

# マルチエージェントベースドメソ交通流シミュレータ MAUMS の標準, および実用性検証結果の報告

## Verification and practical validation of Multi Agent-based Urban Mobility Simulator MAUMS

溝上 章志 \* Shoshi MIZOKAMI  
森 俊勝 \*\* Toshikatsu MORI

都市圏に新規の交通システムを導入したりする場合, 事前に交通利用者の交通行動や交通網上のフローを予測しながら, 導入効果の検討をすることが求められる. 開発した MAUMS (Multi Agent-based Urban Mobility Simulator) は, 交通利用者一人一人のアクティビティシミュレーションモデルとメソレベルでの動的交通流シミュレーションモデルから成るモビリティシミュレータである. 後者の動的交通流シミュレーションモデルでは道路網上に発生する現実の交通現象を正しく表現する必要がある. 本稿では, MAUMS の交通流シミュレータとしての挙動を確認するために, 交通工学研究会が策定した交通流シミュレーションの標準検証マニュアルに基づいて性能検証 verification と実用性検証 validation を行った結果を報告する.

キーワード 交通流シミュレーションモデル, 性能・実用性標準検証, MAUMS

### 1. はじめに

#### 1.1 交通流シミュレーション

交通流シミュレーションモデル<sup>1), 2), 3), 4)</sup>にはモデリングの単位によってマクロモデル, ミクロモデル, および両者の中間的性質を持つメソモデルがある. マクロモデルは, 個々の車両ではなく,  $q-v$  関係などによって連続した車両群としてフローを表現する. 計算コストが小さく, 大規模な交通ネットワークを対象とした分析も容易であるが, 車両間のミクロな相互作用によって生じるショックウェーブのような交通現象を再現できない. 一方で, PTV Vissim や AIMSUN Next などのミクロモデルは, 車両一台単位の加減速や車線変更など

の挙動を明示的に表現することによってフローを詳細に記述する. 個々の車両の挙動を逐次的に追跡することから計算コストが大きくなり, 大規模なネットワークを対象とした分析は容易ではない. それに対して, SUMO や MATSim などのメソモデルでは車両は一台単位で表現されるが, 道路区間上での各車両の挙動は  $k-v$  関係などによって集計的に決定される. 渋滞は待ち行列として表現されるが, 車両間の相互作用は考慮しないため, 計算コストはミクロモデルよりも小さく, 都市圏規模のネットワークにも対応可能である.

#### 1.2 交通シミュレーションの標準検証

交通工学研究会の交通シミュレーションクリアリングハウス<sup>5)</sup>は, 新たに開発されるシミュレ

\* 正会員 工学博士 熊本学園大学経済学部 (TEL/FAX: 096-3364-71490, e-mail: sh-mizokami@kumagaku.ac.jp)

\*\*正会員 博士 (工学), 合同会社ゴダイバスト

ーションモデルに標準検証プロセス<sup>6)</sup>に沿った性能検証 verification と実用性検証 validation の実施を推奨している。そこには、我が国で開発、あるいは代理管理されている 20 の交通シミュレーションモデルについて、性能検証の結果が掲載されている。行われている性能評価の項目としては 1) 車両の発生、2) リンク下流端の飽和交通流率、3) ボトルネック容量とショックウェーブの伝搬速度、4) 合・分流部の容量、5) 信号交差点での対向による右折容量の低下、6) 経路選択挙動であるが、得られるフローがこれらを全て満足するモデルはマイクロモデルに属するモデルだけである。メソタイプのモデルに対しては、道路区間上の車両の挙動に対して、仮定したモデル通りに作動しているかを説明することが求められている。

本稿では、独自に開発した MAUMS (Multi-Agent based Urban Mobility Simulator) 中のメソ交通流シミュレーションモデルに対して、標準検証プロセスに沿って性能検証 verification と実用性検証 validation を行った結果を報告する。

## 2. MAUMS の概要

### 2.1 MAUMS の構造と機能

MAUMS はその名の通り、個人々人 (Multi-Agent) の活動選択行動に基づき、都市における全ての交通手段 (Urban Mobility) のネットワーク上でのフローを記述するメソ交通流シミュレータ (Simulator) であり、個々のエージェントの交通行動とそれによって生じる全交通網上の動的なフローをシミュレートする。

図 1 に示すように、MAUMS はエージェントベースアクティビティ (ABA: Agent Based Activity) シミュレーションモデルとメソ交通流 (MTF: Mesoscopic Traffic Flow) シミュレーションモデルとのループ構造になっている。交通ネットワーク、交通需要と LOS (Level of Service) の初期値データなどが入力されると、ABA シミュレーションモデルは時々刻々に発生するトリップを一つのエージェントとして生成し、各エージェントは別途、推定されて内挿されている交通行動モデルに基づいて目的地や利用手段、経路を選択する。

