

道路網における経路選択を考慮した 動的交通流シミュレーション

飯田恭敬¹・藤井 聡²・内田 敬³

1正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)
2正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)
3正会員 博(工) 京都大学講師 工学部交通土木工学教室 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

情報提供による経路誘導や信号制御などの交通運用方策によるネットワーク交通流への効果を把握するための、動的交通流メソシミュレーションを提案する。本モデルでは、数値計算の効率化を図るためにリンクを複数の箱(ボックス)の連なりで表現し、リンクフローをボックス間のフローの受け渡しで再現した。そして、対向交通流による右折容量の変動、渋滞列の延伸に伴う自由走行領域の減少、渋滞列の上流側リンクへの延伸をモデル化した。また、運転者の経路選択行動を明示的に考慮し、時々刻々と変化する交通状況に対応した経路選択行動をモデル化した。最後に仮想道路網におけるテストケースを通してモデルの挙動の確認を行ない、リンクおよびネットワークにおいて、動的な交通状況を再現できることを示す。

Key Words : dynamic traffic simulation, box model, drivers' route choice

1. はじめに

近年、都市部における自動車交通の混雑はより深刻となっており、大きな社会問題の一つとなっている。交通混雑を解消するための方策として、従来より道路建設といったハードウェア的な方策が施されている。しかし、地価高騰による用地買収難など、ハードウェア的な容量増強策の実施は容易ではない。近年では、情報提供による経路誘導、信号制御といったソフトウェア的な交通運用方策が重要視されている。

ソフトウェア的交通運用方策は、局所的、かつ短期的な交通状態を対象としたものであり、それを評価するための交通配分モデルは交通現象を時間的、空間的に詳細に再現する必要がある。すなわち、交差点やリンク内における局所的な交通状態を動的に再現するモデルが必要となる。ところで、動的な交通状態は運転者の経路選択に影響を与え、その結果各運転者の車両が構成する交通状態は変化するという相互作用がある。したがって、動的な交通モデルでは経路選択を内生的に扱うことが必要である。さらに、選択経路は各運転者の出発地、目的地に依存するから、経路選択を内生化した交通モデルは、各運転者のODを包括する程度に大規模なネットワークを対象とすることが望ましい。特に、情報提供による交通管理の効果を評価する場合、大規模ネットワーク上での交通

状態への影響を把握することが重要である。

動的な交通モデルは、静的な交通配分法を動量化するアプローチのものと、計算機上で交通状態を逐次再現する交通流シミュレーションとに分類できる。前者のモデルの多くは均衡を前提としているが^{1,2}、動的に変化する交通における均衡状態の成立には疑問がある。したがって、動的な交通状態変化の再現を目指す場合、均衡を前提としない後者の方が自由度が高く、より現実的に再現することが可能であると思われる。

後者、すなわち交通流シミュレーションには、マイクロシミュレーションとマクロシミュレーションとがある³。前者は車両一台一台を追跡するのに対し、後者はある程度まとまった車両群を単位として追跡する。

マイクロシミュレーションとしては、NETSIM⁴、名古屋高速道路公社の交通流再現シミュレーション⁵、日本道路公団の交通流シミュレーション⁶、TRANSYT⁶などが挙げられる。これらのモデルは、個々の車両の挙動に関して詳細な仮定を設け現象を記述しているが、個々の車両を逐次追跡するための計算コストは大きく、大規模なネットワークを対象とすることは容易ではない。大規模ネットワークを対象とし、経路選択を内生化したマイクロシミュレーション⁷も開発されているものの運転者の特性、情報提供の有無は考慮されておらず、情報提供方策の評価への適用は現状のままでは困難と思われる。

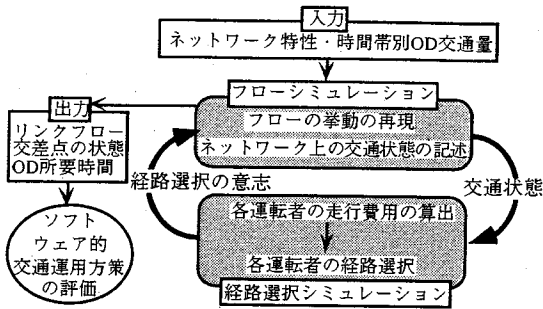


図1 ボックスモデルの基本構造

一方、ブロック密度法⁸⁾、CONIRAM⁹⁾、SATURN¹⁰⁾がマクロシミュレーションとして挙げられる。これらのモデルは複数の車両群を単位として挙動を再現する。そのため計算コストは低く、大規模ネットワークを対象とすることが容易であり、首都高速道路に適用した例なども報告されている⁸⁾。したがって、情報提供の効果をネットワーク交通流の観点から把握するには、マクロシミュレーションを応用するのが得策である。

しかし、巨視的な交通状態を対象とするマクロシミュレーションのままでは経路選択行動に十分に対応することは困難である。さらに、ブロック密度法では交通密度-交通量曲線を、CONIRAMでは利用者均衡を前提として交通流はモデル化されているが、単路部ではない一般街路での交通密度-交通量曲線の再現や、現実の道路網上における利用者均衡の成立には疑問がある。そこで、本研究では、フローの挙動や経路選択等の各々の局面で、個々の車両を集計した形で取り扱うというマクロシミュレーションのアプローチを基本とした上で、交差点における交通流やリンク内の各領域におけるミクロな交通状態を動的に再現するハイブリッド型のシミュレーションモデル(メソシミュレーションモデル)を提案する。

本研究で提案するシミュレーションモデルは、リンクフローのモデル化に箱(ボックス)を用いることを特徴とする。そこで、本モデルをボックスモデルと呼ぶ。本稿では、ボックスモデルを記述すると共に、仮想状況におけるケーススタディーを示し、その適用性に関して考察を加える。

2. ボックスモデルの概要

ボックスモデルの基本的な構造を図-1に示す。ボックスモデルは、運転者の経路選択をシミュレートする「経路選択シミュレーション」と、道路網上の交通流を再現する「フローシミュレーション」とで構成される。両者は循環的な関係を有する。経路選択シミュレーションにおいてはフローシミュレーションで計算された交通状態に基づいて運転者の経路選択行動を再現する。フローシ

ミュレーションでは運転者の経路選択結果を集計して各リンク、各交差点のフローの時間的推移を再現する。以上のサイクルをスキニングインターバル(時間を離散化して得られる交通状態を更新する時間間隔)ごとに繰り返す。時々刻々と変化する交通状態を再現する。各サブシミュレーションは以下のような特徴を持つ。

【フローシミュレーション】

- ・動的に変化する大規模ネットワーク上の交通状態を再現する。
- ・リンクをボックスの連なりで表現する。
- ・道路上の領域を渋滞領域と走行領域に区分する。
- ・交通量の変化による所要時間の変化をモデル化する。
- ・渋滞領域の延伸による走行領域の減少をモデル化する。
- ・交差点における先詰まり現象を考慮する。
- ・交差点における直進交通流による右折交通流への影響を考慮する。

