

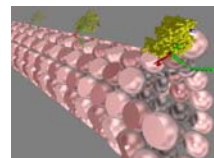
渋滞のサイエンス

渋滞学とは何か

東京大学 大学院 工学系研究科
(独)科学技術振興機構「さがけ」
西成 活裕

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

第23回講談社科学出版賞受賞
第7回日経BP社BizTech賞受賞

日本テレビ「世界一受けたい授業」(2007/02/10)
NHK「爆笑問題のニッポンの教養」(2007/10/9)
NHK「サイエンスZERO」(2007/8/11)
など多数出演



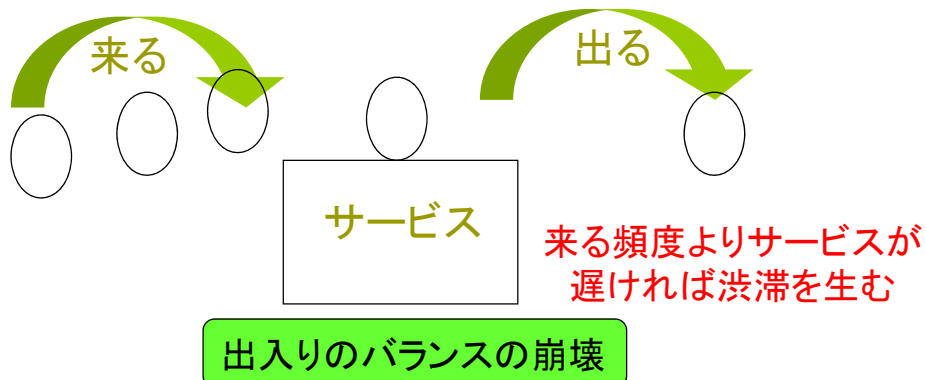
内容

- 様々な渋滞を考えるための基礎理論
待ち行列理論、ASEP
基本図
- 車、アリ、人の渋滞
- 全体のまとめ

従来の渋滞に関する理論

(オペレーションズリサーチ)

これまで渋滞現象は「待ち行列理論」で解析されてきた



待ち行列理論の基本公式

リトルの公式 (定常状態、一般分布で成立)

待ち行列の長さ = 待ち時間 × 人の到着率 α

待ち時間 = 到着して何分待たされるか？
待ち行列の長さ = 何人待っているか？

問) 1分で平均2人来るすし屋には、いつも平均10人待っているとする。

このとき、平均待ち時間は何分か？

答) 待ち時間 = 行列の長さ ÷ 到着率
 $= 10 \div 2 = 5分$

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



- 前が空いてもすぐに詰めない
- ゾロゾロと前に進む



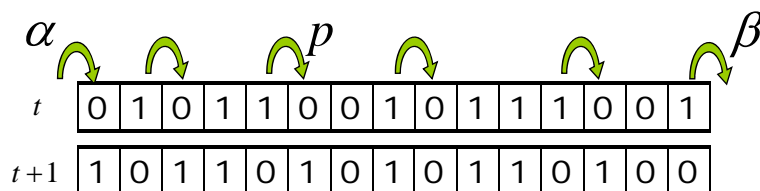
ASEPへ!

渋滞を考えるための新しい数学

ASEP (非対称単純排除過程)

Asymmetric Simple Exclusion Process

ルール: 前が空いているときだけ進む



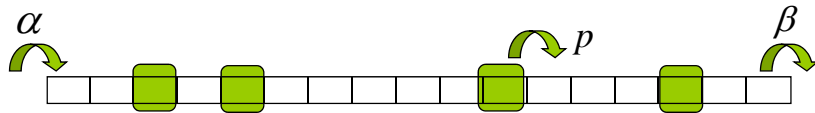
このモデルにより渋滞のできる様子がより正確に分かるようになった(1993~)

ASEPをベースにして、車、アリ、人、神経などの渋滞を研究

ASEPの大論文登場!

