

ミツバチのダンス言語の謎に迫る脳科学

金子 九美 (生物科学専攻 博士課程修了), 久保 健雄 (生物科学専攻 教授)

ミツバチは尻振りダンスを用いて餌場の在処を仲間に伝える。これまでに餌を集めるミツバチの脳ではキノコ体とよばれる高次中枢の一部が活動することが分かっていた。今回、私たちはミツバチ脳で領野選択的に発現する遺伝子の解析から、ミツバチのキノコ体が、従来考えられてきた大型と小型のケニヨン細胞に加えて、新規な「中間型」ケニヨン細胞から構成されることを発見し、餌を集める働き蜂の脳では小型と中間型ケニヨン細胞の一部が活動していることを見いだした。

花蜜や花粉を集めて巣に戻ったミツバチの働き蜂は、フリッシュ (Karl Ritter von Frisch 1973 年ノーベル生理学・医学賞受賞) の発見で有名な尻振り (8 の字) ダンスを用いて仲間に餌場の在処を教える。尻振りダンスでは視覚により受容した飛行経験のミニチュア版が表現される。尻振りダンスは記号的コミュニケーションの一種であり、フリッシュはこれを「ダンス言語」と呼んだが、その神経的基盤は良く分かっていない。

さて、ミツバチの脳では感覚統合や記憶・学習に働き、昆虫脳の高次中枢と考えられているキノコ体が発達しており、社会性行動との関連が想定されてきた。ミツバチのキノコ体は上向きの傘を2つずつもつ左右一対の構造体で、ケニヨン細胞とよばれる神経細胞から構成される (図 1A)。これまで、キノコ体の傘内側の両側には細胞体が大きい大型ケニヨン細胞、傘内側中央部には細胞体が小さい

小型ケニヨン細胞が存在するとされてきた (図 1B)。また、私たちの研究室ではこれまで、ミツバチ脳でキノコ体選択的に (=強く) 発現する遺伝子を探索し、多数の大型や小型ケニヨン細胞選択的に発現する遺伝子を同定してきた。ところが今回、私たちは *mKast* (*middle-type Kenyon cell-preferential arrestin-related protein*) と命名した新規な遺伝子の解析から、大型と小型のケニヨン細胞の境界域に、大きさも中間で *mKast* を選択的に発現する新規のケニヨン細胞が存在することを見だし、このケニヨン細胞を「中間型」ケニヨン細胞と命名した (図 1C)。2007 年に当研究室の大学院生であった木矢剛智博士らは、初期応答遺伝子 (神経興奮のマーカー遺伝子) を用いた解析から、餌を集める働き蜂の脳ではキノコ体傘内側の中央部のケニヨン細胞が選択的に活動することを報告していたが、今回の私たちの解析から、それは小型と中間型ケニヨン細胞の一部であることが判明した。これらのケニヨン細胞は、餌を集める際に受容した感覚情報の処理に関わる可能性がある。

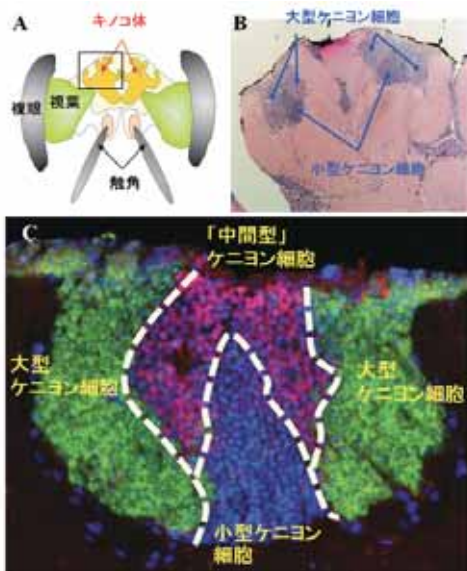


図 1: ミツバチ脳のキノコ体を構成する 3 種類のケニヨン細胞。(A) ミツバチの脳の模式図、(B) キノコ体 (A) の黒枠内) の染色像に見る大型と小型ケニヨン細胞 (従来の考え方)、(C) 遺伝子発現で区別される 3 種類のケニヨン細胞。緑: 大型ケニヨン細胞選択的な *CaMKII* の発現、マゼンタ: 「中間型」ケニヨン細胞選択的な *mKast* の発現 (以上、蛍光二重 *in situ* ハイブリダイゼーション法)、青: 両遺伝子とも発現しない小型ケニヨン細胞の核染色 (カウンター染色)。

