

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

高嶋 望都¹・塩見 康博²

¹学生員 立命館大学大学院 環境都市専攻環境社会工学コース (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
rv0029hh@kankyousystem.jp

²正会員 立命館大学准教授 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
shiomi@fc.ritsumeai.ac.jp

サグは下りから上りへ勾配が変化する構造的特徴を指し、日本の高速道路における交通渋滞の6割がこのサグ部で発生している。サグ部は交通容量が比較的小さくなることからボトルネックであることが分かっているが、車線が減るなど外的要因によるものではなくその詳細な渋滞発生メカニズムは未だ明らかにされていない。また、渋滞状況など交通状態の把握にはデータの質の面で車両検知器が長けているが、定点観測であるため空間的解像度が低い点が挙げられる。本研究では空間的欠損を補完するために、データ同化手法を用いて交通状態推定システムを構築する。さらに、このシステムにより観測出来ない交通容量の変動が可視化され、自由流と渋滞流で速度の低下するポイントが異なる可能性が示された。

Key Words : sags, data assimilation system, Extended Kalman Filter, Particle Filter, capacity drop

1. はじめに

高速道路における交通渋滞や交通事故は社会的・経済的にも大きな影響をもたらす。日本で頻発するサグ渋滞は、交通量が増し追い越し車線への偏り等によって形成される密で大きな車群がサグの上り勾配にさしかかった際、一部の車両が気づかぬ内に速度が低下し、その結果、後続車が次々にブレーキを踏むことにより発生している。サグは渋滞の先頭が溜まりやすい¹⁾特徴から、キープレフトの促しや車間自動制御システム、動的路肩運用や速度回復誘導灯など、刻々と変化する交通状態を把握し、動的なマネジメントを行うことが求められている。交通状態の把握は車両検知器データやビデオデータ、プローブデータ等を用いて行っており、特に車両検知器は常時データを収集出来る点からデータ量の面で長けている。しかし、車両検知器は定点設置であるため検知器間の区間の交通状況を適切に把握することができず、交通状態推定の精度は検知器の設置間隔に依存することとなる。本研究ではこの問題点を解決するために、データ同化を用いて観測システムと交通流モデルとを組み合わせた交通状態推定システムを構築し、非観測区間を的確に推定することが可能であるか検討する。また、この交通状態推定システムを用いてサグ部で発生した渋滞現象を交通流モデルパラメータの変動に着目し、分析を行う。

2. 交通状態推定システムの構築

交通流モデルにはブロック密度法を適用し、本研究ではこれに観測システムを同化させる。構築する交通状態推定システムの概要を図-1に示す。システム方程式、観測方程式はそれぞれ以下の通りに記述される。

$$x_t = f_t(x_{t-1}, v_t) \quad (2.1)$$

$$y_t = h_t(x_t) + w_t \quad (2.2)$$

x_t は t 時点における状態変数、 y_t は t 時点における観測データ、 v_t と w_t はそれぞれノイズである。

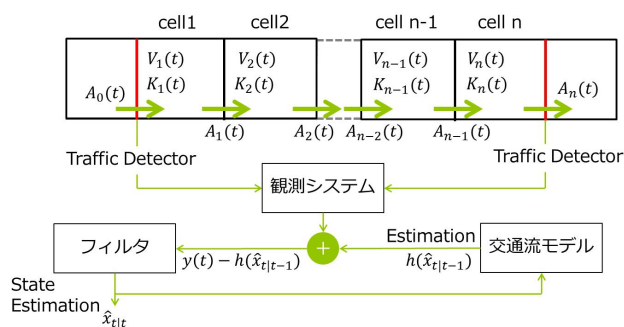


図-1 交通状態推定システムの概要

データ同化にはいくつか手法があり、先行研究²⁾³⁾では拡張カルマンフィルタ（以下EKF）が用いられている。EKFは非線形なシステムモデル、および観測モデルを近似的に線形化する手法であり、自由流から渋滞流への遷移過程など非線形な事象に対する推定精度に限界があると考えられる。そこで本研究では非線形モデルに直接的に対応出来るパーティクルフィルタ（以下PF）を用いる。双方でシステムの構築を行い、非観測区間の推定精度をEKFとPFとで比較する。

