

信号現示方式最適化を考慮した信号制御モデルの構築

インフラ計画研究室 松田 真宜
指導教官 松本 昌二
佐野 可寸志
及川 康

1. はじめに

わが国では、高度経済成長期以降、急速にモータリゼーションが発展し、それに伴い渋滞も慢性化の様相を見せ、都市交通の円滑化が求められている。

この都市交通の円滑化の一手段として、交通信号制御があり、わが国の交通信号制御技術も高度成長期以降発展をとげてきた。近年では、ITS (*Intelligent Transport Systems*) の発展により、交通量データの入手精度の向上やUTMS (*Universal Traffic Management System*) に代表されるような高度な交通信号制御が可能となってきている。しかしながら、わが国の信号制御方式の大半は、欧米と比較して、制御システムの運用上の理由から、運用者レベルで試行錯誤的に決められることが少なくない。この中で交通管理者の頭を悩ませる問題は、時々刻々と変化する交通流に対して最適である信号現示の設計と信号制御パラメータの設定を行うことにある。この問題を簡単にするため、現状では、信号現示と信号制御パラメータは、静的な飽和度指標から交差点ごとに設計されてきた¹⁾。この立案過程は、計算コストの観点から操作性優れている反面、遅れ時間に対する説得力に欠け、最適解にいたるまで試行錯誤しなければならず非常に時間のかかる問題も抱えており、合理的な立案方法の確立が望まれているのが現状である。

本研究では、以上の問題点に基づき、交通信号制御施策の立案・評価システム構築の基礎的研究として、試行錯誤的な操作を改善するために、現示方式の最適化を考慮した信号制御モデルの提案を行う。まず、信号現示方式の設計手法を構築し、渋滞改善の期待値が大きいとされる信号制御パラメータの決定手法を構築する。その後、地点制御と系統制御にて本モデルの適用性を見ることとする。

2. 評価モデルの構成

本評価モデルの特徴は、簡単なデータ入力により、交差点における現示方式の設計と信号パラメータの設

定が容易かつ 動的に行えることがあげられる また、従来の飽和度指標による試行錯誤適な方法が必ずしも最適な運用状態へ解を導かない点を改善するため最適解導出の過程に遅れ時間式を導入し遅れ時間の最小化を目的関数としている (ただし、オフセットの設定は通過大域最大化で行っている)。

本モデルは、以下のような大きく分けて3つの機能に大分される。

- 現示方式のパタン化
- 信号制御パラメータの計算
- 交通流シミュレータ

これらは、図-1 に示すよう構成により相互に連動し機能する。

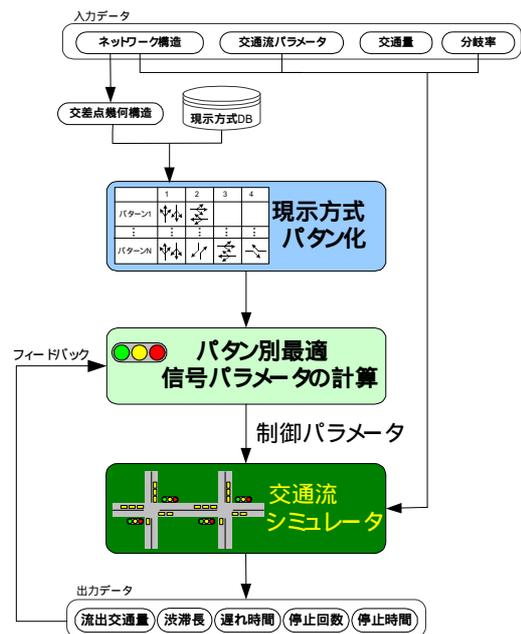


図-1 制御システムの構成

現示方式データベースは、あらかじめ外部プログラムにて交差点形状別に自動生成している。現示方式の生成は、まず1流入部の表示可能現示を考える。例えば、交差点で3方向に分岐する流入部では、図-2のように入右・左折レーンの有無により表示可能現示のパタン数が決定できる。

