

# Nagel-Schreckenberg モデルを用いた流量逆転の原因分析

野田季宏<sup>1</sup>, 日永田泰啓<sup>2</sup>, 只木進一<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 佐賀大学 工学系研究科 知能情報システム学専攻

<sup>2</sup> 佐賀大学 総合情報基盤センター

## 概要

日本の二車線の高速道路では、追越車線の流量が走行車線のそれを越える「流量逆転」と呼ばれる現象がよく見られる。本稿では、Nagel-Schreckenberg モデルを二車線に拡張し、流量逆転を起こす要素を検討し、追越車線の速度が走行車線のそれよりも速いことが重要であることを示す。また、ドイツの交通規則との比較を行う。

## Origins of Reverse Lane Usage Studied with Nagel-Schreckenberg Model

Toshihiro Noda<sup>1</sup>, Yasuhiro Hieida<sup>2</sup>, and Shin-ichi Tadaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Information Science, Saga University

<sup>2</sup> Computer and Network Center, Saga University

## Abstract

A phenomenon called “reverse lane usage”, in which flow in fast lane exceeds that in slow lane, is frequently observed. This report analyzes the phenomenon by using an extended Nagel-Schreckenberg model and shows that the speed excess in fast lane against that in slow lane plays the key role. The effects of the traffic rules in German expressways are also discussed in this context.

## 1 はじめに

高速道路には走行車線と追越車線の設定があり、車は走行車線を走ることを基本として、追い越し時に追越車線を走ることとなっている。しかし、実際には多くの車が追越車線を走っていることに気づく。図1は高速道路の利用率を総流量に対する走行車線の流量の比として表したものである。

実測データからも走行車線の流量が0.5を下回る、つまり追越車線の流量が走行車線のそれを上回っていることが分かる。これを「流量逆転」と呼ぶことにする。このような現象は、日本の高速道路の多くの点で観測されている。

流量逆転現象をシミュレーションを通じて再現する試みが行われている。結合写像型最適速度モデル

に、高速道路を模した非対称的な車線変更規則及び走行車線と追越車線の最高速度の差を導入することで、流量逆転が再現されている [1]。しかし、車線変更規則等の中の部分が流量逆転にもっとも大きな影響を与えているかは明らかではない。

本稿では、車線変更規則と流量逆転の関係を明確にするために、交通流セルオートマトンモデルである Nagel-Schreckenberg モデルを二車線に拡張する。車線変更規則に現れるパラメータ等と車線利用率の関係をシミュレーションを通じて分析し、流量逆転を引き起こす原因を探索する。また、走行車線と追越車線の車線変更規則を、日本の規則とドイツのそれを比較し、原因の違いを議論する。

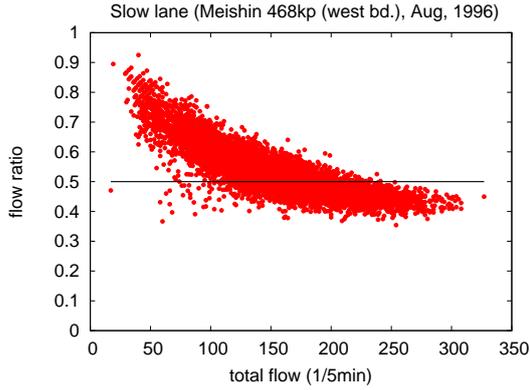


図1: 名神高速道路, 1996年8月の実測データ。横軸は5分間の総流量、縦軸は走行車線の車線利用率である。

## 2 Nagel-Schreckenberg モデル

Nagel-Schreckenberg(NS) モデルは、最もよく利用されている交通流セルオートマトンモデルの一つである [2]。道路はセルに分割され、一つのセルには一台の車しか入ることができない。各車は前方の空のセルの数に応じて、最高速度  $v_{\max}$  の制限の下で加速減速を行う。以下に示す速度変更規則に従って全車の速度を決定した後、全車の位置を更新する。

$n$  番目の車の位置を  $x_n$ 、速度を  $v_n$ 、先行する  $n+1$  番目の車までの空のセルの数を  $d_n = x_{n+1} - x_n$  とする。この時、以下の三つの手順で速度を更新する。全車の速度の更新の後に、車の位置を更新する。

