

高速道路の流入制限モデルの開発

鳥取大学工学部 正会員 ○奥山 育英
旭化成情報システム㈱ 正会員 横川 元一
鳥取大学大学院 学生員 高梨 誠

1. はじめに

高速道路は、その名称に見合うように円滑な交通流が一般の道路に比べて強く要求される。とりわけ、料金を徴収する高速道路においては一般の道路を利用するよりも交通時間がかかることは好ましくない。したがって、そのような事態の発生するような場合には流入制限によって対応することが多い。しかし、その方法は混雑してくると流入を制限するといった後追いの流入制限方法であり、総合的に高速道路の効率を考慮したものではない。

高速道路ばかりでなく道路においては、車が多くなると車の速力は遅くなり、たくさん車が存在するにもかかわらず、結果的に時間当たりの通過交通量は減少する。もちろん、車の速力が速いときは、車間距離が大きくなり、この場合にも時間当たりの通過交通量は減少する。このことは、車がある速力に達すると時間当たりの通過交通量は最大となり、その速力より速くても、また遅くても、時間当たりの通過交通量は少なくなることを示唆している。すなわち、時間当たりの通過交通量が最大でない場合には、車の速力が速い場合と遅い場合の2つの場合があることがわかる。

そこで、本研究では、時間当たりの通過交通量に対応する速力を、速く取ろうと遅く取ろうと、時間当たりの通過交通量は同じだから、速い方を取ることとして、高速道路の流入制限モデルを提案する。より具体的にいうと、高速道路入口直後の通過交通量を最大とするような流入制限モデルを提案し、高速道路各所における交通挙動に関する情報を取得するためのシステムを開発し、パソコンレベルのコンピュータでプログラムを作成した。

このシステムは、交通量-密度 ($q-k$) 曲線と時刻に依存するランプ間交通量を与え、ランプ入口直後の交通量を最大とするようにランプ入口での流入制限を実施して、高速道路上の任意の地点にお

ける交通量の経時変化、および各ランプにおける流入制限による流入待ちの車の台数の経時変化を得るものである。

なお本研究では、多くのランプを持つ直線状の高速道路を扱うが、本モデルの考え方で、より複雑な合流や分岐を含む環状高速道路網に適用させることも可能である。

高速道路の流入制御を扱った研究としては、松井・佐藤¹⁾、巻上ほか²⁾などの研究があり、また、高速道路ではないが信号の影響による交通量の変動を扱った研究として、福山³⁾、池之上ほか^{4) 5) 6)}、久井・蔵重⁷⁾、辰己ほか⁸⁾などの研究があるが、いずれも本研究とは異なるものである。

また、本研究はNewell⁹⁾と同種のモデルであるが、Newellはランプの数の少ない単純な高速道路を扱い、 $q-k$ 曲線は理論的に扱える三角分布とし、ランプ直後の交通流は渋滞流までをも考慮した純理論モデルである。

2. 本モデルの前提条件

本研究では、高速道路のランプ直後の通過交通量の最大化を、以下に示すような前提条件のもとで実現し、さらに、高速道路における各地点の交通量の経時変化、およびランプ入口の流入待ちの車の台数の経時変化を求める。

1) 交通量と交通密度の関係

高速道路上の交通流は次式を満たす。ここに、 q は交通量(台/時)、 k は密度(台/距離)、 v は速力(距離/時)を表す。

$$q = k v \quad \dots (1)$$

さらに、次の関係式が成立し、速力は密度の関数として表現される。

$$v = v(k) \quad \dots (2)$$

上の2式から得られる交通量 q の最大値を q_0 とし、そのときの交通密度を k_0 とする。

なお、関数 $v(k)$ は数式、もしくは折れ線の点列で、対象高速道路に応じて与える。

2) 本線交通流の優先

本線通過交通流を円滑にするため、本線の許容交通密度を k_c と定める。

ここで、車は本線の交通密度が k_c 、つまり交通量が q_c になるまで流入でき、ランプ通過直後の交通量は次の関係式で表される。

$$q_a = \min\{q_b + q_{in} - q_{out}, q_c\} \quad \dots (3)$$

ただし、

- q_a : 合流後の交通量
- q_b : 合流前の交通量
- q_{in} : ランプからの流入希望交通量
- q_{out} : 本線から流出ランプへの流出交通量

