

# 円周上のTASEPとバクテリア 集団の円運動観察

中大理工 山田泰之, 香取眞理, 脇田順一

2013年 日本物理学会 第68回年次大会  
2013年 3月 26日 広島大学

# 1. イントロダクション

## •研究対象

自己駆動粒子系の例として, 2次元平面上での枯草菌, *Bacillus subtilis* (*B. subtilis*) の集団運動に着目した.

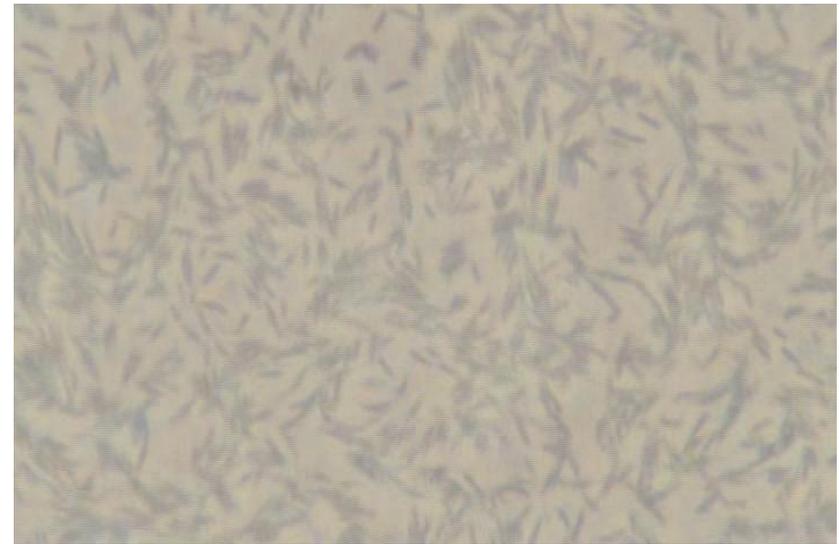
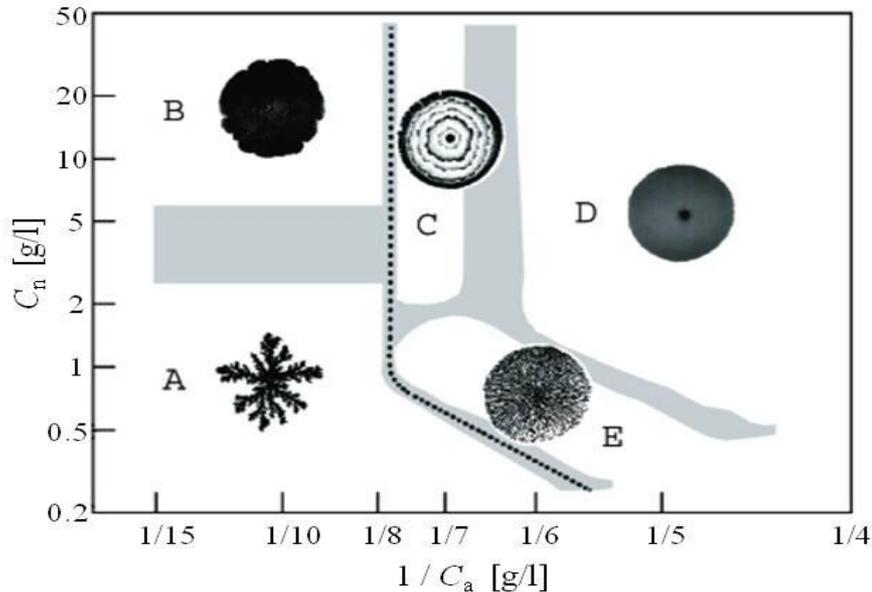


図. 寒天培地上の*B. subtilis*

## •寒天培地上の *Bacillus subtilis* (*B. subtilis*)



培地の寒天濃度 $C_n$ と栄養濃度 $C_a$ の値を変化させることで5種類のコロニーパターンを示す.

寒天濃度; 培地の硬さ. 菌の運動性  
栄養濃度; コロニー内の菌密度. 個体の大きさ.

