

勾配影響を考慮した追従挙動モデルの比較分析*

Comparative Study of Car-following Models Including Grade Change Effects *

大口 敬**・小沼 良一***

By Takashi OGUCHI**・Ryouichi KONUMA***

1. はじめに

本研究では、渋滞が多発する東名高速道路下り大和バス停付近のサグ(21.9~22.6kp)を仮想3次元空間に再現し、この縦断線形条件のみを変化させた仮想道路空間も作成した。ドライビングシミュレータ(以下DS)を用いて、多数の被験者によるこれら合計7タイプの線形条件の仮想道路で追従走行実験を行ない、既提案の10種類の異なる追従挙動モデルによる実験走行の再現性・汎用性を比較する。また勾配影響について複数のモデルを提案し、同様に実験走行の再現性・汎用性を比較する。これらの検討を通して、異なるモデル構造が持つ追従挙動の一般的性能を把握し、サグ部ボトルネック現象を説明するための実用的なモデル構造を検討することを目的とする。

2. 実験データの収集

(1) 実験概要

本研究では、東大国際・産学共同研究センター保有の「複合現実感交通実験スペース¹⁾」におけるターンテーブル付6自由度動揺装置、全方位模擬視界映像装置を備えたDSを使用して実験走行を行なった。表1に作成した7種類の3次元道路空間の線形条件を示す。線形0は対象とする実道路、他の6種類は当該サグ部の縦断線形条件を表のように変更した以外は、実道路と同じ条件として、仮想道路空間を自作した。

(2) 実験の方法

まず、実験車両²⁾を用いて大和サグの走行実験を行ない、渋滞発生直前の速度変動を伴う実走行挙動を得る。

表1 設定線形条件

| | | 縦断曲線長 | | |
|-----|------|---------|------|------|
| | | 700m | 200m | (平坦) |
| 勾配差 | 1.3% | 線形1 | 線形4 | |
| | 2.6% | 線形0(現状) | 線形3 | |
| | 3.9% | 線形2 | 線形5 | |
| | (一定) | | | 線形6 |

*キーワード: 交通流, 交通容量, 交通制御, ITS

**正員, 博(工), 首都大学東京大学院都市環境科学研究科
(〒192-0397 oguchi-takakshi@c.metro-u.ac.jp)

***正員, 修(工), 首都高速道路(株)

得られたGPS位置・速度を、実空間と仮想空間の座標系定義の違い、実道路形状と仮想道路形状のズレを補正する変換を行い、これを7種類全ての線形条件における共通の「0台目」の走行軌跡とする。1人目の被験者は0台目を先行車としてその後ろを追従し、その結果を1台目とする。2人目の被験者は1台目を先行車としてその後ろを追従し、その結果を2台目とする。以下順番に追従走行を繰り返す。

実験車およびDSによる走行は、全て追越車線上である。対象区間は片側3車線であり、隣接2車線の交通状況は、「複合現実感交通実験スペース¹⁾」が提供するマイクロ交通シミュレータ「KAKUMO³⁾」により、渋滞発生時と同等な交通流状態を再現した。

被験者には練習走行の後、7種類の線形条件を特別な指示は一切なしで先行車の後を走行してもらう。データが得られた被験者は33名、年齢構成は20代21名、30代7名、40代4名、50代1名である。図1は実験走行結果のTime-Space図の例である。

3. 平坦部における追従挙動モデルの比較分析

(1) 分析方法

ここでは、同じ被験者の追従挙動は、縦断線形条件によらず同じパラメータにより表現できるものと仮定し、縦断線形条件が異なることにより生じる追従挙動特性の違いは、縦断勾配の変化による影響であると考えられる。そこで、まず縦断勾配変化のない道路(線形6)における33名の追従挙動に対して、次に示す既存の10モデルのパラメータを推定し、その再現性を評価する。

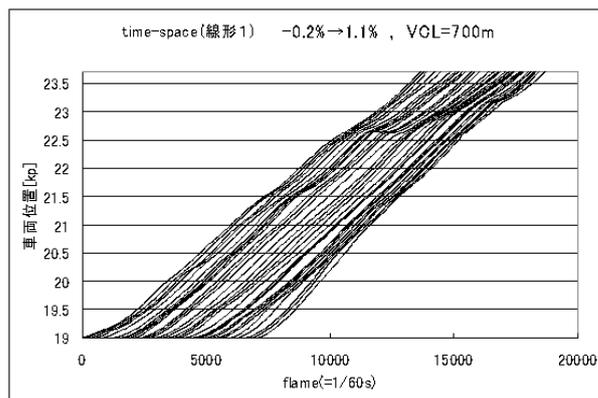


図1 実験走行結果のTime-Space図の例(線形1)

