

トラフィックシミュレーションを用いた路側観測交通量からの動的OD交通量の推定*

*Estimation of a Time Dependent OD Matrix from Traffic Counts Using Dynamic Traffic Simulation**

吉井稔雄**, 桑原雅夫***, 赤羽弘和****, 堀口良太*****

Toshio YOSHII**, Masao KUWAHARA***, Hirokazu AKAHANE****, Ryota HORIGUCHI*****

1. はじめに

経路選択機能を内生化するネットワークシミュレーションモデルを用いて、交通状況を動的に再現することにより、新路線の建設、交通規制あるいは経路誘導などの交通施策によって交通流が受ける影響を、より詳細に評価しようとする試みがなされている。こういった試みを行う際に、大きな問題となるのが、シミュレーションモデルが必要とする入力OD交通量の問題である。OD交通量は、直接観測することが非常に困難であるため、多くの場合、比較的簡便に計測可能な路側観測交通量や、サンプル調査による結果をもとに推定されている。しかし、その精度が結果に大きな影響を与えるにも関わらず、OD交通量の推定精度に関しては、十分に検討されているとは言いがたいのが現状である。また、路側観測交通量を用いた推定方法では、OD交通量を推定する際に、経路選択確率に代表されるようなOD交通量と観測交通量との関係を与える必要がある。しかし、OD推定の際に仮定する関係とシミュレーションにより達成される関係が一致しない場合には、推定されたOD交通量を用いてシミュレーションを実行しても、観測交通量が再現されるとは限らない。そこで、本研究では、

(a)上記のOD交通量と観測交通量の間を一致させることにより、シミュレーションを実行した際に、路側観測交通量を再現可能とするOD交通量を推定する方法の提案を行い、

(b)実際のネットワークへの適用を通して、その推定精度とシミュレーションの再現精度との関係、あるいはどのような情報を付加すればより精度の高いOD交通量が推定できるのかといった点について考察を加える。

2. 既往の研究

面的な広がりを持った道路ネットワークを対象として、リンクの路側観測交通量から動的なOD交通量を推定するモデルとしては、Nguyenら¹⁾、楊ら²⁾、Ashokら³⁾によって提案されているモデルがあげられる。しかし、これらのモデルは、順にリンクコストの時間変化を考慮していない、経路選択率に固定値を用いている、既存のOD交通量や経路選択確率を必要とする、といった問題点をそれぞれに抱えている。また、Cascettaら⁴⁾、小根山ら⁵⁾によって提案されたモデルでは、これらの問題点は解消されたものの、上記のモデルと同様に、得られたOD交通量を用いてシミュレーションを実行した場合に、観測交通量を必ずしも再現する保障がないという問題点が残されている。これに対して、本研究による推定方法を用いることにより、獲得ODの精度については必ずしも高くなるものではないが、得られたODを用いたシミュレーションの実行時に、高い再現性が期待できる。

3. 動的なOD交通量の推定方法

本研究で提案するOD推定モデルは、小根山らによって提案されたモデル⁵⁾を基本としたものであり、大きく(a)OD交通量とリンク交通量(路側観測交通量)の関係の記述(b)エントロピー最大化法を用いたOD推定の2つの部分に分けられる(図1)。

まず、シミュレーションモデルを実行することで

*キーワード：分布交通、経路選択、ネットワーク交通流

**正会員、工修、東京大学生産技術研究所

連絡先：〒106 港区六本木7-22-1, TEL 03-3402-6231,

FAX 03-3401-6286, E-mail yoshii@nishi.iis.u-tokyo.ac.jp

***正会員、Ph.D, 東京大学生産技術研究所

****正会員、工博、千葉工業大学 土木工学科

*****正会員、工博、(株)熊谷組 エンジニアリング本部

(a)の関係を求め、得られた関係をもとに(b)のOD推定を行う。このとき、一般には、(a)のOD交通量とリンク交通量の関係がシミュレーションモデルで得られる関係と異なるため、得られたODをもとに再度シミュレーションを実行しても、推定に用いた(a)の関係は達成されない。すなわち、シミュレーションはリンク交通量を再現することが出来ない。そこで、この2つの操作を交互に繰り返し実行することにより、シミュレーションを実行した場合に、達成されるOD交通量とリンク交通量の関係が、推定に用いられた関係と一致するような、動的OD交通量を求めるのが本研究で提案するOD推定法である。その計算アルゴリズムを以下に示す。

