

路側観測交通量からの時間変化する OD 交通量の推定

小根山 裕 之*
桑 原 雅 夫**

本研究は、交差点における方向別分岐交通量や単路部交通量など簡便に観測できる路側観測交通量から、比較的細かな街区単位のゾーンにおける時間変化する OD 交通量を推定するモデルを提案するものである。モデルは次の2つの部分から成り立っている。第1に、時間変化する OD 交通量と観測交通量の関係を、利用者の経路選択率に基づいて関係づけ、OD 推定に当たっての制約条件を定式化する。この際、平面的なネットワークに時間軸を追加して、リンク旅行時間の時間変化を取り扱えるようにネットワークを3次元に拡張して、経路選択確率を推定した。なお、3次元ネットワークにおけるリンク旅行時間の時間変化は、所与であると仮定している。第2に、求められた制約条件を満足するように、エントロピーを最大にする OD 交通量の推定方法を検討した。特に、時間軸を集約化してより大きい時間単位で OD 交通量を推定する方法、既存の日単位あるいは大きなゾーン単位での OD 交通量情報を利用した推定方法について提案を行った。最後に、本モデルを仮想ネットワーク及び首都高速道路ネットワークに適用して、モデルの有効性と今後の課題を整理した。

1. はじめに

交通渋滞・環境の改善施策を評価するため、交通渋滞状況を再現できる街路ネットワークにおける動的な交通流シミュレーションモデルの開発が行われているが、その入力情報として時間変化する OD 交通量、特に街区レベルの細かいゾーンでの OD 交通量が必要となる。しかし、このような細かなゾーンにおける時間変化する OD 交通量を直接インタビュー調査などによって求めることは非常に困難である。

本研究では、交差点における方向別分岐交通量や単路部交通量などから、時間変化する OD 交通量をオフラインで推定するモデルを提案する。本研究の特徴は、(1)リンク旅行時間の時間変化が与えられている場合の OD 推定方法を提案するも

のであること、(2)静的な OD 交通量推定問題に適用されているエントロピー最大化法を動的な問題に拡張して適用していること、(3)日単位あるいはより大きいゾーンレベルでの発生・集中交通量、OD 交通量などの既存の情報を利用した OD 推定方法を提案していること、(4)現実の首都高速道路ネットワークに本モデルを適用し、モデルの有効性と今後の課題を整理していることである。

2. 既往の研究

時間変化する OD 交通量の推定モデルは、ネットワークの範囲や必要とされる出力結果などにより、2つの流れに大別される。ひとつは、ごく狭い範囲の交通計画や交差点の交通流管理、施設計画などのための、単一交差点あるいはインターチェンジにおけるアプローチ交通量から分岐交通量を推定するモデルである。もうひとつは、面的な

* 建設省土木研究所環境部交通環境研究室

** 東京大学生産技術研究所第五部助教授

広がりを持った小・中規模の一般街路ネットワークを対象として、リンクの路側観測交通量からOD交通量を推定するモデルである。本研究のモデルは、後者に分類される。これら2つの研究は、前者が経路選択を考慮する必要がないのに対し、後者はひとつのODに対し複数の経路が存在し、経路選択行動を考慮する必要があるという点が大きく異なる。

前者については、CremerとKeller¹⁾による最小自乗法、逐次計算法、カルマンフィルターを用いた方法など4種類の手法、NihanとDavis^{2),3)}による逐次最小自乗法や最尤推定法を用いた手法、KellerとPloss⁴⁾によるLinked Static-Dynamic Correlationモデル、Bell^{5),6)}によるDRIVEプロジェクトのODINモデルの提案、楊、秋山ら⁷⁾の誤差伝搬学習法によるオンライン推計法など、多くの手法が提案されている。

一方、本研究に関連する後者のモデルについては、Nguyenら⁸⁾の公共交通ネットワークを対象にしたOD推定モデルが挙げられるが、リンクコストの時間変化を考慮していないため、時間変化による経路選択の変化が記述できていない。また、Cascettaらのモデル⁹⁾では、経路選択確率の推定を行うとき経路の列挙を行う必要があり、複雑なネットワークでは計算手順が煩雑になる。また、楊、飯田ら¹⁰⁾は、二乗残差積分と最小化モデルとフーリエ変換を用いた数値解法を用いたOD推定モデルを提案しているが、経路選択確率として時間変化を考慮しない固定値を用いているという問題点がある。また、Ashok, Ben-Akiva¹¹⁾は、カルマンフィルターを用いたOD交通量のオンライン推定モデルを提案しているが、既存のOD交通量や経路選択確率が所与であることが前提となっていることと、オンライン情報が入手できない場合に難点がある。その他、松本ら¹²⁾は、観測時間リンク交通量から任意の仮想スクリーンラインの時間断面交通量を求め、残差平方和と最小化手法を用いたモデルを提案しているが、比較的大きいゾーン間のODペアを対象としており、本研究で対象としているような街区単位の細かいゾーン間のOD推定には適していない。

このように既往の研究のうち本研究のようにオフラインでOD推定を行うものについては、経路選択確率の時間変化が考慮されていないか、不十分なものが多いという問題点が指摘されるとともに、実ネットワークに適用した検証が行われていないことが課題として残されている。

3. 時間変化するOD交通量の推定モデル

3.1 リンク交通量とOD交通量の関係

本研究では、時刻 t におけるリンク a の旅行時間 $T_a(t)$ は、すべてのリンク a 、すべての時刻 t について与えられているものとする。現状のOD交通量を推定する場合には、対象地域の比較的簡単な調査によって、どこのリンクが何時頃に混雑するといった、おおよそのリンク旅行時間が把握できると思われるため、このような仮定を用いることとした。また、本来はリンク旅行時間はリンク交通量によって変化する量であるが、このようなフローディペンデントな推定方法を用いる際にも、フローの推定と旅行時間の更新という繰り返し計算が必要となると思われ、その場合の繰り返し計算の1ステップとして本方法が適用できるものと考えられる。

所与である $T_a(t)$ に基づいて車両の走行軌跡を図-1のようなTime-Space図上に表すことができる*脚注。図-1では、ODペア w の起点 r を出発した車両が、経路 k に沿って走行している軌跡が表されており、時刻 t_r に起点を出発した車両が、時刻 $t = \tau_{rk}^w(t_r)$ にリンク a に流入している。この起点出発時刻とリンク a への流入時刻の関係を示す $\tau_{rk}^w(t_r)$ は、起点出発時刻 t_r とOD w の経路 k が決まれば、リンク旅行時間 $T_a(t)$ (所与)から求めることができる量である。

