

プローブカーデータを用いたリンクコスト関数推定に関する研究*

Estimation of Link Performance Function by Using Probe-Car Data*

岡田良之**・森川高行***・三輪富生****

By Yoshiyuki OKADA**・Takayuki MORIKAWA***・Tomio MIWA****

1. はじめに

道路ネットワークへの自動車交通需要の配分モデルに適用されるリンクコスト関数は、配分交通量の精度に与える影響が非常に大きい。また、リンクコスト関数は、道路投資の便益評価や、きめ細やかな道路施策評価を行う上で重要となるOD間の所要時間、走行速度の予測に用いられることから、その役割は益々大きくなってきている。

リンクコスト関数の推定には、ある区間を通過する車両の速度（時間）と交通量に関するデータが必要となるが、既存研究においては、非常に限られた路線（区間）・期間におけるデータか、道路交通センサスのような全国の道路網を対象としているが、混雑時だけのデータを用いた推定であった。

プローブカーデータは、実際の道路ネットワークを走行する車両をセンサーとして用いることで、リアルタイムかつ広範囲における様々な情報を収集できる。そのうちのひとつである旅行速度情報は、各車両の走行軌跡を時間軸と併せて集計することで、任意の地点間における旅行速度を得ることが可能である。

本研究で用いる旅行速度データは、名古屋市街地を中心として営業を行っている約1,500台のタクシー車両から約2ヶ月という長い期間において得られたものであり、道路種別、車線数の異なる様々な道路区間における膨大な旅行速度サンプルである。一方、交通量データは、愛知県警が所有する車両感知器の時間帯別交通量を用いており、プローブ旅行速度データと組み合わせると、100を超える車両感知器設置区間におけるリンクコスト関数の推定が可能となる。

本研究は、これらの旅行速度データと交通量データを

用いたリンクコスト関数の推定を行い、パラメータのばらつきや推定精度へ影響を与える要因についての分析を行い、精緻なリンクコスト関数を開発するための手法について考察を行う。

2. データの概要

(1) 旅行速度データの概要

本研究で使用するデータは、2002年1月28日～3月31日の2ヶ月間、名古屋都市圏において行われた「インターネットITSプロジェクト」（主体：経済産業省）の実証実験により取得されたデータである。この名古屋実証実験は、名古屋市およびその周辺に営業所をもつ32のタクシー営業所の協力を得て、1,570台のタクシーをプローブカーとして行われた。データ送信は、イベントスキミングにより行われ、実験において設定されたデータ送信イベントは表-1に示すとおりである。

また、実車（乗客が乗車中）と空車では、走行特性が異なることから¹⁾、実車データのみデータを利用する。

表-1 主なデータ送信イベント

送信イベント	備考
距離(300m)周期	イベント発生後、300m走行するまで他のイベントが発生しなかったとき
時間周期(550s)周期	停止車両からも一定間隔でデータを入力
車両停止時	ST(Short Trip)
車両発進時	SS(Short Stop)
実車/空車変化時	タクシーの実車/空車状態が変化したとき
エンジン始動/終了時	エンジンの始動/終了時
危険挙動発生時	速度超過、急加速、急減速発生時

(2) 交通量データの概要

愛知県警が県内に所有する車両感知器は200箇所以上あるが、名古屋市とその周辺における平成11年度道路交通センサス²⁾（以下、センサス）の調査対象区間に設置されている車両感知器の交通量データ（台/時）を用いている。センサスの調査対象区間とした理由は、車両感知器から得られる交通量データは車種別ではないことから、センサスから得られる時間帯別車種別交通量を用いて乗用車換算する必要があること、また、リンクコスト関数の推定に必要な交通容量を算出するためには車線数、

*キーワード：リンクコスト関数、プローブカー

**正員，工修，名古屋大学大学院工学研究科

(名古屋市千種区不老町，TEL:052-789-3730，

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

***正員，Ph.D，名古屋大学大学院環境学研究科

(E-mail:morikawa@civil.nagoya-u.ac.jp)

