

# ミクロ交通流シミュレータを用いたデータ同化による高速道路サグ部の交通状態推定

中井 万理子<sup>1</sup>・塩見 康博<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生員 立命館大学大学院 理工学研究科 環境都市専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目1-1)  
E-mail:rv0046hs@kankyousystem.jp

<sup>2</sup>正会員 立命館大学 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目1-1)  
E-mail:shiomi@fc.ritsume.ac.jp

我が国では、交通渋滞による損失は年間12兆円に上り、特に都市間高速道路における渋滞の約6割がサグ部で発生していることから、サグ渋滞の解消は環境問題や経済効率の低下を食い止めることに繋がると考えられる。このような問題に対して動的な交通マネジメントが実施されており、特に交通状態の推定と予測は、効果的な動的マネジメントに必要な要素の一つである。今後、コネクティッド車両や自動走行車両が増加し、マネジメントメニューが高度化することを想定すると、従来のデータ同化による交通状態推定をマクロレベルからミクロレベルに進化させる必要があると考えられる。そこで本研究では、ミクロ交通流シミュレータVissimを使用して、サグ渋滞再現のための主要パラメータ及びそれらの適切な設定範囲の抽出、また動的なデータ同化システムを構築した。その結果、渋滞の発生状況を適切にシミュレーション可能となることを示した。

**Key Words :** Sags, Traffic state estimation, Microscopic simulation, Vissim, Data assimilation

## 1. 背景

日本の都市間高速道路における渋滞発生箇所の約6割をサグ部が占めているといわれており、渋滞を解消することは環境問題や経済効率の低下を食い止めることに繋がると考えられる。サグ部とは下り勾配から上り勾配にさしかかる区間をさす。上り勾配におけるドライバーの無意識の速度低下が原因で後続車との車間距離が縮み、後続車にブレーキが連鎖することが、渋滞が発生するメカニズムである。こういったサグ部における問題に対して、刻一刻と変化する交通状況に対応した車線規制や速度制限といった動的な交通マネジメントが実施されている。これより、交通状態推定と予測は効果的な動的マネジメントに必要な要素として考えられる。従来の交通状態推定はマクロレベルで行われており<sup>1)</sup>、トラフィックカウンターによるデータ（以下トラカンデータ）やプローブデータを用いてマクロ交通流シミュレーションと同化している。一方で、道路事業者が各車両を制御または指示することが可能な自動走行車両やコネクティッド車両が将来的に普及することを考慮すると、交通状態推定をマクロレベルからミクロレベルへと発展させることが不可欠である。そこで、ミクロ交通流シミュレーションを用いたデータ同化が有効であると考えた。

しかし、現状としてVissimをはじめとする商用シミュレーションソフトではサグ部における渋滞の再現が難しく、一般的にサグ部の渋滞対策を検討する際には独自のシミュレーションを開発して検討する事例が多い。このような場合、シミュレーションの開発コストがかかるため、交通状態推定を行う上で障壁となる。そこで本研究では、商用シミュレーションソフトVissimを使用したサグ部の渋滞の再現に必要なパラメータの設定を明らかにするとともに、データ同化を用いた動的な交通状態推定手法を構築する。

具体的には、Vissim上に構築したサグを含む区間における渋滞を再現するために必要なパラメータ及びそれらの適切な設定範囲を抽出し、これらを用いて、トラカンデータ及びプローブデータを基に動的にキャリブレーションを行うデータ同化システムを構築する。Vissimには膨大な数のパラメータが存在し、それらのパラメータがサグ部における運転挙動にどのように影響するのかが不明であり、さらにパラメータ同士で交互作用が発生する可能性がある。そのため、はじめに希望速度分布等車両の走行に影響するパラメータが、サグ部における運転挙動にどのような影響を与えるのかを調べるため感度分析を行う。また、パラメータの組み合わせによる交互作用が発生すると考えられるパラメータを抽出し、交互作用

を分析する。続いて、感度分析及び交互作用の分析結果を基に、対象区間のサグ渋滞を再現する。対象区間のトラカンデータを基に交通量や走行速度を入力し、パラメータを調整することによってトラカンデータ及び車両軌跡を用いて渋滞の再現精度の評価を行う。最後に、精度の高い交通状態推定を可能にするため、単位時間毎に状態の更新を行うデータ同化システムを構築し、実現象の再現精度を検証する。

