【土木計画学研究・論文集 Vol.24 no.4 2007年10月】

都市高速道路におけるオンライン流入制御モデルの渋滞抑制効果に関する分析*

Effects of On-line Type Inflow Control Model upon Reduction in Traffic Jams on Urban Expressway*

宇野 伸宏**・粟田 大貴***・倉内 文孝****
By Nobuhiro UNO**, Hiroki AWATA***, 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および効率性の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，都市高速道路には良質かつ信頼性の高い交通サービスの提供が求められると考えられるが，その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，ランプからの流出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，情報提供による利用者の合理的な経路選択の促進とともに，主要な管制方策として位置づけられている．

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，渋滞の発生により交通の効率性が阻害されている状況も多く見受けられる．したがって，利用者に対しては良質のサービスを提供し，都市内道路ネットワークとしては効率的な交通処理を行うという観点からは，ETCの普及にかかわらず，今後とも入路における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，LP(Linear Programming)制御の考え方を基礎とし，豊富なリアルタイム観測交通データを有効活用した，動的流入制御モデルを提案する．詳細については後述するが，都市高速道路本線上に設置された車両検知器より得られる交通量および速度の観測値を制御モデルの入力とすることで，各オンランプからの流入需要量の誤差が，制御解に及ぼす悪影響を緩和できる，頑健性の点で優れた流入制御モデルの構築を企図する．本稿の主たるねらいは，次の２つである．

1)本線の観測交通データを基本入力として，それに基づき各時間帯の初期交通状態を設定し制御量を求めるモデル構造を採用することで，流入需要の誤差に対する頑健性が高まるかどうかを検証する．
2)渋滞が顕在化する前に予防的に行う制御（以下，「予防制御」と呼ぶ）と，渋滞発生後に事後的に行う制御（以下,「事後制御」と称する）の効果を，各々本稿で提案するモデルを活用して分析・評価し，各制御方式の特徴をまとめる．

上記1)の研究のねらいについては3章の数値計算が，2)については4章の数値計算が各々対応している．

2. オンラインモデルの概要

(1) 既存研究と本研究の方向性

LP制御については，佐佐木・明神[1]，Wattleworth[2]がその先駆者として理論的研究に着手した．線形計画問題として流入制御問題を定式化することにより，理論的に明快で，かつ，求解性の点でも優れた制御モデルが各種提案されてきた．初期形のモデルでは，高速道路の上の交通状態の定常性を仮定した，いわゆる静的モデルとしての適用が主であったが，制御モデルの本質として，時々刻々の交通状態変化への対応が求められたこともあり，例えば，松井ら[3]，Papageorgiou[4]，森地ら[5]，朝倉ら[6]の研究等，LP制御を基礎として多くの動的制御モデルが提案されてきた．近年では，これらの基礎的な動的制御モデルに関する研究成果を踏まえつつ，実環境下での交通混雑の緩和に対する，動的制御モデルの実効性を示そうとした研究例（Katsialosら[8]，Sunら[9)10)]）が散見される．

本研究の方向性は，上記のそれとは必ずしも一致はしないものの，車両検知器による観測データを明示的に入力として有効活用することで，制御モデルの流入需要誤差に対する頑健性を高め，その実効性の向上を企図しているという点が特色でもあり，かつ，上記の動的流入制御の関する研究の流れと整合する点でもある．なお，本研究は著者を含む研究グループが提案してきた，走行速度制約による渋滞予防を意図したLPタイプの動的制御モデルを先行研

*Keywords :交通管制,流入制御,オンライン観測,都市高速道路
** 正員，博（工），京都大学大学院経営管理研究部
（e-mail: uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp ）
*** 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