したがって、リンク a の交通量とOD交通量の関係は、経路選択確率を介在させることによって次のように表すことができる。

*脚注) リンクにおける交通の移動がFIFO条件を満たしているならば、時刻 t にリンク a に流入した交通が時間区間 $t+dt$ に流入した車に追い越されることはないので

$$\frac{dT_a(t)}{dt} \geq -1$$

を満足するようにリンク旅行時間が与えられている必要がある。

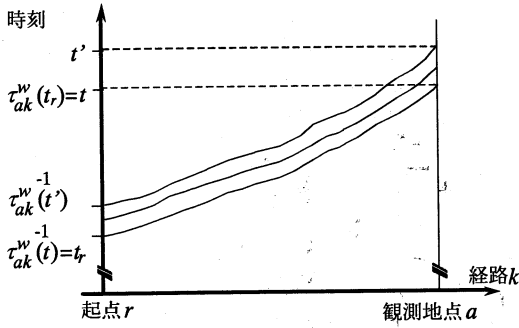


図-1 タイムスペース図

$$\int_t^{t'} v_a(t) dt = \sum_w \sum_k \int_{\tau_{ak}^{w-1}(t)}^{\tau_{ak}^{w-1}(t')} p_{kw}(\tau_{ak}^{w-1}(t')) \cdot q_w(\tau_{ak}^{w-1}(t')) \cdot \delta_{ak}^w dt \quad (1)$$

$p_{kw}(\tau_r)$ = OD ペア w (起点 r , 終点 s) の起点を時刻 τ_r に出発した交通が、経路 k を選択する確率

$v_a(t)$ = 時刻 t にリンク a に流入する交通流率

$q_w(\tau_r)$ = OD ペア w の起点 r を時刻 τ_r に出発する OD 交通流率

$\tau_{ak}^{w-1}(t)$ = OD ペア w , 経路 k の交通がリンク a に時刻 t に流入するときの起点出発時刻 (出発時刻を τ_r とすると, $t = \tau_{ak}^w(\tau_r)$)

δ_{ak}^w = OD ペア w の経路 k がリンク a を通る場合 1, その他の場合 0 となる変数

式(1)の左辺は、時刻 t から t' の間にリンク a に流入した交通量を表しており、右辺はそれに対応する量を未知数である OD 交通量と経路選択確率で表現したものである。

この関係に基づいて、リンク交通量 $v_a(t)$ から OD 交通量 $q_w(\tau_r)$ を推定することとなる。なお、式(1)中の経路選択確率 $p_{kw}(\tau_r)$ については、次節で述べることにする。

式(1)の関係は、以下のように時間軸を離散化することによって異なった形で表現することもできる。まず、時間軸を Δt ごとの小区間 h に分割し、時間 $[h \cdot \Delta t, (h+1) \cdot \Delta t]$, $h=1, 2, 3, \dots, H$ に含まれる時間区間を時間区間 h とする。ここで、

出発時間区間 h_r , リンクへの流入時間区間 h と表記するものとする。ここで、 Δt を十分に小さく取れば、リンク旅行時間 $T_a(h)$ と、交通流率 $v_a(h)$, $q_w(h)$ については、各時間区間で変化しないものとし、時間区間の始まりの時刻の流率が Δt 間続くものと近似できるので、式(1)の関係は、

$$v_a(h) \cdot \Delta t = \sum_w \sum_k p_{kw}(\tau_{ak}^{w-1}(h)) \cdot q_w(\tau_{ak}^{w-1}(h)) \cdot \delta_{ak}^w \cdot \Delta t \quad (2)$$

と表現することができる。さらに、リンク利用率 $p_{aw}(h_r, h)$ を、OD ペア w の起点を時間区間 h_r に出発した交通が時間区間 h にリンク a に流入する割合と定義すると、式(1)の関係は次式のよ

$$v_a(h) \cdot \Delta t = \sum_w \sum_{h_r=1}^H p_{aw}(h_r, h) \cdot q_w(h_r) \cdot \Delta t \quad (3)$$

3.2 経路選択確率の推定

前節で定式化した式(2)あるいは(3)が、OD 交通量を推定する場合に満たすべき制約条件となるのであるが、これらの制約条件式の中には、経路選択確率 $p_{kw}(h_r)$ あるいはリンク利用率 $p_{aw}(h_r, h)$ が含まれているので、これらの量を評価しておく必要がある。これまでのところ、利用者の経路選択行動については未知の部分が多く、経路選択確率の推定には確立された方法があるとは言えない。したがって、基本的には対象地域における利用者行動に基づいて時間的に変化する経路選択確率を、何らかの方法によって別途推定しておく必要がある。本研究では、以下に一例として、経路選択に大きな影響を及ぼすと考えられるリンク旅行時間に基づいた経路選択確率の推定方法について考察することとする。

まず、利用者の経路選択確率を次のように仮定する。

$$p_{kw}(h_r) = \frac{\exp(-\theta C_{kw}(h_r))}{\sum_m \exp(-\theta C_{mw}(h_r))} \quad (4)$$

ここに、 θ はロジットモデル型分布のパラメー

タであり、外生的に利用者の経路選択行動に基づいて与える必要がある。リンク a の時間区間 h の不効用 $C_a(h)$ はリンク旅行時間 $T_a(h)$ の関数として表せるものとし、OD ペア w を h_r に出発して経路 k をとる場合の不効用 $C_{kw}(h_r)$ はその経路を構成するリンクの不効用の線形和として表現できるような場合について考える。

ここで、通常の2次元ネットワークに時間軸を追加した3次元時空間ネットワーク(図-2)を考える。実ネットワーク上の1本のリンク a を、図-2のように流入時間区間の複数のリンクに分解する。横軸に距離、縦軸に Δt 単位の時間軸をとると、分解された各リンクは時間軸方向にリンク旅行時間分増加する単調増加型のリンクとして表される。この時、リンクの傾きは速度を表す。(この際、リンクの本数を有限個に抑えるために、リンク旅行時間 $T_a(h)$ を Δt を単位として与えておく必要がある。実際のネットワークにおいては、リンクの長さにもよるが、十分に旅行時間の変化を記述できる程度に細かく Δt を設定しなければならない。)ただし、各ODペアに関して終点ノードを唯一に特定するために、図-2のように各ODの終点にはダミーリンクを設け、実ネットワークの終点 s に対応したノード S に接続する。

ここで、定式化に用いた変数について、この時空間ネットワークの起点 R 、リンク A 、ODペア W ともとのネットワークの変数との対応を考える。時空間ネットワークにおける起点 R を決

