

バスによって誘起された2車線交通流の渋滞転移

○長井亮一、長谷隆、谷口直樹（静岡大工）

Traffic states and jamming transitions induced by a bus in two-lane traffic flow

NAGAI Ryoichi, NAGATANI Takashi, TANIGUCHI Naoki
Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu 432-8561, Japan

Abstract

We study the traffic states and jamming transitions induced by a bus (slow car) in a two-lane traffic of cars. We use the dynamic model which is an extended one of the optimal velocity model to take into account the lane changing. The fundamental (flow-density) diagram is presented. The fundamental diagram changes highly by introducing a bus on a two-lane roadway. It is found that there are the six distinct states for the two-lane traffic flow including a bus. The spatio-temporal patterns are presented for the distinct traffic states. The dynamical state of traffic changes with density of cars. It is shown that the dynamical transitions among the distinct traffic states occur at some values of density. The phase diagram (region map) is shown for the two-lane traffic flow including a bus.

Key Words : Traffic dynamics; Jamming transition; Phase diagram; Traffic state

1. はじめに

モータリゼーションは人々の生活をより快適なものへと変えたが、同時に交通渋滞という問題が顕著となった。交通渋滞は日常生活や経済に大きな損失をもたらし、さらに近年では大気汚染や地球温暖化など環境への影響もクローズアップされている。また物理学の分野においては複雑系の一つの問題として、交通流の問題は関心の集まっているテーマの一つである[1-5]。交通流の研究で用いられた手法としては最適速度モデル、CA モデル、気体分子運動論モデル、流体モデルがあげられる[6-22]。

本研究では、交通流問題の一つとして、2車線交通流においてバスのような遅い車が片側の車線に存在した場合について検討する。都市交通においては、バスは重要な公共輸送手段である。しかしバスは他の車に比べて遅く、渋滞の原因になる場合がある。ここでは交通流モデルの中でも特に最適速度モデルを用い、車線変更を考慮した2車線交通流において1台の遅い車が片側の車線に存在した場合について数値シミュレーションを行い、そのときの交通状態、特に渋滞の様子について検討することを目的としている。ここでは基本図（流量—密度線図）や交通流の時間—空間分布図を用いてバスによって誘起される交通状態を明らかにする。

2. 交通流モデル

ここでは2車線交通流の数値シミュレーションを行う。有限長さ l の2車線道路を考え、両端を周期境界とする。初期条件として、両方の車線に車を等間隔 Δx_{in} に並べ、片側車線 (lane 1) の1台の車を遅いバスとする。図1に2車線交通流モデルの概略図を示す。車は前方移動、車線変更による横への移動のみを行う。前方移動については最適速度モデルを用いる。最適速度モデルは車 i について以下のように表される。

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = a \left\{ V(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\} \quad (1)$$

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、 $\Delta x_i(t) (= x_{i+1}(t) - x_i(t))$ は時間 t における車 i の車間距離、 a は感度である。最適速度関数 $V(\Delta x_i)$ は以下のように表される。

$$V(\Delta x_i) = \frac{v_{\max f}}{2} \left[\tanh(\Delta x_i - x_{cf}) + \tanh(x_{cf}) \right] \quad (2)$$

ここで $v_{\max f}$ は車の最大速度、 x_{cf} は車の安全距離である。バスの最適速度モデルは以下のようになる。

$$V(\Delta x_i) = \frac{v_{\max s}}{2} \left[\tanh(\Delta x_i - x_{cs}) + \tanh(x_{cs}) \right] \quad (3)$$

ここで $v_{\max s}$ は車の最大速度、 x_{cs} は車の安全距離である。車線変更は両方の車線において同じ規則を用いる。車は動機となる条件と安全条件を満たした場合に車線変更すると仮定する。

