

プローブデータを活用した Cell Transmission Model のパラメータ較正

大森優希¹・安田昌平²・井料隆雅³・玉川大⁴

¹ 学生非会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: 207t106t@stu.kobe-u.ac.jp

² 学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: s.yasuda@stu.kobe-u.ac.jp

³ 正会員 東北大学大学院 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: iryo@tohoku.ac.jp

⁴ 正会員 阪神高速道路株式会社 保全交通部交通技術課 (〒530-0005 大阪市北区中之島 3-2-4)
E-mail: dai-tamagawa@hanshin-exp.co.jp

区間検知器データを用いて推定された fundamental diagram (FD) のパラメータは、検知器が設置されている箇所の情報のみを含むため、分析において様々な誤差を生じさせる可能性がある。本研究では、近年活発に用いられるようになった空間的に連続した観測データ（プローブデータ）を用いて、より高い空間分解能のパラメータとして FD を逐次的に較正する方法を提案する。交通流ダイナミクスの計算には Cell Transmission Model (CTM) を活用し、FD のパラメータと流入交通量を入力として実現される交通状態を観測データと比較することによりパラメータの尤度を評価する。パラメータの較正には particle filter を用いる。本研究で提案する方法論により、都市高速道路で取得された実観測データを用いて数値計算を行った。

Key Words: プローブデータ, Fundamental Diagram, Cell Transmission Model, Particle Filter

1. 序論

(1) 研究の背景と目的

交通状態変数間の関係を記述する Fundamental diagram (FD)¹⁾²⁾は交通流をモデル化する上で最も重要な概念の一つであり、実務・研究において多用されている。分析対象区間の FD パラメータについては、観測データから推定する必要があるが、検知器等の固定点観測機器から取得されたデータを用いて推定された FD のパラメータは、観測機器が設置されている箇所の情報のみを含むため、分析において様々な誤差を生じさせる。本研究では、近年活発に用いられるようになった空間的に連続した観測データ（プローブデータ）を用いて、より高い空間分解能のパラメータとして FD の逐次的な較正を行うことを目的とする。

交通流ダイナミクスの計算には Cell Transmission Model (CTM)³⁾を活用し、FD のパラメータと流入交通量を入力として実現される交通状態を観測データと比較することによりパラメータの尤度を評価する。パラメータの較正には particle filter を用いる。本研究で提案する方法論によ

り、都市高速道路で取得された実観測データを用いて数値計算を行った。

(2) 本論文の構成

第 1 章では、研究の背景と目的について述べた。第 2 章では、CTM と particle filter の方法論について述べる。第 3 章では、数値計算を行う。第 4 章では、結論を述べる。

2. 方法論

(1) CTM を用いた計算

出入りのない単路を対象とし、対象区間を等間隔のセグメントに分割する。流入交通量と FD を入力として、実現される交通状態を CTM により計算する。流入交通量は、区間検知器で観測された交通量を、セルの入り口における交通量に、ETC20 で観測された旅行時間を用いたタイムスライス法によって変換する。

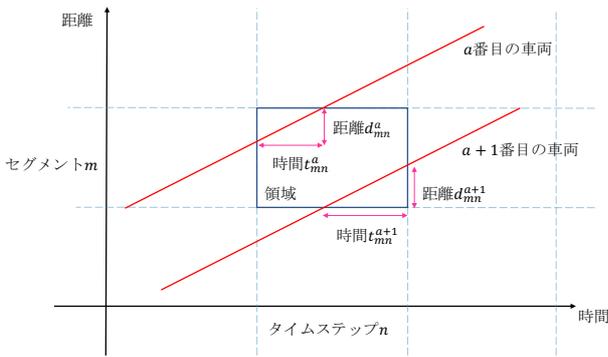


図-1 時空間図作成

(2) 観測データの定義

現況再現のための観測データとして、走行軌跡データから作成した時空間図のデータを使用する⁴⁾。本研究では、マップマッチング処理後の ETC2.0 データから時空間図を作成する。24 時間を 15 分ごとに分割することで、1 日を 0 から 95 までのタイムステップで表す。対象区間の距離を 100m ごとのセグメントに分割する。図-1 で示すように、横軸にタイムステップに分割した時間・縦軸セグメントに分割した距離を取ることで、距離-時間の 2 次元図を作成する。タイムステップとセグメントによって区切られたセルに、ETC2.0 データから計算された平均速度を与えることで時空間図を作成する。

