

都市高速道路における交通流シミュレーションモデルの適用

An Application of Traffic Simulation Model to the Urban Expressway

鈴木裕介* 森田綽之****
原隆広** 吉井稔雄*****
桑原雅夫***

最近の交通計画に対する住民参加の必要性の高まりを背景として、新たな整備事業等の必要性・妥当性・効果について、的確にかつ詳細に説明していくためには、ピーク時の渋滞状況や所要時間といったわかりやすい項目を用いて、客観的に評価する必要がある。さらに、ネットワークが比較的密に構成されている都市高速道路における、新たな路線整備の影響は広範囲に及ぶことから、ネットワーク全体が評価できるツールが必要とされてきた。本研究では、時々刻々と変化する交通状況を評価することが可能な交通流シミュレーションモデルを首都高速道路ネットワークに適用している。車両の移動と経路選択を繰り返すタイプのネットワークシミュレーションモデルに対して、交通感知器データから得ることができる実際の交通量と交通密度の関係を反映し、実用性を重視しつつ適用を試みた結果、実際の交通状況について比較的良好に再現できることが確認できた。

キーワード 交通流シミュレーション 経路選択 交通状況再現

1. はじめに

近年、自動車交通の増大がもたらす渋滞問題や環境問題等の諸問題に対して、交通容量の拡大や交通の迂回・分散化を図るための環状ネットワークといった新たな路線整備の必要性が議論されてきた。

新規路線における将来交通量を推計する方法として、実務上多くの行政機関で「静的配分手法」が用いられてきた。この方法に関しては、理論としては完成の域に達しており効率的な計算方法も示されている¹⁾。

一方、今後の情報公開等を踏まえ、事業の必要性や効果等について、的確に検討し、広く説明する必要がある。そのためには、日単位の断面的な将来交通量の予測といった視点に加えて、渋滞や所要時間の変化などわかりやすい指標が要求され、それらを客観的に評価するためのツールが必要となってきた。

しかしながら、静的な評価では本質的に非定常である混雑・渋滞下の交通流を表現し厳密に評価するのは不可能であるため、動的な評価が可能な交通流シミュレーションの必要性が高まっている。

* 首都高速道路公団神奈川建設局建設第二部設計第二課 (TEL: 045-439-0755, FAX: 045-439-0773)

** 首都高速道路公団計画部調査課 (TEL: 03-3539-9408, FAX: 03-3502-2412)

*** 東京大学国際産学共同研究センター教授

**** 日本大学総合科学研究所教授

***** 高知工科大学社会システム工学科助教授

本研究は、時々刻々と変化する交通状況を評価することが可能な交通流ネットワークシミュレーションモデルについて、実用性を考慮しつつ、首都高速道路への適用を試みた実証的研究と位置づけられる。

2. 既往の研究

本研究で対象とする、利用者の経路選択行動を内生化したネットワークシミュレーションモデルの例としては、イギリスで開発された SATURN²⁾、CONTRAM³⁾、我が国においては DYTAM⁴⁾、BOX⁵⁾などが挙げられる。これらのレビューについては、上田らの論文⁶⁾にまとめられている。

これらのモデルは、渋滞中の交通密度の管理が十分に成されていない為、特にランプやジャンクションが近接する都市高速道路への適用には適していない。paramics や MITSIM は、個々の車両の追従挙動を表現することにより、渋滞中の交通密度を表現しているが、各リンクの容量値を直接的に管理することが出来ないため、例えばボトルネックでの交通容量といった観測可能な交通現象をモデルパラメータとして取り込むことが困難となっている。上田らは、各リンクの交通量-交通密度の関係を外生的に与え、車両を流体として扱うシミュレーションモデルとしてブロック密度法を提案している。しかしながら、車両を流体として扱うブロック密度法では個々の車両の属性を扱うことが困難である。吉井らは個々の車両を離散的に表現し、かつ交通量と交通密度の関係から車両の移動を管理する方法による SOUND⁷⁾を開発している。

しかし、上述のように、多くのネットワークシミュレーションモデルが提案されているものの実務レベルでの検証事例については報告が少なく、1日(24時間)を通した完結した単位での適用も実施されていない。

そこで本研究では、SOUNDを基本モデルとし実務への適用を容易にするために経路選択モデルに改良を加えたシミュレーションモデル TRANDMEX (TRANsportation Dynamic

Model on urban EXpressway) を提案する。

3. モデルの概要とパラメータの設定

モデルは図-1に示すようにシミュレーションモデルと経路選択モデルの2種類のモデルから構成されている。シミュレーションモデルでは、経路選択モデルから算出される経路選択確率により車両をネットワーク上で分岐・移動させ、リンクの旅行時間を更新していく。更新されたリンク旅行時間を基に経路選択モデルで経路選択確率を更新し、車両が配分されるといったモデルの繰り返しによって成り立っている。

