

交通シミュレーションモデル開発の変遷経緯

赤 羽 弘 和*
大 口 敬**
小 根 山 裕 之***

1. はじめに

日本において、最初に具体的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、1971年に首都高速道路における交通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。本稿では、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)において著者らが発表したものを抄訳したものである。

表-1には、著者らが直接的・間接的に開発や適用に関わるモデルの開発経緯を示す。首都高速道路の交通管制システムにおいて、オンライン交通状況の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。本稿では、以下でこれらのモデルの発展過程を説明する。

2. BDM と IOM の対決

2.1 シミュレーション開発の目的

1971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近未来の予測、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¹⁾。

* 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発展の経緯

| Year | AVENUE (for streets) | SOUND (for motorways) | Input Output Method (for motorways) |
|------|---|---|--|
| 1970 | Block Density Method(BDM) | | Input Output Method (IOM) |
| 1989 | DESC ⁷⁾ (Simplified-BDM) | | |
| 1993 | AVENUE ¹¹⁾ (Hybrid-BDM) | SOUND ¹⁰⁾ (BDM) | |
| 1995 | | SOUND ¹⁹⁾ (Packet & Density-Speed Relationship) | |
| 1996 | AVENUE Ver. 2 ¹²⁾ (+Multi-Scanning) | SOUND ²⁰⁾ (+Point Queue: for streets) | |
| 2001 | AVENUE Ver. 3 (Commercial Package) | SOUND/P (with built-in engine SOUND/A-21) | |

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、FORTRANにより試験的にプログラム・コーディングされた。この試作プログラムを、当時の計算機(富士通 FACOM270-30)を用いてアルゴリズムの確認が行われ、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、各リンクはさらに細かい幾つかのブロックに分割される。1回の計算ステップ(スキャン時間 dt)でブロックを飛び越えて車両が流出しないよう、自由速度を V_f として、ブロック長 dL は少なくとも $V_f dt$ 以上の長さが必要である。一方、 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、ブロックの状態を一意に表すことができない。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。

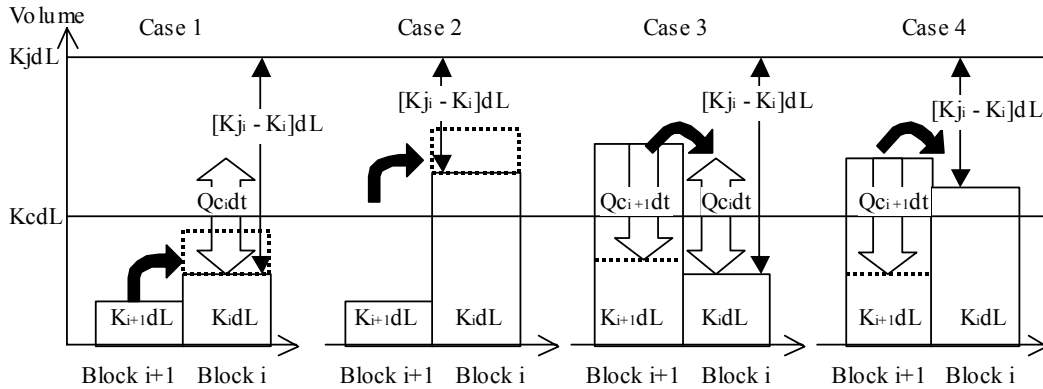


図-1 BDM におけるブロック存在交通量と移動量の関係

ネットワーク上の各リンク長は、 dL の倍数で表現される必要があるため、 dL は全リンク長の公約数でなければならない。 dL が長いほうがブロック数は少なく、 dt も長くなるために計算時間は節約できる。

まず各ブロック i に交通流率 Q_i と交通密度 K_i の関係 (Q-K 関係) があらかじめ与えられる。

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

1971 年当時のモデルでは、2 次曲線が用いられた。

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

また、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 つの直線もよく用いられている。

$$f_i(K_i) = V_f K_i \quad (K < K_c \text{ の場合})$$

$$f_i(K_i) = Q_{c_i} (K_j - K_i) / (K_j - K_{c_i}) \quad (\text{その他の場合})$$

(3)

