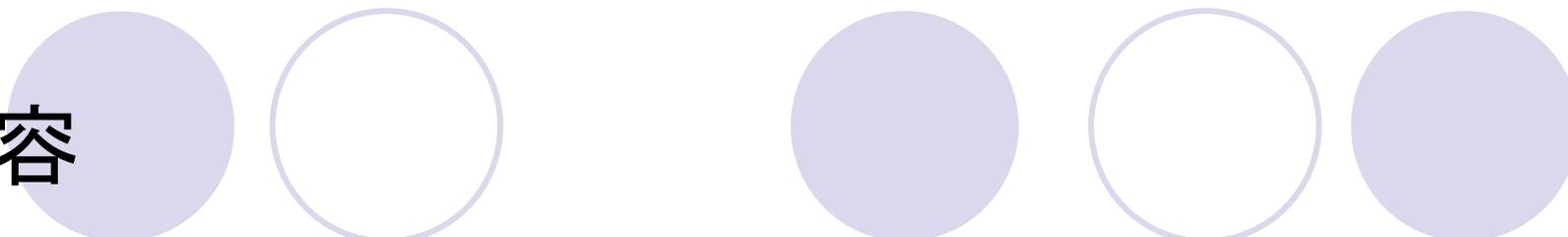


自己駆動粒子系の統計力学的手法による  
新しい渋滞シミュレーションの開発  
(名称)SDPソフトウェア

東京大学 大学院 工学系研究科  
西成 活裕



# 内容

- 「渋滞学」とは

  - 自己駆動粒子系とは？ 渋滞とは？

  - 基本となる理論

- 1. 車の流れのモデル化とシミュレーション

  - 自然渋滞とメタ安定について

- 2. 人の動きのモデル化とシミュレーション

  - フロアフィールドモデル

- まとめ

# 車や生物＝自己駆動する粒子

- 自己駆動粒子系(Self-Driven Particles, SDP)

作用＝反作用の法則の成り立たない粒子



- 学問上興味深い複雑な対象  
統計物理学、機能性流体力学
- 莫大な応用と社会的要請  
渋滞解消、物流問題、避難安全など

# 歴史的背景

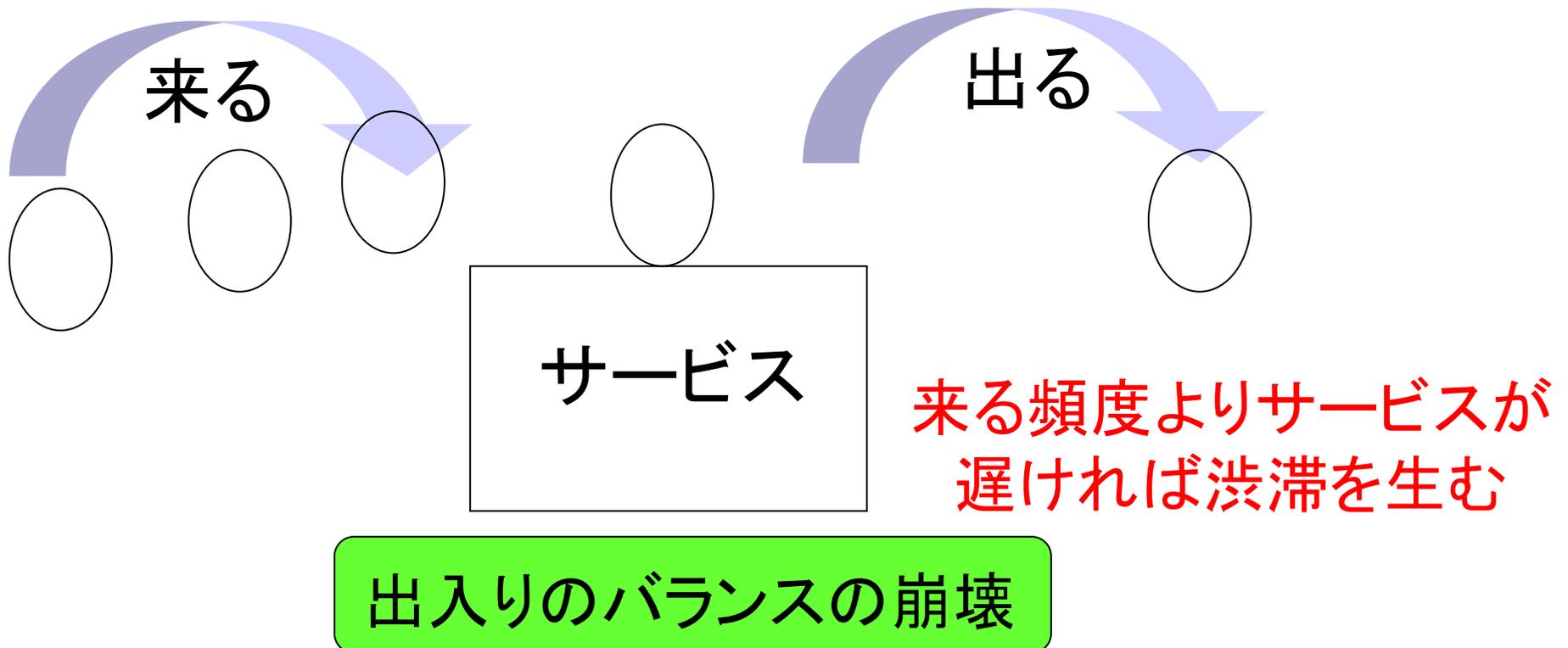
1990年代になって、、、

- 車の動きを表すモデルが物理学者から提唱
  - 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)
- 厳密に解ける確率モデルが次々に提唱
  - ASEP、ZRP(1993、Derrida、Evans、他)
- 超離散法の発見(1996、時弘ら)

国際会議Traffic & Granular flowが始まる(1995)  
＝世界的にSDP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

