

都市間高速道路ネットワークを対象とした 交通流シミュレーションの開発

平井 章一¹・Jian XING²・高橋 亮介³・堀口 良太⁴・白石 智良⁵・小林 正人⁶

¹非会員 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒194-8608 東京都町田市忠生一丁目4-1)
E-mail:s.hirai.aa@ri.nexco.co.jp

²正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒194-8608 東京都町田市忠生一丁目4-1)
E-mail:xing@ri.nexco.co.jp

³非会員 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒194-8608 東京都町田市忠生一丁目4-1)
E-mail:r.takahashi.ac@ri.nexco.co.jp

⁴正会員 株式会社アイ・トランスポート・ラボ (〒101-0052 東京都千代田区神田小川町3-10)
E-mail:horiguchi@i-transportlab.jp

⁴正会員 株式会社アイ・トランスポート・ラボ (〒101-0052 東京都千代田区神田小川町3-10)
E-mail:shiraishi@i-transportlab.jp

⁶非会員 株式会社アイ・トランスポート・ラボ (〒101-0052 東京都千代田区神田小川町3-10)
E-mail:kobayashi@i-transportlab.jp

高速道路3会社は、高速道路の新規建設・改築、各種料金施策や各種の交通運用施策（集中工事の実施、情報提供、渋滞予測など）によるネットワーク全体の交通状況を予測するため、全国及び地域毎の高速道路ネットワークを対象とした交通流シミュレーションの開発を行っている。

今回、シミュレーションモデルの概要を述べるとともに、個別に開発した、ボトルネック交通容量の設定、分岐部での情報提供を前提にした経路選択モデル、及び、シミュレーションに必要な時間帯別IC間OD表をETCデータを基に作成する機能について紹介する。

Key Words : *traffic simulation, expressway network, O-D matrix calibration, route choice behavior*

1. はじめに

日本の都市間高速道路の供用延長は平成26年3月末時点で8,055km（新直轄を除く）¹⁾となっている。新東名・新名神高速道路や首都圏中央連絡自動車道などの整備により高速道路ネットワークがより複雑となり、ネットワーク化を考慮した交通混雑期等の渋滞予測が困難となっている。また、高速道路の老朽化に伴う大規模更新・修繕時の交通規制の影響予測など、高速道路ネットワークにおける交通関連施策の事前評価のニーズも高まっている。

一方、料金自動収受システム（ETC）の利用率は平成26年3月時点で89.7%となっているなど、ここ数年の利用率は9割弱で安定している²⁾。ほとんどの都市間高速道路では、入口と出口でETCの利用履歴を取得することが可能で、また、ネットワーク化された一部の路線では本線

上での通過履歴も取得可能である。従って、時間帯別IC間OD表の推定や経路選択行動の推定が可能なデータが定常的に入手可能な環境となっている。

東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社及び株式会社高速道路総合技術研究所では、このような背景のもと、全国の都市間高速道路ネットワークを対象とした交通流シミュレーション（以下「ENS：高速道路ネットワークシミュレーション」という）の開発を行っている。本稿では、開発の概要、個別モデルの開発、時間帯別IC間OD表の調整手法に関して述べる。

2. ENSの概要

ENSでは、東京大学生産技術研究所での研究をもとに開発・実用化された『広域道路網交通流シミュレーション』

ンシステム「SOUND」』³⁾ (以下「SOUND」という) を基本エンジンとして使用し、モデルの一部について改良を行いカスタマイズしている。本章では、SOUNDの概要と、主な改良点である、①ボトルネックにおける交通容量モデル、②所要時間情報等の提供を考慮した経路選択モデル について述べる。

(1) SOUNDの動的利用者最適配分フレームワーク

SOUNDは、経路選択サブモデルと車両移動サブモデルの2種類のサブモデルから構成され、図1に示すようにこの2種類のサブモデルを繰り返し適用する構造になっている。経路選択サブモデルでは、車両移動サブモデルによって計算されたリンク旅行時間をもとに、ODごとの経路選択率を一定時間おきに改定する。車両移動サブモデルでは経路選択サブモデルによって求められた経路選択率をもとに各車両の経路を決定し、ネットワーク上のすべての車両について、1~数秒毎にそれぞれの経路上を移動させることによりリンク旅行時間を決定するという構造である。即ち、動的利用者最適配分の枠組みにおいて、シミュレーションと確率配分 (Dial 配分) による経路選択を繰り返すことにより、近似的に均衡交通流の時間変化を得ようとするものである。