****学生員，工修，名古屋大学大学院環境学研究科

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

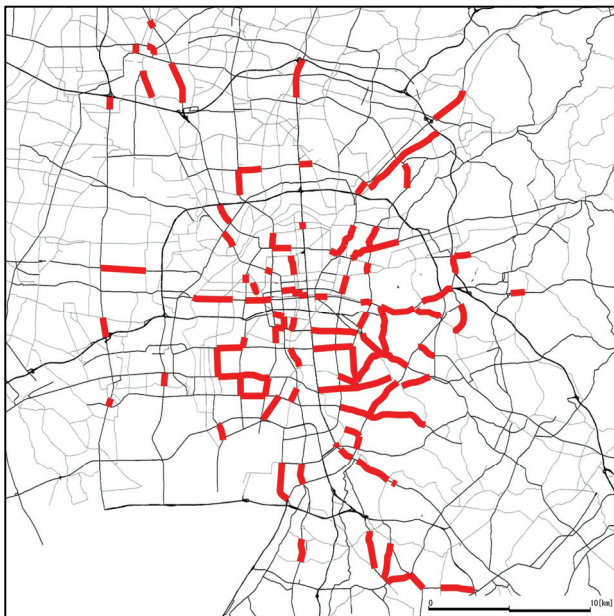
道路幅員等のデータが必要であるためである。なお、大型車（バスと普通貨物車）における乗用車換算係数は2.0を適用し、センサスから得られる平日・休日別の時間帯別の大型車混入率を用いて乗用車換算している。

(3) 旅行速度と交通量のマッチング

データの集計時間帯は1時間とし、プローブカーによって観測された旅行速度サンプルに対して「同じ日」の「同じ時間帯」の車両感知器の交通量をマッチングした。旅行時間データと交通量データをマッチングし、リンクコスト関数の推定が可能となった区間（車両感知器の交通量欠損時間帯、及び旅行速度が5km/h以下、100km/h以上のデータを除くサンプル数が50以上ある区間）は、表一2、図一1に示す100箇所（太線表示）であり、上下方向別では168区間となった。なお、各区間のサンプル数は、最大で11,500サンプル、最小で51サンプルであり、平均サンプル数は1,085サンプルとなっている。

表一2 リンクコスト関数の推定区間数

	2車線	4車線	6車線以上	計
一般国道	7	12	21	40
主要地方道	10	50	24	84
一般県道	7	8	8	23
指定市道	0	7	14	21
計	24	77	67	168



図一1 リンクコスト関数の推定区間

3. リンクコスト関数推定の基本的方針

(1) 分析の位置づけ

本研究で分析対象とするリンクコスト関数は、都市圏レベル以上の大規模ネットワークに対する1時間、もし

くは日あたりの交通量配分問題に適用する利用者均衡配分モデルに組み込むことを前提としている。しかしながら、そのような大規模ネットワークを構成する全リンクについて個別の関数を推定・設定するために、2章で説明したプローブカーによる旅行速度データと車両感知器による交通量データを全リンクで収集することは困難である。したがって、最終的には表一2に示したようなセンサス調査区間単位ごとの道路種別、車線数などの道路特性や混雑度、ピーク率などの交通特性を用いてリンクコスト関数に含まれるパラメータを一般化して定義することを目的としている。

そこで、本研究においては、168区間において個別に推定されたリンクコスト関数に関して、各リンクのどのような特性が、パラメータにどのような影響を及ぼすかを分析し、均衡配分モデルに組み込むことが可能なリンクコスト関数推定に関するデータの集計・加工手法、パラメータ推定にあたっての留意事項、さらにはパラメータの一般化に向けた今後の課題等についての考察を行う。

(2) 推定手法

これまで、提案されてきた代表的なリンクコスト関数としては、Davidson関数とBPR関数があるが³⁾、均衡配分モデルにおいて解の一意性の保証、計算の効率性を確保するためには単調増加関数であることが条件であることから、本研究では式(1)に示すBPR関数を採用する。

$$t_a(q_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha (q_a / C_a)^\beta \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 q_a : リンクaの時間交通量 (pcu/h)
 t_{a0} : " 自由走行時間 (min/km)
 C_a : " 時間可能交通容量 (pcu/h)
 α, β : 未知パラメータ

