

# 自然界でもっとも低密度の液体を発見

福山 寛（物理学専攻 教授）  
佐藤 大輔（物理学専攻 博士課程修了<sup>注)</sup>）

絶対零度で液化も固化もせず気体にとどまると考えられていたヘリウム3の2次元系が、これまで知られるどの物質より低密度の液体に「自己凝集」することを発見した。この発見は従来の理論計算の再検証を促すだけでなく、量子力学に従う多粒子系の一般論に新展開をもたらす可能性を秘めている。今後、2次元ヘリウム3における未発見の超流動転移の探索に拍車がかかるることは間違いない。

物質を構成する粒子の質量が小さいとき、ハイゼンベルクの不確定性原理による零点振動エネルギーが粒子間の引力エネルギーと拮抗して、絶対零度でも固化しない液体や、液化すらしない気体が実現する。こうした量子性の高い液体や気体のことを量子液体・気体とよび、極低温で超流動など驚くべき現象が見られる。自然界には、核子の液体と見なせる原子核や、気体として振る舞う固体中の伝導電子などさまざまな量子液体・気体がある。しかし、気液相転移を直接観測できる量子系は稀である。

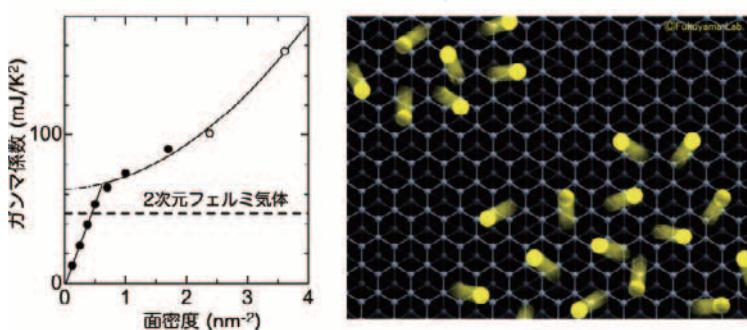
原子の中でもっとも大きな量子性をもつヘリウム3(<sup>3</sup>He)を固体表面に単原子層吸着させ、その運動を2次元空間に閉じ込めた量子系は新奇な量子相の宝庫である。空間次元を下げるに連接原子数が減るために引力を弱めることができ、吸着基板と<sup>3</sup>He層の間に異種原子層を挿入すれば逆に引力を強めることもできる。最近われわれは、<sup>3</sup>Heの2次元系が超低密度の液体に自己凝集することを突き止めた。これまでの理論計算では、この系は基底状態(絶対零度で最低のエネルギーをもつ安定状態)で気体となる唯一の物質と考えられていたので、この結果は驚きをもって迎えられた。

粒子には電荷やスピン(磁性の起源)などのほかに「統計性」という属性があり、物質の低温の性質は粒子の統計性が決めている。これにはフェルミ統計とボース統計の二種類ある

が、<sup>3</sup>Heは電子と同じフェルミ統計に従い、その熱容量は十分低温で温度に比例する。さらに2次元フェルミ粒子系の場合、その比例係数( $\gamma$ )が粒子密度( $\rho$ )によらず、系の面積と粒子質量だけで決まる(両者に比例する)というユニークな性質がある。われわれは、従来の基板にくらべナノスケールでの平坦度に勝るグラファイト表面に2次元<sup>3</sup>He試料をつくり、これまで調べられたことのない低密度まで熱容量を2mK(千分の2ケルビン)の超低温まで測定した。得られた $\gamma$ 値を $\rho$ の関数として図示したのが左図である。系が一様な気体ならば $\rho \rightarrow 0$ の極限で $\gamma$ は滑らかに一定値(図中波線)に漸近するはずだが、0.6 nm<sup>-2</sup>(1平方ナノメートルあたり原子0.6個)以下で鋭角的に折れ曲がり、原点に向かって直線的に減少している。これは系が臨界密度0.6 nm<sup>-2</sup>の量子液体とほとんどゼロ密度の気体に二相分離したことを意味する(右図)。臨界密度とは、それより低密度の状態が存在しない下限値のことである。この平均粒子間距離(約1.4 nm)はどの液体よりも長く、3次元換算した比重はわずか0.002で、自然界でもっとも希薄な液体である。液体水素がこれまでの最低比重で、その1/30と桁違いに小さい。

この発見は、現代物理学の難問のひとつであるフェルミ粒子からなる多体系の第一原理計算のさらなる進展を促し、そのホールマークを与える。さらに、2次元<sup>3</sup>Heには液化するほどの引力が働いていることが分かったので、実験的に到達可能な温度域に超流動転移が見つかる可能性が高まった。未発見の2次元超流動<sup>3</sup>Heは、引力相互作用の制御性が高く、今後どのような新しい物理が生まれそれをデザインできるか楽しみである。本研究は D.Sato et al., *Physical Review Letters* 109, 235306 (2012) に掲載された。

(2012年12月20日プレスリリース)



