合流部容量変動と不確実性を考慮した 旅行時間の統計的予測手法

坂井 勝哉¹・日下部 貴彦²・朝倉 康夫³

¹学生会員 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: k.sakai@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: t.kusakabe@plan.cv.titech.ac.jp

³正会員 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

旅行時間を点推定で予測し、かつ一定の割合で収まると期待される幅も推定する既存の統計モデルを基にして、合流部を対象とするモデルに拡張した。合流によるボトルネックでは相手路線の混雑状況によって容量が変動するため、容量の大きさに応じて旅行時間の不確実性が異なることを考慮する必要がある。

実データを用いたモデルの検証分析では、旅行時間を点推定で予測する段階では既存モデルで対応できることが確認されたが、旅行時間のばらつきを確率的に考慮した幅を予測する場合には合流相手路線のオキュパンシーをモデルの入力変数として用いることで旅行時間の不確実性をより適切に推定できることが示された。具体的には、相手路線のオキュパンシーが高ければ合流部の容量が小さくなり旅行時間のばらつきが大きくなることがわかった。

Key Words : travel time prediction, prediction interval, junction, Bayesian probability

1. 序論

サグや合流などといった道路線形によるボトルネックが原因のひとつとなり、日々渋滞が発生している。渋滞の発生状況を利用者へ知らせることは、利用者が経路や出発時刻の選択を行う上で重要であり、旅行時間情報のニーズは高い。都市高速道路の放射線部では一般道との並行路線が多いため、より良い旅行時間情報を提供することによって適切な経路選択を可能にすると考えられる。また、実務的な観点から、シンプルで利用可能性の高い旅行時間予測手法が必要である。

旅行時間予測手法として、主に交通流をモデル化したシミュレーションに基づく方法と、過去のデータに基づいた統計的方法がある。交通流シミュレーションに基づく方法として、宗像ら¹⁾や白石ら²⁾は、リアルタイムに観測されたデータを入力値とした手法を開発している。統計的方法として、舟橋ら³⁾はVICSデータを用いた手法を、割田ら⁴⁾や松本ら⁵⁾は、車両感知器データを用いた手法を提案している。また、中村・王⁶⁾や三輪ら^{7), 8)}は、蓄積データに加えてプローブデータを用いてフィルタリングに

よる補正を行う手法を提案している。シミュレーションによる手法は、入力変数が多く複雑である一方、統計的手法はシンプルで扱いやすいという利点がある。Weiら⁹⁾のモデルは、単一ボトルネック区間を対象として、ボトルネックの性質を考慮し、パラメータが1つであるためシンプルで利用しやすい。このモデルは、合流部をボトルネックとした区間の予測を行うことも可能である。坂井ら¹⁰⁾はWeiらのモデルを拡張し、旅行時間を点で予測するのに加えて、一定の割合で経験されると期待される旅行時間の幅も同時に予測するモデルを提案している。川北ら¹¹⁾が車両検知器データを用いて阪神高速内の各路線の所要時間信頼性に関して分析しているのに対して、坂井ら¹⁰⁾は時々刻々の混雑状況の変化による所要時間のばらつきをモデル化している。

坂井ら¹⁰⁾の研究では、Weiらのモデルで用いられていた交通状況を表す変数によって場合分けを行うことにより、旅行時間が変動しやすい場合には幅が広く推定され、旅行時間が安定している場合には幅が狭く推定されることが確認されている。つまり、交通状況をうまく場合分けすることで、旅行時間の不確実性を利用者へ適切に情

報提供することができると期待される。

ジャンクションなどの合流部では、自路線の混雑状況によって旅行時間が変動するのはもちろんのこと、合流する相手路線の混雑状況によっても旅行時間が変動するだろう。相手路線が合流部で混雑していれば、合流比率が低下するため自路線のボトルネック容量が低下することが考えられる。ボトルネック容量が比較的大きければ需要が変動しても旅行時間にはあまり影響しないのに対して、ボトルネック容量が小さい場合には旅行時間が需要の変化によって大きく左右されるだろう。ボトルネック容量が予測時刻の近傍で安定していればWeiらのモデルを用いることができるが、そのモデルを拡張して幅をもたせた予測も行いう場合には、ボトルネック容量が異なることによる旅行時間のばらつきを考慮する必要がある。

本研究の目的は、先行研究のモデルを改良することで、ジャンクションなどの合流部がボトルネックとなって渋滞が発生する区間を対象として幅をもたせた旅行時間予測を行う方法に拡張し、その精度検証を行うことである。また、ボトルネック容量の違いによる旅行時間のばらつきの変化についても分析を行う。

2. 旅行時間予測モデル

この章では、旅行時間予測モデルについて述べる。本研究のモデルは、都市高速のように検知器が密に備え付けられている区間への適用を想定してある。第1節では、Weiら⁹⁾によるモデルの導出を示し、本研究のモデルに含まれる変数の特徴について述べる。Weiらのモデルはボトルネックの性質を考慮したものとなっており、ボトルネック容量と流入量が予測時刻の近傍で安定していればその大小にかかわらず適用可能なモデルとなっている。第2節では、点の予測値に加えて幅を持たせて旅行時間を予測する坂井らのモデルについて述べる。このモデルを合流部へ適用した場合、Weiらのモデルをそのまま拡張しているため予測時刻の近傍でボトルネック容量が安定していれば点の予測については問題が生じないが、幅をもたせた予測を行うにはボトルネック容量の大小による旅行時間の変動のしやすさを考慮する必要がある。第3節では、第2節のモデルを合流部へ適用するためのモデルへ拡張する。ボトルネック容量が大きい場合と小さい場合を区別することによって、より適切に旅行時間の幅を推定できるようになると考えられる。

(1) Weiら⁹⁾のモデル

現在利用者へ提供されている旅行時間情報は瞬間旅行時間 (ITT; Instantaneous Travel Time) であり、情報提供時刻の直前に検知器から読み取れる速度データより算出さ

