

シミュレーションによる交通流の解析

鈴木 啓 祐

I はしがき*

交通流については、すでにかなり詳細な研究がなされている。実際、佐々木が指摘しているように、車の通過する状態において、車道を横断する歩行者の行動に関する「横断待ちの理論」や、交通密度の変動の考察がなされる「波動理論」や、先行車に対する後続車の運動を論じる「追従理論 (car following theory)」等が研究され、また、街路上の自動車交通流に関するシミュレーションもおこなわれている¹⁾。

ここでは、交通流のもつ2, 3の特性を基礎として、道路上の自動車の行動に関するシミュレーション・モデルをつくり、そのモデルを用いて、自動車の交通流の性質を調査、解析してみた。

II 交通流に見られる基本的性質

この研究で用いるシミュレーション・モデル

* この研究をおこなう際、モデルに関する多くの検討とコンピューターによるシミュレーションの実行に協力された、株式会社フジミックの浜名泰三氏、植野明美氏、および蒲耕二氏に対し深く感謝の意を表す。また、この研究内容は、1976年、北海道大学(札幌)における日本統計学会第44回大会において、発表した(鈴木啓祐、浜名泰三、植野明美、蒲耕二:「シミュレーション・モデルによる交通流の解析」『第44回日本統計学会講演予稿集』1976年, 20・N1。前3頁, 『日本統計学会誌』第7巻第1号, 1977年, 47頁)。

1) 佐々木綱:『交通流理論』, 東京, 技術書院, 昭和42年(第2版)。

池之上慶一郎, 斎藤威, 花堂紘之:「街路交通流のネットワーク・シミュレーション」『科学警察研究所報告』交通編 第14巻第1号, 1973年, 17-31頁。

池之上慶一郎, 斎藤威, 花堂紘之:「街路交通のシミュレーション」『交通工学』第9巻第1号, 1974年, 3-17頁。

池之上慶一郎, 斎藤威, 花堂紘之:「街路交通のシミュレーション・モデル(MICSTRAN-I と MACSTRAN-I)」『科学警察研究所報告』交通編 第16巻第1号, 1975年, 1-16頁。

を作成するためには、交通流のもつ2つの基本的性質を知る必要があった。ここでは、それらの性質について述べることにする。

(1) 交通量と自動車平均速度との関係

一般に、交通量、すなわち、単位時間あたりの自動車の通過量 Q は、観察時間内の自動車の通過量 n を観察時間 T で割ったものである。したがって、

$$Q = \frac{n}{T} \quad (2.1)$$

のように書ける。

次いで、交通密度 D は、走行台数、すなわち、道路の観察区間内の走行自動車台数 N を観察道路区間の長さ L で割ったものであり、

$$D = \frac{N}{L} \quad (2.2)$$

で定義される。

さらにまた、自動車の平均速度 V は、

$$V = \frac{l}{T} \quad (2.3)$$

である。ただし、 l は時間 T の間に自動車があった距離である。

Q , D , および V の間には、

$$Q = VD \quad (2.4)$$

という関係が成立する。なんとなれば、いま、1単位の長さの中に D 台の車を乗せたベルト(すなわち、交通密度 D のベルト)があり、そのベルトが時間 T に l という距離だけ一方の方向に動くとき(すなわち、速度 l/T で動くとき)、時間 T 内に、ある場所(1地点)を通過するベルト上の車の台数 n は、

