

# 世界初の芳香族有機超伝導体の電子状態を解明

小杉 太一 (物理学専攻 研究員), 有田亮太郎 (工学系研究科  
物理工学専攻 准教授), 青木 秀夫 (物理学専攻 教授)

有機物は、生体も構成している重要な物質群であるが、ふつうは絶縁体や半導体であることが多く、金属的にはなりにくい。実際、金属化を達成した白川英樹先生の仕事はノーベル賞を受けたわけである。有機金属の中のさらに限られたものは、十分低温にすると超伝導になる。有機超伝導が珍しいのは、無機物において超伝導が発見されたのが1世紀以上前(20世紀初頭)であるのに対して、有機超伝導の発見は、ずっと最近(1980年)であることから分かる。また、炭素系においては、グラファイトに金属をはさんだ構造で超伝導が発見されたのは1965年であり、さらにフラレンというサッカーボール状の炭素分子の間にアルカリ金属原子をはさんだ構造で約30Kという転移温度をもつ超伝導が、谷垣勝己博士(現在東北大学教授)により1991年に発見された。超伝導では電子が2個ずつペアを組み、これがボース・アインシュタイン凝縮しており、量子力学的な現象が極微ではなく巨視的な物体で起きていることが人々をわくわくさせてきたが、有機超伝導は挑戦的課題でありつづけて、新たな発見は滞り気味であった。

そこに、岡山大学理学部の久保園芳博教授のグループによって、芳香族炭化水素分子ピセン(picene, 図1)の結晶(図2)

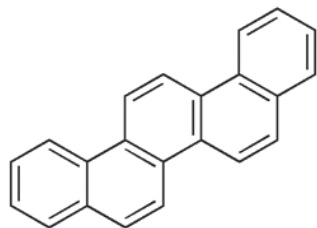


図1:ピセン分子。ベンゼン環が5つ連なっている。

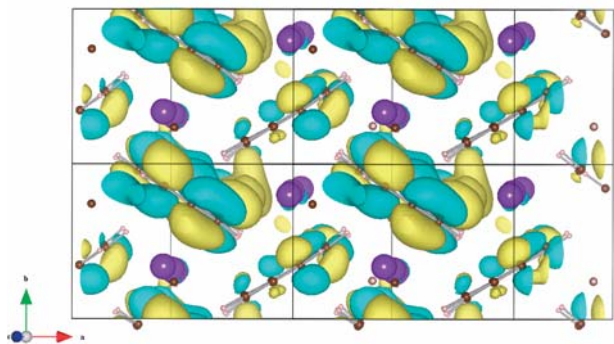


図2:ピセン分子が結晶を組んだ様子。紫の玉はカリウム原子。等高面は、本研究で得られた典型的な電子の波動関数(青が正,黄が負)。

にアルカリ金属をドーブすることで、超伝導が発見された(発見は2009年始め、論文はR. Mitsuhashi *et al.*, *Nature* 464, 76, 2010)。この分子は、高校の化学でも習うベンゼンという六角形をした炭素分子が(ピセンでは5個)つながった分子であり、このような炭素分子は「芳香族」とよばれ、最も典型的な有機分子族をなす。実は、この超伝導体は芳香族炭化水素からなる物質としては世界初の超伝導体である。固体ピセンは良い絶縁体である(強電場をかけても電流がながれにくい)ので、有機トランジスタの絶縁材として知られていたが、ここに電子を(カリウムを混ぜることにより)注入したところ、超伝導が実現したのである。のみならず、超伝導になる温度は絶対温度で20Kであり、有機超伝導としてはひじょうに高い。