(2) SOUNDの車両移動モデル

SOUNDでは、1~数台の車両をまとめた離散的な「パケット」を移動単位として、ネットワーク上のすべてのパケットを1~数秒の「スキャンインターバル」毎に移動させる。SOUNDの車両移動モデルには、これまでいくつかの方式が提案されているが、ENSで採用したエンジンでは、道路区間 (リンク) をfirst-in-first-outの待ち行列で表現し、これに図2のようなリンク毎の交通量-密度関係で交通流を厳密に管理できるロジックが実装されたphysical queueモデルを採用している。即ち、滞留車列が渋滞時に延伸していく様子を再現するために、Newell⁴⁾によって考案されたSimplified Kinematic Wave アルゴリズムを実装しているものである。これは図3のように、累積交通量図上で、リンク下流端の流出交通量累積曲線Dを一定量だけ右上にシフトした線D'と、上流端での到着交通量累積曲線Aとの図式的な関係から判断する、非常に簡素なアルゴリズムとなっている。図の例では、D'よりもAが上回る場合は、当該リンクに流入できず、上流側に滞留し、実際に流入できるのはA*となる。

(3) ボトルネック交通容量の設定

SOUNDではリンク毎に下流端からの流出容量 (最大捌け容量) をパラメータとして設定するが、高速道路上の容量ボトルネックでの渋滞現象はよく知られているように、渋滞発生直後は比較的高い捌け容量を示し、渋滞

が継続するにつれて捌け容量が徐々に低下する現象が見られる。このため、ENSではボトルネック (以下「BN」という) の流出容量は、この時間変化をモデル化した。具体的には、以下の手順により実装した。

(a) 平成24年の渋滞実績データより、渋滞が5回/年以上発生しているBN (全国465箇所) を顕在化BNとして設定。ただし、本線料金所とアクセス渋滞によるBNは対象外とした。

(b) 過去の交通容量分析結果⁵⁾があるBNは、顕在化BNの渋滞発生時交通量 (BDF: Breakdown Flow) (以下「BDF」という) と渋滞発生後捌け交通量 (QDF: Queue Discharge Flow) (以下「QDF」という) を平日・休日別に設定した。

(c) 交通容量分析結果がないBNは、表1及び表2に示す再構築した交通容量推定モデルより推定した。暫定2車線区間のBNは、吉川らの研究結果⁶⁾を適用した。

(d) IC間に1つも顕在化BNがない区間は、IC間にある全サグ (約1万サグ) の交通容量を推定モデルより算出した上で、最もBDFが低いサグを潜在的BNとして設定した。

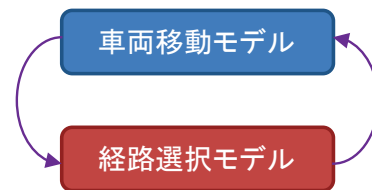


図1 車両移動モデルと経路選択モデルとの関係

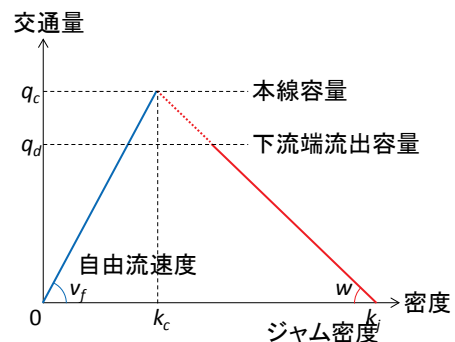


図2 交通量-密度関係

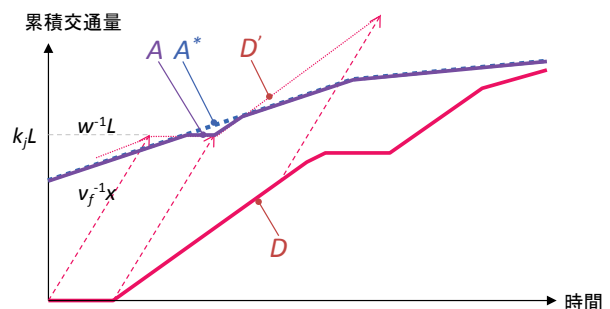


図3 Simplified Kinematic Wave アルゴリズム

表1 交通容量推定モデル (2車線)

