

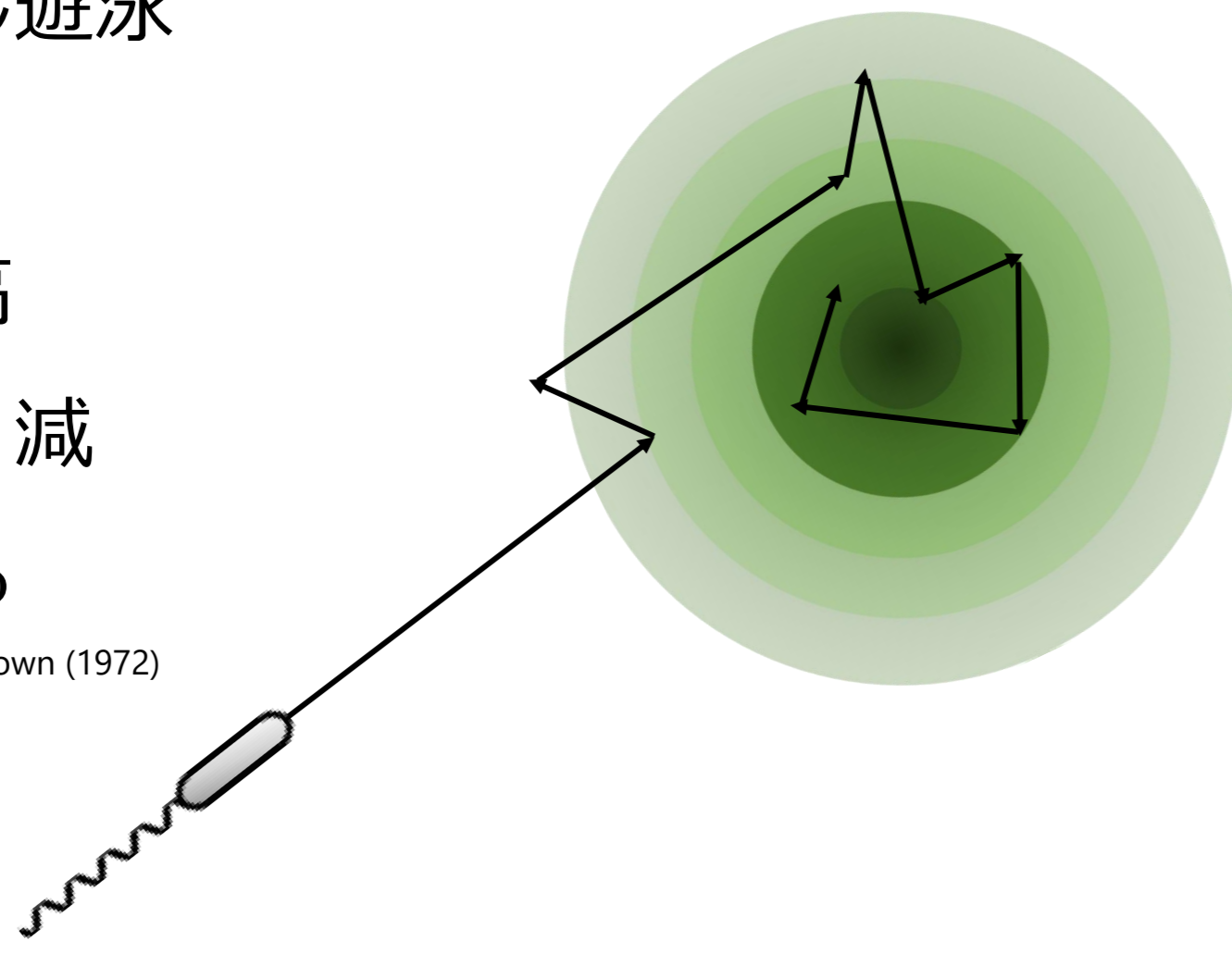
観察に基づく数理モデルによる単毛性細菌と周毛性細菌の走化性の解析

細菌の遊泳と走化性

らせん型のべん毛を回転させ直進運動と方向転換を繰り返し遊泳

- 誘引物質の濃度：高
- 方向転換の頻度：減
- 誘引物質に集まる

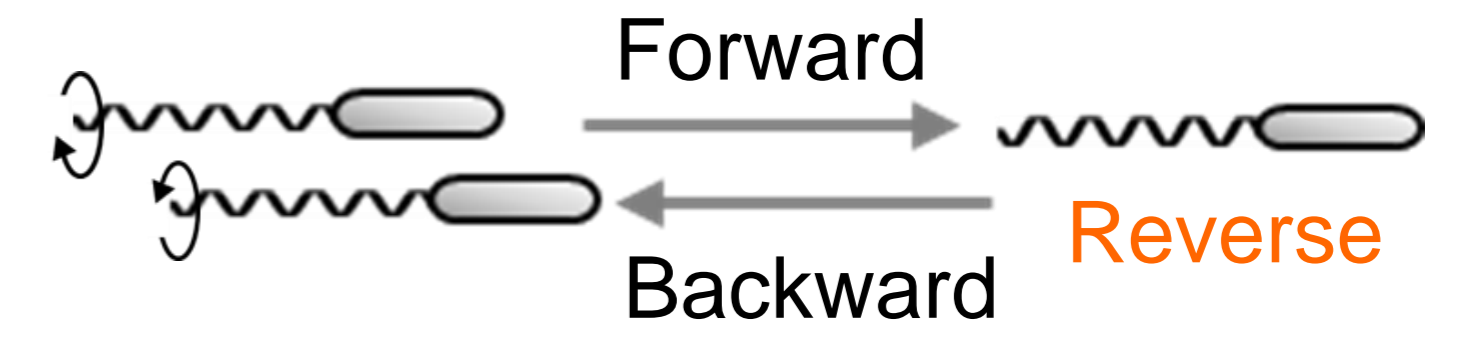
