

多車線交通流における遅い車によって発生する渋滞転移

増倉秀一, 田中克典, 長谷隆

静岡大学 工学部 機械工学科

概要

車線変更を考慮した最適速度モデルを用いて, 一台の遅い車を含む多車線交通流を研究する. 自然渋滞の発生しない高感度領域での交通流についてシミュレーションを行い, 遅い車による影響について研究する. 車線数が増加するに従い, 交通流量の転移点が変わることを明らかにし, 二車線交通流モデルにおいて数値シミュレーションと理論解析結果の比較を示す.

Jamming transitions induced by a slow vehicle in traffic flow on multi-lane highway

Shuichi Masukura, Katsunori Tanaka, Takashi Nagatani

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

Abstract

We study the jamming transitions induced by a slow vehicle in multi-lane traffic flow. We extend the conventional optimal velocity model to the multi-lane traffic by taking into account the lane changing. It is found that there are three transition points, four transition points and five transition points, respectively, two-lane traffic flow, three-lane traffic flow and four-lane traffic flow. We show the current-density diagram numerically and theoretically.

1 緒言

バスやトラックのような遅い車は他車のスムーズな走行を妨げるため, しばしば交通渋滞を引き起こす. 実際の高速道路は二~四の多車線交通が一般的であるが, 遅い車を含む多車線交通流はあまり研究されていない. 本研究では一台の遅い車を含む多車線交通流に関する交通特性, 交通状態, 渋滞転移について研究する.

2 最適速度モデル

本研究で用いる最適速度モデル[1]について説明する. 多車線交通流では車線変更を考慮するため, 車の運動を前進運動と車線変更運動の二つに分けて考える.

2.1 前進運動

最適速度モデルを前進運動に用いる. 最適速度モデルは車 i の運動方程式によって次式で表される.

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = a \left\{ V(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\}$$

ここで $V(\Delta x_i)$ は最適速度関数, $x_i(t)$ は時間 t における車 i の位置, $\Delta x_i(t)$ は時間 t における車 i の車間距離, a は感度である. 本研究では以下の最適速度関数を用いる.

$$V(\Delta x_i) = \frac{v_{\max}}{2} [\tanh(\Delta x_i - x_c) + \tanh(x_c)]$$

また, 遅い車については以下の最適速度関数を用いる[2].

$$V(\Delta x_i) = \frac{v_{s,\max}}{2} [\tanh(\Delta x_i - x_c) + \tanh(x_c)]$$

ここで v_{\max} は一般車の最大速度, $v_{s,\max}$ は遅い車

の最大速度であり、 x_c は安全距離である。

2.2 車線変更運動

本研究では遅い車は車線変更をしないものとする。遅い車以外の車が「動機基準」と「安全基準」の二つの基準を満たしたとき、その車は車線変更をするものとする。目標車線が左右片側のみである場合の車線変更概略図を図1に示す。

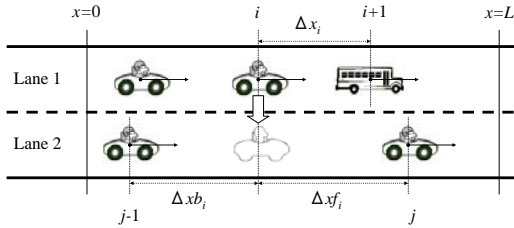


図1：目標車線が片側のみである場合の車線変更概略図

「動機基準」とは前方車間が狭くなり、ドライバーが車線変更をしたいと思う基準であり、「安全基準」とはドライバーが車線変更するのに十分なスペースがあるかを確認する基準である。車 i における「動機基準」と「安全基準」を以下に示す。

- 動機基準 $\Delta x_i < 2.0x_c$
- 安全基準 $\Delta x_f_i > \Delta x_i$ and $\Delta x_b_i > x_c$

ここで、 Δx_f_i はターゲットレーンの前方車間距離、 Δx_b_i はターゲットレーンの後方車間距離である。前方車間距離 Δx_f_i が安全距離 x_c の2倍より小さくなることで車線変更が動機付けられる。ターゲットレーンの前方車両と車線変更をしたい車の距離が前方車間距離よりも広いこと、ターゲットレーンの後方車両と車線変更をしたい車の距離が安全距離よりも広いことを安全基準とする。上式の二つの条件が同時に満たされたとき車線変更を行う。