図. *B. subtilis*のモルフォロジカルダイアグラム.  
M. Matsushita *et al*, *Biofilms* **1**, 305-317 (2004)

# 1. イントロダクション

## •寒天培地上での *B. subtilis* の集団運動

培地が柔らかく、菌密度が高い場合において、コロニー内部で数匹の菌がまとまってランダムな方向に集団運動する。

## •研究目的

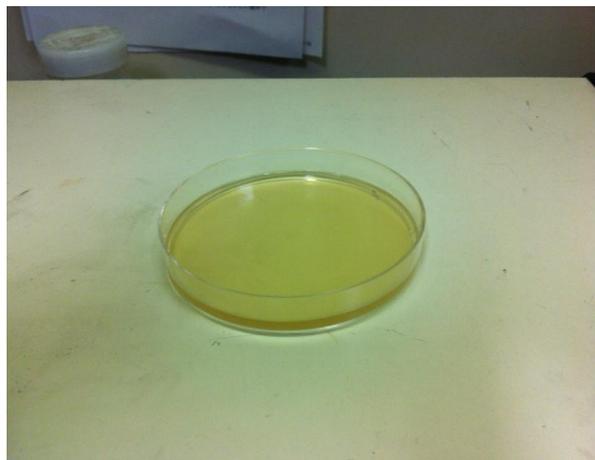
今回、寒天培地上作成した円形プールの中で、菌が一方向に運動する様子を捉えた。  定量的に示す。

## •目次

1. イントロダクション
2. 実験方法
3. 観察の様子
4. 解析方法
5. 測定結果
6. 結果の考察
7. 今後の課題

# 2. 実験系作成方法

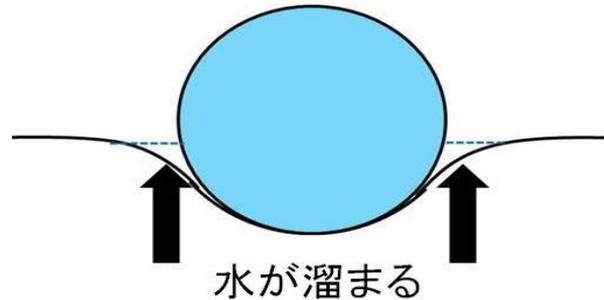
円形プールは、寒天培地にガラスビーズで型をとって作成した。



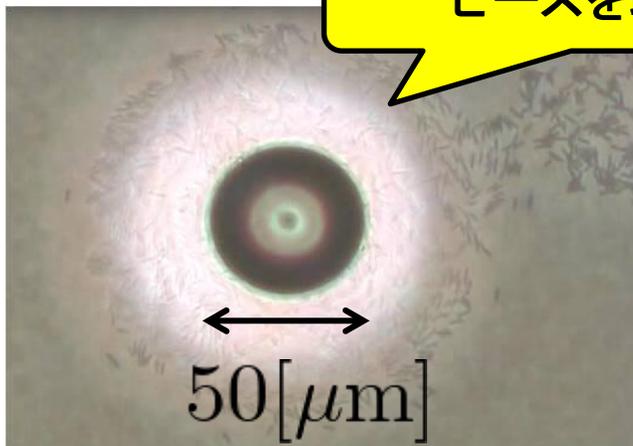
Ca=8.25[g/L], Cn=30[g/L].

直径50[ $\mu\text{m}$ ]のガラスビーズを撒く

ガラスビーズの重さで寒天表面が窪み、培地から浸み出た水が溜まって円環状のプールが出来る。



ビーズを取り除く



42[ $\mu\text{m}$ ]



