

交通信号制御手法に関する実験的研究

An Experimental Study on Traffic Signal Control

越 正 毅*

Masaki KOSI

1. 研究の目的と概要

日常の都市内道路交通のネックの大部分は信号交差点にあり、交通渋滞の発生はもちろん、停止や遅れ、加減速による排気、騒音なども信号交差点に起因することが多い。交通信号機の制御を最適化することによって、これらの損失や公害を最小にする余地があることは十分想像できることであり、この研究がねらいとする所もまさにこの点にある。

研究施設は、実際の街路信号交差点 5 箇所の交通信号を、研究室内に設置する電子計算機によって自由に制御できるようなハードウェア式である。機器構成を表 1 に、制御対象となる現場交差点群の見取り図を図 1 に示す。

表 1 機器構成

中央装置	交通制御用電子計算機 16 kW	1 台
	入出力制御装置 (PIO)	1 式
	指令送出、確認および感知受信装置	1 式
	タイプライター	1 台
端末装置	端末信号制御機	5 台
	端末信号送受信装置	5 個
	車両感知器 (超音波式)	5 台
	車両感知器 (ループ式)	22 台

車両感知器 27 個は 5 個の単末信号機に対比して、実用システムでの割合いからすると多過ぎるが様々な制御手法を実験的に適用するためと、制御結果としての交通現象を計測解析するためとに最小限必要な数である。

2. 制御効果の評価

信号制御の目的関数としては、在来用いられて来た遅

れおよび停止回数に加え、本研究では排出ガスおよび騒音を考慮している。しかし、信号制御によって直接に制御できるのはやはり前 2 者であるので、後 2 者は前 2 者の関数として表現されることを前提として考え、前 2 者によって信号制御の評価を行なっている。遅れおよび停止といった交差点交通現象量と排出ガスあるいは騒音との関連については、別途研究を行なった。騒音については石井教授の研究の一環として調査が実施され、排出ガスについては本研究の一部として実施された。

制御効果の評価のために、(1)制御結果としての遅れおよび停止台数、(2)最適パラメータ値および(3)最適パラメータ値が出現したと仮定したときの遅れおよび停止台数、を知らなければならない。

図 2 は、ひとつの停止線における流入 (致着) 交通流、信号表示、遅れ、停止台数の関係を示すものである。本研究においては、流入交通流の波形は停止線の upstream 100~150 m の位置に設けられた車両感知器情報から求め、飽和交通流量はオフライン調査 (実査) から求めた

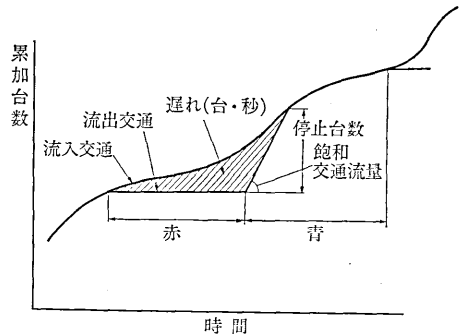


図 2 遅れおよび停止台数計算のモデル

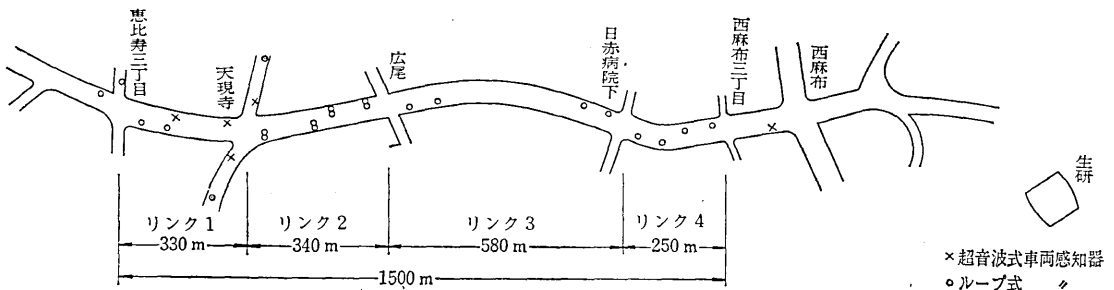


図 1 実験路線見取り図

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

ものを用いている。

制御結果としての遅れおよび停止台数は、実現した信号表示から図2のモデルに従って直ちにリアルタイムで計算することができる。

最適オフセットは、流入交通と信号表示との相対時間を2秒間隔に変えて網羅的にすべてのオフセット値における遅れあるいは停止台数を計算し、遅れあるいは停止台数が最小になるようなオフセット値を見出すという方法によっている。最適オフセット時の遅れあるいは停止台数も、従って同時に得られる。

最適スプリットは、青の中点を変えずに青の長さを様々な変えて上と同様な網羅的な計算によって求めている。

3. オフセット制御

オフセット制御の手法としては、固定オフセット、定時プログラム選択制御、交通感応プログラム選択制御といった在来の手法の他に、著者が先に提示したオンラインフィードバック制御¹²⁾がある。前3者はいわばパタン制御であって、各パタンにおけるオフセット値は予め人間が作成して置かなければならないが、後者はプログラム形成制御と呼ばれる手法であって、オフセット値を計

