

リアルタイムデータ同化を反映した交通流シミュレーションシステム実現に向けた検討 Investigation of traffic simulation system reflecting real-time data assimilation

佐橋 功一¹, 河森 大樹¹, 大藤 武彦², 豊岡 祥³, 津々 直大³, 西村 拓哉¹, 児玉 崇⁴, 田名部 淳⁵

Koichi SABASHI¹, Daiki KAWAMORI¹, Takehiko DAITO², Sho TOYOKA³,
Naohiro TSUZU³, Takuya NISHIMURA¹ and Takashi KODAMA⁴, Jun TANABE⁵

近年の情報通信技術の発展に伴い、高速道路・一般道の両方についてリアルタイムに収集されたデータを活用した交通マネジメントの実施が可能となっている。リアルタイムで運用する交通流シミュレーションは、交通障害が発生した場合には予測結果が実際と大きく乖離する場合が多いことが知られている。この問題に対応するにあたり、本稿ではリアルタイムデータを用いたデータ同化に着目した。高速道路・一般道についてリアルタイムデータ同化を実現するための交通流シミュレーションシステムのフレームワークと実現に向けた課題を整理し、データ同化が反映可能な柔軟なシミュレータである S⁴ Simulation System をマクロ交通流シミュレータとして使用した場合の精度検証を実施した。

Keywords: 交通流シミュレータ, データ同化, デジタルツイン

1. はじめに

近年の情報通信技術の発展に伴い、高速道路上に設置された車両検知器のデータやプローブカーから得られる速度データなどがリアルタイムで活用可能となっている。また、リアルタイムに収集した現実世界のデータをサイバー空間へ連携し、そのデータを基にサイバー空間上でシミュレーションを行った結果を現実世界へフィードバックする、デジタルツイン技術が新しい道路交通マネジメントとして検討されている¹。このようなデータ駆動型マネジメントの社会実装の取り組みは既に進められており、阪神高速とNTTグループは都市全体の道路交通の整量化に貢献する新たな交通マネジメントの実現に向けた検討を共同で実施することを発表した¹。

先述したデジタルツインの中で交通流シミュレーションは中核を担う存在であり、サイバー空間上での交通施策適用結果を正確に把握するためにも、精緻な交通状況予測が求められる。しかし、リアルタイムで運用する交通流シミュレーションは、現実で交通障害などの突発事象が発生した場合には予測結果が大きく乖離する。この問題を受け、実観測データを用いてシミュレーション結果を補正する、データ同化が有効であると考えられ、実観測データの利用でシミュレーション精度が向上することが報告されている^{2,3}。上記のデジタルツインの枠組みの中で、交通流シミュレーションは現実世界からリアル

タイムに収集したデータに基づいてデータ同化を行うことが可能である。

データ同化によって推定された初期条件やパラメータをシミュレーションに活用するには、初期条件としての道路リンク上の車両存在台数やパラメータとしての交通容量といった情報をセット可能なシミュレータが必要となる。市中のOSSのシミュレータを活用することも考えられるが、筆者らはシミュレータをシステム開発に組み込む予定であることから、筆者らに知見が豊富なシミュレータを活用することが望ましいと考え、自組織で開発する S⁴ Simulation System (以下 S⁴)⁴ を活用することとした。S⁴は柔軟な設定が可能な汎用マルチエージェントシミュレータであるが、これまでマクロ交通流シミュレータとしての精度評価を実施したことがないため、本稿ではその精度検証も実施する。

本稿では、リアルタイムに取得した現実世界のデータに基づいてデータ同化を行う交通流シミュレーションシステムの実現に向けて、そのプロセスと手法を整理、検討する。また、データ同化や交通マネジメントを稼働させる交通流シミュレータについても実用性の検証を行う。

2. 既往研究

データ同化の目的として、中村ら⁴は実観測データに基づいてシミュレーションにおける初期条件や境界条件、

1 正会員, (株)NTT データグループ 〒135-6033 東京都江東区豊洲 3-3-3 豊洲センタービル
e-mail: Koichi.Sabashi@nttdata.com Phone: 050-5547-2439

