

# GA を用いた経路最適化による 広域交通流シミュレータ上での交通状況再現手法

馬場 美也子<sup>†</sup> 北岡 広宣<sup>†</sup> 棚橋 巖<sup>†</sup>

我々は以前に、渋滞や環境を改善するための交通対策や ITS 技術の効果評価に役立つ交通流シミュレータ NETSTREAM (NETwork Simulator for TRAffic Efficiency And Mobility) を開発した。本論文では評価の際に必要な、シミュレータ上での対象地域における施策実施前の交通状況再現手法について述べる。我々は、シミュレータの入力である経路データを GA (遺伝的アルゴリズム) を用いてあらかじめ最適化することにより、精度良く交通状況再現を行う手法を考案した。さらに本手法および従来手法を愛知県豊田市に適用した場合の NETSTREAM の出力結果と実測値の比較を行って本手法の有効性を確認した。

## Reproduction of Traffic Conditions on a Traffic Simulator Based on Optimization of Drivers' Routes Using Genetic Algorithm

MIYAKO BABA,<sup>†</sup> HIRONOBU KITAOKA<sup>†</sup> and IWAO TANAHASHI<sup>†</sup>

Traffic simulator NETSTREAM (NETwork Simulator for TRAffic Efficiency And Mobility) has been developed to estimate the effects of traffic measures and Intelligent Transport Systems that ease traffic congestion and environmental pollution. Traffic conditions of target area before application of systems have to be reproduced on NETSTREAM at the outset of the estimation. In this paper, we propose a method to reproduce traffic conditions accurately. In this method, drivers' routes are optimized by the use of genetic algorithm. As the result of the application to the simulation of Toyota city, availability of the method was confirmed.

### 1. はじめに

交通渋滞低減、環境改善のための交通対策や様々な ITS 技術を導入した際の効果予測など、実際の道路での評価が困難な場合に、交通流シミュレータを用いた評価が有効である。このような観点から、我々はこれまでに広域交通流を対象とする様々な施策評価が可能な交通流シミュレータ NETSTREAM (NETwork Simulator for TRAffic Efficiency And Mobility)<sup>1)</sup> を開発した。NETSTREAM のみならず交通流シミュレータを用いて評価を行う際には、対象とする地域における施策実施前の交通状況を精度良く再現する必要がある。

交通状況再現を行うためには実測調査を行う必要があるが、対象地域が広域であるときはすべての道路を調査することは困難である。そこで、従来では広域を対象とした交通状況再現にはアンケート調査などで求

めた OD 交通量を、対象とする道路ネットワーク上に均衡配分を行うという交通均衡的手法が多く用いられてきた<sup>2)</sup>。しかしながら、現実の交通状況は必ずしも均衡状態であるとはいえないため、再現された交通状況が実際の状況と大きく異なり高精度な再現を行うことが難しい。またこのような場合、経験的に入力データやパラメータなどを調整しながら繰り返しシミュレーションを行うことにより精度向上を図る必要があり、交通状況を再現するために多大な労力と時間を要する。

一方、観測交通量と一致するように OD 交通量を推定<sup>3),4)</sup>し、シミュレータ上で高精度な交通状況再現を行う方法もある。その場合、交通均衡的手法などを用いて経路選択率を仮定する必要があるが、ドライバの経路選択行動を明確に示す手法は確立されていないため、推定された OD 交通量が必ずしも実際の状況と一致せず、現況再現は良好であっても施策実施後の予測に悪影響を及ぼす可能性がある。したがって、OD 交通量はアンケート調査などに基づくものを用いることが望ましい。

我々は、各車両が選択した経路の組合せを求めるこ

<sup>†</sup> 株式会社豊田中央研究所  
Toyota Central R&D Labs., Inc.

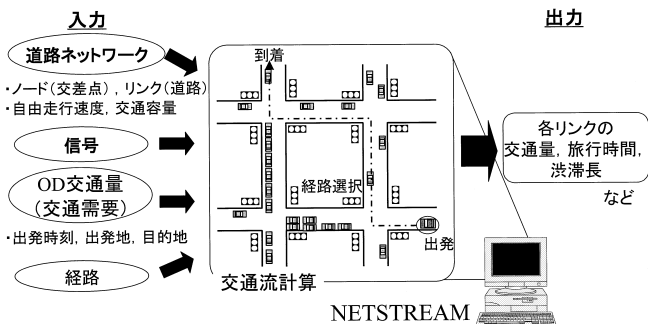


図1 NETSTREAMの入出力  
Fig. 1 Outline of NETSTREAM.

