生物対流パターンに及ぼす回転重力場の影響*

伊 東 明 俊^{*1}, 天 谷 賢 児^{*2}
新 井 雅 隆^{*2}, 三 船 博 史^{*1}

The Effect of Rotational Gravitational Field on Bioconvection Pattern

Akitoshi ITOH, Kenji AMAGAI,
Masataka ARAI and Hiroshi MIFUNE

This paper experimentally investigates a behavior of a bioconvective pattern under super gravitational fields. Experimental materials are the high density culture media of *Tetrahymena*. A centrifugal force was used to synthesize various super gravity conditions by using a spin tester that can generate 1-12[G]. To realize the decreasing effect of bioconvection pattern size by the increase of synthesized gravity, different lengths of a rotative beam are used to change the rate of Coriolis's force and synthesized gravity. The main results are as follows: (1) The size of the convection pattern is reduced by an increase of the synthesized gravity. (2) Under synthesized gravitational field, the stream mode of bioconvection is changed by the Coriolis's force. (3) The maximum transition velocity (upward, downward) of *Tetrahymena* is obtained with the 2-4[G] condition. (4) The decrease in the size of convection pattern is due to the composite gravity.

Key Words: Bio-Fluid Mechanics, Biological Engineering, Space Engineering, Bioconvection, Polygon, *Tetrahymena*, Super Gravitational Field, Coriolis's Force

1. 緒 言

近年のマイクロ加工技術の進展により、マイクロマシンの実現が遠い夢ではなくなってきている。マイクロマシンの将来的な応用方法として、単機能のマイクロマシンを多量に生産して、群れとして制御するアイデアが数多く表明されている⁽¹⁾。この実現のヒントとして、自然界のマイクロマシンである微生物が、群れとしてどのような行動をとっているかを調べることは、今後非常に重要な意味を持つものと考えられる。この一例として、微生物には、数密度が非常に高くなると、自然に対流を発生し、新たな秩序を自動生成する生物対流といわれる現象が存在することが150年以上前から知られている⁽²⁾。

生物対流とは、微生物を液体中で高密度に培養すると、培養液よりも比重が重い微生物が上へ向かって泳ごうとする「負の走地性」と呼ばれる性質により、密度の見かけ上の反転現象が起き、Benard対流に似た細胞のようなパターンが自己組織化される散逸構造現象である。このようなメカニズムによることから、生物対流は、環境条件としての重力加速度の大きさに影響されるものと予測される。

Noeverは、航空機による放物線飛行実験により、微小重力、通常重力、1.8G(地球上の重力環境の1.8倍)の過重力場における生物対流パターンの変化を観察した結果、微小重力環境下では、対流パターンが消失すること、

1.8Gにおいては、細胞のようなポリゴン状のパターン(以下ではこれをポリゴンと呼ぶ)の大きさが増大することを報告している⁽³⁾。しかし、航空機実験では、微小重力および過重力環境の設定時間が20秒と短いため、定常状態における生物対流の観察としては疑問が残る。また、過重力環境下において対流パターンがどのように変化してゆくか、特に10G程度の過重力を付加したときの微生物の挙動などは、いまだに明らかにされていない。

そこで本研究では、遠心式過重力発生装置に観察用チャンバを取り付け、重力場の大きさを変化させていったときの対流パターンの変化を直接観察したので、結果を報告する。

2. 供試材、装置および方法

今回実験には、体長50 μ m前後の小型の原生動物テトラヒメナ(*Tetrahymena thermophilla*)を用いた。生物対流を発生させるには、一般に高密度に微生物を培養する必要がある。テトラヒメナの場合、通常の静置培養では生物対流を発生させるような高密度培養を行うことは困難なため、今回の実験では、振盪培養を行うことにより、密度を 1.0×10^6 population/ml以上に高め、生物対流を発生させた。

過重力環境を擬似的に発生させるために用いた遠心式過重力発生装置は、回転直径1550mmの梯子状の回転ビーム先端に観察用チャンバがつり下げて取り付けられた構造となっている。本装置では、遠心力と重力による合成重力の方向と大きさは装置の回転速度によって変わるが、回転