## 2. 研究方法

### (1) Vissimについて

Vissimは高速道路及び公共交通に対応可能なミクロ交通流シミュレータであり、自由度の高いシミュレーションが可能となっている。車両の走行に関するパラメータは、①重量分布・パワー分布、②希望速度分布 (Desired Speed Distributions)、③加速度・減速度関数 (Acceleration/Deceleration Functions)、④追従挙動パラメータ (Driving Behavior)、⑤車線変更パラメータである。

①は、発生する車両及び出力パワーに対して割り当てる重量を確率分布で表現したものである。この二つの分布に関しては車両性能を大型車に設定した場合のみ操作可能なパラメータである。②は車両の希望速度を確率分布で表現しており、発生車両毎に確率分布を基に希望速度が割り当てられる。③は、車両の速度に対する加速度及び減速度の値を関数として表現したものである。④は、Wiedemannの追従モデルを基にした、追従時の運転挙動を操作するパラメータである。

本研究では、車間距離を定義するCC0、車頭間隔を定義するCC1、前方車両との負の速度差を定義するCC5、停止時からの加速度を定義するCC8の4つを使用した。⑤は車線変更に関する制御を行うパラメータ (追従挙動パラメータに含まれる) となっており、追越の方法を定義するGeneral behavior、追越車線の車両と走行車線の後続車となる車両との最小車頭時間(s)を定義するTo slower lane if collision time is above、変更後の車線における後続車との安全車間距離 (追従挙動パラメータにて定義) に乗ずる削減ファクターを定義するSafety distance reduction factorの3つを本研究では使用した。

### (2) データ同化

データ同化とは、シミュレーションと観測データを融合させるための基盤である。観測データを基にシミュレーションを行う際の初期条件、境界条件を求めるとともに、シミュレーションモデルに含まれる諸パラメータの最適な値を求める。また、シミュレーションモデルに基づいて観測の不足を補う<sup>3)</sup>。本研究では、データ同化を用

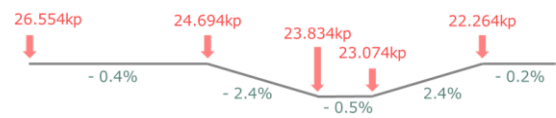


図1 道路構造及びトラカン設置地点

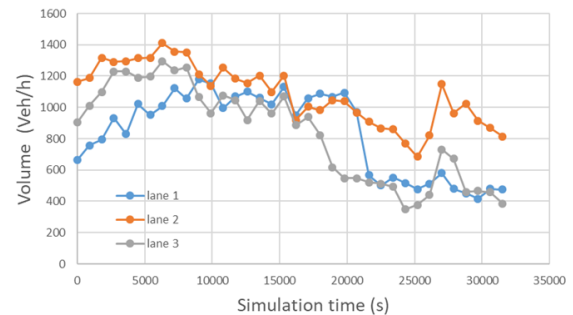


図2 発生交通量変化図

いて、観測データにフィットするシミュレーションを実行し、動的な交通状態の推定を行うシステムを構築する。

## 3. 大和サグの渋滞現象再現

### (1) 対象区間の概要

東名高速道路厚木IC・横浜町田IC間26.554KPから21.514KP (上り) の約500mを対象区間とする。また、道路構造、及びトラカン設置地点は図1の通りである。

感度分析及び交互作用分析を基にシミュレーション実施条件を設定した。①車種はすべて大型車 (重量分布・パワー分布の操作が可能とするため)。②重量分布は3000kgに固定。③パワー分布は20kWに固定。④①、②、③以外のパラメータはすべて小型車のデフォルト設定と同様に設定。⑤シミュレーション時間は2時間(7200秒)。⑥28.82KPのトラカンデータを基に交通量を設定 (5分毎に交通量を変化させる)。発生交通量については図2に示す。

### (2) 渋滞現象再現

サグ部における渋滞発生メカニズム<sup>4)</sup>より、①渋滞流の発生、②交通容量の低下、③上り坂での速度低下。④減速波の発生及び増幅の4項目を達成する必要があると考えた。そこで、Fundamental Diagram(以下FD)より①、②を、また車両軌跡より③、④を確認することにより、渋滞現象が発生しているかどうか、また実データと近い状況になっているかを判断する。

