

首都高速道路における突発事象発生時の 入口交通量予測手法に関する研究

田村 勇二¹・西内 裕晶²・割田 博³

¹非会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 都市・環境事業本部 交通政策部
(〒163-6018 東京都新宿区西新宿六丁目8番1号住友不動産新宿オークタワー22F)
E-mail: yuuji.tamura@ss.pacific.co.jp

²正会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: nishiuchi@vos.nagaokaut.ac.jp

³正会員 首都高速道路株式会社 保全・交通部 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1)
E-mail: h.warita1116@shutoko.jp

首都高速道路は複雑な道路ネットワークで構成され、事故等突発事象による急激な交通状況変化が多発しており、利用者にとって、一般道も含め経路選択はますます多様になってきている。首都高では、渋滞解消やサービス向上を目指し、突発事象発生時も含めた高精度な交通状況予測シミュレーションを研究開発している。重要なインプットの一つとして、突発事象の影響を考慮した予測入口交通量が挙げられ、これまで事故発生区間と入口交通量変動関係のパターン化による対応を図ってきた。しかし、予測精度が不十分であり、事故規模や同時に発生している他の事象による影響を考慮することが課題となっている。本研究は、これまでの課題を解決すべく、パターン化からモデル化に視点を移し、道路ネットワーク上で発生する様々な事象を幅広く取り扱うことができるベイジアンネットワークモデルによる入口交通量予測手法の構築を目指すものである。

Key Words : Bayesian networks, Traffic incident, Traffic conditions prediction, Real time traffic simulation

1. はじめに

首都高速道路（以下、首都高）は、路線延長約300km、1日の利用台数が約100万台の大規模な道路ネットワークであり、首都圏の大動脈としての役割を担っている道路網である¹⁾ (図-1)。平成27年3月には、品川線の供用により、中央環状線の整備が完了しており、道路ネットワークの拡充に伴い、渋滞は減少傾向にあるが、時間的な交通集中や、多発している事故（30件/日以上）等の突発事象により、渋滞問題の解消には至っていない。

このような背景の下、首都高では、利用者の多様な経路選択を支援すべく、所要時間情報の高度化を目的に、リアルタイム交通状況予測シミュレーション（Real time traffic Information by dynamic Simulation on urban Expressway：以下、RISE）の開発研究を行ってきた^{2,3)}。開発の一環として、筆者らはRISEの重要なインプットデータとなる、事故等突発事象発生時の入口交通量予測の研究を進めてきた⁴⁾。しかしながら、既往の手法は、過去の統計パターンであり、事故規模や同時に発生している他の事象による影響を考慮できておらず、課題となっている。

本研究は、首都高における事故等突発事象発生時の入口交通量予測の精度向上に向け、ベイジアンネットワークを用いた予測手法を構築するものである。



図-1 首都高速道路ネットワーク

2. RISEと既往の事故時入口交通量予測

(1) RISEの概要

RISEは交通管制システム（以下、TTIS）と交通シミュレーションをオンラインリアルタイムで接続し、現在から2時間先までの将来交通状況を5分周期で予測するシステムである（図-2）。

大別して5つの機能で構成されており、大きな特徴として、首都高で多発している事故等突発事象に対応するモジュール（図中、②突発事象対応モジュール）を実装していることが挙げられる。突発事象対応モジュールのサブモジュールとしては、本研究対象としている入口交通量変動予測の他、事故や故障車の車線閉塞時間予測や交通容量予測等を具備している。

