

鞭毛のオシレーションのメカニズム

真行寺 千佳子 (生物科学専攻)

chikako@biol.s.u-tokyo.ac.jp

「鞭毛」とは、原核生物と真核生物が持つ器官に付けられている名称であるが、両者は構成蛋白質も運動の仕組みも全く違っている。私が扱っているのは、真核生物、中でもウニの精子の鞭毛である。精子は円錐状の頭部と頭部の付け根から出ている鞭(むち)のような鞭毛とからなる。S字の屈曲波が規則的に鞭毛の付け根で作られ鞭毛にそって伝わっていく結果、精子は頭部を先頭にして遊泳できる(図1 a)。鞭毛運動が、「むち」の動きと大きく違う点は、鞭毛ではどの場所でも能動的屈曲を作る能力を持っていて、屈曲がほとんど減衰しない点である。私は、この屈曲の形成と伝播の周期的振動現象(オシレーション)がどのようなメカニズムで起こるのか、について研究を続けているが、最近面白い現象を発見したのでご紹介したい。

鞭毛の周期的屈曲形成の原動力となっているのは、「滑り運動」である。鞭毛は、膜の内側に直径約 $0.2\mu\text{m}$ の軸糸と呼ばれる構造を持っていて、この軸糸は、9本の8の字型の微小管(ダブルレット微小管)とその中心に位置する2本のシングルレット微小管(中心小管)から構成されている(「9+2」構造と呼ぶ)。ダブルレット微小管からは隣のダブルレットに向かって2列のダイニンの腕(内腕と外腕)がほぼ 24nm おきに並んで出ている(図1 b)。ダイニンは、モーター蛋白質の1つで、ATPase活性を持ち、化学エネルギーを力学エネルギーに変換することによって、隣のダブルレット微小管を鞭毛の付け根から先端方向に向かって押し上げるように滑らせる。9本のダブルレットのダイニンはすべて同じ方向への滑りを起こさせる能力を持っている。したがって、もしすべてのダイニンが同時に活性をもって滑りを起こすと、鞭毛は決して曲がることはできない。鞭毛が周期的屈曲形成をするには、滑りの量が鞭毛にそって、また、9本のダブルレット間で時間的空間的に制御されていなければならないことになる。

この制御機構を探ろうというのが私の研究テーマの一つである。詳しい説明は省略するが、最近の実験から、この滑りの量の制御には、中心小管が直接関わっているらしいことがわかってきた。図1 cのように、2つに別れるように軸糸を滑らせることができるが、この滑りのあと露出したダイニンの列に外から微小管を与えて滑りを解析すると、中心小管の存在により滑りやすさと滑り速度が変化する。また、面白いことにこの2つに別れたダブルレットの束は実験中そのままの形を保つ。つまり、ダブルレットの束の内部のダイニンは、滑りを起こす能力を持っているはずであるが、滑らないようにコントロールされているらしい。この結果から、中心小管は、滑りを

起こすダイニンを決めると同時に、その滑りの量を制御しているのではないかと推測される。

ところで、鞭毛の屈曲波はなぜ振動するのであろう？これは、中心小管などの様々な軸糸構成蛋白質がダイニンの活性を巧みに制御する結果なのだろうか？それとも、ダイニンそのものにオシレーションの特性があるのだろうか？この疑問の解明を目指して、ダイニン1分子の力学特性の解析、つまりダイニン1分子が出す力を測ることを試みた。図1 cで用いた実験系を応用して、軸糸からダブルレット微小管を1本1本になるように滑らせ、ダブルレット上に露出したダイニンの列に、微小管を相互作用させる。微小管には直径 $1\mu\text{m}$ のラテックスビーズを特別な手法で付着させ、このビーズを使ってダイニンの力をレーザートラップ(optical trap)法を用いて測定した(図2 a)。レーザートラップ法というのは「光のバネ」を使って物を捕える方法である。この方法とnm計測の技術を組み合わせると、pNという微小な力、nmという微小な変位を、msの時間分解能で測定できる。ところでこの実験系では、ダブルレットは図2 bのように様々な方向を向きうるので、ダイニンのうちの内腕か外腕かのいずれか一方が微小管と相互作用できる場合が多いと予想される。微小管の直径は 25nm 、ダイニンの間隔は約 24nm であるので、微小管をダイニンの列と直角に近い状態で作用させた場合、微小管と相互作用できるダイニンの数は1個かせいぜい2個であろうと予想される。これらのことを考慮して測定した力の値を検討した結果、ダイニン1分子は約 6pN の力を出すことがわかった。さらに、この測定中に、多くのデータで力と変位の振動が見られた(図2 c)。振動の周波数はATP濃度に依存していて、 0.7mM では約 70Hz であった。この周波数は、ウニ精子鞭毛の振動の最高の周波数とよく一致する。この一致は、偶然かもしれないが、この結果は、鞭毛のオシレーションの基本が、少なくともダイニン1分子にあるらしいことを示唆している。ダイニンのオシレーションがどのような制御を経て鞭毛のオシレーションに至るのか、その解明は今後の大きな課題である。

