

## 研究会・学会スケジュール

第5回 ITbM 国際シンポジウム、  
第13回平田アワードおよび第3回岡崎令治・恒子賞  
5th International Symposium on Transformative Bio-Molecules (ISTbM-5),  
13th Hirata Award, 3rd Tsuneko & Reiji Okazaki Award  
開催日: 2017年11月20日(月)・21日(火)  
開催場所: 名古屋大学野依記念学術交流館  
主催: ITbM (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 特任准教授  
istbm-5@itbm.nagoya-u.ac.jp/052-747-6856

### 性と生殖の懇談会

開催日: 2017年12月12日(火)・13日(水)  
開催場所: 名古屋大学理学南館1Fセミナー室  
主催: 「性と生殖の懇談会」有志メンバー  
問い合わせ: 田中 実 理学研究科 教授  
mtanaka@bio.nagoya-u.ac.jp/052-789-2979

### 第17回名古屋大学遺伝子実験施設公開セミナー

開催日: 2017年12月14日(木)  
開催場所: 名古屋大学理学南館坂田・平田ホール  
主催: 遺伝子実験施設  
問い合わせ: 松尾拓哉 遺伝子実験施設 講師  
t-matsuo@gene.nagoya-u.ac.jp/052-789-4527

### 第17回名古屋国際数学コンファレンス「K3 曲面とその周辺」

The 17th International Conference, Graduate School of Mathematics,  
Nagoya University "K3 Surfaces and Related Topics"

開催日: 2017年12月19日(火)~21日(木)  
開催場所: 名古屋大学理学南館坂田・平田ホール  
主催: 名古屋大学大学院多元数理科学研究科  
問い合わせ: 伊藤由佳理 多元数理科学研究科 准教授  
y-ito@math.nagoya-u.ac.jp/052-789-5572

### 第1回 KMI スクール - 暗黒物質 -

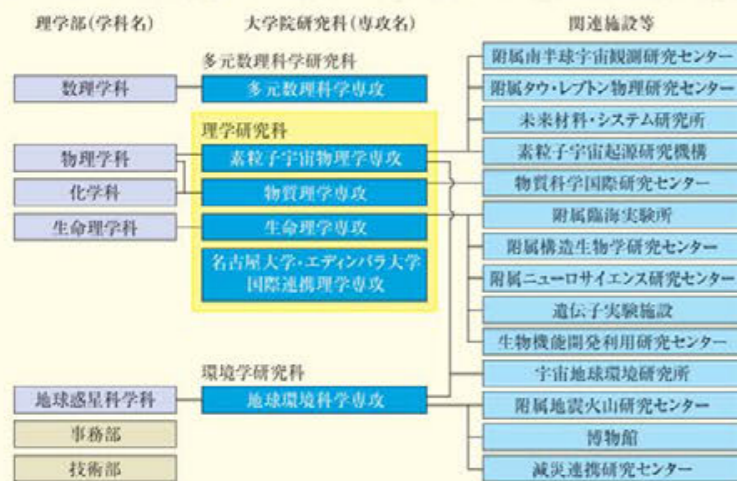
The First KMI School: "Dark Matter"  
開催日: 2018年2月28日(水)~3月2日(金)  
開催場所: 名古屋大学ES館635 (理学シンポジウム)  
主催: 素粒子宇宙起源研究機構  
問い合わせ: 久野純治 基礎理論研究センター 教授  
hisano@eken.phys.nagoya-u.ac.jp/052-789-2875

### 周惑星円盤と衛星形成

Circumplanetary Disks and Satellite Formation  
開催日: 2018年3月26日(月)~30日(金)  
開催場所: 名古屋大学および名古屋市内  
主催: 名古屋大学  
問い合わせ: 藤井悠里 理学研究科 特任助教  
yuri.f@nagoya-u.jp/052-789-2459

## 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

本号の特集では、天文学の最先端研究を取り上げた。夜空に光る星々や遙か彼方まで広がる宇宙を対象とする天文学は、我々人間の夢とロマンをかき立て、自然科学の最先鋒を担う学問分野の1つである。では、それが何の役に立つかと問われたら、人はなんと答えるのだろうか。

素粒子実験が専門の私は、毎年最初の講義で、素粒子や原子核物理は何の役に立つかというレポート課題を出しているが、少なからずの学生がとまどうようである。「理学」の真髄は、わからないことを知りたいという純粋な好奇心に基づく基礎研究にある。本号の理のエッセイで齋藤先生が書かれているように、昨今の社会の状況は変わってきているが、それでもなお、世間におもねることなく、人類の知を開拓する「理学」のマインドを伝えたい。新しく広報委員長として編集長を任されることになったが、そんなマインドを伝えていきたいと思う。(飯嶋徹)

### 表紙説明

太陽系が現在の姿に至った経緯は未解決の宇宙の謎の1つである。名古屋大学の研究グループは、星や惑星系が誕生する過程を明らかにするため、電波や赤外線などさまざまな観測手法を駆使して肉眼では何も見えない宇宙を見つめつつけている。



## 理 philosophia

No.33  
autumn - winter 2017  
2017年11月10日発行

広報委員 杉山 直(研究科長)  
阿波賀邦夫(副研究科長・評議員)  
大隅圭太(副研究科長)  
糸 健太郎(数理学科)  
飯嶋 徹(物理学科)※委員長  
立原研悟(物理学科)  
宮崎州正(物理学科)  
荘司長三(化学科)  
杉山 伸(生命理学科)  
白石洋一(生命理学科)  
渡邊誠一郎(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2018年4月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通  
編集協力 株式会社コミケ  
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 2017

33

philosophia

特集  
「星と惑星が生まれるとき」

04 アルマが目撃した星の誕生 ◆ 立原研悟  
08 惑星系の誕生を観る ◆ 深川美里  
02 時を語るもの(太田行人博士) ◆ 近藤孝男  
03 理のエッセイ ◆ 斎藤 進  
12 理の先端をいく ◆ 久本直毅 / 瀬川泰知 / タマ・フロランス  
18 理学部交差点

# 太田行人博士 — 植物世界のマンダラを描く

太田行人は最終講義で、植物世界のマンダラを描くのが研究の目的であったと述べている。新設の名古屋帝国大学理学部生物学科に赴任した太田は、空襲による疎開と戦後の数年間の空白の後、植物の一生を貫く原則を理解することをめざした。時代の主流だった光合成やホルモンの研究から距離をおき、自分のスタイルにこだわった。

生物学の方法として生命を構成する要素への還元を追求するものと、細胞や個体の統合された機能を対象とする

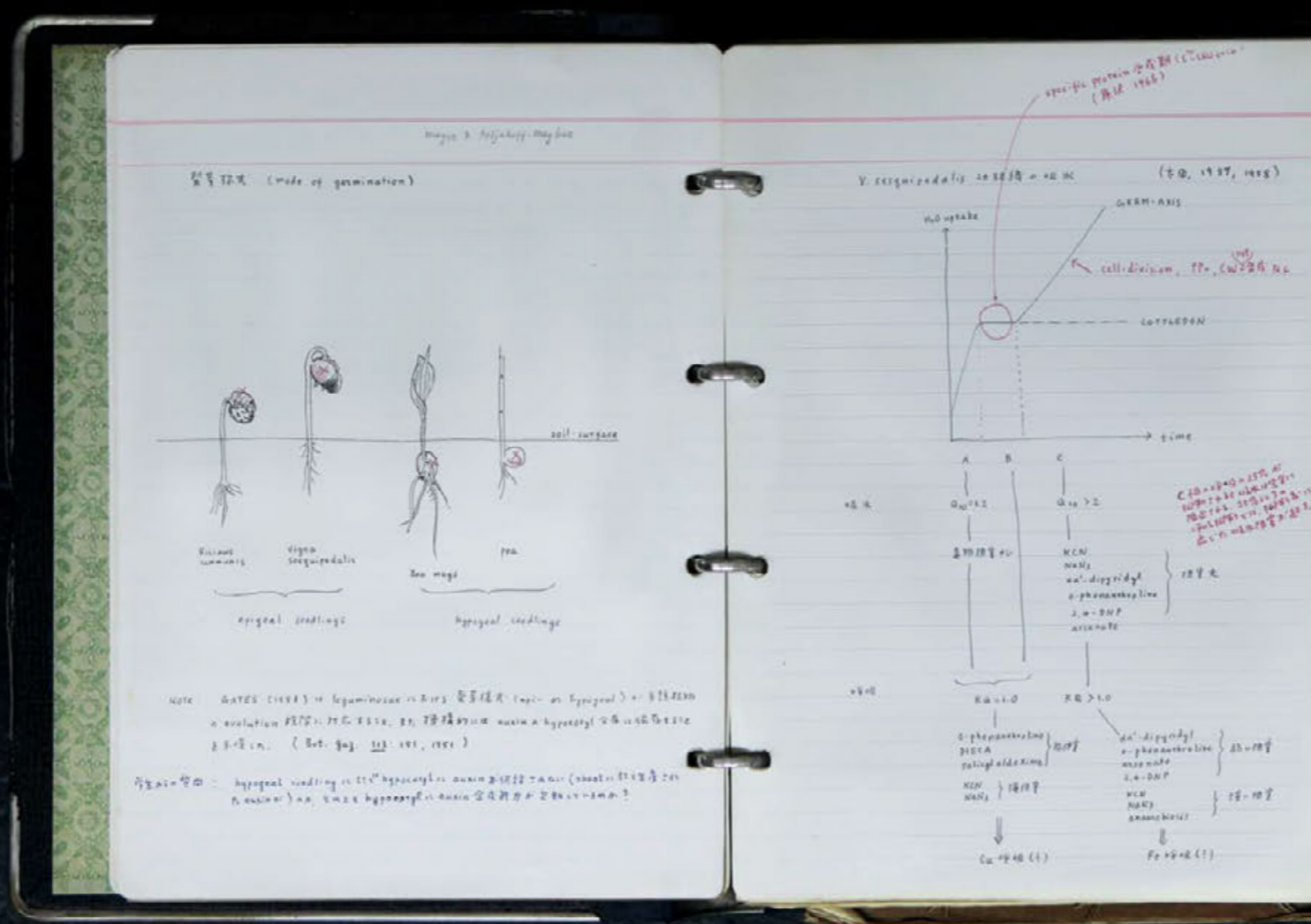
ものがあるが、太田は要素の解析を基礎にしながらも、植物の生活を統合的に理解する研究に取り組んだ。彼は発芽と花成と老化を植物の最も重要なイベントと位置付け、ミトリササゲとウキクサでその仕組みを探った。研究は植物内の幼老組織のやりとりと外部環境（特に時間）の認識のメカニズムとその必然性を追求した。これは名古屋大学で進められていた発生生物学と分子生物学を植物生理学に統合したものであった。(近藤孝男 名古屋大学名誉教授)



