

## リンクフローによる交通需要推計のための 交通量観測点の配置に関する一考察

### OPTIMUM DISPOSITION OF TRAFFIC COUNTING POINT FOR THE ESTIMATION OF TRAFFIC DEMAND USING THE LINK-FLOW

外井 哲志\*・榑木 武\*\*・吉武 哲信\*\*\*・天本 徳浩\*\*\*\*

By Satoshi TOI, Takeshi CHISHAKI, Tetunobu YOSHITAKE  
and Tokuhiro AMAMOTO

There have been several studies for the estimation of trip distributions in the area using the observed link-flow. The accuracy of the estimation much depends upon the location and the number of the traffic counting in the network. In this paper, two methods are proposed, which enable us to extract the effective links for the estimation of trip distributions. One of them is the method for direct estimation of trip distributions, named "OD-covering method", and the other is the method through the estimation of trip generations, named "zone-covering method". These methods are applied to the trunk road network in Fukuoka City, and using the observed volume of the links included in the solution, the results of the estimation are accurate enough to be used.

*Keywords : traffic counting, optimum disposition, trip distribution*

#### 1. はじめに

都市交通計画、幹線道路網計画等に必要とされる交通需要推計は、パーソントリップ調査、道路交通情勢調査等の大調査に基づき、4段階推計法を用いて行われるのが一般である。ところが近年、これらの大掛かりな調査、計画では十分に対応しきれない狭い地域内の交通処理や道路交通管理の重要性が増し、そのための計画手法確立の要請が高まってきている。このような背景から、地域内の交通需要推計に関する現実的な対応として、リンク交通量の観測値から、地区内のOD交通量を推定する手法の開発が試みられ、いくつかの推定モデルが開発されているが、新たな推定手法の開発はもとより、適切な観測リンクの選定に関する研究も、これに劣らず重要な課題であるとの指摘がなされている。

本研究は、以上の立場から、リンクフローを用いて交

通需要推計を行うための交通量観測点の配置方法について考察したものである。

#### 2. リンクフローによる交通需要推計に関する 既往の研究

道路区間上で観測される交通量データ(リンクフロー)を利用して、対象地区内の交通需要量を推定するモデルがこれまで数多く提案されている。

従来のモデルを対象ネットワークの規模によって分類すると、①局所的なネットワークを対象とするものと、②広域的なネットワークを対象とするものの2種類に大別される。前者は交差点における右左折直進交通量から、ごく狭い範囲における交通挙動を分析し、その成果を交通処理計画等に利用しようとするものである。後者は広範囲のネットワーク上の交通流を対象として、都市内あるいは都市の交通需要を推計するもので、さらにODパターンを重力モデルで与えるAタイプと既往のOD交通量のパターンを与えるBタイプに分類される。Aタイプのモデルは、既往のOD交通量が不要のため適用の範囲が広いが、推計精度は重力モデル式の信頼性に左右され、あまり高くない。一方BタイプのモデルではOD調査のデータが必要であるが、その分推定精度は高まると

\* 正会員 工修 九州大学講師 工学部土木工学科  
(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

\*\* 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木工学科  
(同上)

\*\*\* 正会員 工修 九州大学助手 工学部土木工学科  
(同上)

\*\*\*\* 学生会員 工修 九州大学大学院博士課程(同上)

いえる。B タイプのモデルは主に OD 表の修正を目的として開発されてきたものであり、初期のものにスクリーンライン交通量を制約条件としたモデル等がある。

B タイプモデルのうち、比較的実用的なものとして、(1)エントロピー最大化モデル<sup>1)</sup>、(2)残差平方和最小化モデル<sup>2)</sup>がある。エントロピー最大化モデルは各リンクでの計算交通量が観測交通量に一致するという条件のもとに OD トリップの出現確率が最大となる OD 分布を求めるものである。残差平方和最小化モデルはその名が示すように、計算交通量と観測交通量の残差平方和を種々の制約条件のもとで最小化するものであり、目的関数と制約条件の組合せにより、a) 道路区間モデル、b) 発生交通量モデル等がある。

以上のリンクフローによる交通需要推計の手法は交通量に関する制約条件下で、観測値と推計値との乖離を最小化する、あるいは出現確率を最大化するという、最適化手法の応用であるといえる。しかし、①道路ネットワークの変化、② OD データの誤差や変動、③観測点の数とその配置等、需要推計に大きな影響を及ぼす要因については、研究は行われているものの課題も多い。①、②に関しては、飯田・高山の研究<sup>2)</sup>、②に関しては井上の研究<sup>3)</sup>があるが、③に関してはきわめて少なく、飯田・高山の研究<sup>2)</sup>で一部触れられているほか、一般的な観測点配置の考え方として、OD 網羅規準による方法<sup>4)</sup>、非観測区間の交通量推定のための観測点配置法<sup>5)</sup>が外井によって提案されているのみである。

