

三差路交通のシミュレーション

木戸 睦彦*

Simulation of Traffic Flow at a T-junction

Mutsuhiko KIDO

(Received Oct. 15, 1967)

The interaction between the intersecting traffic streams and the effect of pedestrian crossing to vehicles are so complex that the mathematical handling is very difficult. To such situations the simulation approach seems particularly useful. So, considering such situations, we investigate delays to a signal-controlled T-junction by the simulation on a digital electronic computer.

§ 1 ま え が き

信号のある交差点を通る車の運行を図1のような形でとらえることは多い。しかし、停止線を通過して後に起る、右折車と反対方向から来る直進車との交錯などはこの方法でとらえることはできない。こうした交錯や、横断歩行者による停止などは、三差路では特に留意する必要があるにも拘らず、前回のシミュレーション⁽¹⁾では全く考慮されていなかったの、その点をシミュレートする方法並びに実験結果を記すことにする。

T字路で起る混乱としては、図2において

- (1) ①, ②, ③で起る交錯。
- (2) ④, ⑤, ⑥で起る、横断歩行者のための停止。
- (3) ⑦, ⑧で起る停止。これはCが緑になると同時に⑤の地点を歩行者が横断を始めるので、Aから⑤に達した車が交差点から出られずに列を作り、そこへCから来た車が突当って停止するなどの現象である。

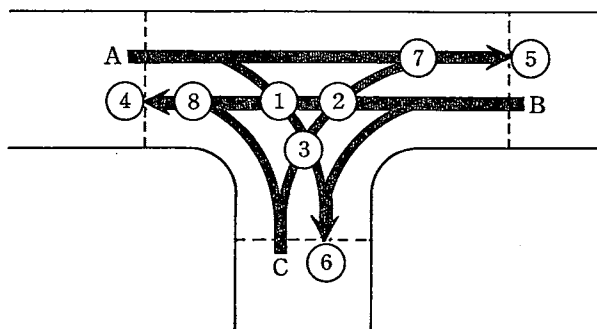


図 2

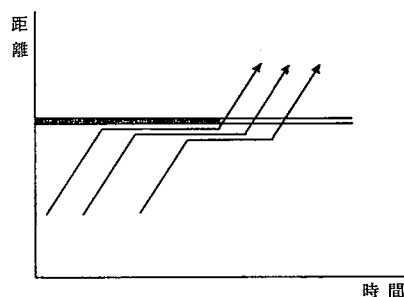


図 1

等である。これらは複雑に影響し合うので、数学的に扱うのは可成困難であり、電子計算機によるシミュレーションは最もよいと考えたのであるが、考えそのものは極めて初等的である。

§ 2 シミュレーションの方法

交差点及びその付近の路面を自動車1台分よりやや大きめの区割に分割したと考え、その各に計算機の記憶装置の番地を1つずつ対応させる。各区割に車があることは対応する番地に0以外の数を書いて示し、車がないことは0を書いて示すことにすれば、ある瞬間における交差点及びその付近の状態を計算機上に表現できる。次の1秒間に各車はその前方の区割が空いていれば1区割だけ前進することができる。このようにして1秒毎の状態を作ってゆけば交差点の交通流がシミュレートできるわけで、必要に応じて、信号による待時間、交錯点での待時間、歩行者のための待時間など取出すことができる。

次に、準備段階的なこまかいことを幾つか並べてみる。

(a) 図3は図2のAで示された地区の分割を示すもので、40台ずつ2列、計80台の車が並び得ることにした。ここにある車は直進するものと右折するものとがあるが、直進車は1、右折車は2という数

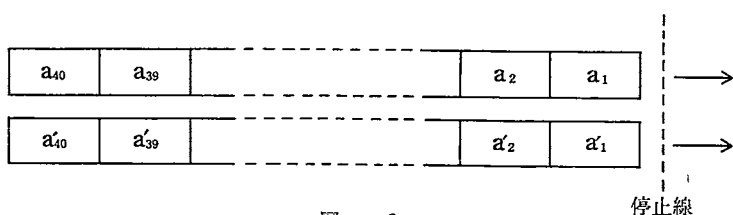


図 3

で示すことにした。また a_{40} より左の方から a_{40} または a'_{40} に進入した車はまだ速さが速く、1秒間に2区割前進するものとし、それが直進車なら11、右折車なら12で示すことにした。この速い車は前の車に追いつくか、または停止線に達したとき、速さが半減して、以後は1秒間に1区割ずつ前進することにし、車を表わす数も11または12を1または2に変えることにした。