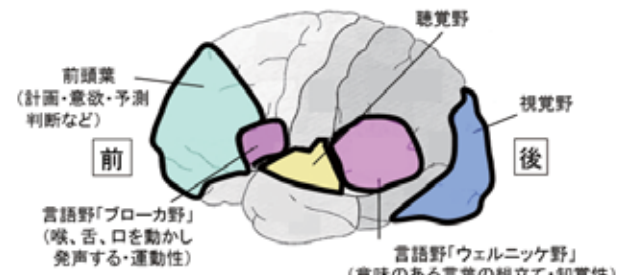


図 2: ヒトの脳新皮質の「脳機能局在論」。左脳半球を示す。

ヒトの脳には「ブローカ野」と「ウェルニッケ野」という 2 つの言語野が存在するが (図 2)、これら領野の遺伝子発現プロファイルがどのように異なるのかは分かっていない。本研究では、餌を集めるミツバチの高次脳で異なる遺伝子発現プロファイルをもつ領野が活動することを初めて見いだした。今後、ミツバチ脳で遺伝子操作技術を確立し、*mKast* などの遺伝子を改変し、その影響を調べることで「ダンス言語野」が同定され、その働きが理解されると期待される。本研究は、Kaneko *et al. PLOS ONE* 8 (8) : e71732 (2013) として発表された。

(2013 年 8 月 22 日プレスリリース)

原子核の新しい魔法数 34 を発見

大塚 孝治 (物理学専攻 教授), Steppenbeck, David (原子核科学研究センター 特任研究員)

原子核は陽子と中性子から成るが、魔法数というものがあり、陽子数 (Z), 中性子数 (N) がそれに一致すると特別な安定性を示す。1949 年に 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 が魔法数としてゲッパート = メイヤー (Maria G.A.Nvppert-Mayer) とイェンゼン (Johannes Hans Daniel Jensen) によって提案された (1963 年ノーベル物理学賞)。それらは、通常の物質の原子核 (安定核) の魔法数である。近年、別種の寿命が短いエキゾチック原子核の研究が始まり、これらの魔法数の一部は消滅、新たな魔法数が出現、という驚くべき事が判明してきた。そのような研究の中核を成すのは、新しい魔法数の探索である。ここでは、新しい魔法数 34 の発見について述べる。

原子核は、原子に比べ 1 万分の 1 のスケールの一層ミクロな世界であり、量子論に従う「量子多体系」である。ミクロな世界で粒子が集まって多体系をつくると、粒子の数によって特異な性質が現れる。原子の場合での、ヘリウム、ネオン、クリプトンなどの希ガス元素の安定性がその好例で、原子の中の電子の数がちょうど原子の魔法数 (2,10,18,...) に一致し、電子の状態が壊れにくくなる。

