

連続流体モデルによる混雑したネットワーク 交通流の動的シミュレーション手法

井上博司¹

¹正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部 (〒700 岡山市津島中2-1-1)

本研究は、交通制御支援システムの一部として、混雑した道路ネットワークにおける将来の交通流状況を適確に予測しうる動的トラフィック・シミュレーション手法を提示するものである。交通流モデルとして連続流体モデルを用いており、交通流中の衝撃波を考慮することにより、渋滞の形成や、延伸・減衰を適確に表現することを可能とした。実用性の観点から、モデルをできるだけシンプルにするとともに、並列的な演算が可能となるようモデル化を行なっている。またネットワーク上でのシミュレーションを行なうために、フローのOD構成の表現方法や、合流・分流に対する取り扱い、経路選択について考慮している。2, 3の簡単なシミュレーション例を用いて、交通流の動的な挙動の再現性について考察を行なった。

Key Words : *traffic simulation, traffic congestion, network flow*

1. はじめに

近年、交通制御の高度化、複雑化にともない、その支援システムもより高度でかつ能率的なものが要求されるようになってきた。とりわけ、車両検知器から得られるリアルタイムの情報や、過去の統計的データをもとに、将来の交通流状況を適確に予測しうるネットワーク交通流のシミュレータが是非とも必要である。これまでに開発されたシミュレータにはそれぞれ特徴があり、実際の問題への適用が図られてきたが、複雑な交通問題に対処するためには、今後ともモデルの改良・発展を行っていく必要がある。交通流は、時間的にダイナミックに変化すること、著しい非線形性を有すること、渋滞流と非渋滞流ではその挙動が異なること、ネットワークフローであることなどの性質があり、これらの特性を十分に表現しうることにシミュレータに要求される。それとともに、モデル自体が合理的であり、かつ大規模なネットワークに適用しうるよう、モデルがシンプルであることが要請される。

交通流シミュレーション・モデルは、個々の車両を単位としてその動きを記述する離散モデルと、車両の集合を単位としてその動きを記述する流体モデルに分けられる。離散ネットワーク・シミュレーション・モデルとして、TRAFFICQ¹⁾、TRANSYT²⁾、NETSIM³⁾などがある。これらのモデルでは、ネットワーク上の個別車両の動きを巧みに表現しているが、外生的に設定された固定配分を仮定している。わが国で開発された離散モデルには、森

津等⁴⁾、井上⁵⁾、吉井等⁶⁾のモデルなどがあり、これらのモデルでは変動する交通状況に応じて経路選択がなされるようにモデル化されている。離散モデルは、個別車両の細かい動きを取り扱っているため、シミュレーションの効率性があまりよくないのが欠点である。このため、ナビゲーションシステムの評価等、個別車両の挙動の分析が必要な分野への適用が適切と考えられる。

これに対して流体モデルでは、大規模なネットワークにも適用が可能な効率性のよいシミュレーション・モデルを作成することが可能である。流体モデルの代表的なものとして、CONTRAM⁷⁾やSATURN⁸⁾がある。CONTRAMでは、パケットと呼ばれる同一ODペアをもつ車両の集合を単位として、またSATURNでは連続流体として交通流を表現しているが、これらは時間帯別のフローを重畳する擬似的な動学化モデルであり、需要が連続的に変化する動的な現象には対応しがたい。

わが国で開発された動的ネットワーク・シミュレーション・モデルとして、桑原等⁹⁾¹⁰⁾、飯田等¹¹⁾¹²⁾¹³⁾などのモデルがある。桑原等のモデルでは、交通流を連続流体とみなし、リンクを細かいブロックに分割して、ブロックへのフローの出入りによって交通流動を表現している。ブロック内のフローはQ-K曲線によって決まる速度で移動し、経路選択モデルによって作られる情報に基づいて、ネットワーク内を移動するという構造になっている。このモデルではブロック間のフローの移動量は、上流ブロックからの需要交通量と下流ブロックでの受け入れ可能交通量を比較して、小さい方を下流ブロック

への流入交通量としている。このため下流側から上流に向かって計算を進める必要がある。飯田等のモデルではパケットを交通流の単位とし、またリンクを複数のボックスに分割して、ボックスに出入りする交通流を求めることによって交通流動を表現している。ボックスへの流入量に上限を設定して、それを超えたフローは上流側に残留するものとして、渋滞の上流への延伸を表現している。このモデルでは、フローが単位時間に進む距離をボックスの長さとする点に特徴がある。この他経路選択は考慮されていないが、単路での動的交通流を記述するモデルとして、松井¹⁴⁾、巻上等¹⁵⁾、朝倉等¹⁶⁾などのモデルがある。松井のモデルは道路を適当な複数の小区間に分割し、小区間内の交通密度の時間的変化を小区間に入出入りする交通量により微分方程式の形で表現している。渋滞流での下流から上流への遡上現象を表現するため、上流側から下流側への流出量が抑えられる働きをもつ係数を導入している。巻上等のモデルも同様に道路を小区間に分割し、渋滞にともなう衝撃波を追跡することによって、シミュレーション区間での旅行時間を算定している。朝倉のモデルでは小区間へのフローの出入りによって交通密度の時間的変化を表現しているが、小区間への流入交通量は上流側と下流側の小区間の交通量の平均をとるものとされている。これらのモデルでは計算を必ずしも下流から上流に向かって進める必要がないが、渋滞流の延伸、減衰を適確に表現するには多少問題がある。

