

市街地道路交通を対象とした ナウキャストシミュレーションシステムの構築

花房比佐友¹・小林正人²・小出勝亮³・堀口良太⁴・大口敬⁵

¹正会員 株式会社アイ・トランスポート・ラボ 技術部 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-4 神保町1-4ビル3階)

E-mail:hanabusa@i-transportlab.jp

²正会員 株式会社アイ・トランスポート・ラボ 技術部 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-4 神保町1-4ビル3階)

E-mail:kobayashi@i-transportlab.jp

³株式会社アイ・トランスポート・ラボ 技術部 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-4 神保町1-4ビル3階)

E-mail:koide@i-transportlab.jp

⁴正会員 株式会社アイ・トランスポート・ラボ 代表取締役 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-4 神保町1-4ビル3階)

E-mail:rhoriguchi@i-transportlab.jp

⁵正会員 国立大学法人東京大学生産技術研究所 教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所C棟Cw504)

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

本研究は、プローブやセンサー等で得られた時空間に関する部分的な交通状態観測データを基に、交通流シミュレーションモデルによる補完で、対象地域全体のその時点での交通状態を再現する「ナウキャストシミュレーションシステム」の構築を目的としている。ここでのナウキャストシミュレーションシステムは、主に市街地道路ネットワークを対象としており、そのアウトプットを活用してある区域の交通流動性や特異性の評価、地域全体のCO2排出量のモニタリングなど、様々な情報サービスへの展開が期待できる。本稿では、柏市で実施されている実証実験の概要について紹介しながら、ナウキャストシミュレーションの理論を示し、オンライン交通シミュレーションシステムとして一般街路に適用するためのシステム構成について説明する。

Key Words : *traffic simulation, real time, nowcast, probe data, macroscopic fundamental diagram*

1. はじめに

本研究は、感知器情報やプローブ情報など様々な交通センサーを活用してリアルタイムで一般街路の交通状態を推定する「ナウキャストシミュレーションシステム」の開発を目的としている。

近年、既存の交通センサー情報を活用したオンライン交通シミュレーションは、国内外で様々な研究がなされており、実用化においても様々な交通運用策評価に用いられている。日本国内においては、武藤ら¹⁾、宗像ら²⁾をはじめとした研究者が都市高速道路におけるオンラインシミュレーションを開発し、リアルタイムでの交通状況

把握からの交通管理業務支援、さらには予測による旅行時間提供など様々なサービスに対する研究が進められている。

オンラインシミュレーションシステムにおける要望としては、先に述べた交通状況モニタリングのほか、事故等の突発事象に対するより詳しい状況把握、予測機能による対策の意思決定支援、CO2排出量モデルや騒音モデルなどを組み合わせることによる自動車交通の環境モニタリングなどが挙げられる。その推定精度・予測精度に関しては今後の課題としても、感知器情報をはじめとしてある断面（またはある区間）でしか把握できなかったことが、渋滞の延伸など空間的にかつ時間的に推定

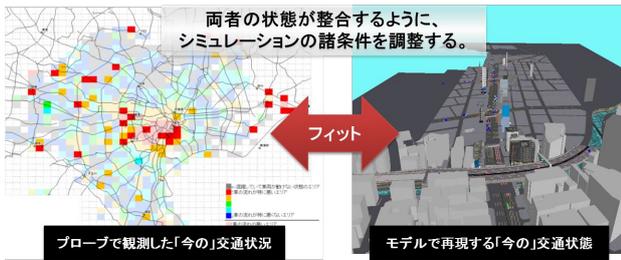


図-1 ナウキャストシステムのイメージ図

できるようになることは、交通情報提供サービスや道路管理業務の高度化に大きな意義を持つと考えられる。しかしながら、既出のオンラインシミュレーションシステムの多くは、高速道路や自動車専用道のような、比較的密に設置された感知器で得られるデータやETCデータ等が活用でき、かつ流入出の場所が限定された道路ネットワークを対象としたものとなっている。