変数	2車線			
	BDF		QDF	
	パラメータ	t値	パラメータ	t値
平面曲率(1/km)	-106.64738	1.23	-145.97754	1.58
上流側勾配(%)	-34.9	0.64	-62.84	1.08
上流側延長(m)	-	-	-	-
下流側交番(%)	-128.32	2.86	-185.98	3.87
下流側延長(m)	-158.88	2.63	-129.04	1.95
勾配差(%)	90.27	1.98	130.33	2.65
勾配区間曲線半径(km)	0.24	1.22	0.38	0.69
休日ダミー	-22.43	0.37	-42.12	0.65
切片	3548.97	29.64	3238.35	25.49
重相関係数 R	0.64		0.7	
重決定係数 R ²	0.41		0.49	

表2 交通容量推定モデル (3車線)

変数	3車線			
	BDF		QDF	
	パラメータ	t値	パラメータ	t値
平面曲率(1/km)	-	-	-	-
上流側勾配(%)	-	-	-	-
上流側延長(m)	-87.49	2.54	-83.84	1.69
下流側交番(%)	-9.88	0.19	-153.03	1.97
下流側延長(m)	-167.89	3.59	-190.22	2.5
勾配差(%)	20.16	0.68	140.06	2.68
勾配区間曲線半径(km)	5.06	2.72	3.03	1.25
休日ダミー	-79.83	1.34	-86.48	0.98
切片	5171.23	28.77	4628.42	15.7
重相関係数 R	0.82		0.8	
重決定係数 R ²	0.67		0.64	

(e) 交通容量は平日・休日別に昼間の値を基本値として設定し、薄暮、夜間の交通容量については図4及び表3に示す昼間値からの低下率を乗じて設定することとした。

(f) QDFは渋滞巻き込まれ時間により変化することが知られているが、BDFからQDFへの移行は、QDFが安定する渋滞時間または渋滞長を定め、一定の割合で低下するようにした(図5)。

(4) 高速道路分岐部での情報提供を前提とした経路選択モデルの構築

SOUNDには、各ドライバーが目的地までの完全な情報を知っているという前提で、目的地までの距離、現在の交通状況での所要時間、通行料金等に重み付けした一般化費用関数に基づいて、確率的な経路選択モデルが実装されている。しかしながら、高速道路上の情報板を通しては、全ての交通情報を提供できるわけではなく、これらの状況を踏まえて経路選択モデルを改修する必要がある。

図6に、現状で都市間高速道路のジャンクション(以下「JCT」という)における経路選択対象の有無と所要時間情報板設置状況を示す。なお、実際の高速道路上の情報板では、JCTからおよそ150km先までの渋滞情報しか表示されない。このため、ネットワークシミュレーションにおいても、同様に渋滞情報を収集する範囲を制限

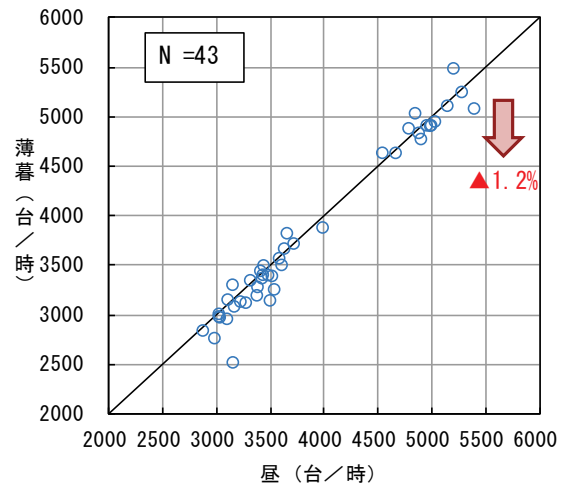


図4 昼間値に対する容量低減算出事例(対薄暮)