(1) EKF

ここではEKFとブロック密度法を用いた交通状態推定システムについて概説する。ブロック数を n_b 個とするとセル i の変数は交通密度 K_i 、空間平均速度 V_i であり、境界条件は最上流流入量 A_1 ・最上流走行速度 V_1 ・最下流速度 V_{nb} ・最下流流出量 A_{nb+1} である。状態空間モデルの基礎式(2.1), (2.2)よりシステム変数を x 、観測変数を y としたが、システム変数はセル内密度・セル内走行速度・臨界交通密度・自由流走行速度・セル間移動交通量と設定する。また、観測変数は最上流走行速度・最下流速度・最上流流入量・最下流流出量である。

さらに、システム変数に対応して、システムノイズ v_i と観測ノイズ w_i を設定する。ノイズは各セル間の移動で発生するものとし、これらによって分散共分散行列 Q_i が生成される。なお、システムモデルの関数 f はブロック密度法による密度の更新過程を表す。観測モデルの h_i は全システム変数から観測変数を抽出する演算子を表す。

(2) PF

次に、PFとブロック密度法を用いた交通状態推定システムについて説明する。具体的な計算フローチャートを図-2に示す。また図中各stepの所作について以下に記述する。なお、フローチャート中、 t はタイムステップ数を表し、 $1 \leq t \leq T$ とする。また、推定に用いる粒子の番号を i で表し、その総数を N [個]とする。

step1 粒子の設定を行う。粒子を表すベクトル \mathbf{p}_i は、システムモデルのパラメータであるブロック毎の自由流速度 V_f と臨界交通密度 K_c により構成されるとする。ただし、 n_b はブロック数を表す。

step2 パラメータの初期分布の設定を表す。RND は平均 μ 、標準偏差 σ の正規分布に従う乱数を発生させる関数を表す。

step3 step3~step7 は各粒子に対する PF の具体的な操作を示す。まず、step3 では一期先予測を行い、各粒子に対するシミュレーションによる結果の算出を表す。ここでシステムモデルの関数 f は EKF 同様ブロック密度法を表すものとする。 x_{t+1}^i は粒子 i の

$t+1$ の時の状態変数であり、それは t の時の状態変数と粒子 i のもつパラメータによって決定する。

step4 step4 以降はフィルタの操作を表す。ここでは対数尤度の計算を行う。尤度 λ_i は step3 の推測値と観測値の残差 \mathbf{z} に関わる多変量正規分布にて決定する。ただし、多変量正規分布の平均は0、標準偏差は任意に設定する。 n_o は観測値が与えられているブロックの数を示す。

step5 尤度計算によってランク付けされた粒子にそれぞれ重みを持たせる。 w_i は粒子 i の重みを示し、 w_i は i に与えられた尤度 λ_i と最大値をとる尤度 λ_{max} との差を用いて表す。また、 w_i から w_N の合計値が1となるように標準化を行う。

step6 更新パラメータの代表値 \hat{p}_i^{t+1} を決定し、その値を出力する。

step7 粒子のリサンプリングを行う。復元抽出回数は粒子数と同じである。 $U[\alpha, \beta]$ は α から β の間で一様乱数を発生させる関数であり、(a)では0~1の一様な乱数を発生させることを意味する。 k_i を i 番目の乱数に対応する粒子番号とすると、0~1の間に並べられた幅の違う w_i から w_N と乱数とを見比べ、その乱数がどの粒子に当てはまるのか見つける操作が(b)である。さらに、(c)では特定された少数の粒子だけが選ばれ続け、システムが退化するのを防ぐため、リサンプリング後に一様乱数による微少攪乱 $\Delta\epsilon$ を与える。

3. 分析対象データとシミュレーションの設定

本研究では、阪神高速道路3号神戸線上りの2車線のパルスデータ10秒間集計値を用いる。対象とする区間は、慢性的な渋滞が発生するサグ部を含む。図-3は路面計画高と縦断線形、車両検知器の設置個所を示す。20.9kp付近に流出口があることから、サグ部のみを対象とするため区間を20.4kp~19.0kpに限った。図-4は対象区間内にある4つの車両検知器より得られた時間占有率と平均速度の関係を表す。上流側のサグ底から上り勾配にかけてである20.4kpと19.9kpで渋滞発生が確認できる。これらの条件と、ブロック密度法は道路を分割しブロック毎に交通状態を推定するモデルであることから、最大速度を100km/hとし、シミュレーションのタイムステップを10秒、対象区間をブロック長280mの5つのブロックに分割している。データは2015年7月6日から12日の7日間を使用し、パラメータは臨界密度(K_c)と自由流速度(V_f)とし、(3.1)をFundamental Diagramの式とする。なお、分析は渋滞発生直前直後の1時間(360 Time Steps)とする。