れている。ITTを算出する区間を検知器の設置されている n 個の小区間に分ける。ある小区間 $m(=1,2,\dots,n)$ の区間長を l_m 、検知器による時刻 t の小区間 m での観測速度を v_m とすれば、時刻 t のITTは、観測された速度で小区間を通過するのにかかる時間の同時刻単純和として

$$ITT_t = \sum_{m=1}^n \frac{l_m}{v_m} \quad (1)$$

と求められる。しかし、利用者が経験する実旅行時間 (RTT; Real Travel Time) はITTとは異なる。

Weiら⁹⁾は、ITTをモデルの入力値として旅行時間を予測する統計モデルを構築しており、観測されたITTをそのまま予測値とするよりも精度が高いことが確認されている。Weiらによるモデルの誘導を以下に示す。

単路部の最下流部にボトルネックが1つ存在する区間を考える。自由流区間と渋滞流区間の速度がそれぞれ安定していると仮定すれば、ある車両の旅行時間は、自由流区間と渋滞流区間のそれぞれをどれだけ走行するのかで決まる。図-1より、時刻 t に対象区間へ流入した車両が渋滞末尾へ到達するまでの時間 gap_t を考えれば、時刻 t に対象区間へ流入する利用者が経験する実旅行時間 RTT_t は、ITTを用いて次式で表すことができる。

$$RTT_t = ITT_{t+gap_t} \quad (2)$$

ITT_{t+gap_t} の値は ITT_t とは異なるが、その原因は「 gap_t の時間差があること」と「 gap_t の間に交通状況 (渋滞長) が変化すること」である。渋滞長の変化は、渋滞長の延伸 (収縮) 速度を用いて記述できるが、検知器データから求めるのは困難であるため、交通状況の変化を表す指標としてITTの時間変化率 C を導入し、それをモデルに反映している。 C は次のように定義される。

$$C_t = \frac{ITT_t}{ITT_{t-1}} \quad (3)$$

C_t は時刻 t のITT変化率を表す。この指標は、「 $C>1$ 」ならば渋滞が延伸していることを意味しており、「 $C<1$ 」ならば逆を意味する。以上より、 ITT_{t+gap_t} と ITT_t の関係は次のように書ける。

$$ITT_{t+gap_t} = f(C_t, gap_t) \cdot ITT_t \quad (4)$$

ここに、関数 $f(\cdot)$ は未知の関数である。式(2)と式(4)より、

$$RTT_t = f(C_t, gap_t) \cdot ITT_t \quad (5)$$

また、時刻 t に対象区間へ流入した車両が渋滞末尾へ到達するまでにかかる時間 gap_t は、図-1より、対象区間の始点から渋滞末尾までの距離 x を自由流区間の速度 V_{free} と渋滞延伸速度 $\bar{V}_{extent}$ の和で除して算出される。

$$gap_t = \frac{x}{V_{free} + \bar{V}_{extent}(C_t)} \quad (6)$$

渋滞延伸速度 $\bar{V}_{extent}$ は渋滞長の変化率を表す C_t の関数である。ゆえに、 gap_t は x と C_t の関数であると考えられ、

$$gap_t = gap_t(x, C_t) \quad (7)$$

であり、関数 $f(C_t, gap_t)$ は次のように書き直せる。

$$f(C_t, gap_t) = F(C, x) \quad (8)$$

ゆえに、ITTとRTTの関係は次式で表すことができる。

$$RTT_t = F(C, x) \cdot ITT_t \quad (9)$$

式(9)は、「ITTの時間変化率 C 」と「対象区間の始点から渋滞末尾までの距離 x 」の値の組み合わせ毎にITTとRTTの比例定数 $F(C, x)$ を変えてRTTを予測することを意味する。具体的な方法は、過去の観測データから C と x の値の組み合わせが共通のサンプルを抽出し、ITTとRTTの組の線形回帰分析により、パラメータ $F(C, x)$ を推定するというものである。

このモデルは旅行時間を点推定するモデルである。ボトルネックをモデル化して交通流の性質を定式化している上に、パラメータがひとつであり簡便なモデルである。

(2) 幅を持たせたモデルへの展開

坂井ら¹⁰⁾は、前節のモデルを拡張して予測値の性能を表す幅を持たせた旅行時間予測手法を提案している。従来の点の予測値に加えて、ある一定の確率で観測されると想定される幅を情報として付加することで、利用者へ予測の確からしさを情報提供できると考えられている。

a) 実旅行時間のモデル

RTTとITTの関係を表すモデル式は次の通りである。

$$RTT_t (ITT = ITT_{t-\tau}, C = C_{t-\tau}, x = x_{t-\tau}) = F_{C,x} \cdot ITT \quad (10)$$

式(10)は、予測を行う時刻の1期前に観測されたITTに、 C と x の値の組み合わせによって決まるパラメータ $F_{C,x}$ を乗ずることにより、旅行時間予測を行えることを意味している。 RTT_t は時刻 t に予測対象区間へ流入する車の実旅行時間であり、 τ を検知器の観測周期としたとき、 $ITT_{t-\tau}$ は時刻 $t-\tau$ の瞬間旅行時間である。 $C_{t-\tau}$ は時刻 $t-\tau$ のITT変化率であり

$$C_{t-\tau} = \frac{ITT_{t-\tau}}{ITT_{t-2\tau}} \quad (11)$$

と定義される。 $x_{t-\tau}$ は時刻 $t-\tau$ における予測対象区間の始点から渋滞末尾までの距離である。モデルパラメータである $F_{C,x}$ は C と x の値の組み合わせ毎に異なる確率関数 $p(F|C, x)$ に従う確率変数であると定義する。

$$F_{C,x} \sim p(F|C, x) \quad (12)$$

b) パラメータ推定方法

パラメータ $F_{C,x}$ が従う確率関数 $p(C, x)$ を算出する方法を示す。 C, x, F は連続値であるが、実際の道路へモデルを適用する際にはいくつかの階級に区切り離散化する。蓄積された検知器データによって算出される時刻毎のデータセット $[ITT_{t-\tau}, RTT_t, C_{t-\tau}, x_{t-\tau}]$ を C と x の階級値の組み合わせ毎に分割し、分割されたデータセット毎に $F_t (= RTT_t / ITT_{t-\tau})$ を算出する。モデルパラメータが従う確率関数を求める例として、ITTの変化率 C が a 番目の階級 C^a に含まれ、対象区間の始点から渋滞末尾までの距離 x が b 番目の階級 x^b に含まれる場合を考える。過去の蓄積データのう

