

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

吉 井 稔 雄*
桑 原 雅 夫**
森 田 綽 之***

本研究は、都市内高速道路網を対象として、渋滞長や旅行時間の変化をダイナミックに再現できるシミュレーションモデルの開発を行った。本モデルは経路選択が内生化されており、経路選択モデルと車両移動モデルとを交互に繰り返すことによって、近似的な均衡交通流の時間変化を得ようとするものである。ランプ、ジャンクションの近接する都市内高速道路を対象としたので、交通密度の管理を交通流率と関係づけて行い、渋滞の延伸状況を再現できるモデルを構築した。さらに、首都高速道路ネットワークに適用した結果、本モデルは、実際の交通状況を比較的良く再現できていることが確認された。

1. はじめに

本研究は、都市内の高速道路網を対象とし、過飽和ネットワークにおける渋滞長や旅行時間の時間変化をダイナミックに再現できるシミュレーションモデルの開発を行ったものである。都市内において慢性的に渋滞が発生している道路ネットワークを対象にした場合、ネットワークの新設や交通規制の変更によって、渋滞状況が時間的にどのように変化するかを予測することが不可欠なものとなる。そこで、過飽和時における渋滞の延伸及び解消の状況を精度良く再現できるように、交通密度を交通流率と関連づけながら管理するとともに、経路選択の機能を内生化したモデルの開発を行った。

2. 既往の研究と本モデルの特徴

交通運用策の評価やネットワーク新設による影響評価などのために開発された経路選択機能を取り込んだモデルとしては、イギリスで開発されたSATURN¹⁾、CONTRAM²⁾をはじめ科学警察研

究所で開発されたDYTAN³⁾、飯田らによるBOX⁴⁾モデル、上田らによるブロック密度法に基づいた方法^{5),7)}などがあげられる。これらのモデルのレビューは文献5)にまとめてあるので省略するが、これらのモデルにほぼ共通の問題点として、渋滞の管理が十分になされていないことがあげられる。具体的には、ボトルネックの容量が比較的大きく流率の高い状況(図-1)と、ボトルネックの容量が小さく流率の低い状況(図-2)との違いについての表現がなされていない、ということである。図-1と図-2は簡単な概念図であるが、ボトルネックを通過することのできる交通量の大小によって、ボトルネック上流側の渋滞密度は図のように大きく異なり、上流側に流入ランプがあ



図-1 ボトルネック容量 大



図-2 ボトルネック容量 小

* 東京大学生産技術研究所助手
** 東京大学生産技術研究所助教授
*** 首都高速道路公団神奈川建設局次長

る場合、その流入地点まで渋滞が延びている状況とそうでない状況とは、本線とランプからの車双方の旅行時間に大きな違いが生じることになる。例えば、本線が渋滞していてオンランプからの交通が本線に合流する状況を考えてみると、図-1では待ち行列のかなり前の方に割り込むのに対し、図-2では待ち行列の最後尾につくことになる。このように、2つの状況では旅行時間にすると大きな違いが生じ、経路選択にも大きな影響を与えるので、ランプ、ジャンクションが近接する都市内高速道路網においては、この状況を無視することはできない。そこで、本モデルではこの交通密度を流率と関連づけて管理するモデルの構築を目指した。

このように都市内の高速道路を対象とした動的なモデルとしては、先にもあげたブロック密度法が開発されているが、ブロック密度法に基づいた方法は、交通密度の管理はなされているが、各ブロックが全目的地別の交通密度を記憶し、その交通密度をスキャンインターバルごとに改訂していくという方法を用いているので、大きなネットワークの計算においては、ブロック数と目的地の数が増えて計算時間がかかるという問題点を抱えており、本研究によりこの点が大きく改善された。

