

植物の液胞へ物質を運ぶ仕組みを解明

海老根 一生 (生物科学専攻 博士研究員), 上田 貴志 (生物科学専攻 准教授)

植物細胞の大部分を占める大きな袋、それが液胞である。液胞は動物細胞のリソソームと同様に、不要になったタンパク質の分解を担う細胞小器官であるが、それ以外にも、タンパク質の貯蔵、細胞内の恒常性の維持などの独自の機能をもっている。これらの機能を発揮するためには、多種多様なタンパク質が液胞に正しく運ばれる必要がある。この液胞へのタンパク質輸送の仕組みを詳しく調べた結果、植物の液胞への輸送経路には、動物のリソソームへの輸送と共通する経路に加え、植物に独自の2つの輸送経路が存在することが明らかになった。

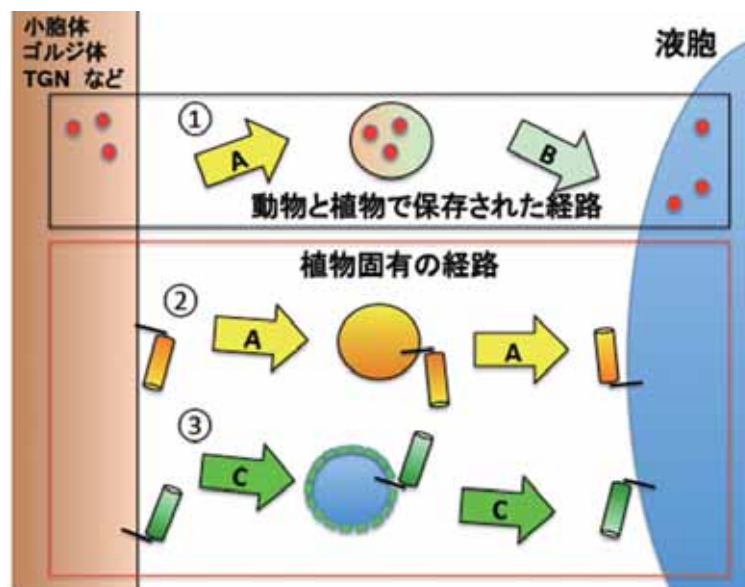
真核生物の細胞には、タンパク質を合成する小胞体、不要なタンパク質を分解する液胞（動物細胞ではリソソーム）など、機能の異なるさまざまな細胞小器官が存在する。これらの細胞小器官のはたらきの違いは、それぞれの細胞小器官に存在するタンパク質の違いに起因し、タンパク質を目的の細胞小器官に正しく運ぶことが、細胞小器官が正しく機能するために必要不可欠である。このタンパク質の運び分けを担うのが、「膜交通」とよばれる仕組みである。

細胞小器官の機能は多くの場合生物間で似通っているが、そのライフスタイルや体制に応じて細胞小器官に特殊なはたらきを付与している場合がある。たとえば、成長した植物細胞の容積の9割以上を占める液胞は、不要物の分解を行うことから、動物細胞のリソソームと類似した細胞小器官であると考えられている。しかし、植物の液胞は、種子では発芽のエネルギー源となるタンパク質を蓄えたり、花では色素を蓄積して色を決めたり、葉や根では浸透圧の調整や細胞形態の維持をおこなったりと、動物細胞のリソソームには無い多様な役割を担っている。このような細胞小器官のはたらきの違いは、そこで機能するタンパク質の種類の違いを反映している。多くの機能をもつ植物の液胞では、それぞれの機能に対応してさまざまなタンパク質がはたらくていると考えられ、それらのタンパク質を正確に液胞に運ぶための特別な仕組みが備わっているものと考えられる。

そこでわれわれは、植物における液胞へのタンパク質輸送の仕組みを明らかにするために、動物細胞と植物細胞で共通してリソソーム / 液胞への輸送を制御する膜交通制御因子の役割を詳しく調べた。それらの因子の機能を欠失したシロイヌナズナの変