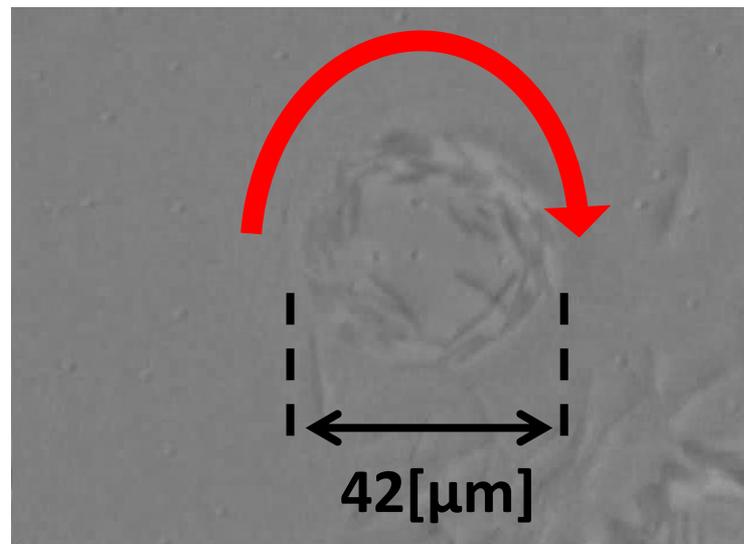
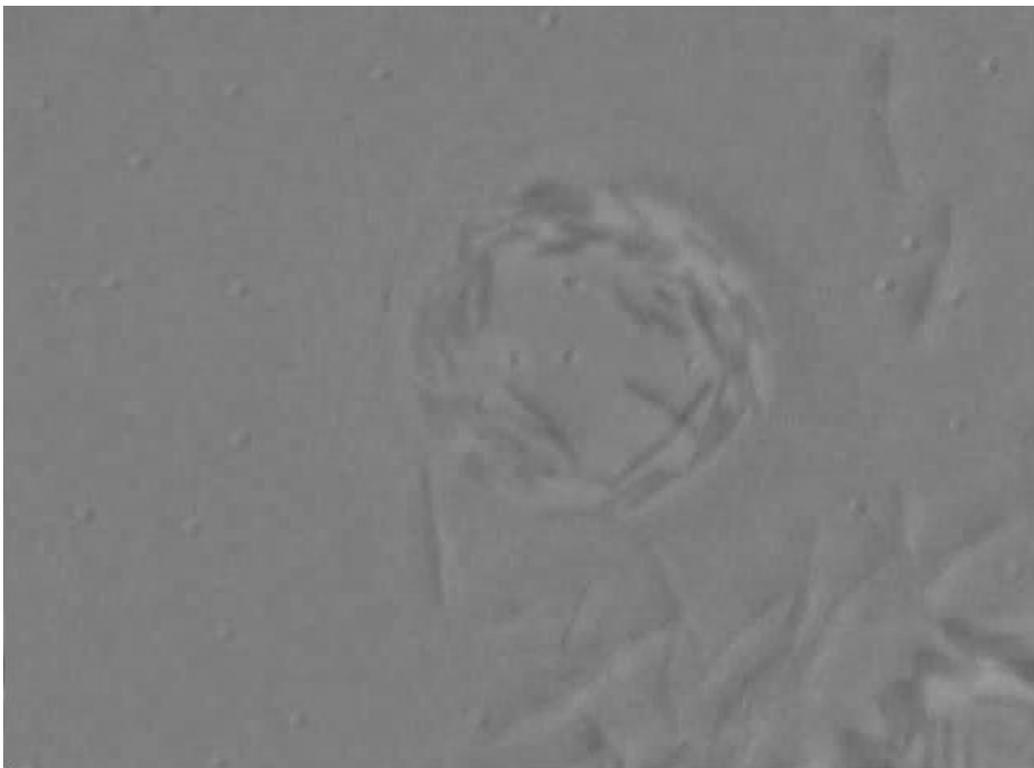
→ 最大水深約1[ $\mu\text{m}$ ].  
菌の胴の厚さ程度.

# 3. 観察動画

動画; ハイスピードカメラで撮影. フレームレート30[fps].  
10分間撮影. 菌密度はプール面積と菌の影の面積比.

菌密度0.37, 0.5の二つの場合について観察と解析を行った. 動画は培地底面から実験系を見上げるように撮影を行った. 菌の運動方向はシャーレ底面に対して時計回り, 反時計回りを議論する.

(1) 菌密度,  $\rho=0.37$  の場合



菌はプールの縁に沿って時計回りに運動する傾向が見られた.

プール内部では縁を沿って運動する菌とは反対方向の反時計回りの運動をする菌が見られた.