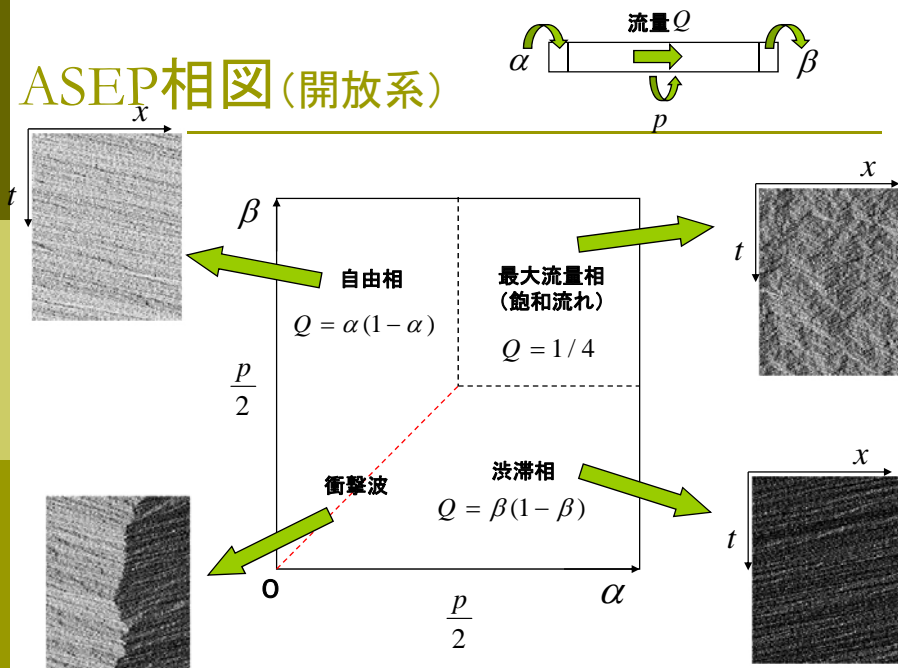
Derrida, Evans, Hakim, Pasquier, *J. Phys. A*, vol. 26 (1993) p. 1493.

MPA(Matrix Product Ansatz)の方法の開発



ASEPにおいて、長時間後の振る舞いを
完全に解明 (厳密)

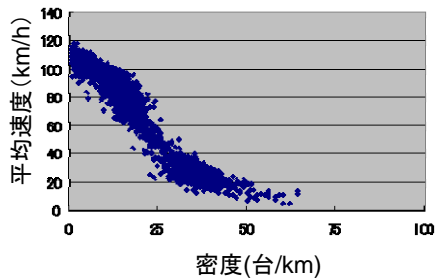
ASEP相図 (開放系)



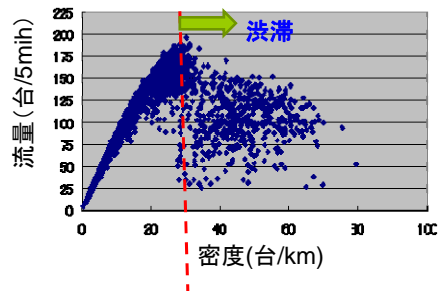
渋滞の定義とは？

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

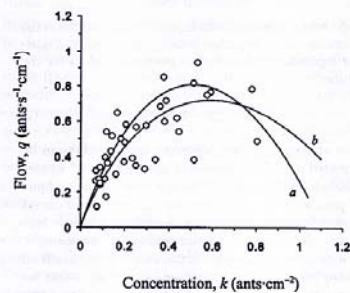


$Q = v\rho$ の関係がある。速度より流量で見た方が渋滞開始が分かりやすい

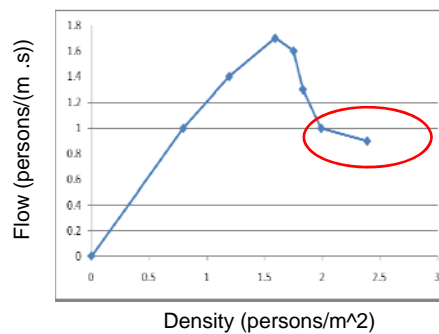
渋滞 = 流量が減少すること (高速道路では25台/km)

アリと人の基本図

Leaf-Cutting Ants (M.Burd, 2002)

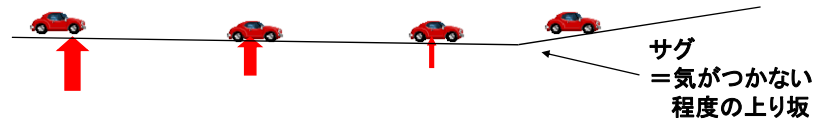


Pedestrians walk along a circle



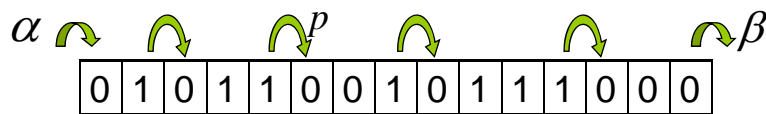
高速道路での自然渋滞はなぜ起こるか？

- 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)
この現象は車間距離40m以下になると起こる(臨界密度)。
- 現在、高速道路渋滞原因の第1位

