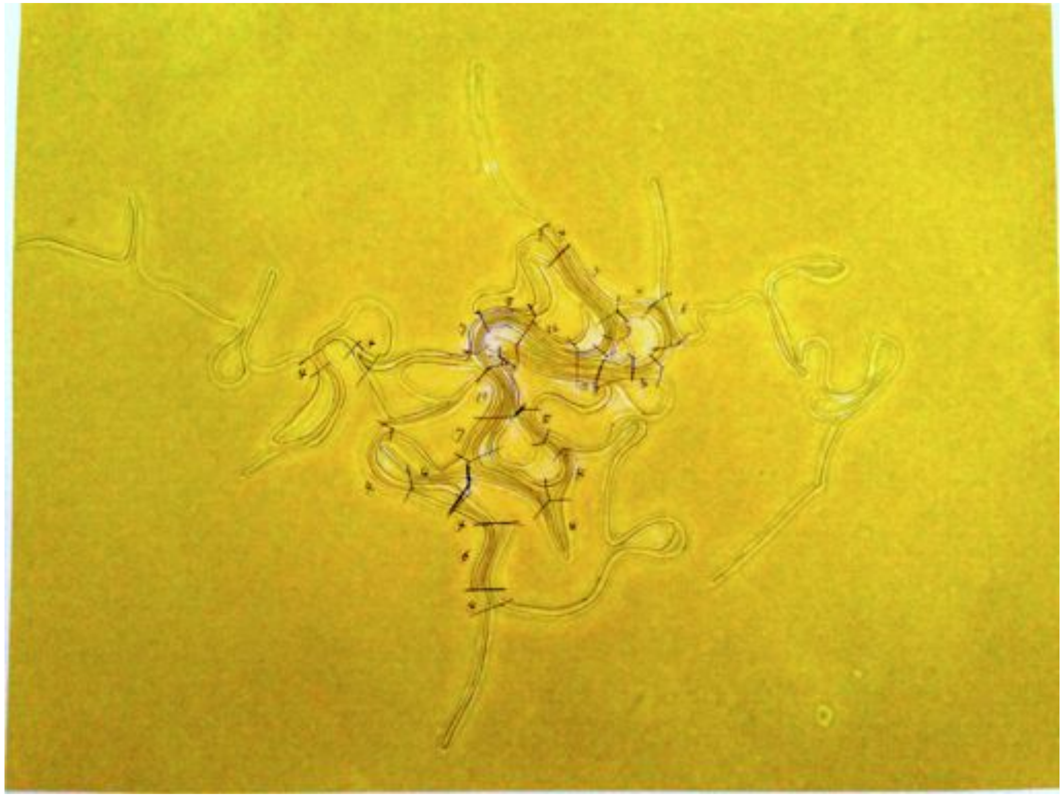
バクテリアのひも状成長にみられるパターン

中央大学大学院理工学研究科
本田良二郎, 脇田順一, 香取眞理

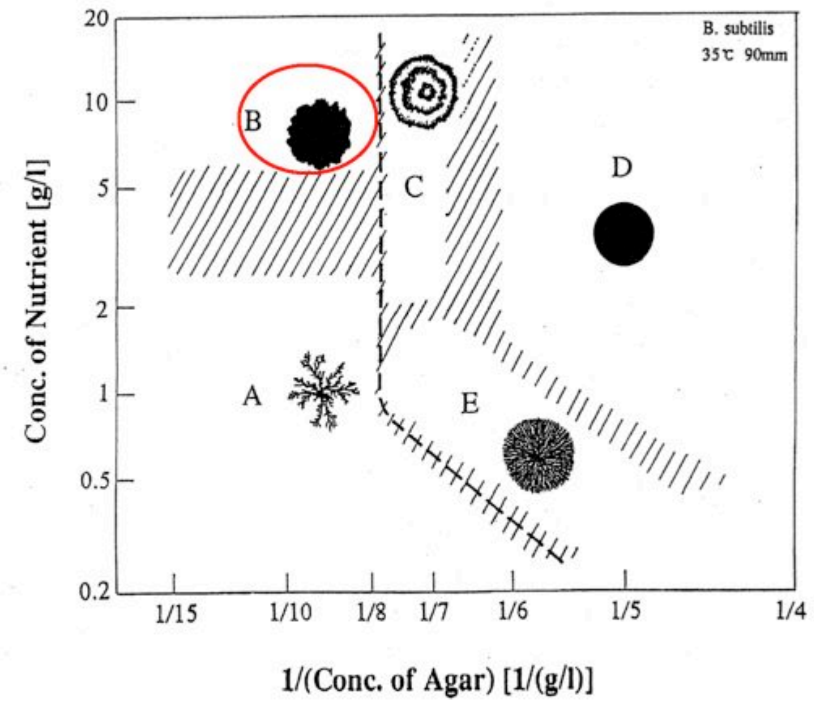


日本物理学会 第70回年次大会
2015年 3月22日

目次

はじめに

- バクテリアの集団は、寒天濃度、栄養濃度によって多様な形のコロニーを形成し、様々なパターンを見れることが知られている。



[1]M.Matsushita et al.,
"Colony formation in bacteria:
experiments and modeling",
Biofilms (2004) **1**, 305-317.

はじめに

- バクテリアを用いる利点
  - 個体の増殖能と運動能を培地の栄養濃度と寒天濃度を変えることで制御出来る。
  - バクテリアは顕微鏡で観察可能なので, マクロなコロニー成長と同時にミクロな個々の運動を観察出来る。
- ミクロな部分に焦点をあて、特徴的な振る舞いがあるのか知りたい。

はじめに

- 稀薄菌液を培地に接種して局所的に菌単体から分裂し成長する様子が観察された。
- 菌は最初期では1次元的にひも状に伸びていくが, 途中から自らを折り畳むことを繰り返して2次元的に広がっていく。

研究目的

- コロニー形成の研究では, その特徴的なパターンを統一的に再現するようなモデルが, 反応拡散方程式を出発点として提案されている。
- 1次元的なひも状の成長から, どのようにして2次元的なコロニーが形成されていくのか知りたい。
- ミクロな部分に焦点をあてて, 定量的な測定を行うことで特徴がみられるのか調べる。

