マイクロ交通流シミュレーションによる 車両挙動及びCO₂排出量の再現性比較検証

小根山 裕之¹・松田 啓²・大口 敬³・鹿田 成則⁴

¹正会員 首都大学東京大学院教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: oneyama@tmu.ac.jp

²非会員 千葉県香取土木事務所 (〒289-0301 千葉県香取市一ノ分目5180)

E-mail: s.mtsd26@pref.chiba.lg.jp

³正会員 東京大学生産技術研究所教授 先進モビリティ研究センター
(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: takog@iis.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 首都大学東京大学院助教 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: shikata@tmu.ac.jp

交通流シミュレーションを用いたCO₂排出量推計や、そのために必要な速度や加速度などの詳細な交通現象については、検証項目や方法は確立されておらず、推計されるCO₂排出量の妥当性についても十分な検証はなされていない。そこで本研究では、3種類のマイクロ交通流シミュレーションを同じ交通条件で実行させ、集約的な交通状況の再現性が確保された状況下における個別車両挙動やCO₂排出量を比較分析することにより、モデル間の挙動の違いを考慮した検証のあり方を検討するための基礎的知見を得ることを目的とする。比較分析の結果、モデルの特性によって車両挙動やCO₂排出量の再現性が大きく異なることが示された。これらの結果を踏まえ、CO₂排出量の再現性の観点から考慮すべき検証のあり方を議論した。

Key Words : CO₂ emission, microscopic traffic simulation, validation

1. はじめに

近年、温暖化問題に対応するため、様々な分野でCO₂等温室効果ガスの排出量低減を目的とした取り組みが進められており、交通分野においても、その重要性はますます大きくなっている。現在、交通施策の適切な評価や分析を行うためのツールとして、複雑な交通現象の変化を動的に再現することが可能な交通流シミュレーションモデルが数多く開発されている。そのため、これらの交通流シミュレーションモデルとCO₂排出量推計モデルを組み合わせることで、上記のような交通施策を実施した際のCO₂排出量の評価を行うことが一般に可能とされている。

一般的に、交通流シミュレーションモデルの主たる目的は、交通量・渋滞長・旅行時間などの集約的な交通現象の再現・評価であることが多く、これらの主要な交通

現象については検証のプロセスが提案され¹⁾、研究や実務の場面で活用されている。しかしながら、CO₂排出量や、その推計に必要な速度や加速度などの詳細な交通現象については、検証すべき項目や方法は確立されていない。また、交通流シミュレーションモデルとCO₂排出量推計モデルを組み合わせることで推計されるCO₂排出量の妥当性についても、十分な検証はなされていない。

図-1は、交通流シミュレーションモデルを用いてCO₂排出量を推計する場合に考えられる検証 (Validation) のステージを示したものである。「検証I」は、シミュレーションの集約的な交通状況の再現性を検証する部分であり、シミュレーションの開発・利用の様々な場面で行われている。また、「検証III」は与えられた車両挙動に対するCO₂排出モデルの再現性を検証する部分であり、一般に、排出モデルの作成やパラメータ同定の際に行われている。

図-1 交通流シミュレーションによるCO₂排出量推計の検証の考え方

それに対して、「検証II」は個別車両挙動の再現性の検証であり、個別車両挙動の再現を目的としたモデルの検証としては行われるが、一般的な利用条件下での再現性検証はほとんど行われない。特に、マイクロ交通流シミュレーションの場合、個別車両挙動の再現性を確保するためには、車両挙動モデルに含まれる多くのパラメータを調整する必要がある。しかし、設定の複雑さや設定に必要なデータ取得の困難さもあり、特に個別車両挙動の再現性に注意を払ったような事例を除き、個別車両挙動の再現性という観点からパラメータ調整が行われているとはいえない。

また、トータルとしてのシミュレーションによるCO₂排出量の再現性に関する検証である「検証IV」が行われた例はほとんどない。これは、個別車両挙動やCO₂排出量をシミュレーションと比較可能な形で計測することが困難であったからである。今後、CO₂排出量の推計精度確保の観点から求められる検証項目や方法についても検討するためには、適切なデータソースを活用しながらシミュレーションのCO₂排出量や関連する個別車両挙動についての検証事例を蓄積する必要がある。

