

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13535

研究課題名(和文) Coarse Analysisによる非平衡多体系の巨視的現象の研究

研究課題名(英文) Study of macroscopic phenomenon in non-equilibrium many particle systems by Coarse Analysis

研究代表者

杉山 雄規 (Sugiyama, Yuki)

名古屋大学・情報学研究科・教授

研究者番号：20196778

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、非平衡開放系における構成粒子の集団が発現する巨視的運動現象を、個々の運動の詳細に立ち入らず、大量のマイクロデータの集積から直接に現象を支配するマクロ変数と法則を効率的に見出す数理的手法("Coarse Analysis")を開発し、多体系の数理モデルの解析や現象データに適用することである。

高速道路における交通流の渋滞発生現象を、拡散写像手法により車両集団の重心と分散を変数とする空間で現象を表現することにより、特徴的振舞いを明確に示した。また、粒子集団の作る形態の類似度を表現する空間で形態の時間変化を表現することにより、迷路において作られる最適な流動形態の安定性を研究した。

研究成果の概要(英文)：Our study provides the mathematical method for investigation of macroscopic phenomenon in non-equilibrium many particle systems by Coarse Analysis. The method drives the important macroscopic variables which govern the rule for the motions of many particles without the detailed knowledge of individual particle.

We investigate the jam formation on highway traffic using the method with diffusion map. The characteristic feature of the bi-stability of traffic jam is clearly described. Also, we study the optimal pattern formation of flows of particles in a maze, and investigate its stability using the Wasserstein metric space, which distinguish similarity of patterns.

研究分野：非平衡多体系の動力学

キーワード：non-equilibrium system phase transition asymmetric interaction collective motions traffic jam formation self-organization coase analysis adaptation

1. 研究開始当初の背景

現象は何らかの要素の集団における時間変化の総体である。自然、生命、社会の現象を何らかのミクロな構成分子集団の力学として捉え、協同現象によって、どのような巨視的様相が発現するかを探究することが、様々な動力学現象において必要とされた。

そのような現象は力学的には非平衡過程における動的緩和状態として現れる動的形態と規定できる。我々の目に現象と写るのは、マクロな変数の挙動であり、それが現象の支配法則である。これを見出す方法の要点は、早い時間変化のミクロ変数を何らかの射影、縮約、積分等により大きな自由度の削減 (dimensional reduction) により、緩和後に現れる巨視的形態の挙動を司る遅い時間変化を記述するごく少数のマクロ変数と、その力学的法則性とを同時に見出すことである。このような研究が、考案され始めた。

デンマーク工科大学の Starke のグループが Equation-free 手法により、ミクロモデル (OV 模型) の解析的な計算を経ずに、初期条件やパラメータを様々に替えて得られた数値計算データから、この渋滞形成の相転移現象 (または、分岐現象) の重要な力学的性質を明瞭な形で示した。そこで採用されたマクロ変数は、分散という統計力学量である。

しかし、彼らが分散をマクロ量として選んだのは、解析したモデルの性質から物理的に推測した発見的な方法であり、他の現象の解析に応用できる汎用性に欠けている。そこで、我々はミクロ量を与えるモデルや、現象を記述するミクロデータそのものから、体系的に有用なマクロ量を導き出す方法を考案する必要性を感じた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非平衡開放系における巨視的構成分子の集団が発現する、巨視的動力学現象をミクロレベルのモデルや運動方程式の詳細に立ち入らず、大量のミクロデータより直接に巨視的振る舞いを支配するマクロ変数とその支配法則を見出す数的手法 (“ Coarse Analysis ”) を開発し、多体系の数値モデルや現象データに適用することである。

自然、生命、社会における現象は、非平衡開放系の巨視的現象と考えることができ、それらに共通するのは、環境や状況に応じて発生する巨視的様相の変化であり、相転移現象や分岐現象と位置付けることができる。その際に、巨視的現象を記述するマクロ量とそれによって記述される法則性を、現象それぞれの特徴の詳細に依存せずに見出すという、体系的かつ汎用性のある手法により見出すことが目標である。

我々は特に現象を記述する構成分子を多体粒子系として捉えることができる現象に

ついてこの手法を開発することを目的とした。

解析対象として、非平衡運動・エネルギー開放系をなす集団運動の現象を考える。具体的には、車を構成分子として捉える高速度交通流の渋滞発生現象や生物個体や歩行者の集団の流動運動について空間の移動経路を自発的かつ最適に選ぶという適応的な行動の解析を研究主題として選んだ。

