

交通制御方策検討のための 自動車交通流のシミュレーション

Car Traffic Simulation for Evaluation of Traffic Control Strategies

高羽 禎雄*・浜田 喬*・田代文之助*・谷口 忠勝*

Sadao TAKABA, Takashi HAMADA, Bunnosuke TASHIRO, Tadakatsu TANIGUCHI,

兼子 隆*・藤田 一彦**・上村 務***

Takashi KANEKO, Kazuhiko FUJITA and Tsutomu KAMIMURA

1. ま え が き

都市における道路交通が直面している過密化の対策として、交通制御方策の面でも信号制御手法の高度化とともに、広域的な迂回誘導や流入規制のような方法が検討されている。

これらのような新しい制御方策を実施した場合の効果の予測は、従来の経験からの類推、理論的解析あるいは野外実験からのみでは必ずしも十分な結果が得られないので、シミュレーションの活用が望まれるところである。

筆者らはさきに、専用デジタル演算装置と汎用電子計算機とを結合したハイブリッド・シミュレーション・システムを開発しているが、本プロジェクトではあらたにシミュレータを増設してシステムの拡充をはかるとともに、上記のような制御方策の検討のためのシミュレーションを試みた。

本文ではこのシステムで用いられているシミュレーション・モデル、野外実験の結果との照合によるモデルの妥当性の検討、シミュレーションによる制御手法の評価・検討の例などについて報告する。

2. シミュレーション手法とシミュレーション・モデル

交通流シミュレーションの手法としては、個々の車両を個別に取扱う微視的手法と、車群あるいは流体としての取扱いをする巨視的手法とがあるが、ここでは種々の制御手法を評価しうる一般的モデルとするために微視的手法を採用する一方で、演算量が大いことから生ずる道路網規模や演算時間に対する制約を打開するために、専用デジタル演算装置に主としてシミュレーション実行上の演算処理を受持たせたハイブリッドシミュレーションシステムを構成した。その概要はすでに発表したとおりであるが、TRN*SIM Iシステム¹⁾では9交差点の道路網を実時間の1/800、TRN*SIM IIシステム²⁾で



写真1 交通流解析システム、右端は交通流シミュレータ TRN*SIM I、左端は TRN*SIM II (中央は交通情報の収集、解析などを行なう別のシステム) で、いずれも本所中央設置の計算機と接続されている。

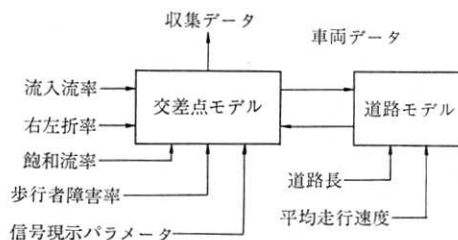


図1 TRN*SIM I モデルにおけるパラメータ設定

は64交差点の道路網を実時間の1/33の処理時間で模擬できる。写真1はシステムの概観を示す。

これらのシステムにおけるシミュレーションモデルの概要を表1に示す。

TRN*SIM I システムでは、これらのモデルは道路モデル、交差点モデルとしてまとめられ、それぞれ固有のハードウェアによって実現され、図1に示すように各種のパラメータを設定することによってシミュレーションが行なわれる。

道路モデルでは車群の分散が考慮されている他は方形波モデルなどのマクロモデルに近いものであって、走行速度の交通量依存性(Q-V特性)、車両による希望速度の分布、車線変更、追越し、対向車両の影響などは考慮されておらず、また交差点流入部における待行列は、道路リンクとは別に交差点模擬装置のカウンタにおける待合せ車台数の計数値として表現される。したがって、こ

* 東京大学生産技術研究所 第3部

** 元東京大学生産技術研究所第3部

*** 元東大大学院生

表 1 シミュレーション・モデルの概要

	TRN*SIM I モデル	TRN*SIM II モデル
道路網の表現		
道路	片側 1 車線のリンク	片側 1~4 車線のリンク
交差点	交差点内距離を無視	短リンクの集合体
車両の挙動		
車両の属性	なし	車種, 目的地
車両の発生	ランダム生起, 周期的生起	ランダム生起, 周期的生起, アーラン分布, 他任意間隔分布
車両の走行	リンク毎の平均速度と分散	リンク部分で定まる追従走行
車線変更	なし	追抜き, 右左折時
右左折	ランダム生起	目的地毎のランダム生起
交差点からの発進	最小車頭時間+ランダム生起	追従走行+ランダム生起
信号現示・干涉		
信号現示	最大 8 現示, 9 種類	最大 12 現示
対向車両による干涉	右折車に対する交差・合流	右折車に対する交差・合流, 直進車同志の車線閉塞
収集データ	方向別流入車, 流出車, 待合せ車台数	地点通過車両台数, 同平均速度 オキュパンス 区間存在車台数, 同平均速度 同車種・加減速状態別台数 待行列長, 渋滞の有無

