て可能であると述べている。

(2) 妥当性 (validity)

もとのシステムとシミュレーター間の妥当性と、シミュレーターから得られるデータの妥当性を含むが、シミュレーターの設計方針との関連で、いずれの項目についても妥当性の高いデータを得ることは困難なので、シミュレーターの運用上注意が必要であろう。一般に、再測定法、妥当性係数法を含む統推計の方法が有効である。

このほか、評価項目としては、

(3) 信頼性 (reliability)

(4) 運用性 (operability)

(5) フレキシビリティ (flexibility)

(6) コスト (cost)

などがあげられる。

5. む す び

本稿においては、国の内外において現在用いられ、あるいは開発されているシミュレーターについて、特に情報呈示装置を中心にその代表的なものを紹介し、また筆者が現実計画、設計、運用に関与したいくつかのシミュレーターに関する体験から、シミュレーターの計画上留意すべき事項を述べた。

システムにおける人間の役割と期待は、近年のシステ

ムの高度化にともなって変化しつつあるので、シミュレーターの計画においても、訓練用シミュレーターで何を訓練し何を体得させるか、は常に検討を重ねなければならない。

このような点からも、今後はオペレーションの手順の訓練もさることながら、トラブルシューティングにおける人間の思考過程や行動を支援し訓練するようなシミュレーターや、システム訓練に有効な特性を持つシミュレーターなど、設計機能オリエンテッドではなく、システム挙動と人間行動オリエンテッドなシミュレーターの開発が、より切実な効果を得るものとして期待されよう。これを可能とする技術の各分野の発達にも期待したい。

(昭和50年7月21日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 飯山雄次: シミュレータの現状と技術課題, 画像技術, 3 (1971)
- 2) 大川雅司: シミュレータ開発の計画と設計手法の諸要点, オーム, 3 (1969)
- 3) 百名盛之: フライトシミュレータ, エレクトロニクス・ダイジェスト, 7 (1970)
- 4) 飯山雄次: 動力車運転シミュレータ, 人間工学, 4, 3 (1968)
- 5) 小林実: シミュレーション, 心理学評論, 7, 1 (1964)
- 6) General Precision Systems Ltd: Specification for Locomotive Simulation, 1963
- 7) A. I. Siegel and J. J. Wolf: Man-Machine Simulation Models, Psychosocial and Performance Interaction, Wiley & Sons (1969)
- 8) D. Meister & G. F. Rabideau: Human Factors Evaluation in System Development, Wiley & Sons (1965)

5-2 交通流のモデルとシミュレーション

住友電気工業株式会社 油 本 暢 勇

1. ま え が き

自動車交通は、その機動性により、運輸手段の中で高い位置を占めて来た。道路交通の制御もコンピューターの導入により、ますます高度化大規模化している¹⁾²⁾。

街路においては、交通信号のタイミングを都市規模で制御する広域信号制御システムが東京、横浜、大阪、神戸、福岡等の主要都市で稼動しており³⁾⁴⁾、待時間の減少、排ガスの減少、交通事故の減少等の効果をあげている。

高速道路では、流入ランプでの流入の制御、トンネル内の交通流の監視と制御、本線上の車線制御等が行われ

ている⁵⁾。本線上の車のギャップを検出し、流入ランプにつけた信号機によって、ちょうどこのギャップに入るようにランプから流入車を送り込むという方式も試行されている。

近年、バス交通の効用が見直され、バスの巡行速度を上げるために、バス専用レーンの設置やバス優先信号の導入が進められている。

交通流の制御を適確に行うには、交通流の特性を正確に把握することが必要である。このためには実測によるデータの集積が必要であることはもちろんであるが、制御の条件を種々に変えたときの交通流の特性を完全にとりつくすことは下記のような理由で至難である。交通流の場合、特性の実測そのものが多大の労力と費用を要し、また種々の制御条件を現実の交通流に与えることは

"5-2 Traffic Flow Model and Simulation" by Nobuo Yumoto (Sumitomo Electric Ind., Ltd., Tokyo)