とにより、交通流シミュレータ上で高精度な交通状況再現を行う手法を提案する。本手法ではアンケート調査から作成した OD 交通量データを用い、各車両が選択しうる経路の中から実測交通量との誤差が最小となる経路の組合せを GA (遺伝的アルゴリズム<sup>5)</sup>)を用いて求めることにより交通状況再現を行う。本手法は必ずしもネットワーク全体の交通量などの実測値を必要とせず、一部の道路の実測値を用いても計算可能であるため、全域のデータが入手不可能である広域にも容易に適用できる。車両数が増えるにつれ経路の組合せ数は膨大になるが、GAを用いることにより車両数の多い広域でも効率良く高速に計算することができる。さらに実際の交通状況を最も精度良く再現するように各車両の選択経路の組合せを求めることにより、交通均衡的手法などでは表されないような交通状況をも再現することができる。また本手法を用いれば、精度向上のために繰り返しシミュレーションを実行してチューニングを行うことなく、高精度な交通状況再現ができる。GAを用いた研究としてインターネットなどのネットワーク上の負荷を分散させるための経路評価頻度の制御<sup>6)</sup>や、交通関連では都市内のバスルート設計にGAを適用したもの<sup>7)</sup>があるが、都市全体の車両の経路を対象とした研究は行われていない。本研究では手法の提案とともに実データに適用した結果についても示す。

以下ではまず2章で、提案する交通状況再現手法について説明する。そして3章で、我々が開発した交通流シミュレータ NETSTREAM の概要について述べ、実際に NETSTREAM を用いて本手法を愛知県豊田市に適用したときの再現性の検証について示す。

## 2. 交通状況再現手法

交通流シミュレータでは、たとえば NETSTREAM の場合、図1に示すように道路ネットワークや OD

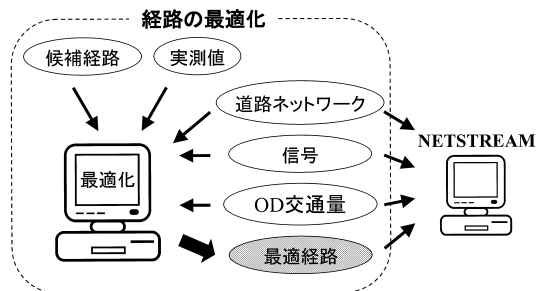


図2 交通状況再現の流れ  
Fig. 2 Procedure to reproduce traffic conditions.

交通量など複数のデータを入力として使用している。我々はそのうちの経路データをあらかじめ最適化して最適経路データを作成し、これを入力として用いることにより交通流シミュレータ上で交通状況を精度良く再現する手法を考案した。以下に経路の最適化について説明する。

最適化計算では図2に示すように、道路ネットワークデータ、信号データ、OD交通量データのほか、各車両に対して選択する可能性のある複数の経路すなわち候補経路と再現したい交通状況におけるリンク交通量などの実測値を入力とし、以下のような計算を行う。候補経路の中から各車両が選択する経路の組合せ別に交通量配分を行い、実測値との誤差を計算する。そのうち最も誤差の少ない経路の組合せを求め、最適経路データとする。経路の最適化は、各車両の候補経路数を  $M$ 、車両数を  $N$  とすると、 $M^N$  通りの経路の組合せから最適な組合せを求めるため、広域に適用した場合など組合せ数が多くなると計算時間が膨大になり実用的ではない。そこで我々は、膨大な組合せの中から近似解を高速に求めることができるGAを用いて経路の最適化計算を行った。次にGAの適用方法について説明する。

GAの詳細についてはここでは省略し、今回の適用

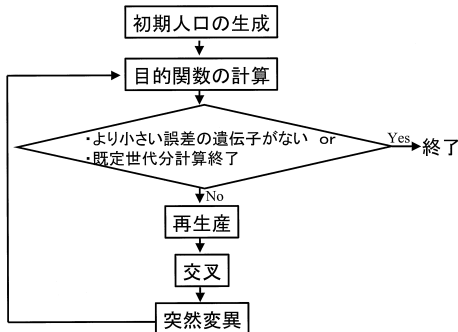


図3 GA(遺伝的アルゴリズム)の計算手順  
Fig. 3 Processing flow of genetic algorithm.

