

# 都市高速道路におけるオンライン流入制御の渋滞抑制効果に関する分析\*

## Analysis of Effects of On-line Inflow Control upon Reduction in Traffic Jams on Urban Expressway\*

栗田 大貴\*\*・宇野 伸宏\*\*\*・倉内 文孝\*\*\*\*  
By Hiroki AWATA\*\*, Nobuhiro UNO\*\*\*, Fumitaka KURAUCHI\*\*\*\*

### 1. はじめに

都市交通網の礎となる都市高速道路では、大量の交通需要に対する効率的な対処が求められており、平面街路を含めた都市道路交通の円滑性確保に大きく寄与している。将来的な ITS 技術の進展ならびに各高速道公団の民営化を踏まえ、都市高速道路が良質かつ信頼性の高い交通サービスを提供するためには、交通管制システムのさらなる高度化が不可欠であろう。アクセス制限された都市高速道路では、ランプからの流入を制御することで、高速道路利用台数を比較的容易に操作可能であるため、交通管制の上で、オンランプにおける流入制御が主要な方策として位置づけられている。一般に流入制御は制御実施のタイミングにより、「予防制御」と「事後制御」に大別される。予防制御は、本研究にて根幹をなす考え方、すなわち平常時による自然渋滞の予防を目的としている。一方、実際の交通管制で取り扱われている事後制御では、事故・異常気象などに起因する交通渋滞の迅速な回復を目的としており、両者の性格は異なるといえよう。

さて、近年では ETC の普及に伴い、高速道路料金所付近の渋滞は減少傾向にある反面、本線上に合流部やサグ部等のボトルネックが存在するケースでは、ETC 導入の有無によらず、今後も流入交通量の調整が必要であると予想される。本研究では ITS 技術の目覚ましい進歩に伴う動的データの入手可能性を考慮し、オンライン観測データを入力とした動的流入制御モデルを提唱しており、当モデルを活用してより大きな渋滞抑制効果が期待される予防制御と、現行の事後制御との比較をすることで、両者の特徴・意義について考察を行う。

当制御モデルが動的流入制御に関する既往の研究<sup>1)3)</sup>と異なる特徴として、本線交通状態の観測データを活用し、流入需要データの不確実性の影響の抑制という観点で頑健なモデルであり、実際の交通管制への適用可能性が高いことが挙げられる。

\*Keywords :交通管制, 流入制御, オンライン観測, 都市高速道路

\*\*非会員, 工修, トヨタマップマスター  
(e-mail: awatah@mapmaster.co.jp)

\*\*\* 正員, 博(工), 京都大学工学研究科都市社会工学専攻  
(e-mail: uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

\*\*\*\*正員, 博(工), 京都大学工学研究科都市社会工学専攻

### 2. オンラインモデルの概要

#### 2.1 オンライン制御モデルの特色

本研究では都市高速道路上に設置された観測機器より収集されるオンライン観測データを有効活用した流入制御モデル<sup>4)</sup>を利用している。ここでは、都市高速道路本線上の渋滞の予防・緩和に資する LP (Linear Programming) タイプのオンライン制御モデル構築への経緯を簡略に述べるが、そのためには操作変数である各オンランプからの流入可能量と各リンクの交通状態を関連づけ、本線上の混雑に対するオンランプからの流入交通の影響度を予測することが必要となる。

また、LP タイプの流入制御モデルの求解には、オンランプの流入需要データが必要であるが、流入需要の正確な推定は今後の技術進展を勧案しても容易ではない。本研究では車両検知器より得られる交通データを重視し、対象時間帯以前に流入した交通の影響は、車両検知器データに反映されると仮定する。そして、タイムステップ  $t+1$  におけるリンク  $a$  の交通状態を推定する際には、次の 3 要素の影響を合算する。

a) タイムステップ  $t$  の流入交通のリンク  $a$  への影響

b) タイムステップ  $t-1$  の流入交通のリンク  $a$  への影響

c) タイムステップ  $t-2$  以前の流入交通のリンク  $a$  への影響

a) は求解される制御解自体の影響部分、b) はデータ処理時間を考慮し、前タイムステップの制御解(既知)の影響部分、c) はタイムステップ  $t-2$  の本線上の観測データに基づき推定した影響部分を各々適用する。こうした取り扱いにより、仮にタイムステップ  $t$  の制御解を求める際に用いる流入需要データの誤差が大きい場合にも、その影響は数タイムステップ後に c) として反映されるため、より頑健な制御モデルが構成されることが期待される。

