

シミュレーションによる 交通信号制御の効果評価分析

Evaluation of Signal Control by Simulation Experiments

向井伸治・片倉正彦・桜田陽一

By Shinji MUKAI, Masahiko KATAKURA and Yoichi SAKURADA

Traffic simulation is a powerful tool for testing alternate signal control strategies. This paper describes a outline of a new traffic simulation model, which was developed for the evaluation study of on-line traffic control, and the results of application of this programme to the actual street networks. In order to evaluate the effects of coordinated signal control and area network control, the simulation model was applied to a 73-intersections network in Shinjuku area and a 15-linked intersections in Ome street. The comparative investigation of effectiveness between the current signal control and the various control policies were performed. In result, it is indicated that the improved signal control method can lead to reduction in vehicle travel time.

1. はじめに

道路交通の実態に対応した交通信号の適正な運用により、車両の旅行速度の向上に伴う時間便益や燃料節約の経済効果をはじめ、交通事故の軽減、排ガス・騒音の公害の軽減など、期待される効果は大きいものと推察できる。

たとえば、1980年、米国連邦道路局を中心として、11都市での系統交通信号の制御パラメータをシミュレーションプログラムTRANSYT-7Fを用いて最適化する、信号制御の運用改善プロジェクトが実施された。それによれば、交差点平均で遅れが15,470台時/年、停止回数が455,921回/年、いずれも減少し、10,524

ガロンの燃料が節約され、時間便益と燃料便益を合わせれば、所要経費に対して63対1にもなることが報告されている。¹⁾

わが国においても、単独制御、系統制御、地域制御など、各制御レベルにおける制御パラメータの見直しや制御手法の改善を通じ、信号システムの運用を高度化していくことがますます重要となっている。そのため、在来の制御技術を含む各種制御手法間の比較運用により、制御効果を測定していくことが必要である。

この研究は、コンピュータ・シミュレーションにより、現行の系統制御化、地域制御化について、その効果計測を試みたものである。²⁾

以下では、まず、交通信号制御方式の評価およびオンライン最適化制御方式の探索を行うために開発された、シミュレーション・モデルの概要を紹介する。そして、このモデルを現実の道路網に適用して、各種制御条件のもとにおける制御効果を遅れ時間を

* キーワーズ：交通流シミュレーション、系統信号制御

** 正会員 工修 前橋市立工業短期大学講師 建設工業科
(〒371 前橋市上左島町460)

*** 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部 土木工学科
(〒158 世田谷区深沢2-1-1)

**** 学生会員 工修 東京大学大学院

評価指標として計測し、評価検討した例を報告する。

2. シミュレーション・モデル

(1) 従来のモデル

これまでに、街路網を対象とした多くの交通流シミュレーション・モデルが開発されている。これら従来のモデルは、その利用目的から次の2つに区別される。

第一は、信号制御方式を中心とする交通運用方法の評価ツールとしてのシミュレーションプログラムである。その代表的なものには、米国連邦道路局により開発されたUTCS-1、科学警察研究所が開発したMICSTRAN、およびMACSTRANを挙げることができる。³⁾ 前二者は、いずれも車を一台ごと表現する微視的モデルであり、演算時間や計算機記憶容量の制約から、広範囲の街路網を扱うことは不可能である。また、後者のような巨視的モデルでは、ほとんどのものが、車両感知情報のシミュレート機能を有しておらず、オンライン制御の評価シミュレーションは実行できない。

もう一つは、系統制御された信号機群を対象とした信号制御パラメータを最適化するシミュレーション・モデルである。これには、米国連邦道路局を中心に開発されたSIGOP、英国TRRLが開発し、世界的によく用いられているTRANSYTがある。これらは、道路網の交通流を車群伝達モデルとして扱う巨視的モデルの代表であり、オフラインシミュレーションによる繰返し計算によって最適パラメータを求めるプログラムである。^{4) 5)}

一方、SIGOPやTRANSYTのように、あらかじめオフラインシミュレーション・プログラムにより計算された信号タイミングスケジュールに従う方式ではなく、感知器情報を基に、交通状況に対応してオンラインで制御パラメータを計算し、自動的にアップデートしていく方式に、英国TRRLの開発したSCOOTプログラムがある。⁶⁾

(2) モデルの特徴

本シミュレーション・モデルは、制御パラメータ最適化過程のプログラムはまだ組込まれていないが、広範囲の道路網を対象に、各種信号制御手法の評価ツールとしての機能を具備し、オンライン最適化実験による信号制御の改善および新制御手法の確立を

