

過飽和時の信号オフセット設定に関する研究*

A Study on Signal Offset Settings during Oversaturation*

本間正勝**

By Masakatsu HONMA**

1. 研究の背景と目的

信号制御の主要パラメータの1つである信号オフセットは系統化した信号間で欠くことのできないものである。系統制御の広まりとともにオフセットの設定リンク数は増加し、その設定方法が重要なものとなっている。

オフセットの設定は非飽和時には隣接する交差点間で双方向に効果的なスルーバンドを作成することが基本となる。一方、過飽和時にはクリティカル交差点を先頭とする渋滞方向でスルーバンドの作成が困難になり、オフセット値による遅れ時間の改善効果は望めなくなる。この様に、概して非飽和の方が過飽和よりオフセット設定による効果は大きく、過飽和を対象としたオフセットの研究¹⁾はさほど多く行われていない。しかし、系統制御では非飽和、過飽和に関わらずオフセット設定は必要である。特に、過飽和になりやすい都市部では密に信号機が設置され交差点間が短い傾向にあることから、オフセットを適切に設定しないと、いわゆる信号表示の反転事象により捌け台数が減少してしまう可能性がある。

実際に信号を運用する際、過飽和時にこうした事象を避けるには、どの様なオフセット値をベースとして考えればよいのか、また、他のリンクなどの交通条件から対象路線の捌け台数が制限されるようなオフセットを設定しなくてはならない場合もあり、その場合どの程度捌け台数が減少するのか、等の基本的なことが必要となる。しかし、信号マニュアル²⁾には過飽和時のオフセットの許容範囲が簡単に図示されているものの、信号交差点間距離や信号状況等との関係は整理されていない。また、管制端末で信号運用者が参考にするオフセット設定機能は非飽和時のみ対応で、非飽和時にはベースとなるオフセット値の検討が行えるが、交通流の伝播状況が全く異なる過飽和時には対応しておらず検討ができない。

そこで、本研究では過飽和時を対象に信号オフセットと信号制御状況、交差点間距離、捌け台数との関係を明らかにし、過飽和時のオフセット設定手順を示すことを目的とする。

2. 研究の方法

(1) 走行軌跡図を用いた方法

本研究では、時間的・空間的に車両の滞留状態や走行状態が容易に判読できる走行軌跡図を用いて、視覚的に交通流の状況を把握しつつ、信号オフセットと信号制御状況、交差点間距離、捌け台数との関係について検討・整理する。

(2) 変数の定義

本論文で用いる信号制御関連、交差点間距離、交通流関連の各記号を以下のように定義する。

- G_c クリティカル交差点の青信号時間
- R_c クリティカル交差点の赤信号時間
- G クリティカル交差点の隣接交差点の青信号時間
- R クリティカル交差点の隣接交差点の赤信号時間
- G_{cmin} クリティカル交差点の最小青信号時間
- G_{cmax} クリティカル交差点の最大青信号時間
- G_{min} クリティカル交差点の隣接交差点の最小青信号時間
- G_{max} クリティカル交差点の隣接交差点の最大青信号時間
- t_{gc} クリティカル交差点の青信号開始時刻
- t_{rc} クリティカル交差点の赤信号開始時刻
- t_g クリティカル交差点の隣接交差点の青信号開始時刻
- t_r クリティカル交差点の隣接交差点の赤信号開始時刻
- O 信号交差点間のオフセット
- C サイクル長
- D 信号交差点間の距離
- h_s 飽和交通流時の車頭時間
- v_s 飽和交通流時の速度
- v_x 発進波の伝播速度
- v_y 停止波の伝播速度
- N 1サイクル当たりの捌け台数

