

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*

LP Type Dynamic On-Ramp Control Model on Urban Expressway Using Observed Traffic Data

朝倉康夫^{**}, 柏谷増男^{***}, 山内敏通^{****}

by Yasuo ASAKURA, Masuo KASHIWADANI, Toshimichi YAMAUCHI

1. はじめに

都市高速道路の交通管制システムは、利用者に対する交通情報の提供とランプ流入制御などの交通制御を組み合わせ運用されている。平常時の交通制御の目的は自然渋滞の予防にあるが、交通流が定常状態か非定常状態かによって制御方式は異なっている。

定常状態とは、制御対象であるランプ流入量や高速道路本線上の交通量の時間的変化が一定とみなせる状態である。したがって、定常状態に対する制御は、制御を実施したことによる交通流の乱れが少ないと仮定できるような巨視的な観点から見た制御である。定常状態に対する制御理論は、ランプ流入量を線形計画法(LP)により決定するLP制御理論を中心に展開されてきた。

佐佐木・明神⁽¹⁾によって提案されたLP制御モデルは、高速道路の区間交通量がその区間の容量を上回らないという条件の下に、高速道路流入台数(あるいは高速道路の延べ利用距離)が最大になるようなランプ流入量を決定するもので、次のように定式化される。

$$Z = \sum_{i \in I} X_i \rightarrow \max. \quad (1.a)$$

sub. to

$$\sum_{i \in I} Q_{ia} X_i \leq C_a \quad \forall a \in A \quad (1.b)$$

$$X_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (1.c)$$

ここに、 X_i : オンランプ*i*からの流入量(台/単位時間)、 Q_{ia} : ランプ*i*から流入した1台の車がリンク*a*を利用する割合(影響係数)、 C_a : リンク*a*の容量制約(台/単位時間)、 A : 制約リンクの集合、 I : オンランプの集合である。

*Keywords: 交通制御, 交通量観測, 都市高速道路

** 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科

*** 正会員 工博 愛媛大学 教授 工学部環境建設工学科

**** 正会員 工修 愛媛県庁 御荘土木事務所

〒790松山市文京町 TEL.089-927-9829, FAX.089-927-9843

LPによる流入制御方式はモデル定式化が簡潔であり、基本的な構造を保ちつつ現実的な制約(たとえば待ち行列長制約)を付加することが容易であるという利点を持っているため、実際の制御システムにも組み込まれて活用されている。LP制御モデルの展開は、飯田 et al.⁽²⁾やPapageorgiou⁽³⁾に述べられている。

LP制御モデルは実用性の高いモデルであるが、交通流の定常性を仮定しているため、その適用範囲には限界があり、モデルの動的な展開が試みられるようになった。たとえば、飯田 et al.⁽⁴⁾は動的配分シミュレーションモデルにより影響係数を更新しながら逐次最適化を行う方法への拡張を提案している。また、揚 et al.⁽⁵⁾はオフランプからの流出待ち行列の影響を考慮した改良を行っている。しかし、いずれの研究も、現時刻に高速道路上を走行している車両による将来時点のリンク交通量や、影響係数の動的な記述は必ずしも十分ではない^{注1)}。

一方、交通流の観測機器・システムなどの発達に伴い、時々刻々と変化するネットワーク上の交通量や走行速度などについての豊富で詳細なデータの入手はますます容易になってきた。近い将来にはAVI(Automatic Vehicle Identification)や路車間通信システムにより、利用者のODや経路に関するデータも得られる可能性が高い。しかし、これまでに研究されてきた流入制御モデルは、必ずしも豊富な観測データを制御のインプットとして利用することを前提としたものではなく、観測データを十分に活用した制御手法の構築が重要であると考えられる。本研究では、高速道路網上で時々刻々得られる交通流の観測データを用いて、ネットワーク上を走行する車両の時間的変動を記述するとともに、それを従来のLP型の流入制御モデルに組み込むことによって動的な流入制御モデルシステムを開発することを目的としている。以下、2では制御モデルシステムの枠組みと流入制御モデルの定式化について述べる。3では、仮想ネットワークを用いてモデルの数値計算を行った結果について考察する。

2. 制御モデル

(1) モデルの枠組み

本研究で構築する動的なLP型流入制御モデルシステムの全体的枠組を図1に示す。実際の都市高速道路では5分程度の時間間隔で制御変数を更新していることを考慮して、以下で説明する流入制御モデルでも時刻を離散的に表現する。制御時間間隔を Δt とし、時刻 $t \sim t+\Delta t$ の間を時間帯 t と呼ぶ。制御変数は時間帯 t に各ランプ i から流入することができる流入台数（許容流入量 $X_i(t)$ 、単位：台/ Δt ）である。

