

マクロ交通シミュレーションモデルとその数値計算手法に関する研究

Macroscopic Traffic Simulation Modeling and its Numerical Analyses

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 上出 祐次 (Yuji Kamide)

北海道大学大学院工学研究科 正員 中辻 隆 (Takashi Nakatsuji)

Burapha University

非会員 Rattaphol PUEBOOBPHAN

1. 本研究の背景と目的

近年、世界各国で多くの交通シミュレーションが提案・活用されている。交通シミュレーションはある施策による交通の流れの変化を事前に把握する際に利用されることが多く、一般的には渋滞等の交通現象を表現し、評価することを目的としている。

交通シミュレーションを行う理論モデルには大別してミクロモデル(微視的モデル)とマクロモデル(巨視的モデル)に分類される。ミクロモデルは個々の車両の挙動を模擬することで詳細に交通流を予測するもので、比較的狭い範囲を対象とする場合によく用いられる。一方マクロモデルは交通流を流体として捉え、流体の動きを模擬して予測を行うモデルである。個々の車両運動を表現しなくて良いためミクロモデルに比べて比較的計算時間が短く済むため、広い範囲を対象とした予測やリアルタイムでの予測も可能である。

本研究では過去10年に渡って大きな論争¹⁾が繰り返されてきたマクロモデルについて着目し、幾つかのモデルを用いた推定精度の比較を行う。またそれとともに、解析精度の向上を計った新しい数値計算手法を提案することを目的とする。

2. マクロモデル

マクロモデルは1950年代に提案されたLWRモデルを始祖としており、時刻 t 、位置 x における密度を $\rho(x, t)$ 、交通量を $q(x, t)$ 、平均速度を $v(x, t)$ とすると、これらの交通変量を求めるために以下の3つの状態方程式が用いられる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (1)$$

$$q = \rho v \quad (2)$$

$$v = V_e(\rho) \quad (3)$$

ここで、 r は流入/流出交通量であり、 $V_e(\rho)$ は均衡速度(密度-速度関係式)である。この3つの式で、(1)式は連続式、(2)式は基本関係式と呼ばれるものであり、それぞれのマクロモデルに共通な状態方程式である。(3)式は速度と車両密度の関係式であり、各モデルによって異なっている。つまり、この(3)式が各モデルの特徴を表しているとも言える。

例えば、LWRモデルでは車両密度が求められれば一意的に速度が決まるような単純な関係式を設定している。

このようなマクロモデルのことを単純マクロモデル(一次モデル)と呼び、一意的に求められない複雑な関係式をもつモデルを高次モデルと呼ぶ。本研究では推定精度の比較の対象として代表的なマクロモデルであるPayneモデル、Cell Transmission Model、Helbingモデルの3つを採用することとする。以下にそれぞれのモデルの説明を挙げる。

2.1 Payne モデル

1970年代にPayneによって提案されたモデルで、式(3)の代わりに追従理論に基づいた交通流の速度変化を表す式(4)を用いている。一次モデルでは考慮されていなかった密度勾配や速度の分散性を取り入れたもので、高次モデルと呼ばれるものの始祖である。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\tau} [v - V_e(\rho)] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (4)$$

このモデルは90年代前半まで幾多の改良を行いながら主流に使われ続けていた。しかし、交通流の特性を十分に表していないとして90年代後半にDaganzoによって流体力学に基礎を置く高次モデルが批判された後は主流から外れつつある。この批判は、交通流には異方性や非対象性、運転者の特性など水流とは異なった独自の性質があるが、その特徴が十分に表されていないということであった。

2.2 Cell Transmission Model(CTM)

1990年代中盤にDaganzo²⁾が高次モデルへの批判の後自身で提案した一次モデルであり、LWRモデル等の一次モデルでは問題があったとされる渋滞時の表現精度に優れていると言われている。本研究で用いるCTMはDaganzoが最初に提案したものではなく、Lebacque³⁾のGodunov差分を用いたCTMである。また、現在日本で最も主流に使われているブロック密度法も基本的な概念はこのモデルと同様であり、交通状況が渋滞か非渋滞かによって交通量の推定方法を分けて考えるモデルである。

