ゆらぎと構造の協奏

～非平衡系における普遍法則の確立～

News Letter　Vol.5

2015.6.26 発行

本号では、本新学術領域研究の開始以来、領域内で行われた共同研究の成果のひとつを掲載いたします。

F_1-ATPase：非対称性の生む散逸ルール

川口喬吾、佐々真一、沙川貴大

ゆらぎの熱力学と生体分子モーター

熱ゆらぎの無視できない小さなスケールで働くエンジンがあるとして、それが従う熱力学法則とはなにか。熱力学はマクロ世界のエネルギー移動に関する法則を体系化したもので、それが一分子のスケールにまで適用されるべき理由はない。歴史的には、分子の運動が見える世界では熱力学第二法則が破れうるのではないか、という 19 世紀のマクスウェルの指摘があり、それに対する反論として、熱ゆらぎの効く小さなスケールに人類はそもそもアクセス不可能である、との主張がリアリティを持っていたこともあった[1]。こうしたマクロとミクロの接続をめぐる思考実験や論争は現在に至るまで絶えず続いているが、小さな機関への理解が近年急速に進展する起爆剤となったのは、生体分子モーターに関する精緻な実験データであった。

生体分子モーターとは、細胞内で稼働する極微の化学エンジンである[2]。その機能は多岐にわたり、筋収縮や小さな荷物のレール上の輸送を担うリニアモーターと、べん毛回転やポンプの動力伝達などを担う回転モーターに大きく分けられる他は、形や大きさも多様である。これらのモーターは、ATP の加水分解に伴う自由エネルギー差や、膜間の化学ポテンシャル差などを動力源としている。1990 年代の実験技術の進歩により、モーターに取り付けられたプローブから 1 分子のダイナミクスが観察可能になり、光ピンセットなどを用いることでピコニュートン精度の力さえ計測できるようになった。これらの観察・制御実験の結果、ナノスケールの 1 分子化学機関が、ゆらぎにさらされながらも驚くべき高さの熱力学効率で稼働していることが明らかになり、生物学の枠を超えた注目を集めた。

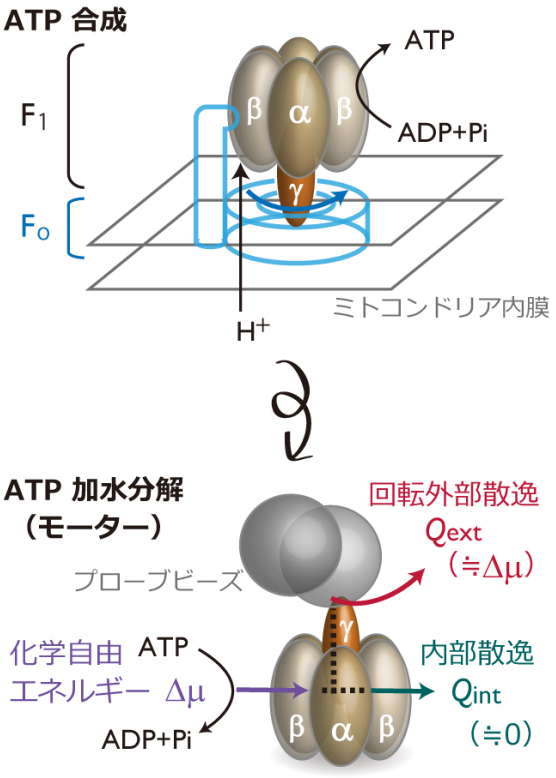

図 1：可逆で極微な化学エンジンである F_1-ATPase と熱散逸の実験結果のまとめ。F_1 は真核細胞内では Fo（青）によるトルクを駆動力として ATP を合成している（上）。F_1 単独では ATP 存在下でモーター回転することもできる（下）。モーター回転時の自由エネルギー流入と回転自由度を通じた熱散逸の測定結果[12]により、内部散逸がほぼ 0 であることが示されている。

こうして、小さなスケールのエンジンは、空想のものではなく、われわれの体内にありふれて実在するものであることがわかった。分子モーターの詳細な性質が明らかになるにつれ、それに対応した新しい熱力学、すなわちゆらぐ世界の熱力学の構築が必要に迫られた。関本は、確率解析の枠組みにおいて、ゆらぐ熱や仕事が定義できることを示し、熱力学量それ自体が確率的な値を取る場合に適用可能な、ゆらぎのエネルギー論(stochastic energetics)を展開した[3]。ほぼ同時期に、ゆらぎの定理やジャルジンスキー等式といった、ゆらぐ世界の熱力学第二法則と密接にかかわる議論が、非平衡統計力学の基礎理論の観点から活発になり始めていた[4,5]。小さな世界における熱とはなにか、エントロピーとはなにかについて定式的な理解が進み、いわゆるゆらぎの熱力学(stochastic thermodynamics)が完成していった[6]。

ゆらぎの熱力学は、平均値のレベルでは従来の熱力学と整合しながらも、ゆらぎの効果を取り込む形に拡張された理論である。この枠組みの中では、たとえば熱力学第二法則は、平均としては満たされることが「証明」できる上に、確率的には破れうるということの効果が定量的に扱える。より最近の展開としては、このゆらぐ世界の熱力学第二法則を測定やフィードバックを含む場合に拡張した議論もあり、古典的な「マクスウェルのデーモン」の設定を超えた多彩な状況に理論が展開されつつある[7]。