目的として開発されたものであり、次に列挙する点に特徴がある。

①大規模ネットワーク交通流をシミュレートするに当り、演算時間の高速化を図るために、交通流を流体（連続量）と見なして記述する巨視的モデルである。

②オンライン制御手法の研究のために、車両感知機能を備えており、各リンクの任意の箇所に車両感知器が設置でき、そこでの通過交通量、オキュパンスをシミュレートできる。

③車両感知器設置位置における到着車両の感知および交差点における右折車の右折挙動をシミュレートするために、交通流を連続量から1台ずつの離散量へ変換して扱う微視的モデルの部分が含まれている。

④短期的に変動する交通流現象をシミュレートするために、車の発生、飽和交通流率、渋滞時交通密度等について、ランダム性を考慮している。

⑤車群の拡散を考慮している。

(3) モデルの概要^{7) 8)}

1) モデルの構成

図-1に、モデルの構成を流れ図で示す。モデルの主要部分は、信号制御セクター、交通流セクター、車両感知セクターから成り立っている。シミュレーション時間の進め方は1秒毎のタイムスキニング方式で行っている。

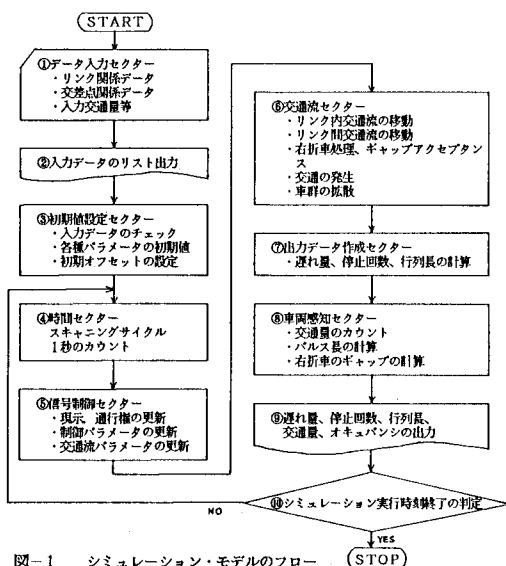


図-1 シミュレーション・モデルのフロー

2) 道路ネットワークの表現

道路ネットワークは、図-2に示すように、入力リンク、ネットワークリンクおよび出力リンクの組合せとして表現される。また、立体交差点の場合には、その前後に仮想交差点を設け、そこでの交通の合分流を行うことで表現している。

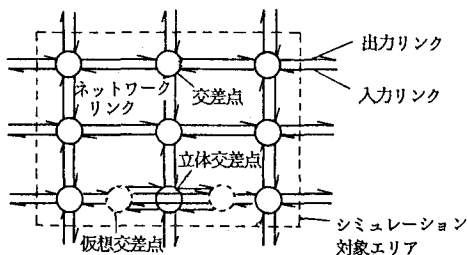


図-2 道路網の表現

3) 交通流の再現方法

a) 交通の流れの記述

各リンクの交通流は、1断面の流れとして扱われる。ただし、右折レーンの存在するリンクでは、右折交通流のみ本線交通流と別扱いする。

図-3に示すように、各リンクは単位走行長（スキニングサイクル1秒で進む距離）によって分割されたブロックより構成され、1秒毎に隣接ブロック間で交通流量を移動させる方法により表現される。

交通流の状態は、自由走行状態と待ち行列状態とで表わされ、自由走行状態では、すべての車両は定速走行しているものとし、待ち行列状態では、すべて停止しているものとみなしている。

b) 交通の発生

車両の発生は、シミュレーション対象道路ネットワーク外からの各入力リンクの入力交通量を与件として、ポアソン分布を仮定して行われる。また、対象エリア内の細街路からの交通発生も同様に行われる。

入力交通量は、任意の分単位、時間単位の交通量で与えられ、傾向変動を表わしうる。

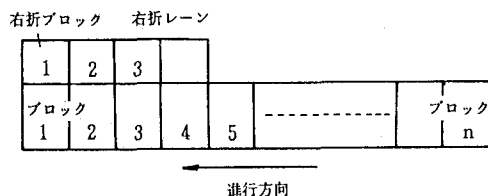


図-3 リンクのブロック構成

c) リンク内交通流の移動

隣接するブロック間を流れる交通量は、飽和交通流量を上限としてコントロールされる。各ブロックの存在流量には、上限値（ジャム密度）があり、当該ブロックがこの上限値に達した時には、後方ブロックからの流入量は零となる。