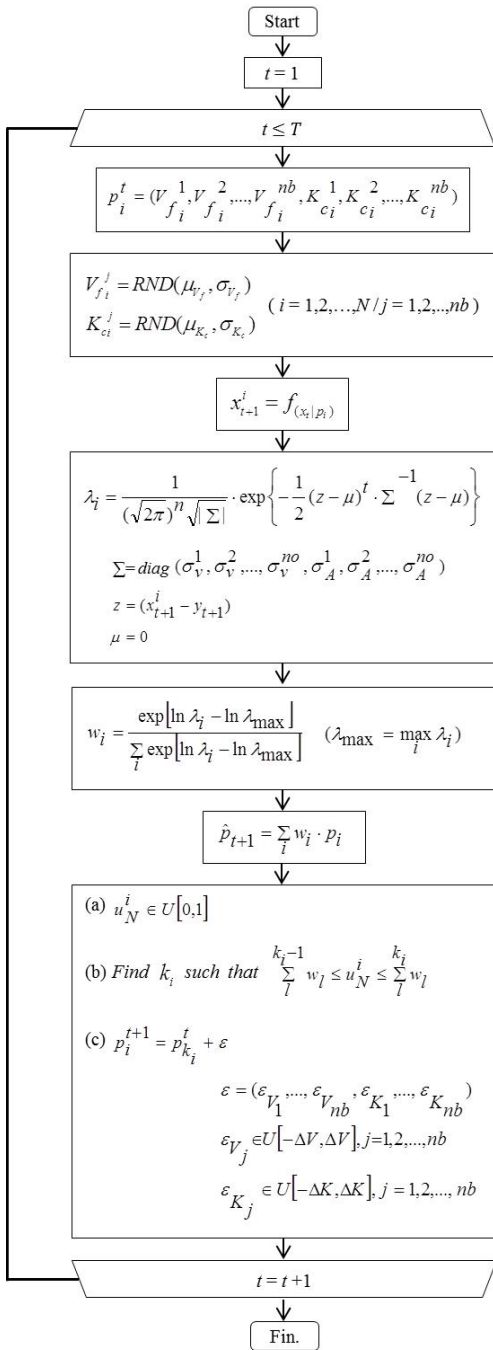


図-2 PFのフロー図

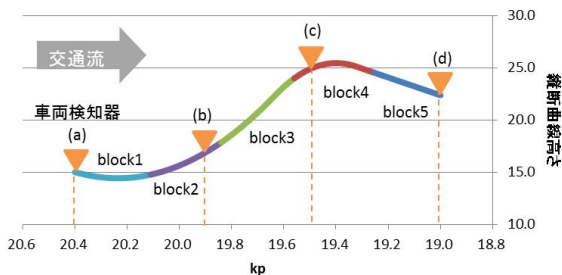


図-3 対象区間の計画高とブロック分け

$$V = V_f * \exp\left(-\frac{1}{2} * \left(\frac{K}{K_c}\right)^2\right) \quad (3.1)$$

また、表-1、表-2に対象区間におけるEKF, PF双方のパラメータの設定を示す。ノイズは経験的に決定し、推定値と観測値の速度と交通量を比較し調節した。

step1

step2

step3

step4

step5

step6

step7

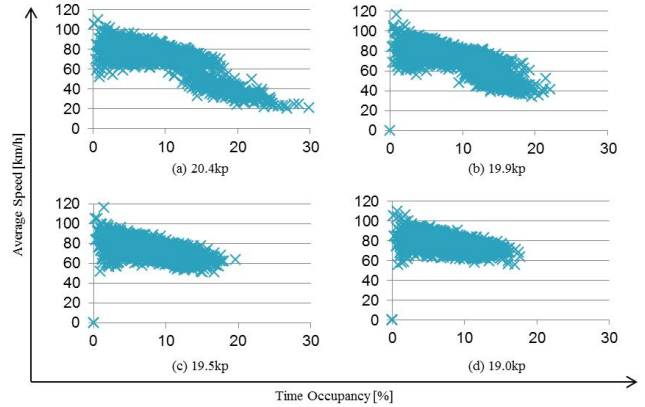


図-4 地点別の平均速度と時間所有率の関係

表-1 EKFのノイズの設定

EKF	
システムノイズ	観測ノイズ
交通密度	流入交通量
0 [veh/km]	1 [veh]
走行速度	流入走行速度
0 [km/h]	1.38 [km/h]
臨界交通密度	流出交通量
0.003 [veh/km]	1 [veh]
自由流速度	流出走行速度
0.3 [km/h]	1.38 [km/h]
セル間移動交通量	
0.08 [veh]	