H.C.Berg and D.A.Brown (1972)



周毛性細菌と単毛性細菌

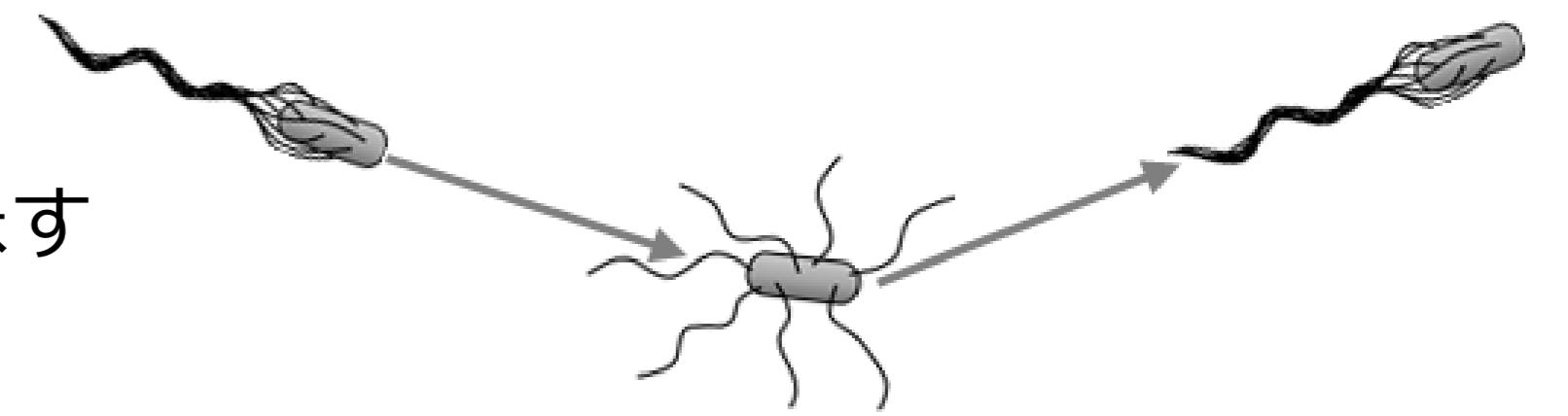
単毛性細菌 (*V. alginolyticus*)

前進と後退の切り替えで方向転換
→ 方向転換角度が制限



周毛性細菌 (*S. typhimurium*)

