マクロシステムにおけるシミュレーション技術

解説

I. 道路交通システムのシミュレーション

正 員 高 羽 禎 雄 (東京大学)

1. はし が き

道路交通の現象あるいはそのシステムとしての挙動の解明は、早くからシミュレーションの対象として注目された。コンピュータが黎明期にあった時代から、高速道路における自動車の走行・追越し(Gerlough, 1955)や各方向2レーンの信号交差点(Goode, 1955)のシミュレーションなどの野心的な試みがある⁽¹⁾。

1960年代から1970年代にかけて、コンピュータを用いる交通信号制御システムが世界各国に普及した中で、その運用と評価のための応用が試みられ、信号パラメータの最適化や、高速道路の状況の把握などいくつかの成果があげられた。しかし一般には、対象規模が大きいうえに、道路交通は単なる物理現象ではなく、モデルの検証や結果の評価が難しいことから、満足すべき結果の得られないことが多かった⁽²⁾。

1980年代の後半に入ると、交通管制システムの高制度化や自動車情報通信システムの開発が進められ、ヨーロッパのPROMETHEUS(1987～)やDRIVE(1989～)、アメリカのIVHS(1991～)などの大規模プロジェクトの進行に伴って交通信号制御や交通情報提供、最適経路誘導などの各種システムの手法の評価や運用の手段などに交通システムのシミュレーションを用いる動きが本格化するに至った⁽³⁾。

ここでは、交通流モデルと代表的なシミュレータ、最近の事例などを解説するとともに、今後の課題について述べる。

2. 交通流モデル

道路交通システムは、道路、自動車、ドライバ、制

御システムなどの種々の要素から構成される。道路交通は、その様相が複雑であるとともに、シミュレーションの対象が多岐にわたるので、それぞれの目的に応じて異なるモデルを用いることが多い。

自動車は道路平面で二次元の運動をするが、交通流モデルとしては複雑さを避けるため、車線に沿った進行方向の運動と車線変更などの横方向の運動に分けて扱う。車両のモデルを分類すると、車両を個々に取り扱うマイクロモデルと、車群あるいは流体として取り扱うマクロモデルがある。道路のモデルは通常リンクとノードの集合体で表われ、車両のモデルに対応して、たかだか1台の車あるいは複数台の車両が入ることのできる区間から、交差点間を結ぶ複数車線のリンクまで、種々のモデルが用いられる⁽¹⁾⁽²⁾。

車両のマイクロモデルのなかでは、追従(Car Following)モデルがよく知られている。これは、車両が同一車線の先行車両に追従して走行するときのダイナミクスを、車両の加速度および速度と車間距離の関係で与えるもので、観測データによる検証もなされている。車群走行の安定性などの検討には有用であるが、実際には個々の車両の運動性能や運転者の運転性向の違いを考慮する必要がある。

車両の発生、合流、交差点での発進、複数車線における車線変更や追越しなど運転者によりばらつきのある行動についても統計的な観測が行われており、これを取り入れたモデル化も可能である。

個々の車両は、旅行目的に応じた出発地および目的地(OD)と経路をもっている。経路の選択は運転者の判断により、時間や距離の短さ、道路の走りやすさなどで定められる。渋滞情報や事故情報の提供を受けて経路を変更したり、システム側から最適経路へ誘導を行うこともあり、このような状況を取り扱うには、これらを個々の車両の属性として与える。

マクロモデルでは、流体(Q-K)モデルがよく知られる。これは、交通流の基本パラメータである交通量Qと密度Kの相関関係を用いる(そのときの速度は

Simulations for Macro-Systems.

I. Simulation of Road Traffic Systems.

By Sadao Takaba, Member (The University of Tokyo).