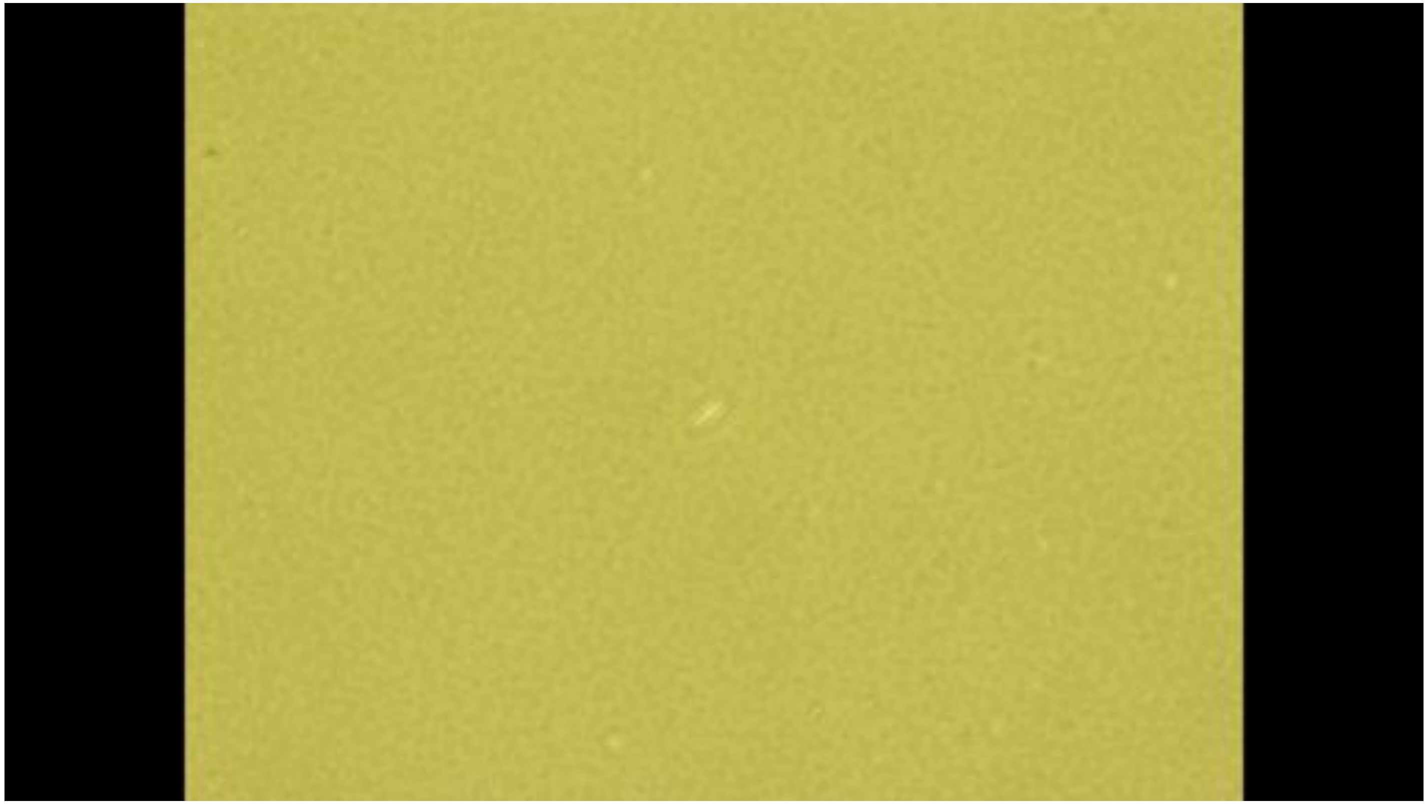
実験方法

- 寒天濃度10[g/l], 栄養濃度10[g/l]の寒天培地を用意して菌液からスポイトで1滴培地の中央に接種する。
- 培地の温度を35℃に保ち, タイムラプスモードで撮影を行う。

