

## 動的交通シミュレーションの再現性指標に関する適正性の考察\*

What should be Proper Indicators to Evaluate the Reproducibility of Traffic  
Conditions for Dynamic Traffic Simulation?\*

堀口良太\*\*

By Ryota HORIGUCHI\*\*

### 1. はじめに

本論文では、動的交通流シミュレーションの計算結果から、実際の交通状況をどれくらいの精度で再現しているかを示す指標として、どのようなものが適切であるかを考察する。

シミュレーションには「計算の内容がブラックボックスである」「モデルの特質の違いがわかりにくい」「実施者の技術レベルに結果が左右される」などの批判があり、実務での普及を阻害する要因となっている。このため、国内では交通工学の分野を中心に研究者と実務者が集まり、モデルの検証と情報公開を基本路線としたシミュレーションの標準化に関する活動が展開されている。

標準化の文脈には、一定基準を満たすモデルの利用を推奨しようという議論だけでなく、シミュレーションを利用する場合の望ましい使い方を示す、いわゆるベスト・プラクティス・マニュアルを整備しよう、という議論も含まれている。いずれにおいても、あるシミュレーションモデルがどの程度現実の交通状況を再現しうるかを、客観的に評価することが必須となる。

一般に動的シミュレーションでは、交通流の状態を表す2つの物理量、すなわち交通量と旅行時間(あるいは旅行速度)を用いて再現性を議論する。その際、観測値と計算値がどれくらい合致しているかを定量化するため、しばしば相関係数やRMS誤差などの指標が採用される。

しかしながら、これらの指標には時系列データの比較には適さない面も指摘される。すなわち、時系列変動の様子によっては、わずかの乖離でも指標が大きく変動する場合もあり、人間が直感的に認知する類似の度合いと必ずしも一致しないというものである。この

ため、静的評価では一般に認知されている「飽和度が0.9未満なら交差点は非飽和」とあるとか、「混雑度が2.0未満であればリンクは渋滞しない」といった類の、実用的な基準を確立することが困難であった。

このような問題意識から、ここではパターン分析的な手法で時系列データの類似度を定量化し、再現性評価の指標とすることを提案する。以下ではまず、交通量と旅行時間を相関係数やRMS誤差を用いて評価する際の問題を指摘し、シミュレーションの再現結果をウェーブレット級数展開し、時系列変動の大まかな特徴を評価する方法について述べる。

また、ここでの議論をふまえた結果として、シミュレーション利用技術の標準化の議論に対して、再現性を評価するための基準を策定する際の提案を、本論文の最後に示す。

### 2. 相関係数やRMS誤差による評価の問題点

図1と図2に、シミュレーションの現況再現性を評価する場合の、これまで用いられてきた典型的な指標を示す<sup>1)</sup>。すなわち時間帯ごとの断面交通量の相関や、旅行時間あるいは旅行速度の時間変動を比較し、相関係数やRMS誤差を指標とするものである。

しかしながら、これらの指標には次のような問題点が指摘されよう。

- ① 集計の時間帯幅に評価指標の値が左右されるが、シミュレーションの目的に即した適切な集計幅に関する議論がなされていない。
- ② 実現象に含まれる、短い周期の局所的な変動に起因する誤差と、大局的な変動に起因する誤差が区別されていない。このため主観による評価が介在する。
- ③ とくに保存則が求められる交通量については、時間帯別交通量を評価の対象とすると、動的な側面を十分に評価できない。

\*キーワード：交通流シミュレーション、再現性、標準化

\*\* 正員、工博、(株)アイ・トランスポート・ラボ  
(東京都新宿区揚場町2-12 セントラルコーポラス 404  
Tel: 03-5261-3077, E-mail: horiguchi@i-transportlab.jp)