式(1)において、本研究で推定するパラメータは t_{a0}, α, β であり、推定は溝上ら⁴⁾が提案した手法に基づいて行う。また、時間可能交通容量 C_a は基準交通容量(台/h/車線)にセンサスから得られる車線幅員、側方余裕及び沿道条件の影響による補正を行い、推計区間毎にあらかじめ算出する⁵⁾。

溝上らは、単位時間帯*i*に走行する車両のリンク所要時間は確率変数で、その分布は時間帯毎に独立であり、 $N(\bar{t}_{ai}, s_{a0}^2(\bar{t}_{ai}))$ の正規分布に従うと仮定し、時間帯*i*に観測されるn番目の車両の所要時間サンプル t_{ai}^n の確率密度関数を、

$$f(t_{ai}^n | \bar{t}_{ai}, s_{a0}^2(\bar{t}_{ai})) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} s_{a0}(\bar{t}_{ai})} \exp \left[-\frac{(t_{ai}^n - \bar{t}_{ai})^2}{2s_{a0}^2(\bar{t}_{ai})} \right] \dots \dots \dots (2)$$

として表現し、次式の尤度関数を定義することで最尤推

定法によりパラメータを推定している。

$$L(\theta) = \prod_a \prod_i \prod_n f(t_{ai}^n | \bar{t}_{ai}, s_{a0}^2(\bar{t}_{ai})) \dots \dots \dots (3)$$

ところで、交通流理論における交通量と旅行時間の関係は、交通量が交通容量に達しない領域では単調増加であるが、交通量が交通容量を超える領域（渋滞領域）では、旅行時間は増加を続けるが交通量は減少するといった、1つの交通量に対して2つの旅行時間を持つ二価関数となることが知られている⁹⁾。したがって、交通量と旅行時間の関係を単調増加関数と仮定しているBPR関数推定にあたっては、実際に観測される渋滞領域のデータの扱いに関する問題、実際には観測されない交通容量を超える領域を推定する必要があるといった2つの問題を抱えている。前者の問題については、明らかに渋滞領域のデータであると考えられる旅行速度が5km/h以下、またはST（停止）、SS（発進）を頻繁に繰り返しているサンプルデータを推定から除外することで対応している。後者の問題については、交通容量周辺のデータが観測されない区間（日中を通じてあまり混雑がない区間）において、どのように推計すべきかといった問題も含めて、実際のデータ散布状況に基づいて4章において考察する。

4. 推定結果とその考察

(1) 推定結果の概要

アメリカの道路局で提案されたBPR関数のパラメータ推定に関する我が国の既存研究では、溝上ら⁴⁾の $\alpha=1.0 \sim 1.1$ 、 $\beta=1.2 \sim 1.5$ 、西谷ら⁷⁾の $\alpha=0.6 \sim 0.7$ 、 $\beta=2.9 \sim 3.0$ 、松井ら⁸⁾の $\alpha=0.4 \sim 0.5$ 、 $\beta=2.2 \sim 3.3$ と報告されている。

一方、本研究の168区間における推定結果をみると表-3に示すように、既存研究の値（ $\alpha=0.4 \sim 1.1$ 、 $\beta=1.2 \sim 3.3$ ）と比較して非常にばらついていることがわかる。

表-3 α 、 β の推定値

推定値	α		β	
	区間数	構成比	区間数	構成比
0.0~1.0	73	43.5%	40	23.8%
1.0~2.0	40	23.8%	56	33.3%
2.0~3.0	25	14.9%	29	17.3%
3.0~4.0	7	4.2%	10	6.0%
4.0~5.0	3	1.8%	11	6.5%
5.0~6.0	5	3.0%	8	4.8%
6.0以上	15	8.9%	14	8.3%
計	168	100.0%	168	100.0%

また、 α 、 β の相対的な大小関係についても説明が難しく、車線数でみても図-2に示したように α 、 β の推

定値に顕著な傾向はみられなかった。したがって、 α 、 β の推定値にばらつきが生じる要因について個別の区間における交通量-観測旅行時間の分布状況に基づき考察するとともに、より精緻な推定を行うための方法について検討する。

