

道路交通における渋滞予測のアルゴリズムとシミュレーション

An algorithm and a simulation of expected traffic congestion on road traffic

鈴木祥介, 谷口正成, 高木相

Shousuke Suzuki, Masanari Taniguchi, Tasuku Takagi

東北文化学園大学

Tohoku Bunka Gakuen University

キーワード： 交通流(traffic flow), 交通渋滞(traffic congestion), シミュレーション (simulation)

連絡先： 〒981-8551 仙台市青葉区国見6-45-1 東北文化学園大学 科学技術学部

鈴木祥介 Tel.: (022)233-9990, Fax.: (022)233-6419, E-mail: ssuzuki@ait.tbgu.ac.jp

1. はじめに

筆者らはこれまで、ショックウエーブの理論を用いて、交差点の交通流を解析することに主眼をおいてきた¹⁾。それは交差点信号による待ち車両群が渋滞の最大の原因であるから、このダイナミクスを明らかにすることが、渋滞問題の理解にはもっとも近いと考えたからである。しかし、交差点も渋滞を起こすひとつの要因であるから、これをボトルネックのひとつと見れば、その他の原因で生じる渋滞問題にも当然適用されるので、ここで、交差点を含めて、高速道の料金所(ゲート)、工事による片側交互通行、などの交通障害となるものに、これまでの考察結果を展開した^{I-VIII)}。本文ではこれまでの筆者らの研究結果を取りまとめ、渋滞発生と解消のプロセスから、コ

ンピュータシミュレーションのためのアルゴリズムを導出し、シミュレータWATSim²⁾の適用の可能性を検討する。

2. 道路交通のボトルネックのモデル

2.1 モデル

図2.1はボトルネックのモデルである。一般に道路は双方向であるが、ここでは一方向を示している。ここで、

○ : 平均1車両存在ゾーン (L_o : 車両停止時平均車頭距離)

L_B : ボトルネック距離(交通流が制限される距離, ボトルネックの種類によって決まる)

$L_{BZ}(t)$: ボトルネックゾーン(ボトルネックの

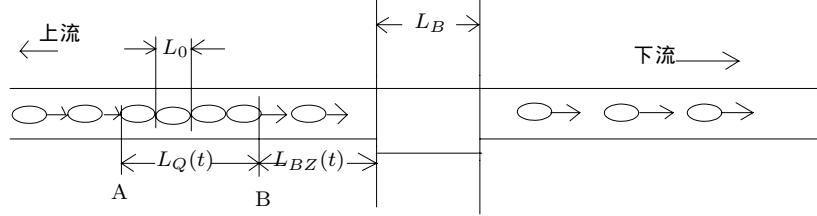


図2.1 道路交通におけるボトルネックのモデル

存在が影響する距離、時間関数となる)

$L_Q(t)$: 待ち行列長 (停止車両列の長さ、時間関数となる)

である。

2.2 ボトルネックとなる交通障害の種類とモデルとの対応

ボトルネックとなる交通障害には、1) 平面交差点信号、2) 高速道路のゲート (料金所)、3) 道路工事や事故による片側交互通行、などがある。これらと図2.1のモデルとの対応について述べる。

1) 交差点交通信号

一般に交差点では、車両は赤信号点灯により、停止線で停車する。後続車は L_0 だけ後方に停車して車両列 (待ち行列) を作る。そして、先頭車が青信号で発進すると、待ち行列車列は前から次々と解消する。車両は必ず交差点を通り抜けるから、交差点の場合ボトルネック距離 $L_B = 0$ としてよい。青信号点灯とともに待ち行列が解消するから (B点を上流に移動)、ボトルネックゾーン $L_{BZ}(t)$ も上流方向へ移動する。上流からの車両がA点に着く (A点も後方へ移動) ので、待ち行列も上流方向へ移動しその長さ $L_Q(t)$ はA点とB点の速度差によって定まる。すでに明らかにしているように^{I-II)}、ショックウエーブの理論から、A点のショックウエーブ波頭関数 $W_A(t)$ とB点の波尾関数