直進運動 (Run)
回転運動 (Tumble) で挙動を示す
→ 方向転換角度がランダム



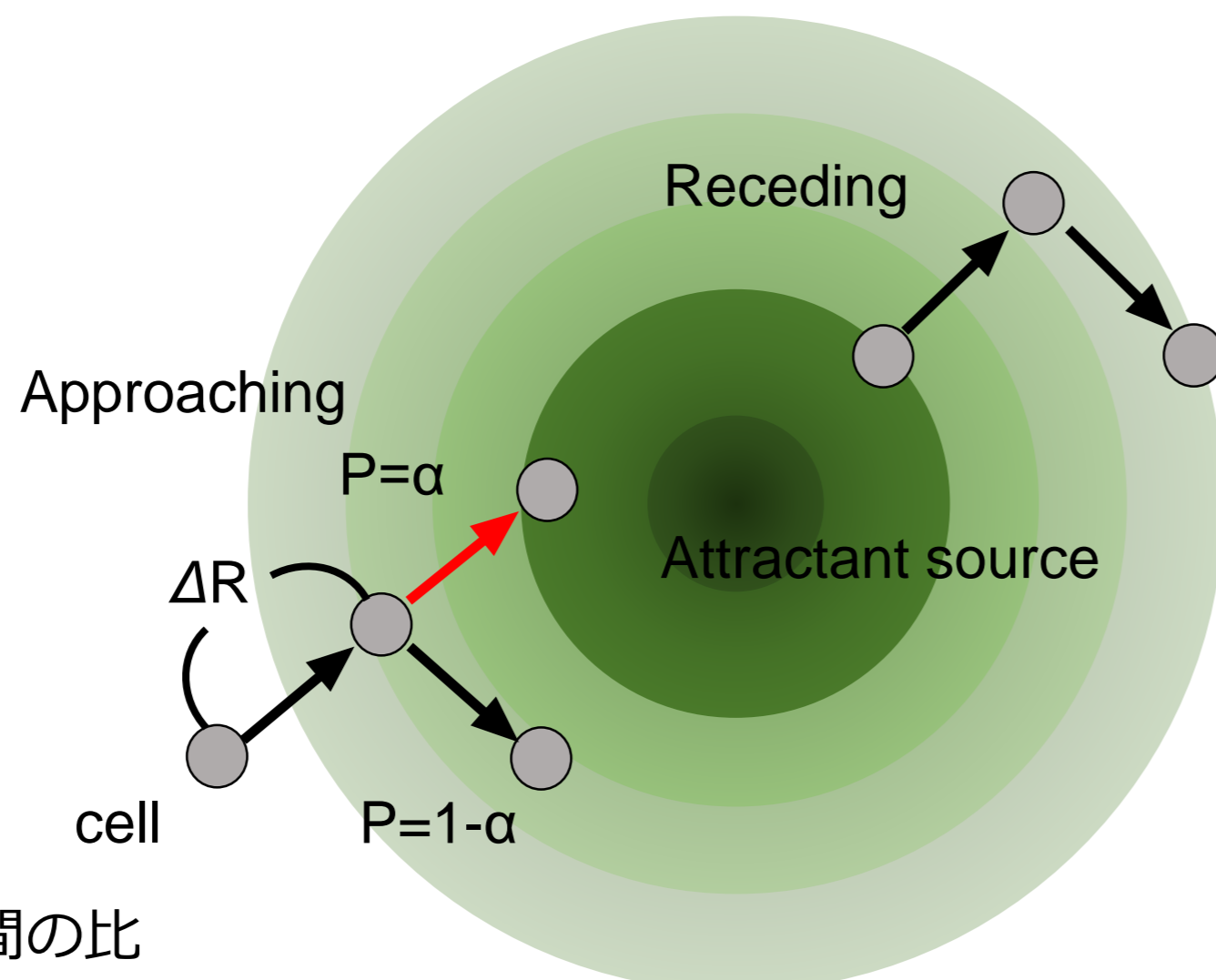
数理モデル

時間 Δt に距離 ΔR 移動

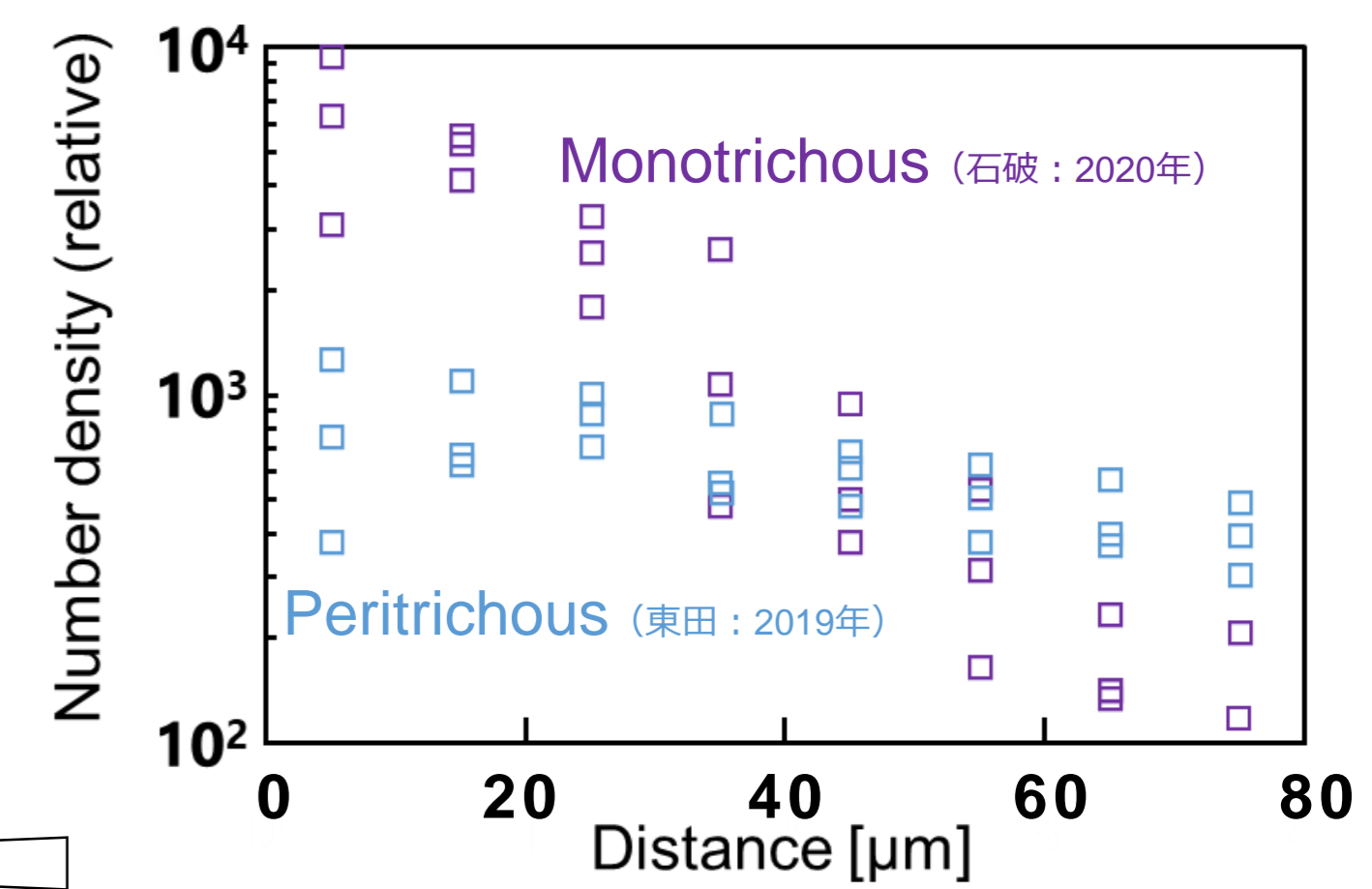