3 章では仮想ネットワークに対する数値計算を通じ、予防制御と事後制御の比較検討を試みるが、この場合上記 3) に対応する観測データは実在しない。そこでシミュレーションから得られる交通状態を仮想現実として、**図-1** に示す流入需要・制御モデル・シミュレーションモデル間のフィードバックループを仮定する。

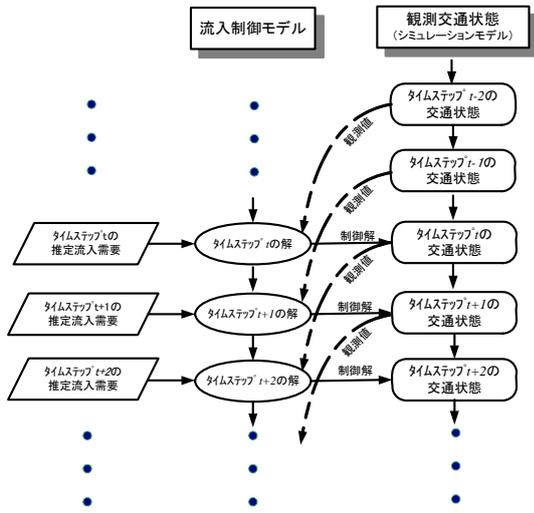


図-1 流入需要・制御モデル・シミュレーションの関係

## 2.2 定式化

本研究では、流入制御モデルの目的関数として総走行距離の最大化を適用する(式(1)). 制約条件としては、流入交通量の上・下限に関する条件(式(2))と、渋滞予防のためのリンク走行速度制約(式(3))を設ける.

$$\max \sum_i \bar{d}_i^r U_i^r \quad (1)$$

$$UL_i^r \leq U_i^r \leq \min(U_{Max,i}, UD_i^r) \quad for \forall i \in I \quad (2)$$

$$V_l^{r+1} = \frac{K_{jam} - \{K_l^r + (X_l^r - Y_l^r)/L_l\}}{K_{jam}} V_{free} \geq V_l^{min} \quad \forall l \quad (3)$$

- $r$ : 制御対象タイムステップを表す添え字
- $i$ : オンランプ番号を表す添え字
- $\bar{d}_i^r$ : オンランプ  $i$  流入交通 1 台当たりの平均トリップ長
- $U_i^r$ : オンランプ  $i$  の流入可能交通量 (求解対象)
- $UL_i^r$ : 流入可能交通量  $U_{0i}^r$  の最低保証値
- $U_{Max,i}$ : 最大処理能力 (台/分)
- $UD_i^r$ : 流入待ち交通を考慮した予測流入需要量
- $X_l^r$ : リンク  $l$  への流入交通量
- $Y_l^r$ : リンク  $l$  からの流出交通量
- $L_l$ : リンク  $l$  の長さ (km)
- $K_l^r$ : リンク  $l$  の交通密度 (台/km)
- $K_{jam}$ : 飽和密度 (台/km)
- $V_{free}$ : 自由走行速度 (km/分)
- $V_l^{min}$ : リンク  $l$  の許容速度 (臨界速度を仮定) (km/分)
- $V_l^{r+1}$ : タイムステップ  $r+1$  リンク  $l$  の推定速度 (km/分)