$$n = lD \quad (2.5)$$

でなければならず、この式の両辺を観察時間 T で割れば、

$$\frac{n}{T} = \frac{l}{T} D \quad (2.6)$$

が得られるからである。式 (2.6) の n/T は Q 、 l/T は V であるから、この式は式 (2.4) と同じものである²⁾。

いうまでもなく、 V は D の関数であるので、式 (2.4) は、

$$Q = f(D) \quad (2.7)$$

となる。この関係を交通密度曲線 (flow-concentration curve) という³⁾。この曲線は、原点を通り、 Q が正の領域で、

$$\frac{dQ}{dD} \cong 0 \quad (2.8.1)$$

$$\frac{d^2Q}{dD^2} < 0 \quad (2.8.2)$$

という性質をもつ曲線である。

(2) グリーンシールドズの関係

式 (2.4) を変形すれば、

$$V = \frac{Q}{D} \quad (2.9)$$

という式を得る。式 (2.7) により、 Q は D の関数となっているので、

$$V = g(D) \quad (2.10)$$

と書ける。グリーンシールドズ (Greenshields)⁴⁾ は、この関係を統計的に観察し、これが、

$$V = V_f - \left(\frac{V_f}{D^*} \right) D \quad (2.11)$$

という式で示されることを見いだした⁵⁾。ただし、 V_f は、自由速度 (自動車が自由に走れるときの速度)、 D^* は渋滞密度 (渋滞が発生するときの密度) である。

この式によれば、自動車平均速度は、密度が大きくなるにつれて小さくなり、また、密度が 0 となると最大の速度 V_f となる。

2) 佐々木綱：前掲書，31頁。

3) 佐々木綱：前掲書，31頁。

4) Greenshields, B. D.: "A Study of Highway Capacity," *Highway Research Board, Proceedings*, Vol. 14, 1934.

加藤晃，山根孟訳；M. ウォール，B. V. マーチン著：『計画者と技術者のための交通工学(下)』，東京，鹿島研究所出版会，昭和48年，225頁。

5) 加藤晃，山根孟訳：前掲書，8-9頁。

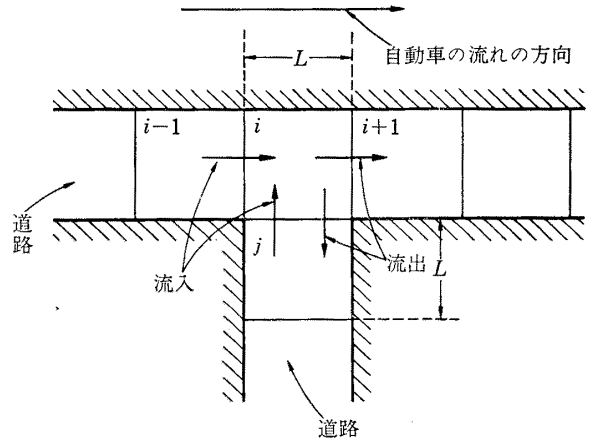


図1 ここでのシミュレーションにおいて前提とする道路の構造

III シミュレーション・モデル

上記の諸性質を基礎として、道路上の自動車の流れを示すシミュレーション・モデルをつかった。ただし、ここで前提とする道路の構造は、図1のようなものである。この図に見られるように、道路は、長さ L の区間に分けられ、第 i 区間の左側の区間を第 $i-1$ 区間、右側の区間を第 $i+1$ 区間、下側の区間を第 j 区間とする。自動車の移動方向は、第 $i-1$ 区間から第 $i+1$ へ方向とする。また、その自動車の流れの一部が、第 j 区間へ流出し、さらに、その流れに第 j 区間から自動車が流入すると仮定する。

上述のような道路の構造を前提としたモデルは、つぎのように書かれる。

$$D_i^{t+1} = D_i^t + \Delta D_i^{t+1} \quad (3.1)$$

$$\Delta D_i^{t+1} = I_i^{t+1} - O_i^{t+1} + G_i^{t+1} - A_i^{t+1} \quad (3.2)$$

$$I_i^{t+1} = I_i^{t+1}/L \quad (3.3)$$

$$O_i^{t+1} = O_i^{t+1}/L \quad (3.4)$$

$$G_i^{t+1} = G_i^{t+1}/L \quad (3.5)$$

$$A_i^{t+1} = A_i^{t+1}/L \quad (3.6)$$

$$I_i^{t+1} = R_{i-1,i}^t \times [V_{i-1,i}^t \times D_{i-1}^t \times S_{i-1,i} \times \Delta T] \quad (3.7)$$

$$O_i^{t+1} = R_{i,i+1}^t \times [V_{i,i+1}^t \times D_i^t \times S_{i,i+1} \times \Delta T] \quad (3.8)$$

