

# 単一交差点におけるスプリット制御手法の シミュレーションに基づく検討

Evaluation on Split Control Strategies for the Isolated  
Intersection with Hardware Simulation

高羽 禎 雄\*・田代 文之助\*

Sadao TAKABA and Bunnosuke TASHIRO

## 1. はじめに

近年都市内道路交通の円滑化のために、電子計算機による広域信号制御が種々進められてきたが、このような信号制御手法についてはなお検討の余地があり、<sup>1),2)</sup>更に制御手法の高度化に対する研究が必要とされている。われわれはこの目的のために交通流シミュレータTRN\*SIM I及びTRN\*SIM IIを用いる交通流シミュレーションによって各種の交通制御方策の検討を行っている。<sup>3)</sup>

信号のパラメータの中で、スプリット(信号一周期中の青時間の比率)は交差する流れにおける通行権の配分を直接定めるもので、交通需要が交差点の交通処理能力の限界に近いかそれを超えるような場合には交通状況を支配する要因となる。ここではスプリット制御における基礎的な特性に関し、より詳細な知見を得ることを目的として、TRN\*SIM I(以後T Iと呼ぶ)による単一交差点のスプリット制御特性についての解析を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 単一交差点の定常スプリット特性

単一交差点のモデルは図1のように交差点Cに対して流入流率 $q$ に基づいて定常的に流入した車両が信号周期 $T$ 及びスプリット $g$ の制御を受けながら飽和流率 $q_M$ に基づいて流出するものとした。

交差点は流入・流出路とも4方向を考え、右左折は無視して直進流のみとした。車両の流入・流出については一定間隔で発生する場合と、ランダムに発生する場合を考え、前者については一様流流体モデルを用いた理論値により、後者についてはT Iによるシミュレーションに

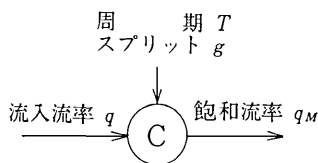


図1 単一交差点のモデル

よって解析を行い、両者を比較検討することとした。

### 2.1 一様流モデルによる理論式

単一交差点においては、交通量が大きくなると到着車両の車頭間隔はしだいに一定値に近づき、交通流は近似的に一様な流体とみなすことができる。このような近似モデルにおいて信号の赤時間中に生成した待行列が次の青時間中にすべて流出するものとすれば、信号一周期中に一方向に生ずる車両の総遅れ時間 $W$ は次式で示される。<sup>7)</sup>

$$W = \frac{1}{2} \frac{(1-g)^2 T^2}{1-\rho} q \quad (1)$$

ただし  $\rho = q/q_M$

また、1台当りの遅れ時間 $\omega$ は(2)式で与えられる。

$$\omega = \frac{1}{2} \frac{(1-g)^2 T}{1-\rho} \quad (2)$$

なお、 $g$ には通常発進遅れ時間、全赤時間等の損失時間が含まれるが、ここではこのような損失時間を0としている。

全方向の遅れ時間の総和 $\Sigma W$ は、 $E, W, N, S$ を4方向を示す添字とすると、スプリット $g$ のもとでは次の(3)式で示される。

$$\Sigma W = W_E(g) + W_W(g) + W_N(1-g) + W_S(1-g) \quad (3)$$

各方向の流入流率を $q_{E-S}$ 、その相対値を $\rho_{E-S}$ とし、

$q_E = q_W = q_{EW}$ 、 $q_N = q_S = q_{NS}$ 、 $\rho_E = \rho_W = \rho_{EW}$ 、 $\rho_N = \rho_S = \rho_{NS}$ とすれば、全方向の総遅れ時間 $\Sigma W$ は(4)式で与えられる。

$$\Sigma W = \frac{(1-g)^2 T^2}{1-\rho_{EW}} q_{EW} + \frac{g^2 T^2}{1-\rho_{NS}} q_{NS} \quad (4)$$