方法に沿って簡単に説明する．GAで用いる遺伝子を今回次のように定義した．遺伝子の長さは車両数であり，各要素は各車両が選択した候補経路の番号を示す．たとえば  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  は，車両数  $n$ ，1番目の車両は候補経路  $x_1$ ，2番目の車両は候補経路  $x_2, \dots, n$ 番目の車両は候補経路  $x_n$  を選択した場合の遺伝子を表す．今回は，提案する手法の有効性の確認を行う目的からこのように最も単純な遺伝子の定義の仕方を採用した．GAの計算手順を図3に示す．初めにあらかじめ設定した数の遺伝子をランダムに作成する．これを初期人口の生成という．次に以下に示す手順で第1世代の計算を行う．まず各遺伝子に示される番号の経路に対して交通量配分を行い，配分値と実測値の誤差を示す目的関数を算出する．交通量配分では，式(1)により各リンクの交通量が算出される．

$$Q_l = \sum_{i=1}^n e_i \quad (1)$$

$Q_l$ : リンク  $l$  の配分交通量．

$e_i$ : 遺伝子に示される車両  $i$  に対する経路  $x_i$  がリンク  $l$  を利用するとき 1．

リンク  $l$  を利用しないとき 0．

目的関数の計算には，実測値としてリンク交通量のほか旅行時間，渋滞度などを用いることができる．すべての遺伝子について目的関数を計算した後，目的関数値の小さい順に並べ替える．ここで第2世代以降の計算の場合，前世代以前で計算された目的関数最小値と現世代の目的関数最小値を比較し，目的関数の減少が見られなければ計算終了とする．また，あらかじめ設定した世代数の計算が終了した場合も計算終了とする．そうでない場合，GAの手法に従って再生産，交叉，突然変異を行い，目的関数計算の過程に戻って同様に次世代の計算を行う．これを先にあげた終了条件が満たされるまで繰り返すことにより，目的関数が最

小となる経路の組合せを示す遺伝子を求める．

再生産，交叉，突然変異については種々の方法が考案されているが，今回は提案する手法の有効性の確認を行う目的のため，次のような比較的単純な遺伝子操作を行うこととした．再生産は，人口の中の遺伝子のうち，目的関数の大きい方からあらかじめ定めた割合の遺伝子を消去し，消去した数の遺伝子を新たにランダムに作成する．また交叉は，あらかじめ定めた交叉率でランダムに2つの遺伝子を組み合わせ，ランダムな複数の位置で各遺伝子の要素を交互に入れ替えて新しい2つの遺伝子を作成する．ここでは遺伝子が長いことを考慮して，交差点数を定めずランダムな複数点で交叉する．このとき，遺伝子の各要素の配置は車両により固定されているため，交叉後の遺伝子が存在しない遺伝子となることはない．突然変異は，あらかじめ定めた突然変異率で遺伝子を抽出し，その遺伝子のランダムな位置の要素を異なる要素に入れ替えて新しい遺伝子を作成する．ただしこのときも，突然変異後の遺伝子が存在しないものとならないよう，入れ替える要素が存在する候補の中からランダムに選択している．これらの操作から，新しい遺伝子の生成により解の探索範囲を広げ，突然変異を起こすことにより局所解に陥るのを防ぎつつ，優秀な遺伝子すなわち目的関数を小さくする遺伝子を次世代に残しながら効率良く最適解を求めることができる．次に NETSTREAM を用いてこの手法を豊田市に適用したときの再現性の検証について示す．

### 3. 豊田市への適用と検証

#### 3.1 広域交通流シミュレータ NETSTREAM

はじめに我々が開発した広域交通流シミュレータ NETSTREAM の概要を説明する．NETSTREAM では図1に示すように，ノード・リンクなどを表す道路ネットワークデータ，信号データ，出発時刻・出発地・目的地を表す OD (Origin-Destination) 交通量データなどを入力とする．そして，各道路を走行する車両の位置を更新することにより，ネットワーク上の交通流をシミュレートし，リンクの交通量，旅行時間などを出力する．車両移動モデルは，個々の車両が前車との車頭時間，車間距離などから自車の速度を決定する追従モデルとなっている．スキャンサイクルは1秒として使用したが，さらに短く設定することも可能である．NETSTREAM はグラフィカルなユーザインタフェースを備えており，走行中の車両情報やリンク通過台数などの情報を容易に確認することができる．また，交通流の様子を表示範囲や角度の変更，あるい