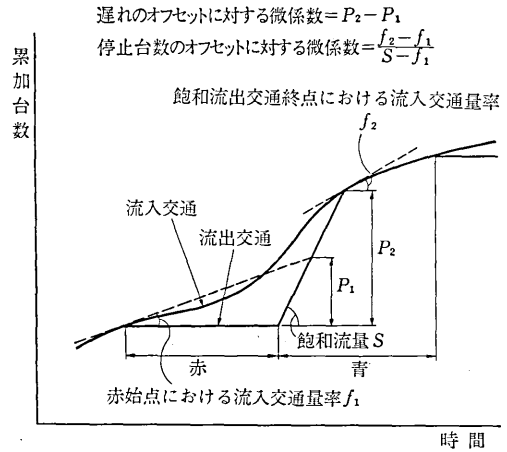


図3 遅れおよび停止台数のオフセットに対する微係数

算機がオンラインで定めるせめアルゴリズムを人間が入力するのみである。

図3に見られるように、ある停止線における遅れあるいは停止台数の、その停止線のオフセット値に対する微係数は比較的簡単な計測値から求めることができる¹⁾。ひとつのリンクについて、そのリンクの両端の停止線2つの微係数の差をとれば、このリンクにおける遅れある

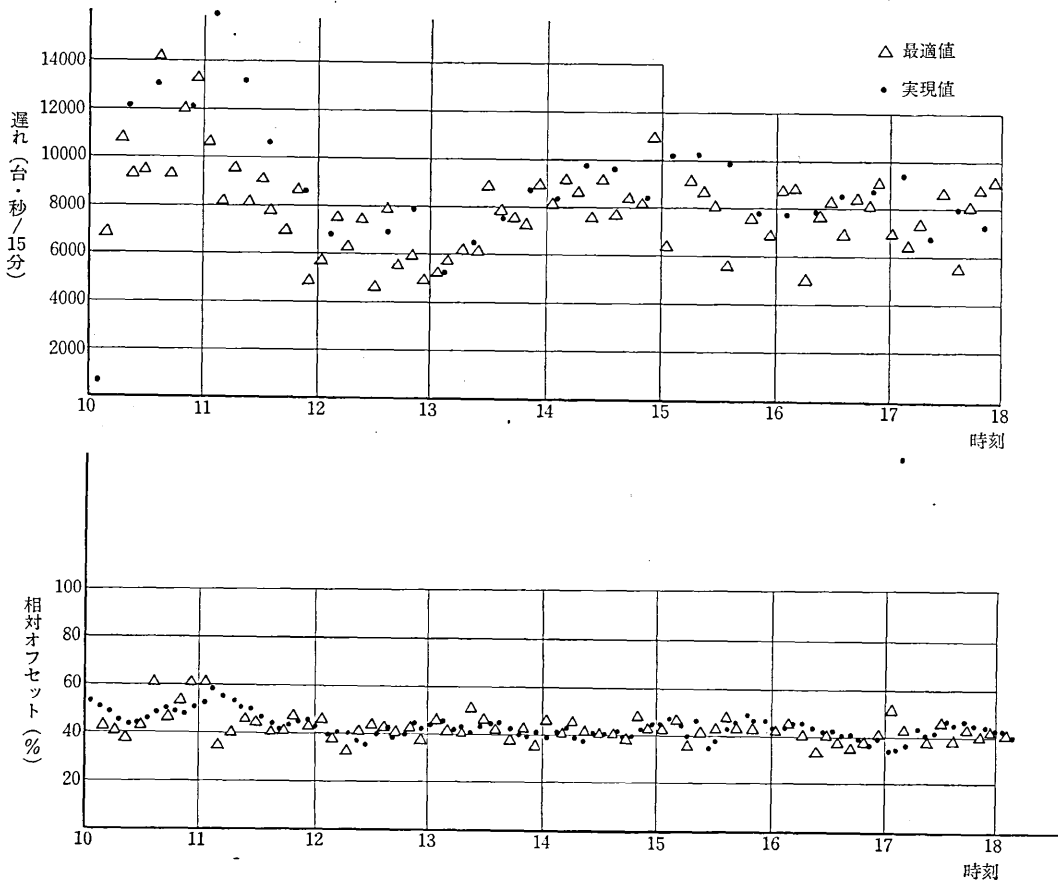


図4 リンク1におけるオフセット追従制御

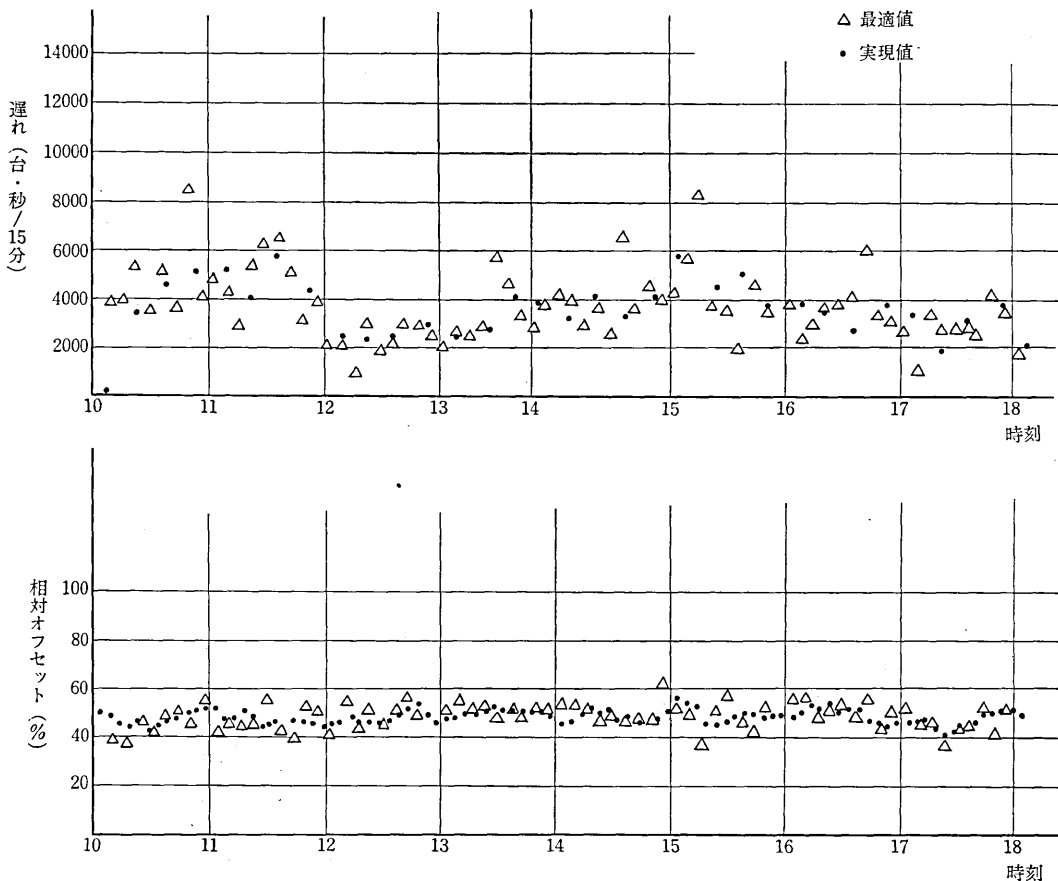


図 5 リンク 3 におけるオフセット追従制御

いは停止台数の、そのリンクの相対オフセット（リンク両端のオフセット値の差）に対する微係数を得ることができる。したがって、この微係数に基づいて、常に遅れあるいは停止台数が減少する方向に各リンクの相対オフセットしながら制御するというオンラインフィードバック制御が可能となる。各停止数における飽和流量はほぼ一定と仮定できるので、この制御は各停止線上流約 150 m の地点における車両感知器 1 箇で可能である。

図 4 および図 5 は、オフセットのフィードバックによる追従制御結果の例を示すものである。それぞれ計算上の最適パラメータと対比して示してある。この実験では、微係数を 3 サイクルにわたって合計し、3 サイクルに 1 回ずつオフセットを最大 2 秒ずつシフトするという方法によった。