セグメント m 、タイムステップ n で区切られる領域の平均速度は、Edie の定義より、

$$v_{mn} = \frac{\sum_{a \in A_{mn}} d_{mn}^a}{\sum_{a \in A_{mn}} t_{mn}^a} \quad (1)$$

で計算される。 A_{mn} はセグメント m 、タイムステップ n で作られる領域（セル）を通過した車両の集合である。ただし、 M をセグメントの集合、 N をタイムステップの集合として、 $m \in M, n \in N$ とする。セグメント m 、タイムステップ n で作られる領域を通過した車両軌跡の距離 d_{mn}^a の総和を通過時間 t_{mn}^a の総和で割ったものを平均旅行時間 v_{mn} とする。時空間図の作成において、セルによっては欠測値が存在する可能性がある。また、距離-時間の 2 次元図を距離方向・時間方向に等間隔で分割し時空間図を作成するため、セルごとのばらつきが生じてしまう。本研究では欠測値を含むセルを、同セグメントの前のタイムステップの値で補完する、補完した時空間図を加重移動平均により平滑化する。加重移動平均 WMA は、

$$WMA_n = \frac{\tilde{n}v_n + (\tilde{n} - 1)v_{n-1} + \dots + 2v_{n-\tilde{n}+2} + v_{n-\tilde{n}+1}}{\tilde{n} + (\tilde{n} - 1) + \dots + 2 + 1} \quad (2)$$

で表される。ここで、 v_n は、タイムステップ n における時空間図の列ベクトルを、 \tilde{n} は加重移動平均をとるタイムステップ数を表している。本研究では、 $\tilde{n}=3$ とした。

(3) particle filter

本節では既存研究⁵⁾を参考に particle filter の説明を行う。

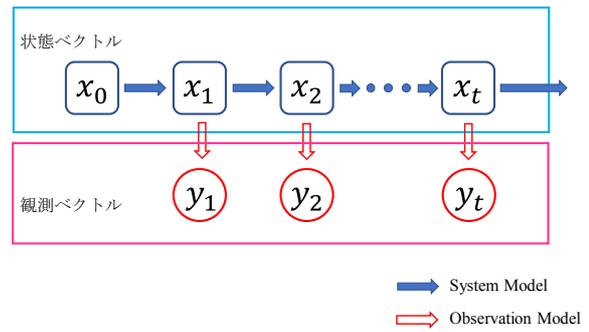


図-2 状態空間モデルによる状態推定概念

particle filter（粒子フィルタ、逐次モンテカルロ法）とは、状態空間モデルの一種である。状態空間モデルは System Model と Observation Model から構成される。System Model は状態 x_t の時系列の遷移を表したものであり、Observation Model はある状態 x_t のときの観測値 y_t との関係を表したものである。状態空間モデルを用いた推定の概念図を図-2 に示す。

c) particle filter の計算方法

本研究では、観測値を速度、潜在状態を FD として particle filter により FD パラメータの較正を行う。System Model と Observation Model を式で表すと以下の式で表される。

System Model $\theta_t = \theta_{t-1} \quad (3)$

Observation Model $v_t = Sim(\theta_t, D_t) \quad (4)$

θ_t : FD のパラメータ

v_t : 速度の行列

$Sim(x)$: CTM によるシミュレーションを行う関数

D_t : 流入交通量

本研究における計算の流れは、

- STEP1 : 初期値の設定（最初のみ）
- STEP2 : 尤度計算
- STEP3 : リサンプリング
- STEP4 : フィルタリング処理

の手順で行われる。上記の STEP2-4 を分析対象の日数分繰り返すことで処理を行う。以下では、各 STEP について詳細を述べる。STEP1 での初期値は、対象区間全体を 1 区間として区間検知器から求められた FD のパラメータ（後進波速度：-12.3km/h、渋滞密度：304.9veh/km）を使用する。その値を平均とする正規分布に従ってアンサンブルと同数の値を無作為に取得する。このとき、標準偏差は後進波速度と渋滞密度ともに 1.5 とした。