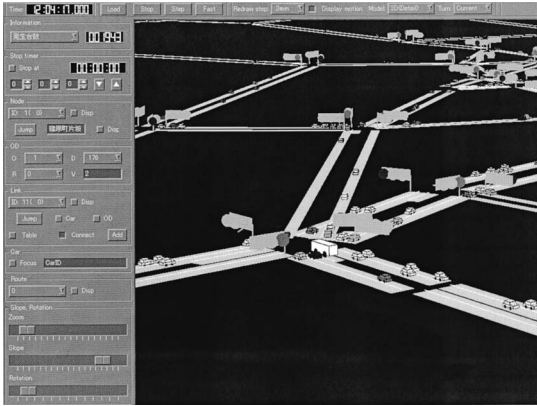


図4 NETSTREAM 実行画面 (3D & パードビュー表示時)  
Fig. 4 On-screen graphics of NETSTREAM (3D view).

は3D, 2D 切替えを行って表示することができる. 実行画面の一例を図4に示す. NETSTREAMはC++言語を用いて, Windows, UNIX, LinuxをOSとするコンピュータ上で動作するよう構築されている.

3.2 適用方法と検証結果

提案した交通状況再現手法を愛知県豊田市に適用した. 対象時間は, 入力データおよび検証用データの入手が可能であった休日の12:00~19:00とした. シミュレーションおよび経路の最適化計算の入力データについて説明する. 使用した道路ネットワークデータを図5に示す. ノード数は296, リンク数は900である. また, 信号データは2000年10月8日(日)のパターンおよびオフセットデータを設定した. 信号設置交差点数は196である. OD交通量データは, 1994年に調査された平成6年度道路交通センサスの休日カーODなどのデータを基に別途推計された, 1999年予測値の30分単位での時間帯別OD交通量を用いた. これは対象域内50, 域外20の計70ゾーン間のODであるが, シミュレーションおよび経路の最適化に適用するためにはノード間のOD交通量データが必要であるため, 各ゾーン内の全ノードに交通量を等分割するという方法で時間帯別ノード間OD交通量データを作成した.

これらのデータを用いて, 前章で示した方法により経路の最適化を行った. ただし, 最適経路は各車両ご

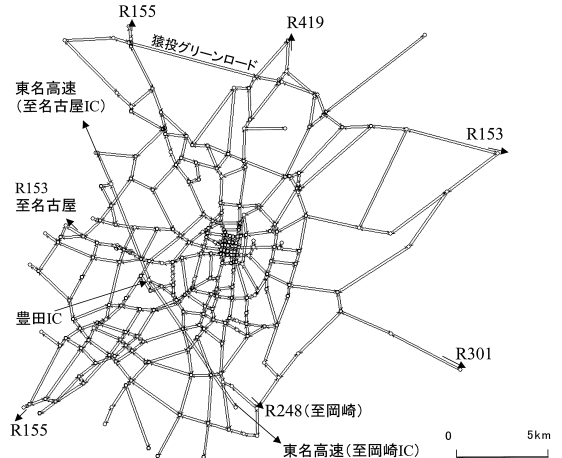


図5 対象とした道路ネットワーク  
Fig. 5 Toyota-city road network of simulation area.

とに決定する方が精度向上のためには望ましいが, 車両数が多い場合には同じ経路を通る車両が存在するため, 数台ごとにまとめて決定してもそれほど精度に影響しない. むしろ車両をまとめることによる計算効率向上の効用の方が大きい. そこで今回は各ODの車両数が数台であることを前提に, ODごとにまとめて最適経路データを計算した. 最適化計算はシミュレーション対象となる12:00~19:00でOD交通量と同じ30分単位で行った.

GAのパラメータを検討するために, 人口100, 世代数10000, 再生産割合0.2, 交叉率0.8, 突然変異率0.1をデフォルト値としてシミュレーションを行った. 各パラメータを順に変動させたときの目的関数の最小値を比較することで, 各パラメータの検討を行った. 各遺伝子の目的関数は式(2)で算出した. ここで用いた実測交通量データは, 1999年11月14日(日)の豊田市内59カ所の感知器データである.

$$\sum_{l \in L_s} (q_l - q'_l)^2 + \sum_{l \notin L_s} o_l^2 \tag{2}$$

- $q_l$ : リンク  $l$  の実測交通量.
- $q'_l$ : リンク  $l$  の配分交通量.
- $L_s$ : 感知器設置リンクの集合.
- $o_l$ : リンク容量超過交通量.  
 $c_l < q'_l$  のとき  $q'_l - c_l$ .  
 その他 0.
- $c_l$ : リンク容量.  $c_l = h_l \times s_l \times t$ .
- $h_l$ : リンクの飽和交通流率 (台/青1時間).
- $s_l$ : 信号スプリット (= リンク  $l$  に対する青時間/サイクル長).
- $t$ : 時間係数 (= ODの時間幅/1時間).