基本的には、図-4に示すように、ブロックK、K+1の2ブロックにおける移動量 $AF(K)$ は、

$$AF(K) = \min(DNSJAM \times UL \times NLANE - EF(K), SFRT \times NLANE, EF(K+1))$$

により決定される。

ここに、 $EF(K)$: Kブロック内存在流量

$EF(K+1)$: K+1ブロック内存在流量

SFRT : 飽和交通流量

DNSJAM : ジャム密度

UL : ブロック単位延長

NLANE : 車線数

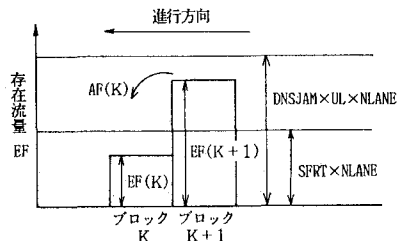


図-4 ブロック間交通流の移動

また、停止波、発進波の伝播が生ずるように、停止流（ジャム密度）の先頭ブロックと末尾ブロックで移動量をコントロールしている。

右折レーンが存在するリンクでは、右折レーンの入口で本線の直進交通流から右折確率に従って分流させる。この場合、右折交通流は1台ずつの離散量に変換されて、右折レーンに流入される。

右折交通流のブロック間での移動は、連続量として、本線交通流と同様の方法による。

d) リンク間交通流の移動

リンク間での移動のさせ方は、直進・左折交通流を進める場合と右折交通流を進める場合とで異なる。

各リンクの最前端的のブロックに到達した交通流は、右折レーンが存在しないリンクでは、右左折直進率に従って分岐される。直進・左折交通流は、流入先リンク末尾のブロックの空隙状態、先詰まり状態を確認して、飽和交通流量を上限として、移動が行わ

れる。右折レーンが存在しないリンクからの右折交通は、インターグリーンでの右折を除き、すべて対向直進交通流に対するギャップアクセプタンスにより行われる。

右折レーンが存在するリンクの右折交通流については、右折専用現示のある場合には、流入先リンクの末尾ブロックの空隙、先詰まり状態を確認して、1台ずつ流入させる。右折専用現示によらない右折挙動は、対向直進交通流に対するギャップアクセプタンスによって行われる。

ギャップアクセプタンスによる右折挙動は、右折車1台が独立に右折を行う場合と、前車に追従して右折を行う場合とでは、利用されるギャップ・サイズが異なることを考慮し、右折車が独立走行車か、追従走行車かを識別して、図-5に示すギャップアクセプタンス関数の設定のもとに、確率的に表現している。ギャップ・サイズは、対向リンクに設置された車両感知器の感知情報より求められる。

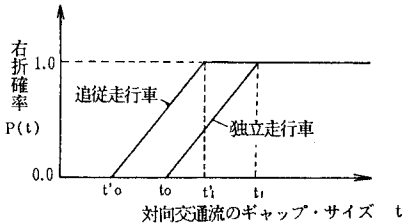


図-5 右折車のギャップ利用確率

e) 右折車による直進車線の閉塞

右折レーンの存在しないリンクにおける右折待機車両および右折レーン外への溢流右折車両を検出し、その影響による直進交通の飽和交通流率の低減を考慮している。

f) 車群の拡散

車群拡散は、図-6に示すように、隣接ブロック間での存在流量の差(DF)に拡散係数(COEF)を乗じた量を、隣接ブロック間で加減して平滑化することによって表現している。

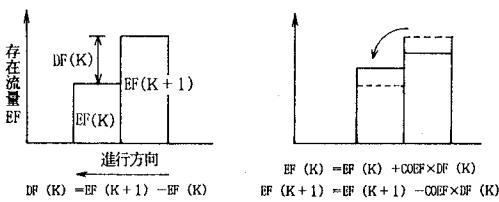


図-6 車群拡散

g) 飽和交通流率、ジャム密度(停止車列の密度) 飽和交通流率、ジャム密度の変動は、いずれも正規分布に従うものとし、サイクル毎に変動させることができる。

4) 車両の感知方法

交通流は一断面の流れとして扱われているが、車両感知器設置位置においては、車線利用率によって車線別に区分して扱われる。

車両感知器は、リンク上のブロック単位で車線別に任意の位置に設定でき、1台ずつの車両の到着を判断し、ギャップ計算、通過交通量、平均オキュパンシを求めるための情報を生成する。

