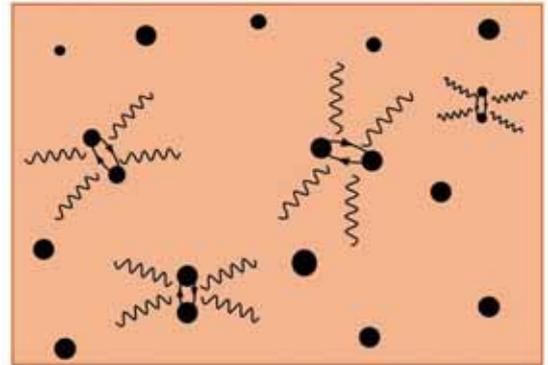


CASE 1

原始ブラックホールが見つかったか？

2015年、米国のLIGO(ライゴ)観測所がついに重力波を初めてとらえた。この重力波は2つのブラックホールが合体したときに放出されたものであり、この重力波観測により宇宙にはわれわれの想像以上にブラックホールがたくさん存在することが明らかになった。しかも、2つのブラックホールが互いを周回する連星の存在も明らかになった。これらの起源は何なのかという問題が急浮上している。今回私たちは、見つかったブラックホールは宇宙ビッグバン直後にできた原始ブラックホールである可能性を指摘した。これが正しいことが分かると、いまだ解明されていない宇宙の始まりについても手掛かりが得られたことになる。今後の観測による検証が望まれる。



宇宙に分布するPBH連星のイメージ図。ビッグバン直後にできたPBHのいくらかは連星を形成し、その後重力波を放出し続ける。重力波放出とともに連星のサイズは徐々に縮み、最終的に強烈な重力波放射を伴って合体する。LIGOが観測したのは、この合体時の重力波である。

2015年9月、LIGO観測所がついに重力波を初めてとらえた。重力波とは、空間の伸び縮みが光速で伝播する一般相対性理論が予言する「波」であり、それが本当に検出されたのだから、これは大きな科学的成果である。しかし、研究者を驚かせたのは、重力波そのものよりは、検出された重力波をつくり出したのがなんと2つのブラックホールの合体だということだ。ブラックホールはその強烈な重力によってすべてを吸い込む天体である。これまでも電磁波観測により、ブラックホールと思われる候補天体は20個ほど間接的に見つかったが、重力波観測によってブラックホールが実在することが鮮明に確認されたのである。さらに予想外だったのは、これまでのブラックホール候補天体の質量にくらべて、今回見つかった2つのブラックホールの質量は双方とも2~3倍ほど有意に大きく、しかもそれらが連星を成し最後に合体するというこれまで見たことのない現象がこの宇宙で頻繁に起こっていることである。LIGO観測所による発見後、見つかったブラックホールがいつどこで生まれ、どのように連星を作ったのかを解明することが宇宙物理学の重要なテーマとして躍り出た。

