。はじめは縦に長いアーモンド型だった高温・高密度部分が短軸方向に膨張していく；(3) 温度が冷えてくると周囲のクォーク3つあるいは2つが結びつくリコンビネーション過程を経てクォークから陽子やパイ中間子などが生成される；(4) さらに温度が冷えてくると生成した陽子やパイ中間子などが検出器へ飛び込んでくる。

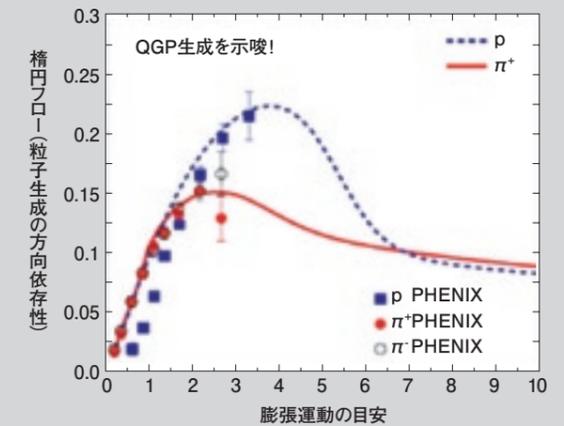


図2 RHICにおける楕円フローのリコンビネーション模型による理論的解析(実線、破線)と実験結果(PHENIX実験グループによる：■、●、○)の比較

陽子(p)とパイ中間子(π)の楕円フローの最大値の比、およびその最大値をとる膨張運動の目安(横軸の値)の比は、ともに構成クォークの数の比である3:2となっており、QGPができたとした理論予想とよく一致している。これがクォークのスープがRHICで生成されたことを示唆していると考えられている。

とよぶ。さらに、この楕円フローのふるまいが陽子やパイ中間子間で異なることもわかってきた。これは当時謎とされ、それを一挙に解決に導いたのが筆者らによるリコンビネーション模型\*7であった（図2）。リコンビネーション模型の成功は、重イオン衝突後、高温・高密度状態のクォークの「スープ」ができ、そこから陽子などのハドロン\*8が生成したことを示唆している。つまり、高エネルギー重イオン衝突後に生じたクォークのスープが流体膨張し、温度が冷えるにつれて今度はまわりのクォーク3つあるいは2つと結びつくリコンビネーション機構を経て陽子やパイ中間子ができ、これらが検出器に飛び込んでくるという理解に到達した（図1）。これら相対論的流体模型、リコンビネーションの成功により稼働後5年を経た2005年、ようやくRHICで「強結合QGPの生成」が決定的になった。このように理論的解析手段も充実し、強結合QGPの理解が深まった2010年11月、LHCの重イオン衝突実験が始まった。

筆者自身は、優れた現象論的模型とは、物理的エッセンスを的確にとらえたシンプルな模型ではないだろうかと思う。雑多とも思える高エネルギー重イオン衝突実験結果の背景にある物理をうまくとらえ、かつ、普遍性のあるシンプルな現象論的模型が構築できないだろうかと考えている。また一方で、いつの日か、第一原理から積み上げられた模型によって実験結果が説明され、同時に、実験結果からのQCD相図の直接理解が実現できないだろうか考えている。

### LHC実験とこれから

LHC実験から得られた楕円フローは

RHICとそれほど変わらず、相対論的流体模型での解析が有効であることが示唆される。さらに、楕円フローのゆらぎといった今までにない新しい実験結果も報告され、QGP研究がより進むことが期待される。相対論的流体模型をはじめとする模型は、「現象論的」模型とよばれる。この反対の極に、純粋に理論的考察で組み立てた「第一原理」理論がある。第一原理理論と高エネルギー重イオン衝突実験の結果との間には、あまりにも大きな隔りがある。これを埋めるために、現象論的模型が必要とされる。

筆者自身は、優れた現象論的模型とは、物理的エッセンスを的確にとらえたシンプルな模型ではないだろうかと思う。雑多とも思える高エネルギー重イオン衝突実験結果の背景にある物理をうまくとらえ、かつ、普遍性のあるシンプルな現象論的模型が構築できないだろうかと考えている。また一方で、いつの日か、第一原理から積み上げられた模型によって実験結果が説明され、同時に、実験結果からのQCD相図の直接理解が実現できないだろうか考えている。