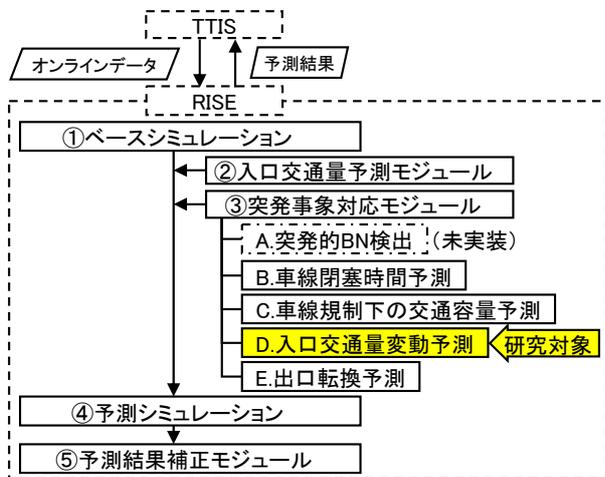


図-2 RISEの構成と本研究対象の位置付け

(2) 既往のRISEにおける事故時の入口交通量予測

RISEは、入口交通量予測モジュールとして、自己回帰移動平均モデルを実装しており、個々の入口には、曜日時間帯別の入口交通量基本パターンが設定されている。

事故時の入口交通量変動予測では、事故が発生した箇所と入口交通量変動割合の関係をパターン化した「入口交通量変動パターンテーブル」（図5）を使用しており、当該テーブルにて、事故影響を受けると特定された入口の交通量が、通常時とは異なる観測値となった場合に、入口交通量基本パターンを予測された車線閉塞時間長だけ減少・増加方向に書き換えることで対応している。

ここで、既往のパターンテーブルによる予測方法では、事故の規模を考慮しておらず、どのような事故が発生しても入口交通量増減割合は一律の値となっている。また、過去事例に基づくパターン化であるため、事故規模を考慮すると膨大なパターン数となり、事故事例がない場合は対応が困難となるといった課題がある。

筆者らの既往の研究⁵⁾では、同等の事故渋滞長（規模）でも、入口交通量の変動有無が確認できる場合とできな

い場合があることを確認している。要因としては、対象入口に対する事故渋滞末尾距離により、出口転換と考えられる行動変化の有無が影響していると考えられる知見を得ており、入口交通量の更なる予測精度向上には、事故規模を考慮することが必要であることを考察している。

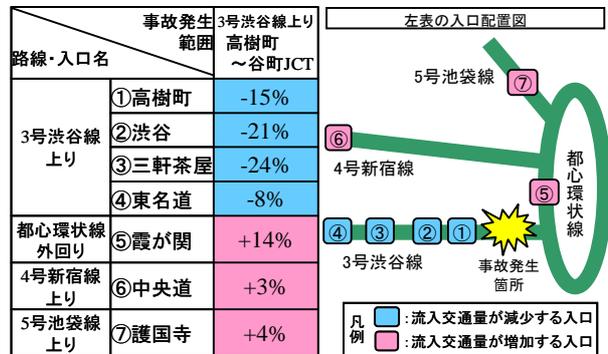
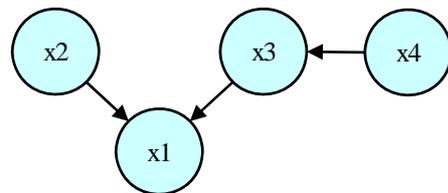


図-3 入口交通量変動パターンテーブル例

3. ベイジアンネットワークを用いた入口交通量予測モデルの構築

(1) ベイジアンネットワークの概要

ベイジアンネットワークは、「複数の確率変数の間の定性的な依存関係をグラフ構造によって表し、個々の変数間の定量的な関係を条件付確率で表した確率モデル」と定義されている⁶⁾。確率的な因果関係をモデル化する手法であり、因果関係の有無を有向グラフで表し、因果関係の強さを条件付確率で表す（図-4）。



CPT of $P(x1 | x2, x3)$

		x3		x2	
		0	1	0	1
x1	0	0.2	0.1	0.7	0.85
	1	0.8	0.9	0.3	0.15

CPT: Conditional Probability Table

図-4 ベイジアンネットワークと条件付き確率表の例

ベイジアンネットワークは、前提知識に基づくモデル構築とデータからの学習の両方の側面を持っている。そのため、不完全なデータや観測不可能なデータにも対応可能である。また、専門家の持つノウハウをネットワーク構造として導入することが可能なため、推測される仮説を実データに基づいて検証することが可能という利点もある。なお、ベイジアンネットワークは、モデルの柔軟性から、マーケティングにおける消費者の商品選択要

