

ネットワークシミュレーションモデルにおける交通流のモデル化とその検証

(株)熊谷組 エンジニアリング本部 堀口 良太^{注1}
 東京大学生産技術研究所 吉井 稔雄^{注2}

1. はじめに

都市部の道路網における交通運用策の評価を目的としたネットワークシミュレーションモデルについて、その利用目的に応じた機能要件と交通流のモデル化の方向性について考察する。またネットワークシミュレーションが実用化されるには、そのモデルがどの程度の再現能力を有するかについての検証が不可欠である。ここでは筆者らが開発しているシミュレーションモデル AVENUE¹⁾ と SOUND^{2),3)}での例を交えながら、最低限必要と考えられるモデル検証について述べる。

2. ネットワークシミュレーションでの交通流のモデル化

2.1 モデルへの機能要件

ネットワークシミュレーションモデルの一般的な利用目的は、面的な信号制御や交通規制の見直し、新規路線の建設や道路改良、情報提供や動的経路誘導、あるいは交通需要調整や流入制限といった各種の交通運用策の影響を評価することである。そのためには、すくなくとも次のような基本的な機能要件が考慮されていることが必要である。

- 1) ボトルネック容量を正しく再現すること ... 信号交差点や路上駐車などによる車線減少、あるいは合流部やサグ、トンネル入口など、渋滞の原因となるボトルネック部での容量もしくは飽和交通流率を、シミュレーションは正しく再現しなければならない。このことは渋滞によってドライバーが被る遅れ時間を評価する際の精度に影響する。
- 2) 渋滞の延伸と解消を正しく再現すること ... ボトルネック容量だけではなく、需要超過による渋滞の延伸とその解消、およびボトルネック容量の改善による下流側からの渋滞の解消をシミュレーションは正しく再現しなければならない。とくに感知器情報を再現して、信号制御の評価に利用する場合などは、ショックウェーブの伝播速度まで再現する必要がある。
- 3) ドライバーの経路選択行動を組込むこと ... ドライバーは交通状況を考慮しながら各々の判断で目的地までの経路を選択する。その結果が集積されたものがネットワークの交通状況であり、ドライバーの経路選択行動が与える影響は大きい。シミュレーションではさまざまな利用者層ごとの経路選択モデルを内生化することが必要である。とくに情報提供や動的経路誘導の影響評価への適用を考えると、このことは必須の機能といえる。

2.2 交通流のモデル化

1980年代後半以降に開発されたネットワークシミュレーションモデルを利用目的ごとに分類し、交通流のモデル化についてのアプローチが、どのように棲みわけがなされているかについて考察する。

まず広域ネットワークにおいて動的な交通配分を行い、路線新設や情報提供、動的な流入制御などの施策の評価を目的としたシミュレーションがある。INTEGRATION⁴⁾と DYNASMART⁵⁾は、リンク上の車両をリストで表現し、リンクに設定された車両密度 - 速度($K-V$)の関係をもちいて密度管理を行いながら、リンク間での車両移動を行うモデ

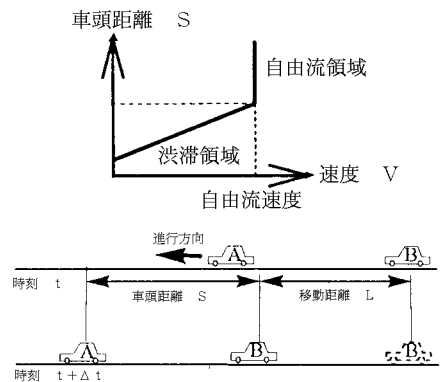


図1：SOUNDの交通流モデル

注1 e-mail: rhoriguc@ku.kumagaigumi.co.jp

注2 e-mail: yoshii@nishi.iis.u-tokyo.ac.jp

ルであるが、リンク内の車両移動については簡略化されている。SOUNDはリンクに設定される車両距離 - 速度(S-V)の関係を用いて車両1台ごとの速度を求め、リンク上の車両位置を逐次計算するモデルを採用しており、ショックウェーブの再現性を保証している(図1)。