3.1 シミュレーションモデル

シミュレーションモデルは、前方の車両との車頭間隔と、各リンクごとに設定した交通量と交通密度の関係(Q-K)により、スキャンインターバル(Δt)間に移動する車両の位置を管理するものである。

3.1.1 車両感知器によるQ-Kの設定

各リンクごとのQ-Kについては、1997年より使用されている首都高速道路の管制システム(通称:システム97)では、道路上のおよそ300m~900mを“区間”としており、その区間単位に5分間の各Q、Kを常に自動更新してQ-K曲線を得ている。今回は、本調査時点での最新である1998年8月末までのQ-Kを使用しており、様々な交通状況を包括した平均値として位置付けられる。

図-2は自由流側・渋滞流側をいずれも2次曲線で近似したQ-K曲線の一例である。シミュレ

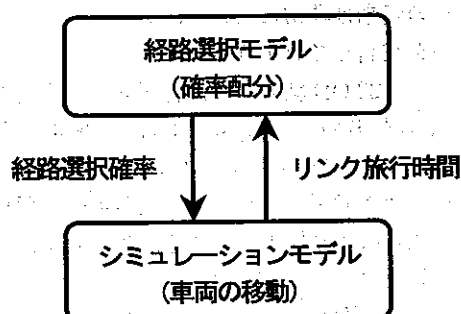


図-1 シミュレーションモデルの構造

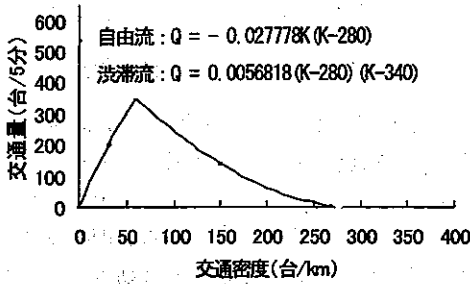


図-2 区間Q-Kの例

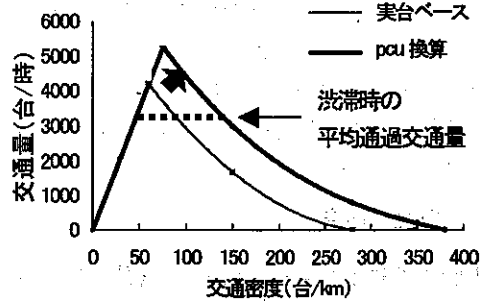


図-4 Q-Kの変形方法

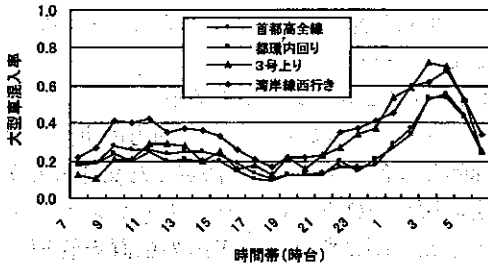


図-3 時間帯・路線別大型車混入率

値を示すことが多く、過大な交通容量を設定してしまうこととなる。そこで、ボトルネック部においては、実態データから速度が低下している時間帯における平均通過交通量を算出し、ボトルネック部の交通容量として適用している。具体的には上記Q-K曲線の上部をカットした図-4の破線で示すようなQ-K曲線を採用した。

$$q = f(k) \tag{1}$$

$f(i)$: 交通密度 i の時の通過交通量

$$k = K \times (1 + \alpha)$$

$$q = Q \times (1 + \alpha)$$

α : 大型車混入率

ーション上は、演算時間の短縮を考慮して自由流側を直線式に置き換えている。なお、自由流と渋滞流の判別は、車両感知器から得られる速度データに対して大津の閾値選択法⁸⁾を用いて自由流と渋滞流の閾値となる速度を算出し判別を行っている。

一方、ここで得られるQ-Kは車両感知器を通過した車両台数(実台数)によって構成されているが、交通状況を再現する上で大型車の影響を無視することはできない。図-3は第22回首都高速道路交通起終点調査⁹⁾(以降22ODと記す)から得られる時間帯・路線別大型車混入率であるが、その変動は非常に大きく、シミュレーションの結果を左右してしまう恐れがある。

そこで、22OD結果から、各区間の日平均大型車混入率を考慮するためにQ-Kを修正した。図-4はその方法を示しており、交通容量を道路交通センサスで用いられている大型車の乗用車換算係数2.0により拡大し、渋滞流側の曲線については式(1)に従って修正した。

なお、この近似式で定義される交通容量については、実際に車両感知器では観測され難い大きな

3.1.2 渋滞時の交通容量低下に関する検討

区間速度の再現性を向上させるため、渋滞時の交通容量低下に関するロジックの導入を検討した。すなわち、交通容量が発現する付近のQ-Kが不連続かつ不安定な状態であり、自由流域における最大交通流率(ある断面を通過する最大車両台数)が渋滞時におけるものより高いこと、また、一度渋滞現象が生じた場合に回復し難いことを表現することである。