次に車線変更目標車線が左右二方向にある場合の車線変更条件を車 i において以下に示す。目標車線が左右にある場合、「安全基準」はさらに「左安全基準」と「右安全基準」に分かれる。

- 動機基準 $\Delta x_i < 2.0x_c$
- 左安全基準 $\Delta x_f_{li} > \Delta x_i$ and $\Delta x_b_{li} > x_c$
- 右安全基準 $\Delta x_f_{ri} > \Delta x_i$ and $\Delta x_b_{ri} > x_c$

このときの車線変更の概略図を図2に示す。

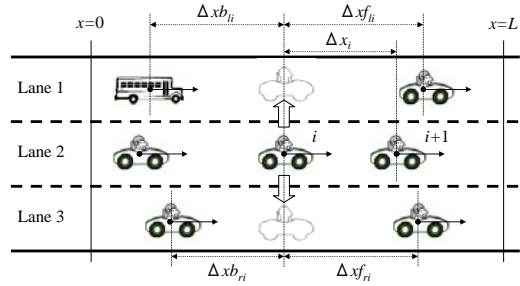


図2：目標車線が左右両側にある場合の車線変更概略図

左右どちらの車線変更条件も満たしている場合、以下の条件に従い目標車線を決定する。 $\Delta x_{f_{li}} > \Delta x_{f_{ri}}$ ($\Delta x_{f_{ri}} > \Delta x_{f_{li}}$)ならば左(右)へ車線変更を行う。もし $\Delta x_{f_{li}} = \Delta x_{f_{ri}}$ の場合、 $\Delta x_{b_{li}} > \Delta x_{b_{ri}}$ ($\Delta x_{b_{ri}} > \Delta x_{b_{li}}$)ならば左(右)へ車線変更を行う。 $\Delta x_{f_{li}} = \Delta x_{f_{ri}}$ かつ $\Delta x_{b_{li}} = \Delta x_{b_{ri}}$ ならば1/2の確率で左右どちらかに車線変更を行う。

3 数値シミュレーション

3.1 シミュレーション手法

本研究の数値シミュレーション手法について説明する。先頭車両の直前の車は最後尾の車と同一である周期境界条件とする。初期条件は以下のように設定する。 N 台の車を等間隔 Δx_0 で配置し(道路長 $L=N\Delta x_0$)、そのうち一台を遅い車とした状態を初期状態として計算を始める。4次のRunge・Kutta法により数値シミュレーションを行う。時間刻みは $\Delta t=1/128$ とする。時間が経過し定常状態となったときの交通流の挙動を調べる。

3.2 二車線交通流

二車線交通流モデルにおいて一般車の最大速度 $v_{\max}=2.0$ 、遅い車の最大速度 $v_{s,\max}=1.0$ 、安全距離 $x_c=3.0$ および感度 $a=3.0$ におけるシミュレーションにより得られた流量図を図3に示す。実線は理論解析結果、○はシミュレーション結果であり、一点破線は理論流量曲線である。ここで理論解析結果とは遅い車を一台含む二車線交通流の交通流量を理論的に求めた値であり、理論流量曲線とは全ての車の

最大速度が一般車の最大速度 $v_{\max}=2.0$ であるときの交通流量を理論的に求めた曲線である。図4は各車線に対する車の占有率である。○が第一車線，△が第二車線の占有率を示す。二車線交通流モデルは三つの転移点が存在し，四つの交通状態に分けられる。領域Ⅰは一般車が最大速度で走行できる自由流領域，領域Ⅱは遅い車の後ろに渋滞が発生する渋滞流領域である。領域Ⅲは各車線で異なる占有率の一樣流領域で，領域Ⅳは両車線共に等しい占有率の混雑流領域である。領域Ⅱの車間距離分布図を図5に示す。実線は第一車線，破線は第二車線である。この密度領域では交通状態は自由走行領域，渋滞領域，一樣領域の三つに分けられる。図5のように自由走行領域の車間距離を Δx_F ，第一車線の渋滞領域の車間距離を Δx_{J1} ，第二車線の一樣領域の車間距離を Δx_{J2} というように記号を決め，道路長に対する渋滞の長さの割合を理論的に求める。台数の保存則により以下の式を得る。

$$\frac{l_J}{L} = \left(\frac{N}{L} - \frac{2}{\Delta x_F} \right) \left(\frac{\Delta x_F \Delta x_{J1} \Delta x_{J2}}{\Delta x_F \Delta x_{J1} + \Delta x_F \Delta x_{J2} - 2 \Delta x_{J1} \Delta x_{J2}} \right)$$

