

## 海洋教育促進研究センターの発足と理学部

浦辺 徹郎 (地球惑星科学専攻 教授),  
赤坂 甲治 (臨海実験所 教授)

◆ ◆ ◆  
東京大学海洋アライアンスがなぜ、小・中・高校生の海洋教育にまで乗り出すのか？また、どうして理学部がそれに絡んでいるのか？これは昨年12月20日に行われた、濱田総長と日本財団笹川会長による「海洋教育促進研究センター(日本財団)」発足調印式の記事を見た友人の正直な感想であった。もっともな疑問であるが、以下の記事に眼を通していただければ、その理由を理解いただけるのではないだろうか。

◆ ◆ ◆  
「海洋教育促進研究センター(日本財団)」は、日本財団からの助成を受けて2010年10月、海洋アライアンス内に設立された。センターには、海洋教育政策学ユニット(ユニット長：佐藤学 教育学研究科教授)、海洋人材育成学ユニット(ユニット長：赤坂甲治 理学系研究科教授)、の二つのユニットに計4名の特任教員が配置され、教育学・教育政策学と、学際的海洋学とが融合した体制となっている。センターは、全国の大学、小・中・高等学校などと連携し、海洋教育の普及推進に関わる研究と実践のハブ拠点として、初等・中等教育レベルにおいて海洋教育を普及推進することを目的としている。

ただし、これは容易なことではない。理科教科書の作成に協力してもらえる理学部の教員が口をそろえておっしゃるのは、特定の分野について教科内容を追加することの想像を越えた難しさである。センターでは上記のように教育学の専門家と海洋学の専門家がタッグを組んで、その難問に立ち向かおうとしている。まず子供達の興味を引き出し、海に親しみを感じさせるために、理学部附属臨海実験所を中心に海辺の生物を子供達にいかに見せるかを研究する。このように、目に見え手に触れることのできる素材から入って、次第に目に見えない、海が社会に対し果たす役割といった点まで、興味をもたせることができ

れば大成功であろう。後者については、地球惑星科学専攻のチームが取り組んで、地球システムの中での海の重要性を知ってもらえる教材作りをする計画である。

もちろん、子供達を実際に指導する先生への教育と研修、カリキュラム作りがなされなければ、これらのことは絵に描いた餅になる。そこで教育学が専門の佐藤教授のユニットが登場する。このユニットでは幾つかの拠点大学とネットワークを構成し、そのハブ拠点として上記の構想を実現していく計画である。それが実現すると、この試みは初等・中等教育課程における日本最大の海洋教育に関する組織として実力を発揮することになるだろう。

センターでは4月2日午後小柴ホールで第1回シンポジウム「海は学びの宝庫—海洋教育のグランド・デザイン—」の開催を予定している。それへの準備を兼ねて熱心な議論が重ねられ、ようやくセンターの方向性が定まってきた。ぜひ、覗いていただきたいと希望している。

子供の理科離れを憂う声は、日本の将来を心配する多くの人の間に根強い。それを改善する最良の方法は、子供を自然の中に連れ出し、直に興味をもたせることではないだろうか。それには、子供達が感じた興味を発展させていくことのできる豊富

な教材と教育プランを用意し、教師の方々に提示することが必要だろう。研究のおもしろさを伝えることのできる人がそれに取り組む必要性については、説明の必要がないだろう。海洋教育促進研究センター(日本財団)の活動に、支援と協力をお願いしたい。

(2010年12月20日プレスリリース)



「海洋教育促進研究センター(日本財団)」プログラム発足調印式で協定書を交換する東京大学濱田総長と日本財団笹川会長

# 細菌の遺伝子発現を阻害する新たなメカニズム

田上 俊輔 (生物化学専攻修士<sup>注</sup>)、関根 俊一 (構造生物学社会連携講座 特任准教授)、横山 茂之 (構造生物学社会連携講座 教授)

DNAの遺伝子発現では、DNA配列をコピーしてRNAが合成される“転写”とよばれる過程と、RNA配列を基にアミノ酸を重合してタンパク質を合成する“翻訳”とよばれる過程を経る。転写は、RNAポリメラーゼ (RNAP) という酵素によって行われる。正確な遺伝子発現のためにさまざまなタンパク質がRNAPを制御している。われわれはGfh1というタンパク質がRNAPに作用している状態の立体構造解析を行い、Gfh1によるRNAP制御機構を明らかにした。また、制御の過程におけるRNAPの構造変化を観察した。この構造変化は、RNAPがはたらくメカニズムにおいて重要な役割をもつと考えられる。

