

紹介

ブロック密度法を用いた交通流の表現方法について

桑 原 雅 夫*
 吉 井 稔 雄**
 堀 口 良 太***

1. はじめに

ブロック密度法はリンクを細かなブロックに分割し、流体近似した交通流のブロック間の移動量を、交通量 - 密度 (Q-K) 関係と交通量の保存則を用いて求める動的交通流シミュレーションモデルである。このブロック密度法に属するモデルとしては、1971年に交通工学研究会のプロジェクトで開発されたモデル-1971¹⁾に始まり、その後、DESC²⁾、モデル-1991⁵⁾、AVENUE⁶⁾などが、モデル-1971をベースに提案されている(図1。ただしモデル名がつけられていないものについては開発年をモデル名として用いた)。しかし、筆者らの努力不足もありその交通移動のアルゴリズムについては広く認知されているとはいいがたい。そこで、ブロック密度法による交通流の表現方法について紹介する機会を頂戴し、この手法での車両(交通密度)の移動方法を概説するとともに、これまでの開発・改良の経緯を紹介することとした。

2. ブロック密度法の概要

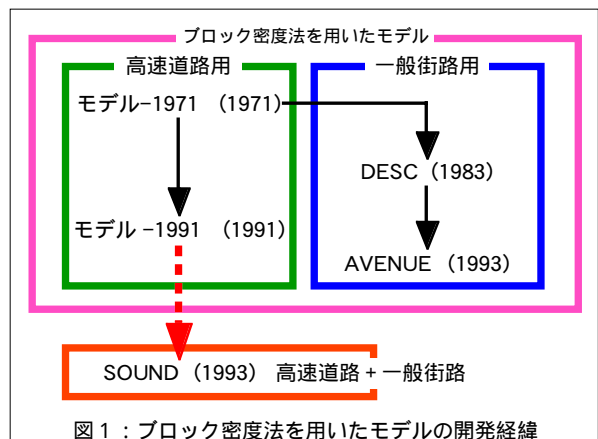
まずはじめに、ブロック密度法における交通の移動方法について説明する。1971年に最初の開発をみた当時からいくつかの改良を経てはいるものの、基本的な方法は当初から変わってはおらず、以下に単路部における交通移動のロジックを概説する。

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ないくつかのブロックに分割され

る。ブロック長(dL)は、1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にするため、自由流速度をVfとすると、dLはVf dtより長く設定する必要がある。一方、dLがVf dtより長いと、1スキャン時間のなかで自由流のウェーブがブロックの途中にとどまることになり、ブロックの状態を1つの値で表すことが困難になる。したがって、dLはVf dtに等しく設定して、以下のアルゴリズムを構築する。

各ブロックiには交通量(Q_i) - 密度(K_i)の関係が設定されており、この関係をQ_i = f_i(K_i)と表現する。現在のQ-K関係には、図2に示すような自由流側が一定速度の関数が通常使われるが、開発当初は2次曲線が用いられていた。

図3は横軸に距離、縦軸に時間を取り、各時間での各ブロックの密度とブロック間の移動交通量を示したものである。時間軸はスキャン時間間隔dtで離散化されており、時刻tにおけるブロックi+1からiへの交通の移動可能な流率Q_{i+1,i}(t)は、そのスキャン時間開始時点tでの密度を用いて、



