

CASE 1

進化を捉える 実験室で細菌ゲノムの

単純に見える単細胞生物でさえ数千の遺伝子を持ち、周囲の環境に応じて使い分けしている。この使い分けを可能にしている一つのメカニズムとして、こうした生物が複数の遺伝子の発現をまとめて調節するオペロン構造を持つことが60年前に提唱された。その後の研究でオペロン構造の普遍性や合理性は分かってきたものの、オペロン構造がどのように進化するのはわかっていない。今回、私たちはオペロン形成の新説を提唱し、実験室でオペロン構造の形成過程を捉えることに成功した。ヒントとなったのは、昆虫の腸内細菌であった。

生き物は遺伝子をただ持っているだけでなく適切に使わないと生きられない。たとえば、胃の壁細胞では、食べ物来たタイミングに合わせて、ゲノム上にある数万の遺伝子のうち胃酸を作るのに関係する複数の遺伝子の機能が発揮される必要がある。このような適切な遺伝子群を適切なタイミングで適切な量だけ発現させる「遺伝子発現調節」は単細胞生物からヒトを含むすべての生物に欠かせないものである。

1961年にフランソワ・ジャコブ (François Jacob) とジャック・モノー (Jacques Monod) は、大腸菌の研究を通して、機能が関係している遺伝子群はゲノムDNA上にまとまって配置され、まとめて調節・操作されていると予想した。彼らがオペロン (operon) と読んだこの操作 (operation) の単位は、遺伝子発現調節の基本原則の一つとされている。しかし、未だにどのような進化過程を経て、もともと互いに離れた位置にあった複数の遺伝子がオペロンとしてまとまるのかはわかっていない (図)。

今回、私たちはその突破口となりうる新説を提唱した。多くの細菌は挿入配列と呼ばれる、ゲノムDNA上を移動する配列 (トランスポゾン) をもっている。奇妙なことに、昆虫の腸内細菌の進化過程で、この挿入配列が数百個にまで爆発的に

増加することが知られている。この進化過程の理解を目指して、私たちは昆虫の腸内細菌の祖先に近い遺伝情報をもつ大腸菌を使って挿入配列の爆発的増加の再現を試みた。自己複製活性の高い挿入配列を導入した大腸菌を用意し、実験室で進化させたところ、予想外なことに、挿入配列が自身の周りの配列を除去する様子が観察された。

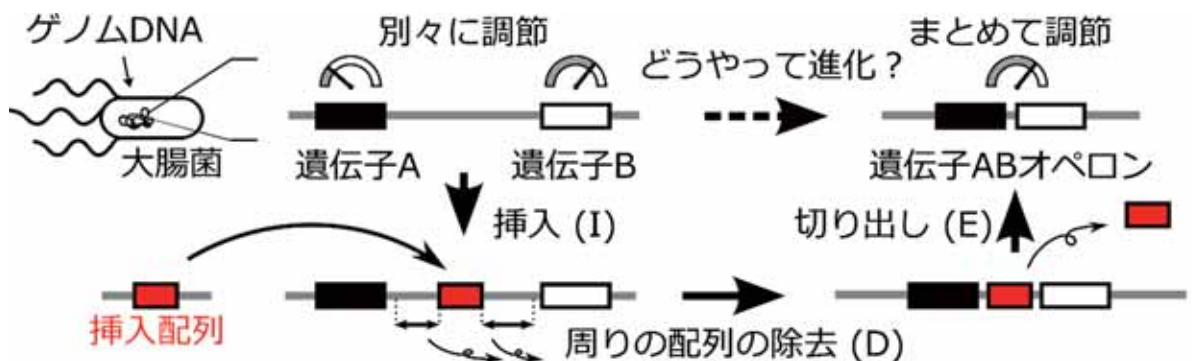
この現象を基に、私たちは次のように考えた (図)。祖先ゲノムにおいて、挿入配列が、離れた位置にあった遺伝子と遺伝子の間に自身を挿入し (Insertion)、周りの配列を除去し (Deletion)、最後に自身を切り出した (Excision) ことで、オペロンができたのかもしれない。仮説の通りオペロンが生じうることを裏付けるために、私たちは二つの遺伝子の間に挿入配列をもつ大腸菌を用意した。その大腸菌を一晩培養し続けたところ、たしかに新規のオペロンが形成された。

