

隊列走行による交通流の安定化と促進*

倉田真吾^{*1}, 村松将邦^{*1}, 長谷隆^{*2}

Enhancement and Stabilization of Traffic Flow with Vehicles Moving in Groups

Shingo KURATA, Masakuni MURAMATSU and Takashi NAGATANI^{*3}

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University,
3-5-1 Jyohoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan

The traffic behavior is investigated for vehicles moving in groups (platooning) analytically and numerically. The car-following model of traffic is extended to take into account a binary mixture of vehicles. It is shown that the moving in groups stabilizes the traffic flow. The jamming transition between the freely moving and jammed phases occurs at a higher density than the threshold of the original car-following model. The traffic current is enhanced at a high density region by keeping a short headway. The jamming transition is analyzed with the use of the linear stability method. It is found that the theoretical neutral stability curve is in good agreement with the transition line obtained by the simulation result. It is shown that the moving in groups has a significant effect on the enhancement of traffic current.

Key Words: Traffic Flow, Traffic Jam, Stability, Nonlinear Wave, Platooning, Phase Transition

1. 緒言

近年、交通渋滞が社会問題となり交通流について多くの関心もたれ、交通渋滞の改善が早急に望まれている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。交通渋滞に関して交通工学及び物理学の観点から研究がなされ、交通渋滞を改善する種々の交通システムが考えられている。その一つのシステムとして隊列走行(プラトーン走行)が注目を集めている。このシステムは車間距離を短くして複数の車で隊列を組み車の流量を増やし交通量を促進させるものである。隊列走行は車間距離の長い先導車の後ろに車間距離の短い複数の追従車が列をなして先導車に追従して走行する。車間距離の短い追従車を先導車に追従させることで平均車間距離が短くなり渋滞が発生する臨界密度が増加し交通量が促進されると考えられている。しかしながら、隊列走行による交通量促進効果や交通渋滞の発生メカニズムなどの詳細な研究はあまりない。

代表的な交通流モデルとして、連続体モデル(流体

力学の方程式によって記述されるモデル)と粒子モデル(追従モデル)がある⁽⁸⁾⁻⁽¹⁵⁾。追従モデルの一つである最適速度モデル⁽⁸⁾は直前の車との車間距離を計測して自車の加速度を決定するモデルである。前方の車との車間距離から自車の加速度を決定する際に車間距離によって決定される最適速度という目標速度と自車の速度の差をもとに自車の加速度を決定している。

本研究では先導車どうし、追従車どうしでは同じパラメータ最適速度関数を与え、先導車と追従車には異なったパラメータをもつ最適速度関数を与えて隊列を組み、複数の隊列が列をなして走行するモデルを提案する。この隊列走行モデルに線形安定解析並びに数値シミュレーションを行い、隊列走行による交通量の促進効果および渋滞発生機構を研究する。

また最近 ITS(Intelligent Transportation System)に代表されるような、自動車の自動運転化をめざす傾向がある^{(16),(17)}。現在考えられているシステムとしては、道路状況を観測し、それを各自動車に送信するものや、道路上に磁気ラインを引き、それに沿って走行するものなどがある。追従モデルは前方をカメラで監視し、障害物、車などに反応して速度(加速度)を調

* 原稿受付 2000年11月16日。

^{*1} 静岡大学大学院(〒432-8561 浜松市城北3-5-1)

^{*2} 正員, 静岡大学工学部。

E-mail: tmtnaga@ipc.shizuoka.ac.jp

整するものに関連する. さらに今回我々が考えるモデルは高知能自動車交通システム(SSVS: Super Smart Vehicle System)の車々間通信による「隊列走行」に相当するものである⁽¹⁸⁾.

主な記号

- n : 車の番号 (最後尾の車から数えて n 番目)
- x_n : n 番目の車の位置
- Δx_n : n 番目の車の前方車間距離 ($= x_{n+1} - x_n$)
- $\Delta x_n^{(0)}$: 定常状態における車間距離
- $\Delta x_i^{(0)}$: 先導車の定常状態における車間距離
- $\Delta x_r^{(0)}$: 追従車の定常状態における車間距離
- x_c : 安全距離
- V_n : n 番目の車の最適速度
- V_i : 先導車の最適速度
- V_r : 追従車の最適速度
- a_n : n 番目の車の運転手の感度
- y_n : 定常流解 $x_n^{(0)}$ からのずれ ($|\hat{y}_n| < \Delta$)
- t : 時刻
- ρ : 密度
- Q : 流量
- $\hat{\cdot}$: 無次元量 (ハット)

2. モデルと基礎方程式

一般に追い越しをしない場合, 運転手は直前の車に反応してアクセルとブレーキを操作することにより, 先行する車に衝突しないように走行する. 最適速度モデルでは運転手は直前の車との車間距離を目測し, それに応じた最適速度 (目標速度) に近づくように加速減速する. 最適速度モデルの運動方程式は以下のように与えられる⁽⁸⁾. また最適速度モデルの概略図を図1(a)に示す.

