

交通流量推定のための観測系の編成

外井 哲志

1. はじめに

最近、大都市ばかりでなく地方都市においても交通混雑が進行しているが、道路整備の進捗の遅れから、短期的には道路建設よりもむしろ道路交通の管理・運用システムの強化による交通混雑の緩和に期待がかけられている。最近の道路交通情報や、道路利用者個人の情報収集の手段としての、ナビゲーションシステムへの関心の高まりは、こうしたソフト面への期待の裏づけであろう。この分野では、詳細かつ正確な道路交通に関する諸情報を必要とするが、それには情報収集源である「交通流観測」のあり方に関するさまざまな問題の解決が必要である。これまで、交通流観測の問題は、どちらかといえば観測機器の開発の面に重点がおかれていた。しかし、道路網の利用状況を正確に把握するためには、機器の開発のみならず、道路網のシステム分析にもとづいた、交通量観測体制のあり方を研究することが必要である。

本稿では、以上の立場から、筆者らが道路網システムを数理的手法を用いて研究した成果にもとづき、交通流量の推定のための交通量観測体制のあり方について述べるものである。なお、本稿で示す内容は、道路網上で交通量観測点を配置すべきリンクを決定するも

ので、1-0型の整数計画問題となる。図1には、以下の3, 4, 5の各節で示す観測系の編成手順に共通する概略の流れを示す。

2. 交通量観測体制の問題点と交通量観測の目的の設定

わが国の交通量調査には、道路交通情勢調査と交通量常時観測調査とがある。前者は、2年半に1度、全国の県道以上の道路22000箇所で一斉に実施される交通量調査で、基本的に昼間12時間交通量を車種別に観測するものであり、わが国全体の道路網の混雑状況等をマクロ的に把握する目的で行なわれている。後者は、全国の幹線道路の約400箇所に設置された車両感知器を用いて、時間単位の交通量を年間を通して連続観測するもので、交通量の時間変動、日変動、季節変動などの変動特性を分析し、道路幅員計画や道路交通環境の評価に用いることを目的としている。このほか、都市内の交通管制を目的とし、主要交差点などに設置した車両感知器で、車両の密度等を計測する調査もあるが、ここでは省略する。

道路交通情勢調査の問題点としては、①わが国の道路網総延長の約85%を占める市町村道がほとんど調査されていない、②春秋各々平日1日の調査であり、休日交通あるいは観光交通について調査がなされていない、③冬期における積雪地の交通量が把握されていない、の3点が指摘されている[1]。

一方、交通量常時観測調査に関しては、①観測点数が少なく、また地域的にも偏りがあるため、データを利用しにくい、②機械の故障が多い等の指摘がある[1]。

このように、現在の交通量観測体制には多くの問題があるが、上に述べた2つの調査を相互に補完させることによって、問題の解決を図ることができる。その1つとして、定期的実施される道路交通情勢調査の中間年の補間に、交通量常時観測調査を利用すること（非観測時点の交通量推定）が考えられ、また、市町村道の交通量調査の欠落に対しても、交通量常時観測調査、道路交通情勢調査の既存の交通量データと、道