市街地の道路ネットワークにおいては、高速道路や自動車専用道と同じレベルで全体を網羅できるほどの情報をリアルタイムで収集することは難しい。そのため、市街地道路ネットワークへ適用するためには、市街地においてオンラインで収集できる交通データを活用した仕組みを構築する必要がある。

近年では、様々な交通情報サービスにプローブデータの活用が期待されている。広域にわたってデータが収集できる点は、全体の交通状態を把握する上で非常に価値が高い情報である。ただし、全ての道路において高頻度のデータが得られる保証がなくデータの品質が一定しない、走行経路や旅行時間が得ることができても直接交通量に関する情報は得られない、という特徴があることを留意すべきである。つまり、プローブデータそのもので全体の交通状態を把握できるわけではないので、前述した特徴を踏まえつつ、いかに全体を推計していくかが課題となる。

本稿では、まずナウキャストシミュレーションシステムの概要を述べ、その後、本研究で提案する一部の交通データ（ここではプローブデータ）をマクロ的な視点から集計して交通状態を把握し、交通流シミュレーションモデルと組み合わせて全体の交通状態推定を行う仕組みについて説明する。また、シミュレーションパラメータを同定する理論について解説し、その実装方法、システム仕様およびシステムの活用方法について概説する。

2. システムの概要

ナウキャストとは、天気予報で使われている「降水ナウキャスト」等の言葉で広く知られているように、観測データから直近の系の状態を推測することを指す。ここでの「ナウキャストシミュレーション」とは、道路交通

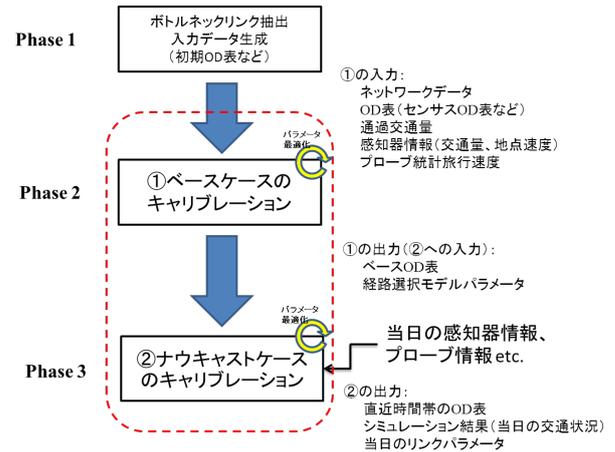


図-2 処理ステップ

を対象にセンサーやプローブ等の、リアルタイムで継続的に入手できる交通データを活用し、データが得られている今現在の交通状況を逐次推定する仕組みを示す。本研究で示すものは交通シミュレーションを活用する仕組みで、これにより観測データ間の情報をモデル補完し、道路ネットワーク全体を面的、連続的に推定する。図-1にイメージ図を示す。

ナウキャストシミュレーションシステムは、「ベースケースキャリブレーション」と「ナウキャストケースキャリブレーション」の2つの技術要素で構成される。図-2に処理ステップのイメージを示す。

ベースケースキャリブレーション³⁾とは、ある一定期間における平均的な交通状況（以下、ベースケース）が再現されるように、シミュレーションへの入力データであるOD交通量とリンク容量パラメータ、確率経路選択モデルのパラメータをキャリブレートする処理のことである。ベースケースの入力データは後述のナウキャストシミュレーションに利用される。

ナウキャストキャリブレーションとは、リアルタイムで継続的に得られる実測データが示す交通状況が再現されるように、ベースケースの入力データのうちOD交通量とリンク容量パラメータを逐次調整し、その時々全体の交通状態を再現するシミュレーション（以下、ナウキャストケース）計算処理である。ここでは主にプローブ情報を取得することで運用することを想定している。

