

都市内高速道路における待ち行列を考慮した流入制御モデルの構築と適用*

Development and Application of In-flow Control Model Considering Point-Queue at Bottle-neck Links *

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、中央環状線等の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を行うことで流入量を制御する方法により渋滞対策を実施してきた。

ネットワークを構成する首都高速道路においては、複数の箇所で渋滞が発生(ボトルネックが複数存在)しており、この場合、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、下部のボトルネックまで効果が及ばないため、制御を行う際には留意が必要である。

しかしながら参考文献^{1)~6)}に示すように、これまでさまざまな流入制御モデルが提案されているものの、ボトルネックが複数存在する場合には、入口制御の効果が途中のボトルネックで吸収されてしまうことについては明確に扱われていない。

本稿では、都市内高速道路ネットワーク上の遅れをボトルネックでの待ち行列として考慮し、ボトルネックが複数存在する状況下で制御効果が適切に発現する流入制御モデルを提案する。

2. 流入制御モデルの特長と考え方

(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待ち行列で代表させて扱う。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、即ち待ち行列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。

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。

本稿で提案するモデルは、これまでに提案されているモデルに対して最適解を算出するLPの基本的な部分は同じであるが、実務上必要な事項を考慮することで、それを発展させ現実的なモデルとしているところが特長と言える。

(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 $x_a(t)$ とOD交通量 $q_{ij}(h)$ には、以下の関係がある。

$$x_a(t) = \sum_{ijh} [p_{ij}^a(h,t) \times q_{ij}(h)] \quad (1)$$

$q_{ij}(h)$: 時間空間 h における入口 i から出口 j への流入需要量(所与)

$x_a(t)$: 時間空間 t におけるターゲットリンク a の流入交通量

$p_{ij}^a(h,t)$: 時間空間 h に入口 i から流入し出口 j に向かう車両が時間空間 t にターゲットリンク 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

ネットワークを構成する首都高速道路においては、日常的に複数の箇所で渋滞が発生しており、複数のボトルネックが存在している状況にある。ターゲットリンクの渋滞を緩和するために流入制御を行う場合、そのターゲットリンクと制御を行う入口との間にボトルネックが存在する場合には、中間のボトルネックに待ち行列がある限り、そ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ため、入口からの流入量を削減しても、その削減量そのままボトルネックより下流のターゲットリンクの削減量にならない⁷⁾。

*キーワード：都市内高速、流入制御、待ち行列

**非会員、MSc (Eng)、東京地下鉄株

(東京都台東区上野3-19-6 TEL03-3837-7323、
e-mail tomo.okada@tokyometro.jp)

***正員、Ph. D. 東京大学生産技術研究所

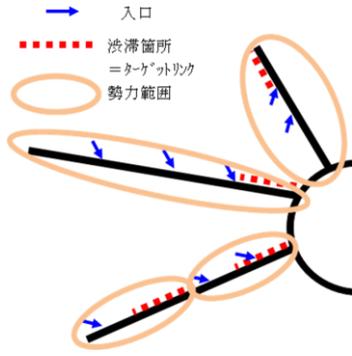
(東京都目黒区駒場4-6-1)

****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)



図一 ターゲットリンクとその勢力範囲の概念図

効果的な流入制御を実現するためには、渋滞が生じている箇所を明確に認識することが重要であり、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。

また、LPタイプの流入制御モデルは交通状態が一定という前提に基づいておりリンク交通量や影響係数の動的な記述が不十分な点が指摘されているが、ターゲットリンクで渋滞を代表させていることと対象範囲を限定していることから、そのような弱点の悪影響をなるべく小さくすることができると考えられ、より実用に適したモデルと言える。

(3) 流入制御に伴う滞留及び迂回転換交通の考慮

流入制御の運用手法によって想定すべき交通行動は異なる。例えば、首都高速道路において従来から行っている入口閉鎖では、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る。このような運用を想定する場合は、他の入口への迂回転換を考慮できるモデルが望まれる。

一方、ランプメタリングのような比較的短い時間間隔での流入制御を想定すると、ランプウェイの途中で車両を滞留させる運用が考えられる。その場合には、制御時に伴う滞留について考慮することが必要である。これまで入口での滞留を考慮したモデルは提案されているが、迂回転換を想定したものにはなっていない。制御量が滞留可能量を超える場合は、入口での滞留と迂回転換の両方が考慮する必要がある。

