

流入台数とボトルネック容量に着目した 都市高速における旅行時間予測

坂井 勝哉¹・朝倉 康夫²

¹学生会員 東京工業大学 大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1-M1-20)

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 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1-M1-20)

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

本研究では「区間途中での流入・流出を考慮したボトルネックへの流入交通量」と「ボトルネック容量」を用いて渋滞時の旅行時間を定式化した。さらに、車両検知器による観測速度と交通流率が変動しないとの仮定に基づいて旅行時間予測モデルを構築した。都市高速内で複数の出入口を含む区間の実データを用いて予測モデルの精度検証を行った。その結果、現在提供されている瞬間旅行時間よりも精度良く旅行時間を予測できることが示された。特に、渋滞発生時の旅行時間の立ち上がりを予測できた。また、渋滞時に低速度が観測されると瞬間旅行時間では大幅に過大推定するが、提案モデルではその程度が抑えられた。しかし、下流からの渋滞が延伸してくる場合や事故発生時には、ボトルネック容量が低下するため、本モデルは過小推定するという問題がある。

Key Words : travel time prediction, urban expressway, bottleneck capacity, input-output model

1. 序論

旅行時間情報は円滑な道路交通を実現するために必要不可欠である。特に、都市内では目的地まで複数の経路があるため、正確な旅行時間を情報提供することにより速達性の向上が期待される。

現在、情報板によって提供されている旅行時間情報は、車両検知器によって観測される速度データに基づく小区間の所要時間同時刻和（瞬間旅行時間：ITT; Instantaneous Travel Time）である。非渋滞時にはITTが実際に利用者が経験する旅行時間とおおむね同じ値になるが、渋滞の発生時や解消時には時間遅れが生じるという問題がある。さらに、低速時には瞬間旅行時間が過大推定になりやすいという問題もある。

渋滞時の旅行時間はボトルネックの交通容量（供給）と流入交通量（需要）とのバランスによって決定される。交通流ミクロシミュレーションによる手法¹⁾²⁾³⁾は精緻な計算を行うことが可能であるが、キャリブレーションが非常に煩雑である。旅行時間を予測するという目的のためだけに、ミクロな交通流シミュレーションを行う必要性は小さいと考えられる。統計的に説明変数から直接的に旅行時間を予測する手法⁴⁾⁵⁾⁶⁾は、データさえ蓄積されている区間であれば適用できるため簡便である。しかし、

ボトルネック交通容量と流入交通量との関係が明示的にモデル化されていないため、区間に応じてモデルを拡張することが困難である。需給の関係から旅行時間を算出するモデルとして、Otaka *et al.*⁷⁾は「車両検知器から得られる下流の累積交通量」と「アップリンク情報による区間旅行時間」を用いて上流の累積交通量を作成し、上流の累積交通量と下流の累積交通量をパターンマッチングによって予測する手法を提案している。この手法は、車両検知器が密に設置されていない区間に有効な手法であるが、都市高速のように車両検知器が密に設置されている区間では更に有利な手法がある。小川・黒川⁸⁾は、ボトルネックの交通容量と区間存在台数を用いて渋滞発生の有無を考慮した旅行時間予測方法のモデル化を行った。この手法を都市間高速へ適用し、瞬間旅行時間よりも精度が高いことが示された。しかし、都市高速では本線の流入交通量に加えて途中出入口での流入・流出がボトルネックへの流入交通量に大きな影響を与えるため、この手法を都市高速へ適用する場合には途中出入口での流入・流出を考慮する必要がある。

本研究の目的は、都市高速道路の日常的に渋滞が発生する区間を対象として、現在提供されている瞬間旅行時間よりも精度の高い予測を行うモデルを提案することである。提案しようとするモデルは、「区間存在台数に加

えて途中出入口での流入・流出を考慮した台数」を「ボトルネック交通容量」で除することによって旅行時間を予測するモデルである。

本研究では、渋滞時の旅行時間決定メカニズムである「ボトルネックへの流入交通量」と「ボトルネック容量」を明示的にモデル化することにより、簡便な旅行時間予測の枠組みを作成する。簡便な枠組みであれば実務への適用が容易である。さらに、路線毎にモデルを拡張することも容易であり、例えば、対象区間よりも上流で交通流率が観測されている場合には、その観測データに基づいて対象区間への流入交通量をモデル化できる。また、過去データが蓄積されている場合には、統計的手法により流入交通量の予測をモデルへ組み込むことができる。

