

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360045

研究課題名（和文） 交通流および自己駆動粒子系の流動機構の解明

研究課題名（英文） Research of flow-mechanism  
in traffic and self-driven particles systems

研究代表者：杉山 雄規 (SUGIYAMA YUKI)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：20196778

研究成果の概要（和文）：

交通流を典型とする自己駆動粒子系における巨視的な流動形態の形成が、多体効果による力学的な相転移現象であり、力学系におけるホップ分岐現象として理解できることを理論的に明らかにした。また、ナゴヤドームにおける実車両を使った実証実験を行い、渋滞などの巨視的流動形態の形成過程における詳細な時系列データを測定した。さらに、群衆や生物集団の運動における数理モデルによる計算機シミュレーションを行い、実現象に見られる流動形態や群知能的振舞いを再現した。

研究成果の概要（英文）：

The mechanism of emergence of macroscopic states in flow-dynamics of many body systems such as a traffic flow and self-driven particles is investigated, and is understood as a dynamical phase transition as well as a Hopf bifurcation phenomenon. We performed an experimental study for forming a traffic jam using real vehicles in the arena of Nagoya-Dome, and obtain precise sequential data of the process of forming a jam cluster. Moreover, computer simulations of mathematical models for pedestrians, crowd people, and collective bio-motions are done, and the real phenomena, especially, group-intelligent behaviors are well recreated

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2009 年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2010 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：交通流, 自己駆動粒子, 渋滞, 動的相転移, 非平衡散逸系, 非対称相互作用, ホップ分岐, シミュレーション科学

## 1. 研究開始当初の背景

交通流の研究は 1990 年代に流体模型、セルオートマトン模型、OV 模型(非線型微分方程式)などの数理モデルのシミュレーションによ

る成果を得た。交通流に端を発した研究は数理科学の一分野として成長し、歩行者・避難者流、生物集団、分子モーターや粉体流の輸送現象など、多体相互作用系の協同現象という共通の視点でさらに対象を拡大している。

## 2. 研究の目的

交通流の数理的理解を基礎に、その発展として歩行者・避難者、生物集団(蟻、魚群、バクテリア)、分子モーター、ネットワーク上のパケット流を、“自己駆動粒子系”(Self-driven Particles)として統一的に捉え、その流動機構を解明することである。粒子集団の流動機構における重要な概念は「渋滞」である。交通流渋滞をはじめ群衆の渋滞・パニック、生物集団の群れ形成、パケット通信の渋滞を自己駆動粒子系のクラスタ形成と捉え、その一般的な生成機構と動的性質を解明し、適正に制御する理論的指針を与えることを目標とする。

## 3. 研究の方法

交通流を基礎とする自己駆動粒子集団の流れのダイナミクスを、非平衡開放系の観点から理解し、渋滞・クラスタの発現機構の解明とその制御指針の理論的探索の目的のため、(1)基礎理論解析：自己駆動系が一般的に有するミクロレベルの基本性質の数理的解析、(2)実測現象の収集と分析：自己駆動系の共通の性質を種々の現象から抽出、(3)シミュレーション実験：数理模型のシミュレーション実験と実測現象との照合により、基礎理論を整備すると同時に各対象についての流動機構の特徴を明らかにするべく、3つの過程の連携を取りながら研究を進めていく。

## 4. 研究成果

### (1)基礎理論解析の成果：

自己駆動粒子系の数理模型(OV 模型)は、非線形非対称力による散逸系として、交通流をはじめ多くの流動粒子系に共通の物理的特徴を示す。そのクラスタ形成の動的相転移現象が、新しい型のホップ分岐として理解できることを示した。サブクリティカル型のメタ安定転移であることを解析的に示した。これは、現実の高速道路で発生する渋滞に一般的に見られる性質について、初めて物理的現象として説明できることを(数値シミュレーションではなく)解析計算により理論的に示したものである。

### (2)実測現象データの収集と解析の成果：

交通流の渋滞形成における非平衡過程の時系列詳細データの計測のため、ナゴヤドーム球場アリーナにおいて直径 100m の円形サーキットを設定し、天井の全周カメラによる動画像及び円周中心に設置した高速回転レーザーキャナによる計測の方法を開発した。これにより、実車両 20 台~40 台による、20

回に及ぶ走行実験を実施し、車両挙動の時系列詳細データを取得した。今回の実験における 20 ランから得た測定データは、清浄化を終え、秒単位の車両の位置と速度による基本データを作成し終わった。今後、この 1 次データより様々な 2 次データを作成し多角的な分析が可能である。



これまでの解析では、サーキット実験における渋滞発生が起こる臨界車両密度は、平均車両間隔で約 8.8~10.0m であり、このあたりが 300m 程度の走行の長さ・速度スケールにおける臨界車間の範囲であり、渋滞形成が起こる一様流の不安定相の領域と思われる。高速道路における臨界車両密度との比較には物理的なスケール変換が必要だが、実験により世界で初めて臨界密度の数値を特定した。また平均車両 8.8m 以下の高密度では、渋滞は発生せず、低速な一様流が観測された。高密度状態における低速一様流の存在については、高速道路における観測は難しく、世界的な議論になっており、我々はボトルネックのないサーキット実験により初めて見出した。この成果は、交通渋滞の発生が多体相互作用による動的な相転移現象であるという物理理論を裏付ける重要な証拠となるものである。