【経路選択シミュレーション】

- ・交通状態の変化に対応した動的な経路選択行動をモデル化する。
- ・フローは経路途上における各ノードにおいて逐一、経路選択意思決定を行うものとする。
- ・計算の簡略化を図るため、同一ノードに存在して目的地を共有する複数のフローで選択意思決定単位を構成し、選択意思決定単位ごとに経路選択意思決定をモデル化する。

3. フローシミュレーション

ボックスモデルは、ノードとリンクでグラフ表現された道路ネットワーク上でのフローを計算対象とする。フローは、セントロイドで発生/集中すると仮定する。各フローはノードごとに、経路選択シミュレーションで与えられる経路を選択し、それぞれの集中セントロイドへと向けて移動するものとする。リンクを箱(ボックス)の連なり(ボックス列)で表現し、ボックス間のフローの受け渡しによってリンクフローを表現する。本章では、

- (1)、(2)、(3)でリンク、現実の道路上におけるフローの流れ、および流出制約に関する仮定を述べる。そして(4)でボックスモデルにおけるフローの流れに関するルールを述べると共に、これらのルールと(1)、(2)、(3)で述べた仮定との対応関係を述べる。

(1) リンクに関する仮定

本研究では、リンクを以下の仮定に基づいてモデル化する。

- A1) リンクは一様であり、リンクのある断面をスキニングインターバルあたりに通過することのできる最

大の交通量（以下、断面容量）はそのリンクの任意の断面で一定である。

A2) リンク途中におけるフローの流入・流出はない。

なお、通常のリンクでは、車線減少、路上駐車の影響などにより、仮定A1)が成立しない状況が考えられる。この場合、リンク途中において容量が低下する断面でリンクを分割し、双方のリンクにおいて仮定A1)が成立するようにリンクを設定する必要がある。

(2) フローに関する仮定

本研究では、前節で仮定したリンクにおけるリンクフローの流れに関して、以下のように仮定する。

B1) リンク上のフローの挙動は、リンク下流端で発生した渋滞列が存在する領域（渋滞領域）と存在しない領域（走行領域）とで異なる。

B2) 走行領域長と渋滞領域長の和は一定、すなわち、

$$L = L_f + L_j \quad (1)$$

- L : リンク長
- L_f : 走行領域長
- L_j : 渋滞領域長

B3) 渋滞領域での渋滞列における渋滞粗密波は、単位時間内に渋滞列最後尾に到達する。

B4) 走行領域では、交通密度 K が臨界交通密度 K_0 以下の場合、走行速度 V は自由走行速度 V_f に等しい¹²⁾。

B5) 走行領域では、交通密度 K が臨界交通密度 K_0 の場合、交通量は Q_{max} に等しい¹²⁾。

B6) リンクに存在する車両台数には最大値（存在可能台数）が存在し、それを超過する車両がリンク上に存在することはできない。

以下、以上の仮定に基づいて、渋滞領域、走行領域における所要時間、およびその領域長を誘導する。

仮定B3)に基づくと、渋滞領域における所要時間 T_j は、渋滞列を構成する全てのフロー量 F_j をリンク下流端から単位時間に流出可能な交通量（以下、流出可能量 C_{po} ）で除したものに等しい。すなわち、

$$T_j = \frac{F_j}{C_{po}} \quad (2)$$

一方、交通密度 K 、交通量 Q 、走行速度 V は、以下の関係を持つ。

$$Q = KV \quad (3)$$

ここで、式(3)、および仮定B4)、B5)より、

$$Q_{max} = K_0 V_f \quad (4)$$

また、リンクに関する仮定A1)より、交通密度が臨界交通密度 K_0 を超過した場合でも Q_{max} に等しいフローが単位時間に任意の断面を通過することができる。したがって $K > K_0$ の時、

$$Q_{max} = KV \quad (5)$$

式(4)、(5)より、 $K > K_0$ の時、

V : 走行速度

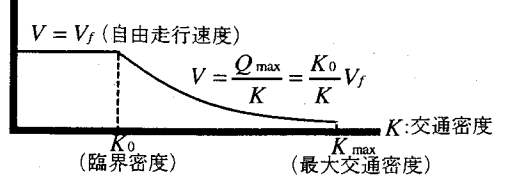


図2 交通密度-走行速度曲線に関する仮定

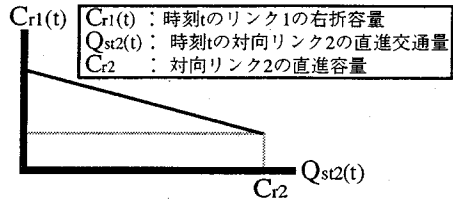


図3 右折容量-対向リンク直進交通量との関係

$$V = Q_{max} / K = K_0 V_f / K \quad (6)$$

一方、仮定B4)より、 $K \leq K_0$ の時、

$$V = V_f \quad (7)$$

式(6)、(7)より、図2の様一般的な交通密度-走行速度曲線が得られる。

式(4)、(6)、(7)より、走行領域所要時間 T_f は、

$$T_f = \begin{cases} \frac{L_f}{V_f} & \text{if } K \leq K_0 = \frac{Q_{max}}{V_f} \\ \frac{L_f K}{Q_{max}} & \text{if } K > K_0 = \frac{Q_{max}}{V_f} \end{cases} \quad (8)$$

本研究では、仮定B1)~B5)の仮定に基づいて得られる式(2)、(8)で定式化された所要時間をフローシミュレーション上で再現する事で、リンクフローのモデル化を図る。

(3) リンク下流端における流出制約に関する仮定

リンク下流端からの流出需要量が、

流出容量 (C) 制約1

屈折方向別流出容量 (C_x : x は屈折方向) 制約2

下流側リンクの流入可能量 (C_{in}) 制約3

のいずれかの制約を受けた場合、流出できなかったフローがリンクに残留して渋滞列を形成し、渋滞領域が生じるものと仮定する。制約1は「単位時間にリンク下流端から流出可能な最大交通量」である。また、制約2は、「単位時間においてリンクからその方向へ流出可能な最大交通量」であり、全ての流出需要量の屈折方向が特定方向 x である場合に屈折方向別流出容量は屈折方向別流出交通量と一致する¹³⁾。そして、流出容量と方向別流出容量の関係は、

$$C_x = \alpha_x C \quad (9)$$

で示される。ここに α_x は交差点の幾何学的条件やリンクの各車線において許可されている屈折方向、下流側リンクの断面容量などを考慮して得られる $[0, 1]$ なる値をとる。左折容量、直進容量は式(9)のみによって規定される静的

