

2 光周期分のパルス幅の超短パルスレーザーで視覚の機構を探る

小林 孝 嘉 (物理学専攻)

kobayashi@phys.s.u-tokyo.ac.jp

私達は、1秒間に地球を7周半する光が髪の毛の100分の1しか進めない様な短い時間幅しか持たない可視光のパルスレーザーを開発した。これは世界で最も短いパルス幅の可視光で、その持続時間はフェムト秒 (10^{-15} 秒、記号は fs) という単位で測って 3.9fs である。この最も短いパルスを用いる実験では、初めての現象に遭遇する事が多い。ここでは最近 Nature に発表された光生物初期過程に関する研究例を示す。

ヒトが外界から得る情報の大部分は、視覚によっている。視覚は、眼の網膜にある視物質ロドプシンの光吸収から始まる。眼は数個の光子を検出する事が出来るだけでなく、生理温度という高い温度条件下で極めて低雑音である。熱雑音は一つの分子につき100年に一回である。この機構を解明することにより、例えば超高感度低雑音光センサーの開発に有効なヒントが得られる可能性がある。ロドプシン試料を多量に準備することが困難であるので、代わりに、機構が類似しているバクテリオロドプシン (以下、bR) を用いることがある。bR は、光エネルギーを用いてプロトン細胞内から細胞外へ能動輸送し細胞膜内外にプロトン濃度勾配を作り出すことにより ATP を合成する。bR の中で可視光を吸収する発色団レチナールは、光構造異性化し、一連の光プロトン輸送サイクルが引き起こされる。このサイクルの初期過程 (bR \rightarrow J 中間体) は、レチナールが可視光を吸収して all-trans 型から 13-cis 型への構造異性化であり、図 1 に示すようなモデルが提案されている。反応座標は $C_{13}=C_{14}$ 二重結合の廻りの二面角 θ である。

まず、基底電子状態 (S_0) から第一電子励起一重項状態 (S_1) に励起された直後は、Franck-Condon 状態で多数の振動固有状態を重ね合わせた波束を形成している。この波束が S_1 ポテンシャル曲面に沿って運動していき、その後、基底状態に移り、13-cis 型の J 中間体が形成される。

実験は次のように行う。まず、サブ 5fs パルスをビームスプリッターで強い励起光と弱いプローブ光に二分する。bR に励起パルスを照射すると励起された試料の透過率が変化するため透過プローブ光の強度が変化する。プローブ光を分光していろいろな波長の透過率変化量を励起・プローブパルス間の時間間隔の関数として測定する。その結果が図 2 に示されている。その実時間スペクトルに、振動が観測された。このプローブ光透過率変化に現れる振動は、分子振動によって分子の形が変わり、

電子状態がその変形に断熱的に追従し吸収確率が変化する事による。

このことをはっきり見るために、時間周波数解析の手法の一つであるスペクトログラム解析を行った。610nm の透過率変化のデータに適当な幅のゲート関数を掛け、その範囲内のフーリエ変換を行い、フーリエパワースペクトルのゲート関数のピーク時間依存性として二次元プロットした。このスペクトログラムに現れるピーク位置の遅延時間依存性を示したものが図3である。それによると、150fs 以前では振動数 1500、1200、1000 cm^{-1} の振動がみえるが、これはそれぞれ $C=C$ 二重結合の伸縮振動、 $C-H$ 結合の $C=C$ 二重結合平面に対して面内振動、 $C-H$ 結合の $C=C$ 二重結合平面に対して面外振動である (図4上)。これらの振動周期は、おのおの 22, 28, 33fs という短い時間であるので、その正確な周波数また後述する周波数の変化を議論するためには、パルス幅は少なくとも周期の 1/4 以下でないといけない。従って、他のグループの 10fs 程度のパルスではこの実験は不可能である。図3で、150fs 以降になると 1200 cm^{-1} と 1000 cm^{-1} の振動の周波数が近づいてひとつになるように見えるが、これは、異性化の途中で $C=C$ 二重結合平面がねじれ、 $C-H$ 結合の平面内の振動と平面外の振動の区別がつかなくなるためである。また 1500 cm^{-1} の振動数がやや小さくなるが、これは $C=C$ 二重結合の π 電子が非局在化して結合次数が下がるためである (図4中)。そして 300fs 以降になると 1500、1200、1000 cm^{-1} の振動がそれぞれ元の振動数に戻る。分子の遷移状態の振動スペクトルを観測したのはこの実験が初めてである。

