

電子計算機を利用したシミュレーション による道路交通流の解析

APPLICATION OF COMPUTER SIMULATION TECHNIQUES TO ROAD TRAFFIC ANALYSIS

高 田 弘*

By Hiroshi Takata

要 旨 本研究は2車線道路の平坦部における自動車交通流に関し、その諸特性を明らかにし、道路および交通条件の変化が交通流におよぼす影響を簡易に、かつ現実的に表現するための手法として電子計算機によるシミュレーションの利用法、およびこれに関連した諸問題について考察したものである。なお実際にこのシミュレーションプログラムを利用して各種の道路、交通条件に応ずる例示計算を行なったので、その結果についても、あわせて報告する。

1. ま え が き

自動車交通量が増大し道路交通の機能が高度化されるにつれて道路の設計、管理あるいは交通の規制に当ってはそこを流れる交通流の実態を十分明らかにするとともにそれらの計画または施策の結果がどのような形で交通流の性格に影響するかという交通工学的検討を十分に行なう必要がある。しかし実際の道路交通現象はその一つ一つが確率的要素を含んでおり全体としてはきわめて複雑なもので特に2車線道路ではその特性上この傾向がいちじるしい。

従来上記のような解析または予測を行なう手段としては交通流の数学的モデルにもとづく理論計算や類似条件の道路における実測資料または現地で行なうトライアルの結果が参照されて来たが、いずれも一長一短があり、特に理論解析の場合はそのモデルに各種の仮定をおいて十分簡単化してもなお解析の過程はかなり複雑となり適用範囲が限定されるのみならず、その結果も十分現実に即したものとはいいがたい実状である。

ところが近時高速度の大型電子計算機が出現し各種問題を解明する方法が進歩するにつれて、これを利用して交通の動態を微視的に計算しその現象を忠実に表現することによって必要な推論を行なういわゆるトラフィックシミュレーションの試みが各国で行なわれるようになり、最近では交通問題研究の手法として欠くべからざる武器となりつつある。

シミュレーションは他の方法に比較してつぎの3つの

大きな利点を持っている。

- (1) 理論解析で取り扱かえないような複雑なモデルまたは現象についても計算することができる。
- (2) 必要な情報、特に実測では得られないような種類の資料をも同時に、かつ多量にうるることができる。
- (3) そのプログラムを効率的に構成しておけば、諸条件の変化またはモデルの変更が容易にでき、各種の条件に対する比較計算が簡単に行なわれる。

本研究では2車線道路の定常状態における交通現象の解析に関して上記の利点を最大限に活用するためのプログラムを作るに当たって考慮すべき諸問題について基本的な検討を加えると同時にこれを利用して道路、交通条件の変化、交通規制の実施等の影響に関する実際の計算を行なったもので、その結果この種のシミュレーションはモデルの構成に十分検討を加え、また高速度の計算機を使用しさえすれば道路の計画、設計、および交通規制方策の決定に当たって、きわめて有用な資料を提供できるものであり、広汎な実用範囲を持つことがわかった。

すなわち道路交通のシミュレーションはプログラムの作成に多くの労力と時間を必要とするなど若干の欠点を有するにもかかわらず、上記の利点を十分利用できる分野において今後ますます発展の可能性を有する有力な手法ということができよう。

なお本研究においては UNIVAC-1107 および IBM-7090 の2機を使用し、このほか予備計算、プログラムテスト等に MELCOM 1101, NEAC 1103 の小型計算機2機を使用した。

2. モデルとシミュレーション

(1) 交通流モデルの性格

シミュレーションを利用して交通流を解析するためにはこれをモデル化して計算機に適用できる形に構成する必要がある。モデルにはいろいろの種類があるが、今回は計数型計算機を使用したので交通流の数学的モデルについて考察した。数学的モデルはその内容と主題の取り扱い方によってつぎの4つの種類が考えられる。

* 正会員 防衛大学校陸上防衛学教室 助教授

- (1) 決定的モデルの解析的取り扱い
- (2) 決定的モデルの数値的取り扱い
- (3) 推計的モデルの解析的取り扱い
- (4) 推計的モデルの数値的取り扱い

従来交通理論の中で流体理論による方法、または交通動力学において用いられるモデルは交通流の性格を一意的に定めた関係によって律しようとするもので決定的モデルの一種であり、これを理論解析によって解析的に取り扱ってゆくものである。これに対して交通流の確率的な性格を重視し車の流れを一種の確率過程と見て推計的モデルを構成しこれを解析的に取り扱う方法は従来から最も多く見られた方法である。

しかし本来複雑な性格を持った交通流を理論解析のみによって解明しようとする方法には自ずから限度がありこれに代わるものとして数値的試行の積み重ねによって所要の解を求めようとする方法が発達したことは計算機の進歩した現在、当然の結果と思われる。

特に交通流の推計的な性格をそのままモデル化してこれに乱数処理の方法を適用してトライアルをくり返すことにより複雑な事象を十分現実的な形で表現することが可能であり、いわばモンテカルロ法の交通流モデルに対する適用ということができよう。

しかし交通流に見られる各現象はすべて推計的要素を含んでおり、これらにすべて乱数処理を適用することは全体としてきわめてぼう大な計算を必要とし実現性を欠くおそれもあり、実際のシミュレーションでは交通流の各事象を細かく区分して、推計的モデルとして表現、処理すべき事象と決定的モデルとして取り扱っても交通流全般におよぼす影響度の少ない事象とを明らかにし、これらを総合して全体を数値的に取り扱ってゆくことになる。

(2) 交通流モデル化の基準

交通流の場合モデル化の基準としてつぎのようなものが考えられる。

a) 自由(希望)速度 他の交通の影響を全くうけない状態でその運転者の採る速度すなわち自由速度は乗用車の平坦部走行の場合は通常その車の最高速度より低く、希望速度に等しいと見ることができ。シミュレーションにおいてはその道路交通条件に於ける自由速度の分布を設定し、乱数処理によって各車に一つの自由速度を与え、他の交通の影響がなければ必ずこの速度を維持または回復しようとするものと仮定する。

b) 追従現象 2車線道路において最も重要な走行現象で、これをモデル化するには追越に關係する両車線上の車の位置、速度、間隔、および追越車の加速能力について基準を定める必要があり、特に追越可否の判断にはその時の交通密度や追越車の自由速度、被追越車との

速度差等が影響すると思われるのでこれらについても妥当な基準を設定する必要がある。

c) 追従現象 追越が制約されて前車に追従する現象のモデル化のためにはまず前車に接近してその影響をうけ始める車頭時間(以下初期影響時間と呼ぶ)、その後の減速過程および追従中の車頭時間について規定する必要があり、特に追従車頭時間についてはその分布にもとづいて推計的に取り扱うべきであろう。

このほか対向車とのすれ違いにともなう減速、または走行中における速度の自然変動等についても細かい基準を設ければさらに現実的なモデルを得るであろうが本研究ではいたずらにモデルを複雑にすることを避け、主として上記の3項に關し実測結果を参照してモデル化の基準を求めた。以下その各項について考察を加える。

3. 速度特性のモデル化

(1) 自由速度の分布

自由速度の分布は従来ほとんどの場合時間分布として表現されることが多かったが、ここでは空間分布を対象として考察する。したがってここにいう自由速度の平均値は空間平均速度である。

図-1は Highway Capacity Manual (以下 H.C.M と呼ぶ) に示されている自由速度の時間分布に關する2つの例(高速道路および幹線道路)から空間分布を計算した結果である。すなわち自由速度 v_0 について時間分布と空間分布の密度関数および分布関数を $f_t(v_0)$, $f_s(v_0)$ および $F_t(v_0)$, $F_s(v_0)$ とすると

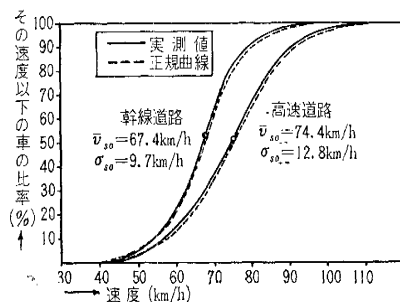
$$\bar{v}_{s0} = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{v_0} f_t(v_0) dv_0} \dots\dots\dots (1)$$

