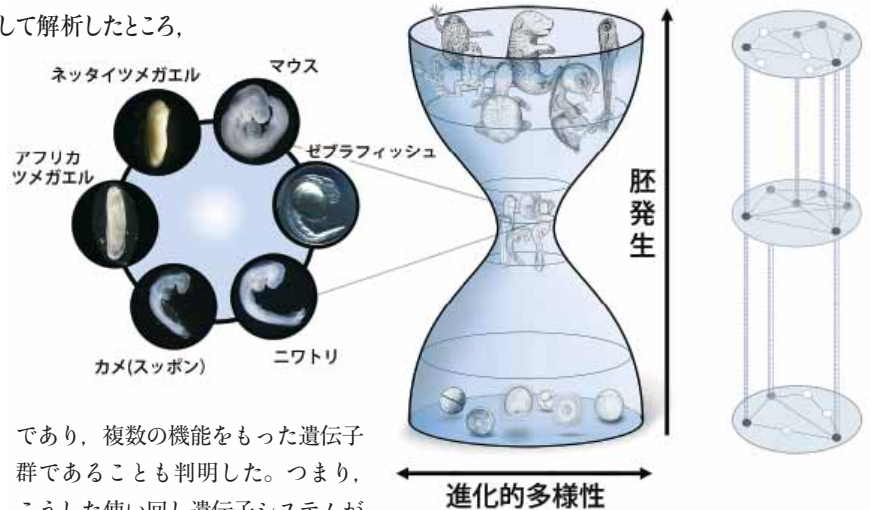


## CASE 1

### 進化を制限する？ 遺伝子の使い回しは、

われわれを含む動物は、進化を通して姿かたちを変え、さまざまな環境に適応放散してきた。しかし、進化は無制限に自由ではない。たとえば動物では、5億年以上前のカンブリア期までに爆発的にいろいろな動物が出現して以降、全く新しい体の基本構造をもつ動物は登場していない。私たちは、動物の体の基本構造が進化を通して変化しなかった原因を探るべく、体づくりが行われる胎児期の遺伝子の働きを詳しく調べた。コンピュータ解析を駆使して解析したところ、

遺伝子の使い回しが関係している可能性が浮かび上がってきた。



われわれ人間の末裔が鳥のような翼を獲得して、空を飛ぶ日は来るのだろうか。くるとすれば、どのくらいの確率だろうか。実は、現在の生物学ではこうした進化の予測はほとんどできない。確かに、蛙の子は蛙と言われるように、1世代でいきなり蛙からハエが生まれることはないが、数千万年、数億年後の進化を経た後、それぞれの生物がどのような姿になるかと問われると、予測に使える理論はほとんどないのが現状だ。いっぽうで観察事実としては、進化を通してなかなか変わりにくい特徴があることは知られていた。動物の体の基本構造はその一例である。5億4000万年前までに爆発的にいろいろな動物が出現し、その頃までには現存する30以上の動物の基本構造がすでに揃っていたことが分かっているのだ。言い換えれば、5億年以上、新しい体の基本構造を持った動物が出現していないことになる。

われわれは、動物の体の基本構造が変化しにくいのはなぜかという問いに対し、発生過程(受精卵から大人の体になるまでの時期)の遺伝子の使われ方に着目した。発生過程は体づくりが行われる時期で、とくに体の基本構造ができる時期(図の砂時計モデルのくびれ部分)は進化を通して遺伝子の使われ方が変化しなかった事が分かっているためだ。超並列シーケンサーやコンピュータ解析を駆使し、8種の脊索動物を対象に、発生過程で使われる遺伝子の働きを詳しく調べたところ、体の基本構造ができる発生期の遺伝子は、他の発生段階でもよく使われている遺伝子群であることがわかった。また、そうした使い回し遺伝子は、失われると致命的となる生存に重要な遺伝子

であり、複数の機能をもった遺伝子群であることも判明した。つまり、こうした使い回し遺伝子システムが突然変異などで変化してしまうと、その遺伝子群が働いているいろいろな組織や器官形成に問題が生じることを意味する。このために、使い回し遺伝子システムを重用している「体の基本構造」もなかなか進化を通して変化できなかったというシナリオが考えられるのだ。ただし、使い回し遺伝子が制約をもたらす仕組みは複数考えられる他、使い回し遺伝子群がなぜ器官形成期に集積したのかはまだ不明だ。いずれにしても、こうした遺伝子の使い回しは、体の基本構造だけでなくあらゆる生命現象でみられるもので、今後さらなる研究が進むことが期待される。