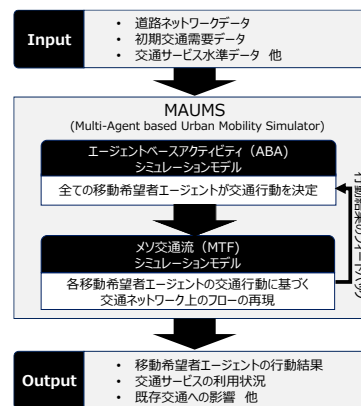


図 1 MAUMS の構造

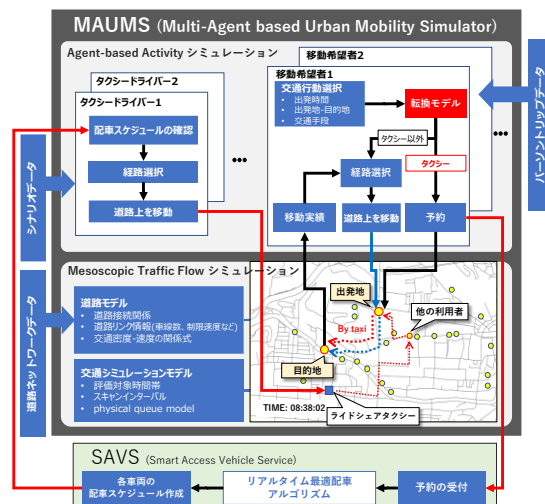


図 2 オンデマンドタクシー導入時の MAUMS による分析の概要

一方、MTF シミュレーションモデルでは、個々のエージェントが選択した出発時刻や利用手段、経路などの選択行動を交通ネットワーク上で再現する。自動車の場合、距離と車線数および制限速度の情報を持つリンクで構成される道路ネットワーク上で、車両は 1 台単位で表現され、各リンク上での車両の挙動は交通密度  $k$  (km/h) と空間平均速度  $v$  (veh/km) の関係を示す  $k$ - $v$  曲線に基づいて決定される。また、交通渋滞現象の表現には渋滞の延伸・縮小を考慮可能な Physical Queue モデルを採用している。

MTF シミュレーションモデルを経て更新された LOS 値は ABA シミュレーションモデルにフィ

ードバックされ、このループを反復する。全エージェントの全ての選択行動が収束した時点を実常状態とし、そのときの各種の評価指標を出力する。MAUMSは、都市圏レベルの交通政策の評価を目的として、メソ交通流シミュレーションを導入しており、かつエージェント単位の移動とのインタラクションを重視し、欧米で実務だけでなく学術にも利用されている MATSim に類似している。

ここでは、配車システムに SAVS (Smart Access Vehicle Service) を用いたリアルタイムオンデマンドタクシーが導入された場合を想定し、MAUMSが行う需要分析の概要を図2を用いて説明する。まず、現利用手段からオンデマンドタクシーへの転換モデルが内挿された ABA シミュレーションモデルによって、全てのエージェントは転換エージェントと現利用手段利用エージェントに判別される。前者はオンデマンドタクシーを用いて予め SAVS が指定した経路を、後者は手段ごとに内挿された経路選択行動モデルに従って経路選択を行う。MTF シミュレーションモデルではエージェントが選択した交通行動を各交通ネットワーク上で再現する。

### 2.2 待ち行列と下流リンクへの流入の表現

リンク上の車両の速度  $v$  は、走行領域内を走行している前方車両との車頭距離  $D_h$  (m) から算出される交通密度  $k$  を Greenshields の  $k-v$  曲線に代入することによって決定される。各車両は単位刻み時間  $\Delta t$  ごとに速度  $v$  で移動するが、密度が飽和密度に達した時点で停止する。車両のリンク上での物理的な位置は走行速度と待ち行列の位置に基づいて厳密に計算される。次のリンクに流入可能かどうかは、次のリンク上の最後方車両との車頭距離を最小車頭距離と比較することによって判定される。

## 3. MAUMS の性能 verification の検証

MAUMS 中の MTF シミュレーションモデルの主要な性能検証結果を (1)車両発生、(2)ボトルネック容量、(3)リンク下流端の飽和交通流率、(4)渋滞の延伸/解消とショックウェーブの伝播速度、(5)経路選択行動の順に示す。



