54-08

第 57 回土木計画学研究発表会・講演集

少数のトライアンドエラーによる 交通ネットワーク制御の最適化

中野　総士[1]・井料　隆雅[2]・原　祐輔[3]・日下部　貴彦[4]

[1]学生会員　神戸大学大学院工学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: 177t136t@stu.kobe-u.ac.jp

[2]正会員　神戸大学大学院工学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail:iryo@kobe-u.ac.jp

[3]正会員　東京大学大学院工学系研究科（〒113-8656　東京都文京区本郷 7-3-1）
E-mail: hara@bin.t.u-tokyo.ac.jp

[4]正会員　東京大学空間情報科学研究センター（〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5）
E-mail: t.kusakabe@csis.u-tokyo.ac.jp

混雑料金などにより交通ネットワークを制御する際には，OD（起終点）交通量に関する情報が不足することが往々にして問題となる．この問題を回避するために，トライアンドエラーを繰り返す適合的な制御手法が多く提案されいるが，実ネットワークにおいては，トライアンドエラーを多数反復することが困難なことも多い．本研究では，OD 交通量に関する事前の情報を活用し，1 回だけのトライアンドエラーが許される状況でリンクへの課金額をできるだけよくす方法を提案する．提案手法では，OD 交通量パターンが交通量配分問題の実行可能領域にのみ影響することを考慮し，リンク交通量パターンのみを用いて最適料金を推計することを行っている．数値計算の結果，提案手法は一定の効果はあるものの，精度向上には課題もあることが示された．

Key Words: *optimal toll, road pricing, network control*

1. はじめに

混雑料金などを用いて交通需要を管理して交通ネットワークを制御する手法は数多く存在するが，実際のネットワークに実装する際には，制御パラメータ決定に必要なデータをどのように設定するかが問題となる．特に問題となるのは交通需要に関するデータ，すなわち OD（起終点）交通量の情報である．OD 交通量の調査には各種制約（技術的制約，社会的制約，費用制約など）により相当の困難が伴い，その精度も必ずしも十分とはいえない．このことは OD 交通量の存在を前提とした交通量配分に依存して制御パラメータを決める場合の障害となる．OD 交通量の情報を用いずにネットワークを制御しようとする際によく用いられるアプローチに，交通状況の変動に応じてトライアンドエラーにより適合的に制御パラメータを調整する方法がある．このアプローチは交通信号の制御において一般的であり，SCOOT[1]などすでに複数の実装がある．混雑料金に関しては Yang らによる手法が知られる[2, 3]．ボトルネック通行券取引[4]のように，適合させるメカニズムを路外に設定する手法も同様のものといえよう．

トライアンドエラーによる制御パラメータの調整は，OD 交通量の情報を用いずに制御パラメータを最適化できる有効な手段といえるが，実際の交通システムで十分な回数のトライアンドエラーが可能かというと，必ずしもそうとはいえない．インフラのハード的整備計画はその最たるものである．混雑料金についても，利用者への周知や合意形成に時間を要する場合には，その価格を変えるタイミングはかなり限られてくる（例えば数年に 1 回など）だろう．このよう，少数のトライアンドエラーしか許されない場合には，トライアンドエラー中の観測データだけを用いるのではなく，たとえ不確実であっても，OD 交通量に関する事前の情報を活用する手法を用いることが望ましい．

OD 交通量に関する事前の情報を得るための手法にはさまざまなアプローチのものが考えられるが，本研究では河瀬ら[5]によるモンテカルロシミュレーションによるサンプリング手法の活用を前提とする．この手法では，発生集中交通量の期待値といくつかのパラメータ（分散パラメータ等）を入力値とする確率モデルで記述された

旅行者の目的地選択行動に基づいた確率分布に従った OD 交通量をサンプリングする．この手法の考え方は Wilson のエントロピーモデル [6]に近いが，エントロピーモデルがいわば最尤値だけを推定するのに対して，この手法は幅を持った推定パターンを多数生成するところに特徴がある．当然ながら OD 交通量が一意に決まるわけではないが，総発生交通量のような交通需要に関するスケールを示す値は概ね一定である． そのことが，制御パラメータを具体的な OD 交通量パターンにかかわらず決定することに有利に働くことは十分に考えられよう．