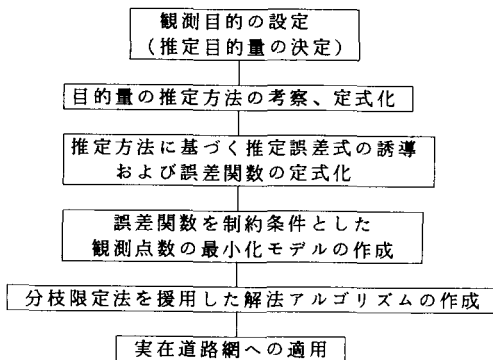


図1 観測系の編成の手順

とい さとし 九州大学 工学部 建設都市工学科
〒812 福岡市東区箱崎6-10-1

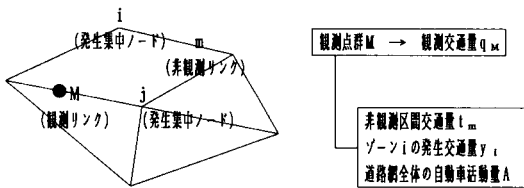


図2 道路網上の交通量の観測と推定概念

路リンク内のOD交通量（出発地と目的地の組合せ別交通量）の構成率とを用いて、交通量を推定する方法（非観測区間交通量の推定）が考えられる。このような利用法のほかに、観測交通量からゾーンの発生交通量やOD交通量を推定する（交通需要の推定）などの利用も考えられ、この方法によって交通計画調査の費用軽減が期待されている。

さらに、自動車交通の総活動量を表現する走行台キロを正確に推定するためには、観測点の間隔が適正でなければならない、この観点からの配置問題も重要である。

以下では、①非観測区間の交通量推定、②交通需要量（発生交通量）の推定、③自動車交通の総活動量（走行台キロ）の推定の3項目に限定して、それぞれの目的に沿った交通量観測点の配置の方法を紹介する。

なお、図2には、道路網上の交通量観測と推定概念を整理して示す。

3. 非観測区間の交通量推定のための観測系 [2]

リンクのOD構成率と観測交通量とを用いて、交通量が観測されていないリンクの交通量を推定する方法と、そのための観測系のあり方について述べる。

(1) リンクのOD構成率を考慮した交通量推定法

ノードとリンクとで構成される道路網モデル上でOD交通が複数の経路に分かれて通行しており、各リンクのOD構成率に関する過去のデータが存在するものとする。また、いくつかのリンクには交通量の観測点が配置されており、実測交通量が即座に提供されるものとする。

ここで、非観測リンク(m)の交通量を構成するOD交通量を、①観測リンクを流れているOD交通量と、②観測リンクを流れないOD交通量、の2種類に区分し、リンク m における①の和を f_m 、②の和を h_m とする。このとき、 f_m の推定値 f_m' と、これを用いたリンク m の交通量 t_m の推定値 t_m' は、次のように表わされる。

$$f_m' = \sum_{ij \in F_m} u_{ijM} (\sum v_{ijm} q_M) \quad (1)$$

$$t_m' = (1 + r_m) f_m' \quad (2)$$

ここに、

$$u_{ijm} = t_{ijm} / T_{ij} \quad (3)$$

$$T_{ij} = \sum_{M \in M} t_{ijM} \quad (4)$$

$$v_{ijM} = t_{ijM} / t_M \quad (5)$$

$$r_m = h_m / f_m \quad (6)$$

t_{ijm} : リンク m を流れる ij 間のOD交通量

F_m : リンク m を流れるODペアのうち、道路網内の観測点において少なくとも一部が観測されているODペアの集合

M : 観測リンクの集合

q_M : 観測リンク M における観測交通量

式(1), (2)において、 u_{ijm} , v_{ijM} , r_m は道路網における既存のOD交通の分布データと交通量観測リンクの位置から決まる既知量であり、 q_M のみが変量である。

ここで、式(1), (2)は、①各リンクのOD構成率は求められた当初において、ある程度以上の精度が保証されており、その後の短期間内に大きく変化しないこと、②観測交通量 q_M に大きな誤差が含まれないこと、という2つの仮定にもとづいて導かれている。

(2) 推定誤差の解析にもとづく観測系の最適化

リンク m を通過する ij 間OD交通量 t_{ijm} は、交通量配分計算や路側OD調査の結果として入手できるが、計算や調査の過程で誤差 e_{ijm} が混入し、 t_{ijm}' となる。