本研究では、上記のような問題意識に基づき、集約的な交通状況の再現性が確保された状況下における、個別車両挙動やCO₂排出量の検証（上記の区分では「検証II」や「検証IV」に相当）を行い、その特性や検証に当たって考慮すべき事項を考察することを目的とする。特に、本研究では3種類のマイクロ交通流シミュレーションを同一交通条件下で実行させ、横並びで比較検証することで、モデル間の挙動の違いを考慮した検証のあり方を検討することも目的の一つである。複数のシミュレーションの同一交通条件下での比較検証は、集約的な交通状況の再現性という観点では事例はあるが^{1),2)}、CO₂排出量では見られず、そのような点からも貴重な事例であると考えられる。

2. 対象路線及びシミュレーションの概要

(1) 基本的考え方

まず最初に、本研究で実施するシミュレーションの比較検証の基本的考え方を整理する。本研究では、複数のシミュレーションについて同一交通条件下で実行させ、集約的な交通状況の再現性が確保された状況下における、個別車両挙動やCO₂排出量の検証を行うものである。この際、入力データの設定条件やパラメータの設定方法によって、結果は大きく変わる。そのため、本研究では、以下の条件でシミュレーションの実施及び比較検証を行うこととした。

- 各シミュレーションに実装された車両挙動モデルのパラメータは基本的に調整せず、デフォルト値を用いる。
- 各シミュレーションの入力データとして、交通需要、信号制御パラメータは同じものを用いる。
- 比較対象となる実測データとして、対象路線のプローブ車両から得られた速度プロファイルデータ等を用いる。

以下、a)について補足説明する。車両挙動の再現性向上という観点からは、各マイクロ交通流シミュレーションに実装されている車両挙動モデルのパラメータを調整する必要がある。しかし、本研究では原則として車両挙動モデルのパラメータについてはデフォルト値を用いることとした。その前提となる認識として、多くの一般ユーザは当該シミュレーションの車両挙動モデルを十分に理解しておらず、結果としてデフォルト値のまま、あるいは適切なパラメータキャリブレーションを行わずに使用するケースが多いと想定されることが挙げられる。また、デフォルト値は各シミュレーションの開発者が一定の根拠に基づいて設定し、製品として販売しているものであり、モデル間の横並び比較検証の基準としてデフォルト値を用いるのは一定の妥当性があると考えられる。

従って、本研究ではパラメータのデフォルト設定に基づく車両挙動を前提とした比較検証を行うものであり、各シミュレーションの本質的な性能の評価が目的ではないことに留意されたい。

(2) 対象とする交通流シミュレーション

本研究で比較分析の対象とする交通流シミュレーションとして、「AIMSUN[®]」「NETSIM[®]」「VISSIM[®]」の3つのマイクロ交通流シミュレーションを用いた。いずれも、商用で販売されており入手が容易であること、実務や研究など様々な場面での適用事例が多いことなどを考慮して、比較検証の事例として選定したものである。実装されている車両挙動モデルについてもそれぞれ異なる特徴を有しており、マイクロ交通流シミュレーションが

有するモデルの多様性を踏まえた比較検証ができるものと考えられる。なお、本稿では、モデル間の比較を通じて検証に当たって考慮すべき事項を考察することに主眼を置いており、各モデルの性能評価やモデル間の優劣を判定しようとするものではない。この点を踏まえて、以下の文章ではシミュレーション名は用いず、上記の順番にSIMULATION A, SIMULATION B, SIMULATION Cと表すこととする。

(3) 分析対象路線と実測調査の概要

本研究では、駒沢通りの東京医療センター前交差点を起点、ローソン目黒鷹番3丁目店前交差点を終点とする1.55 kmを対象路線とする（図-2）。この区間には起点と終点を含め、全部で7箇所の信号交差点がある。朝の時間帯（概ね7～10時の間）は、ローソン目黒鷹番3丁目店前交差点をボトルネックとする上り方向の渋滞が発生する。

この区間での交通状況等のデータを得るため、プローブ調査を含んだ大規模な交通調査が実施されており³⁾、本研究ではこのデータを用いる。調査は2010年12月1日の朝6時～10時に行われた。プローブ調査の車種及び有効トリップ数を表-1に示す。プローブ車両は全車両についてGPS座標等が取得されている。平均的には概ね10分に1本程度の走行軌跡が得られている。その他、本調査では流入交通量や信号交差点での信号制御パラメータも調査しており、シミュレーションではこれらの情報も一部用いているが、設定方法については後述する。

