

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ているかを、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場合がしばしば見られる。

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」であるとか、「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点を指摘し、シミュレーションの再現結果をウェ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¹⁾。すなわち時間帯ごとの断面交通量の相関や、旅行時間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。

集計の時間帯幅に評価指標が左右されるが、適切な長さに関する議論がなされていない。また、観測値の調査方法とシミュレーション結果の集計方法が違う場合の影響を吸収できない。

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。

時間帯ごとの交通量を比較するだけでは、動的な

*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)

側面を十分に評価できていない。

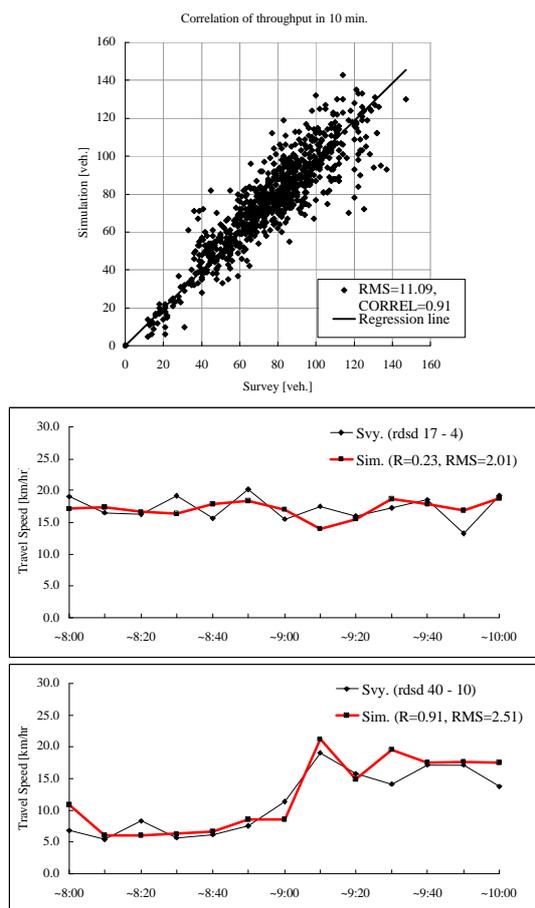


図1：現況再現性評価のための断面交通量の相関(上)と区間旅行時間変動の比較(下)¹⁾

まず 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などに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。

また区間旅行時間については、プローブ等のサンプル調査なのか/ナンバープレート照合による全数調査なのか/感知器の地点速度から推計されたものなのか/など、調査手法によって、変動特性が大きく変わると考えられる。また、街路の場合、当該区間を通過するのに1回余分に信号で停止するだけで、旅行時間は大きく増加するので、サンプル数が少ない場合は、母集団(=全通過車両)から少しでも偏ると、平均値は大きく乖離し、見かけの変動を伴ってしまう。シミュレーションでは、必ずしも調査方法と同じ方式で、集計結果を求めるわけではないので、直接両者を比較することの正当性に疑問がのこる場合もある。

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。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2左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2右のような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。

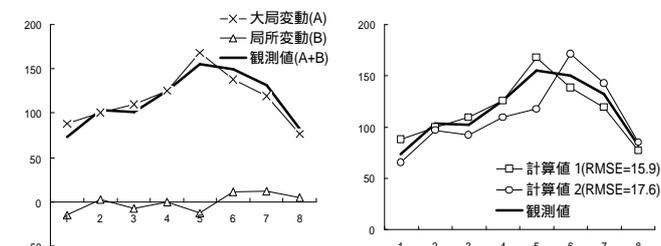


図2：局所変動が大局変動のずれをキャンセルする例

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、実用上好ましくない。

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には、サンプルの抽出に偏りがあつ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。

については、図3を見れば明らかである。図3上側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3下側のケースは、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3上側のケースでの過大な交通量が、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。

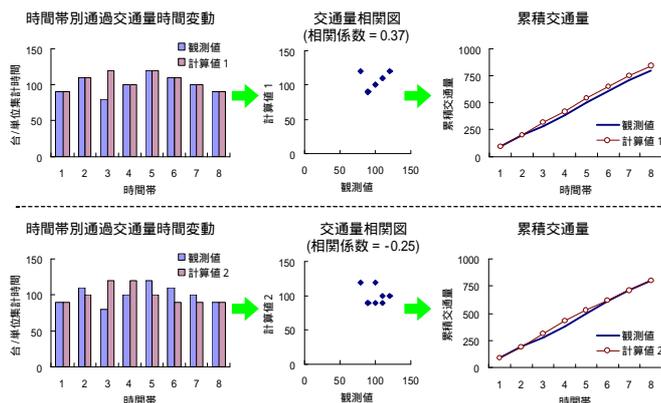


図3：時間帯別交通量で再現性を評価する際の問題

3. 時間 - 周波数領域での再現性指標の評価

図4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。それぞれ観測値に対するRMS誤差が110, 75, 49[sec]となっており、3番目の値が相対的に良好な再現性を示している。

