

状態空間モデルによる区間途中の流出入を考慮したリアルタイムな渋滞状況の推定手法の構築

川崎洋輔¹・原祐輔²・桑原雅夫³

¹正会員 東北大学大学院 情報科学研究科 博士後期課程 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: kawasaki-y@plan.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学大学院助教 情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: hara@plan.civil.tohoku.ac.jp

³正会員 東北大学大学院教授 情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

アクセスコントロールされた高速道路やバイパスと異なり、街区にある通常の一般道では、交差点や沿道施設からの流出入が発生し、本線交通に影響を及ぼす。一般道において、リアルタイムに渋滞状況を把握するためには、こうした区間途中の流出入の影響を考慮した手法の開発が必要である。筆者らは、過去に逐次型データ同化のアプローチで交通流理論に基づいたVariational Theory(VT)を状態空間モデルに拡張し、区間途中の流出入がない条件下で渋滞状況を推定するモデル(PFVT)を提案した。本稿では、“過去のモデル(PFVT)のパラメータ設定を工夫する”と“過去のモデル(PFVT)構造を改良する”の2つの方針について、今後、どちらの方針で区間途中の流出入を考慮したモデルを構築すべきか検討した。

Key Words : kinematic wave theory, state space model, inflow and outflow in the section

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

アクセスコントロールされた高速道路やバイパスと異なり、街区にある通常の一般道では、交差点や沿道施設からの流出入が発生し、本線交通に影響を及ぼす。また、一般道では、信号により交通が制御(車両の発信・停止が制御)されているという特徴がある。また、一般道に限らず、ドライバー個人ごとのFundamental Diagram (以降FDという)が異なるため、こうしたドライバー特性が交通に影響を及ぼす状況も見られる。そのため、一般道の渋滞状況をモデルにより推定するためには、こうした「区間途中の流出入交通の影響」や「信号制御の影響」ならびに「ドライバー特性」を考慮することが必要である。また、時々刻々と変化する渋滞状況を情報提供するためには、渋滞把握のリアルタイム性も重要と考える。リアルタイムに渋滞状況が把握できれば、動的な交通マネジメントへ貢献できる。

一般道の渋滞状況を把握のための既往のアプローチとしては、「センサーによる把握(観測)」と「シミュレーションによる交通状態の推定」がある。道路の渋滞状況を把握するセンサーは、車両感知器やプローブ機器(GPS)がある。このようなセンサーは、交通量や車両速

度等を把握可能であるが、車両感知器の設置箇所が限定されていることや、全ての車両にプローブ機器が搭載されていないといった問題がある。そのため、車両感知器の設置箇所のみ全車両の状態が把握可能であること、プローブ間の交通状態は不明といった課題がある。そのため、センサーのみでは、一般道の区間全体の全車両の交通状況や、区間途中の流出入交通の状況がわからない場合が見受けられる。一方で、センサー等から観測される交通データを拡大処理し、全車の交通流を再現する手法として、交通流理論をベースとしたシミュレーションモデルがある。ただし、観測データを完全に再現するような完璧なシミュレーションモデルを構築することは困難である。こうした観測データとシミュレーションモデルの問題点を解決するために、観測データとシミュレーションモデルを統合してシミュレーションモデルの改善を図るデータ同化というアプローチ¹⁾²⁾がある。データ同化には、データが取得されるたびにシミュレーション結果の更新を行う逐次型データ同化と、全てのデータを取得した後にシミュレーション結果を最適化する非逐次型データ同化がある。

以上の背景を踏まえ、本研究では、逐次型データ同化のアプローチで、一般道の渋滞状況をリアルタイムに推定する手法の開発を目的とする。

(2) 本稿の位置づけ

交通流理論モデルを効率的に解く手法として、Daganzo³⁾により提案されたVariational Theory(以降VTという)がある。VTは、時空間上の累積交通量を解析的に推定する手法であり、一般道における信号制御の影響を考慮できるという特徴を持つ。しかし、VTは、入力するFDが一つのみであるため、区間途中で出入りのない状態であっても、プローブ車両間に不自然なギャップが生じることがわかっている。

そこで、筆者らは、過去にVTを状態空間モデルに拡張し、区間途中の流入出がない条件下でドライバー特性の違いを考慮したリアルタイムな一般道の渋滞状況を推定するモデルを提案した⁴⁾。筆者らが提案したモデルは、ドライバーごとに異なるFDが存在する場合において、既往のVTよりも高い精度で渋滞状況(ボトルネック、渋滞長)を推定することが可能である。

ただし、最初に述べたように、実際の一般道では、区間途中の流入出が存在する。よって、実際の一般道へのモデル適用のためには、信号制御の影響とドライバー特性にあわせて区間途中の流入出も考慮する必要がある。

これら流入出やドライバー特性等は相互に影響し、交通状態を構成するものであるが、問題を単純化するために、それぞれに対応した個別のモデルを構築した上で相互の影響を考慮したモデルを構築することを考える。

以上より、まずは、区間途中の流入出交通の影響のみを考慮したモデルの構築を試みる。本稿は、区間途中の流入出を考慮したモデル構築の基礎分析として、“過去のモデルのパラメータ設定を工夫する”と“過去のモデル構造を改良する”の2つの方針について、今後、どちらの方針で研究していくべきか検討したものである。区間途中の流入出を考慮したモデルで想定する適用条件を以下に整理する。

