

高速道路における交通量計測についての基礎的研究

BASIC STUDY ON EXPRESSWAY TRAFFIC VOLUME MEASUREMENT

巻 上 安 爾*
By Yasuji MAKIGAMI

1. はじめに

近年の道路交通需要の増大にともない、道路の利用状況を的確に把握しておくことは道路の管理運用さらには将来の道路計画立案上その重要性が日ごとに増大してきている。特に交通量は道路利用の状況を示す最も基本的な尺度である。

この交通量の計測は道路の主要地点において常時行われているが、このためには交通量計測器機の利用が必要になってくる。また都市内の主要幹線街路や高速道路、あるいは都市間高速道路の一部においては交通渋滞対策として多数の車両検知器を駆使して各種の交通制御が不可欠のものとなってきている。街路における広域制御や高速道路における交通管制システムの開発が促進されたゆえんである。

本研究は超音波式またはループ式車両検知器のような交通量自動計測器機を用いて計測される計測交通量について、その誤差の範囲や信頼性を確率統計論的に検討し、さらに車両検知器の配置方法についても検討を加え車両検知器の適切な利用を計るための基礎的研究を行ったものである。特に多数の車両検知器からの情報を中央処理装置で集計する場合、中央処理装置が各検知器の検知信号を走査していく周期、いわゆるスキャンニング周期の最適化と計測精度の信頼性についての研究はこれまで主として器機自体または器機システム構成上からの検討に流れがちであったが、交通流特性の基礎にたったアプローチを試みている。研究対象とした交通流は名神高速道路のような都市間高速道路である。

2. 交通量自動計測の理論

(1) 車両検知器の計測のメカニズム

車両の存在または通過を検知するには、車両の持つ固有の属性により検知子に与えられる影響を物理量に変換することが必要になってくる。この観点から車両検知器を作動原理別に大別すると、車両の接地圧を利用したゴムホース式等で代表される圧力式、車両の磁性を利用した電磁式および形状と不透性を利用した形状感応式などの各種検知器が開発されている。これらの検知器は安定性、精度、価格、設置および保守などにおいて一長一短があるが総合的に電磁式であるループ式車両検知器と形状感応式である超音波式車両検知器がほかよりもすぐれており主として用いられている。この2つの車両検知器について作動原理の概要を述べると次のとおりである。

ループ式車両検知器は道路内に埋設された絶縁電線のインダクタンスループが車両の接近によって電気的な定数を変化させることを検出するもので、この電気的な定数の時間的変動の例を車種別に示したものが図-1¹⁾である。図において乗用車は車床が低いため鋭敏な検知が行われ、大型トラックでは最小検知レベルすれすれの場合もあることが示されている。

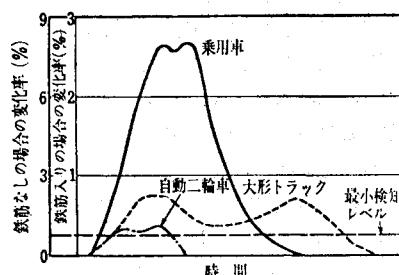


図-1 ループ式車両検知器の感度特性

* 正会員 工博 日本道路公団東京第一管理局技術部
補修第一課

次に超音波式車両検知器についてみると、建築限界上方から路面に向けて設置された送信ヘッドから発信された超音波パルスが、路面あるいは車両の上面から反射され受信ヘッドへもどってくるが、この反射波のうち車両の上面からの反射波のみをとり出して検知信号を得たとするものである。当然検知信号はパルスとして出されるので、これを車両通過時間中連続した検知信号とするためにパルス繰り返し周期の 1.5 ないし 2.5 倍の出力保持時間を設定して受波信号の整形が通常行われている。図-2²⁾ にその整形過程の例を示すが、空気の渦流や断層あるいは車両の形状などによって反射パルス欠除の発生、いわゆる歯抜け現象が出力保持時間の挿入により 8 回のうち 7 回まで補正されていることがわかる。

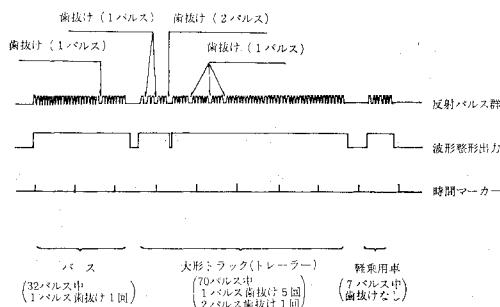


図-2 超音波式車両検知器受波信号波形整形の例

(2) 交通量自動計測過程の数値的表現

交通管制システムのように多数の車両検知器を用いて交通流を自動的に計測していくシステムにおいては、中央処理装置があらかじめ定められた順序で逐次各車両検知器の検知信号を調べていくことがよく行われている。この処理を走査またはスキャンニングと呼び、スキャンニングが一巡するに必要な時間をスキャンニング周期と呼んでいる。このスキャンニング周期は通常 10 ミリセカンドから数百ミリセカンドといった微小時間であるが、スキャンニング周期を短くすると計測結果の精度はあげられるが、処理可能な車両検知器の数は限られ、逆に中央処理装置の能力を固定し、より多くの車両検知器を設置しようとするとスキャンニング周期は長くして、そのかわりに計測結果の精度低下はある程度認めざるをえないと考えられていたものである³⁾。

さて、スキャンニング法に基づいた車両検知器の自動計測過程を数値的に表わすと次のようになる。スキャンニングごとに検知信号があれば 1、なければ 0 を対応させ連続する 1 の群の数でもって交通量におきかえればよい。たとえば 0011011000111000 の 0-1 表示を得た場合、この 16 スキャンニング周期の間に 3 台の車両が検知器上を通過したものとみなすわけになる。ある

いは二つの連続した 0-1 表示に注目して (01) または (10) の状態が発生した回数が計測交通量に対応すると考えられる。

ところで車両検知器の検知信号に基づいて得られるシステムのアウトプットと実際の車両の通過状態から判定される 0-1 表示の間には差異が生ずる可能性があることは、すでに述べた車両検知器の計測メカニズムから考えて当然であろう。ここで問題となってくるのは、ある誤差が発生する可能性のある計測システムのアウトプットの信頼性である。具体的には 0 状態が 1 とアウトプットされる、またはその逆の状態が起こる確率を認めたうえで計測台数の確からしさの程度と最適スキャンニング周期をいかに定めるかということである。このためには車両検知器への車両の到着状態または占有状態を示す交通発生の確率モデルをまず想定しなければならない。