# 従来の渋滞理論 (OR)

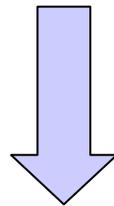
従来の理論は「待ち行列理論」で解析



# 空間構造を考慮したモデルへ

人が集まる際の「ぶつかり合い」

= 排除体積効果、慣性効果、移動距離

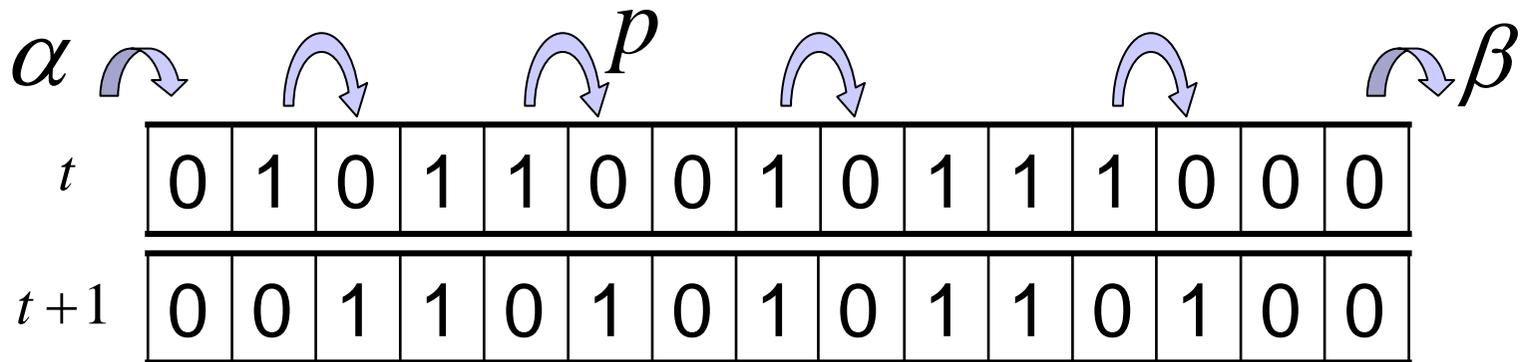


**ASEPへ!**

# 渋滞を考えるための基本モデル

## ASEP (非対称単純排除過程)

ルール: 前が空いているときだけ進む



左端から入ってきて、右端からぬける。

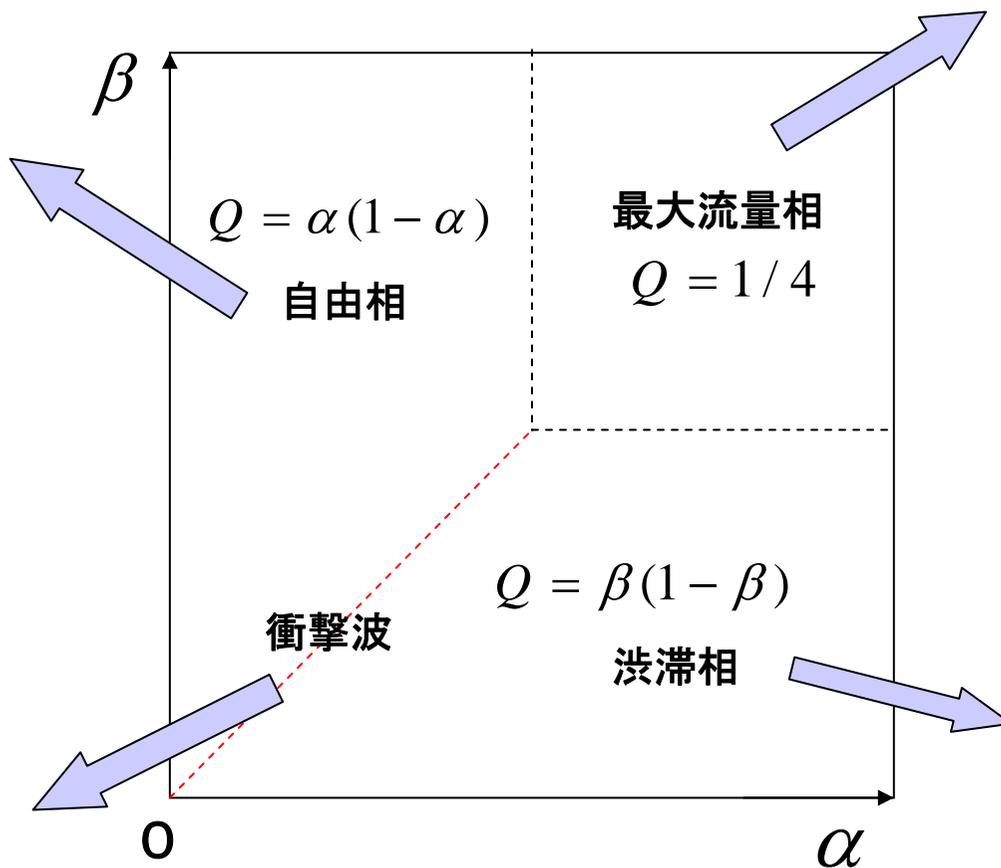
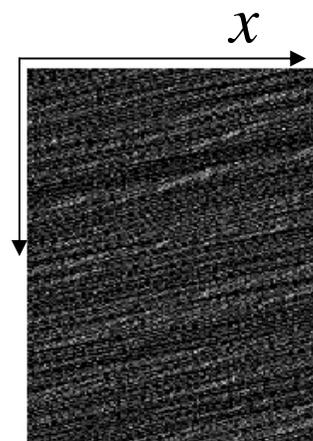
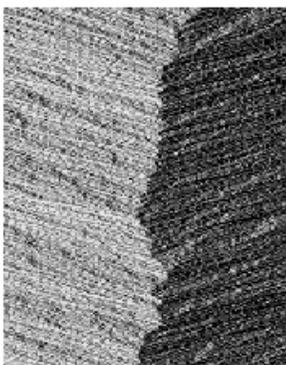
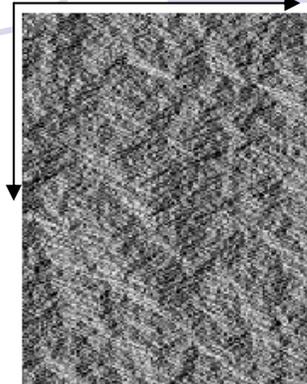
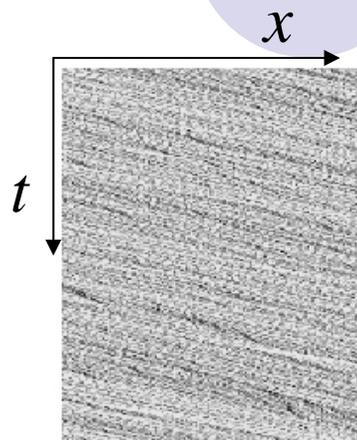
$\alpha$   $\beta$

前が空いているとき、確率  $p$  で進む

# ASEP相図



厳密解



----- 2次相転移  
 - - - - - 1次相転移



# 以上の背景を基礎として 自己駆動粒子系の研究が本格化

## 研究グループ

### 1) 日本

杉山(名大)、只木(佐賀大)、菊池(阪大)、中山(琉球大)  
湯川(東大)、福井(名大)、長谷(静岡大)など

### 2) ドイツ

Schreckenberg, Schadschneider, Helbing,  
Kerner, Nagel, Schuetzなど

### 3) 韓国、中国

Kim, Lee, Wangなど

### 4) その他

オランダ(Hoogendorn)、スイス(Chopard)  
アメリカ(Boccaro, Fucks)など

# 渋滞 道路だけじゃない

アリの列、細胞の中でも起きるんです



イライライライラ……  
＝東京都内で



アリ

ゾロゾロゾロ……(農業  
生物資源研究所の秋野順  
治・主任研究官提供)

西成大大学院 西成浩裕・助教  
今年もお盆の高速道路は大渋滞。東京  
大大学院工学系研究科の西成浩裕・助教  
によれば、渋滞は道路だけでなく、  
アリの行列や細胞の中でも起きていると  
いう。渋滞研究は、病気の理解や治療に  
もつながっている。(勝田敏彦)

交通渋滞は車による  
車線減少などで起きる  
が、特に理由がない「自  
然渋滞」もある。非常に  
ゆるい上り坂が代表例  
で、運転者が気付かない  
ほどの減速をする結果、  
勢いよく進んだ車と  
ブレーキをかけて速度が  
落ちる。  
車の流れの測定結果を  
西成さんが調べたとし  
て、高速で走っているこ

きに車間距離が大体40倍  
以下になると自然渋滞が  
起きることがわかった。  
ゆるい上り坂での自然  
渋滞対策は、ある程度わ  
かっている。東名高速に  
は「渋滞注意！」こぼ  
り板という看板が立  
てられている。これをみ  
る運転者がアクセルを  
少し踏むので、「団子」  
ができていく。

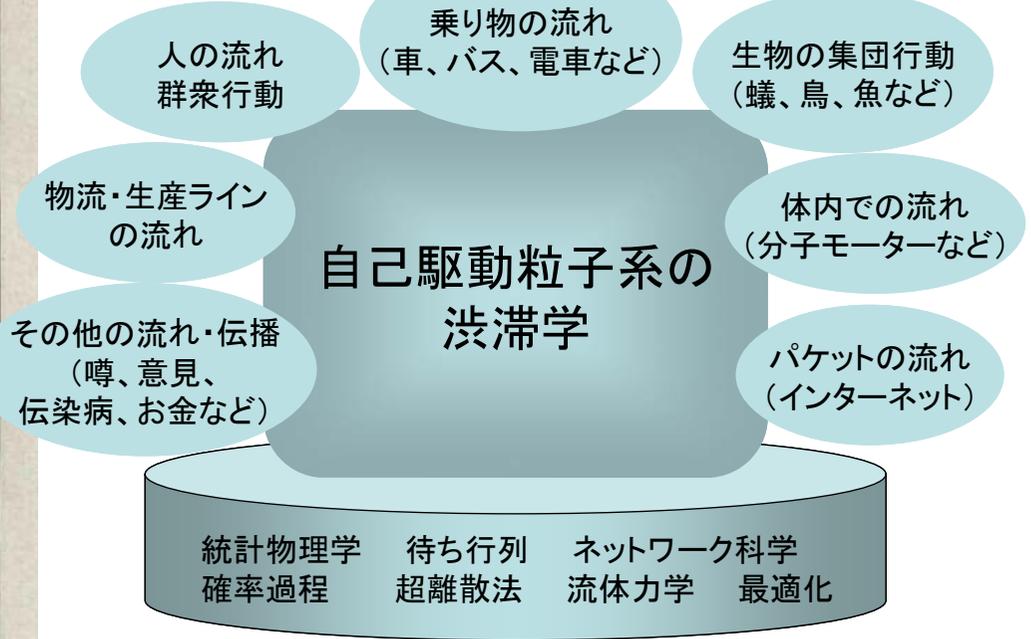
人間の渋滞も各地で問  
題になっている。ドイツ  
の研究グループは、競技  
場の出口に殺到する人が  
渋滞を起こさないよう、  
出口の前に柱を立てるこ  
とを考えている。柱が邪  
魔になって人の流れが変  
わり、結果的には渋滞が  
起きにくくなるという。  
アリの列でも数学的に  
同じ現象が起きていると  
いう。アリは仲間を道  
教えるため、目印のフェ

ロモンを地面に落とす。  
後続のアリは、フェロモ  
ンに向かって速く動く  
が、フェロモンが蒸発し  
てなくなると迷う。前に  
仲間がいないアリは進み  
方がゆっくりになり後続  
のアリが追いつき、渋滞  
する。このことは実験で  
も確かめられた。  
西成さんは、生体細  
胞の中の分子の流れでも  
渋滞が起きることを理論  
計算やシミュレーション  
で示した。

細胞の中では、キネシ  
ンなどの分子がミトコン  
ドリアや葉緑体といった  
「荷物」を載せ、ガンリ  
ンに相当する分子ATP  
を消費しながら、微小管  
と呼ばれる「道」を走っ  
ている。キネシンの密度  
を高めると、流れにた  
まりができる。車が増え  
て道路が渋滞するのと全  
く同じだ。  
ある種の腫瘍や神経疾  
患は、細胞内の分子の流  
れの不調が原因と考えら  
れており、渋滞の研究は  
病気の治療にもつなが  
るかもしれない。  
西成さんは「高速道路  
の自然渋滞はそのまま流  
れる液体のような状態か  
ら、流れに「ゼリー」の  
ような状態へ移る「一種  
の相転移」とみることが  
できる」といっている。  
お互いがぶつからないよ  
うに流れる「自己駆動  
型」粒子に共通する現  
象。統一的に研究してい  
きたいと話している。

## 西成大大学院 発生学の謎と対策探る

# SDP系の「渋滞学」



一般向けの渋滞学の本が新潮社より  
2006年9月に出版予定！

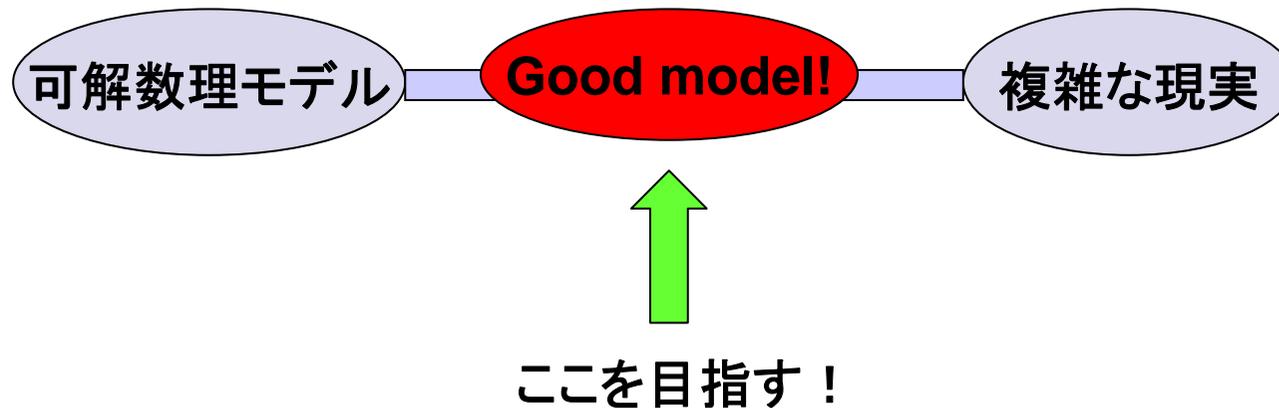
方法論(私見)