本研究では制御を受けて当該タイムステップに流入できなかった交通は、オンランプ前の許容待ち台数に収まる場合は以降の時間帯までオンランプ前で待機すると仮定し、また許容待ちスペースを超える需要につい

ては、物理的にオンランプ部に接続する平面街路へ経路変更すると仮定している. 数値計算では流入制御の効果を、被制御車両が経路変更した際の平面街路交通へ及ぼす総走行時間の増加量、そしてオンランプ前の待ち時間をそれぞれ加味した上で評価を行う. 式(3)はリンク  $l$  の交通量保存則を Greenshields の  $k-v$  式に代入し導出した式であり、渋滞とならない許容値以上の速度維持を求めている.

## 3. 予防制御と事後制御の比較分析

### 3.1 前提条件

数値計算に関する初期設定条件を表-1 に、数値計算用ネットワークを図-2 に示す. 本研究における平面街路とは、都市高速道路に並走する道路を想定しており、ノード 01 にて 20 (台/単位タイムステップ) の定常な需要が生じ、その交通状態変化については、流入制御によって経路変更した需要量のみ依存している.

なお、数値計算用ネットワーク上の交通状態記述用のモデルとして、ブロック密度法による交通流シミュレーションモデルを利用し、流入制御モデルと連動させる.

表-1 数値計算の初期設定条件

項目	内容	備考
1 タイムステップ	1 (分)	流入制御モデルの更新時間間隔
1 サイクル	10.0 (秒)	シミュレーションの更新時間間隔
自由走行速度 $V_{free}$	高速道路	1.52 (km/分) = 91.2 (km/h)
	平面街路	1.00 (km/分) = 60.0 (km/h)
臨界速度 $V_0$	高速道路	0.76 (km/分)
	平面街路	0.50 (km/分)
臨界密度 $k_0$	高速道路	111.8 (台/km) = 85 (台/分) / 0.76 (km/分)
	平面街路	73.6 (台/km) = 37 (台/分) / 0.50 (km/分)
ブロック長 $dL_l$	0.30 (km)	> 1.00 (km/分) × 10.0 (秒) (平面街路)
車両検知器	全ブロックに設置	およそ 300m 間隔
オンランプ $i$ の最大処理能力 $U_{Max,i}$	48 (台/分)	1 ブースあたり 12 (台/分) × 4 ブース
オンランプ $i$ の許容待ち台数 $R_{S,i}$	0,15,30,60,∞ (台)	この値を超えると平面街路へ流出する (∞台は、すべてオンランプ前で待つと仮定)

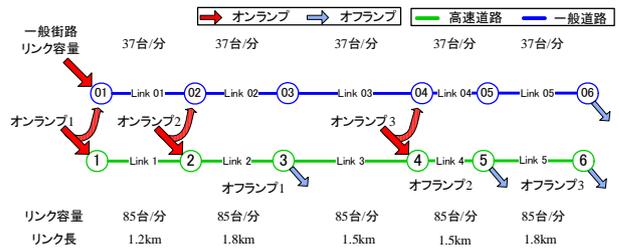


図-2 数値計算用ネットワーク

既述の通りに、本研究で対象とする流入制御モデルは、リアルタイム観測データを活用している. 当制御モデルに期待される機能としては、交通状態の変動に即応した効果的な制御の実施に資することであり、特に直接観測可能な本線上の交通データを重視したモデル構造とすることで、流入需要誤差が制御解に及ぼす影響の抑制作用を有すると期待される.