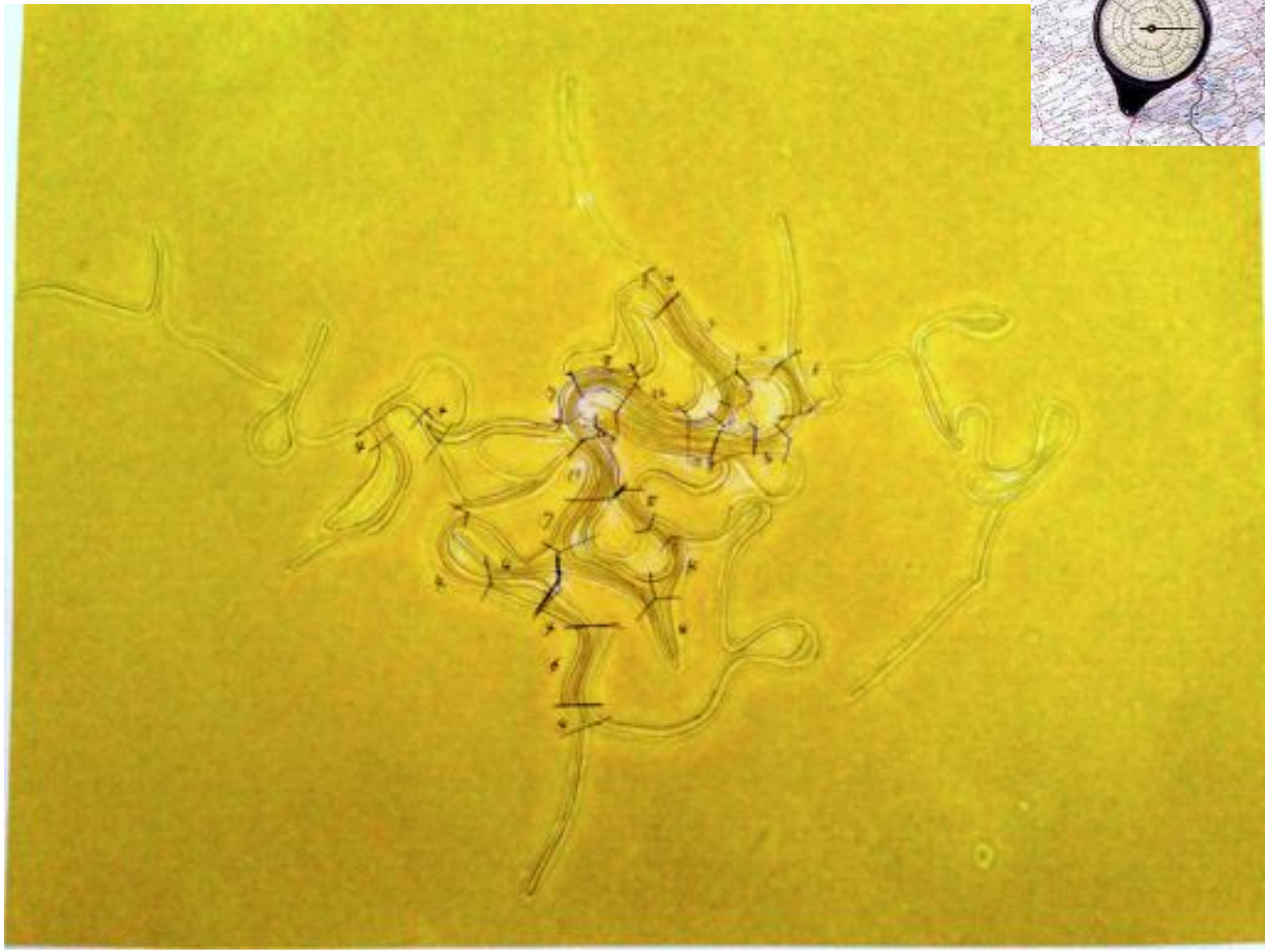
※タイムラプスモード:1分毎に1枚撮影

ひも状成長の観察

- 動画



ひも状成長の観察

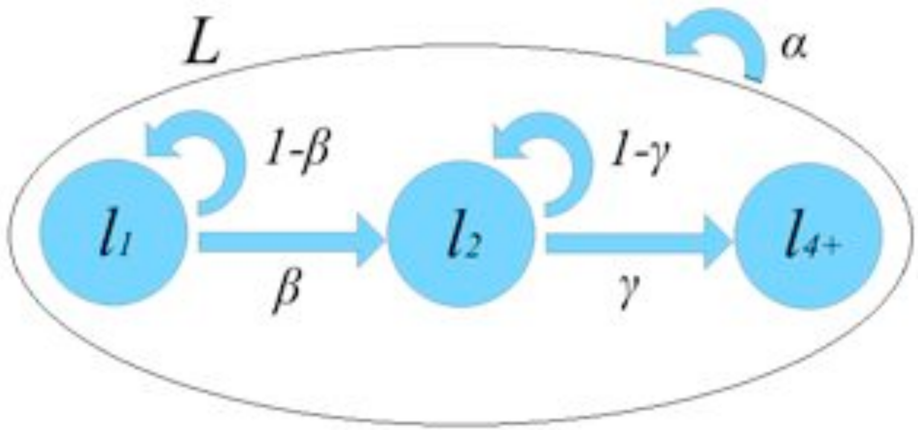


観察結果

t	L	l_1	l_2	l_{4+}
0	9.6	9.6	0	-
1	14.5	12.0	2.5	-
2	20.0	15.7	4.3	-
3	30.8	21.6	9.2	-
4	46.6	28.1	18.5	0
5	69.2	39.4	27.8	2.0
6	102.0	51.5	45.5	5.0
7	-	-	-	23.5
8	-	-	-	62.0
9	-	-	-	121.0