このような流れの中で、2005 年には原田と佐々により、熱平衡にある系の満たす基本的な性質である揺動応答関係が、非平衡定常状態に一般化された[8]。ここでいう非平衡な状態とは、温度の定義できる熱浴の中で、外力や化学ポテンシャルに駆動された粒子などが、定常的に流れている状況をさす。ATP を加水分解して運動する分子モーターは、まさにこのような状況にある。拡張された揺動応答関係である原田-佐々等式の著しい特徴は、運動のゆらぎと微小な外力摂動への速度の応答という実験的にアクセス可能な情報から、ブラウン運動に伴う熱散逸を推定できる、ということであった。この性質を利用して、ミクロな詳細設計の分からない生体分子モーターについて、実験的に熱散逸を測定する道が開けた。

F_1-ATPase の高効率と熱散逸

F_1-ATPase (F_1)は真核細胞ではミトコンドリアの内膜に埋まる FoF_1 の一部で、その生体内での機能は、ATP を ADP + Pi からつくる合成酵素である。Fo が膜間のプロトン勾配の化学ポテンシャル差によってトルクを発生し、F_1 の γ 軸を回転させると、その回転運動が F_1 内での化学反応とカップルし、ATP が作られる（図 1 上）。このプロセスは生体内の 90%以上の ATP を合成するのに使われており、F_1 はいわば代謝系の最終走者としての役割を担っている。

1990 年代の野地と安田らの実験により、F_1 を単独で ATP 存在下に置くと、γ 軸がモーター回転することが確かめられた[9]。すなわち、F_1 は Fo に駆動された軸回転により ATP を合成できるばかりでなく、Fo から解き放たれた際には、ATP を消費しながら生体内と逆方向に軸を回転させることもできる（図 1 下）。この驚くべき可逆性は、現在までのところ F_1 にユニークなもので、他のリニアモーターなどでは確認されていない。F_1 の軸回転と ATP 分子の合成・加水分解プロセスとの関係は詳しく調べられており、ATP 1 分子に対して 120 度を 1 ステップとする回転が伴うこと、その 120 度の回転が厳密には 80 度と 40 度のサブステップに分けられることや、それぞれのステップに対応した素反応があることも明らかになっている。また、F_1 がタイトカップリングであること、すなわち 1 つの 120 度ステップあたりに F_1 に流入する自由エネルギーが ATP 加水分解自由エネルギー$\Delta\mu$と定量的に合うという、熱力学的高効率性も確かめられている[10]。これら一連の研究により、F_1 はγ軸の角度という 1 自由度だけで化学反応の順逆方向を制御できる、理想的なナノマシンであることがわかってきた。

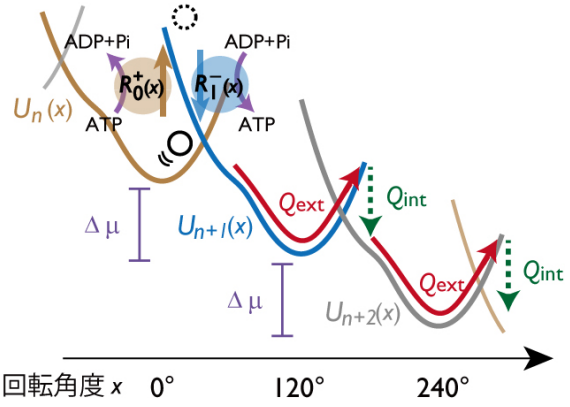

図 2：F_1 モーター回転の理論モデルのポテンシャル図。回転外部散逸がQ_{ext}(赤)、内部散逸がQ_{int}(緑)で示されている。

2010 年に鳥谷部らは、原田-佐々等式を用いて、F_1 のモーター回転における軸回転自由度のブラウン運動に伴う熱散逸を測定した[11]。そこで明らかになった衝撃的な事実は、ATP から供給された自由エネルギーが、すべてγ軸の回転自由度を通じて環境に散逸しており、F_1 の分子内部の散逸はゼロに近い、ということであった（図 1 下）。この F_1 の性質は、$\Delta\mu$ を固定して外部 ATP 濃度を変えることで F_1 の平均回転速度を変化させる実験においても、同じように観察された。

F_1 のγ軸モーター回転は、次のようにモデル化できる[12]。まず、3 回対称な分子に対応して 3 つの化学状態があると考えると、それぞれの状態がγ軸の回転自由度に力を及ぼす 120 度ずつずれた有効ポテンシャルを、図 2 のように描ける。有効ポテンシャルには、サブステップの構造や、観察用ビーズとγ軸の間の連結バネに関する情報も取り込まれている。回転自由度であるγ軸の角度方向をxとすると、これは有効ポテンシャル$U_n(x)$の中で overdamped なブラウン運動をする。$U_n(x)$の概形は、独立な実験により測定されている[13]ほか、サブステップにかかる時間が粒子の拡散の時間スケールに比べて短いという実験的に妥当な仮定の下で、理論的に導出することもできる[12]。またこのポテンシャルは、ATP 1 分子の加水分解に対応する化学反応の進行（あるいは後退）に対応して、遷移レート$R_n^+(x)$（あるいは$R_n^-(x)$）に従って$U_n(x) \to U_{n+1}(x)$（あるいは$U_n(x) \to U_{n-1}(x)$）と確率的に切り替わる。図 2 では、ATP が 1 個消費されてポテンシャルが切り替わるごとに、ATP の加水分解エネルギー$\Delta\mu$に相当する分だけポテンシャルが低くなるように描かれている。これらのブラウン運動とポテンシャルの切り替えダイナミクスの組み合わせにより、F_1 のゆらぐステップ運動が記述できる。

順逆反応の遷移レート$R_n^+(x)$と$R_n^-(x)$は、切り替えダイナミクスの軸角度依存性、すなわち、F_1 内部の化学反応がγ軸の位置にどう依存するかという、酵素学でいうアロステリック機構の設計原理を反映しており、実験によって決定されるべきものである。ゆらぎの熱力学の一般論から言えることは、ATP 加水分解反応を考慮に入れた遷移レートの局所詳細つり合い

$$\frac{R_n^+(x)}{R_{n+1}^-(x)} = \exp\left\{-\frac{U_{n+1}(x)-U_n(x)+\Delta\mu}{k_B T}\right\} \qquad (1)$$