図3 車両発生検証用のデータセット

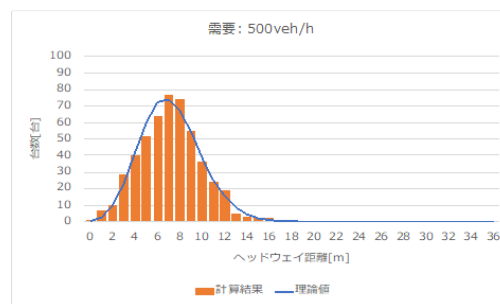


図4 500veh/h のヘッドウェイ距離分布

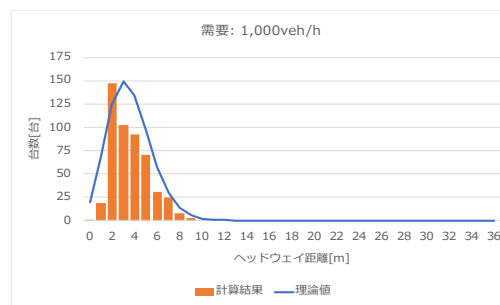


図5 1,000veh/h の車頭距離分布

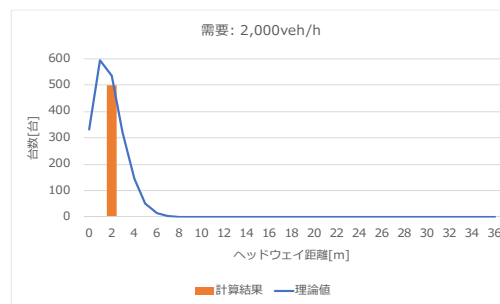


図6 2,000veh/h の車頭距離分布

### 3.1 車両発生の検証

紙面の制約のため、ここでは車両が等間隔発生する場合は省略し、ランダム発生の場合について、1)発生車両の車頭時間の分布、2)発生台数の総量、および3)交通量の保存状態を検証する。1)では、乱数系列の違いに依存せず、設定した指数分布から大きく乖離していないかを、2)では設定した交

表 1 ランダム発生時の発生台数の総量

需要 (veh/h)	発生台数(1h)					
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
500	500	500	500	500	500	500
1,000	1,000	1,000	1,000	999	1,000	1,000
2,000	1,797	1,797	1,796	1,800	1,799	1,798

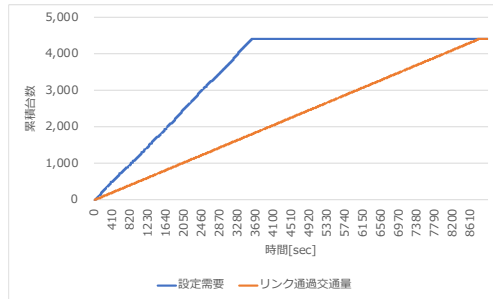


図 7 ランダム発生時の交通量の保存

通需要に基づく台数の車両が発生しているかを、3)では、発生道路リンク末端まで渋滞が延伸し、道路リンクに流入できない状況においても、最終的に設定した需要が消滅することなくすべてネットワーク内に流入しているかを確認した。

これらの検証は、図3に示す発生点とそこから流出する道路リンクからなる道路ネットワークで行った。ランダム発生と等間隔発生のそれぞれについて 10 試行のシミュレーションを行い、理論値とシミュレーション結果を比較した。

ランダム発生ではポアソン乱数に基づき1台毎のヘッドウェイ時間を求め出発時刻を決定する。ポアソン乱数は指定された平均車頭時間が平均値となるポアソン確率密度分布に基づいて発生させる。平均車頭時間は、交通需要と発生時間に基づき算出する。

### 1) 車頭時間分布

図4～図6は500, 1,000, 2,000veh/hの交通需要に対して1時間のシミュレーションを5試行し、各車両が発生したときの車頭距離の分布を示したものである。図中の折れ線グラフは理論値、棒グラフは計算結果（5試行の平均値）である。

図4に示すように、500veh/hでは計算結果と理論値は概ね一致する。1,000veh/h, 2,000veh/hと増加するに従い、計算結果と理論値の乖離が大きくな

表 2 検証するモデルパラメータの設定

名称	最小値	標準値	最大値
反応遅れ時間 [sec]	0	1	2
交通需要 [veh/h]	必要に応じて任意に設定		
制限速度 [km/h]	30	60	80

った。これは、発生点からリンクに流入する際に、リンク最後尾の車両との車頭距離が十分に確保できずに流入できないケースが発生することが原因である。また、スキャンインターバル時間を1秒としており、車頭時間が1秒未満の場合には1スキャン未満であるためシミュレータでは0秒として扱う。これは、同一時間に同一場所から車両が発生することを意味する。このとき、前方車両との車間距離が確保できず流入できないことから、該当時間の出発を次のスキャン以降に見送る。以上のことから、理論値との乖離はこの仮定による。