きわめて最適に近い制御が実現されることが知られる。オフセットを急変させるためにはスプリットを急変させなければならないという制約から、計算上の最適オフセットに完全に追従するオフセット制御は実用上不可能であり、ここで試みたフィードバック制御はおそらく望みうる限りの実用上の最適制御であろう。

4. スプリット制御

スプリットは、飽和度の高い重交通交差点においては

もっとも遅れに大きな影響を持つパラメータである。しかし、これまで用いられて来た制御手法は必ずしも重交通時に良好な制御効果をもたらすものとはいえない。

この研究では、停止線付近（約 30 m 上流地点）の車両感知器のオキュパンシ（青の終りに近い 28 秒間）が停止線の飽和度を表わしているという推定に基づいて、このオキュパンシ値が各現示について等しくなるようにオキュパンシの低い現示から高い現示に青時間を移すという方法を試みた。2 サイクルにわたるオキュパンシの合計値に基づいて、2 サイクルに 1 度ずつスプリットを 1% 修正するという方法を用いた。

図 6 は天現寺交差点における実験結果を示すものである。最適値に非常に近似したスプリットが実現していることが知られる。

このようなスプリット制御は、在来の延長青瞬時打ち切りによる交通感応制御とは異り、青開始時において青終了時点が既知であるから、歩行者青を無用に早く終わらせるという必要がなく、歩行者に不快感を持たせずにスプリットの変化範囲を大きくできるという利点を持っている。