図1 2台の車の軌跡

交通の安全を損ね、渋滞を発生させる等の理由で制約が多い。交通現象には、多くの偶然的変動が含まれるので、有意な結果を得るためには測定回数を多くとることが必要となるが、多くの回数をくり返しているうちに状況そのものが変わってしまう。

交通流シミュレーションは、現地実験にくらべて条件を精密にコントロールでき、同一条件で多数のデータをとることができるという利点があり、交通制御方策の評価、信号タイミングの設定、道路の設計等において重要な役割を果たしている。

2. 交通流のモデル

2.1 車両の追従モデル (car following theory)⁶⁾

相続く2台の車に着目し、後続車が先行車の動きに対してどのように追従するかを考える。まず単純なモデルとして、定常走行車の車頭間隔が次の条件を満足するものとする。

- ① 先行車 i がブレーキを踏んでから T sec 後に後続車 $i+1$ がブレーキを踏む。
- ② 先行車に後続車は追突しない。

図1からわかるように、

$$x_i(t-T) - x_{i+1}(t-T) = \frac{v_{i+1}^2(t)}{2\alpha_{i+1}} + L_i + T v_{i+1}(t) - \frac{v_i^2(t-T)}{2\alpha_i}$$

ただし、 x, v, α ; それぞれ位置、速度、減速度

$t-T$; 先行車がブレーキを踏んだ時刻

ブレーキを踏む前の両者の速度が等しく、ブレーキ性能も等しいと仮定して上式を微分すると、

$$v_i(t-T) - v_{i+1}(t-T) = T \dot{v}_{i+1}(t) \quad (1)$$

(1)式を一般化して、後続車の加速度が相対速度だけでなく先行車との距離にもよるとすると、次のモデルが得られる。

$$v_{i+1}(t) = a \frac{v_i(t-T) - v_{i+1}(t-T)}{\{x_i(t) - x_{i+1}(t)\}^m} \quad (2)$$

先頭車の動きが与えられると、上式により車列のすべての車の動きが次々と決定され、流れの動的安定性や巨視的性質を論ずることができる。

2.2 巨視的モデル

交通流の巨視的なメジャーとして次のようなものがある。

交通量 Q [台/hr]; 単位時間あたりの通過台数

密度 K [台/km]; 単位道路長あたりの存在台数

平均速度 V [km/hr]; ある区間に存在する車の速度の平均

流体の流量は密度と流速の積に等しいから、

$$Q = KV \quad (3)$$

追従モデルの(2)式で、車頭間隔 $x_i - x_{i+1}$ を密度の逆数 K^{-1} と書きかえ、これを積分すると、

$$V = C \ln \frac{K_j}{K} \quad m=1 \quad (4)$$

$$V = V_f \left\{ 1 - \left(\frac{K}{K_j} \right)^m \right\} \quad m>1 \quad (5)$$

が得られる。

密度と速度が関数関係にあるので(3)式によって交通量 Q は密度 K または速度 V の関数、

$$Q = K f(K) = f^{-1}(V) V$$

となる。図2のように f や f^{-1} は減少関数なので Q を最大にする $K=K_m, V=V_m$ が存在し、これを最適密度および最適速度と呼ぶ。また、 $K=K_j$ のとき $V=0$ となり、したがって Q も0となる。 K_j は jam density と呼ばれる。

2.3 波動の伝播

微小道路区間 dx の微小時間 dt の間での存在台数の変化 $(\partial K / \partial t) dt dx$ は区間の両端での流入と流出台数の差 $-(\partial Q / \partial x) dx dt$ に等しいから下記の連続の式が得られる。

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

交通量 Q は密度 K の関数だから上式は、

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{dQ}{dK} \frac{\partial K}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

