

A03 細胞組織の動力学の理解へ向けた自己駆動粒子の集団運動の解析

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (WPI-AIMR) 義永 那津人

化学反応によって液滴から濃度場を生成する、あるいは消費する液滴は、この反応が等方的であっても自発的に対称性を破って運動する。この自己駆動液滴は、界面活性剤などによって表面張力を変化させる化学物質が液滴から溶け出すことによって、周囲に濃度分布を形成することによって実現する。我々は、この現象のモデルとして、液滴にソース項を持つ濃度場のダイナミクスと流体力学との結合によって、化学反応の反応速度を大きくしたり粘性を下げることによって、一つの液滴の周りの濃度場が対称性を破って一方向に運動することを明らかにしてきた。このような自発的に液滴する液滴は、集団で様々な協同運動を示すことが実験的に示唆されているが、その普遍的なメカニズムや、集団運動の分類などについての理解はほとんど得られていない。これは、液滴の運動をコントロールすることによって、「貨物の運び手」として利用するなどの応用に向けて重要であると考えている。我々は、液滴が生成する濃度場が相互作用によってゆがむことを理論的に計算し、また液滴が作り出す流れの影響と比較し解析を行った。その結果、濃度場のダイナミクスと流体方程式から、二つの液滴の縮約された運動方程式を導出することができた。自発運動液滴のアクティビティの無次元量の符号が二つの液滴で同じ場合には液滴は反発し、逆の場合には引力が生じる。これは、双方の液滴が、化学物質を生成している、あるいは両方とも消費している場合には斥力が生じ、片方が生成、もう片方が化学物質を消費する場合には引力相互作用することを示している【参考文献(1)】。

また、Phase-Field モデルを用いて、液滴の界面をシャープだが連続的な場で表現し、濃度場と流体力学と結合させた数値計算を行った。解析的な計算と比較することによって半定量的によい一致を得ている。理論と数値計算のどちらの結果でも、正面衝突の場合には、上記で述べた二種類の相互作用では、濃度場の重なりによる相互作用が支配的であることを示している。しかし、斜めから衝突では、流体効果を取り入れた場合にのみ強い配向の効果が数値計算で見られるなど、今後解析を続けるべき課題も見つかっている。

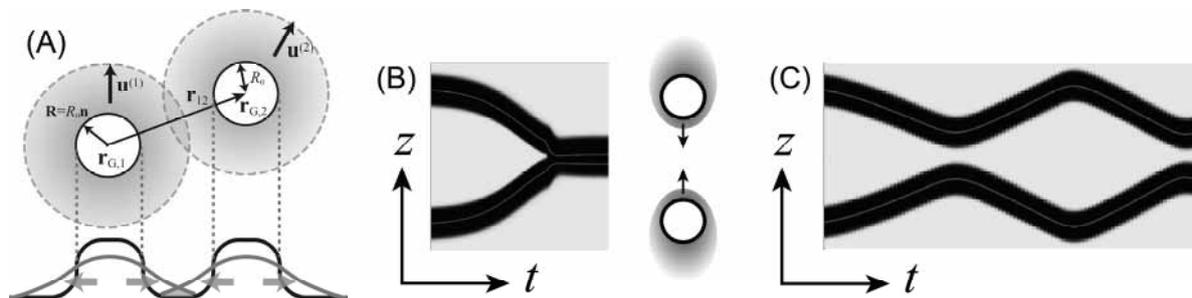


図1. 相互作用する自発運動液滴の模式図(A)と数値計算の結果.

