

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560181

研究課題名(和文) 宇宙環境下の走化性バクテリアによる生物対流に及ぼす重力変調の影響に関する数値解析

研究課題名(英文) Numerical analysis of effects of gravity modulation on bioconvection generated by chemotactic bacteria in microgravity environments

研究代表者

柳岡 英樹 (Yanaoka, Hideki)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：40281951

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、重力変調が存在する微小重力場において、走化性バクテリアにより生じる生物対流とその輸送特性に関する数値解析を行った。安定な懸濁液に重力変調が作用すると、生物対流が発生し、複数の三次元的なブルームや生物対流パターンが形成される。重力変調の周波数が低い場合、生物対流は重力変調に追従しやすくなる。ブルーム同士の干渉が強くなると、輸送特性が向上する。これらの結果は既存の実験では得られていない初めての研究成果である。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulations were carried out modeling the bioconvection generated by chemotactic bacteria in microgravity environments with gravity modulation, and the transport characteristics were examined. When the gravity modulation acts on the steady suspension of bacterial cells, the bioconvection occurs, and the three-dimensional plumes and bioconvection pattern are generated. The increase of interference between the plumes enhances transport characteristics. These results don't clarify in the previous results.

研究分野：工学

キーワード：生物対流 バクテリア 酸素 走化性 計算流体力学

### 1. 研究開始当初の背景

人類が宇宙環境へ進出する時代へと進み、現在では宇宙実験などの船内活動を実施している。この制限された船内において、将来的には水質浄化、食料自給、ごみ処理を行い、また新たな動力源の開発などを考える必要がある。その有効な方法の一つとして微生物の利用が考えられる。今後、宇宙環境において微生物と共生・共存するためには、微生物が持つ特徴や能力をこれまで以上に調査することが重要となる。

地球上には多様な微生物が存在する。これらの微生物は、外部の刺激に反応し移動する性質を持っている。このような微生物の特徴は走性と呼ばれる。懸濁液中の微生物はある種の走性により水面近傍に集中する。枯草菌のような微生物の密度は水より重く、一定量の微生物が水面近傍に集中することによって微生物の沈降がはじまり、生物対流が発生する。

従来、生物対流に関する基礎的および応用的な研究が実施されている。これまでに生物対流に関する研究は地上の環境におけるものであり、宇宙環境における生物対流に関する本研究は新しい試みである。宇宙環境において微生物の持つ特徴を有効利用するためには、微小重力場における生物対流を把握しておく必要がある。しかしながら、重力変動が生物対流や輸送特性に与える影響については不明であり、このような研究例はいまだ報告されていない。

### 2. 研究の目的

宇宙環境において微生物を有効に利用するためには、微小重力場の流体中における微生物の挙動を理解する必要がある。実際の微小重力場では重力変動が存在するため、微生物の移動によって発生する生物対流に及ぼす重力変動の影響を調査し、その生物対流を効率的に制御することが重要となる。本研究では、酸素に反応する走化性バクテリアに着目し、重力変動が存在する微小重力場において、走化性バクテリアによって生成される生物対流中のバクテリアと酸素の輸送特性を明らかにし、それらの輸送を制御することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は三年計画であり、重力変動が存在する微小重力場において、走化性バクテリアにより生じる生物対流とその輸送特性を数値解析により明らかにすることにより、宇宙環境における生物対流の有効利用の可能性を探るものである。この目的を達成するため、初年度では、二次元解析により重力変動の存在下における生物対流と輸送の基本特性を探る。次年度では、重力変動がブルーム同士の干渉に及ぼす影響を三次元解析により詳細に明らかにする。最終年度では、重力変動が存在する微小重力場における生物対流と