ただちに知りたいのは超伝導の機構であるが、それを明らかにするためには、先ずこの物質の中で電子がどのような状態をとっているかを明らかにしなければならない。量子力学に従えば電子は粒子であると同時に波として振る舞うが、有機結晶では分子の並び方が複雑(ピセン結晶では、分子が杉綾模様(ヘリンボン)に並んだ層が積層、図2参照)だけでなく、個々の分子中でも電子は複雑な軌道をとるので、どのような波になっているかを明らかにすることは大切である。物理学専攻の小杉太一研究員、青木秀夫教授と工学系研究科物理工学専攻の有田亮太郎准教授のグループは、産業技術総合研究所計算科学研究部門の石橋章司第一原理シミュレーション研究グループ長、同基礎解析研究グループの三宅隆主任研究員と共に、ピセン結晶、およびカリウムを混ぜたピセンの結晶の電子状態を理論的に解析した。とくに有機物の結晶で大事なものは、電子がどのように分子軌道の間を飛び移るかという点であり、これから生じる電子構造を明らかにした。また、導入されたカリウム原子が結晶中のどこにいるかが実験では明らかになっていないが、それを理論的にシミュレーションすることで位置の候補を挙げると同時に、カリウムを入れる前後で電子状態がどのように変化するかを解析した。これらにより特徴ある電子状態が明らかになり、超伝導機構解明へのひとつの重要な手掛かりを与えた。

本研究は、T. Kosugi *et al.*, *Journal of the Physical Society of Japan* 78, 113704 (2009)に掲載された。

(2010年3月4日プレスリリース)

# 安定原子核アルゴン 40 での超変形状態の発見

井手口 栄治 (原子核科学研究センター 講師)

自然界で安定に存在する原子核のひとつである  $^{40}\text{Ar}$  (アルゴン-40) が、高いエネルギー状態で長軸と短軸が約 2:1 の比をもつ、ラグビーボールのような形に大きく変形 (超変形) することを発見した。これはこれまで発見された中でもっとも中性子過剰な超変形原子核に相当し、 $^{40}\text{Ar}$  を構成する 18 個の陽子と 22 個の中性子が超変形を与える数 (超変形魔法数) になっていることを示唆する、世界初の発見である。

自然界の物質を構成する原子のほとんどの質量を担う原子核は、陽子と中性子から成るが、原子内の電子のエネルギー準位がシェル構造をもつと同様に、原子核内の陽子、中性子のエネルギー準位も、それぞれシェル構造をもつことが知られている。陽子数、中性子数が 2, 8, 20, … の魔法数をもつ原子核は、不活性ガス原子と同様にとくに安定となり、球形の形状をもつと考えられていた。しかし、中性子数が陽子数に比べて過剰な原子核 (中性子過剰核) では、魔法数をもつ場合でも球形にならない例が、近年多数発見されている。この魔法数消滅の発生メカニズムの究明は現在、原子核物理学の主要な研究テーマのひとつとなっている。

いっぽう、超変形原子核とよばれる長軸と短軸の比が、約 2:1 と極端に変形したラグビーボール形の原子核は、球形の魔法数とは異なる新たな魔法数 (超変形魔法数) の場合に現れると予想され、さまざまな原子核で超変形状態の探査が行われてき

た。しかし、これまで対象は陽子数と中性子数が等しい原子核か、安定原子核に比べて陽子過剰な原子核に限られており、中性子過剰核の超変形状態は良く分かっていなかった。

アルゴンおよびその近傍の原子核では、陽子数と中性子数が等しい場合のみで超変形状態の存在が確認されており、陽子数、中性子数ともに 18, 20, 22 が超変形魔法数になっていることを示唆していた。超変形魔法数の中性子過剰核での振る舞いを調べるために、陽子数 18, 中性子数 22 の  $^{40}\text{Ar}$  での超変形状態の探査実験を行った。

