

ドライビングシミュレータを用いた追従積重ね試験データから交通流の特徴を抽出する手法

柴垣 俊¹・葛西 誠²・伏屋 和晃³・寺部 慎太郎⁴

¹学生非会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: j7612618@ed.tus.ac.jp

²正会員 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: kasai@rs.noda.tus.ac.jp

³非会員 首都高速道路株式会社 (〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安1-2-4)

E-mail: k.fushiya612@shutoko.jp

⁴正会員 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: terabe@rs.noda.tus.ac.jp

高速道路単路部の渋滞はサグ部で頻繁に発生することがわかっており、特に縦断勾配の影響を受けているとみられている。この現象解明のため、追従積み重ね試験の走行データを用いて、これまでの一對の追従挙動解析に拘ることなく、車群全体の動きを少数の特徴量に縮約するためのまったく新しい方法を試みる。車群の交通流を形成する必要最低限の要素は車頭時間であるとみなし、階層ベイズ法を用いて、車頭時間の変動にいくつかの制約を設けたモデルによる推定を行う。限定された被験者による追従積み重ね試験のデータではあるが、一定程度の精度を有しており、縦断勾配と交通流の関係を議論することの布石となり得る。

Key Words : *traffic flow ,vertical gradient, accumulation of car-following behavior, time headway*

1. はじめに

高速道路単路部の渋滞はサグ部で頻繁に発生することが知られており、このことは交通容量が道路線形、特に縦断勾配によって影響を受けることを示唆する¹⁾³⁾。このような、前後に比べて容量の小さい断面が生じることを容量上のボトルネック現象という。

この現象を理解するためのアプローチの一つとして挙げられるのは適切な交通流のモデリングである。様々な要素が含まれる複雑な交通流現象に対して、本質的と思われる要素を観測事実等に基づき抽出し、ボトルネック現象を説明できると思われる仮説を立てこれを数理モデルに置き換えることで、交通流を簡潔な現象として縮約し表現するのがモデリングの主旨である。これまで、追従挙動解析の分野では様々な仮説に基づいた交通流モデルが多数存在するものの、どのモデルが最も的確にボトルネック現象を表現できるかは決着がつかず、未だにボトルネックになり得るかの決定的な要因はわかって

ていないのが現状である。

その原因の一つに、追従挙動モデルへ当てはめる走行データ取得が困難であることが挙げられる⁰⁾。実観測による走行データは車両属性のばらつきや気象等の外的要因から大きく影響を受けており、有効なデータとして扱うのが難しい。これに対してドライビングシミュレータ(DS)は、実走行では得られにくい精度の高い速度・位置データが取得可能であることや、余計な外的要因を排除し、道路線形の変化のみが影響する環境下で大量の走行データを入手できるという利点があり、再現性という点での課題はあるものの、実観測の欠点を補う有力なデータ取得法の一つとして位置づけられる⁴⁾。

DSならではの特徴を活かしたデータ取得法の一つに、同一被験者によって追従を積み重ね、車群を生成する「追従積み重ね試験」⁴⁾がある。追従積み重ね試験により、ドライバーや車両の違いといった個人属性を排除し、縦断勾配をはじめとした道路線形の影響のみを受けたとみなしてよい追従走行データが得られる。さらには複数

台の速度や位置のデータが一挙に得られるという点が特徴的であり、これを活かし新たな交通流の見方を考えることの可能性を開く点に価値があると思われる。

この問題意識の下、本論文ではこれまでの一対の追従挙動解析に拘ることなく、車群全体の動きを少数の特徴量に縮約するためのまったく新しい方法を試みる。

2. ドライビングシミュレータによる追従積み重ね試験

(1) 追従積み重ね試験の意義

本論文で取り扱う走行データは、HONDAドライビングシミュレータ(以下DS)を用いて取得する。完全な実路再現性は担保されない以上、実際の高速道路のサグ部にて走行試験を行い、数十台に連なる車群のデータを取得することが望ましい可能性はあるが、実観測による走行データは車両属性のばらつきや気象等の外的要因が大きく影響を及ぼしており、有効なデータとして扱うのが難しい。一方でDSでは実験条件を自由に設定でき、不必要と思われる外的要因を排除し、道路線形の変化の影響のみに特化した走行データを取得できるという利点がある。また簡易に多数の有効なデータを取得できる点でも非常に便利なデータ取得装置である。したがって、実際の道路の再現性という限界があることを考慮しても、DS利用の価値は十分にあると考えられる。