究としつつ，観測交通データの活用によるモデルの頑健性向上という点について改良をはかったものである[7]．

(2) オンライン制御モデルの特色

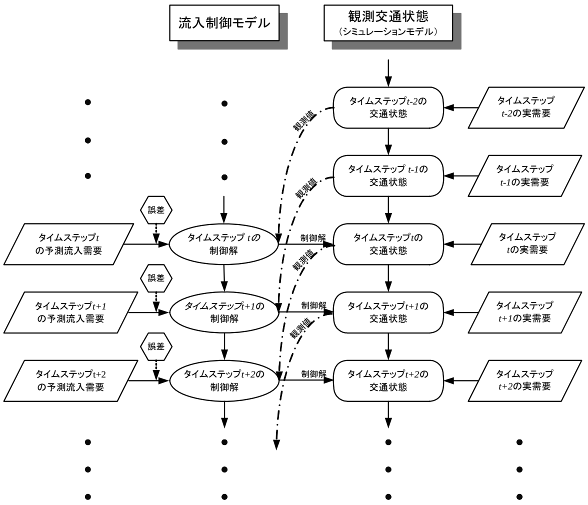
本研究では都市高速道路上に設置された観測機器より収集されるオンライン観測データを有効活用した流入制御モデルを利用している．ここでは，都市高速道路本線上の渋滞の予防・緩和に資する LP（Linear Programming）タイプのオンライン制御モデルの概要を述べるが，そのためには操作変数である各オンランプからの流入可能量と各リンクの交通状態を関連づけ，本線上の混雑に対するオンランプからの流入交通の影響度を予測することが必要となる．

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，流入需要の正確な予測は今後の技術進展を勘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（交通密度，速度，交通量データ等）の方が相対的に精度が高いと考え，対象時間帯以前に流入した交通の影響は，いくばくかの時間経過の後に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* でのリンク *a* の交通状態を予測する際には，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予測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 章および 4 章では，仮想ネットワークに対する数値計算を通じ，提案する LP タイプの動的流入制御モデルの有効性の検証を試みるが，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．例えば，タイムステップ *t* の実交通状態をシミュレーションにより代用することになるが，このとき，実需要と求めた制御解を入力として用い，タイムステップ *t* の交通状態を計算する．このタイムステップ *t* での観測交通状態（シミュレーション結果）は，タイムステップ *t+2* の制御モデルの入力として利用されることとなる．このようなフィードバックループを本研究では想定している．



図−1 流入需要・制御モデル・シミュレーションの関係

(3) 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．

$$\max \sum_i \bar{d}_i^r U_i^r \tag{1}$$

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

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

r ：制御対象タイムステップを表す添え字($r \in R$)
R ：制御対象タイムステップの集合
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（所与）
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 Uo_i^r の最低保証値（所与）
$U_{Max,i}$ ：最大処理能力（台/分）（所与）
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 の流入交通量（制御モデル内で予測）
Y_l^r ：リンク l の流出交通量（制御モデル内で予測）
L_l ：リンク l の長さ（km）
K_l^r ：リンク *l* の交通密度（台/km）（制御モデル内で予測）

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 (km/分)（所与）
V_l^{r+1} ：タイムステップ $r+1$ リンク l の予測速度（km/分）

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，許容サービス水準以上の速度維持を求めている．本研究では，動的な交通状態変化を前提として流入制御モデルを構築している．リンクからの流出交通量については，その交通量の値だけでは，自由流，渋滞流のいずれと対応しているか明確に分類できない．そこでリンク交通量がリンク容量以下というリンク容量制約条件に代えて，リンク走行速度制約条件を導入している．

(4) 制御モデル内の交通状態予測の方法

制御解算出のため，式 (3) で必要となるリンク流出・流入交通量（X_l^r，Y_l^r）を予測する．検知器による観測データを活用し（X_l^r，Y_l^r）を予測すると，仮に予測流入需要に誤差が含まれ，本線の混雑度を過大／過小評価する可能性がある場合でも，数タイムステップ後には，観測データにより実際の交通状態が制御モデルに反映されることで，この誤差が制御解に及ぼす影響の緩和が期待される．

ここでは代表的にタイムステップ r のリンク流出交通量 Y_l^r の予測式について述べる．なおリンク l への流入交通量 X_l^r についても，算出の基本的な考え方は Y_l^r と同様であるので，本稿では説明を割愛する．

$$Y_l^r = \sum_{k=0}^{1}\sum_{i}^{I} E_{1il}^{(r-k)r} U_i^{r-k} + \sum_{m}^{L} E_{2ml}^{(r-1)r} W_m^{r-1} \quad (4)$$