3. オンライン処理のためのパラメータ調整戦略

ここでは、前章で説明したナウキャストケースの作成処理におけるシミュレーション入力パラメータの調整手順について解説をする。

交通流シミュレーションの入力パラメータ調整手順としては、まずシミュレーション結果と目標値（交通量や旅行時間などの観測データ）に対する乖離を見て調整量

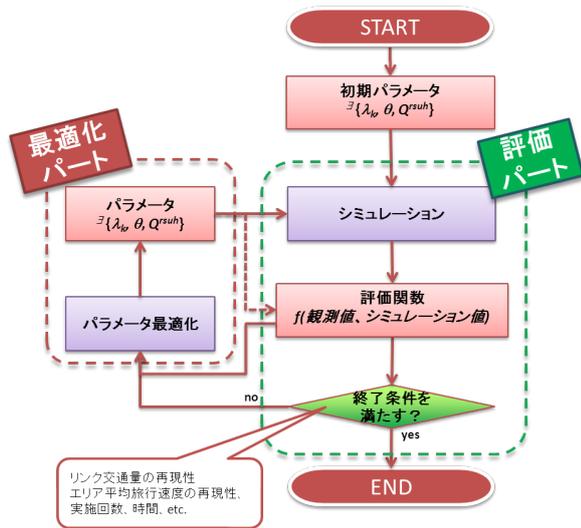


図-3 キャリブレーションの手順

を定め、再びシミュレーションを行なった結果と目標値との比較を試みる、という繰り返しが一般的と考えられる。この場合、入力パラメータを変えながらその都度シミュレーションを実施することになり、オンラインでの運用を考えると、シミュレーション計算に時間が掛かりすぎるため、繰り返し回数を多くすることは現実的ではない。したがって本研究においては、1回のシミュレーション計算結果をもとに入力パラメータ値と出力交通状態値との関係を数理モデルとして近似し、観測データとの乖離を最小にする最適化問題として定式化し、パラメータの近似解を求める手法とした。キャリブレーション手順を図-3に示す。これにより、得られた近似解をシミュレーションに入力し、得られた結果を用いて再び数理モデルでの最適化問題を解くという手順となり、シミュレーション計算の繰り返し回数を減らし、実用的な時間内でリアルタイムの交通状況を再現できるようになった。

4. 交通状態の推定手法

ナウキャストケースのキャリブレーションでは、プローブ情報、またはセンサー情報を利用した単位時間当たりのプローブ走行台数と走行距離から求められる Macroscopic Fundamental Diagram⁴⁾⁵⁾ 上の集計交通量(集計Q)、集計存在台数(集計K)を利用する。ここではこの概念を集計QKと呼ぶ。集計QKを利用する際は、対象地域をいくつかのゾーンに分け、そのゾーン単位で集計QKを求める。

ここで、あるゾーンにおけるパラメータ同定を考える。ベースケースの集計QKカーブが、プローブ情報から得られる集計QKのカーブと相似であると仮定すると、ある時間帯における集計QK上の状態はシミュレーションで得られるものと実測値(プローブの集計QK)と同じ

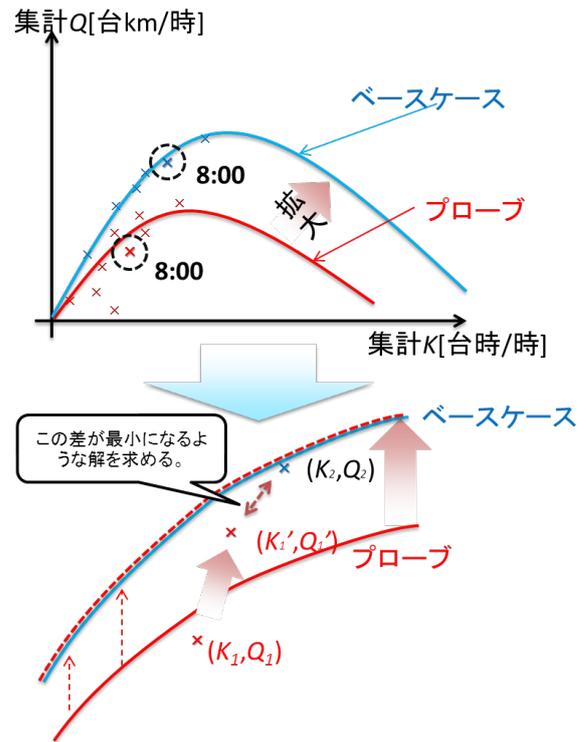


図-4 パラメータ調整のコンセプト

であると考えられる。このとき、ベースケース集計QKの状態がプローブによる集計QKの状態に近づくように「時間帯別車種別OD交通量」、「リンク容量低減率」の調整を行う。図-3にパラメータ調整のためのイメージ図を示す。

