

流出入交通量観測値を用いた時間 OD 交通量のオンライン推定手法に関する研究*

On-line Estimation of OD Flows from Input/Output Counts*

松本 幸正^{**}・藤田 素弘^{***}・松井 寛^{****}

By Yukimasa MATSUMOTO^{**}, Motoluro FUJITA^{***} and Hirosu MATSUI^{****}

1. はじめに

渋滞情報、所要時間情報など道路交通においてもドライバーの多様なニーズに応えるべく、最近各種の交通情報提供システムが開発・実用化されつつある。これらのシステムの多くは、車両感知器や AVI 装置などを用いて時々刻々と変化する交通状況を観測し、得られた観測結果を分析することにより各種の情報を提供し、道路ネットワークの有効利用を促進しようとするものである。また大気汚染や騒音の防止などの環境対策の必要性から、今後交通運用に対する要望は、ますます高度化かつ多様化していくと考えられる。

このようなきめの細かな交通運用を行っていくためには、道路交通需要を分析する際にも時間軸の導入は欠かせないものとなっており、時間変動する交通状況に敏感に反応できるようなより短い時間間隔での交通需要分析の必要性が高まってきている。また分析手法の必要性とともに、時間変動する交通状況の通信ネットワーク等を通じた逐次的な把握、すなわちオンラインでの把握が不可欠であり、観測されたデータを短時間で分析するためのシステムの構築が必要となる。道路上に設置されている車両感知器は、時間変動する交通状況を観測するのに適しており、観測地点の交通量や平均速度、オキュパンシーなどのデータを得ることができ、今後設置場所の拡大が進めば、より多くの地点の交通状況の時間変化の把握が可能となるであろう。

しかしながら時間変動する交通状況の観測やデータの蓄積は進んでいるにも関わらず、それらデータの有効な利用方法については依然模索状態であると言える。特に集計される前の観測データに含まれている連続時間軸上、あるいは非常に短い時間間隔でのデータの有効利用は十分に進んではいない。

そこで本研究では、道路交通情報の提供や交通管制・交通管制の基礎データとして不可欠である短い時間間隔での時間 OD 交通量を、車両感知器などから得られる交通量の時間変動データをもとに推計可能な、オンラインでの適用を考慮した手法を提案する。

2. 従来の研究と本研究の概要

道路上の車両感知器などは交通需要の構造的変化や日変動あるいは時間変動などを直接計測できることから、設置個所の拡大が計られ、それにとともに多くの研究者が車両感知器から得られるデータの有効利用について取り組んできた。特にこの十数年間、交通量観測値から OD 交通量を推定する各種の手法が提案されてきている。

交通量観測値の時系列データを用いて動的な OD 交通量を推計する手法が Cremer and Keller(1981)¹⁾、(1984)²⁾らによって提案された。その後交差点や小さなネットワークを対象とした OD マトリックスの推定法として Cremer and Keller(1987)³⁾は非再帰的及び再帰的推定法とカルマンフィルタ法を用いた手法を、同時期に Nilhan and Davis(1987)⁴⁾は再帰的推定法とカルマンフィルタ法を用いた手法を示し、また楊・秋山・佐々木(1992)⁵⁾はニューラルネットワークを適用した手法を提案した。しかしながらこれらの手法では、対象とするシステムを横断する旅行時間は、推定時間間隔に比べ無視できるほど小さいか、あるいは各 OD ペア間の旅行時間はほぼ等しくかつ一定値であると仮定できるようなシステムを対象とし

* キーワーズ 分布交通、ネットワーク交通流

** 正員 工修、名城大学理工学部土木工学科
(468、名古屋市天白区塩釜口 1-501、tel(052)832-1151、
fax(052)832-1178)

*** 正員 工博、名古屋工業大学社会開発工学科
(466、名古屋市昭和区御器所町 tel(052)735-5492、
fax(052)735-5492)

**** 正員 工博、名古屋工業大学社会開発工学科
(466、名古屋市昭和区御器所町 tel(052)735-5481
fax(052)735-5481)

ており、個々の交差点あるいは非常に小さなネットワークでしか適用できず、システムを横断する旅行時間が各 OD ペア間で異なるような場合には、モデルの構造から本質的には適用できない。

現実的な都市ネットワークにおいて動的 OD 交通量を推計する問題は、時間変動する OD 交通量とリンク交通量の間の動的な関係を経路選択行動を介して設定する必要があることから、非常に複雑になる。一方高速道路の各ランプ間の OD 交通量やジャンクションなどの方向別交通量の推計問題は起終点間の経路選択を考える必要が無く、比較的扱いやすくなる。Bell(1991)⁶⁾は各時間インターバルにおける旅行時間の分布が幾つかの時間インターバルにまたがる場合の 2 つの動的 OD 推定手法を提案した。一つは旅行時間の分布に幾何分布を仮定した車群分散の再帰モデルであり、信号交差点や小さなネットワークに適した方法である。もう一つは旅行時間分布に関して特定の仮定を必要としない方法で、高速道路での適用が可能な方法である。しかしながら OD 交通量と交通量観測値の動的な関係を定式化するため、実質的に多くのパラメータ推定が必要であるという欠点を持ち合わせている。

Chang and Wu(1994)⁷⁾は高速道路区間においては、各ランプにおける流出入交通量の観測値とともに、本線上の各道路区間上における交通量の観測値が利用できることに着目した。そしてこの流出入交通量及び本線上の区間交通量の観測値と時間変動する OD 交通量の間の動的な関係を定式化し、拡張カルマンフィルタ法に基づくパラメータの推定手法を示した。しかしながら実際には旅行時間には幾つかの時間インターバルにまたがる分布が存在するにもかかわらず、この方法では、隣り合う 2 つのインターバルしか考慮できず、旅行時間の分布が限定されてしまう。また流入交通量と流出交通量の間での保存則が成立せず、さらにモデルの特質上非常に多次元のマトリックスを取り扱わなければならない。

本研究では、経路が一つに限定される高速道路やネットワークの一部分で適用が可能な時間 OD 交通量の推定手法を提案する。本手法では、対象システムへの流入交通量と流出交通量の時間連続観測値に基づいて OD 交通量を推定するが、各 OD 間の旅行時間に関しては既知として考え、モデルの定式化

に際して旅行時間分布に関する仮定は特に必要なく、旅行時間は時間変動すると考えるため旅行時間の変動が幾つかの時間インターバルにまたがるような場合にも適用可能である。さらに時間変動する OD 交通量と流入交通量観測値の間の動的な関係を構築し、流入交通量と流出交通量の間での動的な交通量保存則が成り立つような手法を提案する。

3. 時間 OD 交通量の推定手法

本研究では、各 OD ペア間で経路が一つに限定される様なネットワークを対象として考える。このようなシステムは、高速道路の一部であるともでき、あるいは単独の信号交差点や幾つかの信号交差点を直列に組み合わせた都市ネットワークの一部と考えることもできる。また対象とするシステムへの流入及び流出交通量が車両感知器などによって観測されていると考え、これらの交通量観測値の時間連続データに基づいた OD 交通量の推定モデルの定式化を行う。さらに旅行時間が各 OD ペア間でほぼ同一である渋滞の発生していない単独の信号交差点や高速道路のジャンクションなどを対象とした場合と、OD 間の旅行時間が各 OD ペア間で異なる高速道路部分区間や都市ネットワークの一部を対象とした場合について、それぞれパラメータとなる推移確率の推定方法について述べる。