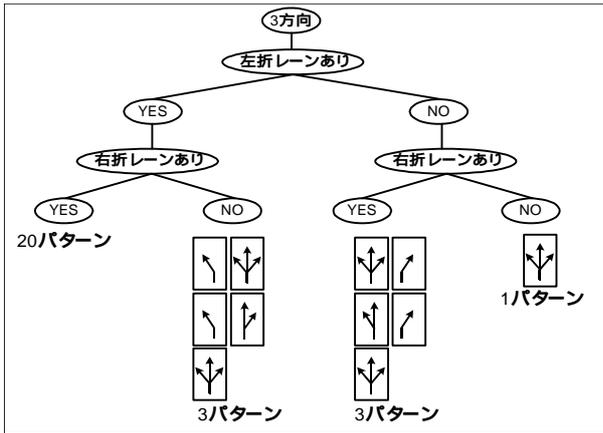


図-2 1 流入部における表示可能現示

N 差路交差点での現示方式のパターン数を考えると、流入部 1 のパターン数から流入部 N のパターン数までを掛け合わせたもので表現できる。このとき、以下の 4 つの条件にて、運用上支障のきたす現示方式を除外したものが実際の現示方式最適化問題に適用される。

- 同一流線に対する現示の連続性の確保
- 青早出し現示の禁止
- 交通流の錯綜が無いこと

クリアランス時間が許容値を超えないこと

現示方式のパターン化は、この現示方式データベースと、入力データから得た交差点形状を照合し表示可能な現示方式を抽出する方法によって行っている。

交通状態の定性分析を行うために、ミクロ交通流シミュレーションモデルを構築した。特徴としては普通車、大型車の 2 車種の交通を扱うことができそれぞれ車両が加速度、減速度、最大速度を保持する S-V 型の追従型モデルであり、アニメーション機能 (図-3) を具備している。

3. 1 交差点を対象とした制御 (地点制御)

3-1 遅れ時間式の導入²⁾

ここでは、非飽和領域から飽和領域まで扱うことが可能である HCM の遅れ時間式を用いて遅れ時間を定義する。(1) 式に交差点における現示 i 、流入路 j における平均遅れ時間式、(2) 式に総遅れ時間、(3) 式に交差点総遅れ時間 (4) 式に交差点平均遅れ時間を示す。

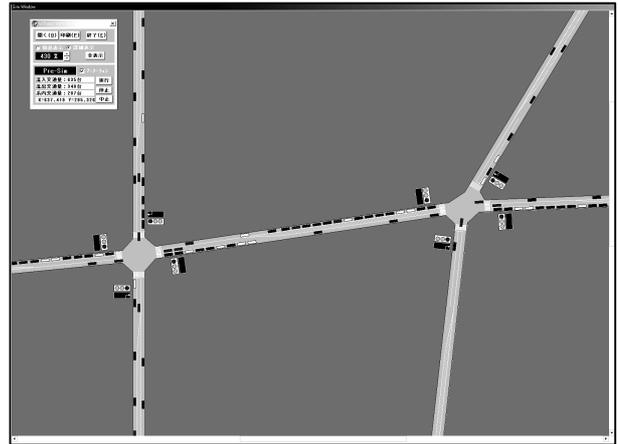


図-3 交通流のアニメーション表示

$$d_{ij} = \frac{0.38C(1-f_{ij})^2}{1-f_{ij}x_{ij}} + 173(x_{ij})^2 \left\{ (x_{ij}-1) + \sqrt{(x_{ij}-1)^2 + \frac{16x_{ij}}{f_{ij}S_{ij}}} \right\} \dots(1)$$

Subject to

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \quad C = f_1 + \dots + f_n + L_1 + \dots + L_n$$

$$D_{ij} = d_{ij}q_{ij} \dots(2)$$

$$D_{All} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_{ij} \dots(3) \quad D = \frac{D_{All}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n q_{ij}} \dots(4)$$