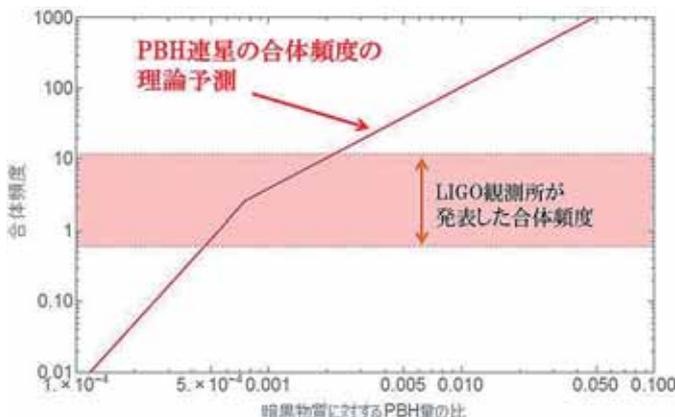
私たちは、発見されたブラックホールは原始ブラックホール(以後PBHと表記)である可能性を指摘した。PBHとは、宇宙開闢0.1ミリ秒後のまだ宇宙が超高密度であった時期に、周りよりも高密度の領域が圧縮されてできたブラックホールのことである。理論上はそのようなブラックホールが存在しても何ら不思議ではなく、またいまだ正体が分かっていない暗黒物質の候補ともなることから、1970年頃にPBHの存在可能性が提唱されて以来、PBHの探索が継続的に行われてきた。しかし、これまで存在を示す証拠は見つからなかった。そのPBHをLIGO観測所が初めて見つけたかもしれないのだ。PBHシナリオでは、連星が自然に作られることが先行研究によって明らかにされており、今回の研究では先行研究を参考にして、予測されるPBH連星の合体頻度を理論的に求めた。その結果、PBHが暗黒物質の約0.1%を占めれば、予測合体頻度がLIGO観測所の結果と一致することを明らかにした。これは天の川銀河内に約3000万個のPBHがあることに相当する。こう書くと莫大な数のPBHに思えるが、ブラックホールは基本的には見えないので、このくらいの量のPBHがあっても他の観測とは矛盾しない。

LIGO観測所が見つけたブラックホールはPBHかもしれない。PBHが実在することが確定すると初期宇宙論に対するインパクトは計り知れない。今後の重力波観測でデータが蓄積してくると、PBH説を検証できるようになるだろう。

本研究は、Sasaki *et al.* *Phys. Rev. Lett.* 117, 061101 (2016)に掲載された。

(2016年8月3日プレスリリース)

今回のPBH説で予測されるブラックホール連星の合体頻度(縦軸)を、暗黒物質に対するPBHの比をパラメータ(横軸)として表したものの。合体頻度の単位は、 $1/\text{Gpc}^3/\text{年}$ (Gpcは距離の単位でおおよそ33億光年)。LIGO観測所が発表した合体頻度(0.6~12)も桃色の帯で示してある。



CASE 2

放射線からDNAを守る
新規タンパク質の発見

クマムシという動物をご存知だろうか？
体長数百マイクロンのとても小さい生き物だが、
さまざまな極限環境に対して驚くべき耐性を示し、
放射線に対してもヒトの半致死量の千倍の照射に耐える。
こうした耐性はどのようにして可能になっているのだろうか？
今回、われわれは高い耐性をもつヨコヅナクマムシについて
全ゲノム配列を高精度で解読し、DNAに親和性をもつ新規タンパク質を同定した。
このタンパク質を導入したヒト培養細胞では、放射線によるDNA傷害が半減し、
致死線量の照射後も一部の細胞が増殖能を保持できることがわかった。

クマムシは、4対の脚でゆっくりと歩く微小動物で、ほとんどの種は体長1mmに満たない。分類学上、昆虫やカニなどと比較的近縁な独自の「緩歩動物門」を構成する。南極や高山、深海からも発見されているが、身近な環境にも生息しており道端のコケなどからも見つけることができる。陸生種の多くは、周囲の環境が乾燥するとほぼ完全に脱水し、生命活動を一時的に停止した状態に移行する。乾燥したクマムシは、さまざまな極限環境に耐性を示し、超低温（ほぼ絶対零度）や高温（約100度）、真空、超高压（75,000気圧）、ヒトの半致死量の1,000倍の放射線照射に曝露した後も、給水することで生命活動を再開できる。宇宙空間に直接曝露されても生還した初めての動物である。クマムシは動物として抜群の環境ストレス耐性をもつが、そのメカニズムはほとんど分かっていなかった。

今回、私たちは、クマムシ類の中でも耐性の高いヨコヅナクマムシ (*Ramazzottius varicornatus*) について、高精度なゲノム配列を決定することに成功した。ゲノムには約2万個の遺伝子がコードされており、約40%が機能未知の新規な遺伝子で

