

渋滞の科学

～様々な渋滞とその解消法～

東京大学 大学大学院工学系研究科 教授
西成 活裕

1



西成 活裕 教授
数理物理学者
渋滞コンサルタント
2021年度イグノーベル賞受賞

「車・人・モノ」の流れをスムーズにする科学

渋滞学 Jamology

渋滞問題の新しいソリューション=未然に防ぐマネジメント
車・人などの移動に関する混雑緩和、物流・生産の効率化

人流のスムーズ化 高速道路での渋滞緩和 物流・生産の効率化





研究費
科学技術振興機構「さげがけ」
企業との共同研究100社以上、等

これまでの社会貢献実績
成田空港(入管審査場の改善)
警察庁(渋滞解消の社会実験)
サウジアラビア(メッカ巡礼混雑改善)
JFEスチール(鉄鋼生産ライン)
パイオニア(カーナビ)
ホンダ(交通流改善システム)
NEXCO中日本(SA駐車場)
東芝(半導体工場効率化)
鈴木(物流改善)
三菱電機(群集シミュレーション)
群集マネジメント研究会(社会連携講座)
物流寄附講座設置(ヤマト・鈴木・SBS・DBJ)
東京オリンピック組織委員会アドバイザー

政府関係
内閣府IT戦略本部ITS委員
内閣府流通イノベーション座長
国交省物流施策大綱委員、等

メディア報道
日経新聞夕刊一面、NHK「おはよう日本」
日本テレビ「世界一受けたい授業」
NHK「サイエンスZERO」など500を超える。



新潮流選書
渋滞学
西成活裕
講談社科学出版賞受賞

渋滞が嫌いな人も、行列がほしい人も。車や人から見た渋滞の謎を、最新の研究から、インターネットまで、詳しく説明する。

2

物理から見た渋滞現象

- **多体集団の相互作用で起こる現象**
相転移現象、非平衡物理、創発現象
排除体積効果が本質
- **車、人、魚、鳥、動物、昆虫などの集団**で見られる
自己駆動粒子 Self-driven particles (SDP)
→ アクティブマター
- **社会現象**でも見られる 物流、生産ライン、仕事
- **物質や生体内のミクロな現象**にも見られる
ジャミング転移、ガラス転移
キネシン、セルラーゼ
イオン渋滞学(2024年4月より新学術領域発足！)

3

私の問題意識と立場

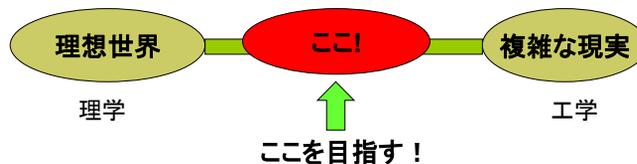
理学と工学応用のバランス

理学アプローチ (なぜ、演繹)

モデル化・実験と解析＝数理とデータで厳密に分析

工学アプローチ (どうやって、帰納、経験)

実験との対応、実証実験、社会的な実装を目指す

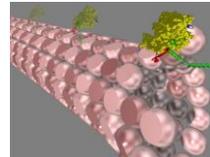


一人の人間の頭に両方を詰め込んで初めて真のバランスが可能
→ 第3の人材! 「どっちも分かる人」

4

渋滞学とは？

- 渋滞をおこすもの = 自己駆動粒子の集団を研究する
作用 = 反作用の法則の成り立たない粒子！



これらの共通の集団行動を扱うのが「渋滞学」
「流れがあれば渋滞あり」

- 莫大な応用と社会的要請
道路の渋滞解消（経済損失年12兆円）
物流問題、避難安全、人の動線の制御

5

理学サイドからの研究の歴史

1990年代になって、、、

- 数理物理学の新しい分野への進出（車、経済、脳）
確率セルオートマトンモデル（1993、Nagel、他）
最適速度モデル（1995、杉山、他）
- 厳密に解ける数理モデルが次々に提唱
ASEP、ZRP（1993、Derrida、Evans、他）
超離散法の発見（1996、時弘・松木平ら）

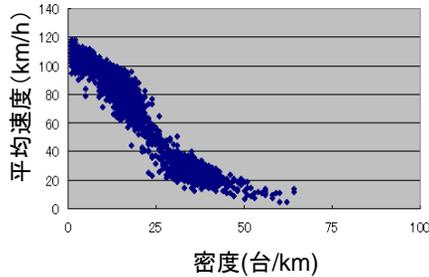
国際会議Traffic & Granular flowが始まる（1995）
＝世界的にこの研究分野が確立される
日本、ドイツ、インド、韓国などが牽引

