

# 連載 理学のキーワード 第9回



## 「海洋大循環」

日比谷 紀之 (地球惑星科学専攻 教授)

世界海洋を巡る海洋大循環は、その駆動力によって「風成大循環」と「熱塩大循環」とにわけられる。風成大循環は風と海面との摩擦により引き起こされ、陸地や海底地形によって区切られた大洋内で、閉じた水平循環として存在する。黒潮やメキシコ湾流などはこの風成大循環の一部分である。この風成大循環の影響がおよぶのは深度数百メートルより浅い部分に限られ、それ以下の深層領域には別の種類の海洋大循環が存在する。これが熱塩大循環とよばれるもので、海域による海水密度の違いが原因で生じる。

高緯度域の表層水は気から強い冷却を受けるために密度が増加して沈降する。実際に、冷却された表層水が深層にまで沈降するような場所は、北大西洋のグリーンランド沖と南極のウェッデル海に限られていることがわかっている。この深層水は約 1500 年もの歳月をかけて

世界海洋の底層や深層をゆっくりと満たしながら表層へと上昇（湧昇）し、表層を通過して元の深層水形成域まで戻ること、あたかもコンベアベルトのような鉛直循環を形成すると推察されている。この循環は、極域から低緯度域に向けて冷水を、低緯度域から極域に向けて暖水を運ぶため、温和な地球気候の実現とその維持に大きな役割を果たしていると考えられている。ところが、この沈み込んだ深層水が、どこで、どのようにして表層に戻っているのかは、いまだにあまりよくわかっていない。

それでも、この深層水の湧昇を引き起こす物理過程として現在もっとも有力と考えられているのが、意外にも、海洋中のマイクロな（1 cm スケール）渦の作用「鉛直乱流拡散」である。すなわち、日射で暖められた表層の水が鉛直乱流拡散によって少しずつ下方に混合し、その結果

暖められて軽くなった深層水が表層まで上昇してくるというシナリオである。この鉛直乱流拡散は、おもに、潮汐流が海嶺や海山列にぶつかることで励起されているので、このシナリオどおりだとすると、熱塩大循環は、潮汐、すなわち、「月」によって駆動されているといえるのかも知れない。地球が月という衛星をもっていなかったら、人類の生存を可能としたこの温和な気候は、果たして実現していたのだろうか？海洋における鉛直乱流拡散というミクروسケールの現象の解明が、熱塩大循環というグローバルスケールの現象の把握に本質的に重要である理由はここにある。理学系研究科・日比谷研究室では、長期気候変動の解明に不可欠な熱塩大循環モデルの高精度化に向け、現実の海洋における鉛直乱流拡散の実態を海洋観測と数値モデリングの両面から解明するべく研究を進めている。



## 「有機半導体」

島田 敏宏 (化学専攻 准教授)

有機電界発光素子はいまや携帯電話の表示パネルに使われるようになり、有機半導体を用いたデバイスが新聞の経済面に登場することも多くなった。歴史的には、有機半導体の研究の草創期に化学教室の赤松研究室が大きな役割を果たしたことはよく知られている。現在、理学系研究科では ERATO 中村プロジェクトや固体化学研究室などで研究が行われている。

ペンタセンをはじめとする有機半導体の特長はプロセスの容易さと構造のやわらかさにある。プロセスに関しては、Si のような無機半導体は、デバイス作成時に原子間の共有結合を作らなければならないために超高真空装置など大型の設備が必要であるが、有機半導体は有機合成済みの安定な分子を用い

るため、デバイス作成時には原子間の共有結合を作る必要がない。そのため、インクジェットプリントなど高速・簡便な方法によって素子を作ることができる。この点は、大面積の回路への応用（例：表示装置や集積センサーなど人間とのインターフェース）に適していると考えられる。構造のやわらかさは、曲げられる表示素子など、これまでにない応用に直結する重要な性質である。有機半導体は分子間の結合が弱いファンデルワールス力によるので構造に自由度が大きい。

有機半導体の欠点としては、動作速度が遅いことと酸素や水分に弱いことがあげられる。これらの欠点はいずれも構造のやわらかさと密接に関連した本質的なものであると考えられている。

動作速度が遅いのは分子の空間的な位置が熱的に揺らいでいるため電荷が分子間を確率的に飛び移ることにより移動せざるを得ないためであり、Si などにおいて電荷が結晶の周期性を反映して広がった波としてふるまうことと対比すると桁違いに遅くなることはやむを得ないと考えられる。また、酸素や水に弱いのは、熱揺らぎにより固体中に小さな分子が透過できる隙間が生じるために酸素分子や水分子が浸入し、電荷をもって持っている分子（ラジカルイオン）と化学反応するためである。現状ではこれらの問題は不可避のように見えるが、有機半導体の分野はすでに何度か大きなブレークスルーを経験しており、新しい原理に基づく高速で安定な有機半導体が登場する日は近いかもしれない。



## 「相転移」

宮下 精二 (物理学専攻 教授)