表-2 PFのノイズの設定

PF	
システムノイズ	観測ノイズ
粒子数 N	流入交通量
1000 [個]	5 [veh]
微少攪乱幅 $\Delta \epsilon$	流入走行速度
± 2.5	20 [km/h]
臨界交通密度	流出交通量
7 [veh/km]	5 [veh]
自由流速度	流出走行速度
5 [km/h]	20 [km/h]

4. EKFとPFの比較結果

交通状態推定システムの精度を検証するため、図-3中の(a)と(d)の車両検知器による観測データを用いてデータ同化を行い、サグの上り勾配に当たる(b)の観測値とEKF・PFの推定値を比較する。データは7月7日～12日の6日分のデータを用い、図-5に断面通貨交通量の観測値と推定値の時系列比較を、図-6に各観測日のRMSE値を示す。

図-5をみると、EKFでは推定値に大きな乱れが見られる一方、PFは比較的なめらかに、かつ的確に観測値の傾向を追うことが出来ている。この乱れはEKFの逆行列の計算をする際に行ったコレスキー分解に起因するものだと考えられるが、自由流から渋滞流へ移る非線形な事象の計算には不可欠であり、EKFの限界であると言える。他の観測日でも同様の結果が得られ、図-6よりPFの方が高精度に断面通過交通量の推定がなされている事が読み取れる。なお、7月12日に関しては日曜日であり、渋滞は発生していなかった。

坂にあたり、block2と3の間にボトルネックが存在することが読み取れる。また、渋滞の始まるの部分を見ると、減速波が確認される。一方自由流時に注目すると、block3のあたりで速度がやや落ちている事が読み取れる。この事から、サグ渋滞の先頭となるポイントが渋滞発生前後で異なることがわかる。

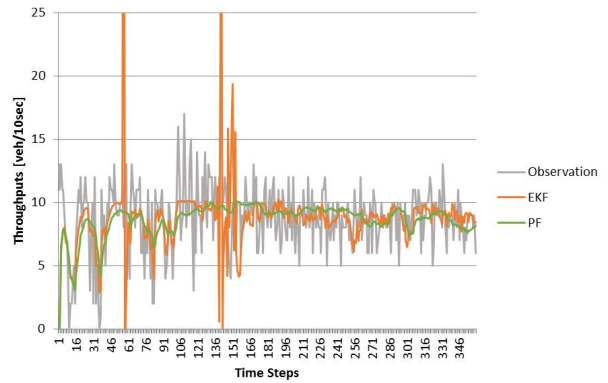


図-5 (b)における推定値と観測値の時系列比較(7月10日)

5. サグ部における渋滞現象の分析

(1) 推定値による分析

図-3の全検知器データとパーティクルフィルタを用いて渋滞発生前後の交通状況の変動傾向を分析する。まず、推定された密度と速度のコンター図から、ブロック毎の変動をみる。図-7、図-8はサグの渋滞時の状況を表しており、密度が高く、速度が遅くなるにつれて赤色に変化している。block1がサグ底、block2とblock3がサグの上り