キーワード: 道路交通, シミュレーション, ミクロモデル, マクロモデル, 自動車, 交通管制, 交通情報, 情報システム, 経路誘導, 旅行時間

$V=Q/K$ となる)もので、巨視的な観測結果に基づいて定めることができ、交通量の最大値である交通容量 Q_c と、それに対応する臨界密度 K_c が与えられる。 $K < K_c$ では自由流、 $K > K_c$ では渋滞流となり、後者では粗密波の伝播のような不安定現象を生ずる。

車群波伝達モデルは、車両の行動を定常走行と停止の2状態に簡単化したもので、上流側交差点からの発進車群が一定の走行時間遅れをもって下流側交差点に到着するとして扱う。

長さ L のリンクの旅行時間のモデルとしては、 Q - K モデルを定常化して交通量 Q と旅行時間 $T=L/V$ の関係を与え、あるいは車群波伝達モデルで信号待ちの時間を加味して Q と T の関係を定めることができる。マクロモデルで経路選択を取り入れるには、多種流として取り扱う。

3. 交通流シミュレータ

上に述べた交通流モデルを具体化し、シミュレータとして実際に役立てた例として、1970年代で最も著名なのは、イギリスの運輸道路研究所(TRRL)が開発したTRANSYTである。これは定常状態において街路網の定時式最適信号パラメータの最適化を車群波伝達モデルによるシミュレーションを繰り返し行って求めるもので、時間の単位は信号周期の1/50とし、車両の発生、右左折、走行などが決定論的に定められるが、走行中の車群の分散を考慮している。開発後各地で他の信号制御システムと比較評価を行い、良好な成果を得て広く採用された。SCOOTはその発展形としてTRRLが1980年代にリアルタイムの交通信号制御のために開発したもので、上流側交差点を流出した車群を車両感知信号でとらえ、車群波伝達モデルで下流側交差点への到着流を予測して、信号周期ごとにパラメータの最適化を行う⁽¹⁾。

我が国では、1970年に東京広域交通管制システムを発足させる際に、猪瀬、浜田らが方形波モデルと呼ばれる車群波伝達型のモデルを用いて信号制御方式の評価を行った。また、同年に越によって提案されたインプットアウトプット(IO)法は、首都高速道路交通管制システムにおける交通状況予測のために1973年に導入され、その後、数次の改良と評価を経て現在も実用されている。IO法では、高速道路の流入出点、分合流点、ボトルネックなどをキーポイントとし、この間を区間の単位として Q - K モデルを適用するものである。

マイクロモデルを用いるものとしては、池之上らのMICSTRAN(1974)、トヨタ自動車のATRAS

(1978)、筆者らのTRN * SIM II(1973)などの試みがある。MICSTRANは、実交通流における諸特性を基本データをもとに定量的に得ようとしたもの、ATRASは通産省の大型プロジェクトCACSにおいて経路誘導効果の評価を目的としたもの、TRN * SIM IIは、シミュレーション用ハードウェアにより、経路誘導や流入調整を含む交通制御手法の評価を行うとしたものである⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

アメリカでは、連邦道路庁(FHWA)を中心としてさまざまな試みがあり、街路網を対象としたマイクロモデルによるシミュレータUTCS-1(1972)、高速道路を対象としたマクロシミュレータFREFLO(1978)、都市のコリダー(街路と高速道路の複合網)を対象としたSCOT(1972)、交通流管理のためのCON-TRAM(1978)、交通流配分のためのTRAF(1980)など、枚挙に暇がない⁽¹⁾⁽¹¹⁾。

4. 最近の動向

1980年代の後半に入ると、交通管制システムの高度化や自動車情報通信システムの開発が活発になり、上に述べたような多くのシミュレータの成果を土台に、種々の方面で進展が見られるようになった。

4.1 交通状況把握のためのシミュレーション

筆者は先に、追従モデルを用いるマイクロシミュレーションにより自由流や渋滞流をかなり現実に近い形で表現できることを示したが、多車線道路の高速道路を対象として、このような考え方でシミュレーションが行われ、交通流調査によってモデルの検証が進められている⁽⁴⁾。