物理学の研究は自然現象の根本要素がどうなっているかを解明することであり、原子、原子核、素粒子の仕組みと研究が進んでいる。しかし、自然現象を理解するためにはもうひとつ重要な側面がある。それは、協力現象とよばれ、簡単な要素でも、それぞれ同士が相互作用することによって巨視的に特徴ある状態を生み出す現象である。この現象は、単に複雑というだけではすまされない。たとえば、水の分子の分子自身は変化しないが、温度によって氷、水、水蒸気とマクロな形態を温度とともに不連続に変化する。このように、ミクロにみるとシステム自身には何ら特異性はないのに、マクロに特異性が現れる現象を「相転移」という。水の変化だけでなく、鉄が磁石になる現象や、電気抵抗が無くなる超伝導相転移、ヘリウムが低温で見せる超流動相への変

化も相転移である。そのほか、液晶やゾルゲル転移など相転移の枚挙にいとまがない。逆にいえば、森羅万象は、相転移の集まりからできていると言ってよいかもしれない。実際、宇宙の始まりのモデルであるビッグバンやそれに伴うインフレーションなども相転移のアナロジーで論じられる。

相転移に関して重要な概念として、「対称性の破れ」というものがある。例として、+1 (白) か -1 (黒) をとる要素からなる格子を考え、隣り合った2つがそろった方がエネルギー的に得とする。この系は土に関してエネルギー的に対称であり、大きな熱的擾乱を受けている場合 (高温) には、対称性が破れず系は灰色 (ミクロに2つの状態が混ざった状態) になる。しかし、ある温度以下では、すべての要素が全体

的にそろった状態になる。つまり、白か黒のどちらかになる。これが相転移である。ここで、白黒どちらでもよいが、どちらかを選ばなくてはならないのである。そして、選んだ後は対称性が破れている。物質の創成も高温の対称性の高い状態からの対称性の破れで説明されている。このように、マクロな現象であった相転移は、ミクロな現象の理解にも大きな役割を果たしている。

相転移の機構は統計力学の中心課題のひとつであり、種々の新しいタイプの相転移やその動的過程、さらには動的過程が示す非平衡相転移などの研究が詳しく進められている。たとえば、スピントロニクスとよばれる磁性・非磁性間の相転移や光照射の効果が、物理 (宮下研究室) と化学 (大越研究室) の共同で進められている。



## 「統計的機械翻訳」

宮尾 祐介 (情報科学科 助教)

近年、多くのポータルサイトで翻訳機能が提供されており、実際に利用したことがある人も多いだろう。英日や仏日翻訳では突拍子もない訳が出る事が多いが、欧米の言語間ではほぼ実用レベルに達しており、幅広く利用されている。これら現代の機械翻訳システムにおいて中心的な技術が、統計的機械翻訳である。

人間はどのように翻訳を行っているだろうか。たとえば英日翻訳なら、1) 英文を読んで意味を理解し、2) その意味を表す日本語文を作成する、というステップが考えられる。機械翻訳においても、1) 英文を解析して意味構造を計算し、2) その意味構造から日本語文を生成する、という技術が中心的に研究されてきた。

これに対し、統計的機械翻訳はまったく異なる考え方で翻訳を行う手法である。

アイデアはとても単純で、英文  $e$  を日本語文  $j$  に翻訳する確率  $p(j|e)$  を考え、この確率が最大になる  $j$  を出力する。この確率を変形すると、

$$p(j|e) = \frac{p(e|j)p(j)}{p(e)} \propto p(e|j)p(j)$$

となり、 $p(e|j)$  を翻訳確率、 $p(j)$  を統計的言語モデルと呼ぶ。直感的には、 $p(e|j)$  は  $j$  が  $e$  に翻訳される確率、 $p(j)$  は  $j$  が文として出現する確率、すなわち「文らしさ」を表す。 $p(e|j)$ 、 $p(j)$  は実際の翻訳例やテキストから推定することができる。

この手法では意味構造や翻訳規則をまったく用いない。しかし、実際にはこの手法の方が従来手法より良い訳を出すことがわかってきた。その理由のひとつは、 $p(j)$  により「日本語として自然な文」が出力されることである。大量のテキス

トを用いることで  $p(j)$  をより精密に推定できるため、たとえば Google はインターネットのテキスト約 2 兆語を用いて  $p(j)$  を推定し、2006 年の機械翻訳コンペティションで優勝している。これは、機械翻訳では意味構造を扱うより自然な文を出力する方が重要であったということを示唆している。

ただし、この手法が成功しているのは欧米の言語など単語や文の構造が比較的似ている言語間の翻訳である。英日翻訳などはまだ実用には遠く、また、近年アジアの言語がさかんに研究されるにつれ、統計的機械翻訳の限界が見えて来ている。理学部情報科学科辻井研究室では、統計的機械翻訳をベースとして、そこにさまざまな構文・意味情報を追加することで、英日など「遠い」言語間の翻訳の性能を上げる研究を行っている。



## 「モータータンパク質」

神谷 律 (生物科学専攻 教授)