a) 連続量の離散量への変換

車両1台の到着の判定は、車両感知器設置位置における到着交通流を累積し、図-7に示すような関数形の設定のもとに、確率的に行っている。

b) パルス長への変換

1台ずつの感知車両に対して、オキュパンシを求めるためのパルスが発生させる。感知車両のパルス長は、当該車両が感知された位置から、近い将来その車両が到達するであろう渋滞末尾までの距離、あるいは過去に停止していた位置までの距離(X)を計算し、その値に基づいて図-8に示すような関数形から求められる。平均パルス長(PLm)は、正規分布を仮定して、サイクル毎に変動させることができる。

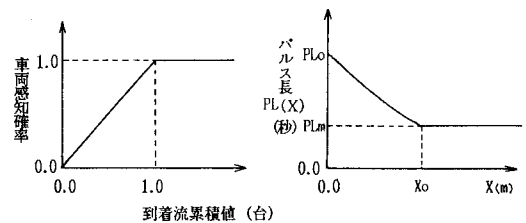


図-7 車両感知

図-8 パルス長変換

5) 信号制御

本モデルの信号制御セクターには、右折感應制御、スプリット制御など、既存の各種制御方法が組み込まれている。車両感知セクターと連動させて、信号制御セクターに種々の制御論理を組み入れることにより、各種応答制御の評価が可能となる。シミュレーションは、各交差点の制御方式と制御パラメータを与件として実行される。

(4) プログラムの概要

シミュレーション・モデルは、プログラムの汎用性を考慮して、FORTRAN-77語でプログラミングされている。プログラムは、メインプログラムと6個のサブルーチン群より構成されており、プログラムステートメント数は、約3500ステートメントである。

シミュレーションの対象とする道路網の大きさは、当然ながら計算機の記憶容量と演算時間に支配されるが、これらの許容範囲でいくらかでも大きくできる。大型計算機システムFACOM M-380Qによる本シミュレーションの演算時間の例を表-1に示す。

表-1 演算時間の例

	交差点数	リンク数	シミュレーション時間	CPU使用時間
単独制御	1	8	2時間	1分20秒
路線制御	33	125	6時間	7分
地域制御	85	285	1時間	14分28秒

(5) モデルの現状再現性

現実の単独交差点、複数交差点を対象に、現行の制御方式を適用することにより、交通流、車両感知等のモデル諸機能の再現性を検討した。交通量、オキュパンシ、旅行時間についてのシミュレーション結果と実測値の比較を通じて、本モデルの現状再現性は、概ね良好な結果を得ている。

3. 路線系統制御の効果

路線の系統化による制御効果について、交通条件一定のもとにオフセットを種々変更してシミュレーションを行い、遅れ時間の減少効果を計測した。

実験対象路線は、東京都青梅街道における高円寺陸橋下交差点から中野坂上交差点までの15交差点、路線延長約2.5kmの区間である(図-9)。

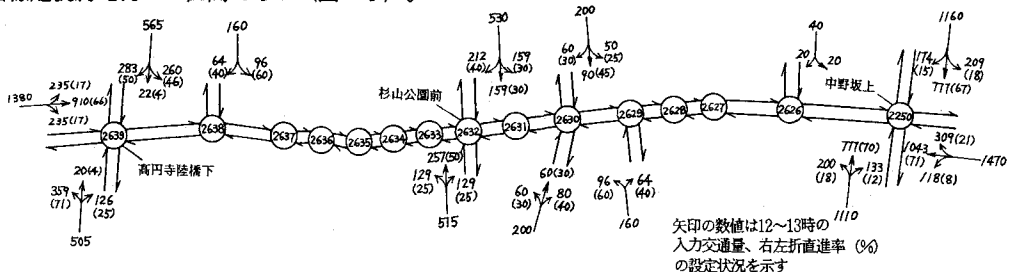


図-9 青梅街道 実験対象路線

(1) シミュレーション実験条件

1) 実験ケースの設定

シミュレーション実験の比較ケースは、表-2に示すように、現状の系統制御による場合(実験対象日時の制御結果の再現)、平等オフセット制御を行った場合、時間帯により優先オフセット制御を行った場合、およびまったく系統制御をせずに各信号を独立に制御した場合の4つのケースを設定した。