$E_{1il}^{(r-k)r}$ ：タイムステップ r-k のオンランプ i の流入交通のうちタイムステップ r にリンク l から流出する割合（リンク流出影響係数 1）．
$E_{2ml}^{(r-1)r}$ ：タイムステップ r-1 冒頭にリンク m 上に存在している交通のうちタイムステップ r にリンク l へ流出する割合（リンク流出影響係数 2）
W_m^{r-1} ：タイムステップ r-1 冒頭の時点にリンク m に残存している交通量（観測値，ただし本研究ではシミュレーション結果により代用）

右辺第 1 項の k であるが，$k=0$ は 2(2)で述べた a)の影響に対応し，求解対象の U_i^r がリンク l の交通状態に及ぼす影響を表す．$k=1$ は b)の影響に対応し，前ステップの制御解が及ぼす影響を表す．第 2 項の計算では観測交通データ（速度・交通量）を利用しており，データ処理時間を考慮して，タイムステップ r を基準として r-2 の観測値により r-1 冒頭の残存交通量 W^{r-1}_m を算出する．

観測交通データの活用について具体的に説明する．この数値計算例では，車両検知器により設置箇所の速度及び交通量を計測すると仮定している．車両検知器は一つのリンク内に数個設置されていると仮定し，これらの値の平均をリンク平均速度としている．次式よりリンク l の密度を求める．

$$K_l^{r-2^*} = Q_l^{r-2^*} / V_l^{r-2^*} \quad (5)$$

Q_l^{r-2*} ：タイムステップ r-2 間に，リンク l の車両検知器で観測された通過交通量
V_l^{r-2*} ：タイムステップ r-2 間に，リンク l の車両検知器で観測された時間平均速度

ここでタイムステップ r-1 冒頭のリンク l の時間平均速度 V_l^{r-1}，密度 K_l^{r-1} がタイムステップ r-2 間に観測された上記の値に等しいと仮定する．すると，タイムステップ r-1 冒頭のリンク l 上に存在する交通量 W_l^{r-1} は次式で表される．

$$W_l^{r-1} = K_l^{r-2*} \cdot L_l = K_l^{r-1} \cdot L_l \quad (6)$$

L_l ：リンク l の長さ

以上のように制御対象タイムステップ r の前ステップ r-1 冒頭時点の交通状態 V_l^{r-1} 及び W_l^{r-1} を，オンライン観測交通データを用いて推定し，制御モデルの入力データとして利用する．

式(4)で用いられている影響係数は，基準地点（オンランプ i・リンク m）を通過する 1 台の車両が時間遅れを伴って下流側リンク l に到達する割合を記述する交通流動パラメータである．求解時点を r とすると，基準地点通過車両の下流側への移動軌跡をタイムステップ r-2 の観測速度に基づき描くことで得られるリンク通過割合と，当該地点の通過交通の目的地選択率を乗じて算出される．リンク通過割合の算出方法については，参考文献 7)に詳述されているので，こちらを参照いただきたい．

3. オンラインモデルとしての頑健性検証

(1) 前提条件

本章では，1 章で述べた本研究のねらいの 1)に対応する数値計算を行う．すなわち，オンライン観測される都市高速道路本線上の交通状態に基づき，初期状態を設定し，逐次 LP 制御の問題を解くモデル構造を取ることで，流入需要の誤差に対する制御モデルの頑健性が認められるか否かを数値計算に基づき分析する．なお，本章で想定している制御は，1 章で述べた「予防制御」である．数値計算用ネットワークを**図-2** に，ネットワーク条件を含む数値計算に関する各種設定条件を**表**

-1 に示す．本数値計算では，流入需要の予測誤差が制御解に及ぼす影響を端的に示すことが求められるため，各オンランプからの流入交通のオフランプ選択率は，時間的に変化しないと仮定した．このオフランプ選択率に基づき，各オンランプからの流入交通のリンク利用率を算出した結果を**表-2** として示す．交通状態記述用のモデルとしては，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．

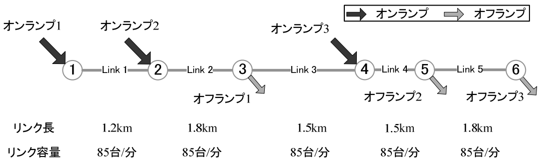


図-2 数値計算用ネットワーク

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）	シミュレーションモデルの更新時間間隔
自由走行速度 v_{free}	1.52（km/分）	=91.2（km/h）
臨界速度 v_0	0.76（km/分）	
臨界密度 k_0	111.8（台/km）	=85（台/分）／0.76（km/分）
ブロック長 dL_j	0.30（km）	＞1.52（km/分）×10.0（秒）（高速道路）
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 $UMax_i$	48（台/分）	1 ブースあたり 12（台/分）×4 ブース