(1) OD 交通量の推定問題の定式化

はじめに以下の記号を定義する。

$q_i(t)$	インターバル t の流入交通量観測値
$y_j(t)$	インターバル t の流出交通量観測値
$b_{ij}(t)$	流入時刻ベースの OD 間推移確率
$f_{ij}(t)$	流入時刻ベースの OD 交通量
$g_{ij}(t)$	流出時刻ベースの OD 交通量
$\tau_{ij}(t)$	インターバル t のはじめの時間 $t \cdot u$ に流出地点 j へ到着した車両の旅行時間
u	推定単位時間

上述の記号の間には、その定義から次のような関係が成り立つことが分かる。なお I は流入地点の集合、 J は流出地点の集合を表す。

$$f_{ij}(t) = q_i(t)b_{ij}(t) \quad i \in I, j \in J \quad (3.1)$$

$$q_i(t) = \sum_{j \in J} f_{ij}(t) \quad i \in I \quad (3.2)$$

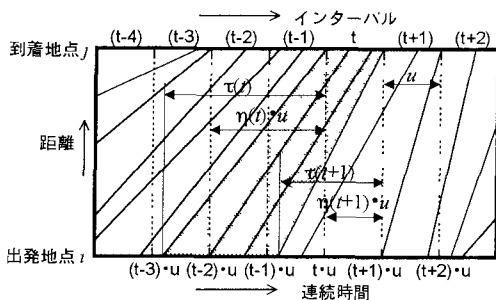


図-1 概念的な時間-距離線図

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} g_{ij}(t) \quad j \in J \quad (3.3)$$

さらに推移確率 $b_{ij}(t)$ は、以下の条件を満足しなければならない。

$$\sum_{j \in J} b_{ij}(t) = 1 \quad i \in I \quad (3.4)$$

$$0 \leq b_{ij}(t) \quad i \in I, j \in J \quad (3.5)$$

$$b_{ij}(t) = 0 \quad (i, j) \in W \quad (3.6)$$

式 (3.4) の等式制約条件は、流入時刻ベースの OD 交通量と流入交通量観測値の間の保存則を表しており、式 (3.5) の不等式制約条件は OD 交通量の非負条件を表している。また進入禁止や右折禁止などの規制のある場合には、それらの OD ペア間の交通量は 0 であり、 W はこのような交通量が 0 である OD ペアの集合を表しており、式 (3.6) はその OD ペア間における OD 交通量を事前に 0 と設定することを意味している。

一般に交通制御や交通誘導などの各種交通運用を行うために必要な OD 交通量は、到着時刻ベースでの集計値よりも出発時刻ベースでの集計値である。そこでこれまでの関係式を用いて、流入及び流出地点において観測されている交通量と流入時刻ベースでの OD 交通量の動的な関係を確立する必要がある。すなわち上記関係に追加するものとして、流入時刻ベースの OD 交通量と流出時刻ベースの OD 交通量の動的な関係が表現できれば良いことになる。

いまある特定の OD ペアに着目して考える。図-1 に、ある OD ペア i, j 間における概念的な時間-距離線図を示した。図中、斜めの実線は個々の車両の走行状況を示し、横軸下部に連続時間表示における時間を、また上部には単位時間 u により離散化したインターバルが示してある。この図からも分かるよ

うに、推定時間インターバル t のはじめの時間、すなわち連続時間で表すと $t \cdot u$ に流出地点へ到着する車両は、 $\tau_{ij}(t)$ 時間前に流入地点からシステムへ流入したことになる。同様に次のインターバルのはじめの時間 $(t+1) \cdot u$ に流出地点へ到着した車両は、 $\tau_{ij}(t+1)$ 時間前に流入地点から流入したことになる。ここで、車両の追い越しはほとんど無く、また各時間インターバル内においては車両が一様に分布していると仮定する。このときインターバル t に流出地点へ到着する車両は、連続時間表示で $t \cdot u - \tau_{ij}(t)$ から $(t+1) \cdot u - \tau_{ij}(t+1)$ の時間内に流入地点から流入した車両ということになる。すなわち流入時刻ベースの OD 交通量と流出時刻ベースの OD 交通量の間には、次の関係が成立する。

$$g_{ij}(t) = \sum_{k=t-\eta_{ij}(t)-1}^{t-\eta_{ij}(t+1)} f_{ij}(k) - \left\{ 1 - \left(\frac{\tau_{ij}(t)}{u} - \eta_{ij}(t) \right) \right\} f_{ij}(t - \eta_{ij}(t) - 1) - \left(\frac{\tau_{ij}(t+1)}{u} - \eta_{ij}(t+1) \right) f_{ij}(t - \eta_{ij}(t+1)) \quad i \in I, j \in J \quad (3.7)$$

ここで

$$\eta_{ij}(t) = \left\lceil \frac{\tau_{ij}(t)}{u} \right\rceil \quad i \in I, j \in J \quad (3.8)$$

であり、 $\lceil \cdot \rceil$ は Gauss の記号で $\lceil \cdot \rceil$ 内の実数の切り捨て整数化を表す。この流入時刻ベースの OD 交通量と流出時刻ベースの OD 交通量の関係を式 (3.3) へ代入し、さらに式 (3.1) を用いると、流入交通量の観測値 $q_i(t)$ と流出交通量の観測値 $y_j(t)$ の動的な関係が次のように確立される。

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \left[\sum_{k=\theta_{ij}^-(t)}^{\theta_{ij}^+(t)} q_i(k) b_{ij}(k) - (1 - \xi_{ij}(t) + \eta_{ij}(t)) q_i(\theta_{ij}^-(t)) b_{ij}(\theta_{ij}^-(t)) - (\xi_{ij}(t+1) - \eta_{ij}(t+1)) q_i(\theta_{ij}^+(t)) b_{ij}(\theta_{ij}^+(t)) \right] \quad j \in J \quad (3.9)$$

ここで

$$\theta_{ij}^-(t) = t - \eta_{ij}(t) - 1 \quad (3.10)$$

$$\theta_{ij}^+(t) = t - \eta_{ij}(t+1) \quad (3.11)$$

$$\xi_{ij}(t) = \frac{\tau_{ij}(t)}{u} \quad (3.12)$$

である。この式からも分かるように、旅行時間の変動を考慮した動的な流入交通量と流出交通量の関係を

定式化するため、流出地点へ到着する時間インターバルは1インターバルであるにも関わらず、流入地点から流入する時間インターバルは旅行時間の時間変動により数インターバルにまたがることもあることが分かる。すなわち上式においては $t - \eta_{ij}(t) - 1$ から $t - \eta_{ij}(t + 1)$ の間のインターバル区間の推移確率の同定が必要となる。しかしながらこの場合、到着時間インターバル t に対して成り立つ関係式の数は各流出地点に対し一つであり、 $t - \eta_{ij}(t) - 1$ から $t - \eta_{ij}(t + 1)$ の間の推移確率を個別に同定するためには、他の何らかの情報の追加が必要となってしまう。そこで簡単のため $t - \eta_{ij}(t) - 1$ から $t - \eta_{ij}(t + 1)$ のインターバル内における平均的な推移確率を求めることとする。すなわち

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \gamma_{ij}(t) \bar{q}_i(\theta_{ij}^-(t)) \bar{b}_{ij}(\theta_{ij}^-(t)) \quad j \in J \quad (3.13)$$