いくつかの技術的な工夫により世界最短可視光パルスを発生し現状では、最も高い精度の実験が行い得るようになった。1999年のノーベル化学賞は、カリフォルニア工科大学の A. H. Zewail が受賞した。彼の実験結果で気相反応生成物がトンネル効果で段階的に増えていく様子は、衝撃的であった。しかしながら、その実験では、遷移状態のスペクトル測定は行っていなかった。彼らより10倍以上高速な分光によって、色素蛋白のような複雑な系の反応中間体でなく中間体と中間体との間の遷移状態の構造が初めて見えた。この実時間分光法により化学反応や、光生物初期過程の機構がはるかに詳細に明らかになって行くであろう。

この研究は、院生の斎藤敬君の協力による。

バクテリオロドプシンの2準位モデル

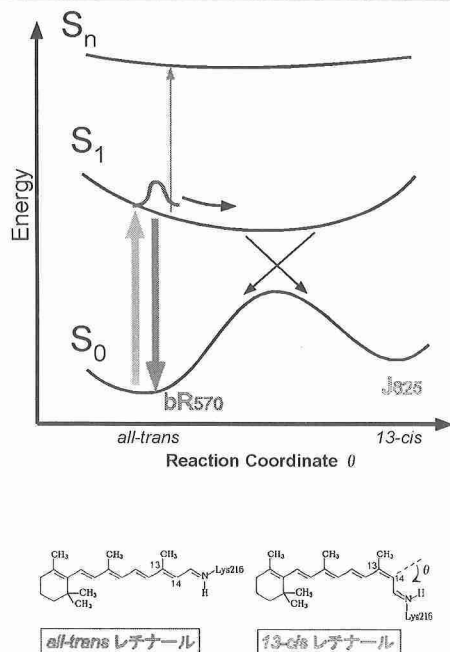


図1 バクテリオロドプシンのポテンシャルエネルギーと異性化反応機構の模式図および全トランス型・13-シス型の構造

時間依存透過率変化

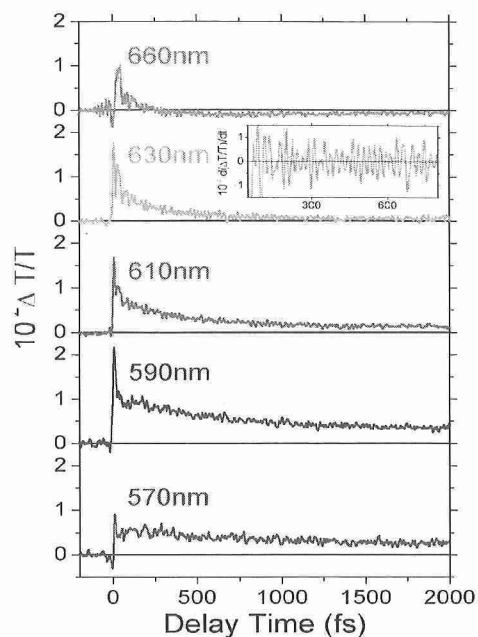


図2 サブ5フェムト秒励起光による透過率変化のプロープ光の遅延時間依存性

振動周波数のゲート遅延時間依存性

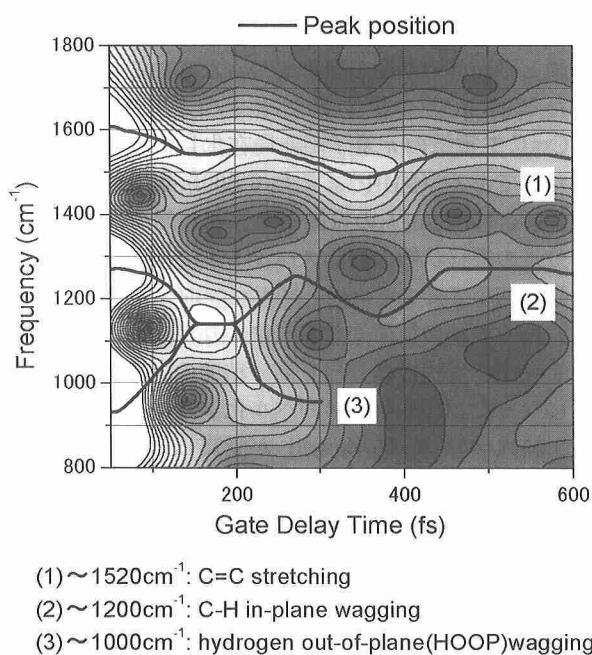


図3 610nm でプロープした透過率変化の遅延時間依存性から得たスペクトログラムのフーリエパワースペクトルのピーク周波数のゲート遅延時間依存性

光構造異性化のダイナミクス

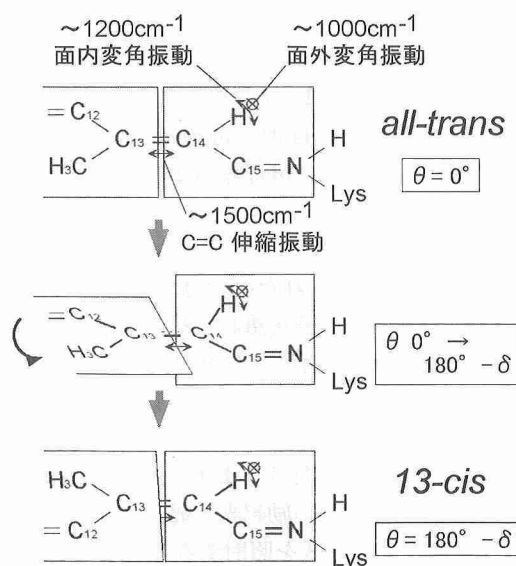


図4 バクテリオロドプシン中の色素の異性化反応機構の模式図

すばる望遠鏡による遠方銀河宇宙へのいざない

児 玉 忠 恭 (天文学専攻)
kodama@astron.s.u-tokyo.ac.jp

宇宙には無数の銀河が存在する。それらは重力によって互いに寄せ集まり、大規模な構造をなしているが、その最も特徴的なものが「銀河団」である。

数百個もの銀河が1000万光年 (10^{23}m) 程の領域にひしめき合う銀河の集合体であり、暗黒物質やガスも含めて、その総質量は重い物で 10^{15} 太陽質量 ($2 \times 10^{46}\text{kg}$) にも達する。

では、この銀河団とその構成要素である銀河は、一体いつどのように誕生し、その後どのような進化を辿って今日の銀河宇宙の姿を形づくっているのでしょうか？