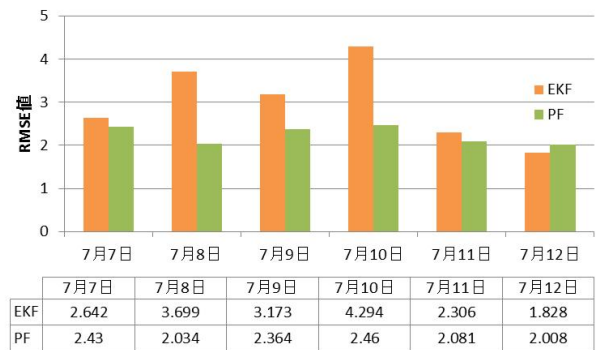


図-6 RMSE値の比較

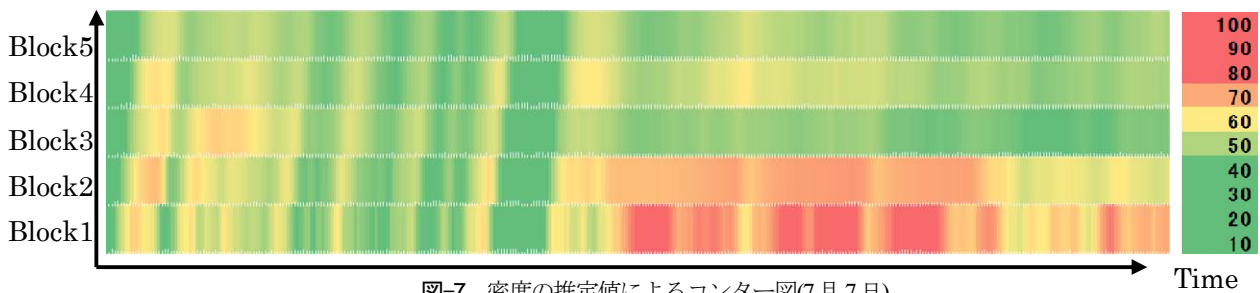


図-7 密度の推定値によるコンター図(7月7日)

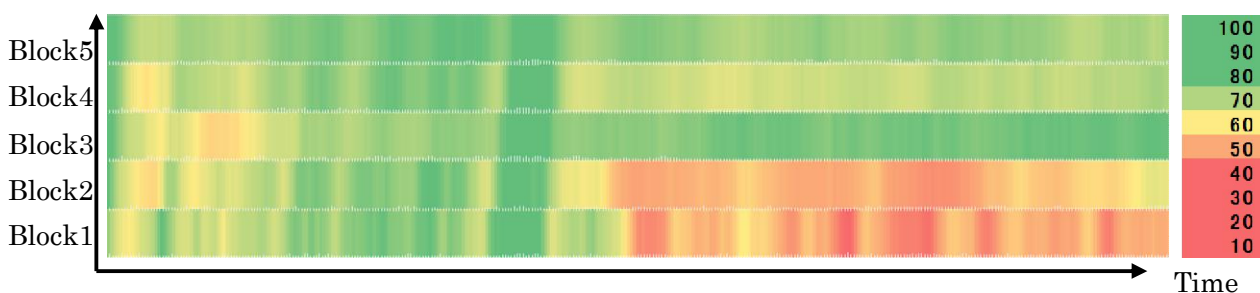


図-8 速度の推定値によるコンター図(7月7日)

(2) 交通容量による分析

図-9, 図-10にモデル内部のパラメータである臨界密度(K_c)と自由流速度(V_f)のブロック毎の推移を示す. 各ブロックの色は図-3と対応しており, 破線を境に速度が落ち, 渋滞が発生している. 自由流時の各ブロックのパラメータの値に大きな変動は見られないが, 渋滞すると特に臨界密度と自由流速度に共通して, block1, block2に特異な動きが見られる.

図-11はパラメータと(3.1)から算出した交通容量 $Q_c (= K_c V_f)$ のブロック毎の推移である. 図-11より渋滞が発生すると, 交通容量が低下するCapacity Drop⁴⁾が発生していることが分かる. 渋滞前はblock3が最も低い交通容量を示すが, 渋滞後にはblock2, block1へとボトルネックが遷移していることが読み取れる. この現象は(1)のサグ渋滞の先頭位置が自由流と渋滞流とで異なる事を裏付ける結果であり, 以上の事より, 渋滞発生前では上り勾配部の円滑化, 渋滞発生後はサグ底から上り勾配にさしかかる区間での円滑化を図ることが重要であると考えられる.

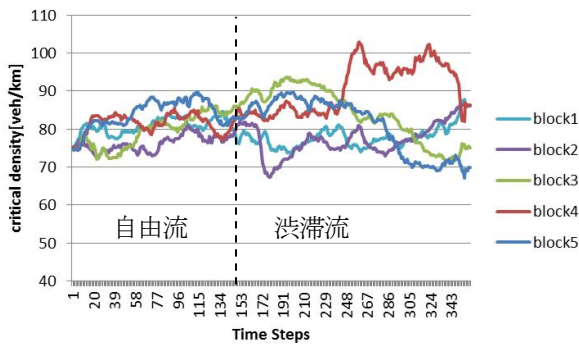


図-9 ブロック毎の臨界交通密度の時間推移(7月7日)