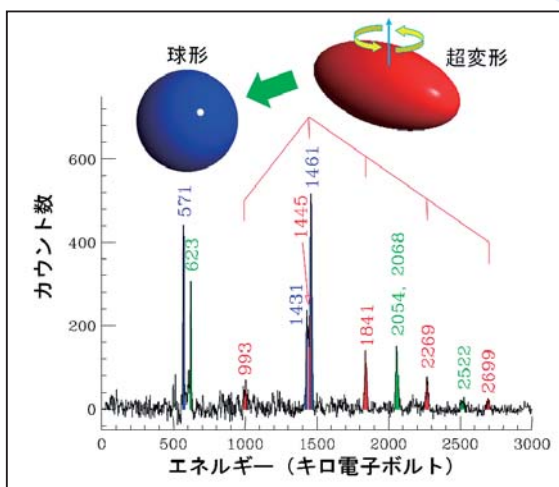
日本原子力研究開発機構のタンデム加速器と多重ガンマ線検出装置 GEMINI-II を用いて、酸素-18 ビームをマグネシウム-26 の薄膜に照射して起こる、核融合反応で出てくる 2 個の陽子と多重ガンマ線を同時に計測することにより、 $^{40}\text{Ar}$  の高い角運動量状態 (高速で回転している状態) についての精密測定を行った。その結果、超変形原子核が高速で回転していることを示すスペクトル (図) が得られ、 $^{40}\text{Ar}$  に超変形状態が存在することを世界で初めて示すことができた。今回の実験結果は陽子数 18, 中性子数 22 の超変形魔法数が、中性子過剰領域でも現れることを示唆する、初めての例となる。

原子核模型に基づく考察により、観測された超変形状態は陽子 2 個、中性子 2 個が同時に高いエネルギー準位に励起することにより発生することが、明らかにされた。全体の 10% に過ぎない核子 (陽子, 中性子) が、原子核全体の形状に影響を与えるという、特徴的な現象である。また、この励起は中性子過剰核での異常変形状態の発現にも対応しており、この研究を通して、これまでとは異なった方法で、中性子数 22 の中性子過剰核に現れる異常変形の発生メカニズムの解明に迫ることができた。

中性子過剰領域では、バナナ型超変形や軸比 3:1 のハイパー変形などのエキゾチック変形の出現が、理論的に予言されているが、それら未知の変形状態の研究が、今後さらに進展すると期待される。

本研究は原子核科学研究センターおよび日本原子力研究開発機構、九州大学、千葉工業大学、高エネルギー加速器研究機構、専修大学の研究グループとの共同研究として行われ、E. Ideguchi *et al.*, *Physics Letters B* **686**, 18 (2010) に掲載された。

(2010年3月11日プレスリリース)



観測された  $^{40}\text{Ar}$  のガンマ線スペクトル。図中に赤色で示された等間隔のピークは超変形状態にある原子核が回転する事を示す。青で示されたピークは球形状態から放出されるガンマ線を示し、緑色のピークは超変形から球形に移り変わる際に放出されるガンマ線を示す。

## 機能未知の GnRH2 ニューロンから電気活動を記録

岡 良隆 (生物科学専攻 教授)

脊椎動物の脳内には、生殖腺刺激ホルモン放出ホルモンとして発見されたペプチド GnRH (GnRH1; 10 個のアミノ酸よりなる) に似ているが、ホルモン以外の機能をもつと考えられる他の 2 種の GnRH ペプチド (GnRH2, GnRH3) が存在するが、GnRH2 の機能については未知であった。私たちは GnRH2 産生ニューロンだけを GFP 蛍光タンパク質で光らせたトランスジェニックメダカ (遺伝子改変メダカ) をつくって、このニューロンからの電気活動記録に脊椎動物で初めて成功し、脊椎動物に共通するそれらの機能を知るための第一歩を踏み出した。