(1) 集計QKの算出

集計QKは、ある領域(ゾーン)で囲まれた道路ネットワークの集計値である。ある集計時間帯 τ における、あるゾーンの集計交通量 Q_τ 、エリア存在台数 K_τ は以下のように計算される。

$$Q_\tau = \sum_{j \in J} l_j n_{j\tau} \quad (1)$$

$$K_\tau = \sum_{j \in J} T_{j\tau} n_{j\tau} \quad (2)$$

ここで、

- J : あるゾーンに属するリンクの集合.
- l_j : リンクjの長さ[km].
- $n_{j\tau}$: リンクjの時間帯 τ におけるプローブ通過台数[台].
- $T_{j\tau}$: リンクjの時間帯 τ における平均旅行時間[時].

これにより、プローブ情報による集計QK、またシミュレーションによる集計QKをMFD上に展開することができる。

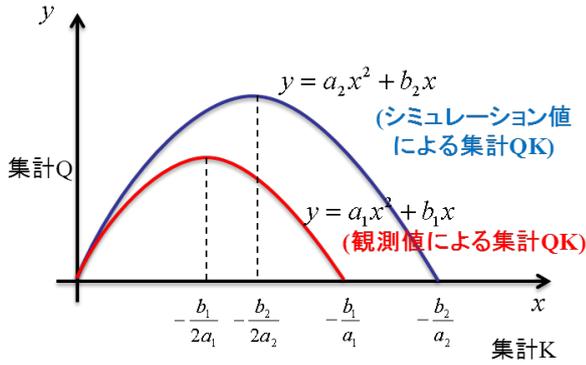


図-5 集計QKの拡大

ただし、プローブ情報は全体の一部から推定されるものであるため、全数の車両から求められるシミュレーション結果の集計QKよりも値が小さくなる。そのため、実測データから求められる集計QKを拡大することによってシミュレーション値との比較を可能にする。

(2) 実測データから求められる集計QKの拡大

集計QKを拡大するための方法を以下に示す（イメージ図は図-4参照）。

- 1) 集計QKのパターンを上凸の2次曲線と仮定し、実測データから得られた集計QKのプロットから曲線パラメータを求める。
- 2) 同様に、シミュレーション結果の集計QKにおいても2次曲線と仮定した際の曲線パラメータを求める。
- 3) このとき、各集計QK曲線は相似の関係にあるため、実測データの集計QK曲線の拡大率を求め、それを構成する各集計QKの値を拡大する。

いま、実測データによる集計QKの曲線を

$$y = a_1x^2 + b_1x \quad (a_1 < 0, b_1 > 0) \quad (3)$$

として、シミュレーションによる集計QKの曲線を

$$y = a_2x^2 + b_2x \quad (a_2 < 0, b_2 > 0) \quad (4)$$

とする。このとき、実測データの集計QK曲線をシミュレーション結果の集計QK曲線へ拡大するためのx軸、y軸それぞれの拡大率 α 、 β が以下のように計算される。

$$\alpha = \frac{a_1b_2}{a_2b_1} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{a_1b_2^2}{a_2b_1^2} \quad (6)$$

(3) パラメータ同定のための手法

ここで、パラメータ同定のための評価関数について説明する。あるゾーン z の時刻 h における、観測値による集計QK曲線を、シミュレーション結果から求められる集計QK曲線に合わせて相似拡大させたときの集計QKの状態 $\hat{u}^{z\tau}$ が、正規化されたシミュレーションにおけるQK状態 $\bar{u}^{z\tau}$ とのマハラノビス平方距離の累積和が最小になったときが最も現況に近づくことと仮定する。そのとき、時間帯別OD交通量とリンク容量低減率を未知の変数として最適な状態を推定する。ナウキャストケースのパラメータ探索のための評価関数 E は以下のとおりである。

