航空写真を用いた交通流調査の方法

丸 安 隆 和・津 田 昌 明・椎 名 公 一

自動車の速度，速度の変化を，航空写真を用いて計算し，自動車の流れの実体を知ろうとする新しい方法の提案である．飛行機のもつ機動性を利用して，ある時刻における，ある路線の交通流の実態を知るのに，極めて有効な方法となるであろう

1. ま え が き

東京を中心とした道路は一般に，マヒ寸前の混雑状態である，といわれている．いったいどんな風に混雑しているのだろうか，この混雑はどうすれば解消するだろうか，道路が新しくでき上がったらこの道でどのくらいの車がさばけるだろうか，こんなことを研究するのが交通に関係している人達の大きい仕事であるに違いない．しかし，これらの問題を解決するには，交通流の実態の調査資料がまずその前提条件となるであろう．

従来から交通流の調査にはいろいろな方法が用いられてきている．ある地点を通る車の台数を数える方法，特定の2点間を走る時間をはかって自動車の平均速度を求める方法などさまざまである．しかし，これらの調査を広範囲に行なおうとすると，非常に多くの労力と時間のかかることは，いままでの実例が示している．これらの調査を行なうのに極めて有効であろうということは誰も気のつくことであるが，実際にはまだこれが実用されているという段階には至っていないようである．それは，高い費用をかけて航空写真を写しても，その写真から自動車の台数を勘定したり，これを車種別に分類したりするだけでは経済的に見て，その効果はあまりにも少なすぎると考えられるからであろう．航空写真をもっと有効に利用する方法を考えてさらに多くの資料を得，これによってさらにくわしい交通流の解析が可能となれば，航空写真の有効さはいっそう高まるに違いないのである．

この研究はこのような意図にもとづいて，航空写真の交通流解析のための資料を得る方法を開発して，それを利用して〃たいへん混んでいる〃とか〃あそこがネックだ〃というようなただ莫然とした表現をするかわりにもっと数量的に混雑の程度を示す方法を考え，それぞれの道路についてどれぐらいの車を走らすことができるか，どの部分をどのように改良したら混雑の緩和に役立つか，などの問題を解決する糸口にしたいというのが目的である．

航空写真は高速度で飛んでいる飛行機から一定の時間間隔をおいて次々にとられるものであるから，これらの写真から実体観察によって測定ができるためには，少なくとも隣り合う2枚の写真を撮る間は，被写物体がじっとしていて動かないものでなければならない，というのがいままでの通念であった．ところが，被写体が動いた場合，逆にその間の動く距離が，後で述べるように，高さの変化として測定できることに気がついて，これから自動車の速度，速度の変化がわかり，ブレーキをかけた回数や自動車群の前部と後部での動きの違いなどが計算できることになったのである．

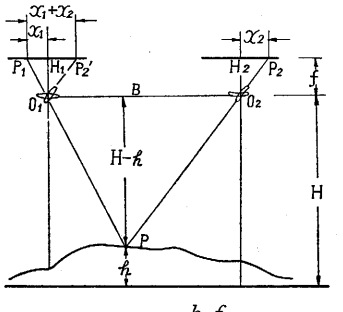
飛行機のもつ機動性と，写真のもつ記録性を十分に活用することを考えたこの方法は，特定の地点における交通流の長時間にわたる時間的な動きをとらえることには向かないが，自動車を全体的に群として取り扱うことのできること，またある特定の時刻における相当長い区間にわたる交通流の状態をつかむのには非常に役立つのではないだろうか．

これが交通流の調査解析に新しい貢献をすることができれば，航空写真測量の利用の道が一つ大きく開けたことになるのであって，まことに有意義なことといわねばならない．

本研究に当たってはアジア航空測量，特に西尾元充氏にたいへんお世話になったことを付記して謝意を表する次第である．

2. 写真測量の原理

航空写真は一定の速度で飛ぶ飛行機から，一定の時間間隔で撮影される．第1図で O_1，O_2 は隣り合う写真の撮影点で，地上の P 点はそれぞれの写真上に P_1，P_2 に写っている．