近年の冷たい暗黒物質に満ちた宇宙モデルでは、初期宇宙の密度揺らぎの重力的成長によりまず小さな物質塊が形成され、それらが重力によって集合、合体を繰り返しながら次第に大きな構造 (ハロー) が形成される。個々のハローではガスが収縮し星が生まれ、輝く銀河が誕生する。そしてこれら銀河が、ハローの集合・合体に伴って、次第に銀河群、銀河団といった大きな銀河構造を形成してくるものと考えられる。

この過程で、個々の銀河は、銀河同士や銀河団の重力場、銀河間ガスなどの相互作用により、星の形成率や銀河の形態に変化を来たしながら進化して行くであろう。

私の基本的な研究姿勢は、このような理論的な銀河宇宙の形成シナリオを、宇宙の観測によって実証的に検証していくことである。

光の速度の有限性のお陰で、宇宙は遠方を見れば見るほどより昔の情報が直接得られるという大きな特長をもつ。この特性を利用し、近傍宇宙から遠方宇宙へと時間を遡って、様々な環境下の宇宙を直接観測することによって、『銀河・銀河団の形成史を観測に則して再構築する』ことが私の研究目標である。

これには遠方からの僅かな光を捕える「巨大な目」が必要なのは言うまでもないが、我が日本は1999年にハワイ山頂に口径8mの「すばる望遠鏡」を完成させ、世界の観測天文学の第一線へと躍り出た。すばるの最大の特徴はその「広視野」である。満月に相当する30分角もの領域を、未踏の深さで一度に撮し出す性能を有するこの望遠鏡は、遠方宇宙の系統的な研究への扉を開いたといっても過言ではない。

我々は、すばる望遠鏡を軸とした遠方銀河団の広視野研究の第一段階として、今年1月に、我々から約50億光年 (赤方偏移 z で0.4) 離れた銀河団の多色撮像観測を

行ない、このような過去の姿の銀河団において、銀河団コアから、周りの遷移領域、さらには一般フィールドに至る、非常に広い領域を見渡すことに成功した。この画像には約2万個もの銀河が写っている (図1)。

これから、銀河団の前景または背景にある多数の無関係な銀河を、銀河の色に基づいてうまく除去することによって、50億光年彼方の銀河団周りの大規模構造をリアルに描き出すことに世界で初めて成功した (図2)。

この構造の特徴は、銀河団の周りに多くの銀河群が存在し、それらが銀河団コアから伸び出すいくつかのフィラメント (1500万光年にも及ぶ) の上に揃って並んでいることである。