$$G_i^{t+1} = R_{j,i}^t \times [V_{j,i}^t \times D_j^t \times S_{j,i} \times \Delta T] \quad (3.9)$$

$$A_i^{t+1} = R_{i,j}^t \times [V_{i,j}^t \times D_i^t$$

$$\times S_{i,j} \times \Delta T] \quad (3.10)$$

$$V_{p,q}^t = \frac{\alpha V_p^t + \beta V_q^t}{\alpha + \beta}, \quad \alpha + \beta = 1, \\ \alpha, \beta \geq 0 \quad (3.11)$$

$$V_i^{t+1} = V_f \left(1 - \frac{D_i^{t+1}}{D^*}\right) \quad (3.12)$$

$$Q_i^{t+1} = V_i^{t+1} D_i^{t+1} \quad (3.13)$$

ただし、これらの式中の添字 i, j は、第 i 、第 j 区間の値であることを、 p, q は i または j であり、添字 t は時点 t の値であることを示し、各文字は、下記のような意味をもっている。

ΔD_i^{t+1} : $D_i^{t+1} - D_i^t$

D^* : 渋滞時の密度

I_i' および G_i' : 区間 i への、区間 $i-1$ および区間 j からの流入量

O_i' および A_i' : 区間 i から区間 $i+1$ および区間 j への流出量

R_{pq} : 区間 p, q 間の境界での道路幅員率、すなわち、標準的道路幅員を 1 とし、これを基準として第 p 、第 q 区間の道路の幅員を W_p, W_q で表示した場合、 W_q/W_p が示す値

V_i : 区間 i における車の速度

V_{pq} : 区間 p から q への車の移動速度

S_{pq} : 信号による交通可能時間

ΔT : 観察の際の単位時間の長さ

α, β : パラメーター

式 (3.1) は、時点 $t+1$ における第 i 区間内の車の密度 D は、時点 t におけるそれに、時点 t から $t+1$ までの期間における第 i 区間内の変化量 ΔD を加えたものであることを示している。

ΔD は、式 (3.2) に示されるように I_i と G_i とにより増加され、 O_i と A_i とによって減少させられる値である。

上記の I_i, G_i, O_i, A_i は、流入量 I_i', G_i' や流出量 O_i', A_i' を密度の形で示したものであるから、式 (3.3) から (3.6) までの式に書かれているように、 I_i', G_i', O_i', A_i' を L で除した値として表現される。

式 (3.7) から (3.10) までの式は、 $I_i', O_i',$

G_i' および A_i' がどのようにして決定されるかを示した式である。これらは、すべて、同様の仮定の上につくられた式であるので、ここでは、代表的に I_i' をとり上げて、これらの式の構築過程を説明することにしよう。

I_i' は、まず、式 (2.4) に従って、第 $i-1$ 区間の密度 D_{i-1} とその速度（ここでは、第 $i-1$ 区間と第 i 区間との間における車の速度） $V_{i-1,i}$ とによって決定される。しかし、もしも、観察の単位時間 ΔT を大きくすれば、 I_i' は大きくなるから、その値に ΔT を乗じる。そして、さらに、もしも、交通信号によって、第 $i-1$ 区間と第 i 区間との間の車の流入が制御されているとすれば、 I_i は、上述の値 $V_{i-1,i} D_{i-1} \Delta T$ に、交通信号によって与えられた交通可能時間の構成比率 S を乗じて求められなければならない。最後に、道路の幅員が減少、あるいは増大すると、それだけ車の流入量も減少あるいは増加するであろうから、ここまで得られた I_i の値 $V_{i-1,i} D_{i-1} S \Delta T$ に、道路の幅員の変化率 R を乗じることによって、 I_i の算出のための式 (3.7) が得られる。式 (3.8) から (3.10) までの式も同様の仮定によって得られる。