太田行人 (1916-2014)  
名古屋大学名誉教授  
第17回中日文化賞受賞(1964)

### ◇写真の説明

写真は太田の残した研究ノート。太田は発芽と花成と老化を重要な植物イベントであるとして注意深く観察し、そこから見えてきた植物の生き様の偶然と必然を理解しようとした。B5サイズのファイルには太田の思考の足跡がうかがえるさまざまな図表やメモが綴じ込まれている。植物世界のマンダラの一部をのぞくことができる。



## ◎理のエッセイ

### 「社会の役にたつ」とは

斎藤 進 物質理学専攻教授



Illustration: TSUJI Keiko

最近よく、大学の存在意義が社会や政治の世界で問われている。莫大な血税が、コストではなく本当に将来への投資になっているのか、が一つの指標のようである。最高学府として「自由の聖域」を保つことができるのか、大学の教育と研究を、明るい未来社会を拓くためにかけがえのない場所であると国民から尊敬され信頼され心から支援したいと今後も思っていたらいいのか、不安にかられることもある。

「社会の役にたつ」とは何か。何も、それがイノベーションにつながり新しい雇用を生み出し、経済効果に寄与する、だけを意味するものではないだろう。

五感では捉えられないものを解明し、創造していく唯一の手段である「学術」は「人類の栄光」「人知の限界」について究極を求め社会を高揚させ歓喜させることができる。「宇宙の果てはどうなっているのか」「物質を構成する最小単位は何か」などについて、新しいことがわかればさらにその何十倍もわからないことが生まれ、人を普遍的に謙虚にさせてくれる。陸上100メートル走で9秒を切れるかどうかは直接、他人の役にたつまい。だが結果に一喜一憂することで「今の自分を知り次の限界にチャレンジしよう。他人を感動させ元気づける人になろう」という夢と希望にあふれさせてくれることとよく似ている。

大学人の「自由」にはだからこそ、国民を希望に導くための大きな「責任」もあるだろう。私のいる触媒の世界には、科学と技術との乖離を遥かに超越した何かはまだ残っているだろうか。自由という名の下で自己評価を意り無責任になってないか、浮世の限定的な価値に基づく一過性の評価にこだわるあまり、「抹消」研究に凋落していないか。本当に「応用」や「純正」に結びつくとき心から信じられる「基礎」なのか。無用の難物に挑んでいないか、自費を投じてでもやる覚悟があるのか。次代を担う若者の高揚心と夢、そして明るい未来を導くことの役にたっているのか、自問自答する毎日である。

Susumu Saito

1969年岡山県生まれ。1995年名古屋大学大学院工学研究科応用化学および合成化学専攻単位取得退学。その後、博士(工学)取得。工学部生物機能工学科助手、高等研究院・大学院理学研究科准教授を経て2015年より現職。専門は有機化学。数々の産学連携事業を推進し2012年よりJST ACT-C PI。

宇宙には太陽系をはじめとする多くの惑星系が存在する。

しかし、太陽系がなぜ現在の姿に至ったのか、惑星がどのように誕生するのかは、よくわかっていない。

私たちは、恒星や惑星系の母胎となる若い星を取り巻く構造を、

赤外線や電波で観測することで、星と惑星系誕生の過程を明らかにしようとしている。

地上望遠鏡による、これまでにない鮮明かつ詳細な観測結果や

宇宙望遠鏡で得られた大規模観測の結果を解説する。

(2017年6月3日、第27回理学懇話会より)

## アルマが目撃した星の誕生

立原 研悟 素粒子宇宙物理学専攻准教授



Kengo Tachihara

1999年 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻修了。マックスプランク・地球外物理学研究所、ドイツ・フリードリッヒ＝シラー・イェーナ大学、神戸大学研究員、国立天文台助教(合同アルマ観測所サイエンティスト)を経て、2013年より現職。専門は電波天文学。星形成や星間物質を観測的に研究している。名古屋大学においてはNANTEN2望遠鏡の運用や開発も指揮している。

### アルマ望遠鏡とは

アルマ望遠鏡は日本も参加する国際共同プロジェクトで、2013年から初期科学観測を開始して以来、たくさんの成果を出してきました(図1)。標高は5000m、いつも晴れていて大気が澄んでおり、しかも電波観測の妨げとなる水蒸気が非常に少ない、チリのアタカマ砂漠に建設されました。北半球では観測できない天の川銀河の中心方向や、銀河進化の歴史を調べる上で興味深い天体である大小マゼラン雲が観測できることも、この地を選んだ理由の1つです。アルマ望遠鏡は人類史上最大の電波望遠鏡です。全部で66台のアンテナからなり、それぞれが1つの望遠鏡(単一鏡)としての性能を有していますが、全体を組み合わせると1つの巨大な望遠鏡として機能する干渉計望遠鏡です。アルマには様々な先端技術がたくさん使われています。たとえば、重力や強い風、熱変形によるたわみを検知して、自らそれを補正するように動くハイテクアンテナ、異なる周波数を観測する7個の超伝導受信器、さらに1秒間に1.7京回の計算能力をもつ計算機などを装備しています。アルマではこうした装置のおかげで、超高感度かつ高分解能な性能が実現されています。

### 星の一生をたどる

宇宙の年齢はおおよそ138億年だと考えられています。地球の年齢は岩石の放射性年代測定からおおよそ46億年と求められ、太陽

もおおよそ同じ年齢だと考えられます。では太陽の寿命がどれくらいかご存じでしょうか。これは理論的計算から、おおよそ100億年と推定されています。つまりあと50億年くらい経つと、燃料を燃やし尽くした太陽は巨大に膨張し、地球をも飲み込んで死ぬだろうと考えられています。

星は、宇宙空間のガスや固体の微粒子(塵)が集まり、自らの重力で収縮して密度が高くなった分子雲コアとよばれるガス塊の中で生まれると考えられています。星が誕生すると、その後たどる一生は「生まれたときの質量」によって決まります。太陽のように軽い星は、長く静々と燃え続け、最後は惑星状星雲といわれる星雲になって死ぬと考えられています。一方より重い星は寿命が短く、超新星爆発とよばれる大爆発を起こして死にます。太陽より10倍程度重い星は1000万年から1億年くらいで爆発し、

星を構成している物質は宇宙空間にまき散らされ、次の世代の星をつくる材料になります。この物質には、私たちの体の材料となるような重元素(炭素や酸素、窒素や鉄、カルシウムなど)が豊富に含まれています。爆発直後のガスは超高温ですが、徐々に冷えて、次の世代の材料になるころには絶対温度で15K、摂氏マイナス250度くらいまで下がります。このように星が生まれたり死んだりするサイクルが宇宙を進化させてきました。

### 星が生まれる場所

アタカマ砂漠のような空の綺麗な場所で天の川の写真を撮ると、本当にたくさんの星が写ります(図2)。ですが電波天文学者はひねくれものなので、むしろ「星がないところ」に注目します。黒くしみのように見える場所は暗黒星雲とよばれ、まさに星が誕

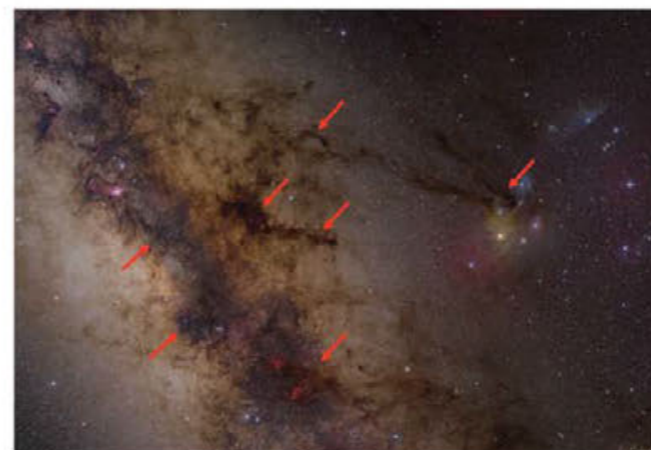


図2 可視光線で見た天の川。多くの星の他に暗黒星雲がいたるところで黒いしみのように見えている(赤矢印)。

生する現場です。ここでは、ガスや塵が高い密度で集中し、その中で若い星(原始星)が誕生しています。しかし、塵が星の光を吸収(減光)するため、可視光では中心部付近まで見通すことができません。そこで赤外線や電波を使って調べるようになります。

観測が困難なとき、天文学で重要なことは物理法則の理論を駆使することです。これまで理論的予想から、さまざまな星形成のシナリオが提案されてきました。それによると、基本的に分子雲コアを支配している力は重力です。自己重力によってガスや塵が集まり、中心の密度が高くなります。また周囲の物質を引き寄せ、より質量が大きくなります。その結果、時間とともに質量も密度も高くなり、中心部が重力崩壊して、ついには原始星が生まれると予想されます。この重力収縮によって星が生まれる過程を、観測で明らかにしたいということが、我々のモチベーションです。

分子雲と原始星の観測にはいくつか手法があります。1983年にアメリカのNASAが打ち上げた赤外線天文衛星IRAS(Infrared Astronomical Satellite)は赤外線ですべて全天を観測した最初の衛星でした。暗黒星雲で真っ黒に見えていた中に、赤外線を発する点源を見つけ、これが原始星でした。電波による観測で検出された密度の高い分子雲コアの中心部に、埋もれた原始星が多数発見されたのです。IRASの観測により、原始星が付随する分子雲コアと付随しないコア(星なしコア)の物理的性質の違いから、星が誕生するために必要な条件を調べる研究が盛んに行われました。

### 分子雲コアをめぐる観測と理論

重力で閉じ込められた分子雲コアは、丸いかたちになると想像されます。なぜなら重力は等方的な力で、質量があればどちらの方向でも等しく力を及ぼすからです。分子雲も暗黒星雲も一般的には複雑なかたちをしています。しかし、その中に丸く高密度の塊があり、かつ赤外線で見える原始星が付随していないければ、星形成の直前の



図1 標高5000mのチリ・アタカマ砂漠で観測するアルマ望遠鏡。口径12mのアンテナ54台と、口径7mのアンテナ12台からなる干渉計望遠鏡(Credit: ALMA Observatory)



段階にある分子雲コアだと予想できます。このような形状のことを物理では「球対称」という言葉で表現します。特定の方角をもたず、温度や密度などの物理状態が、中心からの距離というパラメーター1つだけで決まります。まだ観測データが不十分だったころ、分子雲コアは球対称なものとして、理論的モデルがつけられました。1969年、イエール大学のラーソン<sup>\*1</sup>は、単純な球対称ガスのモデルを数学的に記述し、解析しました。初期にガスが一様に分布しているところから計算をはじめ、分子雲コアの進化とともに密度分布がどのように変わるかを調べました。この理論的予想から、観測天文学者は外側のガスが中心部に向かって落下している星なしの分子雲コアを探しましたが、なかなか良いものがみつかりませんでした。一方、ラーソンのモデルだと、重力により短時間で分子雲コアがつぶれて、あっという間に星ができてしまうことが予想されます。しかし観測される分子雲コアのうち、星なしコアの割合が高いことから、この予想と合わないと考えの人が多くなりました。そこで重力に拮抗する力により、ゆっくりと収縮するコアを考えようという、2つのモデルが注目されるようになりました。1つ目は、「ガスの圧力で支える」というモデルです。このモデルはポナー<sup>\*2</sup>と