STEP2 では各パーティクルにつき、各セルでの CTM の計算結果の速度の値を平均、標準偏差を 5 とした。この正規分布と時空間図の対応するセルから得られた速度の値を用いて各セルの尤度計算を行う。尤度計算の式は

以下で表される。

$$f(x_j^i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x_j^i - \mu_j^i)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (5)$$

x_j^i : 実測値 (i行j列の時空間図の値) (km/h)
 μ_j^i : 平均 (i行j列の CTM の値) (km/h)
 σ : 標準偏差

上記の計算によって得られた尤度を用いて, 1 パーティクルあたりの平均尤度が求められる (式(6)) .

$$\overline{f(x)} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f(x_j^i)}{n} \quad (6)$$

$\overline{f(x)}$: 1パーティクルあたりの平均
 $f(x_j^i)$: i行j列のセルの尤度
 n : 1パーティクルのセルの合計

STEP3 では, STEP2 で得られた平均尤度をもとに以下の式で各パーティクルの重み付けを行う。

$$p_n = \frac{f^3(x_n)}{\sum_{k=1}^n f^3(x_k)} \quad (7)$$

$\overline{f^3(x_n)}$: パーティクル n での平均尤度の3乗

これをパーティクルが取得されやすい確率とする。1 回目では, パーティクルからその確率の上位 5%のパーティクルを取得する。2 回目以降はその確率に依存して, 1 回目に取得したアンサンブルと同数の FD のパラメータを, 1 つ前の時点での FD のパラメータの中から重複を許して取得する。

STEP4 では, 各パーティクルに対応する FD の最大交通容量を重み付け平均を求める。

$$\overline{q_{weight}} = \frac{\sum_{k=1}^n q_n \times f^3(x_n)}{n} \quad (8)$$

上記の処理を繰り返して抽出されたパーティクルのうち平均尤度が最も高いパーティクルの FD を用いて CTM を計算する。

3. 数値計算

本章では, 2 章で提案した方法を用いて数値計算を行い, その結果を示す。また, 数値計算を行うために必要なデータの概要や, 推定とシミュレーションを行うための事前処理の説明をする。

(1) 使用データと計算対象の概要

本研究で使用したデータは, ETC2.0 データと区間検知器データの 2 つである。このデータには, 車両 id, 通

表-1 分析対象日

年	2018
月	6
日	1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 28, 29, 30

過時刻, 速度などの情報が含まれている。本研究では, 観測データを作成する際に ETC2.0 データの日付, 車両 id, トリップ番号, 上流部からの距離, 旅行時間を利用する。区間検知器データは, 高速道路上の一定の間隔で区間検知器が設置してあり, この検知器の下を通過した車両が 5 分間ごとに集計されているデータである。検知器データには, 5 分ごとの時刻, 交通量, 平均速度などの情報が含まれている。本研究では区間検知器は CTM の流入交通量に使用されるため, 交通量, 年, 月, 曜日, 時刻, 平均速度を使用する。

検証区間と対象期間について述べる。検証区間は, 阪神高速道路 3 号神戸線東行き (上り方向) の魚崎～深江間 (距離: 1.3km) の区間であり, 魚崎入口 (上流地点) から 0.6km 地点に区間検知器は設置されている。対象期間は, 2018 年 6 月 1 日～2018 年 6 月 30 日の 30 日間から大阪北部地震が発生した日 (6 月 18 日), 先詰まり等で検証区間内にボトルネックが確認できない日 (8 日間) を除外した 21 日間 (表-1) である。