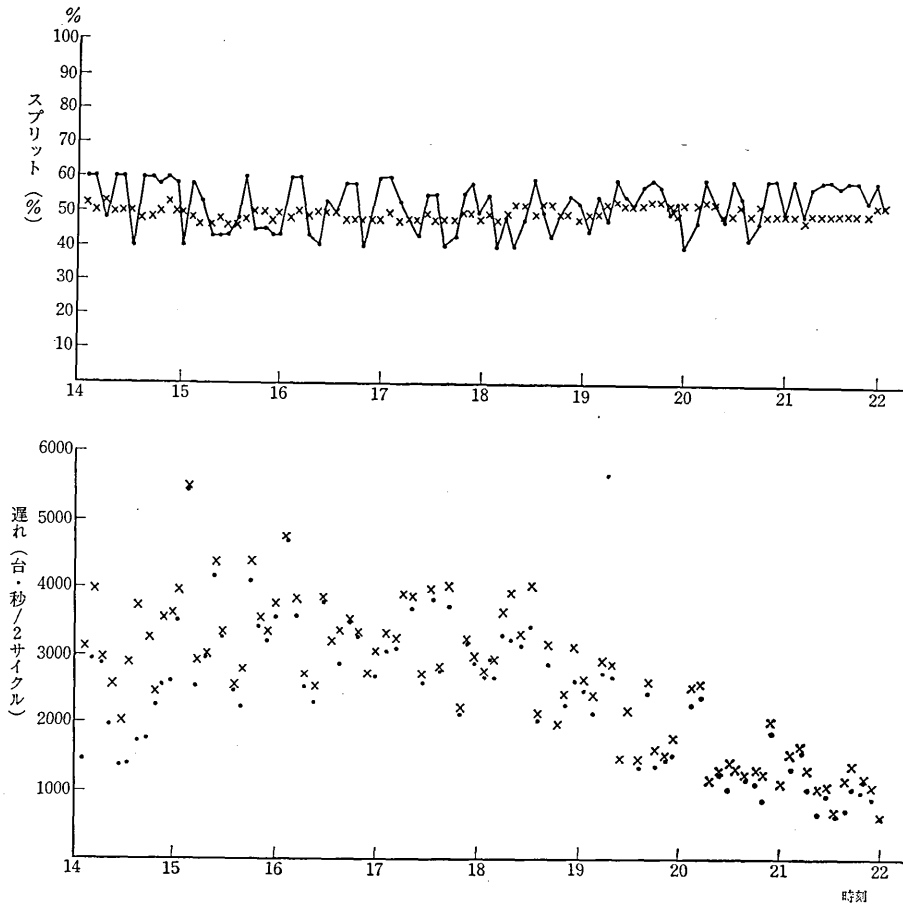


図 6 オキュパンシに基づくスプリット追従制御結果 (天現寺交差点) × 最適値
 ・ 実現値

5. サイクル制御

系統制御におけるサイクル長と遅れとの関係については、これまであまり着目されなかったが、この研究ではこの関係の解析を試みた。

孤立した単独交差点におけるサイクル長と遅れとの関係はこれまでに理論的にも実験的にも明らかにされている。交差点の飽和度に従って、最小サイクル長があり、ランダムな到着においてはこの最小サイクル長の約 2 倍程度のあたりに最適サイクル長がある。

系統制御においては、単独交差点における上のような関係に加えて、系統のとりやすさ、いい換えれば良いオフセットのとりやすさから来るサイクル長と遅れとの関係がある。簡単のために、(1)リンク両端の青時間は等しい。(2)リンク両端の青はちょうど飽和している、(3)右左折車および車群の拡散はない、という単一飽和矩形波モデルについて、サイクル長と平均遅れとの関係を示すと図 7 のようになるはずである。図 7 において、 T はリンクの往復旅行所要時間である。実際には上記の単純化条件は満たされないので、図 7 が多少なまった形になるであろう。

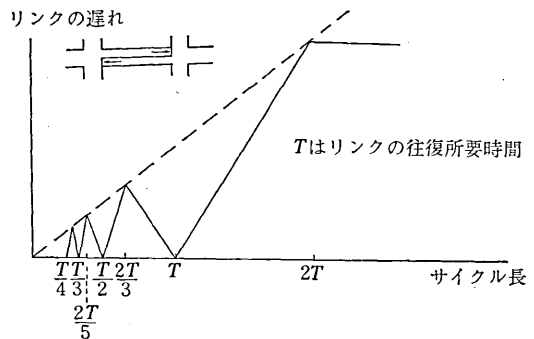


図 7 リンクの遅れ (両端 2 停止線の遅れの和) とサイクル長との関係 (単一飽和矩形波の場合)

図 8 は、実際にサイクル長を 70 秒から 120 秒までの間で変えて実験したときの遅れを示すものである。リンク 1 および 2 はリンク長がそれぞれ 330 m, 340 m であるから $T \approx 60$ 秒程度であり、したがって図に示された範囲は $T \sim 2T$ の間である。リンク 3 は $T \approx 90$ 秒であって極小値が 90 秒付近に出ている。リンク 4 は $T \approx 40$ 秒であるので $2T \approx 80$ 秒付近で極値が現れている。図 8 から図 7 に示したサイクル長と遅れとの模式的な関係が実際にも成り立つことが知られる。図 9 は 4 つのリンク

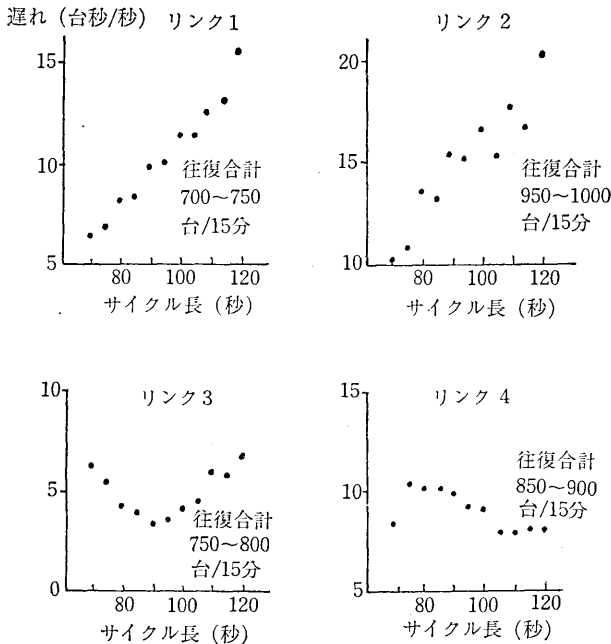


図 8 各リンクにおけるサイクル長と遅れとの関係実測値

4 リンク合計遅れ (台秒/秒)

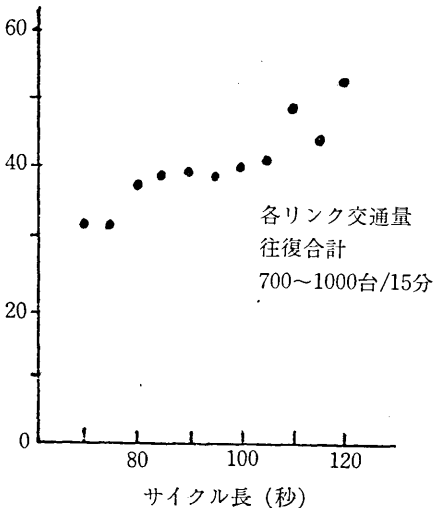


図 9 4 リンク合計遅れとサイクル長との関係実測値

の合計である。全体としては、サイクルが短くなれば遅れも減小する傾向にある。この傾向は信号間隔の分布から定まるものであるので、東京都内のような大都市街路の一般的傾向であろうと推定される。