多重化遷移モデル

- l_1, l_2 はそれぞれ1重部分の長さ,2重部分の長さを表し, l_{4+} は4重以上の部分の長さを表す。
- 1重状態から2重状態への遷移率を β, 2重状態から4重状態への遷移率を γ とする。
- Lは全長を表し, その増加率は α とする。



多重化遷移モデル

- 微分方程式系の導入

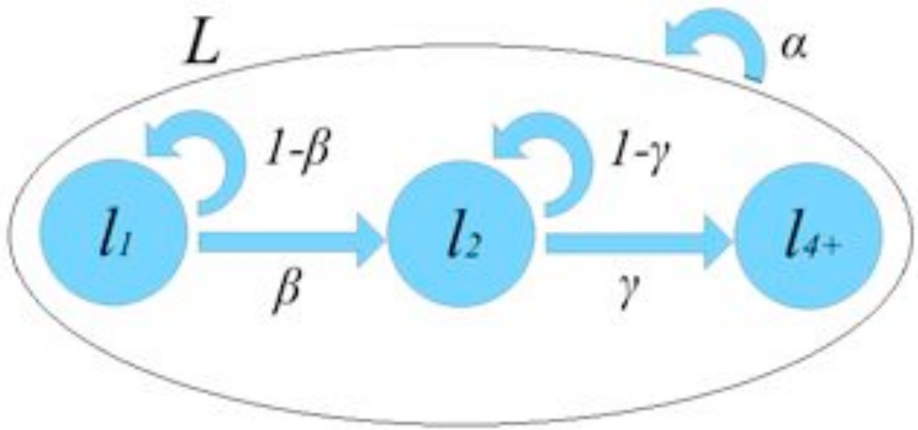
$$L = l_1 + l_2 + l_{4+}$$

$$\frac{d}{dt} L = \alpha L$$

$$\frac{d}{dt} l_1 = \alpha(1-\beta) l_1$$

$$\frac{d}{dt} l_2 = \alpha(1-\gamma) l_2 + \alpha\beta l_1$$

$$\frac{d}{dt} l_{4+} = \alpha l_{4+} + \alpha\gamma l_2$$



微分方程式系の解

- 微分方程式系

$$L = l_1 + l_2 + l_{4+}$$

$$\frac{d}{dt}L = \alpha L$$

$$\frac{d}{dt}l_1 = \alpha(1-\beta)l_1$$

$$\frac{d}{dt}l_2 = \alpha(1-\gamma)l_2 + \alpha\beta l_1$$

$$\frac{d}{dt}l_{4+} = \alpha l_{4+} + \alpha\gamma l_2$$

- 微分方程式系の解

$$L = l_1 + l_2 + l_{4+} \quad ①$$

$$L = A\mathrm{e}^{\alpha t} \quad ②$$

$$l_1 = A\mathrm{e}^{\alpha(1-\beta)t} \quad ③$$

$$l_2 = \frac{\beta}{\beta-\gamma}A\mathrm{e}^{\alpha(1-\gamma)t}(1-\mathrm{e}^{-\alpha(\beta-\gamma)t}) \quad ④$$