2. モデル

この章では、旅行時間を「ボトルネックへの流入交通量」と「ボトルネック容量」により定式化し、旅行時間予測モデルを構築する。第1節では定式化のための表記法を定義する。第2節では、「ボトルネックへの流入交通量」と「ボトルネック容量」を比較することにより、渋滞時の旅行時間を定式化する。第3節では、第2節で定式化されるモデルを用いた旅行時間予測モデルを構築する。第4節では、既存研究⁹⁾で提案されているモデルとの違いを述べる。

(1) 表記法

本研究で使用する表記法は以下のとおりである。

$TT_{AB}(t)$: 時刻 t に地点Aへ流入する車両の区間ABの旅行時間。

$TT_{AB}^R(t)$: 時刻 t に地点Bを流出する車両の区間ABの旅行時間。つまり、Rは流出時刻ベースであることを表すものとする。

$ITT_{AB}(t)$: 時刻 t の区間ABの瞬間旅行時間

$PTT_{AB}(t)$: 時刻 t に地点Aへ流入する車の区間ABの予測旅行時間

$q_A(t)$: 時刻 t の地点Aでの流率

$N(t)$: 時刻 t での区間存在台数

$N'(t)$: 時刻 t 以降に、時刻 t に対象区間へ流入する車両よりも早くボトルネックへ到達する車両台数

q_{BN} : ボトルネック容量（本研究では一定と仮定）

(2) 旅行時間定式化

本節では、「ボトルネックへの流入交通量」を「ボトルネック容量」で除することにより、渋滞時の旅行時間を定式化する。ボトルネックへの流入交通量は「基準時刻に対象区間に存在する台数」と「基準時刻以降の区間

途中での流入・流出台数」によって求められる。a項では区間途中での流入・流出がない場合の定式化を行う。b項では区間途中での流入・流出がある場合の定式化を行う。

a) 区間途中での流入・流出がない場合

途中での流入・流出がない単路区間ODを考える。時刻 t_0 にOへ流入する車両の旅行時間 $TT_{OD}(t_0)$ は、ボトルネック容量 q_{BN} を一定と仮定することにより、「予測時刻 t_0 に対象区間に存在する台数 $N(t_0)$ 」と「ボトルネック容量 q_{BN} 」を用いて

$$TT_{OD}(t_0) = \frac{N(t_0)}{q_{BN}} \quad (1)$$

と表すことができる。既存の研究⁹⁾では、車両検知器によって得られる時間占有率から $N(t_0)$ を算出しているが、粗密の影響による誤差が生じる。もし、地点Oの断面交通量が観測されている場合には、時刻 t_0 に地点Dを流出する車両が地点Oへ流入した時刻から累積流入台数をカウントできる。本研究ではこの手法を用いて存在台数を推定する。図-1は、上流側と下流側の累積曲線の差によって旅行時間を表現している。時刻 t_0 にDを流出する車両の区間ODの旅行時間 $TT_{OD}^R(t_0)$ 遡った時刻から地点Oでの累積交通量をカウントすることにより $N(t_0)$ を求める。 $N(t_0)$ は「地点Oでの流率 q_0 」を用いて

$$N(t_0) = \int_{t_0 - TT_{OD}^R(t_0)}^{t_0} q_0(t) dt \quad (2)$$

と算出される。式(1)と式(2)より、

$$TT_{OD}(t_0) = \frac{\int_{t_0 - TT_{OD}^R(t_0)}^{t_0} q_0(t) dt}{q_{BN}} \quad (3)$$