6

渋滞の定義とは？

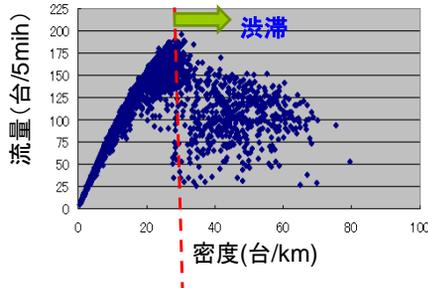
首都高速道路 時速20km以下
 その他の高速道路 時速40km以下

速度 v と密度 ρ の関係



基本図

流量 Q と密度 ρ の関係

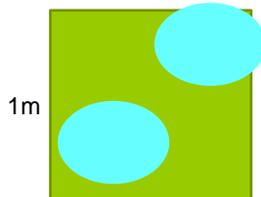
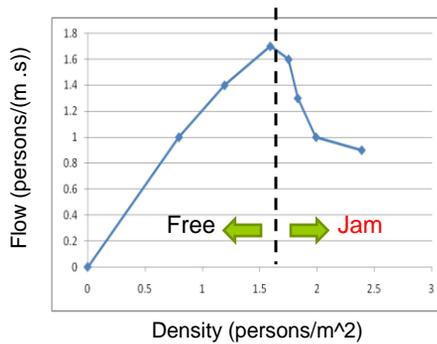


$Q = v\rho$ の関係がある。速度より流量で見た方が渋滞開始が分かりやすい

渋滞 = 流量が減少すること (高速道路では25台/km)

7

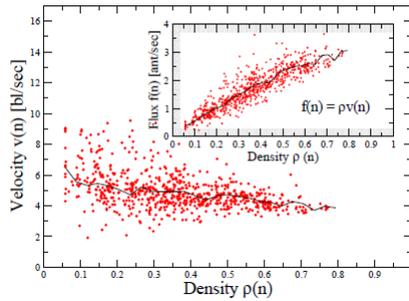
人の渋滞とは？



臨界密度
 = 1.8 人/m²

8

アリは渋滞を起こさない！？



自然界での観察(インド西部にて)

自然観察では、速度は密度によらずほぼ一定になっている
渋滞高密度は観測されない

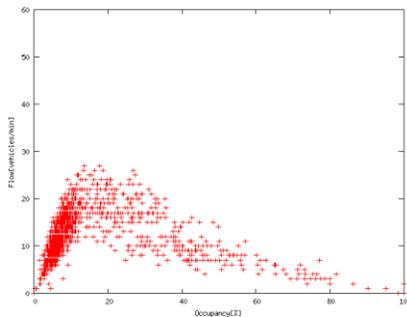
“Traffic-like collective movement of ants on trails: absence of jammed phase” Phys.Rev.Lett.(2009)

9

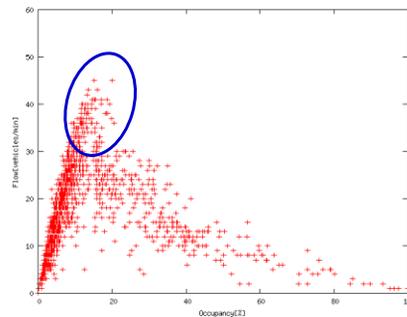
観測による新事実 メタ安定状態

首都高速道路 三郷線上りの1日データ

走行車線(左車線)



追越車線(右車線)



10

なぜ渋滞が起こるのか？ ボトルネック説 v.s. メタ安定説

New Journal of Physics

The open-access journal for physics

Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam

世界数十カ国メディアで報道
2008年度Best Paper Award

Yuki Sugiyama^{1,10}, Minoru Fukui², Macoto Kikuchi³, Katsuya Hasebe⁴, Akihiro Nakayama⁵, Katsuhiro Nishinari^{6,7}, Shin-ichi Tadaki⁸ and Satoshi Yukawa⁹

¹ Department of Complex Systems Science, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan

² Nakanihon Automotive College, Sakahogi 505-0077, Japan

³ Cybermedia Center, Osaka University, Toyonaka 560-0043, Japan

⁴ Aichi University, Miyoshi 470-0296, Japan

⁵ Faculty of Science and Technology, Meijo University, Nagoya 468-8502, Japan

⁶ Department of Aeronautics and Astronautics, The University of Tokyo, Bunkyo 113-8656, Japan

⁷ PRESTO, Japan Science and Technology Agency

⁸ Computer and Network Center, Saga University, Saga 840-8502, Japan

⁹ Department of Earth and Space Science, Osaka University, Toyonaka 560-0043, Japan

E-mail: sugiyama@phys.cs.is.nagoya-u.ac.jp

New Journal of Physics 10 (2008) 033001 (7pp)