いま、 $EW$ 方向及び $NS$ 方向の損失時間を等しく $L$ とし、 $l = L/T$ とすれば $\Sigma W$ は(5)式で示される。

$$\Sigma W = \frac{(1-g+l)^2 T^2}{1-\rho_{EW}} q_{EW} + \frac{(g+l)^2 T^2}{1-\rho_{NS}} q_{NS} \quad (5)$$

### 2.2 ランダム流モデル(T Iモデル)による定常スプリット特性のシミュレーション

交通流シミュレータT Iでは図1の交差点モデルにおいて、車両の流入・流出にランダムな現象を採り入れている。<sup>3)</sup>ここではこれをT Iモデルと呼ぶこととする。

車両の流入は、流入流率(0~15)の指定に基づき0~1687.5台/時の範囲で112.5台/時の刻みでランダム

\* 東京大学生産技術研究所 第3部

に発生、車両の流出については飽和流率(1~15)及び流出速度(1~8)の指定により種々の値をとるが、本実験で使用した平均速度45km/時の場合、約263~2371台/時の範囲で15段階に設定でき、最小車頭時間間隔を置いたのちランダムな発進を行うモデルを採用している。

シミュレーションは、各方向の初期待合せ車台数を0とし、スプリットを固定した状態で信号周期12周期間のシミュレーションを行った。このうち試行開始後第3周期から10周期間のデータを収集し、これを10回くり返したのち得られたデータ、すなわち i) 各方面ごとの総流入車台数、ii) 同じく総遅れ時間、iii) 同じく1台当りの遅れ時間のそれぞれ平均値と標準偏差を求めた。

2.3 定常スプリット特性

実験は周期  $T$  及び飽和流率  $q_M$  の種々な値について行ったが、ここでは代表例として  $T = 120$  秒、 $q_M = 1840$  台/時の場合を示す。

図2は  $g$  をパラメータとした相対交通量対1車両当りの遅れ時間 ( $\rho - \omega$ ) 特性を示す。実線はTIによるシミュレーション結果、破線は一樣流モデルに基づく理論値である。一樣流モデルに比しTIモデルでは  $\rho = g$  付近において遅れ時間が著しく増大する傾向が明らかである。また  $\rho - g$  の小さい範囲ではTIモデルと一樣流モデルの間で遅れ時間に2秒程度の差が見られるが、これはTIモデルでは青信号の交差点へ到着した車でもいったん待行列を形成した後発進するというモデルの性質によるもので、飽和流率が小さい程この差が大きくなる性質を持っている。図3はNS方向の交通量を675台/時に固定し、EW方向の交通量を225台/時から900台/時まで変えた場合のスプリットと総遅れ時間の関係をもとめたもので、一樣流理論値とランダム事象を扱うTIモデルの違いが明らかである。また、交通量が大きくなり

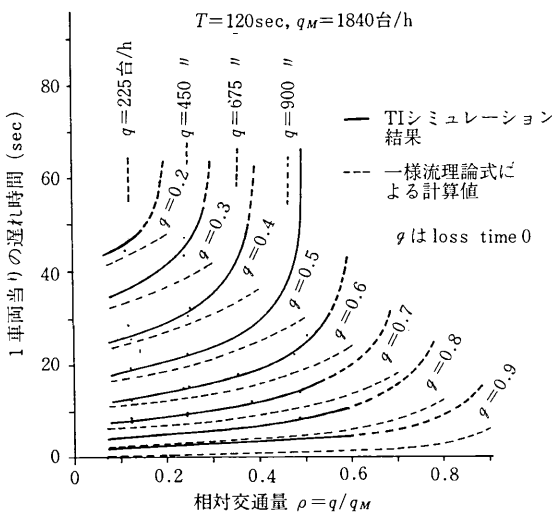


図2 定常スプリット

飽和に近づくると適合するスプリットの幅が非常に狭くなり、最適スプリット(総遅れ時間を最小にするスプリット)の設定が困難なことを示している。

以上の一様流モデル及びTIモデルによる解析結果から、定常状態における流入流率比  $q_{EW}/(q_{EW} + q_{NS})$  と、最適スプリットとの関係を求め、総交通量をパラメータとして描いたものが図4である。破線は一樣流モデルに基づくものであり、(5)式より  $d(\Sigma W)/dg = 0$  と置き、これを  $g$  について解いて得られた(6)式により計算したものである。