エバート<sup>\*3</sup>の2人が独立に、ラーソンの発表より14年ほど前に論文で発表したため、ポナー・エバートモデルといわれています。2つ目は、シュエ<sup>\*4</sup>が提案した「磁場の反発力で支える」というモデルです。宇宙空間にはいたるところに磁場があり、弱く電離した星間ガスは磁場に凍結している（磁力線をまたぐように運動できない）と考えられます。そのため分子雲コアが収縮しようすると磁気圧が収縮を妨げて、押し戻す力が働きます。磁場の観測は難しいため、モデルは検証されないままです。しかし分子雲コアの密度構造を詳しく調べた観測が

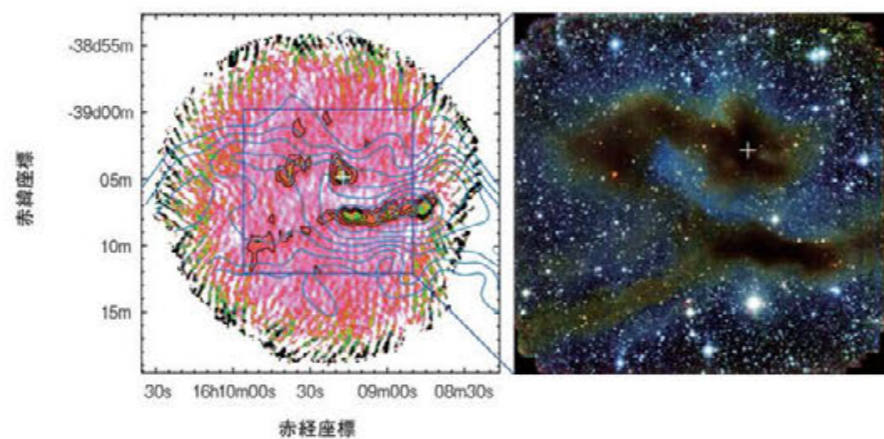


図3 おおかみ座で観測された分子雲コア  
右はIRSFで観測された近赤外線画像 (Nakajima et al. 2003, AJ, 125, 1407)。左は「なんてん」で観測した分子ガスの分布(青い等高線)と、SESTで観測された塵が放つ電波強度分布(擬似カラー) (Tachihara et al. 2007, ApJ, 659, 1382)。大きな減光を示す高密度の分子雲コアが複数観測され、そのうちの1つには電波点源として検出された原始星(十字)が埋もれている。

出てきて、事情が変わってきました。バーナード68という暗黒星雲を赤外線で見ると、赤外線は透過力が高いので、後ろの星が透けて見えます。背景の星の光が透過する時に、星間物質中に含まれる塵の影響で赤く見える性質を使い、分子雲コアの密度の分布を調べると、ポナー・エバートモデルと非常によく合います。2001年にアルベス<sup>\*5</sup>らが『Nature』に論文を発表すると、ポナー・エバートモデルは多くの支持を集めることになりました。私がドイツで研究員をしていた時、アルベスとは個人的に親しくさせてもらいました。彼のいうとおり、実際に分子雲コアを調べてみると、確かにポナー・エバートモデルとよく合うものが多かったのです。それ以降、星形成直前の分子雲コアは、ポナー・エバートモデルで記述される球対称な構造を持つと理解されるようになりました。

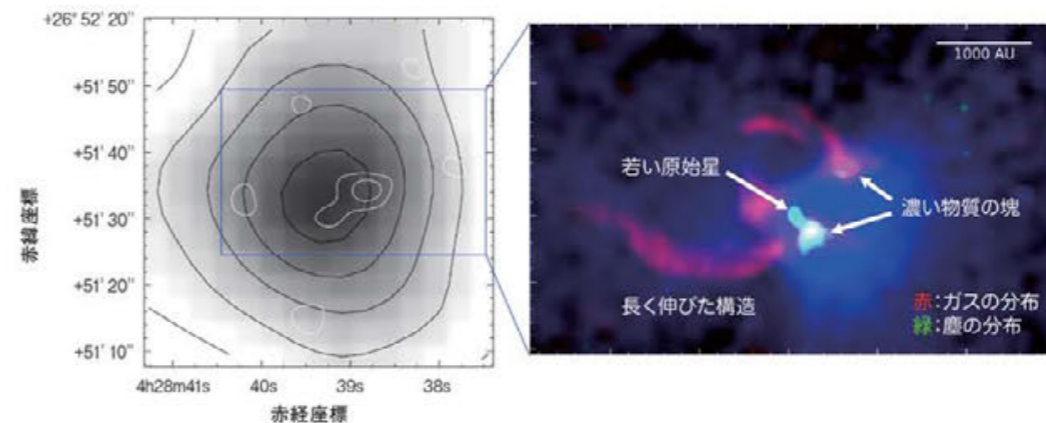


図4 分子雲コアMC27中心部の密度構造  
(左) スペイン・ミリ波電波天文学研究所の30m望遠鏡で観測された結果(グレー)に、ハワイ・サブミリ波干渉計で得られた結果(白い等高線)を重ねた (Takahashi et al. 2013, ApJ, 774, 20)。(右) 若い四角の中を、圧倒的に高い分解能と感度をもつアルマで観測した結果。赤外線で見える若い原始星以外にも、高密度のガスや塵の塊や、弓状に伸びた構造などが見られ、これらが複雑に運動していることなどがわかった (Tokuda et al. 2014, ApJ, 789, L4)。

### 電波観測から見えてくるもの

分子雲を電波で観測すると、どのようなものが見えるでしょうか。1995年まで名古屋大学のキャンパスの中には電波望遠鏡がありました。設計の段階から南半球にもっていくことを考慮してつくられた望遠鏡です。最初のテスト観測を数年間、名古屋大学で行った後に、チリのラスカンパナス天文台に移設し、「なんてん望遠鏡」と名づけられました。1990年代後半から観測をはじめ、天の川やマゼラン雲に存在するたくさんの分子雲を調べました。2005年に、さらにチリの北部のアタカマ砂漠に移設して、今ではNANTEN2とよばれています。NANTEN2のすぐ隣ではアルマが稼働しています。

図3は、おおかみ座分子雲の観測例です。可視光線では真っ暗な暗黒星雲として見えますが、名古屋大学が南アフリカの天文台に所有するIRSF (InfraRed Survey Facility) 望遠鏡を使い、近赤外線で見ると、濃い塊があるのが見えます。なんてん望遠鏡やSEST (Swedish-ESO Submillimetre Telescope) 望遠鏡を使って高密度ガスを観測した結果、分子雲コアが3つあることがわかりました。また星間塵が出す電波でも観測したところ、3つのうち1つの分子雲コアの内部で、局所的に強度の強い点源が見つかり、若い原始星が埋もれていることがわかりました。密度分布を調べてみると、中心部はほぼ均一な構造をもっており、これもラーソンやポナー・エバートのモデルとも似ています。しかしこれまでの観測では、実は中心付近のデータ点

が少なく、密度構造を細かく調べることが困難でした。これは望遠鏡の分解能の限界によるもので、ミリ波やサブミリ波で観測できる干渉計望遠鏡が南半球には存在しなかったためです。

ここで登場するのがアルマ望遠鏡です。飛躍的に高い分解能を用いて、この問題を再度調べる観測を行いました。最初に観測に選んだのは、おうし座分子雲にある、MC27とよばれる分子雲コアです。これまでの観測から中心部分の密度がかなり高く、またアメリカが打ち上げたスピッツァー宇宙望遠鏡の観測により、赤外線を放出する非常に若いと思われる原始星が付随することがわかっています。アルマでこの分子雲コアの中心部を観測してみると、均一な密度構造ではなく、内部に複雑な構造が存在しているということもわかりました(図4)。若い原始星のまわりには、濃いガスの塊がいくつか存在しています。さらに弓状に伸びた構造もあり、それらの速度構造も複雑です。これまで密度分布は球対称であり、中心部の一点に向かって物質が落下していると考えていました。しかしこの観測から、実際には複数のより高密度な塊に分裂しており、複雑に運動していることがわかりました。なぜこのようなものができたのかはまだわかりませんが、数値シミュレーションの結果から、以下のようなモデルが提案されています。分子雲は初期の密度分布にムラがあり、これらが進化の過程で高密度になると、重力で束縛された複数の星、すなわち連星系や多重星系に成長します。これらが互いに

重力相互作用を及ぼしあいながら濃いガスの中を運動すると、複雑な構造がつけられます。アルマはこのような構造を見たのではないかと考えられます。これまでのモデルは、あまりに単純化され過ぎていることがわかりました。実際の星形成の様子は想像以上に複雑でダイナミックであり、いくつもの高密度な構造が重力を及ぼしあい、運動をしながら成長すると予想されます。

私たちは、この予想を検証するための観測も始めています。おおかみ座の分子雲コアを含む高密度な星なしコアを系統的にアルマで観測し、内部構造がどのように進化するのかを調べています。そして私たちの予想を支持する、とても興味深い結果も得られつつあります。今後さらに分子雲の初期条件を調べるためには、星間空間の原子ガスから分子ガスがつけられる現場を調べることが重要になるでしょう。現在オーストラリアと南アフリカには、スクエア・キロメートル・アレー (SKA) とよばれる次世代の電波望遠鏡の建設も進んでいます。これらも活用しながら、星形成の真の姿に迫り、新たなモデルをつくり上げたいと考えています。

- \*1 R.ラーソン  
アメリカの理論天文学者。
- \*2 W.B.ポナー(1920-2015)  
アメリカの物理学者。
- \*3 R.エバート(1926-2013)  
ドイツの理論物理学者。
- \*4 F.シュエ(1943-)  
アメリカの理論天文学者。
- \*5 J.アルベス(1968-)  
オーストラリアの観測天文学者。



Misato Fukagawa

2005年東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了。大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻助教、国立天文台ナリ観測所特任准教授などを経て、2016年より現職。専門は赤外線天文学。特に惑星系形成過程の観測的理解をテーマに研究を展開。