(2) 使用データと検証対象の概要

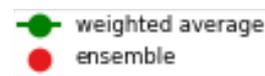
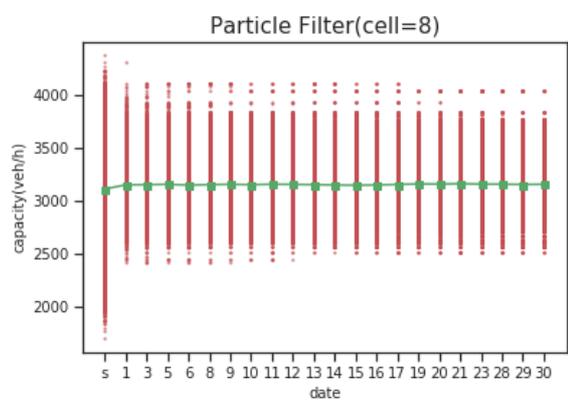
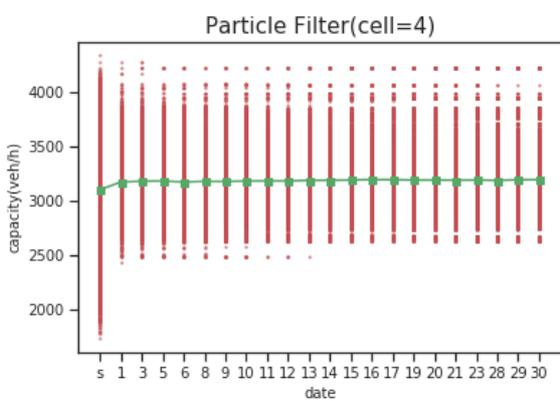
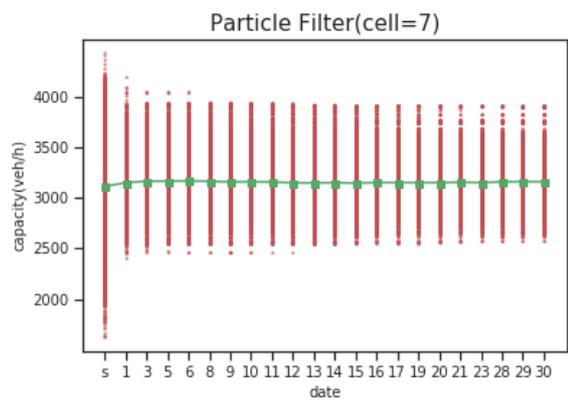
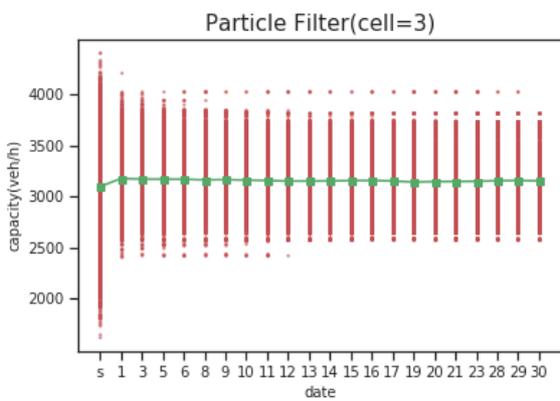
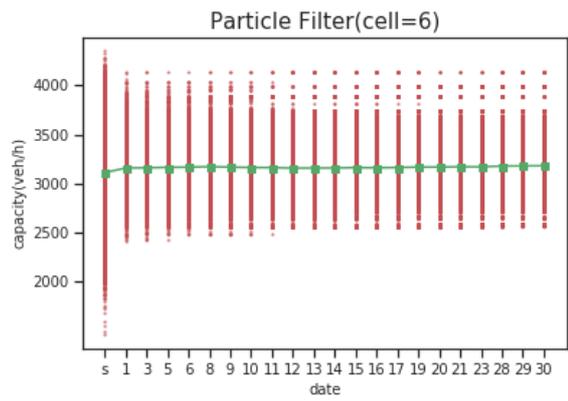