異体における液胞輸送の異常を詳細に調べた結果、植物細胞においても動物細胞のリソソーム輸送と同様の仕組みが存在することが確認された。しかしながら、複数の液胞局在タンパク質の輸送をそれらの変異体を用いてさらに調べたところ、植物には、動物と共通する輸送経路とは異なる仕組みで液胞へとタンパク質を運ぶ輸送経路が2つ存在することが明らかとなった。これらの結果から、植物細胞は少なくとも3つの輸送経路を使って液胞へとタンパク質を運んでいることが示された(図)。本研究成果は K. Ebine *et al.*, *Current Biology* 24 1375-82 (2014) に掲載された。

(2014年5月30日プレスリリース)



植物の液胞輸送経路の模式図。二つの因子 A, B が連続してはたらくて液胞へタンパク質を輸送する経路(図中①)が、動物でもリソソームへの輸送を担っている。いっぽう、植物には因子 A のみがはたらくている経路(図中②)、A, B のどちらとも違う因子 C が制御している輸送経路(図中③)も存在し、それぞれが異なるタンパク質の輸送を担っている。

宇宙最強の磁石天体は、磁力で変形していた

牧島 一夫 (物理学専攻 教授), 中澤 知洋 (物理学専攻 講師)

◆ 中性子星は、宇宙で最強レベルの磁場をもち、中でも磁場がとくに強い一群は、マグネターとよばれる。◆
◆ 私たちは JAXA の X 線衛星「すざく」を用い、あるマグネターを観測したところ、その自転周期に伴う◆
◆ 硬 X 線パルスの位相が、ゆっくり進み遅れする現象を発見した。これは、本来は強い重力で球形になる◆
◆ はずの中性子星が、内部に潜むドーナツ状の磁場がもつ磁力のためわずかに変形し、自由歳差運動 (自◆
◆ 転軸の首振り) が起きている結果と解釈された。内部磁場の強度は、 10^{12} テスラに達すると推定される。◆

「力学」では、剛体 (大きさをもつが変形しない物体) の運動を学ぶ。球対称なときは簡単で、重心系から見れば、剛体は任意の軸の回りに任意の周期で自転する。球対称からずれて軸対称になると、剛体は図のラグビーボールのように、対称軸の回りに任意の周期 P で自転し、同時にこの対称軸が、空間に固定した別の軸 (角運動量の方向) の回りを周期 P' で首振りする。後者は自由歳差運動とよばれ、 P と P' の比は剛体の形のみで決まる。球形からずれるほど P/P' は 1 からずれ (縦長なら < 1 、扁平なら > 1)、ラグビーボールでは $P/P' = 3/5$ である。こう書くと、コマの首振りや地軸の 26,000 年周期の移動を連想する人が多いだろうが、これらの例は重力のトルクによる強制歳差運動であり、自由歳差運動ではない。

天体に遠心力や、磁力など非等方的な圧力が働くと、球形から変形して軸対称となる。すると自由歳差運動が起きうが、その検出は必ずしも容易ではない。なぜなら図で、ボールの先端に赤い光源があるとき、その飛行を真横から見ても、光が周期 P' で明滅するのみで、周期 P は現れず、球形か否か判別できないからである。光源が先端からずれた青の位置にあると、その強度は平均周期 P' で増減しつつ、光が最大となる時刻 (位相) は、 P と P' の「うなり」に相当する長い周期で早まったり遅れたりするので、初めて球形からのずれが検知できる。

