

渋滞学

27 期 谷内東



0 目的、諸注意

- 目的

- 1、なぜ、渋滞は起こるか？

- 2、なぜ、渋滞現象が物理モデルを用いて説明できるのか？

この2点を理解する事

- 諸注意

図、表、動画等の著作権に関しては目を瞑って下さい。



講義の流れ

- 1、渋滞とは
- 2、自己駆動粒子の導入
- 3、物理モデルと渋滞
- 4、渋滞のモデル
- 5、渋滞の相転移現象
- 6、今後の展望



1-1 渋滞とは

- 渋滞とは

→車が集中して交通が滞ること

定義づけは交通管理者によってまちまちである

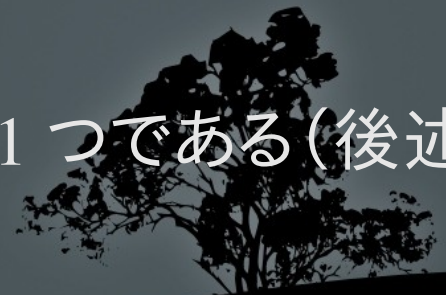
ex) 警察庁(国家公安委員会)

走行速度が 40km/h 以下になった状態(高速道路)

ex) 道路公団

時速40km以下で1kmの車列の延長が15分以上継続したとき(高速道路)

渋滞学においては交通流における相の 1 つである(後述)



1-2 なぜ渋滞は起こるのか

いろいろな理由が考えられるが東日本高速道株式会社の調べによると

- サグ部、上り坂（ 35% ）
- 事故（ 29% ）
- 合流部（ 28% ）
- 料金所（ 4% ）
- 工事（ 2% ）
- トンネル、その他（ 2% ）

※ サグ部：気づかない程、緩やかな上り坂の事



1-2 続き

- 先ほどデータより主原因であったサグ部、事故、合流部の3つを考えてる。

合流部: 合流による相対的な車線の減少が原因

事故: 事故処理に伴う車線の減少が原因

- ではサグ部ではどのようなメカニズムで渋滞が起きているのか？

1、ある車 ($c1$) がサグ部に差し掛かり、減速する

2、 $c1$ の後続の車 $c2$ がそれによりブレーキをかけて減速する

3、 $c2$ の後続の車 $c2$ がそれによりさらに強いブレーキをかけて減速する

4、以下、連鎖反応的に事が進み渋滞発生につながる

この様なメカニズムで起こる渋滞を自然渋滞という



2-1 粒子と車の違い

- 粒子：物理法則に従って運動する
 - 力学系を考えれば Newton の運動の 3 法則に従う
- 車（人）：意志を持って行動する
 - Newton の運動の 3 法則に従わない
 - 慣性の法則 ×
 - 運動方程式 ×
 - 作用反作用の法則 ×

つまり、車を Newton 力学的に扱うことは無理である



2-2 自己駆動粒子の導入

Newton 力学で扱う事ができないが、車を粒子と考え、力学的に考えた方が都合が良い。

この様にニュートンの運動の3法則が成り立たない粒子を自己駆動粒子 (self-driven particle)、または機能性粒子という。

ただし自己駆動粒子を考えた時、力学における力等を定量的に示すのが難しいという問題も残されている。



3 物理モデルとの適合性

case1) パイプ中の粉体流の渋滞

case2) 超音速圧縮流体の通過断面積変化による渋滞

これら2つの実験から渋滞と物理現象がまったく関係ないものでなく、結びついている事が分かる。

Case1 に限って言えばパイプ中の液体による効果のある種のブラックボックスと考えれば車の交通渋滞にそっくりなのも分かる。

以上から渋滞を物理現象の一種として考えられ、物理を用いて議論することができそうである。



4-1 OV モデル

OV モデル (Optical Velocity Model) は 1995 年に杉山雄規らが考案したモデルで、交通流の基礎方程式の1つであるとされている。本質的には車 (歩行者) は前の車 (歩行者) とのみ相互作用し合い、その前者との距離において加速、減速するというものである。

