

連続可変面制御による交通渋滞制御方式に関する研究†

蔡 再 旺†

Abstract

Lately traffic situations have become more and more serious year after year because of the marced increase in automobile transportation and the urban concentration of traffic demand. A traffic jam in the street-network specially leads to more sperious confusion on account of intersecting traffic at intersections.

Therefore, if the traffic demand becomes great, the level of traffic flow should be kept high to prevent the occurence of the traffic jam, qnce the traffic jam accures. It should be swiftly settled and at the same time the confusion at the intersections should be prevented.

In the present study the author treats of the following five modes as a method of control: a stoppage mode, a delay mode, a capacity mode, a quene mode and a jam mode, the present study also deals with the method of automatic traffic jam measurement for the switchover of the modes, together with the examination of the actual effect of the five modes by the control of on-line computer.

1. まえがき

交通公害が問題化している昨今、その対策の一つとしてコンピューターにより、道路全体の交通状況把握して信号機をうまく制御することにより、交通混雑を緩和しようとする交通制御理論が世界各国で研究されているが、しかし連続可変な面制御における決定的な渋滞制御方策はいまだ実現されていなかった。

そこで本論文はこの観点より、広域の道路網における交通渋滞制御方式として、停止、遅れ、容量、行列および渋滞の5つのモードを用いて、交通の混雑度に応じて制御理論およびその評価基準をも変化させ、常に道路上での交通状態に対して最適な制御を行なうことができるような各モード間の切替え閾値論理を確立した、またこのために渋滞の自動測定原理を確立し、連続可変面制御を可能ならしめた。この論理は福岡広域交通管制システムにおいて初めて適用されたものである。

福岡広域交通管制システムは、制御端末数を300交差点、1000感知器より構成されており、東京広域交

通管制システムの信号制御方式に情報収集およびその機能を付加したものである。

2. 連続可変面制御による交通渋滞制御論理

2.1 概要

本方式では、交通量に応じて軽交通の場合は遅れを最小にし、交通需要の大きい時は交通容量を高く維持して渋滞の発生を防止し、渋滞が発生した場合はこれを速かに解消して、つねに道路上での交通状態が最適な制御を行いうるよう、制御原理の切替えにより、制御のダイナミックレンジを広げ、自動測定法によって連続可変面制御を可能ならしめている。

2.2 交通渋滞制御論理

2.2.1 交通情報処理方式

交通情報は、街頭に設置された車両感知器から送られる車両検知信号を解析することによってえられる。車両感知器のパルスは50msに1度サンプルして読みとられ、サンプル値の変化を検出して、パルスの立上り時点と立下り時点が測定される。パルス幅、パルス間隔、パルス数などから、車の速度、占有率、交通量が求まる。これらの量からマイクロな変動をとりのぞくために、移動平均化を施し、これらの平均値を種々の制御の基本量として使用する。

† The Traffic Congestion Controlling Method of Variable Continuation Control Area, by Saio Sai (Sumitomo Electrical Industrial Co., Ltd.)

† 住友電気工業株式会社

2.2.2 渋滞制御方式

制御地域が広い場合、同一制御パラメータ、制御モードなどで制御することは不都合である。ここでは、交通状況によって制御地域全体をあらかじめいくつかのモードエリアに分割し、エリア内は属する交差点または交差点区間の要求するモードのうち最も次数の高いモードで制御される。

(1) 停止モード

停止モードとは軽交通時において、オフセット制御による通過帯[†]の範囲内で処理できる交通流に対してのみ適用される。一般交差点に対しては、信号による停止回数を少なくするようなオフセットパターンを与え、重要交差点に対しては、ギャップ感応による延長制御^{††}を加味して制御を行なう。

(2) 遅れモード

遅れモードとは、交通需要が中程度の時にオフセット制御によって交差点での信号待ちによる遅れの総和を最小とする制御を行なうものである。このモードは通過帯の範囲内に交通流を収容できないほど交通需要が大きい場合に適用され、またこのモードではオフセット最適化^{†††}を行なって、オフセットのダイナミックな制御を加味する。