と書ける。これは K の波動方程式であり、波動の伝播速度 U は、

$$U = \frac{dQ}{dK} = V + K \frac{dV}{dK} \quad (7)$$

図 2 速度、密度、交通量の関係

すなわち、図 2 の交通量—密度曲線で接線の勾配が波動伝播速度となる。 dV/dK は負であるから、速度 V よりも波動の速度の方が遅い。密度が K_m より大のときは、波動は後方へ伝播する（衝撃波）。

3. 交通流シミュレーションの手法

3.1 コンピューター

普通は汎用の電子計算機が用いられる。記述言語とし

ては、SIMSCRIPT や GPSS のようなシミュレーション言語が用いられた例もある。米国や英国の国立研究機関の開発したものでは、プログラムの普及のため FORTRAN が用いられている。

交通流シミュレーション専用のハードウェアシミュレーターとしては、マンチェスター大学⁸⁾、東大生研⁹⁾、電子総研¹⁰⁾等のものがある。文献 9) のものでは、専用デジタル演算装置をミニコンで制御するハイブリッド方式をとっている。

実用に供せられているシミュレーションシステムでは、シミュレーション結果の出力にはラインプリンターが用いられているが、ブラウン管¹¹⁾¹²⁾や専用表示装置¹³⁾に表示した例もある（写真 1, 2）。

3.2 微視的モデルと巨視的モデル

シミュレーションの目的によりモデルの詳しさが選ばれる。

高速道路のランプ付近の現象や、交差点付近の車と車、車と人の干渉を調べる場合には、1 台ずつの車の動きをシミュレート

する微視的モデルが用いられる。

微視的シミュレーションでは、先行車への追従、右左折、マージ、車線変更等の際の挙動、黄信号時の判断、行列からの発進、車の到着等が詳細にモデル化され、個々の車の動きは確率現象として扱われる（4.1 節参照）。

交通信号で制御された街路網の交通の場合は、車は車群としてふるまうので、1 台ずつを区別しない巨視的モデルでも信号機のタイミングの評価には十分な精度が得

写真 1 シミュレーション結果のブラウン管表示¹²⁾

写真 2 シミュレーション結果のブラウン管表示¹¹⁾

られる。

シミュレートする対象が大きくなれば、コンピュータの容量や速度の制約からモデルは巨視的なものにせざるを得なくなるが、コンピュータの性能とシミュレーション手法の向上により、微視的モデルの対象規模は100交差点程度に達している。

本稿で引用したもの以外に文献 22)~26)を参照されたい。

3.3 車と道路の表現

(1) 道路をセグメントに分けるもの¹¹⁾¹³⁾

通路を進行方向に一定長のセグメントに分け、メモリのビットを対応させる。車がセグメントに存在すれば、対応するビットに1が書込まれ、車の移動は1をビットからビットにシフトすることにより表現される。

車の長さや車間を表現するには、セグメントを車長よりも細かく分け、車の長さに相当するだけ1を並べて書込む。

上記のような方法は初期の微視的シミュレーションで用いられた。

セグメントにメモリの語を対応させ、セグメント内に存在する車の台数を書込むという方法¹⁶⁾は、現在でも巨視的シミュレーションで用いられている(4.2節参照)。

(2) 車をメモリの語に対応させるもの¹⁵⁾

車1台ごとに数ワードの語を対応させ、これに車の位置、速度、長さ等の属性を書込む方法で、車の動きや位置関係を細かく表現できるので、微視的モデルで広く用いられている。

(3) 交通量波形モデル²¹⁾

街路網において交差点での流入と流出の交通量の信号1周期内の時間波形のみで交通流を表現するもので、全

信号機の周期が等しく、かつ変化しないときは、定常状態での波形の変換処理だけとなるので、きわめて高速にシミュレーションを実行できる(4.4節参照)。

ネットワークでの交通流の扱い方には、

- ① ネットワーク内の特定の点(たとえば交差点流入部)のみの交通流だけを調べる。
- ② 特定の車に着目して、この車の動きを全ネットワークを通してフォローする。