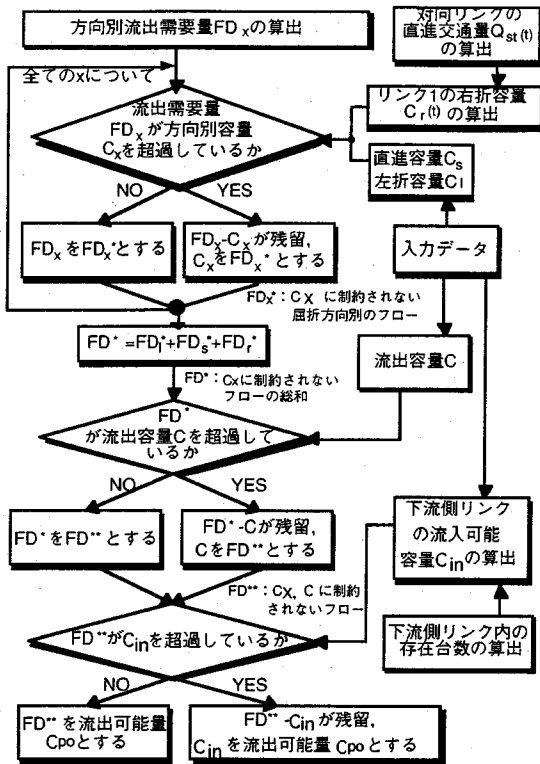


図4 リンク下流端からの流出可能量の計算手順

な値と仮定する一方、右折容量は対向リンクの直進交通量と図-3に示したような単純な線形関係があると仮定し、動的に変化することとした。なお、本モデルを実際の街路に適用する場合、交差点の幾何構造、サイクル長等を十分に考慮した上で、右折容量と対向リンクの直進交通量との関係を設定する必要がある。

制約3は「下流側のリンクが単位時間に受け入れることのできる最大交通量」であり、仮定B6)に基づいた以下の式で定式化される。

$$C_{in} = K_{max} L - F_d \quad (10)$$

F_d : 下流側リンクに存在する車両台数

L : 下流側リンク長

K_{max} : 最大交通密度

この制約によって、下流側のリンクが混雑している場合に下流側リンクへ流入することが不可能となる「先詰まり現象」をモデル化することができる。そして、下流側リンクの渋滞領域が上流側リンクへと延伸する様子をモデル化する。

以上の3つの制約を受け、流出が可能であった交通量が流出可能量 C_{po} となる。なお、計算では図-4に示すように、流出需要量が屈折方向別流出容量、流出容量、流入可能量の順序で制約を受けて、流出可能量が算出される。それぞれの制約において需要量が超過した場合、その超過分がリンクに残留し渋滞が発生すると仮定する。

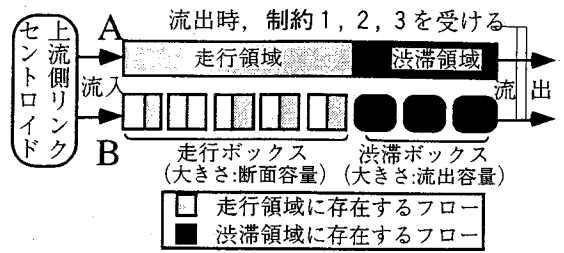


図5 ボックス列を用いたリンクのモデル化

(4) ボックスを用いたリンクフローのモデル化

本研究では、ボックス間のフローの受け渡しをミュレーション上で実行することで、本章で述べたリンク、リンクフロー、および流出制約に関する仮定に基づいたフローの流れを再現する。ボックスの連なりを用いるのは、シミュレーションで式(2)、(8)を直接計算することを回避し、計算コストの軽減を図るためである。

本研究では、図-5Aの様な状態にあるリンクを図-5Bの様にもモデル化する。すなわち、仮定B1)に基づいて、渋滞列が存在する渋滞領域を渋滞ボックス列で、渋滞列が存在しない走行領域は走行ボックス列でそれぞれモデル化する。そして、それぞれのボックスおよびボックス内部のフローの挙動に関して以下のようなルールを設定する。

C1) 基本的なフローの流れに関するルール

C1-1) ボックス内の全てのフローを次の時間帯における下流側ボックス (α リンク) への流入需要量とする。

C1-2) ボックスの大きさを超過するフローは存在できない。

C1-3) ボックス内のフローは一様に混ざり合っている。

C2) 容量制約に関するルール

C2-1) あるリンクにおける全ての走行ボックスの大きさは、そのリンクにおける断面容量 Q_{max} とスキューニングインターバルの積に等しい。

C2-2) 走行ボックス内のフローはスキューニングインターバルが経過すると全て下流側ボックスへ流出する。

C2-3) あるリンクにおける全ての渋滞ボックスの大きさは、そのリンクの流出容量 C とスキューニングインターバルの積に等しい。

C2-4) ボックス列の先頭ボックスからの単位時間に流出するフローは、制約1~制約3の流出制約を受ける。

C3) 渋滞領域と走行領域の変動に関するルール

C3-1) 渋滞フローが既に設定されている渋滞ボックス列に納まりきらない場合、渋滞ボックスを増設する。

C3-2) 渋滞ボックス数が走行ボックス長と渋滞ボックス長の比 θ (以下、ボックス長比) の整数倍を超過する (α 下回る) ごとに走行ボックスを一つずつ削除 (α 追加) する。

C4) フローのリンクへの流入に関するルール

C4-1) リンク上流端からの流入フローは、上流側リンクからの流出フローと上流側セントロイドからの発生フローとで構成される。

C4-2) リンク上流端からの流入フローは、リンク最後尾のボックスに入れる。

C4-3) 流入フローは式(10)で求められる C_{in} を超過した場合、 C_{in} に等しいフローがリンクに流入し、それを除いた流入フローは上流側リンク (α 発生セントロイド) に残留し、次の時間帯まで流出 (α 発生) を延期する。

C5) 走行領域所要時間の再現に関するルール

C5-1) リンク上にフローが存在しない場合、自由リンク走行時間 $T_{free} (=L/V_f)$ に等しい数の走行ボックス列でリンクを表現する。

C5-2) リンク上流端からの流入フローがリンク最後尾のボックスの大きさを超過した場合、最後尾にボックスを新しく設定し、そのボックスに流入フローを入れる。なお新しく設定されるボックスを「超過ボックス」と呼ぶ。超過ボックスは断面容量分の大きさを持つが、長さは持たないものとする。

a) 基本的なフローの流れの再現

ルールC1-1)より、時間の経過に伴いフローは下流側のボックスへと一つずつ移動することとなる。ただし、ルールC1-2)より、上流側ボックス n からの流入需要量 Q_n が下流側ボックス $n+1$ の空き領域 E_{n+1} を超過した場合には、下流側ボックスの空き領域に相当するフローが下流側ボックスに流入し、それ以上のフローは上流側ボックスに残留することとなる¹⁰⁾。したがって、ある微小フローがボックス n を通過するための所要時間 T_n は、 $E_{n+1} \geq Q_n$ の場合、すなわち、残留フローが生じない場合、