2 正会員, (株)交通システム研究所

3 (株)NTT データ数理システム

4 正会員, 阪神高速道路(株)

5 正会員, (株)地域未来研究所

パラメータを適切なものに構成することであると述べている。マクロ交通流シミュレーションに置き換えて考えると、初期条件はシミュレーション開始時に各道路リンク上に存在している車両台数であり、パラメータは各道路リンクに設定されている交通容量や自由流速度、ジャム密度、合流比率などである。データ同化はこれらパラメータの推定に活用される他、推定された初期条件やパラメータを基にシミュレーション精度を向上させることにも活用されている。

データ同化をパラメータ推定に活用する取り組みとして、成岡ら⁵⁾は速度を状態変数とするマクロ交通流モデルと観測値から、状態変数とモデルパラメータを推定する手法を提案している。佐々木ら³⁾は観測データによってミクロ交通流シミュレーション結果との比較を行い、パラメータ更新を実施した。また、更新したパラメータでシミュレーションを行い、精度が向上することを確認している。初期条件の推定と推定結果の活用に関しては、白石ら⁶⁾がリアルタイム予測交通流シミュレーションシステムを提案している。高速道路上の車両検知器などからリアルタイムに得られる交通量データを基に道路リンク上の車両存在台数を推定し、予測シミュレーションの初期条件として活用している。

上記の既往研究を踏まえた上で、本稿では高速道路だけでなく一般道まで含めて収集された実観測データを活用してデータ同化を実施する交通流シミュレーションシステムの実現に向けて、そのフレームワークと課題を整理する。

3. データ同化を反映したシミュレーションシステム実現に関する検討

本章では、データ同化を反映した交通流シミュレーション

の概要及びフレームワークについて述べる。また、提案する交通流シミュレーションシステムを構成する「初期条件推定機能」及び「パラメータ推定機能」について、その内容と実現に向けた課題について記述する。その後、4 章でデータ同化を反映したシミュレーション機能にて利用する交通流シミュレータについて詳細を説明する。

3.1 フレームワーク

本稿では、車両検知器やプローブカーから収集したリアルタイムデータを基に、シミュレーションの初期条件及びパラメータを推定し、これらを入力としてシミュレーションを実行することでデータ同化を反映したシミュレーションを実現する。ここでシミュレーションの初期条件とは、シミュレーション開始時刻において各リンク上に存在する車両台数及び、各車両に付与された目的地情報を指す。また、パラメータとはシミュレーションによって予測する時間における、各リンクの交通容量を指す。

データ同化の対象には、道路リンクのパラメータのキャリブレーション、OD の補正など様々なものが存在する。本稿でデータ同化の対象として、シミュレーション開始時刻の車両台数及び、交通容量を選択した理由は、リアルタイムな交通状況をシミュレーションの入力データとして与え、交通状況が変化する度にシミュレーションを再実行することにより、突発事象発生時の予測結果が現実の交通流から乖離する問題の解決を図ったためである。