ただし \bar{v}_{s0} : 自由速度の空間平均
また

$$F_s(v_0) = \int_0^{v_0} f_s(v_0) dv_0 = \bar{v}_{s0} \int_0^{v_0} \frac{1}{v_0} f_t(v_0) dv_0 \dots\dots\dots (2)$$

この關係を利用して時間分布の実測資料より Δv_0 ごとに計算すれば空間分布が得られる。図-1は $\Delta v_0 =$

図-1 自由速度の空間分布 (H.C.M)



2.5 km/h として求めたものであるが、分散 σ_{s0}^2 もこの結果から簡単に計算することができる。

図に示す点線はこれらの \bar{v}_{s0} , σ_{s0} にもついで画いた正規曲線で、空間分布の場合はいずれもかなり正規性があることがわかる。

わが国の道路交通についても同じような考察を行なうため国道16号において交通量600 V.P.H 以下の時間を選んで測定した結果を図-2に示す。(H.C.M)の場合と同じく実測値より計算した \bar{v}_{s0} , σ_{s0} により正規曲線を画いて見たが各車種とも、このような交通量の少ない場合の空間分布では正規性をうかがうことができ χ^2 検定の結果もかなりよく適合する。

しかしシミュレーションの場合は制限速度の影響をうけない真の意味の自由速度を基準に採るべきであるから、たとえば図-3に示すような交通密度と平均速度および標準偏差の関係から類推した結果を利用の方がより適当であると思われる。この場合 $\bar{v}_{s0} = 59.2$ km/h, $\sigma_{s0} = 9.8$ km/h となる。

表-1は各種の道路についてこのような実測を行ないその結果からこのような方法で自由速度を推定したものである。これによれば4車線道路は2車線道路に比較して \bar{v}_{s0} は高いがその割に σ_{s0} は大きくない。また勾配部では \bar{v}_{s0} の低下と逆に σ_{s0} は平坦部に比べて大きくなっている。しかし2車線道路の平坦部を考える場合には車種にかかわらずその空間分布は正規性があり、またその空間平均速度と標準偏差の間にはつぎの関係があるものと考えてよいであろう。

$$\phi = \frac{\sigma_{s0}}{\bar{v}_{s0}} = 0.15 \sim 0.17 \dots\dots\dots (3)$$

表-1 各種道路における自由速度(各道路とも2日間にわたる実測結果より推定)

区分	場所	道路条件	方向車線	車種	\bar{v}_{s0} (km/h)	σ_{s0} (km/h)	σ_{s0}/\bar{v}_{s0}
2車線道路	国道16号 (横浜市金沢区)	コンクリート舗装 幅員7.3m 直線平坦	両方向計	乗用車	59.2	9.8	0.166
				小型トラック	53.9	8.6	0.160
				大型トラック	51.1	7.9	0.156
	国道1号 (横浜市戸塚区)	アスファルト舗装 幅員11m 直線平坦	両方向計	乗用車	63.5	10.1	0.159
				小型トラック	58.3	8.9	0.151
				大型トラック	54.8	8.3	0.151
国道1号 (薬沢市)	アスファルト舗装 幅員11m 勾配6.5%	両方向計	乗用車	46.9	10.5	0.224	
			小型トラック	37.0	11.1	0.300	
			大型トラック	32.0	9.0	0.281	
箱根新道 (箱根新畑宿)	アスファルト舗装 幅員7.9m 勾配8%	両方向計	乗用車	46.4	10.8	0.233	
			小型トラック	40.0	10.2	0.255	
			大型トラック	33.3	10.4	0.312	
4車線道路	首都高速1号 (東京都)	分離4車線 直線 勾配1.2%	東京→羽田 外側車線	乗用車	73.1	11.3	0.155
				小型トラック	65.9	9.2	0.140
				大型トラック	64.8	8.3	0.128
	藤沢バイパス (藤沢市)	非分離4車線 直線平坦	下り内側 下り外側 下り外側	乗用車	76.5	8.1	0.106
				小型トラック	75.3	9.8	0.130
				大型トラック	65.1	—	—
藤沢バイパス (藤沢市)	非分離4車線 直線平坦	下り内側 下り外側 下り外側	乗用車	73.0	10.1	0.138	
			小型トラック	59.9	8.2	0.137	
			大型トラック	56.2	7.7	0.137	

図-2 速度の空間分布
(国道16号において測定2時間交通量1120台)

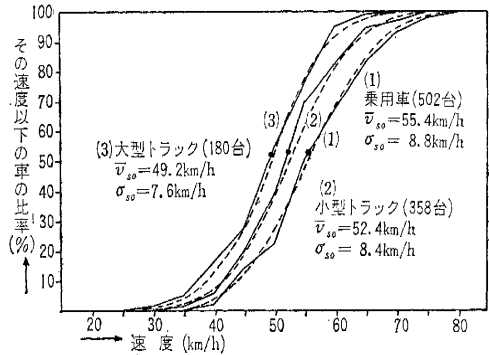
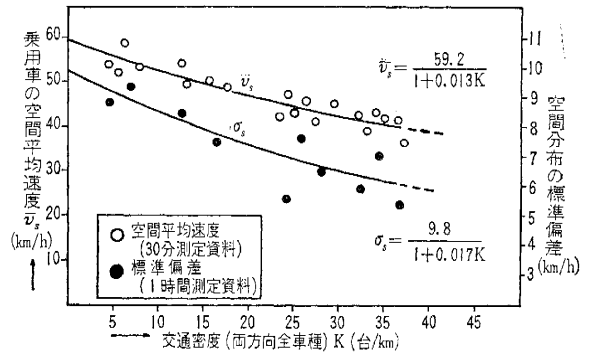


図-3 乗用車の空間平均速度と空間分布の標準偏差
(国道16号)



(2) 前車の影響による減速

自由な追越を制限されるような交通流の中を走行する車が次第に前車に接近し、車頭間隔がある値以下になる

この車は前車の影響をうけて自己の希望速度を保つことができなくなり減速し始める。

この初期影響をうける時間については(H.C.M)に示す例では乗用車で9秒とされているが国道16号で測定した結果によれば図-4に示すようにこれより若干短くおおむねつぎの値をとるのが妥当であると思われる。

- 乗用車……7秒
- 小型トラック……6秒
- 大型トラック……4秒

したがってシミュレーションに際してはこの車頭時間以上前車と離れて走行中

の車はすべて自車の希望速度を維持または回復しようとつとめるものと仮定してよいであろう。

追越してできない車が初期影響をうけて減速し始めた場合、その減速度は各瞬間において異なり必ずしも一定の減速過程をとるものではないが、この過程をモデル化するにはかなり数学的な仮定が必要である。

そこで交通力学の手法を用いてモデル化の基準を定めて見る。いま、道路上を走行する車列の座標系を図5のように与えるものとする。このような1次元シミュレーションの系の中における車の動きに関してつぎの仮定を設ける。

- ① 走行中の I 車は $I-1$ 車に接近し車頭時間が初期影響時間より短くなると以後減速を始める。
- ② 減速は追従車頭間隔 $d(I)$ に接近するまで行なわれ $d(I)$ になったとき速度は前車と等しくなる。
- ③ 追従車頭間隔 $d(I)$ は一定の分布にしたがって乱数処理によって与えられる。
- ④ I 車の減速度はその瞬間 (t) における $I-1$ 車との車頭間隔 $S(I)$ に逆比例し、速度差 $v(I)-v(I-1)$ に比例する。

以上の仮定より

$$\dot{x}(I)_t = \frac{\mu[\dot{x}(I)-\dot{x}(I-1)]_{t-\Delta}}{[x(I-1)-x(I)]_{t-\Delta}} \dots\dots(4)$$