その成果を交通流における車集団の運動、魚・鳥の群れの運動、アメーバ性バクテリアの運動、都市空間における歩行者・災害時の避難者の集団退避行動の行動様式の合理的制御の具体策を見出すことを目標とした。

3. 研究の方法

Coarse Analysis の数的手法開発は次の基本課程による。

まず集団を構成する要素を点として規定し、各時刻での巨視的パターンを点の集合で与える。このパターンの差異を定量化するために、類似度の違いを距離で測る計量空間を設定する。次いで、任意に取った二つのパターンの類似度距離を成分とする共分散行列を定義し、パターンの差異を測る主要な統計量に対応する少数の主軸を、この共分散行列の主成分分析により求める。それにより、巨視的パターンの持つ集団を構成する各ミクロな点の位置に関する膨大な自由度を大幅に縮減し、少数次元の固有空間の位置として巨視的パターンを規定できる低次元空間を作る。この空間の1点として各時刻における巨視的パターンは記述され、状態の時間的変化による巨視的パターンの変化を、この低次元空間内の軌道として表現する。この軌道の解析で状態の変化を記述し解析する。

類似度を測る計量の選び方には種々あり、我々は、基本手法として、1) 拡散写像の方法、2) Wasserstein 計量空間の方法、を候補として考えた。

1) 拡散写像の方法では、各巨視的パターンをベクトルとして規定し、二つのベクトルの距離として、その差の大きさを指数関数の変数とした数値で与える。二つのパターンの組み合わせの全てをそれぞれのペアとして取る行列を共分散行列とする。

2) Wasserstein 計量空間の方法では、二つのパターンに対して、片方を構成する点の位置を、もう片方を構成する点の位置に移動することを考え、その移動コストが最小になる量を距離と規定する。コストとしては、パターンを移し替えるときの各点の移動距離の総和をとる。それによって、各パターン間の類似度における差異を示す共分散行列とする。これらの特徴を生かし研究対象に合った手法を選び、必要に応じ両者を融合して手法開発を進めた。

動力学巨視的状態を発現するミクロデータを与えるモデルとして自己駆動粒子系

を考える。特に、0V 模型を選び、性質がよく知られている 1 次元系でそれぞれの手法で得られる結果の物理的意味と利用可能性を調べ、適切なマクロ変数を見出す方法を考案する。次に、応用的にも興味ある、2 次元系の模型で現れる“群れ”形成や流動形態の最適な適応の現象について、1 次元系での研究で開発した手法を適用し、マクロ変数の設定とそれによる解析で得られるマクロ現象の法則性を見出す。

4 . 研究成果

高速度道路交通流の渋滞発生の研究について、交通流の自己駆動粒子系として 1 次元 0V 模型を解析した。この模型は高速道路交通流の渋滞現象を物理的に説明する簡潔なモデルである。渋滞の発生に際して、過飽和の流量の相転移現象が重要な性質として観測データから知られている。渋滞発生は 0V 模型において車間と速度の相空間におけるリミットサイクル解として知られており、この解の発現における相転移的な分岐現象が研究されている。過飽和状態に対応する一様流と渋滞流との双安定領域における分岐現象は、サブクリティカルホップ分岐現象と予想される。我々は、拡散写像法を用いた Coarse Analysis 手法によって、それらの統計力学的相関量が構成する空間において支配的な二つのマクロ量を示す主軸空間に縮減した固有空間において、双安定な分岐を明確に示す結果を得た。この成果は、国際会議 CCP2017 及び日本物理学会や多くの研究会で発表され、Physics Letters A に掲載された。

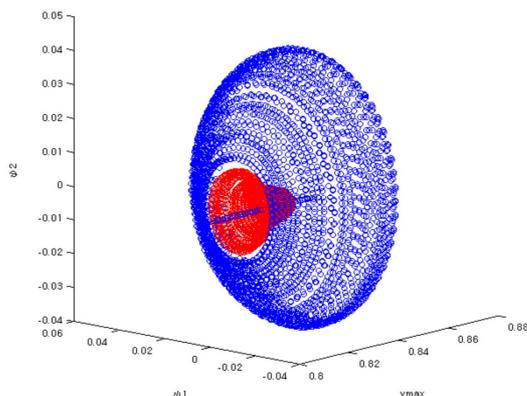


図 1 : 渋滞解と自由流解の双安定分岐

また、避難者の退出における出口付近の障害物を利用した最適誘導について研究した。障害物があると、その周囲に沿って移動することにより、人流はむしろスムーズになる。初めから障害物が存在するとももちろん邪魔になる。それで、人が集まって来たどの時点で障害物を出口前に移動してくるのが避難時間を最小にするかを調べた。歩行者流の 2 次元 0V 型のモデルを用い Wasserstein 計量空間の手法を使って、集団の形態が変化しな