表-2 各オンランプのリンク利用率

オンランプ	リンク1	リンク2	リンク3	リンク4	リンク5
1	1.0	1.0	0.7	0.7	0.2
2	0.0	1.0	0.6	0.6	0.2
3	0.0	0.0	0.0	1.0	0.5

本数値計算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，都市高速道路に流入できるまでオンランプ前で待機すると仮定している．そのため，流入制御解の適用結果を評価する際にも，被制御車両の待ち時間も明示的に考慮する．

上述の通りにリアルタイム観測データを活用した，実用的な流入制御モデルの構築を本研究では目的としている．この様な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，既述の通り流入需要誤差が制御解に及ぼす影響の緩和も期待される．本章の数値計算では，特にこの流入需要データに誤差が見込まれる場合を想定し，流入制御の効果を検証する．大別して 2 つのケースの数値計算を行う．一つは流入需要のピークを見誤るケース（3(2)節）であり，他方はランダムな誤差が含まれるケース（3(3)節）である．

(2) 需要のピークを見誤るケース

本節では，流入需要のピークを実際より遅く見積もるケースを想定する．流入需要の予測値と実需要の関係を**図-3** に示す．このケースでは流入制御モデルの入力としては誤差を含む予測需要を与える．交通シミュレーションの入力としては，a)制御が必要との解が得られたタイムステップでは，制御解と実需要の小さい方の値，b)制御が不要との解が得られたタイムステップでは実需要そのものを採用する．なお，本章の数値計算では制御により都市高速道路に流入できなかった交通は，オンランプ手前で待機すると仮定している．そのため，待機交通が存在する場合には，上記 a)および b)の実需要は，当該タイムステップの実需要に待機交通を加算したものに置き換えて計算を行う．

図-4 は算出された流入制御率，**図-5** は制御解を適用した場合の都市高速道路上の交通密度，そして**図-6** は比較対象としての無制御時の交通密度を各々示す．**図-5** および**図-6** は列方向がタイムステップを行方向が都市高速道路のリンクを表しており，密度の時空間変化を示している．

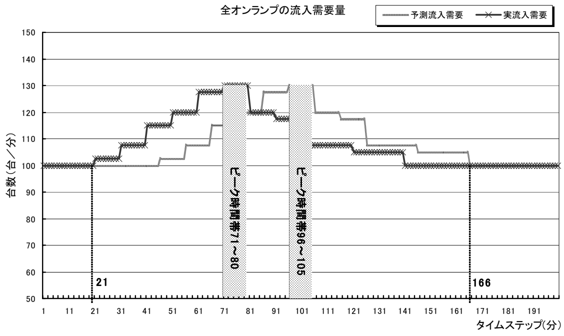


図-3 実需要と予測需要（ピークを遅く見積もるケース）

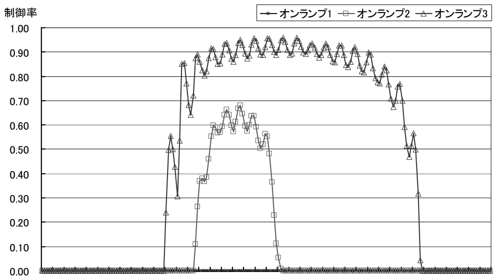


図-4 流入制御率（ピークを遅めに予測）

図-4 の流入制御率は当該タイムステップの流入需要（オンランプ待機台数含む）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-4** より予測流入需要がピークを迎える（タイムステップ 96～105）より早い段階で流入制御が開始されており，**図-5** 及び**図-6** とあわせ見ると，流入需要のピークを遅く見積もるという予測の失敗にもかかわらず，流入制御がある程度有効機能し，都市高速道路本線に関しては円滑な交通状態が維持されてい