式 (3.11) は、第 p 区間から第 q 区間へ移動する車の速度は各区間の車の移動速度の加重平均であることを示している。

式 (3.12) は、グリーンシールズの得た式である。

最後の式 (3.13) は、時点 $t+1$ における第 i 区間において、式 (2.4) が成立していることを明示したものである。

IV シミュレーション

ここでは、4種類のシミュレーションをおこなった。その第1は、交通事故が起きたときの渋滞に関するものであり、第2は、1本の道路上で場所により交通密度が異なっていたとき、その密度分布の時間的变化に関するものである。また、第3は、車の流入に関するものであり、第4は車の流出に関するものである。そして各シミュレーションは、それぞれ、下記のような

表 1 シミュレーションにおいて交通事故を起す以前の交通密度

場 合	交 通 密 度 (台/km)
I	18.8
II	31.5
III	56.3
IV	75.0
V	93.8
VI	112.5
VII	131.5

条件の下におこなわれた。

(1) 渋滞に関するシミュレーション

交通事故による渋滞を発生させる場合、交通事故が発生する以前の交通密度が与えられる必要がある。このシミュレーションでは7種の状態(場合IからVIIまで)を与えた。その状態は表1に示されている。なお、観察の対象となる区間は1kmの長さの道路を1区間とする100個の区間であり、各区間の交通密度は、すべて同等とした。たとえば、交通密度18.8とは、すべての区間(全体では100区間が用意されている)で、18.8台/kmの交通密度が与えられ、第1区間では、つねにこの区間の交通密度が18.8台/kmとなるように自動車が追加的に流入することを意味する。

上記のように種々の交通密度を与えた理由は、交通密度の高いとき、渋滞現象が急速に遠方まで伝播して行くであろうことが予想され、それが、シミュレーションによって実際に見られるかどうかを検討しようとしたからである。

L はすでに述べたように1km、 D^* は150台/km、観察の単位時間 ΔT は、0.01時間、自由速度50km/h、そして $\alpha=\beta=0.5$ とした。交通事故は第70区間で発生させた。なお、交通事故の発生は、第70区間と第71区間との間の V_{pq} を強制的に0とすることによって与えられる。

(2) 密度分布の変化に関するシミュレーション

このシミュレーションでは、観察の対象とする100区間のうち、第1から第20区間、第41区

間から第60区間および第81区間から100区間までの各区間の交通密度が100台/km、その他の区間のそれが50台/kmとなっている交通密度分布を初期の交通密度分布の状態として与える。そして、第1区間には、(1)と同様に、つねにこの区間の自動車の交通密度が100台/kmとなるように、自動車が追加的に流入することにする。

D^* は、150台/km、 ΔT は0.01時間、自由速度50km/h、そして $\alpha=\beta=0.5$ とした。

(3) 流入に関するシミュレーション

流入が発生する以前においては、すべての区間の交通密度は、75.0としておく。自動車の流入は、第30区間において発生することにする。そして、第1回目に2台の流入が発生した後は、単位時間 ΔT 内に、つねに2台ずつ流入が現われることにした(いうまでもなく、第1区間には、(1)と同様に、つねに、その区間の交通密度が75.0となるように自動車の追加的流入が現われることにする)。なお、 D^* は、やはり100台/km、 ΔT は0.01時間、自由速度50km/h、 $\alpha=\beta=0.5$ とした。

(4) 流出に関するシミュレーション

流出が発生する以前においては、すべての区間の交通密度は、75.0としておく。自動車の流出は、第70区間において発生させることにする。流出は、第70区間の走行自動車台数(ここでは、 $L=1$ であるので、この台数は、交通密度に一致する)の50%とする。そして、第1回の流出が現われた後も、つねに、第70区間の交通密度の50%の流出が現われることにする。ただし、 D^* は150台/km、 ΔT は0.01時間、自由速度は50km/h、 $\alpha=\beta=0.5$ 、 $S=0.8$ とした。ここでは、第70区間と第71区間の中間にある信号機による制御のため、それらの区間の間の自動車の移動量が、それがなくなるときのそれにくらべて20%少なくなると仮定したのである。