を満たすことだけである。言い換えると、$R_n^+(x)$の関数形をどのようにとっても、式(1)を満たすように$R_{n+1}^-(x)$をとりさえすれば、モデルは熱力学と矛盾はしない。すなわち、アロステリック機構の詳細に制約を与える理論は、ゆらぎの熱力学の一般論の中にはないということになる。

実験データに戻ると、原田-佐々等式により測定される回転外部散逸は、ポテンシャル中をブラウン運動するときのエネルギー変化、すなわち図 2 のQ_{ext}に対応する。Q_{ext}がほぼ$\Delta\mu$と等しいという実験結果（図 3 シンボル）は、図 2 において、軸の回転角度がちょうど有効ポテンシャルが重なり合う点に来た際に、化学状態がタイミングよく切り替わっていることを意味する[13]。これは、F_1 のアロステリック機構が、ゆらぎの熱力学による制約から自由であるにも関わらず、精密に調整されていることを示唆している。

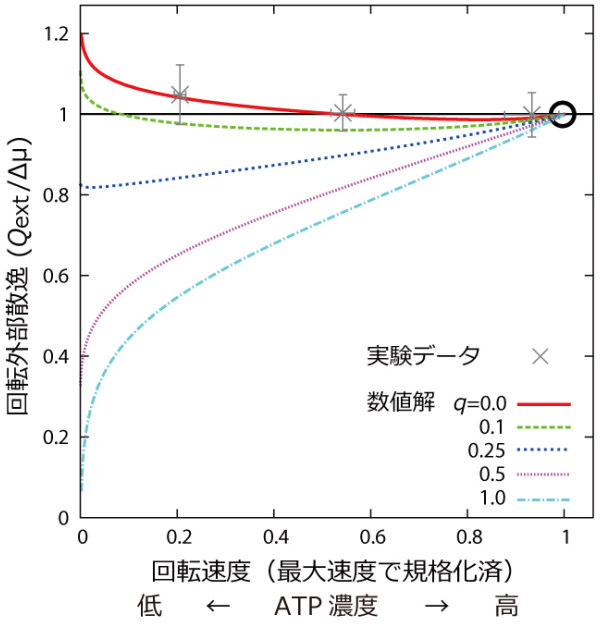

図 3：F_1 モーターの回転外部散逸の回転速度（ATP 濃度）依存性の実験データ[11]と理論モデルの数値解の比較。理論モデルのパラメータqについては式(2)参照。

非対称アロステリックモデル

われわれは、このように一見不思議なほど良く調整されている F_1 の化学反応ルールを、簡単な設計原理で説明する可能性を探った。様々な遷移レートの関数形について熱散逸を表示したものが図 3 である。式(1)を満たす$R_n^+(x)$や$R_n^-(x)$を多様に与えるために、パラメータqを以下のように導入した[12]。

$$R_n^+(x) \propto \exp\{-q\,[U_{n+1}(x) - U_n(x) + \Delta\mu]/k_B T\}$$
$$R_{n+1}^-(x) \propto \exp\{(1-q)\,[U_{n+1}(x) - U_n(x) + \Delta\mu]/k_B T\} \qquad (2)$$

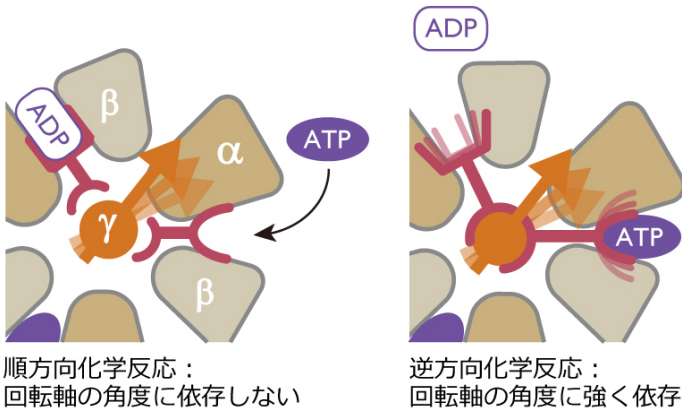

図 4：非対称アロステリックモデル。F_1を回転軸方向から表した図。

ここでqは、順方向と逆方向の遷移レートがxにどのように依存するかについての、非対称性を表している。たとえば、両方向の遷移が対称的にxに依存する場合が、$q = 1/2$である。このqが$1/2$付近やそれ以上に大きいモデルにおいて、特に回転速度が遅い状況で外部散逸の数値的に得られた結果は、実験データと合わない（図3）。このことから、ランダムな設計では外部散逸に関する実験データを再現できないことがわかる。

一方で、qが 0 に近いところでは、数値解とF_1の実験データとがよく合っている。このようにqが小さい状況は、図 4 のような非対称な設計を表している。まずF_1の ATP 加水分解反応、すなわち ATP の結合と ADP の解離に始まる反応において、遷移レートがγ軸の角度にまったく依存しない。一方で、逆反応、すなわち ADP の結合と ATP の解離に対応するレートは、γ軸の角度に強く依存する。このように遷移レートの細部に非対称性を持ったモデルを、われわれは「非対称アロステリックモデル」と呼んでいる。