ると見受けられる．

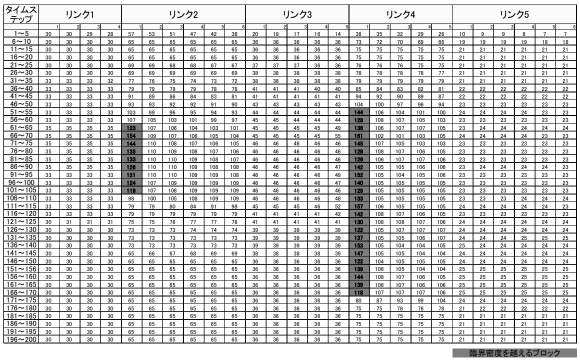


図-5　密度の時空間変化（ピークを遅めに予測）

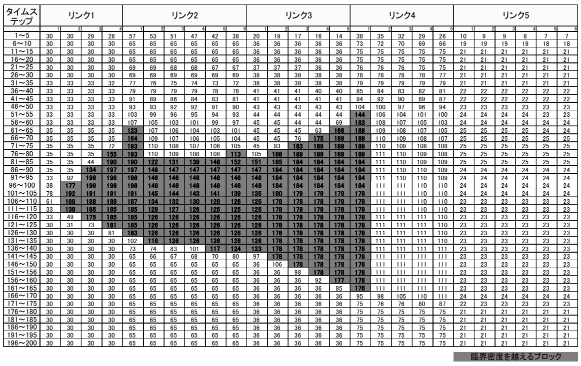


図-6　密度の時空間変化（無制御時）

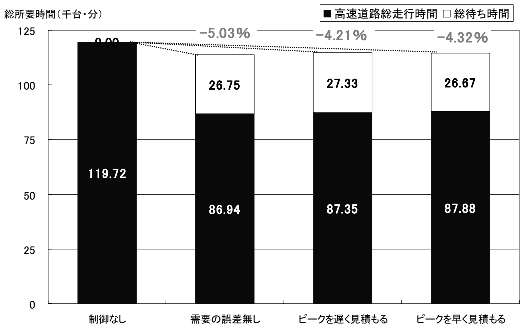


図-7　総所要時間の比較

図-7 は無制御時を基準として，流入制御実施時のオンランプ待ち時間を含む総所要時間の変化を示す．この図では上記ケースに加えて，流入需要のピークを早く見積もるケースも示す．予測流入需要誤差が無い場合よりは，僅かながら総所要時間が長くなる傾向にあるが，流入需要の誤差が生じるケースでも，無制御時と比して総所要時間の点で改善が認められる．本章での数値計算は，単純な構造を持つ仮想ネットワークを対象としており，設定した流入需要についても限られたケースにとどまっている．しかしながら，本数値計算の結果に依れば，流入需要のピークを読み違えた場合でも，被制御車両の待ち時間を含めて 4.2～4.3%の総所要時間の削減が認められており，本研究で提案したオンライン観測交通データを活用した流入制御モデルが，流入需要の誤差に対しても一定の頑健性を有する可能性が示された．

(3) ランダムな誤差を仮定するケース

本節では流入需要誤差を平均 1，標準偏差（σ）0.05，0.1，0.15，0.2，0.25，計 5 ケースの正規乱数を予測需要に乗じて表現し，誤差の大小と流入制御効果の関係を数値計算に基づき分析する．図-8 はオンランプ毎の予測流入需要を示す．なお$\sigma = 0.05$では予測誤差がほぼ真値の±10%の範囲内に収まるが，$\sigma = 0.25$では±50%の範囲に出現することとなる．

ここではオンランプ待ち時間を含む総所要時間に着目し，需要誤差と制御効果の関係の分析する．図-9 は乱数の初期値を変化させて 10 回計算した時の総所要時間の平均値を示し，その内訳を表-3 に示す．

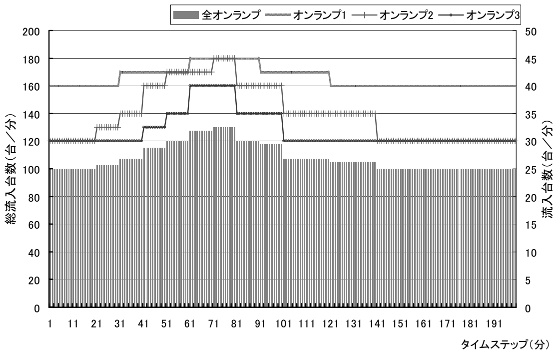


図-8　各タイムステップの予測流入需要

表-3　総所要時間の内訳

制御なしの場合			単位(千min・台)
種類	総所要時間	総走行時間	平均待ち時間
誤差なし	119.72	119.72	0.00
σ=0.05	122.84	122.84	0.00
σ=0.1	123.98	123.98	0.00
σ=0.15	126.57	126.57	0.00
σ=0.2	128.61	128.61	0.00
σ=0.25	127.42	127.42	0.00