感度分析及び交互作用分析の結果を基に、本研究の対象区間である東名高速道路厚木IC・横浜町田IC間のサグ渋滞現象を再現した。再現方法としては、4(1)に示したシ

シミュレーション実施条件に加え、希望速度分布、加速度関数、追従挙動パラメータ、車線変更パラメータを調整することによって実データのFDに近似させる。対象区間内25.050KP地点のトラカンデータを実データとする。

**a) 希望速度分布**

感度分析<sup>9)</sup>より、運転挙動への影響が非常に大きいことが判明しているため、**Reduced Speed Areas**というパラメータを使用して、実データのトラカンデータを基に区間毎に希望速度分布を定義する。これにより、車両毎に割り当てられる希望速度とは別で、区間毎に定義した希望速度が走行時に適用される。定義した希望速度分布は表の通りである。

**b) 加速度関数**

感度分析及び交互作用分析より、上り坂における速度低下への影響が大きいことが判明したため、最大加速度関数を変化させてシミュレーションを実施した。その結果、最大値1.0m/s<sup>2</sup>の波型の関数が最適であることが判明した。最大加速度関数設定時の関数グラフを図3に示す。また、希望加速度関数については、最大加速度関数を適用しない場合は一定の希望加速度が適用されるようにするため、最大加速度を下回る0.5m/s<sup>2</sup>に設定する。希望加速度関数設定時の関数グラフを図4に示す。

**c) 追従挙動パラメータ**

車間距離を定義するCC0は、デフォルト設定では車両が車間を詰めすぎる様子が確認されたため、デフォルト値である1.5mから3.3mへと引き上げた。車頭間隔を定義するCC1は、CC0と同様に車間を詰めすぎることを防ぐため、0.9sから2.0sに引き上げた。また、前方車両との負の速度差を定義するCC5については、0.35から0.70に変更した。

**d) 車線変更パラメータ**

General behaviorについては、どの車線にも自由に車線変更可能なFree lane selectionモデルと、走行車線と追越車線を区別するSlow lane ruleモデルを選択可能となっている。本研究では、日本の高速道路事情に近いSlow lane ruleモデルに設定した。To slower lane if collision time is aboveについては、追越車線走行車線を行き来する車両が非常に多く確認されたため、デフォルト値の11秒から30秒に変更した。

これらの設定によりシミュレーションを実施した結果、実データのFD (図5, 図6) とシミュレーション結果から作成したFD (図7, 図8) より、臨界速度及び交通量の最大値を近づけることができた。また、車両軌跡からも上り坂付近から速度低下が発生していることが確認されている。

表1 区間毎・車線毎に定義した希望速度分布

		Lane		
		1	2	10
26.554 KP -	Average speed (km/h)	80.82	93.05	10
24.694 KP	standard deviation	8.39	6.66	
24.694 KP -	Average speed (km/h)	81.18	92.87	10
23.074 KP	standard deviation	6.94	6.66	
23.074 KP -	Average speed (km/h)	81.27	92.76	10
21.514 KP	standard deviation	6.95	6.66	