$W'_A(t - T_R)$ はそれぞれ

$$W_A(t) = \frac{V_L L_0}{V_L T'_0 - L_0} t \quad (2.1)$$

$$W'_A(t) = \frac{-V_L L_0}{V_L T'_0 - L_0} (t - T_R) \quad (2.2)$$

と求められている。マイナス符号はともに上流方向 (負方向) へ伝播することを示している。これから、A点とB点の速度をそれぞれ、 V_A, V_B とすれば、これらはそれぞれ、

$$V_A = \frac{V_L L_0}{V_L T'_0 - L_0} \quad (2.3)$$

$$V_B = \frac{V_L L_0}{V_L T_0 - L_0} \quad (2.4)$$

である。ここに T'_0 は上流より流入する車両の平均車頭時間 (平均 T'_0 秒ごとに流入する) で、 T_0 は青信号時間内に平均 T_0 秒ごとに出行く平均車頭時間である。

2.3 青信号スループット

すでに明らかにしているように³⁾、青信号時間 T_G 内に通過できる車両数 (青信号通過容量 (スループット) n_G) は

$$n_G = \frac{V_L (T_G - t_B) + d_B}{V_L T_0 + L_0} + 1 \quad (2.5)$$

で表される。ここで、

V_L : 自由走行時の平均速度 (測定値)

T_0 : 待ち車両の発進車頭時間 (平均) (測定値であるが大体2.5~3秒)

L_0 : 待ち車両 (停止時) の平均車頭距離 (車種の混合率に依存する。乗用車だけの場合およそ5.5m)

T_G : 青信号時間 (設定値)

t_B : 車両発進時の加速時間 (測定値³⁾)

d_B : t_B 間の走行距離 (車両発進時の加速度(α)の測定値から計算³⁾) である。

2) 高速道路のゲート

高速道には信号はないが、渋滞はゲートがボトルネックとなるために起こるこの場合もゲートを通ると自由走行となるので $L_B = 0$ としてよい。よって、基本的には上記の交差点の場合と同様である。

3) 道路工事等による片側交互通行

この場合は工事区間を含むある区間が L_B である。ここでは一般に車両の速度も落ちる。片側交互通行は渋滞の大きい原因となるが、まだその解析的研究は十分なされているとは云えないように思われる。

3. 下流交通流の平均化とボトルネックの $t-s$ ダイアグラム

$t-s$ ダイアグラムとは車両の時間 t と距離 d の関係を群として空間的に描いた時空間図のことである。図2.1のモデルを交通を妨げる多くの要因に適用するためには、下流の交通流 (ボトルネックの交通流に等しい) について、若干の考察が必要である。特に交差点 (2.2の1)) と片側交互通行 (2.2の3)) のように、交通流が交差方向や対向方向と交互に切り替わる場合の取り扱いが複雑になる。そこでここでは、多くのボトルネ交通流に適用できるモデルとするため、下流交通流を平均化する。

1) 交差点

交差点では、信号機によってこれらが制御される。ここでは簡単のため、黄信号時間、同時赤信号時間は無視して、赤信号と青信号のみによって制御されるものとして、ボトルネッ

クの平均流量をその信号の1周期で平均化した交通流とする。図3.1は信号1周期の青信号通過車両数 (青信号スループット) を1周期で平均化したときのショックウエーブを示す。上の図は交通流が疎な場合 (進入車両数 n_U がすべて青信号で通過する場合) で、下の図は交通流が密な場合 (n_U が大きくなりその周期の青信号では全部通過できず取り残される場合) である。このように平均化して考えれば、ボトルネック交通流はすべて共通の概念として処理することができる。(a) は実体を示し、(b) は平均化したものを示している。下の図の場合が渋滞に至る場合である。図3.1 (a) で青信号時間 T_G 間に通過する車両数 n_G は式 (2.5) によって求められる。また、流入車両数 n_U は信号時間1周期 (T) 内に流入する車両数であるから

$$n_U = \frac{T}{T_0} \quad (3.2)$$

$$T_{0m} = T_0 \left(1 + \frac{T_R}{T_G} \right) \quad (3.3)$$

となる。高速道のゲートは信号機のような時間制限ではなく、料金を支払う時間によって、通行が制限される。今1ゲートあたり平均 T_0 秒の時間間隔でゲートを通るものとする。ゲートの数 N 個とすると、全体として平均 T_0/N 秒ごとに1台通過することになる。すなわち、

