

自然環境への影響を考慮したミクロ交通流モデルの新しい妥当性検証手法

A new validation method for microscopic car models affecting to the natural environment

白山 晋*, 市橋 立**

*RACE, the University of Tokyo

**Accenture

*工博, 東京大学助教授, 人工物工学研究センター (〒160-0004 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

** 工修, アクセンチュア株式会社, 戦略部門 (〒107-8672 東京都港区赤坂 7-1-16 日本生命赤坂第2ビル)

The simulation intended for the real social systems has been performed on each domain. However, it is necessary to deal with as one system including natural environment to understand the entire intertwined object complexly. In this paper, interaction of a traffic system and natural environment is inquired by integrating a traffic simulation system and a local area wind energy prediction system. In that case, several issues will occur owing to a difference of the scale to be governed in the events. Therefore, we may separate scale-dependent effects in each event, and assume model on each scale. And then, a method of verification or validation of the models is considered. At this point, we need model validation method linking between each scale. This paper describes a micro-level validation method in a traffic simulation including interaction of natural environment. Clustering spatio-temporal datasets is proposed as the validation method. It is shown that a spatio-temporal data obtained from the movement of each vehicle can be clustered in a space constructed from the summation of absolute values of the accelerations and the average of OV function proposed by Bando et al., or the average of the velocities.

Key Words: Validation, Traffic simulation, Microscopic car model, Natural environment

キーワード: 検証, 検証手法, 交通流シミュレーション, ミクロ交通流モデル, 自然環境

1. はじめに

社会という複雑に絡み合った対象全体を理解するには、自然環境を含めて、相互作用を考慮した一つのシステムとして扱わなければならない。このシステムを扱うために、事象毎のスケール分離によりスケール毎にモデル化を行い、スケール毎の異なるアプローチを統合し、システム全体を構成するという戦略が採られることが多い。この際に問題になるのは、分離したスケール内での検証と、スケール間の干渉である。あるスケールにおけるモデルの検証を考えた場合、そのスケールでは十分と考えられる検証であってもスケール間の干渉によって検証が不十分になるという可能性がある。このため、あるスケール内に着目したとしても、スケールを繋ぐようなモデルの検証手法が必要になる。特に、複数の異なるスケール、あるいはアプローチのシミュレーション群の統合を行う場合、信頼性のある分析・予測システムを構築するためには検証手法を確立することが必須である。

シミュレーションにおける検証は、正当性の検証と妥当性の検証に分類される^{1),2),3),4)}。正確な検証のためには、

正当性検証と妥当性検証を同じスケールで行わなければならない。しかしながら、多くのシミュレーションにおいて、ミクロレベルに対する妥当性検証手法が不足している。また、異なる思想のシミュレーションを統合して一つのシステムを構築する場合、シミュレーション統合の段階において、ミクロレベルでの妥当性検証で検討したミクロな挙動が、スケール間の相互作用に及ぼす影響を検証する必要がある。

本稿では、交通システムと自然環境の相互作用を、交通流シミュレーションと環境シミュレーションの統合によって分析する際に必要となるミクロレベルの検証手法について検討し、ミクロ交通流モデルに対する新しい妥当性検証手法を提案する。

2. 交通流シミュレーションの検証手法

検証は、正当性検証 (Verification) と妥当性検証 (Validation) の二つに分類される。Sargent^{3),4)}によれば、正当性検証は、「コンピュータモデルとその実装のプログラムが正しいことの確認」とされ、妥当性の検証は、

「適用領域において、コンピュータモデルが、モデルの使用目的に対して満足できる範囲の正確さを有していることの立証」とされている。Sargent は、モデル化と検証のプロセスを二つのモデルに分類している。その一つを図-1 に示す。図-1 における検証プロセスでは、概念モデルに対する妥当性検証 (Conceptual Model Validation)、コンピュータモデルに対する正当性検証 (Computerized Model Verification)、運用上の妥当性検証 (Operational Validation)、データに対する妥当性検証 (Data Validity) の四通りの検証が存在する。

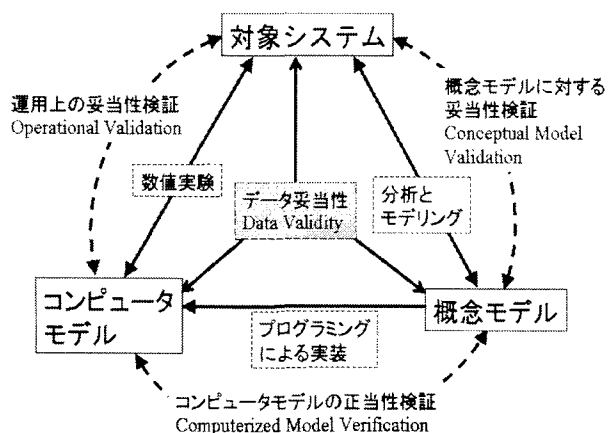


図-1 検証とモデル化の枠組 ^{3),4)}

交通流シミュレーションにおいては、赤羽らがネットワークモデルに対する検証手法を提案している ⁵⁾。また、花房らは市街地交通流シミュレータ AVENUE ⁶⁾ に対して発進波と停止波の理論値との比較や検証用データセットの構築を行っている ^{7),8),9)}。これらをマイクロモデルとマクロモデルに分け、Verification と Validation に対応させると表-1 になる。概念、およびコンピュータモデルの正当性検証の項目としては交通流における衝撃波的波動の伝播状況、渋滞時の合流/分流比、飽和交通流量、経路コストと経路選択確率の関係などがある。運用、およびデータに対する妥当性の検証項目は、リンク交通流、合分流や交差点の方向別交通量、リンク旅行時間などである。

