

# 加減速の差を考慮した拡張最適速度モデル

杉山 直希, 長谷 隆

静岡大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

## 概要

加速・減速過程で加速力の異なる拡張最適速度モデルを提案する. この拡張最適速度モデルの交通特性をコンピュータシミュレーションで研究する. 拡張最適速度モデルの基本図を導出する. 中間密度領域において高流量を維持する. ボトルネックを配置する場合, 後方に伝播する渋滞とボトルネック入口から渋滞波が同時発生する. 実験での特徴を再現することができる.

## Extended optimal velocity model taking into account the difference between acceleration and deceleration

Naoki Sugiyama, Takashi Nagatani

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

## Abstract

We extend the optimal velocity to take into account the difference between acceleration and deceleration. We investigate the traffic states and fundamental diagram in the extended optimal velocity. It is shown that the difference between acceleration and deceleration has an important effect on the fundamental diagram. The traffic flow (current) keeps a high value at an intermediate density. The first transition density is lower than that in the optimal velocity model. The second transition density is higher than that in the optimal velocity model.

## 1 緒言

Kerner らの実験によって最適速度モデルでは同期交通が重要であると指摘された. この特徴として中間密度領域での高流量, ボトルネックを配置した場合のボトルネック手前の定常渋滞と伝播する幅広渋滞 (moving wide jam) が同時発生, そして加速・減速過程での車両運動の差が挙げられる. これらの特徴を再現するために Helbing らなどによって次式で表されるモデルが提案された [1, 2].

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

ここで  $x_i$  は時刻  $t$  における車両  $i$  の位置,  $\Delta x_i$  は車両  $i$  の前方車間距離,  $V(\Delta x_i)$  は最適速度関数,  $a$  は感度である. このモデルではパラメータ  $b$  の値を前走車との相対速度の正負によって異なる値へ変更する. これによって加速・減速過程の車両運動に差を与えている. しかし, (1)式では基本図はほとんど変化し

ない. 渋滞の発生密度は少し高密度側へ移動するが, 実験での高流量維持と渋滞発生の特徴は再現できない. また, 実際の運転手の立場として考えたとき同じ車間距離でも加速と減速で加速力が異なる. (1)式では前走車との速度差によって加速力に差を与えているが, 車間距離に対しては差を与えておらず考慮されていない.

そこで, 本研究では同じ車間距離で加速と減速の加速力に差を与え, 実験の特徴を再現できるモデルを提案する. 差を与える方法として加速と減速で最適速度関数の安全距離 (変曲点) を異なる値へ変更する. さらに, 拡張最適速度モデルの交通特性を明らかにする.

## 2 拡張最適速度モデル

車両の前進運動は次式で表される拡張最適速度モデルを用いる.

$$\begin{cases} \frac{d^2x_i}{dt^2} = a \left\{ V_a(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\} & \left( \frac{d^2x_i}{dt^2} \geq 0 \right) \\ \frac{d^2x_i}{dt^2} = a \left\{ V_d(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\} & \left( \frac{d^2x_i}{dt^2} \leq 0 \right) \end{cases} \quad (2)$$

ここで  $V_a(\Delta x_i)$  は加速最適速度関数,  $V_d(\Delta x_i)$  は減速最適速度関数である. 加速・減速最適速度関数は次式で表される.

$$\begin{cases} V_a(\Delta x_i) = \frac{V_{max}}{2} \{ \tanh(\Delta x_i - x_{c,a}) + \tanh x_{c,a} \} \\ V_d(\Delta x_i) = \frac{V_{max}}{2} \{ \tanh(\Delta x_i - x_{c,d}) + \tanh x_{c,d} \} \end{cases} \quad (3)$$

ここで  $V_{max}$  は現在の車両位置での最大速度,  $x_{c,a}$  は加速安全距離,  $x_{c,d}$  は減速安全距離である. 加速・減速安全距離の関係は  $x_{c,a} > x_{c,d}$  とする. 二つの安全距離は現在の車両の状態(加速・減速)によって変化する. 図1に最大速度  $V_{max}=2.0$  で減速安全距離  $x_{c,d}=3.0$ , 加速安全距離  $x_{c,a}=5.0$  としたときの最適速度関数を示す.