これまでDSを用いてサグ部での様々な追従走行試験が行われてきた⁹⁾が、その中の一つにDSを用いた同一被験者による「追従積み重ね試験」⁴⁾がある。これは、ドライバー属性などその他の要因が含まれる実路での走行では得ることが困難な、純粋に縦断線形の変化の影響のみを抽出した走行データを取得するために考案された試験である。DS内に再現したサグ部を擁する道路において、まずは被験者に速度を一定に保ちながら走行してもらい、1回目の走行データを得る。その1回目の走行データをDS上で先行車として再現し、その後ろを再び同一被験者が追従走行したデータを得る。これを繰り返し、同一被験者による追従走行を積み重ねた疑似的な車群を得ることが「追従積み重ね試験」である。これにより、個人属性を排除した縦断線形の変化のみに着目した追従走行データを得られるという利点がある。このように道路線形と交通流との関係を直接に議論できるデータを取得できることは実道路では極めて難しく、DSならではの技法である。

(2) 追従積み重ね試験による走行データ

実験で再現したコースは、実道路における著名なボトルネックである東北道下り羽生PA付近のサグ部を模し

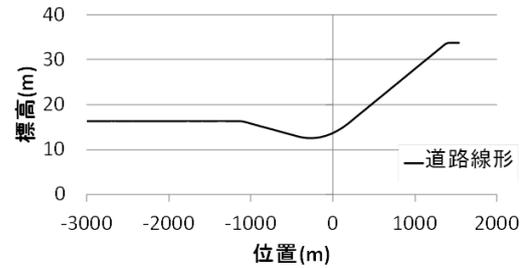


図-1 実験道路の縦断線形

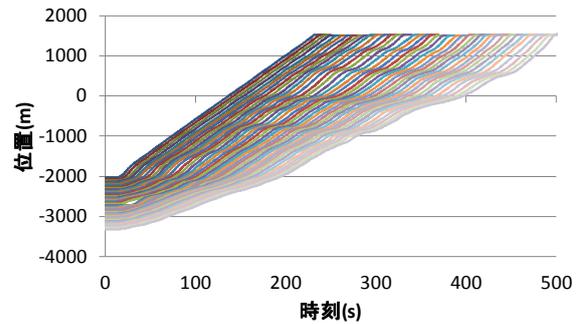


図-2 被験者1の追従積み重ね試験によるTime-Space図

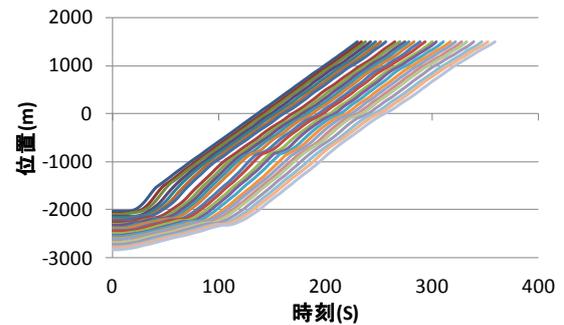


図-3 被験者2の追従積み重ね試験によるTime-Space図

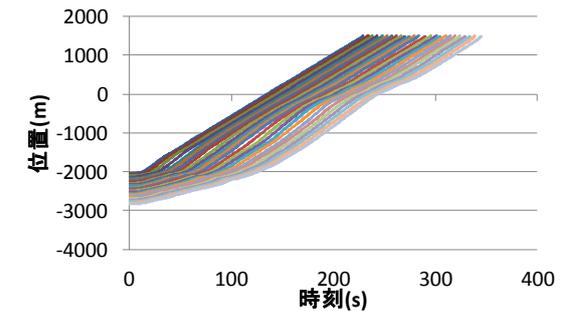


図-4 被験者3の追従積み重ね試験によるTime-Space図

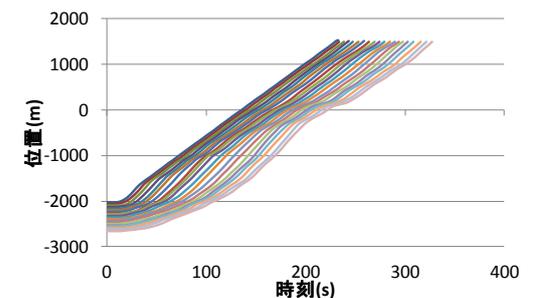


図-5 被験者4の追従積み重ね試験によるTime-Space図

た、下り-0.5%から上り1.5%のサグを含む全長約5000mのコースである。なお、走行開始から安定した追従走行に至った上でサグでの挙動検証を行うため、縦断・平面線形が共に直線である約2000mの助走区間を含む(図-1)。被験者4名(いずれも学生)による追従積み重ね試験の結果は図-2~図-5に図示する通りである。図より、被験者によって違いはあるものの、ほぼ同様の場所で減速波が生じている様子が見られる。しかし、これはあくまでも定性的な判断でしかなく、この様子を何らかの方法で定量的に表現する必要がある。