3. モデルの概要

モデルは、シミュレーションモデルと経路選択モデルの2種類からなり、図-3に示すようにこの

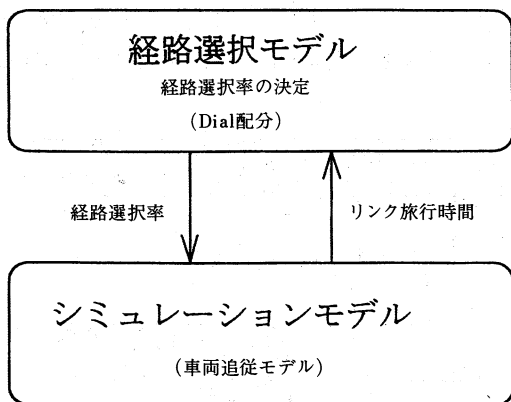


図-3 シミュレーションモデルの構造

2種類のモデルを繰り返し適用する構造になっている。シミュレーションモデルでは、経路選択モデルによって求められた各経路の選択率を基に、与えられた交通量をネットワークに流し、リンク旅行時間を決定する。一方経路選択モデルにおいては、シミュレーションモデルによって得られたリンク旅行時間をもとに、各ODの経路選択率をある一定時間ごとに改定するという構造である。本モデルは厳密な意味での利用者均衡状態を再現するものではなく、シミュレーションと確率配分(Dial配分)による経路選択を繰り返すことにより、近似的な均衡交通流の時間変化を得ようとするものである。

3.1 シミュレーションモデル

(1) 車両追従モデル

シミュレーションモデルにおいては、各スキャンインターバル(Δt)ごとにリンクとノードから構成されるネットワーク上の個々の車両(あるいは車両数台のグループ)を離散的に移動させる方法を用いた。

本研究で用いた車両追従モデルは、各リンクごとに交通量-交通密度関係($Q-K$ 関係)を設定しておき、この関係を用いて、車両を各リンクの下流側より順次移動させるものである。時刻 t に、あるリンク上に図-4のように2台の車両 A, B が存在し、時刻 $t + \Delta t$ で、まず下流側の車両 A の移動が完了した状況を考える。このとき、車両 B がもし L だけ移動したとすると、時刻 $t + \Delta t$ における A, B 間の車頭距離は S となる。各車両は現在位置を記憶しているため、このとき $S + L$ の距離は分かっている。

この状態における車両 B の1スキャンにおける移動距離 (L) の求め方は以下のように、車両 B

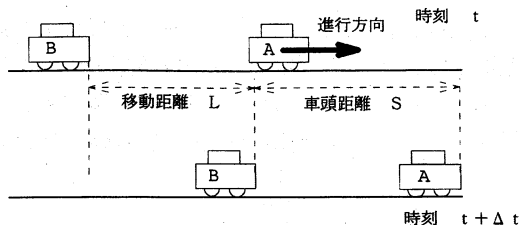


図-4 車両の移動方法

が仮に L だけ動いた後の車頭距離 S と速度 $L/\Delta t$ が仮定した Q - K 関係を満たすことを条件に求めるものである。

まず、 Q - K 関係を次のように表す

$$Q=f(K) \dots\dots\dots(1)$$

Q : 交通量

K : 交通密度

車頭間隔距離 (S) は交通密度の逆数であることと、交通量 (Q) が速度 (V) と交通密度 (K) の積で表される関係を式 (1) に代入して整理すると

$$V=S \times f\left(\frac{1}{S}\right)$$

となり、速度が車頭距離の関係として得られる。さらに 1 スキャン (Δt) における移動距離は

$$L=V \times \Delta t$$

であるから

$$f\left(\frac{1}{S}\right) \times S = \frac{L}{\Delta t} \dots\dots\dots(2)$$

が得られる。ここで Δt と関数形 f は既知であり、さらに前車の移動により $S+L$ が与えられるので、 L 、 S の値を決定することができる。

(2) 合分流の方法

合流部の移動については以下のような方法を用いた。渋滞の発生していない状況では、両方のリンクからの交通は、互いに相手側のリンクの交通に影響されずに、前方下流のリンクの状況によって移動する。また合流するリンクのうち、どちらかのリンク、または両方のリンクが渋滞している場合には、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の割合が、設定した合流比による割合以下になることのないように合流させる。