現実への応用を「真面目に」目指す

## モデル化と解析

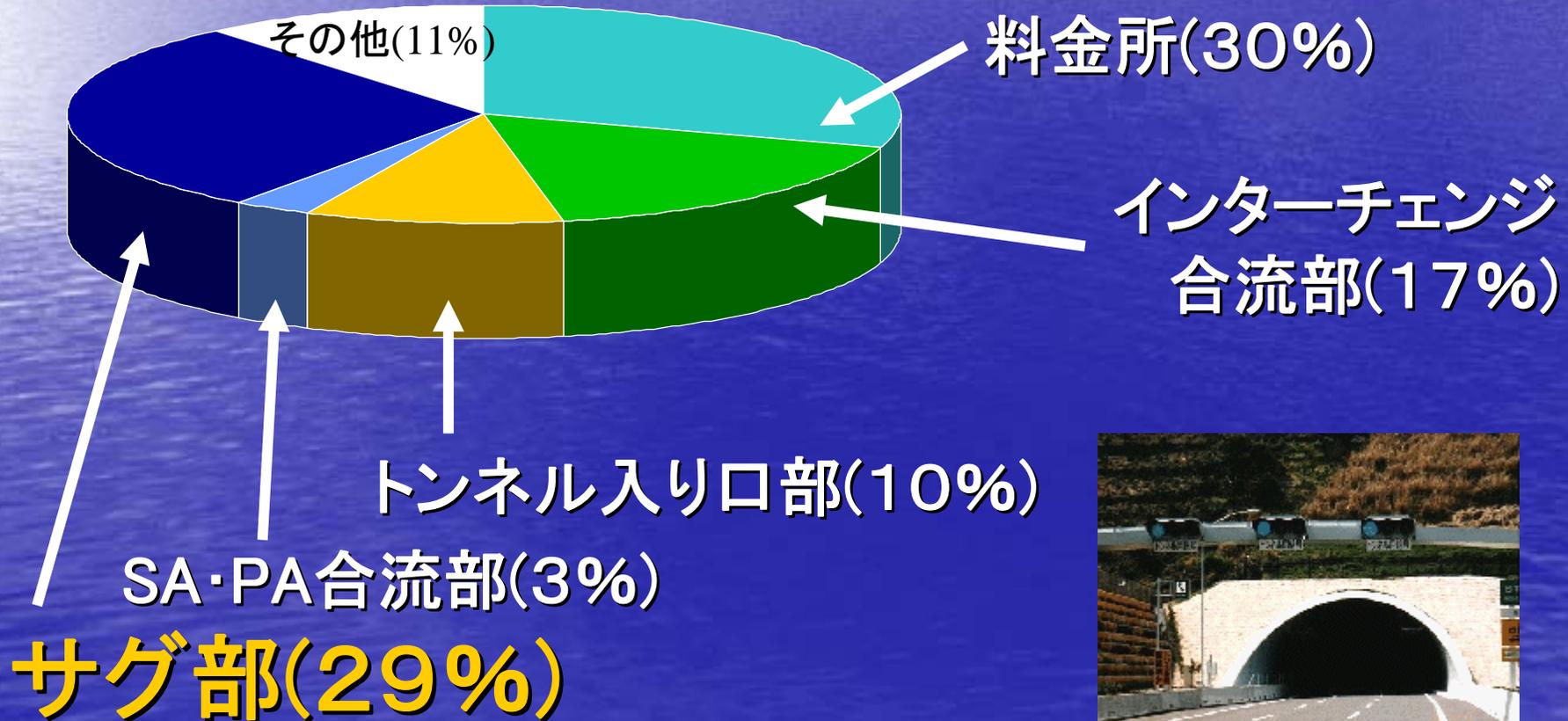
数理的になるべく厳密に解析

実験データとの対応を真面目に考える



# 1. 車の流れ

## 高速道路での渋滞原因



# 高速道路での自然渋滞はなぜ起こるか？

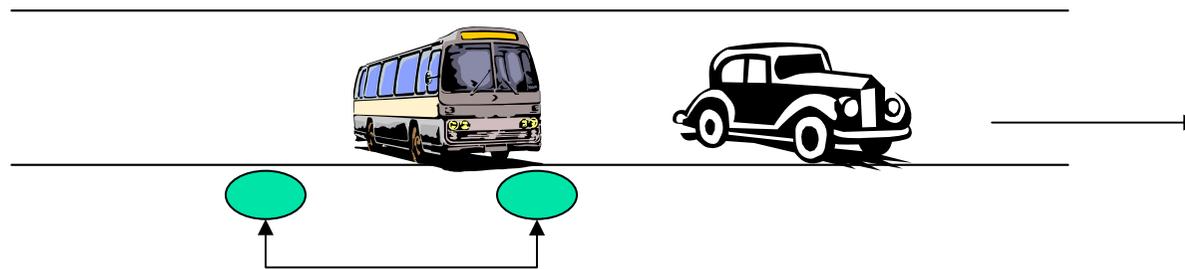
- サグ部にさしかかると、車は自然に速度が少し落ちてくる。後続車はある車間距離以下に詰まると安全のため速度を落とす。



- これが後ろの車にブレーキを踏ませ、さらに後ろへと**増幅されて**伝わる。連鎖反应的。  
(車の流れの**不安定性**)  
この現象はある車間距離以下になると起こる。  
(**臨界密度**)

# 交通流の測定(日本道路公団)

- 交通量  $Q$ 、平均速度  $\bar{v}$ 、交通密度  $\rho$



ループコイル(7m間隔、2kmおき、5分間毎記録)