V シミュレーションの結果

(1) 渋滞に関するシミュレーション

シミュレーションの結果、たとえば、図2に示されるような交通密度が得られた。この図は、交通密度 75.0台/km（場合Ⅳ）のとき、交通事故が発生し、第70区間で自動車の通行が不可能になった場合10, 20, …, 50単位時間の経過した各時点、すなわち、第10期, 20期, …, 50期の経過後における交通密度の分布状態を示した図である。この図には、第70区間以後の地帯においては、追従する自動車なくなるため、交通密度の低い地帯が次第に拡大し、これに対し、第70区間以前の地帯では、交通密度の高い地帯が次第に拡大して行く有様が明瞭に示されている。図中、たとえば、第10期と書かれている線が交通事故発生後10期経過したときの交通密度分布である。

第50期（時間で表現すれば50期は $0.01\text{h} \times 50 = 0.5\text{h}$ （30分）であるから、30分後ということになる）後において、交通密度分布に変化が現われた区間の数を測定したところ、表2のようになった。

この表によれば、きわめて興味あることが知られる。すなわち、(1)第70区間以前の地帯においては、初期密度が高いとき、影響を受ける区間の数が多いが、これに対して、(2)第70区間以後の地帯においては、初期密度が高いとき、影響を受ける区間の数が少なくなるという現象が見られる。このことは、初期密度が高いときに

表2 交通事故により交通密度に影響を受けた区間の数（第50期における区間数）

場 合	初期密度 (台/km)	第70区間以前	第70区間以後
I	18.8	3 区間	30 区間
II	37.5	6	26
III	56.3	10	21
IV	75.0	13	16
V	93.8	16	12
VI	112.5	20	*
VII	131.3	22	*

は、交通渋滞は急速に波及するが、交通事故に遭遇しなかった自動車は高交通密度のため低速度で事故発生地点から遠ざかることを示しているといえよう。

なお、表2において、場合ⅥとⅦに*印が見られ、そこには数字が記入されていないが、これは、初期密度がこのように高い場合には、シミュレーションの結果が、第70区間以後の地帯において現実には考えられないような状態（交通密度が不自然に不規則的に高まる場所が波状に現われるような状態）——たとえば、図3のような状態（これは、交通密度が131.5台/km（場合Ⅶ）において交通事故が発生したときの結果である）——を発生させるために起った結果である。

