

「重力生物学が目指すもの」

オーガナイザー：澤井里枝

小黒麻美

講師：最上善広先生

私たち宇宙ライフサイエンス若手の会は、宇宙や生物に関連する研究をしている大学院生、助手、ポスドクなど若手研究者を中心とした集まりです。宇宙と生物をキーワードに、幅広く様々な分野の人が交流しています。

地球上に生命が誕生してから 36 億年。生物はずっと地球にへばりつき、そこでの環境に適応し、進化してきた。その間、生物はまわりの環境が変わるたびにその変化に対処し、生き延びてきた。地球の環境が生物を鍛え、それに耐えられたものだけが残ってきたのである。地球の環境を考えずには生命の誕生と進化を語ることはできない。

地球が作り出す環境にはいろいろなものがあるが、ここで重力に注目したのが重力（宇宙）生物学である。

重力は生命が誕生して以来、常に同じ大きさで存在し続けた環境因子である。そして地球にいる限り、空を飛んでも、水中や地中にいてもその影響から逃れることはできない。地球生命にとって重力は、いつでも「あって当たり前」の環境因子となっている。

つい最近まで、重力を環境因子の一つとして捕らえ、生命現象との関連を調べる研究を想定すること自体が難しかった。なぜなら、重力が「なくなる」状況を想定することが非現実的であったからである。しかし、最近の宇宙開発により、我々にも宇宙の「無重力環境」を利用することが可能となった。

重力（宇宙）生物学は、外部環境因子としての地球重力に着目し、地球生命の進化と多様化に及ぼした重力の作用を探ろうとするものである。また、今後人類が宇宙に進出していく際の生命活動に関する研究も目的の一つにある。

今回講師を務めて下さる最上先生は、複数の宇宙実験の経験を持つ。また、重力によって繰り広げられる様々な興味深い生命現象に着目し、重力が生命に与える可能性を広げていく研究を行っている。

地球生命にとって、切っても切り離せない重力。その存在と可能性について議論できたらいいなと思う。

重力生物学が目指すもの

お茶の水女子大学・理学部・生物学科 最上善広

前世紀に人類がなし遂げた宇宙への進出は、未知の領域への大きな扉を開いた。宇宙への進出は、我々が久しく忘れていた、冒険や挑戦というファンタスティックな感情を刺激する。新たな可能性への挑戦は、学術の分野にも現れ、宇宙を対象とした学問領域が次々と創出されることとなった。その中の一つに、宇宙生物学がある。

宇宙生物学は、「宇宙」と「生物学」の間に入れる字句によってニュアンスの異なるものとなる。「の」を入れると、生命の起源や地球外生命の探査を目指すように受け取れる。一方、「で」を補うと、主体は地球生命であり、宇宙という（特殊な）環境でそれらがどのように活動を展開できるのかを調べる学問という性格が見えてくる。重力生物学はさらにこの色彩を強めて、地球生命（もし今後、他でも見つかったらそれも加えるとして）と地球の環境因子としての重力との関わりを研究する分野として位置づけられている。重力生物学にとって、宇宙は研究の対象ではなく、微小重力環境を与えてくれる、いわば一つの実験ツールである。

重力はサイズ依存性の外力であり、対象とする現象のサイズが小さくなるにつれて、その影響力は急激に減少する。それに基づき、細胞やその内部で行われる生体（化学）反応に、重力は全く影響しないものとされてきた。従って、重力は地球上での生命活動を規定する要因ではあるものの、生物の大きさやデザイン、さらにはそのマクロな行動を制限する、拘束的な作用力としてのみ捉えられてきた。この既存概念をうち破り、重力が生体システム内での要素間の協同作用を通じて全く新しい能力（特性）を創出できる可能性を提示したい。これが、現在我々が、重力生物学の研究を通して目指していることである。個々の構成要素のレベルでは極微弱な応答（重力応答）が、要素間の協同作用と、その産物である動的不安定性を通じて、集団としての「思いもよらない特性」が発現されるという、新しい概念を導入することはできないか。それによって、地球重力環境と、生命との関わり（発生・進化）を見通す、これまでにはない新たな概念形成の萌芽をもたらす、宇宙環境利用の新たな側面を開拓できるものと考えられる。

重力も含めた弱い外力の作用が、協同現象と動的不安定性を通して増幅される可能性が理論的研究においてすでに指摘されている。Prigogine等は、非平衡状態にある反応系は、電場や重力場のような外部環境要因に対し高い感受性を持つことを指摘した。生命活動は非平衡状態の極めて複雑な反応系によって構成され、多くの動的不安定性を持っている。この特性を通して生命現象の中で重力の効果が増幅され、単なる束縛力以外の作用が発現されると考えられている⁽¹⁾。