表-1 交通流シミュレーションにおける検証

	Verification	Validation
ミクロレベル	車両挙動の検証	リンク旅行時間 リンク間平均流量
マクロレベル	交通流特性の検証 渋滞の発生	実際の交通統計量との比較

ミクロレベルの正当性検証における車両挙動の検証とは、例えば、前後する二つの車両の挙動をモデル化する際に理論的に不具合のない車間距離の変化などを確かめるものである ¹⁰⁾。車両群となったときに、個別車両の挙動がどのように影響するかについては、交通流における衝撃波的波動の伝播状況などをマクロレベルの正当性検

証として調べるということが行われている。

一方、妥当性の検証に関しては、表-1 に示すように統計量を用いたものが主である。マイクロモデルにおいては、ミクロレベルでの個々の車両挙動を分離したような検証は行われていない。図-1 の Sargent の検証モデルの立場からは、データの妥当性検証を中核とした実空間での個別の車両挙動との比較が考えられるが、現実的ではなく、その前段階での検証手法が必要となる。

本稿では、マイクロモデルの妥当性検証に対して、概念モデルに対する妥当性の検証と運用上の妥当性の検証が不十分であると考え、個々の車両挙動の影響が反映される特性量を導き、その特性量を利用した妥当性検証手法について提案する。また、この際に自然環境との相互作用を考慮する。この場合、交通流シミュレーション単独でミクロレベルの構造を考えるだけでは不十分であり、レベル間を繋ぐような特性量の導出と検証手法が必要になる。

3. ミクロモデルに対する妥当性検証手法

3.1 交通流シミュレーション

本稿では、ネットワーク型のマイクロ交通流モデルによってシミュレーションを行う。道路ネットワークはリンクとノードからなり、リンクは任意数の車線を持つものとする。ノードは複数のリンクがあれば交差点として機能するが、現時点では信号モデルを含めておらず、今後の検討課題としている。車両挙動モデルは様々なものがあるが、車両移動、車線変更、経路選択行動に大別して提唱されることが多い。また、車両移動は、Q-K モデルと追従モデルに分けられる。

Q-K モデルの代表であるブロック密度法 ¹¹⁾ は、以下のようなモデルである。はじめに、リンクを細かなブロックに分割し、その間を流体近似する。次に交通流の移動量を、交通量(Q)と交通流密度(K)関係と交通量の保存則を用いて求める。例えば、時間刻み幅を dt 、自由流速度を V_f として、ブロック長を $dL=V_f dt$ として車線毎に分割する。各ブロック i には交通量 Q_i と密度 K_i の関係が設定されており、この関係を $Q_i=f(K_i)$ で表す。一般的には図-2 のような関係を用いる。

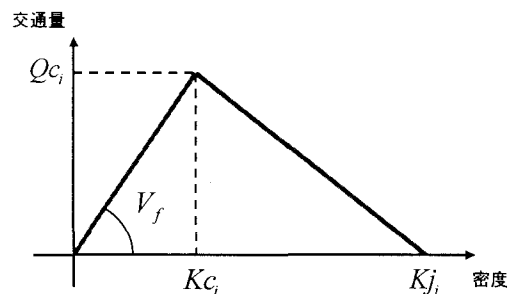


図-2 Q-K の関係図

Q_{c_i} はリンクの交通容量、 K_{c_i} は臨界密度、 K_{j_i} はジャム

密度を示す。密度が Kc_i 以下の領域は自由流領域と呼ばれ、各車両が自由流速度で走行している状態である。密度が Kc_i 以上の領域は渋滞領域と呼ばれ、渋滞が発生しており密度が増えるほど交通量は減少する。時間ステップ毎に式(1)に従って各ブロックの密度 K_i を更新していく。ここで $dQ_i(t)$ は時刻 t にブロック i に流入してくる流量である。

$$\begin{aligned} T_{i+1} &= \begin{cases} Qc_{i+1} & \text{if } (K_{i+1} \leq Kc_{i+1}) \\ f_{i+1}(K_{i+1}(t)) & \text{otherwise} \end{cases} \\ T_i &= \begin{cases} f_i(K_i(t)) & \text{if } (K_i \leq Kc_i) \\ Qc_i & \text{otherwise} \end{cases} \\ dQ_{i+1}(t) &= \min(T_i, T_{i+1}) \\ K_i(t+dt) &= K_i(t) + \frac{dQ_i(t)dt}{dL} - \frac{dQ_{i+1}(t)dt}{dL} \end{aligned} \quad (1)$$

追従モデルは、前方車両との速度差により加速度を制御するモデルが基本となる。車両の識別子を m とし、 m 番目の車両の速度 v_m を次の方程式で与える。

$$\frac{dv_m(t+T)}{dt} = a(v_{m+1}(t) - v_m(t)) \quad (2)$$

ここで、 a は感応度、 T は反応時間の遅れを示す。パラメータ依存性が大きいので、このままの形式が利用されることは少ない。いくつかの工夫がなされ、追従モデルの研究は現在でも続けられている¹²⁾。