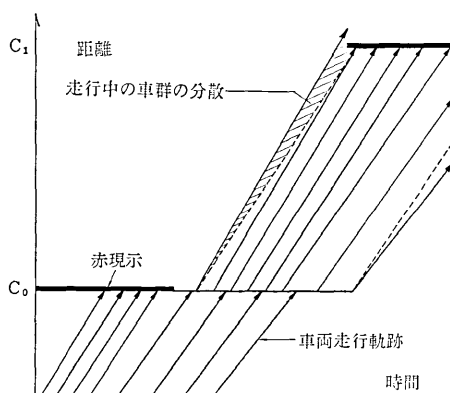


図 2 TRN*SIM I モデルに基づく車群の走行軌跡

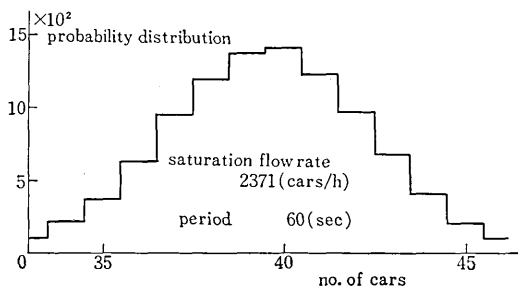


図 3 車両発進モデルによる発進車両台数分布の一例

のモデルにおける車群の走行状況は図 2 のようになる。車群の分散の論理は、平均走行速度および車頭間隔から定められる位置のランダムな移動で表現され、平均速度 36 km/h で 5 台ずつの車列を 400 m 走行させたときの走行時間の広がりにはほぼ ±5% 程度である³⁾。

交差点モデルには、車両の発生、消滅、信号機現示、干涉、データ収集などが含まれた形となっている。ここ

では、交差点はいわば点モデルであって、交差点通過時間や停止、発進に伴う遅れは道路モデルで補正される必要がある。信号現示はハードウェア自体は定周期動作をするが、パラメータの変更により交通感應信号も模擬できる。交差点からの飽和流としての発進は、最小車頭時間 0.75 sec のちはランダム生起とする。図 3 は飽和流率を与えられたときの発進車両台数の分布の一例を示したものである。

TRN*SIM II システムおよびそのモデルについてはすでに報告している²⁾ので改めて言及することを避けるが、リンクまたは短リンクを単位として車両データ群を専用メモリに割付けたこと、車両の挙動、データの収集などの内容をプログラム化して専用磁気ドラムに格納したこと、車両の走行に関する演算のパラメータを書換え可能なテーブルに格納したこと、車両の発生、信号現示などをソフトウェアに受け持たせたことなど、全体として TRN*SIM I の場合より柔軟なシステムとなっている。また、モデルの特徴としては微視的ではあるが数値のきざみが粗いこと、車両による希望速度の分布は考慮していないこと、車線変更、干涉の条件を車両相互の位置関係からのみ定めていることなどの点で、都市内街路において中程度以上の交通量がある場合のシミュレーションを主たる対象とすることを考えている。図 4 は TRN*SIM II モデルにおける同一車線走行時の車群の走行状況の一例を示したものである⁴⁾(図中には作爲的な衝撃波の伝搬が併せて示されている)。このモデルでは追従走行の演算を希望速度関数 F 、希望速度修正関数 H 、加速度制限関数 G などを与えるテーブルを用いて行なうこととしているが、ここでは Greenberg の対数形密度・速度曲線に基いて F を定め、 G を

