

## 道路交通のダイナミクス(III)

### —交差点で生じる車列形成のダイナミクス—

高木 相 藤木澄義 谷口正成 鈴木伸夫

(東北文化学園大学)

交差点に進入する車両密度(単位時間内に通過する車両数)と青信号によって発進する車両密度(最大車両密度)によって、交差点で出来る車両列長が定まる。青信号時間と赤信号時間(黄信号は当面考えない)、車速などの関係で車列長がどのように時間的に形成されるかを、単一の交差点についてモデル的に考察する。結果として、渋滞がどのように進行するか、渋滞がどのようにして解消して行くかを定量的に示す簡単な式を導出する。

## Road Traffic Dynamics(III)

### -Generation of a Vehicle Queue Dynamics at an Intersection-

Tasuku Takagi Sumiyoshi Fujiki Masanari Taniguchi Nobuo Suzuki

(Tohoku Bunak Gakuen University)

Vehicle queue can emerge at an intersection in a road due to vehicles being made stop by a red signal, which may depend on both incoming and outgoing vehicle density, and also depend on the signal period and vehicle speed. This article will discuss the dynamics of vehicle queue generation with respect to time at an intersection point. A comprehensive quantitative formula will be derived for congestion queue growing and diminishing.

#### 1. はじめに

交差点における車列形成とショックウエーブの挙動についてその基本的事項を先回の本研究会において報告した<sup>1)</sup>。ショックウエーブ論は交通流を波動現象として理解しようというもので、道路交通のダイナミクスを考察するのに便利である。本文ではまず、交差点で生じるショックウエーブの形を、関係するパラメータとともに示して文献1)を補足し、これをもとにして、単一の交差点での車列形成、消滅の時間特性を考察する。

#### 2. 交差点で出来るショックウエーブ

図2. 1は交差点で出来るショックウエーブのモデル図( $t-s$ ダイアグラム:時間-距離特性群)を示す。ここで $t=0$ で赤信号が点灯し、最初の車両①が停車し、以後後続車が・・・⑦、⑧、⑨のよに停車する。そして、青信号点灯に①の車両から順次発進する。ここで図2. 1のパラメータを説明しておこう。

$T_R$ : 赤信号時間

$T_G$ : 青信号時間 (黄信号は当面無視する)

$T_0$ : 最短車頭時間 (定常走行で最短車頭距離を時間になおしたのも、定常速度を $V_L$ 、最短車頭距離を $L_{v0}$ とすると $T_0=L_{v0}/V_L$ )

$T_0'$ : 交差点に進入する車両群の平均車頭時間

$L_0$ : 車両停止時の平均道路占有距離

$W_A$ : ショックウエーブの波頭

$W_A'$ : ショックウエーブの波尾

$t_G$  ( $t_{G1,2}$ ): ショックウエーブの継続時間

すでに報告したように<sup>1)</sup>、

$T_0' = T_0$ では $t_G = \infty$ 、

$T_0' > T_0$ では $t_G = \text{有限}$

である。図のように $t_G = t_{G1}$ でショックウエーブが消滅

するときは、赤信号で出来た車列はすべて次の青信号時間内に解消し、取り残される車両はない。すなはち

$t = t_{G1}$ では⑬の車両は青信号を通過する最後の車と

なり、⑬は次の赤信号で停止することとなる。

$t_G > t_{G1}$  でショックウェーブが消滅しても⑬以降お車は赤信号で停止して再び車列を作ることとなる。この概念的な  $t-s$  ダイアグラムは文献1) に示されている。これについては4. 4項でさらに考察する。