* 原稿受付 1998年3月31日。

^{*1} 正員、東京電機大学工学部(〒101 8457 東京都千代田区神田錦町2-2)。^{*2} 正員、群馬大学工学部(〒376-0052 桐生市天神町1-5-1)。

E-mail: aito@eck.dendai.ac.jp

Fig.1 Schematic diagram of super gravity field generator

に伴い観察用チャンバが半径方向に振り出される機構になっている。チャンバの底面には合成重力が常に垂直に作用するようになっている。装置の回転数と合成重力の関係、装置の詳細などは、著者らの一部が先に報告している⁽⁴⁾。回転数を0～100rpmの範囲で制御することにより、1～12Gの任意の過重力環境をチャンバ内につくり出すことができる。図1に実験装置のシステム構成を示す。回転中の生物対流の観察にはCCDカメラを用い、そのNTSCビデオ信号をスリップリングを通して実験中に装置外部に取り出しモニターした。また、観察用チャンバ内は、サーモスタットにより温度を28℃一定に保持した。

実験は、Noeverの実験と同様に対流パターンを上面から観察するためのアクリル製円筒浅皿容器（φ 25.4mm, t=3.2, 6.4mmの2種類）と、側面からの観察のための直方体容器（3×30×6.4, 3×30×3.2, 6×30×6.4mmの3種類）を使用を行った。各容器における観察方向と合成重力や回転中心の

Fig.2 Relation of relative position of observation case at experiment

方向などとの関係を図2に示す。なお、深さ6.4mmの円筒浅皿容器はNoeverが用いた容器と同じ寸法である。

実験の際のテトラヒメナの数密度は、 4.8×10^4 population/ml ～ 1.28×10^6 population/ml の範囲で変化させた。また経時変化を調べるため2時間連続観察する実験も行った。観察中は、生物対流により後述するポリゴンが発生するが、ビデオ観察画像におけるポリゴンを示す流れ模様の濃淡は小さく、そのままではポリゴン形状の測定は困難であった。そこで、流れ模様の識別のために、ビデオ画像をコンピュータに取り込み、画像処理により濃淡を強調し、ポリゴン形状を鮮明化した。なお、コンピュータに取り込まれた画像の画素数は横×縦=640×480画素であり、階調はRGB各色256段階で取り込むが、画像処理時はグレースケール化して処理を行っている。

3. 生物対流の上面からの観察

3.1 通常重力下の予備実験による実験条件の設定 過重力場での実験を始める前に、通常重力環境下で円筒浅皿容器内のテトラヒメナ高密度懸濁液がどのような流れの様子を示すかを観察した。容器に所定の数密度のテトラヒメナを入れ、均一に攪拌した後放置すると、発生した生物対流により、図3のスケッチに示すような細胞状のポリゴンが観察された。その際の溶液の流れは、ポリゴンの内部では上昇流、筋状に見える境界面の部分で下降流を形成している。本研究では、下降流により筋状に見える部分をポリゴン壁と呼び、その大きさを図3に示す内の一つのポリゴンと同じ画素数を持つ円の直径をポリゴン径とした。予備実験としてテトラヒメナの数密度とポリゴン径の関係、およびポリゴン径の経時変化を調べた結果、数密度が増加するほどポリゴン径は小さくなり、また時間の経過に伴ってもポリゴン径は小さくなることが明らかになった。なお、実験開始後ポリゴン形状が定常状態に達するまでに約2分を要し、その後約30分の間のポリゴン径の変化はほとんどなかった。また、容器の深さが浅くなるほど、ポリゴン径は小さくなる傾向にあった。

Fig.3 An example of the "polygon" of bio-convection at the normal 1G condition (Observed from upward)

以上の予備実験をもとに、上面観察におけるテトラヒメナの数密度の代表条件として、 1.0×10^6 population/ml を採用した。なお、実験開始後30分の間のポリゴン径の変化はほとんどないため、経時変化を調べる実験以外は1サンプルあたりの実験時間が30分以内になるように設定した。