という2つのアプローチがあり¹⁴⁾、上述の交通量波形モデルは①に属する。微視的モデルでも対象規模が大きくなるにつれて①のアプローチが主流になっている。

4. シミュレーションモデルの実例

4.1 微視的モデル

米 Planning Research Corp. の Gerlough と Wagner により開発された NCHRP モデル¹⁵⁾を紹介する。

(1) 道路の表現

片側2車線の道路どうしの交差点を対象とする。車の位置は、停止線からの距離で表現される。

(2) 車の表現

各車は位置、速度、加速度、実車長、等価車長、目標速度、最大希望加速度、希望減速度、到着時刻、停止位置、フラッグの11語によって表現され、この語は各車線ごとに車列の順に並べられる。

(3) 車の追従走行

右左折と停止以外の場合には行列からの発進を含めて car following theory に従うものとし、2.1節の(2)式で $m=1$ としたものを用いている。

自由走行する車は目標速度との差に比例した加速度を持つものとしている。

(4) 車の停止

車が停止する場合は、現在位置から目標停止位置まで等加速度で減速するものとした。

(5) 左折(日本での右折に相当)

左折車は図3の点1で、対向直進車が交差点中心に到着するまでの時間(ラグタイム)の大きさを判定し、ラグタイムが充分大のときはパスAを通して左折する。ラグタイムが不足であると判定したときはパスBを通して地点2で停止し、対向車の車頭間隔(ギャップ)の大きさを判定し、充分なギャップが見つかれば左折を行う。ラグタイムやギャップの分布確率とラグタイムやギャップの長さに対する左折遂行確率がテーブルとして与えられている。

(6) 車線変更

左車線にいる直進車は、その車線に左折車が待っている右車線が空いていれば、右車線への車線変更を試み

図 3 左折車の動き

る。隣の車線を走る車が車線変更しようとする車の横に来るまでの時間(ラグタイム)を現在の位置と速度に基づいて計算し、ラグタイムに対する車線変更確率のテーブルに基づいて車線変更するかどうかを確率的に決定する。

(7) 車の発生

到着間隔の分布は Kell によって与えられた下記の式を用いた。

$$P(H \geq t) = (1 - \alpha) \rho^{-(t-\lambda)/(T_1-\lambda)} + \alpha e^{-(t-\tau)/(T_2-\tau)}$$

ただし、 $P(H \geq t)$; 到着間隔が t 以上となる確率

α ; 追従走行車の比率

4.2 巨視的モデル

米 Planning Research Corp. により開発された TRANS¹⁶⁾ を紹介する。このモデルは前節の NCHRP モデルとともに、わが国の科学警察研究所で改良が加えられ、日本の交通特性に合うモデルの開発が進められている¹⁷⁾¹⁸⁾。

(1) 道路の表現

図 4 のように道路網は交差点と、交差点間を結ぶリンクとによって表現される。上りと下りは別のリンクによって表現する。

リンクは図 5 のように車線ごとに長さ一定のエレメントに分けられる。エレメントの長さは、自由走行速度で走る車がシミュレーションの 1 スキャンタイムに通過する距離に等しくとる。

(2) 車の表現

エレメントの中に存在する車が一群として扱われる。各スキャンサイクルごとに、エレメントからエレメントに何台の車を移動させるかを定めることにより、シミュレーションを進めて行く。

(3) リンク内の車の移動

スキャンサイクルごとに先方エレメントの空き台数だ

図 4 道路ネットワーク

図 5 道路リンク

け、後方エレメントから車を前に詰める。

(4) リンク間の車の移動

- ① 赤信号時: リンク間の車の移動はない。
- ② 青信号開始時; 行列からの発進は、青開始時からの時間の関数として与えられたレートで行われる。
- ③ 青信号時; 右左折車に対する対向直進車の妨害確率を考慮する。

(5) 車の到着

車はポアソン到着するものとして、スキャンサイクルごとに各入力リンクの到着台数を確率的に定める。

4.3 微視的モデルと巨視的モデルの混用

米運輸省の Transportation Systems Center による SCOT (Simulation of Corridor Traffic)¹⁹⁾ を紹介する。このプログラムは、高速道路の巨視的モデル DAFT (Dynamic Analysis of Freeway Traffic) に、街路の微視的モデル UTCS-1 (Urban Traffic Control System)²⁰⁾