ここでいう合流比とは、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の比率をいい、合流部の道路構造から決まる値である。したがって、図-5 のように合流するリンク i 、 j は、合流直下のリンク k の容量に、割り振られた合流比

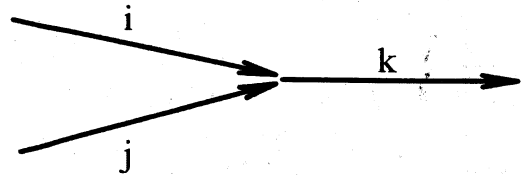


図-5 合流リンク模式図

を乗じた量の容量が保障されることとなる。リンク i 、 j からの需要がこの容量よりも小さければ自由流状態で、リンク k の状態にのみ依存して車両が移動する。また、両方のリンクの需要が共に容量を上回った場合には、設定した合流比でコントロールしながら合流させる。しかし、もしも一方のリンク i の需要のみが容量を上回った場合には、容量に余裕のあるリンク j の余った容量分をリンク i の交通処理に振り替える操作を行う。結果として、この場合のリンク i の合流比は設定された値よりも大きくなる。

また、分流の方法について、後述する経路選択モデルにより、各分流ノードには目的地別の分流比が与えられる。分岐ノードにおいては、それぞれの方向に分岐する車両の台数を、目的地別にカウントしておき、ある目的地を持つ車両が分流ノードに到達した場合には、それ以前に分岐した同じ目的地の車両の割合が、与えられている分流比率よりも小さい方向に分岐させる。

(3) リンク旅行時間の算定方法

各車両は、新しいリンクに入った時刻を記憶しており、車両追従モデルで移動を行い、リンクから流出する際にその車両がリンクを通過するのにかかった時間を、その時刻におけるリンク旅行時間とする。したがって、リンクから車両が 1 台流出するごとに、そのリンクの旅行時間は更新される。

3.2 シミュレーションモデルの検証

シミュレーションモデルを検証するために、単路部におけるショックウェーブの伝播を理論値と比較した。以下では 3000 m の単路区間を対象とし、代表的な 2 パターンについてその結果を示す。3000 m の全区間は図-6 に示す Q - K 関係をもつが、その下流は、容量が 1400 [veh/h] となってお

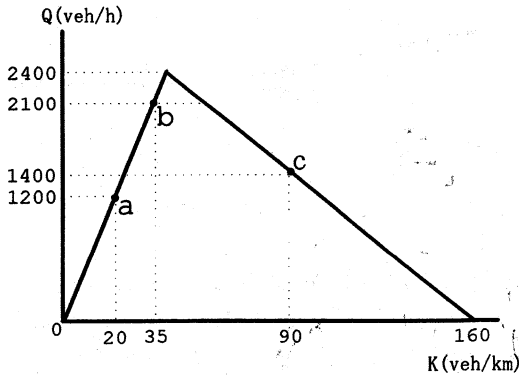


図-6 検証に用いた Q-K 関係

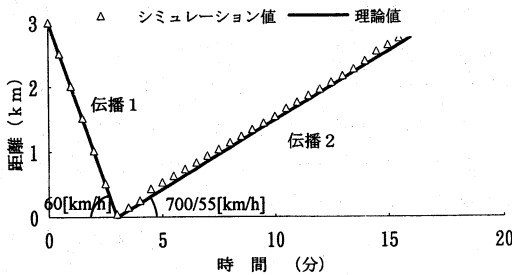


図-7 理論値との比較 (パターン1)

り、そこがボトルネックとなり渋滞する構造である。

パターン1：上流側から大きな需要が押し寄せボトルネックに達し、次に渋滞が上流へと伝播する状況。

対象区間すべてが、図-6の交通量 1200 [veh/h] であった初期状態 (a) に、上流端から 2100 [veh/h] の交通量が押し寄せる状況で、まず上流側より交通の状態は a → b に変化する (伝播1)、やがて、この需要がボトルネックに到達すると、容量が 1400 [veh/h] に制限されるので、渋滞が発生し上流へと延伸し、交通の状態は下流端より順に b → c に変化する (伝播2)。理論から得られるショックウェーブの伝播速度は伝播1, 2それぞれ 60 [km/h], 700/55 [km/h] となるが、図-7に示すように、シミュレーション値は理論値とよく一致している。