である。

b) 区間途中での流入・流出がある場合

途中での流入・流出がある区間ODを考える。この場合、時刻 t_0 にOへ流入する車両の旅行時間 $TT_{OD}(t_0)$ は

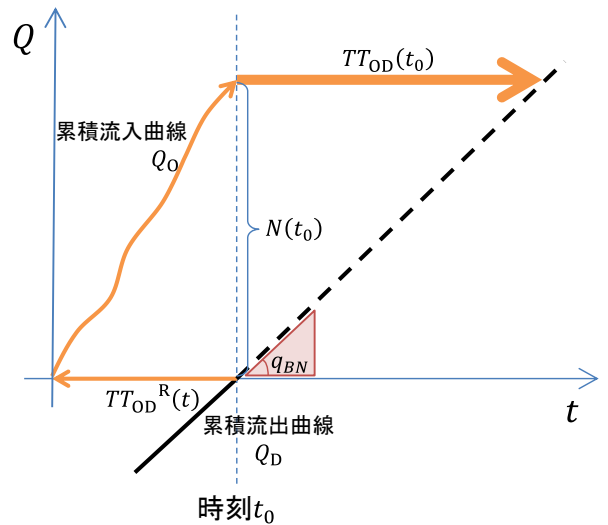


図-1 累積曲線による旅行時間

「時刻 t_0 以降に、時刻 t_0 に対象区間へ流入する車両よりも早くボトルネックへ到達する車両台数 $N'(t_0)$ 」と「ボトルネック容量 q_{BN} 」を用いて

$$(t_0) = \frac{N'(t_0)}{q_{BN}} \quad (4)$$

と表すことができる。 $N'(t_0)$ は時刻 t_0 における区間ODの存在台数 $N(t_0)$ に加えて、時刻 t_0 以降に流入・流出する台数を考慮して求める必要がある。

まず、時刻 t_0 における区間ODの存在台数 $N(t_0)$ を考える。前項で示した式(2)に加えて、途中での流入・流出を考慮する必要がある。これらは、時刻 t_0 以前に、時刻 t_0 に地点Dを流出する車両よりも上流側へ流入・流出する台数をカウントすることにより求められる。したがって、 $N(t_0)$ は次式によって算出される。

$$N(t_0) = \int_{t_0-TT_{OD}^R(t_0)}^{t_0} q_0(t) dt + \sum_i \int_{t_0-TT_{iD}^R(t_0)}^{t_0} q_i(t) dt - \sum_j \int_{t_0-TT_{jD}^R(t_0)}^{t_0} q_j(t) dt \quad (5)$$

ここに、地点 i, j はそれぞれ入口、出口である。

次に、時刻 t_0 以降に、時刻 t_0 に地点Oへ流入する車両よりも下流側へ流入・流出する台数を考える。これらは、時刻 t_0 に地点Oへ流入する車両が出入口へ到達するまでに流入・流出する台数を考えればよいので、

$$N'(t_0) = N(t_0) + \sum_i \int_{t_0}^{t_0+TT_{Oi}(t_0)} q_i(t) dt - \sum_j \int_{t_0}^{t_0+TT_{Oj}(t_0)} q_j(t) dt \quad (6)$$

であり、以上をまとめると、

$$TT_{OD}(t_0) = \frac{1}{q_{BN}} \left(\int_{t_0-TT_{OD}^R(t_0)}^{t_0} q_0(t) dt + \sum_i \int_{t_0-TT_{iD}^R(t_0)}^{t_0+TT_{Oi}(t_0)} q_i(t) dt - \sum_j \int_{t_0-TT_{jD}^R(t_0)}^{t_0+TT_{Oj}(t_0)} q_j(t) dt \right) \quad (7)$$

である。

(3) 旅行時間予測モデル

本節では、前節 b 項で定式化した「区間途中での流入・流出がある場合旅行時間モデル」を用いて、渋滞発

生時の旅行時間予測モデルを構築する。渋滞が発生しない場合には瞬間旅行時間をそのまま予測値とすればよい。

予測モデル構築のために、予測時刻以降の流入・流出台数について、最も単純な2つの仮定をおく。本研究では「予測時刻直前に観測された速度が継続する」「予測時刻直前に観測された交通流率が継続する」と仮定する。仮定より、時刻 t_0 に地点Oへ流入する車両が途中の流入地点 i 、流出地点 j へ到達するまでの旅行時間は瞬間旅行時間(ITT)によって表される。また、区間途中での流入・流出率は時刻 t_0 に観測された値がそのまま継続する。

$$PTT_{OD}(t_0) = \frac{1}{q_{BN}} \left(\int_{t_0-TT_{OD}^R(t_0)}^{t_0} q_0(t) dt + \sum_i \int_{t_0-TT_{iD}^R(t_0)}^{t_0} q_i(t) dt - \sum_j \int_{t_0-TT_{jD}^R(t_0)}^{t_0} q_j(t) dt + \sum_i q_i(t_0) ITT_{Oi}(t_0) - \sum_j q_j(t_0) ITT_{Oj}(t_0) \right) \quad (8)$$

