

Particle Filterを用いた 車種別交通状態推定とその応用

高嶋 望都¹・塩見 康博²

¹非会員 元・立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻

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.ritsumeji.ac.jp

一般に車両感知器では交通量・走行速度に加え、車高や車長を計測することにより車種を特定することができる。加えて、近年、大型商用車を中心としたプローブデータの利用可能性が高まりつつある。一方、交通流中では、車種によって加減速性能などの走行特性が異なる。そのため、特定の車種から収集されたプローブデータを用いて交通状態を推定する場合には、その結果にバイアスが生じる可能性がある。本研究では、マルチクラス化したマクロ交通流モデルと定点観測データ・プローブデータを統合的に用い、パーティクルフィルタによってモデル内の内生変数を動的に特定し、交通状態を推定するデータ同化システムを構築する。サグ部での渋滞発生時の交通状態の変動特性など、車種によって特性の異なる事象に対する本システムの適用可能性について検討する。

Key Words : *particle filter, multiclass traffic flow, data assimilation, probe data, sag*

1. はじめに

高速道路では車両感知器によりリアルタイムでデータが取得されており、また、交通流の理論体系化・モデル化も一定程度確立され、その計算手法も種々提案されている。また、交通流をマネジメントするためには、交通流のデータ収集・状態推定・予測を通して、動的に施策を展開し、交通流を望ましい状態に可能な範囲で維持することが求められている。そのため、交通流の状態推定は交通分野においてデータ同化を適用する事例としてふさわしいといえよう。

オンラインで収集されるデータの種類と質が多様化し、その量も増加してくる中で、各データをオンラインで統合的に活用するニーズは少なくない。そのような中で、膨大に蓄積されたデータに基づき、AIを活用して予測を行う手法も多く開発されつつある¹⁾。しかしながら、道路事業者は、予測結果に対してアカウントビリティを負うことを考慮すると、一定の合理性をもつ交通流理論に依拠するデータ同化は、その点に関して優位性をもつものと考えられる。

交通流モデルとオンラインデータを用いた交通状態推定を行う取り組みはCremer and Keller²⁾を嚆矢として多数展開されている。2000年代前半までの研究レビューは中辻³⁾に詳しく、その後の展開については高嶋・塩見⁴⁾に整理されている。研究の動向としては、1) システムモデルとして何をを使うか、2) 活用できるデータには何があるか、3) どのフィルタアルゴリズムを適用するか、4) データ同化を適用する目的は何か、という4つの軸でおおむね分

類できる。その上で、計算リソースに応じてデータ同化の規模が規定されることとなる。

本研究では、先行研究で活用したCTMで計算するマクロ交通流モデルとParticle Filterによるデータ同化システムをベースに、システムモデルであるマクロ交通流モデルを多車種化(マルチクラス化)することを試みる。ここで、マルチクラス化することの狙いは以下の通りである。

- 1) 高速道路に設置された車両感知器では多くの場合、車種の識別が可能であるため、取得されたデータのレベルを落とすことなく利活用できること
- 2) 小型車と大型車、また将来的には自動走行車両など、車種によって挙動特性の異なる車種が混在した状況において、車種別の状態推定が可能であること
- 3) 大型商用車など特定の車種から収集されたプローブデータを活用することを想定すると、システムモデルがマルチクラスに対応していない場合には、交通状態推定の結果にバイアスが生じること

本稿では、マルチクラス化したデータ同化システムの適用事例として、高速道路単路区間サグ部における車種毎の渋滞発生状況の分析し、そのメカニズムについて考察を行う。

論文の構成は以下の通りである。まず、第1章では、本研究の背景、既往研究の概観、および目的について述べた。つづく第2章ではデータ同化システムについて概説する。その中で、システム方程式に相当するマルチクラスマクロ交通流モデル、および想定する観測システムの概要について述べる。第3章で使用されるデータの概要

を述べた後、第4章にてデータ同化システムの設定を述べ、第5章で適用事例として高速道路単路区間サグ部における渋滞発生状況の分析を行う。最後に本研究の結論を述べるとともに、提案するマルチクラスのデータ同化システムの今後の展望を示す。

2. データ同化システムの概要

本章では、本研究で構築する交通状態推定システムの概要を述べる。データ同化システムは交通流モデルに相当するシステムモデル (式(1)) とオンラインデータ収集に相当する観測システム (式(2)) により構成される。

$$\mathbf{x}_t = f_t(\mathbf{x}_{t-1}) + \boldsymbol{\xi}_{t-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_t = h_t(\mathbf{x}_t) + \boldsymbol{\Psi}_t \quad (2)$$

\mathbf{x}_t は t 時点における状態変数ベクトル、 \mathbf{y}_t は t 時点における観測データ、 $\boldsymbol{\xi}_t$ と $\boldsymbol{\Psi}_t$ はそれぞれノイズを表す。