ここで

$$\begin{aligned} \bar{q}_i(\theta_{ij}^-(t)) &= \left[\sum_{k=\theta_{ij}^-(t)}^{\theta_{ij}^+(t)} q_i(k) \right. \\ &\quad - (1 - \xi_{ij}(t) + \eta_{ij}(t)) q_i(\theta_{ij}^-(t)) \\ &\quad \left. - (\xi_{ij}(t + 1) - \eta_{ij}(t + 1)) q_i(\theta_{ij}^+(t)) \right] \\ &\quad \div \gamma_{ij}(t) \quad i \in I \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_{ij}(\theta_{ij}^-(t)) &= \left[\sum_{k=\theta_{ij}^-(t)}^{\theta_{ij}^+(t)} f_{ij}(k) \right. \\ &\quad - (1 - \xi_{ij}(t) + \eta_{ij}(t)) f_{ij}(\theta_{ij}^-(t)) \\ &\quad \left. - (\xi_{ij}(t + 1) - \eta_{ij}(t + 1)) f_{ij}(\theta_{ij}^+(t)) \right] \\ &\quad \div (\gamma_{ij}(t) \bar{q}_i(\theta_{ij}^-(t))) \quad i \in I, j \in J \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{ij}(t) &= \theta_{ij}^+(t) - \theta_{ij}^-(t) + 1 - (1 - \xi_{ij}(t) + \eta_{ij}(t)) \\ &\quad - (\xi_{ij}(t + 1) - \eta_{ij}(t + 1)) \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$= \left(\frac{\tau_{ij}(t) - \tau_{ij}(t + 1)}{u} + 1 \right) \quad i \in I, j \in J \quad (3.17)$$

である。

一般に交通量観測値から OD 交通量を求める問題は、求める未知変数の数がそれらの相互関係を記述する独立な方程式の数より多い劣決定問題であり、従ってそのような問題において唯一解を求めるためには事前 OD マトリックスなどの付加的な情報を与えた

りしなければならない。しかしながら推移確率は急激には変化しないという仮定の下で OD 交通量を動的過程として扱い、それらの時間的変動を直接反映する交通量観測値の時系列データを用いることによって、何ら付加的な情報を与えることなく唯一に推移確率を同定でき、従って OD 交通量も一意に推定可能となる。このような考えから、OD 交通量の推定問題は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \min m0_j &= \sum_{l=1}^t d^{t-l} \left(\sum_{i \in I} \gamma_{ij}(l) \bar{q}_i(\theta_{ij}^-(l)) \bar{b}_{ij}(\theta_{ij}^-(l)) \right. \\ &\quad \left. - y_j(l) \right)^2 \quad j \in J \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} \bar{b}_{ij}(\theta_{ij}^-(t)) = 1 \quad i \in I \quad (3.19)$$

$$0 \leq \bar{b}_{ij}(\theta_{ij}^-(t)) \quad i \in I, j \in J \quad (3.20)$$

$$\bar{b}_{ij}(\theta_{ij}^-(t)) = 0 \quad (i, j) \in W \quad (3.21)$$

ここで d は重み係数で、その値により推移確率の時間的変動を捉えることが可能となるが、具体的な値については適用例を通して検討する。

上記問題は、各 OD ペア間での旅行時間が等しい場合と異なる場合において、その制約条件の取り扱いが異なってくる。そこでこの両者の場合のパラメータの推定方法についてそれぞれ次節以降で述べる。

(2) 旅行時間が同一で一定の場合の推定方法

ここではシステムを流入地点から流出地点へ横断する旅行時間が、各 OD ペア間でほぼ同一でかつ一定値であると考えられる場合のパラメータの推定方法について述べる。このような場合は、渋滞の発生していない単独の信号交差点を対象とした場合や、高速道路のジャンクションなどを対象とした場合にあたる。またこれまで提案された多くの手法^{1)~5)}では、基本的にはこのような各 OD 間での旅行時間がほぼ同一でかつ一定値であるとして仮定できるような場合に適用可能な手法である。さらにこれら手法においては、その多くが推移確率に関する制約条件式 (3.19)、式 (3.20)、式 (3.21) を考慮しない手法となっている。唯一 Nihan and Davis(1987)⁴⁾は、非負制約条件を扱うために切り詰め法を、等式制約条件を扱うために正規化法や投影法などを提案しているが、いずれも制約条件を明示的に扱ったものではなく、各制約条件下における最適解を求めているものではない。そこで本研究では推移確率に関する制約条件を明示的

に扱い、各制約条件下における最適解を求める手法を提案する。

はじめに各 OD 間で等しい旅行時間を τ とし、それを切り捨て整数化したものを η とする。この場合式 (3.17) において $\gamma_{ij}(t) = 1$ となることが分かる。また式 (3.14) より

$$\begin{aligned} \bar{q}_i(t - \eta - 1) &= \left(\frac{\tau}{u} - \eta \right) q_i(t - \eta - 1) \\ &+ \left\{ 1 - \left(\frac{\tau}{u} - \eta \right) \right\} q_i(t - \eta) \\ &\quad i \in I \end{aligned} \quad (3.22)$$

となる。さらに簡単のため上式により求められる $\bar{q}_i(t - \eta - 1)$ を $z_i(t)$ と置く。この $z_i(t)$ は流入地点において観測時間を $\tau/u - \eta$ だけ前方へシフトし、流入地点観測値のインターバルに η だけ時間遅れを持たせた場合の交通量観測値に相当する。

以上の関係を用い、等式制約条件式 (3.19) に対するラグランジェ乗数を $\varphi_i(t)$ 、不等式制約条件式 (3.20) に対するラグランジェ乗数を $\lambda_{ij}(t)$ とすると、ラグランジェ問題は次のようになる。

$$\begin{aligned} \min M1 &= \sum_{j \in J} \left[\sum_{l=1}^t d^{t-l} \left\{ \sum_{i \in I} z_i(l) b_{ij}(t) - y_j(l) \right\}^2 \right] \\ &+ \sum_{i \in I} \varphi_i(t) \left(1 - \sum_{j \in J} b_{ij}(t) \right) \\ &- \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \lambda_{ij}(t) b_{ij}(t) \end{aligned} \quad (3.23)$$

この場合の最適性の条件は、上記ラグランジェ関数は凸関数であることから

$$\begin{aligned} \frac{\partial M1}{\partial b_{ij}(t)} &= 2 \sum_{l=1}^t d^{t-l} z_i(l) \left\{ \sum_{i \in I} z_i(l) b_{ij}(t) - y_j(l) \right\} \\ &- \varphi_i(t) - \lambda_{ij}(t) = 0 \quad (i, j) \notin W \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial M1}{\partial \varphi_i(t)} = 1 - \sum_{j \in J} b_{ij}(t) = 0 \quad i \in I \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M1}{\partial \lambda_{ij}(t)} &\leq 0, \quad \lambda_{ij}(t) \frac{\partial M1}{\partial \lambda_{ij}(t)} = 0, \quad \lambda_{ij}(t) \geq 0 \\ &\quad i \in I, j \in J \end{aligned} \quad (3.26)$$