3. 新たな交通流モデルの考え方

これまで行われてきた単路部ボトルネック現象の研究では、追従挙動をモデリングすることでサグ部の交通流の性質を明らかにしようとするのが一般的である。その中でも著名な例は越¹⁾や尾崎^{1,8)}によるものである。越¹⁾は縦断勾配に比例した減速度項を、尾崎⁷⁾、Ozaki⁸⁾はサグ縦断勾配変化率に対して遅れ時間を伴った加速をすと仮定した。しかしこの仮定は必ずしも自明ではないとの指摘もあり、武藤・赤羽⁹⁾は、サグの下り坂で車間距離が狭まることで速度擾乱に対して不安定な状況をもたらす、渋滞が生じるきっかけとなっている可能性に言及している。この他にもOVモデル¹⁰⁾やセル・オートマトンモデル^{11,12)}、IDM¹³⁾など様々な交通流モデルを基本としたボトルネック現象の表現があり得るが、これはボトルネックを生じるために、自明ではない要素、例えば上り坂部での速度低下を加味してしまう危険性を持っている。また逆に、追突を生じさせないようモデルの安定性を向上させようとするあまり、ボトルネック現象の核心となる部分を切り捨ててしまっている可能性も否定できない。渋滞対策の切り札とみられているAdaptive Cruise Control (ACC)の性能チューニングといった場面では、追従挙動モデルは非常に重要な役割を担うであろうが、ボトルネック現象そのものの本質を見抜くためには新たな視点から交通流を表現したモデルの必要性があると考えられる。

一般には、追従積み重ね試験で取得された走行データを一対一対の追従走行データに分割して考えるところであろう。しかし追従積み重ね試験では車群全体の挙動データが得られており、上記のような、1対の追従挙動モデルを媒介させることのデメリットを回避する方法があり得る。それは車群全体を1個の集団のデータとしてみなし、ここから車群の状態を少数の変量に縮約する交通流モデリングの手法である¹⁴⁾。その場合、車群の状態を記述する要素は様々なものが考えられるが、前後の車に対する位置や速度を最もシンプルに関係づけるものとして