ところで、遺伝子の使い回しが今回とは逆の効果をもつことはこれまでの研究でよく知られていた。たとえば、カブトムシの角などは、脚で使われていた遺伝子を使い回すことで、角の進化を可能にしたことが判明しており、遺伝子の使い回しが新しい特徴を獲得することに貢献しているらしいのだ。今回の発見は、こうした使い回しが過ぎると、逆にその遺伝子システムは融通が効かなくなる可能性を示唆するものだ。遺伝子の使い回しは、進化によって多様化を促進もすれば制限もする諸刃の剣なのかもしれない。今後、さらなる研究が進めば、進化の予測性に関しても、科学的に議論できる日がくるかもしれない。

本研究成果は、Hu *et al.*, *Nature Ecology & Evolution*, 1, 1722–1730 (2017) に掲載された。

(2017年9月26日プレスリリース)

胚発生と進化的な多様性の関係を示した発生砂時計モデル(中央)。下から上へ発生が進み、横幅は進化的な多様性を示す。解剖学的な体の基本構造がつくられる器官形成期(砂時計モデルのくびれ部分)では、異なる動物間での多様性が少ない(左)。今回の研究で、器官形成期は他の発生時期や組織でもはたらく使い回し遺伝子が多く、それが多様化を制約してきた可能性が明らかとなった(右の小さな丸印は、使われている遺伝子を示す。異なる発生期にも使われている同じ遺伝子は垂直の線で繋ぎ、グレーまたは黒で示す)。

## CASE 2

# 宇宙黎明期の「風」と 巨大ブラックホール

天の川銀河をふくむ多くの銀河の中心には、太陽の10万から100億倍ほどの質量をもつブラックホールが普遍的に存在する。最近の観測によって、宇宙開闢から数億年という若い宇宙でも最大級のブラックホールが見つかった。これまで40例ほど報告されているこのモンスターブラックホールは、いつ、どのようにして誕生したのだろうか。私たちは、スーパーコンピュータ上に再現した初期宇宙を「実験室」として、モンスターブラックホールの新たな起源を発見した。謎を解く鍵は、ビッグバンから38万年後の宇宙に吹く「風」だった。

2015年2月、国際研究チームによる宇宙観測によって、ビッグバンからわずか9億年後の宇宙に存在した太陽120億個分の質量をもつ超大質量ブラックホール(SuperMassive Black Hole, 以下SMBH)が発見された。それまでに見つかった同時期のSMBHよりさらに4倍も大きく、その巨大な天体の誕生に関していくつもの説が提唱された。

SMBHはほとんどすべての銀河の中心にあり、周囲の物質や星を吸い込みながら成長してきたと考えられている。いっぽう、ブラックホールが物質を吸い込み成長する速さには物理的な限界があり、成長時間の限られる若い宇宙にSMBHが存在することは大きな謎とされてきた。

重いブラックホールほど重力は強くなり、その成長率の限界も増大する。観測された早期ブラックホールの存在を説明するには、できるだけ大きなブラックホールができるだけ早い時期に生まれなくてはならない。有力な説によれば、太陽の10万倍の質量をもつ種ブラックホールがビッグバン直後に誕生すれば、

観測されたようなSMBHへと成長できるという。しかし宇宙最初の星々はせいぜい太陽の100倍程度の質量しか持たないと考えられており、それよりもさらに1000倍も重い天体を生み出すことは困難である。

私たちの研究チームはスーパーコンピュータシミュレーションを用いて、SMBHの種となる巨大ブラックホールの

誕生過程を調べた。始めに、これまでの宇宙観測により判明した宇宙初期での物質分布を再現する。初期天体形成で主役となるのは、宇宙の質量の大半を占める暗黒物質(ダークマター)だ。自己重力によってダークマターが集積し、網の目の大規模構造をつくりだす。重力が最大となる網の「節」に水素とヘリウムから成る始原ガスが集まると、濃い分子ガス雲(星のゆりかご)が誕生する(図)。

ダークマターがガスを集めて初めて星は誕生するのだが、若い宇宙においては、ダークマターに対してガスはあちこちへと流れ出る「風」のように振る舞う。ビッグバン直後の灼熱の宇宙では、ガスは光と結びついて運動していたいっぽう、ダークマターは光とは無関係に運動していた。その差が原因となり、ダークマターに対して風が取り残される。風の速さは場所によって異なり、なかには超音速に達する「宇宙の暴風域」ともいえる領域も存在する。強い風はダークマターの重力(引力)に逆らうため、星の材料となるガスが容易には集まらないことになる。

しかし、コンピュータ上に再現した宇宙の「暴風域」の様子を詳しく観察したところ、太陽の200万倍もの質量をもつダークマターの塊が存在する場合には、強い重力が高速のガス流を捕捉できることが分かった。その中心で誕生した原始星(星の赤ちゃん)には、風となって吹き付ける膨大なガスが降り注ぎ、急激に成長して太陽の34000倍にもなる。この星が遺す巨大ブラックホールが数億年かけて成長すれば、太陽の数10億倍の質量をもつSMBHとなることができる。