では、このようなモデルがなぜ内部散逸の小さいモーターを生むのか。われわれは、モーター速度が大きい極限と小さい極限について、漸近的な解析を行った[12]。特にqが小さいモデルにおいては、十分小さい化学反応レートさえ存在すれば、上述の有効ポテンシャルの交点以外の点にxがある際に、ポテンシャルの切り替えが抑制される機構が働き、結果的に内部散逸の少ない経路が選択されることが示せる。理論的な焦点としては、このモデルにおいて、漸近的な解析の許される二つの時間スケールの間に、大きな隔たりがあることが挙げられる。実験で観察されている有限速度のF_1モーター回転は、まさにこの中間的時間スケールにある。一見単純なポテンシャル切り替えのモデルであるが、2 つの時間スケールの存在と、その間の広い中間的な領域の存在はこれまで認識されておらず、その熱散逸の振る舞いの理解はまだ十分に進んでいない。

この非対称な設計がF_1に採用されているか否かは、将来的には実験で直接確かめることができる。まず、ATP の結合レートのγ軸角度依存性と$R_n^+(x)$とを比較すると、過去の実験結果[15,16]と非対称モデルは整合している。一方で、逆反応、すなわち ADP の結合レートなどの性質を詳しく検証するには、外部トルクにより ATP 合成方向に回転させた際のF_1の挙動を詳しく調べる必要がある[17]。

この場合に示唆的なデータは、F_1モーターの回転速度の外部トルクへの応答である。外部トルクとモーター回転の駆動力がつり合う点を原点とした、回転速度のトルク依存性曲線の対称性に着目すると、ATP 濃度が低い設定において、大きく非対称になることがF_1の実験で見いだされている[10]（図 5 赤丸）。この非自明な性質は、非対称モデルにトルクを加えた際の数値解で定性的によく再現できる（図 5 赤線）。これは、非対称なアロステリック機構が、ATP を分解しながら回転する方向よりも、ATP を合成しながら回転する方向の方に外部トルク応答が大きいという、非対称なマシンを作りだすことを意味している。こうし

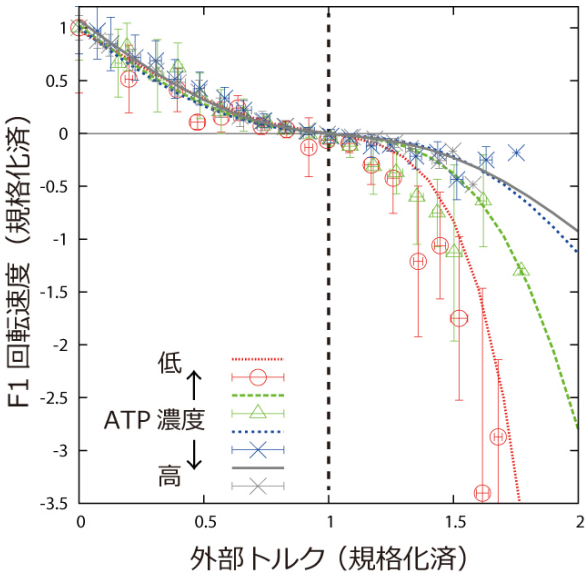

図 5：F_1回転速度の外部トルク依存性。点は実験データ[10]、線は非対称アロステリックモデルの数値解を表す。外部トルクはモーター回転駆動力とつり合うトルクで、回転速度はトルクがないときの回転速度で規格化してある。低濃度の ATP 条件下で、曲線が非対称になっていることがわかる。

てわれわれのモデルから、F_1 の生体内での ATP 合成系としての役割と合致した描像が得られたことになる。

まとめと展望

われわれの研究では、F_1 のモーター回転時における熱散逸の実験データに触発されて、アロステリック機構に非対称性があることを予想した。さて、このように非対称なモデルが F_1 に採用されているとして、それはなにを目的とした設計原理なのであろうか。

本モデルから、F_1 が ATP 合成方向へ回転する場合に、特に低 ATP・ADP 濃度環境下において、内部散逸が大きくなることが予測される。真核細胞のミトコンドリア内の ATP・ADP 濃度は十分に高いとみなせるため、このように大きい内部散逸が生体内の F_1 の合成方向回転で実現されているとは考えにくい。しかしながら、F_1 の進化的発生が ATP 低濃度な環境で起きたと想定すれば、そのような状況で合成酵素としてよりもモーターとしての内部散逸の方が小さいことを示すわれわれのモデルは、F_1 が本来モーターとして設計され利用されていたのではないか、という示唆を与える。

一方で、ゆらぎの熱力学の一般論からは、内部散逸が大きい状況にデメリットがあるのかどうかについて、答えることができない。もし内部散逸の大きさが F_1 にとって問題でなければ、図 5 に示されるような、外部トルク依存性の大きな非対称性の方が重要である可能性もある。そうであれば、F_1 のモーター回転における低内部散逸は、非対称性な設計に随伴した現象ということになる。

これらの設計原理にまつわる問いは、他の分子モーターの設計と F_1 のそれを比べることにより、解決されていくかもしれない。たとえば、近年構造の決定された V-ATPase は、F 型の ATPase とよく似た構造を持つ分子マシンでありながら、その主な機能はポンプの一部としてのモーターである[17]。V モーターと F_1 モーターの熱散逸特性や回転速度の外部トルク依存性を比較することにより、F_1 の設計が ATP 合成に特化したものなのか、回転モーターに共通の性質なのかがわかる。こうした現象論的なモデルの階層での比較により、多種多様な分子モーターのそれぞれが「なにを考えているのか」が順々に明らかにされていくことが期待される。