本研究では，OD 交通量に関する事前の情報を活用した上で，少数のトライアンドエラーで制御パラメータをできるだけよいものにする方法を提案する．本研究では，簡単のため，静的な利用者均衡配分モデルが適用される混雑する交通ネットワークにおいて，ある 1 個のリンクに設定される混雑料金の価格を決める問題を考える．もし OD 交通量が既知であれば，この問題は単なる一次元探索となり簡単に最適料金を算出できる．本稿では，特に 1 回のトライアンドエラーが許されることを想定した手法を説明する．本稿の構成は以下のとおりである．第 1 章で背景と目的を説明した．第 2 章で提案手法の説明を行う．第 3 章で Sioux Falls ネットワークによる数値計算例について紹介する．第 4 章でまとめと今後の課題を述べる．

2. 問題の定式化と提案手法

本稿では，

- 静的な交通流モデルによる道路ネットワーク
- 固定された OD 交通量パターン
- 均衡状態（確定的ないし確率的）が成立
- OD 交通量パターンは未知だが，河瀬らのモデル [5]により確率的には推定が可能
- リンク旅行時間関数は既知
- リンク交通量と旅行時間は正確に観測可能

を仮定し，

- 料金なしの状態でリンク交通量を観測
- 適当な料金をかけて，リンク交通量を観測
- 上記の観測結果を基に料金を確定

する，という手順で混雑料金を決める問題を考える．料金決定の際の目的関数は「確定後の混雑料金による総旅行時間」とする．ただし，複数の料金で総旅行時間が最小になるばあいは，最も小さい料金を最適な料金とする．なお，確率利用者均衡配分であれば，料金をきわめて大きくして，総旅行時間をほんの少しだけ減少させる状況もありうるが，このような料金設定は現実的には過大な設定であるというべきである．このような状況を避けるために，確率的利用者均衡配分を適用する際には，総旅行時間の大小は一定のしきい値を用いて判定する．

提案手法は以下の手順による：

1. 現状（料金なし）でのリンク交通量パターンを観測する．
2. 多数の OD 交通量パターンをサンプリング（サンプル OD 交通量パターンと名付ける）し，それぞれに対する最適料金を計算する．
3. 1.で求めた最適料金のヒストグラムを作成し，多くのケースに比して高めとなる料金を 1 回目の料金として実際に設定する．
4. リンク交通量パターンを再度観測する．
5. 課金前後で観測されたリンク交通量パターンともっとも近いリンク交通量パターンを実現する OD 交通量パターンを，2.のサンプルの中から選ぶ．
6. 5.で選んだ OD 交通量パターンにおける最適料金を確定料金とする．

ステップ 5 では，何等かの距離関数を設定する必要がある．また，リンク交通量をそのまま用いる方法だけでなく，リンク総旅行時間を用いる方法も考えられる．本稿における具体的な設定方法は，以降，個々のケースにおいて個別に導入する．

提案手法は，「リンク交通量のパターンが類似であれば，最適な混雑料金も同じ金額になる可能性が高いだろう」という考えに基づいて構築されている．このことを以降で説明する．一般的な静的利用者均衡配分問題は，リンク交通量 $\mathbf{x}$ と料金 p を引数とする適切な目的関数 $f(\mathbf{x}, p)$ を設定することにより，以下のように最適化問題で定式化することが可能である：

$$\begin{array}{l} \text{Max. } f(\mathbf{x}, p) \\ \text{sub. to. } \mathbf{x} \in \{\text{Feasible link flow}\} \end{array} . \tag{1}$$

確定的利用者均衡配分であれば Beckmann らの方法 [7]，確率的利用者均衡配分であれば赤松らの方法 [8]をこの式に当てはめることができる．ここで，目的関数にはリンク交通量のみが入り，料金 p もリンク旅行時間に直接足しこまれることに注意したい．すなわち，目的関数は OD 交通量パターンには依存していない．よって，式(1)の最適化問題の答え（すなわち均衡状態における $\mathbf{x}$ の値）は $\mathbf{x}$ の実行可能領域のみに依存して決定することとなる．観測したリンク交通量パターンと同じリンク交通量パターンを実現するサンプル OD 交通量パターンを得ることができれば，真の OD 交通量パターンとサンプル OD 交通量パターンは，少なくともその 1 点で実行可能領域を共有する．このことは，少なくともその近傍で 2 つの OD 交通量パターンの実行可能領域が重複する領域があることを示唆する．ここで料金 p を 0 より大きい値