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

また、リンク M の観測交通量には機械や観測員の観測誤差 Δq_M が含まれているとすると、真値 q_M に対して観測値 q_M' は次式で表わされる。

$$q_M' = q_M + \Delta q_M \quad (8)$$

ここに、観測結果においても、OD交通量の配分計算の結果においても、真のリンク交通量は一致すべきであると考え、 $q_M = t_M$ とする。

以下、誤差 e_{ijm} の期待値が0であると仮定し、式(1)~式(6)に式(7)、式(8)を代入するとともに、誤差の微小項の性質を利用して、リンク交通量 t_m の推定誤差 Δt_m の解析を行えば、近似的に次式ようになる（途中は省略）。

$$\Delta t_m \approx e_m - (1 + r_m) \sum_{ij \in F_m} t_{ijm} g_{ij} \quad (9)$$

$$g_{ij} = \frac{1}{T_{ij}} \sum_{M \in M} \frac{t_{ijM}}{t_M} (e_M - \Delta q_M)$$

しかし、直接に制御不可能な観測交通量 q_M の誤差が及ぼす影響に関しては、異なった観点からの分析が必要であるので、ここでは、 $\Delta q_M = 0$ の場合のみを対象とする。

上式(9)において e_m (e_M) の期待値を e_m^* (e_M^*)、分散を σ_m^2 (σ_M^2) とし、 e_m (e_M) が互いに独立であると仮定すれば、 Δt_m の期待値 Δt_m^* 、分散 σ_{tm}^2 が次のように与えられる。

$$\Delta t_m^* = e_m^* - (1 + r_m) \sum_{ij \in F_m} (t_{ijm} g_{ij}^*) \quad (10)$$

$$\sigma_{tm}^2 = \sigma_m^2 + (1 + r_m)^2 \sum_{ij \in F_m} (t_{ijm}^2 \sigma_{g_{ij}^2})$$

ここに、 g_{ij}^* 、 $\sigma_{g_{ij}^2}$ は、 g_{ij} の期待値と分散であり、次のように表わされる。

$$g_{ij}^* = \frac{1}{T_{ij}} \sum_{M \in M} \frac{t_{ijM}}{t_M} e_M^* \quad (11)$$

$$\sigma_{g_{ij}^2} = \left(\frac{1}{T_{ij}} \right)^2 \sum_{M \in M} \left(\frac{t_{ijM}}{t_M} \right)^2 \sigma_M^2$$

式(10)に示された Δt_m^* は正負いずれの値をもとり得ることから、 Δt_m^* が正の場合には $\Delta t_m^* + \sigma_{tm}$ が、また、 Δt_m^* が負の場合には $\Delta t_m^* - \sigma_{tm}$ がそれぞれ絶対値の大きい側の推定誤差の 1 点となる。そこで、各リンクにおける誤差の評価に関して次の関数を考えれば、 Δt_m^* の値の正負に応じて、絶対値の大きい側の 1 点の大きさを表現することができる。

$$\begin{aligned} \lambda_m^2 &= \{(\Delta t_m^* + \sigma_{tm})^2 + (\Delta t_m^* - \sigma_{tm})^2\} / 2 \\ &= \Delta t_m^{*2} + \sigma_{tm}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

本稿では、観測目的を達成するための観測点数と位置を同時に決定する必要があると考え、観測点の最適配置の問題を「各リンクに対する推定誤差許容水準の制約条件下での観測点数 Z (目的関数) の最小化」問題ととらえて、次式(13)のように定式化した。なお、式(13)で L は全リンク数、 ξ_m はリンク m で観測点が置かれる場合に 1、置かれない場合に 0 をとる決定変数、 τ_m^2 は推定誤差の許容水準値を表わす。式(12)には明示的に示されていないが、 λ_m^2 は ξ_m の関数となっている。

$$\text{Minimize } Z = \sum_{m=1}^L \xi_m \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \lambda_m^2 \leq \tau_m^2 \quad (\text{for all } m)$$

(3) 解法

式(13)は制約条件式が非線形の式となるが、変数 ξ_m はすべて 1 または 0 の値をとるので、解の組合せは有限であり、原理的にはすべての組合せを検討し尽くすことによって最適解を求めることは可能である。しかし、その演算量は膨大なものとなるため、分枝限定法を用いて最適解が存在しないと判断される領域を切り捨て、検討対象領域を限定することにより、現実的な演算量の範囲内で最適解を求めることができる。具体的には次の手順で演算を進める。