ちから C^a と x^b の組が観測されたデータセットのみを抽出し、観測された F が含まれる階級値を数え、その頻度を確率に置きかえる。つまり C^a と x^b が観測されているとき、 F の r 番目の階級値 F^r が生起する確率 $p(F^r|C=C^a, x=x^b)$ は次のように求められる。

$$p(F^r | C = C^a, x = x^b) = \frac{\sum_t \delta_{F^r C^a x^b}(F_t, C_t, x_t)}{\sum_t \sum_{F^r \in Z} \delta_{F^r C^a x^b}(F_t, C_t, x_t)} \quad (13)$$

$$\delta_{F^r C^a x^b}(F, C, x) = \begin{cases} 1 & \text{if } F = F^r, C = C^a, x = x^b \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

c) 旅行時間予測方法

利用者へ情報提供を行うことを想定し、旅行時間を点で予測する方法に加えて幅を持たせて予測する方法を示す。以下では、点で予測を行った出力結果を旅行時間の予測値といい、幅を持たせて予測を行った出力結果を旅行時間に対する予測区間 (PI; Prediction Interval) という。本研究のモデルによる予測方法は、観測されたITTを過去の蓄積データから得られるモデルパラメータがとる値の分布へ乗ずることで、次の時刻に観測される旅行時間の分布形を求めるものである。旅行時間の分布は一般的に長い側へ尾を引くため、モデルによって出力される旅行時間分布の中央値を旅行時間の予測値とする。また、旅行時間分布の上側限界 u %ile値と下側限界 l %ile値を求め、 $u-l$ (%)の割合で収まると期待される旅行時間に対する予測区間を求める。

モデルパラメータ $F_{C,x}$ は C と x の値の組み合わせ毎に異なる分布に従い、分布の中央値を F^{50} とすれば式(10)より、時刻 t の直前に観測された $C_{t-\tau}, x_{t-\tau}, ITT_{t-\tau}$ を用いて、時刻 t の旅行時間の予測値 PTT_t は、

$$PTT_t = F_{C_{t-\tau}, x_{t-\tau}}^{50} \cdot ITT_{t-\tau} \quad (15)$$

と求められる。パラメータの上側限界として u %ile値を $F_{C,x}^u$ 、下側限界として l %ile値を $F_{C,x}^l$ とすれば、時刻 t の旅行時間に対する予測区間の上側限界 PTT_t^u は

$$PTT_t^u = F_{C_{t-\tau}, x_{t-\tau}}^u \cdot ITT_{t-\tau} \quad (16)$$

であり、予測区間の下側限界 PTT_t^l は、

$$PTT_t^l = F_{C_{t-\tau}, x_{t-\tau}}^l \cdot ITT_{t-\tau} \quad (17)$$

である。これらを用いて、時刻 t の旅行時間に対する予測区間 PI_t^{u-l} は次式のように求められる。

$$PI_t^{u-l} = [PTT_t^l, PTT_t^u] \quad (18)$$

図-1 交通状況（渋滞長）の時間変化

(3) 本研究で提案するモデル

ボトルネック容量が大きい場合と小さい場合とでは、需要の変化による旅行時間への影響が異なるため、ボトルネック容量の大小によって旅行時間のばらつき幅が変動することが想定される。しかし、前節のモデルは合流部渋滞のような下流部ボトルネック容量が変動することを想定しておらず、モデルパラメータはボトルネック容量に依存しないため、ボトルネック容量の大小が旅行時間の不確実性へ与える影響をモデル化できていない。本節では、合流部でのボトルネック容量の変動に対応するため、前節のモデルを拡張し、相手路線の混雑状況を考慮した変数を導入した新しいモデルを提案する。

時刻毎のボトルネック容量を直接観測するのは困難であるため、ボトルネック容量の違いによって直接的に場合分けを行うことは難しい。ジャンクションなどの合流部では、合流する相手路線の交通状態によって合流比率が異なり、ボトルネック容量が変動することが想定される。そこで、相手路線の合流部でのオキュパンシー、あるいは検知器が合流部になればその直上流部のオキュパンシーを用いることにより、合流部のボトルネック容量が表現できると考える。

本研究では、合流する相手路線の合流直上流部のオキュパンシーをモデルの変数として組み込み、相手路線の混雑による旅行時間変動への影響をモデル化する。しかし、統計モデルの入力変数の数を増やせば、各変数がとる値の場合分けの数が爆発的に多くなるため、ひとつの場合あたりに使えるデータ数が少なくなり、モデルパラメータを推定するためのデータが不足する可能性が考えられる。一方、坂井ら¹⁰⁾はモデルの入力値となる2変数 C, x の間に統計的な条件付独立性を仮定する手法を提案している。この手法を適用すれば、データ数が少ない場合でもモデルパラメータを推定できる。以上をまとめると、本研究のモデルで設定する仮定は次の3つである。

