

計測結果に基づいた最適速度モデルの作成

中根一朗¹, 鈴木和也²

¹ 神奈川工科大学工学部機械工学科

² 神奈川工科大学大学院機械工学専攻

概要

交通流予測では、車両が高密度状態となり加減速を繰り返す状況での予測が問題となる。そこで本研究では、加速あるいは減速している複数車両の位置関係を時系列に計測し、この計測結果に基づいて、その挙動を表す最適速度モデルを作成した。なお、このモデルは、複数車線化を考慮し、離散モデルとしている。そして、作成したモデルにより、先頭車両の減速による速度低下の伝搬を数値計算し、発生する現象を検討するとともに作成したモデルを評価する。

Modified Optimal Velocity Model Based on Measurements

Ichiro Nakane¹, Kazuya Suzuki²

¹ Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering Kanagawa Institute of Technology

² Graduate School of Mechanical Engineering Kanagawa Institute of Technology

Abstract

The traffic flow is measured and the optimal velocity model is modified from this measurements. Traffic jams propagating in the congested traffic flow are investigated by computer simulation with this model. This simulation results are assessed and the validity of this model is discussed.

1 はじめに

交通流においては多様な数理モデルが提案され、シミュレーションも盛んに行われている。このため、渋滞相への相転移のメカニズムや定性的な予測に関しては、既にかんがりの知見が得られており[1]、今後、より実用的な数理モデルに移行するものと思われる。

そこで本研究では、実用的な数理モデル構築、ならびにモデルの評価を目的として、定点計測、移動計測等を行っている。そして最近、最も基本となる片側1車線道路の定点計測結果がまとまったことから、これを基にした最適速度モデルを、複数車線への適用を考慮して離散形で作成した。なお、このモデルにおいては、計測した車両の平均速度を最適速度関数としているため、従来のモデルとは異なり、最適速度が目標値ではなく、実際に次の時間ステップにおいて車両の取るべき速度となる。

2 計測方法と計測結果

まず、片側1車線道路の定点計測データを採取するため、神奈川工科大学情報学部棟12階より県道63号線を移動する車をビデオ撮影した。そして、この動画より、VideoPointを用いて1/30秒毎の各車両の位置を算出した。なお、この地点を観測点として選定したのは、計測範囲内に歩行者用信号が設置されているためである。これにより、信号での停止と発進を含めることで、通常に

走行している状態だけからでは得られない幅広い車間距離と速度の結果が得られ、加速時と減速時に分けての検討を可能としている。また、ビデオ撮影においては広角レンズを使用しており、画像に歪みを生じることから、撮影領域内の距離を実測し、これを補正している。

次に、得られた計測結果から、車両追従モデルの作成を試みた。車両追従モデルは、前方車両との車間距離や速度差に応じて自車両の速度や加速度を制御するモデルである。例えば、Bierleyモデル[2]では、直前方車両との車間距離と速度差によって自車速度を決定し、最適速度モデル[3]では、車間距離の関数である最適速度と自車速度の差により自車加速度を決定している。

このため、ここでは、直前方車両との車間距離・速度差と自車速度の関係、ならびに自車速度と自車加速度の関係を検討することとし、“車間距離 Δx_m と自車速度 V の計測結果”を図1に、“速度差 ΔV と自車速度 V の計測結果”を図2に、そして“自車速度 V と自車加速度 a の計測結果”を図3に示す。ただし、本研究においては、加減速時の挙動の違いに着目していることから、これらの図においては、加速時と減速時を区別して表記している。なお、速度差 ΔV は、車間距離 Δx_m と同様に、直前方車両の値から自車の値を減じたものである。

図1、2、3より明らかなように、計測データは相当にばらついている。しかしながら、図1では右肩上がりとの相関が見てとれ、車間距離 Δx_m に応じて自車速度 V を調節していることが分かる。しかしながら、図2、3に

おいては、ほんのわずかに右肩上がりの傾向の見られる部分も有るが、図1に比べるとその傾向は隠微であり、相関は無いと判断される。従って、ここでは、車間距離 Δx_m のみにより自車速度が決定されることとし、そのような追従モデルを検討する。ただし、図3より分かるように、加速時の多くの車両の加速度 a は $a < 0.15 [\text{m/s}^2]$ であることから、加速度上限も考慮できるモデルとする。