これは近年急速に発展した高速並列計算機によってシミュレーションされている理論的な銀河団構造と非常によく似ている。

シミュレーションによると、これらの銀河群は現在までに、フィラメントに沿って銀河団本体に落ち込み同化するものと考えられ、我々は銀河、銀河群が寄せ集まって銀河団が成長して行く過程をまさに目撃していることになる。

一方で、個々の銀河の特性も、このような環境変化によって大きな影響を受けながら進化していく。

我々は、銀河団本体に落ち込む前の、フィラメント構造に沿った銀河群の中で、銀河の色が急速に赤くなることを突き止めた (図2)。これは銀河から銀河団への集合化の過程で、銀河が銀河群クラスに飲み込まれた時点で既に、これまで続いていた星形成活動が急速に抑制されることを示唆している。

この結果は、銀河が銀河団コアに落ちた時に初めて銀河団ガスとの相互作用によって銀河ガスが剥ぎ取られ星形成活動が終わる、とした従来の説を覆す驚きの結果である。

このようにすばるの威力を発揮した研究成果は着実に上がりつつあるが、今後は、様々な進化段階にある遠方銀河団の系統的な広視野観測を行ない、銀河・銀河団が形成されてくる過程を時間軸と空間軸の両方に拡張して見ていくことが非常に重要である。まさに百聞は一見に如かずである。

「すばる」というタイムマシンに乗った過去の銀河宇宙への旅は、まだ始まったばかりである。様々な宇宙の時代に各駅停車しながら、宇宙の歴史を紐解いていく作業は、さながらSFの様でもあり、好奇心が掻き立てられ身の震える思いだ。

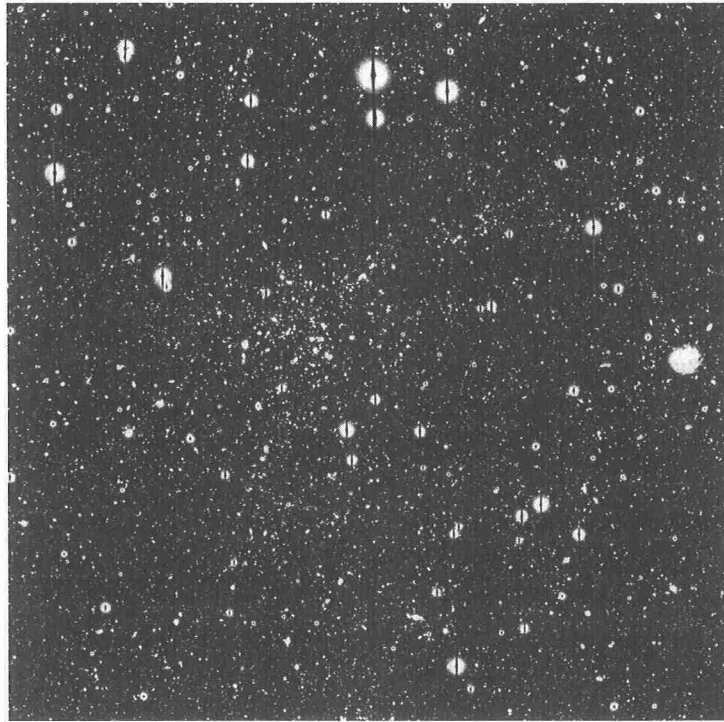


図1 すばる望遠鏡による遠方銀河団 (A851) の画像。上が北、左が東である。一辺は27分角で、銀河団の距離 ($z=0.4$) で 10Mpc (3000万光年) に相当し、約2万個の銀河が写っている。中央から少し左上の銀河の塊が銀河団のコアである。コアから北西や南に伸びる大きな構造を目でも追うことができる。

