

# 都市高速道路の流入制御モデルの発展経緯と今後の展開\*

## A Review of Inflow Control Models for Urban Expressway and Expected Subjects\*

宇野伸宏\*\*・倉内文孝\*\*\*・石井康裕\*\*\*\*・石橋照久\*\*\*\*\*・大藤武彦\*\*\*\*\*

By Nobuhiro UNO\*\*・Fumitaka KURAUCHI\*\*\*・Yasuhiro ISHII\*\*\*\*・Teruhisa ISHIBASHI\*\*\*\*\*・Takehiko DAITO\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

都市道路網の基幹インフラである都市高速道路については、緊要かつ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、一般道路を含めた都市道路交通の円滑性・効率性の維持・確保が重要な課題であるため、交通管制システムの高度化が不可欠と考えられる。アクセス制限された都市高速道路では、ランプからの流入の調整により、高速道路利用台数を比較的容易に制御可能であるため、オンランプでの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、主要な交通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、料金所付近の渋滞は減少傾向にあるが、本線上の合流部・サグ部等のボトルネックでは、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。利用者に対して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、今後とも交通状況に応じた高速道路利用交通の調整が必要と考えられる。また、首都高速道路、阪神高速道路は距離に応じた料金への移行を検討している。従来型のオンランプでの流入制御は均一料金を前提とした制御の考え方であるため、料金制度の変更はその制御のあり方にも影響を及ぼすと考えられる。

本稿では、都市高速道路を取り巻く状況の変化を踏まえつつ、流入制御の効果的・効率的な実施支援を目指して開発されてきた流入制御モデルに着目し、既存の研究成果を体系的に整理する。そして流入制御モデルに期待される役割および今後の検討課題・方向性について討議するための素材を提供することを目的とする。

### 2. 流入制御モデルの発展経緯

都市高速道路の利用台数を直接的にコントロールで

きる入路閉鎖・開口ブース数制限による流入制御手法は、自然渋滞の予防の観点から見れば、その効果が明らかであり、適切な制御パターンを策定するための手法の開発研究が多く行われてきている。J.A.Wattleworth<sup>1)</sup>や佐佐木・明神等<sup>2)</sup>は本線上の各区間の容量制約の下で、高速道路利用台数を最大化する問題を定式化し、これを解くことで制御解を求める流入制御手法を提案した。この問題は線形計画問題(Linear Programming)として定式化され得るため、一般にLP制御と呼ばれている。LP制御は理論的に明快であり、都市高速道路の運営者の制御方針を目的関数により反映することができ、さらに求解も比較的容易である。そのためより実用的な制御手法の開発を目指して、LP制御を基礎とした多くの改良モデルがこれまで提案されてきた。例えば明神等<sup>3)</sup>はオンランプでの待ち行列制約を考慮したモデルを開発し、都市高速道路本線とともに、オンランプの待ち行列に起因する平面道路の自然渋滞の予防も企図している。またオンランプでの実際の流入調整は入路閉鎖、開口ブース数制限方式が一般的であることから、許容ブース数の決定を整数LPにより求めた井上等<sup>4)</sup>の研究もある。このほかYuan等<sup>5)</sup>、Wang等<sup>6)</sup>、Chen<sup>7)</sup>によっていくつかのLP制御手法の改良型が提案されている。また近年の都市高速道路ネットワークの拡大に対応すべく、利用者の経路選択を利用者均衡問題として明示的に取り入れ、2レベル最適化問題として定式化した流入制御モデル<sup>8)</sup>も提案されている。

一方、LP流入制御手法では、ネットワーク上の交通状態ならびにランプ流入交通の時間的変化が一定と見なせる定常状態を仮定しているため、その適用範囲に制限が加えられることとなる<sup>9,10)</sup>。実際のところ流入制御手法がその効力を発揮する場面は、ネットワーク上の交通状態が自由流状態から臨界状態へと遷移していく過程であり、何らかの制御方策が実施されなければ、渋滞が発生・延伸する可能性が高い状況である。すなわち、渋滞の予防・緩和を図り、都市高速道路の効率的運用を促すためには、交通状態が非定常な場合にも適用可能な流入制御手法を構築することが必要と考えられる。

