

都市内高速道路におけるボトルネック遅れ時間最小化のための流入制御モデル*

In-flow Control Model for Minimizing Delays at Bottle-neck Links on Urban Motorway*

岡田知朗**・桑原雅夫***・森田緯之****・割田博*****

By Tomoaki OKADA**・Masao KUWAHARA***・Hirohisa MORITA****・Hiroshi WARITA*****

1. はじめに

これまで首都高速道路においては、ネットワーク整備や拡幅等の大規模な事業の実施により渋滞対策を実施する一方で、道路ネットワークを効率的に運用すべく、渋滞の長さがある基準を超えた場合に入口閉鎖（流入制御）することで、渋滞対策を実施してきた。しかしながら、これは渋滞発生後の対策であるため、大きな効果の発現には至らなかった。参考文献^{1)~4)}に示すように、これまでも渋滞予防を考慮した様々な流入制御モデルが提案されているが、ボトルネックが複数存在する場合に入口制御の効果が途中のボトルネックで止められてしまうことへの対応については考慮されていない。

本稿では、首都高速道路の渋滞を予防又は最小限に抑制するため道路ネットワーク上の遅れをボトルネックでの遅れで代表させ、制御効果が適切に発現する流入制御モデルを提案するものである。

2. 流入制御モデルの特徴と考え方

(1) 採用する制御モデル

首都高速道路上の渋滞を予防又は最小限に抑制し、より円滑な道路ネットワーク実現のための流入制御であることから、遅れ時間に着目するものであり、首都高速道路上での遅れをボトルネックでの遅れとして代表させて扱う。遅れが発生するボトルネックをターゲットリンクとして設定し、ターゲットリンクでの遅れを最小化するための各入口からの最適な流入量を決定する。

*キーワード：都市内高速、流入制御、動的限界時間

**非会員、MSc(Eng)、首都高速道路株

(東京都千代田区霞が関1-4-1 TEL03-35395-9506、
e-mail t.okada851@shutoko.jp)

***正員、Ph.D. 東京大学生産技術研究所

(東京都目黒区駒場4-6-1)

****フェロー、工博、日本大学総合科学研究所

(東京都千代田区九段南4-8-24)

*****正員、博(工)、首都高速道路株

(東京都千代田区霞が関1-4-1)

実用的な流入制御モデルの構築を目指し、最適解の算出には、理論的な明快さや取扱いの容易性といった点で有利な線形計画法 (Linear Programming) を用いている。

(2) ターゲットリンクの設定

a) リンク交通量と流入交通量との関係

ターゲットリンクの交通量 x_{at} とOD交通量 q_{ijh} には、以下の関係がある。

$$x_{at} = \sum_{ijh} [p_{ijh}^{at} q_{ijh}] \quad (1)$$

q_{ijh} : 出口 j を目的地とする入口 i からの時刻 h における流入交通量

x_{at} : 時刻 t におけるリンク a の流入交通量

p_{ijh}^{at} : q_{ijh} が時刻 t にリンク a に流入する確率

b) 複数のボトルネックが存在する場合の制御

ターゲットリンク以外にもボトルネックが存在し、それが入口とターゲットリンクの間に位置する場合には、制御入口での制御効果が途中のボトルネックで止められてしまい、その下流、即ちターゲットリンクには制御効果が伝わらない。これを以下に詳述する。

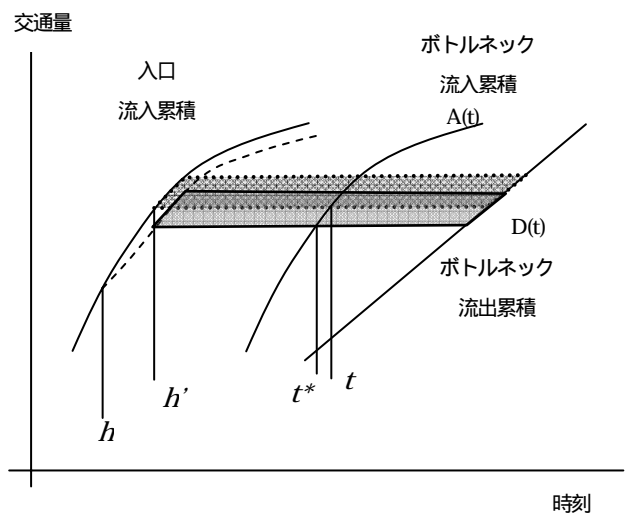


図-1 入口流入交通量とボトルネック交通量の変化

今、時刻 h に流入した交通が破線のように減少したとする。後の時刻 h' の流入交通は、ボトルネックでは網

掛帯のような位置を占めていたのが、この変化によって着色帯のように位置が変化する。このように、時刻 h の流入交通の変化によって、その後の時刻 h' に流入した交通のボトルネック流入時刻が t から t^* 変化したことを意味している。これについては、以下のように式で説明できる。式(1)を偏微分すると、次の右辺第2項があらわれる。

$$\frac{\partial x_{at}}{\partial q_{ijh}} = p_{ijh}^{at} + \sum_{i'j'h'} \frac{\partial p_{i'j'h'}^{at}}{\partial q_{ijh}} q_{i'j'h'} \quad (2)$$