である。式 (3.24) を流出地点 j ごとに分解すれば以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} b_j(t) &= \left(\sum_{l=1}^t d^{t-l} z_j(l) z'_j(l) \right)^{-1} \\ &\times \left(\sum_{l=1}^t d^{t-l} z_j(l) y_j(l) + \frac{1}{2} \varphi(t) + \frac{1}{2} \lambda_j(t) \right) \end{aligned} \quad (3.27)$$

また式 (3.27) を式 (3.25) へ代入し、変形すると

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= 2 \left\{ \sum_{j \in J} \left(\sum_{l=1}^t d^{t-l} z_j(l) z'_j(l) \right)^{-1} \right\}^{-1} \\ &\times \left[1 - \sum_{j \in J} \left\{ \left(\sum_{l=1}^t d^{t-l} z_j(l) z'_j(l) \right) \right. \right. \\ &\times \left. \left. \left(\sum_{l=1}^t d^{t-l} z_j(l) y_j(l) + \frac{1}{2} \lambda_j(t) \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.28)$$

が得られる。ここで各ベクトルはすべて次のような縦ベクトルであるが、制約条件 (3.21) を満たすために各ベクトルにおいて集合 W に含まれる OD ペアに対する要素は削除する。従って $z_j(t)$ においても、それらの値は流出地点 j によって異なる要素が削除されるため、それらを区別するために添字 j を付加してある。なお記号'は転置を表す。

$$b_j(t) = \begin{bmatrix} b_{1j}(t) & b_{2j}(t) & \cdots & b_{Ij}(t) \end{bmatrix}' \quad (3.29)$$

$$z_j(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) & z_2(t) & \cdots & z_I(t) \end{bmatrix}' \quad (3.30)$$

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \varphi_1(t) & \varphi_2(t) & \cdots & \varphi_I(t) \end{bmatrix}' \quad (3.31)$$

$$\lambda_j(t) = \begin{bmatrix} \lambda_{1j} & \lambda_{2j} & \cdots & \lambda_{Ij} \end{bmatrix}' \quad (3.32)$$

さらに観測値から計算される値を次のように定義し、変形すると

$$h_j(t) \equiv \sum_{l=1}^t d^{t-l} z_j(l) z'_j(l) \quad (3.33)$$

$$= h_j(t-1)d + z_j(t) z'_j(t) \quad (3.34)$$

$$c_j(t) \equiv \sum_{l=1}^t d^{t-l} z_j(l) y_j(l) \quad (3.35)$$

$$= c_j(t-1)d + z_j(t) y_j(t) \quad (3.36)$$

と表せられる。次に

$$P_j(t) \equiv h_j(t)^{-1} \quad (3.37)$$

とし、式 (3.34) の両辺に $P_j(t)$ 、 $P_j(t-1)$ を乗じると

$$K_j(t) \equiv P_j(t) q_j(t) \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} &= P_j(t-1) z_j(t) \left(d + z'_j(t) P_j(t-1) z_j(t) \right)^{-1} \end{aligned} \quad (3.39)$$

が得られる。さらに逆行列の補助定理を用いると

$$P_j(t) = \frac{1}{d} (I - K_j(t) z'_j(t)) P_j(t-1) \quad (3.40)$$

が得られ、これらを用いて式 (3.27)、式 (3.28) を表すと次のようになる。

$$b_j(t) = P_j(t) \left(c_j(t) + \frac{1}{2} \varphi(t) + \frac{1}{2} \lambda_j(t) \right) \quad (3.41)$$

$$\varphi(t) = 2 \left(\sum_{j \in J} P_j(t) \right)^{-1} \times \left\{ 1 - \sum_{j \in J} P_j(t) \left(c_j(t) + \frac{1}{2} \lambda_j(t) \right) \right\} \quad (3.42)$$

以上より旅行時間が各 OD ペア間で等しく、ほぼ一定の値をとる場合における推移確率は、オンラインで得られる流出入交通量の観測値により式 (3.34)、式 (3.36)、式 (3.39)、式 (3.40)、式 (3.41)、式 (3.42) を順次計算することにより推定可能となり、また式 (3.1) により OD 交通量の推定値が得られる。

この手法では式 (3.34)、式 (3.36) から明らかなように、インターバル t においてオンラインで得られる流出入交通量の観測値と一時点前のインターバルにおける各変量の値を用いて現時点の各変量の値を逐次更新していくため、交通量観測値のデータを過去にわたって記憶しておく必要はなく、オンラインに適した手法であると言える。なおこれまでの推定方法においては、交通量の非負条件に対するラグランジェ乗数の求め方については触れていないが、後ほどそれらの扱いについて述べることとする。

(3) 旅行時間が異なる場合の推定方法

前節ではこれまで提案された多くの手法において対象としていた、旅行時間が各 OD ペア間で等しくかつほぼ一定値である場合における推移確率の求め方を示した。しかしながらこのような手法においてはモデルの性格上、適用できる対象が限定されてしまう。そこでここではより一般的に、各 OD ペア間の旅行時間が異なり、また時間変動するような場合に適用可能な方法について述べる。

旅行時間が各 OD ペア間で異なり、かつ時間変動する場合の OD 交通量の推定問題は、旅行時間が各 OD ペア間で同一でほぼ一定の場合の推定問題とは式 (3.19) の等式制約条件の取り扱いの点で大きく異なる。旅行時間が同一である場合には、推定される推移確率の時間インターバルが各 OD ペア間で同一であり、従って各推定時間インターバルごとに式 (3.19) の等式制約条件を明示的に組み込むことが可能であった。しかしながら旅行時間が各 OD ペア間で異なる場合には、推定される推移確率の時間インターバルが OD ペアごとに異なり、等式制約条件を明示的に

扱える問題としての定式化は難しい。従ってここでは等式制約条件を考慮しない問題により解を求めた後、等式制約条件を満たすように解を修正する方法について述べる。

なお本研究では旅行時間を既知として考えるが、旅行時間の推定方法としては AVI 装置等により直接的に観測するか、あるいは路線上の車両感知器データから得られる交通量やオキュパンシーのデータに基づいて推定する方法^(7),8),9),10)などが考えられる。

旅行時間が各 OD ペア間で異なる場合においては推移確率に関する等式制約条件を明示的に扱うことができないため、推移確率に関する不等式制約条件 (3.20) はあらたに次のようになる。

$$0 \leq \bar{b}_{ij}(t) \leq 1 \quad i \in I, j \in J \quad (3.43)$$

従ってこの場合のラグランジェ問題は、上式右辺に対するラグランジェ乗数を $\mu_{ij}(t)$ とすれば次のような問題となる。なおこの場合には、OD 交通量の推定問題は流出地点により分割が可能となるため、以降流出地点 j ごとに個別に考える。

$$\begin{aligned} \min m_{2j} &= \sum_{l=1}^I d^{I-l} \left(z'_j(l) b_j(t) - y_j(l) \right)^2 \\ &- \lambda'_j(t) b_j(t) + \mu'_j(t) (b_j(t) - 1) \end{aligned} \quad (3.44)$$