加速：最高速度  $v_{\max}$  までの範囲で1加速する。

$$v_n = \min(v_n + 1, v_{\max}) \quad (1)$$

減速：先行車に衝突しないように減速する。

$$v_n = \min(v_n, d_n - 1) \quad (2)$$

ランダム化：確率  $p$  で1減速する。

$$v_n = \max(v_n - 1, 0) \quad (3)$$

## 3 二車線路の NS モデル

NS モデルに車線変更規則を追加することで二車線路の NS モデルを構成する。各時刻において、最初に後述する車線変更を全車に対して行う。その後、前述の速度変更及び位置の更新を行う。

車線変更規則は大きく二つの要素に分けることができる。車線変更を行う必要性と、車線変更の安全

性である。車線変更を行う必要性とは、自分の前を走行している車までの車間距離が十分ではなく、車線変更を行った方が速く走行できる場合に対応する。車線変更の安全性とは、車線変更を行うには、隣接車線に安全に入れなければならないことに対応する。

日本の交通規則では、一般道か高速道路かに関わらず一番左側の車線を走行することを基本としている (道路交通法二十条)[3]。また、追い越しを行う場合には走行している車線の右側から行うことと定められている (道路交通法二十条第三項)。しかし、一般道ではその先の交差点における右左折という目的に応じて車線が選ばれる傾向も強い。高速道路では、追越車線を走り続ける車も多く見ることができ。また、出口へ向けて走行車線を走る車が、出口を越えて本線を走行する大型車などの低速車を追い越すこともしばしばである。ここでは、「現実的」な車線変更規則を構成することにする。追越車線は追い越し挙動に用いる目的であることから、走行車線とは最高速度が異なる場合も仮定しておく。

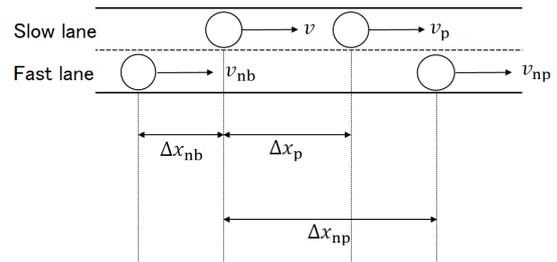


図2: 走行車線から追越車線への車線変更の概念図

図2は走行車線から追越車線への車線変更の概念図である。現在の車の速度を  $v$ 、現在の車とその前を走行する車の距離を  $\Delta x_p$  (前節の  $d_n$  と同じ)、現在の車の前を走行している車の速度を  $v_p$ 、現在の車と隣接車線で前を走行している車との距離を  $\Delta x_{np}$ 、隣接車線で前を走行している車の速度を  $v_{np}$ 、現在の車と隣接車線で後ろで走行している車との距離を  $\Delta x_{nb}$ 、隣接車線で後ろを走行している車の速度を  $v_{nb}$  とする。

車線変更が必要となるのは、同一車線を走り続ける場合に減速が必要となり、かつ、同一車線より隣接車線の方が速く走行できる場合である。この条件

は次式で表される。

$$\Delta x_p \leq v \text{ かつ } v_p < v_{np} \quad (4)$$

安全性については、隣接車線の前後の車と衝突しない空間が必要となる。この条件は次式で表される。

$$\Delta x_{np} > v \text{ かつ } \Delta x_{nb} > v_{nb} \quad (5)$$

さらに、追越車線を走行し続ける車が走行車線に戻る条件 (式 (6)) を追加する。十分な車間距離を取るための変数を  $F > 1$ 、走行車線を走行する前の車との十分な車間距離を  $v \times F$  とする。

$$\Delta x_{np} > v \times F \text{ かつ } \Delta x_{nb} > v_{nb} \quad (6)$$

## 4 シミュレーションによる流量逆転現象の分析

前述の車線変更規則に基づき、特に流量逆転に注目してシミュレーションを行った。周期境界条件の下で、各車線のセル数を  $L = 10000$  とし、車数を変化させながらシミュレーションを行った。走行車線の最高速度は  $v_{\max}^s = 5$  とし、追越車線の最高速度  $v_{\max}^f$  をパラメータとして変化させた。また、追越車線を走り続けることを抑止する規則 (式 (6)) の利用の有無 (SWITCH)、及び十分な車間距離を取るための変数  $F$  をパラメータとして変化させた。

| $v_{\max}^f$ | $F$ | 流量逆転 |
|--------------|-----|------|
| 5            | -   | ×    |
|              | 5   | ×    |
|              | 10  | ×    |
|              | 30  | ×    |
| -----        |     |      |
| 6            | -   | ○    |
|              | 5   | ○    |
|              | 10  | ○    |
|              | 30  | ○    |