[1] L. Szilard, Z. fur Phys., 53, 840 (1929).
[2] J. Howard, “Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskelton”, Sinauer (2001).
[3] K. Sekimoto, “Stochastic Energetics”, Springer (2010).
[4] D. J. Evans, E. G. D. Cohen, and G. P. Morriss, Phys. Rev. Lett. 71, 2401 (1993).
[5] C. Jarzynki, Phys. Rev. Lett., 78, 2690 (1997).
[6] U. Seifert, Rep. Prog. Phys., 75, 126001 (2012).
[7] J. M. R. Parrondo, J. M. Horowitz, and T. Sagawa, Nat. Phys. 11, 131 (2015).
[8] T. Harada and S.-i. Sasa, Phys. Rev. Lett., 95, 130602 (2005).
[9] H. Noji et al., Nature, 386, 299 (1997).
[10] S. Toyabe et al., Proc. Natl. Acad. Sci., 108, 17951 (2011).
[11] S. Toyabe et al., Phys. Rev. Lett., 104, 198103 (2010).
[12] K. Kawaguchi, S.-i. Sasa, and T. Sagawa, Biophys. J., 106, 2450 (2014).
[13] S. Toyabe, H. Ueno, and E. Muneyuki, Europhys. Lett., 97, 40004 (2012).
[14] R. Watanabe et al., Nat. Chem. Biol, 8, 86 (2012).
[15] K. Adachi et al., Nat Commun., 3, 1022 (2012).
[16] S. Toyabe and E. Muneyuki, New J. Phys., 17, 015008 (2015).
[17] H. Ueno et al., J. Biol. Chem., 31212, 289 (2014).

川口　喬吾（ハーバード・メディカルスクール・研究員）
佐々　真一（京都大学・理学研究科・教授）
沙川　貴大（東京大学・工学系研究科・准教授）

研究会報告

第 24 回「非線形反応と協同現象」研究会

A03 班　多羅間充輔

去る 2014 年 12 月 6 日、東京は北千住駅前に位置する東京電機大学において、第 24 回「非線形反応と協同現象」研究会が本新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」との共催で開催された。この研究会は、もともと物理学、数学、化学、生物学などの各分野における非線形科学に携わる研究者が、それぞれのバックグラウンドとする分野の垣根を越えて手弁当で行なってきた研究会で、今回で 24 回を数えることとなった。研究会の雰囲気は、ガチガチのものとは両極端の、いわば非線形現象の科学に魅せられた愛好家たちによる「同好会」（森義人先生）といったものであり、そこでは名誉教授から高校生までが和気あいあいと研究発表、議論を楽しんだ。

今回の研究会は、4 件の招待講演と 55 件のポスター発表により構成され、84 名の参加者を迎えた。世話人代表の向山義治氏（東京電機大学）の開会の挨拶に続き、中西周次氏（東京大学）が「シアノバクテリア概日リズムの電気化学制御と計測」というタイトルで講演された。シアノバクテリアを主な例に、生体親和性をもつ細胞膜透過型電子伝達物質を用いて電気化学を駆使することによりサーカディアンクロックのある部分における電子密度を外から調整することで擬似的に昼夜を作り出すことで、概日リズムを制御し、あるいはその逆のプロセスにより計測するといったことが実験的に可能となった。この技術では従来のような遺伝子操作を必要としないため、ヒトの細胞にも応用できと期待される。続いて深見一弘氏（京都大学）の「ナノポーラス電極の電気化学におけるイオンの協同的振る舞い」では、ナノポーラス構造をもつシリコンの孔壁への白金（錯）イオンの析出の仕方が、シリコン表面の親水性あるいは共存イオンの影響により、ある閾値を超えると劇的に変化するという発見およびその電極への応用に向けた研究が紹介された。この転移は spinodal 分解と関係があるのではないかという点でも大変興味深い。

休憩を挟んだのち、本新学術領域のメンバーでもある澤井哲氏（東京大学）が「整流作用と細胞集合の協同性」というタイトルで、細胞性粘菌の走化性に関する研究を紹介された。マイクロチャンバーを用いて精確に制御された細胞誘因物質の cAMP の波に対して、粘菌細胞の内部の状態がどのように変化し、その結果細胞自身がどのように応答するのかを、波の時空間的な構造を変えて実験で調べた。生き物を物理学的な視点から捉えようとするときに、本来の性質を保ったままでよく制御された実験系を構築することは困難であるため、その意味でも注目に値する研究であると思われる。最後の講演は、松本章吾氏（東京電機大学）による「放電現象に見られる不連続転移」であった。雷などの放電現象は電位差がある閾値を超えると突然よく通電するようになるという点を、相転移の観点から研究しようという試みである。驚くことにこのような視点からの研究はこれまでになかったようであり、その意味でもよい着眼である。空間のイオン化（あるいはプラズマ化）された状態に、フレッシュな状態とエイジングした状態との２状態を考えることで、転移が１次的な挙動を示すが、その区別をしない場合には不連続なギャップが解消され連続転移になるという面白い結果が紹介された。

その後、ポスター発表へと続いた。高校生をはじめ多くの参加者がポスターを出していた。研究会の性格上、さまざまな分野の視点からの研究があり、普段あまり触れる機会のない他の分野の考え方などにも触れることができ非常に刺激的である。この刺激が、非線形現象を中心に様々な分野から人が集まるこの研究会、あるいはこの非線形科学の分野そのものの特色であろう。ポスター発表ののちにあった懇親会ではポスター賞の発表があり、名和愛利香氏（同志社大学）にポスター賞が、小谷野由紀氏（千葉大学）に藤枝賞が授与された。