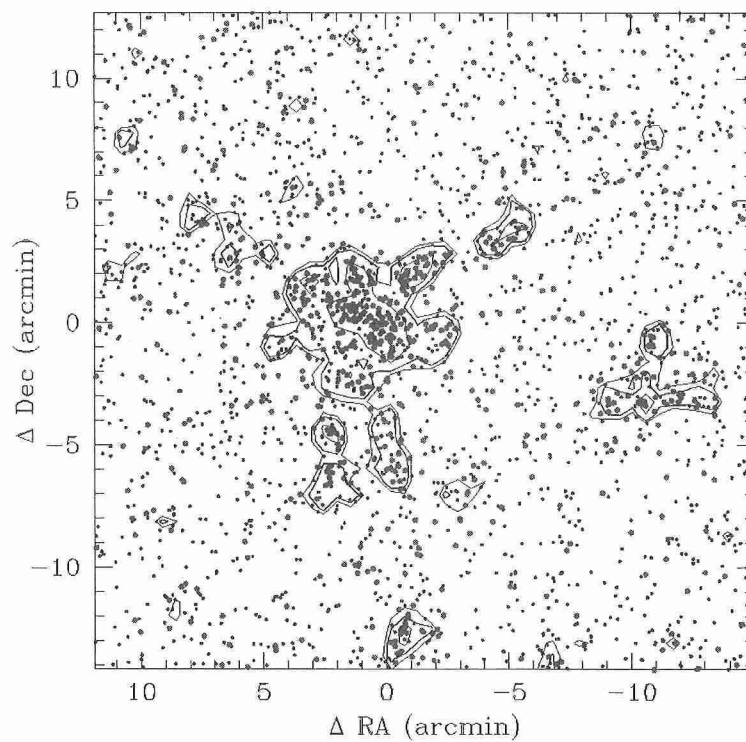


図2 銀河の色による取舍選択により、前景と背景の銀河を大きく排除した後の銀河団地図。大きい点と小さい点は、ある色基準により赤い銀河と青い銀河を区別している。銀河団の周囲に広がる大規模構造がくっきりと浮き上がり、丸いコアから足が四方八方に伸びている様子は、さながら蛸を上から見た様である。等高線は銀河の局所表面密度を示し、真ん中の太いものは、銀河の色 (星形成率) が大きく変わる臨界密度に相当する。コアから遠く離れた銀河群の中で、既に環境効果を受け銀河の特性が大きく変化することを示唆している。

静的な地殻観から動的な地殻観へ

深 畑 幸 俊 (地球惑星科学専攻)

fukahata@eps.s.u-tokyo.ac.jp

地球は巨大な熱機関である。地球形成時の集積熱やその後の放射性物質の壊変によって生じた熱を地球史を通じて地球外へ放出し続けている。地球表層を覆うプレートの相対運動も地球の熱機関としての性質の一つの現れである。

地球は表面から地殻、マントル、核の3つに区分される。核は流体であり対流で熱を運ぶ。マントルは、地震波のような短い時間スケールでは完全な固体(弾性体)として振る舞うが、長い時間スケールでは流体的となり、これまた対流で熱を運ぶ。一方地殻では、温度が低く粘性が極端に大きいので、コアやマントルのような熱対流は生じない。そのため、地殻はマントルを覆う静的な蓋であり、伝導でのみ熱を輸送するものとして通常取り扱われてきた。

しかし、プレートの収束運動が起こっている大陸衝突域(ヒマラヤ等)やプレート沈み込み帯(日本列島等)などの変動帯と呼ばれる地域では活発な地殻変動が生じている。活発な地殻変動は物質の移動を引き起こし、物質の移動は熱の輸送を必然的に伴う(熱伝導方程式の移流項に相当する)。つまり変動帯の地殻では、テクトニクスな力に起因する地殻の変形運動が、熱の輸送を行っている筈である。

上記のような視点から、日本列島を例に標高と熱流量の関係を調べた(図1、図2)。一般に、標高は隆起速度と良い相関を持つと考えられている。なぜなら、隆起速度と侵食速度が釣り合う高さで地形の動的平衡が成り立つが、侵食速度は標高が高い所ほど大きいからである。図2より標高と熱流量は良い相関を示す。これは、隆起運動の活発な標高の高い地域ほど運ばれている熱量が大きいことを意味している。隆起運動とは、地殻深部からの高温物質の輸送過程に他ならない。さらに、隆起速度が標高の一次関数で表されると仮定して、標高プロファイルから期待される熱流量を理論的に計算したものが図の太線である。理論曲線(太線)と観測値(+印)のトレンドは、大まかに良い一致を示す。このように、標高

と熱流量の良い相関が、地殻の変形運動つまり動的な地殻観を採用することで自然に理解できる。

台湾でも同様な現象が観測されている。台湾は、小型の大陸衝突により形成された島で、1999年の集集地震からも分かるように激しい地殻変動が生じている。そして、中央山脈のいくつもの地点から400mW/m²を越す異常に高い熱流量が報告されている。それは、100万年間で約5kmという世界でも一、二を争う非常に速い隆起運動が起こっていることを示唆する。

地球惑星科学専攻統合の2年前(1998年)、筆者(地球惑星物理)が呼びかけ地理学や地質学専攻の人達と、地形形成論セミナーと称して地球表層のテクトニクスを総合的に理解しようという研究会を発足させた。昨年のは台湾に的を絞り、世界の最先端をいく構造発達概念モデルの構築に成功した。次にモデルの定量化をする上で構成物質の力学的応答特性が問題となるが、そこで最も重要なパラメタが温度である。静的な地殻観に立てば温度構造は熱伝導で定まるが、上述のように台湾ではそれは成り立たない。つまり、地殻の変形運動による熱輸送によって地殻の温度構造が変化する一方、その変化した温度構造が今度は地殻の変形運動を規定するのだ。動的な地殻観を持つことは、力学的にどのような変形運動が生じるか考える上でも、本質的に重要なことなのである。