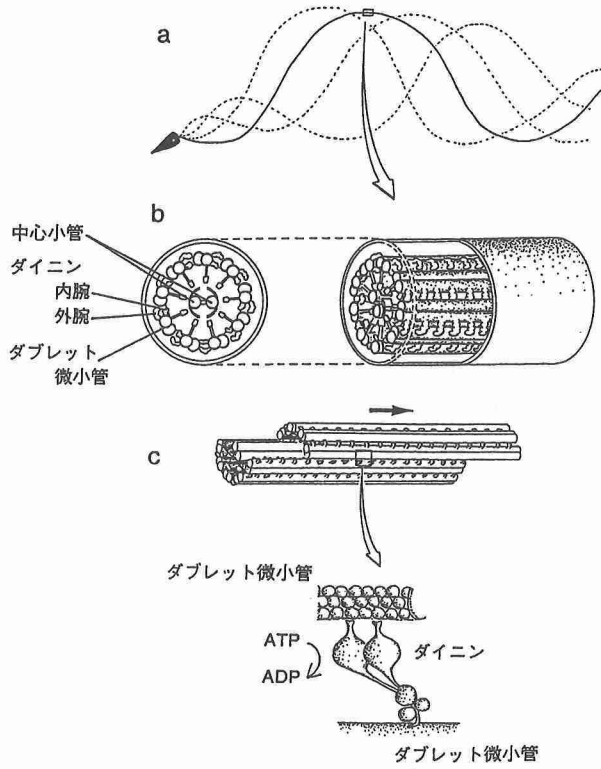
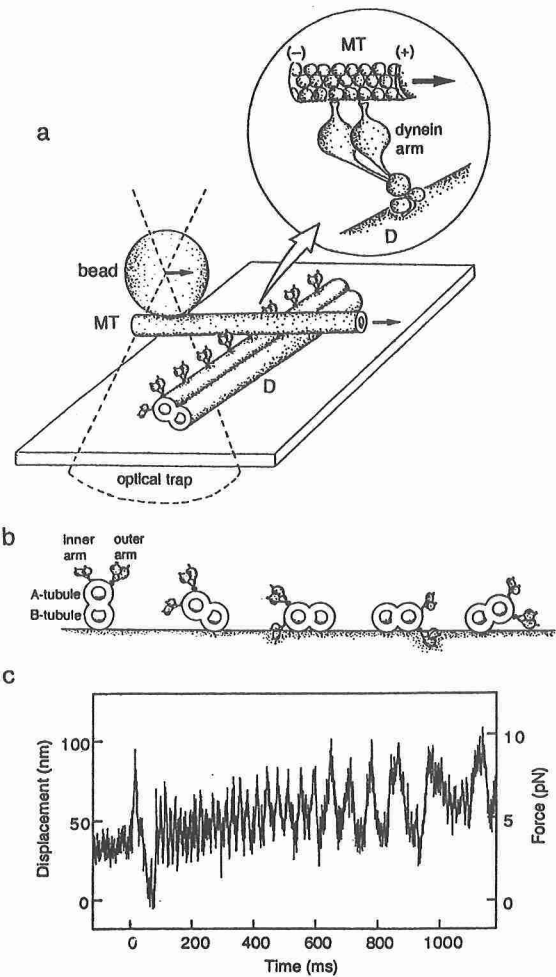


図1 a、ウニ精子の鞭毛運動の模式図。規則的な屈曲波が作られ鞭毛先端へ伝わる。b、鞭毛の「9+2」構造の模式図。c、鞭毛運動の基礎となるダブルット微小管間の滑りは、ダイニンにより引き起こされる。

図2 ダイニン分子の力の振動。a、ダイニン1分子の力測定法の模式図。MT、微小管。D、ダブルット。b、a図において予想されるダイニンの向き。c、力と変位の振動の記録の例。
(Shingyoji, *et al.*, Nature, 393: 711-714, 1998. 参照)



鳥類と哺乳類の生殖腺の分化

赤染 康久 (生物科学専攻)
zome@biol.s.u-tokyo.ac.jp

ヒトを含めた多くの脊椎動物には明らかな性的二形が存在し、オスは精子をメスは卵子を産生し両者が合体することで次代を得る。精子は精巣で、卵子は卵巣で作られるのだから、精巣を持っているのがオスで卵巣を持っているのがメスだということが出来る。また、生殖腺は生殖器官であると同時に内分泌器官でもあり、そこから分泌される性ホルモンによって全身に性徴を発現させている。哺乳類以外の脊椎動物では、生殖腺が性分化する以前に性ホルモン処理することによって様々な程度に性転換を起こさせることが出来る。ただしより“高等”といわれる動物ほど性転換は起こりにくくなっており、有羊膜類ではニワトリでの実験報告が比較的最近なされた程度である。これは芳香化酵素という雄性ホルモンを前駆物質として、これを発情ホルモン（雌性ホルモン）に変換する酵素に対する阻害剤を投与するもので、遺伝的にはメスになる個体に精巣を出現させ、精子形成も認められたという(Elbrecht と Smith, 1992)。この事実は卵巣形成における発情ホルモンの重要性を示すものである。筆者らはこれまでにニワトリ胚の卵巣では、精巣よりも早くから黄体形成ホルモン（脳下垂体から分泌される生殖腺刺激ホルモンのひとつ）受容体遺伝子が発現されることを見出してきた。これは胚発生時、卵巣のほうが精巣よりも活発に性ホルモンである発情ホルモンを分泌するという事実と合致する（あくまでも鳥類の場合）。ニワトリの胚は薬剤処理が容易なこともあって、前述の方法で性転換させた胚の生殖腺を用いて生殖腺刺激ホルモンに対する応答性の性差の解析も行ってきたが、その結果黄体形成ホルモン受容体の発現も発情ホルモンの影響下にあることが明らかになった。こうなると、それでは最初に発情ホルモン合成の引金となる因子は何であるかが問題となる。最新の報告では芳香化酵素の発現それ自体が、発情ホルモンによって（間接的にせよ）促進されるという。ひとたび発情ホルモンの合成が始まると自律的にも、また脳下垂体からの刺激に対しても反応性を増して発情ホルモン合成能が上がることになる。しかし合成開始の引金については依然として謎である。

さて、哺乳類ではどうであろうか。哺乳類では性ホルモン処理による性転換は不可能であるとされている。性ホルモン処理は妊娠に対する影響が大きいので実験として難しいのだが、発情ホルモン受容体遺伝子を破壊したマウスでも、ある程度異常があるものの卵巣が形成される。実は発情ホルモンに対する受容体は一種類ではないことが判明しているのだから、ここから直ちに発情ホルモンは卵巣への分化に不要であるとは言えないのだが、胚の卵巣における発情ホルモン合成能は極めて低く、生殖腺