今回の発見は、大腸菌の進化を通じて進化の普遍的性質を探究している私たちが、昆虫の腸内細菌や挿入配列に触れたことによる成果であった。どこに発見のヒントがあるかわからないものである。

本研究成果は、Y. Kanai *et al.*, *Nucleic Acids Research* 50, 1673 (2022) に掲載された。

(2022年1月24日プレスリリース)

図：オペロン形成のIDE仮説。離れた位置でそれぞれ調節されていた二つの遺伝子が、挿入配列の活性によって近づき、オペロンとしてまとめて調節されるようになる



CASE 2

なぜ火星の磁場が失われ、海が蒸発したのか？

近年のNASAの探査機インサイトの活躍により、

火星での地震波を使って火星の内部構造が明らかにされつつある。

2020年には、火星の中心にある金属コアは従来の予測に比べて密度が小さく、サイズが大きいことがわかった。

地球のコアは、液体金属の対流を通して惑星の磁場を形成し、

大気中の水素が太陽風によって剥ぎ取られるのを防いでいる。

火星では約40億年前まで磁場が存在していたが、それが消滅したことで水素が宇宙へ散逸し、

数億年以内に海が蒸発したとされている。なぜ火星の磁場は消滅してしまったのだろうか？

地球と異なり、火星ではどうして磁場が失われたのだろうか？この謎を解くには、火星コア中でどうして対流が起き、またどうしてそれが止まってしまったのかを明らかにする必要がある。地球や火星などの岩石惑星の金属コアは、鉄とニッケルに加えてそれより軽い（原子番号が小さい）元素を含んでいる。火星から来た隕石の研究から、火星のコアは大量の硫黄を含んでいるとされる。さらに現在、探査機インサイトによる内部探査が行われており、昨年には液体のコアを検知したという成果が報告された。その密度が従来の予測よりも小さかったことから、火星のコアには硫黄以外の軽元素も含まれているはずだ。太陽系の惑星形成時には、現在の小惑星帯からさらに外側の領域から、地球や火星へ多くの水が運ばれてきたと考えられている。その水に由来する水素も火星コアの軽元素の有力な候補の一つである。

そこで今回私たちは、火星コアに相当する高い圧力下で、鉄-硫黄-水素合金を溶かす実験を行った。回収した試料の断面を観察した結果、40万気圧（火星コアの底=火星中心の圧力）において3000 K以上に加熱された試料中では、硫黄と水素を共に含む1種類の液体が存在していた。一方、それよりも低い温度へ加熱した試料では、水素に富む液体鉄と硫黄に富む液体鉄が、水と油のように分離している様子が観察された（下図）。現在の火星コアの温度圧力は、液体が2つに分離する条件にあたる。