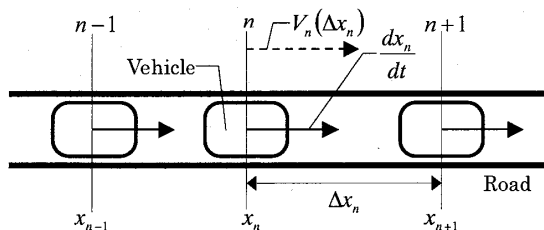


Fig.1(a).Optimal velocity model

$$\frac{d^2 x_n}{dt^2} = a_n \left\{ V_n(\Delta x_n) - \frac{dx_n}{dt} \right\} \quad (1)$$

式(1)は簡単な非線形方程式であるが, 十分多くの車が相互作用する高速道路においては典型的な多体問題を構成している. 一般に多体問題は非常に複雑な挙動を示すことが知られている.

そこで簡単化のために, すべての運転手の感度を一定 ($a_n = a = \text{一定}$) とし, さらに最適速度は運転手に依存

しないものとする. また計算の一般化のために代表長さを L , 代表速度を U として以下の無次元化を行う.

$$\hat{x}_n = \frac{1}{L} x_n, \quad \hat{V} = \frac{1}{U} V, \quad \hat{t} = \frac{U}{L} t, \quad (2)$$

$$\frac{d\hat{x}_n}{d\hat{t}} = \frac{1}{U} \frac{dx_n}{dt}, \quad \frac{d^2 \hat{x}_n}{d\hat{t}^2} = \frac{L}{U^2} \frac{d^2 x_n}{dt^2}, \quad a = \frac{L}{U} a_n$$

これによりハットのついた変数は無次元変数となる. 式(2)の無次元変数を用いて, 式(1)の無次元化を行うと次式が得られる.

$$\frac{d^2 \hat{x}_n}{d\hat{t}^2} = \hat{a} \left[\hat{V}(\Delta \hat{x}_n) - \frac{d\hat{x}_n}{d\hat{t}} \right] \quad (3)$$

この無次元化により, 状況によって変化するパラメータは L, U, a から a のみとなり, 相似則が成立する.

最適速度は次の条件を満たさなければならない. (・)車間距離に対して単調増加, (・)車間距離が長くなると一定値 (最大速度) に漸近, (・)安全距離 x_c 付近で急激に変化. ここで車間距離が x_c より縮まると車は急激に減速する (高速で走行できないためにブレーキを踏む) ので, x_c を安全距離とし最適速度の最大値の 1/2 となる車間距離と定義する. この条件を満たす関数として次式の最適速度関数を採用する.

$$\hat{V}(\Delta \hat{x}_n) = \frac{v_{\max}}{2} \left[\tanh(\Delta \hat{x}_n - \hat{x}_c) + \tanh(\hat{x}_c) \right] \quad (4)$$

v_{\max} は最大速度とする. 車間距離 Δx_n が無限大になった時, 最適速度関数は最大速度 v_{\max} となる. ここで最適速度関数と安全距離の関係を図1(b)に示す.

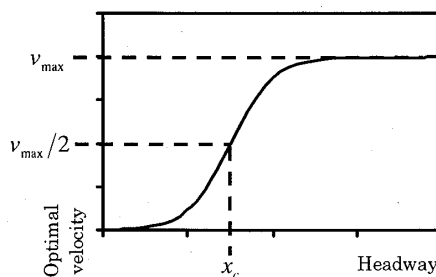


Fig.1(b).Optimal velocity and safety headway

次に無次元化した最適速度モデルを用いて隊列走行を表現するために, 先導車と追従車は異なる最適速度を持つものとする.

$$\hat{V}(\Delta \hat{x}) = \begin{cases} \hat{V}_i(\Delta \hat{x}) \\ \hat{V}_r(\Delta \hat{x}) \end{cases} \quad (5)$$

ここで, $\hat{V}_i(\Delta \hat{x})$ は先導車の最適速度, $\hat{V}_r(\Delta \hat{x})$ は追従車の最適速度である. 隊列を組ませるために各車に与える最適速度は次の条件を満たさなければならない.

(・)追従車は先導車に比べて車間距離が短くなければならない, (・)先導車は追従車よりも最大速度が大き

い。隊列走行は車間距離の短い車を加えて走行する車の密度を増加させ交通流量を促進させる交通システムであるので、本モデルでは追従車の車間距離を先導車の車間距離の半分程度に短くして交通流量を促進させる。しかし車間距離が短くなると衝突の危険性が高くなるので、衝突回避のために追従車の最大速度も先導車の最大速度の半分として、この条件を満たす次式的最適速度関数を採用する。

$$\begin{aligned} \hat{V}_L(\Delta\hat{x}) &= \frac{v_{\max}}{2} [2\{\tanh(\Delta\hat{x} - 2\hat{x}_c) + \tanh(2\hat{x}_c)\}] \\ \hat{V}_T(\Delta\hat{x}) &= \frac{v_{\max}}{2} [\tanh(\Delta\hat{x} - \hat{x}_c) + \tanh(\hat{x}_c)] \end{aligned} \quad (6)$$