めることは、実ネットワークにおける起点 r と出発時間区間 h_r を同時に決めることであり、リンク A を決めることは、実ネットワークのリンク a と流入時間区間 h を同時に決めることに、またODペア W を決めることはもとのODペア w と起点出発時刻 h_r を決めることに等しい。

今、時空間ネットワークにおいて、あるODペア W について、そのOD交通量を1としてDial配分を行えば、ODペア W の交通量が時空間ネットワーク上のリンク A を利用する割合である p_{AW} が求められる。これは実ネットワーク上ではODペア w (起点 r 、終点 s) を時間区間 h_r に出発した交通が、時間区間 h にリンク a に流入する割合であるリンク利用率 $p_{aw}(h_r, h)$ に対応する。したがって、3次元時空間ネットワークにおけるDial配分によりリンク利用率が求められ、式(3)で表されているリンク交通量とOD交通量との関連づけができることとなる。

3.3 OD交通量の推定

ここで、交通量が観測されているリンク a について、観測リンク交通量を $\hat{v}_a(h)$ とし、真のリンク交通量 $v_a(h)$ と観測誤差 $\epsilon_a(h)$ から成り立っているとすると、式(3)は

$$\begin{aligned} \hat{v}_a(h) &= v_a(h) + \epsilon_a(h) \\ &= \sum_{w, h_r} p_{aw}(h_r, h) \cdot q_w(h_r) + \epsilon_a(h) \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

となる。ただし、リンク交通量は必ずしもすべてのリンクで観測されていなくてもよい。ここで、 $p_{aw}(h_r, h)$ を3.2節で示した方法などを用いて推定し、式(5)を $q_w(h_r)$ に関する制約条件としてOD交通量を推定するのであるが、未知変数 $q_w(h_r)$ 、 $\forall w, h_r$ の数は(ODペア数)×(対象時間区間数)となるのに対し、制約条件の数は(観測リンク数)×(観測時間区間数)となる。もし、 $\epsilon_a(h) = 0, \forall a, h$ で条件数が未知変数の数に等しいか、より多い場合は、式(5)を $q_w(h_r)$ に関して解くことにより、OD交通量を推定することができるが、一般的なネットワークの場合、制約条件数より未知変数の数が多く、さらに観測誤差も存在するため、式(5)のみではOD交通量を一意に

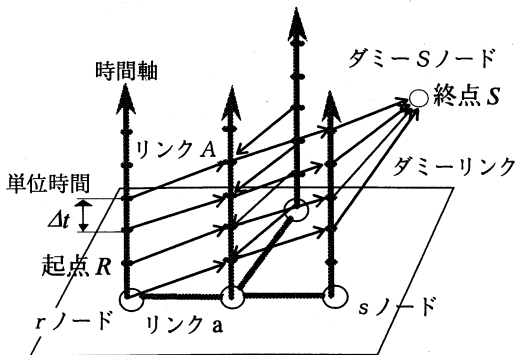


図-2 3次元時空間ネットワーク

推定することができない。

そこで、静的な OD 交通量の推定問題に提案されているエントロピー最大化法¹³⁾を時間的に拡張して適用することとする。ここで、時間区間 h_r における OD ペア w の既存の OD 交通量を $\bar{q}_w(h_r)$ とすると、推定 OD 交通量 $\hat{q}_w(h_r)$ と推定リンク交通量 $\hat{v}_a(h)$ は次のように表せる¹⁴⁾。

$$\hat{q}_w(h_r) = \bar{q}_w(h_r) \prod_{a,h} X_a(h)^{p_{aw}(h_r,h)} \dots\dots\dots (6)$$

$$\hat{v}_a(h) = \bar{v}_a(h) X_a(h)^{-\frac{1}{\gamma}} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $X_a(h)$ は次の方程式を解くことにより得られるパラメータである (付録参照)。

$$\begin{aligned} & \hat{v}_a(h) X_a(h)^{-\frac{1}{\gamma}} \\ &= \sum_{w,h_r} \left\{ p_{aw}(h_r, h) \bar{q}_w(h_r) \prod_{a,h} X_a(h)^{p_{aw}(h_r,h)} \right\}, \\ & \forall a, h \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

式(8)の未知数はリンク交通量の観測数だけある $X_a(h)$ であり、式(8)も同じ数だけあるので、この非線形連立方程式を解くことによって $X_a(h)$ を求めることができる。解法としては、Murchland の方法¹³⁾の他、標準的な非線形連立方程式の解法が用いられる。

なお、拡張型エントロピー最大化法で用いられている γ は、リンク交通量の確率変動の重みを表すパラメータであり、 γ が大きいほどリンク交通量の確率変動を相対的に小さく評価し、 $\gamma = \infty$ の場合は観測誤差を考慮しない通常のエントロピー最大化法と同じになる¹⁴⁾。

以上 OD 交通量 $\bar{q}_w(h_r)$ の推定方法をまとめると、

- (1) $p_{aw}(h_r, h)$ を $T_a(h)$ に基づき Dial 配分より推定する。
- (2) $\hat{v}_a(h)$ と $\bar{q}_w(h_r)$ を式(8)に代入して $X_a(h)$ を解く。この際、既存の OD 情報がない $\bar{q}_w(h_r)$ については適当な値を仮定する。
- (3) $X_a(h)$, $\bar{q}_w(h_r)$, $p_{aw}(h_r, h)$ を式(6)に代入して $\hat{q}_w(h_r)$ を求める。

という手順となる。

4. モデルの適用に関する諸論

4.1 時間集約化とリンク利用率の簡略化

前章で提案したモデルでは Δt は旅行時間の変化を記述できるように細かく設定する必要があり、ネットワークの規模やリンク長などによって異なるが、数秒～数十秒のオーダーで設定する必要がある。一方、OD 交通量は 15 分～1 時間位の Δt に比較して長い時間単位で推定したい場合が多く、 Δt のような微小時間単位で OD 交通量を推定することは必ずしも有用であるとは言えない。むしろ、OD 交通量、リンク交通量について Δt のような微小時間単位での交通量の変化は傾向的な変動による要素に比べて確率的な変動による要素が大きいと考えられるため、OD 交通量の時間単位を Δt より大きく設定することが実用的である。

以下、まず時間単位 Δt を集約化してより大きな時間単位に変換する方法を述べる。さらに、3.2 節で示したリンク利用率の推定手法を利用してより簡便に集約化した時間単位でのリンク利用率を推定する手法を述べる。