$$g_0 = \frac{(1+l)(q_M - q_{NS})q_{EW} - l(q_M - q_{EW})q_{NS}}{(q_M - q_{NS})q_{EW} - (q_M - q_{EW})q_{NS}} \quad (6)$$

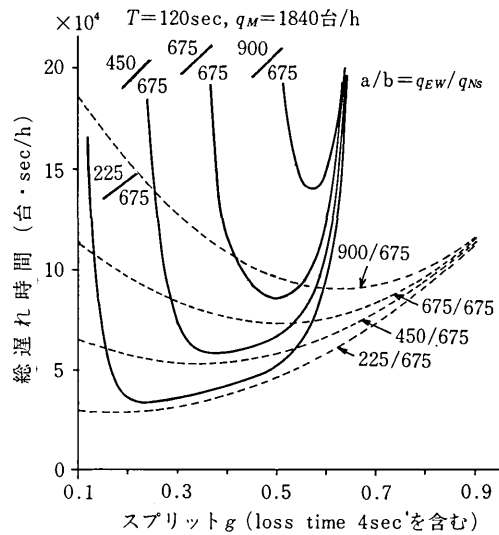


図3 交通量とスプリット特性

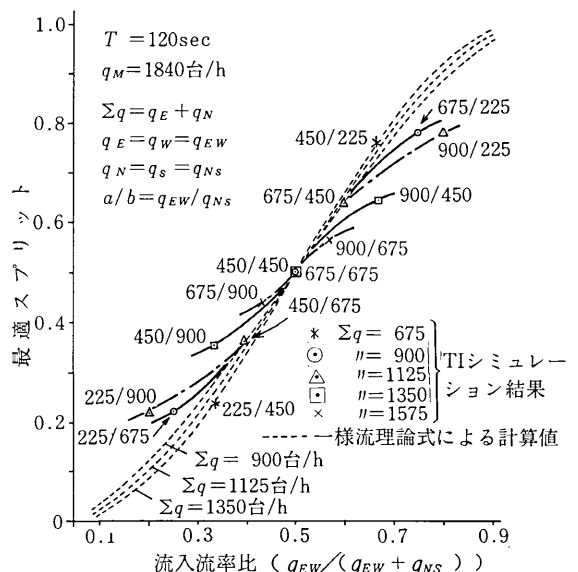


図4 流入流率比と最適スプリット

実線はT Iモデルすなわちランダム流モデルに基づくもので図3及び同様の他のデータから特性曲線の極小値を求めて図示したものである。図よりT Iモデルに基づく特性は交通量が大きくなる程一様流モデルに基づく曲線より傾斜がゆるやかになっている。これはランダムネスの影響によりスプリットの割当ての小さい方にあふれが生ずるため、交通量の小さい方のスプリットを絞る過ぎてはいけないことを示している。

3. シミュレーションによるスプリット制御の検討

スプリット制御の手法としては現在実施されている手法を含めて次のような各種の方法が考えられる。すなわち、

(A) 流入交通量の平均値に基づき定常スプリットを修正する方法

一定時間(例えば15分間)の流入交通量を計測し、その結果から一定時間(例えば計測後の次の15分間)のスプリットを定める。

(B) 車頭間隔を検出して青信号を延長する方法

一定値の初期青時間の後、青信号側の車両の流れを計測し、車両が連続して到着している場合には青信号を延長し、車頭時間間隔がある一定値を越えた場合または最大青時間に達した場合に青を打切る。