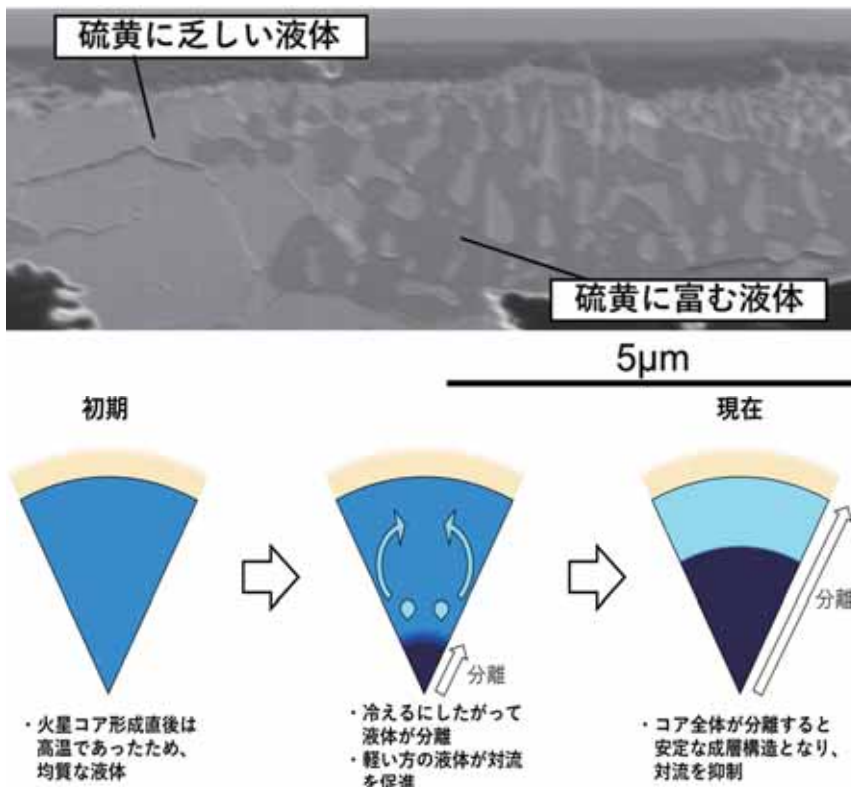
火星形成直後の初期の火星コアは現在よりも高温であったはずだ。高温下で均質な液体であった火星コアが冷え始め、やがてコアの底（火星の中心）で液体の分離が始まった（下図）。重い方の液体が底にたまる一方、軽い方の液体は浮き上がる。これが火星コアの対流を促進し、火星磁場が発生した。しかし、冷却が十分に進みコアの大部分で液体の分離が起きると、重い液体ほど下にあるという重力的に安定な成層構造ができるため、今度はコアの対流を抑制し火星磁場を消失させた。このように、火星コアに硫黄と水素の両方が含まれるとすると、火星における磁場の発生と消失の両方のメカニズムが説明できることがわかった。

今後、火星の内部探査がさらに進み、コア中での成層構造が見つければ、本研究のシナリオを検証することができる。またそれが、火星を作った材料物質や惑星形成プロセスを教えてくれると期待される。

本研究成果は S. Yokoo *et al.*, *Nature Communications* 13, 644 (2022) に掲載された。

(2022年2月3日プレスリリース)

図：(上) 火星コアに相当する高圧高温下で、水素に富む液体鉄と硫黄に富む液体鉄が、水と油のように分離している様子を示す実験試料。(下) 液体の分離による火星コアの対流の促進（磁場の形成）と抑制（磁場の消滅）の概略図



CASE 3

なぜ宇宙のゆらぎは ガウス分布に従うか？

私たちの宇宙は、数百億光年もの広がりを持つ一様で平坦な空間を持ち、その中には星、銀河、銀河団、超銀河団、とさまざまなスケールにわたる豊かな階層構造が存在する。

これらすべては、宇宙が始めに急加速膨張をした、というインフレーション宇宙論で説明されている。急激な膨張によって宇宙が急拡大すると同時に、インフレーションを駆動したインフラトンという素粒子場の量子的性質によって、階層構造のタネとなるエネルギー密度の不均一性(ゆらぎ)が生成し、その分布は、高密度領域と低密度領域が同じ数だけ対称に現れる、ガウス統計に高精度で従うことが観測されている。

私たちの暮らすマクロな世界では、ある時刻でボールの位置と速度を指定すれば、それがいつどこに到達するか、不定性なく予言できる。しかし、ミクロな世界で成り立つ量子論では、例えば電子のような粒子も波としての性質を持っている。波はボールのような塊と違って、一波長分の長さを見るか、一波長が通過するだけの時間をかけて観測してはじめて、そこにあるとわかる。つまり時間と空間の両方をピンポイントで指定することはできないのだ。その不定性こそがゆらぎの正体である。さらに、素粒子どうしの相互作用を表す場の量子論では、素粒子の存在数自体もゆらぎを持つことになる。このことは真空中であっても、仮想的な粒子が生まれたり、消えたり、ぶつかり合ったり、ほかの仮想粒子に変化したりする、ということの意味する。