Windows は米国 Microsoft Corp. の米国およびその他の国における登録商標である.  
 UNIX は X/Open Company Limited がライセンスしている米国およびその他の国における登録商標である.  
 Linux は Linus Torvalds 氏の米国およびその他の国における登録商標あるいは商標である.

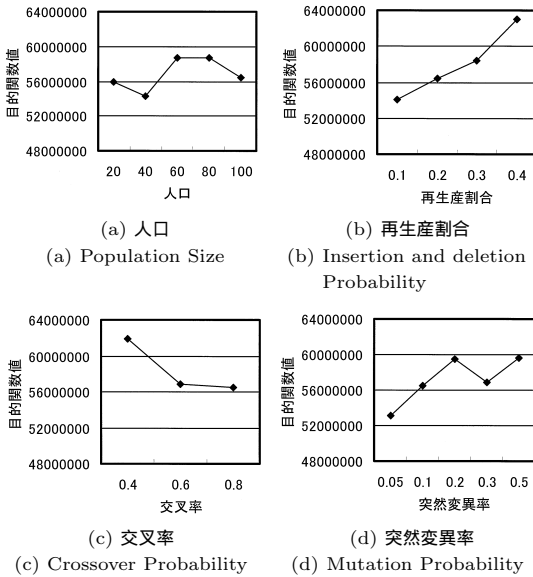


図6 GAで用いるパラメータの感応評価結果

Fig. 6 Results of sensitivity analysis of GA parameters.

目的関数の最小値を図6に示す．図6(a)より，このシミュレーションでは人口は最終的な目的関数値にそれほど規則的に影響していないと考えられる．これは，解の探索範囲が膨大であることが影響していると思われる．そこで人口を20として計算負荷を抑え，世代数を50000と長く設定することにより，できるだけ探索範囲を広げるような設定とすることとした．また図6(b)，(c)，(d)より，再生産割合と突然変異率は少ない方が，交叉率は多い方が良い傾向があるが，前述のように解の探索範囲が広いこと考慮して，局所解に陥るのを抑制するため，今回は再生産割合0.2，交叉率0.8，突然変異率0.3とした．

次に，最適化計算に用いた候補経路の選定方法について説明する．今回，候補経路数は最大3本とした．候補経路0，候補経路1はAHP(階層分析法)を用いてドライバの経路選択特性を考慮した経路探索<sup>8)</sup>により求めた．これは，アンケート調査より分析して求めた，距離，時間，車線数，右左折回数を考慮した経路探索となっている．候補経路0は混雑していない場合を想定し，この経路探索の中の時間を，リンクの設定値である距離と走行速度から算出して用いた．また，候補経路1は混雑時を想定し，All or Nothing法による交通量配分を行ったときの交通量に対する速度とリンク設定値の距離から算出した時間を用いた．All or Nothing法は，全車両が出発地から目的地までの最小コスト経路，ここでは候補経路0を走行すると仮定したときの各リンク交通量を求める最も単純な配分

手法である．また，交通量から速度を算出する際には，各リンクに設定されている走行速度，容量より求めたQ-V式すなわち交通量と速度の関係式を用いた．候補経路2は，国道リンクに対して重み付けを行って経路探索を行い，国道を優先して通る経路を選定した．