ASEPから車のモデルへ



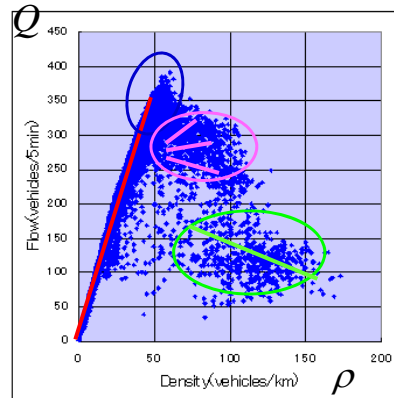
ASEPは車のモデルとしては単純すぎ？
何を取り入れれば車のモデルとして良いのか？



車の「自然渋滞」を再現すべき

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

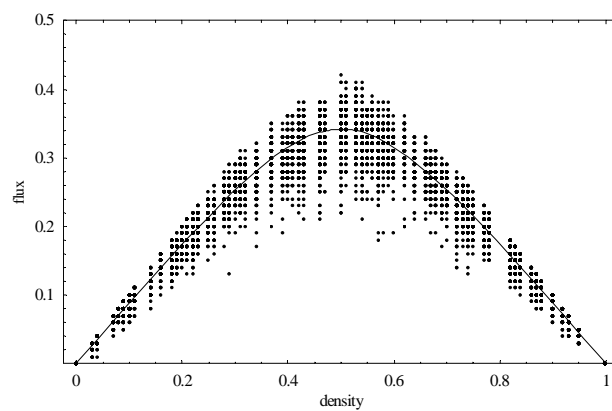
◆相転移領域

1. メタ安定 自然渋滞に関連

2. 高流量渋滞

ASEPの基本図

単純すぎてメタ安定が無い



様々な交通流モデルの検討

□ 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(OV)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

最適速度 (Optimal Velocity) モデル

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

Newell, Oper. Res., 9 (1961) p.209 $\frac{d}{dt} x_n(t + \tau) = V(x_{n+1} - x_n)$

$V(h)$ 最適速度関数 h 車間距離 τ 反応の時間遅れパラメータ

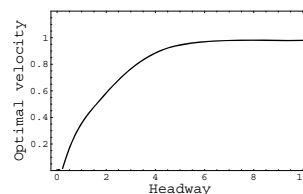


Newellモデルを τ について展開すると

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

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

$a = 1/\tau$ Sensitivity parameter



確率OVモデル＝OVモデル＋ASEP

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

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

すると、「速度＝前進確率」と見なせる。

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

これを**Stochastic OVモデル(SOV)**と呼ぶ。

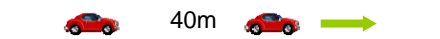
車の「内部状態」としての「速度」が考慮されている点の特徴

M.Kanai, K.Nishinari, T.Tokihira,
Physical Review E, vol.72 (2005) p.035102(R).