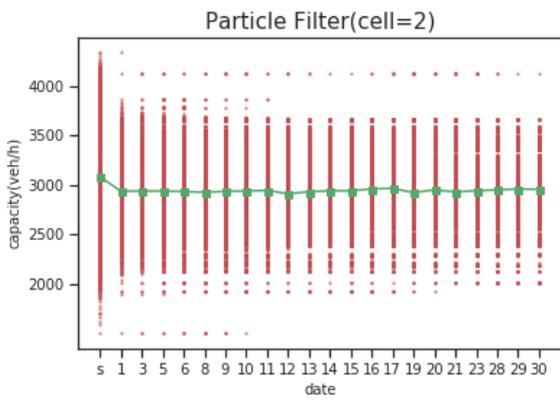
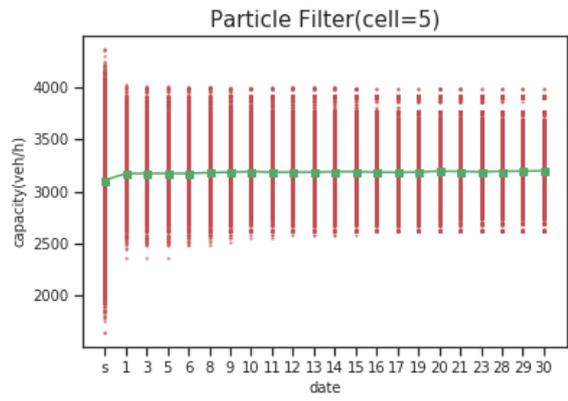
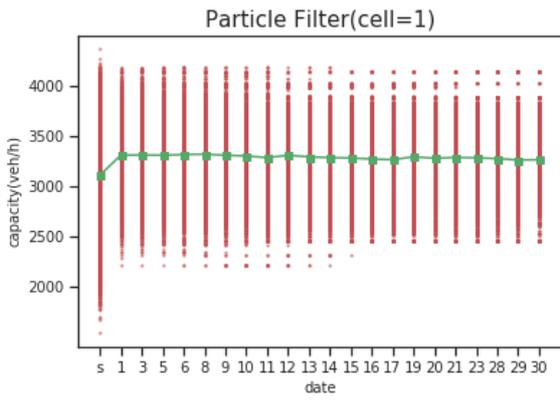
CTM や particle filter を用いて実装を行う前に, 時空間図を用いて ETC2.0 データから実際の速度変化を表現する。CTM と比較しやすいように, 時空間図で時速 60km 以上のものは一律時速 60km とする。実際の速度変化を表現した時に, 検証区間中にボトルネックが確認できない日を特定し, その日を除外日とする。