(3) 計測過程検討のための交通発生モデル

車両検知器の検知状態に応じてスキャンニングごとに送られる 0 または 1 の数から形成される数列において、相連なる 2 つについて同時に注目すれば (00), (01), (10) および (11) の 4 つの状態が考えられる。この 4 つの状態をそれぞれ車両非占有期間、前期遷移期間、後期遷移期間および車両占有期間とする。この 2 連続 0-1 表示をスキャンニングのたびに逐次 1 つずつシフトさせていくことを考え、さらに状態の変動過程にマルコフ性を仮定する。その根拠としては前項の計測過程の数値的表現で示したように微小時間ごとの検知信号が 0 または 1 の群の形となって表わされることをあげることができる。これはいったん 1 (または 0) の検知信号が得られれば、その後のスキャンニングにおいても引き続き同じ検知信号が得られる確率が高いことを示しており、0 または 1 の表示を得る確率は直前のスキャンニングの結果によって大きく異なることを示している。したがって 0 または 1 の表示を得る確率は直前のスキャンニングの結果のみに関係するとしてマルコフ性を仮定してもそれほど無理はないものと考えられる。また 0 と 1 の間にマルコフ性が認められれば、二連続 0-1 表示間にマルコフ性が仮定でき遷移確率 P は式 (1) のように、また状態線図は図-3 のように示すことができる。

$$P = \begin{bmatrix} (00) & (01) & (10) & (11) \\ (00) & P_{000} & P_{001} & 0 & 0 \\ (01) & 0 & 0 & P_{010} & P_{011} \\ (10) & P_{100} & P_{101} & 0 & 0 \\ (11) & 0 & 0 & P_{110} & P_{111} \end{bmatrix} \dots \dots (1)$$

ここで

P_{000} : 前のスキャンニングでは (00) で 1 つシフトさせた後も (00) の状態である確率

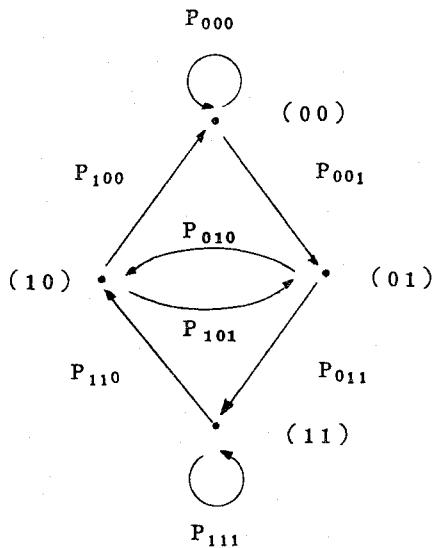


図-3 状態線図

P_{001} : 前のスキャンニングでは (00) であったが 1 つシフトさせた後は (01) の状態となる確率

以下同様である。交通発生モデルとしてはこれらの推移確率要素を交通量やオキュパンシーのような交通流の特性を示す数値で表わすことが必要となってくる。ところで通常の交通量自動計測の単位である 5 分間、あるいは 1 時間といった時間長を想定した場合、数十ミリあるいは数百ミリセカンドの周期で走査された検知情報の集計を論ずるにあたっては、第 n スキャンニングでどのような状態であるかということより定常状態を主に考えていくべきである。定常状態における 2 連続 0-1 表示を示す確率変数を X 、その事象である非占有、前期および後期遷移、ならびに占有の各期間の発生確率をそれぞれ a, b, c, d とする。さらに推移確率のうち $P_{001} = p, P_{011} = q, P_{100} = r, P_{110} = s$ とすれば式(1) は

$$(00) \quad (01) \quad (10) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} P = (00) & \begin{bmatrix} 1-p & p & 0 & 0 \end{bmatrix}; P(X=00)=a \\ (01) & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1-q & q \end{bmatrix}; P(X=01)=b \\ (10) & \begin{bmatrix} r & 1-r & 0 & 0 \end{bmatrix}; P(X=10)=c \\ (11) & \begin{bmatrix} 0 & 0 & s & 1-s \end{bmatrix}; P(X=11)=d \end{aligned} \quad \dots \quad (2)$$

のように定常確率と合せて示すことができる。定常確率の定義から推移確率要素と定常確率の関係として

$$\left. \begin{aligned} a+b+c+d &= 1 \\ a(1-p)+cr &= a \\ ap+c(1-r) &= b \\ b(1-q)+ds &= c \\ bq+d(1-s) &= d \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (3)$$

が導かれる。さらに 1 スキャンニング周期内に車の到着する確率を v 、オキュパンシーを Q とすれば

$$\left. \begin{aligned} Q &= (b+c)/2+d \\ v &= b=c \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (4)$$

として定常確率と交通量とオキュパンシーの関連づけを行う。ただし式(3) および(4) のみではすべての推移確率要素と定常確率を定めることは不可能であるので大型車混入率 (T) も考慮に入れることを試みる。式(2) からみて車両が到着したという条件のもとで、いいかえれば二連続 0-1 表示において (01) の状態から車両占有状態が n スキャンニング周期続く確率 $P(n)$ は

$$P(n) = qs(1-s)^{n-2} \quad \dots \quad (5)$$

ただし、 $n \geq 2$ 、また当然 $p(1) = 1 - q$ である。いま $n \geq N$ なる確率 $P(n \geq N)$ を式(5) から求めると

$$\begin{aligned} P(n \geq N) &= qs(1-s)^{N-2} \sum_{i=1}^{\infty} (1-s)^i \\ &= q(1-s)^{N-2} \end{aligned} \quad \dots \quad (6)$$

この $P(n \geq N)$ は任意の車両が検知器上を通過していくのに要する時間、すなわち車両占有時間がスキャンニング周期単位で N 以上である確率を表わしている。

図-4(A) に高速道路における車種別速度分布の実測例を、(B) に車種別の車長と検知幅の実測例から車長と検知幅の和を大型車で 8 m、小型車で 5 m と仮定した場合の車両占有時間の車種別分布を示したものである。図からみて車両占有時間が 0.29 秒以下の場合は小型車、それ以上の場合は大型車としてほぼ間違いないことが示されている。もちろん式(5) に示される車両占有時

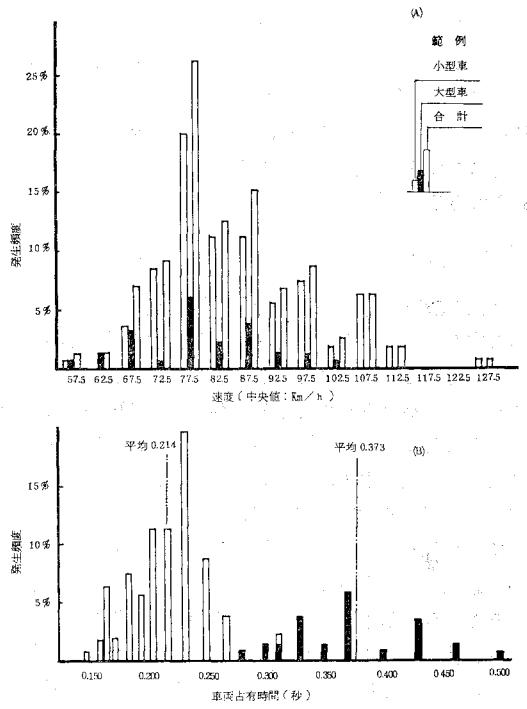


図-4 高速道路における車種別の速度と車両占有時間の頻度分布の例

間の分布は図-4(B)のように車種別による二重ピークをもった分布型ではないが、0.29秒のような車種判別境界値(τ_t)以上の車両占有時間の発生確率を大型車混入率と等しくするという条件式は次のようにして導くことは可能である。すなわち τ_t をスキャンニング周期、 τ_t/τ よりも大で τ_t/τ に最も近い整数を N_t 、さらに大型車混入率を比率で示したものとすれば

$$P(n \geq N_t) = q(1-s)^{N_t-1} = T \quad \dots \dots \dots (7)$$

またここで r の意味を式(2)から考えると、 r は連続する3つのスキャンニングで得られる数列が101となる確率で通常用いられる100ms程度のスキャンニング周期と車頭時間の実測例からみて簡単にために $r=1$ としても差し支えないものと考えられる。