新しい試みとして、ドライバが交通状況を判断して経路選択を行うことをモデルに取り入れた例がみられる。飯田らは上に述べたCONTRAMを改良し、渋滞時の先詰まりや右左折に対する障害に加えて、経路途上での最短経路選択を考慮したモデルを作成し、25交差点の道路網の例を用いて検討を行っている⁽⁵⁾。桑原らも動的に変動する経路選択行動に基づいて交通状況を再現するシミュレーションモデルを構築し、その一部を首都高速3号線の実例で検証している⁽⁶⁾。朝倉らは、交通量の増加に伴い駐車車両が増えると道路の容量低下をもたらす「駐車容量制約」を考慮して、交通流配分シミュレーションを行い、道路網の最大容量を推定している。松山都市圏の道路の計算例が示されている⁽⁷⁾。

4.2 交通制御手法の評価

交通信号制御と経路誘導や交通流配分を組み合わせる場合の効果の評価が話題となっている。例えば、

Chenらは、交通流配分の手法として「静的、準動的、動的」の3通りを、またドライバとして「車載機非搭載、搭載し部分的に指示に従う、搭載しすべて指示に従う」の3通りを想定したシミュレーションで、その効果を検討している⁽⁸⁾。

交通流配分の評価基準としてシステム最適とユーザ最適の2通りがあり、結果の相違点について NET-SIM を用いるシミュレーションによる検討が行われている。また、これらの最適解を得るにも次節で述べるようなリアルタイムのシミュレーションが必要となる⁽⁹⁾。

4.3 リアルタイム制御の手段

交通管制システムにおいてリアルタイムの情報提供や制御の手段としてシミュレーションが用いられる。

最短経路案内のための旅行時間予測の実用的な方法として、事故などの異常のあったリンクに関してのみ予測値を、正常なリンクに関しては実測値を用いる方法が提案され、予測の手段として、シミュレーションが行われている。THOREAU モデルがオブジェクト指向型シミュレーション言語で実装されており、ミシガン州トロイ市のシミュレーション例が示されている⁽¹⁰⁾。

4.4 新しいシミュレータ

アメリカでは、Santiago らによりコネクションマシン CM 2 を用いる野心的な試みが進められている。このシミュレータは街路と高速道路のネットワークを対象とし、異なるレベル（マクロ、修正マクロ、ミクロ）のモデル化により各種の問題をリアルタイムに処理するもので、個々のドライバによる経路選択が取り入れられている⁽¹¹⁾。我が国では中西ら複数の大学人のグループが、渋滞解析を目的とし、リアルタイムに作動するミクロシミュレータ MITRAM の構成に取り組んでいる。ドライバの行動表現にファジーロジックを用いるなどの工夫がみられる⁽¹²⁾。

シミュレータに柔軟性と拡張性をもたせ、多様な条件やモデルに対応するため、オブジェクト指向型とすることは、国内外で行われ成果をあげている⁽¹³⁾。また、リアルタイムの情報提供に対する人の行動を取り扱えるよう、ダイナミックでインタラクティブなシミュレータが考えられている⁽¹⁴⁾。

上に述べた TRAF-NETSIM の使用例から、今後 IVHS 分野で交通流シミュレータに要求される性能についても検討されている⁽¹⁵⁾。

4.5 環境への影響の評価

交通需要抑制やエネルギー、騒音、大気汚染などの環境に対する影響の検討なども今後の重要な事項であ

る。自動車の走行モードと排出ガス量との関係などについてもシミュレーションによる検討がなされている⁽¹⁶⁾。

5. 今後の課題

1950 年代からほぼ 30 年近く、交通流シミュレーションは、ひとびとを魅了しながら、成功への道は険しかった。最近の進歩は、高速で大量の処理を行うハードウェアや、柔軟で扱いやすいソフトウェアなどの発達があった一方で、経験の蓄積に起因する点が多い。

しかし、モデリングやシミュレータの作成、シミュレーションの実行の手間と費用に比べて十分な成果が得られることは、必ずしも多くはない。その最大の理由は、フィールドデータの取得に要する手間と費用が大きく、さらに現象の中に社会的、行動学的要因があつてモデルの検証が容易でないことがあげられる。データ取得手法の改善と収集データの共有による活用、さらにはモデル検証方法の確立とモデルやシミュレーション手法の標準化などが望ましいと考えられる。