ここで、 Q_{c_i} は臨界交通流率(最大交通流率)、 K_{c_i} 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の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²⁾ 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

$$[K_{i+1}(t) \leq K_{c_{i+1}}, K_i(t) \leq K_{c_i}]$$

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

2) ブロック $i+1$ が自由流、 i が渋滞流の場合

$$[K_{i+1}(t) \leq K_{c_{i+1}}, K_i(t) > K_{c_i}]$$

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

3) ブロック $i+1$ が渋滞流、 i が自由流の場合

$$[K_{i+1}(t) > K_{c_{i+1}}, K_i(t) \leq K_{c_i}]$$

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

4) ブロック $i+1$ と i が共に渋滞流の場合

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

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

(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交通量に一致する。

式(4)を用いてブロック間移動交通量が計算されると、 Δ スキャン後 ($t+dt$) の各ブロックの交通密度 $K_i(t+dt)$ は、連続の式(交通量の保存則)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下流側から上流側へ交通の流れとは逆に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が、BDM の特徴の一つは、ブロックの交通密度の更新計算を行う計算順番によらず、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³⁾)。なお、この 1971 年に開発された最初の BDM では、分流点ではあらかじめ計算された分流比率により分流させており、経路選択は考慮していない。

2.3 IOM の基本的な考え方

IOM では、道路ネットワークはリンクとノードで表現され、交通量を各ノードに接続される上流側リンクと下流側リンクとの間で受け渡す方法が定められる¹⁾。

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_{C_k} とすると、ノード k へ流入する交通量 $I_k(t)$ とノード k から流出する交通量 $O_k(t)$ 、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。ノードへの流入交通量が交通容量を越えなければ流出交通量に一致して待ち行列は発生しないが、交通容量を越える場合は、流出交通量は交通容量に一致し、超過分が待ち行列台数となる。

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

ノード k に 1 つのリンクを介して隣接する上流側のノードを $k+1$ とする。ノード $k+1$ から k までのリンク旅行時間を $T_{k+1,k}$ 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。

ノード k とこれに隣接する上流側ノード $k+1$ を結びリンクを $i_{k+1,k}$ とし、リンク $i_{k+1,k}$ の Q-K 関係は BDM と同様に式(1)で与える。ノード $k+1$ の流出率率($O_{k+1}(t)$ の時間微分)に対応する交通密度は、一般には 2 つ存在し、これを $K_{k+1,1}$ 、 $K_{k+1,2}$ ($K_{k+1,1}$ 、 $K_{k+1,2}$) とする。このときリンク $i_{k+1,k}$ に滞留できる最大待ち行列台数 $N_{k+1,k}$ は、リンク $i_{k+1,k}$ のリンク長を $L_{k+1,k}$ として次式で与えられる。

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

上流演算による $W_k(t)$ が、リンク $i_{k+1,k}$ 上の $N_{k+1,k}$ を超過する場合(この超過量を $E_{k+1}(t)$ とする)、下流演算として次式のような修正計算を行う。

$$\begin{aligned} E_{k+1}(t) &= W_k(t) - N_{k+1,k} \\ O_{k+1}(t - T_{k+1,k}) &= O_{k+1}(t - T_{k+1,k}) - E_{k+1}(t) \\ W_k(t) &= W_k(t) - E_{k+1}(t) && (W_k(t) > N_{k+1,k} \text{ の場合}) \\ O_{k+1}(t - T_{k+1,k}), W_k(t) &\text{ は未修正 } && (W_k(t) > N_{k+1,k} \text{ の場合}) \end{aligned} \quad (9)$$

この $O_{k+1}(t)$ に応じて、 $I_{k+1}(t - T_{k+1,k})$ と $W_{k+1}(t - T_{k+1,k})$ は次式のように修正され、交通流状態が確定する。

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

IOM では、スキャン時間 dt は任意であり、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構わず、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 同様経路選択は考慮されていない¹⁾。

2.4 首都高速道路の交通管制への応用

首都高速道路では分合流点付近に近接しているため、BDM におけるブロック長 dL は最大でも 100m 程度となり、ブロックの平均旅行速度を 60km/h 程度として、スキャン時間 dt は 6 秒とされた。一方、IOM では dt にこのような制約はなく、交通状況の変動を予測したい時間解像度として dt は 2 分に設定された。

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が、BDM ではメモリ消費量の多さと計算速度に問題があり、IOM を基本とした手法が結局採用された。ちなみに当時の管制システムのコンピュータは、TOSBAC 7000-25、メインメモリ 130KByte、サブメモリ 1,536KByte、クロック周波数 1MHz という性能であった⁴⁾。

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 が大きい場合、その間は需要変化によらず一定量を流すことになるため、実態と合わないことがある。そこで、下流演算の修正計算時にフローレートベクトル⁵⁾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をベクトル表現する。需要交通量をこのベクトルで表したものを需要フローレートベクトル、通過交通量をこのベクトルで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する。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が、検証の結果、あまり大きな精度向上は見られな