データ同化を反映した交通流シミュレーションのフレームワークを図1に示す。

本稿で構築する交通流シミュレーションシステムは、

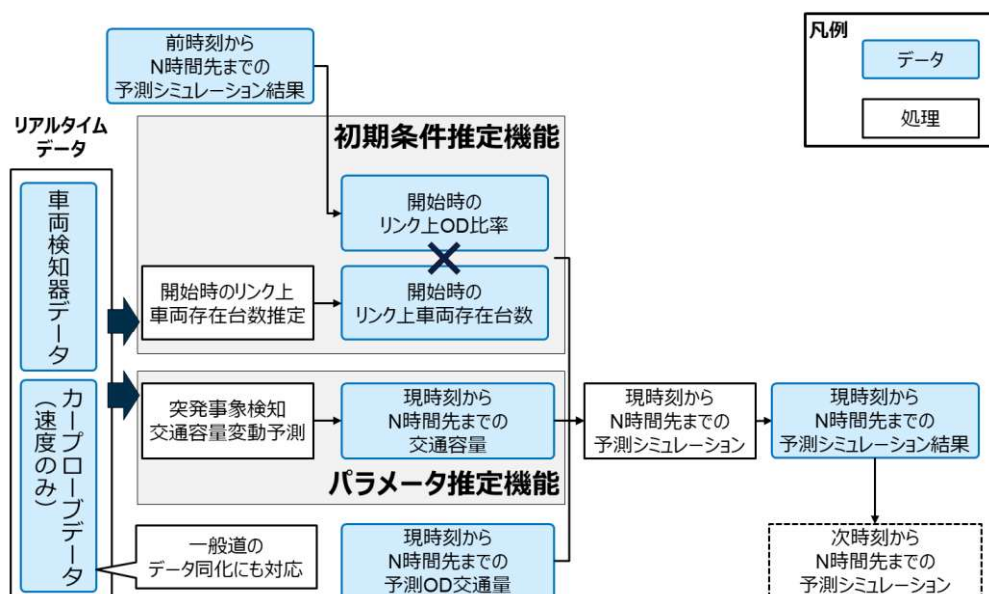


図1 データ同化を反映した交通流シミュレーションのフレームワーク

大きく以下3つの機能から構成される。

- 初期条件推定機能
リアルタイムデータに基づき、シミュレーション開始時刻におけるリンク上に存在する車両台数及び、各車両に付与された目的地情報を推定する機能
- パラメータ推定機能
リアルタイムデータに基づき、シミュレーションにより予測する時間における、各リンク上の交通容量を推定する機能
- データ同化を反映したシミュレーション機能
推定した初期条件及びパラメータを読み込み、将来の交通状況を予測する機能

初期条件推定機能及びパラメータ推定機能の出力結果を読み込み、データ同化を反映したシミュレーション機能を実行する、という一連の処理を周期的に行うことにより、リアルタイムな交通状況の変化を逐次反映した交通状況の予測を実現する。

3.2 初期条件推定機能

先に述べた通り、初期条件推定機能は大きく「シミュレーション開始時刻において各リンク上に存在する車両台数を推定する（存在台数推定）」処理と、「各車両に目的地情報を付与する（目的地付与）」処理に分かれる。

まず、存在台数推定処理について、高速道路上においては、車両検知器データから得られる交通量などの情報を基に、シミュレーション開始時刻において各リンク上に存在する車両台数を容易に把握することが可能である。一方で一般道上では、取得可能なデータが一部の車両から収集したカープローブデータなどに限られ、リンク上に存在する車両台数の総数を把握することができない点が課題である。したがって一般道においては、カープローブデータから収集した速度情報や、プローブカーの台数などを用いて、各時刻において各リンク上に存在する全車両台数を推定する手法の検討が必要である。

次に、目的地付与処理については、前時刻における予測シミュレーション結果を基に作成したリンク上OD比率を利用する。図2にその処理の流れを示す。前時刻に実行完了したシミュレーション結果に基づき、現在実行しようとしているシミュレーションの開始時刻におけるリンク上のOD比率を計算し、この割合を存在台数推定処理の出力結果と掛け合わせることで、各車両に目的地情報を付与する。

3.3 パラメータ推定機能

3.1 節で述べたように、本稿ではリアルタイムデータに基づき推定した、シミュレーションの予測対象となる時間における交通容量をシミュレーションの開始時にパラメータとして与える。この機能の目的は、交通事故や落下物などの突発事象による交通容量の変動を考慮したシミュレーションを実施することである。突発事象による交通容量の変動は、将来の交通状況の予測精度に大きく影響する。一方で突発事象の発生を事前に予測することは不可能であるため、リアルタイムデータに基づき突発事象の発生を検知し、これによる交通容量の変動をシミュレーションによる予測に反映する必要がある。

突発事象による交通容量変動の推定は、大まかに以下のステップで実現できる。

- (1) 渋滞先頭の検出
 - (2) 交通集中渋滞の除外
 - (3) 交通容量低下幅・突発事象の影響継続時間の推定
- 高速道路上については、各ステップについて朝倉らの手法⁷⁾を始めとして様々な手法が提案されているため、実現は難しくない。一方で一般道上では、各ステップについて以下のような課題が存在する。

