

観測リンク交通量を用いた時間 OD交通量の動的推計法

DYNAMIC ESTIMATION OF REAL TIME OD TRIP MATRIX FROM TRAFFIC COUNTS

楊 海*・飯田恭敬**・佐佐木綱**

By Hai YANG, Yasunori IIDA and Tsuna SASAKI

A dynamic traffic demand estimation model is presented to estimate real-time distribution of OD trip matrix using time-series of traffic counts. The variation of OD traffic demand over time is explicitly treated as a dynamic process. The proposed model is based on minimizing the integrated squared error between observed and predicted link traffic flows over the period of observation. An efficient solution method is developed by means of Fourier transformation and tested by a numerical simulation experiment with hypothetical data.

Keywords: dynamic estimation, time-dependent OD trip matrix
integrated squared error, Fourier transformation.

1. はじめに

近年の情報化時代にもなう交通情報提供、交通制御といった交通運用を行なうには、交通需要の時間変動を反映したきめ細かい時間OD交通量が必要となろう。すなわち、従来の交通流の定常性を前提とした静的交通需要推計モデルでは、交通状態変化に対応したレベルの高い交通運用サービスを提供することが困難であり、時間変動する交通需要の推計が可能な動的モデルの開発が望まれている。

本研究はこのような背景のもとに、道路網上のいくつかの地点で時間単位の交通量観測データが得られた場合のOD交通量と発生交通量の時間分布を推計しようとするものである。本研究においては、交通需要の時間的な変化を明示的に考えるために、交通需要を時間的連続関数としてとらえ、各観測点における観測交通量と推計交通量の二乗残差積分和を最小にするようにOD交通量の時間分布を推計する。本研究の最終的の目的は、トリップの出発時間と道路網

上の交通流の間に存在する時間的および空間的な動的関係を記述することにより、トリップの出発時間の変化による排気ガス、騒音等の沿道環境影響の評価、交通制御、時差出勤などの各種交通運用計画の策定、実施効果評価等に役立てることにある。

2. 従来の研究と本研究の概要

観測リンク交通量に基づいてOD交通量を推計することは、比較的少ない費用と労力で交通量観測データからOD交通量の構造変化を検出できるところに特徴があり、これまでに数多くのモデルが提案されている。これらのモデルを問題の性質により分類すると、(1)一日についてのOD交通量とリンクフローパターンを対象とした静的な推計モデル^{1)~5)}と、(2)時間単位の観測交通量から時間別OD交通量を推計する動的モデル^{6)~10)}の2つに大別される。前者は交通システムの計画と設計等に役立てようとするものである。また、後者は交通制御、経路誘導などへの情報提供を目的とし、単個交差点を対象としたモデルと一般ネットワークを対象としたモデルとさらに2つ分類される。

Cremer and Keller⁹⁾, Nihan and Davis¹⁰⁾は単個交差点を対象として、流入・流出交通量の時系列

* 学生会員 工修 京都大学大学院 工学研究科
博士課程 (〒606 京都市左京区吉田本町)

**正会員 工博 京都大学教授 工学部 交通土木工学教室 (同上)

観測データから右左折直進交通量比率の時系列パターンを動的に推計する方法を提案している。また、ネットワークレベルでのOD交通量を推計するために、Willumsen⁽⁶⁾ および Nguyen *et al*⁽⁷⁾ は、考察対象となる時間を有限個の時間帯に分割し、従来の静的な場合を対象としたOD交通量を推計するためのエントロピー最大化モデル⁽¹⁾ を各時間帯に拡張して時間帯別OD交通量の推計を試みた。ただし、Nguyenのモデルにおいては、交通混雑が走行時間に与える影響を無視し、各時間帯の吸収トリップが前の時間帯で観測リンクを通過するかどうかを区別して、静的な場合のリンク選択率⁽³⁾ をそのまま応用している。また Willumsenの方法においては、CONTRAM⁽¹¹⁾ という交通マネジメントシミュレーションプログラム (Traffic Management Simulation Program) と ME2⁽¹⁾ (Matrix Estimation Using Maximum Entropy) を統合して、交通需要の時間変動を考えた場合の利用者経路選択をシミュレートし、時間帯別OD交通量を推計している。さらに、Southworth *et al*⁽⁸⁾ は、同様に対象時間をいくつかの時間帯に区分し、動的交通量配分アルゴリズム⁽²⁾ と観測交通量データを用いたトリップ出発時間の最大エントロピー分布モデルを提案した。

以上のように、これまでの方法は時間OD交通量の分布パターンと時間帯別の道路区間利用率の推計を必要としており、その基本的特徴は、各時間帯における各リンクでの推計交通量が観測交通量に一致することを制約条件とし、Willson⁽⁴⁾ 型のエントロピー最大化の基準により時間OD交通量を推計するところにある。