(2) 比較に用いる追従挙動モデル

以下では、 t :時刻[s], $x_0(t)$, $\dot{x}_0(t)$, $\ddot{x}_0(t)$:先行車位置[m], 速度[m/s], 加速度[m/s²], $x_1(t)$, $\dot{x}_1(t)$, $\ddot{x}_1(t)$:追従車位置[m], 速度[m/s], 加速度[m/s²], $\theta_n(t)$:時刻 t の n 台目位置の縦断勾配角度[rad], T :反応遅れ時間, $\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta$:係数パラメータ, l, m, n :べき乗パラメータ, とする.

[Model-1]線形単項型モデル⁴⁾

$$\ddot{x}_1(t+T) = \alpha(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t))$$

[Model-2]非線形単項型モデル⁵⁾

$$\ddot{x}_1(t+T) = \frac{\alpha}{x_0(t) - x_1(t)}(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t))$$

[Model-3]単項初等関数型(GMモデル)⁵⁾

$$\ddot{x}_1(t+T) = \alpha \frac{\{\dot{x}_1(t)\}^m}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^l}(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t))$$

[Model-4]指数関数型(Newellモデル)⁶⁾

$$\ddot{x}_1(t+T) = \alpha_1 \cdot e^{-\alpha_2(x_0(t) - x_1(t) - \alpha_3)} \times (\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t))$$

[Model-5]指数関数型その2(Cederモデル)⁷⁾

$$\ddot{x}_1(t+T) = \frac{\alpha_1 \cdot e^{-\alpha_2/(x_0(t) - x_1(t))}}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^2} \times (\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t))$$

[Model-6]線形多項式型(Kometani & Sasakiモデル)⁸⁾

$$\ddot{x}_1(t+T) = \alpha_1(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) + \alpha_2\ddot{x}_0(t)$$

[Model-7]双曲線正接関数型(OVモデル)⁹⁾

$$\ddot{x}_1(t+T) = \alpha [\{\alpha_1 \tanh(\alpha_2(x_0(t) - x_1(t)) - \alpha_3) + \alpha_4\} - \dot{x}_1(t)]$$

[Model-8]線形多項式型(Helleyモデル)¹⁰⁾

$$\ddot{x}_1(t+T) = \alpha_1(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) + \alpha_2(x_0(t) - x_1(t) - \beta)$$

[Model-9]非線形多項式型その1(スパイラル・モデル)¹¹⁾

$$\ddot{x}_1(t+T) = \frac{\alpha_3}{\alpha_1 Y + \alpha_2} \{x_0(t) - x_1(t) - \beta\} + \frac{\alpha_4}{\alpha_1 Y + \alpha_2} \{\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)\}$$

ここに、 $Y = (x_0(t) - x_1(t) - \beta)/(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t))$

[Model-10]非線形多項式型その2(越モデル)¹²⁾

$$\ddot{x}_1(t+T) = \frac{\alpha_1}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^l} \{\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)\} + \frac{\alpha_2}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^n} \{x_0(t) - x_1(t) - \beta\}$$

ここで、文献 9)の OV モデルには反応遅れの概念がないが、比較分析のため OV モデルにも反応遅れパラメータ T を追加する。Helly モデル、スパイラル・モデル、および越モデルにおけるパラメータ β は、本来は目標車間距離を意味する関数であるが、ここでは短区間を対象とするため定数(平均車間距離)とする。さらに文献 12)の越モデルの第3項は、他の項の定数成分で表現されるものとして省略し、また勾配変化の影響を表す第4項もここでは平坦部を対象とするため除外する。さらに反応遅れ時間 T を1つにまとめている。

なお、GMモデル、Newellモデル、Kometani & Sasakiモデル、Helleyモデル、越モデルは、Model-1、Model-2、Model-8などを特殊形として包含するモデルであるが、これらと区別するため、各モデルパラメータはいずれもゼロ以外の実数とする。

(3) パラメータ推定と再現性・汎用性評価

パラメータ推定は、モデル毎に、各被験者挙動に対してRMSEの最小値を与えるパラメータセットを、全パラメータの組合せの絨毯爆撃により探索する。ただしパラメータ変化の離散化解像度や範囲の決め方には恣意性があるため、厳密に最適解が得られるとは限らない。追従挙動モデルはいずれも追従車加速度を直接出力するが、加速度の実測値とのRMSEや相関係数は、必ずしも再現性評価指標として適切でない¹³⁾と考えられるので、本研究では、最も時間的に積分された指標である車頭距離のDS実験値とのRMSE値を再現性評価指標に用いる。

