

論文要旨

食物連鎖、天体形成、食感設計の結合写像格子

—複雑な系の振る舞いをシンプルに再現するモデル構成手法を通して、難解な分野横断的テーマに迫る—

野澤恵理花

これまで、様々な分野において、カオスやフラクタルなど、非線形科学の手法を用いた応用研究が行われてきた。非線形科学の手法を用いると、一見異なって見える対象を統一的に取り扱うことができるため、それらに共通した性質（対象の示すカオス的、フラクタル的な振る舞いなど）を見出しやすい。そのような性質が見つかれば、その性質を介して、対象を理解するための新たな切り口を得ることができる。本論文では、非線形科学の手法である結合写像格子を用いて、複雑な系の振る舞いを再現するシンプルな素過程を構成することで、難解な分野横断的テーマとして知られる、食物連鎖（生物・物理分野）、天体形成（宇宙・物性分野）、食感設計（生物・化学・物理分野）の系に迫る。

CMLシミュレーションでは、一連なりのシンプルな手続きを構成することで、対象となる系の振る舞いを模擬する。手続きの構成を繰り返し、CMLが系の振る舞いを再現したとき、その振る舞いに欠かせない（それ故、本質的な）手続きが得られる。このようにして導かれる現象再現性の高さ、すなわち、系の示す複雑な振る舞いを手続きの構成へと還元していくアプローチ（手続き還元的アプローチ）こそ、多くの分野の難解な系にCMLが適用されてきた理由である。本論文では、特に、CMLのラグランジュ手続きに着目し、系の振る舞いにおいて、なんらかの流れが本質的な役割を担う現象を取り上げる。例えば、食物連鎖の系では、種内競争や被食捕食による栄養の流れ、天体形成の系では、重力によるガスとダストの流れ、食感設計の系では、攪拌や凝集によるエマルションの流れに着目する。また、流れの存在は、平均場モデル（Globally Coupled Map, GCM）とは異なった、長距離相互作用系を自然に導く。天体形成の系では、そのような長距離相互作用系の一つとして、新たなCMLのクラス（Globally Coupled Map Lattice, GCML）を提案する。

本論文は、食物連鎖、天体形成、そして、食感設計の3部から成る。各部分は、CMLの応用研究と言う立場では一貫しているが、それぞれ独立した内容であるので、読者の興味に応じてどの部から読んでいただいても構わない。

第I部では、親世代の死後、子世代が生まれて来る（世代が重ならず、完全に入れ替わる）、複数種の生物個体群から成る食物連鎖のCMLを提案し、3種個体群のシミュレーションにおいて再現された従来の食物連鎖的な振る舞いと、新たに見つかった種間協調による相利共生的な振る舞いのそれぞれについて、力学系の視点から解析を行う。第1章では、食物連鎖の系とその数理モデルである一般化ロトカ=ヴォルテラ方程式について紹介する。第2章では、種内及び種間の栄養の流れを考慮した、食物連鎖のCMLを構成する。そして、食物連鎖のCMLが、いくつかの典型的な数理生態学モデルや、差分された一般化ロトカ=ヴォルテラ方程式と一致することを示す。第3章では、シミュレーションにより得られた、食物連鎖と相利共生と言う全く異なる2つの振る舞いについて、力学系の視点から、分岐図、最大リアプノフ指数、時系列、アトラクター等を用いた詳細な解析を行う。第4章では、相利共生的な振る舞いを、リアプノフスペクトラムから得られたカプラン=ヨーク次元、コルモゴロフ=シナイのエントロピー等を用いて調べ、ヘテロな系におけるカオス的遍歴の特徴について考察する。第5章では、まとめ及び今後の課題について述べる。

第II部では、長距離相互作用するガスとダストから成る天体形成のCML（GCML）を提案し、シミュレーションにおいて再現された2本の渦状腕を持つ渦巻銀河や原始惑星系円盤のようなパターン（グランドデザインスパイラルパターン）の形成過程について詳細に解析する。また、新たに見つかった渦状腕同士の間隔による星の形成過程について簡単に紹介する。第1章では、渦巻銀河や原始惑星系円盤において

観測されたグランドデザインスパイラルパターンや、関連した未解決問題について紹介する。第2章では、重力相互作用によるガスとダストの流れを緩和の視点から考慮した、天体形成のCMLを構成する。第3章では、天体形成のCMLが示した、グランドデザインスパイラルパターンの新たな形成過程について、質量場のスナップショットを示しながら説明する。第4章では、得られたスパイラルパターンの動的性質について、渦巻銀河や原始惑星系円盤における観測結果を挙げながら、詳細に解析する。第5章では、まとめ及び今後の課題について述べる。

第III部では、攪拌により、生クリームからホイップクリームを経てバターへと至る転相過程において、多様に变化する食感（テクスチャ）を視覚化し、デザインするための食感設計のCMLを提案する。併せて、レオロジー特性平面を用いた食感の解析へアプローチする。第1章では、生クリームからバターへの転相現象にまつわる個人的なエピソードをお話する。第2章では、生クリームからバターへの転相現象について紹介する。第3章では、実験（調理）を通して、転相過程における生クリームの変化の様子を観察する。第4章では、攪拌と凝集によるエマルションの流れを緩和の視点から考慮した、食感設計のCMLを構成する。第5章では、シミュレーションにより得られた、高い攪拌温度と低い攪拌温度における2つの異なる転相過程について、気泡性（界面エネルギー）、粘性（凝集エネルギー）の空間パターンを示しながら説明する。第6章では、これらの振る舞いをレオロジー特性（粘性 - 気泡性）平面上で特徴づけると共に、得られた気泡性、粘性の空間パターンに基づく、食感の視覚化について議論する。第7章では、まとめ及び今後の課題について述べる。