To minimize

$$E = \sum_z \sum_\tau \sqrt{(\hat{u}^{z\tau} - \bar{u}^{z\tau})^T \Omega^{-1} (\hat{u}^{z\tau} - \bar{u}^{z\tau})} \quad (7)$$

ここで、

$\hat{u}^{z\tau}$: 時間帯 τ における、集計QKゾーン z についてのプローブ情報（観測値）から集計され、シミュレーション結果の集計QKカーブに合わせて相似拡大された集計QKベクトル。

$\bar{u}^{z\tau}$: 時間帯 τ における、集計QKゾーン z についてのシミュレーション結果から集計される集計QKベクトル。

Ω^{-1} : プローブ（観測値）による集計QK群とシミュレーション集計QK群から求められる分散共分散行列の逆行列。

一方、評価のためのシミュレーション結果から集計される集計QKは、時間帯別車種別OD交通量とリンク容量低減率の式で表現することができる。まず集計QKの通過交通量については、リンク通過交通量とリンク長の積和で表現される。このとき、リンク通過交通量は以下のように定式化できる。このとき、ボトルネックリンクはあらかじめ特定されているものとする。

$$n_{j\tau} = \begin{cases} \alpha \hat{q}_{j\tau} & \text{Bottleneck link} \\ q_{j\tau} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$q_{j\tau} = \sum_{rs} \sum_{j\tau} \hat{p}_{j\tau}^{rsh} Q^{rsh} \quad (9)$$

ここで、

$$Q^{rsh} \geq 0, \left| 1 - \frac{Q^{rsh}}{Q_0^{rsh}} \right| \leq \beta \quad (10)$$

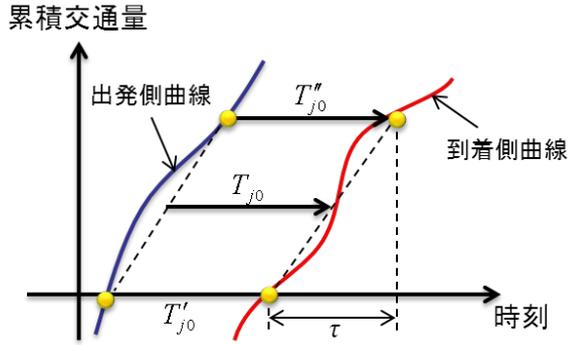


図-6 リンク上の累積曲線イメージ

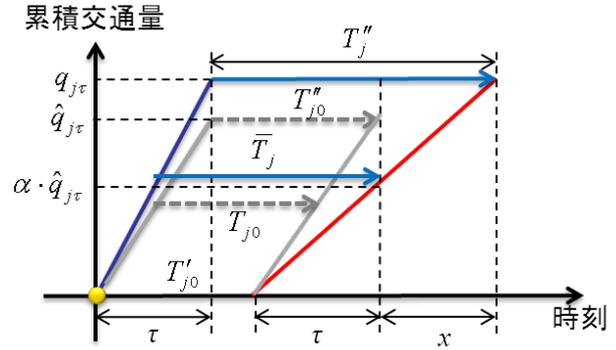


図-7 累積図による平均旅行時間の算出方法

α : あるゾーンに対するリンク流出容量
に対する一律の調整率[0-1.0].

(未知変数)

β : ある時間帯のOD交通量の初期値
からの変化率についての制約条件.

$\hat{q}_{j\tau}$: リンクjのリンク通過交通量
(シミュレーション結果).

\hat{p}_{kr}^{rsh} : ある出発時間帯hに出発するOD
ペアrsがリンクkを時間帯tに通過
する確率(既知: ベースキャリブ
レーションで計算済み).