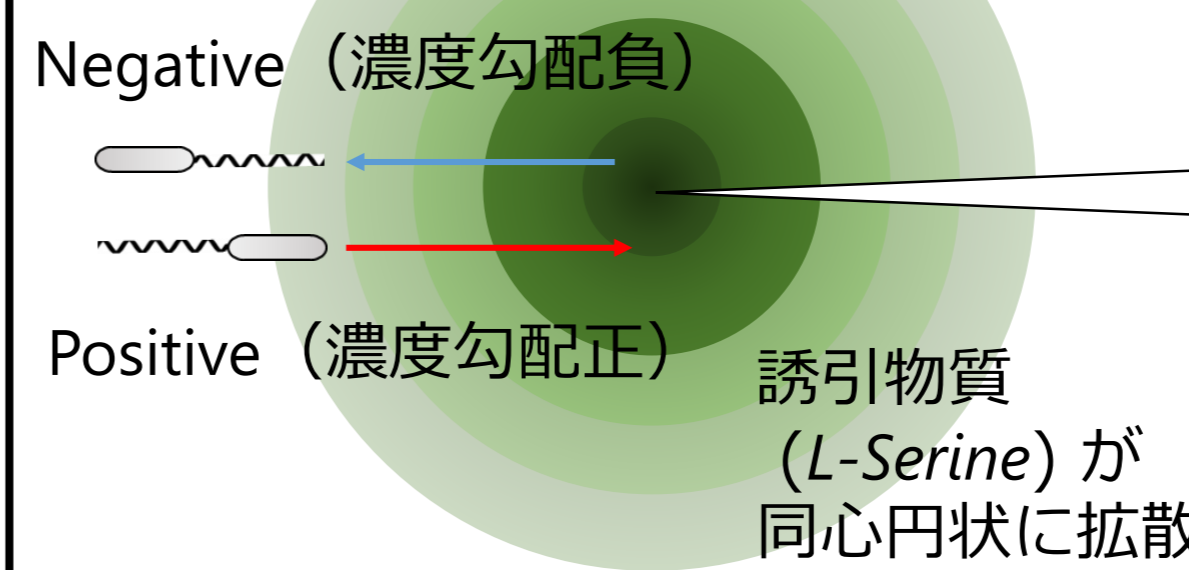
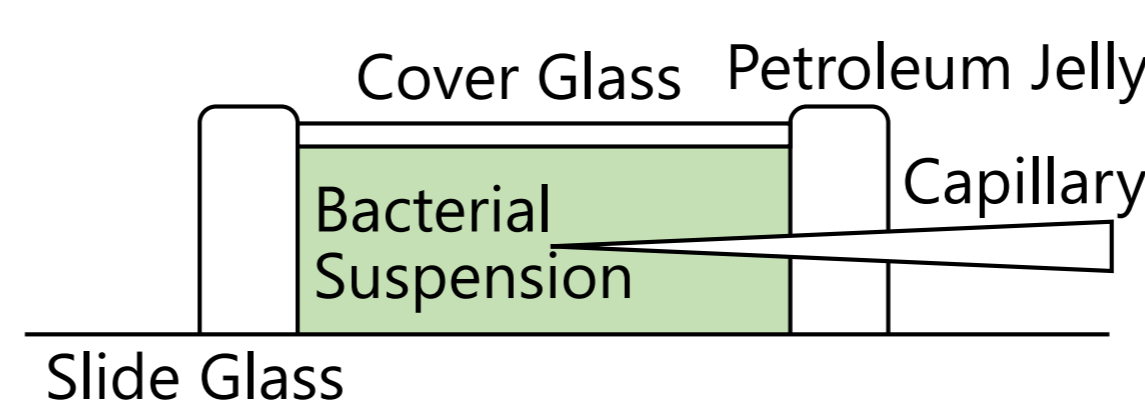
- ・前の移動で原点に近づく
- 確率 α で直進
- 確率 $1-\alpha$ で方向転換
- ・前の移動で原点から離れる
- 必ず方向転換

