

ニッポンウミシダがナショナルバイオリソースプロジェクトに採択

附属臨海実験所長 赤坂 甲治（附属臨海実験所 教授）

理学系研究科附属臨海実験所（通称三崎臨海実験所）のニッポンウミシダがナショナルバイオリソースプロジェクト（NBRP）に採択された。NBRPとは、「わが国のライフサイエンス研究の基盤となるバイオリソースについて、国の戦略目標に基づき、継続的に収集・保存・提供を行うとともに、バイオリソースの所在情報などを提供する情報センター機能を強化する」国家プロジェクトである。

ニッポンウミシダとはウミユリ類の一種であり、名前からは植物を想像するが植物ではなく動物であり、ウニなどの棘皮動物に属す。NBRPに採択される生物は「研究対象としてきわめて有用であり、ニーズが高い」ことが必須条件である。しかし、ニッポンウミシダは研究者人口も少なく研究成果もほとんどない。ではなぜ、ニッポンウミシダが国家プロジェクトに採択されたのだろうか？

人類までも生み出した進化を理解し、その起源を探るためには、人類に至る進化系統の中でもっとも古い動物、すなわち棘皮動物を研究する必要がある。従来は、棘皮動物の代表として入手しやすいウニ・ヒトデ・ナマコなどが研究されてきた。しかし、これらの動物の起源は比較的新しく、進化の過程で脳（中枢神経）など、多くの動物に共通した組織・器官を捨てている。したがって、これらの動物は本当の意味では棘皮動物の代表とはいえなかった。

棘皮動物の中でもっとも起源が古いのはウミユリ類であり、中枢神経系を有するなど、棘皮動物の本来の体制を継承する。また、再生能力がきわめて高く、発達した神経系が再生にかかわることから、

ヒトの組織の再生機構の研究にもつながると期待されてきた。しかし、ウミユリ類の多くは深海に生息し、採集が困難なため、実験動物とすることができなかった。

三崎臨海実験所周辺の海底地形は、急峻で深海が迫っている。そのため、深海の生物が沿岸に生息し、ウミユリ類も比較的浅い海域で採集することができる。昭和時代の動物学・発生生物学のカリスマ的存在であった団勝磨*先生以来、三崎臨海実験所ではニッポンウミシダの生態研究を継続してきた。最近、大学院生らの篤い情熱が実り、ついに飼育・発生・継代に成功した。ウミユリ類を閉鎖系で飼育・継代できる海洋生物研究施設は世界でも三崎臨海実験所だけであり、バイオリソースとしての重要性和高い独自性が評価されてNBRPの採択となった。

今後、三崎臨海実験所を舞台として、また、世界に向けてニッポンウミシダの胚、幼生、成体およびゲノムを供給することにより、進化と再生の研究が飛躍的に進歩すると期待される。理学系研究科の皆さん、ニッポンウミシダを使ってみませんか？

*団勝磨：東京大学理学部動物学教室出身。昭和時代に活躍した発生生物学者。第二次大戦前、渡米。米国人生物学者ジーンと結婚、帰国。三崎臨海実験所を舞台に研究。戦前、戦中、戦後の激動の時期をジーンと過ごした生活は文化的にも注目されている。戦時中、三崎臨海実験所旧本館は海軍の特殊潜航艇基地として使用された。敗戦を迎え、米軍により実験所が破壊されようとした時、玄関に「Last one to go」の張り紙をして立ち去ったストーリーはあまりにも有名。東京大学出版会磯野直秀著「三崎臨海実験所を去来した人々」参照。



■ ニッポンウミシダ

超伝導を引き起こす「重い電子」の不思議な振る舞い

— 遍歴から局在への転移過程が明らかに —

藤森 淳 (物理学専攻 教授)

物質中の電子は、金属中の電子のように物質中を自由に動き回る(量子力学的な“波”の性質が顕著な)「遍歴状態」と、絶縁体中の電子のように原子に束縛されて動けない(古典的な“粒子”の性質が顕著な)「局在状態」の二種類に分類される。しかし、一部の希土類化合物やアクチノイド化合物に見られる「重い電子」^{注)}はその両方の性質を兼ね備えており、室温付近の高温で局在状態の性質を、液体窒素・液体ヘリウム温度付近の低温では遍歴状態の性質を示すことが知られていた。さらに低温では、多くの重い電子が磁気秩序を示し、極低温で超伝導を示すものがあることも見だされている。重い電子がどのようにして局在状態—遍歴状態—超伝導状態と極端に性質の異なった状態を移り変わることができるのか、重い電子の発見以来30年間、その転移過程について多くの理論的研究や電気的・磁気的応答の研究がなされてきた。しかし、転移過程における電子の状態変化を直接明らかにした研究は行われていなかった。