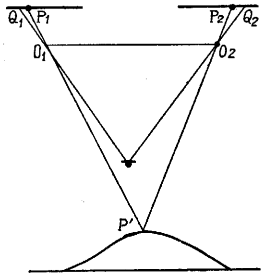
第1図　$H-h=\dfrac{b.f}{P}$　$P=x_1+x_2$

この写真を図化機の投影器にのせ投影器を撮影したカメラと同じ関係位置に，同じ状態にして後方から光を送ったとする．対応した2点 P_1，P_2 を通る光線は再び P に交わる．このようにして写真上のすべての点が投影されると，もとの地形と同じ光の模像がつくられる．

この場合，投影器の間隔をせばめると，できる光の模像がそれに応じて縮少される．実際にわれわれが写真測

量で測定作業を行なうのは，この縮少されたモデルについて行なうことになる．

立体像の測定　図化機においた写真上の P_1，P_2 点の上に，それぞれ一つの黒点を乗せる．これらの黒点を上から見ると二つの黒点は一つに融合し，立体像の中で P' と同じ位置に見える（第２図）．いま，この黒点を左右に動かして Q_1，Q_2 の上にもってきてみると，山の上にとんでいる鳥にくっついて見える．この二つの黒点を測標といい，測標の間隔を広げると，立体像中の測標像は上に浮かび，間隔をせばめると下に沈んでゆくことがわかる．さらに測標の間隔を一定に保ったままで前後左右に移動させると，測標像は立体像の中で同一水平面上を移動することもわかる．



第　2　図

このようにして，測標を模像上で動かし，これを鉛筆に連動させて地図をつくり上げることができる．

3.　視差を測定して自動車の速度を求める方法

視差と高さとの関係　第１図を再び参照して，O_1，O_2 から写真上に下した垂線の足を H_1，H_2 とし，$O_2P_2 /\!/ O_1P_2'$ に P_2' をとる．この場合，$\overline{P_1H_1}+\overline{P_2H_2}=\overline{P_1P_2'}=p$ をＰ点の視差（Ｘ視差）という．

$\triangle P_1P_2'O_1 \backsim \triangle O_1O_2P$ であるから

$$H-h=\frac{B.f}{p}$$

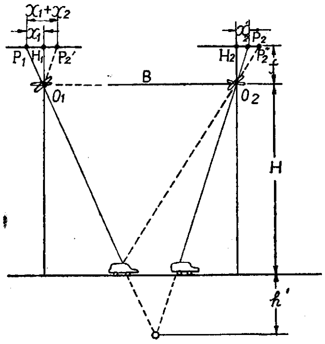
ここに

$H-h$：Ｐ点のカメラ中心からの距離

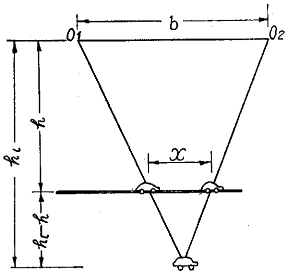
f：カメラの焦点距離

B：基線長

いま隣り合う２枚の写真をとる間に，その対象物が移動したらどうなるかを考えてみよう．第３図は飛行機のとぶ方向に自動車が動いた場合を示す．この場合２枚の写真を実体視すると，静止している物体よりも視差が小さくなるので，自動車は地面より沈んで見えるであろう．反対に，自動車と飛行機の走る方向が逆であれば視差が大きくなって浮かんでみえる．B と f とがわかっていれば，次のような関係から２枚の写真を撮る間に自動車がどれほど走ったかを求めることができる．



第　3　図



第　4　図

第４図から

$$h_c=\frac{b.f}{p_c}\qquad h=\frac{b.f}{p}\ \text{であるから}$$

$$x=\frac{b}{h_c}\ (h_c-h)=b\ \left(1-\frac{h}{h_c}\right)=b\ \left(1-\frac{p_c}{p}\right)$$

実際の道路上で，自動車の移動距離を X(m)，撮影高度を H(m) とすれば

$$\frac{x\,(\text{mm})}{h\,(\text{mm})}=\frac{X\,(\text{m})}{H\,(\text{m})}$$

$$\therefore\quad X(\text{m})=\frac{H}{b.\ f/p}\times b\ \left(1-\frac{p_c}{p}\right)=\frac{H(\text{m})\triangle p}{p}$$

$\triangle p=p-p_c$ は視差差で，自動車が飛行方向と反対方向に動くときは視差差は負になる．

２枚の写真の撮影時間を t を測れば，自動車の速度 V(m/sec) は

$$V(\text{m/sec})=\frac{H(\text{m})}{f(\text{mm}).\,t(\text{sec})}\times\triangle p(\text{mm})$$