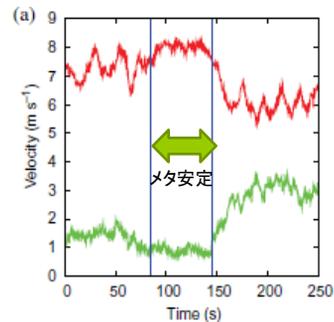
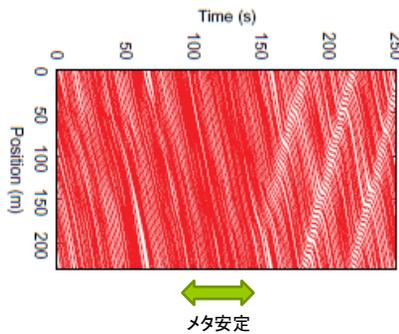
Received 14 November 2007

Published 4 March 2008

ボトルネック無しでも渋滞が発生することを示した！

11

渋滞相転移の直前にメタ安定流が形成

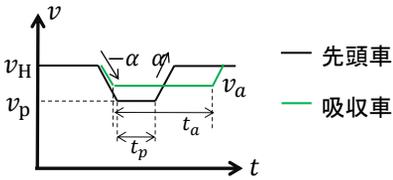


速度の平均(赤)と分散

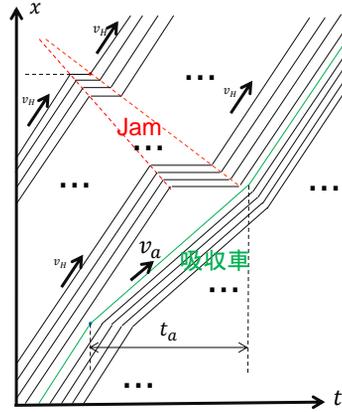
12

渋滞吸収走行の成否 いつ、どれぐらい減速すべきか？

速度の減速
先頭車: 黒線
渋滞吸収車: 緑線



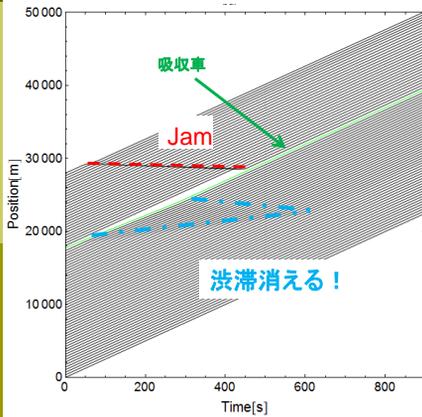
いつ(t_a), どれぐらい(v_a)



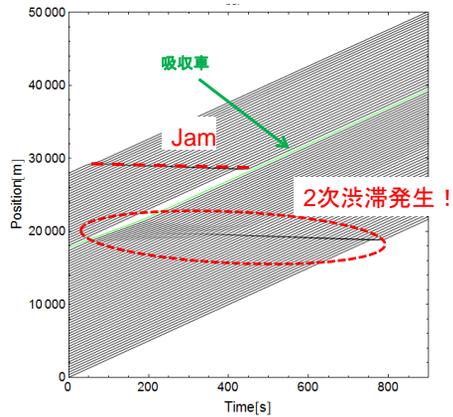
13

シミュレーション結果

成功例



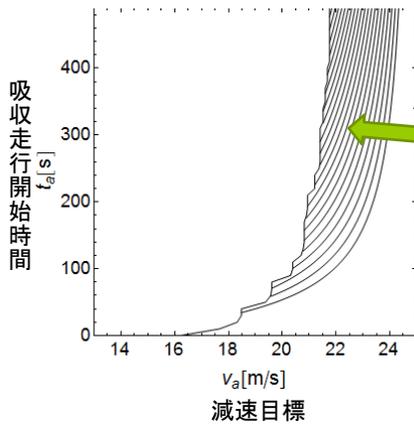
失敗例(減速強すぎ)