高速道路単路部の交通流を表現するマクロ交通流モデルを適用するにあたり、対象区間はいくつかのセルに分割され、車種 i ・セル j 毎に時刻 t の平均走行速度 $V_j^i(t)$ 、密度 $K_j^i(t)$ 、自由走行速度 $v_{fj}^i(t)$ 、および臨界密度 $k_{cj}^i(t)$ 、セルからの流入・流出交通量 $A_j^i(t)$ を状態変数として定義する (図-1参照)。以下、システムモデル、観測モデル、およびデータ同化アルゴリズムとして採用する Particle Filter の概要を説明する。

(1) システムモデル

システムモデルとして、van Hans et al.⁵⁾によるFastlaneを用いる。Fastlaneは1次のマクロ交通流モデルをマルチクラス化し、セルベースで交通流のダイナミクスを計算するものである。大型車換算係数を固定値ではなく、交通状態に応じて合理的に決定する点にその特徴がある。モデル中、Fundamental Diagramを車種毎に式(3)の通り定義し、交通量保存則も式(4)に示すように車種毎に記述される。なお、式(3)および式(4)では表現を明確にするため、セル番号を表す添え字 j は省略している。

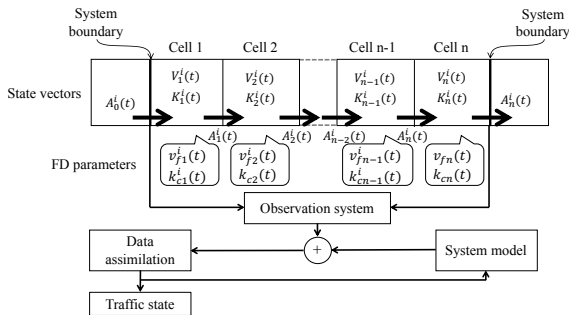


図-1 本研究で構築するデータ同化システムの概要

$$V^i = g(K^i | v_f^i, k_c) \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q^i}{\partial x} + \frac{\partial K^i}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

ただし、 $g(\cdot)$ は任意の単調減少関数である。交通量保存則は全車種の線形和をとっても成立する。

Godunov Schemeを適用して式(4)の近似解を計算する際には、合成密度の概念を用い、式(5)の通りに合成密度 $K(t)$ を定義する。

$$K(t) = K^0(t) + \sum_i \eta^i(t) \cdot K^i(t) \quad (5)$$

ここで、 $K^0(t)$ は基準とする車種(乗用車)の密度、 $\eta^i(t)$ はタイムステップ t における車種 i の乗用車換算係数を表す。通常、乗用車換算係数は固定値を用いることが多いが、Fastlaneでは、車長のインパクトは密度が小さいときほど大きくなることを考慮し、交通状態に応じて動的に変動するものとして扱っている。具体的には、式(6)で定義する。

$$\eta^i(t) = \frac{L^i + T^i \cdot V^i(t)}{L^0 + T^0 \cdot V^0(t)} \quad (6)$$

ただし、 L^i は車種 i の車長、 T^i は車種 i の最小車頭時間を表す。

車種別のセル間の移動量はIT principle⁶⁾により算定する。すなわち、セル j からの車種 i の移動希望台数を $d_j^i(t)$ 、およびセル $j+1$ の乗用車換算の受け入れ可能台数を $s_{j+1}(t)$ としたとき、セル j からセル $j+1$ に移動する車種 i の台数 $A_{j,j+1}^i(t)$ は、

$$A_{j,j+1}^i(t) = \frac{1}{\eta_j^i(t)} \cdot \min(d_j^i(t), \rho_{j+1}^i(t) \cdot s_{j+1}(t)) \quad (7)$$

と記述される。ここで、

$$d_j^i(t) = \begin{cases} \eta_j^i(t) \cdot K_j^i(t) \cdot V_j^i(t) \cdot dx, & K_j(t) < k_{cj} \\ \eta_{ij}(t) \cdot q_{cj}^i \cdot dt, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$s_j(t) = \begin{cases} \eta_{ij}(t) \cdot q_{cj}^i \cdot dt, & K_j(t) < k_{cj} \\ \eta_j^i(t) \cdot K_j^i(t) \cdot V_j^i(t) \cdot dx, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

である。ただし、 q_{cj}^i は車種 i のセル j における交通容量である。また、 $\rho_j^i(t)$ は受け入れ可能量の車種毎の割合を表し、

$$\rho_j^i(t) = \frac{K_j^i(t)}{K_j(t)} \quad (10)$$

と記述される。

(2) 観測モデル

観測モデルとしては、現実的な高速道路のデータ収集状況を反映したものとする。すなわち、一定間隔に設置された車両感知器により断面交通量と時間平均速度が観測され、特定の車種（主に大型車）の一部よりプローブデータが収集されている状況を想定する。

(3) データ同化アルゴリズム

本研究では、先行研究⁴⁾において、拡張カルマンフィルタとの比較で、渋滞発生時にも交通状態推定の精度の高いことが示されたParticle Filterをデータ同化アルゴリズムとして採用する。Particle Filterは、各パラメータの分布を多数の粒子で近似して表現するため、任意の分布形を想定可能であり、非線形なモデルへの適用に優れている。十分な量の粒子数を確保し、粒子の退化現象に注意すれば、柔軟に、モデルを観測データに同化することが可能である。具体的な計算過程を以下のまとめる。