3 のオフセットの項で述べた停止線における遅れのオフセットに対する微係数を利用して、リンクにおける遅れのサイクル長に対する微係数を求めることができる⁵⁾。

これによってサイクル長のオンラインフィードバック制御が当然可能となり、実験的にも検討された⁵⁾。実験

道路の各リンクごとに適用した場合には、正しく各リンクの最適サイクルに近づくように制御されるが、4 リンクすべてに対して適用すると、図 9 に示されるような、約 100 秒付近における局部最適値に陥ち込んでしまうことがある。このことは、微係数に関する理論の正しさを証明するものであるが、多数のリンクを含む信号システムのサイクル制御には、このようなフィードバック制御が必ずしも適していないことを意味すると考えてよかろう。

サイクルは一般に全信号全リンクに共通なパラメータであるから、上述のような微係数を用いた制御によって最適化をはかるためには、全リンクに車両感知器が必要となるが、この点でもこのような制御手法は適当とは思われない。

ある程度の規模の交通信号システムにおいては、図 9 のような、遅れがサイクル長に関して単調に増加するという傾向を持つと考えられるから、いずれの交差点も過飽和にならない限度で実用上可能な限り短いサイクル長を用いるという単純な政策が結局は最良であるといってもよいであろう。

6. 制御パラメータのマンマシンアプディティンゲ

スプリットおよびオフセットのオンライン形成制御は、上に述べたように良好な結果をもたらすことは認められるが、大規模な実用システムにおいては車両感知器数と電子計算機の演算量との制約から、すべての交差点やリンクの制御方法として用いるのは実際的には思われない。

したがって定時あるいは交通感应選択に用いる制御パラメータを容易にアップデートできるような方法を見出すことが必要である。

ここで試みたのは、スプリットおよびオフセットの半自動的なアプディティンゲであって、人間が現場の交通現象の観察から得られる単純な情報を一定のフォーマットに従って計算機に入力し、計算機がこれに基いて状況を判断してパラメータを修正するというマンマシンアプディティンゲである。

(1) スプリットのアプディティンゲ

交通状況を次の 4 通りに分類して、交差点番号と停止線番号とともに入力する。

- a. 右折車の捌けが悪い。
- b. 左折車の捌けが悪い。
- c. 歩行者の青時間が短い。
- d. 進向方向に関係なく一様に捌けが悪い。

上の情報によって、歩行者青時間、車両青時間、右折青時間の修正が行なわれる。サイクル長の調整が許される場合には、必要に応じてサイクル長も修正される。歩行者青、車両青の最小値の条件は予め規定して置く。ま

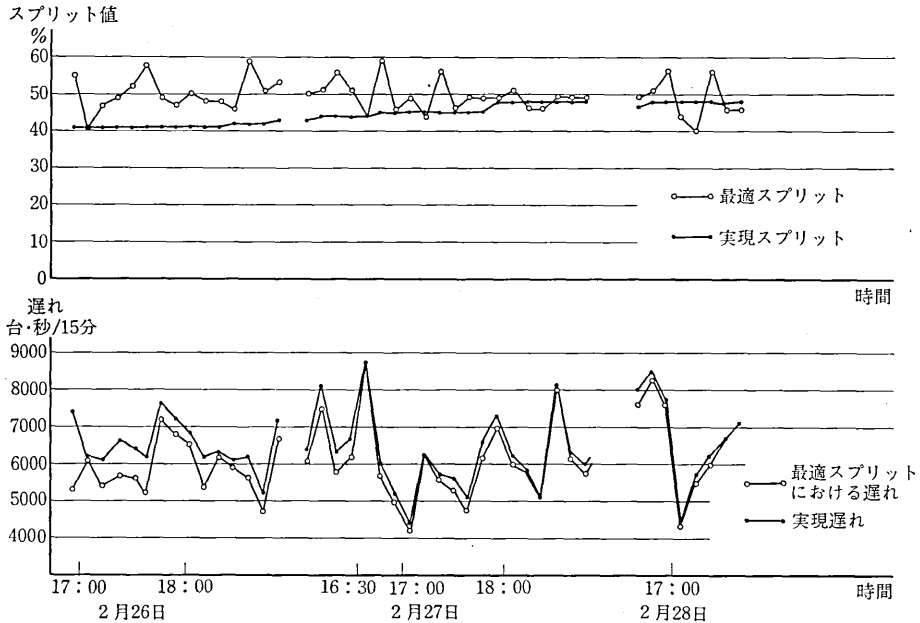


図 10 スプリットのアップディティンク結果 (天現寺交差点)

た、過去5回分のアップデート要求入力をストアして置き、矛盾した修正が行なわれないようにするとともに、数次の修正によって改善がなされない交差点については、人間によるより詳細な検討を要求するための打ち出しを行なう。

図 10 は夕刻 (16:00~19:00) の時間帯に用いる天現寺交差点のスプリットを、上の方法でアップデートした場合の実現スプリットと最適スプリットを対比して示したものである。最適スプリット付近に収束して行く様子を見ることができる。