### 2) 発生台数の総量

500, 1,000, 2,000veh/hの交通需要が与えられた場合の車両の発生台数の総量を表 1 に示す。500veh/hと1,000veh/hの場合の発生台数は指定した需要が1時間内に発生したが、2,000veh/hでは上記で示した車頭時間分布の結果より1時間内には発生しきれていない。これより、検証用のリンク上の交通容量は1,800veh/hとなっていることが分かる。

### 3) 交通量の保存

リンク上流端から4,400veh/hの交通需要を与え、リンク下流端の交通量が0になるまでのシミュレーションを行った。図7は設定需要とリンクの交通量観測点における累積交通量を示す。道路リンクの交通容量を超えた分の車両は道路リンク内に流入できないため、発生台数に対して道路リンクの交通量は遅れて増加しているが、最終的には交通需要として設定した4,400台の全ての車両が消滅することなく流入していることを確認した。

### 3.2 ボトルネック容量

現実的な入力項目の範囲内、およびモデルが推奨しているパラメータの設定範囲内で、再現されるリンク容量値、あるいは飽和交通流率の範囲を明らかにする。以下で検証するパラメータの設定を表 2 に示す。

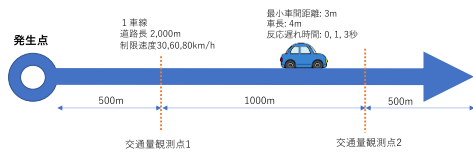


図 8 自由流の  $q$ - $k$  特性検証用のデータセット

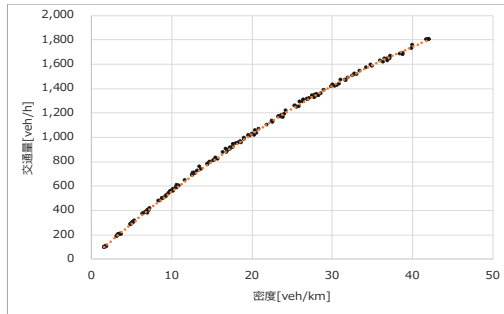


図 9 反応遅れ時間と制限速度が標準値の時の  $q$ - $k$

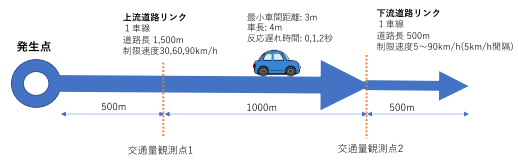


図 10 渋滞流の  $q$ - $k$  特性検証用のデータセット

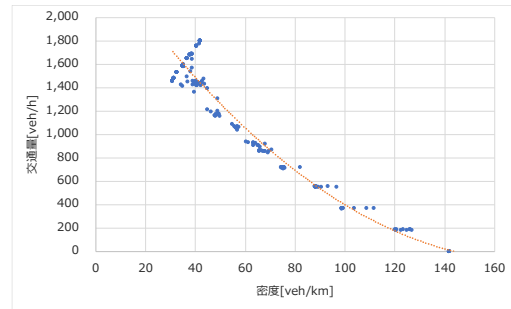


図 11 反応遅れ時間と制限速度が標準値の時の  $q$ - $k$

### 1) 自由流側の $q$ - $k$ 特性

自由流側の  $q$ - $k$  曲線を求める際のデータセットを図 8 に示す。シミュレーション開始後、上流側リンクが渋滞流で定常状態となる 10 分後からの上流側リンクの上流端、下流側の累積交通量を観測する。ある 10 分間について、1 分ごとに両者の累積交通量の差でリンク内の車両台数を求め、これらを平均し、その 10 分間の車両密度とする。また、10 分間にリンクを通過した車両台数を交通量とし、これをそれ以降も同様に 10 分間ずつ 10 回、つまり 100 分間のシミュレーションの車両密度  $k$  と交通量  $q$  を算出し、その結果を  $q$ - $k$  平面上にプロットする。交通需要を 100veh/h ずつ変化させ、それぞれの結果をひとつの  $q$ - $k$  平面上にプロットすることで自由流側の  $q$ - $k$  曲線を作成する。

図 9 には反応遅れ時間と制限速度が標準値の場合の  $q$  と  $k$  の自由流側の  $q$ - $k$  曲線を示す。ボトルネック容量は理論値と一致している。

### 2) 渋滞流側の $q$ - $k$ 特性

図 10 に示すボトルネックで渋滞が発生するようなデータセットを用い、リンク容量に相当する需要を与えてシミュレーションを実行し、渋滞流側の  $q$ - $k$  曲線を求める。シミュレーション開始後、最初の 10 分間で上流側リンクが渋滞流で定常状

