

都市高速道路の動的流入制御理論に関する研究

DYNAMIC RAMP-FLOW CONTROL OF URBAN EXPRESSWAYS

松 井 寛*・佐 藤 佳 朗**

By Hiroshi MATSUI and Yoshiro SATOH

1. はじめに

都市高速道路の平常時における流入制御の目的は、本線上で予測される自然渋滞に対し、オンランプで車両の流入を制限することにより、自然渋滞を予防して本線上の車両の円滑な走行を実現することである。特に都市高速道路では、一般の街路と異なりランプ以外からの車の出入りが不可能なため、ランプでの流入制御が効果的に実行できる。またわが国の都市高速道路は、均一料金前払い制を採用しているため、利用者に対し事前に交通サービスを保証する必要がある、この意味でも自然渋滞が予測される場合には、これを防止するための予防的制御が必要となってくる。

このように都市高速道路の交通渋滞の防止と交通流の円滑化には、ランプでの流入量を調整する流入制御が最も実用的かつ効果的な制御と考えられ、従来から多くの研究がなされてきた。J.A. Wattleworth¹⁾、²⁾や佐佐木・明神³⁾は、本線上の交通量が交通容量以下という制約のもとで、高速道路利用台数が最大となるような制御理論を提案した。この制御理論は線形計画法の問題として定式化されるため、わが国ではLP制御とよばれている。さらに明神・坂本・岩本⁴⁾、⁵⁾は実用上の観点から、ランプの流入待ち行列制約を考慮したLP制御を提案している。このほかLP制御に関してL.S. Yuan⁶⁾、J.J. Wang⁷⁾およびC.I. Chen⁸⁾によっていくつかの改良型が提案されている。しかしながら以上の流入制御モデルでは、制御対象となるランプ需要量および本線上の交通量を時間軸に対し一定（したがって速度も一定）と仮定した定常流問題として扱っており、いわば制御自体の影響による交通流の攪乱が無視できるほどに十分長い期間にわたる巨視的な制御解を得ようとするもの

である。しかしながら実際に流入制御が必要となるようなピーク時においては、ランプ需要量は時間的に大きく変動しており、また仮に一定のランプ需要量を与えたとしても、本線上の交通流は流入制御自体の影響を受けて非定常な交通状態を示すはずである。したがって都市高速道路の流入制御問題は、本来非定常な交通流を対象とした動的流入制御問題として扱うべきものと考えられる。動的流入制御に関しては、すでにC.F. Wang⁹⁾、L. Isaksen¹⁰⁾、M. Cremer¹¹⁾およびM. Papageorgiou¹²⁾による研究がみられるが、まだ十分有効な制御理論となり得ていないというのが現状である。

本論文の目的は、以上の背景のもとにランプ需要量とランプ間OD確率が予測可能であるという前提のもとに、都市高速道路本線上で予測される自然渋滞を予防あるいは軽減し、円滑な流れを保証するための、非定常交通流を対象とした動的流入制御理論を提案し¹³⁾、¹⁴⁾、阪神高速道路への適用計算を通して、本流入制御モデルの妥当性と実用性について検討を加えることである。

2. 流入制御モデル

(1) 状態方程式

非定常交通流を対象とした流入制御理論を構築するにあたってまず必要なことは、高速道路本線上の交通流およびオンランプ上の流入待ち行列に関する状態方程式を導入することである。

一般街路上の時間的に変動する交通流の記述モデルとして、著者はすでに連続マルコフ過程に基づく交通流理論を提案しているが¹⁵⁾、本稿でもこの理論を高速道路に適用してみる。まず制御対象となる都市高速道路網を上方向別に m 個の小区間に分割し、各区間に番号 i ($i=1, 2, \dots, m$) を付ける。なお区間区分にあたっては、合流部、分流部、曲線部など道路特性や道路規格が変化す

* 正会員 工博 名古屋工業大学助教授

** 正会員 工修 北海道開発局

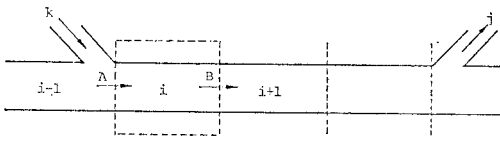


Fig. 1 An elementary segment of expressway.

る箇所では必ず区分線を設けるものとする。さて Fig. 1 に示すように上流側にオンランプをもつ区間 i に注目する。区間 i の区間長を l_i 、時刻 t における交通密度を $x_i(t)$ 、区間 i に接続するオンランプ k からの流入量を $u_k(t)$ 、上流側断面 A での本線交通量を $q_{i-1}(t)$ 、下流側断面 B での本線交通量を $q_i(t)$ としたとき、次式が成立する。

$$l_i \frac{dx_i(t)}{dt} = u_k(t) + P_{i-1,i} q_{i-1}(t) - q_i(t) \quad (l=1, 2, \dots, m) \dots\dots(1)$$

上式は流体における連続方程式に相当するものであり、ここに $P_{i-1,i}$ は区間 $i-1$ から区間 i への推移確率を表わす。この $P_{i-1,i}$ は必ずしも一定である必要はないが、時間軸に対して既知であるとする。なお区間 $i-1$ にオフランプが接続していなければ、常に $P_{i-1,i}=1$ が成り立つ。

さて、走行中の車は常に区間内に一様に分布しているとは限らないが、ここでは交通情報を区間単位としてみるマクロな立場から、いま常に一様に分布していると仮定する。すると $q_{i-1}(t)$ 、 $q_i(t)$ はそれぞれ区間 $i-1$ 、区間 i の交通密度と空間平均速度の積で表わされ、さらに空間平均速度は交通密度の関数形で表わされることから、結局式 (1) は

$$l_i \frac{dx_i(t)}{dt} = u_k(t) + P_{i-1,i} x_{i-1}(t) v_{i-1}(x_{i-1}) - x_i(t) v_i(x_i) \quad (i=1, 2, \dots, m) \dots(2)$$

と書き直せる。ここに v_{i-1} 、 v_i はそれぞれ区間 $i-1$ 、区間 i の空間平均速度で、交通密度の関数形として与えられる。代表的な関数形を Table 1 に示す。

式 (2) は交通密度を状態量とする m 次元連立非線形微分方程式であり、これを解くことにより、本線上の任意の区間の時間的に変動する交通状態を記述できることになる。また区間別の速度-密度曲線の導入によって、区間ごとに最大交通量(区間容量)が定まる。なお区間容量はそれぞれの速度-密度曲線に対応して Table 1 の下欄に示す値をとる。

Table 1 Relationships of speed-density models.

Element	Greenshields	Greenberg	Underwood
v-x curve	$v = v_f(1 - x/x_j)$	$v = v_m \ln(x_j/x)$	$v = v_f e^{-x/x_m}$
Capacity	$v_f x_j/4$	$v_m x_j/e$	$v_f x_m/e$

v_f = free speed, v_m = critical speed, x_j = jam density
 x_m = critical density

さて次にオンランプにおける流入待ち行列に関する状態方程式であるが、これも先と同様に次のように表わせる。

$$\frac{dw_k(t)}{dt} = Q_k(t) - u_k(t) \quad (k=1, 2, \dots, r) \dots\dots\dots(3)$$

ここに $w_k(t)$ はオンランプ k の時刻 t における流入待ち行列台数、 $Q_k(t)$ は同じくランプ需要量である。ここにランプ需要量とは一般街路からオンランプへの流入需要量であるが、待ち行列中の車両は含まれるが、待ち行列をみて流入を断念するような車両については除いて考えている。

(2) 評価基準

流入制御を実施するにあたっては、まず制御目標を明確にし、制御効果が客観的に評価できるような評価基準を設定することが必要である。従来の研究では総利用台数最大化基準や総走行台キロ最大化基準をとった例がほとんどであるが、本稿ではさらに総所要時間最小化基準を加えた以下の3つの評価基準を採用することにした。