- 区間内での追い越しは発生しない(FIFOを満たす)。
- 区間上流と端と下流端の車両の到着分布は、車両感知器によって得られる(観測可能)とする。
- 区間途中の流入出交通の状況は、不明(観測不可能)とする。

上記仮定の下、プローブ間の渋滞状況(ボトルネック、渋滞長)を推定するモデルの構築を行う。想定するモデルの適用条件および問題設定のイメージを図- 1に、図- 2に本稿の位置づけを示す。

2. 既往の研究

VTやデータ同化に関する既往研究について述べる。Mehran et.al.⁵⁶⁾は、VTを拡張し、区間途中の流入出交通の状況が既知の場合の交通状況推定手法を提案している。

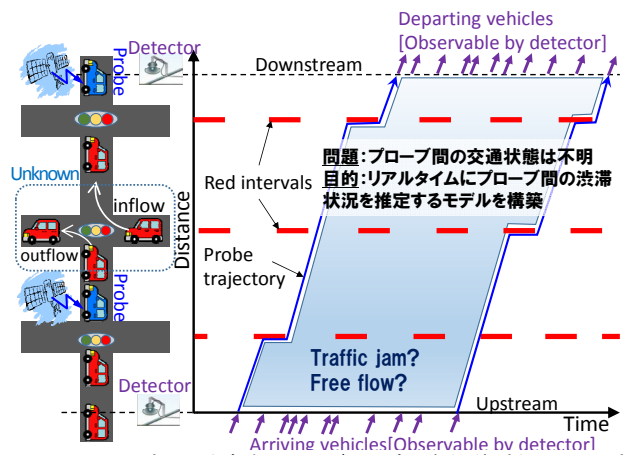


図- 1 区間流入出を考慮したモデルの適用条件(想定)と問題設定

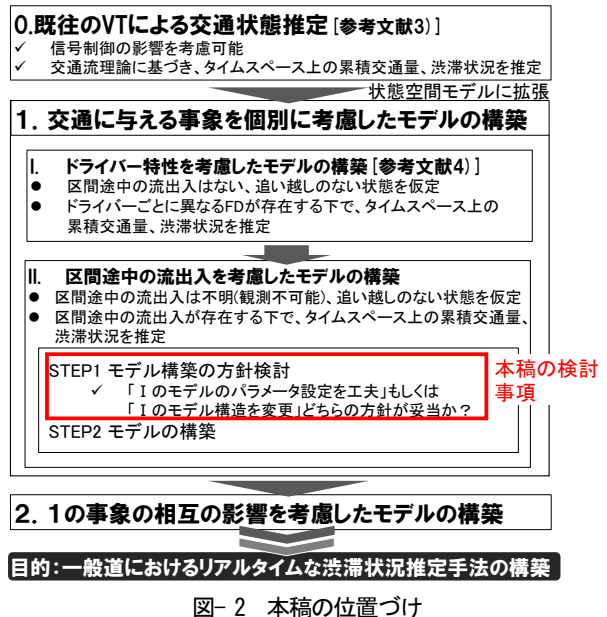


図- 2 本稿の位置づけ

本研究の場合は、流入出交通が不明であること、VTを状態空間モデルに拡張している点が異なる。福田⁷⁾は、交通工学における交通状態の推定問題をデータ同化のアプローチで研究しているものをレビューしている。文中にもあるように、近年、観測データの増加や計算機の高性能化に伴い、データ同化関連の研究は増えつつある。Patirea et al.⁸⁾は、高速道路を対象に、車両感知器やプローブデータを融合し、カルマンフィルタにより、区間速度の推定を行っている。本山ら⁹⁾は、中央道を対象に、一般状態空間モデルの枠組みで、実際の道路区間を走行したものを含む観測値として得られた区間データを用いて、シミュレーションから得られる走行時間と融合し、現実の走行状態の再現を試みている。このように交通状態を推定に関する研究は数多く存在するが、一般道における区間途中の流入出の影響を加味した交通状態推定に関する研究は少ない。また、本研究は、モデルの推定量を時空間上の累積交通量としている点が他の研究と異なる。

3. 検討手順

ここでは、本研究の検討手順について述べる。本研究では、モデルの構築にあたって、区間途中の流出入交通と本線の交通流との関係进行分析するために、筆者が作成した交通シミュレーションによってベンチマークデータを作成する。そのベンチマークデータを分析することで、モデル構築の方針を検討する。本研究の検討フローを図-3に示す。

最初に、筆者らが提案した過去のモデル⁴⁾の概要について述べる。次に、前提条件として、モデル構築の基本方針を整理する。あわせて、交通シミュレーションのネットワーク条件や発生交通の条件についても整理する。

流出入交通が本線交通に与える影響を理解するために、交通シミュレーションにより分析を行う。具体的には、前提条件を踏まえ、シミュレーションにより区間途中の流出入あり／なしの交通流を再現したベンチマークデータを生成する。そして、流出入あり／なしのベンチマークデータの渋滞状況を比較・分析する。

最後に、モデル構築の方針を検討する。ベンチマークデータに対して、一部データをプローブデータとして抽出する。そのプローブデータを用いて、過去のモデルにより渋滞状況を推定し、ベンチマークデータと比較することで精度を検証する。プローブデータの抽出パターンによる精度の変動ばらつきを考慮するために、プローブデータのパターンを変えた複数ケースを設定し、精度検証を行う。なお、モデルの適用にあたっては、渋滞の推定精度が高くなるようにパラメータチューニングを行うことで、モデルの限界性能を把握する。以上の結果を踏まえ、“過去のモデルのパラメータ設定を工夫すべきか”、“モデル構造を改良すべきか”の2つの方針についてどちらの方針が妥当か検討する。