われわれは大型放射光施設 SPring-8 からの放射光を用いて、極低温で超伝導を示す重い電子系化合物 UPd₂Al₃ (ウラン・パラジウム・アルミニウムからなる化合物)の角度分解光電子分光法で測定を行い、重い電子の“バンド構造”を直接測定することによって遍歴状態と局在状態の違いの本質を明確に観測することに成功した。これは世界トップクラスのX線強度とエネルギー分解能をもつ測定装置を開発したことで初めて実現したものである。

図1に高温・低温における「重い電子」のバンド構造を概念的に示す。低温では電子は遍歴する“波”であるため、その

エネルギー(∞周波数)が電子の波数 $2\pi/\lambda$ (λ :波長)の関数として変化する。いっぽう、高温では電子が局在した“粒子”となり波数が意味を失うために、そのエネルギーは定数になる。この様子が、実際に UPd₂Al₃ の角度分解光電子分光で観測されたのが図2である。フェルミ準位付近のわずかな部分ではあるが、「遍歴状態」と「局在状態」との明瞭な差が表れている。

重い電子系化合物は、上に述べた「重い電子」の奇妙な振る舞いと共通の原因により、従来の金属で観測されている超伝導とは異なる“エキゾチックな”超伝導を示す場合があり、今回測定した UPd₂Al₃ もその一例である。今回の成果

によって、エキゾチック超伝導に対する理解が進み、超伝導機構の解明も大きく進展するものと期待される。

本研究は、日本原子力研究開発機構の藤森伸一副主任研究員・芳賀芳範研究主幹、京都産業大学の山上浩志教授、大阪大学の大貫惇睦教授らとの共同で、*Nature Physics*, **3**, 618, 2007 に掲載されている。

(2007年7月27日プレスリリース)

^{注)} 重い電子：金属中の伝導電子が電子間相互作用の“衣”を着ることで、その質量が、自由電子の質量の数百倍〜千倍に重くなったように見える現象。電子比熱など、電子の質量に比例した物理量が巨大化することを通じて検出される。

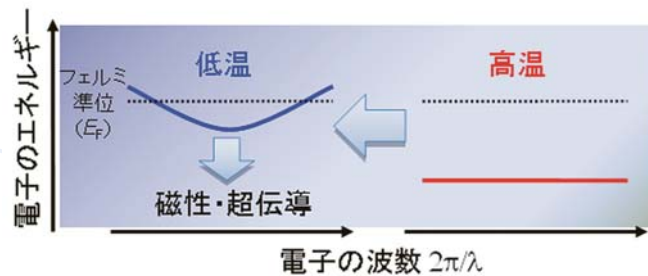


図1: 「重い電子」のバンド構造の概念図
(左: 低温における遍歴状態, 右: 高温における局在状態)