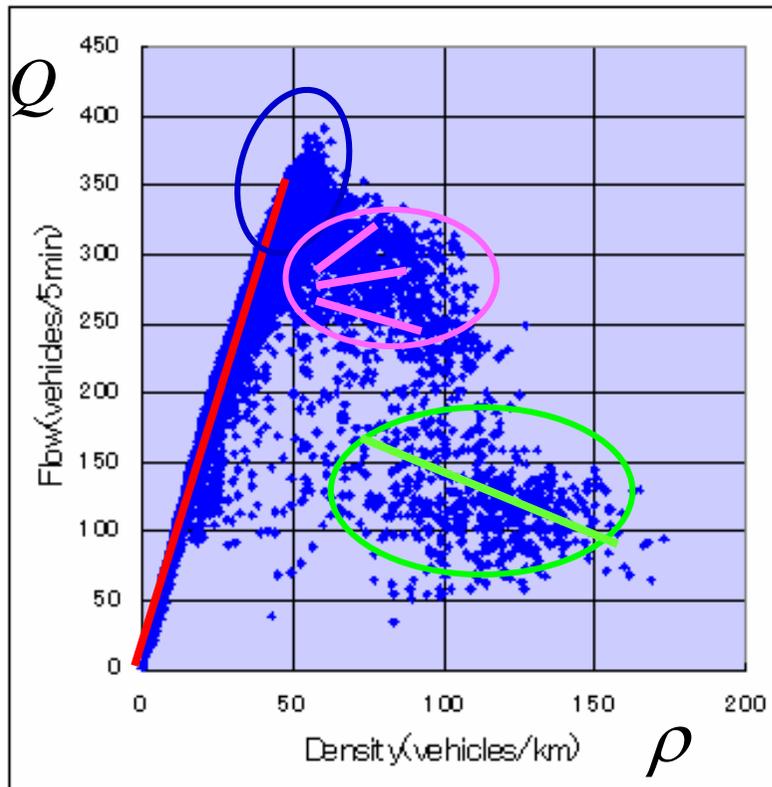
$Q$  (台/5min)・・・上流側ループコイルを5分間に通過する台数

$\bar{v}$  (km/5min)・・・5分間の各車の速度の平均

$Q = \rho \bar{v}$  の関係より、密度(台/km)を算出

# 流量と密度の関係(基本図)

実測データはほぼ全て以下のような特徴を示す



## ◆自由走行相

速度約時速80Km

## ◆渋滞相

Stop & Go wave

速度約時速-20Km

## ◆相転移領域

1. **メタ安定** 10分程度の寿命  
いかに制御するか？

2. **高流量渋滞**

Recovering traffic, Time clearance effect, Pinch effect, 移流不安定性など諸説あり

# 交通流モデル(1998年まで)

## ■ 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

Kernerらのモデル

## ■ ミクロモデル

### 1. 追従モデル

・Newellモデル

・最適速度モデル

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

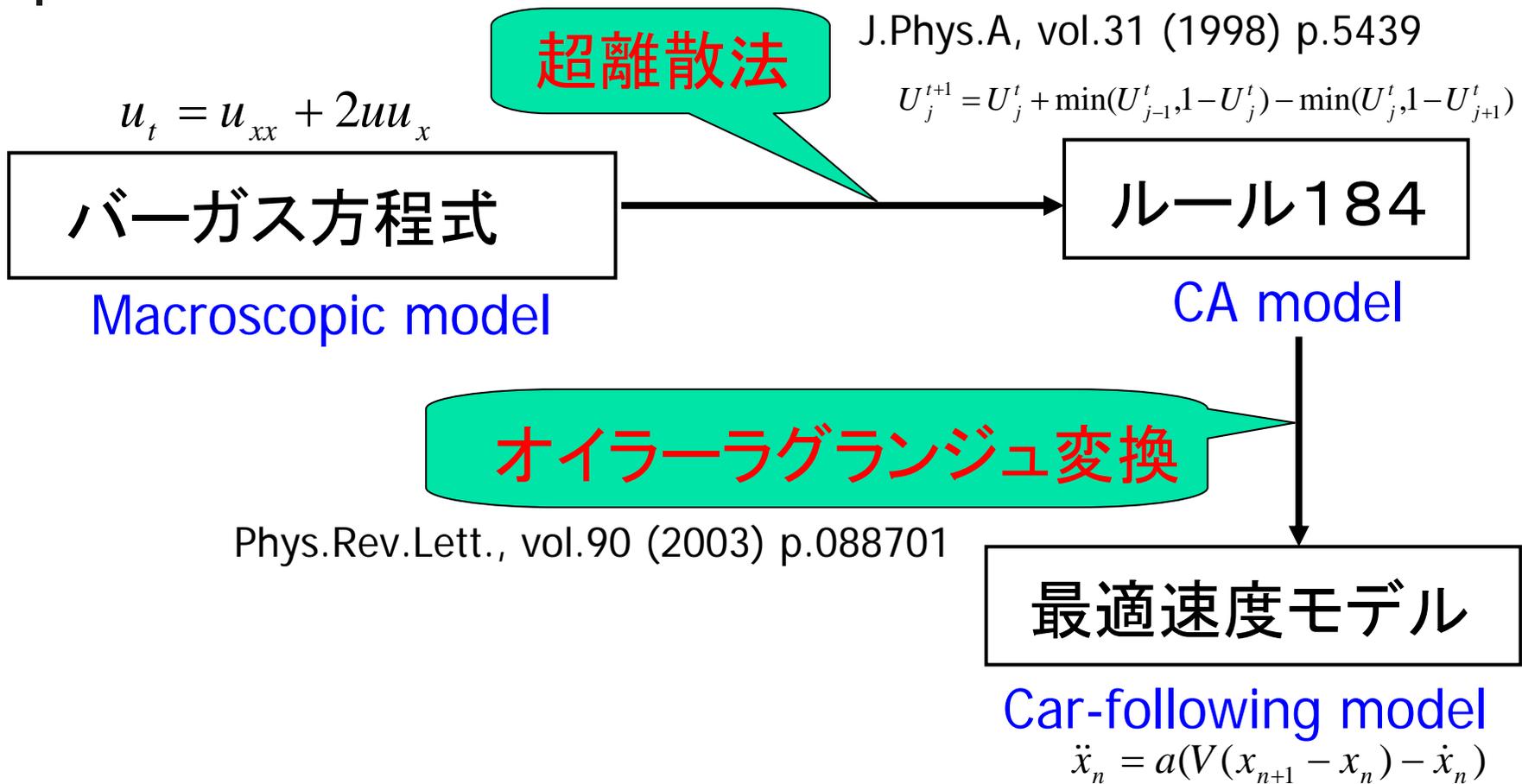
### 2. セルオートマトンモデル

・ルール184モデル、ASEP

・SISモデル, QSモデル

・NSモデル

# 決定論的モデルの「形式的」統一理論

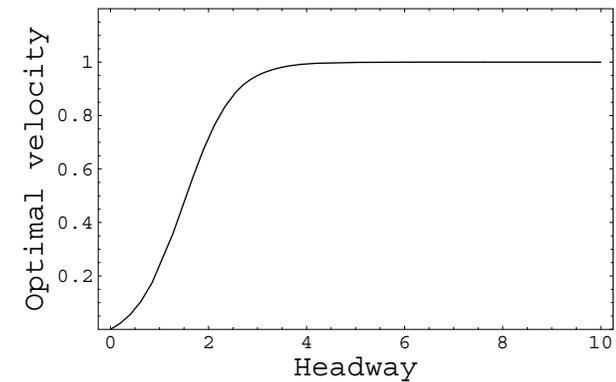


# 最適速度 (Optimal Velocity) モデル

Bando, et al, J.Phys. I 5 (1995) p.1389

$$\frac{d^2 x_n}{dt^2} = a(V(x_{n+1} - x_n) - \frac{dx_n}{dt})$$

$a$  Sensitivity parameter



車間距離が詰まって自然に不安定流れができる様子が再現できた。

# SOVモデル ASEPとOVモデルの 統合による新モデル

OVモデル  $\frac{d^2 x_n}{dt^2} = a(V(x_{n+1} - x_n) - \frac{dx_n}{dt})$

差分化  $v_i^{t+1} = v_i^t + a(V(x_{i+1}^t - x_i^t) - v_i^t)$

$$= (1-a)v_i^t + aV(x_{i+1}^t - x_i^t)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$$

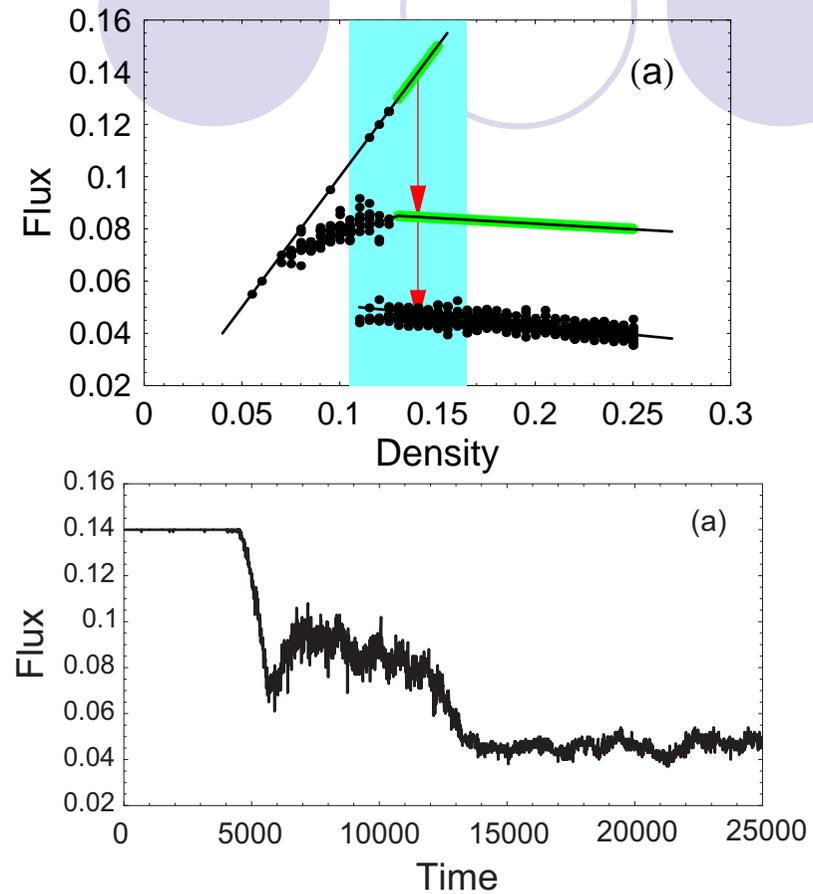
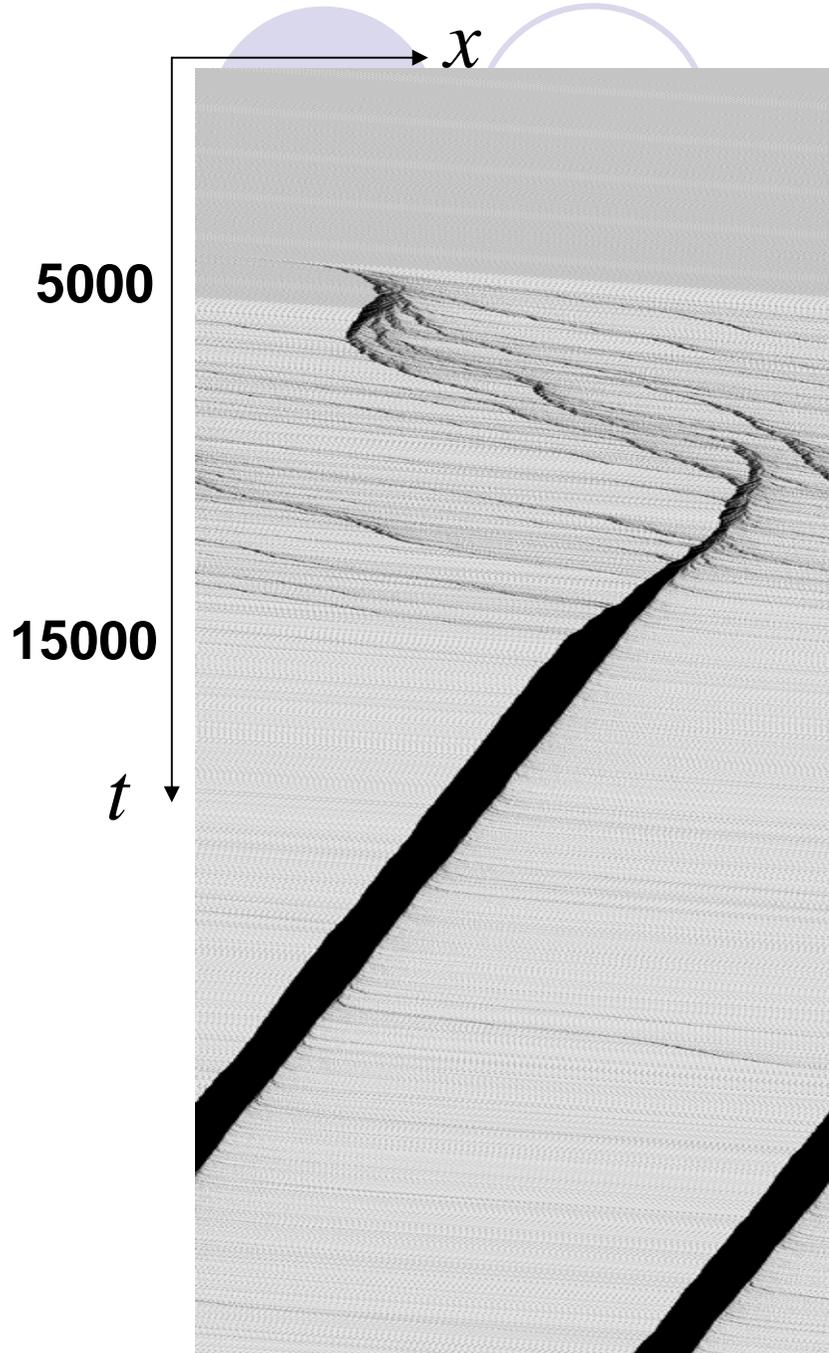
$a \in [0,1]$   $v, V \in [0,1]$   $x \in \mathbf{Z}$  として考える。

すると、「**速度 = 前進確率**」と見なせる。

SOVモデル

確率  $v_i^{t+1}$  で  $x_i^{t+1} = x_i^t + 1$  (前が空いていれば)