(b) 図4は図2の交錯点①付近を示すもので、 f_9, f_8, \dots, f_4 及び f'_9, f'_8, \dots, f'_4 はB方向から来た直進車の通路であ

り、 e_7, e_6, e_5, e_4 はA方向から来た右折車の通路である。図では直交しているが、実際は斜めの交差であり、 f_5 と e_6 及び f'_5 と e_5 は本来同一区割であるが、計算機では別の番地を対応させた。従って、例えば e_6 が空いていても f_5 に車があれば e_7 にある車は e_6 に入れないというようなことが起る。それらについては次の様に決めた。

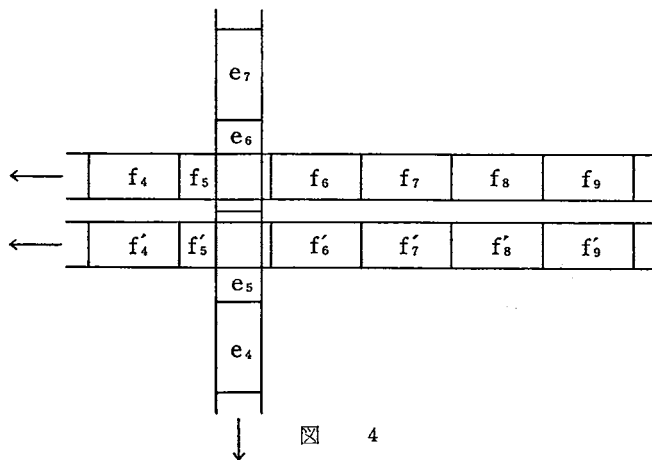


図 4

e_6 が空いていても、 e_7 にある車がそこに入れないのは

- (i) f_5 に車があるとき。
- (ii) f_4 と f_6 に車があるとき。(f_4 に車があるということは、その車は f_5 を通過したばかりと考えられるので、これに引続いて来た f_6 の車は優先的に f_5 に入る権利があるということ。)
- (iii) 前記 (i), (ii) 以外の場合で e_5 に車がないときは(すなわち、右折車が引続いて交錯点を通過している状態でないことが明らかなき)、更にこまかく分けて
 - (イ) f_6 に車があれば e_6 には入れない。

- (d) f_6 に車がなく f_7 にあれば、80%の確率で e_6 に入れない。(f_7 の車が直進車であるために、その優先性を認め、 e_7 の車の運転手の80%が e_6 に入ることを諦めるということ。)
- (e) f_6, f_7 に車がなく f_8 にあれば、50%の確率で e_6 に入れない。
- (f) f_6, f_7, f_8 に車がなく f_9 にあれば20%の確率で e_6 に入れない。

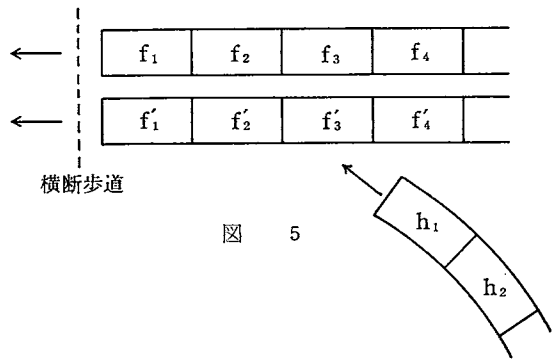
f_5 が空いていても、 f_6 にある車がそこに入れないのは

- (i) e_6 に車があるとき。
- (ii) e_5 と e_7 に車があつて、 f_4 にないとき。(e 列の車が引続いて通っていて、 f 列の方は明らかにそうでないとき。)

以上は e_7, e_6, e_5 と f_9, f_8, \dots, f_4 の関係であるが、 e_6, e_5, e_4 と f'_9, f'_8, \dots, f'_4 の関係も全く同様とした。