車線変更規則は以下のようになる[22]。

- (a) $v_i > v_{i+1}$ and $\Delta x_i < 4x_{cf}$: 動機条件,
 $\Delta x_{fi} > 2x_{cf}$ and $\Delta x_{bi} > x_{cf}$: 安全条件,
- (b) $v_i > v_{i+1}$ and $\Delta x_i < 4x_{cf}$: 動機条件,
 $v_i > v_i$ and $\Delta x_{bi} > x_{cf}$: 安全条件,
- (c) $\Delta x_i > 2x_{cf}$: 動機条件,
 $\Delta x_{fi} > \Delta x_i$ and $\Delta x_{bi} > x_{cf}$: 安全条件, (4)

このとき Δx_{fi} は車 i と変更後の車線における前方の車との車間距離であり、 Δx_{bi} は車 i と変更後の車線における後方との車との車間距離である。本発表では、道路長さ $l = 400$ とし、車の最大速度 $v_{\max f} = 2.0$ としてバスの最大速度 $v_{\max s}$ を変化させてシミュレーションを行った。また感度 $a = 2.0$ 、安全距離 $x_{cf} = x_{cs} = 4.0$ とした。

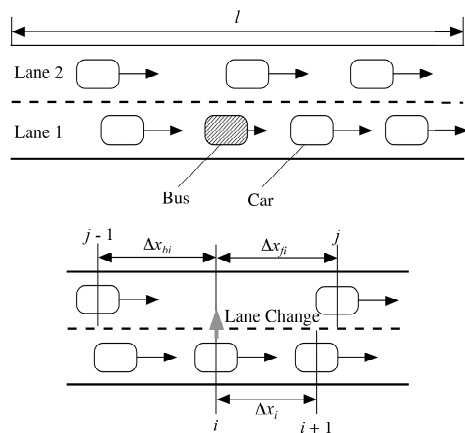
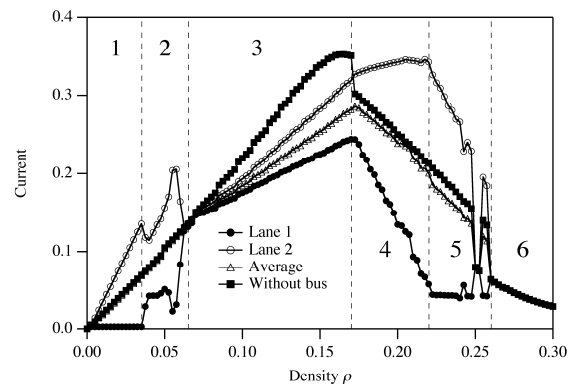


図1：2車線交通流モデルの概略図

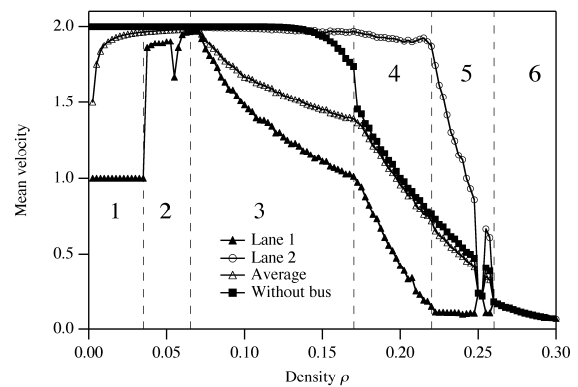
3. シミュレーション結果および考察

はじめに密度による流量の変化（基本図）および平均速度の変化を調べる。このとき $v_{maxs} = 1.0$ とする。(a) は密度による流量の変化（基本図）であり、(b) は平均速度の変化である。密度は $\rho = 1/(1 + \Delta x_{int})$ で定義される。それぞれバスのいる Lane 1、バスのいない Lane 2、両方の車線における平均値、バスが存在しない場合の値について示されている。バスが存在しない場合、交通状態は自由流状態、自由流と混雑流が共存する状態、混雑流状態と3つの状態に分類することができるが、遅いバスが存在する場合、 $\rho_c = 0.035, 0.065, 0.17, 0.22$ および 0.26 において交通状態の相転移を見ることができる。密度に対する流量および平均速度の傾きは各転移点において不連続となっていることがわかる。これらの ρ_c によって分けられる領域をそれぞれ Region 1~6 と定義する。