がら退出する過程を解析し、障害物と移動速度との最適な選択を調べた。この成果は、日本物理学会、自己駆動交通流シンポジウムで発表され、論文集に掲載された。

さらに、2 次元系の 0V 粒子集団を迷路空間に封入し、シミュレーションにより自己組織化流動形態の発現として最適経路の探索を自発的に行う、群知脳的行動を調べた。0V 粒子の相互作用を引力のみとすると粒子集団には 1 次元的な追従運動が現れ、その形態が自由に曲線的に変形する。この運動が、束縛された通路では、通路に沿って変形する追従挙動が自発的に現れ、最短経路をとる。

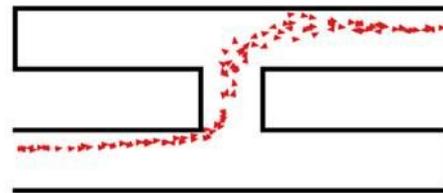


図 2 : 迷路内で最適経路の粒子流の自発的発現

形態のパターンの類似度を計量化した Wasserstein 計量空間において、最適経路を流動する非平衡定常状態に緩和していく過程を追跡し、この緩和状態の安定性を調べた。図 3 の円内が図 2 の最適流動形態が維持さ

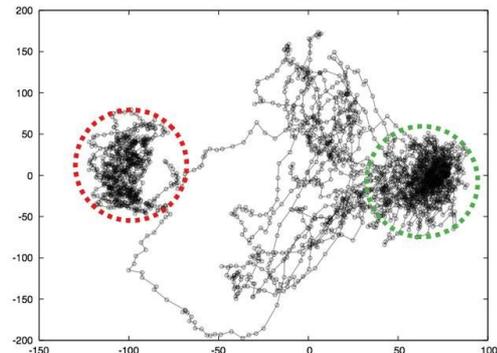


図 3 : Wasserstein 計量空間内の流動形態の時間変化の軌跡

れていることを表わしている。もうひとつの円内は、固定端での反射により安定している形態を表わしている。この運動は、引力による反応の敏感さによって運動の安定性が変化する。感応度をパラメータとして、この数値に対する最適形態の安定度を定量的に解析した。この成果は TGF2015 など様々な国内外の学会で発表されて、2018 年春に Science Report に掲載が決定された。これらの研究成果は、Coarse Analysis 手法で意図したことが十分に達成されことを示し、更に非平衡多体系の一般的な解析に適用可能なことを示している。また、この研究で示した、大幅に多体粒子系

の自由度を縮減し、マクロ量によって構成された空間における状態変化を示す軌跡は、この空間に定義される何らかのポテンシャルによる勾配曲線として規定できる可能性を示唆するものである。すなわち、本研究の成果は、非平衡多体系において巨視的形態として現れる非平衡定常状態の形成を、マクロ変数による熱力学的なポテンシャル関数により解析し、その形態の発現・運動の制御を可能にする数的手法を構築することを更なる目標とする足がかりとなるものである。

多体集団が形成する巨視的形態の構成要素の分布を確率測度として定義し、時間的に変化する形態を、マクロ変数で構成される類似度を計量とする縮減した空間の中で表現する。それにより巨視的形態の運動の力学原理を調べる。集団による現象の法則性とその制御手法を、最新の数学理論の枠組み(最適輸送理論に基づく Wasserstein 幾何)を利用し、構築しようとする研究に本研究の成果を基に更に発展させたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

1) Ishiwata, R., Kinukawa, R., & Sugiyama, Y. Analysis of dynamically stable patterns in a maze-like corridor using the Wasserstein metric. Scientific Reports, 8(1), 6367.(2018).

<http://doi.org/10.1038/s41598-018-24777-2>
(査読有)

2) Yasunari Miura, Yuki Sugiyama, Coarse analysis of collective behaviors: Bifurcation analysis of the optimal velocity model for traffic jam formation, Physics Letters A, 331(48), 3983-3988 (2017) (査読有)

3) 石渡龍輔, 矢口令朗, 杉山雄規, 非対称散逸粒子系の揺動散逸関係の解析, 交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集, 23, 2017, 13-16 (2017) (査読有)

4) Nomura, Y, Saito, S, Ishiwata, R, and Sugiyama, Y., Hopf bifurcation analysis for a dissipative system with asymmetric interaction: Analytical explanation of a specific property of highway traffic Physical Review E 93(1)012215, (2016) (査読有)