一般的な N 台グループの隊列走行における m 番目のグループの運動方程式を次式に示し、モデルの概略図を図 1(c)に示す。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \hat{x}_{Nm}}{dt^2} &= \hat{a} \left[\hat{V}_L(\Delta\hat{x}_{Nm}) - \frac{d\hat{x}_{Nm}}{dt} \right] \\ \frac{d^2 \hat{x}_{Nm-1}}{dt^2} &= \hat{a} \left[\hat{V}_T(\Delta\hat{x}_{Nm-1}) - \frac{d\hat{x}_{Nm-1}}{dt} \right] \\ \frac{d^2 \hat{x}_{Nm-2}}{dt^2} &= \hat{a} \left[\hat{V}_T(\Delta\hat{x}_{Nm-2}) - \frac{d\hat{x}_{Nm-2}}{dt} \right] \\ &\dots \\ \frac{d^2 \hat{x}_{Nm-(N-1)}}{dt^2} &= \hat{a} \left[\hat{V}_T(\Delta\hat{x}_{Nm-(N-1)}) - \frac{d\hat{x}_{Nm-(N-1)}}{dt} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

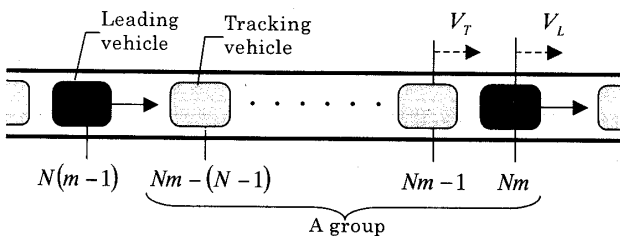


Fig.1(c). Group traveling model

これ以降無次元量を示すは省略する。

3. 線形安定解析

非線形の運動方程式(7)を線形化することにより隊列走行における系の安定性に関する解析を行う。

最も簡単な場合である先導車1台、追従車1台の2台1グループで隊列走行する場合について解析する。式(7)から2台1グループの場合の運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_{2m}}{dt^2} &= a \left[V_L(\Delta x_{2m}) - \frac{dx_{2m}}{dt} \right] \\ \frac{d^2 x_{2m-1}}{dt^2} &= a \left[V_T(\Delta x_{2m-1}) - \frac{dx_{2m-1}}{dt} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

定常解として、すべての車が最適速度に達し加速も減速もしない一様状態（等車間距離）が存在する。

$$\begin{aligned} x_{2m}^{(0)} &= V_L(\Delta x_L^{(0)}) \cdot t + (m-1)\Delta x_L^{(0)} + m\Delta x_T^{(0)} \\ x_{2m-1}^{(0)} &= V_T(\Delta x_T^{(0)}) \cdot t + (m-1)(\Delta x_L^{(0)} + \Delta x_T^{(0)}) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで $\Delta x_L^{(0)}$ は先導車の定常状態における車間距離、 $\Delta x_T^{(0)}$ は追従車の定常状態における車間距離である。系の安定性を調べるためこの様な定常流解にわずかな擾乱を加え、式(9)の解を以下のようにおく。

$$\begin{aligned} x_{2m} &= x_{2m}^{(0)} + y_{2m}, \quad |y_{2m}| < \delta \\ x_{2m-1} &= x_{2m-1}^{(0)} + y_{2m-1}, \quad |y_{2m-1}| < \delta \end{aligned} \quad (10)$$

ここで y_n は定常流解 $x_n^{(0)}$ からのわずかなずれである。式(10)を式(8)に代入して Taylor 展開を行い、 y_n の2次以上の項を無視すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_{2m}}{dt^2} &= a \left[\Delta y_{2m} \cdot V_L'(\Delta x_L^{(0)}) - \frac{dy_{2m}}{dt} \right] \\ \frac{d^2 y_{2m-1}}{dt^2} &= a \left[\Delta y_{2m-1} \cdot V_T'(\Delta x_T^{(0)}) - \frac{dy_{2m-1}}{dt} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、

$$\begin{aligned} V_L'(\Delta x_L^{(0)}) &= \left. \frac{dV_L(\Delta x_n)}{d\Delta x_n} \right|_{\Delta x_n = \Delta x_L^{(0)}} \\ V_T'(\Delta x_T^{(0)}) &= \left. \frac{dV_T(\Delta x_n)}{d\Delta x_n} \right|_{\Delta x_n = \Delta x_T^{(0)}} \end{aligned}$$