一般に都市圏レベルの広域のネットワークに適用されるモデルでは、K-VやS-V関係のようなマクロな交通特性をリンクごとに与え、属性を持たせた粒(ミクロ)の車両を移動させる、ハイブリッドな交通流表現が用いられる。これには単純な移動のロジックにすることで計算コストを軽減するとともに、道路構造などからある程度もっともらしい値を推定できるパラメータを用いて、そのフィッティングに要する労力を省くことができるという利点がある。

一方、集客施設やイベントなどの交通へのインパクトを予測するために、数100m～数千キロ四方の範囲である地区レベルのネットワークを対象とした、比較的詳細なモデルを持ったシミュレーションがある。このレベルでの施策は、情報提供や流入規制、信号制御の最適化といった面的な広がりを持つものから、交通規制や車線運用の変更、交差点改良などの局所的なものまでさまざまである。したがってより汎用的であるためには、広域のモデルでは必ずしも求められなかった車線変更のような交通に影響を及ぼすミクロな現象をモデル化ことが求められる。

地区レベルのシミュレーションでの交通流のモデル化は二つのタイプに分けることができる。一つはFHWAのリアルタイムシミュレーションモデル⁸⁾やMITSIM⁹⁾といった米国で開発されたモデルにみられる、追従モデルに車線変更のモデルを組み込んだタイプである。このアプローチの利点は、いうまでもなく車両挙動を直接的にモデル化し、さまざまな機能の実現が容易となることである。MITSIMではドライバーごとの運転特性や車種ごとの性能、合流時の挙動などのサブモデルが組み込まれている。

このようなモデルには多くのパラメータが介在するが、これらには「マジックナンバー」が用意されており、ユーザはデフォルトとして使うことができる。しかしながらそれらの値は米国のハイウエーのネットワークへ適用することを念頭に置いて設定されているため、日本の都市部における街路には適切であるとはいえない。さまざまな状況が混在する街路では一揃いのパラメータセットでは対応することができないため、新たな値を設定するために大きな労力が必要となる。

これに対し、もう一つは取り扱いの比較的容易なハイブリッドモデルを地区レベルの交通シミュレーションに利用するモデルがある。AVENUEは道路を車線ごとに10～20mの「ブロック」とよぶ単位に区切り、それぞれのブロックに設定された交通量 - 密度(Q-K)の関係と流量保存則を用いて隣接するブロック間の車両移動台数を

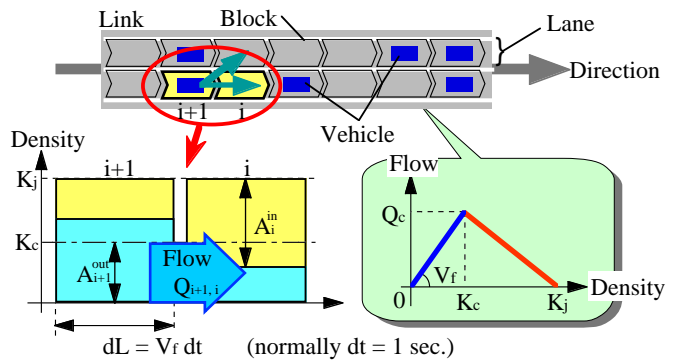


図2：AVENUEのハイブリッドブロック密度法

求める、ハイブリッドブロック密度法を用いている(図2)。この手法では合流や路上駐車による車線変更の挙動も、すべて設定されたQ-K関係に基づいて計算されるため、設定が簡易であるのに加え、ブロックに車種や進行方向についての規制の属性を設けることで、広域のシミュレーションではあまり考慮されていなかった車線ごとの規制を表現できるようにしている^{8),9)}。

3. “Verification” と “Validation”

一般にシミュレーションは問題解決のための「ツール」であり、利用者の立場から考えると、モデル自体はブラックボックスと捉えることができる。このようなシステムが広く使われるようになるにはモデル仕様、すなわち 入出力項目と モデルが最低限保証すべき挙動、についての共通の認識が利用者の間に形成されていなければならない。このためモデル開発にあたっては、各種のケーススタディを通してモデルの性能を保証する「検証」のプロセスが必須となる。モデルの検証には“verification”と“validation”の2つの段階がある。