車頭時間が適当であると思われる。以下では、この車頭時間のダイナミクスを記述する方法を考える。

4. 車頭時間がなめらかに変動する交通流モデルの概要

(1) 階層ベイズ法の導入

本論文で提案する交通流モデルは、という条件を事前分布とした階層ベイズ型モデル¹⁵⁾とする。

階層ベイズ型モデルは、対象とする現象に対して「事前の知識」を仮定し、その仮定の下で、実際に「得られたデータ」に基づいて「事後確率」を求める構造となっている。

われわれは、「事前の知識」として「車頭時間が時間変化に対応してなめらかに変動する」ことを仮定する。つまり隣接する車両の車頭時間の差はほぼないと仮定した事前分布式を考える。事前分布は式(1)で表わされ、 i 台目における時刻 $k-1$ の時の推定車頭時間 $t_{i,k-1}$ と時刻 k の時の推定車頭時間 $t_{i,k}$ の一階差分が0に近いほど高確率で分布する正規分布を仮定する。

$$p_{i,k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp \left\{ -\frac{(t_{i,k-1} - t_{i,k})^2}{2\sigma_1^2} \right\} \quad (1)$$

データ分布 \bar{p}_i は、 i 台目における時刻 k の時の実際の車頭時間 $\bar{t}_{i,k}$ と推定される車頭時間 $t_{i,k}$ の乖離0のとき、最も高い確率密度であるような分布を仮定する：

$$\bar{p}_{i,k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp \left\{ -\frac{(t_{i,k} - \bar{t}_{i,k})^2}{2\sigma_2^2} \right\} \quad (2)$$

ここで、 σ_1 および σ_2 は階層ベイズ法においてはハイパーパラメータと呼ばれる。 σ_1 は車頭時間の滑らかさを表わすパラメータであり、推定対象の車群である1団のデータに対して1個の値が推定されることとなる。したがって、 σ_1 に交通流の特徴が縮約され、道路線形と交通流の関係を端的に結び付けるものこそこの σ_1 である。 σ_2 のデータ分布に関するハイパーパラメータは概ね推定精度を示す変量と捉えてよい。

i 台分のデータ分布と事前分布をかけた同時確率 $P = \prod_k \prod_i \bar{p}_{i,k} \cdot \prod_k p_{i,k}$ を最大にするようなパラメータの組み合わせを推定する問題となる。

(2) マルコフ連鎖モンテカルロ法によるパラメータの組み合わせの決定

推定するパラメータの組み合わせを決定する方法とし

て、本論文ではマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC法)を用いる¹⁶⁾。

MCMC法の特徴は、パラメータに初期値を与え、その値をランダムに変動させながら最適解を探索するという点である。本質的にはパラメータのサンプリング方法として用いられるが、ここでは最適化手法の1つとして用いる。図-6にMCMC法の手順を示す。図-6の縦軸に時刻 k 、横軸に台数 i をとり、奥行き方向をMCMCの計算回数 j とする。そして赤実線がある時刻、ある車の車頭時間を表わしており、例えば、格子点の上に偏差を持っていれば相対的に長いことを意味する。式(1)によれば、各車に対して時間とともに車頭時間はなめらかに変動する、すなわち縦方向(図-6の青で囲まれた部分)がなめらかであることを意味する。MCMC法の手続きを繰り返せば、グラフの奥行き方向に車頭時間の分布が更新されていく。式(2)に従えば、十分な繰り返し回数を経ると、実車頭時間データに近似するようになる。

更新の手続きは、詳しく述べれば以下ようになる。時刻 k におけるMCMC手続きの $j-1$ 回目ときのパラメータ値 $t_{i,k}^{j-1}$ とハイパーパラメータ $\sigma_1^{j-1}, \sigma_2^{j-1}$ をわずかにランダムに変化させ、パラメータ値の候補 $t_{i,k}^c$ とハイパーパラメータ値の候補 σ_1^c, σ_2^c の下、事後分布 p^c を計算する。続いて $j-1$ 回目ときの事後分布 p_{j-1} との比 L_j を計算し、設定した基準値(0~1を動く一様乱数)を超えていれば候補のパラメータ $t_{i,k}^c$ とハイパーパラメータ σ_1^c, σ_2^c の組み合わせを採用する。基準値に達していない場合は、 $j-1$ 回目のパラメータ $t_{i,k}^{j-1}$ と $\sigma_1^{j-1}, \sigma_2^{j-1}$ をそのまま j 回目の値として保持する。上記の手順を n 回繰り返し、より高い事後確率を与えるようなパラメータおよびハイパーパラメータが取得できる。