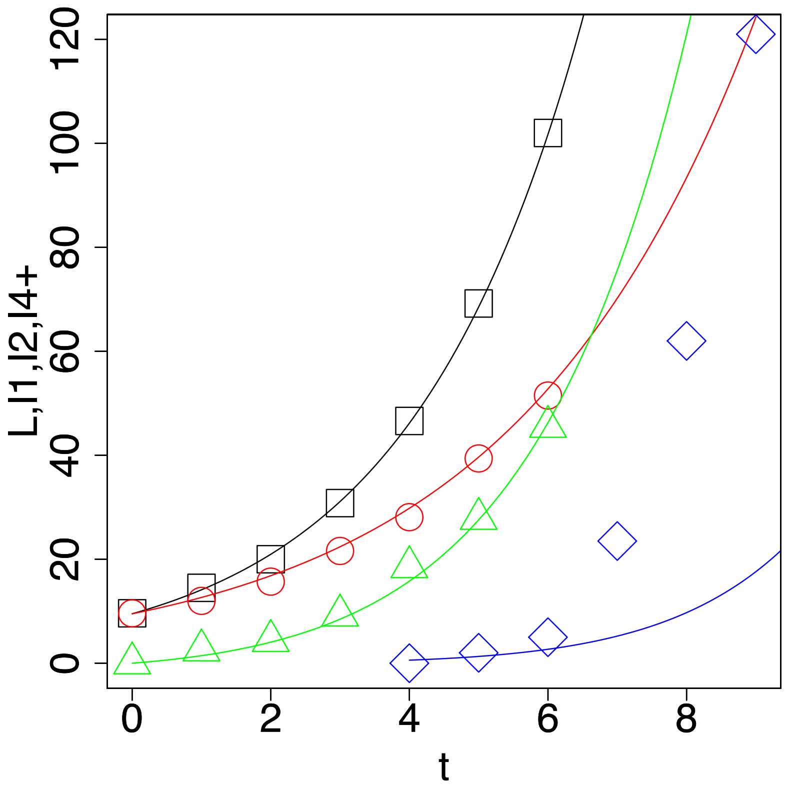
$$l_{4+} = \frac{A}{\beta-\gamma}\mathrm{e}^{\alpha t}\left\{\beta(1-\mathrm{e}^{-\alpha\gamma t}) - \gamma(1-\mathrm{e}^{-\alpha\beta t})\right\} ⑤$$