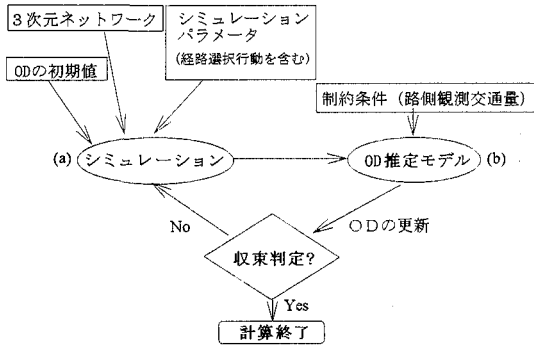


図1 OD推定の概要

Step 0 OD交通量の初期値を設定

Step 1 シミュレーションモデルを実行し、各OD交通の通過リンク及び通過時刻、すなわち時間的に動的なOD交通量とリンク交通量の関係を求める。

Step 2 Step 1 で得られた関係をもとに、エントロピー最大化法を用いて、OD交通量の推定を行う。

Step 3 OD交通量を更新する。

Step 4 収束判定を行い、収束していれば計算終了。収束していなければ Step 1 へ戻る。

(1) 3次元ネットワーク

本モデルでは、図2に示すような3次元ネットワークを作成する。時間軸については、図2、図3に示すように一定の時間間隔に分割する。例えばこのネットワーク上で、図3の軌跡に示されるように時

刻 h_r に起点を出発した交通がリンク $a \sim f$ を通過して目的地に向かう場合には、3次元ネットワーク上での車両の軌跡は、図2に示す太線で表される。これは、時間間隔 $H_r (h_r \leq t < h_r+dt)$ にリンク a, b を通過し、時間間隔 $H_{r+1} (h_r+dt \leq t < h_r+2dt)$ にリンク c, d, e を通過し、時間間隔 $H_{r+2} (h_r+2dt \leq t < h_r+3dt)$ にリンク f を通過した後、目的地に到達することを示している。

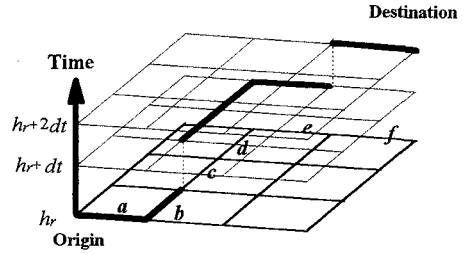


図2 3次元ネットワーク

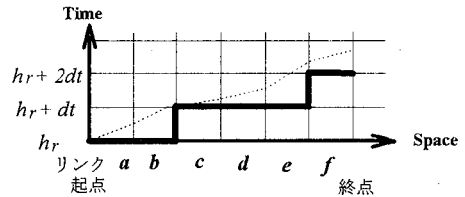


図3 Time-Space 平面上での車両の軌跡

(2) 経路選択モデル

経路選択モデルには、Logitモデルを仮定し、Dial配分を行う。これは、経路が n 本有り、それぞれの経路 k の旅行時間が T_k で与えられるとき、経路 k の選択確率を θ をパラメータとして

$$Prob(k) = \frac{\exp(-\theta \cdot T_k)}{\sum_i \exp(-\theta \cdot T_i)} \dots (1)$$

で与えるものである。

(3) シミュレーションモデル

本推定では、動的交通シミュレーションモデルとしてSOUNDモデル⁶⁾を採用する。SOUNDモデルはドライバーの経路選択行動が内生化したシミュレーションモデルで、時間帯別のOD交通量の入力が必要とし、さらにリンク交通容量、経路選択モデルのパラメータ等のシミュレーションパラメータの設定を行う必要がある。

(4) ODの更新

本研究が提案するアルゴリズムは、収束が保障されるものではなく、step.3でのOD交通量の更新時に、step.2で得られたODパターンをそのまま用いると、収束するとは限らないので、ODの更新方法は、Method of Successive Average⁷⁾ (式(2))を用いる。

$$Q_{rsh}^{n+1} = \frac{n \cdot Q_{rsh}^n + R_{rsh}^n}{n+1} \quad \dots \dots (2)$$