- Step 1: 状態変数の初期値を設定し、正規乱数により各粒子の値を決定する。
- Step 2: 各粒子の値をモデルの状態変数として設定した状況で、1タイムスキャン後の予測結果をシミュレートする。
- Step 3: 観測モデルに従い、シミュレーション結果と観測データから粒子*i*の尤度 λ_i を決定する。尤度の算出に当たっては、観測データの誤差分布として対数正規分布を仮定する。
- Step 4: 計算された尤度に基づき、粒子*i*のウェイト w_i を式(11)により算出する。また、

$$w_i = \frac{\exp[\ln \lambda_i - \ln \lambda_{\max}]}{\sum_j \exp[\ln \lambda_j - \ln \lambda_{\max}]} \quad (11)$$

ただし、

$$\lambda_{\max} = \max_i \lambda_i \quad (12)$$

を表す。また、各粒子のウェイトで重み付けした平均値を状態変数の推定値としてアウトプットする。

- Step 5: 各粒子のウェイトに従って、新しい粒子のリサンプリングを行う。
- Step 6: 各粒子に正規乱数を付与し、タイムステップを更新し、Step 2にもどる。

3. データ概要

本研究では、阪神高速道路3号神戸線上り線の21.0kp～19.0kpの区間を対象とする。当該区間はオン/オフランプのない片側2車線の単路部であり、20.4kp～19.9kpにかけて存在する深江サグの影響で渋滞が頻発する。図-2に

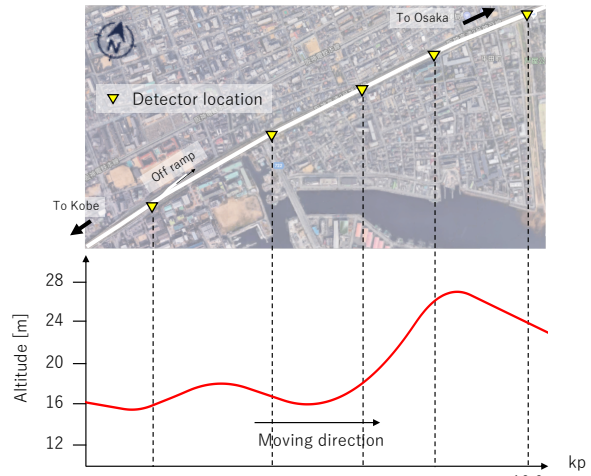


図-2 対象区間の概要図

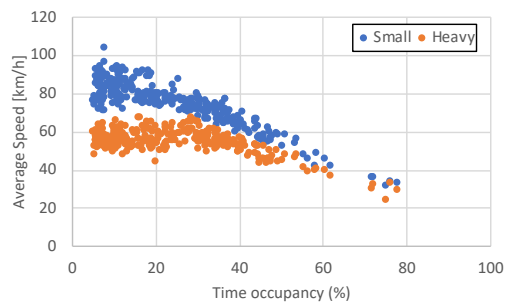


図-3 車種別の時間オキュパンシーと平均走行速度の関係

対象区間の概要図、路面高、車両検知器の設置状況を示す。車両検知器はシングルヘッドの超音波式であり、車線ごとに個別車両の到着時刻と時間オキュパンシーが計測されている。また、超音波の検知時刻のずれから、車高2.3m未満の車両を小型車、それ以上の車両を大型車として区別可能である。加えて、小型車・大型車の車長を仮定することで、誤差は大きいものの個別車両速度も計測することができる。

車両検知器データに加えて、本システムでは商用車プローブデータも融合的に活用する。当該データは阪神高速道路を利用する全車両のうち、およそ0.5%程度の車両から得られるGPSデータであり、設置車両はほぼ大型車に限られている。GPS点列は1秒間隔で取得されており、緯度・経度に加えて走行速度などのデータも併せて収集されている。

車両検知器による個別車両データ、および商用車プローブデータは2016年6月6日～30日にかけて収集された。そのうち、本研究では、降雨のない平日であり、速度回復誘導灯が運用されておらず、かつ、深江サグをボトルネックとする渋滞が発生した2016年6月30日（木）に収集されたデータを用いる。