本モデルでは、流入制御の様々な運用方法に適用できるように、流入制御に伴う交通行動として入口での滞留車両と迂回転換車両を考慮している。

$$N_i(h) = Q_i(h) - Q_i^*(h) \quad (2)$$

$$Q_i(h) = \sum_{h'=1}^h \{q_i(h') + q_i^{IN}(h') - q_i^{OUT}(h')\} \quad (3)$$

$$Q_i^*(h) = \sum_{h'=1}^h q_i^*(h') \quad (4)$$

$$q_i(h) = \sum_j q_{ij}(h) \quad (5)$$

$$q_i^*(h) = \sum_j q_{ij}^*(h) \quad (6)$$

ここでは、時間軸を Δh の微小区間に分割し、その区間番号を $h=1,2,3, \dots, H$ とおく

$N_i(h)$: 時間空間 h における入口 i の待ち台数

$Q_i(h)$: 時間空間1~ h までの入口 i における累積需要

$Q_i^*(h)$: 時間空間1~ h までの入口 i における累積流入台数

$q_{ij}^*(h)$: 時間空間 h における入口 i から出口 j への流入量

$q_i^*(h)$: 時間空間 h における入口 i からの流入量 (制御変数)

$q_i(h)$: 時間空間 h における入口 i からの需要量

$q_i^{IN}(h)$: 時間空間 h に入口 i に迂回してくる交通量

$q_i^{OUT}(h)$: 時間空間 h に入口 i から下流入口に迂回する交通量

迂回交通量については、迂回先入口と迂回先入口への到着時刻との関係から以下のように表せる。この関数は所与で、どこからどこへの程度の時間をかけて迂回するのかが事前に設定しておくものである。

$$q_i^{IN}(h) = f_i(q^{OUT}(h-1)) \quad (7)$$

$$q^{OUT}(h-1) = \{q_i^{OUT}(h') \mid \forall i \in I, 1 \leq h' \leq h-1\} \quad (8)$$

$q^{OUT}(h-1)$: 各入口における時間空間 $h-1$ までに迂回する交通量の集合

(4) 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⁸⁾。

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。

更に、なるべく遠方から流入する交通を優先することも動的限界時間の理論と整合する⁹⁾ことから、ターゲットリンクの直近上流の入口を優先的に制御するよう配

慮している。

(5) 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としており、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。

(6) 目的関数及び制約条件の定式化

a) 目的関数

制御量の最小化

ターゲットリンク交通量が容量以下という条件の下で、滞留台数や迂回台数を含めた制御量の最小化を目指す。また動的限界時間を考慮するとターゲットリンクに近い入口を優先的に制御することが効率的である⁹⁾ことから、制御量にターゲットリンクまでの距離で重み付けしたものの最小化を目的関数とする。

$$\min Z = \sum_{i,h} \{Q_i(h) - Q_i^*(h)\} \times S_i(h) \quad (9)$$

S_i : 入口*i*からターゲットリンク*a*までの距離(所与)

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。①同一の入口から上下両方向に進入できる入口。②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。③都市間高速道路との接続部。

このように従来の運用で制御対象外となっていた入口は、今後も対象外となることも考えられるため、流入制御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。

$$q_i^*(h) = q_i(h) + q_i^{IN}(h), \quad i \in I_{NC} \quad (10)$$

I_{NC} : 制御対象外入口の集合(所与)

制御対象外の入口であっても、上流入口からの迂回先

となり得るので、右辺第2項に迂回交通を考慮している。

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。

$$0 \leq q_i^*(h) \leq N_i(h-1) + q_i(h) + q_i^{IN}(h) \quad (11)$$

なお前の時間帯での滞留車両と上流入口からの迂回車両も考慮したものを上限としている。

ハ) 制御後のターゲットリンク交通量の上限

制御後のターゲットリンク交通量は、その容量値を超えることが無いよう設定する。

$$\begin{aligned} x_a^*(t) &= \sum_{i,j,h} P_{ij}^a(h,t) \times q_{ij}^*(h) \\ &= x_a(t) + \sum_{i,j,h} [P_{ij}^a(h,t) \times \{q_{ij}^*(h) - q_{ij}(h)\}] \\ &\leq CAP_a \end{aligned} \quad (12)$$

CAP_a : ターゲットリンク *a* の容量値 (所与)

ニ) 入口での滞留台数、待ち時間の上限

制御時には、制御された車両は可能な限り入口部に滞留するものとし、滞留した車両は次の時間帯に当該入口から流入するものとして、入口における許容待ち台数の制約を設ける。

待ち台数の制約

$$N_i(h) = Q_i(h) - Q_i^*(h) \leq N_i \quad (13)$$

N_i : 入口*i*の最大滞留台数(所与)