3) 待ち行列の形成

本線交通量が q_c のときは、ランプ上の車は流入できず待ち行列が形成される。

また、本線交通量が q_c 未満のときは、ランプ上で待ち行列が形成されている場合には、先着順に流入できるものとする。

4) 各ランプにおける行き先の分布

時間帯によってランプに到着した車の行き先の分布は異なるが、待つ場合の車の行き先は、到着した車の行き先の分布に等しい。これは、待っている間は運転者の意志が変わらないということである。

3. 高速道路の流入制限モデル

3.1 モデルの基本的構想

本章では、2章で定義した仮定を用いて高速道路流入制限モデルの構築を行う。なお、このモデルの基本的構想を図1に示す。

まず、はじめに2つのランプ間の交通流について述べることにする。

いま、本線上の地点Aと地点Bでランプとの合流部があり、地点Aが上流で地点Bが下流に存在するとする。このときの地点Bでの通過交通量の経時変化、および流入ランプでの流入待ちの車の台数の経時変化は以下の[a][b]の手順で算定される。

[a] 地点Aでの合流直後の通過交通量の経時変化から、地点Bへの到着交通量の経時変化を以下の段階を通して算定する。

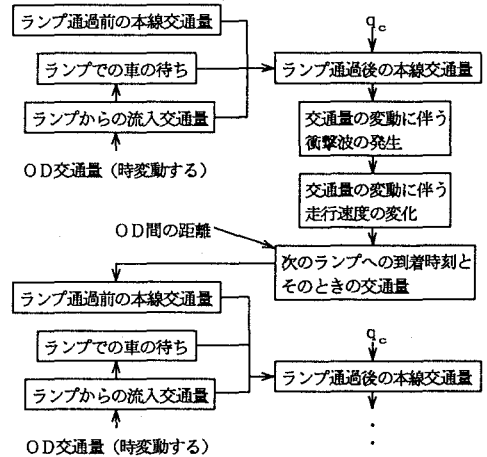


図1 モデルの基本的構想図

① 地点Aでの合流直後の通過交通量が経時変化することによって「衝撃波」が発生する。

(「衝撃波」については後述する。)

② 地点Aで発生した衝撃波が地点Bまで伝播するので、衝撃波の軌跡(時間と位置)が算定される。この結果より、高速道路上の任意の地点における交通量の経時変化が算定される。

③ ②により、地点Aを出発する車の出発時刻から地点Bへの到着時刻が算定される。

そして、地点Aの通過交通量のOD構成比の経時変化を用いて、地点Bへの到着交通量の経時変化が算定される。

[b] 地点Bでの流入待ちの車の台数、および出発交通量を算定する。

① 地点Bに到着した本線交通流は、ここで流出する車を除いてすべての車が本線へと流れる。

② ①ののち、本線の交通密度が k_c 以下であれば、地点Bで流入待ちランプに到着した車は到着順に本線の交通密度が k_c になるまで本線に流入する。このとき、交通密度が k_c になれば本線には流入できず、流入できない車は流入ランプで待ち行列を形成することになる。

以上のような手順を繰り返すことによって、全ランプにおける通過交通量の経時変化、および流入待ちの車の経時変化を算定することができる。

3.2 衝撃波について

高速道路上では、ランプ付近を中心として交通量が変化する部分が多く存在する。

いま、図2のように交通量が q_1 から q_2 に変化する部分を考えて、この境界線は絶えず動いており、境界線を境として交通密度が異なることから「衝撃波」と呼ばれる。