(4) 交通流シミュレーションの実施とキャリブレーション

2.(2)で選定した3つのシミュレーションに対して、交通需要、信号制御パラメータ及び必要なパラメータを設定して、シミュレーションを実行する。ここで、再現性検証という観点からは、調査により得られた交通需要、信号制御パラメータをシミュレーションの入力として与え、プローブ車両から得られる交通状況の再現性を分析するのが望ましい。しかし、今回の対象区間では集中制御が導入され信号制御パラメータが時々刻々変化するため、調査により得られた信号制御パラメータをシミュレーションに設定するのは極めて困難かつ煩雑な作業を要する。そのため、設定の煩雑さを避けるため、平均的な信号制御パラメータを設定することを考えると、調査で得られた交通需要を入力としたシミュレーションでは信号制御の設定に起因する交通状況の再現性低下が想定される。本研究が集約的な交通状況の再現性が確保された状況下における、個別車両挙動やCO₂排出量の検証に着目していることを考えると、信号制御の設定によって交通状況の再現性が低下するのは望ましくない。

図-2 対象路線の概要（○で示しているのは信号交差点）

表-1 プローブ調査の車種及び有効トリップ数

車種	有効トリップ数
Corolla Fielder	4
Isis	6
MarkX	6
Vellfire	6
Prius	2
計	24

そこで本研究では、設定の煩雑さを避けつつ集約的な交通状況の再現性を確保するため、以下の手順でシミュレーションを行うこととした。まず、全車両が図-2に示す起点から終点までの単一ODを持つと仮定する。その上で、プローブ車両の平均旅行速度を再現できるように、起点から流入する交通需要と信号パラメータを調整する。実際には、まず信号パラメータについて交通調査の結果に基づき平均的な値を設定し、その後に交通需要を調整する。また、平均旅行速度の再現性に希望最高速度が大きく影響することがわかったため、希望最高速度についてもプローブ車両の実態に合うよう、調整する。これらの調整を3つのシミュレーションに対して順次行い、同じ交通需要、信号パラメータ、希望最高速度の設定で概ね同じような再現性になるまでキャリブレーションを行った。なお、(1)で述べたように、他の車両挙動のパラメータは各モデルのデフォルト値としている。平均旅行速度の再現性については3.(1)で詳しく述べるが、概ね同様の再現性が得られたと考えられる。

上記のキャリブレーションはある1つの乱数シードに対して行うが、シミュレーションは合計5つの乱数シードを設定して実行し、結果を得た。

(5) 排出量モデルと排出量の推計

本研究では、交通流シミュレーション及びプローブ車両の走行軌跡からCO₂排出量を推計するのに、JCAPII詳細排出量モデル⁷⁾を用いる。本モデルは瞬間の速度と駆動力に対応した排出マップを保持し、車両の瞬間の速度・加速度を与えると、駆動力を計算して排出マップに適用し、瞬間の排出量を推計することのできるモデルであり、瞬間の排出量についても概ね高い再現性を有している⁷⁾。車種は平成17年規制の2,000 cc乗用車のマップ

図3 トリップ毎の旅行速度

図4 トリップ毎の最高速度

図5 旅行速度のRMSE

(1車種)を適用する。本来であれば、車種別に該当するCO₂排出モデルを用いて、車両毎のCO₂排出量を推計比較するのが望ましいが、今回のプローブ車両はいずれも小型乗用車であり走行軌跡の特性は大きな違いがないと考えられること、車種の違いを考慮するとその影響の方が大きく、走行挙動の特性によるCO₂排出量への比較検討が困難になることから、JCAPII詳細排出量モデルを

プローブ車両及びシミュレーションの車両軌跡に適用した結果を比較することによりCO₂排出量の再現性を比較検証することとする。

3. 比較分析結果

(1) 旅行速度及び最高速度の再現性

トリップの旅行速度（区間平均速度）については、いずれのモデルにおいても概ね再現している（図-3）。また、トリップの最高速度についても、いずれのモデルにおいても設定した範囲内に分布していることが確認できる（図-4）。これは、今回のシミュレーションにおいて、プローブ車両の区間旅行速度を概ね再現するように発生需要と最高速度をキャリブレーションしているためである。先に説明した通り、発生需要と最高速度の設定は、いずれのシミュレーションにおいても同じである。また、交通流状態に大きな影響を与える信号制御パラメータについても同じ値を設定している。従って、いずれのシミュレーションにおいても、マクロな交通流については概ね類似した再現性を有していることが確認できた。しかし、図-3の旅行速度を見ると、一部のシミュレーションでは、乱数シードの設定によって結果のバラツキが大き