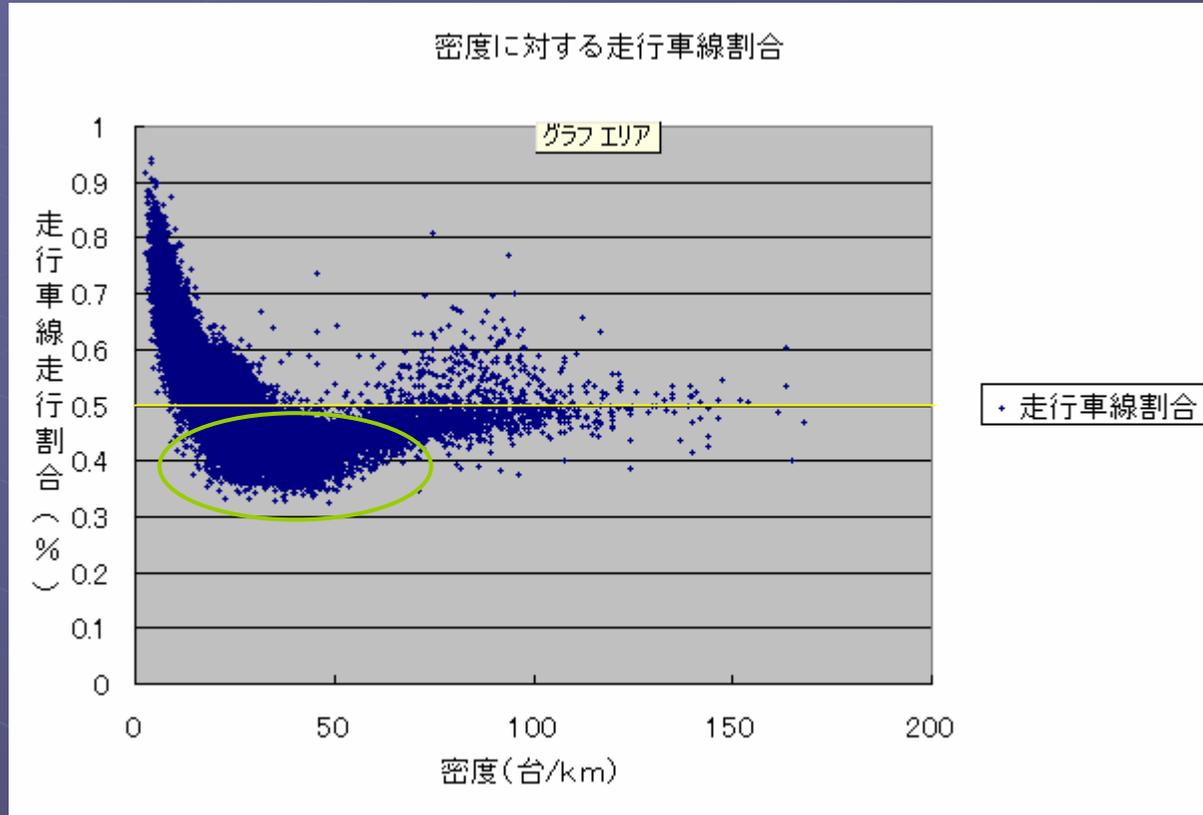
# 時間発展の時空図



中間状態の寿命が大変長い。  
状態遷移の様子がsharpである。

M.Kanai, K.Nishinari, T.Tokihiro,  
*PRE*, vol.72 (2005) p.035102.

# 2車線交通の逆転現象

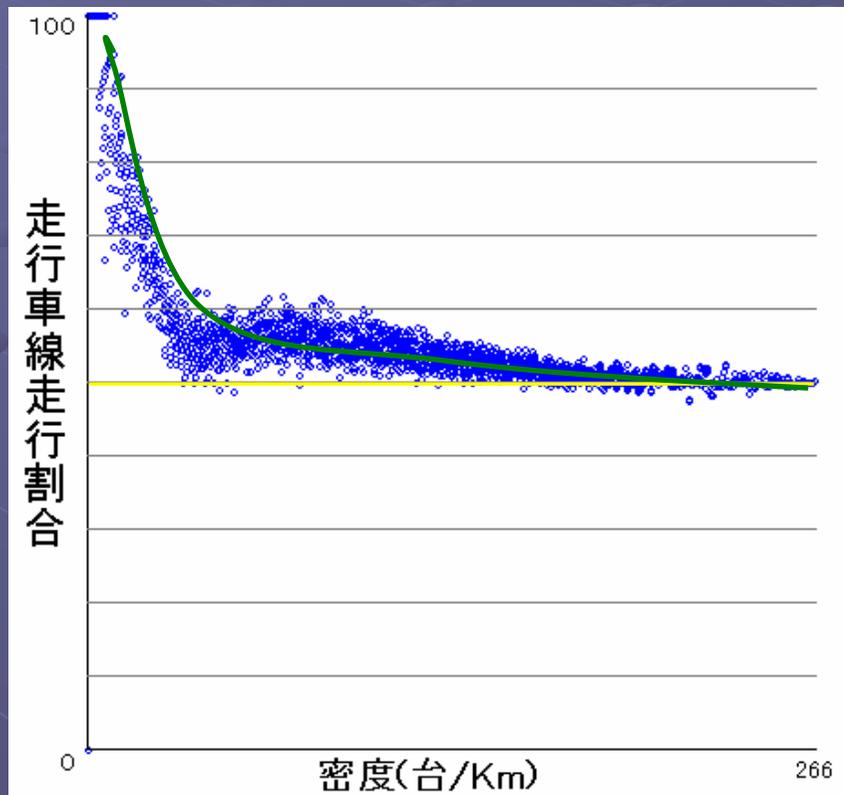


瀬田西IC～大津IC区間データ(日本道路公団提供)