### 3. 分布交通量の推計法とその必要条件

リンクフローから分布交通量を推計するには、前述のように各種の方法があるが、本研究では、過去の OD 調査データが存在する場合の簡易な推定方法について考察する。

リンク  $m$  の交通量を  $t_m$ 、リンク  $m$  中のゾーン  $i, j$  間交通量の割合を  $v_{ijm}$ 、 $ij$  間交通量を  $x_{ij}$ 、 $ij$  間交通量のリンク  $m$  利用率を  $p_{mij}$  とすると、リンク  $m$  中の  $ij$  間交通量は  $t_m \cdot v_{ijm} = x_{ij} \cdot p_{mij}$  であることから、次式(1)が導かれる。

$$x_{ij} = v_{ijm} / p_{mij} \cdot t_m \dots\dots\dots (1)$$

$v_{ijm}$ 、 $p_{mij}$  を配分計算で求めれば、真値との間に誤差が生じる。また、 $t_m$  の代わりに観測値  $q_m$  を用いれば、 $q_m$  には観測誤差が含まれるうに、 $v_{ijm}$ 、 $p_{mij}$  が求められた時点と観測時点とに時間的な差が生じる。このため、 $v_{ijm} \neq 0$ 、 $p_{mij} \neq 0$  を満足するすべての  $ij, m$  の組合せにおいて、厳密には式(1)は成立しない。式(1)の残差平方和が最小となるように  $x_{ij}'$  を推定するものとし、次式(2)で  $H_{ij}$  を定義する。

$$H_{ij} = \sum_m (x_{ij} - v_{ijm} / p_{mij} \cdot q_m)^2 \dots\dots\dots (2)$$

さらに、

$$\begin{aligned} u_{ijm} &= v_{ijm} / p_{mij} (p_{mij} \neq 0), 0 (p_{mij} = 0), \\ \delta_{ijm} &= 1 (p_{mij} \neq 0), 0 (p_{mij} = 0), \\ \xi_m &= 1 \text{ (リンク } m \text{ で観測する),} \\ &= 0 \text{ (リンク } m \text{ で観測しない).} \end{aligned}$$

とくと、式(2)は次のように表わされる。

$$H_{ij} = \sum_m \xi_m (\delta_{ijm} \cdot x_{ij} - u_{ijm} \cdot q_m)^2 \dots\dots\dots (2)'$$

式(2)'の両辺を  $x_{ij}$  で偏微分し、0と置くと、

$$\begin{aligned} \partial H_{ij} / \partial x_{ij} &= 2 \sum_m \xi_m \delta_{ijm} (\delta_{ijm} x_{ij} - u_{ijm} q_m) = 0 \\ \delta_{ijm}^2 &= \delta_{ijm}, \delta_{ijm} u_{ijm} = u_{ijm} \text{ であるから,} \\ (\sum_m \xi_m \delta_{ijm}) x_{ij} &= \sum_m \xi_m u_{ijm} q_m \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

したがって、 $x_{ij}$  を求めることができる条件は、

$$\sum_m \xi_m \delta_{ijm} \geq 1 \dots\dots\dots (4)$$

であり、このとき  $x_{ij}$  の推定値  $x_{ij}'$  は次式(5)で与えられる。

$$x_{ij}' = \sum_m \xi_m u_{ijm} q_m / \sum_m \xi_m \delta_{ijm} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\delta_{ijm}$  は  $ij$  間交通量がリンク  $m$  に流れているか否かを示す定数であるから、 $\xi_m \delta_{ijm} = 1$  は  $ij$  間交通量が流れているリンクで観測を行うことを意味しており、式(4)はすでに提案した「OD 網羅規準」<sup>4)</sup>にほかならない。すなわち、「OD 網羅規準による交通量観測点の最適配置」は式(1)において  $t_m = q_m$  として  $x_{ij}'$  を推定する方法を可能にする観測点配置を与えることを意味している。

### 4. 分布交通量推計のための観測点配置

前章で述べた理由により、「OD 網羅規準」に従う観測点配置が考えられる。また、目的関数としては観測費用を採用し、その最小化を図るのが一般的であろう。車両感知器を用いる場合、管理費用を考慮すると観測費用はほぼ観測点数に比例すると考えてよい。そこで、観測点数で観測費用を代表させることにする。以上のことは次の最適化問題によって定式化される。

$$\left. \begin{aligned} \text{Minimize } Z &= \sum_m \xi_m \\ \text{st. } \sum_m \xi_m \delta_{ijm} &\geq 1 \text{ (for all } i, j) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

この問題を解くには、Balass の加法アルゴリズムを用いて初期可能解を求め、分枝限定法を用いて改善可能性

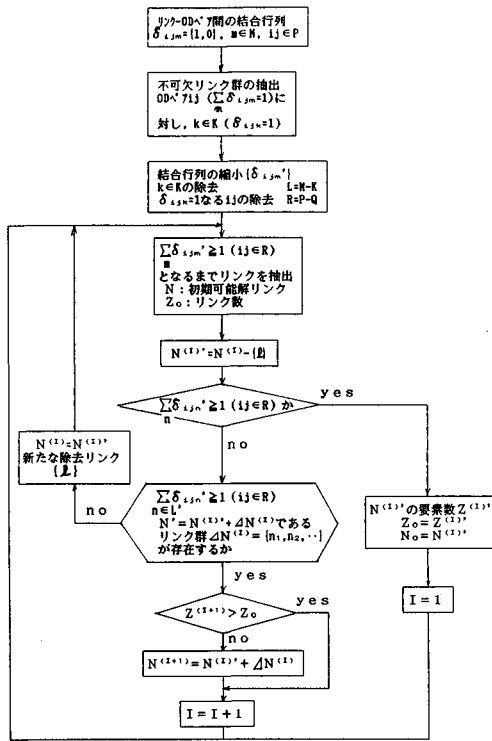


図-1 OD 網羅規準による観測リンク群の抽出フロー

を探索するという方法をとる。この解法のフローチャートを図-1に示す。図の中で、 $M, P$ はそれぞれ、リンク集合、ODペアの集合、 $K, Q$ は不可欠リンク(あるODペアがリンク  $k$ のみを流れる場合、 $k$ を不可欠リンクとよぶ)の集合、不可欠リンクに含まれるODペアの集合である。 $N^{(0)}$ 、 $Z$ はそれぞれ第  $I$ 可能解の構成リンク集合、およびその数、 $\Delta N^{(0)}$ は未検討リンクの集合である。ただし、求められた解は  $i, j$ のすべての組合せについて  $x_{ij}$ の推定値を求めるための最低条件であり、各推定値に対して、なら推定誤差上の制限を加えるものではない。そこで、以下では推定誤差制御による観測点配置問題について考察する。