以上の条件と式(3), (4)および(7)からマルコフ過程を想定した交通発生モデルにおける各期間の定常確率および確率マトリックス P の各推移確率要素は次のように示される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{車両非占有期間;} P(X=00) = a = 1 - Q - v \\ \text{前期遷移期間;} P(X=01) = b = v \\ \text{後期遷移期間;} P(X=10) = c = v \\ \text{車両占有期間;} P(X=11) = d = Q - v \end{array} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

$$\left. \begin{array}{l} p = v/(1-Q-v) \\ q = (Q-v)s/v \\ r = 1 \\ (1-s)^{N_t-1} = vT/(Q-v)s \end{array} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

s については実際に用いられているスキャンニング周期の範囲(0.05~0.2秒)からみて、式(9)の第4式左辺の $(1-s)$ についていえば、 N_t は大きくて6程度であるので簡単な計算図表あるいは多少のトライアルで s を求めることができる。

(4) 計測過程の確率モデル

前節の議論から交通量の計測過程は相前後する0-1表示の中から(01)または(10)が発生する回数を数えることに対応していることが示されたが、問題はこの遷移状態の表示が得られたときそれがどの程度確からしいかということである：計測の誤りはたとえば(111)のような占有状態が歯抜けのため(101)となり、結果として実態に反する(01)表示がシステムのアウトプットとして得られるような場合に起こる。したがって交通量計測の過程を追跡するには2つの連続する0-1表示を、またその確からしさを求めるには3つ以上の連続する0-1表示を検討することが必要になってくる。マルコフ過程を用いた交通発生モデルにおいて定常状態における3連続0-1表示の発生確率を示すと図-5のとおりである。

図-5を参照しながら交通量計測システムからの出力

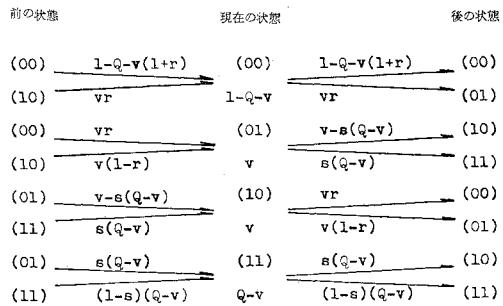


図-5 2連続0-1表示の推移と確率の状態

にある程度の誤りがあることを認めたうえで交通量計測結果がどのようになるかを検討する。(1)で示したように車両検知器のアウトプットには二種類の誤りを犯す可能性がある。一つは検知器上を車両が通過中に占有状態であるにもかかわらずそのスキャンニングにおけるアウトプットは0とでる誤りであり、他の一つは非占有状態が1と検知される誤りである。ここで前者を正の誤り、後者を負の誤りとする。正の誤りの発生原因としては、ループ式車両検知器の場合においては温度天候などによる感度の変動や車床の差による定数変化の違いからくる検知物が、また超音波式車両検知器の場合においては空気の対流や温度断層による音波伝播経路の変動、車両の形状の差による有効反射面積の減少などに起因する反射パルスの歯抜け状態があげられる。負の誤りについては出力保持時間内にスキャンニングが行われた場合などが想定される。ここで正および負の誤り発生確率を α および β とし、また負の誤りについては発生原因から考えて車両占有状態の直後に1回のみ起ると仮定する。すなわち正の誤りについては、その発生が気象等の環境条件や通過車両の種類など多様な要因を受けており、その発生確率の分布についても不明な点が多いので一応 α のスキャンニングにおいても一様に α の発生確率で、また負の誤りについては後期遷移期間で一様に β の発生確率でそれぞれの誤りを犯すと想定したのである。

さて正および負の誤りが発生したとしても必ずしも計測台数の過不足が正および負の誤りの発生と1対1の対応をすることはかぎらない。

たとえば001110という0-1数列上で正の誤りが三番目のスキャンニングで発生したとしても数列は000110と変りはするが計測台数は1台で変わらないからである。表-1は車両の占有状態とそれに対応した誤りの可能性とその発生確率と発生理由を示し、さらに計測台数の誤りが起こる状態とその発生確率を図-5を参照して求めたものを示したものである。

表-1に示される計測誤差確率に過不足台数を乗じ、さらに対応する占有状態の発生確率を乗じて集計すれば

表-1 計測台数の誤りが発生する過程

占有状態	誤りの可能性	発生確率	発 生 理 由	台数計測に及ぼす影響	計測誤差確率	過不足台数
(00)	(10)	β_{vr}	前の状態が(10)(発生確率: vr)のとき負の誤りにより(11)となり現在の状態に移行	(100)か(110)と変化しても計測台数には変化なし	—	—
(01)	(00)	α	歯抜け現象による	後の車両占有状態が(10)のとき(010)が(000)となり計測台数は1減少	$(v-s(Q-v))\alpha$	-1
(01)	(11)	$v(1-r)\beta$	前の状態が(10){発生確率: $v(1-r)$ }のとき負の誤りにより(11)となり現在の状態に移行	(101)が(111)となり計測台数は1減少($r=1$ のときこの種の誤りはない)	$v(1-r)\beta$	-1
(10)	(00)	α	歯抜けによる正の誤りの発生	前の占有状態が(01)のとき(010)が(000)となり計測台数は1減少	$(v-s(Q-v))\alpha$	-1
(10)	(11)	β	後の状態が(10){発生確率: $v(1-r)$ }のとき負の誤りにより(11)となり現在の状態に移行	(101)が(111)となり計測台数は1減少($r=1$ のときこの種の誤りはない)	$v(1-r)\beta$	-1
(11)	(10)	α	歯抜け現象による正の誤りの発生	後の占有状態が(11)の場合(101)となり計測台数は1増加	$(1-s)(Q-v)\alpha$	+1
(11)	(01)	α	同 上	前の占有状態が(11)の場合(101)となり計測台数は1増加	$(1-s)(Q-v)\alpha$	+1
(11)	(00)	α^2	同 上	前および後の占有状態が(11)の場合(1001)となり計測台数は1増加	$(1-s)^2(Q-v)^2\alpha^2$	+1

