

変動重力に対する生物対流パターンの応答

最上善広¹・千葉陽子¹・勝 由美子²・安里枝利子¹・澤井里枝²・馬場昭次²

お茶の水女子大学理学部生物学科¹, 人間文化研究科²

Responses of bioconvection pattern to altered gravity

Yoshihiro Mogami¹, Youko Chiba¹, Yumiko Katsu², Eriko Asato¹, Satoe Sawai², Shoji A. Baba²

¹Department of Biology, Ochanomizu University,

²Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University

mogami@cc.ocha.ac.jp

We proposed a research which aims to reveal the possibility for gravity to develop new functions of the biological systems through the collective interactions between the components of the systems. Bioconvection of the aquatic microorganisms has been focused as a research tool for the proposal. In this paper, responses were investigated of the bioconvection pattern of *Tetrahymena* and *Chlamydomonas* to the altered gravity during parabolic flight of an airplane. In *Tetrahymena*, patterns were observed to increase their size under hypergravity and disappeared under microgravity. In *Chlamydomonas*, changes in the pattern size under hypergravity was less clear, although the patterns were observed to be enhanced under hypergravity. The patterns by *Chlamydomonas* remained less changed under microgravity. These differences in the response between organisms may be informative for the investigations for the development of the new research fields in space and gravitational biology.

key words: parabolic flight, altered gravity, bioconvection, Tetrahymena, Chlamydomonas

重力の影響はそれが及ぼすと想定される現象のサイズが小さくなるにつれて急激に減少する。従って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。このことから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。この既成概念をうち破り重力が生体システムと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。

我々は宇宙環境利用科学委員会研究班ワーキンググループとして「生体要素間の共同作用に基づく重力効果の増幅発現機構解明への研究展開」をテーマとした研究を提案した。メンバー所属は以下の通りであった。最上善広 お茶の水女子大学理学部

馬場昭次 お茶の水女子大学大学院人間文化研究科
宮本泰則 お茶の水女子大学理学部 清本正人 お茶の水女子大学湾岸生物教育研究センター 河村哲也 お茶の水女子大学理学部 吉村建二郎 筑波大学大学院生命環境科学研究科 奥野 誠 東京大学大学院総合文化研究科 森 義人 お茶の水女子大学理学部 岩本裕之 スプリング

本研究の目的は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、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確立しようとするところにある。それを通し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

本研究グループの活動として重力変動に敏感な時空間発展を示すことが明らかにされている生物対流現象、基質接着による細胞格の再構成応答、およびウニ幼生の片形成をモデルとしたバイオミネラライゼーションなどを研究モデルとして取り上げ、研究展開をはかってきた。これらを代表し、生物対流現象に関する研究の進展状況について述べる。

すでに指摘したように、生物対流は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、恰好の実システムである¹。重力走性行動に基づいて偏在化されるエネルギー・ポテンシャル・エネルギーが散逸する過程で空間パターンが形成されるが、そこには個々の構成要素、水棲微生物の持つ個性、運動能力等の生理機能が、それらの間の相互作用を経て強く反映されている²³。

生物対流に関してこれまでになされた多くの研究では、重力を実パラメータとして扱うことはなかった。流体物理学の視点から、対流パターンの形成単位となる微生物は単なる粒子として捉えられ、それらが持つ重力への応答性や微生物間の相互作用などはまったく考慮されてこなかった。そのような観点からは、変動重力に対する応答はあまり意味をなさなかったのかも知れない。しかし、対流パターンの形成は本来、独立して活動している個々の微生物が作り出す共同現象であり、個々の微生物の間にはミクロなスケールでの相互作用がある。その作用が重力という外力が介在することによって空間的に増幅され、マクロスケールのパターンが出現する。繊毛虫などで