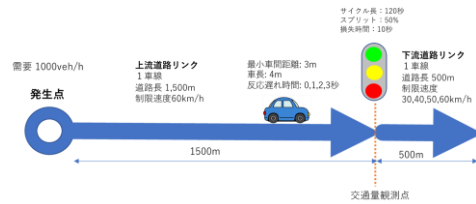


図 12 飽和交通流率の検証用のデータセット

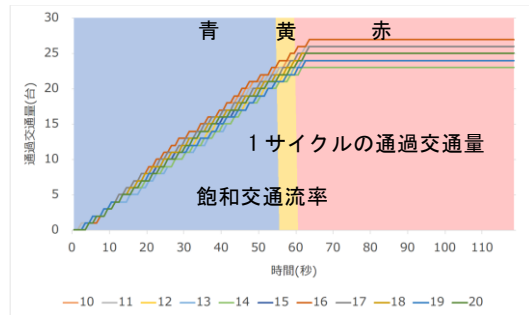


図 13 反応遅れ時間と制限速度が標準値の時の飽和交通流率

態となるのを待つ。その後は自由流の時と同様の方法で 100 分間のシミュレーション実行時の車両密度および交通量を算出し、その結果を  $q$ - $k$  平面上にプロットする。下流側の制限速度を 0km/h ~ 90km/h まで 5km/h ずつ変化させ、それぞれの結果をひとつの  $q$ - $k$  平面上にプロットすることで、渋滞流側の  $q$ - $k$  曲線を作成した。図 11 に自由流側の

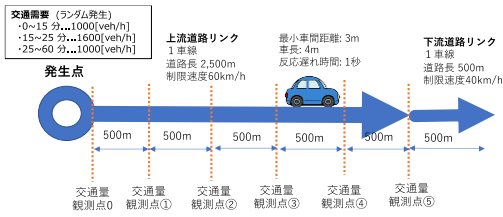


図 14 渋滞の延伸/解消の検証用のデータセット

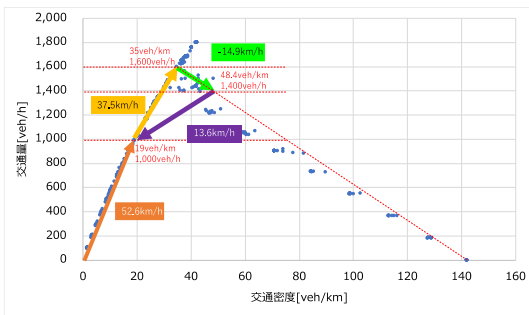


図 15  $q-k$  曲線から求められるショックウェーブの伝播速度

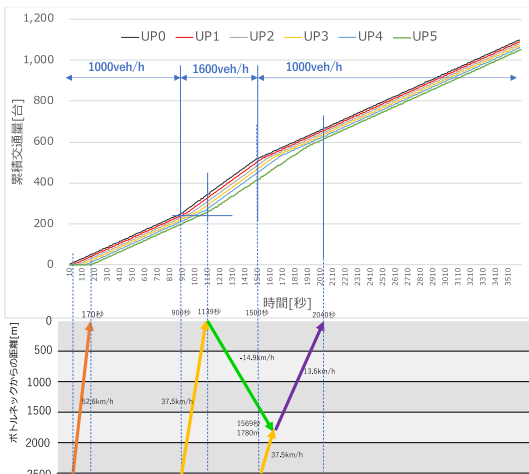


図 16 上流道路リンクの交通状態遷移図 (下) と各観測断面での通過交通量累積曲線 (上)

時と同じ反応遅れ 2 秒、制限速度 60km の際の  $q-k$  を示すが、理論値と一致したボトルネック容量が得られている。

### 3.3 リンク下流端の飽和交通流率

信号交差点を含む一般街路を対象とするシミュレーションモデルでは、赤現示の間に滞留した車両が青現示の間に流出していく様子を確認する

ことによって、リンク下流端での飽和交通流率の再現性を検証する。検証は図 12 に示すような下流端が信号で制御される 1 車線のリンクからなる道路ネットワークを用いる。信号はサイクル長 120[秒], スプリット 50%, 損失時間 10[秒/サイクル]の定周期制御とする。シミュレーション開始後 10 サイクルが経過後の 10 サイクル (10 サイクル ~ 20 サイクル) の間、リンクからの流出量を観測交通流が飽和している間はいずれのサイクルでも流率が安定して再現されていることを確認した。ここでは、表 2 の標準値の場合の飽和交通流率を図 13 に示す。

### 3.4 渋滞の延伸/解消とショックウェーブの伝播速度

ボトルネックを含む単路部において、上流からの交通需要がボトルネック容量を上回ると渋滞が上流に延伸し、その後、交通需要がボトルネック容量を下回ると渋滞が上流から解消していく。この渋滞の延伸と解消を再現の状況をショックウェーブ理論と対比しながら確認する。また、信号現示が赤から青に変わること、滞留が下流から解消していく状況についても検証する。