これは、 $p_{i'j'h'}^{at}$ が q_{ijh} の変化によって変わったことを表している。

この例のように、ある時刻 h の入口の流入交通量が小さくなくても、ターゲットリンクとの間にボトルネックがあると、時刻 h 以降の交通のボトルネック流入時刻が早くなるため、ターゲットリンクに流入する交通量は変化しないことになる。(簡単に言えば、中間のボトルネックに待ち行列がある限り、そこの流出レートは変化しないので、上流の流入レートの変化はそこで吸収されてしまう。)

本モデルでは、入口での制御効果をターゲットリンクに伝えるために、ターゲットリンクを設定する際に制御ランプとの間にボトルネックの有無を確認する。存在する場合は、まず、上流部のボトルネックの渋滞を解消するような制御を行うことになる。即ち渋滞発生時刻と場所に留意してターゲットリンクを設定し、それに応じた流入制御を実施する。

(3) 動的な限界時間の考慮

限界時間とは本来経済学用語であるが、需要が1単位変化した場合の総旅行時間の変化量と定義される。時間軸を追加してこれを動的に拡張すると、時刻 t に需要が1単位増加した場合に総旅行時間がどのように増加するかを表す動的な限界時間は、自由旅行時間と時刻 t における渋滞継続時間に等しいことが示されている。⁵⁾⁶⁾⁷⁾

動的な限界時間が大きい時刻の交通を制御すれば、総旅行時間をより大きく減少させることができるので、動的限界時間の最も大きい渋滞開始時を最適化の対象時間帯とし、渋滞の発生を遅らせる制御を実施する。

(4) オンラインシミュレーションモデルとの連動

a) 最適化計算の対象時間帯

本モデルは、現在開発を進めているオンラインシミュレーションモデルとの連動を前提にしており、オンラインシミュレーションモデルで得られる渋滞発生時刻を

対象として最適化計算を行う。最適化計算の最小時間単位を5分としているが、制御量が不足する場合に備え、後続の時間帯も考慮する必要があるため、15分間を一括して最適解を算出する。

b) 交通状況データの常時更新による最適解算出
予測条件及び予測結果を逐次修正・更新し、時々刻々最適解を修正するもので、ボトルネックにおける動的な遅れ時間変化を明示的に考慮したモデルであり、恒常的なモニタリングを並行して実施し、流入制御の微調整を行えるものである。

(5) 流入制御に伴う迂回転換交通の考慮

従来から行っている入口閉鎖は、街路との接続部で閉鎖処理を行っており、待機できるスペースはほとんどない。また閉鎖時間は30分間を基本としており、制御により流入出来ない車両が全て待機することは困難であり、他の入口への迂回転換を考慮している。入口 i が制御された場合の迂回交通量 D_{ijh} は、

$$D_{ijh} = \alpha_{ijh} (q_{ijh}^d - q_{ijh}^*) \quad (3)$$

迂回交通は、次の時間帯に直近下流入口に迂回するものとする、

$$\begin{aligned} q_{(i-1)j(h+1)}^d &= q_{(i-1)j(h+1)} + D_{ijh} \\ &= q_{(i-1)j(h+1)} + \alpha_{ijh} (q_{ijh}^d - q_{ijh}^*) \end{aligned} \quad (4)$$