$$T_{0m} = \frac{T_0}{N} \quad (3.4)$$

よって、たとえば5分間にゲートを通る車両数 $n(5分)$ は

$$n(5分) = \frac{300N}{T_0} \text{ (台)} \quad (3.5)$$

となる。このときのショックウエーブダイアグラムは図3.1の(b)と同じである。

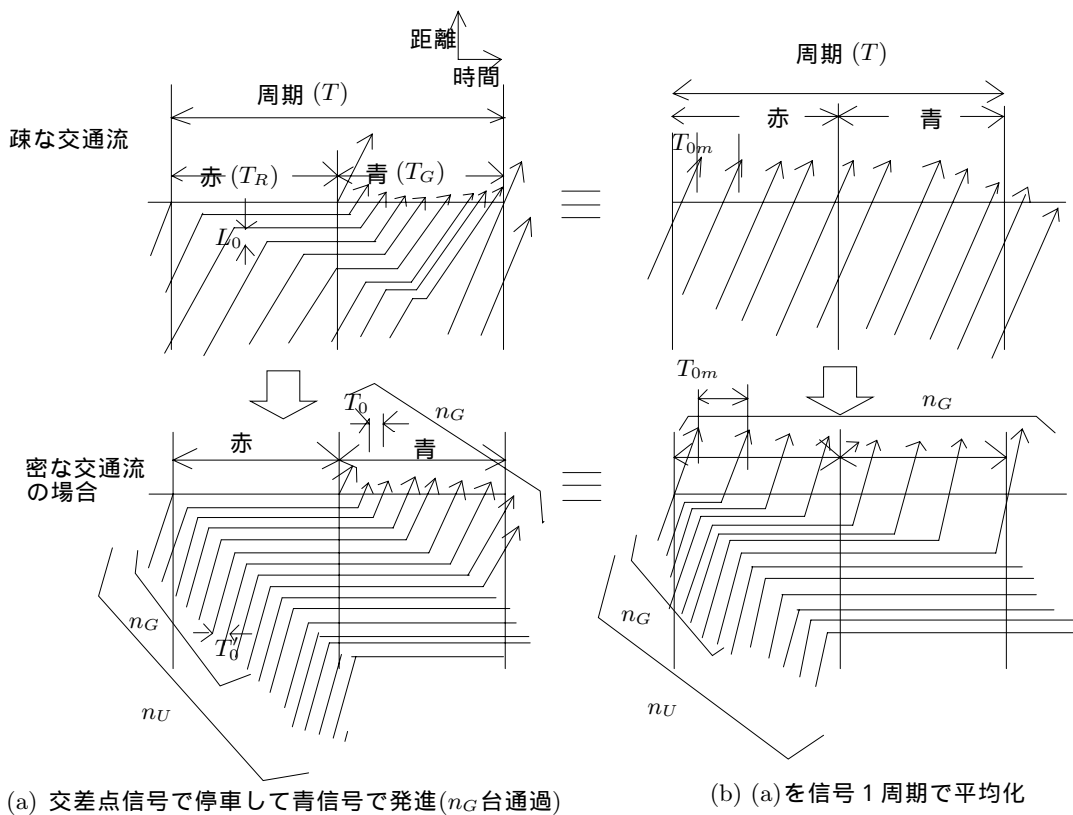


図 3.1 交差点交通流の $t-s$ ダイアグラム(a)とその平均化ダイアグラム(b)

3) 片側交互通行

事故や工事などで、片側交互通行となることがある。この場合、ボトルネック距離 L_B は交互通行の設定距離である。片側交互通行の時空間特性($t-s$ ダイアグラム)を描くと図3.2のようになる(ボトルネックで速度は変わらないとしている)。この図では、座標 d の正方向と負方向の交通流を示している。ここで、 $d > 0$ の流れを正方向、 $d < 0$ の流れを負方向と定義する。この場合の特徴はボトルネックに距離 L_B が存在していることである。 L_B を走行する時間が存在するため上り方向と下り方向がともに赤信号となる時間が存在する。このことは片側交互交通が大きい交通障害となることを意味する。図を説明しよう。時間軸 $t = 0$ で交互交通が始まったとする。