次に区分された各領域における車の時間空間分布図について示す。図3は $\rho = 0.03$ (Region 1) のときの時間空間分布である。(a) はバスが存在する Lane 1、(b) はもう一方の Lane 2 に関する図で、太線がバス、細線が車である。これらを見ると Lane 1 にはバスのみ存在し、Lane 2 には車のみが存在している様子が見える。最初は Lane 1 に車は存在するが、車はバスに追いついて Lane 2 に車線変更する。Region 1 では車の密度は低く、Lane 2 において車は車線変更する動機を持たないので、車は Lane 2 に居続ける。これにより車が Lane 2 に集まる。図4は $\rho = 0.05$ (Region 2) のときの時間空間分布である。図3と同様の手法で示されているが、図3の場合に加えて車線変更を表す白丸 (Lane 1 から Lane 2 へ) と黒丸 (Lane 2 から Lane 1 へ) が示されている。これらを見ると図3 (Region 1) とは異なり、バスの存在する Lane 1 にも車が存在する様子が見える。Region 1 と Region 2 の境界 $\rho_c = 0.035$ において、すべての車が片側の車線に集まったときの平均車間距離は、動機条件が発生するときの車間距離と一致する。Region 2 においては車がバスを追い越すために Lane 1 から Lane 2 へ車線変更した後、Lane 2 において車線変更する動機を持ち、Lane 1 に車が帰ってくる。図5に $\rho = 0.12$ (Region 3) のときの時間空間分布が、図3、4と同様に示されている。Region 3 においては Lane 1 ではバスの後方に車のクラスタが形成され、そこでは車線変更は行われず、



(a)



(b)

図2：密度による流量の変化および平均速度の変化

クラスタの後方で車線変更が自由に行われている。Region 2 と Region 3 の境界 $\rho_c = 0.065$ における平均車間距離は両方の車線において動機条件が発生するときの車間距離と一致する。Region 3 ではバスを追い越そうとする車が安全条件を満たせずに Lane 2 に車線変更できず、バスと同じ速度で走る車のクラスタを形成する。密度の増加とともにこのクラスタは大きくなる。図6に $\rho = 0.20$ (Region 4) のときの時間空間分布が、図3~5と同様に示されている。Lane 1 に渋滞波が発生しており、バスと他の車が影響を受けている様子が見える。一方、Lane 2 においてはすべての車がほぼ最高速度で走る。また、バスが渋滞波から出るときにバスの前方に安全条件を満たすほどの車間距離があり、そこで車線変更が行われている。図7に $\rho = 0.23$ (Region 5) のときの時間空間分布が、図3~6と同様に示されている。Lane 1 ではすべての車が同じ速度で移動しており、図2における密度による流量や平均速度の変化がない。一方、Lane 2 に渋滞波が発生している様子が見える。図8に $\rho = 0.27$ (Region 6) のときの時間空間分布が、図3~7と同様に示されている。Lane 1、Lane 2 の両方で完全渋滞となっている様子が見える。図2における流量と平均速度は Lane 1、Lane 2 およびバスがない状態が完全に一致しているため、流れへのバスによる影響はないと考えられる。

ここでは、遅いバスの速度が流れに与える影響について検討するため、速い車の最高速度に対する遅い車の最高速度の比 $S = v_{maxs} / v_{maxf}$ を変化させた場合の結果について示す。図9は $S = 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ における密度

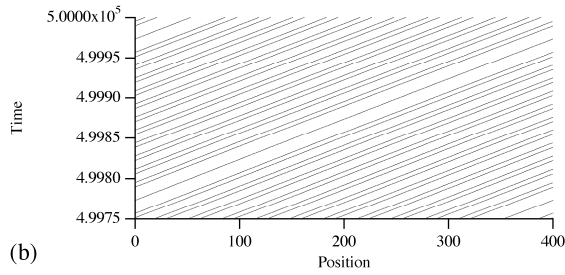
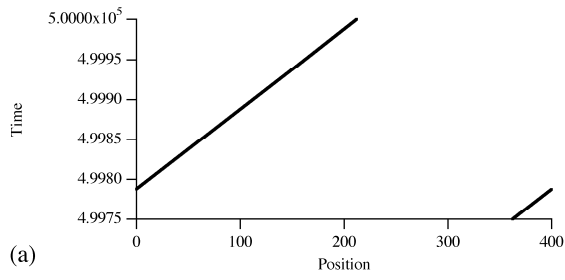