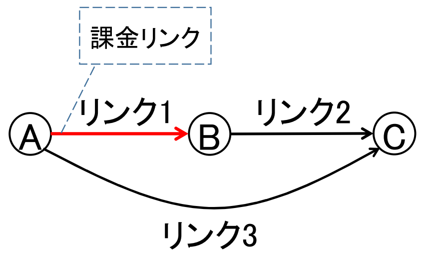

図-1　2 経路 3OD ネットワーク

に設定したときに，最適解における **x** がこの重複領域に収まる場合には，いずれの OD 交通量パターンにおいても最適料金は同一となる．

上記のことを端的に示す例題について説明する．いま，**図-1** のようなネットワークを考える．このネットワークにおける OD ペアは「A から B」「B から C」「A から C」の 3 つである．経路選択が可能なのは A から C である．課金はリンク 1 にのみ行う．それぞれの OD 交通量を q_{AB}, q_{BC}, q_{AC} ，リンク交通量を x_1, x_2, x_3 とすれば，リンク交通量の実行可能領域は

$$x_1 = q_{AB} + \alpha q_{AC},\ x_2 = q_{BC} + \alpha q_{AC},\ x_3 = (1-\alpha) q_{AC} \\ 0 \le \alpha \le 1 \tag{2}$$

と書くことができる．ここで α は OD ペア AC の経路選択率を意味する．式(2)で示される実行可能領域は α で示される 1 次元の自由度を持つ．いま，ある 1 点で同一の x_1, x_2, x_3 を実現する 2 つの異なる q_{AB}, q_{BC}, q_{AC} を考えよう． α の範囲を無視してしまえば，これら 2 つの q_{AB}, q_{BC}, q_{AC} が形成する実行可能領域は全く同じ形になる（このことは，ある x_1, x_2, x_3 が実現していれば，OD ペア AC の車両をリンク 3 の経路に移動することにより，x_1, x_2 はその分だけ減少し， x_3 はその分だけ増加することを考えればわかりやすい）．よって，制約条件のことを引き続き無視すれば，これら 2 つの q_{AB}, q_{BC}, q_{AC} に対応する課金リンクの最適料金は必ず同じ値となる．

もちろん，実際の問題では，制約条件（具体的には経路交通量の非負制約）の影響により，「リンク交通パターンが同一であれば最適課金も同一」という関係は普遍的には成立しない．特に，最適料金がより高額の場合にはこの問題がより発生しやすい．再び**図-1** の例を考えよう．この例において，リンク 1 と 2 は「自由流旅行時間は短いが混雑しやすいリンク（都心通過リンク）」，リンク 3 は「自由流旅行時間は長いが混雑しづらいリンク（バイパスリンク）」と考える．このとき，リンク 1 に課金することにより，OD ペア AC の車両がバイパスに移動し，それにより総旅行時間が減少することが期待できる．しかし，この移動量の上限は q_{AC} により制約される．よって，料金がないときのリンク交通量パターンが同一であっても，「q_{AC} が小さい OD 交通量パターンのケースにおいては，最適料金下では OD ペア AC の全車両がバイパスリンクを利用」「q_{AC} が大きい OD 交通量パターンのケースにおいては，最適料金下では OD ペア AC の一部車両のみがバイパスリンクを利用」ということが発生する．この場合の両者の最適料金は異なる．なお，後者における最適料金は前者においても総旅行時間を最小にするが，本研究では総旅行時間が改善しないのであれば最適料金は安く設定するべきとしていることに注意したい．

提案手法において，初回の課金額をステップ 3 において高めの値として設定しているのは，初回において制約条件の影響が発生しやすい状況をあえて生成することを意図している．ステップ 5 において，制約条件の影響を含めてリンク交通量パターンを比較することにより，実行可能領域の形状が真の OD 交通量パターンにより近いサンプル OD 交通量パターンを取得できることが期待できよう．このことを**図-1** の例において説明する．課金リンクに大きい料金を設定すれば， q_{AC} の値にかかわらず OD ペア AC の交通はすべてリンク 3 を利用することが期待される．このときには，各リンクの交通量は各 OD ペアの交通量と 1 対 1 に対応するため，リンク交通量パターンが同一の場合には，OD 交通量パターンも必ず同一になる．よって，最適料金の金額も一致する．