2.3 Helbing モデル

Daganzoの高次モデルへの批判を受けて、90年代中盤にHelbing⁴⁾が提案した高次モデルである。それまでの主な高次モデルが流体力学に基礎を置いていたのに対し、このモデルは気体力学のボルツマン方程式に基礎を置いて交通流を表現するものである。

また、このモデルでは Payne モデルなどの高次モデルでは考慮されていなかった速度変動 θ についての運動方程式を取り入れている。このモデルでは式(3)の代わりに追従挙動だけでなく、追越挙動も考慮した式(5)が用いられている。また、速度変動については Helbing らがアウトバーンで行った走行車両の実験データから求めた経験式(6)を用いている。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{\tau} [V_0 - v] - \frac{1}{\tau} [V_0 - V_e] \quad (5)$$

$$\theta = A(\rho) V^2 = \left[A_0 + \Delta A \tanh \left(\frac{\rho - \rho_c}{\Delta \rho} \right) \right] V^2 \quad (6)$$

3. 数値差分法

マクロモデルにおいては、差分法による数値解析を行っているため、数値差分法の選択は解析精度に大きな影響を及ぼすと考えられる。ただし一次モデルである CTM やブロック密度法は定式化された状態で提案されているため、差分法についての議論はあまり見られない。

一方、高次モデルについてはその差分法の選択について様々な報告がされているが、過去の例を見ると実際には単純な差分法である FTFS を使っている例が多く見られる。そこで、差分法の選択による影響がどの程度かを調査するために差分法の安定性を検討した。

安定性の判断に際しては、Von Neumann の安定性解析を行うとともに交通流モデルを用いた再現性を見て判断した。対象とする差分法としては代表的な差分法である FTFS、FTCS、Lax-Friedrich、Lax-Wendroff、風上差分法の5つである。この中で風上差分法については計算を行う際に十分に注意する必要がある。交通流で考える場合、自由流時は上流側から波が伝わるため上流側が風上となるが、渋滞時は下流側から波が伝わってくるため下流側が風上になるという特徴を持っている。

3.1 Von Neumann の安定性解析

まず数値差分法自体の安定性を調べるために、進行波を持つ一次元線形スカラー移流方程式を考え、Von Neumann の安定性解析を行った。これは時刻 n における波形として、

$$u_j^n = g^n \exp(ij\theta) \quad (7)$$

という式を差分式に代入し、複素増幅率 g を求め、増幅率 $|g| \leq 1$ となれば安定であるという解析方法である。それぞれの解析結果は表 1 のようになった。これを見ると、常に安定という結果になったのは Lax-Friedrich、Lax-Wendroff、風上差分法だけであり、過去によく使われてきた FTFS は常に不安定という結果であった。

交通流モデルは線形方程式でなく非線形方程式であるため、この解析だけでは結論を出すことができない。しかし、過去に交通シミュレーションでよく使われていた FTFS が不安定であったことから、差分法による影響に留意する必要があるといえる。

表 1. 解析結果

差分法	解析結果
FTFS	不安定
FTCS	不安定
Lax-Friedrich	安定
Lax-Wendroff	安定
風上差分法	安定

3.2 交通流モデルを用いた解析

次に実際に交通流モデルを用いて数値シミュレーションを行い、再現性を調べた。用いる交通流モデルとしては、高次モデルの最も簡単で違いを判断しやすいと考えたため Payne モデルとした。図 1 は数値シミュレーションで求めた密度の位置変化を示す波形の一例である。

再現性については、求めた結果と GreenShield 式(図 2)による理論値の一致性を調べるために決定係数を求め、その決定係数を基に再現性を判断した。求めた決定係数を表 2 に、Von Neumann の安定性解析、交通流モデルを用いた再現性の両方の結果をまとめたものを表 3 に示す。