首都高速道路の車両感知器データを用いて解析した結果¹⁰⁾からは、Q-K曲線が不連続となり渋滞側の最大交通量が自由流側の最大交通量より小さくなっていること、また、都市間高速のトンネル、サグにおいて「渋滞前の交通容量」と「渋滞中の交通容量」の存在が示されており¹¹⁾、これらの既存の研究を踏まえ、主なボトルネック箇所において実態データの分析を行った。

具体的には、平成11年7月12日～16日の平日5日間の1分間車両感知器データから横軸に時刻、縦軸に車両の進行方向をとった速度の時空間図を描き、渋滞の先頭を特定することを考えた。渋滞の先頭の定義は「その地点を通り過ぎればフリー走行ができる地点」すなわち、下流側が自由流、上流側が渋滞流を示している地点である。図-5は高速3号渋谷線下りの時空間図であるが、池尻ランプ付近(03-02-26)において17:00前後から認められる速度低下が時間とともに徐々に上流側に伝播している状況がわかる。

次に、この地点における交通量、速度、交通密度の関係を図-6から見てみると18:40位から約20分間で速度低下が急激に生じており、それに対応するように交通量も約10%程度低下し、以降は回復が見られないことがわかる。

以上のような分析を、代表的なボトルネック7箇所において実施したところ、都市間高速における変化ほどドラスティックではないものの、平均的に渋滞前と渋滞中の最大交通量の差が生じる時間間隔は20分程度であり、その減少率は5%程度であることが確認できた。(渋滞判定については、3.1.1に記述した大津の閾値法を用いる)

このことをシミュレーションに反映させ、渋滞継続時間が20分以上連続した場合に、渋滞流側

の曲線については、式(2)に従ってQ-K曲線を5%分下側にシフトさせることとした。

$$q_{jam} = f_{jam}(k) \times 0.95 \quad (2)$$

jam: 渋滞流

3.2 経路選択モデル

道路利用者の経路選択行動を確率的に表現するために、よく用いられる方法としてロジットモデルを用いたDial配分¹²⁾がある。この方法は、「終点ノードよりも起点ノードの方が発生点に近いリンク」のみで構成されるネットワーク上の全経路(efficient path)を対象として選択確率を求めていくものである。しかしながらDial配分では、図-7に示すような、ネットワーク形状ではリンクコストの状態によって、本来代替経路とし

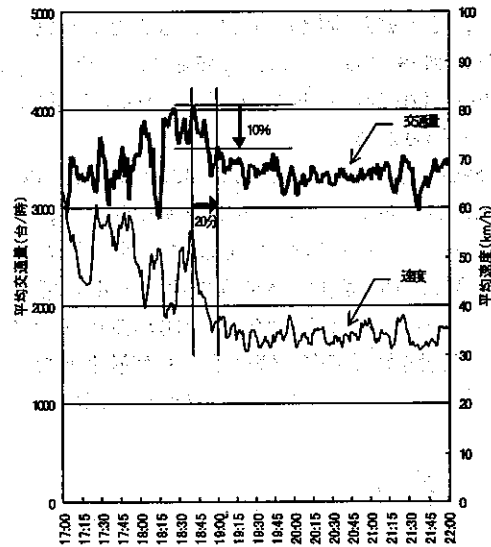


図-6 高速3号渋谷線下り池尻ランプ付近の交通量、速度の関係

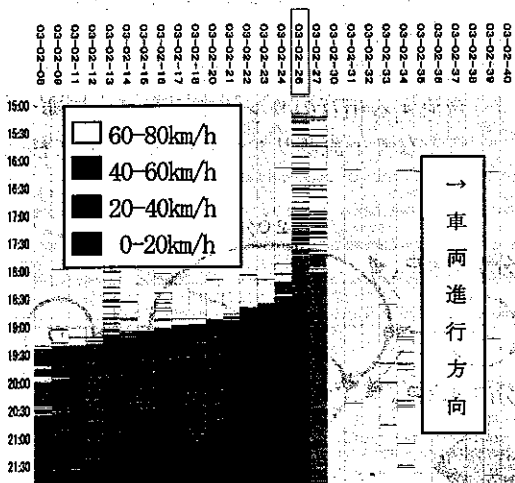


図-5 高速3号渋谷線下りの時空間図
(平成11年7月15日木曜日)