$$T_n = \Delta t \quad (11)$$

Δt : スキャニングインターバル

一方、ルールC1-3)より、 $E_{n+1} < Q_n$ の場合、すなわち、残留フローが生じる場合、

$$\bar{T}_n = (Q_n / E_{n+1}) \Delta t \quad (12)$$

を期待値とする確率変数となる (付録1参照)。

b) 容量制約の再現

C2-1), C2-2)は、同一リンクの断面容量が任意の断面で等しいと仮定した仮定A1)を再現するために設定したルールである。また、ルールC2-3), C3-4)で、リンク下流端における制約1, 2, 3の再現を図る。

c) 渋滞領域と走行領域の変動の再現

ルールC3-1)は、渋滞の発生、および、延伸を再現するために設定したルールである。そして、ルールC3-2)は、仮定B2)の再現を図るために設定した。これらのルールに基づくと、ルールC2-4)の流出制約で渋滞フローが発生した場合、図-6 (A)に示した様に渋滞ボックスが増設され、それに伴い走行ボックスが一つ削除される。同様に、図

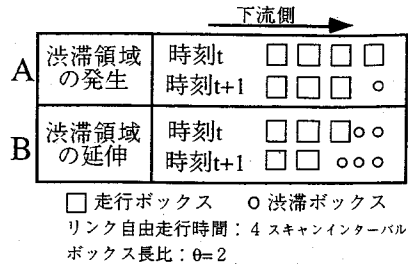


図-6 渋滞の発生と延伸

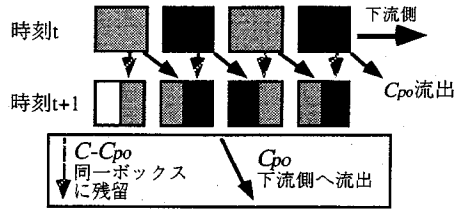


図-7 渋滞ボックス列内のフローの挙動

-6 (B)の様に渋滞フローが増加した場合も、渋滞ボックスが増設され、それに伴って走行ボックスが削除される。

なお、C3-2)における θ は走行ボックス長と渋滞ボックス長の比であり、この設定により、仮定B2)の式(1)を近似的に再現できる (付録2参照)。

d) リンクへのフローの流入の再現

C4-1), C4-2), C4-3)はリンクへのフローの流入を再現するために設定したルールである。

なお、リンクへの流入制約としてリンク上流端断面の断面容量を考慮する必要があることも考えられる。しかし、本研究では計算の簡略化のため、ルールC4-1)に定めたように、流入フローにセントロイドからの発生フローも含めることとした。本来のネットワークでは発生フローは必ずしもリンク上流端断面を通過するものではない。したがって、発生フローのリンクへの流入に上流端断面における容量制約をかけないために、 C_{in} のみを流入フローに関する制約とした。

e) 渋滞領域所要時間の再現

上記ルールに基づくと、渋滞領域における所要時間は式(12)より確率変数となる。したがって、先にリンクへ流入したフローが先に流出するとは限らない。しかし、フローの平均的な所要時間を再現することで、ネットワークにおけるマクロな交通流の再現は可能であると考えられる。そこで、本研究では、渋滞列所要時間の期待値が式(2)に一致するように各ルールを設定した。

ルールC2-4)に基づくと、単位時間あたりのリンク下流端からの流出交通量は、前節で述べた流出可能量 C_{po} となる。それに伴い、全ての渋滞ボックス内の残留フロー、流出フローは図-7に示す様にそれぞれ $C - C_{po}$ 、 C_{po} となる。ここで、ボックス n を、微小フローが通過するための所要時間の平均 \bar{T}_n は、式(12)より、

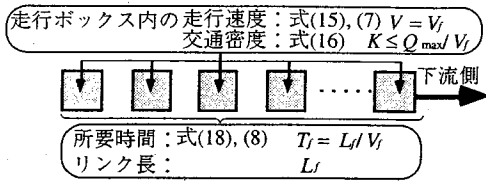


図8 超過ボックスがない場合の走行領域内フローの属性

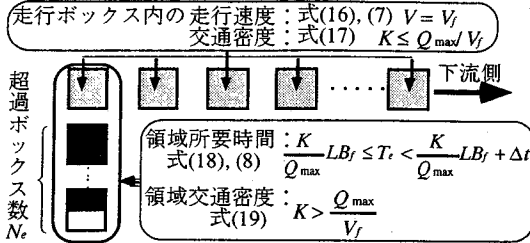


図9 超過ボックスがある場合の走行領域内のフローの属性

$$\bar{T}_n = \frac{Q_n}{C_{po}} \quad (13)$$

Q_n : ボックス n 内のフロー
となる。一方、渋滞領域所要時間の期待値 \bar{T} は、

$$\bar{T} = \sum_{n=1}^{N_f} \frac{Q_n}{C_{po}} = \frac{F_f}{C_{po}} \quad (14)$$

N_f : 渋滞ボックス数
 F_f : 渋滞列を構成する全てのフロー量

すなわち、ボックスモデルでは、上記ルールに基づいてフローを流すことで、仮定B3に基づいた式(2)の渋滞領域所要時間を平均的に再現することができる。

f) 走行領域内所要時間の再現

ルールC52)に基づくと、断面容量を超過する流入フローが存在しない場合、図8に示した様に、超過ボックスが設定されない。その場合、全ての走行ボックスにおける走行速度 v 、交通密度 K は、

$$V = V_f \quad (15)$$

$$K \leq \frac{Q_{max}}{V_f} \quad (16)$$

となる(付録3参照)。したがって、走行領域所要時間 T_f は、

$$T_f = L_f / V_f \quad (17)$$

L_f : 走行領域長

一方、ルールC52)より、断面容量を超過する量のフローがリンク上流端から流入した場合、図9に示したようにリンク最後尾に超過ボックスが増設される。最後尾の走行ボックス、および、超過ボックスを通過するための所要時間 T_c 、および、それらのボックス内における交通密度 K は、

$$\frac{K}{Q_{max}} LB_f \leq T_c < \frac{K}{Q_{max}} LB_f + \Delta t \quad (18)$$

$$K > \frac{Q_{max}}{V_f} \quad (19)$$

となる(付録4参照)。

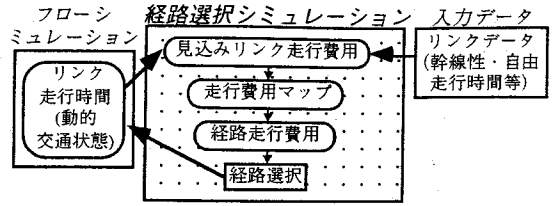


図10 経路選択のフロー

式(15)~(19)に示した様に、ボックスモデルでは近似的に、式(8)で示した走行時間を再現する。なお、本研究では時間を離散的に扱い、その最小単位を Δt と設定しているため、所要時間を再現する際に Δt 未満の誤差は避けられない。