まず推定したい OD 交通流率は、 $\Delta T = m \cdot \Delta t$ の間では変化しないものとし (言い換えれば OD 交通量を ΔT 間隔で推定する)、次のように Δt を m 個ずつの集約時間区間 $H(i)$ にまとめることとする。

$$\begin{aligned} H(i) &= \text{時間 } [(i-1) \cdot \Delta T, i \cdot \Delta T] \text{ に含まれる} \\ & m \text{ 個の小時間区間 } \Delta t \text{ の集合,} \\ & i=1, 2, \dots, H/m. \end{aligned}$$

集約時間区間 i に出発する OD ペア w の OD 交通流率を $Q_w(i)$ とすると、式(3)は次のようになる。

$$v_a(h) \cdot \Delta t = \sum_w \sum_i Q_w(i) \sum_{h_r \in H(i)} p_{aw}(h_r, h) \cdot \Delta t$$

さらに、リンクへの流入時刻も $\Delta T = m \cdot \Delta t$ 単位に集約時間区間 j について集約すると、

$$\sum_{h \in H(j)} v_a(h) \cdot \Delta t = \sum_w \sum_i Q_w(i) \sum_{h_r \in H(j)} \sum_{h \in H(i)} p_{aw}(h_r, h) \cdot \Delta t \quad \dots (9)$$

ここで以下のように、 $V_a(j)$, $P_{aw}(i, j)$ を定義すると、次の関係が得られる。

$$V_a(j) \cdot \Delta T = \sum_{w,i} \{P_{aw}(i, j) \cdot Q_w(i) \cdot \Delta T\} \quad \dots (10)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし, } V_a(j) &= \sum_{h \in H(j)} v_a(h) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta T} \\ &= \frac{1}{m} \sum_{h \in H(j)} v_a(h) \quad \dots (11) \end{aligned}$$

$$P_{aw}(i, j) = \frac{1}{m} \sum_{h_r \in H(i)} \sum_{h \in H(j)} p_{aw}(h_r, h) \quad \dots (12)$$

$P_{aw}(i, j)$ は集約区間 i に起点を出発する OD ペア w の交通が集約区間 j にリンク a に流入する割合を表す。なお、式(10)は式(3)と全く同様の形なので、時間単位の集約化後も前節で示した方法で OD 交通量の推定を行うことができる。

次に、集約化した時間単位によるリンク利用率を簡略化して推定する方法を検討する。基本的には 3.2 節で提案した方法により小時間区間 h_r, h について $p_{aw}(h_r, h)$ を推定することができれば、式(12)によって集約時間区間 i, j におけるリンク利用率 $P_{aw}(i, j)$ を簡単に計算することができる。しかし、この方法によると、 Δt 単位での計算を行う必要があるため、計算時間、記憶容量など実用面で問題がある。そこで、簡略化の基本的な考え方として、一定時間間隔ではリンク利用率は変化しないとして推定し、計算量を軽減する。

まず、リンク利用率が変化しない一定時間間隔単位として $\Delta \tau = c \cdot \Delta t$ を導入する。ただし、 c は正の整数で、 $\Delta \tau$ に含まれる小時間区間 Δt の個数を表す。ここで、 $\Delta \tau \leq \Delta T$ であり、かつ ΔT は $\Delta \tau$ の整数倍で表すことができるものとする。なお、以降の説明では、 Δt を単位とする時間区間を小時間区間、 $\Delta \tau$ を中時間区間、 ΔT を大時間区間または集約時間区間と表現することにす。時間単位 $\Delta \tau$ を単位とする中時間区間を順に $n=1, 2, \dots, H/c$ とすると、中時間区間 n は小時間区間 $[(n-1)c+1, nc]$ で構成される。また、

中時間区間 n に含まれる小時間区間の集合を $N(n)$ 、中時間区間 n の始まりの小時間区間を $s(n) = (n-1)c+1$ とする。

ここで、起点出発時刻が $\Delta \tau$ 内の交通については、すべて等しいリンク利用率が維持されると仮定する。すなわち、 $p_{aw}(s(n)+l, h) = p_{aw}(s(n), h-l)$, $l=0, 1, 2, \dots, c-1$ とすると、

$$\begin{aligned} p_{aw}(h_r, h) &= p_{aw}(s(n)+l, h) = p_{aw}(s(n), h-l), \\ l &= h_r - s(n), h_r \in N(n), \forall a, w, n, h \quad \dots (13) \end{aligned}$$

となる。したがって、まず任意の中時間区間 n の始まりの小時間区間 $s(n)$ に起点を出発する交通についてのみリンク利用率を推定しておけば、式(13)により全小時間区間ごとのリンク利用率 $p_{aw}(h_r, h)$ を推定することができ、さらに式(12)より集約時間単位ごとのリンク利用率 $P_{aw}(i, j)$ を推定することができる。

4.2 集約された既知の OD 交通量のモデルへの取り込み

3.3 節で示した OD 推定手法ではターゲットとして既存の OD 交通量 $\bar{q}_w(h_r)$ を必要とした。しかし、現実的には推定したいゾーンレベル及び時間単位をもつ OD 交通量がない場合が多い。一方、過去の交通調査によって、発生・集中交通量やより広い OD ゾーンでの日 OD 交通量などが存在する場合が多い。これらの情報をモデルに取り込むことができれば、モデルの推定精度を向上させる意味でも非常に有用であると考えられる。本節では、これらの時間的、空間的に集約された OD 交通量の情報をモデルに取り込む方法を述べる。

ここで、OD 交通量 $q_w(h_r)$ を OD ペア w や時間区間 h_r などについて集約して表現される交通量を集約 OD 交通量と呼ぶものとする。このような OD 交通量の時間的・空間的な集約化は、すべて最小単位の OD 交通量 $q_w(h_r)$ の線形和で表される。ここで、 u は集約 OD 交通量に付けた番号、 U は集約 OD 交通量の集合とし、集約 OD 交通量を g_u , $u \in U$ とする。また、 $\phi(u) =$ 集約 OD 交通量 g_u , $u \in U$ に含まれる OD ペアと出発時刻 (w, h_r) の集合を表す。このとき、集約 OD 交通

量は $q_w(h_r)$ の線形和として次のように表せる。

$$g_u = \sum_{w, h_r} a_u(w, h_r) \cdot q_w(h_r) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$a_u(w, h_r) = g_u$ に対する $q_w(h_r)$ の寄与を表すパラメータであり、 $(w, h_r) \in \phi(u)$ の場合は1, その他の場合0となる変数

