

交通シミュレーションモデル開発の系譜

赤 羽 弘 和*
大 口 敬**
小 根 山 裕 之***

1. はじめに

日本において、最初にオンラインシステムへの実装を前提として検討されたネットワーク交通シミュレーションモデルは、1970年に首都高速道路における交通状況予測のために提案されたものである。その後、適用対象ネットワークの種類や利用目的、ハードウェア・ソフトウェア技術の進展などに応じて、モデルの基本ロジックは改良・高度化された。本稿は、モデルの基本ロジックを中心に、こうしたモデル開発の変遷経緯を振り返り、これからの交通シミュレーションの課題と将来を志向する端緒を提供することを目指している。なお本稿は、2002年8月開催の交通シミュレーション国際シンポジウム(International Symposium on Transport Simulation)にて著者らが発表したもの¹⁾を抄訳し、一部加筆修正したものである。

表-1には、著者らが直接・間接に関連しているモデル開発の系譜を示す。前述のように、首都高速道路の交通管制システムにおいて、交通状況のオンライン短期予測用にブロック密度法(Block Density Method, BDM)とインプット・アウトプット法(Input Output Method, IOM)とが比較検討されたことが、交通シミュレーションモデル開発の直接の起点である。

2. BDM と IOM の比較

2.1 交通シミュレーションモデル開発の目的

1970年に交通工学研究会において、都市高速道路(首都高速道路)における交通渋滞の発生や渋滞車列の伸縮などの非定常な交通状況の短期的将来の予測、あるいは新たな交通管制手段の効果などを予測するために、交通シミュレーションの開発が初めて検討された²⁾。

* 千葉工業大学工学部教授

** 東京都立大学大学院工学研究科助教授

*** 東京大学生産技術研究所助手

表-1 シミュレーションモデル開発の系譜

Year	AVENUE (for streets)	SOUND (for motorways)	Input Output Method (for motorways)
1970	Block Density Method(BDM)		Input Output Method (IOM)
1989	DESC ⁶⁾ (Simplified-BDM)		
1993	AVENUE ¹⁷⁾ (Hybrid-BDM)	BDM with route choice model ¹⁶⁾	
1995		SOUND ¹⁹⁾ (Packet & Density-Speed Relationship)	
1996	AVENUE Ver. 2 ¹⁸⁾ (+Multi-Scanning)	SOUND ²⁰⁾ (+Point Queue: for streets)	
2001	AVENUE Ver. 3 (Commercial Package)	SOUND/A-21 SOUND/Express	

このとき、ブロック密度法(BDM)とインプット・アウトプット法(IOM)とが検討され、試験的にコーディングされた。この試作プログラムが、当時の計算機(富士通 FACOM270-30)を用いて動作確認され、計算機の計算速度、メモリ使用量などが検討されている。

2.2 BDM の基本的な考え方

BDM において道路ネットワークはリンクとノードで表現され、各リンクは幾つかのブロックに細分割される。1回の計算ステップ(スキャン時間 dt)で車両がブロックを飛び越えないように制御するため、自由速度を V_f として、ブロック長 dL は少なくとも $V_f dt$ 以上である必要がある。一方、ブロック長 dL が $V_f dt$ よりも長いと、1スキャン時間の中で自由速度の流れがブロックの途中までしか到達できず、ブロック内の交通状態が不均一になる。そこで、 dL を $V_f dt$ と等しく設定する点が、BDM の重要な基本的特徴である。

ネットワーク上の各リンク長は、ブロック長 dL の

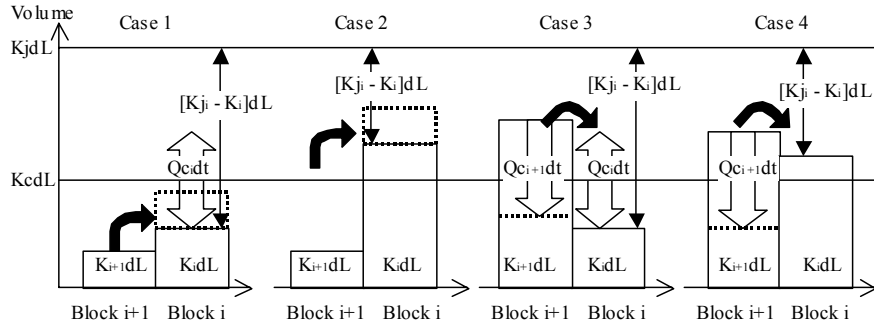


図-1 BDM におけるブロック存在交通量と移動量の関係

倍数でなければならないので、 dL は全リンク長の公約数となる。 dL が長いほうがブロック数は少なく、スキャン時間 dt も長くなって、計算時間は節約できる。

あらかじめ、各ブロック i の交通流率 Q_i と交通密度 K_i の関係(Q-K 関係)が、次式で与えられる。

$$Q_i = f_i(K_i) \quad (1)$$

1970 年当時は、次式の 2 次曲線が用いられた。

$$f_i(K_i) = Q_{Ci} - Q_{Ci}((K_{Ci} - 2K_i)/K_{Ci})^2 \quad (2)$$

また、次式のように自由流領域における速度を一定とし、臨界密度で折れ曲がる 2 直線もよく用いられる。

$$f_i(K_i) = V_f K_i \quad (K_i < K_{Ci} \text{ の場合})$$

$$f_i(K_i) = Q_{Ci} (K_{Ci} - K_i) / (K_{Ci} - K_{Ci}) \quad (K_i \geq K_{Ci} \text{ の場合})$$