ここで、

d_{ij} : 現示 i 流入路 j の車両 1 台あたりの遅れ時間

C : サイクル長 L : 損失時間 f_j : スプリット

S_{ij} : 現示 i 流入路 j における飽和交通流率 $X_{ij} = q_{ij} / S_{ij}$

3-2 実遅れ時間と推定遅れ時間

ここでは、交通流シミュレータ上で計測される平均遅れ時間を実遅れ時間とし、HCM の遅れ時間式による平均遅れ時間を推定値として、両者が大きく乖離しないことを確認する。図-4 は、横軸に交通流シミュレータで計測したリンクの実平均遅れ時間、縦軸に HCM の遅れ時間式によって推定したリンクの平均遅れ時間と取り相関を見たものである。これらの値は、1 リンクからなるネットワークに、リンクの飽和交通流率がほぼ 0.5 となるように信号秒数を設定し、7200 秒のシミュレーションを行い、30 秒ごとに遅れ時間を計測したものである。この結果、 $R^2=0.93$ を得た。RMS を見ると 5.23 とばらつきが大きい、これは渋滞車列中のショックウェーブの伝播に関係があると思われる。

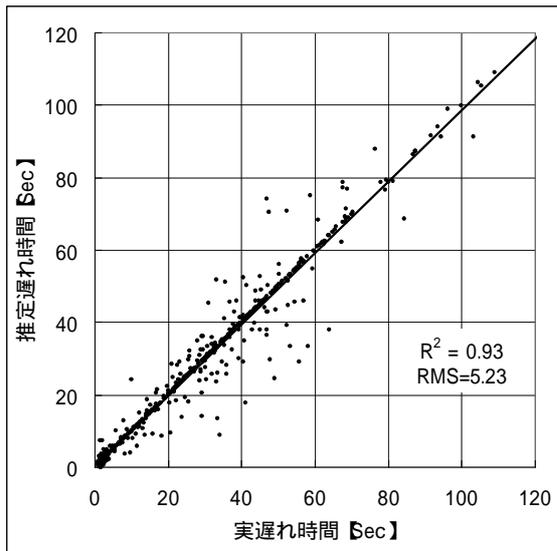


図-4 実遅れ時間と推定遅れ時間

3-3 スプリット最適化問題

HCM の遅れ時間式は、サイクル、スプリット、飽和交通流率、交通需要が与えられたときの遅れ時間を導き出すことができる。ある制御時間で交通需要が既知である場合のスプリット最適化問題は、有効青時間（サイクル・損失時間）のタイムシェアリング問題として扱うことができる。これは、時間軸上で現示数1個のスプリット切り替え時刻の境界線を決める問題となる。これはどのような境界線が良いかを取り決める組合せ問題である。この組合せ問題を総当り法で調べ上げ遅れ時間が最小となるスプリットを決定するには膨大な計算時間を要する。そこで、計算の工夫の1手法として、ある現示までの最適制御は、その時刻までの交通量変動によって求められたものでありそれ以降の交通状況と独立である性質に着目する。この性質は Bellman の最適性原理でありダイナミックプログラミング (DP) の適用が可能である。

DP は、ネットワーク分析の最短経路探索問題と捕らえることができる。例えば、図-5のようにサイクル長100秒で現示数が5つの場合には、現示1については開始時刻が0なのでまずこれをノードとし、現示2については開始可能な時刻は1から96なのでそれらをノードとする。現示3以降も同様にいきネットワークを作成する。スプリットの決定はこのネットワークのそれぞれのパス（現示の開始時刻と終了時刻）につ