(C) 数周期間の飽和度に基づきスプリットを修正する方法

交差する両方向の飽和度が等しくなるように制御する方法で、具体的には例えば停止線直近上流地点でのオキュパンスーを計測・比較して、その差がある値以上となった場合、次の数周期の青時間を増減する。<sup>1)</sup>

(D) 待行列長に基づいてスプリットを修正する方法

交差する両方向の待合せ車台数を計測して、待行列の有無、待行列長の差等に基づいて次の周期または次の数周期間の青時間を増減する。

以上の手法の中では、(A)は現在広く用いられている方法であるが交通量の変動に対する速応性に問題がある。一方、速応性を高めるため計測期間を短くすると交通量の変動による制御誤差が大きくなる。(B)は速応性はよいが交通需要が大きくなり飽和に近づいた場合には制御効果を失う。(C)はA、Bに比べて高度の制御手法であり野外実験で効果のあったことが報告されている。<sup>1)</sup>(D)はほぼ理想的な方法と考えられるが現場における待行列長の計測が困難な点に問題がある。

以上の各制御手法について順次シミュレーションを行い、手法の有効性及び適用範囲等について比較検討を進めつつあるが、ここでは(A)及び(D)に属する一、二の手法に対するシミュレーションを行い、総遅れ時間を評価基準として制御効果の検討を行った。

3.1 スプリット制御のアルゴリズム

(I) 手法(A) 前述のように制御入力として流入交通量を用いるが、計測値から制御変数への変換方法として、一定周期間(これを制御周期 $T_c$ とする) $E, W, N, S$ 各方向ごとに流入車台数を累積した計測値 $q_E, q_W, q_N, q_S$ から $q_{EW} = \max(q_E, q_W), q_{NS} = \max(q_N, q_S)$ として得られる $q_{EW}, q_{NS}$ を制御変数とし、これよりスプリット $g$ を決定する手段として次の二つの手法を選んだ。すなわち

(A-1) 流入流率比 $R = q_{EW} / (q_{EW} + q_{NS})$ を求め $g = R$ とする。これは従来から有効な経験則として実用されている手法である。

(A-2) 一様流モデルによる理論式から得られた最適スプリット値を適用する。すなわち $q_{EW}, q_{NS}$ 及び $q_M$ の値を(6)式に代入して $g$ を決定する。

(II) 手法(D) 制御入力として待行列長を用いる方法として、ここでは総遅れ時間を最小とすることを考え、交差点各方向の青時間開始時の待行列長 $N_E \max \sim N_S \max$ 、青時間終了時の待行列長 $N_E \min \sim N_S \min$ に基づいて次のようにスプリットを修正する方法をとった。

i) 前の周期で $N_E \min \sim N_S \min$ の何れかが0または1でない場合(7)式の正負により青時間を一定値減または増とする。

$$N' = dN/dG = -(S_E q_{ME} + S_W q_{MW}) + (S_N q_{MN} + S_S q_{MS}) \tag{7}$$

ここに $q_{ME} \sim q_{MS}$ は各方向の飽和流率、 $S_E \sim S_S$ は $N_E \sim N_S \min \geq 2 \mid S_{E \sim S} = 1, N_{E \sim S} \min \leq 1 \mid S_{E \sim S} = 0$

ii)  $N_E \min \sim N_S \min$ がすべて1または0のとき $N_E \max \sim N_S \max$ の値から流入交通量を推定し、待行列の微係数

$$W' = \frac{dW}{dG} = -\frac{q_{ME} N_E \max}{q_{ME} - q_E} - \frac{q_{MW} N_W \max}{q_{MW} - q_W} + \frac{q_{MN} N_N \max}{q_{MN} - q_N} + \frac{q_{MS} N_S \max}{q_{MS} - q_S} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \text{ただし } q_E &= N_E \max / (1-g+l) T, \\ q_W &= N_W \max / (1-g+l) T, \\ q_N &= N_N \max / (g+l) T, \\ q_S &= N_S \max / (g+l) T \end{aligned}$$