転写は、さまざまな制御を受ける複雑なプロセスであり、そのメカニズムは未解明な部分が多い。RNAPはヌクレオシド三リン酸 (NTP) を材料にして、DNAと同じ情報をもつRNAを合成する。まずRNAPはDNA上の目的とする遺伝子を含む部位に結合する。次に、DNA上を移動しつつ、RNAを合成する。RNAPはカニのハサミのような形をしており、DNAや合成途中のRNAはそのハサミに挟まれている。ハサミの刃元には、2次チャンネルとよばれる穴があり、そこからNTPを取り込むと考えられている (図左)。最後にRNAPがDNAやRNAから解離し、転写が終結する。これらの過程はRNAPの構造変化を伴うと考えられている。

また細胞では、その時々状況に合わせて必要な遺伝子を必要量コピーするために、多様なタンパク質がRNAPを制御している。しかし、これまで“RNAPの構造変化”や“RNAPと制御タンパク質の複合体構造”に関する報告はごく限られていた。Gfh1は細菌のRNAP制御タンパク質のひとつであり、転写を阻害することが報告されていた。われわれはGfh1がRNAPに対してどのようなにはたらくのかを解明するために、RNAP・Gfh1複合体のX線結晶構造解析を行った。

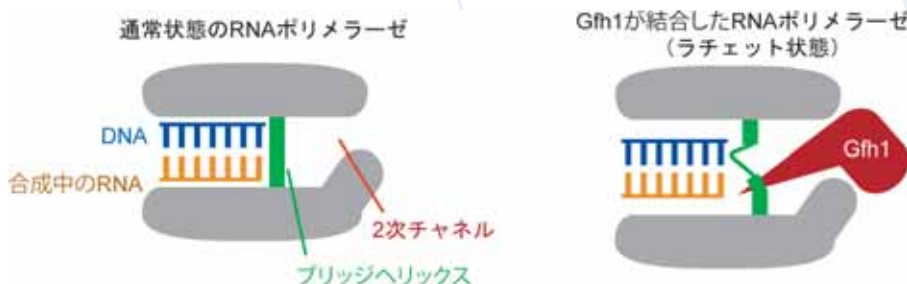
RNAP・Gfh1複合体中で、Gfh1はRNAPのNTP取り込み口である2次チャンネルに結合していた。Gfh1は2次チャンネルを完全に塞いでおり、NTPの取り込みを阻害することが示された。さらにGfh1の先端はRNA合成反応におけるNTPの

結合部位を占拠しており、直接的にNTPの結合を阻害していた。このRNAPを阻害する機構は、既存の抗生物質による細菌RNAP阻害の機構とは全く異なる新規の機構であった。

また、RNAP・Gfh1複合体の構造を、過去に報告されていたRNAPの結晶構造と比較したところ、Gfh1複合体中のRNAPでは大きな構造変化が観察された。われわれはこのRNAPの構造変化した状態をラチェット状態と名付けた。ラチェット状態ではハサミの部分 (DNA・RNA結合チャンネル) が広がっており、RNAPとDNA・RNAとの結合が弱くなっていると考えられた。また、ハサミの上下をつないでいるブリッジヘリックスという構造が中央で折れ曲がり、DNA・RNA結合部位にちょうど1塩基分突き出していた。では、このラチェット状態は転写においてどのような意味をもつのだろうか。われわれは、RNAPがDNA上を移動していくさいに、ラチェット状態をとることで一時的にDNA・RNAとの結合を弱めつつ、ブリッジヘリックスを折り曲げてDNA・RNAを先へ送るのではないかと考えている。このほかにも、転写開始や終結といった複数の過程でラチェット状態が現れる可能性もある。

今回の研究結果は、RNAPによる転写機構の解明の出発点としてひじょうに重要な意味をもつ。また、細菌の転写を阻害する新規メカニズムは、抗生物質開発のヒントとなるとも期待される。本研究はS. Tagami *et al.*, *Nature* **468**, 978 (2010) に掲載された。

(2010年12月2日プレスリリース)



■ Gfh1がRNAポリメラーゼ (RNAP) を阻害するメカニズムとRNAPの構造変化 (図右)