Q_{rsh}^n : n 回目繰り返し計算開始時点での、時間間隔 h に起点 r を出発し、目的地 s に向かうOD交通量
 R_{rsh}^n : n 回目繰り返し計算の step2 で計算される、時間間隔 h に起点 r を出発し、目的地 s に向かうOD交通量

4. モデルの適用

(1) 対象ネットワーク

対象ネットワークとしては、豊田市周辺のネットワーク (図4) を用いた。ネットワークの起点ノード数は 18, 終点ノード数は 31, ODペアの数は 540 である。また、交通量を観測した交差点数は 21 であり、さらに駐車場入庫車両の観測もあわせて行った。各観測地点では方向別に交通量を観測し、観測結果の集計が朝ピーク時 (午前 6 時 30 分~9 時 30 分) の 15 分単位であったので、単位時間を 15 分とし、総観測数は 1998 となった。一方、15 分単位の出発時間帯別のODペア数は 6480 となる。

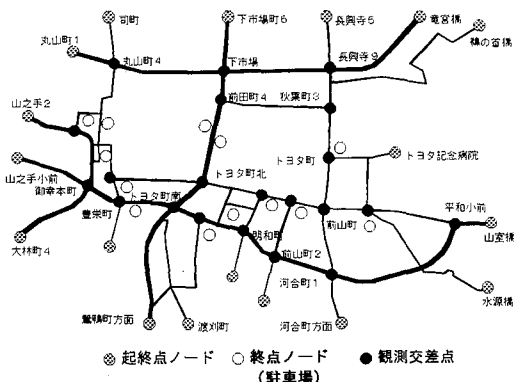


図4 豊田市周辺ネットワーク

(2) 初期設定

OD交通量の初期値として、全てのOD交通量を 1 [台/15分] に設定した。ここで、本アルゴリズムが解く問題は、解の唯一性が保障されているものではないため、この初期値によっては異なる解を導く可能性があることには注意しなければならない。また、シミュレーションモデルのパラメータについては、各リンクの交通容量はそれぞれ幾何構造により設定し、経路選択モデルのパラメータ (Dialのパラメータ θ) を 0.01 [1/秒] に設定した。

(3) 適用結果

適用は、現実の観測交通量をもとに行った場合に加えて、仮想のOD交通量を与えてシミュレーションを行い、その結果として得られた各観測地点での交通量を用いた場合も併せて行った。図5に、仮想の交通状況を仮定したケースの評価フレームを示す。このケースでは、OD交通量の真値が与えられているので、推定されたOD交通量の精度に関する考察が可能になる。なお、仮想のOD交通量には、現実の観測交通量を用いて推定した結果得られたODパターンを用いた。

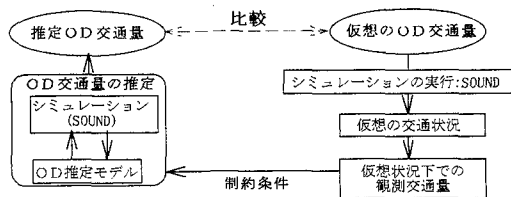


図5 評価フレーム

図6は、上記2ケースにおける、路側観測交通量 (15分間) と得られたOD交通量をもとにシミュレーションを実行した場合に再現される各観測地点での交通量を、RMS誤差 (式(3)) を用いて比較したものである。図より、数回の繰り返し計算でほぼ結果が収束していることが読みとれる。この結果より、以下の計算では、全て 10 回で繰り返し計算を打ち切り、その時点での結果を評価することとする。

図7は、各観測地点での、観測交通量とシミュレーションにより再現される観測交通量を比較したものであり、その相関係数は、現実の状況下では 0.87、

仮想状況下では0.97である。さらに、その差の絶対値の平均(式(4))を計算すると、それぞれ21.7と3.7であった。図8に、既存の手法⁵⁾で推定したOD交通量をもとにシミュレーションを実施した場合の、観測交通量とシミュレーションが再現する交通量との比較を示す。相関係数は0.78、そのRMS誤差(式(3))は41.3、差の絶対値(式(4))は28.7であった。いずれの値も、本研究の手法による結果が良くなっており、本研究が提案する手法を用いることにより、既存の方法で獲得したODを用いた場合と比較して、高い再現性が得られることが確認出来る。また、現実の状況では、観測誤差ならびに、シミュレーションモデルで再現される交通現象と実際の現象との乖離といった誤差要因、特に経路選択行動のモデル化に誤差が含まれるのに対し、仮想状況下では、そういった要因が含まれないため、仮想状況下では現実の状況下よりも、より正確に観測交通量が再現されているものと考えられる。すなわち、シミュレーションの再現する交通量と観測交通量の差が、仮想状況下で小さくなるということを確認した。