因の研究⁷⁾や機械工学におけるシステム故障診断⁸⁾など、既に多くの分野で適用されており、交通工学分野での研究事例も見られる^{9) 10)}。

(2) 入口交通量予測手法の構築方法

本研究では、首都高で多発し、交通に多大な影響を与える事故を対象に、5分間入口交通量を予測するためのベイジアンネットワークを構築した。

a) 予測モデルの考え方とモデル構造

ベイジアンネットワークの適用に当たっては、使用するデータの離散化が必要となるが、例えば入口交通量を1台単位で離散化すると、条件付き確率表が膨大になるため、過去の平均値に対する変動量（増減方向を考慮）をレベル分けして扱うこととした。従って、被説明変数は入口交通量の平均値からの変動量レベルとなり、予測入口交通量は以下に示す式1で求められる。

$$q_{pred}(t) = \bar{q}(t) + q^*(t) \quad (式1)$$

ここで、

- $q_{pred}(t)$: 時間tにおける予測入口交通量
- $\bar{q}(t)$: 時間tにおける平均入口交通量
- $q^*(t)$: 時間tにおける予測された入口交通量変動レベルに対応した変動量

説明変数には、事故の影響を受ける入口交通量が5分単位で大幅に変動する場合があることから、予測時点から15分前までの5分単位の入口交通量レベルとし、変動傾向を考慮するモデル構造とした。更に、入口交通量は下流側の交通状況の影響を受け、渋滞要因によって変動が異なるという既往の見解⁹⁾から、予測対象とする入口下流側の渋滞量レベルと、渋滞要因が事故であるか否か

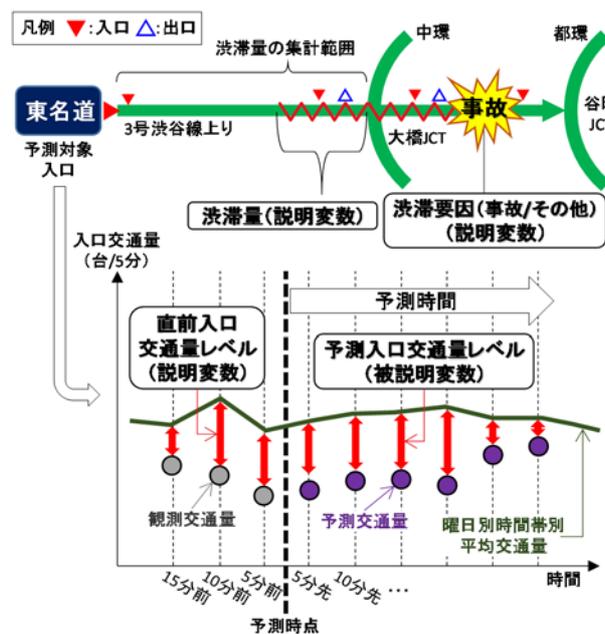


図4 構築する予測モデルの考え方

を説明変数とした。なお、対象とする渋滞量の範囲は、首都高ネットワークをJCTによって分割し、予測対象とする入口が属する道路範囲とした。本研究で構築するベイジアンネットワークによる予測モデルの考え方を図4に示し、構築したベイジアンネットワークを図5に示す。

ここで、本研究で予測の対象とする入口は、予測シミュレーションへの影響を考慮し、交通量が多い東名道とした。また、ベイジアンネットワークによるモデルを構築するには、確率変数間の因果関係に基づいた条件付き確率分布を推計する必要があり、本研究では、推計にBAYONET¹¹⁾というソフトウェアを用いた。

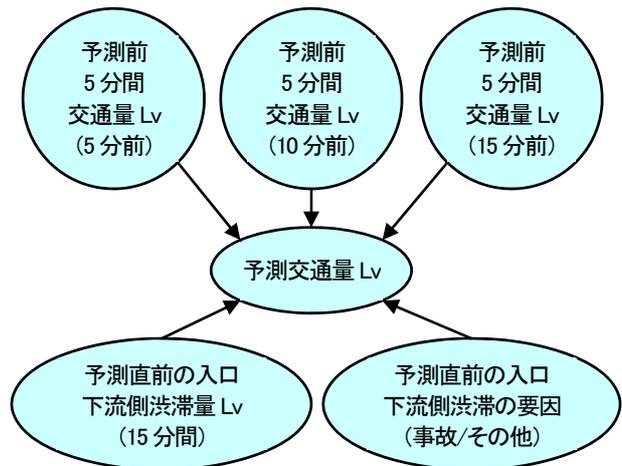


図5 構築するモデル構造

b) 離散化方法

入口交通量と渋滞量について、平均値からの変動量レベルを設定した。使用したデータ期間及び曜日区分と時間区分を以下に示す。なお年末年始とG.W.、お盆は特異日として除外した。