方向転換頻度：確率 α → 遊泳時間の比

方向転換角度, Δt , ΔR , 確率 α → 実験から求める



Capillary assay



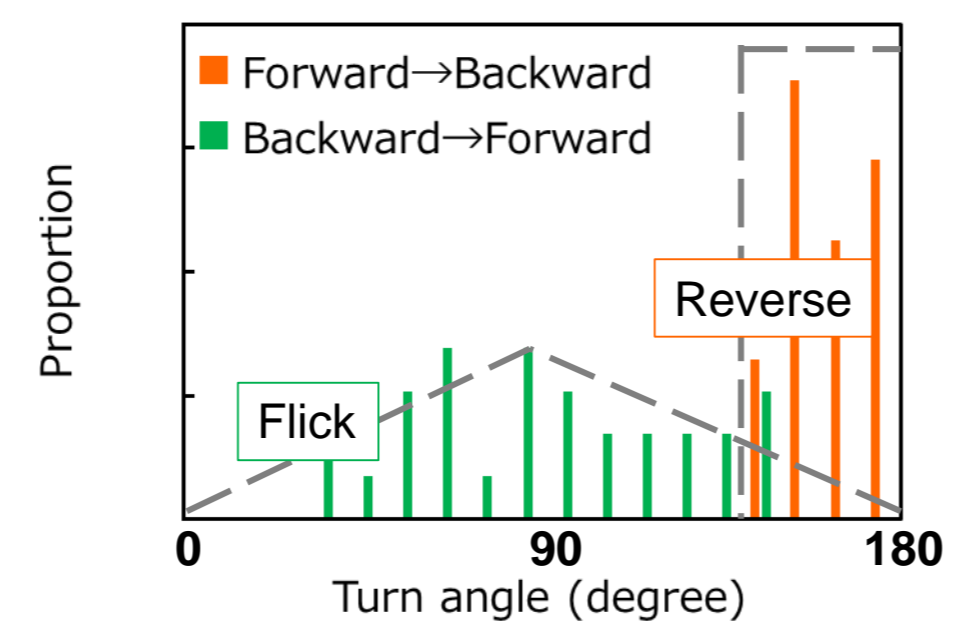
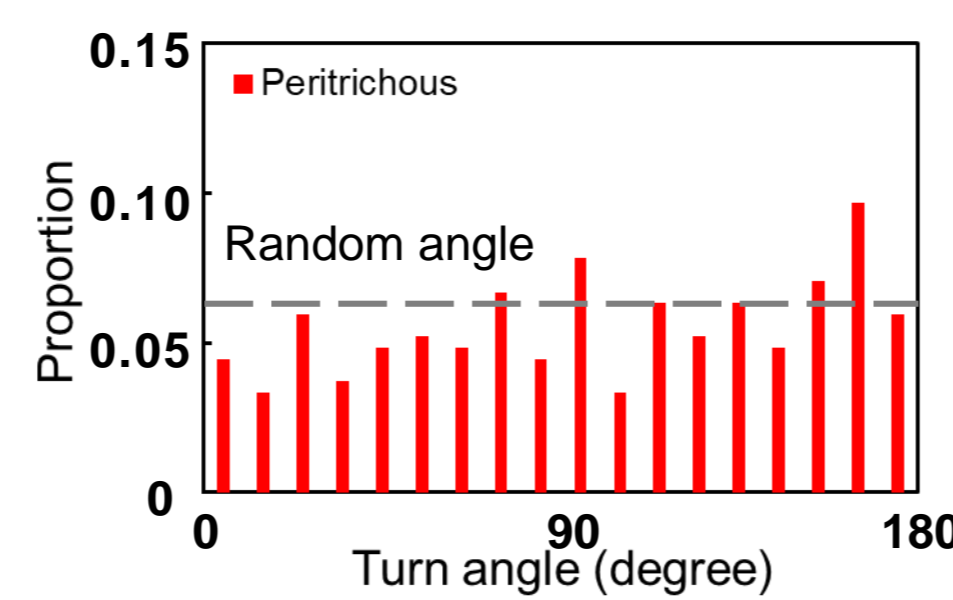
毛細管先端付近での細菌数密度
単毛性細菌 > 周毛性細菌

