

# 交通量観測値に基づく動的OD交通量の再帰的推定に関する研究

松本幸正<sup>1</sup>・藤田素弘<sup>2</sup>・松井 寛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 名城大学講師 理工学部土木工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

<sup>2</sup>正会員 工博 名古屋工業大学助教授 都市循環システム工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

<sup>3</sup>フェロー 工博 名古屋工業大学教授 社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

道路ネットワーク上における交通需要の時間変動を直接捉えることのできるリンク交通量の観測データに基づいて、多経路ネットワーク上の時間変動するOD交通量を再帰的に推定するための手法を提案する。本手法においては、ターゲットODのようなOD交通に関する事前情報は必要なく、またネットワーク上の全ての交通量観測値も必要ない。さらに提案する再帰的アルゴリズムによりオンラインでの適用に適した手法であると言える。推定問題はネットワーク上の観測交通量間の動的な関係式から得られるOD間推移確率の推定問題と交通量均衡配分問題とから構成される2レベル最適化問題として定式化される。シミュレーションデータを用いた推定モデルの適用計算の結果、動的OD交通量を精度良く推定できることが分かった。

**Key Words :** *origin-destination matrices, dynamic O-D flows, traffic counts, recursive estimation, user equilibrium, inequality constraints*

## 1. はじめに

道路ネットワークの高度有効利用を促進すべく、道路交通のインテリジェント化が進められつつあり、現在各方面で様々な取り組みがなされている。そのような中、交通需要を分析する際にも交通現象の時間軸上での取り扱いが不可欠となってきており、車両感知器やAVI装置などの交通需要の時間変動を直接観測可能な機器の設置拡充も計られてきている。従って、交通需要の時間変動を分析する際に必要となる各種交通資料は、比較的容易に入手可能となってきた。これにともない、交通需要の時間変動データをより有効に活用したきめの細かな交通運用計画の必要性がますます高まってきている。

起点から終点の間のトリップの量を表すOD交通量は、長期交通計画のみならず交通管制・交通制御のための基礎資料となる。特に、交通需要の時間変動を考慮した交通運用計画を遂行するためには、OD交通量の時間変動の把握が不可欠である。また最近その重要性が認識されつつある短い時間間隔での交通量配分手法や動的な交通量配分手法を適用して、道路ネットワークの交通需要を時間変動を考慮して分析・評価する際にも、入力データとして短い時間間隔でのOD交通量の値が不可欠である。

しかしながら従来OD交通量の推定は、交通需要の定常性を仮定した静的な枠組みの中で行われてきており、これまで提案された多くの推定手法は時間軸上で

の取り扱いが困難である。従って、交通量観測値のような交通需要の時間変動に関する情報を含有するデータを有効に活用した短い時間間隔のOD交通量の推定手法の確立が望まれている。

そこで本研究では、道路ネットワーク上における交通需要の時間変動を直接捉えることのできる交通量観測値のデータに基づいて、時間変動するOD交通量を推定するための手法を提案する。提案する手法においては、通信ネットワーク等を通じたオンラインでの適用が可能なように、再帰的な計算手法を採用し、今後ますますその重要性が高まってくると考えられる時間変動を考慮した交通運用計画手法の一端として役立てようとするものである。

## 2. 従来の研究と本研究の概要

従来よりOD交通量は、パーソントリップ調査や自動車起終点調査などから直接推定されるか、重力モデルのようなOD間トリップの分布型を仮定し、発生・集中交通量などを与件として間接的に推定されてきた。一方道路ネットワーク上に設置されている車両感知器などから得られる交通量観測値を用いてOD交通量を推定するための手法もこれまで多く提案されてきた。

交通量観測値に基づくOD交通量の推定手法は、道路ネットワーク上におけるドライバーの経路選択行動に対する仮定の違いから大きく二つに分けられる。一つは道路混雑の影響を考慮しないflow-independentな

手法であり、これら手法の詳細なレビューは飯田、高山<sup>1)</sup>、高山<sup>2)</sup>、Cascetta and Nguyen<sup>3)</sup>らによって得られる。これら手法では、OD間の経路選択率をDial<sup>4)</sup>の確率配分アルゴリズムなどによって外生的に与え、エントロピー最大化手法、残差平方和最小化手法あるいは最尤推定法などにより観測交通量に一致するようなOD交通量を求めるものである。もう一つは道路混雑の影響を考慮したflow-dependentな手法であり、OD交通量の推定問題をネットワーク均衡問題とともに構築し、経路選択率はOD交通量の推定過程で内生的に求めるという方法である。

利用者均衡条件下におけるリンク交通量からのOD交通量推定問題は、Nguyen<sup>5)</sup>により定式化された。しかしながらNguyenの方法では唯一のOD交通量を得るためにはターゲットOD情報が必要であり、ターゲットOD交通量と推定OD交通量の残差平方和を最小にする手法<sup>5),6),7),8),9)</sup>やエントロピーを最大にする手法<sup>5),10),11),12)</sup>が提案された。LeBlanc and Farhangian<sup>6)</sup>はこれらの問題を部分ラグランジュ法を用いて解く方法を提案し、Nguyen<sup>5)</sup>、Hall *et al.*<sup>10)</sup>、Fisk<sup>11)</sup>、楊ら<sup>8)</sup>、Yan *et al.*<sup>9)</sup>は2レベル問題を繰り返し解く方法を提案している。また楊、佐佐木<sup>13)</sup>、Yan, Iida and Sasaki<sup>14)</sup>は、Nguyenの問題をシングル凸計画問題に変換し、より簡便に解く方法を提案した。

しかしながら上記手法はすべて静的枠組みに立脚した推定手法であり、対象とするある限られた時間内での平均的なOD交通量を推定するために、その時間間隔における交通量観測値を個別に用いる手法であり、従って観測値に含まれる時間変動に関する情報を用いた動的なOD交通量の推定問題への適用は不可能である。

OD交通量を動的過程として扱い、観測リンク交通量から推定する手法が、Cremer and Keller<sup>15),16)</sup>らによって提案された。その後単一の交差点などを対象としたODマトリックスの推定法としてCremer and Keller<sup>17)</sup>やNihan and Davis<sup>18)</sup>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<sup>19)</sup>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、OD間の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ペア間でほぼ等しくかつ一定値であると仮定しており、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と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。その一方で、単路線の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、また各起点からネットワークへ流入する交通量と各終点でネットワークから流出する交通量の観測値が入手可能であるため比較的扱いやすくなる。Bell<sup>20)</sup>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動的OD推定手法を提案した。またChang and Wu<sup>21)</sup>は高速道路回廊において、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交通量と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、松本、藤田、松井<sup>22)</sup>は、旅行時間が時間変動し、各ODペアで同一の場合と異なる場合の推定手法を示した。同様に、Sherali, Arora and Hobeika<sup>23)</sup>は各ODペア間で旅行時間が異なる場合のOD交通量の推定問題を制約条件付き残差平方和最小化問題及び制約条件付き最小ノルム問題として定式化を行い、それぞれ射影共役勾配法及び線形計画法を用いたアルゴリズムを提案している。このように、動的OD交通量を推定するためには、時間変動するOD交通量と交通量観測値との関係を捉えるための動的な関係式の設定は不可欠であり、その関係式においては観測交通量間相互の関係を交通量の関数とし、またネットワークを横断する各ODペア間の旅行時間は交通量従属もしくは時間従属として扱われるべきである。しかしながらこれらのOD交通量の動的推定手法では、いずれもOD間に複数の経路が存在するような場合への適用は不可能となっている。

OD間に複数経路が存在するネットワークにおける動的OD交通量の推定手法として、Chang and Tao<sup>24)</sup>は流出入交通量及びブロードラインの観測データを利用した推定手法を提案しているが、この手法においては経路を明示的に扱っておらず、基本的にはOD間の経路選択行動を考慮しないモデルと同様であると言える。OD間の経路選択行動を明示的に考慮した動的なOD交通量の推定手法として、安井、池之上、竹内<sup>25)</sup>、Matsui and Matsumoto<sup>26)</sup>、小根山、桑原<sup>27)</sup>はOD間の経路選択モデルに確率配分モデルを適用したOD交通量の推定手法を提案した。しかしながらこれら手法においては、経路選択率は対象とするネットワークの交通状況に応じてOD交通量の推定と同時に求められるものではなく、OD交通量の推定とは別に事前に配分パラメータ等を設定しておく必要がある。

本研究では、OD間に複数の経路が存在する都市高速道路ネットワークで適用可能な動的OD交通量の再帰的推定手法を提案する。その手法では、対象とするネットワークへの流入交通量とネットワーク上のいくつかのリンク及びネットワークからの流出地点での観測値を用い、ドライバーの経路選択行動に利用者均衡原理を仮定し、OD交通量及び経路利用率を同時に推定する。

OD交通量は動的過程として扱われるため、何らOD交通量に関する事前情報は必要なく、また提案する再帰的アルゴリズムにより、過去のすべての観測データを記憶しておく必要はなくなることから、オンラインでの適用が可能である。

本論文は以下のように構成される。最初にネットワーク上で観測される各交通量観測値間の動的な相互関係を定式化する。一つはネットワークへの流入交通量とネットワーク上のリンク交通量の関係であり、もう一つは流入交通量とネットワークからの流出交通量である。次にOD交通量の推定問題を定式化するが、その問題は観測交通量間の相互関係系からなる上位問題と、静的なネットワーク均衡問題からなる下位問題の2レベル問題の構造を持つ。そこで本論文では、まず上位問題として位置付けられるOD間推移確率の推定問題を定式化し、続いて利用者均衡に基づく動的OD交通量の推定問題を定式化する。さらに定式化した問題を解くための再帰的アルゴリズムを示し、実際にシミュレーションデータを用いてモデルの検証を行い、最後に本研究から得られた知見をまとめる。

### 3. 観測交通量間の動的関係の定式化

対象とする道路ネットワークへの流入交通量とネットワーク上のいくつかのリンク及び流出交通量が車両感知器などによって、推定単位時間毎に観測されていると考える。ここではこれら交通量の時系列観測値間の相互の動的な関係を定式化する。はじめに流入交通量とリンク交通量の関係を、続いて流入交通量と流出交通量の関係を定式化する。