ただし Δ : 反応のためのおくれ時間

μ : 定数

この関係はつぎの範囲で成り立つ

$$V(I) \cdot T_m \geq S(I) \geq d(I) \dots\dots(5)$$

ただし T_m : 減速開始時の車頭時間

$V(I)$: I 車の初期速度

連続減速過程では反応おくれ時間を無視しても影響は

図-4 車頭時間と平均速度

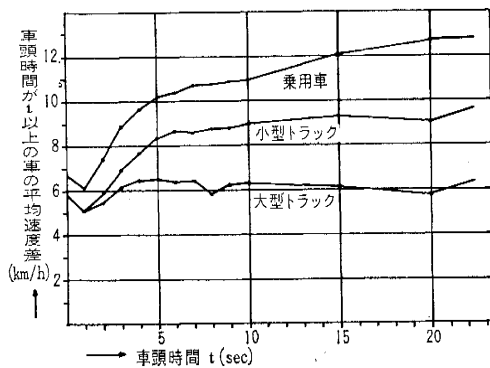
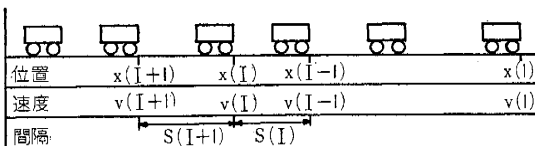


図-5 車列の座標系



少ないから式(4)より

$$\dot{x}(I) = -C \log[x(I-1) - x(I)] + C' \dots\dots(6)$$

すなわち

$$v(I) = -C \log S(I) + C' \dots\dots(7)$$

しかるに

$$v(I) = V(I) \text{ で } S(I) = V(I) \cdot T_m$$

また

$$v(I) = v(I-1) \text{ で } S(I) = d(I)$$

であるから

$$V(I) = -C \log\{V(I) \cdot T_m\} + C'$$

$$v(I-1) = -C \log d(I) + C'$$

これより

$$C = \frac{V(I) - v(I-1)}{\log \frac{d(I)}{V(I) \cdot T_m}}$$

$$C' = V(I) + \{V(I) - v(I-1)\} \frac{\log\{V(I) \cdot T_m\}}{\log \frac{d(I)}{V(I) \cdot T_m}}$$

$$\therefore v(I) = V(I) - \{V(I) - v(I-1)\} \frac{\log S(I) - \log\{V(I) \cdot T_m\}}{\log d(I) - \log\{V(I) \cdot T_m\}} \dots\dots(8)$$

図-6 は $T_m=7$ 秒, $V(I)=72$ km/h, $v(I-1)=36$ km/h として各種の追従車頭間隔に応ずる速度の変化状態を例示したもので、前車に接近するにつれて次第に減速度は大きくなる。

4. 車頭時間および追越特性のモデル化

(1) 車頭時間の分布

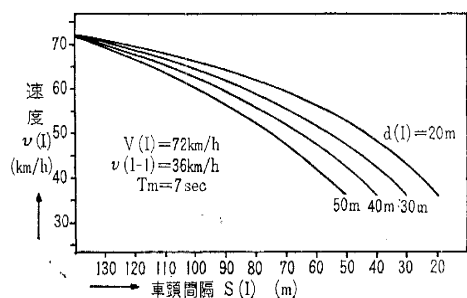
a) Leader と Follower 車頭時間の分布は交通流のモデル化に当り、きわめて重要な要素であるが、2車線道路の場合は、車群を作って走るものが多く単純な Poisson 流として取り扱うことは無理である。そこで交通流を自由走行車 (Leader) と追従走行車 (Follower) の2つのおのおの独立な流れが合成されたものと仮定する。この場合任意の時間間隔 θ に1台も車の通過しない確率 $q(\theta)$ は

$$q(\theta) = (1-r)Q \bar{f}_L e^{-\theta \bar{f}_L} + rQ \bar{f}_F f(\theta) \dots\dots(9)$$

ただし Q : 単位時間当り交通量

r : Follower の台数比

図-6 前車の影響による減速



\bar{t}_L : Leader の平均車頭時間

\bar{t}_F : Follower の平均車頭時間

$f(\theta)$: θ 時間に Follower が 1 台も通過しない確率

そこでいま車頭時間を一般に t として表わしその出現確率を $p(t)$ とすると $t \sim t+dt$ の車頭時間が単位時間内出現する回数は $Qp(t)dt$ であるから、任意にある時点 t をえらびこれより θ 時間観測した場合 θ が完全に車頭時間 $t \sim t+dt$ の中に含まれる確率はつぎのとおりである。

$$Q \int_t^{t-\theta} p(t) dt = Q(t-\theta)p(t)dt \dots\dots\dots(10)$$

すなわちこれより $q(\theta)$ はつぎのように表わすこともできる。

$$q(\theta) = \int_0^\infty Q(t-\theta)p(t)dt = \int_0^\infty Qdt \int_t^\infty p(t)dt \dots\dots\dots(11)$$

したがって

$$p(t) = \frac{1}{Q} \cdot \frac{d^2q(t)}{dt^2} \dots\dots\dots(12)$$

式(9)より

$$p(t) = \frac{1}{\bar{t}_L} (1-r)e^{-t/\bar{t}_L} + r t \bar{t}_F f''(t) \dots\dots\dots(13)$$

また車頭時間が t より大きい確率 $P(t)$ は

$$P(t) = \int_t^\infty p(t)dt = (1-r)e^{-t/\bar{t}_L} + r \bar{t}_F f'(t) \dots\dots\dots(14)$$

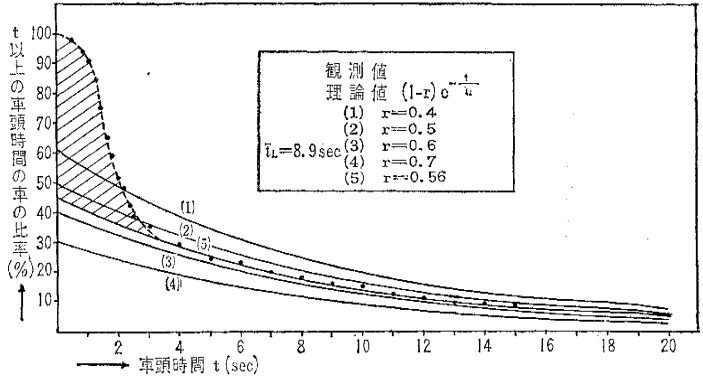
$f(t)$ の形については Follower そのものの判定がむずかしく従来あまり知られていないのでつぎの方法で求めて見る。

b) \bar{t}_L の推定 まず Leader のみの車頭時間の分布について考察する。Leader の車頭時間は $0 \sim \infty$ にわたって分布するが、限界値 t_0 以上の車頭時間の車はすべて Leader であり Follower は含まれないものとすれば、 t_0 以上の車のみについて車頭時間の分布を考えると、

$$P'(t) = e^{-\frac{1}{\bar{t}_L}(t-t_0)} \quad (t \geq t_0) \dots\dots\dots(15)$$

ただし $P'(t)$: t_0 以上の車のみに関し車頭時間が t 以

図-8 車群比(r)の決定(国道16号, 交通量 1346 V.P.H.)



上である確率

t_0 の値については前節で述べたようにわが国の道路交通の場合7秒と考えれば十分である。したがって t_0 以上の車頭時間で走る車の平均車頭時間 \bar{t}' はつぎのように与えられる。

$$\bar{t}' = \frac{1}{e^{-t_0/\bar{t}_L}} \int_{t_0}^\infty \frac{t}{\bar{t}_L} e^{-t/\bar{t}_L} dt = \bar{t}_L + t_0 \dots\dots\dots(16)$$

すなわち、観測値より \bar{t}' を求めると \bar{t}_L は計算できる。しかしこのような決定的方法をとるより観測値に対する式(15)の回帰計算を行なって \bar{t}_L を決定した方がよい結果を得られる。図-7 は国道 16 号における観測結果につき7秒以上の車頭時間の車を集計した結果より \bar{t}_L を推定した例である。

c) 車群比(r)の推定 つぎに、問題となるのは Follower の比率 r (以下これを車群比と呼ぶ) である。このためまず全観測資料を図-8のように集計しこの中で Leader のみの車頭時間分布は式(14)の第1項で表わされるからいま求めた \bar{t}_L を用いて t_0 以上の部分に最もよく適合する r を見出せばよい。この場合 $r=0.56$ とすれば最もよい適合が得られるが図において斜線を施した部分が Follower に相当し、この例では4秒以上の車頭時間を持つ Follower はほとんどないことがわかる。図-9 は同一場所で上記の方法により各種の交通量における r の値を求めた結果で交通量の増大とともに r の値も増加するが2車線道路の場合は決して1.0とはなら

図-7 \bar{t}_L の推定(国道16号)