参考文献

1. M. Yamano, Recent heat flow studies in and around Japan, in: M.L. Gupta, M. Yamano (Eds.), Terrestrial Heat Flow and Geothermal energy in Asia, Oxford & IBH Publishing Co., New Delhi, 1995, pp. 173-201.
2. Y. Fukahata and M. Matsu'ura, Correlation between surface heat flow and elevation and its geophysical implication, Geophys. Res. Lett., 28, 2703-2706, 2001.

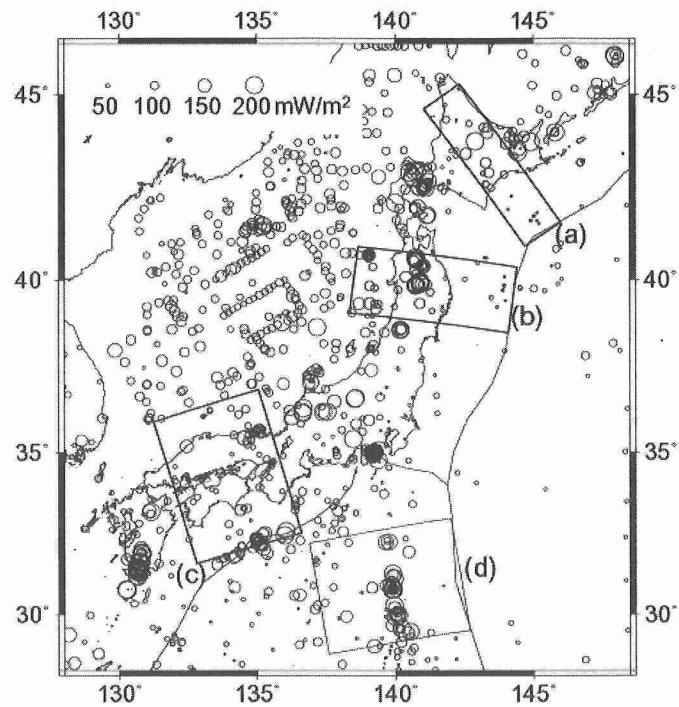


図1 日本周辺の熱流量分布図。熱流量データはYamano(1995)より。

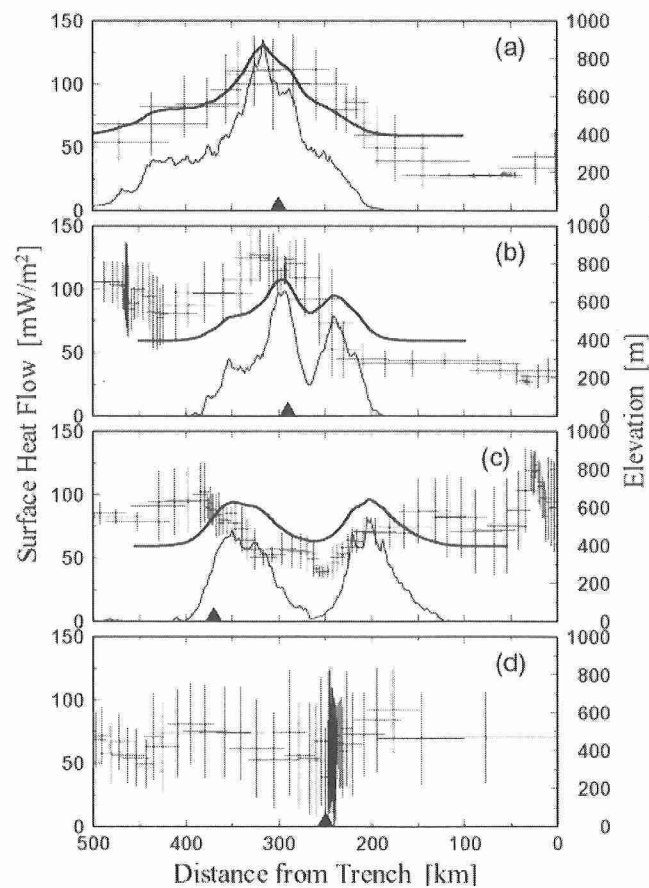


図2 標高と熱流量の関係。+印は熱流量観測値の移動平均、細線は各地域の平均標高プロファイル、太線は標高プロファイルから期待される熱流量。横軸は海溝からの距離。▲は火山フロントの位置。