制御ありの場合			単位(千min・台)
種類	総所要時間	総走行時間	平均待ち時間
誤差なし	113.70	86.95	26.75
σ=0.05	114.75	87.27	27.48
σ=0.1	117.70	87.93	29.77
σ=0.15	122.19	88.76	33.44
σ=0.2	125.56	89.27	36.29
σ=0.25	129.18	90.23	38.95

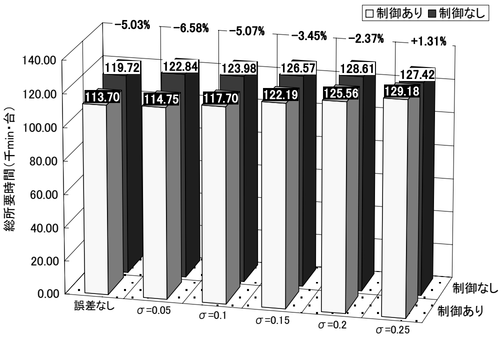


図-9　各ケースにおける総所要時間の比較

$\sigma = 0.05 \sim 0.2$ では制御による総所要時間の短縮が確認される．$\sigma = 0.10$では無制御時と比較して，5%余り，$\sigma = 0.20$でも 2.4%弱，各々総所要時間（被制御車両の待ち時間を含む）が相対的に小さくなっている．ただし誤差の増大に伴い総所要時間から見

た効果は漸減している．$\sigma = 0.25$ では無制御時と比して+1.3%と，むしろ所要時間が増大する傾向にある．**表-3** より誤差増大に伴い総走行時間も増加するが，伸び率では待ち時間の増加傾向がより顕著である．予測需要誤差のため，本来制御が不要な場合にも流入抑制されるケースがあり，その結果待ち時間増につながると考えられる．以上より，ある程度までの流入需要誤差に対して，提案した制御モデルは，頑健性を有しており，制御実施により交通状態の改善が期待できることが分かった．単純な構造を持つ仮想ネットワークに対する数値計算であり，かつ設定需要パターンも限定されているので，断定的なことはいうことは難しい．しかしながら，流入需要の予測に関しても，相当程度の精度が確保されないと，流入制御モデルが有効機能しない可能性があることも，数値計算例を通して同時に示唆されている．

4．予防制御と事後制御の比較分析

(1) 前提条件

本章の数値計算では，1 章で述べた本研究のねらいの 2)に対応する数値計算を行う．すなわち，「予防制御」と「事後制御」の効果を，本稿で提案した動的流入制御モデルを用いて分析する．本章ではあるタイムステップの被制御車両は，オンランプ前の許容待ち台数に収まる場合は，以後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としている．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．そのため，数値計算用のネットワークも**図-10** に示すものを用いることとする．これは，**図-2** に示したネットワークに迂回用の平面街路リンクを追加したものである．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に依存している．ネットワーク条件を含む数値計算の諸条件を，**表-4** に示す．

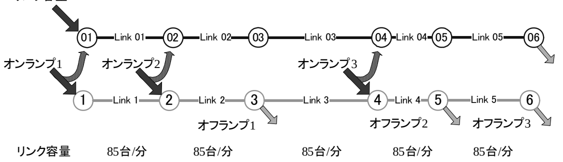


図-10 数値計算用ネットワーク

表-4 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_j		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 $UMax_i$		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 Rs_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)

本章でも 3 章の予測流入需要(**図-8**)を用いつつ，オンラインデータを活用した制御モデルの特徴を示すため，流入需要にランダムな誤差が存在すると仮定する．誤差の与え方については，3(3)と同様として，乱数の標準偏差は $\sigma = 0.1$ とする．これは 3 章の数値計算によれば，本研究で提案した制御モデルが十分に機能し得る誤差の大きさである．この場合，需要のおよそ 7 割が真値に対して±10%の誤差範囲に収まることとなる．

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．そこで本章の数値計算においては，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∞，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∞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．