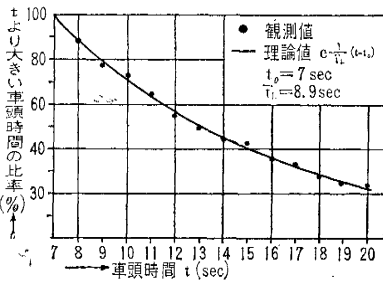
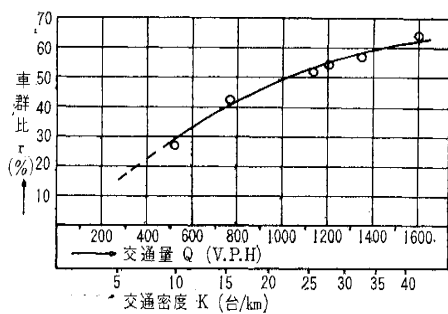


図-9 交通量(密度)と車群比(r) (国道16号における実測値)



ない。

d) 追従車頭時間の分布 \bar{t}_L および r の値から Follower の平均車頭時間 \bar{t}_F を求めるにはつぎの3つの方法がある。

① つぎの関係を利用する

$$\bar{t}_F = \frac{1}{r} \{ \bar{t} - (1-r)\bar{t}_L \} \dots\dots\dots(17)$$

② t_0 以下の車頭時間の合計 T より計算する

$$\begin{aligned} \bar{t}_F &= \frac{1}{Qr} \left[T - Q(1-r) \int_0^{t_0} \frac{t}{\bar{t}_L} e^{-t/\bar{t}_L} dt \right] \\ &= \frac{1}{Qr} \left[T - Q(1-r)\bar{t}_L \left\{ 1 - e^{-t_0/\bar{t}_L} \left(\frac{t_0}{\bar{t}_L} + 1 \right) \right\} \right] \end{aligned} \dots\dots\dots(18)$$

③ 全交通量より Leader を差し引いた部分に $f(t)$ をあてはめることによって \bar{t}_F を求める。

実際には③の方法によるのが最も妥当な結果が得られる。ここで $f(t)$ の形としてつぎの分布形を仮定する。

$$f(t) = e^{-\beta\lambda t} \sum_{n=0}^{\beta-1} \left(1 - \frac{n}{\beta} \right) \frac{(\beta\lambda t)^n}{n!} \dots\dots\dots(19)$$

ただし $\lambda: 1/\bar{t}_F$ $\beta: 定数(整数)$

これより

$$f'(t) = -\lambda e^{-\beta\lambda t} \sum_{n=0}^{\beta-1} \frac{(\beta\lambda t)^n}{n!} \dots\dots\dots(20)$$

図-10 追従車頭時間の分布

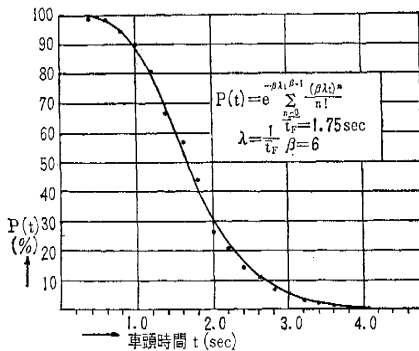
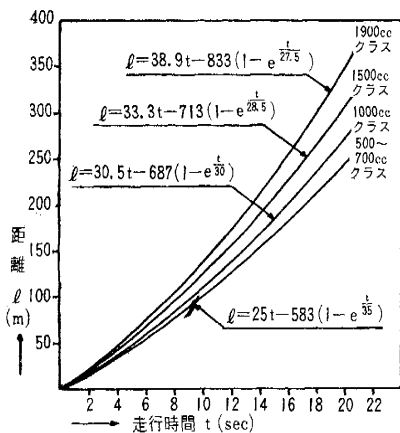


図-11 追越加速テスト結果の集計 (初速 30 km/h より最大加速による)



したがって式(14)より

$$P(t) = (1-r)e^{-t/\bar{t}_L} + re^{-\beta\lambda t} \sum_{n=0}^{\beta-1} \frac{(\beta\lambda t)^n}{n!} \dots\dots(21)$$

右辺第2項はいわゆる Erlang 型の分布で β の値が増加するにつれてその Regularity が増すがこの例の場合 $\beta=6$ としたとき最もよく追従車の分布を説明することができる。図-10 はこの結果を示すもので β の値は他の2車線道路平坦部においても同じような結果が得られた。

(2) 追越時間と距離

ギヤシフティングをしないで、ある初速から行なう追越の場合の加速能力を規定するには理論的な計算よりも実際の加速テストの結果から走行時間と走行距離を基準として求める方が適切である。図-11 は最近数年間の国産の乗用車について行なった最大加速のテストの結果を総合し、各クラスごとにおおの 4~6 車種の平均を求めたものでつぎのような曲線がかなりよくあてはめられる。

$$l = At - B(1 - e^{-t/C}) \dots\dots\dots(22)$$

ただし l : 追越開始後の走行距離 (m)

t : 追越開始後の走行時間 (sec)

A, B, C : 定数

これより時間 t における速度 v (m/sec) および加速度 a (m/sec²) を求めることができる。

$$v = \frac{dl}{dt} = A - \frac{B}{C} e^{-t/C} \dots\dots\dots(23)$$

$$a = \frac{d^2l}{dt^2} = \frac{B}{C^2} e^{-t/C} \dots\dots\dots(24)$$

この両式より

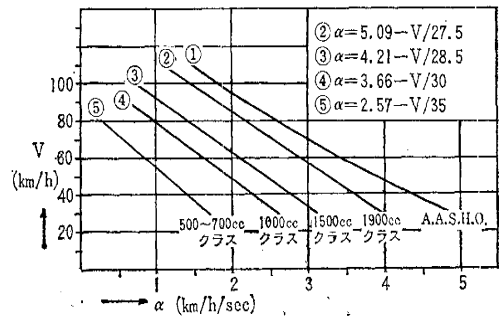
$$a = \frac{1}{C} (A - v) \dots\dots\dots(25)$$

実用に適するように加速度を α (km/h/sec), 速度を V (km/h) として表わすと

$$\alpha = \frac{1}{C} (3.6A - V) \dots\dots\dots(26)$$

これより α と V の関係を各クラスごとに求めたのが図-12 であるが曲線①は米国の A.A.S.H.O. で示しているものである。この追越加速能力にもとづいて追越に

図-12 速度と加速度



要する時間と距離を求めて見る。追越は常に最大加速で行なわれるものとし、追越前後における最小車頭間隔はその時の速度の関数として示されるものとする、

$$D_P = \frac{1}{3.6} V_0 T_P + l_1 + l_0, \quad l_1 = f(V_1), \quad l_0 = f(V_0) \quad \dots\dots\dots(27)$$

ただし l_1, l_0 : 追越前後の最小車頭間隔 (m)

D_P : 追越距離 (m)

T_P : 追越時間 (sec)

V_1 : 追越車の初速 (km/h)

V_0 : 被追越車の速度 (km/h)

もし追越中の加速度が一定であるとすれば初速に応じて簡単な計算で D_P を求めうるが加速能力は式 (26) に示すように速度によって異なり、しかも一般の追越においては両車の速度差には道路によって安全限度があり追越車はそれ以上加速することなく追越を終るのが普通であるからこのような条件を考慮すると理論計算で D_P および T_P を求めることは困難である。そこで今つぎのような簡単なシミュレーションを行なって見る。

すなわち追越車と被追越車の動きをその時点における加速能力を式(26) から求めることによって Δt sec ごとに計算し、距離および時間を累加してゆけばつぎのような条件が満足された時を以て追越は終り D_P, T_P が求められることになる。

$$L_1 - L_0 \geq l_1 + l_0 \quad \dots\dots\dots(28)$$

ただし L_1 : 追越車の累加走行距離

L_0 : 被追越車の累加走行距離

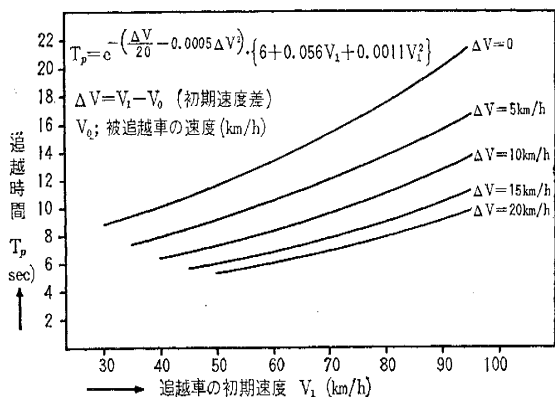
図-13 は 1500 cc クラスの国産乗用車につき式(26)の加速能力にもとづき被追越車との速度差 20 km/h を限度として実施したシミュレーションの結果で、この場合追越前後の車頭間隔はつぎのように規定した。

$$l = 0.25 V + 6 \quad \dots\dots\dots(29)$$

l : (m) V : (km/h)