(c) 交差点②、③においても①におけると同様な規則を作ったが、強力な優先方向というものがないので (b) の (iii) で確率を用いた部分(d), (e), (f)は省いた。

(d) 図5は図2の⑧の部分である。
 f 列、 f' 列は B からの直進車の通路で、 h 列は C からの左折車の通路である。少し無理な考え方かもしれないが、 h_1 に来た車は次の行動をとるものとした。



- (i) f_3, f_4, f'_3, f'_4 がすべて空いているときのみ f_3 に入る。
- (ii) f'_3, f'_4 は空いているが、 f_3, f_4 の少くとも一方がふさがっているときは f'_3 に入る。
- (iii) その他の場合は h_1 にとどまる。

図2の⑦でも同様な規則を作った。

(e) 図3の a_{40}, a'_{40} の位置より左の方では車は1列になって走っているものと考え、車頭間隔で表わすこととし指数乱数を用いた。単位は秒とし、例えば、車頭間隔が2, 3, 1, ……と並んでいることは、図3において a_{40} より左の方2秒の位置に車があり、次の車はその3秒後方、その後方1秒の位置に3番目の車が……、という状態を表わすものとした。(便宜上、この2を“最初の車頭間隔”と呼ぶことにする。) 車はすべて同じ速さで交差点に近づいているものと考えるので、1秒後の車頭間隔の列は1, 3, 1, ……となる。(このとき“最初の車頭間隔”は1。) 更に1秒後には0, 3, 1, ……となるが、ここで最初の車は a_{40} か a'_{40} に入る。(このとき3を“最初の車頭間隔”とする。)

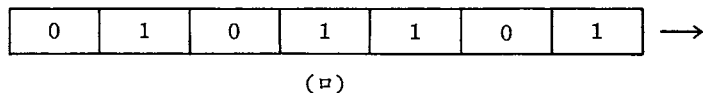
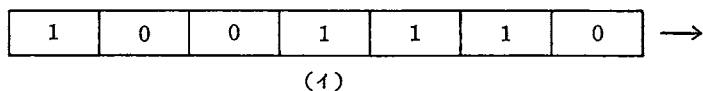
以上はA方向に関してのべたが、B, Cの方向についても同様とする。

(f) A, B, C各方向から来る車の直進、右折、左折等の割合は分っているものとする。A地区を例にとれば、前記(e)により a_{40} または a'_{40} に入るとき、一様乱数を用いて、直進、右折を決定する。

(g) A, B, C各方面の停止線が通過可能か否かは信号の色によって決まるから、それを示すための番地を1つずつ用意する。信号が緑であることは0, 赤であることは1で示せばよく、黄は赤に含めるか、折半して緑と赤に含めてもよい。

(h) 図2の④、⑤、⑥に達した車は信号の色に関係なく、横断歩行者さえなければ交差点から出られるものとした。横断歩行者の有無は0と1によればよいことは前と同様である。

(i) 図6の(f)のように並んでいる車は1秒後には(d)のような並び方になる。このような働きをするサブルーチンを用意する。これは左の方の区割から順に車があるかないかを判定し、あった場合はその次の区割が空いているかどうかを調べ、空いていればそこへ移すという操作を繰返せばよい。(これを“順送り”のサブルーチンと呼ぶことにする。)



1 は車のあることを示し

0 はないことを示す

図 6

(j) 速さの速い車 (a) でのべた) は毎秒 2 区劃前進するが、2 区劃前方に速さの遅い車があるときは、1 区劃だけ前進して自らも遅い車になる。2 区劃前方に車があってもそれが速い車なら、その区劃まで前進し速さは変らない。図 7 はこのような動きを示す 1 例で、(イ) の * 及び ** で示した車は 1 秒後には (ロ) の * 及び ** の位置に移り遅い車になっている。このような動きをするサブルーチンを作っておく。(これを“速送り”のサブルーチンと呼ぶことにする。) この場合は右の区劃から順に速い車があるかないかを判定し、それがあった場合は、2 区劃前進が可能かどうか、前進後速度を落すかどうかなどを調べてゆくとよい。