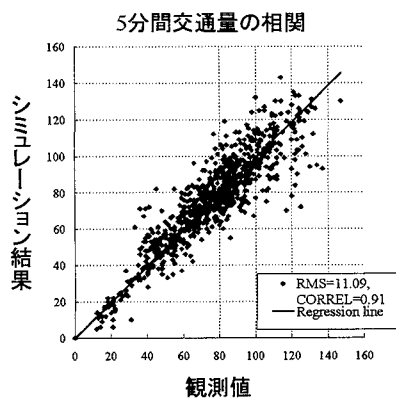


図1：断面交通量の相関による現況再現性の評価例<sup>1)</sup>

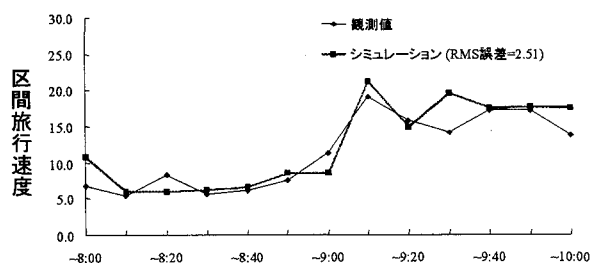


図2：旅行速度のRMS誤差による現況再現性の評価例<sup>1)</sup>

まず①については、一般に集計幅を大きくすると、これらの指標はよい結果を示すようになるが、問題とする交通状況の大局的な変動周期よりも長い集計幅で評価するような、ナンセンスな議論も散見される。本来は、考慮する交通現象や、発生需要の設定時間帯幅などと関連づけて適切な集計幅を議論すべきであるが、調査時の集計幅をそのまま用いている場合も多分に見かけられる。

また調査方法の面からも適切な集計幅を意識する必要がある。例えば区間旅行時間をサンプル平均で求めることを考えると、シミュレーションで考慮したい交通現象を捉えるために必要な集計幅では、サンプルの偏差を考慮するのに十分な数を確保できない場合もある。街路の場合、対象区間を通過するのに信号で1回余分に停められるだけで、旅行時間は大きく増加することを考えると、少ないサンプルに基づく観測値には見かけの変動が含まれることは容易に想像がつく。シミュレーションでは基本的には全車両の旅行時間がわかっているが、観測と全く同じサンプリングを再現することは不可能である。そもそもこの見かけの変動までを再現することは無意味であるが、RMS誤差や相関値といった指標を用いると、この「無意味な」変動に

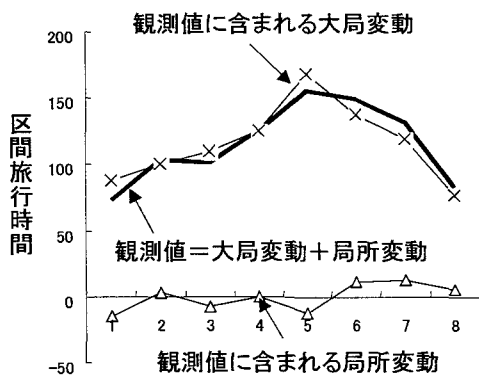


図3：大局変動と局所変動が含まれる観測値

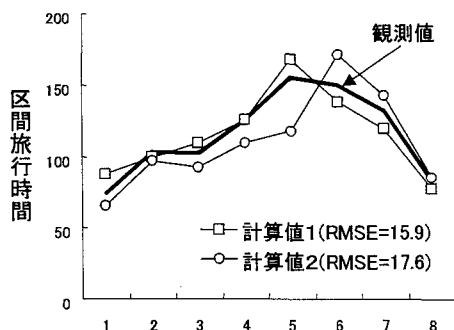


図4：局所変動が大局変動のずれをキャンセルする例

起因する誤差までもが区別されずに値の中に含まれてしまう。

②に関しては、計算結果が大局的な変動を十分に再現していなくても、局所的な変動が「同期」して誤差を相殺する可能性も否定できない。時系列変動の大局性／局所性は周期で定量化することができるが、ここではシミュレーションで考慮する交通現象の特徴を十分に捉えうる周期の変動を大局的とし、ノイズのようにそれより短い周期のものを局所的と呼んでいる。

特に相関係数は、計算値が大局変動を再現していても、局所変動をフォローできなければ良好な数値を示さない。例を示すと、図3のように大局変動と局所変動を内包していると考えられる観測値に対して、図4のような2つの計算値が得られている場合である。計算値1は、実は観測値の大局変動をぴたりと再現しているが、局所変動をフォローできていないので、RMS誤差が15.9となる。一方、計算値2は大局変動を正確に再現していないが、局所変動が観測値のそれと同期しているため、RMS誤差を見ると計算値1とそれほど変わらない値(17.6)になっている。