また、計測結果の一般性に関して追記すると、この計測を実施した前年にも同じ場所から、異なる計測者による計測を実施している。そして、その結果においても、最高速度、自車が停止する車間距離、自車が最高速度に達する車間距離等を含め、ほぼ同じ結果が得られている。

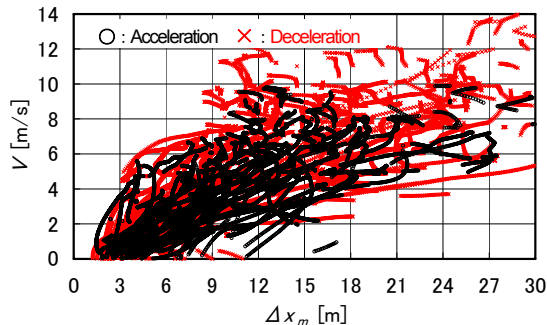


図1 直前車との車間距離 Δx_m と自車速度 V の相関

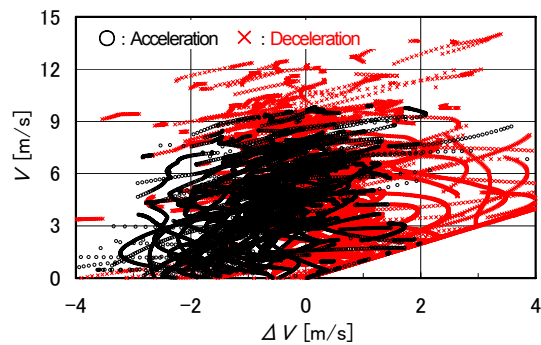


図2 直前車との速度差 ΔV と自車速度 V の相関

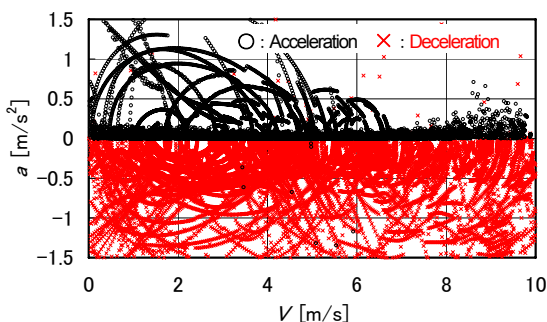


図3 自車速度 V と自車加速度 a の相関

3 最適速度モデルと最適速度関数

3.1 最適速度モデル

自車速度を車間距離のみにより決定するモデルとしては、例えば、Newell モデルが有る[4]。同モデルでは、自車速度を車間距離の非線形関数としている。一方、自車加速度を車間距離等から決定するモデルが、前記した最

適速度モデルであり、これは下式で表わされる。ただし、 V^{opt} :最適速度関数、 β :感度、 Δx :車間距離 ($\Delta x_n = x_{n-1} - x_n$: x : 車両位置)、 t :経過時間、添え字 n : n 番目の車、である。

$$a_n = dV_n/dt = \beta(V_n^{opt} - V_n) \quad \text{ここで } V_n^{opt} = f(\Delta x_n) \quad (1)$$

本研究においては、複数車線への対応を容易にするため、離散化を前提としている。そこで、上式(1)を離散化すると次式(2)となり、 $\beta\Delta t$ (Δt : 数値計算での時間刻み)が緩和係数の役割を果たしていることが分かる。

$$V_n(t + \Delta t) = (1 - \beta\Delta t)V_n(t) + \beta\Delta t V_n^{opt} \quad (2)$$

つまり、最適速度モデルでは、感度を小さくすることで不足緩和として加減速の遅れ(オーバーシュート: O.S.)を発生させ、渋滞相への相転移を誘起していると考えられる。従って、感度の値は非常に重要であるが、この値を実用的に定めることは極めて難しい。そこで、本研究では $\beta\Delta t = 1$ 、つまり、 $V_n(t + \Delta t) = V_n^{opt}$ を基本とする。なお、本研究における最適速度関数は、後記するように計測結果を近似したものであることから、従来のモデルとは異なり、最適速度が目標値ではなく、実際に次の時間ステップにおいて車両の取るべき速度となることは当然であると考えている。これにより、(2)式はNewellモデルと同じになる。ただし、これでは、加速度の上限が表現されないことから、加速度 a_n は、別途定義する最大加速度 a_{max} を越えないものとする。つまり、ここでは、(2)式と組み合わせる感度を以下とする。

$$a_n \leq a_{max}: \beta = 1/\Delta t \quad a_n > a_{max}: \beta = a_{max}/(V_n^{opt} - V_n) \quad (3)$$