本稿では、二つのモデルに着目する。一つは、速度と車間距離を結びつけたモデルである（SV モデルと呼ぶことにする）。SV モデルでは、次のステップの速度を車間距離から直接的に求める追従モデルである。いくつかの形式があるが、宮田ら¹³⁾によって提唱された次の形式を用いることにする。 x を車両の一次元座標とし、 $(\cdot)^n$ を n ステップの量を表すものとする、

$$\begin{aligned} X &= (x_{m+1}^n - x_m^n) - 0.6 \\ v_m^{n+1} &= 25\alpha(X^{0.1} - e^{-0.25X}) \quad (X < 70) \\ v_m^{n+1} &= 142.5\alpha \quad (X \geq 70) \end{aligned} \quad (3)$$

$$P(\alpha) = \frac{1}{1.39} \frac{\alpha - 0.39}{1.39\sigma^2} \exp\left(-\frac{(\alpha - (0.39/1.39))^2}{2\sigma^2}\right)$$

となる。ここで、 $P(\alpha)$ は係数 α の確率分布で、東名高速道路と中央自動車道における実測値から推定している。式(2)の感応度に車間距離を加味したモデルもある¹⁴⁾。

$$\frac{dv_m(t+T)}{dt} = a' \frac{v_{m+1}(t+T)^\beta}{(x_{m+1}(t) - x_m(t))^\alpha} (v_{m+1}(t) - v_m(t)) \quad (4)$$

もう一つのモデルとして、Bando ら¹⁵⁾の OV (Optimal Velocity) モデルを扱う。本稿では、主としてこのモデルを用いる。OV モデルは前方の車両との車間距離に応じて加速度を制御するモデルである。車両の加速度は、

$$\begin{aligned} \frac{dv^n}{dt} &= a\{V(\delta x^n) - v^n\}, \\ V(\delta x) &= V_{\max} \cdot \left(\frac{\tanh((\delta x - c)/b) + \tanh(c)}{1 + \tanh(c)} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

と表される。ここで、 $\delta x (= x_{m+1} - x_m)$ は車間距離、 $V(\delta x)$ は、OV 関数と呼ばれるもので、車間距離に応じた最適速度を求める関数である。また、 a は感応度を表し、 b 、 c は適当な定数である。 $V_{\max}$ は最高速度を示す。物理的には排除効果(衝突回避)、相互作用の非対称性(追従挙動)、応答の非可逆性(散逸系)を表すものとされている¹⁵⁾。

車線変更に関しては、図-3 に示すように前車との車間距離が一定値以下であり、移動する隣の車線における移動後の車間距離が長く、かつ隣の車線に変更しても前後の車両と衝突しなければ移動するというモデルを採用する。定式化すると、車線変更を予定している車両を i 、前方車両を j_1 、隣接車線の前車車両を j_2 、後方車両を j_3 とすると、

$$\begin{aligned} x_{j_1} - x_i &< d_1, \\ x_{j_2} - x_i &> d_2, \\ x_i - x_{j_3} &> d_3 \end{aligned} \quad (6)$$

となり、 d_1, d_2 、及び d_3 をパラメータとして扱う。

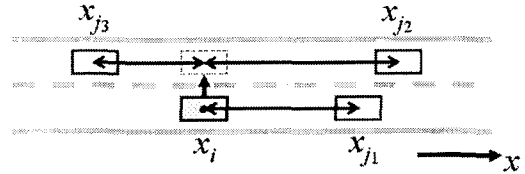


図-3 車線変更モデル

経路選択モデルとは、車両が出発地から目的地までどのような経路を辿るかをモデル化するものであり、内部で生成されるもの（内生モデル）と外部で生成されるもの（外生モデル）がある。ノードが流入部に相当する場合は、定められた確率にしたがって車両を流入させることにし、経路選択は内生モデルを採用することにした。運用上の妥当性検証とデータ妥当性検証に対しては、このモデルを十分に吟味する必要があるが、車両個別の挙動を追うことは難しく、統計量を用いた検証にならざるを得ない。

最後に、交通流シミュレーションの計算手順を図-4 に示す。

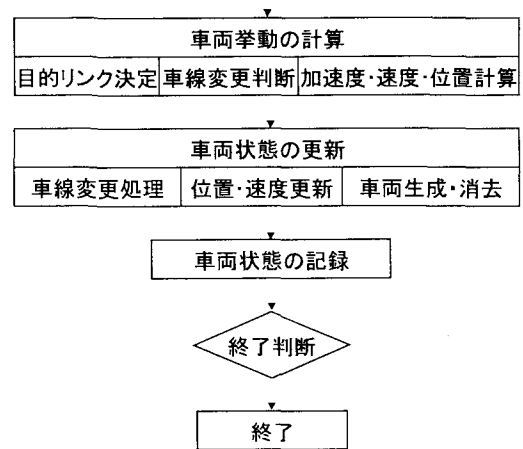


図-4 交通流シミュレーション全体のながれ

3. 2 自然環境との相互作用

交通流と自然環境との相互干渉は、シミュレーションという観点からは異なる思想のシミュレーションを統合することによって検討されることが多い^{16),17)}。本稿においては、交通流は前節で述べたネットワーク型のシミュレーション手法によって扱う。環境シミュレーションに関してはオイラー的な方法によるものを考える(図-5)。

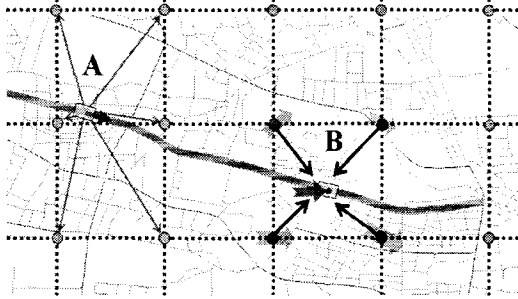


図-5 自然環境と交通流の相互作用

図-5のAは、交通流シミュレーション側で得られる諸量の環境シミュレーション側への受け渡しを示している。例えば、車両からの排出ガスである。図中Bは環境シミュレーションで得られた風況情報を車両挙動に反映させることを示している。