(3) 容量モード

容量モードは、信号交差点の交通容量を最大にすることを目的とした制御モードで、青の利用率を高めることであり、飽和したかまたは飽和状態に近い交差点とその周辺に対して適用される。このモードの原理は重要交差点の流入部に待行列を作り、待行列からの発進のみを許すことによって、青時間中のフローレートを高くし、さらに青時間中の飽和度を監視し、これが一定値を下まわれば直ちに青を打切って他の現示に青を回すことによって青時間の効率を最大にすることである。

(4) 行列モード

行列モードは容量モードを適用してもなおさばききれない交通需要があって、交差点の容量一杯に利用されている状態で、下流側交差点の待行列の影響によって上流側の発進を妨げられて交通容量の低下がみられるような状態の時に用いる。このモードの目的は、下

流交差点の待行列の長さや発生時点を下流側交差点の行列が当交差点の発進を妨げないように制御することによって交差点容量の低下を防止することにある。

(5) 渋滞モード

渋滞モードは行列が一定値以上になった時に適用される。すなわち、ある区間において交通容量以上の交通需要が発生し、渋滞からさらに混乱へ発展する恐れのある時その交通需要を交差点区間に吸収し、交通容量の少ない下流側交差点への影響を抑える。また、すでに渋滞が発生した場合には、系の復元性を回復する為交通需要の減少とともに渋滞を一たん解消させ、渋滞により低下した交差点容量を渋滞発生以前の状態に復帰させるようなシーケンス制御を行なうものである。

2.3 交通自動測定法によるモード切替え閾値論理

後(4.1)で立証するごとく渋滞待行列長は車両占有率に比例するので、連続可変面制御の最適制御閾値はその自動測定法によってえられる。モード制御の切替え閾値には、各モード間の切り替え閾値とモード内の信号パラメータ決定などがある。前者は交通の混雑度によって制御論理およびその評価基準を切り替えるための各モード間の移行閾値の決定であり、後者は各モード内の信号パラメータの定数設定と制御効果を高めるような定数修正も含まれる。

2.3.1 モード選択の切替え閾値設定

(1) 停止モードと遅れモード間の移行

停止モードと遅れモード間の移行は、測定された交通量が通過帯の範囲内で収容できるかどうかで決定されるが、本システムでは次式で V_0 (交通量) を計測しモード決定重要交差点に定められた閾値 V_s , V_D と比較し、その結果

$V_0 < V_s$ ならば停止モードに移行、

$V_0 > V_D$ ならば遅れモードに移行、

$V_s \leq V_0 \leq V_D$ ならばモード変更をしない、

$$V_0 = \sum_i \alpha_i V_i \quad (1)$$

ただし V_i : 感知器の交通量, i : 感知器番号,

α_i : 感知器 i の交通量補正係数 (車線数補正係数)。

(2) 遅れモードと容量モード間の移行

遅れモードと容量モードの移行は、重要交差点の飽和度が1に近い交通状況になった時に行なわれる。本システムでは飽和度と占有率の相関々係を利用して、飽和度の代わりに占有率を用いている。次式で Q_0 (占有率) を計測してモード決定 (重要交差点ごとに定め

† 系統内のどの交差点でも停止せずに通過できる車団の最初の車と最後の車との時間間隔。

†† これは感知器入力により計測された車間々隔が短い場合は青信号を延長し逆に車間々隔が一定の長さ以上をこえた場合は青信号をうち切る。交通状況に合わせて信号周期毎に行なわれる。

††† 2.3.2 節に参照。

られた閾値 Q_s, Q_D と比較する, その結果

- $Q_0 < Q_s$ ならば遅れモードに移行,
- $Q_0 > Q_D$ ならば容量モードに移行,
- $Q_s \leq Q_0 \leq Q_D$ ならばモード変更をしない,
- $Q_0 = \sum_i Q_i \beta_i$. (2)

ただし Q_i : 感知器 i の占有率, i : 感知器番号
 β_i : 感知器 i の占有率補正係数 (車線数補正係数), Q_s : 信号 1 回待ちの待行列長に対応した占有率.