(3)

ここで、 Q_{Ci} は臨界交通流率(最大交通流率)、 K_{Ci} は臨界密度であり、これらはパラメータとして与えられる。

BDM では、スキャン毎に Q-K 関係を用いてブロックの交通密度に対応する交通流率を算出し、これに基づいて隣接するブロック間において交通量を移動させる。その基本的なロジックは式(4)のとおりである³⁾。

図-1 は、このロジックを模式的に示す。

$$A_{i+1,i}(t) = Q_{i+1,i}(t) dt$$

1) ブロック $i+1$ と i が共に自由流の場合

$$[K_{i+1}(t) < K_{Ci+1}, K_i(t) < K_{Ci}]$$

$$A_{i+1,i}(t) = \min\{f_{i+1}(K_{i+1}(t))dt, Q_{Ci}dt, [K_{Ci} - K_i(t)]dL\}$$

2) ブロック $i+1$ が自由流、 i が渋滞流の場合

$$[K_{i+1}(t) < K_{Ci+1}, K_i(t) > K_{Ci}]$$

$$A_{i+1,i}(t) = \min\{f_{i+1}(K_{i+1}(t))dt, f_i(K_i(t))dt, [K_{Ci} - K_i(t)]dL\}$$

3) ブロック $i+1$ が渋滞流、 i が自由流の場合

$$[K_{i+1}(t) > K_{Ci+1}, K_i(t) < K_{Ci}]$$

$$A_{i+1,i}(t) = \min\{Q_{Ci+1}dt, Q_{Ci}dt, [K_{Ci} - K_i(t)]dL\}$$

4) ブロック $i+1$ と i が共に渋滞流の場合

$$[K_{i+1}(t) > K_{Ci+1}, K_i(t) > K_{Ci}]$$

$$A_{i+1,i}(t) = \min\{Q_{Ci+1}dt, f_i(K_i(t))dt, [K_{Ci} - K_i(t)]dL\}$$

(4)

ここで、Q-K 関係が式(3)で表現される場合は、自由流において $f(K(t))dt = V_f K dt = K dL$ が常に成立するので、上流側ブロックから流出できる最大の交通量は上流ブロックに存在する車両数に一致する。

式(4)を用いてブロック間移動交通量が計算されると、1 スキャン後($t+dt$)の各ブロックの交通密度 $K_i(t+dt)$ は、次式(車両数保存則)に基づき計算される。

$$K_i(t+dt) = K_i(t) + (A_{i+1,i}(t) - A_{i,i+1}(t))/dL \quad (5)$$

ここでブロックの番号を交通の流れとは逆に下流側から上流側へ順番をつけているのは、合流部における計算上の便宜のためである。ただし、BDM の特徴の一つは、ブロックの交通密度の更新順序によらず、計算結果が一意に決まることである(このことは、基本的なロジックが BDM と同じ Cell Transmission Model を提案した Daganzo により証明されている⁴⁾)。なお、この 1970 年に開発された最初の BDM では、分流出点ではあらかじめ規定された分流比率が適用されており、経路選択機能は内包されていない。

2.3 IOM の基本的な考え方

IOM では、道路ネットワークをリンクとノードで表現し、基本的な Point-Queue モデルに基づいて、各ノードに接続された上流側リンクと下流側リンクとの間で交通量を受け渡す方法が記述される²⁾。

スキャン時間を dt とし、ノード k における交通容量(最大交通流率)を Q_{Ck} とすると、ノード k の流入交通量(交通需要) $Y_k(t)$ 、流出交通量(実際の交通量) $O_k(t)$ 、およびノード k における待ち行列台数 $W_k(t)$ は、次式で

与えられる．

$$\begin{aligned} O_k(t) &= I_k(t) \\ W_k(t) &= 0 & (I_k(t) \leq Q_{C_k} dt \text{ の場合}) \\ O_k(t) &= Q_{C_k} dt \\ W_k(t) &= I_k(t) - O_k(t) & (I_k(t) > Q_{C_k} dt \text{ の場合}) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)はPoint-Queueモデルの基本的な考え方である．ノードへの流入交通量(交通需要)が交通容量を越えない範囲では，そのまま流出交通量(すなわち実際の交通量(通過台数))となる．流入交通量が交通容量を越える場合には，流出交通量は交通容量と等しくなり，交通容量を超過した部分が待ち行列台数となる．