- ・使用データ期間：2010年4月1日～2011年1月31日
- ・曜日区分：月、火～木、金、土、日祝
- ・時間区分：4～6時台、7～9時台、10～12時台、13～16時台、17～20時台

変動量レベルは、箱ひげ図の考え方を参考に、以下の手順で設定した。ここでは入口交通量について示し、渋滞量もこれに準じて設定した。なお、箱ひげ図は、データの分布状況に依存せず特徴を表現する指標として、製品管理等でよく利用される考え方である。

- ① 曜日別・時間帯別（5分間）で入口交通量の平均値を算出し、観測値との差分を算出する。
- ② 算出した差分について、曜日区分別・時間区分別で25%タイル値と75%タイル値を求める。
- ③ 75%タイル値と25%タイル値の差分を算出し、75%タイル値に加算して最大値を、25%タイル値から減算して最小値を算出する。
- ④ 上記②、③で求めた値をレベル閾値とする。

入口交通量のレベル設定例を図-6に示す。なお、式1にて予測入口交通量を求める際は、予測された変動量レベルの中央値を使用した。

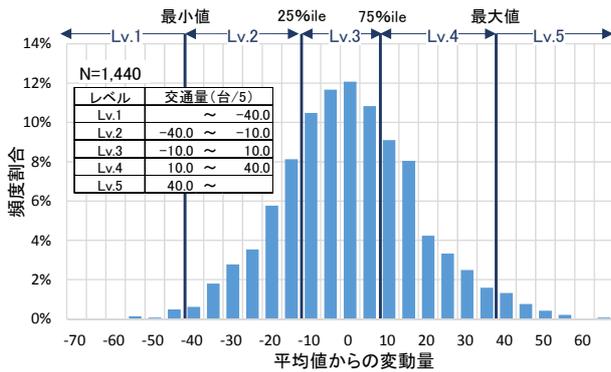


図-6 入口交通量の変動量レベル設定例
(曜日区分：月曜，時間区分：4～6時台)

4. 構築したモデルの予測精度検証

(1) 予測精度検証方法

本研究で構築した予測モデルについて、2011年2月の一ヶ月間のデータを使用して予測精度を検証した。

評価指標は、予測当日の観測値とのRMSEの他、入口交通量レベルの正解率及び外れ率とした。各評価指標の算出式について表-1に示す。

なお、RMSEによる精度評価については、平均値による予測と、既往の入口交通量変動パターンテーブルによって入口交通量基本パターンを書き換えた結果についても精度評価を実施し、比較した。

また、本研究で構築した予測モデルについては、各説明変数の影響を分析するため、ケース別で精度評価を実施した(表-2)。

表-1 評価指標と算出式

評価指標	算出式
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (q(t) - q_{pred}(t))^2}$ <p>ここで、N : 全サンプル数 $q(t)$: 時刻 t における観測値 $q_{pred}(t)$: 時刻 t における予測値</p>
正解率	$\text{正解率} = \frac{\text{変動量レベルの正解サンプル数}}{\text{全サンプル数}} \times 100$
外れ率	$\text{外れ率} = \frac{\text{変動量レベルが3以上外れている予測サンプル数}}{\text{全サンプル数}} \times 100$

表-2 本研究で構築した予測モデルのケース設定

ケース名	説明変数		
	予測前5分間交通量Lv (5, 10, 15分前)	予測直前の入口下流側渋滞量Lv	予測直前の入口下流側渋滞の要因
Case1	●		
Case2	●	●	
Case3	●	●	●