ここで式 (3.14)、式 (3.15)、式 (3.17) を用いて

$$b_j(t) = \begin{bmatrix} \bar{b}_{1j}(t - \eta_{ij}(t) - 1) \\ \bar{b}_{2j}(t - \eta_{ij}(t) - 1) \\ \vdots \\ \bar{b}_{Ij}(t - \eta_{ij}(t) - 1) \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$z_j(t) = \begin{bmatrix} \gamma_{1j}(t) \bar{q}_1(t - \eta_{ij}(t) - 1) \\ \gamma_{2j}(t) \bar{q}_2(t - \eta_{ij}(t) - 1) \\ \vdots \\ \gamma_{Ij}(t) \bar{q}_I(t - \eta_{ij}(t) - 1) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$\lambda_j(t) = \begin{bmatrix} \lambda_{1j}(t - \eta_{ij}(t) - 1) \\ \lambda_{2j}(t - \eta_{ij}(t) - 1) \\ \vdots \\ \lambda_{Ij}(t - \eta_{ij}(t) - 1) \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$\mu_j(t) = \begin{bmatrix} \mu_{1j}(t - \eta_{ij}(t) - 1) \\ \mu_{2j}(t - \eta_{ij}(t) - 1) \\ \vdots \\ \mu_{Ij}(t - \eta_{ij}(t) - 1) \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

である。ただし W に含まれる OD ペアに対する要素

は除く。この場合の最適性の条件は

$$\frac{\partial m_{2j}}{\partial b_j(t)} = 2 \sum_{l=1}^t d^{t-l} z_j(l) (z_j(l) b_j(t) - y_j(l)) - \lambda_j(t) + \mu_j(t) = 0 \quad (i, j) \notin W \quad (3.49)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial m_{2j}}{\partial \lambda_j(t)} \leq 0 \\ \lambda_j(t - \eta_{ij}(t) - 1) \frac{\partial m_{2j}}{\partial \lambda_j(t - \eta_{ij}(t) - 1)} = 0 \\ \lambda_j(t) \geq 0 \end{cases} \quad (3.50)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial m_{2j}}{\partial \mu_j(t)} \leq 0 \\ \mu_j(t - \eta_{ij}(t) - 1) \frac{\partial m_{2j}}{\partial \mu_j(t - \eta_{ij}(t) - 1)} = 0 \\ \mu_j(t) \geq 0 \end{cases} \quad (3.51)$$

であり、(3.49) から (2) と同様にして以下の関係が得られる。

$$h_j(t) = h_j(t-1)d + z_j(t)z'_j(t) \quad (3.52)$$

$$c_j(t) = c_j(t-1)d + z_j(t)y_j(t) \quad (3.53)$$

$$K_j(t) = P_j(t-1)z_j(t)(d + z'_j(t)P_j(t-1)z_j(t))^{-1} \quad (3.54)$$

$$P_j(t) = \frac{1}{d}(I - K_j(t)z'_j(t))P_j(t-1) \quad (3.55)$$

$$b_j(t) = P_j(t) \left(c_j(t) + \frac{1}{2}\lambda_j(t) - \frac{1}{2}\mu_j(t) \right) \quad (3.56)$$

以上より、得られる観測結果をもとに上記各式を計算することによって、ラグランジェ乗数 $\lambda_{ij}(t)$ 、 $\mu_{ij}(t)$ のある実行可能解のもとでの推移確率の最適解を求めることができる。また (3.19) の等式制約条件を満たすように次のような正規化法⁴⁾を用いて推移確率の推定値を修正する。

$$b_{ij}(t) = \frac{b_{ij}(t)}{\sum_{j \in I} b_{ij}(t)} \quad i \in I \quad (3.57)$$

なお不等式制約条件に対するラグランジェ乗数の求め方については次節で述べる。

(4) 不等式制約に対するラグランジェ乗数の求め方

これまでの方法では、不等式制約条件式 (3.20) あるいは (3.43) に対するラグランジェ乗数 $\lambda_{ij}(t)$ 、 $\mu_{ij}(t)$ が、ある任意の実行可能領域の値である場合の推移確率 $b_{ij}(t)$ の最適解を求めることしかできない。そこでここでは、OD ペア間の旅行時間が異なり、その旅行時間が時間変動する場合におけるラグランジェ乗数の求め方について説明する。なお旅行時間が一定

で同一の場合にも全く同様な方法で非負制約条件に対するラグランジェ乗数は求めることができる。

式 (3.18)、式 (3.21) 及び式 (3.43) で示される OD 交通量の推定問題の双対問題を構成し、その問題を解くことによって非負制約条件に対するラグランジェ乗数を求める方法を示す。OD 交通量の推定問題の原問題に対する双対問題はベクトル表記を用いると

$$\max_{\lambda, \mu} n_j(\lambda_j, \mu_j) = \inf_b \left(\sum_{l=1}^t d^{t-l} z'_j(l) b_j(t) - y_j(l) \right)^2 - \lambda'_j(t) b_j(t) + \mu'_j(t) (b_j(t) - \mathbf{1}) \quad (3.58)$$

$$\text{s.t.} \quad \lambda_{ij}(t) \geq 0, \mu_{ij}(t) \geq 0 \quad i \in I \quad (3.59)$$

となる。この問題から式 (3.56) を用いて $b_j(t)$ を消去することにより、双対問題は次のような形で表現できる。

$$\begin{aligned} \max_{\lambda} n_j(\lambda_j, \mu_j) &= -\frac{1}{4} \lambda'_j(t) P_j(t) \lambda_j(t) \\ &\quad - c'_j(t) P_j(t) \lambda_j(t) \\ &\quad - \frac{1}{4} \mu'_j(t) P_j(t) \mu_j(t) \\ &\quad + c'_j(t) P_j(t) \mu_j(t) \\ &\quad - \mathbf{1}' \mu_j(t) + \frac{1}{2} \lambda'_j(t) P_j(t) \mu_j(t) \\ &\quad + \text{const.} \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\text{s.t.} \quad \lambda_{ij}(t) \geq 0, \mu_{ij}(t) \geq 0 \quad i \in I \quad (3.61)$$

この問題の最適解が得られれば、この解に対する式 (3.56) の推移確率の最適解が、その凸性から原問題の最適解になる。ここで

$$\frac{\partial n_j(\lambda_j, \mu_j)}{\partial \lambda_j(t)} = -b_j(t) \quad (3.62)$$

$$\frac{\partial n_j(\lambda_j, \mu_j)}{\partial \lambda_j(t)} = b_j(t) - \mathbf{1} \quad (3.63)$$

であるから、もし $-b_{ij}(t) \neq 0$ 、 $b_{ij}(t) - 1 \neq 0$ ならば、それは双対目的関数の増加方向ということになる。ところでラグランジェ乗数のある成分が0で、その成分に対応する式 (3.62)、式 (3.63) の値が負であるならば、その方向に解の更新方向をとるとラグランジェ乗数は負値となってしまう。そこで双対目的関数の解の更新方向を非負制約条件を侵害しないように次のようにとる。

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} -b_{ij}(t) & \text{if } \lambda_{ij}(t) > 0 \\ \max(0, -b_{ij}(t)) & \text{if } \lambda_{ij}(t) = 0 \end{cases} \quad (3.64)$$

$$\rho_{ij} = \begin{cases} b_{ij}(t) - 1 & \text{if } \mu_{ij}(t) > 0 \\ \max(0, b_{ij}(t) - 1) & \text{if } \mu_{ij}(t) = 0 \end{cases} \quad (3.65)$$

さらにこの方向を用いて次のようにラグランジェ乗数を更新する。

$$\lambda_{ij}(t) = \lambda_{ij}(t) + \alpha \sigma_{ij} \quad i \in I, j \in J \quad (3.66)$$

$$\mu_{ij}(t) = \mu_{ij}(t) + \beta \rho_{ij} \quad i \in I, j \in J \quad (3.67)$$