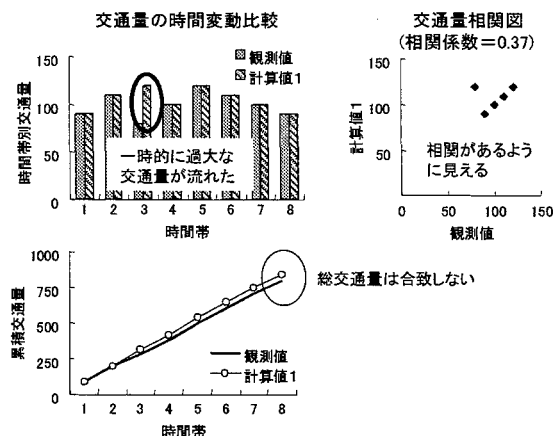


図5：ある時間帯だけ過大な交通量が再現された場合

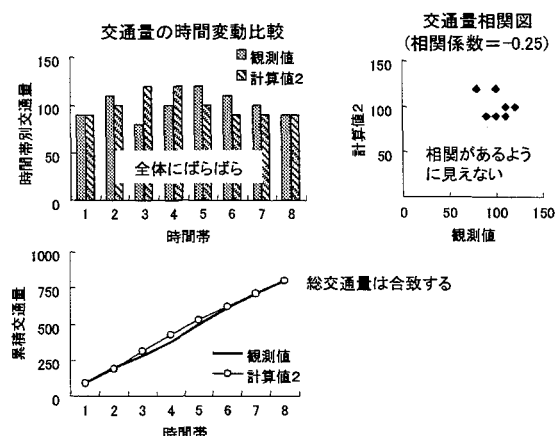


図6：時間帯ごとの相関はないが総交通量は整合する場合

いずれの計算結果がより良好と判定されるかは、この例では人間がグラフの形状をみれば明らかだが、判定に主観が介在することは、工学上好ましくない。

観測値に局所変動が内包される理由はいろいろ考えられるが、たとえば信号サイクルと集計幅が不整合であったり、車両を照合して区間旅行時間を観測する場合では、サンプルの抽出に偏りがあったりすることなどである。場合によっては、路上駐車のような非周期的で一時的な現象が影響することもあるだろう。シミュレーションにこのような事情をすべて考慮することを求めるのは、現実的ではない。

③については、図5と図6を見れば明らかである。図5のケースでは早い時間帯に一時的に過大な交通量が流れているが、他の時間帯は観測値と等しい。一方、図6のケースは、他の時間帯でも計算値は観測値と異なっている。この両者を相関係数で比較した場合、観測値との乖離が少ない上のケースの方が良好な結果となる。しかしながら、両者を累積交通量で比較すると、上のケースは一時的に過大に流れた交通量の分だけ、最後まで計算値が観測値を上回るが、下のケースは最終的には観測値と同じ交通量が流れたことがわかる。

一般には、交通量は旅行時間よりも良い精度で計測されると考えられるので、総旅行時間などの全体指標を求める場合には、総交通量の再現性には注意を払うべきであるが、時間帯別交通量の相関係数やRMS誤差には、総発生量は考慮されていない。

また、動的なシミュレーションでは、渋滞が発生すると後の時間帯にも影響を及ぼすので、図5の過大な交通量が、早い時間帯に発生したのか、遅くに発生したのかによって、評価値は変わるべきである。この動

的な側面も、時間帯別交通量を独立に評価する限りは、十分に考慮されない。

### 3. 時間一周波数領域での再現性指標の評価

図7はある区間の旅行時間観測値に対して、3種類のシミュレーション計算値(Sim1~Sim3)が得られている例を示している。Sim1は設定需要やシミュレーションモデルのパラメータが十分に調整されていない状態での結果で、Sim3は入念にそれらを調整したものである。Sim2はここでの説明の便宜上、Sim3での設定からボトルネックとは関係ないリンクの信号オフセットを「改悪」して計算した結果で、サイクル長と集計幅の関係も影響して、5分周期の変動が大きくなったものである。Sim1~3それぞれの観測値に対するRMS誤差は110, 75, 49[sec]となっており、Sim3が相対的に良好な再現性を示している。

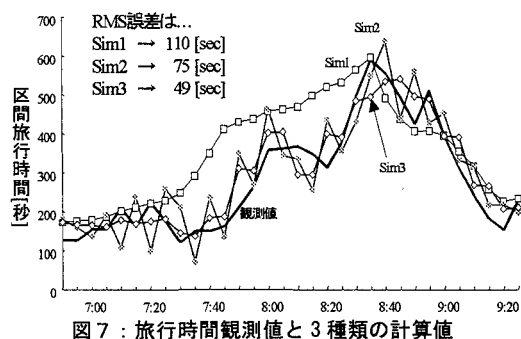


図7：旅行時間観測値と3種類の計算値

しかしながら、RMS誤差を見るだけでは、その結果が十分であるかどうかは判定できないので、現状ではグラフを視認して「主観的に」Sim3が十分なもので

あると結論づけている。

別の見方をすれば、指標である RMS 誤差の違いが大局的な変動を再現していないことに起因しているの  
かどうか判断できないため、「シミュレーションでは旅行時間の RMS 誤差が〇〇秒以下であれば、十分な再現性を示している」という客観的な基準を示せないのが現状である。