撮影高度，焦点距離は写真上に記録されているから，これに撮影時間も同時に写しこむようにすれば，あとは $\triangle p$ をはかることによって速度を求めることができるわけである．

4.　撮影の条件

ある自動車について，それがどんな運動をするかを調べるには，その自動車ができるだけ多くの連続写真上に写るようにすることが望ましい．隣り合う写真が 80% ずつ重なり合うように撮影するとある自動車は５枚の写真上に確認でき，４区間の速度を計算することができる．

密着写真で測定するとすると，連続写真上，自動車の移動距離を 10 mm 以内におさえた方が見やすいので，最大自動車速度を 50 km/時 とすれば

$$\left(\frac{50}{3.6}\cdot t\right)(\text{m})\times\frac{f}{H}=10(\text{mm})$$

$$\therefore\ t=\frac{0.72}{f(\text{mm})}\times H(\text{m})$$

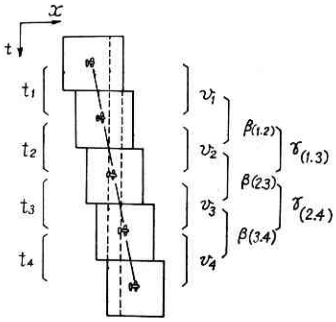
飛行機の速さは

$$V_o(\text{km/hr})=\frac{230(\text{mm})}{5}\times\frac{H(\text{m})}{f(\text{mm})}\times\frac{1}{t(\text{sec})}\times 3.6$$

$$=230(\text{km/hr})$$

とするのがよい．

またこの場合，撮影の時間間隔は 4.3 sec となる．



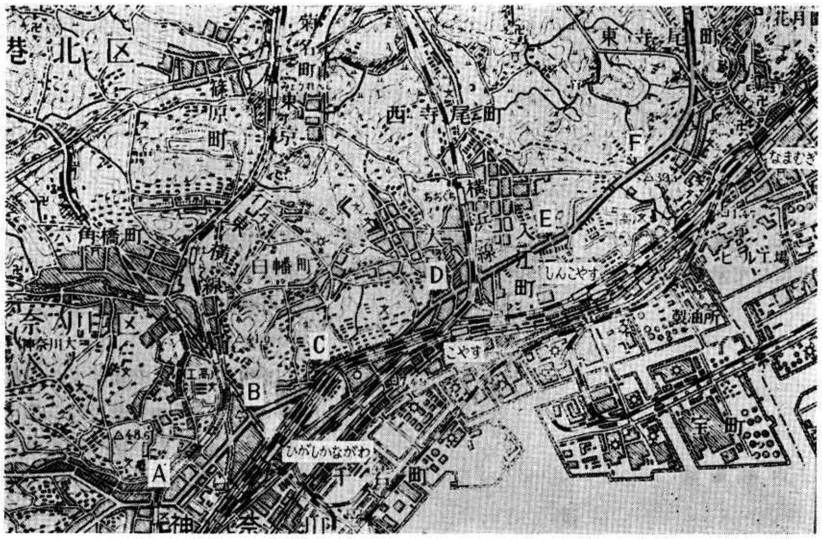
第 5 図

このようにして得られた写真から各自動車ごとに4区間の速度（v_1, v_2, v_3, v_4）その間の加速度，$\beta_{(12)}$ $\beta_{(2.3)}$ $\beta_{(3.4)}$，加速度の変化 $\gamma_{(1.3)}$ $\gamma_{(2.4)}$ を求めることができるのである．

5.　測定資料の整理

（1）　第2京浜国道における実験

上述のことを実地にためすために，第2京浜国道にそう6区間（第6図）上り線について撮影を行ない，その結果を整理した．この実験で対象となった車の数および車種別は第1表に示した．



第 6 図

個々の車を確認するために，5倍の引伸し写真を使ったが，この程度のものであれば十分車種別の区別ができた．

第1表　試験区間の車種別の車の数

区間	バス	乗用車	トラック	小型トラック	軽自動車	合　計
A	5	16	1	3	1	26
B	3	22	3	0	2	30
C	1	6	1	4	6	18
D	2	12	4	6	5	29
E	8	7	4	2	4	25
F	7	24	6	4	3	44