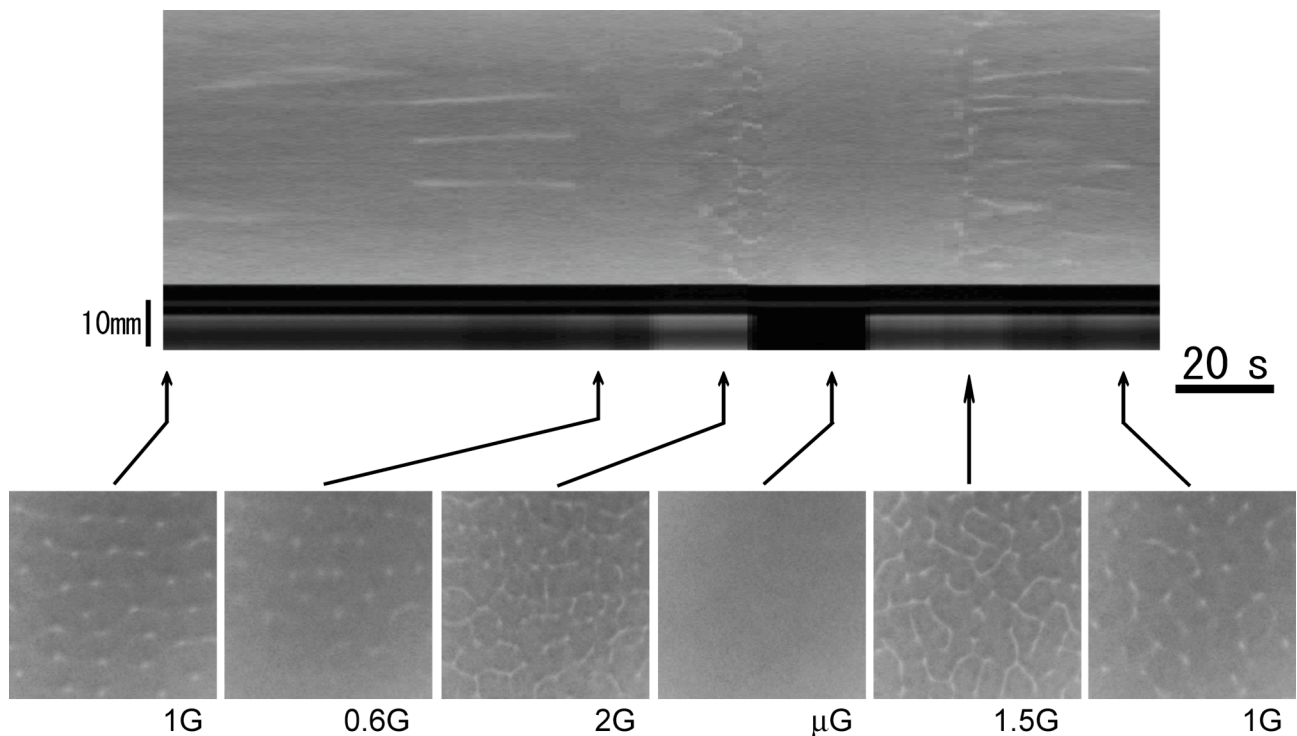


Fig 1. Space-time plot of the response of the bioconvection pattern by *Tetrahymena pyriformis* to the altered gravity during parabolic flight of the airplane (MU-300, Diamond Air Service). Plan views of the convection pattern at the time indicated by arrows were shown in the lower part of the figure. Gravity acceleration was monitored by the light intensity of LED recorded simultaneously with the pattern (bottom part of the space-time plot). The dark and the light bands beside it indicate the microgravity and the hypergravity phases performed by parabolic flight, respectively.

は単細胞でありながら 重力依存的な行動を可能とする感受機構を持つことが知られている この機構を考慮に入れるならば 生物対流パターンが重力の変動に対して鋭敏に反応することは十分に予測されることである

最近になって我々は遠心加重力装置を使った実により 対流パターンの形成には明確な重力の閾値が存在すること さらにには対流パターンが重力依存的にその空間サイズを変更することを見出した⁴ これらの特性は従来から展開されてきた 流体物理学にのみ立脚した理論からは十分に説明されてはいない

本年度のワーキンググループの活動の一部として 航空機のパラボリックフライトによる重力変動環境を利用した研究をもとに「生体要素間の共同作用に基づく重力効果の増幅発現機構」の可能性に関する検討を行った