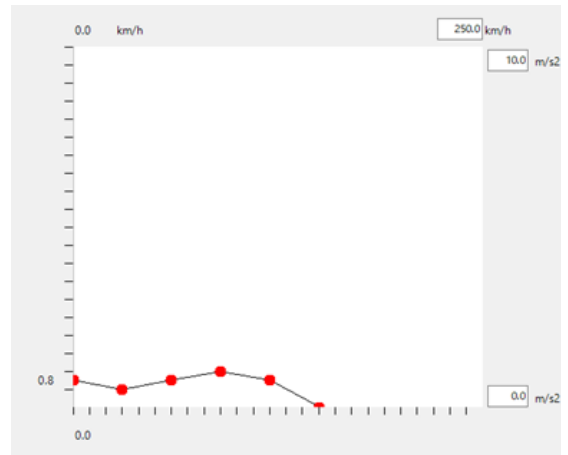


図3 最大加速度関数設定時の関数グラフ

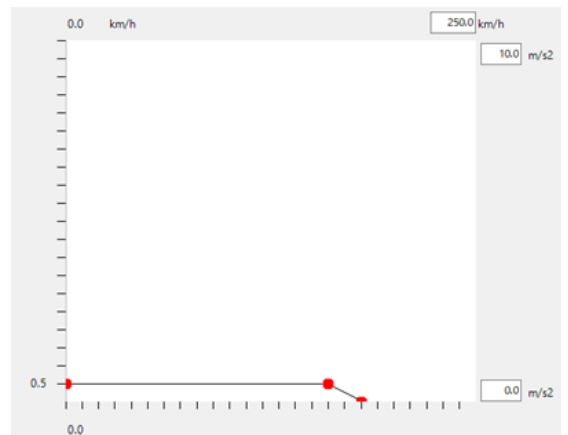


図4 希望加速度関数設定時の関数グラフ

**4. データ同化の方法と結果**

**(1) 分析方法**

最初にVissimにてGrand truth dataとなるシミュレーション結果を出力し、観測地点における単位時間毎に密度と平均速度を算出する。続いて、パラメータキャリブレーションとして、単位時間に区切ったシミュレーションを実行する。その際、単位時間毎に車両発生パターンを定義するランダムシードを複数回変動させ、Grand truth dataから算出された密度及び平均速度に最も近いランダ



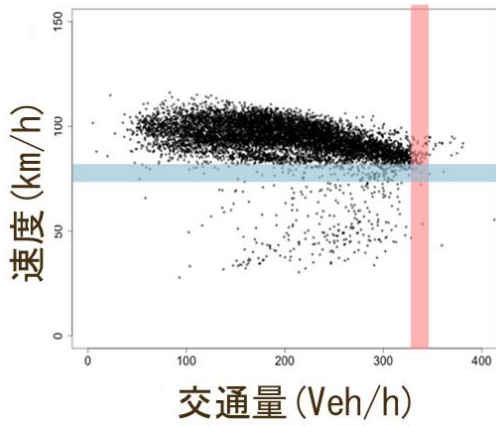


図5 実データのFD (全車線)

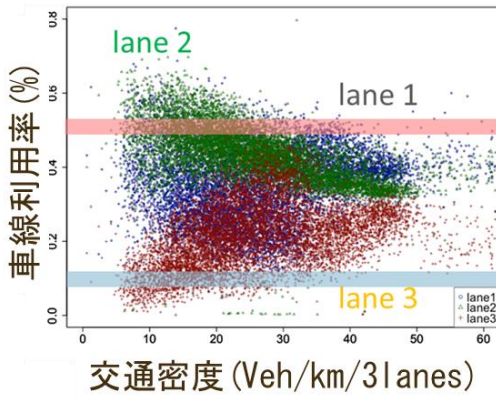


図6 実データのFD (車線毎)

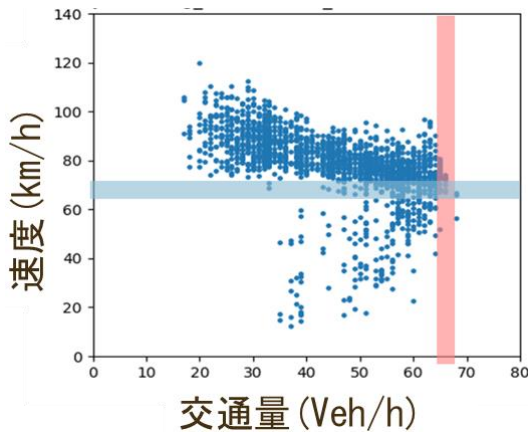


図7 シミュレーション結果のFD (全車線)

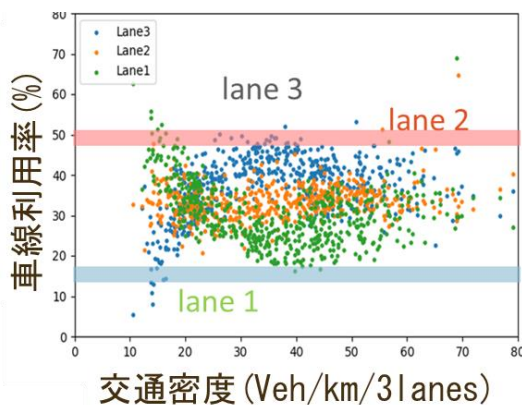


図8 シミュレーション結果のFD (車線毎)