3.1 Verification ~ 仮想データによる検証

このプロセスは開発にあたって設定したモデル仕様を、計算機上に実装されたモデルが満足しているかどうかを確認し、ひいてはそのモデルの動作原理が正当であることを証明するものである。これは作成したプログラムが正常に動作するかどうかを確認するデバッグとは一線を画する。実際の作業では、データの精度やアクセス性などの現実に存在する様々な制約を排除するために、理想的な条件を備えた仮想データを用いて計算機実験を行う。表1にネットワークシミュレーションの検証に最低限必要と考えられる項目を挙げる。

図3は信号交差点での滞留長の延伸/解消状況のAVENUEでの再現性を、発進波と停止波の伝播速度を理論値と比較するこ

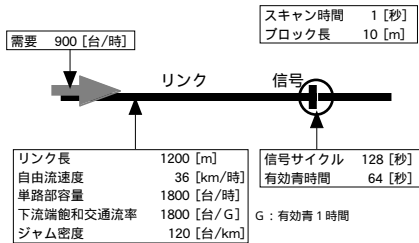


図3：検証でのシミュレーション設定

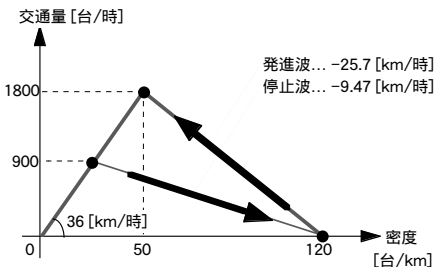


図4：Q-K関係とショックウェーブ

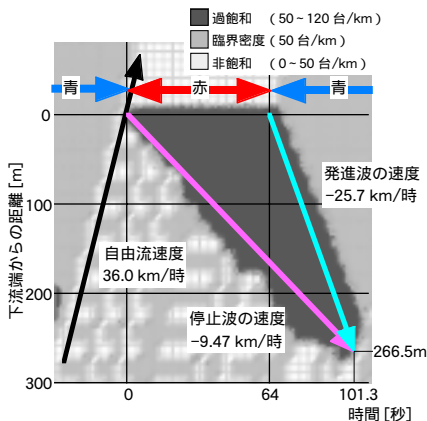


図5：発進波・停止波の再現結果

表1：仮想データを用いたネットワークモデルの検証項目

単路部	上流からの到着パターン リンク容量/リンクパフォーマンス マクロな交通特性 (ex. Q-K関係) ショックウェーブの伝播状況 (渋滞の延伸/解消, 発進波/停止波の伝播など)
合分流部 (信号なし)	渋滞時の合流比/分流比 合流による容量低下の度合い
合分流部 (信号あり)	飽和交通流率, 交差点容量 非飽和時の遅れ時間 動線交錯による容量低下 (右折など)
ネットワーク	先詰まりによる容量低下 経路コストと経路選択確率の関係 経路コストと経路交通量の関係 経路選択に用いられたコストと運転者が実際に経験するコストの関係

とで検証したときに用いた設定である。AVENUEでは三角形関数で近似したQ-K関係を用いて流量計算しているの
で、発進波と停止波の伝播速度の理論値は、図4に示すよ
うな値となり、赤現示の始まりから101.3秒後に、リンク
下流端から266.5mの位置で発進波が停止波に追いつくこ
となる。図5はこのときのリンク上の車両密度の時間変
化に関するシミュレーション結果である。グラフは横軸に
経過時間を、縦軸にリンク下流端からの距離を取り、各時
間におけるリンク上の車両密度分布を濃淡で表したもので
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、AVENUEで再現
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し、理論通りに滞留長の延伸/
解消が再現されていることが認められる。