3. 数値計算例

第 2 章で提案した手法がどの程度有効かを数値計算により確かめる．ここでは Sioux Falls Network [9] を用いた（**図-2**）．発生集中交通量の分布はオリジナルの交通量をベースに設定し，これを用いて河瀬らの方法でサンプル OD 交通量パターンを 684 万個生成した．総交通量は 360,000 台程度である．**図-3** に総旅行時間の分布を示す（1,000 個のサンプルから計算している）．課金リンクとしては，料金なしの状況で混雑が激しいリンク 9 から 10 の 1 本を選定した．課金額としては，0 分相当（無課金）から 20 分相当までの金額を 1 分単位で設定した．均衡配分時には Dial のアルゴリズムを用いた確率的利用者均衡配分を用いる．分散パラメータは 1.5（／分）とした．最適料金の判定の際の総旅行時間のしきい値は 1 分とした．

図-4 にステップ 2 で計算した最適料金の分布を示す（1,000 個のサンプルから計算している）．8 分付近にごく小さいピークが，14 分付近にかなり大きいピークがある．このことは，仮に何の観測も不可能であっても，14 分相当を料金として設定すれば，多くの場合にそのまま最適料金付近とを実現できることを意味する．よっ

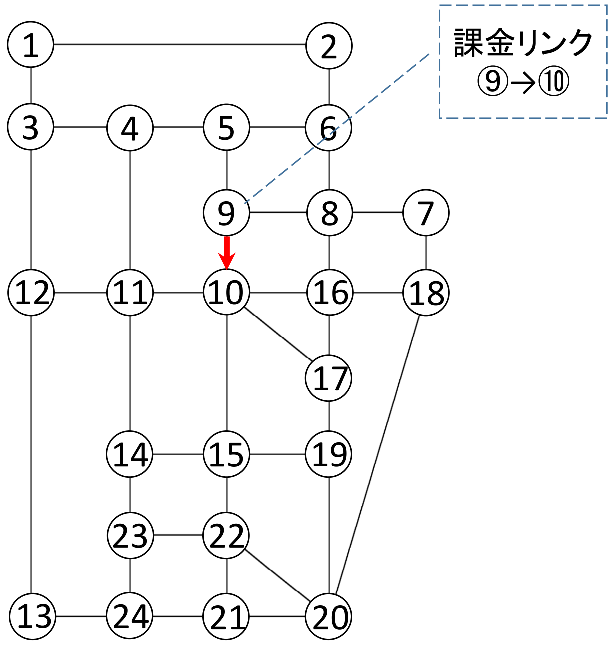

図-2 Sioux Falls ネットワーク（リンクはすべて双方向）

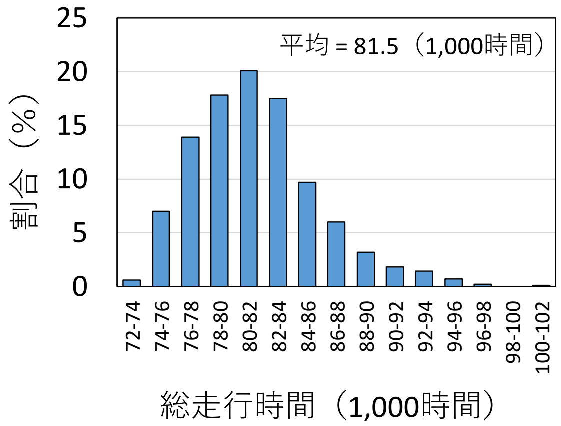

図-3 総走行時間の分布（1,000 サンプルより作成）

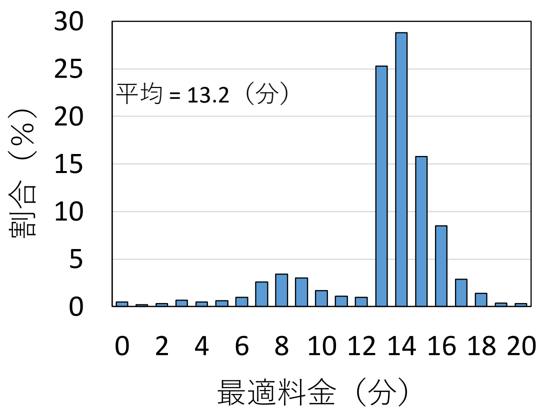

図-4 最適料金の分布（1,000 サンプルより作成）

て以降で検証すべきことは「真の最適料金が 14 分付近ではないときに，そのことを提案手法でどれだけ検出できるか」になる．ステップ 3 における 1 回目の料金としては 20 分相当を設定した．