パターン2：渋滞が上流からの需要の減少に伴い解消する状況。

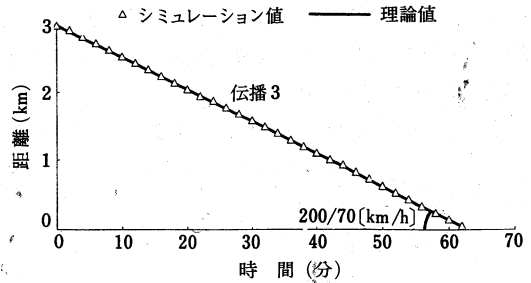


図-8 理論値との比較 (パターン2)

対象区間すべてが交通量 1400 [veh/h] で渋滞している初期状態 (c) に、上流からの交通需要が 1200 [veh/h] に減少することによって、上流端より渋滞が解消する状況で、交通の状態は上流端より c → a に変化する (伝播3)。このとき、理論から得られる伝播速度は 200/70 [km/h] となり、図-8に示すようにシミュレーション値は理論値とよく一致している。

これらの結果より、本モデルは、簡略化のため時間を離散的に扱ったモデルではあるが、リンクの Q-K 関係が与えられれば、渋滞の延伸状況が理論どおりに再現できることが確認された。

3.3 経路選択モデル

経路選択の際には、まず利用者を、旅行時間に依りて経路を選択する経路選択層と、旅行時間に関係なくあらかじめ経路を決定している経路固定層との2種類に分類し、この割合については、経路選択層の割合を a ($0 \leq a \leq 1$) とした。経路選択層については、ある一定の時間間隔 ($\Delta T \geq \Delta t$) おきにシミュレーションモデルから得られる旅行時間を用いて Dial 配分を行い、各経路の選択確率を改訂する。一方、経路固定層については、自由流速度 (60 km/h) で移動したときの旅行時間に基づいて経路を選択すると仮定し、経路選択層の配分のときに用いたのと同じパラメータ θ を用いて Dial 配分を行い、各経路の経路選択率を決定する。Dial 配分は、経路が n 本あり、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 (/秒) をパラメータとして

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

で与えるものである。

次にこの計算された経路選択率を基に、各分流ノードにおける各層別、目的地別の分流比率を算出する。そしてこの分流比率により、前述したシミュレーションモデルによって各車両が経路を選択することになる。したがって経路選択層については、経路選択率の改訂時刻にネットワーク上に存在する交通は、その時刻から新たな経路選択率によって経路を選択することになる。

このように本モデルは厳密には利用者均衡状況を再現するものではない。厳密に利用者均衡状況を再現するためには、CONTRAM²⁾やSATURN³⁾のように繰り返し計算を行う必要があるが、収束するとは限らず、また大規模なネットワークに対しては膨大な量の計算機のメモリが必要となり、さらには計算時間もかかることから、現在のところはこの方法で近似的に均衡状況を再現してい