この衝撃波の速力 v_{12} は次式で示される。

$$v_{12} = \frac{q_1 - q_2}{k_1 - k_2} \quad \dots (4)$$

したがって、交通流理論で知られているように、 $q-k$ 曲線が与えられたとき、前後の交通密度 k_1 と k_2 によって生成される衝撃波の速力 v_{12} は図3のように示される。

また、速力の異なる衝撃波がいたる所で存在するため、2つの衝撃波の交差が生じることもある。そして交差が生じると新たな衝撃波が形成される。

ここで、図2のように (t_1, x_1) で交通量が q_1 から q_2 に変化し、 (t_2, x_2) で交通量が q_2 から q_3 に変化したとする。このときに発生した衝撃波の速力をそれぞれ v_{12} 、 v_{23} とする。

以上より、この2つの衝撃波が交差する場合に、その交点 (t^*, x^*) は次式で与えられる。

$$t^* = \frac{x_2 - x_1 + v_{12}t_1 - v_{23}t_2}{v_{12} - v_{23}} \quad \dots (5)$$

$$x^* = v_{12}(t^* - t_1) + x_1$$

ここで交点 (t^*, x^*) で交通量は q_1 から q_3 に変化し、新たな衝撃波が発生する。

ところで、2章の前提条件より、交通量は交通密度の単調増加関数であることがいえるので、衝撃波の速力はすべて正である。したがって、図4に示すように交通量 q_2 の交通流において地点 (t_a, x_a) に存在した車が速力 v_{12} の衝撃波に到着する時刻と位置 (t', x') は次式で与えられる。

$$t' = \frac{x_a - x_1 + v_{12}t_1 - v_2 t_a}{v_{12} - v_2} \quad \dots (6)$$

$$x' = v_{12}(t' - t_1) + x_1$$

この車は、衝撃波に到達した後は交通量 q_1 の交通流の中を速力 v_1 で走行する。

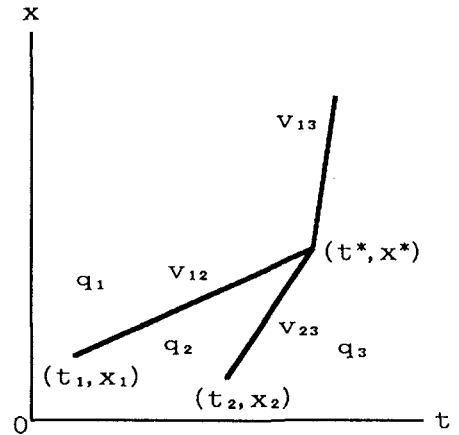
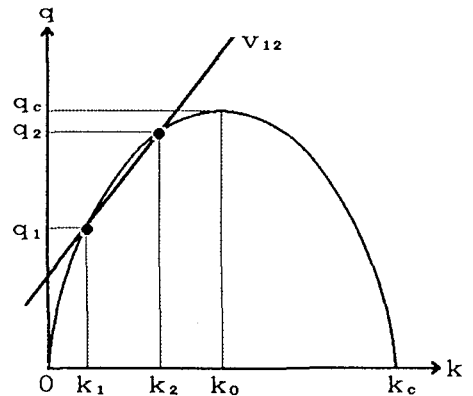


図2 衝撃波の交差



交通量 q の単位は [台/単位時間]
交通密度 k の単位は [台/単位距離]

