

宇宙線変成衝撃波の観測的研究

寺 沢 敏 夫 (地球惑星物理学専攻)

terasawa@geoph.s.u-tokyo.ac.jp

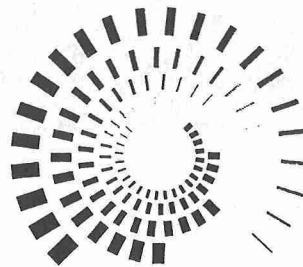
地球外から飛来する高エネルギー粒子、宇宙線粒子は今世紀初めに発見された。その起源の有力候補は超新星であったが、加速過程についての定説が存在しない状況が半世紀以上も続いていた。定説が確立したのは1978年以後である。その頃までに、人工天体の直接観測により太陽風内の衝撃波(秒速数百~二千km)の周辺で数十keV~数十MeVの粒子加速が起きることが示されていた(文献1)。そして1978年にブランドフォード他の複数のグループにより、衝撃波フェルミ加速過程——衝撃波の周りで荷電粒子が大振幅の電磁流体波動により繰り返し散乱される過程——の理論的定式化が完成した(文献2)。太陽風内の観測との比較によって「検証」された新理論は超新星爆風の衝撃波(光速の1/10程度)に適用され、宇宙線の様々な特徴を説明した。さらに、最近のX線・ガンマ線天文学の観測(文献3)は超新星衝撃波周辺の加速現場の「可視化」にも成功している。

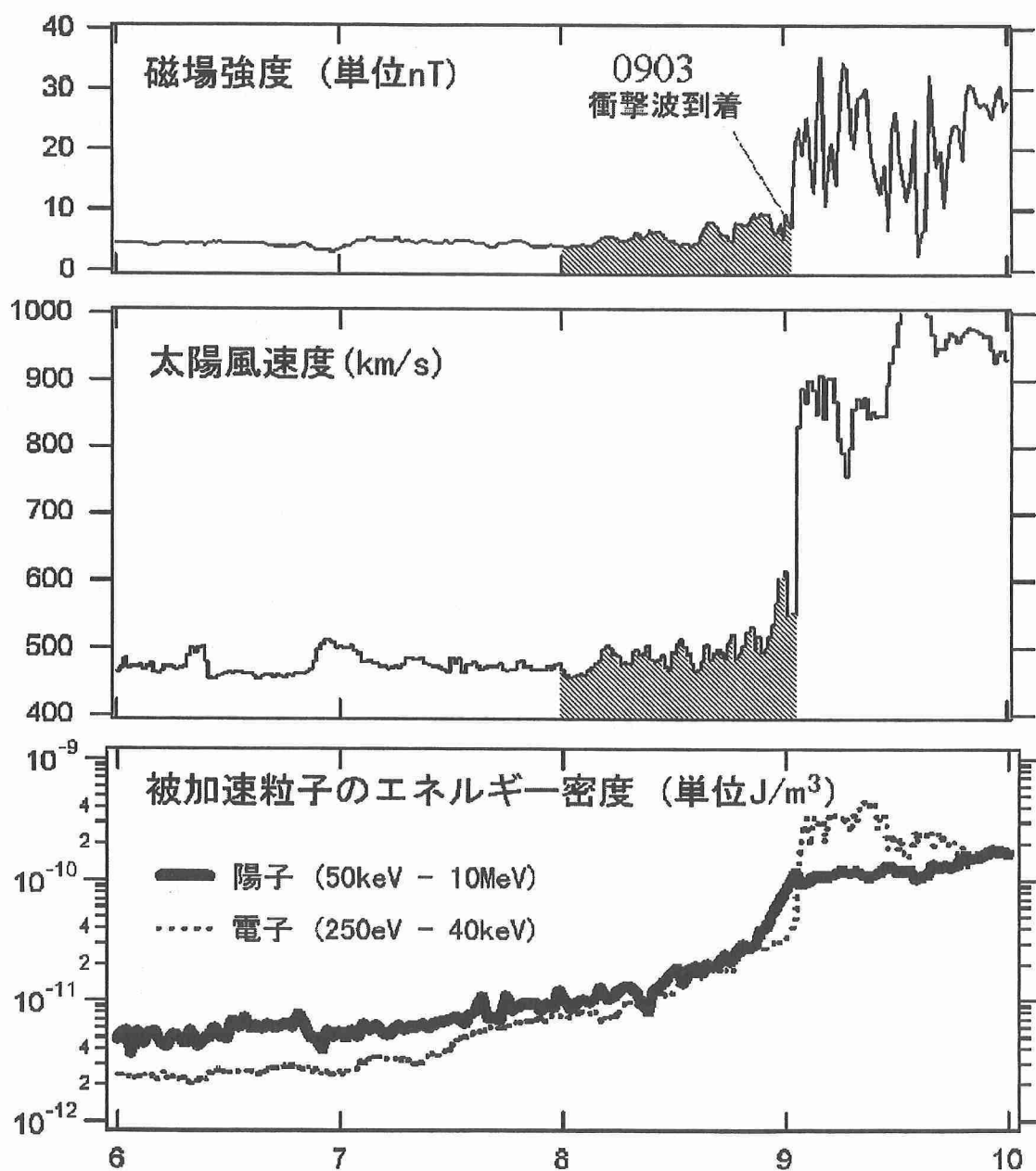
定式化後20年余りを経て、宇宙線の組成の説明(文献4)にいたるまで理論は大きく進展を見せているのだが、未解決の部分も残されている。加速された宇宙線粒子のエネルギー密度は時間と共に増大し、衝撃波を作ったガス・磁場のエネルギー密度と同程度になることがあり、そうすると衝撃波自体の性質が変わってしまう。そのような衝撃波は「宇宙線変成衝撃波」と呼ばれているのだが、その性質は理論的に扱われてきたに過ぎなかった。理論の初期の検証に寄与した太陽風内の衝撃波ではなかなか変成を生むほどの高い被加速粒子のエネルギー密度が実現されず、観測的裏付けが得られなかったからである。しかし、我々は科学衛星GEOTAILの観測した太陽風内の衝撃波の1つでこの被加速粒子による変成効果を見いだすことに成功した。1994年2月20日の午前1時