推定による誤差は式(1)によれば、 $v_{ijm}$ 、 $p_{mij}$ 、 $t_m(q_m)$ に含まれているが、その原因として、①過去のOD調査データの誤差、②  $v_{ijm}$ 、 $p_{mij}$ 、 $t_m$ を求める過程で生ずる誤差(一般には配分誤差)、③時間の経過によるOD交通量の傾向変動とネットワークの変化、④観測交通量の誤差等が考えられる。誤差①②③は  $m$ リンク中の  $ij$ 間交通量  $t_{ijm}$ 中に存在するため、まとめて  $e_{ijm}$ と表現することができる。また④については観測誤差  $\Delta q_m$ と表現できよう。このようにすると誤差を含んだ  $m$ リンク中の  $ij$ 間交通量  $t_{ijm}'$ は、

$$t_{ijm}' = t_{ijm} + e_{ijm} \dots\dots\dots (7)$$

と表わせる。式(7)を用いれば、 $e_m = \sum_{ij} e_{ijm}$ として、

$$v_{ijm}' = (t_{ijm} + e_{ijm}) / (t_m + e_m)$$

$$p_{mij}' = (t_{ijm} + e_{ijm}) / x_{ij}$$

$$u_{ijm}' = v_{ijm}' / p_{mij}' = x_{ij} / (t_m + e_m)$$

これらの結果を式(5)に代入し、 $(1 + e_m/t_m)^{-1} \approx 1 - e_m/t_m$  ( $e_m/t_m \ll 1$ )の近似を行って整理すれば、

$$x_{ij} + \Delta x_{ij} = \left( \sum_m \xi_m x_{ij} (t_m + \Delta q_m) / (t_m + e_m) \right) / \sum_m \xi_m \delta_{ijm}$$

$$\approx \left( \sum_m \xi_m u_{ijm} t_m - \sum_m \xi_m u_{ijm} (e_m - \Delta q_m) \right) / \sum_m \xi_m \delta_{ijm}$$

$$- \sum_m \xi_m u_{ijm} e_m \Delta q_m / t_m \Big/ \sum_m \xi_m \delta_{ijm}$$

{ }内の第3項は誤差成分の積であるので、微小項と考えて省略し、整理すれば、

$$\Delta x_{ij} \approx \sum_m \xi_m u_{ijm} (\Delta q_m - e_m) / \sum_m \xi_m \delta_{ijm} \dots\dots\dots (8)$$

ここで  $e_m$ は確率変数であるので、 $\Delta x_{ij}$ も確率変数と考えることができる。 $\Delta q_m$ は各観測点における観測誤差であり、ネットワークとは無関係に決まるので、ここでは  $e_m$ のみを確率変数として扱い、 $\Delta q_m = 0$ とする。 $e_m^*$ 、 $\sigma_m^2$ をそれぞれ  $e_m$ の期待値と分散とし、 $Cov(e_m, e_k) = 0$  ( $m \neq k$ )を仮定すると、 $\Delta x_{ij}$ の期待値、分散はそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{ij}^* &= - \sum_m \xi_m u_{ijm} e_m^* / \sum_m \xi_m \delta_{ijm} \\ \sigma_{x_{ij}}^2 &= \sum_m (\xi_m u_{ijm})^2 \sigma_m^2 / \left( \sum_m \xi_m \delta_{ijm} \right)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

で表わせ、 $\sigma_{x_{ij}}^2$ は上記仮定により、近似式となる。

さて、次のような関数  $S_{ij}$ を定義すると、次式において  $\Delta x_{ij}^* > 0$ の場合には{ }内第1項が、 $\Delta x_{ij}^* < 0$ の場合には第2項が卓越するため、 $S_{ij}^2$ は  $\Delta x_{ij} = 0$ まわりの  $\Delta x_{ij}$ のばらつきを示す指標となる。

$$\begin{aligned} S_{ij}^2 &= \frac{1}{2} \{ (\Delta x_{ij}^* + \sigma_{x_{ij}})^2 + (\Delta x_{ij}^* - \sigma_{x_{ij}})^2 \} \\ &= \Delta x_{ij}^{*2} + \sigma_{x_{ij}}^2 \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

そこで、 $\{\xi_m\}$ を変化させ、 $S_{ij}^2$ を可能な限り小さくすれば、推定誤差  $\Delta x_{ij}$ の小さな  $\xi_m$ の組合せ(配置案)が得られる。また、 $S_{ij}^2$ を一定値以下に制限するような解の求め方も考えられる。すなわち、

$$S_{ij}^2 = \Delta x_{ij}^{*2} + \sigma_{x_{ij}}^2 \leq \theta_{ij}^2 \dots\dots\dots (11)$$

となるようすべての  $i, j$ に対して、 $S_{ij}^2$ の上限値(許容水準値)  $\theta_{ij}^2$ を定義すると、式(11)を制約条件とし、観測点数を最小化する最適化問題を定式化できる。

$$\left. \begin{aligned} \text{Minimize } Z &= \sum_m \xi_m \\ \text{s.t. } \Delta x_{ij}^{*2} + \sigma_{x_{ij}}^2 &\leq \theta_{ij}^2 \\ &\text{(for all } ij) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

この問題は0-1解型の非線形計画問題であるが、決定変数が1または0をとることから、解の組合せは $2^L$  ( $L$ はリンク数)と有限であり、原理的にはすべての解を調べ尽くすことにより最適解を求めることができる。しかしこの方法は実際的ではないので、本論文の6.では分枝限定法を用いて効率的に解を求めた。

