

# プローブカーデータを用いたリンク旅行時間情報による動的OD交通量の推定\*

## Updating Dynamic O/D Matrices Using Probe-Vehicle's Link Travel Time Data\*

三輪富生\*\*・山本俊行\*\*\*・竹下知範\*\*\*\*・森川高行\*\*\*\*\*

By Tomio MIWA\*\*・Toshiyuki YAMAMOTO\*\*\*・Tomonori TAKESHITA\*\*\*\*・Taka MORIKAWA\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

プローブカーシステムは、道路ネットワーク上の交通状況に関する情報をリアルタイムに収集可能であり、近年では各地で実験が行われている。特に、このシステムは、路側センサーと比較して飛躍的に情報収集エリアを広げる点や、比較的安価に詳細な情報を収集可能な点、さらには従来の路側観測データと比較してデータ利用に関する制約が少ない点などが利点である。しかし、プローブカーから提供される交通情報は車両が実際に走行した道路区間のみのものであり、車両が走行しない限り同じ地点における時間的に連続したデータの収集は困難である。さらには、周辺の道路区間や近い将来における交通状況など、空間的、時間的な広がりを持たない。従って、事故等の突発的な事象による交通渋滞の空間的、時間的に広がる影響の分析は、プローブデータのみからでは困難である。これを克服する方法の1つには、プローブデータからOD交通量を推定し、交通シミュレータにより近い将来の交通状況を予測する手法がある。

これまでにも、プローブデータを用いてOD交通量の推定を試みた研究はみられるが、主にはプローブカーの走行軌跡から得られる経路利用率を用いている<sup>1)</sup>。しかし、この場合はプローブカーが目的地に到着するまでは情報を利用できず、リアルタイムに収集されるデータを有効に活用できない。また、多くの実験がそうであるように、現在のところプローブカーはタクシーやトラックなどの業務用車両がほとんどであり、そのデータは道路網を走行する車両の母集団を代表しない。

プローブカーのリンク通過旅行時間(リンク通過旅行速度)はリアルタイム利用が可能であり、業務用車両と一般乗用車との差異を予め分析しておけば、そのバイアスを除去することも可能である。ただし、プローブデータのリンク旅行時間には、車両間の走行速度のばらつき

\*キーワード: プローブデータ, OD 推定

\*\*正員, 博士(工学), 名古屋大学大学院環境学研究所

(名古屋市千種区不老町, TEL:052-789-3565,

E-mail:miwa@trans.civil.nagoya-u.ac.jp)

\*\*\*正員, 博(工), 名古屋大学大学院工学研究所

\*\*\*\*正員, 工修, 静岡県庁

\*\*\*\*\*正員, Ph.D, 名古屋大学大学院環境学研究所

が含まれることに注意が必要である。

そこで本研究では、プローブカーのリンク旅行時間情報から動的OD交通量の推定を行う。特に、プローブデータの信頼性を考慮した動的OD交通量の推定を行う。

### 2. 動的交通シミュレータの開発

#### (1) 交通シミュレータの概要

プローブデータを用いた動的OD交通量推定を行うにあたり、本研究で開発した交通シミュレータの概要を以下に示す。これは複数の車両を1パケットとするメソシミュレータであり、車両の移動はピリオディックスキューニング方式で管理されている。各パケットは、流出ノード到着時にDial法のリンクウェイト値に基づいて流入リンクを決定する。また、各リンク上での車両走行速度は、リンク流入時刻における当該リンクの交通密度を用いて $k-v$ 曲線より算出される。ここで、 $k-v$ 曲線はGazisらにより示された追従理論における非線形モデル<sup>2)</sup>から導出した下式を用いる。

$$v = v_f \exp\left\{-\alpha(k/C)^{n-1}\right\} \quad (1)$$

ここに、 $v$ はリンク旅行速度、 $v_f$ は自由走行速度、 $C$ は可能交通容量、 $k$ は交通密度、 $\alpha$ 、 $n$ は未知パラメータ。