本研究においては、流体モデルに基づくネットワーク交通流のシミュレーション手法の開発を行っている。これは主として本モデルを、高速道路交通の制御や高速道路上での交通情報提供のためのツールとして用いることを目的としているためである。高速道路交通は個別車両の集合から成ってはいるが、フローとしての性質はむしろ流体として捉える方がより適確であり、またシミュレーションを行う上でもより効率的であると考えられる。このため本研究でのモデル化は、主として高速道路交通を対象としているが、将来一般平面道路の交通流に対しても適用が可能なように拡張していきたいと考えている。

2. 単路での動的交通流モデル

(1) フローの保存方程式

本研究における動的交通流モデルの基本形を、単路での交通流を対象として説明する。いま単路を交通特性が均質な適当な長さの小区間（ここではセグメントと呼ぶことにする）に分割し、上流から下流に順に番号をつける。隣接セグメント間では交通特性が大きく異なることはないものとする。シミュレーション時間を適当な長さの微小時間（スキャンタイム）に分割し、この微小時間

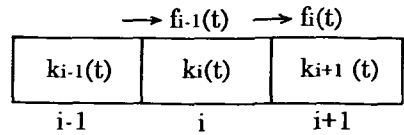


図-1 交通流のモデル

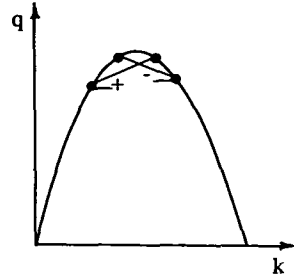


図-2 交通量—密度曲線と衝撃波の速度(1)

を順に進めることによってシミュレーションを進行させる。スキャンタイムが微小であることから、フローの急激な変化はないものとする。ここでモデルを単純化するために、次の仮定を設ける。

- (1) セグメント内の交通流は一様に分布した連続流体である。
- (2) セグメント内の交通流は、それぞれのセグメントに固有の速度—密度関係（ $K-V$ 関係）を有する。

このとき、既往の多くのモデルと同様に、時刻 $t \rightarrow t + \Delta t$ におけるセグメント内のフローの増分が、セグメントへのフローの流入量と流出量の差に等しいことから、次のフローの保存方程式が成り立つ。

$$k_i(t + \Delta t) \Delta x_i = k_i(t) \Delta x_i + f_{i-1}(t) \Delta t - f_i(t) \Delta t \quad (1)$$

ここに、 $k_i(t)$: 時刻 t におけるセグメント i の密度、 $f_i(t)$: 時刻 t においてセグメント i から流出し、セグメント $i+1$ に流入する交通量、 Δx_i : セグメント i の長さ、 Δt : スキャンタイムの長さ（図-1 参照）。

本研究においては、 $f_i(t)$ を交通流中の衝撃波の伝播方向についての考察により求める。セグメント内の交通流が一様であるという仮定から、隣接するセグメント間でわずかに密度差があることによって衝撃波が発生する。この衝撃波の速度は、

$$v_s = (q_{i+1}(t) - q_i(t)) / (k_{i+1}(t) - k_i(t)) \quad (2)$$

である。ここに、 v_s : 衝撃波の速度（下流方向を正とする）、 $q_i(t)$: 時刻 t におけるセグメント i の交通量。式(2)より密度が連続的に変化しているときには、衝撃波の速度は交通量—密度曲線の勾配に等しい。 $f_i(t)$ を決めるためには衝撃波の伝播方向、すなわち式(2)における v_s の正負が分かればよい（図-2 参照）。

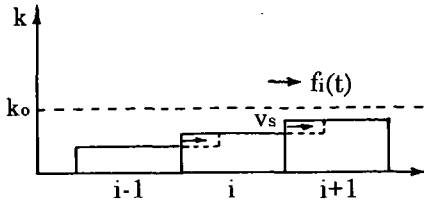


図-3 上・下流セグメントが非渋滞流のとき

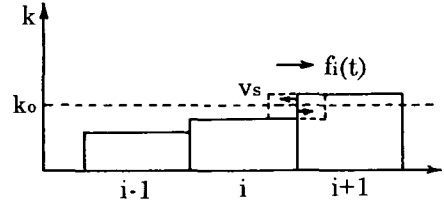


図-6 上流が非渋滞流，下流が渋滞流のとき

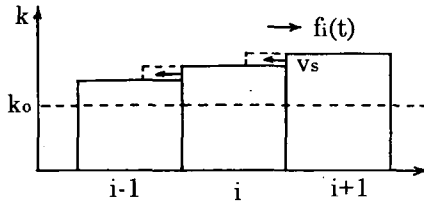


図-4 上・下流セグメントが渋滞流のとき

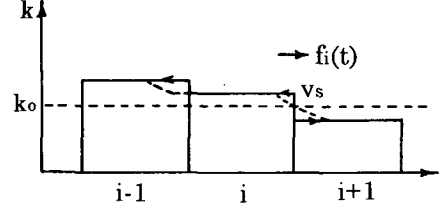


図-7 上流が渋滞流，下流が非渋滞流の場合

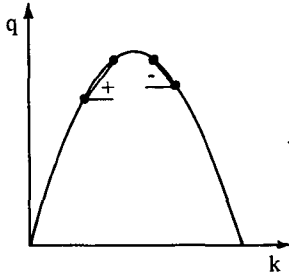


図-5 交通量—密度曲線と衝撃波の速度(2)