このような現象を検討した結果、パラメーター α および β を初期密度に対して不適当な大

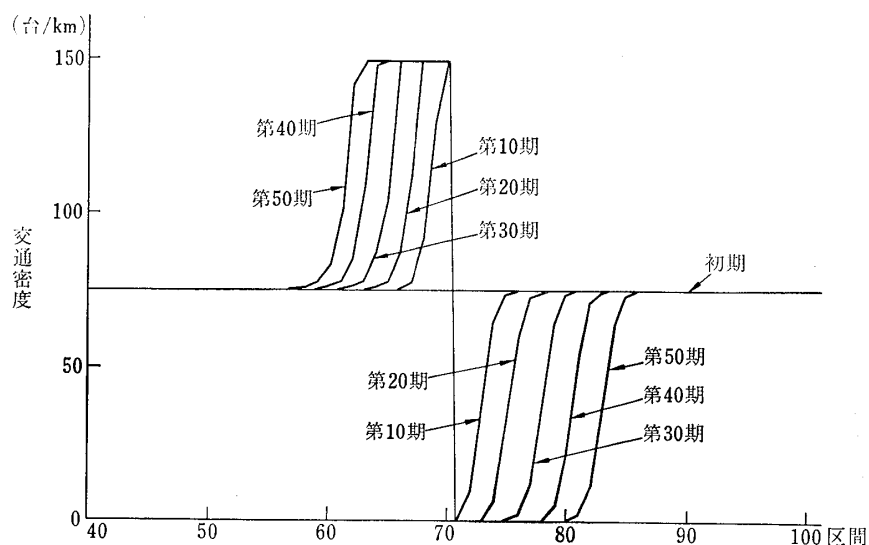


図2 交通事故による渋滞発生シミュレーション

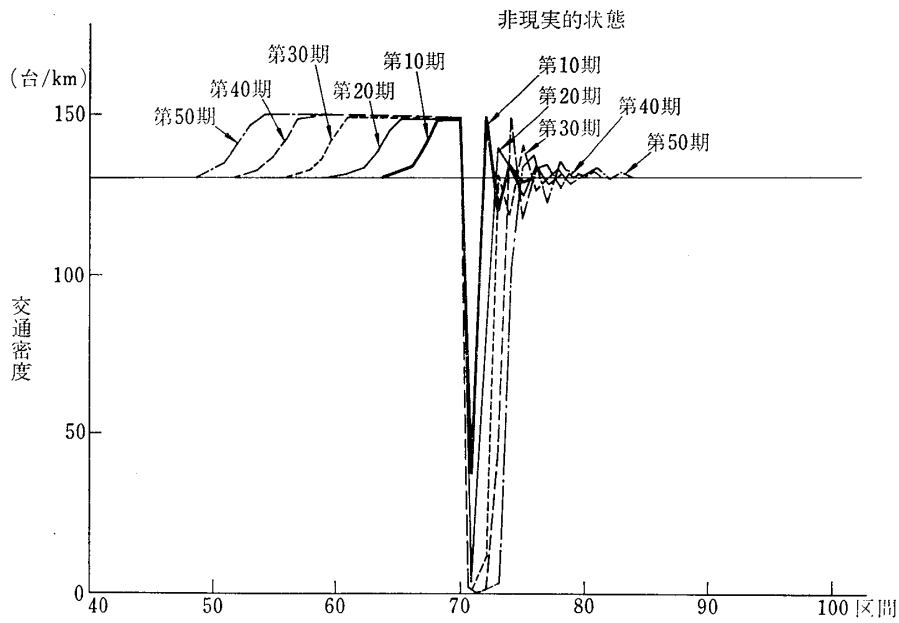


図3 非現実的な状態の起ったシミュレーションの結果

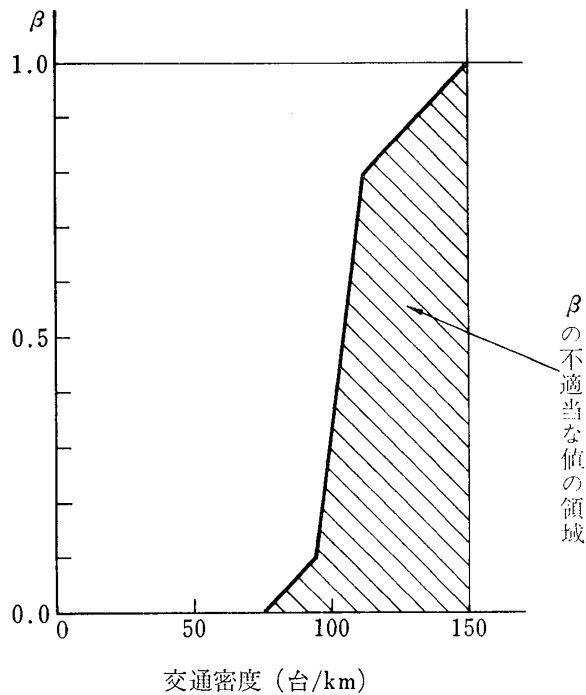


図4 β の不適当な値の領域

きさにしておくとこのような現象が起ることが判明した。たとえば、 $D^*=150$ 台/km のとき、初期密度と β の不適当な値の領域は、図4の境界線の下部の領域であることが実験的に知られた。図の境界線は、点 (0.0), (75.0, 0), (93.8, 0.1), (112.5, 0.8), (131.3, 0.9),

(141.6, 0.94), および (150.0, 1.0) を結ぶ線である。この図から、初期交通密度 112.5 以上では、 $\beta=0.5$ が不適當であることが知られる。

このことは、現実においても、交通密度の高い場合には、 β が高くなければならない、いかえれば、各自動車は、その前方にある自動車の速度に追従する傾向が強くなることを示唆しているといえよう。もし、そうでなければ、現実にも、上述の不自然な波状に現われる高交通密度が見られるはずである。