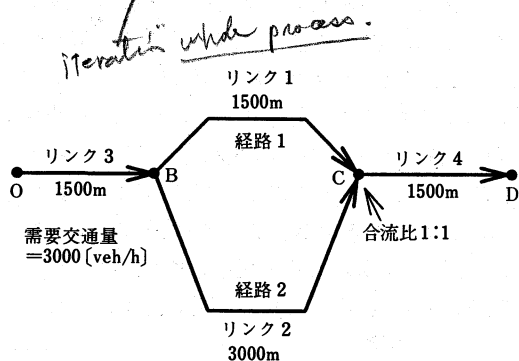


図-9 検証に用いた簡単なネットワーク

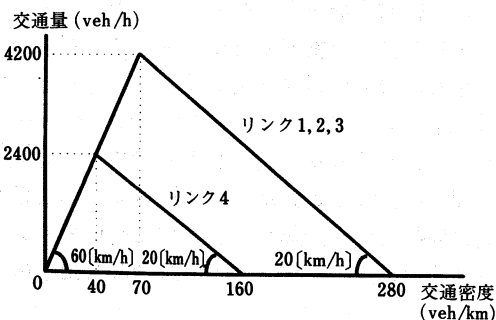


図-10 検証に用いた Q-K 関係

る。

3.4 経路選択を内生化したモデルの検証

この経路選択を内生化したモデルが、厳密な意味での確率均衡状態と、どのような違いが生じるのかを検証するために、図-9に示す簡単なネットワークを用い、スキャンインターバル(Δt)は1秒、経路選択率の改訂間隔(ΔT)を10秒として検証した。なお、各リンクの Q-K 関係は、図-10のように自由流側では傾き 60 [km/h]、渋滞流側では傾き 20 [km/h] の 2 本の直線で表しており、その容量はリンク 1, 2, 3 は 4200 [veh/h] であるが、リンク 4 の容量だけ 2400 [veh/h] と低いので、合流ノード C がボトルネックとなる。この合流ノードでは、リンク 1 とリンク 2 からの交通が均等に合流するものと仮定し、合流比は 1:1 と設定する。

経路選択モデルのパラメータ θ をこの検証では

1. $\theta = \infty$ (最短経路を選択するもの)
2. $\theta = 0.011$ (/sec)

の 2 とおりについて行った。この値では、2 経路の場合の経路選択率が、図-11 のようになる。また利用者はすべて経路選択層 ($\alpha=1$) とした。

$\theta = \infty$ としてこのネットワークに 3000 [veh/h] の交通を流すと、最初は距離の短い経路 1 を選択することになる。やがて、C を先頭にして渋滞が始まり、その渋滞によって経路 1 と経路 2 の旅行時間が等しくなると、今度は両経路に同じ量の交通が配分されることになる。この状況をシミュレーションと完全な利用者均衡とで分流ノード B における両経路の累積流入交通量を比較したものが

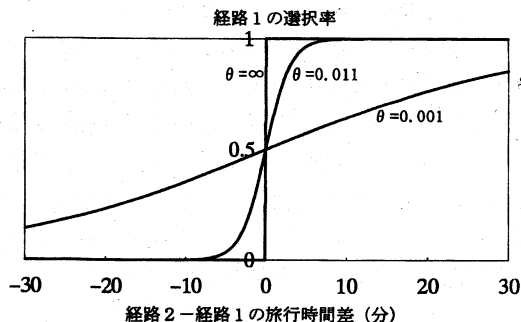


図-11 Dial 配分のパラメータ

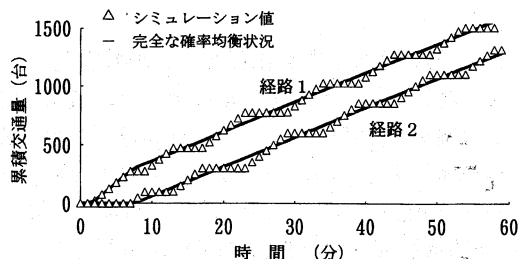


図-12 分流ノード B における経路別の累積交通量の比較 ($\theta = \infty$)

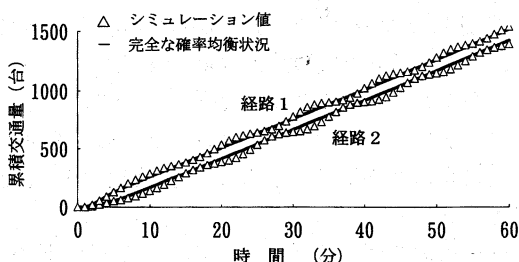


図-13 分流ノード B における経路別の累積交通量の比較 ($\theta = 0.001$)