\*1 LHC Large Hadron Collider (大型ハドロン加速器)の略。スイス・ジュネーブ郊外にある世界最大の加速器施設。陽子同士の衝突実験に加えて、鉛イオンによる「重イオン衝突実験」も行われている。

\*2 クォーク (quark) 陽子・中性子などを構成する粒子。陽子・中性子はクォーク3個からできている。

\*3 グルーオン (gluon) 陽子・中性子の中で、クォークを結びつけている粒子。

\*4 RHIC Relativistic Heavy Ion Collider(相対論的重イオン衝突器)の略。アメリカ・ニューヨーク州のブルックヘブン国立研究所にある。

\*5 楕円フロー 図1をみると衝突後、反応に関与した高温・高密度状態(オレンジ色の部分)はアーモンドのかたちをしている。重イオン衝突実験でつくられる新たな粒子はこの部分で生成する。生成粒子数はこのアーモンドのかたちを反映し、ある方向(この場合は楕円の短軸方向)により多く生成される。この生成粒子数の方向依存性を見積る尺度。

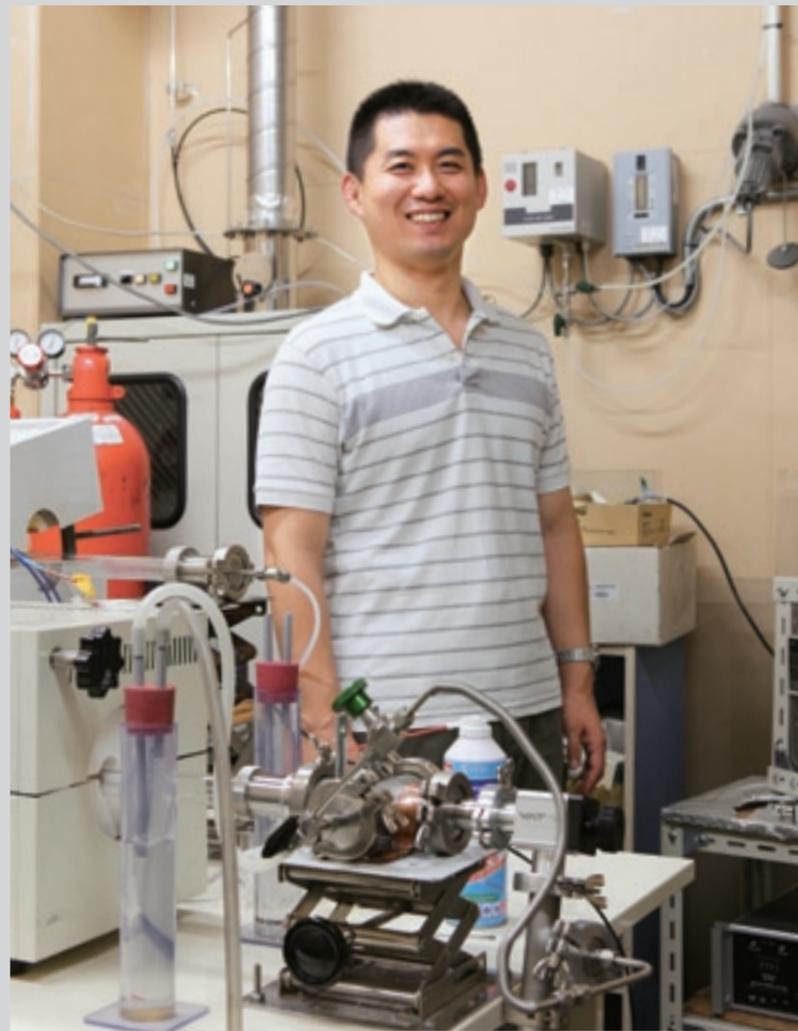
\*6 相対論的流体模型 重イオン衝突後の多重生成で生じた粒子をマクロに捉え流体として取り扱う現象論的模型。筆者は楕円フローの重要性にRHIC実験稼働前から注目し、その解析に必要な3+1次元での相対論的流体模型を世界に先駆けて構築した。