図3 $q-k$ 曲線と衝撃波の速力

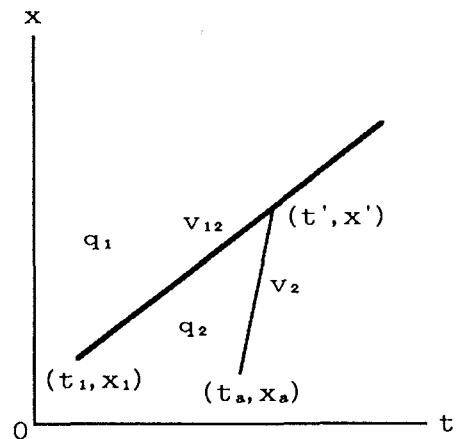


図4 衝撃波への車の到着時刻

3.3 次のランプへの到着時刻

まず、衝撃波が交差することのない場合の車の到着時刻を求める。

いま、地点 $(t_s[0], x_s[0])$ において交通量は 0 から $q_s[1]$ に変化し、 $(t_s[i], x_s[i])$ において交通量は $q_s[i]$ から $q_s[i+1]$ ($1 \leq i \leq n$) に変化するとする。このとき、 $t = t_0, x = x_0$ (ただし交通量は $q_s[n]$) を通過した車が $x = x_d$ に到着する時刻 t_d と $x = x_d$ で $t < t_d$ の範囲で起こる交通量の変化の回数 n_s を求める。ただし、 $x_0 \leq x \leq x_d$ で衝撃波は交差しないものとする。

交通量 $q_s[i+1]$ の交通流で地点 (t_{i+1}, x_{i+1}) を走行している車が、交通量 $q_s[i]$ の交通流に到着する時刻と位置 (t_i, x_i) は次式で与えられる。

$$t_i = \frac{1}{k_s[i] (v_s[i] - v_s[i+1]) \times \{ (q_s[i] - q_s[i+1]) t_s[i] + (k_s[i] - k_s[i+1]) \times (x_{i+1} - x_s[i] - v_s[i+1] t_{i+1}) \}} \quad \dots (7)$$

$$x_i = v_s[i+1] (t_i - t_{i+1}) + x_{i+1}$$

ただし ($1 \leq i \leq n-1$)

また、 $x_j < x_d$ となる最小の j ($j \geq 1$) を見つけ、 t_d を求めると、

$$t_d = \frac{x_d - x_j}{v_s[j]} + t_j \quad \dots (8)$$

であり、 $n_s = j$ である。

以上のようにして、 t_d および n_s を出力する関数を次のように定義する。

$$\text{time1}(n, t_s, x_s, q_s, t_0, x_0, x_d, | t_d, n_s)$$

ところで、一般には次のランプへ到着するまでに衝撃波の交差が生じる可能性があり、新たな衝撃波の発生による影響を考慮しなければならない。そのためには、車の下流側の最も近いところで衝撃波が交差し、新たな衝撃波が形成される時刻と位置を把握する必要がある。

まず、仮定は交差しない場合と同様であるとし、 $x < x_d$ の範囲で衝撃波の交差する時刻と位置は (t^*, x^*) の関係式によって与えられるので、このうち x 座標が最小となる衝撃波の交差する組を選ばばよい。

このとき、交通量 $q_s[m]$ から $q_s[m+1]$ に変化する衝撃波と、 $q_s[m+1]$ と $q_s[m+2]$ に変化する衝撃波とが交差する場合において交点の x 座標を最小にし、交点の座標が (t_m, x_m) であるとする。ここで、交通量は $q_s[m]$ から $q_s[m+2]$ に変化することになる。

以上のようにして、 t_m, x_m および m を出力する関数を次のように定義する。

$$\text{time2}(n, t_s, x_s, q_s, x_d, | t_m, x_m, m)$$

ただし、 $x < x_d$ の範囲で衝撃波が交差しないときは、 $t_m = 0, x_m = x_d, m = n$ と出力する。

次に、あるランプ (位置は $x = r_s$) において、 $t_s[i-1] < t < t_s[i]$ ($1 \leq i \leq n_p$) で交通量 $q_s[i]$ であり、その他の時間帯では交通量は 0 であるとする。このとき、時刻 $t_s[i]$ にこのランプを通過した車が、次のランプ (位置は $x = r_f$) に到着する時刻 $t_{1r}[i]$ を出力する関数を次のように定義する。

$$\text{time3}(n_p, t_s, q_s, r_s, r_f, | t_{1r})$$

このようにして、衝撃波の特性は交通量の変化した時刻と位置、およびその前後の交通量によって記述される。

いま、地点 (t_0, x_0) にいる車の交通挙動に影響を与える可能性のある衝撃波は、 $x = x_0$ の位置で時刻 $t = t_0$ までに発生した衝撃波である。もし、それらの衝撃波が $x = r_f$ までに交差しなければ、関数 time1 を用いて次のランプへの到着時刻が求められる。