の卵巣への分化に対する性ホルモンの寄与を示唆する証拠はない。しかしながら、ステロイドホルモンが全く卵巣の初期発生に関係がないかということ、そうではない。性ホルモンを含むステロイド合成はチトクローム P450 系の諸酵素をはじめとする多数の酵素によって触媒される複雑な経路をたどる。このチトクローム P450 系の諸酵素に対する調節因子として Ad4BP/SF-1 (adrenal gland 4binding protein / steroidogenic factor 1) が、諸橋らと Lala ら (1992) によって独立に単離された。この遺伝子を破壊すると生殖腺と副腎が全く形成されない。そして Ad4BP/SF-1 自身、25、26 または 27 位の炭素原子に水酸基をもつコレステロールによってその転写活性が活性化される核内受容体の一種であることがわかった (Lala ら, 1997)。いずれも生殖腺の発生におけるステロイド（性ホルモンではないにしても）やその前駆物質の重要性を示すものである。

生殖腺の発生のメカニズムはまだ謎に包まれている。関係する遺伝子に関する知見は性分化異常に対する診療の蓄積から、ヒトから得られるケースが多い。しかし胚に対する実験的操作は哺乳類以外を材料とした場合の方が容易なことが多い。哺乳類と鳥類では性分化の機構は異なっていると思われるが、それぞれの研究の成果は互いに脊椎動物の性分化に対する理解を深めることに寄与すると思われる。

参考書

「生殖細胞の発生と性分化」蛋白質核酸酵素 (1998) 3月号増刊



火星のリングを求めて： 火星探査機「のぞみ」に搭載されたダスト計測器

佐々木 晶 (地質学専攻)
sho@geol.s.u-tokyo.ac.jp

宇宙科学研究所は1998年7月4日に火星探査機「のぞみ」(旧 PLANET-B) を打ち上げた。これは、火星の上層大気、周囲のプラズマ環境、磁場を調べることを主目的とした探査機である。「のぞみ」には、火星のダストリングを発見する目的で、ダスト計測器 Mars Dust Counter(MDC) が搭載されている。火星の衛星フォボス、ダイモスは半径10kmほどの小天体で、脱出速度は10 m/s 程度である。衛星表面への微小隕石の衝突で生成されるダストは比較的容易に放出される。このダストが衛星の軌道に沿ってリングかトーラスを形成する可能性がある(図)。

我々(東大・水産大・宇宙科学研究所のグループ)は、ドイツのグループと共同でMDCの開発・試験に携わっ

てきた。MDCではダストの高速衝突で発生したプラズマの計測から、速度・質量の情報を得る。「のぞみ」打ち上げの後、MDCは7月10日より地球周囲でのダストの計測を開始した。宇宙空間には、主として彗星や小惑星起源のダストの他に、太陽系外からの星間ダストの存在も確認されている。火星到着までに、これらのダストの分布を調べることもMDCの大きな目的である。すでに10月までの間、MDCは20個以上の確実なダストの衝突を確認している。1999年10月より、「のぞみ」は火星周囲での観測を開始する予定である。ダスト計測器MDCは、火星周囲でのダストの量・分布を計測して、理論的な予測を検証する。

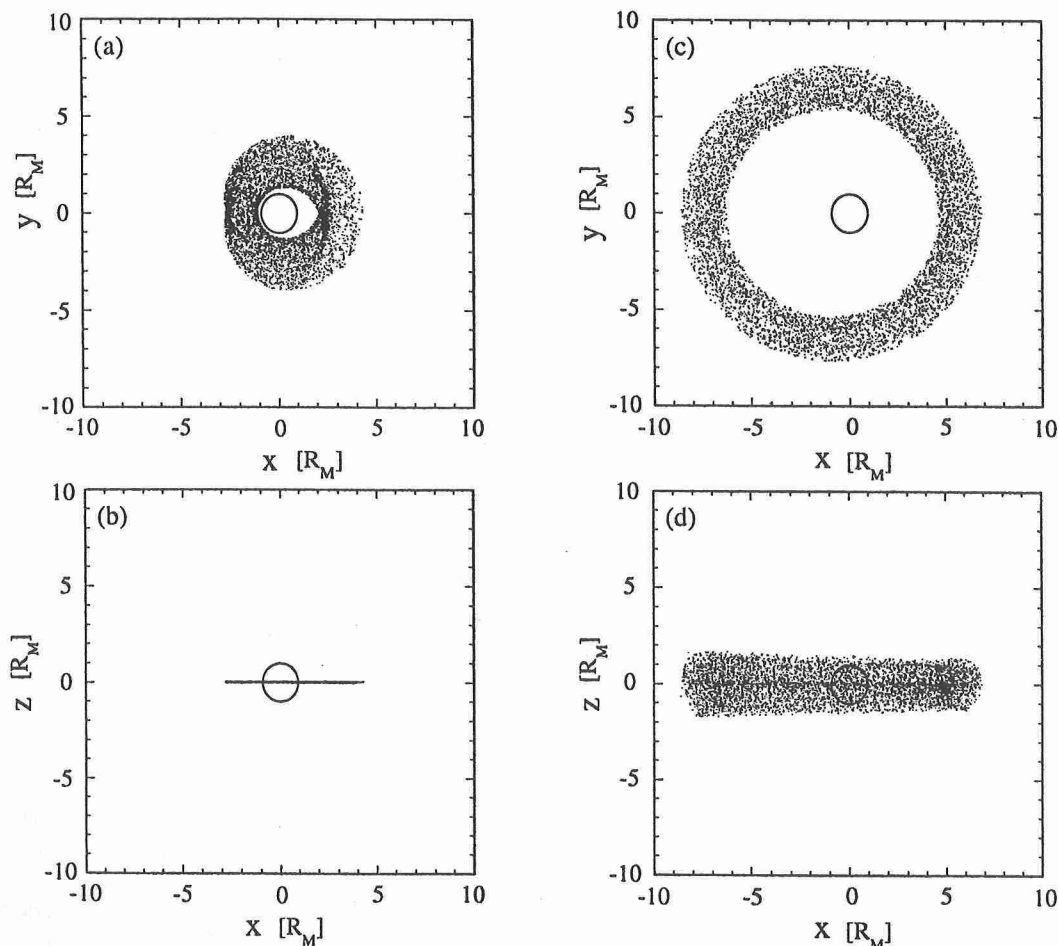


図 火星の周囲で、フォボス、ダイモスから放出された半径40ミクロンの粒子の分布。(a)フォボスからの粒子の火星赤道面上の分布。(b)フォボスからの粒子の鉛直分布。(c)ダイモスからの粒子の火星赤道面上の分布。(d)ダイモスからの粒子の鉛直分布。中心の○は火星の大きさ。フォボスからの粒子は薄いリングを、ダイモスからの粒子は広がったトーラスを形成すると予想されている。