図 3 : $\rho = 0.03$ (Region 1) のときの時間空間分布

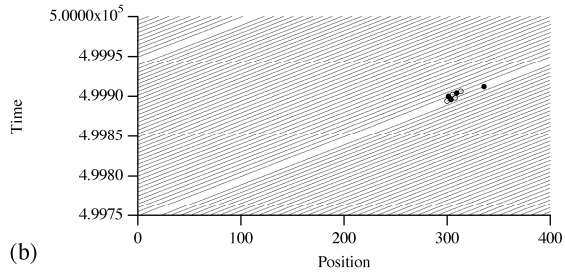
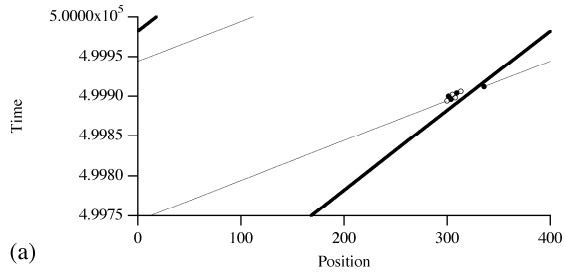


図 4 : $\rho = 0.05$ (Region 2) のときの時間空間分布

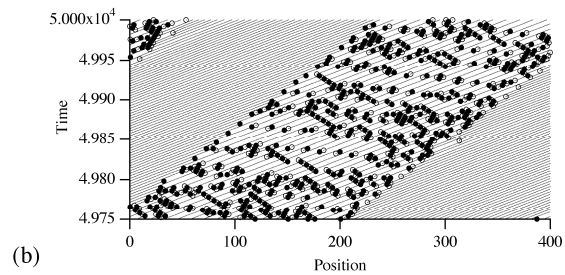
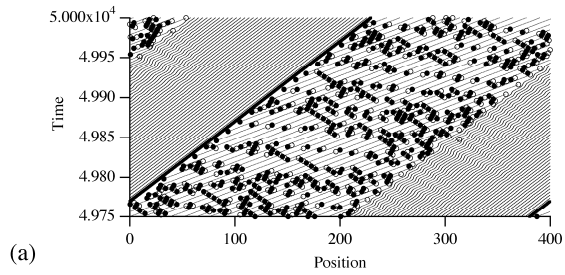


図 5 : $\rho = 0.12$ (Region 3) のときの時間空間分布

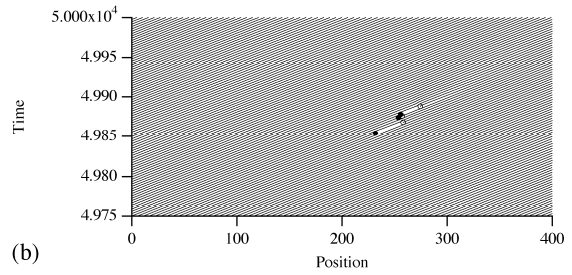
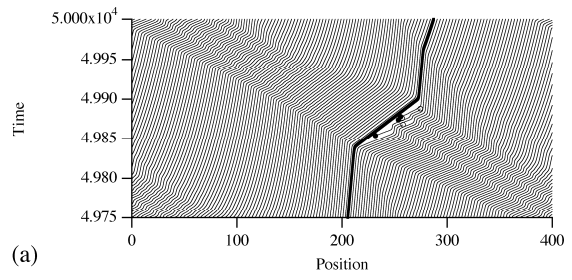