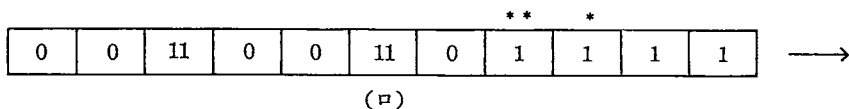
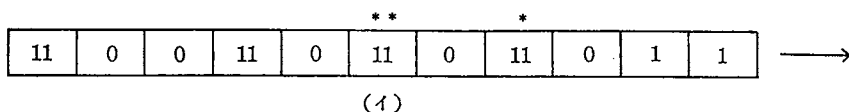


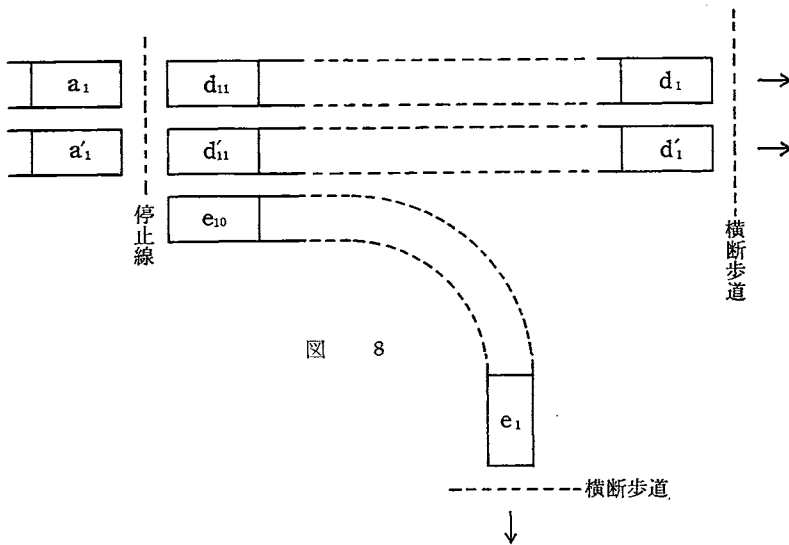
図 7

以上のような準備をした上で、ある瞬間の状態から、その 1 秒後の状態を作るには次のような順序で行った。

(1) 先づ、(b)でのべたように交錯点では空いていてもそこへ入れないようなことが起るから、そのような番地には何か印をつける。(例えば 500 を記憶させる。) このとき、もし前回につけた印が残っていれば、前以て消しておかねばならない。

(2) “速送り”と“順送り”のサブルーチン ((j), (i)参照) を用い、図 3 の A 地区 a 列にある車を前進させる。ただし、a₁ にある車については次にのべる。

(3) 図 8 は図 3 の右に続く部分である。この a₁ に車があるときは (これは必ず直進車である。後述 (6)参照) 信号を調べ ((f)参照) 赤ならばその位置にとどまり、緑ならば d₁₁ が空いているときそこへ移り、空いていなければとどまる。引続いて d 列の“順送り”を行い、d₁ に車があれば横断歩道が通過可能かどうかを調べ ((h)参照) 通過可能なら通過させる。(横断歩道より先は考える必要がないので番地の対応はない。従って、d₁ にあった車が横断歩道を通過するということは、d₁ にあったが 1 が 0 になるだけである。)



(4) 図3のa'列の“速送り”，“順送り”を行う。図8のd'11とe10は実際は同一区割であるが，計算機の上では別の番地にしたので，a'1に車があるときは，信号が緑で且つd'11とe10が共に空いているときだけ進み得るものとする。前進はa'1の車が直進車ならd'11に移り，右折車ならe10に移る。引続きd'1, e1に車があれば横断歩道が通過可能のとき通過させる。

(5) B、Cの地区及びそれに続く部分でA地区におけると同様な操作を行う。ただし、Cから来た車が図の⑦、⑧の地点に達したときは(d)にのべた方法で前進、停止をきめる。

(6) 最後にA地区への進入を考える。A方向の“最初の車頭間隔”(e参照)から1を引き、0でなければそれを新しい“最初の車頭間隔”にする。

0 ならば図3の a_{40} に車が到着したのであるから、(f)により直進か右折かを決定し、次の(i)または(ii)の処置をとる。このとき(e)でのべたように“最初の車頭間隔”を今迄のものからそのものに変える。