また、車両の走行状態として、①追突の発生、②限界減速度(-9.8m/s²)の超過、③限界加速度(3.0m/s²)の超過、④非追従状態の発生(車間距離150m以上)、⑤車両停止後退の発生(5項目を随時判定し、時間領域における安定性評価を試みる。5項目条件は一つでも満たさなければ、その時点でパラメータセットは不適とされて計算は中止する。また、追従挙動モデルで走行した軌跡を先行車として、さらにもう1台追従モデルにより走行させ、この2台目についても5項目の安定性条件を満たすかどうかを判定することにより、漸近安定性も確認する。

探索の結果、全てのパラメータセットにおいて安定性条件を満たさない場合には最小RMSE値は求められない。したがって汎用性の観点からはあるモデルが多くの特験

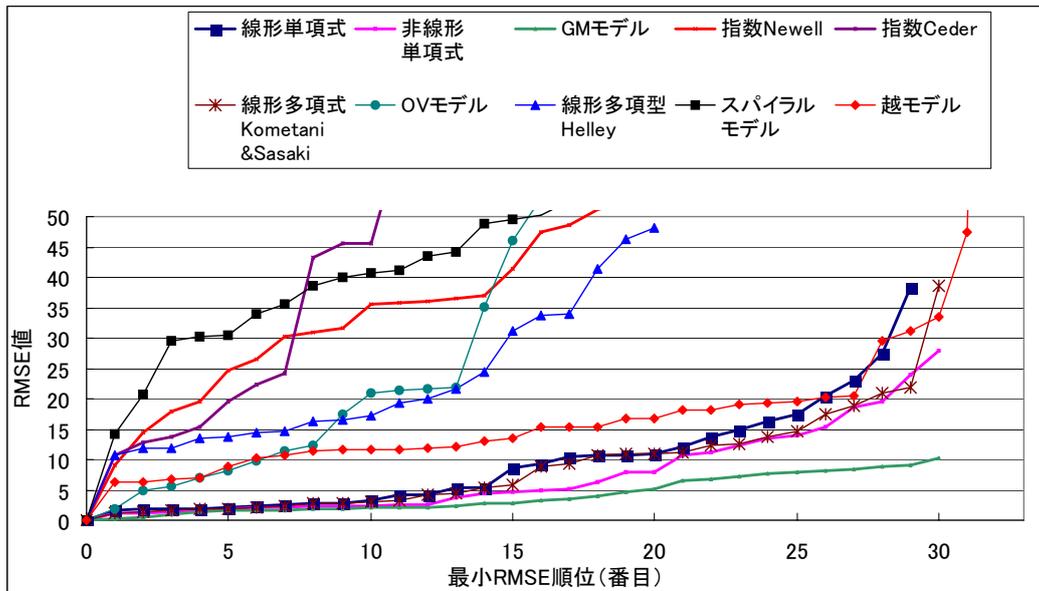


図2 追従挙動 10 モデルの最小 RMSE 値の順位図 (2 台目追従シミュレーション結果による)

者に対してRMSE値を持つほうが望ましく、再現性の観点からは最小RMSE値が小さいほど望ましいため、両者を同時に満たすことが有望なモデルの条件である。

図2は、より安定性条件の厳しい2台目までの追従シミュレーション結果で安定性条件を満たすパラメータ範囲に対して、最小RMSE値の低い順に順位図として並べたものである。RMSE値が得られなくなる順位値を見ると、Ceder, OV, スパイラル, Newell, およびHelleyの5モデルは、安定性が確保できるのは全被験者の半分程度でしかない。一方、相対的に汎用性の高い残りの5つのモデルは、線形多項式モデル, Kometani & Sasakiモデル, 非線形多項式モデル, GMモデル, そして越モデルの順で多くの被験者の挙動を記述している。これらのモデルは越モデルかGMモデルの特殊形として包含されるので、越モデルかGMモデルが有望であることがわかる。ただし順位の低いところでは、GMモデルのほうが越モデルよりも再現性は高い傾向が見られる。