(4) 既存モデルとの違い

既存の研究⁹⁾では、都市間高速のインターチェンジ間を対象としていたため、区間途中での流入・流出を考慮する必要がなかった。また、本線上の車両検知器によって得られる車両密度からその区間に存在する台数を推定していたが、この方法では、粗密の影響による誤差が生じる。

本研究では、都市高速を対象としているため、区間途中での流入・流出を定式化に反映した。都市高速では車両検知器が密に設置されているため、タイムスライス法を用いて、予測時刻に対象区間を流出する車両の軌跡を遡り、観測された流入・流出台数によって区間の存在台数を算出している。

3. 実データによる検証

この章では、実データを用いて、前章第3節で構築した旅行時間予測モデルの精度検証を行う。第1節では使用するデータについて述べる。第2節では精度検証の方法について、第3節では精度検証結果について記述する。

(1) データ

対象区間は図-2で示される阪神高速11号池田線上り池

田入口(14.2 kP)から塚本入口直下流(3.9 kP)までの10.3 kmとする。この区間の末尾（塚本入口付近）のサグおよび合流によるボトルネックの影響で、塚本付近を先頭とする渋滞が日常的に発生している。図中の▼印で示される本線上の箇所に、約500 m間隔で車両検知器が設置されており、5分間交通量・平均速度が取得されている。また、全ての出入口にも車両検知器が設置されている。

2008年4月1日から2009年3月31日までに取得されたデータを用いてモデルパラメータであるボトルネック容量を推定する。2009年4月1日から2010年3月31日までに取得されたデータを用いてモデルの精度検証を行うが、そのうち、本線上にある全ての車両検知器が継続的に速度データを取得できていた281日間のデータを用いる。

(2) 方法

本節では「モデルパラメータであるボトルネック容量の推定手法」と「予測結果を集計して精度評価を行うための指標」について定義する。

モデルパラメータであるボトルネック容量を推定するために、対象区間の下流側（2.5kP地点）の断面交通流率を用いる。この断面では2車線共に車両検知器が設置されているため、断面の5分間交通量が取得できる。ボトルネック部分からこの断面までの間に出入口は存在しないため、この断面の交通流率をボトルネック部分での流率とみなすことができる。2008年4月1日から2009年3月31日までに取得されたデータのうち、ボトルネック部分で渋滞が発生している場合のデータのみ抽出する。簡単のため、40 km/h以下が観測されれば渋滞しているとみなす。データに大きな観測誤差が含まれている可能性を考慮して、抽出された5分間交通量のうち、5%ile値以下と95%ile値以上のデータを除去し、残りの平均値をボトルネック容量とする。

本研究では、タイムスライス法を用いて車両の軌跡を考慮して算出される旅行時間を推定旅行時間(ETT; Estimated Travel Time)と定義して真値とみなす。ETTと比較して瞬間旅行時間(IIT; Instantaneous Travel Time)および予測旅行時間(PTT; Predicted Travel Time)の乖離をそれぞれの誤差と定義する。IITと比較して改善されたかどうかを把握するため、モデルの評価指標として、絶対平均誤差(MAE; Mean Absolute Error)と平方平均二乗誤差(RMSE; Root

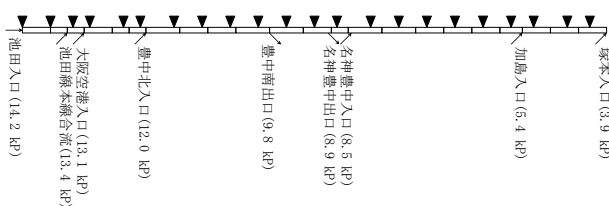


図-2 対象路線

表-1 ETTに対する誤差

	MAE	RMSE
PTT	2.14 min	14.19 min
IIT	2.26 min	18.37 min

Mean Square Error)を用いる。MAEとRMSEを算出する際は、PTTとIITとの違いを比較するために、PTTがIITと異なる値を出力した場合のみ計算する。すなわち、PTTのMAEとRMSEは次式によって定義する。なお、IITについても同様に定義できる。

$$MAE_{PTT} = \frac{1}{n} \sum_k |PTT_k - ETT_k| \quad (9)$$

$$RMSE_{PTT} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_k (PTT_k - ETT_k)^2} \quad (10)$$