(3) 結果

得られた結果を時空間図と比較して, どの程度の現況再現ができているのかを検証する。

a) particle filter による推定結果

particle filter によって FD のパラメータ較正を行った。本研究では初期値で発生させるパーティクル数は 100,000 個とする。また, 深夜や早朝は欠損値が存在しており正しい判定ができないので, 尤度計算に使う時間帯は 6:00-22:00 とする。そのときのセグメントごとの最大交通容量のアンサンブルと重み付き平均の推移を表したグラフは以下の通りである (図-3)。



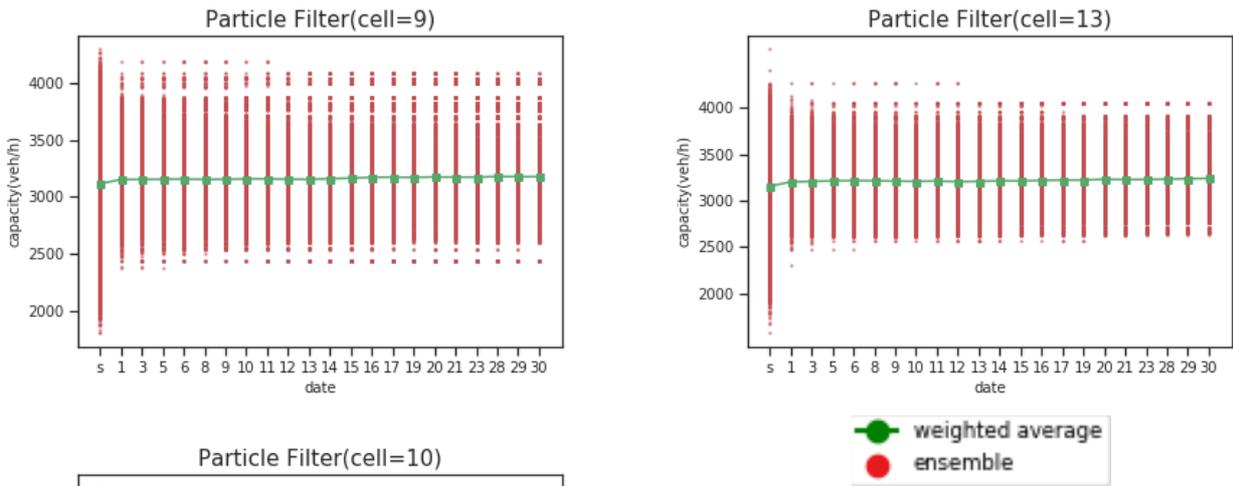


図-3 particle filter による推定

13 区間すべての最大交通容量の重み付き平均の推移を 1 つのグラフにまとめたものが以下の図である (図-4) . この図における x 軸の s は初期値で, ここから尤度が高い 5%を取得しリサンプリングされていく. この図の凡例における cell n (n=1, 2, …) は上流からのセグメントが何番目であるかを示している. 初期値では各セグメントの最大交通容量の重み付き平均はあまり差がなく, 同じような容量を示している. 1 日目から日数の経過とともに, 各セグメントの最大交通容量が増減や変化なしをしながら各々最適な値を取得していく. 最終的に各セグメントはそれぞれ異なる FD を取得しているので, 検証区間は一樣な FD を持つ道路ではなくなる.

b) CTMによる実装結果

a)より, 検証区間のFDはセグメントごとに異なるFDを有することがわかる. b)項では, particle filter で得られたFDのパラメータがどの程度観測値の再現性を有するのかを検証する. 同時に全く較正を行わなかった結果として, 初期に生成されたパーティクルのうち無作為に抽出したFDパラメータを用いた結果を示す. 本論文では, 検証期間である21日間から6月13日の一例を挙げて検証を進める. 時空間図による観測値を図-5, particle