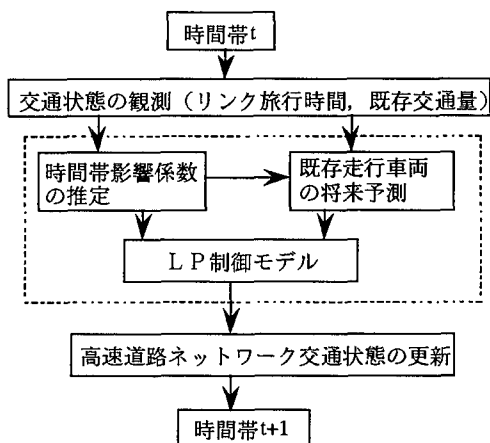


図1 流入制御システムの枠組み

図中の点線枠内が時間帯ごとの許容流入量を決定する流入制御モデルである。このモデルは、時間帯影響係数の推定、現在ネットワーク上を走行中の車両に関する将来予測、オンランプからの許容流入量を決定するLP制御モデルから構成される。

時間帯影響係数 $Q_{ia}(t,s)$ とは、時間帯 t にランプ i から流入した1台の車が時間帯 s ($s > t$)の期末（すなわち時刻 $s+\Delta t$ ）にリンク a に存在する割合であり、従来のLP制御で用いられていた静的な影響係数を動的に拡張したものである。 $Q_{ia}(t,s)$ の作成には直前の時間帯($t-1$)における観測データを用いるものとする。

時間帯 t にネットワーク上を走行している車両が将来時間帯にどのリンクを利用するかを予測するのが既存走行車両の将来予測モデルである。予測には、交通量の観測データと時間帯影響係数を用いる。

LP制御モデルは、時間帯影響係数と既存走行車両の予測値を用いて、将来時点でリンク交通量が容量を上回らないという条件のもとで、高速利用台数を最大にする各ランプの許容流入量を将来の時間帯にわたって求めるモデルである。このモデルはLPにより定式

化される。考慮すべき将来時間帯を $(t, t+1, \dots, t+T)$ とすると、LPモデルを解くことによって、時間帯 t から $t+T$ までのすべての時間帯の許容流入量が計算される。このうち、時間帯 t で制御に用いられるのはその時間帯の許容流入量であり、時間帯 $t+1$ 以降の値は次の時間帯に再び計算される。すなわち、制御モデルは時間帯ごとに逐次計算され、ランプの許容流入量は逐次更新される。

許容流入量に見合う交通が現実の高速道路ネットワークに流入し、交通状態が更新される。その状態が観測され、次の時間帯での制御モデルのインプットデータとなる。なお、制御モデルシステム全体の構造は動的であるが、時間を離散化して扱う動的交通モデルと同様に、時間帯（時刻 $t \sim t+\Delta t$ ）の内部で交通状態の時間変化はないとしている。

(2) 時間帯影響係数

モデル定式化に先立ち、リンク交通量を制御変数である流入交通量の関数として表現するために、時間帯影響係数を求める方法について説明する。時間帯影響係数を求めるには、流入時間帯ごとの目的地選択率、経路選択率、リンク走行時間などが必要となるが、まず、オンランプ、オフランプがそれぞれ1つでODペア間に経路が1本の場合について、ネットワーク上を移動する車群の動きについての考え方を述べる。

最も単純なケースは時間帯 t に流入する車両が1台の場合である。車が時間帯 s の期末にリンク a を走行しているなら時間帯影響係数 $Q_{ia}(t,s)=1$ （ODペアの添字 ij は省略している）であり、リンク a 以外を走行しているなら $Q_{ia}(t,s)=0$ である。オンランプからリンク a までの旅行時間を π_a とすると、 $s-t \leq \pi_a < s+\Delta t-t$ のとき $Q_{ia}(t,s)=1$ である。つまり、流入した車両が将来の時間帯にどのリンクに存在するかを推定するには、リンク旅行時間の将来値を与える必要がある。本研究では、直前の時間帯に観測されたリンク旅行時間をそのまま将来の旅行時間とする。これは、制御が有効に機能するなら自然渋滞は発生せず、交通流が非渋滞流であれば将来時間帯の旅行時間は流入時間帯の値と変わらないと仮定することに他ならない。

つぎに、時間帯 t に複数の車両（車群）が流入するが、車群は時間とともに分散することはないとしよう。車群の大きさを1とすると、時間帯 s に車群の一部がリンク a に存在しておれば $0 < Q_{ia}(t,s) \leq 1$ 、リンク a に存在していなければ $Q_{ia}(t,s)=0$ である。図2において車群を長方形（面積1）で表すと、この長方形は時間とともにその大きさのまま図上では右方向に移動する。車

群がリンクに存在している割合は、この長方形を横軸の旅行時間軸上に投影すれば求められる。図2の時間帯 $t+1$ ではリンク1,2の影響係数が正であり、時間帯 $t+2$ ではリンク2の影響係数が1である^{注2)}。なお、車群の速度は、車群の先頭が存在するリンクの速度とする。また、ひとつの時間帯に車群がリンクを通過してしまうことのないよう最短のリンク長を定めるものとする。