$k \forall k \in [2009年4月1日, 2010年3月31日], IIT_k \neq PTT_k$
ここに、 n はサンプル数。

(3) 結果

a) ボトルネック容量推定結果

図-3は、ボトルネック容量を推定するために使用したデータの分布である。これらの平均値により、ボトルネック容量は276.38 veh/5 min、すなわち55.28 veh/minと推定された。

b) 集計指標による精度評価

表-1は、予測モデルによって渋滞が発生すると判別され、PTTがIITと異なる場合のMAEとRMSEである。サンプル数は14,513であった。PTTのMAE・RMSEはIITに比べて小さい。特にRMSEが改善されている理由は、渋滞区間中で低速度が観測された場合にIITでは過大推定されることが多いが、モデルを適用することにより過大推定の程度が抑えられるからである。

c) 誤差の分布

図-4は誤差のヒストグラムを示している。横軸はETTに対する誤差、縦軸はサンプル数である。青はIITの誤差、赤はPTTの誤差を示している。IITでは大幅に過大推定するケースが多いが、PTTではその問題が解消されて

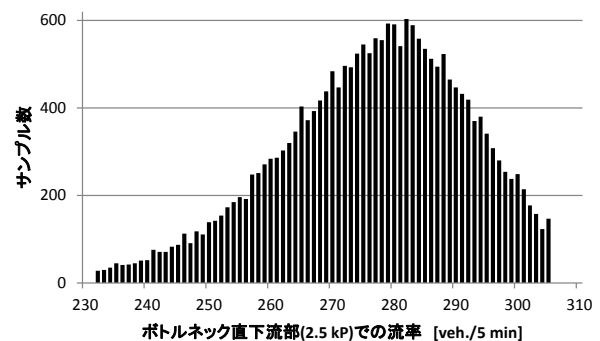


図-3 ボトルネック容量の分布

いる。ITTではプラス側へ誤差が生じることが多いが、PTTではマイナス側が多い。また、PTTでは大幅に過小推定することもある。この原因として、下流からの渋滞延伸時や突発事象発生時にボトルネック容量が低下することが考えられる。本研究の予測モデルではボトルネック容量を一定と仮定しているため、このような容量低下時には過小推定する傾向にある。

d) 時系列変化

図-5は時間の経過と旅行時間の推移の関係を示している。横軸は時刻、縦軸は旅行時間であり、5分毎のETT, ITT, PTTが線でつなぎ合わせられている。黒はETT, 青はITT, 赤はPTTを示している。ITTでは、渋滞長が変化する場合に時間遅れが生じることが問題とされていたが、モデルを適用することによって、渋滞発生時の旅行時間の立ち上がりと渋滞解消時の旅行時間の落ち込みを予測できている。この結果は、上流側の流入交通量を利用しているため下流部の速度が変化するよりも早く旅行時間の変動を把握できることによるものである。また、17時頃に渋滞区間中で低速度が観測されたためにITTでは過大推計されているが、PTTではその影響は限定的である。

e) 誤差の発生要因

本モデルの誤差の発生要因は、大きく2つある。第一に「予測時刻以降に流入・流出する台数」である。本モデルでは、予測時刻直前に観測された5分間交通量と速

度を用いて、各出入口への到達時間を推定し、予測時刻以降の流入・流出台数を推定した。そのため、急激な速度変化や需要変動が発生する場合にはモデルの予測精度が低下する。

第二に「ボトルネック容量」である。本モデルでは、ボトルネック容量を一定と仮定し、渋滞発生時の平均流率をボトルネック容量とみなした。想定しているボトルネック部分を先頭とした日常的な渋滞が発生している場合には精度良く予測できたものの、下流側から渋滞が延伸してくる場合や、突発事象が発生した場合には過小推定することがわかった。この原因は、ボトルネック部分の交通容量が想定している容量よりも小さいからである。