14

渋滞吸収走行が成功する条件を説明！

Physica A vol.433 (2015) p.304



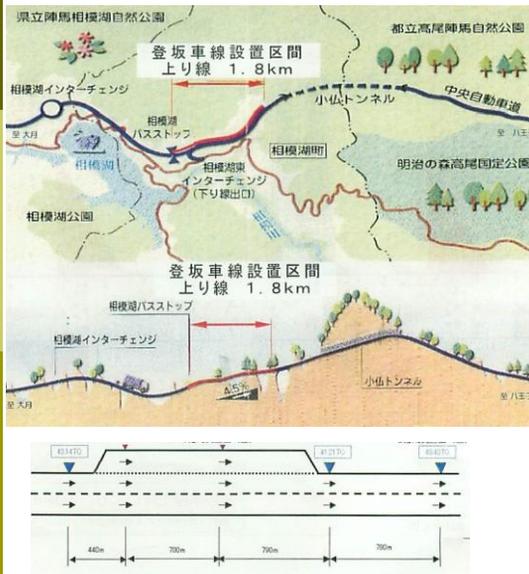
2次渋滞が発生せず、かつ前方の渋滞を吸収できる領域

例：渋滞に出会う5分前に
時速90kmから80kmに
減速すればよい！

自動運転でシステム化可能！

15

小仏トンネルにおける社会実験



坂道による自然渋滞
トンネル出口では渋滞解消

車線拡幅工事後=合流渋滞発生

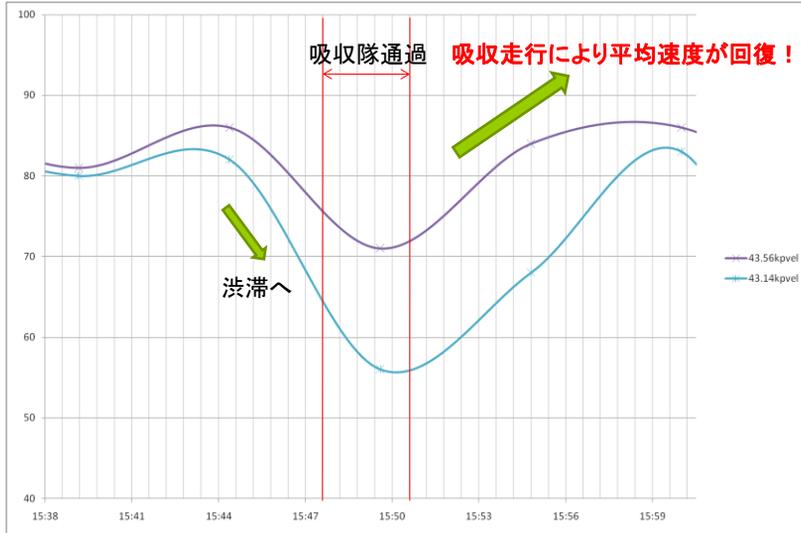
上りが下りに見えるところあり
➡ 看板の設置提案

渋滞抑制実験(2009/3/15)
車間距離40mを意識して空ける
なるべく一定の速度で走ること
前から来た渋滞波を吸収して、
後ろの車にブレーキを踏ませない

(JAF MATE 2009年6月号)