図 6 : $\rho = 0.20$ (Region 4) のときの時間空間分布

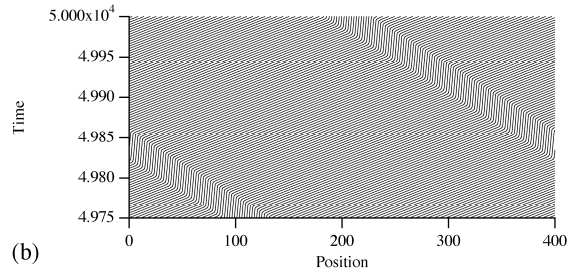
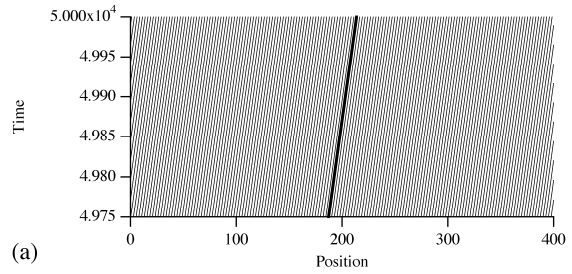


図 7 : $\rho = 0.23$ (Region 5) のときの時間空間分布

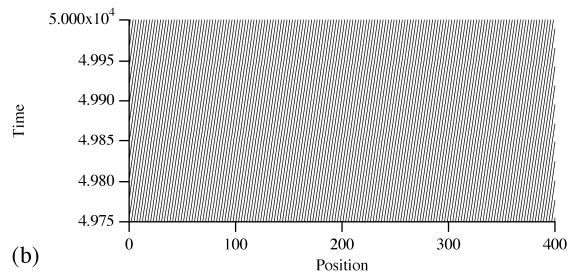
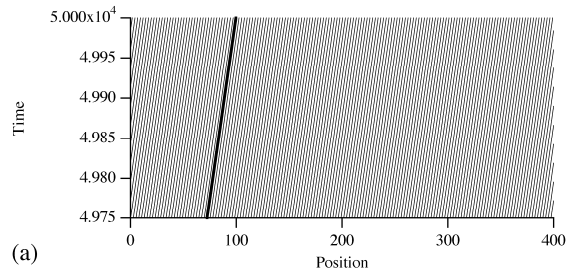


図 8 : $\rho = 0.27$ (Region 6) のときの時間空間分布

による流量の変化（基本図）である。密度が低い場合（Region 1, Region 2）では、 S によって流量は変化しない。この領域では速い車が遅いバスを追い越しているためと考えられる。Region 2 と Region 3 の転移点は S によって変化せず、Region 3 と Region 4 の転移点にはよって変化する。Region 5 と Region 6 の転移点は S によって変化せず、Region 6 では遅いバスが存在しない場合と同じ結果となった。最後に図 10 に位相空間(S, ρ) についての領域マップを示す。異なる密度やバスの速度に対する流れの状態が示されている。Region 1~6 に加えて、Region 4', Region 4''を確認することができた。Region 4'は Lane 1 において完全渋滞、Lane 2 において自由流となる状態である。また Region 4''は Lane 1, Lane 2 において渋滞波が発生する状態である。

