

## 交通量観測点の配置間隔に関する基礎的研究

A Study on the Interval Distribution of Traffic Counting Points

外井哲志\*・樺木 武\*\*・天本徳浩\*\*\*

by Satoshi TOI, Takeshi CHISHAKI, Tokuhiko AMAMOTO

So far we have developed several methods to dispose the continual traffic counting points. And it also needs to consider how to distribute the points of general traffic survey on the road network. In this reserch, we analysed the degree that the trip length distribution and the intervals between traffic counting points affect the accuracy of the estimation of the observed frequency and total trip length.

This paper shows that the expectation of the observed frequency is in proportion to the trip length, that the estimation error of total trip length is in proportion to the average interval, and that the average interval needs to be less than 5.0km from the analysis of the trip length distribution of the car OD survey in 1980. On the base of these results, we tried to dispose the traffic counting points nearly equally on the route of the trunk road network of Fukuoka City.

### 1. はじめに

複数の観測点がある道路の路線で、自動車のトリップが観測される回数は観測点の配置間隔とその分布形態およびトリップ長の関数として確率論的に表現されるはずである。例えばトリップ長の大小は観測回数と密接な関係を持つことは容易に想像できるが、一方で必ずしもトリップ長に比例した観測回数が得られるとは限らない。このため、どのように観測点を密に配置しても必ず走行台キロ推計の誤差が生じる。この誤差の大きさと観測点の配置方法との関係は交通量観測の最も根本的な問題の1つであり、この問題の解決によって、交通量観測から得られる走行台キロに関するデータの信頼性について定量的な評価ができるのみならず、一定の信頼性に対して合理的な配置間隔のあり方を明確に示すことが

できるものと考えられる。

本論文は以上の観点から交通量観測点配置間隔のあり方について論じるものである。

### 2. 交通量観測点配置に関する既往の研究との関係

著者らがこれまでにに行った交通量観測点の配置問題に関する研究を振り返ると、第1に、各リンクに観測点を置くか否かを1, 0変数を用いて表わし、OD交通量の一部が観測されているという制約条件(OD網羅規準)のもとに、観測点数を最小化する最適化問題とその解法を示した研究<sup>1)</sup>がある。第2の研究では観測区間の交通量を用いて、非観測区間の交通量を推定する際に発生する推定誤差を一定値以下に抑えるという制約条件のもとに、観測点数を最小化する最適化問題とその解法を示した<sup>2)</sup>。第3の研究では、リンクフローから分布交通量あるいは発生交通量を推定するための最低限の観測点配置、推定値の誤差を制御した観測点配置の2つのレベルにおける最適化問題とその解法を示した<sup>3)</sup>。以上の3

\* 正会員 工修 九州大学講師 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 九州大学助手 工学部土木工学科

(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

つの研究は、いずれもリンク内のOD交通量の構成を用い、各々の目的関数と制約条件のもとに整数解型の最適化問題を解くというものである。

第4の研究では、主に道路計画に用いる交通量の変動特性を把握することを主目的とし、道路区間の交通特性分類に基づいて各グループから代表区間を抽出し、これを観測点とするものである<sup>4)</sup>。

これらの研究はいずれも目的、交通量データの利用、観測点数の規模の面で小規模連続型調査の配置リンクの選定法として相応しいといえる。これに対し、本研究は走行台キロ等の活動量の捕捉精度の追究に主眼があり、一般交通量調査に代表される大規模定期型調査の地点選定法として適するものである。

### 3. 一次元上の観測点配置性状と観測量の特性

#### 3.1 基礎理論

一本の長い道路上に密度関数  $f(l)$  を有する確率分布に従う長さ  $l$  のトリップが一樣に存在している状態を想定する。このような道路上にある間隔で観測点を配置する。以下では配置間隔が一定である(等間隔)場合、確率分布に従う(密度関数  $g(t)$  :  $t$  は間隔)場合の2ケースを考える。

##### 3.1.1 等配置間隔の場合

観測点間隔が一定値  $t$  の場合に長さ  $l$  のトリップが観測される回数について考察する。図-1に示すように  $l \geq t$  であるトリップ  $a$  は少なくとも1回以上観測されるが、 $l < t$  であるトリップ  $b, c$  は2回以上観測されることはありえず、観測回数は0回か1回のみである。このように  $l$  の大きさによって観測される回数が増加する。ここで、トリップ長が  $nt \leq l < (n+1)t$  ( $n \geq 0$ ) の場合について検討する。