$$E_{flow}^{rms} = \frac{\sqrt{\sum_a \sum_h [v_{ah}^{sim} - v_{ah}^{obs}]^2}}{N^{obs}} \dots (3)$$

$$E_{flow}^{avg} = \frac{\sum_a \sum_h |v_{ah}^{sim} - v_{ah}^{obs}|}{N^{obs}} \dots (4)$$

v_{ah}^{sim} : シミュレーションによって、時間間隔 h にリンク a で再現される交通量
 v_{ah}^{obs} : 時間間隔 h にリンク a で観測された交通量
 N^{obs} : 総観測数

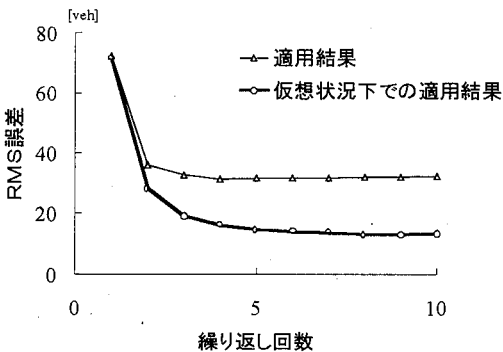
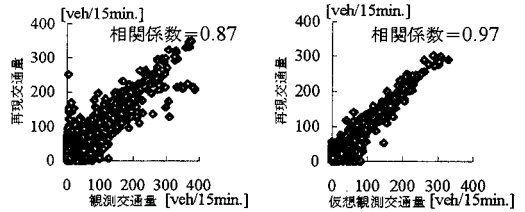


図6 観測交通量と再現交通量の比較



(現実の状況下) (仮想の状況下)

図7 観測交通量と再現交通量

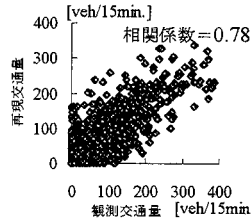


図8 既存の手法による推定ODを用いた場合の現状再現性

5. 推定ODの精度

図9は、仮想したOD交通量と推定結果のOD交通量を比較したものであり、その相関係数は0.76である。

一般には、推定するODペア(未知数)の数は観測交通量(制約条件)の数よりも大きく、本研究においても、未知数の数が制約条件の数よりも大きい条件設定のため、観測交通量が再現可能なODパターンは複数存在する。そこで、本研究によるモデルは、その複数あるODパターンの中から一つの解を決定する方法としてエントロピー最大化法を用いている。この方法は、各ドライバーが、複数ある状態(各ODペア)を等しい確率で選択する場合に、最も確からしいODパターン(エントロピーを最大にするOD)を求める方法である。しかし、現実にはODごとに特性を有するため、現実のODパターンがエントロピー最大とは限らないため、観測交通量は再現されても、正確なODパターンを得ることは保障されない。

その結果、図7に示したように、観測交通量に関しては高い精度で再現されるのに対して(相関係数=0.97)、推定されたOD交通量の推定精度(図9)はかなり低い。

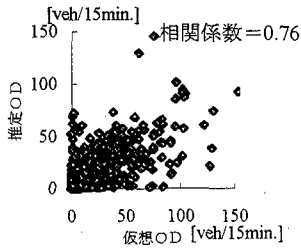


図9 仮想ODと推定OD (15分交通量)

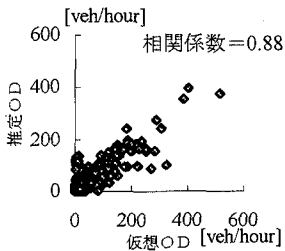


図10 仮想ODと推定OD (1時間交通量)