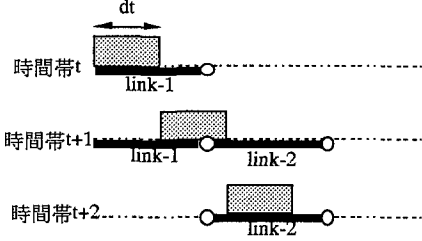


図2 ネットワーク上の車群の移動

複数のオン・オフランプペアと各ランプペア間に複数の経路が存在する場合には、個々の経路ごとに $Q_a(t,s)$ に相当する車群の移動を表す係数を求めて、目的地選択率と経路選択率により重みをつけて集計すれば、時間帯影響係数を求めることができる。すなわち、

$$Q_{ia}(t,s) = \sum_{j \in J_k} \sum_{k \in K_j} P_{ij}(t) R_{ijk}(t) q_{jka}(t,s) \quad (2)$$

である。ここに、 $q_{jka}(t,s)$ はODペア i,j 間の k 番目経路について、時間帯 t に流入した大きさ1の車群(台/ dt)のうち時間帯 s にリンク a に存在する台数の割合、 $P_{ij}(t)$ は時間帯 t にランプ i から流入した車がランプ j へ向かう割合(目的地選択率)、 $R_{ijk}(t)$ はODペア i,j 間について k 番目経路が利用される割合(経路選択率)で、それぞれ次式を満たす。

$$\sum_{j \in J} P_{ij}(t) = 1 \quad (3.a)$$

$$\sum_{k \in K_j} R_{ijk}(t) = 1 \quad (3.b)$$

目的地選択率と経路選択率の値は、観測データから直接得られるかあるいは旅行時間の観測値などから推定できるものとする。たとえば、経路選択率については観測された最新のリンクもしくは経路旅行時間を用いてロジットタイプの経路選択モデルにより選択率を推定することが考えられる。将来的にはAVIなどの車両認識システムによる観測データを用いた時間帯別OD推定手法(たとえば田名部 et al.⁽⁶⁾)の応用や、路車間通信システムにより各ランプで一部または全ての

ドライバーをモニターしその選好を集計することによって目的地や経路の選択率を得る方法なども考えられる^{注3)}。

オン・オフランプ間に経路が1本で流入する車両が1台の場合の説明で既に述べたように、車群の移動を表す係数 $q_{jka}(t,s)$ の将来値を予測するにはリンク旅行時間の予測値が必要である。ここでは最も簡便な方法として、流入時間帯に観測されている最新の旅行時間の値を将来値としてそのまま用いることとする。この場合、リンク旅行時間の値は将来時間帯のいずれでも同じ値をとるので、考慮する時間帯の数が多い場合は精度的に問題があるが、時間帯の数が少ない場合には適用可能であると思われる。一方、旅行時間の時系列観測値から将来値を推定する方法を組み込むことも可能である。しかしながら、いずれの場合でも車群の移動による交通状態の変化が旅行時間の変化に及ぼす影響を考慮することまでは想定していない。制御システムのサブモデルとして動的配分モデルのような交通流予測モデルを組み込むことは不可能ではないが、システム全体の構成がきわめて大規模になることは避けられない。

時間帯影響係数 $Q_{ia}(t,s)$ を用いることにより、時間帯 $t \sim s$ の間に各ランプからそれぞれ $X_i(\tau)$ ($\tau = t, t+1, \dots, s$)の新たな流入があったとき、時間帯 s におけるリンク a 上の存在台数 $F_a(s)$ (単位: 台)は、

$$F_a(s) = \sum_{i \in I_{\tau=t}} \sum_{\tau=t}^s Q_{ia}(\tau, s) X_i(\tau) \quad (4)$$

と表すことができる。式(4)で求められる値が容量を超過しないように流入量を制御するのである。

(3) 既存走行車両の将来予測とリンク容量制約

$Q_{ia}(t,s)$ はオンランプからの流入量とリンク交通量に関係づける係数であるが、同様に二つのリンク間の交通に関係づける影響係数 $Q_{ba}(t,s)$ を考えることもできる。 $Q_{ba}(t,s)$ とは時間帯 t にリンク b を走行している1台の車が時間帯 s にリンク a を利用する割合である。この係数は $Q_{ia}(t,s)$ を求める手順と全く同様の手順で求められる。時間帯 t 以前にネットワークに流入し、時間帯 $t-1$ に各リンクを走行中の台数を $G_b(t-1)$ とすると、それらの車のうち時間帯 s においてなおリンクに残存している台数は、

$$H_a(s) = \sum_{b \in A} Q_{ba}(t-1, s) G_b(t-1) \quad (5)$$

と表すことができる。既存走行台数 $G_b(t-1)$ は観測される台数である。

従来のLP流入制御モデルでは、新たに高速道路へ流入する交通によるリンク容量制約は考えられていたが、既にネットワーク上へ流入している車両の影響は考慮されていなかった。本研究では、既にリンクに存在している車両が将来時間帯にも残存することによって、ランプからの新たな流入交通が利用できる容量が減少すると考えるものとした。既存車両による将来時間帯の残存台数は式(5)で表すことができるから、リンク容量を C_a とすると新たな流入交通が利用できる残存容量は将来時間帯 s には、

$$C_a - \sum_{b \in A} Q_{ba}(t-1, s) G_b(t-1) \quad (6)$$

となる。なお、ここでいうリンク容量はリンク上の収容可能台数であって、通過交通量が最大になるときの交通密度とリンク長との積で表される。

リンク容量制約は、新たな流入によるリンク交通量(式(4))が残存リンク容量(式(6))を上まわらないことであり式(7)で表される。

$$\sum_{i \in I_{\tau=t}} Q_{ia}(\tau, s) X_i(\tau) \leq C_a - \sum_{b \in A} Q_{ba}(t-1, s) G_b(t-1) \quad (7)$$