いま上，下流セグメントの密度がともに臨界密度よりも小さい，すなわち上，下流セグメントがともに非渋滞領域にある場合には，この衝撃波の伝播速度は正すなわち衝撃波は下流方向に伝播する（図-3 参照）．このときセグメント境界での交通流は上流側セグメントの交通流と同じになるので，セグメント境界での交通流は上流側セグメントの交通流に等しくなる．このことから，

$$f_i(t) = q_i(t), (\text{セグメント } i, i+1 \text{ が非渋滞流のとき}) \quad (3)$$

一方上，下流の密度がともに臨界密度より大きい場合，すなわち上，下流セグメントがともに渋滞領域にあるとき，衝撃波の伝播速度は負，すなわち衝撃波は上流側に伝播する（図-4 参照）．このときセグメント境界での交通流は下流側セグメントの交通流と同じになるので，セグメント境界の交通流は下流側セグメントの交通流に等しい．したがって，

$$f_i(t) = q_{i+1}(t), (\text{セグメント } i, i+1 \text{ が渋滞流のとき}) \quad (4)$$

次に上流側が非渋滞流，下流側が渋滞流の場合には，

$$q_{i+1}(t) \geq q_i(t) \text{ のとき, } v_s \geq 0 \quad (5a)$$

$$q_{i+1}(t) < q_i(t) \text{ のとき, } v_s < 0 \quad (5b)$$

となる（図-5，図-6 参照）．したがってセグメント境界の交通量は，上，下流セグメントの小さい方の交通量に等しい．すなわち，

$$f_i(t) = \min \{ q_i(t), q_{i+1}(t) \}$$

（セグメント i が非渋滞流， $i+1$ が渋滞流のとき） (6)

逆に上流側が渋滞流，下流側が非渋滞流の場合には，時間の経過とともに衝撃波は傾斜し，その前端部は下流側に，後端部は上流側に伝播していく（図-7 参照）．臨界密度の点の伝播速度は0であるから，セグメントの境界では密度は常に臨界密度に等しく，したがってこの断面での最大交通量が流れている．すなわち，

$$f_i(t) = q_{i, i+1}^{\max}$$

（セグメント i が渋滞流， $i+1$ が非渋滞流のとき） (7)

ここに， $q_{i, i+1}^{\max}$: セグメント $i, i+1$ の境界での最大交通量．

なお以上の4ケースにおいて，上・下流のセグメントの交通特性が異なる場合も含め， $f_i(t)$ は物理的にセグメントの最大交通量を越えることはできないので，

$$f_i(t) \leftarrow \min \{ f_i(t), q_i^{\max}, q_{i+1}^{\max} \} \quad (8)$$

とする必要がある．ここに， q_i^{\max} : セグメント i の最大交通量．

ここでセグメント内の交通流は，それぞれ固有の速度—密度関係を有しているという仮定から，各セグメントの交通量は次のように与えられる．

$$u_i(t) = v_i(k_i(t)) \quad (9a)$$

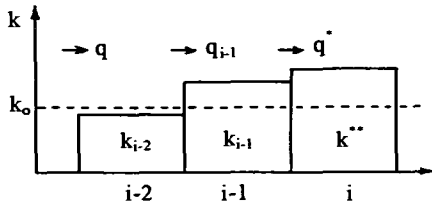


図-8 渋滞流の上流への延伸

$$q_i(t) = k_i(t) u_i(t) \quad (9b)$$

ここに $u_i(t)$: セグメント i の速度, $q_i(t)$: セグメント i の交通量, $v_i(k_i)$: セグメント i の速度-密度関数.

本モデルでは, 速度-密度関係は特定の関数形に限定していないため, 任意の関数を用いることができる. 時刻 t における各セグメントの密度が与えられたとき, 式(3)~式(9)の演算を実行することにより, 時刻 $t+\Delta t$ での各セグメントの密度を求めることができる. このような演算によってシミュレーションを進行させるが, このときセグメントの交通密度が負にならないようにする必要がある. このためには, セグメントからの流出量がセグメント内のフローを越えないようにすばよい. すなわち,

$$q_i(t)\Delta t \leq k_i(t)\Delta x_i \quad (10)$$

これより,

$$u_i(t)\Delta t \leq \Delta x_i \quad (11)$$

よって速度の最も大きい場合を考慮すると, セグメントの長さがスキャンタイム中にセグメントの自由速度で走れる距離よりも長くなるよう設定しておく必要がある. なおセグメントの長さの上限については特に制約はないが, 精度よく演算を行うためには, なるべくセグメントの長さを小さくして, セグメント数を増やすことが望ましい.

(2) 容量制限の取り扱い方

既往の一部のシミュレーションモデルでは, セグメント内のフローがセグメントに存在しうるフローの最大値を越えると, 上流セグメントからの流入量を制限するという措置をとっている. これによってフローをセグメント内に貯留して, 渋滞流の上流への延伸を表現している. この場合密度を順に確定していく必要があるため, 計算を下流から上流に向かって進める必要がある. さもなくば密度が飽和密度を越えたり, あるいはフローが途中で消えるなどの不都合を生じる可能性がある. このような措置はシミュレーションにおいて極めて煩雑であり, モデルを複雑にする. また多数のループをもつ一般

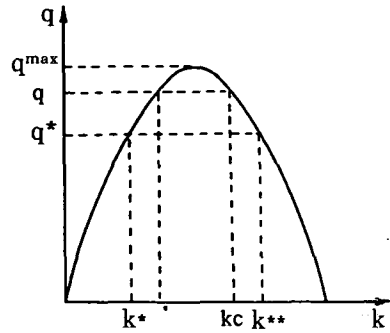


図-9 容量制限を受けるセグメントのQ-K曲線

のネットワークでは, 計算を下流から上流に向かって進めるということを矛盾なく実行することは困難である.