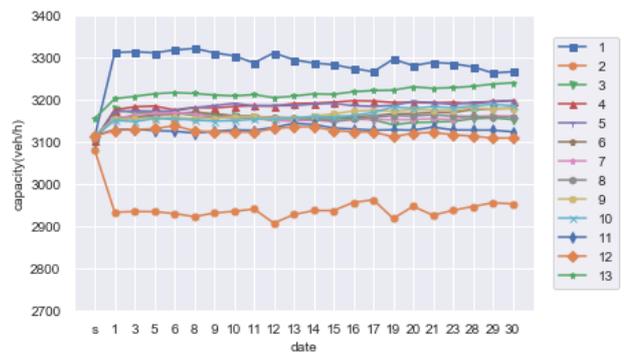
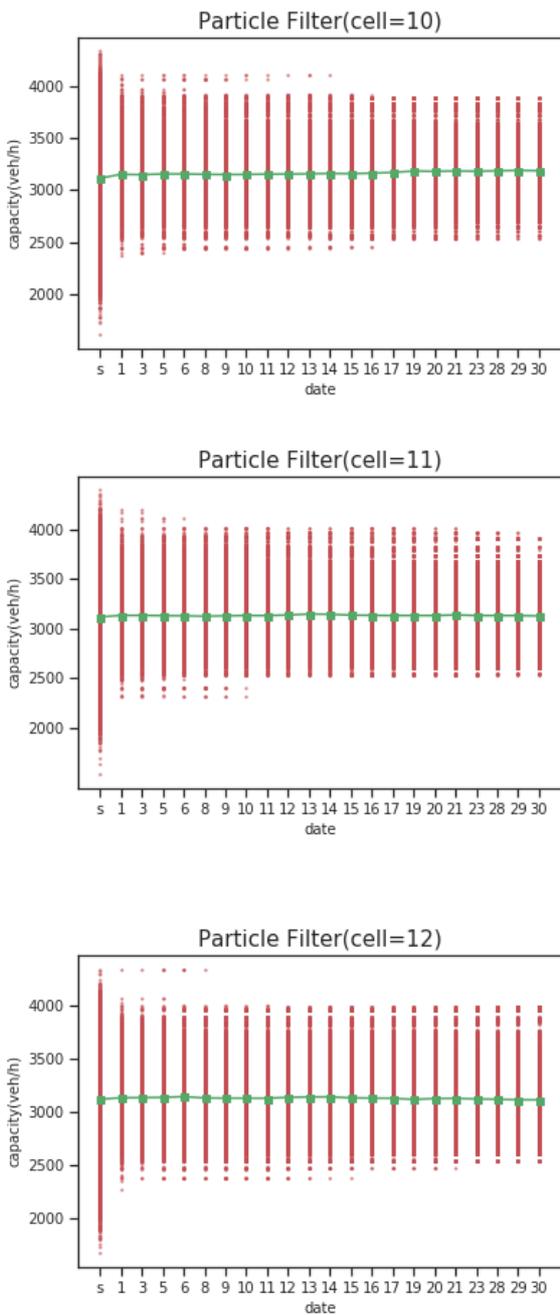


図-4 セグメントごとの重み付き平均の推移

filter で校正した結果の CTM を図-6 に示す. 両者を比較すると, どちらも 0.3~0.4km のあたりにボトルネックが存在していることが確認できる. 検証区間が一律の FD を持つ一様な道路ではなくなったことによりボトルネックが発生し, 観測値に近い道路が再現されていると考えられる. また, 両者の速度分布を比較すると, 時空間図と CTM の結果は類似している. しかし, CTM では 0.3~0.4km のあたりほど強くはないものの 0.9km の地点にもボトルネックが存在しているが, 時空間図ではその地点にボトルネックは見られない. 本研究では対象期間全体を通して校正を行うが, 対象期間中には 0.9km の地点にボトルネックが発生している日も存在している. そのような日においては, 0.9km の地点にボトルネックが発生するような FD のパラメータを持つパーティクルの尤度が高くなるため, このパーティクルが最後まで生き残るとこのような結果が出力される. 本研究では初期のパーティクル数が 10000 個, 分析対象期間が 21 日間で図のような再現性を得られたことから, より多くのパーティクル数を用いて推定を行うか, 長い対象期間で行うと再現性を高めることができると考える.

本校正を行わなかった結果として, 初期に生成されたパーティクルの FD パラメータを用いて計算された CTM の結果から 2 つを無作為に抽出したもの (図-7) と校正後のパラメータを用いて計算された CTM の結果 (図-6) を比較する. 流入交通量は固定で与えているため変化はないが, ボトルネックの位置などに相違点が見られる. 校正を行わない場合, 観測値とは異なる場所にボトルネックを発生させており, 再現度は低いと判断できる. また, 速度分布についても観測値と大きく異なるものも存在している. 観測値では 8:00~12:00 頃の時間帯には車両は自由流速度で進んでいるが, 推定を行わなかった場合の中にはその時間帯も渋滞している. 初期値の FD の生成の段階では, このように観測値とは大きく異なる FD も存在しており, このような FD は particle filter を行うことで除外されている. 校正後の結果は観測値を正確に再現しているとはいえないものの, 校正を全く行わない場合よりは観測値に近い結果を出力している.