ノード k に 1 つのリンクを介して上流側に隣接するノードを $k+1$ とする．ノード $k+1$ から k までのリンク $i_{k+1,k}$ (リンク長を $L_{k+1,k}$ とする)の旅行時間を $T_{k+1,k}$ とし，これは別途外生的に与えられているとすると， $O_k(t)$ と $I_k(t)$ の関係は次のようになる．

$$I_k(t) = O_{k+1}(t - T_{k+1,k}) \quad (7)$$

式(6)，(7)により，上流側から下流側へ逐次計算を繰り返して(上流演算)， $I_k(t)$ と $O_k(t)$ を求める．しかしあるノード k における待ち行列が累積して上流側に接続するノード $k+1$ まで延伸する場合は，この計算だけでは正しい解が得られない．そこで下流側から上流側へ $I_k(t)$ と $O_k(t)$ を修正する計算(下流演算)を行う．

リンク $i_{k+1,k}$ の Q-K 関係は式(1)で与えられるものとし，ノード $k+1$ の流出率($O_{k+1}(t)$ の時間微分)に対応する交通密度は一般に 2 つ存在する(これを $K_{k+1,1}$ ， $K_{k+1,2}$ ($K_{k+1,1} \leq K_{k+1,2}$)とする)．このときリンク $i_{k+1,k}$ に滞留可能な最大台数 $N_{k+1,k}$ は，次式で与えられる．

$$N_{k+1,k} = (K_{k+1,2} - K_{k+1,1}) L_{k+1,k} \quad (8)$$

上流演算によって求められた $W_k(t)$ が，リンク $i_{k+1,k}$ に滞留可能な最大台数 $N_{k+1,k}$ を超過する場合(この超過量を $E_{k+1}(t)$ とする)においてのみ，式(9)，(10)のような修正計算を行って(下流演算)，交通流状態を確定する．

$$\begin{aligned} E_{k+1}(t) &= W_k(t) - N_{k+1,k} \\ O_{k+1}(t - T_{k+1,k}) &= O_{k+1}(t - T_{k+1,k}) - E_{k+1}(t) \\ W_k(t) &= W_k(t) - E_{k+1}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_{k+1}(t - T_{k+1,k}) &= O_{k+1}(t - T_{k+1,k}) \\ W_{k+1}(t - T_{k+1,k}) &= W_{k+1}(t - T_{k+1,k}) + E_{k+1}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

IOM は，スキャン時間 dt を任意に設定でき，必要な時間分解能の範囲であれば，比較的長いスキャン時間でも動作可能である．また，BDM のようにリンクを複数のブロックに分割する必要はない．なお，分流点では OD 交通量に基づく分流比率により $O_k(t)$ が決められ，BDM 同様経路選択は内包されていない²⁾．

2.4 首都高速道路の交通管制システムへの適用

首都高速道路では分合流点が近接しているため，BDM におけるブロック長 dL は最大で 100m 程度となり，ブロックの平均旅行速度を 60km/h 程度と仮定して，スキャン時間 dt は 6 秒とされた．一方，IOM ではスキャン時間 dt にこのような制約はなく，交通状況予測に必要な時間解像度に基づき dt は 2 分とされた．

BDM と IOM は，当時の計算機能力において首都高速道路の交通状況をオンライン・リアルタイムで再現することを重視して開発された．そのため，両手法間で必要なメモリ容量，計算時間等が比較評価された結果，IOM を基本とした手法が採用された．ちなみに，当時の当該管制システムのコンピュータは TOSBAC 7000-25，メインメモリ容量 130KByte，2 次メモリ容量 1,536KByte，クロック周波数 1MHz の性能であった⁵⁾．

3. IOM の時代

3.1 フローレートベクトルの導入

IOM の基本ロジックでは，スキャン時間 dt 毎に需要交通量の設定及び容量超過の判定が行われるが，スキャン時間 dt が大きいと，その間の需要変動によらず一定量を流すことになるため，実態と乖離することがある．そこで，下流演算の修正計算に適用する目的でフローレートベクトル⁶⁾が考案された．この手法では， dt を n 分割して dt/n 時間における交通量の変化がベクトル表現される．このベクトルを用いて，需要交通量を表したものを需要フローレートベクトル，通過台数を表したものを通過フローレートベクトルとよぶ．

フローレートベクトルの各要素は， dt/n 時間毎の需要と通過交通量であり，下流演算による地点 k の需要ベクトルの各要素が dt/n 時間単位の交通容量(C_k)を超過するかどうかを判断して修正計算される．その後，時間 dt における需要交通量と通過交通量はこのベクトルの各要素の和として求められる．

フローレートベクトルを用いて交通需要変動を考慮すると，交通量再現精度が向上することが期待された．しかし，検証の結果，あまり大きな精度向上は見られなかった．したがって，複雑な計算を要するこの計算手法は，実際に採用されるには至っていない．