ただし、動的交通量配分を用いて時間帯別道路区間利用率を推計するという方法は非常に優れた考え方といえるが、現状では、時間帯別交通量配分モデルの今後の進展に待つところが大きい。特に動的交通量配分を推計過程のなかに取入れても、最初に交通量配分を行うための時間帯別OD交通量をどのように設定するかが問題であり、また推計された時間帯別OD交通量と設定した時間帯別OD交通量が大きく離れた場合、OD交通量推計と交通量配分を反復する必要があるため、計算量と変数が膨大であり解の収束性が必ずしも保証されない、等の課題を残している。

このように、リンク観測交通量データを用いて時間単位のOD交通量を推計することは、非常に重要で興味深い課題であり、今後の研究発展が大きく期待されている。

本研究においては、時間単位の観測交通量データを用いてOD交通量と発生交通量の時間帯別分布を推

計するモデルを提案する。OD交通量を推計する問題を動的化する際の複雑さを取り除くために、本研究では、OD交通量と発生交通量に関する時間的な連続変数を用いて、各観測点における観測交通量と推計交通量の二乗残差積分和を最小にするようにモデルの定式化を行う。また Fourier変換を用いたモデルの数値解法を考える。

3. 交通量の時間変動を考慮したOD交通量推計モデル

(1) モデルの定式化

ここでは交通需要の時間的な変動を明示的に考えるために、各ODペア間の交通量及び各観測点における観測交通量を時間の連続関数として考える。また各発生ノードから各観測点にいたるまでの所要時間を固定値とする。つまり、交通混雑が走行時間に与える影響は小さく、無視できるものとする。さらに各OD交通の経路選択は固定して考え、各起終点間の利用経路と経路選択率は走行経路調査やDial確率配分法⁽³⁾ 等により推定し、時間OD交通量を推計するにあたって先決されているものとする（これらの前提条件の仮定は現実と比べて厳しいかもしれないが、その適用範囲と緩和方法について6節で述べる）。

以下は本論文に用いられる主な変数である。

A : 観測リンクの集合である。

R, S : それぞれ発生ノードと集中ノードの集合

Q : ODペアの集合

K_{rs} : ODペアrs間の有効経路集合

δ_{akrs} : ODペアrs間の第k番目の経路がリンクaを含むとき 1、そうでないとき 0

t_{rka} : 発生ノード rから経路kに沿って、観測点aまでの所要時間。経路 k がリンクaを含まない時、 $t_{rka} = \infty$ とする

$v_a(t)$: 観測点 aにおいて観測される通過交通強度関数 (単位時間当たりの通過交通量)

$f_{rs}(t)$: rs間を ODペアとする発生ノードrからのトリップ発生交通強度関数 (単位時間当たりの発生交通量)

p_{krs} : ODペアrs間の交通量の経路kを利用する比率

いま発生ノードrからのトリップが経路kに沿って観測点aに到達するのに走行時間 t_{rka} がかかるため、もし時刻 tで観測点 aにおいて観測されているならば、時刻 $(t - t_{rka})$ でノードrから出発しなければならない。よつて、観測点 aにおける任意時刻 tでの単位時間通過交通量 $v_a^*(t)$ は、

$$v_a^*(t) = \sum_{rs \in Q} \sum_{k \in K_{rs}} f_{rs}(t - t_{rka}) p_{krs} \delta_{akrs} \quad (1)$$

$$\forall a \in A, \quad t_0 \leq t \leq t_1$$

と表される。ここに、 $[t_0, t_1]$ は考察期間となる観測時間間隔である。

観測点 a における推計交通量と観測交通量の間の誤差関数(*error function*)を $\bar{v}_a(t)$ とすると、

$$\bar{v}_a(t) = \begin{cases} \sum_{rs \in Q} \sum_{k \in K_{rs}} f_{rs}(t - t_{rka}) p_{krs} \delta_{akrs} - v_a(t) & \text{for } t_0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & \text{for } t < t_0 \text{ or } t > t_1 \end{cases} \quad (2)$$

$\forall a \in A$

となる。ここでは非観測期間の交通量が考察対象外であるため、 $t < t_0$ また $t > t_1$ においては、誤差関数値 $\bar{v}_a(t) = 0$ とする。

したがってリンクフローの推計値と観測値が等しくなるように、その二乗残差積分和 (*integrated squared error*) を最小にするように時間OD交通量を推計できる。

$$\begin{aligned} \text{Min } E[f_{rs}(t)] &= \sum_{a \in A} \int_{t_0}^{t_1} |\bar{v}_a(t)|^2 dt \\ &= \sum_a \int_{t_0}^{t_1} \left\{ \sum_{rs \in Q} \sum_{k \in K_{rs}} f_{rs}(t - t_{rka}) p_{krs} \delta_{akrs} - v_a(t) \right\}^2 dt \end{aligned} \quad (3)$$