D_{ijh} : 出口 j を目的地とする入口 i からの時刻 h における迂回交通

α_{ijh} : 出口 j を目的地とする入口 i からの時刻 h における迂回率

q_{ijh}^d : 出口 j を目的地とする入口 i からの時刻 h における流入需要交通量

q_{ijh}^* : 出口 j を目的地とする入口 i からの時刻 h における制御時の流入交通量

q_{ijh} : 出口 j を目的地とする入口 i からの時刻 h における非制御時の流入交通量

入口閉鎖の場合、街路ノーズ部で閉鎖するため、基本的に閉鎖時に開放を待つことはできない。したがって、ここでは入口での待ち時間については、考慮していない。

(6) 実行手順

今回提案する流入制御モデルの実行手順は、図-2の通りである。

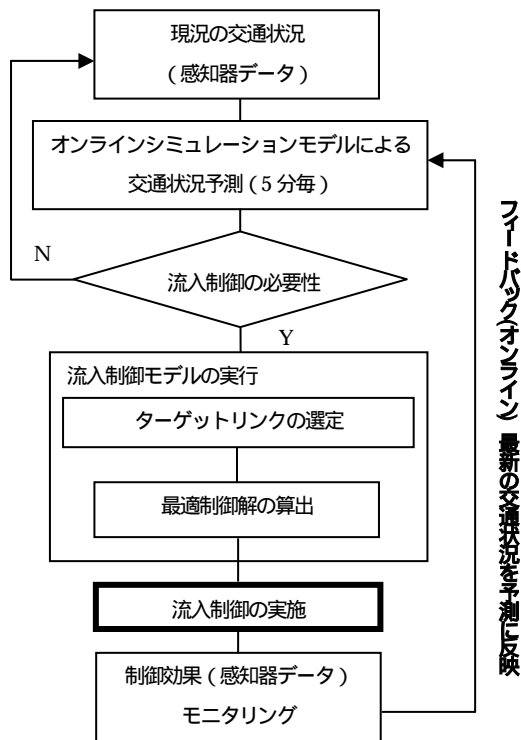


図 - 2 流入制御モデルの実行手順

(7) 目的関数及び制約条件の定式化

a) 目的関数

ターゲットリンクでの遅れ時間を最小化することから、ターゲットリンクでの超過需要最小化、即ち制御効果最大化を目的関数として設定する。

$$\max Z$$

$$Z = x_{at} - x_{at}^* = P_{ijh}^{at} (q_{ijh} - q_{ijh}^*) \quad (5)$$

x_{at}^* : 時刻における制御時のリンク a の流入交通量

b) 制約条件

実際の運用を考える上で必要となる事項を制約条件として設定している。

イ) 制御対象外入口の特定

従来の入口閉鎖については、次のような箇所は入口閉鎖の対象外であった。料金所のない入口。本線料金所手前の入口は、流入直後の本線料金所で料金を徴収するため料金所はない。都市間高速道路との接続部。入口閉鎖対象外の入口については、制約条件として次式で表現する。

$$q_{ijh}^* = q_{ijh} \quad (6)$$

なお、特定の入口を長時間連続的に制御することを避けるため、ある一定時間制御を継続した場合、次の時間帯からは制御対象外とする。

ロ) 流入交通量の上限

制御時の流入交通量は非負であり、かつ非制御時の交通量を超えることはないものとする。ただし、上流入口が制御され迂回がある場合は、非制御時の交通量に迂回交通を加算したものを超えない。

$$0 \leq q_{ijh}^* \leq q_{ijh}^d = q_{ijh} + D_{(i+1)j(h-1)} \quad (7)$$

ハ) 制御後のターゲットリンク交通量の下限

必要以上の制御を防ぐため、制御後のターゲットリンク交通量は、その容量値を下回ることが無いよう設定する。

$$x_{at}^* = x_{at} + P_{ijh}^{at} (q_{ijh}^* - q_{ijh}) \geq CAP \quad (8)$$

二) 総走行台キロ減少量の上限

制御入口の選定にも動的な限界時間を適用すると、街路との自由旅行時間差が大きい経路を優先する、即ち遠方入口からの流入を優先しターゲットリンクの直近から制御することが効率的となる。従って、ここでは流入制御による総走行台キロの減少量に制限を設ける。

$$\sum_m \sum_{ijh} l_m q_{ijh}^* \geq \beta \sum_m \sum_{ijh} l_m q_{ijh} \quad (9)$$

l_m : リンク m の区間長

β : 総走行台キロ減少量 の上限値

今後の利用距離に応じた料金制度の導入を踏まえると、料金収入に関する制約という意味も持つ。

3 . 流入制御モデルの適用

(1) 計算条件

a) 対象ネットワーク

首都高速4号新宿線(上り)を対象に本モデルの適用性を確認した。前述の通り、オンラインシミュレーションモデルとの連動を前提としているが、ここではオフラインシミュレーションモデルの予測結果を用いて流入制御モデルを適用した。

4号新宿線は、中央自動車道と首都高速都心環状線を結ぶ路線であり、国道20号線とほぼ並行する路線である。図 3に示す通り、4号新宿線(上り)には、中央自動車道との接続部以外に6か所の入口があるが、最も上流部の高井戸入口は本線料金所の直近上流に位置しており、高井戸入口からの流入交通に対しては本線料金所で料金