- ① 対象リンクの中から OD ペア数 (n_m) が最大であるリンクを抽出し、そのリンクのみを用いたときに制約条件が満足されないリンク数 U を求める。
- ② 第 2 番目に n_m の大きなリンクを解に加えたとき、 U が減少するならば、リンク m を解の構成リンクとする。 U が減少しない場合には、他のリンクの中から n_m の大きな順に U が減少するまで追加すべきリンクの検討を加える。
- ③ 可能解が得られるまで①、②を繰り返す。可能解のリンクの集合を (N_0)、リンク数を (Z_0) とする。
- ④ 以下、初期可能解をベースとして、解を構成するリンクを 1 本ずつ解から除去した場合の新たな可能解の存在を調べる。制約条件が満たされない場合には、未検討リンク (解に含まれているリンクと解から除去するリンク以外のリンク) すべてを加えた場合に制約条件が満たされるかどうかを調べ、満たされるならば、未検討リンクの中から n_m の大きい順に検討解に加えつつ、制約条件の満足状況を判定する。未検討リンクをすべて追加しても制約条件が満たされなければ、個別リンクの追加では制約条件が満たされないのので、その探索枝はその段階で検討を打ち切る。(観測点の追加によって、式(10)、(11)の σ_{tm}^2 、 $\sigma_{g_{ij}^2}$ は減少することを証明することができる [3]。したがって、仮に未検討リンクをすべて追加しても制約条件を満たさないような探索枝では、それ以上の解の改善は望めない)
- ⑤ この検討過程において、あるリンクを検討解 (リンク数 Z_I) から除去しても ($A = N_0 - \{k\}$) 制約条件が満たされている場合があるが、その場合の解のリンク数 ($Z_I - 1$) は Z_0 より小さく、より最適解に近づいたことになる。そこで、 $N_0 = A$ および $Z_0 = Z_I - 1$ とし、④の過程を繰り返す。
- ⑥ 初期可能解を構成するすべてのリンクに関して、

解に含める場合と除去する場合を検討し終わった時点で計算を終了する。

4. 交通需要量の推計のための観測系の編成 [4]

リンクのOD構成率と観測交通量から、ゾーンの発生交通量を推定する方法とそのための観測系の編成方法について述べる。

(1) 発生交通量の推定のための観測点配置モデル

このモデルを考察するには、道路網上を流れる交通をその発生ゾーンと関連させてとらえる必要がある。そこで、次のような諸量を定義する。すなわち、

$$r_{im} : i \text{ ゾーン発生交通量がリンク } m \text{ を利用する確率,}$$

$$t_{im} : m \text{ リンク中の } i \text{ ゾーン関連交通量,}$$

$$w_{im} : t_{im} \text{ に対する } m \text{ リンク中の } i \text{ ゾーン関連交通量の割合,}$$

$$y_i : i \text{ ゾーンの発生交通量とすると, } y_i \text{ は,}$$

$$y_i = (w_{im} / r_{im}) t_{im} \quad (r_{im} \neq 0) \quad (14)$$

となる。

次に、 y_i の推定誤差 Δy_i は、前節と類似の考察により、次のように表わされる。

$$\Delta y_i = \sum_{m \in L} \xi_m \gamma_{im} (\Delta q_m - e_m) / \sum_{m \in L} \xi_m \beta_{im} \quad (15)$$

ここに、

$$\gamma_{im} = w_{im} / r_{im} \quad (r_{im} \neq 0), \quad 0 \quad (r_{im} = 0)$$

$\beta_{im} = 1$ (リンク m に i ゾーン交通量が流れている),
 0 (リンク m に i ゾーン交通量が流れていない)