一時的(密度が25～50台/kmあたり)に、  
走行車線と追い越し車線の台数が逆転する時がある。

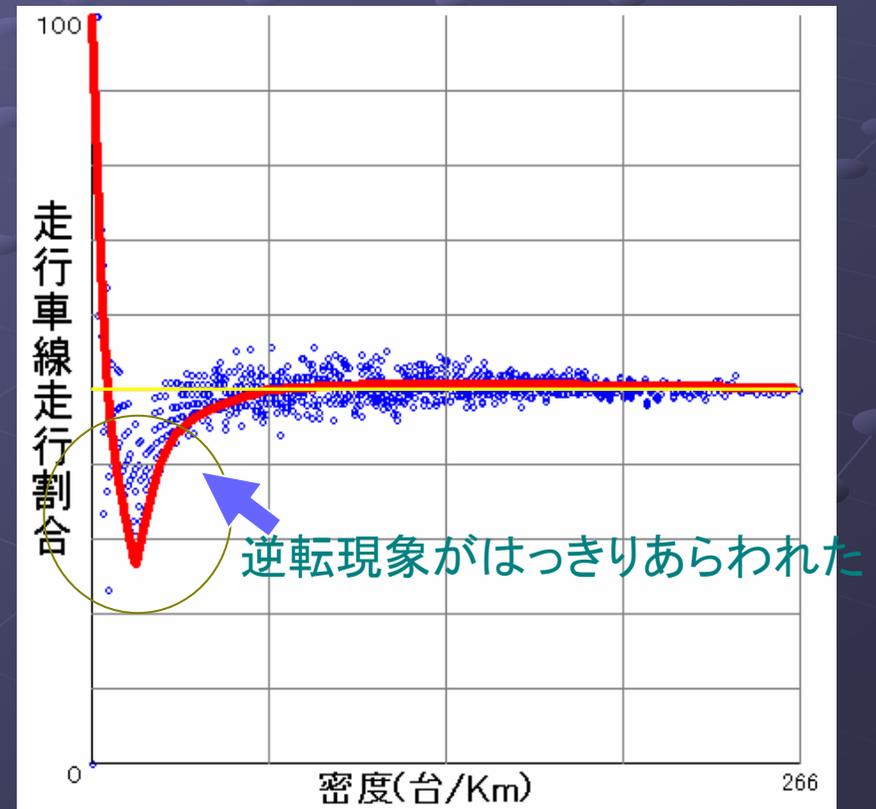
# 車線変更CAモデル

- 2車線でのローカルな密度から判定



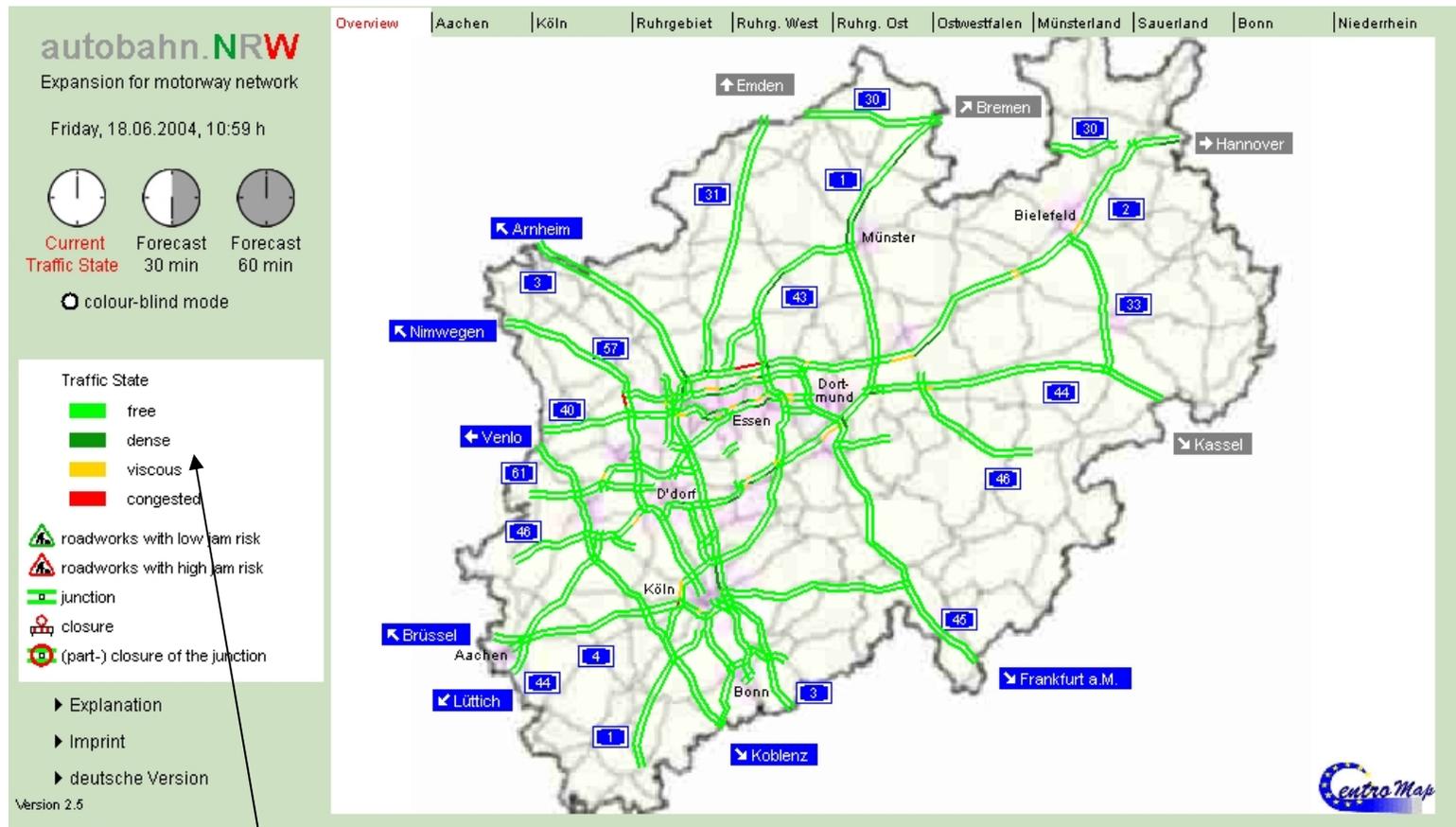
ダメなCAモデルの例

- 2車線での周囲30セルの密度と平均速度から判定



# Online Simulation

State of full network through simulation based on available data  
➔ “interpolation” based on online data: online simulation

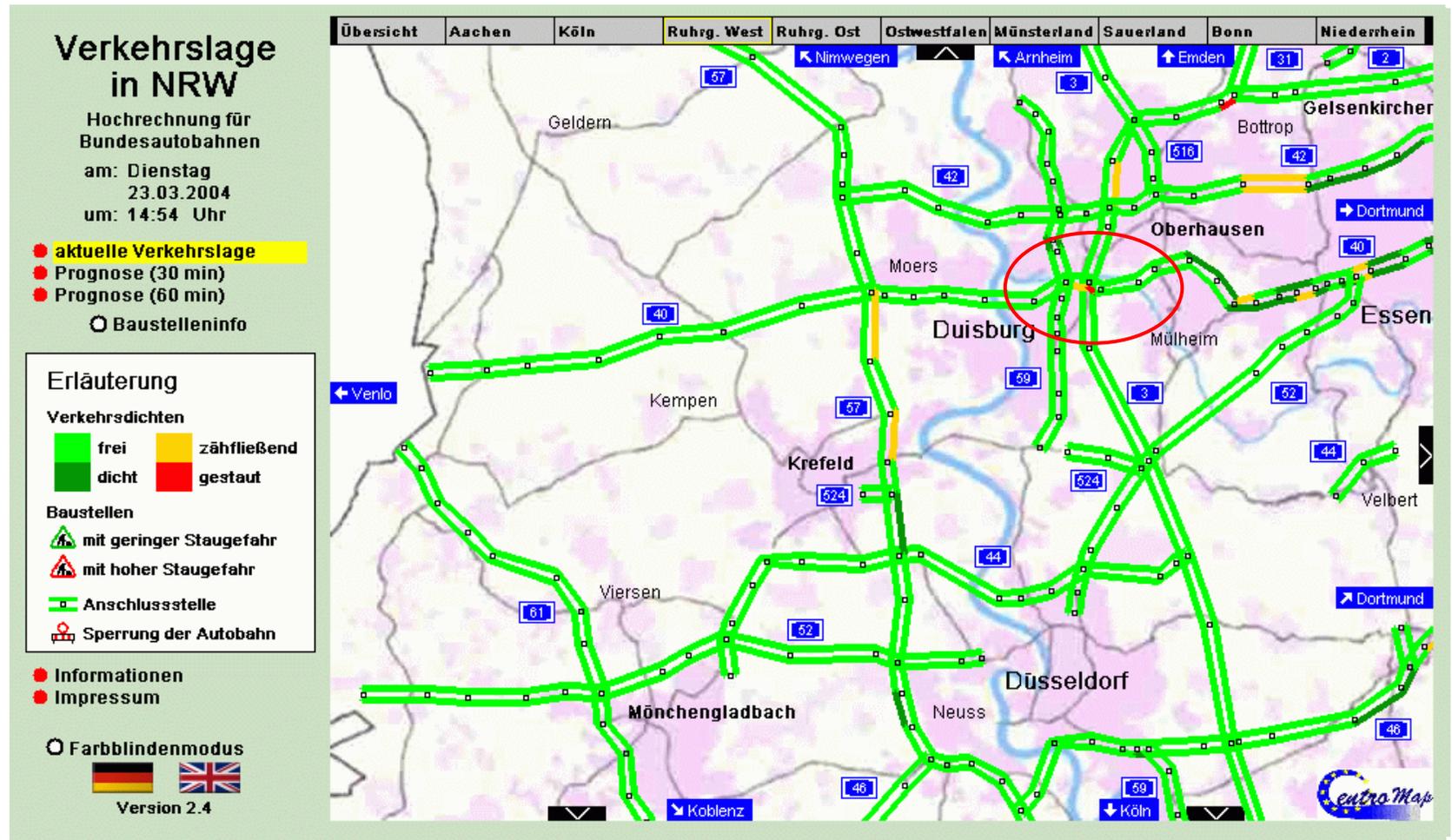


classification into 4 states

(available at [www.autobahn.nrw.de](http://www.autobahn.nrw.de))

# Traffic Forecasting

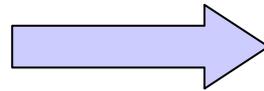
state at 13:51



## 2. 人の集団行動



- 人の集団行動、群集行動のシミュレーション  
新しい分野で近年活発な研究対象



- 避難安全行動(建物、乗り物等)
- 駅や交差点、大会場での効率化

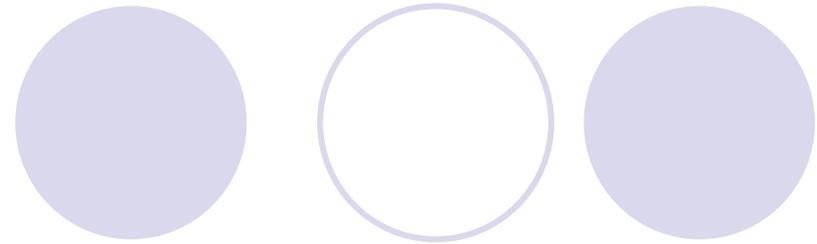
- 様々な応用  
デパートの商品配置、広告配置、駐車場の形状
- 学際的理論  
流体力学、粉粒体力学、社会心理学



# 群集のモデル化と問題点

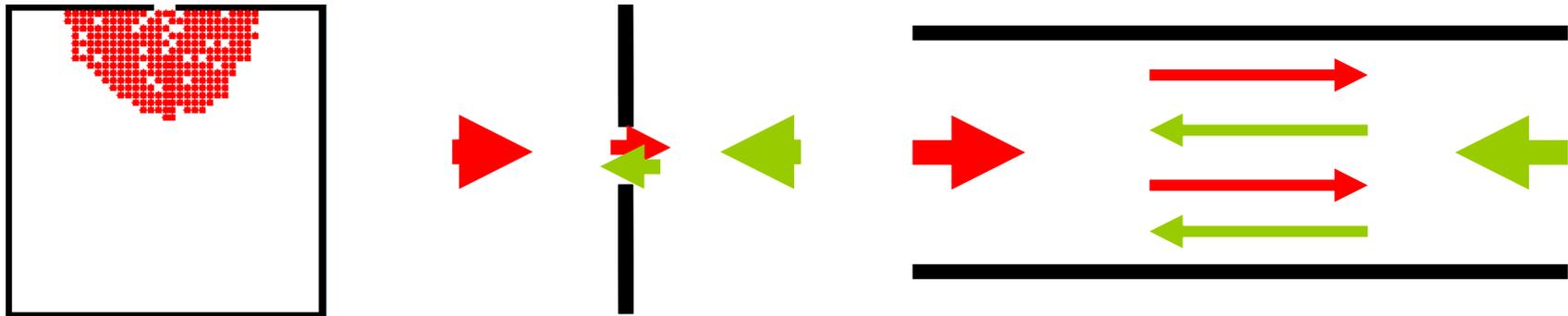
- 人の行動のモデルの難しさ
  - 1) 個人の自由勝手な動きはモデル化不可能
  - 2) 集団の中で、個人の自由行動が抑制されたときに法則性が出現、その特徴をとらえてモデル化
- 集団行動の例
  - パニック時の避難行動（単純な動きに制限される）
  - 駅の通路など（目的方向が明確化できる）
- 信頼できるモデル作り
  - Social force モデル、2次元OVモデル（連続モデル）
  - Floor field モデル（CAモデル）

# 群集モデル



- 群集の基本的な特性

- 1) 出口でのアーチ形成
- 2) 隘路での振動現象
- 3) レーン形成



- これらを再現するモデル

Social force model (Continuous model)

D.Helbing, I.Farkas and T.Vicsek, Nature (2000).