次に、推定OD交通量の時間単位を15分から1時間に変更して(観測交通量も1時間単位とした。)推定を行った結果を図10に示す。

15分単位のOD交通量を推定した場合と比較して良い結果が得られた。

この理由としては、以下の2点が考えられる。

(a)観測交通量の再現状況の相違

本推定方法によるモデル(図1参照)は、シミュレーション実行後のOD推定で、制約条件式の数(路側観測の数)に等しい変数を持つ1次連立方程式を解く(文献5参照)。この際に、変数が非常に多く解を求めることが困難であるため、この連立方程式を、両辺の差の二乗和を目的関数とする最適化問題に置き換え、最急降下法を用いて解を求めている。この変数の数が、1時間単位では426個であるのに対して、15分単位では1998個となっており、この最急降下法による計算が収束する(目的関数値=0)には多くの計算時間を必要とする。そのため、両者とも解を正確に得るまでには至らず、このことも再現交通量と観測交通量の不一致に影響を及ぼしている。図11に、OD交通量並びに観測交通量の時間単位を1時間にした場合の観測交通量と再現交通量との比較を示すが、1時間単位の方が15分単位の時と比較して変数の数が小さいので、この影響の度合いは小さくなり、再現交通量と観測交通量とがよ

りよく一致していることが確認できる。

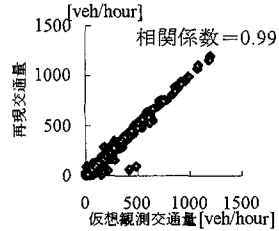


図11 観測交通量と再現交通量 (1時間単位)

(b)設定したOD交通量のエントロピーの相違

表1に、15分単位ならびに1時間単位の仮想OD交通量と推定OD交通量のエントロピー(式(5))を示す。推定されたOD交通量はエントロピーを最大にするものであるが、設定されたOD交通量は、そのエントロピーよりも、それぞれ0.33, 0.20だけ小さくなっている。なお、設定したODペアの数が異なると、比較することが難しいので、1時間単位については、OD交通量を4分割し、15分単位のOD交通量にしてエントロピーを調べた結果を示している。このように、1時間単位の方が、OD交通量の時間によるばらつきが小さくなるため、そのエントロピーは推定OD(最大値)との関係で相対的に大きいものとなり、推定されたOD交通量と設定されたOD交通量のエントロピーの差は、15分単位の時と比較して小さくなっている。そのため、得られたODの精度が良くなったものと考えられる。

$$\text{エントロピー} = \sum_T \sum_I \sum_J (-x'_{ij} \cdot \log x'_{ij}) \cdots (5)$$

$$x'_{ij} = \frac{Q'_{ij}}{\sum_T \sum_I \sum_J (Q'_{ij})}$$

Q'_{ij} : 時間帯 t に起点 i を出発し、目的地 j に向かうOD交通量

表1 エントロピーの比較

	15分単位	1時間単位
設定OD	8.54	8.27
推定OD	8.87	8.47

ここまで示したように、本推定によるモデルは高精度のOD交通量の獲得を保障するものではない。OD交通量の推定精度を高めるためには、サンプル調査によるOD情報や、日単位やゾーン単位といった集約されたOD交通量に関する情報などの、ODに関する先見情報を加味した推定を行う必要があるものと考えられる。

以下では、15分単位のOD交通量を用いてシミュレーションのパラメータの影響について分析を加えた後、観測地点数の違いによる影響、いくつかのODペアについて正確な交通量を与えた場合に推定されるOD交通量の精度について考察を加える。

(1) シミュレーションパラメータの感度分析

シミュレーションの再現性にもっとも影響を及ぼすパラメータの一つである各リンクの交通容量について、その設定値の精度が推定ODの精度に及ぼす影響を評価した。評価は、各リンクの正確な容量値（仮想交通状況作成時に用いた値）に、乱数を利用して最大 $\pm 1\%$ 、 $\pm 3\%$ の誤差を与えた設定値を用いて計算を行った。図12は、違う乱数系列を用いて行った10回の計算結果の平均値を示している。

再現性に影響を及ぼすもう一つの大きな要因としては、経路選択モデルの現状再現性が挙げられる。すなわち、経路選択モデルが、現実の経路選択行動をどの程度正確に記述しているかによってシミュレーションモデルの再現結果はかなり異なったものとなる。本研究によるシミュレーションでは、経路選択モデルにロジットモデルを採用しているため、そのパラメータの感度を調べた。図13は、パラメータ値を0.001[sec]から0.1[sec]まで変化させた場合の計算結果を示している。なお、先にも述べたが、仮想交通状況作成時には0.01[sec]を用いている。