- ・ 単一ボトルネック区間において、予測時刻の近傍で需要とボトルネック容量はそれぞれ一定である。
- ・ 合流する相手路線の合流直上流部のオキュパンシーによって自路線のボトルネック容量が表現される。
- ・ 既存モデルの入力変数である「ITTの時間変化率 C 」と「対象区間の始点から渋滞末尾までの距離 x 」が統計的に条件付独立であるとみなす。

a) 実旅行時間のモデル

RTTとITTの関係を表すモデル式は次の通りである。

$$RTT_t(ITT = ITT_{t-\tau}, C = C_{t-\tau}, x = x_{t-\tau}, occ = occ_{t-\tau}) = F_{C,x,occ} \cdot ITT \quad (19)$$

ここに、 $F_{C,x,occ}$ は3変数 C, x, occ の値の組み合わせ毎に異なる確率関数 $p(F|C, x, occ)$ に従う確率変数であり、

$$F_{C,x,occ} \sim p(F|C, x, occ) \quad (20)$$

と定義される。ここで、 F が与えられたとき C と x が条件

付独立であると仮定すれば

$$p(F|C, x, occ) \propto \frac{p(F|C, occ) \cdot p(F|x, occ)}{p(F|occ)} \quad (21)$$

である。 C と x の間にのみ独立性を仮定している理由として、合流部のオキュパンシーが高ければITTの増大によって C が大きくなりやすく、 occ と C の間には強い相関があることがあげられる。また、坂井ら¹⁰⁾によると C と x の間に独立性を仮定した場合、推定結果に大きな問題は生じないことが確認されている。

b) パラメータ推定方法

モデルパラメータ $F_{C,x,occ}$ が従う確率関数 $p(F|C, x, occ)$ を算出する方法を示す。式(21)より、3変数の条件付き確率 $p(F|C, x, occ)$ を求めるためには、1変数の条件付き確率 $p(F|occ)$ と、2変数の条件付き確率 $p(F|C, occ)$ 、 $p(F|x, occ)$ を求めればよい。以下ではこれこれらの求め方を順に示す。

前節b項と同様に、 C, x, occ, F をそれぞれ離散化し、蓄積された検知器データによって算出される時刻毎のデータセット $[ITT_t, RTT_t, C_{t-\tau}, x_{t-\tau}, occ_{t-\tau}]$ 毎に $F_t (= RTT_t / ITT_t)$ を算出する。ITTの変化率 C が a 番目の階級(C^a)であり相手路線の合流直上流部のオキュパンシー occ が d 番目の階級(occ^d)である場合、 F が r 番目の階級値(F^r)をとる数をカウントしてその頻度を確率に置きかえる。つまり、 occ^d と C^a が観測されているとき、 F^r が生起する確率 $p(F^r|C=C^a, occ=occ^d)$ は次のように求められる。

$$p(F^r | C = C^a, occ = occ^d) = \frac{\sum_t \delta_{F^r C^a occ^d}(F_t, C_t, occ_t)}{\sum_t \sum_{F^r \in Z} \delta_{F^r C^a occ^d}(F_t, C_t, occ_t)} \quad (22)$$

$$\delta_{F^r C^a occ^d}(F, C, occ) = \begin{cases} 1 & \text{if } F = F^r, C = C^a, occ = occ^d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

ここに、 Z は F の階級の全体集合である。

次に、 x が b 番目の階級であり相手路線の合流直上流部のオキュパンシー occ が d 番目の階級である場合、 F^r が生起する確率は次のように求められる。

$$p(F^r | x = x^b, occ = occ^d) = \frac{\sum_t \delta_{F^r x^b occ^d}(F_t, x_t, occ_t)}{\sum_t \sum_{F^r \in Z} \delta_{F^r x^b occ^d}(F_t, x_t, occ_t)} \quad (24)$$

$$\delta_{F^r x^b occ^d}(F, x, occ) = \begin{cases} 1 & \text{if } F = F^r, x = x^b, occ = occ^d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

最後に、 occ が d 番目の階級である場合、 F^r が生起する確率は次のように求められる。

$$p(F^r | occ = occ^d) = \frac{\sum_t \delta_{F^r occ^d}(F_t, occ_t)}{\sum_t \sum_{F^r \in Z} \delta_{F^r occ^d}(F_t, occ_t)} \quad (26)$$

$$\delta_{F^r occ^d}(F, occ) = \begin{cases} 1 & \text{if } F = F^r, occ = occ^d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

c) 旅行時間予測方法

前節第c項で述べた既存モデルの旅行時間予測方法と同様に、旅行時間の予測値は

$$PTT_t = F_{C_{t-\tau}, x_{t-\tau}, occ_{t-\tau}}^{50} \cdot ITT_{t-\tau} \quad (28)$$

であり、旅行時間に対する予測区間の上側限界、下側限界はそれぞれ

$$PTT_t^u = F_{C_{t-\tau}, x_{t-\tau}, occ_{t-\tau}}^u \cdot ITT_{t-\tau} \quad (29)$$

$$PTT_t^l = F_{C_{t-\tau}, x_{t-\tau}, occ_{t-\tau}}^l \cdot ITT_{t-\tau} \quad (30)$$

である。これらを用いて、時刻 t の旅行時間に対する予測区間 PT_t^{u-l} は

$$PI_t^{u-l} = [PTT_t^l, PTT_t^u] \quad (31)$$

と求められる。

d) 期待される予測結果

モデルの入力変数である C, x, occ がモデルパラメータ F の分布へ及ぼすと想定される影響をそれぞれについて述べる。

まず、ITTの変化率 C は渋滞長の変化率を反映した変数であり、渋滞延伸時には C が大きくなることが想定されている。したがって、 C が大きい場合ほど F は大きな値をとる確率が高くなり、ITTよりも長い旅行時間を予測するモデルとなることが想定されている。

次に、対象区間の始点から渋滞末尾までの距離 x は、対象区間へ流入した車両が渋滞末尾へ辿り着くまでの時間を反映した変数であり、その時間が長ければ流入時刻からの渋滞長変化が大きくなることが想定されている。そのため、 x が大きい場合には F の分散が大きくなることが想定される。