火星隕石中の衝撃ガラス化斜長石の加熱実験と 月・火星隕石中にみられる衝撃変成斜長石の鉱物学的特徴

三河内 岳 (鉱物学専攻)
mikouchi@min.s.u-tokyo.ac.jp

火星隕石の多くは、非常に強い衝撃変成作用を受けており、ショックメルト脈やガラス化した斜長石（マスケリナイト）が存在する。マスケリナイトは斜長石が衝撃による固相→固相の反応によりガラス化したもの（Diaplectic glass）と考えられているが、最近 El Goresy ら（1997）は、斜長石が一度溶融した後に高压下で急冷して形成されたガラス（Melt glass）だと主張している。このことを確かめるために、玄武岩質の火星隕石である Zagami を酸素分圧制御電気炉で加熱し、マスケリナイトの変化の様子を観察した。試料の加熱は、900°C一定で、酸素分圧が $\log f_{O_2} = IW + 2$ の下、 $1 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 24 \cdot 72$ 時間行なった。その結果、1時間加熱の試料では、特に大きな変化が見られず、マスケリナイトは光学的にほぼ非晶質のままだったが、4・8時間加熱のマスケリナイトでは、元々のグレインのエッジの部分から再結晶が始まっていた。これらのグレインでは、中心部にまだ非晶質の部分が残ったままであった。24・72時間加熱のマスケリナイトでは、非晶質の部分は残っておらず、完全に再結晶していた。いずれの試料でも、再結晶した部分は細粒状の斜長石ドメインからなっており、偏光顕微鏡で観察すると、それぞれのドメインの光学軸は、お互いにばらばらの方向を向いていた。また、4・8時間加熱の試料で、マスケリナイトの中心部に残っていた非晶質の部分は、著しくKに富んでいることが分かった。この実験から、Zagami 隕石中のマスケリナイトは、加熱によって容易に再結晶することが分かったが、Zagami 中のマスケリナイトは、衝撃によるディスオー

ダーの度合が大きく、そのため再結晶した斜長石は元のグレインの光学軸を再現できなかったものと考えられる。このことは、Zagami のマスケリナイトは、Diaplectic glass ではなく、Melt glass であることを示唆しているものと思われる。

月隕石の多くも強い衝撃変成作用を受けていることが知られている。ほとんどの月隕石は角レキ岩であるが、やまと793169とあすか881757の2隕石は完晶質の玄武岩である。やまと793169中の斜長石は、元々のグレインの外形を残しているが、その内部は細粒状の斜長石ドメインからなっている。この組織は、加熱したZagami 隕石のマスケリナイトに非常によく似ているが、偏光顕微鏡による観察では、それぞれの細粒状のドメインの光学軸はかなりそろっており、全体的には元のグレインの光学軸を保持している。おそらく、やまと793169中の細粒状の斜長石は Melt glass からではなく、Diaplectic glass から再結晶したためだと推測される。あすか881757の斜長石は、完全に非晶質であり、鉱物学的特徴は火星隕石中のマスケリナイトに酷似している。しかし、これらの斜長石ガラスは、溶融皮膜に接しているところでは再結晶している。このような特徴は、火星隕石中のマスケリナイトには見られないものであり、あすか881757中のマスケリナイトは、火星隕石中のマスケリナイトよりもディスオーダーの度合がおそらく小さいためだと考えられる。これらの結果は、月隕石の衝撃の度合が火星隕石のものよりも弱かったことに対応している。



チベット高原北東縁の活断層調査

池田 安隆 (地理学専攻)

ikededa@geogr.s.u-tokyo.ac.jp

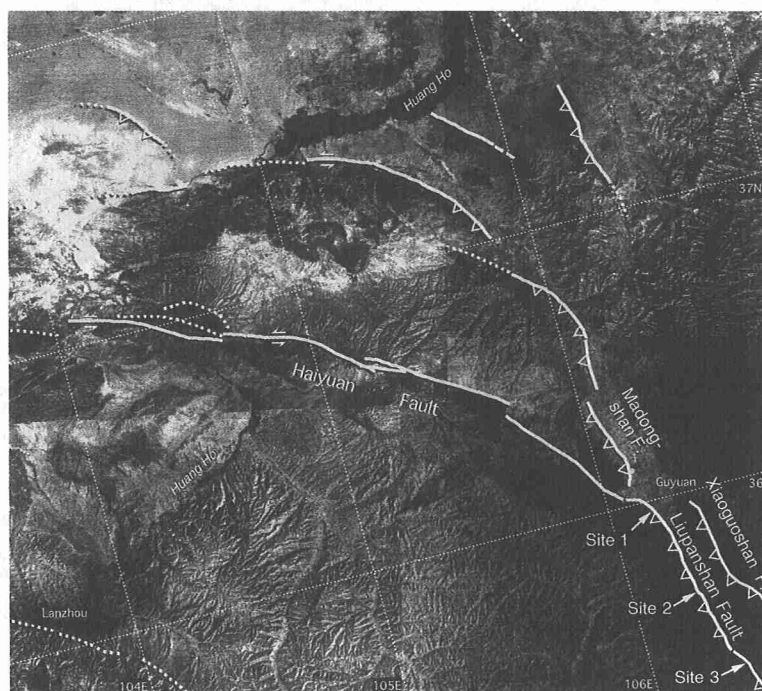
ヒマラヤ・チベット山塊は地球上で最も大きな山脈であり、現在もまだ成長しつつある。この巨大な山脈の成長の歴史とそのメカニズムを解明することは、地球科学の第一級の課題である。ヒマラヤ・チベット山塊に魅了された多くの研究者がこの巨大な山塊に挑んだが、いまだに多くの謎が残されている。

