

1車線高速道におけるトンネル上流の渋滞形成

佐賀大学 内田 泰介、只木 進一

Congestion formed in the upstream of a tunnel in one-lane Expressways
Saga Univ. Taisuke UCHIDA, Shin-ichi TADAKI

概要

トンネルのある一車線高速道路における交通流の理解を深める。最適速度モデルを改良した結合写像モデルを基にシミュレーションを行なった。トンネルの上流側に渋滞を確認することができた。この渋滞は、車両がほとんど停止するような強い渋滞となった。

1 はじめに

トンネルのようなボトルネックの上流で渋滞が起こることが一般に知られている。この渋滞は、車両がスタートとストップを繰り返すような強い渋滞、あるいは車両が停止することはないが低速で走行するような弱い渋滞である。本講演では、一車線高速道におけるトンネルの上流に発生する渋滞現象をシミュレーションを通じて解析する。

実際の高速道路ではトンネル直前で渋滞が発生している。観測地点を通過する車両の平均速度は、時速 40 km である。つまり、車両が完全に停止するような渋滞ではなく、低速で走行するような渋滞が発生している。このような渋滞は、一車線でも発生するのであろうか？

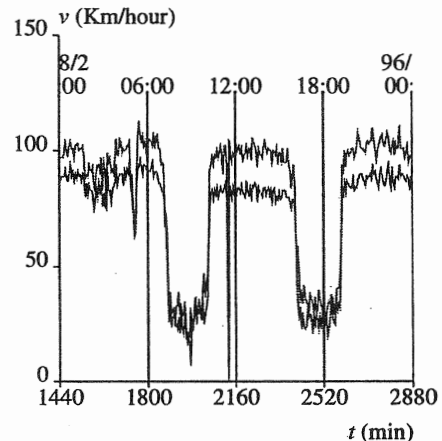


図 1: 実際の高速道路の観測データ。観測地点は、東名高速道路にある日本坂トンネルの手前 2 km 地点。5 分間に観測地点を通過する車両の平均速度を表している。2 車線分のデータを plot している。

2 モデル

最適速度 (OV) モデルは、追従行動を車間距離に応じた最適速度への調整としてとらえるモデルであり、追従モデルの一つである [1, 2]。各車両の加速度 d^2x/dt^2 は次式で表される。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \alpha \left[V(\Delta x) - \frac{dx}{dt} \right] \quad (1)$$

Δx は車間距離を表し、 α は感度を示す定数である。 V は最適速度関数と呼ばれ、最適な速度を車間距離に応じて与える。このモデルは、密度をパラメタとして動かすことで自由走行から渋滞への相転移を見ることができる。長さ L の周期系で N 台の車両が走ることを考えた場合、一定車間距離 $b = L/N$ の車列は OV 関数の具体的な形によらずに

$$V'(b) > \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

の時、不安定になることが知られている。ここで ' $'$ は一階微分を表す。

最適速度関数に基づいた結合写像型 (CMOV) モデルは、OV モデルを時間的に離散化したモデルである [3, 4]。離散化を通じて開放系のシミュレーションを可能にする。また、道路状況により運転行動を変化させることが可能となる。これによってトンネルのある系を想定できる。車両の位置 x および速度 v は次のように更新される。

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t \quad (3)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \alpha(V(\Delta x) - v(t))\Delta t \quad (4)$$

最適速度関数 V は一般的に sigmoidal な関数である。ここでは、次のような関数を用いる。

$$V(\Delta x) = \frac{v_{\max}}{2} \left[\tanh\left(2\frac{\Delta x - d}{w}\right) + c_{\text{bias}} \right] \quad (5)$$

v_{\max} 、 d 、 w と c_{bias} の各パラメータは実際の観測データに基づいて決定することができる定数である (表 1 参照)[5]。

3 トンネルでの走行

トンネル内では、一般に視界が狭くなったり圧迫感を感じたりするという理由から、普段の道路状態のときよりも減速して走行する。トンネル内の目標速度 $V_T(\Delta x)$ を次のように表す。

$$V_T(\Delta x) = (1 - \mu)V(\Delta x) \quad (6)$$

表 1: 定数の設定詳細

定数	値	単位
d	25	m
w	23.3	m
v_{\max}	33.6	m/sec
a	2	sec ⁻¹
c_{bias}	0.913	
Δt	0.1	sec
x_{\min}	7.02	m