(2) 精度検証結果

まず、RMSEによる精度検証結果を図-7に示す。平均値による予測及び既往の入口交通量変動パターンテーブル(図中、「既往のパターン」と比較し、本研究で構築した予測モデルを適用することで、大幅に精度が向上することが確認された。ただし、30分先では、既往のパターンと同程度のRMSEとなっている。ケース別での差については、Case1からCase3にかけて精度が向上しており、本研究で検討した説明変数の有効性が示されている。

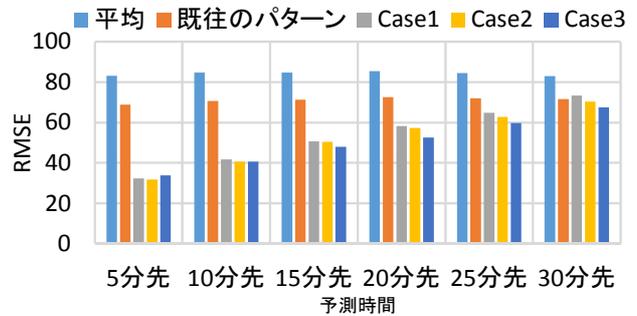


図-7 RMSEによる評価結果の比較 (N=126)

次に、事故時の正解率及び外れ率の精度検証結果について、正解率を図-8に示し、外れ率を図-9に示す。正解率については、ケース別で比較するとCase3の精度が最も高く、5分先で約80%となっている。全ケースに共通して、予測時間が将来になるにつれて精度が低下する傾向が見られるが、Case3については、他のケースよりも高い精度を維持しており、30分先で約60%の正解率となっている。外れ率については、予測時間が将来になるほど外れ率は高くなり、30分先で約15%となっている。ケース別での差は見られなかった。

最後に、予測サンプルの中から、特定の事故事例を対象とした予測結果の時間推移を図-10に示す。図より、本研究で構築した予測モデルが、平均値による予測や既往のパターンよりも入口交通量の減少傾向を精度良く予測していることが確認できる。特に5分先の予測結果については、観測値を良好に予測することができている。ただし、30分後については、予測対象時間分の時間的な遅れが生じており、事故の継続時間を説明変数として考慮する等、今後の精度向上が必要である。なお、5分先

の予測について、16時20分以降に乖離が見られるが、当該時間は渋滞末尾が東名道に到達しており、先詰り状態となっている。予測シミュレーションで再現されることが見込まれるが、今後の評価として確認が必要である。

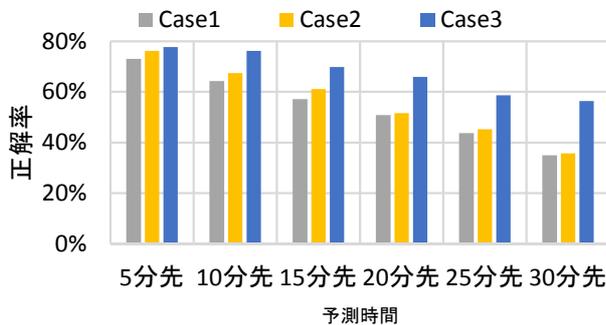


図-8 正解率による評価結果の比較 (N=126)

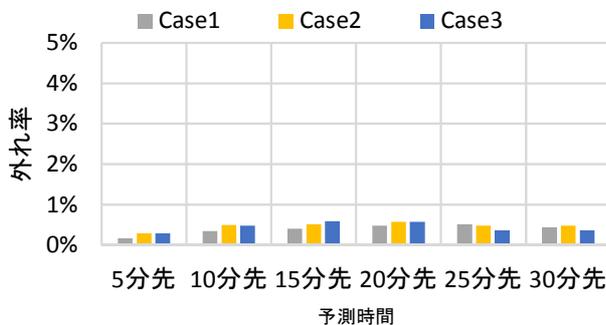


図-9 外れ率による評価結果の比較 (N=126)