また $x = r_f$ までに交差する衝撃波があれば、その交点の x 座標が最小となる位置 x_m を関数 time2 を用いて求める。ここで $x = x_m$ までは衝撃波が交差しないので、関数 time1 を用いて車が $x = x_m$ の位置に到着する時刻 t_d を求める。

次に、地点 (t_m, x_d) の位置で新たに今後の交通挙動に影響を与える可能性のある衝撃波を把握する必要がある。そして、 $x = r_f$ までに交差する衝撃波があれば、その交点の x 座標が最小となる位置に到着する時刻を求める。

以上の作業を繰り返すと、車は $x = r_f$ までに交差する衝撃波が存在しない位置まで移動して、関数 time1 を用いることによって、次のランプへの到着時刻を求めることができる。

3.4 交通量の分布

まず、行き先別の割合による到着交通量の経時変化を求める。

あるランプ ($x = r s$) において $t_s[i-1] < t \leq t_s[i]$ ($1 \leq i \leq n_p$) で交通量 $q_s[i]$ であり、そのうちランプ g へ行こうとする交通量を $q_{gp}[g][i]$ とする。また、その他の時間帯では交通量は 0 であるとする。そして、 $t_s[i]$ にこのランプを通過した車が次のランプ (位置は $x = r f$) に到着する時刻を $t_{1r}[i]$ とすると、この $t_{1r}[i]$ は関数 $time3$ を用いて求められる。

よって、 $t_{1r}[i-1] < t < t_{1r}[i]$ の時間帯で、全到着交通量のうちランプ g へ行こうとした交通量の割合 $A_r[g][i]$ は次式によって与えられる。

$$A_r[g][i] = \frac{q_{gp}[g][i]}{q_s[i]} \quad \dots (9)$$

次に、到着交通量の経時変化を求める。

あるランプ ($x = r s$) において $t_s[i-1] < t \leq t_s[i]$ ($1 \leq i \leq n_p$) で交通量 $q_s[i]$ であり、その他の時間帯で交通量は 0 であるとする。このとき $x = r f$ への到着交通量の経時変化が $t_{2r}[i_{2r}-1] < t \leq t_{2r}[i_{2r}]$ ($1 \leq i_{2r} \leq n_{2r}$) であり、交通量は $q_{2r}[i_{2r}]$ であり、その他の時間帯では交通量は 0 になったとする。

以上のようにして、 $t_{2r}[i_{2r}]$ ($0 \leq i_{2r} \leq n_{2r}$)、 $q_{2r}[i_{2r}]$ ($1 \leq i_{2r} \leq n_{2r}+1$) および n_{2r} を出力する関数を次のように定義する。

$$\underline{time4}(n_p, t_s, q_s, r_s, r_f, | t_{2r}, q_{2r}, n_{2r})$$

3.5 流入ランプでの待ち行列の形成過程

3.4 で行き先別の到着交通量の経時変化を算定したので、次に流入ランプにおける待ち行列の形成過程について考える。

いま、最大許容交通量を q_0 とすると、あるランプ p ($p = 1, 2, \dots, g_r$) において $tp[i-1] < t < tp[i]$ ($1 \leq i \leq n_p$) のとき、各種交通量に対する変数を次のように定義する。

(ただし $g > p$ とする)

- $q_r[i]$: ランプとの合流点を通過する直前の本線交通量
(ランプ p での流出を除く)
- $q_{gr}[g][i]$: $q_r[i]$ のうちランプ g へ行こうとする交通量
- $q_{in}[i]$: 本線に流入するためランプに到着した交通量
- $q_{gin}[g][i]$: $q_{in}[i]$ のうちランプ g へ行こうとする交通量