上り方向：

- 1) T_1 までが青信号
- 2) T_1 から T_4 までが赤信号
- 3) T_4 から T_5 まで青信号

以下繰り返し

下り方向：

- T_2 まで赤信号
- T_2 から T_3 まで青信号
- T_3 から T_6 まで赤信号

以下繰り返し

よって、 $T_1 \sim T_2$ 間、および $T_3 \sim T_4$ 間が両方向赤信号となる。ここで上り方向の交通流(スループット)を n_{G1} 、下り方向のそれを n_{G2} とする。これらの値は(2.5)式から求められる。上り方向の青信号時間内の平均車頭時間を T_{01} 、下り方向のそれを T_{02} とすると、信号1周期内の平均車頭時間は、上り方向のそれを T_{0m1} 、正方向のそれを T_{0m2} とすると、それぞれは $T_2 - T_6$ 間で、また $0 - T_4$ で平均することにな

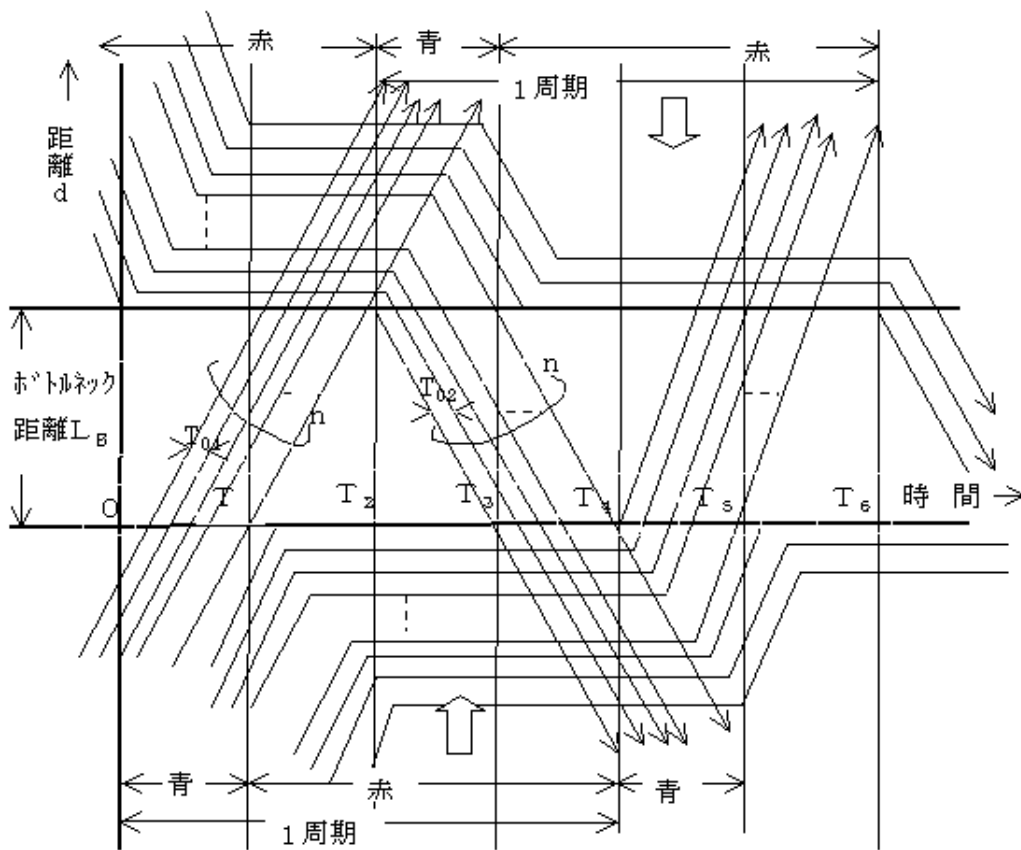


図 3.2 片側交互通行の $t-s$ ダイアグラム

るから、以下のように計算される。

$$T_{0m1} = T_{02} \frac{T_4}{T_1} \quad (3.6)$$

$$T_{0m2} = T_{01} \frac{T_6 - T_2}{T_3 - T_2} \quad (3.7)$$

4. ボトルネックのある道路交通の一般的 $t-s$ ダイアグラム (渋滞に至るとき)

図2.1でボトルネックでは車速は落ちるので一般的と考えられるが 簡単のため図3.2ではこのことは考慮していない。また、ボトルネックゾーンでの速度は異なる速度となる(後述)。上流からの進入車両の定常速度とボトルネックを抜けた下流の車両の定常速度は等しいとする。