以上の定式化においては、時間遅れ(*time delay*) t_{rka} ($r \in R, a \in A$)が含まれているので、直接に時間OD交通量 $f_{rs}(t)$, ($r \in R, s \in S$)を求めることが困難であるため、ここではモデルにおける被積分関数のフーリエ変換^{15), 16)} (*Fourier transform*)を考える。

$F_{rs}(t)$, $V_a(t)$ をそれぞれ強度関数 $f_{rs}(t)$, $v_a(t)$ の *Fourier* 変換とする、

$$F_{rs}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i2\pi xt} f_{rs}(t) dt \quad (4)$$

$$V_a(x) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i2\pi xt} v_a(t) dt \quad (5)$$

ここに $i = \sqrt{-1}$ が虚数単位を表している。

また式(2)で示されている誤差関数 $\bar{v}_a(t)$ の *Fourier* 変換を $\bar{v}_a(x)$ とすると、*Fourier* 変換に関する加法定理と推移定理から

$$\bar{v}_a(x) = \sum_{rs \in Q} \sum_{k \in K_{rs}} p_{krs} \delta_{akrs} e^{-i2\pi x t_{rka}} F_{rs}(x) - V_a(x) \quad (6)$$

となる。

$\bar{v}_a(t)$ が実関数であり、また $t < t_0$ と $t > t_1$ において $\bar{v}_a(t) = 0$ であるので、 $\bar{v}_a(t)$ の取り扱い時間領域(*time domain*) $[t_0, t_1]$ にわたる積分を無限大まで広げていくと、

$$\int_{t_0}^{t_1} |\bar{v}_a(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\bar{v}_a(t)|^2 dt \quad (7)$$

と書ける。

さらに *Fourier* 変換に関する *Parseval* の等式により

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\bar{v}_a(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\bar{v}_a(x)|^2 dx \quad (8)$$

が得られる。

以上の関係式を用いて目的関数(3)は、以下のような問題 P1 に変換できる。

P1: OD交通量の時間分布推計

$$\begin{aligned} \text{Min } E[f_{rs}(t)] &= \sum_{a \in A} \int_{t_0}^{t_1} |\bar{v}_a(t)|^2 dt \\ &= \sum_a \int_{-\infty}^{\infty} \left| \sum_{rs \in Q} \sum_{k \in K_{rs}} p_{krs} \delta_{akrs} e^{-i2\pi x t_{rka}} F_{rs}(x) - V_a(x) \right|^2 dx \end{aligned} \quad (9)$$

したがって以上の最小化問題によって関数 $F_{rs}(x)$ ($r \in R, s \in S$)を求めることができれば、次の *Fourier* 変換の逆変換(*inverse transform*)により、対象時間領域における時間OD交通量 $f_{rs}(t)$ が求められる。

$$f_{rs}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi xt} F_{rs}(x) dx \quad (10)$$

定式化(9)においては、独立な観測リンク数がODペア数より少ない場合、モデルが推計不能となる。この場合、既存OD交通量(パーソントリップ調査、自動車OD調査等のサンプル調査により)を用いてあるいは他の何らかの方法で目的地選択確率(OD推移確率) q_{rs} ($\sum_s q_{rs} = 1.0$)を求めることができれば、トリップの発生交通強度(ここでは単位時間あたりの発生トリップ数と定義する) $f_r(t)$ を未知関数とした定式化が可能である。この場合未知変数がかかなり少なくなり、発生交通量の数だけ観測リンクがあれば、モデルが推計可能となる。

ここでは簡単のため、目的地選択確率 q_{rs} ($r \in R, s \in S$)を固定値として用いる。時間OD交通量 $f_{rs}(t)$ は、ノード r のトリップ発生強度 $f_r(t)$ を用いて、

$$f_{rs}(t) = f_r(t) q_{rs} \quad t_0 \leq t \leq t_1 \quad \forall r \in R, s \in S \quad (11)$$

と表される。

式(11)を用いた発生交通量の時間分布推計モデルは、次のような問題 P2 に示される。

P2: 発生交通量の時間分布推計

$$\begin{aligned} \text{Min } E[f_r(t)] &= \sum_{a \in A} \int_{t_0}^{t_1} |\bar{v}_a(t)|^2 dt \\ &= \sum_a \int_{-\infty}^{\infty} \left| \sum_{rs \in Q} \sum_{k \in K_{rs}} q_{rs} p_{krs} \delta_{akrs} e^{-i2\pi x t_{rka}} F_r(x) - V_a(x) \right|^2 dx \end{aligned} \quad (12)$$