アメリカでは、IVHS プロジェクトにおいてこの分野にも巨額の研究開発費が投ぜられ、多くの大学人が参画して、交通管制システムや交通情報提供システムの設計に役立てようとしている。我が国も賢明な対応が望まれるところである。（平成 5 年 4 月 27 日受付）

文 献

- (1) 高羽：「交通流シミュレーション」，シミュレーション，1，2，74～80（昭 57）
- (2) 高羽：「道路交通管制におけるシミュレーション技法」，生産研究，38，8，363～369（昭 61）
- (3) S. Takaba："Simulation Activities on Traffic Problems in Japan"，1991 Summer Computer Simulation Conference，p. 1113～1118（1991）
- (4) 丸山：「交通流シミュレーションによる渋滞に関する検討」，交通工学，27，1，53～60（平 4）
- (5) 飯田，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），p. 301～308（平 3）
- (6) 上田，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），p. 279～286（平 3）
- (7) 朝倉，他：「配分シミュレーションによる道路網の最大容量推定に関する実証的研究」，交通工学，27，2，7～15（平 4）
- (8) H. Chen，et al.："A Study on a Traffic Assignment-Simulation Model"，Transp. Res. Board，72nd Annual Meeting，Paper No. 930356（1993）
- (9) P. T. R. Wang，et al.："A Comparison of Travel Time Reduction Using Current vs. Partially Predictive Travel Times"，The 3RD Int'l Conf. on Vehicle Navigation & Information Systems，p. 476～482（1992）
- (10) H. S. Mahmassani，et al.："Network Performance Under System Optimal and User Equilibrium Dynamic Assignments: Implications for ATIS"，Transp. Res. Board，72nd Annual Meeting，Paper No. 931126（1993）

-
- (11) G. L. Chang, et al.: "A Real-Time Network Traffic Simulation Model for ATMS Applications", *Transp. Res. Board. 72nd Annual Meeting*, Paper No. 930646 (1993)
 - (12) 佐藤, 他: 「渋滞解析を目的とした微視的道路交通システムの機能と構成」, 日本シミュレーション学会第11回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス, p. 171~174 (平4)
 - (13) 影沢, 他: 「オブジェクト指向型交通流シミュレーター1リンクのシミュレーション」, 日本シミュレーション学会第11回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス, p. 217~220 (平4)
 - (14) P. S. Chen, et al.: "A Dynamic Interactive Simulator for the Study of Commuter Behavior Under Real-Time Traffic Information Supply Strategies" *Transp. Res. Board. 72nd Annual Meeting*, Paper No. 931105 (1993)
 - (15) E. J. Santiago, et al.: "Simulation and Intelligent Vehicle Highway Systems", *The 3RD Int'l Conf. on Vehicle Navigation & Information Systems*, p. 490~498 (1992)
 - (16) 寺本, 他: 「走行シミュレーションモデルによる排出ガス量の推計とその応用に関する一考察」, 土木計画学研究・講演集, No. 14 (1), p. 673~678 (平3)

高 羽 禎 雄 (正員)

昭和11年3月17日生。33年3月東京大学工学部電気工学科卒業。35年3月同大学院修士課程修了。38年3月同博士課程修了, 工学博士。同年4月東京大学助教授, 生産技術研究所勤務。52年4月教授昇任, 現在に至る。情報システムとその道路交通分野への応用, 特に交通流シミュレーション, 交通流画像計測, 交通情報システム, 自動車情報通信などの研究に従事。警視庁交通管制システム, 首都高速道路交通管制システム, 自動車情報通信システム等に関する各種プロジェクトに参画。電気学会道路交通技術委員会前委員長, 日本シミュレーション学会副会長, IEEE Vehicular Technology Society 東京チャプタ・チェアマン, 運輸技術審議会委員。