16

地点速度が回復



17

交通流はモデル化できるか？

交通流の数値モデルが乱立状態

□ マクロモデル

1. バーガース方程式

$$u_t = u_{xx} + 2uu_x$$

2. 流体力学的拡張
KK model

□ ミクロモデル

1. 追従モデル

- Newellモデル

- 最適速度モデル

$$\ddot{x}_n = a(V(x_{n+1} - x_n) - \dot{x}_n)$$

2. セルオートマトンモデル

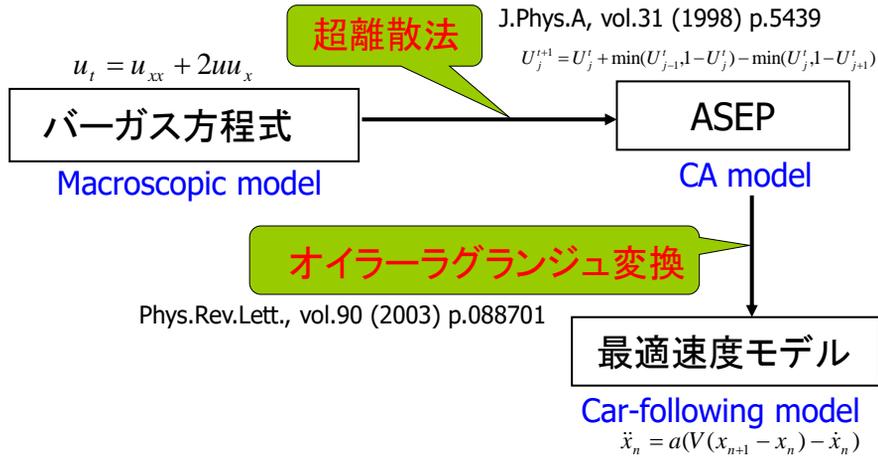
- ASEP

- SISモデル, QSモデル

- NSモデル

18

モデルの「統一理論」が出来た！

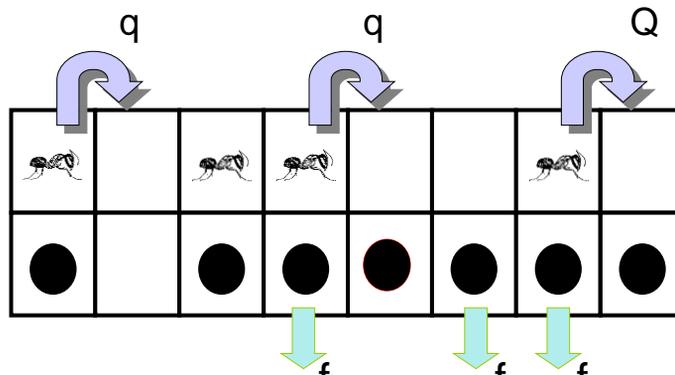


19

アリの数理モデル フェロモン場付きASEP

D. Chowdhury, V. Guttal, K. Nishinari and A. Schadschneider, J.Phys.A, Vol. 35 (2002) p.L573.

- ダイナミクス:
1. 蟻の並進運動
 2. フェロモンの状態更新 (生成 + 蒸発)



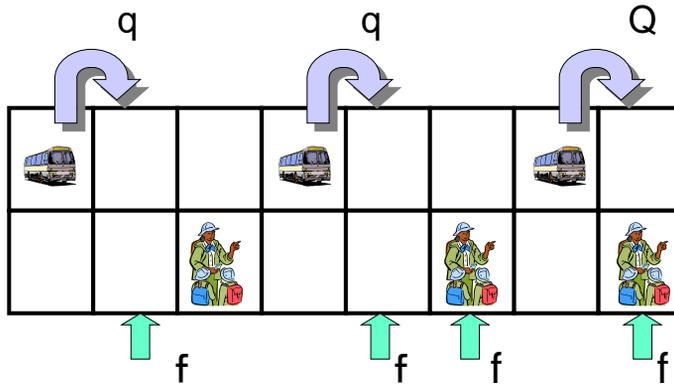
パラメータ: q, Q, f

- $f=0$ ・ ・ ASEP with hopping prob. Q
- $f=1$ ・ ・ ASEP with hopping prob. q

20

バスや電車の運行モデルへの応用

公共交通システム=実は、蟻のモデルと同じ！



このダイナミクスは本質的に蟻のモデルと同じになっている！

21

群集マネジメント研究の必要性

 **Transport and Crowd Management Forum 2010**
May 02, 2010 Park Hyatt Resort - Jeddah, Saudi Arabia



世界中より様々な専門家が集結(オリンピック、感染症、シミュレーション等)