車の自然渋滞の起こる2大要因

□ 車間距離

車間距離を40m以下に詰めると、ブレーキの連鎖反応が後ろに伝わってしまう。



□ 反応速度

前の車の加速、減速にすばやく対応できないとブレーキの連鎖反応が増幅して後ろに伝わってしまう。



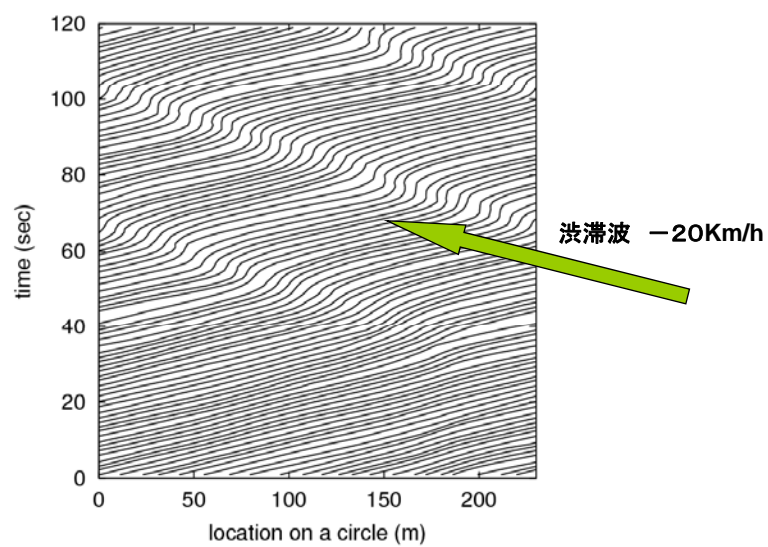
自然渋滞実験

交通流数理研究会
協力: フジテレビ

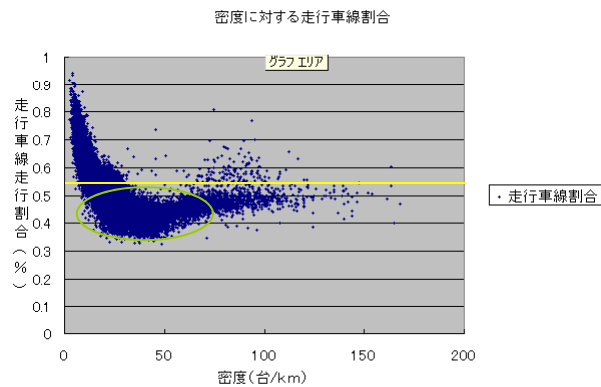
世界初 自然渋滞のできる瞬間！



時空図による自然渋滞発生の様子



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。

渋滞学による問題解決のキーワード 創発 emergency とは？

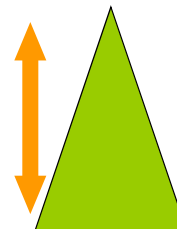
全体の統制を中央で行なうか(トップダウン)
あるいは各構成員の自主的判断に任せるか(ボトムアップ)

□ トップダウン

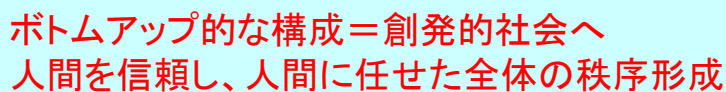
コンピューターにおけるCPUとクロック
航空機運行における航空管制

□ ボトムアップ＝創発

クロックのないコンピューター(非ノイマン型)
オブジェクト指向(JAVA言語)
社会性動物の集団(アリ、小魚の群れ)



多数の要素が絡んでいるシステムでは、
トップダウン型の制御のみでは限界にきている



中央に情報を集めて全体を管理するシステムはダメ
 ➡ 中央集権的、トップダウン的なものはコストがかかる
 貴重な予算の無駄遣いを避けるためにも、
 新しい創発的方法論による渋滞解消を目指すべき

相模湖馬相模湖自然公園

登坂車線設置区間
上り線 1.8km

相模湖インターチェンジ

相模湖バスストップ

相模湖駅

相模湖東インターチェンジ
(下り線出口)