(4) ランプの流入量に関する制約

従来のLP制御モデルと同様に、時間帯 $t+1$ の新たな流入需要 $\alpha_i(t)$ (台/dt)は別途に予測されているとしよう。流入需要に見合う台数が流入できないなら、単位時間当たりオンランプで新たに $\alpha_i(t) - X_i(t-1)$ の待ち車両が発生する。これらは次の時間帯の流入需要に付加されるから、時間帯 t の流入需要は

$$D_i(t) = D_i(t-1) + \{\alpha_i(t) - X_i(t-1)\}dt \quad (8)$$

と表される。 $D_i(t)$ 、 $D_i(t-1)$ は、それぞれ時間帯 t 、 $t-1$ において積み残しされた待ち台数を加えた流入需要(台)である。

ランプでの流入量に関する制約の一つは、各時間帯の流入量が式(8)で表された流入需要を上回らないという制約であり、式(9)で表される。

$$X_i(t) \leq D_i(t)/dt \quad (9)$$

もう一つの制約は、流入に対する物理的な制約である。ネットワークに余裕があっても、ランプの構造などにより限定された時間内に流入できる台数には上限がある。この値を β_i (台/dt)とすると、流入量は式(10)を満足しなければならない。

$$X_i(t) \leq \beta_i \quad (10)$$

(5) LP制御モデルの定式化

これまでのLP制御モデルで用いられてきた目的関

数は、流入台数の最大化、高速道路延べ利用距離(台キロ)の最大化などである。LPモデルでは許容流入量 $X_i(\tau)$ の線形関数で表現できる範囲であればどのような関数を採用することも可能であるが、ここでは、最も簡明な目的関数として時間帯から $t+T$ までの流入台数の総和の最大化を目的関数とする。できる限り多くの車を高速道路に吸い上げることは、平面街路の混雑緩和にも有効であると考えられる。

制約条件は将来時間帯に新規の流入によるリンク交通量が残存容量以下でなければならないという条件(式(7)で表されるリンク容量制約)、流入量は積み残しにより修正された流入需要量以下でなければならないという条件(式(8),(9))、流入量に対するランプの構造上の制約(式(10))および非負条件である。

これらをまとめると、LP制御モデルは式(11.a)~(11.f)のように定式化できる。

$$Z = \sum_{i \in I} \sum_{\tau=t}^{t+T} X_i(\tau) \rightarrow \max. \quad (11.a)$$

sub. to

$$\sum_{i \in I_{\tau=t}} Q_{ia}(\tau, s) X_i(\tau) \leq C_a - \sum_{b \in A} Q_{ba}(t-1, s) G_b(t-1) \quad \forall a \in A, s=t, \dots, t+T \quad (11.b)$$

$$X_i(\tau) \leq D_i(\tau)/dt \quad \forall i \in I, \tau=t, \dots, t+T \quad (11.c)$$

$$D_i(\tau) = D_i(\tau-1) + \{\alpha_i(\tau) - X_i(\tau-1)\}dt \quad \forall i \in I, \tau=t, \dots, t+T \quad (11.d)$$

$$X_i(\tau) \leq \beta_i \quad \forall i \in I, \tau=t, \dots, t+T \quad (11.e)$$

$$X_i(\tau) \geq 0 \quad \forall i \in I, \tau=t, \dots, t+T \quad (11.f)$$

(6) 交通流シミュレーションモデル

制御モデルを実際の高速道路ネットワークの制御に用いる場合は、実際の観測データを得ることができるので交通流のシミュレーションは必要ではない。しかし、数値計算で制御モデルの挙動や効果を調べる際には、ネットワーク交通流の動的な変化を記述するとともに、交通流の観測データを作成する必要がある。そこで、数値計算では図3のように交通流シミュレーションモデルにより高速道路交通流の変化を代替的に記述するものとする。流入制御モデルで求められた許容流入量は、交通流シミュレーションモデルのインプットとなる。シミュレーションモデルでは交通状況を再現し、それを観測値とみなして次の時間帯の流入制御モデルのインプットとする。

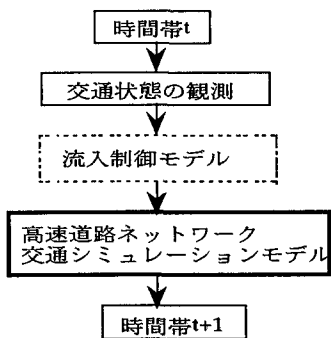


図3 数値計算におけるシミュレーションモデル

用いるモデルはマクロモデルで、車両を目的地別の車群に集約してネットワーク上でその挙動を記述する。リンクとオンランプは図4に示すように複数の同じ長さのボックスに分割され、交通の動態はボックス間の移動によってモデル化する。シミュレーションの単位時間 Δu は、制御の単位時間 Δt の1/10とする。