(3) 容量モードと行列モード間の移行

容量モードと行列モード間の移行は, 1 流入路 1 感知器として 4 流入路について計測し, すなわち,

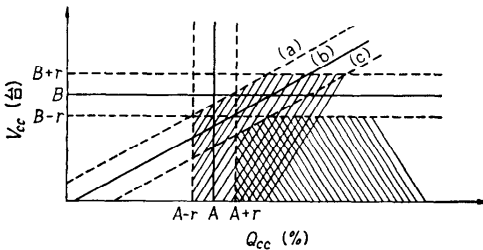
$$\left. \begin{aligned} V_{cc1} &= \gamma_1 V_1 & Q_{cc1} &= \beta_1 Q_1 \\ V_{cc2} &= \gamma_2 V_2 & Q_{cc2} &= \beta_2 Q_2 \\ V_{cc3} &= \gamma_3 V_3 & Q_{cc3} &= \beta_3 Q_3 \\ V_{cc4} &= \gamma_4 V_4 & Q_{cc4} &= \beta_4 Q_4 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし $\gamma_{1-4}, \beta_{1-4}$ は各感知器ごとの交通量, 占有率の補正係数である (V_{1-4} =交通量, Q_{1-4} =占有率).

上記の値による 4 コの組合せ (V_{cc1}, Q_{cc1}), (V_{cc2}, Q_{cc2}), (V_{cc3}, Q_{cc3}), (V_{cc4}, Q_{cc4}) のいずれかが図 1 の左斜線内に入れば行列モードに移行する. また, この 4 組がすべて図 1 の右斜線内に入れば容量モードに移行する.

(4) 行列モードと渋滞モード間の移行

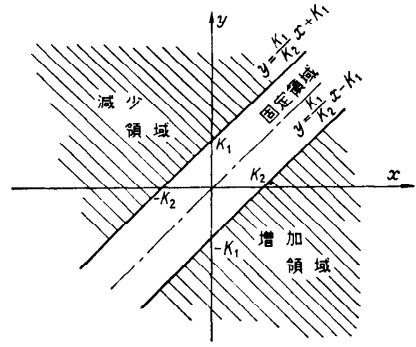
行列モードと渋滞モード間の移行は, 下式で \bar{I}_j (最大待行列長に対応した占有率) を 4 流入路について計測し, そのうちの最大 \bar{I}_j をモード決定重要交差点ごとの流入路ごとに定められた閾値 M_j と比較し, その結果いずれかの流入路で $\bar{I}_j > M_j$ ならば渋滞モードに移行する.



- (a) $V_c = C \cdot O_c + D + r$
- (b) $V_c = C \cdot O_c + D$
- (c) $V_c = C \cdot O_c + D - r$

なお, A, B, C, D, r はモード決定重要交差点毎に定められる.

図 1 容量モードと行列モード間の移行ロジック



x : 上り方向の遅れ微係数
 y : 下り
 $y > \frac{K_1}{K_2}x + K_1 \Rightarrow \frac{K_1}{K_2}x - y + K_1 < 0$ (減少)
 $y < \frac{K_1}{K_2}x - K_1 \Rightarrow \frac{K_1}{K_2}x - y - K_1 > 0$ (増加)

図 2 オフセット最適化のデンジョンテーブル

$$\bar{I}_j = \text{Max} (B_{ij}, Q_{ij}). \quad (4)$$

ただし Q_{ij} : 感知器 i の占有率, 流入路, B_{ij} : 感知器 i の占有率補正係数, i : 感知器番号.

2.3.2 モード内の定数設定

モード決定によって遅れモードが選択された交差点区間 (リンクともいう) についてオフセット最適化を行なう. オフセット最適化とは, リンク間の相対オフセットを微小量変化させた時の上下リンク遅れ量を調べ, 遅れ量が少なくなる方向にオフセットを修正して行くことである.