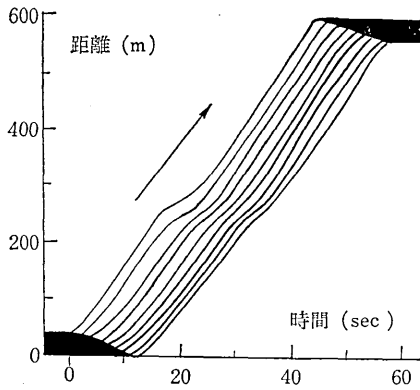


図 4 TRN*SIM II モデルに基づく車群の走行軌跡

の設定により発進交通量 1,895 台/h, 発進遅れ 1.3 sec, H の設定により走行中の速度 54 km/h で交通量 1,778 台/h, 接近停止遅れ 1.4 sec などの実際の都市内街路における観測値と対応のつく値を得ている。

上記に述べたように, このシステムでは微視的モデルを採用してはいるが広域道路網における交通現象を扱うという目的から, モデルにおけるパラメータの設定は主として巨視的観点から定められる。

3. 野外実験システムによるシミュレーションモデルの検証

ここで採用したシミュレーションモデルでは, その要素についてはパラメータの設定は知り得る範囲で実際の観測値に基づく値を選び, また関数形や確率分布などが実際の現象に対応するように選ばれているが, 観測によらない推定に基づいてパラメータを設定したり, モデルの形や数値の粗さから止むを得ず実際と異なる設定を行なっているものもある。このようなシミュレーションの妥当性を検証するためには交通現象を模擬した結果得られる評価量が, 実現象での観測値と一致するかどうかを調べることがひとつの方法である。

ここでは TRN*SIM I モデルについて, 本臨時事業プロジェクトで行なわれた信号制御の野外実験における実測値との照合を行なった例¹⁵⁾を述べる。

野外実験の対象は恵比寿 3 丁目から西麻布 3 丁目に至る全長 1,500m の 5 交差点線状道路である。信号制御のモードはここにおける目的から各交差点信号が独立の周期で動作している場合, 通常固定オフセットで系統化されている場合のふたつを選んだ。

シミュレーションに際しての条件設定やパラメータの選択は次のように行なった。各交差点間の道路長, 平均走行速度は, 地図から求められる交差点間距離, 系統信号の設計速度に基づいて定め, それぞれ誤差は 20 m, 8 km/h 以下とした。後者は 4.5 km/h 以下に選べるが, 道路長と速度の組合せで定まる標準旅行時間の路線にお

表 2 信号パラメータ

交 差 点	恵比寿 3丁目	天現寺	広尾	日赤 病院下	西麻布 3丁目
系統化されないとき					
サイクル (sec)	85	90	80	75	85
スプリット (%)	60	52	60	60	60
系統化されたとき					
サイクル (sec)	80	80	80	80	80
スプリット (%)	60	52	60	60	60
オフセット (%)	0	50	0	50	50

ける総和の一致をはかるための修正を行なったもので, 標準旅行時間のずれは 1.1 sec となった。車線数は実際の道路では 2~3 であるが, 2 車線とみなした。各交差点での飽和流率は, 実測値を 1 車線当りの値に換算して用いた。上記の理由から実測値は 1,818~2,448 台/h と高い値となり, 数値の粗さによる設定値との誤差は 22~77 台/h の範囲であった。右折車の存在, 対向車および歩行者による干渉は無視した。信号現示については表 2 のパラメータを用い, 緑, 黄は GO, 赤は NO-GO とみなして実効現示を定めた。

シミュレーションは, 上記の条件の下で実時間 800 sec を 1 回として実行し, 流入交通量, 総遅れ時間, 総停止回数などのデータを算出し, 20 回の試行を行なって