図 14 に示す検証用のデータセットでは、下流にボトルネック区間をもつ単路状のネットワークを作成した。累積通過台数を観測する区間を上流リンク側に 500m ごと、合計 5 箇所の交通量観測点を設定した。

モデルに与えたパラメータセットが示す  $q-k$  曲線から求められるショックウェーブの伝播速度、およびボトルネック上流側での交通状態遷移図を図 15 に示す。また、各観測断面の通過交通量累積曲線と交通状態遷移図とを対応させて示したものが図 16 である。これらの結果は次式から算出されるショックウェーブ速度  $v_w$  (km/h) と概ね一致している。

$$v_w = \frac{A - C_b}{k_1 - k_2} \quad (1)$$

ここで、 $A$  は流入交通量 (台/h),  $C_b$  はボトルネック交通量 (台/h),  $k_1$  はボトルネック交通量に達した時点の交通密度 (台/km),  $k_2$  は交通量飽和時の交通密度 (台/km) である。これより、渋滞の延伸・

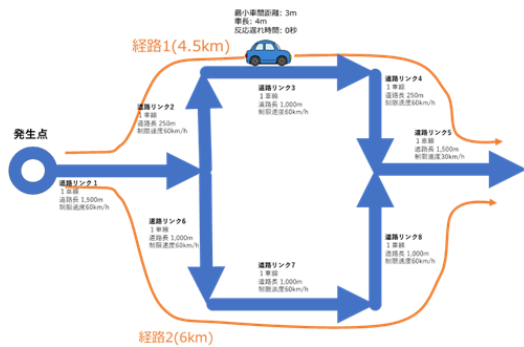


図17 経路選択行動の検証用データセット

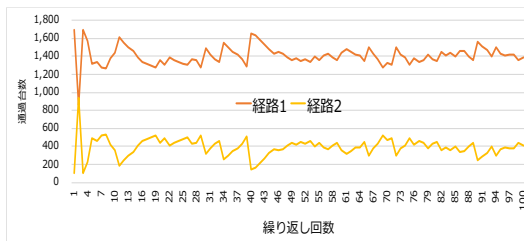
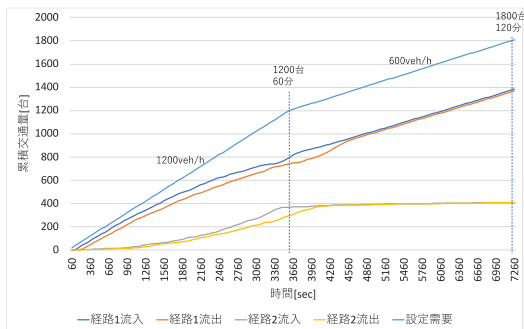
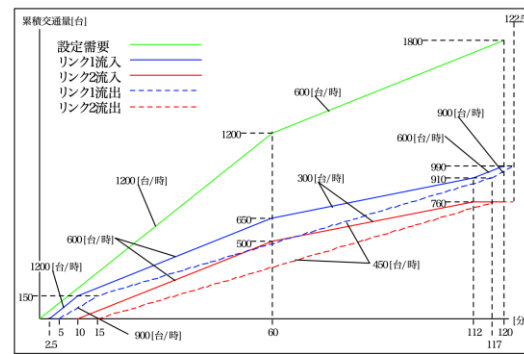


図18 繰り返しごとの経路選択比率



(a) 得られるフローパターン



(b) DUEによるフローパターン

図-19 繰り返しごとの経路選択比率

解消の状況が理論通りに再現されていることが確認できた。

### 3.5 経路選択行動

当初想定した経路選択行動規範の通り，メソ交通流シミュレーションモデルの経路選択モデルが挙動をするかを確認する．想定した経路選択行動規範は，各エージェントは起終点間で最小の経路コストを持つ経路を選択するというものである．経路コストは，過去に利用した経路上のリンク移動時間に基づいて算出される予想移動時間である．従って，DUOやDUEのような均衡状態にはならず，個人ごとに選択経路が変化しなくなった時点で収束したとする．

経路選択行動の検証には図17に示す10D2経路からなるネットワークを用いた．交通需要は最初の1時間は1,200veh/hとし，続く1時間を600veh/hに設定する．100回のシミュレーションを繰り返し行い，検証する．なお，シミュレーションの初回は，全ての車両は距離，および制限速度のみを参考に，最短時間で到着できる経路を選択する．各車両は一度通過した道路リンクの実績通過時間を記録しておき，次回以降の経路選択時には実績通過時間のある道路リンクについては実績通過時間を参照して最小コスト（最短時間）で移動できる経路を探索する．なお，複数回同じ道路リンクを通過した場合は，最新の通過実績のみを参照するものとする．