細胞毒を貯め込む海綿の自己耐性に関わるタンパク質

橘 和 夫 (化学専攻)

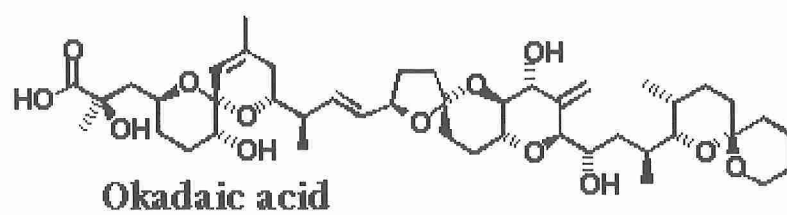
ktachi@chem.s.u-tokyo.ac.jp

付着性海洋無脊椎動物には海綿に代表されるように細胞毒性低分子を高濃度に含むものが多く知られ、我々天然物化学屋にとっては新しい生理活性物質発見のための宝庫となっている。このうちオカダ酸 (OA ; 図) は油壺近辺で採集されたクロイソカイメン (*Halichondria okadae*) より1970年代に単離されたポリエーテル海産毒であるが、その後渦鞭毛藻 *Prorocentrum lima* により生産されこれがイガイなどの二枚貝に移行した結果、下痢性貝毒として知られる食中毒の原因となることが明らかにされている。これより OA はクロイソカイメンの代謝物ではなく、ここに共生する微生物の生産物、あるいは食餌由来の蓄積物であると見なされる。OA の生理活性として知られる細胞毒性、筋収縮作用、下痢原性、および発癌プロモータ活性は全てタンパク質脱リン酸化酵素 (Protein phosphatases; PP) のうち PP1 と PP2A に対する阻害により説明されている。タンパク質リン酸化、脱リン酸化による細胞代謝制御は真核生物に普遍的に存在すると考えられ、これら PP のアミノ酸配列も高く保存されていることより、OA は海綿といえども宿主自身に対しても極めて有毒と考えられる。そこで我々はフグの血清中にフグ毒に親和性を示すタンパク質が存在するという報告をヒントに、海綿細胞内での OA が結合タンパク質 (Okadaic acid binding protein; OABP) と複合体を作ることによって PP への結合が阻害されていると想定した。

まずこの海綿のタンパク質画分にトリチウムで標識した OA を加えたところここに結合活性が見られ、これはアセトン沈殿による内在性 OA の除去により顕著に増大した。この結合活性を指標に分画、精製を行なった結果、2種のタンパク質 OABP1 と OABP2 の単離に至った。このうち前者は部分配列と脱リン酸化酵素活性より PP2A と結論したが、哺乳類の PP2A に比べて親和性が弱く、これが変異による海綿の耐性機構の結果なのか精製過程での変性によるものかは不明である。

一方の OABP2 に関しては部分アミノ酸配列と mRNA 画分より得られた cDNA を用いた RT-PCR、RACE、および増幅された DNA のクローニングによりアミノ酸残基189の配列を決定した。この結果既知のタンパク質いずれにも相同性を示さない新規なタンパク質であったが、この配列によるタンパク質の分子量は OABP2 そのものの質量分析による値と微妙な食い違いを示した。そこでさらに調べた結果 OABP2 は2種のアイソフォーム混合物であることが判明し、プライマーで挟んだ PCR で得たこれら一方の配列に RACE によるもう一方の3'末端配列を繋げてしまったためと分かった。以後、相互分離したタンパク質よりのエドマン分解やタンデム質量分析により、ともに開始コドンに対応するアミノ末端のメチオニンが落ちここがアセチル化された両者の全アミノ酸配列が得られた (杉山ら; 投稿準備中)。遺伝子情報のみからの配列決定が必ずしも信用できないことを感じる一方で、化学屋であることの幸運さを秘かにほくそ笑んでいる。