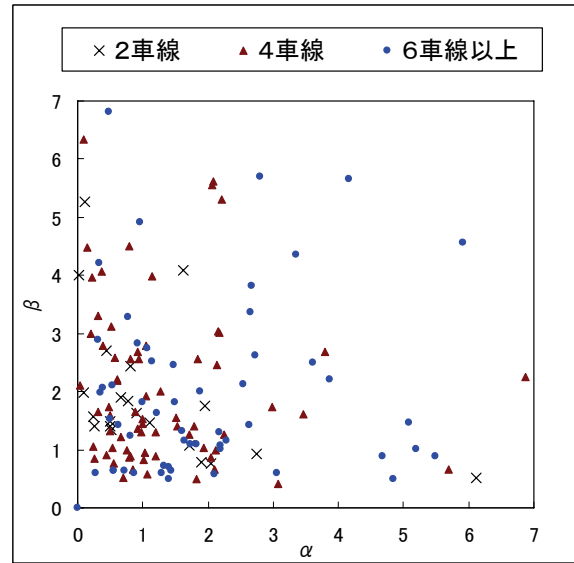


図-2 車線数別の α と β の散布図

(2) α 、 β に関する考察

まず、 α のばらつきの要因について考える。 α は、交通量が交通容量と等しくなった場合の旅行時間が、自由走行時間の何倍になるかを示すものである。式(1)において外生的に与えている時間可能交通容量(C_a)は、時間帯に係わらず定数としているので、仮に C_a の値を定数倍した場合は α も定数倍となる。

図-3に、ある区間における交通量-観測旅行時間の分布状況と推定されたリンクコスト関数との関係を示す。

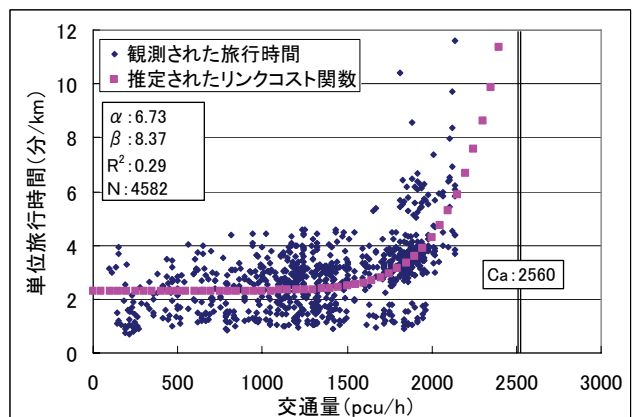


図-3 観測データと推定リンクコスト関数(1)
〈国道 片側4車線の区間〉

この区間においては道路交通センサに基づく C_a として2,560 (pcu/h)を設定しており、この値は実際に観測された最大交通量と比較しても2割程度大きいことが

わかる。この区間は、名古屋中心部を通過する片側4車線の国道(L=850m)であり、混雑時においては路上駐車車が非常に多く(約13.8台/0.1km)、これらの駐車車両の影響により交通容量が小さくなっていると考えられる。ここで、 C_a を観測された最大交通量に近づけた2,200(pcu/h)として設定し、再推定を行った結果、推定されるリンクコスト関数の形は同じであるが、 $\alpha = 「6.73」 \Rightarrow 「1.89」$ となる。

このように、 α の値は各区間で設定している C_a の過大評価、もしくは過小評価によってばらつく結果となることから、データの分布状況より現実の道路状況を把握し、これを反映するように補正を加え、適切な容量を再設定した上で推定を行う必要がある。

次に、 β のばらつきの要因について考える。 β は関数の傾きを示すものであり、 β の値が大きい場合には図-3に示したような C_a の近傍で急激に増加する関数となる。一方、 β の値が小さい場合には、図-4(主要地方道 片側3車線の区間 L=1,200m)に示すような C_a を超えても旅行時間があまり増加しないという非現実的な関数となる。