上述の問題は、RMS 誤差や相関係数では変動の「特徴」を評価できないことに因る。従って、パターン分析的な手法を利用して「どの程度変動の様子が似ているか」を評価できる指標が望ましいと考えられる。ここでは、誤差の変動をウェーブレット級数展開し、類似度を評価する方法を提案する。これはよく利用される RMS 誤差による類似性の判定では考慮されなかった、短い周期の変動パターンと長い周期の変動パターンを区別して評価することが特徴であり、画像認識などの分野でしばしば利用されている。

図 8 はもっとも単純な Harr の直交基底を使った時系列信号のウェーブレット級数展開の手順を示したものである。原信号  $s_0$  は、直交基底関数とスケール関数を使ってレベル 1 の近似信号  $s_1$  と詳細情報を保持するウェーブレット成分  $g_1$  に分解される。Harr 規定の場合は近似信号  $s_1$  の  $i$  番目要素は、原信号  $s_0$  の  $2i$  番目要素と  $2i+1$  番目要素の平均値に等しく、ウェーブレット成分は近似信号  $s_1$  と原信号  $s_0$  の差分に等しい。

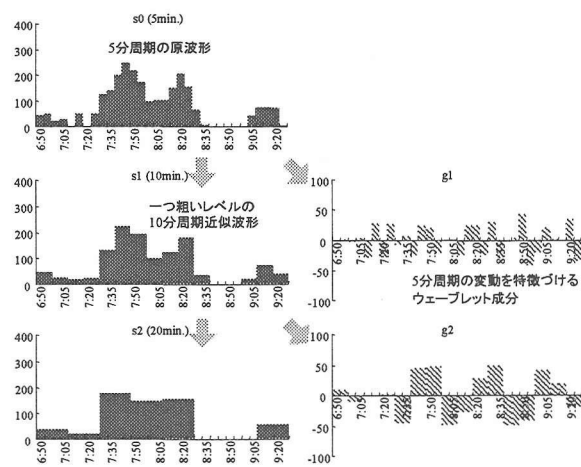


図 8：旅行時間誤差の離散ウェーブレット変換

ウェーブレット成分の奇数番目と続く偶数番目の成分は絶対値が同じで符号が異なるだけなので、奇数番目の成分だけを残したものがウェーブレット係数であ

る。近似信号  $s_1$  はさらにレベル 2 の近似信号  $s_2$  とウェーブレット成分  $g_2$  に分解され、最終的に線形成分  $L$  が得られるまで、この操作を繰り返す。

ウェーブレット成分には各近似レベルでの変動に関する情報がすべて格納されているので、線形成分  $L$  とウェーブレット成分  $g_1 \sim g_5$  を合成すれば、原信号  $s_0$  が復元される。

このような過程で得られた各周波数でのウェーブレット係数は、それぞれの周波数での変動を時間軸上で特徴づけるベクトルである。従って、各ウェーブレット係数ベクトルのノルムが、再現性を評価するスカラー指標として利用できる。図 9 は、観測値と 3 種類それぞれの計算値との差の絶対値を離散ウェーブレット展開し、各周波数でのウェーブレット係数のノルムを単位時間に正規化して比較したもの(横軸は変動周期になっている)である。一番右は定常成分である。参考のために、左端にそれぞれの観測値に対する RMS 誤差を示してある。

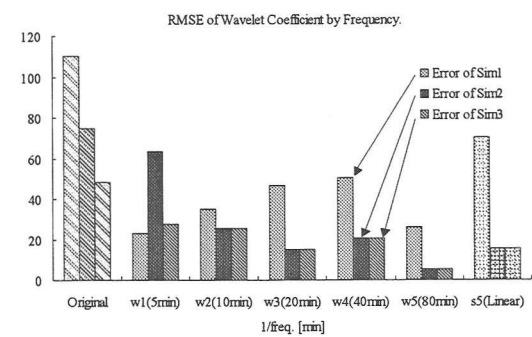


図 9：旅行時間誤差ウェーブレット展開係数ノルム

3 つの計算値を比べてみると、Sim1 よりも Sim2 と Sim3 の方が、10 分以上の周期の誤差が少なく、大きな特徴を再現していると言える。また Sim2 と Sim3 では、5 分周期の変動に対する誤差が異なるだけで、より長い周期の変動は同等に再現している。