表-2 路線系統制御実験ケース

ケース	制 御 方 法	制 御 パ ラ メ ー タ		
		サイクル長	スプリット	オフセット
ケース1	現状の制御	120秒固定	現状固定	現 状
ケース2	同時オフセット制御	120秒固定	現状固定	同 時
ケース3	優先オフセット制御	120秒固定	現状固定	優 先 ^{注1}
ケース4	個別交差点毎の単独制御	主要交差点 120秒 その他 100~120 秒	現示飽和度に 比例した配分	初期値として ランダムに設定

注1: 朝のピーク時(7時~9時) 上り優先オフセット
昼間時(12時~14時) 下り優先オフセット

2) 入力データの設定

a) 実験対象日・時間帯

シミュレーション実験の入力データ条件は、昭和59年10月16日(火)の実測データに基づいており、実験時間帯は、朝のピーク時7時~9時と昼間時12時~14時のそれぞれ2時間である。

b) 入力交通量、右左折直進率

入力交通量は、車両感知器データに基づき、15分間交通量として設定した。細街路との小交差点における流入交通量は、非常に少ないので、零と仮定した。右左折直進率は、主要交差点方向別交通量の実測結果に基づき、シミュレーション実行時間帯の平均値として、一定値に設定した。入力交通量、右左折直進率の設定状況の一例を図-9に示す。

c) 飽和交通流率、ジャム密度

飽和交通流率は、感知器データおよび一部の実測データに基づき、すべての交差点流入部について、平均値 0.5台/秒/車線、標準偏差0.05台/秒/車線の正規分布を設定して、サイクル毎に変動させた。

ジャム密度については、すべてのリンクにおいて 0.15台/m/車線の一律に設定した。

d) 路線系統速度

系統速度は、40km/時固定である。

e) 信号制御パラメータ

比較の対象とした各ケースの制御条件の設定は次のようである。

まず、サイクル長は、系統制御であるケース1～3については、現状のサイクル長に合わせて 120秒に設定し、ケース4の個別交差点毎の独立制御については、主要交差点である中野坂上、高円寺陸橋下、杉山公園前の3交差点を現状の 120秒とし、その他の交差点を 100～120秒にランダムに設定したもので、各交差点の最適値では必ずしもない。

スプリットは、ケース1～3を現状の制御と同一に設定した。ケース4は現示の飽和度に比例して配分した。

オフセット値は、表-3に示される通りである。ケース4の独立制御については、当然オフセットはないが、シミュレーション実行初期値としてランダムに設定した。

シミュレーション実行に当っては、初期15分間交通量を入力してプリランを行い、待ち行列状態を再現させてから、出力情報の計測を行っている。

(2) シミュレーション結果

図-10は、朝のピーク時間帯と昼間時間帯における10分間毎の平均遅れ時間の推移をケース別に比較して示したものである。また、表-4に2時間分の総遅れ時間、総交通量、平均遅れ時間を各ケースを比較して示す。

ここで、路線の10分間平均遅れ時間は、次式のよう、各リンクの10分間総遅れ量を全リンク数について合計し、それを各リンクの10分間交通量の平均値で除した値として求めたものである。

路線の10分間平均遅れ(秒) =

$$\frac{\sum_i \text{リンク } i \text{ の10分間総遅れ量 (台・秒)}}{\text{路線の10分間交通量 (台)}}$$

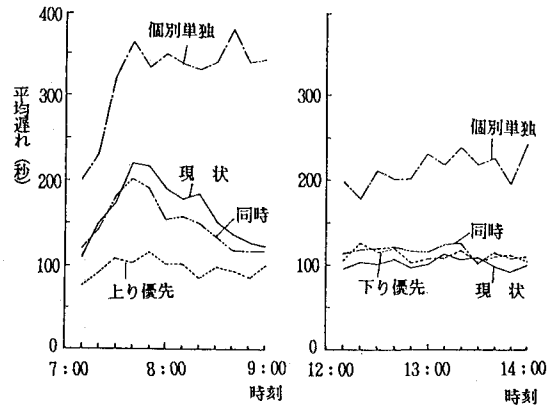


図-10 10分間平均遅れの推移(両方向)

表-4 総遅れ(台・秒)、平均遅れ(秒)

(上下両方向合計)