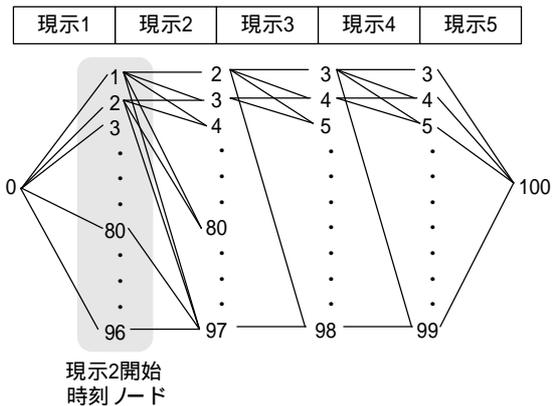


図-5 現示の切り替え時刻決定問題のネットワーク

て(1)式を用いて現示遅れ時間を計算する。この中で現示1から現示5の終了時刻までの遅れ時間の総和が最小となるパスの現示時刻をスプリットとして用いる。

3-4 サイクルの決定方法

サイクルは、サイクル探索の上限値と下限値を決め刻み幅1秒にして逐次探索する。実際の探索ではサイクルをずらすごとにDPを用いたスプリットの計算を行う。この中で最小となる交差点総遅れ時間をとるものをサイクルとする。サイクルの上限値・下限値の設定は、街路網のリンク長とリンク速度から設定する。例えば、街路の一般的なリンク長(250から300m)、系統速度(40km/h)とした場合の往復旅行時間 T は45~90秒の範囲にあり平等オフセットを仮定すると一般的に用いられる最低サイクル長の範囲は $T \sim 2T$ の範囲内が望ましいといわれている。この考えを用いると最小サイクル長 ($C_{min} = 90$ 秒)、最大サイクル長 ($C_{max} = 180$ 秒)となる。

4. 1 交差点における解析と考察

4-1 交通需要の変化と現示方式の選択

交通量変動と交差点での分岐率変動が、どのように現示方式の選択に影響及ぼすか考察するために、表-1に示すケースにて感度分析を行う。交差点流入部の構造は左直レーンに右折ポケット30mを付加している。現示方式のパタン数は、簡単のため図-6に示すような2パターンに固定している。図-7は、各ケースの現示

表-1 ケース設定

ケース	交通量 [Veh/h]	左折率 [%]	直進率 [%]	右折率 [%]
Case1-A	100	5	90	5
Case1-B	100	5	85	10
Case1-C	100	5	75	20
Case2-A	300	5	90	5
Case2-B	300	5	85	10
Case2-C	300	5	75	20
Case3-A	600	5	90	5
Case3-B	600	5	85	10
Case3-C	600	5	75	20

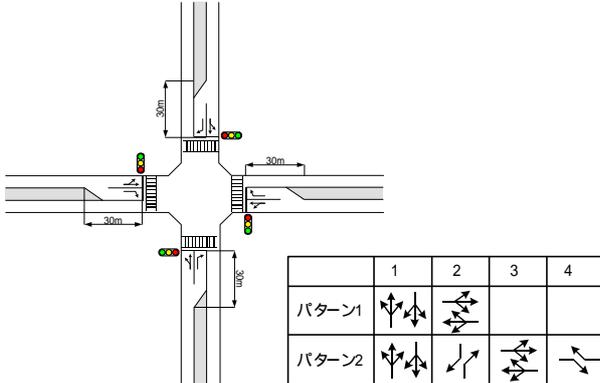


図-6 交差点形状と現示方式のパターン

方式のパターンの選択回数を示している。右折交通が少ない場合はパターン1を選択し、右折交通が多くなるに従いパターン2を選択する傾向があることが伺える。発生交通量の側面から見ると発生交通量が多くなるに従い選択回数が安定していることがわかる。これは、流入部が飽和状態に近づき交差点到着のランダム性が小さくなっているためと思われる。

4-2 現示方式と制御パラメータの最適化

現示方式と制御パラメータの最適化を行ったときの遅れ時間にどのような影響を及ぼすかについて分析する。表-2 にケース、表-3 には交通量の設定を示す。制御パラメータの決定方法は、飽和度指標を用いたものと遅れ時間を用いたものの2種類の比較を行い、各ケース現示方式の最適化選択を行うものを行わないもので評価している(図-8)。

現示方式の最適化を行ったケースと行わなかったケースとで見ると、約15%程度の効果が見られる。これは、交通流に右折交通量が多いか少ないかによって右折矢印が出るかでないかが判断され右折矢印を出す際の右折矢の最小信号時間とクリアランス時間が他の現示の青時間に振り分けられているためである。