以下、同様に、 $\Delta q_m = 0$ として取り扱おうと、 Δy_i の期待値、分散はそれぞれ、

$$\Delta y_i^* = - \sum_{m \in L} \xi_m \gamma_{im} e_m^* / \sum_{m \in L} \xi_m \beta_{im} \quad (16)$$

$$\sigma_{y_i}^2 = \sum_{m \in L} (\xi_m \gamma_{im})^2 \sigma_m^2 / (\sum_{m \in L} \xi_m \beta_{im})^2$$

と表わせる。また、 Δy_i のばらつきの指標として次式の Y_i^2 を定義する。

$$Y_i^2 = \Delta y_i^{*2} + \sigma_{y_i}^2 \quad (17)$$

許容値 ρ_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。

$$\text{Minimize} \quad Z = \sum_{m \in L} \xi_m \quad (18)$$

$$\text{s. t.} \quad Y_i^2 \leq \rho_i^2 \quad (\text{for all } i)$$

この最適化問題も、前出の解法とほとんど同じ手順

で求めることができる。

5. 自動車の活動総量を把握するための観測系の編成 [5]

自動車交通の活動量の分布を知るための交通量観測点配置のあり方について述べる。

(1) 走行台キロの推定誤差に関する分析と観測点配置間隔の設定

走行台キロの推定誤差を分析するためには、ある長さをもつ交通(トリップ)が、道路網上に分布した観測点群によって観測される回数とその確率を求めることが基本となる。そこで、まず1次元上の観測点間隔特性とトリップ長推定精度との関係を分析する。

いま、1の長さをもつトリップが、 t_1, t_2, \dots, t_n の間隔をもつ連続した n 箇所の観測点を通過する場合、トリップ長は $l' = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n$ と推定され、1と l' の差の2乗平均値は、次式で表わされる。

$$\epsilon_n^2 = \{1 - (t_1 + t_2 + \dots + t_n)\}^2 \quad (19)$$

ここで、 t_1, t_2, \dots, t_n は、ある確率分布に従う確率変数であるとし、確率理論とモンテカルロシミュレーションを用いて、配置間隔が等間隔の場合、一様分布、指数分布、対数正規分布などの理論分布に従う場合について、 ϵ_n^2 の値の分析を行なった。その結果の一部を図3に示す。これは、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前後に制御した観測点間隔分布をもとに、トリップ長の推定誤差の2乗平均値の平方根 ϵ^* の値のトリップ長1による変化をみたものである。等観測点間隔の場合には一定の周期で ϵ^* の増減が繰り返されるのに対し、観測点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、等観測点間隔の場合よりも大きな ϵ^* の値を示している。

このような一連の分析から、トリップ長を一定とした場合、

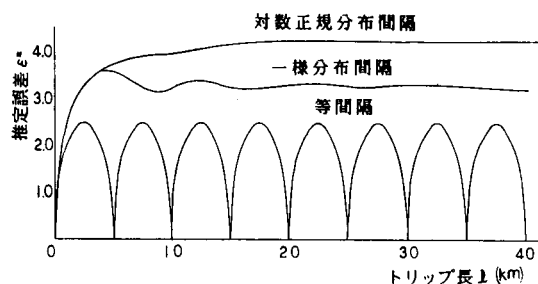


図3 観測点配置間隔の分布形とトリップ長の推定誤差

- ① トリップの観測される箇所数の期待値は、観測点間隔の分布形によらず、トリップ長と平均観測点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、平均観測点間隔の2乗に比例する。
- ③ 観測密度を同一とした場合、等観測点間隔は、ばらつきのある観測点間隔よりもトリップ長の推定誤差を小さくできる。

という3つの重要な性質を明らかにすることができる。

次に、実際の自動車のトリップ長分布の分析から、トリップ長分布が対数正規分布に従うものとすれば、走行台キロ推定誤差と観測点間隔との数量的な関係を明らかにすることができる。その結果より、走行台キロの推定誤差率を1%以下に抑えるためには、観測点間隔を約5.0 km以下とする必要があることを示すことができる。