Q^{rsh} : ある集計時間帯hに出発するOD
ペアrsの交通量(未知変数).

Q_0^{rsh} : ある集計時間帯hに出発するOD
ペアrsの交通量(既知: ベース
キャリブレーションで計算済み)

集計QKの存在台数を求めるための平均旅行時間につ
いては、各リンクの流入、流出における累積交通量曲線
を用いて時間帯別OD交通量とリンク容量低減率を未知
変数とした定式化を行う。あるリンクjのある時間帯 τ
において、累積曲線は図-5のようになる。このとき、時
間帯 τ 内において

T'_{j0} : 最初に流出した車両の旅行時間.

T''_{j0} : 最後に流出した車両の旅行時間.

としたとき、その間の累積曲線を直線と仮定すると時間
帯 τ におけるリンクjの平均旅行時間 T_{j0} は以下の式と
なる。

$$T_{j0} = \frac{1}{2} (T'_{j0} + T''_{j0}) \quad (11)$$

このとき、シミュレーションで求められたリンク平
均旅行時間結果を \hat{T}_{j0} とすると、

$$\hat{T}_{j0} = \frac{1}{2} (T'_{j0} + T''_{j0}) \quad (12)$$

となる。一方、リンク交通量とリンク容量低減率が調整
された場合の推定される平均旅行時間 \bar{T}_{j0} は調整時間 x
を用いて以下の通りである(図-6参照)。

$$\bar{T}_{j0} = \frac{1}{2} (T'_{j0} + T''_{j0}) \quad (13)$$

$$T''_{j0} = T''_{j0} + x \quad (14)$$

ここで、調整時間 x は、出発側曲線と到着曲線から以下
のように求めることができる。

$$x = \tau \left(\frac{q_{j\tau}}{\alpha \cdot \hat{q}_{j\tau}} - 1 \right) \quad (15)$$

したがって、求めるリンク平均旅行時間は式(12)、式(13)、
式(14)から以下のようになる。

$$\bar{T}_{j0} = \frac{1}{2} (T'_{j0} + T''_{j0}) + \frac{\tau}{2} \left(\frac{q_{j\tau}}{\alpha \cdot \hat{q}_{j\tau}} - 1 \right) \quad (16)$$

よって、式(11)と式(15)から、最終的にリンク平均旅行時
間と通過交通量、リンク容量低減率の関係式が以下のよ
うに求められる。

$$\bar{T}_{j0} = \hat{T}_{j0} + \frac{\tau}{2} \left(\frac{q_{j\tau}}{\alpha \cdot \hat{q}_{j\tau}} - 1 \right) \quad (17)$$