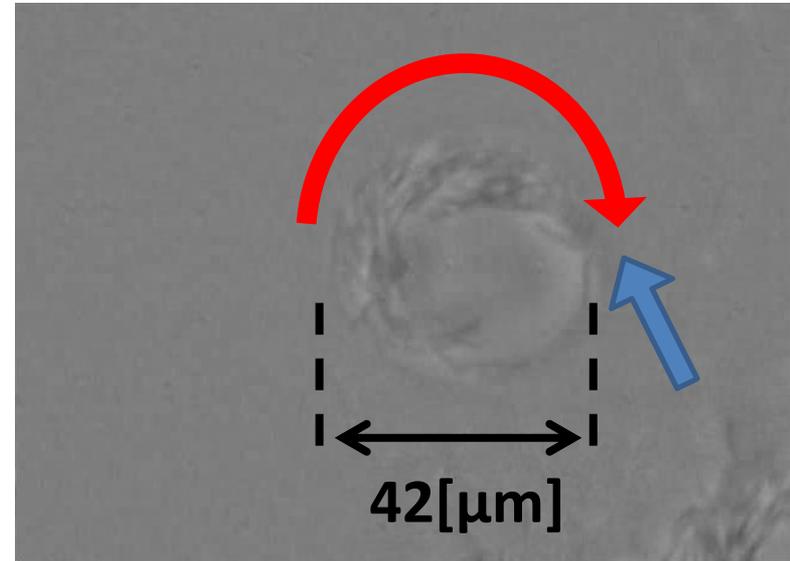
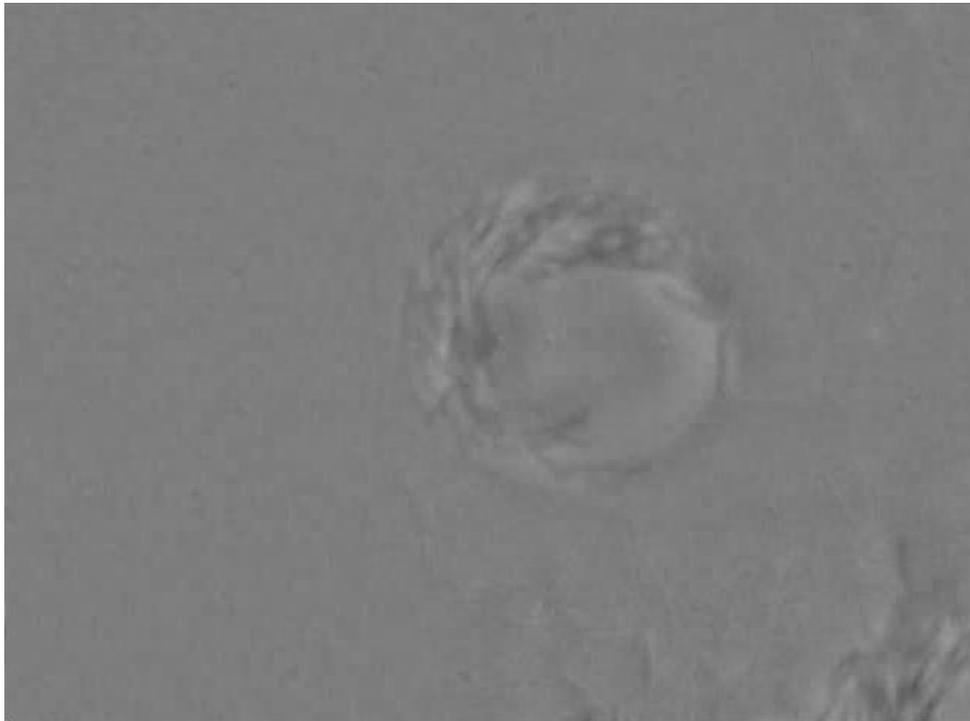
# 3. 観察動画

(2) 渋滞が起こる場合(菌密度 $\rho=0.37$ )

・プール右上の箇所で菌が培地に引っ掛かり、渋滞が発生してしている様子が見て取れる。

・渋滞が起きた箇所(青い矢印)