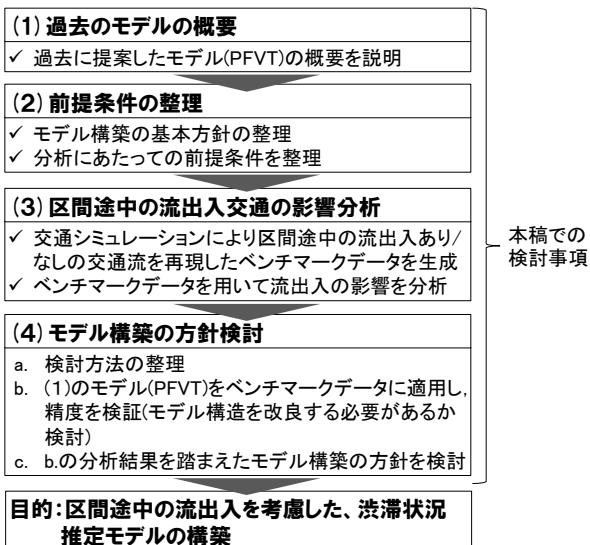


図-3 検討手順

4. 既往モデル(PFVT)の概要

筆者らが過去に提案したモデル(PFVT: Particle Filter based on Variational Theory, 以降PFVTという)の概要について述べる。なお、詳細は参考文献4)を参照されたい。

(1) モデルの仮定

前提として、区間途中の流出入交通や追い越しはないものと仮定する。本モデルは、車両感知器の交通量データと信号現示データおよびFDを入力データとしたシステムモデルとプローブデータを活用した観測モデルで構成される。システムモデルの状態量を時空間上の累積交通量と定義する。システムモデルのスキューンインターバルのインデックスを t とする。 $t-1 \sim t$ および距離 $0 \sim L$ で囲まれた時空間を考える。その時空間を単位時間 Δt 、単位距離 l で分割する。その $\Delta t \times l$ のメッシュを単位メッシュと定義する。この単位メッシュで構成された時空間を t 時の状態空間として定義する(図-4)。

(2) システムモデル

システムモデルは、VTをベースに構築した。システムモデルは、状態ベクトル $\mathbf{x}_{t-1}$ と $\mathbf{x}_t$ の時間推移(一期先予測)を表現し、システムノイズにより、 $\mathbf{x}_t$ の予測分布を生成するモデルである。VTは1パターンの入力データに対して解を一意に算出するモデルである。したがって、VTに確率的にFDデータを入力することで解が確率的に出力させると考えた。具体的には、予め様々なパターンのFDを生成しておき、計算時に観測モデルの尤度の大きさに応じて確率的にFDを選択し、VTに入力する。以上のシステムモデルを式(1)および図-5に示す。

$$\mathbf{x}_t = f(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_t$ は時間 t における状態ベクトル、 $\mathbf{v}_t$ はシステムノイズ、 $f(\cdot)$ はVTの関数である。

(3) 観測モデル

車両感知器と区間上流端から流入するプローブ車両により単位メッシュごとの累積交通量を観測可能と考え、観測モデルを構築した。単位メッシュごとの観測値 $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ のノイズは、独立な正規分布 $N(0, \sigma^2)$ を仮定した。観測モデルを式(2)、図-6に示す。

$$\mathbf{y}_t = H_t \mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{y}_t$ は時間 t における観測ベクトル、 H_t は観測行列、 $\mathbf{w}_t$ は観測ノイズである。

(4) 事後分布の算定方法

本モデルでは、パーティクルフィルタ¹⁰⁾により事後分布を求めることとした。

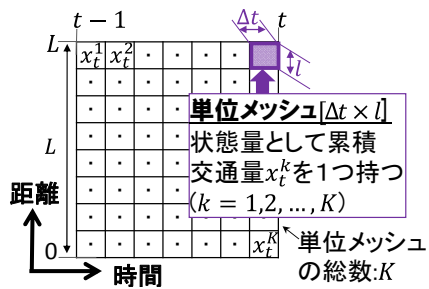
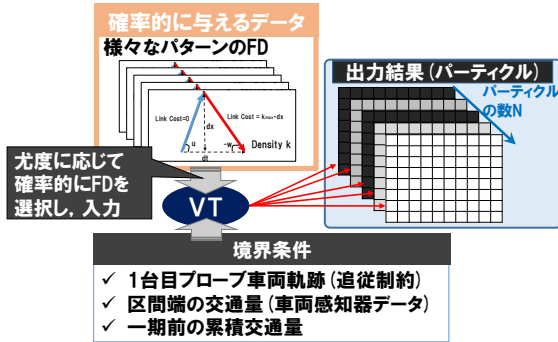
図- 4 t 時の状態空間(時空間メッシュ)