(2) 密度分布の変化に関するシミュレーション

第50期までの密度分布の変化は図5のようになった。この図によれば、高密度の場所は移動せず、徐々にその高さを低め、低密度の場所も移動せず、徐々にその高さを高めて行く傾向が見られる。

もしも、自動車の走行速度が低密度においても、高密度においても同等であれば、高密度の場所は移動して行くであろうが、自動車の走行速度が密度の関数となっているので、高密度の場所はほとんど動かないという結果が得られるのである。

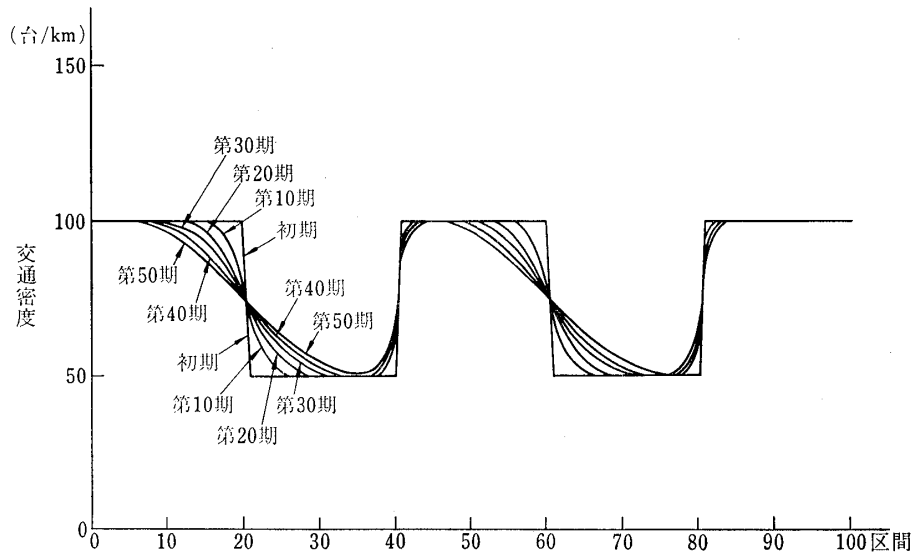


図 5 交通密度の分布状態の変化

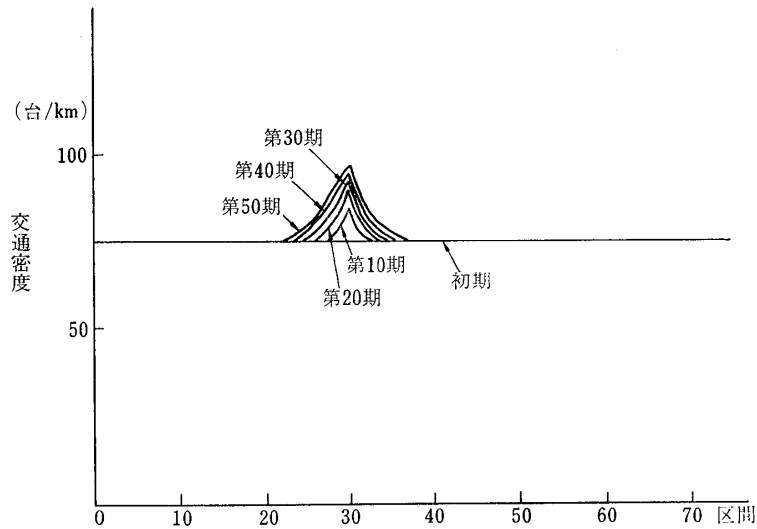


図 6 流入に関するシミュレーション

(3) 流入に関するシミュレーション

流入という現象をシミュレーションによって観察してみると図6のような結果が得られた。

この図から、流入の際には、流入が起った場所の前後に高密度の交通が現われ、連続的な流入がおこなわれると、その高密度の交通流の出現する範囲が次第に拡大して行くということが知られる。

