

道路交通流の物理的性質(I)  
—挙動の調査—  
Physical Properties of Road Traffic Flow (I)  
—Behavioral Investigations—

高木 相  
東北大学名誉教授  
Tasuku Takagi  
Professor Emeritus, Tohoku University

キーワード： 交通流 (traffic flow)

連絡先：〒981-0952 仙台市青葉区中山5-2-2

0

E-mail : tasuku@sirius.ocn.ne.jp

## 1. はじめに

### 交通流研究とはじめ

道路交通流の研究は1939

年代から1960年代に  
主として欧米で活発に  
行なわれたが、我が国  
においても1960代後半か  
らの自動車社会に向け  
て交通信号の制御のあ  
り方を含めて活発な調  
査研究がなされた。筆  
者が交通問題の課題を  
恩師、故真野国夫先生  
から下命されたのは、  
「道路交通の面制御」  
なる課題であった<sup>1)</sup>。  
我が国が急速に自動車

社会に向かって、交通  
信号を如何に連携制御  
すればよいかを求めら  
れたのである。面制御  
とは都市内の交差点信  
号の系統的制御のこと  
である。この頃から、  
交通信号を電子的に

( Intelligent に ) 制御する

研究が同時にはじまっ  
た。しかし、面制御の  
研究は全く成果を得る  
に至らず終了した。都  
市内交通流は、とりつ  
く島がないほど難しか  
かったからである。  
この時代から、交通信

号の制御を電子的に行なう研究がはじまっていた。筆者も審査員に加えられた定方希夫氏の学位論文は先駆的である<sup>2)</sup>。

筆者は車を運転して仙台市青葉区中山の自宅から約5kmの青葉山の東北大学工学部に通った。運転しながらよく、交通問題の難しさについて考えた。停年(1995年(平成7年)3月)1年前になって、全ての雑用を免除してもらい、自由時間ができた。見通しのきく交差点(大崎八幡神社裏通りから48号線へでる交差点)で待ち車両列を目視で数えて、青信号点灯時に何台通過出来るか、を習慣的に調べた。

### ある発見 (FR (主体 - 客体) モデルから)

まったく無関係に筆者は、FR(Front-Rear) (主体 - 客体) モデルなる2つの系の相互依存関係を扱うモデルを考えていた<sup>3)</sup>。主客 - 客体モデルとも称した。主体は外から情報・エネルギーを受け取り、必要な情報・エネルギーを客

体は独自に異なる情報・エネルギーを外からも得る。客体は主体が必要とする情報・エネルギーを主体に送る。主体は総合的に判断して最適な情報・エネルギーを外に向かって発進する(動く)というモデルである。運転中の先の目視調査で、後ろの車の状態が気になる。しかし全く分からない。ふと、FR (主体 - 客体) モデルを思い浮かべた。そして運転者は後続するすぐ後ろの車の情報はまったく持たないことに気づいた。後ろの車の運転者はすぐ前の車の情報(車間距離)を常に知っていることが求められる(前方注意義務)。FRモデルではループは閉じているが、これを2台続けて走っている車に当てはめると前から後ろへの情報は必須であるが、後ろから前への情報は無い。つまり、ループは切れており、オープンループである。これに気づいて筆者は、交通問題はけっして難しくないと確信した。学会でも講演で解説したことも

ある<sup>4)</sup>。

## 交差点発進特性の調査の開始

1965年の面制御の研究では、交差点の状態を調べた。当該交差点の車列は、その前の交差点の状況に左右される。前の交差点の状況はその前の交差点の状況に左右される。このことから、何処まで遡っても、解析の出発点（原点）はえられない。このことが解決されない限り、都市の交通流問題には取りかかれないうのが結論であった。今から考えれば簡単なことであるが、あなときは、交差点の車列に惑わされていたのである。