オフセット最適化で決定すべき定数は, オフセットの微小変動幅と遅れ微係数 (遅れ量/オフセット変動幅) に対する閾値がある. 前者はリンク間の距離と計測された交通量によって決定される, 後者は図 2 にもとづいてオフセットの修正が行なわれる. 図中に設定された K_1, K_2 は上下リンク方向の閾値であり, この値が小さければ相対オフセットは変化し難く, 大きければ変化しやすくなる図 2 において減少領域の場合は相対オフセット \uparrow の値を数% 減少し, 増加領域の場合は相対オフセットの値を数% 増加する.

3. システム構成

図 3 に福岡広域の交通管制システムの構成概略を示

† オフセットとは基準時点から測ってある信号に青表示が現れるまでの時間で, 実秒数またはそれをサイクルで除した%で表示される. 相隣合う信号のオフセットの差を相対オフセットという% (百分率) で表示される.

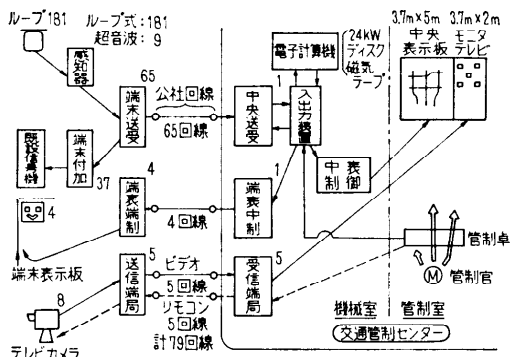


図3 システム概略構成図

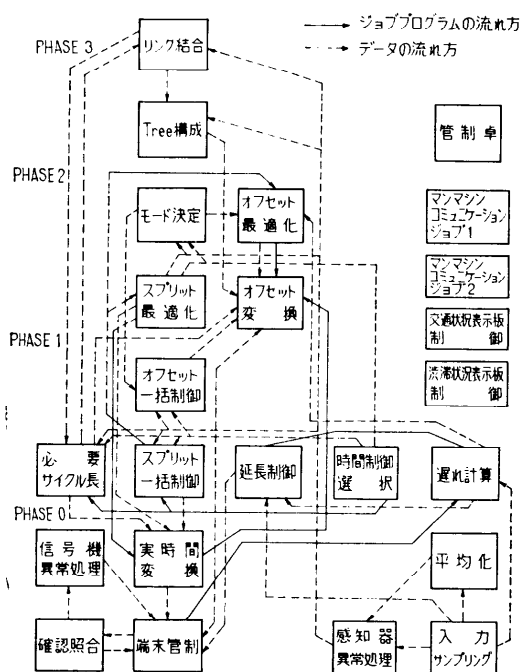


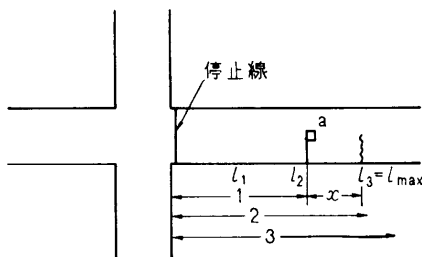
図3' ジョブプログラムの全体構成

した。端末と信号のやりとりはすべて電電公社回線を通じて行なわれる。図3に示すように、車両信号送信と信号機への制御信号送信は同一の回線を共用する。

また、ソフトウェアにはモニタプログラム、ジョブプログラム、サポートプログラムおよび定数設定の4項目によって構成される。((3)' はそのジョブプログラムの全体構成である。)

4. 交通渋滞の自動測定

制御領域内の交通渋滞状況を自動的かつ正確に把握



a: 感知度 x: 信号1 回待行列長

図4 渋滞測定流入路の見取図

して、表示板で集中監視するシステムは過去2度ばかり実施されて、その際に感知器入力の処理手法が吟味確立された、そしてこれに基づいて福岡広域システムが初めて交通渋滞の自動測定システムを実用化した。

4.1 渋滞の測定原理

交通渋滞長は車両感知器上の時間占有率を測定することによってえられる。運転者の心理は一般に前方に停車中の車との間隔に反応して減速するので、感知器上の存在時間に影響して占有率が変化する。ゆえに停車中の車の増減と占有率の増減との間に、相関があるというのがその原理である。