図-3にはデータ収集期間中に観測された小型車、大型車別の時間オキュパンシーと5分間平均走行速度の関係を示す。ただし、時間オキュパンシーは小型車と大型車

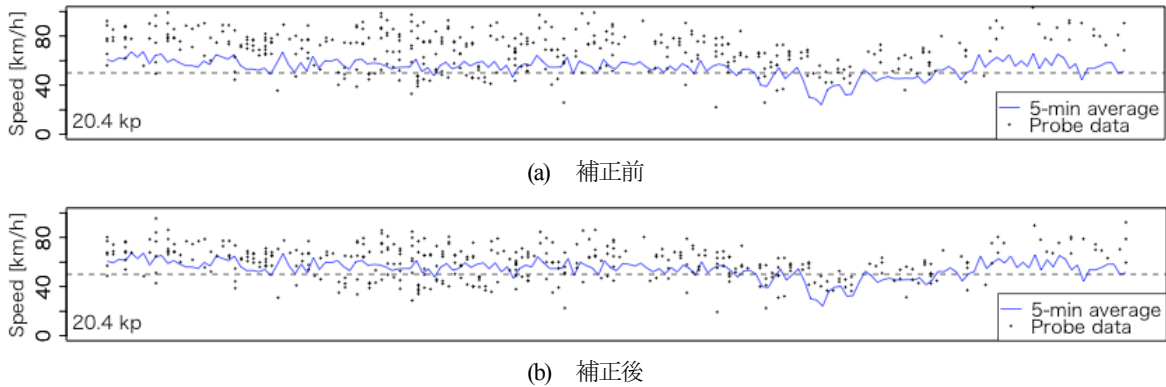


図-4 車両検知器データとプローブデータの観測値（速度）の比較

の合計値を用いており、速度の算出にあたっては小型車・大型車の車長をそれぞれ4.97m、および8.2mと仮定した。これより、車種による速度レベルの差は明確であり、とりわけ自由流領域で小型車の速度が大型車の速度と比較して大きく、時間オキュパンシーが大きくなるにつれて自由に走行できない状況となり、速度差が小さくなる傾向にあることが分かる。

当該区間20.4kp地点におけるプローブデータと車両検知器から収集された大型車の5分間平均走行速度を図-4に示す。(a)補正前をみると、全体的にプローブデータの方が車両検知器データより高めの速度になっていることが分かる。これは、プローブ機器搭載車両が他の大型車と比べて全体的に高い速度で走行する傾向にある可能性がある。しかしながら、とりわけ平均速度が低い混雑した状況で顕著であることを考えるとそのようなバイアスが生じることは考えにくい。そのため、車両検知器から走行速度を算出する際に仮定した車長が実際と整合していない可能性が指摘される。本来は当該区間を走行する大型車の車長の平均値を計測し、それに基づいて車両検知器による速度データを補正して分析に用いるのが望ましい。しかしながら、車長を計測するのは簡単ではないため、プローブデータの平均値が概ね車両検知器による観測値に一致するよう補正を行った。その結果を図-4(b)に示す。なお、このような補正を行っても、以降の分析に関してはその結果に不整合が生じることはない。

4. データ同化システムの設定

(1) システムモデルの設定

分析にあたっては渋滞発生の前後30分間の1時間を対象とする。21.1kpのオフランプ、および車両検知器の配置を考慮し、20.4kp地点から19.0kp地点までを5つのセルに分割する。この場合、1セルの区間長は280mとなる。セルと車両検知器の設置位置との関係を図-5に示す。これより、対象区間の上下流端の流入・流出交通量、およ

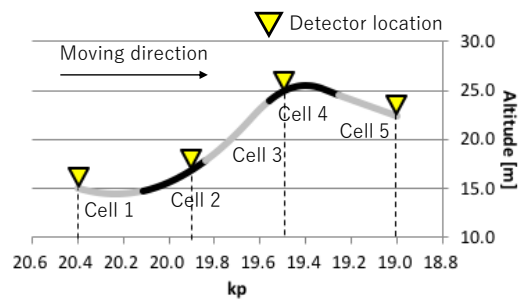


図-5 セルの配置と車両検知器設置位置の関係

びCell 2とCell 4の交通状況のデータが収集される状況となる。

また、これに応じて、速度の最大値 v_{max} とセル区間長 dx 、タイムステップ幅 dt に関わる制約条件、

$$dx \geq v_{max} \cdot dt$$

を満たすよう、速度の最大値は100km/h、タイムステップ幅は10秒と設定した。

CTMの計算を行うにあたり、Fundamental Diagramは式(13)に示すドレイク式を用いる。

$$V_i = v_f^i \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{K_i}{k_c} \right)^2 \right] \quad (13)$$

ここで、 v_f^i と k_c はドレイク式のパラメータであり、それぞれ、車種 i の自由走行速度、乗用車換算後の臨界密度を表す。なお、車種に関しては乗用車と大型車の2種類とする。

大型車の乗用車換算係数を決定する式(6)中のパラメータについては、乗用車の車長を4.97m、最小車頭時間を1.0秒、大型車の車長を8.2m、最小車頭時間を1.4秒とそれぞれ設定した。なお、車種毎の最小車頭時間は車頭時間分布の5%タイル値に相当する値としている。

(2) 観測モデルの設定

観測データは車両検知器とプローブデータから収集されている。車両検知器からは該当するセルの10秒間平均

表-1 Particle Filter のパラメータ値

FD パラメータの初期値 (すべてのセル)		
自由走行速度 (乗用車)	80	km/h
自由走行速度 (大型車)	60	km/h
臨界密度 (乗用車換算値)	75	veh/km/2lanes
システムノイズの標準偏差		
平均速度 (全セル・全車種)	0	km/h
密度 (全セル・全車種)	0	km/h
断面通過交通量 (全セル・全車種)	0	veh/10sec
臨界密度 (すべてのセル)	0.4	veh/km
小型車の自由走行速度 (すべてのセル)	138	km/h
大型車の自由走行速度 (すべてのセル)	138	km/h
観測ノイズの標準偏差		
小型車の断面通過交通量 (検知器設置セル)	3.0	veh/10sec
小型車の断面通過交通量 (検知器設置セル)	15	veh/10sec
小型車の平均速度 (検知器設置セル)	7.0	km/h
大型車の平均速度 (検知器設置セル)	6.0	km/h
プローブデータによる大型車の平均速度 (検知器非設置セル)	6.0	km/h