(4) 流出に関するシミュレーション

流出という現象を前述のような条件の下に与

えてみると図7のような結果が得られた。

図7によれば、前述のような条件の下に流出が発生した場合においては、流出の起った場所の前の区間には比較的高密度の交通流が、また後の区間には比較的低密度の交通流が現われることが知られる。

VI 結 語

現代の生活においては、われわれは、もはや、道路上の交通流に対する関心なしではすまされない状態に置かれている。特に、まったく偶発

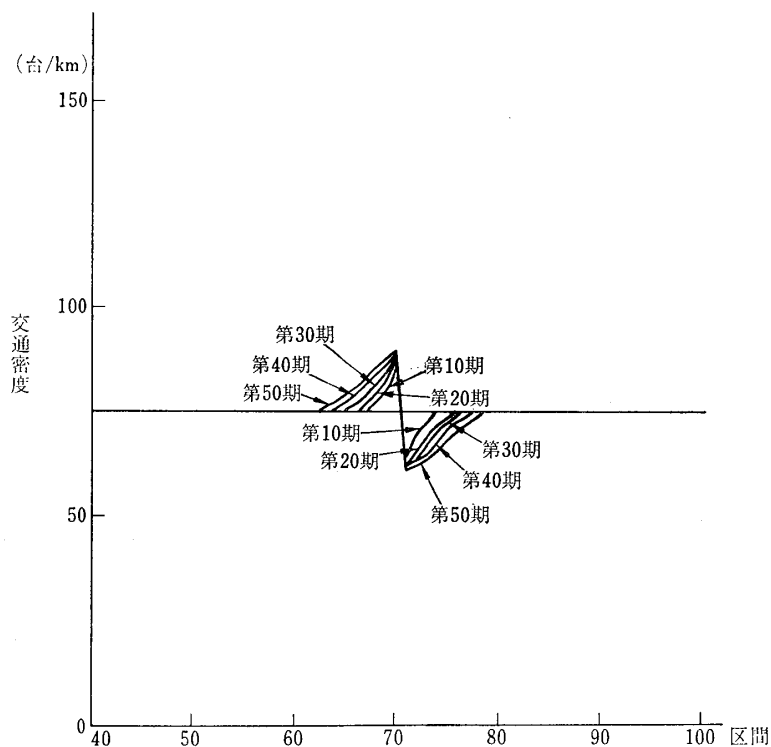


図 7 流出に関するシミュレーション

的に起る道路上の事故やそれによって引きおこされる道路の混雑は、多くの人々に時間的浪費や精神的不快感を与え、人々の大きな関心事項となっている。

したがって、道路上に生起する種々の現象に関する知識を獲得して、これらに関する対策を検討することが必要である。しかし、いかに重要な知識を得る必要があるといっても、道路上で危険のともなう実験をし、その結果を観察することはできない。また、実際に、偶発的に起った状態を実測するということがほとんど不可能である。シミュレーションは、このような条件に置かれた現象を観察する場合、最も有効な方法であるといえよう。

ここでは、道路交通流のシミュレーション・モデルをつくり、それによって、交通渋滞の状態や、密度分布の時間的変化などを観察したのであるが、ここで得られた結果からでも、少なくとも、

(1) 交通密度が高い道路において事故が発生

し交通渋滞が起ると、その交通渋滞は、交通密度が低い道路におけるよりも早く遠方に波及する。

(2) 交通密度が高いほど、道路上の自動車は、その自動車よりも前方にある自動車の動きに追従する傾向を示す。

(3) 道路上の交通密度に粗密があり、しかも第1区間の交通密度が不変となるような車の流入がある場合、その分布状態は、海面の波のように移動するのではなく、粗密の場所は安定的であり移動しない。

(4) 交通流のある道路へ新たに連続的に自動車が流入する場合、流入地点の周囲に密度の高い交通流が形成され、交通密度の高い範囲は次にその地点の前後に拡大して行く。

(5) 自動車の流出が起る場合、流出が起る区間の後方の区間に低密度の区間が現われ、その区間の分布範囲は次第に増大して行く。

という事実が明らかにされた。