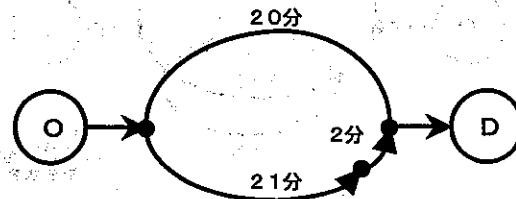


図-7 efficient pathの問題

て認識すべき経路が対象経路からはずされてしまうという問題が生じる。

この問題を解消するために、

- ① 経路を列挙する方法
- ② 経路選択用の粗いネットワークを別途準備する方法

などが考えられるが、①の方法では複雑なネットワークでの計算が困難である。②の方法では問題は緩和されるものの、必ずしもこの問題が解決するわけではない。また、この作業が経験や勘などに頼らざるを得ないこと、さらにネットワークを変更する都度の作業となるため困難で膨大な作業となってしまうことから、この種のシミュレーションを実務に適用する上で大きな問題となっていた。

そこで、本研究では分岐後の目的地までの経路について、分岐方向別に最短となる代表経路を抽出し、その経路選択問題と捉えることとした。例えば、図-8においては、分岐確率 P_A 及び P_B は経路 A (20分) と B (15分) の所要時間によって算出される。

経路選択確率は式(3)のように計算する。以下、本稿におけるシミュレーション適用時には、パラメータ θ については、22 OD における代表的な JCT 間の時間帯別経路別選択比率と車両感知器データから得られる時間帯別経路別旅行時間に基づいて経路選択確率の残差平方和が最小となるように推計した値 (0.00835 (1/秒)) を用いる。

$$P_i = \frac{e^{-\theta t_i}}{\sum_{j=1}^n e^{-\theta t_j}} \quad (3)$$

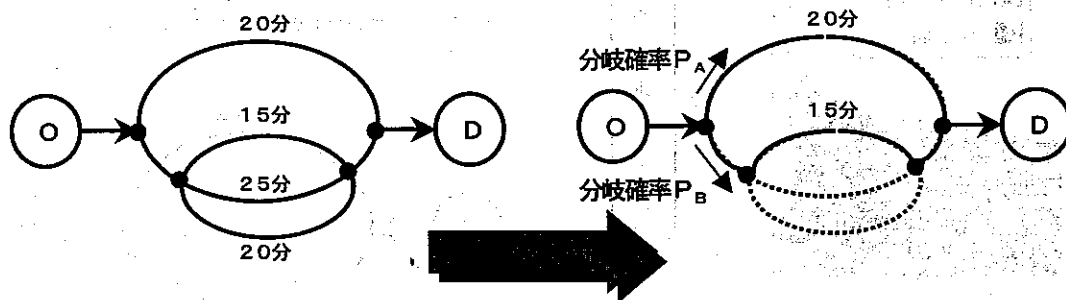


図-8 分岐比率の2経路選択問題

- P_i : 分岐後の代表経路 i の選択確率
- n : 分岐後の代表経路数
- θ : トレードオフパラメータ (0.00835/秒)
- t_i : 分岐後の代表経路 i の旅行時間
- t_j : 分岐後の代表経路 j の旅行時間

3.3 交通状況依存層と非依存層の設定

経路選択行動について、現実には、所要時間によって経路を決定するのではなく、距離の短さ、運転のしやすさ、走行経験の有無などにより決定しているドライバーの存在が明らかになっている¹³⁾。そこで本稿のシミュレーション適用に際しては、ドライバーを所要時間に対する反応の違い等によって①交通状況依存層、②交通状況非依存層の2種類に分類する。①は各瞬間のネットワークの状況(所要時間)に基づいて式(3)から算出される確率に従って経路選択を行い、②は交通状況の変化には反応せず、自由流の旅行時間に基づいて式(3)から算出される確率に従って経路選択を行う。アンケート調査によればこの割合については約40%とされている。また、吉井ら¹⁴⁾はシミュレーション適用時のパラメータの推計結果から40%~60%となることを推定している。

これらの結果を参考にして交通状況依存層と非依存層の比率を50:50と設定した。

3.4 合流比の設定

ネットワークの合流部における移動については、以下の方法を用いている。

- ① 渋滞が発生していない場合

合流する相互のリンク交通量は、干渉することなく下流側リンクの状況に応じて移動

- ② どちらかのリンクが渋滞している場合
あらかじめ設定した合流比を用いて、渋滞しているリンク側の合流比が、設定した合流比以下にならないように移動
- ③ 両方のリンクが渋滞している場合
あらかじめ設定した合流比に従って合流させる

合流比の定義は、合流するリンクがどちらも渋滞している場合における合流する交通量の比率を指し合流部の道路構造から決定されるものである。

図-9は、合流方法の概念図である。リンク*i*、*j*は合流後下流側のリンク*k*の流量を合流比によって割り振けた分の容量が確保されることになり、*i*、*j*からの交通需要が共にこれを上回らなければリンク*k*の状況に依存する。また、両方のリンクの交通需要が共にこれを上回った場合には、設定した合流比に基づいて合流する。一方の交通需要のみが上回る場合には、上回っていない側の余裕分を上回る側に振り替えることとなる。