における車種毎の平均速度、および断面通過交通量が取得されている。プローブデータは車両検知器が設置されていないセル (図-5中のCell 3) の走行速度を補足するものとして活用する。その際、10秒間に当該セルで取得されているGPS点列を抽出し、その速度の平均値を算出し、データ同化に用いた。なお、プローブ車両の混入率は大型車の5.7%であり、必ずしもすべてのタイムステップでデータが取得されている訳ではない。

(3) Particle Filterの設定

Particle Filterを適用するにあたり、システムモデルの状態変数は境界条件である流入・流出交通量、セル毎の密度と速度、および各セルの車種別のFDパラメータとした。

システムノイズの設定にあたり、交通状態推定にかかわる多くの研究では、各セルの状態変数である速度や密度にもシステムノイズを考慮することが一般的である。一方で、本研究では、

- FDパラメータは勾配条件などによりセル毎に独立に変動すると仮定しており、それだけで状態変数の数が15個と多くなる
- サグ部での渋滞発生過程の可視化を分析の目的としており、交通状態を表すセル毎の密度や速度を観測誤差とFDパラメータの変動で説明できるとの前提にたっている
- 当該区間は分合流のない単路区間であり、交通量保存則が頑健に成立していると考えられる

ことを理由に、FDパラメータ以外の状態変数のシステムノイズの分散はすべて0に設定した。ここで、時系列

にセル毎のFDパラメータが変動すると仮定していることは、車両毎に挙動特性が異なり、その特性を統合したものがFDパラメータとして表出される、との仮定に立脚していることに他ならない。

システムノイズ、観測ノイズともにそれぞれ独立の正規分布を仮定し、経験的に各分散値を決定した。具体的なパラメータ値は表-1の通りである。なお、Particle Filterを適用する際には、大型車の自由走行速度は小型車の自由走行速度より大きくはならない、という制約を設けている。そのため、Particle Filterの更新過程でそのような粒子がサンプリングされた場合には、棄却し、新たにサンプリングするという操作を行う。

5. 分析結果

(1) 現況再現性の確認

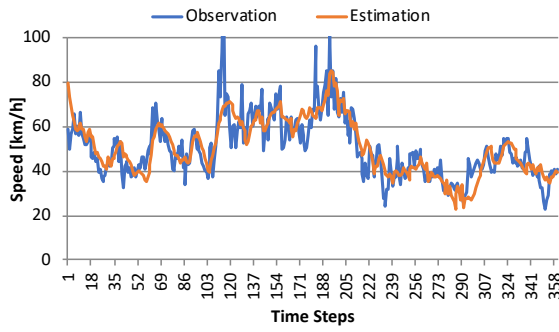
データ同化システムによって推定された19.9kp地点における車種別の平均速度と断面交通量、およびCell 3におけるプローブデータによる速度平均値とその推定結果を図-6に示す。

これより、小型車と大型車の平均速度 (図-6(a)と図-6(b)) に関して、観測値のランダム誤差を丸める形で精度良く推定されていることが分かる。ここでの観測値のランダム誤差の要因の1つは車種毎の車長を平均値で固定していることにある。実際は多様な車長の車両が存在するため、時間オキュパンスーから個別車両の走行速度も求めることにより誤差が生じるのは避けられない。その傾向は車両形状が多様な大型車で顕著になることが考えられるが、推定結果はその誤差を打ち消していることが読み取れる。

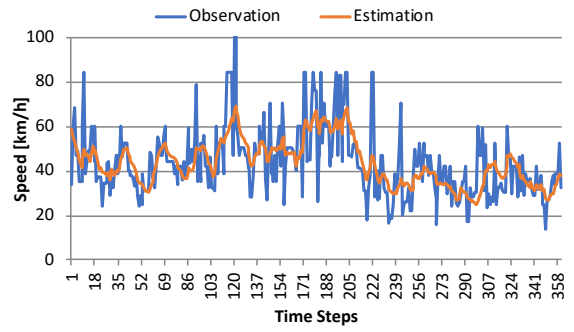
次に車種別の断面通過交通量 (図-6(c)) の変動に着目すると、推定値は観測値を精度良く追従している様子が読み取れる。とりわけ、大型車は混入台数が少ないものの、その増減の傾向は観測値と一致しつつ、ランダム誤差が除去できていることが分かる。

最後にCell 3における速度変動の観測値と推定値 (図-6(d)) に着目する。前述の通り、プローブデータは大型車の5.7%からしか収集されておらず、必ずしもすべてのタイムステップでデータが利用できている訳ではないものの、全体的な速度変動を精度よく再現しており、また、観測値の得られていないタイムステップにおける速度変動の傾向も補完されていることが分かる。