パラボリックフライト実 では 遠心過重力環境などでのパターン記録に使用した手法をもとに 半密閉容器を用い⁵ テトラヒメナ *Tetrahymena pyriformis* とクラミドモナス *Chlamydomonas*

reinhardtii による生物対流パターンを誘導し →過重力→微小重力→ の変動におけるパターンの変化を記録し 重力変化に対する応答を解析した 実 に際しては 培 した微生物 細胞密度は テトラヒメナとクラミドモナスのそれぞれで 1×10^6 および 1×10^7 cells/ml をエアレーションしつつ維持しパラボリックフライトの直前 テトラヒメナは10分前 クラミドモナスは5分前 に容器内に導入した 対流パターンの挙動を示す時空間プロット⁴が示すように テトラヒメナではパラボリックフライト突入直前の過重力 $2 \times g$ 時にパターンサイズが一過的に増大し 微小重力時にパターンが消失し さらに重力復帰によりパターン形成が回復するのが観察された Fig 1 実 全般を通して パターンサイズはフライトパターンに応じて変動する重力に対応して 重力加速度の増大によりサイズの減少 加速度の減少によりサイズの増大が認められた これは以前の過重力実 の結果と一致する

一方 クラミドモナスでは 過重力時にパターンの強調 輪郭の明瞭化 が見られるものの そのサイズには大きな変化が見られなかった また 微小

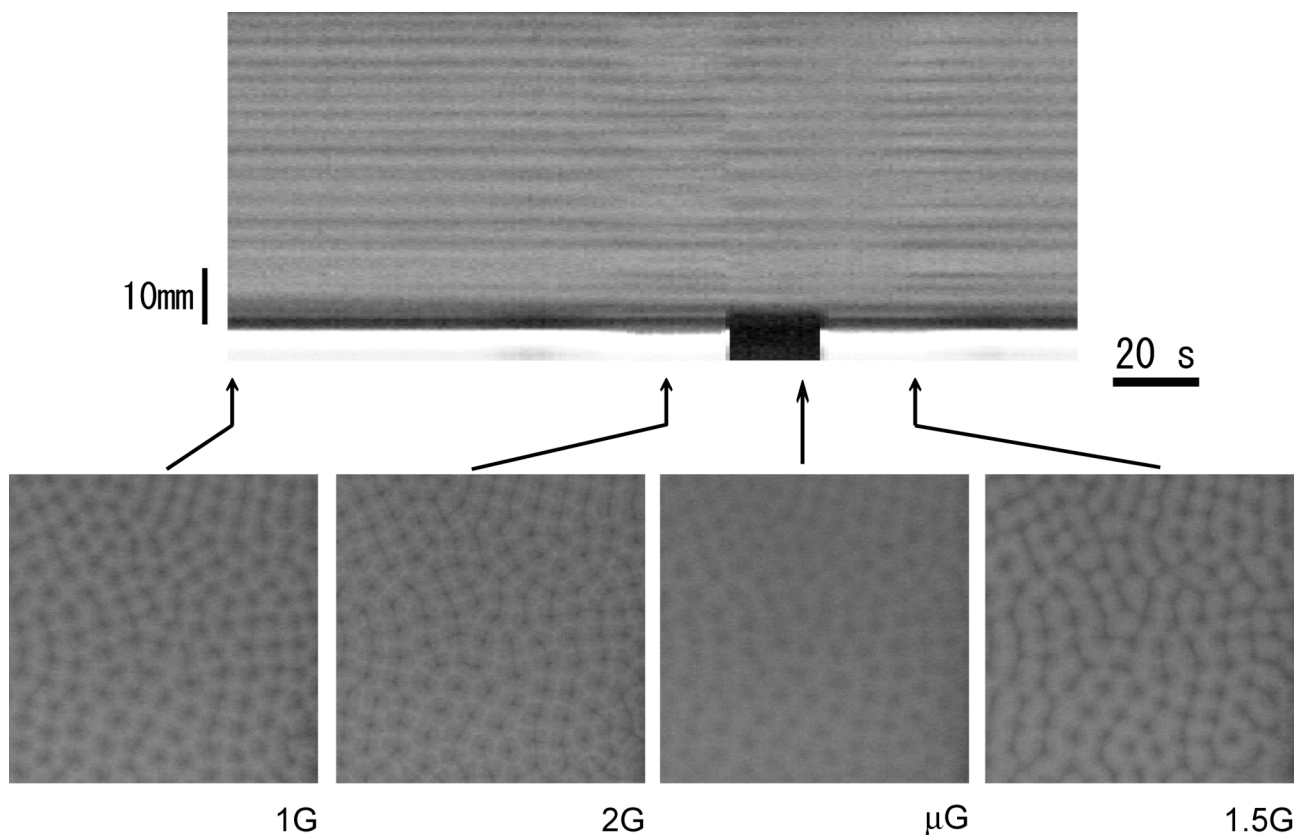


Fig 2. Space-time plot of the response of the bioconvection pattern by *Chlamydomonas reinhardtii* to the altered gravity during parabolic flight of the airplane. Details of the figure are the same as those in Fig 1.

重力時においてもパターンが完全に消失することはなく、そのサイズをほぼ維持したまま輪郭が不明瞭になって行くのが観察された。Fig 2 実 全般を通して、重力加速度が変動してもパターンサイズにはほとんど変化がみられなかった。唯一、微小重力からの復帰直後に現れる過重力時、 $1.5 \times g$ にパターンサイズが一過的に増加することが認められた。これらはテトラヒメナでの結果および、予備的に行った過重力実 の結果とは一致しない。

航空機を利用した微小重力実 の先行研究として、Noever が 弾道 行に伴う対流パターンの変動を報告している⁶。回だけの 行実 にもとづくものではあるが、微小重力フェーズにおいて、テトラヒメナやクラミドモナスによる対流パターンが消失することに加え、微小重力の前後にある過重力フェーズでのパターンサイズの増大が報告されている。これは、今回の我々の結果とは一致しない。