(2) 事後制御の定義

本章の数値計算では，流入制御を実施するまでの時間経過に着目し，事後制御を定義することとする．ここで事後制御については，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，速度 30km 以下の交通状態の継続時間が，15 分および 30 分のケースを設定し，予防制御との差別化を図った．

(3) 数値計算結果

ここでは，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-11** 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-5** に示す．

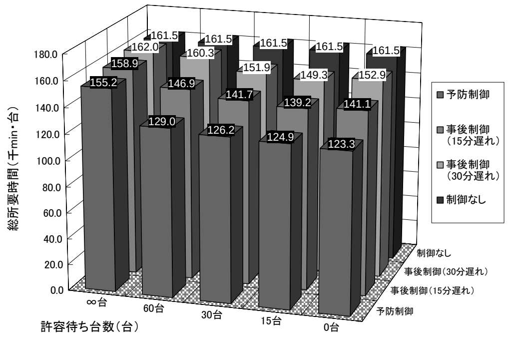


図-11 各ケースにおける総所要時間の比較

表-5 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）	∞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）	∞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）	∞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-11 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，予防制御の方が総所要時間の短縮が見込めること，そして事後制御については，制御開始時間が 30 分と遅いケースの方が，効果が小さい（総所要時間が増加する）ことが分かる．制御を実施した 3 つのケースに着目すると，予防制御については，許容待ち台数が 0 台の時に総所要時間が最小となるが，事後制御の 2 ケースでは，許容待ち台数 15 台の時に総所要時間が最小となる．事後制御の 2 ケースでは，許容待ち台数を 0 台に設定すると，都市高速道路上の渋滞を緩和するため，多くの交通が平面街路を利用せざるを得ない制御解が得られたと考えられる．加えて，この数値計算例では，平面街路の交通処理能力が高速道路のそれよりも大きく劣る設定になっており，その結果事後制御については，許容台数 0 台のケースの総所要時間が 15 台の時よりも増加したものと推察される．

自明のことではあるが，この数値計算の結果は，流入需要の設定，高速道路ならびに平面街路のネットワークの性能の設定により影響を受けると考えられ，本研究では限定されたケースの数値計算にとどまっている．しかしながら，数値計算の結果より，一定程度の待機スペースの存在が，平面街路への負荷を軽減しつつ，高速道路上の交通状態改善に資する制御につながる可能性が示唆されているといえる．

以下では，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）の計算結果を比較する．**図-12**，**図-13** 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を示す．

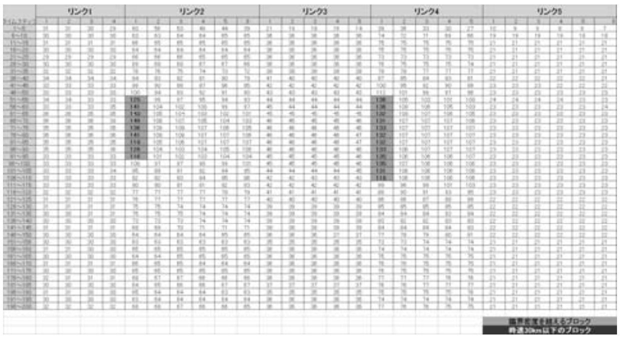


図-12 密度の時空間変化（予防制御）

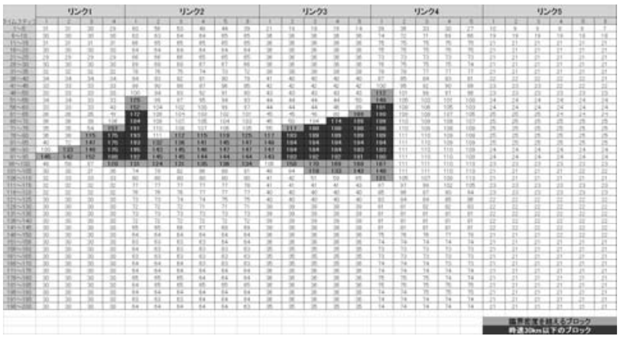


図-13 密度の時空間変化（事後制御:15 分）

図-12 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．一方，事後制御実施時の交通密度の変化を示した**図-13** 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（図中では混雑状態がリンク 1 の最上流まで達した時点）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，事後制御の適用によっても相当程度の渋滞回復効果が認められる．