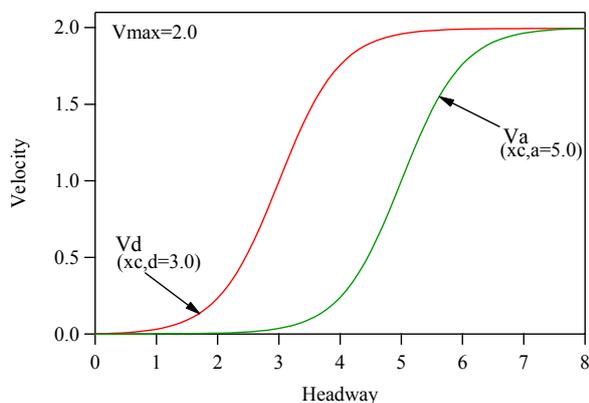


図1 最適速度関数

減速最適速度関数より高い速度で減速, 加速最適速度関数より低い速度で加速する. 加速度ゼロでは加速度がゼロとなる前の状態(加速・減速)の最適速度関数に従う.

### 3 シミュレーション結果

一車線の道路を走行する車両群を考える. シミュレーションの条件として道路長  $L=800$ , 道路両端は周期境界条件とする. 車両の最高速度  $V_{max}=2.0$ , 減速安全距離  $x_{c,d}=3.0$ , 加速安全距離  $x_{c,a}=5.0$  とし, 流量は  $x=700$  の位置で通過台数を測定する. 車両台数を道路長で除した値で定義される平均密度  $\rho=0.01 \sim 0.50$  までを  $0.01$  刻みで(2), (3)式を4次の Runge-Kutta 法で計算する. 時間刻み  $\Delta t=1/128$  で計算時間  $t=80000$  までとして, コンピュータシミュレーションを行う. 車両は平均密度の逆数で定義される平均車間距離の間隔で配置し, そこから平均車間距離の  $1/3$  を上限として値を乱数でランダムに増減させて車両の初期位

置を決定する.

### 3.1 自然渋滞

感度  $a=1.0$  における基本図を図2に示す. 横軸に平均密度, 縦軸に流量をとる. 感度が臨界感度以下であるため自然渋滞が発生する.

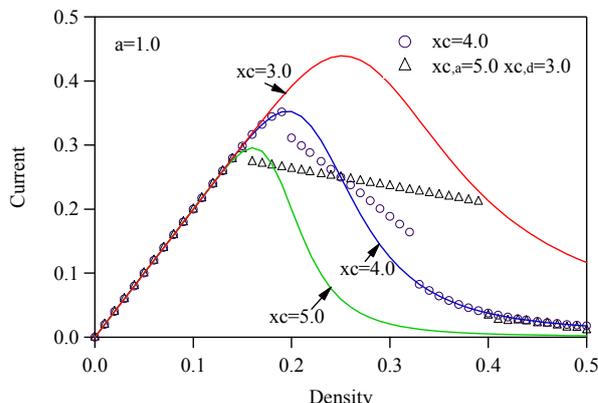


図2 基本図

ここで○は従来の最適速度モデルで安全距離を4.0としたときの流量, △は加速安全距離  $x_{c,a}$  を5.0, 減速安全距離  $x_{c,d}$  を3.0としたときの拡張最適速度モデルでの流量を示す. 3つの実線はそれぞれ従来の最適速度モデルで安全距離を3.0,4.0,5.0としたときの理論流量曲線を示す. 低密度領域では流量は平均密度に比例して増加する. 全車両最高速度で走行できるため流量に差は現れない. 拡張最適速度モデルは従来の最適速度モデルに比べ低密度, 低流量で飽和, 渋滞波が発生する. しかし, 拡張最適速度モデルでは中間密度において高流量を維持する. 従来の最適速度モデルより高密度で一様混雑流へ転移する.

平均密度  $0.25$  での車間距離-速度線図を図3に示す. 横軸に車間距離, 縦軸に速度をとる.