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = a \left[V(x_{n+1}(t) - x_n(t)) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

$V(\Delta x_n(t))$ は OV 関数と呼ばれ前者との距離に応じて加減速の応答する関数である。



4-1 続き

OV 関数 ($V(\Delta x_n(t))$) は前者の距離に応じて加減速の応答をする関数であった。では一体どの関数型を選べばいいか？

- 単調増加関数
- $\Delta x_n \rightarrow \infty$ で $v_{\max}$ に落ち着き
- 衝突しないように徐々に加速する

この3つの要請を満たせばよい。例として $\tanh(\Delta x_n)$ が挙げられる。



4-2 NS モデル

NS モデル (Negel-Schreckenberg Model) は 1992 年に Negel-Schreckenberg によって考案されたモデルで時刻 t だけでなく位置 x も離散化されている超離散化された箱玉系のモデルである。

一般にこのようなモデルをセルオートマトン (Cell-automaton) といい、Wolfarm によって与えられた。



図1 NS モデル

4-2 続き

NS モデルは1つのセルに1つの車しか入ることができず
以下の4つのルールに従うモデルである。

1) if ($v > \text{gap}$; 前方のセルの数)

→ $v := \text{gap}$ (減速過程)

2) if ($v < \text{gap}$, $v < v_{\max}$)

→ $v := v+1$ (加速過程)

3) 1),2) の結果、if($v > 0$)

→ 確率 p で $v := v-1$

4) 以上で決めた v だけ進む



5-1 基本図

物理学者が本格的に渋滞の研究を始めたのは1990年代に入ってからであるが、それ以前から交通工学と呼ばれる学問があり工学的な立場から研究されていた。交通流の特性を示す基礎的なもので基本図と呼ばれる図がある。縦軸に交通流量 Q 、横軸に車両密度 k をとる。

- 交通流量 Q : 単位時間あたり通過した車両数
- 車両密度 k : 単位長さあたりの車両数



5-2 渋滞と相転移

右図の基本図を見ると、
 $k = 20$ あたりに順調に増加
していたのに突然山が崩れ
た様な変化をしているのは
わかる。これは渋滞が原因
であり $k = 20$ が臨界点であ
ることがわかる。