Floor field model (CA model)

C.Burstedde, K.Klauck, A.Schadschneider, J.Zittartz, Physica A (2001)

# フロアフィールドモデル

避難、パニック状態  
= 他者追従行動  
= 長距離相互作用

人は近傍ルールのみで動くわけではない。  
しかし計算効率化のためにも近傍ルールで  
ダイナミクスを記述できないか？

Idea: 足跡 = フェロモン

長距離相互作用を  
フロアのメモリーを利用して  
短距離相互作用で模擬する方法



# 動的フロアフィールド

- 人が通ったセルに足跡を残す = フェロモン
- 足跡の多いセルに向かう = 他者に追従
- グローバル情報をローカル情報に変換

	4	
1	●	2
	1	

- 動的フロアフィールド自身のダイナミクス

## 減衰 + 拡散

減衰・・・各セルの足跡数を減らす (確率  $\alpha$ )

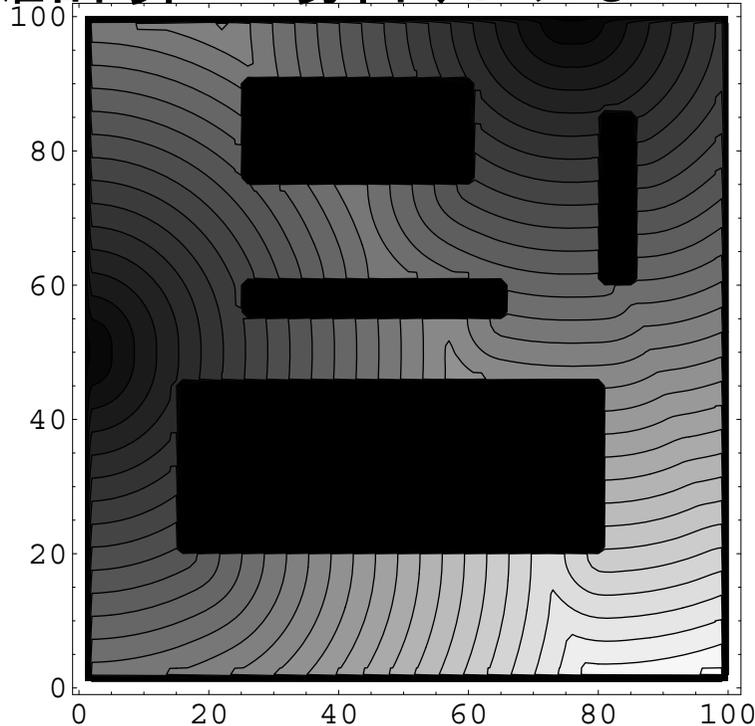
パーソナルスペースの視野距離に関係

拡散・・・あるセルの足跡数を近傍セルに分配 (確率  $\beta$ )

人間のランダムな動きを反映

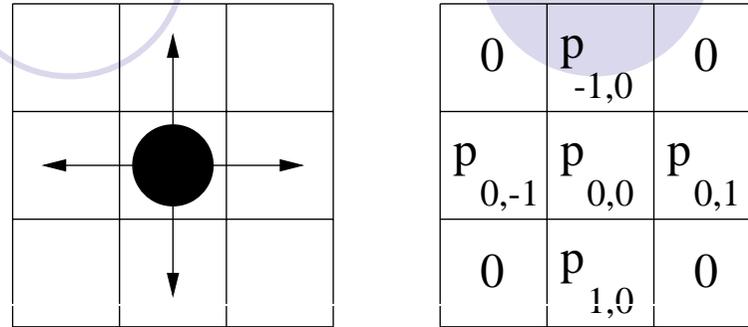
# 静的フロアフィールド

- 目的地までの距離をセルにあらかじめ記入しておく  
避難計算の場合、ドアまでの距離



距離計算は可視グラフ+ダイクストラ法による方法

# 人の動く確率とパニック度の導入



$$p_{ij} \approx \exp(k_D D_{ij}) \exp(-k_S S_{ij})$$

$S_{ij}$  セル(i,j) と扉との距離

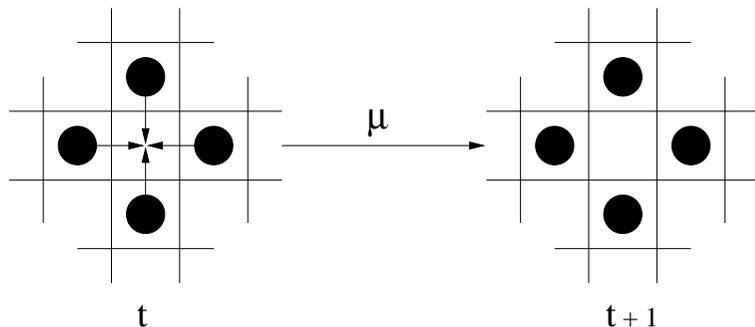
$D_{ij}$  セル(i,j)の足跡の数

- $k_S \rightarrow \infty$  : 冷静状態 (  $k_S, k_D \rightarrow 0$  : ランダム歩き)
  - $k_D \rightarrow \infty$  : パニック状態
- $k_D / k_S$  …… **パニック度** (パニック度パラメータ)

# 時間更新ルール

1. DFFの更新 (拡散 & 減衰)
2.  $p_{ij}$  の計算
3.  $p_{ij}$  をもとに動くセルを決定
4. **コンフリクトの解消**
5. 全ての人を動かす
6. 動いて人がいなくなったセルのDFF に1加える

## コンフリクト解消方法

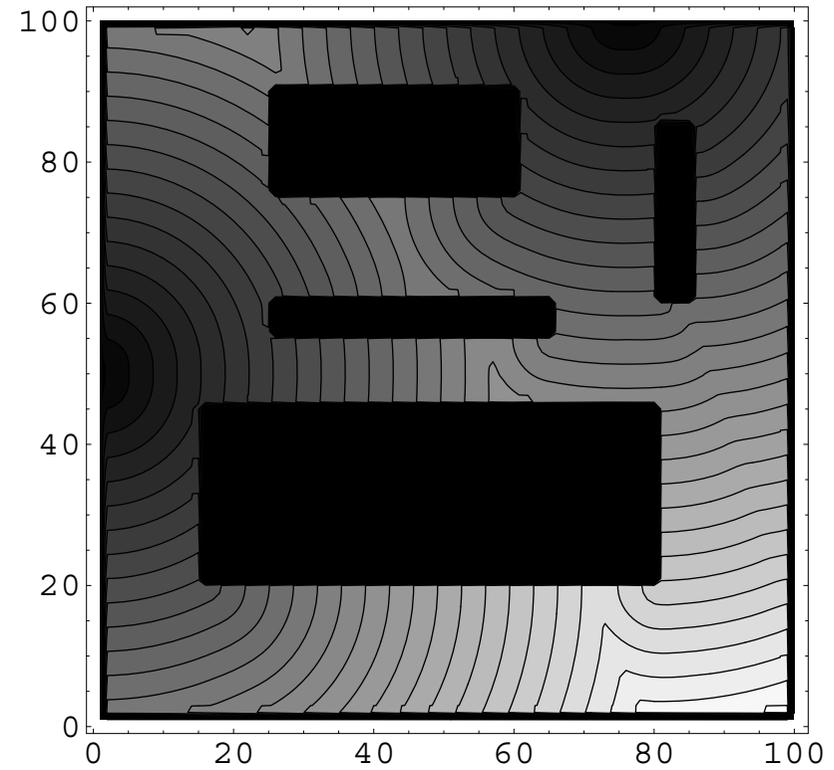
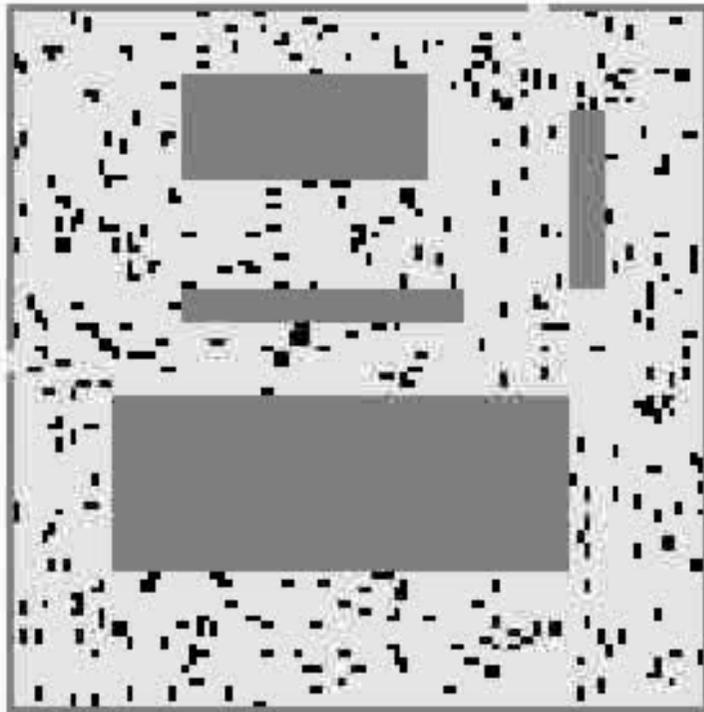
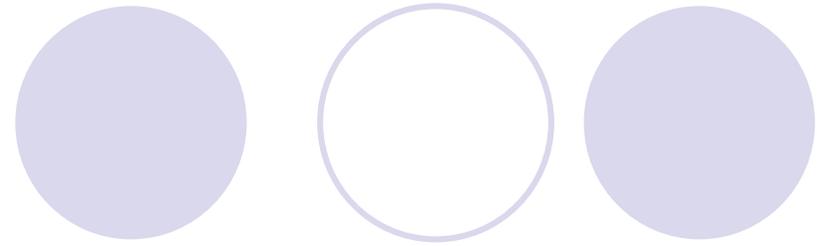


摩擦パラメーター  $\mu \in [0,1]$

$\mu$  この確率で全員動けない  
(みんなで競争している状況)

$1 - \mu$  誰か一人ランダムに選び動く  
(譲り合い、譲歩行動)