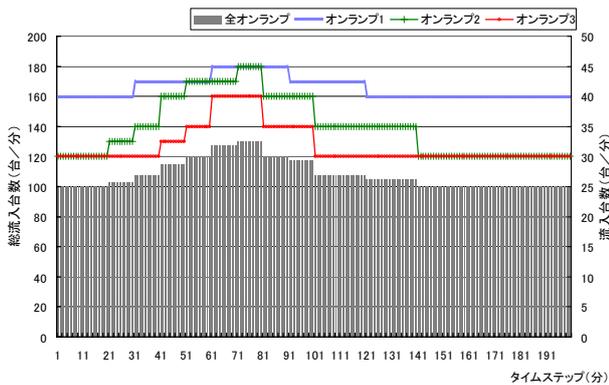


図-3 各タイムステップの予測流入需要

図-3にはオンランプ毎の予測流入需要を示す。上述のオンラインモデルとしての特徴を活かすため、以降の数値計算では流入需要データにランダムな誤差、つまり流入需要誤差をタイムステップ毎に平均 1、標準偏差 ( $\sigma$ ) 0.1 の正規乱数を予測需要に乗じて表現した。ちなみに標準偏差  $\sigma = 0.1$  を与えた際には、およそ 7 割の確率で予測誤差は  $\pm 10\%$  に収まるとされている。

また、流入制御を実施するにあたって都市高速道路の現状を鑑みると、オンランプ前の待機スペースが制御結果に与える影響を無視することはできない。そこで今回の数値計算において、オンランプ前の許容待ち台数を適宜変化させることによって、オンランプ構造が及ぼす流入制御効果の差異についても配慮した。すなわち、許容待ち台数を 1 オンランプにつき  $\infty$ , 60, 30, 15, 0 (台) と変化させた場合の数値計算を行う。ここで、許容待ち台数が  $\infty$  台の場合は、被制御車両はすべてオンランプ前で待機することを意味し、0 台のときはすべて平面街路へと経路変更することになる。

### 3.2 本研究における事後制御の定義

表-2 は各道路管理者が設定した渋滞の判定基準を示す。本研究では流入制御を実施するまでの時間に着目し、ここで事後制御とは、交通流シミュレーション内で速度が 30km 以下となるブロックが 4 つ以上連続した状態 (1 ブロックの長さ 300m) が一定時間継続した時、始めて流入制御を開始するものとした。同時に、継続時間を 15 分および 30 分のケースを取扱い、流入制御を開始する時間を操作パラメータとした数値計算を実施し、予防制御との差別化を図った。

表-2 各道路管理者の渋滞の判定基準

道路管理者	道路の種類	速度	車列長	継続時間
東/中/西日本高速道路	高速自動車国道	40km/h以下	1~1.5km以上	—
首都高速道路	都市高速道路	20km/h以下	1.5km以上	30分以上
阪神高速道路	都市高速道路	30km/h以下	1km以上	30分以上
本州四国連絡高速道路	高速自動車国道	40km/h以下	1~1.5km以上	—

### 3.3 数値計算結果

まずは平面街路の総走行時間およびオンランプ待ち時間を含んだ総所要時間に着目した上で、流入制御が

与える効果を分析する。図-4 は乱数の初期値を変化させて 10 回計算した際の総所要時間の平均値を示し、その内訳を表-3 に示す。図-4 から、どの許容待ち台数のケースについても、無制御時と比較して流入制御を実施した方が総所要時間の短縮が望めること、また事後制御の効果は、制御開始時間が遅れるほど減少(所要時間が増加)することが分かる。さらに許容待ち台数が増えるにつれ、総所要時間が増加する傾向が読みとれる。この結果は平面街路の交通状態にもよるが、被制御車両の待ち損失の影響が、平面街路への経路変更が平面街路交通へ及ぼす影響よりも大きいことを示唆している。しかしながら、事後制御の許容待ち台数 0 台および 5 台の結果を比較すれば、仮に事後制御を実施するにも、ある程度の許容待ちスペースを必要とすることが窺える。

表-3 総所要時間の内訳

高速道路総走行時間 (10ケースの平均値)		単位 (千min・台)				
許容待ち台数 (台)	$\infty$ 台	60台	30台	15台	0台	
無制御	125.1	125.1	125.1	125.1	125.1	
事後制御 (30分遅れ)	104.9	115.8	98.2	97.4	94.4	
事後制御 (15分遅れ)	95.2	91.2	89.9	88.9	85.8	
予防制御	88.1	84.5	83.7	83.2	82.3	