○総所要時間最小化基準

これは利用者のオンランプ到着からオフランプ流出までのランプでの待ち時間を含めた旅行時間の総和を最小化するものであり、利用者に対するサービスの最大化を意味すると考えられる。評価関数は次のように表わせる。

$$J_1 \equiv \sum_i \int_0^T l_i x_i(t) dt + \sum_k \int_0^T w_k(t) dt \rightarrow \text{Min} \dots\dots\dots(4)$$

ここに第1項は高速道路本線上の所要時間の総和を、第2項はオンランプでの流入待ち時間の総和を表わす。積分範囲の終端時刻 T は制御時間で、これはあらかじめ与えられるものとする。

○総走行台キロ最大化基準

これは利用者の総走行台キロを最大化する基準であり、したがって短距離利用者比べて相対的に長距離利用者を優先する制御となる。これは都市高速道路の重要な機能の1つとしての、長距離トリップの円滑処理と時間短縮という役割に添うものである。評価関数は次のように表わせる。

$$J_2 \equiv \sum_i \int_0^T l_i x_i(t) v_i(x_i) dt \rightarrow \text{Max} \dots\dots\dots(5)$$

○総利用台数最大化基準

これは一般街路の混雑緩和を目的に、都市高速道路の利用台数を最大にしようとするもので、次のように定式化される。

$$J_3 \equiv \sum_k \int_0^T u_k(t) dt \rightarrow \text{Max} \dots\dots\dots(6)$$

この評価基準は均一料金制という立場からみれば、料金

収入最大化を意味することになる。

(3) 制約条件

上記の流入制御問題においては、ランプ流入量 $u_k(t)$ が制御変数となる。この制御変数は自由にその値をとり得るものではなく、次に示す制約条件を満たすものでなければならない。

$$0 \leq u_k(t) \leq S_k \quad (k=1, 2, \dots, r) \dots\dots\dots(7)$$

ここに S_k はオンランプ k のランプ容量である。すなわちオンランプからの許容流入量はランプ容量以下であること、および非負条件を満足することを意味している。

一方オンランプの流入待ち行列に関しては、次の制約条件が与えられる。

$$0 \leq w_k(t) \leq M_k \quad (k=1, 2, \dots, r) \dots\dots\dots(8)$$

すなわち非負条件および待ち行列制限長 M_k を越えないという条件である。待ち行列制限長の設定は、待ち行列がランプウェイからはみ出して一般街路にまで及び、一般街路の交通に支障を来すおそれのある場合に有効である。

3. 離散型最大原理による解法

前章で定式化した都市高速道路の流入制御問題は、数学的には式 (2) と式 (3) で与えられる状態方程式を満たしながら、評価関数 (4), (5), (6) のいずれかを、制約条件式 (7), 式 (8) のもとで最小化ないしは最大化する最適制御問題となる。ここで状態方程式が微分方程式系で与えられているので、その最適化手法としては Pontryagin の最大原理^{(6), (17)} の適用が考えられる。しかしながら本制御モデルでは状態方程式が連立非線形微分方程式で与えられているため、これを解析的に解くことは困難である。そこで、変数の離散化によるいわゆる離散型最大原理の問題として再定式化し、その解法を示すことにする。

制御時間 T を N 個の適当な微小時間 Δt に分割し、それぞれの時間段階を n とする ($n=1, 2, \dots, N$)。すると式 (2) と式 (3) で与えられる状態方程式は、それぞれ次のような差分方程式に書き直せる。

$$x_i^n = x_i^{n-1} + \{u_k^n + P_{i-1,i} x_{i-1}^{n-1} v_{i-1}(x_{i-1}^{n-1}) - x_i^{n-1} v_i(x_i^{n-1})\} \Delta t / l_i, \quad (i=1, 2, \dots, m) \dots\dots\dots(9)$$

$$w_k^n = w_k^{n-1} + (Q_k^{n-1} - u_k^n) \Delta t, \quad (k=1, 2, \dots, r) \dots\dots\dots(10)$$

ここに x_i^n, w_k^n はそれぞれ交通密度、待ち行列長を表わす n 段階の離散化した状態変数、 u_k^n は同様に離散化した制御変数、 Q_k^{n-1} は離散化したランプ需要量であ

る。

一方、前述の3つの評価関数に対しては、新しい変数 $x_0^n (n=1, 2, \dots, N)$ を導入して書き直すと、

$$x_0^n = x_0^{n-1} + \sum_i l_i x_i^{n-1} \Delta t + \sum_k w_k^{n-1} \Delta t \dots\dots\dots(11)$$

$$x_0^n = x_0^{n-1} + \sum_i l_i x_i^{n-1} v_i(x_i^{n-1}) \Delta t \dots\dots\dots(12)$$

$$x_0^n = x_0^{n-1} + \sum_k u_k^n \Delta t \dots\dots\dots(13)$$

改めて $x_{m+k}^n = w_k^n (k=1, 2, \dots, r)$ と置き換えたうえで式 (9)~(13) を共通形でベクトル表示すると

$$x_i^n = f_i^n(x^{n-1}, u^n), \quad (i=0, 1, \dots, m+r, n=1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots(14)$$

ここに $x^{n-1} = (x_0^{n-1}, x_1^{n-1}, \dots, x_{m+r}^{n-1})'$, $u^n = (u_1^n, u_2^n, \dots, u_r^n)'$ はそれぞれ $n-1$ 段階, n 段階における状態ベクトル, 制御ベクトルである。

また元の評価関数は次のように表現できる。

$$J \equiv x_0^N \rightarrow \text{Min (or Max)} \dots\dots\dots(15)$$

次に離散型のハミルトニアン H^n を次のように定義する。

$$H^n = \sum_{i=0}^{m+r} z_i^n f_i^n(x^{n-1}, u^n) \dots\dots\dots(16)$$

ここに離散型補助変数 z_i^n は次の差分方程式を満足する。

$$z_i^{n-1} = \frac{\partial H^n}{\partial x_i^{n-1}} = \sum_{j=0}^{m+r} z_j^n \frac{\partial f_j^n}{\partial x_i^{n-1}}, \quad (i=0, 1, \dots, m+r, n=1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots(17)$$

本制御モデルは終端時間指定、終端状態未定の最大原理問題であり、状態変数の初期値および補助変数の終端値は、それぞれ次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} x_0^0 &= 0, \quad x_i^0 = X_{i0}, \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ x_{m+k}^0 &= W_{k0}, \quad (k=1, 2, \dots, r) \\ z_0^N &= 1, \quad z_i^N = 0, \quad (i=1, 2, \dots, m+r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

ここに X_{i0} は本線区間の初期交通密度、 W_{k0} はオンランプの初期待ち行列台数を与える。

最後に式 (7), 式 (8) で与えられる制約条件は、それぞれ次のように書き直せる。

$$0 \leq u_k^n \leq S_k \quad (k=1, 2, \dots, r, n=1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots(19)$$

$$0 \leq x_{m+k}^n \leq M_k \quad (k=1, 2, \dots, r, n=1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots(20)$$

上記の問題ではハミルトニアン H^n が u^n に対して線形となるため、その制御パターンはリレー式制御 (bang-bang control) となる。実際にランプ制御を行う立場からみると、オンランプからの許容流入量自体を連続的に制御するよりも、ランプ流入口の開閉を繰り返す2段切替えによる制御方式の方が操作が単純で容易であり、制御技術上からみて好ましいといえる。状態変数自体に制約条件が付加されない場合は、以下に示す制御変数の上