図-6 トリップ毎の停止回数

図-7 トリップ毎の最大加速度

図-8 トリップ毎の最大減速度

くなっていることがわかる。結果のバラツキを定量的に見るため、プローブ車両とシミュレーションの旅行速度のRMSEを算出した。具体的には、プローブ車両の区間流入時刻の前後の時刻に流入するシミュレーションの車両1台ずつ計2台の平均によりプローブ車両に対応するシミュレーション旅行速度を算出し、RMSEを算出した。図-5に結果を示す。RMSEが小さいケースについてはシミュレーション間の差はさほどないが、SIMULATION AとSIMULATION Bでは、乱数シードによって旅行速度のRMSEが大きくばらついている様子が見られる。

(2) 停止回数・加減速度の再現性

次に、停止回数、加速度、減速度などの再現性について比較する。これらの項目は、いずれもCO₂排出量に係ると考えられる項目である。

まず、停止回数については、いずれのシミュレーションでも概ねプローブ車両の傾向を再現していることが確認できる(図-6)。しかし、特にSIMULATION Aについては、乱数に伴うバラツキが大きくなっていることがわかる。

一方、最大加速度についてみると、SIMULATION A, Cでは、概ね設定した範囲内ではばらついているのに対し、SIMULATION Bでは、高い加速度の値も表れていること

図-9 走行モード別時間比率

図-10 瞬間の速度別加速度の頻度分布（トリップ平均旅行速度：11 km/h）

表-2 走行モードの設定条件

モード種類	条件
停止モード	$V=0\text{km/h}$
低速モード	$0\text{km/h} < V \leq 5\text{km/h}$
加速モード	$V > 5\text{km/h}$ かつ $A > 0.5\text{km/h/s}$
定常モード	$V > 5\text{km/h}$ かつ $-0.5\text{km/h/s} \leq A \leq 0.5\text{km/h/s}$
減速モード	$V > 5\text{km/h}$ かつ $A < -0.5\text{km/h/s}$

V: 瞬間速度, A: 瞬間加速度

がわかる（図-7）。また、最大減速度では、程度の差はあれバラツキが大きく、かなり大きい減速度が表れていることがわかる（図-8）。特に、SIMULATION A, Bでは、 $-9.8\text{ m/s}^2 = -1\text{ G}$ 前後の減速度も少なからず表れている。停止時の挙動が追従モデルで必ずしも適切に表現されておらず、前車に追突しそうになると急減速を行わざるを得ない状況が多く表れているものと想定される。

次に、CO₂などの排出量推計に対して加減速を含む走

行パターンの影響を考慮するため、停止、加速、定常、減速などの走行モードに区分してモード別の時間比率の再現性について分析を行う。ここで、走行モードの区分については既存の研究事例^{8),9)}を参考にし、表-2のように行った。なお、既往の事例では停止モードを5 km/h以下としているが、本研究ではさらに速度0 km/hの完全に停止した状態（これを本研究では停止モードとする）と0 km/h～5 km/hの状態（これを低速モードとする）に区分している。

図-9は各シミュレーションについてトリップの平均旅行速度1 km/h毎にモード別時間を集計・平均化し、モード別時間比率を算出して線で結んだグラフである。ここで、乱数シードによる違いが見られなかったので、5ケース全てをまとめて分析している。あわせて、プローブ車両の車両軌跡から得られるモード別時間比率もプロットした。各シミュレーションはそれぞれ異なる特徴的な

図-11 トリップ毎のCO₂排出量

図-12 CO₂排出量の RMSE

図-13 CO₂総排出量

傾向を有している。停止モードについてみると、低速域にてSIMULATION A, Cではプローブ車両と比較して過小評価、SIMULATION Bでは逆に過大評価となっている。一方、加速モードについてみると、低速域ではSIMULATION Aで比較的プローブ車両と傾向が似ている