なお、本論で対象とする過飽和時には発進波の伝播速度と停止波の伝播速度は式(1)の関係となる^{*)}。

$$v_x = v_y \quad (1)$$

3. 信号オフセットに関する検討

本研究では過飽和時を対象とし、青信号時間と赤信号時間の関係は式(2),(3)を満たす。

*キーワード：交通流，交通容量，交通制御

**正員，工博，科警研交通科学部交通科学第一研究室
(千葉県柏市柏の葉 6-3-1,
TEL:04-7135-8001, FAX:04-7133-9187)

$$G_c < G \quad (2), \quad R < R_c \quad (3)$$

また、信号交差点間のオフセットは式(4)で定義する。
 $O = t_{gc} - t_g \quad (4)$

(1) ケースA

交差点間の滞留可能台数が、クリティカル交差点の青時間に捌け得る台数以下、隣接交差点の青時間からクリティカル交差点の赤時間を除く時間に捌け得る台数以上、すなわち式(5),(6)の条件式を満たす場合(ケースA)について検討する。

$$\frac{D}{v_x} + \frac{D}{v_s} \leq G_c \quad (5), \quad G - R_c \leq \frac{D}{v_x} + \frac{D}{v_s} \quad (6)$$

まず、下流側交差点がクリティカルな場合(この場合をケースIとする)について検討する。

図1は横軸に時間、縦軸に距離をとり、信号1サイクル分を表示した走行軌跡図である。この図は図中A点が t_g 以上、B点が t_{rc} 以上、すなわち式(7),(8)を満たす時で、捌け台数の減少がない良好な状況となっている。

$$t_g \leq t_{gc} + \frac{D}{v_x} \quad (7), \quad t_{rc} \leq t_r + \frac{D}{v_s} \quad (8)$$

式(7)は式(9)に変形でき、式(8)は図1より式(10)に置き換えられ、さらには式(11)に変形できる。

$$-\frac{D}{v_x} \leq t_{gc} - t_g \quad (9), \quad t_{gc} + G_c \leq t_g + G + \frac{D}{v_s} \quad (10)$$

$$t_{gc} - t_g \leq G - G_c + \frac{D}{v_s} \quad (11)$$

これら式(9),(11)と式(4)から、この場合のオフセット範囲は式(12)で、捌け台数は図1より式(13)で表される。(以下、式(7)~(11)と同様の導出過程は紙面の都合上、省略する。)

$$-\frac{D}{v_x} \leq O \leq G - G_c + \frac{D}{v_s} \quad (12), \quad N = \frac{G_c}{h_s} \quad (13)$$

図2はオフセットの増加に伴い、捌け台数が減少していく状況を示している。この場合のオフセットの範囲と、捌け台数は式(14),(15)で表される。

$$G - G_c + \frac{D}{v_s} \leq O \leq G - \frac{D}{v_x} \quad (14), \quad N = \frac{G + \frac{D}{v_s} - O}{h_s} \quad (15)$$

図3はオフセット設定が悪く、交差点間に滞留した車両しか捌けない状況を示している。この場合のオフセットの範囲と、捌け台数は式(16),(17)で表される。

$$G - \frac{D}{v_x} \leq O \leq R_c + \frac{D}{v_s} \quad (16), \quad N = \frac{\frac{D}{v_x} + \frac{D}{v_s}}{h_s} \quad (17)$$

図4はオフセットの増加に伴い、捌け台数が増加していく状況を示している。この場合のオフセットの範囲と、捌け台数は式(18),(19)で表される。

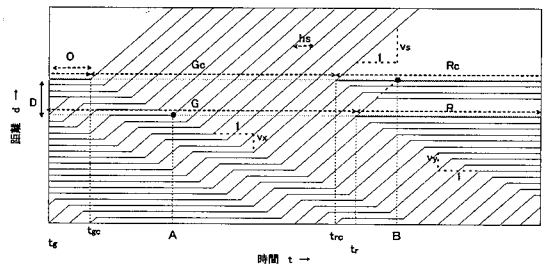


図1 走行軌跡図(ケースA-I-1)

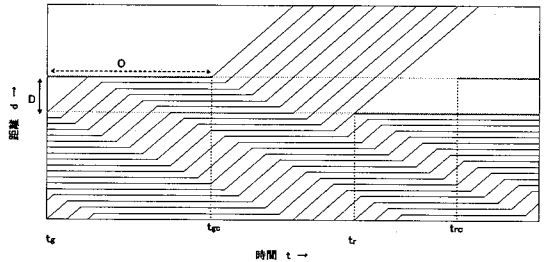


図2 走行軌跡図(ケースA-I-2)