限値と下限値の切換えによる制御となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H^n}{\partial u_k^n} \leq 0 \text{ のとき } u_k^{n*} = S_k \text{ (or } 0) \\ \frac{\partial H^n}{\partial u_k^n} > 0 \text{ のとき } u_k^{n*} = 0 \text{ (or } S_k) \end{aligned} \right\} \dots (21)$$

上式が成立するのは状態変数に対して制約条件のない場合であり、状態変数に制約条件が加わるときの最大原理は一般に問題が複雑となる。ところで最大原理の定理によれば、状態変数が制約条件の内部にある限り、その解は前述の最大原理によって与えられることがわかっている¹⁶⁾。問題は状態変数のトラジェクトリーが制約条件の境界線上に達した場合である。いまここではオンランプ k の待ち行列が n_1 段階から n_2 段階の間その制限値に達した状態を例として考えてみよう。状態変数が制約条件の境界線上にある間は、当然次の等式条件が成立しなければならない。

$$x_{m+k}^n - M_k = 0 \quad n_1 \leq n \leq n_2 \dots (22)$$

このとき同時に式 (10) より次式が成立しなければならない。

$$R_k^n \equiv Q_k^{n-1} - u_k^n = 0 \quad n_1 \leq n \leq n_2 \dots (23)$$

状態変数に対して上のような等式条件が付く場合、補助変数の満足すべき差分方程式は、先の式 (17) に代わって次式で与えられる¹⁸⁾。

$$z_i^{n-1} = \sum_{j=0}^{m+r} z_j^n \left\{ \frac{\partial f_j^n}{\partial x_i^{n-1}} - \frac{\partial f_j^n}{\partial u_k^n} \left(\frac{\partial R_k^n}{\partial u_k^n} \right)^{-1} \frac{\partial R_k^n}{\partial x_i^{n-1}} \right\} \quad (i=0, 1, \dots, m+r, n=1, 2, \dots, N) \dots (24)$$

ただし R_k^n が式 (23) のように状態変数 \mathbf{x}^n に無関係な場合は、結果的には式 (24) は先の式 (17) と同形となり、結局式 (24) から

$$z_{m+k}^{n-1} = z_{m+k}^n \quad n_1 \leq n \leq n_2 \dots (25)$$

が導ける。すなわち、状態変数 x_{m+k}^n が式 (22) で与えられる等式条件を満足する間、対応する補助変数 z_{m+k}^n は一定値をとることを示している。さらに状態変数に制約条件が加わったときの最大原理の特徴として、状態変数のトラジェクトリーがその制約条件の境界線に達したところで、補助変数に跳躍が生じ不連続となることである¹⁸⁾。上の例では n_1-1 と n_1 の境界上で跳躍が生じ、その跳躍幅は $n_2 - n_1 + 1$ で与えられることが導ける。なお制約条件の境界線上にあるときの最適制御解は、式 (23) で決まることはいうまでもない。すなわち待ち行列がその制限値に達すれば、それ以降はランプ需要量分だけ流入させるのが最適制御となる。なおこのときのランプ需要量がランプ容量を越えるときは、与えられた待ち行列制限長内では制御不能を意味する。一方待ち行列に対する非負条件、 $x_{m+k}^n \geq 0$ に対しても同様の結果が得られる。すなわち待ち行列が消滅すれば、それ以降はランプ需要量をそのまま流入させるのが最適制御とな

る。また、いくつかの状態変数が同時に制約条件の境界線上にある場合も同様である。

以上の結果をまとめ、求解のための計算手順を以下に示す。

[手順 1] 式 (19) を満たす範囲で、 $u_k^n (k=1, 2, \dots, r)$ をそれぞれの段階 ($n=1, 2, \dots, N$) において仮定する。

[手順 2] 仮定された u_k^n を用いて、式 (14) より状態変数 $x_i^n (i=0, 1, \dots, m+r)$ を初期値より各段階を遡って $n=1, 2, \dots, N$ まで計算する。

[手順 3] 計算された状態変数のうち、待ち行列台数を表わす状態変数 $x_{m+k}^n (k=1, 2, \dots, r, n=1, 2, \dots, N)$ が式 (20) を満足しなければ、対応する制御変数を $u_k^n = Q_k^{n-1}$ とおき、 $x_{m+k}^n < 0$ のときは $x_{m+k}^n = 0$ 、 $x_{m+k}^n > M_r$ のときは $x_{m+k}^n = M_r$ とおく。さらに、この u_k^n が式 (19) を満足しなければ、再び $u_k^n = 0$ または $u_k^n = S_k$ とおき直す。

[手順 4] 上で得られた u_k^n と x_i^n を用いて、式 (17) と式 (24) より逆時間方向に $n=N, N-1, \dots, 1$ まで $z_i^n (i=0, 1, \dots, m+r)$ を計算する。

[手順 5] 計算された x_i^n と z_i^n を用いて、式 (21) より各段階で H^n を最適化する u_k^n を決定する。この u_k^n を用いて再び x_i^n を計算し、このうち待ち行列台数を表わす状態変数 x_{m+k}^n が式 (20) を満足しなければ、対応する制御変数を $u_k^n = Q_k^{n-1}$ とおき、 $x_{m+k}^n < 0$ のときは $x_{m+k}^n = 0$ 、 $x_{m+k}^n > M_r$ のときは $x_{m+k}^n = M_r$ とおく。さらに、この u_k^n が式 (19) を満足しなければ、再び $u_k^n = 0$ または $u_k^n = S_k$ とおき直す。

[手順 6] 上で得られた u_k^n が計算前の u_k^n とすべて一致すれば計算終了。一致しなければ、[手順 5] で得られた u_k^n を新しい u_k^n として [手順 2] へ戻る。

4. 推移確率の推定

2.(1) で導いた状態方程式において、上流区間から下流区間への交通流の推移状態は推移確率を用いて表わした。この状態方程式によって実際の交通流を精度よく記述するには、この推移確率の与え方が重要な要素となり、その正確な推定が要求される。ところで、流入制御によりオンランプからの流入量が調整されると、その影響で本線上の交通流のランプ間 OD 構成比率に変化が生じるので、必然的に推移確率は制御と無関係ではなくなる。したがって制御解と整合性のとれた形で推移確率を推定することが必要となってくる。ここではランプ間 OD 確率が与えられているものとして、この推移確率の推定法について考えてみたい。

実際問題として各オンランプに到着する交通需要のラ

ランプ間 OD 確率を、時々刻々にとらえることは不可能であり、せいぜい1時間程度の時間帯での平均 OD 確率としてのデータしか得られないとすれば、その時間帯で推移確率も一定と仮定して推定するのが最も現実的である。いま τ 時間帯単位のランプ間 OD 確率が与えられているものとしよう。いま時刻 t ($0 \leq t \leq \tau$) にオンランプ k に到着した車のオフランプ j へのランプ間 OD 確率を p_{kj} で表わす。ここに $\sum_j p_{kj} = 1$ が成立する。また時刻 t におけるオフランプ j からの流出量を $D_j(t)$ で表わす。するとオフランプ j が接続する上流側区間 i の流量 $q_i(t)$ と推移確率 $P_{i,i+1}$ より

$$D_j \equiv \int_0^\tau D_j(t) dt = (1 - P_{i,i+1}) \int_0^\tau q_i(t) dt \dots (26)$$

が成立する。またオンランプ側からみて予想されるオフランプ j の流出量 $\hat{D}_j(t)$ は、ランプ間 OD 確率 p_{kj} とランプ需要量 $Q_k(t)$ を用いて

$$\hat{D}_j \equiv \int_0^\tau \hat{D}_j(t) dt = \sum_k p_{kj} \int_0^\tau Q_k(t - \tau_{kj}) dt \dots (27)$$