## 惑星系の誕生を観る

深川美里 素粒子宇宙物理学専攻准教授

### 物質世界の進化の解明へ向けて

私たち宇宙物理学研究室赤外線グループは、宇宙における物質世界の進化の解明を目指しています。銀河で星が生まれ、星の内部で重い元素がつくられ、それらが星の死とともに空間へ放出されます。放出された物質を材料に、また星が誕生し、そのまわりでは重い元素を使って地球のような惑星や生命が生まれます。こうした物質の輪廻により、宇宙がその誕生以来、どのようにして現在の姿へ至ったのかを解き明かすことが、最終的なゴールです。そのゴールへたどり着くために、既存の望遠鏡や装置を用いて観測するだけでなく、新しい装置の開発も行っています。今、私たちが見るこ

とのできる宇宙の現象や空間・時間の範囲は、観測技術によって制限されています。つまり、技術の進展によりこれまで見えなかったものが見えたとき、宇宙物理学や天文学は、大きく前進します。そのため、装置をデザインしてつくりあげるという大変重要なプロセスを、研究者自身が担っているわけです。私たちが研究対象とする天体や物質は多岐にわたりますが、ここでは惑星系の誕生について、最近の観測結果をまじえながら述べていきます。

### 系外惑星

惑星をもつ星は、太陽だけではありません。これは観測事実です。太陽以外の星を

回る惑星は、(太陽)系外惑星とよばれます。系外惑星の研究分野が確立し、急速に発展するきっかけになったのは、1995年の、ペガサス座51番星に付随する惑星の発見です。ただし、惑星そのものの像を撮ることは、技術的に簡単ではありません。たとえば、地球は太陽に比べて可視光で約10億分の1の明るさです。そのような親星に比べて圧倒的に暗い天体を、親星のすぐ近くで分離してとらえることは、現在の観測技術をもってしても困難です。そこで、惑星が親星に与える変化を検出する方法がよく用いられます。たとえば、惑星が存在すると、親星は惑星との共通重心のまわりを回る、つまり、観測者に近づいたり、観測者から

遠ざかったりします。ペガサス座51番星の惑星は、この運動が引き起こす光のドップラー効果によって見つかりました。また、惑星が星の前面を通過することによる、星の明るさの微小な変化をとらえる方法もあります。これら検出方法の工夫により、現在までに見つかった系外惑星の数は、候補天体を含めると8000個近くにもなります。昔、人々は恒星を数えてその性質を調べましたが、今は、惑星を数える時代です。

系外惑星の存在は確立していますが、性質はどうなっているのでしょうか。たとえば、図1は検出された系外惑星の公転周期と重さの関係を表しています。地球が位置するあたりにはデータ点がありませんが、これは観測技術が十分でないためです。つまり、地球が珍しい存在かどうかは、まだ結論できません。いずれにしても、ここで強調したいのは、太陽系の惑星とはかけ離れた性質をもつ惑星が多数ある、つまり、宇宙に存在する惑星は「多様」である、ということです。するとおさら、なぜ太陽系が現在のかたちになったのかという疑問がわいてきます。惑星系は一般にどのようなプロセスで生まれるのか、その中で太陽系や地球はどのような必然性あるいは偶然性に導か

れて現在の姿になったのか。この疑問に答えるべく、理論・観測の両面から盛んに研究が行われています。

### 原始惑星系円盤を観測するために

惑星系の誕生のプロセスを理解するには、惑星がまさに形成されつつある現場を調べるのが、最も直接的です。それは、生まれてまもない星の周囲を調べることに相当し



ます。星の誕生については立原さんの記事に詳しく述べられていますが、分子雲コア中で原始星に物質が降り積もるとき、角運動量保存則によって、星を中心に回転する円盤状構造が形成されます。時間がたつて分子雲コアの物質が晴れ上がると、若い星と円盤が姿を現します。円盤の材料は、もともと宇宙空間に存在した物質であり、大

別すると、ガスと塵(固体の微粒子、大きさは0.1マイクロメートル程度)です。星の年齢でいえば、約100万年程度までは、ガスを豊富に含む円盤が星をとり巻きます。ここで惑星系が誕生すると考えられることから、円盤は、原始惑星系円盤とよばれます。

惑星系形成のおおまかな描像は、すでにあります。代表的、かつ古典的なシナリオによれば、円盤内で塵が成長し、キロメートルサイズの微惑星になって、微惑星同士の衝突合体により惑星が生まれます。惑星が十分に重ければ、まわりのガスを集めて木星や土星のような巨大ガス惑星ができます(図2)。これは太陽系形成の標準モデルであり、京都大学の研究グループが基礎の構築に大きく寄与しています。高校の地学の資料集にものっています。ですが、あくまでも理論モデルであり、観測による検証が必須です。

円盤の観測は容易ではありません。その一番の理由は、観測者にとって円盤が小さいからです。典型的な大きさは、およそ100天文単位(1天文単位は太陽と地球の距離)ですが、星が遠いほど、その星の円盤を調べるために高い解像度が必要になります。太陽系を参考にとると、太陽から海王星は

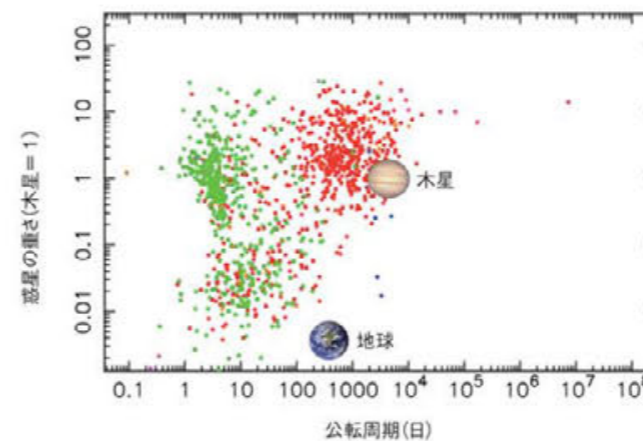


図1 系外惑星の公転周期と重さ  
データ点の色の違いは惑星の検出方法の違いを示す。重い惑星、大きい惑星や、中心の親星に近い惑星は検出されやすいという観測バイアスがある。地球に似た惑星の検出は技術的に難しいため、地球が稀な存在かどうかは、まだわからない。(2017年6月11日版、<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>より取得)。

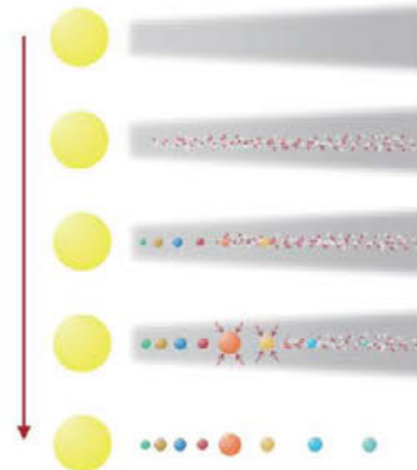


図2 太陽系形成の標準シナリオの概念図  
ガスと塵からなる原始惑星系円盤の中で、塵が惑星へと成長する。十分に重い(地球の10倍程度)惑星は周囲のガスを集めて巨大ガス惑星となる。

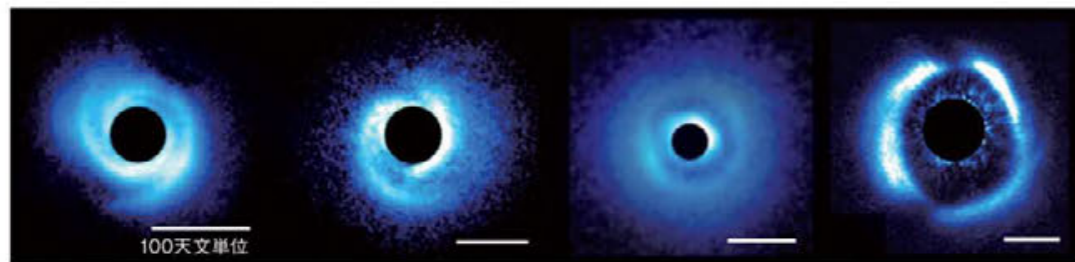
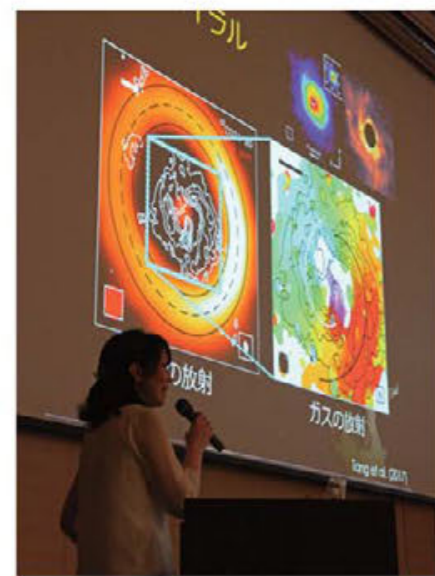


図3 すばる望遠鏡で得られた原始惑星系円盤の近赤外線画像  
星からの光が円盤の塵にあたって光っている。渦巻きや溝が複数の円盤に見つかった。星の光の影響が強く残るため議論できない領域を黒丸でマスクしてある。図中の白線は100天文単位を示す。一番右は図4と同じ円盤である。

30天文単位、木星までは5天文単位です。30天文単位の大きさは見分ける必要がある、せめて5天文単位ぐらいの大きさの構造は見分けたい、理想的には1天文単位まで円盤を分割して調べたいところです。若い星が分布する領域は太陽の近所ではなく、5天文単位や1天文単位は、困難、かつ挑戦がいのある数字です。解像度は、観測する波長と望遠鏡の口径の比で決まり、解像度を上げるには、大きい望遠鏡を使う必要があります。大口径望遠鏡の1つに、ハワイに設置されている日本のすばる望遠鏡があります。反射望遠鏡で、主鏡の直径は8.2メートルです。可視光、近・中間赤外線でも観測できます。近赤外域では、補償光学を用いることにより、地球大気のゆらぎで生じる像のぼけを抑えることができます。また、電波域ではアルマ望遠鏡があります。こちらは立原さんの記事が詳しい



です。電波は波長が長いので解像度の面で不利に見えますが、アルマは干渉計です。複数の電波望遠鏡で検出した信号を合成し、1個の巨大な望遠鏡のように用いることができます。

#### 原始惑星系円盤の姿

私たちがすばる望遠鏡でとらえた原始惑星系円盤の姿のごく一部を、図3に示しました。まず目を引くのは、渦巻き状の腕です。星から100天文単位以内の渦巻き構造は、私たちの観測によってはじめて見つかりました。渦巻きの成因については複数の可能性があります。単純に思いつくのは、惑星の存在です。円盤というガスの海に惑星が波を立て、それが円盤中を伝わるとともに、その波より速く回転する円盤によって渦巻きのパターンができると考えられます。また、別の特徴的な円盤構造として、リング状の溝もあります。これら観測結果が示唆するのは、年齢およそ100万年の多くの円盤には、重力源、つまり惑星や伴星が存在するという事です。円盤の構造は、惑星との力学的な相互作用で生じている可能性が高く、惑星の成長や軌道の進化に重要な知見を与えます。