合流比を設定するために、車両感知器データから、合流部の上流側及び下流側が渋滞している時間帯における合流比を算出した結果、若干のバラツキがあるものの、図-9のように2車線に1車線が合流する(ランプも含む)箇所の合流比は概ね6:4~8:2であった。

合流現象は、当該箇所の道路構造とその時点における個々の車両の挙動に左右される問題である。現在、その研究が進められている段階であり、「本研究の目的とする実用的なネットワークシミュレーションへの導入は実務的でない。」と

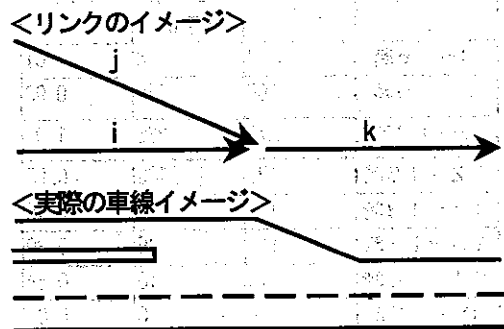


図-9 合流方法の概念

考え、合流比の設定については、車線数の比率と実態データを勘案して設定している。

4. 現況再現性の検証

シミュレーションモデルの妥当性を検証するため、実測データを入力値として、出力される結果と実測値との比較を実施することで現況再現性の検証(Validation)を行った。

4.1 シミュレーション条件

シミュレーションの条件については以下のとおりである。

【調整不可能な設定条件】

- ① 対象ネットワーク：首都高速道路
- ② 対象年次：22 OD 実施時の平成7年
- ③ 対象時間：AM3時~AM3時の24時間
(残留交通の影響の最も少ない時点から評価)

【調整可能な設定条件及び設定根拠】

- ④ OD表：22 ODではランプ流入時刻が得られる事から各時間帯毎のランプ間OD表を作成し、大型車については乗用車に換算している。(換算係数2.0)
- ⑤ Q-K曲線：車両感知器データから設定(3-1-1参照)
- ⑥ スキャンタイム：3秒
- ⑦ パケットの台数：3台(※パケットとは、同じドライバー属性及び車両属性を持つ車両数台のグループ)
※⑥⑦については、1秒1台でシミュレーションを実施したが、精度に大差は無く、表記の3秒3台の演算時間が半分程度となることから、今回は3秒3台で実施している。
- ⑧ 経路選択時間間隔：1分(※経路選択時間間隔とは、経路選択の為に旅行時間情報の更新間隔)(首都公団トラカンデータの収集周期1分)
- ⑨ 最短車頭間隔：9.5m (20km/時÷2,100台/時/車線)

4.2 区間交通量に関する評価

区間交通量に関して、統計指標による評価を

表-1に示す。

この表は、当日の車両感知器データから得られる時間帯別区間別交通量とシミュレーションのアウトプットを全ての区間について統計的に比較したものである。

12時～18時にかけて若干誤差率が高くなっているが、全体的には相関係数、%RMS、MAPEともに誤差が低いことを示し、現況再現性が高いことが窺える。この結果は、経路選択の妥当性を表現しているものと考えられる。

%RMS：RMS 誤差

$$RMS = \sqrt{\frac{(P_i - A_i)^2}{n}} \times 100$$

MAPE：平均誤差率

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{P_i - A_i}{A_i} \right| \times 100$$

P_i ：推計値

A_i ：実績値

n ：サンプル数

4.3 区間速度に関する評価

区間速度に関して、混雑量による評価を表-2に示す。

実測値は22 OD 当日の車両が道路上を走行する際の時間遅れを考慮したタイムスライスで算出された車両感知器データを時間単位で集計した値である。混雑量の定義は、40 km/h以下の区間を混雑区間とみなし、混雑区間長に時間を乗じた

値とした。また、速度の推定方法については、リンクの1時間当たりの走行台キロ（1時間のリンク終点ノード通過台数にリンク長を乗じたもの）をリンクの1時間当たりの走行台時（1時間にリンクを通過した車両のリンク通過時間の総和）で除して算出している。結果は、シミュレーション開始時から15時までは実態と良く合致しているが、15時以降は実態の半分以下と乖離していることがわかる。

次に、東京線における速度ランク図を時間帯別に9時台・15時台・17時台を図-10～12に示す。ピーク時における9時台の交通状況においては環状の一部において混雑状況が若干過大に評価されているものの全体的な混雑状況は良く表現されている。また、15時台の混雑が解消した状況の場合にも、かなり実測値と合致した形で表現することができている。一方、夕方のピークが始まる17時台においては混雑状況がかなり過小評価されていることが、区間交通量の誤差を大きくしている原因と考えられる。これは、シミュレーションによる誤差の蓄積に加えて、午前と午後におけるドライバーの運転挙動の違い、織り込み区間における容量の変化等をシミュレーションモデルが表現していないことが原因であると想定される。