また、リンクには単位時間内の存在可能容量、流入・流出可能容量が設定されており、これを超える場合には渋滞長が流出ノードにおいてPoint-Queueを形成する。また、これにより渋滞の延伸状況も再現可能である。

#### (2) $k-v$ 曲線

名古屋市で収集されたプローブデータとトラフィックカウンターデータを用いて $k-v$ 曲線を推定した。ここで、あるリンクの旅行速度が平均 $v^*$ 、標準偏差 $s$ の正規確率変数であるとする。 $v^*$ は式(1)から求められ、 $s$ は未知パラメータとして推定される。いま、リンク旅行速度の確率密度関数がリンク間で独立であると仮定すると、観測リンク旅行速度 $\hat{v}$ の確率密度関数は次式となる。

$$f(\hat{v} | v^*, s^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} \exp\left[-\frac{(\hat{v} - v^*)^2}{2s^2}\right] \quad (2)$$

このとき、尤度関数 $L(\theta)$ は次式で定義できる。

$$L(\theta) = \prod_a f(\hat{v} | v^*, s^2) \quad (3)$$

ここに、 $\theta$  は未知パラメータベクトルであり、 $v_f, \alpha, n, s$  からなるベクトルである。これらの推定値は  $\max L(\theta)$  を満足する最尤推定量として求められる。

次節で詳細に述べるが、リンク旅行速度からリンク交通量を推定する方法の違いを考慮するため、個々の車両が示す旅行速度のばらつきが速度の大きさによって変化しない場合 ( $k-v$ 曲線) と変化する場合 ( $k-v$ 曲線) の2種類の推定を行った。後者においては、リンク旅行速度の標準偏差  $s$  を  $v^*$  により下式のように構造化する。

$$s = s' \times v^* \quad (4)$$

表 - 1 に推定結果を示す。本来であれば、推定用データは、以降の分析に合わせた時間間隔で収集されたデータ (車両ごとのリンク旅行速度、10分交通量) とすべきであるが、入手したトラカンデータが1時間合計値であり、また実際のプローブデータはここでは取り扱わないばらつき要因 (マップマッチングエラーなど) も含むため、プローブデータも1時間平均値を用いた。全てのパラメータが有意に推定され、特に  $n$  が2に近い値に推定されたことから、Drakeの式に類似した曲線が推定された<sup>3)</sup>。

表 - 1  $k-v$ 曲線の推定結果

$k-v$ 曲線 : リンク旅行速度のばらつき一定					
車線数	$v_f$ (km/min)	$\alpha$	$N$	$s$ (km/min)	サンプル数
4~	0.922	0.443	1.941	0.150	2784
2	0.801	0.200	1.972	0.115	283
$k-v$ 曲線 : リンク旅行速度のばらつきが速度平均値により変化					
車線数	$v_f$ (km/min)	$\alpha$	$N$	$s'$	サンプル数
4~	0.917	0.435	1.968	0.209	2784
2	0.839	0.256	1.821	0.215	283

\*すべて1%有意水準を満たす

### (3) 現況再現性

開発した交通シミュレータの現況再現性を確認した。使用データは吉祥寺BMデータセット (138リンク, 57ノード)<sup>4)</sup>であり、詳細な観測に基づく7:50-10:00の10分間隔ODデータ (以降、真ODと呼ぶ)、観測リンク交通量 (70リンク)、およびネットワーク情報が含まれる。パケットサイズは1台、シミュレーション更新間隔は4秒、経路選択における分散パラメータは0.01 (1/sec) とした。

$k-v$ 曲線 を用いた場合の現況再現性は、観測リンク交通量とシミュレーション再現交通量 (ともに台/10分) に対して、 $R=0.824$ ,  $RMSE=15.12$  であり、 $k-v$ 曲線 を用いた場合には、 $R=0.828$ ,  $RMSE=15.04$  であった。従って、開発したシミュレータは概ね良好な現況再現性を示すものの、設定した可能交通容量や  $k-v$ 曲線を名古屋市で得られたデータから設定しており、必ずしも適切な条件設定が行われていないことに注意が必要である。