図 6 速度曲線

を埋め込んだもので、高速道路と街路の組合せからなる corridor をシミュレートするためのものである。

(1) 高速道路上の車の走行

街路と流入ランプで微視的に扱われた車は、高速道路上では車群に吸収され、車群はリンクと密度によって定まる速度で走行する。

(2) 街路での車の走行

バス停や二重駐車の影響を含めて忠実にシミュレートすることをねらっている。車種はトラックと 10 種の乗用車に分けている。

自由走行する車は図 6 のような車種ごとに定められた速度曲線に従って走る。すなわち乗用車の場合では、発進後 20 ft/sec の速度になるまでは 8 ft/sec^2 の加速度で加速し、次に巡行速度になるまで 4 ft/sec^2 で加速し、前方の低速車、行列、赤信号等に妨げられるまで一定速

度で走る。巡行速度はリンクごとの平均自由速度を中心とする統計的分布に基づいて 1 台ごとに与えられる。停止するときは、巡行速度の 1/2 になるまで 1 ft/sec^2 で減速し、その後は停止するまで 7 ft/sec^2 で減速する。

先行車に対する追従走行については、2 車の間隔と、おのおのの速度に基づいて加速度が定められる。

行列からの発進、交差点での右左折に関しては、他のモデルと同様に確率的な取り扱いが行われる。

4.4 波形モデル

英 Transport and Road Research Laboratory の開発した TRANSYT (Traffic Network Study Tool)²¹⁾ を紹介する。これは信号機で制御されている道路網の交通流をモデル化し、信号による車両の遅れを最小にする信

図 7 発進波形の計算

図 8 走行中の車群の変形

号パラメーターを山登り法で求めるもので、英国で広く実用されている。

（1）交通流の表現

交通パターンは信号周期ごとに同一のものが繰返されるとし、信号周期の 1/50 ほどの時間的な交通量波形として、交差点での到着波形、発進波形が表現される。

（2）交差点での波形の変形

停止線からの発進波形は、到着波形に信号による変形を施して求められる。赤信号中は発進車はなく、青信号になると待行列のある間は飽和流で発進し、待行列がなくなると到着波形がそのまま発進波形となる。交差点からの発進波形には、これに右左折車が重畳される。この模様を図 7 に示す。

（3）交差点区間での波形の変形

走行により交通流は次式による変形を受ける。

$$q_i' + t = F \cdot q_i + (1 - F) q_{i-1}' + t$$

q_i は第 i 番目の時間スロットの発進交通量

q_i' は第 i 番目の時間スロットの到着交通量

$$F = 1 / (1 + 0.5t)$$

t は区間平均走行時間の 0.8 倍で、この平滑化係数 F は実測で求められた。波形変形の様子を図 8 に示す。

（8）信号パラメーターの最適化

評価関数は、信号による遅れと停止回数の加重和で表わされる。初期値として与えた任意の信号パラメーターについて各交差点の到着波形を求め、この波形を固定したまま各交差点区間について相対オフセットを一定ステップで変化させ、評価関数を最小とするものを求める。求めた信号パラメーターによって全交差点の到着波形を更新し、先の最適化手順を繰返す。異なるステップ幅でこれを 8 回繰返して最適化を終了する。

5. む す び

交通流のモデルとシミュレーション手法について概観し、典型的なシミュレーションモデルの例を紹介した。

交通流シミュレーションは、研究者の研究対象としてよりも交通実務家のツールとしての性格が強くなって来た。実用的モデルを作るためには、充分な金と時間をかけてフィールドでの検定とモデルの改良をくり返す必要があり、米国等では国費が継続的に投入されている。

本稿をまとめるにあたって御助言と資料の提供を賜った科学警察研究所 池之上慶一郎氏、東京大学生産技術研究所 高羽雄祐助教授、豊田中央研究所 辻弘良氏、ならびに住友電気工業 北村武次氏に深く感謝する。