5. モデルの適用

0.01秒間隔に記録されている追従積み重ね試験の走行データを位置、速度データを用いて車頭時間を求め、推定時間短縮のため、0.5秒毎に丸めて推定に用いる。

上述の手続きを、試行的に被験者1に対して適用してみる。推定する区間は、減速波がいくつか生じている125秒間とする。追従積み重ね試験での走行回数は40回であるので、39台分の車頭時間データを用いる。

MCMCの手続きにより、最終的に求められた n 回目車頭時間データを、先行車の速度と各車の初期位置のみ与えてTime-space図に変換したのが図-8である。

図-7と図-8とを見比べると、推定されたTime-space図は実測の減速波の発生位置や伝播速度等を定性的によく近

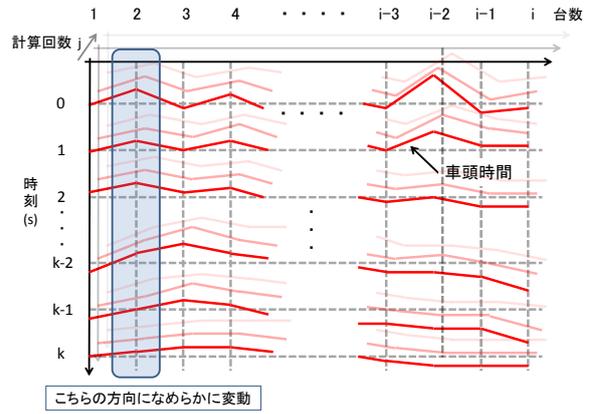


図-6 MCMC法の手続き

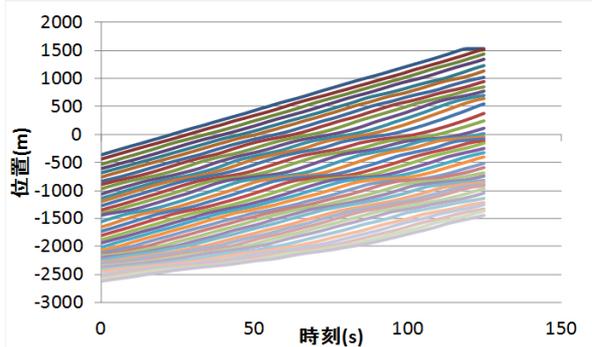


図-7 DSにより取得された位置データに基づくTime-Space図(入力データ)

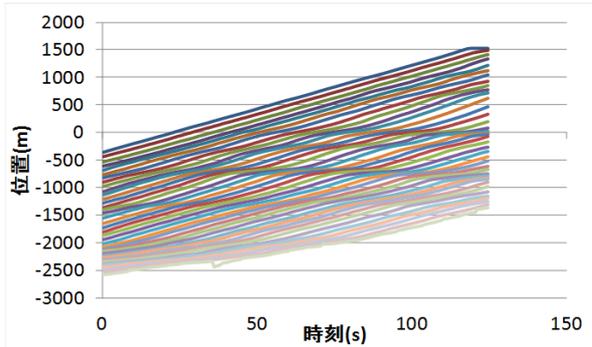


図-8 モデルによる推定されたTime-Space図

似している様子がみられる。さらに、車頭時間の実測値と推定値の比較を行ったのが図-9である。図-9の左側は実測の車頭時間である。赤色の部分は車頭時間が長いことを示し、概ね減速波の下流側に相当する。推定の車頭時間は右側であり、概ね実測の車頭時間を再現していることが見てとれる。

MCMCの手続きによって、ハイパーパラメータがどのように推移しているかを示したのが図-10である。ここで、 σ_2 は「車頭時間の変動の具合」を表わすパラメータであり、値が小さいほど車頭時間がなめらかに変動していることになる。すなわち、この値が、DS上のサグ部を走行したときの、車群全体の車間距離の変動を表す特徴量である。このように、車群内の車頭時間の変動を少数の変数(ここでは1つ)に縮約できることが、こ