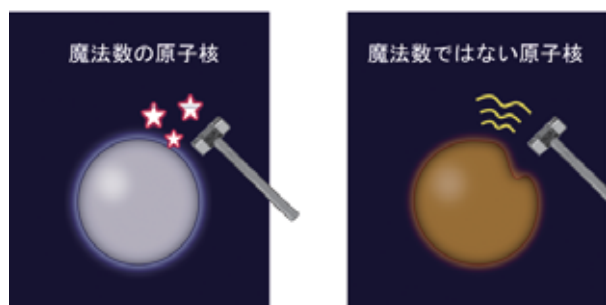
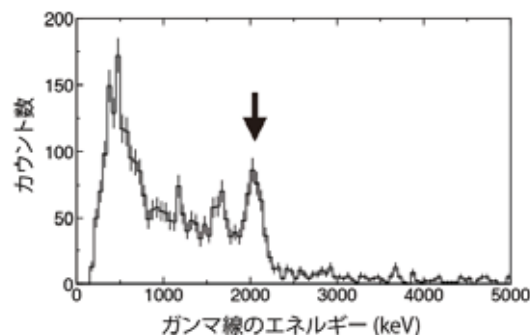
原子核ではどうだろうか？原子核を塊にしている力は核力で、原子中の電子を束縛している電気力とは違うが、魔法数はやはり現れ、特別な安定性を示す。メイヤーとイェンゼンの魔法数は、原子の場合と同様に、すべての原子核に共通の「定数」であると半世紀に渡って想定されてきた。それが、20 世紀の終わり頃から怪しくなってきた。核力にはテンソル力とよばれる成分があり、陽子や中性子のスピンの向きによって引力になったり斥力になったりするユニークで重要な効果を生ずる。その起源は、パイ中間子の交換に基づく湯川理論で説明される。原子核の魔法数にこの効果が強く影響していることは長く気づかれずにまよっていた。著者 (大塚) らはこのメカニズムを発見し、その一例として魔法数 34 がエキゾチック核に現れることを 2001 年以来予言していた。

これは基本的な問題として注目を集め、検証実験が世界各地のグループにより最先端の加速器を用いて挑戦されてきた。しかし、10 年経っても成功せず、予言を疑問視する声もあがっていた。それが、理化学研究所の RIBF (RI ビームファクトリー) 加速器によって見事に検証され、国際学術誌 *Nature* 10 月 10 日号に論文が掲載された。魔法数 34 を実験で検証するには、 $Z=20, N=34$ のカルシウム 54 というアイソトープの性質を調べる必要があるが、中性子が大幅に多いために寿命があり天然に存在しない。RIBF 加速器により、多量のカルシウム 54 が生成でき実験に成功した。

魔法数かどうかは堅さで分かる。解説図下部にはゴムボールのような柔らかいボール (右) と鉄球のような堅いボール (左) が示されている。前者は外から押すと簡単に変形し、ポツ

と低い音を出して元に戻る。鉄球は叩くとカンと高い音を出して元に戻る。魔法数の原子核は安定で壊れにくく、鉄球に相当し高い音を出す。量子論では、それは高いエネルギーのガンマ線となる。図のガンマ線の強度分布で矢印が示すピークがそれであり、カルシウム 54 が強く、魔法数である事が分かり、魔法数 34 の理論予言の実験的検証となった。この実験は著者の一人 (ステッペンベック) を代表者の一人とし、本研究科原子核科学研究センターと理化学研究所の共同研究であった。本研究は D. Steppenbeck, *et al.*, *Nature* 502, 207-210 (2013) に掲載された。

(2013 年 10 月 10 日プレスリリース)



上の図は、エキゾチック原子核であるカルシウム 54 が刺激された状態で生成された後、冷える際に放射されるガンマ線の強度分布を表す。矢印のピークのエネルギーがこの原子核の硬さを現わす。(作成協力：原子核科学研究センター 岩田順敬 特任助教)

超巨大ブラックホールをとりまく分子合成工場

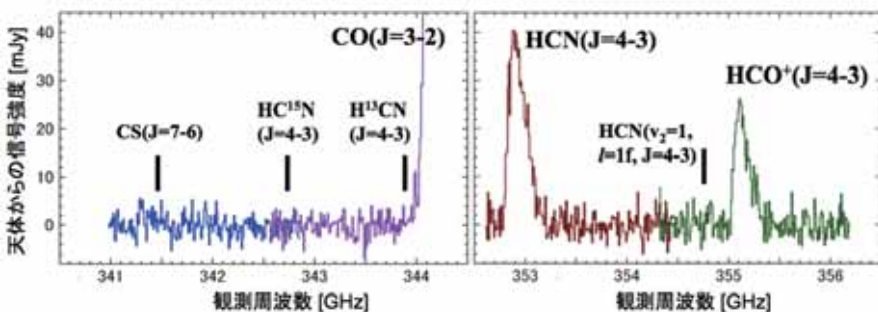
河野 孝太郎 (天文学専攻 教授), 泉 拓磨 (天文学専攻 修士課程2年)