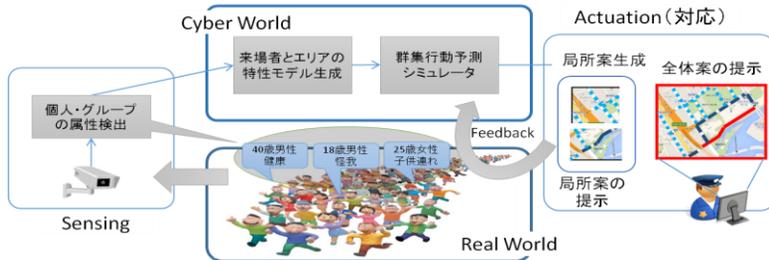
22

進行中の国のプロジェクト

研究代表者: 西成活裕



「個人及びグループの属性に適応する群集制御」



群集を構成する個やグループの属性を考慮した行動指針の生成
行動変容を考慮した群集全体の安全な移動に必要な情報提供

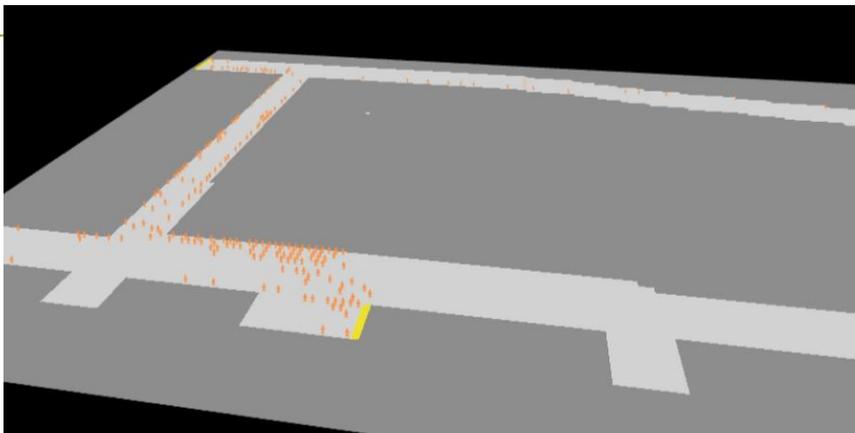
大規模イベント時は**オンサイトの監視基地**が必要！

23

韓国イテウオン雑踏事故

2022年10月29日

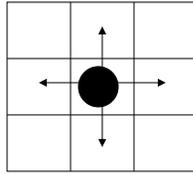
死者158名



- 狭い通路での対面流れになっていた
- 群集制御が全く無かった(出入制御、中央動線分離)
- そもそもの警備計画が無かった

24

フロアフィールドモデル 2D ASEP



東西南北のいずれかに動く

動きの際にモデルで考慮していること

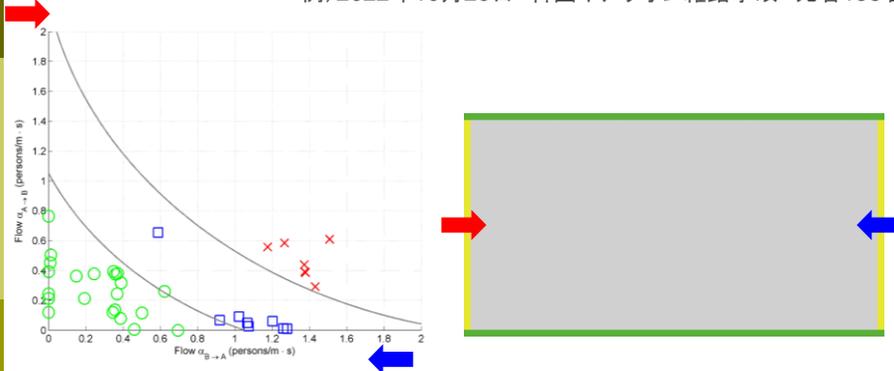
- ① 周囲の他者への追従、あるいはその逆
- ② 他者との競争・協力関係の強さ
- ③ 目的地までの最短ルートを選択
- ④ 壁や障害物から離れようとする傾向
- ⑤ 以前に動いてきた方向を維持する傾向

アルゴリズムの工夫により、
実時間以上の高速なシミュレーションが可能

25

「対向流は危険」 ある通行量を超えるとデッドロックする

例) 2022年10月29日 韓国イテウオン雑踏事故 死者158名



安全な対向流の条件 左右通行量合計が1人/m.s以下

C. Feliciani, K. Nishinari, "Phenomenological description of deadlock formation in pedestrian bidirectional flow based on empirical observation", J. Stat. Mech. (2015) P10003

26

スマホ歩きの人がいるとなぜ混雑するのか？2021年度イグノーベル賞

Science
ScienceAdvances

RESEARCH ARTICLE APPLIED PHYSICS

Mutual anticipation can contribute to self-organization in human crowds

HISASHI MURAKAMI, CLAUDIO FELICIANI, YUTA NISHIYAMA, AND KATSUHIRO NISHINARI

Human crowds provide paradigmatic examples of collective behavior emerging through self-organization. Understanding their dynamics is crucial to help manage mass events and daily pedestrian transportation. Although recent findings emphasized that pedestrian interactions are fundamentally anticipatory in nature, whether and how individual anticipation functionally benefits the group is not well understood. Here, we show the link between individual anticipation and emergent pattern formation through our experiments of lane formation, where unidirectional lanes are spontaneously formed in bidirectional pedestrian flows. Manipulating the anticipatory

27

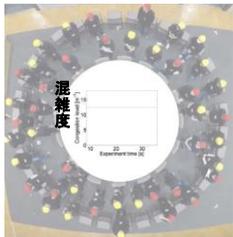
リスク判定の新しい「混雑度」の提案



高密度でも一方通行ならばよい。しかし低密度でも交差があれば問題

- 高密度でも交差がなければ危険度は少ない。交差度合いが本当の問題。
- 密度による従来判定法に代わる、交差の動きを正確に検知する新しい指標を構築

$$\text{混雑度} = \text{回転量} \div \text{平均速度}$$



従来の指標である密度は最初から最後まで一定

新しい「混雑度」により、レーンが形成される瞬間が分かる

回転量

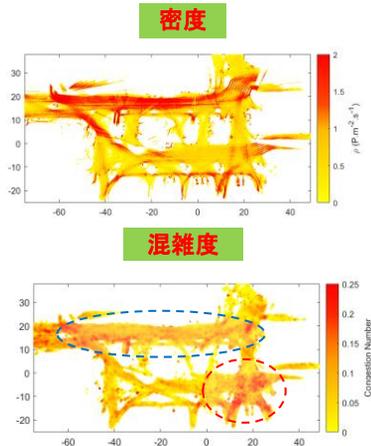
$$\vec{R} = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \nabla \times \vec{v}$$

$$\text{混雑度} = \frac{\max(r_z) - \min(r_z)}{E[\vec{v}]}$$

Feliciani, C. and Nishinari, K., Transportation Research Part C, vol. 91, pp. 124-155, 2018.