これに対して本モデルでは, セグメント内のフローが上限値を越えないよう流入量を制限するというを行なわない. これは前記の演算では交通量-密度関係によって, 流入量を制限しなくても不都合を生じることはなく, フローをセグメント内に貯留し, 渋滞流の上流への延伸を表現できるからである. したがって計算は, すべての隣接するセグメントペアに対して, 並列的に実行することができる. これは実用性の面で, 極めて有利な点である.

このことを簡単な例で説明する (図-8, 図-9 参照). いまセグメント i からの流出がセグメントの最大交通量 q^{max} よりも小さな値 q^* に制限されており, 上流より q^* を上回る交通量 q が継続的に流れ込んでいる場合を想定する. セグメント i では流入量が流出量を上回るためフローが貯留されていき, 密度が次第に増加する. セグメント i の密度が交通量 q に対応する渋滞密度 k_c を越えると, セグメント $i-1$ からの流出量はセグメント i の交通量に等しくなり, このためセグメント $i-1$ では流入量が流出量を上回るため密度が次第に増加していく. セグメント i では, 密度が交通量 q^* に対応する渋滞密度 k^{**} に近づくとつれ, 流入量も q^* に近づくため密度の増加は緩やかになり, やがて密度が k^{**} になったとき, 流入量と流出量がバランスするので密度の増加は止まる. 以後同様の過程でセグメント $i-1$ の密度が増加し, 渋滞密度 k^{**} になったとき密度の増加が止まる. このようにして上流側に密度 k^{**} の渋滞流が延伸していくことになる. この場合, 上流側の交通量 q の大小によって渋滞流延伸の速度は変わるが, 渋滞流の密度は変わらない. このように本モデルでは, 現スキャンタイムでのセグメントの密度によって, 次のスキャンタイムでのセグメントへの流入・流出量を決定することができ, 次のスキャンタイムでのセグメントの密度を計算する際, 下流から密度を順に確定していかなくとも不都合が生じることはない. し

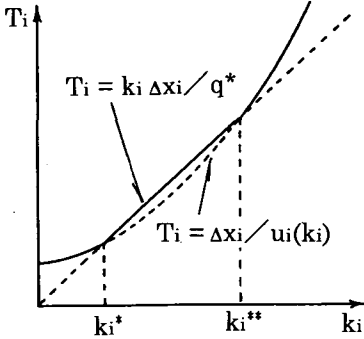


図-10 所要時間-密度曲線

たがって計算は、すべての隣接するセグメント・ペアに対して任意の順序で実行することができる。

ところで交差点流入部のリンクのように、交通量がQ-K曲線によって決まる最大交通量よりも低い値に制限される場合には、若干の措置が必要である。いまセグメント*i*が端末において交通量の制限を受けるものとし、制限値を q^* とする。この場合、このセグメントのQ-K曲線を、もとの曲線を $q=q^*$ で頭切りした形に設定することは不適切である。このとき上流側からの流入量が q^* に制限されるため、セグメント*i*が下流の渋滞密度 k^{**} に到達しない。このためQ-K曲線は、頭切りしないもとの関数形を用いる必要がある。

この場合式(3)～式(9)の演算によれば、セグメント*i*からの流出量が q^* を越えてしまうことが起こりうるが、このときにはセグメント*i*からの流出量を q^* に修正するというわずかな変更を加えるのみでよい。これによってセグメントにフローが貯溜され、渋滞流が形成されていく。

ところで、セグメントの所要時間-密度曲線については、 $k_i^* < k_i \leq k_i^{**}$ のときセグメントからの実流出量が q^* となるので、次の形をとることに留意する必要がある。

$$T_i = \Delta x_i / u_i = \Delta x_i / u_i(k_i) \quad (k_i \leq k_i^* \text{ および } k_i > k_i^{**} \text{ のとき}) \quad (12a)$$

$$T_i = k_i \Delta x_i / q^* \quad (k_i^* < k_i \leq k_i^{**} \text{ のとき}) \quad (12b)$$

3. ネットワークモデルへの拡張

前記のモデルを用いてネットワーク上でシミュレーションを行なうためには、OD構成を考慮してフローの保存方程式が設定される必要がある。また分流部、および合流部での交通流動が的確に表現される必要がある。さらに経路選択についても考慮しておく必要がある。

(1) フローの表現単位

起点および終点が多くなる一般のネットワークを対象とする場合、分岐点においてフローがどの方向に分岐するかは起終点によって異なるので、フローを起終点によって識別しておく必要がある。このときパッケージのようにフローの表現単位をODペアごとに設定すると、非常に数多くのフロー単位を取り扱わねばならないので、シミュレーションの効率性が低下する。任意のセグメント上に存在する終点と同じフローは、いずれの起点から出発したかにかかわらず同一の経路選択行動をとるとすると、フローを起点によって識別する必要がないので、単に終点によってのみフローを識別しておけばよい。この他、交通情報を基にして時々刻々経路を変更している運転者と経路を固定している運転者の混在等、複数の交通量配分原則を考慮する必要があるときには、それぞれの交通量配分原則ごとにもフローを識別しておく必要がある。なお本モデルの基本的な仮定において、セグメント内のフローは一様であると仮定しているが、これはセグメント内でフローが均等に分布しているという意味であり、フローが無差別であるということ意味するものではない。