と表わせる。ここに τ_{kj} はオンランプ k からオフランプ j までの平均旅行時間（流入待ち時間を含む）である。よって推移確率は式 (26) と式 (27) を等しいと置いて

$$P_{i,i+1} = 1 - \frac{\sum_k p_{kj} \int_0^\tau Q_k(t - \tau_{kj}) dt}{\int_0^\tau q_i(t) dt} \dots (28)$$

なお上式で $\tau_{kj} \ll \tau$ の場合は、 $Q_k(t - \tau_{kj})$ の代わりにさらに簡単に $Q_k(t)$ とおくことができる。上式において τ_{kj} や $q_i(t)$ は制御の結果として与えられるものであるから、制御前にはわからない。そこで次のような計算アルゴリズムにより、繰返し計算によって $P_{i,i+1}$ を求める方法を考える。

- [手順 1] 推移確率 $P_{i,i+1}$ を仮定する。
- [手順 2] 仮定した $P_{i,i+1}$ を用いて制御計算を行う。
- [手順 3] 制御結果より τ_{kj} , $q_i(t)$ を算出し、式(26)、式(27)より D_j , \hat{D}_j を計算する。
- [手順 4] すべてのオフランプにおいて D_j , \hat{D}_j が一致するなら計算終了。そうでなければ式(28)より $P_{i,i+1}$ を求め、これを新しい $P_{i,i+1}$ として [手順 2] に戻る。

なお、実際の計算は先の制御計算の場合と同様に、時間を離散化して行うことになる。

5. 阪神高速道路への適用

(1) 適用計算にあたっての準備

a) 交通量、速度、密度の関係式について

本制御モデルを実際の都市高速道路に適用するに先立ち、先に提案した状態方程式が実際の高速道路上の交通

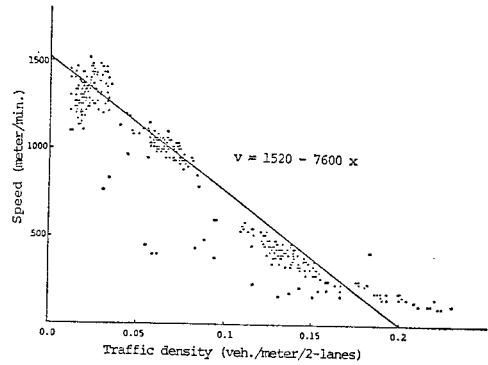


Fig. 2 The speed-density relationship on the expressway.

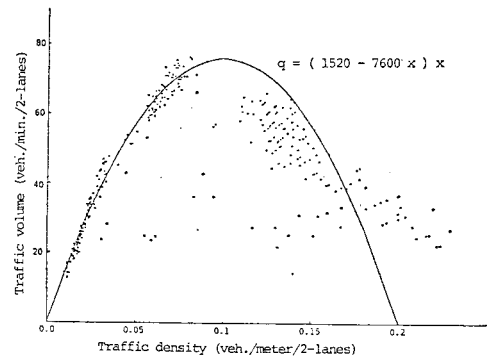


Fig. 3 The volume-density relationship on the expressway.

流的確に表現し得るかどうかをあらかじめ検討してみなければならない。そのためには、まず適合性の高い速度-密度曲線を採用することが重要である。

計算例として取り上げた阪神高速道路空港線上り方向のデータ（昭和55年10月28日、A.M. 7:00~10:00の5分間ごとの交通量、平均速度の実測値、および交通量/平均速度から計算された平均密度）から、速度-密度相関図、交通量-密度相関図を作成してみると、それぞれ Fig. 2, Fig. 3 のようになる。図中にはこの実績データを参考に、交通容量を 76 台/分/2車線 (=2280 台/時/1車線)、飽和密度を 0.2 台/m/2車線とそれぞれ定め、速度-密度曲線を線形に仮定したときのグラフが示されている。これによれば速度-密度相関図 (Fig. 2) においては比較的よく適合しているが、交通量-密度相関図 (Fig. 3) においては特に臨界密度を越える渋滞領域でデータのばらつきがみられ、適合性は必ずしも十分ではない。この傾向は Table 1 に示した他の速度-密度曲線を用いても同様にみられる。しかしながら図中に示した速度-密度関係式の相関係数が 0.91 と比較的高いことから、一応ここでは以下に示す線形関係式を用いることにする。

$$v=1520-7600x \dots\dots\dots(29)$$

ここに速度 v 、交通密度 x の単位は、それぞれ m/分、台/m/2車線である。

b) ランプの最小開閉単位時間について

前述のように最大原理を用いた流入制御モデルは、ランプ流入口の開閉を繰り返すといった bang-bang control となるが、問題はこのランプ流入口を開閉するときの最小開閉単位時間をどの程度にとるかという点である。まず制御効果の面から考察するため、評価基準として総所要時間最小化をとり、区間数 1、オンランプ数 1 の簡単な路線モデルについて、最小開閉単位時間をい

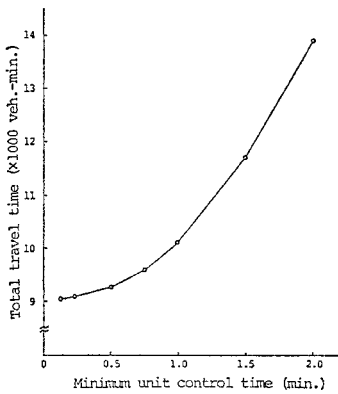


Fig. 4 The relationship between minimum unit control time and the value of the objective function.

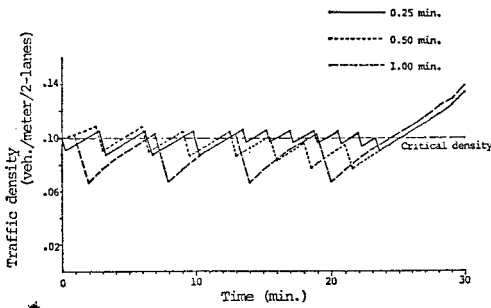


Fig. 5 The fluctuation of traffic density.

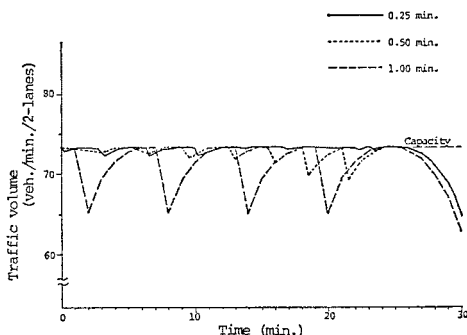


Fig. 6 The fluctuation of traffic volume.

いろに変えて制御計算を行い、評価値と単位時間との関係を求めたところ、Fig. 4 に示す結果を得た。またその制御解による本線交通流の変動状態は Fig. 5, Fig. 6 に示すとおりである。Fig. 4 の結果を考察するならば、開閉単位時間を小さくするほど評価値(総所要時間)は小さくなり、制御効率が高くなることを示している。また Fig. 5, Fig. 6 の結果からは、開閉単位時間を小さくした方が、本線上の交通流の安定性が増すことが明らかになった。しかしながら逆に開閉単位時間を小さくとりすぎると、ランプ開閉に伴うロスが多くなり、また流入待ちの車に混乱を与えることにもなる。したがって開閉単位時間の決定には、制御効率面と交通管理面の両面から総合的に判断して決める必要がある。以下の計算例では一応信号機による開閉を念頭に置きながら、Fig. 4 の結果を参考に最小開閉単位時間を 1 分とすることにした。