(昭和 50 年 6 月 30 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 猪瀬, 浜田: 道路交通管制, 産業図書 (1972)
- 2) 田中, 油本, 前田: 道路交通管制システム—電子計算機による広域交通信号制御—, 電子通信学会 (1972)
- 3) Inose, Okamoto and Yumoto: A Multi Computer Urban Traffic Control and Surveillance System in Tokyo, IFAC/IFIP/IFORS 2nd World Symposium "Traffic Control and Transportation Systems" (Monte Carlo, 1974)
- 4) Hasegawa: Traffic Control System in Osaka, 1st U.S.-Japan Computer Conference (1972), 494-495
- 5) P.F. Everall: Urban Freeway Surveillance and Control: the State of the Art, U.S. Department of Transportation FHWA (1972)
- 6) D. R. Drew: Traffic Flow Theory and Control, McGraw-Hill (1968) 337-342
- 7) 油本, 橋本, 山本: 交通流の計測, 計測と制御, 11, 6(1972) 535-547
- 8) P. J. Grigg, M. G. Hartley: Simulation of Traffic Flows in a Road Network, Dept. of Electrical Engineering and Electronics, Univ. of Manchester, Institute of Science and Technology.
- 9) 高羽, 浜田, 谷口ほか: 街路網を対象とした交通流シミュレータ TRAN-SIM II, シミュレーション技術研究会 (1975)
- 10) 松田, 秋山, 黒川, 油本: ETL ハイブリッド計算機による交通管制システムについて, アナログ技術研究会 (1970)
- 11) M. C. Stark: Simulation of the Arterial Street, Conference on Traffic Surveillance, Simulation and Control (Washington D. C. 1964) 127-
- 12) R. Böttger: Simulation von Strassenverkehr mit Datenverarbeitungsanlagen, Neue Technik A4/1968
- 13) Sakai, Nagao: Simulation of Traffic Flows in a Network, Communications of the ACM, 12, 6 (1969) 311-318
- 14) OECD Road Research Group: Area Traffic Control Systems (Paris 1972) 23-26, 41-46
- 15) D. L. Gerlough, F. A. Wagner: Improved Criteria for Traffic Signals at Individual Intersections, National Cooperative Highway Research Program. Report 32, Highway Research Board (1967) 27-43
- 16) D. L. Gerlough, F. A. Wagner: Simulation of the Network, Conference on Traffic Surveillance, Simulation and Control (Washington, D. C. 1964) 152-165
- 17) 池之上, 齊藤, 花堂: 街路交通流のネットワーク・シミュレーション, 科学警察研究所報告, 14, 1 (1973) 17-31
- 18) 池之上, 齊藤, 花堂: 平面交差点の交通流シミュレーション (第 2 報), 科学警察研究所報告, 15, 1 (1974) 1-23
- 19) A. Muzyka: Urban/Freeway Traffic Control, IEEE Conference on Decision and Control, (New Orleans, 1972)
- 20) E. B. Lieberman, R. D. Worral, J. M. Bruggeman: Logical Design and Demonstration of UTCS-1 Network Simulation Model, 51st Annual Meeting, Highway Research Board (1972)
- 21) D. I. Robertson: Transyt; a traffic network study tool, RRL Report LR253 (1969)
- 22) R. G. Needham: ROSIM; A Simulation Program of a Road Network Controlled by Traffic Responsive Signals, Road Research Laboratory
- 23) Case Studies in Computer Simulation TRANSIM Activity Network Analysis of Asroc Launcher Exchange Project, UCLA-ENG-7057 (1970)
- 24) A. D. May: Optimization Techniques Applied to Improving Freeway Operations
- 25) シミュレーション技術研究会資料 (1973)
- 26) R. C. Sandys: The Dynamic Highway Transportation Model (DHTM) Users Manual, SRI Project IRD 83053102-AHJ (1971)