が、SIMULATION B, Cでは大幅に過小評価となっている。その一方、速度が上がると、SIMULATION Cにおいて傾向が近くなるのに対し、SIMULATION A, Bは過小評価となる。SIMULATION Bではどの時間帯でも加速モード時間分布が過小評価されている。さらに特徴的なのはSIMULATION A, Bにおける定常モード時間比率である。速度が上がると定常モード時間比率が大幅に大きくなっているが、これらのシミュレーションでは自由流走行時に速度変化が非常に少ないことを表している。このように、いずれのシミュレーションについても、プローブ車両で表現される現実の走行モードの特性を再現するような結果にはなっていないことがわかる。

ここで、CO₂排出量に関する詳細な加減速挙動を比較するため、トリップ平均旅行速度毎にデータを集計して、瞬間の速度・加速度の頻度分布を分析した。ここでは、瞬間の速度・加速度を速度は1 m/s毎、加速度は0.5 m/s毎に集計し、出現頻度を算出した。図-10は、低速域（平均旅行速度が11 km/h $\pm$ 0.5 km/h）の速度・加速度頻度分布である。これについても、シミュレーションモデルによって異なる特徴的な様相を呈している。SIMULATION A, Bでは、10 m/sec（概ね40 km/h）当たりにおいて、強いピークが見られる。これは、定速走行状態になった際に、ほぼ同じ速度で加減速せずに走行する特性を有しているためである。さらにSIMULATION Bでは、10 m/sのみならず5 m/s周辺においてもピークが見られることから、追従走行下でも速度の変化が小さく、ある一定の速度で走行するような特徴がある。また、SIMULATION A, Cでは、停止（速度0 km/h、加速度0 m/s²）の周りに頻度の高い領域があり、プローブ車両に比べて低い速度での追従を強いられている状況が多いことが窺える。さらに、SIMULATION Aでは、低速域において加減速度が非常に大きい領域がある。

このような速度・加速度分布の比較検証を行うことにより、トリップ平均旅行速度、停止回数、走行モード別

図-14 単位距離当たりCO₂排出量

図-15 旅行速度のRMSEとCO₂排出量のRMSEの関係

時間比率などの集計量での比較では見えない部分を確認することができる。なお、CO₂排出量の比較も踏まえた考察は後に述べる。

(3) CO₂排出量の再現性

次に、CO₂排出量の再現性について分析する。まず、図-11は、トリップ毎のCO₂排出量を流入時刻毎に示したものである。概ね、プローブ車両のCO₂排出量と傾向が似ているが、SIMULATION A, Bにおいては乱数シードの設定によりバラツキが大きいことがわかる。これは、旅行速度のバラツキが大きいことでもわかるように、走行状態の再現性が乱数シードによって大きく異なることに起因すると考えられる。また、図-12は、プローブ車両とシミュレーションのCO₂排出量のRMSEを、旅行速度のRMSEと同じ方法で算出したものである。SIMULATION A, Bにおいては乱数シードの設定によるバラツキが大きいことが本図でも示されているが、特にSIMULATION AはSIMULATION B, Cに比べてRMSEが大きくなっていることがわかる。更に、CO₂総排出量とし

て集計したものを図-13に示す。プローブ車両ではCO₂総排出量はわからないためシミュレーション間の比較のみにとどまるが、SIMULATION A, Bは乱数シードの設定によるバラツキが大きく、今回のケースにおける最大値と最小値の比はSIMULATION Aで約1.6倍、SIMULATION Bでも約1.5倍となった。

このようなCO₂排出量のバラツキは旅行速度の再現性の影響を受けていると考えられることから、その影響を除外するため、旅行速度と単位距離あたりCO₂排出量の関係を分析する。その結果、乱数シードの影響はほとんど見られず、一般に知られているような平均旅行速度が上がるとCO₂排出量が小さくなる関係¹⁰が見られる（図-14）。この結果から、上で示されたトリップ毎のCO₂排出量のバラツキは、旅行速度のバラツキに起因していることが想定される。一方、図-15は、3.(1)で示した旅行速度のRMSEとCO₂排出量のRMSEを比較したものである。SIMULATION Bについては正の相関が見られるが(R=0.86)、SIMULATION Cについては大きな値の変化ではないものの負の相関が見られ(R=-0.90)、SIMULATION Aについては負の相関があるものの(R=-0.64)、グラフ上では明確な関係があるようには見られない。

