

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05780

研究課題名(和文) 走化性バクテリアによる生物対流と熱対流の干渉および輸送特性に関する数値解析

研究課題名(英文) Numerical analysis of interference and transport characteristics in bioconvection and thermal convection generated by chemotactic bacteria

研究代表者

柳岡 英樹 (Hideki, Yanaoka)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：40281951

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、下壁面から加熱された懸濁液中において、酸素に反応する走化性バクテリアによって生じる熱生物対流について三次元数値解析を行った。生物対流と熱対流のレイリー数、バクテリア濃度の初期乱れを変化させると、プルームの配置や形状が異なる熱生物対流パターンが形成される。生物対流および熱対流のレイリー数が増加すると、生物対流と熱対流の干渉が強まり、バクテリアと酸素の輸送特性が向上する。パラメータが同一条件であるとき、領域内に形成されるプルーム数が変化するが、領域全体の物質の輸送は定量的に変化せず、輸送特性は熱生物対流パターンに依存しない。これらの結果は既存の研究では得られていない研究成果である。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulations were carried out modeling the bioconvection and thermal convection generated by chemotactic bacteria in the suspension heated from the lower wall. When the bioconvection and thermal convection Rayleigh numbers and the initial disturbance of bacterial concentration are changed, the plumes with different forms and patterns occur in the thermo-bioconvection. The increase of two Rayleigh numbers enhances the interference between bioconvection and thermal convection, and transport characteristics of the bacteria and oxygen. The number of the plume varies even if the parameters are the same condition. However, the transport in the entire field of the suspension doesn't vary quantitatively, and therefore the transport characteristics are independent of the thermo-bioconvection patterns. These results have not been clarified in the previous studies.

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 数値流体力学

### 1. 研究開始当初の背景

近年、バイオ燃料の生成や微生物燃料電池に代表されるように、微生物の能力を有効に利用することが考えられている。循環型社会の実現には革新的技術の創生が必要であり、そのためには微生物の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。

地球上には様々な種類の微生物が存在する。ある種の微生物は、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、走性の種類として、重力に反応する走地性、光に対する走光性、化学物質に対する走化性などがある。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、この生物対流に関して基礎的研究が実施されている。一方、生物対流を制御することにより、微生物の集団を工学的に利用することが考えられている。今後、バイオ燃料の効率的な生成や微生物燃料電池の高効率化、生物対流による微小機械システムの駆動、微生物の分離や環境浄化、宇宙環境下の生命活動などの様々な分野への微生物利用の観点からも、流体中における走性を持つ微生物の挙動を解明し、微生物による生物対流を効率的に制御する方法を見出すことは重要となる。

### 2. 研究の目的

様々な産業分野において微生物を有効に利用するためには、流体中における微生物の挙動を解明し、制御することが要求される。走性を持つ微生物が移動することによって、生物対流が発生するため、その生物対流を効率的に制御することが重要となる。微生物のなかには熱に強いものも存在する。微生物が入った懸濁液に熱を加えることにより、触媒反応をより効率的に行える可能性がある。本研究では、酸素に反応する走化性バクテリアが入った懸濁液に温度勾配を加えたときの生物対流と熱対流の干渉を調査し、その干渉がバクテリアと酸素の輸送特性に及ぼす影響を明らかにし、さらに輸送を制御する方法を提案することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、温度勾配を与えた懸濁液において、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、生物対流の熱制御の可能性を探るものである。この目的を達成するため、本研究は三年計画とする。

#### (1) 生物対流と熱対流の干渉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(枯草菌など)が存在している。水面から

酸素が一樣に供給されるため、酸素が豊富な水面へ向かってバクテリアが移動する。空気を一樣温度に保ち、下壁面を加熱することにより、生物対流と熱対流を発生させる。本研究の最終目的は、生物対流と輸送特性を熱によって制御することであるが、バクテリア濃度や加熱条件が生物対流に及ぼす影響が不明であるため、まずは基本的な流動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と、熱対流計算コードを組み合わせる。次に、バクテリアが生息できる程度の微小な温度差を懸濁液に加え、生物対流と熱対流の発生を確認する。

生物対流が発生している状態と発生していない状態に熱を付加したときの熱対流と生物対流の干渉の違いを明らかにする。

#### (2) 熱の付加がブルーム同士の干渉に及ぼす影響に関する調査

平成 28 年度では、バクテリアと酸素の輸送特性を明らかにするため、熱の付加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。

申請者のこれまでの研究から、生物対流パターンはバクテリアの初期濃度によって変化することが明らかになっている。まずは、1つのパターンに着目し、温度差を変化させたときのブルーム同士の干渉の変化を明らかにする。