5. 発生交通量の推計法と観測点配置

4.までに、リンクフローから分布交通量を推計する簡単な方法と、それを可能とする交通量観測点の配置手法について述べた。本節では、未知数を減じるため、発生交通量を求める手法とそのための観測点配置の必要条件について考察する。

$i$ ゾーン発生交通量がリンク $m$ を利用する確率を $r_{im}$ 、 $t_m$ に対する $m$ リンク中の $i$ ゾーン関連交通量を $t_{mi}$ 、その割合を $w_{mi}$ 、 $i$ ゾーンの発生交通量を $y_i$ とする。 $t_{mi}$ は $t_m \cdot w_{mi} = y_i \cdot r_{im}$ で表わされるから、 $y_i$ は、

$$y_i = (w_{mi}/r_{im})t_m \quad (r_{im} \neq 0) \dots\dots\dots(13)$$

となる。 $t_m$ の代わりに観測値 $q_m$ を用いれば、前に述べた種々の誤差により、式(13)は厳密には成立しない。そこで、式(13)の残差平方和 $G_i$ が最小となるよう $y_i$ を推定するものとする。

$$G_i = \sum_m (\beta_{im}y_i - \gamma_{im}q_m)^2 \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 $\gamma_{im} = w_{mi}/r_{im}$  ( $r_{im} \neq 0$ )、 $0$  ( $r_{im} = 0$ )、 $\beta_{im} = 1$  (リンク $m$ に $i$ ゾーン交通量が流れている場合)、 $0$  (リンク $m$ に $i$ ゾーン交通量が流れていない場合)である。

式(14)の両辺を $y_i$ で偏微分して0とくと、

$$\partial G/\partial y_i = 2 \sum_m \xi_m \beta_{im} (\beta_{im}y_i - \gamma_{im}q_m) = 0$$

$\beta_{im}^2 = \beta_{im}$ 、 $\beta_{im}\gamma_{im} = \gamma_{im}$ だから、

$$(\sum_m \xi_m \beta_{im})y_i = \sum_m \xi_m \gamma_{im}q_m \dots\dots\dots(15)$$

したがって、 $y_i$ が求められるための条件は、

$$\sum_m \xi_m \beta_{im} \geq 1 \dots\dots\dots(16)$$

であり、このとき $y_i$ の推定値 $y_i'$ は次式(17)で与えられる。

$$y_i' = \sum_m \xi_m \gamma_{im}q_m / \sum_m \xi_m \beta_{im} \dots\dots\dots(17)$$

式(16)は「ゾーン網羅規準」といえる。この規準に基づいた観測点配置は次の最適化問題を解くことによって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \text{Minimize } Z &= \sum_m \xi_m \\ \text{s.t. } \sum_m \xi_m \beta_{im} &\geq 1 \quad (\text{for all } i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

この問題の解法は4.に述べたものと同じである。

次に $y_i$ の推定誤差 $\Delta y_i$ を制御するための観測点配置について考察する。4.と類似の解析により、

$$\gamma_{im}' = w_{mi}'/r_{im}' = y_i/(t_m + e_m) \dots\dots\dots(19)$$

$y_i$ の推定誤差は、

$$\Delta y_i = \sum_m \xi_m \gamma_{im} (\Delta q_m - e_m) / \sum_m \xi_m \beta_{im} \dots\dots\dots(20)$$

と表わせる。以下、 $\Delta q_m = 0$ として取り扱う。

$e_m^*$ 、 $\sigma_m^2$ を用い、 $\text{Cov}(e_m, e_k) = 0$  ( $m \neq k$ )とすると、 $\Delta y_i$ の期待値、分散はそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_i^* &= - \sum_m \xi_m \gamma_{im} e_m^* / \sum_m \xi_m \beta_{im} \\ \sigma_{y_i}^2 &= \sum_m (\xi_m \gamma_{im})^2 \sigma_m^2 / (\sum_m \xi_m \beta_{im})^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(21)$$

と表わせ、 $\sigma_{y_i}^2$ に関する第2式は近似式となる。また、 $\Delta y_i$ のばらつきの指標として $T_i$ を定義する。

$$T_i^2 = \Delta y_i^{*2} + \sigma_{y_i}^2 \dots\dots\dots(22)$$

$T_i^2$ の許容値 $\tau_i^2$ を導入すれば、次のような最適化問題とすることができる。

$$\left. \begin{aligned} \text{Minimize } Z &= \sum_m \xi_m \\ \text{s.t. } \Delta y_i^{*2} + \sigma_{y_i}^2 &\leq \tau_i^2 \quad (\text{for all } i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(23)$$

6. 実在ネットワークへの適用

これまで述べてきた交通需要推定法に関して、実在のネットワークを対象として理論を適用し、分布交通量、発生交通量の推定精度、推定誤差の近似式の精度、およびそれらと観測点選定との関連性等について分析した。

(1) 適用ネットワークと誤差の発生

図-2に本研究で用いる福岡市と周辺部を含むネットワークの概略図(図中○印は発生・集中ノードを表わす)を示す。対象とする道路は国道、一般県道および主要地方道で、全国道路交通情勢調査の対象区間をベースとし

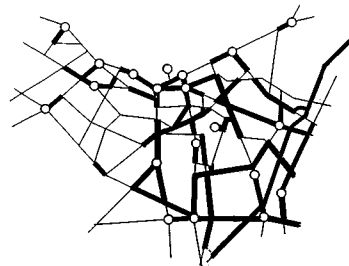


図-2 対象ネットワークと独立なリンク

ている。なお昭和60年度の調査データを用いたので、福岡都市高速道路は対象外とした。昭和60年の自動車OD調査データより、本対象のネットワーク内20、ネットワーク外5、合計25の発生ゾーンを設定し、25回の分割配分法により、ネットワーク内の各リンクの交通量 $t_{ij}$ 、およびそのOD内訳 $t_{ijm}$ と配分経路とを求めた。