表3 昼間値に対する容量低減率

	BDF	QDF
昼間に対する薄暮の低下率	▲1.2%	▲1.7%
昼間に対する夜間の低下率	▲7.5%	▲6.6%

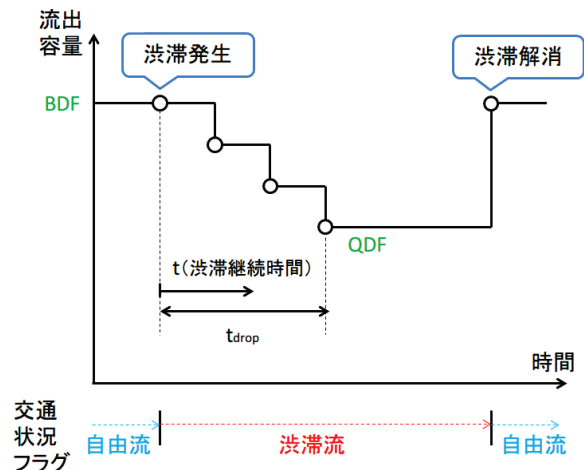


図5 BDF から QDF への移行

し、得られた情報のみで経路選択確率を計算するようにした。

ENSでは、経路選択はJCT分岐部上流に位置する可変情報板の情報を基に実施していると仮定してモデルの構築を行った。経路が把握できる図7に示す3つのJCTを対象として、ロジット型離散選択モデルにより各ルートの個別モデルを構築した。そして、3つのJCTのデータを統合して、表4に示す渋滞長・所要時間・料金等を変数とした経路選択の「統合モデル」を車種別に構築した。