0-1 表示に基づいた交通量計測過程の誤差の期待値を求めることができる。また過不足台数を示す+1または-1の絶対値を考えれば絶対誤差も評価することができる。計測誤差および計測絶対誤差の期待値をそれぞれ $E(R)$ および $E(|R|)$ とすれば

$$E(R) = 2(1-s)(Q-v)^2\alpha - 2v\{v-s(Q-v)\}\alpha + (1-s)(Q-v)^3\alpha^2$$

上式の第3項についてみれば α の値はかなり小さく Q の値も0.3程度であるので無視できるものとして近似式として

$$E(R) \approx 2(1-s)(Q-v)^2\alpha - 2v\{v-s(Q-v)\}\alpha = 2\alpha\{(1-s)Q^2 + Qv(3s-2) - 2sv^2\} \quad \dots \dots \dots (10)$$

同様にして

$$E(|R|) \approx 2\alpha\{(1-s)Q^2 + Qv(s-2) + v^2 + 2sv^2\} \quad \dots \dots \dots (11)$$

またスキャニング周期を τ (sec), 計測時間を T_m (sec) とすれば、計測時間内における計測誤差台数の期待値および誤差率(γ)はそれぞれ次式で与えられる

$$\left. \begin{aligned} E &= T_m \cdot E(R)/\tau \\ \gamma &= 100 E(R)/v \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (12)$$

絶対誤差($E(|R|)$)に関しても同様の式が成立する。

図-6 に昭和44年12月から45年1月にかけて名神高速道路の車両検知器からのアウトプットから求めた交通量とオキュパンシーの関係の一例を示す⁴⁾。図から交通量が1500台/時程度までは交通量とオキュパンシーの関係は直線関係とみて差し支えないことが示される。この交通量とオキュパンシーの関係をもとにしてスキャニング周期当りの誤差と絶対誤差を式(10)およ

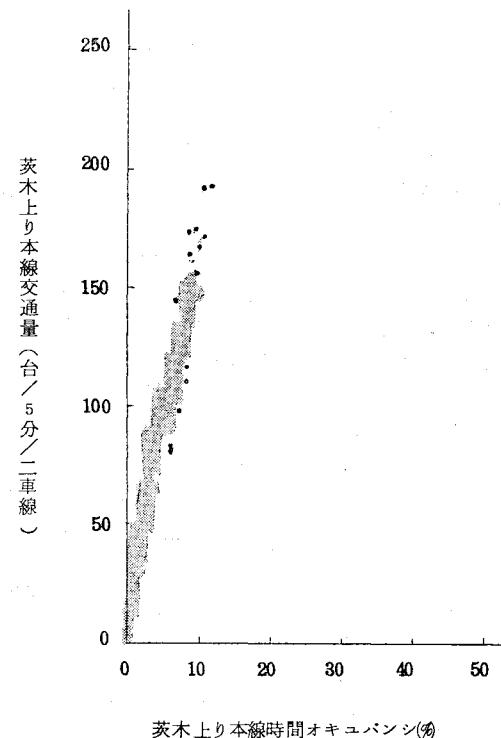


図-6 時間オキュパンシー交通量

び(11)から求めてプロットしたものが図-7である。計算に用いた値としては車種境界判別値は0.3秒、また大型車混入率は図-6に示される交通量とオキュパンシーの関係が実測された期間の平均大型車混入率を参考文献5)から求めて20%としたものである。図-7の例ではスキャニング周期が150 msあたりで誤差の期待

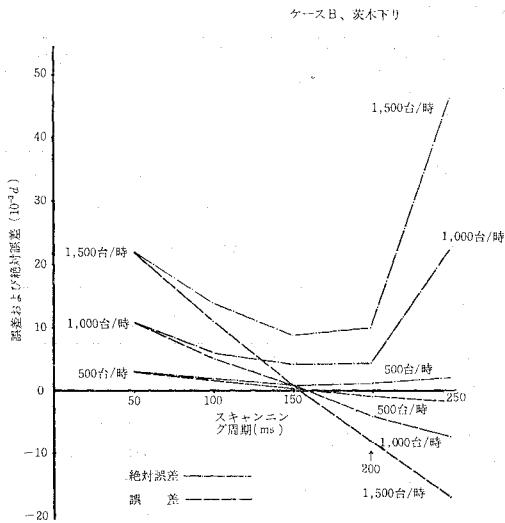


図-7 スキャンニング周期と周期当りの誤差および絶対誤差

値が 0, 絶対誤差の期待値が最小となっている。他の車両検知器からのアウトプットをもとにした計算結果から地方部高速道路における最適スキャニング周期としては 125~150 ms 程度の範囲であるということがわかる。この最適スキャニング周期の変動は主として交通量とオキュパンシーの直線関係から定まる。すなわち交通量の増加につれてオキュパンシーが増大する割合が大きいほど、いいかえれば図-6 に示す Q と V の直線関係の傾きがゆるいほど最適スキャニング周期は大きくなる。また図-7 から推定されるように一たん交通量とオキュパンシーの関係が定まれば交通量の変動に関係なく最適スキャニング周期は一定値に定まる。以上

のことは式(10)で示される計測誤差の期待値を 0 とおいて求められる最適スキャニング (τ_0 ; 秒) の条件式に、交通量 (V ; 台/時) とオキュパンシー (Q) の直線関係を仮定することによって想定できる定数 C_0 についての式

$$\frac{v}{Q} = \frac{V \cdot \tau_0}{3600 Q} = C_0 \tau_0$$

を代入して得られる下記の条件式

$$2sC_0^2\tau_0^2 - (3s-2)C_0\tau_0 - (1-s) = 0$$

から最適スキャニング周期が

$$\tau_0 = \frac{1}{2C_0} = \frac{1800Q}{V}$$

の形で求められることによっても明らかに示される。

(5) あいまい度による評価

最適スキャニングの評価方法として情報理論の適用を考えれば次のとおりである。すなわち、実際の車両占有状態を集合 A 、機器システムから得られる 2 連続 0-1 表示を集合 B とする。当然 A は情報理論における入力記号であり、 B は出力記号に相当する。 A の要素を a_i 、 B の要素を b_j とし 0-1 表示との関連づけは次のとおりとする。

2 連続 0-1 表示の内容	入力情報	出力情報
車両非占有期間 (0 0)	a_1	b_1
前期遷移期間 (0 1)	a_2	b_2
後期遷移期間 (1 0)	a_3	b_3
車両占有期間 (1 1)	a_4	b_4

いま a_i が与えられたとしたとき b_j がアウトプットされる条件つき確率を $P(b_j|a_i) = P_{ij}$ ($i, j = 1, 2, 3, 4$) とすれば P_{ij} を確率要素とするマトリックス P は表-1 を参考にして次のように与えられる。

$$P = [P_{ij}] = \begin{pmatrix} (0 0) & 1 & 0 \\ (0 1) & \{v-s(Q-v)\}\alpha & 1-\{v-s(Q-v)\}\alpha \\ (1 0) & \{v-s(Q-v)\}\alpha & 0 \\ (1 1) & (1-s)^2(Q-v)^2\alpha^2 & (1-s)(Q-v)\alpha \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1-\{v-s(Q-v)\}\alpha & 0 \\ (1-s)(Q-v)\alpha & 1-2(1-s)(Q-v)\alpha \\ -(1-s)^2(Q-v)^2\alpha^2 & -\alpha \end{pmatrix}$$