ケース	7-9時			12-14時		
	総遅れ	交通量	平均遅れ	総遅れ	交通量	平均遅れ
現 状	875182.7	5200	165.8	566541.5	5489	103.2
同 時 オフセット	782237.0 (-10.6)	5190	150.7	739216.2 (-30.5)	5541	133.4
優 先 オフセット	511007.5 (-41.6)	5224	97.8	681171.5 (-20.2)	5459	124.8
個別単独	1607511.9 (83.7)	4940	325.4	1193905.8 (110.7)	5547	215.2

注) カッコ内数値は、現状の総遅れを基準とした増減率(%)

表-3 制御パラメータ設定状況

	交差点番号	2639	2638	2637	2636	2635	2634	2633	2632	2631	2630	2629	2628	2627	2626	2250
現 状	系統別緑色スプリット(%)	72	68	70	65	70	70	70	60	70	66	70	75	70	74	56
	オフセット	0	84	115	0	0	24	0	17	98	0	103	108	0	108	96
同 時	オフセット	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
上り優先	オフセット	0	26	17	12	8	12	10	17	5	20	18	8	8	27	40
下り優先	オフセット	24	20	8	8	8	10	10	12	14	20	6	6	28	26	0
個別単独	サイクル	120	110	120	100	100	110	100	120	120	100	100	120	100	110	120
	オフセット	0	80	29	95	92	18	34	64	26	10	61	70	89	52	24

路線の系統化を行った場合と各交差点個別単独に制御した場合との比較では、遅れ時間に著しい差異があることが認められる。個別独立に制御したケース4の結果については、無系統制御の一例を示しているにすぎず、制御パラメータの設定に依存して、遅れ時間は大きく変動する。

また、系統制御間を比較すれば、時間帯の上下交通量レベルに依存して、優先方式、平等方式の相違により、遅れに差が現われている。都心への交通量が多い朝方ピーク時には、上り優先オフセット制御をすることにより、下り方向交通は犠牲を強いられるが、上下両方向全体で見れば、現行の平等オフセット方式に比べ、約40%の遅れ時間の減少をもたらす。上下交通量が同レベルの昼間時には、現状の制御を行うことで遅れ時間を減少させることができる。

4. 地域制御の効果

路線系統制御を道路ネットワークとして面的に拡大し、交差路側の系統をも考慮して制御する地域制御（面制御）について、その制御効果を遅れ時間の短縮効果として計測した。

実験対象エリアは、東京新宿地区の青梅街道・甲州街道および山手通り・環七通りで囲まれた7路線73交差点の格子状道路ネットワークである（図-11）。

（1）シミュレーション実験条件

1) 実験ケースの設定

シミュレーション実験の比較ケースとして、次の



図-11 新宿エリアネットワーク図

4 ケースを設定した（表-5）。

ケース1は、現状の制御方式、すなわち東西、南北両方向の系統化を考慮した地域制御を行った場合である。ケース2およびケース3は、それぞれ東西方向路線のみの系統化、南北方向路線のみの系統化であり、交差側路線は系統をとらずに制御した場合である。いずれの路線も系統をとらず、各交差点単独の制御をケース4とする。

表-5 実験 ケース

ケース	制御方法	制 御 パ ラ メ ー タ		
		サイクル長	スプリット	オフセット
ケース1	現状の制御	現状（図-11）	現 状	現 状
ケース2	東西方向路線の優先系統化	青梅街道 栄通り 水道道路 甲州街道	120秒 80秒 80秒 120秒	現状固定
		その他の交差点	60～120秒ランダムに設定	現状のオフセット値 乱数によりランダムに設定
ケース3	南北方向路線の優先系統化	山手通り 中野通り 環 七	120秒 80秒 120秒	現状固定
		その他の交差点	60～120秒ランダムに設定	現状のオフセット値 乱数によりランダムに設定
ケース4	個別単独制御	主要交差点	120秒	現状固定
		その他の交差点	60～120秒ランダムに設定	乱数によりランダムに設定