なおその他のクラスの乗用車および A.A.S.H.O. の例についても全く同様にしてそれぞれ追越時間または距離を求めることができる。

図-13 追越時間 (国産乗用車 1500 cc クラス)



5. シミュレーションの方法

(1) 方法の概要

定常状態における交通現象の表現というこのシミュレーションの目的を満足し、また通常行なわれるシミュレーションのように特定区間に対する車の進入退出にともなう手法のはん雑さをさけるため 図-14 のような循環路線を想定しこの上に乱数処理によって車頭間隔と自由速度を規定した一定台数の車を配置し全車同時にスタートさせる方法を探った。

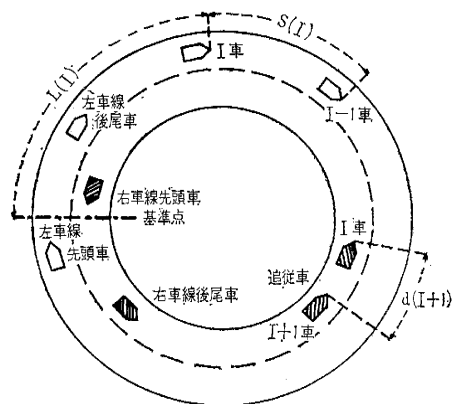
すなわち直線平坦路線の始点と終点を連結するという考え方で、各車の位置は基準点からの距離によって与えられ、この点を通過するごとに修正される。したがって車の台数を変えることなく路線長を伸縮することにより、各種の密度における交通動態を表現することができる。

計算は Δt sec ごとにまずすべての車についてその瞬間の走行状態を判定し、ついで各状態に応じた速度を計算し、その速度によって各車の位置を移動させる方法をとった。このため計算機内においては1台の車に対してそれぞれ 11 語のメモリーを配当しこれにつぎに示すような語元を格納する。

- ① 車の番号 (方向は番号で区分)
- ② 自由速度
- ③ 瞬間速度
- ④ 走行状態
- ⑤ 追越回数 (最初からの累加数)
- ⑥ 循環回数 (基準点通過回数)
- ⑦ 基準点通過時刻 (直前のもの)
- ⑧ 車の位置 (基準点からの距離)
- ⑨ 区間速度
- ⑩ 予備番地 (2)

今回の計算では、一応 200 台に限定して実施したが UNIVAC-1107 の場合各方向 500 台、計 1,000 台程度までは配置できる。またもし車の台数を制限して 1 台当り

図-14 シミュレーションの方法



の配当メモリーを 30~40 語に増加すれば各車の瞬間速度の変化を累積した形で求めることもでき、すべての車が速度分類計を装置して走行するのと同じ結果を表現することも可能である。

またシミュレーションの結果は計算の途中で適時つぎのような形の出力情報としてタイプアウトされる。

すなわち一定時間ごと（今回は走行時間 10 分ごと）にすべての車について

- (a) 位置 (b) 瞬間速度 (c) 走行状態
- (d) 追越回数

またさらに細かい時間区分（今回は 1 分）ごとに

- (a) 空間平均速度 (b) 空間分布の分散
- (c) 全追越回数

基準点通過車に対して

- (a) 地点速度 (b) 車頭時間 (c) 区間速度
- (d) 通過時刻

(2) 走行状態の表現

各瞬間におけるその車の走行状態は自由速度とその瞬間の速度との差違、および他の車との関係位置によって判定する。実際の交通流ではそれぞれの車の走行状態は千差万別であるけれども、あまりに細分することはシミュレーションを困難にするので今回はつぎの 8 種類に区分した。

① 自由走行車：他車に拘束されることなく自車の自由速度を維持して走行中の車

② 加速走行車：他車による拘束がなくなり、自由速度を回復するため加速中の車で、標準加速度（今回は追越加速度の 60% とした）で加速走行する。

③ 減速走行車：自由走行状態にあるにもかかわらず瞬間速度が自由速度より高い車（たとえば追越後）で、標準減速度（今回は一律に -1.8 km/h/sec とした）により減速走行する。

④ 拘束走行車 No. 1：前車との車頭時間が初期影響時間（今回は 7 sec）より短くまた追越不能と見て減速過程に入った車で式 (8) によってその速度は規定されるが追越判断は Δt ごとに実施し、もし途中で追越可能となれば拘束車 No. 2 に変わる。またその車の追従車頭間隔まで接近してなお追越不能であれば追従車となり前車と同一速度をとる。

⑤ 拘束走行車 No. 2：初期影響時間内にあるにもかかわらず追越可能と判断した車で、前車との速度差が 20 km/h 以内であるかぎりその瞬間速度を維持するが追越判断を Δt ごとに反復し、もし追越不能となれば拘束車 No. 1 に変わる。また、追従車頭間隔まで接近してなお、追越可能であればそのまま追越車 No. 1 となる。

⑥ 追従走行車：追越不能のため与えられた追従間隔で前車に追従中の車で Δt ごとに追越判断を行

ない可能となれば追越車 No. 1 となり、また追従走行中前車が追越車となれば加速走行車に変わり $d(I)$ まで間隔をつめる。

追従間隔は式(14)右辺第 2 項により与えられるが通常の指数分布の場合と異なり対数計算で求めるのはむずかしいのでつぎの方法による。

すなわち $[0,1]$ の乱数 R が与えられると

$$R = 1 - e^{-\beta \lambda t} \sum_{n=0}^{\beta-1} \frac{(\beta \lambda t)^n}{n!}$$

これより $\beta=6$ として

$$1 - R = e^{-6 \lambda t} \left\{ 1 + \frac{(6 \lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(6 \lambda t)^5}{5!} \right\} \dots \dots \dots (30)$$

この式に数値的手法を適用して追従車頭時間が求められるが t の値が 4 sec または拘束発生時の車頭時間 T_m 越えるものはこのうち小なる方に一律に規定した。なお今回の計算では実測の結果にもとづき $\lambda=1/1.75$ とした。

⑦ 追越車 No. 1：追越開始してなお前車より後にある車で追越加速度により加速走行する。また $\Delta t \text{ sec}$ ごとに前車との関係位置を計算し前車より前に出た瞬間に追越車 No. 2 となる（前車の速度を 20 km/h 以上越えない）。

⑧ 追越車 No. 2：前車を追抜いて自車線に復帰しつつある車で No. 1 と同じく加速走行するが $\Delta t \text{ sec}$ ごとに後車との距離を計算し式(29)で与えられる値を越えた瞬間を以って追越を終り新しく状態を判定する。

(3) 追越可否の判断

追従車および拘束車はたえず追越可否の判断を行なうが、判断の基準はつぎのとおりである。

まず 図-15 に示すような状態において前車が自由走行車および加減速車であり、しかもつぎに示すような関係が満足されるとき始めて追越可能な状態になったものとする。

拘束車の場合

$$\left(\frac{S_1 - l_1}{V_1 - V_0} + T_p + \Delta T_p \right) (V_0 + V_c) + S_1 + l_0 \leq D_1 \dots \dots \dots (31)$$

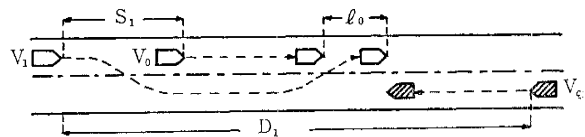
追従車の場合

$$(T' + T_p + \Delta T_p) (V_0 + V_c) + S_1 + l_0 \leq D_1 \dots \dots \dots (32)$$