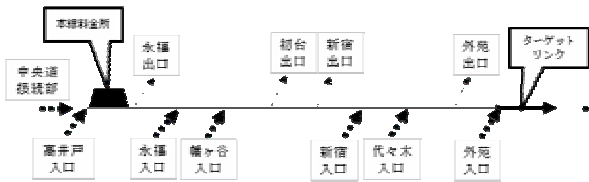


図 - 3 対象ネットワーク図

を徴収する形態となっており、入口料金所は設置されていない。従って中央道接続部と高井戸入口は流入制御対象外と設定した。また都心環状線との接続部である最も下流部のリンクをターゲットリンクに設定している。

(2) 数値計算結果

a) 総走行台キロ減少量の制約に関する感度分析

渋滞予測の結果、7時10分にターゲットリンクで渋滞が発生しそれ以降渋滞が継続することから、7時10分以降を対象に制御モデルを適用した。総走行台キロ減少量の制約を付与することの効果確認のために簡易的に5分間だけの最適化計算を行い、表-1に示すようにターゲットリンク直近の入口が制御される結果が得られた。

永福 幡ヶ谷 新宿 代々木 外苑

7:00 ~05	8				
	8				
	8				
7:05 ~10		24	37		
		12	37		
		23	37		
7:10 ~15				7	27
				0	27
				0	21

上段:非制御 中段:制御(台扣制約無) 下段:制御(台扣制約有)

表 - 1 各入口の流入交通量比較

b) 渋滞緩和効果

7時10分から25分までの15分を一括で算出した最適制御を実施した際の渋滞緩和効果を図 4に示す。

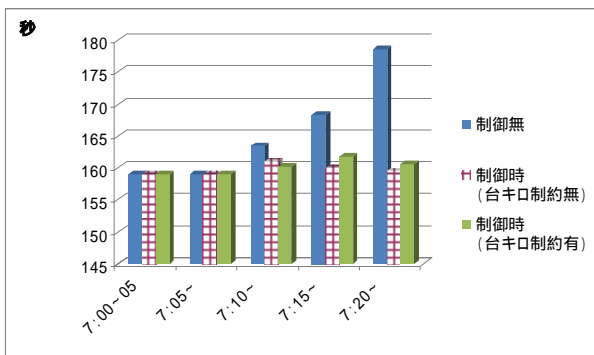


図 - 4 ターゲットリンク及び上流隣接リンクの旅行時間比較

4. おわりに

実際の運用を考える上で必要な事項を制約条件として取り入れたLP制御モデルについて本稿で提案した。実用性の高いモデルの開発を目指しており、制御効果が途中のボトルネックで止められてしまうことへの対応や動的な限界費用の考慮なども本モデルの特徴である。

今回の適用ネットワークは高速同士の経路選択のない非常にシンプルなものであったが、経路選択のあるネットワークでの適用についても今後確認する予定である。またこれまで実施していた30分間の入口閉鎖への適用等、実運用に応じた近似解の算出も含め、今後の実用化に向けた検討が必要である。

更に、ランプメタリング等の導入を想定した場合、ランプウェイの途中で滞留させることも考えられることから、将来的な運用への拡張を考え、入口での許容待ち時間や待ち台数に関する制約を考慮することも考えられる。

参考文献

- 1) 森地茂, 清水哲夫: 都市高速道路における新たなリアルタイム流入制御手法に関する研究 遺伝的アルゴリズムの適用, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.915-922, 1995.
- 2) 楊曉行, 飯田恭敬, 宇野伸宏: 走行速度の時間変化を考慮した動的LP制御モデル, 土木学会論文集, No.597/40, pp113-126, 1998.
- 3) 西林素彦, 大藤武彦, 奥嶋政嗣, 井上矩之: 都市高速道路における流入調整による交通制御手法の事前評価, 高速道路と自動車, 2005.4.
- 4) 宇野伸宏, 栗田大貴, 倉内文孝: オンライン観測データを活用した都市高速道路の流入制御モデルの効果分析, 第26回交通工学研究発表会論文報告集, pp.169-172, 2006.
- 5) 桑原雅夫, 吉井稔雄, 熊谷香太郎: 動的システム最適配分とランプ流入制御に関する研究 簡略ネットワークにおける基礎的分析, 土木学会論文集, No.667/40, pp.59-71, 2001.
- 6) 桑原雅夫: 動的な限界費用に関する理論的分析, 土木学会論文集, No.709/40, pp.127-138, 2002.
- 7) 桑原雅夫: 渋滞現象と需要解析, 土木計画学研究・講演集, Vol.28, CD-ROM, 土木学会, 2003.11.