## 3. リンク旅行時間情報からのリンク交通量の推定

### (1) リンク交通量推定手法の開発

本研究では、プローブ旅行速度情報からリンク交通量を推定し、これを用いてOD交通量を推定する。ここでは、個々の車両が示すリンク旅行速度のばらつきを考慮する方法によって以下の3つの手法を提案する。

**手法1:** この手法では、個々の車両が示す情報のばらつきを考慮せず、プローブカーの旅行速度のみからリンク交通量を推定する。ある時間帯に  $n$  個のリンク旅行時間  $\hat{t}_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) が得られたとき、これをリンク旅行速度  $\hat{v}_i$  に変換し、 $k-v$ 曲線に基づき  $n$  個の対応する交通密度を算出する。さらに、 $q = kv$  の関係式より  $n$  個の交通量を算出し、この平均値を推定リンク交通量とする。

**手法2:** この手法では、観測されるプローブ旅行速度が従う分布は、速度の大きさによらず一定のばらつきを持つ正規分布であると仮定する。その上で、ベイズの定理によりデータ観測時刻におけるリンク旅行速度の分布を考慮する。すなわち、 $k-v$ 曲線の推定に用いたデータの旅行速度分布から、観測データが従う分布のばらつき (=  $s$ ) を差し引いたものを旅行速度の事前分布  $N(v_0, \sigma_0^2)$  とする。また、 $k-v$ 曲線 周りの  $v$  の分布を、観測されるプローブ旅行速度が従う分布とする。つまり、ある時間帯に  $n$  個のリンク旅行速度  $\hat{v}_i$  が得られたとき、標本分布は  $N(\bar{v}, \sigma^2)$  に従う ( $\bar{v}$  は観測リンク旅行速度の平均値、 $\sigma = s$ )。この上で、プローブデータ観測時刻における旅行速度の事後分布  $N(v_1, \sigma_1^2)$  を下式より求める<sup>5)</sup>。

$$v_1 = \frac{\sigma_0^{-2} v_0 + n \sigma^{-2} \bar{v}}{\sigma_0^{-2} + n \sigma^{-2}} \quad (5)$$

$$\sigma_1^{-2} = \sigma_0^{-2} + n \sigma^{-2} \quad (6)$$

得られたリンク旅行速度の事後分布と  $k-v$ 曲線  $q = kv$  の関係を用い、乱数シミュレーションによりリンク交通量の事後分布を求める。

**手法3:** この手法では、観測されるプローブ旅行速度が従う分布のばらつきは、速度の大きさによってその大きさが変化すると仮定する。その上で、ベイズの定理によりデータ観測時刻におけるリンク上の交通密度分布を考慮する。すなわち、 $k-v$ 曲線の推定に用いたデータの交通密度分布を事前分布とし、交通密度が  $k_i$  である確率と そのとき  $\hat{v}$  が観測される確率を用いて、ベイズの定理によりプローブデータ観測時刻における交通密度の事後分布の平均と標準偏差を求める (式(7))。

$$P(k_i | \hat{v}) = \frac{P(k_i) P(\hat{v} | k_i)}{\sum_{k_i} P(k_i) P(\hat{v} | k_i)} \quad (7)$$

ただし、この手法では交通密度 $k$ が従う事前、事後分布に特定の分布形を仮定せず、観測データから得られた微小区間ごとの交通密度 $k$ の構成比率を用いている。

さらに、手法2と同様に、得られたリンク交通密度の事後分布と $k$ - $v$ 曲線を用い、 $q = kv$ の関係と乱数シミュレーションによりリンク交通量の事後分布を求める。