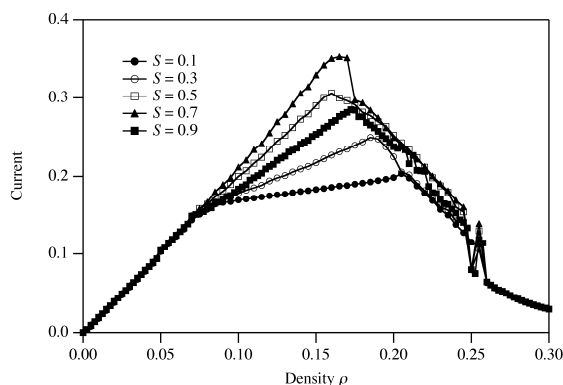


図 9 : 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 における密度による流量の変化

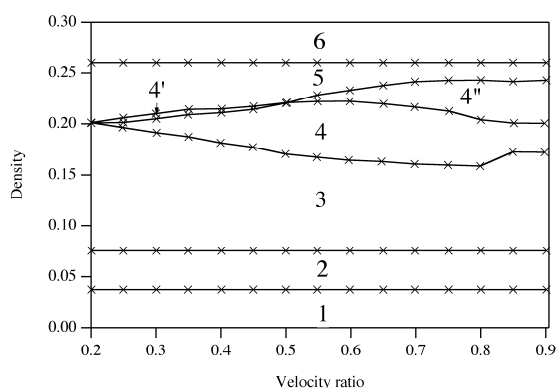


図 10 : 位相空間(S, ρ)についての領域マップ

4. おわりに

片側車線に遅いバスが存在する場合の 2 車線交通流について数値シミュレーションを行い、その交通状態について検討した。特に、初期密度の違いによる交通状態の変化が調べられた。密度による流量変化（基本図）および平均速度の変化を調べることで、密度によって交通状態が変化する様子が確認された。各交通状態は車の時間空間分布によりその特徴が明らかとなり、従来から明らかとなっている自由流状態、自由流と混雑流が共存する状態、混雑流状態の 3 つの交通状態に加えて、3 つの新しい交通状態を確かめることができた。さらに領域図により各交通状態を分類することができた。これらのことから、2 車線交通流において遅いバスを投入すると流れに大きな影響を与え、新しい渋滞構造が発生することが結論づけられる。

参考文献

- [1] T. Nagatani, Rep. Prog. Phys. 65 (2002) 1331.
- [2] D. Helbing, Rev. Mod. Phys. 73 (2001) 1067.
- [3] D. Chowdhury, L. Santen, A. Schadscheider, Phys. Rep. 329 (2000) 199.
- [4] B. S. Kerner, Networks Spatial Econ. 1 (2001) 35.
- [5] D. Helbing, H. J. Herrmann, M. Schreckenberg, D. E. Wolf (Eds.) *Traffic and Granular Flow '99*, Springer, Heidelberg, 2000.
- [6] K. Nagel, M. Schreckenberg, J. Phys. I France 2 (1992) 2221.
- [7] E. Ben-Naim, P. L. Krapivsky, S. Redner, Phys. Rev. E 50 (1994) 822.
- [8] E. Tomer, L. Safonov, S. Havlin, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 382.
- [9] M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing, Phys. Rev. E 62 (2000) 1805.
- [10] H. K. Lee, H.-W. Lee, D. Kim, Phys. Rev. E 64 (2001) 056126.
- [11] I. Lubashevsky, S. Kalenkov, R. Mahnke, Phys. Rev. E 65 (2002) 036140.
- [12] I. Lubashevsky, R. Mahnke, P. Wagner, S. Kalenkov, Phys. Rev. E 66 (2002) 016117.
- [13] F. Weifeng, Y. Lizhong, F. Weicheng, Physica A 321 (2003) 633.
- [14] S. Maniccam, Physica A 321 (2003) 653.
- [15] O. J. O'loan, M. R. Evans, M. E. Cates, Phys. Rev. E 58 (1998) 1404.
- [16] T. Nagatani, Phys. Rev. E 63 (2001) 036116.
- [17] H. J. C. Huijberts, Physica A 308 (2002) 489.
- [18] T. Nagatani, Phys. Rev. E 66 (2002) 046103.
- [19] L. A. Safonov, E. Tomer, V. V. Strygin, Y. Ashkenazy, S. Havlin, Chaos, 12 (2002) 1006.
- [20] E. Brockfeld, R. Barlovic, A. Schadschneider, M. Schreckenberg, Phys. Rev. E 64 (2001) 056132.
- [21] M. Sasaki, T. Nagatani, Physica A 325 (2002) 531.
- [22] S. Kurata, T. Nagatani, Physica A 318 (2003) 537.
- [23] K. Nagel, D. E. Wolf, P. Wagner, P. Simon, Phys. Rev. E 58 (1998) 1425.