車両からの排出ガスの影響を見積もる方法としては、交通流側から得られるリンク間の時間当たりの交通量を環境シミュレーションの排出ガスの発生源のモデルとして扱うという方法が一般的である¹⁷⁾。個別車両の挙動までを考慮した交通流シミュレーションと環境シミュレーションの統合例は少ない。これは双方のシミュレーションにおいて時空間のスケールが異なるため、一台一台の車両の影響を個別に考慮する必要がないためである。しかしながら、現在の環境シミュレーションは、ネスティングと呼ばれる方法を使って局所的に高解像度を実現しており、その領域の時空間の最小スケールは、数秒、数十メートルであり、さらに高解像度化を目指している¹⁸⁾。近い将来において1秒以下の時間分解能と数メートルの空間分解能が実現されれば、個々の車両挙動が意味を持つようになる。したがって、自然環境との相互作用を正確に算出するためには、個別車両挙動を扱った相互干渉の評価が必要になる。

そこで、PM (Particle Matter: 粒子状物質)を対象として、車両から排出拡散されていく様子を、交通流シミュレーションと環境シミュレーションの一つである風況予測シミュレーションの統合によって調べることを試みる。PM排出モデルとして、Shirahamaらのモデル¹⁹⁾をもとに、勾配を考慮しないように変更した次式のモデルを用いる。

$$\begin{aligned} \ln(E_{PM}(t)) = & -2.1247 + 0.1782 v(t) \\ & - 0.009072 v(t)^2 + 0.00023328 v(t)^3 \\ & + 0.41796 a(t) \\ & - 0.04652 D_d(t) + 0.07086 D_i(t) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $E_{PM}(t)$ は時刻 t におけるPM瞬間排出量であり、

$v(t)$ は時刻 t における速度、 $a(t)$ は時刻 t における加速度である。また、 $D_d(t)$ 、 $D_i(t)$ は減速時及びアイドリング時のダミー変数であり、ダミー変数は条件が満たされれば1、それ以外は0とする。このモデルでは速度と加速度から各時刻各地点でのPM排出量が求められる。

各時刻において排出されたPMに関するデータは、交通流シミュレーションの時空間のスケールとなっている。これを環境シミュレーションへの時空間的スケールへと変換しなければならない。以下のように単純に面積比を用いることで近傍格子への寄与分を算出することにした。

PMの単位時間、単位面積あたりの排出量を E とし、PMの濃度を C とする。図-5の環境シミュレーション側の格子点を (i,j) で表す。ある時間において車両が図-6の計算セル内に存在する場合、その車両から排出されたPMによって周囲の格子点のPM濃度が以下のように変化するものとする。

$$\begin{aligned} C_{i,j}^N &= C_{i,j}^N + \\ & \alpha \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{m \in \text{Cell}} E_m^n \left(1 - \frac{x_m^n - x_{i,j}}{\Delta x}\right) \left(1 - \frac{y_m^n - y_{i,j}}{\Delta y}\right), \\ C_{i+1,j}^N &= C_{i+1,j}^N + \\ & \alpha \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{m \in \text{Cell}} E_m^n \frac{x_m^n - x_{i,j}}{\Delta x} \left(1 - \frac{y_m^n - y_{i,j}}{\Delta y}\right), \\ C_{i+1,j+1}^N &= C_{i+1,j+1}^N + \\ & \alpha \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{m \in \text{Cell}} E_m^n \frac{x_m^n - x_{i,j}}{\Delta x} \frac{y_m^n - y_{i,j}}{\Delta y}, \\ C_{i,j+1}^N &= C_{i,j+1}^N + \\ & \alpha \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{m \in \text{Cell}} E_m^n \left(1 - \frac{x_m^n - x_{i,j}}{\Delta x}\right) \frac{y_m^n - y_{i,j}}{\Delta y}. \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 N は環境シミュレーションにおける時間ステップ、 n は交通流シミュレーションにおける時間ステップである。環境シミュレーションの時間刻み幅(Δt)は交通流シミュレーションのもの($\Delta \tau$)よりも大きいとする。 n_1 、 n_2 は環境シミュレーションの1ステップ間の交通流シミュレーションの時間ステップを示す。 m は、この間にこの計算セル内に存在する車両である。 Δx 、 Δy は格子幅である。 α は排出量から濃度への変換係数で、時間刻み幅、格子幅によって決められる。

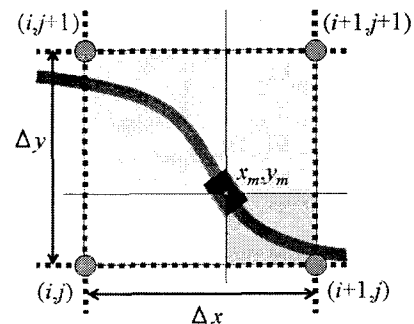


図-6 データ補間の模式図

式(8)の問題は、計算セルが大きい場合に計算セル内での移流拡散挙動が反映されないことである。本稿では、

高精度化のために、図-7のような補助格子を用いることにした。

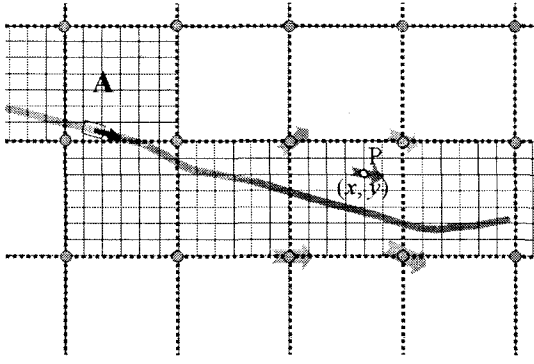


図-7 補助格子を用いた自然環境シミュレーション

交通流シミュレーションから環境シミュレーションへのデータの受け渡しの終了後、環境シミュレーションにおいて時間を進める。本稿の目的は、自然環境との相互作用を考慮した場合のミクロ交通流モデルの検証手法の提案と、検証のフレームワークを示すことにある。概念モデルに対する妥当性検証手法の考察を主体とするために環境シミュレーションとしては、最も単純な移流拡散シミュレーションを用いることにする。離散化した移流拡散方程式として式(9)を用いる。