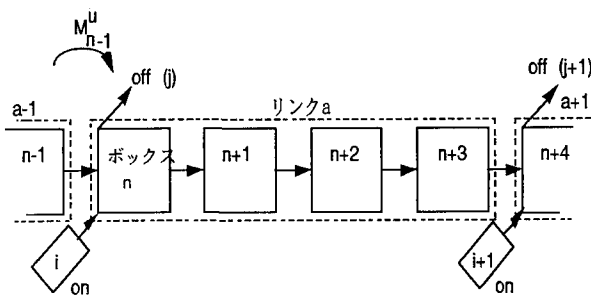


図4 リンクのボックス分割

時間帯 u においてボックス n に存在する車の台数を $W^n(u)$ 、このうち目的地 j へ向かう車両数を $W_j^n(u)$ で表す。ボックス内の交通流の速度 $V^n(u)$ は、 $W^n(u)$ の線形減少関数で表される。上流ボックス n から下流ボックス $n+1$ へ、時間帯 $u \sim u + \Delta u$ の間に移動する台数 $M^{n,n+1}(u)$ は、上流ボックスの車両台数 $W^n(u)$ と下流ボックスの速度 $V^{n+1}(u)$ により式(12)のように求められるとする。

$$M^{n,n+1}(u) = (W^n(u)/L) V^{n+1}(u) \Delta u \quad (12)$$

ここに、 L はボックスの長さ、 Δu はシミュレーション単位時間である。この式は、移動台数(台/ Δt)が上流側ボックスの交通密度と下流側ボックスの速度の積に比例することを意味している。制御モデルで用いる影響係数を作成する際に車群の移動を考えると、車群の先頭の色を取ることに対応させている。

ボックス内部の交通流は目的地別に様に混ざりっているとすれば、目的地(j)別のボックス間移動台数 $M^{n,n+1}_j(u)$ は式(13)となる。

$$M_j^{n,n+1}(u) = M^{n,n+1}(u) \{ W_j^n(u)/W^n(u) \} \quad (13)$$

これらを用いて、次の時間帯のボックスの車両台数は次式によって求められる。

$$W_j^n(u+1) = W_j^n(u) + M_j^{n-1,n}(u) - M_j^{n,n+1}(u) \quad (14.a)$$

$$W^n(u+1) = \sum_{j \in J} W_j^n(u+1) \quad (14.b)$$

オフランプを目的地として移動してくる車両数が流出できる上限値以下であれば、すべて流出できるが、上限値より大きければそれを上回る超過台数はボックスに留まる。ボックス間の移動台数は下流のボックスの速度によって決まるので、オフランプでの流出の際の混雑が上流に波及する現象を記述できる構造になっている。

なお、LP制御モデルから決まる許容流入量をシミュレーションモデルに入力する際には、両者の時間間隔が異なる($\Delta u = \Delta t/10$)ので、図5に示すように許容流入量を等分割する。オンランプからの流入は本線のボックスに余裕がある限り流入可能であり、目的地別の車群として流入する。オンランプから本線へ流入できない車両は流入できるまでオンランプで待つものとする。これらは次の制御時間帯へ積み残される。

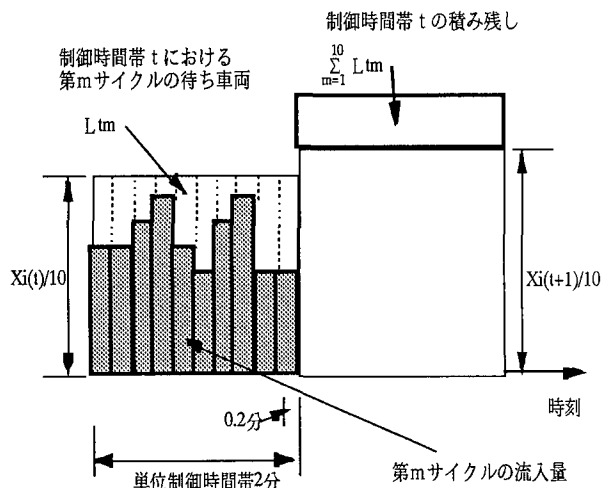


図5 制御モデルとシミュレーションモデルの間の受け渡し

3. 数値計算例

(1) ケース設定

簡単なネットワークを対象として提案したモデルシステムの数値計算を行う。用いたネットワークを図6

に示す。オン・オフランプ間には経路は1本しか存在しない。リンクはすべて一方通行で、リンク長はいずれも2kmである。リンクは500m単位の4つのブロックに分割される。各ブロックに存在できる台数は100台とする。制御時間間隔 Δt は2分とし、シミュレーションの時間間隔 Δu は0.2分とした。