ただし

S_1, V_1, V_0 ：判断時点における車頭間隔および追越

図-15 追越判断



車, 被追車の速度

l_1, l_0 : 式(27)で与えられる最小車頭間隔

V_c : 対向車線における最近車の速度

D_1 : 判断時点における対向最近車との距離

T' : 追従車がその間隔を l_1 にまで短縮するに要する時間

T_p : 追越時間, 図-13 使用

ΔT_p : 密度と速度差に応ずる調節時間

このうち T' は微小な時間であるから, 標準加速度を用いて dt sec (今回は 0.2 sec) ごとに別途シミュレーションを実施して決定する。また追越可能な状態になっても, 追越に移る確率はその時の密度および追越車の自由速度, 被追越車との速度差等によって異なるが実際に乱数処理によってこれを決定するための基準を求めることはむずかしいのでつぎのような便宜的な方法により, 追越確率の代わりに各密度に応じて調節時間 ΔT_p を定めた。

実際のシミュレーションでは各種の ΔT_p について計算を反復し, 既存の資料(たとえば平均速度)に最もよく適合するようにこれを定めればよい。今回は H.C.M の資料についてこの検討を行ない表-2のような値を採用した。

6. シミュレーションの結果

(1) プログラムと計算時間

シミュレーションのためのプログラムは FORTRAN によったが入出力関係を除いた基本部分のみで約 500 ステートメントの命令ステップを要した。付図に示す流れ

表-2 ΔT_p の値

交通密度 (台/km)	ΔT_p	交通密度 (台/km)	ΔT_p
5	4 sec	20	1 sec
10	2.5 sec	25	0.5 sec
15	1.5 sec	30, 40	0 sec

図はその概要を説明したもので交通密度 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 の7種類の場合について連続して実施するためのプログラムである。

モデルを構成するための入力情報としては表-3に見るように(H.C.M)に示された高速道路の資料および, 典型的な本邦2車線道路の乗用車交通を採用し, 3.4.章に示した実測例にしたがってそれぞれモデル化の基準となる諸元を付与した。ただ今回は試験的に両方向合計200台という少ない台数で実施したので最初に規定する自由速度については乱数処理の結果を一応タイプアウトし, 若干の修正を施こして十分正規分布に適合するよう調整した。

また最初の車の位置については交通密度5(路線長40km)の場合に関し, 車頭間隔の分布が指数分布にしたがうように付与し, その他の密度の場合はそれぞれ路線長を短縮(たとえば密度20で路線長10km)すると同時に車頭間隔もまた同じ比率で短縮した。

計算は $dt=1$ sec として行なったが dt を微小にとるほど, 計算時間は増大し, これに反して結果は正確を期しうことは当然であるが, 各種の dt について試験的に実施した結果ではこれを2sec以上にとると追従, 追越の過程において実状に合わない現象を生じ不相当である。しかし1sec以下に細かくとることはこの種のシミュレーションではいたずらに計算時間を増すのみでそれほどの効果はないように思われる。

このように, 両車線合計200台, $dt=1$ sec としてこのシミュレーションを実施した場合の計算時間はUNI-VAC-1107の場合実走行時間の約20~25%, IBM7090の場合同じく約25~30%であった。ただ密度によって走行現象が変わるため計算時間にもかなりの差があり一律には論じ得ない。

なお上記の大型計算機2機のほか, 予備計算, プログラムの検討等のため MELCOM-1101 および NEAC 1103

表-3 シミュレーションの内容

No.	道路交通条件	実走行時間	基礎資料	自由速度	追越加速	計算台数
1	直線平坦 乗用車のみ 最低速度制限 40 km/h	交通密度 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 台/km につき それぞれ1時間	H.C.M(高速道路)	$\bar{v}_{50}=74.4$ km/h	A.A.S.H.O.の資料による	両車線とも 100 台 計 200 台
2	直線平坦 乗用車のみ 速度制限なし			$\sigma_{50}=12.8$ km/h		
3	追越視距 全路線 300 m	各密度につきそれぞれ 30分間	本邦2車線道路 実測資料	$\bar{v}_{50}=60$ km/h	乗用車 1500 cc クラス (図-12)	
4	同上 200 m			$\sigma_{50}=10$ km/h		
5	全路線の1/4区間 追越禁止			$\bar{v}_{50}=55.6$ km/h		
6	制限速度 60 km/h			$\sigma_{50}=5.9$ km/h		
7	両車線交通量分布 2:1	各密度につきそれぞれ1 時間		$\bar{v}_{50}=60$ km/h		
				$\sigma_{50}=10$ km/h		

の小型計算機（いずれも記憶容量 4000 語）2機をそれぞれ 100 時間程度使用した。

(2) 追越回数および車頭時間

道路上の単位区間で単位時間に実際に行なわれる追越回数およびある一地点を通過する交通流の車頭時間の分布はその交通の混雑度、走行車の拘束度を類推するための有効な基準となる。このシミュレーションにおいては (H.C.M) に示された高速道路の資料とわが国の 2 車線道路における実測資料とにもとづいて、前述の方法により各交通密度につきそれぞれ 1 時間宛路線を循環させこの間に各車の行なったすべての追越回数を記録し、これより単位区間上の全追越回数を計算すると同時に、これらを自由速度に応じて分類し、両者の相関を求めた。

図-16 および 図-17 はその結果を示すもので、両モデルとも交通密度約 30 台/km で追越回数が最大となり、これは交通量 1320 VPH(国産乗用車) および 1560 VPH(H.C.M) に相当する。またこの回数をそれぞれ交通密度で除し 1 台当り平均追越回数を求めて見ると密度

図-16 追越回数 (国産乗用車交通)

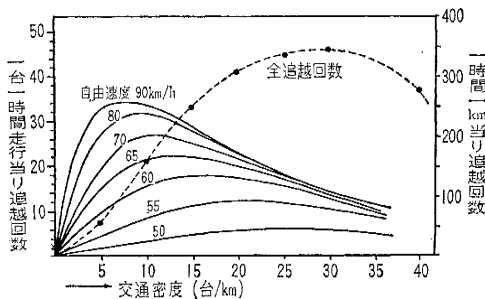


図-17 追越回数 (H.C.M)

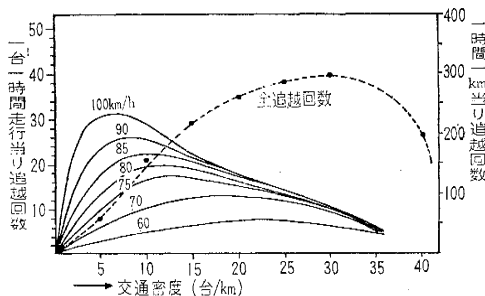


図-18 車頭時間の分布 (H.C.M)

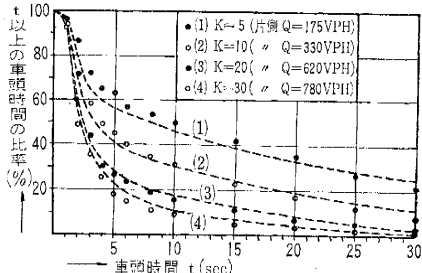
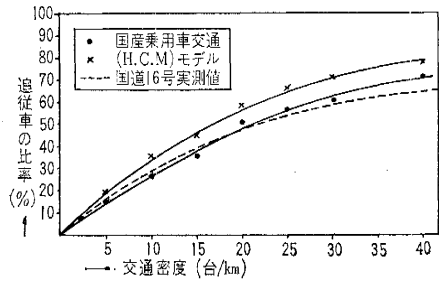


図-19 追従走行車の比率



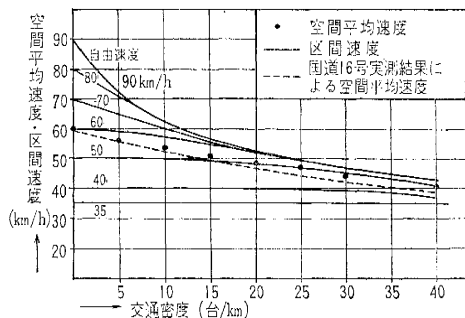
15 台/km(国産乗用車), 12.5 台/km(H.C.M) でそれぞれ最大値を示すが、これは両者とも交通量 800 VPH に相当する。なお自由速度との相関については図より明らかとなり自由速度の高い車ほど、低い交通密度(交通量)において最も多くの追越を行っており、密度 25~30 台/km では、自由速度がその交通流について平均値以上の車はほとんどその特性を失ないすべて同じような走行状態を強いられていることがわかる。