(i) 直進車ならば

(i) a_{40} , a'_{40} が共に空いているとき、 a 列にある車の数と a' 列にある車の数を比較し、その少い方の列に入れる。同数なら a_{40} に入れる。尚、例えば a_{40} に入れるとき、 a_{39} が空いていれば11（速い車）という数にし、空いていなければ1（遅い車）にする。

(d) a_{40}, a'_{40} の一方だけが空いていればその方に入れる。11にするか1にするかは(i)の場合と同様。

(ハ) a_{40}, a'_{40} が共にふさがっていれば計算機を止める。

(ii) 右折車なら a'_{40} が空いているとき (i) の(i)と同様な考えで12または2として a'_{40} に入れる。 a'_{40} がふさがっているれば計算機を止める。

(7) B、Cの地区についても(6)と同様な操作を行う。ただし、C地区については、右折車は必ず右側の列に入れ、左折車は必ず左側の列に入れることにした。

§ 3 実 験

以上のような方法で実験を行うにり、当尚幾つかの補助的な考えを用いた。

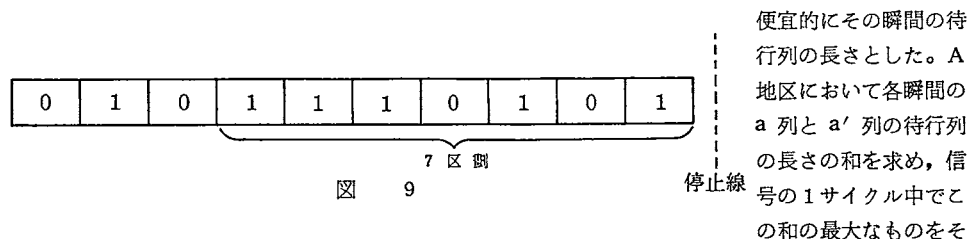
(1) 車頭間隔は計算機で疑似一様乱数を作り、1時間の平均台数に対応する指数乱数に変換した。秒未満は四捨五入したが、車が1列になって走るときの最小の車頭間隔を1秒と考え、四捨五入によって0になった数はすべて1になおした。従って、例えば毎時1200台で作った車頭間隔も実際の平均は1200

台より少くなることが考えられるが、毎時1200台程度では殆んど減少しなかった。毎時1400台になると60台程度の減少がみられた。

(2) 最初、交差点及びその付近（計算機の番地を割当てた範囲）には全く車のない状態から実験を始めたので、定常状態に達するまでとして600秒前後を経過させた後、待時間その他を測った。結果からみて600秒あれば差支ないようであった。

(3) 信号待ちの歩行者は信号が緑になると同時に一団となって横断するので、緑になってから14秒間は車の通過ができないものとし、それ以後は平均5秒の間隔でランダムに車の通過が止められるとした。信号が黄になってからは、横断中の歩行者の半数が車の通過を阻止するものとした。

(4) 待行列の長さをどのように考えるのが妥当かは問題である。ここでは行列の長さということより、信号の影響でどれだけ遠くの車が一時停止をしたかということを問題にし、次のような考え方をした。ある瞬間に図9のように車が並んでいたとすれば、2台以上連続している車で停止線から最も遠いものを求め、その距離7台（実際の車の数は5台で、図のように7区割というべきかもしれないが）を



のサイクルでの待行列の長さ考えることにした。

実験に際して、A、B、C各方向の到着台数並びに右左折の割合は、金沢市香林坊交差点に関する新聞報道⁽²⁾を参考にして、次のような数値を用いた。

到着台数	A方向	1400台/時
	B方向	1200台/時
	C方向	800台/時
右左折の割合	Aでの右折	26%
	Bでの左折	15%
	Cでの右折	30%

サイクル長は10秒刻みで40秒～120秒のものを考え、どの場合も約2400秒間（サイクル長の倍数で2400秒に近い時間）の状態をシミュレートし、次の事柄に注目した。