(1) 渋滞先頭の検出

単純には非日常的な速度低下などを基に渋滞を検知する、といった手法が考えられる。しかし、一般道においては信号待ちによる速度低下との区別が必要である。

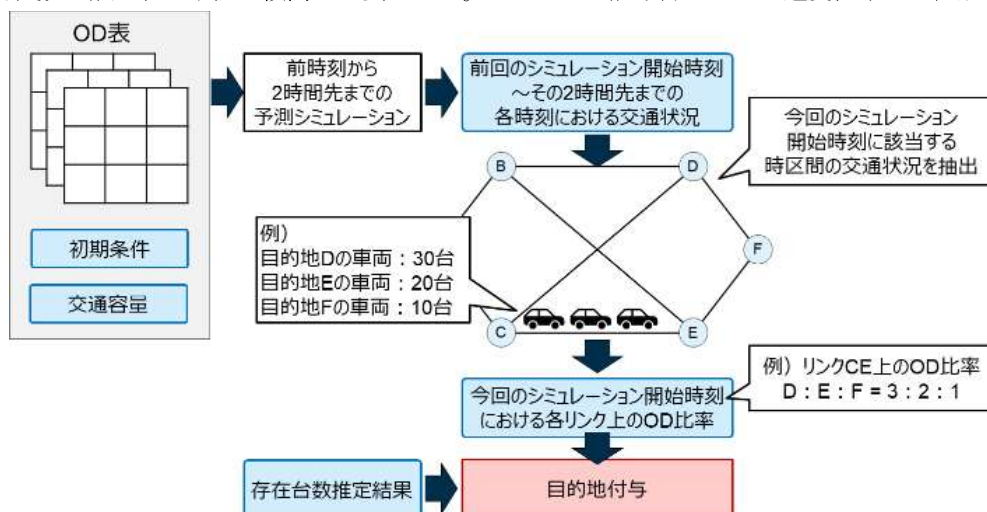


図2 目的地付与の処理フロー

また、本稿では一般道から収集可能なデータとしてカーブプローブデータに基づく速度情報の利用を前提とする。これは全車両中からサンプリングしたごく一部の車両の情報であるため、ノイズへの対応や、データが存在しなかったリンクについて「プローブカーが通行していない場合」と「通行止めなどで車線が閉塞している場合」を区別する手法も必要である。

(2) 交通集中渋滞の除外

突発事象による渋滞と交通集中渋滞を判別する手法としては、過去の交通集中渋滞時の観測交通量に基づきデフォルトの交通容量を設定しておき、これと一定以上乖離した渋滞時捌け交通量が観測された場合に突発事象と判定する、という方法が存在する。しかし、一般道においては、過去の突発事象による渋滞、交通集中渋滞の実観測データが限られる。また、ほとんどの地点・時間帯において過去の観測交通量が存在しない点も課題である。これらを踏まえると、平時の交通集中渋滞と異なる地点・時間帯において渋滞が発生した場合は突発事象による渋滞であるとする、といった異常検出のアプローチに基づく手法が望ましいと考える。

(3) 交通容量・突発事象の影響継続時間の推定

交通容量について、高速道路上では渋滞発生後に観測した捌け交通量に基づき設定することが可能である。一方で一般道では、ほとんどの地点・時間帯において交通量を観測することができないため同様の手法の適用は困難である。以上を踏まえると、一般道においては高速道路の実観測データを基に事前に突発事象発生時の交通容量の低下割合をモデル化しておき、これに基づきルールベースで交通容量低下幅を設定する、といった手法が考えられる。

突発事象の影響継続時間については高速道路上であっても推定が困難であることが既往研究から分かっている。よって継続時間は固定値、もしくは専門家の知見に基づき作成したルールに従い設定することが考えられる。