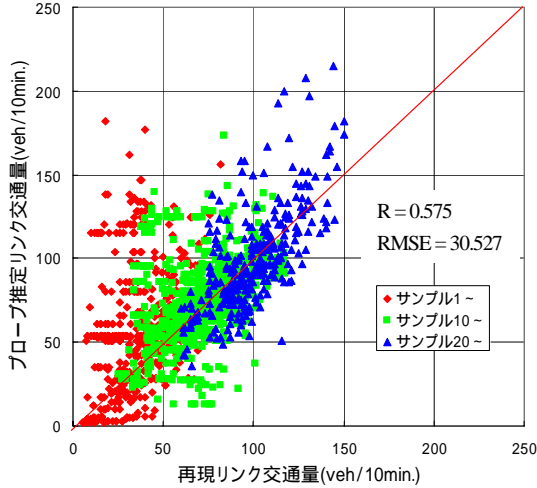


図 - 2 (a) 手法1によるリンク交通量推定結果

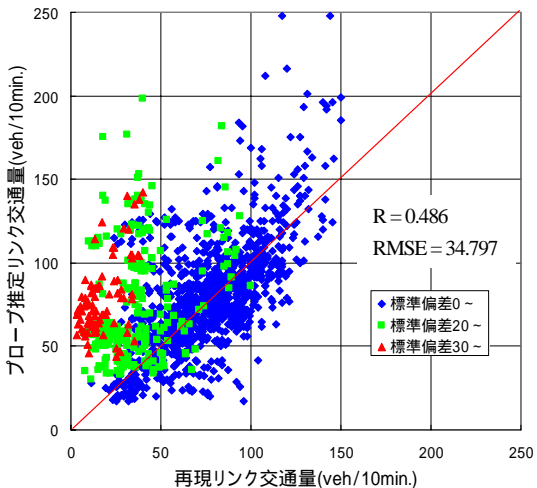


図 - 2 (b) 手法2によるリンク交通量推定結果

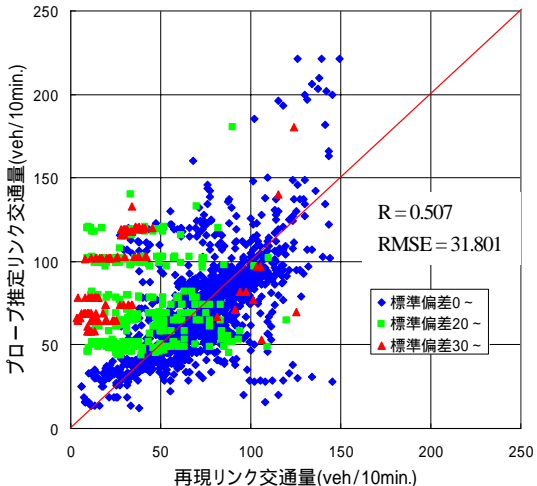


図 - 2 (c) 手法3によるリンク交通量推定結果

## (2) プローブデータの作成

プローブデータは、吉祥寺BMデータセットの真ODを用いてシミュレータを実行し、各リンクを通過する車両から5台に1台の割合で抽出してプローブカーとする。すなわち、各リンクから0.2の確率でプローブカーを抽出できるようなベルヌーイ試行により、各リンクを通過する車両からプローブカーが決定される。

## (3) リンク交通量推定結果

図 - 2 に、抽出されたプローブデータを用いて、前述の3つの手法により推定されたリンク交通量（プローブ推定リンク交通量）と真ODによる配分リンク交通量（再現リンク交通量）との散布図を示す。本研究では、各リンクの通過車両から5台に1台の割合でプローブカーを設定しているため、いずれの図においても横軸値（再現リンク交通量）を5で除した値が、あるリンクである時刻に観測されたプローブデータ数と概ね一致する。