FRモデルから教えられたことは、前のみを見ればよいことであるつまり、交差点の車列には関係なく、交差点における車列の発進特性を先ず明らかにすべきであった。

1995年4月から筆者は日本大学工学部に勤めた。1996年から卒業研究に交通問題を取り上げることにした。

## 現在までの研究の概要

以降、現在まで、情報処理学会ITS研究会、電子情報通信学会大会電気関係学会東北支部連合大会、SICE東北支部研究集会、SICE Annual Conferenceなどで発表してきた。その主な視点は、時間領域の交通流の把握である。手始めに日大（郡山）の阿武隈川にかかる橋の手前（日大入り口）の交差点での青信号発進特性の測定から、車頭時間（ $T$ ）と車速度（ $V$ ）が基本的な測定量であるものと考え、その測定を行なった。交通流は物理現象であるとの専門家の言<sup>5)</sup>から、筆者の研究は交通流の物理的性質を明らかにすることに主眼をおいてきた。

これまで得られた結果として、車密度 $k$ と速度 $V$ の関係に指数関数関係

$$V = V_M \exp(-\alpha k)$$

(1)

の関係が存在することを明らかにしている<sup>6)</sup>。 $V_M$ と $\alpha$ は道路によって異なる定数であるが、詳しくはまだ検証していない。ただ、この式は

交差点を含む通常の都市道路でも、高速道路でも成立するところは明らかになってきている<sup>7)</sup>。

この数式モデルは交通流の指数則といえるもので、筆者の研究の重要な成果である。これを導出する過程での考察に、t-sダイアグラム (time-space Diagram) がある。渋滞がどのように起こるのかは車頭時間の変化をみれば、視覚的に図示することが出来る。その時間経過はショックウェーブ論によって定量的に求められる、などの主要な特性はほぼ明らかにしてきた。

これらのことは本シリーズの後編で述べることとなる。

#### 本シリーズの意図

これまで発表した論文の中には、しかし、正しくない記述がある。これを正しながらこれまでの研究をまとめておきたいということから、この度、稿を起すこととした。

先ず本稿は日本大学の学生達とともに実地測定したデータを取りまとめておくこととする。

## 2. 実地測定した各種データ

### 2.1. 交差点発進特性

1996年 から日大工学部

(情報工学科) で卒業研究を指導することになった。本格的な交通流の測定はこれが始めてである。測定は郡山市の日大工学部の国道49号線からの入り口、日大入り口(阿武隈にかかるといわれる橋のいわき側の交差点で橋を渡って会津若松市方向に行く車両群について行なった。測定結果を図2.1に示す。研究の取りまとめについては、平成11年3月終了の大学院学生、植野文高君(現本田技研工業)の修士論文に負うところが多い<sup>8)</sup>。

測定は青信号点灯時から、5m、10m、25m、40mのそれぞれの位置に到達する時間(秒)を各車両について測定した。図に示すように、測定値は大きいばらつきがある。しかし全体の平均をとると、およそ実線で示すようなカーブになる。トラック、バスなどの大型車の混入率は73台中7台(ほぼ10%)であった。

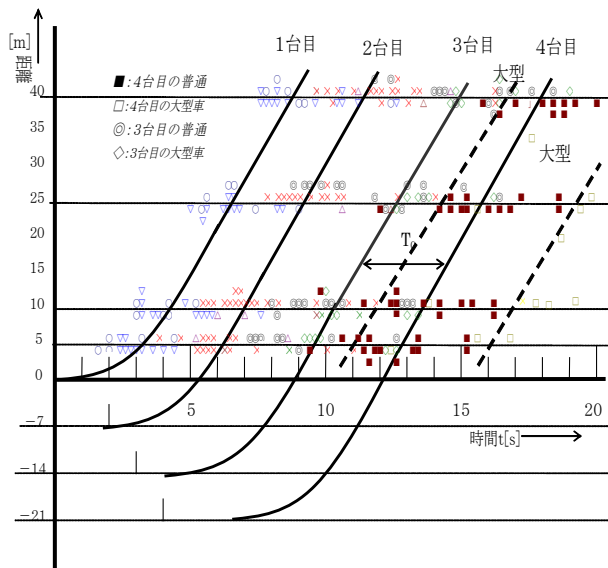


図 2.1 日大入り口（郡山）交差点での車両発進特性

大型車のみについて見ると、点線のように速度も遅く時間も遅れることがわかる。しかし平均すると車頭時間（実線の間隔）は約 3 秒であることが分かった。

このようなデータは多く取られているものと思っていたので、発進特性は諸家の論文をみて詳しい知識を得ようと考えていた。しかし現在に至るまで、このようなデータにはお目にかかっていない。当時、車両発進時のタイ