北上するインド大陸の地殻は、4500万年前にアジア大陸と衝突した。これ以後、二つの大陸地殻は50mm/年位の速度で南北に短縮し、その結果集積した地殻物質がヒマラヤ・チベット山塊をつくりあげた。現在のヒマラヤ・チベット山塊は高度が極めてよくそろっており(5~5.5 km)、断面系はほぼ台形に近い。大きな山脈が存在すると、重力によって地殻内部にはほぼ山脈の高度に比例した大きさの差応力が生じる。この差応力が地殻物質の強度を超えると地殻は塑性変形を始めるために、山塊の高さは増加し得なくなる。ヒマラヤ・チベット山塊の高さは地殻の強度に規制されて現在既に頭打ちになっている可能性が高い。上方への成長が頭打ちになった山脈では、プレート収束運動が止まらない限り、山体の幅の増加が起こるであろう。ヒマラヤ・チベット山塊の南縁では、中新世の初め頃(約2000万年前)から山体の幅が拡大してきたことを示す証拠がある。山体の幅の拡大は、チベット高原の北縁でも起こっているらしいが、その詳細はよ

く分かっていない。

昨年秋に中国国家地震局地質研究所との共同研究により、チベット高原北東縁の活断層を調査する機会を得た。この調査には日本側から大学院博士課程に在籍する何宏林君と私が、中国側から向宏発・魏順民・張晚霞・張乘良の4氏が参加した。蘭州(Lanzhou)の東約200kmにある固源(Guyuan)という町に滞在し、主として海原(Haiyuan)断層とその東南延長の六盤山(Liupanshan)断層を調査した(図参照)。中国側研究者の調査目的はこの地域の断層から発生する地震の危険度評価にあったが、我々は上述の問題を確かめる絶好の機会と考えていた。

今回の調査でわかった重要なことは、この地域に断層や褶曲運動が始まった時代がきわめて新しい(数百万年前以降)ということである。チベット高原北東麓には、湖沼や大河川の氾濫原の環境で堆積した白亜紀から新第三紀の地層がきわめて広範囲に分布している。これらの地層には、堆積中に変形を受けた証拠がまったく認められない。したがって、少なくとも白亜紀から数百万年前まで、この地域は無変形な安定大陸であったに違いない。インドとユーラシアの衝突開始から遅れること4000万年程にして、そこに突如として褶曲や断層運動が始まったことになる。



チベット高原北東麓の Landsat モザイク映像。実線は主な活断層(歯形の付いている線は逆断層を、付いていない線は横ずれ断層を示す)。

絶滅危惧種の復元

下園文雄 (附属植物園)

ikusei2@ns.bg.s.u-tokyo.ac.jp

日本の自然は多様で豊かである。しかし、近年の人間生活における多様化は、自然環境に多大な影響をもたらし、これまで身近で見られた植物たちの多くが姿を消しつつある。植物版レッドリスト（環境庁1998）では、日本の野生植物（維管束植物）5300種のうち、絶滅の危機に瀕している絶滅危惧Ⅰ類が881種、すでに自生地から絶滅した種が29種報告されている。また、日本版レッドデータブック（日本自然保護協会1989）では、里山の植物や沼沢地、日本南部の島々地区の植物が危機的状況にあるとする。野生植物は貴重な遺伝子資源であり、多様な自然の構成種である。このまま放置すれば、第2、第3の植物種がこの世から姿を消すこととなり、植生の単純化や国家的資源の損失を意味し、絶滅した種については、現在の科学では蘇らせることはできない。絶滅寸前まで追い込まれ、自己回復の望めなくなった種について、自生地の植生を回復させるには、人工的な手助けを行うことが必要となっている。

附属植物園では、1983年から小笠原諸島に於ける絶滅寸前となった固有植物のムニンノボタンやムニンツツジ、ホシツルランなど9種について、環境庁と東京都から研

究補助を受け、自生地の回復と絶滅危惧種の植生を回復させるためのマニュアル作りを行ってきた。自生地の植生回復方法としては、自生地に於ける種子の播種育成方法と人工施設に於ける育成株の自生地移植方法とがある。種によって異なるが、極端に株数の減少した種では、前者はあまり効率的な方法ではない。後者の場合、植物園は野生植物を増殖させるための施設と技術があることから大量増殖が可能で有効な手段である。

育苗した苗を自生地に植え戻すには、基本的ないくつかのマニュアルがあるが、ここでは省略する。これまで小笠原諸島に復元植栽した、ムニンノボタンやムニンツツジについては、順調な成育が見られ、開花結実するまでになった。しかし、人工的には種子発芽は可能であるが、自生地ではこれまで自然発芽は確認されていなかった。自然条件下で種子が散布され、発芽成育する世代の交代（生活環）が完結しないと復元に成功したことにはならない。それがムニンノボタンでは、今年、自生地において多くの自然発芽が確認されている。その後の調査から、昨年のエルニーニョによる気象条件が、この植物の世代交代に関係していることが明らかになりつつある。