平面街路総走行時間 (10ケースの平均値)		単位 (千min・台)				
許容待ち台数 (台)	$\infty$ 台	60台	30台	15台	0台	
無制御	36.3	36.3	36.3	36.3	36.3	
事後制御 (30分遅れ)	36.3	40.2	47.3	46.9	55.4	
事後制御 (15分遅れ)	36.3	46.6	44.6	44.7	52.0	
予防制御	36.3	39.2	39.8	40.2	40.5	

平均待ち時間 (10ケースの平均値)		単位 (千min・台)				
許容待ち台数 (台)	$\infty$ 台	60台	30台	15台	0台	
無制御	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
事後制御 (30分遅れ)	20.8	4.2	6.3	5.0	3.2	
事後制御 (15分遅れ)	27.4	9.1	7.3	5.5	3.4	
予防制御	30.8	5.4	2.7	1.5	0.5	

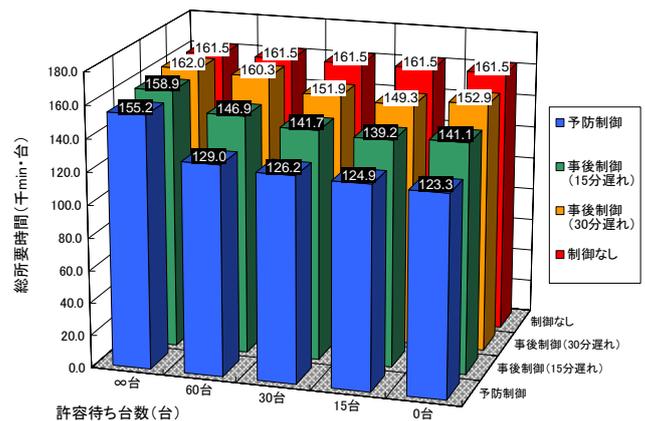


図-4 各ケースにおける総所要時間の比較

以下には、許容待ち台数 15 台のケースに限定して、予防制御と事後制御 (15 分遅れの場合) における計算結果を比較する。図-4, 5 は制御を実施した場合の都市高速道路上の交通密度の平均値、図-6, 7 は算出されたオンランプ別の流入制御率の平均値を各々示す。

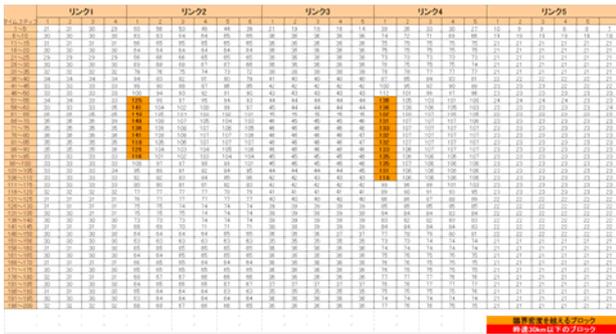


図-4 密度の時空間変化(予防制御)

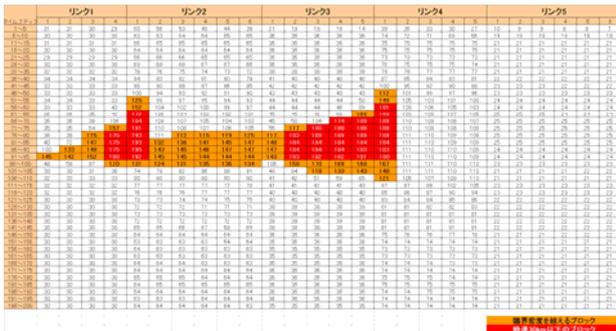


図-5 密度の時空間変化(事後制御:15分)