図-14を見ると、プローブ車両のCO₂排出量を概ね再現しているが、特にシミュレーションA, Cでは、低速域において若干過大評価となっていることがわかる。この結果は、低速域において、同じ旅行速度であっても、プローブ車両のデータと比較するとCO₂排出量が大きくなるような走行パターンとなっていることを示している。このような低速域における誤差が、図-15で示したような旅行速度の誤差とCO₂排出量の誤差の関係の一因であると推察される。

このような速度帯による再現性の違いの要因を詳細に分析するため、単位距離あたり排出量を前節で示した走行モード別に分解する。すなわち、各走行モード別に発生したCO₂排出量をトリップの総走行距離で除すること

図-16 速度帯別走行モード別単位距離あたりCO₂排出量

により、単位距離走行あたり発生するCO₂排出量について、走行モード別の寄与が算出される。ここで、単位距離あたり走行モード別排出量を全モードについて加算すると、単位距離あたりの総CO₂排出量となる。前節の走行モード別分析にあわせて、各シミュレーションについてトリップの平均旅行速度1 km/h毎にモード別CO₂排出量を集計・平均化し、線で結んだグラフを図-16に示す。なお、ここでも乱数設定による違いはほとんど見られないことから、全5ケースをまとめて分析した。これらを見ると、CO₂排出量についてもシミュレーションによって異なる特性を有していることがわかる。SIMULATION Aの低速域でのCO₂排出量の過大評価は、加速モードにおける過大評価に起因していることがわかる。前節で見たとおり、低速域において加減速度が非常に大きい領域があるが、その影響によるものと推察される。一方、SIMULATION BはCO₂排出量では大きなズレは見られないが、モード別に見ると大きなズレが見られる。場合によっては、モード別のズレが合計のCO₂排出量に影響する恐れもあるものと考えられる。

SIMULATION Cは、各走行モード別に見ても、合計でも、プローブ車両から算出したCO₂排出量と近い値となっていることがわかる。

4. 考察

(1) シミュレーションのパラメータ設定

本研究では、2.(1)で述べたとおり、各シミュレーション実行時の条件として希望最高速度など現況再現性確保のために必要な一部のパラメータを除き、車両挙動のパラメータは基本的にシミュレーションのデフォルト値を使用している。これは実務等における多くのシミュレーション適用場面に近いと考えられる。マイクロシミュレーションでは数多くの車両挙動に関するパラメータがあるが、多くの場合そのほとんどはデフォルト値のまま用

いられるものと考えられる。それは、モデルが複雑でパラメータの理解が困難であること、仮にパラメータをキャリブレーションしようとしても必要とされる詳細な車両挙動のデータが得られないこと、さらに一部のパラメータをキャリブレーションすれば必要な現況再現性（交通量や旅行時間）が得られることから利用者にとって車両挙動パラメータ調整の必要性が低い、などの理由によると思われる。

今回の結果は、デフォルト値で実行すると、平均速度などが再現できたとしても走行モードの時間比率や、速度・加速度分布や、その結果としてのCO₂排出量などは合わない可能性があることを示した。これらは再現するようにキャリブレーションしていないのであるから合わないのは当然とも言える。その意味では、今回の結果が必ずしも各シミュレーションモデルの真の性能を表しているわけではない。モデルの性能評価を行うためには、詳細な車両挙動やパラメータの設定を行うとともに、それらパラメータの感度分析を行うことが必要である。

(2) 走行挙動の再現性とCO₂排出量の再現性の関係

今回の分析では、走行モード時間比率の分析において、低速度域の加速モード時間比率の再現性が高かったSIMULATION AでCO₂排出量が過大評価になること、逆に、低速度域で加速モード時間比率の再現性が低かったSIMULATION CでCO₂排出量の再現性が高かったことは興味深い現象である。また、SIMULATION Bでは、走行モード時間比率や速度・加速度頻度分布の再現性は高くはないにもかかわらず、CO₂排出量の再現性は比較的高いという結果になっていることも興味深い。これらの点は、車両の走行挙動をどのような側面から分析するかによって再現性の見え方が変わってくることを表しており、CO₂排出量プローブ車両の再現性の観点からシミュレーション挙動を検証する場合でも、複数の視点から比較することが重要であることを示している。