ここに関数 $F_r(x)$ ($r \in R$)は、起点ノード r におけるト

リップ発生強度関数 $f_r(t)$ の Fourier変換である。

したがって、式(12)より関数 $F_r(x)$ が求まれば、Fourier変換の逆変換を施すことにより、各発生ノードにおける発生交通量の時間分布を推計できる。

(2) モデルに関する検討

1) 定式化P1及びP2において、目的地選択確率と経路選択確率を固定値として取り扱っている。OD分布パターンと起終点間の経路選択率にあまり時間的な変化がなければ、交通量観測データから交通需要構造の時間的な変化を検出することに適用できるといえる。ODパターンと経路選択率の時間変化を無視できない場合、目的地選択率と経路選択率を時間の変数として与えても、モデルの数値計算は可能であると思われる。ただし、そのために時間単位に変化するOD分布パターンならびに経路選択率を何らかの方法で別個に推計する必要がある。この方法についての詳細内容については別の機会にゆずる。なお、これに関して飯田・高山らの既存研究¹⁷⁾がある。

2) モデルを実際に適用するにあたって、まず考察対象となる時間領域 $[t_0, t_1]$ の取り方であるが、ここでまず考えられる観測システムの最大遅れ時間 $\tau_{\max}$ (maximum delay time)と最小遅れ時間 $\tau_{\min}$ (minimum delay time)をそれぞれ次のように定義しておく。

$$\tau_{\max} = \max_r \max_k \max_a t_{rka} \quad (13)$$

$$\tau_{\min} = \min_r \min_k \min_a t_{rka} \quad (14)$$

また

$$T_0 = t_0 - \tau_{\max}, \quad T_1 = t_1 - \tau_{\min} \quad (15)$$

とする。

明らかに、時刻 T_0 以前で各発生ノードから出発したトリップは、観測時間領域 $[t_0, t_1]$ でいずれの観測点を通過しない、つまりどの観測点においても観測されない。したがって、時刻 T_0 を時間軸 t の原点として考える。一方、Fourier数値解析上の都合により、全観測時間領域 $[t_0, t_1]$ における時間OD交通量が計算されるが、時間遅れの存在によって、 $[T_1, t_1]$ の間で出発したトリップが $[t_0, t_1]$ で観測されていないため、時間領域 $[t_0, t_1]$ に含まれる時間間隔 $[T_1, t_1]$ において時間OD交通量の推計精度が悪くなると予想される。したがって、信頼度の高い時間OD交通量を得るために、交通量観測期間を推計すべきOD交通量の時間間隔より長くとるべきである。

4. モデルの数値解法

OD交通量の時間分布を推計する定式化(9)またはトリップ発生の時間分布を推計する定式化(12)は、

制約条件なしの複素関数に関する積分最小化問題である。特別な場合ではない限り、強度関数 $f_r(t)$ 、 $f_r(t)$ を解析的に求めることはできない。ここではFourier変換 $F_{rs}(t)$ 、 $F_r(t)$ の数値解法を用いてモデルを解くことにする。また高速Fourier数値変換によって強度関数の分布を求める。

定式化(9)と(12)の数値解法には本質的な相違はないが、ここでは定式化(12)のみを対象としてモデルの数値解法を考える。いま複素関数 $G_{ar}(x)$

$$G_{ar}(x) = \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}} q_{rs} p_{krs} \delta_{akrs} e^{-i2\pi x t_{rka}} \quad \forall a \in A, r \in R \quad (16)$$

とおくと、式(16)を(12)に代入すれば、

$$\text{Min } E[f_r(t)] = \sum_{a \in A} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \sum_{r \in R} G_{ar}(x) F_r(x) - V_a(x) \right|^2 dx \quad (17)$$

となる。

式(17)において $(-\infty, +\infty)$ の範囲での積分を取り扱うものであるが、これは現象が無限時間続くことを意味するものではない。実際の数値計算においては有限Fourier変換を用いて、時間領域 $[t_0, t_1]$ に対応した適当な有限区間 $[a, b]$ における複素関数 $F_r(x)$ の離散的な有限個の標本値を求めれば十分である。

いま閉区間 $[a, b]$ を M 個の部分区間に分ける。各部分区間の中間点の座標を $x_0, x_1, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_{M-1}$ とする。複素関数 $G_{ar}(x)$ 、 $F_r(x)$ 、 $V_a(x)$ の各部分区間の中央値を $G_{ar}(x_m)$ 、 $F_r(x_m)$ 、 $V_a(x_m)$ ($m=0, 1, \dots, M-1$)を用いると、式(17)の積分の近似値は、次のような数値積分で与えられる。

$$E[f_r(t)] = \sum_{a=1}^P \sum_{m=0}^{M-1} w_m \left| \sum_{r=1}^N G_{ar}(x_m) F_r(x_m) - V_a(x_m) \right|^2 \quad (18)$$