3.2 Validation ~ 実データによる検証

“Verification”によってモデルの正当性が検証されてい
ても、入力となるデータの現実的な精度やアクセス性などが
問題となり、実際の交通状況を再現することに適用できな
い場合は、そのモデルに実用性があるとはいえない。また
、実用に足る時間内でシミュレーションが実行可能か、
適切な規模のハードウェアで稼働するか、など実際の使用
上の性能についても確認されるべきである。このため実世
界において得られるデータを用いて、設定したモデルの仕
様・性能が妥当であるかを検証する“validation”のプロセ
スが必要となる。表2にネットワークシミュレーションモ
デルの“validation”の項目を示す。通常はシミュレーシ
ョン結果と実データの間の相関や誤差を指標として、実現象
を再現することができるかどうかを評価する。

図6はSOUNDを首都高速道路のデータを用いて検証した結果である。午前8～10時におけるリンク平均速度の実測値をシミュレーション値と比較しているが、相関係数は0.81、平均の速度差は3.5[km/h]となり、比較的よい再現性を示している。

表2：実データを用いたネットワークモデルの検証項目

必須項目	リンク交通量 合分流部や交差点の方向別交通量 リンク旅行時間 / 区間旅行時間
望ましい項目	経路交通量, 経路旅行時間 渋滞長, 待ち行列長 各車両の経路選択結果

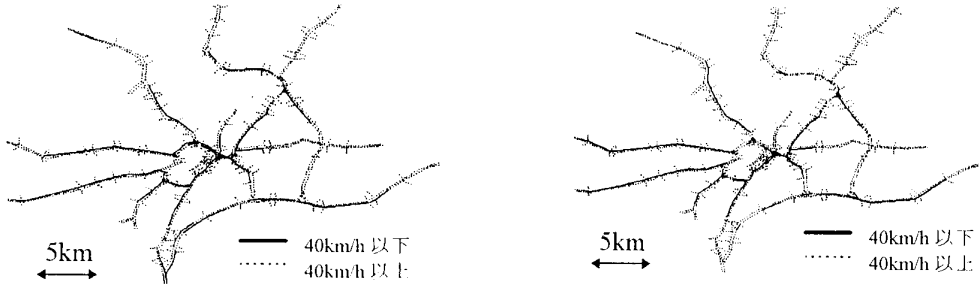


図6：SOUNDの首都高速道路での検証（左：実測値，右：シミュレーション値）

4. まとめと課題

近年シミュレーションモデルの開発が活発であるが、多くのモデル開発においてその妥当性が十分に検証されているとはいいがたい。これには十分に信頼性のある検証用の実データを入手することが非常に困難であることも一因となっている。このため、現在筆者らを中心に、ネットワークシミュレーションモデルのベンチマークとなりうるデータセットの整備を進めている⁽⁴⁰⁾。また、このデータセットはモデルの開発者に広く公開され、同時に各モデルの検証結果も利用者が自由に入手できる仕組みを検討中である。

【参考文献】

- 堀口良太：交通運用策評価のための街路網交通シミュレーションモデルの開発，東京大学学位論文，1996
- 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
- 桑原雅夫，吉井稔雄，森田緯之，岡村寛明：広域ネットワーク交通流シミュレーションモデルSOUNDの開発，生産研究，第48巻第10号，東京大学生産技術研究所，1996
- Van Aerde, M. and Yagar, S. : "Dynamic integrated freeway/traffic signal networks: a routing-based modeling approach", Transportation Research-A, 22(6), pp.445-453, 1988
- Jayakrishnan, R., Mahamassani, H. and Hu, T. : "An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks", Transportation Research-C, 2(3), pp.129-147, 1995
- Chang, G. and Junchaya, T. : "A real-time network traffic simulation model for ATMS applications, Preprint of Transportation Research Board, 72nd Annual Meeting, 1993
- Yang, Q. and Koutsopoulos, H. N. : "A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems", Transportation Research C, 4 (3):-129, 1996
- 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 Third Annual World Congress on Intelligent Transport Systems, Orlando, 1996
- 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，第32巻4号，pp.39-43，1997
- 花房比佐友，白石智良，赤羽弘和，吉井稔雄，堀口良太：交通シミュレーションシステムの再現性検証用データセットの構築，土木計画学研究講演集，No. 20 (1) ，pp.497-499，1997