図-12である。このようにシミュレーション値は、完全な利用者均衡状況と比較した場合に振動していることが分かる。これは、完全な利用者均衡状況では実際に経路を通過する時間で配分されるのに対し、シミュレーションでは分流ノードを通過する瞬間の旅行時間を採用するためである。例えばある時刻に一方の経路の旅行時間が短いと、実際はその交通量が流入したことによって旅行時間が短いほうの経路を通過するのにかかる旅行時間は長くなるが、その情報を持たずに現在得られている旅行時間によって、旅行時間の短い経路に必要以上の交通量が流入してしまうからである。

図-13は同じく流入交通量の比較で θ に値を持たせて確率的に配分した場合である。この場合もシミュレーション値は振動するがその振動幅は小さくなる。これは配分を確率的にするため、先に説明した、必要以上に流入する交通量が少なくなるためである。このように多少の振動は生じるものの傾向としては完全な均衡状況に追随しているものと考えられる。さらにより均衡状態に近い状況を再現するためには、旅行時間の評価に何らか

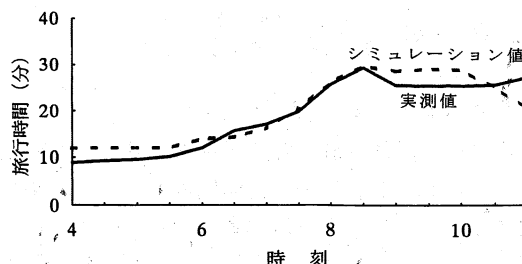


図-14 旅行時間の比較 (用賀～谷町)

の旅行時間の予測を取り入れるなどの見直しを考えられ、今後さらに改善していく必要がある。

4. モデルの首都高速道路への適用

4.1 経路選択を含まない場合

前章までに、簡単なネットワークでのモデルの検証が終わり、モデルがほぼ理論によるものと同じ状況を再現していることを確認した。そこで、次にモデルを首都高速道路ネットワークに適用するのであるが、まず経路選択を含まないネットワークとして、首都高速3号線の用賀→谷町(約12 km)についてモデルを適用した。

このモデルでは、入力データとして、時間帯別のOD、各リンクのQ-K関係、合流部における合流比が必要である。このうち時間帯別ODについては、首都高速道路公団により平成2年に行われた、第20回首都高速道路交通起終点調査⁶⁾によって得られた値を用い、Q-K関係、合流比はパラメータとして設定した。

図-14は実測による旅行時間と、シミュレーションによる旅行時間を比較した結果である。このように、経路選択を含まないモデルでは、現実の状況をかかなり良い精度で再現できることが分かった。なお本論文における実測値とは、各リンク内の感知器により得られる30分平均の速度データを基にリンク速度を算出したものであり、その旅行時間とは、算出されたリンク速度を用いて各リンクの旅行時間を計算し、各時刻におけるリンク旅行時間を起点から終点まで足し合わせたものである。

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

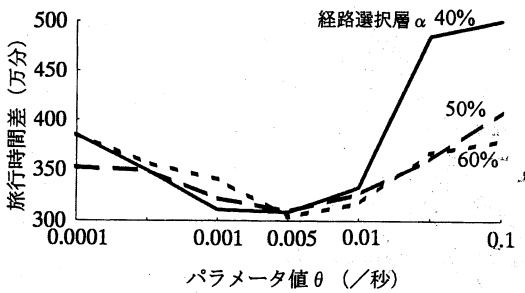


図-15 パラメータ値 θ の推定

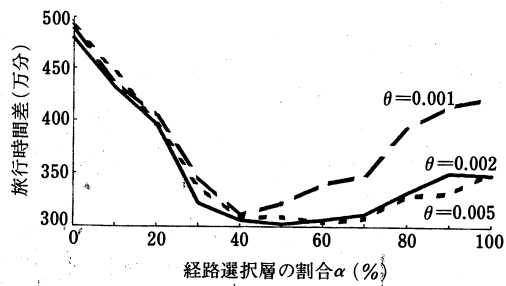


図-16 時間で経路選択する割合 α の推定

4.2 経路選択を含む場合

次に、経路選択の含まれる場合として首都高速全線に本モデルを適用し、実際の状況とモデルの再現する状況との比較を行った。

このモデルでは、先の経路選択を含まない場合に加えて、パラメータとして以下の2種類の設定が必要である。

- ① 経路選択モデルにおける Dial 配分のパラメータ (θ)
- ② 経路固定層と経路選択層の割合 (α)