長さ  $l$  のトリップが  $n$  箇所まで観測されるのは左端が  $A \sim A'$  の範囲にある場合であり、その確率  $P_n$  は、

$$P_n = ((n+1)t - l) / t = (n+1) - l/t \quad (1)$$

一方、 $(n+1)t$  地点で観測されるのは左端が  $A' \sim B$  の範囲にある場合であり、その確率  $P_{n+1}$  は、

$$P_{n+1} = (l - nt) / t = l/t - n \quad (2)$$

よって、 $P_n + P_{n+1} = 1$  となる。

ここで、長さ  $l$  のトリップが観測される回数の期待値を  $M_n$  とすると、

$$M_n = P_n \cdot n + P_{n+1} \cdot (n+1) = l/t \quad (3)$$

となり、 $n$  の大きさに無関係である。

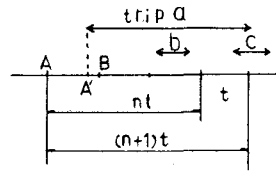


図-1 等間隔配置

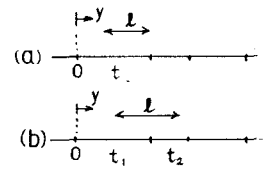


図-2 一般の間隔配置

等間隔配置では観測回数は  $n$  と  $n+1$  の2通りであるから、トリップ長の推定値は  $nt$  と  $(n+1)t$  の2通り考えられる。したがって、トリップ長推定誤差の2乗平均値  $\epsilon_n^2$  は、

$$\begin{aligned} \epsilon_n^2 &= P_n \cdot (l - nt)^2 + P_{n+1} \cdot \{(n+1)t - l\}^2 \\ &= (n+1 - l/t) \cdot (l/t - n) \cdot t^2 \end{aligned} \quad (4)$$

となり、推定誤差は観測地点間隔  $t$  の2乗に比例して増大することがわかる。なお式(4)を  $l$  に関して平均すると  $(t^2/6)$  となる。

##### 3.1.2 配置間隔が確率分布に従う場合

観測点の配置間隔が確率分布に従う場合にトリップ長  $l$  が観測される回数について考察する。

##### (1) 観測回数とその確率

長さ  $l$  のトリップが  $n$  回観測される確率を  $P_n$  とする。  $n=0$  であるためには図-2(a)において  $l < t$  かつトリップの左端の座標  $y$  が、  $0 < y < t - l$  でなければならない。すなわち、

$$P_0 = \Pr(l < t, 0 < y < t - l) \quad (5)$$

配置間隔  $t$  の確率密度関数を  $g(t)$  で表わすと、

$$P_0 = \int_0^{\infty} (t - l) g(t) dt / \bar{t} \quad (6)$$

$$\text{ここに、} \bar{t} = \int_0^{\infty} t g(t) dt$$

次に、 $n=1$  であるためには図-2(b)において必ず  $l < t_1 + t_2$  でなければならない。 $n=1$  であるためにはこの条件のもとで、さらに次の4条件のいずれかを満足する必要がある。

- a)  $l < t_1, l < t_2$ , and  $t_1 - l < y < t_1$
- b)  $l < t_1, l > t_2$ , and  $t_1 - l < y < t_1 + t_2 - l$
- c)  $l > t_1, l > t_2$ , and  $0 < y < t_1 + t_2 - l$
- d)  $l > t_1, l < t_2$ , and  $0 < y < t_1$

よって、

$$\begin{aligned} P_1 &= \Pr(l < t_1, l < t_2, t_1 - l < y < t_1) \\ &\quad + \Pr(l < t_1 + t_2, l < t_1, l > t_2, t_1 - l < y < t_1 + t_2 - l) \\ &\quad + \Pr(l < t_1 + t_2, l > t_1, l > t_2, 0 < y < t_1 + t_2 - l) \end{aligned}$$

$$+ \Pr(\mathbb{L} < t_1 + t_2, \mathbb{L} > t_1, \mathbb{L} < t_2, 0 < y < t_1) \quad (7)$$

式(7)における4つの確率の意味は、( )内の $\mathbb{L}$ と $t_1, t_2$ との大小関係のもとに、上記a)～d)におけるそれぞれの $y$ のとりうる範囲の大きさの期待値である。したがって、 $P_1$ は $t_1, t_2$ の確率密度関数 $g(t_1), g(t_2)$ を用いて次式のように表わせる。

$$\begin{aligned} P_1 = & \left\{ \int_0^{\infty} g(t_1) \int_0^{\infty} g(t_2) dt_2 \cdot dt_1 \right. \\ & + \int_0^{\infty} g(t_1) \int_0^{\mathbb{L}} t_2 \cdot g(t_2) dt_2 \cdot dt_1 \\ & + \int_0^{\mathbb{L}} g(t_1) \int_{\mathbb{L}-t_1}^{\mathbb{L}} (t_1 + t_2 - \mathbb{L}) \cdot g(t_2) dt_2 \cdot dt_1 \\ & \left. + \int_0^{\mathbb{L}} g(t_1) \int_{\mathbb{L}-t_1}^{\infty} t_1 \cdot g(t_2) dt_2 \cdot dt_1 \right\} / \bar{t} \quad (8) \end{aligned}$$

以下、 $P_2, P_3, \dots, P_n$ も同様の考え方で求められる。

## (2) トリップ長の推定誤差

$\mathbb{L}$ の長さをもつトリップが $n$ 回観測された場合、トリップ長は $\mathbb{L} = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n$ と推定される。そこで $\mathbb{L}$ と $\mathbb{L}$ の差を推定誤差とし、その2乗平均値を求めてみる。

$$\varepsilon_n^2 = \{\mathbb{L} - (t_1 + t_2 + \dots + t_n)\}^2 \quad (9)$$

$\varepsilon_n^2$ の期待値を求めるためには、これまでに示した確率式を応用する。すなわち $P_0$ に対する $\varepsilon_0^2$ の期待値 $E(\varepsilon_0^2)$ は次式で表わされる。

$$E(\varepsilon_0^2) = \int_0^{\infty} \mathbb{L}^2 (t - \mathbb{L}) g(t) dt / \bar{t} / P_0 \quad (10)$$