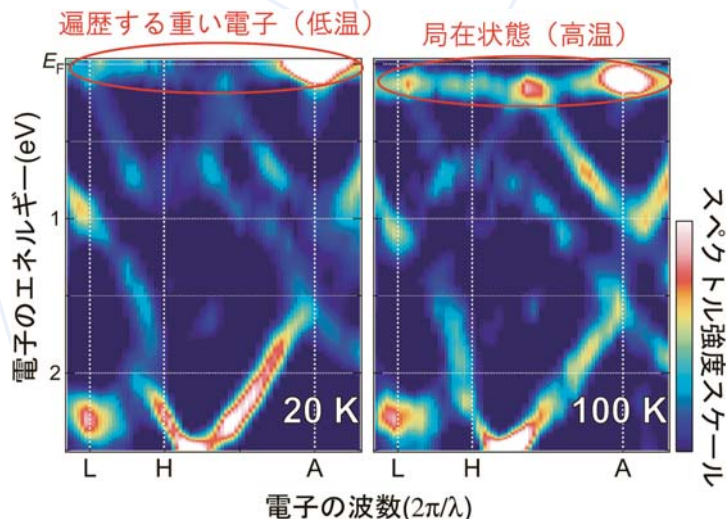


図2: 角度分解光電子分光測定で得られた UPd₂Al₃ のバンド構造の温度依存性。赤線で囲った部分が、図1に描かれた特徴を示している。

すばる望遠鏡，太陽系外惑星の公転軸の向きの測定に成功

成田 憲保（物理学専攻 博士課程3年），須藤 靖（物理学専攻 教授）

これまでに，太陽以外の恒星にある惑星は250個以上発見されている。しかしこの太陽系外惑星の中には，太陽系でいうと木星のような巨大惑星であるにもかかわらず，公転周期がたった数日しかないものや，細長く伸びた楕円軌道をしているものが多く存在している。このように太陽系の惑星とは似ても似つかない惑星たちは，どのようにして生まれたのだろうか？

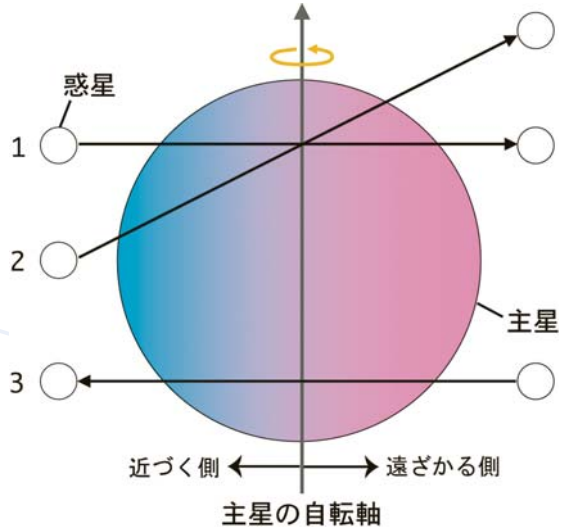
現在の標準的な惑星形成理論では，惑星は原始星のまわりを取り囲む原始惑星系円盤の中で，小さなチリが集積・合体して徐々に成長していくことで形成されると考えられている。この過程において，惑星は周囲を取り囲む原始惑星系円盤との相互作用によって，中心星に徐々に近づいていく。公転周期の短い惑星の存在は，この理論で大まかに説明することができる。いっぽう，この理論ではすべての惑星の軌道離心率はほぼ0になることが予想されている。そのため，この理論だけでは離心率をもった多くの惑星の存在を説明できない。そこで最近，成長した巨大惑星同士の重力散乱などが，惑星の離心率を大きくすると考える理論が注目されている。これらの新しい理論は，先の標準理論と組み合わせることで，太陽系外惑星の軌道の性質をきちんと説明することができる可能性がある。しかし，これらの理論を強く支持する観測的な証拠はまだ得られていない。

では，観測的証拠として何を発見すればよいのだろうか？ここでわれわれは，主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角度に着目した。標準理論では，惑星は原始星の自転とそろって回転する円盤の中で生まれるため，2つの軸のなす角度が

0度から大きくずれることはない。いっぽう，複数の巨大惑星による重力散乱を考慮した理論は，かなりの割合の惑星が大きなずれをもつことを（ときには主星の自転と惑星の公転の向きが逆になることも）予言している。したがって，観測から2つの軸のなす角度を測ることができれば，惑星の生い立ちを探る新しい道をひらくことができる。

そこで，われわれはトランジット惑星系とよばれる惑星の公転軌道が主星の前面を通過するような惑星系に注目した。このような惑星系では，惑星が主星の前面を通過している間，惑星が主星のごく一部を隠すが，その場所が徐々にずれるため，主星の時点で近づく側と遠ざかる側の見える割合がわずかに変化し，結果として，見かけ上，主星が近づいたり遠ざかったりして見える。この現象はロシター（Rossiter）効果とよばれており，この効果を検出することで2つの軸のなす角度を測ることができるようになる（図）。

今回われわれがハワイにあるすばる望遠鏡とMAGNUM望遠鏡（東京大学）の2台を用いて同時観測を行い，ロシター効果の検出に成功したのは，TrES-1という主星の見かけの等級が約12等の惑星系である。これは世界で3例目の検出例だが，この惑星系は以前に検出がなされていた2つの惑星系に比べて約2%の明るさしかなく，現時点でもっとも暗いターゲットでの成功例



主星の前を横切る，惑星の公転軌道の3つの例。主星の青い部分は自転によって観測者に近づいてくる側を表し，逆に赤い部分は遠ざかる側を表している。それぞれの軌道によって，ロシター効果は異なって観測される。そのため，ロシター効果を測定することで，主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角度を調べることができる。