\*7 リコンビネーション模型 クォークの密度が大きい場合は周囲のクォークと結合することによりメソン(クォーク2つ)やバリオン(クォーク3つ)が生成する。

\*8 ハドロン 原子核中の陽子・中性子を結びつけている強い力を受ける粒子。陽子・中性子などのバリオンと、強い力を媒介するとして湯川博士により導入されたパイ中間子などのメソンに大別される。

# ナノ物質の世界を探る

北浦 良 物質理学専攻准教授



Ryo Kitaura

1974年生まれ。2003年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。(株)豊田中央研究所、名古屋大学大学院理学研究科助手、助教を経て2008年より現職。

## ナノ物質の可能性

近年、ナノを冠してよばれる物質は多い。最新の論文を眺めてみると、PRLあるいはJACSなど、物理、化学と分野を限らず、ナノ粒子、ナノチューブ、ナノワイヤーなどをタイトルに見出すことはたやすい。ナノを冠してよばれるこれらの物質（ナノ物質）の最大の特徴は、そのサイズがある方向で著しく小さいことにある。たとえば、最小のカーボンナノチューブは太さが0.4ナノメートルしかなく、これ以上に細いチューブは存在しえない。さて、これらナノ物質が、分野をまたがって大きな注目を集めているのはなぜだろうか。原子スケールの究極に微細な構造体という、構造そのものの面白さにまっさきに思い至るが、より重要なのはナノ構造に由来する驚くべき物性・機能が現れることである。たとえば、太さが1原子の金原子ワイヤーは、そのコンダクタンスが量子化されるとともに、一般的な金ワイヤーの $10^5$ 倍という高い電流密度で電流が流せることが知られている。従って、これらナノ構造体を自在につくり出し、かつその機能を引き出すことができれば、巨視的サイズの物質では実現しえない驚くべき機能を発現する物質群となりうる。

## 低次元空間を利用した物質創成

ナノ物質を意のままにつくり出すにはどうしたら良いだろうか。ナノ物質のサイズは、化学合成の対象としては大きすぎ、リソグラフィをはじめとする物理的なトップダウン法の対象としては小さすぎる。やはり、原子、分子レベルの小さな構成要素を積み重ねることで

大きな構造体を構築する、いわゆるボトムアップ法を用いるのがよいだろう。ただし、ナノ物質ではある方向のサイズがきわめて制限されているため、ボトムアップ構築の過程で成長する方向を制限する必要がある。

カーボンナノチューブは内部にトンネル状空間をもち、その空間のサイズが軸方向で最大cmレベルであるのに対し、直径方向は最小で1原子分の大きさしかない。このため、このトンネル状空間を舞台としたボトムアップ構築を行うことで、自然と原子レベルの極細ナノワイヤーをつくり出すことができる。この方法は一般性が高く、これまでに、太さが1原子という究極に細い金属ナノワイヤー、炭素原子ワイヤー、直径5ナノメートル超の金属ワイヤー、種々の金属化合物ナノワイヤーなど、多彩なナノワイヤーをつくり出すことに成功した（図1および図2）。さらに、合成したナノワイヤーはカーボンナノチューブの壁

に保護されているため、容易にさまざまな特性を調べることができる。これまでに、電子顕微鏡やプローブ顕微鏡を用いた構造、電子状態の観察、電気抵抗の測定、磁気物性の測定などを通して、これらのナノワイヤーは巨視的サイズの金属結晶とは異なる構造、性質を示すことがわかってきた。とくに、電子顕微鏡観察による詳細な構造解析や構造ダイナミクスの観察の結果から、これらナノワイヤーについて、自発的ならせん構造の形成や、大きな構造ゆらぎが存在し、液体・固体ともつかない状態にあることなど、興味深いことが明らかになってきており、今後の展開が楽しみである。また、最近では、ナノチューブ空間より次元が1つ高い2次元空間、つまりさまざまな基板表面上を舞台としたボトムアップ構築にも取り組んでおり、ナノワイヤーに限らず、多彩な次元性、構造をもつ新規ナノ物質へと標的を広げつつある。