2) 入力データの設定

入力データ条件は、昭和59年10月16日（火）の実測データに基づいており、実験時間帯は、朝のピーク時間帯の7時～8時の1時間である。

入力交通量、右左折率、飽和交通流率およびジャム密度の設定方法は前章の路線系統制御の場合と同様である。

各路線の系統速度は、栄通り、中野通りおよび水道道路を30km/時、その他の路線を40km/時に設定した。

表-5に各ケースにおける信号制御パラメータの設定概要を示す。

サイクル長は、系統化路線を現状のサイクル長に従い120秒または80秒とし、その他の無系統路線の交差点を60秒～120秒の範囲でランダムに設定した。

スプリットは、4ケースとも現状のスプリットを用いた。

オフセットは、系統化を図る路線については現状

のオフセット設定値に従い、系統をとらない路線については初期設定値として乱数によりランダムに定めた。

(2) シミュレーション結果

路線系統制御の場合と同様に、各ケースの10分間平均遅れの推移を図-12に示す。平均遅れは、実験対象エリア全体を通過する車の総遅れ量を、全路線の通過交通量で除して求めたものであり、この地域を通過する車1台当たりの遅れ時間の平均を表わす。

面を対象とした現状の制御方法によれば、東西方向あるいは南北方向の路線を対象とした制御に比べて、地域全体としては、遅れ時間を減少できることが明示されている。それは、約15～20%の減少効果となる。

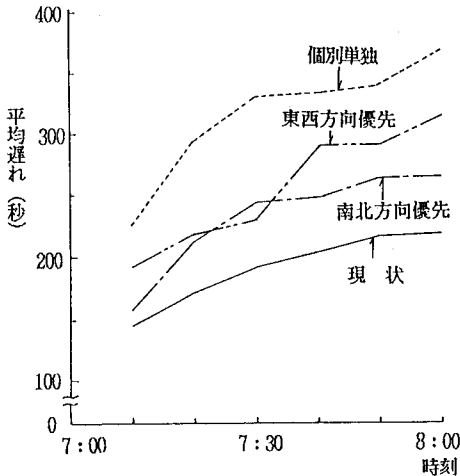


図-12 10分間平均遅れの推移(全路線合計)

5. まとめ

本研究では、交通信号制御の評価のために開発された交通流シミュレーション・モデルの概要を示し、このモデルの現実の道路網への適用を試みた。現行の路線系統制御および地域制御の効果について、青梅街道、新宿地区をケース・スタディとして、種々の制御方策のもとでの遅れ時間の減少効果を計測した。

本モデルの適用結果によれば、広範囲の道路網を対象に比較的高速に演算処理できることが確認され、また、交通流の再現性においても概ね実態を記述できるモデルであるということが出来る。現行制御の

ケース・スタディからは、路線系統化、地域制御化により、さらには、今後これらの制御を高度化していくことにより、遅れ時間は減少し、交通流の円滑化が図られることが示された。

今後の課題としては、経済的な面から評価ができるように、燃料消費量推定のための機能を組み込むことや、信号タイミングの最適化を図るプログラムの作成等モデル機能を向上させていく必要がある。また、演算時間の一層の高速化、入力データ作成の簡便化など実用面への高い適用性を有するように改良していく必要がある。そして、本モデルを種々の条件下における多様なケースに適用し、各種制御手法の比較評価をして行きたいと考えている。

最後に、本研究のケース・スタディは、昭和59年度、60年度にわたる「交通安全施設の投資効果に関する調査研究」の一環として行った、コンピュータ・シミュレーションによる信号制御の効果評価の一部分について、作業グループの成果および打ち合せ記録を基にまとめたものであることを記し、関係各位に謝意を表わします。

参考文献

- 1) FHWA: National signal timing optimization project, ITE Journal, pp.12~14, 1982.10.
- 2) 日本交通管理技術協会: 交通安全施設の投資効果に関する調査研究中間報告書, 昭和60年5月
- 3) 池之上慶一郎他: 街路交通流のシミュレーション, 交通工学, vol.9, No.1, pp.3~17, 1974.
- 4) Cohen, S.L.: Macroscopic simulation models for use in traffic systems management, Trans. Res. Rec., 667, pp.76~79, 1978.
- 5) Robertson, D.I.: Transyt, a traffic network study tool, RRL Report, LR253, 1969.
- 6) Hunt, P.B. et al. Scoot — a traffic responsive method of coordinating signals, TRRL Report, 1014, 1981.
- 7) 尾崎晴男: 交通信号制御の評価シミュレーション・モデルの開発, 第7回交通工学研究発表会論文集, pp.13~15, 昭和59年11月
- 8) 桜田陽一他: シミュレーションによる信号制御手法の評価に関する研究, 土木学会第40回年次講演概要集 第4部, pp.457~458, 昭和60年9月