$$\begin{aligned} & \frac{C_{i,j}^{N+1} - C_{i,j}^N}{\Delta t} + u \frac{C_{i+1,j}^N - C_{i,j}^N}{2\Delta x} - |u| \frac{C_{i+1,j}^N - 2C_{i,j}^N + C_{i-1,j}^N}{2\Delta x} \\ & + v \frac{C_{i,j+1}^N - C_{i,j}^N}{2\Delta y} - |v| \frac{C_{i,j+1}^N - 2C_{i,j}^N + C_{i,j-1}^N}{2\Delta y} \quad (9) \\ & = D \left(\frac{C_{i+1,j}^N - 2C_{i,j}^N + C_{i-1,j}^N}{\Delta x^2} + \frac{C_{i,j+1}^N - 2C_{i,j}^N + C_{i,j-1}^N}{\Delta y^2} \right) \end{aligned}$$

ここで、 D は拡散係数である。

3. 3 移動軌跡データとクラスタ分析による検証

簡単のため、乱数によって車両を流入させた二車線一リンクのシミュレーション結果を用いて提案手法を説明する。なお、車線変更モデル、経路選択モデル、交差点モデルなどについては、それぞれに対して正当性検証(Verification)が必要になる。一般的には Verification 後に Validation を行うのだが、図-1に示した Sargent のフレームワークのように、分けて検討する場合もある。本稿では、表-1に示すようにミクロモデルの Validation 手法がほとんどないことから、Verification はできているという仮定のもとで、手法、および方法論の提案を行う。

図-8 上図はある瞬間の車両の位置を示している。図-8 下図はある一定時間内にこの区間を通過した車両の流入から流出までを時間と流入位置からの旅行距離の時間変化をグラフで表したものである。図-8下図を分析すると、このような単純なシミュレーションであっても、通過車両の挙動がいくつかのパターンを持つことを示せる。そこで、図-8下図を移動軌跡データとみなすことで移動軌跡データの分析を試みる。

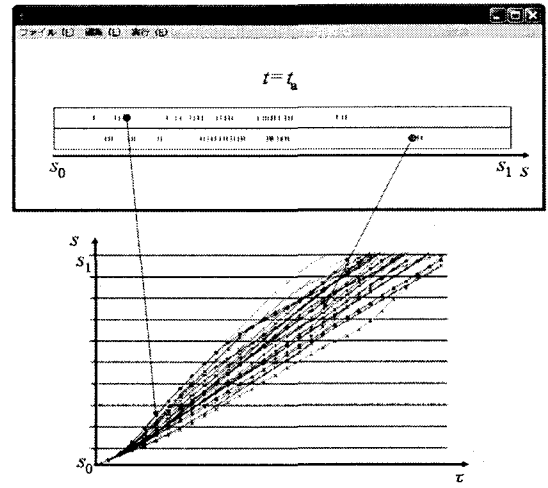


図-8 車両位置のスナップショット(上)と各車両の旅行位置の時間変化(下)

はじめに、この移動軌跡データ $C_m(x^0, \dots, x^n, x^{n+1}, \dots)$ をいくつかの指標によって分類する。ここで、 m を個別車両の識別子とした。また、 x^0 は区間の始まり、 n はこの車両が区間に入ってから時間ステップを表すものとする。図-8下図のように変曲点と傾きが移動軌跡データの特徴となっている。しかしながら、個々の車両を識別するようなパターンを分析することは、ミクロレベルに対する検証といっても粒度が小さく、現実的ではない。

そこで、いくつかの特徴量によって移動軌跡データを分類することを試みる。移動軌跡データを図-8下図のように表示した場合、変曲点は加速度の変化に対応する。したがって、符号を考慮し、一つ目の指標として次式で算出される加速度の絶対値の総和を用いることにした。これを Sa と表記する。

$$Sa_m = \sum \left| \frac{x_m^{n+1} - 2x_m^n + x_m^{n-1}}{\Delta \tau^2} \right|, \quad (10)$$

となる。図-8下図で示す移動軌跡データの傾きは速度の変化に対応するが、OV モデルの場合は、OV 関数値がそれを表すことになる。二つ目の指標としては、OV 関数値の平均値 (Va と表記する)：

$$Va_m = \frac{\sum V(\delta x_m(t^n)) \Delta \tau}{T} \quad (11a)$$

あるいは、より一般的に速度の平均値：

$$Va_m = \frac{\sum \frac{x_m^{n+1} - x_m^n}{\Delta \tau}}{T} \quad (11b)$$

とする。ここで、 T は正規化のための定数である。

これらの指標は、前節で述べた環境シミュレーションとの統合からも妥当であると考えられる。式(7)のように交通流シミュレーションにおける各車両の速度と加速度が、環境予測シミュレーションに対して PM の排出量という形で影響を与えている。また、環境が車両挙動に与