ムシードを選択する。これにより、Grand truth dataを出力した際のシミュレーションに近いシミュレーションの実行を可能とする。具体的には、感度分析や交互作用分析の結果を基に、車両発生パターンを定義するランダムシードをTimestep毎に更新する。具体的な手順は以下の通りである。またフローチャートを図9に示す。

Step 1 Grand truth dataをVissimにて作成し、5分間を1TimestepとしてTimestep毎の平均速度 $V_G$ 及び平均密度 $K_G$ を式(1), (2)を用いて算出する。なお、2時間のシミュレーションとなっており、ランダムシードはシミュレーション全体を通して一定とする。

$$V_G = \frac{v_0 + v_1 + \dots + v_n}{n} \quad (1)$$

$$K_G = \frac{Q_G}{V_G} \quad (2)$$

$n$  : Grand truth dataのデータ数

$v_n$  : Grand truth dataの断面で観測された車両の走行速度

$Q_g$  : Grand truth dataの断面で観測された交通量

Step 2 乱数を  $r$  個生させ、Vissim で実行する 5 分間のシミュレーションに順番にランダムシードとして設定する。

Step 3 Grand truth data から算出した 1Timestep の平均速度 $V_G$ 及び平均密度 $K_G$ と、Step 2にて実行したシミュレーションから式(3), (4)を用いて算出した平均速度 $V_{S_i}$ 及び平均密度 $K_{S_i}$ をプロットして距離の近さを尤度 $L(S_i)$ とし、最も尤度の高いシミュレーション結果の実行時のランダムシードを抽出する。

$$V_{S_i} = \frac{v_0^i + v_1^i + \dots + v_{n_i}^i}{n_i} \quad (3)$$

$$K_{S_i} = \frac{Q_{S_i}}{V_{S_i}} \quad (4)$$

$$L(S_i) = \sqrt{(V_G - V_{S_i})^2 + (K_G - K_{S_i})^2} \quad (5)$$

$r$  : ランダムシード変更回数

$n_r$  : シミュレーション結果のデータ数

$v_{r_n}$  : シミュレーション結果の断面で観測された車両の走行速度

$Q_{S_r}$  : シミュレーション結果の断面で観測された交通量

Step 4 抽出されたランダムシード時のシミュレーションデータから最後の時刻の車両配列データを取得し、次のTimestep時の最初の車両配列として入力する。

Step 5 Step 2からStep 4を、全Timestep分繰り返す。

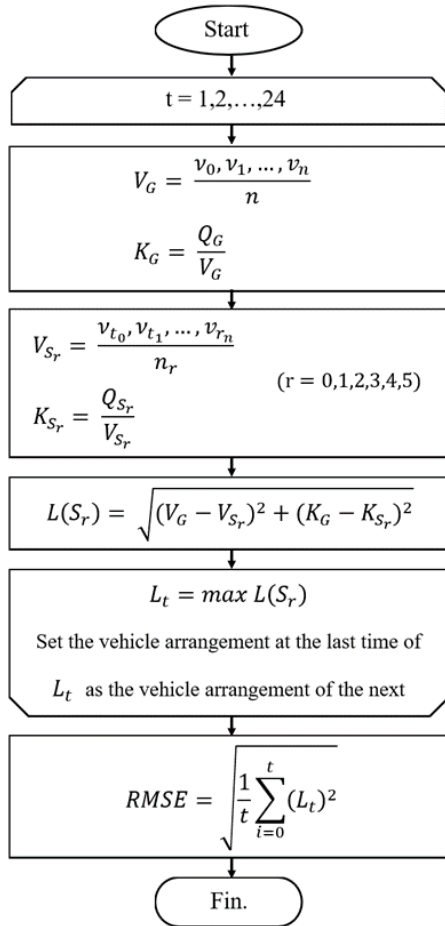


図9 データ同化のフローチャート

Step 6 各Timestep時の尤度が最も大きかったものを $L_t$ とし、RMSE(Root Mean Squared error)を計算する。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{i=0}^t (L_t)^2} \quad (6)$$

t : Timestepの数

全Timestepランダムシードを変更せずに実行した場合(A), また Timestep毎にランダムシードを選択した場合(B)のKV図(図10, 図11)と速度変化図(図12, 図13)について、Grand truth dataとシミュレーション結果を比較したものを示す。KV図より、(A)より(B)の方が速度及び密度共にGrand truth dataに近い結果が出ていることがわかる。Grand truth dataとデータ同化の結果の尤度を示すRMSEについても、(B)の方が値が小さくなっているため、同様のことがいえる。また、速度変化図より、シミュレーション終盤において、(A)の場合は速度低下するタイミングがGrand truth dataとデータ同化の結果で大きく異なることに対し、(B)の場合は比較的近いタイミングで速度低下していることがわかる。これより、全