表 1: 日本の車線変更規則のシミュレーション結果。 $F$  の欄の “-” は、式 (6) の適用を行わないことを示す。○は流量逆転が起き、×は流量逆転が起きなかったことを表す。

表 1、図 3 に、シミュレーションにおける流量逆転現象の有無をまとめる。 $F$  の欄の “-” は、式 (6) の適用を行わないことを示す。追越車線の最高速度は  $v_{\max}^f = 5$  と 6 の二つを比較した。追越車線を走り続けることを抑制する規則の有無、安全確保の距離

によらず、追越車線の最高速度が走行車線のそれよりも速いことが流量逆転に寄与していることがわかる。十分な車間距離を取るための変数  $F$  は、その値が大きいほど、少ない総流量で流量逆転を引き起こす。流量逆転の強度、つまり追越車線側の流量の総流量に対する比の最大値は、 $v_{\max}^f$  の値のみで決定されている。

## 5 ドイツの二車線路モデル

3 節で述べた通り、一般道、高速道路において左側走行をしなければならない。しかし、日本では左側車線、つまり走行車線からの追い越しが行われている。そこで、走行車線からの追い越しを抑制するドイツとの比較を行う。ドイツでも、日本と同様に走行車線を走行しなければならない [4]。一方、追越車線上の遅い車に対する (走行車線からの) 追い越しを抑制する規則がある。それを具体化するために、追越車線に遅い車がいる場合には、走行車線を走行する車は追越車線へ移動するという規則が設けられている。なお、この規則の効果を明確にするために、走行車線と追越車線の最高速度を同じ値 5 と設定する。

これらのことを考慮すると、必要性のルールは、走行車線から追越車線への移動は式 (7)、追越車線から走行車線への移動は式 (8) と表される。ただし、同一車線及び他車線の先行車との速度を計測するのは、距離が  $d$  以内になった場合に限られる。つまり、 $d$  の範囲で前に遅い車がいた場合、車線変更を行おうとする。同一車線で  $d$  以内に車がいなかった場合は  $v_p = L$ 、他車線で  $d$  以内に車がいなかった場合は  $v_{np} = L$  とする。

$$v_p \leq v \text{ または } v_{np} \leq v \quad (7)$$

$$v_p > v \text{ かつ } v_{np} > v \quad (8)$$

安全性については式 (9) とする。

$$\Delta x_{np} > v \text{ かつ } \Delta x_{nb} > v_{\max} \quad (9)$$

走行車線の速い車が追越車線に移動できた場合には、追越車線の遅い車が走行車線に戻るための空間が生まれる事になる。

$d$  の値を変えてシミュレーションを行った。図 4 は  $v_{\max}^s = 5, v_{\max}^f = 5$  の場合のシミュレーション結果である。図 4 より  $d = 5$  を除く全てのシミュレーションで、流量逆転を確認することが出来た。また、