以上の値は与えられているものとし、これらの値をもとにして、以下の変数を算定する。

(ただし $g > p$ とする)

- $q_w[i]$: 流入待ちの車のうち $tp[i-1] < t \leq tp[i]$ のときに本線へ流入できた車の交通量
- $q_{gw}[g][i]$: $q_w[i]$ のうちランプ g へ行こうとする交通量
- $wp[i]$: 時刻 $tp[i]$ における流入待ちの車の台数 ($wp[0]=0$)
- $w_{jp}[i][j]$: $wp[i]$ のうち $tp[j-1] < t \leq tp[j]$ ($j=1, 2, \dots, i$) のときから待っていた車の台数
- $w_{gj}[g][i][j]$: $w_{jp}[i][j]$ のうちランプ g へ行こうとする交通量
- $qp[i]$: $tp[i-1] < t \leq tp[i-1]$ のときにランプとの合流点を通過した直後の本線交通量
- $q_{gp}[g][i]$: $qp[i]$ のうちランプ g へ行こうとする交通量

特に本研究では、 $wp[i], qp[i], q_{gp}[g][i]$ を求めていくことを目的とする。

次に、流入待ちの車の本線への合流過程を考えるために次式を定義する。

$$\Delta T \equiv tp[i] - tp[i-1] \quad \dots (10)$$

いま、時間帯 $tp[i-1] < t \leq tp[i]$ のとき、ランプから本線への流入が可能なる車の台数 Z_1 は、本線交通流の優先を考慮すると次式のようになる。

$$Z_1 = (q_0 - q_r[i]) \Delta T \quad \dots (11)$$

さらに、流入ランプに到着した車のうち、本線に流入することができる台数を Z とし、以下のような 2 通りの場合について考えると、 Z の値はそれぞれ

れ次式で与えられる。

$$1) Z_1 \geq wp[i-1] \text{ のとき} \\ Z = Z_1 - wp[i-1] \quad \dots (12)$$

$$2) Z_1 < wp[i-1] \text{ のとき} \\ Z = 0 \quad \dots (13)$$

この1) 2)より、本線に流入することができる車の台数が求められる。

最後に、本線への流入過程、あるいは待ち行列の形成過程について、以下のような2通りの場合について考える。

$$1) Z \geq q_{in}[i] \Delta T \text{ のとき}$$

$$2) Z < q_{in}[i] \Delta T \text{ のとき}$$

以上より、 $qp[i]$ 、 $qgp[g][i]$ および $wp[i]$ を出力する関数を次のように定義する。

wate(p, gr, tp, np, qgr, qgin, qc, | qp, qgp, wp)

ただし、これまでに挙げた5つの関数に関する詳しいアルゴリズムについては省略する。

4. シミュレーション計算例

本研究で開発したモデルによる計算例を以下に示す。なお、サンプルデータは適当な値を設定し、そのデータによる計算結果の一部を一例として示す。さらに、今回開発したモデルにおいて明らかにされた今後の課題について述べる。

4.1 サンプルデータ

2車線の高速道路を想定し、ランプの配置は図5のようにランプ1からランプ4までであるとする。このうち、ランプ1については流入のみであり、ランプ4については流出のみを扱うことにする。また、ランプ間の距離は20kmとする。そして、空間平均速力と交通密度の関係は松井の研究²⁾で用いた次の関係式

$$v = 91.2 - 0.456k \quad \dots (14)$$

を採用して、このときの最大許容交通量を4560台/時とした。

ランプ間の需要交通量は図6のような変動を用いた。この図では、需要交通量が時刻24時までの部分しか表示されていないが、本研究ではこれがずっと繰り返されるものとしている。