今回のドーム実験で確立した、広い領域における全体映像の撮影方法と秒単位での個体集団の運動の時系列測定技術は、今後、群衆などの自己駆動粒子集団の運動の実験・測定に応用可能であり、精密データによる本格的な科学研究の道を拓くものである。

### (3)数理模型シミュレーション実験の成果：

追従性と排除性を持つ 3 次元 OV 模型による群れ形成のシミュレータを試作し試行実験を行なった。非対称相互作用における粒子系は、非平衡系における粒子密度をパラメータとする動的相転移を示し、少数でも多体効果を引き起こし、冪乗則のゆらぎを示し、マクロなクラスタの形成とその多彩な形体と多自由度の運動は、生物系の現象を物理学的に説明する力学としての可能性を示した。また、

OV 粒子の集団運動による迷路の最適経路探索により、非対称相互作用する物理的粒子系により生物集団の群知能的振舞いをシミュレートする可能性を示した。

#### 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 19 件)

- 1) "Effects of Fast Noises on Long-Range Correlations", S. Tadaki, (査読有), *Comp. Phys. Comm.*, 182, 237-239, (2010)
- 2) "Cellular model for sand dunes with saltation, avalanche and strong erosion: collisional simulation of barchans", Katsuki, A., M. Kikuchi, Nishimori, H., Endo, N. and Taniguchi, K., (査読有) *Earth Surface Processes and Landforms*, n/a. doi:10.1002/esp.2049, (2010)
- 3) "Meandering instability in two dimensional optimal velocity model for collective motion of self-propelled particles", A. Nakayama, *Phys. Rev. E*, 82, 031123, (査読有), (2010)
- 4) "Dissipative System with Asymmetric Interaction and Hopf Bifurcation", M. Yamamoto, Y. Nomura, Y. Sugiyama, *Phys. Rev. E*, 80, 026203-1-6, (査読有) (2009)
- 5) "Similarity between Temporal and Spatial Structures in Pattern Formation of Dissipative Non-Equilibrium System", R. Akiyama, H. Watanabe, Y. Sugiyama, *Proceedings of International Workshop on Traffic and Granular Flow '07*, 7, 253 - 258 (査読有) (2009)
- 6) "Dynamics of Dissipative system with Asymmetric Interaction and N-body Problem for Emergence of Moving Cluster", Y. Sugiyama, K. Masuoka, T. Ishida, *Proceedings of International Workshop on Traffic and Granular Flow '07*, 7, 555 - 563, (査読有) (2009)
- 7) "Instability of Collective Flow in Two-Dimensional Optimal Velocity Model", R. Ishiwata, Y. Sugiyama, *Proceedings in Information and Communications Technology, Natural Computing*, 2, 191-198 (査読有) (2009)
- 8) "Asymmetric Interaction in Non-equilibrium Dissipative System

towards Dynamics for Biological System", Y. Sugiyama, *Natural Computing*, Y. Suzuki, M. Hagita, H. Umeo, A. Adamatzky, eds. (Springer) 189-200, (査読有) (2009)

- 9) "Packet flow and its temporal properties in the Internet", S. Tadaki, (査読有) *Traffic and Granular Flow '07* (Springer-Verlag, Berlin) 745- (2009)
  - 10) "Metastability in the formation of an experimental traffic jam", A. Nakayama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Nishinari, Y. Sugiyama, S.-i. Tadaki, S. Yukawa, *New Journal of Physics* 11, 083025 1-17 (査読有) (2009)
  - 11) "Detailed data of traffic jam experiment", A. Nakayama, M. Kikuchi, Y. Sugiyama, S.-i. Tadaki, S. Yukawa, *Traffic and Granular Flow '07*, 389-394, (Springer) (査読有) (2009)
  - 12) "Traffic jam without bottleneck -experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam", Y. Sugiyama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Hasebe, A. Nakayama, K. Nishinari, S. Tadaki, S. Yukawa, *New Journal of Physics* 10, 033001-1 - 7 (査読有) (2008)
  - 13) "Free-energy landscape of kinesin by a realistic lattice model", H. Kenzaki, M. Kikuchi, *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 71, 389 (査読有) (2008)
  - 14) "Effect of attractive interaction on instability of pedestrian flow in a two-dimensional optimal velocity model", A. Nakayama, K. Hasebe, Y. Sugiyama, *Phys. Rev. E* 77, 016105-1 -9 (査読有) (2008)
- [学会発表] (計 20 件)
- 1) "Stability of a flow of self-driven particles and formation of a moving cluster", Y. Sugiyama, *Hakodate Winter School of Natural Computing in 2011*, Future Univ. Hakodate. (2011/3/14) (招待講演)

2) "交通渋滞の数理模型", 杉山雄規, 日本機械学会先端技術フォーラム, (招待講演)(名古屋市立大学, 8月)(2010/9/6).