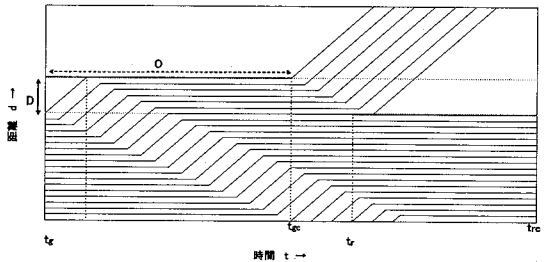


図3 走行軌跡図(ケースA-I-3)

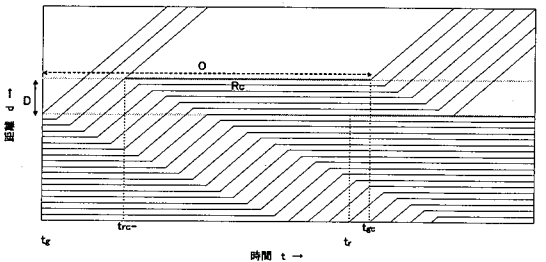


図4 走行軌跡図(ケースA-I-4)

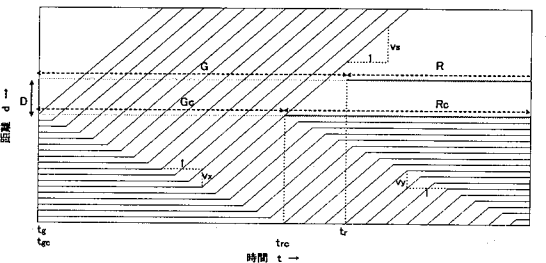


図5 走行軌跡図(ケースA-II-1①)

$$R_c + \frac{D}{v_s} \leq O \leq C - \frac{D}{v_x} \quad (18), \quad N = \frac{O - R_c + \frac{D}{v_x}}{h_s} \quad (19)$$

次いで、上流側交差点がクリティカルな場合(この場合をケースⅡとする)について検討する。

図5と図6は共に捌け台数の減少がない状況を示している。図5は交差点間に車両が滞留しない、より良好なオフセット設定である。一方、図6は交差点間に一部の車両が滞留するオフセット設定である。

図5の場合のオフセットの範囲は式(20)で表される。

$$-\frac{D}{v_s} \leq O \leq G - G_c - \frac{D}{v_s} \quad (20)$$

図6の場合のオフセットの範囲は式(21)で表される。

$$G - G_c - \frac{D}{v_s} \leq O \leq G - G_c + \frac{D}{v_s} \quad (21)$$

これらの場合の捌け台数は式(22)で表される。

$$N = \frac{G_c}{h_s} \quad (22)$$

図7はオフセットの増加に伴い、捌け台数が減少していく状況を示している。この場合のオフセットの範囲と、捌け台数は式(23)、(24)で表される。

$$G - G_c + \frac{D}{v_y} \leq O \leq G - \frac{D}{v_s} \quad (23), \quad N = \frac{G + \frac{D}{v_x} - O}{h_s} \quad (24)$$

図8はオフセット設定が悪く、交差点間に滞留した車両しか捌けない状況を示している。この場合のオフセットの範囲と、捌け台数は式(25)、(26)で表される。

$$G - \frac{D}{v_s} \leq O \leq R_c + \frac{D}{v_x} \quad (25), \quad N = \frac{\frac{D}{v_x} + \frac{D}{v_s}}{h_s} \quad (26)$$

図9はオフセットの増加に伴い、捌け台数が増加していく状況を示している。この場合のオフセットの範囲と、捌け台数は式(27)、(28)で表される。

$$R_c + \frac{D}{v_x} \leq O \leq C - \frac{D}{v_s} \quad (27), \quad N = \frac{O - R_c + \frac{D}{v_x}}{h_s} \quad (28)$$