推定誤差の原因は前述のように4種類あるが、これらの誤差のうち、推定のために用いたパラメーター( $w_{im}$ ,  $r_{im}$ )内に主な原因が存在するものと考え、以下の要領で誤差を発生させた。式(7)の誤差 $e_{ijm}$ は、標準正規乱数 $s$ を用いて、

$$e_{ijm} = t_{ijm} \cdot s / 3 \dots \dots \dots (24)$$

により、 $t_{ijm}$ が $3\sigma$ に相当する正規乱数を発生させ、次の2条件を満足するものを採用した。

$$|e_{ijm}| \leq t_{ijm} \quad (t_{ijm}' \text{の非負条件})$$

$$\sum_{k \in R_i} e_{ijk} = 0 \dots \dots \dots (25)$$

ここに、 $e_{ijk}$ は $ij$ 間交通量の流れる第 $k$ ルートへの配分誤差、 $R_i$ は $ij$ 間交通量の流れる代替ルートの集合である。なお、本例では300回のモンテカルロシミュレーションにより、 $e_{ijm}$ 、その期待値 $e_m^*$ 、分散 $\sigma_m^2$ を求めた。

(2) OD網羅規準による必要リンクの抽出

a) OD網羅法

図-2中、太線で示したリンク77本は、リンク交通量を構成するODの組合せに関して、他のリンクに包含されない、すなわち互いに部分集合でないリンクを表わしている。したがって、OD網羅規準を満たす観測点配置を考える場合には、このリンクの集合から必要リンクを抽出すればよい。本分析では、福岡市近辺の20の発生ゾーン間における190のODペアのうち、交通量が0でない175のODペアの分布交通量を推定の対象とした。

ところで、ネットワーク上のすべてのODペア間の交通量を求めるためには、式(5)の分母が正である必要がある。観測点数が最小で、この条件を満たす解は式(6)

の問題を解くことによって得られる。そこで、互いに部分集合でないリンクの集合を対象として式(6)の最適化問題を解くと、構成リンク数20の16組の解が抽出された。それらの解を構成するリンクの分布は図-3に示される。図-3中で小さな●印を付されるリンクが16組の解すべてに共通のリンクであり、このうちいずれが欠けても式(5)での分布交通量の推定が不可能となるODペアが出現する。また図-3中で大きな●印を付された8本のリンクは、このうち適当な4本の組合せにより、上記共通リンクでカバーできないODペアの集合をカバーすることができる。

b) 推定誤差制御法

分布交通量の推定誤差を一定値以下に抑えるという制約の下に、観測点数を最小化する問題で、式(12)を解くことによって解が得られる。本研究では、 $\theta_{ij}/x_{ij} = 0.10, 0.15, 0.20$ の3ケースについて解を求めた。この方法ではすべてのODペアに関して式(12)の制約条件が満足される必要があるが、条件式の左辺の分母は $(\sum \xi_m \delta_{ijm})^2$ であるため、左辺が有限であるためにはOD網羅規準が満たされていなければならない。このためには前項の解析から明らかなように、20リンク構成の解を要する。ただし、OD網羅規準に個々の分布交通量の推定誤差に関する制約が加わるので、解の自由度は低下し、解の数が減少する。表-1はOD網羅法による解(リンク番号の組合せ)、誤差制御法による解の組合せを示したものであるが、誤差制御法の解は $\theta_{ij}/x_{ij} = 0.10, 0.15, 0.20$ のいずれの場合もOD網羅法による解の1~16のうち、1~8に相当しており、リンク47を含むものは除外されている。なお、 $\theta_{ij}/x_{ij} = 0.09, 0.08, 0.07, 0.06, 0.05$ の5ケースについても計算を行ったが、可能解を求めることができなかった。

以上、OD網羅法、誤差制御法の2法を用いて、必要リンクの抽出を試みたが、いずれの方法においても、必要リンク数20の共通解を得られることが明らかとなった。

(3) 分布交通量の推定精度

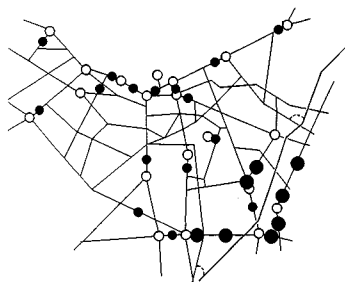


図-3 OD網羅規準に基づく解の構成リンク

表-1 分布交通量推定のための方法別観測点最適配置解

解番号	OD網羅法																			推定誤差 ソフト法			
	最適解構成リンク番号																			20%	15%	10%	
(1)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	40	41	48	54	○	○	○
(2)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	40	41	48	55	○	○	○
(3)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	40	41	49	54	○	○	○
(4)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	40	41	49	55	○	○	○
(5)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	40	42	48	54	○	○	○
(6)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	40	42	48	55	○	○	○
(7)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	40	42	49	54	○	○	○
(8)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	40	42	49	55	○	○	○
(9)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	41	47	48	54	○	○	○
(10)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	41	47	48	55	○	○	○
(11)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	41	47	49	54	○	○	○
(12)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	41	47	49	55	○	○	○
(13)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	42	47	48	54	○	○	○
(14)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	42	47	48	55	○	○	○
(15)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	42	47	49	54	○	○	○
(16)	4	5	6	25	26	55	56	60	63	9	17	33	35	45	62	74	42	47	49	55	○	○	○