さて、集約 OD 交通量について観測などによる既知の情報をモデルに取り込む場合、既存の集約 OD 交通量を \hat{g}_u とし、 \hat{g}_u と真の集約 OD 交通量 g_u との偏差を η_u とすると、以下ようになる。

$$\hat{g}_u = g_u + \eta_u = \sum_{w, h_r} a_u(w, h_r) q_w(h_r) + \eta_u \quad \dots\dots (15)$$

式(5)と(15)を比較すると、 $\hat{v}_a(h)$ と \hat{g}_u 、 $p_{aw}(h_r, h)$ と $a_u(w, h_r)$ が対応関係にある。すなわち、式(14)で表せる制約条件に対しては、式(6)、(7)、(8)の $p_{aw}(h_r, h)$ を $a_u(w, h_r)$ に、 $\hat{v}_a(h)$ を \hat{g}_u に置き換えれば式(8)より、

$$g_u \cdot X_u^{-\frac{1}{\tau}} = \sum_{w, h_r} \left\{ a_u(w, h_r) \bar{q}_w(h_r) \prod_u X_u^{a_u(w, h_r)} \right\}, \quad \forall u$$

となり、これより X_u を解くことができる。そして、求められた $X_a(h)$ と X_u を次のように X_u に関する項を加えた式(6)に代入して $\bar{q}_w(h_r)$ を求めることができる。

$$\bar{q}_w(h_r) = \bar{q}_w(h_r) \prod_{a, h} X_a(h)^{p_{aw}(h_r, h)} \cdot \hat{g}_u \prod_u X_u^{a_u(w, h_r)}$$

5. 適用実験

5.1 仮想ネットワークによる適用実験

ここでは、図-3のような仮想ネットワークを用いてモデルの適用実験を行った。時間単位は $\Delta t = 10$ 秒、 $\Delta \tau = 30$ 分、 $\Delta T = 1$ 時間とし、1時間単位の OD 交通量を推定するものとする。実験は、以下の手順で行った。まず、各リンクの旅行時間を Δt 単位で与え、これを用いて $\Delta \tau$ ごとに Dial 配分を行い、式(13)、(12)によりリンク利用率を ΔT ごとに推定する。ここで、Dial パラメータは $\theta = 0.001 [1/\text{秒}]$ とした。また、リンク

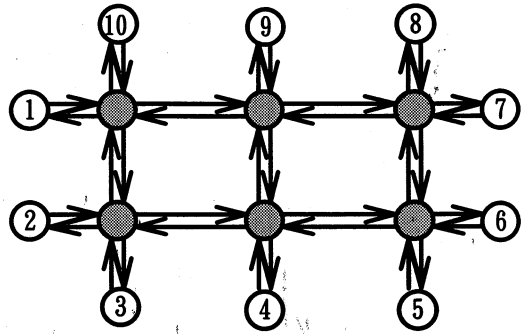


図-3 対象ネットワーク

旅行時間は 3.1 節の脚注に示した条件を満足するように与えなければならない。これを離散的に表現すれば、

$$T_a(t + \Delta t) \geq T_a(t) - \Delta t$$

となるので、これを満たすように設定しておく。次に、1時間単位の OD 交通量を適宜仮定し、推定したリンク利用率によりこの OD 交通量を3次元ネットワーク上の各リンクに配分し、各リンクの ΔT 単位の時間別交通量を求める。このようにして求めたリンク利用率と時間別リンク交通量はモデルの入力情報として用いる。

さらに、時間別 OD 交通量は得られていないが日平均の OD 交通量が存在する場合を想定して、先に仮定した1時間単位の OD 交通量より日平均時間 OD 交通量を求め、既存情報として用いる。なお、日平均時間 OD 交通量に対する時間別 OD 交通量の標準偏差の割合は、約 50% となるよう設定した。

これらの情報をモデルに入力して OD 交通量を推定し、先に仮定した OD 交通量と比較してモデルの挙動を考察するものとする。なお、拡張型エントロピー最大化法のパラメータ γ の値は 1.0 とし、全リンクのすべての時間で交通量が観測されているものとした。

実験は、リンク観測交通量、既存 OD 交通量に誤差を含ませるなど幾つかの条件を設定した。リンク観測交通量については、誤差を含まない場合と、10%、20%の範囲内で誤差を含む場合の3パターンを設定した。また既存 OD 情報としては、

日平均時間OD交通量をそのまま用いる場合、10%、20%の偏差を含む場合、そして10の位を四捨五入した概算値を用いる場合の4パターンを設定した。これらのパターンを組み合わせ、9ケースについて実験を行った。

その結果として、OD交通量の仮定値と推定値の相関係数、RMSE、PRMSE (Percent RMSE) を表-1に掲げ、Case 9の相関図を図-4に示す。まず、仮定値と推定値の相関についてみると、既存のOD情報を与えない場合 (Case 1) は相関は低く、思わしくない推定結果であるものの、既存のOD情報を与えた場合 (Case 2-9) は高い相関を示しており、比較的良好な結果が得られた。これは、既存のOD情報がモデルの精度向上のために重要であることを示している。すなわち、エント

ロピー最大化法では、観測リンク交通量の精度が高い場合、残差平方和最小化法とほぼ一致するため、式(5)の制約条件を満たす多くのOD交通量セットのうちから1つを選び出す時にいかに推定すべきODに近い既存OD情報を与えるかが極めて重要なことである¹⁵⁾。

また、リンクの観測誤差の影響について考察すると、既存OD情報が正確な場合 (Case 2, 3, 4) と既存OD情報の概算値を与えた場合 (Case 7, 8, 9) は、共に観測誤差が増加するに従い相関係数が低下し、PRMSEが増加して精度が低下している。ただし、観測誤差が10%の場合は精度の低下は比較的小さい。これより、実験条件が少ないため断定はできないものの、観測誤差が小さい場合は推定精度への影響が比較的小さいものと推測される。

次に、既存OD情報の真値 (仮定値) と偏差の影響について考察する。リンク観測誤差がない場合について4つのパターンの既存OD情報を与えた (Case 2, 5, 6, 7)。これらの結果を比較すると、偏差の増加により精度が低下しており、しかも観測誤差の場合と比較すると既存OD情報の偏差が敏感に精度の低下に反応していることがわかる。

次に、本モデルによる時間変化の再現性を考察する。図-5はODペア⑥→①の時間別OD交通量を表したものである。このODペアは日平均時間交通量が対象ネットワーク中最大であり、既存の日平均時間OD交通量に正の偏差を持たせたケースである。ここで、(a)はリンク観測誤差がな