そこで松井等<sup>11)</sup>、Wang<sup>12)</sup>、Isaksen等<sup>13)</sup>は流入需要ならびに本線の交通状態の時間変動を考慮するため、動的流入制御手法の開発を試みてきた。これらはLP制御手法と比較して、モデル構造の複雑化と計算量の増加を伴う

\*キーワード：交通制御, ITS, サービス水準

\*\* 正員, 博士(工), 京都大学大学院経営管理研究部  
(京都市西京区京都大学桂Cクラスター, TEL075-383-3234,  
E-mail uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

\*\*\* 正員, 博士(工), 岐阜大学工学部社会基盤工学科

\*\*\*\* 正員, 阪神高速道路(株)情報システム部

\*\*\*\*\* 正員, 阪神高速道路(株)計画部

\*\*\*\*\*正員, (株)交通システム研究所

ため、制御モデルとしての実用性、操作性等の点で課題が残されている。そのため近年では、理論的な明解さと実用性を兼ね備えたLP制御モデルを動学化する試みが、Papageorgiou<sup>14)</sup>、松井等<sup>9)</sup>によって行われている。これらの研究では交通フローの空間的分布を明示することで、流入交通が時々刻々本線上の各区間に及ぼす影響を考慮可能な制御モデルを提案している。しかしながら、本線上の走行速度一定の仮定を設けているため、流入需要の急変時等には十分対応できないという課題もある。最近では交通データの収集技術、コンピュータ性能の進展を背景とした、動的流入制御モデルの開発が盛んに行われている。朝倉等は観測データの利用を前提とした動的LP制御モデルを提案している<sup>10)</sup>。また森地等は交通シミュレーションと遺伝的アルゴリズム(GA)による最適化問題を組合せたリアルタイム制御手法を提案している<sup>15)</sup>。また、桑原等は動的システム最適配分を適用し動的マージナルコストを評価指標に用いて、高速道路と一般街路の双方の総費用の減少可能性について分析している<sup>18)</sup>。

楊・飯田・宇野はLP制御モデルを基礎として流入交通需要と本線上の交通状態の時間変化を明示的に考慮できる動的LP流入制御モデル<sup>16)</sup>を提案している。このモデルは数分から数十分を流入制御の単位時間として、流入制御が必要な期間を複数のタイムステップに分割し、流入需要に応じた各タイムステップの流入可能量をLPとして求めるものである。このモデルではさらに、交通状況の悪化を防止するための制約条件として、リンク容量制約条件に加え、リンク走行速度制約条件を用いている。リンク容量制約条件では、 $q-v$ 関係から明らかのように、あるひとつの交通流に対して2つの走行状態（自由流状態・渋滞流状態）が存在するため、リンクの通過交通量が容量以下という制約条件は渋滞領域まで対象とすると、実質上意味を持たなくなる。その点リンク走行速度制約条件を用いれば、交通状態と走行速度が1対1に対応しているため、渋滞領域でも有効と考えられる。

しかし、このモデルでは制御対象タイムステップにおけるネットワーク上の交通状態を、制御モデル内で算出した前タイムステップの制御解により表わしており、流入制御モデル内で推定された交通状態が実際のネットワーク上でも再現されるという前提条件が必要となる。実際にはこのような前提条件は成り立たず、例えば実際の流入需要と予測された流入需要量（制御モデルへの入力データ）とに差異が生じるケースや、実際の交通状態を完全にモデル化できないことにより推定交通状態と実際の交通状態とが一致しないケースなどの発生が考えられる。このような状況で制御解を逐次求めれば、モデル内で推定している交通状態と実際の交通状態の乖離が大きくなり、制御が的確に行われなくなる可能性も考えられる。一方ITS時代の到来とともに、道路ネットワーク上にも