である。今回の結果は，2つの軸のなす角度が 30 ± 21 度で，有意なずれは検出できず，どちらかといえば標準理論を支持する。ここでとくに重要なのはロシター効果の観測対象をより暗い主星をもつ惑星系にまで拡張したことである。実際，われわれは2007年7～9月にかけて，同じように暗い5つの惑星系でロシター効果の観測を行い，現在，解析を行っている。後もこうした観測を通し，さらに多くの惑星系で，精度を高めた観測を行っていくことで，太陽系外惑星の生い立ちに迫っていきたいと考えている。

本研究は多くの共同研究者の方々のご協力をいただき達成することができた。ここに深く感謝したい。本研究は，N. Narita et al., *Publ. Astron. Soc. Japan*, **59**, 763-770, 2007 に掲載された。

(2007年8月24日プレスリリース)

熱水中で水を通さなくなる新しい膜材料

中村 栄一 (化学専攻 教授)

細胞などに見られる生体膜は脂質とよばれる飽和炭化水素の構成する分子二重膜からなっている。そのもっとも重要な役割は、水分子を自由に透過し、外界から必要な物質を取り込む一方で、生命活動に必要な物質が外に漏れ出さないようにすること、つまり「物質のふるい分け」である。今回、われわれの研究グループは、分子二重膜をフラーレンからつくと、温度を上げるほど水分子の透過性が減少し、最大で通常の細胞膜の一万倍も水を通しにくい膜ができることを明らかにした。世界でもっとも薄い分子二重膜であるフラーレンの分子膜が、世界でもっとも水を通しにくいという予想外の性質をもつ一方、膜透過の分子選択性も脂質二重膜とはまったく異なることを予想させる発見である。

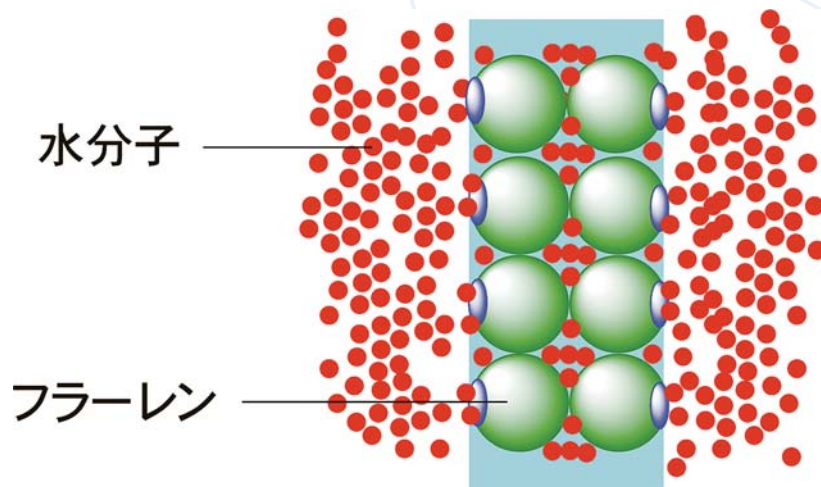
われわれは、フラーレン誘導体の陰イオンを水に溶かすと、黄色い均質な溶液が生じ、この中に分子二重膜からできたベシクル (小胞) ができることを2001年に報告した。このフラーレンベシクルと

脂質二重膜からなるベシクルの性質の差にはたいへん興味をもたれるところである。細胞膜とフラーレン膜の水透過性の違いを、核磁気共鳴装置を使った熱力学測定により詳細に調べたところ、この違いが膜を構成する分子と水分子の相互作用の違いによることがわかった。すなわち、脂質二重膜の内部では、高い運動自由度をもった炭化水素の鎖が膜に対して垂直に並んでおり、水分子はこの柔軟な炭化水素鎖の隙間をぬうようにして通り抜けていく。いっぽうで、フラーレン二重膜の内部は剛直なフラーレンが密に詰まった、いわば結晶のような状態をとっている。このため、膜を透過するために膜外部から侵入した水分子は結晶性の膜の隙間に挟まって自由度が減少し (エントロピー減少)、膜を通り抜けることが困難になっていると考えられる (図)。すなわち、フラーレン二重膜の中に取り込まれた水が糊のように働き、熱を加えたときに膜を硬くすると考えられる。これまでの細胞などの分子二重膜で