5. 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構築し，数値計算によりその有用性を評価した．検知器から得られるリンク交通データを重視したモデル構成とすることで，交通状態の変化に即応でき流入需要誤差が見込

まれる場合にも，ある程度有効な流入制御が可能との結果を得た．すなわち本モデルは，流入需要誤差に対して頑健な制御を実施する上で有用と言える．

また，本研究で提案した動的制御モデルを利用して，より大きな制御効果が見込まれる予防制御と，実際の都市高速道路の交通管制にて多く採用されている事後制御との比較分析を行った．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，予防制御・事後制御の両者ともに総所要時間の短縮という正の効果を及ぼす可能性が高いことが確認された．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，ならびに，オンランプ前の待機スペースの存在が事後制御においては，平面街路への負荷を軽減し，都市高速と平面街路トータルでの制御効果を高める可能性があることを示唆した．

今後の研究課題としては，本研究で得られた知見をより一般化するため，対象ネットワークならびに流入需要の設定を変化させ，数値計算を行うことを挙げることができる．また，本研究で提案した動的制御モデルを実規模ネットワークに展開すること，交通管制手法の両輪の一つである「情報提供」と連動した流入制御モデルを構築することも今後の研究課題と考えている．

【参考文献】

1) 佐佐木綱, 明神証：都市高速道路における流入車制御理論，交通工学，Vol.3, No.3, pp.8-16, 1968.
2) Wattleworth, J.A.: Park-Period analysis and control of a freeway system, Highway Res. Rec., No.157, pp.1-10, 1967.
3) 松井寛，佐藤佳郎：都市高速道路の動的流入制御理論に関する研究，土木学会論文集, No. 326, pp.103-114，1982
4) Papageorgiou, M.: A New Approach to Time-of-day Control Based on a Dynamic Freeway Traffic Model, Transportation Research, Vol.14B, pp.349-360, 1980
5)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，土木計画学研究・論文集 No.18(2)，pp.253-256，1995
6)朝倉康夫，柏谷増男，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
7)楊暁光，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
8) Katsialos, A and Papageorgiou, M.: The Traffic Amelioration Potential of Freeway Network Ramp Metering Control, Advances in Control, Communication Network and Transportation Systems, edited by E. H. Abed, Birkhauser, pp.283-303, 2005
9) Sun, X. and Horowitz, R.: Localized Switching Ramp-Metering Controller with Queue Length Regulator for Congested Freeways, Proceedings of the 2005 American Control Conference, IEEE. vol. 3 pp.2141-6 vol. 3, Portland, Or, Jun. 8-10, 2005
10) Sun, X. and Horowitz, R.: Localized Switching Ramp-Metering Control With Queue Length Estimation And Regulation And Microscopic Simulation Results, Proceedings of the 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005

都市高速道路におけるオンライン流入制御モデルの渋滞抑制効果に関する分析

宇野伸宏・粟田大貴・倉内文孝

本研究では，LP 制御の考え方を基礎とし豊富なリアルタイム観測交通データを有効活用した，動的流入制御モデルを提案する．都市高速道路本線上に設置された車両検知器より得られる交通量および速度の観測値を制御モデルの入力とすることで，各オンランプからの流入需要量の誤差が，制御解に及ぼす悪影響を緩和できる頑健性の点で優れた流入制御モデルを構築する．仮想ネットワークに対する数値計算に基づき，1)提案した動的流入制御モデルが，流入需要の誤差に対して頑健性を有するか否かを明らかにするとともに，2)予防制御と事後制御の効果を，提案する動的流入制御モデルを活用して分析・評価し，各制御方式の特徴をまとめる．

Effects of On-line Type Inflow Control Model upon Reduction in Traffic Jams on Urban Expressway

By Nobuhiro UNO, Hiroki AWATA, Fumitaka KURAUCHI

This study proposes a LP type inflow control model using real time observations on link traffic condition of urban expressway. This study is aimed at building a dynamic inflow control model of which inputs are traffic density and speed observed by detectors, and evaluating the applicability of the inflow control model from the viewpoints of robustness against the error included in the predicted inflow demand. Some numerical experiments for hypothetical network suggests that the proposed inflow control model may be effective to mitigate congestion on urban expressway, even if the traffic control system fails to correctly predict inflow demand.