ミング（車頭時間、 $T_H$ ）はおよそ 3 秒としてよいだろうと考

えていたが、これは正しくないことが最近の調査で明らかになった。最近の交差点での発進特性の測定結果の例が図 2.2 に示されている。交差点での車両発進時の  $T_H$  を速度  $V$  軸上にプロットしたものであるが最も短い  $T_H$  は 1 秒以下で、車が隙間無く、つまり最短時間で、次々に前車に追従して走行している状況、すなわち最も密度が高い状態（交差点で停止している車群が次々に前車に追従して発進しているときは、最大でも  $T_H$  は 4 秒を越えることは希である。そこで 4 秒以上の  $T_H$  を切り捨てて平均すると、平均値は約 2 秒となった。渋滞学の提唱者西成克裕東大準教授は交通渋滞に関連して、2 秒という値を繰り返し解説している<sup>9)</sup>。

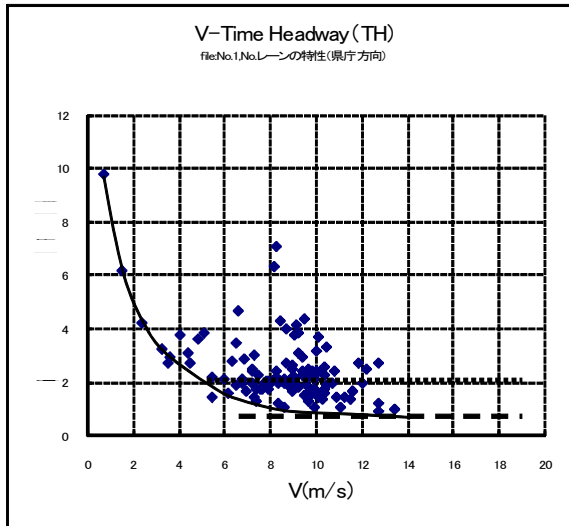


図 2.2 車頭時間  $T_H$  と

速度  $V$  の関係の測定結果の例（仙台市東 2 番町通り）

図 2.2 で、下の粗い点線は  $T_H$  が最も短い時間を示している。この値は約 0.8 秒あたりにある。そして、細かい点線は  $T_H$  の 4 秒以上を省いたとき（最大頻度時）の平均値である。この値は大体 2.2 秒あたりにある。おおざっぱに見ると、車頭時間の平均値は大体 2 秒であるとしてよいであろう。

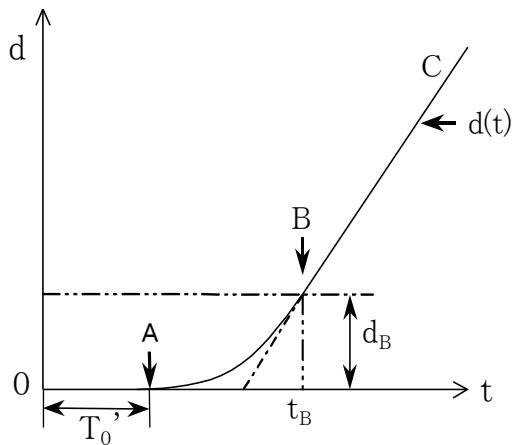
なお、図 2.2 には速度  $V$  と車頭時間  $T_H$  の間に、ある速度以下になると

$T_H$  は  $1/V$  に比例する関係になるという物理現象が見えることである（図中の実線）。 $V$  の大きいところではこの関係はなくなり、両者は独立なパラメータとなる。なお、これに関する議論は後編で行なう予定である。

## 2.2 車両発進時の加速度の測定

### 2.2.1 車両発進時間 - 距離 ( $t-d$ ) モデル

図 2.1 で縦軸の負の領域にはデータがない。しかし、2 台目以降の車両の平均的カーブが描かれている。これは実測値の平均を繋いだ線ではなく、1 台目のカーブをシフトしたものである。1 台目の立ち上がりも十分なデータのもとに描かれたものではない。この部分では発進時の加速度が重要なパラメータである。そこで発進時の加速度を実際運転で調べた。



$d(t)$  : 車両発進軌跡

$T_0'$  : 発進遅れ (秒)

$t_B$  : 定常速度に達した時刻 (秒)

$d_B$  : 時刻  $t_B$  での走行距離 (m)