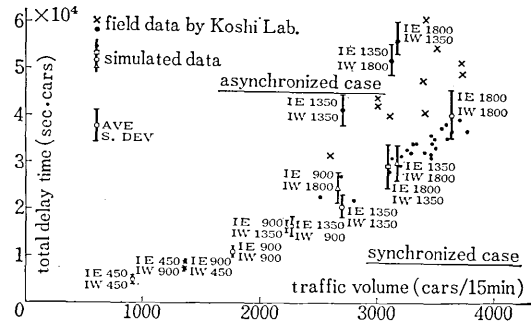


図 5 野外実験システム (恵比寿 3 丁目-西麻布 3 丁目) での総遅れ時間

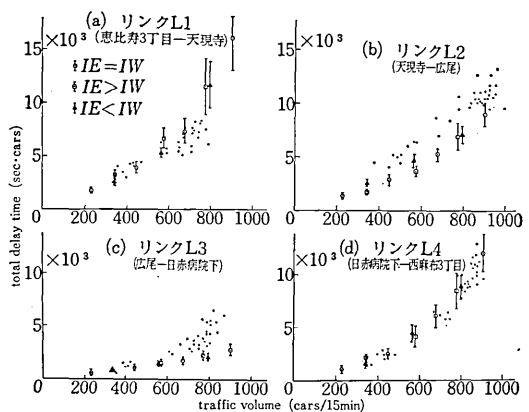


図 6 リンク毎の総遅れ時間

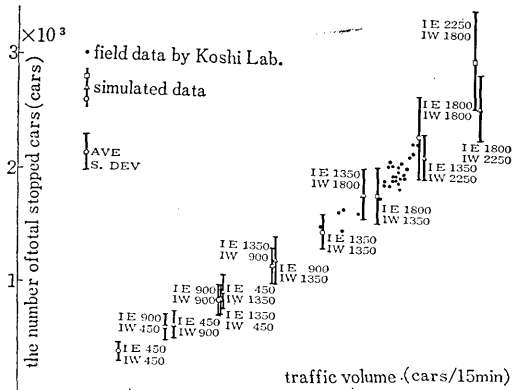


図 7 野外実験システムの総停止回数

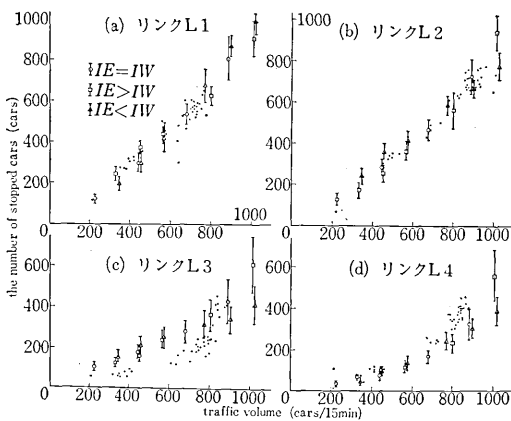


図 8 リンク毎の総停止回数

平均値と偏差を求めた。図 5～8 はその結果である。図 5 はリンク L1～L4 の両方向交通量と遅れ時間の総和の関係を示したもので、野外実験による実測値（各点は 15 分間の値である）を併せ示してある。両者を比較すると、系統化されていない場合にはシミュレーション値の方がやや大となっているが、系統化されている場合にはかなりよい一致を示している。図 6 は系統化されている場合の上記の関係を各リンク毎に示したもので、リンク L3 を除いては同様にかなりよい一致を示している。図 7 は全リンクについての両方向交通量、停止回数の総和を、図 8 はそのリンク毎の関係を同様に示したもので、やはりリンク L3 を除いてはシミュレーション値と実測値とはかなりよい一致を示している。リンク L3 における不一致の原因は、右左折車の存在、道路長が大であるための車群の分散の相違などが影響していると予想されるが、詳細はあきらかでない。

4. 容量以上の交通量に対する信号制御手法の評価

都市内街路において交差点の容量以上に流入車両があり、待行列の成長が避けられないような場合の一制御手法として、スプリット制御により待行列の成長を平均化

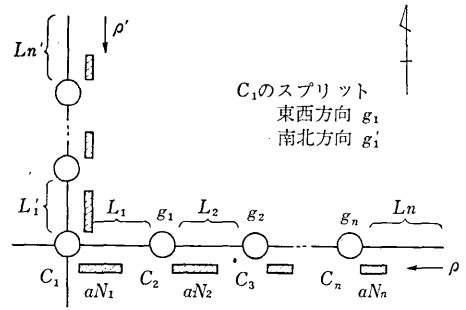


図 9 線状道路

させ、交差点の閉塞に至る時間を最大にする方法を提案し、主として TRN*SIM I モデルを用いたシミュレーションによりその有効性の検討を行なった⁶⁾ので、評価の一例として述べる。

- イ、各信号周期に待行列に加わった車は、同じ周期内に交差点から流出することはない。
- ロ、待行列長が常時検出できる。
- ハ、次の周期における各交差点での右折、左折、直進車の割合が推定できる。