非常にアクセスの便利な会場の効果もあってか、多くの学生が参加し、今回も盛況のうちに幕を閉じたのである。

多羅間　充輔（京都大学・福井謙一記念研究センター・研究員）

領域横断研究会「細胞力学と細胞運動の協奏」

A03 班　義永那津人

2014 年 12 月 19 日から 20 日に九州大学理学部にて領域横断研究会「細胞力学と細胞運動の協奏」が開催されました。本研究会は、細胞力学と細胞運動の研究の連携から新しい視点がみえてくることを期待して企画されたということで、最新の研究成果を詳しい研究の背景を含めて聞くことができました。口頭発表件数 7 件、ポスター発表件数 13 件の比較的ゆったりとしたプログラムで、講演時間も一人一時間と長めに設定されており、参加人数も 32 名と深く議論するのにちょうど良いサイズであったためか、講演中もたくさんの質問や議論が飛び交う活気のある研究会だったと思います。通常の研究会ではなかなかお目にかかれない点として、ポスターセッションの合間に水野研究室のマイクロレオロジー測定装置の実演がありました。論文や研究会で、どのようなことを測定しているのかということは見聞きした人も多いかと思いますが、装置や測定の様子を実際に見てみるのは、実験系理論系問わず非常に参考になるものだったと思います。講演ではたくさんのデータを次から次へと示していましたが、やはり実験できれいなデータを取るまでには様々な試行錯誤が必要なのだという当たり前のことを感じながら、やはりそれでも実験したくなるような理論が必要であることを痛感しました。

最後に、折原先生が、やはり生物をゆらぎの観点で普遍的に理解するのは難しい、けどたくさんの成果が出てきているので進んでいくしかない、というようなことを話されました。私も含めて多くの人が同様のことを感じたかもしれません。それでも講演の合間に議論を交えた中では、細胞運動を比較的シンプルに理解できるかもしれないアイデアのようなものが芽生えてきたような気もします。

最後になりましたが、本研究会を企画された折原先生、今井先生、また、会場、装置説明会、そして懇親会まで手配して下さった水野先生及び研究室のメンバーに、ここに感謝いたします。

図 1:研究会の風景。

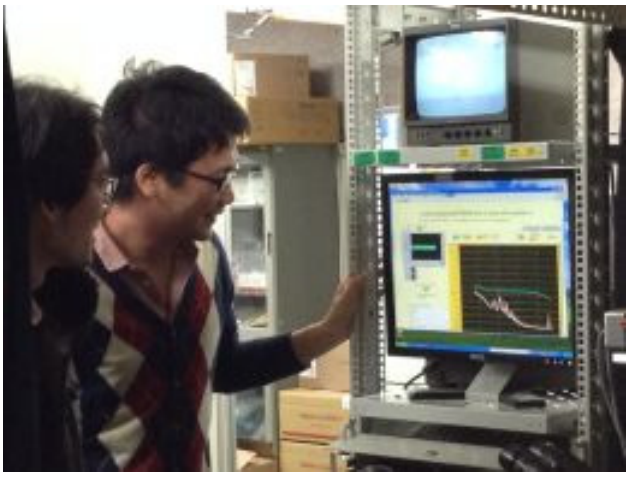

図 2:装置説明会の様子。

プログラム
「細胞のレオロジーの普遍性」好村滋行
「フィードバックマイクロレオロジーを用いた細胞力学の測定」水野大介
「プローブ顕微鏡による生細胞の時空間ゆらぎの測定」岡嶋孝治
「牽引力顕微鏡とマイクロレオロジー手法の細胞計測への応用」佐野雅己
「細胞ー基質間相互作用と自発的シグナリングの起源について」澤井哲
「内因性細胞顆粒の粒子追跡法(PIV)による細胞運動計測の試み」中垣俊之
「魚類表皮細胞ケラトサイトの細胞遊走とメカノセンシング」岩楯好昭

義永　那津人（東北大学・原子分子材料科学高等研究機構（WPI-AIMR）・助教）

研究会「アクティブ・マター研究の過去・現在・未来」

A03 班　多羅間充輔

去る３月１４日、１５日の両日、東北大学・片平キャンパス・AIMR に於いて、領域横断の研究会「アクティブ・マター研究の過去・現在・未来」が開催された。本研究会は自律的に運動するものであるアクティブマターの研究に興味のある研究者で集まり、これまでの研究や現在の進捗状況などの情報を共有する目的で櫻井、今井、義永の各氏が中心となり計画され、合計 21 名が参加した。

研究会はまず基本的な理解としてアクティブマターの自律運動には並進運動に限らず広く自転運動や変形、分裂、融合などのプロセスも含まれるということが強調されて始まった。太田氏（東京大学）による発表「細胞の這走モデル」では泳動と這走というふたつの運動を明確に分類し、これらの性質がこれまで研究されて来た変形を考慮した現象論的なモデルの枠組みでどのように区別されるのかが議論されたのち、這走に関するモデルについて詳細に説明された。次に、市川氏（京都大学）による発表「再構成アメーバ液滴の自律変形と運動」では、アメーバ運動にはアクチンの重合による運動とブレッビングに誘起される運動とがあるという分類が紹介され、実際の細胞から抽出されたアクチン・ミオシン系の液滴が示す運動が時間とともに形の振動からくびれに変化するという興味深い実験結果が示された。坂上・設楽両氏（九州大学）による発表「電気粘性効果とアクティブマター」では、２成分混合流体の示す電気粘性効果についての研究が紹介されたのち、アクティブマターとの接点が議論された。初日最後は佐野氏（東京大学）により「自己駆動 Janus 粒子の相互作用と運動パターン」というタイトルの発表が行なわれ、アクティブマターの分野で最も良く研究されている実験系のひとつである Janus コロイドの研究についてこれまでの研究が簡単に整理されたのち、粒子間の相互作用をうまく制御できるようになりつつあるという最近の進展が紹介され、これまでの理論研究による予測が実際の実験で確かめられる可能性などが示唆された。