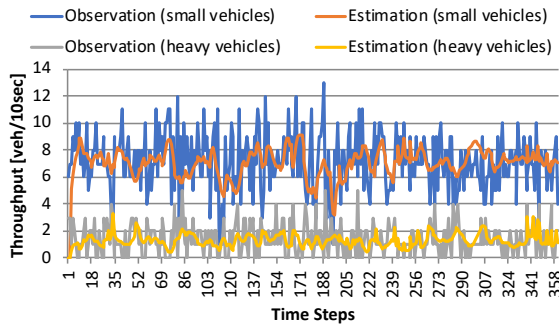
仮にプローブデータを融合的に用いない場合、Cell 3の交通状態を本アプローチで同定することは不可能となる。すなわち、Cell 3が自由流状態にあるかは渋滞流状態にあるかは、Cell 2 (あるいはCell 3) からの流出可能台数が実際にCell 2からCell 3 (あるいはCell 3からCell 4) に移動した量との比較で求めることができる。一方で、



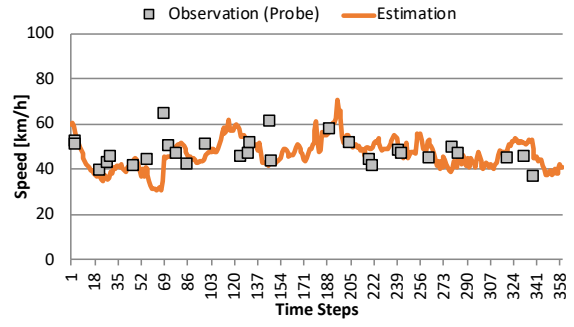
(a) 19.9kp における小型車の走行速度の観測値と推定値



(b) 19.9kp における大型車の走行速度の観測値と推定値



(c) 19.9kp における車種別の断面交通量の観測値と推定値



(d) Cell 3 の走行速度の観測値と推定値

図-6 観測値と推定値の比較

Cell 3の密度については、流出可能台数と流入可能台数のみからは特定することが不可能となる。図-7はその例をFundamental Diagramにより説明したものである。いま、交通量の観測値として q が与えられており、対象区間は自由走行状態にあることが分かっているとす。このとき、黒線で描かれるFDを想定した場合には、当該区間の密度は k_1 となり、一方で赤線で描かれたFDを想定した場合には密度は k_2 となる。いずれのケースでも与えられている制約条件は満たされており、例えば臨界密度、交通容量の値域に制約をかけたとしてもデータ同化システム上は k_1 と k_2 を識別することができない。このことは、当該区間が渋滞状態にあることを仮定した k'_1 、 k'_2 に対しても同様である。

一方、プローブデータが取得されている場合には、走行速度が交通状態を同定する上で制約条件となるため、 k_1 か k_2 、あるいは k'_1 か k'_2 かを一意に決定することが可能となる。

すなわち、多種のオンラインデータを活用することで、はじめて走行速度が制約条件となり、密度の特定が可能となるため、データを融合的に利用することが極めて重要であることが指摘できる。

(2) FDパラメータの変動

次に、セル毎に推定されたFD形状の変動特性に着目する。ここで、セルの特徴量として、式(14)で記述され

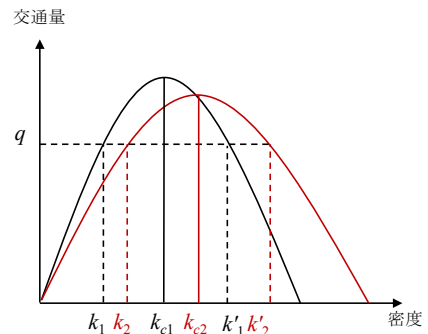


図-7 交通量制約だけでは複数の状態が特定される例

る交通容量を対象とする。

$$q_c = k_c \cdot v_f \cdot e^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

その結果を図-8に示す。ただし、図中、タイムステップ222に描かれた点線は渋滞発生時点を示している。これより、各セルの交通容量は、乗用車は3000 veh/h～5000 veh/h、大型車は2500 veh/h～4500 veh/h程度で分布しており、大型車の方が乗用車との比較で交通容量レベルが低いことが分かる。また、上り勾配区間を過ぎたクレスト部に相当するCell 4では小型車、大型車を問わず全体的に交通容量が高い傾向にあることが分かる。このことはCell 4はボトルネックの下流側に位置していることがうかがえる。また、全体的に渋滞発生前の状況では、Cell 3の方がCell 2より交通容量が低い傾向にあり、Cell 3が当該区間のボトルネックとなっている可能性が指摘される。