また確率 $P_1$ に対応する $\varepsilon_1^2$ の期待値 $E(\varepsilon_1^2)$ は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} E(\varepsilon_1^2) = & \left\{ \int_0^{\infty} g(t_1) dt_1 \int_0^{\infty} (1 - t_2)^2 g(t_2) dt_2 \right. \\ & + \int_0^{\infty} g(t_1) dt_1 \int_0^{\mathbb{L}} t_2 (1 - t_2)^2 g(t_2) dt_2 \\ & + \int_0^{\mathbb{L}} g(t_1) dt_1 \int_{\mathbb{L}-t_1}^{\mathbb{L}} (t_1 + t_2 - \mathbb{L}) (1 - t_2)^2 g(t_2) dt_2 \\ & \left. + \int_0^{\mathbb{L}} g(t_1) dt_1 \int_{\mathbb{L}-t_1}^{\infty} t_1 (1 - t_2)^2 g(t_2) dt_2 \right\} / \bar{t} / P_1 \quad (11) \end{aligned}$$

以下、 $P_2, P_3, \dots, P_n$ に関しても同様の考え方で求められる。

### 3. 1. 3 観測点間隔が指数分布に従う場合

指数分布の確率密度関数を $g(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$  ( $t \geq 0$ )とすれば、前項で示した考え方により、トリ

ップ長 $\mathbb{L}$ が $n$ 回観測される確率 $P_n$ を求めることができ、 $P_n$ は次式に示すポアソン分布となることを示すことができる。

$$P_n = (\lambda \mathbb{L})^n \exp(-\lambda \mathbb{L}) / n! \quad (12)$$

## (1) 観測回数の期待値

観測回数の期待値 $M_L$ は次式によって表わされる。

$$M_L = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = (\lambda \mathbb{L}) \exp(-\lambda \mathbb{L}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\lambda \mathbb{L})^{n-1}}{(n-1)!} \quad (13)$$

$\lambda \mathbb{L} = x$ とおいて上式を展開すると、

$$M_L = x \exp(-x) \cdot$$

$$(1 + x + x^2/2! + x^3/3! + \dots + x^n/n! + \dots) \quad (14)$$

上式(14)の( )内の級数は $\exp(x)$ のMaclaurin展開であるので、

$$M_L = x = \mathbb{L} / \bar{t} \quad (15)$$

すなわち、観測される回数はトリップ長 $\mathbb{L}$ と平均観測間隔 $\bar{t}$ との比となる。

## (2) トリップ長の推定誤差

式(10)、式(11)より、

$$P_0 E(\varepsilon_0^2) = (2/\lambda^2) (x^2/2) \exp(-x)$$

$$P_1 E(\varepsilon_1^2) = (2/\lambda^2) (x^3/3! - x^2/2! + x/1!) \exp(-x)$$

同様に、

$$P_2 E(\varepsilon_2^2) = (2/\lambda^2) (x^4/4! - x^3/3! + x^2/2!) \exp(-x)$$

$$P_3 E(\varepsilon_3^2) = (2/\lambda^2) (x^5/5! - x^4/4! + x^3/3!) \exp(-x)$$

$\vdots$

$$P_n E(\varepsilon_n^2) = (2/\lambda^2) (x^{n+2}/(n+2)! - x^{n+1}/(n+1)! + x^n/n!) \exp(-x) \quad (16)$$

したがって、トリップ長推定誤差の期待値は式(16)を用いて、

$$E(\varepsilon^2) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n E(\varepsilon_n^2) = \frac{2}{\lambda^2} (1 - e^{-x}) \quad (17)$$

以上のように、観測回数の期待値は等間隔配置、確率分布する配置のいずれにおいても同様に、①トリップ長と平均配置間隔の比の値で求められること、②トリップ長の推定誤差の2乗平均値は平均配置間隔の2乗に比例して増大することが明かとなった。

### 3. 2 配置間隔が各種の確率分布に従う場合

この節では、理論分布として一様分布、対数正規分布を用いて、シミュレーションにより数量的に前節の内容を補足し、望ましい配置間隔のあり方について考察を加えるものである。

#### 3. 2. 1 トリップ長の推定誤差に関する特性

図-3は期待値をほぼ5.0に固定し、一様分布と対数正規分布に関しては標準偏差を2.9前後に制御した配置間隔分布をもとに、トリップ長の推定誤差の2乗平均値の平方根 $\bar{\varepsilon}$ の値のトリップ長 $\bar{L}$ による変化をみたものである。等間隔配置の場合には一定の周期での $\bar{\varepsilon}$ の増減が繰返されるのに対し、配置間隔が確率分布する場合にはいずれも一定値に収束しており、等間隔配置の場合よりも高い $\bar{\varepsilon}$ の値を示している。なお、図-3で配置間隔が確率分布をする2ケースの比較を行なうと、期待値、標準偏差に差がないのにもかかわらず、 $\bar{\varepsilon}$ の値に明瞭な差が現れている。これは分布形の特長であろうと考えられる。