2次元ヘリウム3の熱容量のガンマ係数。原点に向かって直線的に変化する面密度範囲が気液の共存状態(左図)。グラファイト表面の2次元空間に閉じ込めたヘリウム3が自己凝集したイメージ図(右図)。

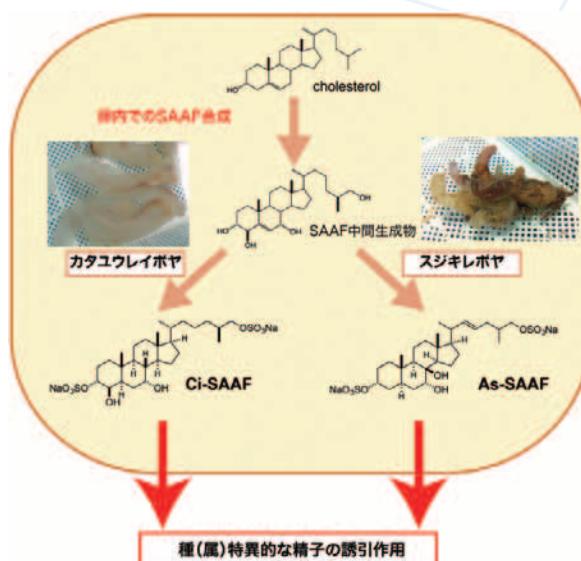
注) 現所属:理化学研究所 基礎科学特別研究員

# 同種の精子をいざなうホヤ卵の精子誘引物質

吉田 学（臨海実験所 准教授）

◆◆ 受精のさいに卵は同種の精子を誘引する物質を放出し、精子はその物質を手がかりに卵まで泳いでいく。この精子走化性には種を見分ける特異性が存在するが、その分子メカニズムは全く分かっていない。われわれは原始的な脊索動物であるホヤを用いて精子誘引物質の同定を行い、これまで同定していたカタユウレイボヤに加えて、このたびスジキレボヤの精子誘引物質の構造決定に成功した。この2種の精子誘引物質はきわめて類似した構造をもつステロイド誘導体であり、その違いは、水酸基の位置と1つの二重結合の有無であった。

受精のさいに見られる精子が卵へ誘引される現象（走化性）は、植物から動物まで広く存在し、とくにクラゲやホヤなど体外受精を行う海産無脊椎動物において顕著である。多くの動物でこの精子走化性には特異性があり、同じ種の精子と卵が出会う確率を上げる仕組みの1つであると考えられている。卵から放出される精子誘引物質はごく微量で、さらにこの物質はタンパク質の場合もあれば、低分子有機化合物のこともあり様々で、その同定はとても難しい。全動物種を見渡しても、これまで8種で同定されたに過ぎず、種間比較は困難であった。元々は共通なはずの精子走化性がどのようにしてそれぞれの種で特異性を獲得してきたのか、その分子メカニズムは全く不明であった。



ホヤは卵内でコレステロールより精子誘引物質SAAFを生合成する。おそらく合成経路のわずかな違いで種特異的な精子誘引物質が作られるのだと思われる。

これまでわれわれは、カタユウレイボヤ (*Ciona intestinalis*) 精子誘引物質の分子構造を決定し、新奇なステロイド誘導体 Ci-SAAF (図参照) であることを明らかにしている。ホヤでも精子走化性に属レベルでの特異性があることが報告されており、実際、Ci-SAAF は近縁のホヤ精子を誘引しない。そこで、この種特異性の分子メカニズムを解明するため、比較対象として *Ciona* 属に近縁なホヤの精子誘引物質の解明に取り組んできた。そして今回、われわれは *Ascidia* 属のスジキレボヤ (*Ascidia sydneiensis*) の卵から抽出したわずかな精製物をもとに、スジキレボヤ精子誘引物質 As-SAAF の分子構造を決定することに成功した。この2つのホヤの精子誘引物質はきわめて類似した構造をもつステロイド誘導体であり、分子量の差は二重結合の有無による2だけで、それ以外には水酸基が結合する炭素の位置が1カ所異なるだけであることがわかった。このようなわずかな分子の違いが種特異性につながっていることは大きな驚きである。ホヤではこのように少しづつ形が違うステロイド誘導体が種特異的な誘引物質として働いていると考えられる。

原始的な脊索動物であるホヤは、ステロイド代謝酵素はもっているが、同じ脊索動物門である脊椎動物とは異なり、性ステロイドホルモン受容体が存在しない。したがってホヤでは、独自のステロイド代謝経路が進化し、種特異的な精子誘引物質の合成につながっていると推測される。今後、受精の分子機構がどのように種分化してきたか、種特異的な分子機構とは何かを明らかにしたいと考えている。本研究は大阪大学大学院理学研究科化学専攻の村田道雄教授、松森信明准教授との共同研究であり、研究成果は N.Matsumori, et al., *Organic Letters*, 15, 294-297 (2013) に掲載された。

(2013年1月15日プレスリリース)