である。

式(11)は以下のような解を持つ。

$$\begin{aligned} y_{2m}(t) &= Y_L \exp\{ik(2m) + \omega \cdot t\} \\ y_{2m-1}(t) &= Y_T \exp\{ik(2m-1) + \omega \cdot t\} \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)を式(11)に代入し整理すると次式を得る。

$$\begin{bmatrix} M_1 & M_2 \\ M_4 & M_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_L \\ Y_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで、

$$\begin{aligned} M_1 &= \omega^2 + a\omega + aV_L'(\Delta x_L^{(0)}) \\ M_2 &= -aV_L'(\Delta x_L^{(0)})e^{ik} \\ M_3 &= \omega^2 + a\omega + aV_T'(\Delta x_T^{(0)}) \\ M_4 &= -aV_T'(\Delta x_T^{(0)})e^{ik} \end{aligned}$$

である。

Y_L, Y_T が有意な解をもつためには式(13)の行列式が零にならなければならないので次式を得る。

$$\begin{aligned} &\omega^4 + 2a\omega^3 \\ &+ a \left\{ a + V_L'(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'(\Delta x_T^{(0)}) \right\} \omega^2 \\ &+ a^2 \left\{ V_L'(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'(\Delta x_T^{(0)}) \right\} \omega \\ &- a^2 (e^{2ik} - 1) V_L'(\Delta x_L^{(0)}) V_T'(\Delta x_T^{(0)}) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

ここで $\omega = \omega_1(ik) + \omega_2(ik)^2 + \omega_3(ik)^3 + \dots$ と展開し、 $(ik)^3$ 以上の項を無視し (ik) と $(ik)^2$ の項について整理すると以下の連立方程式を得る。

$$a^2 \left\{ V_L'(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'(\Delta x_T^{(0)}) \right\} \omega_1 - 2a^2 V_L'(\Delta x_L^{(0)}) V_T'(\Delta x_T^{(0)}) = 0 \quad (15)$$

$$a \left\{ a + V_L'(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'(\Delta x_T^{(0)}) \right\} \omega_1^2 + a^2 \left\{ V_L'(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'(\Delta x_T^{(0)}) \right\} \omega_2 - 2a^2 V_L'(\Delta x_L^{(0)}) V_T'(\Delta x_T^{(0)}) = 0 \quad (16)$$

式(15)、式(16)から ω_1 、 ω_2 を求めると次式を得る。

$$\omega_1 = \frac{2V_L'(\Delta x_L^{(0)})V_T'(\Delta x_T^{(0)})}{V_L'(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'(\Delta x_T^{(0)})} \quad (17)$$

$$\omega_2 = \frac{2V_L'(\Delta x_L^{(0)})V_T'(\Delta x_T^{(0)})}{\left\{ V_L'(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'(\Delta x_T^{(0)}) \right\}^2} \left[a^2 \left\{ V_L'^2(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'^2(\Delta x_T^{(0)}) \right\} - 2aV_L'(\Delta x_L^{(0)})V_T'(\Delta x_T^{(0)}) \left\{ V_L'(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'(\Delta x_T^{(0)}) \right\} \right] \quad (18)$$

この解 $y_s(t)$ は定常流解からのずれなので、 $y_s(t)$ の振幅が時間経過に伴い増大すると状態は不安定になる。従って $\text{Re}(z) > 0$ つまり $\omega_2 < 0$ ならば振幅は時間経過に伴い増大するため定常流は不安定である。逆に $\text{Re}(z) < 0$ つまり $\omega_2 > 0$ ならば振幅は時間経過に伴い減少するため定常流は安定となる。故に定常流が常に安定であるためには $\omega_2 > 0$ でなければならない。この結果安定条件は式(18)から以下のように与えられる。

$$a > \frac{2V_L'(\Delta x_L^{(0)})V_T'(\Delta x_T^{(0)})}{V_L'(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'(\Delta x_T^{(0)})} \quad (19)$$

また $\text{Re}(z) = 0$ つまり $\omega_2 = 0$ のとき中立安定状態であり、式(19)で等号が成立する場合が中立安定条件となる。

一般的な N 台グループでの隊列走行の場合について同様に解析する。 N 台グループの場合の運動方程式は式(7)で与えられる。同様にして式(7)から一般的な場合の N 台グループでの隊列走行における安定条件が以下のように得られる。

$$a > \frac{2V_L'(\Delta x_L^{(0)})V_T'(\Delta x_T^{(0)})}{(N-1)V_L'^2(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'^2(\Delta x_T^{(0)})} (N-1)V_L'(\Delta x_L^{(0)}) + V_T'(\Delta x_T^{(0)}) \quad (20)$$

求めた解析結果から隊列走行による交通流の安定化効果を調べるために不安定領域の変化で比較する。隊列走行における追従車は自動運転で走行する。この自

動運転システムによって車の応答性は変化するため、感度を変えた場合についても検討する。図2に隊列走行をした場合の中立安定曲線と、比較のための先導車だけの場合、追従車だけの場合の中立安定曲線を示す。一般道における普通車の平均速度が 30km/h と考えて安全距離を 30m とする。この安全距離を車の全長で無次元化すると安全距離は 8 程度となる。しかし実交通では安全距離よりも短い車間距離で走行しているので、普通車の安全距離は 6 程度と考えられる。この普通車を先導車とみなし式(6)から先導車の安全距離は $x_c = 6.0$ 、追従車の安全距離は $x_c = 3.0$ と設定する。各中立曲線の下領域が不安定領域であり、この領域で一般的な定常状態の交通流は不安定となり交通渋滞へと発展する。