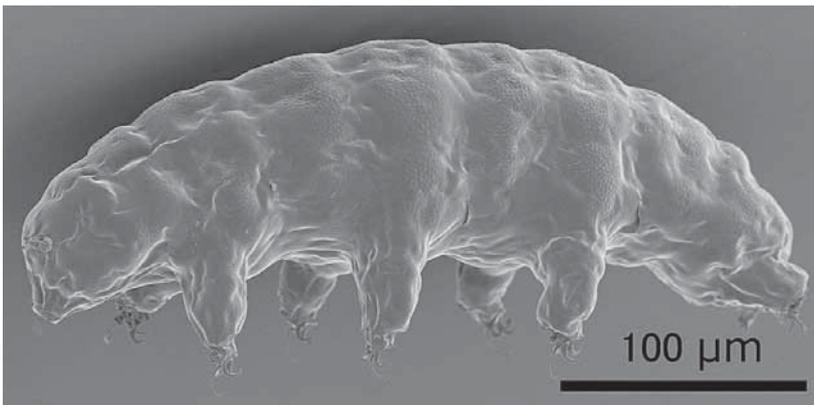
あった。遺伝子発現プロファイルを調べると、乾燥時も再吸水時もほとんど変化は見られず、耐性関連遺伝子は恒常的に発現していると考えられた。クマムシの極限環境耐性のほとんどは乾燥状態でのみ観察されるのに対し、放射線に対してだけは水和した通常の状態でも乾燥状態と同程度の高い耐性を示す。通常、高線量の放射線はDNAを切断し生体に深刻なダメージを与えることから、クマムシにはこれらのダメージを軽減する特殊な機構があると考えられた。そうした機構に関わる候補分子として、クマムシのDNAの近傍に存在するタンパク質を解析した結果、クマムシ固有のタンパク質を見出し、Damage suppressor (Dsup)と名付けた。Dsupを産生するように改変したヒト培養細胞では、X線照射によるDNAの切断が通常細胞の約半分に減少することがわかった。DsupがX線からDNAを保護していると考えられる。さらに、Dsupを導入した細胞は致死線量のX線を照射した後も一部が生存し増殖することがわかった。

これらの結果は、クマムシ固有の遺伝子が耐性能力に重要な役割を果たすことを示すとともに、その遺伝子の導入によって他の生物の耐性能力を向上できることを明らかにした。クマムシのゲノムにはDsup以外にも機能未知の新規遺伝子が多数コードされており、今後も耐性に寄与する新たな遺伝子が続々と見つかることが期待される。

本研究成果は、T. Hashimoto *et al.*, *Nature Comm.* 7.12808 (2016) に掲載された。

(2016年9月21日プレスリリース)

高い耐性を示すヨコヅナクマムシ (札幌市街地より採取)。ほぼ完全な脱水にも、ヒトの半致死量の1,000倍の放射線照射にも耐える。



※ 生物科学専攻 博士研究員

CASE 3

記憶効率が一日の時刻によって変化する仕組み

一日の時刻によって記憶のしやすさは違うのだろうか。
もし違ふとしたら、どの時刻に記憶しやすいのだろうか。
また、どんな仕組みで時刻による記憶効率が変化するのだろうか。
マウスを用いた長期記憶テストの結果、
活動期の前半に学習させると記憶効率が最高に達した。
記憶は脳の海馬に蓄えられるが、この記憶保持の調節には
視床下部の中核時計と海馬の末梢時計が深く関わっていた。