ステップ 5 における距離の計算については以下の方法によった：

1. 684 万個の全サンプル OD 交通量パターンのそれぞれについて， Dial のアルゴリズムによって交通量を配分し得られたリンク交通量パターンと，観測リンク交通量パターン（すなわち，真の OD 交通量パターンによるもの）の距離を計算する．距離はリンクごとの総旅行時間をベクトルの要素とし，マンハッタン距離を用いて計算する．Dial のアルゴリズムを実施する際には，観測リンク交通量パターンの旅行時間を用いる．
2. 1.で得られた距離が小さい順に 30 個のサンプル OD パターンを抽出する．
3. 2 で抽出した各パターンについて，20 分相当の料金を課金した状態で確率的利用者均衡配分を実施し，課金後の課金リンクのリンク交通量を得る．
4. 課金リンクについて，「課金前の交通量」と「20 分相当の課金後の交通量」の差を計算する．
5. 4.で計算した値の真値との差を距離とする．なお，この真値は，真の OD 交通量パターンにおいてステップ 2 と 3 を実施することにより得ることができる（実ネットワークにおいては，いずれも観測値をそのまま用いることができることに注意）．

本来であれば，距離が最も小さい 1 個のサンプル OD パターンを用いて最終的に最適料金を算出することになるが，今回の数値実験では，評価のためのサンプルを多く確保するために，30 個のうち上位 5 パターンを最適料金の候補とし，これらすべてについて，真の最適料金に対してどれだけ正確に推定できたかを評価した（ステップ 1 でかなりの計算時間を要するために，評価のために試せる真の OD 交通量パターンの数には限りがある）．あわせて，トライアンドエラーによって推定精度が改善しているかどうかを評価するために，比較対象として，1 回目の課金後の情報を用いずに抽出できる，ステップ 2 までに得られた 30 個すべてに対する評価も実施した．以降では，上位 5 パターンを抽出したものを「推計値（2 回目）」と呼び，30 パターン抽出したものを「推計値（1 回目）」と呼ぶ．

真の OD 交通量パターンとして，サンプル OD 交通量パターンと同じアルゴリズムで生成したもののうち「最適料金が 8 分相当」のもの 20 個と，「最適料金が 14 分相当」のもの 20 個をそれぞれ抽出した． それぞれについて提案アルゴリズムを実施し，「推計値（1 回目）」と「推計値（2 回目）」を計算した．8 分相当，14 分相

当それぞれのケースについて，前者は 100 個，後者は 600 個の推計値が存在する．

結果を**図-5**（8 分相当）と**図-6**（14 分相当）に示す．いずれのケースについても，「推計値（1 回目）」，「推計値（2 回目）」いずれでも，推計前の最適料金の分布（推計前：図-4 と同じ）よりも，前者であれば 8 分近辺が多く推計されており，後者であれば 14 分近辺が多く推計されている．ただし，いずれの場合でも 1 回目と 2 回目の差はほとんど見られない．また，8 分相当においては，推計により改善はされたものの，真値とは異なる 14 分という推定値が多数を占めている．