ここで α 、 β は直線探索パラメータであり、例えば α については以下の問題により求められる値である。

$$\max_{\alpha} \quad n_j(\lambda_j(t) + \alpha \sigma_j, \mu_j(t)) \quad (3.68)$$

$$\text{s.t.} \quad \alpha \geq 0 \quad (3.69)$$

$$\lambda_{ij}(t) + \alpha \sigma_{ij} \geq 0 \quad i \in I \quad (3.70)$$

式 (3.68) は α に関して凹関数であることから最適性の条件は

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_j(\lambda_j, \mu_j)}{\partial \alpha} &= \left(-\frac{1}{2} \sigma_j' P_j(t) \sigma_j \right) \alpha - b_j'(t) \sigma \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.71)$$

を満たさなければならない。ここで制約条件 (3.70) を考慮すると直線探索パラメータは以下のようにすれば良いことが分かる。

$$\alpha = \min \left\{ -\frac{2\sigma_j' b_j(t)}{\sigma_j' P_j(t) \sigma_j}, \min_{i \in I} \left(-\frac{\lambda_{ij}(t)}{\sigma_{ij}} \right) \right\} \quad (3.72)$$

さらに同様の手順により

$$\beta = \min \left\{ \frac{2\rho_j' b_j(t) - 1}{\rho_j' P_j(t) \rho_j}, \min_{i \in I} \left(-\frac{\mu_{ij}(t)}{\rho_{ij}} \right) \right\} \quad (3.73)$$

となる。ここで $\hat{I}$ はそれぞれ $\sigma_{ij} < 0, \rho_{ij} < 0$ となるような i の集合である。以上から不等式制約条件を考慮した OD 交通量の推定アルゴリズムはある時間インターバル t において以下になる。

step1 初期化する。すなわち

$$\lambda_j(t) = \mathbf{0}$$

$$\mu_j(t) = \mathbf{0}$$

とする。

step2 $b_j(t)$ を計算する。

step3 もし $|-b_{ij}(t)| < \varepsilon, i \in \{i | \lambda_{ij}(t) > 0\}$,

$$b_{ij}(t) < \varepsilon, i \in \{i | \lambda_{ij}(t) = 0\}$$

及び $|b_{ij}(t) - 1| < \varepsilon, i \in \{i | \mu_{ij}(t) > 0\}$,

$$b_{ij}(t) - 1 < \varepsilon, i \in \{i | \mu_{ij}(t) = 0\}$$

ならば計算を終了し、そうでなければstep4へいく。ただし ε は十分小さな正数である。

step4 式 (3.64)、式 (3.65) から解の更新方向を計算する。

step5 式 (3.72)、式 (3.73) から直線探索パラメータの値を計算する。

表-1 旅行時間が同一の場合の相関係数

d	1.00	0.98	0.96	0.94
sim-1	0.9969	0.9965	0.9960	0.9954
sim-2	0.9723	0.9712	0.9697	0.9676
sim-3	0.8026	0.8175	0.8265	0.8304

$$\text{step6} \quad \lambda_{ij}(t) = \lambda_{ij}(t) + \alpha \sigma_{ij}$$

$$\mu_{ij}(t) = \mu_{ij}(t) + \beta \rho_{ij}$$

として step2 へ戻る。

4. 適用例

本研究で提案した推定手法を、シミュレーションデータを用いて検証する。はじめに旅行時間が同一の場合の適用例について述べ、次に旅行時間が変動する場合について述べる。後者においては、推移確率が時間的な傾向変動をした場合及び観測値に誤差が含まれる場合についても検討した。

(1) 旅行時間が一定値の場合の適用例

OD ペア数を 3×3 とし、シミュレーションデータは以下に示す3種類を考え、またそれぞれ100インターバル分を発生させ、これらのシミュレーションデータを用いて提案モデルの適用計算を行った。

sim-1 発生交通量は平均値 $\bar{q}$ が以下のようなポワソン乱数として与え、また推移確率の平均値 $\bar{B}$ を以下のように与え、その偏差 ΔB の分布を平均0、標準偏差0.03の正規分布として与え整数化した。

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} 30 & 60 & 40 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.7 \\ 0.8 & 0.05 & 0.15 \\ 0.3 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

sim-2 推移確率の偏差 ΔB の分布を平均0、標準偏差0.1の正規分布として与えた。

sim-3 推移確率の偏差 ΔB の分布を平均0、標準偏差0.3の正規分布として与えた。

表-1は観測値と推定値の全100インターバルにおける相関係数を示している。この表より全般に高い相関性を有していることが分かり、また sim-3 以外の結果においては、 d の値が小さくなるほど少しずつ相関性が劣っていくことが分かる。このことは推移

表-2 旅行時間が同一の場合の RMS 誤差

d	1.00	0.98	0.96	0.94
sim-1	1.0786	1.1447	1.2205	1.3025
sim-2	3.2462	3.2990	3.3750	3.4785
sim-3	8.3951	8.1055	7.9214	7.8427

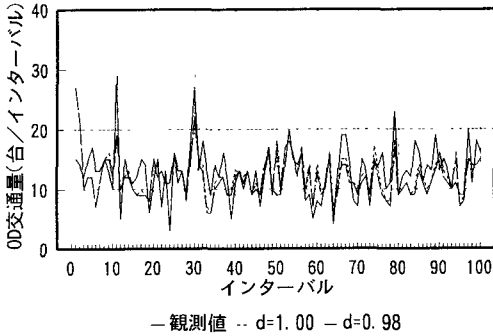


図-2 推定 OD(3-1) 交通量の時間変動 (sim-3)

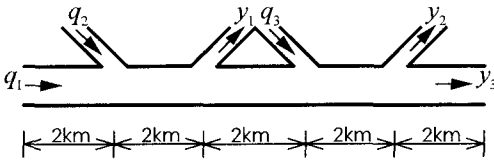


図-3 高速道路の部分区間

確率の変動が大きな場合には、推定時点に近いデータほど大きな重みで、つまり過去のデータは減却していくように評価した方が良い結果が得られるということである。

表-2は観測値と推定値の全 100 インターバルにおける RMS 誤差の値を示してある。この表より RMS 誤差の値は、推移確率の発生の違いによる差異が大きく現れており、本推定手法における推定結果は推移確率の変動に敏感であるということが分かる。なお sim-3 におけるシミュレーション値と推定値の時間変動の一例として、ゾーン 3-1 における推定結果を図-2に示したが、この図から本推定手法による OD 交通量の推定結果がほぼ妥当な値であることが分かる。