実験結果による数理モデルの諸パラメタの決定

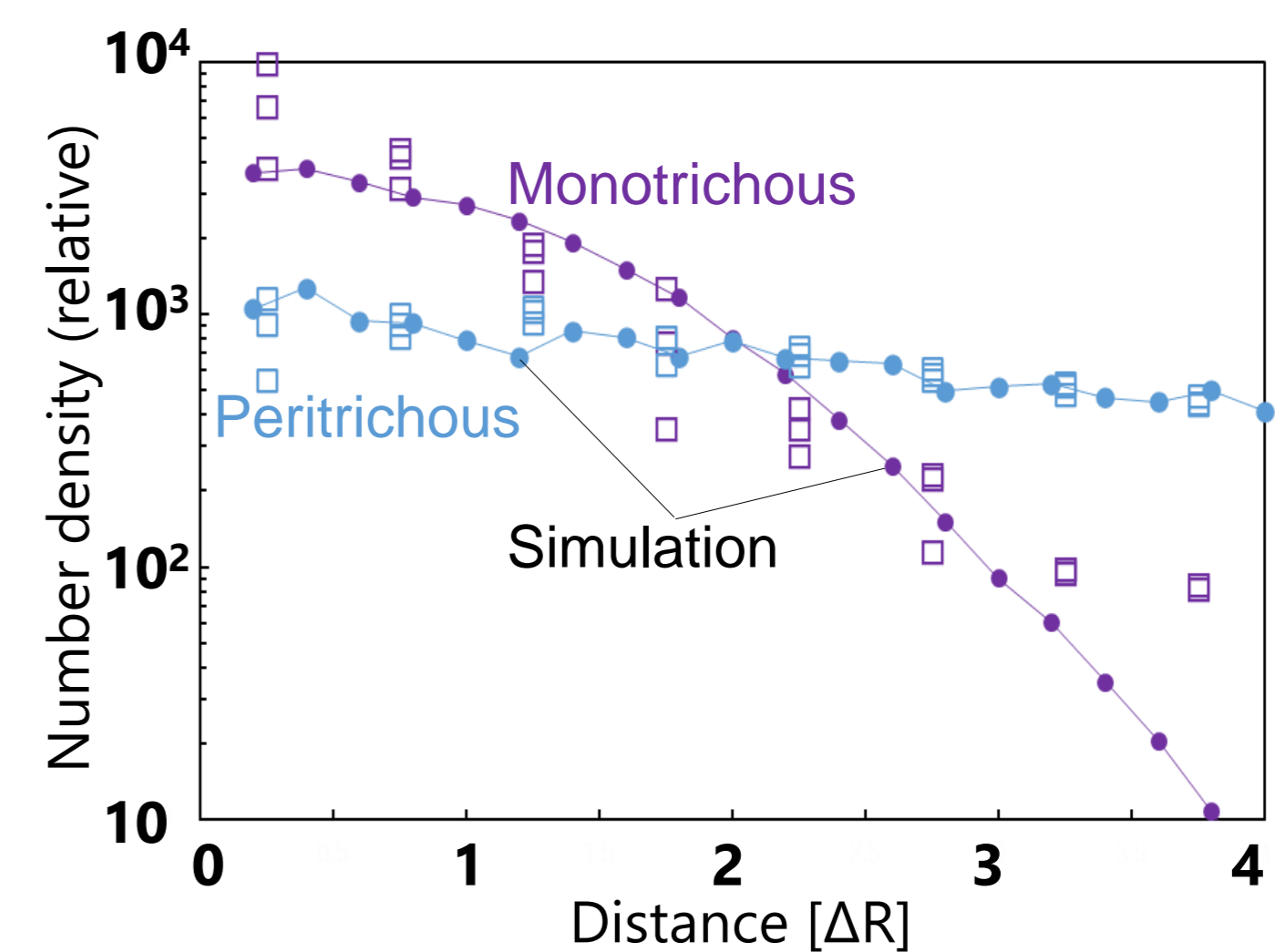
単毛性細菌と周毛性細菌で

- ΔR , 直進を続ける確率 α に大きな差無 (下表)
- 方向転換時の角度に大きな差有 (右グラフ)

| | Monotrichous (Observation) | Peritrichous (Observation) | Simulation |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------|
| Δt [s] | 0.6 | 1.0 | |
| ΔR [μm] | 21.8 | 21.0 | 20 |
| α | 0.26 | 0.31 | 0.25 |