28

JR新宿駅での混雑の様子を密度と混雑度で比較



- 南通路の群集密度は高いが、速度も高いため、混雑度は高くない。(青い点線)
- 13,14番線北口周辺の混雑度は比較的に高い。(赤い点線)

29

神経の渋滞

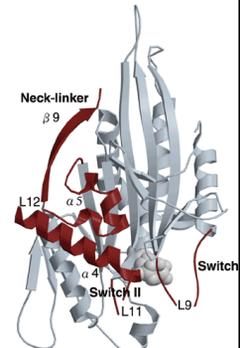
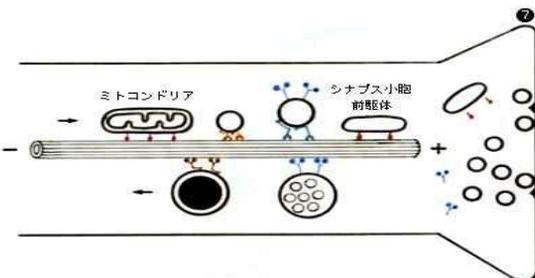
□ 分子モーター＝車、微小管＝道路

神経細胞内の物質の移動

この渋滞が様々な神経疾患を引き起こす

□ キネシン、ダイニンという2つの分子モーターが主役

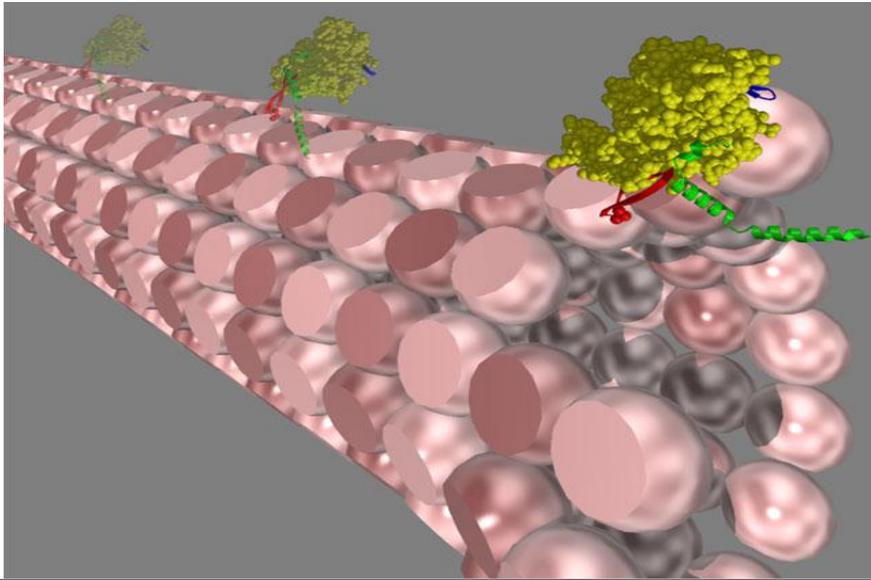
微小管上を進んで物質を運ぶ



30

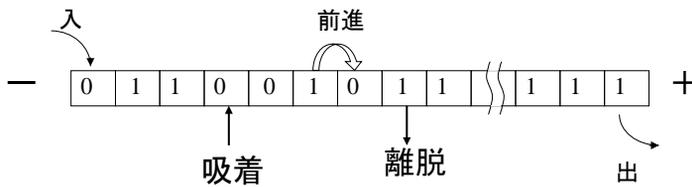
微小管を動くキネシン

キネシン=車
微小管=高速道路



31

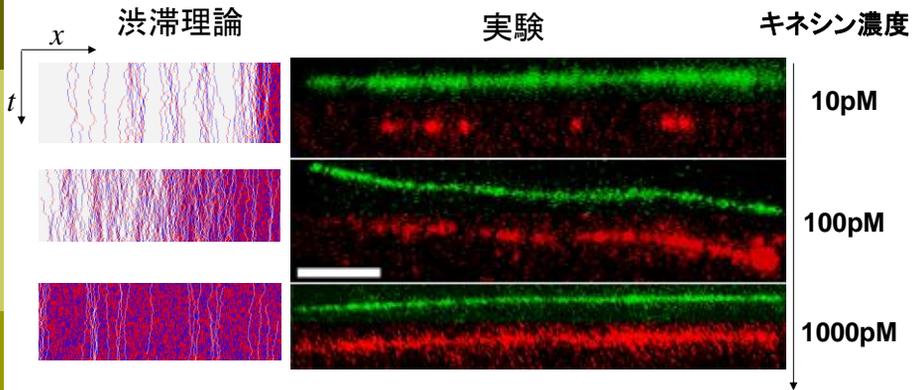
分子モーターの渋滞学モデル



ルール	1) 吸着	0	→	1	} 分子モーターの出入り → セルオートマトン
	2) 離脱	1	→	0	
	3) 前進	10	→	01	

32

理論と実験が一致！



キネシンの濃度が高くなると渋滞する
 K.Nishinari., et al, *Physical Review Letters*

33

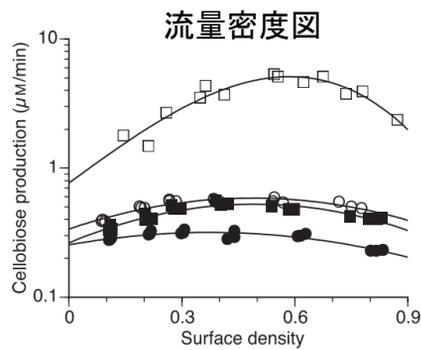
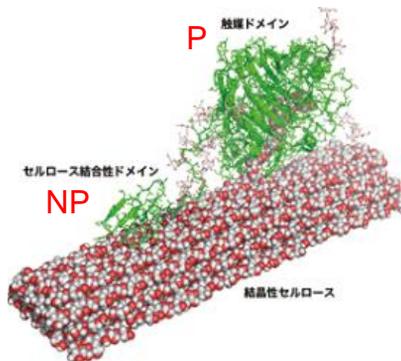
酵素の渋滞

セルラーゼの渋滞をモデル化

セルロースを分解してバイオエタノールを作る！