図- 5 システムモデルのイメージ

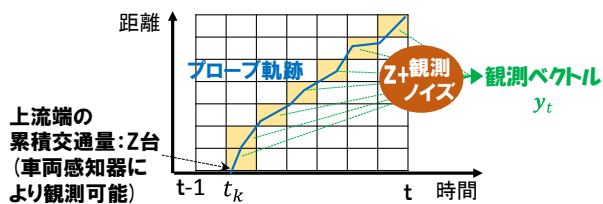


図- 6 観測モデルのイメージ

5. 前提条件の整理

(1) モデル構築の基本方針

モデル構築の基本方針としては、前述の通り下記の2つの方針を考える。

方針1) PFVTのパラメータ設定を工夫

PFVTは、観測されるプローブに対して、尤度を評価し、渋滞状況を推定するものである。観測されるプローブデータは、区間途中の流出入の影響を受けて加減速している可能性が考えられる。そのため、最もリーズナブルなアプローチとして、PFVTのパラメータ設定を工夫することで区間途中の流出入がある場合の渋滞推定を試みる。

方針2) PFVTのモデル構造を改良

方針1)のアプローチで渋滞推定の精度を検証した結果、よい精度が得られない場合は、区間途中の流出入の影響を考慮するためにモデル構造そのものを改良することが考えられる。

(2) シミュレーションネットワークの基本条件

ここでは、ベンチマークデータ生成のためのシミュレーションの基本条件を整理する。

ネットワークは、区間延長1km、信号を2基設置したものを考える。なお、流出入可能なポイントは、1箇所とし、流出入ポイントの先の信号交差点は、ボトルネックとして表現するために青現示を短く設定する。ネットワーク条件および信号現示条件を図- 7、表- 1に示す。

(3) シミュレーションにおける交通流の基本条件

本線交通および区間途中の流出入交通の発生は一様分布とする。また、区間途中の流出入の影響のみを分析するために、全車両のS-V条件は一つ(全ドライバー同じ走行特性)とする。加えて、流出入回数は1回のみに設定し、1回の流出入の影響のみを本線に与える。

(4) 流出入交通のパターン分類

(1)で設定したネットワークについて、検討ケース設定のために区間途中の流出入のパターンを考える。パターンの整理結果を表- 2に示す。同表に示すように流入パターンは、3パターン考えられるが、パターン3は、パターン1,2の組み合わせで表現できると考えられるため、パターン1,2を対象に検討することとする。

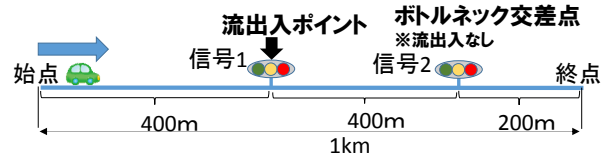


図- 7 シミュレーションのネットワーク条件

表- 1 シミュレーションの信号現示条件

	現示(秒)				
	青	黄	赤	サイクル長	オフセット
信号1	117	3	30	150	0
信号2	57	3	40	90	5

表- 2 流出入パターン

パターン	想定される本線への影響(流出入なしとの違い)
1 流入交通のみ発生	・ 本線の交通量が増加 ・ 本線需要の増加により本線交通が速度低下 → 流入なしに比べて渋滞が悪化
2 流出交通のみ発生	・ 本線の交通量が減少 ・ 交通流減少により本線の交通の速度が回復 → 流出なしに比べて渋滞が軽減
3 流出入両方発生	・ 流出入の関係により本線への影響が異なる ◇ 流入>流出: パターン1が発生 ◇ 流入<流出: パターン2が発生 → パターン1,2のいずれかで表現可能

6. 流出入交通の影響分析

(1) ベンチマークデータの生成

まず、分析のためのベンチマークデータとして交通シミュレーションによって全車両の車両器跡データを作成する。シミュレーション時間は10分とし、本線の交通量は、150台/10分発生させることとした。その他のネットワーク条件等は前節の前提条件に従うものとする。作成したベンチマークデータを図- 8に示す。同図を見ると信号2を先頭とした渋滞が発生していることがわかる。

(2) 区間途中の流入・流出交通による影響分析

流入交通の影響を見るために、信号1の2現示目の赤現示において流入交通を10台発生させた。作成したベンチマークデータを図- 9に示す。また、流入あり/なしのRYG(渋滞発生状況図)および速度差(流入なし-流入あり)のヒートマップを図- 10に示す。同図を見ると、わずか10台の流入交通が後続の渋滞に大きく影響(本線車両のFDが変化)していることがわかる。この現象は、流入交通量を数台読み違えただけでもモデルの渋滞推定結果が実際と乖離が生じる可能性があることを示唆している。

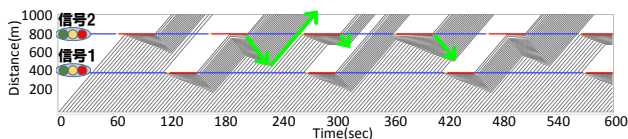


図- 8 ベンチマークデータ 1(区間途中の流出入なし)

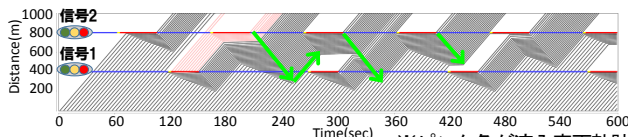


図- 9 ベンチマークデータ 2(区間途中の流入 10 台)