(2) ケースB

交差点間の滞留可能台数が、クリティカル交差点の青時間に捌け得る台数以下、隣接交差点の青時間からクリティカル交差点の赤時間を除く時間に捌け得る台数以下、すなわち式(5)、(29)の条件式を満たす場合(ケースB)について検討する。(両条件を満たす式は式(29)に集約される。)

$$\frac{D}{v_x} + \frac{D}{v_s} \leq G - R_c \quad (29)$$

このケースBは、概ねケースAの場合と同様であるが、オフセット設定が悪く、捌け台数が最小となる時に違い

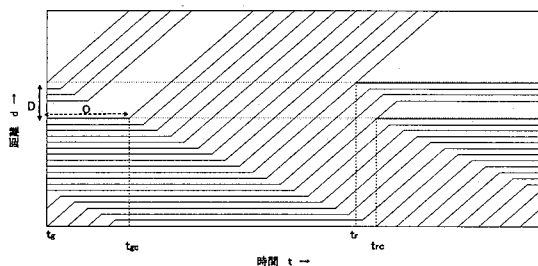


図6 走行軌跡図(ケースA-Ⅱ-1②)

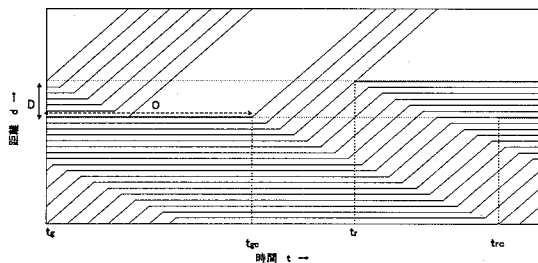


図7 走行軌跡図(ケースA-Ⅱ-2)

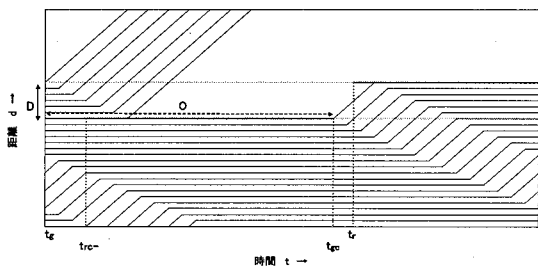


図8 走行軌跡図(ケースA-Ⅱ-3)

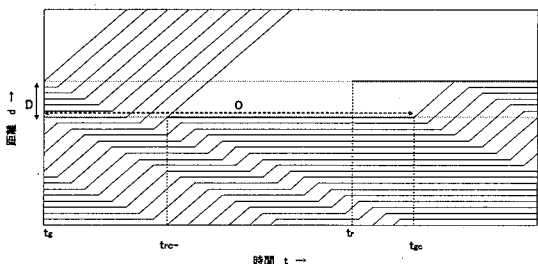


図9 走行軌跡図(ケースA-Ⅱ-4)

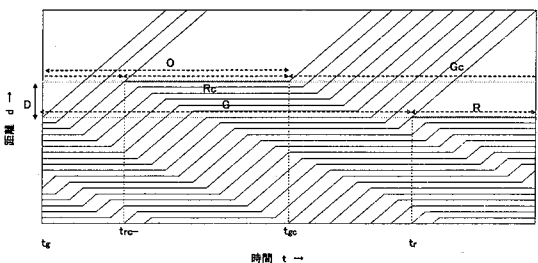


図10 走行軌跡図(ケースB-I-3)

がみられる。

図10は、下流側がクリティカル交差点の場合(ケースI)で、捌け台数が最小となる時である。この図では、上流側交差点の青信号で通過した車群が下流側交差点の赤信号によって妨げられるが一部は通過する状況が示されている。この場合のオフセットの範囲と、捌け台数は式(30),(31)で表される。

$$R_c + \frac{D}{v_s} \leq O \leq G - \frac{D}{v_x} \quad (30), \quad N = \frac{G - R_c}{h_s} \quad (31)$$

図11は、下流側がクリティカル交差点の場合(ケースII)で、この場合のオフセットの範囲と、捌け台数は式(32),(33)で表される。

$$R_c + \frac{D}{v_s} \leq O \leq G - \frac{D}{v_s} \quad (32), \quad N = \frac{G - R_c}{h_s} \quad (33)$$

交差点間距離が近く、オフセット設定が悪いと、一般的には交差点間の滞留可能台数しか捌けなくなる可能性があると考えられているが、ケースBでは、最悪のオフセット設定でも交差点間の滞留台数を超える車両が捌けることが示されている。