マウスに2つの積み木を5分間呈示して探索させ記憶させる。その24時間後に、最初に呈示した積み木のひとつと新しい形の積み木ひとつを呈示する。マウスが初めに呈示した積み木の形を覚えていれば、新しい積み木を探索する時間が長くなる。これはマウスの好奇心を利用した一般的な記憶効率の測定法である。このテストを一日のうちのさまざまな時刻に行くと、マウスの活動期の前半（マウスは夜行性なので夜の前半にあたる）に記憶効率が最高に達した。記憶は脳の海馬が司ることはよく知られているが、海馬から遠く離れた場所に位置する視交叉上核という脳内の神経核を破壊すると、このような記憶効率の時刻変化は消失し、どの時刻にも記憶できなくなった。視交叉上核は体内時計の中核であり、この実験から中核時計が学習効率の時刻変化を生み出す事が分かる。時計は海馬にも存在するが、この海馬時計は中核時計の支配下にあることが知られている。遺伝子工学的な実験手法を使って海馬時計だけを破壊したところ、やはり記憶効率の時刻変化は消失し、どの時刻にも記憶できなくなった。これらの

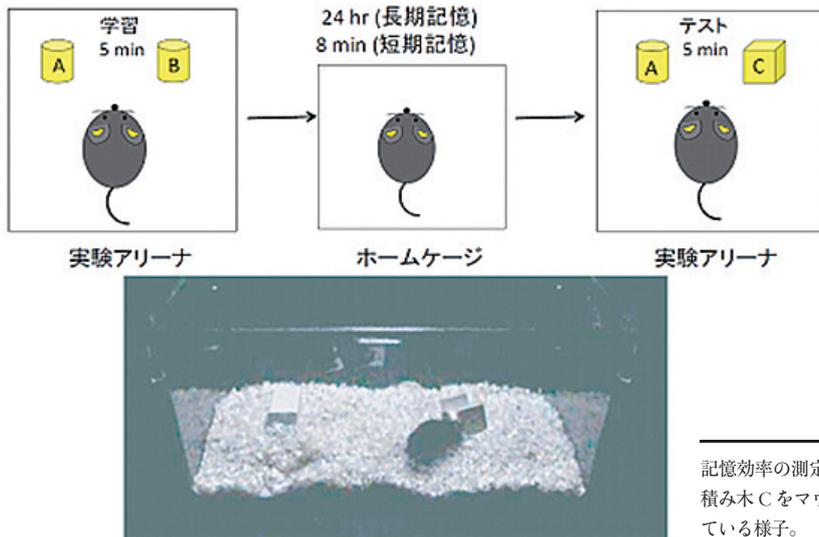
ことから、記憶効率の時刻変化は、海馬時計を介して視交叉上核の時計中枢によって支配されていることがわかった。いっぽう、8分後におこなった短期記憶テストでは、一日を通して一定の記憶効率を示し、さらに視床下部の中核時計や海馬の末梢時計を破壊しても何ら影響を受けなかった。つまり、短期記憶は一日のどの時刻でも可能だが、これを長期記憶として固定化する過程が体内時計の制御下であり、時刻によって変化することがわかった。

では、どのような仕組みで長期記憶の日周リズムが作られるのだろうか。体内時計が記憶の固定化を制御するためには、SCOPというタンパク質を中心とした一連のシグナル伝達機構が重要な役割を果たすことが明らかになった。海馬の神経細胞において、SCOPは記憶の固定化に関わるタンパク質(K-Ras)を抱き込むことで長期記憶を形成するためのポテンシャルを蓄える。海馬時計の制御によって海馬のSCOP量が時刻変化し、これにより、長期記憶形成のポテンシャルを一日の活動期の前半だけに蓄えるのである。同じ学習シグナルが海馬に到達しても、これを固定化する過程で働く分子の量が変化しているのが、長期記憶に時刻変化が生み出されていることがわかった。

ヒトでも記憶しやすさには時刻変化があると言われているが、今回発見した仕組みはヒトにもあてはまると考えられる。このような記憶の固定化の時刻変化を利用すれば、より効率よく学習効果を上げることができないかもしれない。

本研究成果は、K. Shimizu *et al.*, *Nat. Commun.*, 7, 12926 (2016)に掲載された。

(2016年9月30日プレスリリース)



記憶効率の測定法。写真は積み木Cをマウスが探索している様子。