(2) 走行台キロ推定のための交通量観測点配置モデル

以上の結果から、「道路網上の主なOD間の経路上で、観測密度を0.2箇所/km以上とするという制約条件のもとに、観測点数を最小化する」最適化問題を定式化し、これを分枝限定法などを援用して解くことによって、走行台キロを精度よくとらえるための交通量観測点の配置リンクを求めることができる。さらに、観測点相互の距離がより均等化するよう、配置が決定されたリンク上での観測点の位置を決定していく数理モデルをつくることができ、これを用いることによって、走行台キロをより高い精度で把握することができる。

6. 実在道路網への適用例

これまで述べた理論を、福岡市の道路網（リンク数139、地域内ゾーン数20）に適用し、①非観測区間の交通量推定、②交通需要量（発生交通量）の推定、③自動車交通の総活動量（走行台キロ）の推定のそれぞれの目的に必要な、交通量観測点数とその配置を求めた。

① 非観測区間の交通量推定に関しては、誤差許容水準値は、 $\tau_m/t_m=0.03$ とし、制約条件式左辺の誤差関数は、伝播誤差のみの項に限定して計算を行なった。解の探索の初期に現われる可能解は3リンク構成であり、リンクの代替可能性を検討する段階で2リンク構成の解が出現し、その後最終段階までに、20組の2リンク構成解が最適解として得られた。これらのうち、

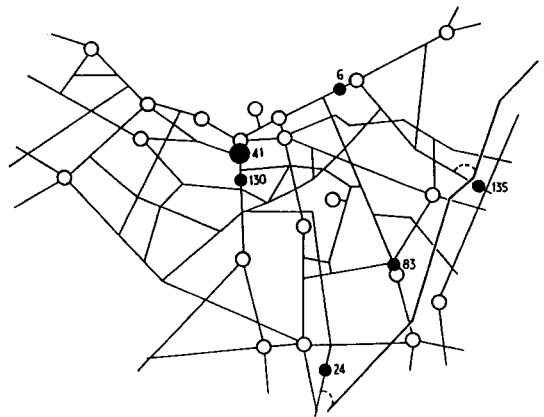
リンク41およびリンク41と対になる観測リンクの分布を図4(1)に示す。

② 交通需要量（発生交通量）の推定について、前出の道路網に適用して解を求めると、構成リンクの数は1、すなわち、道路網中の1リンクで観測すれば、十分な精度で発生交通量を推定できることが分かった。ここでは、推定誤差が5%以下となる解（観測リンク）の道路網上の分布を図4(2)に示す。

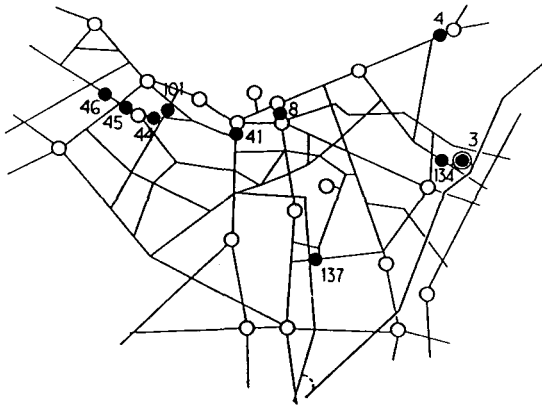
③ 自動車交通の総活動量（走行台キロ）の推定に関して、前出の道路網に適用して解を求めると、その結果は、139リンク中に43の観測点を配置するというものであった。その分布を図4(3)に示す。