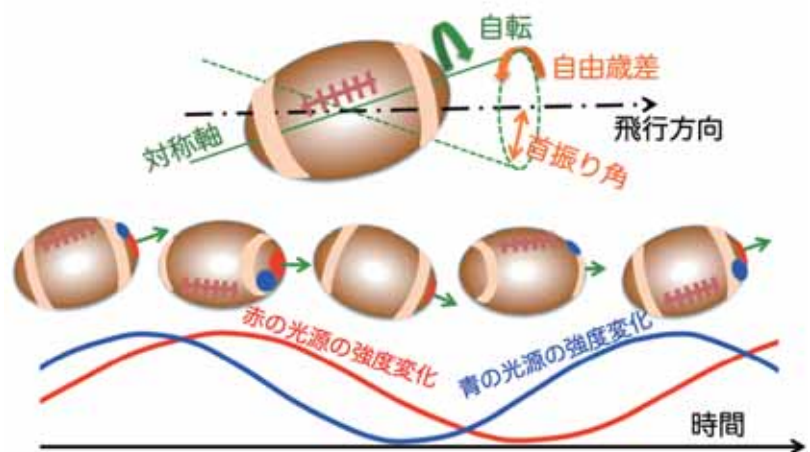
宇宙にあるさまざまな天体の中で、高密度、強い重力、強磁場の三冠王というべきものは、中性子星である。その中でもとくに磁場が強いものは、マグネターとよばれる天体で、30 個ほど知られており、磁気エネルギーを費やすことで X 線を放射している。私たちは 4U 0142+61 とよばれる代表的なマグネターを、JAXA の宇宙 X 線衛星「すざく」で、2007 年、2009 年、2013 年の 3 回にわたり観測した。その結果、低エネルギー X 線 (軟 X 線) のパ

ルスは、周期 $P = 8.6897$ 秒で等間隔に到来するが、高エネルギー X 線 (硬 X 線) パルスの到着時刻は、 $Q = 15$ 時間という長い周期で、0.7 秒ほど進んだり遅れたりしていた。これは 4U 0142+61 が軸対称なため、自由歳差運動が起きており、軟 X 線は図で赤の位置から、また硬 X 線は青の位置から放射されているとすると理解できる。

この解釈にもとづき Q/P' の比から計算すると、このマグネターは対称軸に沿って 0.01% ほど (おそらく縦長に) 変形していると推測できる。その原因として、星の内部にドーナツ状に強い磁場が閉じ込められ、その磁力が星を縦に引き延ばしていることが考えられる。変形量を説明するのに必要な磁場は、 10^{12} テスラ (黒板マグネットの 10^{14} 倍) という強烈なもので、4U0142+61 の外部に出ている双極子磁場を 100 倍ものぐ値である。

このように、中性子星の内部に潜む磁場の強度を観測から推定した研究は世界初であり、K. Makishima *et al.*, *Physical Review Letters* 112, id.171102 (2014) に掲載された。

(2014 年 6 月 2 日プレスリリース)



軸対称な剛体の自由歳差運動を、ラグビーボールを例にとり示したものの。簡単のため、およそ $P:P' = 3:4$ にとってある。

1つの遺伝子から2つのペプチドを同時に合成

寺坂 尚紘 (化学専攻 博士課程3年), 菅 裕明 (化学専攻 教授)

◆ 遺伝暗号にしたがってメッセンジャー RNA (mRNA) からタンパク質が作られる過程では、タンパク質の合成の場所となるリボソームおよびアミノ酸をリボソームへ運ぶ転移 RNA (tRNA) が翻訳反応をおもに担っている。今回の研究では、リボソームを構成するリボソーム RNA (rRNA) と tRNA を人工的に改変することで、通常の翻訳システムとは独立して働く改変翻訳システムの開発に成功した。本システムによって、1種類の遺伝子から、2つの異なる遺伝暗号に基づき、2種類のペプチドを同時に翻訳することができた。

タンパク質の設計図である遺伝情報は、アデニン (A), グアニン (G), シトシン (C), チミン (T) (RNA ではチミンの代わりにウラシル (U)) の4種類の塩基で書かれている。3つの塩基の組み合わせが1種類のアミノ酸に対応しており、この対応を遺伝暗号という。

