

本論文では、生物と無生物それぞれの運動軌跡を対象として、同じ実験手法と解析法を適用して比較することで、生物の運動の自律性について考察を試みたものである。生物は代謝・恒常性・栄養分の取り込み（摂食）・自己複製・増殖などの特性を備えており、これらは生物と周囲の環境との相互作用で成り立つものである。それを支えている生物の性質として運動や行動がある（主に細菌・原生生物・粘菌・動物など）。一般に生物の運動や行動は環境からの履歴情報に依存しており、ブラウン運動ではない。履歴を持った運動こそ生物にとって重要であり、これにより生物の運動は自律的(autonomous)であると表現される。生物の自己複製と繁殖の帰結として競争と淘汰が生じることを考慮すると、適応的な運動にこそ生物の自律性 (autonomy) が宿るといえる。一方で、無生物系にも、油滴やミセル、コアセルベート等のように環境との相互作用による履歴情報をもった複雑な動きを示すものがある。生物を無生物と比較することで、生物の持つ自律性の本質を問う試みである。

生物は変異系統が多く揃っているキイロショウジョウバエ(*Drosophila melanogaster*)を材料にし、無生物系としては水溶液中の無水オレイン酸の油滴を対象とした。生物の運動軌跡にはその生物の自律的な運動メカニズムや外部環境の影響を受けての履歴情報が反映されているはずで、この軌跡を解析していくことで、生物の生理状態や適応戦略を明らかにすることが可能と申請者は着想した。これは無生物の運動についても同様で、運動軌跡からその運動メカニズムや環境との相互作用を推測することができる。しかし、定量的に運動軌跡を解析する技法は確立しておらず、軌跡を定量的に解析する一般的な手法の開発も同時に行っている。

1章の序論に続いて、2章として動画解析システムを独自に開発している。これは統計言語Rを用いており、1個体の追跡だけでなく、カラーマーキングによる複数個体の同時追跡、色情報の統計処理などが可能な汎用性の高いシステムとなっている。

この動画解析システムを用いて、3章ではキイロショウジョウバエの野生系統 (Canton-S) ならびに短期記憶障害系統 (rutabaga 系統) による餌探索歩行の運動軌跡の画像を取得した。ここから得られる時間ステップごとの速度と角度の時系列データについて局所定常自己回帰分析 (AR モデル) を適用することで、アクティブに動き回るモードと、ごく限られた領域を比較的低速度で運動するモードの、2つが抽出できた。後者のモードには、探索目標 (砂糖水の水滴) に遭遇した直後に見られる局所集中型探索と、自発的に運動を抑制している状態の両方が含まれる。また、自己相関のリカレンスプロットも同様の結果を示し、これら2つの運動モードは、大域探査運動は目立った構造がなくノイズが多いが、局所探査運動はカオス構造を持つ特徴が明らかになった。次に、運動要素を分類するための自己組織化マップ (SOM) の解析により複数の運動要素が検出され、要素間の遷移確率分布をみると停止/抑制状態に留まる状態から直線運動へと切り替えていく指向性が認められた。この切り替えは適応的である可能性が示唆される。

そこで、運動軌跡の適応性を調べるために時系列データの go/stop 解析を行っている。これは、

環境から情報が得られない状況での最適採餌行動とされる Lévy walk と、乱雑な運動の帰無モデルである random walk とで、当てはまりの良いモデルを選択する解析法である。Akaike weight の結果がちょうど中間の運動であることが分かった。これは、一定方向運動をある程度持続することで Lévy walk して採餌効率を高める指向性と、現実には有限の記憶力と運動持続能力しか持てない身体性の制約による混合状態と見なしている。実際に、記憶力がより希薄と考えられる変異系統では、一定報告運動の継続時間が短い傾向があり、(Lévy 係数がより高い)、通過しない歩行軌跡の「穴」が表れたのは、同じ方向への緩い角度を継続した結果として生じたと考えられる。その具体的な生理メカニズムはまだ明らかではないが、記憶力が不完全である身体性の影響の解析は今後の興味深い大きなテーマとなる可能性が高く、この点の発見は評価が高い。

第4章では、オレイン酸アルカリ溶液中で複雑な運動を示す無水オレイン酸の油滴の運動を対象とした。この油滴系は、界面での化学反応に起因する小規模な対流が自発的に対称性を破って成長した大規模な対流によって駆動されることが先行論文で報告されている。第2章で開発した装置を用いて運動軌跡を記録・分析したところ、油滴サイズに依存した軌跡の多様性が確認された。小さいサイズだと異常拡散、中程度だと一定方向運動、大きくなると不安定な振動運動と、複数の運動様式が確認できた。さらに、SOM を用いた分類を行い、振動(fluctuating)、円運動(circular)、一定方向の前進(directional)、小さな振動(vibrating) という4つの運動モードが特定された。サイズに依存して要素間の遷移確率は大きく異なっており、特に興味があるのは中程度のサイズである。初期には一定方向への前進を主に示し、時間が経つにつれて円運動から振動へと移っていく。さらに本系が協同現象を示すことも確認できた。具体的には、対流が比較的安定している小～中サイズの油滴どうしで、ある油滴の運動モードがもう一方の油滴の運動モードを引き込み、お互いの運動を強めあう傾向である。この現象は新発見であり、この協同運動を解析した点は大いに評価される。

第5章は総合考察であり、生物と無生物の運動軌跡を統一して解析する共通の解析法を確立したことが述べられている。生物には環境からの履歴情報を持つ個体に対して自然選択がかかることで自律的な進化的適応が備わってきたが、無生物系は環境からの履歴情報に依存して複雑な運動を示したとしても、そこには自然選択による進化的適応は見られない。それでも、環境の履歴情報に依存して複雑な運動を示す系を解析し、生物系と無生物系とを比較した申請者の新しいアプローチは、生物学者も物理学者も化学者も魅了させるものである。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。