注) 現所属: 理化学研究所 特別研究員

## 葉の大きさを決める細胞間のやりとり

川出 健介(生物科学専攻 博士課程3年),  
塚谷 裕一(生物科学専攻 教授)

◆ ◆ ◆  
同じ種<sup>しゅ</sup>の生物では、器官の大きさがひじょうに均一である。これは、各々の種に特徴的な発生プログラムが、器官に含まれる細胞の数と大きさを厳密に制御しているからである。しかし、多くの細胞が集まってできている器官が、どのように個々の細胞のふるまいを統制しているのかは、よく分かっていない。私たちは、葉に含まれる細胞の数と大きさが細胞間のコミュニケーションを通じて統合されていることを、今回明らかにした。これは葉の大きさが、個々の細胞を越えた多細胞レベルで制御されていることを実証した初めての成果である。

◆ ◆ ◆  
植物の葉は、各々の植物種に特徴的な大きさに発達するのが一般的である。これは、同じ種であれば、葉に含まれる細胞の数と大きさがほぼ一定だからである。そこで、葉のサイズがどう決まるのかを知るためには、細胞の増殖と肥大が発生の過程においてどのようにコントロールされているのかを理解する必要がある。葉一枚あたりの細胞の総数と、個々の細胞のサイズとは、それぞれ別個に決まっているのだろうか。そのヒントとして、葉の発達のさいに細胞の増殖があるレベル以下に落ちると、細胞が異常に大きくなるという現象(補償作用)が知られている。発達中の葉では、増殖している細胞と、増殖を終えて肥大している細胞とが別々の場所に位置している。したがって

◆ ◆ ◆  
補償作用という現象から、細胞の増殖と肥大とは、何らかの形で統合的にコントロールされているのではないかと推察されてきた。しかしながら、そのような仕組みはこれまで全く知られていなかった。

今回、私たちのグループは、シロイヌナズナという植物を用いて、まず細胞増殖に欠陥があり補償作用を示す変異型の細胞と、正常な細胞とが混在するキメラ葉を人工的に作り出し、細胞のサイズを調べた。その結果キメラ葉の中では、野生型の細胞であっても、変異型の細胞と同様に補償作用を起こしてサイズが大きくなっていた。これは、変異型の細胞から細胞肥大を促進させるような細胞間シグナルが放出されていることを示している。さらに詳細に調べたところ、この細胞間シグナルには、中肋(葉の中央を走る太い葉脈と、それを取り囲む細胞からなる構造)を境として、葉身の半分の範囲でのみ機能する、というユニークな性質も見つかった。私たちのこれらの発見は、器官のサイズがどのようにして決まるかの理解にとって大きなブレイクスルーとなったといえる。多細胞レベルの制御の実証を受け、今後、器官制御の解明は、従来の細胞増殖や細胞肥大といった個々の細胞プロセスに限定したものから、より高次の、多細胞レベルを統合するシステムの解析へと、新たな局面に移行すると予想される。また応用的には、この細胞間シグナリングの特性を利用することで、バイオマスの増大などへの寄与が期待される。

この成果は、K. Kawade *et al.*, *Development* 137, 4221 (2010) に公刊された。また掲載号の冒頭では、注目すべき論文のひとつとして紹介されている。

(2010年11月16日プレスリリース)



野生型(緑色に光っている部分)と変異型の細胞(灰色の部分)が混在するキメラ葉では、野生型の細胞でも、変異型の細胞と同じくらいまで大きくなっている。

# 情報を自由エネルギーに変換することに成功！

佐野 雅己 (物理学専攻 教授), 沙川 貴大 (物理学専攻 博士課程3年), 上田 正仁 (物理学専攻 教授)

マックスウェルの悪魔は、熱力学の基礎に関わる重要なパラドックスのひとつである。われわれは、ブラウン運動するコロイド粒子を観測し、その情報を元に適宜決められた操作をするだけで情報を自由エネルギーに変換できることを実証した。これは、マックスウェルの悪魔の実現であると同時に、情報と熱力学をつなぐ重要な関係式の実験的検証を与えている。

温度差のないところから仕事をせずに温度差を生み出せると、その温度差を利用して仕事をさせる永久機関ができてしまう。熱力学第二法則はそれが不可能であることを教えている。