これは情報理論における通信路行列にほかならない。この通信路行列の各行について、そのエントロピーを $H_i(B)$ とすれば

$$H_i(B) = -\sum_{j=1}^4 P_{ij} \log P_{ij} \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

この $H_i(B)$ は入力記号に特定の a_i が起きたという条件のもとで、なお検知システムのアウトプットである出力記号 b_j に残されているあいまいさの程度を示し、検知システムの条件つきエントロピーとよんでよいものである。したがって $H_i(B)$ の A についての平均を求めればマルコフ過程に基づいた交通発生モデルの仮定のもとで、検知システムの平均的なあいまいさの程度を数値的に評価することができる。あいまいさの平均、すな

わちあいまい度を $H_a(B)$ とすれば、入力記号の発生確率は交通発生モデルの定常確率と等しいからこれを $P(a_i)$ として

$$H_a(B) = \sum_{i=1}^4 P(a_i) \cdot H_i(B) \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

図-8 は、図-7 を計算した場合と等しい条件のもとで時間交通量 500, 1,000 および 1,500 台に対して式(14)で示されるあいまい度をスキャニング周期に対応してプロットしたものである。図-7 の場合と同様にあいまい度も交通量の大小をとわず交通量とオキュパンシーの関係で定まる最適スキャニング周期の点で最小値をとることが示される。

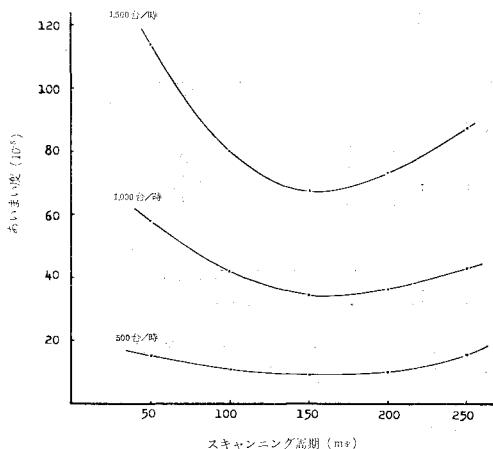


図-8 スキャンニング周期と計測のあいまい度

(6) 実測例に基づいた計測過程モデルの評価

これまでにマルコフ過程を利用して交通発生モデルのもとで交通量計測過程の確率的検討を行ってきたが、問題となるのはモデルがどの程度現実の車両検知器の検出過程を追跡し、検出結果との適合性を得ているかということであり、またモデルの限界を確かめておくことである。図-9は昭和46年5月から7月にかけて行われた検知精度の実測結果を示す。この実測は追越し、走行の両車線に向けて設置された超音波式車両検知器の30分間検知台数(V_2)を入力によって観測した実際の通過台数(V_1)と比較したもので、誤差率として γ 印で示したものは $(V_2 - V_1)/V_1$ から計算される値を観測地点での通過台数の位置にプロットしたものである。またこれに対応する誤差の理論値としては式(12)で求められる γ を α をパラメーターとしてプロットしたものである。 γ の計算にあたって用いたスキャンニング周期は名神高速道路で用いられている50 msを、また交通量とオキュパンシーの関係は図-6に基づいている。誤差の理論値、実測値ともに通過交通量に対してプロットされているが、前者は単に一つの検知器上を一時間に通行する台

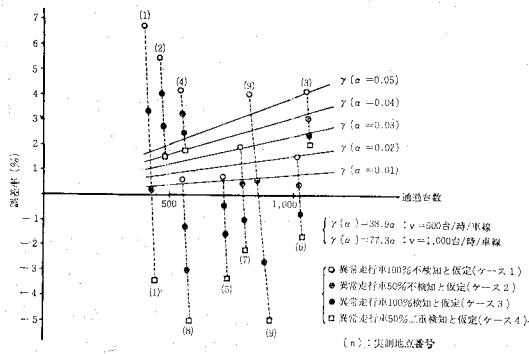


図-9 誤差率の実測例

数であるのに対して、後者は走行、追越し両車線の平均車線当たり時間交通量であることに注目しなければならない。

さて図において理論値と実測値の間には何らかの相関性を認めることは、ほとんど不可能のようである。これは上に記した通過交通量の内容の差、具体的には実測中に車線を跨って走行する異常走行による影響がでているものと考えられる。実測中に異常走行車の台数は確かめられているので、異常走行車の取り扱い方によって検知器自体の精度も異なった見方ができる。たとえば、もし異常走行車が走行、追越し両車線に向けて設置されている2つの検知器ともに検知されない状態であるとすれば、検知器自体の精度としては通過台数から異常通行車両台数を差引いたものを基準にして求めるのが妥当であろう。このように考えて図-9に示すように4つのケースを想定して検知器自体の実測誤差としては各想定値を結ぶ点線の範囲で示したのである。

図-9から α の値を定めることは非常に難しいが、各測定地点における想定実測誤差範囲の中に最もよく含まれる0.01程度の非常に小さい値であると考えて妥当であろう。また二車線以上の道路の交通量計測過程を論ずるにあたって異常通行車の存在を無視することができないことも図からみて明らかである。

3. 計測過程モデルの多車線交通流への適用

(1) 車両検知器の車線配置

これまでに展開してきた計測過程モデルは車両検知器の上をもれなく走行するといふいわば理想的な一車線交通流を対象にしてきたといえる。しかし検知精度の理論値と実測値を比較した結果からみて本モデルを単純に一車線交通流の範囲に止めておくかぎり、モデルを用いて車両検知器の検知精度を議論することは不可能であり、モデルの多車線交通流への適用手法について考察を進めていく必要がある。ここで前提条件としてまず定めなければならないことは計測誤差の理論値と実測値の差異の主たる原因が車線を跨って走行する異常通行車によることが示されているので、車両検知器の車線ごとの配置方法と横断方向の検知幅をどのように想定しておくかということであろう。

ここで車両検知器の車線配置方式と計測台数の精度についての調査結果を簡単に紹介する。これは昭和45年12月に大阪と泉南線で高速道路調査会交通流監視制御研究班によって行われたものであるが、当調査で採用された車両検知器の配置方式と調査方法の概要を図-10に示す⁶⁾。図中3ループ方式において方式4と方式5の