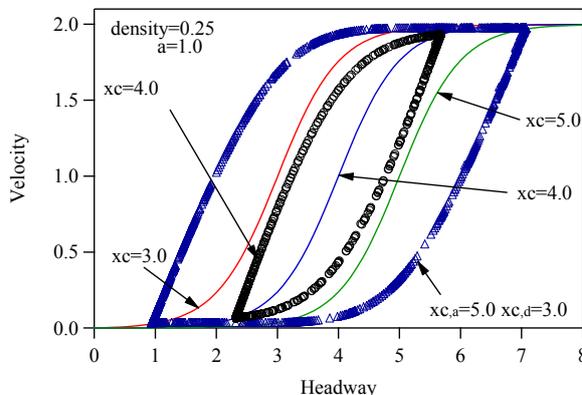
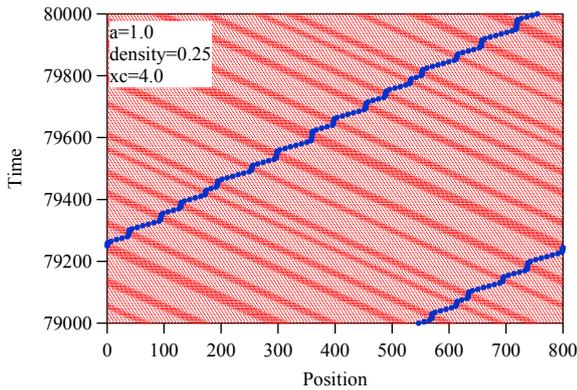


図3 車間距離-速度線図

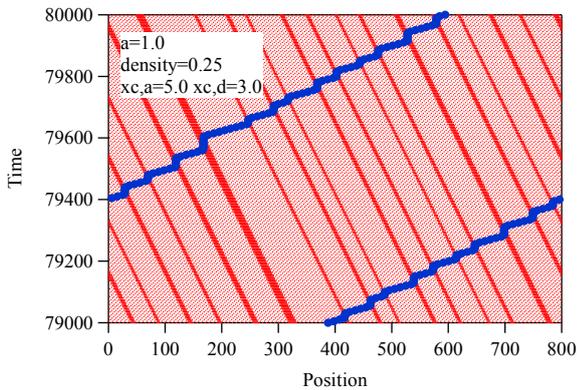
ここで○は従来の最適速度モデルで安全距離を4.0

とした場合、 $\Delta$ は拡張最適速度モデルで加速安全距離  $x_{c,a}$  を 5.0, 減速安全距離  $x_{c,d}$  を 3.0 とした場合の関係を示す。実線は安全距離を 3.0, 4.0, 5.0 としたときの最適速度関数を示す。従来の最適速度モデル, 拡張最適速度モデル共にリミットサイクルとなっている。加速後の車間距離は従来の最適速度モデルより大きくなり, 加速安全距離によって決まる。逆に減速後の車間距離は従来の最適速度モデルより小さくなり, 減速安全距離によって決まる。このように, 車間距離は大きく変化するが, 速度の変化は小さい。加速安全距離が長くなったことで, 渋滞波の加速後の車間距離は大きくなり, 加速後の車両の流量を小さくする。減速時の安全距離が短くなったことで, 渋滞波の減速後の車間距離は小さくなり, 減速後の車両の流量を大きくする。この結果, 高流量の維持が再現できている。

さらに交通状態の時間変化を調べるため図 4 に平均密度 0.25 での渋滞発生時の時空間プロットを示す。横軸に車両位置, 縦軸に時刻をとる。図 4(a)は従来の最適速度モデル, 図 4(b)は拡張最適速度モデルである。



(a) 従来の最適速度モデル( $x_c=4.0$ )



(b) 拡張最適速度モデル( $x_{c,a}=5.0, x_{c,d}=3.0$ )

図 4 時空間プロット

ここで●は一台の車両の軌跡を示す。図 4(a),(b)ともに Stop-and-go wave が時間経過とともに後方に伝播している。拡張最適速度モデルの伝播速度は従来

の最適速度モデルの伝播速度に比べ遅くなる。

### 3.2 減速区間による渋滞

感度  $a=1.0$ , 道路の  $x=300\sim 700$  を最大制限速度 1.0 の減速区間としたときの基本図を図 5 に示す。横軸に平均密度, 縦軸に流量をとる。自然渋滞に加えて減速区間との速度差によって渋滞が発生する。