最後に、合流相手路線の合流直上流部でのオキュパンシー occ は、自路線のボトルネック容量に影響を与える変数として導入されており、 occ が大きければボトルネック容量が低下すると想定している。ボトルネック容量が小さければ自路線の需要変動による旅行時間へ与える影響が大きくなるため、 occ が大きい場合ほど旅行時間の変動が大きくなると想定している。つまり、 occ が大きい場合ほど F の分散は大きく推定され、PIの幅も大きくなることが想定される。

3. 実データを用いた分析

この章では実データを用いてモデルによる旅行時間予測を行い、モデルパラメータの特性分析と予測精度検証によるモデルの評価を行う。第1節では分析に使用する実データについて述べる。第2節では入力変数がモデルパラメータへ与える影響を調べ、モデルの特性について述べる。第3節では予測値の精度について、第4節では予測区間の精度について評価を行う。

(1) 使用データ

予測の対象区間は、阪神高速3号神戸線上り6.9KPから0.0KP（阿波座ジャンクション）までの6.9kmとする。この区間にはおよそ500m間隔で14箇所を設置された車両検知器によって5分間隔で、交通量・速度・占有率のデータが取得されている。したがって、 $\tau=5$ であり、予測の更新周期（単位時間）は5分とする。この区間の最下流部である阿波座ジャンクションは、大阪港線との合流によるボトルネックであり、日常的に阿波座ジャンクションを先頭として渋滞が発生している。図-2は対象区間を示しており、図中の▼は検知器の設置箇所であり、各セルがそれぞれの検知器の支配区間を表している。

2004年4月1日から2010年3月31日までに取得された631,008組のデータを使用する。このうち、検知器の不具合等により時速0km/hが含まれている32,355組のデータは、ITTが無限大となり、解析に用いることが適切ではないため除去する。次に、阪神高速では速度が3km/h未満のデータは全て3km/hとして扱っているため、同様の補正を行った。そのうち、モデルの適用範囲を満たすものを抽出する。具体的には、最下流部のボトルネック部分から渋滞が延伸している143,781組のデータを抽出した。ここでは、簡単のため、渋滞の定義を時速30km/h以下とした。検知器によって取得された5分毎の速度データを用いて、ITT, RTT, C, x を算出する。なお、RTTの算出にはタイムスライス法を用いた。吉村・菅¹²⁾は阪神高速道路において渋滞が発生しているケースでAVIによる値とタイムスライスによる値の比較を行い、高い精度で算出することができることを確認している。

モデルの予測精度を検証するために「パラメータを推定するためのデータ」と「モデルの精度を検証するためのデータ」に分ける。2004年4月から2007年3月までに取得された83,108組のデータをパラメータの推定に用いて、2007年4月から2010年3月までの60,673組のデータをモデルの再現性を検証するために用いる。

ITTの変化率 C は連続値なので、パラメータ推定用データの数が増えるように10個の階級に分ける。また、相手路線合流直上流部のオキュパンシー occ もパラメータ推定用データの数が増えるように10個の階級に分ける。この分け方では、階級によってある一点に対する予測精度が異なることが考えられるが、もし、これらの変数を等間隔の階級に分けた場合にはデータの多い階級

図-2 予測対象区間

と少ない階級が生じて予測精度が落ちたり、予測ができなかったりすることもあり得る。データの数が増えるように階級を分けることと、均一な階級幅で階級を分けることとのトレードオフを考慮して、本研究ではデータ数が等しくなるように分ける。モデルパラメータ F も離散値として扱うが、旅行時間のスケールを考慮して十分小さな0.001刻みの階級に分ける。もし、ITTが15分である場合、 F が0.001違うことによる旅行時間の違いは0.9秒であり、ほとんど影響がない。検知器が30 km/h以下の速度を観測すればその検知器の支配区間全体が渋滞しているとみなして対象区間の始点から渋滞末尾までの距離 x を算出する。つまり、 x は設置されている検知器の数である14通りの値をとりうる離散的な変数である。

図-3は、大阪港線の阿波座ジャンクション直上流部(1.2KP)のオキュパンシー occ と神戸線上りの阿波座ジャンクション直上流部(0.1KP)の交通量 q_{BN} との関係を表している。横軸に occ を2%刻みで、縦軸に q_{BN} を2 veh/minでとり、使用する全てのデータのうち各セルに該当するデータセットの数をカウントし、その頻度を色によって表している。合流部を先頭とした渋滞が発生している場合のみを抽出しているため、合流部直上流部の交通流率をボトルネック容量として考えることができる。

occ が大きい場合には q_{BN} が小さい。この原因として、合流相手路線が飽和しており、スムーズに合流できなくなっていることがあげられる。また、 occ が小さい場合

図-3 occ とボトルネック直上流部の流率

図-4 F_{acc} の上側限界・中央値・下側限界

には、 q_{BN} が大きくなっているが、ばらつきがでている。この原因として、合流相手路線が自由流で流れているため、一気に複数台流入できる場合や速度差により合流できない場合があることによると考えられる。