星間空間は一般にきわめて希薄 (太陽近辺では、平均して1立方センチメートルあたり水素原子1個) であるが、領域によっては1立方センチメートルあたり 10^5 個~ 10^7 個も水素分子が含まれるような“濃い”ガスのかたまり (分子雲) が存在し、そこには、さまざまな分子も発見されている (星間分子)。今回、私たちは、超巨大ブラックホールのごく近くにある分子雲の中で、シアン化水素 (HCN) の割合が多いことを突き止めた。巨大ブラックホールの周辺で、なぜ、ある特定の分子が多いのだろうか？ また、巨大ブラックホールの周辺で、ある分子が多いと、いったい何が嬉しいのだろうか？

さまざまな銀河の中心付近では、膨大なエネルギーの放射を伴う活動的現象がしばしば観測される。そのひとつは爆発的な大質量星の形成「スターバースト」である。もうひとつは、「活動銀河核」とよばれ、多くの銀河の中心に存在すると考えられている超巨大ブラックホール (太陽の数百万倍以上という途方も無い質量をもつ) へ星間物質が落ち込む際に発生する強い放射を見ていると考えられている。いずれも銀河や超巨大ブラックホールの形成・進化を理解する上できわめて重要であるが、ある銀河がその中心にスターバーストをもつのか、あるいは活動銀河核をもつのか (はたまた両方が共存しているのか) を調べることは、時に厄介なことでもある。なぜなら、銀河中心領域には、往々にして、多量の星間物質が集積され、その結果、星間物質による影響 (減光や散乱など) を受けやすい可視光はもちろん、比較的透過力の高い赤外線やX線ですら、なかなか中心部分まで見通すことができないという状況が起き得るからである。

ここで注目されるのが、ミリ波サブミリ波とよばれる電磁波を使った観測である。この波長帯は、多量の星間物質が集まっている銀河中心領域でも、その中を見通して調べることができるというユニークかつ重要な特徴をもつ。

私たちは、2011年に初期科学運用を開始したアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) を使い、超巨大ブラックホールがあり、そこで活動的な現象が起きていると分かっている銀河、NGC1097の観測を行った。その結果、超巨大ブラックホールの近くで、シアン化水素やホルミルイオン (HCO^+) からの強い放射が検出された (図)。観測結果を再現するような物理化学状態をモデル計算により徹底的に調べたところ、 HCO^+ 分子に対する HCN 分子の量が、数倍から数10倍あり、一般的な分子雲において見られる HCN 分子の割合よりも顕著に増えていること、また、分子雲の温度は数100Kに及ぶこと (一般的な分子雲では数10K程度) を突き止めた。これは、高温環境下で HCN 分子は増え HCO^+ 分子は破壊されるとする最近の星間化学理論モデルと整合する。超巨大ブラックホール周辺での特徴的な活動現象、たとえば強いX線放射や激しいジェットに伴う衝撃波により、周辺に存在する分子ガス雲が数100Kまで加熱され、そこが HCN 分子の理想的な合成工場となっているのであろう。HCN 分子の割合が高くなっている領域では、顕著なスターバーストの兆候は見られないため、今回見出された分子の特徴は、活動銀河核に特有なものだと考えられる。



ALMA望遠鏡により得られた、活動銀河NGC1097の中心領域でのスペクトル。一酸化炭素(CO)、シアン化水素(HCN)、ホルミルイオン(HCO^+)からの強い放射が検出された。いっぽう、硫化炭素(CS)は検出されなかったことから、星形成領域とは異なる特徴を示していることが、また、振動励起状態にあるHCN分子からの放射が検出されていないことから、中間赤外線による高いエネルギー状態への「汲み上げ」は起きていないことが読み取れる。

NGC1097という銀河で得られたこれらの結果が、より多くの銀河でも検証されれば、HCNなどの特徴的な分子を「マーカー」として活用し、濃い星間物質に覆われた銀河の正体をALMAによる分光観測で診断することが可能になると期待される。

以上の成果は、T. Izumi, *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65,100 (2013) に掲載された。

(2013年10月23日プレスリリース)