ここに、 P, N はそれぞれ観測リンク数と発生ノード数であり、また重み w_m は用いられる特定の積分則に依存する実定数である。

さらに $\text{Re}[\cdot]$ 、 $\text{Im}[\cdot]$ をそれぞれ複素数の実部と虚部として

$$\begin{aligned} & \left| \sum_{r=1}^N G_{ar}(x_m) F_r(x_m) - V_a(x_m) \right|^2 \\ &= \text{Re} \left[\sum_{r=1}^N G_{ar}(x_m) F_r(x_m) - V_a(x_m) \right]^2 \\ &+ \text{Im} \left[\sum_{r=1}^N G_{ar}(x_m) F_r(x_m) - V_a(x_m) \right]^2 \quad (19) \end{aligned}$$

という関係式を用いると、式(18)の $F_r(x_m)$ ($r \in R, m = 1, 2, \dots, M-1$)に関する最小化問題は、次のような形の線形最小二乗法問題に帰着することになる。

$$\min_{u_j} \sum_{k=1}^{2PM} \left[\sum_{j=1}^{2NM} c_{kj} u_j - d_k \right]^2 \quad (20)$$

このとき、複素関数 $G_{ar}(x)$, $F_r(x)$, $V_a(x)$ を等間隔にサンプリングして w_m を目的関数から除外しても良い。また c_{kj} , d_k は実定数であり、 u_j は求めるべき実数パラメータである。

$$u_j = \begin{cases} \text{Re}[F_r(x_{m-1})] & j=2M(r-1)+2m-1 \\ \text{Im}[F_r(x_{m-1})] & j=2M(r-1)+2m \\ m=1, 2, \dots, M, r=1, 2, \dots, N \end{cases}$$

$$d_k = \begin{cases} \text{Re}[V_a(x_{m-1})] & k=2M(a-1)+2m-1 \\ \text{Im}[V_a(x_{m-1})] & k=2M(a-1)+2m \\ m=1, 2, \dots, M, a=1, 2, \dots, P \end{cases}$$

実係数 c_{kj} ($k=1, 2, \dots, 2PM$, $j=1, 2, \dots, 2NM$) は複素関数 $G_{ar}(x_{m-1})$ ($a \in A, r \in R, m=1, 2, \dots, M$) の実部と虚部から定まる定数である。

$$c_{kj} = \begin{cases} \text{Re}[G_{ar}(x_{m-1})] & k=2M(a-1)+2m-1, j=2M(r-1)+2m-1 \\ -\text{Im}[G_{ar}(x_{m-1})] & k=2M(a-1)+2m-1, j=2M(r-1)+2m \\ \text{Im}[G_{ar}(x_{m-1})] & k=2M(a-1)+2m, j=2M(r-1)+2m-1 \\ \text{Re}[G_{ar}(x_{m-1})] & k=2M(a-1)+2m, j=2M(r-1)+2m \\ m=1, 2, \dots, M, r=1, 2, \dots, N, a=1, 2, \dots, P \end{cases}$$

係数 c_{kj} からなる $(2PM \times 2NM)$ 行列を C とし、またベクトル $U = (u_1, u_2, \dots, u_{2NM})^T$, $D = (d_1, d_2, \dots, d_{2PM})^T$ とすると、最小化の必要条件により、式(20)を最小化する U^* はつぎのように求められる。

$$U^* = (C^T C)^{-1} C^T D \quad (21)$$

したがって、 M 個の代表座標点 $(x_0, x_1, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_{M-1})$ における複素関数 $F_r(x_m)$ ($r \in R$) の値を求めれば、離散フーリエ変換を施すことにより、トリップ発生強度 $f_r(t)$ が求められる。

以上の考え方に基づいて、離散 Fourier 変換を用いた求解のアルゴリズムは次の step1~step4 のように述べられる。ただし観測交通量が時系列データとして与えられているため、これまでに連続関数とした場合の Fourier 変換をそれに対応した離散的な有限 Fourier 変換を用いる。また t_m , x_m の代わりに、 k , m を用いてデータの番号を表す。さらに式(16)を相応の離散的な表現に書き改める。

$$G_{ar}(m) = \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}} q_{rs} p_{krs} \delta_{akrs} e^{-i2\pi m(t_{rka}/T)} \quad m=1, 2, \dots, M, a \in A, r \in R \quad (22)$$

ここに、 $T = t_1 - t_0$ 。

step. 1 考察対象となる時間領域 $[t_0, t_1]$ を適当な M 個の等間隔の時間帯に区分し、各観測点における時間帯別の交通量観測データを用いて、各時間帯における単位時間あたりの平均通過交通量 $v_a(m)$ ($m=0, 1, \dots, M-1$, $a \in A$) を求めて入力する。

step. 2 有限 Fourier 変換

$$V_a(k) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} v_a(m) e^{-i2\pi km/M} \quad k=0, 1, \dots, M-1, a \in A$$