自発運動によって生成する流れ場による相互作用とは別に、液滴の周りの濃度場が重なることによって相互作用する。(B, C) 数値計算では、化学反応を強くすることによって、弾性衝突(B)から、衝突して融合する状態に移行する。液滴が存在する部分を黒で表し、その中心の軌道を示している。

上記とは別の課題として、慶應義塾大学の藤原慶氏と共同で、大腸菌の細胞分裂に重要な役割を果たす Min たんぱく質の人工合成系におけるたんぱく質の局在と波の伝搬について理論的に解析を行った。膜面上の二次元でのたんぱく質の分布と、球状の膜の内部三次元空間に存在するたんぱく質の両方、合わせて 5 つの濃度場が従う反応拡散方程式を解析することによって、実験で見られる波の伝搬を再現することができた。ベシクルのサイズや、たんぱく質の総量を変えることによって、この波が Wave Instability によって現れることを明らかにした。これは、一様静止状態が不安定化し、一様振動が現れる前に、有限の波数を持った波が不安定化することを示している。ベシクル内部の濃度場のダイナミクスが十分速いとして、膜面の濃度場のダイナミクスに注目することによって、波の出現を示すことができる。また、上記のモデルの直接数値計算も行い、それぞれの自由度を球面調和関数で展開することによって、図 2 で示す様々な波のパターンを得ることができている。さらに、本現象は、膜面上の遅い拡散と、膜内部の速い拡散が本質的な役割を果たすことから、3 変数を用いた簡略モデルの解析も進め、ベシクルの形状によって、定在波と回転波が選ばれる条件を明らかにすることができている。

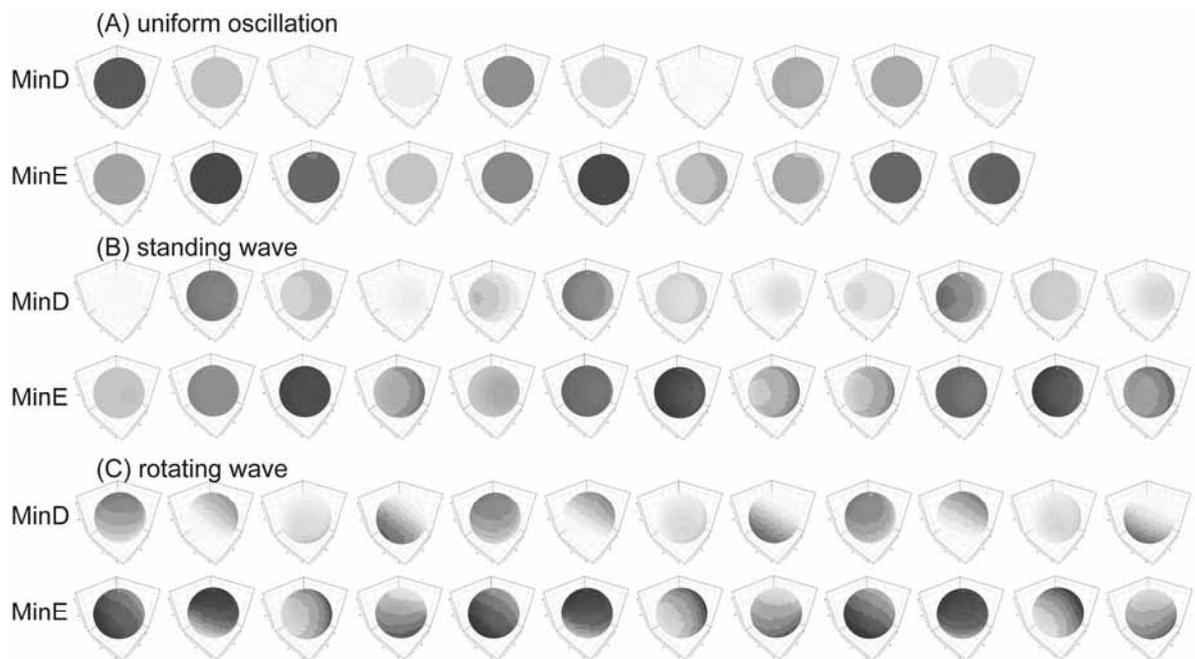


図 1. Min たんぱく質系における波の伝搬の理論モデルの数値計算結果。

球状の膜面上のたんぱく質 (MinD, MinE) が、バルク内部の濃度場と相互作用することによって時空間構造を形成する。(A) 一様振動、(B) 球面の二つの極の間を振動する定在波、(C) 一方向に波が回転しながら伝搬する回転波。

参考文献：

- (1) S. Yabunaka and N. Yoshinaga, *J. Fluid. Mech.* **806**, 205-233 (2016).