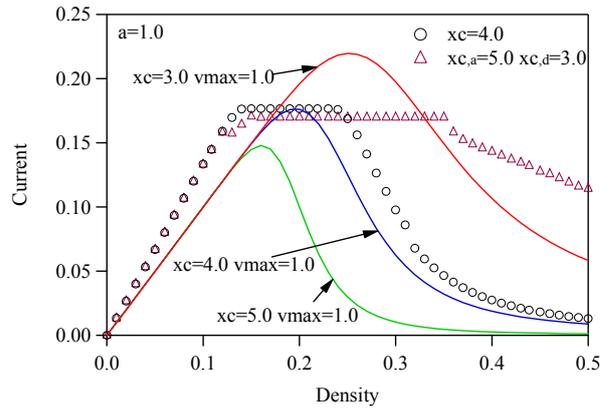


図 5 基本図

ここで○は従来の最適速度モデルで安全距離を 4.0 としたときの流量,  $\Delta$ は加速安全距離  $x_{c,a}$  を 5.0, 減速安全距離  $x_{c,d}$  を 3.0 としたときの拡張最適速度モデルでの流量を示す。3 つの実線はそれぞれ全区間の最大速度  $V_{max}$  を減速区間の最大制限速度である 1.0 として従来の最適速度モデルで安全距離を 3.0, 4.0, 5.0 としたときの理論流量曲線を示す。流量はほぼ同密度で飽和して, 飽和流量も従来の最適速度関数とほぼ同じ値となる。流量が減少する密度は従来の最適速度モデルより高密度となる。

流量飽和領域である平均密度 0.20 での車間距離分布図を図 6 に, 速度分布図を図 7 に示す。図 6 は横軸に車両位置, 縦軸に車間距離をとり, 図 7 は横軸に車両位置, 縦軸に速度をとる。

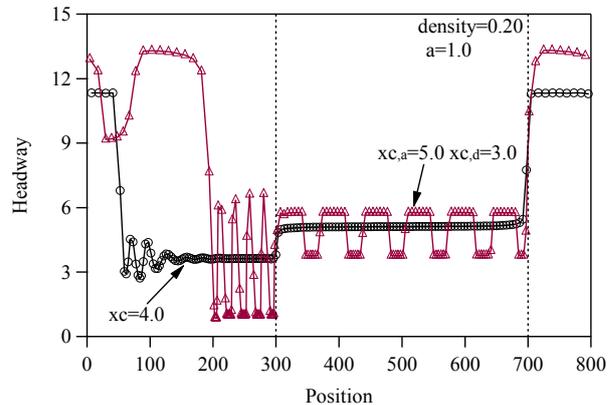


図 6 車間距離分布図

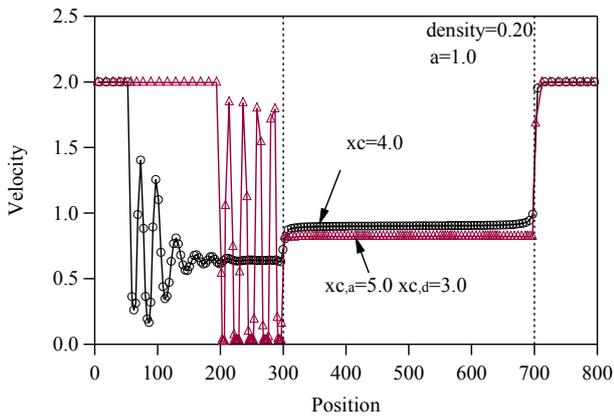
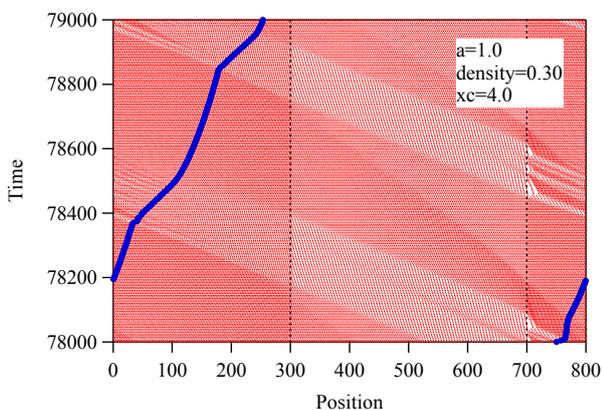