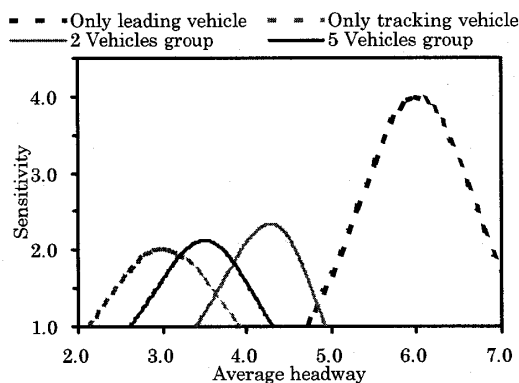


Fig.2. Neutral stability lines

車間距離の短い追従車を加えることで先導車の平均車間距離が短くなり、先導車だけの場合よりも系の安定性が増加して不安定領域が減少する。また先導車に追従する追従車の台数が増えるにしたがい先導車の平均車間距離は短くなるため、不安定領域の減少効果は増加し追従車の中立安定曲線に近づいていく。よって隊列走行には交通流の安定化効果がある。

次に隊列走行による交通流の促進効果調べるために流量の変化を比較する。渋滞が発生しない理想的な一様状態において隊列走行をした場合と、比較のための先導車だけの場合、追従車だけの場合の密度と流量の関係を図3に示す。密度 ρ は一般に車間距離の逆数に比例しているため、車が完全に詰まった状態(車間距離が零)で密度が 1 となるように次式で定義する。

$$\rho = \frac{1}{1 + \langle \Delta x / L \rangle} = \frac{1}{1 + \langle \Delta x \rangle} \quad (21)$$

ここで $\langle \Delta x \rangle$ は空間平均した平均車間距離の無次元量を示す。また流量は次式で定義する。

$$Q = \frac{\langle v / U \rangle}{1 + \langle \Delta x / L \rangle} = \frac{\langle \hat{v} \rangle}{1 + \langle \Delta x \rangle} \quad (22)$$

ここで $\langle v \rangle$ は空間平均した平均速度の無次元量を示す。

ただし先導車の安全距離 $x_c = 6.0$, 追従車の安全距離 $x_c = 3.0$ としている。

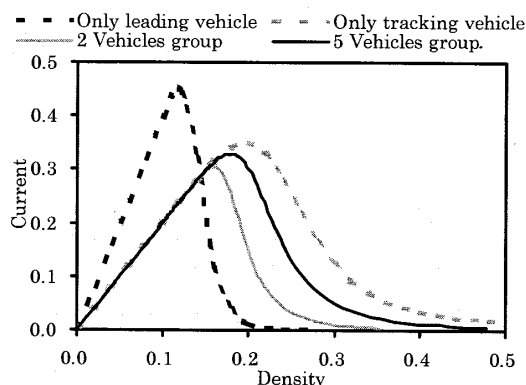


Fig.3. Plots of current against density

追従車を加えると低密度側の自由流では速度の遅い追従車に抑制されて先導車の場合よりも平均速度が低下するので先導車の場合と比べると流量は減少するが、先導車の平均車間距離は短くなっているので先導車の場合よりも高密度側で流量が増加している。また先導車に追従する追従車の台数を増やすことによって高密度での流量は増加し追従車だけの流量曲線に近づく。よって通常渋滞が発生するような高密度領域において隊列走行による交通量の促進効果が現れ、先導車に追従する追従車の台数に比例して高密度側での交通量を増加させることが可能である。また低密度では人間が運転し、渋滞が発生する高密度では自動運転に切り替えて隊列走行を行うことで、低密度の交通流量を損なうことなく高密度での流量促進効果が望める。

4. シミュレーション結果

周期的境界条件の下、数値計算は4次のRunge-Kutta法を用い、時間刻み1/128、先導車の安全距離 $x_c = 6.0$, 追従車の安全距離 $x_c = 3.0$ でシミュレーションを行う。

先導車1台、追従車1台の2台グループで隊列走行した場合のシミュレーション結果を示す。感度が2.33以下のとき密度が高くなると渋滞が発生し、交通渋滞は密度波として後方に伝播する。このような渋滞が発生する領域を図4に示す。図中の角印がシミュレーションから得られた渋滞が発生または消滅する限界点を示す。また図中の実線は線形安定論から得られた中立安定曲線である。中立安定曲線とシミュレーション結果は計算精度内で線形安定解析と一致している。シミュレーション結果は中立安定曲線よりも少し内側に存在するが、これはシミュレーションを行う際に計算時間の短縮のために車の台数を100-200台としたためと、