を用いて、 $V_a(k)$ の実部と虚部を求め、ベクトル $D = (d_1, d_2, \dots, d_{2PM})^T$ を決定する。また式(22)で定義される関数関係式に基づいて、係数行列 C を作る。

step. 3 式(21)により、ベクトル U^* を計算し、複素数 $F_r(m)$ ($m=0, 2, \dots, M-1$, $r \in R$) の実部と虚部を求める。

step. 4 Fourier 変換の逆変換

$$f_r(m) = \sum_{k=0}^{M-1} F_r(k) e^{i2\pi mk/M} \quad m=0, 1, \dots, M-1, r \in R$$

により、各時間帯 m における各起点 r からのトリップ発生強度 $f_r(m)$ を求める。

5. 数値計算例

本研究で提案したモデルとその数値解法の妥当性を検証するために、Fig. 1 に示す 8 リンク、6 ノード、40D ペアの簡単なネットワークを用いて数値シミュレーションを行う。各リンクの所要時間がリンク上に示す数値であると仮定し、目的地選択確率を Table 1 に示すものとする。また各起終点間の利用経路と経路選択率は Table 2 に示すとおりとする。

本計算例では、目的地選択確率を既知として起点①、②におけるトリップの発生時間分布（出発時間分布）を推計する。独立な観測リンク数は 2 個あれば推計できる。ここでは二つの観測点 a_1 , a_2 がリンク 35 とリンク 46 の終端に設置されているとする。

いまピーク時間帯の AM 7:40~AM 9:20 を考えて、起点①、②における 1 分間単位の発生交通量を任意に設定する。これを Fig. 2 に示す。次に各時点における起点①、②の発生交通量を仮定した目的地選択確率と経路選択確率によってネットワークに割り当てる（目的地選択確率と経路選択確率はあらかじめ正確に推計されているとする）。トリップの出発時間と、起点から観測点までの移動時間に基づいて観

測点 a_1 , a_2 における交通通過強度を求める。実際には微小時間間隔についての交通量を時々刻々計測することはできるが、データ集計上の都合からここではAM7:40~AM8:00という過渡状態を除き、時間領域 AM8:00~AM9:20 ($t_0=8:00$, $t_1=9:20$)にわたる5分間あたりの平均通過交通量を各時間帯での観測交通量とみなし、入力データとしてトリップ発生時間(出発時間)の推計を行う。

Fig. 3は観測点 a_1 , a_2 における1分間交通量を基本単位とする交通量の時系列変化と、5分間を時間帯とする平均観測交通量(入力データ)を表している。この場合、時間帯を短く取るほど、交通量の時間変動に照合する交通量観測データが得られ、それだけ時間OD交通量の推計精度がよくなることは明かである。

起点①、②における時間帯別トリップの出発時間分布の真実値と推計値は、Fig. 4にプロットしてある。提案したモデルは、最後の二つの時間帯を除いてトリップ出発率の時間変動を十分に追従できることがわかる。わずかの誤差が生じたのは、主として数値近似計算における打ち切り誤差と観測交通量を時間帯別通過交通量の平均値としたことが影響したものと考えられる。最後の二つの時間帯の推計精度が若干悪くなるが、これは前述したようにこの二つの時間帯で出発したトリップが観測時間領域内で計測されないからである。この問題はリンク上の観測時間を延長することで解決できる。

6. 討議と結論

本研究では、高度情報化社会における交通情報提供、交通制御等の道路運用計画を策定するために必要となる時間OD交通量の推計モデルを開発し、時間単位の交通量観測データからOD交通量および発生交通量の時間分布の推計を試みた。本手法の特徴を取りまとめると以下のとおりである。

(1) 交通量の時間変動特性を明示的にモデルに組み込み、時々刻々と変化するOD交通量の変動を考慮できる。また単にOD交通量の時間分布が求められることにとどまらず、この結果から同時に日平均OD交通量が推計される。

(2) 従来の時間帯別OD交通量推計モデルは、離散変数を用いており、既存時間帯別OD交通量に基づいてエントロピー最大化の考え方により定式化されているが、これは非線形最適化問題を解くための繰り返し計算が必要である。また、特に時間帯別のリンク利用率の推計が必要であり、対象道路網が大きくなると、計算量と推計変数が膨大となる。本研究で

提案したモデルは数値Fourier変換と連立一次方程式を解くだけで解を得ることができるため、OD交通量推計の更新が頻繁に必要なオンライン交通管理に応用する場合でも、実時間による演算処理が可能と考えられる。

しかし、本研究ではモデルの簡略化のためにいくつかの仮定を導入しており、今後はこの点を現実的に改良することが課題であろう。問題の第一点は目的地選択確率と経路選択確率をあらかじめ設定した固定値として取り扱っていることである。この点について例えば高速道路のランプOD交通量の推計に応用するときは、トリップの利用経路が固定されてお