すばる望遠鏡はいち早く高い解像度を達成し、おかげで円盤の詳細な構造が明らかになりました。しかし、円盤内部の密度の高い領域は、近赤外線では不透明で見通せません。そこで、より長い波長の観測も重要になります。図4は、私たちがアルマ望遠鏡で見た原始惑星系円盤の画像です。明るいということは、塵がたくさんある

ことを意味します。つまり図4の円盤では、星から100天文単位以上離れた場所に、塵が集まっていることになります。一方、同じ円盤をすばるで観測すると、アルマで暗い部分も明るく光っています(図3右端)。波長による見え方の違いは、塵の大きさにも関係します。アルマでは円盤の奥深くにある1ミリメートル程度のサイズの塵、すばるでは円盤表面にある1マイクロメートル程度の塵を見ていると考えられます。もともと宇宙空間に存在する塵は0.1マイクロメートルほどですから、成長の進んだ塵が円盤の一部に集中しているということになります。これはアルマではじめて見えてきた現象です。

#### 観測と理論の相互の発展

塵の成長は惑星誕生への第一歩です。しかし、理解が大変未熟な部分でもあります。そもそも、塵の運動をシンプルに考えると、惑星は生まれません。円盤中の固体の回転運動は、重力と遠心力のつり合いで決まります。一方、ガスの場合は圧力(勾配)も加わるため、固体の塵よりもわずかに遅い速度で回っています。すると、塵にとっては向かい風が吹く、すなわち抵抗を受けることになります。抵抗を受けると回転の勢いが弱まり、塵は成長する前に中心の星に向かって落ちてしまいます。そこで出てきたアイデアが、円盤にうまい具合の圧力勾配、つまり高気圧をつくり、向かい風と追い風を組み合わせると、塵を高気圧の中心に捕獲しておくというものです。そして観測結果は、この塵の捕獲という現象をまさに示していると考えられます。

アルマの性能評価試験において、複数の溝をもつ原始惑星系円盤が、年齢10万年程度の星に見つかったことも驚きでした。溝の原因としては、塵の成長・破壊や惑星の誕生など複数の可能性があり、決着はついていませんが、惑星の誕生は標準的な描像よりもずっと早く始まるのではないかと、多くの研究者が認識を新たにしました。このように、最近の観測は、理論モデルにいくつかの修正を迫っており、やっとなそれができる時代に入ったことを、うれしく感じます。

#### 天体衝突から探る惑星系

円盤のガスが消失し、年齢が1000万年、1億年と進んでも、星の周囲に塵の円盤が観測されることがあります。このような円盤はデブリ円盤とよばれます。デブリ

円盤の塵は、微惑星や原始惑星どうしの衝突によって生じたのではないかと考えられています。私たちの研究グループは、南アフリカ天文台と共同で運用する望遠鏡 IRSF (InfraRed Survey Facility) や、その装置開発に深く携わった赤外線天文衛星「あかり」の全天データを用いて、デブリ円盤探しを精力的に行っています。見つけた円盤のうち明るいものについては、光を波長方向に細かく分析して、塵のサイズや組成(かんらん石など)を調べています。特に塵の組成は、衝突母天体の地殻の性質を反映するはずですが、現在の太陽系に残存するような少量の塵を検出するには感度が足りず、また、既存の望遠鏡で塵の分析が行えるような明るい円盤は多くありません。そこで現在、私たちが国内・ヨーロッパの研究機関・大学と共同で

推進している計画に、次世代赤外線天文衛星 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) があります(図5)。口径2.5mの冷却望遠鏡で、2020年代後半の打ち上げを目指しており、名古屋大学は中間赤外線装置の開発を担当する予定です。

ここで述べてきた研究の目的は、初期条件である円盤と、結果としての系外惑星をつなぐ過程を明らかにすることです。そのために観測を進めてはいますが、詳細が見えてくると天体の個性が目立つようになり、多様性という言葉を使いたくなくなります。多様な性質が何によって生じているのかを素直に理解するとともに、その根底で支配的となっている物理過程をどのように抜き出せばよいか。そこを常に意識しながら取り組んでいきたいと思っています。

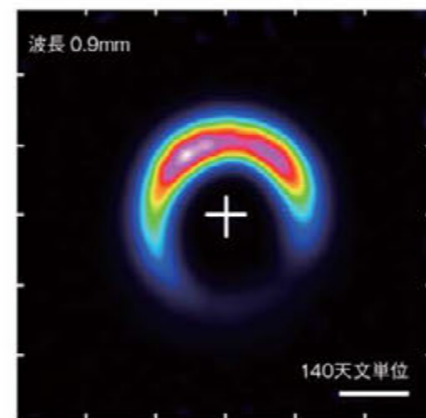


図4 アルマ望遠鏡で得られた原始惑星系円盤の画像  
塵からの放射をとらえたものであり、塵の密度分布を反映していると思えばよい。中心の十字の位置に星がある(波長0.9mmでは、星自身は暗く見えない)。円盤は北東(左上)の方向で特に明るい。アルマ稼働初期の結果であり、ごく最近はこちらより10倍程度高い解像度のデータが得られるようになってきた。

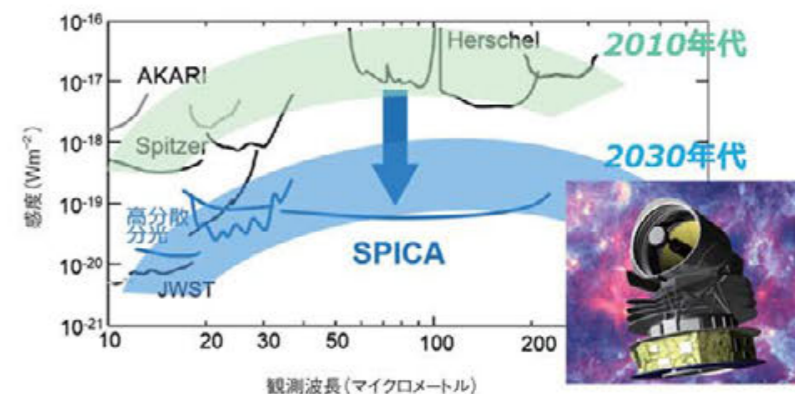
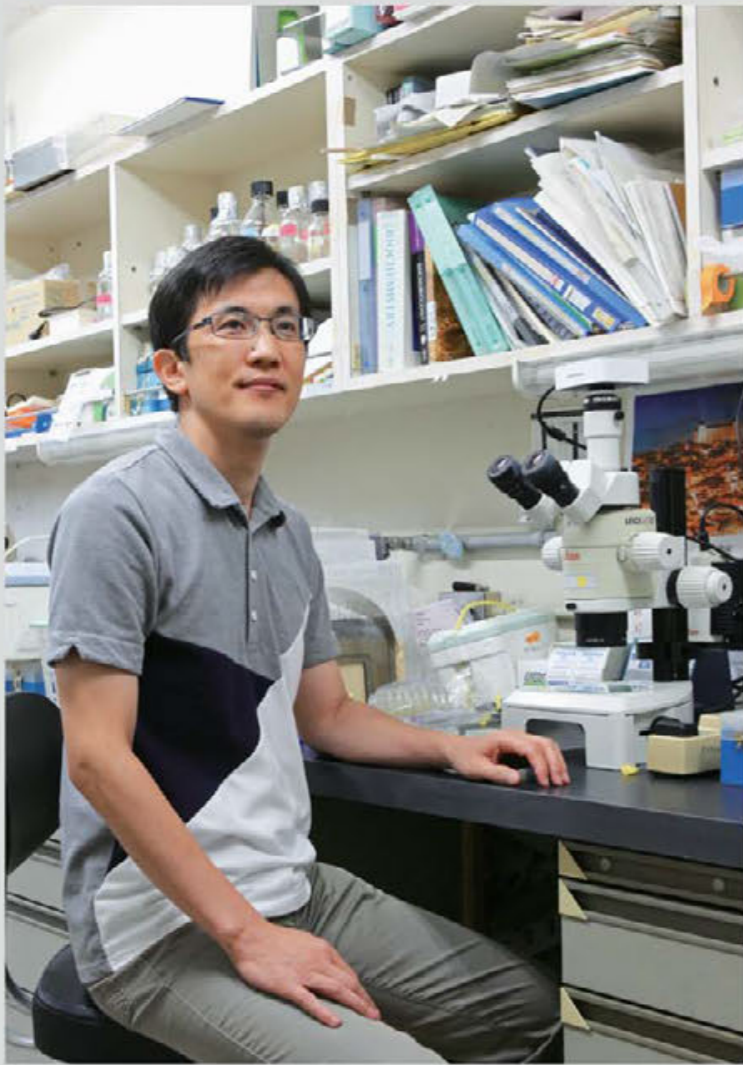


図5 次世代赤外線天文衛星SPICAの感度  
縦軸は、1時間の観測で検出できる天体の明るさを示す。これまでの赤外線宇宙望遠鏡に比べ、およそ100倍、感度が向上する計画である。



Naoki Hisamoto

1990年九州大学理学部卒業、1995年名古屋大学大学院理学研究科で学位取得後、日本学術振興会特別研究員、名古屋大学大学院理学研究科助手、同助教授、准教授を経て2017年より現職。

## 切断された神経を再生させるメカニズム

久本直毅 生命理学専攻教授

### 神経軸索の切断と再生

神経細胞は軸索とよばれる長い神経繊維を介して電気信号を伝達している。外傷や手術により軸索が切断あるいは損傷すると、電気信号が伝達されなくなるためにしばしば運動障害や感覚障害が生じる。中でも、脊髄損傷を含む中枢神経軸索の切断・損傷は一般に治療不能とされており、その患者数は日本国内だけで10万人を超える。そのような切断を受けた神経軸索を修復し、機能的な状態にまで回復させる方法の探索は、患者の苦痛を緩和するだけでなく、介助削減や患者の社会復帰を通じて公益に資するものであり、社会的にも喫緊の課題である。

脊髄損傷のイメージが強いせいも、切れた神経は再生しない、という先入観をもつ人は多い。しかし実のところ、程度の差はあるが多くの神経は切断された軸索を修復・再生する能力をもっている。切断を受けた軸索は、まずその切断部の先端が速やかに退縮して短くなる(図1)。その後、細胞体とつながっていない軸索は変性して消失するが、細胞体とつながっている軸索は、その先端に成長円錐とよばれる構造を形成して伸長しはじめ、最終的に標的組織に到達することにより機能的な軸索を再形成する。哺乳動物の場合、運動神経や感覚神経などの末梢神経では切断軸索が再生することが多いのに対し、脳や脊髄など中枢神経の切断軸索はほとんど再生しない。その理由として、脳脊髄内に再生を抑制する因子が存在することや、軸索再生を促進するシグナルが脳脊髄内で不足している可能