#### (1) 流入交通量とリンク交通量の動的な関係

ネットワークへの流入地点で観測されている流入交通量とネットワーク上で観測されているリンク交通量との間の動的な関係を、OD交通量を介して定式化する。はじめに以下のように記号を定義する。

- $q_i(t)$  インターバル  $t$  の時間内に流入地点  $i$  からネットワークへ流入する交通量
- $v_l(t)$  インターバル  $t$  の時間内にリンク  $l$  を通行する交通量
- $f_{ij}(t)$  インターバル  $t$  の時間内に流入地点  $i$  からネットワークへ流入するODペア  $i, j$  間の交通量
- $b_{ij}(t)$  インターバル  $t$  の時間内に流入地点  $i$  からネットワークへ流入する交通量のうち、流出地点  $j$  へ到着する交通量の比率
- $h_{ijk}(t)$  インターバル  $t$  の時間内に流入地点  $i$  からネットワークへ流入し、経路  $k$  を利用して流出地点  $j$  へ到着する交通量

$p_{ijk}(t)$  インターバル  $t$  の時間内に流入地点  $i$  からネットワークへ流入し、流出地点  $j$  へ到着する交通量のうち、経路  $k$  を利用する交通量の比率

ここでインターバル  $t$  は連続時間表示では  $u$  を推定単位時間とし、 $[t \cdot u, (t+1) \cdot u)$  の範囲とする。各OD間のトリップはその所要時間によって流入インターバルと流出インターバルが異なるが、 $f_{ij}(t)$ 、 $h_{ijk}(t)$  はそれぞれ流入時刻ベースのOD交通量、経路交通量を、 $b_{ij}(t)$ 、 $p_{ijk}(t)$  はそれぞれ流入時刻ベースのOD間推移確率、経路利用率を意味する。

流入交通量とOD交通量及び経路交通量の間には、以下のような関係が成り立つ。なお  $I$  はネットワークへの流入地点の集合、 $J$  は流出地点の集合、 $\Omega$  はODペアの集合を表し、 $K_{ij}$  はODペア  $i, j$  間の経路の集合を表す。

$$f_{ij}(t) = q_i(t)b_{ij}(t) \quad i, j \in \Omega \quad (1)$$

$$h_{ijk}(t) = p_{ijk}(t)f_{ij}(t) \quad k \in K_{ij}, i, j \in \Omega \quad (2a)$$

$$= p_{ijk}(t)q_i(t)b_{ij}(t) \quad k \in K_{ij}, i, j \in \Omega \quad (2b)$$

またOD間推移確率は、以下の条件を満足しなければならない。

$$\sum_{j \in J} b_{ij}(t) = 1 \quad i \in I \quad (3)$$

$$0 \leq b_{ij}(t) \quad i, j \in \Omega \quad (4)$$

式(3)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との間の保存則を表しており、式(4)の不等式制約条件はOD交通量の非負条件を表している。同様に経路利用率は、以下の条件を満足する。

$$\sum_{k \in K_{ij}} p_{ijk}(t) = 1 \quad i, j \in \Omega \quad (5)$$

$$0 \leq p_{ijk}(t) \quad k \in K_{ij}, i, j \in \Omega \quad (6)$$

交通現象を動的に扱うため、車両がネットワークへ流入した時刻と、ネットワーク上のリンクで観測される時刻との間にはその距離により時間差が生じる。特に同一車両が観測される時刻は、観測されるリンクの位置によって異なってくる。ここでインターバルのはじめの時間にリンク観測地点を通過する車両の流入地点から観測地点までの旅行時間を  $\tau_{ijkl}(t)$  とする。ただし  $l \in L_{ijk}$  であり、 $L_{ijk}$  はODペア  $i, j$  間の経路  $k$  上に存在するリンクの集合を表す。

いまある一つのリンクに着目して考えてみる。図-1に、2つの経路が1つのリンクで合流するような簡単なネットワークにおける概念的な時間-距離線図を示す。この図から分かるように、インターバル  $t$  のはじめの時間にあるリンクで観測される車両は、 $\tau(t)$  時間前に流入地点からネットワークへ流入したことになり、同様に次のインターバル  $t+1$  のはじめの時間にあるリンク

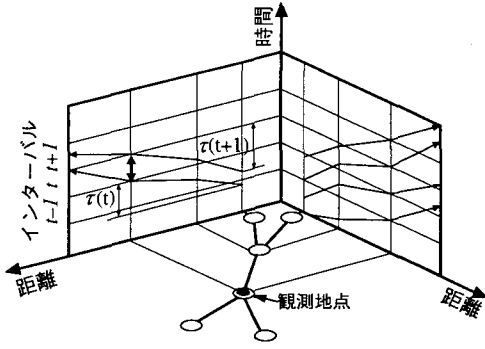


図-1 概念的な時間-距離線図

で観測される車両は、 $\tau(t+1)$  時間前に流入地点から流入したことになる。ここで、車両の追い越しは無いものと考え、ネットワークを走行中の車両の速度は追い越しが発生しない範囲内で自由に変動すると仮定し、ODペア  $i, j$  間の経路  $k$  に着目すると、インターバル  $t$  の時間内にリンク  $l$  で観測される車両は、 $t \cdot u - \tau_{ijkl}(t)$  から  $(t+1) \cdot u - \tau_{ijkl}(t+1)$  の時間内に流入地点  $i$  から流入し、経路  $k$  を通行してきた車両ということになる。

ここで観測時刻ベースの経路交通量、すなわち OD ペア  $i, j$  間の経路  $k$  を通行する交通量のうち、インターバル  $t$  の時間内にリンク  $l$  で観測される交通量を  $z_{ijkl}(t)$  とすると、

$$z_{ijkl}(t) = \sum_{n=t-\tau_{ijkl}(t)-1}^{t-\tau_{ijkl}(t+1)} h_{ijk}(n) - \left\{ 1 - \left( \frac{\tau_{ijkl}(t)}{u} - \eta_{ijkl}(t) \right) \right\} h_{ijk}(t - \eta_{ijkl}(t) - 1) - \left( \frac{\tau_{ijkl}(t+1)}{u} - \eta_{ijkl}(t+1) \right) h_{ijk}(t - \eta_{ijkl}(t+1))$$

$k \in K_{ij}, l \in L_{ijk}, i, j \in \Omega$  (7)

と表せられる。ここで  $\eta_{ijkl}(t)$  は以下に示すように、観測リンクまでの旅行時間を単位時間で離散化したものである。

$$\eta_{ijkl}(t) \equiv \text{int} \left[ \frac{\tau_{ijkl}(t)}{u} \right]$$

式(7)で表せられる交通量を OD ペア及びその経路で総和することにより、インターバル  $t$  の時間内に観測されるリンク  $l$  の交通量が表せられる。すなわち

$$v_l(t) = \sum_{ij \in \Omega} \sum_{k \in K_{ij}} \delta_{ijkl} z_{ijkl}(t) \quad l \in L \quad (8)$$

となり、式(2)及び式(7)を代入すると、流入交通量とリンク交通量の動的な関係が以下のように定式化される。なお  $\delta_{ijkl}$  は、リンク  $l$  が OD ペア  $i, j$  間の経路  $k$  上に存在するとき 1、その他 0 となるダミー変数であ

り、 $L$  はネットワーク全体のリンク集合である。

$$v_l(t) = \sum_{ij \in \Omega} \sum_{k \in K_{ij}} \delta_{ijkl} \left[ \sum_{n=\theta_{ijkl}(t)}^{\theta_{ijkl}(t+1)} p_{ijk}(n) q_i(n) b_{ij}(n) - (1 - \xi_{ijkl}(t)) \times p_{ijk}(\theta_{ijkl}(t)) q_i(\theta_{ijkl}(t)) b_{ij}(\theta_{ijkl}(t)) - \xi_{ijkl}(t+1) \times p_{ijk}(\theta_{ijkl}(t+1)) q_i(\theta_{ijkl}(t+1)) b_{ij}(\theta_{ijkl}(t+1)) \right] \quad l \in L \quad (9)$$

ここで

$$\theta_{ijkl}(t) \equiv t - \eta_{ijkl}(t) - 1$$

$$\xi_{ijkl}(t) \equiv \frac{\tau_{ijkl}(t)}{u} - \eta_{ijkl}(t)$$

である。

式(9)から分かるように、旅行時間の変動を考慮した動的な流入交通量とリンク交通量の関係を定式化するため、リンクで観測され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各 OD ペアの経路ごとの旅行時間の差違により数インターバルにまたがることもあり得ることが分かる。しかしながらこの場合、リンク観測時間インターバル  $t$  に対して成り立つ関係式の数は各リンクに対し一つであるため、ここでは  $t - \eta_{ijkl}(t) - 1$  から  $t - \eta_{ijkl}(t+1)$  のインターバル内における平均的な OD 間推移確率を用いて表すことにする。すなわち

$$v_l(t) = \sum_{ij \in \Omega} \sum_{k \in K_{ij}} \delta_{ijkl} \left[ \sum_{n=\theta_{ijkl}(t)}^{\theta_{ijkl}(t+1)} p_{ijk}(n) q_i(n) - (1 - \xi_{ijkl}(t)) p_{ijk}(\theta_{ijkl}(t)) q_i(\theta_{ijkl}(t)) - \xi_{ijkl}(t+1) p_{ijk}(\theta_{ijkl}(t+1)) q_i(\theta_{ijkl}(t+1)) \right] \times \bar{b}_{ij}(\theta_{ijkl}(t)) \quad l \in L \quad (10)$$

により、流入交通量とリンク交通量の関係が表せられることになる。なお、 $\bar{b}_{ij}(\theta_{ijkl}(t))$  は  $t - \eta_{ijkl}(t) - 1$  から  $t - \eta_{ijkl}(t+1)$  までの平均的な推移確率を表す。

## (2) 流入交通量と流出交通量の動的な関係

ネットワークからの流出交通量が観測されている場合には、OD 交通量を推定する際に、その観測流出交通量の情報を用いることができる。ここでは、流入交通量とリンク交通量との関係を定式化した場合と同様に、流入交通量と流出交通量の動的な関係を定式化する。