える影響は（現時点では主として速度規制などの制約条件である場合がほとんどであるが）、モデルの精緻化とともに風が車両に与える影響がエンジンの回転数やトルクなどサブミクロスケールのモデルを介してミクロスケールに伝達される可能性がある。その場合は追従性に影響するだろう。このように自然環境との相互作用を加味した場合も、加速度と追従性（OV 関数、あるいは速度）に関連した量を特徴量として扱うことに意味があるものと考えられる。

そこで、 Sa と Va を座標軸とした空間を考え、それを特徴空間と呼ぶことにする。車両 m は特徴空間上の点 (Sa_m, Va_m) に写像される。図-8 下図に示した移動軌跡データを特徴空間で表したものが図-9 である。

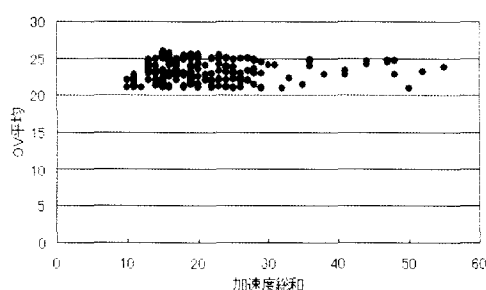


図-9 特徴空間上の移動軌跡データの散布図

図からは、クラスタが形成され、何かしらのパターンを有していることがわかる。次にクラスタ分析を行う。クラスタリングには階層的クラスタリング手法の一つであるウォード法²⁰⁾を用いる。図-9 に対して4つのクラスが形成された例を図-10 に示す。図-8 上図の車両のプロットの時間変化からこのような情報を読み取ることは難しい。

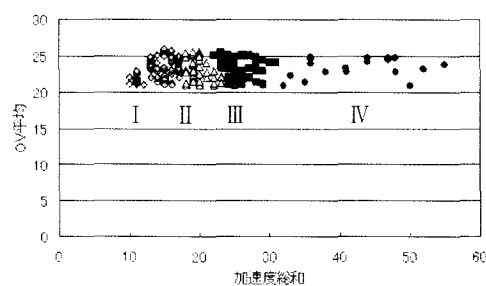


図-10 ウォード法によるクラスタ分析

3. 4 環境シミュレーションを考慮した検証

図-11 は、同一リンクで車線数を変えた場合の PM 濃度分布を示している。車両は左方向から右方向に移動する。移流はなく、拡散計算のみとした。図-12 は対応する移動軌跡データの散布図である。

1 車線のシミュレーションでは、領域内の PM 総排出量は 4247、計算要素内での総和の最大値が 275 であった。4 車線の場合は、総排出量が 4558、最大値が 269 であった。濃度分布図においては、1 車線、4 車線ともに、流入側から少し離れた部分に高濃度の領域が現れている。

1 車線の場合、その後、徐々に濃度が低下するが、4 車線の場合はほぼ一定値となっている。図-12 から 1 車線では加速度の絶対値の総和が広く分布していることがわかる。これは軽度の渋滞の存在を示しており、式(4)から加速度項を介して濃度分布に影響していることが予想できる。また、1 車線の場合の最大値が大きい理由でもある。一方、総排出量の違いは、図-10、図-11 と式(7)から速度項からの寄与であると考えられる。

このように、移動軌跡データの散布図と濃度分布には相関があることを示唆できる。詳細な分析には、濃度の空間分布のパターン化が必要になるが、個別車両に対するモデル、パラメータの差違は表現できる。車線の違い、排出モデルの違いなど、交通流シミュレーションと環境シミュレーションの結合に対して、概念モデルの妥当性検証は可能であると考えられる。また、運用上に対してはその可能性があるものと思われる。

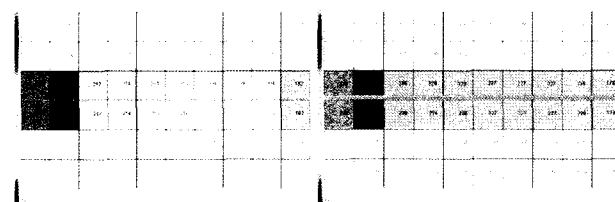


図-11 PM 濃度分布図 1 車線(左)、4 車線(右)

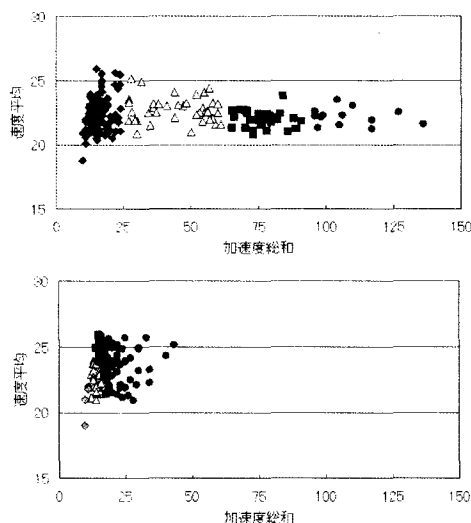


図-12 移動軌跡データの散布図 1 車線(上)、4 車線(下)

4. 数値実験と考察

4. 1 車両移動モデル

2 車線 1 リンクの場合について、車両移動モデルの違いによる速度の平均値によるパターンの変化を調べる。リンク長は 5km、時間刻み幅 Δt は 1 秒、総実行ステップ数は 4600 ステップで、流入間隔は平均 10 ステップに 1 台としている。1000 ステップ後のデータに対して分析を行う。