A-B間の加速度 :  $a$  ( $m \cdot s^{-2}$ )

図 2.3 車両発進時のモデルカーブ

(本研究では国際単位系 SI を使用する)

車両の発進時間・距離 ( $t-d$ ) 特性はモデル的に図 2.3 のように画くことができる。図で A-B 間は加速領域、B-C は定常速度で走行する領域である。発進時の加速度は必ずしも一定ではないが、ここでは一定と

した。

## 2.2.2. 自家用車運転に

### よる実地測定法と測定結果

適当な加速度計がなかったため、次の要領で加速度を割り出すこととした。すなわち、研究室の学生の自家用車 3 台を適当に路上を運転させ、交差点で停止したとき、先頭車に成った場合、前に 1 台から 4 台まで車がある場合について、それぞれ、青信号発進時に車が発進した瞬間を時間の原点 (0 点) とし、それから、運転手は速度計の読み (時速) を 10km 毎時ごとに 60km まで口頭で知らせる。同乗者はその都度ストップウォッチを押す。そのデータ (時刻) は時計のメモリに蓄えられる。測定結果は時間・速度 ( $t \cdot V$ ) カーブとしてグラフ化し、これからある速度に至るまでの時間を求め、これから平均加速度を算出した。図 2.4 は測定結果である。

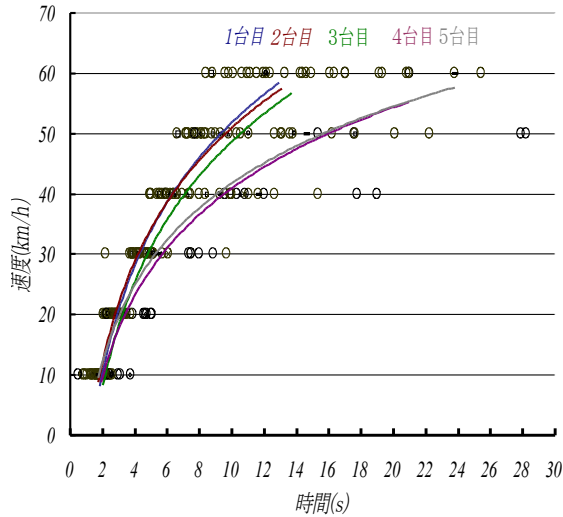


図 2.4 交差点発進時の

時間—距離 (t-d) 特性  
の測定結果

図で1台目は自車が先頭で停止したこと、2台目とは前に1台いて自車が2番目に停止していたことを意味する。3台目と4台目の間に大きい差がある。これは自車の前に大型車があったためである。他はほとんど差がない。これは前車に大型車が無いときで、普通車の発進特性には大きい差が無いことを意味している。

図 2.4 の平均をとると

図 2.5 のようになる。多くないデータからの結果であるが、これからおよその傾向を知ることが出来る。

先ず云えることは、平均カーブは0点を通らないことである。約1秒の遅れ時間が存在するこれは図 2.3 の発進遅れ時間  $T_0'$  に対応する。 $T_0'$  は約1秒としてよい。

加速度  $\alpha$  はこのカーブの微分値であるが、平均加速度は、ある速度に達する時間でその速度を除した値とすることが出来る。つまり、例えば、60km/h まで達する時間は約20秒であるからこの時の平均加速度は  $3\text{km/s}^2$  ( $= 3000\text{m/s}^2$ ) である。

このようにしてある速度に達するまでの平均加速度と、その速度まで達する時間(加速時間)から作図にしたものが図 2.6 である。



(km/h)

速度  
km/h  
時間  
t(s)

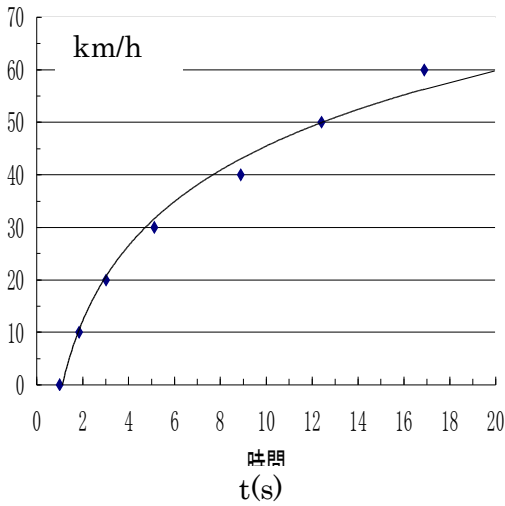


図 2.6 加速時間と加速度の車速度との関係

時間 (s)