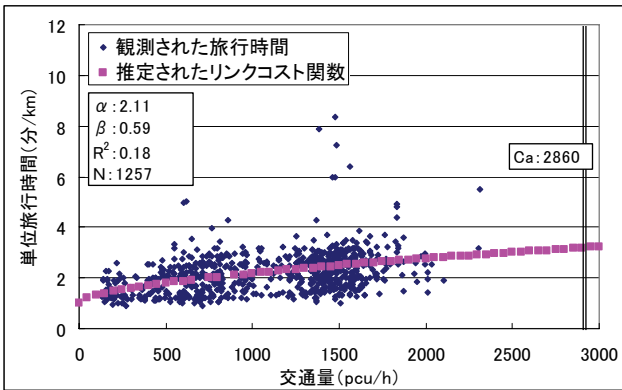


図-4 観測データと推定リンクコスト関数(2)
〈主要地方道 片側3車線の区間〉

このような β のばらつきは、 α が容量を超える前の領域において支配的であるのに対し、 β は容量を超えた場合において支配的になることから、図-4のように、交通量が増加しても観測された旅行時間に顕著な増加傾向がみられない分布になっている区間においては、 β による影響がなく、ほぼ α のみで決定されてしまうことが原因となっている。

したがって、 $\beta < 1$ となるような推定区間においては、 β は配分計算上で混雑による容量制約が十分に影響するような値(例えば、同様の道路特性を有する他区間における β の推定値)を外生的に与え、他のパラメータ(α , t_{a0})や推定精度に与える影響について分析を行った上で設定するといった方法について検討する必要がある。

(3) t_{a0} に関する考察

自由走行時間 t_{a0} (分/km)の推定値については、時速換算(km/h)した結果、表-4に示すように20~50(km/h)の間に推定されている。この自由走行速度は、推定区間の信号交差点数、車線数などが影響するものと考えられるため、指定最高速度(km/h)、信号交差点密度(箇所/km)、多車線ダミー変数(2車線以上を1)を説明変数とした回帰分析を行った結果を表-5に示す。重相関係数をもても十分な精度、指定最高速度と車線数については有意な結果が得られなかったが、信号交差点密度については、自由走行速度に影響を与えていることが確認できる。したがって、 t_{a0} の推定値は信号交差点密度の影響を大きく受けることから、BPR関数設定のランクの設定に信号交差点密度を反映させる、もしくは t_{a0} に信号交差点密度を組み込んだ形($t_{a0} = t'_{a0} + \gamma * \text{信号交差点密度}$)で推定するなどにより、より現実の交通状況を反映しうるBPR関数を作成することができる。

表-4 自由走行速度の推定結果

自由走行速度 (km/h)	20~	30~	40~	50~	60~	70~	80~	計
区間数	35	64	42	13	2	6	6	168

表-5 自由走行速度の回帰分析結果

定数項 (km/h)	信号交差点密度 (箇所/km)	指定最高速度 (km/h)	多車線ダミー	重相関係数
41.911 (7.027)	-1.891 (3.282)	0.083 (0.698)	-1.595 (0.546)	0.299

※上段は回帰係数、下段()内は値を示す。

(4) 推定精度に関する考察

最後に、リンクコスト関数の推定精度(R^2)についてみると、表-6に示すように決して良くはないことがわかる。これは、図-3、図-4をみて分かるように同じ交通量が観測されている場合でも、プローブカーの旅行時間がばらついていることが原因と考えられる。

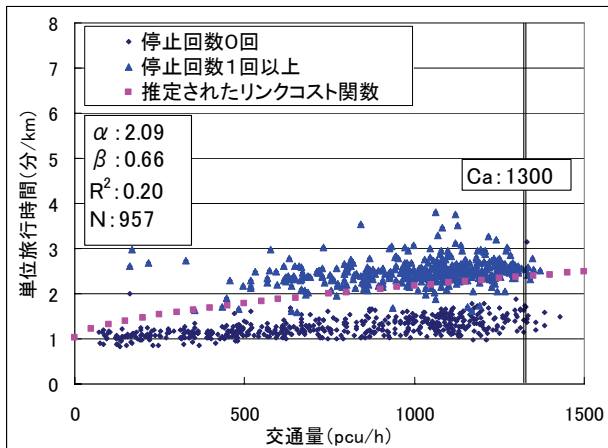
表-6 リンクコスト関数の推定精度

	R^2	
	区間数	構成比
0.00~0.20	99	58.9%
0.20~0.40	51	30.4%
0.40~0.60	16	9.5%
0.6以上	2	1.2%
計	168	100.0%