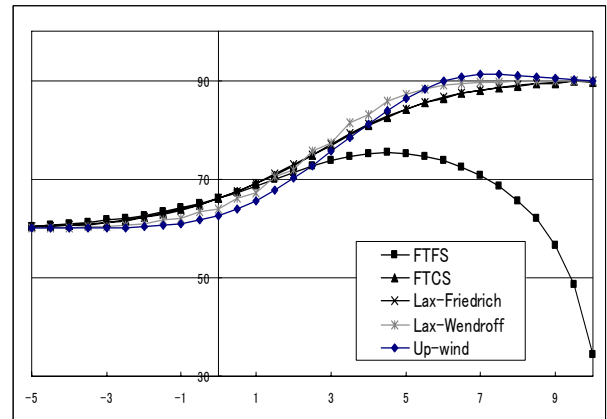


図 1. 差分法の安定性

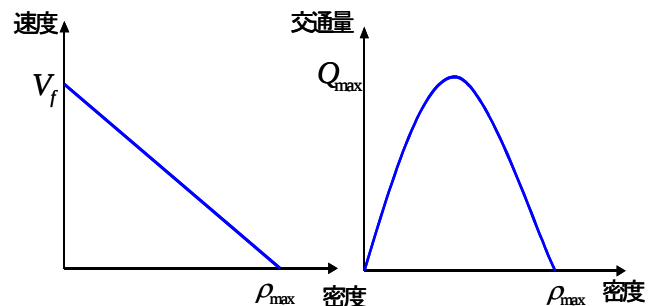


図 2. Green Shield の関係

表 2. 決定係数

差分法	K-V関係	K-Q関係
FTFS	0.87	0.1
FTCS	0.99	0.65
Lax-Friedrich	0.01	0.21
Lax-Wendroff	0.98	0.43
風上差分法	0.99	0.96

表 3. 差分法の再現性

差分法	安定性解析	交通流モデル
FTFS	×	×
FTCS	×	○
Lax-Friedrich	○	×
Lax-Wendrof	○	×
風上差分法	○	○

Von Neumann の安定性解析、交通流モデルを用いた解析の両方で安定となったのは風上差分法のみであった。以上より交通流モデル、特に高次モデルの差分法には風上差分法が再現性が高く、有効であると結論づけられる。よって本研究で扱う高次モデルについては、風上差分法を用いた式で比較を行うこととする。

4. 数値シミュレーションによる比較

各モデルの精度を比較するために INTEGRATION⁵⁾から得た人工の観測データを用いて数値シミュレーションを行った。シミュレーションに用いた設定条件は表 4 の通りである。INTEGRATION はシミュレーションソフトであるが、シミュレーション内に車両感知器を設置し、そのデータを得ることができる。そのため仮想の入力データの理論解を求めるよりも現実的なデータを得ることができるため、精度の比較を行うには適当だと考えられる。INTEGRATION によって得られるのは交通量データ(図 3)と地点速度データ(図 4)であり、このデータと数値シミュレーションの結果を比較して決定係数(R^2 値)を求めることによって各モデルの精度を比較・検証した。また Helbing Model については単純化のため、式(6)の代わりに式(8)を用いることとした。

$$\theta = A_1 V^2 = 0.01 V^2 \quad (8)$$

表 5、表 6 は各モデルによる 10 分後、20 分後の交通量、及び平均速度の R^2 値を比較したものである。

表 4. 設定条件

セグメント長	300(m)
タイムステップ	10(sec)
自由速度	108(km/hr)
ジャム密度	160(veh/km)
緩和時間	32(sec)
反応時間	1.8(sec)

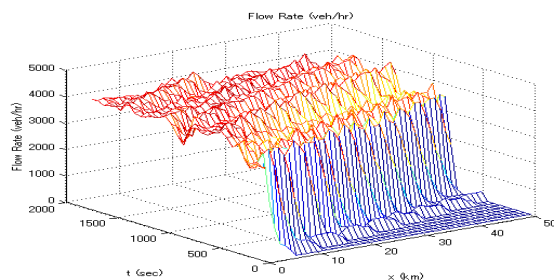


図 3. INTEGRATION の車両感知器データ(交通量)