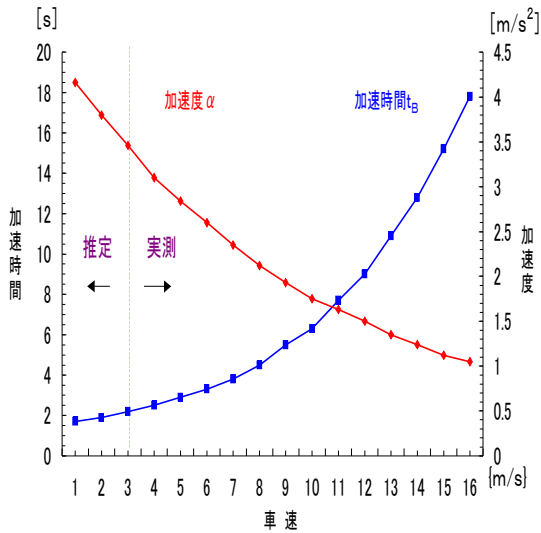


図 2.6 加速時間、加速度の到達速度依存性

図 2.6 はがどのような

意味を持つかを考える  
加速度データはあまり  
役に立つとは思えない  
が、定常速度に達する  
までの時間（加速時間）  
は参考になるであろう。

実際の経験から毎時 60km

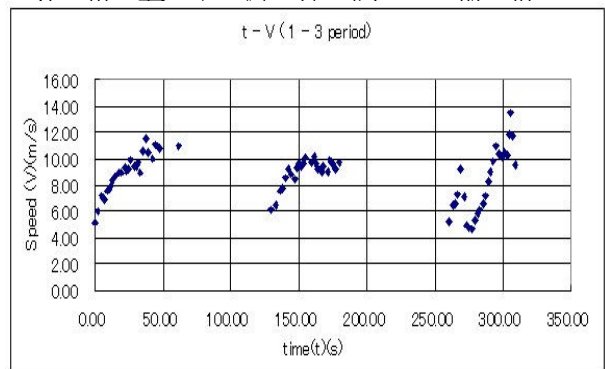
の速度まで加速すると  
この図に示すように、  
約 20 秒を要する。

### 2.2.3 交差点スループット

#### 1) 最近の実際のデータ

交差点を調査していた初めの頃、青信号時間内に何台の車両が通過可能かに興味があった。これはつまり信号 1 周期のスループットである。すでに述べたように (2.1 交差点発進特性)、発進時の車頭時間の平均はおよそ 2 秒であることから、青信号時間を  $T_G$  とすれば通過可能な車数は  $T_G / 2$  台に近くなる。

よって交差点スループットは実用上  $T_G / 2$  としてよい。先の論文で述べているスループットの式<sup>10</sup>は実用的にはあまり重要ではない。最近



量は無関係であるということである。この議論は後編にゆずる。

## 2) ts ダイアグラムから計算した交差点スループット

図 2.7 交差点スループットの測定例

図 2.7 は札幌市（シェラトンホテル前）の交差点のビデオから、発信車両の速度変化を測定したものであるが、青信号時間（50 秒強）に 25 台通過している。平均車頭時間は 2 秒である<sup>10</sup>。

なお、ここで注目すべきことは、後続する車の速度は先頭車から次第におおきくなるが車頭時間の変化は無いことである。つまりスループットは通過する車の速度は無関係であるということである。速度と交通流量は (1) 式の関係と密接に関係するから、一般的には交通流量（一定時間内に通過する車の台数）は車速度と深い関連があるが、前方に障害がないときの交差点交通流では、速度と流

