

連続流体モデルによる混雑した交通流の動的シミュレーション Dynamic Traffic Simulation of Congested Flow Through Continuous Fluid Model

井上博司*

Hiroshi Inouye

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ている。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。しかしこれまでに開発されたシミュレータは、必ずしも実用性と合理性を兼備したものではなかった。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ものが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ためには、モデルがシンプルであることが要請される。

本研究においては、連続流体モデルを用いて、これらの条件を具備したシミュレーション手法の開発を行なうことを目的としており、本稿ではそのためのモデルの基本的な構造について述べる。

2. 既往の研究

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マイクロモデルと、車両の集合を単位としてその動きを記述するマクロモ

デルに分けられる。

マイクロ・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。わが国で開発されたマイクロモデルには、井上のモデル⁴⁾、森津等のモデル⁵⁾などがあり、これらのモデルでは、詳細に表現されたネットワーク上の個別車両の動きを表現するとともに、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。マイクロモデルは、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。

これに対してマクロモデルでは、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構成することが可能である。マクロモデルの代表的なものとして、CONTRAM⁶⁾やSATURN⁷⁾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、これらは疑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精緻な動的ネットワーク・シミュレーションモデルとして、東大生研モデル^{8), 9)}、飯田等のモデル^{10), 11), 12)}などがある。東大生研モデルでは、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は、上流

キーワード：交通流、ネットワーク分析

* 正会員 工博 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科
〒700 岡山市津島中 2-1-1 Tel. 086-251-8162

Fax. 086-253-2993

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。このため計算は下流から上流に向かって進める必要がある。

この外、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、松井のモデル¹³⁾、巻上等のモデル¹⁴⁾などがある。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流出係数なるものを導入している。巻上等のモデルも同様に道路を小区間に分割し、小区間へのフローの出入りによって小区間の交通密度の時間的変化を表現している。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、リンク交通流に容量制限を付加することが困難である。

3. 単路での動的交通流モデル

(1) 連続方程式

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（ここではセクションと呼ぶことにする）に分割し、上流から下流に順に番号をつける。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。ここでモデルを簡単化するために、次の仮定を設ける。

- (1) セクション内の交通流は均質な連続流体である。
- (2) セクション内の交通流は、それぞれのセクションに固有の速度-密度関係（V-K 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 $t \sim t + \Delta t$ におけるセクション内の車両台数の増分が、セクションへの流入交通量と流出交通量の差に等しいことから、次の連続方程式が成り立つ。

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

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

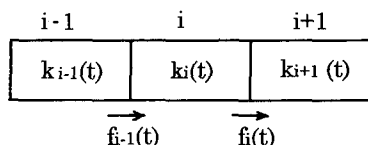


図-1 交通流のモデル

ここで $f_i(t)$ がどのように与えられるかを考察する。スキャンタイムの初頭においてセクション内の交通流が一様であるという仮定から、隣接するセクション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 $q_i(t)$ ：時刻 t におけるセクション i の交通量。

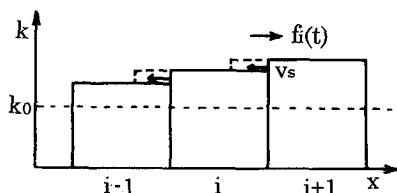


図-2 上・下流セクションが渋滞流のとき

いま上、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、下流セクションがともに渋

滞領域にあるとき、この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。このときセクション境界の交通量は下流側セクションの交通量に等しい。したがって、

$$f_i(t) = q_{i+1}(t), \quad (\text{セクション } i, i+1 \text{ が渋滞流のとき}) \quad (3)$$

一方上、下流セクションの密度がともに臨界密度よりも小さい、すなわち上、下流セクションがともに非渋滞領域にある場合には、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。このときセクション境界での交通量は上流側セクションの交通量に等しい。このことから、

$$f_i(t) = q_i(t), \quad (\text{セクション } i, i+1 \text{ が非渋滞流のとき}) \quad (4)$$

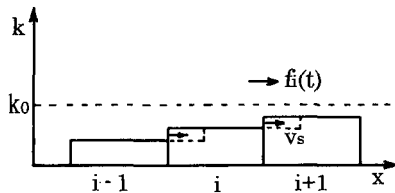


図-3 上・下流セクションが非渋滞流のとき
次に上流側が非渋滞流、下流側が渋滞流の場合、
には、

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

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

となる。したがって、

$$f_i(t) = \min\{q_i(t), q_{i+1}(t)\} \quad (5)$$

(セクション i が非渋滞流、 $i+1$ が渋滞流のとき)

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。セクション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。よって上、下流セクションで交通特性が異なる場合も考慮すると、

$$f_i(t) = \min\{q_i^{\max}, q_{i+1}^{\max}\} \quad (6)$$

(セクション i が渋滞流、 $i+1$ が非渋滞流のとき)