頃に太陽面で比較的大きな爆発現象があり、それに伴って放出されたプラズマがその前面に衝撃波を形成しつつ地球軌道に至った。図は翌2月21日の世界時6~10時の観測で、衝撃波の通過は9時3分の磁場強度・太陽風速度の急増に示されている。一方、被加速粒子(実線:陽子、点線:電子)のエネルギー密度は衝撃波到着の数時間前からゆるやかに増大を示しているが、この時間変化は衝撃波フェルミ加速過程の顕著な特徴である。図の上段・中段のハッチした時間帯をよく見ると、衝撃波到着前に磁場強度は30%程度、速度は50-100km/sの増大を示している。この増大はプラズマ・磁場が被加速粒子による変成を受けたものとして定量的に解釈できることが示された(文献5)。この観測は衝撃波変成効果の実例として貴重なものであり、現在、さらに詳しい解析を進めている。また、これから数年間の太陽活動の極大期を控え、より多くの観測例を得ることも期待している。

文献リスト

- 1 最近の review として、D. Reams, Space Science Reviews, 印刷中, 1999.
- 2 R. D. Blandford and Ostriker, Astrophys. J. Lett., vol. 221, 29, 1978.
- 3 K. Koyama et al., Nature, vol. 378, 255, 1995; T. Tanimori et al., Astrophys. J. Lett., vol. 497, 25, 1998.
- 4 たとえば D. C. Ellison et al., Astrophys. J., vol. 487, 197, 1997.
- 5 Terasawa, T., et al., 第26回宇宙線国際会議 Proceedings, vol.6, 528, 1999.





1994年2月21日世界時

エルニーニョと熱帯アジア域の対流圏オゾン

北 和 之 (地球惑星物理専攻)

kita@sunep1.geoph.s.u-tokyo.ac.jp

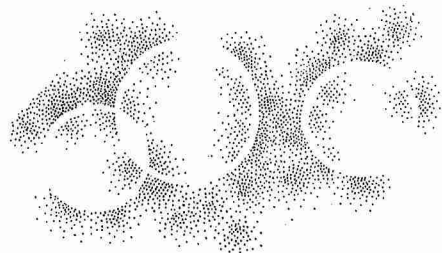
大気中のオゾンは、成層圏に多く分布して太陽紫外線の吸収とそれによる大気加熱を行うことから極めて重要であることはよく知られている。オゾンは対流圏中においても多くの化学反応に関わる中心的な成分であり、また強い温室効果を持つとともに、直接生物に悪影響を及ぼしうることから、近年研究が世界的に活発化している(参考文献:小川利紘著「大気の物理化学」東京堂出版)。対流圏中のオゾンは、成層圏からの輸送の他、窒素酸化物、一酸化炭素などオゾン前駆気体の光化学反応によって生成する。中緯度域においては、人為活動によるオゾン前駆気体生成が対流圏オゾンを増加させていると考えられている。それに対し熱帯域では、最近、森林火災などバイオマス燃焼による対流圏オゾン生成が重要視されている。

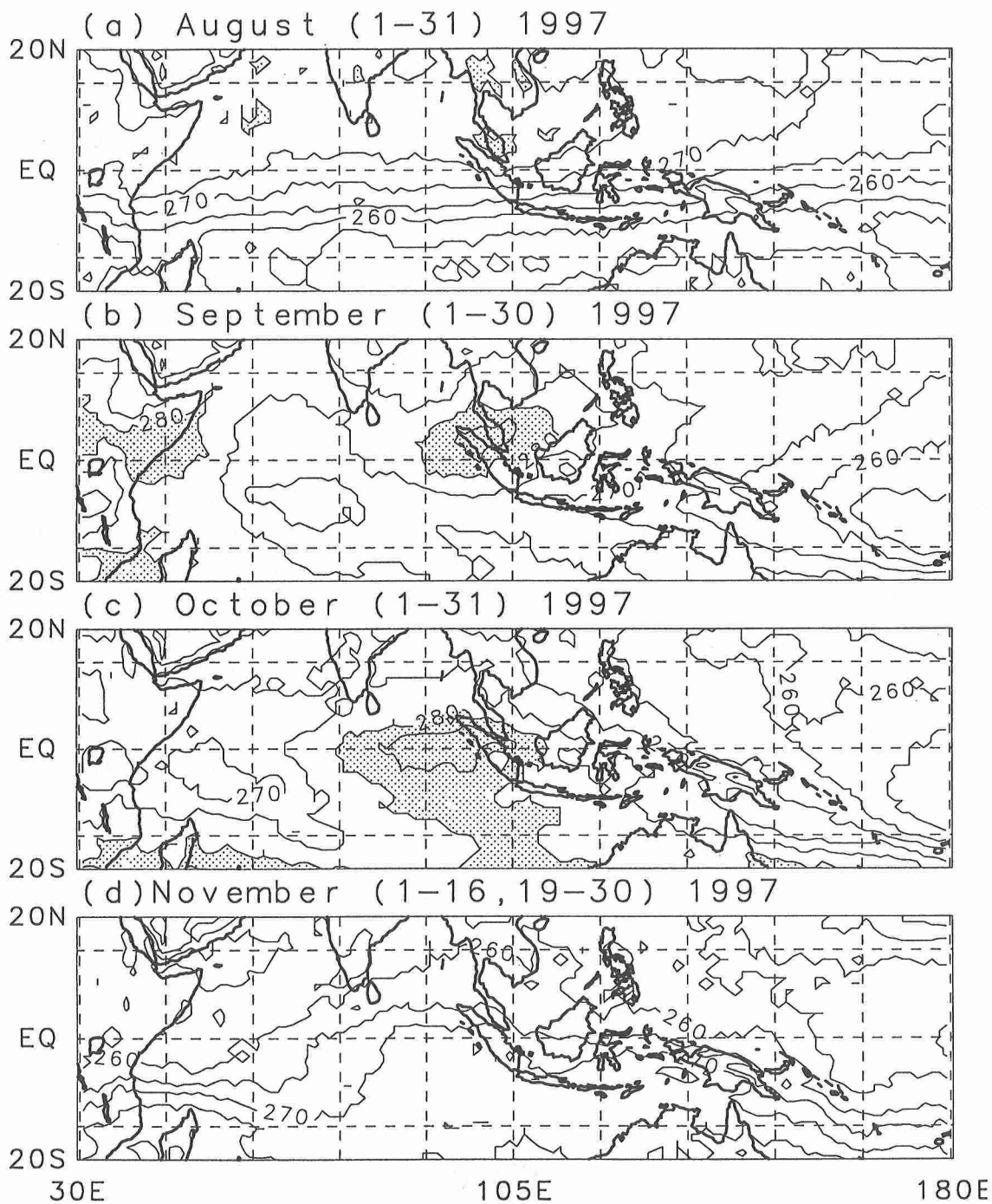
我々のグループは、宇宙開発事業団およびインドネシア航空宇宙庁と共同で、1993年よりインドネシア・ジャワ島の Watukosek (7° S) において熱帯アジアで初めての定常的オゾンゾンデ観測(気球による高度分布観測)、オゾン全量(大気全体の積分値)観測を続けており、現在、これまでに発見された現象について順次発表している。