* 東京大学生産技術研究所助教授
 ** 東京大学生産技術研究所助手
 *** 株式会社熊谷組エンジニアリング本部

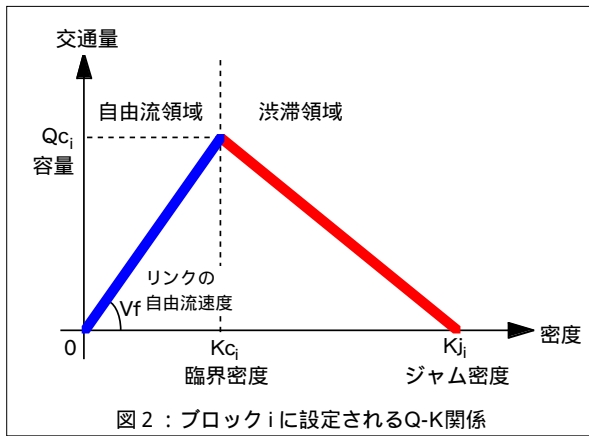


図2：ブロックiに設定されるQ-K関係

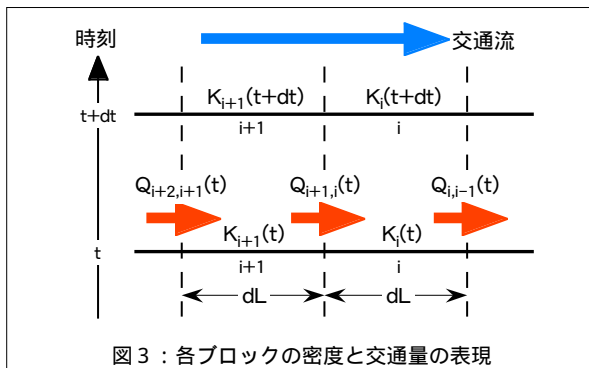


図3：各ブロックの密度と交通量の表現

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

$$Q_{i+1,i}(t) = \text{Min}\{f_{i+1}(K_{i+1}(t)), Q_{c_i}\} \quad \dots(1)$$

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

$$Q_{i+1,i}(t) = \text{Min}\{Q_{c_{i+1}}, Q_{c_i}\} \quad \dots(2)$$

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

$$Q_{i+1,i}(t) = \text{Min}\{f_{i+1}(K_{i+1}(t)), f_i(K_i(t))\} \quad \dots(3)$$

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

$$Q_{i+1,i}(t) = \text{Min}\{Q_{c_{i+1}}, f_i(K_i(t))\} \quad \dots(4)$$

ここに,

Q_{c_i} : ブロックiにおける交通容量

K_{c_i} : ブロックiにおける臨界密度

K_{j_i} : ブロックiにおけるジャム密度

$K_i(t)$: 時刻tにおけるブロックiにおける交通密度

$Q_{i+1,i}(t)$: 時刻tにおいてブロックi+1からブロックiに移動する交通流率

と表される。すなわち、下流側ブロックについては、自由流ならばその交通容量に相当する交通量 (Q_{c_i}) を、渋滞流ならばその密度に見合った交通量 ($f_i(K_i(t))$) を、それぞれ流入可能量とし、また上流

側ブロックについては、自由流の場合はその密度に見合った交通量 ($f_{i+1}(K_{i+1}(t))$) を、渋滞流ならばその交通容量に相当する交通量 ($Q_{c_{i+1}}$) を流出可能量とし、両者の小さいほうを移動可能とする手法である。さらに、実際のブロック間の移動量は、この移動可能量 $Q_{i+1,i}(t) dt$ に「下流側ブロックiの余裕台数 ($K_{j_i} - K_i(t)) dL$ 以下であること」という制約条件をつけて求められる。

この方法では、渋滞の延伸時や需要の減少によって上流側から渋滞が解消される場合には、そのショックウェーブの伝播を正しく再現することが可能であるが、事故処理が終わったなどの理由で、ボトルネック容量が上がったことにより下流側から渋滞が解消するような場合(式(2))には、ショックウェーブの伝播に多少の問題があることが指摘されている。具体的には、ショックウェーブが上流に伝播するにつれて空間的に分散されてしまい、密度の変化が多くブロックにわたって次第になだらかに生じてしまうことである。これは、1ブロック中の交通密度は常に1つの値をとるため、ブロックの中にはショックウェーブが存在できないことが原因となっている。したがって、スキャン時間とブロック長を短くとることによって、この点については改善が期待できる。1971年当初は、スキャン時間を6~7秒にとっていたために、平均走行速度を50~60 km/hとして、リンクは100m程度のブロックで分割されていたが、最近ではスキャン時間を1秒とし、ブロック長をかなり短く設定している。

3. 開発経緯

ブロック密度法の最初のモデルは、1971年に開発されたモデル-1971である。このモデルは、首都高速道路において近未来の渋滞状況の予測を行うために開発されたもので、当時の計算機能力でオンラインによる交通状況の再現を目指したため、計算負荷を軽減することが可能な、交通流を流体に近似して扱う方法として提案された。