知られていた常識からは考えられない特性である。

脂質二重膜では、酸素や窒素のような非極性小分子や、水やエタノールのような中性小分子は透過することが可能だが、より大きなアミノ酸や糖といった分子や、イオン性分子は通り抜けることができない。これは透過する分子と脂質二重膜内部の炭化水素鎖との相互作用の違いによって生じる選択性である。今回の発見は、フラーレンの膜がこれまで知られている膜とはまったく異なる物質選択性をもつということに要約できる。近年、エネルギーや環境問題に関連して膜による分離精製法が脚光を浴びている。今回見つかった新しい性質を活用してフラーレンを含む薄膜を設計すれば、これまでにない物質分離の選択性をもつ新しいタイプの膜としての利用ができることと期待される。たとえば、メタンハイドレートからのメタンガスを分離するためのガス分離膜、また近年バイオ燃料として注目されているエタノールを精製する過程で必要とされる水とエタノールの分離のための膜の開発など、環境問題やエネルギー科学における鍵物質の分離という観点から、将来の工業的応用が期待される新材料である。

本研究は、文部科学省 (科学研究費補助金および科学技術振興機構 ERATO プロジェクト) の支援によって行われ、H. Isobe *et al.*, *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, **104**, 14895-14898, 2007 に掲載された。



フラーレン二重膜が水透過するさいの模式図。フラーレン二重膜内では水分子が結晶性の膜の隙間にとらわれるため、水を著しく通しにくい

(2007年8月31日プレスリリース)

宇宙でも同位体を使って化学反応を追跡

山本 智 (物理学専攻 教授), 坂井 南美 (物理学専攻 博士課程 2年)

星と星との間にはガスと塵からなる希薄な雲(星間分子雲)が存在している。星間分子雲は温度が 10 K, 水素分子密度が 10^4 cm^{-3} と、低温低密度の極限的環境にある。そこでの化学反応の理解は、星形成に伴う物質進化の理解において重要なばかりか、分子科学の観点からも注目されている。星間分子雲に存在するさまざまな分子の中で、もっとも特徴的なものは炭素鎖分子(HC_nN , C_nH , C_nH_2 , C_nS など)である。本研究でとりあげる CCS もその仲間、星間分子雲の化学進化を反映する分子として、星形成の研究でよく用いられている。炭素鎖分子は一般に化学反応性が高く、地上には自然に存在しない。そのため、炭素鎖分子の生成過程の理解は、星間化学の重要課題となっている。CCS についてもアセチレンを経由する反応、CCH を経由する反応、CH と CS の反応などが提案されてきたが、それらの当否および相対的重要性はわかっていなかった。本研究では CCS の ^{13}C 同位体種の観測を行って、CCS の生成過程を明らかにすることに成功した。

星間分子雲には炭素同位体 (^{13}C) が 1/60 ほどの割合で含まれている(地上では 1/89)。私たちは国立天文台の 45 m 電波望遠鏡と米国国立電波天文台の 100 m 電波望遠鏡を用いて、 ^{13}CCS と C^{13}CS の回転スペクトル線を高感度観測した。その結果、両者の強度が大きく異なることを発見した(図)。存在量比 $[\text{C}^{13}\text{CS}] / [\text{CCS}]$ は、星間空間の同位体比 (1/60)

とほぼ同じであったが、 $[\text{C}^{13}\text{CCS}] / [\text{CCS}]$ は 1/230 であり、 $[\text{C}^{13}\text{CS}] / [\text{CCS}]$ の 1/4 にすぎないことがわかった。

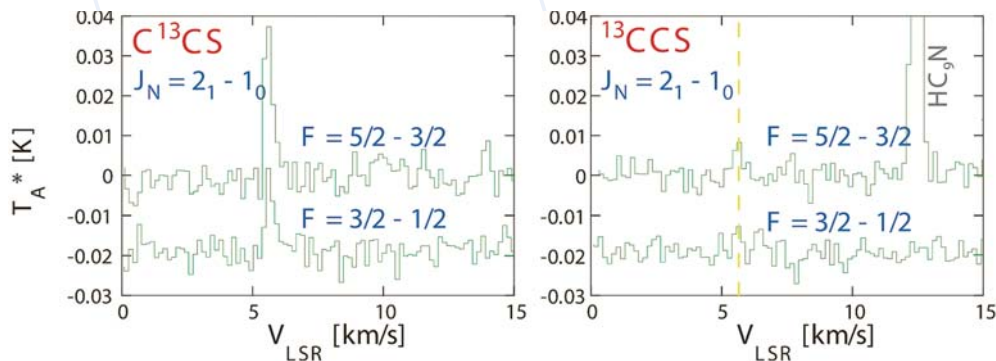
この結果から 2 つの重要な結論が得られる。第 1 は、 C^{13}CS と ^{13}CCS の存在量が違うことから、2 つの炭素原子は生成時に非等価であったということである。したがって、これまで最有力とされてきたアセチレン経由ルートは、2 つの炭素原子が等価なのでただちに除外される。また、CCH の ^{13}C 同位体比と比べることによって、CCH を経由する反応も除外された。その結果、CCS の生成には CS と CH の反応がもっとも寄与していることがはじめて明らかになった。