相模湖公園

都立高尾陣馬自然公園

中央自動車道

明治の森高尾公園

登坂車線設置区間
上り線 1.8km

相模湖バスストップ

相模湖インターチェンジ

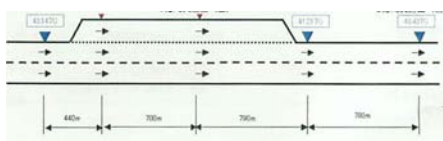
小仏トンネル

相模湖駅

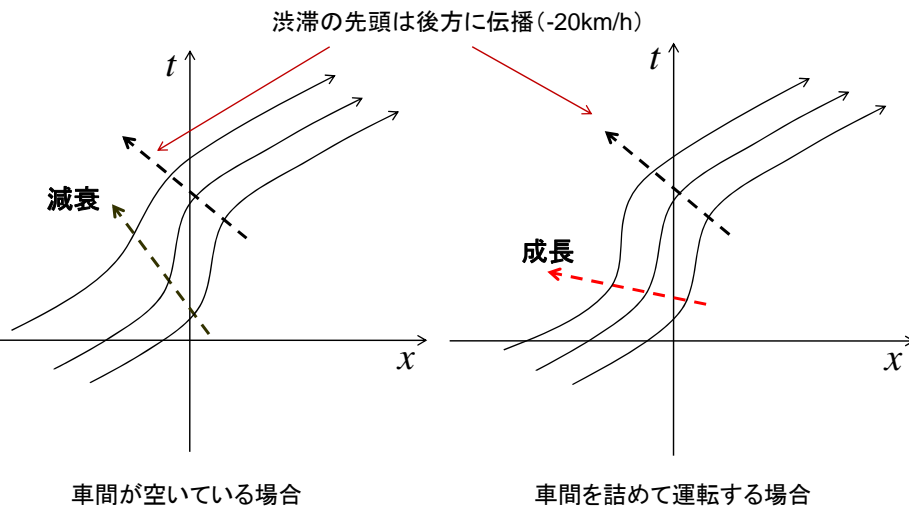
➡ 看板の設置提案

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

(この様子はTBSニュース23にて放映)