4.1 線状道路の場合

図 9 の線状道路で、第 i 番目のリンクの長さを L_i 、待行列長を aN_i (N_i は待合せ車台数、 a は平均車頭間隔)、その下流側交差点の飽和流率を s_i 、信号のサイクル長を T_c 、スプリットを g_i とする。右左折を考えない場合、1 サイクルの間に増加する車の数は $s_{i+1}g_{i+1}T_c - s_i g_i T_c$ であり、リンクに残されている貯留可能な車の数 α_i は

$$\alpha_i = L_i/a - N_i \tag{1}$$

であるから、閉塞に至る迄の時間 t_i は

$$t_i = \frac{\alpha_i}{s_{i+1}g_{i+1} - s_i g_i} \tag{2}$$

となる。 t_i を最大にするには (2) 式から t_i が $i=1 \sim n$ に対して等しくなるように

$$g_i = \frac{\rho \sum_{j=1}^i \alpha_j + s_1 g_1 \sum_{j=i+1}^n \alpha_j}{s_i \sum_{j=1}^n \alpha_j} = \frac{\rho \alpha_u + s_1 g_1 \alpha_u}{s_i \alpha} \tag{2}$$

と定めればよい。

ただし ρ は流入交通量、 $\alpha = \sum_{j=1}^n \alpha_j$ は全リンクの、 $\alpha_d = \sum_{j=1}^i \alpha_j$ は下流側リンク群の、 $\alpha_u = \sum_{j=i+1}^n \alpha_j$ は上流側リンク群の貯留可能な車の総数である。このとき、 t_i は

$$t_{i \max} = \alpha / (\rho - s_1 g_1) \tag{4}$$

となる、交差点 C_1 のスプリット g_1 は他の条件で与えられるものとする。例えば、図 9 のように交差点 C_1 で他の道路が交差している時、両方の道路が閉塞に至る時

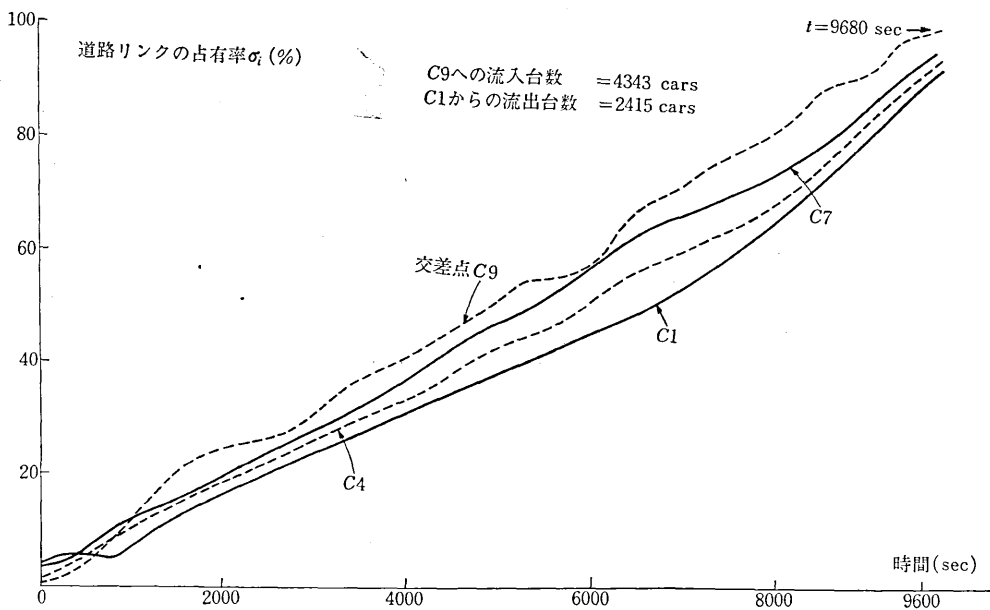


図 10 スプリット制御を行ったときの待行列の成長

間を最大にするには、(3) (4) 式の関係から $g_i + g_i' = 1$, $t_{i \max} = t_{i' \max}$ とすると、 g_i を

$$g_i = \frac{\alpha' \rho + \alpha (s_1' - \rho')}{\alpha' s_1 + \alpha s_1'} \quad (5)$$