各方向の待行列の長さ

停止線通過までの待時間

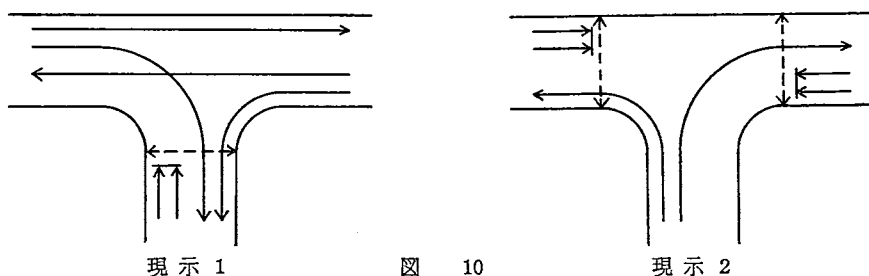
交錯点通過のための待時間

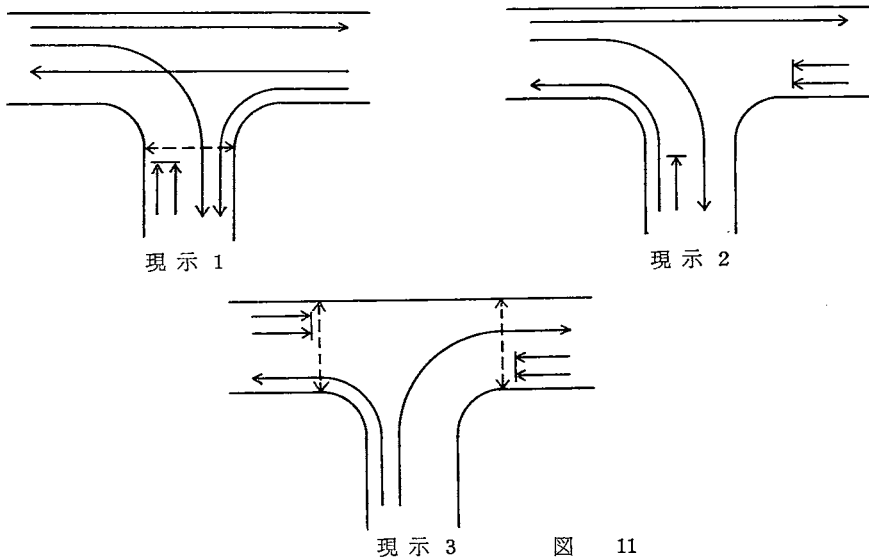
歩行者のための待時間

上記3つを総合した待時間

信号が緑であるにも拘らず、車がつまっていて停止線を通過できなかった時間

信号方式は図10の2顯示方式と図11の3顯示方式を考えた。黄色時間は常に5秒とし、サイクル長か





現示 3 図 11

ら黄色時間の合計10秒を引いた残りの時間を各現示に対して表1のような割合に配当した。

実験番号	現示1	現示2	現示3
I (2現示)	60%	40%	
II (3現示)	46%	8%	46%
III (3現示)	55%	9%	36%

表 1

図12は上記3実験において、交差点を通過した車全体についての平均待時間（信号、交錯点、歩行車によるものすべてを含む）を示すものである。実験Iのサイクル長40秒、60秒に対する平均待時間などグラフに現われていないのは、実験途中で待行列が長くなりすぎて計算機が停止したものである。

(i) 実験Iの結果について

サイクル長が40秒、60秒、90秒のものが無いので確実ではないが、平均待時間は余りサイクル長には関係しないようである。尚、平均待時間の得られなかったのは、常にC方向の左折車の待行列が長くなりすぎたことが原因である。表2は各方向で停止線通過までの平均待時間である。サイクル長が100秒まではC方向

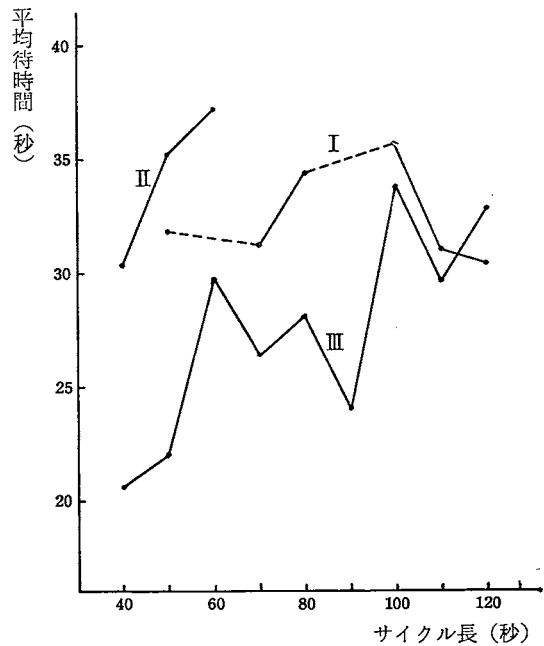


図 12 サイクル長 (秒)