渋滞の長さの割合を考慮することで領域Ⅱの流量が得られる。領域Ⅲでは第一車線は全て遅い車の最大速度で走行し，第二車線は一般車の最適速度で走行するため，それぞれの速度を考慮にいれ流量を得る。領域ⅠとⅣは理論流量曲線と等しい。図3に示すように，理論解析結果とシミュレーション結果がよく一致している。

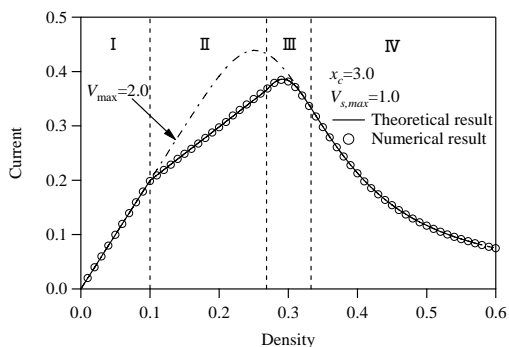


図3：二車線交通モデルのシミュレーション結果と理論解析結果の比較

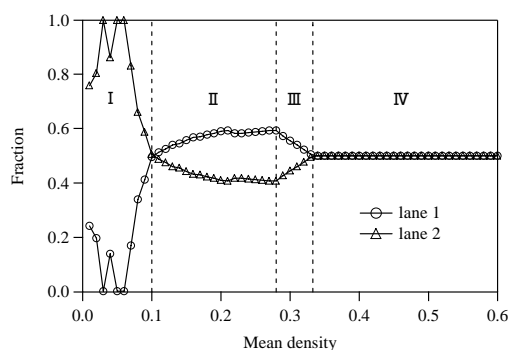


図4：二車線交通流モデルの占有率

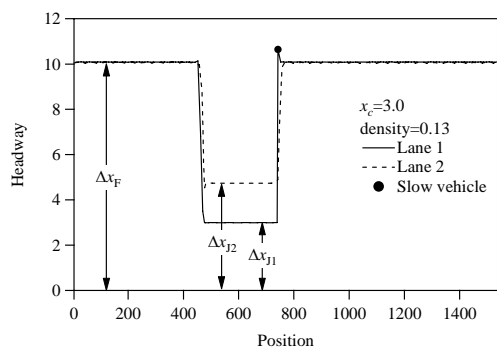


図5：二車線交通流の車間距離分布図($\rho=0.13$)

3.3 多車線交通流

三車線，四車線交通流モデルにおいて一般車の最大速度 $v_{\max}=2.0$ ，遅い車の最大速度 $v_{s,\max}=1.0$ ，安全距離 $x_c=3.0$ および感度 $a=3.0$ におけるシミュレーションにより得られた流量図をそれぞれ図6，図7に示す。実線は理論流量曲線，○はシミュレーション結果である。図8，図9はそれぞれ三車線，四車線交通流モデルにおける各車線に対する車の占有率である。○が第一車線，△が第二車線，□が第三車線，+が第四車線の占有率を示す。