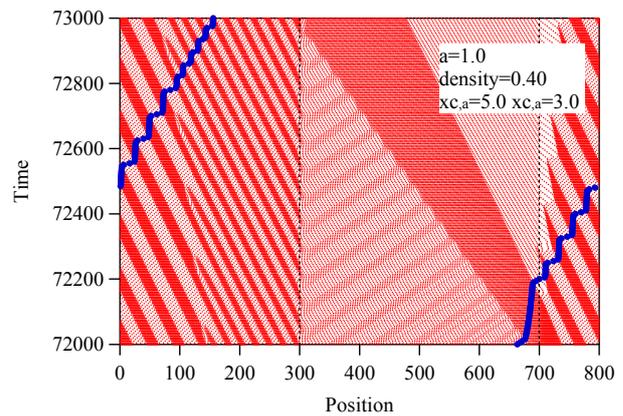
図 7 速度分布図

ここで○は従来の最適速度モデルで安全距離を 4.0 としたときの車間距離，速度を示し，△は加速安全距離  $x_{c,a}$  を 5.0，減速安全距離  $x_{c,d}$  を 3.0 としたときの拡張最適速度モデルでの車間距離，速度を示す。感度が低いため減速区間入口( $x=300$ )から渋滞波が発生する。従来の最適速度モデルでは振動が徐々に小さくなり減速区間に到達するまでにほぼ振動がなくなる。全車両が加速で減速区間に入る。拡張最適速度モデルでは振動の振幅が大きい強い渋滞波が発生し，渋滞の振動が減速区間に入るまで残る。このため，減速区間に入るときに加速する車両だけでなく減速する車両も現れる。加速と減速で加速力が異なるので速度は図 7 に示すように一定だが車間距離は加速か減速かで図 6 のように二つの値に分かれ，これが減速区間を出ても残る。この結果，飽和流量の値は従来の最適速度モデルとほぼ等しくなる。さらに，流量減少領域での渋滞の特徴に差が現れる。

流量減少領域の交通状態の時間変化を調べるため図 8 に時空間プロットを示す。横軸に車両位置，縦軸に時刻をとる。図 8(a)は平均密度 0.30 での従来の最適速度モデル，図 8(b)は平均密度 0.40 での拡張最適速度モデルである。



(a) 従来の最適速度モデル( $x_c=4.0$ )



(b) 拡張最適速度モデル( $x_{c,a}=5.0, x_{c,d}=3.0$ )

図 8 時空間プロット

ここで●は一台の車両の軌跡を示す。従来の最適速度モデルでは道路全体を後方へ伝播する渋滞のみが発生する。これに対し拡張最適速度モデルでは後方へ伝播する幅広渋滞だけでなく，減速区間入口からの渋滞波も同時に発生する。よって実験での渋滞発生の特徴を再現している。拡張最適速度モデルで減速区間入口から発生した渋滞波は  $x=100\sim 150$  付近で隣の渋滞波と合流する。渋滞波の終端は  $x=700\sim 800$  まで到達する。時間の幅が 1000 であるためわかりにくいですが，道路全体を後方へ伝播する渋滞以降，渋滞波の長さは時間経過に伴って短くなる。そして，全体を伝播する渋滞と，終端の位置は周期的に変化する。

## 4 結言

加速・減速過程で加速力の異なる拡張最適速度モデルを提案し，コンピュータシミュレーションを行い，以下の結言を得た。

- 1) 加速・減速過程で加速力が異なる拡張最適速度モデルを提案した。
- 2) 低感度するとき，以下の実験での特徴を再現。
  - (1) 中間密度領域での高流量。
  - (2) 減速区間(ボトルネック)がある場合，渋滞はボトルネック手前から発生する渋滞波と伝播する幅広渋滞が同時発生。

## 参考文献

- [1] D.Helbing,B.Tillich, Phys.Rev.E 58 (1998) 133.
- [2] H.X.Ge,R.J.Cheng,Z.P.Li,Physica A 387 (2008) 5239.