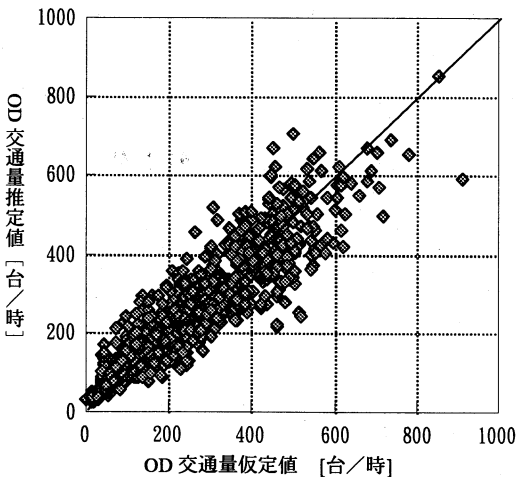
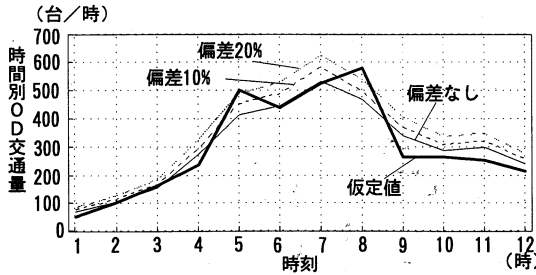


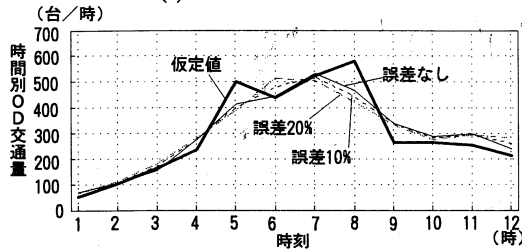
図-4 相関図 (case 9)

表-1 仮想ネットワークにおけるシミュレーション結果

	既存日平均時間 OD交通量偏差	リンク交通量	相関係数	RMSE [台/時]	PRMSE [%]
Case 1	—	誤差なし	0.456	191.6	80.5
Case 2	偏差なし	誤差なし	0.953	51.0	21.4
Case 3	偏差なし	誤差 10 %	0.950	52.0	21.8
Case 4	偏差なし	誤差 20 %	0.940	55.7	23.4
Case 5	偏差 10 %	誤差なし	0.947	52.8	22.1
Case 6	偏差 20 %	誤差なし	0.937	56.3	23.7
Case 7	概算値	誤差なし	0.925	59.9	25.2
Case 8	概算値	誤差 10 %	0.924	60.2	25.3
Case 9	概算値	誤差 20 %	0.916	63.1	26.5



(a) 既存OD交通量の偏差別



(b) リンク観測交通量の誤差別

図-5 OD 交通量の時間変化

い場合について既存 OD 情報の偏差ごとにプロットしたもの (Case 2, 5, 6), (b)は既存 OD 情報の偏差がない場合についてリンク観測誤差ごとにプロットしたもの (Case 2, 3, 4) である。これより, 若干のズレはあるものの比較的時間変化を再現できていることがわかる。ただし, (a)の場合, 既存 OD 情報の偏差の増大に伴って推定 OD の誤差は一樣に増加しているのに対し, (b)の場合はリンク観測誤差に対して, 一樣には変化していないことがわかる。

5.2 首都高速道路ネットワークへの適用

本モデルを, 時間別の OD 交通量がわかっている首都高速道路東京線ネットワークに適用した。ネットワークはノード数 215, リンク数 287, OD ペア数 38×38 で, 図-6 に示すように経路選択のない枝線部分を除いて簡略化したものを用いた。

時間単位は $\Delta t = 10$ 秒, $\Delta \tau = 30$ 分, $\Delta T = 1$ 時間で, 1 時間単位の OD 交通量を推定した。また, 車両感知器から得られた速度データとリンク長より 30 分単位の平均リンク旅行時間を計算し, Dial 配分のパラメーター θ の値は, 吉井・桑原の研究結果¹⁶⁾に基づいて $0.001 [1/\text{秒}]$ として, リンク利用率を式(13), (12)により ΔT ごとに推

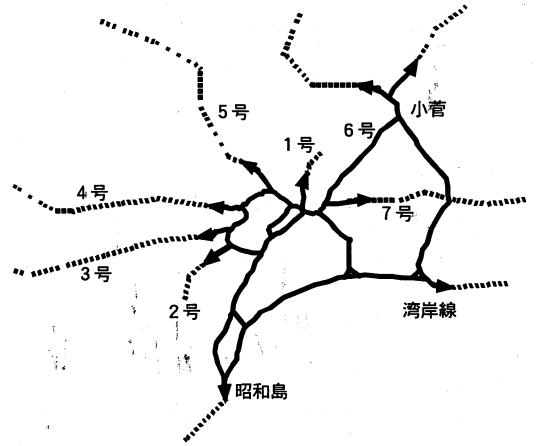


図-6 首都高ネットワーク図

定した。この際, Δt ごとにリンク旅行時間が必要であるが, 30 分単位の平均リンク旅行時間を用いて直線補間により推定した。

リンク観測交通量は, 車両感知器の交通量データを 4 時から 15 時迄の 12 時間にわたって集計して, 1 時間単位のリンク観測交通量とし, 対象ネットワーク内のすべてのリンク及び時間においてリンク交通量が観測されているものとした。

観測 OD 交通量としては, 平成 2 年 10 月に行われた第 20 回交通起終点調査で得られている 1 時間単位のランプ間 OD 交通量を, 本実験のネットワークの OD にまとめなおしたものを時間別 OD 交通量とした。既存の OD 交通量情報としては, 上記の観測時間別 OD 交通量より求められた (1)日平均時間 OD 交通量 (すべての OD ペアに与える), (2)起点について集計した時間別発生交通量 (すべての起点について与える), (3)日合計 OD 交通量を (2)の時間別発生交通量の割合で時間配分した時間別 OD 交通量 (すべての OD ペアに与える) の 3 種類を用いた。なお, 拡張型エントロピー最大化法のパラメーター γ の値は, 1.0 とした。

表-2 は, 今回行った 7 つのケースについて, 実験条件, 相関係数, RMSE, PRMSE をまとめたものである。また, Case 4 について OD 交通量の観測値と推定値の関係を表したのが図-7 である。相関係数で見ると, 既存 OD 情報を与え