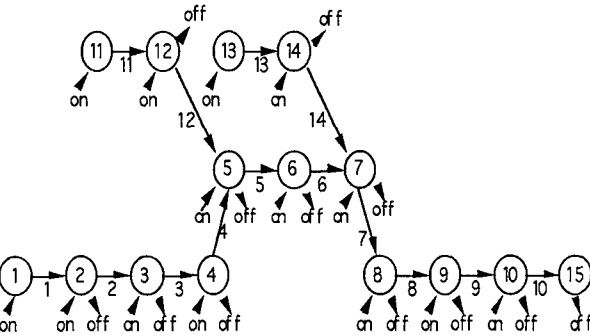


図6 数値計算に用いたネットワーク

流入需要はピーク性を持つものとした。各時間帯の総流入需要($\sum_{i \in I} \alpha_i(t)$)の変化を図7の実線に示す。な

お、各ランプからの流入需要はいずれも均等とした。時間帯影響係数を計算する際の目的地選択確率は、時間帯によらず一定とした。車群の移動を表す係数を求める際に必要となるリンク旅行時間の将来値は、直前の時間帯($t-1$)に観測された値(シミュレーションモデルの計算値)を用いるものとした。

ケース設定は以下の4通りである。

- (A) 制御しない場合
- (B) 静的な制御を行う場合
- (C) 現時間帯のみの容量制約を考慮し制御する場合
- (D) 5時間帯先までの容量制約を考慮し制御する場合

(A)はオンランプでの制御が実施されず、需要に応じて自由に高速道路に流入できる状況に相当する。このケースでは、交通流シミュレーションモデルのみを計算する。

(B)は式(1.a)~(1.c)で定式化されるLP制御モデルを時間帯ごとに逐次計算するものである。影響係数は静的で、既に流入している車両による影響も考慮されない。

(C)は式(11.a)~(11.f)のLP制御モデルにおいて、 $T=0$ とするものである。すなわち、直前の時間帯($t-1$)にリンク上に存在する車両と時間帯 t に新たに流入する車両によるリンク交通量が、時間帯 t にリンク容量を超えないという制約の下に、時間帯 t に流入する車両の総数を最大にするように制御するケースである。このとき式

(11.b)で表されるリンク容量制約は式(15)となる。

$$\sum_{i \in I} Q_{ik}(t, t) X_i(t) \leq C_k - \sum_{b \in A} Q_{bk}(t-1, t) G_k(t-1) \quad (15)$$

(D)は式(11.a)~(11.f)のLP制御モデルにおいて $T=4$ としたケースである。直前の時間帯の観測データから5時間帯先までの影響係数を推定し、将来の5時間帯にわたってリンク交通量が容量を超えない範囲で総流入台数を最大にする流入量を求めるものである。

(2) 数値計算結果

表1に4ケースそれぞれについて1台あたりの本線上の走行時間、オンランプでの待ち時間、走行時間と待ち時間の和を示す。本モデルでは、高速道路のみからなるネットワーク(一般道を含まない)を対象とした数値計算であり、走行時間や待ち時間の最小化を目的とした制御ではないために、制御効果を時間指標で評価することは必ずしも最善ではないが、適切な流入制御が時間短縮効果を生じさせる可能性があることを示す狙いがある。

表1 走行時間と待ち時間の比較(単位:分)

ケース	I. 走行時間	II. 待ち時間	I+II
A	16.50	0.11	16.61
B	7.66	13.18	20.84
C	6.77	7.64	14.11
D	6.74	8.05	14.79

ケースAは制御をしないのでほとんど待つことなしに流入できるが、本線上は混雑するため走行時間は長い。ケースBでは走行時間と待ち時間の和が制御しない場合よりも大きくなり、制御効果が生じていない。この原因は定常的な影響係数にあると考えられる。定常的な影響係数は車がその時間帯にリンクに到達しなくても、ネットワーク上に一様に分布するとみなしているため、必要以上に流入が制限される。その結果、ボトルネックのリンクに隣接する上流ランプには大量の待ち車両が発生し、総待ち時間が増加する。一方、ネットワーク上の残存交通量を無視しているため、流入需要のあるランプが少ない場合にはリンク容量制約は有効に作用せず、これらのランプから大量の流入が許可される。それらが流入することによって混雑が激化し、走行時間もそれほど減少しないのである。

ケースAに比較すると、ケースC,Dはいずれも待ち時間は長くなるものの走行時間が小さくなり、待ち時間と走行時間の和で見ると制御しない場合の85~90%に減少している。ケースCに比べると、ケースDでは走行時間は短くなるが待ち時間がやや長くなり、結果的に

走行時間と待ち時間の和はケースDの方がやや大きい。ケースDでは5時間帯先までの容量制約を考慮しているので、許容流入量が抑制され、待ち時間を指標にするとケースCよりも効率的ではないという結果になったものと考えられる。先に述べたように、本研究で定式化した制御モデルは走行時間や待ち時間の最小化を目的としたものではない。そのことにより、時間指標で比較した場合には、必ずしも動的制御の効果が十分に発揮されないとみなされる場合もあることに注意しなければならない。