プローブカー旅行時間のばらつきの原因の一つとしては信号サイクルの影響があり、推定区間を信号の影響を受けずに早く走行した車両は、流入区間、流出区間のどちらかの隣接区間においては遅くなることが考えられる。

図-5に示すのは、プローブカー情報から得られる停

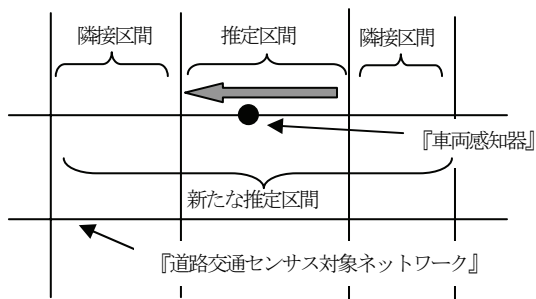
車回数の有無で区分した、ある区間（主要地方道 片側2車線の区間 $L=700\text{m}$ ）における交通量-観測旅行時間の分布状況と推定されたリンクコスト関数である。この区間は延長が比較的短く、区間内に存在する6箇所の信号交差点はすべて系統的に制御されており、停車回数が0回と1回以上で明らかに2つの関数が存在することが確認できる。



図—5 観測データと推定リンクコスト関数(3)
 <主要地方道 片側2車線の区間>

一方、ネットワーク均衡配分においては、一般的に右左折行動も含め信号サイクルの影響は考慮しない。したがって、適用するリンクコスト関数についても、このような信号サイクルの影響を平均化して交通状況（旅行速度）を再現することが望ましいと考えられる。

そこで、信号停止による影響を平均化した場合の推定特性を把握するために、図—6に示すように、推定区間に隣接する区間を加え、信号による停車回数の違いが少なくなるように区間延長を長くした。この新たな推定区間でプローブカー旅行時間を算出し、リンクコスト関数を再推定することとした。

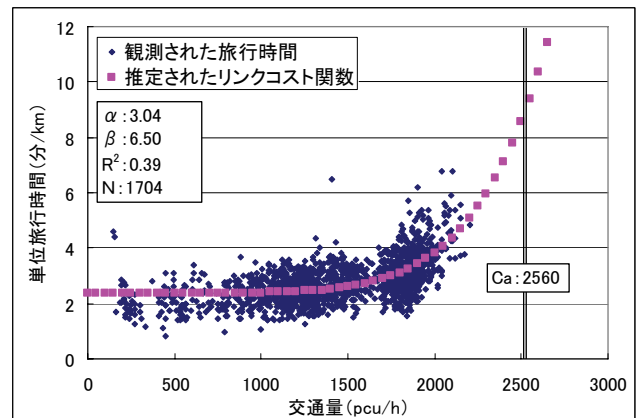


図—6 新たな推定区間の設定方法

図—7は、図—3に示した区間 ($L=850\text{m}$) において、隣接区間を加えた新たな推定区間 ($L=2,200\text{m}$) で推定したものである。図—3の推定区間における4,582サンプルのうち、推定区間と2つの隣接区間を一気通貫してい

るサンプルのみを対象としているため1,704サンプルに減少しているが、明らかにプローブカーによって観測された旅行時間のばらつきが減少し、推定精度が向上していることがわかる。

ここで示した手法は、速度データを平均化するための一例ではあるが、このように、推定結果を踏まえ推定データを新たに加工することで適切なリンクコスト関数の推定が可能となったこと、さらには、本研究ではまだ至っていないが、右折車両と直進車両のセグメンテーションによる推定が可能であることは、各車両の走行軌跡を有するプローブカーデータをリンクコスト関数の推定に用いることの有用性を示す結果と言えよう。