図4.1はボトルネックをもつ道路交通の交通流を一般的に表した $t-s$ ダイアグラムである。図中 $O-A$ 、 $O-A'$ 、 $D-D'$ はそれぞれ車両の速度が変化する境目を表すショックウエーブの波頭または波尾を表わしている。 $O-A$ はボトルネックへ向けて進入する車両が停止することによって生ずるショックウエーブである。これを $W_{OA}(t)$ とすると

$$W_{OA}(t) = -\frac{V_L L_0}{V_L T'_0 - L_0} t \quad (4.1)$$

$O-A'$ は待ち行列領域からボトルネック領域にはいるときのショックウエーブである。これを $W'_{OA}(t)$ とすれば、

$$W'_{OA}(t) = -\frac{V_{BZ} L_0}{V_{BZ} T_{0m} - L_0} t \quad (4.2)$$

と書ける。時間軸と $D-D'$ もショックウエー

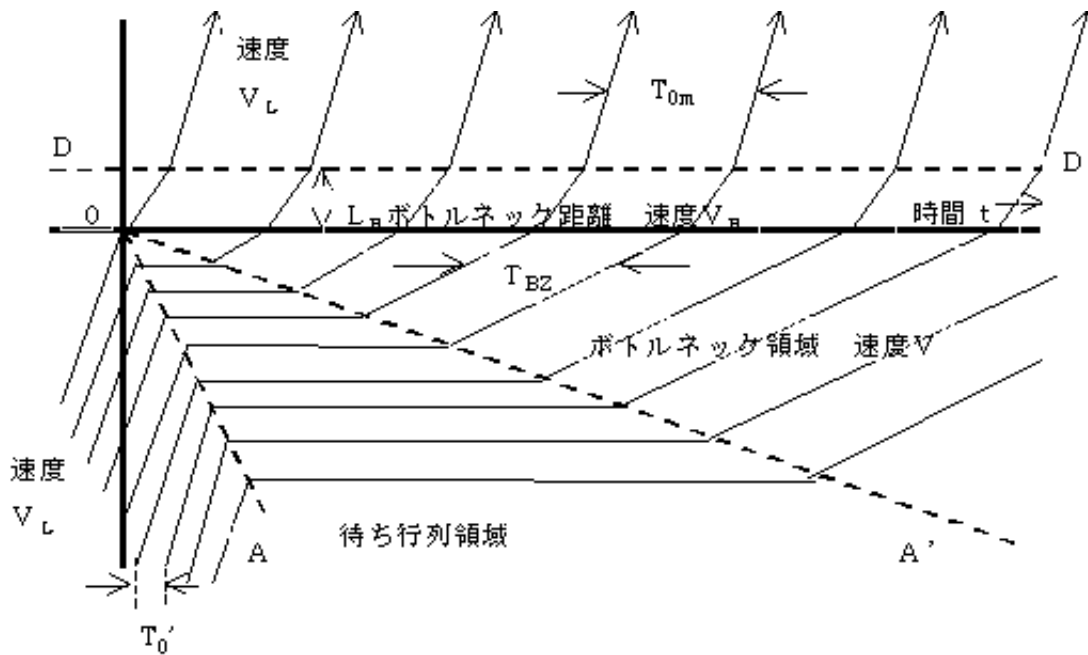


図 4.1 ボトルネックのある道路交通の一般的 $t-s$ ダイアグラム (渋滞に至るとき)

ブの波頭であるが、これは水平 (停滞型ショックウエーブ) である (2.3)。 $O-A'$ を過ぎた後の車両の流れ (流量) は等しい。流量は走行車両の車頭時間の逆数であるから、ボトルネックを過ぎたあとの車頭時間は等しく

$$\frac{1}{T_{BZ}} = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{T_{0m}} \quad (4.3)$$

である。進入車両の車頭時間 T_0' とボトルネックで定まる車頭時間 T_{0m} が

$$T_0' < T_{0m}, \left(\frac{1}{T_0'} - \frac{1}{T_{0m}} \right) > 0 \quad (4.4)$$