の正負により青時間を一定値だけ減または増とする。

(III) 手法(O) 以上の2手法に対する比較対象として $g = 0.5$ に固定した場合を手法(O)とする。

3.2 シミュレーションの方法

朝夕のピーク時における交通量の変動や、突発事象によって生成した待行列に対して、上記の各手法による制御がどのように行われるかを調べるために、シミュレーションにおいては次の2条件4ケースを設定した。

(1) EW方向の流入交通量を変化させる場合

EW方向のピーク時の交通量が交差点の処理容量以内の場合(ケース1)と、それを越す場合(ケース2)の二つのケースを選んだ。NS方向の流入交通量は一定とし、最初の5周期間はスプリットを0.5に固定して初期待行列を生成させ、第6周期より制御及びデータの収集を行った。

(2) EW方向に初期待行列を与える場合

NS方向の初期待行列は0とし、EW方向に64台(ケース3)及び128台(ケース4)の待行列を与え、流入交通量は各方向共一定とした。初期スプリットを0.5として試行開始と同時に制御及びデータ収集を行った。

使用したパラメータとしては周期 $T=120$ 秒、飽和流率 $q_M=1840$ 台/時、流入交通量はEW方向675~1237.5台/時、NS方向は675台/時または787.5台/時、損失時間は全赤時間を含め両方向それぞれ4秒とした。

制御周期 $T_c$ は手法(A)では $2T$ 、 $4T$ 及び $8T$ 、手法(D)では $1T$ とし、手法(D)のスプリット修正値 $\Delta Tg$ は1秒または2秒とした。(1)の場合流入流率変化の周期 $T_0$ は $8T$ とし、全試行期間は $9T_0=72T$ 、実時間で2時間24分とした。これを12回くり返し $8T$ ごとならびに全期間の総流入車台数、総遅れ時間及びそれぞれの平均値、標準偏差を求めた。

3.3 シミュレーション結果

上記の手法に基づくシミュレーションの結果を図5~

7及び表1に示す。図5~7は各ケース、各手法ごとの12回の試行の中から標準的な1例を選び、流入流率の変

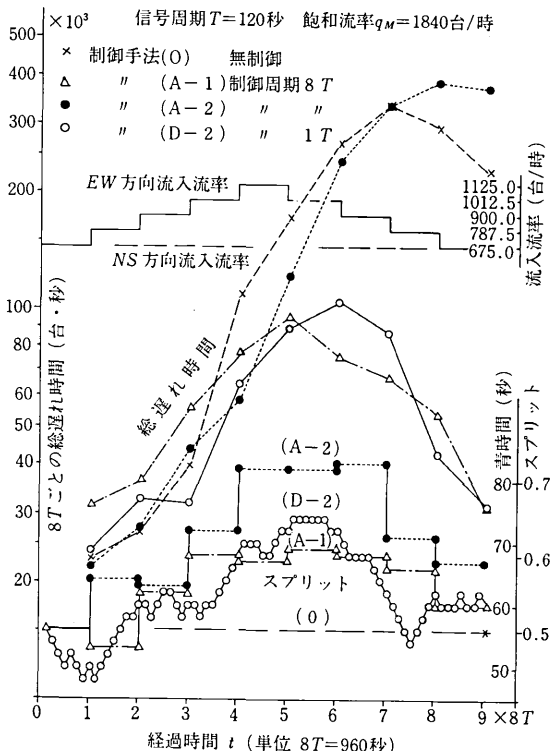


図5 単一交差点におけるスプリット制御特性の一例(ケース1)