最後に、路線別の上り方向の旅行時間変動について図-13に示す。これらのグラフから渋滞の開始時間、速度低下に伴う旅行時間の増加の変動、その傾向や感度について良く表現しているが、お

表-2 混雑量の比較 (単位：km・時)

表-1 区間交通量の評価

時間帯	相関係数	%RMS	MAPE
3～6時	0.941	15.9	14.6
6～9時	0.902	17.2	12.1
9～12時	0.928	13.5	11.6
12～15時	0.877	26.4	20.8
15～18時	0.837	27.7	21.5
18～21時	0.922	14.2	12.6
21～0時	0.933	15.7	12.6
0～3時	0.945	13.8	12.3
24時間合計	0.936	14.6	9.2

時間帯	実測値 (a)	シミュレーション結果 (b)	比 (b/a)
3～6時	4	4	1.01
6～9時	167	156	0.93
9～12時	276	285	1.03
12～15時	192	183	0.95
15～18時	197	94	0.48
18～21時	114	45	0.39
21～0時	19	10	0.54
0～3時	19	0	0.01
24時間合計	988	776	0.79

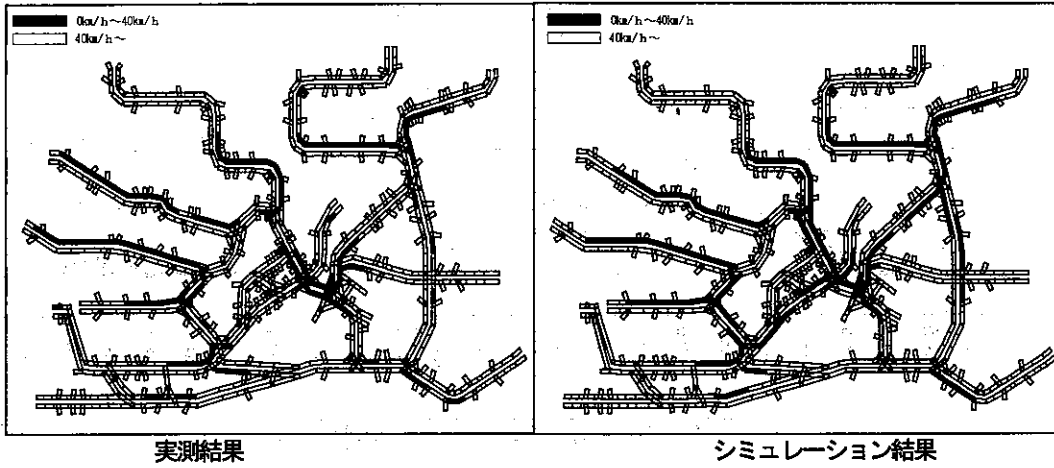


図-10 速度ランク図 (9時台)

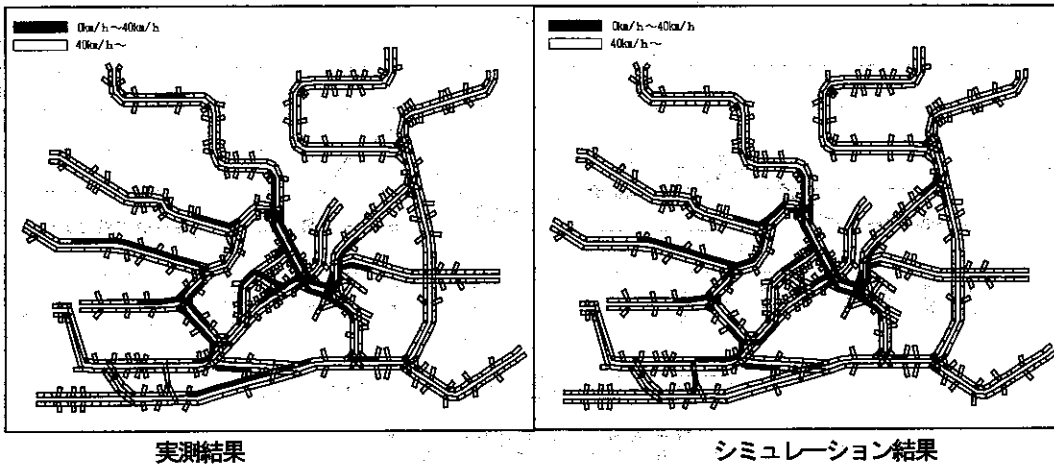


図-11 速度ランク図 (15時台)