流出交通量は、流出ノードに接続するリンクを流出する交通量の総和であると考えられるため、基本的には前節における定式化の手順と全く同様になるが、リンク観測地点  $l$  に関する情報が無くなる点が異なる。

ここでリンク交通量と流出交通量の違いを明確にするために、以下のような記号を定義する。

- $y_j(t)$  インターバル  $t$  の時間内に流出地点  $j$  からネットワークを流出する交通量
- $g_{ijk}(t)$  流入地点  $i$  から流入し、インターバル  $t$  の時間内に流出地点  $j$  からネットワークを流出する経路  $k$  を通過してきた交通量
- $\tilde{\tau}_{ijk}(t)$  インターバル  $t$  のはじめの時間  $t \cdot u$  に流出地点  $j$  へ到着した車両の流入地点から経路  $k$  を利用した場合の旅行時間

流入交通量と流入時刻ベースのOD交通量及び流出交通量と流出時刻ベースのOD交通量の間には、以下の関係が成り立つ。

$$q_i(t) = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K_{ij}} h_{ijk}(t) \quad i \in I \quad (11)$$

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_{ij}} g_{ijk}(t) \quad j \in J \quad (12)$$

さらに流入時刻ベースの経路交通量と流出時刻ベースの経路交通量の間には、流入交通量とリンク交通量の間を定式化した場合と同様な考えにより、次の関係が成立することがわかる。

$$g_{ijk}(t) = \sum_{n=t-\tilde{\tau}_{ijk}(t)+1}^{t-\tilde{\tau}_{ijk}(t+1)} h_{ijk}(n) - \left\{ 1 - \left( \frac{\tilde{\tau}_{ijk}(t)}{u} - \tilde{\eta}_{ijk}(t) \right) \right\} h_{ijk}(t - \tilde{\eta}_{ijk}(t) - 1) - \left( \frac{\tilde{\tau}_{ijk}(t+1)}{u} - \tilde{\eta}_{ijk}(t+1) \right) h_{ijk}(t - \tilde{\eta}_{ijk}(t+1)) \quad i \in I, j \in J \quad (13)$$

ここで、先程と同様に

$$\tilde{\eta}_{ijk}(t) \equiv \text{int} \left[ \frac{\tilde{\tau}_{ijk}(t)}{u} \right]$$

である。この流入時刻ベースの経路交通量と流出時刻ベースの経路交通量の間を式(12)へ代入し、さらに式(2)を用いると、流入交通量  $q_i(t)$  と流出交通量  $y_j(t)$  の動的な関係が次のように定式化される。

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_{ij}} \left[ \sum_{n=\tilde{\theta}_{ijk}(t)}^{\tilde{\theta}_{ijk}(t+1)} p_{ijk}(n) q_i(n) b_{ij}(n) - \left( 1 - \tilde{\xi}_{ijk}(t) \right) \times p_{ijk}(\tilde{\theta}_{ijk}(t)) q_i(\tilde{\theta}_{ijk}(t)) b_{ij}(\tilde{\theta}_{ijk}(t)) - \tilde{\xi}_{ijk}(t+1) \times p_{ijk}(\tilde{\theta}_{ijk}(t+1)) q_i(\tilde{\theta}_{ijk}(t+1)) b_{ij}(\tilde{\theta}_{ijk}(t+1)) \right] \quad j \in J \quad (14)$$

ここで

$$\tilde{\theta}_{ijk}(t) \equiv t - \tilde{\eta}_{ijk}(t) - 1$$

$$\tilde{\xi}_{ijk}(t) \equiv \frac{\tilde{\tau}_{ijk}(t)}{u} - \tilde{\eta}_{ijk}(t)$$

である。この場合にも、上記関係を  $t - \tilde{\eta}_{ijk}(t) - 1$  から  $t - \tilde{\eta}_{ijk}(t+1)$  のインターバル内における平均的なOD間推移確率を用いて表すことにする。すなわち

$$y_j(t) = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_{ij}} \left[ \sum_{n=\tilde{\theta}_{ijk}(t)}^{\tilde{\theta}_{ijk}(t+1)} p_{ijk}(n) q_i(n) - \left( 1 - \tilde{\xi}_{ijk}(t) \right) p_{ijk}(\tilde{\theta}_{ijk}(t)) q_i(\tilde{\theta}_{ijk}(t)) - \tilde{\xi}_{ijk}(t+1) p_{ijk}(\tilde{\theta}_{ijk}(t+1)) q_i(\tilde{\theta}_{ijk}(t+1)) \right] \times \bar{b}_{ij}(\tilde{\theta}_{ijk}(t)) \quad j \in J \quad (15)$$

となる。以上の定式化は、流入交通量とリンク交通量を定式化した場合において、リンク  $l$  の観測地点がノード  $j$  と置き換わったと考えられ、その結果ダミー変数  $\delta_{ijkl}$  が式中より消える。しかしながらこの場合には、各リンクまでの旅行時間に関する情報は失われ、ODペア間の旅行時間に関する情報しか利用できなくなる。

#### 4. 動的OD交通量の推定モデルの定式化

本研究では、ドライバーの経路選択行動が瞬間的な利用者均衡原理に基づく仮定し、動的なOD交通量を再帰的に推定するための手法を提案する。利用者均衡原理の導入により、対象とするネットワーク上のすべてのリンク上での交通量観測データは必要なくなり、流入地点及びいくつかのリンク、もしくは流出地点での時系列観測値があれば適用可能となる。また流入地点から各観測地点までの所要時間は直接観測されているか、もしくは推定され、利用可能であるとする。

利用者均衡原理を仮定した経路選択行動は、静的な枠組みでの扱いとする。その理由は、本研究で提案するOD交通量の推定モデルにおいては、各時間インターバルごとのOD交通量を再帰的に推定するため、単一時間インターバルでの情報により経路選択行動が決定可能な配分原理の導入が不可欠なためであることと、その扱いが簡便であることである。従って、3.で示した旅行時間の変動を考慮した交通量観測値間の動的な概念及び経路選択行動の静的な概念を同時に扱うために次のような仮定を設ける。すなわち、ドライバーはネットワークへ流入するインターバルにおける瞬間的な利用者均衡条件下で経路を選択し、ネットワーク走行中に経路は変更しないものとする。この仮定は、ドライバーがネットワーク流入時点での道路状況で経路を決定するといった意志決定の過程を表すものであるが、本

手法のように静的な配分原理を導入する限り、走行中の経路変更を考慮することは難しいと考えられる。またネットワークへ流入した車両は、ネットワークに設置されている少なくとも一カ所以上の観測地点を1インターバル以内に通過するものとする。これは、ネットワークへの流入地点のすぐ下流には車両感知器が設置されているということの意味するが、渋滞等で車両が1インターバル以内に車両感知器を通過できないと予想される場合には、OD交通量の推定単位時間を長くする等、技術的対応により対処できると考えられる。

動的OD交通量の推定問題は、2つの問題から構成される。一つは与えられた経路利用率の条件下で交通量観測値に基づいてOD間推移確率すなわちOD交通量を推定する問題であり、もう一つは与えられたOD交通量に基づく均衡ネットワーク交通量の推定問題である。はじめに上位問題として位置づけられる各交通量観測値間の動的関係式からなるOD間推移確率の推定問題の定式化を行い、続いてその問題を上位問題とした利用者均衡条件下における動的OD交通量の推定問題について述べる。

### (1) 上位問題の定式化

一般に交通量観測値からOD交通量を求める問題は劣決定問題であり、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ターゲットODなどの付加的な情報を与えたりしなければならず、OD交通量の推定精度はそのターゲットODの精度に大きく依存する事が知られている。しかしながら時間変動するOD交通量を推定する場合には、精度の高いターゲットODのような付加的な情報の入手は期待できない場合が多い。そこでOD間推移確率は急激には大きく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的にOD間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、リンク交通量と流入交通量及び流出交通量と流入交通量の観測値間の動的な関係は、次のように表せられる。

$$\hat{v}_l(t) = \sum_{ij \in \Omega} \gamma_{ijl}(t) b_{ij}(T) + \varepsilon_l(t) \quad l \in L, t = 1, 2, \dots, T \quad (16)$$

$$\hat{y}_j(t) = \sum_{i \in I} \tilde{\gamma}_{ij}(t) b_{ij}(T) + \varepsilon_j(t) \quad j \in J, t = 1, 2, \dots, T \quad (17)$$

ただし

$$\gamma_{ijl}(t) \equiv \sum_{k \in K_{ij}} \delta_{ijkl} \left[ \sum_{n=\theta_{ijkl}(t)}^{\theta_{ijkl}(t+1)} p_{ijk}(n) q_i(n) \right.$$

$$\left. - (1 - \xi_{ijkl}(t)) p_{ijk}(\theta_{ijkl}(t)) q_i(\theta_{ijkl}(t)) - \xi_{ijkl}(t+1) p_{ijk}(\theta_{ijkl}(t+1)) q_i(\theta_{ijkl}(t+1)) \right] \quad i, j \in \Omega, l \in L \quad (18)$$

$$\tilde{\gamma}_{ij}(t) \equiv \sum_{k \in K_{ij}} \left[ \sum_{n=\tilde{\theta}_{ijk}(t)}^{\tilde{\theta}_{ijk}(t+1)} p_{ijk}(n) q_i(n) - (1 - \tilde{\xi}_{ijk}(t)) p_{ijk}(\tilde{\theta}_{ijk}(t)) q_i(\tilde{\theta}_{ijk}(t)) - \tilde{\xi}_{ijk}(t+1) p_{ijk}(\tilde{\theta}_{ijk}(t+1)) q_i(\tilde{\theta}_{ijk}(t+1)) \right] \quad i, j \in \Omega \quad (19)$$

であり、 $\varepsilon_l(t), \varepsilon_j(t)$ は観測値、所要時間などの誤差や時系列の確率的変動誤差などをすべて含んだ誤差を表す。式(16)および式(17)において、変数 $T$ は現在の推定インターバルを表し、この $T$ は時間の経過とともに進んでいくことになる。