モデル-1971では、あらかじめ設定されている分流比、合流比に従って交通をネットワークに流すもの

であり、経路選択などの利用者の選択行動は内生化するようになっていない。その後、シミュレーションに対するニーズが多様化する中で、当初の車両移動口ジックを基本に、例えば交通流の流体近似と離散化を取り混ぜたハイブリッド化や、経路選択機能の内生化、あるいはリンクに車線を持たせて車線をまたがる動きを組み込むなどの様々な改良が加えられてきた。

3.1. DESC (Dynamic Evaluator of Signal Control)

DESC²⁾は、日本交通管理技術協会での研究において、街路における信号制御方式の評価を目的として開発されたモデル³⁾⁴⁾をシステム化したものである。モデル開発の主目的は信号制御方式の評価であり、スキャン時間が1秒のブロック密度法を採用している。この場合、一般的な街路の自由流速度を30~50 km/hと想定すると、リンクはおおよそ10~15 mの長さのブロックで分割されることになる。

DESCでは、モデル-1971のブロック密度法を簡略化し、計算時間を大幅に節約している。すなわち、スキャン時間内での隣接するブロック間における移動量は、

1. 上流ブロックの最大流量 $Q_{c_{i+1}} dt$
2. 下流ブロックの最大流量 $Q_{c_i} dt$
3. 上流ブロックの存在台数 $K_{i+1}(t) dL$
4. 下流ブロック i の余裕台数 $(K_{j_i} - K_i(t)) dL$

の最小値とするものである。この方式では渋滞側のQ-K関係が明示的に設定されていないため、渋滞流は常にジャム密度の状態になる。したがって、ジャム密度より低い密度の渋滞流の表現、例えばボトルネックを含む単路部に適用しようとする場合には、渋滞の延伸が正しく再現されない。しかしながら、信号で制御される交通流を対象とする場合は、信号待ちの渋滞はジャム密度の状態と考えられるため、あまり問題とはならない。

経路選択機能を内生化しないDESCは、交差点に

設定された右左折直進率にしたがって交通流を分岐させるが、右折車両だけは例外的に流体の連続量から粒の離散量に変換している。これは対向直進交通流のギャップを検出し、設定したギャップ・アクセプタンス関数により確率的に右折車両の挙動を表現して、干渉による容量低下を扱うためである。

3.2. モデル-1991

1991年に開発されたモデル-1991⁵⁾は、高速道路ネットワークを対象とした、経路選択行動のモデルをブロック密度法に組み込んだものである。交通流の表現方法としては、モデル-1971に多少の改良を加えてはいるが、基本的には同様に交通量保存則とQ-K関係を用いてブロック間の流量をスキャン時間ごとに更新するモデルである。

モデル-1971との主な相違点は、経路選択モデルを内生化するために、車両に目的地の情報を持たせる必要があるため、各ブロック内の密度が目的地別に管理されていることである。問題点としては、毎スキャンごとにブロック内の密度の更新を目的地別に行うのに、かなりの計算時間を要することがあげられた。この点を考慮すると、車両を粒で表現したモデルの方が、計算時間の点では有利であると思われるため、離散モデルであるSOUND⁹⁾¹⁰⁾へ移行していった。

3.3. AVENUE (an Advanced & Visual Evaluator for road Networks in Urban arEas)

AVENUE⁶⁾は筆者らが数年来開発している、街路網における交通運用策評価のためのシミュレーションモデルである。開発に際しては、DESCで考慮されていた交差点の容量改善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が行えることを目的としている。

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必要があるため、ブロック密度法を簡略化しないで用いている。スキャン時間はDESC同様、1秒としている。しかしながら、

目的とする運用策評価のためにはドライバーの経路選択行動や、車線変更などの挙動をモデル化する必要があるため、目的地や車種などの属性を持たせて離散化した車両を直接扱い、それらの移動量としてブロック密度法で計算された流量を用いる、ハイブリッドブロック密度法と呼ぶ手法に拡張している。この手法については、理論値との比較検証⁸⁾や実際の道路ネットワークでの検証⁷⁾が行われている。