空中でほかの粒子とぶつかったり相互作用したりしない素粒子場のゆらぎは、ガウス統計にしたがうことが示されている。一方、インフラトンが真空中にあっても、自分自身や他の素粒子場とぶつかり合ったりする相互作用の影響を取り入れると、ガウス分布からのズレが見られることになる。

逆に言うと、観測によってガウス分布からのズレが発見できれば、インフレーションの素粒子場がどんな相互作用をしていたか知ることができるのである。これは最遠の宇宙全方向からやって来る宇宙の最古の光子、宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎを観測することによって検出できる。ところが、アメリカのウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機 (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe: WMAP)、欧州のプランク (Planck) 衛星いずれの観測によってもガウス分布からのズレは見つかっていない。

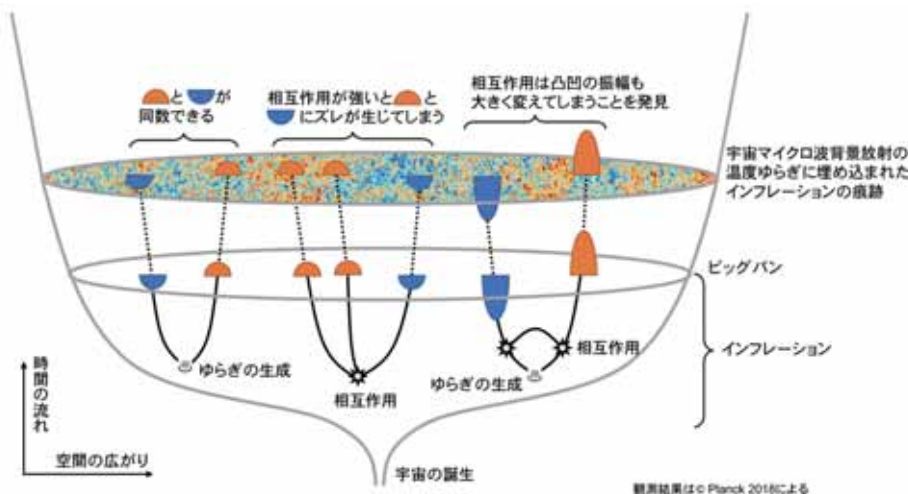
私たちはこのほど、ガウス分布からのズレをもたらすこのような相互作用があると、真空のゆらぎどうしがぶつかり合って温度ゆらぎの振幅が大きく変化してしまうことを見だし、観測されている振幅 (10 万分の 1 という小さな値である) とは整合性を持ってないことを示した。すなわち、ゆらぎの振幅を正しく予言できる理論は、同時にゆらぎの統計が高い精度でガウス分布に一致することを予言することを発見したのである。このことは、素粒子の場の量子論を宇宙初期に適用してはじめて出てきたことであり、その結果が

宇宙最遠の光子を観測するプランク探査衛星の観測結果に表れているというのはとても興味深いことであるといえる。

本研究成果は J. Kristiano and J. Yokoyama, *Phys. Rev. Lett.* 128, 061301 (2022) に掲載された。

(2022 年 2 月 10 日プレスリリース)

図: インフラトンの相互作用があると高密度領域と低密度領域の数のズレが生じるが、相互作用が強すぎると密度の不均一性(凸凹)が大きくなりすぎて、観測と矛盾することになるので、インフラトンの相互作用は強く抑制され、高密度領域と低密度領域が同数できるガウス統計に従う



インフレーションという急膨張によってすべての物質のエネルギーは急激に薄められてしまうので、宇宙は実質的に真空状態になる。そのため、インフラトンの量子ゆらぎも、真空中でのゆらぎと同じ性質を持つことになる。場の量子論によると、真