本研究においては、流入した車両は1インターバル以内にいずれかの観測地点を通過するように観測地点が配置されていると仮定していることから、上式において推定するOD間推移確率のインターバル $\theta_{ijkl}(t), \tilde{\theta}_{ijk}(t)$ の最も現時点に近いインターバルは推定時点インターバル $T$ と等しくなり、この式は時間の経過とともに進行する各時間インターバル $T$ において、推定時点から過去に向けてOD間推移確率 $b_{ij}(T)$ は一定であると仮定した場合と同様な表現となっていることがわかる。したがって式(16)および式(17)の両辺の残差平方和を取ることによってOD間推移確率の推定問題は定式化できる。しかしながらこのままではOD間推移確率の時間的変動を捉えることは難しい。そこで過去のデータに対するウエイトを適度に軽減し、現インターバルに近いOD間推移確率の時間変動を重点的に捉えるために忘却係数 $d$ を導入する。この忘却係数 $d$ の値については適用事例を通して検証するが、一般に1.0より小さな定数として与えることが多い。

与えられた経路利用率下における時間変動するOD間推移確率の推定問題は、以下のように構成される。

$$\min \sum_{t=1}^T d^{T-t} \sum_{l \in L} \left( \sum_{ij \in \Omega} \gamma_{ijl}(t) b_{ij}(T) - \hat{v}_l(t) \right)^2 + \sum_{t=1}^T d^{T-t} \sum_{j \in J} \left( \sum_{i \in I} \tilde{\gamma}_{ij}(t) b_{ij}(T) - \hat{y}_j(t) \right)^2 \quad (20)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq b_{ij}(T) \leq 1 \quad i, j \in \Omega \quad (21)$$

$$b_{ij}(T) = 0 \quad i, j \notin \Omega \quad (22)$$

なおこの問題においては、等式制約条件(3)を明示的に扱うことは困難となるため、代わりにOD間推移確率に関する制約に上限値を加え、不等式制約条件とし

て扱い、その後等式制約条件 (3) を満たすように解を修正する方法を用いることとする。具体的な修正方法については、後ほど述べる。

## (2) 利用者均衡条件下における動的OD交通量の推定モデル

ドライバーの経路選択行動がネットワークへの流入時点における瞬間的な利用者均衡原理に基づくと仮定した場合の動的OD交通量の推定問題は以下のように構成される。

$$\min \sum_{t=1}^T d^{T-t} \sum_{l \in L} \left( \sum_{ij \in \Omega} \gamma_{ijl}(t) b_{ij}(T) - \hat{v}_l(t) \right)^2 + \sum_{t=1}^T d^{T-t} \sum_{j \in J} \left( \sum_{i \in I} \tilde{\gamma}_{ij}(t) b_{ij}(T) - \hat{y}_j(t) \right)^2 \quad (23)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq b_{ij}(T) \leq 1 \quad i, j \in \Omega \quad (24)$$

$$b_{ij}(T) = 0 \quad i, j \notin \Omega \quad (25)$$

$$\min \sum_{l \in L} \int_0^{v_l(t)} \pi_l(\omega) d\omega \quad (26)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k \in K_{ij}} h_{ijk}(t) = f_{ij}(t) \quad i, j \in \Omega \quad (27)$$

$$h_{ijk}(t) \geq 0 \quad k \in K_{ij}, i, j \in \Omega \quad (28)$$

ここで

$$f_{ij}(t) = q_i(t) b_{ij}(t) \quad i, j \in \Omega \quad (29)$$

$$v_l(t) = \sum_{ij \in \Omega} \sum_{k \in K_{ij}} \delta_{ijkl} h_{ijk}(t) \quad l \in L \quad (30)$$

であり、 $\pi_l(\omega)$  はリンクコスト関数である。

## 5. 問題の解法

前節で示された問題は、以下のような上位問題と下位問題を持つ Stackelberg 計画問題として表すことができる。

$$\min F_1(b, v(b, p(b))) \quad (31)$$

$$\text{s.t. } g_1(b, v(b, p(b))) \leq 0 \quad (32)$$

$$F_2(b, v(b, p(b))) = \min_v F_2(b, v(b, p(b))) \quad (33)$$

$$\text{s.t. } g_2(b, v) \leq 0 \quad (34)$$

本問題においては、上位問題は  $b$  と  $v$  に関して狭義な凸関数、下位問題は与えられた  $b$  のもとで  $v$  に関して狭義な凸関数、また上・下位問題の制約条件も凸関数である凸2レベル最適化問題<sup>28)</sup>となっている。このような問題では下位問題をその必要十分条件に置き換えたり、変分不等式条件などに置き換えて厳密にその解を求める方法が提案される一方で、そのアルゴリズムの簡便さやモデルの実用性を重んじてヒューリスティックに解を求める方法も多く提案されてきた。すなわち

本問題のような Stackelberg 計画問題におけるヒューリスティックな解法は、上位問題と下位問題を交互に解いて、その収束解を求めるというものである。

一般にこのような解法では必ずしも Stackelberg 計画問題の大域的最適解が得られる保証はない<sup>29)</sup>。しかし最適道路網計画で Stackelberg 計画問題を扱った佐佐木、朝倉<sup>30)</sup>のモデルや、利用者均衡条件下における静的なOD交通量推定モデルとして Stackelberg 計画問題を扱った楊ら<sup>8)</sup>、Yan *et al.*<sup>9)</sup>の数値計算例において示されたように、本モデルにおけるヒューリスティックな解法もまた効率よく大域的な最適解に収束することが期待できる。しかしながら本モデルの上位問題は動的なモデルであり、その解法には双補性の収束方法を利用していることなどから、解の収束性の検討については適用事例で確認することとする。

下位問題を解く方法については良く知られた Frank-Wolfe 法などを用いて解くことができるため、その説明については省略するが、本手法においては下位問題によって経路利用率を求めなければならない。下位問題となる利用者均衡配分問題においては、経路交通量は一意には求まらない。従って本研究においては、一意のリンク交通量を生成する特定の経路利用率を求める。すなわち Frank-Wolfe 法を用いた場合には、繰り返し計算の各段階において all-or-nothing 配分結果の経路交通量が求められるため、これをリンク交通量と同様に凸結合することによって経路交通量を求める<sup>31)</sup>。ところで、本研究における動的なOD交通量の推定手法は、上位問題が複数のインターバルにまたがって構成される。従って異なる経路利用率を与えた場合には、問題を構成する時間インターバルの差異のために推定結果が異なってくる。しかしながら、上位問題では経路利用率を用いて現インターバルにおけるリンク交通量を求めていることから、推定結果に及ぼす影響は小さいと考えられるが、OD交通量の時間変動やネットワークの規模などによりその影響の大きさは異なってくると思われる。

はじめに上位問題に対応するラグランジュ問題のうち、任意のラグランジュ乗数が与えられた時のOD間推移確率の再帰的な求め方を、続いてラグランジュ乗数の求め方について説明する。最後に下位問題も合わせた問題を解くためのアルゴリズムについて説明する。

### (1) 上位問題の再帰的解法

上位問題に対応するラグランジュ問題は、 $\lambda(T)$ 、 $\mu(T)$ を不等式制約に対するラグランジュ乗数とすると以下のように構成される。

$$\min P$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{t=1}^T d^{T-t} (\Gamma'(t)\mathbf{b}(T) - \mathbf{v}(t))' (\Gamma'(t)\mathbf{b}(T) - \mathbf{v}(t)) \\
&+ \sum_{t=1}^T d^{T-t} (\Psi'(t)\mathbf{b}(T) - \mathbf{y}(t))' (\Psi'(t)\mathbf{b}(T) - \mathbf{y}(t)) \\
&- \lambda'(T)\mathbf{b}(T) + \mu'(T) (\mathbf{b}(T) - \mathbf{1}) \quad (35)
\end{aligned}$$

ここで、ベクトル、マトリクスは以下に示すとおりであり、記号'は転置を表し、 $\Omega$ に含まれないODペアに対する要素は除くものとする。

$$\begin{aligned}
\mathbf{v}'(t) &\equiv [v_1(t), v_2(t), \dots, v_l(t), \dots] \\
\mathbf{y}'(t) &\equiv [y_1(t), y_2(t), \dots, y_j(t), \dots] \\
\Gamma(t) &\equiv \begin{bmatrix} \gamma_{111}(t) & \gamma_{112}(t) & \dots & \gamma_{11l}(t) & \dots \\ \gamma_{121}(t) & \gamma_{122}(t) & \dots & \gamma_{12l}(t) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{ij1}(t) & \gamma_{ij2}(t) & \dots & \gamma_{ijl}(t) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \\
\Psi(t) &\equiv \begin{bmatrix} \psi_{111}(t) & \psi_{112}(t) & \dots & \psi_{11m}(t) & \dots \\ \psi_{121}(t) & \psi_{122}(t) & \dots & \psi_{12m}(t) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \psi_{ij1}(t) & \psi_{ij2}(t) & \dots & \psi_{ijm}(t) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \\
&\quad \begin{cases} \psi_{ijm}(t) \equiv \tilde{\gamma}_{ij}(t) & (m = j) \\ \psi_{ijm}(t) \equiv 0 & (m \neq j) \end{cases}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{b}'(T) &\equiv [b_{11}(T), b_{12}(T), \dots, b_{ij}(T), \dots] \\
\lambda'(T) &\equiv [\lambda_{11}(T), \lambda_{12}(T), \dots, \lambda_{ij}(T), \dots] \\
\mu'(T) &\equiv [\mu_{11}(T), \mu_{12}(T), \dots, \mu_{ij}(T), \dots]
\end{aligned}$$

この場合の最適性の一次の必要条件から以下の式が得られる。

$$\begin{aligned}
\mathbf{b}(T) &= \left( \sum_{t=1}^T d^{T-t} \Gamma(t) \Gamma'(t) + \sum_{t=1}^T d^{T-t} \Psi(t) \Psi'(t) \right)^{-1} \\
&\times \left( \sum_{t=1}^T d^{T-t} \Gamma(t) \mathbf{v}(t) + \sum_{t=1}^T d^{T-t} \Psi(t) \mathbf{y}(t) \right. \\
&\left. + \frac{1}{2} \lambda(T) - \frac{1}{2} \mu(T) \right) \quad (36)
\end{aligned}$$