図7はケースA,C,Dについてランプからの許容流入台数の和を時間帯ごとに求め、その変化を見たものである。制御しないケースAでは流入需要のままに流入が進むが、 $t=15$ には本線が容量に達するため流入需要をそのまま受け入れることはできなくなっている。ケースC,Dの時間的变化は良く似ており、 $t=11$ で流入制御が始まっていることがわかる。 $T=11\sim18$ の間はかなり流入が抑制されている。 $t=18$ 以降は両者の傾向がやや異なるが、ケースCに比較してケースDの変化のほうはやや安定적であるように思われる。LPの解は制約条件の端点であるために、許容流入量が時間帯ごとに変動することは避けられないが、将来5時間帯先まで考慮したケースDではその変化が多少緩和されるものと思われる。

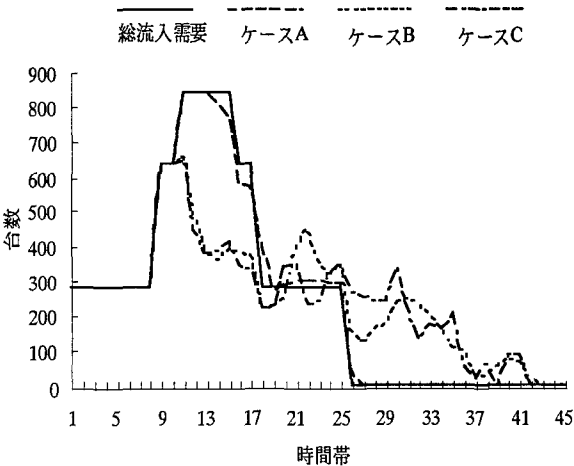


図7 流入台数の時間変化

図8はネットワーク上の存在台数の時間変化を見たものである。ケースC,Dは制御を行わないケースAと比べて存在台数が大幅に押さえられていることがわかる。ピーク時間帯は $t=13$ であるが、このときケースC,Dの存在台数はそれぞれ1708台、1657台であり、ケースDの方がネットワーク上での混雑はわずかではあるが少

ないことがわかる。また、存在台数の時間変化もケースDのほうはやや安定しており、交通流の安定的な変化という意味ではケースCに比較してケースDのほうが見事な結果であるといえる。

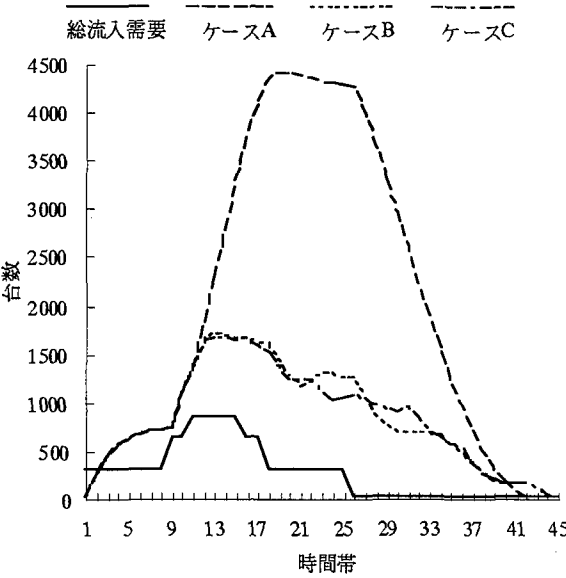


図8 ネットワーク上の存在台数の時間変化

以上の結果から、ここに示したネットワークと前提条件の範囲では本研究で提案したLP制御方式が有効であることが確認できた。しかしながら、この例では将来5時間帯先までを考慮しても著しい差異は見られなかった。原因の一つは、直前の時間帯の観測データから将来時点の車群の移動を予測するため、考慮する将来時間帯の数が多くなれば予測誤差の影響が大きくなるということにあるかもしれない。また、用いたネットワークでは経路が1本しかなく、ケース間の差異が発生しにくいネットワーク構造である可能性もある。これらの点については、今後さらに検討する必要があるものと思われる。

4. おわりに

本研究では、都市高速道路における観測システムの充実によって近い将来に豊富な観測データが入手できるようになることを前提に、定常的な交通流を対象とするLPタイプの流入制御モデルを改良した動的な流入制御モデルシステムを提案した。新たに制御モデルに組み込まれたのは以下の点である。

- (i) 影響係数の概念を動的に拡張し、制御時間帯に流入した1単位の車群が将来時間帯にリンクに存在する割合を求める方法を示したこと。

(ii) 既にネットワークに流入している交通によって占められる将来のリンク容量の減少を考慮できるようにしたこと。

(iii) 流入量に関する制約として、オンランプでの積み残し車両の累積と流入需要の和による上限と、ランプの構造的制約を加えたこと。

提案したモデルの効果を調べるため、新たに開発した交通流シミュレーションモデルと組み合わせた数値計算を行った。その結果、明らかになったのは以下の点である。

(iv) 定常的な影響係数を用いる場合には制御効果が発揮できない場合もあること。

(v) 将来時間帯を考慮すると流入台数や交通流の時間変化が安定すること。

一方、今後に残された課題も少なくない。計算例の中でも述べたが、考慮する時間帯の長さに関係づけて影響係数の予測誤差の影響を調べる必要があるし、実ネットワークへの適用計算を通してモデルの適用可能性を吟味する必要もある。これらの点については今後の課題としたい。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費試験研究(B),(1) (#065555155, 代表: 飯田恭敬京都大学教授) の助成を受けて進めたものである。ここに記して感謝したい。