第 2 の重要な結論は、 $[\text{C}^{13}\text{CCS}] / [\text{CCS}]$ 比が通常の同位体比よりも小さいことである。CCS の主要生成ルートが CS と CH の反応であることを考えると、この事実は $[\text{C}^{13}\text{CH}] / [\text{CH}]$ が小さいことに対応する。一般に、重い同位体は分子に濃縮される傾向にあるので、この結果は異常といえる。その原因としては、星間紫外線による光解離によって ^{13}CH が

選択的に解離されている可能性が考えられる。CH は CCS 以外にもさまざまな星間分子(たとえば CCCS)の生成において重要な役割を果たしている。したがって、CH の同位体比の異常は他の分子にも転移していると考えられ、その追跡を通して星間分子の生成過程を詳しく調べることができよう。

以上述べたように、 ^{13}C 同位体種の観測によって、星間分子雲での化学反応を追跡できることがわかった。通常、 ^{13}C 同位体種のスペクトル線はひじょうに弱いため、短時間の観測ではその検出自体すら難しい。しかし、今回のように高感度の望遠鏡で長時間の観測を行えば、弱いスペクトル線でも精度良く観測でき、分子の生成過程をつぶさに調べることができる。今後、観測装置の一層の高感度化により、この手法は宇宙の化学の理解に広く用いられるようになるであろう。なお、この成果は N. Sakai *et al.*, *The Astrophysical Journal*, **663**, 1174-1179, 2007 に掲載された。

(2007年9月4日プレスリリース)



米国国立電波天文台 100 m 望遠鏡によって TMC-1 で観測された C^{13}CS と ^{13}CCS のスペクトル。横軸は周波数を天体の運動のドップラーシフトで表している。2 本のスペクトルは ^{13}C 核の超微細構造

日本で初めての天然ダイヤモンド発見

鍵 裕之 (附属地殻化学実験施設 准教授)

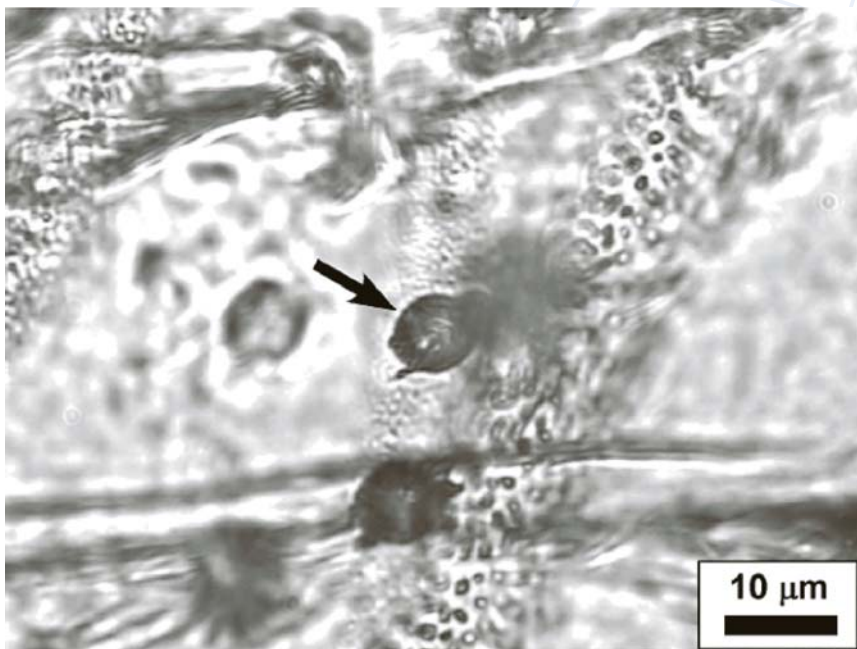
名古屋大学環境学研究科の水上知行博士、サイモン・ウォリス准教授 (Simon Wallis)、榎並正樹教授と著者からなる共同研究グループは、愛媛県の露頭岩石に含まれるマントル捕獲岩から、日本で初めて天然に産するダイヤモンドを発見した。