(2) 旅行時間が時間変動する場合の適用例

ここでは、図-3に示したような高速道路部分区間を想定したシミュレーションデータを用いて、旅行

時間が各 OD ペア間で異なり、また時間変動するような場合におけるモデルの妥当性を検証する。推移確率については、平均値回りのランダム変動がある場合及び時間的な傾向変動がある場合の 2 種類の状況を考え、また流入交通量の観測値に誤差が含まれる場合についても検討する。

a) 平均値まわりのランダム変動がある場合

ここでは、推移確率が定常的である平均値の回りをランダムに変動する場合におけるモデルの適用性を検証する。データは以下に示す 4 種類を、それぞれ 100 インターバル分発生させた。

sim-i 発生交通量は平均値 $\bar{q}$ が以下のようなポワソン乱数として与え、また推移確率 B を以下のように一定値として与え整数化した。

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} 50 & 20 & 30 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.25 & 0.6 \\ 0.05 & 0.20 & 0.75 \\ - & 0.05 & 0.95 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

sim-ii 発生交通量は sim-i に同じで、推移確率の平均値 $\bar{B}$ が sim-i の B に等しく、その偏差 ΔB の分布を平均 0、標準偏差 0.05 の正規分布として与えて整数化した。

sim-iii 推移確率の偏差 ΔB の分布を平均 0、標準偏差 0.10 の正規分布として与えた。

sim-iv 推移確率の偏差 ΔB の分布を平均 0、標準偏差 0.15 の正規分布として与えた。

なお旅行時間は実際には、交通量や交通容量に従属すると考えられるが、ここでは簡単のために以下のような値として考え、また追い越しが発生するような場合にはその値を切り詰め調整した。

case1 各 OD 間の旅行時間の平均値 τ 及びその標準偏差 s を以下のように与えた。

$$\tau = \begin{bmatrix} 4.0 & 8.0 & 10.0 \\ 2.0 & 6.0 & 8.0 \\ - & 2.0 & 4.0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$s = \begin{bmatrix} 0.20 & 0.40 & 0.50 \\ 0.20 & 0.10 & 0.40 \\ - & 0.10 & 0.10 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

case2 標準偏差 s を以下のようにした。

$$s = \begin{bmatrix} 0.39 & 0.86 & 1.18 \\ 0.15 & 0.53 & 0.95 \\ - & 0.21 & 0.32 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

表-3 旅行時間変動の場合の相関係数 ($d = 1.00$)

	case1	case2	case3
sim-i	0.9998	0.9997	0.9998
sim-ii	0.9887	0.9887	0.9885
sim-iii	0.9630	0.9628	0.9620
sim-iv	0.9298	0.9295	0.9278

表-4 旅行時間変動の場合の RMS 誤差 ($d = 1.00$)

	case1	case2	case3
sim-i	0.2507	0.2529	0.2479
sim-ii	1.7217	1.7243	1.7411
sim-iii	3.1977	3.2118	3.2566
sim-iv	4.5737	4.5906	4.6611

case3 標準偏差 s を以下のようにした。

$$s = \begin{bmatrix} 0.78 & 1.72 & 2.36 \\ 0.30 & 1.06 & 1.90 \\ - & 0.42 & 0.63 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

また旅行時間があまりにも小さすぎることは非現実的であることから、その下限値を別に設け、これを下回るものは下限値と置き換えた。

以上の 3 種類の旅行時間に対応した流出交通量をそれぞれ計算し、これを流出交通量観測値とした。

表-3及び表-4に推定結果が最も優れていた $d = 1.00$ の場合の各適合度指標を示してある。なお旅行時間が時間変動する場合には推定時間帯に差が生じ、推定時間インターバルの始めと終わりの部分についてはその前後のデータがなければ正確には推定できないため、ここでの考察においては 20 インターバルから 80 インターバルの区間の推定結果を対象とする。

相関係数を見てみると全般に高い相関性を有していることが分かり、またこれらの値は推移確率の変動の大きさに比例しており、特に sim-i の場合には非常に高い相関性があることが分かる。旅行時間の変動の大きさに関しては、その影響はあまり小さくなく、旅行時間を正確に捉えることが可能であれば、その変動の大きさは OD 交通量の推定結果には大きな影響を及ぼさないと言える。次に RMS 誤差の値を見ても同様のことが言え、本提案モデルにおいて旅行時間が時間変動するような現実的な場合においても OD 交通量の推定結果は、ほぼ妥当な値で得られ

表-5 傾向変動がある場合の相関係数 (case3)

d	1.00	0.98	0.92	0.90
sim-i	0.9906	0.9880	0.9942	0.9937
sim-ii	0.9825	0.9800	0.9866	0.9864
sim-iii	0.9656	0.9631	0.9694	0.9694
sim-iv	0.9509	0.9483	0.9515	0.9511

表-6 傾向変動がある場合の RMS 誤差 (case3)

d	1.00	0.98	0.92	0.90
sim-i	1.3603	1.7377	1.3610	1.3967
sim-ii	2.0111	2.3363	1.9613	1.9581
sim-iii	3.0187	3.2775	3.0177	2.9996
sim-iv	4.0635	4.3025	4.1857	4.1800

ることが分かる。

b) 時間的な傾向変動がある場合の適用例

これまでは推移確率が時間的にランダムに変動する場合についての推定結果を検証してきたが、ここでは推移確率が時間的な傾向変動がある場合について検証する。発生させたデータは、基本的な部分は上述した sim-i, sim-ii, sim-iii, sim-iv と同様であるが、それぞれ OD ペア 1-3 に対応する推移確率の平均値をサインカーブにより 0.6 から 0.2 へと傾向変動させ、また 1-2 をその逆とした。この場合の case3 に対応する推定値と観測値の各適合度指標を表-5及び表-6に示してある。全般的な傾向は推移確率が時間的に傾向変動を見せない場合に良く似ているが、相対的に推移確率の変動の大きさの影響が小さくなるようであり、相関係数、RMS 誤差とも sim-i と sim-iv の差が小さくなっていることが分かる。また d の値を見ると、0.92 か 0.90 の場合の推定結果が最も優れていることが分かり、推移確率が傾向変動をする場合には d の値を 1 より小さくし、過去のデータを減却するように評価することにより推定結果が良くなると言える。図-4に sim-iv の場合の OD ペア 1-2 における推定結果を示したが、この図からも $d = 0.90$ における推定結果は妥当であることが分かる。

c) 観測値に誤差が含まれる場合の適用例

車両感知器などから得られる交通量は実際には正確な値ではなく、ある程度の誤差を含んでいるのが

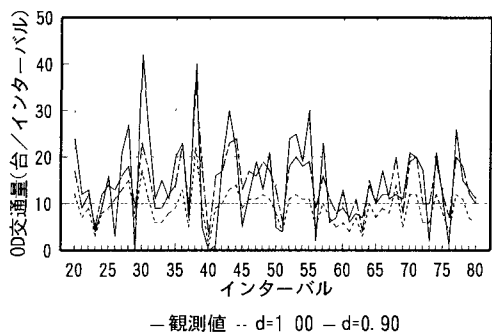


図-4 推定 OD(1-2) 交通量の時間変動 (sim-iv)

表-7 誤差を含んだ場合の相関係数

	10%	20%	30%
err0	0.9269	0.8970	0.8718
err+	0.9299	0.9036	0.8869
err-	0.9162	0.8797	0.8438

表-8 誤差を含んだ場合の RMS 誤差

	10%	20%	30%
err0	4.6878	5.5705	6.2600
err+	5.5166	6.3567	6.5846
err-	5.5667	6.3086	7.2611

一般的である。ここでは観測値に含まれる誤差が推定結果にどのような影響を及ぼすかを検証する。発生させた誤差はその平均値が 0 で標準偏差が流出入交通量の平均値の 10%、20%、30% の 3 種類の場合を考え、またランダムに存在する場合と偏って存在する場合などについても検証するため以下の 3 種類についてそれぞれ適用計算を行った。なおこの場合の OD 交通量は sim-iv で旅行時間は case3 とした。

$$\text{err0} \quad q_i(t) = q_i(t) + \epsilon_i(t) \quad i \in I \quad (4.9)$$

$$\text{err+} \quad q_i(t) = q_i(t) + 0.2\bar{q}_i + \epsilon_i(t) \quad i \in I \quad (4.10)$$

$$\text{err-} \quad q_i(t) = q_i(t) - 0.2\bar{q}_i + \epsilon_i(t) \quad i \in I \quad (4.11)$$