3. 時間帯別IC間OD調整機能の構築

(1) 時間帯別IC間OD表作成の流れ

OD調整機能は、初期値となるETCトリップを、シミュレーションによる断面交通量が感知機の実測交通量に

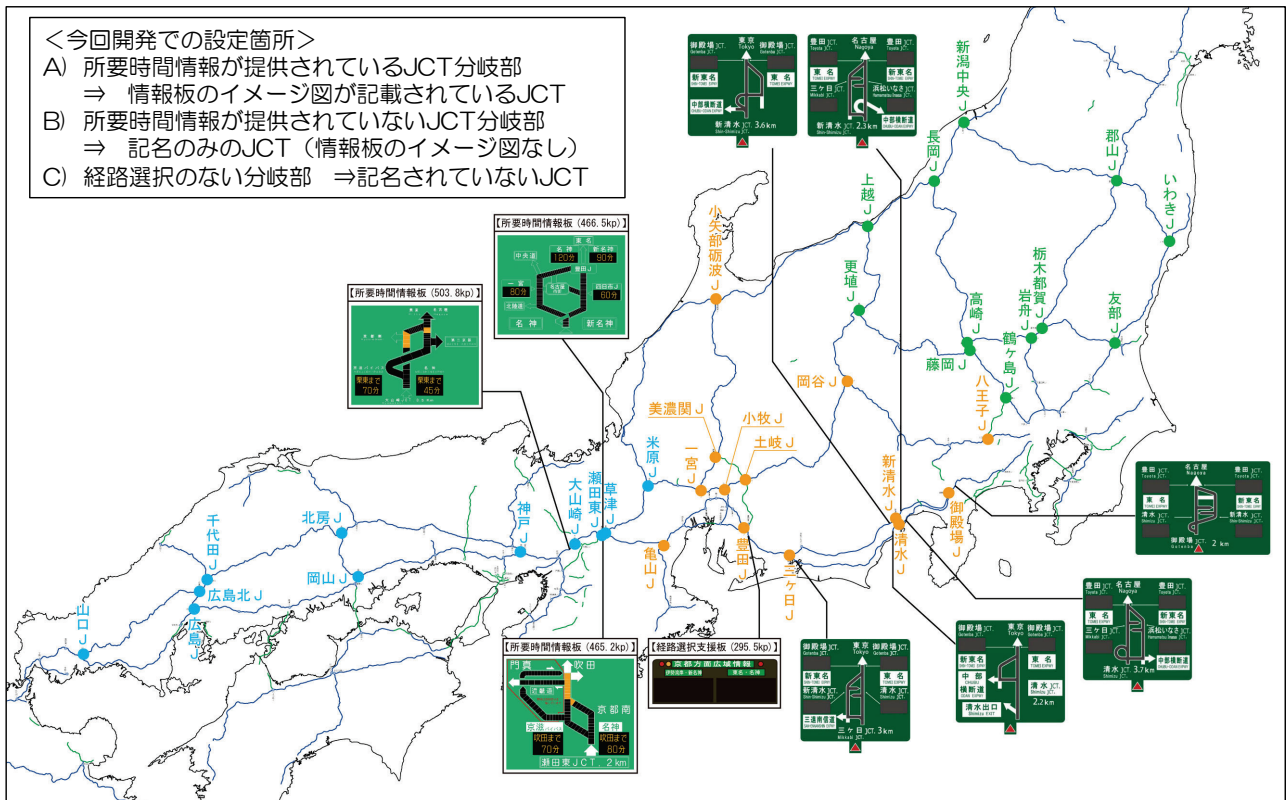


図6 経路選択ジャンクションと所要時間情報板設置状況

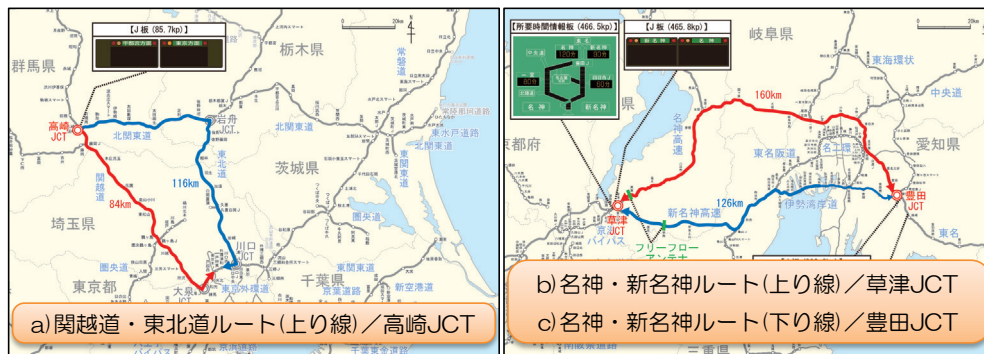


図7 経路選択分析対象ジャンクション

表4 経路選択の「統合モデル」(車種別)

変数名	小型車		大型車		
	パラメータ	t値	パラメータ	t値	
選択肢 共通変数	料金(円)	-0.011	-56.927	-0.005	-58.356
	所要時間(分)	-0.057	-50.794	-0.107	-60.248
	渋滞長情報(km)	-0.012	-4.032	-0.037	-7.560
	インシデントダミー	-0.312	-2.775	-0.607	-5.861
修正尤度比	0.513		0.651		
的中率	0.874		0.930		
サンプル数	20000		20000		

合うように調整する機能である。OD調整の手順を図8に示す。まず、ETCデータを用い、対距離区間と均一料金区間の連続走行となるトリップを結合したのち、流入ベースでODを集計し、ETC利用率により拡大を行う。また、均一料金区間については、通行可能なODについて仮の初期値を設定する。これらを合わせて、15分単位の

OD表の初期値を設定し、次節で説明する手法で調整を行いOD表の最適化を図る。

(2) 効率的な動的OD表推定手法によるOD調整

ENSは時間帯別IC間OD表(動的OD表)を与件とするが、これをいかに正確に与えられるかが、シミュレーシ

シミュレーション結果の精度を確保する上で重要となる。リンク交通量観測データから動的OD表を推定する手法については、これまでも、北岡ら⁸⁾のように遺伝的アルゴリズムを適用したり、Balakrishnaら⁹⁾のように効率的な探索手法を採用して、動的OD表を探索的に修正しながらシミュレーションを繰り返して、交通量の再現性が高くなる動的OD表を選択する手法などが提案されている。しかしながら、良好な探索解を得るには、数十回から数百回のシミュレーション計算を繰り返さなければならず、大規模ネットワークではシミュレーション計算時間の長さが、実用上の問題となる。

このため、ENSでは、小林ら¹⁰⁾による効率的な動的OD表推定手法を採用した。これは、図8に示すフローにおいて、①ENSの結果から時間帯別リンク交通量の出発時間帯別OD交通量内訳を得る外部ループと、② その結果を基に構成した数理モデルで、リンク交通量の観測値と計算値の誤差を最小化するような動的OD表の数値探索を行う内部ループで構成されるものである。内部ループの数値探索は、シミュレーションと比べて大幅に計算時間が短く、これを多数回繰り返すことで、外部ループでのENSの計算回数を数回程度に抑えることができる。