この結果より、どの手法においてもリンク交通量の推定精度は高くはないが、手法1による推定精度が最も高く、手法2が最も低い。いずれの手法においてもばらつきが非常に大きい。手法1においてはサンプル数が多くなるほど、手法2,3においては推定リンク交通量の標準偏差が小さいほど45度線に近づく傾向がみられる。すなわち、得られる情報が多いほど観測時点のリンク交通量をより正確に推定可能であり、サンプル数や推定された標準偏差が推定精度をある程度示すことが分かる。

## 4. プローブ情報の信頼性を考慮した動的OD推定

本研究では、Willumsenにより示され<sup>6)</sup>、小根山らにより動的な枠組みに拡張された<sup>7)</sup>、エントロピー最大化問題により動的OD交通量を推定する。これは式(8)により表されるが、ラグランジュ乗数法により導かれる式(9)の非線形連立方程式を解くことで推定OD交通量が得られる。これはGauss法などで直接解くことも可能であるが、本研究では吉井ら<sup>8)</sup>と同様に式(9)の両辺の差の自乗和を最小にするような目的関数を設定し、最急降下法により推定計算を行うこととした。

$$P = \left[ \frac{q!}{\prod_{w,h_r} q_w(h_r)} \prod_{w,h_r} \left( \frac{\hat{q}_w(h_r)}{\sum_{w,h} \hat{q}_w(h_r)} \right)^{q_w(h_r)} \right] \quad (8.a)$$

$$\times \left[ \frac{v!}{\prod_{a,h} v_a(h)} \prod_{a,h} \left( \frac{\hat{v}_a(h)}{\sum_{a,h} \hat{v}_a(h)} \right)^{v_a(h)} \right]^r$$

$$\text{s.t. } v_a(h) = \sum_{w,hr} p_{aw}(h_r, h) q_w(h_r) \quad (8.b)$$

$$\hat{v}_a(h) X_a(h)^{\frac{1}{r}} = \sum_{rs, tr} p_{aw}(h_r, h) \hat{q}_w(h_r) \prod_{a,t} X_a(h)^{p_{aw}(h_r, h)} \quad (9)$$

ここに、 $q$ は総OD量、 $q_w(h_r)$ はODペア $w$ を時刻 $h_r$ に出発するOD量、 $p_{aw}(h_r, h)$ はこのOD量が時刻 $h$ にリンク $a$ を通過する割合、 $v$ は対象リンクの総リンク交通量、 $v_a(h)$ はリンク $a$ を時刻 $h$ に通過するリンク交通量であり、“ $\hat{\phantom{x}}$ ”はそれぞれ観測値を表す。 $X_a(h)$ はラグランジュ乗数から導かれる未知変数であり、これについて解くことで推定OD交通量が計算できる。また、 $r$ は、初期OD量の精度に対する観測リンク交通量の相対的な信頼性を表す。この値を大きくするほど観測リンク交通量の精度を小さく評価することになる<sup>9)</sup>が、これまでのほとんどの研究において $r = 1$ としている。本研究では、3.(1)で示した手法1においてはプローブサンプル数、手法2, 3においては推定されたリンク交通量の標準偏差を用いて、 $r$ の値を以下のようにリンク別に設定した。

$$r_{a,h} = 1.0 + 10.0/n_{a,h} \quad (10)$$

$$r_{a,h} = 1.0 + 0.1 \times \sigma_{a,h} \quad (11)$$

ここに、 $n_{a,h}$ はリンク $a$ 上で時刻 $h$ に観測されたプローブデータ数、 $\sigma_{a,h}$ は推定されたリンク交通量の標準偏差。

計算負荷軽減のため、OD交通量の推定対象時間帯は7:50 - 9:10とし、プローブデータ観測リンクは観測リンク交通量が存在するリンクとした。また、修正される初期OD交通量は、真ODの各OD交通量 $\hat{q}_w(h_r)$ に対して $\hat{q}_w(h_r) \times (1 - \tan 15^\circ) / 1.96$ の標準偏差を持つ正規分布に従うようばらつかせて作成した。OD推定計算の基本的な手順は以下のとおり。