ハイブリッドブロック密度法ではリンクは車線ごとにブロックに分割され、カスケード状にブロックを接続しているため、直進方向だけでなく車線変更の方向についても、ブロック密度法での流量計算が適用される。各ブロックには交差点での進行方向や車種などに対する流入規制が設けられており、実際に車両を移動するときはこの規制を満たすものだけを受け入れる。このブロックの規制を組み合わせることで、AVENUEでは右左折専用レーンやバスレーンなどのさまざまな車線運用をモデル化している。また、最新のバージョン⁷⁾ではより長い区間のブロックを混在させることで、精度をあまり落とさずに計算コストを節約するマルチスキャンハイブリッドブロック密度法⁸⁾が採用されている。

4. ショックウェーブ理論との比較検証⁸⁾

上述したブロック密度法のアルゴリズムが、渋滞の延伸を正しく再現することができるかどうか、シミュレーションを行い、ショックウェーブ理論と比較した。図4は検証に用いたネットワークで、下流端が信号で制御されるリンクを含んでいる。ここでは、このリンクを先頭に発生する渋滞（信号待ち行列）の延伸状況、ならびに解消状況について、シミュレーションの再現する各ブロックの密度がどのように改訂されていくかを確認し、ショックウェーブ理論からえられる停止波と発進波を再現することができるかを検証するものである。なお、スキャン時間は1秒、リンク上のブロック長は10m、上流からの需要は900台/時で一様到着^{注1)}するものとし、

^{注1)} 実際は1分ごとの到着のレートを一定にし、その1分のあいだはランダム到着としている。

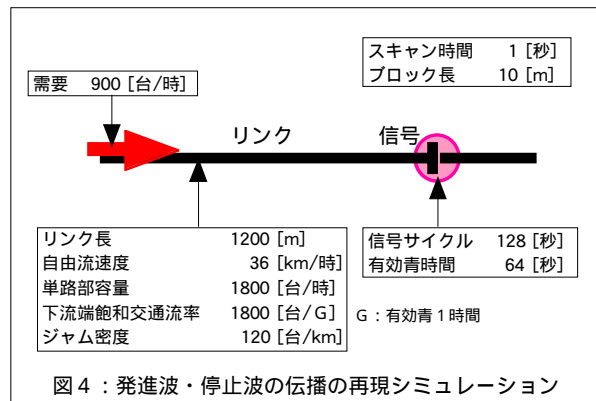


図4：発進波・停止波の伝播の再現シミュレーション

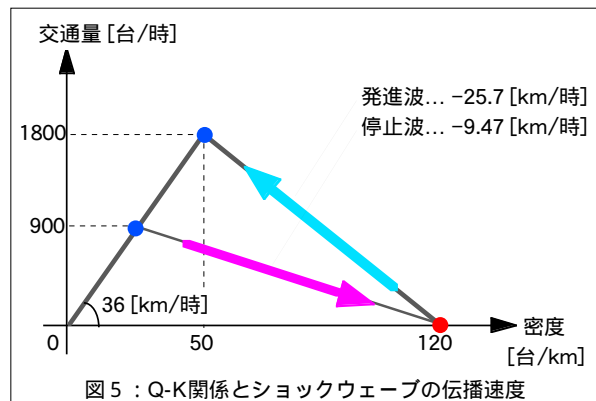
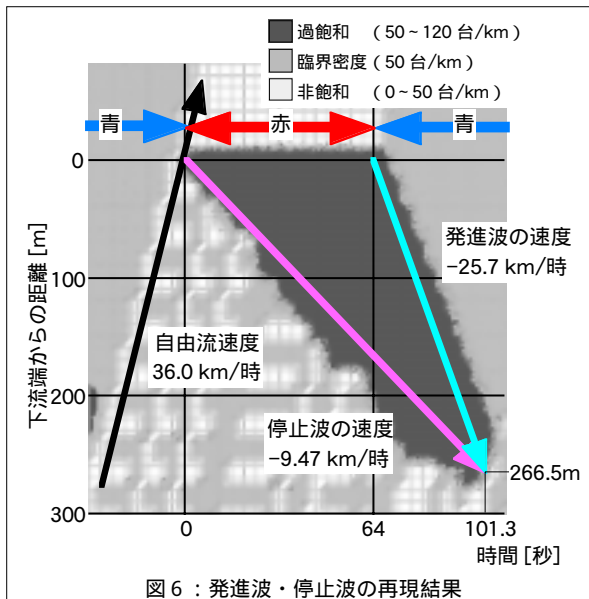