図-13 上図は、OV モデルの結果である。図中の点線は、速度平均と加速度総和が比例する領域を示している。他の数値実験の結果でもこのような領域が現れており、こ

れが追従モデルの特徴であると考えられる。クラスタ分析は、他のパラメータの場合をふまえて、4つとして行ったが、この場合のクラスタは、大きく分けると比例部分とそれ以外の部分にあると考えられる。この点に関しては今後の検討が必要である。図-13 下図は、SV モデルの結果を示している。図からわかるように OV モデルと同様の傾向が示されているが、図中の矢印で示すように速度の平均が離散的に現れている。

このような特徴は、従来のマイクロモデルの指標からは読み取ることにはできない。表-2 に示すように、同じ条件で行った Q-K モデルを含めた平均旅行時間では、3つのモデルの有意な違いを見出すことは難しい。

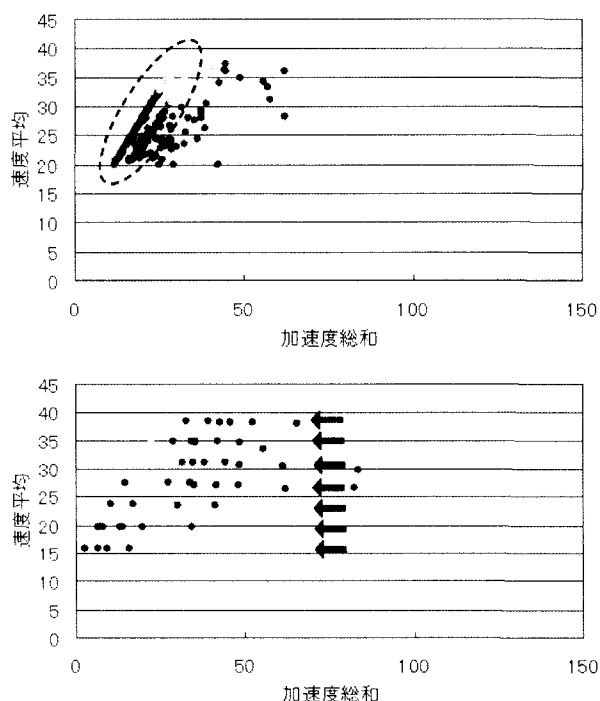


図-13 移動軌跡データの散布図 OV モデル (上), SV モデル (下)

表-2 平均旅行時間の違い

モデル	OV モデル	SV モデル	Q-K モデル
平均旅行時間(秒)	175	198	178

一方、提案した指標では、実際の車両群と比較した場合に、全体の傾向が一致し、速度平均の離散的な構造があれば、SV モデル、なければ、OV モデルが適当であるというような検証から、段階的に詳細度を高めることによって、車両全体から車両群、車両群から個別車両へと検証を進めることができるものと考えられる。

最終的には、実データとの比較が必要になるが、このような方法で概念的にモデルの妥当性を検証することができる。これは、図-1 の概念モデルの妥当性検証に相当する。

4. 2 自然環境との相互作用

図-14 は十字路を含む場合における PM 濃度分布と移

動軌跡データの散布図を示している。リンク長が 2.5km, 上3下2の5車線を持つリンク4本を連結している。信号モデルはなく、交差点では適当な確率で経路を選択するようにしたが、車間距離の保持と車線変更によって衝突は生じていない。その他の条件は前節のシミュレーションと同じである。環境シミュレーションは拡散シミュレーションとしている。

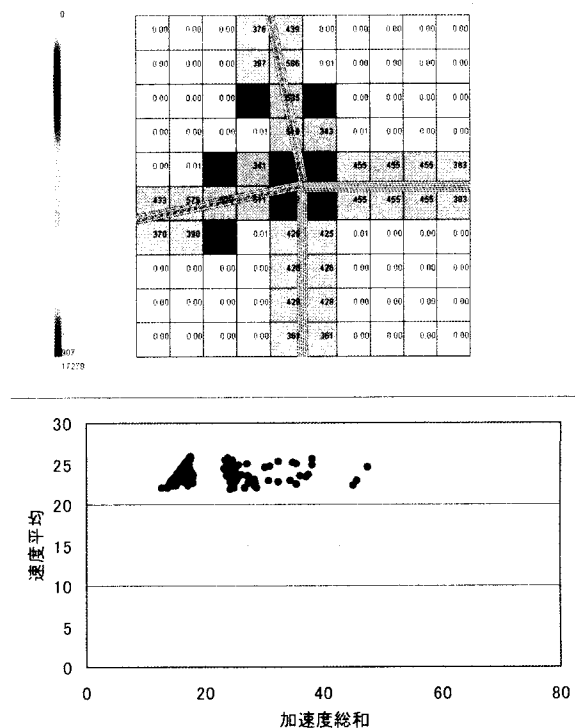


図-14 PM 濃度分布図と移動軌跡データの散布図

次に流入頻度を2倍(平均5ステップに1台)にして実行した結果を図-15 に示す。

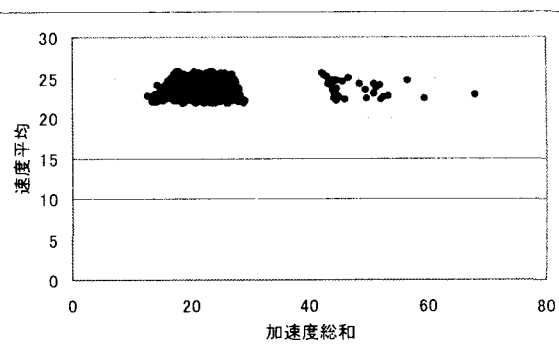


図-15 移動軌跡データの散布図(流入頻度2倍の場合)