3.2 分流点における過大な交通量の防止

IOM では方向別(目的地別)交通量を保持せず，分流

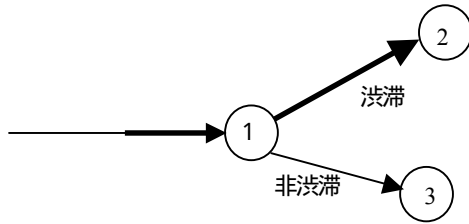


図-2 一方が渋滞している分流部の例

部では別途設定された分流比率が用いられる。分流部における上流演算では流出交通量が分流比率で配分され、下流演算では超過交通量が上流に差し戻される。この上流へ環流された交通量が、どの分流方向から上流に差し戻されたものであるかを考慮せずに次のスキャン時間に処理されると、再び同じ分流比率で配分されてしまう。そのため、分流部下流リンクのうち、一方が渋滞でもう一方が非渋滞の場合には、渋滞方向に配分されるべき交通量の一部分が非渋滞方向にも配分され、非渋滞方向に過大な交通量が流れてしまう。

図-2は、方向別の分流比率を β_{12} 、 β_{13} ($\beta_{12} + \beta_{13} = 1$)とし、リンク12が渋滞、リンク13が非渋滞の場合を表す。時刻 t において、リンク12から捌け残った交通量 $B_2(t)$ が上流へ還流されたとする。次のスキャン時刻 $t+dt$ において、上流演算でノード1の通過交通量 $O_1(t+dt)$ が計算されるが、 $O_1(t+dt)$ は、前のスキャンの上流還流量 $B_2(t)$ と dt の間に通過する交通量 $O'_1(t+dt)$ からなる。

$$O_1(t+dt) = O'_1(t+dt) + B_2(t) \quad (11)$$

方向別の交通量を分流比率で配分すると次式となる。

$$O_{12}(t+dt) = O_1(t+dt) \times \beta_{12} = \{O'_1(t+dt) + B_2(t)\} \beta_{12}$$

$$O_{13}(t+dt) = O_1(t+dt) \times \beta_{13} = \{O'_1(t+dt) + B_2(t)\} \beta_{13} \quad (12)$$

渋滞リンク12の流出交通量が、ノード2の交通容量とリンク12の最大存在可能台数により O'_{12} に制限される場合、下流演算では $B_2(t+dt)$ が上流へ差し戻される。

$$B_2(t+dt) = O_{12}(t+dt) - O'_{12} = \{O'_1(t+dt) + B_2(t)\} \beta_{12} - O'_{12} \quad (13)$$

このとき、ノード1の通過交通量は次式のようになる。

$$\begin{aligned} O_1(t+dt) &= O_1(t+dt) - B_2(t+dt) = O_{13}(t+dt) + O'_{12} \\ &= \{O'_1(t+dt) + B_2(t)\} \beta_{13} + O'_{12} \end{aligned} \quad (14)$$

ここで $B_2(t)$ は、本来リンク12にのみ配分される交通量であるため、正しい方向別通過交通量 $O^*_{12}(t+dt)$ 、 $O^*_{13}(t+dt)$ 、上流への正しい差し戻し交通量 $B^*_{2}(t+dt)$ 、および正しいノード1の通過交通量 $O^*_{1}(t+dt)$ は式(15)により与えられる。

$$O^*_{12}(t+dt) = O'_1(t+dt) \beta_{12} + B_2(t)$$

$$O^*_{13}(t+dt) = O'_1(t+dt) \beta_{13}$$

$$B^*_{2}(t+dt) = O^*_{12}(t+dt) - O'_{12} = O'_1(t+dt) \beta_{12} + B_2(t) - O'_{12}$$

$$O^*_{1}(t+dt) = O^*_{12}(t+dt) - B^*_{2}(t+dt) = O^*_{13}(t+dt) + O'_{12}$$

$$= O'_1(t+dt) \beta_{13} + O'_{12} \quad (15)$$

正しい修正をしない場合は式(14)、正しい場合式(15)よりも、 $O^*_{1}(t+dt)$ が $O^*_{12}(t+dt) - O'_{12} = B_2(t) \beta_{13}$ だけ少なくなる。この場合、渋滞リンクの交通需要が少なくなり、本来よりも渋滞が過小に再現される。そこで、上流へ差し戻される交通量を方向別に保持し、この交通量を次のスキャンにおいて差し戻し元の方向のみに流入させるようにロジックが改良された。その結果、渋滞状況の再現性は大幅に改善された⁷⁾。

3.3 IOMの限界

首都高速道路のネットワーク化が進むと、交通状況に応じて経路選択の余地が拡大し、交通情報提供による渋滞緩和や事故時の迂回交通の効果を、交通シミュレーションを用いて評価する必要性が増大してきた。これを実現するには、交通シミュレーションに経路選択モデルを導入して、交通に目的地を持たせる必要がある。しかし、上流演算と下流演算を交互に行うIOMでは目的地の保持が困難であり、仮に実現できたとしてもアルゴリズムが非常に複雑になる。

IOMでは計算順序によって計算結果が異なるため、計算順序を明確に決めてこれを守る必要がある。そのため、環状道路では「カットポイント」(上・下流の端点)を設ける必要があり、また計算誤差を抑えるには、カットポイントを非渋滞リンクに設ける必要がある。しかし、首都高速道路では環状線のほぼ全体が渋滞することも少なくなく、カットポイントを上記の条件を満たすように固定的に設定することは困難である。