図 2.1 のような車群の動きを示す曲線群（td 曲線群）は一般に ts (time-

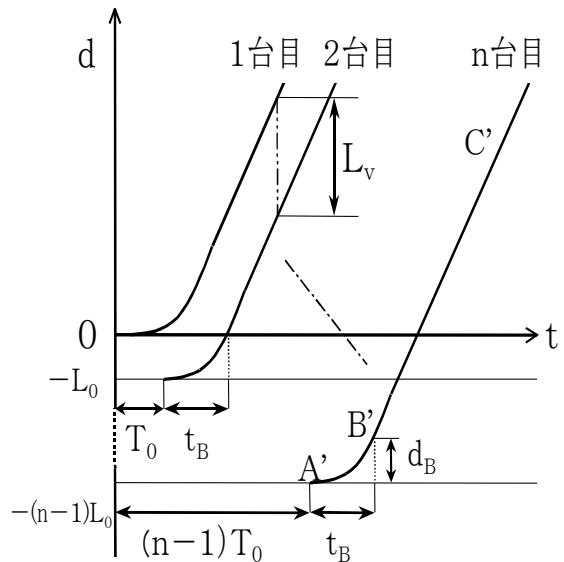


図 2.8 交差点発進時車列の ts ダイアグラム

よばれる<sup>10</sup>。図 2.1 を ts ダイアグラムとしてモデル的に描くと図 2.8 のようになる。ここで  $T_0$  は発進遅れ時間である。これについてはすでに触れたように（図 2.4、2.5）、大体 2 秒である。図 2.1 では上り坂であったことと、大型車が多かった

ため)約3秒であった)。

$L_0$ は停止車列の1台当たりの平均道路占有距離(車長+余裕距離)である。図2.1に関連して、交差点停止線から50mの間に何台停止するかを調べた。大型車が約10%混入している状況で、平均して $L_0$ は6.8mであったので、計算値としては7mとした(その後大型車の混入がない道路での測定では、5m強であった。大型車の混入が多くない道路では6mを採用している)。 $L_v$ は車頭距離である。

$t_B$ と $d_B$ は図2.3に示してある。

以上の準備のもとに青信号 $T_G$ 秒間に何台通過出来るかを計算すると(2)式のように求まった。通過台数を $n$ 、定常速度を $V_L$ とすると、

$$n = \frac{V_L(T_G - t_B) + d_B}{V_L L_0 + L_0} + 1$$

(2)

である。ここで $d_B$ は、発進時の加速度 $a$ を用いて

$$d_B = \frac{1}{2} a t_B^2$$

(3)

で計算される。

図2.9は定常速度 $V_L$ に対してスループット $n$ がどうなるかを計算したものである。なお、×印は測定値である。

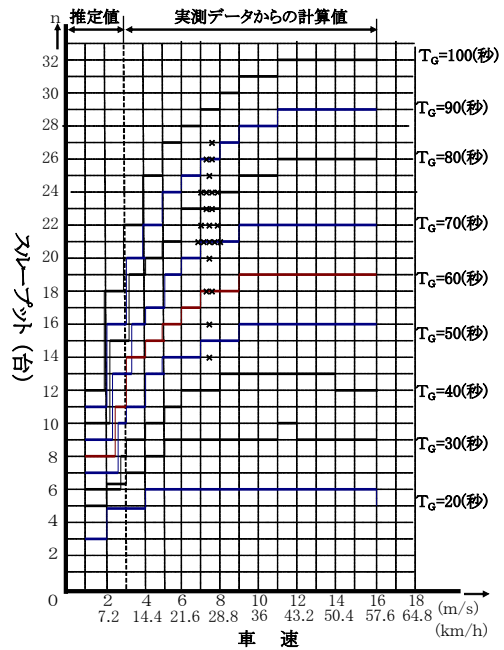


図2.9 青信号スループットの計算結果

図のように高速度になるとスループットは大きくなるという結果になった。図中の×印は図2.1と同じ交差点での測定結果である。この交差点はやや上り坂で大型車が混入することから、定常速度は大体25km/hであった。青信号時間 $T_G$ は70秒であった。青信号スループットは交差点スループットに等しい(右折・左折信号時間、黄信号時間を除く)。

注) この結果は前述の、「車頭時間の平均は約 2 秒」という結果とは異なる

図 2.9 から青信号時間  $T_G$  間に交差点を通過出来る車の台数 (縦軸) から計算すると、定常速度  $V_L$  の大きいところ、 $T_G = 20s$  では 6 台 (車頭時間  $T_0 = 3.3s$ )、 $T_G=100s$  で  $T_0 = 3.1s$  となっている。どこかに過評価がある。それは多分加速時間  $t_B$  であろう (図 2.9 からの推定車頭時間は 3 秒という図 2.1 に一致しているが、これを主張することはできない。加速度、加速時間の測定は図 2.1 とは無関係であるから)。