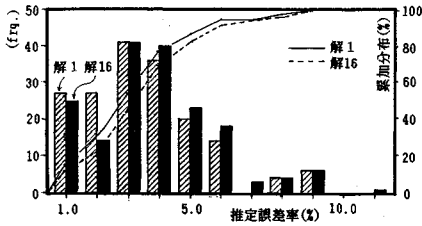


図-4 解1と解16の観測点配置による分布交通量の推定誤差率の頻度分布

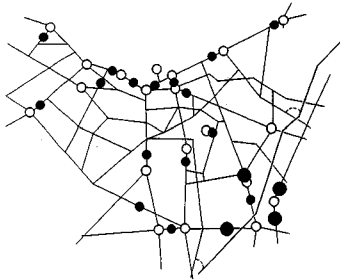


図-5 OD 網羅法に基づく解1の構成リンク分布

16組の観測リンク解のどれを使用するかによって、分布交通量の推定精度は異なる。この点を推定誤差率(推定誤差の標準偏差/分布交通量×100)を用いて調べたところ最も精度が高いのが解1、最も低いのが解16という結果が得られた。2つの解による推定誤差率の頻度分布、累積度数分布を図-4に示す。これより、解1と解16では推定誤差に若干の差はあるものの、その程度は小さく、大半が誤差率6%以内にあること等が読み取れる。

次に、解1(図-5)を観測リンクとした場合のモンテカルロシミュレーションの各試行において、式(5)により分布交通量  $x_{ij}'$  を求め、これを平均した値  $\bar{x}_{ij}'$  と分布交通量の真値(与えられたデータ)  $x_{ij}$  との相関を図

一6に示した。両者はきわめて高い相関を示している。また分布交通量と推定誤差率との関係を図-7に示した。これより、誤差率は分布交通量の大小とほとんど相関がないことがわかる。また、シミュレーションによる推定誤差の標準偏差と、式(9)の第2式で計算した近似値との相関をみたものが図-8である。近似式による計算値はシミュレーション値よりもやや低めであるが、両者は高い相関を示すことが読み取れ、式(9)の近似式は十分に実用的であるといえる。このことより式(12)のように推定誤差の大きさを考慮しつつ、最小の観測リンク数に抑える場合、1組のシミュレーションで得られた  $e_m^*$ 、 $\sigma_m^2$  を定数として用いて、最適化を図ることができる。

式(9)第2式をみると、 $u_{ijm}^2 \cdot \sigma_m^2$  の相対的に大きなリンクを含む解において、推定誤差の分散が大きくなることから、観測点配置によって分布交通量の推定誤差に差が出ることは明らかである。 $\sigma_m^2$  はリンク交通量が増加するとともに減少することはすでに述べた<sup>5)</sup>。したがって、交通量の大きなリンクに観測点を配置する方が、分布交通量の推定誤差は小さくなるものと考えられる。ちなみに、解1において共通リンク以外のリンクの交通量の総和は77419台/日、解2においては38676台/日である。このように、本例では共通リンク以外のリンクにおいて解1は解2の約2倍の交通量をとらえていることになり、上記の推論を裏付ける結果となっている。

(4) ゾーン網羅規準による必要リンクの抽出

ゾーン網羅規準を満たす観測点配置を考える場合にも、OD網羅規準と同様、図-2のリンクの集合から必要リンクを抽出すればよい。

ネットワーク上のすべての発生ゾーンの交通量を求めるためには、式(17)の分母が正である必要がある。この条件を満たし、かつ観測点数が最小である解は、式(18)の問題を解くことによって得られる。そこで図-2のリンクの集合を対象として、式(18)の最適化問題を解くと、

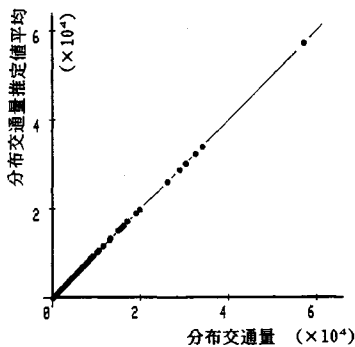


図-6 分布交通量の真値と推定値平均との比較

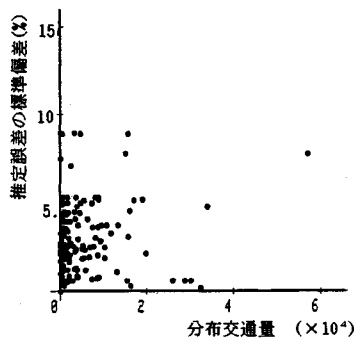


図-7 分布交通量とその推定誤差標準偏差の関係

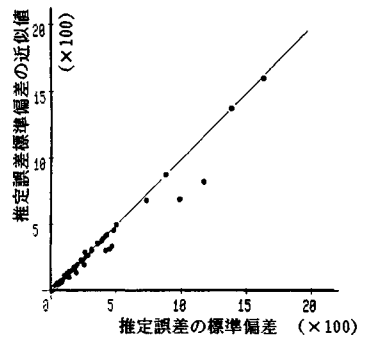


図-8 分布交通量の推定誤差標準偏差の近似値の精度

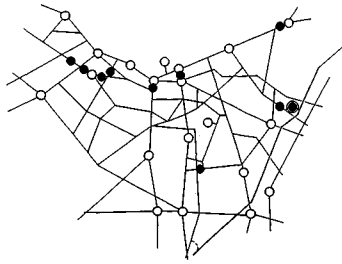


図-9 ゾーン網羅法に基づく解の構成リンク分布

表-2 発生交通量推定のための観測点最適配置解

解番号	リンク番号	推定精度 $T_i/y_i$
(1)	27	0.887(%)
(2)	3	1.781
(3)	4	1.797
(4)	75	2.312
(5)	62	2.478
(6)	29	2.520
(7)	6	2.941
(8)	30	3.176
(9)	31	4.526
(10)	76	6.441