3.2 上面からの観察結果 次に合成重力の大きさを1～10Gの範囲で変えた際の観察例を図4に示す。これは深さ6mmの円筒浅皿容器を観察用チャンバーの底面におき、垂直方向すなわち合成重力を基準として上方から観察した結果であり、1～3Gの結果のみを示している。結果より、(a)重力加速度の増加に伴い、ポリゴンの大きさが小さくなっていくこと、(b)合成重力環境では対流パターンの様子が変化すること、すなわち1G環境下のようにポリゴンの形状がはっきりとした細胞のような形とはならず、ポリゴン壁がゆっくりと移動しながら時間とともに非定常的に変化していくこと、(c)ポリゴン壁の向きに方向性ができ、回転の中心軸に沿った方向(図の縦方向)に多くポリゴン壁が分布すること、(d)ポリゴン壁が厚くなるように見えること、(e)重力の増加に伴い、底面に沈殿するテトラヒメナが増え、対流の画像のコントラストが低下することなどが明らかになった。なお、4G以上の過重力場での実験においては、この実験の密度では対流パターンが小さくなりすぎるため、ポリゴン壁の確認は困難であり、画像処理による解析は不可能であった。

Fig.4 Changes of the polygon's shape by the size of gravitational acceleration

以上のように、本実験系における合成重力環境下での生物対流では、通常重力下と比較して明確なポリゴンを観察しづらいが、対流の下降流により壁のように見える場所(以下これを「下降流壁」と呼ぶ)が、縦方向に並んでいるのが観察できる。そこで、合成重力環境下の実験では、この下降流壁の間の寸法をもって「ポリゴン径」として求めた。具体的には、合成重力下では画像処理によりポリゴン壁を自動検出することは極めて困難であるため、計測者が、壁の間隔を20箇所、なるべく均等に分布するように選び、計測するものである。

このような過重力環境下における対流の縦構造の発生は、実験対象に遠心力以外にコリオリ力が加わっているためであると考えられる。筆者らの用いた実験系では、Noeverらの実験条件(航空機による放物線飛行)と比較して、回転半径が2～3オーダー小さいため、コリオリ力は無視できなくなる。しかし、このように対流の流れのモードが変化した状態でも下降流壁は観察され、生物対流は継続しているのがわかる。後述するようにコリオリ力の大きさを変化させる実験を行った結果、コリオリ力の影響を考慮することができると明らかになり、本装置により生物対流に及ぼす重力場の影響を明らかにすることは、十分可能であると考えられる。

また、合成重力環境下においても経時変化による生物対流パターンの変化を観察したところ、通常重力環境下での結果と同様に、時間経過に伴いポリゴンの大きさが縮小することを見出した。結果を図5に示す。

Fig.5 Time changing behavior of polygon size (Value of synthesized gravity: 2G)

3.3 上面観察における合成重力とポリゴン径の関係

以上行った観察実験画像について、縦方向に並んだ下降流壁の距離の変化を、実験ビデオ画像をコンピュータに取り込んで画像処理を行うことにより計測した。図6が1～3Gの結果をまとめたものである。結果にバラツキはあるが、重力の増加に伴いポリゴン径が小さくなっていく傾向が確認できる。Noeverは1.8Gでの対流パターンにおけるポリゴンの大きさが1G環境でのポリゴンより拡大することを報告して

Fig.6 Relationship between polygon size and the size of gravitational acceleration (Observed from upward surface)

いる⁽¹⁾ため、今回の実験結果はNoeverの結果とは反対の傾向である。この理由としては、Noeverの実験は飛行機の放物線飛行を利用しているため、1.8Gの環境を20秒しか保持できないことが考えられる。我々の観察では、合成重力環境を変化させてから生物対流が安定するまでに少なくとも2～3分は必要としており、Noeverは定常状態になる前の過渡状態の対流現象を測定した可能性が高い。すなわちこの結果は、合成重力の増加により対流ポリゴンのスケールが小さくなることを示しているわけであるが、本実験よりこれを立証するには、このポリゴンスケールの縮小効果がコリオリ力の影響ではないことを確認する必要がある、これに関しては後述する。

4. 生物対流の側面からの拡大観察

4.1 側面からの観察による対流の流れの様式 次に、過重力環境下における対流の流れの様式を詳細に確認する側面から拡大観察実験の結果について述べる。コリオリ力の影響を見るために、容器の観察面を回転の進行方向に平行（合成重力の方向は常に容器の上方、図2のSetting 1）と、進行方向に垂直（合成重力の方向は常に容器の上方、図2のSetting 2）の2種類の設置方法で観察した。