ここで、交通量観測値から計算される値を以下のよりに再帰型で定義し直す。

$$\mathbf{c}_1(T) \equiv \sum_{t=1}^T d^{T-t} \Gamma(t) \mathbf{v}(t) \quad (37)$$

$$= \mathbf{c}_1(T-1) \cdot d + \Gamma(T) \mathbf{v}(T) \quad (38)$$

$$\mathbf{c}_2(T) \equiv \sum_{t=1}^T d^{T-t} \Psi(t) \mathbf{y}(t) \quad (39)$$

$$= \mathbf{c}_2(T-1) \cdot d + \Psi(T) \mathbf{y}(T) \quad (40)$$

$$\mathbf{A}_1(T) \equiv \sum_{t=1}^T d^{T-t} \Gamma(t) \Gamma'(t) \quad (41)$$

$$= \mathbf{A}_1(T-1) \cdot d + \Gamma(T) \Gamma'(T) \quad (42)$$

$$\mathbf{A}_2(T) \equiv \sum_{t=1}^T d^{T-t} \Psi(t) \Psi'(t) \quad (43)$$

$$= \mathbf{A}_2(T-1) \cdot d + \Psi(T) \Psi'(T) \quad (44)$$

これらの値は、現インターバル $T$ の各交通量観測値及びインターバル $T-1$ における計算値のみから再帰的に算出できるものであり、すなわち本手法においては全時間インターバルにおける各交通量観測値の値を記憶しておく必要はなく、オンラインでの推定に適した手法であることがわかる。

これらを式(36)へ代入すると

$$\begin{aligned}
\mathbf{b}(T) &= (\mathbf{A}_1(T) + \mathbf{A}_2(T))^{-1} \\
&\times \left( \mathbf{c}_1(T) + \mathbf{c}_2(T) + \frac{1}{2} \lambda(T) - \frac{1}{2} \mu(T) \right) \quad (45)
\end{aligned}$$

が得られ、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OD間推移確率の最適解を再帰的に求めることができる。また式(3)の等式制約条件下におけるOD間推移確率の最適解を求める方法<sup>22)</sup>も提案されているが、ここでは簡単のため次のような正規化法<sup>4)</sup>を用いてOD間推移確率の推定値を修正する。ただしこの場合には等式制約条件下における最適解を求めているものではなく、近似的な解を求めることになる。

$$b_{ij}(t) = \frac{b_{ij}(t)}{\sum_{j \in J} b_{ij}(t)} \quad i, j \in \Omega \quad (46)$$

## (2) ラグランジェ乗数の更新

ラグランジェ乗数は、式(35)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求められる。双対問題に対する最適解が得られれば、その解に対する式(45)のOD間推移確率の値が、その凸性から原問題の最適解になる。

双対目的関数の解の更新方向は非負制約条件を侵さないように次のようにとる。

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} -b_{ij}(T) & \text{if } \lambda_{ij}(T) > 0 \\ \max(0, -b_{ij}(T)) & \text{if } \lambda_{ij}(T) = 0 \end{cases} \quad (47)$$

$$\rho_{ij} = \begin{cases} b_{ij}(T) - 1 & \text{if } \mu_{ij}(T) > 0 \\ \max(0, b_{ij}(T) - 1) & \text{if } \mu_{ij}(T) = 0 \end{cases} \quad (48)$$

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。

$$\lambda_{ij}(T) = \lambda_{ij}(T) + \alpha \sigma_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (49)$$



$$\mu_{ij}(T) = \mu_{ij}(T) + \alpha \rho_{ij} \quad i, j \in \Omega \quad (50)$$

ここで $\alpha$ は直線探索パラメータである。これらの式を双対問題に代入し、その必要条件から以下が得られる。

$$\alpha = 2 \frac{-b(T)' \sigma + (b(T) - 1)' \rho}{\sigma' A^{-1} \sigma + \rho' A^{-1} \rho - 2 \sigma' A^{-1} \rho} \quad (51)$$

ここで $A$ は、 $A_1(T) + A_2(T)$ である。なお上記の値以外に、 $\alpha$ には制約条件(21)に対する上下限値が存在するため、それらの範囲内で設定する必要がある。

ところでBell<sup>20)</sup>の提案したラグランジェ乗数の更新アルゴリズムは基本的には

$$\lambda_{ij}(T) = \lambda_{ij}(T) - 2 \frac{b_{ij}(T)}{a_{(ij)(ij)}(T)} \quad (52)$$

となっている。これは、本研究で提案するラグランジェ乗数の更新アルゴリズムにおいて、各要素のラグランジェ乗数を別々に個別に更新する場合に相当する。この場合には、各乗数間の相互関係を無視し各乗数を独立に更新していくことになる。一方、本研究で提案するアルゴリズムは各乗数間の相互関係を考慮し、さらに制約の上下限をも同時に考慮することから、Bellのアルゴリズムと比較し、より一般的な形であるとともに、乗数更新の効率化が得られることになる。

### (3) 動的OD交通量の推定アルゴリズム

以上から利用者均衡条件下における動的OD交通量の再帰的推定アルゴリズムは以下ようになる。

- step0 初期実行可能な  $p_{ijk}^{(0)}(T)$  を与え、 $m = 0$  とする。
- step1 上位問題に対するラグランジェ乗数を初期化する。  
すなわち  $\lambda^{(0)}(T) = \mathbf{o}$ 、 $\mu^{(0)}(T) = \mathbf{o}$  とし、 $n = 1$  とする。
- step2 交通量観測値及び  $p_{ijk}^{(m)}(T)$  を用いて、 $c_1^{(m)}(T)$ 、 $c_2^{(m)}(T)$ 、 $A_1^{(m)}(T)$ 、 $A_2^{(m)}(T)$  を更新する。
- step3 式(45)を用いて  $b^{(n)}(T)$  を計算する。
- step4 収束判定を行い、収束していればstep6へ、収束していなければ次のステップへ
- step5  $\lambda^{(n)}(T)$ 、 $\mu^{(n)}(T)$  を更新し、 $n = n + 1$  としてstep3へ
- step6 求められた  $b^{(n)}(T)$  をもとに式(1)から  $f^{(m)}(T)$  を計算し、これを用いて下位問題を解き、 $p_{ijk}^{(m)}(T)$  を求める。
- step7 収束判定を行い、収束していれば次のインターバルへ、収束していなければ  $m = m + 1$  としてstep2へ

ここで  $f^{(m)}(T)$  は  $f_{ij}(T)$  を各要素に持つ列ベクトルであり、step4における収束判定基準は以下のものである。ただし  $\varepsilon$  は十分小さな正数である。

$$\begin{aligned} &| -b_{ij}^{(n)}(T) | < \varepsilon \quad i, j \in \{i, j | \lambda_{ij}^{(n)}(T) > 0\}, \\ &-b_{ij}^{(n)}(T) < \varepsilon \quad i, j \in \{i, j | \lambda_{ij}^{(n)}(T) = 0\} \end{aligned}$$

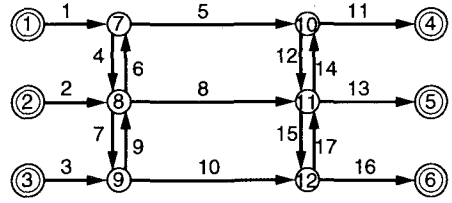


図-2 適用事例に用いたネットワーク

かつ

$$\begin{aligned} &|b_{ij}^{(n)}(T) - 1| < \varepsilon \quad i, j \in \{i, j | \mu_{ij}^{(n)}(T) > 0\}, \\ &b_{ij}^{(n)}(T) - 1 < \varepsilon \quad i, j \in \{i, j | \mu_{ij}^{(n)}(T) = 0\} \end{aligned}$$

またstep7における収束判定基準は以下のようである。

$$\max_{ij} \{ |f_{ij}^{(m)}(T) - f_{ij}^{(m-1)}(T)| / f_{ij}^{(m-1)}(T) \} < \varepsilon$$

提案するアルゴリズムにおいては、上位問題と下位問題を交互に解いていくが、上位問題を解く際に、下位問題の決定変数となるリンク交通量は固定しておらず、上位問題の決定変数となるOD間推移確率の値によって上位問題でのリンク交通量の値は変化する。従って本アルゴリズムは、下位問題の決定変数を固定して上位問題を解き、上位問題の決定変数を固定して下位問題を解くことを交互に行う解法<sup>10), 11)</sup>とは異なり、Stackelberg計画問題のleaderとfollowerの関係を明示的に扱った解法となっていることが分かる。

## 6. モデルの適用事例

本研究で提案した動的OD交通量の再帰的推定手法を実際に適用し、本手法の有効性や妥当性を検証する。ところで実際の交通ネットワークにおいて時間間隔の短いOD交通量が調査、観測されていることはほとんどなく、本モデルの検証に用いることのできる精度の高いOD交通量の観測値の入手は非常に困難である。そこでここでは簡単なネットワークを用いてシミュレーションによりデータを作成し、モデルの適用計算を行う。

図-2に本適用事例で用いたネットワーク図を示す。このネットワークは12のノードと17のリンクから構成されている。このうち発生ノードは1, 2及び3であり、集中ノードは4, 5及び6でODペア数は合計9となっている。設定した各リンクの特性値を表-1に示す。

### (1) 検証用データの作成

動的な交通状況を再現するためには、車両がネットワークへ流入した時刻とネットワーク上で観測される時刻との間に交通量に依存する時間差が生じなければならない。そこで本研究では、動的な交通状況を簡便

表-1 リンク特性値

リンク番号	距離 (km)	容量 (台/5分)	自由速度 (km/h)
1,2,3	2	180	60
5,8,10	10	180	60
11,13,16	5	180	60
4,6,7,9,12,14,15,17	2	100	60

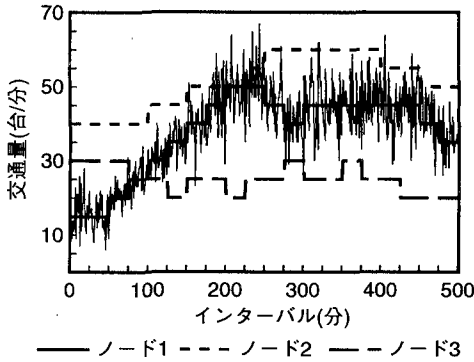


図-3 ポワソン乱数の平均値とノード1からの発生交通量

に再現することにより適用事例に用いるデータをシミュレーションにより作成した。

a) 1分間隔OD交通量の作成

はじめに発生交通量を、平均値が時間的に変動するポワソン乱数として作成した。図-3に発生交通量を作成するのに用いたポワソン乱数の平均値と、一例としてノード1からの発生交通量の時間的変動を示す。