いずれの場合も、パラメータ値に誤差を含ませることにより、推定精度が低下していることが確認できる。また、その影響は経路選択モデルのパラメータ値の方がより強いように読みとれる。さらに、「各リンクの容量値については、観測により、数パーセントの誤差の範囲での推定が可能であるのに対し、経路選択行動を、精度良く再現するのは困難である。」という現状を考慮すると、OD推定の精度は経路選択モデルの精度により強く影響されるという

ことがいえる。すなわち、OD推定の精度を良くするためには、シミュレーションの精度、特に経路選択モデルの再現精度を上げることが重要であるものと考えられる。

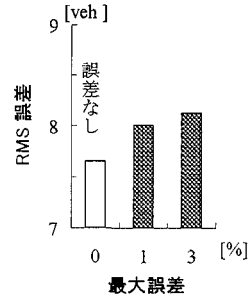


図12 交通容量に誤差

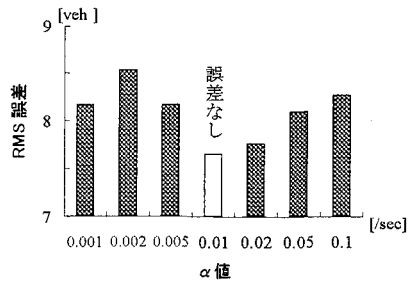


図13 パラメータに誤差

(2) 観測地点数による影響

路側観測の地点数が、推定されるOD交通量の精度に与える影響を調べるために、観測地点数（正確には各地点に観測時間帯数をかけ合わせた観測数）を変えて、OD推定を行った。図14に、観測数を1998から1096と642に減らしてOD推定を行った場合の推定精度（推定誤差の二乗和）を示す。図より、観測地点数によって、推定されるOD交通量の

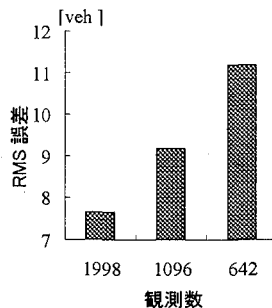


図14 観測数の影響

精度がかなり影響されることが読みとれる。このことから、推定精度を上げるためには観測地点数を多くすることは有効な手段であるものと考えられる。しかし、実際には互いに独立な制約条件となりうる観測地点数には限界があり、一般的にはODペア数並みの観測地点を確保するのは困難である。

(3) 先見情報による影響

先見情報を与えた場合に、推定されるOD交通量の精度がどの程度改善されるのかを調べるため、ここでは、いくつかのODペアについて正確なOD交通量を与えて、OD推定を行った。図15に、12ODペア(×12時間帯=144)、90ODペア(×12時間帯=1080)について正確なOD交通量を与えた場合の推定ODの精度を示す。なお、全ODペア数は540(×12時間帯=6480)であり、全OD交通量32347トリップに対して、情報として与えた交通量の総和は、それぞれ2313(7%)と8339(26%)トリップであった。また、左図は、入力ODも含めて全てのODを対象とした場合のRMS誤差、右図は入力ODを除いたODを対象とした場合のRMS誤差を示している。OD情報を与えることで、推定ODの精度は高くなっていることが読みとれるが、実際に推定した入力ODを除いたODについてのみ見てみると、12ODを入力した場合には、わずかではあるが精度が逆に悪くなるという結果を得た。このことから、全体の中から部分的なODペアについて正確なOD交通量を入力した場合には、その推定精度は良くなることが確認された。しかし、入力OD交通量を除いた、実際に推定したOD交通量については、必ずしも良い結果が得られるとは限らないということがいえる。

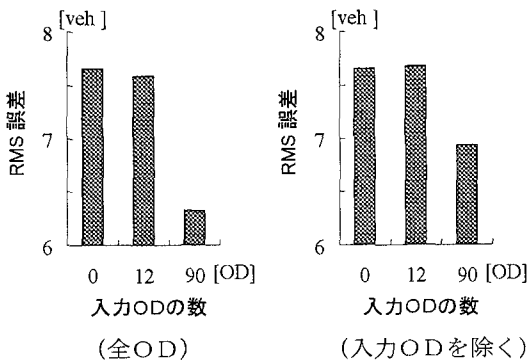


図15 OD情報の影響

6. まとめ

本研究では、シミュレーションモデルを実行した際に路側観測交通量を再現可能とするOD交通量を推定する方法を提案し、その推定によって得られたOD交通量の精度について考察を加えた。