の推定法の長所である。これが、道路線形、特に縦断勾配とどのように対応しているかを解析していけばよいこととなる。

σ_1 は「車頭時間の実測値と推定値の乖離の具合」を表わすパラメータであり、値が小さいほど実測値に沿った推定結果であると言え、いわば中等誤差に相当する。

図-10より、MCMC法による推定の計算回数が500万回でほぼパラメータが収束すると判断してよいだろう。なお、最終的なハイパーパラメータ値は、車頭時間の滑らかさを表現する σ_2 が $\sigma_2 = 0.56$ [s]、推定誤差に相当する σ_1 は $\sigma_1 = 0.35$ [s]である。

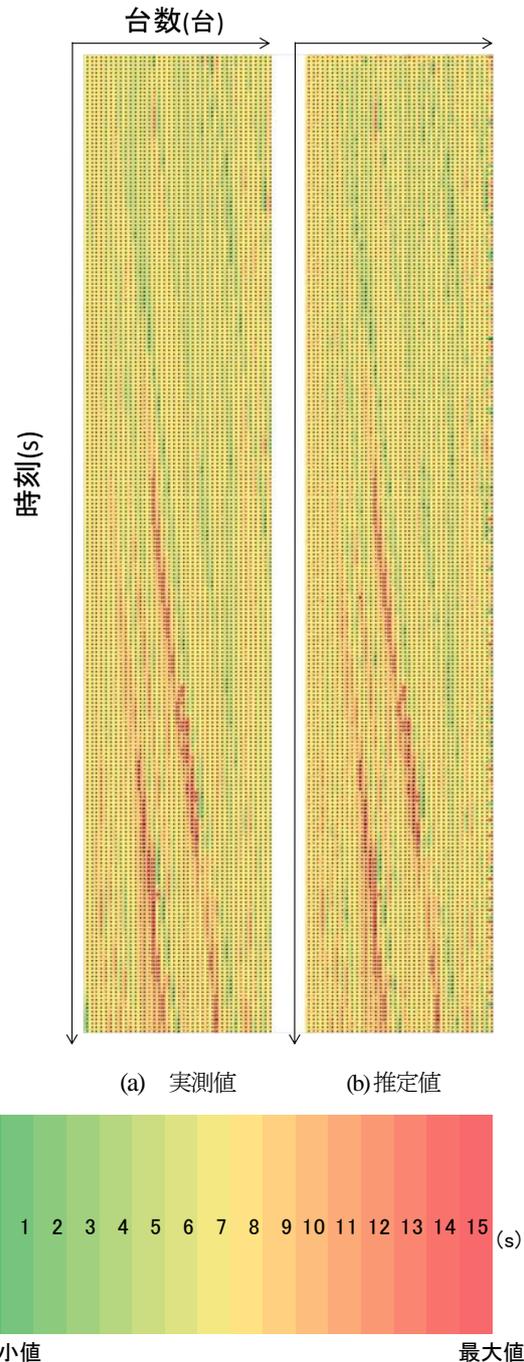
6. おわりに

本論文では、高速道路サグ部におけるボトルネック現象の解明に向け、新たな視点を提供することを目的とした。第1に、実路での車両追従挙動データの取得の代替としてドライビングシミュレータを用いた追従積重ね試験が有用であることを改めて指摘し、第2にこの追従積重ね試験のデータから、1対の追従データとして分解することなく、1つの集団のデータとしてみなしサグ部での交通流の特徴を少量の変量として抽出する方法を示した。

上記の第2に関しては、追従挙動のモデル化に拘ることなく、追従挙動の結果実現した「車間時間」の時間変動のみをモデル化することを試みた。このモデルの推定結果は上述の通り一定程度担保されているものと判断できる。しかし、現段階では最終的なねらいである縦断線形の変化との対応づけはされていないため、今後は縦断線形の変化とモデル中のハイパーパラメータとの関係を議論することが必要である。また、モデルの現象再現性はある程度確認されているが、限定された被験者による追従積重ね試験データであること、また用いたDSコースも1種類のサグであるため、当然ながらデータの補充が望まれる。さらには推定結果をもとにした交通流シミュレーションに繋げていく必要性もあるであろう。いずれにしても、追従挙動のモデル化に拘ることなく交通流の特徴を抽出する試みは、今後の交通流解析の可能性を広げるうえで大きな意義があると考えられる。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 大口敬：高速道路単路部渋滞発生解析－追従挙動モデルの整理と今後の展望－，土木学会論文集，No.660