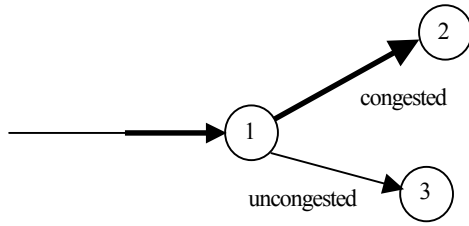


図-2 一方が渋滞している分流部の例

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 分流部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、分流部ではあらかじめ設定された分流比率が用いられる。分流部では上流演算で流出交通量を分流比率で配分し、下流演算で超過交通量を上流へ戻す。上流へ戻された交通量を次のスキャン時間に処理するとき、これがどの分流方向から上流へ戻されたものであるかを考慮しないと、再び同じ分流比率を用いて配分されてしまう。そのため、分流部下流リンクの一方が渋滞で、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の一部が、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 における演算において、リンク 12 から捌け残り交通量 $B_2(t)$ が上流へ戻された場合を考える。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、 $O_1(t+dt)$ は前のスキャンのバックアップ量と $t+dt$ に通過する量 $O_1(t+dt)$ に分けることができる。

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

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 の通過交通量がノード 2 の交通容量とリンク 12 の最大存在可能台数によって O'_{12} に制限された場合、下流演算では交通量 $B_2(t+dt)$ が上流へ戻される。

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

このとき、ノード 1 の通過交通量は次式のようになる。

$$O_1(t+dt) = O_1(t+dt) - B_2(t+dt) = O_{13}(t+dt) + O'_{12}$$

$$= \{O'_1(t+dt) + B_2(t)\} \beta_{13} + O'_{12} \quad (14)$$

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 $O^*_{12}(t+dt)$ 、 $O^*_{13}(t+dt)$ 、正しい上流へ戻される交通量 $B^*_{2}(t+dt)$ 、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と式(14)、正しい場合(式(15))よりも、 $O^*_{1}(t+dt)$ が $O^*_{1}(t+dt) - O_1(t+dt) = B_2(t) \beta_{13}$ だけ少なくなることがわかる。この場合、渋滞リンクの交通需要が少なくなり、本来よりも渋滞が減少する傾向がある。そこで、上流へ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その方向のみに流入させるようにロジックの改良が行われた。その結果、渋滞状況の再現性は大幅に改善された⁶⁾。

3.3 IOM の限界

シミュレーションにおいて、特に情報提供の効果や事故時の迂回を考慮する場合は、経路選択モデルを導入する必要があるが、そのためには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、仮に行ったとしても非常に複雑で扱いにくい。

また、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。環状道路ではカットポイント(上・下流の始点となるポイント)を設ける必要があるが、計算誤差を抑えるには非渋滞リンクにカットポイントを設ける必要がある。しかし首都高速道路では環状線全体が渋滞する場合もあり、この場合計算誤差は大きくなる。

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)の開発が行われた⁷⁾。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 BDM に基づいて先行的に開発されたモデル⁸⁾⁹⁾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²⁾。DESCでは、この問題を解消するために dt を1秒と短くしており、街路の自由速度を30~50km/h程度と考えると、ブロック長 dL は10~15mとなる。

dt を短くするとメモリ消費量が増え、計算時間も長くなるので、DESCでは、式(4)よりも簡略化したBDMを採用した。すなわちブロック i の最大収容可能台数を N_i 、ブロックの受入れ可能最大交通流率を 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、あるブロック i と隣接する上流側ブロック $i+1$ から、 dt 間に移動する交通量 $A_{i+1,i}(t)$ は次式で与えられる。

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

これは、渋滞流におけるQ-K関係を簡略化しているため、簡略化BDM(Simplified Block Density Method, S-BDM)と呼ぶことができる。なおDESCでは、Q-K関係に式(3)による線形関係を用いている。

S-BDMでは、渋滞流は全て飽和交通密度(K_f)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・縮小は正しく表現されない。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。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表現できる。車両感知器による交通量と時間オキュパンシを模擬する機能や、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を持っている。

1994年にDaganzoが提案したCell Transmission Model³⁾は、基本的にS-BDMと同じである。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 $N_i - n_i(t) = [K_i - K_i(t)]dL$ とおくことが、待ち行列車列の上流延伸速度(衝撃波速度)を V_f とすることと同値であることを示し、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。

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

4.2 BDMへの経路選択機能の内生化

1971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、SATURN¹⁰⁾、COMTRAM¹¹⁾、DYTAN¹²⁾、Box-Model^{13), 14)}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。ボトルネックを先頭とする渋滞が延伸して、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¹⁵⁾。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))と同じであるため、渋滞列の伸縮など密度変化の伝播が正確に表現できる。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。