乾期末にあたる9月から10月にかけて、主に高度8 km以下の中～下部対流圏においてオゾン濃度が増大することには、観測の初期から気づいていたが、1994年および1997年には、雨期には20-30ppbv程度の対流圏オゾン濃度が50-60ppbvに増大し、時には100ppbvにも達した。1994,1997年は、いずれもエルニーニョ期にあたり、インドネシア域では雨量が減少し大規模な森林火災が生じていた。

このオゾン増大の範囲・規模を知るため人工衛星搭載の TOMS (Total ozone mapping spectrometer) によるオゾン全量データを解析した。その結果オゾン増大は、1994年と1997年ともに9月に火災域の風下に当たるスマトラ島からマレー半島にかけて現れ、10月にはスマトラ島中部を中心にインド洋にかけての広い範囲に広がっていることがわかった(参考図)。さらに、類似したインドネシア域でのオゾン増大現象が、1982-3、1987、1991年と、他のエルニーニョ期間にも発生していることがわかった。このことからエルニーニョによる大気-海洋システムの変調が、降水・気温など気象のみならず、大気組成にも大きく影響することが示された。

森林火災などバイオマス燃焼と対流圏オゾン増加の定量的関係を明らかにする目的で、1998年9-10月、1999年8-9月には、BIBLE(Biomass burning and lightning experiment)-A,B 観測キャンペーンがインドネシア～北部オーストラリアで行われた。このキャンペーンでは、航空機にオゾンと種々のオゾン前駆気体、エアロゾルの測定装置を搭載して観測することにより、オゾンの生成・消滅率を定量できる。1998年はエルニーニョと反対のラニーニャ期にあたり、乾期にも降水が多く森林火災は活発ではなかった。しかし、上部対流圏においてはオゾン前駆気体の増大や、インドネシアの風下域でのオゾン増大がみられた。1999年には、北オーストラリアの大規模なバイオマス燃焼を観測し、また中～上部対流圏では、バイオマス燃焼起源と思われるエアロゾルを伴ったオゾン前駆気体・オゾンの増大層を観測した。現在、これらの対流圏オゾン増大とバイオマス燃焼の関わりについて、鋭意解析を進めている。





参考図. インドネシアを中心とする地域でのオゾン全量分布図。1997年(a)8月(b)9月(c)10月(d)11月の月平均値を示す。等値線は5DUおきで、280DU以上の領域にハッチをかけてある。(1 DU = 2.69×10^{16} 個オゾン分子 cm^{-2})

ミトコンドリアと色素体（葉緑体）の分裂装置を通して、細胞社会の誕生、現在そして未来を視る

黒岩 常祥 (生物科学専攻)

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

我々の身体は約60兆個の細胞からできている。その全ての細胞には数千個のミトコンドリアがふくまれ、分裂増殖し、生命活動に必須なATPを合成している。ATP合成に使う酸素や糖は、もとを辿れば植物細胞内で増殖した葉緑体が太陽のエネルギーをつかって光合成により生産したものだ。葉緑体は炭酸ガスを固定し、地球の温暖化を防ぎ、酸素を放出するとともに糖（食糧）を生産し、人類をはじめほとんどすべての生物の存在を支えてきた。しかしこれらのミトコンドリアと葉緑体（オルガネラ）が、どのように分裂・増殖するのか、その根本的な問題は解明されていなかった。