以上より，交通状況を最も精度良く再現する時間帯別最適経路データを求め，NETSTREAMの入力データとして用いることにより交通状況再現シミュレーションを行った．本手法による再現性の検証を行うため，本手法を用いたシミュレーション結果，および従来手法を用いたシミュレーション結果と交通量，旅行時間の実測値の比較を行った．従来手法として式(3)で表されるDialの経路選択確率により走行経路を決定し，本手法と同一の道路ネットワーク，OD交通量，候補経路データを用いてシミュレーションを行った．また実測値として，交通量については経路の最適化計算時に用いた感知器交通量を，旅行時間については1999年11月14日(日)に計測されたデータを用いて比較を行った．このデータは豊田市内の代表的な20ルートについて15分ごとに1台の車両が走行して計測した旅行時間データである．また，入手可能なデータの制約から交通量データおよび旅行時間データとOD交通量データの測定時期に差が生じるが，OD交通量データとして1999年の予測値を用いたことから，評価上問題は無い．

$$P_k = \frac{\exp(-\theta t_k)}{\sum_{r \in R_{ij}} \exp(-\theta t_r)} \quad (3)$$

$P_k$ :  $ij$ 間の候補経路のうち経路 $k$ を選択する確率．

$R_{ij}$ :  $ij$ 間の候補経路の集合．

$t_k$ : 経路 $k$ の所要時間．

$\theta$ : パラメータ．

感知器が設置されているリンクの1時間単位の交通量について実測値とシミュレーション値の比較を図7に示す．ここで示している%RMS誤差は式(4)により算出している．この値は，実測値に対する実測値とシミュレーション値の誤差の平均を示している．

$$\text{PRMS} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (P_i - A_i)^2}{n}}}{A_{ave}} \quad (4)$$

PRMS: %RMS誤差．

$n$ : サンプル数．

$P_i$ : シミュレーション値．

$A_i$ : 実測値．

$A_{ave}$ : 実測値の平均．

シミュレーション結果は，従来手法よりも実測値とよ

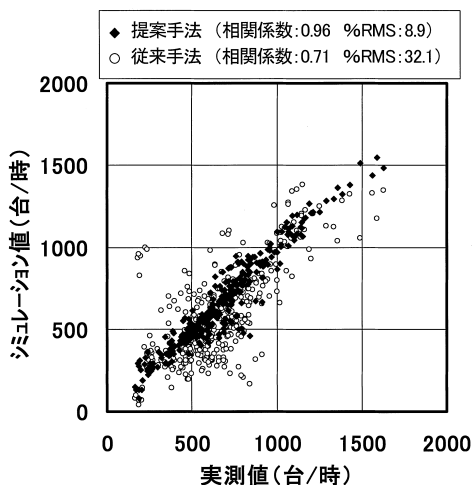


図7 交通量の実測値とシミュレーション値の比較

Fig. 7 Comparison between simulated and observed traffic volume.

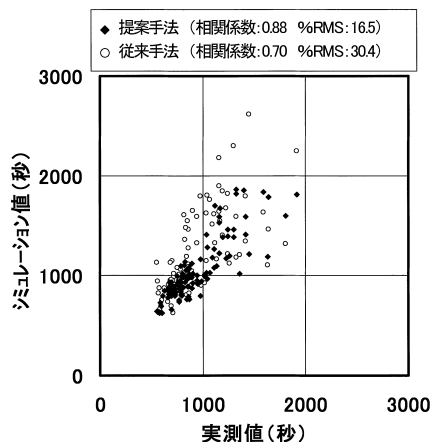


図8 旅行時間の実測値とシミュレーション値の比較

Fig. 8 Comparison between simulated and observed travel time.

く一致していることが分かる。また提案手法によるシミュレーション値は実測値との相関係数が高く、%RMS誤差がかなり小さいことから、提案手法は高い精度で交通量を再現していることが分かる。

また、今回の適用では感知器交通量が得られる地点に限られているため、図7のみではその他の道路における交通状況再現性が検証されない。そこで、市内の主要な20ルートの1時間平均の旅行時間について実測値とシミュレーション値の比較を行うことにより、感知器交通量の実測値を用いていない主要道路における交通状況再現性の検証を行うこととした。結果を図8に示す。旅行時間はGAの計算に取り入れていない項目であるため、交通量ほど実測値と一致してはいないものの、提案手法を用いた場合の方が実測値とよい相関を示していることが分かる。したがって、提案手法を用いることにより、従来手法に比べて交通状況再現性の高いシミュレーションが可能であることが分かる。また、旅行時間の精度には、交通量以外にも各リンクの走行速度や時間あたり何台の車両が通過できるかを示す交通容量などの設定が影響しているため、本手法の適用以外にもこれらの設定値の調整を行うことによりさらなる精度向上が実現できると考えられる。