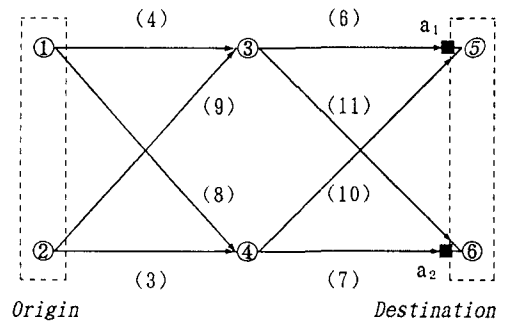


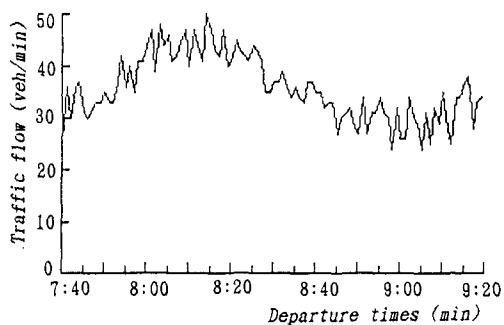
Fig. 1 Test Network

Table 1 Destination Choice Probability

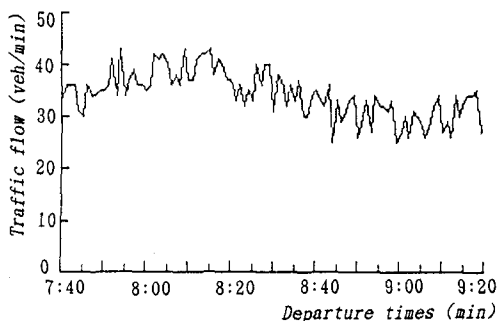
Origin	Destination	
	5	6
1	0.60	0.40
2	0.30	0.70

Table 2 Route Choice Probability

0-D Path	①-⑤	①-⑥	②-⑤	②-⑥
1-3-5	0.80	×	×	×
1-3-6	×	0.50	×	×
1-4-5	0.20	×	×	×
1-4-6	×	0.50	×	×
2-3-5	×	×	0.4	×
2-3-6	×	×	×	0.1
2-4-5	×	×	0.6	×
2-4-6	×	×	×	0.9

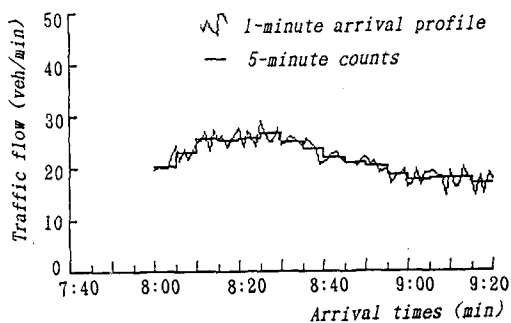


(1) Origin 1

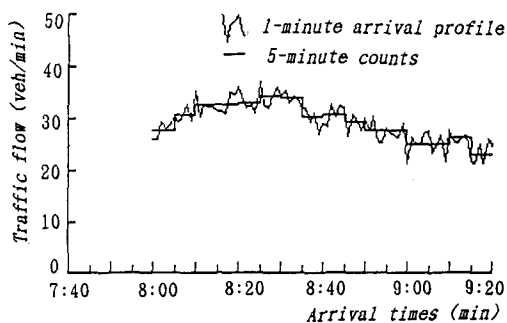


(2) Origin 2

Fig. 2. Departure rate profiles input to simulation.

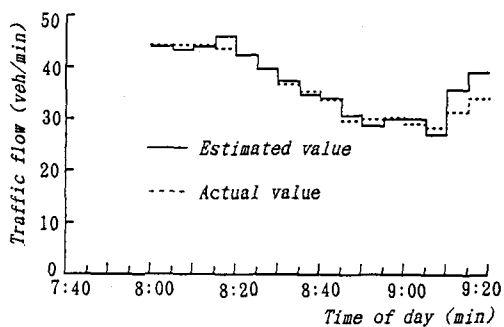


(1) Traffic counting point a₁

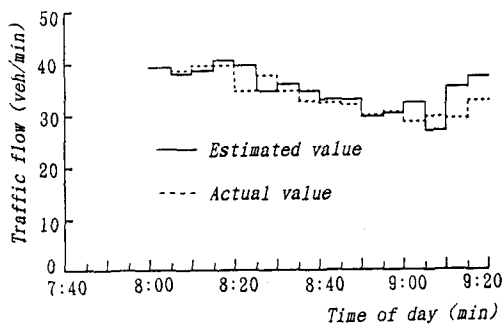


(2) Traffic counting point a₂

Fig. 3. Arrival time profiles at traffic counting points.



(1) Origin 1



(2) Origin 2

Fig. 4. Estimated and actual distributions of trip departure times.