以上の式を用いて、ナウキャストキャリブレーション
が実行される。

5. システムの実装

ナウキャストシミュレーションシステムは大きく分けて
3つのモジュールに分けられる。1つ目は外部システム
との接続を行いデータの送受信を行うインターフェース

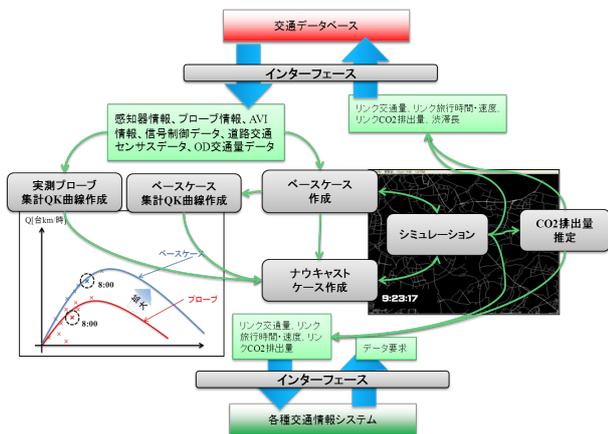


図-8 システム内のモジュール構成

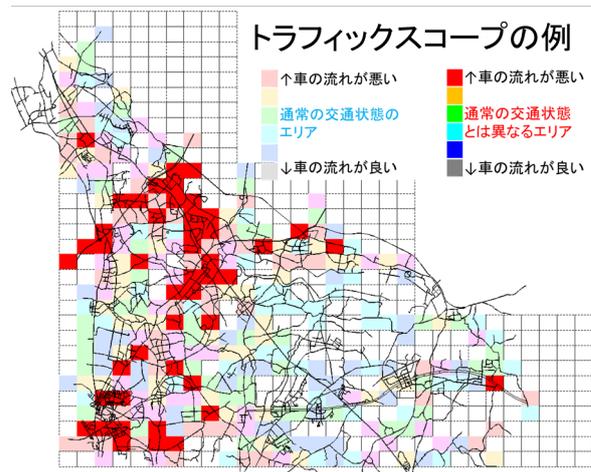


図-10 トラフィックスコープ

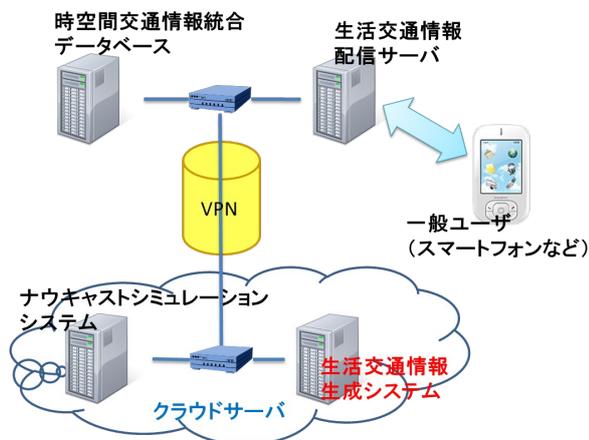


図-9 配信システム構成

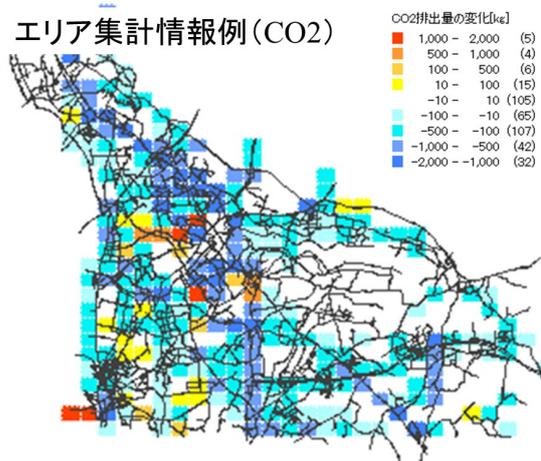


図-11 CO2 排出量マップ

機能である。2つ目は取得した観測値とナウキャストシミュレーションシステム内で実行されたシミュレーション結果を用いて集計QKを計算、および観測データ集計QKの拡大率を求める機能である。3つ目はナウキャストケースを作成するためのパラメータ同定処理（ナウキャストキャリブレーション）機能である。システム構成概要を図-7に示す。パラメータ同定機能においては、交通流シミュレーションのSOUNDを適用している。

6. ナウキャストシミュレーションの活用

ナウキャストシミュレーションの活用として、交通状態やCO2排出量のリアルタイムモニタリング等が考えられる。現在、環境に配慮した効率的な交通行動への変容を促す生活交通情報フィードバックシステム（以下、フィードバックシステム）の開発を行っており、今後柏市における実証実験を通じてその効果を検証する予定である。⁶⁾

図-9にフィードバックシステム内におけるナウキャストシミュレーションシステムを活用した生活交通情報配信システム構成を示す。ナウキャストシミュレーション

システムは、時空間交通情報統合データベース⁷⁾からリアルタイムプローブ情報を取得し、現況の交通状況を逐次再現する（15分単位の更新）。その後、ナウキャストシミュレーションによって再現された交通状況の結果を生活交通情報生成システム⁸⁾へ送信し、図-10、図-11に示すようなトラフィックスコープ⁹⁾やCO2排出量マップを作成し、生活交通情報配信サーバへリクエストに応じて送信する。