この OABP2 は混合物として得られた OA との解離定数 (Kd) として0.9 nM という強い親和性を有し、数段階の分離操作を経た後も大部分がまだ OA を抱合している。加えて海綿湿重量当たり13 mg/kg と多量に発現していることから、海綿の自己耐性に何らかの関わりを持っていることは間違いないと思われるが、分子量の違いを考えれば OA の含量 (数 mg/kg) が量論的にまだ上回り、これで耐性機構に決着が付いたわけではない。予備的な細胞分離実験によれば OA の大部分は海綿細胞外に存在するようであるが、OABP2 が細胞内に入ってきた OA を単にマスクしているのか、細胞外への輸送に関与しているのか、調べねばならないことがどんどん増えてくる感がある。今回の発見が海綿などによる共生寄主選択性、さらにその結果としての海底での多細胞生物の棲み分け機構といった一般的な海洋生態化学としての広がりに繋がればと思っている。



p 進ホッジ理論

辻 雄 (数学科)
t-tsuj@ms.u-tokyo.ac.jp

私の専門は p 進数体上の代数多様体の p 進ホッジ理論である。ここで、 p は素数である。素数 p を一つとると、有理数の集合に p 進距離という通常の距離とはことなる距離が考えられる。2つの有理数の差が高い p の冪で割れば割れる程、2つの数は近くなるような距離である。たとえば、 p が3のとき、2と3の距離は1、2と5の距離は1/3、2と11の距離は1/9となる。1, 3, 9, 27, 81, ... という等比数列は3進世界では0に収束し、これらを順に足していくと $1/(1-3) = -1/2$ になる。通常の距離で考えると、有理数のコーシー列は必ずしも有理数には収束しないで、一般に実数に収束する。 p 進距離の場合も同じ問題が生じて、実数のかわりに p 進数を考えることになる。整数論というのは、整数あるいは有理数と関係する対象・問題を研究する分野といえるが、有理数でいきなり考えると難しく、 p を法とした合同式や、 p 進数体、実数体の場合にまず詳しく調べて、次にその結果を使って有理数に関するもとの問題を考えることが多い。

p 進ホッジ理論は、実多様体に対するある基本的な理論を、実数体を p 進体におきかえて類似を考えようとするものである。ここで実多様体とは、曲線とか曲面を高次元に一般化したものである。多様体（他の数学的な対象でもいい）を研究するとき、多様体そのものを考えるかわりに、多様体に附随するいろいろな量（不変量）を定義して、その不変量からどのくらいもとの多様体のことが分かるかを調べたり、異なる不変量があった場合それらがどういう関係にあるかを調べたりすることが多い。量というと数字を連想するかも知れないが、別に数字である必要はなくて、特にそれが可換群であるものとして、ホモロジー群、コホモロジー群とよばれるものがある。さて、 p 進ホッジ理論のモデルとなった理論は、サイクルを使って幾何的・位相的に定義される特異ホモロジー群と微分形式を使って解析的に定義されるド・ラム・コホモロジー群を、微分形式をサイクル上で積分するという手法で比較する理論である。この積分値は多様体の周期とよばれ、多様体を研究する上で基本的な不変

量で、実際、この周期でもとの多様体が決まってしまう例も多くある。またこの量は数論とも関係が深く、有理数体上の代数多様体から誘導される実多様体の場合、もとの代数多様体に伴う L 関数という1変数解析関数（これも一種の不変量である）の critical と呼ばれる整数点での値は、有理数倍のずれを無視すれば、この周期を使って表すことができると予想されている。有理数体、あるいは p 進数体上の代数多様体の場合、特異コホモロジー群の類似はエタール・コホモロジー群と呼ばれ、有理数体あるいは p 進数体の絶対ガロア群が自然に作用する数論的な不変量である。代数的な微分形式を考えてド・ラム・コホモロジー群も定義され、 p 進体上の場合フロベニウス作用素を持つ。

'80年代の終わり頃には、多様体が半安定還元を持ち、かつ多様体の次元が素数 p にくらべて大きいという場合のみを残して上記のコホモロジーを比較する問題は解決していた。京大数理研の助手になってから1年後の'94年の春、筆者は幸運にもこの最後の残されたケースを p が2でない場合に解決することに成功した。最初に書いた論文は証明を略したところが多く、その後詳しい証明を書き加えるという形でくり返し書き直されて、 $p=2$ の場合の証明も加えて最終的に雑誌に出版されたのは、5年後の'99年であった。その後局所的な視点からエタール層と微分形式の関係を調べる研究をしていたが、2年程前からは応用に重点を移し、 L 関数の整数点での値について、特に虚2次体に伴う L 関数の場合に p 進ホッジ理論的視点から研究している。

エタール・コホモロジー群は代数体のイデアル類群、楕円曲線の有理点といった数論的に興味深い対象と結びつきやすい。一方、微分形式は L 関数、保型形式といった解析の対象に近く、また具体的な計算がしやすいことが多い。従って、今後数論への多くの応用が期待されるが、理論がかなり難解である上に文献が乏しいということもあって、知られている応用は残念ながらまだあまり多くない。