5) Tadaki, Si, Kikuchi, M, Nakayama, A, Shibata, A, Sugiyama, Y., and Yukawa, S., Characterizing and distinguishing free

and jammed traffic flows from the distribution and correlation of experimental speed data, New Journal of Physics 18(8), 83022 (2016) (査読有)

6) Nakayama, A, Kikuchi, M, Shibata, A, Sugiyama, Y., Tadaki, Si, and Yukawa, S., Quantitative explanation of circuit experiments and real traffic using the optimal velocity model, New Journal of Physics, 18(4), 43040 (2016) (査読有)

7) Kano, T, Sugiyama, Y., and Ishiguro, A., Autonomous Decentralized Control of Traffic Signals that can Adapt to Changes in Traffic, Collective Dynamics, 1(0), A5-18 (2016) (査読有)

8) 三浦康也, 杉山雄規, 歩行者集団の配置を参照して動く障害物を用いた出口退出過程の制御, 第 22 回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, 22, 37-40, (2016) (査読有)

9) 石渡龍輔, 衣川亮太, 杉山雄規, Kantrovich metric を用いた 2 次元 OV 粒子の集団流の感応度依存性の解析, 第 22 回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, 22, 41-44, (2016) (査読有)

10) Ishiwata, R and Sugiyama, Y. Flow instability originating from particle configurations using the two-dimensional optimal velocity model. Physical Review E, 92(6):062830, December (2015). (査読有)

[学会発表](計 11 件)

1) 石渡龍輔, 矢口令朗, 杉山雄規, 非対称相互作用をふくむ散逸系の応答関数と相関関数の解析, 日本物理学会第 73 回年次大会, 3月25日(2018)

2) 杉山雄規, OV モデルと戸田ソリトン系, 日本応用数理学会 2017 年度年会「戸田格子 50 周年: その意義と発展」(招待講演), 9月6-8日(2017)

3) Yuki Sugiyama, Jam Formation in Traffic Flow and Collective Notions of Self-Driven Particles, 4th International Conference on Mathematical Applications in Engineering (ICMAE '17) (招待講演)(国際学会), Aug. 7-8, (2017)

4) Yasunari Miura, Yuki Sugiyama, Coarse analysis of non-equilibrium collective phenomena: Bifurcation

analysis of the optimal velocity model using diffusion Maps, 第 29 回 Conference on Computational Physics (国際学会), July 9-13, (2017)

5) 三浦康也, 杉山雄規,
動く障害物を用いた歩行者の出口退出過程の制御, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 3 月 18 日, (2017)

6) 三浦康也, 杉山雄規,
動く障害物を用いた歩行者出口退出過程のフィードバック制御, 第 29 回自律分散システム・シンポジウム, 1 月 31 日 (2017)

7) 三浦康也, 杉山雄規,
歩行者集団の配置を参照して動く障害物を用いた出口退出過程の制御, 第 22 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム, 12 月 2 日 (2016)

8) 石渡龍輔, 衣川亮太, 杉山雄規,
Kantrovich metric を用いた 2 次元 OV 粒子の集団流の感応度依存性の解析, 第 22 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム, 年 12 月 2 日 (2016)

9) 三浦康也, 杉山雄規,
Diffusion Maps の手法による群れのダイナミクスの解析, 日本物理学会第 71 年次大会, 3 月 20 日, 日本物理学会第 71 年次大会 (2016)

10) 三浦康也, 杉山雄規,
A coarse analysis method using Diffusion maps : Application to a bifurcation analysis of the OV Model, MIMS 現象数理学拠点 共同研究会 「生物の動的集団の形成と制御」(招待講演), 10 月 16 日(2015)

11) Ryosuku Ishiwata, Yuki Sugiyama,
Analysis in Kantrovich Geometric Space for Quasi-Stable Patterns in 2D-OV model, Analysis in Kantrovich Geometric Space for Quasi-Stable Patterns in 2D-OV model, Traffic and Granular Flow 2015 (国際学会) 9 月 28 日, the Netherlands (2015)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :

出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況(計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等

交通流数理研究会
<http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/>

研究者のホームページ
<http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~genbey/>

http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20180426_i_1.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者
杉山雄規 (SUGIYAMA Yuki)
名古屋大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号 : 20196778

(2) 研究分担者
時田恵一郎 (TOKITA Keiichiro)
名古屋大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号 : 00263195

(3) 連携研究者
なし ()

研究者番号 :

(4) 研究協力者
なし ()