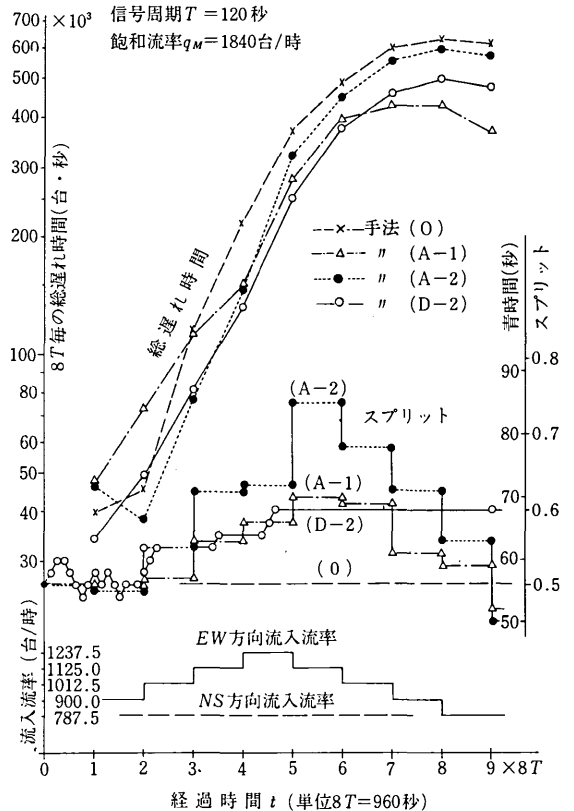


図6 単一交差点におけるスプリット制御特性の一例(ケース2)

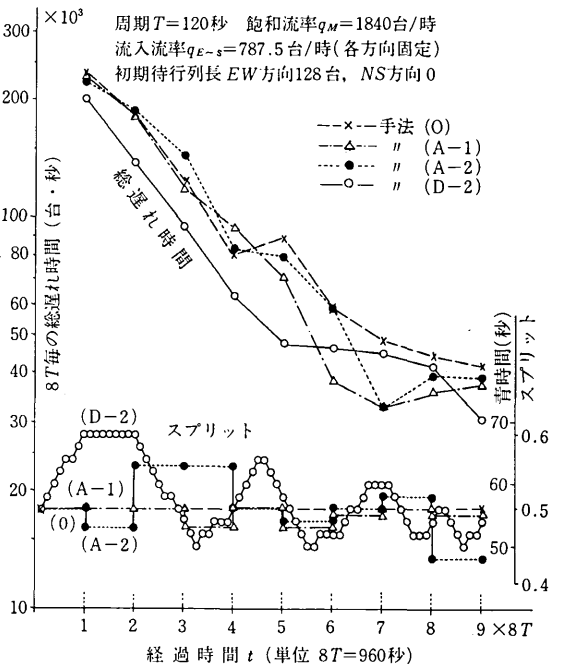


図7 単一交差点におけるスプリット制御特性の一例(ケース4)

化に対する各手法ごとのスプリットの変化の模様ならびに8Tごとの4方向の遅れ時間の総和を示したものである。手法(A)のスプリットの変化が流入流率の変化と一致しないのは流入のランダムネスによるものである。図5はケース1の場合で手法(A-1)及び(D)の制御効果が手法(O)または(A-2)のそれに比べて良好であることが示されている。手法(O)ではスプリットを変えないためにEW方向の遅れ時間が、(A-2)ではスプリットを変え過ぎたためNS方向の遅れ時間がそれぞれ大幅に増加している。図6はケース2の場合で飽和状態になると手法(A-1),(D)においても総遅れ時間の著しい増加があるが、相対的な優位は失われていない。なお待行列生成後は手法(D)ではスプリットが固定化しているのが示されている。図7はケース4の場合で4方向共流入交通量に対し交差点容量に余裕があり、いずれの手法でも時間経過と共に待行列が減少しているが、手法(D)の有効性がよく現われている。

表1は各手法の定量的評価を行うためにそれぞれ12回の試行の総流入車台数及び総遅れ時間の平均値と標準偏差を求めたものを示す。手法(A)については3種類の制御周期( $T_c$ )について実験を行ったが、この実験の範囲では $T_c$ の差による制御効果の違いが明瞭でなかったのでここでは $T_c = 8T$ の場合について記載した。評価基準