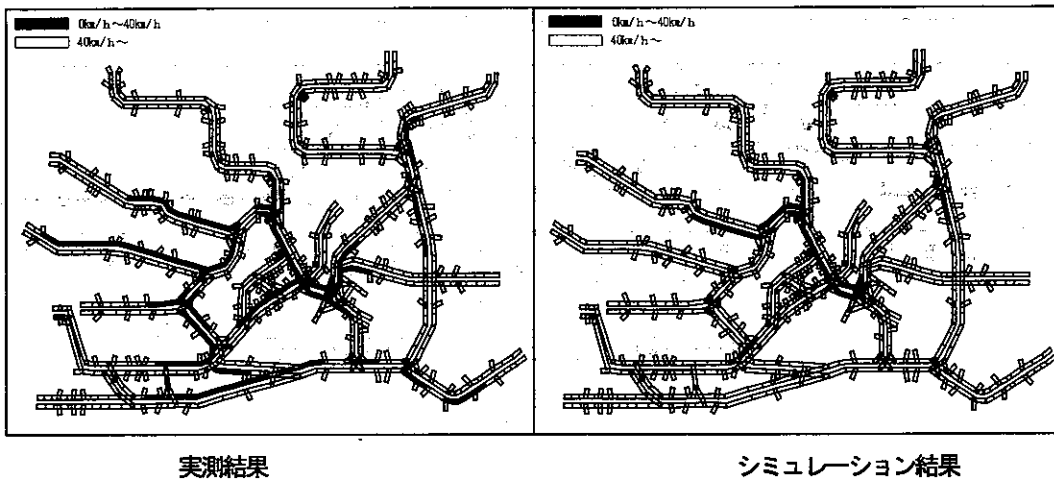
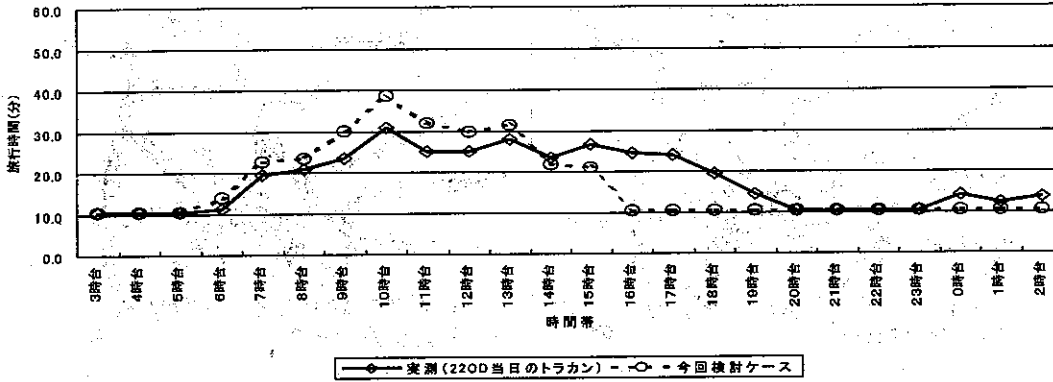
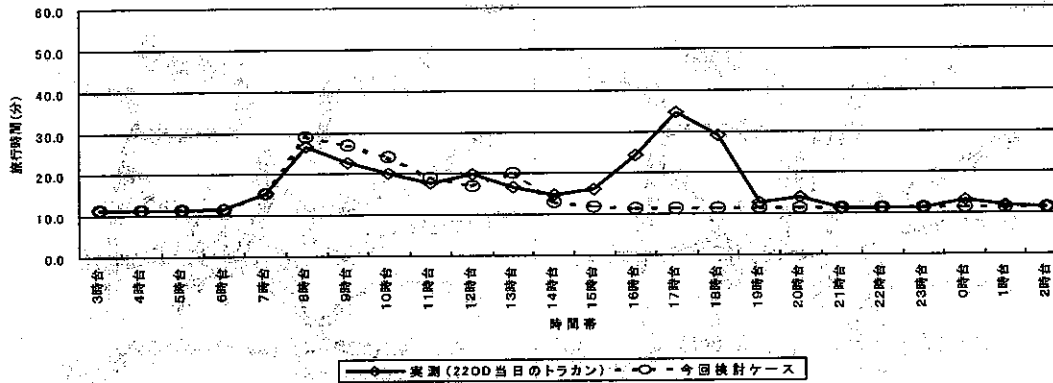


図-12 速度ランク図 (17時台)

放射路線上りの旅行時間の比較
3号渋谷線(用賀→谷町)



放射路線上りの旅行時間の比較
4号新宿線(高井戸→三花坂)



放射路線上りの旅行時間の比較
6号向島線(堀切→江戸橋)