その結果、本実験装置における過重力下での生物対流の流れの様子は通常重力環境下とはかなり異なっていることが明らかになった。図7に容器の観察面を回転の進行方向に平行に向けてセットした場合（Setting 1）の実験時の画像と、流れの様式図を示す。なお、カメラの取り付け位置の関係で、上面観察（図4）とは左右の方向が反転している。図7より判るように、側壁が斜めになること、対流の一对の渦の片側が縮小し、もう一方の側のみが発達するため、側壁付近で逆方向の流れが近づくため、新たな渦が発生し、対流パターンが安定せずゆっくりと変化していくことが観察された。容器の観察面を回転の進行方向に平行にセットした場合（Setting 1）と進行方向に垂直にセットした場合（Setting 2）の対流の流れの様式図を図8に示す。容器の観察面を進行方向に垂直にセットした場合は、観察面方向に対する対流の渦はほとんど観察できず、テトラヒメナは

Fig.7 Observation results of the bio-convection at each size of gravitational acceleration (Observed from side surface)

観察面の壁に沿って落ちてくるので、模式図のような対流の流れとなっているものと考えられる。その際、容器の観察面を進行方向に平行にセットしたときのような側壁の傾きや移動などは観察されなかった。

以上のように、合成重力場による生物対流の流れの様相は、コリオリ力の加わる方向により変化し、明らかにコリオリ力の影響を受けていることがわかった。

また、側壁間の距離を画像解析した結果、容器寸法・数密度が異なるため各合成重力場に対するポリゴン径は異なる

Fig.8 Difference of the stream mode of bio-convection by the setting angle of observation case

るが、重力による変化の基本的な傾向は上面からの観察の結果と変わりなく、重力の増加に従いポリゴン径が小さくなる事が明らかになった。

また、側面観察より、対流中でのテトラヒメナの挙動に関して、以下の事実が確認できた。

- (1) 生物対流中では、テトラヒメナは、上昇時は上に向かって泳いでいるが、下降時は流れに巻き込まれているように、様々な方向に回転しながら落ちてくる。
- (2) 高重力になるほど下に沈殿するテトラヒメナが増えてくるが、実験を行った最大重力である10G環境下においても一部のテトラヒメナは重力に逆らって上面まで泳ぎ、それにより小さなスケールの対流が起きる。
- (3) 高重力環境下で下に沈殿していたテトラヒメナも、実験終了後1G環境に戻すと上方へ向かって泳ぎ始め、1Gでの定常なポリゴンを形成する。
- (4) 1G環境では対流が起きないような低密度培養液でも、重力を増加していくと、ある重力以上になると、上方で泳いでいたテトラヒメナの群が下方へ落とされ、それを契機に対流が発生し始める。

4.2 生物対流中でのテトラヒメナの移動速度 次に、下降流壁中で下降しているテトラヒメナや、下降流壁と下降流壁の中間付近で上昇しているテトラヒメナの移動速度を、

Fig.9 Changes of the moving velocity of *Tetrahymena* by the size of gravitational acceleration (Density: 1.6×10^4 popl./mm², Case size: A=25.4x6.4x3, B=25.4x6.4x5, C=25.4x3.2x3)

拡大画像を画像処理することにより測定してみた。今回の移動速度の測定法では対流の流速とテトラヒメナの遊泳速度を分離できないが、上述のように、上昇時と下降時ではテトラヒメナの行動が異なり、上昇時にはテトラヒメナは流れに乗って上方へ向かって泳いでいるため、測定した移動速度は対流の流速+テトラヒメナの遊泳速度となるが、下降時は流れに巻き込まれて回転しながら落ちてくるため、ほぼ対流の流速を測っていると考えた。結果をまとめたものを図9に示す。移動速度は、同じ条件下では、つねに下降流の方が速かった。上昇流にはテトラヒメナの平均遊泳速度（最大で0.5mm/s前後）が加わっていることを考慮すると、実際の対流の流速差は、さらに大きいと考えられる。これは上昇流に対して下降流が狭い領域に集中して流れていることから見て妥当な結果であろう。