続いてOD間推移確率の平均値が以下のものであると仮定し、その偏差の分布を平均値が0、標準偏差が平均値の5%である正規分布として与え、式(1)を用いて1分間隔OD交通量を整数化して求めた。

$$\begin{bmatrix} 1-4 & 1-5 & 1-6 \\ 2-4 & 2-5 & 2-6 \\ 3-4 & 3-5 & 3-6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.25 & 0.6 & 0.15 \\ 0.22 & 0.38 & 0.4 \end{bmatrix}$$

同様に偏差の標準偏差が平均値の10%である場合及び平均値の15%である場合についてもそれぞれ求めた。

次にOD間推移確率が時間的な傾向変動を見せる場合を想定して、ODペア1-4を0.5から0.3までコサインカーブに従って減少させ、ODペア1-6をその逆とした。またODペア3-4を同様に0.22から0.32まで増加させ、ODペア3-5をその逆とした。図-4および図-5に作成したOD交通量の一例として、ODペア1-4でOD間推移確率の偏差の標準偏差が10%の場合の定常変動及び傾

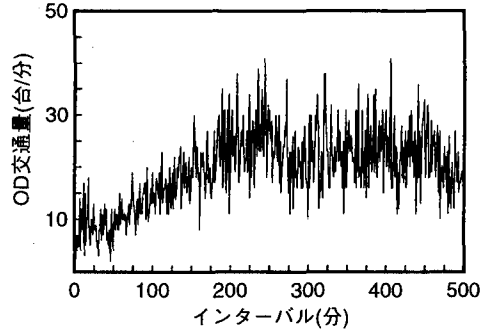


図-4 シミュレーションによる定常変動時のOD交通量の一例

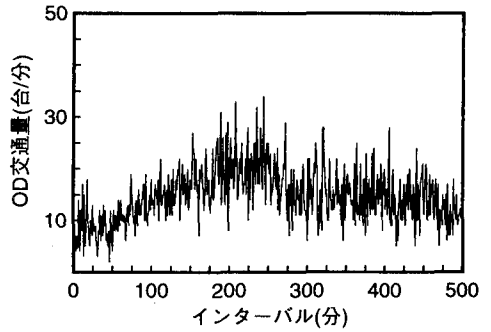


図-5 シミュレーションによる傾向変動時のOD交通量の一例

向変動のOD交通量を示す。

b) 動的ネットワーク交通流

動的ネットワーク交通流を作成するにあたり、問題の複雑化を避けるために経路利用率は車両がネットワークへ流入する時点で決定され、ネットワークへ流入した後経路の変更はないものと仮定した。経路利用率については、以下の2種類の場合を想定して与えた。

- AN: ネットワークへ流入する瞬間における最短経路を選択
- UE: ネットワークへ流入する瞬間における利用者均衡状態に基づく経路を選択

この経路利用率を作成したOD交通量に乗じることにより1分間隔ごとの出発時刻別経路交通量が決定される。リンク所要時間はそのリンクへ流入する時点でのリンク存在台数から、式(53)に示した交通流の基本式とBPR型関数から簡便に得られる密度-速度式を用いて数値計算により求め、リンクを流出するまではその速度は一定とした。この密度-速度式では渋滞現象を表現できないが、シミュレーションで用いる密度-速度式としては、動的な密度-速度関係を記述したもの

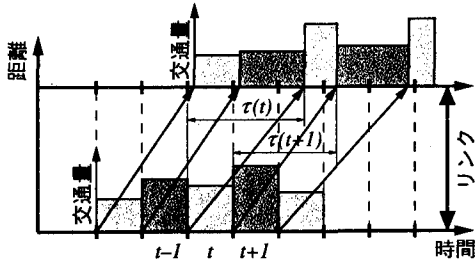


図-6 想定した車両の走行

や待ち行列の発生をとまなう渋滞を明示的に扱ったものの利用も可能である。

$$\alpha k^\beta v^{\beta+1} + c^\beta (v - v_0) = 0 \quad (53)$$

ここで $\alpha$ は0.15,  $\beta$ は4で,  $k$ ,  $v$ ,  $v_0$ ,  $c$ はそれぞれ密度(台/km), 速度(km/分), 初期速度(km/分), 容量(台/分)を表す。

この求められた速度に対応するリンク所要時間を $\tau(t)$ とすれば, 図-6に示したように, インターバル $t$ の間にリンクへ流入した車両は,  $t \cdot u + \tau(t)$ から $(t+1) \cdot u + \tau(t+1)$ の間にリンクを流出することになり, 流入した交通量がどのインターバルに流出するかが算出できることとなる。従ってこれら手順を各リンク, 各インターバル繰り返して, 動的な交通流をシミュレーションにより作成できる。

以上のようにシミュレーションは1分間隔で行ったが, 適用計算に用いる際の入力データと検証用データは5分間隔で集計し直したものをを用い, 適用計算は1インターバルを5分として行った。

## (2) 解の収束状況の検証

本研究で提案したヒューリスティックな解法により解がどのように収束するかを検証するために, 先に示したアルゴリズムのstep0における初期実行可能な経路利用率に異なる3つの値を与えてそれぞれ計算を実行した。表-2に異なる3つの初期値からの収束状況のうち, OD間推移確率が定常的に変動し, その偏差の標準偏差が10%, 経路利用が利用者均衡の場合で全リンクの観測値を用いた計算結果のうち, 推定開始インターバル10におけるODペア1-4の収束状況を示す。この表から, 提案したヒューリスティックなアルゴリズムは, その初期値によらず同じ解に収束していることが確認できる。ただしその値により収束速度は大きく変わることが分かり, 効率良く収束させるためには良い初期値が必要であると言える。なお他の場合についても同様に同じ解に収束することが確認された。

表-2 初期値の違いによるOD交通量の収束状況

iteration	初期値1	初期値2	初期値3
0	38.8579	54.5564	42.6513
1	40.2379	42.0474	43.6458
2	41.4232	40.2148	43.6458
3	41.8314	41.0162	
⋮	⋮	⋮	
13	43.6694	42.8839	
14	43.6458	43.1156	
15	43.6458	43.7503	
16		43.7197	
17		43.6893	
18		43.6613	
19		43.6458	
20		43.6458	

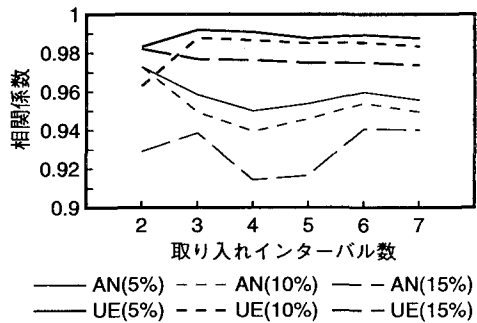


図-7 取り入れインターバル数と全推定時間OD交通量の観測値と推定値の相関係数の関係

## (3) 初期推定状態と推定結果の関係

本研究で提案した動的OD交通量の推定手法は, 過去の時系列データを用いて現在のOD交通量を推定するという手法である。推定開始時に過去 $n$ インターバルのデータを用いる場合,  $T-n+1$ から $T$ までのインターバルのデータを用いて推定開始インターバル $T$ のOD交通量を推定することになる。従ってこの推定開始インターバルのOD交通量を推定する際に, どこまでの過去データを用いるかによってその推定結果は異なってくる。ここでは, その開始インターバルの初期推定状態とOD交通量の推定結果の関係について検討する。

図-7に初期推定時に取り入れたインターバルの数と全インターバルにおけるOD交通量の観測値と推定値の相関係数の関係を示す。この結果は先ほどと同様に, OD間推移確率が定常的に変動し, その偏差の標準偏差

表-3 定常変動時における全推定時間OD交通量の観測値と推定値の相関係数

		case-1	case-2	case-3	case-4
AN	5%	0.9594	0.9583	0.9736	0.9779
	10%	0.9552	0.9493	0.9644	0.9758
	15%	0.9422	0.9385	0.9442	0.9649
UE	5%	0.9919	0.9912	0.9885	0.9961
	10%	0.9877	0.9873	0.9828	0.9916
	15%	0.9767	0.9758	0.9750	0.9816

が10%の場合で全リンクの観測値を用いた場合の計算結果である。この図からは統一的な規則性のある関係は見い出せないが、取り入れるインターバルの数が多くなるのに従って全般的に相関性が減少していく傾向があることが分かる。ただし2インターバルの場合には、相関性が劣ることがあることも分かる。これは取り入れる過去データが少なすぎても安定性に欠けるが、多くを取り入れすぎても、各インターバルごとに異なる経路利用率を初期経路利用率で全て置き換えることにより、各時間インターバルごとの経路利用率の変動が取り入れられなくなることによるものと思われる。従ってこの場合には、3インターバルぐらいを推定開始時に取り入れるのが妥当であると判断できる。ただしこれらの関係は、ネットワークの状況や規模、そしてネットワーク上の交通状況により変化するものと考えられ、普遍的な傾向を見つけたすにはさらなる追求が必要であると考えられる。

#### (4) 定常変動時の適用結果

本推定手法をOD間推移確率が平均値の周りを定常的に変動する場合に適用した。OD交通量を推定するに際し、利用可能なリンクの観測地点や流出交通量の観測地点については以下の4つの場合を想定して計算を行った。なおOD交通量の推定はシミュレーションの過渡期を避けるため推定開始インターバルを10とし、初期推定時の過去の取り入れインターバル数を3とした。また定常的変動であることから忘却係数を1.0<sup>22)</sup>とした。

- case-1: 全リンク観測値と全流出交通量の観測値
- case-2: 全リンクの観測値
- case-3: リンク12,14,15,17以外のリンク観測値
- case-4: リンク5,8,10以外のリンク観測値

表-3及び表-4に全推定時間インターバルにおけるOD交通量の観測値と推定値の相関係数及びRMS誤差を示す。これらの表から、全般的に非常に高い相関性を有していることが分かるが、全ての場合でシミュレ-