線形近似では微小な擾乱を与えるのに対してシミュレーションでは有限振幅の擾乱を与えたためである。この中立安定曲線よりも外側ではいかなる初期条件より始めても十分時間が経過すると、すべての車の速度は等しくなる。先導車の車の車間距離はすべての車で等しくなり、追従車の車間距離もすべての車で等しくなる。先導車の車間距離と追従車の車間距離は次式によって決定される。

$$\begin{aligned} \Delta x^{(0)} &= (\Delta x_L^{(0)} + \Delta x_T^{(0)})/2 \\ V_L(\Delta x_L^{(0)}) &= V_T(\Delta x_T^{(0)}) \end{aligned} \quad (23)$$

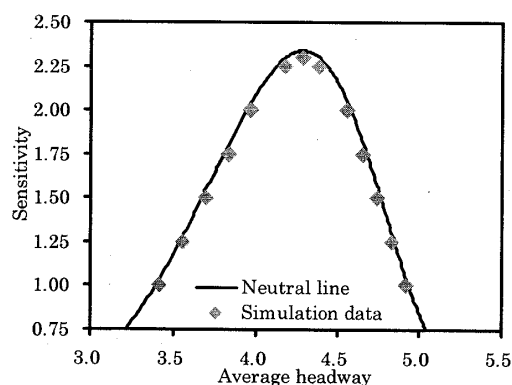


Fig.4. Comparison between transition points and neutral stability line for two vehicles

中立曲線より内側の不安定領域では上のような一様状態は不安定となり、十分な時間が経過すると有限振幅をもつ密度波(交通渋滞)となる。不安定領域(初期車間距離4.25)で発生した渋滞が定常状態になったときの速度分布(横軸に車番、縦軸に速度)、車間距離分布(横軸に車番、縦軸に車間距離)、リミットサイクル(横軸に車間距離、縦軸に速度)のシミュレーション結果を図5~7に示す。最大速度、安全距離の異なる先導車と追従車は、渋滞の内外においても追従車は先導車よりも短い車間距離を保ちながら、先導車と追従車は同じ速度で走行している。車間距離と速度との関係を示すリミットサイクルをみると先導車と追従車のリミットサイクルは別々のループを描き、追従車よりも大きい最大速度をもつ先導車は、渋滞をぬけた自由流において前方の最大速度の遅い追従車に抑制されて速度を上げることが出来ずに追従車と極端に変わらない最大速度をもつループとなっている。一方追従車は前方の加速度が大きい先導車が渋滞をぬけた後の加速領域での挙動の影響を受けて上下非対称なループとなっている。また、速度分布や車間距離分布における先導車の飛び出しや、先導車のリミットサイクルにおける小さなループがみられる。これは先導車が追従車よりも大きい最大速度をもつために渋滞をぬけた加速領域において追従車よりも大きな速度をもつので、自

由流状態に入ったところで前方の最大速度の小さい追従車に抑制されて減速するために発生する現象であると考えられる。

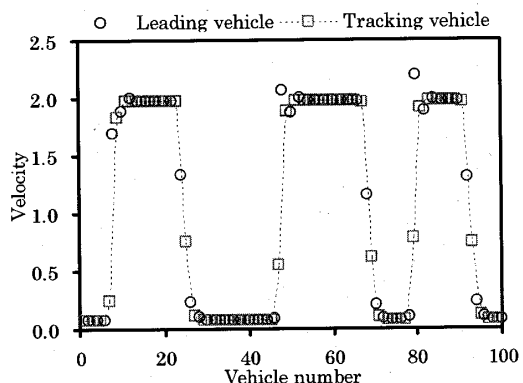


Fig. 5. Velocity profiles for two vehicles

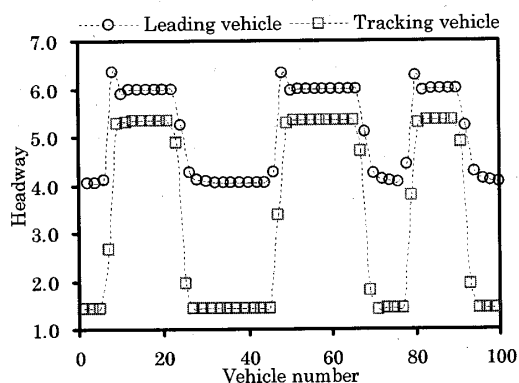


Fig. 6. Headway profiles for two vehicles

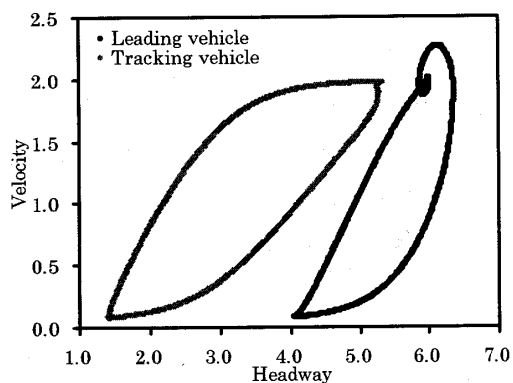


Fig. 7. Plot of velocity against headway for two vehicles

シミュレーションから得られた流量を角印で図 8 に示す。シミュレーション結果と比較するために渋滞のない一様流における流量曲線を実線で示す。密度が 0.16~0.22 あたりでシミュレーション結果と曲線が異なった値となっているが、これは渋滞キング波が発生したことに起因する。渋滞のない一様な状態の領域では曲線とシミュレーション結果は一致している。