輸送特性の制御を試み、宇宙環境における微生物の有効利用の可能性を明らかにする。

#### (1) 重力変動の存在下における生物対流と輸送の基本特性の調査

計算において、対象とする容器は浅く、懸濁液中には酸素に反応する走化性バクテリアが存在している。水面から酸素が一様に供給されるため、バクテリアは酸素の豊富な水面へ向かって移動する。本研究の最終目的は、微小重力場における生物対流と輸送特性を制御することであるが、残留重力や重力変動が生物対流に及ぼす影響が不明であるため、まずは二次元解析により基本特性を明らかにする。解析手順は以下の通りである。

申請者が既に構築した生物対流計算コードに重力変動のモデルを組み込む。次に、実測値を参考にしながら残留重力場を設定し、生物対流の解析を行うことにより、生物対流が発生する臨界の重力場を明らかにする。

重力変動の周波数や振幅を変えたときのバクテリアと酸素の濃度場および流れ場の関連を明らかにするとともに、バクテリアと酸素の流束分布を求めることにより輸送特性を調査する。

#### (2) 重力変動がブルーム同士の干渉に及ぼす影響に関する調査

微小重力場における生物対流について詳細な三次元解析を行い、重力変動がブルーム同士の干渉に及ぼす影響を調査する。ブルーム同士の干渉には生物対流パターンが大きく影響するので、多様な生物対流パターンも発生させる。解析手順は以下の通りである。

前年度において微小重力場で生物対流が発生する臨界条件が判明しているため、まずは残留重力や重力変動を固定し、バクテリアの初期濃度に様々な乱れを加え、波長の異なる多様な生物対流パターンを発生させ、ブルームの波長による輸送特性の変化を明らかにする。

次に、最も出現パターンが多い生物対流に着目し、重力変動の周波数や振幅を変化させたときのブルームの周波数応答性を調査し、輸送特性を向上あるいは抑制させる最適な条件を明らかにする。

#### (3) 微小重力場における生物対流と輸送特性の制御に関する調査

微小重力場においてバクテリアを動力源、化学分析、環境浄化など様々な用途に有効利用するために、バクテリア制御の工学的応用の可能性を調査する。申請者の過去の研究において、容器の下壁面を振動させることが簡単で有効な制御方法であることを見出している。この制御方法を微小重力場にも適用し、ブルームの周波数応答性を調査する。解析手順は以下の通りである。

容器の下壁面を加振させたときのブルー

ム同士の干渉による濃度場や生物対流の時間的変化を観察し、バクテリアと酸素の輸送に関する非定常特性を調査する。また、重力変調と加振による生物対流の共振現象が現れるかを探る。  
 以上の結果を総合して、微小重力場における生物対流と輸送特性を制御することにより、宇宙環境における微生物の有効利用の可能性について、一つの指針を提供する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 重力変調の存在下における生物対流と輸送の基本特性の調査

平成 24 年度は二次元解析により生物対流の基本特性を調査した。得られた知見は以下の通りである。

生物対流が発生していない状態において、重力変調が作用すると、生物対流が発生し、周期的に複数のブルームが形成される(図 1, 2)。重力加速度の増加とともにブルームが出現し、重力加速度が減少するとブルームは消滅する。ブルームの個数や間隔は周波数によって異なる。

レイリー数によらず、重力変調の周波数が低い場合、生物対流は重力変調に追従しやすくなる(図 1)。このとき、ブルーム内のバクテリア濃度が過濃となり、ブルーム中心における下降流の速度は速くなるため、生物対流による輸送特性が向上する。重力変調の周波数が高くなるに従って、生物対流は重力変調に追従できなくなり、ブルームの規模は減少し、輸送特性は低下する(図 2)。臨界レイリー数より低い場合、高周波数では、ブルームが形成されず、生物対流は発生しなくなる(図 3)。

生物対流が発生している状態において、重力変調が作用すると、定常状態と比較してバクテリアの輸送特性が低下する。周波数が高くなるに従い、上述と同様に輸送特性は低下する。

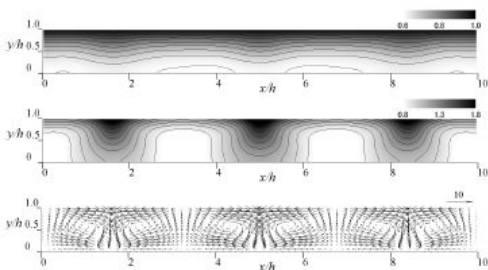


Fig.1 Concentration contours of oxygen and bacteria, and velocity vectors for  $\Gamma=4.0 \times 10^5$ ,  $f=0.05$  at  $T=\pi/2$ .