4. 経路選択シミュレーション

(1) 経路選択シミュレーションの基本概念

運転者は経路途中での経路変更が可能な全ての地点、すなわち、経路途中の全てのノードにおいて経路選択の意志決定を行う。図10に運転者の経路選択行動のフローを示す。経路選択シミュレーションでは、各運転者は、自らが予測する各々のリンクの走行費用(以下、見込みリンク走行費用と呼ぶ)に基づいて主観的な認知交通ネットワークを構成するものとする。本研究では、この主観的な認知交通ネットワークを走行費用マップ¹⁹⁾と呼ぶこととする。走行費用マップにおける各リンクは見込みリンク走行費用をリンク属性として持つものとする。運転者は自分の走行費用マップに基づいて、ノードに到着するたびに、現在位置から集中セントロイドまでの経路走行費用が最小となる経路を選択するものと仮定する。

(2) 見込みリンク走行費用

見込みリンク走行費用は、運転者の過去の経験や走行当日の知覚情報に基づいて予想される費用に関する知覚値である。走行当日の知覚情報とは、視覚によって直接的に把握される情報や、ラジオ、情報板や路車間の交通情報システムで得られる情報である。また、見込みリンク走行費用は運転者の年齢、性別、性格等の個人属性にも大きく影響を受ける。個々の運転者の経路選択行動を一人一人再現するためには大きな計算コストがかかる。そこで、本研究では、スキニングインターバル毎に小数の運転者グループで「選択意思決定単位」を構成し、それぞれの選択意思決定単位ごとに選択経路を算定することとした。選択意思決定単位は、以下の条件に基づいて複数の運転者で構成される。

1. ドライバーセグメントが同一である。
2. 経路選択の意思決定を行なった直後に通過する交差点が同一である。

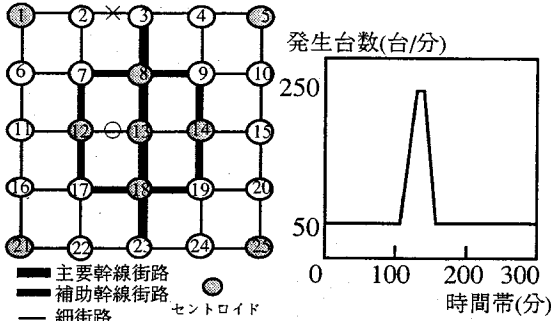


図-11 仮想ネットワーク1

図-12 発生パターン

表1 計算時間 (計算機種: FACOM M-1800)

	計算時間	割合
初期設定	104 ミリ秒	1.4 %
フローシミュレーション	5791 ミリ秒	80.8 %
経路選択シミュレーション	1273 ミリ秒	17.8 %
出力	1 ミリ秒	0.0 %
合計	7170 ミリ秒	100.0 %

そして選択意思決定単位毎に同一の走行費用マップを構成すると仮定する。

なお本研究では、各選択意思決定単位の走行費用マップは、確率分布に従う見込みリンク走行費用に基づいて与えた。すなわち、経路選択を実行する時間帯における各リンクのリンク走行時間を平均とする確率分布に基づき、乱数を発生させて見込みリンク走行費用を求める。そして、得られた見込みリンク走行費用から走行費用マップを構成する。確率分布として正規分布を用いた。また、確率分布の分散は、外生的に与えた。本研究では、このような手順で確率分布を導入することにより、経路選択行動におけるランダム性の考慮を図った。

すなわち、本研究では、経路選択行動に関して以下のように仮定する。

「各選択意思決定単位は選択実行時点における見込み経路走行費用が最小となる経路を選択する。なお、見込み経路走行費用は確率変数と考える。」

5. 数値計算例

ここでは、図-11に示した仮想ネットワーク(リンク数80, ノード数25, セントロイド数9)を対象とした数値計算を行い、モデルの挙動を確認する。

(1) 前提条件

時間帯の幅(スキューピングインターバル)を信号の1サイクル程度、すなわち1分とした。リンクの自由走行時間を3~6分の間で乱数的に与え、主要幹線街路・補助幹線街路・細街路の流出容量をそれぞれ60, 40, 20(単位:台/分)とした。また、ルールC3.2)の θ を3と設定した。時間帯別

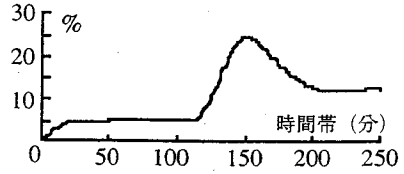


図-13 混雑度推移

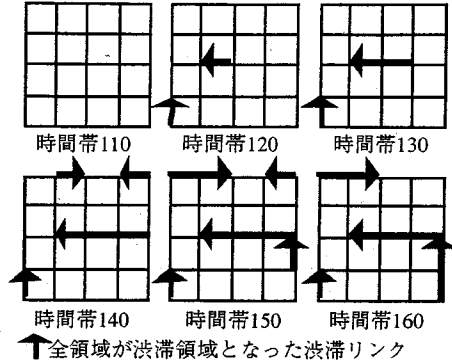


図-14 渋滞リンクの時間推移

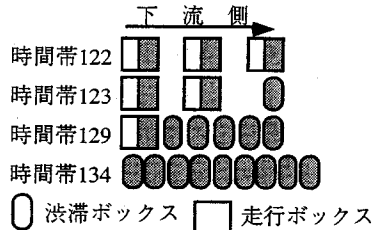


図-15 渋滞列の延伸

のOD交通量は各セントロイドにおけるその時間帯の発生交通量に時間帯によらず一定の目的地選択確率を掛け合わせるにより得る。発生交通量は同一時間帯では各セントロイドから同一の交通量が発生するが、図-12に示したように時間帯によって変化する。目的地選択確率はOD間の距離に反比例する形で外生的に与えた。なお、モデルの挙動の基本的な確認を行なうために、以下の(2)、

(3)で示す計算例では時間帯0~300までの300分間の数値計算を行なった。また、見込みリンク走行費用を算出する際に用いる正規確率分布の変動係数を0.2と設定した。

計算のために要した時間を表-1に示しているが、計算時間の多く(80.8%)をフローシミュレーションに対する計算に要していることが分かる。これは、交差点における交通流、渋滞の延伸による走行領域の減少などのミクロな交通現象のモデル化のために多くの計算を必要としたからである。しかし、総計算時間は7.17秒であり、ミクロな観点を導入したマクロシミュレーションとしては経済性は高いと考えられる。