合成重力に対する移動速度の変化は、容器をセットした方向によって異なった傾向を示した。観察容器の長手方向を進行方向に平行にセットした観察 (Setting 1) では、観察ケースのサイズによって若干異なるが、ほぼ2~4 G にピークがあり、その後徐々に減少した。一方、進行方向に垂直にセットした観察 (Setting 2) では、移動速度は、合成重力の大きさにほとんど影響されなかった。これも結果的にコリオリ力による対流のモード変化の影響であると推測される。よって、本装置で調べた結果で生物対流を論ずるには、コリオリ力が生物対流に与える効果について明らかにする必要がある。以下の実験を行った。

5 合成重力／コリオリ力比による生物対流の変化

5.1 合成重力／コリオリ力比の推定 回転過重力場において移動する物体には移動速度に比例するコリオリ力が発生し、回転中心に向かう移動物体の軌跡は回転の進行方向に曲げられることが知られている。本実験装置ではコリオリ力の影響を無くすることは原理的にできないが、回転半径を変化させることで、合成重力に対するコリオリ力の大きさを変化させることは可能であり、この方法でコリオリ力の影響を調べることとし、これによってどの程度コリオリ力を変化させられるかを概算した。

最初に、テトラヒメナの移動速度（対流の流速+テトラヒメナの遊泳速度）を、上述の結果をもとに0.8mm/sと仮定する。また観察用チャンバの取り付け位置の直径を1550mm, 1750mm, 2150mmに変化させるものとする。実際の観察容器の回転半径は、チャンバが遠心力により外側へ振り出され、その角度が変化するため、実効回転半径は合成重力の大きさにより変化する。この点を考慮して、生物対流の下降流における合成重力加速度に対するコリオリ力加速度の比を、下降流が鉛直下向きに流れているものと仮定して、下式より算出した。

$$CA/SGA = 2\omega v / \omega^2 r \quad (1)$$

Fig. 10 Changes of the ratio of Coriolis's acceleration/synthesized gravitational acceleration by the rotational radius (Stream velocity is assumed at 0.8mm/s)

ここで、CAはコリオリ力による加速度、SGAは合成重力による加速度、 ω は観察箇所の回転角速度、 v は下降流中のテトラヒメナの移動速度であり上述のように0.8mm/sと仮定、 r は観察箇所の回転半径である。

結果を図10に示す。図において、合成重力はコリオリ力より3オーダー以上大きく算出されるが、合成重力は実際にはテトラヒメナと培養液の密度差分だけがテトラヒメナに加わり、テトラヒメナの密度は測定できないが密度差は小さいと予想される。そのため、実際に10Gに及ぶ高重力場においても、前述のように上方へ向かって泳ぐテトラヒメナが観察されるわけである。よって、対流に与える影響としては、コリオリ力の影響はずっと大きくなる。従ってこの図においては、算出した比の変化の傾向のみが意味を持つものと考えられる。コリオリ力の比は1.4G前後でピークとなり、その後漸次減少していく。コリオリ力による加速度の大きさはテトラヒメナの移動速度に比例するため、例えば移動速度を1.6mm/sと2倍にすると、合成重力加速度に対するコリオリ力加速度の比も2倍になる。その際に、ピーク位置などの合成重力加速度に対する変化の傾向は変わらない。

また、チャンバ取り付け位置直径が短い場合の方がコリオリ力が大きくなり、取り付け位置直径1550mmの場合には2150mmの場合よりも約14%コリオリ力の影響が大きくなる。この14%の差異を利用して、以下にコリオリ力に依存した現象と依存しない現象の分離を試みた。

5.2 観察用チャンバ回転半径による対流の下降流壁の傾きの変化 以上の概算結果をもとに実際に観察用チャンバの取り付け位置直径を1550mm、1750mm、2150mmと変化させて側面からの観察実験を行った。最初に、図2のSetting1にセットした状態での下降流壁の傾きを測定した。図11に結果を示す。各点は、20箇所測定したものの平均値である。合成過重力環境下では、対流は乱れており、非定常的であるため、測定値は大きくばらつく。しかし、側壁の角度の変化の傾向は、どの長さのビームの実験においても、図10の重力加速度/コリオリの加速度の比のグラフと類似し