先進的な計測機器やセンサーが多数設置されている。今後は豊富な動的交通データのリアルタイム利用を前提とした、交通制御手法の開発が一層望まれると考えられる。

### 3. 観測交通データを用いた動的流入制御モデル

#### (1) オンライン流入制御モデルの概要

2章では豊富な動的交通データの有効活用を前提とした流入制御モデルの必要性について触れた。本稿の第一・第二著者を含むグループは、LPタイプのオンライン流入制御モデルを提案してきた。この主な狙いは、1) 豊かかつ高質の観測値が得られる本線の交通状態に関するデータを活用し、頑健な流入制御モデルの構築を目指すこと、2) 渋滞発生時点との時間差（制御タイミング）が流入制御の効果に及ぼす影響の評価を試みることであり、オンライン流入制御モデルの構造的な特徴について、図-1を用いて概説する。

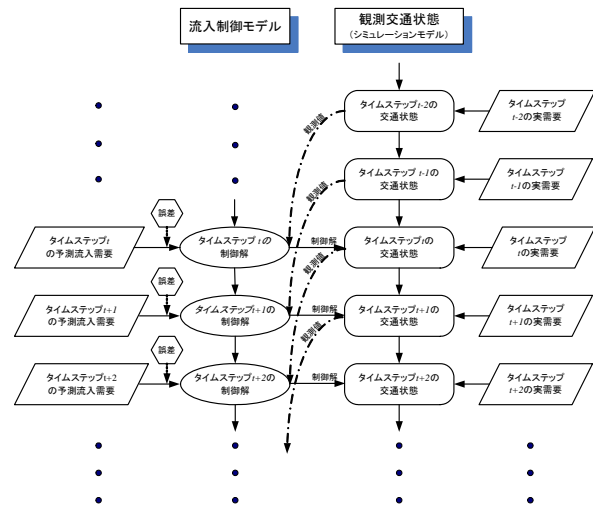


図-1 流入需要・制御モデル・シミュレーションの関係

いま、タイムステップ $t$ の流入制御解を求めることを想定する。そのため、タイムステップ $t+1$ でのリンク $a$ の交通状態を制御モデルにて予測することが必要となるが、その際、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。

モデル構造であるが各タイムステップの総流入台数最

大化を目的関数として、オンランプ流入可能交通量 $U_i^t$ をタイムステップ毎に逐次的に線形計画問題により求める。制約条件としては、渋滞の予防・解消のための条件であるリンク走行速度制約と流入需要に関する制約条件を設ける。なおリンク走行速度制約条件は、次タイムステップにおける予測走行速度が許容速度以上を維持するという条件であり、図-1に基づき制御解である $U_i^t$ と本線上の観測交通量を説明変数として、走行速度を予測する構造を想定している。なお、本章で述べるLPタイプのオンライン流入制御モデルについては、参考文献17)に詳述している。モデルの定式化、計算条件及び結果の詳細については、上記文献をご覧ください。

## (2) オンライン流入制御モデルを用いた数値計算例

本節では、LPタイプのオンライン形流入制御モデルを用いた数値計算例を2例紹介し、この種の流入制御モデルを構築することの有用性について議論する。

### a) 流入需要の誤差に対する頑健性

本項では図-2に示す仮想ネットワークを対象として、流入需要誤差を平均1、標準偏差( $\sigma$ ) 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25の計5ケースの正規乱数により表現し、誤差の大小と流入制御効果の関係性を分析するための数値計算を行う。LP制御問題を解くには流入需要を与える必要があるが、この需要の適切な予測は難しい課題である。ここでは流入需要には誤差があることを前提として、流入制御モデルの効果を数値計算により分析する。図-3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 $\pm 10\%$ の範囲内に収まるが、 $\sigma=0.25$ では $\pm 50\%$ 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性を分析する。図-4は乱数の初期値を変化させて10回計算した時の総所要時間の平均値を示す。

ここで $\sigma=0.05\sim 0.2$ 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、各々待ち時間を含む総所要時間が相対的に小さくなる。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。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を引き起こし、総所要時間の増大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可能性があることが分かった。