次に、温度差を固定し、バクテリアの初期濃度に様々な乱れを加え、波長が異なる多様な生物対流パターンを発生させ、パターンの波長による輸送特性の変化を明らかにする。

#### (3) 生物対流と輸送特性の熱制御に関する調査

平成 29 年度では、バクテリア濃度や温度差を変化させ、生物対流と輸送特性の熱制御を試み、微生物の有効利用の可能性を明らかにする。解析手順は以下の通りである。

前年度の解析をさらに進め、熱の付加がバクテリアと酸素の輸送特性を向上させるメカニズムを詳細に明らかにし、熱制御の原理を提案する。

以上の結果を総合して、熱の付加によって生物対流と輸送特性を制御することにより、様々な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) 生物対流と熱対流の干渉と輸送の基本特性の調査

平成 27 年度では、温度勾配が存在する懸濁液中に生成される生物対流に関して三次元数値解析を行い、下壁面からの加熱が生物

対流の変化やバクテリアと酸素の輸送特性に及ぼす影響を調査した。その結果、以下の知見が得られた。

安定な懸濁液を下壁面から加熱すると、懸濁液の不安定性が強まることにより生物対流が発生し、領域内に複数の三次元的なプルームが形成される（図1）。

下壁面から加熱すると、懸濁液の不安定性が強まるため、プルームの成長が促進され、下壁面に向かって伸長する。温度勾配の増加とともに、領域内に形成されるプルームの数が増加する。さらに加熱を強めると、プルームが消失し、サーマルプルームが形成され、熱対流が支配的な場に変化する。生物対流と熱対流が共存している場合、プルーム中心とプルーム間の下降流と上昇流の速度が増加する。このとき、対流によるバクテリアと酸素の輸送が向上するため、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（図2）。

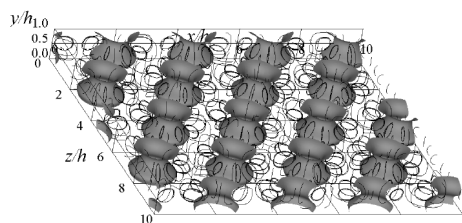


Fig.1 Isosurface of bacterial concentration and streamlines for  $\Gamma=400$ ,  $Ra=1000$ .

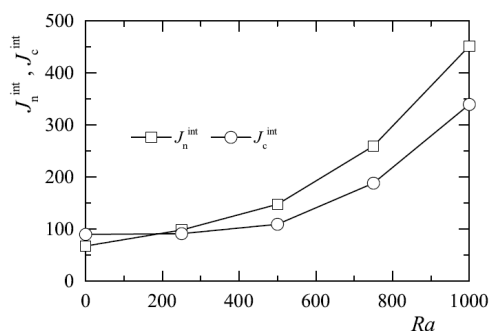


Fig.2 Integral values of total flux of bacteria and oxygen in y-direction.

## (2) 熱の付加がプルーム同士の干渉に及ぼす影響に関する調査

平成 28 年度では、生物対流のレイリー数および熱対流のレイリー数を広範囲に変化させ、熱生物対流のパターンの構造と輸送特性を調査した。その結果、以下の知見が得られた。

底面から加熱された懸濁液では、生物対流と熱対流が共存し、熱生物対流が発生する。熱対流のレイリー数を増加させると、生物対流に対する熱対流の干渉の効果が強ま

り、領域内に形成されるプルーム数が増加し、熱生物対流パターンが変化する。さらに熱対流のレイリー数を増加させると、熱対流が支配的になり、プルームが消滅し、サーマルプルームが形成される。

生物対流が発生している状態において、熱対流のレイリー数を増加させると、熱生物対流の対流速度が増加するため、対流による物質の輸送が促進され、領域全体にわたってバクテリアと酸素の輸送特性が向上する（図3）。

バクテリア濃度の初期乱れを変化させると、プルーム数が異なる熱生物対流パターンが形成される（図4）。パラメータが同一条件であるとき、領域全体における物質の輸送は、プルーム数によって定量的に変化せず、バクテリアと酸素の輸送特性は熱生物対流パターンに依存しない。

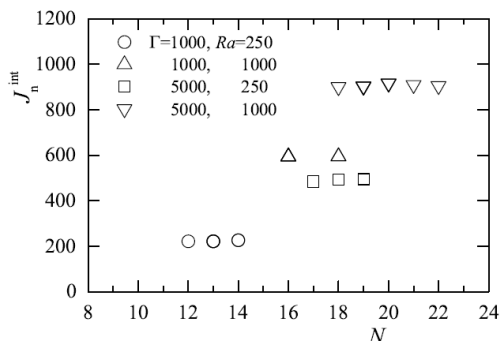


Fig.3 Integral values of total flux of bacteria and oxygen in y-direction for  $\Gamma=1000$ , 5000 and  $Ra=250$ , 1000.