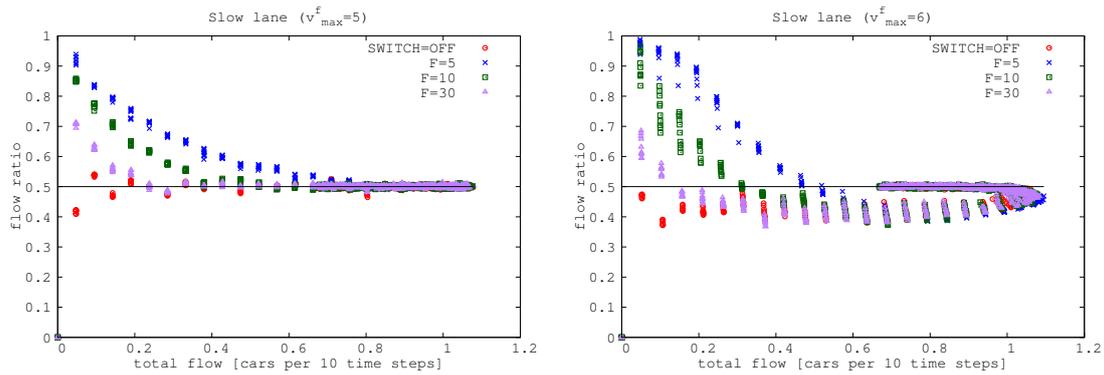


図 3: 日本の車線変更規則のシミュレーション結果。左が  $v_{\max}^f = 5$  の場合、右が  $v_{\max}^f = 6$  の場合である。左では、 $SWITCH = OFF$ 、 $F$  の値を変えた全ての場合で流量逆転が発生しなかった。しかし、右では流量逆転が発生した。

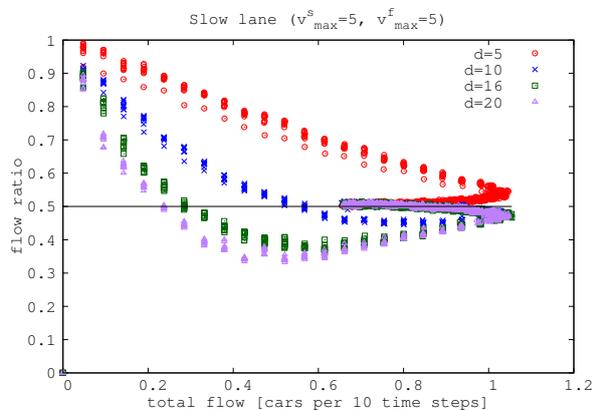


図 4: ドイツの車線変更規則のシミュレーション結果 ( $v_{\max}^s = 5, v_{\max}^f = 5$  の場合)。

$d$  の値を大きくするほど、車線利用率の値が低くなる。つまり、追越車線を走行する車を走行車線から追いつかないための車線変更規則が、流量逆転に寄与していることがわかる。

## 6 まとめ

本稿では、Nagel-Schreckenberg モデルを用いて、日本・ドイツの 2 つの場合の二車線路の NS モデルを構成し、これらのモデルのパラメータの値を変えながらシミュレーションを行い、流量逆転に注目して結果の比較を行った。

日本の場合は、 $F$  の値を変えながら、各車線の最高速度が異なる場合、最高速度が等しい場合の比較を行った。結果は、各車線の最高速度が異なる場合に流量逆転が見られた。一方、最高速度が等しい場合には、様々なパラメータにおいても流量逆転は見ら

れなかった。以上より、日本の場合は各車線の最高速度が異なることで流量逆転が起きることが分かった。

走行車線からの追い越しが制限されているドイツの車線変更規則を用いたシミュレーションを比較として実施し、 $d$  の値を変えて比較を行った。ドイツの車線変更規則を用いた場合、 $d = 5$  より大きい場合で流量逆転が見られた。つまり各車は追越車線で前を走行する遅い車を走行車線から追い抜いてはいけないという規則が流量逆転を発生させる原因になっていることが分かった。

本稿のシミュレーションでは、車の最高速度は走行している車線によって定まり、走行車線の車の数が最高速度を許す範囲では、速度更新規則中のランダムブレーキが速度減少を引き起こし、追越車線への車線変更を誘発している。一方、実際の道路では大型車を中心とした低速車を追い越す挙動が多くみられる。車の希望最高速度のばらつきと流量逆転現象の関係解明については今後の課題である。

## 参考文献

- [1] 只木進一, 応用数理, 12, (2002) 119.
- [2] K. Nagel and M. Schreckenberg, J. Phys. I France 2, (1992) 2221.
- [3] 道路交通法 (1960 年 6 月 25 日法律第五号), <http://law.e-gov.go.jp/htldata/S35/S35HO105.html>, 2016 年 10 月 19 日確認
- [4] K. Nagel, D. E. Wolf, P. Wagner, and P. Simon, Phys. Rev. E58 (1998) 1425.