対流パターンは、本来独立して活動している個々の微生物が作り出す共同現象の結果である。本来ならば均一になるようとする微生物が、重力の効果を背景に、密度の不均衡を維持している。従って、重力の消失により、パターンが消失することが予測され

る。この予想はテトラヒメナのパターンの挙動では確認されたものの、クラミドモナスでの挙動には当てはまらない。個々の微生物の間の微弱な相互作用が、重力という外力が介在することによって空間的に増幅されているならば、重力の消失に伴うパターン変化、消失、には、物理的な拡散的による密度の均一化とともに、パターンのもととなる微生物の持つ特性、遊泳速度や重力感知能力⁷が反映されているはずである。これらの相互作用の中に「重力効果の増幅発現」をもたらすメカニズムが潜んでいる可能性がある。サイズの変動特性に加え、パターンの消失と再発現の償に見られる挙動の詳細を解析することで、ワーキンググループの目指すものにたどり着くことができるかも知れない。

引用文献

1. 最上善広・大木田明代・ 場昭次 (2005) 重力生物学の研究モデルとしての生物対流 宇宙利用シンポジウム 第 21 回 213-215.
2. 山根章子・最上善広・ 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.
3. 最上善広・秋山あすか・ 場昭次 2006 生物対流現象の比較生理学 宇宙利用シンポジウム 第 22 回 213-215.
 4. 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.
 5. Akiyama, A., Ookida, A., Mogami, Y. and Baba, S.A. (2005) Spontaneous alteration of the pattern formation in the bioconvection of *Chlamydomonas reinhardtii*. J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 22, 210-215.
 6. Noever, D.A. (1991). Evolution of bioconvective patterns in variable gravity. *Phys. Rev. A* 44, 5279-5291.
 7. Mogami, Y., Ishii, J. and Baba, S.A. (2001). Theoretical and experimental dissection of gravity-dependent mechanical orientation in gravitactic microorganisms. Biol. Bull. 201, 26-33.