表-2 首都高速道路ネットワークにおけるシミュレーション結果

	既存 OD 情報	集約 OD 情報	相関係数	RMSE (台/時)	PRMSE (%)
Case 1	なし	なし	0.357	97.5	231
Case 2	日平均時間 OD	なし	0.806	64.3	152
Case 3	なし	時間別発生交通量	0.451	92.6	220
Case 4	日平均時間 OD	時間別発生交通量	0.869	53.7	127
Case 5	日平均時間 OD(4段階)	時間別発生交通量	0.801	69.8	166
Case 6	日平均時間 OD *	時間別発生交通量	0.884	51.4	122
Case 7	日平均時間 OD(4段階) *	時間別発生交通量	0.808	70.3	167

*各 O ノードの時間別発生交通量で時間ごとに配分したものを与える。

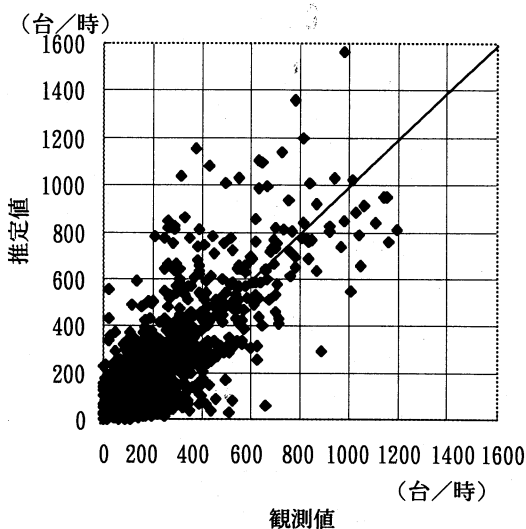


図-7 OD 交通量の観測値と推定値 (case 4)

ない場合 (Case 1, 3) は、推定結果は好ましくないものの、日平均時間 OD 交通量を与えた場合 (Case 2, 4, 5, 6, 7) は、まずまずの推定結果となっている。なお、PRMSE がいずれも 100% を超えているが、大部分を占める交通量の少ない OD ペアの誤差が影響しているものと考えられる。また、Case 2 と 4 を比較すると、集約 OD 交通量である時間別発生交通量を与えた場合はより精度の向上に寄与しており、4 段階に概算した既存 OD 交通量を与えた場合 (Case 5, 7) でも、まずまずの結果が得られている。ただし、図-7 からわかるとおり、交通量が大きいくところでは過大推定される傾向がある。これは、既存の OD 交通量は精度に対してかなりの影響力をもっているため、概算値のずれが大きいくところで推定誤差

も大きくなるためであると考えられる。

Case 4 と Case 6 はほぼ同じ程度の推定結果である。つまり、既存の OD 交通量として時間変化しない OD 交通量を与えた場合 (Case 4) と、日 OD 交通量を時間別発生交通量の比率で各時間に割り振った OD 交通量を与えた場合 (Case 6) では、今回のケースについてはあまり大きな差にならなかった。ちなみに発生交通量の変動 (時間別発生交通量の標準偏差/平均時間発生交通量) は、平均で 60% であった。両ケースの結果がほとんど変わらないということは、与える OD 交通量のパターンが重要であって、絶対量の大小はほとんど精度には影響しないということである。

時間変化の再現性を見るため、3号線→7号線、小菅→昭和島の OD ペアについて、観測値と推定値 (Case 4, 5, 6) の時間別変化をグラフにしたものが図-8, 9 である。いずれも観測値からのずれがかなり大きく、図-8 ではピーク時間がずれており、時間変化が再現できていない。また、図-9 では、時間変化はおおむね再現できているが、オーダーがかなり異なっている。

仮想ネットワークでは、OD 交通量の時間変化がかなりよく推定されていたことを考えると、首都高速道路ネットワークにおいての OD 交通量の時間変化があまりよく再現できていない最も大きな原因は、リンク利用率の推定が利用者の行動を十分に表せていないことであると思われる。

6. 結論

本研究は、簡便に観測できる路側観測交通量から、細かな街区単位のゾーンにおける時間変化す

路側観測交通量からの時間変化する OD 交通量の推定

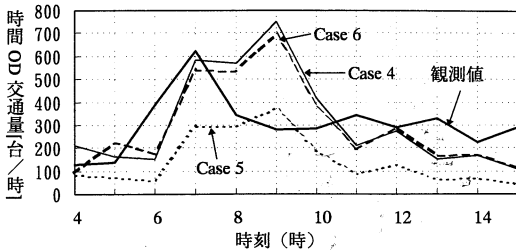


図-8 3号線から7号線へのOD交通量

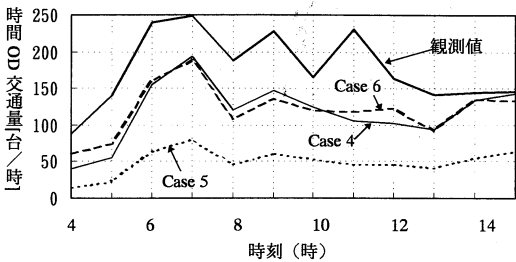


図-9 小菅から昭和島へのOD交通量

る OD 交通量を推定するモデルを提案した。まず、時間変化する OD 交通量と観測交通量の関係を、利用者の経路選択確率に基づいて関係づけ、OD 推定に当たっての制約条件を定式化した。なお、リンク旅行時間の時間変化は所与であると仮定し、時間軸を追加した 3 次元時空間ネットワークにおいて、Dial 配分を行い経路選択確率を推定した。次に拡張エントロピー最大化法を用い、求められた制約条件を満足するような、OD 交通量の推定方法を検討した。特に、時間軸を集約化してより大きい時間単位で OD 交通量を推定する方法、既存の日単位あるいは大きなゾーン単位での OD 交通量情報を利用した推定方法について提案を行った。

最後に、本モデルを仮想ネットワークと首都高速道路ネットワークに適用した。既存の OD 交通量や観測リンク交通量に、偏差・誤差を持たせ、それらの影響について考察し、モデルの有効性と今後の課題を整理した。本モデルのような既存の OD 情報を用いるモデルでは、既存の OD 情報をいかに真値に近く与えるのかが推定精度向上のためには重要である。当然のことながら真値は未知であり、実際には分析者の経験と現状の OD パタ

ーンに基づいて、OD 交通量の大小を入力する必要がある。すべての OD ペアの交通量を限られた観測交通量に基づいて推定するのであるから、このような経験に基づいた入力が必要とされることは、現段階では仕方ないと言えよう。また、OD 交通量の推定精度には、リンク利用率（経路選択確率）の推定精度が大きく影響することを示唆する結果を得た。