Fig. 11 Changes of the angle of the downward wall by the size of Coriolis's acceleration

た傾向を示した。すなわち、2G近辺でピーク値となり、その後漸次減少していくというものである。このことから、下降流壁の傾き、すなわち実験装置における合成過重力環境下での対流のモードの変化は、コリオリ力の影響であると考えられる。また、10G近辺になると傾きは5°前後と小さくなり、コリオリ力の影響が相対的に小さくなっていることが判る。

また、回転半径を変化させた場合の変化に注目しても、バラツキは大きい。各測定値の平均では、回転半径が小さいほど下降流壁の傾きが大きい。すなわち、合成重力に対するコリオリ力の比が大きいほど、側壁の傾きは大きくなる。この事実も、下降流壁の傾き、すなわち対流のモードの変化は、コリオリ力の影響であることを推定する根拠となっている。

5.3 観察用チャンバ回転半径によるポリゴン径の変化

次に下降流壁間の距離、すなわちポリゴン径がチャンバ回転半径によりどのように変化するかを調べてみた。合成重力を1~3Gの範囲で変化させたときのポリゴン径の画像処理結果をまとめて図12に示す。

その結果、合成重力場の増加に対して、ポリゴン径は単調的に減少してゆくことが明らかになった。また、その際に、チャンバ取り付け位置すなわち実効回転半径を変化させたことによるポリゴン径への影響は有意の差としては現れなかった。これより、このポリゴン径の縮小は、コリオリ力に起因する副次的な現象ではなく、重力場の増加自体に起因する現象であると推察され

Fig. 12 Difference of the changing process of the polygon's size by the size of Coriolis's acceleration

る。すなわち、生物対流において、対流ポリゴンのスケールは、Noeverの結果とは異なり、重力加速度の増加に伴い小さくなることを、本実験結果は示すものである。

6. 考 察

6・1 対流モード変化とコリオリ力の関係 以上のように、本研究により、回転過重力環境下においては、生物対流のポリゴン径が重力の増加とともに縮小すること、生物対流の流れのモードが変化することが明らかになった。また、このモード変化がコリオリ力による効果であることが推定できた。そこで、最初に本実験における過重力環境下における対流の流れのモード変化をコリオリ力により定性的に説明することを試みる。

観察された流れのモード変化をまとめると、回転過重力環境下で容器の観察面を進行方向に平行にセットした場合は、a) 側壁が回転方向(左向き)に傾く、b) 対流ロールの片側(左回り)が縮小する、c) 対流の流れが非定常的に揺らぐ乱れた流れとなる、d) 側壁がゆっくりと反回転方向(右向き)に移動していく、の4点にまとめられる。このセッティングの場合の移動物体に加わるコリオリ力は、上昇する物体には回転方向(左向き)、下降する物体には反回転方向(右向き)に加わる。すると、図13に示す模式図のように、コリオリ力により下降流壁を回転方向に傾ける力が加わることになる。また、対流のダブルロールのうちの右回りの渦は拡大し、左回りの渦は縮小することとなる。それにより逆方向の流れが接近するため、新たな渦が発生し、1Gのように安定した対流とはならず、乱れた非定常的な流れが連続することとなる。また、コリオリ力は移動速度に比例するため、コリオリ力は速度の大きな下降流により大きく作用し、結果として全体がゆっくりと右方向へ移動してゆき、時間の経過とともに沈殿しているテトラヒメナは右下に偏って溜まることになる。以上のように、本実験における対流の流れのモード変化はコリオリ力により定性的に説明できる。

6・2 ポリゴン径の変化 次に過重力環境下で対流ポリゴンの直径(合成重力場においては下降流壁間の距離)が小さく

Fig.13 Changes of the stream mode of bio-convection by Coriolis force

なる現象を、Benard対流と比較して検討してみる。Benard対流は、一般に、対流の流れの強さを表す無次元数であるRayleigh数により結果が整理される⁽⁶⁻⁷⁾。Benard対流における対流ポリゴンの幅とRayleigh数との関係は複雑であるが、通常の条件下でRayleigh数を上げていくと、対流ポリゴンの幅は大きくなっていくことが実験的に知られている⁽⁷⁾。このことは、重力加速度が他のパラメータと独立であるとする、重力加速度の増加に伴い対流ポリゴンの幅が大きくなることになり、本実験における生物対流の結果とは反対の傾向となる。