本推定方法は、その特性上、高精度の路側観測交通量の再現性は実現されるものの、高精度のOD交通量を得ることは保障されない。高精度のOD交通量を得るためには、(a)シミュレーションの再現精度の向上、(b)観測地点数の追加、(c)先見情報の獲得といった方法が考えられるが、これらによって推定ODの精度が高くなることを確認した。

今後は、

- ここで得られた結果は、1ケースのみの適用に対するものに過ぎず、一般性を持つものではないため、様々なネットワーク、ODパターンのもとでの検討
- 先見情報の内容として、時間的、空間的に集約されたOD情報等の、比較的簡単に入手できる情報を与えた場合についての分析
- サンプル調査をはじめとする種々の方法を用いて推定されるOD交通量について、その精度を吟味する方法の確立
- 推定されたODをもとに再現されたシミュレーション結果が、OD交通量、経路選択モデル、交通容量などのパラメータなどに起因する誤差の影響をどの程度含むものであるのかについての検討等を進めていきたい。

なお、現在これらの検討を可能にするデータセットの作成が進められている^{8) 9)}。

参考文献

- 1) S. Nguyen *et al*: Discrete Time Dynamic Estimation Model for Passenger Origin/Destination Matrices on Transit Networks, *Transpn. Res.*, Vol.22 B No.4, pp.251-260,1988
- 2) 楊、他：観測リンク交通量を用いた時間OD交通量の動的推計法、土木計画学研究講演集, No.13, pp599-606, 1990

- 3) K. Ashok, M. E. Ben-Akiva : Dynamic Origin-destination Matrices Estimation and Prediction for Real-Time Traffic Management Systems, *Transpn. and Traffic Theory*, pp465-484, 1993
- 4) E. Cascetta *et al.*: Dynamic Estimators of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts, *Transpn. Sci.* Vol.27 No.4, pp.363-373, 1993
- 5) 小根山、桑原；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, pp5-16, 1997
- 6) 岡村、他；一般街路網シミュレーションモデルの開発と検証、第16回交通工学研究発表会論文報告集, pp93-96, 1996
- 7) Sheffi Y.: *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice Hall, 1985
- 8) 花房、他；交通シミュレーションシステムの再現性検証用データセットの構築、第52回土木学会年次学術講演会投稿, 1997
- 9) 堀口、他；ネットワークシミュレーション用のベンチマークデータセットの構築～車両経路の抽出、第52回土木学会年次学術講演会投稿, 1997

トラフィックシミュレーションを用いた路側観測交通量からの動的OD交通量の推定*

吉井稔雄**, 桑原雅夫***, 赤羽弘和****, 堀口良太*****

本研究では、シミュレーションを実行した際に、路側観測交通量を再現可能とするOD交通量を推定する方法の提案を行い、実際のネットワークへの適用を通して、その推定精度とシミュレーションの再現精度との関係、あるいはどのような情報を付加すればより精度の高いODが得られるのかといった点について考察を加えた。その結果、提案した推定方法は、本質的には観測交通量を再現しようとするものであるため、高精度のOD交通量を獲得する保障は無いものの、(a)シミュレーションの再現精度の向上、(b)観測地点数の追加、(c)先見情報の獲得といった方法によって推定ODの精度が高くなることを確認した。

*Estimation of a Time Dependent OD Matrix from Traffic Counts Using Dynamic Traffic Simulation**

Toshio YOSHII**, Masao KUWAHARA***, Hirokazu AKAHANE****, Ryota HORIGUCHI*****

This study proposes and develops an OD(Origin-Destination) estimating method from traffic counts using dynamic traffic simulation. The proposed method intends to get an OD matrix which is required by dynamic traffic simulation so as to reproduce observed counts. After development, we evaluate how accurately it can estimate an OD matrix using actual road network. In result, we confirm that the method cannot estimate exact OD matrix because it intends to get an OD matrix by which simulation can reproduce observed counts. However, we understand what a extent (a)accuracy of simulation performance, (b)number of observed counts and (c) other information effect the accuracy of estimated OD.