図18に繰り返しごとの各経路の通過台数の推移を示す．ゼロフロー時のリンク移動時間情報に基づいた経路選択を行う1回目は，全ての車両が距離と制限速度だけに基づいて経路を選択するため，全車両が経路1を選択する．そのため，交通混雑によって増加した移動時間の実績値が記憶されるため，2回目には半分の車両が経路2を利用する．その後も繰り返しごとに各経路の利用比率は変化するが，50回を超える頃から変動は小さくなってきている．

経路の選択状況が安定した100試行目の各経路の交通量の時系列推移を図19(a)に示す．発生交通需要が1,200veh/hと多いシミュレーション開始後3,600秒(60分)までは経路2も利用されるが，

需要が半分の 800veh/h なる 60 分以降は経路 2 はほとんど利用されない。本モデルによる経路選択結果は図 19(b)に示す Verification マニュアルに示された同一条件下での DUE によるフローパターンとは異なる結果となるが、過去に利用した経路の移動時間に基づいて算出される期待移動時間が最小の経路が選択されるという、当初想定したフローを再現することが明らかになった。

#### 4. MAUMS の実用性 validation の検証

種々の交通現象が含まれている現実の交通状況を、シミュレーションの設定やモデルパラメータを妥当な範囲でキャリブレーションし、モデルが総合的に現象を再現することができるかどうかの実用性 (Validation) の検証を行う。本検証には、シミュレーションの入力値となる交通需要や交通運用、比較する交通状況には高い信頼性を持つ実測データが必要となる。今回は、交通シミュレーションクリアリングハウスで公開されている「首都高速道路ベンチマークデータセット (平成7年9月)」を用いた。

##### 4.1 検証シナリオ

表4に示す首都高速道路ベンチマークデータセットは第22回首都高速道路交通起終点調査に基づいて作成されている。以下にその概要を示す。

- 1) 調査日: 平成7年9月20日 (水) 22:00~9月21日 (木) 22:00
- 2) 調査方法: 首都高速道路の全料金所で調査票を配布し、同時に全流入台数を車両感知器 (トラフィックカウンタ) にて把握
- 3) 調査票回収結果:
  - ・ 配布枚数 805,281枚
  - ・ 回収枚数 (回収率) 85,619枚 (10.6%)
  - ・ 流入交通量 (抽出率) 1,096,004台 (7.8%)
  - ・ 有効枚数 (有効回答率) 81,898枚 (95.7%)
  - ・ 有効回収率 10.2%
- 4) 調査項目: 性別・年齢, 料金所通過時間帯, 出発地・目的地, 入路・経路・出路 二度乗り 車種 (普通車, 大型車), 交通目的, 利用理由, 乗車人員, 平均利用回数, 一日の利用回数, 積載品目, 積載重量等

表4 シミュレーション用データセットの概要

項目	内容	出典	備考
OD 表	時間帯別ランプ間 OD 表	首都高速道路交通起終点調査結果 (平成7年9月), 以下 22OD と呼ぶ	2車種 (乗用車類, 大型車) 大型車は 22OD における環境関係の定義による
リンクデータ	首都高速道路ネットワーク (全線)	22OD 時点の首都高速道路ネットワーク	リンク数:1100 程度 属性値:自由流速度, 交通容量, 道路長
座標データ	リンクデータの図化用データ		リンク別の座標データ

表5 検証用データセットの概要

項目	内容	出典	備考
リンク交通量	時間帯別リンク交通量 (全車)	22OD における時間帯別リンク交通量	リンク交通量は, 車両がオンランプを通過した時間帯にオフランプを降りると仮定した値
リンク速度	時間帯別リンク別平均速度	22OD 実施時のトラフィックカウンタデータ (以下トラカンデータと呼ぶ)	

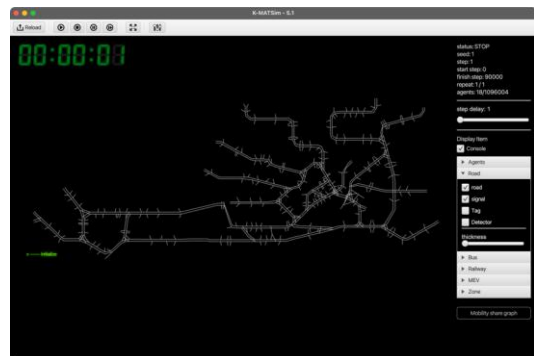


図20 設定した首都高速道路ネットワーク

- 5) 拡大方法: 既知のオン・オフランプ交通量を用いてランプ間 OD をフレータ法により推定。本線断面交通量等, 入手可能な観測値による補正などにより精度確保を行う。