## さいごに

ナノ物質の可能性を開拓するためには、新規ナノ物質を生み出すことに加えて、ナノ物質1つ1つの構造と物性の相関を理解することが重要である。そのためには、自らビルドアップしたナノサイズの構造体1つ1つを、電子顕微鏡、プローブ顕微鏡を駆使して観察し、リソグラフィのテクニックを用いてその1つ1つにアクセスしてナノ構造体の中を動く電子あるいは原子の挙動を調べることが必要不可欠である。これらを通して、ナノスケールにおける新たな物理現象を見出すとともに、次世代エレクトロニクスを支える基板材料を生み出すことができると考えている。ナノ物質の、合成、構造解析、物性計測、これらすべてに一貫して取り組むのは困難も多いが、それだけに新しい発見があったときの喜びは大きい。これからも欲張りながら、ナノ物質の世界を探索していきたい。

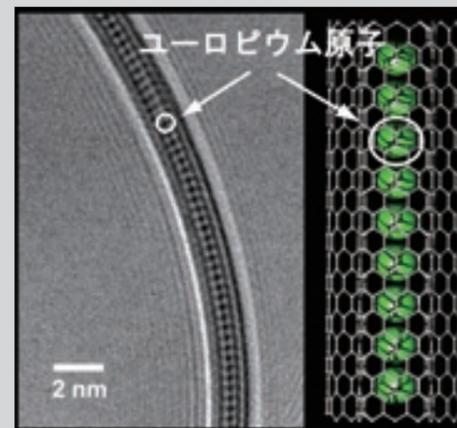


図1 内層の太さが0.7nmの2層カーボンナノチューブ内に生成したユーロピウム(Eu)単原子ナノワイヤーの高分解能透過型電子顕微鏡写真と構造モデル  
観察像のスポット状のコントラストがユーロピウム1原子に対応する。Eu-Eu原子間距離は平均4.6ナノメートルであり、通常の金属Eu結晶で見られる最近接原子間距離(4.0ナノメートル)よりもはるかに大きい。

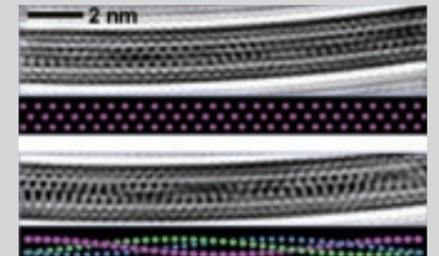


図2 断面が4原子の太さのユーロピウムナノワイヤーの透過型電子顕微鏡写真と構造モデル図  
2枚の写真は、同じ場所で数秒置いて観察されたものであるが、最密充填構造(上)、らせん構造(下)と異なった構造を示している。ナノサイズの世界では、自発的ならせん構造が現れると同時に、可逆的な構造変換が起こっている。

物理化学研究室ウェブサイト <http://nano.chem.nagoya-u.ac.jp/japanese/>

# 粉体の低速衝突現象から見えるもの

桂木洋光 地球環境科学専攻准教授



Hiroaki Katsuragi

1973年鳥取県生まれ。1998年九州大学大学院工学研究科修士課程修了。(株)三菱総合研究所、九州大学大学院総合理工学研究院助手、助教を経て2011年より現職。

## 自然界にあふれかえる「粉体」

古代のアリストテレス自然学は「火・空気・水・土」を知覚可能な始元的物質とみなし四大元素とした。今日、これらのうち「火」は化学反応として理解され「空気・水」は流体力学によりその運動が説明される。しかし「土」は他の要素に比べてその現代的理解が立ちおけているといわざるを得ない。土を対象とする地球物理学や土木工学でその性質は議論されてきているが、基本的な意味で土の力学を記述する基礎物理体系は未だ整備されていない。

土は一般に粒々から構成されている。考えてみると我々の周囲には粒々があふれている(図1)。砂浜の砂はもとよりキッチン

では食材や調味料の多くが粒々もしくは粉状である。また、見方によっては通勤ラッシュ時の人間も粒々とみなせる。時代をさかのぼれば、太陽系を形成した素材も元は小さな粒々だったと考えられている。このよう