(2) オフセットのアップディティンク

アップデートのアルゴリズムはスプリットの場合よりほかに単純である。

リンクに着目し、リンク両端の停止台数を比較してその多い方の停止線番号と、車群の先頭と後尾のいずれが赤につかまるのかの判別とを入力する。

また、リンク長から、基本的に同時オフセットが交互オフセットかの判定を行なっており、基本オフセットからのずれをマンマシンアップディティンクによって調整するようにしてある。

図 11 は実験結果の1例である。アップディティンクによって遅れが減少する方向にオフセットが修正されて行く様子を見ることができる。図 12 および図 13 には、アップディティンクの結果の遅れを他のオフセット制御によった場合と比較して示されており、実用上十分に良好なオフセット値がアップディティンクによって得られることが知られる。

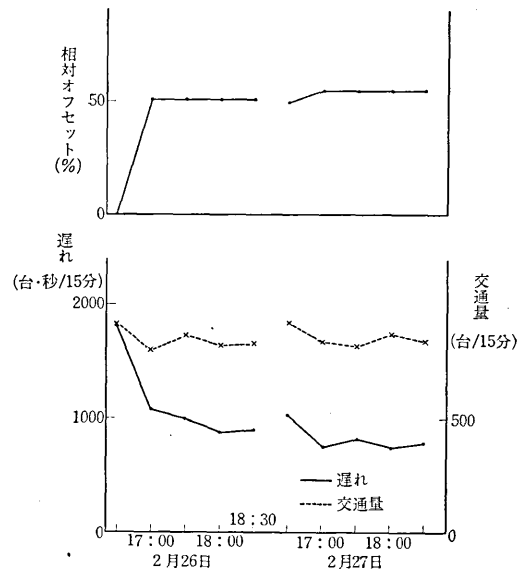


図 11 オフセットのアップディティンク (リンク 2)

7. 自動車排出ガスと走行状態との関係

都市内街路網においては、交通流の挙動はほぼ全面的に交通信号制御によって支配されるので、もし交通流の挙動と排出ガスとの間に相関があるとすれば信号制御によってある程度排出ガスを左右できるはずである。

この研究は、信号制御実験と併行して、都市公害という面からの目的関数の吟味のために実施したものであって、自動車の走行状態と排出ガスとの定量的な関係を把握することを目的としたものである。

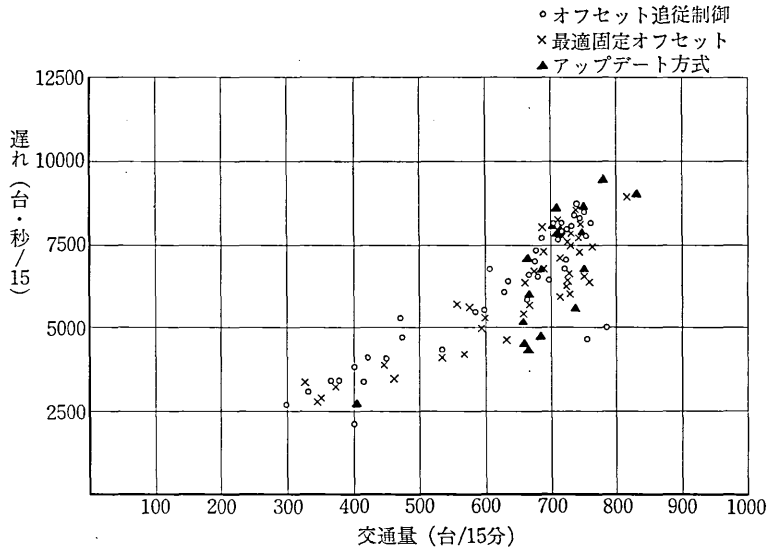


図 12 各種オフセット制御の比較リンク 1

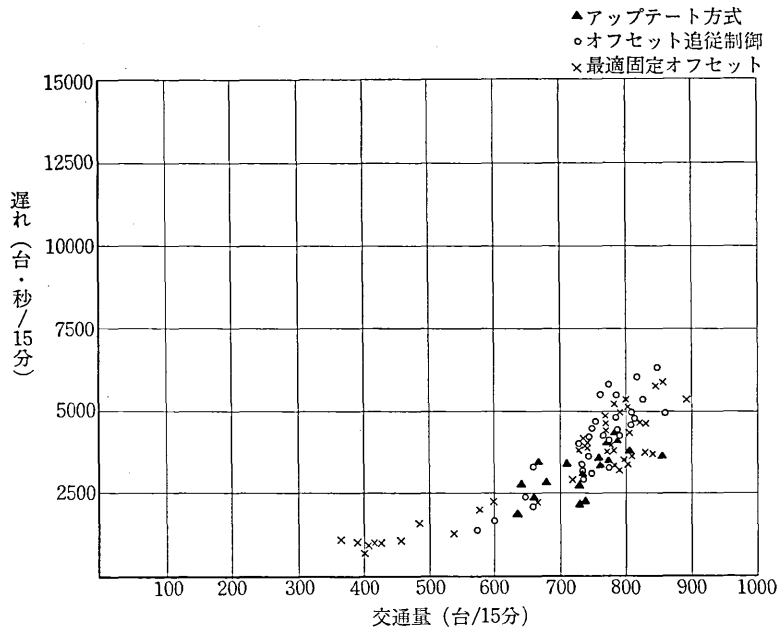


図 13 各種オフセット制御の比較リンク 3

表 2 解析対象とした標数

車種	小型乗用車					軽自動車		小型貨物車
	スカイライン	セドリック	カリーナ	ミビック	クラウン (LPG)	ライフ	フロント	トヨエース
標本数	36	9	9	9	8	9	9	9