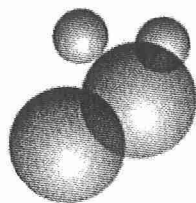
我々はこの問題を長い間研究し続けるうちに、これらの謎を解く鍵は、より原始的な環境に棲息する生物にあると思いついた。そこで、これらの生物を求めて、箱根、草津そしてナポリの温泉に採集に出かけた。1986年に高温強酸性の温泉に棲息する原始紅藻の葉緑体で、1993年にはミトコンドリアで分裂装置を発見し、それぞれ色素体分裂リング（PDリング）、ミトコンドリア分裂リング（MDリング）と名付けた（図1）。その後、葉緑体の分裂装置は50余種の植物で観察され、植物界で普遍的な構造となっている。その構造は2-3重のリング構造で構成されており、分裂の収縮力を発する外側リング（図1の写真上）は直径4-5 nmの細い繊維の数十本の束である。分裂装置は分裂開始直前のオルガネラの赤道上に現われ、外側から、葉緑体やミトコンドリアを絞り込むことによって分裂させる。われわれの身体内で爆発的に増え続けるミトコンドリアもこのMDリングによって増えているにちがいない。

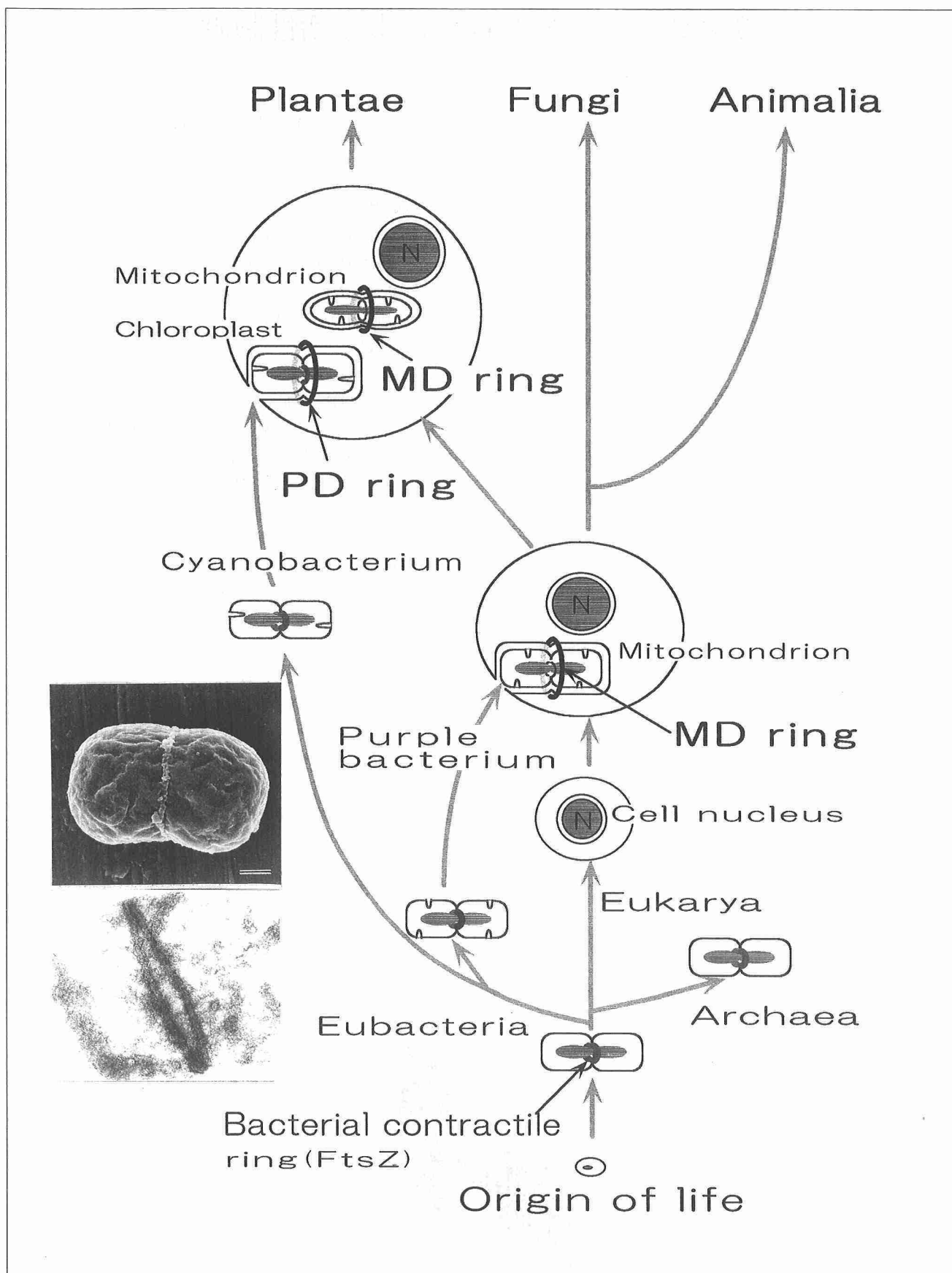
では、葉緑体やミトコンドリアの分裂装置が誕生した意義はなんだろうか。今から約20億年前に、宿主真核

生物に紅色細菌が共生し、やがてミトコンドリアになり、将来我々人類を含む動物や菌類に進化する始原細胞が誕生した（図1）。この細胞に、更に藍色細菌（シアノバクテリア）が共生し葉緑体になり、植物の祖先が誕生した（図1）。この動物や植物の祖先細胞が誕生する時に、宿主生物の細胞核（ゲノム）は共生した細菌が細胞内で勝手に増えないように、MDリングやPDリングをつくり、その増殖を制御し続け、今日に至ったと考えている。この20億年前におこった真核細胞社会の誕生のエピソードとその歴史は、オルガネラの分裂装置を構成するタンパク質の遺伝子に書かれているはずである。我々は最近ようやく葉緑体の分裂装置を取り出すことに成功した（図1の写真下）。これを構成するタンパク質の決定とその遺伝子の同定は時間の問題であろう。