その他のオフセット範囲については、ケースAと同様であるので、図や関係式は省略する。

(3) ケースC

交差点間の滞留可能台数がクリティカル交差点の青時間で捌け得る台数以上、すなわち式(34)の条件式を満たす場合(ケースC)について検討する。

$$G_c \leq \frac{D}{v_x} + \frac{D}{v_s} \quad (34)$$

図12は、下流側がクリティカル交差点の場合(ケースI)で、オフセット値によらず、捌け台数の減少がない状況を示している。

ケースCでは、捌け台数が減少する可能性がないため、オフセット設定の自由度はケースAやBより高い。クリティカル交差点の青時間が長くなるとケースCの条件式を外れ、捌け台数が減少する可能性が生じ、隣接交差点の系統化の必要性が出てくる。従ってケースCの条件式を満たすか否かは、系統化やサブエリアの結合化の判断に応用可能である。また、信号交差点間距離が近いと、ケースCの条件を満たさなくなる可能性が高まる。これは信号を密に設置しすぎないことが信号制御の自由度を低下させない1つの要件であることを意味している。

(4) 双方方向のまとめ

上流側および下流側がクリティカル交差点の双方方向をまとめ、ケースA～C毎に捌け台数とオフセットの関係を整理し図13～図15に示す。これらの図より各ケース毎の信号オフセットと信号制御状況、交差点間距離、捌

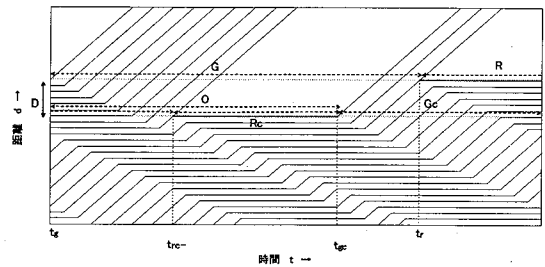


図11 走行軌跡図(ケースB-II-3)

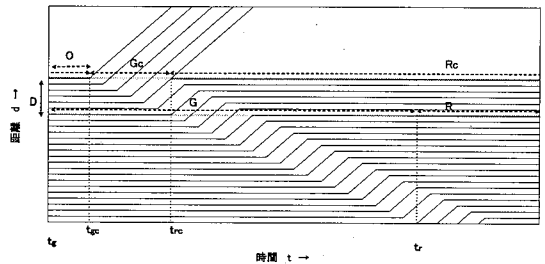


図12 走行軌跡図(ケースC-I)

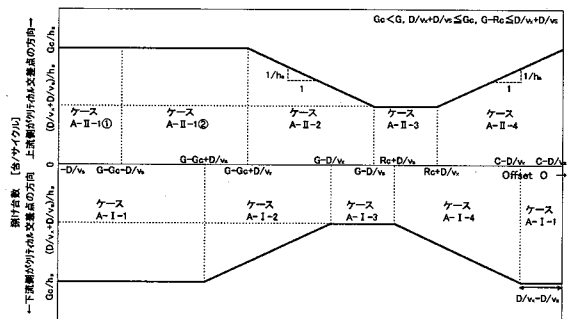


図13 ケースAの双方方向の捌け台数とオフセットの関係

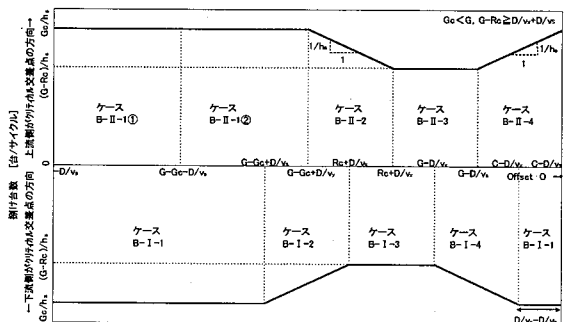


図14 ケースBの双方方向の捌け台数とオフセットの関係

け台数の関係が概観できる。

ケースAとケースB共に、双方向共に反転事象による捌け台数の減少が起きないオフセットの範囲は、式(35)で示される。

$$-\frac{D}{v_s} \leq O \leq G - G_c + \frac{D}{v_s} \quad (35)$$

また、非飽和方向の遅れ時間に配慮したオフセットの範囲は、式(36)で示される。

$$-\frac{D}{v_s} \leq O \leq G - G_c - \frac{D}{v_s} \quad (36)$$

ケースCでは、オフセット値による捌け台数の減少は起きないが、非飽和方向の遅れ時間に配慮するのであれば、同様に式(36)が要件となる。

(5) 青時間とケース区分

式(37)の関係式を満たす場合、

$$G_{\min} = G_{c\min} < \frac{D}{v_x} + \frac{D}{v_s} < G_{\max} = G_{c\max} \quad (37)$$