ムニンノボタンの自生地復元植栽株

分子の振動エネルギーはどのように流れるか

岡本 裕 巳 (附属スペクトル化学研究センター)
aho@music.email.ne.jp

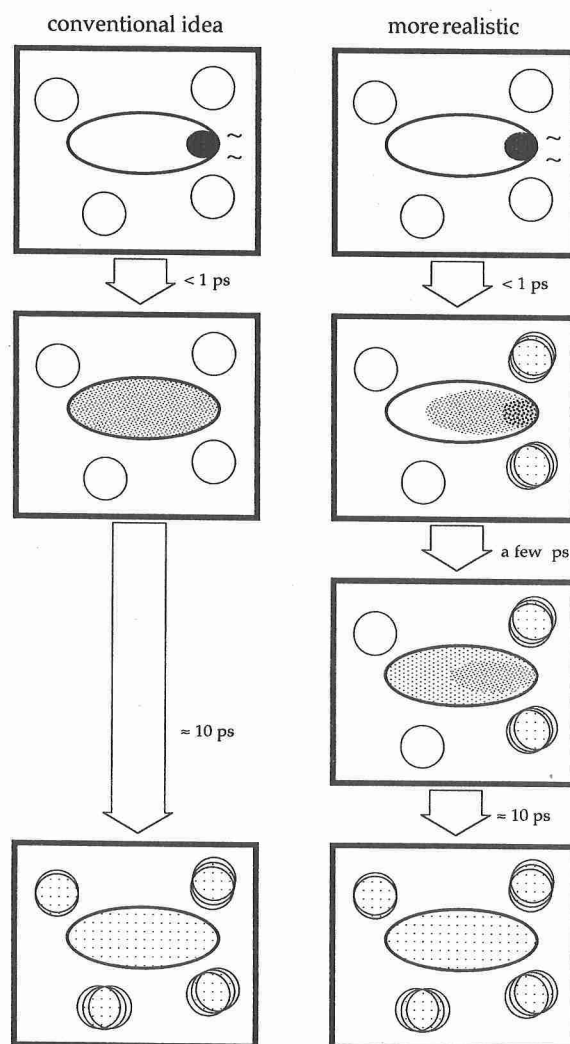
水は高い所から低い所へ流れていく。エネルギーもその点は同じである。少数の自由度にエネルギーが局在した状態は長く続かず、多数の自由度に均等にエネルギーが分配された状態へと移行しようとする。分子にエネルギーを与えると、一般には分子内の原子の振動運動が励起された状態になる。特に光によって分子を励起すると、分子の特定の部位（正確には振動モード）にエネルギーが局在した状態が生成するが、上に述べた原則に従って、時間が経つとエネルギーは系全体に均等に分配されていく。この過程において、特別な振動運動の座標に沿った大きな変位によって分子構造の変化が起こると、我々はこのことを「化学反応」として認識するのである。

溶液中の多原子分子において、このような振動エネルギーの分配の過程（振動緩和過程）は、通常100ps以下の短い時間領域で起こる。振動緩和の研究には四半世紀の歴史があるが、数年前まで以下のような経験則が広い範囲で成立すると考えられてきた。即ち、分子内の特定の振動モードを励起すると、そのエネルギーはまず分子内で素早く分配し、概ね1ps以内に分子内で平衡状態になる。溶液中では周囲に溶媒があり、分子の振動エネルギーは溶媒に移っていくが、これには数ピコ秒～数十ピコ秒の時間を要する。例えば物理学辞典（培風館）の「振動緩和」の項はほぼこれに沿った解説がなされているし、現在の化学反応の理論の多くがこれを基礎に組み立てられている。ところがここ数年、このような経験則が現実に合わない場合が存外多いことが、次第に明らかになってきた。分子内でエネルギーが分配して平衡状態になる過程が、数ピコ秒の時間をかけて比較的ゆっくりと進む場合が色々な系で見つかったのである。

我々は、ピコ秒アンチストークスラマン散乱を用いて *trans*-スチルベン ($C_6H_5-CH=CH-C_6H_5$) の振動緩和過程を詳しく調べた。アンチストークスラマン散乱法は、分子の振動励起状態を選択的に検出できる振動分光法である。我々はこれを用いて励起分子の振動量子数を調べる手法を新たに開発し、特定の振動モードを量子数3程度まで高く励起した後の、振動状態の時間変化を観測した。その結果次のようなことがわかってきた。
(1) 励起後数ピコ秒（5 ps 前後）にわたって、分子内でエネルギーが非平衡な状態にある。
(2) 励起後極めて早く（恐らくピコ秒以下）、励起した振動モードの量子数は0（大部分）か1（概ね1割以下）まで緩和する。
(3) 励起後10ps前後の時間をかけて、エネルギーが分子から溶媒に移る過程が見られる。これは上述の経験則に反する例となっているだけでなく、振動緩和の初期の過程について踏み込んだ議論を可能にする。このような挙

動を合理的に説明するには、励起した振動モードから他の特定の振動モードへの効率よいエネルギーの流れのチャンネルが存在するか、量子数の高い（＝振動の振幅が大きい）場合に限って極めて速く（ピコ秒以下）溶媒にエネルギーが流れるような過程が存在するか、いずれかであると現在考えている。

我々を含めた最近の研究でわかってきたことは、分子振動のエネルギーの流れは前述の経験則で語られるような単純なものではなく、分子内と分子間の緩和が絡み合った複雑な過程だということである。これを契機に最近、理論研究家の間で新たな反理論、分子統計力学等の展開への動きも出てきている。



分子振動エネルギーの流れの模式図。中央の楕円が励起される分子を、周囲の円は溶媒分子を表す。また色の濃い部分は振動エネルギーが高いことを表す。(左) 従来の単純な考え方、(右) スチルベンに対する研究でわかってきた、より現実に近いと思われる情況。

銀河団の銀河はいつ生まれたか

有本 信雄 (天文学教育研究センター)
arimoto@mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

銀河団とは文字どおりの銀河の集団である。一般に五十個以上の銀河が集まっているものを銀河団という。我々の銀河系の近くにある代表的な銀河団としては、乙女座銀河団(2500銀河)や髪座銀河団(5000銀河)などがあげられる。

天文学においては、天体の距離を決めるのが難しいが、銀河団の場合にはどの銀河もすべて同じ距離にある。そのおかげで話が簡単になる。つまり、ひとつの銀河団の中には当然さまざまな銀河があり、その絶対等級も異なるが、みかけの明るさの違いがそのまま絶対等級の違いをあらわしている。本当は暗いのに、たまたま近くにあるために明るく見える、ということは銀河団の場合には心配する必要がない。したがって、銀河団にある銀河の明るさや色の違いを調べれば、銀河の性質や進化の様子を調べることができるのである。これはちょうど、星の進化の研究が星団の星の性質を調べることで飛躍的に進んだのと良く似た状況にあたる。つまり、銀河団は「銀河進化の実験室」なのである。