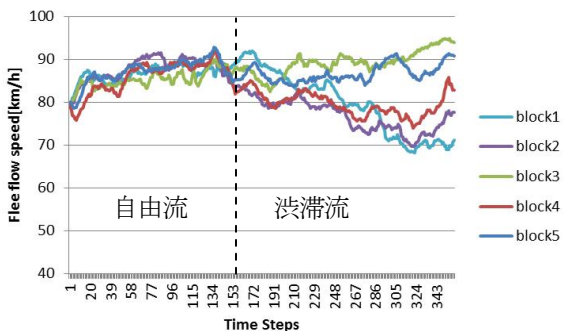


図-10 ブロック毎の自由流速度の時間推移(7月7日)

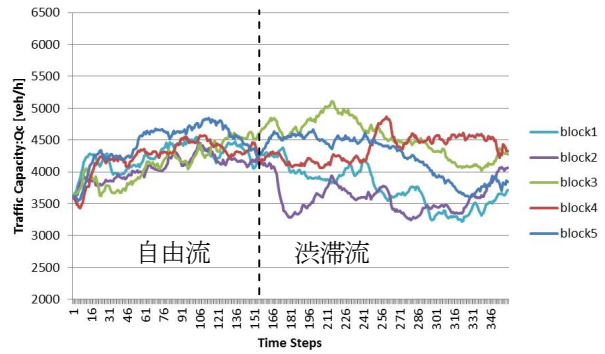


図-11 ブロック毎の交通容量の時間推移(7月7日)

6. おわりに

本研究では, PF を用いて非線形にも対応出来るシステムを構築した. また, パラメータの動きを追う事で観測データでは測れない交通容量の変動が可視化された. その結果, 自由流時に速度が低下するポイントと渋滞の先頭となるポイントが異なる可能性が示され, 渋滞発生前・発生後で対策を講じる区間を変更するなど, きめ細かな対策が必要である可能性が示唆された. 今後は対象区間を拡大し, かつ車線や車種などの影響を考慮する事で, より実際に近い交通流を推定するシステムを構築する必要がある.

謝辞

本研究を実施するにあたり, 阪神高速道路(株), 阪神高速技研(株), (株)地域未来研究所よりデータを提供いただくなど, 多大な協力を賜りました. ここに記して謝意を表します. また, 本研究成果の一部はJSPS科研費16H04433の助成を受けたものです.

参考文献

- 1) Jing Xingら: 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, 土木学論文集, No.506, IV-26, 45-55, 1995
- 2) 藤井ら: フィードバック型交通状態推定手法の事故発生状況分析への適用可能性, 土木学会論文集D3 (土木計画学), 70(5), I_1067-I_1076, 2014
- 3) Wang and Papageorgiouら:
- 4) Anupamら: Empirical observations of capacity drop in freeway merges with ramp control and integration in a first-order model, Transportation Research Part C, Vol. 30, pp.161-177, 2013

(2016. 7. 30 受付)

MONITORING TRAFFIC FLOW DYNAMICS AT SAGS : DATA ASSIMILATION APPROACH

Moto TAKASHIMA and Yasuhiro SHIOMI

Sags are one of freeway geometric features where the gradient changes from downgrade to upgrade. As the sequential gradient change causes speed disturbances in traffic flow, traffic capacities at sags become lower than flat sections. Statistics reported that more than 60 % of traffic congestion occurred on freeway networks in Japan were caused by sags. Considerable scientific attention has been paid on the bottleneck phenomena at sags during the last three decades both from microscopic aspect and macroscopic aspect. However, the detailed bottleneck mechanisms at sags are still uncovered. We developed a data assimilation system combining online-observations and model simulations, to grasp the traffic dynamics towards the congestion queue formation process at sags by estimating the unobservable parameters in traffic flow models. In the system, it is assumed that individual vehicle data is collected by online at a certain distance along the target section. The objectives of the paper are two-fold. First, we evaluate the performance of a Particle Filter by comparing the estimated throughputs and the observations, which are not used for the filtering process. Then the time-series variations of fundamental diagrams on each cell before and after the traffic breakdown at sags are investigated. This study shows that data assimilation system has a characteristic to renew parameters one by one. Therefore, the variation of traffic capacity is made visible; the result is considered possibility that the point of dropping speed in the free flow and the point at the head of traffic congestion are different.