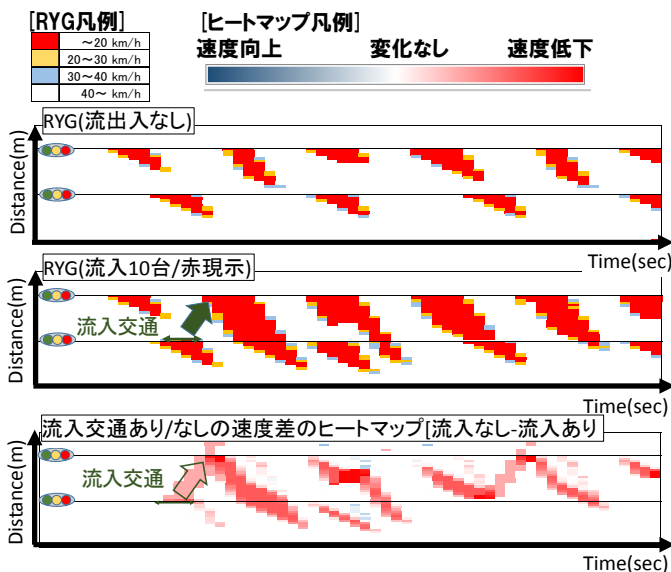


図- 10 RYG(上段:流入なし, 中段:流入 10 台), 速度差ヒートマップ(下段)

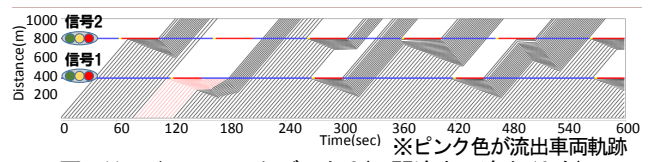


図- 11 ベンチマークデータ 3(区間途中の流出 10 台)

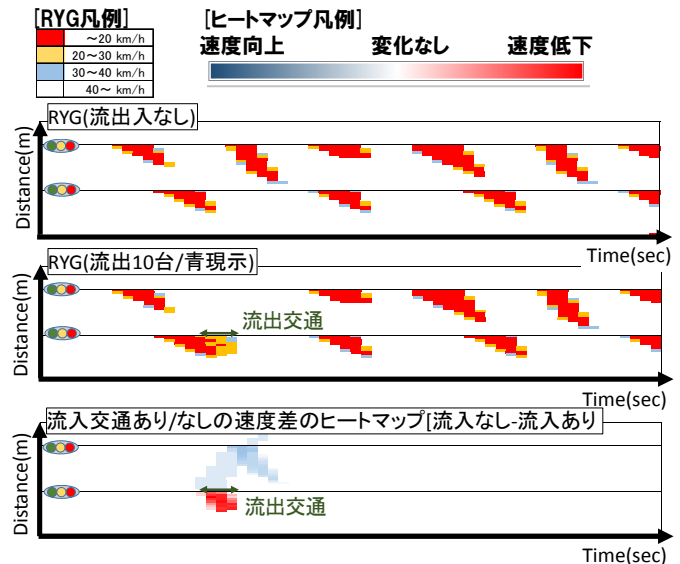


図- 12 RYG(上段:なし, 中段:流出 10 台), 速度差ヒートマップ(下段)

次に流出交通の影響を見るために、信号1の2現示目の青現示において流出交通を10台発生させた。作成したベンチマークデータを図- 11に示す。また、流入あり/なしのRYG(渋滞発生状況図)および速度差(流入なし-流入あり)のヒートマップを図- 12に示す。同図を見ると、流出交通発生後、流出なしに比べて速度が向上していることがわかる。また、この例の場合、その影響は流入ケース(図- 10)に比べて後続への影響は比較的小さい。そのため、本稿では、比較的影響の大きい流入ケースを対象に検討を行うこととした。

7. モデル構築の方針検討

(1) 検討方法

ベンチマークを用いて、方針1(過去のモデルのパラメータを工夫)の妥当性確認のために、区間途中の流出入交通がある状況下での渋滞の推定精度の検証を行う。具体的な検証方法は以下の通りである。

まず、前節で作成したベンチマークデータの本線交通からプローブデータ(観測データ)として、一部の車両軌跡をランダムに抽出する。プローブデータ、区間端の交通量(シミュレーション結果)、信号現示データを入力データとし、既往のVT³⁾とPFVTでタイムスペース上の全車両の累積交通量を推定する。そして、累積交通量、渋滞発生状況の推定精度を既往VTとPFVTと比較し、モデルの

精度を検証した。累積交通量は、タイムスペース上の推定誤差をMAE(平均絶対誤差), MAPE(平均絶対誤差率)と3D図により評価した。MAEは、真値と推定値の誤差の絶対値の平均値である。MAPEは、真値と推定値の平均誤差率の平均値である。MAEとMAPEは下式のように定義する。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |x_k - \hat{x}_k| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{x_k - \hat{x}_k}{x_k} \right| \quad (4)$$

ここで、 n はデータ数、 x_k は、真の累積交通量(ここではシミュレーション結果)、左下の添え字の k は x のインデックスを示す。 $\hat{x}_k$ はモデルによる累積交通量の推定値である。なお、累積交通量は、タイムスペース上の10秒×20mのメッシュ平均値を用いた。

渋滞状況の推定精度の評価指標は、RYGとPrecision(適合率)とRecall(再現率)およびF値を用いることとした。PrecisionとRecallは情報検索の有効性を示す評価指標として使われており、Precisionは検索結果に適合データ(正解)がどれだけ含まれるかを示す適合率である。Recallは、適合データ(正解)全体のどれだけが検索結果(推定結果)に含まれているかを示すものである。そしてPrecisionとRecallの調和平均が、F値である。一般に、PrecisionとRecallは、トレードオフの関係にある。そしてF値が高ければ、モデルの性能が良いことを意味する¹¹⁾。本研究でのPrecisionとは、モデルが渋滞と推定した中で、実際に渋滞となっているものの割合と定義する。Recallとは、実際に渋滞が発生している場所の中で、モデルが渋滞と推定しているものの割合と定義する。ここでは、累積交通量を速度に変換し、タイムスペース上の10秒×20mのメッシュ平均速度に集計したものをを用いた。メッシュ平均速度20km/h未満を渋滞として評価を行った。実際の渋滞状況とモデルで推定された渋滞の関係を表- 3のように定義する。以上を踏まえ、PrecisionとRecallおよびF値の算定方法を以下に示す。