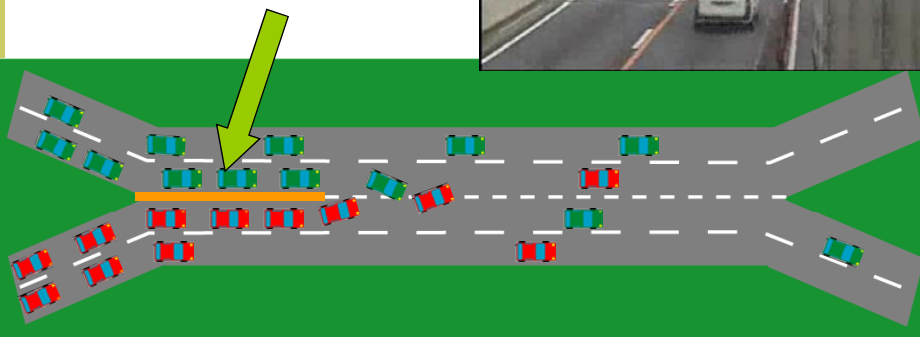


渋滞の成長と減衰



首都高小菅JCTの渋滞改善案

立体交差にする? => No!
交互合流のための黄色線



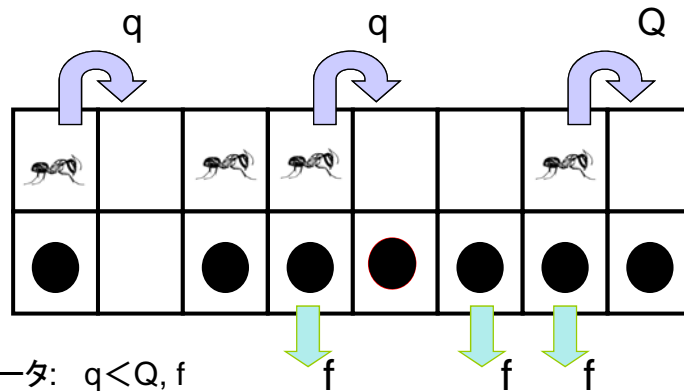
異なる車の流れの「自発的」な整流化 = 鴨川カップル作戦

アリの行列 フェロモン場付きASEP



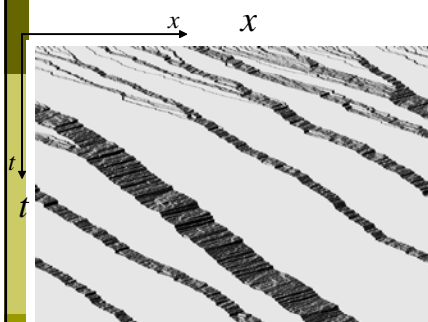
動きのルール: 1. 蟻の運動

2. フェロモンの生成と蒸発



時空図

蟻のダンゴ運転状態

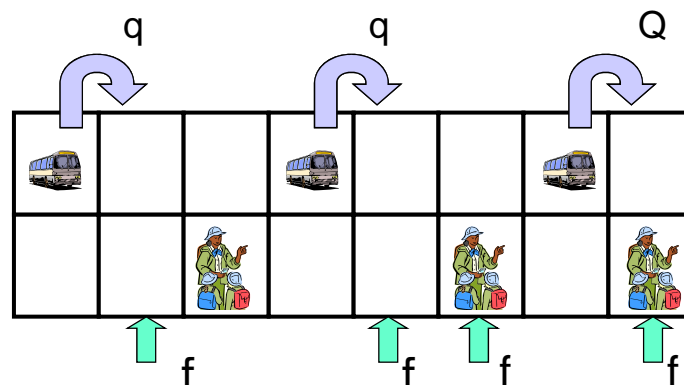


蟻はダンゴ状態で動くことを数学的に証明することに成功！

A. Kunwar, A. John, K. Nishinari, A. Schadschneider and D. Chowdhury,
J. Phys. Soc. Jpn. Vol.73, (2004) pp.2979-2985.

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！

人の集団行動と渋滞

□ 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、大会場での流れの効率化

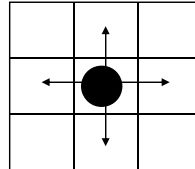
- 集団の中で、個人の自由行動が抑制されたときに統計物理学的アプローチが適用可能。避難行動など

人の動きのシミュレーション



フロアフィールドモデル

フロアフィールドモデル



東西南北のいずれかに動く

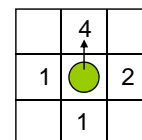
動きの際にモデルで考慮していること

- 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(2種類フロアフィールドの導入)
により、実時間より高速なシミュレーションが可能

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



- 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 α)

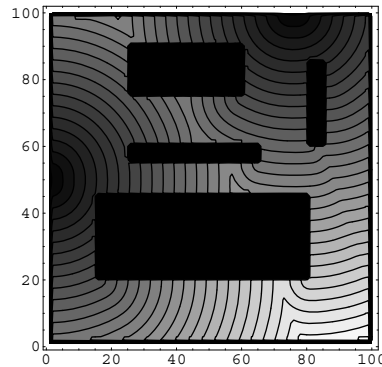
パーソナルスペースの視野距離に関係

拡散・・・あるセルの足跡数を近傍セルに分配(確率 β)

人間のランダムな動きを反映

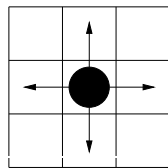
静的フロアフィールド

- 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



| | | |
|------------|------------|-----------|
| 0 | $p_{-1,0}$ | 0 |
| $p_{0,-1}$ | $p_{0,0}$ | $p_{0,1}$ |
| 0 | $p_{1,0}$ | 0 |

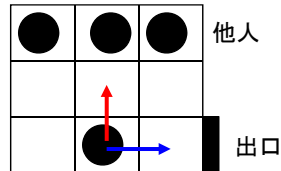
$$p_{ij} \approx \exp(k_D D_{ij}) \exp(-k_S S_{ij})$$

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
 $k_D / k_S \cdots$ **パニック度** (パニック度パラメータ)

「パニック度」の導入

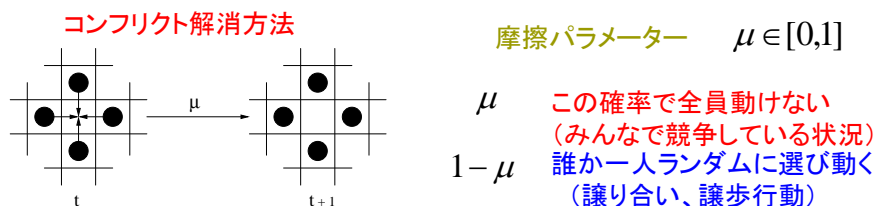


- 冷静なとき、最短距離で動こうとする
- パニックになると、他人に追従するようになる



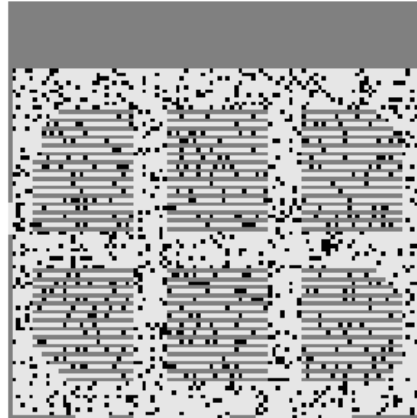
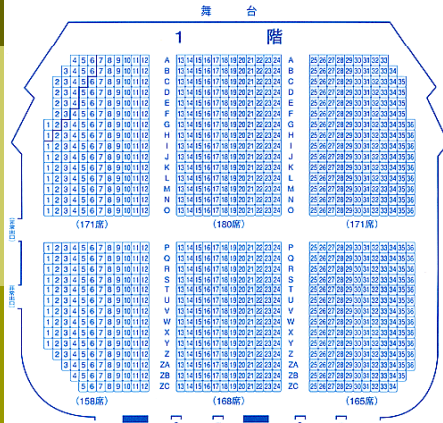
時間更新ルール