7. 道路網におけるその他の政策決定型モデル研究

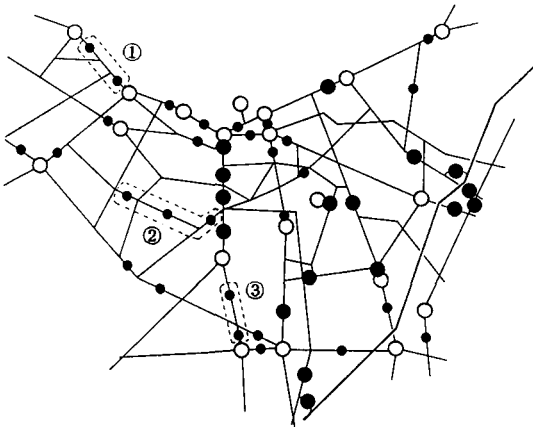
以上、解説した交通量観測系の編成問題は、リンクに観測点を置くか否かを決定するもので、数理的にはリンクに関する決定変数（ $\xi_m=1,0$ ）を決定する最適化問題であった。交通計画、都市計画等の土木計画の分野では、数理的な根拠にもとづいた政策決定を課題とすることが多いため、こうした形式の数理問題の取り扱いが重要となる。本稿で取り上げたもの以外に、最近筆者が研究した例を紹介すれば、「地名案内標識の設置場所と案内地名の選定の問題」[6]がある。この問題では、各リンクの標識設置の有無と、標識上の地名の有無を決定変数とする。目的関数は設置すべき標識の本数であり、これを最小化する形式とし、制約条件は、1枚の標識上に表示し得る地名数およびOD毎の迷走度（ある分岐点で標識がないか、標識に目的地の



- (1) 非観測区間の交通量推定のための観測点配置
 (解は、{41, 6} {41, 130}, {41, 83}, {41, 24}, {41, 135}の5組で、すべて2リンク構成である)



(2) 発生交通量推定のための交通量観測点の配置
(この解では、観測点数は1であり、10箇所の候補地が考えられる)



(3) 走行台キロ推定のための交通量観測点の配置
(●は必要な交通量観測点、破線で囲ったグループは互いに代替可能であり、グループごとに1つ必要)

図4 実在道路網上への観測点配置

表示がなければ、運転者は直進すると仮定し、最短経路からはずれる程度を計算する。)がそれぞれの上限をこえないこととしている。この問題も分枝限定法を用いて最適解を探索することができる。また、目的地と駐車場が複数ある場合の商業地区での駐車場案内誘導などへの応用 [7] も可能である。このほか、類似の研究に、計画道路網でのリンクの整備順位の決定 [8] や既存の道路網での道路工事順位の決定 [9] などの研究もある。

さて、本稿で解法として紹介した分枝限定法は、原理は明快であるが、目的関数や制約条件の性質によっては、厳密解に到達するのに膨大な時間を要するとい

う欠点がある。たとえば、本稿 3.(4)で紹介した実在道路網への適用では、PC 9801 VX (286, 10 MHz) を用いて、約1月の時間を要した。こうしたことから、最近では土木計画の分野でも、遺伝的アルゴリズムのように、解の厳密性よりも求解の速度を重視した解法の導入 [8] が進みつつある。

こうした新しい解法の発展によって、本稿で述べたような数理モデルの現実の道路網への適用例がますます増えてくることを期待する。

参考文献

- [1] 建設省道路局道路経済調査室他；道路交通センサスの改善に関する調査研究報告書，昭和59年3月
- [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，pp. 251-258, 1989.12
- [3] 外井哲志；道路網における交通量観測系の編成に関する研究，九州大学学位論文，pp. 188-191, 1991.7
- [4] 外井，樗木，吉武，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，No. 419/IV-13, pp. 95-103, 1990.7
- [5] 外井，樗木，天本；交通量観測点の配置間隔に関する基礎的研究，土木計画学研究・論文集，pp. 145-152, 1990.11
- [6] 外井哲志；道路網における地名案内標識の最適配置に関する研究，第12回交通工学研究発表会論文集，pp. 53-56, 1992.11
- [7] 辰巳，樗木，外井；駐車場案内システムのための最適誘導に関する基礎的研究，土木計画学研究・講演集，No. 15(1), pp. 731-738, 1992.11
- [8] 田村，杉本，上前；遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用，土木学会論文集，No. 482/IV-22, pp. 37-46, 1994.1
- [9] 清田，樗木，古賀；市街地を対象にした道路工事の同時着工グループ化に関する研究，土木学会論文集，No. 449/IV-17, pp. 227-230, 1992.7