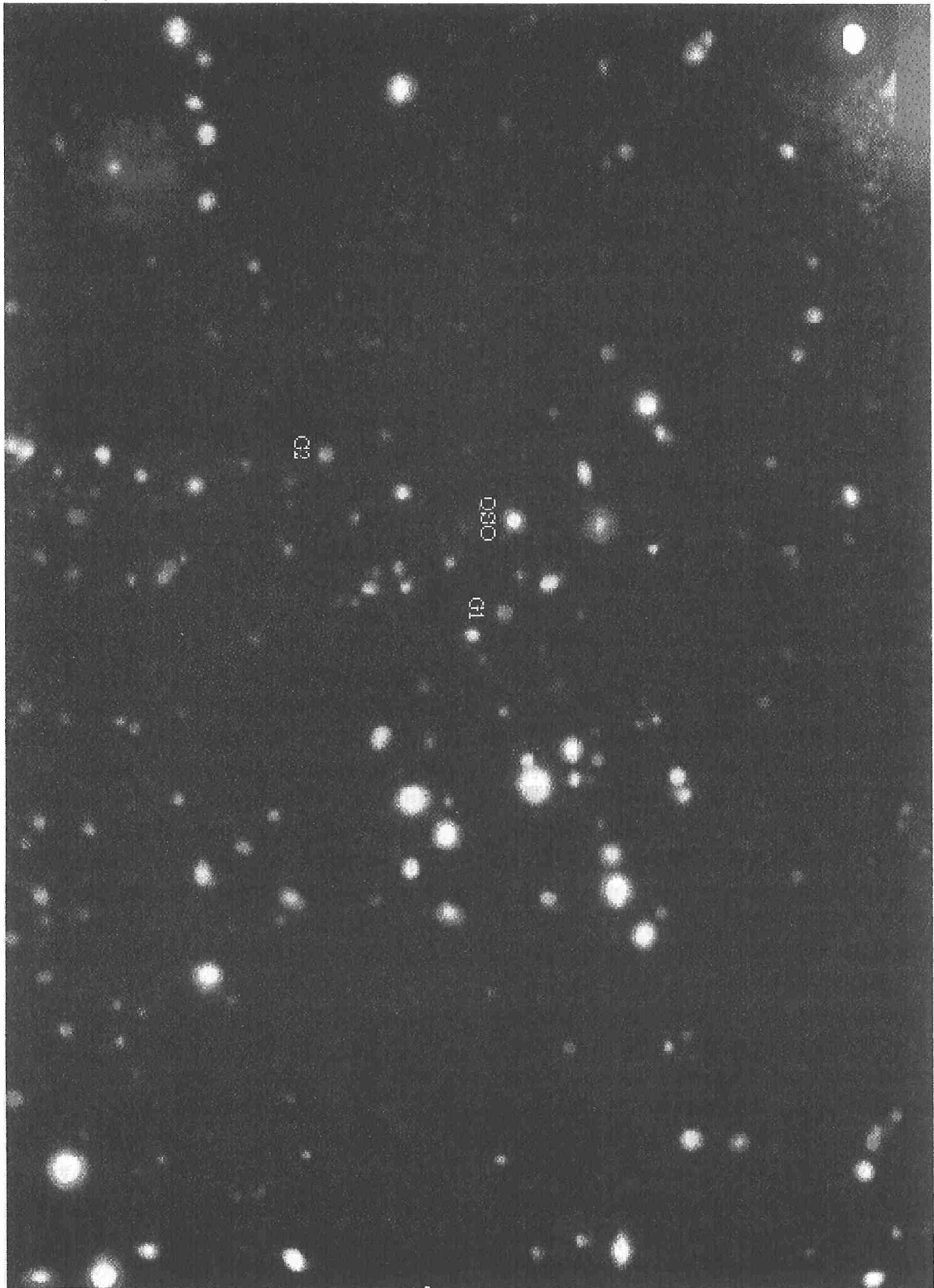
銀河にはさまざまな形態があり、ほとんど星ばかりでできている楕円銀河や、あざやかな渦巻きのみられる渦状銀河、あるいはアメーバのような形状の不規則銀河などがある。宇宙にはこれらの銀河が適当な割合で分布している。ところが、銀河団にはどのようなわけか楕円銀河が圧倒的に多いのである。したがって、表題は「銀河団の楕円銀河はいつ形成されたか」と言い換えてもよい。さて、この楕円銀河というのは、一見すると何の変哲もない星だけの銀河である、と考えられてきた。ところが、よくよく見ると、X線でしか見えない高温のガスに取り囲まれていたり、周りに星が貝殻状にへばりついていたり、中心部に銀河本体とは無関係に高速で自転したり、逆方向に回転している核が複数あったりと、実は複雑な構造を持つ銀河であることがわかってきた。こういう特徴には、銀河が誕生したときにできたものと、その後の進化でまわりの小さな銀河を吸収してできたものがあると考えられる。

楕円銀河がいつできたかを知る鍵は星が握っている。楕円銀河にはさまざまな質量を持つものがあるが、明るい楕円銀河ほど色が赤いという非常に際立った特徴がある。これを「楕円銀河の色-等級関係」という。赤くなるのは星の色が赤いからである。星の色が赤くなるのは多量の重元素を含んでいるからである。重元素は銀河の中の星が世代交代することで作りだされる。この世代交代が繰り返されればされるほど、ガスは重元素で汚染され、そこから生まれる星の色はますます赤くなる。質量の大きな銀河では重力ポテンシャルが深い。そのためガ

スが長期間銀河の中に閉じ込められて、星の世代交代が進む。これに対して、軽い銀河では超新星爆発によって銀河のガスが暖められて、銀河の外に吹き飛ばされたと考えられる。これを「銀河風」という。つまり、銀河風が早く吹いた銀河は青くなり、遅く吹いた銀河は赤くなる。その結果、楕円銀河には色-等級関係が成立する。最近、比較的近傍にある約四十個の銀河団の色-等級関係が「全く同一である」ことが発見された。これはどの銀河団でも楕円銀河の形成と進化が普遍的に同じであった、ということを示している。