止まっている菌を追い越して再びプールの縁に沿って運動する菌と渋滞の後方で進行方向を反転させ、プール中央付近で反時計回りに運動する菌が見られた。

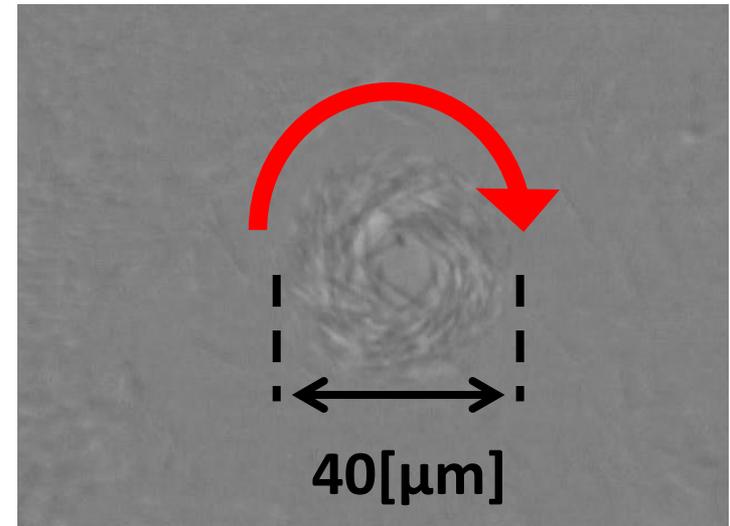
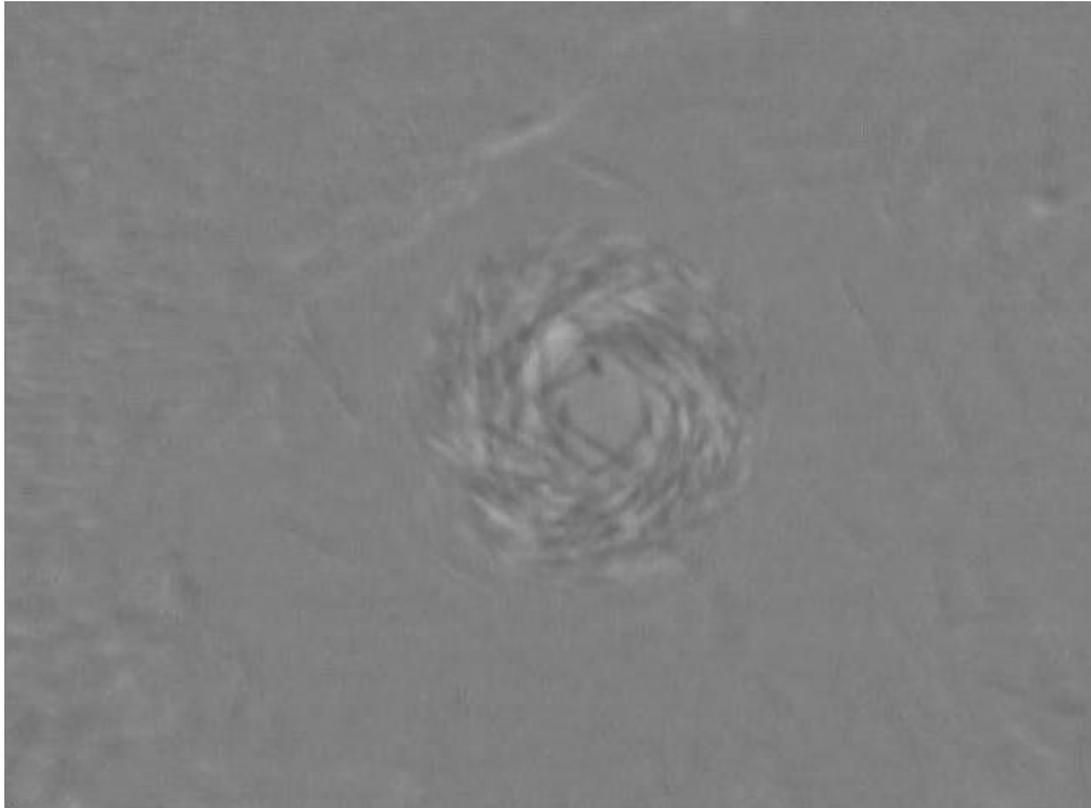