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



計算例:コンサートホール

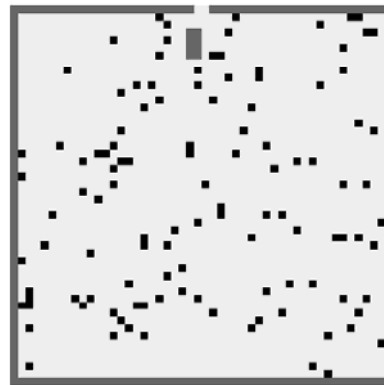
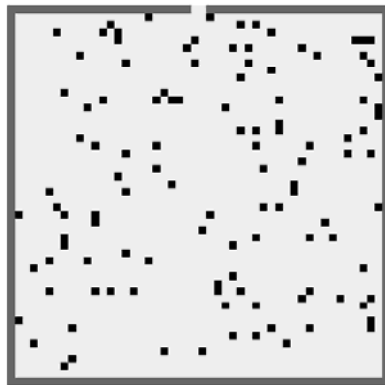
左右の出口付近で滞留発生



障害物の影響について

障害物なし

障害物あり



総退出時間 障害物なし62秒 障害物あり55秒
部屋サイズ 25m×25m 障害物サイズ 1m×1.5m 人数 125人

障害物を非対称に置くと、総避難時間が短縮できる！

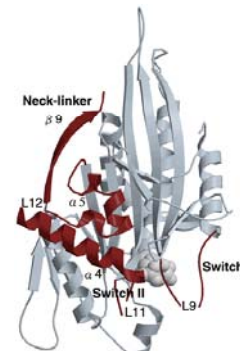
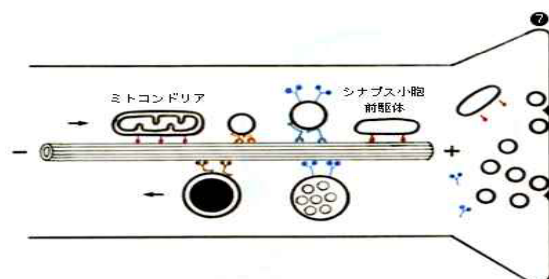
今からできる「創発的」混雑緩和方法

ちよつとのマナーで混雑も減る＝江戸しぐさ

- ①歩きタバコはやめよう、5人分のスペース
- ②傘 傘かしげ、後ろにつき
- ③携帯電話
- ④止まる前に後ろを振り返る。今自分がいる場所が他人の邪魔か？＝仁王立ち、肩引き
他者の動線を予測する

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



キネシンに関連した病気

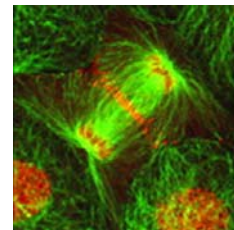
キネシンの異常

腫瘍、神経疾患、不妊、動脈瘤、染色体異常、臓器反転症

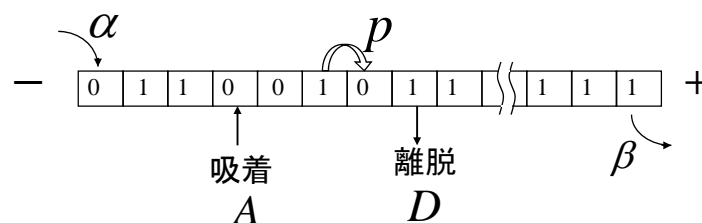
キネシンについては、細胞の増殖に関係しているということから、あるキネシンの働きを抑えることによりがん細胞の増殖を止める立体構造を用いた新しい抗がん剤の開発につながると考えられている。また、神経疾患をはじめとした数多くの微小管に関連した病気の治療法の確立が考えられている。また、キネシンを増加させたマウスでは、学習効果の向上が見られることも分かっている。

ダイニンの異常 (2003)

ALS (amyotrophic lateral sclerosis: 筋萎縮性側索硬化症)