(2) 動的な交通状態の表現性の確認

図-13に混雑度(ネットワーク上に存在できうる最大の



図-16 QK曲線

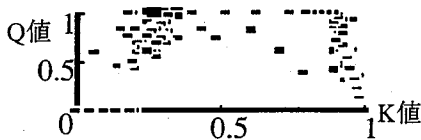


図-17 交通密度-流出交通量の関係

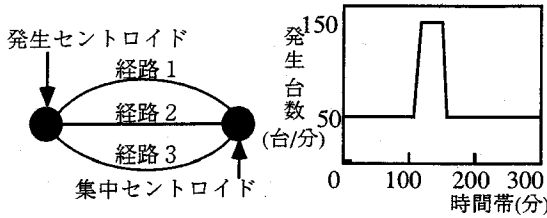


図-18 仮想ネットワーク2 図-19 発生交通量時間分布

表-2 仮想ネットワーク各経路属性

	流出容量	存在可能台数	自由走行時間
経路1	20台/分	600台	10分
経路2	40台/分	1800台	15分
経路3	60台/分	3600台	20分

車両台数に対する、実際に存在している車両台数の割合)の推移を示す。これより発生交通量がピークを迎える時間帯110あたりから混雑もピークを迎えることが分かる。そして、発生需要交通量が急激に低下した後、混雑は徐々に解消していく。図-14に渋滞リンクの時間推移を示す。これより、時間帯110以降、渋滞リンクが増加していくことが分かる。特にノード12を先頭に発生した渋滞列が下流側リンクへと延伸していく様子が確認できる。以上より、ネットワーク全体のマクロな交通状態の動的な推移、および渋滞延伸現象を再現していることが確認できた。

次に、図-14で示した渋滞リンクの内部における交通状態の再現を確認する。ここでは、その一例として図-11に×を記したリンク(②→③)における交通状態の時間推移を図-15に示す。時間帯122では渋滞列は存在していない。ところが時間帯123において右折需要が右折容量に制約されて残留フローが生じ、渋滞列が形成される。それ以後、徐々に上流側へと渋滞列が延伸し、時間帯134において全領域が渋滞領域となり、リンク上の車両台数はそのリンクに存在できうる最大の値となる。それ以後、渋滞列は上流側のリンクへと延伸することとなる。以上より、リンク内のミクロな交通状態が動的に変化する過程を再現できることが示された。

(3) リンクにおけるQK曲線の再現

リンクフローの再現性を確認するために、一般に知ら

れる図-16のようなQK曲線と、本モデルで再現される交通密度と下流端からの流出交通量の関係とを比較する。ここで、交通密度と下流端からの流出交通量の関係を把握するためには、十分に交通密度が高い値を取るリンクに着目する必要がある。そこで、図-14で確認された渋滞リンクのうち、複数のリンクにわたる渋滞列の原因となったリンク(図-11の○を記したリンク⑬→⑫)に着目した。リンク(⑬→⑫)の交通密度と下流端からの流出交通量の関係を図-17に示す。なお、図-17では交通密度、流出交通量のそれぞれを最大交通密度、流出容量で正規化した値(Q値およびK値)を用いた。ボックスモデルでは、リンクフローを再現する際にQK曲線を仮定していないが、図-17を図-16と比較すると、近似的にQK曲線を再現していることが確認できる。なお、モデルで再現するQK曲線の形状はリンクデータに依存する。すなわち右上がりの傾向は自由走行速度に、Q値が1となる水平部分は流出容量に、右下がりの傾向はリンク長や最大交通密度にそれぞれ依存する。したがって、入力データによって任意の形状のQK曲線を再現することが可能である。

(4) 経路選択行動の表現性

本モデルにおける経路選択行動の表現性を確認するために、表-2に示した属性を持つ3つの経路で構成される図-18の10D3リンクの単純なネットワークにおいてボックスモデルを適用した例を示す。ここでは、各見込みリンク走行費用を算出する際に用いる正規確率分布の変動係数を0.2、ルールC32)のθを3に設定した。スキューニングインターバルを1分とし、発生セントロイド1から図-19に示す交通量が各時間帯に発生するものとした。

本研究では、計算の簡略化のために、各時間帯で構成される選択意思決定単位を同一経路に配分するものと仮定している。したがって、「選択意思決定単位」に基づいた配分を行う本モデルでは、単位時間あたりの配分交通量における現実性は保証できない。そこで、10分単位で平均をとった経路交通量を求め図-20に示した。それに伴い、10分単位での平均経路走行時間を図-21に示した。

図-21より発生交通量の少ない時間帯110以前、および、時間帯200以後においては、経路1の所要時間は時間の経過に伴って変動しているものの、その平均所要時間は経路2の所要時間とほぼ同じ値となっていることが分かる。一方、経路3の所要時間は、自由走行時間である20分で一定となっている。また、図-20より、時間帯110以前、時間帯200以後においては、経路3の交通量は経路1、経路2に比べて非常に小さな値となっている。

一方、発生交通量が多く、各経路が混雑する時間帯110から時間帯200前後にかけては、経路3の交通量が大きなものとなっている。特に、最も流入交通量が大きくなる時間帯においては、ほとんどの発生フローが経路3を利用し

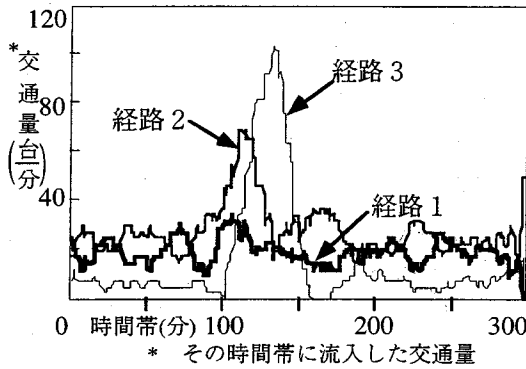


図20 経路交通量推移

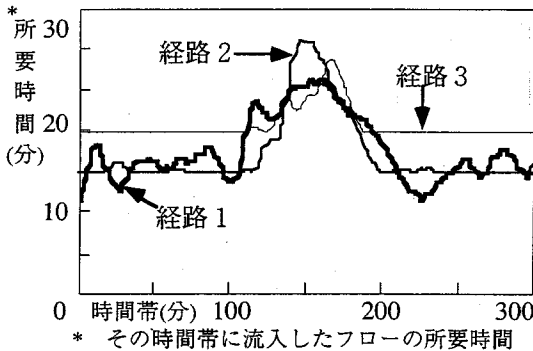


図21 経路所要時間推移

ている。また、経路3よりも小さいものの、経路2の交通量も大きくなっている。しかし、経路1の交通量には大きな変動は見られない。これは、経路1の存在可能台数が小さいため、発生交通量が大きな値となった場合に、経路1への流入が制約されるためと考えられる。各経路の所要時間に着目すると、最も発生交通量が大きくなる時間帯150前後において経路2の所要時間が経路1、経路3よりも大きな値をとっているものの、ほぼ同じ値をとっていることが分かる。ただし、経路2の所要時間が他の経路より大きくなるのは、経路2では、経路1の様に流入が制約されないために図20に示した様に交通量が増加し、かつ、経路3よりも流出容量が小さく、交通量に対する所要時間の感度も高いためであると考えられる。