とすればよいことが分る。但し ρ' , α' , s_1' は交差点路における流入交通量, 総貯留可能車数, 交差点 C_1 の飽和流率である。

このような制御手法の有効性を検証するためのシミュレーションとしては、図 9 に示した道路において

$$n=9, L_1 \sim L_8=840 \text{ m}, L_9=2,000 \text{ m}$$

$$a=5 \text{ m/台}, s_1 \sim s_9=1,800 \text{ 台/h}, \rho=1,575 \text{ 台/h}$$

の例について行なった。信号はサイクル長 $T_c=80 \text{ sec}$, 同時オフセットとした。

初期状態として 48 台の車が道路内にある時点を選び、(5) 式から g_1 を求めて $G_1=g_1 T_c=42 \text{ sec}$ を得た。その後、

手法 1 全ての交差点の青時間 G_i を 42 sec に固定

手法 2 G_1 を 42 sec に固定し、その他の G_i は(3)

式に基づいて 2 sec を単位として毎周期変更

の 2 つについて TRN*SIM I モデルでのシミュレーションを行なった。その結果

手法 1 $t=2,212 \text{ sec}$ でリンク L_9 が閉塞

手法 2 $t=9,680 \text{ sec}$ でリンク L_9 が閉塞

となった。後者の値は(4)式による計算値 9,691 sec とほぼ一致する。図 10 は手法 2 によるシミュレーションにおいて、各リンクにおける車両貯留台数の増加の過程を道路リンクの占有率 $\sigma_i = aN_i/L_i$ の変化によって示す。

各交差点での右左折を考慮した場合でも、同様に適当

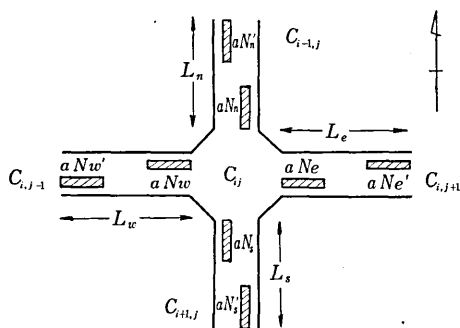


図 11 面状道路網の一部

なスプリットを定めることができる。しかし、右左折率がある程度以上大きい場合には、次節で述べると同様に流入制限などを行なう必要を生ずることがある。

4.2 面状道路網の場合

面状道路網においても、道路リンクに閉塞に近い渋滞が生じていない場合には上記の手法を拡張して用いることができるが、渋滞が著しい場合にはその他の方策を併せ用いる必要を生ずる。そのため、次に述べるように渋滞の状況によって方策を選択する。図 11 は面状道路網中の交差点と、それに連なるリンクの状況を示す。リンクの占有率がある値以下であるとき、リンクは渋滞段階 1、その値を越えたとき渋滞段階 2 であるとする。

イ. 交差点に接続される全リンクが、上流側、下流側とも渋滞段階 1 であるとき

線状道路の場合と同様に、待行列の成長を平均化するようにスプリットを定める。ここでは交差点 C_{ij} のスプリット g_{ij} を

$$g_{ij} = \alpha_{ij} + \beta_{ij} g_{i-1,j} + \gamma_{ij} g_{i+1,j} + \delta_{ij} g_{i,j-1}$$

$$+\varepsilon_{ij}q_{i,j+1} \quad (6)$$

と定める。但し $\alpha_{ij} \sim \varepsilon_{ij}$ は定数で (1)~(5) 式を算出したと同様の考え方によって導かれ、 β_{ij} と γ_{ij} の一方、 δ_{ij} と ε_{ij} の一方は零となる。(6) 式に加速緩和法と同じ手法を用いて解を収束させることができる。

ロ、交差点に接続される上流側リンクのみに、渋滞段階 2 のものがあるとき

イの収束性を保証するため、各リンクの占有率 $\phi_e = aN_e/L_e$ などに基いて

$$q_{ij} = \frac{1 - \text{Max}(\phi_n, \phi_s)}{2 - \{\text{Max}(\phi_n, \phi_s) + \text{Max}(\phi_e, \phi_w)\}} \quad (7)$$