e) 区間長と離散化時間間隔について

状態方程式は高速道路本線上の交通状態を、各区間ごとの平均諸量として表わしたものである。また実際の計算は、時間を微小時間間隔 Δt で離散化して解くことになる。したがって実際の交通流の時間変動に対し、状態方程式がどの程度の精度で適合するかは、時間間隔 Δt と区間長 l_i のとり方にも依存してくる。阪神高速道路の 5 分間単位の交通量の実測値と計算値との比較検討から、 Δt を分単位、最小区間の l_i を m 単位にとったとき、 $\Delta t/l_i$ の比が 10^{-3} 以下にとれば、実際の交通流との適合度が良好であることが確かめられた。なお l_i については、これを小さくするほど交通流の変動を局部的に細かくとらえることが可能となるが、それに対応して Δt を小さくとらなければならないが、したがって計算時間が膨大なものとなる。以下に取り上げる計算例では、制御対象区間である池田オンランプから梅田オフランプまでを 8 つに区分することにした。8 区間のうち最小区間長は豊中南オフランプと豊中北オンランプ間の 256 m であることから、 Δt としては 0.25 分 (=15 秒) をとることにした。

d) 実測交通量との適合性

前述の考察結果に基づいて、先に提案した状態方程式が時間的に変動する高速道路上の交通流をどの程度表わすことができるか、実測交通量との比較によって検証を行った。実測により得られた 5 分刻みの各ランプ需要量を入力データとして計算した結果と実測値を比較したものが Fig. 7, Fig. 8 である。Fig. 7 は最上流側区間 S1 の、また Fig. 8 はほぼ中間部に位置する区間 S5 の交通量の変動を示しているが、図に示すように上流側区間の適合度は非常によいが、下流側になるに従って悪くなっている。この理由として下流側になるほど各車の

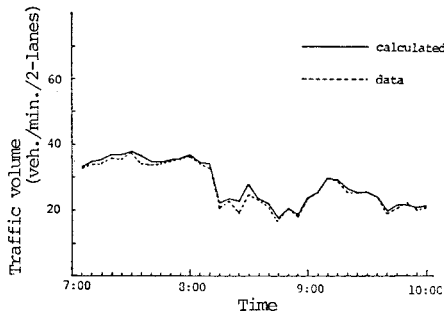


Fig. 7 Traffic volume on Segment 1.

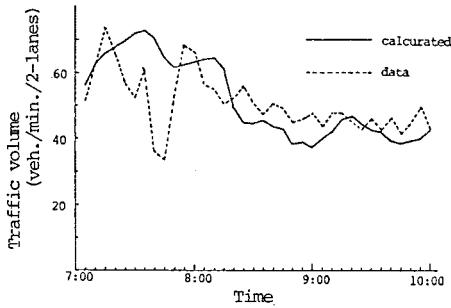


Fig. 8 Traffic volume on Segment 5.

速度のばらつきによる誤差が累積していくこと、区間 S 5 の区間長を大きくとりすぎたこと、およびこの計算例では推移確率の時間変動を考慮しなかったことが挙げられる。なお Fig. 8 において、7:20 から 8:00 の間で実測交通量が大きく落ち込んでいるのは、下流側区間 S 6 で発生した渋滞が上流側区間に広がってきたことによる影響である。つまり式 (2) で提案した状態方程式では下流側からさかのぼってきたような交通渋滞については十分に表現できないことを示しており、この点の状態方程式の改良は今後の課題である。また渋滞領域をうまく表現するという意味では区間長を細分化することも必要となる。

(2) 流入制御モデルの適用と計算結果

a) 対象路線と入力データ

次に本稿で提案した動的流入制御を阪神高速道路に適用した計算例を示す。制御計算は Table 2 に示す 6 ケースについて行った。すなわち評価基準として総所要時

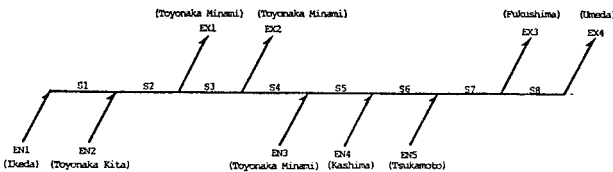


Fig. 9 The expressway system considered in the example (Hanshin Expressway Osaka-Ikeda Route).

Table 2 Variation of control.

	Objective Function	Queue length condition
Case 1	Min. the total travel time	no limitation
Case 2		constrained
Case 3	Max. the total amount of vehicle-kilometers	no limitation
Case 4		constrained
Case 5	Max. the total amount of vehicles	no limitation
Case 6		constrained

間最小、総走行台キロ最大、および総利用台数最大の 3 通り、およびそれぞれの評価基準について流入待ち行列制限のある場合とない場合である。対象路線は阪神高速道路空港線上り方向 (大阪市内方向) 延長約 12.2 km の区間で、その形状を Fig. 9 に示す。対象区間は池田オンランプから梅田オフランプに至る 8 区間で、この間に 5 つのオンランプと 3 つのオフランプが存在する。区間長は上流側から順に $l_1=1\ 097\ m$, $l_2=2\ 213\ m$, $l_3=1\ 034\ m$, $l_4=256\ m$, $l_5=3\ 081\ m$, $l_6=1\ 525\ m$, $l_7=1\ 887\ m$, $l_8=1\ 149\ m$ である。対象区間は片側 2 車線の同一規格の道路構造であるが、実際には単路部、分流部、合流部などでそれぞれ異なる容量をもち、特に隘路部となるのは合流部と考えられる。しかしながら今回の計算例ではこれら区間ごとの容量を算定に必要な実測データが得られなかったため、全区間にわたり実測データから作成した式 (29) で与えられる速度-密度曲線を用い、したがって本線容量は全区間一律に 76 台/分/2 車線と仮定した。よってこの計算例では全体的に実際よりいくぶん容量が過大となっている点に注意したい。またランプ容量については、同様に実測データに基づく容量算定式の作成ができなかったため、一応最上流側の池田オンランプのみ $S_1=76$ 台/分と一定とし、他のオンランプについてはそれぞれランプ上流側区間の交通密度 x_{i-1} に対する単調減少関数として以下のように仮定した。

$$S_k = 38(1 - x_{i-1}/0.2) \text{ 台/分 } (k=2, 3, 4, 5)$$

..... (30)

オンランプの待ち行列制限台数は阪神高速道路公団の資料をもとに、上流側オンランプから M_1 (池田オン) = 406 台, M_2 (豊中北オン) = 66 台, M_3 (豊中南オン) = 416 台, M_4 (加島オン) = 66 台, M_5 (塚本オン) = 130 台とおいた。また初期待ち行列台数 W_{k0} はすべて 0 とし、本線区間上の交通密度の初期値は、実績値で与えられる午前 7 時 00 分の制御開始時刻の値を用いた。推移確率については、今回の計算ではランプ間 OD のデータが得られなかったため、区間交通量とオフランプ流出量の実測値より平均推移確率を求め、この値を制御時間中一定として用いた。なお制御時間は A.M. 7:00 から 10:00

Table 3 Summary of the results of the optimal control.