この2種類のパラメータの推定を行った結果が、図-15, 16 であり、いずれも各リンクごとに実測値とシミュレーション値との旅行時間差を計算し、その絶対値に通過交通量を乗じて、合計した値でパラメータを評価したものである。シミュレーションを行った午前4時から11時までの間の実測による総旅行時間は約1000万分で、シミュレーションでは約1100万分程度である。このうち、図-15はDial配分のパラメータを推定した結果で、経路選択層の割合 α をそれぞれ40%、50%、60%とした。図よりパラメータの値 θ は0.001から0.005 (/秒) 程度であると判断できる。また、図-16は経路選択層の割合 α を推定した結果である。Dial配分のパラメータ θ はそれぞれ0.001、0.002、0.005に固定した。図より、時間で経路選択する経路選択層の割合 α は、40%から60%程度であると判断できる。また、首都高速のアンケート調査では約60%となっており、本モデルの結果とほぼ一致している。いずれの図も差の絶対値を加算しているので旅行時間差は300万分以上となっている。現在、経路選択においては首都高速の

場合、約半数程度が旅行時間をもとに選択しており、残りの半数は交通状況に無関係に決まった経路を選択しているようである。

また、午前8時～午前10時までの速度の平均値を各リンクごとにシミュレーション値と実測値とを比較したものが図-17と図-18である。リンクごとの平均速度の相関係数は0.81、平均速度差は3.5 [km/h] となった。

5. まとめと今後の課題

本研究をまとめると

- 1) 本研究では、都市内高速道路網の交通状況を予測するために、ダイナミックに変化する交通状況が再現できる、経路選択を内生化したシミュレーションモデルの開発を行った。
- 2) モデルはシミュレーションモデルと経路選択モデルとからなり、2つを交互に繰り返すことによって、近似的に動的な確率均衡配分を再現しようとしたものである。
- 3) 対象を都市内高速道路網としたため、特に渋滞時における交通密度の管理に最大の重点をおき、渋滞の延伸状況を再現できるようにした。
- 4) その構築したモデルについて、簡単なネットワークにおいて基本的な性質を検証した。その結果経路選択モデルにおいて、多少理論値との相違が認められたものの、近似的には理論どおりに交通状況を再現できていることが確認された。
- 5) 次に経路選択を含まないモデルとして、首都高速3号線に適用し、シミュレーションモデルとしては非常によく実際の状況を再現できていることが確認された。

3 veh / packet.

h
深
々
の
青
を
シ
望
選
真
意
8,
ム

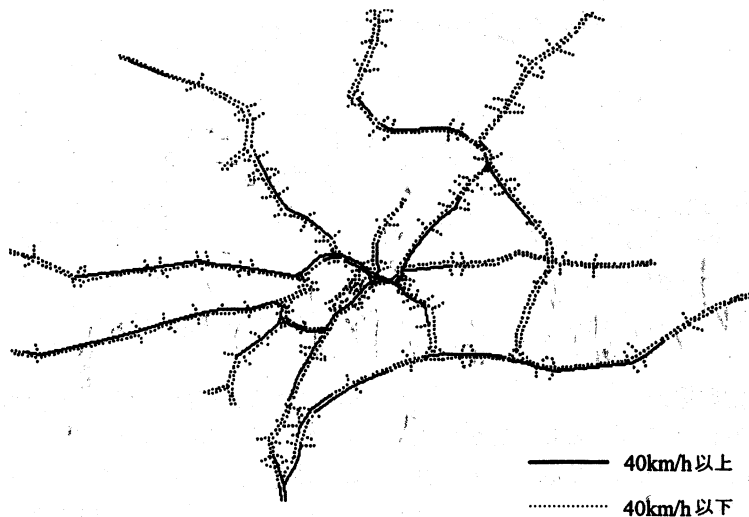


図-17 リンクの平均速度 (実測値)

