

# 変動重力場に対する生物対流時空間パターンの応答

最上善広・安里枝利子・和田祐子・久保田彩水・勝 由美子・新堀真希・馬場昭次

お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科

## Responses of the spatio-temporal pattern of bioconvection to altered gravity

Yoshihiro Mogami, Eriko Asato, Yuuko Wada, Ayami Kubota, Yumiko Katsu, Maki Niihori and Shoji A. Baba

Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University

mogami@cc.ocha.ac.jp

**Abstract:** Bioconvection of the aquatic microorganisms has been focused as an experimental tool for the research proposal aiming to reveal the possibility for gravity to develop new functions of the biological systems through the collective interactions between the individual components of the systems. Previously we reported the changes in the bioconvection pattern of *Tetrahymena* and *Chlamydomonas*, viewed from top, in response to the altered gravity during parabolic flight by an airplane. In top-view recordings, patterns from *Tetrahymena* were observed to decrease their size under hypergravity and disappeared under microgravity. The patterns from *Chlamydomonas*, on the other hand, showed little changes in their size under hypergravity, although the patterns were observed to be enhanced under hypergravity. The patterns by *Chlamydomonas* remained less changed under microgravity. These results were confirmed by the analyses on the side-view recordings of the bioconvection pattern of the same specimens. In *Tetrahymena* the number of the settling blob increased, corresponding to the decreasing pattern size under hypergravity. In *Chlamydomonas*, the settling blobs changed to the shape of a bottle with constricted neck under hypergravity, which may correspond to the enhanced (or sharpened) pattern in the top-view recordings. Interestingly, side-view recordings revealed that large population of the microorganisms swam preferentially upwards and accumulated at the top of the chamber under microgravity, which caused, especially in *Tetrahymena*, abrupt formation of the settling blobs at the onset of the hypergravity.

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

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）は以下の通りである。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8）、狐崎 創（奈良女子大学）。

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、集団としての「思いもよらない特性」が発現されるという、新しい概念を確立しようとするにある。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する。これまで、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。

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、恰好の実験システムである<sup>1</sup>。しかし、生物対流に関してこれまでになされた多くの研究では、重力を実験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。最近になって我々は遠心加重力装置を使った実験により、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<sup>2,3</sup>。これらの特性は、従来から展開されてきた流体物理学のみに立脚した理論からは十分に説明されてはいない。

生物対流により形成されたパターンの時空間構造が、重力変動に対してどれほど鋭敏に反応し、その結果どのような増幅効果を示すか。これを調べることを目的として、航空機の弾道飛行による変動重力下での生物対流パターンの挙動を調べた。

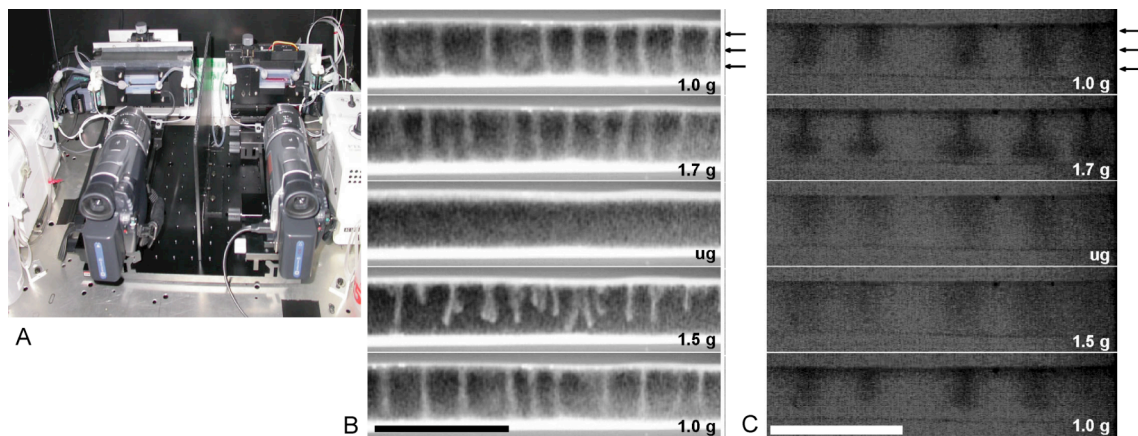


Fig 1. A, Set-ups for the recordings side-views of bioconvection pattern of *Tetrahymena* (left) and *Chlamydomonas* (right). B and C, Sequential changes in the bioconvection pattern in side-views for *Tetrahymena* (B) and *Chlamydomonas* (C) in response to the altered gravity during a parabolic flight of an air-lane (G II, Diamond Air Service, Toyooka, Aichi). g-values are indicated at the lower right of each image. Arrows beside each top image correspond the positions (top, center and bottom) for the space-time plot analysis shown in Fig 2. Scale bars, 10 mm.