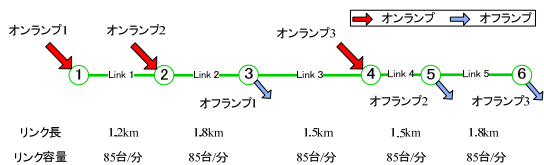


図-2 数値計算用ネットワーク

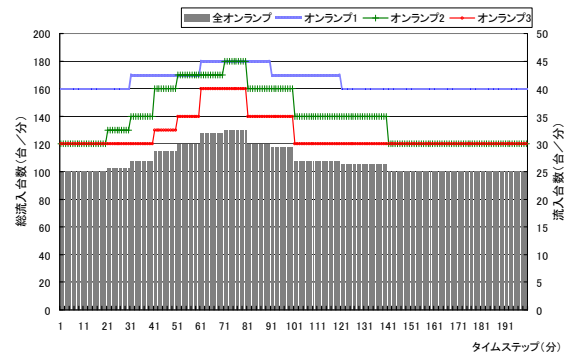


図-3 各タイムステップの予測流入需要

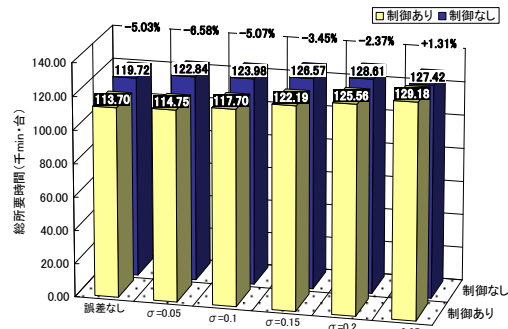


図-4 各ケースにおける総所要時間の比較

### b) 流入制御実施タイミングの影響

阪神高速道路では入路閉鎖ブース制限方式による流入制御が、これまで実施され渋滞の緩和・解消促進に効果をあげている。これまで広く実施されている方式は、渋滞発生確認後に、制御効果の大きな入路からの流入交通を抑制する、いわゆる事後制御方式である。この場合、渋滞検知から制御実施までの時間差により、制御効果が影響されると考えられる。一方利用者及び関係機関のコンセンサスを得ることが困難であるため、その実現は難しいが、渋滞発生を予見し制御を開始する予防制御についても、流入制御効果を計るベンチマークとして、机上検討の対象として含めることとする。ここで流入制御モデルに期待される役割の一つとして、制御タイミングと制御効果の関係性を分析するための数値計算例を提供する。

ここでは図-5に示す都市高速と並行する一般道路から成る、単純な仮想道路ネットワークを対象とする。予測流入需要については前出(図-3)のものを用いる。オンライン流入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し、乱数の標準偏差は $\sigma=0.1$ とする。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の有無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。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、流入制御が与える効果を分析する。図-6は乱数の初期値

を変化させ10回計算した総所要時間の平均値を示す。

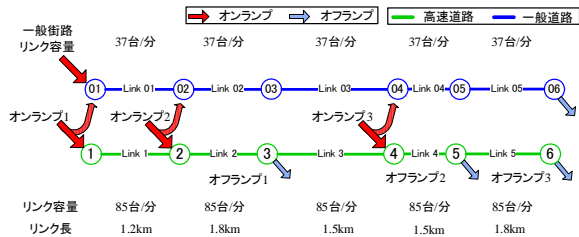


図-5 数値計算用ネットワーク

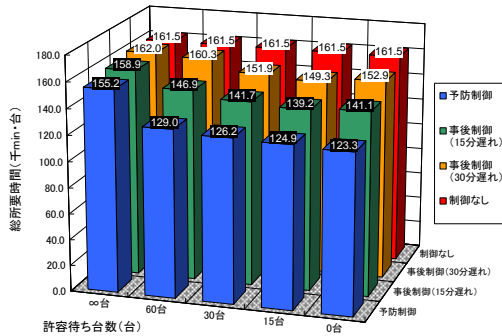


図-6 各ケースにおける総所要時間の比較

図-6より、いずれの許容待ち台数ケースでも無制御時と比較して、流入制御の実施により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、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。なお、3章の内容はあくまでも仮想ネットワークを対象とした結果であり、その普遍性は現段階ではあるとは言えない。しかしながら、流入制御モデル活用の必要性を示唆するための例題として本稿で記述したものである。