4. データ同化を反映可能なシミュレータの開発

4.1 シミュレータの概要

3章で述べたデータ同化の実現プロセス内で使用するシミュレータとして、NTT データ数理システムが提供する汎用シミュレーションシステムである S⁴ を使用する^{*2}。S⁴ は汎用シミュレータであり交通流シミュレーション専用のソフトウェアではないが、機能拡張が容易であるため、流量-密度関係式に基づいた車両移動を計算させることでマクロ交通流シミュレータとしての利用が可能である。柔軟な機能拡張性によって、交通容量を時間によって変更すること²⁾や、初期条件として道路上の車

両数を指定してシミュレーションを開始することも実現可能である。S⁴ をマクロ交通流シミュレータとして使用した場合に交通流シミュレーションモデルが正しく機能しているかどうかについては、交通シミュレーション自主研究委員会の Verification マニュアル (案)⁸⁾ に基づき、既に確認している。

4.2 シミュレータ実用性検証の位置づけ

3章では高速道路・一般道両方を対象としてデータ同化を反映する交通流シミュレーションシステムについて述べた。最終的にはデータ同化機能を実装したシミュレーションシステムが必要であるが、まずはシミュレーションの機能・精度について確認する必要がある。そこで、本稿では、S⁴ をマクロ交通流シミュレータとして使用した場合の性能検証として実用性検証を実施した。検証のプロセスを図3に示す。実用性検証後の検証プロセスとしては、実観測データが豊富な高速道路上でのデータ同化機能の実現に関する検証・一般道を想定して速度情報のみを用いた場合に高速道路上でデータ同化が実現可能かを確認する検証・一般道におけるデータ同化に関する検証を計画している。

4.3 シミュレータ実用性検証

本シミュレータが現実の交通状態を再現可能かどうかを検証するために、シミュレーション結果と実観測データとの比較を行った。

(1) 検証設定

本シミュレータは入力データとして、道路ネットワークデータ、OD データ、各種パラメータを受け付ける。以降では、本検証で使用する各入力データの設定について記述する。

道路ネットワークの設定に関して、検証対象道路を選定した。検証対象道路としては、交通量データや速度デ

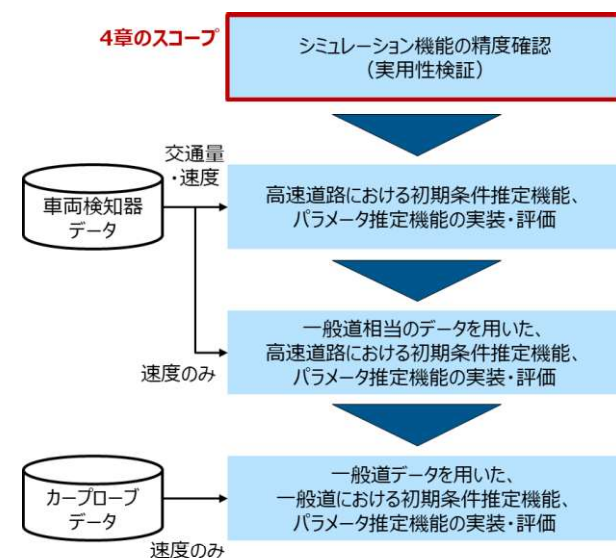


図3 データ同化の検証プロセス

ータが入手可能であり、シミュレーションの精度比較が容易な阪神高速道路を選択した。シミュレーション上での道路ネットワークとしては、阪神高速道路本線や渡り線に加え、高速道路を乗り継いで使用するための乗り継ぎ用リンクから構成される道路ネットワークを使用した。本シミュレータは高速道路だけではなく一般道まで含めてシミュレーション可能であるが、本検証では先述した高速道路ネットワークのみを対象としてシミュレーションを実施した。

OD データは、阪神高速道路入口上に設置された車両検知器から取得した交通量データと ETC (Electronic Toll Collection) データを基に作成した。ETC データより各高速道路入口の OD 比率を算出し、車両検知器の入口交通量データにその比率を乗じることで OD データとした。ただし、車両検知器データ側にエラーが含まれるようなデータについては、前後の時間帯のデータや同年同月の同曜日のデータもしくは ETC データ由来の車両数に普及率を除算したものをを用いて置換した。