## 2.2.4 走行中の車頭時間の

### 実地測定 (方法と結果)

運転者が最も関心をもつのは車間距離である。しかし実際にこれを測定することは難しい。

この測定では次の方法をとった。筆者の研究室 (日大) の学生と筆者 (10 人) で 4 台の自家用車に分乗して高速道 (常磐梗塞) と国道 49 号線を会津若松方向へ走行した。

車頭時間は次の要領で測定した。

運転者は通常前車に接近出来る距離に近づいて (最短安全距離) 前車がある適当な目印

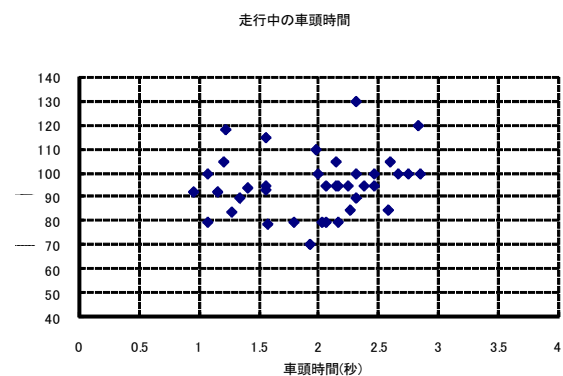


図 2.10 走行中の車頭時間の測定値

をよめることができる。図 2.10 はこの結果を示す。

図 2.10 は常磐高速道、郡山・猪苗代の間で測定したデータである。運転者は学生 2 名と筆者の 3 人で 3 台の自家用車で各車 10-5 回の測定、計 35 個のデータがプロットされている。この図を見ると大体最小 1 秒、最大 3 秒の範囲に分布しており、大体平均 2 秒という値が見える。実際の平均値は 1.96 秒である。

3 台の平均速度は 95.5km/h (26.5m/s) である。この速度で 2 秒間隔走行すると、最も密度の高い、つまり最大流量の時の平均車頭距離が分かる。これは平均 53m となる。よって、おおむね平均速度 100km/h とすれば、車頭距離は大体 60m 弱と考えてよいであろう。

### 3. まとめ

本文は平成 9 年から 3 年間、日本大学工学部情報工学科で行なった

交通流に関する素朴なデータ収集の結果を取りまとめたものである。当時、この種のデータは何処にもあるものとは思っていたが、現在まで同様な測定結果を見えていない。交通流の測定にはあまり高い精度を要しない。本文で述べているように、ここでの測定は時計の操作メータの目視、などの感覚によったものである。交通流に関する限りこれで十分であると考えている。

本文で得られた結果は次のように取りまとめることができる。

- 1) 交差点における待ち車列の青信号発進のタイミング（車頭時間）は普通車と大型車では大きくことなる。また、道路の傾斜に大きく影響される（どの程度影響されるかのデータは当面ない）。
- 2) 市内の平らな交差点での、あまり大型車が混入しないときの車列の発進時の車頭時間は平均 2 秒と考えてよい。（注参照（図 2.9 関連））
- 3) 車が発進してから、定常速度に達するま

での時間は速度が大きくなると相当長い時間を要する。

経験では 60km/h まで到達するのに 20 秒かかるという結果（平均）は納得出来る値である。

#### 4) 走行中の車頭時間

の測定結果も平均値は 2 秒であった。

（国道 49 号線でも 1 台のデータがあるが運転は学生で平均は 1.5 秒であった）。大体の理解として、高速道（昼間、晴天）で 100km/h

近辺での最頻時の走行中の車間距離は 60m ぐらいと考えるとよいであろう（車間距離は車頭距離より 6, 7 m 短くなるが目視では分からない）。

#### 4. 結び

本文は筆者が日本大学工学部（郡山）に赴任（1995）して 1 年後、卒業研究として始めた交通流の研究（平成 8 年から 10 年（1996-1999））で取得したデータを取りまとめて述べた。その後引き続いて、東北文化学園大学に席を移して