り、それほど大きな問題ではないが、一般街路ネットワークに適用する場合、時間OD分布パターンと時間経路選択確率をどのように推計するかが考究されなければならない。また目的地選択確率と経路選択確率を時間の変数とした場合、これらをいかにモデルの定式化に組み込むかを検討しなければならない。

第二点は、交通混雑による走行時間の遅れである。本研究では、トリップの出発点から観測点にいたるまでの所要時間を固定値としており、走行時間に交通混雑の与える影響を考えていないが。この点について次のことが考えられる。(1) モデルが公共交通運輸システム、あるいは小規模ネットワーク(例えば、高速道路の部分区間)のOD交通量の推計に適用する場合、旅行時間を固定値として考えても良い[see, e.g., Nihan *et al*(1986), Keller *et al* (1987), Nguyen *et al*(1988)]。(2) Bell博士の本論文に対する建議に基づき、出発点から観測点までの所要時間を固定値とするのではなく、ある確率分布にしたがうと仮定することにより、期待二乗残差(*expected squared errors*)、あるいは二乗期待残差(*squared expected errors*)を最小にするように推計問題を定式化する。ただし、一般ネットワークにおける交通制御と経路誘導のためのOD交通量の推計には、走行時間の変動が考慮すべき重要な要因であり、それゆえ交通混雑による走行時間の遅れを考慮したモデルへの拡張が必要である。

これまでに述べたように、交通量の時系列観測データを用いたOD交通量の時間変動の推計は非常に重要で興味深い研究課題である。現在の段階ではモデルの定式化には、すべての要因を同時に動的に考えるのは困難があり、実際の応用には大きな限界がある。しかし研究はあくまでも一步一步進展していくものであり、本モデルの今後の研究発展が大きく期待できると確信を持っている。今後これらの課題を解決し、モデルの設けた仮定を一般化していく方向に研究を進展させ、実用化を図ることを考えたい。

最後に本論文に対して貴重なコメントと建議を頂いた Newcastle upon Tyne 大学の M. G. H. Bell 博士に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Van Zuylen, H. J. and Willumsen L. G. : The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts, *Transpn. Res.*, Vol. 14B, pp. 281~293, 1980.
- [2] 飯田恭敬・高山純一・金子信一 : 傾向変動を考慮したリンク交通量によるOD交通量推計法、土木学会論文集、第383号, pp. 83~91, 1987.
- [3] 井上博司 : 交通量調査資料を用いたOD交通量の統計的推計法、土木学会論文報告集、第332号, pp. 85~94, 1983.
- [4] 井上博司 : シェドウ・コスト概念による観測交通量からのOD交通量推計、土木学会論文集、第401号, pp. 41~50, 1989.
- [5] Iida, Y. and Takayama, J. : Comparative Study of Model Formulations on OD Matrix Estimation from Observed Link Flows, *Proc. of 4th WCTR*, Vol. 2, pp. 1570~1581, 1986.
- [6] Willumsen, L. G. : Estimating Time-Dependent Trip Matrices from Traffic Counts, *Ninth Int. Sym. on Transpn. and Traffic Theory*, pp. 397~411, 1984.
- [7] Nguyen, S., Morello, E. and Pallottino, S. : Discrete Time Dynamics Estimation Model for Passenger Origin Destination Matrices on Transit Network, *Transpn. Res.*, Vol. 22B pp. 251~260, 1988.
- [8] Janson, B. N. and Southworth, F. : Estimating Departure Times from Traffic Counts Using Dynamic Assignment, *Int. Conference on Dynamic Travel Behavior Analysis*, 1989, Kyoto University, Japan.
- [9] Cremer M. and Keller H. : A new class of dynamic methods for the identification of origin-destination flows, *Transpn. Res.* Vol. 21B, pp. 117~132, 1987.
- [10] Nihan, N. L. and Davis, G. A. : Recursive estimation of origin-destination matrices from input/output counts, *Transpn. Res.* Vol. 21B, pp. 149~163, 1987.
- [11] Leonard, D. R., Tough, J. B., Baguley, P. C. CONTRAM : A Traffic Assignment Model for Predicting Flows and Queues during Peak Periods, *Transport and Road Research Laboratory Report LR 841*, Crowthorne, UK.
- [12] Janson, B. N. : Dynamic Traffic Assignment for Urban Road Networks, *Working Paper, Oak Ridge National Laboratory*, Oak Ridge, TN, 1989.
- [13] Dial, R. B. : A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model Which Obviates Path Enumeration, *Transpn. Res.*, Vol. 5, pp. 83~111, 1970.
- [14] Wilson, A. G. : Entropy in Urban and Regional Modeling, *Pion, London*, 1970.
- [15] 河田龍夫 : Fourier 解析: 数理解析とその周辺 7, 産業図書, 1975.
- [16] Robillard P. Multipath Traffic Assignment with Dynamic Input Flows, *Transpn. Res.* Vol. 8, 1974, pp. 567~573.
- [17] 高山純一・飯田恭敬・藤本克郎 : 交通発生・分布の時間変動推計に関する研究, 第9回交通工学研究発表会論文集, pp. 85~87, 1988.