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

$$F = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (7)$$

表- 3 実際の渋滞状況とモデルで推定された渋滞状況の関係

		実際の(真の)渋滞状況	
		渋滞	非渋滞
モデル	渋滞	TP (True Positive)	FP (False Positive)
	非渋滞	FN (False Negative)	TN (True Negative)

※20km/h以下を渋滞と定義

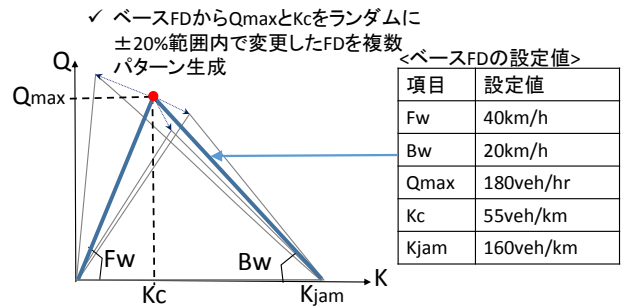


図- 13 FDパターンの生成イメージ

ここで、TP,FP,FNは表- 3の関係に該当するメッシュ数である。なお、定義より $0 \leq \text{Precision(適合率)} \leq 1$ と $0 \leq \text{Recall(再現率)} \leq 1$ であることから、 $0 \leq F \leq 1$ となる。

(2) PFVTのパラメータ設定方法

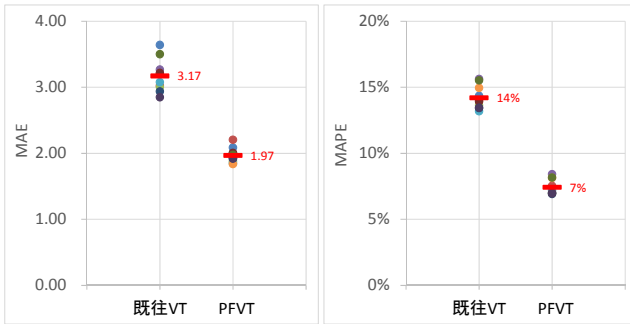
PFVTのパラメータは、FD(複数パターン入力可能)と観測ノイズの分散がある。本稿では、入力するFDをチューニングし、精度向上を試みた。今回の場合、真の交通状態(シミュレーションによる全車両軌跡)のデータがある。よって、真の交通流の生成するのに使用した本線車両のFDをベースとして、精度向上を試みた。この場合、流入がない場合には、モデルと真の交通流は一致する。ただし、前節で述べたように流入交通の影響により本線車両は影響(本線のFDが変わる)を受ける。そのため、ベースFDのランダムにベースFDのQmax、Kcを±20%幅内で変更したものを2,000パターン生成することで、流入交通の影響(本線のFDの変化)への対応を図った。ベースFDの設定値とその他のFDパターンの生成イメージを図- 13に示す。このFD2,000パターンをPFVTに入力し、精度検証を行った。

(3) PFVTの適用による精度検証結果

ここでは、ベンチマーク2に対して精度検証を行った結果を整理する。ベンチマークデータ2に対して10ケースのプロブデータを生成し、全ケースの平均値で精度を検証した。なお、プロブデータは、全ケース10%(15台/10分)の抽出率とし、ランダムサンプリングした。累積交通量の推定精度検証結果(MAE、MAPE)を図- 14、渋滞状況の推定精度検証結果(Precision、Recall、F値)を図- 15に示す。

図- 14を見ると、既往VTのMAEの平均値が3.17に対して、PFVTは1.97となっており、PFVTの方が1台程度誤差が小さい。MAPEは、既往VT14%に対し、PFVTは7%となっており半分の大きさとなっており、PFVTの方が精度が高い。

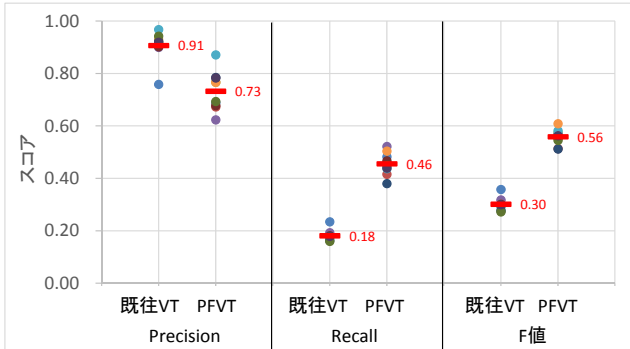
一方、図- 15を見ると、Precisionは既往VTの方が高いが、RecallはPFVTの方が高い結果となった。既往VTのPrecisionが0.91と高いのに対して、Recallが0.18と低い



※図中の●はパターン別の算定結果

※図中の●は、平均を示し、赤数値は平均値

図- 14 累積交通量の推定精度検証結果[MAE(左図), MAPE(右図)]



※図中の●はパターン別の算定結果

※図中の●は、平均を示し、赤数値は平均値

図- 15 渋滞状況の推定精度検証結果[Precision, Recall, F 値]