車頭時間の凡例
図-9 車頭時間コンター図

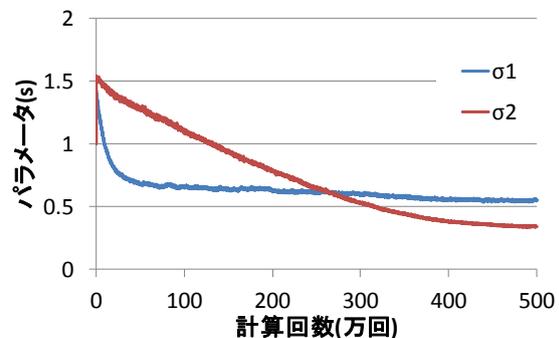


図-10 ハイパーパラメータ推定結果

／IV-49，pp.39-51，2000。

- 3) 大口敬, 中村英樹: 日本における交通容量・サービスの質に関する研究の概観と展望, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.3, pp.217-229, 2011.
- 4) 大口敬, 飯田克弘: 高速道路サグにおける追従挙動特性におけるドライビング・シミュレータ技術の適用性, 交通工学, Vol.38, No.4, pp.41-50, 2003.
- 5) Oguchi, T. and Konuma, R.: Comparative study of car-following models for describing breakdown phenomena at sags through driving simulator experiments, *proceedings of the 16th World Congress on ITS*, 12pages, 2009
- 6) 塩見康博, 吉澤隆司, 宇野伸宏, 飯田克弘: ドライビングシミュレータを用いた高速道路サグ部における追従挙動特性の解析, 第 30 回交通工学研究発表会論文集, pp.53-56, 2010.
- 7) 尾崎晴男: 車両の追従挙動とサグ部の隘路現象, 東京大学博士(工学)論文, 1994.
- 8) Ozaki, H.: Reaction and anticipation in the car-following behavior, *Proceedings of 12th ISTTT*, pp.45-55, 1995.
- 9) 武藤憲弘, 赤羽弘和: 車両の走行軌跡の精密観測に基づくサグ渋滞の分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.40, 5pages, 2009.
- 10) Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. and Sugiyama, Y.: Dynamic Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation, *Physical Review E*, Vol. 51, pp. 1035-1042, 1995.
- 11) Bham, G.H. and Benekohal, R.F.: A high fidelity traffic simulation model based on cellular automata and car-following concepts, *Transportation Research Part C*, Vol.12, pp.1-32, 2004.
- 12) Nishinari, K., Fukui, M. and Schadschneider, A.: A Stochastic Cellular Automaton Model for Traffic Flow with Multiple Metastable States, *Journal of Physics A*, Vol.37, pp.3101-3110, 2004.
- 13) Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observations and micro-scale simulations, *Physical Review E*, Vol. 62, pp. 1805-1824, 2000.
- 14) Kasai, M.: Exchange Interaction in the Time Headway Model in Critical Traffic Flow States, *Proceedings of the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2013.(Accepted)
- 15) 石黒真木夫, 松本隆, 乾敏郎, 田邊國士: 統計科学のフロンティア 4 階層ベイズモデルとその周辺, 岩波書店, 2004.
- 16) 伊庭幸人, 種村正美, 大森裕浩, 和合肇, 佐藤整尚, 高橋明彦: 統計科学のフロンティア 12 計算統計 II, 岩波書店, 2005.

(2013.8.2 受付)

EXTRACTION OF CHARACTERISTICS OF TRAFFIC FLOW FROM ACCUMULATION OF CAR-FOLLOWING BEHAVIOURS BY A DRIVING SIMULATOR

Shun SHIBAGAKI, Makoto KASAI, Kazuaki FUSHIYA and Shintaro TERABE