4. 勾配影響モデルの比較分析

(1) 比較対象モデル

勾配影響モデルの基本構造は次のとおりとする。

$$\ddot{x}(t) = (\text{GMモデル}) - \beta g \{ \sin \theta(t) - \sin \theta_u \}$$

ここで、 g は重力加速度[m/s²]、 θ_u はサグによる勾配変化の上流側一定勾配[rad]である。

勾配影響がない場合は $\beta=0$ 、勾配変化の影響を全く認知できずに一切補償的行動をしない場合は $\beta=1$ であり、一般に勾配変化区間における運転者の認知状態は、 β が $0 \leq \beta \leq 1$ の範囲にあるものと考えられる。また、運転者が勾配変化の影響を徐々に認知して適応していくのならば、 β は1から0へと変化するものと考えられる。

そこで β に次の5つのモデルタイプを考える。

[勾配影響0モデル]

勾配変化の影響を考慮しない場合 ($\beta=0$)

[勾配影響1モデル]

勾配変化の影響を100%受ける場合 ($\beta=1$)

[勾配影響一定モデル]

勾配変化の影響を任意割合で受ける場合 ($\beta=一定$)
 β を $0 \leq \beta \leq 1$ の範囲の任意の定数パラメータとする

[勾配影響線形変化モデル]

運転者が勾配変化の影響に気付いてから適応するまで、 β を次の線形関数で表されるものとする。

$$\beta(t) = 1 \quad (\beta < T_a - T_w)$$

$$\beta(t) = \frac{T_w + T_a - t}{2T_w} \quad (T_a - T_w \leq \beta < T_a + T_w)$$

$$\beta(t) = 0 \quad (T_a + T_w \leq \beta)$$

ここに、 $T_a - T_w$: 勾配変化適応開始時刻, $T_a + T_w$: 勾配変化適応終了時刻, T_a, T_w : 定数パラメータ。

[勾配影響非線形変化モデル]

運転者が勾配変化の影響に気付いてから適応するまで、 β を次の非線形関数で表わされるものとする。

$$\beta(t) = \frac{1 - \tanh\{\gamma(t - T_a)\}}{2}$$

ここに、 γ : 勾配変化の適応の速さに関わる定数パラメータ, T_a : 勾配変化の認知時刻に関わるパラメータ

(2) 7線形条件におけるGMモデルの安定性検証

まず、DS実験においてシミュレータ酔いにより全7種類の線形条件を走行できなかった被験者3名、3.においてGMモデルの有意なパラメータが推定できなかった

被験者3名を除く27名を分析対象とする。また、7種類の道路における走行挙動が、被験者ごとに全て同一のGMモデルパラメータで記述できなければ、GMモデルで表現できない残差分を勾配影響によるものとして分析することができない。そこで、どの線形条件においても勾配がほとんど変化しない21.4~21.9kpの500m区間を対象に、各被験者の6線形対象走行全てに対する評価指標(車間距離のRMSE値)の最小値を与えるGMモデルのパラメータを推定する。

その結果、いずれかの線形で3. に示す5つの安定性条件を満たすパラメータが存在せず、同じGMモデルで異なる線形条件の走行は記述できない被験者が11名、さらに、線形条件により最小RMSE値が大きく異なり、線形が違えばパラメータが異なる可能性の高い被験者が12名いることがわかった。残った4名は、ほぼ同等で比較的小さなRMSE値で安定していた。つまり、全ての線形条件の走行を同一モデルで記述できる被験者は極めて少ないことがわかる。

(3) 勾配影響モデルのパラメータ推定と再現性評価

勾配変化が生じる6線形条件について、最小RMSE値が10[m]以下となる線形条件・被験者の組合せを取り出して、21.4~23.4kpの2.0km区間を対象として勾配影響モデルの再現性を評価する。GMモデルパラメータは表2の値で固定し、5種類の勾配影響モデルのパラメータを縦断爆撃により変化させ、車間距離の最小RMSE値を与えるパラメータを探索する。ここでも再現性、汎用性、安定性については3. と全く同様な議論が成立する。

図3に、2台目追従シミュレーションによる(漸近安定性も考慮して推定された)勾配影響モデルのパラメータ探索結果の最小RMSE順位図を示す。図より勾配影響線形/非線形変化モデルの方が、それ以外の β を固定するモデルより、再現性、汎用性が高いことは明らかである。

5. おわりに

サグ部の渋滞発生の根本原因である追従挙動を説明するモデルとして適切なものについて検討し、既提案の10モデルを比較分析した結果、GMモデルもしくは越モデルが有望であり、これに勾配変化区間で勾配による影響が徐々に低減する構造を持つモデルが望ましいことを見出した。ただし、検討の前提となるDS実験の信頼性検証、追従挙動モデルの精緻化、個人差のパラメータ表現、再現性・汎用性・安定性評価方法の確立、などまだ課題