##### (2) 重力変調がブルーム同士の干渉に及ぼす影響に関する調査

平成 25 年度では、地上の重力場と微小重力場における生物対流について詳細な三次元解析を行い、ブルーム同士の干渉と輸送特性を調査した。また、ブルーム同士の干渉に

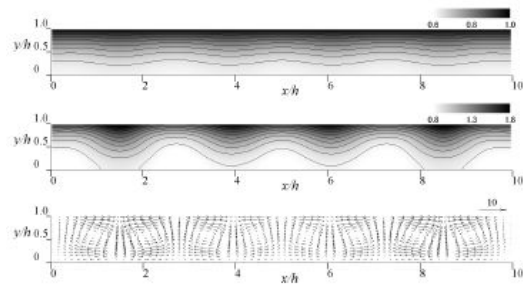


Fig.2. Concentration contours of oxygen and bacteria, and velocity vectors for  $\Gamma=4.0 \times 10^5$ ,  $f=0.1$  at  $T=\pi/2$ .

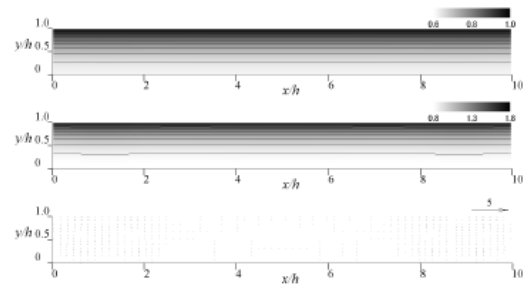


Fig.3 Concentration contours of oxygen and bacteria, and velocity vectors for  $\Gamma=4.0 \times 10^5$ ,  $f=1.0$  at  $T=\pi/2$ .

は生物対流パターンが大きく影響するので、多様な生物対流パターンも発生させた。得られた知見は以下の通りである。

地上の重力場において、バクテリアの初期濃度に様々な乱れを加えると、波長が異なる多様な生物対流パターンが発生する。ブルームの波長が短くなると、ブルーム同士の干渉が強くなり、輸送特性が向上する。微小重力場において、生物対流が発生していない懸濁液に、重力変調が作用すると、生物対流が発生し、複数の三次元的なブルームが形成される(図 4)。重力加速度の増加とともにブルームが出現し、重力加速度が減少するとブルームは消失する。重力変調の周波数が低くなるにつれて、生物対流は重力変調に追従しやすくなる。このとき、ブルームの数は減少し、ブルームの規模が大きくなるため、波長が長くなる(図 5)。その結果、容器内全体の輸送特性が向上する。

ブルーム間では、周囲のブルームとの干渉によって速い上昇流が発生し、輸送特性が向上する。このとき、より多くのブルームからの干渉が発生し、ブルームの波長が短くなるほど、輸送特性が向上する。

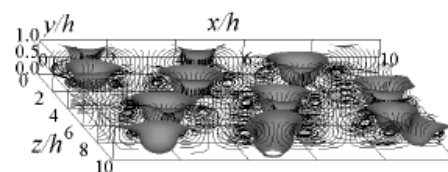


Fig.4 Isosurface of bacterial concentration for  $\Gamma=4.0 \times 10^5$ ,  $f=0.02$  at  $T=\pi/2$ .