3) "自己駆動粒子の集団運動と非対称散逸系の動力学", 杉山雄規, 計測自動制御学会, 自律分散学会創発シンポジウム, (招待講演), 富山インテック大山研修センター, (2010/8/6)

4) "Optimal Velocity 模型の数理", 杉山雄規, (招待講演) 明治大学グローバル COE プログラム, 明治大学 (2010/8/3)

5) "Search for the solution of a maze by Asymmetric Dissipative Particle System", R. Kinukawa, R. Ishiwata, Y. Sugiyama, Conference on Computational Physics, Norway Technical Univ. Trondheim, (2010/6/25)

6) "非対称性が2次元OVの集団運動の安定性に与える影響", 石渡龍輔, 杉山雄規, 第22回自律分散システムシンポジウム, 名古屋大学 (2010/1/30)

7) "Dynamics of Collective motions in Asymmetric dissipative system". 11th. International School on Complexity, Y. Sugiyama, Ettore Majorana Foundation and Centre for Scientific Culture, Erice, Italy (7/20/2009)

8) "Asymmetric Interaction in Non-equilibrium Dissipative System towards Dynamics for Biological System", Y. Sugiyama (招待講演), International workshop on Collective behaviors in bio- and related systems, RIES, Hokkaido University, Sapporo (2008/9/3)

[図書] (計1件)

1) "交通流と自己駆動粒子系", 杉山雄規, 「自己組織化ハンドブック」ネヌ・ティエ・エス, 118-119, (2009)

[その他]

ホームページ:

・交通流研究会

<http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~mstf/>

・Physics of Traffic(国際的な成果・データ公開)

<http://traffic.phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp/>

・名大トピックス No181 (2008/6月号) 知の先端, 記事掲載。「渋滞はなぜ発生するか? - 渋滞形成の数理と実証実験」

<http://www.nagoya-u.ac.jp/extra/topics/pdf/no181.pdf>

・渋滞実験動画 Web 公開

<http://www.youtube.com/watch?v=Suugn-p5C1M>, 科学雑誌 NewScientist により YouTube に公開, 現在アクセス数 110 万件以上 (検索 → traffic shockwave)

・公開講演:

“ナゴヤドーム渋滞形成実験渋滞はなぜ発生するか-その数理と実証実験-”, 杉山雄規, 名古屋大学野依記念学術交流館 (2010.11.26)

・国際的論文賞:

New Journal of Physics (IOP) Best Paper of 2008 受賞 (2009.5)

[国内外メディア報道:]

・Science: 「Traffic Jam Happen, Get Used to it」 (by Dennis Normile) ScienceNOW Daily News 28 March 2008)

・Daily Telegraph: 「Too many cars cause traffic jams」 (Roger Highfield, Science Editor), Last Updated: GMT 04/03/2008

・New Scientist: 「Shockwave traffic jam recreated for first time」 (by Max Glaskin) 04 March 2008, NewScientist.com news service

・Science Daily: 「Stop-And-Go Traffic: An Accident? Construction Work? No, Just Too Much Traffic」 ScienceDaily (Mar. 5, 2008)

他、国際報道多数(20 各国以上)

・Science & VIE Vol. 1091、8月号 (2008) (フランス科学雑誌) 取材を受け、研究内容の特集記事 「Les bouchons analyses par la

physique]

・VellSatile Vol. maio/junho (5月/6月号) de (2008) (ブラジル)「Alternativas no caminho, Fisica no transito」に掲載。

・オランダ科学テレビ番組 VPRO 出演。インタビュー質疑応答の映像放映。(4/2008)

・韓国のテレビ番組、韓国教育放送 EBS で研究内容と実験映像を提供、放映。(7/2008)

・毎日新聞全国版(5/5/2008)

「必然ナリ自然渋滞」(西川拓)

・朝日新聞関西版(3月4日2008)

「渋滞、車多いと自然発生」(久保田裕)

・読売新聞中部版(3月5日2008)

「交通量一定以上で渋滞実証」

・日本経済新聞(8月3日2009)[古希の名大第1部「ノーベル賞の系譜」①の記事内で、研究業績について紹介。

・読売新聞(8月19日2009)「渋滞、なぜ起こる？」の記事内でのコメント

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

杉山 雄規 (SUGIYAMA YUKI)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号：20196778

### (2) 研究分担者

只木 進一 (TADAKI SHIN-ICHI)

佐賀大学・学術情報センター・教授  
研究者番号：00202169

菊池 誠 (KIKUCHI MAKOTO)

大阪大学・サイバーメディアセンター・教授  
研究者番号：50195210

中山 章宏 (NAKAYAMA AKIHIRO)

名城大学・理工学部・教授  
研究者番号：60212106

湯川 諭 (YUKAWA SATOSHI)

大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：20292899

柴田 章博 (SHABATA AKIHIRO)

高エネルギー加速器研究機構・共通基盤施設  
計算科学センター・研究機関講師  
研究者番号：30290852