研究会２日目は、永井氏（北陸先端大学）による「回転速度が持続する自走粒子の集団運動」についての発表で始まり、有限の長さゆえに回転が持続する自己駆動粒子の集団的振る舞いについて実験、シミュレーション双方から議論がされた。続いて、豊田氏（東京大学）による「油滴の自己駆動と化学反応の結合」の発表では、様々な化学の知識を用いることで非常によく制御された油滴の自発運動の実験系が実現できているという非常に刺激的な研究の報告があった。お昼休みを挟み、午後は理論研究の発表が続いた。多羅間氏（京都大学）は、形が動的に変化するときのアクティブマターの運動について回転や振動運動に着目した「アクティブマターにおける変形と運動」という発表を行なった。内田氏（東北大学）は「流体効果によるアクティブ振動子の同期現象と集団運動」というタイトルで、流体相互作用を考慮した繊毛などの自発回転子の集団的な振る舞いに関する研究に加え、最近の進展についても報告された。研究会最後は、義永氏（東北大学）が「自発運動する粒子の間の相互作用」というタイトルで、自発運動粒子の間に働く相互作用について連続場のモデルから調べる研究について発表された。

図 1: 2日目朝の研究会風景。

以上の９件の口頭発表に加え、９件のポスター発表が行なわれ、さらに休憩時間の個別の議論など非常に盛んな研究会となった。本研究会を通して、１粒子の運動についてもアクティブマターには様々な系がありそれぞれの現象がすでに非常に複雑で興味深いが、今後それらをどのような視点で包括して理解していくのかが重要になると思われた。またアクティブマターの多粒子系の理論研究にはこれまでほぼ平行して発展してきた点粒子のモデルと大きさを考慮した粒子のモデルとがあるが、今後それらの間の関係が明らかになれば理解がさらに深まるであろう。さらに１粒子の運動から多体系のダイナミクスをつなぐ研究も進んでおり、アクティブマターの研究の更なる発展が期待される。昨年末の九州大学での研究会「細胞力学と細胞運動の協奏」に引き続き今回の研究会に参加したが、今後の一つの方向としてこれらをつなぐ研究が考えられる。これは個人的にも興味のあるテーマであり、近い将来、新たな潮流に発展させることができると感じられた。

多羅間　充輔（京都大学・福井謙一記念研究センター・研究員）

Kyoto Winter School for Statistical Mechanics 参加報告

A01 班　西口大貴

Winter School の副題は、Frontiers of Statistical Mechanics: From Non-equilibrium Fluctuations to Active Matter でした。この副題の下に、関心の近い研究者 69 名（そのうちフランス・ドイツ・中国・インドなど海外から 34 名）が集い、２週間にわたって講義を受け、Active Matter もビックリの active な議論・交流をかわしました。修士・博士課程学生や PD などの若手参加者の中心でしたが、若手の間だけでなく、若手と講師陣の間でも積極的な交流が見られました。この報告では、普通の報告では面白くはないので、プログラムの詳細など web ページを見れば分かる情報ではなく、交流の active さを出来る限り伝えられるエピソードをいくつか紹介したいと思います。

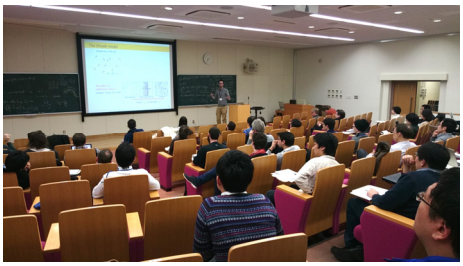

図 1：博士課程学生の A. Solon 氏による講義

“Winter School”＝「冬の学校」の名の通り、若手の活躍が各所で見られました。よく挙げられる「講義中の若手の活躍」というと、積極的に質問をしていただけのように思いますが、それだけではありません。もちろん、講義中の質疑も非常に活発であり、講義の時間が押してしまうことも多々ありました。しかし、特筆すべき点は、若手も講師を勤めた点です。講義は計 22 コマおこなわれましたが、そのうち３コマ分は博士課程学生と PD が担当し、参加者にとって非常に刺激的な講義となりました。

冬の学校前半では、交流を促すためにポスターセッションが開催されました。議論が白熱するあまり、用意されていたビールやお菓子にほとんど手をつけないまま、当初の 18:30 までの予定を超えて、20:00 過ぎまで続きました。今回、斬新だったこととして、ポスター優秀者の４名が、最後の２日間に開催された Focus Meeting での contributed talk に選ばれたということがあります。みごと選ばれた参加者は、急いで talk の準備をするという、非常に充実した週末を過ごしました。光栄にも選ばれた、とある参加者は、本国に解析結果をすべて置いてきてしまったために、改めてコードを書いて、手持ちの実験動画から解析し直していました。それでも、当日のプレゼンテーションは素晴らしいものであり、みんなを感心させました。

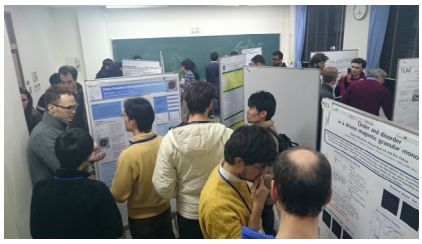

図 2：予定時間を超えて続くポスター発表

図 3：Closing のコメントをする筆者

Academic な面以外での交流も、非常に盛んでした。毎晩、メンバーを変えつつ、各々が夜の町に繰り出して親交を深めました。それでは飽き足らず、banquet が公式には計画されていなかったため、学生で self-organized banquet を計画・実行し、盛り上がりを見せました。Banquet 後には、日本人学生が引率してカラオケに繰り出し、学生・PD・教員が入り乱れて、日本文化に親しみました。

最後の concluding remarks では、年長の organizer が総括・展望を述べるという典型的なスタイルではなく、数人の学生がこの２週間を通して感じたこと、みんなに伝えたいことを言うという形式でおこなわれました。学生主体の School になるように、また、学生を表舞台に立たせるように、organizer の皆様が気遣ってくださっていることを、最後の最後まで感じる素晴らしい Winter School でした。