待ち時間の制約

$$W_i(h) = \frac{N_i(h)}{q_i^*(h) / \Delta h} < W_i \quad (14)$$

W_i : 入口*i*の最大待ち時間(所与)

上式は次のように書き換えられる

$$N_i(h) < q_i^*(h) \frac{W_i}{\Delta h} \quad (15)$$

即ち、 $N_i > q_i^*(h) \frac{W_i}{\Delta h}$ の場合には待ち時間の制約がクリティカルとなり、逆の場合は待ち台数の制約がクリティカルとなる。本稿においては、後者の場合について記述する。

3. 流入制御モデルの適用

(1) 対象ネットワーク

中央自動車道と首都高速都心環状線を結ぶ、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。図-4に示す通り、中央自動車道との接続部以外に6か所の入口があるが、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を徴収する形態となっており

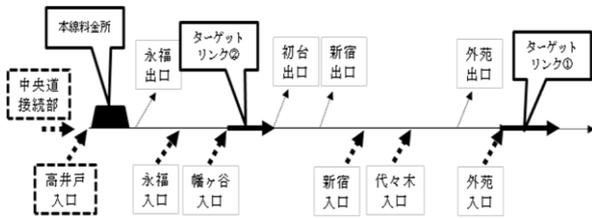


図-2 対象ネットワーク図

入口料金所は設置されていない。そのため、高井戸入口と中央道接続部は流入制御対象外とした。

(2) モデル適用時の交通状況

2007（平成19）年4月6日（金）車両感知器データ及びETC-ODデータを利用し、外苑入口先のリンク（ターゲットリンク①）と幡ヶ谷入口先のリンク（ターゲットリンク②）において渋滞が同時に発生している状況にモデルを適用した。制御対象時間は、それぞれ

ターゲットリンク①：6:35～7:05まで

ターゲットリンク②：6:35～6:50まで

本稿での試算は、迂回転換車両については扱わず、まず流入制御による入口での滞留車両を考慮したケースについて実施した。なお制御によって生じた滞留車両は、次の時間帯に優先的に流入できるものとしている。

(3) 数値計算結果

図-3に示す通り、LP計算で算出された最適制御解に応じて流入制御を行うことで、2つのターゲットリンクにおける遅れ時間は減少している。

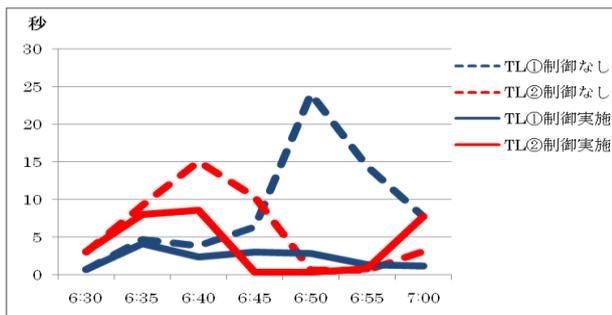


図-3 各ターゲットリンクでの遅れ時間の変化

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制御に伴う交通行動、更に動的な限界費用の考慮なども本モデルの特長である。

部分的ではあるが実際のネットワークに本モデルを適用することで、渋滞が緩和されることを確認した。

本稿においては、入口での待ち台数がクリティカルとなる場合を対象に試算を行ったが、流入制御に伴う迂回転換行動を考慮したモデルの適用性についても確認する必要がある。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。

参考文献

- 1) 松井寛, 藤田素弘, 堀尾朋宏: 交通量の空間的分布を考慮したファジィLP制御, 土木計画学研究・論文集, No. 10, pp. 95-102, 1992.
- 2) 飯田恭敬, 金周頤, 宇野伸宏: 都市高速道路ネットワークに対する動的流入制御モデルの開発, 土木計画学研究・論文集, No. 12, pp. 757-768, 1995.
- 3) 朝倉康夫, 柏谷増男, 山内敏通: 観測データの利用による都市高速道路の動的なLP型流入制御モデル, 土木計画学研究・論文集, No. 13, pp. 923-931, 1996.
- 4) 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/IV - 40, pp.113-126, 1998.
- 5) 奥嶋政嗣, 秋山孝正: 一般街路の交通状態を考慮した都市高速道路交通制御方式の検討, 第23回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 21-24, 2003.
- 6) 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.
- 7) 岡田知朗, 桑原雅夫, 森田純之, 割田博: 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の構築, 第28回交通工学研究発表会論文報告集, pp.53-56, 2008. 10.
- 8) 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
- 9) 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/IV-50, pp. 59-71, 2001.