#### 4. 制御モデルに関する課題

2章で概説した流入制御モデルの既存研究には、高速道路(株)(旧公団)と研究者との協力関係の中で築きあげられたモデルも少なくなく、実際の交通管制の現場にも一定の影響を及ぼしてきたと考えられる。しかしながら、流入制御モデルが交通管制の現場で十分に活用されるレベルにまで成熟しているとは言い難い点もある。その理由として次の課題をあげることができる。

a) 流入制御モデルの適用に必要な入力値の収集・予測のための方法論開発が不十分である。例えば3(2)で述べたが、LP制御モデルを用いて流入可能量を求めるた

めには、流入需要の予測値が必要不可欠となる。

b) 上記a)とも関連するが、流入制御モデルが必ずしも十分な精度レベルにはなく、現場の管制官の判断とは必ずしも整合しない解を算出する可能性がある。今後は、上記の課題に対する対応を積み重ねていくことが、流入制御モデルが実際の交通管制の現場で利用可能なものとなるために必要である。

一方、冒頭でも述べたが距離に応じた料金の導入により、これまでの流入制御モデルの枠組みを、大きく見直すが必要になると考えられる。距離制料金の導入により、高速道路上に渋滞が発生すると、状況によっては渋滞区間の利用を回避し、一般道路を利用し、その後高速道路に再流入する利用者等も出てくる可能性が考えられる。今後は流入制御に加えて、リアルタイム情報の提供の影響も考慮に入れて、新たな制御方式およびモデルの構築を進めていくことが望まれる。

#### 参考文献

- 1) Wattleworth, J.A.: Peak Period Analysis and Control of a Freeway System, Highway Res. Record, No.157, pp.1-10, 1967.
- 2) 佐佐木綱, 明神証: 都市高速道路網における流入制御理論, 交通工学, Vol. 3, No.3, pp.8-16, 1968.
- 3) 明神証, 坂本破魔雄, 岩本俊輔: 流入待ち行列を考慮したLP制御, 交通工学, Vol.10, No.4, pp.15-23, 1975.
- 4) 井上矩之, 辻本賀一, 多和健一: 整数LPを用いた高速道路ブース数制御, 土木計画学研究・講演集, No.11, pp.133-140, 1988.
- 5) Yuan, L.S. and Kreer, J.B.: Adjustment of Freeway Ramp Metering Rates to Balance Entrance Ramp Queues, Transportation Research, No.5, pp.127-133, 1971.
- 6) Wang, J.J. and May, A.D.: Computer Model for Optimal Freeway On-ramp Control, Highway Res. Record, No.469, pp.16-25, 1973.
- 7) Chen, C.I., Gruz Jr., J.B. and Paquet, J.G.: Entrance ramp control for Travel rate maximization in expressways, Transportation Research, Vol.8, pp.503-508, 1974.
- 8) 飯田恭敬, 朝倉康夫, 田中啓之: 複数経路を持つ都市高速道路網における最適流入制御モデルの定式化と解法, 土木学会論文集, No.449/IV-17, pp.135-144, 1992.
- 9) 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, 土木学会土木計画学研究・論文集, No.10, pp.95-102, 1992.
- 10) 山内敏通, 朝倉康夫: 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.
- 11) 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.
- 12) Wang, C.F.: On a Ramp-flow Assignment Problem, Transportation Science, Vol.6, No.2, pp.114-130, 1972.
- 13) Isaksen, L. and Payne, H.J.: Suboptimal Control of Linear System by Augmentation with Application to Freeway Traffic Regulation, IEEE, Transportation Automation Control., Vol.AC-18, No.3, pp.210-219, 1973.
- 14) Papageorgiou, M.: A New Approach to Time-of-day Control Based on a Dynamic Freeway Traffic Model, Transportation Research B, Vol. 14B, pp.349-360, 1980.
- 15) 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, 1996.
- 16) 楊曉光, 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, 113-126, 1998.
- 17) 宇野伸宏, 栗田大貴, 倉内文孝: 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, 土木計画学研究・論文集, Vol.24, pp.835-342, 2007.
- 18) 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, 土木学会, 2001.01