縦軸にクリティカル交差点の青時間、横軸にクリティカル交差点に隣接する交差点の青時間をとると、青時間とケース区分の関係は図16に示すとおりとなる。

青時間はサイクル長内で、通常は設定可能な最小青時間から最大青時間の範囲で選定されるので、選ぶべき青時間の組み合わせは、 $G_{\min}$ および $G_{\max}$ の実線と $G_c = G$ の点線で囲まれた図中右下の中となる。なお、これまで述べてきた各ケースの条件式は図中でケース区分の境界線となっている。

図16からは、クリティカル交差点の青時間が短いとケースCに、長いとケースAに、クリティカル交差点に隣接する交差点の青時間も長いとケースBになる傾向があることが読み取れる。また、交差点間距離 D はケースCとA、ケースAとBの各境界線に関連しており、交差点間距離が長くなると図中のケースCとAの境界線は上方向へ、ケースAとBの境界線は右上方向へ推移し、ケースCの領域が広く、ケースBの領域が狭くなる傾向にある。さらに、ケースCとAの境界線が $G_{\max}$ を超えると、いかなる青時間の組み合わせにおいてもケースCとなり、ケースAとBが選択される可能性はなくなる。

(6) 過飽和時のオフセット設定手順

これまで整理してきたパラメータを用いた過飽和時のオフセット設定手順を図17に示す。

まず、道路状況によって固有の D , V_x , V_s が得られる。 V_x , V_s はフィールドによって異なるので実測値を用いるべきであるが、既存研究³⁾から $V_x=5\text{m/s}$, $V_s=10\text{m/s}$ を一つの目安に用いるのも一法であろう。次いで、信号制御状況により C , G , R , G_c , R_c が得られる。 C はクリティカ

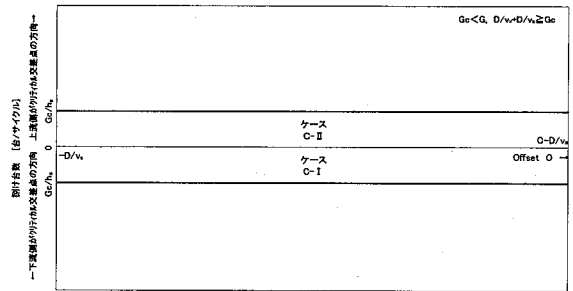


図15 ケースCの双方向の捌け台数とオフセットの関係

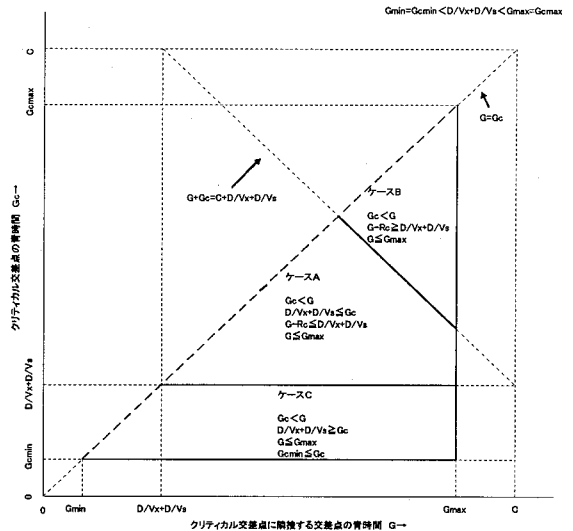


図16 青時間とケース区分の関係

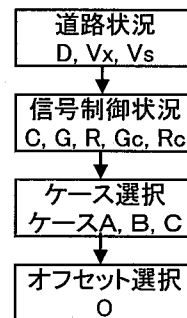


図17 過飽和時のオフセット設定手順

ル交差点が過飽和になっていることから、通常は最大サイクル長付近となるであろう。 G , G_c 等の各信号時間はスプリット配分によって交差点毎に求められる。以上の道路状況、信号制御状況で得られたパラメータ値を図16に入力すると該当ケースが選択される。ケースが定まれば、図13～図15を用いて捌け台数を考慮に入れた過飽和時のオフセット選択が可能となる。