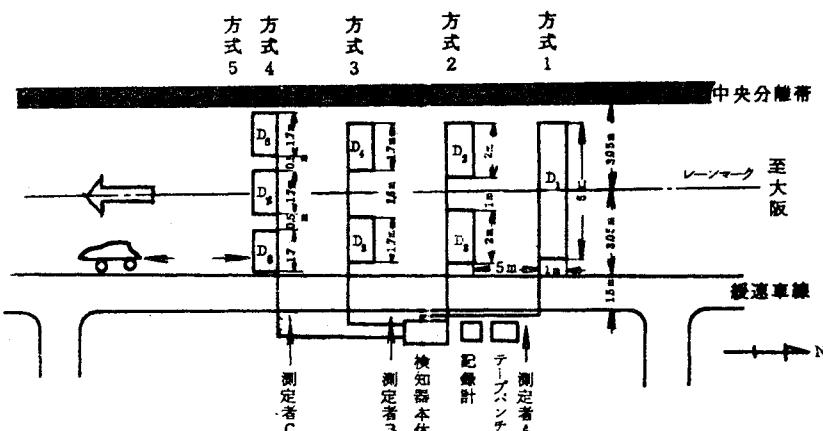


図-10 車線配置と精度についての実験の機器配置図

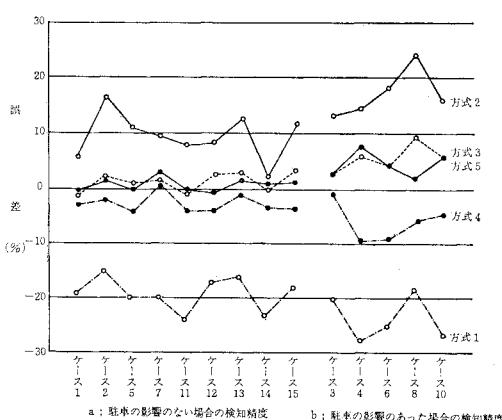


図-11 検知器の設置方式および駐車の有無と検知精度の関係

差は3検知器おののの検知時間の差を考えて出力のロジック処理をするかしないかの違いで異なるものである。また図に示される自動車は異常走行の状態を発生させるために置かれたものである。図-11に調査結果を示す。縦軸は計測誤差、横軸は車の走行状態確認のため16ミリカメラで測定したケース番号で1測定は約10分間の連続測定が15回行われている。図-11から明らかに2ループ方式の方式3と3ループ方式の精度が良いことがわかる。方式3の特徴はループ間隔を小型車の車幅程度にとっているということで、これによって車線を跨いで走る異常走行車の二重検知等の検知ミスが抑えられていることが示されている。結論としては設置および保守の費用を考えれば、2ループ方式で3ループ方式と同程度の精度があげられる方式3が最もすぐれていると判断される。したがって方式3のような一車線一検知器、検知幅の相互間隔は小型車の車幅程度といった車両検知器の車線配置を想定して計測過程モデルの2車線道路への適用方法を考える。

(2) 都市間高速道における車線利用率と異常通行

計測過程モデルは、モデル構成上車線ごとにその適用を考えていかざるをえない。したがって片側二車線以上の多車線道の断面交通量の計測精度を取り扱うためには車線利用率、異常通行率等の諸要素を実測値から定めておく必要がある。

a) 車線利用率

図-12は片側2車線の5分間交通量と追越車線利用率の関係を示したもので、●印は名神高速道路桜井パーキングエリア付近にある車両検知器からの実測結果を示したものである。また曲線の群として示されているものは参考文献7)による車線分布モデルの理論値である。理論値算出の条件として図中、枠内に示されている v および V はそれぞれ高速車と低速車の速度を、また d_1 と d_2 はそれぞれ低速車と高速車の最小車頭間隔を、 d は高速車が走行車線上で連続して高速走行を期待する距離、すなわち最小自由走行距離を示す。 φ は低速車の混入率である。以後の計算においては、車線利用率は図中の理論曲線群のうち $d=0.2\text{ km}$ の曲線を用いた。

b) 異常通行車

図-13は名神高速道路において昭和45年⁶⁾および46年⁸⁾に名神高速道路本線上の車両検知器設置位置付近で調査した異常通行率の実測値を断面交通量に対してプロットしたものである。図中の点線はこの交通量と異常通行率の実測値から得られる一次回帰直線であるが、直線の勾配(0.18)については検定の結果、しいて交通量と異常通行率の関連づけを考える必要はないという結果を得た。したがって平均および95%信頼限界の異常通行率はともに交通量とは関係なく図-13に示す一点鎖線の値をとるとして計測過程モデルの多車線への利用を考えることにする。この考え方はあくまでも図-13の実測データに基づけばこのような結論になるというこ

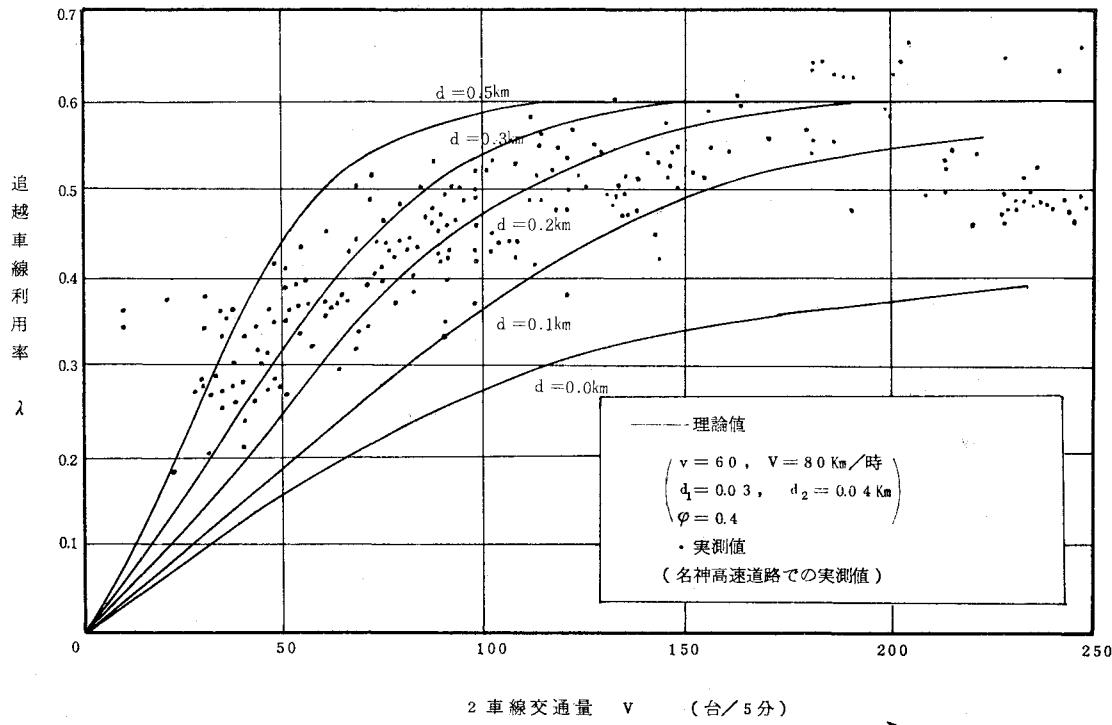


図-12 交通量と追越車線利用率

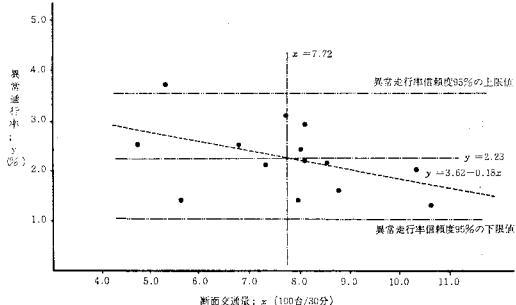


図-13 名神高速道路における断面交通量と異常通行率の関係

とで、交通量の範囲をもっと広くカバーした多数の実測値が得られたとすれば一次回帰または二次回帰によって交通量と異常通行率の関連づけを行うのが妥当という結果になるかもしれない。