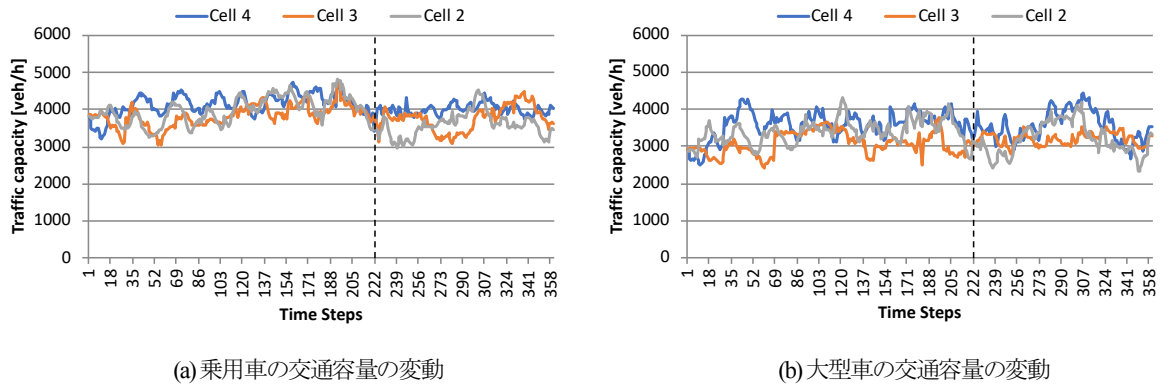
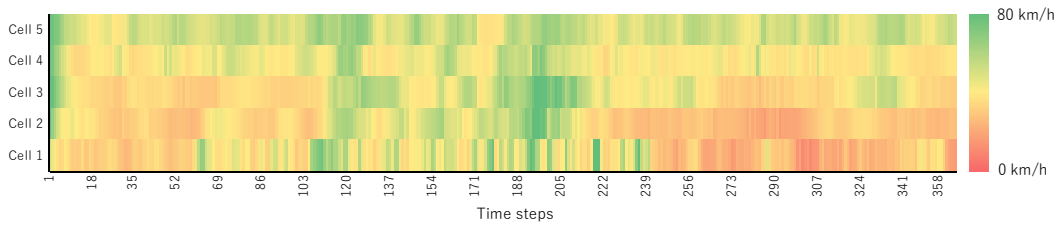
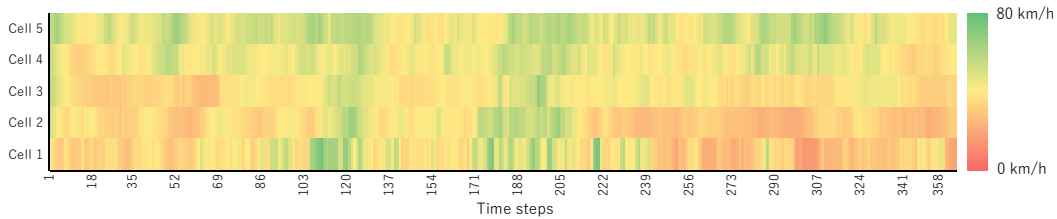


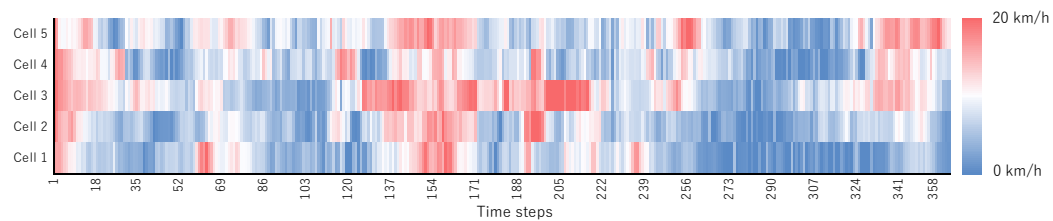
図-8 車種・セル毎の交通容量の変動状況



(a) 小型車の速度変動



(b) 大型車の速度変動



(c) 小型車と大型車の速度差 (小型車-大型車)

図-9 速度コンター図

また、この傾向は大型車で顕著であることが分かる。すなわち、当該区間で最も上り勾配が急なCell 3では、大型車の加速性能の低さに起因し、円滑な流れが阻害されていることが推察される。

一方で、渋滞発生後は一時的にCell 2の交通容量が低下していることが確認できる。これは、渋滞発生のかっかけは上り勾配部での全体的な速度低下にある一方、Traffic Breakdownが発生したことによってCell 2でCapacity dropが発生しているものと解釈することができる。その後はCell 2とCell 3の交通容量が一定の位相差を保ちながら周期的に変動していく状況が読み取れる。サグの渋滞では渋滞の先頭位置は必ずしも固定的ではなく、サグ底

においてゆるやかに変動することが実観測データに基づいて報告されており⁷⁾、この結果はそれを裏付けているものと考えられる。

(3) 速度コンターによる交通状態の変動

最後に速度コンター図を描画し、動的な交通状態の変動特性について考察する。図-9(a)、図-9(b)には小型車、大型車それぞれの速度の時空間変動を、また、図-9(c)には小型車と大型車の速度差の時空間変動を示す。これより、渋滞発生前のタイムステップ1~120あたりでは小型車、大型車共に上り勾配部 (Cell 3) までで速度が低く、Cell 4以降で速度が回復している傾向にあることが読み