構成リンク数1の10組の解が抽出される。10本のリンクの分布を図-9に、求められた解のリンク番号とその推定精度を表-2に示した。分布交通量推定におけるOD網羅法と推定誤差制御法との関係と同様、発生交通量推定においても、ゾーン網羅法と推定誤差制御法との間には式(16)の共通の制約条件があり、誤差の大小とは無関係に式(16)の制約条件から発生交通量推定に必要なリンク数の最小値が決定される。本例では解の構成リンク数が1であるため、おのおのの解における発生交通量の推定誤差率 ( $T_i/y_i$ ) はゾーンによらず一律に一本の構成リンクの交通量に含まれる誤差 ( $e_m^*$ ,  $\sigma_m$ ) に左右される。したがって、本例のように解の構成リンク数が1で

ある場合に限り、推定誤差制御法による解と精度の関係は特別の解析によらず表-2から直接読み取ることができる。たとえば、 $T_i/y_i=0.05$ の制約を行えば、求められる解は表-2の(1)~(9)の9組となる。

(5) 発生交通量の推定精度

ここで、発生交通量の推定精度、および推定誤差の近似式等について分析する。リンク3(図-9の◎印)を観測リンクとしたモンテカルロシミュレーションの各試行において、式(17)により、ゾーン*i*の発生交通量  $y_i$  を求め、これを全試行について平均した値  $\bar{y}_i'$  と、発生交通量の真値(与えられたデータ)  $\eta_i$  との相関を図-10に示した。両者はきわめて高い相関を示している。また同じシミュレーションで ( $y_i' - \eta_i$ ) の分散を求めたものと、式(21)の第2式で計算したものととの相関をみたものが図-11である。両者は高い相関を示すことが読み取れ、式(21)の近似式は十分に実用的であることがわかる。このことより、式(23)のように推定誤差の大きさを考慮しつつ、最小の観測リンク数に抑える場合、1組のシミュレーションで得られた  $e_m^*$ ,  $\sigma_m^2$  を定数として用いて、最適化を図ることができる。

発生交通量と推定誤差標準偏差の関係、およびその関係の観測リンクの選定による変化を示したのが図-12である。発生交通量が増大するにつれて、推定誤差標準偏差も増大し、両者は比例関係にある。一方、これらの関係は観測リンクの選定によって、その傾きが大きく異なっている。直線の傾きは発生交通量に対する推定誤差の標準偏差の比率 ( $\sigma_{y_i}/y_i$ ) を表わしているが、最大6.82%、最小0.88%の間にばらついている。この点から観測リンク選定が推定誤差に及ぼす影響の大きさを知ることができる。

このように観測リンクの選定によって推定誤差の範囲が変化する原因が観測リンクの  $\sigma_m^2$  にあることは式(21)~(23)等から明らかである。そこで、 $\sigma_m^2$  の大小がどのようなリンク特性と関連があるのかについて分析するた

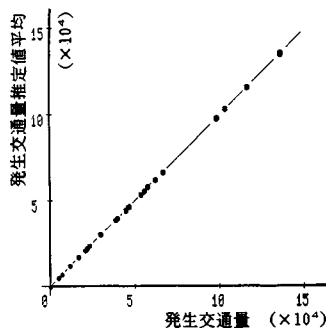


図-10 発生交通量の真値と推定値平均との比較

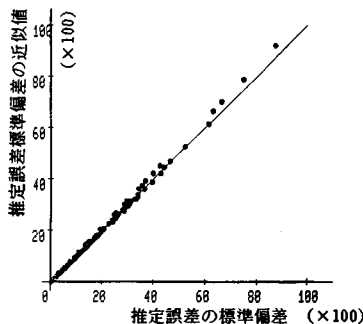


図-11 発生交通量の推定誤差標準偏差の近似値の精度

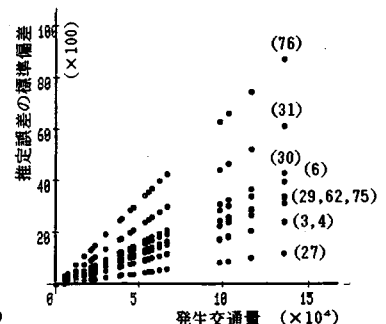
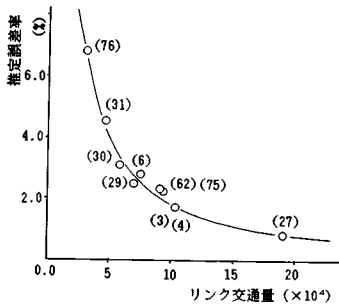
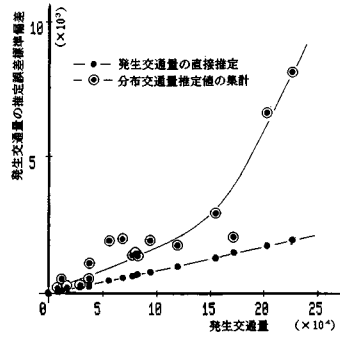