図—7 観測データと推定リンクコスト関数(4)
 <国道 片側4車線の区間>

5. まとめ

本研究では、プローブカーから得られる旅行時間データと車両感知器から得られる交通量データを用いてリンクコスト関数の推定を行い、以下の知見が得られた。

- α のばらつきは交通容量の設定方法による影響が大きく、実際の観測交通量との整合を図ることで安定した値を推定することが可能である。
- 容量周辺において観測されるデータがない区間においては、 β を推定することは難しいため、外生的に与えた場合の推定手法についての検討も必要である。
- 自由走行速度は、信号交差点密度による影響が大きい。
- 推定精度を向上させるためには、個別の推定区間ごとに信号の影響を平均化できる適切な延長を設定する必要がある。

本研究で得られた知見に基づき、さらに精緻なリンクコスト関数を推定し、実際のネットワーク配分問題に適用していくための今後の課題を以下に述べる。

- すべての推定区間について、交通量-観測旅行時間の分布状況と推定されたリンクコスト関数との

関係を詳細に分析し、交通容量や推定延長の設定方法について検討し、パラメータの安定性と十分な精度を確保する。

- 車両感知器が設置されていない道路区間にも適用可能とするために、道路種別、車線数、沿道状況などによってリンクコスト関数に含まれるパラメータを一般化できる手法を開発する。
- 開発したリンクコスト関数を実際の道路ネットワークへの配分問題に適用し、配分交通量、及び走行時間などの推定精度について検証する。

謝辞: 本研究を進めるにあたって、貴重なデータを快く提供していただいた、インターネットITSプロジェクトグループ（経済産業省、慶応大学WIDEプロジェクトグループ、トヨタ自動車株式会社、株式会社デンソー、日本電気株式会社（NEC））、及び愛知県警察の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Miwa, T. and Morikawa, T.: Analysis on Route Choice Behavior Based on Probe-Car Data, Proceedings of 10th World Congress on Intelligent Transport Systems, CD-ROM, 2003
- 2) 国土交通省中部地方整備局：「平成11年度道路交通センサス」, 1999
- 3) 土木学会：「交通ネットワークの均衡分析 -最新の理論と解法」, 1998
- 4) 溝上章志, 松井 寛, 可知 隆：「日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発」, 土木学会論文集, 第401号 /IV-10, pp99-107, 1989
- 5) 社団法人 日本道路協会：「道路の交通容量」, pp19-35,昭和59年9月
- 6) 河上省吾, 松井 寛：「交通工学」, 森北出版, 1987
- 7) 西谷仁志, 朝倉康夫, 柏谷増男：「交通量配分に用いる走行時間関数のパラメータ推定と影響分析」, 土木計画学研究・講演集, No.14 (1), pp315-322, 1991
- 8) 松井 寛, 山田周治：「道路交通センサスデータに基づくBPR関数の設定」, 交通工学, Vol.33, No.6, pp9-16, 1998

プローブカーデータを用いたリンクコスト関数推定に関する研究*

岡田良之・森川高行・三輪富生

本研究では、リアルタイムかつ広範囲における様々な情報を習得できるプローブカーから得られる旅行速度データに着目し、道路ネットワークへの自動車交通需要の配分モデルに適用されるリンクコスト関数の推定を行った。推定結果について、パラメータのばらつきの要因や道路特性との相関関係について考察した。より精緻なリンクコスト関数の推定のためには、交通容量を観測交通量と照査した上で設定する必要があることが分かった。また、信号サイクルの影響による旅行時間データのばらつきを抑えるためには、推定区間をある程度長く設定する必要があることが分かり、各車両の走行軌跡を有するプローブカーデータを用いることの有用性を示した。

Estimation of Link Performance Function by Using Probe-Car Data*

By Yoshiyuki OKADA · Takayuki MORIKAWA · Tomio MIWA

In this study, we estimated the link performance function and investigated its reproducibility using probe-car data. The estimated results showed high variability. One of the main factors which cause the variability was the link capacity settings, and it might be essential to modify the link capacity properly referring to the observed daily traffic volumes. The signal cycle was another factor, and it is, therefore, required to set the link length appropriately to reduce its effect. Thus, probe-car data seems to be useful to estimate the link performance function and check its validity.