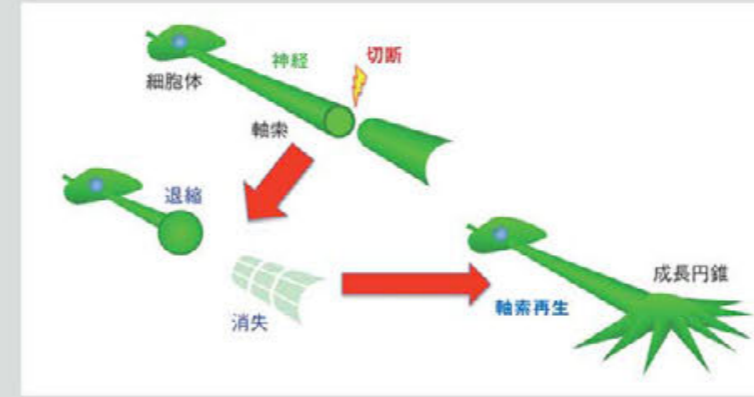


図1 神経軸索の再生  
神経は細胞体と軸索(神経繊維)をもつ。軸索が切断されると、細胞体とつながっていない軸索は消失し、つながっている軸索はその先端が退縮する。その後、退縮した先端部が成長円錐へと変換し、標的へと伸びてゆくことで軸索の再生が起こる。

性等が示唆されている。しかし、軸索再生を制御するメカニズムについては、中枢神経、末梢神経を問わず、いまだに不明の部分が多い。

### 神経軸索の再生を制御する

神経軸索の再生は、ヒトを含む哺乳動物だけではなく、両生類や魚類のような脊椎動物、さらにはアメフラシなどの無脊椎動物でも起こることがわかっている。そこで、時間がかかり扱いも難しい哺乳動物の代わりに、時間がかからず扱いも簡単な無脊椎動物を用いた神経軸索再生研究が近年注目されている。線虫*C. elegans*は、自然界では土壤中に生息して細菌を食する体長約1ミリの目立たない動物であるが(図2)、約60%の遺伝子がヒトと共通している上に、遺伝学および分子生物学的解析が自在に行えるモデル生物である。そこで、線虫を用いて神経軸索再生の普遍的メカニズムを解明する研究が最近脚光を浴びている。

我々は線虫を用いた研究により、JNK\*1が切断神経における軸索再生の誘導に必要であることを発見した(図3)。その後、別の研究者らの実験により、哺乳動物個体においてもJNKが神経軸索再生に重要であることが報告されたことで、その機能が種を超えて保存されていることが示された。また、神経軸索の切断が、肝細胞増殖因子(HGF)やコラーゲンに相当する線虫のタンパク質、および生体アミンの一種であるセロトニン\*2を介して、JNKを不活性型から活性型に変えることも見いだした。さらにこのJNKの活性化を抑制する因子としてアナンドミド\*3を見いだすなど、複数の制御因子の同定に成功している。上記の因子のうち、HGFはヒトにおいて脊髄損傷治療への有効性を調べる最初の治験が始まっており、またコラーゲンはそれを充填したチューブがヒト末梢神経の再生治療に使われ始めている。これらの事実は、線虫で解明された基礎的知見が、普遍的メカニズム

としてヒトの神経再生治療の最前線と密接につながりうることを示している。

軸索再生には不思議な現象がいくつかある。例えば、軸索の再生は切断してから一定の期間内にしか起こらない。また、神経の加齢による再生能低下は、神経細胞自体の加齢による機能低下よりずっと前から始まる。そのような現象の理解も含め、今後も研究に邁進することで、切断神経を再生させるメカニズムの詳細を解明していきたい。

- \*1 JNK  
タンパク質リン酸化酵素の一種。通常は外界からの有害物質等の刺激により活性化して、それらに対する耐性を誘導する。
- \*2 セロトニン  
幸せホルモンともよばれ、神経伝達物質およびホルモンとして働く。セロトニンが不足すると不安や無力感、うつ状態を誘発するとされる。
- \*3 アナンドミド  
脳内マリファナの別名をもつ内因性カンナビノイド。神経伝達物質の一種であり、脳に多い。鎮痛や快感の形成等に関与する。



図2 モデル生物としての線虫  
線虫*C. elegans*の成体の写真。頭部が上になる。線虫の下にある楕円形の構造物は受精卵(左)。線虫には約20000個の遺伝子があるが、そのうち約60%はヒトと共通した遺伝子である(右)。

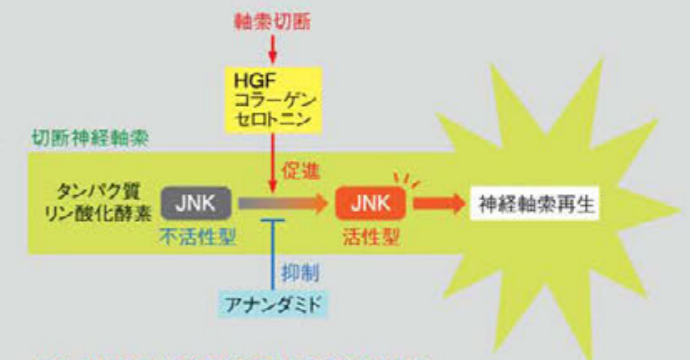
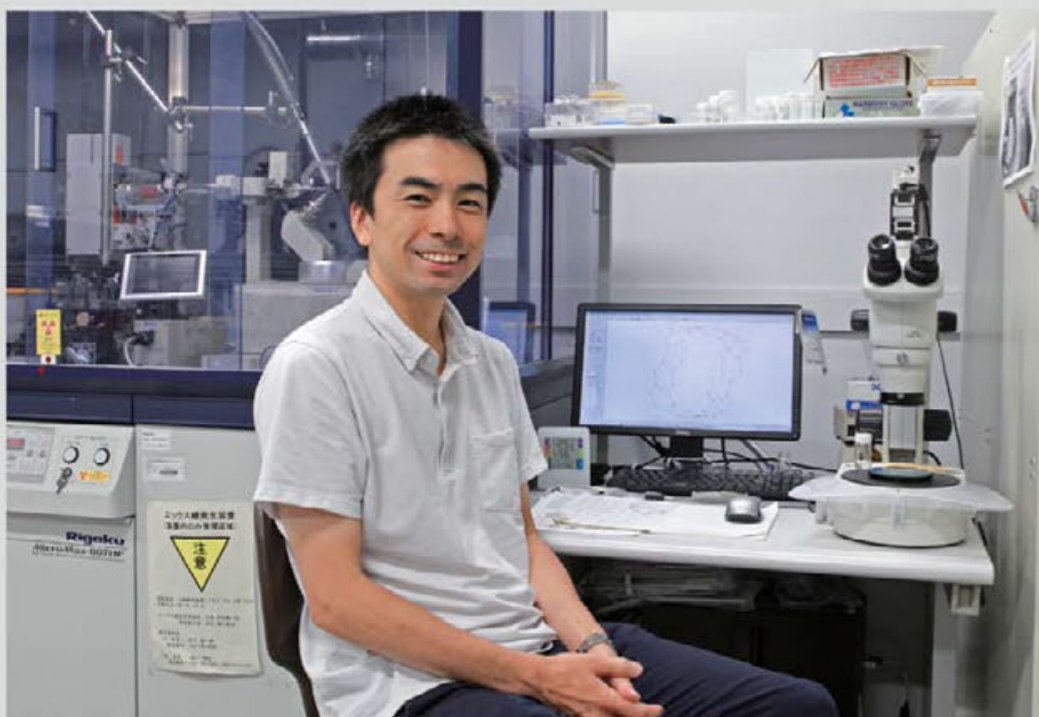


図3 神経軸索再生を制御するJNKとその上流因子  
JNKは通常は不活性型で存在する。軸索が切断されると、HGF、コラーゲンおよびセロトニンを介してJNKが不活性型から活性型に変わり、神経軸索再生が誘導される。一方、アナンドミドはJNKの活性化を抑制することで、再生を抑制する。

# カーボンナノベルトの合成

瀬川 泰知 物質理学専攻特任准教授



Yasutomo Segawa

1982年生まれ。2009年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年名古屋大学物質科学国際研究センター助教を経て、2013年より現職。JST-ERATO伊丹分子ナノカーボンプロジェクトグループリーダー業務。専門は有機合成化学・構造有機化学。

## カーボンナノベルトとは

有機化学のシンボルである「ベンゼン環」は正六角形の平面構造であり、非常に多くの有機分子に含まれる最重要基本骨格である。ベンゼン (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) やベンゼン環同士が縮環した分子は「芳香族炭化水素」とよばれ、発光性や半導体性といったさまざまな電子的性質を有する非常に有用な物

質群として知られている (図1)。芳香族炭化水素は、ベンゼン環の数や縮環様式によってそれぞれ異なる電子的性質を示すため、これらを思い通りに作る方法が古くから研究されてきた。このような芳香族炭化水素の合成化学において長年「夢の分子」とされてきたのがカーボンナノベルトである。カーボンナノベルトは、ベンゼン環同

士が縮環して筒状の構造を構成している分子の総称であり、ベンゼン環の数や縮環様式の異なる多数のカーボンナノベルトを描くことができる。

## カーボンナノベルトの歴史

カーボンナノベルトの歴史は古く、1954年に「シクラセン」という分子が文献に記載されたことに始まり、その後「シクロフェナセン」や「Vögtleベルト」などさまざまなカーボンナノベルトがこれまでに提案され、構造の美しさや電子物性への興味から世界中の化学者が合成に挑戦した (図2)。しかし、カーボンナノベルトの合成はこれまでに成功例がなく、その最も大きな理由

は「ひずみ」である。一般に、平面構造が最も安定である剛直なベンゼン環が曲がると、分子内に大きなひずみエネルギーが生じるため、通常進行するような結合形成が通用しない、分子全体の反応性が高くなりすぐに分解してしまう、といった問題が生じる。カーボンナノベルトはすべての炭素が一律に大きくひずんでいるため非常に難しく、有効な合成法はこれまで存在しなかった。