3.2 最適速度関数

車間距離 Δx に応じて目標値となる速度 V を表すのが最適速度関数であり、本研究では図1の結果にフィットする関数として定める。ただし、図1は“ある瞬間の車間距離における速度”を表していることから、 $V(t) = f\{\Delta x(t)\}$ の関係である。これに対して、ここでは陽解法を用いるため、特に $a_n \leq a_{max}$ においては $V_n(t + \Delta t) = f\{\Delta x_n(t)\}$ でなければならない。そこで、現在の車間距離 Δx_m を基に、 Δt 時間前の車間距離 Δx を前車との速度差から算出する。

Δx_m に対して、車間距離の広がる速さ ΔV をグラフ化すると図4となる。同図では、加減速各色の実線 ($\pm 0.6 \text{m/s}$) を中心として、対応する測定値がその上下に分布している。つまり、大雑把にとらえると、車間距離に関わらず、おおむね 0.6m/s の速さで、加速時には車間距離が広がり、減速時には車間距離が縮まっていると言える。このため、この結果を踏まえ、数値計算の時間刻み Δt と図4の一定値 ($\pm 0.6 \text{m/s}$) の積を図1の Δx_m に加えることで、 Δx_m を Δx に補正し、最適速度関数の形としたのが図5である。

図5中の2色の実線は、計測結果に基づく加減速時、それぞれの最適速度関数である。なお、この関数の詳細は後記する。

まず、図5の軸ラベルが、上添え字*を付した量であることから分かるように、図5は無次元で表記されている。これは、結果の一般性を担保するためであり、図5を始めとして今後の各物理量は無次元で表記する。なお、無次元化の際の代表値は、最高速度 $U = 50/7 [\text{m/s}]$ と、計算における時間刻み $\Delta t = 0.7 [\text{s}]$ であり、これにより距離の代表値は $U\Delta t = 5 [\text{m}]$ となる。加えて、最適速度関数におい

て、自車が停止する車間距離 $\Delta x_i^*=0.5$ 、自車が最高速度 U に達する車間距離 $\Delta x_h^*=3.5$ であり、 $\Delta x \leq \Delta x_i^*$ では $V_n^{opt*}=0$ 、 $\Delta x \geq \Delta x_h^*$ では $V_n^{opt*}=1$ である。なお、 Δx_h^* は、車両流量増加に伴う自由走行から渋滞への相転移において、その境界を決定する重要なパラメータとなると予測される。ここで、 $\Delta t=0.7[s]$ に関して付記する。 Δt は陽解法の時間刻みであることから、計算の安定性に影響する。従って、 Δt の値としては、十分に小さい値とする必要がある。加えて、最適速度関数では、車間距離を $\Delta x = \Delta x_m - \Delta V \Delta t$ とするため、 Δt により Δx が変化する。従って、最適速度関数においては、特に Δx_i^* 、 Δx_h^* の値が、 Δt の変化の影響を受ける。そこで、本研究においては、これ以上にパラメータを増やすべきではないとの判断から、加速と減速の最適速度関数において、両者の Δx_i^* 、 Δx_h^* をほぼ一致させる値であることと、線形な最適速度関数における解の安定条件を満足[5]する値であることから、 $\Delta t=0.7[s]$ を選定した。なお、速度を変更できず、一定速度で走行する時間である Δt を $0.7[s]$ とすることは、多くの判例において制動措置の際の空走時間が約 $0.7[s]$ とされていることと整合している。