(3) 計測過程モデルの二車線道路への適用方法

まず交通発生モデルの片側二車線道路への適用を考えると図-14のようになる。すなわち断面交通量が与えられると、この交通量に対する異常通行量を求め、断面交通量から異常通行量を差し引いた、いわゆる正常な通行量に対して図-12を利用して車線への分配を行う。大型車混入率はこれまでの実測値から走行車線の大型車混入率は追越車線のそれのほぼ2倍であるという結果を

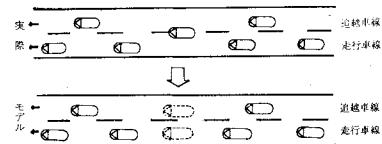


図-14 交通発生モデルの二車線道路への適用

もとにして車線別に定めることができる。

さて異常通行車両の取り扱いである。異常通行車が車両検知器の上で車線を跨いで走行していたということは追越挙動などにおこる車線移行中の車両がたまたまこの車両検知器の位置で車線を跨ぐような状態にあったと考えるのが妥当であり、したがって異常通行車とまったく併進して走行あるいは追越車線上を走行している車はなく、また異常通行車と相前後して走行、追越両車線を走っている車両は異常通行車との間に通常の車頭間隔はほぼ保っていると考えてもよいであろう。したがって交通発生モデルを二車線交通流に適用する場合は図-14に示すように異常通行車は両車線に共存していると考えて交通量オキュパンシー等の諸数値を計算すればよい。計測精度の算定においても、上記のような仮定のうえで求められる一車線交通流を計測過程モデルに適用する。ただし計算結果を異常通行車の検知状態によって調整する必要がある。想定する検知状態としては

(1) 正常検知状態：異常通行車のうち小型車はどち

らかの検知器で検知されるが、大型車は両方の検知器で二重検知される。

- (2) 二重検知状態：異常通行車はともに両方の検知器で検知される。

(3) 無検知の状態：異常通行車のうち小型車はいずれの検知器にも検知されない。

以上のような考え方のもとに計測過程モデルの多車線道路への適用式を示すと次のとおりである。いま

v_0 : 車道断面を通じてスキャンニング周期内に車両が到着している確率で断面交通量に対応するもの。

u_0 : 車道断面を通じてスキャンニング周期内に異常通行車が到着している確率

λ_i : 車線 i における交通の車線利用率

$u_{i-1,i}$: 車線 $i-1$ および i に跨って走行する異常通行車がスキャンニング周期内に到着している確率、ただし車線数 n の道路において $u_{0,0}=0$ および $u_{n,n+1}=0$

$P_{uk_i}(i-1, i)$ ：車線 $i-1$ および i に跨って走行する異常通行車が車線 i に設置された検知器の検知範囲に入る確率で、添字の ki は検知状態によって定まり、標準の場合は 0、無検知の場合は -1、二重検知の場合は +1 と定める。

ただしこまでの定義で示した添字 i は車線番号を示し路肩側車線から中央分離帯に向って 1, 2, 3… と番号をつけていくものとする。

さて車線 i に関する正常異常の全交通量 (v_i) はスキャニング周期内に車両が到着している確率に換算して

$$v_i = (v_0 - u_0) \lambda_i + u_{i-1,i} + u_{i,i+1}$$

また車線 i に設置された車両検知器の検知対象交通量 (v_i') は

$$v_i' = (v_0 - u_0) \lambda_i + P_{uk_i}(i-1, i) \cdot u_{i-1, i} \\ + P_{uk_i}(i, i+1) \cdot u_{i, i+1}$$

車線 i に関する検知対象交通量となり、したがって計測誤差の発生過程に組み入れられる確率は (ξ_i, k_i) は当然のことながら

$$\xi_i, k_i = v_i'/v_i$$

結局のところ車線における車両検知器による計測台数の期待値 $E(v_i)$ は式 (10) を参照して

$$E(v_i) = v_i' + 2\alpha \{(1-s_i) + Q_i^2 + Q_i v_i(3s_i - 2) \\ - 2s_i v_i^2\} \xi_i k;$$

ここに s_i , Q_i は車線 i における車両占有状態に対する推移確率とオキュパンシーである。車線数 n の道路において断面交通量 (v_0) に対する 1 スキャンニング周期当たりの計測誤差台数の期待値 $E(R_n)$ および計測誤差台数

の絶対値の期待値 $E(|R_n|)$ はそれぞれ

1車線交通量における場合と同様に誤差率と絶対誤差率は

$$\left. \begin{array}{l} r_n = 100 E(R_n)/v_0 \\ |r_n| = 100 E(|R_n|)/v_0 \end{array} \right\} \dots \quad (17)$$

で求められる。

(4) 適用結果

式(17)を用いて図-6で用いたと同じオキュパンシーと交通量、大型車混入率等の交通流特性係数を基にして交通量1000台/時の場合の計測誤差率および計測の絶対誤差率を算定した結果を図-15に示す。ただしこの場合計測システムの正の誤りを犯す確率は0.01している。異常通行率については図-13に示す平均および信頼度95%の値を用いている。図-7と異なり正常検知状態の場合においても異常通行車のうち大型車は走行、追越両車線におかれた2つの検知器とともに検知されると仮定しているため、一車線交通流のようにスキヤンニング周期の調整によって誤差率を見かけ上0にする

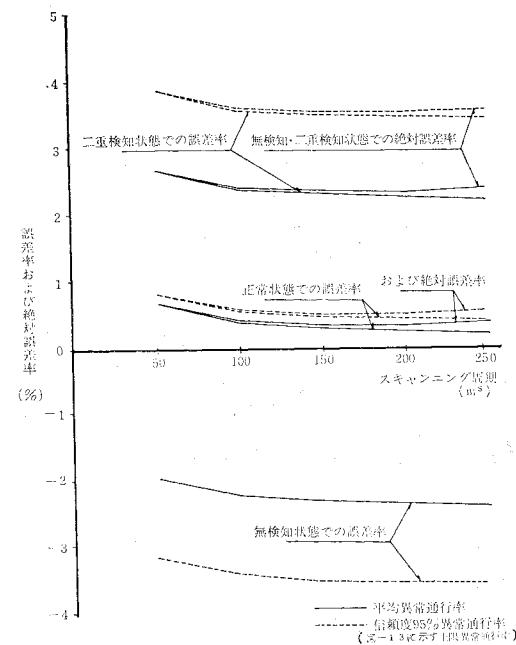


図-15 片側二車線の地方部高速道路における
スキヤンニング周期と交通量計測の誤
差率および絶対誤差率との関係

ということはほとんど不可能であることが示される。ただし絶対誤差率はやはり 150 ms 程度のスキャンニング周期において最小値を示している。以上の傾向は平均および信頼度 95% の異常通行率ともに共通している。ただし異常通行の率が高いほうが誤差率、絶対誤差率ともに高い値を示しているのは当然のことである。