4 シミュレーション

シミュレーションは、出入口のある開放境界条件で行なう。その理由としては、系の密度は外からコントロールできるパラメタではなく、系自身が自発的に形成する値であるからである。

道路は、一車線の直線道路で全長 7,000 (m) とする。入口を起点として、[6000, 6200](m) 区間にトンネルを設置する。

入口から前方の車両までの車間距離がある距離 (x_{\min}) 以上離れていれば、新しく車両を初速 0 (m/sec)、加速度 0 (m/sec²) で進入させる。進入のプロセスは、1 秒毎に行なう。出口まで走り終えた車両は系から取り除かれる。系の先頭の車両は、前方に車両がないため十分に大きい値を車間距離とする。

[3000, 4000](m) 区間を観測区間とし、4000(m) 地点を観測地点と定義する。緩和時間 t_0 は、10,000 秒とした。

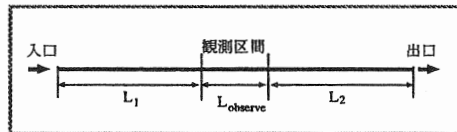


図 2: 道路の概観 車は左の入口から進入し、右の出口で取り除かれる

μ の値がある値を超えると、トンネルより上流側へ渋滞が発生する。図 3 は、各車両の軌跡である。横軸に位置を表し、縦軸に時間を表す。

1本の線が一台の車両の軌跡を表している。トンネルより上流部分に、密度の濃い部分が見られる。車両がほぼ停止している部分が上流側へ伝播している。トンネルの内部では渋滞は発生していない。トンネルの入口付近では弱い渋滞が発生し、上流に伝播するにつれて強い渋滞に成長している。この強い渋滞は、安定して上流側へ伝播している。

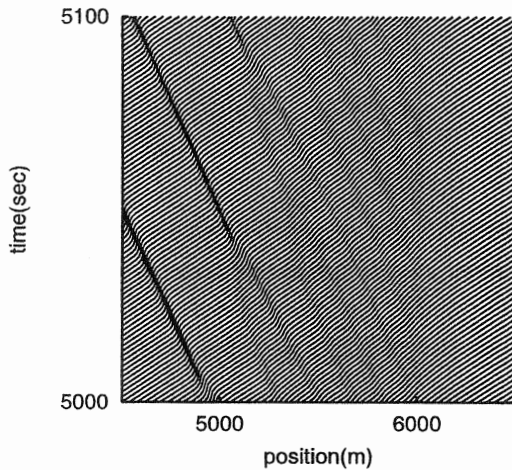


図 3: 各車両の軌跡。横軸に位置、縦軸に時間を表す。 $\mu = 0.08$ (右)のとき。

図 4 は、ある一台の車頭距離-速度空間内の軌跡を示している。左の図は、渋滞に入りヒステリクスループを描いている。ループの上端は非渋滞相を表し、自由走行の部分に当たる。内側のループの下端は、停止することはない弱い渋滞相を示す。外側のループの下端は、車両が停止する強い渋滞相を示している。車両は、反時計まわりに、渋滞に巻き込まれたり抜け出したりすることを繰り返している。

平均速度 $\langle v \rangle$ を次のように定義する。

$$\langle v \rangle = \frac{1}{T_0} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T_0} v(t) \quad (7)$$

ここで $v(t)$ は時刻 t における観測区間内の空間平均速度を表し、 $T_0 = 10^4$ とした。 μ と $\langle v \rangle$ の