から行なった研究から初めに理解したことが必ずしも正しくなかったことが明らかになったことを含めてその頃の解釈に訂正と追加の考察を加えた。既に研究を始めてから 10 年を経ているが、ここに述べたような、実際の見地からの調査研究の報告にはお目にかかっていない。なお、日大での最後の年度（平成 10 年度）の調査で、ここに記述したものは、図 2.10 のデータだけであるが、この年には、車列の形成、信号制御法についての研究を行っている。ほとんど未発表であるので、もし有用なものがあれば後編において漸次取りまとめたい。なお、平成 11 年 4 月から、筆者は東北文化学園大学に移籍した。引き続き今日に至るまで交通流の研究は続行し現在に至っているので最近の成果までの流れをとりまとめたいと考えている。

#### 謝辞

本研究に最初から携わった日本大学工学部情報工学科の平成 8 年度卒業研究学生、平成 10 年度修士学生であっ

た植野文高君（現本田技術研究所）に感謝する。同君は修士論文作成時過去3年間研究室で蓄積した全てのデータを整理してCDに残してくれた。本論文で貼り込んだ図はこのCDからのものである。植野君を含めて、筆者の日大時代の研究室学生の名簿を記して深甚なる謝意を表する次第である。なお、現在東北文化学園大学では谷口正成教授、鈴木祥介准教授ご協力頂いている。併せて謝意を表する次第である。

平成8年度（卒業研究発表会の順序）

栗原 仁	佐藤 吉
幸 篠原 寛史	植野 文高
須合 敬和	大屋 大
志 田村 剛	堀 木伸洋

平成9年度

鹿島 俊介	安田 崇
晶 山内 郁美	安永 孝徳
狩野 祐次	清水 将
文 山崎 昭	望月 友裕
松尾 健司	

平成10年度

石黒 憲	五十嵐
功 青木 洋一	石川 真
岡野 裕一郎	中和 賢
希 目崎 充寛	井城 聖子
佐生理 恵	佐藤 優

## 文献

- 1) 真野国夫、高木相、三浦務、高樹慶次、木村英俊：“道路交通面制御に関する一考察”、東北大学交通問題研究会、第2回資料（昭40）
- 2) 定方希夫：“電子工学的的手法による道路交通流制御に関する研究”、博士学位論文（東北大）、（1974）
- 3) 高木相：最終講義（東北大）（1995.3.8、於東北大電気系101号室）：“ひとつの見方から一進歩と蓄積のモデル思考一”、東北大学電通談話会記録、第64巻第2号，pp.30-47,（March 1996）
- 4) 高木相：“[招待論文]ITS(高度道路交通システム)の課題”、信学技報、TECHNICAL

REPORT OF IEICE. EMD2002-50  
(2002-09)

- 5) 杉山雄規：“交通流の物理”、ながれ、27 (2003)95-108
- 6) 鈴木祥介、谷口正成  
高木相：“道路交通の指数関数モデル”  
計測自動制御学会東北支部第230回研究集会  
資料番号 230-15  
(2006.7.21)
- 7) Shosuke Suzuki, Masaki Tsunoda,  
Masanari Taniguchi, Tasuku Takagi:  
“Characterization of Road Traffic  
Flow from Measured Data of Speed  
and Time-Headway Relationship  
between Density (k), Flow Rate (q)  
and Speed (v)”、SICE Annual  
Conference 2007,(Sept.17-20,2007),  
pp.1657-1661, (Sept. 2007)
- 8) 植野文高：修士論文  
(日本大学工学部情報工学科、平成11年3月)
- 9) 西成克裕：“日本の  
道路はなぜ渋滞する”、  
文藝春秋平成20年7  
月号、pp.320-327
- 10) 高木相、谷口正成、  
藤木澄義、神村伸一、  
鈴木伸夫：“交差点に  
おける車両のモデル的  
解析と青信号スループ  
ット”、情報処理学会  
論文誌、第42巻、第  
7号、pp.1885-1891,(平成13年  
7月号)
- 11) 角田雅樹、鈴木祥介、  
谷口正成、高木相：  
“交差点における交通  
流の測定”、計測自動  
制御学会東北支部第232  
回研究集会、資料番号  
232-2,  
(2006.11.2)
- 12) A. D. May: “Traffic Flow Fundamentals”、  
p .358, Prentice-Hall (1990)