モータータンパク質とは、ATP加水分解のエネルギーを使って細胞の運動を発生させるタンパク質を指す(広く分子レベルの運動を行うタンパク質全般を指すこともある)。古くから筋収縮、鞭毛運動、アメーバ運動、原形質流動などの細胞運動現象が知られていたが、長い間それらは特殊な細胞が行う特殊な現象であると考えられていた。しかし、1970年代以降、すべての真核生物の細胞内には運動を発生する共通の機構があり、それが特殊な運動だけでなく、物質の輸送や染色体の分配といった一般的機能を担っていることがわかってきた。その機構には、細胞骨格と呼ばれる2種のタンパク質繊維(アクチン繊維と微小管)と、その上を滑走するタンパク質群が関わっている。80年代後半に純化したタンパク質を使って顕

微鏡下で運動を発生させる技術が開発されると、それら滑走タンパク質はモータータンパク質とよばれるようになった。現在モータータンパク質として、アクチン繊維上を滑るミオシン、微小管上を滑るキネシンとダイニンの、計3種が知られている。いずれもATP分解酵素である。

細胞内にはその3種それぞれに複数の類似タンパク質があり、それぞれ固有の働きを担っている。それら個々のタンパク質の機能と調節のしくみの解明は、細胞生物学の大きな課題である。いっぽう、生物物理学分野での中心的課題は、化学的エネルギーがどのようにして力学的エネルギーに変換されるのかという基本的問題である。最近では、単一タンパク質の運動を、ATPの分解をモニターしながらナノメートルの精度で計測する実験が

可能になり、今までの考えを覆す発見が行われている。たとえば、これまでミオシンはATP1分子の分解ごとに1回の分子変形を起こして1ステップ動くと考えられていた。しかし最近では、運動には熱ゆらぎの寄与が大きく、運動のステップ数はATPの加水分解数と必ずしも一致しないという考えが優勢になりつつある。しかし、どのようにして方向性のある滑り運動が生まれるのかは、まだ謎である。

理学系研究科では、生物科学専攻の真行寺研究室と筆者の研究室でダイニンの運動性に関する研究が行われている。モータータンパク質は真核細胞の多くの現象の基礎として重要であるから、生物科学専攻、生物化学専攻で行われている多くの研究が、少なくとも間接的に関係しているといえる。



## 「銀河中心」

半田 利弘 (附属天文学教育研究センター 助教)

いて座の方向にある、銀河の中心部、とくに天の川銀河の中心部のことを銀河中心とよぶ。天の川銀河の半径20~25kpc(kpcは距離の単位で1kpc=3260光年)に対して、太陽系は中心から7~8kpcに位置するが、銀河の中心部は太陽系が位置する円盤部とは異なる特徴を示す。したがって、中心といっても広がりをもち、その大きさも着目する特徴によって異なる。

銀河中心では、ほかでは見られない特異な天体がいくつもあり、それが魅力の1つである。銀河中心では、重力以外に磁場や衝撃波や強い輻射など他の効果の影響も大きいためだろうが、そのしくみについてはまだまだ不明確なところが多い。

可視光ではまったく観測できないことも銀河中心の特徴といえる。太陽系から見ると途中にある大量の塵が可視光を遮ってしまうためである。代わって電波・赤外線・X線での観測が中心となる。

銀河中心を電波でみると、独特な形態をしている。図で右の丸い部分はいて座A、左の縦棒の部分は電波アークとよばれる。

銀河中心の核はいて座Aに位置するが、電波アークも銀河中心付近にあると考えられている。

電波アークは銀河面に垂直な磁場構造であることは私を含む研究グループが20年ほど前に明らかにした。これだけ大規模で強い磁場構造は天の川銀河のほかの部分では見つからない。多くの研究者の研究にもかかわらず、その成因やエネルギー源については依然不明である。

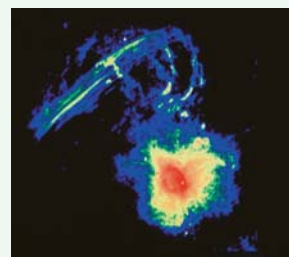
いて座Aは東西2つに分けられる。環状構造を示すいて座A東は超新星残骸、渦巻状構造を示すいて座A西はブラックホールを巡るガス流と解釈されているが、その成因や両者の関係については議論が分かれている。

わからないことだらけの銀河中心であるが、1つだけ明確にわかっていることがある。いて座A西には、強く輝く点状電波天体があり、いて座A\*(エースター)とよばれる。X線や赤外線でも観測され、数十分程度で大きく変光する。周辺の恒星の運動を調べた結果、いて座A\*は太

陽の300万倍程度の質量をもつブラックホールであると判明したのである。

銀河中心には $10^3\text{-}10^4\text{ cm}^{-3}$ という星間ガスとしては高密度な分子雲が0.35kpcほどの範囲に広がっている。天の川銀河内では最大規模の分子雲複合体である。この分子ガスの温度はその加熱源と考えられる塵より低温であることがわかっており、これも謎である。複雑な速度構造も散見され、磁場や衝撃波の効果と考えられるが、その機構は完全には明らかになっていない。

この魅力あふれる天体を観測し、謎に挑戦しているのは、東京大学理学系研究科では、筆者のほか、物理学専攻の岡朋治助教などがいる。



電波でみた銀河中心  
(NRAO/AUI/NSF提供)