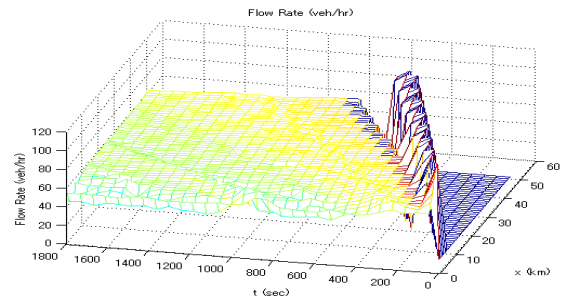


図 4. INTEGRATION の車両感知器データ(地点速度)

表 5. 10 分後の R^2 値

モデル	交通量	平均速度
CTM	0.86	0.85
Payne Model	0.45	0.33
Helbing Model	0.62	0.51

表 6. 20 分後の R^2 値

モデル	交通量	平均速度
CTM	0.84	0.07
Payne Model	0.53	0.01
Helbing Model	0.12	0.03

まず 10 分後の推定結果の比較では CTM の結果が交通量、平均速度ともかなり精度が高く、Payne モデルがあまり精度が良くないという結果になった。20 分後の結果を見ると全体的に精度が落ちてきていて、特に平均速度の方については全てのモデルの推定が非常に精度の悪い結果となった。しかし、その中でも CTM は交通量の推定については高い精度を保っていたため、今回行った数値シミュレーションでは CTM が一番精度が良いといえる。しかし平均速度についての精度が非常に悪いのでこれ以上長い時間の推定となると良い精度は望めないと考えられる。

今回シミュレーションの結果と測定データの比較によって一番精度が良いモデルは CTM であると判断したが、10 分後の結果だけで比較すると Helbing モデルもそれほど悪い精度というわけではない。そこで数値計算手法を変えることによって、精度を向上させられると考え、手法の改善を検討した。

5. 修正高次モデルの構築

5.1 修正高次モデル

一次モデルと高次モデルはそれぞれが異なった特徴を持っている。例えば、一次モデルは渋滞時と非渋滞時で分けて考えるといった簡潔で理解しやすい長所を持っている。しかし、前後のセグメントの関係だけで考えるため変化が急激であるという特徴を持ち合わせている。一方高次モデルは密度勾配項を考慮しており、密度が漸近的に変化する実際の現象に即していると考えられる。そこで、本研究では一次モデルと高次モデルの長所を組み合わせ合わせた修正高次モデルを提案する。

本研究では、修正高次モデルを「高次モデルの考え方に基礎を置き、その数値計算手法の中に一次モデルの考えを組み込んだモデル」と定義する。高次モデルをベースとしているため、現在までに提案されている様々な種類の高次モデルに適用することが可能である。またこの修正高次モデルを用いることによって、風上差分法を用いた高次モデルに比べて推定時間の減少や推定精度の向上が計られると考える。式(9)は連続式を差分式化したものであり、以下に具体的な計算手法を述べる。

$$\rho_j^{n+1} = \rho_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\tilde{q}_{j+\frac{1}{2}}^n - \tilde{q}_{j-\frac{1}{2}}^n) \quad (9)$$

(1) $\tilde{q}_{j+\frac{1}{2}}^n, \tilde{q}_{j-\frac{1}{2}}^n$ の算定

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{渋滞時} \Rightarrow \tilde{q}_{j+\frac{1}{2}}^n = \text{Min} (q_j^n, q_{j+1}^n) \\ \text{非渋滞時} \Rightarrow \tilde{q}_{j+\frac{1}{2}}^n = \text{Max} (q_j^n, q_{j+1}^n) \end{array} \right.$$

