

生物個体はエネルギーを変換して動き、その一方で他個体と相互作用をして集団の運動、構造を形成している。このような動態はアクティブマターという分野として、近年盛んに統計力学的な研究がなされている。ただし、これまでの研究では各要素は点、直線などのように単純化されているものが主流である。その一方で生命現象では、各要素の形が単純でなく、また集団的運動との関係で変形する場合も多い。そこで形と集団運動が相互に影響するシステムの統計力学的理解が今後の問題として浮上している。野口裕信氏の博士論文は、この方向の理解を目指して、複雑な形状をした構成粒子が集団として生み出す現象のシミュレーションと統計力学的解析を行った結果が5章66ページにわたって述べられている。具体的には細胞内バイオフィラメントと3次元細胞組織の2つの問題が扱われる。

このような問題への導入が第1章で行われた後、第2章では、バイオフィラメントの集団動態が扱われる。この問題に関してはこれまでに直線状のバイオフィラメントが相互作用した系が統計力学的に研究されてきた。そこではフィラメント同士が交差すると分子モーターの働きで能動的に互いを動かす相互作用をとりいれ、フィラメント集団の運動が調べられてきた。一方で、細胞内フィラメントはしばしば複雑な複合体（アクティンフィラメント複合体 AFC）を形成している。そこで野口氏は AFC として2本がV字型に結合した構成物を取りあげ、上記の相互作用を導入し、その集団動態を調べている。ここでその集団動態を決める重要なパラメタは AFC の密度と V 字の角度である。この2つのパラメタの値を変えていくと、以下の相が見出された。(1) 強磁性相 (2) 局所的ネマティック相 (3) 無秩序相そして (4) 動的スメクティック相である。これらの相は運動・配向秩序・AFC の重なりを表す秩序パラメタを導入して解析された。特に興味深いのが本モデルで始めて見出された動的スメクティック相である。この相では多くの AFC は配向したままラメラ構造を形成し、それを保ったまま一方向へ移動する。更に、それを補償するために、少数の AFC が多数のラメラ構造とは異なる方向へ高速に移動していることが明らかにされた。

次に第3-4章では3次元細胞組織の集団動態と配置換え転移が扱われる。

組織では細胞状態に応じて細胞間配置換えの頻度が大きく増加する「配置換え転移」の存在が知られていた。近年、2次元の組織に関して、その転移を単純化した統計力学モデルが Manning らにより導入され、その特徴が解析された。しかし、3次元的に配置された細胞から成る組織の配置換え転移については未解明であった。本博士論文の後半では、この問題の統計力学モデルのシミュレーション結果が与えられる。まず細胞組織を、駆動力を持ち、凸多面体で表される細胞の集団でモデル化する。ここで細胞の形状はボロノイ図から求められ、そこから求めた形状エネルギー汎関数が最適表面積値に向かう力と自己駆動力に従う細胞集団の確率的ダイナミクスが与えられる。そこで、最適表面積値と駆動力の値

を変化させて集団運動を調べ配置換え転移が見出された。この転移点で細胞の運動は正常拡散からより遅い異常拡散へと変化する。更に、この転移点近傍では細胞の運動能が空間的に不均一に存在している状態が観察され、ガラスにおけるジャミング転移との類似性が示唆される。

一方で、転移近傍で細胞がどのような形状をなすかについては、境界面積を最小化するケルビン問題との関連が議論される。ここで面積最小化の場合では、ケルビン 14 面体(切頂 8 面体)が最適形状と考えられるが、いまのモデルの結果では転移点で最適表面積参照値の臨界値はケルビン 14 面体の参照値よりやや大きく、また面積の分布も異なることが示された。

第 4 章では配置換えエネルギーを転移点で面積値からのずれで表したスケーリング則が解析される。結果は 2 つの臨界指数を用いてフィッティングされ、これらの臨界指数の値は 2 次元系での値と (誤差の範囲で) 一致している。これはジャミング転移が 2 次元、3 次元で同一の臨界指数を持つことと整合的である。

第 5 章では全体のまとめと今後の考察がなされている。

以上、野口裕信氏の論文では、V 字型のアクティンフィラメント複合体および 3 次元凸多面体細胞の集団運動のシミュレーション統計力学的解析が行われ、前者では動的スメクティック相という新しい発見がなされ、後者では 3 次元での集団運動の転移のジャミング転移との類似性更に転移点での細胞形状のケルビン多面体からのずれ、という興味深い結果が報告されている。後者については今後、大規模計算による、転移のさらなる精密な解析も待たれるが、現時点では重要なステップを与えた結果と考えられる。また、本論文の結果の生物学的意義は、今後議論すべき課題であるが、そうした可能性の示唆も含めて「複雑な形状を持つ要素の集団運動としての生命現象の理論モデル」として、分野への一定の寄与があるとみなせる。

なお、本論文のうち第 2 章の内容はすでに Phys. Rev. E 誌に出版されている。この部分は石原秀至氏との共同研究であるが、論文の提出者が主体となってモデル化、シミュレーション、理論解析を行ったものである。第 3, 4 章の内容は野口氏単著の論文として現在投稿準備中である。以上、すべてにわたって論文提出者の寄与が大であると判断する。

したがって本審査委員会は博士 (学術) の学位を授与するにふさわしいものと認定する。