次に、配置間隔の標準偏差の大きさの変化が $\bar{\varepsilon}$ の増減に及ぼす影響についてみてみよう。図-4は配置間隔を平均ほぼ5.0の一様分布とした場合に、標準偏差の変化による $\bar{\varepsilon}$ の曲線形の変化を表わしたものである。配置間隔の標準偏差 $\sigma_t$ の減少につれて曲線は下方に推移する。①、②など比較的小さい $\sigma_t$ の大きな範囲では上下変動が小さく横道い状態を呈するが、 $\sigma_t$ の減少につれて周期性を帯び、上下変動の激しい曲線形に変化する。さらに $\sigma_t$ が0に近づくとき等間隔配置における誤差曲線に漸近していく。

### 3. 2. 2 平均配置間隔の目標値

これまでの解析結果から判断すると、トリップ長の推定誤差を可能な限り小さくするという目的を設定した場合、一般的には平均配置間隔が短く、配置間隔のばらつきが小さい配置を目指すべきである。

しかし一方で、意味のある限界値、あるいは特性変化点のような特定の値をこれまでの解析からは見出すことはできなかった。そこで、平均配置間隔の目標値を設定するため、トリップ長分布を考慮した以下のような分析を試みた。

トリップ長の推定誤差の2乗平均値 $E(\varepsilon^2)$ をトリップ長分布の確率密度関数 $f(L)$ を用いて平均化した値 $\bar{\varepsilon}^2$ を次のように定義する。

$$\bar{\varepsilon}^2 = \int_0^{\infty} E(\varepsilon^2) f(L) dL \quad (18)$$

$\bar{\varepsilon}^2$ は配置間隔 $t$ の平均値 $\bar{t}$ および標準偏差 $\sigma_t$ のみの関数となる。等間隔配置とすれば、 $\sigma_t=0$ となり、 $t$ のみの影響を考えればよい。したがって、等間隔配置に関して $\bar{\varepsilon}^2$ と $t$ との関係が求められれば、観測精度の設定値 $\bar{\varepsilon}^{2*}$ を与えることにより、対応す

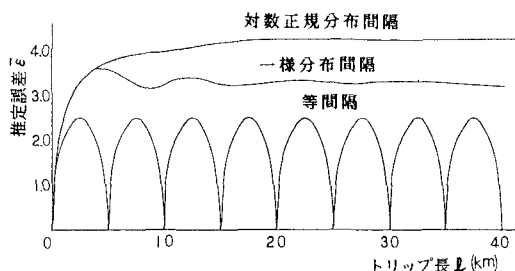


図-3 トリップ長と推定誤差(配置間隔の分布形の変化)

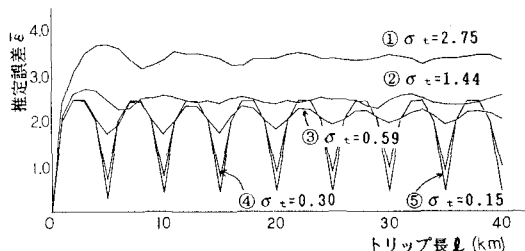


図-4 トリップ長と推定誤差(一様分布配置間隔の分散の変化)

る $t^*$ を逆算的に求めることができる。

図-5は昭和55年度の全国道路交通情勢調査自動車OD調査の結果から、トリップ長の頻度分布を求め、それを対数正規確率紙上に表わしたものであり、各点はほぼ直線上にある。このことからトリップ長分布は対数正規分布であるとみなすことができる。図よりトリップ長の自然対数の期待値 $\mu_L$ と標準偏差 $\sigma_L$ を求めると $\mu_L=1.829$ 、 $\sigma_L=1.101$ であり、平均トリップ長は $\bar{L}^*=6.23\text{km}$ となることわかる。そこで、トリップ長の分布をパラメータ $\mu_L$ 、 $\sigma_L$ を用いた対数正規分布とし、その確率密度関数を次のように設定した。

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_L X} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(X) - \mu_L}{\sigma_L} \right)^2 \right\} \quad (19)$$

式(4)、式(19)を用いて式(18)の $\bar{\varepsilon}^2$ の値を数値積分法により計算した。図-6は $\bar{\varepsilon}^2$ の平方根と平均トリップ長 $\bar{L}$ との比率が平均配置間隔 $\bar{t}$ によってどのように変化するかをみたものである。図-3,4の結果からもわかるように、等間隔配置による誤差特性は一様分布、対数正規分布等に従う配置間隔による誤差特性の下限値に相当しており、図-6の値も平均配置間隔一定の条件下におけるトリップ長推定誤差平均特性の下限値を示している。

図-6の曲線を直線回帰すると次式が得られる。

$$\bar{\varepsilon} / \bar{L} \times 100 = 2.042 \bar{t} + 0.336 \quad (R^2 = 0.9995) \quad (20)$$