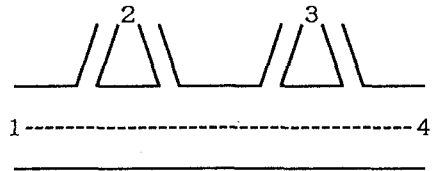


図5 各ランプの位置関係

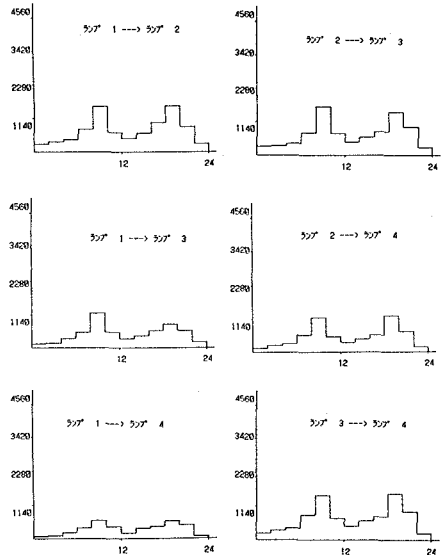


図6 ランプ間の需要交通量

4.2 計算結果と考察

高速道路の任意の地点における交通量の分布状況(2日目)を図7に示す。図7では下流ランプに行くほど時間幅が細分化されることが分かる。さらに、流入ランプにおける出発交通量の経時変化(2日目)を図8に示し、各流入ランプにおける流入待ちの車の台数の経時変化を図9に示した。

この結果を見ると、流入ランプ2においてのみ待ち行列が形成され、しかも定刻に同じ台数だけ流入待ちの車が発生しており、他のランプでは流入待ちの車は存在しない。

図7で、下流ランプに行くほど時間幅が細分化されるのは、到着交通量の行き先別割合の変化する時刻、到着交通量の変化する時刻、流入ランプに到着した車の交通量の変化する時刻等があるので、行き先別のランプ通過後の本線交通量の変化する時刻が増加することによる。

高速道路上の交通挙動については、図6が繰り返されることから、深夜の時間帯に交通量が全くなくなならない場合には、十分の日数が経過した定常状態の挙動を把握することが重要である。したがって、ランプ間の需要交通量の経時変化をパターン化させ、長時間後の通過交通量、および車の待ち台数の経時変化を算定することが可能なシステムを開発する必要がある。

さらに、現実的には流入ランプでの車の待ち台数が多くなると高速道路の利用者が減少することも考えられるため、このことを考慮したシステムを開発する必要もあろう。

また、本研究で取り扱った車の交通挙動については、ある交通量-密度関係に従うことを仮定している。したがって、この関係をより正確に分析し把握することによって、得られた知見をシステムに反映させることが重要である。

5. おわりに

本研究では、与えられた交通量-密度曲線とOD交通パターンのもとで、高速道路の効率を重視するような流入制限を行なったときの高速道路上の任意の地点における交通量の経時変化、および各ランプにおける流入制限による流入待ちの車の台数の経時変化を算定するシステムを開発し、図化した。

各ランプ直後の通過交通量を最大にするという流入制限の基準を、対象とする高速道路全体における時間あたりの通過交通量を最大化するといった基準や、走行時間までもを加味した基準に変更すること、および、合流や分岐を含む複雑な高速道路にも適用できるようにすることが、今後の課題である。しかし、それらについては、本システムをもとにしてさらに開発をしていくことが容易にできよう。