表1 単一交差点スプリット制御シミュレーション結果

ケース	手法	初期待行列長 (台)	流入交通量		総流入車台数		総遅れ時間 (1,000台・秒)	
			EW方向 (台/時)	NS方向 (台/時)	平均値	$\sigma$	平均値	$\sigma$
1	0	0	675	675	7,405	90	1,485	221
	A-1				7,450	58	556	155
	A-2				7,402	68	1,554	259
	D-2				7,415	72	466	91
2	0	0	787.5	787.5	8,519	60	3,119	241
	A-1				8,492	91	2,315	205
	A-2				8,471	62	2,870	268
	D-2				8,547	68	2,295	259
3	0	EW方向	787.5	787.5	7,557	103	439	74
	A-1	64			7,559	86	481	59
	A-2	NS方向			7,553	94	502	60
	D-2	0			7,584	85	471	52
4	0	EW方向	787.5	787.5	7,580	82	937	253
	A-1	128			7,502	70	839	92
	A-2	NS方向			7,564	83	888	97
	D-2	0			7,530	69	763	92

註 信号周期  $T = 120$  秒 飽和流率 1840 台/時  
 制御周期 A-1, A-2; 8T, D-2; 1T  
 D-2のスプリット修正値; 2秒

として総遅れ時間を比較するとケース1すなわち交通量が交差点の容量以下の場合には手法(A-1)及び(D)が(A-2)及び(O)に対し同程度に且つ顕著な制御効果を示しているが、ケース2すなわち交通量が交差点容量を超すような場合にはその効果がやや減少している。

手法(D)と(A-1)を比較すると、ケース1の他初期待行列として128台を与えた場合(ケース4)において、手法(D)が手法(A-1)に優るが、その差は顕著ではなく、初期待行列が64台の場合(ケース3)にはほとんど差がみられなかった。しかし手法(D)についてはスプリット修正量 $\Delta Tg$ の大きさを定める等のくふうにより更に改良も望めるものと思われる。

4. おわりに

単一交差点における定常スプリット特性について、一様流流体モデルに基づく理論値と、TIモデルによるシミュレーション結果との比較検討を行い、一様流の場合とランダム流の場合の特性の差異を明らかにした。更にこの定常スプリット特性における流入流率比と最適スプリットの関係をもとに、流入交通量に基づいてスプリット制御を行う手法(A)と、別の観点から待行列長に基づいてスプリットを制御する手法(D)の両者についてシミュレーションを実行し、それぞれの手法の下での定量的な評価量を求め、制御効果についての比較検討を行った。

今後更に3章で挙げた他の手法についてのシミュレーションを実行し制御手法の評価検討を進めたい。

なお日頃ご教示頂く本所越助教授、浜田助教授、科学警察研究所松永室長、ご援助頂く本所谷口助手、兼子技官に謝意を表する。(1977年1月5日受理)

参考文献

- 1) 越：交通信号制御手法に関する実験的研究，生産研究，26, 11, p. 467 (1974. 11)
- 2) 高羽：これからの交通流制御技術とその課題，昭和50年電気四学会連合大会論文集246 (1975. 10)
- 3) 高羽他：交通制御方策検討のための自動車交通のシミュレーション，生産研究，26, 11, p. 460 (1974. 11)
- 4) 高羽，田代，谷口：交通流シミュレータTRN \* SIM Iの運用実績と利用の一例，シミュレーション技術研究会資料，IV, 1, p. 1 (1976. 3)
- 5) 高羽：道路交通のシミュレーション，昭和47年電気四学会連合大会論文集268 (1972. 10)
- 6) 高羽，谷口，兼子：道路交通のハイブリット・シミュレーション，シミュレーション技術研究会資料，I, 2, p. 85 (1973. 12)
- 7) 例えば 猪瀬，浜田：道路交通管制，産業図書 (1972)