## 世界初のカーボンナノベルトの合成

著者らはごく最近、カーボンナノベルトの合成に世界で初めて成功した。合成したカーボンナノベルトはこれまでに提唱されていたものではなく、実現可能性が高いと思われた合成ルートから逆算して図3に示すような新たなカーボンナノベルト構造をデザインした。合成は計11段階で、石油成分であるパラキシレンを原料として用いた。炭素炭素二重結合を簡便につくる反応である「ウィッティヒ反応」を繰り返し用いることで環状6量体分子を合成した。このとき、最終段階で筒状構造に縮環する炭素原子すべてに、反応性を高める「タグ」である臭素原子が結合しているように設計されている。2つの近接した炭素臭素結合を切断し1つの炭素炭素結合に変換する反応はニッケル錯体を用いて行うことができ、これによって「カーボンナノベルト」を合成することができた (図4)。X線結晶構造解析によって、カーボンナノベルトが美しいベルト状であり、まさにカーボンナノチューブを輪切りにした構造の分子であることを明らかにした。カーボンナノベルトは固体状態および希釈溶液状態において赤い蛍光発光を示すことから、発光材料や半導体材料としても応用可能であると期待される。

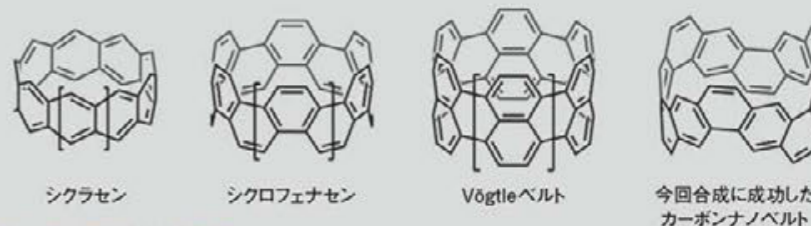


図2 カーボンナノベルトの構造  
シクラセンは1954年、シクロフェナセンやVögtleベルトは1980年代にそれぞれ提唱されており、1991年のカーボンナノチューブの発見よりも早い。1980年代から盛んに合成研究が行われているが、未だに成功例はない。大きなひずみをもたせるための有効な合成法がないことに加え、特にシクラセンは分解反応が速く安定に単離できないのではないかとされている。

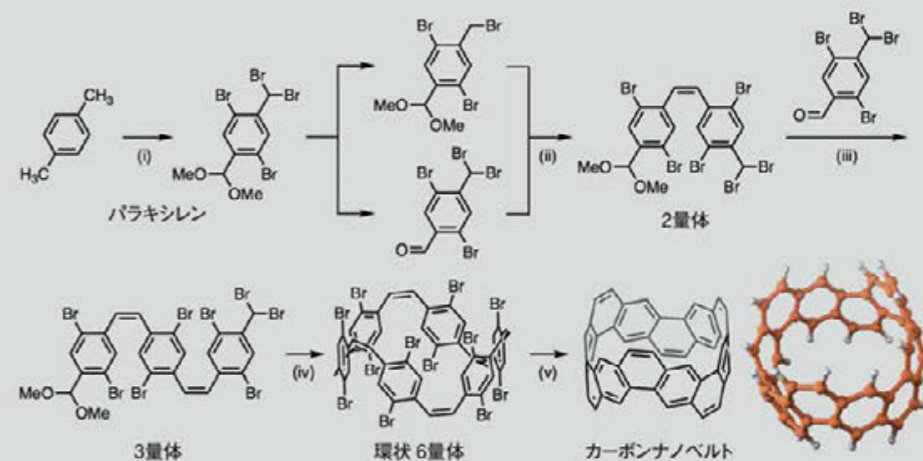


図3 カーボンナノベルト合成経路およびX線結晶構造解析で確認した構造  
パラキシレンを原料として、臭素 (Br) を組み込んだユニットを作成 (i)。炭素炭素二重結合を形成する反応を用いて2量体を合成 (ii)。さらにもう1ユニットを結合させ3量体を合成 (iii)。2分子の3量体を組み合わせて環状6量体を合成 (iv)。最後に12本の炭素臭素結合を切断し炭素炭素結合を6本形成する反応によってカーボンナノベルトを合成した (v)。

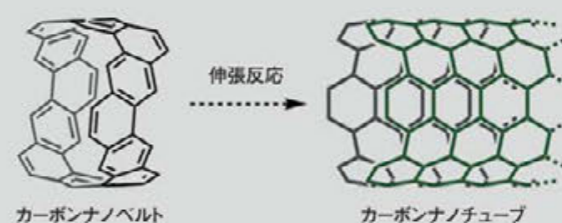


図4 カーボンナノベルトを種に用いたカーボンナノチューブ合成  
カーボンナノベルトと種として用いて、適切な炭素源を連続的に付加させることによって、カーボンナノベルトの直径と構造を保ったままカーボンナノチューブへと伸張させることができると期待されている。

カーボンナノベルトがこれから次々と合成されるであろう。カーボンナノベルトの応用として現在最も注目されているのは、カーボンナノチューブの精密合成である。1991年に飯島澄男教授によって発見・構造決定されたカーボンナノチューブはさまざまな直径や側面構造が存在し、現在の製法ではこれらの混合物としてしか得ることができなかった。

カーボンナノベルトを種として用いて、ここにアルコールなどの安価な炭素源を連続的に付加させることができれば、単一構造のカーボンナノチューブが得られると期待されている (図4)。その他にも、さまざまなナノカーボン合成や電子デバイスへの応用を見据えて、これからはカーボンナノベルトの研究を進めていきたい。

伊丹分子ナノカーボンプロジェクトウェブサイト <http://www.jst.go.jp/erato/itami/>

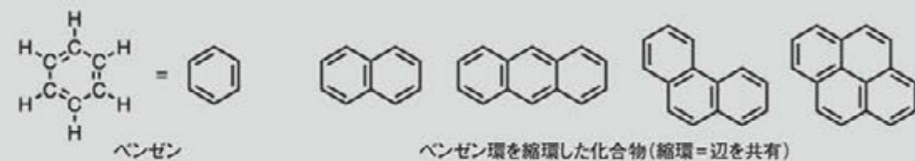


図1 ベンゼンおよびベンゼン環を縮環した化合物の構造  
ベンゼンや、ベンゼン環を縮環した構造をもつ化合物は芳香族炭化水素とよばれ、発光材料や半導体材料として非常に有用な物質群である。剛直で、一般に平面構造をとる。





Florence Tama

2000年フランス、ポール・サバティエ大学博士課程修了。アメリカ、スクリプス研究所で博士研究員。2006年アリゾナ大学助教授。2013年より現在、理化学研究所計算科学研究機構ユニットリーダー。2015年より現職。2016年より名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所勤務。

## シミュレーションと実験の融合による動く生体分子のイメージング

タマ・フロハンス 物質理学専攻教授

### 生体分子の構造

生物物理学は、物理学の原理と手法を使って生物学的現象を理解しようとする学問である。どの生物も物理法則に従っているはずだが、生物というシステムのあるものの複雑さのために、私たちの理解はまだ限定的である。

タンパク質などの生体分子は、私たちの

体の中でさまざまな重要な役割を果たしている。筋肉の収縮を担うタンパク質もあるし、体内の酸素運搬に関わるタンパク質もある。また、タンパク質が集まって大きな複合体となり特定の働きをすることも。これらの生体分子に機能障害が起こると重病を引き起こすことがあり、そのような病気を理解し治療法を開発するため

にも、タンパク質の働きのメカニズムを理解する必要がある。

生体分子の機能を理解する上でまず重要なのは、その3次元構造、つまり原子すべての3次元空間内での位置を知ることである(図1)。また、生体分子は活動中に形を変化させる(原子の位置が変わる)ことが多く、それも考慮しなければならない。

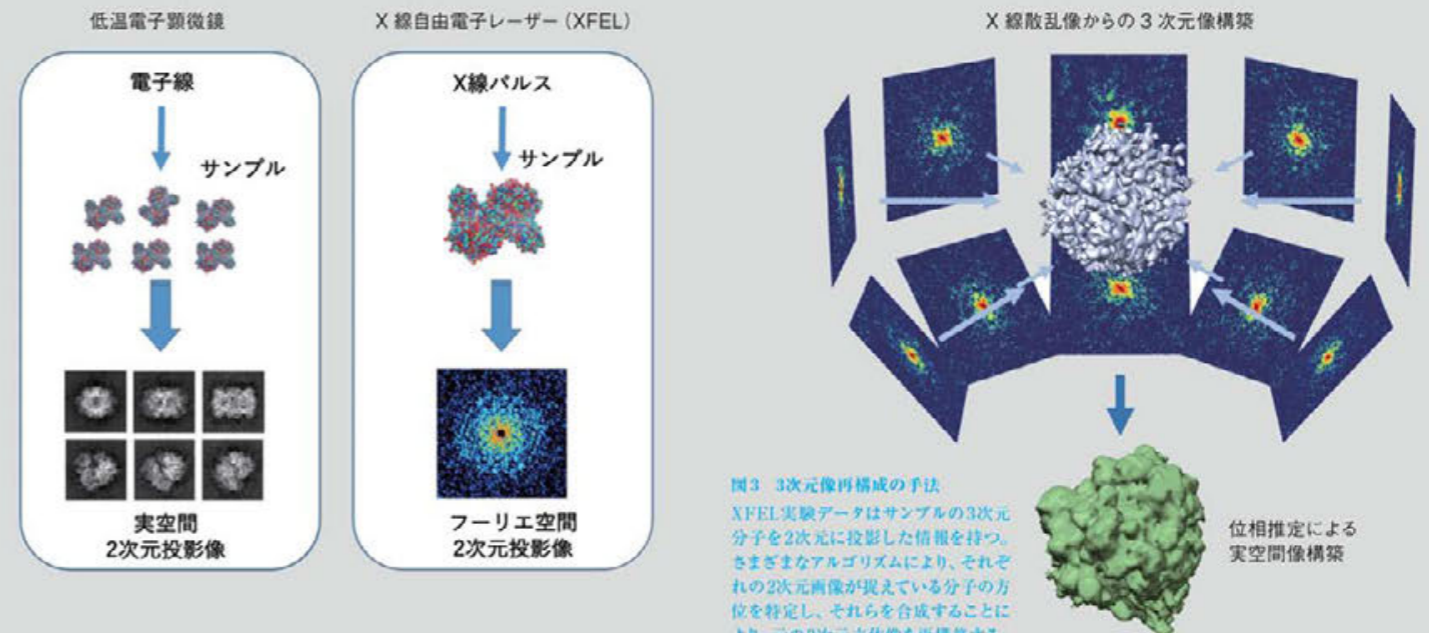
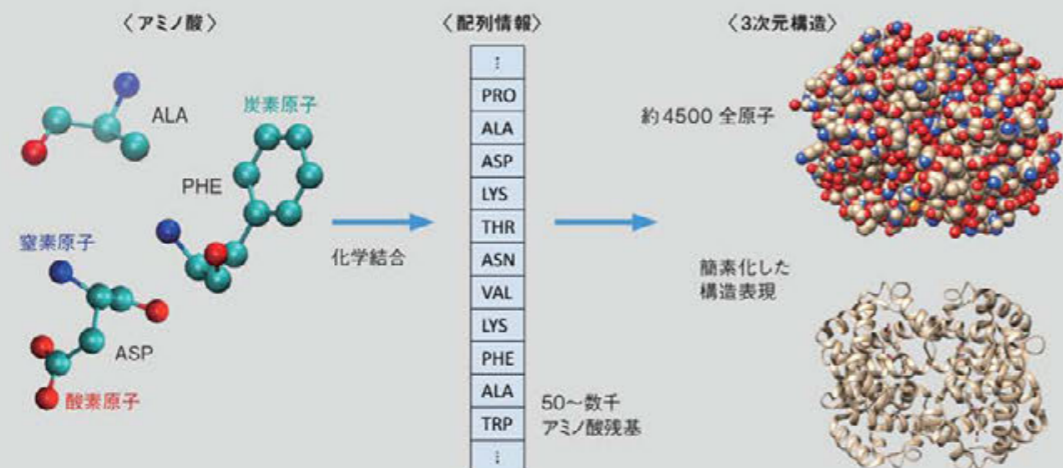