平成 18 年次に行った航空機利用微小重力実験において、生物対流現象の主たる実験試料である、テトラヒメナとクラミドモナスが重力変動に対して明らかに異なる応答をすることが明らかとなった<sup>4,5</sup>。この実験では、トップビューによる記録を行い、パターンサイズの変動に着目して解析を行った。

その結果、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。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、微小重力時においてもパターンが完全に消失することではなく、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ことが明らかとなった。この結果は、生物対流パターンを生み出す重力方向の循環が生物種によって大きく異なることを示唆している。今年度の研究では、パラボリックフライトによる重力変動に伴う生物対流パターンの応答をサイドビュー記録 (Fig 1A) から解析し、循環挙動の詳細を明らかにすることを目指した。

Fig 1 B,C にまとめたように、対流パターンのサイドビューは、トップビューでの変化と一致している。テトラヒメナでは、過重力時に下方流 (Fig 1B の白い帯状の部分) の本数が過重力時に一過的に増加し (Fig 1B, 1.7g), 微小重力時に消失した (Fig 1B, ug)。これはトップビューで確認されたパターンのサイズ増大と、消失に対応している。時空間プロット (Fig

2A) に明らかに示されているように、下方流を形成する細胞集団は容器の下 (すなわち、下方流の先端) から消失していった。

一方、クラミドモナスでは過重力時に下方流の数は変化せず、その形状がフラスコ状に変化するのが観察された。このとき、細胞集団は下方流の先端に移動し、その結果、下方流の上端は細くくびれた形状となった (Fig 1C, 1.7g, および Fig 2B, bottom の変化)。このような変化がトップビューでのパターン強調となることが推定される。また、微小重力下でもパターンが維持されることが、サイドビューでも確認された (Fig 1C, ug)。

テトラヒメナで見られた、下方流の先端からの消失は、細胞集団が上方に移動することを示唆している。この微小重力下での上方への移動は、クラミドモナスでも観察され、フラスコ状の下方流の形が崩れ、細胞が容器の上面に集まるのが観察された。がの。ともに、微小重力の間に細胞集団が上方に移動するのが観察された (Fig 1C, ug)。

微小重力の終了に伴って、パターンが再形成されるが、テトラヒメナ、クラミドモナスともに、パターンの出現は容器の上端から始まった。このことは、微小重力の間にこれらの微生物が上方に移動していることを示し、重力走性行動の増強が起こっている可能性を示唆している。これは全く予期せぬ現象であり、今後に予定されている定量的解析によって、これまでに知られていない、生物対流現象の特性が明らかになることが期待される。

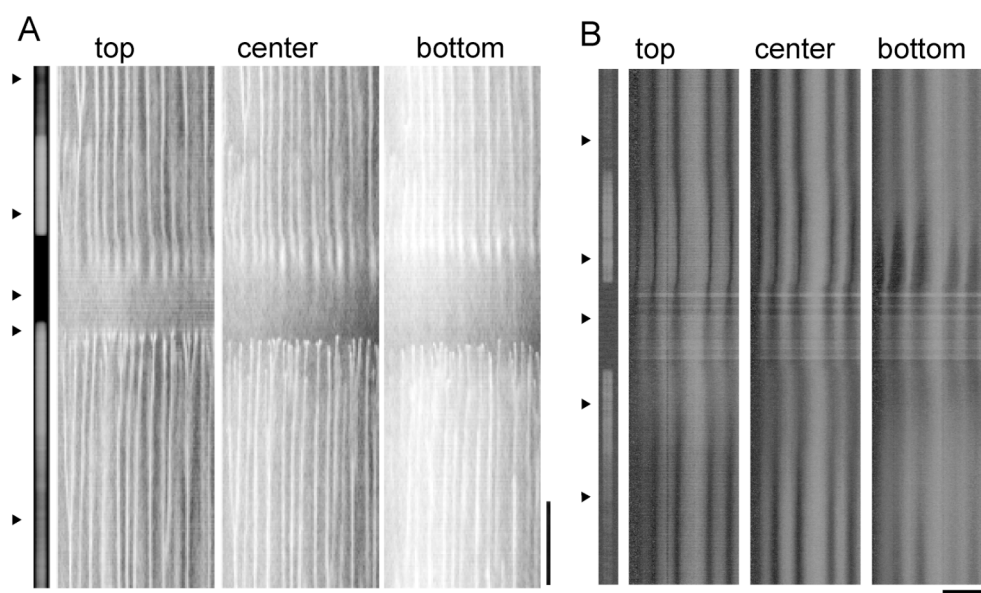


Fig 2. Space-time plot analysis on the side-view recordings of bioconvection pattern of *Tetrahymena* (A) and *Chlamydomonas* (B). Space-time plot obtained three separate positions (top, center and bottom) indicated in Fig 1 are shown. Narrow bars beside the plots shows corresponding g-level monitored by superimposed LED, the brightness of which was roughly proportional to the g-level (the brighter the LED, the larger the g-level). Arrow heads indicate the time corresponding to the side-view images shown in Fig 1 (from top to bottom). Horizontal and vertical bars, 10 mm and 20 s, respectively.

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ろうとする微生物が、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<sup>7)</sup>）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債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・馬場昭次（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. 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. 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.
4. 最上善広・千葉陽子・勝 由美子・安里枝利子・澤井里枝・馬場昭次（2007）変動重力に対する生物対流パターンの応答. 宇宙利用シンポジウム（第23回），335-338.
5. Mogami, Y. and Baba, S.A. (2008) Amplified expression of the gravity effect on the spatio-temporal formation of bioconvection pattern. Space Utiliz. Res., 24, 264-266.