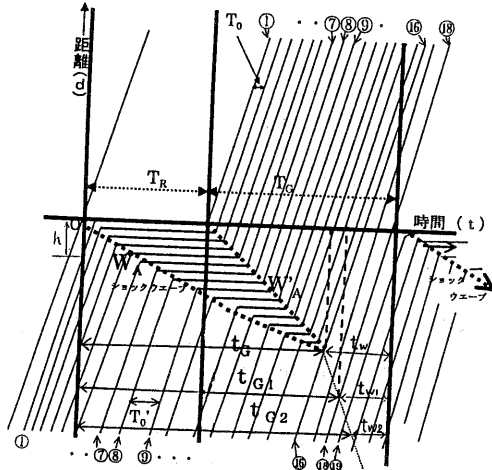


図2. 1交差点で出来るショックウェーブ

### 3. ショックウェーブの終息時間

すでに報告したところであるが、関係部分を整理して再掲することとする。

まず、①の車両がどの時刻に交差点に差しかかるかは不明である。ここでは進入車両の平均進入率を平均車頭時間  $T_0'$  で表しているから、一般的には図2. 1に示すように、赤信号点灯時 ( $t=0$ ) から  $h/V_L$  なる時間遅れをもって停止線に到着することになる。ここで  $h$  は①の車両が  $t=0$  で交差点からどれだけ離れているかという距離、 $V_L$  は定常速度である。この値は最大で  $T_0'$  に等しくなる。すなわち一般的には

$$h/V_L \leq T_0' \quad (3. 1)$$

である。いまここで問題にしているのは、車両密度が相当大きくなった状態、すなわち、 $T_0'$  が  $T_0$  (最短車頭時間) に近くなったときである。 $T_0$  は2~3秒であ

ることをすでに報告した<sup>2)</sup>。したがってこの時間差は大きく影響しないものとして当面  $h=0$  として議論を展開することとする。

ショックウェーブ  $W_A (=W_A(t))$ 、 $W_A'$  ( $=W_A'(t)$ ) はそれぞれ、

$$W_A(t) = \frac{-V_L L_0}{V_L T_0' - L_0} t \quad (t \geq 0) \quad (3. 2)$$

$$W_A'(t) = \frac{-V_L L_0}{V_L T_0' - L_0} (t - T_R) \quad (t > T_R) \quad (3. 3)$$

である。 $W_A$  と  $W_A'$  が交わる点が  $t = t_G$  であるから、

$W_A(t) = W_A'(t)$  から、

$$t_G = T_R \frac{T_0' - L_0}{(T_0' - T_0)} \quad (3. 4)$$

と計算される。

## 4. 車両待ち行列の時間変化

### 4. 1 赤信号停止による車列長の車速依存性

図4. 1に定常走行時の車速の違いが赤信号によって出来るショックウェーブの形にどのように影響するかを示している。ここで交差点への進入車群の平均車頭時間は高速車と低速車ともに  $T_0'$  である。図を見ると、高速車のショックウェーブの傾きは低速車のそれより小さいことが分かる。このことは(3. 2)、(3. 3)式からも明かである。このことから待ち行列の長さは両者で異なることが分かる。つまり、高速車の待ち行列の長さが低速車低速車のそれより短くなる。

### 4. 2 青信号発進による車列長の時間変化

図4. 2(a)は赤信号で出来た車列である。ここで  $L_0$  は停止時の車両の道路占有距離(平均)で、測定によればほぼ7m/台である<sup>2)</sup>。 $l_R$  は車列長である。図4. 2(b)はこの状態で青信号で先頭車が発進し、時間とともに車列長が変化し、また後退して行く様子を示している。これを図4. 1で云えば、 $l_R (=l_R(t))$  はショックウェーブ特性線  $W_A(t)$  と  $W_A'(t)$  の差であ