に遍在する粒々の集合のことを一般に「粉体」とよぶ。私の挑む理の先端は「粉体が従う基礎物理法則」であり、その確立を通して「土」の現代的理解を深めたいと考えている。

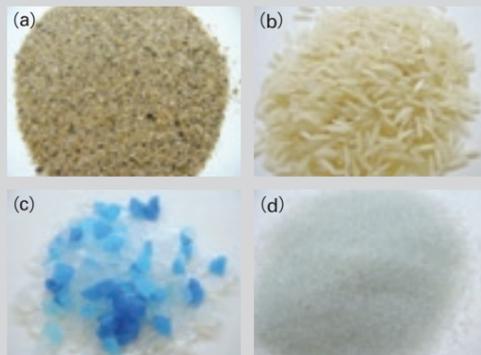


図1 さまざまな粒々(粉体)

(a) 砂浜の砂粒、(b) 米粒、(c) 猫のトイレに使う敷石の粒、(d) ガラスビーズ。かたちや大きさの違いはあるが、いずれも多数の粒々で構成されており、粉体物理の典型的な研究対象となり得る。とくに粉体物理実験ではモデル粉体粒子として球形のガラスビーズを用いることが多い。

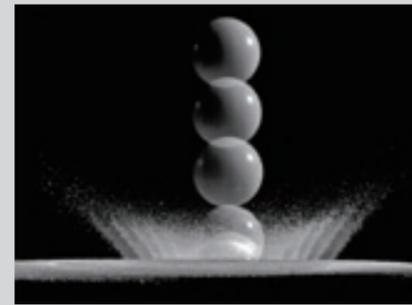


図2 粉体(ガラスビーズ)に固体球を落下衝突させた瞬間の高速撮影写真

固体球が衝突により粉体を巻き上げ、自らは減速して停止に至る様子が示されている。この際に固体球が受ける粉体衝突抵抗力を新たに開発した光学的手法により高精度計測し、抵抗力が流体的慣性抵抗力と固体的摩擦抵抗力の和のかたちで表されることを明らかにした。得られた表式は一見矛盾すると考えられていたさまざまな先行研究を統一的に説明することにも成功した。

## 粉体を「突ついでみる」実験

粉体物理の確立へ挑むと意気込んでみたものの、この問題が古代以来の宿題であるということは問題の原始性と同時に困難性も示している。そこで我々は問題が原始的なら研究戦略も原始的に取ろうという精神で開き直り、粉体を「突ついでみる」ことにした。突ついでその応答を観察するという行為は物理実験の基本である。具体的には粉体に固体球を低速(秒速数メートル程度)で衝突させその応答を計測した(図2)。実験結果より、単純な力学の問題であるにもかかわらず長く未解決であった「固体球が粉体から受ける衝突抵抗力の運動方程式」を明確に書き下すことに成功した。得られた運動方程式によると、粉体衝突抵抗力は速度の二乗に比例する慣性抵抗(流体的挙動)と侵入深さに比例する摩擦抵抗(固体摩擦の挙動)から構成される。これは粉体が流体的性質と固体的性質を併せもつことを定量的に示しているといえる。

固体球の粉体への低速衝突では、変形

するのはもっぱら粉体で固体球の変形は通常考慮しない。では、もっと柔らかいものによる衝突ではどのようなことが起こるだろうか。この問いに答えるべく、我々は次なる課題として水滴と粉体の低速衝突実験を行い(図3)、従来の固体弾衝突実験では見られなかった複雑で多彩な衝突クレーター形状を新たに発見した(図4)。月や惑星表面のクレーターは太陽系の歴史についての重要な情報源であり、その形状研究は惑星科学においても重要な課題である。これらの新規クレーター形状は惑星科学にも一石ならぬ一滴を投げられるものかもしれない。また、この実験は粉体の濡れ現象とも深く関わる新たな未解決問題をも生み出し、粉体における基礎現象としても今後さらなる発展が期待されている。

## 粉体による地球惑星物理学の今後

粉体は四大元素の1つの土という古典的側面の他に現代的な意味での面白さも多数兼ね備えている。たとえば、粉体の関わる現象は履歴に強く依存し、見かけの再現性

が悪くなることが多い。このような履歴依存性は他の非線形系においても多く見られる特徴であり、これは粉体が幅広い非線形系への応用展開可能性を秘めていることを示唆しているといえよう。