（2）　単位時間の輸送効率

ある道路についての輸送量を考える場合，自動車の台数だけではなく，これに速度も合わせ考えることが必要である．連続する N 台の自動車を一つの車群と考えたとき，その車群の平均速度 v_m に1時間1車線当たりの総交通量を乗じた積が，その道路のその区間における単位時間の輸送効率であると考えよう．

それぞれの自動車について求めた速度を v_1, v_2, v_3, v_4(km/時）とすれば，車群の平均速度 v_m は

$$v_m=\frac{1}{4}\ (v_{1m}+v_{2m}+v_{3m}+v_{4m})$$

$$=\frac{1}{4}\left(\frac{\Sigma v_1}{N}+\frac{\Sigma v_2}{N}+\frac{\Sigma v_3}{N}+\frac{\Sigma v_4}{N}\right)$$

車群長を L(m) とすれば，路線単位長さ当たりの輸送量は

$$Q=\frac{N}{L}\times 1000\times v_m\ (\text{台/時})$$

1車線当たりの輸送量 $q=\dfrac{Q}{\text{車線数}}$ で求められる．

q が増せば v_m が減じ，v_m を増そうとすれば q が減ずる．道路の条件によって q. v_m の値がきまり，これができるだけ大きくなるようにすることが望ましく，またこの値によって道路条件を判断することもできる．

第二京浜国道の6区間について実測した結果は第2表のようになった．

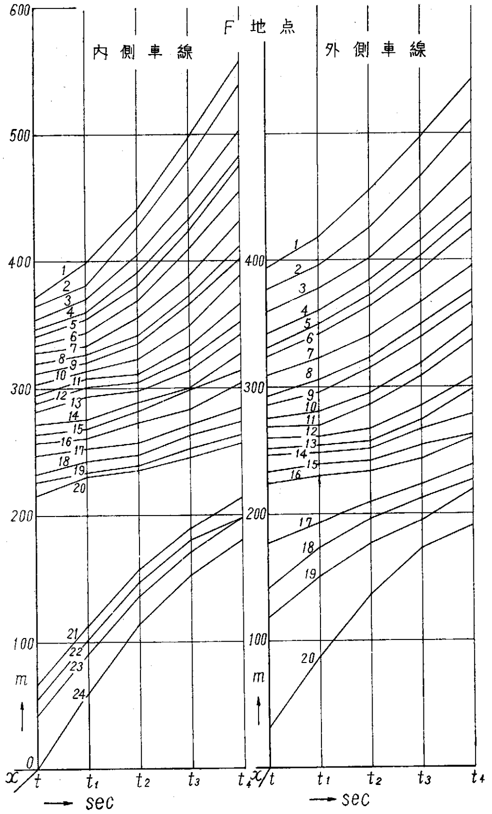
（3）　自動車群の速度分布

各区間について，それぞれの自動車群に含まれる個々の自動車の速度がどのようになっているか，その速度が時間とともにどう変わってゆくか，を調べた結果の1例を第7図，第8図に示した．

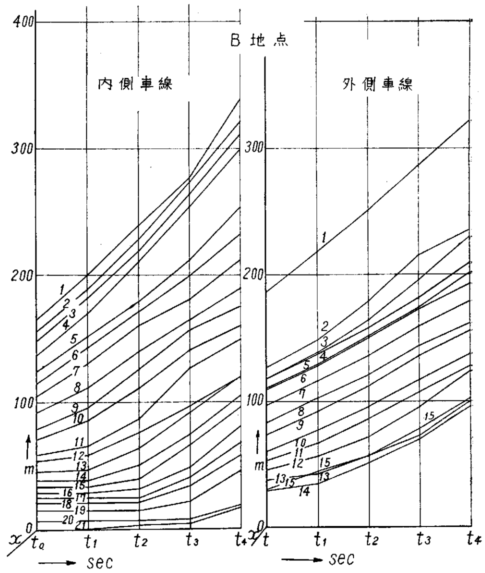
第 2 表

区　間	q	v_m	$q\cdot v_m$	v_{max} に対する比 %
A	1320	29.1	38400	48.5
B	1286	17.5	22480	29.2
C	1023	36.0	36860	60.0
D	834	35.8	21520	60.0
E	879	19.7	17320	33.0
F	1197	19.1	22870	32.5