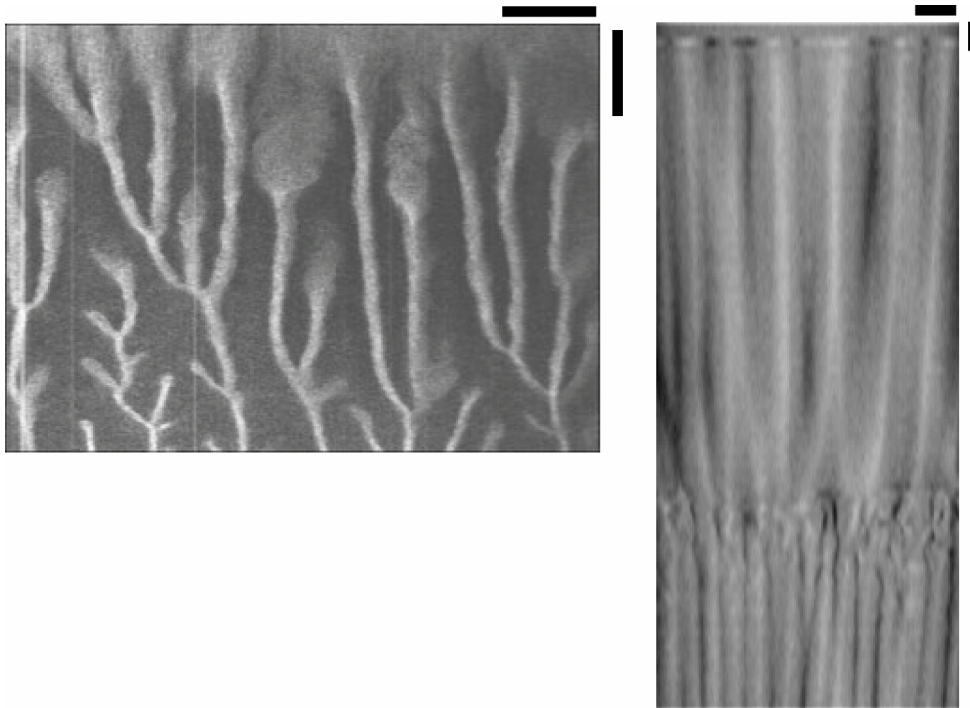
Prigogine等の仮説はレイリー・ベナール対流（熱対流）に対する理論的研究に基づいている。レイリー・ベナール対流では密度差に基づく空間パターンが形成されるが、それは熱膨張による重心の上昇がもたらした不安定性に起因する。上昇によるポテンシャルエネルギーの増加は熱ノイズに比べて大きいとは言えず、平衡状態ではその程度の重力の影響は現れない。しかし、温度差によって引き起こされた非平衡性（媒質密度分布の動的不安定性）のために重力の巨視的効果が、薄い液層（数mm程度）であっても明らかなパターンとなって出現する。非平衡性が重力の効果を拡大するのである。

一方、生命現象でもレイリー・ベナール対流に対応する、動的不安定性を伴うパターン形成現象—生物対流—が知られている。テトラヒメナやクラミドモナス等の微生物をシャーレに入れると、はじめは均一に分布しているが、時間とともに次第に局所的な密度の偏りができ、最終的にはシャーレ全体にわたる一定の繰り返しパターンが形成される。レイリー・ベナール対流では、上方への駆動力は外から加えられた熱エネルギーであるのに対し、生物対流では個々の微生物の持つ重力走性行動を引き起こす運動エネルギーである。駆動エネルギーに違いがあるものの、これらが散逸する過程で空間パターンが形成されるという点において、両者は相同の現象である。このことは、生物対流が生命現象における重力効果の増幅発現作用の検証にとって、恰好の実験システムであることを示唆している。生物対流パターンを作り出す要素間の協同作用と、その産物である動的不安定性への重力の作用を明らかにすることで、生命活動に対する重力の作用の新たな側面を明示することが可能になると考えられる。

上記のような、「重力の増幅作用」が存在するのであれば、生物対流による時空間パターンが、重力に対して鋭敏な応答を示すことが予測される。我々はこれまでにテトラヒメナが作る生物対流パターンが、遠心過重力に対し鋭敏に反応し、パターンの創出や空間周波数の変動を引き起こすことを示している⁽²⁾。また、その応答特性は細胞株によって異なり、集団によるパターンの発現が、要素（細胞）間の協同作用に基づくものである

ことを強く示唆している^(2,3)。また、生物対流パターンの時空間発展に関する詳細な解析より、生物対流現象の持つ動的特性が次第に明らかになってきた。図には、それぞれ、テトラヒメナ（左）およびクラミドモナス（右）による生物対流パターンの時空間発展の様子が示されている。河川の流域形成を連想させるテトラヒメナの時空間パターンは、パターン形成が、細胞集団がエネルギー論的な定常状態に到達する過程を反映して行われていることを暗示しているようにも見える。一方で、クラミドモナスに見られる、相転移を思わせるようなパターンの急激な変化（pattern alteration response）は、集団内に内包された協同現象の動的不安定性の特徴を示している。このような特徴を持つ生物対流現象を研究ツールとして用いることで、要素間の協同作用に基づく集団としての機能発現に及ぼす重力の作用が検証できるものと考えている。

重力がなければ物が集まらないのだから、当然、生命など生まれるはずもない。そういう意味で重力は生命誕生の必須条件ではあるが、誕生以降の生命体にどのような作用を与え続けてきたのか。これを知ることが、地球生命の一つの特性を明らかにすることである。さらに、地球以外の天体を目指す冒険者たちにとって、新たな環境での生命活動の展開に関する道しるべとなるであろう。重力生物学の当面の着地点はそこら辺にあるのだろうか。



生物対流現象の時空間発展。テトラヒメナ（左）およびクラミドモナス（右）による生物対流パターンの時空間プロット。ここではパターン形成における空間情報を横軸（スケール、5 mm）に、時間経過を縦軸（スケール、2分）に展開している。

引用文献

1. Kondepudi, D.K. and Prigogine, I. (1981) Sensitivity of nonequilibrium systems. *Physica A.*, 107A,1-24.
2. Mogami, Y., Yamane, A., Gino, A. and Baba, S.A. (2004) Bioconvective pattern formation of *Tetrahymena* under altered gravity. *J. Exp. Biol.*, 207, 3349-3359.
3. 山根章子・最上善広・馬場昭次 (2001) 繊毛虫テトラヒメナによる生物対流パターンの時空間解析. 宇宙利用シンポジウム (第 17 回), 175-178.