最後に生物の未来の問題について触れてみたい。真核生物は、誕生以来、細胞内におけるエネルギー需要に答えるために、細胞あたりのミトコンドリアや葉緑体数を一個から数千個へと増複させてきた。今後、分裂装置遺伝子や関連遺伝子の強制発現及び改変を行い、進化を先取りして葉緑体数の増加を促し、物質生産性を高めることができよう。また、ミトコンドリアの分裂が老化や寿命に深く関わっていることが指摘されていることから、ミトコンドリアの分裂装置が注目される日も近いであろう。

自由な発想が許され真理に向かい、33年間という長い時間を経た地味な基礎研究が、21世紀における人口爆発や環境問題、そして医療問題の解決への一翼を担えるのではないかという手応えを、今感じている。ミクロの分裂装置を通じて、生物の過去、現在そして未来が僅かに視えてきたのである。





ミトコンドリアの分裂装置 (MD ring) と葉緑体の分裂装置 (PD ring) の生物社会 (Plantae, Fungi, Animalia) における普遍性の根源。約40億年前の生命誕生以来、約20億年前におきた真核生物の誕生は画期的な出来事である。この時、紅色細菌の宿主への共生によりミトコンドリアが生まれ、藍色細菌から葉緑体が生まれた。宿主細胞はミトコンドリアや葉緑体の増殖を制御するために、MDリングやPDリングを作ったようだ。写真上は単離した分裂中の葉緑体の走査型電子顕微鏡像、中心の紐状構造が分裂装置の外側のリング。下はそのリングを単離した透過型電子顕微鏡像。本文参照。
 スケールバーは0.5 μm.

鞭毛ダイニンのADPによる活性制御

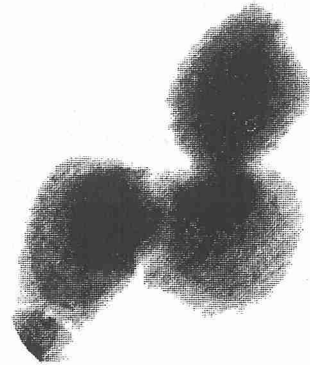
八木 俊 樹 (生物科学専攻)

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

真核生物の鞭毛は規則正しく屈曲運動を行う運動器官である。鞭毛は複雑な構造をしているが(図1)、運動の基礎となるのは微小管の間に生じる滑り運動である。モーター蛋白質ダイニンがATPを分解して得たエネルギーを用いて微小管の間に滑り運動を起こす。その滑りが巧妙に調節されて、規則正しい屈曲運動が生じると考えられているが、屈曲が生じる機構はわかっていない。われわれは突然変異株を得やすい緑藻類クラミドモナスを用いて鞭毛運動機構の研究を行っている。中心小管(CP)やラディアルスポーク(RS)のない非運動性変異株を用いた実験から、ダイニンの活性制御機構の一面が明らかになったので紹介する。

鞭毛から膜を除いたもの(軸糸)にATPを加えると、軸糸は生きているときと同じような屈曲運動を行う。しかし、軸糸がガラスに全長にわたって付着すると、もはや屈曲運動できない。そのような一見運動していない軸糸に小さなプラスチックビーズをつけて、高感度の光学装置で動きをモニターすると、振幅数十ナノメートル、振動数数百ヘルツの振動を行っていることがわかる。この運動は、その振動の大きさから、ダイニン分子の運動を直接反映しているものと考えられる。CP/RSを欠失した非運動性変異株軸糸にビーズをつけて同様に観察すると、この軸糸は野生株の軸糸よりさらに高速で微小

な(振幅数ナノメートル)振動を行うことがわかった。全く動かないように見えたこれらの変異株軸糸も実はナノメートルのスケールで振動していたわけである。このことから、CP/RSがなくなるとダイニンによる微小管の滑り運動の振幅が制限され、そのため、鞭毛は屈曲運動できないことが示唆された。一方、われわれは、これらの非運動性変異株の軸糸がATPと同時にその加水分解産物のADPを加えると屈曲運動を始めることを偶然見出していた。高速振動と屈曲運動の関係を調べるために、ATP存在下で高速振動している変異株軸糸にADPを加えたときの振動の変化を調べた(図2)。ADPを加えるとともに振幅は増大してついには屈曲運動を開始した。変異株軸糸のなかで抑えられていた微小管の滑りがADPにより解除され、屈曲を開始したらしい。ダイニン分子にはATP(またはADP)を結合する部位が4つも存在する。それに対して、ミオシン、キネシンなど、ダイニン以外のモーター蛋白質はATP結合部位を1つもつだけである。今回得られた結果は、ダイニンがATPを分解する部位以外に、いわばATPの制御結合部位を持ち、そこにATPまたはADPを結合することで自らのモーター活性を制御している可能性を示唆するものである。この可能性を調べるために、次に遺伝子レベルでの実験を行うことを計画している。