この手法では、内部ループでの最適化は、以下のように定式化される。即ち、式1及び式2で、シミュレーション結果からOD交通量とリンク交通量の関係式を得る。

$$q_{ku} = \sum_{wh} p_{k\tau}^{wh} Q^{whu} \quad (式1)$$

$$p_{k\tau}^{wh} = \frac{q_{k\tau}^{wh}}{Q^{whu}} \quad (式2)$$

ここで	k	リンクの添え字
	w	ODペアの添え字
	u	車種の添え字
	τ	リンク交通量の観測時間帯の添え字
	h	動的OD表の出発時間帯の添え字
	q_{ku}	時間帯 τ におけるリンク k での車種 u の通過交通量
	$p_{k\tau}^{whu}$	時刻 h に出発するODペア w の車種 u の交通量が時間帯 τ にリンク k を通過する確率
	Q^{whu}	時刻 h に出発するODペア w の車種 u の交通量
	$q_{k\tau}^{whu}$	時刻 h に出発するODペア w の車種 u の交通量のうち時間帯 τ にリンク k を通過する交通量

同時に、リンク k を通過する確率は、ロジット確率選択モデルを前提とすれば、そのリンクを通る経路と通らない経路のログサムコストの差で式3のように表すことができる。

$$p_{k\tau}^{whu} = \frac{1}{1 + \exp(-\theta_u \Delta c_{k\tau}^{whu})} \quad (式3)$$

ここで	θ_u	ロジット選択の感度パラメータ
	$\Delta c_{k\tau}^{whu}$	時刻 h に出発するODペア w の車種 u について、リンク k を通る経路と通らない経路それぞれのログサムコストの差

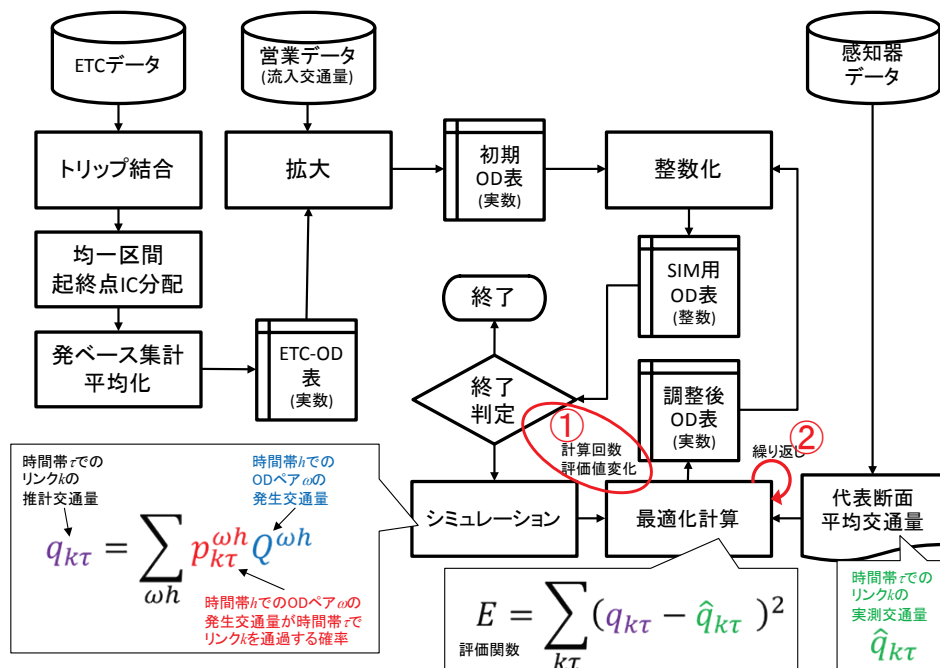


図8 時間帯別 OD 表調整プログラムの処理

このログサムコスト差は、シミュレーション結果より式2と式3を用いて、式4のように比定される。

$$\Delta c_{k\tau}^{whu} = -\frac{1}{\theta_u} \ln \left(\frac{Q_{k\tau}^{whu}}{\hat{q}_{k\tau}^{whu}} - 1 \right) \quad (式4)$$

これより、式5のようにリンク交通量の誤差を最小化する評価関数を定式化できる。

$$E = \sum_{k\tau u} (q_{k\tau u} - \hat{q}_{k\tau u})^2 \quad (式5)$$

ここで $\hat{q}_{k\tau u}$ 時刻 τ におけるリンク k での車種 u の交通観測値

式1～式5で示された最適化問題は、いずれも微分可能な形式であり、勾配情報を利用した数値探索手法が適用できる。以下では最急降下法を適用しているが、動的OD表の初期値にETCデータを利用したIC間OD表を用いることで、精度の高い探索結果を得ることができる。