以上より、それぞれの時間帯において、それほど大きな差が生じていないことが分かる。これは、ネットワークの動的な均衡状態⁹⁾の実現につながる問題であると考えられるが、本モデルで再現する交通配分に関して厳密に議論するためには、動的交通配分に関する理論的な検証、および、現実のフローの観測値を用いた検証が必要であると考えられる。

6. 結語

本研究では、都市部における混雑の緩和のためのソフ

トウェア的な交通運用方策の評価を目的としたボックスモデルと呼ぶ動的な交通流シミュレーションモデルを提案した。ボックスモデルは、巨視的なネットワークを対象とする一方で、先詰まり現象、方向別流出容量の差異、右折容量の動的な変化、渋滞列の延伸による走行領域の減少などの局所的な交通現象をモデル化していることが特徴である。また、経路選択行動のモデル化に際しては、計算の効率化を図るために、複数の運転者群で構成される選択意思決定単位という概念を導入する一方、経路選択行動のランダム性を考慮するために、確率分布に基づいて選択意思決定単位毎に異なる見込みリンク走行時間を与え、より現実的な経路選択行動の再現を図った。そして、仮想ネットワークに対して数値計算を行い、ネットワークおよびリンク内の動的に変化する交通状態の再現が可能であることが確認できた。QK曲線との比較によってリンクフローの再現性を確認した。そして、数値計算のための計算時間は小さなものであり、経済性の高いモデルであると考えられる。また、「各選択意思決定単位が選択実行時点における確率的な見込み経路走行費用が最小となる経路を選択する」と仮定する本モデルを、IOD3リンクのネットワークに適用することで、各経路のOD所要時間に大きな差が生じないことが分かった。

本研究は未だ途上であり、以下のような課題が残されている。

1) 情報提供による交通運用の評価分析

本モデルを用いて、情報提供による交通運用方策の評価分析を図る。そのために、運転者群を交通情報が提供される運転者のセグメント、提供されない運転者のセグメントに分割して、各セグメントごとに個別に経路選択行動をモデル化する。本モデルの枠組みでは、セグメントごとに異なる走行費用マップの与え方を設定することでそれぞれの経路選択行動をモデル化することが可能となる。

2) リンクフローの再現性の向上

渋滞列における疎密波の伝播、リンク途中における交通発生/集中、等をモデル化し、リンクフローの現象再現性の向上を図る。

3) 観測データを用いたモデルの現象再現性の検証

モデルの現象再現性を確認するために、動的な交通データを用いて、モデルを検証する必要がある。

4) ユーザーインターフェースの向上

入力データの簡素化、GUIの導入を行ない、ユーザーインターフェースの向上を図る。

付録

1. ルールC1-1)、C1-2)、およびC1-3)より、上流側ボックス n 内の微小フローが下流側ボックス $n+1$ に移動する確率 $P_{n \rightarrow n+1}$ は、

$$P_{n \rightarrow n+1} = \begin{cases} 1 & \text{if } (E_{n+1} \geq Q_n) \\ E_{n+1}/Q_n & \text{if } (E_{n+1} < Q_n) \end{cases} \quad (1-1)$$

となる。したがって、 $E_{n+1} \geq Q_n$ の場合、 T_n はスキューニングインターバル Δt に一致する。一方、 $E_{n+1} < Q_n$ の場合、 T_n は確率変数となり、その期待値は、

$$\begin{aligned} \bar{T}_n &= \sum_{l=1}^{\infty} l \Delta t P_{n \rightarrow n+1} (1 - P_{n \rightarrow n+1})^{l-1} \\ &= \Delta t \sum_{l=1}^{\infty} l \frac{E_{n+1}}{Q_n} \left(1 - \frac{E_{n+1}}{Q_n}\right)^{l-1} \\ &= \Delta t \left\{ \bar{T}_n - \left(1 - \frac{E_{n+1}}{Q_n}\right) \bar{T}_n \right\} / \frac{E_{n+1}}{Q_n} \\ &= \Delta t \left\{ \sum_{l=1}^{\infty} \left(1 - \frac{E_{n+1}}{Q_n}\right)^{l-1} + 1 \right\} \\ &= \frac{Q_n}{E_{n+1}} \Delta t \end{aligned} \quad (1-2)$$

2. 走行領域長 L_f 、渋滞領域長 L_j は、

$$L_f = N_f LB_f \quad (2-1)$$

$$L_j = N_j LB_j \quad (2-2)$$

LB_f : 走行ボックス長

LB_j : 渋滞ボックス長

N_f : 走行ボックス数

N_j : 渋滞ボックス数

また、ルールCS-1より、フローが存在しない場合、リンク上の全領域は走行領域である ($L_f = L$)。したがって、式(2-1)より、

$$L = N_f \max LB_f \quad (2-3)$$

$N_f \max$: 走行ボックス数の初期値

ルールC3-2に従って走行ボックス数を増減させると、渋滞ボックス数が、

$$(n-1)\theta < N_j \leq n\theta \quad (2-4)$$

n : 任意の自然数

の時、走行ボックス数は、

$$N_f = N_f \max - n \quad (2-5)$$

となる。ここで、 θ を

$$\theta = LB_f / LB_j \quad (2-6)$$

と定義すると、式(2-4)は、式(2-2)、(2-6)を用いて変形すると、

$$(n-1)LB_f / LB_j < N_j \leq nLB_f / LB_j$$

$$(n-1)LB_f < N_j LB_j \leq nLB_f$$

$$(n-1)LB_f < L_j \leq nLB_f \quad (2-7)$$

一方、式(2-5)は、(2-1)、(2-3)より、

$$N_f = N_f \max - n$$

$$= L / LB_f - n$$

$$N_f LB_f = L - nLB_f$$

$$L_f = L - nLB_f \quad (2-8)$$

そして、式(2-7)、(2-8)より、

$$L - LB_f < L_f + L_j \leq L \quad (2-9)$$

すなわちルールC3-2に基づいたボックス数の操作で、再現するリンク長に LB_f 未満の誤差が生じるものの、近似的に式(1)を再現できる。なお、この誤差は、リンクを離散的なボックスで表現する場合、不可避である。