# シミュレーション例

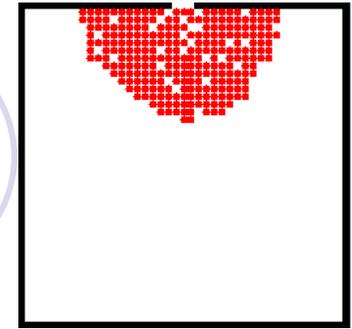


低いパニック度での計算。2つの扉と4つの障害物のある部屋



# 避難戦略 競争か協力か？

## ボトルネックでの例

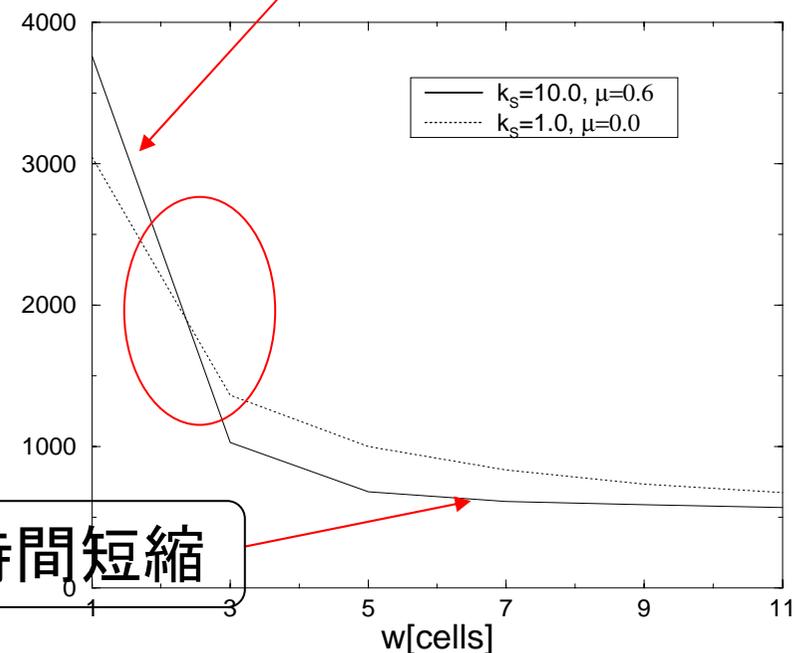


- 競争モード: 大きい  $k_S$  + 大きい  $\mu$
- 協力モード: 小さい  $k_S$  +  $\mu=0$

競争によるアーチ形成  
での避難時間増加

結果: 避難時間の交差が出現

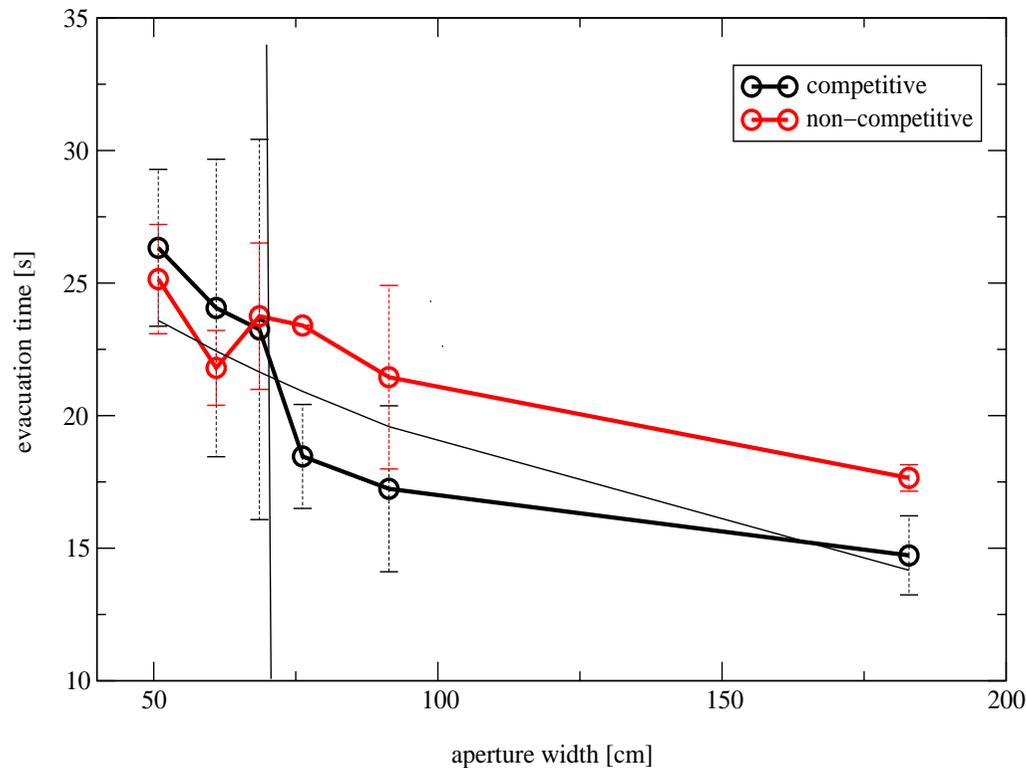
ドア幅が狭いとき、競争モード  
でのアーチング現象が見られる



競争による避難時間短縮

# 協調か競争か？ FFモデルと実験の比較

! (Muir et al. 1996)



ドア幅と総避難時間の関係

$$T_{\text{nonc}} > T_{\text{con}} \quad \text{if} \quad w < w_c$$

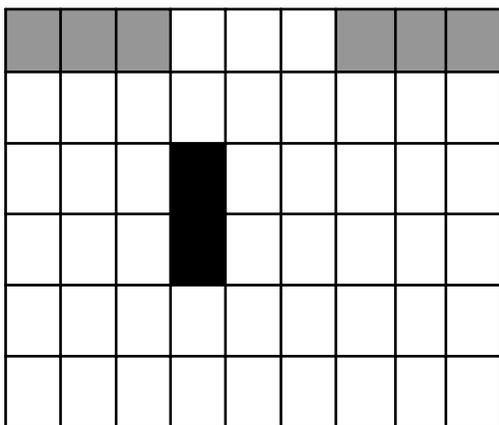
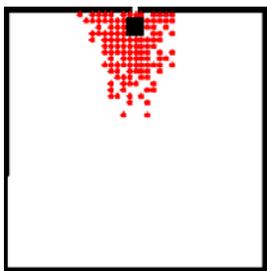
$$T_{\text{nonc}} < T_{\text{con}} \quad \text{if} \quad w > w_c$$

実験でも交差が見られた！

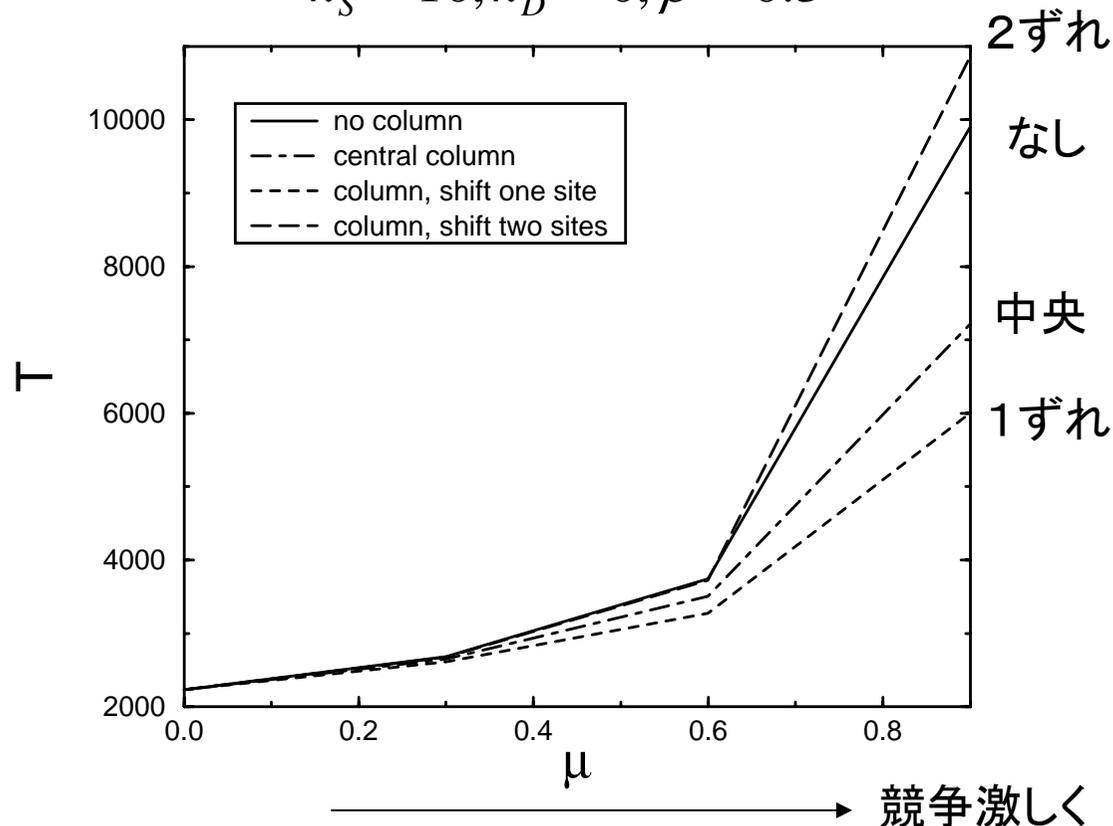
A. Kirchner, H. Kluepfel, K. Nishinari, A. Schadschneider and M. Schreckenberg, Physica A (2003).

# 障害物の影響について

出口付近に障害物をおく

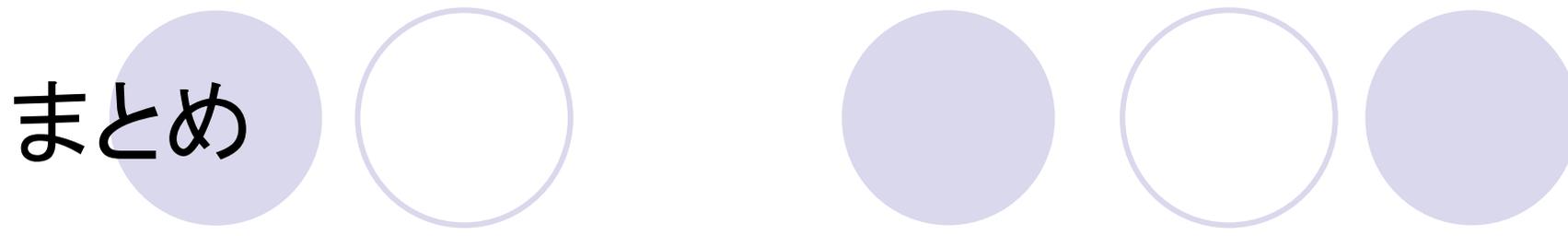


$$k_S = 10, k_D = 0, \rho = 0.3$$



障害物を非対称に置くと、総避難時間が短縮できる！

(Helbing's column)



# まとめ

- これまでの研究によるモデル化
  - 1) 数理的に信頼度の高いもの
  - 2) 様々な実験との比較検討、高信頼度
- ネットワークでの交通流と物流
- 高精度の人と車の集団行動シミュレーション、そして渋滞予測の統合ソフトウェア作成