図2 低温電子顕微鏡による実験とX線自由電子レーザーによる実験の概念図

低温電子顕微鏡実験では、冷却状態に置いた生体分子のサンプルに電子線を照射することにより、個々の分子の投影像を観測する。X線自由電子レーザーによる実験では、個々の分子から散乱するX線を観測する。概念的には類似する点が多いが、X線散乱実験では一般的にフーリエ空間での情報が観測される。

図3 3次元像再構成の手法

XFEL実験データはサンプルの3次元分子を2次元に投影した情報を持つ。さまざまなアルゴリズムにより、それぞれの2次元画像が捉えている分子の方位を特定し、それらを合成することにより、元の3次元立体像を再構築する。さらに、X線散乱のデータはサンプルの構造のフーリエ空間での表現であるため、位相を推定することで実空間のモデルを構築する。図のタンパク質は、ヘモグロビンである。

タンパク質内の原子の配置を知ること、薬剤がどのように分子に結合するかを理解することができ、創薬などにつながるのである。

生体分子の3次元構造を調べるための代表的な実験技術が、X線結晶構造分析という方法である。1950年代に開発されたこの方法では、X線の散乱データから原子の空間配置を高精度に決めることができる。しかし難点は、この方法では生体分子を結晶化させる必要があるのだが、その結晶をつくることは一般には容易ではないことである。もう1つの実験技術が、低温電子顕微鏡法である。1980年代に始まったこの手法では、冷却した個々の生体分子の画像を観測する(図2)。原子の正確な位置まではわからないのが弱点だが、大規模な複合体やそのダイナミクスを研究できるため、X線結晶構造解析にはない利点がある。そして、生体分子の構造解析をさらに推し進めるために開発されたのがX線自由電子レーザー(XFEL)である。2010年頃から利用が開始されたこの技術では、フェムト秒(10<sup>-15</sup>秒)のパルス状になった強力なX線光子を用いたシングルショット

イメージングにより、結晶ではなく個々の分子を室温の生理的な条件に近い状態で直接観測できると期待されている(図2)。

### 構造実験データの計算解析

これらの最新の単分子実験からのデータを解釈することは、それほど単純なものではない。実験で観測されるのはランダムな方向を向いているサンプルの2次元投影像であるため、それらのデータを組み合わせることで3次元構造を構築するアルゴリズムの開発が必須である(図3)。低温電子顕微鏡法データに関してはそのようなアルゴリズムの開発は進んでいるが、XFELでは、まだ実験条件やサンプルの大きさがどのようにデータの質に影響し、それをどのように解析すべきかについてわかっていない点が多い。そこで、私たちは実験チームと連携して実験データを解釈するためのプログラムの開発に取り組んでいる。その1つとして、機械学習のアプローチを活用して数枚のXFEL画像から生体分子の形を識別できる方法を開発している。膨大な量の分子形状データベースをつくっておき、新しい実験データが得られたとき、

データベースに保存されたXFEL画像と突き合わせ3次元立体構造を素早く推測できるのである。

また、私たちは将来に向けて数百万枚以上のXFEL実験画像に対応できる計算ツールの開発にも取り組んでいる。理論的な計算から、原子解像度レベルの構造情報を得るにはこの程度のXFEL散乱データが必要であることが示されており、実際に新しいXFEL施設の建設も進み膨大な量のデータが得られることが期待されている。そのような膨大な量のデータを解析するには、通常のコンピューターでは何カ月もかかってしまうことがわかっており、京コンピューターやポスト京といったスーパーコンピューターを活用することが必要となる。

XFELの技術開発はまだ進行中であるが、非常に面白い分野である。日本にはSACLAという世界でもまだ数少ないXFEL供用施設の1つがあり、最先端の研究が行われている。XFEL実験と開発する新しい計算ツールを融合活用することにより、機能理解や病気の治療開発への道も開いていくと考えている。

同窓生から

科学の魅力を共有したい

蒲郡市生命の海科学館 専門嘱託員  
白瀧千夏子 (Chikako Shirataki)

私は今、科学館で働いている。科学の魅力を共有したいという思いを抱きながら、科学講座や企画展、ワークショップやサイエンスショー、研究者の講演会の開催など、さまざまな活動に挑戦している。

私が勤めているのは「蒲郡市生命の海科学館」という、化石や隕石、鉱物などにふれながら地球46億年の歴史や生命の進化を学べる施設である。私はタンパク質の研究で博士号を取得したため「専門と関係ないのでは」と聞かれることもあるが、鉱物もタンパク質も「結晶」というキーワードでつながるし、タンパク質は生物について掘り下げる上では欠かせないものはずである。

タンパク質のかたちはその機能とダイレクトに結びついている。紙の上でそんな文字を読むだけだった頃は実感がわかなかったが、研究室で実験を重ねるうちに、タンパク質の立体的なかたちがイメージできるようになっていった。そして生き物をかたちづくる分子のたくみさに感動した。自然の仕組みは、巧妙で、奥が深く、本当に面白い。もっと知りたい。確かめたい。目に見えないものを、私はもっと見てみたい。ただし、「タンパク質って面白いよ」といっても、たいていは「そうですか」と返されておしまいだ。私は悔しくて、寂しかった。DNAはメジャーになった。次はタンパク質の番だ。生物を分子レベルで捉えるという視点を世の中に浸透させたい。世の中を変えていきたい。でも、どうすればいいのか。

たどりついた選択肢の1つが科学館だった。博士研究員から、科学館でサイエンスコミュニケーションを行う職種に転職した。多くの人にほんの少しでも、分子という存在を身近に感じてもらえたら。そんな思いを抱きながら、展示室で来館者の皆さんとお話をさせていただいている。

生命の海科学館には充実した化石展示がある一方で、分子に関する展示はほとんどない。博士課程時代に私が学んだことの1つが、「ないものこそ生み出せばいい」だ。そこで、分子に着目したミニ企画展「イアンシって、なあに？～進化の秘密から光るワンピースまで～」を私が企画・実施させていただいた。この企画展では遺伝子組換えカイコが産生した蛍光シルクで織られた蛍光ワンピースの展示などを通じ、タンパク質の紹介も行っている。それに関連させ、科学講座でのタンパク質結晶の観察等、生体分子をテーマにした活動を行っている最中である。

また、科学館での仕事の他にも、Webメディアで科学者のインタビュー記事を作成する等の活動を行っている。記事では「ワクワク感が伝わる」「研究論文の内容をわかりやすく正しく伝える」ことを大切にしていきたいと思っている。科学や科学研究を、広く皆で楽しむ土壌をつくっていきたい。(物理学専攻、2014年博士(理学)名古屋大学)



講義中の筆者



ミニ企画展

キャンパス通信

名大 MIRAI GSC を開催

審議役  
國枝秀世 (Hideyo Kunieda)

18歳人口が減少する中、優秀な高校生を確保・育成することは名古屋大学として大きな課題である。そこで2016年度から、少数精鋭の高校生を対象にサイエンス教育プログラム『名大MIRAI Global Science Campus (GSC)』を、高等研究院(篠原久典院長)の所管のもと、理、工、農、医の4学部の協力を得て開始した。名大MIRAI GSCは3つのステージ(①名大での講義受講、②夏休みの研究室滞在実験、③海外での研修)で構成される。従来のスーパーサイエンスハイスクールと異なるのは、大学が主体となって推進することと少数精鋭にある。コーディネーターである元高校校長の林啓樹先生のおかげで高校との連携もとれ、初年度は135人の応募があり、第1ステージで115人、第2ステージで53人、第3ステージでは21人を選抜した。

2017年3月、第3ステージで選抜された高校生はドイツのフライブルク大学とボッシュ国際高校を訪問し、大学教員の前で英語による研究発表を行った。事前の関係者の指導、滞在中にも練習に努めた成果もあり、質疑も立派に交わすことができた。国際高校では授業に参加し、活発な議論に圧倒されるなど貴重な経験ができた。バスの移動中も課題を解くなど濃密で刺激的な5日間となり、精鋭高校生に未来へのモチベーションを与えたに違いない。

初年度プログラムが高い評価を得て、この春の応募者は約2倍の259人にもものぼった。



書籍紹介

『「生きものらしさ」をもとめて』

地球環境科学専攻教授  
渡邊誠一郎 (Sei-ichiro Watanabe)

大沢文夫・名古屋大学名誉教授は、本誌にも何度も取り上げられ、著書『飄々楽学』も紹介されている。やわらかくてユーモアに富む語り口には定評がある。

「ヒトらしさ」の多くは実は「生きものらしさ」であり、単細胞生物ゾウリムシにも共有されていることが、多くの実験・観察を通して語られる。「自発性」、「大勢が現場にいる方が早く覚える」、「せかせか型とのんびり型の個性差」、「快適だからこそ泳ぎ回る」、「棲み慣れる」、「落ちこぼれの存在」などの特徴をゾウリムシももつ。全部含めて全体が生きものらしさ。ヒトにいたるまで段階はあるが隔絶はない。

急に低温環境下に置かれたゾウリムシが、あちこち体を反転させてランダムに方向変換しながら泳ぐ様はいかにも「不快」な状態にあるようだ。細胞は自らの状態を、快・不快のものさしで総合評価して表現し、「調和優先」を原則に、「快」状態を実現していると推測する。外界や他者との関係から「生きている状態」が決まる。あちこち泳ぐ自発性は、細胞膜のイオンチャネルを通じた電流系が、熱ゆらぎを増幅させ、せん毛運動を反転させることで自ずと実現されている。

本号の特集「星と惑星の生まれるとき」の探究には生命誕生の問題が不可分である。94歳の泰斗が語る「生きものらしさ」が惑星においていかに顕現するのか。これは次の100年に理学が挑む大きな課題であろう。



『「生きものらしさ」をもとめて』  
大沢文夫 (Fumio Oosawa) 著  
藤原書店/2017年5月発行  
1800円(税別)