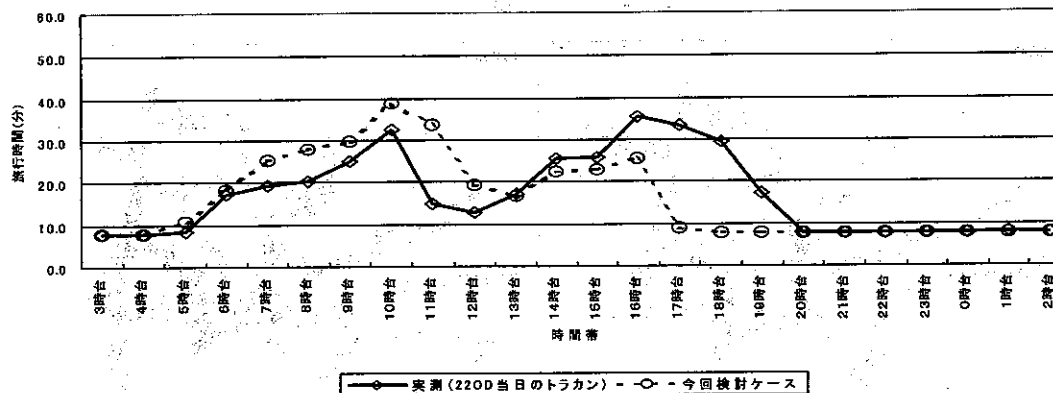


図-13 放射線上市の旅行時間の比較

よそ15時位から乖離が生じていることが判断できる。

以上の検証結果から、区間速度の評価には若干の課題が残されているものの、全体的な交通状況の再現は概ね良好であると評価できる。

5. おわりに

本研究では、時々刻々と変化する交通状況の評価することが可能な交通流シミュレーションモデルを提案し首都高速道路への適用を試みた。

パラメータに関しては、車両感知器データやOD調査などの結果から客観的に設定できるパラメータを用いた。また、現況再現性をより高めるため、OD表・Q-K曲線について大型車の影響を考慮し、さらに渋滞時の交通容量低下現象についてもモデルに反映させている。

その結果、交通量に関する再現は良好であり、経路選択については適切に表現できている。また、速度に関しては、15時以降の実態との乖離が若干の問題として残されているものの、旅行時間の変動や速度ランクに関して、実態の車両感知器データを良く再現していると評価できる。15時以降の再現性低下に関しては、シミュレーションによる誤差が蓄積していること、午前と午後におけるドライバーの運転挙動の違い、織り込み区間における容量の変化等を表現していないことがその主な原因であると想定される。

今後の課題としては、高度化する情報提供下での経路選択行動（交通状況依存層と非依存層）に対する検討が必要である。また、シミュレーションの入力値として必要となる交通容量値の自動設定や自動更新が可能となるモデルの導入について検討が必要である。さらに、交通現象的な側面からは、午前と午後におけるドライバーの運転挙動の違いや織り込み区間における車両挙動の検討も残されている。また、将来ネットワークにおける

適用も視野にいれ、取り扱うOD表についても引き続き検討を行う必要がある。

最後に、本研究を進めるにあたっては、首都高速道路公団「交通量推計手法の研究」委員会において東京大学大学院工学系研究科太田勝敏委員長をはじめ諸先生方に多大なご協力を頂いています。ここに、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 赤松隆; “各種静的均衡配分の理論と適用可能性”, 土木計画学ワンデーセミナーシリーズ第4回, pp. 75~99, 1994
- 2) D. Van Vliet and M. D. Hall; “SATURN 8.3-A User's Manual-Universal Version”, Institute for Transport Studies, University of Leeds, November, 1991
- 3) D. R. Leonard, P. Gower, and N. B. Taylor; “CONTRAM: Structure of the Model, TRRL Research Report RR 178, 1989
- 4) 木戸伴雄, 池之上慶一郎, 育藤威; “街路網における経路探索・交通配分モデル (DYTAM)”, 科学警察研究所報告交通編, Vol. 19, No. 1, 1978
- 5) 飯田恭敬, 内田敬, 藤井聡, 鷹尾和亨; “渋滞の延伸を考慮した動的交通流シミュレーション”, 土木計画学研究講演集, No. 14(1), pp. 301~308, 1991
- 6) 桑原雅夫, 上田功, 赤羽弘和, 森田紳之; “都市内高速道路を対象とした経路選択機能を持つネットワークシミュレーションモデルの開発”, 交通工学, Vol. 28, No. 4, 1993
- 7) 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田紳之; “都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発”, 交通工学, Vol. 30, No. 1, 1995
- 8) 大津展之; “判別及び最小2乗基準に基づく自動しきい値選定法”, 電気情報通信学会論文誌, D-11, Vol. J 63-D 1980
- 9) 首都高速道路公団; 第22回首都高速道路交通起終点調査報告書, 平成7年9月実施
- 10) 越正毅, 岩崎征人, 大蔵泉, 西宮良一; “渋滞時の交通流現象に関する研究”, 土木学会論文報告集第306号, pp. 59~70, 1981
- 11) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和; “高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究”, 土木学会論文集 No. 458, pp. 65~71, 1993
- 12) 土木学会; 交通ネットワークの均衡分析, 第4章, 1997
- 13) 首都高速道路公団; “首都高速道路の利用行動の特性に関する調査”, pp. 139~158, 平成5年3月

(2002年1月22日受付)
(2002年10月17日再受付)