	Expressway travel time 1 (veh.-min.)	Waiting time 2 (veh.-min.)	Total travel Time 1+2 (veh.-min.)	Total amount of vehicle-kilometers (veh.-kilos)	Total amount of vehicles (veh.)
Case 1	104 166.1	29 988.2	134 154.3	109 997.5	67 768
Case 2	103 537.3	34 866.2	138 403.5	109 997.5	67 768
Case 3	105 286.4	31 188.4	136 474.8	109 997.8	67 768
Case 4	102 765.5	37 412.5	140 178.0	109 997.9	67 768
Case 5	105 286.4	31 188.4	136 474.8	109 997.8	67 768
Case 6	102 765.5	37 412.5	140 178.0	109 997.9	67 768
no control	178 309.0	0.0	178 309.0	107 501.2	66 348

モード 2：許容流入量ゼロ，すなわち完全閉鎖

モード 3：待ち行列が許容値を越える場合に，その超過分だけ流入させる部分閉鎖

次に各オンランプの流入待ち行列台数および待ち時間の平均値をそれぞれ **Table 4**，**Table 5** に

までの 3 時間とした。

b) 制御結果

以上の入力データを用いて最適制御計算を行い，評価関数値，各オンランプのランプ開閉パターン，ランプでの流入待ち行列台数および待ち時間，本線上の区間交通量，速度，および密度，各区間の平均走行速度，ランプ間の平均旅行時間等の計算を行った。

Table 3 は最適制御解における各ケースの評価関数値を示している。またこの表の最下欄には制御を行わない場合の実績値が比較のために載せてある。なお **Table 3** によれば，Case 3 は Case 5 と Case 4 は Case 6 とそれぞれ一致しているが，その理由は総走行台キロ，総利用台数については結果的に制御時間中の全需要量が処理できたため必然的に一致したものであり，一方総走行時間，総待ち時間については，それぞれのケースにおいて同じ初期値から演算を進めたため偶然制御解が一致したためである。いずれにしても以下では Case 5 および Case 6 の計算結果は省略することにする。

Fig. 10 は各オンランプのランプ開閉パターンを示したもので，図中のモード 1，2，3 の意味は次のとおりである。

モード 1：ランプ需要量，待ち行列はすべてランプ容量まで流入させ，ランプ閉鎖なし

示す。さらに **Table 6** には各区間上の平均走行速度が，また **Table 7** にはランプ間の平均旅行時間（流入待ち

Table 4 The average queue length at each entrance ramp.
(vehicles)

	EN 1	EN 2	EN 3	EN 4	EN 5	average
Case 1	0.0	0.0	0.0	6.4	160.3	33.3
Case 2	8.4	0.7	159.4	5.9	19.4	38.7
Case 3	0.0	0.0	0.0	0.6	172.7	34.7
Case 4	0.0	0.0	100.3	28.9	78.6	41.6

Table 5 The average waiting time at each entrance ramp.
(min)

	EN 1	EN 2	EN 3	EN 4	EN 5	average
Case 1	0.0	0.0	0.0	0.72	13.18	2.23
Case 2	0.30	0.11	8.15	0.66	1.59	2.60
Case 3	0.0	0.0	0.0	0.06	14.22	2.32
Case 4	0.0	0.0	5.13	3.25	6.47	2.79

Table 6 The average speed on each segment.
(km/h)

	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	average
Case 1	81.1	78.2	78.9	79.3	68.5	61.2	50.0	62.0	66.4
Case 2	79.7	77.9	78.9	79.2	70.3	64.7	48.8	61.9	66.8
Case 3	81.1	78.2	78.9	79.3	68.5	58.5	49.4	62.1	65.9
Case 4	81.1	78.2	78.9	79.3	69.5	63.7	50.7	62.1	67.2
no control	82.2	70.7	50.9	21.4	32.2	32.3	59.0	62.5	49.7

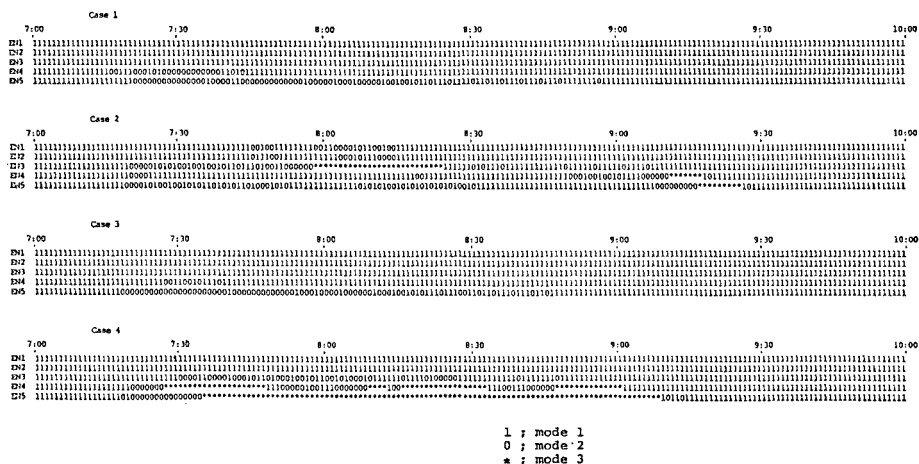


Fig. 10 The optimal on-ramp control of expressway traffic.

Table 7 Travel time between each entrance and exit ramp.

O \ D		(min)			
		EX 1	EX 2	EX 3	EX 4
EN 1	Case 1	2.51	3.30	9.95	11.06
	Case 2	2.83	3.62	10.17	11.29
	Case 3	2.51	3.30	10.04	11.15
	Case 4	2.51	3.30	9.81	10.93
	no control	3.69	6.50	19.64	20.74
EN 2	Case 1	1.70	2.48	9.13	10.25
	Case 2	1.81	2.60	9.15	10.27
	Case 3	1.70	2.28	9.23	10.34
	Case 4	1.70	2.48	9.01	10.12
	no control	2.89	5.71	18.84	19.95
EN 3	Case 1	—	—	6.46	7.57
	Case 2	—	—	14.49	15.62
	Case 3	—	—	6.55	7.66
	Case 4	—	—	11.46	12.57
	no control	—	—	11.95	13.06
EN 4	Case 1	—	—	4.48	5.59
	Case 2	—	—	4.39	5.51
	Case 3	—	—	3.91	5.02
	Case 4	—	—	6.92	8.03
	no control	—	—	4.99	6.10
EN 5	Case 1	—	—	15.44	16.56
	Case 2	—	—	3.91	5.03
	Case 3	—	—	16.51	17.62
	Case 4	—	—	8.70	9.81
	no control	—	—	1.93	3.04

時間を含む)が示されている。なお計算には名古屋大学大型計算機センターの FACOM M-200 を使用したが、計算に要した時間は CPU 時間で 70~230 秒の範囲であった。

(3) 制御結果の考察

ここでは各ケースについて計算された制御結果を比較し、その特徴を明らかにする。

a) 評価関数値

Table 3 に示した評価関数値を比較してみると、待ち行列制限がある場合とない場合では、すべての評価基準に対し待ち行列制限のない場合の方が総所要時間が小さくなっている。したがって制御効率という観点のみからすれば、待ち行列制限を設けない方がよい結果となっているが、一般街路への悪影響を避け、待ち時間の長大化を防ぐという意味からいえば、待ち行列制限を設ける方が現実的である。またこの計算例に用いた程度のランプ需要量と待ち行列制限長では、それほどの制御効率の低下を招いていない。一方評価基準との関係でいえば、当然のことながら総所要時間最小化を評価基準にとった Case 1 および Case 2 が、それぞれ待ち行列制限のない場合とある場合の全ケースの中で最小の総所要時間となっている。しかしながら総走行台キロ、総利用台数については6つのケースとも等しい値となっている(表中

の末尾の数値に若干の違いがみられるのは計算上の誤差によるものである)。この理由は制御時間中(この計算例では3時間)に到着した各ランプ需要量は、結果的にはその時間内にすべて処理することができるためである。

流入制御を実施したときの総所要時間を制御をまったく行わなかった場合と比較してみると、すべてのケースにおいて20%程度以上減少しており、流入制御による効果はかなり大きいことが明らかとなった。最も減少率の大きいケースは Case 1 で、計算上では25%程度減少している。総走行台キロ最大化と総利用台数最大化の比較では、**Table 3** に示したように評価値は一致するが、ただ総利用台数最大化基準をとった場合は、制御解が唯一に決まらないことが知られており、この計算例でも初期値のとり方によって制御解が変わることがわかった。