図5：Q-K関係とショックウェーブの伝播速度

信号サイクルは128秒、有効青時間は64秒とした。

図5に設定したリンクのQ-K関係、およびショックウェーブ理論より求められる停止波と発進波の速度を示す。停止波の速度は需要に等しい交通量が自由流で移動している状態と、ジャム密度で停止している状態を結んだ直線の傾きで求められる。発進波については、ブロック密度法では下流ブロックが自由流で上流ブロックが渋滞している場合（式(2)）、ジャム密度で停止している状態から臨界密度の状態へと移行するため、この状態を示す2点を結んだ線の傾きに等しい速度で伝播する。この場合、理論上は停止波は9.47 km/時、発進波は25.7 km/時の速度でそれぞれ上流に伝播していき、赤現示の始まりから101.3秒後に、下流端から266.5mの地点で発進波が停止波に追いつくことになる。

図6にリンク上の密度分布の時間変化に関するシミュレーション結果を示す。グラフは横軸に時間を、縦軸にリンク下流端からの距離をとり、各時間におけるブロック内の車両密度を濃淡で示したものである。参考のために理論値によるそれぞれのショックウェーブの波頭の軌跡をプロットしている



が、ブロック密度法で計算された密度分布においても、発進波が停止波に追いつく時点で、過飽和の区間が解消されており、理論通りにショックウェーブが再現されていることがわかる。

5. 終わりに

本稿では、ブロック密度法の車両の移動方法について概説し、ブロック密度法に属する4つのモデルを簡単に紹介した後、この手法がショックウェーブ理論に基づいて、どの程度正確に渋滞の延伸状況を再現できるのかについて検証結果を示した。

動的交通流シミュレーションモデルは、その車両の表現方法の違いから、ブロック密度法やインプット-アウトプット法などのような流体モデルと、車両を離散的に扱う離散モデル(例えばSOUND⁹⁾¹⁰⁾など)の2種類に分類できる。流体モデルは、要求される計算精度に応じてブロック長を適当に調節することにより、計算負荷を大きく軽減することが可能であるという長所を持つ。一方、離散モデルは、例えば車両の目的地、ドライバーの属性、車載機の有無などの車両ごとの属性を管理しやすいこと、車線変更・追越しなどのミクロな車両挙動の表現を、流体モデルよりも直接的に行えるという長所を持つ。したがって、この両者の長所を上手に利用したモデル化が進められているところである。

最後に、交通シミュレーションの研究開発におい

ては、その中核となるモデリング論に加えて、モデルの実用性の検証や、OD交通量をはじめとする入力データの獲得、経路選択行動の分析、シミュレーションパラメータ設定の省力化など、周辺領域にも多くの課題が残されている。今後の研究者の積極的な取り組みが期待されるところである。

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”，交通工学研究会報告書，1971
- 2) 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
- 3) “交通安全施設の投資効果に関する調査研究”，日本交通管理技術協会，1986年3月
- 4) 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, 1986年10月
- 5) 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年7月
- 6) 堀口良太，片倉正彦，桑原雅夫：“都市街路網の交通シミュレータ-AVENUE-の開発”，第13回交通工学研究発表会論文集，pp. 33-36, 1993
- 7) R. Horiguchi, M. Kuwahara, M. Katakura, H. Akahane and H. Ozaki：“A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management 'AVENUE Ver. 2'”，Proceedings of the 3rd Annual World Congress on Intelligent Transport Systems, Orlando, CD-ROM, 1996
- 8) 堀口良太，桑原雅夫，片倉正彦：“交通シミュレーションシステム-AVENUE-における交通流計算手法の改良”，土木学会第51回年次学術講演会論文集第IV部，pp. 452-453, 1996
- 9) 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
- 10) 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”，第16回交通工学研究発表会論文集，pp. 93-96, 1996