図-4 は予防制御を実施した場合の交通密度の変化を示しているが、合流部となるリンク 4 上流にて臨界密度を超えるブロックが存在するが、全時間帯において渋滞が抑制されていることが分かる。それに対して、事後制御実施時の交通密度の変化を示した図-5 では、タイムステップ 50 以降、渋滞発生・延伸が確認されている。このケースでは、速度が30km以下となるブロックが4つ以上連続した状態が 15 分間継続した後に、流入制御を開始することになるが、制御開始タイムステップ 91~95 付近を境に密度が大きく変化しており、高速道路上の交通状態が比較的迅速に復帰している様子が窺え、事後制御における渋滞回復効果が認められる。

図-6, 7の流入制御率は当該タイムステップの流入需要(オンランプ待ち台数含む)を分母に、流入需要-流入可能量を分子として算出した比率である。図-6 から、予測流入需要がピークを迎える(タイムステップ 96~105)より早い段階で制御が開始されている一方、図-7 では制御開始直後の制御率の急激な上昇と、以降のタイムステップについても制御率が一定の数値を維持する状態が続いている。これは、急激な制御によって流入可能量を超えた流入需要が絶えずオンランプ前に存在し、以降のタイムステップでも消化されていない状態を示している。ゆえに事後制御では高速道路上の渋滞回復と引き換えに、以降のオンランプ付近の混雑をもたらす結果を誘発すると考えられる。

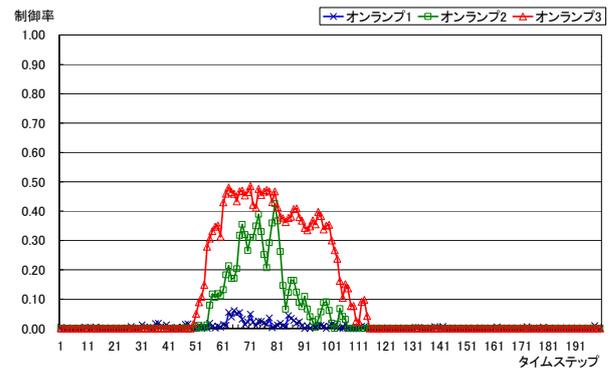


図-6 流入制御率(予防制御)

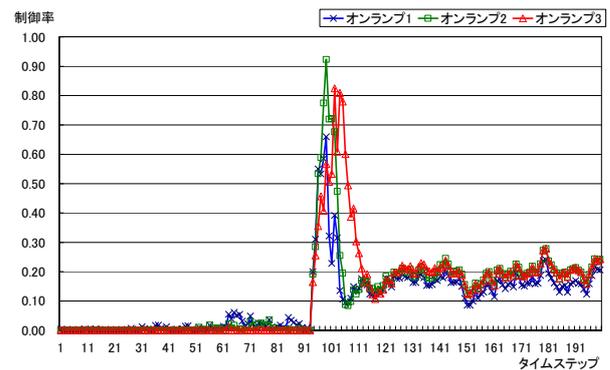


図-7 流入制御率(事後制御:15分)

#### 4. おわりに

本研究ではリアルタイム観測データを活用した、LP タイプの動的流入制御モデルを活用し、数値計算を通じて本研究で提案している予防制御と、実際の交通管制にて採用されている事後制御との比較を行った。無制御時と比較して、流入制御が並走する平面街路へ及ぼす影響や、オンランプ前の待ち時間損失を考慮してもなお、両者ともに総所要時間の短縮効果が確認された。さらには、制御の開始時間の遅れが、流入制御効果を減じせしめる要因になることを示唆した。今後の課題として情報提供と連動した流入制御モデルの構築や、近未来の交通状態を予測可能な流入制御モデルの開発などが挙げられる。

#### 【参考文献】

- 1) 森地, 清水: 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, 土木計画学研究・論文集 No.18(2), pp.253-256, 1995
- 2) 朝倉, 柏谷, 山内: 観測データの利用による都市高速道路の動的な LP 制御モデル, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.923-931, 1996
- 3) 楊, 飯田, 宇野: 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
- 4) 宇野, 栗田, 倉内: 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, 2006