4. BDMの復活

4.1 信号制御の効果評価分析用シミュレーション

1980年代半ばには、信号制御方式の評価を目的としたDESC(Dynamic Evaluator of Signal Control)がBDMに基づいて開発された⁸⁾。これは、街路の交通信号の系統制御化、地域制御化の効果評価を目的として、日本交通管理技術協会において先行的に開発されたシミュレーションモデル^{9), 10)}をシステム化したものである。

BDMの基本ロジックには、障害による交通容量の低下が解消したような場合(式(4)の条件3)の場合に、ブロックサイズが大きいと、衝撃波が上流に伝播するにつれて空間的に分散してしまい、密度の変化が複数

ブロックにわたってなだらかになる問題がある³⁾。DESCでは、この問題を解消するために dt を1秒と短くしている。街路の自由速度を30~50km/h程度と仮定すると、ブロック長 dL は10~15m程度となる。

スキャン時間 dt を短くすると、必要なメモリ容量が増えて計算時間も長くなるので、DESCでは式(4)を簡略化したBDMが採用された。すなわちブロック i の最大収容可能台数を N_i 、受入れ可能最大交通流量を Q_{Ci} 、時刻 t におけるブロックの存在台数を $n_i(t)$ とすると、スキャン時間 dt にブロック i と隣接する上流側ブロック $i+1$ 間の移動交通量 $A_{i+1,i}(t)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} A_{i+1,i}(t) &= \min\{n_{i+1}(t), Q_{C_{i+1}}dt, Q_{C_i}dt, [N_i - n_i(t)]\} \\ &= \min\{K_{i+1}(t)dL, Q_{C_{i+1}}dt, Q_{C_i}dt, [K_j - K_i(t)]dL\} \end{aligned} \quad (16)$$

これは、渋滞流におけるQ-K関係を簡略化しており、簡略化BDM(Simplified Block Density Method, S-BDM)と称することができる。S-BDMでは、渋滞流は全て飽和交通密度(K_j)として扱われるので、例えば単路部ボトルネックを先頭とする交通流現象のように、飽和交通密度よりも低い交通密度の渋滞車列の延伸・縮小は正しく模擬されない。しかし、主に信号交差点ネットワークを対象とする場合は、信号待ち行列は飽和交通密度と考えてよいので、再現精度への影響は小さい。

DESCでは、対向直進車のギャップアクセプタンスによる右折車挙動など、右折車による交差点の交通容量低下現象を模擬できる。また、車両感知器による通過交通量や時間オキュパンシを模擬したり、各車両のランダム性に起因する車群拡散を再現する機能がある。なおQ-K関係には式(3)の線形関係を用いている。

1994年にDaganzoが提案したCell Transmission Model⁴⁾は、基本的にS-BDMと等価である。ただしDaganzoは式(17)における上流側ブロックの最大流量 $Q_{C_i}dt$ の制約条件を考慮していない。またDaganzoは、式(16)の第3項を $N_i - n_i(t) (= [K_j - K_i(t)] dL)$ とおくことが、渋滞待ち行列の上流延伸速度(衝撃波速度)を V_f とすることと等価であることを示し、一般的な待ち行列の延伸速度 $w (< V_f)$ を用いる次式の方法を提案している。

$$\begin{aligned} A_{i+1,i}(t) &= \min\{n_{i+1}(t), Q_{C_{i+1}}dt, a \times [N_i - n_i(t)]\} \\ \text{ここに, } a &= 1 \quad (n_{i+1}(t) \leq Q_{C_{i+1}}(t)dt) \\ a &= w / V_f \quad (n_{i+1}(t) > Q_{C_{i+1}}(t)dt) \end{aligned} \quad (17)$$

4.2 BDMへの経路選択機能の内生化

1970年の最初のBDM開発から20年が経過した1990年代には、首都高速道路ネットワークは飛躍的に

拡充された。その結果、首都高速道路ネットワーク上において交通混雑や旅行時間に応じた利用者の経路選択可能性が高くなり、交通障害時の迂回誘導など交通管制の必要性がますます高まってきた。

当時、経路選択を内包したモデルとしてSATURN¹¹⁾、CONTRAM¹²⁾、DYTAN¹³⁾、Box-Model^{14), 15)}などが既に開発されていたが、これらは主に一般街路を対象としていた。しかし、例えばボトルネックを先頭とする渋滞の延伸が上流側の分合流部を閉塞して交通容量を低下させるような現象を再現するには、交通密度の伝播を忠実に再現する必要があるが、この点において、いずれの既存モデルも不十分であった。