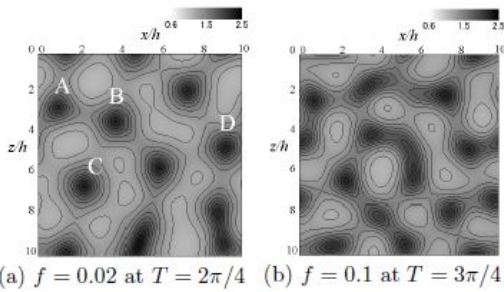


Fig.5 Bacterial concentration contours in  $x$ - $z$  plane at  $y/h=1.0$  for  $\Gamma=4.0\times 10^5$ .

### (3) 微小重力場における生物対流と輸送特性の制御に関する調査

平成 26 年度の当初の計画では、容器の下壁面を振動させることによるプルームの周波数応答性を調査する予定であった。しかしながら、微小重力場においては容器の加振により生物対流が発生しなかった。そこで、基本周波数の重力変調に高周波成分を重畳させることにより重力変調の条件を変えて、様々な生物対流が発生させ、生物対流の周波数応答性を調査した(図 6)。得られた知見は以下の通りである。

安定な懸濁液に重力変調が作用すると、生物対流が発生し、複数の三次元的なプルームが形成される。水面上には複雑な生物対流パターンが現れる。パターンの波長は地上における値より大きくなる。

重力変調に重畳させる高周波成分が低くなると、懸濁液の周波数応答性が良くなり、下降流と上昇流の平均速度が増加する。重力変調に高周波成分を重畳させると、沈降速度の増加が 2 回発生する。

重畳する高周波成分の周波数が低くなると、対流速度が増加するため、懸濁液全体におけるバクテリアと酸素の輸送特性が向上する。

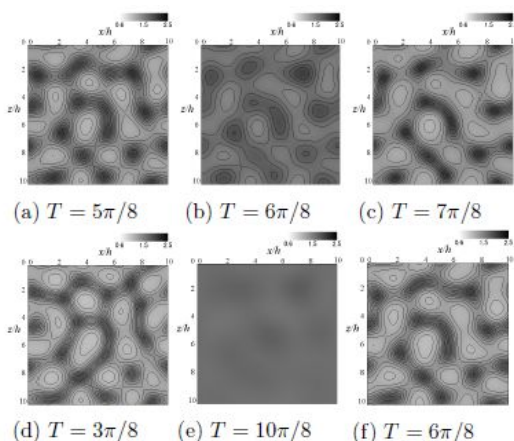


Fig.6 Bacterial concentration contours in  $x$ - $z$  plane at  $y/h=1.0$  for  $\Gamma=4.0\times 10^5$ , and  $f_1=0.1, f_2=5f_1$  [(a), (b), (c)],  $2f_1$  [(d), (e)],  $20f_1$  [(f)].

次に、今後の研究の方向性を探るため、輸送特性の大きな変化を得ることを目的として、温度差を懸濁液に与えることにより、生物対流と熱対流の干渉を調査し、輸送特性の制御の可能性を探ることができた。

研究期間全体を通して、重力変調を伴う微小重力場の流体中における走化性バクテリアによる生物対流や輸送特性を解明することができ、さらにはバクテリアと酸素の輸送を制御できる可能性を見出すことができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

稲船力, 末永陽介, 柳岡英樹, 微小重力場におけるナノ流体による熱対流に及ぼす重力変調の影響, 日本機械学会東北学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 八戸, pp.187-188, 2015.3.10.

川村圭司, 末永陽介, 柳岡英樹, 走化性バクテリアによって生成される三次元生物対流の熱制御, 日本機械学会東北学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 八戸, pp.201-202, 2015.3.10.

西村大夢, 末永陽介, 柳岡英樹, 走化性バクテリアによって生成される三次元生物対流の輸送特性, 日本機械学会東北支部第 49 期秋季講演会, 盛岡, pp.169-170, 2013.9.20.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳岡 英樹 (YANAOKA Hideki)  
岩手大学・工学部・教授  
研究者番号：40281951

(2)研究分担者

末永 陽介 (SUENAGA Yosuke)  
岩手大学・工学部・助教  
研究者番号：60413720

(3)連携研究者

( )

研究者番号：