ここで ϵ_i は発生させた誤差であり、流出交通量についても同様に計算した。

表-7 及び表-8 に各誤差を含んだ場合の推定値と観測値の各適合度指標を示してある。当然のことながら誤差が大きくなるに従い相関係数、RMS 誤差とも悪くなっていることが分かるが、相関性については誤

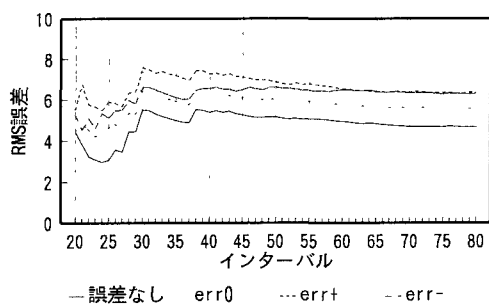


図-5 RMS 誤差の変動 (20%)

差の標準偏差が平均流出入交通量の 10% の場合においては誤差がない場合とほとんど差がなく、err+ においては優れている場合さえあることが分かる。しかしながら RMS 誤差の値を見てみると、err+ 及び err- で RMS 誤差の値が約 1.0 程増加していることが分かる。全般的には偏った誤差を含んでいる err+ 及び err- の推定結果の方が精度は悪くなっている。

図-5 に 20 インターバルから各時間インターバルまでの推定結果の RMS 誤差のうち誤差の標準偏差が観測値の 20% の場合の図を示してあるが、この図から 40 インターバルぐらいまでは RMS 誤差の値は変動するが、インターバルが進むに従って推移確率が不偏推定量に漸近していくため、それ以降 RMS 誤差の値は各状況下で緩やかに収束していくことが分かる。また全般的に誤差なし、err0、err+ 及び err- の順に RMS 誤差の値が大きく、その相互間の差は時間の経過とともに一定値になっていくようである。さらにこの図から、観測値に含まれる誤差が累積され、推定結果の精度が時間の経過とともに悪くなるような傾向はないことが分かる。

5. おわりに

本研究では経路選択行動を考慮する必要のないシステムを対象とし、対象システムへの流入出交通量の観測値を用いて、時間変動する OD 交通量をオンラインで推定する手法を提案した。一つはシステムを横断する旅行時間が各 OD ペア間で等しくかつ一定値であると考えられる単独の交差点や高速道路ジャンクションを対象にした OD 交通量の推定モデルであり、もう一つは旅行時間が各 OD ペア間で異なりかつ時間変動するような高速道路部分区間や交差点

を直列に接続したような都市ネットワークを対象にした場合である。これら両モデルにおいてシミュレーションデータを用いた適用計算を行った結果、以下のような結論が得られた。

- I. 本手法により各状況下で時間変動する OD 交通量が高い精度で推定されることが分かった。
- II. 推移確率に時間的な傾向変動がある場合においても精度の高い OD 交通量の推定値が得られることが分かった。
- III. 観測値にランダムな誤差が含まれる場合は、その誤差の分散が大きくない限り推定結果にあまり大きな影響がないことが分かった。
- IV. 観測値の誤差の分散がかなり大きな場合や、偏った誤差がある場合においては推定結果の精度は悪化するが、誤差が累積されるような傾向は見られなかった。
- V. 重み係数の値は対象とする OD 交通量により、その最適値は変化することが分かった。

参考文献

- 1) Cremer M. and Keller H. : Dynamic identification of flows from traffic counts at complex intersections. Proc. 8th Int. Symp. on Transp. and Traffic Theory, University of Toronto Press, pp.121-142, 1981
- 2) Cremer M. and Keller H. : A systems dynamics approach to the estimation of entry and exit O-D flows. Proc. 9th Int. Symp. on Transp. and Traffic Theory, VNS Science Press, pp.431-450, 1984
- 3) Cremer M. and Keller H. : A new class of dynamic methods for the identification of origin - destination flows. Transpn. Res.-B, Vol.21B, No.2, pp.117-132, 1987
- 4) Nihan N. L. and Davis G. A. : Recursive estimation of origin - destination matrices from input / output counts, Transpn. Res.-B, Vol.21B, No.2, pp.149-163, 1987
- 5) 楊海・秋山孝正・佐佐木綱：時系列観測交通量を用いた OD フローのオンライン推計法, 交通工学, Vol.27, No.1, pp.33-41, 1992
- 6) Bell M. G. H. : The real time estimation of origin - destination flows in the presence of platoon dispersion, Transpn. Res.-B, Vol.25B, No.2, pp.113-125, 1991
- 7) Chang G. L. and Wu J. : Recursive estimation of time-varying origin - destination flows from traffic counts in freeway corridors, Transpn. Res.-B, Vol.28B, No.2, pp.141-160, 1994
- 8) 安井一彦・池之上慶一郎・桜井慎一：街路における旅行時間予測, 土木計画学研究・論文集, No.11, pp.137-144, 1993
- 9) 高橋一哉・井上健士・横田孝義・小林芳樹：車群パターンマッチングによる旅行時間計測の検討, 第 14 回交通工学研究発表会論文集, pp.29-32, 1994
- 10) 松井寛・藤田素弘・中川雄太郎：ニューラルネット駆動型ファジィ推論による所要時間推定, 土木計画学研究・講演集, No.17, pp.197-220, 1995

流出入交通量観測値を用いた時間 OD 交通量のオンライン推定手法に関する研究

松本 幸正・藤田 素弘・松井 寛

本研究では交差点、高速道路部分区間やネットワークの一部などの各 OD 間で経路が一つに限定されるようなシステムを対象に、システムへの流入交通量の観測値を用いて時間変動する OD 交通量をオンラインで推定する手法を提案する。提案するモデルは、各 OD 間の旅行時間が等しくかつ時間変動しないと仮定できるようなシステムを対象とした場合と、各 OD 間の旅行時間が異なりかつ時間変動するようなシステムを対象とした場合について、推移確率に関する制約の取り扱いが異なることからそれぞれ個別に定式化される。またその両者の場合において時間変動する OD 交通量と交通量観測値の間の動的な関係が確立されている。さらに推移確率に関する等式あるいは不等式制約条件を明示的にモデルに組み込むことにより、各制約条件下における最適解が得られ、シミュレーションデータを用いたモデルの検証の結果、妥当な推定結果が得られることが分かった。

On-line Estimation of OD Flows from Input/Output Counts

Yukimasa MATSUMOTO, Motohiko FUJITA and Hiroshi MATSUI

The dynamic procedure for the estimation of OD matrices within a junction, a freeway corridor and a subarea of urban network from time series counts of traffic flows on the entrances and exits are proposed. This paper presents two methods for identification of split parameters. One, which is appropriate for individual intersections, is formulated based on the assumptions that the travel time for each OD pair is identical and equivalent to a fixed value. The other, which is suitable for freeway networks, makes no specific assumptions about the travel time. The dynamic relations between time-varying OD flows and traffic counts are established through proposed methods.