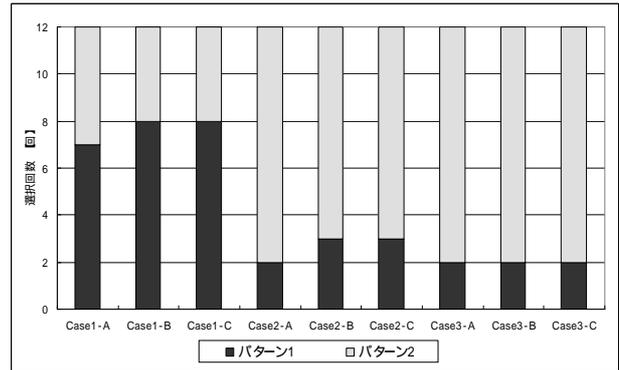


図-7 ケース毎の現示パターンの選択回数

表-2 ケース設定

ケース	現示方式の最適化	パラメータの最適化方法	
		交差点飽和度と飽和度比を用いた手法	HCMの遅れ時間式を用いた手法
-1-A	あり		
-1-B			
-2-A	なし		
-2-B			

表-3 交通量の設定

時間帯	普通車台数	大型車台数	左折率	直進率	右折率
0-600	90	10	10	80	10
600-1200	360	40	10	70	20
1200-1800	540	60	10	60	30
1800-2400	270	30	10	70	20
2400-3000	180	20	10	80	10
3000-3600	90	10	10	85	5
計	1530	170	-	-	-

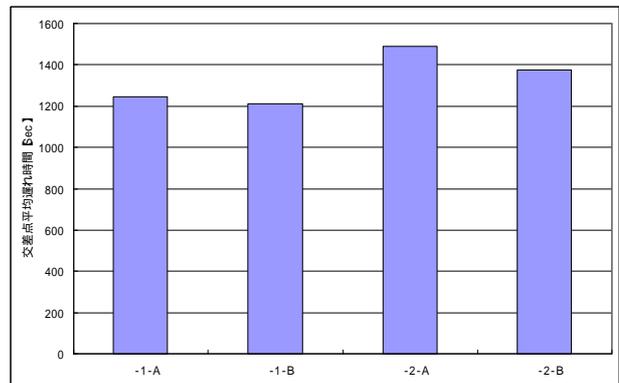


図-8 交差点平均遅れ時間の比較

5. 複数交差点を対象とした制御(系統制御)

系統制御では、交差点間の交通流制御のためにオフセットを導入する必要がある。オフセットの定義としては、相対オフセットと絶対オフセットの2種類があり、絶対オフセットはある基準時点から青開始時点

までの時刻であり隣接2交差点の絶対オフセットの差をとると相対オフセットとなる。このオフセットが、適正に設定されなければ、必然的に交差点間停止する車両が発生し交通容量が低下する。さらに、交通量が比較的多い場合では、渋滞を発生させてしまう。一度のびた渋滞長は、交通需要が減少するまで解消しないので長時間にわたって交通流に影響を与えてしまう。

系統内のサイクル長は、ボトルネック交差点のサイクルをとる既存の手法⁴⁾を用いる。ボトルネック交差点の特定は、交差点総遅れ時間を用い最も大きな値をとる交差点をボトルネック交差点とする。系統制御におけるスプリットとサイクル長の設定は、ボトルネック交差点では、サイクル長とスプリットの最適化を行い、ボトルネック以外の交差点は、ボトルネック交差点のサイクル長を用いてスプリットの最適化を行う。

5-1 オフセットの決定問題

オフセットの決定は、組合せ問題として定義され、1リンクにあたりサイクル長の2乗の組合せがある。また、交差点数が増えるとサイクル長 $2 \times \text{交差点数}^1$ の組合せが存在し、計算が困難となる。そこで、何らかの計算方策や簡便化を行わなければならない。最適化の手法にメタヒューリスティックな手法を用いた報告もあるが、本研究では、簡便的な手法である通過帯域最大化法を利用する。通過帯域最大化法は、遅れ時間との直接的な関係は無いが、図-9のように系統の各交差点の上り方向の青信号時間と下り方向の青信号時間の共通部分を最大化することによりオフセットを決定する手法である。