式(20)の左辺は誤差率(%)と定義できる。この値

の10%に対応するものは4.73kmである。すなわち、等間隔配置の場合にはトリップ長推定誤差の誤差率も下限値を与えるので、少なくとも $\leq 4.73\text{km}$ でなければ上記の誤差率は10%を超えてしまうといえる。

以下の章では、平均配置間隔4.73km（約5.0km）を1つの目安として道路網上での均等間隔配置問題を考える。

#### 4. 道路網上での交通量観測点の均等間隔配置

これまで一次元上で一般的な確率分布を含めた配置間隔を考え、その確率分布の関数形がトリップ長推定誤差にどのような影響を及ぼすかについて分析してきた。その結果、推定トリップ長（トリップ長の期待値）に関してはいかなる確率分布を用いても同一の値が得られるのに対し、推定誤差については配置間隔の分布形により大きく異なり、分散が大きな分布であるほど残差平方和も大きくなる性質のあることが理論的、実証的に示された。特に等間隔配置の場合には検討に用いた全ての分布形の中で最も残差平方和が小さく、トリップの長さに影響される度合も最も小さい。したがって、現実には道路網上に交通量の観測点を配置する場合に、費用の面から観測点数に制約があれば、できるだけ等間隔に観測点を配置することが要求される。

しかし、一次元上に配置する場合と異なり、道路網上に配置する場合には道路が交差するため、同一組の観測点間にいくつもの経路が存在し、絶対的な観測点間隔の定義は困難となる。

そこで本研究では道路網上を流れるOD間の経路に着目し、各経路を対象とした一次元上の問題に置き換え、観測点の配置密度の下限値を基準として、個々の経路を構成するリンク上への観測点配置問題を解くことを考えた。このときの目的関数は観測点数であり、全経路において配置密度に関する基準を満足できる配置解のうち、観測点数の最小のものを最適解とするものである。次に問題となる点は上述の最適化問題の解として抽出された観測リンクにおける観測点の位置の決定方法である。この問題では、隣接する観測点間の距離ができるだけ均等になるような観測点位置を決定する必要がある。

このような二段階の決定法により、道路網上で利

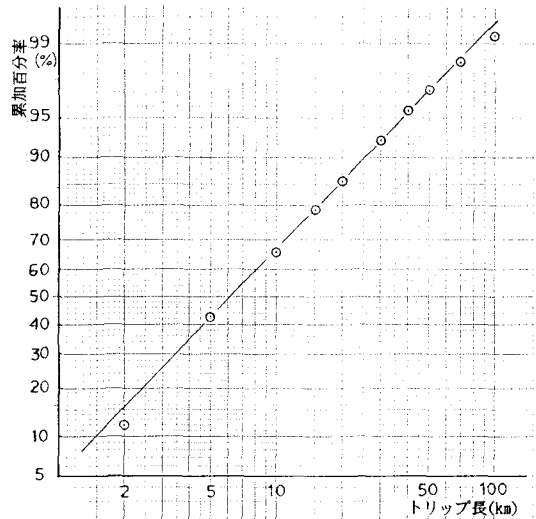


図-5 自動車ODのトリップ長分布

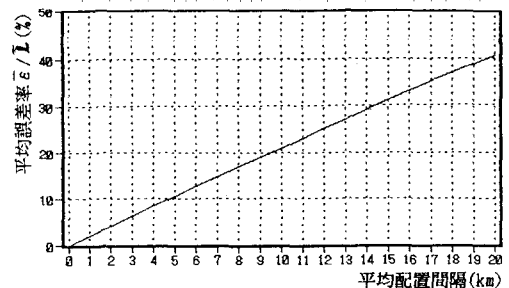


図-6 平均配置間隔とトリップ長推定誤差との関係

用頻度の高い経路を対象とした配置密度、配置間隔の均等化を図ることができる。以下ではその詳細を述べる。

##### 4.1 道路網上の観測点の配置密度均等化

OD間を代表する経路をパス $i$ 、その経路長を $D_i$ とする。各トリップはパス $i$ 上の任意の2点を両端とするが、パス $i$ 上に観測点が $p_i$ 箇所存在したとすると、パス $i$ 上の観測密度は $p_i/D_i$ であり、これまでの解析結果から、この値が大きいほどトリップ長（走行台キロ）の推定誤差のばらつきは小さくなるといえる。ここで、

$\xi_m$ : リンク $m$ に観測点を置く場合1, 置かない場合0,

$d_m$ : リンク $m$ の長さ,

$s_{im}$ : パス $i$ 上にリンク $m$ がある場合1, ない場合0

とすると、パス $i$ 上の観測点数 $p_i$ 、パス長 $D_i$ は次のように表現される。

$$p_i = \sum_m \xi_m s_{im}, \quad D_i = \sum_m d_m s_{im} \quad (21)$$

基準配置密度を $e_i$ とすると、最適化問題は、

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z &= \sum_m \xi_m \\ \text{s.t. } p_i/D_i &\geq e_i \quad (\text{for all } i) \end{aligned} \quad (22)$$