Winter School 終了後も、海外の研究者・学生・PD が各地の研究室を訪問・滞在し、共同研究や交流が続いています。我々の研究室にも、Winter School の講師・参加者が５人訪れ、議論する貴重な機会を得ました。Winter School で得た知見や強固な繋がりは、そう遠くない将来に、必ず実を結ぶに違いないと思っています。結ばせた実については、またどこかで皆さんにお披露目したいと思います。

西口　大貴（東京大学・理学系研究科・博士課程２年）

第 2 回公開シンポジウムに参加して

A03 班　豊田太郎

初夏を感じさせる爽やかな陽気の中、本領域の公開シンポジウムに参加させていただきました。普段、私は所属する教養学部前期課程や教養学部統合自然科学科の学部生に対し、「いろいろな研究分野を勉強することは、それを深く理解するだけでなく、自分の得意な分野（考え方）と結びつけて俯瞰し、豊かな自然感覚・物質観を養うことに役立つ」と偉そうに言っている手前、このような公開シンポジウムで講演を拝聴するときは、私自身が学生時代に戻って楽しんで勉強するよう心がけています。熱意ある研究者の先生方がお話しされた内容を私は十分に理解できていないかもしれませんが、粒子が集団になると、粒子ごとの個性のばらつきと集団の性質との間には本当に興味深い法則が成り立つという熱い先生方のメッセージは、分子集合体のダイナミクス創成の研究を行っている私の背中を力強く押してくれるものでした。特に、澤井哲先生、山本量一先生のセッションでは、生物や集団に見出される波の性質を物理学として解析することの意義について、実験と理論の立場から深い議論がなされていて、大変印象的でした。

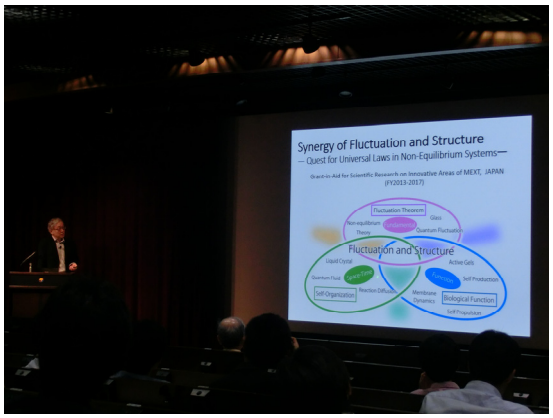

写真 1：佐野先生によるオープニングの様子。

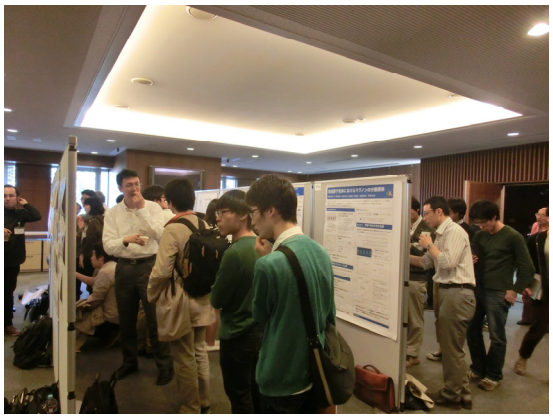

写真 2：ポスター会場の様子。ポスター発表者とそれを聞きに来ている方々の熱気が溢れていました。

本公開シンポジウムでは、8 名の先生方の口頭発表のみならず、ポスター発表も 46 件あり、134 名という大勢の参加者には大学院生や若手の研究者が多く、熱気の溢れるシンポジウムでした（写真 1, 2）。私にとってこのようなシンポジウムに参加する体験は、言語が異なる音楽のフェスティバルに参加した時のそれによく似ています。そのようなとき私は、それぞれの言語をよく知れば、表現されているものをより深く理解できるだろうにと悔やむことがしばしばあります。外国語習得には、その国へ留学する他、耳から慣れよという音声教材も有効かもしれません。最近、https://archive.org/stream/atomsjean00perrrich#page/114/mode/2up のようなウェブサイトで、Perrin のブラウン運動に関する 1916 年の文献が音声情報としても公開されていることを知りました。各研究分野の教科書や専門書の音声教材も、そうした点で効果があるかもしれませんが、やはり、本シンポジウムのような講演会をよくよく拝聴するのが最も良いように思います。さらには、研究分野間を「留学」するのが最も効果的と言えます。文面のみでは感じとりにくい情熱や想いは無形のもので、その言語を話す方々とその時空を共有することでしか、学ぶことができないためです。*ゆらぎと構造の協奏*という共通のキーワードをもとに、私自身も関連する物理学や生物学の研究分野に飛び込んでゆきたいと思うと同時に、そうした関連研究分野の方々の化学への飛び込みも歓迎しています。そうした貴重な機会を与えて頂ける本領域研究は、私にとって大変有り難いものであり、ここに参加させて頂いていることは、感謝の念に堪えません。

豊田　太郎（東京大学・大学院総合文化研究科・広域科学専攻相関基礎科学系・准教授）

今後の予定

◎新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」主催

○International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015
2015 年 8 月 20 日（木）～23 日（日）
京都大学芝蘭会館 稲盛ホール

○International Workshop on Challenge to Synthesizing Life
2015 年 8 月 25 日（水）～26 日（木）
箱根ホテル　花月園

編集委員よりお願い

本ニュースレターでは、新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏：非平衡系おける普遍法則の確立」による研究成果をできるだけ早く発信していきたいと考えております。自薦、他薦問わず重要な研究成果、あるいは関係する研究会報告などありましたら、編集委員までお寄せください。

ニュースレター編集委員　竹内一将（東京工業大学）takeuchi@phys.titech.ac.jp
北畑裕之（千葉大学）kitahata@chiba-u.jp

Copyright© 2013-2018 ゆらぎと構造　All Rights Reserved.