5-2 オフセット追従問題

サイクルとスプリットの値は、急に値を切り替えることができるが、オフセットの変更は、ドライバーへの影響や歩行者信号の最低秒数のために数回に分けて行わなければならない。そのため、オフセット追従 (*Offset Transition*) が発生する。オフセット追従とは、現在のオフセットから新しいオフセットに移行する作業を呼ぶ。信号機は、周期 (現示階段表の全ステップ

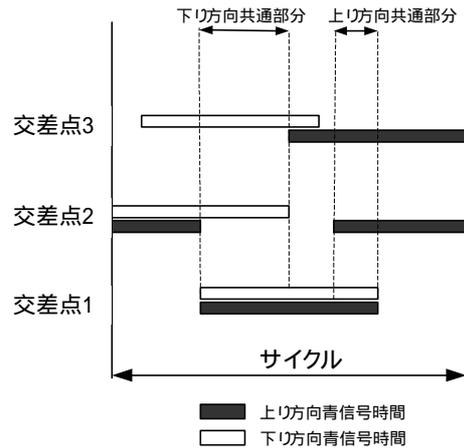


図-9 通過帯域最大化法によるオフセット

を消化するまでの時間) をサイクル開始時刻より延ばすか縮めるかの手法をとり絶対オフセットを変更していく。この周期とサイクルの差を追従幅という。通常、追従幅は、サイクルの1/8値が使用される。1周期の時間をサイクルよりのばすことをプラス追従と呼び、縮めることをマイナス追従と呼ぶ。このプラスとマイナスを対従方向と呼び、対従方向の組合せによっては、目標の相対オフセットの値と追従中の相対オフセットの値が、サイクルの半分以上となるオフセット反転が起こることがある。オフセット反転が起こると、交差点で連続して赤信号に止められる現象が起こる。また、交通量が多いときにオフセット反転が起こると、交差点を通過できる容量を低下する場合がある。

井上ら⁵⁾は、このオフセット追従問題を、総追従量最小化を目的関数にオフセット反転位置の最小化を制約条件とし、P問題であり線形計画法に帰着する問題として扱っている。本研究においても井上らの手法を踏襲する。

5-3 系統制御における解析と考察

解析対象とするネットワークは、図-10に示すような5連続の交差点を考え、交差点4がボトルネック交差点になるように交差点4の従方向交通量を多く設定する。表-4にケース設定を示す。ここでは、ネットワーク全体の遅れ時間最小化を目的関数として現示方式のパターン選択と制御パラメータの設定を行っている。オフセットを0にしたケースオフセットを設定した

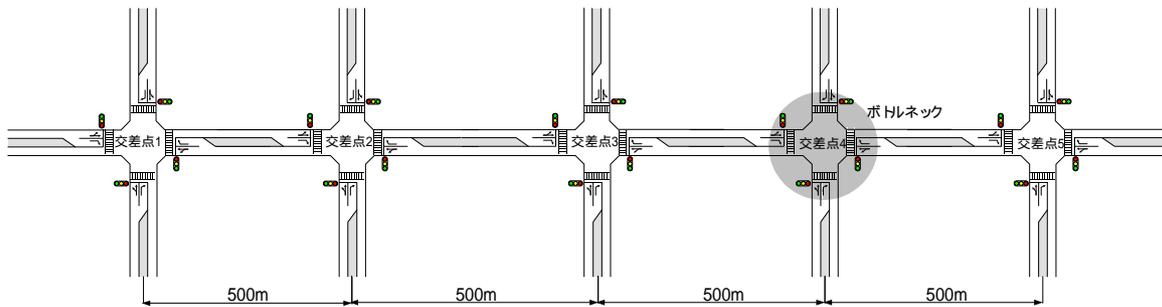


図-10 解析ネットワーク

表-4 ケース設定

ケース	系統交通量	従方向交通量		絶対オフセット
		交差点4	交差点4以外	
1-1	200	600	200	0
1-2		600	200	設定
2-1	400	600	200	0
2-2		600	200	設定
3-1	600	600	200	0
3-2		600	200	設定
4-1	800	600	200	0
4-2		600	200	設定