また、各モデルとも車両軌跡の再現性が必ずしも高い

とは言えないにもかかわらず、平均旅行速度と単位距離あたりCO₂排出量の関係を見ると必ずしも再現性が低いとは言えない。一般に、車両の消費する燃料が走行に要するエネルギーに比例すると考えると、加速に伴って増加する走行エネルギー分は最高速度に規定されるため、最高速度が決まればCO₂排出量もある程度決まってくるようである。例えば、このようなモデルで最も単純な大口らのCO₂排出モデル¹¹⁾では、1回の加速・減速からなるトリップの場合、加速エネルギー等量AEEは途中の加速方法によらず加速時の最終速度（＝最高速度）で決定され、他の変数である走行距離、旅行時間はほとんど変化しない。今回のシミュレーションでは、最高速度を規定するパラメータをキャリブレートして実態に合わせていることから概ね再現性は高く（図-4）、結果としてCO₂排出量の再現性につながっていると推察される。

実際には、途中の加速方法と速度プロファイルによっては、CO₂排出量が異なってくる。SIMULATION Aの低速域で過大評価となっているのは、速度・加速度頻度分布においてSIMULATION Aで加速度が高く、燃費効率が悪い領域の頻度が多くなったことによると考えられる。

このことは、CO₂排出モデルの速度・加速度別の特性が変わると、CO₂排出量の再現性の結果が異なる可能性を示すものである。今回は1車種での分析しか行っていないが、車種が違えば速度・加速度別の排出特性が変わる可能性がある。また、同じ車種でもCO₂以外の他の排出量（NO_x、COなど）は特性が大きく異なることから、排出量の再現性が大きく変わる可能性がある。

(3) 車種・車両特性の課題

今回の分析では1車種を対象としており、車種の要素を考慮していないが排出量推計を行う上では非常に重要なポイントである。上述のように車種によって排出特性が異なり、その結果として走行挙動の再現性とCO₂排出量の再現性の関係が異なってくる可能性がある。これらに対しては、車種を1つに絞らず、複数の車両を対象として分析を行い比較検証することが必要となる。

また、そもそもの問題として、車種・車両の違いによる排出量の違いは非常に大きく、今回の分析で示されたようなCO₂排出量の再現性の違いはそれと比較すると大きな問題ではないという見方もある。対象地域におけるCO₂排出量の総量を推計するような場合には車種構成や車両間の差の影響の方が大きく、それらの要因の方がCO₂排出量の総量の再現性に対して支配的であると考えられる。他方、シミュレーションを何らかの施策の評価に用いてCO₂排出量の削減効果に着目するような場合、その変化の感度が重要となる。その場合、CO₂排出量の変化に関係する要因を適切に再現しているかは重要な点であると考えられる。施策によって走行挙動がどう変化

するかは異なるが、評価対象とする施策に応じて、施策により変化する要因を踏まえた分析が必要である。

なお、今回のプローブ車両の実走行データは限られた被験者ドライバーの走行の結果に過ぎず、一般ドライバーの走行特性を代表しているとは限らない。そのため、プローブ車両の車両軌跡及びそれから得られる詳細な車両挙動のデータとシミュレーションが異なっているとしても、シミュレーションの方がズレているとは限らない。ただし、図-14などを見ると、SIMULATION A, Cでは低速域において再現されているデータの変動の範囲に実走行データが入っていないことから、少なくとも実走行データの被験者の挙動はシミュレーションでは再現されていないことはいえる。

5. おわりに

本研究では、3種類のマイクロ交通流シミュレーションを実データに基づく同じ交通条件で実行させることにより、集約的な交通状況の再現性が確保された状況下における、個別車両挙動やCO₂排出量の比較検証を行った。シミュレーションによって再現特性が異なり、特に乱数設定に対する結果のバラツキが大きいこと、また走行モード時間比率や速度・加速度頻度分布など、詳細な車両挙動の再現特性もシミュレーションによって大きな特性の違いがあること、その結果として推計されるトリップCO₂排出量もバラツキが大きいことが、個別の走行パターンバラツキに起因するというよりもトリップ旅行速度の再現性のバラツキに起因する部分が多いこと、旅行速度別の排出量で見るとばらつきはさほど大きくないが、モデルによってはある速度域でCO₂排出量の再現性に課題があることなどを示した。今後、これらの結果も踏まえつつ、CO₂排出量の再現性確保の観点から必要とされる検証項目や方法について検討する必要がある。