のようになる。この問題は目的関数、制約条件ともに線形の整数(1, 0)計画問題であり、バラスの加法アルゴリズムと分枝限定法との併用による解法<sup>1), 3)</sup>を利用して解くことができる。

#### 4. 2 リンク上の観測位置決定法

1本の観測リンクには2箇所以上の観測点を配置しないことを前提として、隣接する観測点間の距離をできるだけ均等化する観測点位置を決定する。

##### 4. 2. 1 モデルと記号

図-7のような道路網の一部を用いて説明する。図中の○印はノード、×印は観測点である。ここで、

$x_{AiB}$  : 観測点Aと隣接リンク*i j*上の観測点Bとの最短距離。

$d_{ki}$  : リンク*k i*の長さ。

$d_{kA}$ ,  $d_{iA}$  : それぞれノード*k*, *i*と観測点Aとの距離。

$M_A$  : 観測点Aを一端とする観測点間パスの集合。

$M_{Ai}$ ,  $M_{Ak}$  : 観測点Aを含むリンクを*i k*とすると、 $M_A$ のうちそれぞれノード*i*を通るパスの集合およびノード*k*を通るパスの集合。

$n_A$ ,  $n_{Ai}$ ,  $n_{Ak}$  : それぞれ $M_A$ ,  $M_{Ai}$ ,  $M_{Ak}$ の要素数(観測点間パス数)。

$\eta_{AB}$  : AB間の直接のパスが存在するとき1, 存在しないとき, 0。

とする。このとき、観測点間パスの全数をP, パスの平均長を $\bar{x}$ , パス長の分散をZとすると、

$$\begin{aligned} P &= \sum_A \sum_{B \in M_A} \eta_{AB}, \\ \bar{x} &= \frac{1}{P} \sum_A \sum_{B \in M_A} x_{AB}, \\ Z &= \frac{1}{P} \sum_A \sum_{B \in M_A} (x_{AB} - \bar{x})^2 \end{aligned} \quad (23)$$

##### 4. 2. 2 観測点配置リンクを与件としたリンク内観測点位置の決定方法

図-7のようにリンク*i k*間の観測点Aが*k*の方向に $\Delta d_{iA}$ だけ変化した場合のZの変化を調べる。ただし点Aはリンク*i k*間にあるので、

$$-d_{iA} \leq \Delta d_{iA} \leq d_{kA} \quad (24)$$

でなければならない。また $d_{iA}$ の変化とともにAB, AC間のパスは変化し、その最短距離も変化する。したがって $\bar{x}$ は変化し、その変化量 $\Delta \bar{x}$ は次のように表わされる。

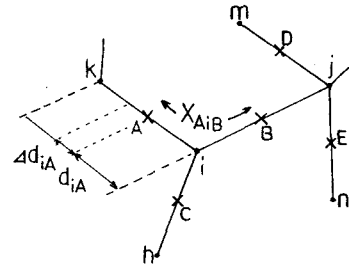


図-7 観測点間パスとその変化

$$\begin{aligned} \Delta \bar{x} &= \sum_A \sum_{B \in M_A} \Delta x_{AB} / P \\ &= (n_{Ai} - n_{Ak}) \Delta d_{iA} / P \end{aligned} \quad (25)$$

またZも次式のように変化する。

$$\begin{aligned} Z + \Delta Z &= \sum_{a \neq A} \sum_{b \in M_A (b \neq A)} (x_{ab} - \bar{x} - \Delta \bar{x})^2 / P \\ &+ \left\{ \sum_{b \in M_{Ai}} (x_{Ab} + \Delta d_{iA} - \bar{x} - \Delta \bar{x})^2 \right. \\ &\left. + \sum_{b \in M_{Ak}} (x_{Ab} - \Delta d_{iA} - \bar{x} - \Delta \bar{x})^2 \right\} / P \end{aligned} \quad (26)$$

これより $\Delta Z$ を求めれば次式となる。

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \left\{ \sum_a \sum_b \Delta \bar{x}^2 + \sum_{b \in M_{Ai}} (\Delta d_{iA} - \Delta \bar{x})^2 \right. \\ &\left. + \sum_{b \in M_{Ak}} (\Delta d_{iA} + \Delta \bar{x})^2 \right\} / P \\ &- 2 \left\{ \sum_a \sum_b (x_{ab} - \bar{x}) \Delta \bar{x} - \sum_{b \in M_{Ai}} (\Delta d_{iA} - \Delta \bar{x}) (x_{Ab} - \bar{x}) \right. \\ &\left. + \sum_{b \in M_{Ak}} (\Delta d_{iA} + \Delta \bar{x}) (x_{Ab} - \bar{x}) \right\} / P \end{aligned} \quad (27)$$

これを整理すれば、 $\Delta Z$ は次の式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \{ n_A - (n_{Ai} - n_{Ak})^2 / P \} / P \Delta d_{iA}^2 \\ &+ \{ -(n_{Ai} - n_{Ak}) \bar{x} + (\sum_{b \in M_{Ai}} \bar{x}_{Ab} - \sum_{b \in M_{Ak}} \bar{x}_{Ab}) \} / P \Delta d_{iA} \end{aligned} \quad (28)$$