いま終点と交通量配分原則によってフローを識別するとき、任意のセグメントの合計交通量は、

$$q_i(t) = \sum_d \sum_r q_i^{dr}(t) \quad (13)$$

となる。ここに、 $q_i(t)$:セグメント*i*の合計交通量、 $q_i^{dr}(t)$:セグメント*i*の終点*d*、交通量配分原則*r*のフローの交通量。

なおこのときセグメント内の各フローの構成を管理するため、フローの保存方程式(1)は各フロー単位ごとに設定される必要がある。すなわち、

$$k_i^{dr}(t+\Delta t)\Delta x_i = k_i^{dr}(t)\Delta x_i + f_{i-1}^{dr}(t)\Delta t - f_i^{dr}(t)\Delta t \quad (14)$$

ここに、 $k_i^{dr}(t)$:セグメント*i*の終点*d*、交通量配分原則*r*のフローの密度、 $f_i^{dr}(t)$:セグメント*i*から流出し、セグメント*i+1*に流入する終点*d*、交通量配分原則*r*のフローの交通量。

なお $f_i^{dr}(t)$ は、セグメントでのフローが一様であるという仮定から、

$$f_i^{dr}(t) = f_i(t) (k_i^{dr}(t) / k_i(t)) \quad (15)$$

となる。また各セグメントの交通量と密度の間には、

$$q_i^{dr}(t) = v_i(k_i(t)) k_i^{dr}(t) \quad (16)$$

が成り立つ。

(2) 分流のモデル

フローの分流点においては、経路選択モデルから得られる情報にもとづいて、フロー単位を方向別に分けてい

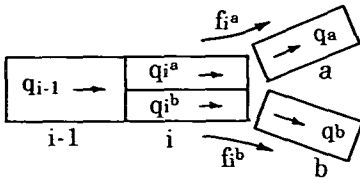


図-11 分岐部での交通流モデル

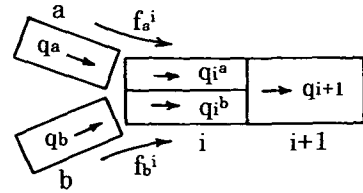


図-12 合流部での交通流モデル

くが、これだけでは十分ではない。交通渋滞は分岐点を越えて上流側に延伸していくことがあり、このような現象が再現できるよう、モデル化がなされなければならない。その際、分岐点での交通流モデルが単路部でのモデルと相似形になることが望ましい。なお信号交差点では信号現示との同期を考慮しなければならないので、ここでは信号のない分岐部を対象とする。

いまセグメント i から二つのセグメント a, b に分岐するものとする。このとき経路選択モデルから得られる情報、すなわちセグメントの端末からそれぞれの終点に至る次のセグメントの情報にもとづいて、各フロー単位をセグメント a を利用する部分とセグメント b を利用する部分に分ける。ただしセグメント内ではフローは一様であるという仮定から、両者は同じ速度で動いており、その交通流状態はセグメント i における全体の交通量と密度によって決まる共通のものとする。ここでセグメント a を利用する部分の交通量を q_i^a 、セグメント b を利用する部分の交通量を q_i^b とする。セグメント i からセグメント a への流入交通量 f_i^a は、両セグメントの交通量およびその交通流状態（渋滞、非渋滞の区別）によって、前記の単路部のモデルと同様に決定することができる。セグメント i からセグメント b への流入交通量 f_i^b についても同様である。上流側セグメントに容量制約がある場合には、単路部での容量制約の場合と同様の取り扱いを行うことができる。

セグメント内ではフローは同じ速度で動いているという仮定から、分岐セグメントからの流出は両方向への流出率 $f_i^a/q_i^a, f_i^b/q_i^b$ の小さいほうの値によって支配される。このことから下流側に渋滞流があって、セグメント a またはセグメント b の交通量により流入量が決定される場合には、両方向への流出率が等しくなるよう、次のような修正を行なっておく必要がある。

$$f_i^a \leftarrow q_i^a \min(f_i^a/q_i^a, f_i^b/q_i^b) \quad (17a)$$

$$f_i^b \leftarrow q_i^b \min(f_i^a/q_i^a, f_i^b/q_i^b) \quad (17b)$$

もちろんセグメント $i-1$ からセグメント i への流入交通量は、セグメント $i-1$ の交通量と交通流状態およびセグメント i の全体の交通量と交通流状態から決定される。

なおここでのセグメントは分岐織込部をモデル化し

たものであり、実際の交通流では織込は分岐点よりもかなり上流側で行われるのが通常であるから、上記の分岐セグメントを交通流の実態に即して、分岐点よりもかなり上流側に配置する必要がある。式(17a), (17b)の意味するところは、たとえば右折方向の下流側セグメントが混雑していて右折方向への流入が制限されているような場合、これにともなって分岐のための折り込み区間が混雑してくるので、混雑のない左折方向もその影響を受け、左折方向への流入が同等の割合で制限を受けるということである。このような現象は日常よく経験するところである。ただし右折方向が非常に混雑していて、ごくわずかししか流入できないような場合、混雑のない左折方向もごくわずかししか流入できないことになり、非常に厳しい条件となる。実際にはかなり強引な挙動をとる車両もあると思われるので、そのような場合交通の実態に即して、式(17a), (17b)を緩和することも必要であろう。