なお、今回の分析では、プローブ調査の交通状態を再現するにあたり、交通需要や信号制御パラメータを調整している。実際の走行パターンと大きく違うことはないと思われるが、厳密にはシミュレーションの条件設定とプローブ調査の交通条件は一致していない。これらについては、実際に調査で得られた交通需要や信号制御パラメータを入力してシミュレーションを実行させ、結果の比較検証を行うことが望ましい。

また、今回の調査においても、計測値として得られているのはプローブ車両の走行軌跡であり、CO₂排出量の総量、あるいはそれを推計するための全車両の走行軌跡については依然として計測値が無いため、総量ベースでの比較は厳密には行えていない。これらについては計測技術や労力の問題もあり困難も多いが、CO₂排出量の総

量あるいは全車両の走行軌跡の調査を行い、データを整備していくことが必要である。

謝辞：本研究は、平成22年度大林都市研究振興財団研究助成『交通流シミュレーションモデルとCO₂排出量推計モデルの組み合わせ方法に関する比較分析』の助成により実施したものである。また、NEDOのエネルギーITSプロジェクト『国際的に信頼される効果評価方法の確立』において実施された調査のデータを使用させていただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (一社) 交通工学研究会：交通流シミュレーションクリアリングハウス
<http://www.jste.or.jp/sim/index.html>
- 2) SMARTTEST PROJECT:
<http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/deliv3.html>
- 3) 田中伸治，白石智良，小宮粹史，花房比佐友，林誠司，平井洋，桑原雅夫：交通シミュレーションを利用した CO₂ 排出量推計手法の検証手続きの構築，第10回 ITS シンポジウム 2011 論文集，CD-ROM，2011.11.
- 4) TSS ホームページ：<http://www.aimsun.com/>
- 5) Federal Highway Administration: Traffic Software Integrated System User's Guide Version 4.3, 1999.6.
- 6) PTV Vision ホームページ：<http://www.ptv-vision.com/>
- 7) 林誠司：過渡排出量推計モデル＋走行風による初期拡散モデル構築，JCAP 技術報告書，PEC-2004AQ-03，2005.
- 8) 小根山裕之，大西博文，山田俊哉，平井洋：自動車の走行特性を反映した排出係数の設定に用いる実走行モードについて，土木計画学研究・講演集，Vol.22，No.2，pp.571-574，1999.
- 9) 横田久司，鹿島茂，国領和夫，田原茂樹：走行動態記録に基づく自動車からの環境負荷推計モデルの開発，大気環境学会誌，Vol.40，pp.67-83，2005.
- 10) 大城温，松下雅行，並河良治，大西博文：自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数，土木技術資料，Vol. 43，No. 11，pp. 50-55，2001.
- 11) 大口敬，片倉正彦，谷口正明：都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル，土木学会論文集，No.695/IV-54，pp.125-136，2002.

(2012. 2. 25 受付)

COMPARATIVE ANALYSIS OF MICROSCOPIC TRAFFIC SIMULATION FROM THE VIEWPOINT OF REPRODUCIBILITY OF VEHICLE MOVEMENT AND CO₂ EMISSION

Hiroyuki ONEYAMA, Satoshi MATSUDA, Takashi OGUCHI
and Shigenori SHIKATA

Thus far, both a process for developing and a method for validating a traffic simulator that calculates CO₂ emission or vehicle speed and acceleration, which influences mainly the calculation of CO₂ emission, have not been explored. As a result, the validity of estimation of CO₂ emission using a traffic simulator is not sufficiently clear. The aim of this study is to investigate the factors that should be validated in order to preserve the reproducibility of CO₂ emission, by comparing the detailed movements of vehicles and CO₂ emissions obtained from three major microscopic traffic simulators that are run under the same input conditions and validated for aggregated levels of traffic conditions such as average speed. As a result, it is found that the reproducibility of vehicle behavior depends on the characteristics of the simulators. On the basis of these results, the points that should be considered in the model validation from the viewpoint of reproducibility of CO₂ emission are discussed.