# 3. 観察動画

## (3) 菌密度 $\rho=0.5$ の場合 (レーン形成)

・高密度のプールでは、菌はプールの縁に沿って時計回りに運動する集団とその内側を反時計回りに運動する集団とに分かれ、レーンを形成した。

・レーンの境界は揺らいでいるが、5分間の観察の間、どちらの向きの流れも安定して存在し、どちらかの流れがもう一方に吸収されて消えてしまうことはなかった。



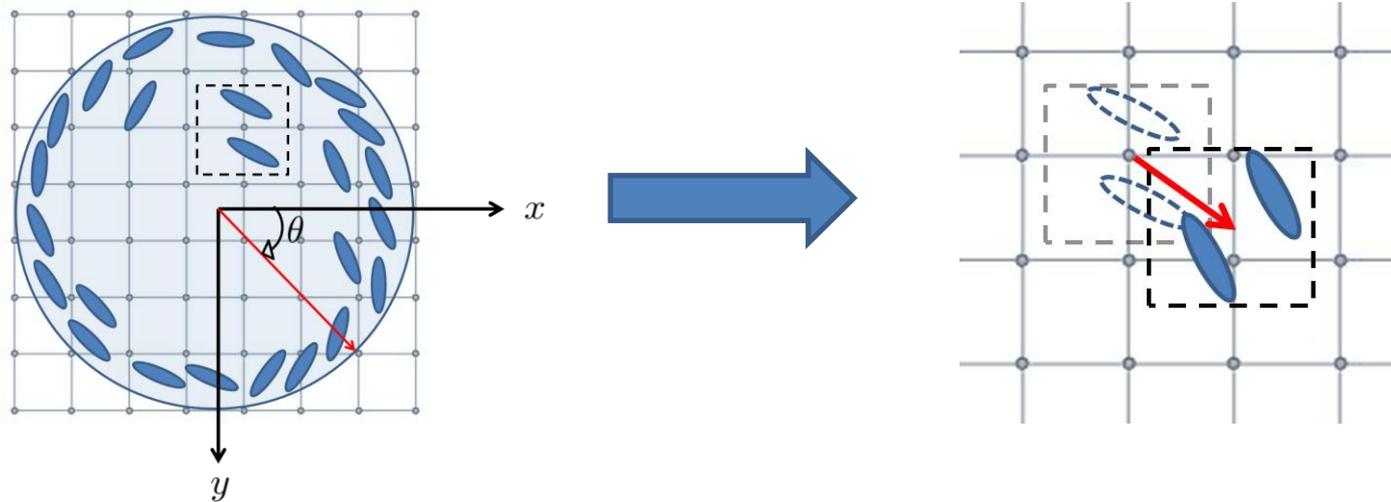
動画; ハイスピードカメラで撮影.  
フレームレート60[fps].  
再生速度; 30[fps].

# 4. 解析方法

- **速度計測**; 流体解析ソフトFlow-PIV(ライブラリー)を用いて解析.

- **Particle Image Velocimetry (PIV)**

…水や気体の流れをトレーサー粒子で可視化した画像に対し, 2時刻間の粒子の位置情報を計測し, 速度と移動方向を解析する流体画像計測法である.



本実験では***B. subtilis* そのものの輝度パターンを追跡**し, プールを覆うように置いた2次元格子の各点に対して, 速度を計測した.

- **通過頻度計測**; 各時刻で計測領域内の平均輝度値を閾値として画像の2値化を行い, 計測点ごとに菌の通過頻度  $F(r, \theta)$  を計算した.

# 5. 測定結果

•速度計測では、各計測点ごとに菌の周方向の速度  $v_f(r, \theta)$  の算術平均値を算出している。これに通過頻度  $F(r, \theta)$  を掛け、単位時間あたりに菌が動径方向の単位長さを通過する流量  $J_f(r, \theta)[\mu\text{m}^2/\text{s}]$  を算出。