(3) 合流のモデル

合流部においては、分岐部の裏返しを行えばよい。いまセグメント i においてセグメント a とセグメント b のフローが合流するものとする。このときセグメント i 内のフローを、セグメント a からのフロー q_i^a とセグメント b からのフロー q_i^b に分ける。フロー q_i^a および q_i^b の交通流状態は、セグメント i の全体の交通量および密度から決まる共通のものとする。このとき、セグメント a からセグメント i への流入量 f_a^i は、交通量 q_a と q_i^a および両セグメントの交通流状態より、単路部モデルと同様に決定することができる。セグメント b からセグメント i への流入交通量 f_b^i についても同様である。

ただし両方向からの流入量の合計がセグメント i の最大交通量 q_i^{max} を越えるときには、セグメント i への流入を制限する必要がある。このとき両方向から流入するフローの比率は、両方向のフローの勢力によって決まると考えられるが、簡便的に同じ比率で流入を制限すると、次のような修正を行えばよい。

$$f_a^i \leftarrow f_a^i q_i^{max} / (f_a^i + f_b^i) \quad (18a)$$

$$f_b^i \leftarrow f_b^i q_i^{max} / (f_a^i + f_b^i) \quad (18b)$$

セグメント i からセグメント $i+1$ への流入交通量は、セ

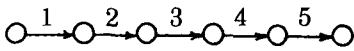


図-13 シミュレーション対象ネットワーク(1)

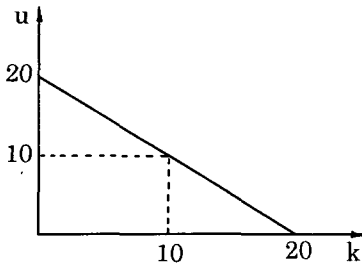


図-14 速度-密度関係

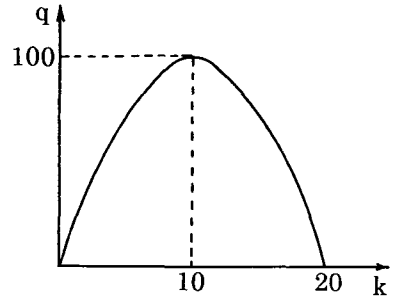


図-15 交通量-交密度関係

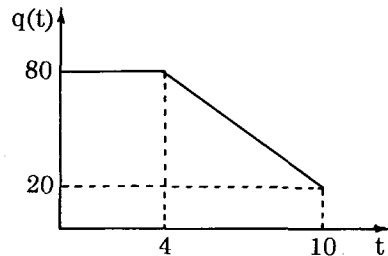


図-16 交通発生の時間パターン

グメント i の全体の交通量と交通流状態およびセグメント $i+1$ の交通量と交通流状態より決定できる。このように、合流部の裏返しを行なうことによって、単路部の基本モデルに相似な形で合流部の交通流を取り扱うことができる。

(4) 経路選択

本モデルでは特定の交通量配分原則に限定していないので、多くの動的な交通量配分原則を用いることができる。今後道路交通の情報化によって、運転者は時々刻々変化するリアルタイムの道路交通情報を取得することになると思われるので、このような状況下では動的利用者最適配分すなわち、終点まで到達する任意の時点において、終点までの所要時間が最小となる経路を選択するという原則を用いるのがよい。この場合各分流点において、それぞれの終点まで最短時間で到達するための経路は起点の如何に関わらないので、経路情報を管理する必要がなく、各終点ごとに次に進むセグメントが何であるかという情報だけを管理しておればよい。この情報は最短時間経路探索によって求められるが、演算には時間がかかるので、経路の更新は各スキャンタイムごとではなく、ある程度の時間間隔で行なうことになる。動的な交通状況下で利用者がどのように経路選択を行うかは未だ十分に解明されていないが、動的利用者最適配分は、現時点でのリンク所用時間だけで経路探索ができること、経路選択に関する管理情報が簡単であることなどの利点を有している。

4. 簡単なシミュレーション例

(1) 単路でのシミュレーション

図-13 に示す5つのセグメントからなるネットワークを想定する。各セグメントの交通流特性はすべて同一

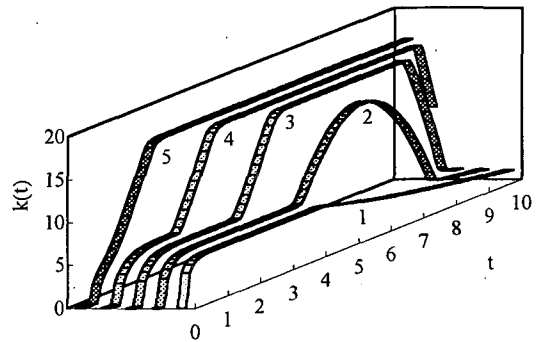


図-17 シミュレーション結果の3次元表示(1)

とし、速度-密度関係および交通量-密度関係を図-14、図-15 のように仮定する。セグメント 1 への流入交通量がセグメント 5 の端末まで流れるものとし、その交通量発生の時間パターンを図-16 のように想定する。セグメント 1 から 4 までは容量制限がなく、単位時間あたり最大 100 台の交通量が流れうるが、セグメント 5 では端末において単位時間あたり最大 60 台に制限されているものとする。 $t=0$ における各セグメントの初期交通量はすべて 0 とし、 $\Delta t=0.1$ 、 $\Delta x=2$ として、 $t=0$ から $t=10$ までのシミュレーションを行なう。なおここでは数値をすべて無次元で表示している。