3. ルールC2-2より、走行ボックス内では残留フローが発生しない。したがって、式(13)より、走行ボックス数 N_f は走行領域の所要時間 T_f に等しい。すなわち、

$$T_f = N_f \Delta t \quad (3-1)$$

なお、ルールCS-1は式(3-1)に基づいて設定したルールである。そして、式(3-1)、ルールCS-1より、

$$\frac{L}{V_f} = N_f \max \Delta t \quad (3-2)$$

$N_f \max$: 走行ボックス数の初期値

一方、リンク上にフローが存在しない場合における走行ボックスの長さ LB_f は、

$$LB_f = \frac{L}{N_f \max} \quad (3-3)$$

であり、この状態においてリンク上流端から微小フローが流入した場合、ボックス一つをスキューニングインターバル Δt で通過するため、その微小フローの走行速度は、

$$V = \frac{LB_f}{\Delta t} \quad (3-4)$$

式(3-4)、(3-3)より、

$$V = \frac{LB_f}{\Delta t} = \frac{LB_f N_f \max V_f}{L} \quad (3-5)$$

$LB_f N_f \max$ はリンク長 L に等しいため、

$$V = V_f \quad (3-6)$$

そして、式(3-4)、(3-6)より、

$$LB_f = V_f \Delta t \quad (3-7)$$

一方、ルールC2-1より、

$$F_f \leq Q \max \Delta t \quad (3-8)$$

F_f : 走行ボックス内に存在するフロー量

また走行ボックス内の交通密度は、定義より、

$$K = F_f / LB_f \quad (3-9)$$

式(3-7)、(3-8)、(3-9)より、

$$K \leq \frac{Q \max \Delta t}{LB_f} = \frac{Q \max}{V_f} \quad (3-10)$$

4. 最後尾の走行ボックスと全ての超過ボックスは、ルールC2-1、CS-2より、断面容量 $Q \max$ の大きさを持つため、

$$N_e Q \max \Delta t < F_e \leq (N_e + 1) Q \max \Delta t \quad (4-1)$$

F_e : 後尾の走行ボックスと全ての超過ボックス内に存在するフローの総和

N_e : 超過ボックス数

なお、ここでは超過ボックスが存在する場合を対象としているため N_e は1以上の整数である。

一方、ルールCS-2より、超過ボックス長は0であるため、フロー F_e は最後尾の走行ボックス長 LB_f の領域に存在することとなる。したがって、交通密度 K は、

$$\frac{N_e Q \max \Delta t}{LB_f} < K \leq \frac{(N_e + 1) Q \max \Delta t}{LB_f} \quad (4-2)$$

の範囲の値を取る。式(3-7)、(4-2)より、

$$\frac{N_e Q \max}{V_f} < K \leq \frac{(N_e + 1) Q \max}{V_f} \quad (4-3)$$

N_e は1以上の整数 (自然数) であるため、

$$\frac{Q \max}{V_f} < K \quad (4-4)$$

一方、超過ボックス列は下流側で走行ボックスに隣接しており、かつ、走行ボックスでは残留フローが発生しないため、超過ボックス内においても残留フローが発生することはない。したがって、式(13)より、最後尾の走行ボックスと超過ボックス列を通過するための所要時間 T_e は、

$$T_e = (N_c + 1)\Delta t \quad (45)$$

また、式(43)を変形すると、

$$\frac{KV_f}{Q_{\max}} \leq N_c + 1 < \frac{KV_f}{Q_{\max}} + 1 \quad (46)$$

式(45)、(46)より、

$$\frac{KV_f\Delta t}{Q_{\max}} \leq T_e < \frac{KLB_f\Delta t}{Q_{\max}} + \Delta t \quad (47)$$

式(3-7)、(47)より、

$$\frac{K}{Q_{\max}} LB_f \leq T_e < \frac{K}{Q_{\max}} LB_f + \Delta t \quad (48)$$

参考文献

- 1) 松井寛：動的交通量配分モデル，第18回土木計画学講習会テキスト，pp.84-97,1987.
- 2) Zawack, D.J. and Thompson, G. L. : A Dynamic Space-Time Network Flow Model for City Traffic Congestion, *Transportation Science*, Vol. 21, No. 3, pp. 153-162, 1987.
- 3) 深田清明，川村隆治，吉田禎雄：交通流再現シミュレーションモデルの開発，第11回交通工学研究発表会論文集，pp.1-4,1991.
- 4) Mahmassani, H.S., Jayakrishnan and R., Herman, R.: Network traffic flow theory: microscope simulation experiments on supercomputers, *Transportation Research A*, Vol.24A, No.2, pp.149-162, 1990.
- 5) 丸山勝：交通流シミュレーションによる渋滞に関する検討，交通工学，Vol.27, No.1, pp.53-58, 1992.
- 6) Robertson, D.I.: TRANSYT Method for area traffic control, *Traffic Engineering & Control*, Vol. 10, No. 11, 1969.
- 7) 井上博司：道路網における交通流動の動的シミュレーション手法，土木学会論文集，No. 470, IV-20, pp. 87-95, 1993.
- 8) 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(1), pp. 279-286, 1991.
- 9) 堀口良太，片倉正彦，桑原雅夫：都市街路網の交通流シミュレーター—AVENUE—の開発，第13回交通工学研究発表会論文集，pp. 33-36, 1993.
- 10) Leonard, D.R., Tough, J.B and P C Baguley: CONTRAM. A traffic assignment model for predicting flows and queue during peak period, *TRRL Laboratory Report 841*, pp. 1-12, 1978.
- 11) Hall, M. D., Van. Vliet, D., and Willumsen, L.G. : A simulation assignment model for the evaluation of traffic management schemes, *Traffic Engineering & Control*, Vol. 21, No. 4, pp. 168-176, 1980.
- 12) 飯田恭敬編著：交通工学，国民科学社，pp. 138-149, 1992.
- 13) 飯田恭敬，内田敬，藤井聡：大規模ネットワークを対象と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. 15(1), pp. 39-46, 1992.
- 14) 鷹尾和享，飯田恭敬，内田敬：経路選択シミュレーションによる動的交通量配分，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.482-483, 1991.
- 15) Fischer, M.M., Nijkamp, P. and Papageorgiou, Y.Y.: *Spatial Choices and Processes*, Elsevir Science Publishers B.V, pp. 169-199, 1990.
- 16) 赤松隆，桑原雅夫：渋滞ネットワークにおける動的利用者均衡配分—1起点・多終点および多起点・1終点ODペアの場合，土木学会論文集，No. 488/IV-23, pp. 21-30, 1994.

(1995.3.15受付)

A DYNAMIC TRAFFIC SIMULATION MODEL CONSIDERING A ROUTE CHOICE BEHAVIOR ON ROAD NETWORK

Yasunori IIDA, Satoshi FUJII and Takashi UCHIDA

This paper proposes a dynamic traffic simulation model called BOX-MODEL for evaluating traffic control measures to reduce urban traffic congestion, for example Advanced Travelers Information Systems. This model simulates traffic condition in a large-scale network, and also simulates micro-scale traffic condition at intersections. Each link is divided into congestion-area and non-congestion-area. Each area is abstracted by some boxes whose size is identical to the capacity per unit time of the area. This model simulates drivers' dynamic route choice. We examine the performance of the model through calculating dynamic traffic flow on an imaginary traffic network. The validity of the model is shown.