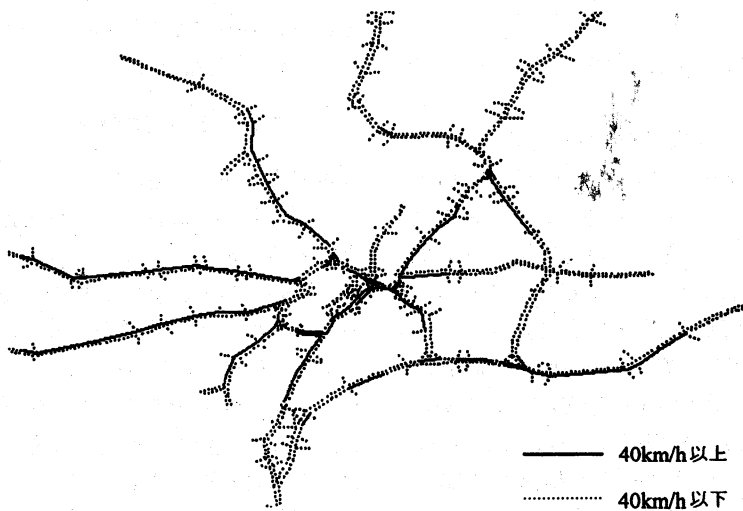


図-18 リンクの平均速度 (シミュレーション値)

Scale 1 km

6) 最後に首都高速道路全線に適用し、まずパラメータの設定から、旅行時間を基に経路選択する車両の割合は約半分であり、残りの半分の車両については、旅行時間に関係なく、あらかじめ決まった経路を選択していることが推測された。またこの結果については首都高速道路のアンケート調査による割合とほぼ同じ結果が得られている。

7) シミュレーションと実測値の旅行時間や速度を比較した結果、多少の相違がみられた。その

原因としては、下記の1)から4)による理由があげられ、今後の改善が必要である。

今後の課題としては

1) 経路選択モデルにおいて、厳密な利用者均衡とは多少のズレがあるので、経路選択行動の分析及び旅行時間の評価方法の検討が必要であること。

2) 分流部においての複雑に変化する車両の挙動について考慮し、その挙動による容量の変化を

考慮する必要があること。

3) 渋滞による容量低下や容量の変動について検討し、モデルに取り込んでいく必要があること

4) 大型車と乗用車などの車種の違いを考慮する必要があること。

5) 周辺一般街路網のモデルへの取り込みを図る必要があること。

などがあげられる。

謝 辞

本論文を進めるに当たり、首都高速道路公団、計画部調査課、交通管制部管制技術課の方々には、資料の提供をはじめ、いろいろと御協力をいただきました。改めて感謝の念とともに心からお礼を申し上げます。

参 考 文 献

1) D. Van Viet and M.D. Hall: SATURN 8.3-A User's Manual-Universal Version, Institute for Transport Studies, University of Leeds, Nov. 1991

2) D. R. Leonard, P. Gower, and N. B. Taylor: CONTRAM: Structure of the Model, TRRL Research Report RR 178, 1989

3) 木戸伴雄, 池之上慶一郎, 斉藤威: “街路網における経路探索・交通配分モデル (DYTAN-1)”, 科学警察研究所報告交通編, Vol. 19, No. 1, 1978.2

4) 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モデル”, 土木計画学研究講演集, No. 14(1), 1991

5) 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, 1993.7

6) 首都高速道路公団: “第20回首都高速道路交通起終点調査報告書 (平日編)”

7) 上田功, 坪野寿美夫, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 尾崎晴男: “経路選択シミュレーションモデルの開発”, 土木計画学研究講演集, No. 14, 1991

8) 飯田恭敬, 内田敬, 泉谷透: “旅行時間変動による損失を考慮した適正経路分担交通量”, 土木計画学研究講演集, No. 8, 1990

9) 交通工学研究会: “交通管制2次システムの基本プログラムに関する研究, 昭和48年”

(1994年4月15日受付)
(1994年7月15日再受付)