Igarashi et al. Science (2011)

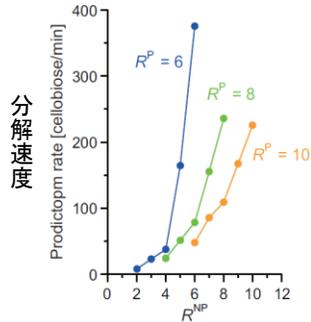


K. Igarashi, et al. FEBS J. (2007)

34

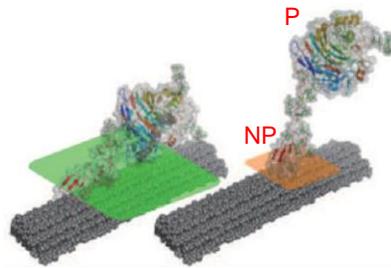
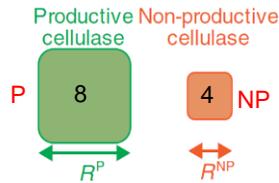
酵素の「大きさ」が反応速度を決める！

T. Ezaki, K. Nishinari, M. Samemjima, K. Igarashi,
Phys. Rev. Lett. 122:098102 (2019).



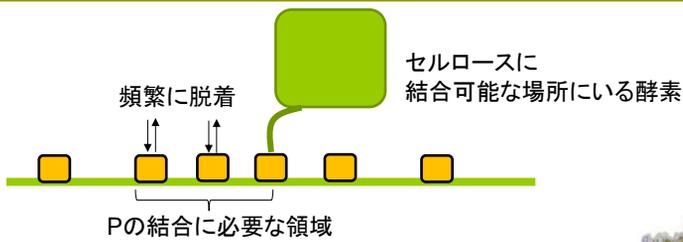
PとNPでサイズの差が
小さいほど反応が早くなる！

セルラーゼの改変で反応速度を
上げられる可能性を示唆

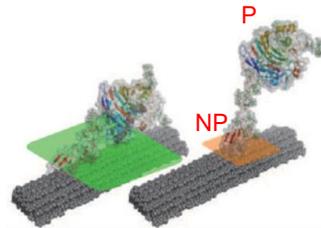
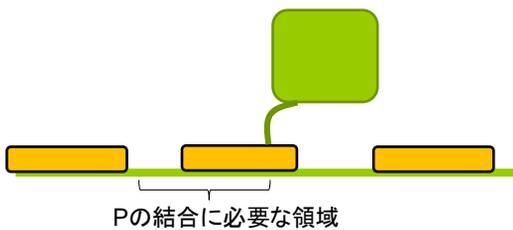


35

Crowd-out 現象



NPサイズが大きいとき



36

参考論文

- オイラーラグランジュ変換
Phys. Rev. Lett. vol.90 (2003) p.088701
- キネシン
Phys. Rev. Lett. vol.95 (2005) p.118101
- アリ
Phys. Rev. Lett. vol.102 (2009) p.108001
- セルラーゼ
Phys. Rev. Lett. vol.122 (2019) p.098102
- イグ・ノーベル賞
Science Advances vol.7 (2021) No. 12

37



38