Step1: 初期ODを用いてシミュレーションを実行し、リンク利用率 $p_{aw}(h_r, h)$ を求める。

Step2: 目的関数(式(9)の両辺の差の自乗和)を最急降下法で解き、 $X_a(h)$ を得る。

Step3: 初期ODを $X_a(h)$ により修正し、再度シミュレーションを実行して新たなリンク利用率 $p_{aw}(h_r, h)$ を求める。

Step4: Step2, Step3を繰り返し、初期OD交通量からの修正の変化が小さくなら終了。

表-2にOD推定結果を示す。再現リンク交通量を用いてもそれほど推定精度が高くない理由は、終了条件とするOD変化量を比較的大きく設定し、また最急降下法を用いているためと考えられる。しかし、いずれの方法でも初期OD交通量を修正することが可能なことが分かる。特に、観測リンク交通量の信頼性パラメータ $r$ をプ

ローブデータ数やリンク交通量の標準偏差により設定することで、OD推定精度が上昇していることが分かる。また、3.(3)で示したように、手法2によるリンク交通量の推定精度が最も低かったにもかかわらず、OD交通量推定精度は手法3より高い。これは、手法3ではリンク交通密度の分布形を特定しておらず、非常に小さな確率値を用いた計算により計算値の桁落ちが発生し、いくつかの推定値が必ずしも適切な値でないためである。

表-2 OD交通量の推定結果

観測リンク交通量	$r_{a,h}$	真ODとの相関係数 / RMSE	再現リンク交通量との相関係数 / RMSE
再現リンク交通量	1.0	0.964 / 1.398	0.983 / 6.492
手法1	1.0	0.951 / 1.625	0.968 / 8.853
	式(10)	0.954 / 1.590	0.974 / 8.114
手法2	1.0	0.951 / 1.630	0.967 / 9.166
	式(11)	0.954 / 1.614	0.975 / 7.943
手法3	1.0	0.945 / 1.709	0.965 / 9.600
	式(11)	0.949 / 1.669	0.973 / 8.050
初期OD		0.937 / 1.865	0.962 / 9.797

## 5. おわりに

本研究では、プローブデータのリンク通過旅行速度から動的OD交通量を推定する手法を示した。結果として、プローブデータから推定されたリンク交通量は、サンプル数やその標準偏差を用いてエントロピー最大化法によるOD交通量推定に利用可能であることを示した。ただし、分析においては、必ずしも適切な条件設定がなされておらず、またOD推定計算も厳密なものではない。従って、今後は名古屋都市圏におけるデータを使用してさらに詳細な分析を行った上で、交通状況の近未来予測や日々の変動に関する分析を行う予定である。

## 参考文献

- 堀場庸介ら：プローブデータに基づく推定経路交通量への観測誤差の影響分析と推定経路交通量の更新手法，土木計画学研究・論文集，Vol.22，no.3，pp.495-505，2005。
- Gazis D. C. *et al*: Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow, Oper. Res. 9 (4), pp.545-567, 1961。
- 河上省吾，松井寛：交通工学，森北出版，1987。
- 花房比佐友ら：交通シミュレーション再現性検証用データセットの構築，土木学会論文集 Vol.668/IV-53，pp.115-123，2001。
- 鈴木雪夫，国友直人 編：ベイズ統計学とその応用，東京大学出版会，1989。
- Willumsen, L.G.: Estimating time-dependent trip matrices from traffic counts, Proc. of the 9th ISTTT, pp.397-411, 1984.
- 小根山裕之，桑原雅夫：路側観測交通量からの時間変化するOD交通量の推定，交通工学 Vol.32 no.2，pp.5-16，1997。
- 吉井稔雄ら：トラフィックシミュレーションを用いた路側観測交通量からの動的OD交通量の推定，土木計画学研究・論文集，No.15，pp.461-468，1998。