$$J_f(r, \theta) = v_f(r, \theta) \times F(r, \theta)$$

\* $v_f(r, \theta)$  ; 時計回りの向きを正とする。

•プール中心を原点とする半径  $r$  の円周上の計測点での  $J_f(r, \theta)$  の平均値を計算。動径方向の距離  $r$  の関数として、

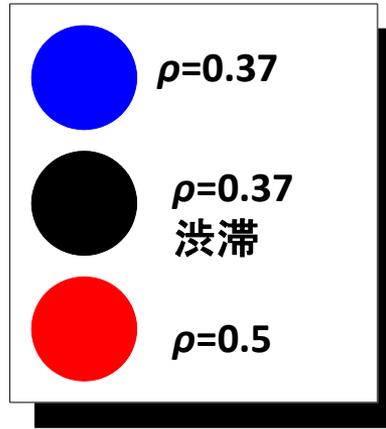
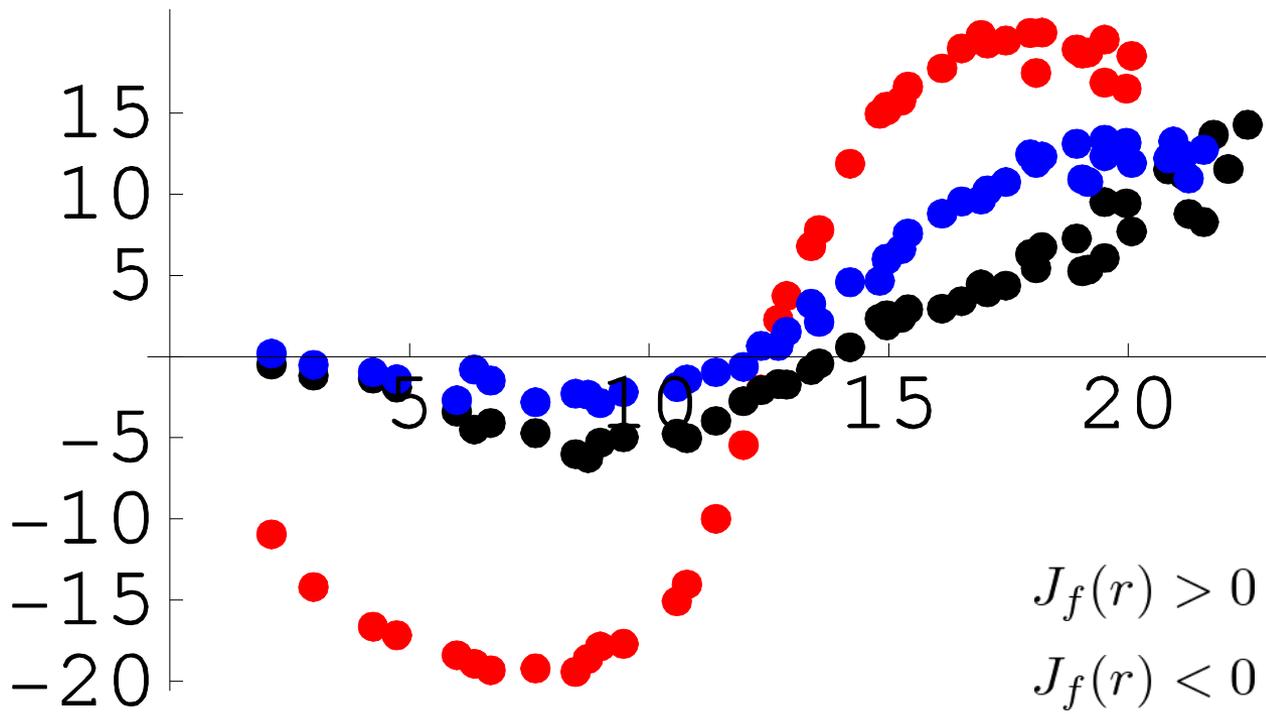
$$J_f(r) \equiv \langle J_f(r, \theta) \rangle_{\theta} = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} J_f(r, \theta_i)$$

$N_r$  ; 半径  $r$  の円周上の計測点数。

# 5. 測定結果

・・・動径方向の距離対流量グラフ

$J_f(r) [\mu\text{m}^2/\text{s}]$



$r [\mu\text{m}]$

$J_f(r) > 0$  ; 時計回り

$J_f(r) < 0$  ; 反時計回り

平均流量

$$\overline{J_f(r)} = \frac{1}{r_{max} - r_{min}} \int_{r_{min}}^{r_{max}} dr J_f(r)$$

密度	平均流量 $[\mu\text{m}^2/\text{s}]$
$\rho=0.37$	3.5
$\rho=0.37$ (渋滞)	0.9
$\rho=0.5$	-2.4