以上の結果から判断すれば、平常時制御の目的が本線上の自然渋滞を未然に防止するとともに、制御時間中に到着したランプ需要量をその制御時間中に処理するという前提に立つならば、流入制御の評価基準としては、総所要時間最小化基準が最も望ましいといえる。

b) ランプ開閉パターン

待ち行列制限のない場合、Case 1 と Case 3 とは比較的似通った制御パターンを示し、いずれも下流側オンランプ EN 4 と EN 5 だけで流入制御が行われている(**Fig. 10**)。これは与えられたランプ需要量に対し明らかに区間 S6, S7 で自然渋滞の発生が予想されることから、これらの区間に最も近いオンランプ EN 4, EN 5 で制御が行われることを示している。一方待ち行列制限がある場合は、ピーク時に待ち行列がこの制限値に達するため、これを越える部分の流入が許容されることになり、その結果制御はさらに上流側のオンランプへと波及する。このため Case 2 ではすべてのオンランプで流入制御が実行されている。しかし Case 4 では最下流側のオンランプから順次閉鎖する制御パターンがとられるが、上流側の2つのオンランプは依然として開放されたままの状態である。この点から考えると、総走行台キロ最大化基準は緊急時制御方式として提案されている逐次ランプ閉鎖制御¹⁹⁾に似た制御パターンを示し、長トリップ優先の傾向がみられる。

c) 流入待ち行列、待ち時間

待ち行列制限のない場合(Case 1, 3)は、すでに述べたように制御が似通っており、平均待ち時間、待ち台数とも最下流側でしかも渋滞区間に最も近いオンランプ EN 5 に制御のしわ寄せが集中する制御パターンを示している。オンランプ EN 5 の流入待ち行列台数の時間的推移は **Fig. 11** に示すとおりであり、ピーク時には待

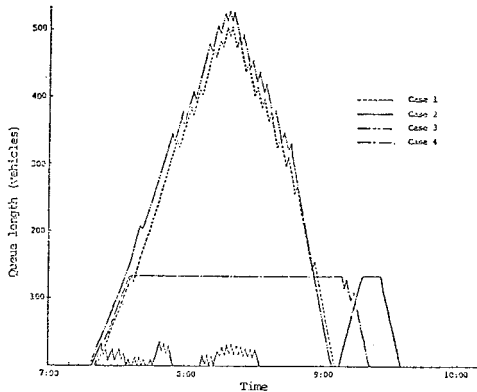


Fig. 11 The fluctuation of number of waiting vehicles at Entrance ramp 5.

ち行列台数が 500 台を越えることさえある。これはこのオンランプの制限値 (130 台) の約 4 倍であり、その結果一般街路上へ流入待ちの車がはみ出し、一般街路の交通を妨害することになり決して好ましい結果とはいえない。また平均待ち時間も 14 分前後と非常に大きくなっている。待ち行列制限のある場合 (Case 2, 4) では、平均待ち時間がすべてのオンランプで 9 分以下に抑えられ、特定ランプへの待ち行列の集中が緩和される (Table 5)。Case 2 と Case 4 を比較すると、Case 2 の方が待ち行列制限長の大きいランプに集中する傾向が強く、そのため下流側ランプ EN 4, EN 5 でむしろ余裕のある状態となっている。一方 Case 4 では、前述のように待ち行列が成長していくに従い、逐次ランプ閉鎖型の制御が行われている。

この計算例では、流入待ち行列制限長をランプウェイの長さから決まる物理的限界という観点から定めたが、このほかにたとえば待ち行列長ではなく待ち時間に制限値を設けるとか、各ランプの待ち時間をできるだけ均等化するということに、この制限値を政策変数として取り扱う考え方が必要であろう。

d) 本線区間上の交通量、速度、密度

例として区間 S6 と S7 における交通量、速度、および交通密度の時間変動を Fig. 12~Fig. 17 に示す。流入制御をまったく行わない場合は、区間 S6 において実際に 7:20 頃頃から交通渋滞が発生し、この渋滞がしだいに上流側に成長し、速度も交通量も低下していく状況がみられる。このため下流側の区間 S7 では逆に空いた状態にあり、交通量も容量に達せず余裕のある状態となっている。しかし流入制御を行った場合は、区間 S6 の渋滞が解消される一方、区間 S7 では容量いっぱいまで有効に利用されるようになっていく。Case 2 と Case 4 を比較すると、交通流の変動は Case 2 の方が Case 4 より比較的安定している。これは Case 2 ではランプの

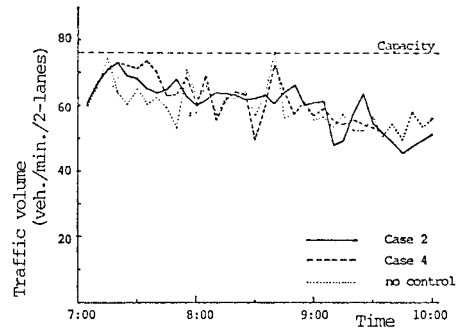


Fig. 12 Traffic volume on Segment 6 in Case 2 and 4.

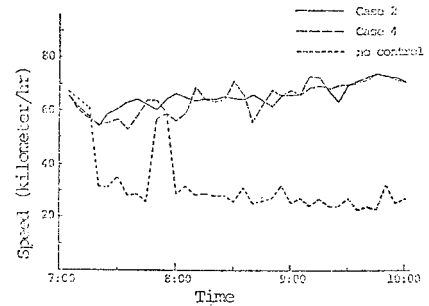


Fig. 13 The fluctuation of speed on Segment 6 in Case 2 and Case 4.

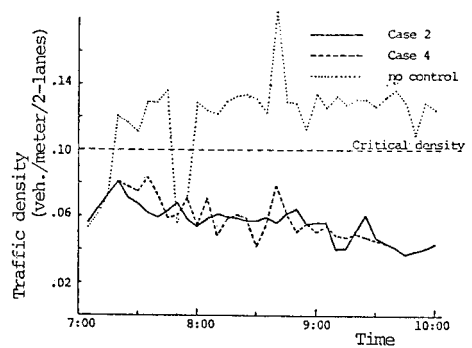


Fig. 14 Traffic density on Segment 6 in Case 2 and 4.

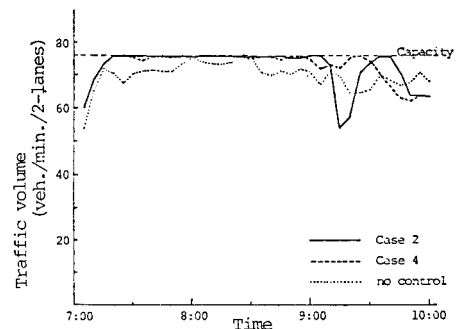


Fig. 15 Traffic volume on Segment 7 in Case 2 and 4.

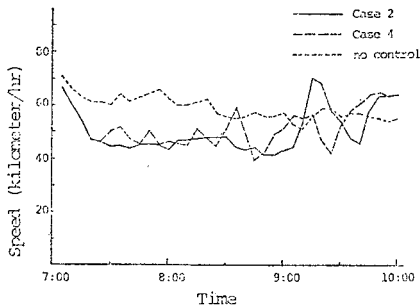


Fig. 16 The fluctuation of speed on Segment 7 in Case 2 and Case 4.

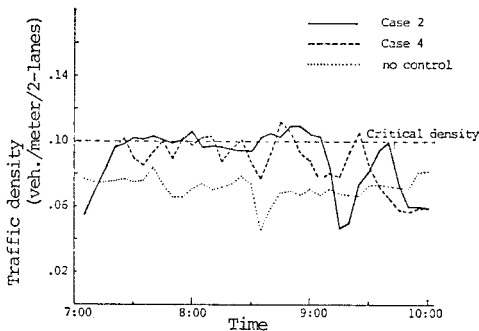


Fig. 17 Traffic density on Segment 7 in Case 2 and 4.