第7図（a）は区間Bについての例であって，縦軸に試験開始時における最後部の車の位置を起点とした距離をとり，横軸に経過した時間をとっている．第7図(b)は同じ方法で区間Fの例を示している．



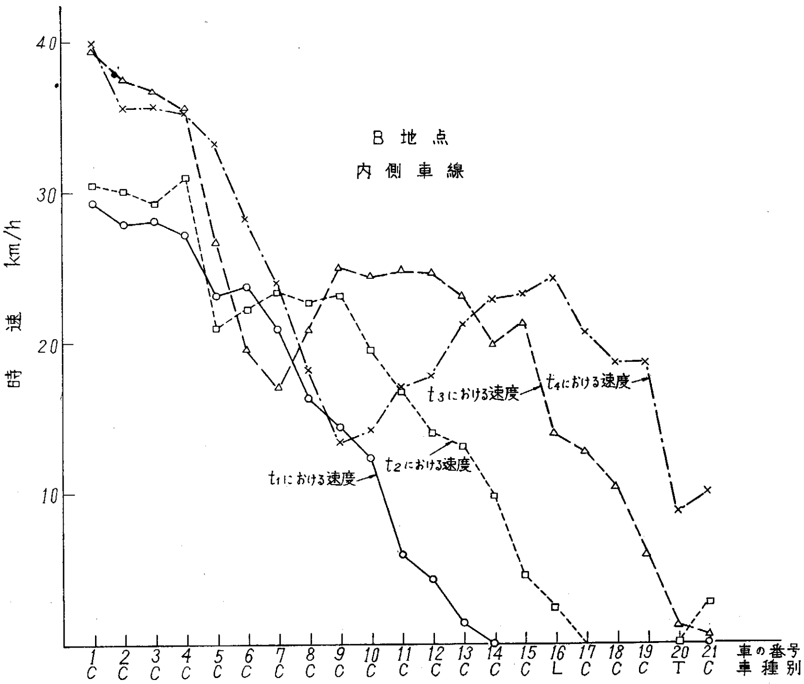
第７図（a）



第 7 図（b）

区間Bでは，信号が青に変わった直後の状態を示しており，この図から次のようなことがわかる．先頭の車が青になると同時に速度を増しながら走ることができるが，後方の車は相当時間がたってからでなければ動きだすことができないようすを知ることができる．内側車線では約４秒たって 13 台目の車が動き出し，７秒たって 17 台目の車が，12 秒で 21 台目の車がようやく動き出している．これに対して外側車線では全部で 15 台であって車間が相当あいているので，速度の差はあるがすべての車が最初から動き出すことができる．