と定める。

ハ、交差点に接続される下流側リンクに渋滞段階 2 のものがあるとき

当該リンクにおける流入量と流出量が等しくなるようにスプリットを定める。そのリンクへの直進、右左折による流入量がいずれも大きいとスプリットの変化のみではこのような条件をみたすことができないので、そのような場合には右左折による流入を禁止する。さらに、このようなリンクが 2 つ以上ある場合には、必要に応じて適当な交差点からの車の発進を制限する。

また、発進制限は渋滞段階が 1 の場合でも 1 周期後に道路が閉塞してしまう場合には同様に適用する。

以上のような制御手法の評価のためのシミュレーションは、マクロモデルによるソフトウェアシミュレーションで行なった。道路網の例としては、交差点数 8×8 の格子状道路網で、網内リンク長 500~800 m、流入部リンク長 2,000 m、流入交通量 1,000~1,500 台/h、飽和流率 1,800 台/h、右左折率 0~0.2 の場合を取上げた。初期状態として ϕ が 10~90% の範囲にあるものとし、

手法 1 青時間 G_{ij} を全ての交差点にわたって等しく固定

手法 2 リンクの占有率に基いて

$$G_{ij} = \frac{\text{Max}(\phi_e, \phi_w)}{\text{Max}(\phi_e, \phi_w) + \text{Max}(\phi_n, \phi_s)} (T_c - 2) \quad (8)$$

として毎周期変更

手法 3 上記イ~ハの方策により G_{ij} を毎周期変更の 3 つについてシミュレーションを行なった。その結果

手法 1 $t=560$ sec で閉塞

手法 2 $t=1,040$ sec で閉塞

手法 3 $t=1,840$ sec で閉塞

となり、上記の手法の有効性があきらかになった。

5. 経路誘導制御における信号オフセットの影響の検討

車の経路を誘導してフローパターンを変化させ、道路網の交通処理能力を改善する方法が、新しい交通制御手法のひとつとして着目される。この場合、都市内街路では

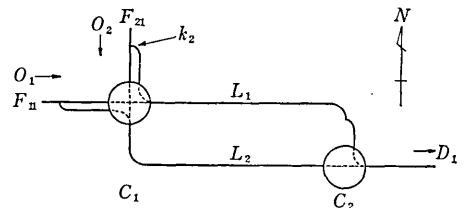


図 12 経路誘導——2 交差点間に二つの経路がある場合

車の旅行時間の中に信号待ちの占める割合が大きく、しかも信号による待合せ時間は交差点への進入方向によって異なるので、その影響は無視し難い。

ここでは、信号オフセットが経路誘導に与える影響の一例を TRN*SIM I モデルを用いたシミュレーションによって検討した。

図 12 は 2 つの交差点 C_1, C_2 の間に 2 つのリンク L_1, L_2 があり、 C_1 では 2 つの方向 O_1, O_2 からそれぞれ流入流率 F_{11}, F_{21} で車が流入し、それぞれ L_1, L_2 を経て C_2 で D_1 へ流出する。但し、 O_2 からの流入車のうち $k_2 F_{21}$ だけは左折してリンク L_1 を経由するものとする。

数値例として $F_{11}=F_{21}=450$ 台/h、 C_1, C_2 の飽和流率 1,800 台/h、信号の周期 72 sec、スプリット 0.5、リンク L_1, L_2 の走行時間 71.3 sec を選んだ。

図 13 はシミュレーションの結果で、 C_2 の信号オフセット γ_2 をパラメータにとり、迂回率 k_2 と総旅行時間 W (通過車両の L_1, L_2 の走行時間に C_1, C_2 での待合せ時間を加えたものの総和) および L_1, L_2 の平均旅行時間 T_1, T_2 (それぞれのリンクの走行時間に C_2 で