4. 結論

本研究では、過飽和時を対象として条件毎にケース分類し、走行軌跡図を用いて交通流の伝播状況を解析的に検討・整理した。その結果、過飽和時の信号オフセットと信号制御状況、交差点間距離、捌け台数との関係を具体的な関係式として明示し、過飽和時のオフセット設定手順を示した。

補注

過飽和時には、図18に示す停止の領域 i から飽和流の領域 j への境界部の衝撃波の伝播速度 SW_{ij} と、飽和流の領域 j から停止の領域 k への境界部の衝撃波の伝播速度 SW_{jk} は、距離 d 方向を正とすると式(38),(39)で表される。

$$SW_{ij} = \frac{q_j - q_i}{k_j - k_i} \quad (38), \quad SW_{jk} = \frac{q_k - q_j}{k_k - k_j} \quad (39)$$

ここで、各記号は以下のように定義する。

- q_i 領域 i の交通流率
- q_j 領域 j の交通流率
- q_k 領域 k の交通流率
- k_i 領域 i の交通密度
- k_j 領域 j の交通密度
- k_k 領域 k の交通密度

図18より、停止時の交通流率 q_i と q_k は共に 0 であるため、式(38),(39)は式(40),(41)に整理される。

$$SW_{ij} = \frac{q_j}{k_j - k_i} = \frac{-q_j}{k_i - k_j} \quad (40), \quad SW_{jk} = \frac{-q_j}{k_k - k_j} \quad (41)$$

v_x, v_y は式(42),(43)で表され、図 18 より、交通密度 k_i と k_k は共に停止時の交通密度で等しく、式(44)となる。

$$v_x = -SW_{ij} \quad (42), \quad v_y = -SW_{jk} \quad (43)$$

$$k_i = k_k \quad (44)$$

以上の式(40)~(44)の関係から式(1)が導出される。

$$v_x = v_y \quad (1)$$

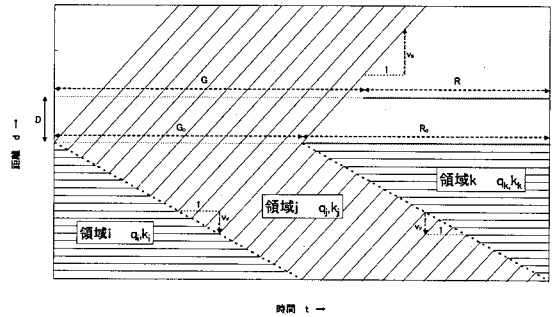


図18 過飽和時の走行軌跡図

参考文献

- 1) 例えば、岩永和大，久井守：道路網の観点からみた混雑時の系統信号のオフセット制御，土木計画学研究・講演集，Vol.24, CD-ROM, 2001.
- 2) 交通信号の手引き，(社)交通工学研究会
- 3) Rahmi Akcelik and Mark Besley, Queue Discharge Flow and Speed Models for Signalised Intersections, Proceeding of the 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp.99-117, 2002.

過飽和時の信号オフセット設定に関する研究*

本間正勝**

本研究では、過飽和時を対象にした信号オフセットの設定手法を明らかにすることを目的とする。研究は、条件毎にケース分類した時間軸と距離軸からなる走行軌跡図を用いて過飽和時における交通流の伝播状況を解析的に検討・整理する方法によって行った。その結果、過飽和時の信号オフセットとその他の信号制御状況、交差点間距離、捌け台数との関係を具体的な関係式として明示し、過飽和時のオフセット設定手順を示した。

A Study on Signal Offset Settings during Oversaturation*

By Masakatsu HONMA**

The purpose of this study is to investigate signal offset settings during oversaturation. The study considered a wide variety of factors that might influence the number of discharged vehicles, including the distance between intersections, a cycle length and green duration. I investigated offset settings by analyzing time-space trajectories of vehicles. As a result, I identified the relation among offset, the number of discharged vehicles and these factors, and showed the procedure for setting signal offset during oversaturation.