(3) 休日交通を対象とした検証

休日交通のシミュレーションでの渋滞の再現性を検証するため、2012年10月21日（日曜日）のOD表を調整し、全国ネットワークでシミュレーションを行った。

a) 本線通過交通量による検証

図9にOD調整時の評価値の推移を、図10に初期値のOD表と最適化2回のOD表を用いたシミュレーション結果による感知器とシミュレーション結果の日交通量との関係を示す。右上の初期値と比較して、右下の最適化2回の結果では、相関係数が0.809から0.963と、誤差が小さくなっていることが見てとれる。

b) 渋滞発生状況による検証

よりミクロな視点で確認するため、渋滞の発生状況を比較した。図11に関越道（上り）と東北道（上り）の速度カウンター図を示す。主要なボトルネックにおいて渋滞の発生が概ね再現されていることが見てとれる。

7. おわりに

本稿では、都市間高速道路を対象とした交通流シミュレーションの開発について述べた。本開発にて、高速道路会社が定期的に整備、収集しているデータを活用して、パラメータの設定を行った。また、ETCデータと車両感知器データを活用して、15分単位の時間帯別IC間OD表を作成できる機能を構築した。その結果、全国の都市間高速道路ネットワークを対象とした動的シミュレーションを実施する環境が整備された。

今後高速道路会社社員がENSを使用することになるが、交通シミュレーションに対する知識・経験が少ないため、今後より利便性を向上させるとともに、シミュレーションに関する理解を深めるべく講習等を実施する必要がある。また、経路選択分析対象が3箇所にとどまるなど、様々なモデル・パラメータの更なる精度向上を図る必要がある。さらに、現状のモデルは都市間高速道路ネットワークのみを対象としており、通行止の影響を予測することが不可能であることから、都市間高速道路や並

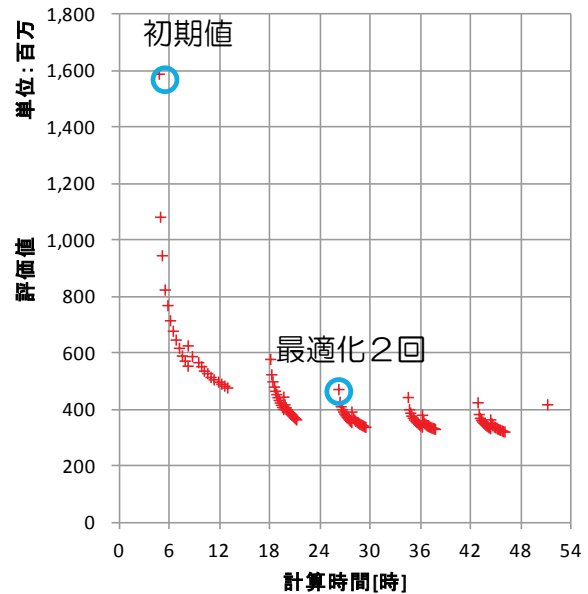


図9 OD調整時の評価値の推移

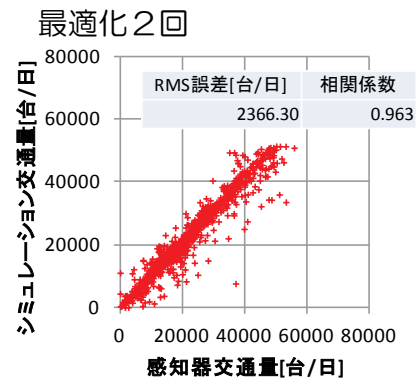
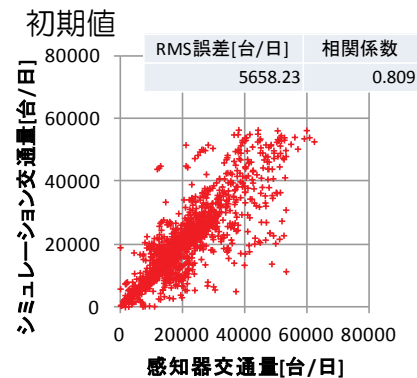