7. 今後の展開

今後は柏市の道路ネットワークを対象に、実データを用いた際の交通状態の推定精度を検証するとともに、オンラインシステム機能の検証を重ねて全体システムの安定化を図り、実用に向けた改良を行っていくことが課題である。なお、本稿で紹介したナウキャストシミュレーションシステムを含めた生活交通情報フィードバックシステムについては、2013年のITS世界会議に向けて長期実証実験を行い、その際にオンラインデモを公開する予定である。

謝辞：本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構のエネルギー I T S 推進事業「国際的に信頼される効果評価方法の確立」において開発した技術を、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度（SCOPE）「市民の交通行動変容を促進する持続可能な生活交通情報フィードバックシステムの研究開発」において活用した成果を報告するものである。研究の推進にあたっては、柏市ITS推進協議会において貴重な意見を賜った東京大学大学院情報学環の池内克史教授をはじめとする参加メンバー各位、及び推進協議会におけるデータ利用等についての便宜を図っていただいた千葉県道事務所様、千葉県警察本部様、加えて交通データの収集に関して様々なご助言をいただいた株式会社長大の岸氏、佐々木氏、萬氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 大藤武彦、小澤友記子、吉村敏志、石井康裕：交通管制システムにおけるオンライン・リアルタイム交通流シミュレーションの活用，第 33 回土木計画学研究発表会(春大会)，2006.
- 2) 宗像恵子、田村勇二、割田博、白石知良：首都高速道路におけるリアルタイム予測シミュレーションの開発，第 29 回交通工学研究発表会講演論文集，2009.11.
- 3) 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，2012 年 9 月，2012.
- 4) C. F. Daganzo, "Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches," Transportation Research B 41, 49-62; "corrigendum" Transportation Research B 41, 379, 2007.
- 5) N. Geroliminis and C. F. Daganzo, "Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings," Working paper, Volvo Center of Excellence on Future Urban Transport, Univ. of California, Berkeley, 2007.
- 6) 光安皓，市川博一，田村勇二，長谷川雅人，須田昌仁，堀口良太，飯島護久，花房比佐友，吉村方男，佐々木卓，萬沙織，小野晋太郎，大口敬，池内克史：環境に配慮した効率的な交通行動への変容を促す生活交通情報フィードバックシステムの構築に関する基礎調査，第 11 回 ITS シンポジウム予稿集，2012 年 12 月 13 日～14 日.
- 7) 佐々木卓，岸浩二，萬沙織，田中淳，松沼毅，後藤秀典，堀口良太，飯島護久，花房比佐友，吉村方男，佐々木政秀：持続可能な生活交通情報フィードバックシステムにおける時空間融合交通情報基盤の検討，第 11 回 ITS シンポジウム予稿集，2012 年 12 月 13 日～14 日.
- 8) 飯島護久，堀口良太，小宮粹史，小出勝亮，小林正人：市民向け生活交通情報配信システムの開発，第 11 回 ITS シンポジウム予稿集，2012 年 12 月 13 日～14 日.
- 9) R. Horiguchi, M. Iijima and H. Hanabusa: Traffic Information Provision Suitable for TV Broadcasting Based on Macroscopic Fundamental Diagram from Floating Car Data, Proceedings of 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Madeira Island, Portugal, 19-22 September 2010.

(2013.5.6 受付)

DEVELOPMENT OF NOWCAST TRAFFIC SIMULATION SYSTEM FOR ROAD TRAFFIC IN URBAN AREA

Hisatomo HANABUSA, Masato KOBAYASHI, Katsuaki KOIDE,
Ryota HORIGUCHI, Takashi OGUCHI

We describe a development of an on-line traffic simulation system called "Nowcast Traffic Simulation System" for road traffic in urban area. The system can reproduce the traffic situation based on various types of traffic data in real time such as probe data and traffic sensor data. And the output data is used for several traffic information services including CO2 monitoring. In this paper, we explain the theoretical concept and the framework of Nowcast Traffic Simulation System giving an example of the demonstration experiment in Kashiwa city.