注1) LPモデルからの展開とは異なるが、ピーク時のように交通量の時間的変化が大きい非定常状態に対しては、これまでから逐次ランプ閉鎖制御や動的制御モデル(たとえば松井・佐藤⁽⁷⁾)が提案されてきた。

最近、森地・清水⁽⁸⁾は遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた動的な流入制御手法を開発したが、制御パターンの組み合わせごとに交通流シミュレーションモデルの計算を行わなくてはならないため、GAによる計算量削減効果が十分に発揮できないという問題点を持っている。

注2) 実際には同じ時間帯に流入した車両がすべて同様に移動するとは限らない。一般に旅行時間が大きくなると長方形の形も時間とともに分散すると考えられる。車群は各車両の速度差等によって前後に分散するから、長方形は時間の経過とともにその面積を保ちながら高さを小さく、長さを大きくしながら変形するであろう。分散の形態を求める明確な方法はないが、たとえばオンランプからの旅行時間に比例して長方形の高さが小さくなると仮定すること(山内・朝倉⁽⁸⁾)が考えられる。前後に伸びた長方形を対応するリンクに

投影し、その部分の面積を求めることによって分散しない場合と同様に影響係数を求めることができる。

注3) 時間帯影響係数を求める際のひとつの問題点は、流入時刻別の経路選択に関する情報の蓄積に必要な記憶量がネットワーク規模の拡大とともに指数的に増大することである。今のところ効率的な記憶方法を提案するには至っていないが、たとえば $q_{jka}(t,s)$ などは極めてゼロ要素の多い係数であるから、必ずしもすべての要素を記憶する必要はない。時間帯の数が多くなければ、流入ランプごとにいくつかの下流区間のみを考慮すれば十分であるから、ネットワーク規模拡大による計算量を削減することは不可能ではないと思われる。

【参考文献】

- [1] 佐佐木綱・明神証(1968) 都市高速道路における流入制御理論. 交通工学, Vol.3, No.3, pp.8-16.
- [2] 飯田恭敬・朝倉康夫・田中啓之(1992) 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/IV-17, pp.135-144.
- [3] Papageorgiou, M. (1991) *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*. Pergamon-Press, pp.285-303.
- [4] 飯田恭敬・金周頤・宇野伸宏(1995) 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.
- [5] 楊曉光・飯田恭敬・宇野伸宏(1995) オフランプの容量制約を考慮した都市高速道路の準動的流入制御法. 土木計画学研究・講演集, No.18(2), pp.249-252.
- [6] 田名部淳・大藤武彦・杉山守久・朝倉康夫(1995) AVIデータを用いた時間帯別路線間OD交通量の推計. 土木計画学研究・講演集, No.18(1), pp.193-196.
- [7] 松井寛・佐藤佳朗(1981) 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.
- [8] 森地茂・清水哲夫(1995) 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・講演集, No.18(2), pp.253-256.
- [9] 山内敏通・朝倉康夫(1994) 観測リンク交通量を用いた道路網交通流の動的推計に関する一考察. JSCE第49回年次学術講演会概要 (IV-436), pp.872-873.

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

朝倉康夫, 柏谷増男, 山内敏通

LPによる都市高速道路の流入制御モデルは、モデル定式化が簡明であるため実際の制御システムにも組み込まれているが、交通流の時間変化が大きい時間帯には適用できない。観測機器やシステムの充実により、近い将来には豊富な観測データが得られるようになることを考慮すると、観測データを十分に活用した制御手法への展開が重要である。本研究では、高速道路網上で時々刻々得られる交通流の観測データを用いて、ネットワーク上を走行する車両の時間的変動を記述するとともに、その結果を従来のLP型の流入制御モデルと組み合わせた流入制御モデルを開発した。仮想的ネットワークを用いた数値計算例を通して、従来のモデルに比較して本研究で提案したモデルシステムの有効性が確認できた。

LP Type Dynamic On-Ramp Control Model on Urban Expressway Using Observed Traffic Data

Yasuo ASAKURA, Masuo KASHIWADANI, Toshimichi YAMAUCHI

Linear Programming type models have been studied for on-ramp traffic control of urban expressway. This paper proposed an extended control model of the steady state LP model so as to describe dynamic aspects of network traffic using the traffic flow data observed by advanced monitoring equipment. Time varying influence coefficient was formulated and the effect of capacity reduction by remaining traffic in the future network was considered in the link capacity constraints. The efficiency of the proposed model system was found in numerical examples.