計算値と実験値における細菌数密度の比較



周毛性細菌と単毛性細菌の方向転換時の角度の違いが
集まりやすさの違いに大きく影響している

拡散度合の比較

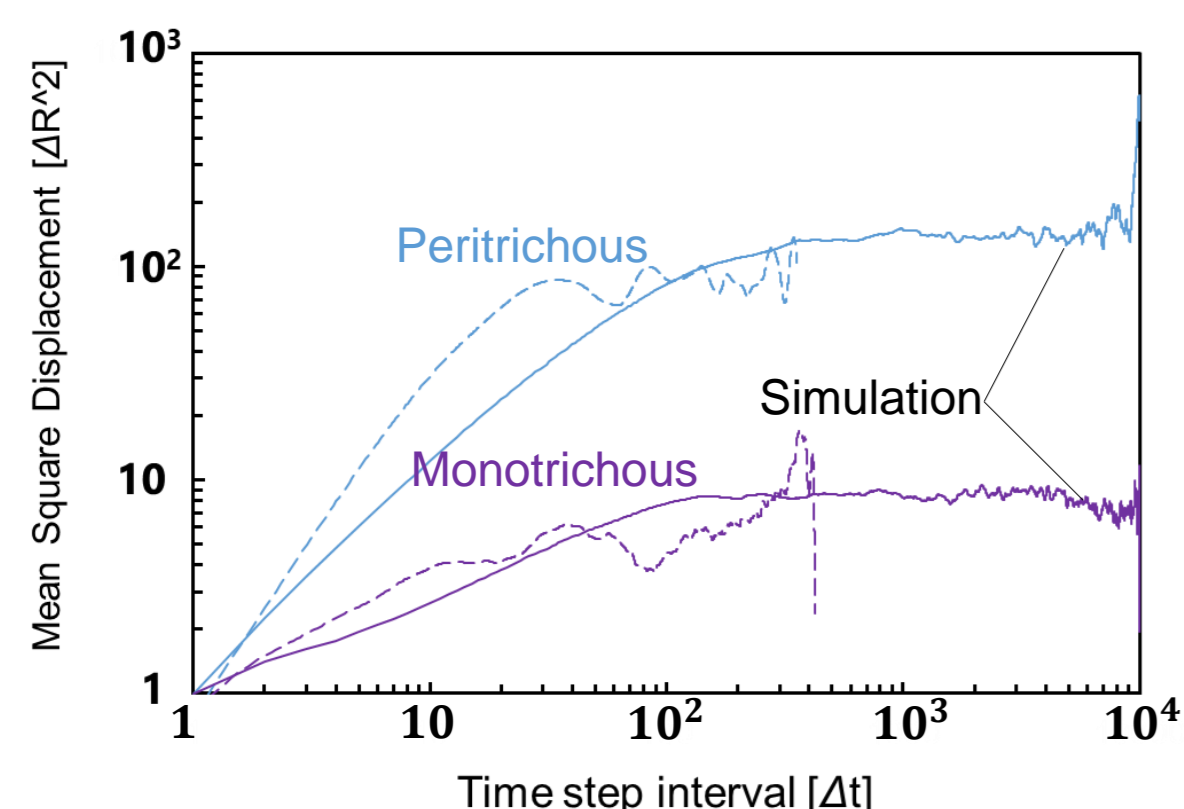
平均二乗変位 (拡散度合)
Mean Square Displacement

$$\langle L(t)^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle L_i(t)^2 \rangle$$

$L_i(t)$: 座標間の直線距離

t: 時間幅

N: データ数



単毛性細菌の方が狭い範囲で収束 → 拡散しにくい

確率漸化式による集積の差異の考察

離散化された空間 i , 時間 n についての

周毛性細菌の遊泳の確率漸化式

$$\text{Neg}_i^{n+1} = \frac{1}{2} \text{Neg}_{i-1}^n + \frac{1}{2} (1-\alpha) \text{Pos}_{i-1}^n$$

$$\text{Pos}_i^{n+1} = \frac{1}{2} \text{Neg}_{i+1}^n + \frac{1}{2} (1+\alpha) \text{Pos}_{i+1}^n$$

$$P_i \propto \frac{1}{(1+\alpha)^i}$$

T. Goto and T. Nakai (2016)

方向転換時の角度に偏りがある場合 (Reverseのみ)