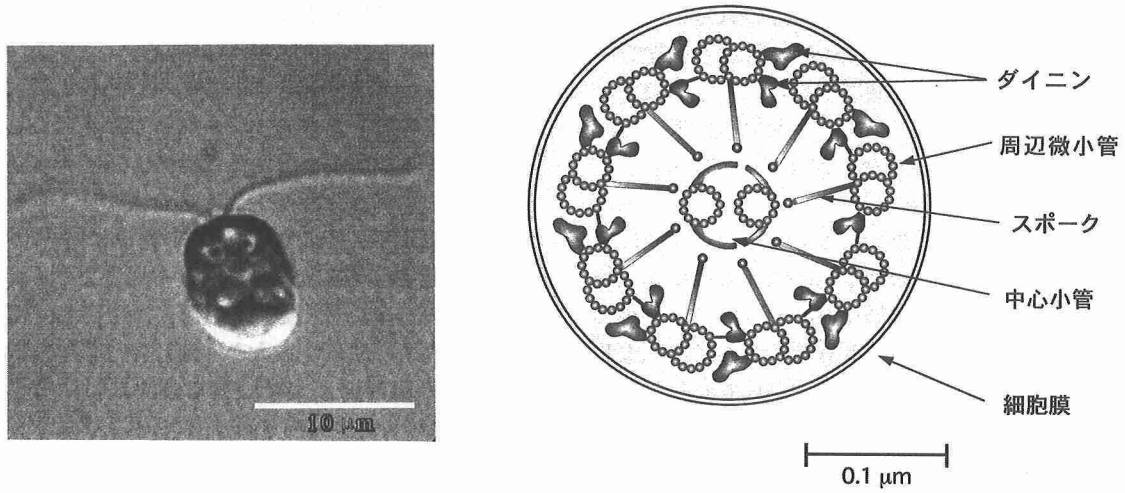


図1 クラミドモナスの顕微鏡写真と鞭毛横断面の模式図

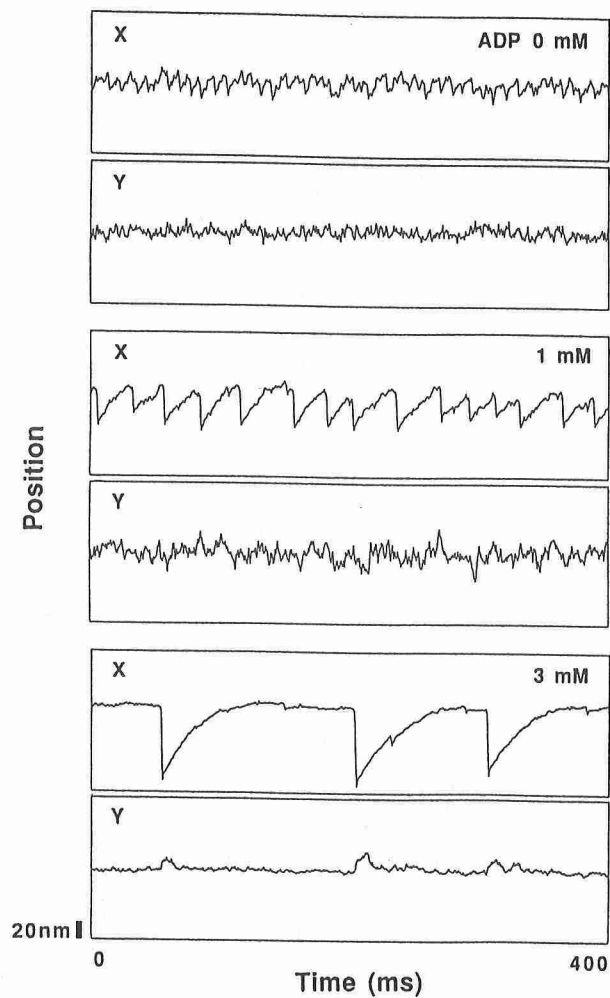


図2 高速振動がADP添加によって変化する様子
(軸系に対して平行な方向の運動(X), 垂直な方向の運動(Y)を示す)

中部日本に見られる火山列の折れ曲り

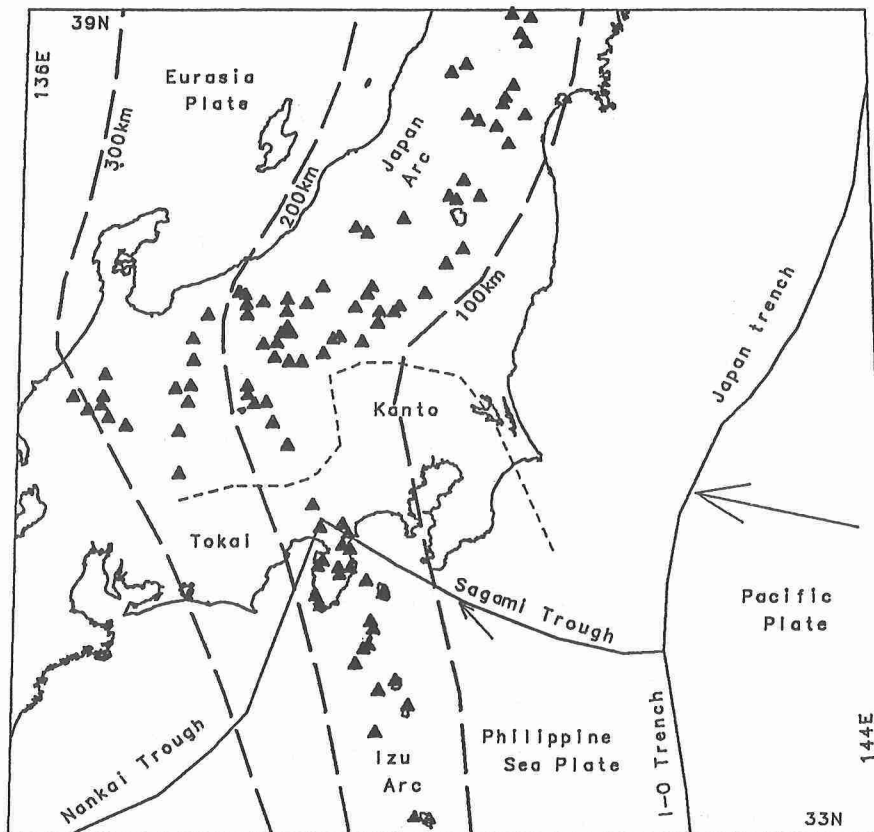
岩 森 光 (地質学専攻)
hikaru@geol.s.u-tokyo.ac.jp