ることが理解される。すなはち、

$$l_R(t) = W'_A(t) - W_A(t) \quad (4.1)$$

である。これを車両数にすれば、 $l_R$ 中の車両数 $n_e$ は

$$n_e = \frac{1}{L_0} \{W'_A(t) - W_A(t)\} \quad (4.2)$$

となる。

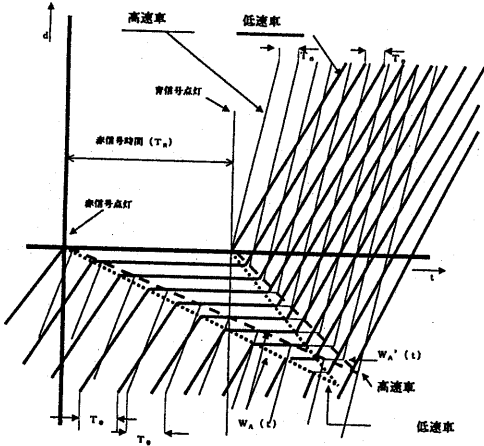


図4.1 赤信号で出来た車列の定常速度依存性

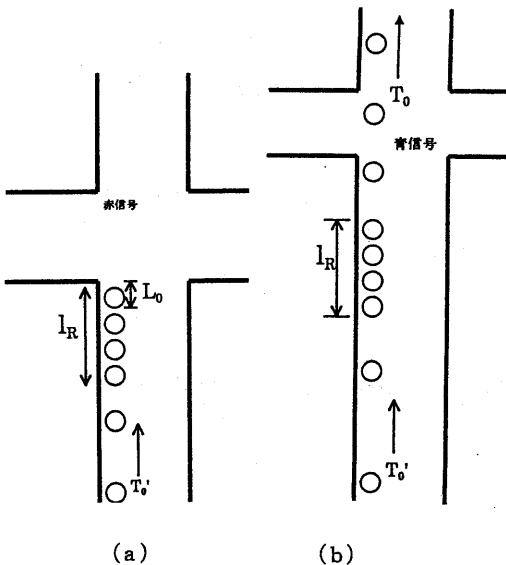


図4.2 交差点での車列

#### 4. 3車両待ち行列の時間特性

$n_e=0$ となる時間 $t=t_G$ は(3.4)式のごとく求めた。いま、 $n_e$ の時間 $t$ による変化を示すと、(4.2)から

$$n_e = \frac{1}{T'_0 - \frac{L_0}{V_L}} (t - T_D) - \frac{1}{T_0 - \frac{L_0}{V_L}} (t - T_R - T_D) \quad (4.3)$$

となる。ここで $T_D$ は車両の発進遅れ時間である(付録)。例えば、定常速度40 km/hに達するには、われわれの一測定によれば、平均7.6秒の加速時間を必要とし、そのときの加速度は $1.6 \text{ m/s}^2$ である。これから発進時間遅れを計算すると約3.8秒という数値が得られる。いま、 $V_L=40 \text{ km/h} (=11.1 \text{ m/s})$ 、 $T_R=60 \text{ s}$ 、 $L_0=7 \text{ m}$ として $n_e$ を計算すると図4.4のごとくなる。ここで小数点は切り上げるものとする。

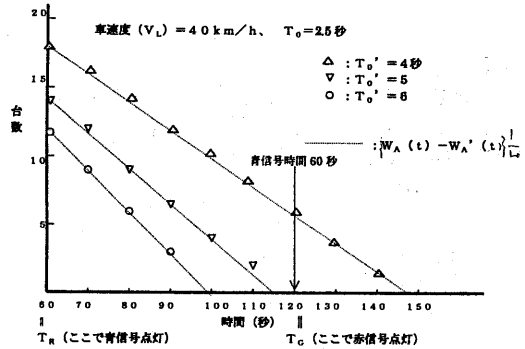


図4.4 待ち行列の時間変化

図4.4で見ると、赤信号 $T_R=60 \text{ s}$ で $T'_0$ が4秒

(平均4秒の間隔で交差点に車両が進入する)のとき、ここで出来る車両待ち行列が完全に解消するには90秒( $150 - T_R(60 \text{ 秒})$ )を必要とすることを示している。台数がゼロとなる時間は、を考慮に入ると、

(3.4)式の $t_G$ に $T_D$ を加えたものとなる。すなはち、

$$t_G + T_D = T_R \frac{T'_0 - \frac{L_0}{V_L}}{(T'_0 - T_0)} \quad (4.4)$$

となる。

4. 4 青信号時間中に待ち行列が解消するときの信号時間  $T_R$ 、 $T_G$  とトラフィックの関係

(4. 4) 式はショックウエーブの終息時間を与えている。図 2. 1 に従って表現すれば、

$$t_{G1} + t_{W1} = T_R + T_G - T_D \quad (4. 5)$$

なる関係を作れば、赤信号による待ち行列は青信号時間内で解消し、このときが最も効率的なトラフィックと信号時間の関係であるといえる。ここで  $t_{W1}$  は

$$t_{W1} = \frac{|W'_A(t_{G1})|}{V_L} \quad (4. 5. 1)$$

または

$$t_{W1} = \frac{|W_A(t_{G1})|}{V_L} \quad (4. 5. 2)$$

である。

ここで交差点に進入する車両と交差点を出て行く車両のトラフィックは、それぞれ車頭時間  $T_0$ 、 $T_0'$  で表している。(4. 4)、(4. 5)、(4. 5. 1)、(4. 5. 2) から、最終的に