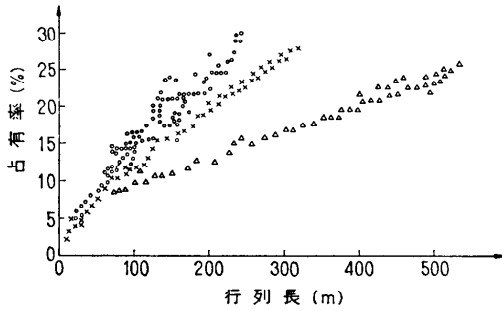
この現象をさらに詳しく考察するために、感知器の位置と停止すべき位置、すなわち待行列長の末尾との位置関係を次の3種に分類する。簡単な見取図を図4に示す。

(1) 待行列長の末尾が停止線と感知器の間に存在する。(2) 待行列長の末尾が感知器と感知器後方信号1 回待行列長の間に存在する。(3) (2) を越えて待行列長の末尾が存在する。

上記(1)の場合は待行列長の最大値、すなわち赤の終りにおける行列長が感知器の位置まで屈かないことになる。(2)の場合は青信号の間に必ず感知器上から車両の一掃されるときがある。(3)の場合の待行列長は、青時間においても感知器上から一掃されないから、(1)、(2)との区別は容易である。

以上により(1)、(2)、(3)と待行列長の増加によって占有率も増加すると推定される図5がその実例である。図中に感知器距離が変化しても占有率対待行列長のグラフ(略してO-Lカーブ)の傾きとの間に相関がみられない。

また、本報告で占有率とよんでいる尺度には、パルス処理の段階で上限がもうけてある。すなわちパルス



(注) ○印 渡辺 4 丁目 (5 分毎) 距離 127m
 ×印 原 (1 分毎) 距離 219m
 △印 稲城 (1 分毎) 距離 300m

図 5 占有率—待行列グラフ

幅の上限を sec とすると、本報告の占有率の次式のごとき制限をうけていることになる。

$$\text{占有率} \leq \frac{T \times \text{交通量}}{\text{総測定時間}} \times 100\% \quad (5)$$

これは感知器上に車両が $Tsec$ 以下存在しても $Tsec$ をこえる分については無視されることを意味する。

4.2 感知器の最適設置とその推定精度

ここでは、渋滞情報集収に最適なる感知器の設置位置と、その 1 コの感知器による推定可能距離およびその推定精度について述べる。

4.1 において、赤青黄の信号周期の影響をうける待行列長と、周期的な車群の消滅する待行列長とが区別された。さらにそれぞれの範囲内を区分する必要がある際には、感知器上で車両の一掃される時間のある前者の方がより明確である。このためには待行列長の閾値(渋滞度を区別する値)の最大値が、少なくとも感知器設置位置から信号 1 回待行列長以内に入っていることが望ましい。また、感知器を停止線から信号 1 回待行列長以内に設置するのは、4.1 の位置関係(1)に含まれる範囲が減少するからムダとなる。上記の視点により感知器位置は、次の不等式で表現することができる。

ただし、 $d(m)$: 停止線より感知器までの距離、
 $l_{max}(m)$: 待行列長閾値の最大値、
 $x(m)$: 信号 1 回待行列長、

$$\left. \begin{aligned} l_{max} \geq 2x \text{ の時 } d > l_{max} - x \\ l_{max} < 2x \text{ の時 } d > x \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

† 実験によるとこの値を大きくしていくにつれて、最初 1 個であった占有率対待行列の相関曲線がヒステリシスを生じて 2 個になる。
 ‡ 福岡広域では 300m を採用。

また、 $h(m)$: 車 1 台が道路を占める平均長†、
 $s(sec)$: 前方信号の 1 周期中の信号青時間長、
 $v(m/sec)$: 交差点進入速度、
 $t(sec)$: 先頭より $\frac{x}{h}$ 台目の停止車両が動き出してから交差点進入までに要する時間、
 $n(sec)$: 車頭の反応は青信号開始時より先頭車が n 秒遅れ、2 台目がさらに n 秒遅れて発進していく。