そこで、都市高速道路ネットワークを対象として、経路選択機能を内生化したBDMに基づく交通シミュレーションモデルが開発された¹⁶⁾。このモデルの基本ロジックは当初のBDMの基本ロジック(式(4))と等しく、渋滞列の伸縮など密度変化の伝播が正確に模擬できる。また、経路選択機能を内生化するため、個別の車両に目的地情報を持たせて、ブロック内の交通密度は目的地別に管理される仕組みになっている。

$$K_i(t) = \sum_s K_{is}(t) \quad (18)$$

ここに、 s は目的地であり、 $K_{is}(t)$ はブロック i 内で目的地 s を持つ交通の時刻 t における交通密度である。このようにブロック内の交通に目的地のラベル s を持たせることで交通を経路別に割振ることが可能となる。

一定時間 DT (DT は dt の倍数とする)毎に、交通シミュレーションから出力されるリンクの旅行時間を用いて各ODペアの最短経路が探索される。それに基づいて、分流点直近上流のブロック(分流ブロック)における目的地別の進行方向が更新される。

4.3 AVENUEの開発

AVENUE(an Advanced & Visual Evaluator for road Networks in Urban arEas)^{17), 18)}は、交差点改良や信号制御方式の評価だけでなく、交通規制、経路誘導、駐車場整備といった、地区レベルに適用されるさまざまな交通運用策の評価も可能とするように開発された。

AVENUEでは、道路工事や路上駐車のような単路部のボトルネックも扱うことができるように、BDMを簡略化せずに基本ロジック(式(4))を用いる。AVENUEの開発にあたって、車両移動に追従挙動モデルではなくBDMが採用されたのは、次のような理由による。第1に、一般に追従挙動に関するパラメータを観測し

て値を設定することは困難であり、また交通容量との関係を明示的に扱うことができない。第2に、交通密度が低い状態では、追従挙動モデルで表現できない単独走行車両が多数存在する。第3に、交通シミュレーション性能の主な評価指標である遅れ時間を厳密に扱うためには、交通容量を再現することが重要である。第4に、ボトルネック交通容量を観測することは追従挙動パラメータを観測するよりは比較的容易である。

AVENUE のスキャン時間は1秒、Q-K 関係は式(3)の線形関係を用いる。経路選択行動や車線変更などの運転挙動をモデル化するために、目的地や車種などを持つ離散車両を直接扱う。リンクを車線毎にも分割したブロックをカスケード状に相互に接続し、同一車線上の直進方向のみならず、車線変更方向についてもBDM に基づく流量計算が適用される。各ブロックに交差点進行方向や車種などに対する流入規制を設けることにより、右左折専用車線やバスレーンなどの車線運用が表現できる。この AVENUE で採用された BDM を Hybrid Block Density Method(H-BDM)と称する。

また、交差点から十分に上流の区間においては、ショックウェーブの伝播を厳密に再現する必要がないため、計算コストを節約するためにブロック長 dL を固定値とせず、長いブロック長を混在可能とする Multi-scan Hybrid Block Density Method(MSH-BDM)という手法が開発された¹⁸⁾。

AVENUE はオブジェクト指向で開発され、信号制御機能や車両感知器機能など新機能の追加などが容易である。BDM だけでは交通現象を十分に再現できない織込み区間などでは、必要に応じて離散的な個別車両挙動モデルを適用できる。また経路を固定されているバスと確率的に経路を選択する車両を混在させて、複数の経路選択モデルを適用することも可能である。

5. BDM とは異なる道の開拓

5.1 BDM の試練

BDM に経路選択機能を内生化する場合は、目的地ラベル s 別に各ブロック内の交通密度を管理する必要がある¹⁶⁾。そのため、ネットワークが大きくなるとブロック数と目的地の数が飛躍的に多くなり、計算時間とメモリ容量上問題がある。例えば、スキャン時間を3秒、自由流速度を60km/h とすると、ブロック長は $60/3.6[m/s] \times 3[sec] = 50m$ となる。1車線道路の1kmのリンクにはブロックが $1000/50 = 20$ 個存在し、仮に

目的地を100個とすると、目的地別ブロック数は $20 \times 100 = 2,000$ 個となる。一方、リンクの飽和密度を160台/km とすると、リンク1kmに存在できる車両台数は高々160台である。つまり目的地別ブロックは160個あれば十分であり、残る1,800個余は無駄なブロックとなる。したがって、大規模ネットワークシミュレーションにBDMを適用することは合理的でなく、新たな車両移動ロジックの開発が必要となった。

5.2 Q-K 関係に基づく車両移動ロジックの開発

吉井ら¹⁹⁾は、首都高速道路を対象に、Q-K 関係に基づいて車両を移動させる新たなネットワークシミュレーション SOUND (Simulation On Urban road Network with Dynamic route guidance)を開発した。SOUND では、リンク毎に交通量(Q)と交通密度(K)の関係(Q-K 関係)を設定して車両を移動させる。また計算速度やメモリの節約のため、車両を何台かで一つの塊にまとめたパケットにして扱うことができる。