また第８図は１台ずつの車について，速度が時間とともにどのように変わったかを車線別にして示してある．

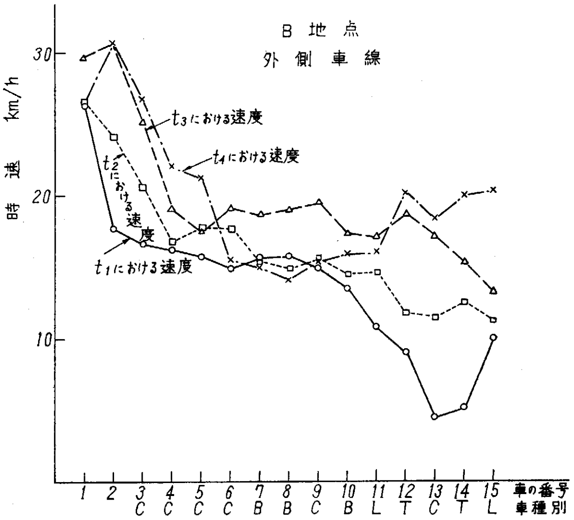


第８図（a）

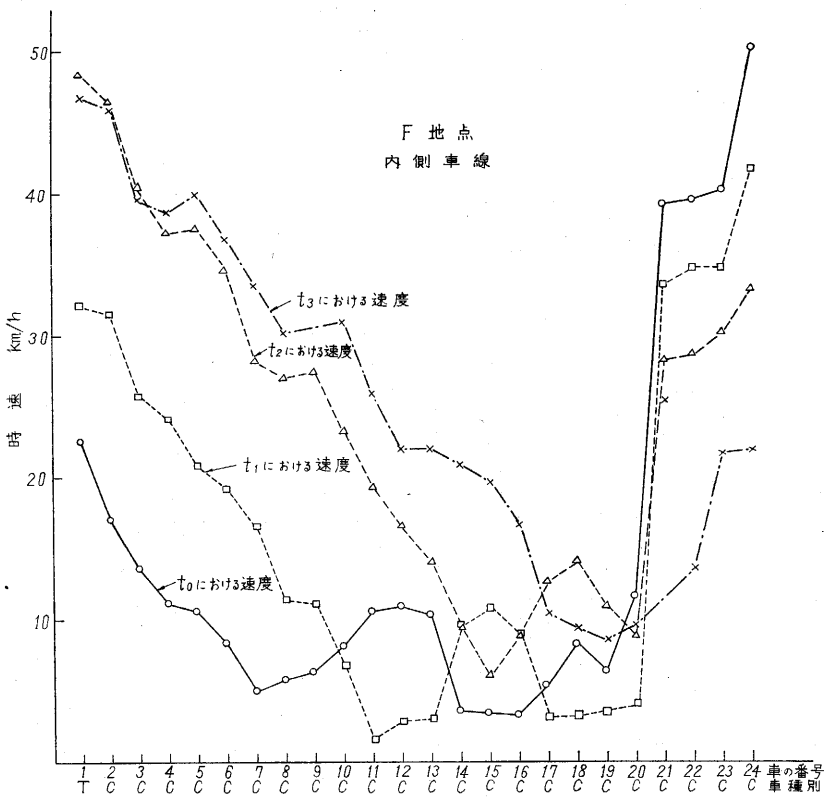
区間Fは信号を過ぎてから先頭車が約 200 m 過ぎたころである．１群の車が信号を通過した後で，なお数台の車が信号青の間に相当スピードをあげて通り過ぎ，前の自動車に追いつき前の車に近づくに従って速度をおとしてくるようすを察知することができるであろう．

第８図（c）で，11，12，13 の車が最初速度をあげたためにに t_1 はスピードを落とし，これにつづく 14，15，16 の車がこれに追従して速度の増減を行なったため，速度分布にフェーズのずれができていることがうかがえる．

信号によってとめられていた１群の車が走り出すとき，適当



第 8 図（b）



第 8 図（c）

な車間を保っている場合には，全体の車が一様に速度を高め（速度曲線が平行）早く所定の速度に達することができることも知りうるであろう.

（4）　自動車の流れのかく乱の程度

ある原因で自動車の流れにかく乱が生じたとして，そのかく乱の程度ができるだけ小さいことが望ましい."かく乱の程度が小さい" ということは，"速度が平均している" といいかえることができるだろう．速度のばらつきの程度を平均速度との偏差で示すことによって,かく乱の程度を数字的に比較することができる.

また，加速度の符号の変化の回数は自動車がかく乱の原因に出会った回数を示し，速度偏差と加速度の符号変化との積は，かく乱が自動車の流れに与える影響量を示すことになるであろう．－の加速度の加わることはブレーキを踏んだことであり，＋の加速度の加わることはアクセルを踏んだことになる.

平均速度との差の平均は

$$E=\frac{\Sigma|\delta|}{4N}$$

ただし　$\Sigma|\delta|=\Sigma|\delta_1|+\Sigma|\delta_2|+\Sigma|\delta_3|+\Sigma|\delta_4|=\Sigma|v_1-v_{1m}|+\Sigma|v_2-v_{2m}|+\Sigma|v_3-v_{3m}|+\Sigma|v_4-v_{4m}|$

1秒間の平均走行距離の総和は，撮影時間間隔を t_1, t_2, t_3, t_4 とすると

$$x=\frac{1}{3.6}(v_{1m}\cdot t_1+v_{2m}\cdot t_2+v_{3m}\cdot t_3+v_{4m}\cdot t_4)$$