無検知の状態では大型車以外の異常通行車両はすべてミスカウントされることを想定しているので当然誤差率は負のほうに落ちこみ、平均異常通行率の場合で -2.0 ~ -2.4% 前後に、信頼度 95% の異常通行率の場合で -3.2% から -3.6% の範囲にまで下ってしまっている。逆に異常通行車二重検知の状態にあっては大きくプラス側へ誤差率がはね上っている。平均異常通行率で 2.2 ~ 2.6%，信頼度 95% の異常通行率で 3.4 ~ 3.8% 程度の範囲に入っている。絶対誤差率については無検知、二重検知の両状態ともにほぼ等しい値を示している。

同様の計算を時間交通量 2000 台/時の場合についても行い、2つの結果をまとめて図-9に示した名神高速道路の実測資料と重ね合わせて示したもののが図-16である。各検知状態および異常通行率別の誤差率は名神高速道路のシステムで用いられている 50 ms のスキャンニング周期に対応する値をプロットしている。実測結果はすべて信頼度 95% の異常通行率に対応する誤差の範囲に入っており、9点のうち7点は平均異常通行率に対応する誤差の範囲に入っている。しかし正常検知状態に近い実測値は1点しかなく、超音波式車両検知器を正常検知の状態に保つことはかなり困難であることを示している。いずれにせよ実測結果は理論上の検知誤

差の範囲におさまっていることは確認でき、断面交通量 1000 ~ 2000 台/時における理論上の誤差の範囲は -3 ~ 4% 前後と考えてよいであろう。またこの誤差の大部分は異常通行車に起因するものである。逆にいえば車両検知器を設置するにあたっては異常通行現象のもとである車線移行の起こりにくい所を考慮すること、少なくともインターチェンジやジャンクションのランプターミナル付近はさけることが計測精度を上げるうえからは望ましいことが指摘できよう。

4. おわりに

以上の研究の結論としていえることは次のとおりである。

(1) 超音波式あるいはループ式車両検知器を多用しスキャンニング法に基づいて交通量計測を中心で自動化しているシステムを対象にした場合、その最適スキャンニング周期は二重マルコフ連鎖を利用した交通発生モデルおよび計測過程モデルを利用して交通流特性の見地からも求めることが可能である。交通流特性を示すものとしては交通量、オキュパンシーおよび大型車混入率を考え、都市間高速道路に適用した場合最適スキャンニング周期は 125 ~ 150 ms であることが示された。

(2) 上記の交通発生モデルおよび計測過程モデルは多車線道路にも適用可能である。片側二車線の都市間高速道路に適用した結果、交通量計測の誤差は -3 ~ 4% 程度であるが、その大部分は車線を跨いで走るいわゆる異常通行に起因するものである。

また今後の問題点として解明していかなければならぬ事項としては

(1) 交通量とオキュパンシーの関係と大型車混入率との関連性の明確化である。すなわち最適スキャンニング周期をほぼ一義的に定めるのはオキュパンシーと交通量の関係であるが、これにおよぼす大型車混入率の影響は大きいはずである。しかし既存の資料からはこの関連性を定量的に示すものではなく、今後車種別車両占有時間の調査など多方面にわたる検討が必要になってくるであろう。このような調査には本モデルが扱ったミリセカンド単位の実測といった調査技術的に困難な点も含まれるが、これによって正の誤り (α) の発生確率も直接的に求められるようにモデルの適用性を高めていくことが期待される。

(2) 多車線道路における交通量計測誤差の主要因は異常通行車にあることが示されたが、本研究においては交通量と異常通行率の調査結果の分析から交通量のどのレベルに対しても一定の異常通行率を用いたが、より現

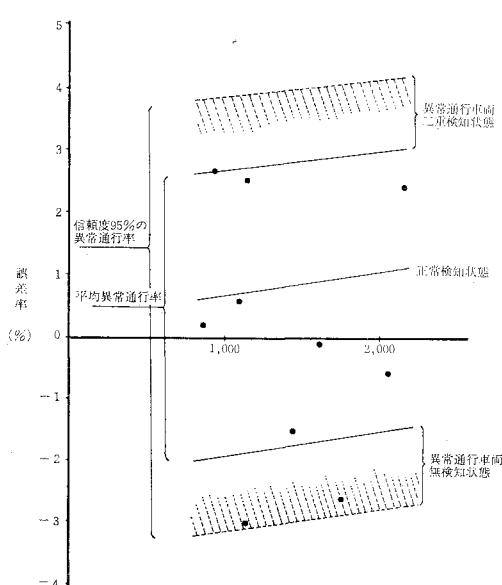


図-16 交通量計測誤差範囲の理論値と実測値との照合

実に近い交通量と異常通行率の関係を求めていくことが望ましい。

という二点が指摘されよう。

謝 辞：本研究は京都大学審査学位論文として行った研究である。本研究を行うにあたってご指導を賜わった岡山大学工学部 米谷栄二教授、京都大学工学部 佐佐木綱教授、同井上矩之助教授ならびにご討議いただいた高速道路調査会交通流監視制御研究班の方々に深甚なる謝意を表したい。

参考文献

- 1) 岩本俊輔：システム工学講座，交通システム第2章5節，広域交通管制用機器，昭和47年1月，日刊工業新聞社，p. 74～84.
- 2) 小武考盛・原田裕治・西村忠夫・福島敏弘：車両検知器

- と歩行者検知器，OMRON TECHNICS 35, Vol. 10, No. 4, p. 81～99, 1970.
- 3) 高速道路調査会；交通流監視制御研究班：高速道路の交通流監視制御装置に関する研究報告書，p. 70～73, 昭和46年2月。
- 4) 高速道路調査会；交通流監視制御研究班：高速道路の交通流監視制御装置に関する研究報告書，p. 87～101, 昭和45年3月。
- 5) 日本道路公団経済調査室：東名・名神高速道路実績交通量解析研究，p. 113～115, 昭和48年2月。
- 6) 上掲 4), p. 33～64.
- 7) 井上矩之・田中清剛：2車線高速道路における交通量の車線分布について，土木学会論文報告集，No. 236, p. 143, 1975-4.
- 8) 高速道路調査会；交通流監視制御研究班：高速道路の交通流監視制御装置に関する研究報告書，p. 130, 昭和48年2月。

(1975.8.1・受付)