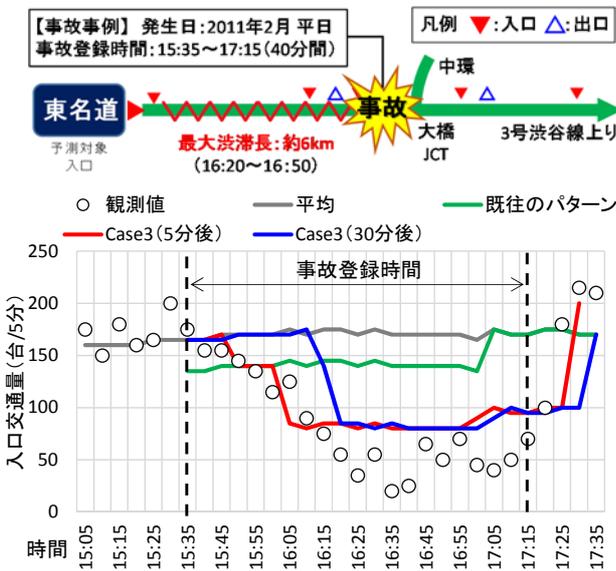


図-10 事故事例における入口交通量の時間推移

5. おわりに

本研究では、首都高における事故等突発事象発生時における入口交通量予測について、予測時点直前の入口交通量と入口下流側の渋滞量及びその要因を説明変数としたベイジアンネットワークの構築を行った。結果、平均値による予測や既往の入口交通量変動パターンテーブルによる予測結果と比較して、大幅な精度向上が見込まれることから、今後の適用可能性が確認された。

今後の課題としては、予測値の時間的な遅れの改善や、様々な入口を対象とした精度検証が必要である。また、本研究では学習データ数の確保から、変動量レベルを5レベルと設定したが、更なる精度向上に向けては、より細やかなレベルとする検討も必要である。更に、将来的にはOD交通量を予測することが必要であり、今後、順次着手していく予定である。

謝辞：RISEの開発を進めるに当たり、ご指導頂いた東北大学の桑原教授、千葉工業大学の赤羽教授、愛媛大学の吉井教授、首都大学東京の小根山教授、横浜国立大学の田中准教授はじめ、関係各位にこの場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 首都高速道路株式会社 HP; <http://www.shutoko.jp/>
- 2) 宗俊恵子, 割田博, 田村勇二, 白石智良; 「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, pp.293-296, 2009
- 3) 田村勇二, 割田博, 小山周一, 白石智良, 桑原雅夫; 「首都高速道路におけるオンライン予測シミュレーションの精度向上に関する一考察」, 土木計画学研究発表会・講演集 Vol.49, 2014
- 4) 田村勇二, 割田博, 桑原雅夫, 佐藤光, 岡田知朗; 「首都高速道路における流入制御時の入口転換行動分析」, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol.37, 2008.6
- 5) 田村勇二, 割田博, 桑原雅夫, 佐藤光; 「首都高速道路における入口交通量変動要因に関する分析」, 土木計画学研究発表会・講演集 Vol.41, 2010
- 6) 木村陽一, 岩崎弘利; 「ベイジアンネットワーク技術」, 東京電機大学出版局, 2006
- 7) 立岡恵介, 吉田哲, 宗本順三; 「店舗内の購買行動のベイジアンネットワーク分析」, 日本建築学会計画系論文集 第73巻第634号, 2633-2638, 2008
- 8) 小川英之, 斎藤光生, 鈴木達也, 稲垣信吉; 「Bayesian Networkを用いた事象駆動型システムの故障診断」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, CD-ROM, 2007
- 9) 西内裕晶, Marc MISKA, 桑原雅夫, 割田博; 「ETC-ODデータを用いた首都高速道路における短期的なOD交通量予測手法に関する研究」, 土木計画学研究発表会・講演集 Vol.42, 2010
- 10) モイヌルフセイン, 室町泰徳; 「ベイジアンネットワークによるリアルタイム交通事故予測モデルの開発」, 交通工学 Vol.47 No.2, pp.39-44, 2012
- 11) BAYONET; <http://www.msi.co.jp/bayonet/>

A STUDY OF INFLOW VOLUME PREDICTION AT THE INCIDENT CONGESTION ON METROPOLITAN EXPRESSEWAY

Yuji TAMURA, Hiroaki NISHIUCHI, Hiroshi WARITA