式(28)の右辺第1項の $\Delta d_{iA}^2$ の係数をV, 第2項 $\Delta d_{iA}$ の係数をWをすると、

$$\begin{aligned} \Delta Z &= V \Delta d_{iA}^2 + W \Delta d_{iA} \\ &= V [\Delta d_{iA} + W/(2V)]^2 - W^2/(4V) \end{aligned} \quad (29)$$

となる。したがって、 $\Delta d_{iA} = -W/(2V)$ のとき $\Delta Z$ は最小値をとる。しかし式(24)の条件により、 $\Delta d_{iA}$ の範囲が定められているので、 $\Delta Z$ の最小値は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \text{Min}(\Delta Z) &= \begin{cases} V \Delta d_{iA}^2 - W \Delta d_{iA} & [-W/(2V) < -\Delta d_{iA}] \\ -W^2/(4V) & [-\Delta d_{iA} < -W/(2V) < \Delta d_{kA}] \\ V \Delta d_{kA}^2 + W \Delta d_{kA} & [\Delta d_{kA} \leq -W/(2V)] \end{cases} \end{aligned} \quad (30)$$

$\text{Min}(\Delta Z) < 0$ である場合のみ、そのときの $d_{iA} + \Delta d_{iA}$ の位置に観測点Aを移動させればよい。

#### 4. 3 実在道路網への適用

前節の結論より $e_i = 0.2$ 箇所/kmとし、福岡市の幹線道路網における最短経路のみを対象にして、式(22)の計算を行なった。

本研究は大規模定期型調査(一般交通量調査)の観測点を念頭においており、観測点数は多くなるものと考えられる。一方、これまでの研究では小規模継続型調査を対象とした配置問題を取扱ってきており、観測点数は相対的に少ない。最終的にはこれまでに提案した一連の配置問題を統合したモデルでの検討が必要である。その意味から本研究ではモデル統合の試みとして文献2)でえられた17本の観測点候補リンクに観測点が既設であるという条件を加えたモデルを対象とした。

4. 1に示した方法で、道路網上の観測点間隔均等化のための観測リンクを抽出した。上記の17本を含めて43本のリンクが必要であり、このリンク数の解は57組存在するという結果が得られた。これらの解を構成するリンクのうち、抽出される頻度の高いリンクで構成されている解を12組拾い出し、それらの解の構成リンクの位置を示したのが図-8である。図中○印は発生集中ノード、大きな●印は上記17本のリンク、小さな●印は本解析によって追加されたリンクである。破線の①、②、③の各グループは各々においていずれか1本のリンクが必要であることを示している。この道路網では発生集中ノードが中央部に高密度に存在し、また多くのOD間経路が中央部を通過する網構造となっていることから、中央部に比較的多くの観測点が集中する結果となっている。

本解析で用いた175本のOD間経路における観測点平均配置間隔の累積頻度分布曲線を図-9に示す。 $e_i = 0.2$ 箇所/kmとしたので、配置間隔は5.0km以下となっており、平均的には2.5km程度である。

次に、12組の解を対象として、各解において式(23)のZが最小となるよう前節で示した方法を用いて観測リンク上の観測点位置を決定した。その結果を表-1に示す。解を構成するリンクの大部分が共通であるため、観測点間バスの平均長および目的関数である分散ともに大きな相違はないが、解1の分散が

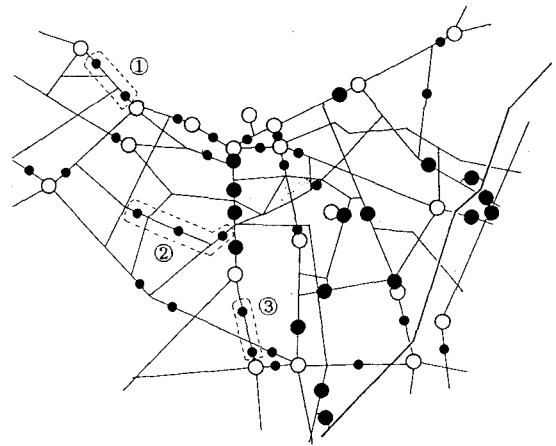


図-8 観測密度の基準を満足する観測点配置

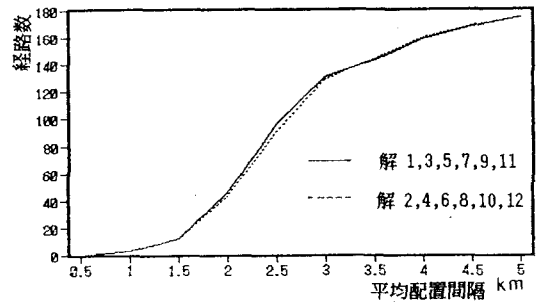


図-9 OD間経路における平均配置間隔の累加頻度

最も小さく、12組の中では最適解であるといえる。解1は図-8の3つの共通でないリンクの各グループにおいて最も中央寄りに位置するリンクの組合せを含んでいる。

一般交通量調査の重要な目的の1つに混雑度等を用いた道路区間の交通状況評価がある。そこでこれまでに得られた観測点配置結果が混雑度等による交通状況評価にどの程度貢献しうるかを調べてみた。