つぎに車頭時間の分布については走行時間中基準点を通過した各車の通過時刻からこれを求めたが 図-18 に (H.C.M) 資料による結果を示す。図中の点線は (H.C.M) の 2 車線道路に関する車頭時間分布の例から各交通密度に応ずる値を計算したもので、このシミュレーションの結果とはやや異なった値となっている。ただシミュレーションの結果も単純な指数分布とは全く相違しており、2 車線道路交通流を単なる Poisson Flow と見ることはかなり無理のあることを裏がきしている。したがって基準点通過車の各走行状態より、前車に追従して走行中の車の比率を求めて見ると 図-19 のようになり、これは国道 16 号における車群実測の結果(図-9)と同じような増大傾向を示している。

(3) 速度特性

【a】空間平均速度と区間速度 速度特性については走行時間 1 分間ごとに路線にある全車について平均速度を求めこれらを 1 時間にわたって平均することにより空間平均速度を求めた(図-20, 21)。(H.C.M) 資料の場合にはかなりよく実測統計値と一致するが、わが国の

図-20 交通密度と区間速度 (国産乗用車交通)



2車線道路の場合は実測値とやや異なった結果となっている。これは国道16号の道路条件の特性によるほか、車種混合の影響が大きいものと思われる。

これに対し自由速度の類似した車ごとに路線区間20kmを走行した間の区間速度を集計し、交通密度との相関を求めて見ると、追越回数の場合と同じように、平均値以上の自由速度を持つ車が、25~30台/kmの密度でほとんどその速度特性を失ない全く同じ区間速度を強いられているのに対し、それ以下の車は比較的高密度になるまで、その自由性を維持している状況をうかがうことができる。

b) 区間速度の分布 瞬間速度または短い区間における区間速度分布に関する実測は従来よく行なわれ、その分布形についてもよく知られているが、きわめて長い区間については実際には区間の途中で出入する車が多く実測が困難である。

しかしシミュレーションにおいては各車とも走行時間の経過に応じてそれぞれ走行開始後の平均速度(区間速度)が計算されているので簡単にこれらの空間分布を求めることができる。図-22, 23は1時間走行後における区間速度の分布をとったもので、瞬間速度の分布にくらべると、もちろん空間平均速度は等しいが、分布形そのものは全く異なっており、とくに平均値は中央値に比較してはるかに小さく、この差違は密度が大きいほどいちじるしくなっている。図-23の点線は瞬間速度分布と

対比するため(H.C.M.)の実測統計資料にもとづいて密度20台/kmにおける分布を計算したもので、区間速度分布に対して速度の分散がきわめて大きいことがわかる。

c) 速度分布の標準偏差 上述の区間速度分布よりその標準偏差を求めたのが図-24である。瞬間速度の場合その分散は交通密度(交通量)の増大とともに減少するがその道路の容量に達しても決して0とはならないことが従来知られている。(H.C.M.)に示す高速道路の場合、交通容量2000VPHにおいても標準偏差約2.6km/hが残存し、わが国の2車線道路では実測の結果によればその値はさらに大きく約5km/hの残存値が見られる。

これは追越に関係のない速度変動がそのまま速度のパラツキとなって観測されるためであるが、これに対して十分長い区間について観測された区間速度の分散はそのまま追越に関係するべきもので、標準偏差の値は瞬間速度に比較してかなり小さくなる。しかし図に示すように実際に行なわれた追越回数から逆算して求めた標準偏差の値に対比するとなお両者には若干の相違が見られる。これは1時間程度の走行時間ではなおその交通流は十分定常状態に達していないため、追越に無関係の速度変動が区間速度の差となって表われているものであろう。

(4) 道路および交通条件の影響

最も典型的な2車線道路に関する2つの資料にもとづいてシミュレーションを行なった結果は上記のようにか

図-21 交通密度と区間速度 (H.C.M.モデル)

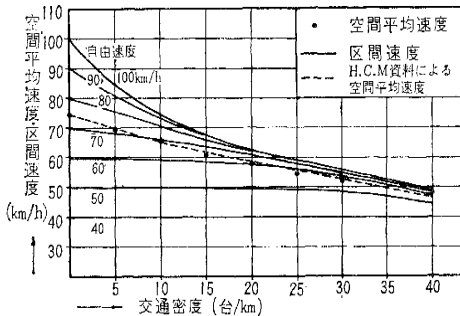


図-22 区間速度の分布 (国産乗用車交通)

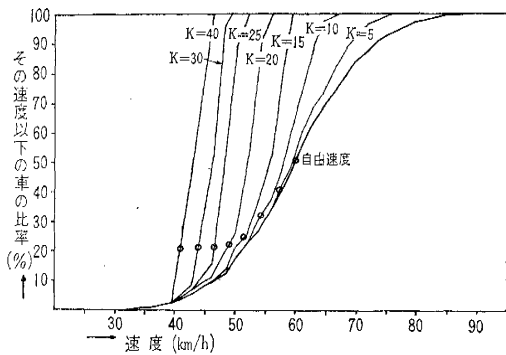


図-23 区間速度の分布 (H.C.M.モデル)

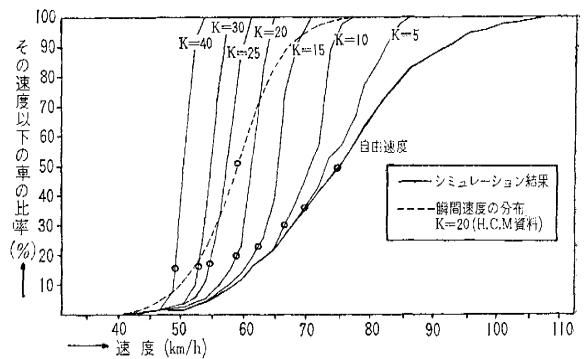
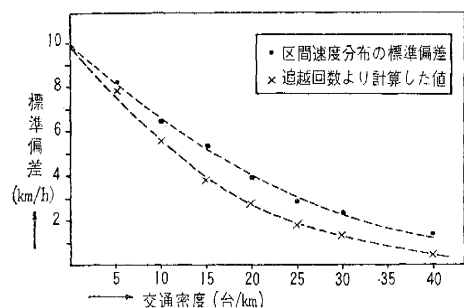


図-24 区間速度分布の標準偏差



なりよく実際の交通を説明しうるが、このプログラムに若干の修正を加えることによって各種の道路条件または交通条件の変化が交通流に与える影響についてこれを現象的に把握することができ、交通施設、あるいは交通規制の効果または影響を予測することが可能である。これらの問題については、主として今後の研究課題であるが、特にわが国の2車線道路交通の場合に関して試験的に実施した2, 3の例をつぎで紹介する。

a) 方向別交通量の影響 これまでのシミュレーションはすべて両方向同一交通量の場合について実施したが、いま、交通量の方向別アンバランスの影響を見るため左車線135台、右車線65台、すなわち交通量2:1として実施した結果を図-25に示す。これによれば両方向を合計した場合の空間平均速度は交通量分布が均等な場合とほとんど大差ないが、高密度においてはむしろ高い平均速度となっている。これに対し方向別平均速度では重交通方向にくらべて軽交通方向の速度がかなり低くなっており、その差は密度25~30台/kmで最大となり以後漸減する。また追越回数が分布均等の場合より多いことは当然であろうが、低密度の場合はむしろ同じような傾向を示すのに反し密度15~20台/km以上になると急激に増大し、前者と同様約30台/kmでピークを示す。さらに追従走行車の比率を求めて見ると密度約15台/kmを境として軽交通方向の比率が次第に増大し、重交通方向にくらべてその拘束度が大きくなることは前述の平均速度低下の傾向を裏がきするものであろう。

b) 制約視距の影響 道路が全区間にわたり一定値以下の視距に制約される場合、当然追越動作は制限され交通流に悪影響を与えるであろうが、いま、全路線を一律に300mおよび200mの2種類の視距にそれぞれ制約されたものとして、シミュレーションにより交通流への影響度を求めて見る。