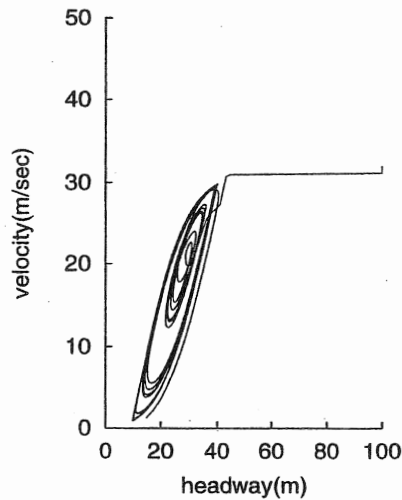


図 4: 一台の車両の(車頭距離-速度)空間内の軌跡。 $\mu = 0.08$ のとき。

関係を見る(図 5)。 μ の値がある値になるまでは、 $\langle v \rangle$ は変化していないのに対し、ある値を超えると低下している。

観測地点を通過する車両の 2 分間平均速度を時系列にして表した(図 6)。 $\mu = 0.08$ のときである。初期状態からある程度緩和時間を要して、平均速度が低下しているのが分かる。

トンネルのある道路では、時間平均速度を見ると低速で安定な流れを再現できる。その速度は、 μ の値に依存していることが分かる(図 7 は $\mu = 0.49$ のとき)。

参考文献

- [1] M.Bando, K.Hasebe, A.Nakayama, A.Shibata and Y.Sugiyama: Japanese J. Ind. Appl. Math., 11 (1994) 203.
- [2] M.Bando, K.Hasebe, A.Nakayama, A.Shibata and Y.Sugiyama: Phys. Rev. E51, 1035 (1995).
- [3] S.Tadaki, M.Kikuchi, Y.Sugiyama and

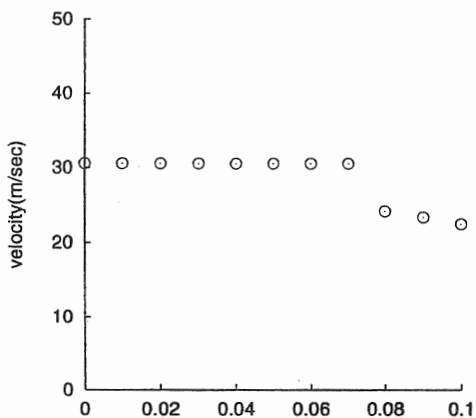


図 5: μ による平均速度の変化

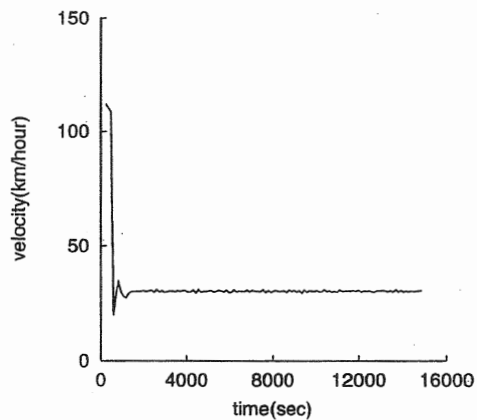


図 7: 観測地点の速度時系列。 $\mu = 0.49$ のとき。

S.Yukawa : J. Phys. Soc. Japan 7 (1998) 62.

[4] S.Tadaki, M.Kikuchi, Y.Sugiyama and S.Yukawa : J. Phys. Soc. Japan 9 (1999) 3110.

[5] M.Bando, K.Hasebe, A.Nakayama, A.Shibata and Y.Sugiyama : J. Phys. I (France) 5 (1995) 1380.

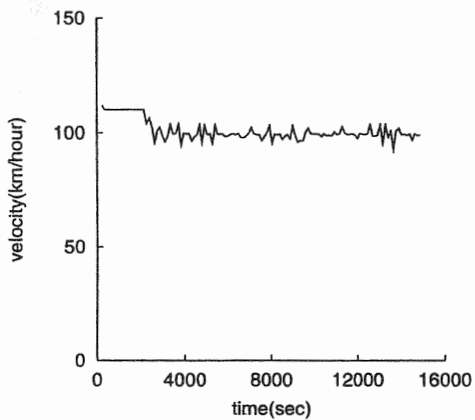


図 6: 観測地点の速度時系列。 $\mu = 0.08$ のとき。