とすれば、車が発進してから交差点に進入するまでの加速度を一定とすれば x と t の間には次式が成立する。

$$x = \frac{1}{2}vt. \quad (7)$$

ここで $\frac{x}{h}$ 台目の車が信号 1 回待で交差点に進入しえる最後の車両であるとすると、 t は次式で与えられる。

$$t = s - x \times \frac{x}{h}. \quad (8)$$

ゆえに、

$$x = \frac{vsh}{2h + un}. \quad (9)$$

ここで h (車長)=6(m)、 u (系統速度 36km/h)=10(m/sec)、 n (発進遅れ)=0.8(sec) とすれば

$$x = 3s. \quad (10)$$

よって(6)式は下記のようなになる、すなわち

$$\left. \begin{aligned} l_{max}(=l_3) \geq 6s \text{ の時 } d > l_{max} - 3s, \\ l_{max}(=l_3) < 6s \text{ の時 } d > 3s. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

感知器設置位置の最大値については、次の 2 点を考慮して決定する。

(a) 隣接交差点との距離。(b) 渋滞度区別の閾値地点との距離。前者は発進交通流の過渡状態を吸収しえるだけの距離を確保する必要がある。この距離が 50m 以下になると発進遅れや右左折車のために、占有率はある程度周期的に高目となる。後者に関しては、この距離が大きくなればなるほど閾値付近の待行列長の変動が吸収されて感知器上を通過する車に伝わる。

最大閾値まで伸びた待行列長を正確につかむためには、閾値地点から少なくとも上記の車間々隔以内に感知器を設置せねばならない。ゆえに隣接交差点を考慮しなければ感知器位置は次の不等式で表現され

† 車のヘッドライトからヘッドライトまで、大型車混入率、車間距離を含む。
 ‡ 筆者らの実験で車頭時間々隔が 9 秒を越えると、後続の車両は信号周期の影響をうけないことが示されている。
 ††† 車頭時間々隔 9 秒は対象流入路の平均速度がわかれば距離に換算できる。

る。

$$d < l_{\max} + \frac{5}{2}u \uparrow \quad (12)$$

ただし u (km/h): 平均速度である。また、式(6)、(7)より

$$\left. \begin{array}{l} l_{\max} \geq 6s \text{ の時 } l_{\max} - 3s < d < l_{\max} + \frac{5}{2}u \\ l_{\max} < 6s \text{ の時 } 3s < d < l_{\max} + \frac{2}{5}u \end{array} \right\} \uparrow\uparrow \quad (13)$$

以上の範囲内で横断歩道、バス停などを考慮して設置すればよい。なお、推定精度については O-L カーブの誤差に集約される。すなわち、待行列長と占有率の測定に関しては次の4種の誤差が考えられる。

- (1) 現地に引かれた 20m ごとの目盛の誤差。
- (2) 待行列長測定者の 20mm 以下の端数に対する目分量誤差。
- (3) ハードウェアの誤差。
- (4) ソフトウェアの誤差 (入力サンプリングプログラムのサンプリング周期による誤差)。

(1) は経験から $\pm 1m$ 程度、20m に対しては $\pm 5\%$ である。

(2) は経験から $\pm 5m$ 程度、すなわち 100~500m の区間の平均では $\pm 2.5\%$ である。

(3) はパルス幅の入出力間での変化率や、レスポンスの遅れ伝送の遅れなどが考えられる、占有率に着目する際は、パルス幅の変化率のみ問題となる。ループ自身および感知器のパルス幅の変化は未知である。

端末送受信装置の入力から中央送受信装置の出力までは $\pm 50msec$ の誤差がある。これは平均時速 36km で車両が通過すると仮定すると、6m 行くのに 0.6sec かかるから $\pm 8\%$ である。

(4) は $\pm 50msec$ であり (3) と同じく $\pm 8\%$ となる。

以上 (1)、(2) より待行列長の測定誤差として、 $\pm 7.5\%$ 程度が考えられ、これが現地測定の精度と言える。占有率の測定誤差は (3)、(4) より $\pm 18\%$ となる。ゆえに待行列長の精度と占有率に対するシステムの観測機構の精度を総合すると、占有率-待行列長グラフの誤差は約 26% となる。