高速道路を対象とした SOUND の基本的な車両移動ロジックは次の通りである。図-3は、時刻 t に2台の車両 A, B が存在し、時刻 $t+dt$ の計算処理において下流側の車両 A の移動が完了した状況を示す。 dt の間に車両 B が移動する距離を L 、時刻 $t+dt$ における車頭距離を S とする。車両 B の速度 L/dt と S から、交通密度 K と交通量 Q とを換算し、 L, S がこのリンクの Q-K 関係を満たすように車両 B を移動させる。

すなわち、前もって決められた Q-K 関係を $Q=f(K)$ とおくと、 $S=1/K$ 、 $Q=KV$ であることから、次式により速度と車頭距離の関係(S-V 関係)が得られる。

$$V = S \times f(1/S) \quad (19)$$

ここで、 $L = V dt$ より次式が導かれる。

$$f(1/S) \times S = L / dt \quad (20)$$

$S+L$ は、前方車 A が移動された時点で定まるため、式(20)を用いて L, S の値を決定することができる。

合流部で渋滞していない場合には、上流側の2つの

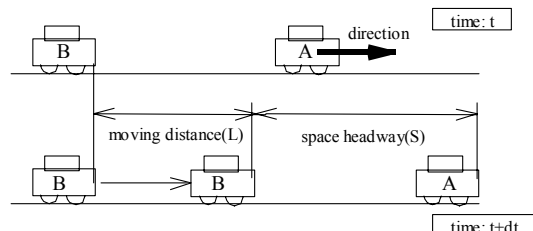


図-3 高速道路版 SOUND の車両移動ロジック

リンクから流入する交通は、互いに相手側のリンクから流入する交通の影響は考慮しなくてよい。一方、合流リンクのうち片方が両方が渋滞している場合、渋滞しているリンクの合流比は、あらかじめ設定された合流比を下まわらないように決められる。また分流部では、経路選択モデルから分流ノード毎に分流比が計算され、これにもとづいて分流する。

SOUND では、目的地や経路選択特性(例えば常に最新の旅行時間情報にもとづいて経路選択を行う経路選択層と、あらかじめ設定された経路を走行する経路固定層など)などの車両の属性を各車両に持たせることができ、交通情報提供効果の評価に有効である。

6. BDM と IOM の結合

6.1 街路版 SOUND の開発経緯

近年、東京都市圏を対象とするロードプライシングの評価、都市高速道路の乗り継ぎ制、事故発生時における一般街路も含めた経路選択行動の把握など、都市高速道路と一般街路の一体的取り扱いや広域街路ネットワークを対象とするシミュレーションの必要性が高まっている。そこで、高速道路版 SOUND(現在は SOUND/Express と称する)の車両移動ロジックを修正した街路版 SOUND²⁰⁾が開発された。

都市高速道路の渋滞現象を正確に再現するためには密度の伝播を正確に再現する必要があるが、街路における主なボトルネックは信号交差点であり、信号待ち行列は飽和密度の車列とみなすことができるので、密度の伝搬をあまり厳密に再現する必要はない。そこで計算量と必要メモリ量を軽減するために、街路版 SOUND における車両移動には、IOM で用いられていた Point-Queue モデルが再び採用された。このように、高速道路を対象とする場合と街路を対象とする場合で車両移動ロジックを使い分けたことで、広域ネットワークを扱う際の計算負荷を軽減することができる。

6.2 Point-Queue モデルによる車両移動ロジック

リンクに存在する車両またはパケット(車両を一定数まとめたもの)は、リンク内走行車両群と流出可能車両群に分けられる。図4にこれを示す。リンク内走行車両群のパケットは、FIFO(First In First Out)原則に従い、リンクに流入した順にリンクから流出する。各パケットは、リンクに流入後自由走行時のリンク所要時間(自由旅行時間)だけ経過後、流出可能車両群に移される。

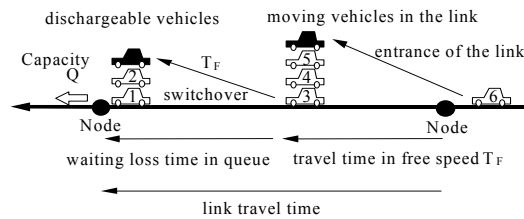


図-4 街路版 SOUND の移動ロジック

流出可能車両群は交差点待ち行列を表しており、交差点の交通容量に基づいて、次のリンクへパケットを受け渡す。なお右左折専用車線がある場合は、直進方向が詰まっても、FIFOによらずに右左折車両を右左折車線相当分だけ移動させる処理を行う。当初の街路版 SOUND²¹⁾では、信号制御ロジックとこれを考慮した車両移動モデルは用いずに、各進行方向別に(飽和交通流率)×(方向別スプリット)相当を交通容量として与えることで計算負荷の軽減を行っている。

その後、さらに進化した街路版 SOUND/A-21 は、信号制御モデルも組み込まれ、非飽和時に信号制御により生じる遅れ時間も考慮してリンク旅行時間を扱うことができる。街路版 SOUND/A-21 は、東京 23 区に対する交通需要の時間分散効果の評価に用いられた²¹⁾。現在、街路版を Point-Queue モデルから Physical-Queue モデルに改良し、街路網における交通渋滞の影響範囲を正確に再現することが試みられている。