サイクル長 方向	50	70	80	100	110	120
A	22.7	18.9	26.4	25.5	25.4	27.0
B	12.5	15.0	23.5	25.6	22.8	21.3
C	58.5	60.9	44.7	50.1	37.3	36.0

表 2

の待時間が非常に長い、それ以後は短くなって安定している。

(ii) 実験Ⅱの結果について

サイクル長が70秒以上のものはすべて結果がでていない。70～100秒はB方向、110秒と120秒はA方向の待行列が長くなりすぎたためである。

(iii) 実験Ⅲの結果について

実験Ⅱの結果と比較して平均待時間の減少が著しく、各現示への時間の配分の重要性がよくわかる。図13は方向別の停止線通過までの平均待時間のグラフである。サイクル長60秒のときのC方向と、サイクル長90秒のときのB方向の値が異常な変化を示しているが、偶然に起った混雑などが可成長時間影響すること示しているのではなかろうか。A、B方向の待時間はサイクル長と共に増加するが、C方向ではその現象が見られない。従って、サイクル長を短くするとA、B方向は有利になるが、そのためにC方向が迷惑するということもないわけである。

図14は待行列の長さの変化を示すものであるが(B方向はA方向のグラフと殆んど一致するので省略)ここでも短いサイクルの有利性は明らかである。

現実の交差点で、この実験程度の交通量ならば60～80秒位のサイクル長が用い

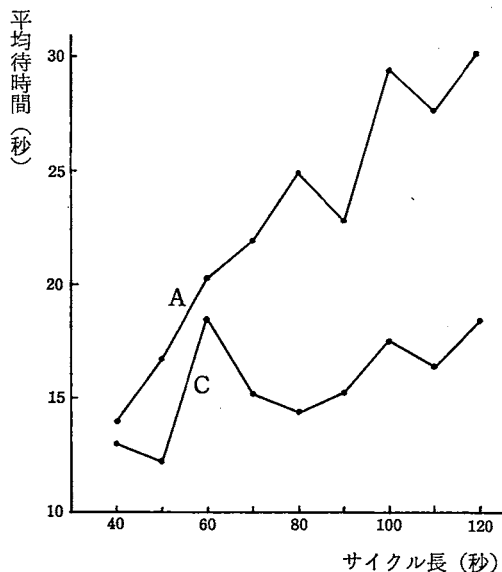


図 14

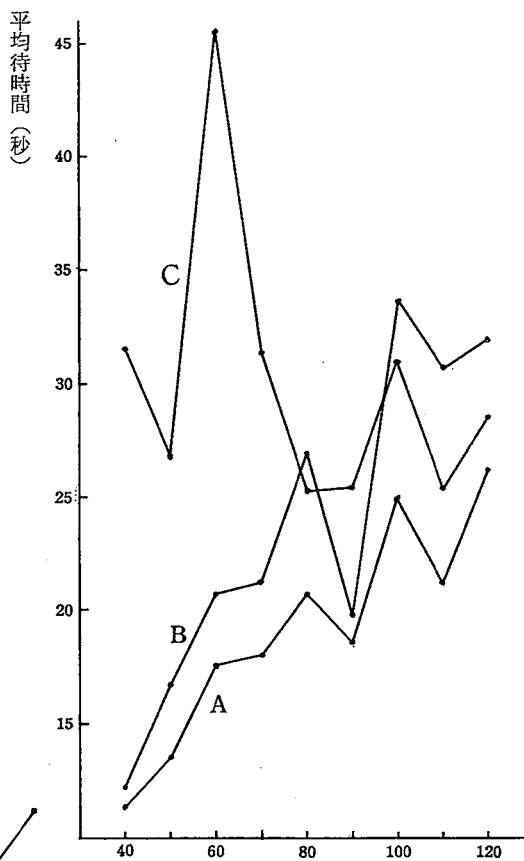


図 13 サイクル長 (秒)