一方、生物対流においても、Rayleigh数が提案されている⁽⁸⁻¹⁰⁾。例えば、Childressら⁽⁸⁾によれば、

$$Ra = G \alpha c_0 h^3 / \nu \kappa \quad (2)$$

ここで、Gは重力加速度、 α は、溶液の比重を ρ 、テトラヒメナの比重を ρ_0 としたときの $(\rho_0/\rho - 1)$ 、 c_0 は最上層のテトラヒメナの体積分率、hは有効な上層厚、 ν は粘性係数、 κ は微生物の拡散係数(微生物の動きの中で、上方へ向かわないランダムな動きの成分の割合)である。この場合も各パラメータが重力加速度と独立であれば、Benard対流と同様に、重力加速度の増加はRayleigh数の増加を意味し、重力加速度の増加により対流ポリゴン幅が大きくなるはずである。これは本研究にて得られた結果とは逆である。

しかしながら、本研究において測定したテトラヒメナの移動速度(下降流の場合は前述のように移動速度=溶液の流速となる)は、全体としては、Gによりあまり変化せず、高G環境ではむしろ低下した。Rayleigh数が対流の流れの強さを示すパラメータであるから、この結果は、Gが増加してもRayleigh数が増加しないことを示している。すなわち、生物の自発的な運動を対流の駆動源とする生物対流現象においては、Rayleigh数における各パラメータはGに依存して変化する。よって、生物対流の解析には、環境変化にともなう微生物の運動の基礎特性の変化過程の解明が必要となる。

7. 結 言

本研究では、遠心式の過重力発生装置を用いて、テトラヒメナの生物対流パターンに及ぼす重力の影響を調べた。主な結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 合成重力の増加により、生物対流ポリゴンの大きさは縮小する。
- (2) 重力加速度の増加にともない下部に沈殿するテトラヒメナが増えるが、10Gにおよぶ高重力環境下においても、一部のテトラヒメナは負の走地性を示し、それにより生物対流は継続する。
- (3) 回転過重力環境下においては、下降流壁の傾斜などの生物対流の流れのモード変化が発現する。
- (4) 合成重力/コリオリ力比を変える実験により、対流のモード変化はコリオリ力の影響であること、ポリゴン径の

縮小はコリオリ力ではなく重力の影響であることを確認した。

謝 辞

以上の研究を行うに当たり、ご指導、ご助言をいただいた、東京電機大学児山秀晴教授、東京大学神谷律教授、早稲田大学三輪敬之教授に深甚なる感謝の意を表す。また、共に研究を行った卒論学生、武藤圭輔、吉田克信、鈴木健一、簗島博之の諸君に深謝する。なお、本研究は、東京電機大学総合研究所研究課題Q95S-06として行った。

文 献

- (1) 例えば、福田敏男、光岡豊一、夢のマイクロロボット、テクノライフ選書、(1995)、90-91、オーム社
- (2) Wagner H., Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B 201, (1911), 333
- (3) Noever, D. A., Phys. Rev. A, 44, 8, (1991), 5279
- (4) 新井雅隆、天谷賢児、機論、B編、60, 572, (1994), 1343-1348
- (5) Busse, F. H. and Frick H., J. Fluid Mech., 150, (1985), 451-465
- (6) Chen, M. M. and Whitehead J. A., J. Fluid Mech., 31, (1968) 1-15
- (7) 井上義朗、大阪大学基礎工学部博士論文、(1988), 69
- (8) Childress, S., Levandowsky, M. and Spiegel, E. A., J. Fluid Mech., 63, (1975), 591-613
- (9) Harashima, A., Watanabe, M. and Fujishiro, I., Phys. Fluids, 31, 4, (1988), 764-775
- (10) Hill, N. A., Pedley, T. J. and Kessler J. O., J. Fluid Mech., 208, (1989), 509-543