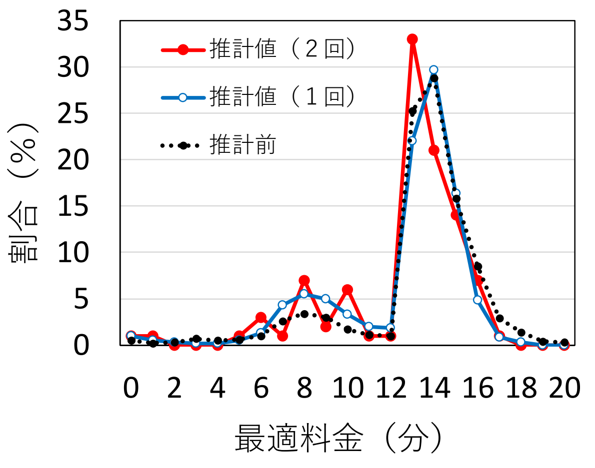

図-5 最適料金の推計値の分布（真値＝8 分相当）

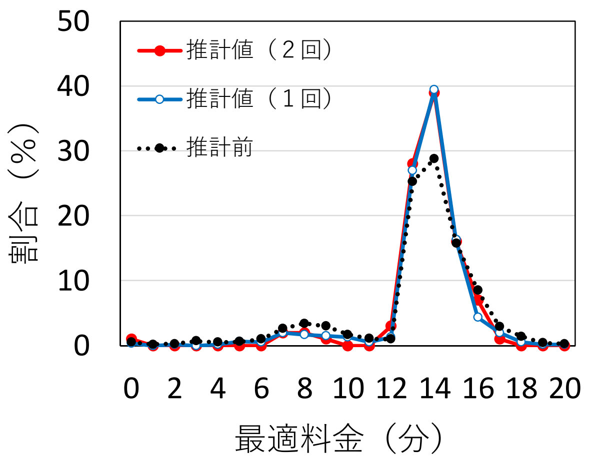

図-6 最適料金の推計値の分布（真値＝14 分相当）

4. まとめと今後の課題

本研究では，OD 交通量に関する事前の情報を活用し，1 回だけのトライアンドエラーが許される状況でリンクへの課金額をできるだけよくす方法を提案した．提案手法では，OD 交通量パターンが交通量配分問題の実行可能領域にのみ影響することを考慮し，リンク交通量パターンのみから最適料金を推計することを行っている．数値計算の結果，提案手法は全体としては一定の効果はあるものの，トライアンドエラーによる改善結果が見られず，かつ，8 分相当が真の最適料金であるときに，それをあまりよく的中できていないこともわかった．

提案手法の精度を改善するにはいくつかのアプローチが考えられる．本研究では，サンプル OD 交通量を計算する際に，料金なしのときの観測リンク交通量の情報を全く考慮していなかった．この場合，非常に多数（例えば 1 億個）のサンプルを取得しても，観測リンク交通量とよく整合するリンク交通量を持つサンプルの取得は難しい．サンプル時から観測リンク交通量の制約を考慮することが望ましい．このためにはマルコフ連鎖モンテカルロ法による方法が有効であると考えられる．トライアンドエラーによる結果の改善の向上については，距離関数や，1 回目にかける料金の適正化が考えらえよう．特に距離関数については，当該リンクだけでなく，それ以外の影響の起きうるリンクを抽出し，そこの情報も活用することが有効である可能性もある．

上記の手段によってもなお精度に問題があるときは，2 回以上のトライアンドエラーによる料金の改善手法を検討することも必要であろう．この際には，回数が増えすぎると総当たりと大差なくなるので，数回程度で十分な精度が確保できるようにする必要があろう．

謝辞：本研究は，科学研究費補助金（基盤研究(A)「ポスト・ビッグデータ時代に向けた次世代交通システムの動学的マネジメント手法の構築（#16H02368）」，代表：井料隆雅）の援助により実施された．

参考文献

1) Hunt, P., Robertson, D., Bretherton, R., and Winton, R.: SCOOT-a traffic responsive method of coordinating signals. TRRL Laboratory Report, 1014, 1891.
2) Yang, H., Meng, Q., and Lee, D-.H.: Trial-and-error implementation of marginal-cost pricing on networks in the absence of demand functions, Transportation Research Part B, Vol.38, No.6, pp.477–493, 2004.
3) Yang, H., Xu, W., He, B., and Meng, Q.: Road pricing for congestion control with unknown demand and cost functions, Transportation Research Part C, Vol.18, No.2, pp.157–175, 2010.
4) Akamatsu, T. and Wada, K.: Tradable network permits: A new scheme for the most efficient use of network capacity, Transportation Research Part C, Vol.79, pp.178–195, 2017.
5) 河瀬理貴，浦田淳司，井料隆雅：未観測変動を内包するための OD 交通量パターン集合形成モデルの提案と実装，土木計画学研究発表会・講演集，55, 2017.

6) Wilson, A. G.: A statistical theory of spatial distribution models, Transportation Research, Vol.1(3), pp.253–269, 1967.
7) Beckmann, M., McGuire, C. B., and Winsten, C. B.: Studies in the Economics of Transportation. New Haven: Yale University Press, 1956.
8) 赤松隆, 土屋雄二, 川上喜博：確率的均衡配分の効率的計算方法の開発, 交通工学, Vol.26, No.1, pp.51–58, 1991.
9) LeBlanc, L., Morlok, E., and Pierskalla, W.:An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem. Transportation Research, Vol.9, No.5, 309–318, 1975.

(2018. 4. 27 受付)

OPTIMISATION OF TRAFFIC NETWORK CONTROL BY LESS NUMBER OF TRIALS

Soshi NAKANO, Takamasa IRYO, Yusuke HARA, and Takahiko KUSAKABE