

A02-003 小さな反応拡散系における秩序形成から生物の機能へ

千葉大学大学院理学研究科 櫻井建成
 千葉大学大学院理学研究科 北畑裕之
 東京大学大学院総合文化研究科 澤井哲
 東京大学大学院総合文化研究科 石原秀至

本研究では、反応拡散波と界面変形を伴ったアクティブマターの相互依存性から生み出される動的秩序とそれに由来する機能の普遍的性質の解明を目的としている。具体的には、反応拡散系とアクティブマターの結合系という新しい枠組みに対して、生体と非生物物質の両方から迫る試みを行う。そのため、実験系を巧みにデザインし、細胞ダイナミクスの背後にある物理的な対応を常に意識しつつ理論を発展させることを基本とする。ここで、(1) 非生物系では、反応拡散波によって駆動されているアメーバ細胞を模した化学反応系として、Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応液滴をベースとする新奇の実験系を構築する。(2) 並行して生物系では、アメーバ細胞のリン脂質シグナリングの *in vitro* 再構成系を構築し、実際のアメーバ内の非自明動態との比較検証と理論的考察を行い、変形しながら運動する系の普遍的性質を明らかにすることを目指した。

(1) 非生物系：反応拡散波によって駆動されているアメーバ細胞を模した化学反応系

共同研究者の北畑は、化学振動反応である BZ 反応溶液の液滴が、内部でのパターン形成と結合して運動する現象について研究してきた。この現象は、BZ 反応において酸化状態と還元状態で界面張力が異なることにより、化学波の進行に伴って液滴表面の界面張力勾配が発生することが原因となって起こることを明らかにしてきた。そこで、実際に BZ 反応溶液の表面や、BZ 反応溶液と油の界面において、化学波が伝播するときの界面張力の変化をレーザー準弾性散乱により測定した(図1)。その結果、気液界面ではほぼ化学波の進行に伴う色の変化と一致して、界面張力が変化することがわかった。一方、油水界面における測定においては、化学波の進行よりも遅れて界面張力が変化することが明らかとなった。この現象について、界面活性をもつ鉄触媒の界面への吸着脱離の時定数を考えることにより議論した(A03-001 班豊田との共同研究[1])。来年度以降は、本結果を BZ 反応液滴系に適用し、液滴運動のメカニズム解明と光感受性を付加した BZ 反応などを用いて新たな実験系の開発を行う予定である。

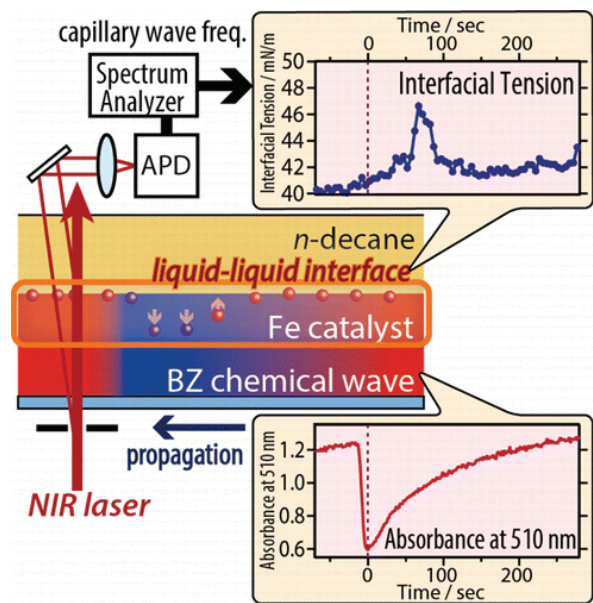


図1：レーザー準弾性散乱による BZ 溶液と油相の界面の界面張力測定の様式図。

(2) 生物系：アメーバ細胞のリン脂質シグナリング

細胞性粘菌におけるアクチンフィラメントの形成や、その上流のイノシトールリン脂質(PIP3)の局在が、基質面の膜の近傍で興奮波として伝播することが近年わかってきた。研究分担者である澤井のこれまでの研究から、アクチン重合の障害が進行波の起点生成頻度を減少させることが見出されている[2]。そこで基質面の形状や物性によって膜の伸展を制限し、進行波を観察した。その結果、特に基質面に疎水性素材である PDMS を用いた場合、PIP3 の局在を起こす細胞がほとんど存在しないこと、また、PDMS 表面の親水化によって、進行波を起こしている細胞の率が増加することが明らかになった。このことから、基質面への接着のしやすさが、PIP3 のゆらぎの増幅と波の生成に強く関わっている可能性が示唆された。今後、基質面の物性を変えて進行波の生成頻度や伝播の様子を測定し、細胞の挙動との関係を調べる予定である。

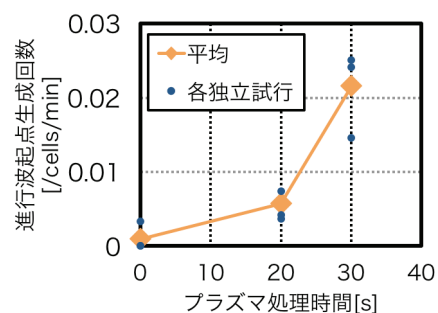


図2. 親水化処理と興奮波発生頻度の関係。

反応拡散系は、連続無限自由度の系であるが、しばしば実際のダイナミクスは低次元的な運動をおこない、縮約された方程式で記述される。小さな反応拡散系を理論的に記述する試みとして、反応波の位置やその強度を変数としてとり、系がもつ対称性からそれらが満たすべき縮約された方程式系をしぼりこみ、低次の展開を行った。特に、新しい面として、自由度が潜在的には無限大でありうる方程式系を構成した。細胞内の反応波だと見なせば[2]、円形領域の拡散波の位置に応じて細胞の形や運動方向を決めることで、細胞運動のモデルと考えることができる。実際に得られた運動は、モデルのパラメータに応じて、極性化した運動、ケラトサイト様運動、ジグザグ様運動、複数の仮足を交互に出すアメーバ様運動など、実際の細胞運動に似た物が得られた。また、固定点などを解析的にしらべ、その分岐構造なども調べている(論文準備中)。今後、拡散波の回転自由度を取り入れた系に拡張し、より現実に近い運動が現れるかどうかを調べる予定である。

以上、本年度は、研究代表者や分担者は個々の研究テーマに関して発展させつつ、連携を深めてきた。今後はそれらの発展的に進めるとともに、(1) 水油系の組成を変更し界面張力が低い BZ 反応系のデザインと並行して BZ 反応の境界における興奮性を制御した系をデザインする。(2) BZ 反応パターンで境界の形状を変え、それによってさらに波パターン伝播の回転、反転、反射が誘発されるという、反応拡散秩序と動く系の相互依存ダイナミクスを明らかにする。非生物系と生物系における定量的測定の相互検証を行い、研究班内での連携を高め、微小空間 BZ 反応における変形や運動、細胞の多様な運動形態を、理論的な立場から予測・分類することを目指す。

参考文献:

- (1) R. Tanaka, T. Nomoto, T. Toyota, H. Kitahata, and M. Fujinami, *J. Phys. Chem. B* **117**, 13893-13898 (2013).
- (2) D. Taniguchi, S. Ishihara, *et al.*, *PNAS* **110**, 5016-21 (2013).