ケース共に、交通量の増加に伴って遅れ時間が大きくなっている(図-11)。交通量が少ないときには、オフセットを設定したケースの遅れ時間の改善が大きいものに対し、交通量が多いときにはオフセットの設定した効果は、小さくなっている。これは、交通量が増大するにつれ交差点間の渋滞が延伸し、オフセットを設定してもあまり系統の効果が期待できないことを示している。しかしながら、非飽和時での遅れ時間の短縮は、オンピーク時の渋滞発生時刻の遅延や最大渋滞長の縮小効果に対しての期待がもてる。ケース4-1,4-2の遅れ時間が大きいのは、与えた系統の交通需要がネットワーク両端の交差点の飽和交通流率以上であり、ネットワーク左右両端のリンク上流方向へ渋滞が延伸しているためである。また、この際現示方式の最適化も行っているが、これによる大きな弊害は無かった。

6. まとめ

簡単なデータ入力により行うことで信号現示方式と制御パラメータの設定行える評価モデルを構築した。

地点制御では、従来の飽和度指標による信号パラメータの設定と遅れ時間式による最適パラメータの設定を比較し優位な結果を得た。また、信号現示の最適化を図ったケースでは、信号制御パラメータの最適化を図るより交通量の状態によっては、大幅な遅れ時間の改善を行うことができる事がわかった。系統制御では、オフセットの準最適化とオフセット変更時の交通流の乱れを最小限にする追従方法を図り、遅れ時間が改善されることを確認した。

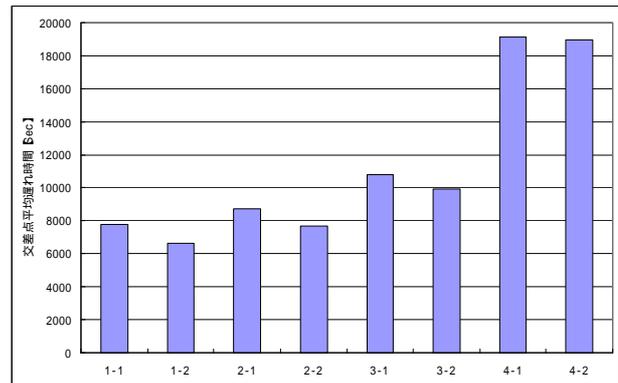


図-11 オフセット設定による遅れ時間の短縮効果

系統制御では、オフセットの準最適化とオフセット変更時の交通流の乱れを最小限にする追従方法を図り遅れ時間が改善されることを確認した。この場合、交通量が非飽和時では効果が比較的大きく、過飽和時では効果は小さなものとなっている。今後の課題としては、オフセットの決定方法に準最適化である通過帯域最大化法を用いたが、遅れ時間との関係性のある手法を用い計算の工夫を図るべきである。また、スプリット、サイクルの最適化過程でも同様に、メタヒューリスティック等の計算の工夫を取り入れ、モデルの適用範囲(交差点数)の拡大を考えるべきである。信号現示の最適化では、今回は、単一の評価時間内(5分)で最適なものを選択したが、実際の運用を考えた場合、ドライバーの信号の見落とし等で、交通事故を発生する可能性が残る。別途、現示方式の変更時間をどのようにするかという問題を解決する必要がある。

参考文献

- 1) 社団法人 交通工学研究会編 交通信号の手引き
- 2) Highway Capacity Manual 1994
- 3) 桑原雅夫 交通信号制御における交通需要の集合化に関する研究
- 4) 久居守 ほか 系統信号システム制御バタン切り替え戦略に関する研究 山口大学工学部研究報告
- 5) 井上健士 ほか U型伝送を使用した道路交通信号におけるオフセット追従問題の最適解法 電子情報通信学会誌 A Vol.J81-A No.4 pp562-577 1998年4月