表-4 定常変動時における全推定時間OD交通量の観測値と推定値のRMS誤差

		case-1	case-2	case-3	case-4
AN	5%	16.83	17.90	11.54	11.52
	10%	16.86	18.93	13.57	11.30
	15%	19.28	21.08	18.98	12.43
UE	5%	6.44	6.86	7.93	4.01
	10%	7.57	7.90	9.09	5.53
	15%	10.24	10.68	10.76	7.98

ションデータを利用者均衡を仮定して作成したUEの場合の方が、最短経路選択を仮定したANの場合よりも優れた推定結果となっていることが分かる。これは本手法の下位問題が、UEのシミュレーションの場合に用いた経路選択規範と同様の経路選択規範となる利用者均衡問題から構成されていることに起因するが、経路選択行動が利用者均衡に従っていない場合においても推定可能であり、その結果は妥当な値であることが分かる。OD間推移確率の偏差の変動の大きさはそれぞれの場合において推定結果に直接的に影響を及ぼし、変動が大きくなるに従い推定結果が悪くなる傾向が見られる。

次にcase-1とcase-2の推定結果を比べれば、流出交通量の観測値も用いたcase-1の方が相関係数、RMS誤差とも優れていることが分かる。しかしながら、リンク観測値だけを用いたcase-2、case-3、case-4を見てみると、ANの場合にはcase-4、case-3、case-2の順で、UEの場合にはcase-4、case-2、case-3の順で推定結果が優れていることが分かる。これは情報量の大きさと推定精度は単純に比例していないことを意味し、必要以上の情報は逆に推定精度を悪化させてしまう場合もあると考えられる。

図-8にOD間推移確率の偏差の標準偏差が10%でcase-2の場合の推定結果の時間的変動を示す。また図-9に全ODペアの散布図を示す。散布図から、ANの場合には交通量の多いところで過大推定、交通量の少ないところで過小推定の傾向がわずかながら見られる。交通量が多いのは主にODペア2-5であるが、ANの場合には経路選択行動の仮定の差異により、このODペアにおけるOD間推移確率が多少過大に推定され、逆にODペア2-4や2-6が過小に推定された結果、このようなバイアス的な傾向が表れたと考えられる。しかしながら全般的には、これらの図から本推定手法により優れた推定結果が得られているということが分かる。

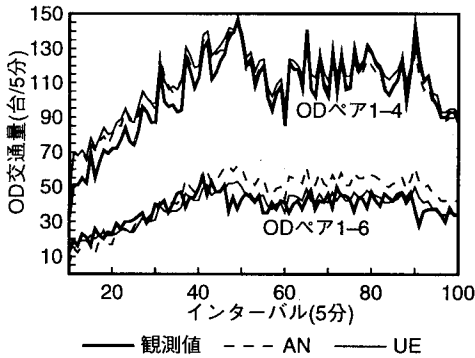


図-8 定常変動時における推定OD交通量の時間変動

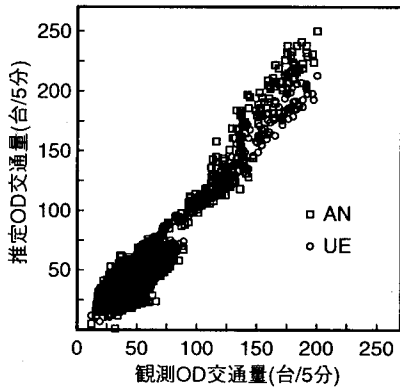


図-9 定常変動時における全推定時間OD交通量の観測値と推定値の散布図

(5) 傾向変動時の適用結果

OD間推移確率が傾向的な変動を見せる場合においても、定常変動の場合と同様に観測されている交通量に関してはcase-1からcase-4までの4つの場合を想定して適用計算を行った。計算は忘却係数 $d$ の値を1.00から0.70まで0.02ずつ減少させてそれぞれ行った。

表-5及び表-6に全推定時間インターバルのOD交通量の観測値と推定値の相関係数及びRMS誤差の値を示してある。この表に示した値は、全推定時間インターバルのOD交通量の観測値と推定値のRMS誤差が最も優れていた場合の忘却係数における値を示してあり、表-7にその時の忘却係数の値を示す。RMS誤差が最も優れていたときの忘却係数と相関係数が最も優れていたときの忘却係数の値は、2つの場合を除いて同一であった。異なった場合の1つは、UEでOD間推移確率の偏差の標準偏差が15%でcase-1の場合であり、このときの相関係数が0.9739で忘却係数の値が0.78であり、もう

表-5 傾向変動時における全推定時間OD交通量の観測値と推定値の相関係数

		case-1	case-2	case-3	case-4
AN	5%	0.9580	0.9554	0.9409	0.9691
	10%	0.9565	0.9509	0.9418	0.9650
	15%	0.9428	0.9360	0.9243	0.9416
UE	5%	0.9858	0.9849	0.9676	0.9568
	10%	0.9749	0.9762	0.9488	0.9445
	15%	0.9728	0.9717	0.9379	0.9358

表-6 傾向変動時における全推定時間OD交通量の観測値と推定値のRMS誤差

		case-1	case-2	case-3	case-4
AN	5%	18.17	19.01	17.07	12.57
	10%	18.01	20.09	17.40	13.00
	15%	20.13	22.22	21.82	14.72
UE	5%	6.36	6.63	9.64	11.13
	10%	8.45	8.32	12.42	12.59
	15%	9.10	9.36	14.11	13.52

表-7 RMS誤差が最小時の $d$ の値

		case-1	case-2	case-3	case-4
AN	5%	1.00	1.00	1.00	1.00
	10%	1.00	1.00	1.00	1.00
	15%	1.00	1.00	1.00	1.00
UE	5%	0.84	0.86	0.88	1.00
	10%	0.86	0.88	0.94	1.00
	15%	0.76	0.74	0.96	1.00

1つはUEでOD間推移確率の偏差の標準偏差が10%でcase-3の場合であり、このときの相関係数が0.9508で忘却係数の値が0.96であった。このように、相関係数及びRMS誤差の両指標が最も優れた場合の忘却係数の値には、大きな差異が見られないことが分かる。

表-5の相関係数を見てみると全ての場合において0.92以上の高い相関性を有していることが分かり、表-6のRMS誤差の値もほぼ妥当な値であることから、OD間推移確率が傾向的な変動を見せる場合においても本手法によりOD交通量を精度良く推定できることが分かる。また定常変動の場合と同様に、ANの場合の相関性がUEの場合に比べ多少劣り、RMS誤差の値も大きくなっていることが分かるが、これも本手法の下位問題

が、UEの場合のデータを作成する際に経路選択規範として仮定した利用者均衡問題で構成されていることによるものと考えられる。

ところでUEの場合において、case-3及びcase-4でRMS誤差の値が大きくなっている。この結果を表-7のdの値と照らし合わせて考えると、dの値が1.00に近いほどRMS誤差の値が大きくなっている傾向があることが分かる。本来、本モデルにおいてはdの値を1.00より小さくすることによってOD間推移確率の変動を捉えようとするのであるのだが、ANの場合やUEのcase-3やcase-4の場合のようにOD間推移確率の傾向変動以外の要素の方がOD交通量の推定に大きな影響を及ぼすと考えられる場合には1.00に近い値をとることがあると言える。すなわち経路選択行動の仮定の違いや、OD間推移確率の平均値周りの変動及び得られる情報量の少なさなどによる影響が大きく、これら変動要素を吸収するためにdの値が1.00に近くなったと考えられ、その結果相対的にRMS誤差の値が大きくなったと考えられる。しかしながら全般的にはdの値に関わらずほぼ妥当な推定結果が得られていることが分かり、特に他の要素に比べて傾向的変動要素が大きいと思われるUEのcase-1やcase-2の場合には非常に優れた推定結果が得られていることが分かる。

忘却係数の値とOD交通量の推定精度の関係について簡単に考察する。ANの場合には、忘却係数の値が小さくなるに従い相関係数、RMS誤差の両指標の値は悪くなり、UEの場合には忘却係数の値を減じていくに従い各指標の値は向上し、表-7に示した値からさらに減じることによって、各指標の値は逆に悪化するという傾向を示した。このUEの場合の各指標の値の変化は、最適な忘却係数付近で緩慢になり、その値付近での忘却係数の値の差異は、OD交通量の推定精度にあまり影響を及ぼさない結果となっている。したがって本適用事例から、ドライバーの経路選択行動が本手法で仮定した瞬間的な利用者均衡原理に従わないような交通状況を対象とした場合には忘却係数の値は1.00がふさわしく、ドライバーの経路選択行動が本手法の仮定に従う場合には、得られる情報量によって0.80から1.00に設定すればよいが、各指標の変化量の特徴を考慮すると、忘却係数の値は0.90ぐらいに設定しておけば、実用上問題は無いと考えられる。表-8に忘却係数を0.90とした場合のOD交通量の推定値と観測値の相関係数とRMS誤差を示すが、この表からも忘却係数を0.90とした場合にも十分有意な推定値が得られていることが分かる。

一例として、図-10にOD間推移確率の偏差の標準偏差が10%でcase-2の場合でRMS誤差が最も小さかった忘却係数における推定結果の時間的変動を、図-11に全

表-8 忘却係数が0.90の場合のUEにおける観測値と推定値の各適合度指標

		case-1	case-2	case-3	case-4
相関	5%	0.9845	0.9837	0.9661	0.9414
	10%	0.9742	0.9751	0.9420	0.9006
	15%	0.9687	0.9677	0.9216	0.8892
RMS	5%	6.73	6.96	9.87	12.77
	10%	8.61	8.55	12.90	16.47
	15%	9.89	10.21	15.14	17.25