7. まとめ

2002 年 6 月より改正道路交通法が施行され、道路交通情報の収集、編集、加工、提供が自由化された。これにより、交通状況予測の実用面での重要性はさらに高まり、交通シミュレーションは研究段階から、実用段階に展開しつつある。交通工学研究会では、クリアリングハウス(<http://www.jste.or.jp/sim/>)において、実用化に向けた普及活動を行っており、モデルの再現性の基本検証(verification)プロセス²²⁾や実用検証(validation)用データセット²³⁾などを公開している。また、実用的な経路選択モデルの開発やパラメータ設定、OD 需要交通量など入力データの作成、排出ガス量など出力データの推定・評価、といった周辺技術の開発もますます加速されつつある。さらに、ITS 技術やインターネット等の汎用技術、特に利用者との双方向コミュニケーションを活かした所要時間情報の収集などは、交通状況予測において非常に重要な意味を持つ。

本稿では、こうした状況に鑑み、交通シミュレーションモデルに対するニーズや計算機性能の変遷との関係において、筆者らが関連したモデルの発展過程の整理を試みた。これが、交通シミュレーションの将来を見定めるためのひとつの参考になれば幸いである。

最後に、本稿の作成にあたり、片倉正彦東京都立大学教授、桑原雅夫東京大学教授、堀口良太(株)アイ・トランスポート・ラボ代表取締役役に多大なる助言を頂いたことをここに記し、深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) H.Akahane, T.Oguchi and H.Oneyama: Saga of Traffic Simulation Models in Japan, Proceedings of the International Symposium on Transport Simulation, pp.201-220, 2002.8.
- 2) 交通工学研究会: 交通管制における交通状況予測手法に関する研究, 1971.3.
- 3) 桑原雅夫, 吉井稔雄, 堀口良太: ブロック密度法を用いた交通流の表現方法について, 交通工学, Vol.32, No.4, pp.39-44, 1997.7.
- 4) C. F. Daganzo: The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory, Transportation Research B, Vol.28B, No.4, pp.269-287, 1994.
- 5) 首都高速道路公団: 交通管制の概要, 首都高速道路の管制システム, pp.14-28, 1977.
- 6) 交通工学研究会: 昭和 58 年度首都高速道路の将来管制システムに関する研究(その 3), 首都高速道路公団, 1984.3.
- 7) 交通工学研究会: 平成 7 年度将来管制システムに関する研究, 首都高速道路公団, 1996.2.
- 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, 1989.11.
- 9) 日本交通管理技術協会: 交通安全施設の投資効果に関する調査研究, 1986.3.
- 10) 向井伸治, 片倉正彦, 桜田陽一: シミュレーションによる交通信号制御の効果評価分析, 土木計画学研究・講演集, No.9, pp.495-502, 1986.10.
- 11) D. Van Vliet and M. D. Hall: SATURN 8,3-A User's Manual-Universal Version, Institute of Transport Studies, University of Leeds, 1991.
- 12) D. R. Leonard, P. Gower, and N. B.Taylor: CONTRAM: Structure of the Model, TRRL Research Report RR178, 1989.
- 13) 木戸伴雄, 池之上慶一郎, 齋藤威: 街路網における経路探索・交通配分モデル(DYTAN-I), 科学警察研究所報告交通編, Vol.19, No.1, 1978.2.
- 14) 飯田恭敬, 内田敬, 藤井聡, 鷹尾和享: 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), pp.301-308, 1991.
- 15) 飯田恭敬, 藤井聡, 内田敬: 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, 土木学会論文集, No.536/4-31, pp.37-47, 1996.
- 16) 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, 1993.7.
- 17) 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 - AVENUE - の開発, 交通工学研究発表会論文集, No.13, pp.33-36, 1993.11.
- 18) R. Horiguchi, M. Kuwahara, H. Akahane, H. Ozaki: A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management 'AVENUE Ver.2', Proceedings of 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems, ITS America, 1996.1.
- 19) 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, 1995.
- 20) 岡村寛明, 桑原雅夫, 吉井稔雄, 西川功: 一般街路網シミュレーションモデルの開発と検証, 交通工学研究発表会論文報告集, No.16, pp.93-96, 1996.11.
- 21) 小根山裕之, 井料隆雅, 桑原雅夫: 東京 23 区を対象とした需要の時間分散施策の効果評価, 土木計画学研究・講演集, CD-ROM, 2001.11.
- 22) R. Horiguchi, M. Kuwahara and T. Yoshii: A Manual of Verification Process for Road Network Simulation Models - an Examination in Japan, Proceedings of 7th World Congress on Intelligent Transportation Systems, ERTICO, Turin, 2001.
- 23) 花房比佐友, 吉井稔雄, 堀口良太, 赤羽弘和, 片倉正彦, 桑原雅夫, 尾崎晴男, 大口敬, 西川功: 交通シミュレーション再現性検証用データセットの構築, 土木学会論文集, No.688/IV-53, pp.115-123, 2001.