宇宙空間で起こっている衝突を再現するためには高速(秒速数10キロメートル程度)の衝突を実験室で模擬することが重要な課題となる。一方で我々はこれまで低速領域で粉体の衝突実験を行ってきた。水や空気といった流体では、たくみに定義された無次元数を基準にとれば地球惑星規模の現象を実験室で相似的に再現することが可能となる。粉体物理ではこのような相似則が未だに確立していないので低速と高速の衝突では物理法則はまったく異なるかもしれない。加えて高速衝突では相転移などの複雑な要素が絡み問題は一層複雑である。しかし、いつしか粉体物理の確立を通して地球惑星規模で起こる衝突現象の本質を実験室で相似的に再現できるようになる日が来ることを夢見ている。



図3 粉体(研磨粉)に水滴を衝突させた瞬間の高速撮影写真  
衝突による粉体の巻き上げのほかに、衝突体である水滴の大変形の様子がとらえられている。

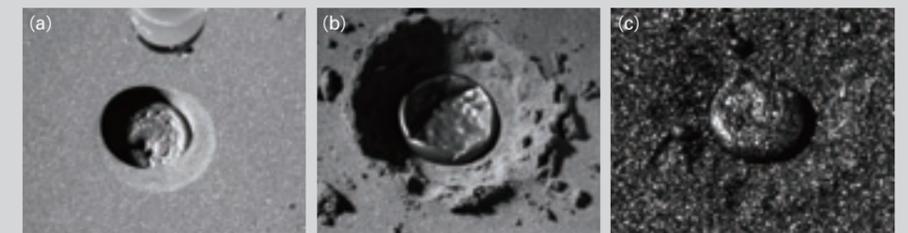


図4 粉体(研磨粉)と水滴の衝突により形成されるさまざまなクレーター形状

(a) すっぱりと抜けたような「縦穴型」、(b) 二重のリング構造をもつ「リング型」、(c) 衝突前より隆起する「たんこぶ型」。これらの形状が実験条件(粉体の粒径や水滴の衝突速度)を変化させることにより観察される。

同窓生から

誇大妄想を許してくれた名古屋大学

マンガ家・京都精華大学准教授  
都留泰作 (Daisaku Turu)

名古屋大学での僕は、理学部などに通いながら、マンガ家になりたいとかほざいている面倒な奴だった。生物学科に所属していたが、今思えば、よくまあ、単位を取り落とさずに卒業できたものと思う。ゲル電気泳動では、出るはずのないバンドばかり出るし、余った寒天培地を意味もなく外気にさらし、赤や黄色の菌類コロニーを増殖させて、「腐海…」とかいって一人でくらくホクそえんでいた。

ミクロな生物学では生命を理解できない、マクロな生物学がやりたい、その根本は結局のところ「人間理解」だ、などという妄想に駆られ、図書館で心理学や社会学の本を読んでいた。人間の社会や心理そのものをフィールド研究の対象としていこうとする文化人類学に心ひかれ、卒業後は京都大学の大学院に進み、アフリカで狩猟採集民の宗教儀礼の研究を行った。

月2万の下宿では、マンガ家デビューを夢見てマンガやスケッチに没頭していた。入部したワンダーフォーゲル部の同輩にマンガを見せて、「つまらない」といわれ落胆していた。結局学部では「描きたいもの」がわからず、本気で原稿を

出版社に持ち込みしたのは、大学院時代からだった。

あとやはり、思い出深いのは、4年生に所属させてもらった昔島の臨海研究所だ。初日の集合場所はがらんとした栈橋で、そこに漁船のような実習船が直接横付けされて驚いた。今もあまり変わっていないようだが、海の中に直接浮かぶような、まるで夢の中のような研究所だった。閉ざされた環境で、同輩や先輩たちには仲良くしてもらった。実験用のウニの餌のために、先輩や研究員の方と近くの海中を泳いで、カジメ（海藻の一種）を取りに行った。夜、栈橋から海に飛び込むと、ばたつかせる手足のまわりでヤコウチュウが青白く光った。海の中で、ただ独りじっとしていると、底知れない不気味と神秘があった。あの感覚がきつと、デビュー作となったマンガ作品「ナチュン」の世界観のもとになっているのだと思っている。