日本列島は地震・火山列島であると言われる。その地震や火山の分布をよく見ると個々の地域にはそれなりの特徴があり、その特徴は地球内部で起こっている現象と対応しているはずである。ここでは中部日本の火山の分布について筆者が最近行っている研究について述べる。

日本列島のような沈み込み帯における火山列は一般に海溝に平行に分布し、火山列の地下100-200kmに沈み込むプレートに対応する深発地震帯(和達-ベニオフ帯)が出現する。太平洋プレートが東側から沈み込んでいる東北日本弧や伊豆-小笠原弧ではこの法則が成立し、概ね南北に長く伸びる火山弧を形成している。しかし中部日本では火山列が海溝から遠い方に折れ曲がりその下の深発地震帯の深さは300kmに達している(図)。中部日本が東北日本弧や伊豆-小笠原弧と異なる点は、太平洋プレートに加えて南からフィリピン海プレートが折り重なるよう

に沈み込んでいる点である。

このような地球内部の場と運動を、物質の流れ・温度・相平衡を考慮した数値モデルにより解析した結果以下のようなことが明らかとなってきた。覆い重なるフィリピン海プレートのために、沈み込む太平洋プレートはなかなか温まらず、そこに含まれる H₂O が放出される化学反応が通常の沈み込み帯における場合よりも深くで起こる。このために放出された H₂O が上昇してマグマを生成する場所が海溝から大きく離れてしまう。しかもこのような低温の場合には、通常の沈み込み帯とは異り、H₂O はすべては放出されずさらに深部までプレートとともに運ばれる。このような低温の場所は世界でもそれほど多くはなく、中部日本は H₂O をマンツルの深部(300km以深)に持ち込む数少ない入口とみなすことができる。



中部日本付近の火山の分布(▲)および太平洋プレートの沈み込みに対応する深発地震面の等深線(太い破線)。沈み込んだフィリピン海プレートの先端は関東の下をかつ太平洋プレートの上を覆うように存在している(細い破線)。

ハゼ類の系統発生

佐藤 寅夫 (臨海実験所)

satot@mmb.s.u-tokyo.ac.jp

ハゼの仲間はスズキ目ハゼ亜目に属する魚類で、世界中に2,000種以上が分布する大世帯である。ほとんどのものは、マハゼやダボハゼでお馴染みの、いかにもハゼらしい形態を保った小型魚であるが、その種類数の多さとともに生息環境の多彩さにおどろかされる。魚類の中では、コイ類、カワスズメ類もハゼ類に匹敵する種類数を誇るが、これらは主として淡水域を住み場所としている。それに対してハゼ類は海を主たる生息場所とし、多くのものが川にも行き来する生活を送っている。また、10%ほどは純淡水産で、山奥の急流の中に住むものもある。大洋島の淡水域で最も種類数の多い魚類もハゼ類である。体の大きさも、大は60cmほどになるものから、成魚で10mm前後しかない最小の脊椎動物と言われるものまで幅が大きい。このように多彩な分類群は、分類学研究者にとっておおいに魅力的であり、特に海と川を自由に行き来できるというその特質から、系統の探究によって種分化の機構を探る手がかりが得られるのではないかという期待を抱かせるものである。

私たちが特に注目したのはチチブ属 *Tridentiger* のハゼで、この属は図1に示した7種が日本周辺に分布している。いずれも体長10cm以下で、河口の汽水域を中心に生息するが、種によって塩分濃度の高低に好みがある。また、生活史の中で川と海の間を移動し、特に川で産卵されたものが、孵化してしばらくのプランクトン生活期には海に流れ出ると考えられる。従ってふだん川で生活している種でも、この時期を経て容易に別の川に移ることができるわけで、純淡水産の魚類とは異なる種分化の歴史を持つことが考えられる。7種のうち、チチブとヌマチチブは共に本州から九州に広く分布し(ヌマチチブは北海道の一部にも)、形態的に互いに酷似しており、その色彩斑紋やひれのすじ(鰭条)の特徴などを注意深く観察することによって初めて識別できる。現在ではヌマチチブが上流、チチブが下流という住み分けが見られるものの、遺伝的にはかなり近いものであろうことが推測できる。

チチブ属の酵素蛋白質を電気泳動法により調べたところ、いくつかのもの(LDH, ODH, SODなど)の遺伝子座に対立遺伝子の置換が起きていることが判り、その頻度から推定した種の系統関係は図1のようなものであった。チチブとヌマチチブは意外に離れており、ヌマチチブに一番近いのは南西諸島の川にのみ分布するナガノゴリであった。そしてチチブは形態的に明瞭に区別できる2種のシマハゼとよりも離れているという結果であった。つまり昔まだヌマチチブとナガノゴリが分かれていなかったころ、おそらく地理的障壁によりチチブが分かれ、そ

の後ナガノゴリと分かれたヌマチチブとチチブがそれぞれ分布を広げ、再び両者が重なりあったということになる。

この系統関係を確認する意味もあり、続いてミトコンドリアに存在するチトクロームb 遺伝子の塩基配列の一部を調べたところ、その変異から推定された7種の系統関係にはおどろくべき違いがあった。そこではチチブとヌマチチブが近く、ナガノゴリが離れているという結果だったのである。さらに、チチブとヌマチチブは同じ場所どうしのもので、遠い場所のチチブまたはヌマチチブとよりも近く、種ではなく場所の違いによる3つの集団に分かれるということが判った。このことは、チチブとヌマチチブの間に交雑が起り、雌親から伝えられるミトコンドリアが種間を移動し、一方の種由来のものだけに置換されてしまったということを示している。現在は両種の雑種個体はほとんど見つからず、両者の融合の進行は止まっているようだが、茨城県酒沼のように両種が混在し、現に交雑が起っている場所も見つかっている。そこでは採集した両種の標本のうちの約6%が雑種個体であった。しかし雑種の繁殖力は弱く、子孫が存続することはなさそうであることも判った。これらチチブ属の例に示されるように、ハゼ類はいろいろな面で興味深い研究対象のようである。