注 以上の他に、次の資料がある。

1. クラウンを除く各車につき、運輸省 10 モードについての測定値
2. スカイラインについて、首都高速道路走行パターン 5 標本および街路閑散時異常高速走行パターン 5 標本

なお、この研究は警視庁および本田技術研究所の協力を得て実施したものである。

(1) 研究方法

様々な交通条件のもとで、東京都内街路区間の試験走行を行なって実走行パターン（速度—時間，速度—距離グラフ）を作成した。この実走行パターンに従って、ジャン

ーダイナモに排出ガス測定車を据えて再現運転を行ない、その際の排出ガスを測定した。

解析対策とした走行パターン-排出ガスの資料数は、表 2 に示される通りである。

走行パタンの数量化パラメータとしては、次のようなものを取り上げた。

- X_1 : 総旅行時間 (sec)
- X_2 : 総停止時間 (sec)
- L : 区間距離 (m)
- V_1 : 時間的平均速度 (m/sec) = L/X_1
- V_2 : 距離的平均速度

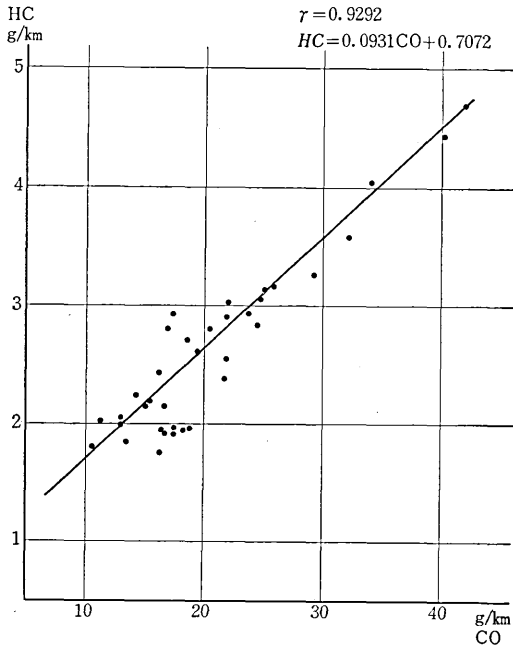


図 14 CO と HC の相関

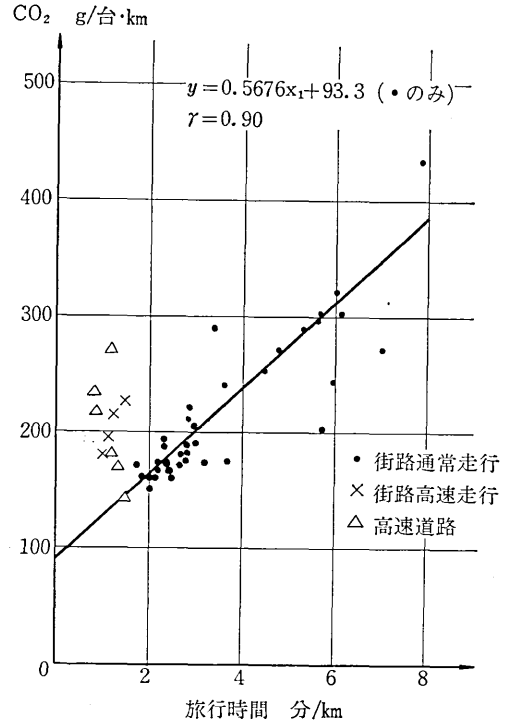


図 16 旅行時間と CO₂ 排出量 (スカイライン)

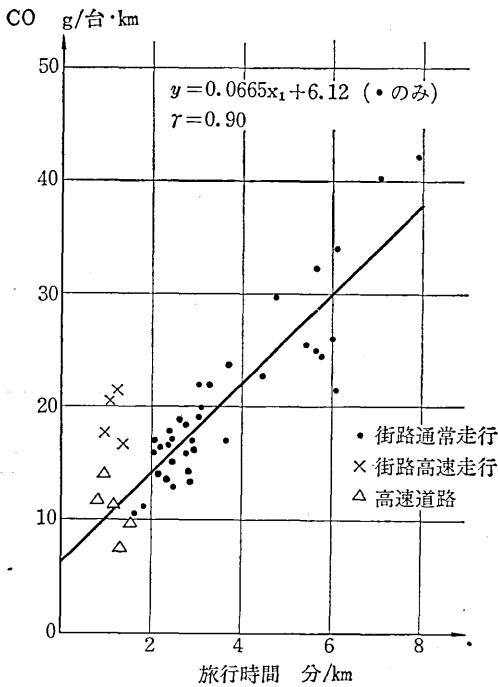


図 15 旅行時間と CO 排出量 (スカイライン)

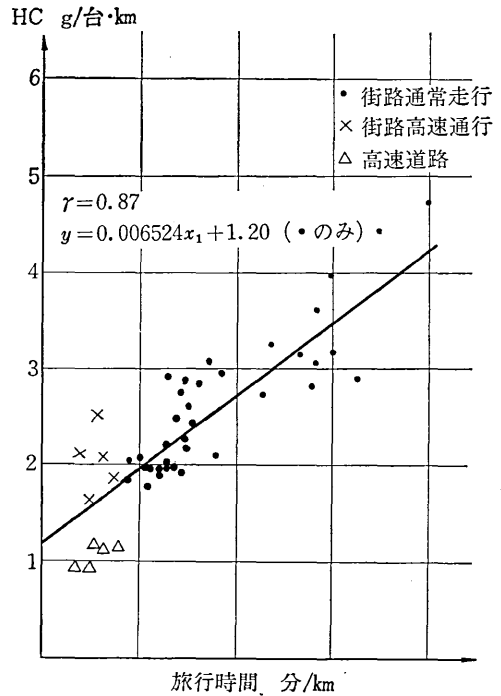


図 17 旅行時間と HC 排出量 (スカイライン)