(2) モデルパラメータの推定結果

この節では、モデルパラメータの推定結果を示す。本研究では、予測値を算出するためにモデルパラメータ F の分布の中央値を用い、90%信頼水準の予測区間を算出するために F の分布の95%ile値と5%ile値をそれぞれ上側限界・下側限界として用いる。以下では、 acc と F の関係、 C と F の関係、 x と F の関係を順に示す。

a) occ がパラメータへ及ぼす影響

occ の違いによるパラメータ F の分布の特性を明らかにする。図-4は occ の階級に応じた F の上側限界(95%ile値)・中央値・下側限界(5%ile値)を示している。横軸は occ の階級、縦軸は F である。32% $\leq occ$ の場合には、 F の分布は広がっているため、予測区間が大きく出力されるモデルとなっている。この原因として、 occ が大きいため、合流によるボトルネック容量が小さくなり、交通需要の増減が旅行時間へ及ぼす影響が大きくなり、旅行時間の不確実性が増大していることが考えられる。また、 $occ \leq 23\%$ の場合では、 occ が小さくなるにつれて F の分布が大きくなっている。この原因は、図-3で示唆したように、 occ が小さくなるとボトルネック容量自体が変動し、旅行時間の不確実性が増大していることにある。

b) C がパラメータへ及ぼす影響

C の違いによるパラメータ F の分布の特性を明らかにする。図-5から図-7はそれぞれ occ が[0%,10%ile値], (40%ile値,50%ile値], (90%ile値,100%ile値]の場合における、 C の階級に応じた F の上側限界(95%ile値)・中央値・下側限界(5%ile値)を示している。横軸は C の階級、縦軸は F である。40%ile値 $\leq occ \leq 50\%$ ile値の場合には、 C の変化によって F の分布はあまり変わらず、 F の分散が $occ \leq 10\%$ ile値の場合や90%ile値 $\leq occ$ の場合と比べて小さいことは、前項の結果と一致する。 $occ \leq 10\%$ ile値の場合には、 C が大きくなるにつれて F が大きくなっているのに対して、90%ile値 $\leq occ$ の場合には、 C が大きくなるにつれて F が小さくなっている。このことから、 occ が小さい状況下では C が渋滞長の変化を的確に捉えられているのに対して、 occ が大きくて相手路線の影響によってボトルネック容量低下すれば、 C が渋滞長の変化を必ずしも表さなくなるため、理論とは逆の挙動を示すことがあると考えられる。

c) x がパラメータへ及ぼす影響

x の違いによるパラメータ F の分布の特性を明らかにする。図-8から図-10はそれぞれ occ が[0%,10%ile値], (40%ile値,50%ile値], (90%ile値,100%ile値]の場合における、 x に応じ

た F の上側限界(95%ile値)・中央値・下側限界(5%ile値)を示している。横軸は x 、縦軸は F である。共通の特徴として、 x が小さくなるにつれて F が小さくなる傾向にある。 F の中央値が1よりも小さくなっていることは、渋滞長が長くなるにつれて渋滞長が短くなる確率が高まることを反映した結果であると考えられる。 x が大きい場合には、渋滞末尾へ到達するまでの時間が長いことから F の分散は大きくなることが想定されていたが、その特性は確認できない。むしろ、90%ile<occの場合には、 x が小さいほど F の分散は大きく推定されている。この原因として、渋滞長が長い場合には渋滞末尾へ辿り着くまでの時間による渋滞長の変動よりも、渋滞区間中の速度変化による影響のほうが大きいことが考えられる。

(3) 予測値の精度

この節では、点の予測、すなわち予測値の精度検証を

行い、既存モデルと提案モデルとの比較を行う。予測値の精度は、モデルによって出力される予測値と実際に観測された旅行時間との差異によって求める。

a) 予測値の精度検証方法

旅行時間の予測値の精度が良いか悪いかを判断するために、実旅行時間に対するモデルから出力される旅行時間の予測値の誤差で評価する。モデルの精度を評価するために、検証用データセット全てについて予測を行い、それらの誤差分布と平均絶対誤差 (MAE: Mean Absolute Error) で評価を行う。MAEは n をサンプル数として

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |PTT_k - RTT_k| \quad (32)$$

と定義される。

b) 予測値の精度検証結果

図-11は検証用データ全てのデータセットについて予測値から実旅行時間を引いた値の分布を示している。既

図-5 $F_{C_{0cc} \leq 10\%ile}$ の上側限界・中央値・下側限界

図-6 $F_{C_{40\%ile} < 0cc \leq 50\%ile}$ の上側限界・中央値・下側限界

図-7 $F_{C_{90\%ile} < 0cc}$ の上側限界・中央値・下側限界

図-8 $F_{x_{0cc} \leq 10\%ile}$ の上側限界・中央値・下側限界

図-9 $F_{x_{40\%ile} < 0cc \leq 50\%ile}$ の上側限界・中央値・下側限界

図-10 $F_{x_{90\%ile} < 0cc}$ の上側限界・中央値・下側限界

存モデルと提案モデルの累積曲線がほぼ重なっていることからモデル間での予測値の精度についての差異はほとんどないことがわかる。このことは、予測時刻の近傍でボトルネック容量が安定していれば既存のモデルが適用可能であったため、旅行時間を点で予測する段階ではボトルネック容量の大小によって場合分けを行う必要がないことを意味している。

表-1は、予測時刻直後の渋滞長変化別に平均絶対値誤差を示している。渋滞長が延伸する場合に比べて渋滞長が変わらない場合や短くなる場合のほうがMAEは小さいことから、渋滞が解消する場合のほうがよく合うモデルとなっていることがわかる。このことは、前節c項で考察した通り、渋滞長が長い場合に F が小さく推定されることにより、渋滞長が短くなり始める時を予測できるモデルになっていることがわかる。

(4) 予測区間の精度

この節では、幅をもたせた予測、すなわち予測区間の精度検証を行い、既存モデルと提案モデルとの差異について分析を行う。本研究では、過去に蓄積されたデータからモデルを用いて旅行時間の分布を求め、その5%ile値を下側限界、95%ile値を上側限界として90%の割合で観測されると期待される予測区間を推定する。

a) 予測区間の精度検証方法

予測区間の精度評価を行うために、次の2つの指標を定義する。

● 予測区間の幅 (PIL; Prediction Interval Length)