J.C. マックスウェル (James Clerk Maxwell) は 1871 年に、第二法則を破る次のような仮想的な悪魔を考えた。左右に仕切られた箱の中に気体分子が閉じ込められおり、悪魔は分子を観測し、速度の速い分子が仕切りに近づいてきたら仕切りのドアを開けて右側に通し、遅い分子が来たらドアを開けて左側に通す。これを繰り返すと温度差のない状態から、気体分子に直接仕事をせずに、仕切りの左右間に温度差をつくり出してしまう。

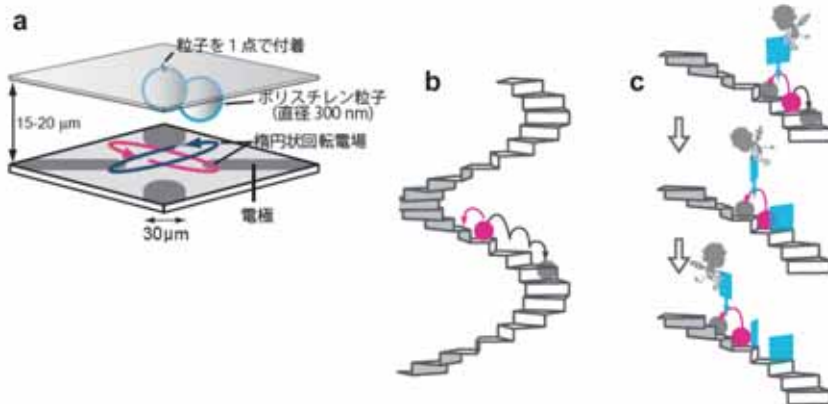
このパラドックスの解決には長い年月を要し、いくつかの重要な貢献がある。レオ・シラード (Leó Szilárd) (1929) は、分子が一個だけあるとし、悪魔が分子の位置が箱の右側か左側にあるかに応じて仕切りをセットすると、気体分子の占める体積が 2 倍に膨張するさいに  $\ln 2$  に比例した仕事を取り出すことができ、これが観測で得られる情報量  $\ln 2$  に一致することから情報量と熱力学の関係を明らかにした。またごく最近、沙川・上田 (2008, 2009) は、記憶の書込みと消去に要する仕事の下限を与え、第二法則との無矛盾性を証明した。このように、情報と熱力学の基礎に関する関心は、最近も高まっている。しかし、これまでマックスウェルの悪魔を実現しようとした実験

は皆無ではないものの、情報量とエネルギーを測定した実験は存在しなかった。

われわれは、中央大学の鳥谷部祥一助教、宗行英朗教授と共同で、シラード型のマックスウェル悪魔を初めて実現し、情報と熱力学をつなぐ基本的関係式が成立していることを実証した。

実験の概要は以下のようなものである。片側がガラス基板上の 1 点で接地し、点の周りで回転可能な直径約 300 nm のポリスチレン粒子対を用意する (図 (a))。対向するガラス基板には 4 つの電極があり、印加する電圧を制御することで粒子対に螺旋階段状のポテンシャル (トルクと周期ポテンシャルの和) を与えることができるようになっている。容器は水で満たされているため、粒子対は水分子の衝突を受けて激しくブラウン運動を行う。階段の 1 ステップは、熱ゆらぎ程度 ( $k_B$  をボルツマン定数、 $T$  を絶対温度とすると  $3k_B T$  の高さ) であるため、粒子はトルクによって平均的には階段を下るが、時折は熱ゆらぎによって階段を登る (図 (b))。このゆらぎを高速度カメラで観測し、粒子が階段を登った場合は、後ろ側に仕切りを置いて階段を下るのを防ぎ、それ以外の場合は何もしないという操作を繰り返す (図 (c)) ことで、粒子をポテンシャルの勾配に逆らって階段を登らせることができた。この仕切りを置く操作は、位相が 180 度ずれた 2 種類のポテンシャルを切り替えることで実現された。ポテンシャルの切り替えによって粒子にした仕事も測定でき、これらを差し引いても粒子はトルクに逆らって回転し、外部に仕事をしたことを定量的に確認した。この実験における情報から自由エネルギーへの変換効率は最大で 28% であった。本研究は、*Nature Physics* 6, 988 (2010) に掲載された。

(2010 年 11 月 15 日プレスリリース)



## 実験の概念図

(a) ポリスチレン粒子対と電極。(b) 粒子は熱ゆらぎで階段を上下するが、階段を降りる (黒矢印) 確率が高く、登る確率は低い (赤矢印)。(c) 粒子が階段を登った場合 (赤矢印) には、後に仕切りを置く。