閉閉を比較的小刻みに行っているためである。

e) 旅行時間

流入制御を実施した結果本線上の自然渋滞が解消され、区間 S1 と S7 と S8 を除く残りの 5 区間で走行速度が上昇している。なかでも区間 S4, S5, S6 での走行速度の上昇効果が大きい (Table 6)。しかしながらランプ間の旅行時間でみると、下流側のオンランプ EN3, EN4, EN5 からの流入車については、むしろ制御しない場合より平均旅行時間が多くなっているケースもみられる (Table 7)。これは本線上の走行速度の増加にもかかわらず、オンランプでの待ち時間が加わるためである。特に最下流側のオンランプ EN5 からの流入車については所要時間が大幅に増加し、流入制御のしわ寄せが集中していることがわかる。

6. まとめ

本研究では、都市高速道路の自然渋滞の予防あるいは軽減を目的とした平常時制御に適用するため、非正常交通流を対象とした動的流入制御モデルを開発した。すなわち、高速道路本線上の区間密度とオンランプにおける流入待ち行列台数を、それぞれ状態変数にとった微分方程式系で与えられる状態方程式を導入し、オンランプの許容流入待ち行列に関する制約式のもとで、総所要時間

最小、総走行台キロ最大、総利用台数最大の 3 つの評価関数を最小化ないし最大化する最適制御問題として定式化し、これを離散型最大原理によって解く方法を提案した。次いで阪神高速道路空港線を対象路線とした適用計算を行い、本制御モデルの妥当性と実用性について検討した。また 3 つの評価基準と流入待ち行列制限の有無による制御解の特徴についても比較検討を行った。以下本研究の結論を述べる。

(1) 本研究で提案した動的流入制御モデルは、従来の LP 制御と異なり、時間的に変動するランプ需要量を対象とし、かつ制御自体が交通流に与える影響を内生化した流入制御モデルである。本制御モデルはまたそのモデルの構造から、各オンランプの許容流入量をその上限値と下限値および中間値の 3 段階に切り換えるリレー式の制御となることが明らかにされた。

(2) 本制御モデルの利点の 1 つは、流入制御実施に伴う本線上の交通流の状態 (交通量, 速度, 密度) を時々刻々とらえることができるほか、オンランプの待ち行列台数, 待ち時間, 車の旅行時間などの時間変動も出力できる点である。

(3) 本制御モデルを阪神高速道路に適用したところ、提案した 3 つの評価基準に対し、いずれも自然渋滞を解消することに成功し、総所要時間の比較では、流入制御を行わない場合に比べて、いずれも計算上で 20% 以上の減少が期待できることが明らかとなった。よって都市高速道路の自然渋滞の予防を目的とする平常時制御として、流入制御が有効な手段であることが立証された。

(4) 評価基準としては、総所要時間最小化基準が平常時制御の評価基準として最も一般性があり、システム全体の効率から考えて提案した 3 つの評価基準の中でも優れている。また都市高速道路の機能の 1 つとして長距離トリップを優先するという立場からみれば、総走行台キロ最大化基準が優れている。一方総利用台数最大化基準は制御解が唯一に決まらないという問題点をもっている。

(5) オンランプに流入待ち行列制限を設けることは、流入待ちの車のランプウェイからはみ出しによる一般街路交通への妨害を防ぎ、特定ランプへの待ち行列の集中化を防ぐという意味において有効である。また、待ち行列制限長は単にランプウェイの長さから決まる物理的限界値として定めるよりも、各ランプの待ち時間を好ましい水準に制御するという観点から政策的に決めることが望ましい。

なお本研究で取り上げた動的流入制御モデルは、まだ基礎研究の段階であり、その実用化にはなお多くの問題が残されている。今後の課題として次の諸点が挙げられ

る。

(6) 本研究では各ランプ需要量、ランプ間OD確率はあらかじめ与えられるものとしたが、実際にはこれらを精度よく予測することが動的流入制御を実用化する際の不可欠の条件である。特にこれらの予測精度が本制御モデルの信頼性に決定的な影響を与えるので、今後はランプ需要量やランプ間OD確率の予測モデルと一体化した総合的予測-制御システムの開発が課題である。

(7) 本研究で取り上げた計算例では、1本の放射状路線を対象区間に選定し、その最適制御解の考察を行ったが、今後は環状路線を含む高速道路網を対象に適用計算を実施する必要がある。対象路線網が大きくなった場合は、計算プログラムの改良、路線網の分割等による計算量の削減化が重要な課題となる。

(8) 本研究で提案した本線交通流に対する状態方程式は、自由走行領域の交通流は精度よく表現することができるが、渋滞領域についてはなお不十分であることが明らかとなった。今後は状態方程式の改良によって、渋滞領域を含む全領域において時間的に変動する交通流を記述できることが望まれ、またこれが可能になれば、本研究で取り上げた平常時制御だけでなく、事故発生等に伴う渋滞の早期解消を目的とした緊急時制御にも適用できる可能性が出てくる。

最後に、本研究を進めるにあたって、阪神高速道路公団計画部調査課から多くの交通データを提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Wattleworth, J.A. and D.S. Berry : Peak-period control of a freeway system-Some theoretical investigations, Highw. Res. Rec., No. 89, pp. 1~25, 1965.
- 2) Wattleworth, J.A. : Peak-Period analysis and control of a freeway system, Highw. Res. Rec., No. 157, pp. 1~10, 1967.
- 3) 佐佐木綱・明神 証 : 都市高速道路網における流入車制御理論, 交通工学, Vol. 3, No. 3, pp. 8~16, 1968.
- 4) 明神・坂本・岩本 : 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.
- 5) Myojin, S., H. Sakamoto and S. Iwamoto : Some characteristics of ramp control on urban expressway network, Proc. of JSCE, No. 247, pp. 137~147, 1976.
- 6) Yuan, L.S. and J.B. Kreer : Adjustment of freeway ramp metering rates to balance entrance ramp queues, Transpn Res., No. 5, pp. 127~133, 1971.
- 7) Wang, J.J. and A.D. May : Computer model for optimal freeway on-ramp control, Highw. Res. Rec., No. 469, pp. 16~25, 1973.
- 8) Chen, C.I., J.B. Gruz Jr. and J.G. Paquet : Entrance ramp control for travel-rate maximization in expressways, Transpn Res., Vol. 8, pp. 503~508, 1974.
- 9) Wang, C.F. : On a ramp-flow assignment problem, Transpn Sci., Vol. 6, No. 2, pp. 114~130, 1972.
- 10) Isaksen, L. and H.J. Payne : Suboptimal control of linear systems by augmentation with application to freeway traffic regulation, IEEE, Trans. Automat. Contr., Vol. AC-18, No. 3, pp. 210~219, 1973.
- 11) Cremer, M. : A state feedback approach to freeway traffic control, Preprints 7th IFAC world Congress, Helsinki, pp. 1575~1582, 1978.
- 12) Papageorgiou, M. : A new approach to time-of-day control based on a dynamic freeway traffic model, Transpn Res., Vol. 14 B, pp. 349~360, 1980.
- 13) 松井 寛 : 非定常交通流における都市高速道路の流入制御, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 1980.
- 14) 松井 寛・佐藤佳朗 : 都市高速道路の動的流入制御, 土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集, 1980.
- 15) 松井 寛 : 街路網上の交通量分布に関する統計力学的考察, 京都大学修士論文, 1966.
- 16) ポントリヤーギン, ボルチャンスキー, ガムクレリーゼ, ミンチェンコ (関根智明訳) : 最適過程の数学的理論, 総合図書, 1967.
- 17) 宇野利雄・菊池豊彦 : 最大原理入門, 共立全書 165, 1967.
- 18) Denn, M.M. : Optimization by variational methods, McGraw-hill, 1969.
- 19) 明神 証 : 都市高速道路の交通管制手法に関する研究, 京都大学学位論文, 1974.

(1981.4.30・受付)