PILが大きい場合には道路利用者が旅行時間を明確に把握できず性能の良くない予測であるのに対して、PILが小さい場合には利用者がより明確に旅行時間を把握でき、性能の良い予測であるといえる。PILは次式で定義する。

$$PIL_t^{u-l} = PTT_t^u - PTT_t^l \quad (33)$$

● 予測区間に実旅行時間が収まる割合(PICP; Prediction Interval Coverage Probability)

実旅行時間が予測区間に含まれる場合は予測が的中しており、この割合が高ければ予測が確からしいことを意味している。PICPは n をサンプル数として次式のように定義される。

$$PICP = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n c_k \quad (34)$$

$$c_k = \begin{cases} 1 & \text{if } RTT_k \in PI_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (35)$$

しかし、これらの指標はトレードオフの関係にあり、PILが小さくなればPICPは低下する。逆に、PICPを大きくするためにはPILを大きく推定する必要がある。したがって、期待されるPICPを、必要最小限のPILから得ることが必要とされる。

PICPが理論値よりも小さければ予測区間内にRTTが収

まらないことを示しており問題になるのは明確であるが、PICPが理論値より大きくても良い予測であるとはいえない。その理由として、予測区間の幅が広がれば広いほどPICPも大きくなることが挙げられる。例えば、予測区間の幅が無限大になればPICPは100%であり、必ず予測区間内にRTTが収まることを意味する。しかし、この予測は旅行時間が全くわからないことを示しているのと同等であり、良い予測であるとはいえない。したがって、PICPが理論確率に近いほどPILに無駄がなく的確に当たるモデル、すなわち適合度が高いといえる。

モデルパラメータ推定用データセットよりRTTの95%ile値と5%ile値を算出した場合、その区間内へ収まる検証用データセットのRTTの割合が89.50%であった。したがって、推定用データを用いてモデルパラメータを推定し、検証用データ上で予測区間の推定を行えば、PICPは89.50%に一致することが期待される。そのため、適用性を評価するためにPICPが89.5%に近いかな否かを基準とする。もし、モデルが的確に旅行時間の不確実性を反映していれば、PILの大きさを変化させることによって、平均的にPILを小さく推定しても的中率が理論値である89.50%で一定とすることが可能である。

b) 予測区間の精度検証結果

図-12は検証用データについて既存モデルと提案モデルより得られたMPILをoccの階級毎に示している。90%ile<occの場合、既存モデルと比べて提案モデルではPILが大きく出力される。つまり、旅行時間の不確実性が増大することを予測している。この結果は、ボトルネック容量が低下することによって、需要変動が旅行時間

表-1 予測値のRTTに対するMAE

	渋滞長 延伸時	渋滞長 不変時	渋滞長 縮小時	全て
サンプル数	12746	49393	10244	72383
既存モデルの MAE [min]	1.79	1.30	1.31	1.38
提案モデルの MAE [min]	1.80	1.31	1.26	1.38

図-11 予測値のRTTに対する誤差 ($PTT_t - RTT_t$)

の変動へ及ぼす影響が増大していることを反映したものであると考えられる。一方、 $30\%ile < occ \leq 90\%ile$ の場合には、既存モデルと比べてPILが小さく出力される。この原因として、旅行時間の不確実性が大きい $90\%ile < occ$ が場合分けされたことにより、その他のPILを小さく推定できていることが考えられる。

図-13は各モデルのPICPを occ の階級毎に示している。既存モデルでは、 occ の大小に依存しない均一なパラメータを用いており、PICPのばらつきが大きい。具体的には、 $25\% < occ \leq 28\%$ の場合にPICPが理論値である89.50%を上回り、92%程度である反面、 $0\% \leq occ \leq 12\%$ や $32\% < occ \leq 100\%$ の場合にはPICPが理論値を下回り、85%～86%になっている。つまり、旅行時間の不確実性があまり大きくない前者の場合では必要以上にPILを大きく推定してしまうのに対して、不確実性が大きい後者の場合ではPILを必要なだけ大きく推定できていないため当たりにくい予測となっている。

提案モデルでは、坂井ら¹⁰⁾が指摘しているように C と x を統計的に条件付独立であると仮定したことによって全般的にPICPが低下しているが、 occ の大小によってパラメータが変わるため、PICPのばらつきが小さくなっている。具体的には、 $25\% < occ \leq 28\%$ の場合で既存モデルが92%程度であったのに対して、提案モデルでは88%～89%と理論値に近づいている。このことは、PILが必要

図-12 occ 毎のMPIL

図-13 occ 毎のPICP

最小限の大きさに推定されていることを意味している。 $0\% \leq occ \leq 12\%$ や $32\% < occ \leq 100\%$ の場合には、既存モデルが85%～86%であったのに対して、理論値との乖離が改善され、前者の場合には86%程度、後者の場合には88%程度になっている。このことは、ボトルネックの容量変動やボトルネック容量低下による旅行時間の不確実性を考慮してPILが推定されていることを意味している。したがって、下流に合流部を持つようにボトルネック容量変化が想定される区間で旅行時間に対する不確実性を考慮した確率的な旅行時間の幅を推定する場合には、合流相手路線のオキュパンシーで場合分けを行うことが有用であるといえる。

4. 結論

一般的な点推定の旅行時間予測に加えて、一定の割合で観測されると期待される旅行時間の幅、すなわち旅行時間に対する予測区間を求めるという既存モデルを合流部へ適用するために、ボトルネック容量の変動要因となる合流相手路線の混雑状況をモデルへ反映させた。具体的には、合流相手路線の合流直上流部のオキュパンシーを変数としてモデルへ組み込んだ。

実データを用いた分析では、予測値の精度検証結果として、既存モデルと比べてほぼ同等の精度が得られた。このことから、旅行時間を点で予測する場合には既存のモデルでも対応できることが確認された。このことは、既存のモデルがボトルネック容量の大小に関わらず、ボトルネック容量が安定していれば適用可能であるということを示している。