「理系」の大学に属しながら、文化人類学のような「文系」学問に心ひかれ、さらには「学問・研究」からかけはなれた「マンガ表現」にしがみついて何とかやってきた。ただ「別のことがしたいだけ」という逃避の面もあったかもしれないが、自分なりに必然性はあったはずだと思っている。今は理学とはかけはなれた環境にはいるが、名古屋大学では、理系な生き方や感じ方そのものを学ばせてもらったのだと思う。文系と理系、芸術と研究、まったく違う世界を旅する誇大妄想を許してくれたのも、名古屋大学という環境だった。



臨海研究所でのカジメ採取をイメージしたイラスト



「ナチュン」第1巻  
都留泰作 作  
講談社  
2007年2月発行  
533円(税別)

書籍紹介

「寄り道の多い数学」

多元数理科学専攻准教授  
栗田英資 (Hidetoshi Awata)

パパ抜き必勝法、渋滞、画像圧縮、フラーレンなど身のまわりの話題や先端科学をヒントにつくられた数学の問題に中高生がじっくりとまる1日かけて取り組む。この名古屋大学主催の「日本数学コンクール」は、森重文名古屋大学特別教授のフィールズ賞受賞をきっかけに1990年に始まり、今年で22年目を迎える。ちなみに参考書やノートなどは持ち込み自由だがネット利用は禁止らしい。

このコンクールで過去に出題された問題を題材にしながら、多面体定理、ポアンカレ予想、エルゴード理論、不動点定理をはじめとする興味深い数学の話題をその歴史とからめてつづる、大沢健夫多元数理科学研究科教授の近著である。

たとえば、伝票計算の入力ミスの問題、「合計が368963550円となるはずの入金伝票を集計したが、1枚だけ手違いで桁をずらして打ち込んでしまい、計算結果が356464800円となってしまった。何円の入金伝票を何桁ずらして打ち込んだか（まずは金額の差を9で割ってみるとよい）」をまず解説する。それを種にしながらくみに、情報圧縮の理論、誤り訂正、アナログ情報の良質なデジタル化の方法などの情報伝達の理論の話題へと読者を案内する。

ほかに、「二人乗りの浮き輪の表と裏を裏返すとどうなるか」や、楕円の中心の作図法、マヤ暦のうるう年のルール、円柱に映る蛍光灯などの一風変わった骨のある問題が多い。数学好きの方は挑戦してみてはいかがか。



「寄り道の多い数学」  
大沢健夫 (Takeo Ohsawa) 著  
岩波書店 / 2010年7月発行  
1200円(税別)

キャンパス通信

理学南館完成

事務部庶務掛長  
鎌澤幸彦 (Yukihiko Kamazawa)

2011年3月、理学館の南、理学部C館の西に理学南館が完成した。理学南館は地上5階建の研究・実験棟と地下1階地上1階の大講堂の2棟からなる。研究・実験棟の2階から5階は、生命理学専攻の研究室に利用され、各階に設けられた広い共用ラウンジが大きな特徴となっている。

大講堂は「坂田・平田ホール」と名付けられた。これは、ノーベル受賞者の野依良治博士、益川敏英博士、小林誠博士、下村脩博士の師であり、名古屋大学の偉大なメンターである坂田昌一博士と平田義正博士の名前を後世に残し、今後の研究者、学生にその意志を受け継ぐことを目的に命名された。

建物玄関からバリアフリーで直接入室できる坂田・平田ホールは、固定式座席301席と車いす用スペース2カ所を擁する。採光に工夫がこらされ、1階南面の広いガラス面と天窓から自然光を取り込むことができるほか、地下1階には控えスペースや、自然光の注ぐ光庭も配置されている。さらに大講堂屋上は植栽やベンチを配置した庭園スペースとなっている。同館1階には、「坂田・平田ホール」のほかに、セミナー室（可動機24台、椅子72席）、会議室（固定円卓1台、椅子16席）を配置、さらに隣接する吹き抜けのエントランスホールは、ポスター展示が可能な広いスペースを確保しているおり、講演会や学会等の開催が可能な施設となっている。