$$\frac{T_R + T_G - T_D}{T_0'} = \frac{T_G - T_D}{T_0} \quad (4. 6)$$

が得られる。左辺は交差点に進入する車両数、右辺は青信号で出て行く車両数である。ここで  $T_0$  は定常速度  $V_L$  によって異なる値を取る (付図 3)。このような関係が成立すれば最も効率のよい信号の状態であるといえる。しかし、1つの交差点でも直進方向と交差方向があり、一方向の信号は他方向の信号を拘束するから、このような単純なことで信号の最適化は期待できない。しかし、ひとつの示唆を与えるものとして、意味があるものと考えられる。

5. 渋滞の発生と解消

5. 1 渋滞発生に向かう時の車列の時間変化

前報告と重複するが<sup>1)</sup>、説明のために再掲する。図 5. 1 は交差点で車列がだんだん長くなって行く (蓄積されて行く) 様子を示している。待ち車両が蓄積されて行く様子を図 5. 2 に示す。

この場合は

$$\frac{T_R + T_G - T_D}{T_0'} > \frac{T_G - T_D}{T_0} \quad (5. 1)$$

なるときで、信号 1 周期につき、両辺の差分づつ蓄積されることとなる。

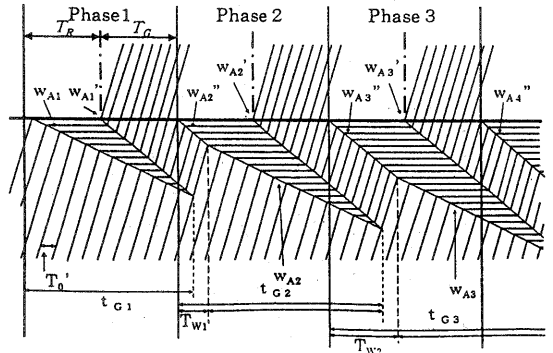


図 5. 1 渋滞に向かう時の  $t-s$  ダイアグラム

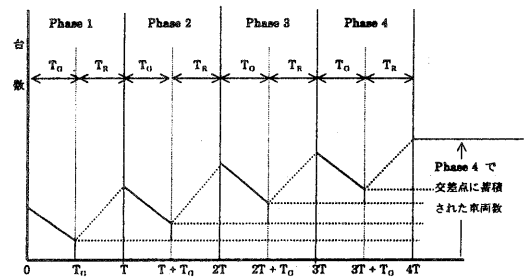


図 5. 2 渋滞に向かうときの車両の蓄積

### 5. 2 渋滞解消に向かうときの車列の時間変化

交差点に進入する車両がまばらになれば、渋滞は解消に向かう。すなはち、

$$\frac{T_R + T_G - T_D}{T_0} < \frac{T_G - T_D}{T_0} \quad (5. 2)$$

なる条件が成立するとき、両辺の差分づつ信号1周期当り待ち車両数が減少することとなる。この様子を図5. 3、と 5. 4に示す。

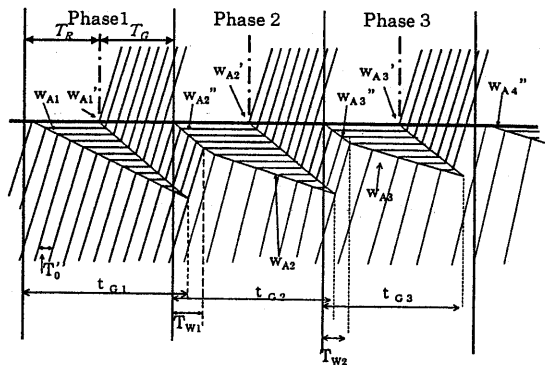


図5. 3 渋滞が解消に向かうときの t-s ダイアグラム

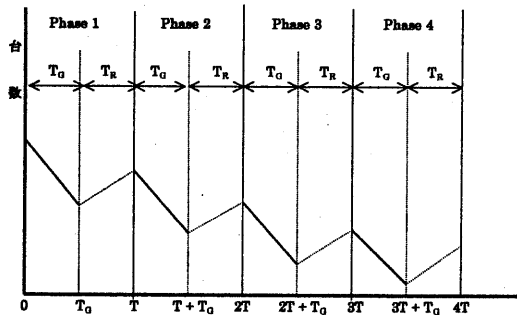


図5. 4 渋滞が解消するときの車の台数の変化

### 6・おわりに

一つの交差点に着目してトラフィックと交通流の関係を考察した。ショックウェーブの理論解析から、渋滞に至る時間経過特性、渋滞が解消するときの時間経過特性の概要を知ることができた