今回発見された結晶は1 mmの約1000分の1程度のたいへん小さなものであるが、これまでの地質学的な定説を覆す画期的なもので、ダイヤモンドの成因解明など今後のさらなる研究の必要性を示した。

2年前まで本研究科に博士研究員として所属していた水上知行博士 (現在、日本学術振興会特別研究員、名古屋大学大学院環境学研究科) は、愛媛県での露頭岩石に含まれるマントル捕獲岩の深さ起源を推定する目的で、二酸化炭素

流体包有物¹⁾の残留圧力を顕微ラマン分光法²⁾で測定していた。彼はその測定データから見慣れぬ信号を見だし、それがダイヤモンドによるものと気づいたが、その時の発見が彼から報告されることはなかった。もしもその発見が本当であれば、わが国の地質学研究の歴史を大きく書き変えることになるため、彼は慎重に実験データをあためることとなった。その後、水上氏は名古屋大学に移り、導入されたばかりの最新鋭の顕微ラマン分光装置で同じ試料を分析したところ、やはりダイヤモンドの結晶の振動に相当する振動数に信号が現れた。薄片試料を3次元的にスキャンしながら詳細にスペクトルを測定したところ、ダイヤモンドと思われる粒子の大きさは1ミクロン程度で、二酸化炭素包有物の内部に取り込まれていることがわかった (図)。

一般にダイヤモンドは火山岩に伴って産出する。アフリカ南部やシベリア、北米などの代表的な産地はキンバーライトマグマに伴うものであり、10億年を超えるような古い大陸地塊に噴出する。大陸衝突によって形成されるような、超高压変成岩中にもダイヤモンドの産出の報告もある。今回のダイヤモンドは、火山岩に伴う形で見つかった。日本のような活動的で地質学的に若いプレート収束域では、比較的起源の浅い火山岩が卓越し、ダイヤモンドの産出には適していないと考えられてきたが、さまざまな方面から見直していく必要がある。この発見の重要性は、日本のようなプレート収束境界において100 km規模の地下から何らかの原因により、地表まで物質がもたらされる地質現象があるということを示したことにある。そのメカニズムの探求は今後の大きな学術的課題である。



日本で初めて発見されたダイヤモンドを含む鉱物薄片の写真。矢印が二酸化炭素包有物で、この中からダイヤモンドが検出された (名古屋大学水上知行博士提供)。

¹⁾ 流体包有物：

鉱物は成長場にあった二酸化炭素などの流体を取り込みながら成長することがしばしばあり、完全に鉱物の結晶の中に捕獲された流体を「流体包有物」とよぶ。今回のダイヤモンドは、輝石の中に取り込まれた主として二酸化炭素からなる流体包有物の壁に付着して存在している。

²⁾ 顕微ラマン分光法：

顕微ラマン分光法はレーザー光を分析対象に照射し、分子の振動とのエネルギーのやりとりによって変化した光の波長変化を読み取る手法である。レーザーの高い指向性を利用して、ミクロンスケールの領域から物質固有の情報を取り出すことができ、埋没した微小試料の同定や圧力などを決定するのに有用である。

冬の雷雲は天然の粒子加速器だった

榎戸 輝揚 (物理学専攻 博士課程1年), 牧島 一夫 (物理学専攻 教授)

ベンジャミン・フランクリン (Benjamin Franklin) が凧を用いて検証したように、雷は電気現象である。正負電荷の分離により、雲の内部や雲と地表のあいだに高い電圧が発生し、大気の絶縁破壊にいたる。雷雲内部での電場強度は、100 kV/mにもおよぶと考えられる。

1990年代の半ば、宇宙ガンマ線衛星により、時おり短時間のガンマ線のパルスが地球から来ており、それらは雷雲から数十 km の上空へ駆け昇る、スプライトとよばれる発光現象に付随する可能性が浮上した。日本海沿岸でも、冬の季節風が吹き「雪起こし」とよばれる雷が鳴ると、原子力発電所の放射線モニタが反応することが報告された。雷の強い電場では、荷電粒子が加速されているらしい。