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」3番目の結果が十分なものであると結論づけている。

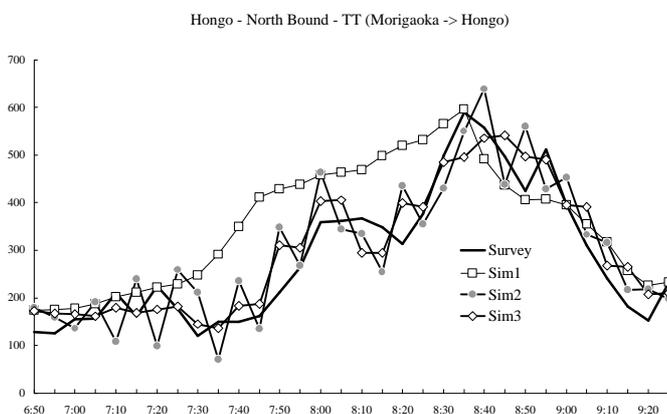


図4：旅行時間観測値と3種類の計算値

別の見方をすれば、指標であるRMS誤差の違いが意味づけできないため、「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すことができ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、パターン分析手法として、誤差の変動をウェーブレット展開し、再現性を評価する方法を提案する。無限に続く定常波を用いるフーリエ変換では、周波数領域上での特徴しか評価できないが、時間領域で偏在する基底波を利用するウェーブレットによる解析は、信号の時間 - 周波数領域での特徴を定量化できる。このため、画像解析の分野などでパターン認識技術として利用されることも多い。

図5は、Sim1の観測値に対する誤差の絶対値を原信号 s_0 として、Harr基底を使って離散ウェーブレット展開の様子を示している。5分周期の s_0 は、10分周期の1次近似信号 s_1 と、 s_0 と s_1 の差分であるウェーブレット成分 g_1 に分解される。さらに s_1 は s_2 と g_2 に分解され、以下同様に定常成分が得られるまで、より低い周波数領域での信号に展開される。

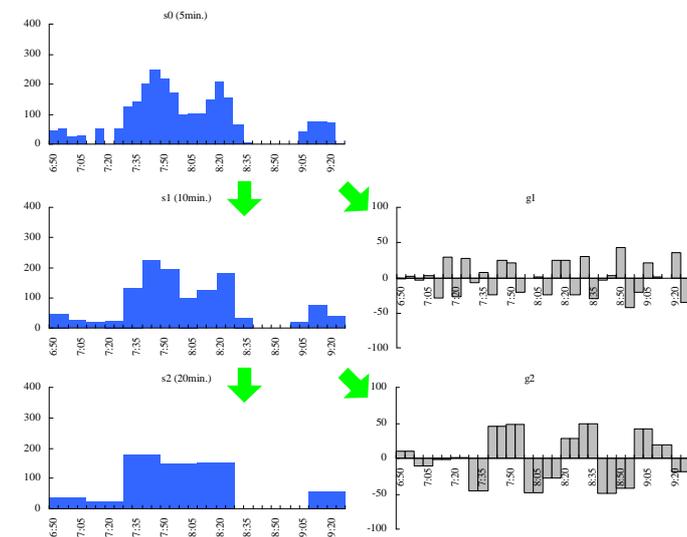


図5：旅行時間誤差の離散ウェーブレット変換

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成分は、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、各ウェーブレット成分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6は、観測値と3種類そ

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成分のノルムを比較したもの(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。

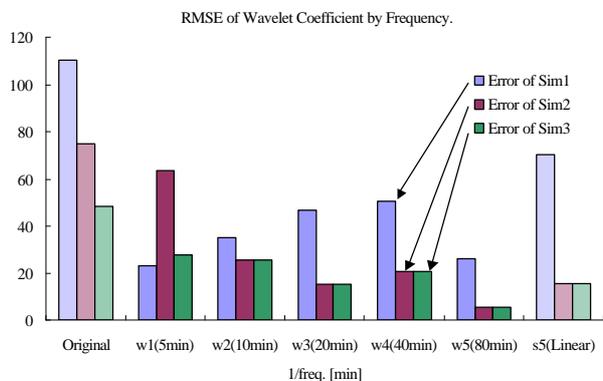


図6：旅行時間誤差ウェーブレット展開係数ノルム

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、大まか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。

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-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。

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提要化されるので、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。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。

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。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。

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。

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