従来考えられていたSMBHの起源に関する仮説では、難しい条件を満たす必要があったが、今回着目した「宇宙の暴風域」は一定の確率で実現することが現在宇宙論より導かれている。宇宙の始まりの頃に吹く「風」が、SMBHの種を生み出すようだ。

本研究は、Hirano et al., *Science*, 357, 1375-1378 (2017)に掲載された。

(2017年9月29日プレスリリース)

誕生直後の原始星を取り囲むガスの構造。図上を右方向に吹く風により、高密度ガスは大きく圧縮される。その中心で誕生する星には周囲のガスが勢いよく流れ込み、大質量星となり星の一生の最期に巨大ブラックホールを遺す。





## CASE 3

# チェルノブイリと福島の違い 河川水中の放射性セシウムの水への溶けやすさ

福島第一原発事故などで放出された放射性セシウムは、土壌浸食により土壌粒子と共に河川に流入し、海洋へと運搬される。河川中でセシウムは、微細な粒子からなる固相と水の間で分配され、その溶け易さは固相の性質に支配される。われわれは、この固相の性質を放射光を用いた分光分析により調べ、チェルノブイリにくらべて、福島においてセシウムが河川水中で水により溶けにくい理由を明らかにした。水への溶けやすさの理解は、河川によるセシウムの運搬のされやすさや生物への移行の程度と関連し、セシウムの環境挙動の予測に貢献する。

東日本大震災の結果生じた福島第一原発事故により、セシウム(Cs)などの放射性核種が環境中に放出され、依然として多くの方々が深刻な影響を受けている。また、今後人類がどのようにして持続可能なエネルギーを確保していくのかの道筋も不明確なままである。このような中で、福島第一原発事故の原因や放出された放射性核種の移行挙動を解明し、それを人類全体で共有することは、世界に対して日本が負った重要な使命ともいえる。

放射性Csは、雲母や粘土鉱物などの層状珪酸塩の層間で安定な錯体(内圏錯体)を形成するため、大気から降下後は、土壌表面に強く吸着される。これらは、降雨などの浸食により河川に流入し、海洋に運搬される。そのさい、河川中で溶けやすいと海洋に放出されやすく、また生物への移行の程度も大きくなる。天然水中の微量元素の溶存濃度は、水中の微小な固体(懸濁粒子)と水の間での溶解-吸着平衡で決まる場合が多く、放射性セシウムの場合には、層状珪酸塩が多ければ溶存濃度が低くなる。

福島の代表的河川である阿武隈川では溶存セシウムの割合は30%以下と低いが、チェルノブイリ

原発事故時に近傍のブリピャチ川で観測された溶存セシウムの割合は70%以上と高かった。この違いを明らかにするために、われわれはこの2つの河川を調査し、回収した懸濁粒子を放射光を用いたX線吸収微細構造(XAFS)法や走査型透過軟X線顕微鏡(STXM)で調べた。その結果、前者ではCsの吸着種として内圏錯体の割合が高いが、後者では水和イオンとして吸着される割合が高いこと、また後者では懸濁粒子中で粘土鉱物と有機物(おもに腐植物質などの天然高分子有機酸)が複合体を形成している割合が高いこと、などが分かり、これらが2つの地域でのCsの溶けやすさの差を生んでいる。このうち腐植物質は、粘土表面に吸着し、セシウムの層間への吸着を妨げることで、結果的に溶存セシウムの割合の増加に寄与する。

2つの地域の違いは、周辺の地質・土質の違いに起因する。チェルノブイリ周辺の土壌は有機物含量が多い泥炭であり、地質はカルシウム(Ca)が多い炭酸塩岩に卓越する。そのため、河川中の溶存有機物濃度は福島の10倍以上である上、高いCaイオン濃度は、粘土鉱物と有機物の複合体の生成を促進する。いっぽう、福島では風化花崗岩が主要な地質で、粘土鉱物が多く生成する。こ

れらの地質や土質などの周辺環境の違いが、河川中でのセシウムの吸着反応に影響を与え、最終的にはセシウムの挙動に違いを生み出す。福島で懸濁粒子への吸着種が安定であることは、セシウムの溶存濃度を下げ、生態系への移行や海への流出を低下させる方に働くと考えられる。また、このような環境中での物質移行の理解には、地質・土壌・化学・生態系などの総合的な知識を基にした考察が必要なこと本研究から理解される。

本研究成果は、Y. Takahashi et al., *Scientific Reports*, 7, 21407 (2017)に掲載された。

(2017年9月29日プレスリリース)

大気から降下したセシウムの環境中での移行挙動とそれを支配する因子の模式図