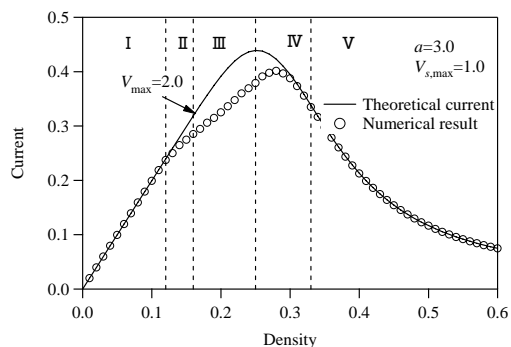


図6：三車線交通流モデルの流量図

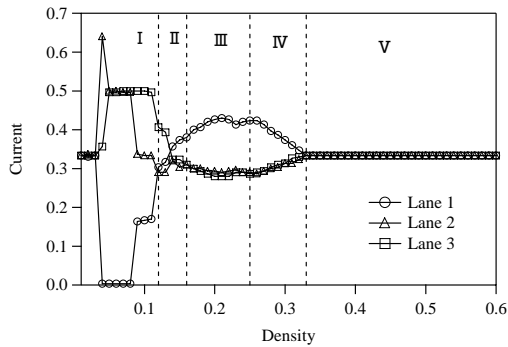


図 7：三車線交通流モデルの占有率

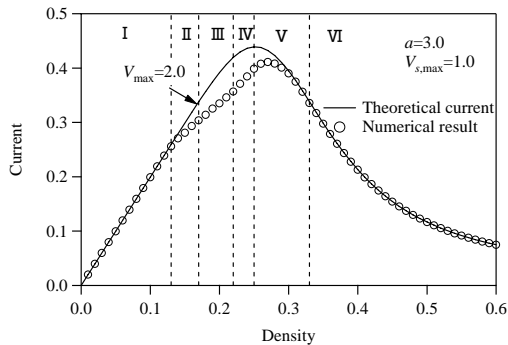


図 8：四車線交通流モデルの流量図

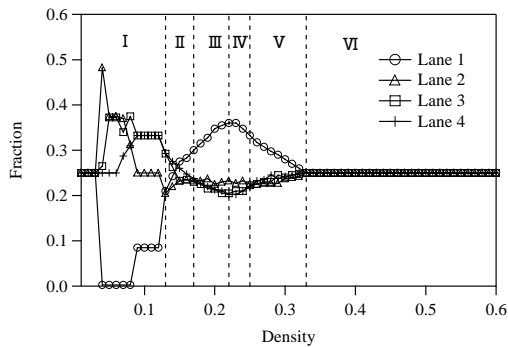


図 9：四車線交通流モデルの占有率

三車線交通流モデルでは四つの転移点が存在し、五つの交通状態に分けられる。

領域 I：自由流領域

領域 II：第三車線の占有率が第二車線よりも高い渋滞流領域

領域 III：第三車線の占有率が第二車線よりも低い渋滞流領域

領域 IV：各車線で異なる占有率の一樣流領域

領域 V：全車線の占有率が等しい混雑流領域

四車線交通流モデルでは五つの転移点が存在し、六つの交通状態に分けられる。

領域 I：自由流領域

領域 II：第三車線と第四車線の占有率が第二

車線よりも高い渋滞流領域

領域 III：第三車線と第四車線の占有率が第二車線よりも低い渋滞流領域

領域 IV：第一、第二、第三、第四車線の順に占有率が高い一樣流領域

領域 V：第一、第四、第三、第二の順に占有率が高い一樣流領域

領域 VI：全車線の占有率が等しい混雑流領域

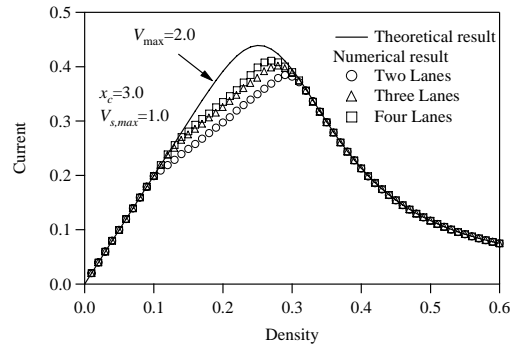


図 10：二車線と多車線交通の流量比較

図 10 に二車線交通流モデルと多車線交通流モデルのシミュレーションによって得られた流量の比較図を示す。多車線交通流モデルの流量は二車線交通流モデルの流量よりも高くなっている。

4 結言

遅い車を含む多車線交通流の数値シミュレーションを行い以下の結論を得た。

- 二車線交通流モデルでは三つの転移点が存在し、四つの交通状態に分けられ、三車線、四車線交通流モデルではそれぞれ四つ、五つの転移点が存在し、五つ、六つの交通状態に分けられることを明らかにした。
- 多車線交通流モデルの流量は二車線交通流モデルの流量よりも高くなることを示した。
- 本研究で導出した二車線交通流モデルの理論解析結果は数値シミュレーション結果と一致することを示した。

参考文献

- [1] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama, Phys. Rev. E **51** (1995) 1035
- [2] S. Masukura, T. Nagatani, K. Tanaka and H. Hanaura, Physica A **379** (2007) 263