遺伝暗号にしたがって mRNA からタンパク質を合成する翻訳反応は、おもにリボソームと tRNA が担っている。tRNA が運んでくるアミノ酸どうしを結合するリボソーム内において、リボソームを構成する rRNA および tRNA では、翻訳反応の間、互いの相補的な塩基が塩基対を形成している (図)。これらの塩基対は翻訳反応過程に重要であることが示唆されている。たとえば、G2553-C75 塩基対に対して、塩基対を保つような相補的な変異 (G2553C-C75G) を導入しても、翻訳反応のうち、ペプチドにアミノ酸を連結する活性は保たれる。しかし、このような相補的な変異が翻訳反応の全体に与える影響は未解明であった。

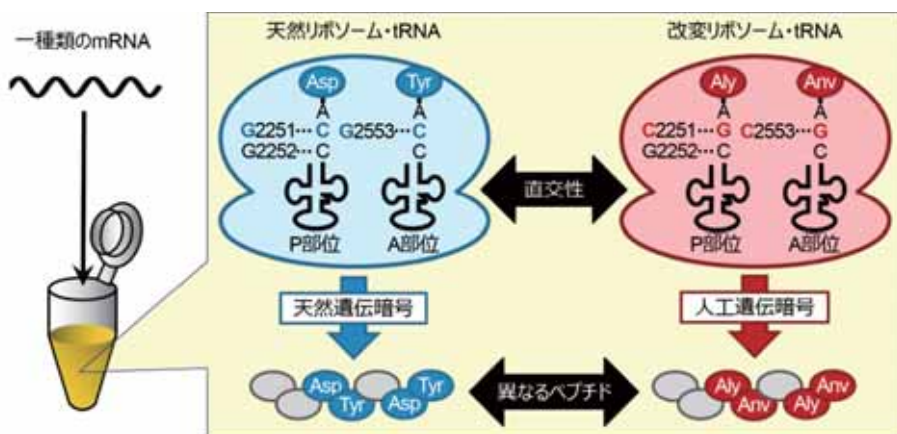
今回われわれは、塩基に変異を導入しても rRNA と tRNA 間の結合を保つような、変異体リボソームと変異体 tRNA の組み合わせの翻訳反応の活性を調べた。その結果、G2252-C74 塩基対は翻訳反応への寄与が少ないが、G2251-C75 と G2553-C75 塩基対は寄与が大きいことがわかった。さらに、G2251C/G2553C リボソームと C75GtRNA の組み合わせと、変異のない通常 (天然) リボソームと tRNA の組み合わせは、それぞれ独立して働く直交性をもつ翻訳

システムであることを発見した。すなわち、天然の翻訳反応と人工の翻訳反応が、お互いに邪魔せずに進行する (直交性をもつ) のである。

この直交性をもつ rRNA と tRNA の組み合わせを用いて、天然・改変 tRNA それぞれに異なるアミノ酸を結合することで、1本の反応チューブ内で1種類の mRNA から各々異なる2種類のペプチドを翻訳することが可能である (図)。この翻訳反応は、自然界に存在する遺伝暗号とは異なる遺伝暗号に従い、天然の翻訳システムとは独立して働く人工的な改変翻訳システムであるといえる。本システムは、近年薬剤候補として注目されている非天然アミノ酸を含む特殊ペプチドの合成への応用も期待される。

本研究成果は、N. Terasaka *et al.*, *Nat. Chem. Biol.* **10**, 555-557 (2014) に掲載された。

(2014年6月11日プレスリリース)



天然では、rRNA_{G2553}とA部位のtRNA_{C75}が、rRNA_{G2251}, G2252とP部位のtRNA_{C75}, C74がそれぞれ塩基対を形成している。天然のリボソーム・tRNAと改変リボソーム・tRNAはそれぞれ独立して働き、同じmRNAから各々異なるペプチドを翻訳する。改変翻訳系ではAspの代わりにAlyが、Tyrの代わりにAnvが翻訳に用いられる (Asp:アスパラギン酸, Tyr:チロシン, Aly:アセチルリシン, Anv:アジドノルバリン)。