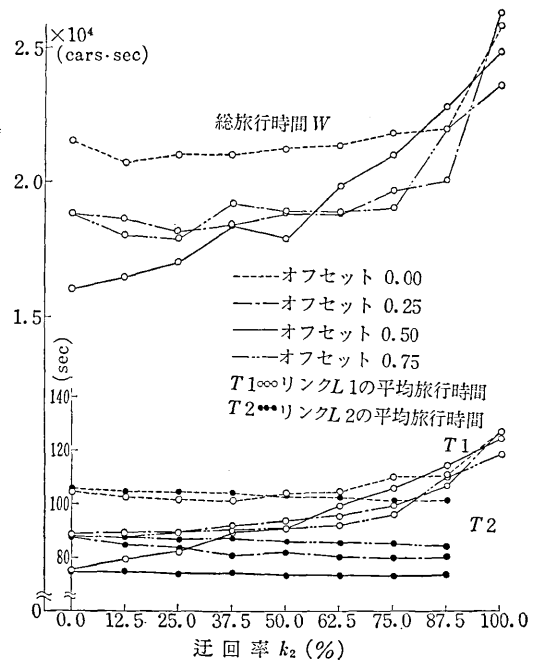


図 13 迂回率と旅行時間の関係

の待合せ時間を加えたものの平均値)との関係を示したものである。

当然ながら、 $\gamma_2=0.5$ の場合にはフロー O_1D_1 は L_1 、フロー O_2D_1 は L_2 にすべて割当てるのが最良である。図示されていないが、 $\gamma_2=0$ の場合にはフロー O_1D_1 は L_2 、フロー O_2D_1 は L_1 にすべて割当てるのが最良である。この場合、例えば前者において k_2 を増加させると L_2 から L_1 に迂回した車は C_2 で赤信号で待合せうえに、その待行列の後に O_1 からのフローが続くことになって旅行時間の増加を招く。一方、 $\gamma_2=0$ の場合には前者の割当てでは両フローとも C_2 の赤信号で待合せることになり、 O_2D_1 の一部を L_1 に転換すると、転換されたフローは C_2 の青信号に出会う。しかし、このフローはフロー O_1D_1 によりすでに形成された待行列の末尾につくことになるので、旅行時間の改善はわずかであり、さらに迂回率を高めるとその待行列長の増加から総旅行時間はかえって大となる。 $\gamma_2=0.25$ および 0.75 の場合には転換されたフローの一部は C_2 の青信号を有効に利用できるが他の部分については上と同様の状況になり、迂回による総旅行時間の改善はたかだか数%にとどまる。

簡単な例による検討ではあるが、この結果は経路誘導制御における信号オフセットの影響が大きいことを示す一方で、定常的な比率に基く配分ではリンク交通量の増加による交差点待合せ時間の増加が、信号オフセットが有利なリンクへの誘導の効果を減ずることを示唆している。

6. む す び

自動車交通流のハイブリッドシミュレーションシステ

ムを開発し、主としてこれらを用いたシミュレーションを行なった。TRN*SIM I モデルによるシミュレーションは中程度の交通量の場合については野外実験の結果とよい一致を示すことがあきらかになり、2, 3の交通管制方策検討のためのシミュレーションに用いられた。TRN*SIM II モデルについても基本走行特性についてのモデルの検証が行なわれた。本プロジェクトで開発された新しい制御論理の検証や、大規模道路網における経路誘導制御のシミュレーションを、今後の課題としてなお進める予定である。

本研究について貴重なご教示と野外実験データの提供を頂いた越助教授ならびに越研究室の方々、ご指導頂いた森脇名誉教授ほか関係各位に謝意を表する次第である。

(1974年8月24日受理)

参 考 文 献

- 1) 高羽禎雄, 谷口忠勝, 兼子隆: 道路交通のハイブリッドシミュレーション, シミュレーション技術研究会資料, 1, 2, p. 85 (昭 48.12)
- 2) 高羽禎雄, 浜田喬, 谷口忠勝, 兼子隆, 藤田一彦: 交通流シミュレーション・システム TRN*SIM II, 生産研究, 25, 2, p. 61 (昭 48.2)
- 3) 森脇義雄, 高羽禎雄, 谷口忠勝: 循環形記憶装置を用いる車両走行状態模擬の一方式, 生産研究, 22, 8, p. 376 (昭 45.8)
- 4) 高羽禎雄, 浜田喬, 兼子隆: TRN*SIM II における車両走行のモデル化, 昭和 48 年電気学会全国大会論文集, 1387 (昭 48.4)
- 5) 高羽禎雄, 兼子隆, 谷口忠勝: TRN*SIM I による野外実験システムのシミュレーション, 昭和 49 年度電子通信学会全国大会論文集, 2395 (昭 49.7)
- 6) 上村務, 高羽禎雄: 容量以上の交通量に対する信号機制御方式, 昭和 48 年電気学会全国大会論文集, 1385 (昭 48.4)