予測区間の精度検証として、予測区間を出力するモデルに必要とされることは、交通状況の違いによって旅行時間の不確実性が変化することを利用して、旅行時間が変動しやすい場合には大きな幅で予測区間を出力するが、旅行時間が確からしい場合には小さな幅を出力し、結果として比較的小さな幅でも実旅行時間がある一定割合で収まる予測区間を出力できることが望まれる。既存のモデルではボトルネック容量の違いによる旅行時間の不確実性を表すことができないため、合流相手路線のオキュパンシー別で実旅行時間が予測区間へ収まる割合を算出すると、必要以上に幅を大きく推定してしまう場合や、幅を小さく推定しすぎて当たらない予測を行うことがわかった。本研究のモデルは入力変数間に統計的条件付独立性を仮定したために全体として予測区間の幅が狭く推定されたものの、旅行時間の不確実性に合わせて予測の幅を推定できることが示された。具体的には、合流相手路線のオキュパンシーが $10\%ile$ 値以下の場合や $90\%ile$ 値

よりも大きい場合には旅行時間の不確実性が高まることを表現できており、逆に、オキュパンシーが40%ile値より大きくて80%ile値以下の場合には旅行時間の不確実性が低くなることを表現できた。したがって、合流相手路線のオキュパンシーを変数としてモデルへ組み込むことはボトルネック容量の違いによる旅行時間の不確実性を表すために有用であることが示された。

今後のモデル展開として、以下のことが考えられる。本研究ではボトルネック容量の変動を考慮してモデル化を行ったが、上流からの交通需要については確率的に扱っているに留まる。流入量に関する変数を導入することにより、さらなるモデル展開が可能である。また、複数のボトルネックが含まれる区間を対象とするためには、対象区間で複数の単一ボトルネック区間に分割し、上流側の区間から順に時間差を考慮してそれらをつなぎ合わせる必要がある。

実データを用いた検証の課題として、モデルの入力変数がパラメータへ与える影響の詳細なメカニズムを知るためには、予測の時間遅れや時系列変動についての分析も行う必要がある。また、検知器密度の低い都市間高速への適用可能性の検証についても今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 宗像恵子, 田村勇二, 割田博, 白石智良: 首都高速道路におけるリアルタイム予測シミュレーションの開発, 交通工学研究発表会論文集, Vol.29, pp.293-296, 2009.
- 2) 白石智良, 桑原雅夫, 堀口良太: リアルタイム予測交通流シミュレーションシステムの開発, 土木計画学研究・講演集, Vol.30, CD-ROM, 2004.
- 3) 舟橋賢二, 西村茂樹, 堀口良太, 赤羽弘和, 桑原雅夫, 小根山裕之: VICS 蓄積データを用いた旅行時間短期予測手法に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.27, CD-ROM, 2003.
- 4) 割田博, 森田紳之, Edward CHUNG, 田中淳: パターンマッチングを用いた所要時間予測手法の研究, 交通工学研究発表会論文集, Vol.24, pp.129-132, 2004.
- 5) 松本幸正, 鈴木忠英, 松井寛: 都市間高速道路における車両感知器を用いた所要時間推定モデルの特性比較, 第6回 ITS シンポジウム 2007Proceedings, pp.119-124, 2007.
- 6) 中村英樹, 王鋭: 車両感知器とプローブデータを組み合わせた旅行時間推定手法の実証分析, 第2回 ITS シンポジウム 2003Proceedings, pp.283-288, 2003.
- 7) 三輪富生, 境隆晃, 森川高行: プローブカーデータを用いた経路特定手法と旅行時間推定に関する研究, 第2回 ITS シンポジウム 2003Proceedings, pp.277-282, 2003.
- 8) 三輪富生, 多和田雄介, 山本俊行, 森川高行: 速度変化情報を用いた予測旅行時間の更新手法の検討, 第3回 ITS シンポジウム 2004Proceedings, pp.451-456, 2004.
- 9) Wei, C., Iryo, T. and Asakura, Y.: Implementation of Short-Term Travel Time Prediction Model on Urban Expressway, *International Journal of ITS Research*, Vol.7, No.2, pp. 101-108, 2009.
- 10) 坂井勝哉, 日下部貴彦, Chong WEI, 朝倉康夫: 旅行時間の区間推定に関する統計分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.68, No.5, pp. I_1297-I_1308, 2012.
- 11) 川北司郎, 北澤俊彦, 飛ヶ谷明人, 田名部淳, 朝倉康夫: 阪神高速道路における所要時間の信頼性に関する分析, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol.35, CD-ROM, 2006.
- 12) 吉村敏志, 菅芳樹: 阪神高速道路における所要時間情報提供と精度検証, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.59, CD-ROM, 2004.

(2013.2.25 受付)

STATISTICAL MODEL OF TRAVEL TIME PREDICTION CORRESPONDING TO FLUCTUATION OF BOTTLENECK CAPACITY ON JUNCTION

Katsuya SAKAI, Takahiko KUSAKABE and Yasuo ASAKURA

This study extends the statistical model which predicts travel time with its variability. The variability is represented by an interval that covers the actually experienced travel time at a certain probability. The purpose of this study is to improve the previous model to cover congestion caused by a merging section, such as a junction. We assume that travel time variability changes according to congestion of the other line merged with the target section of the travel time prediction. This is because the congestion in merging line may decrease the capacity of the bottleneck. Instead of considering the real time capacity of the bottleneck directly, this study employs the occupancy to represent the state of the merging line.

We employ the data in Kobe line of Han-shin Expressway to validate the proposed model. The head of the target section is a bottleneck caused by merging. As a result of the analysis, the accuracy of point estimation of travel time was not improved. However the accuracy of prediction interval was partially improved. The prediction interval estimated by the previous model did not cover the experienced travel time at enough probability when the occupancy of the other merging line is high. The prediction interval estimated by the proposed model covered the actual travel time at larger probability than the previous model.