OD交通量の需要配分は各リンクの潜在的な交通需要量を与えるものであるから、この交通量が大きなリンクは潜在的な交通需要が高く、混雑度等による交通状況の評価を行なう必要性の高いリンクであるといえる。本研究ではOD間の最短経路上で観測点の配置問題を考えてきたが、このことは混雑度の高い区間の抽出の観点からも意味のあるものである。

図-10は解1の観測リンクが必要配分交通量とODペア数に関して全リンク中で占める順位をみたものである。横軸は交通量、ODペア数の順位のランク、縦軸は各ランク中の観測リンク割合を標準化した値であり、解1の観測リンクは需要交通量、需要ODペア数ともに大きなランクでの比率が高い。このこ

表-1 各解の観測点間バス長の平均と分散

| 解  | バス数 | 平均長   | 分散(Z) | 共通でないリンク    |
|----|-----|-------|-------|-------------|
| 1  | 190 | 4.733 | 5.367 | 111, 39, 61 |
| 2  | 190 | 4.719 | 5.461 | 111, 39, 62 |
| 3  | 190 | 4.802 | 5.423 | 111, 40, 61 |
| 4  | 190 | 4.781 | 5.514 | 111, 40, 62 |
| 5  | 195 | 4.837 | 5.508 | 121, 39, 61 |
| 6  | 195 | 4.808 | 5.569 | 121, 39, 62 |
| 7  | 195 | 4.902 | 5.528 | 121, 40, 61 |
| 8  | 195 | 4.869 | 5.581 | 121, 40, 62 |
| 9  | 199 | 4.873 | 5.489 | 122, 39, 61 |
| 10 | 199 | 4.842 | 5.542 | 122, 39, 62 |
| 11 | 199 | 4.943 | 5.559 | 122, 40, 61 |
| 12 | 199 | 4.911 | 5.616 | 122, 40, 62 |

とから、解1においては交通需要が潜在的に高いリンクに観測点が配置されており、交通状況評価にも有効な観測点配置であることがわかる。

## 5. まとめ

一般交通量調査のような大規模定期型調査の目的は交通量を観測して観測区間個別の評価に用いるばかりでなく、特定路線や特定地域の走行台キロを計算することにより、自動車交通の活動量の分布を知ることにもある。この観点から、本研究ではトリップ長、観測間隔等、これまでの研究では取り扱わなかった距離概念を必要とする分野の研究を行なった。

研究の前半では、一次元上の観測点配置間隔特性とトリップ長推定精度等との関係を理論的に取り扱い、トリップ長を一定とした場合に、(1)トリップの観測回数の期待値は、観測点配置間隔の分布形によらず、トリップ長と平均配置間隔との比の値で求められる、(2)トリップ長の推定誤差の2乗平均値は、平均配置間隔の2乗に比例する、(3)配置密度を同一とした場合、等間隔配置はばらつきのある間隔配置よりもトリップ長の推定誤差を小さくできる、という3つの重要な性質を示すことができた。

次に、自動車のトリップ長分布の分析から、対数正規分布によるトリップ長分布を設定し、これを考慮したトリップ長推定誤差の2乗平均値の観測点間隔による関数形を導き、トリップ長の推定誤差率を10%以下に抑えるためには観測点間隔を約5.0km以下とする必要性があることを示した。

研究の後半では、前半における結論に基づき、道路網上の主なOD間の経路上で、配置密度を0.2箇所/km以上とするという制約条件の下に、観測点数を最小化する最適化問題を定式化するとともに、観測リンク上での観測位置の決定法を示した。

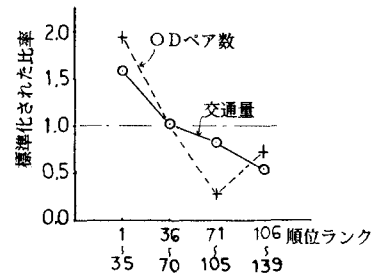


図-10 交通量、ODペア数の順位ランク中に占める観測リンクの割合

以上の結果に基づき、福岡市の幹線道路網を対象とした計算で、139リンク中、観測リンク43の解57組を得た。その中で、観測リンクとして抽出される頻度の高いリンクによって構成される12組の解を対象として観測点相互の距離の分散が最小となるリンク上の観測位置を決定し、分散が最小の解1を12組中の最適解とした。最後に、解1の観測点配置における混雑区間の抽出状況の分析を通して、概ね良好であるという結果を得た。

本研究によって、個別的な観測点の抽出のみならず、道路網における距離の連続性を考慮した観測点の配置が可能となった。ただし、本研究では交通状況評価のための観測点配置問題に関する検討が不十分であり、今後はこの問題も含めた交通量観測点の配置方法の体系化を推進したいと考えている。

## 参考文献

- 1) 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Vol.28, No.11, 1986
- 2) 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7, 1989.12
- 3) 外井・樗木・天本, 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, 土木学会論文集(投稿中)
- 4) 外井・樗木, 交通特性による道路の機能分類, 九州大学工学集報Vol.61, No.5, 1988