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

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。

ODペア毎の経路は、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最短経路が探索され、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。したがって分流部では、 DT 毎に改定された新たな経路に基づいて分流するので、分流比率は最短経路探索結果に基づいて変化する。

4.3 AVENUEの開発

AVENUE(an Advanced & Visual Evaluator for road Networks in Urban arEas)^{16), 17)}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でも、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

のスキャン時間は1秒、Q-K関係は式(3)の線形関係とし、経路選択行動や車線変更などのドライバ挙動をモデル化するために、目的地や車種などを待つ離散車両を直接扱い、それらの移動量がBDMに基づいて計算される。AVENUEのロジックはHybrid Block Density Method(H-BDM)と呼ばれ、交通工学研究会のクリアリングハウス(<http://www.jste.or.jp/sim/>)で公開されているverificationプロセス¹⁸⁾に基づくverifyを実施済みである(<http://www.i-transportlab.jp/products/avenue/verification/>において公開中)。

H-BDMでは、リンクを車線毎にも分割したブロックがカスケード状に相互に接続され、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での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。また、交差点から十分上流においては、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方法を開発し¹⁷⁾、これをMulti-scan Hybrid Block Density Method(MSH-BDM)と呼ぶ。

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に個別車両の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。

AVENUEの車両移動において、追従挙動モデルではなくBDMを採用するのは、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。

5. BDMとは異なる道の開拓

5.1 BDMの限界

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¹⁰⁾。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、計算時間と記憶容量上問題がある。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。1kmのリンクにブロックは $1000/50 = 20$ 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が160台/kmならば、リンク1kmに存在できる車両台数は高々160台である。したがって160個の目的地別ブロックで十分であり、残る1,800個余は明らかに無駄なブロックである。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求められることになった。

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モデル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もできる。

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

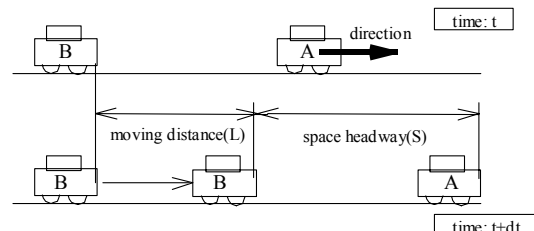


図-3 高速道路版 SOUNDの車両移動ロジック

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. Point Queue の勃興

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 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、Q-K モデルのように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・メモリ消費量を軽減するために、街路版 SOUND では車両の移動に Point Queue モデルが採用された。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分けることは、広域ネットワークを扱う上で計算負荷の軽減のためには妥当な選択であろう。

6.2 Point Queue モデルにおけ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

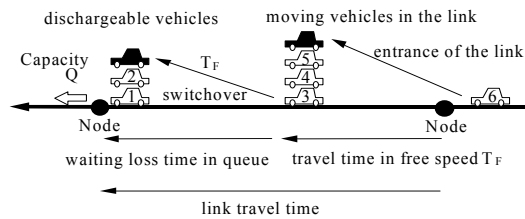


図-4 街路版 SOUND の移動ロジック

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。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 SOUND バージョン²⁰⁾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た。

現在、Q-K モデルによる高速道路版と Point Queue モデルによる街路版が組み合わせられて、統合化された SOUND パッケージとなっている(SOUND/A-21, SOUND/P)。これには、当初バージョンにはなかった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評価できる。このモデルを、東京 23 区を対象とした交通需要の時間分散効果の評価に適用した事例もある²¹⁾。現在、街路版 SOUND を Point-Queue から Physical-Queue 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

本稿では、交通シミュレーションに対するニーズや計算機能力の変遷との関係において、筆者らが関連した交通シミュレーションモデルの発展過程を整理した。

2002 年 6 月より新しい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、交通状況の予測はますます重要となる。その結果、交通シミュレーションモデル本体のみ

ならず、モデルの再現精度の検証²²⁾、経路選択モデルなどの実用化やパラメータ設定、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、といった周辺技術開発の重要性も増すであろう。これは、交通シミュレーションが研究段階から実用段階に展開しつつあることを意味する。また、ITS 技術やインターネット等の汎用技術がもたらした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も重要な技術である。

最後に、本稿の作成にあたり東京都立大学の片倉正彦教授、東京大学の桑原雅夫教授、そしてアイ・トランスポート・ラボの堀口良太氏に多大なる助言をいただいたことを記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) D. Van Vliet and M. D. Hall: SATURN 8,3-A User's Manual-Universal Version, Institute of Transport Studies, University of Leeds, 1991.
- 11) D. R. Leonard, P. Gower, and N. B. Taylor: CONTRAM: Structure of the Model, TRRL Research Report RR178, 1989.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 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) 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.