実験データとの比較

- フィッティングして得られた A, α, β, γ を用いて L, l_1, l_2, l_{4+} を描いた。
- $A=9.51$,

  $\alpha=0.395$, $\beta= 0.277$,

  $\gamma=0.043$
- □:L, ○:l_1, △:l_2, ◇:l_{4+}



l_{4+}の補正

- 微分方程式系

$$L = l_1 + l_2 + l_{4+} + \ldots$$

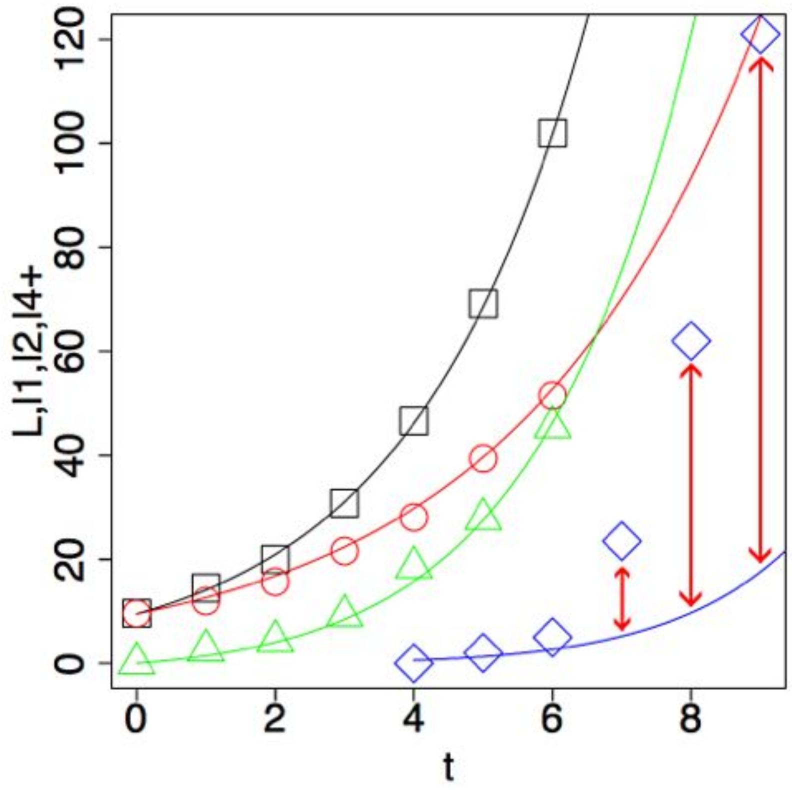
$$\frac{d}{dt} L = \alpha L$$

$$\frac{d}{dt} l_1 = \alpha(1-\beta) l_1$$

$$\frac{d}{dt} l_2 = \alpha(1-\gamma) l_2 + \alpha\beta l_1$$

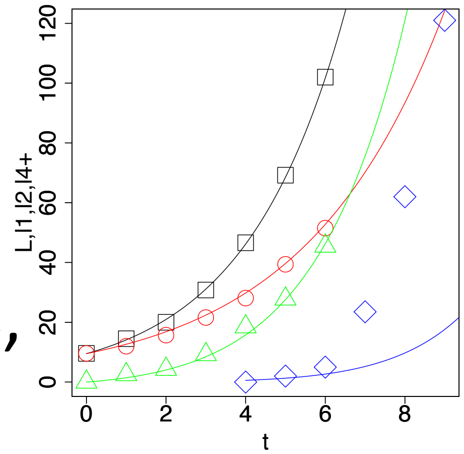
$$\vdots$$

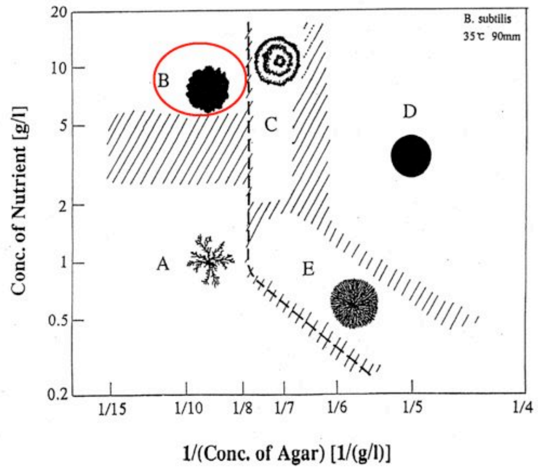
$$\frac{d}{dt} l_{4+} = \alpha l_{4+} + \alpha\gamma l_2 + \ldots$$



結果のまとめ

- 観察結果から菌が折り畳む様子に着目した。
- 成長を特徴付ける為に微分方程式系を導入し, 実験データと理論式の比較から増加率, 遷移率を見積もった。





$$l_1 = A\,\mathrm{e}^{\alpha(1-\beta)t}$$

$$l_2 = \frac{\beta}{\beta-\gamma} A\,\mathrm{e}^{\alpha(1-\gamma)t}\left(1-\mathrm{e}^{-\alpha(\beta-\gamma)t}\right)$$