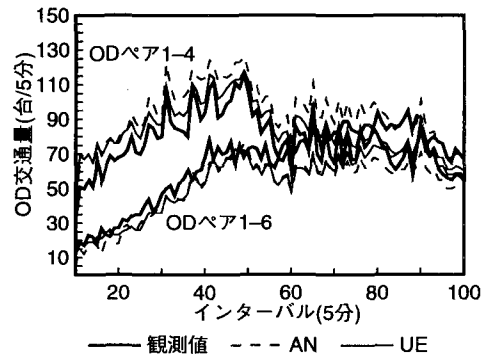


図-10 傾向変動時における推定OD交通量の時間変動

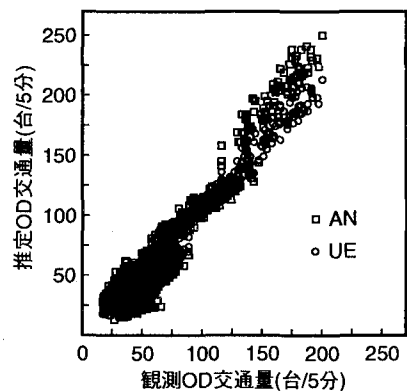


図-11 傾向変動時における全推定時間のOD交通量の観測値と推定値の散布図

ODペアの散布図を示す。散布図からは、ANの場合にわずかながらバイアスな傾向が見られるが、全般的にこれらの図からも優れた推定結果が得られていることが分かる。

## 7. おわりに

本研究では、道路ネットワーク上で観測されているリンク交通量や流出交通量などの時系列観測値を用いて動的OD交通量を再帰的に推定する手法を提案した。推定手法は、観測交通量間の動的な関係をOD交通量を介して定式化したOD間推移確率の推定問題と利用者均衡問題との2レベル構造を持った問題として定式化された。また解法としては問題の複雑化を避け、実用性を重んじることからヒューリスティックな方法を採用した。本手法の特徴をまとめると次のようになる。

- i. 下位問題に利用者均衡問題を位置付けていることから、OD間に複数経路が存在するネットワークにおいて動的OD交通量が推定可能であり、また観測地点数がある程度少なくても適用できる。
- ii. 時系列データを利用することと流入交通量の観測値を用いるということから、ターゲットODのようなOD交通に関する事前情報を必要としない。
- iii. 提案する再帰的計算手法により、あらかじめ適用の対象とする全時間帯において観測交通量データを用意しておく必要はなく、オンラインでデータを入手し、OD交通量を推定することが可能である。

本研究では、動的OD交通量の観測値の入手が困難なことから、簡単なネットワークを用いてシミュレーションによりデータを作成した。このシミュレーションデータを用いて提案した動的OD交通量の推定手法を実際に適用した結果、以下のような知見が得られた。

- i. 本手法により各状況下で動的なOD交通量を精度良く推定できることが分かった。その推定精度はOD間推移確率の変動の大きさに関係することが分かった。
- ii. 経路選択行動が、本モデルの下位問題に位置付けられる利用者均衡原理に従わず、最短経路を選択するような状況下においても、十分な精度を有した推定結果が得られることが分かった。
- iii. 特にネットワークにおける交通状況が利用者均衡原理に従っており、またより多くの情報を用いることが可能であれば、OD間推移確率が傾向的な変動を見せた場合においても非常に高い精度でOD交通量を推定可能であることが分かった。
- iv. ネットワーク上でリンク交通量を観測する地点は全てである必要はなく、OD交通量の推定精度と情報量は必ずしも比例していないことが分かった。
- v. 提案したヒューリスティックなアルゴリズムにより、初期実行可能解の設定によらず同一の解に収束することが分かった。
- vi. また双対問題によるラグランジュ乗数の更新アルゴリズムにより、OD間推移確率に関する不等式制約

条件を満たしたOD交通量の推定値が得られることが分かった。

今後は現実規模のネットワークを含めたより多くのネットワークを用いた適用計算を行い、解の収束状況、初期推定状態と推定結果の関係、観測地点数が推定結果に及ぼす影響の普遍的な傾向を見つけ出すとともに、実際のデータを用いた適用計算を進め、本推定手法の妥当性および一般性を検証していく必要がある。また本推定手法の上位問題は、渋滞が発生しているネットワークへの適用も可能であるが、下位問題の利用者均衡問題は渋滞状況を明示的に扱えないため、今後は渋滞の発生した状況下での適用計算をすすめ、本推定手法の特性を検証していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 飯田恭敬, 高山純一: リンクフローによるOD交通量推計モデル, 第18回土木計画学講習会テキスト, pp. 97-118, 1987.
- 2) 高山純一: リンクフロー観測値に基づいた道路網交通需要分析モデルに関する方法論的研究, 京都大学学位論文, 1988.
- 3) Cascetta, E. and Nguyen, S.: A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts, *Transportation Research*, Vol. 22B, No. 6, pp. 437-455, 1988.
- 4) Dial, R. B.: A probabilistic multipath traffic assignment algorithm which obviates path enumeration, *Transportation Research*, Vol. 5, No. 2, pp. 83-111, 1971.
- 5) Nguyen, S.: Estimating origin-destination matrices from observed flows, *Transportation Planning Models*, Elsevier Science Publishers B. V., pp. 363-380, 1984.
- 6) LeBlanc, L. J. and Farhangian, K.: Selection of a trip table which reproduces observed link flows, *Transportation Research*, Vol. 16B, No. 2, pp. 83-88, 1982.
- 7) Sheffi, Y.: *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1985.
- 8) 楊海, 朝倉康夫, 飯田恭敬, 佐佐木綱: 交通混雑を考慮した観測リンク交通量からのOD交通量推計モデル, 土木学会論文集, No. 440/IV-16, pp. 117-124, 1992.
- 9) Yang, H., Sasaki, T., Iida, Y. and Asakura, Y.: Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts on congested networks, *Transportation Research*, Vol. 26B, No. 6, pp. 417-434, 1992.
- 10) Hall, M. D., Van, Vliet, D. and Willumsen, L. G.: SATURN - a simulation assignment model for the evaluation of traffic management schemes, *Traffic Engineering and Control*, 21, pp. 168-176, 1980.
- 11) Fisk, C. S.: On combining maximum entropy trip matrix estimation with user optimal assignment, *Transportation Research*, Vol. 22B, No. 1, pp. 69-79, 1988.
- 12) Fisk, C. S.: Trip matrix estimation from link traffic counts: The congested network case, *Transportation Research*, Vol. 23B, No. 5, pp. 331-336, 1989.
- 13) 楊海, 佐佐木綱: ネットワーク均衡に基づく観測リンクフローからのOD交通量推計法に関する検討, 土木計画学研究・論文集, No. 9, pp. 29-36, 1991.

- 14) Yang, H., Iida, Y. and Sasaki, T. : The equilibrium-based origin-destination matrix estimation problem, *Transportation Research*, Vol. 28B, No. 1, pp. 23-33, 1994.
- 15) Cremer, M. and Keller, H. : Dynamic identification of flows from traffic counts at complex intersections, *Proceedings of the Eighth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, University of Toronto Press, pp. 121-142, 1981.
- 16) Cremer, M. and Keller, H. : A systems dynamics approach to the estimation of entry and exit O-D flows, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, VNS Science Press, pp. 431-450, 1984.
- 17) Cremer, M. and Keller, H. : A new class of dynamic methods for the identification of origin-destination flows, *Transportation Research*, Vol. 21B, No. 2, pp. 117-132, 1987.
- 18) Nihan, N. L. and Davis, G. A. : Recursive estimation of origin-destination matrices from input/output counts, *Transportation Research*, Vol. 21B, No. 2, pp. 149-163, 1987.
- 19) 楊海, 秋山孝正, 佐佐木綱 : 時系列観測交通量をを用いた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.
- 20) Bell, M. G. H. : The real time estimation of origin-destination flows in the presence of platoon dispersion, *Transportation Research*, Vol. 25B, Nos. 2/3, pp. 115-125, 1991.
- 21) Chang, G. L. and Wu, J. : Recursive estimation of time-varying origin-destination flows from traffic counts in freeway corridors, *Transportation Research*, Vol. 28B, No. 2, pp. 141-160, 1994.
- 22) 松本幸正, 藤田素弘, 松井寛 : 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, *土木計画学研究・論文集*, No. 12, pp. 463-474, 1995.
- 23) Sherali, H. D., Arora, N. and Hobeika, A. G. : Parameter optimization methods for estimating dynamic origin-destination trip-tables, *Transportation Research*, Vol. 31B, No. 2, pp. 141-157, 1997.
- 24) Chang, G. L. and Tao, X. : Estimation of dynamic O-D distributions for urban networks, *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Pergamon, pp. 1-20, 1996.
- 25) 安井一彦, 池之上慶一郎, 竹内秀城 : ネットワークにおけるOD交通量のリアルタイム推計手法について, *土木計画学研究・講演集*, No. 17, pp. 457-460, 1995.
- 26) Matsui, H. and Matsumoto, Y. : Dynamic estimation of origin-destination flows from link traffic counts, *Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems*, Vol. IV, pp. 2007-2014, 1995.
- 27) 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.
- 28) Bard, J. F. : Convex two-level optimization, *Mathematical Programming*, 40, pp. 15-27, 1988.
- 29) Friesz, T. L. and Harker, P. T. : Properties of the iterative optimization-equilibrium algorithm, *Civil Engineering System*, Vol. 2, pp. 142-154, 1985.
- 30) 佐佐木綱, 朝倉康夫 : OD需要の変動を内生化した最適道路網計画モデル, *土木学会論文集*, No. 383/IV-7, pp. 93-102, 1987.
- 31) Tobin, R. L. and Friesz, T. L. : Sensitivity Analysis for Equilibrium Network flow, *Transportation Science*, Vol. 22, No. 4, pp. 242-250, 1988.

(1997. 7. 10 受付)

## RECURSIVE ESTIMATION OF DYNAMIC ORIGIN-DESTINATION MATRICES FROM TRAFFIC COUNTS BASED ON USER EQUILIBRIUM

Yukimasa MATSUMOTO, Motohiro FUJITA and Hiroshi MATSUI

The recursive estimation model of dynamic O-D matrices is proposed. This model estimates the dynamic O-D flows on multiroute networks from measurements of traffic flows. No target O-D matrices and no information about a prior O-D pattern are needed. The estimation problem is formulated as two level optimization problem, in which the upper level problem estimates the dynamic O-D proportions and the lower level problem estimates user equilibrium traffic flows. The heuristic algorithm is proposed to solve such two level optimization problem. Experiments with simulated data suggest that the proposed model is useful for estimation of dynamic O-D flows even when the O-D proportions are time varying.