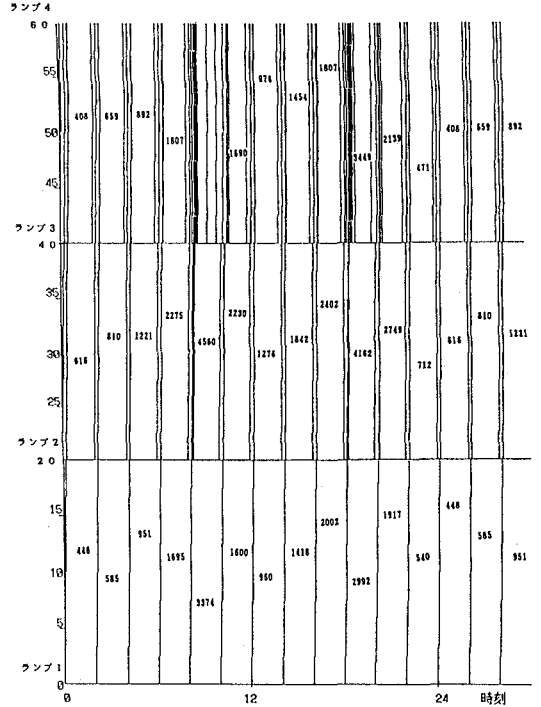


図7 交通量の分布状況

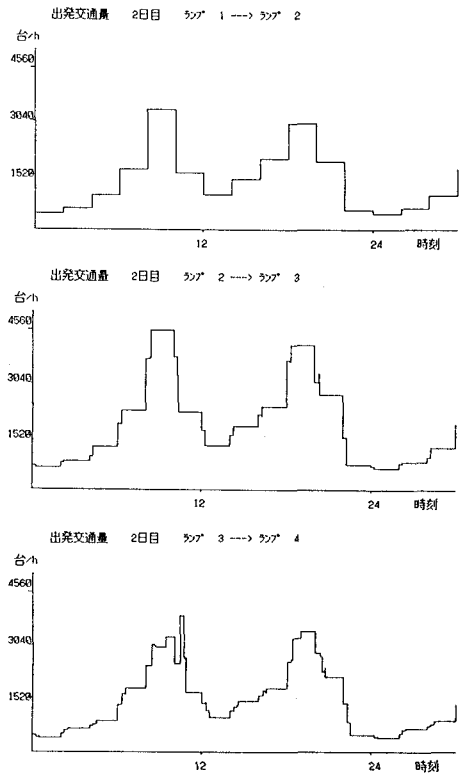


図8 出発交通量の経時変化

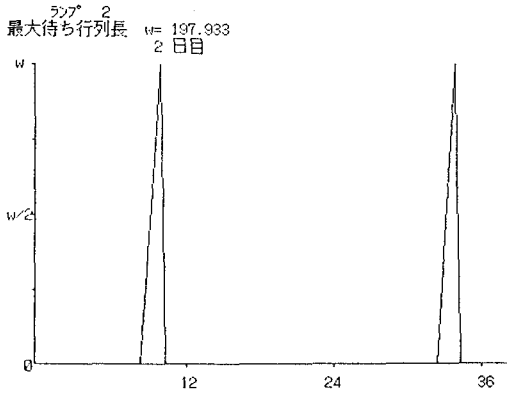


図9 流入待ちの車の台数の経時変化

6. 参考文献

- 1) 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，土木学会論文報告集第326号，pp.103~114，1982.
- 2) 卷上安爾・中西恒彦・上条彰八郎・外山正人：高速道路本線合流部の交通流シミュレーションモデル，土木学会論文報告集第330号，pp.129~138，1983.
- 3) 福山正治：信号街路上に発生する渋滞の特性，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.429~430，1984.
- 4) 赤嶺元紀・池之上慶一郎・李光勲：交通流の状態と流量時系列の相関係数，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.526~527，1990.
- 5) 李光勲・池之上慶一郎・安井一彦：飽和交通流の信号遅れ，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.532~533，1990.
- 6) 児玉和彦・池之上慶一郎・安井一彦：信号系における交通密度の特性，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.538~539，1990.
- 7) 久井守・蔵重良和：飽和信号系における波動伝播解析のグラフィック解析，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.534~535，1990.
- 8) 辰己浩・樗木武・塩見成一・姜元義：信号交差点における速度分布の変化について，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.536~537，1990.

9) Gordon F. Newell: A Simplified Theory of Kinematic Waves, Institute of Transportation Studies (ITS), University of California at Berkeley, September 1991.