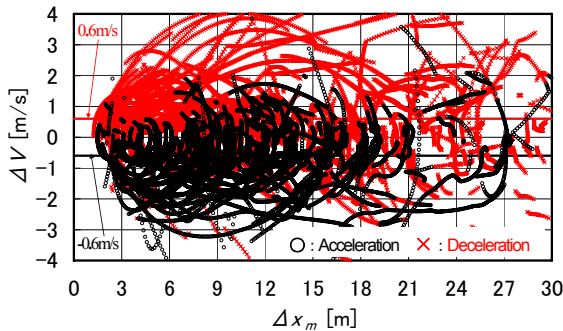


図4 直前車との車間距離 Δx_m と速度差 ΔV の相関

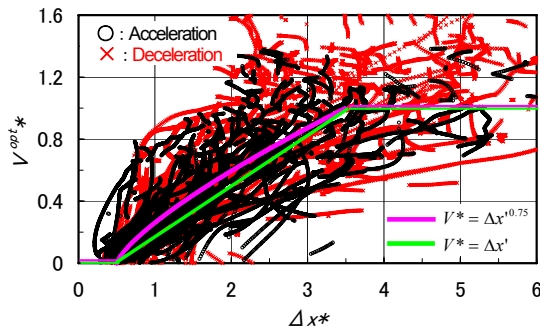


図5 計測結果に基づいた最適速度関数

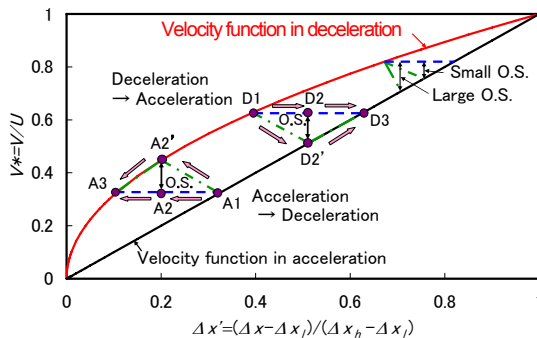


図6 2本の最適速度関数における加減速挙動

次に、図5中の最適速度関数の関数形に関して記す。図5の計測結果を詳細に観察すると、減速時の V が加速時の V に比べて、常に僅かに速い傾向が見受けられる。加えて、図3においては、加速時の加速度には速度による違いが見受けられないものの、減速時の加速度は速度の違い(車間距離の短い)場合に負の加速度が大きくなる傾向が見受けられる。そこで、本研究では、加速時と減速時で異なる最適速度関数を用いることとし、また、この両者で Δx_i^* 、 Δx_h^* を一致させていることも考慮して、以下の関数を、計測結果に基づいた最適速度関数とする。

$$\text{加速時} : V^{opt*} = V^{opt} / U = \Delta x' \quad (4)$$

$$\text{減速時①} : V^{opt*} = V^{opt} / U = \Delta x'^{0.75} \quad (5)$$

$$\text{減速時②} : V^{opt*} = V^{opt} / U = \sqrt{\Delta x'} \quad (6)$$

$$\Delta x^* = \Delta x / (U \tau) \quad \Delta x' = (\Delta x - \Delta x_i) / (\Delta x_h - \Delta x_i)$$

ここで、式(4)、(5)が図5中の計測結果を近似した実線の最適速度関数であり、式(6)は比較のための式である。なお、加速時と減速時で上記の関数とした本質的な理由は、本研究における最適速度モデルでは、加速度 a_m が最大加速度 a_{max} を越えない場合にはNewellモデルとなり(特に加速時は線形Newellモデル)、1本の最適速度関数だけでは車両慣性による加減速の遅れ(オーバーシュート: O.S.)を表現できないためである。逆に言うと、このような2本の最適速度関数を用いることで、感度を用いることなくO.S.を表すことが可能となるからであり、これによる車両挙動を確認・評価するためである。これに関しては、提案する最適速度関数 V^{opt} による加減速時の模式図を図6に示し、これを用いて発生するO.S.を説明する。

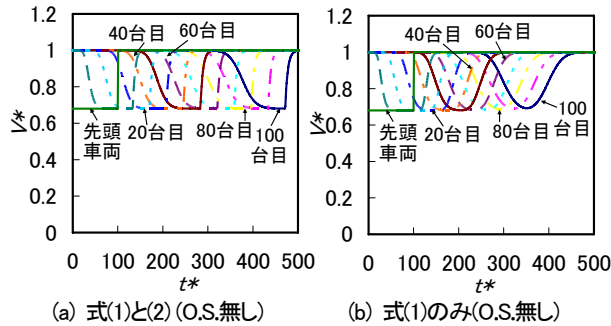
図6において、例えば加速中(A1)に $\Delta x'$ が詰まる状況を考える。そうすると、減速過程となることから、 V^{opt} として減速曲線を適用することとなるが(A1→A2')、極端に $\Delta x'$ が小さくならない限り、かえって速度が増加してO.S.が発生する。これは、減速から加速へと移行する $\Delta x'$ が広がる場合も同様である(D1→D2')。なお比較のため、O.S.が発生しないモデル(図6でA1→A2、D1→D2と変化)も用いて計算し、検討を加える。