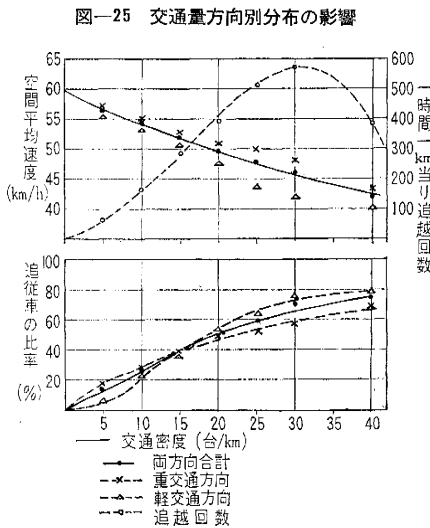


図-25 交通量方向別分布の影響

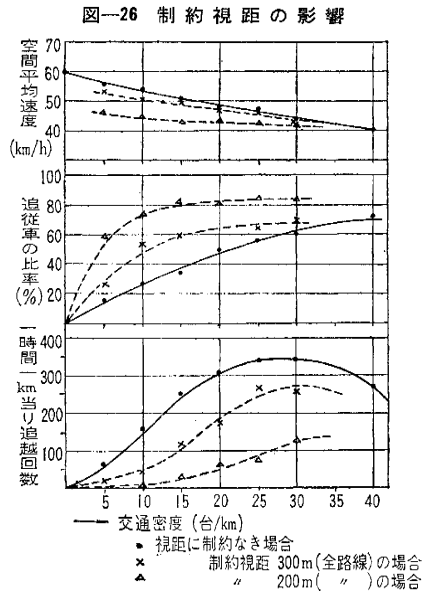


図-26 制約視距の影響

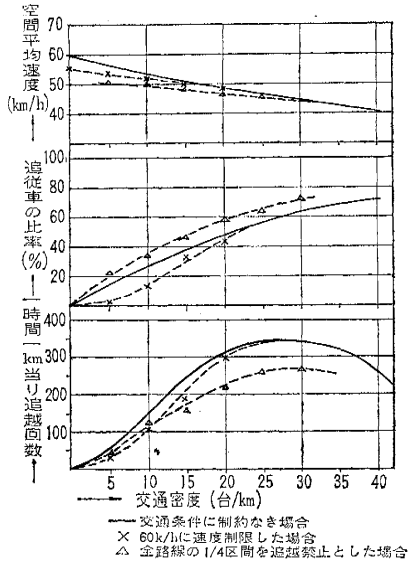
この場合追越以外の交通現象に関してはなんら影響を与えないものとし、ただ追越距離がこの値を越す場合に限り対向車のいかんにかかわらず前車に追従を続けるものと仮定すれば簡単にこのような条件下における現象を表現しうる。図-26はこうして求めた結果を視距に制約のない場合と対比して示したもので、交通密度が小さい場合は制約視距の影響はきわめて大で、特に制約視距200mでは、850 V.P.H (密度20台/km)の交通量においてさえ交通容量に達した時と同じような拘束走行を強いられることになる。

しかし交通密度が増加すると交通流全体の速度が低下し制約視距の影響は次第に少なくなる傾向が見られ、特に300mの場合については、常時、密度30台/km以上の混雑した交通のある道路ではほとんどその影響がないといつてよいであろう。

c) 交通規制の影響 各種の交通規制方策の中で速度制限(60 km/h)、および追越禁止区間の設定(全路線の1/4区間のみ)の2つの場合について図-27に示す。まず自由速度が60 km/hを越える車はすべて60 km/hにその自由速度を制御するものとして計算した結果では、これが全交通流に与える影響は密度15~20台/km以下では認められるが、それ以上交通が混雑してくると制限を設けない場合と比較してほとんど差異がない。また低密度の場合においても、当然平均速度は低く抑えられるが、これに反して追従車の比率、追越回数ともに少なくなり、流れとしてはむしろ齋一性を保っているものと思われる。したがって速度制限の設定に当っては道路の交通量およびその時間変化について十分考慮すべきであろう。

これに対し追越禁止区間が路線の1/4区間に設定され

図-27 各種交通条件の影響



ると平均速度に与える影響はかなり大きくしかもその影響は高密度の交通においてもなお残存し、追従走行を強いられる車もまた増加する。

交通規制の影響に関する考察を行なうには上記のほか、速度分布、各車の速度変動等について解析すればさらにその実態を明らかにすることができるであろう。

7. あとがき

本研究で採用したシミュレーションは2車線道路交通の定常状態における現象を基本的に解析することを目的にしたが、このような簡単な条件設定でモデルを構成してもモデル化に当ってはかなり複雑な計算方式を規定する必要があった。しかし計算機の演算速度が驚異的に高速化された現在ではこの程度のモデルによるシミュレーションは計算時間の上からも十分の実用性を持つものであろう。

すなわち交通規制方法の検討のほか、交通容量の研究、隘路区間(Bottleneck)の影響、道路計画における比較設計の資料等として多くの利用分野を有するものと思われる。

ただ、トラック類の混入した交通流のモデル、および勾配部の影響に関してはきわめて重要な問題であるにもかかわらず、モデル化の過程にかなりの困難さがあり、まだ十分実際の交通現象に適合しこれを正確に説明しうるまでには至らなかった。今後さらに研究と試行を重ねる必要がある。最後に本研究に当って終始ご指導とご援助を戴いた名古屋大学 毛利正光教授に対し感謝すると

ともに、本研究のため数十回にわたって実施した野外実測および数次におよぶ電子計算機の使用に当ってご協力を戴いた数多くの方々に対し心からお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) H.H. Goode: The Application of High Speed Computer to the Definition and Solution of the Vehicular Traffic Problems, Journal of Operations Research Society of America, Dec. 1957
- 2) D.L. Gerlough: Simulation of Freeway Traffic by an Electronic Computer, Proceedings of Highway Research Board, 1956 pp. 543~547
- 3) D.L. Gerlough: Traffic Inputs for Simulation on a Digital Computer, Proceedings of Highway Research Board, 1959 pp. 480~492
- 4) M. Wohl: Simulation-Its Application to traffic Engineering, (PART-I) Aug. 1960, (PART-II) Oct. 1960, Traffic Engineering
- 5) R.M. Lewis: A proposed Headway Distribution for Traffic Simulation Studies Traffic Engineering, Feb. 1963, pp. 16~19
- 6) A. Glickstein et al: Application of Computer Simulation Techniques to Interchange Design Problems, Highway Research Board Bulletin No. 291 pp. 139~163
- 7) J. Harling: Simulation Techniques in Operations Research, Journal of Operations Research Society of America, May-June 1958
- 8) P.A. Perchonok, S.L. Levy: Application of Digital Simulation Techniques to Freeway On-ramp Traffic Operations, Proceedings of Highway Research Board 1960, pp. 506~523
- 9) W. Helly: Simulation of Bottlenecks in Single-Lane Traffic Flow, Theory of Traffic Flow Elsevier Newyork 1961, pp. 207~237
- 10) A. Schuhl: The Probability Theory Applied to Distribution of Vehicles on Two-Lane Highways, ENO FOUNDATION 1955, pp. 59~72
- 11) Bureau of Public Road: Highway Capacity Manual, U.S. Government Printing Office 1950, pp. 27~45
- 12) H. Takata, T. Kisi: Simulation of Uninterrupted Traffic Flow by a Digital, Computer Memoirs of the Defense Academy Vol 3 No. III 1963, pp. 183~194
- 13) 高速道路調査会: 登坂車線設置に関する研究, 1963
- 14) 毛利正光・高田 弘: シミュレーションによる2車線道路交通流の解析, 第20回土木学会年次学術講演会講演概要, IV pp. 87-1
- 15) 高田 弘: 交差のない道路におけるトラフィック シミュレーション, 第19回土木学会年次学術講演会講演概要, IV pp. 10-1
- 16) 高田 弘・栗本 譲: 道路交通流における車群の走行特性について, 防衛大学校理工学研究報告 第2巻第2号, 1964, pp. 175~189
- 17) 高田 弘・栗本 譲: 2車線道路における追越現象および追越視距について, 防衛大学校和文紀要第1巻第4号 1963, pp. 339~351

付図 シミュレーション流れ図(概要)

TIME……走行時間累計
D……路線長
VF(I)……I車の自由速度
その他本文中の記号参照

両車線各100台、交通密度5, 10, 15, 20, 25, 30, 40,
走行時間各密度につきそれぞれ1時間の場合を示す。
(入出力関係を除く)