られているようであるから、実験結果で短いサイクル長の有利性がこれ程明瞭に現れるのは、或はこのシミュレーションの欠陥によるのかもしれない。しかし、幾つかの実験を行ってみると、一般に2現示方式のときよりも3現示方式のときに短いサイクルの有利性が見られるようである。

(iv) 其他の実験結果について

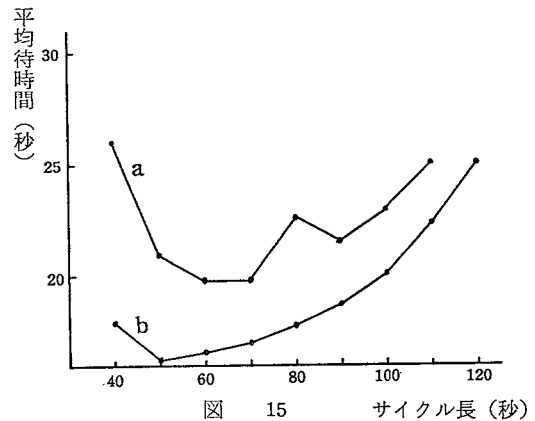
図15は各方向とも到着台数を1000台/時とし、2現示方式、現示1と現示2に配当された時間の比は60:40としたときの車全体の平均待時間を示すものである。a、b 2つのグラフは

$$a : \begin{cases} A \text{ での右折} & 50 \% \\ B \text{ での左折} & 50 \% \\ C \text{ での右折} & 50 \% \end{cases}$$

$$b : \begin{cases} A \text{ での右折} & 30 \% \\ B \text{ での左折} & 50 \% \\ C \text{ での右折} & 50 \% \end{cases}$$

に対するものである。図12のグラフでは平均待時間の変動が不安定であったのが、図15では非常に安定しているのが特徴である。図12の場合もシミュレーションの時間を長くすればグラフが安定するかもしれない。

前にも述べたように、実験に際して注目した事柄は他にもあったが、取り上げる程の結果が得られなかったので省略する。



§ 4 あ と が き

このシミュレーションでは1秒間に1区劃前進するという考えが基礎になっている。この考えに到ったのは、金沢市の交差点で観察された次の3つのことが根拠になっている。

- (a) 待行列を作っている車が停止線を通過するとき、1車線について約2秒に1台であること。
- (b) 停止線通過後の車は、余り急な加速がなされず、交差点内では停止線通過のときと殆んど同じ間隔が保たれること。
- (c) 交差点から或る程度離れた手前の地点を通過する車の最低車頭間隔は約1秒で、前車の後部と後車の前部との距離は、丁度車一台分程の余裕があること。

一般に車の動きに関する調査は甚だ不十分で、モデルも非常に単純化されているが、それでもプログラムの長さは約1700語になり、その他に、乱数を貯蔵するために外部記憶装置を用い、それを小出しするために数百番地を用いた。要した時間は、40分(2400秒)間の状態をシミュレートするのに約30分かかった。(計算機は NEAC-2230)

現在の香林坊交差点は流入部3車線で右左折専用車線が設けられているし、信号方式も異っている。また、香林坊は簡単な3差路でもなく、近くにある他の交通信号の影響も受けるものと思わねばならない。ここに用いたシミュレーションの方法を用いれば、この複雑な状態をシミュレートすることも可能な筈であるが、複雑化したプログラムを作成する労力も相当なものであり、それを収容するに十分な記憶容量も要求される。更に、この種のシミュレーションの欠点として長時間を要することがある。今回の場合も現実の時間に近い時間を要したが、複雑化すれば現実の時間以上になることは十分予想される。シミュレーションの時間が現実の時間の3倍にもなった例がある⁽³⁾から、記憶装置の節約と時間短縮の工夫はこの種のシミュレーションに欠かせないことである。

文 献

- (1) 木戸「三差路交通の解析(I)」金沢大学教養部論集自然科学篇, 第1巻(1964), 11頁
- (2) 北国新聞(昭和42年4月30日)
- (3) Ashton: The Theory of Road Traffic Flow, p. 138. (1966)