今後の課題としては、まず観測交通量がモデルの推定精度に与える影響や、経路旅行時間、経路選択確率などの誤差がモデルの推定精度に与える影響について、モデルの信頼性分析をより深く解析的、実験的に行う必要がある。また、モデルの信頼性分析に基づき、観測場所、観測方法などを検討する手法も、今後の研究課題である。

なお、本研究の実施に当たり、データの提供にご協力下さった首都高速道路公団計画部調査課の皆様がこの場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) M. Cremer and H. Keller; "A New Class of Dynamic Methods for the Identification of Origin-Destination Flows", *Transp. Res.* Vol. 21 B No. 2, pp. 117~132, 1987.
- 2) N. L. Nihan and G. A. Davis; "Recursive Estimation of Origin-Destination Matrices From Input/Output Counts", *Transp. Res.* Vol. 21 B No. 2, pp. 149~163, 1987.
- 3) N. L. Nihan and G. A. Davis; "Application of Prediction-Error Minimization and Maximum Likelihood to Estimate Intersection O-D Matrices from Traffic Counts", *Transp. Sci.* Vol. 23 No. 2, pp. 77~90, 1989.
- 4) H. Keller, G. Ploss; "Real-Time Identification of O-D Network Flows from Counts for Urban Traffic Control", *Transp. and Traffic Theory*, pp. 267~284, 1987.
- 5) M. G. H. Bell; "The Real Time Estimation of Origin-Destination Flows in the Presence of Platoon Dispersion", *Transp. Res.* Vol. 25 B Nos. 2/3, pp. 115~125, 1991.
- 6) M. Bell, D. Inaudi, J. Lange, M. Maher; "Techniques for the Dynamic Estimation of O-D Matrices in Traffic Networks", pp. 1040~1056, 1991.
- 7) 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.
- 8) S. Nguyen, E. Morello and S. Pallottino; "Discrete Time Dynamic Estimation Model for Passenger Origin/destination Matrices on Transit Networks", *Transp. Res.* Vol. 22 B No. 4, pp. 251~260, 1988.
- 9) E. Cascetta, D. Inaudi and G. Marquis; "Dynamic Estimators of Origin-Destination Matrices Using Traffic

- Counts”, Transp. Sci. Vol. 27 No. 4, pp. 363~373, 1993.
- 10) 楊海・飯田恭敬・佐佐木綱; “観測リンク交通量を用いた時間OD交通量の動的推計法”, 土木計画学研究・講演集 No. 13, pp. 599~606, 1990.
 - 11) K. Ashok, M. E. Ben-Akiva; “Dynamic Origin-Destination Matrix Estimation and Prediction for Real-Time Traffic Management Systems”, Transp. and Traffic Theory, pp. 465~484, 1993.
 - 12) 松本幸正, 藤田素弘, 松井寛; “リンク交通量に基づく時間OD交通量の推定手法に関する研究”, 交通工学, Vol. 29, No. 3, pp. 11~19, 1994.
 - 13) H. J. Van Zuylen, L. G. Willumsen; “The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts”, Transp. Res. Vol. 14 B, pp. 281~293, 1980.
 - 14) L. G. Willumsen; “Estimating time-dependent trip matrices from traffic counts”, Proc. of the 9th International Symposium on Transp. and Traffic Theory, pp. 397~411, 1984.
 - 15) M. G. H. Bell; “Log-linear models for the estimation of origin-destination matrices from traffic counts: An approximation. Proc. of the 9th International Symposium on Transp. and Traffic Theory, pp. 451~470, 1984.
 - 16) 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田紳之; “都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発”, 交通工学, Vol. 30, No. 1, pp. 33~41, 1995.

付録：拡張型エントロピー最大化法の導出

まず, エントロピー関数を次のようにおく。

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

$$\cdot \left[\frac{v!}{\prod_{a,h} v_a(h)! \prod_{w,h_r} \left(\sum_{a,h} \bar{v}_a(h) \right)^{v_a(h)}} \right]^r$$

ただし, $q = \sum_{w,h_r} q_w(h_r), v = \sum_{a,h} v_a(h)$
 ここで, q, v は変化しないと仮定し,
 $\log P \approx - \sum_{w,h_r} \{q_w(h_r) \log q_w(h_r) - 1\}$
 $+ \sum_{w,h_r} q_w(h_r) \log \bar{q}_w(h_r)$
 $+ \gamma \left[- \sum_{a,h} \{v_a(h) \log v_a(h) - 1\}$
 $+ \sum_{a,h} v_a(h) \log \bar{v}_a(h) \right] + constant \dots\dots\dots (1)$

これを次の条件の下で最大化する。
 $v_a(h) = \sum_{w,h_r} p_{aw}(h_r, h) q_w(h_r) \dots\dots\dots (2)$

ここでラグランジアン L を次のようにおくことができる。
 $L = \log P + \sum_{a,h} \lambda_a(h) \left\{ v_a(h) - \sum_{w,h_r} p_{aw}(h_r, h) q_w(h_r) \right\}$

Kuhn-Tucker 条件より,
 $\frac{\partial L}{\partial q_w(h_r)} = -\log q_w(h_r) + \log \bar{q}_w(h_r) - \sum_{a,h} \lambda_a(h) p_{aw}(h_r, h) = 0 \dots\dots\dots (3)$

$$\frac{\partial L}{\partial v_a(h)} = -\gamma \log v_a(h) + \gamma \log \bar{v}_a(h) + \lambda_a(h) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで, $X_a(h) = \exp[-\lambda_a(h)]$ において, 式(3), (4)を整理すると, 推定値 $\bar{q}_w(h_r), \bar{v}_a(h)$, は次のようになる。

$$\bar{q}_w(h_r) = \bar{q}_w(h_r) \prod_{a,h} X_a(h)^{p_{aw}(h_r, h)} \dots\dots\dots (5)$$

$$\bar{v}_a(h) = \bar{v}_a(h) X_a(h)^{-\frac{1}{\gamma}} \dots\dots\dots (6)$$

なお, $X_a(h)$ は, 式(5), (6)を式(2)に代入して,
 $\bar{v}_a(h) X_a(h)^{-\frac{1}{\gamma}} = \sum_{w,h_r} p_{aw}(h_r, h) \bar{q}_w(h_r) \prod_{a,h} X_a(h)^{p_{aw}(h_r, h)}$
 を解くことによって得られる。

(1995年9月20日受付)
 (1996年9月17日再受付)