取れる。タイムステップ120～171にかけては、全体的に速度が低下した状況となっており、その際には小型車と大型車の速度差が大きくなっている。その後、一旦、全体的に速度は回復に向かうものの、依然としてとりわけ上り勾配部にあたるCell 3では小型車と大型車の速度差が大きい状況が維持されている。すなわち、大型車が小型車を追い抜いていく状況にあると考えられ、タイムステップ222においてTraffic breakdownが発生し、渋滞状態へと相転移していることが分かる。渋滞発生後は前述の通り、渋滞の先頭位置がCell 3とCell 2で振動している様子が読み取れる。

以上を総合的に考察すると、分析対象とした2016年6月30日に限られるものの、

- 速度の高い小型車の車群 (図-9(a)のタイムステップ190前後) が当該区間に流入することで大型車との間の速度差が顕著となり (図-9(c)のタイムステップ200前後) 、
- その状況で小型車の流入交通量が増加 (図-6(c)のタイムステップ205前後) することで、
- 上り勾配部の密度が高まり、交通流全体としての速度低下が発生し、渋滞に至る、

という仮説が推定される。

もしこの仮説が真であるならば、当該区間およびその上流区間で小型車と大型車の速度差が小さくなるようなマネジメントを行うことで、ボトルネック部で交通密度の増加を緩和することがTraffic Breakdownの発生を抑止できる可能性が指摘できる。例えば、可変速度規制などによって交通流の速度を動的に調整するような施策の有効性が期待されよう。

しかしながら、これらの考察は特定の1日の分析結果に基づくものである。上述のメカニズムだけが渋滞発生の要因である保証はなく、分析対象を拡大することが望まれる。

5. おわりに

本研究では、マルチクラスのマクロ交通流モデルをベースとし、車種別に交通量・走行速度を計測可能な車両検知器と商用車両の一部から得られるプローブデータを融合的に活用したデータ同化システムを構築した。また、状態変数のシステムノイズを各セルのFDパラメータに限定することで、隠れマルコフ的に直接的には観測できない交通状態の変動を可視化した。それにより、サグ区間のボトルネック特性の分析を可能とした。さらに、交通状態推定の結果に基づき、サグ部での渋滞発生メカニズムを考察し、大型車と小型車の速度差の拡大、およびその後の流入交通量の増加が上り勾配部での速度低下を誘発する可能性を指摘した。

今回は車種別交通状態推定をサグにおける渋滞発生メカニズムの解析に適用したが、車種によって異なる交通流特性を対象とした分析には幅広く本システムを適用することが可能であると考えられる。例えば、ネットワーク全体からのCO₂排出量の推定を行う際、車種によって、またその速度レベルによって排出量原単位が異なることが想定される。また、大型車については積み荷重量の大小によっても排出量は影響されるであろう。そのような場合に、例えば軸重計のデータもオンラインで融合的に活用することで、精度の高いCO₂排出量推定が可能になると考えられる。

マルチクラスの交通流モデルでは車両挙動特性、より具体的にはFD形状が異なる車両を区別して表現することが可能であり、その対象は小型車/大型車の区別だけではない。例えば、自動走行車両は一般車両と比べて走行速度を一定に維持し、かつ一般車両より短い車間距離で走行することなどが想定される。その場合、コネクテッド環境で自動走行車両の混入状況が把握できるのであれば、自動走行車両と一般車両の混在した状況に対して車種別の状態推定を行うことも可能になると考えられる。

今後は、マルチクラスのデータ同化システムの適用事例を増やすと共に、車線別の交通状態推定、あるいはミクロレベルの交通状態推定が可能となるよう、モデルの拡張を図りたい。

謝辞：本研究を実施するにあたり、阪神高速道路(株)、(株)富士通交通・道路データサービス、(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. Liu, Y., Zheng, H., Feng, X. & Chen, Z. Short-term traffic flow prediction with Conv-LSTM. *2017 9th Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process.* 1-6 (2017). doi:10.1109/WCSP.2017.8171119
2. Cremer, M. & Keller, H. A new class of dynamic methods for the identification of origin-destination flows. *Transp. Res. Part B* 21, 117-132 (1987).
3. 中辻隆. 交通流におけるフィードバック原理に基づく推定技術の現状と展望. *IATSS Rev.* 31, 15-23 (2006).
4. 高嶋望都, 塩見康博. 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, 1_1073-1_1082 (2017).
5. Van Lint, J. W. C., Hoogendoorn, S. P. & Schreuder, M. FASTLANE New Multiclass First-Order Traffic Flow Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2088, 177-187, 2008.

6. Laval, J. A. & Daganzo, C. F. Lane-changing in traffic streams. *Transp. Res. Part B Methodol.* 40, 251–264 (2006). 従挙動の研究. 土木学会論文集 **506**, 45–55 (1995).
7. 邢健, 越正毅. 高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追 (2018. 4. 27 受付)

A MULTI-CLASS MACROSCOPIC TRAFFIC FLOW MODEL
FOR CLASS-BASED TRAFFIC STATE ESTIMATION

Moto TAKASHIMA and Yasuhiro SHIOMI