という状況は、既往VTが実際の渋滞状況よりもスムーズ（あまり渋滞していない）と推定していることを意味する。F値を見ると、既往VTの平均値が0.30に対して、PFVTの平均値は0.56となっており、比較的PFVTの方がモデルの性能がよいといえる。ただし、F値の大きさの観点から見ると、最高値が1.0に対して0.56と半分程度となっており、モデル性能がよいとはいえない。

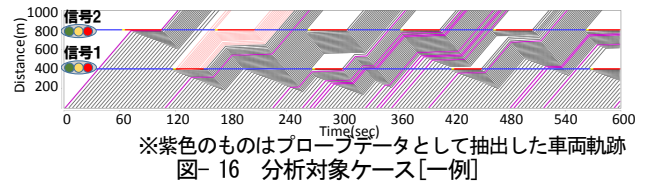
次に、F値が平均に近いケースを対象に累積交通量の誤差の3D図、RYGを作成し、誤差の要因を分析した。既往VTとPFVTの累積交通量の算定ノードの位置が異なるため、10秒×20mのメッシュ平均値に集計した。分析対象ケースを図- 16、誤差の3D図を図- 17、RYGを図- 18に示す。

図- 17を見ると、PFVTの方が累積交通量の誤差が小さい傾向である。しかし、最大誤差は、PFVTの方が大きい。PFVTの誤差の傾向に着目すると、流入交通が発生した後、時間進展に伴い、誤差は徐々に拡大する傾向にある。また、原点からの距離が離れると誤差が大きくなる傾向が見られる。

図- 18を見ると、既往VTでは、シミュレーションの渋滞状況(真の状況)に比べてスムーズに推定してしまっている。一方、PFVTは、既往VTと比べて信号2をボトルネックと推定している点は優れているが、渋滞を過剰に推定してしまっている場所も多く見られる。特に流入交通発生後に、信号2の先のエリアを先詰まりの渋滞と推定

しており、累積交通量の推定誤差の影響が表れていると考える。

以上の分析結果踏まえた結論を述べる。ここでは、累積交通量と渋滞状況の精度検証を行った。その結果、PFVTの累積交通量の推定誤差は、既往VTよりも精度は高く、誤差が1.97台と直感的には小さい。ただし、累積交通量を速度に変換し、渋滞状況の推定結果を検証すると、PFVTの性能は高くないことがわかった。したがって、区間途中の流入交通を考慮したモデルは、現在のPFVTの構造を改良(方針2で対応)する必要があると考える。



※紫色のものはプローブデータとして抽出した車両軌跡
図- 16 分析対象ケース[一例]

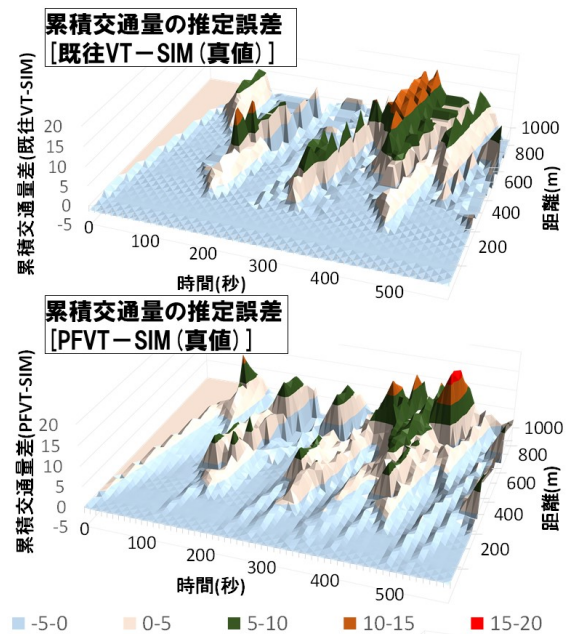


図- 17 累積交通量の推定誤差 3D 図[一例]

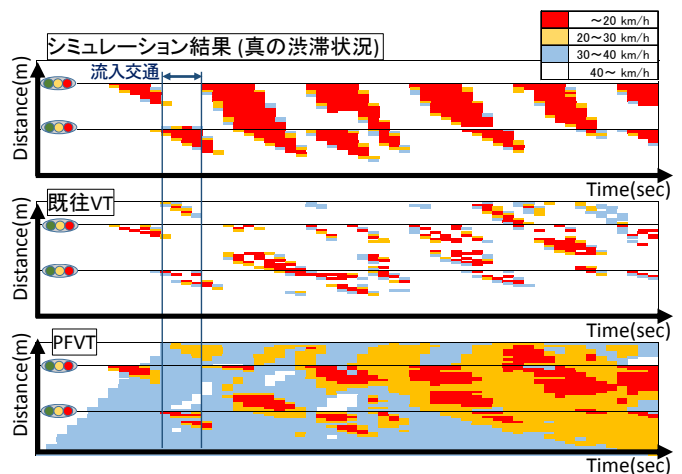


図- 18 RYG(上段:シミュレーション,中段:既往VT,下段:PFVT)[一例]

(3) 精度検証結果を踏まえたモデル構築の方針

前節の分析結果より, ”方針1) PFVTのパラメータ設定を工夫”では, 対応が難しいことがわかった. よって, 今後のモデル構築は, ”方針2) PFVTの構造を改良する”の方針で検討することとする. 今後のモデル構築にあたって, 現状のPFVTの改良案のアイデア出しを行った. 以下に改良案を示す.