ここでの観測旅行時間は、信号交差点がある街路のもので、当該区間を直進したサンプル車両の旅行時間を 5 分ごとに平均したものである。一般に短い周期の集計幅になるほど、サイクル長と集計幅の不整合による変動が顕著になるため、信号サイクルを現実どおりに再現するなど、より精緻なモデリングとデータ設定をしなければ、このような短い変動まで再現するのは難しい。

その意味では、Sim2 と Sim3 の RMS 誤差の違いは、Sim3 がこの短い変動を再現するためにコストをかけた結果が品質の違いに現れていると言える。シミュレーションの目的によってはそこまでコストをかけなくとも、大局変動を再現している Sim2 の結果で十分な場合もあると考えられる。

なお、このように変動周期の成分ごとに誤差を評価する場合は時間解像度、すなわち最小の周期に注意する必要がある。Shannon のサンプリング定理から、離散的な時系列データの時間解像度は、再現したい現象の変動周期の 1/2 以下でなければならない。シミュレーション結果の評価においては、調査データの集計幅が時間解像度を決めるので、注目している交通現象を十分に捉えられる小さい集計幅を採用することが必要である。

#### 4. シミュレーション利用技術標準化への提案

以上において、シミュレーションの再現性の評価において、観測値と計算値の誤差を時間一周波数領域で解析し、その変動の特徴を定量化して議論する方法を、例を示しながら解説した。これには次のような利点が挙げられる。

- ① 従来用いられてきた相関係数や RMS 誤差による評価では、十分な再現性を得たと結論づけるために客観的な基準を確立することが困難であったが、ここで示した手法では大域的な変動をどの程度まで再現しているかが定量化されるので、事例によらず客観的な数値基準を決められる可能性がある。
- ② 同様の理由で、再現性の品質を明示できるので、利用できるデータの精度による再現性の限界や、現況再現にかかるコストとの関連を議論することができる。

このような利点は、シミュレーション適用技術の標準化を目指す議論では重要な事項といえよう。そこで、本論文のまとめとして、シミュレーション標準化の議論に対する以下のような提案を示す。

- ① シミュレーションの再現性は、必ず旅行時間と累積交通量の両方について評価されることを求める。
- ② 交通実態調査は一般には 5 分程度の短い時間帯幅で集計する。
- ③ 旅行時間については、一般に交通状況の変動を十分に特徴づける 10~15 分以上の変動パターンの誤差を、一定基準以下にするよう求める。
- ④ 累積交通量については、さらに定常成分の誤差を非常に小さくすることを求める。定常成分の誤差が大きいと、総交通量が正しく再現されていないことを意味する。

当然ながら目的によっては、信号制御の最適化のように、もっと短い周期の変動まで再現する場合もあるので、上記のような数値基準は目的ごとに整理されるべきであり、今後の議論が必要である。

#### 参考文献

- 1) 堀口良太ほか：「ベンチマークデータを用いた道路ネットワークシミュレーションモデルの検証」，土木計画学研究講演集，No. 21 (1)，pp.579-582，1998
- 2) たとえば，芦野隆一，山本鎮男：「ウェーブレット解析」，共立出版，1997，などのテキスト

### 動的交通シミュレーションの再現性指標に関する適正性の考察\*

堀口良太\*\*

本論文では、交通流シミュレーションの現況再現性を定量化する適切な指標を考察する。動的シミュレーションでは、交通量と旅行時間を用いて再現性を議論するが、従来は相関係数や RMS 誤差などの指標が採用されてきた。しかしながら、これらの指標は人間の直感的な類似の度合いと必ずしも一致しないため、時系列データの比較には適さない。ここではパターン分析的な手法で時系列データの類似度を定量化し、再現性評価の指標とする

ことを提案する。すなわち、ウェーブレット級数展開により時系列変動の大まかな特徴を評価する方法について述べる。最後に、シミュレーション利用技術の標準化ために、再現性を評価する数値基準を策定することを提案する。

---

### **What should be Proper Indicators to Evaluate the Reproducibility of Traffic Conditions for Dynamic Traffic Simulation?\***

by Ryota HORIGUCHI\*\*

This paper discusses the proper way to evaluate the reproducibility of traffic conditions with dynamic traffic simulation, and proposes one methodology using Wavelet Analysis, which based on the quantification of the similarities of time-series of simulation result to the reference data. At first, the problems in the evaluation with correlation coefficient or route mean square error are discussed. Then, the new indicator based on wavelet-analysis is introduced. By using wavelet coefficient, we will be able to evaluate the errors with desirable level of time resolution, and to consider the quality of observed data. Finally, this paper proposes a policy for the evaluation of simulation studies to contribute to the 'Best Practice Manual' for the standardization.