4. 結論

本研究では、都市高速を対象として「途中出入口での流入・流出を考慮したボトルネック流入累積台数」と「ボトルネック交通容量」を用いて渋滞時の旅行時間モデルを構築した。そのモデルを用いて、現状の観測値（本線上の速度、出入口での流入・流出台数）が変わらないという仮定に基づく予測では、現在提供されている瞬間旅行時間よりも高い精度で予測できることが示された。

今後の課題のひとつは、渋滞が下流から延伸してくる場合や突発事象の場合への拡張である。これらの場合にはボトルネック容量が低下するため、リアルタイムに観測されるボトルネック部分での交通流率を用いてモデルを拡張することにより、同じ枠組みで対応できると考えている。

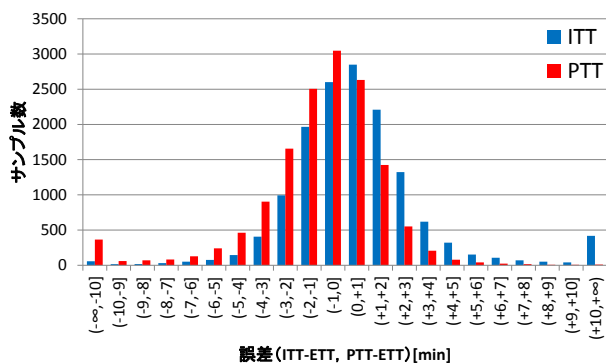


図-4 誤差のヒストグラム

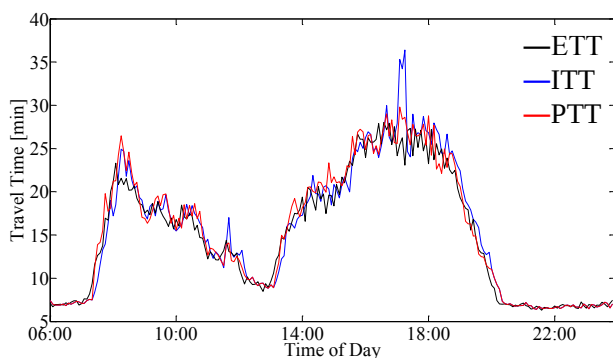


図-5 2010年3月19日結果

参考文献

- 1) Kaumann, O., Froese, K., Chrobok, R., Wahle, J. and Neubert, L. : Online simulation of the freeway network of North Rhine-Westphalia, *Traffic and Granular Flow '99*, pp.351-356, 2000.
- 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, CD-ROM, Vol.30, 2004.
- 3) 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, 第 29 回交通工学研究発表会論文集, pp.293-296, 2009.
- 4) Zhang, X. and Rice, J. A. : Short-term travel time prediction, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, pp.187-210, Vol.17, No.3-4, 2003.
- 5) Wei, C., Iryo, T. and Asakura, Y. : Implementation of Short-term Travel Time Prediction Model on Urban Expressway, *International Journal of ITS Research*, pp.101-108, Vol.7, No.2, 2009.

- 6) 坂井勝哉, 日下部貴彦, 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), pp.I_1297-I_1308, Vol.68, No.5, 2012.
- 7) Otaka, H., Horiguchi, R. and Akahane, H. : Short term travel time prediction using cumulative traffic counts and uplink information collected on expressways, *Proc. of 11th ITS World Congress*, CD-ROM, 2004.
- 8) 小川圭一, 黒川洸: ボトルネック交通容量を用いた所要時間予測モデルに関する研究, 土木計画学研究・論文集, pp.991-1000, No.16, 1999.
- 9) 馬場卓男: 名神高速道路の所要時間提供に関する精度検証, 高速道路と自動車, pp.21-28, Vol.35, No.9, 1992.

(2013.8.2 受付)

TRAVEL TIME PREDICTION METHOD FOR AN URBAN EXPRESSWAY USING THE INPUT FLOW AND THE CAPASITY AT THE BOTTLENECK

Katsuya SAKAI and Yasuo ASAKURA