図6、図7はモード移行の実施例として、福岡広域の制御領域とそのオンライン計測によるモード移行状況を示した。図7には、比恵本町交差点 (交差点 I) から比恵交差点 (交差点 II) への方向について停止モ

ード 10 周期、つづいて行列モードを 10 周期実施した。

停止モードの場合は同時オフセットを用い、本モード移行では現場交通状況に応じてほぼ同時式に近いオフセット値 (97%) を用いた、グラフからもわかるように青信号が始まって一たん比恵本町交差点を発進した交通は前方比恵交差点の待行列によって停止を余儀なくされ、一時発進交通量が低下するという状態がしばしばみられ、その結果比恵本町でのさばけ台数が減少し次の周期では行列長が減少しているのでさばけ台数が増加するという周期性を持った現象が見られる。

行列モードの場合は行列オフセットを用い、すなわち下流側交差点の発進速度波が上流側交差点の青時間に入るようなオフセット値 26% を設定して行なった。グラフに示したように待行列長がつねに交差点区間貯留容量一杯となっているが、後方比恵本町交差点では一定のさばけ台数が確保されている。

上記の2つの結果により、前者は1周期当りの平均さばけ台数が 64 台占有率が 17.8%、後者はさばけ台数が 83 台占有率が 11.9% とかなりの差がある。

上記の各制御方式の適用にあたっては、各モードを採用するための適用交通状況を正確に把握することが重要である。特に制御モードの中において、容量モードでは交差点近傍の瞬時交通需要が、行列モード、渋滞モードでは、交差点の発進交通量と待行列長がさらにこれら制御方式の切り替えのために長時間交通需要も必要であり、その応答はとくに交通状況悪化時に迅速でなければならない。

以上のように本研究で用いた各制御方式は、交通渋滞の自動測定原理と各制御モードの切り替え閾値論理の確立で渋滞解消が一層容易になり、特に交差点間隔の短い都市街路網において有効であり、これは、本システムのように十分な情報収集機能を有し、それによって直接信号制御を行ない、時々刻々の交通変動に対して遅れることなく、モード切り替えを行なわなければならない。

7. 結び

本システムのモード移行の成果は一応認められたので、さらに渋滞の自動測定の検討を続けたい、特に占有率と待行列長の間相関を表現する論理式の確立である。また、ハードウェアへの要請としては、感知

↑ u (平均速度) の単位 km/h で 1h で 1000m、車頭間々隔 9sec で x_m とすれば 3600sec: 1000m = 9sec: x_m , $x = 5/2$ 。
†† (10)、(11)式を参照。