ここに $q_i^{\max}$: セクション i の最大交通量。

ここでセクション内の交通流は、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、セクションの交通量は次のように与えられる。

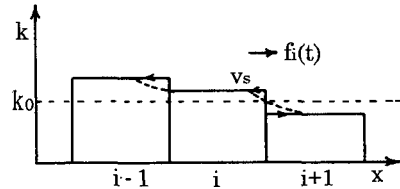


図-4 上流が渋滞流、下流が非渋滞流の場合

$$u_i(t) = u_i(k_i(t)) \quad (7)$$

$$q_i(t) = k_i(t)u_i(t) \quad (8)$$

ここに $u_i(t)$: セクション i の速度、 $q_i(t)$: セクション i の交通量、 $u_i(k_i)$: セクション i の U-K 関数。

本交通流モデルでは、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 における各セクションの密度が与えられたとき、上記の演算を実行することにより、時刻 $t + \Delta t$ での各セクション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、このときセクションの交通密度が負にならないようにする必要がある。このためにはセクションの長さが、スキャンタイム中にセクション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。

(2) 容量制限の取り扱い方

既往の多くの研究では、セクション内のフローがセクションに存在しうるフローの最大値を越えようと、流入交通量を制限するという措置をとり、これによって渋滞流の上流への延伸を表現している。このためには計算を下流から上流に向かって進める必要がある。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、セクション内のフローが上限値を越えないよう流入量を制限することなく渋滞流の上流への延伸を表現することができる。また計算は、すべての隣接するセクションペアに対して、並列的に実行することができる。

これらは実用性の面で、極めて有利な点である。

いま下流での容量狹溢のため渋滞が延伸し、セクション $i+1$ がすでにこの渋滞流の交通量 q^* に到達しているものとする。このときセクション $i+1$ への流入量はセクション $i+1$ の交通量に等しく、したがってセクション $i+1$ では流入量と流出量のバランスがとれており、これ以上密度は増加しない。まだ飽和していないセクション i では流入量が流出量を上回るため密度が次第に増加し、やがて下流の渋滞流の密度に到達する。このように本モデルではセクションの流入量を制限することなく、渋滞の上流への延伸を表現することができる。

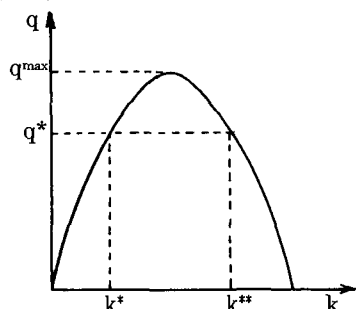


図-5 容量制限を受けるセクションのQ-K曲線

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。いまセクション 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。このセクションの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、セクション i が下流の飽和密度に到達しない。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。

この場合前記の基本モデルによれば、セクション 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、このときにはセクション 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。これによってセクションにフローが貯溜され、渋滞流が形成されていく。ただしセクションの所要時間-密度曲線については、セクションからの実流出量が q^* を越えることはないので、Q-K曲線を $q=q^*$ で頭切りした関数に対応する次の形をとることに留意する必要がある。

$$T_i = \Delta x_i / u_i = \Delta x_i / u_i(k_i)$$

$$(k_i \leq k^* \text{ および } k_i > k^{**} \text{ のとき}) \quad (9)$$

$$T_i = k_i \Delta x_i / q^*$$

$$(k^* < k_i \leq k^{**} \text{ のとき}) \quad (10)$$

5. おわりに

連続流体モデルによる混雑した交通流の動的シミュレーションモデルについて述べた。本モデルは、ロジックが簡単であること、実現象に即していること、計算がネットワーク中で並列的に進められることなどの利点を有しており、実用性と合理性を兼ね備えている。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。

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、日産自動車株式会社, pp. 46-49, 1991.
- 4) 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.
- 5) 森津秀夫他: 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.
- 6) Lenard, D. R. et al.: CONTRAM—a traffic assignment model for predicting flows and queues during peak period, TRRL Report LR841, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorn, 1978.
- 7) Hall, M. D. et al.: A simulation assignment model for the evaluation of traffic management schemes, Traffic Eng. & Control, Vol. 21, No. 4, pp. 168-176, 1980.
- 8) 尾崎晴男: 街路網信号制御の評価シミュレーションモデル(DESC)、交通工学, Vol. 24, No. 6, pp. 31-37, 1989.
- 9) 上田攻他: 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) 飯田恭敬他: 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.
- 11) 飯田恭敬他: 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.
- 12) S. Fujii et al.: Dynamic traffic simulation to evaluate Vehicle navigation systems, 1994 Vehicle Navigation & Information Systems Conference Proceedings, B2-4, pp. 239-244, 1994.
- 13) 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.
- 14) 巻上安爾他: 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.