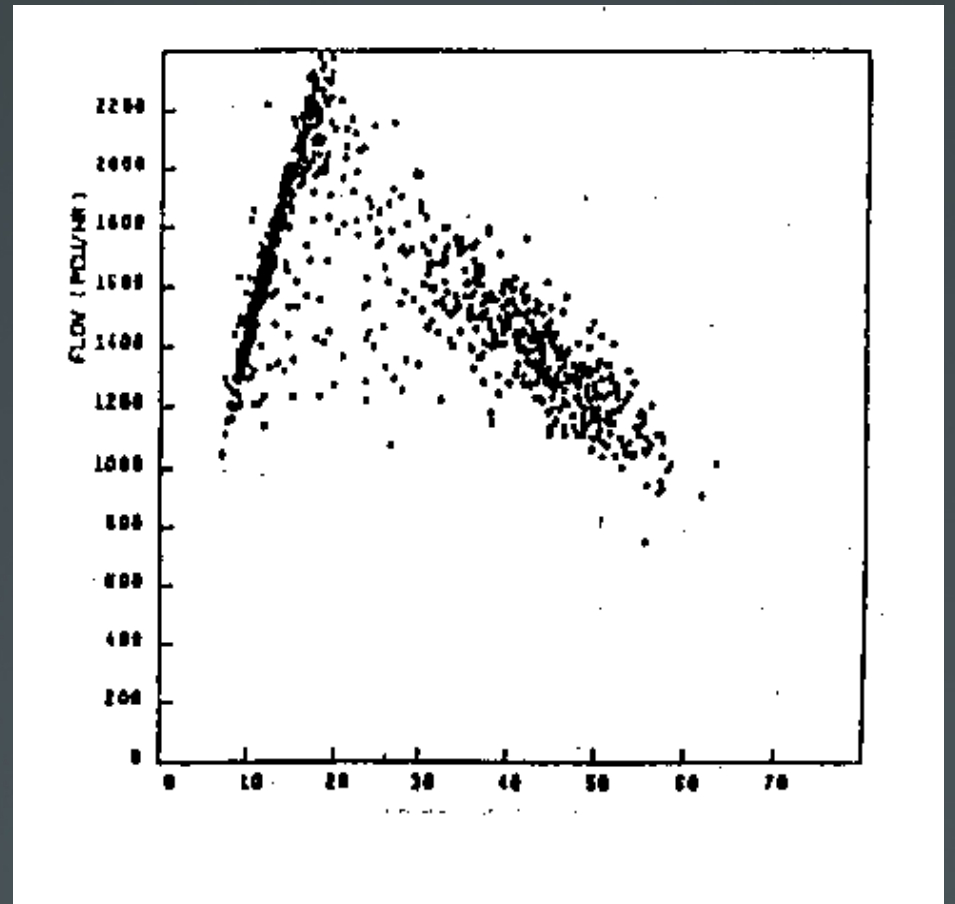


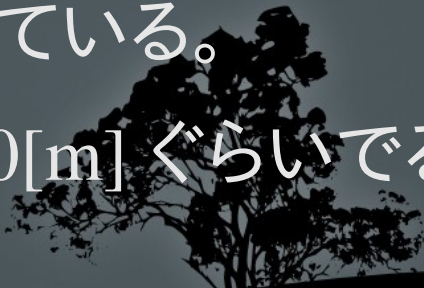
図 2 基本図

5-2 続き

以上から渋滞は相転移現象における相の一種であると考察できる。そして、この相転移は車両密度 k によって特徴づけられている。渋滞学（交通流の研究）においてはこれを渋滞の定義としている。

研究の結果によると臨界密度 k_c は世界中で観測しても $k_c \sim 25 [1/\text{km}]$ である。また先述の 2 つのモデルを計算機にシミュレーションさせるとすると同じ結果であったためモデルも正しいであろうと証明されている。

ちなみに $k_c = 25$ は車間距離にすると $40 [\text{m}]$ ぐらいです。



6 今後の展望

- 自己駆動粒子という概念は人以外にも群集、パケット通信の渋滞、分子モーターなど様々なシーンで応用可能であり、その方面で様々な研究が行われている。
- 車の研究に関してはある程度進められてきているが、最近では車線変更や合流に関する研究が盛んに行われている。
- OV モデルを2次元に拡張した群集に関する研究においても車と同様に相転移現象(レーン現象等)が観測できるが詳しいメカニズムは分かっておらず盛んに研究されている。



まとめ

- 自己駆動粒子という Newton の運動の法則が成り立たない粒子の概念がある。
- 渋滞は物理現象でも起こりえ、それが渋滞を物理現象の一種とする根拠になりえる。
- 渋滞を記述するモデルは OV モデルと NS モデルの 2 つがあり、これらのモデルは観測により正しい事がわかった。
- 自然渋滞は基本図によると車両密度が大きくなることで起こる。
- 渋滞は相転移現象の一種であり、車両密度が $25[1/\text{km}]$ 以上になると起こる。また、それが渋滞の定義である。

参考資料

- [1] 西成活裕 , 渋滞学 (新潮社 ,2006)
- [2] Y.Sugiyama,Physics of Trafic Flow(ながれ
22,2003)
- [3] 中原明生 , パイプ中を流れる粉体流の空間構造解析 (交通流のシミュレーションシンポジウム
講演概要集 ,2000)