4 作成したモデルによる数値計算

作成したモデルの特徴を鑑み、まず、先頭車両の減速が下流車両へ伝播する際のO.S.を含めた挙動を数値計算により確認する。なお、数値計算では、式(2)と(3)に式(4)、(5)、(6)を適宜組み合わせ、支配方程式を構成している。

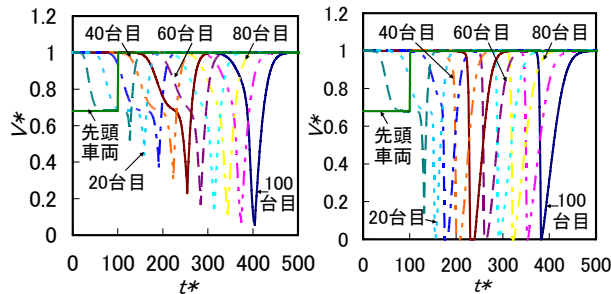
まず、加速度の上限を定めない、Newellモデルとなる $V_n^*(t+\Delta t) = V_n^{opt*}$ の場合の数値計算結果を示す。図7は、101台の車が初期車間距離 $\Delta x_i^* = \Delta x_h^* = 3.5$ 、車速 $V^* = 1$ (最高速度)で走行中に、突然、先頭車両が速度を32%減速して $t^* = t / \Delta t = 100$ の間走行する場合の各車両速度の時系列変化である。同図より明らかなように、O.S.が発生しない図(a)、(b)では、矩形孤立波の下流への伝播を表したような結果となっている。これに対して、O.S.が発生する図(c)、(d)では、下流車両において停止やほぼ停止が表れている。つまり、O.S.の発生により速度の振幅は増幅されるが、O.S.が無い(b)の場合には、速度の振幅がわずかに減少している。また、当然ながら、より大きなO.S.の発生する図(d)において、より多くの車両が停止している。し

かしながら、各車両速度とx軸の成す面積を比較すると分かるように、計算時間内において各車両が走行した距離は、O.S.の有無、車両位置の違いに関わらず、全ての車両で等しい。つまり、全ての車両において遅れがたまっていない。なお、これは、初期車間距離が十分に長く最高速度で走行できる場合の結果であるが、初期車間距離が短い場合 ($\Delta x_i^* < \Delta x_h^*$) にも、興味深い結果が得られる。



(a) 式(1)と(2) (O.S.無し)

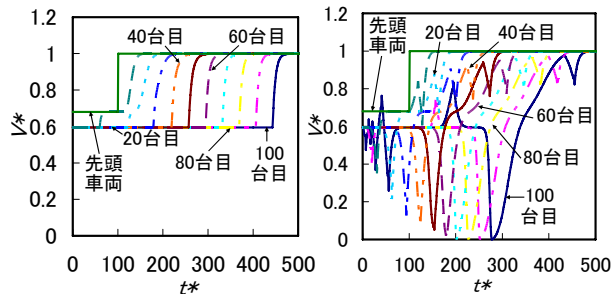
(b) 式(1)のみ (O.S.無し)



(c) 式(1)と(2) (O.S.有り)

(d) 式(1)と(3) (O.S.有り)

図 7 減速波の下流車両への伝播挙動 ($\Delta x_i^* = \Delta x_h^* = 3.5$)



(a) 式(1)と(2) (O.S.無し)

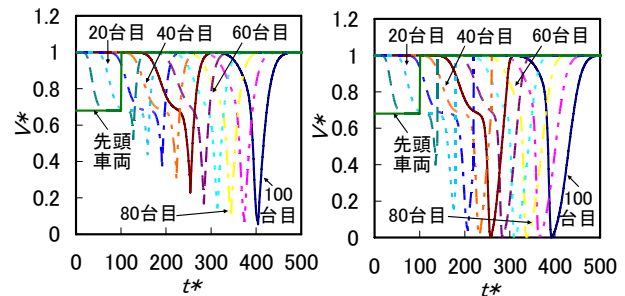
(b) 式(1)と(2) (O.S.有り)