図-17 はシミュレーションの結果を 3 次的に表示

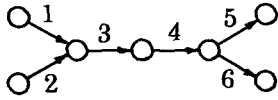


図-18 シミュレーション対象ネットワーク(2)

表-1 OD交通量(1)

O \ D	5	6
1	0.4q(t)	0.4q(t)
2	0.6q(t)	0.6q(t)

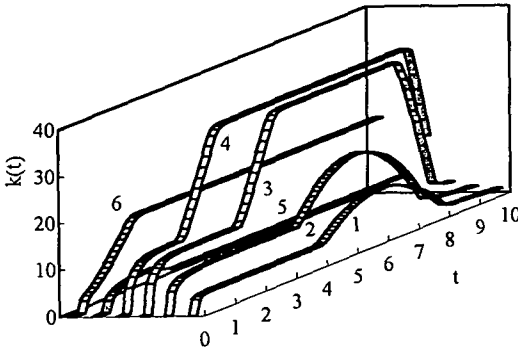


図-19 シミュレーション結果の3次元表示(2)

したものである。容量制限の設定されたセグメント5から交通量60に対応する密度16.3の渋滞流が発生し、時間の経過とともに上流のセグメント4およびセグメント3へと延伸している。さらに時間の経過とともに需要交通量が減少するため、上流側のセグメント3から渋滞流が次第に解消している。

このときの渋滞波の伝播速度は、セグメント5からセグメント3までの伝播に時間2.2を要していることから、

$$v_s = -4/2.2 = -1.82$$

となる。式(2)を用いると渋滞波の前後の密度差より

$$v_s = (79.8 - 60.3) / (5.5 - 16.3) = -1.81$$

となり、シミュレーションでの渋滞波の伝播速度がほぼ理論値と一致していることが分かる。

このように本モデルでは、簡単な演算によって渋滞流の発生、延伸、解消の過程を適確に表現できる。

(2) 分・合流部をもつネットワークでのシミュレーション

図-18に示す合流部と分流部をもつ6セグメントよりなるネットワークを対象とする。各セグメントの速度-密度関係は図-14に示したものと同一とする。ただし

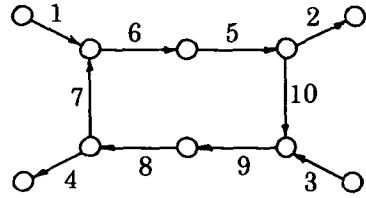


図-20 シミュレーション対象ネットワーク(3)

表-2 OD交通量(2)

O \ D	2	4
1	20	30
3	40	20

セグメント3, 4の飽和密度は他のセグメントの2倍の40とする。セグメント1~5では交通量の制限はないが、セグメント6では、末端において単位時間当たり最大60台に交通量が制限されているものとする。OD交通量を表-1に示す。ここに $q(t)$ はOD交通量発生時の時間的パターンであり、全てのODについて図-16に示したものと同一であるとする。

図-19はシミュレーション結果を3次元的に表示したものである。まずセグメント6で交通量60に対応する渋滞流が発生し、時間の経過とともに分流点を越えて次第に上流のセグメント4, セグメント3へと延伸している。さらに時間の経過とともに、合流点を越えてセグメント1, セグメント2へと渋滞が延伸している。やがて需要交通量が小さくなるため、上流のセグメント1, セグメント2から渋滞が解消し、さらに合流点を越えてセグメント3, セグメント4も急激に渋滞が解消に向かっている。セグメント6では需要交通量が小さくなってセグメント内にフローが残っているため最後まで渋滞が続くが、セグメント5では交通量を処理できるため、渋滞は発生していない。なおセグメント5の密度がほぼ一定なのは、セグメント内で交通流が一様であるという仮定より、セグメント6の渋滞のため、セグメント5への流入量が抑制されているためである。このように本モデルでは、分流点や合流点を越えて渋滞が延伸し、また解消していく過程を適確に表現できる。

(3) ループをもつネットワークでのシミュレーション

図-20に示すループとそれぞれ二つの分流部、合流部をもつネットワークを対象とする。各セグメントの速度-密度関係は図-14と同一とする。ただしセグメント7および10の飽和密度は、他のセグメントの半分の10とする。セグメント1, 3の始端からセグメント2, 4の終

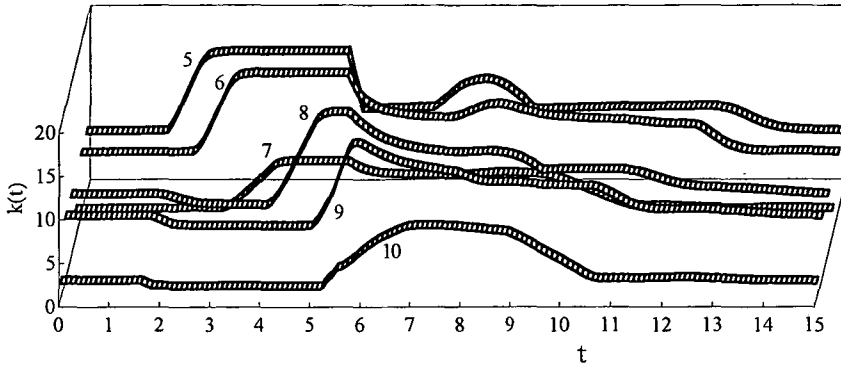


図-21 シミュレーション結果の3次元表示(3)