参考文献

- (1) Zool. Sci., 13: 175-183 (1996)
- (2) Mol. Biol. Evol., 14: 1258-1265 (1997)

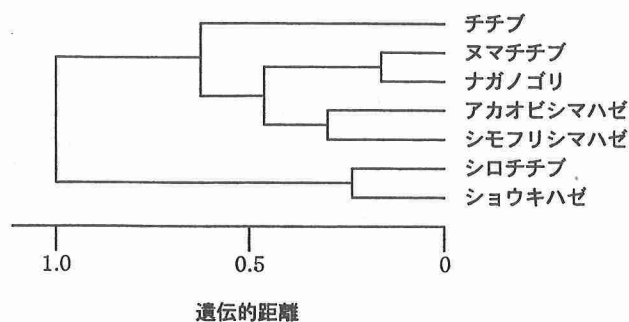


図1 酵素蛋白質の遺伝子の変異から推定されたチチブ属7種の系統関係

赤外炭素星の周期光度関係

中田 好一 (天文学教育研究センター)
nakada@kiso.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

現在の太陽は主系列星と呼ばれる状態にあるが、数十億年後には赤色巨星、惑星状星雲から白色矮星へという道をたどると予想されている。太陽の数倍程度までの星は皆そのような進化を遂げるが、その途中、赤色巨星時代の終わりに、猛烈な勢いでガスを吹き出す時期がある。この間、低温のガス雲の中に埋もれた星は赤外線でのみ観測可能で赤外星と呼ばれる。

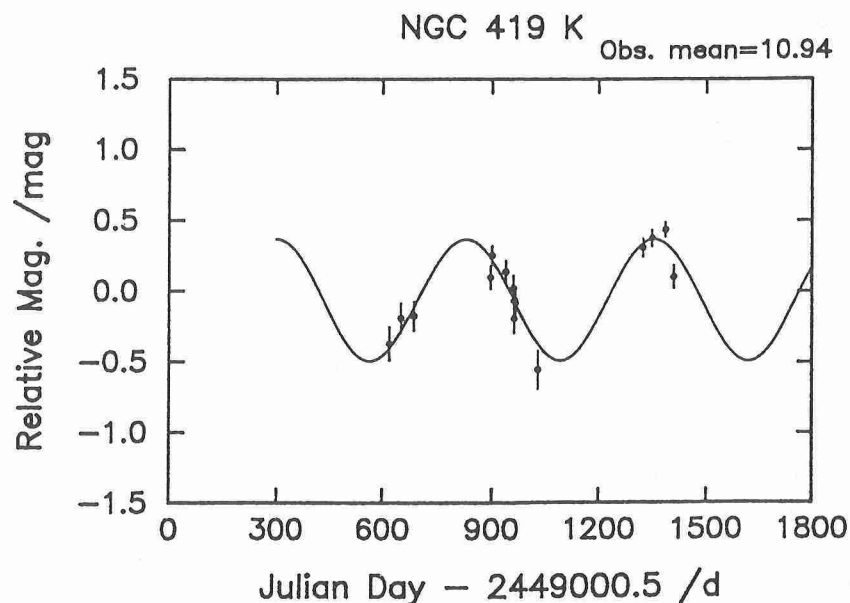
現在数万の赤外星が知られているが、それらの星からのガス放出量、銀河系全体での分布、総数は不明である。この問題を解決するには星の本当の明るさ（光度）を知る必要がある。光度と観測で求まる見かけ明るさとの比較から、ガス放出率、星までの距離などは容易に定まるからである。

実は赤外星のほとんどはミラ型または半規則形の変光を示し、この周期と光度の間に一定の関係が期待されている。この関係を調べるには先程とは逆に距離の判っている赤外星が必要である。マゼラン星雲はその中の星を全て等距離とみなせる程に遠く、しかし個々の星が観測可能な程度には近い。このため、可視光で見えるミラ型変光星の周期光度関係はマゼラン雲の星を使って詳しく調べられてきた。残念ながら赤外星の変光周期は一般に

可視ミラ型星より長く、この周期光度関係の適用範囲外にある。また、炭素型の赤外星は知られていなかった。

われわれはマゼラン雲球状星団の赤外観測の際に3つの赤外星を発見した。赤外分光観測の結果それらはすべて探し求められていた赤外炭素星であることが判った。そこで、3年間に渡り南アフリカにおいて追跡観測を行い、その平均光度と周期を決定した。下の図はその内の一つ、球状星団 NGC419 に発見された赤外星の変光曲線である。これらの観測結果からわれわれは周期光度関係を赤外炭素星の領域に延ばすことに成功した。この関係式は銀河系内の赤外星を調べる上で有益である。

われわれが調べた赤外星は球状星団に属しているため、一般の赤外星よりさらに詳しい情報が得られる。球状星団 HR 図の解析から赤外星が主系列星にあったときの質量は1.6~2.0太陽質量であることが判った。一方、変光星のモデルからは、現在の赤外星質量は0.8太陽質量程度と見積もられる。この差約1太陽質量はいつ失われたのであろうか？この疑問に答え、また上に述べた赤外星周期光度関係をさらに多くのサンプルで確立するため現在マゼラン星雲赤外線探査観測が計画され、来年度から観測に入る予定である。



球状星団 NGC 419 の赤外星の変光曲線