これは前方の交通状況が渋滞している時は移動可能な交通量は少なく、渋滞していなければ多くの交通量が移動可能であることを示している。

この算定方法を用いることにより、渋滞時と非渋滞時を分けて考えるという一次モデルの考え方を高次モデルの中に組み込むことが可能となる。

(2) 移流項の算定

移流項とは上流からの影響を表す項であるため、渋滞・非渋滞という考えではなく、常に上流のセグメントの値を用いて算定を行うこととする。

$$\tilde{q}\tilde{v}_{j+\frac{1}{2}}^n = qv_j^n, \quad \tilde{q}\tilde{v}_{j-\frac{1}{2}}^n = qv_{j-1}^n$$

(3) 交通圧力の算定

交通流の場合、水流などとは違って前方の状況による圧力に比べて後方の状況による圧力は少ないため、交通圧力についても渋滞・非渋滞ではなくて常に下流のセグメントの値を用いることとする。

$$\tilde{p}_{j+\frac{1}{2}}^n = p_{j+1}^n, \quad \tilde{p}_{j-\frac{1}{2}}^n = p_j^n$$

5.2 修正高次モデルの検証

前節で提案した修正高次モデルが本当に有効であるかを調べるために数値シミュレーションを行った。比較に用いた観測データ、および与えた設定条件は4章で行った数値シミュレーションと同様である。今回は Payne モデル、Helbing モデルに修正高次モデルを適用し、それぞれの風上差分法を用いた高次モデルの結果と比較し修正高次モデルの有効性を調べる。表7、表8はそれぞれの10分後、20分後の交通量、および平均速度の R^2 値を比較したものである。

表 7. 10 分後の R^2 値

モデル	交通量	平均速度
Payne	0.45	0.33
Payne(Mix)	0.51	0.12
Helbing	0.62	0.51
Helbing(Mix)	0.86	0.85

表 8. 20 分後の R^2 値

モデル	交通量	平均速度
Payne	0.53	0.01
Payne(Mix)	0.74	0.04
Helbing	0.12	0.03
Helbing(Mix)	0.13	0.08

交通量の推定に関しては Payne モデル、Helbing モデルともに精度の向上が計ることができたが、平均速度の推定については Payne モデルのほうで一部精度の減少が見られた。しかし、Helbing モデルの方は10分後の推定が4章で一番精度が良いとした CTM と同等の値を示しているなど、総合的に見てみると修正高次モデルを用いた推定の方が精度が向上していることがわかる。このことより修正高次モデルは有効であると結論づけられる。

6. おわりに

本研究では3つのマクロモデルによる比較を行うことによって各モデルの精度を示すとともに、高次モデルの数値計算手法を構築し改良に成功した。単路の条件かつシミュレーションデータによる比較を行ったが、実測データを用いてネットワークを広げる際には、この手法によって精度が向上するとは限らないため、より現実的な検証をしていく必要があると考えられる。

いかに有効なモデルであろうと時間的に変動する複雑な交通状況を正確に推定することは困難であり、初期条件だけで何時間も先の交通状態を推定するのは不可能ともいえる。しかし、感知器などのデータによるフィードバック推定を行い推定時間を短くすることで、より正確な交通流の表現ができると考えられる。今後は本研究で提案した修正高次モデルにカルマンフィルターを組み合わせフィードバック推定を可能にし、推定の精度を向上させたい。

参考文献

- 1) Carlos F. Daganzo : Requiem for Second-order Fluid Approximations of Traffic Flow : Transportation Research Part B, Vol29, pp277-286, 1995
- 2) Carlos F. Daganzo 「The Cell Transmission Model : A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent With The Hydrodynamic Theory , Transportation Research Part B, Vol28, pp269-287, 1994
- 3) Lebacque : The Godunov Scheme and What It means for First Order Traffic Flow Models , Proc.13th Intrn. Symp. Transportation and Traffic Theory , pp.647-677, 1996
- 4) Dirk Helbing, Martin Treiber : Numerical Simulation of Macroscopic Traffic Equations , Computing in Science and Engineering, Vol.6 (5), pp89-99, 1999
- 5) INTEGRATION User's manual