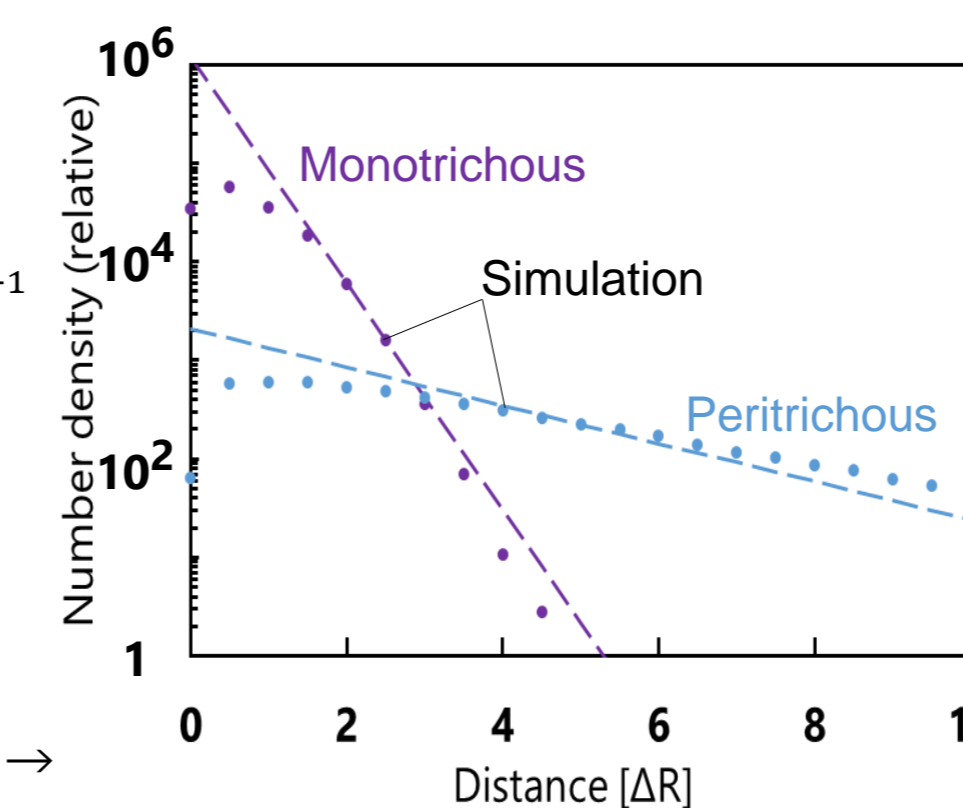
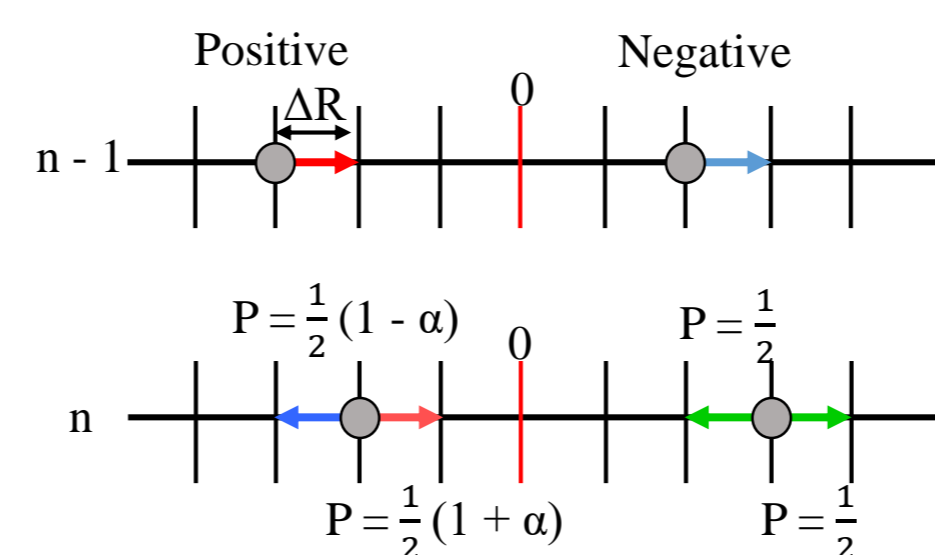
$$\text{Neg}_i^{n+1} = \theta \text{Neg}_{i-1}^n + \{(1-\alpha)(1-\theta)\} \text{Pos}_{i-1}^n$$

$$\text{Pos}_i^{n+1} = (1-\theta) \text{Neg}_{i+1}^n + \{\theta(1-\alpha) + \alpha\} \text{Pos}_{i+1}^n$$

$$P_i \propto \left(\frac{\theta}{\alpha + \theta - \alpha\theta} \right)^i$$

確率 θ : 方向転換を介して遊泳の向きが変わらない確率

周毛性細菌: $\theta = \frac{1}{2}$ 単毛性細菌: $\theta = 0.1 (< \frac{1}{2}) \rightarrow$



結言

単毛性細菌と周毛性細菌の走化性の違いを解明

→ 観察に基づく数値計算

観察

- ・ ΔR , 確率 α : 単毛性細菌と周毛性細菌で差無
- ・ 方向転換角度: 周毛性細菌 → ランダム
- 単毛性細菌 → 角度が制限

計算

- ・ 高濃度側での細菌数密度: 単毛性細菌 > 周毛性細菌
- 実験結果と一致

方向転換時の角度が細菌の集まりやすさに大きく影響

確率 θ により角度分布による集まりやすさへの影響を解析的に関係付け