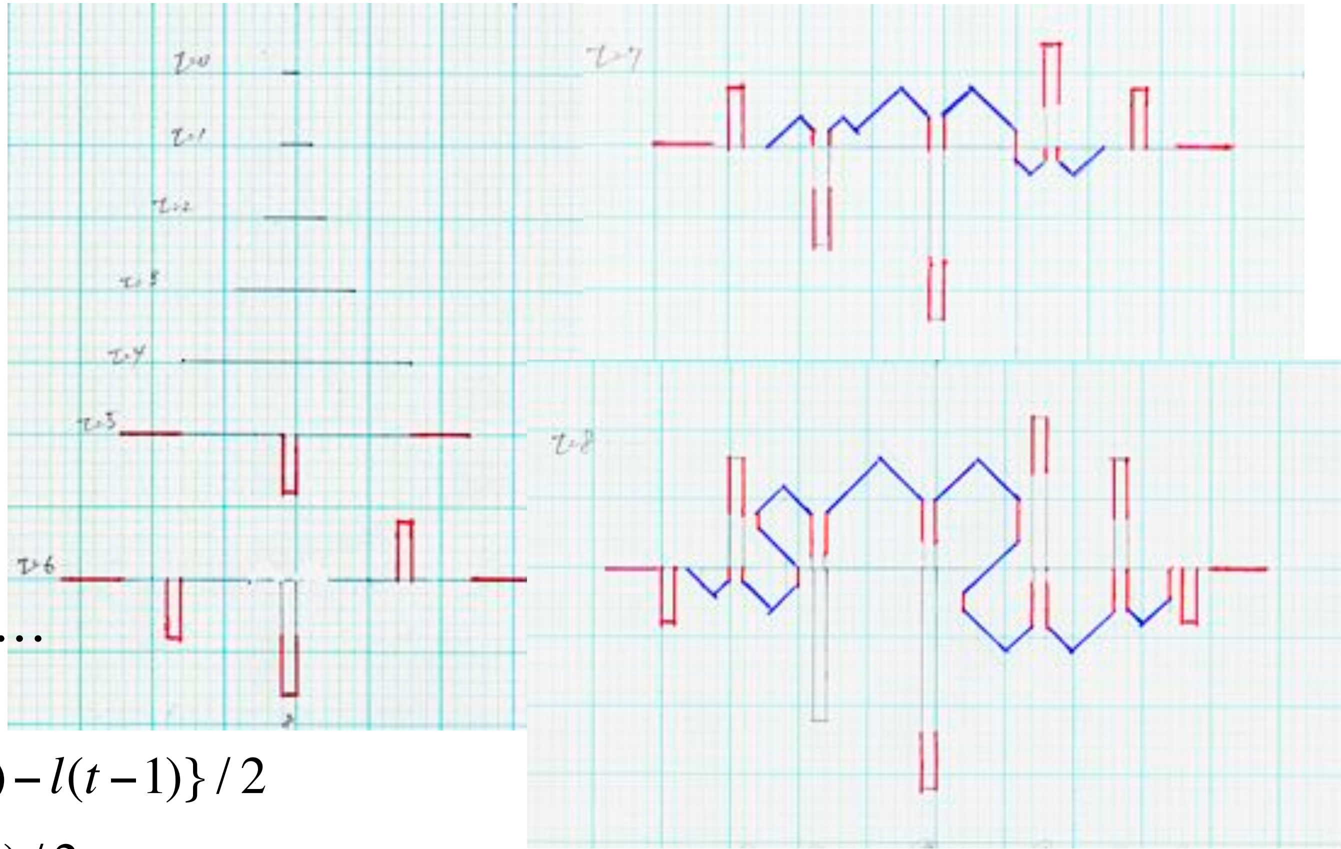
$$l_{4+} = \frac{A}{\beta-\gamma}\mathrm{e}^{\alpha t}\left\{\beta(1-\mathrm{e}^{-\alpha\gamma t})-\gamma(1-\mathrm{e}^{-\alpha\beta t})\right\}$$

$A=9.51$,
$\alpha=0.395$, $\beta= 0.277$
$\gamma=0.043$

空間的なモデルの構築

折り畳む特徴を再現する空間的なパターンを描くモデルを構築したい。

バクテリアは培地との摩擦により菌の先端部分の成長には制限がかかると仮定している。



ステップ数: $t = 0,1,2,\ldots$

全長: $L(t) = 2^t$

成長速度: $v(t) = \{l(t) - l(t-1)\} / 2$

$$= (2^t - 2^{t-1}) / 2$$

$$= 2^{t-2}$$

先端の制限: $v_0 = 4$