ではいったい楕円銀河はいつできたか。それを知るには、遠方の銀河団(つまり、過去の銀河団)では色-等級関係がどのように現在と異なっているかを調べれば良い。楕円銀河の色-等級関係は遠方の銀河団ほど系統的に赤くなる。これは宇宙では遠い銀河ほど我々から高速で遠ざかっているため、地上から同じ波長で見た場合にはドップラー効果によって短い波長におけるエネルギー分布を観測することになるからである。近傍の楕円銀河を構成する星の大部分は古い星である。したがって、楕円銀河のエネルギー分布は短い波長では減衰する。つまり、遠方の楕円銀河ほど、この減衰する波長領域を観測することになるので、赤くなるのである。だから、もし銀河がまったく進化しないならば、遠くの銀河団の色-等級関係は単調に赤くなる。ところが、実際には楕円銀河は進化する。落語の一節みたいだが、遠くの銀河団を超えて、そのまた遠くの銀河団を超えて、もっとずうっと遠くにいくと、楕円銀河の星が皆若くなってしまっているので、今度は逆に青くなる。つまり、楕円銀河の色-等級関係は過去に遡るほど赤くなるが、さらに遡ると逆に青くなる。この青くなる銀河団を発見すれば、それは銀河の誕生直後の銀河団であるといえよう。もし、どこまで遡っても色-等級関係が赤くなっていけば、それは銀河の誕生が遥かなる大昔であったという証拠になる。

我々はケンブリッジ大学と共同で赤方偏移が0.31から1.273にある17個の銀河団の色-等級関係を調べた。ちなみに赤方偏移が1.273にある銀河団の名称はCIGJ0848+4453といい、現在までに知られているもっとも遠方の銀河団である。その結果、「17個の銀河団の色-等級関係がまったく同じように単調に赤くなっている」ということが明らかになった。これはもっとも遠い銀河団でも楕円銀河が青くなる兆候がない、ということを示している。これから、銀河の誕生の時期は、少なくとも赤方偏移が4.5よりも昔であったと結論できる。言い換えると、銀河団の楕円銀河が生まれたのは今から百数十億年前であった、ということが明らかになった。



強い電波源クェーサー(QSO)1335.8+2834(赤方偏移1.086)の周りの赤い銀河団。暗い光源が銀河団の赤い楕円銀河。明るい光源は近傍の恒星。現在までに発見されたもっとも遠方の銀河団のひとつである。視野の大きさは典型的な銀河団のおよそ20パーセント。したがって、銀河団はこの視野よりもさらに広がっていると考えられる。写真はラ・パルマ島、アイザック・ニュートン望遠鏡とハワイ大学2.2メートル赤外望遠鏡で撮影されたものを合成してある。東京大学、ケンブリッジ大学、東北大学、京都大学による共同研究。

伊豆半島東方沖の群発地震活動

大野正夫 (地殻化学実験施設)
ohno@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp

伊豆半島東方沖では、活発な群発地震活動が繰り返し発生している。最近の一連の活動は1978年に始まり、この20年の間に主な活動だけでも16回の活動が発生している。それぞれの活動は十日から数十日間継続し、その間に観測される地震の数は、人間に無感の地震を含めると数千回から一万回以上に及ぶ。この20年間の活動の中で最も地震の回数が多かったのは1989年6月から7月にかけての活動で、約二万五千回の地震が観測された。またこのときには、手石海丘の噴火があった。この1989年の活動の後、1993年までの間は大きな活動は無かったが、その後ここ数年は1995年9月～10月、1996年10月、1997年3月、そして1998年4月～5月と毎年の様に活発な活動が繰り返し発生している。

この群発地震活動の調査のため、伊豆半島には地震、地殻変動、地球電磁気、地下水等々の様々な観測機器が投入されている。地震や火山の定常的な観測点としてはこの地域の観測点の密度は非常に高く、これらの観測により群発地震活動の様々な性質が明らかになってきた。例えば、海底地震観測を含む高密度の地震計網によって正確な震源の位置を求められる様になり、各活動期間中の震源位置の移動や、活動毎の震源域の違いが明らかになった。また地震活動に伴って様々な地殻変動が観測されているが、地中に埋設された歪計や傾斜計の観測から、地震活動の始まる約半日前に微少な地殻変動が先行して起きていることが明らかになってきた。

また最近、地震活動が始まってから最初の24時間の地殻歪の変化量から、その活動の規模が予測できるという報告がある。地震活動の開始直後に、今後発生する地震の総回数や活動の期間などが予測できるのであるから、心強いかぎりである。しかし繰り返し発生している群発地震活動が今後長期的にどのように推移していくかについては、残念ながら今のところ予測することは難しい。長期予測を行うためには、地下の深部で起きていることをもう少し理解する必要があると思われる。これまでの様々な研究によって伊豆半島東方沖の活動にマグマが関与していることは間違いないと考えられるのであるが、マグマがどのようなメカニズムで地震活動を引き起こしているかは必ずしも明らかになっていない。地震活動がマグマそのものの貫入によって引き起こされているのか、マグマによって熱せられた地下水の活動によるものかについてもまだ議論が分かれるところがある。

地殻化学実験施設では、地下水、地球化学の手法でこの群発地震活動を研究している。地下の水やガスは、深部の情報を地表まで運んでくるので、これらを調べることによって地下で何が起きているかを知ることができると期

待される。我々はこの地域の井戸で水位、水温やラドンなどの地下水中の化学成分の濃度の連続観測を行っており、地震活動に関連した様々な変動を捉えている。これまでの解析の結果、観測された変動の中から地震動や地殻変動を反映した変化が明らかになってきた。これらの研究は地震活動の理解に役立っており、今後さらに進めてより深いところで起きている現象の手掛かりを掴まえたいと考えている。

なお、ここに紹介したような観測データやその解析の速報は国土地理院が年2回発行している地震予知連絡学会報に報告されている。