図 8 減速波の下流車両への伝播挙動 ($\Delta x_i^* = 2.0$)

図8は、図7から初期車間距離だけを $\Delta x_i^* = 2.0 < \Delta x_h^*$ として変化させた結果である。この場合、各車両速度とx軸の成す面積を比較すると分かるように、O.S.の有無に関わらず、下流車両ほど計算時間内に走行した距離が短くなっている。しかも、特に図(a)より分かるように、その短くなる割合がほぼ一定であると推察される。このため、実際に各車両が走行した距離を計算すると、O.S.の有無、車両位置の違いに関わらず、全ての車両において、 $\Delta x_h^* - \Delta x_i^*$ に相当する1.5だけ直前方車両よりも減少している。これは、この場合には散逸項である自車速度の項が含まれていないためであると推察される。このため、 $\Delta x_i^* = \Delta x_h^* = 3.5$ の場合には、途中の経路がどのようなものであっても、最終的に自由走行状態に戻った時には

$\Delta x_i^* = \Delta x_h^* = 3.5$ であることから、前車に対しての遅れは貯まらない。これに対して、 $\Delta x_i^* = 2.0 < \Delta x_h^*$ の場合には、最終的に自由走行状態に戻ると ($\Delta x_i^* = \Delta x_h^* = 3.5$)、経路に関わらず初期状態から自由走行状態の車間距離になる分の遅れ $\Delta x_h^* - \Delta x_i^* = 3.5 - 2.0$ が発生する。

次に、散逸項である自車速度の項を加速度の上限として導入した場合の結果を示す。なお、この場合の無次元最大加速度 a_{max}^* は、計測した全加速度の98%が含まれる $a_{max}^* = 0.1$ と、同じく87%が含まれる $a_{max}^* = 0.03$ の2種類とする。また、今回、制限を設けるのは正の加速度のみとし、負の加速度には特に何もしないものとする。これは、図3の加速度の計測結果より分かるように、負の加速度にはしばしば急制動が現れており、これを排除しないためである。図9に、この場合の結果を示す。なお、図9の基本的な計算条件は図7(c)と同じであり、図7(c)との違いが加速度を制限することによってもたらされた変化である。図7(c)と図9を見比べると分かるように、図9(b)では加速度を制限した効果が、現れており、下流車両では計算時間内の走行距離が短くなっている。ただし、図9(a)においては、グラフに現れていないだけではなく、実際に値が変わっていない。また、図9(b)においても、車両の停止が現れる40台目から100台目までは、走行距離に変化がない。



(a) 加速度上限: $a^* \leq 0.1$

(b) 加速度上限: $a^* \leq 0.03$

図 9 加速度の上限が有る場合の下流伝播挙動 ($\Delta x_i^* = 3.5$)

5 まとめ

一般道での定点観測を行い、その結果を基に最適速度モデルを検討した。その結果、加速時と減速時で異なる最適速度関数を持ち、なおかつ減速時の関数が常に加速時の関数よりも大きいこと。加えて、感度は加速度の上限を設定するパラメータとすることで、計測結果との整合性の良いモデルを作成した。さらに、このモデルによって、速度変化が増幅したり、遅れが貯まったりする交通流を表すことが可能であることを確認した。

参考文献

- [1] 例えば、Y. Sugiyama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Hasebe, A. Nakayama, K. Nishinari, S. Tadaki, S. Yukawa, New J. of Phys., Vol. 10 (2008) 033001
- [2] R. L. Bierley, Highway Research Record, No.25 (1963) 58
- [3] M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, A. Nakayama, A. Shibata, Y. Sugiyama, J. of Phys. 1 France, Vol. 5 (1995) 1389
- [4] G.F. Newell, Operations Research, Vol. 9, No.2 (1961) 89
- [5] 杉本祐介、清水光輝、脇田佑希子、玉城龍洋、北栄輔、計算理工学講演会論文集, Vol. 16, (2011) CD-ROM