Timestep通してランダムシードを一定とするシミュレーションと比較して、よりGrand truth dataに近いシミュレーションを実行することが可能となることが判明した。

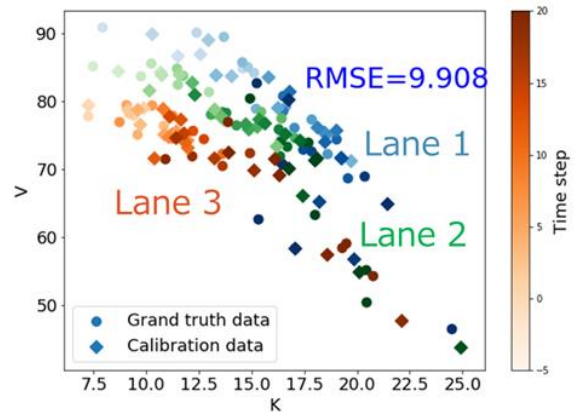


図10 全Timestepランダムシードを変更せずに実行した場合のKV図

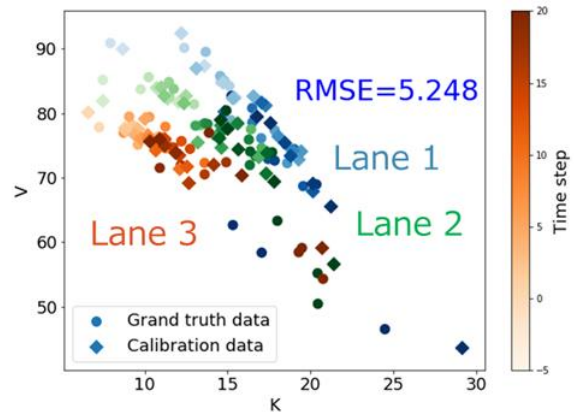


図11 Timestep毎にランダムシードを選択した場合のKV図

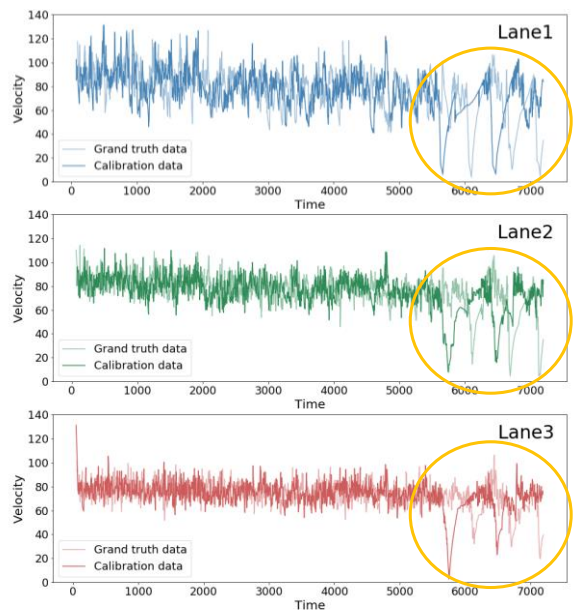


図12 全Timestepランダムシードを変更せずに実行した場合の速度変化図

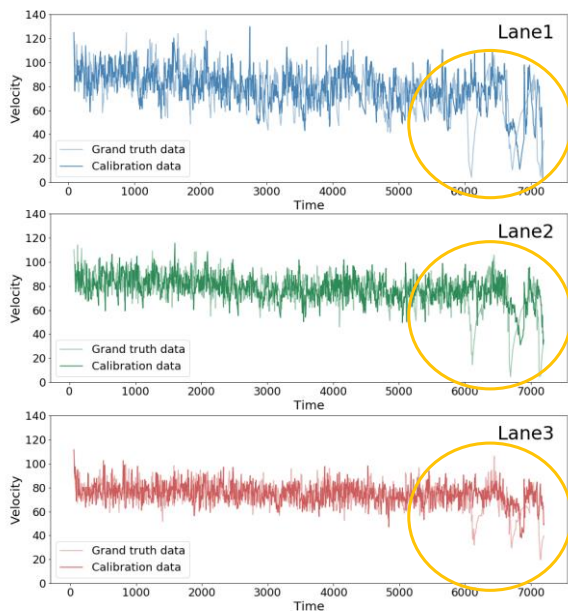


図13 Timestep毎にランダムシードを選択した場合の速度変化図

## 5. まとめ

本研究では、ミクロ交通流シミュレータVissimを用いて、運転挙動に影響を与えるパラメータの感度分析及び交互作用分析の結果を基に、それら制御することによって東名高速道路大和サグの渋滞現象を再現した。またその結果を用いて、車両発生パターンを定義するランダムシードをTimestep毎に選択する動的キャリブレーションシステムを構築した。感度分析及び交互作用分析の結果、希望速度分布が速度低下に大きく影響し、希望速度分布を調整した状態で加速度関数を変動させた場合、上り坂における運転挙動に影響を与えることが判明した。大和サグの渋滞現象再現では、観測されたトラカデータ

基に区間毎及び車線毎に希望速度分布を設定した上で、加速度関数及び運転挙動パラメータ、車線変更パラメータを調整した結果、トラカデータから作成したFDに近いFDを作成することができた。動的キャリブレーションシステムについては、ランダムシードを変更させてTimestep分シミュレーションを実行し、Grand truth dataを基に妥当なランダムシードを選択するシステムを構築した。その結果、ランダムシードを一定にした状態でシミュレーションを実行する場合と比較して、Timestep毎にランダムシードを選択する場合の方がよりGrand truth dataに近いシミュレーションを作成することが可能であることが判明した。今後は、運転挙動に影響するパラメータの動的キャリブレーションが可能となるようシステムを改良する。また、プローブデータを用いた車両軌跡等によるミクロレベルの評価を行うことで、より正確なGrand truth dataに近いシミュレーションを作成することを可能とするシステムの構築が必要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 塩見康博, 高嶋望都: データ同化を用いた高速道路サグ部における渋滞現象の分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), 73 巻 (2017) 5 号 p. I\_1073-I\_1082.
- 2) 福田大輔, 洪子涵, 岡本直久, 石田東生: 都市高速道路における交通状態推定問題およびセンサー配置問題に対するデータ同化アプローチ, 土木学会論文集 D3(土木計画学), 70 巻 (2014) 5 号 p. I\_1041-I\_1050.