本シミュレータのパラメータとして、各道路リンクの交通容量や自由流速度、ジャム密度、各合流部の渋滞時合流比率がある。これらパラメータは曜日や天候によっ

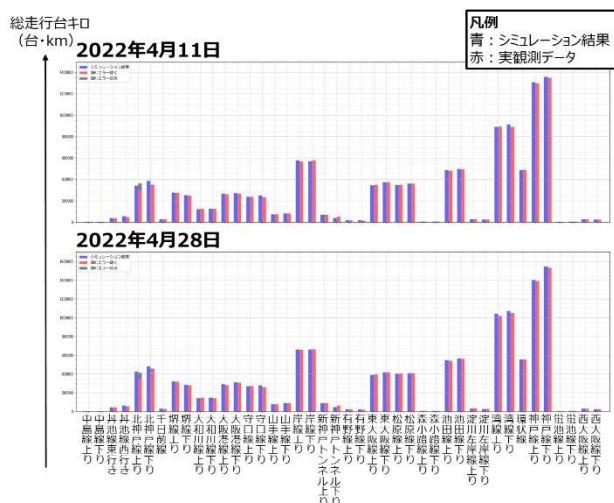


図4 パラメータ調整時の総走行台キロ



図5 阪神高速道路の路線図

て異なる値をとるため、それぞれの条件に合わせてパラメータを調整することが求められる。本検証では、平日かつ晴れという条件でパラメータ調整を行い、その結果について記述する。検証対象日として、平日かつ晴れという条件に合致する、2022 年 4 月 11 日と 2022 年 4 月 28 日、2022 年 3 月 25 日の 3 日間を選定した。この内、4 月 11 日と 4 月 28 日はパラメータ調整のために使用し、3 月 25 日は調整済パラメータを用いたシミュレーションの精度検証のために使用した。

(2)検証結果

まず、パラメータ調整の対象日である 4 月 11 日と 4 月 28 日について結果を記述する。先述した方法で作成した OD データに信頼性があるか、シミュレータ側で車両生成が問題なく実行できているかを確認するために、阪神高速道路の各路線について、一日計で総走行台キロを算出し、シミュレーション結果と実観測データとで比較を行った。総走行台キロの算出にあたっては、シミュレーション側は各リンク長とそのリンクを通過した台数から算出し、実観測データ側は車両検知器の交通量とシミュレーション上のリンク長から算出した。4 月 11 日、4 月 28 日ともにシミュレーション結果と実観測データとで総走行台キロが一致していることが確認でき (図 4)、使用した OD データに大きな問題がないことがわかる。図 4 に記載されている路線名に対応する、阪神高速道路の路線図を図 5 に示す。また、シミュレーション精度を確認するために、総旅行時間を各路線・5 分間隔で各車両の旅行時間を積み上げて集計した。例えば、時刻 11:00~11:05 の神戸線上りのデータとして、同時刻の間に神戸線上りのすべてのリンクを走行していた車両の旅行時間の合計を算出した。時間帯によってはシミュレーション側や実観測データ側で車両が 1 台も走行していないものが存在していたため、そのようなデータについては評価対象外とした。総旅行時間は、各路線を走行している車両の旅行時間の合計値であるため、走行車両数と旅行時間を同時に評価している指標である。集計した総旅行時間をヒストグラム付きで散布図としてプロットしたものを図 6 に示す。走行車両数・路線長が大きく、総旅行時間が大きい値を示しているようなデータにつ