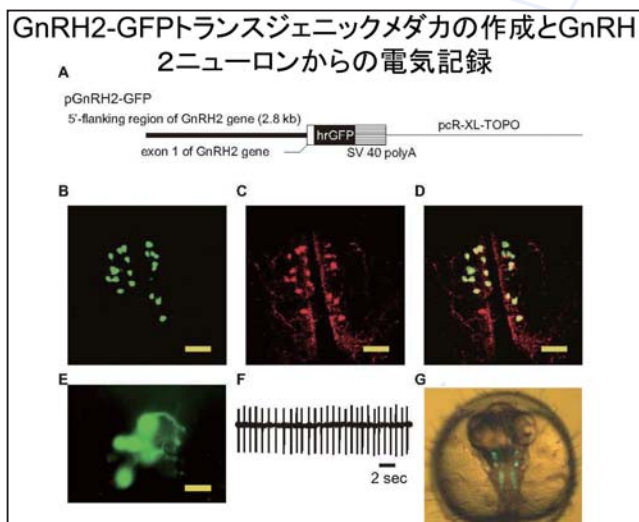
1970 年代に脊椎動物脳内の視床下部から GnRH とよばれるペプチドが発見され (ノーベル賞受賞)、その配列が決定された。この発見により、環境の変化を脳が受け取り、それに応じて脳がホルモン分泌を調節する仕組みの研究が始まった。しかしその後の研究により、脳内にはその GnRH ペプチドの配列に似ているが、機能が異なり、視床下部の外に存在するニューロンがつくる GnRH ペプチドも存在することが分かってきた (GnRH1 ~ 3)。これまでの私たちの研究により、GnRH3 ニューロンは生殖系のホルモン調節にはかかわらず、脳の中ではたいてい脳内のほかのニューロンの興奮しやすさを修飾する作用をもつことがわかっている。この作用は個体レベルでは動物の

行動に関して「やる気を出させる」作用をもつと考えられている。しかしながら、GnRH2 ニューロンに関しては、そのはたらきは未知のままである。魚の脳では 3 つの GnRH 神経系が良く発達していてその研究に適している。とりわけ、メダカは豊富な遺伝子データベースが利用可能であり、トランスジェニック動物 (たとえば特定のニューロンだけに GFP 蛍光タンパク質を作らせるように遺伝子を改変した動物) をつくりやすい、体や脳の透明度が高く丸ごとの脳をディッシュに取り出して GFP 蛍光を見ることができ、など多くの実験上の利点をもっている。

今回私たちは、図 A に示すような人工的な遺伝子を設計してメダカの卵に注入し、GnRH2 ニューロンだけが GFP の緑色蛍光で明るく光るトランスジェニックメダカを作製した。GnRH2 ニューロンを蛍光顕微鏡下で見定めた上で、電気的な活動を脊椎動物の脳で初めて記録することに成功した。この結果、図 F のように、GnRH2 ニューロンは実験的に何も刺激を加えなくても、心臓のペースメーカーのようにきわめて規則的な活動電位を常に自発的に出していることがわかった。このようなペースメーカー活動は、1992 年に私たちが世界で初めて記録した GnRH3 ニューロンの電気活動ときわめて似通っていた。これら GnRH2 および GnRH3 ニューロンは視床下部の外の脳部位に存在していて、GnRH1 ニューロンとは異なり、その軸索とよばれる神経突起を脳下垂体とは全く関係のない脳部位に広く伸ばして、脳の中で GnRH を放出していることも知られている。いっぽう、GnRH1 ニューロンは、一見不規則に見えるが、メダカの排卵周期と関連した、ゆっくりと平均頻度の変化する電気活動を示すこともわかってきている。

このように、今回の発見により、3 つの GnRH 神経系が脳内で異なる神経回路をつくり、異なる電気活動を示すことが明らかになったが、こうした特徴はそれらの脳内における機能と密接に関連していると考えられる。今回の研究成果により、これまで機能未知であった GnRH2 ニューロンの機能をめぐる細胞レベルでの研究が本格化し、メダカをモデル生物として用いる研究が、脊椎動物の神経生物学の研究全体に今後大きな影響を及ぼすことが期待される。本研究は、生物科学専攻の神田真司 (D3)、西川圭 (M2) らにより行われ、論文は S. Kanda, K. Nishikawa *et al.*, *Endocrinology* 151, 695 (2010) に掲載された。

(2010 年 3 月 12 日プレスリリース)



- A. トランスジェニックメダカをつくるために作成した人工的遺伝子配列。  
 B-D. GFP (B, 緑) 発現ニューロンのほとんどすべてが GnRH2 (C, 赤) ペプチドをつくっていることが D の重ね合わせ写真 (黄色) によりわかる。  
 E. GFP 蛍光標識されたニューロンの塊。F. 1 個の GFP 標識ニューロンから記録された電気活動。G. 生きたメダカを卵膜の外から観察しても緑色に光る GnRH2 ニューロンがわかる。