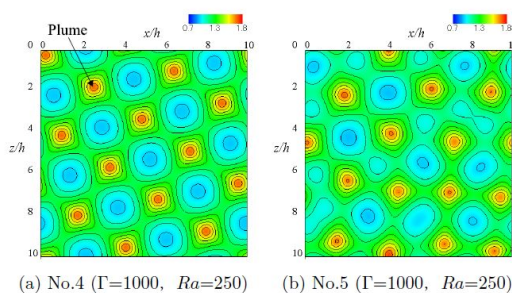


Fig.4 Bacterial concentration contours in x-y plane at  $y/h=9.0$  for  $\Gamma=1000$  and  $Ra=250$ , 1000.

## (3) 生物対流と輸送特性の熱制御に関する調査

平成 29 年度では、微生物の有効利用の可能性を明らかにするため、様々なパラメータが熱生物対流のパターンの構造や、酸素とバクテリアの輸送特性に及ぼす影響を調査し、以下の知見が得られた。

生物対流が支配的な場では、生物対流のレイリー数が増加すると、対流による輸送が

促進され、バクテリアと酸素の輸送特性は向上する(図5)。一方、熱対流が支配的な場では、生物対流のレイリー数によって、輸送特性は変化しない(図6)。したがって、生物対流が支配的な場において、輸送特性に対して生物対流と熱対流の干渉が大きく影響している。

生物対流と熱対流の干渉が、対流速度の増加と輸送特性の向上をもたらすため、微小機械の駆動や攪拌効率の促進など様々な工業的応用といった観点から、加熱による生物対流の制御は有用であるといえる。

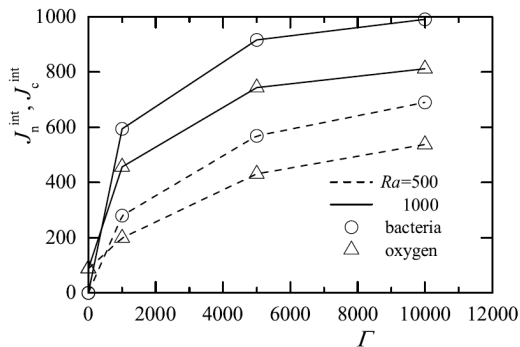


Fig.5 Integral values of total flux of bacteria and oxygen in y-direction  $Ra=500, 1000$ .

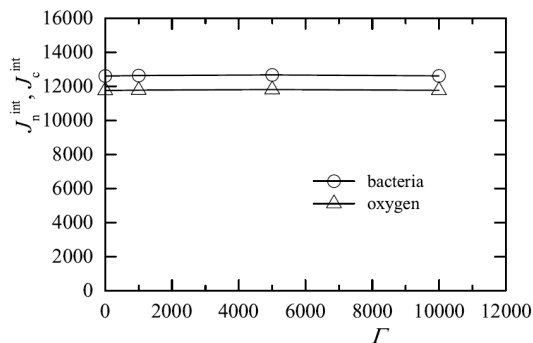


Fig.6 Integral values of total flux of bacteria and oxygen in y-direction  $Ra=1150$ .

最後に、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、加熱した懸濁液にナノ粒子を混ぜて、熱とナノ粒子によるさらなる輸送特性の向上を調査し、輸送特性の制御の可能性を探ることができた。今後、微生物とナノ粒子の干渉の効果を明らかにする予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

小泉大地, 未永陽介, 柳岡英樹, 走化性バ

クテリアによって生成される熱生物対流の分岐現象と輸送特性, 日本機械学会東北学生会第 48 回学生員卒業研究発表講演会, 郡山市, pp.146-147, 2018.3.7.

馬場大樹, 未永陽介, 柳岡英樹, 重力変調を伴う微小重力場におけるナノ流体によって発生する熱対流パターン, 日本機械学会東北学生会第 48 回学生員卒業研究発表講演会, 郡山市, pp.148-149, 2018.3.7.

勝又晴貴, 未永陽介, 柳岡英樹, 重力変調を伴う微小重力場におけるナノ流体によって発生する熱対流の周波数応答性と熱伝達, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 埼玉大学(さいたま), G0600202 (Published in DVD), 5 pages, 2017.9.3-6.

勝又晴貴, 未永陽介, 柳岡英樹, 重力変調を伴う微小重力場におけるナノ流体によって発生する熱対流の周波数応答性, 日本機械学会東北学生会第 47 回学生員卒業研究発表講演会, 多賀城市, pp.172-173, 2017.3.8.

川村圭司, 未永陽介, 柳岡英樹, 走化性バクテリアによって生成される生物対流と熱対流の干渉, 日本機械学会東北支部第 52 期秋季講演会, 秋田, No.311(USBメモリ), 2016.9.17.

長谷川 裕也, 未永陽介, 柳岡英樹, 微小重力場の重力変調によって発生するナノ流体の熱対流に関する数値解析, 日本機械学会東北支部第 52 期秋季講演会, 秋田, No.313(USBメモリ), 2016.9.17.

〔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・理工学部・教授

研究者番号：40281951

(2)研究分担者

末永 陽介 (SUENAGA Yosuke)

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号：60413720

(3)連携研究者

( )

研究者番号：

(4)研究協力者

( )