### 謝辞

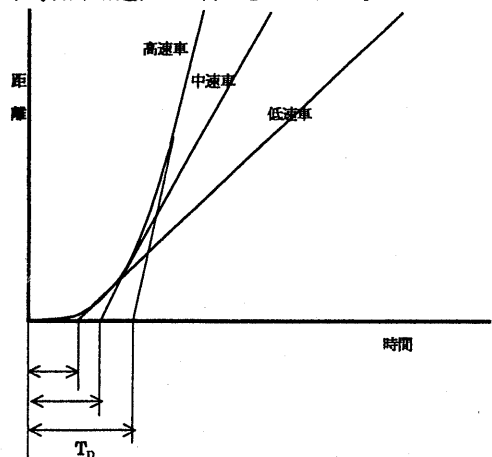
本文は著者の一人が日本大学工学部において行った研究をもとにして書かれたものである。とくに中和賢希君と植野文高君の研究に負うところが大きい。ここに記して感謝の意を表する。

### 文献

- 1) 高木 相：“道路交通のダイナミクス (II) - 交差点車列生成トショックウェーブの挙動”、情報処理学会ITS研究会 (2000, 5, 23)
- 2) 高木 相：“道路交通のダイナミクス (I) - 車両発達特性と交差点スループット”、情報処理学会 高度道路交通システム研究グループ研究報告 (2000, 3, 3)
- 3) 平成9年度卒業研究要旨集、日本大学工学部 情報工学科 (平成10年3月)

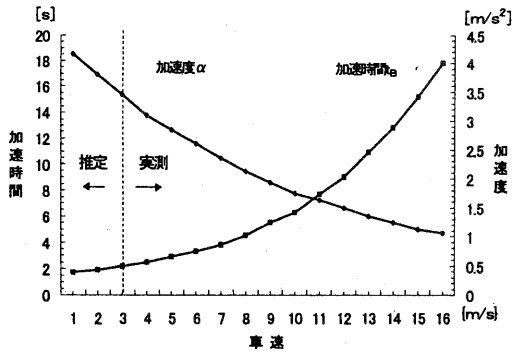
### 付録

付図1は  $T_D$  の説明図である。そして付図2は定常速度に達するまでの加速時間と加速度である。データは実際に自家用車を運転して得たものである<sup>3)</sup>。



付図1 車両発達時の時間遅れ  $T_D$  の説明図

$T_D$  は加速度  $\alpha$  と加速時間  $t_B$  から定常速度  $V_L$  の直線を求めこれが横軸と交わる点として得られる。



付図2 車両発進時の加速度と加速時間

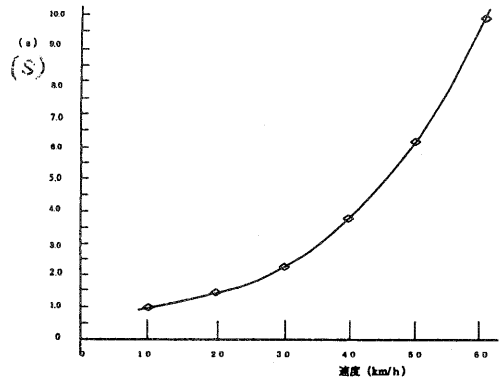
付図1から定常速度が大きくなると(高速車)、加速時間が長くなるため発進遅れ時間が大きくなる。付図1の直線分は距離を  $d$  とするととすると

$$d = V_L t + k$$

(附1)

と書ける。ここで  $k$  は定数である。

付図2の加速度  $\alpha$  と加速時間  $t_B$  から加速時間中の走行距離を求めて、(附1)の直線を決定して、 $d = 0$  において  $t (=T_D)$  を求めると付図3が得られる。



付図3 発進時間遅れの車速依存性