また提案手法を用いた場合、従来手法に比べて最適経路の計算を行う部分についての計算コストを余分に要するが、シミュレーションを行う対象地域ごとに1度だけ最適経路の計算を行えばよいから、それほど問題ではない。むしろ従来手法を用いた場合に、経験的に入力データやパラメータなどを調整しながら繰り返しシミュレーションを行って精度向上を図ることの方

が時間と労力を要すると思われる。

#### 4. まとめ

交通流シミュレータを用いて各種交通対策やITS技術の導入効果予測を行う際に必要となる、広域な道路ネットワークを対象とした交通状況再現手法を提案した。本手法では、GAを用いて各車両が選択する経路の組合せから最も実測値に適合するものを高速に求めることができる。これをシミュレータの入力データとして用いることにより高精度な交通状況再現を行うことができる。我々が開発した交通流シミュレータNETSTREAMを用いて本手法を愛知県豊田市に適用した結果、従来手法に比べて交通量、旅行時間を精度良く再現することが確認できた。今回は、入手可能なデータの制約から休日の7時間分のみ本手法を適用したが、今後さらに別の時間へも適用し、手法の有効性の検証と改善を行っていきたい。

謝辞 本研究を行うにあたり、豊田工業高等専門学校荻野弘教授、国土交通省中部地方整備局、愛知県警察、豊田市（財）豊田都市交通研究所、トヨタ自動車（株）で構成される豊田市交通シミュレーション研究会よりデータの提供や貴重な助言をいただいた。さらに（株）豊田中央研究所第21研究領域の西川訓利リサーチリーダー、寺本英二推進責任者およびITSモデリング・評価メンバより貴重な助言と多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

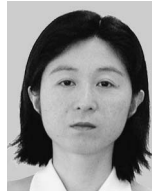
#### 参考文献

- 1) 平子智明, 馬場美也子, 寺本英二: 交通情報システム評価用広域交通流シミュレータ, 第16回交通

- 工学研究発表会論文報告集, pp.97-100 (1996).
- 2) 宮城俊彦, 浅井敦司, 岡 昭二: フレックスタイム制導入に伴う道路交通環境変化のネットワークシミュレーション分析, 交通工学, Vol.31, No.1, pp.35-43 (1996).
  - 3) 楊 海, 飯田恭敬, 佐佐木綱: ネットワーク均衡に基づく OD マトリックス推計法と誤差限界, 交通工学, Vol.27, No.2, pp.17-25 (1992).
  - 4) 小根山裕之, 桑原雅夫: 路側観測交通量からの時間変化する OD 交通量の推定, 交通工学, Vol.32, No.2, pp.5-16 (1997).
  - 5) 日本機械学会(編): 工学問題を解決する適応化・知能化・最適化法, p.124, 技報堂出版 (1996).
  - 6) 山口直彦, 棟朝雅晴, 赤間 清, 佐藤義治: ルーティングアルゴリズムにおける経路評価頻度の制御, 情報処理学会研究報告: マルチメディア通信と分散処理, Vol.100, No.16, pp.69-74 (2000).
  - 7) Pattnaik, S.B., Mohan, S. and Tom, V.M.: Urban bus transit route network design using genetic algorithm, *J. of Trans. Eng.*, Vol.124, No.4, pp.368-375 (1998).
  - 8) 桂川美也子, 辻 紘良: 経路選択特性を取り入れた経路探索法, 自動車技術会中部支部研究発表会前刷集, pp.96-101 (1994).

(平成 14 年 3 月 25 日受付)

(平成 14 年 10 月 7 日採録)



馬場美也子(正会員)

1991年愛知教育大学教育学部数学科卒業。同年(株)豊田中央研究所入社。以来,交通流シミュレーションおよび交通施策評価に関する研究に従事。現在,システムエレクトロニクス分野第21研究領域に所属。交通工学研究会会員。



北岡 広宣

1992年千葉大学大学院工学研究課電子工学専攻卒業。同年(株)豊田中央研究所入社。以来,車載情報機器のヒューマンインタフェースに関する研究,および交通状況予測に関する研究に従事。現在,システムエレクトロニクス分野第21研究領域に所属。交通工学研究会,土木学会各会員。



棚橋 巖

1977年名古屋大学工学部電子工学科卒業。同年日本電気入社。1989年(株)豊田中央研究所入社。以来,路車間通信システムおよび交通流シミュレーションに関する研究に従事。現在,システムエレクトロニクス分野第21研究領域に所属。電子情報通信学会,交通工学研究会各会員。