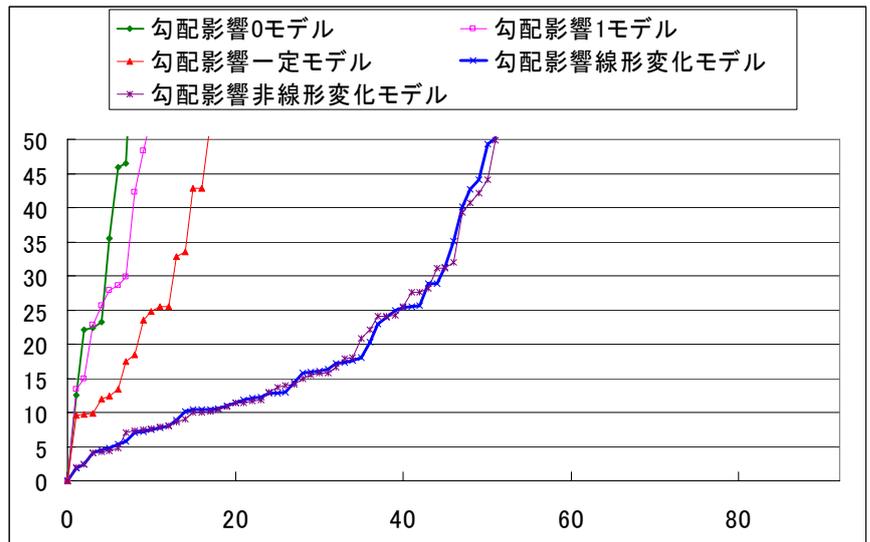


図3 勾配影響5モデルの最小RMSE値の順位図
(2台目追従シミュレーション結果による)

は多く残されている。未筆ながら、本研究は東京大学国際・産学共同研究センター「サステナブルITS」プロジェクトの一貫として行なわれたものである。DS実験の準備・実行などにあたって関係各位に深甚なるご協力・ご教示を頂いた。この場を借りて深謝の意を表す。

参考文献

- 1) K. IKEUCHI, M. KUWAHARA, Y. SUDA, et al.: Mixed reality traffic experiment space under interactive traffic environment for ITS research. Proc. 11th WC on ITS, 2004.
- 2) 小宮粹史, 大口敬, 赤羽弘和, 桑原雅夫: GPS測位に基づく自動車および周辺車両走行挙動観測システムの開発, 交通工学研究発表会論文報告集, Vol.24, pp.21-24, 2004.
- 3) T. SHIRAIISHI, H. HANABUSA, M. KUWAHARA, et al.: Development of a microscopic traffic simulation model for interactive traffic environment. Proc. 11th WC on ITS, 2004.
- 4) R. E. CHANDLER, R. HERMAN and E. W. MONTROLL: Traffic dynamics: studies in car following. Oper. Res., Vol.6, pp.65-184, 1958.
- 5) D. C. GAZIS, R. HERMAN and R. B. POTTS: Car-following theory of steady-state traffic flow. Oper. Res., Vol.7, pp.449-505, 1959.
- 6) G. F. NEWELL: Nonlinear effects in the dynamic of car-following. Oper. Res., Vol.9, pp.209-229, 1961.
- 7) A. CEDER: Deterministic traffic flow model for the tow-regime approach. Transpn. Res. Recrd., No.567, pp.16-30, 1976.
- 8) E. KOMETANI and T. SASAKI: On the stability of traffic flow (Report 1), J. Oper. Res. Soc. Japan, Vol.2, No.1, pp.11-26, 1958.
- 9) M. BANDO, K. HASEBE, A. NAKAYAMA, A. SHIBATA and Y. SUGIYAMA: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. J. of Phys. Rev. E, Vol.51, No.2, pp.1035-1042, 1995.
- 10) W. HELLEY: Simulation of bottlenecks in single-lane traffic flow. Theory of Traffic Flow, pp.207-238, 1959.
- 11) 中山晴幸, 和田幹彦, 市川幸太郎: スパイラル曲線を用いた交通流シミュレーション・モデルの検討, 交通工学研究発表会論文集, No.13, pp.25-28, 1993.
- 12) 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, No.371/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 13) 大口敬: 交通容量評価のための車両挙動の観測・解析手法, 土木計画学ワンディセミナテキスト, pp.45-56, 2001.