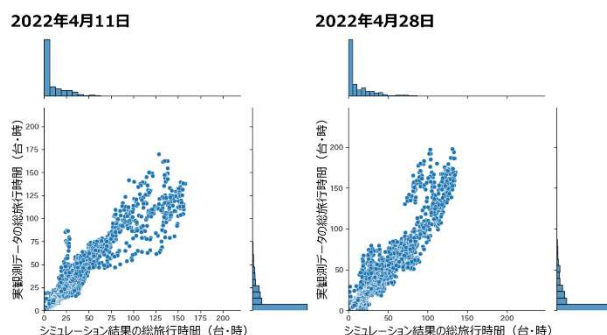


図6 パラメータ調整時の総旅行時間の散布図

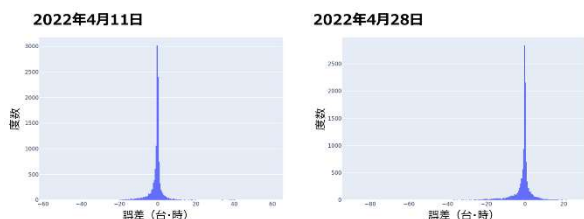


図7 パラメータ調整時の総旅行時間の誤差

表1 パラメータ調整時の総旅行時間より算出した指標

指標	2022年4月11日			2022年4月28日		
	全領域	渋滞	非渋滞	全領域	渋滞	非渋滞
データ数	11856	407	11449	11966	1090	10876
シミュレーション結果平均(台・時)	13.75	66.68	11.87	15.83	51.17	12.29
実観測データ平均(台・時)	14.20	67.45	12.30	17.51	66.39	12.61
平均絶対誤差(台・時)	2.38	15.92	1.89	3.32	17.75	1.87
平均絶対パーセント誤差(%)	26.20	29.30	26.09	29.00	32.68	28.63

いては、シミュレーションで実観測データを比較的良好に再現できている。誤差のヒストグラムを図7に示す。誤差0(台・時)を中心に、正の領域と負の領域に均等に分布している様子が確認できる。予測精度を定量的に評価するために、総旅行時間を基に評価指標を算出した(表1)。算出の際には、全領域・渋滞・非渋滞という区分で算出した。実観測データで渋滞が発生している路線・時間帯のデータについては「渋滞」の区分で処理を行い、それ以外のデータについては「非渋滞」の区分で処理を行った。「全領域」は「渋滞」と「非渋滞」の区別なく処理を実施したものである。シミュレーション側でのみ渋滞が発生している場合には、「非渋滞」の区分で処理した。結果を確認すると、4月11日・4月28日ともに「非渋滞」の区分ではシミュレーションの予測結果と実観測データとの間の平均絶対パーセント誤差は26%・29%という値を示しているものの、平均絶対誤差は1.9(台・時)程度であることが確認できる。一方で、「渋滞」の区分では「非渋滞」よりもずれが大きい傾向が見られ、平均絶対パーセント誤差は30%前後の値を示している。

次に、調整済パラメータを用いて精度検証を行った結果について記述する。対象日として2022年3月25日を選定し、シミュレーションを実行した。総走行台キロについては、パラメータ調整時の結果と同様に、シミュレーション結果と実観測データで一致していることを確認した。また、総旅行時間についても同様に算出し、その結果を図8に示す。パラメータ調整時と同様に、総旅行時間が大きい領域については、シミュレーション結果と実観測データが一致している傾向にある。しかし、一部でシミュレーション結果側の総旅行時間が小さいのに対して実観測データ側で大きな値を示しているデータが見られる。この乖離は阪神高速5号湾岸線(岸線)上りで発生している事故・緊急工事といった交通障害によって引き起こされているものである。本検証内では、交通障害を考慮したシミュレーションを実施していないため、交通障害が発生するとシミュレーション予測と現実とで大きな乖離が生じる。定量的な評価指標を表2

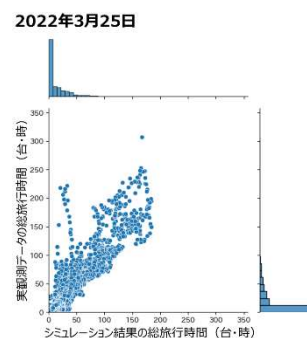


図8 精度検証時の総旅行時間の散布図

表2 精度検証時の総旅行時間より算出した指標

指標	2022年3月25日		
	全領域	渋滞	非渋滞
データ数	11984	1626	10358
シミュレーション結果平均(台・時)	17.06	53.68	11.31
実観測データ平均(台・時)	19.70	70.98	11.65
平均絶対誤差(台・時)	4.44	20.34	1.94
平均絶対パーセント誤差(%)	28.71	33.27	28.00