↑ 福岡広域では1流入路毎に占有率対待行列長の校正を定期的に行なっている。

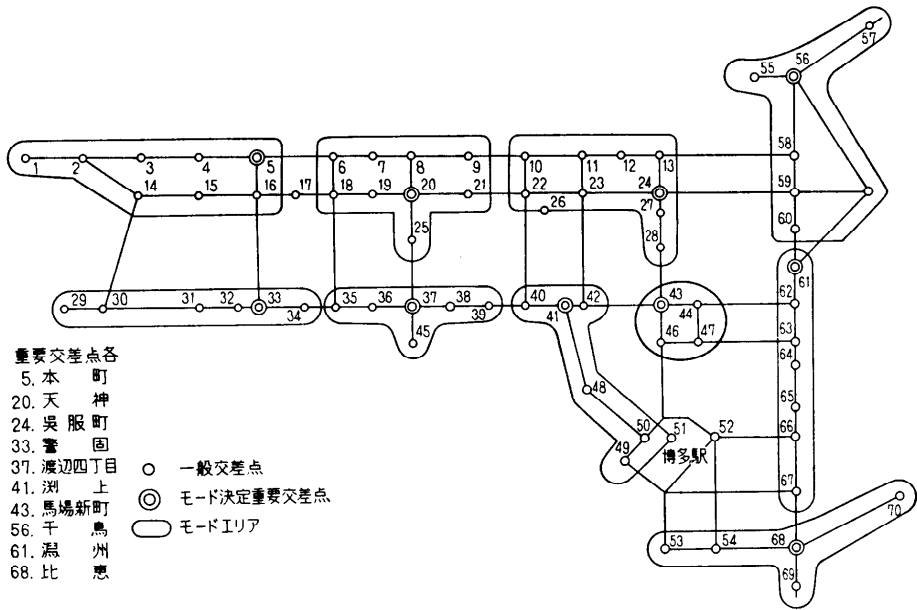


図 6 福岡広域交通管制御領域

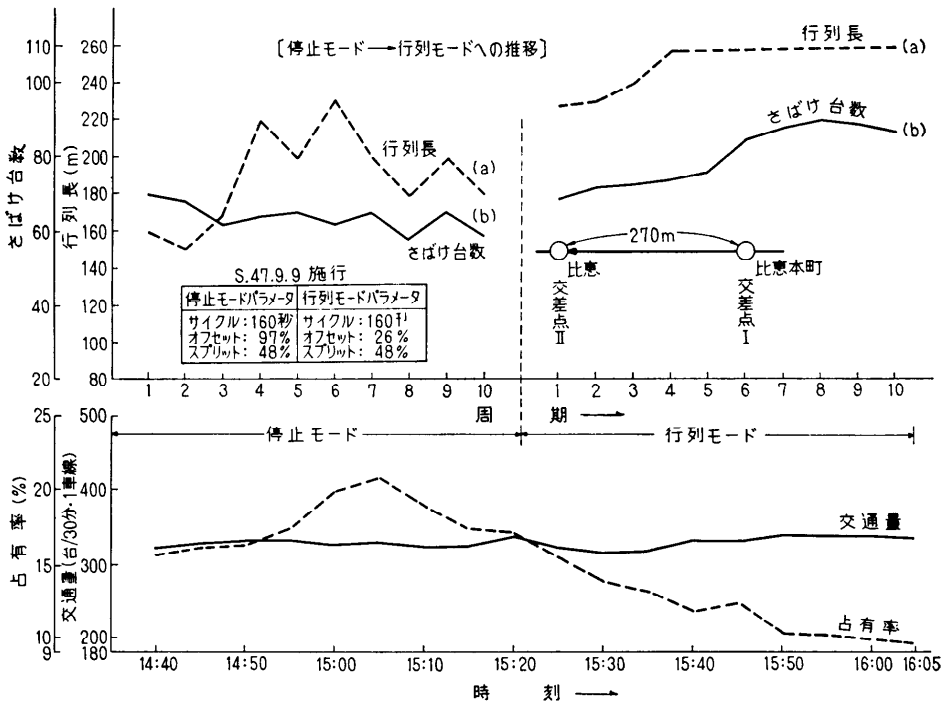


図 7 オンライン計測によるモード移行状況

器の感度、感知範囲のバラツキ、中央送受信装置によるパルスの変化率、端末送受信装置によるパルスの変化率などが精度よく押さえられることである†。

最後に本システムのモード移行と交通渋滞自動測定システムの実現にあたって、多大の御指導と御討論を賜った、東京大学猪瀬教授、工学院大学奥野教授、福岡県警察本部交通部交通規制課浦野警部、住友電氣工

業株式会社システム開発部油本部長補佐、有本技師、岩瀬氏、柴田氏、山本氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 蔡再旺, 油本, 北村: 広域交通信号制御方式とその定数設定について, Vol. 12, No. 6, June 1971, 情報処理学会.
- 2) 交通渋滞の自動測定システム (住友電工研究報告, 昭和46年35号).

(昭和 47 年 10 月 12 日 受 付)

(昭和 47 年 11 月 28 日 再受付)

† 具体的には、ハードウェア (ループ式車両感知器→端末送受信装置→中央送受信装置→プロセス入出力装置→中央処理装置) のどの部分においても基準パルス (200 ms) に対して全体として最大 $\pm 5\%$ 以下に誤差を抑える必要がある。