また, 検証用のデータセットを表5に示す。制限速度は道路リンク属性の自由流速度, 車種は普通車と大型車であり, 車長はそれぞれ4m, 10mと仮定した。

図20に示す首都高速道路網ネットワークの各リンクに交通量検知器を設置して時系列のリンク交通量を記録し, 検証用データセットのリンク交

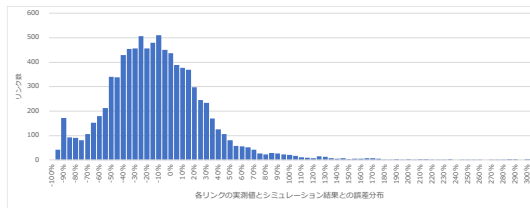


図 21 相対誤差の頻度分布

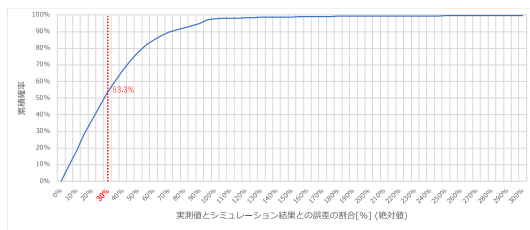


図 22 相対誤差の累積分布

通量の観測値と比較して現況再現性の検証を行う。なお、高速道路においてはいずれのODペアに対しても複数の経路が選択されるとは考えにくいことから、ここでは最短移動時間経路のみを使用するものとした。

#### 4.2 検証結果

以下の式(2)に示す1時間単位のシミュレーションによるリンク $a$ の交通量 $v_a$ と実測交通量 $v'_a$ の相対誤差(%)により、現況再現性の程度を評価する。

$$e_a = (v_a - v'_a) / v_a \quad (2)$$

比較を行ったのは午前中の0時～12時までの12時間である。全てのリンクの交通量の実測値とシミュレーション結果の相対誤差 $e_a$ の頻度分布を図21に、相対誤差の絶対値の累積分布を図22に示す。この結果から相対誤差は概ね正規分布し、全体の53.3%のリンクが交通量の相対誤差が30%未満であることが分かる。

#### 5. おわりに

MAUMSはマルチエージェントアクティビティシミュレーションモデルとメソ交通流シミュレーションモデルから構成される。ここでは、特に道路ネットワーク上での車の流動を記述する後者について、そのアウトプットの挙動と機能を交通工

学研究会の定める標準検証プロセスに従って検証した。その結果、メソ交通流シミュレーションモデルが持つべき基本性能を有していること、同会が用意しているベンチマークデータセットに適用した結果、想定される交通現象を適正に表現できることを確認した。

今後はコードを公開し、学術研究や非営利目的の業務での活用を可能にする予定である。次の報告ではMAUMSの適用事例を紹介し、その有用性を示すことにする。

#### 謝辞

本報告は、平成28～30年度「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」助成の支援を受けて実施したもの<sup>7)</sup>であることを記す。

#### 参考文献

- 1) 赤松 隆, 和田健太郎: 動的な交通ネットワーク流問題, Proceedings of the Twenty-Sixth RAMP Symposium, Hosei University, Tokyo, October 16-17, 2014.
- 2) F. Ciari, M. Balac, M. Balmer: Modelling the effect of different pricing schemes on free-floating carsharing travel demand: a test case for Zurich, Switzerland, Transportation, Vol.42, No.3, pp.413-433, 2015.
- 3) Amr M. Wahaballa, S. Hemdan, F. Kurauchi: Effect of Different Road Pricing Strategies on a Multimodal Network with a Hysteretic Macroscopic Fundamental Diagram, The 16th ITS-AP Forum FUKUOKA, 2018.
- 4) 飯田恭敬, 藤井 聡, 内田 敬: 道路網における経路選択を考慮した動的な交通流シミュレーション, 土木学会論文集, No.536, pp.37-47, 1996.
- 5) 交通工学研究会, 交通シミュレーションクリアリングハウス, <https://www.jste.or.jp/sim/index.html>, 2025年4月24日最終閲覧
- 6) (社)交通工学研究会 交通シミュレーション自主研究委員会: 交通流シミュレーションの標準検証プロセス Verification マニュアル(案), <http://www.jste.or.jp/sim/manuals/VfyMan.pdf>, 2004.
- 7) ワンウェイ型カーシェアリングシステムの導入可能性と道路空間の新たな活用方策についての研究開発-3年目報告書-, 道路政策の質の向上に資する技術研究開発, 国土交通省, 2019.3.