図10 シミュレーション実施後のOD調整結果

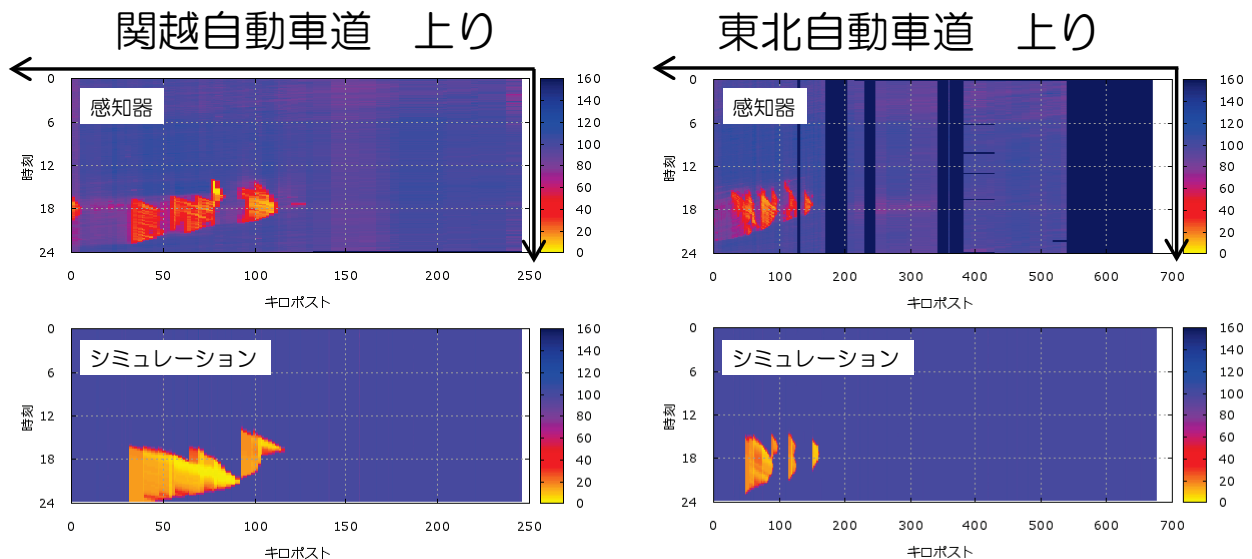


図 11 渋滞の再現結果 (左: 関越道, 右: 東北道)

行する一般道ネットワークを取り込むことも課題である。

今後、これらの課題に対して解決を図るとともに、安全性や休憩施設選択行動など渋滞以外の評価が可能となるよう取り組んでいきたいと考えている。

謝辞: ENSの開発に際し、高速道路ネットワークシミュレーションモデルの構築検討委員会(委員長: 桑原雅夫 東北大学大学院教授)の各委員及び委員会に出席の皆様には貴重なご意見をいただいた。心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高速道路調査会: 高速道路と自動車, Vol57, No.5, pp.84, 2014
- 2) 国土交通省道路局: ETC 利用状況の推移, www.mlit.go.jp/road/yuryo/riyou.pdf (アクセス: 平成 26 年 8 月 1 日), 2014
- 3) ㈱アイ・トランスポート・ラボ: 広域道路網交通流シミュレーションシステム SOUND Ver.5, <http://www.i-transportlab.jp/products/sound/index.html> (アクセス日: 平成 26 年 8 月 1 日), 2014
- 4) G.F. Newell: A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part I, General theory, Transportation Research B, Vol. 27B No. 4, pp. 281-287., 1993
- 5) 例えば, 岡村秀喜, 渡辺修二, 泉正之: 高速道路単路部の交通容量に関する調査研究(上), 高速道路と自動車, Vol44, No.2, pp31-38, 2001
- 6) 吉川良一, 塩見康博, 吉井稔雄, 北村隆一: 暫定 2 車線高速道路のボトルネック交通容量に関する研究, 交通工学, Vol.43, No.5, pp48-58, 2008
- 7) 竹内利夫, 佐藤久長, 皆方忠雄: 高速道路渋滞対策の最前線, 土木学会誌, vol.91, No.5, pp60-66, 2006
- 8) 北岡広宣, 寺本英二, 小根山裕之, 桑原雅夫: OD 交通量推定手法による現況再現, 土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), No.25, 2002.
- 9) Ramachandran Balakrishna, Constantinos Antoniou, Moshe Ben-Akiva, Haris N. Koutsopoulos, Yang Wen, : Calibration of microscopic traffic simulation models: methods and application, Transportation Research Record 1999, pp. 198-207., 2007
- 10) 小林正人, 堀口良太, 花房比佐友, 小出勝亮: ネットワーク交通シミュレーションのための時間帯別 OD 交通量と確率経路選択モデルのロジット感度パラメータ一括推定プログラムの開発, 第 32 回交通工学研究発表会論文集 (CD-ROM), 2012

(2014. ?? ?? 受付)