# 6. 結果の考察

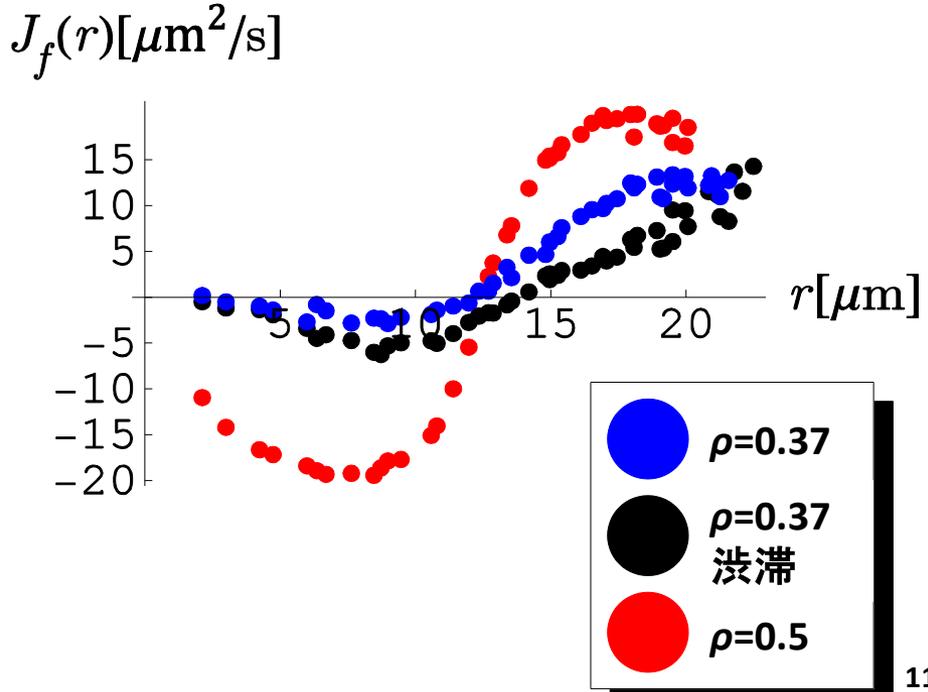
## ・運動方向の対称性の破れ

本研究では、プールの縁に沿って運動するバクテリア集団は時計回りに回転運動した。菌の集団運動の非対称性は、コロニーパターンにおいても見ることができる。(写真は培地を見降ろすように撮影)



図. DBMパターンのバクテリアコロニー

今回の実験では、菌密度  $\rho=0.5$  の場合においてレーンが形成された。系全体での平均流量から、密度  $\rho=0.37$  の場合では時計回りの向きに運動していたのに対し、密度の値が大きくなると反時計回りに運動する菌が多いという結果を得た。

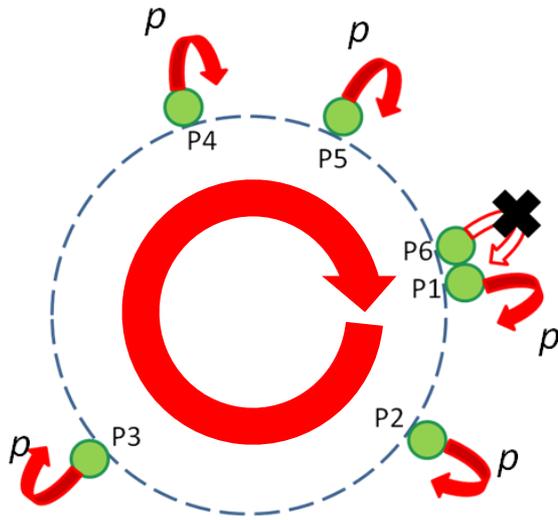


\* 観察動画・・・培地底面からの撮影

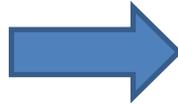
➡ 密度が高い場合、運動方向がコロニーパターンの回転方向に一致する・・・

# 6. 結果の考察

## •円周上のTASEP



縁に沿って一方向に菌が集団運動する様子は、周期境界条件下のTotally Asymmetric Simple-Exclusion Process (TASEP) に似ている。



## •TASEP

排他効果を与えた粒子がそれぞれ独立に一定確率  $p$  で決められた一方向に進むモデル。

粒子密度  $\rho=0.5$  を境に、渋滞が起こる。



## •2次元的に運動する場合・・・ Vicsek *et al*, Phys. Rev. Lett. **75** 1226–1229 (1995)

自己駆動粒子の移動方向に相互作用を加えたモデル。高密度かつ移動方向のノイズが小さい場合に一方向に集団運動する。

→ レーン形成は起こらない。

# 7. 今後の課題

密度変化による菌の運動の変化を調べ、車や人などの流れとの比較を行いたい。