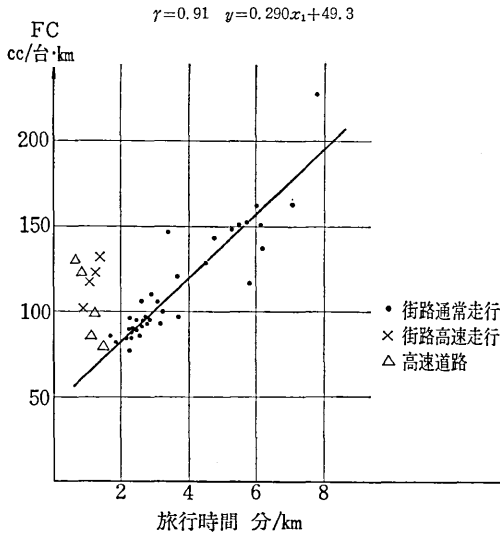


図 18 旅行時間と燃料消費 (スカイライン)

$$x_1 = \frac{X_1}{L} = \frac{1}{V_x}$$

$$x_3 = \frac{\sum |v_{i+1} - v_i|}{L}$$

(ある 1 回の加(減)速開始時の速度を v_i , 終了時の速度を v_{i+1} とした場合)

$$V_x = \frac{1}{X_1} \int_0^{X_1} v(t) dt = \frac{L}{X_1}$$

$$V_x = \frac{\int_0^L v(x) dx}{\int_0^L dx}$$

$$\frac{V_x}{V_t} = 1 + \left(\frac{\sigma_t}{V_t} \right)^2$$

(2) 解析結果

首都高速道路および街路異常高速運転を除く通常の街路走行状態のもとでは, 次のことが知られた.

- 1) CO と HC とは互いに強い相関を持っている (図 14).
- 2) CO, CO₂ および HC は, 旅行時間と高い相関を持っており, ほとんど旅行時間で説明できるといってよい (図 15, 図 16, 図 17).
- 3) 燃料消費もほぼ旅行時間で説明できる (図 18).
- 4) NO_x は旅行時間では説明しにくい (図 19).

各排出ガス成分と走行パターンとの相関を回帰分析した結果は次のようであった.

- 1) CO, HC, CO₂ 排出量 (g/km) および燃料消費量 (cc/km) は, これらを y で表わし, a を回帰係数とすると,

$$y = a_2 \frac{x_3}{V_x} + a_3 x_1 + a_4$$

によって, いずれの車両についてもきわめて高い相

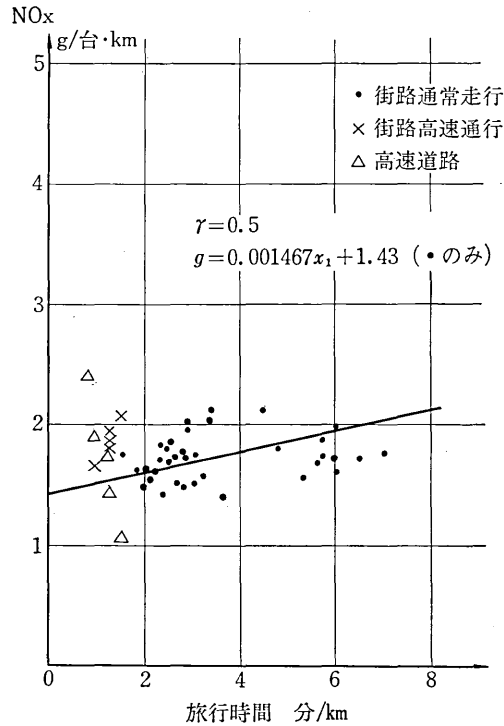


図 19 旅行時間と NO_x 排出量 (スカイライン)

関で回帰することができた.

- 2) NO_x 排出量 (g/km) は,

$$y = a_1 \frac{V_x}{V_t} + a_2 \frac{x_3}{V_x} + a_3 x_1 + a_4$$

によってかなり良く回帰することができた.

- 3) 首都高速道路走行および街路異常高速走行については, 上の回帰は適用できない. これらの走行状況は街路の通常走行とは異質であると考えられる.
- 4) CO, HC, 燃料は旅行時間の短縮によって軽減され, NO_x は加減速の減少によって減少するといってよい. しかし NO_x 排出量の変化域はわずかである. したがって, 交通信号制御における大気汚染防止の観点からの目的関数としては, 遅れを用いるのが妥当であると考えてよい. このことは, 時間便益, 燃料便益といった経済便益最大とも合致する.

(1974 年 8 月 22 日受理)

参考文献

- 1) 越 正毅: 「広域交通制御における信号オフセットのプログラム形成のひとつの方法」 生産研究 20, 3 (43 年 3 月)
- 2) 越 正毅, 高羽禎雄, 大野進一, 河村速雄: 「都市交通公害対策の調査研究」 生産研究 24, 3 (47 年 3 月)
- 3) 越 正毅: 「交通信号制御に関する実験的研究」 生産研究 25, 2 (48 年 2 月)
- 4) 越 正毅: 「都市交通公害対策の調査研究概要」 生産研究 26, 2 (49 年 2 月)
- 5) 越 正毅: 「Optimization of Cycle Time for Computerized Traffic Signal Systems」 生産研究 26, 10 (49 年 10 月)