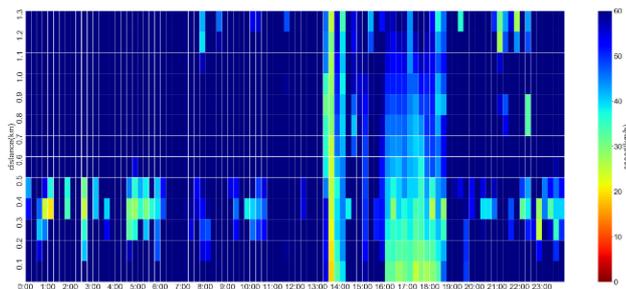


図-5 観測された速度の時空間図

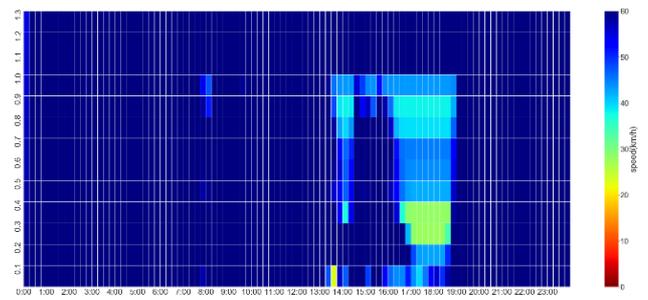


図-6 校正後の FD パラメータを用いて計算された速度の時空間図

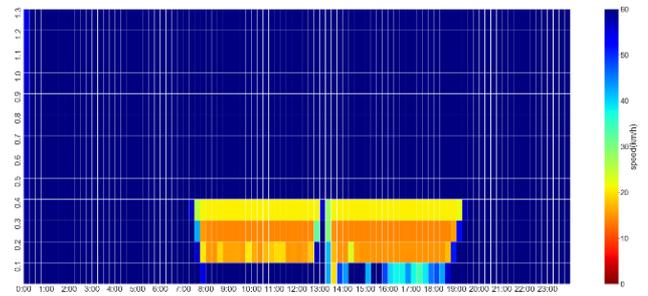
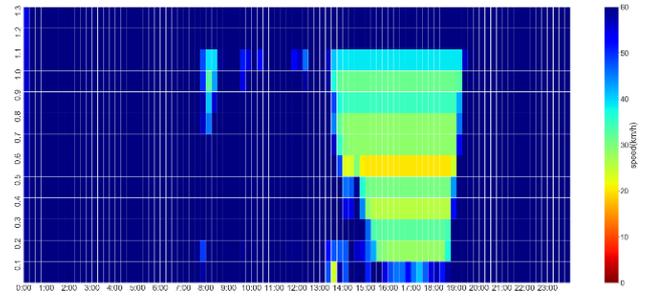


図-7 初期に生成された FD パラメータを用いて計算された速度の時空間図 (2 例を無作為抽出)

4. 結論

本研究では particle filter を用いて FD のパラメータ校正を行い, その結果を用いて CTM の計算を行った. その CTM の結果と時空間図における観測値を比較することで, particle filter における FD のパラメータ推定による再現性を確認した. 数値計算の結果, particle filter を用いた校正を行うことで校正を行わなかった時よりも再現性が高いことが確認できた.

参考文献

- 1) Greenshields, B., Channing, W., Miller, H., et al.: A study of traffic capacity, Highway research board proceedings, Vol. 1935, National Research Council (USA), Highway Research Board, 1935.
- 2) Coifman, B.: Revisiting the empirical fundamental relationship, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.68, pp.173–184, 2014.

- 3) Daganzo, C. F.: The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.28, No.4, pp.269–287, 1994.
- 4) 小倉大輝：プローブカーデータによる旅行時間予測と突発事象検知,神戸大学大学院工学研究科修士論文, 2020.
- 5) 小篠耕平：都市高速道路における潜在的ランプ間 OD 交通量の推定,神戸大学大学院工学研究科修士論文, 2014.

PARAMETER CALIBRATION OF CELL TRANSMISSION MODEL
USING PROBE DATA

Yuki OMORI, Shohei YASUDA, Takamasa IRYO and Dai TAMAGAWA