加速度符号の変化の総数を n とすれば，1台の自動車が 100 m 進む間にうける加速度変化の回数は平均して

$$O=\frac{n}{N\times x/100}\quad 回$$

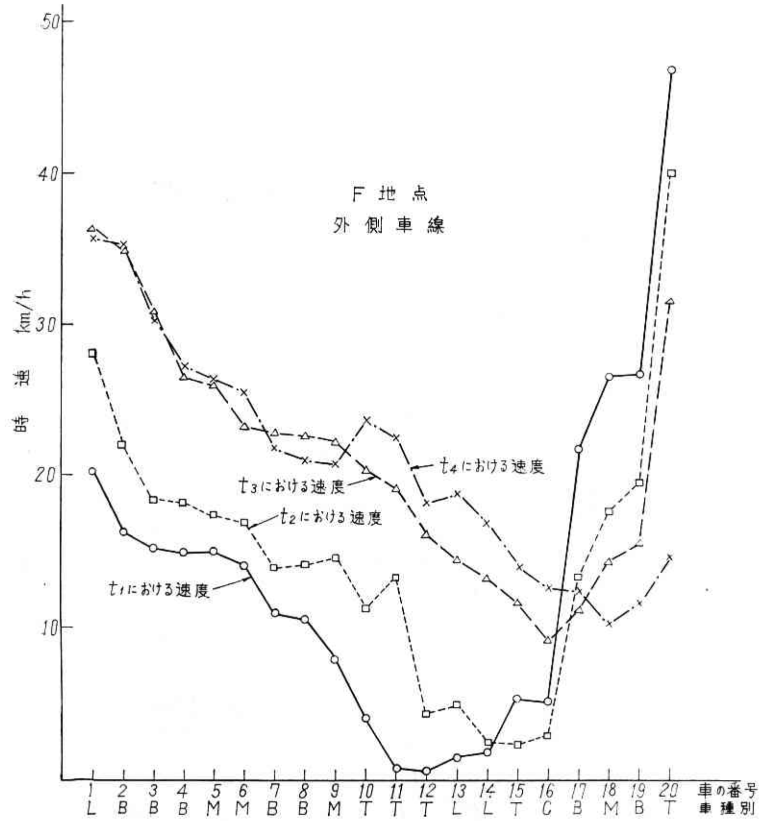
かく乱にぶっつかると，自動車1台 100 m 当たりのかく乱の影響量は次の式で求められる.

$$O\times E$$

これを第二京浜国道の実験結果から計算すると，第3表ような値が得られる.

第 3 表

地点名	$E=\frac{\Sigma\|\delta\|}{4N}$	$O=\frac{n}{N x/100}$	$O\cdot E$
A	5.39	0.926	3.32
B	6.89	0.822	3.32
C	3.87	0.930	2.32
D	5.54	0.205	0.60
E	4.91	0.862	2.00
F	8.85	0.630	1.69



第 8 図 (d)

(5) ある時間内における加速度の大きさの変化

ある時間内で加速度の大きさの変化のうち，負に変わる場合は急にブレーキのかけ得たことを示し，正に変わる場合は急速に速度を増し得る状態にあることを示している．これは道路の条件にもよるであろうし，そこを走っている車種によっても異なるわけてある．しかし，この値が大きくできることは，他の条件が一定なら，交通流に好結果を与えることになるにちがいない．

自動車1台 100 m 当たりの加速度の大きさの変化は

$$C=\frac{\Sigma\beta}{Nx/100}$$

ただし $\beta=\beta_{(1.3)}+\beta_{(2.4)}$

$\beta_{(1.3)}=\alpha_{(2.3)}-\alpha_{(1.2)}$

$\beta_{(2.4)}=\alpha_{(3.4)}-\alpha_{(2.3)}$

これを実測資料から計算すると第4表ようになる

第 4 表

区 間	$\beta_{(1.3)}$	$\beta_{(2.4)}$	β	C
A	13,773	12,109	25,882	0.773
B	9,399	16,115	25,314	0,806
C	7,615	11,097	18,712	0,600
D	11,809	8,996	20,805	0,610
E	9,893	9,515	19,408	0,837
F	19,856	24,865	44,721	1,084

6. むすび

前にも述べたように，航空写真を用いて交通流の調査解析する方法は，新しい技術を提供することは確実であるとはいえ，なおこれらの調査の精度をいかにして高めるか，また上述したような解析の資料をどのように交通対策に取り入れるか，また，さらに得られるであろういくつかの資料をどのようにして求め，またいかにして迅速に処理するかなどの方法については今後の研究にまたなければならない．

しかし，交通流を群としてながめ，相当の距離にわたる路線にそって，ある特定の時間に，どんな交通状態にあるかを調べることのできるのは，新しい観点から交通問題を解決する鍵になるであろうことを信じている．

(1962 年6月 13 日受理)

写真1 使用した航空写真