1) システムモデルの改良案1(考えられる全ての流入パターンを生成)

考えられる全ての流出入パターンを境界条件として, PFVTのシステムモデルに入力する. 流出入交通をVTの境界条件として入力する手法は, Mehran et.al.⁵⁶⁾が提案しており, PFVTにも応用できると考える. この方法は, 実際の交通に適合したパターンが生成できれば, 精度が高まる可能性がある. しかし, モデルの柔軟性を上げるためには, 膨大なパターンを生成する必要があるといった欠点がある.

2) システムモデルの改良案2(ポアソン分布に従って, 確率的に流出入を発生)

基本的には1)と同様であるが, ポアソン分布で, 流出入交通を発生させたパターンを生成し, 1)よりも生成パターンを減らすことを考える.

3) 観測モデルの改良案

現在は, 本線の区間上流端から流入するプローブデータを用いて, タイムスペース上の累積交通量を観測するモデルを構築している. これを”プローブ軌跡上は累積交通量が変化しない”といった交通量の変化量を観測するモデルに改良する. そうすると, 区間途中で流出入するプローブデータを活用することが出来, 精度向上が期待できる.

8. おわりに

本稿では, 流出入を考慮した渋滞推定モデル構築の基礎分析として, ”方針1) PFVTのパラメータ設定を工夫する”と”方針2) PFVTの構造を改良する”の2つの方針について, 今後, どちらの方針でモデルを構築していくべきか検討したものである. その結果, 区間途中の流出入を考慮する場合, 方針2が妥当であることがわかった.

以上の結果を踏まえ, 今後の課題を以下に整理する.

1) モデル改良案の妥当性検証

本稿で提示したモデル改良案について, どの案がよい

か組み合わせの可能性も含めて検証する必要がある. また, 他の案がないかも引き続き検討が必要である. 改良案の検証にあたっては, 本稿と同様に簡易なネットワークに対して, シミュレーションで交通流を生成し, モデル検証を行うことが考えられる.

2) 改良モデルの性能検証

1)で最も良いと判断されたモデルについては, 様々な条件の下でモデルを適用し, モデルの限界性能を検証することも必要と考える. また, 双子実験¹²⁾を実施し, システムモデルの性能を検証することも有効と考える.

謝辞: 本研究は, 独立行政法人 情報通信研究機構 (NICT) の「ソーシャル・ビッグデータ利活用・基盤技術の研究開発(課題178A09)」および平成26年度 戦略的創造研究推進事業 (CREST, JST) の「大規模・高分解能数値シミュレーションの連携とデータ同化による革新的地震・津波減災ビッグデータ解析基盤の創出」プロジェクトより助成を受けたものである. ここに記して感謝の意を表する.

参考文献

- 1) 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田亮: データ同化入門一次世代のシミュレーション技術一, pp.47-77, 朝倉書店, 2011.
- 2) 樋口知之: 予測にいかす統計モデリングの基本ーベイズ統計入門から応用までー, pp63-93, 講談社, 2012.
- 3) Daganzo, C. F.: On the Variational Theory of Traffic Flow: Well-Posedness, Duality and Applications, American Institute of Mathematical Sciences, Vol. 1, No.4, pp.601-619, 2006.
- 4) 川崎洋輔, 原祐輔, 桑原雅夫: 交通流理論の状態空間モデルへの拡張, 土木計画学研究・講演集, Vol.51, CD-ROM, 2015.
- 5) Mehran, B., Kuwahara, M. and Naznin, F.: Implementing Kinematic Wave Theory to Estimate Vehicle Trajectories from Fixed and Probe Sensor Data, Transportation Research Part C, Vol.20, pp.144-163, 2012.
- 6) Mehran, B. and Kuwahara, M.: Fusion of probe and fixed sensor data for short-term traffic prediction in urban signalized arterials, Special Issue for the International Journal of Urban Sciences on Urban Transportation, Vol. 17, pp. 163-183, 2013
- 7) 福田大輔: データ同化アプローチによる交通状態の推定に関する研究動向, 交通工学, Vol.47, No.2, pp33-38, 2012.
- 8) Patireia, A. D., Wrighta, M., Prodhommea, B. and Bayen, A. M.: How much GPS data do we need?, Transportation Research Part C, Vol.58, pp,2015.
- 9) 本山 拓樹, 佐々木 邦明: 高速道路のミクロシミュレー

ションへの交通状態観測のフィードバック, 土木計画学研究・講演集, Vol.51, CD-ROM, 2015.

- 10) Kitagawa, G.: Monte Carlo Filter and Smoother for Non-Gaussian Nonlinear State Space Models, Journal of Computational and Graphical Statistics, Vol. 5, No. 1, pp. 1-25, 1996.
- 11) Han, J., Kamber, M. and Pei, J.: DATA MINING Concepts and Techniques Third Edition, Morgan Kaufmann, 2011.
- 12) 中西航, 石川智行, 布施孝志: 動画像を用いた人物位置推定手法の双子実験による性能検証, 土木計画学研究・講演集, Vol.51, CD-ROM, 2015.

(2015.7.31受付)

CONSTRUCTION OF REAL-TIME TRAFFIC CONGESTION ESTIMATION METHOD CONSIDERING THE INFLOW AND OUTFLOW IN THE INTERVAL BY THE STATE SPACE MODEL

Yosuke KAWASAKI, Yusuke HARA and Masao KUWAHARA