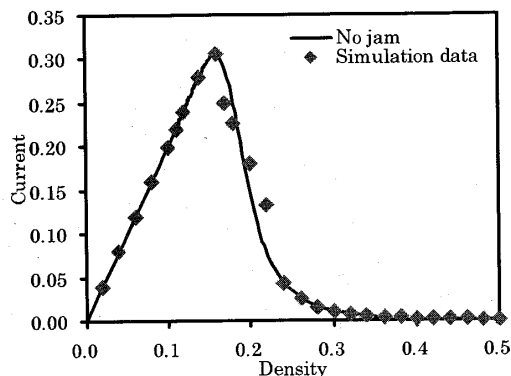


Fig. 8. Comparison between simulation data and theoretical current curve for two vehicles

次に追従車の台数を増やし先導車 1 台、追従車 4 台の 5 台グループの場合で、同様に発生した渋滞が定常状態にあるとき（初期車間距離 3.50）の速度分布、車間距離分布、リミットサイクルのシミュレーション結果を図 9~11 に示す。速度分布、車間距離分布から 2 台グループの場合と同様に渋滞の内外においても、追従車は先導車よりも短い車間距離を保ちながら先導車の後を先導車と同じ速度で走行している。リミットサイクルから先導車と各追従車の渋滞の内外における軌跡を比べると、先導車と追従車 1 は 2 台の場合と同様に飛び出しによる小さなループ、速度の速い先導車に引っ張られる様な上下非対称なループがある。しかし、追従車 1 の後ろの追従車 2~4 は追従車 1 の軌跡と異なっている。これは、追従車 1 が加速度の大きい先導車の影響を受けて先導車の方に引っ張られるような軌跡を描いているのに対し、追従車 1 を経由した追従車 2~4 への先導車の影響は小さいためにほとんど追従車のみで走行している場合と同様な軌跡を描いている。また 2 台グループの場合と先導車のループがほぼ一致することから追従車 1 の上下非対称なループが後続車に与える影響は小さいことが分かる。このことから隊列走行を行った場合先導車と追従車 1 は特殊な軌跡を描くが、それ以降の追従車はすべて普通の軌跡を描く。

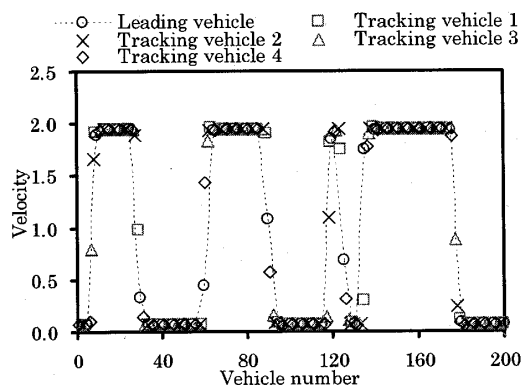


Fig. 9. Velocity profiles for five vehicles

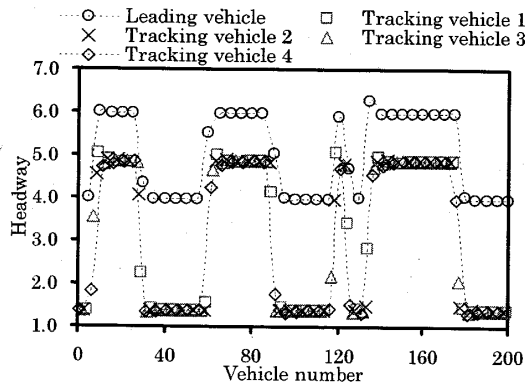


Fig.10. Headway profiles for five vehicles

L:Leading vehicle, T1:Tracking vehicle 1, T2:Tracking vehicle 2, T3:Tracking vehicle 3, T4:Tracking vehicle 4

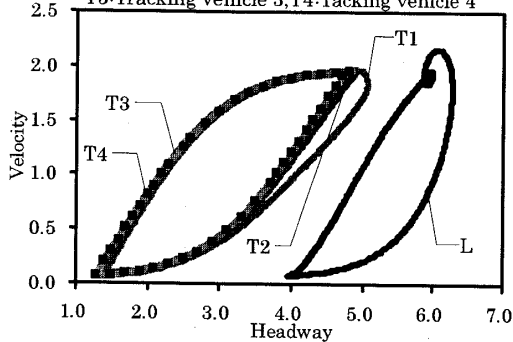


Fig.11. Plot of velocity against headway for five vehicles

シミュレーションから得られた渋滞が発生, または消滅する限界点を角印で図 12 に示す. 線形安定解析と比較するために中立安定曲線を実線で図中に示す.