端にいたるOD交通量は時間的に一定であり、表-2に示す値とする。 $t=0$ における初期交通量はこのOD交通量に対する平衡値とする。いま $t=0$ から $t=5$ までの間、セグメント2の終端で交通量が最大 $q^*=43$ に制限されるものとする。

$t=0$ から $t=15$ までのシミュレーションの結果を図-21に示す。セグメント2での流出量が制限されるため、セグメント2から始まった渋滞がセグメント5に延伸してくる。これがさらに上流側のセグメント6, 7, 8, 9さらにセグメント10へと伝播していく。やがてセグメント2での容量制限の解除のため、セグメント5の渋滞が急速に減衰し、これが上流に伝播していく。しかしループを周回した渋滞波がセグメント5に到達し、再びセグメント5で小規模の渋滞が発生する。これがさらに上流のセグメント6, 7へと伝播していく。このような過程を経て、各セグメントの密度が次第に低下し、もとの平衡値へと戻っていく。このように本モデルでは、ネットワーク中で起こる渋滞波の複雑な挙動を表現できる。

5. おわりに

連続流体モデルによる混雑したネットワーク交通流の動的シミュレーション・モデルについて述べた。本モデルの特徴は、隣接するセグメント間のフローの移動量を、衝撃波の伝播方向をもとに、上・下流のセグメントの交通量により決定するところにある。またネットワークモデルに拡張するため、フローのOD構成の表現方法、ならびに分流、合流の取り扱い、経路選択の方法についても述べた。2, 3のシミュレーション例から、渋滞流の形成、ならびに合流点や分流点を越えた渋滞流の延伸、解消の過程、さらにループでの渋滞波の周回などの複雑な挙動を表現しうることが示された。本モデルは、アルゴリズムが簡単であること、計算をネットワーク中で並列的に進められること、理論的に明解であることなど

の利点を有している。これらの特徴は必ずしも本モデルに限定したものではないが、今後大規模ネットワークへも適用が可能なように、モデルの改良と実用化を図っていきたいと考えている。ただし本モデルは現在まだ開発途上であり、幾つかの課題が残されている。たとえば実際の街路網を対象とするとき、交差点での交通流と信号制御との同期を適確に表現することが必要である。これらについてははまだ未解決の点が多く、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Logie, D.M.W. : TRAFFICQ-A comprehensive model for traffic management schemes, Traffic Eng. & Control, Vol.20, No.11, pp.516-518, 1979.
- 2) Robertson, D.I. : TRANSYT Method for area traffic control, Traffic Eng. & Control, Vol.10, No.11, 1969.
- 3) 交通流シミュレーションモデルの適用性検討, 自動車交通, 日産自動車株式会社, pp.46-49, 1991.
- 4) 森津秀夫, 大原竜也, 多田典史, 井上琢弥: 経路誘導による交通ネットワークフローの変化に関する分析, 土木計画学研究・論文集, No.9, pp.37-44, 1991.
- 5) 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.
- 6) 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田緯之: 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, pp.33-41, 1995.
- 7) Lenard, D.R., Tough, J.B. and Baguley, P.C. : CONTRAM-a traffic assignment model for predicting flows and queues during peak period, TRRL Report LR841, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorn, 1978.
- 8) Hall, M.D., Vliet, D. Van and Willumsen, L.G. : A simulation assignment model for the evaluation of traffic management schemes, Traffic Eng. & Control, Vol.21, No.4, pp.168-176, 1980.
- 9) 上田攻, 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.
- 10) 桑原雅夫, 上田功, 赤羽弘和, 森田緯之: 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, pp.11-20, 1993.

- 11) 飯田恭敏, 内田敬, 藤井聡, 座尾和亨: 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.
- 12) 飯田恭敏, 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.
- 13) Fujii,S., Iida,Y. and Uchida,T. : Dynamic traffic simulation to evaluate Vehicle navigation systems, 1994 Vehicle Navigation & Information Systems Conference Proceedings, B2-4, pp.239-244, 1994.
- 14) 松井寛: 高速道路交通流の動的記述モデル, 交通工学, Vol.18, No.2, pp.17-26, 1983.
- 15) 卷上安爾, 中西恒彦, 久間木信夫: 高速道路の単路部渋滞モデルについて, 交通工学, Vol.18, No.2, pp.3-16, 1983.
- 16) 山内敏通, 朝倉康夫: 観測データの利用による都市高速道路の動的なL P型流入制御モデル, 土木計画学研究・講演集, No.18(2), pp.257-260, 1995.

(1996. 8. 23 受付)

DYNAMIC TRAFFIC SIMULATION METHOD OF CONGESTED NETWORK FLOW THROUGH CONTINUOUS FLUID MODEL

Hiroshi INOUE

This paper presents a dynamic traffic simulation method to forecast future traffic situation on congested road networks. The method is based on the continuous fluid model, and shock wave is considered in the basic formation. The model was made simple and capable of parallel processing for practical use on large scale networks. The model also includes how to deal OD structure of demand, merging and diverging, and route choice. Using some examples, dynamic behaviors of traffic flow was examined, and it was made clear that the model can represent the growth and decline of traffic congestion properly.