流入頻度が2倍になると、領域内の PM 総排出量、計算要素内の総和の最大値はともに約2倍となったが、PM の濃度分布のパターンには図-14 との差が見られなかった。排出量に対しては関連性があるが、移動軌跡データの散布図における加速度総和の広がりというパターンの変化と濃度分布のパターンには相関は見られない。ただし、明確な相関のない場合であっても、交通流シミュ

レーションにおいて車両群に対するパターンが求められているので、排出モデルの変更に対する数値解の変化を確かめることはできる。したがって、概念モデルに対する妥当性の検証は可能になるものと考えられる。

一方、移動軌跡データの散布図は系全体のものを示しており、濃度分布からは交差点近傍が重要であることがわかる。これは、局所的な特徴量の必要性を示唆している。この点については検討が必要である。

5. まとめ

ミクロ交通流モデルの妥当性検証手法の提案を行った。個別車両の移動軌跡データに注目し、加速度の絶対値の総和と、OV 関数の平均、あるいは速度平均という二つの指標から特徴空間を形成した。その空間上の個別車両の分布をクラスタリングすることで、従来のリンク間の平均旅行時間や平均旅行速度といった粒度の大きなものではなく、最小粒度の一つである個別車両の挙動をより直接的に検証に反映できることを示した。

また、環境シミュレーションというスケールやアプローチの異なるシミュレーションとの統合について検討した結果、移動軌跡データのクラスタと排出ガス分布に何かしらの相関が得られれば、提案した特徴量が二つのスケール間の相互作用に対しての妥当性検証手法にとっても重要な量であることを、概念モデルのレベルで明らかにした。提案手法の位置づけを示すと表-3 となる。これにより、実測値との比較ができれば従来よりも詳細に妥当性の検証が可能になるものと考えられる。

表-3 提案手法の位置づけ

	Verification	Validation
ミクロレベル	車両挙動の検証	移動軌跡データ分析 移動軌跡データと他のスケールでの空間分布との相関
マクロレベル	交通流特性の検証 渋滞の発生	実際の交通統計量との比較

参考文献

- 1) Sargent, R.G.: An assessment procedure and a set of criteria for use in the evaluation of computerized models and computer-based modeling tools, Final Technical Report RADC-TR-80-409, 1981.
- 2) Boehm, B.W.: Verifying and validating software requirements and design specifications, IEEE Software, Vol.1, No.1, pp.75-88, 1984.
- 3) Sargent, R.G.: Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models, Proceeding of 2001 Winter Simulation Conference, pp.106-104, 2001.
- 4) Sargent, R.G.: Verification and validation of simulation models, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, pp.37-48, 2003.
- 5) 赤羽弘和, 大口敬, 吉井稔雄, 堀口良太: 交通シミュレーションモデルの実用化に向けての課題, 土木計画学研究講演集, Vol.20, No.1, pp.521-523, 1997.
- 6) AVENUE: <http://www.i-transportlab.jp/products/avenue/>
- 7) 花房比佐友, 山口智浩, 赤羽弘和, 吉井稔雄: 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, 土木学会第 52 回年次学術講演会第 IV 部門論文集, pp.150-151, 1997.
- 8) 花房比佐友, 吉井稔雄, 堀口良太, 赤羽弘和: "交通シミュレーションシステム再現性検証用データセットの構築, 土木学会第 53 回年次学術講演会第 IV 部門論文集, pp.534-535, 1998.
- 9) 花房久佐友, 吉井稔雄, 堀口良太, 赤羽弘和, 片倉正彦, 桑原雅夫, 尾崎晴男, 大口敬, 西川功: 交通シミュレーション再現性検証用データセットの構築, 土木学会論文集IV, Vol.688, No.53, pp.115-123, 2001.
- 10) 杉山雄規: 交通流の物理, ながれ, Vol.22, pp.95-108, 2003.
- 11) 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, Vol.32, No.4, pp.39-44, 1997.
- 12) 鈴木宏典, 鈴木忠: 道路環境シミュレーションのための車両追従モデルの構築, 自動車研究, Vol.26, No.5, 2004.
- 13) 宮田秀明, 石井智憲, 吉村篤彦, 武市祥司: 物流と輸送システム計画のための完全離散型交通シミュレーション法の開発, 第 54 回理論応用力学講演会講演論文集, pp.479-480, 2005.
- 14) Gazis, D.C., Herman, R. and Potts, R.: Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow, Operation Research, Vol.7, No.4, pp.499-505, 1959.
- 15) Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A., Sugiyama, Y.: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, Phys. Rev. E 51, pp.1035-1042, 1995.
- 16) 伊川雅彦, 後藤幸夫, 熊澤宏之, 古澤春樹: 異種分散シミュレーションによる ITS 開発環境の構築, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.12, pp.2805-2814, 2004.
- 17) 斉藤威, 森健二: 交通制御による大気汚染軽減効果の評価用実用型シミュレータに関する研究, 平成 4 年度環境保全研究成果集(I), pp.1-18, 1993.
- 18) 村上周三, 持田 灯, 加藤信介, 木村敦子: 局所風況予測システム LAWEPS の開発と検証, ながれ, Vol.22, pp.375-386, 2003.
- 19) Shirahama, Y., Yai, T., Fukuda, D. and Tazaki, S.: Integrated Modeling System of Traffic and Air Quality for Wide Area Network Using Microscopic Simulation, Proceedings of the 83rd Transportation Research Board Annual Meeting, CD-ROM, 2004.
- 20) 田中 豊, 脇本和昌: 多変量統計解析法, 現代数学社, 1983.

(2005 年 4 月 15 日受付)