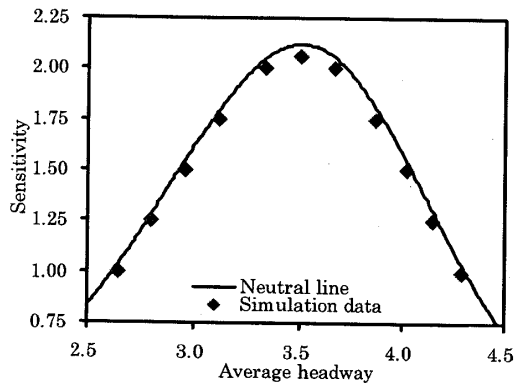


Fig.12. Comparison between transition points and neutral stability line for five vehicles

2 台グループの場合と同様にシミュレーション結果は計算精度内で線形安定解析とよく一致している.

渋滞のない一様流における流量曲線とシミュレーションで求めた流量を図 13 に示す. シミュレーション結果は角印で表す. 密度が 0.18~0.25 あたりでシミュレーション結果と曲線が異なった値となっているが, この領域では一様に不安定となって渋滞キック波が発生したためである. 渋滞のない一様な状態の領域では

曲線とシミュレーション結果は一致している.

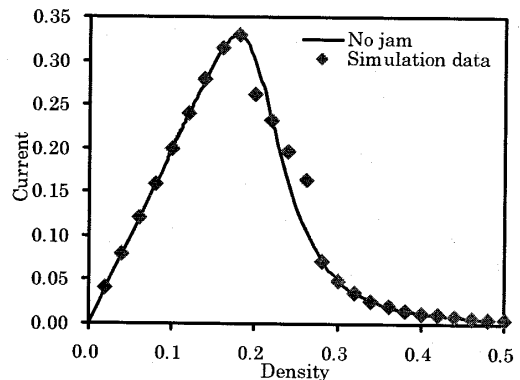


Fig.13. Comparison between simulation data and theoretical current curve for five vehicles

5. 結言

各車に異なる最適速度関数を与えて隊列走行させた最適速度モデルの線形安定解析とシミュレーションを行い, 隊列走行の交通流に関する以下の結論を得た.

1. 一般的な n 台での隊列走行における安定条件を導出し, シミュレーション結果と比較した. この結果, 隊列走行によって交通流が安定化することを示した.
2. 最大速度と車間距離が小さい追従車を加えた隊列走行を行うことにより渋滞が発生する不安定領域が減少し, 高密度側に移動することを明らかにした.
3. 隊列走行を行うことによって交通流の流量曲線の頂点が高密度側に移動し, 高密度領域で流量を増加させることが可能であることを示した.
4. 隊列走行を行った場合の渋滞の内外における先導車と追従車の挙動を明らかにし, 渋滞発生及び渋滞構造を解明した.

本研究において隊列走行の線形安定解析結果及びシミュレーション結果から, 隊列走行による交通流の促進効果および安定化効果を定量的に明らかにした. 本研究は将来の新交通システムにおける高知能自動車交通システムに貢献できるものと期待される.

参考文献

- (1) Schreckenberg, M. and Wolf, D. E., Traffic and Granular Flow '97, Springer, Singapore, (1997).
- (2) Chowdhury, D. Santen, L, and Schadschneider, A, Phys. Rep. 329 (2000), 199.
- (3) Helbing, D., Phys. Rev. E53 (1996), 2366.
- (4) 長谷隆, 科学, Vol.66 No.9 Sep. (1996), 618.
- (5) 斎藤威, 電学誌, J.IEE Japan, Vol.117, No.9 (1997), 600.
- (6) 吉川康雄, 他 4 名, 機論, 63-610, B(1997), 2252.

- (7) 山本直史, 森下信, 機論, 65-637, C(1999), 3553.
- (8) Bando, M., 他 4 名, Phys. Rev. E51 (1995), 1035.
- (9) Nagatani, T., Phys. Rev. E61 (2000), 3534.
- (10) Nagatani, T., Physica A, 265 (1999), 297.
- (11) Nagatani, T., Phys. Rev. E58 (1998), 4271.
- (12) Nagatani, T. and Nakanishi, K., Phys. Rev. E57 (1998), 6415.
- (13) Muramatu, M. and Nagatani, T., Phys. Rev. E60 (1999), 180.
- (14) 村松将邦, 長谷隆, 機論, 65-633, B(1999), 1599.
- (15) 村松将邦, 長谷隆, 機論, 65-635, B(1999), 2398.
- (16) 大前学, 藤岡健彦, 機論, 65-634, C(1999), 2371.
- (17) 中川泰彦, ほか 18 名, 自動車交通 1999, 日産自動車株式会社 車両交通研究所, (1999-3).
- (18) 藤岡健彦, 大前学, 三宅浩四郎, 第 6 回交通流のシミュレーションシンポジウム, (1999), 24.