に示す。パラメータ調整時の結果と同様に、平均絶対パーセント誤差が30%程度であることが確認できる。また、誤差の分布についても、パラメータ調整時と同様に、誤差0(台・時)を中心に、正の領域と負の領域に均等に分布していた。

以上の結果より、調整したパラメータが過剰に対象日に適合しておらず、他の日についても適用可能な値となっていると考えられる。また、パラメータ調整時においても平均絶対パーセント誤差が30%程度の値を示していたように、パラメータ調整を行ったとしてもシミュレーションによる交通流予測と現実との間にはある程度の乖離が発生してしまっている。この原因は、まだ交通障害時のパラメータ調整を反映していないためであり、今後交通障害などの突発事象発生に伴うリンク上の存在台数や交通容量に係るパラメータを反映することで、より予測精度が高まるものと期待している。

5. まとめ

本稿ではリアルタイムデータ同化を反映したシミュレーションシステムの実現に向けて、そのシステムのフレームワークと各機能での処理の概要を示した。また、データ同化を反映可能な柔軟なシミュレータであるS⁴をマクロ交通流シミュレータとして使用した場合の予測精度について、高速道路を対象として実観測データと比較検証を行った。

今後の課題として、車両存在台数推定及び交通容量低下推定について、一般道における推定アルゴリズムの検討・実装が残されている。また、交通流シミュレータ開発についても、本稿では検証対象日のごく一部に限られているため、検証対象日を増やしてパラメータの妥当性を確認する作業が必要である。

補注

*1 NTT データ：NTT と阪神高速，都市の道路交通の整
流化に貢献するデジタル技術を活用した新たな交通
マネジメントの実装に向けた検討を共同で実施，報
道発表，

<https://www.nttdata.com/global/ja/news/release/2023/042102>，
(2024 年 4 月 11 日閲覧)。

*2 (株)NTT データ数理システム：汎用シミュレーショ
ンシステム-S⁴ Simulation System，

<https://www.msi.co.jp/s4/>，(2024 年 4 月 11 日閲覧)

参考文献

- 1) 兒玉崇，岩里泰幸，中田諒，高島健一，西村拓哉，
河森大樹：デジタルツインを活用した交通需要マネ
ジメントの構想と社会実装に向けた検討，第 21 回
ITS シンポジウム，2023。
- 2) 河森大樹，佐橋功一，大藤武彦，西村拓哉，兒玉崇，
田名部淳：突発事象を考慮したリアルタイム交通シ
ミュレーションの実現に向けた検討，土木計画学研
究・講演集，Vol.69，2024。
- 3) 佐々木邦明，広瀬尚樹：マイクロシミュレーションと

観測データを融合した高速道路の所要時間変動の
短期予測，土木計画学研究・講演集，Vol.50，2014。

- 4) 中村和幸，上野玄太，樋口知之：データ同化：その
概念と計算アルゴリズム，統計数理，Vol.53，No.2，
pp.211-229，2005。
- 5) 成岡尚哉，瀬尾亨，日下部貴彦，朝倉康夫：速度デ
ータに基づく交通流の状態とモデルパラメータの
同時推定，土木計画学研究・講演集，Vol.51，2015。
- 6) 白石智良，桑原雅夫，堀口良太：リアルタイム予測
交通流シミュレーションシステムの開発，土木計画
学研究・講演集，Vol.30，2004。
- 7) 朝倉康夫，桑原雅夫，赤松隆，井料隆雅，Chong Wei，
Nguyen Xuan Long，割田博，北澤俊彦，日下部貴彦：
都市高速道路における突発事象時の最適交通運用
についての研究開発，道路政策の質の向上に資する
技術研究開発，22-1，2010。
- 8) (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)，2002。