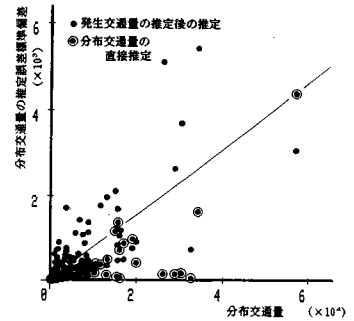
図-12 観測リンク別発生交通量と推定誤差の関係



図一13 観測リンク交通量と推定誤差率との関係



図一14 発生交通のレベルにおける推定法の精度比較



図一15 分布交通のレベルにおける推定法の精度比較

め、観測リンクの交通量  $t_m$  と比率  $(\sigma_{yi}/y_i)$  との関係調べた。これを示したものが図一13であり、 $t_m$  の増大とともに  $\sigma_{yi}/y_i$  の値が急激に減少しており、 $\sigma_{yi}/y_i$  の最小値は最大交通量が実現するリンクで出現することがわかる。

#### (6) 推定対象による観測点配置と推定誤差との関連性

以上の結果を省みると、(a)発生交通量を推定する場合の方が、(b)分布交通量を直接推定する場合よりも、推定精度、観測点数の両面からみて効果的なように思われる。そこで、この点を確認するため、発生レベルおよび分布レベルでの(a)と(b)の推定精度比較を行った。

図一14は発生交通量の直接推定値と分布交通量推定値を集計して求めた発生交通量とをシミュレーションを用いて推定精度の面から比較したものである。発生交通量の増加に伴い、前者の推定誤差は一定の比率で増加し、その絶対値も小さいのに対し、後者の推定誤差は絶対値が大きく、特に発生交通量が大きなゾーンにおいてその程度が著しい。

図一15は分布交通量のレベルで同様の分析をしたもので、分布交通量の直接推定値と発生交通量の推定値からフレーター法を用いて推定した分布交通量の推定値との比較を示している。前者の方が誤差が全体的に小さく、精度が高いことがわかる。ちなみに本例では前者の誤差は後者の誤差の1/2以下である。

以上の分析により、発生交通量、分布交通量ともに直接推定法が推定精度は高いといえる。また、発生交通量の推定のための観測点配置は観測点数の面から経済的に優れるが、推定の目標を分布交通量におく場合には、推定精度の面で分布交通量を推定するための観測点配置が優れているといえよう。

## 7. 結 論

本論文では、リンクフローの観測値から、分布交通量、発生交通量等の交通需要量を推定するための方法と、それを支援する交通量観測点の配置問題について考察し

た。その内容をまとめると以下ようになる。

(1) 分布交通量の簡易推定式(5)を導き、その推定可能条件を示し、この条件は以前に提案した「OD網羅規準」であることを明らかにした。次に推定誤差  $\Delta x_{ij}$  の分散の近似式を導き、推定誤差を制御した観測点配置の考え方に基づく最適化問題を定式化した。

(2) 発生交通量の簡易推定式を式(17)で示し、その必要条件(ゾーン網羅規準)を導いた。次に発生交通量の推定誤差およびその分散の推定式の定式化を行い、推定誤差を制御する観測点配置問題を定式化した。

(3) 福岡近辺の实在ネットワークを用いて、分布交通量推定のための最適化問題を解くことにより、観測リンク数20の16組の解を求め、推定精度の検討を行った。その結果、平均的にはきわめて高い精度の推定値が得られること、推定精度の標準偏差の推定近似式が十分高い精度をもつことが明らかとなった。次に観測点の選定が分布交通量の推定精度に及ぼす影響を分析し、推定精度は観測点の選定によってあまり大きく異なるものの、交通量の多いリンクに観測点を置いた場合に分布交通量の推定精度を向上させる傾向があること等が明らかとなった。

(4) 発生交通量推定のための最適化問題を解くことにより、観測リンク数1の10組の解を求め、推定精度の検討を行った。その結果、平均的にはきわめて高い精度の推定値が得られること、推定精度の標準偏差の推定近似式が十分高い精度をもつことが明らかとなった。次に観測点の選定が発生交通量の推定精度に及ぼす影響を分析し、推定精度は観測点の選定によって大きく異なり、交通量の多いリンクほど観測点として用いられたときに発生交通量の推定精度を向上させることが明らかとなった。

(5) 分布交通量、発生交通量のそれぞれの直接推定のための配置法については、前者が推定精度面、後者が経済性でそれぞれ優れていることが明らかになった。

本論文で示した配置法は唯一の解ではなく、複数の解



を導くものである。したがって、複数の代替案の中から計画者が選択できる余地を残した点では実用的であるといえよう。複数の解の中から配置案を選択するには、現状により近い解、捕捉交通量が最大となる解、スクリーンライン上に観測点の多い解を選ぶ方法など種々の考え方ができる。

本研究では交通量のネットワーク配分の結果を解析に用いるため、その信頼性が問題となる。この点から、現状の交通流の再現性の高い配分法の選定に問題が残る。また、誤差の取扱いに関して  $e_{ijm}$  の発生法と  $\Delta q_m=0$  とした点にも課題は残る。本論文の方法は一例にすぎず、今後、種々のケースで分析を続けたいと考えている。

また、本研究ではリンクフローを用いた既存の交通需要推計法は対象外としており、今後検討すべき課題であると考ええる。さらに著者らが提案している非観測区間の交通量推定のための観測点配置問題と本論文の内容との理論的統一・整合も重要な課題である。これらについて

も今後の課題としたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 土木学会編：交通ネットワークの分析と計画：最新の理論と応用，土木計画学講習会テキスト，1987.11.
- 2) 飯田・高山・金子：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/IV-7，1987.7.
- 3) 井上博司：路上交通量観測による自動車 OD 交通量の推計，第 1 回土木計画学研究発表会講演集，pp.237，1976.10.
- 4) 外井哲志：交通量調査地点の配置に関する理論的考察，土木技術資料 28-11，pp.15～20，1986.
- 5) 外井・天本：非観測道路区間交通量推定のための交通量観測点の最適配置計画に関する研究，土木計画学研究論文集，pp.251～258，1989.12.

(1989.10.9・受付)