そこで私たち、物理学専攻と理化学研究所・宇宙放射線研究室の混成チームは、宇宙での電場加速の手本にすべく、雷からの放射線を探索する二組の放射線検出器を製作した。東大の装置は、X線衛星「すざく」に載せた硬X線検出器にならい、NaIシンチレータの側面と底面を別の結晶で覆い、上空からの信号を除き反同時計数で落とせるようにした。理研の装置は、土屋晴文協力研究員、加藤博専任技師らが製作し、等方的な感度をもつ球形のNaIシンチレータとCsIシンチレータを並べた。私たちは東京電力柏崎刈羽原子力発電所の協力をえて、2006年12月下旬、同発電所の構内に二組の検出器を設置して、データ取得を開始した。

2006～2007年の冬は記録的な暖冬だったが、2007年1月7日の未明から昼にかけては、二つ玉低気圧が合体して爆弾低気圧となり、強い冬型気圧配置と

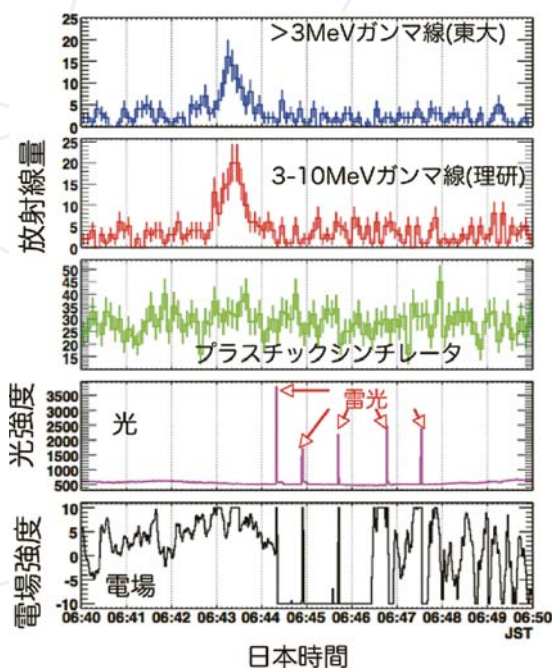
なった。図はこのとき私たちの装置が記録した放射線カウント数で、6時43分ごろ、東大と理研の合計4台の結晶シンチレータのどれにもほぼ同じ強度で、40秒間ほど明らかな放射線の増加が見られる。東大の信号は反同時計数をかけても残るので、この放射線は上空から来たことがわかる。併設したプラスチックシンチレータは反応していないので、この放射線は荷電粒子ではなく、ガンマ線である。さらに理研の装置により、このガンマ線の津波にはエネルギー10 MeVに達する高エネルギー光子まで含まれることも明らかになった。

興味深いのは、このとき雷放電は起きておらず、むしろガンマ線放射が終わって20秒ほど後に、東大の装置に組み込まれた光センサーが、続けて5発の雷光を捕えていることである。したがってガンマ線は、雷雲そのものの強い電場により、電子が準定常的に10 MeV以上にまで加速された結果と推論できる。電子は大気中では大気分子との頻繁なクーロン散乱のため簡単には加速できないが、散乱断面積は電子のエネルギーとともに減るので、いったん宇宙線の入射などでエネルギーの高い電子ができると、それらは「逃走電子」として加速される。電子は大気中を走るさいに、制動放射で前方に絞られたガンマ線を放射し、そのビームが私

たちの装置を照らしたのであろう。こうして雷雲が天然の加速器として働いていることが明らかになり、宇宙のさまざまな加速源への手掛かりが広がった。

柏崎刈羽原子力発電所は、7月16日の中越沖地震で甚大な被害を被った。私たちの装置は幸い、取り付け足が歪んだ程度ですんだが、被災された方々および発電所の皆様に、心よりお見舞いを申し上げます。本研究は、H. Tsuchiya, T. Enoto *et al.*, *Phys.Rev. Lett.*, **99**, 165002, 2007に掲載され、外国の科学雑誌などから問い合わせが相次いでいる。

(2007年10月5日プレスリリース)



2007年1月7日未明の10分間に記録された、ガンマ線の津波を含むデータ。上から、東大の検出器、理研の検出器、プラスチックシンチレータ、可視光センサー、電場センサーの出力を示す