分子モーターのモデル



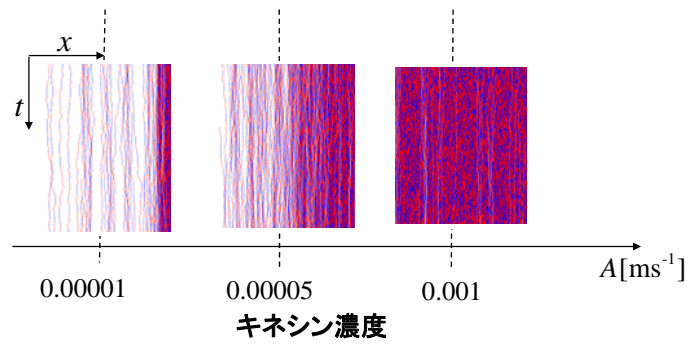
ルール

| | | | | |
|-------|----|---|----|---|
| 1) 吸着 | 0 | → | 1 | A |
| 2) 離脱 | 1 | → | 0 | D |
| 3) 前進 | 10 | → | 01 | P |

分子モーターの出入り

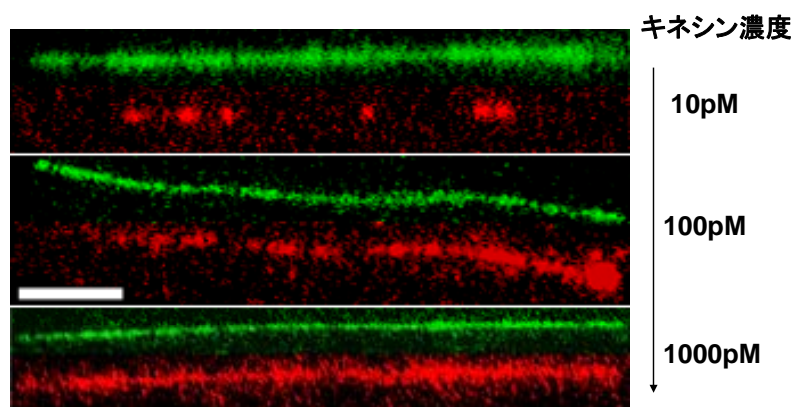
ASEP

シミュレーション： キネシン濃度を変化させたときの様子



キネシン濃度が高くなると渋滞が発生している

キネシンの投入濃度の違い(実験)



実験でもシミュレーションと同様の渋滞が見られた

K.Nishinari, et al, *Physical Review Letters* (2005)

渋滞学からの教訓

「損をして得をとれ」「急がば回れ」

- 個人の利益と全体の利益は一般に一致しない
自己の利益を最大化しようとして行動すると、
結果的に社会的には損をしてしまう。
「わがままは損」
- 自分が少し譲り、我慢することで、全体が得をする。
○合流部で譲りあって交互合流をした方が
流れは良くなる
○出口に障害物を置いたほうが殺到してぶつかる
ことが減り、結果的に早く出られる

個人の益と全体の益

例) 経路選択問題

XからYに行くのに2通りのルート

ルートA: 時間は車の数に比例

ルートB: 時間は常に10分

10台の車がXからYへ行くときのルート選択

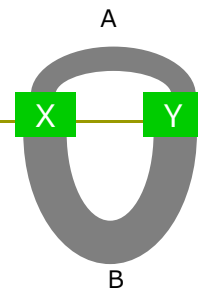
- ① **利用者均衡配分** どちらのルートでも時間差はない

A: 10台、B: 0台

- ② **システム最適化配分** 全員の所要時間の総和が最小

A: 5台、B: 5台

①の場合、所要時間の総和は100分、②の場合は75分
つまり、個人の益を追求する①では、社会全体で損をする！
(ナッシュ均衡)



渋滞問題の根本的な解決策

「時間的、空間的な分散」

□ ライフスタイルの多様化

フランスの休暇ずらしの例

「地産地消」 フードマイレージ(CO2負荷)

人口集中の分散(東京名古屋大阪で50%超)

「人の内面への配慮、内面の変化」

□ ストレスの緩和、人間性の回復

状況を「知る・予測できる」ことでストレスは減る

「コンピューター管理」から「自ら考える」へ

教習所で渋滞学を！

まとめ

□ 「流れがあれば渋滞あり」

渋滞学として統一的に扱う

学際的・分野横断的:

数学・物理学・生物学・心理学・情報学・経済学 etc

□ 車や人の渋滞解消へ

まずは個人のマナーや知識重要

「間」が大切(クルマは2秒、ヒトは1秒)

ボトムアップ的に、そして全体の総合的連携へ

本当の渋滞解消の障害は、「組織の壁」

□ 現実を見ずして良い研究はなし＝実験データの重要性

現実の複雑さを単純化する数理の力