- 3) 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田 亮: データ同化入門, pp. 1-8, 朝倉書店, 2011.
- 4) Jian Xing, 越正毅: 高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追従挙動の研究, 土木学会論文集, No.506/IV-26, pp.45-55, 1995.
- 5) 中井万理子, 塩見康博: ミクロ交通流シミュレータVISSIM による高速道路サグ部渋滞現象再現性の定性評価, 第 58 回土木計画学研究発表会研究講演集 CD-ROM, 2018.

## DYNAMIC CALIBRATION OF MICROSCOPIC TRAFFIC SIMULATION AT SAGS

Mariko NAKAI and Yasuhiro SHIOMI

In Japan, the economic loss due to traffic congestion is estimated to be 12 trillion yens a year. In fact, about 60% of the traffic congestion on intercity expressways is caused by sag. Active traffic management (ATM) is widely implemented as a freeway operation to mitigate such traffic congestion phenomena. Traffic state estimations and predictions are essential parts of an effective ATM. Conventional traffic state estimation with data assimilation is done at the macroscopic level. However, considering the coming era of autonomous and connected vehicles, it is essential to evolve the traffic state estimation from the macroscopic to microscopic level. In this manuscript, we extract key parameters and their appropriate ranges for the reproduction of the sag bottleneck phenomena by focusing on the micro traffic flow simulator, VISSIM. Using this information, we have developed a data assimilation system in which the microscopic-traffic simulator is dynamically calibrated with multiple data sources.