となると、待ち時間が時間とともに大きくなって渋滞状態となる。図 4.1 はこの様子をモデル的に示している。

5. ボトルネック交通流における待ち行列の生成

5.1 待ち行列

一般に (4.4) 式が成立するとき、ボトルネック上流で待ち行列が生成し渋滞が発生するこ

ととなる。その条件は図 2.1 で A 点と B 点の速度関係 (2.3)、(2.4) 式) で定まることを述べた。図 4.1 では (2.3) 式の V_A はショックウエーブ特性 $O-A$ の傾きである。よって (4.1) 式から

$$V_A = \frac{V_L L_0}{V_L T_0' - L_0} \quad (5.1)$$

B 点の速度 V_B は、ショックウエーブ特性 $O-A'$ の傾きであるから、(4.2) 式より、

$$V_B = \frac{V_{BL} L_0}{V_{BZ} T_{0m} - L_0} \quad (5.2)$$

である。よって、渋滞の長さ $L_Q(t)$ は

$$\begin{aligned} L_Q(t) &= (V_A - V_B)t \\ &= L_0 \left(\frac{V_L}{V_L T_0' - L_0} - \frac{V_{BZ}}{V_{BZ} T_{0m} - L_0} \right) \end{aligned} \quad (5.3)$$

である。ここで、 $V_A - V_B < 0$ のとき、待ち行列は存在しなくなる (交差点の場合は 1 周期の信号時間内に待ち車両はすべて通過することができる。高速道ゲートでは待つことなくゲートを通ることが出来る。待ち行列中の車両台数は停止時の一台あたりの平均車頭

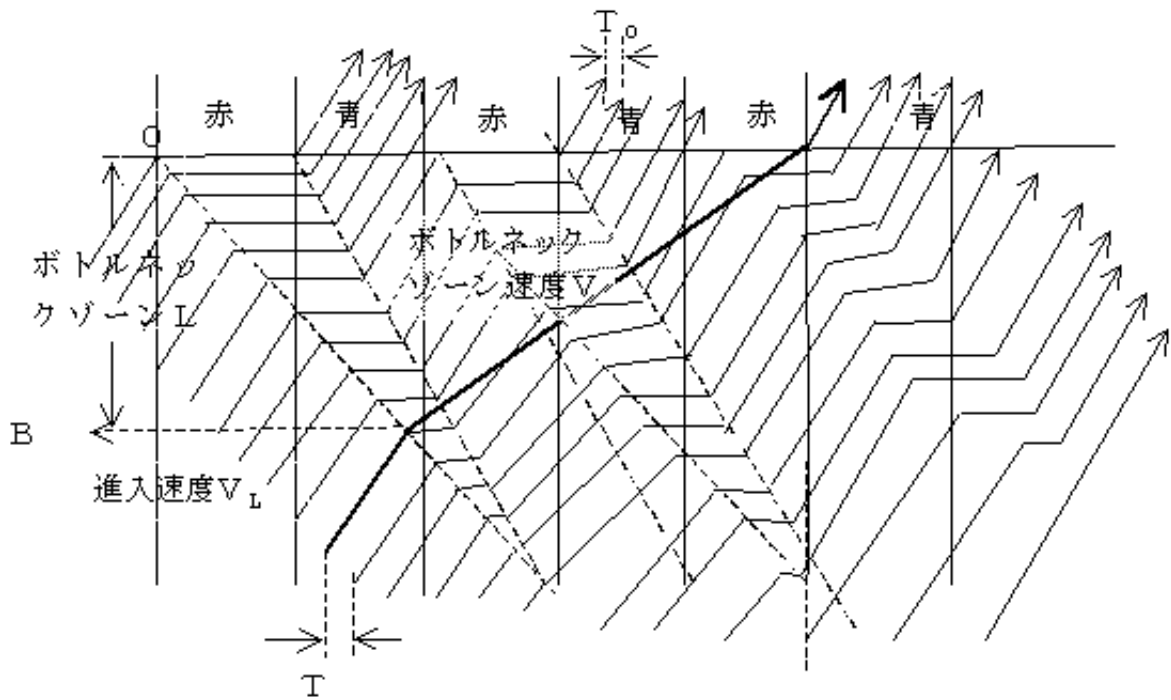


図 5.1 ボトルネックゾーンの車速 V_{BZ} (渋滞状態の交差点上流B点から交差点まで (図 2.1))

距離が L_0 であるから、(5.3)式を L_0 で除した値である。

5.2 ボトルネックゾーンの車速 V_{BZ}

渋滞の長さ $L_Q(t)$ は(5.3)式で表された。ここでボトルネックゾーンの車速 V_{BZ} はどのようなものを理解する必要がある。図5.1は交差点を例にした説明図である。交差点に進入する車両は速度が V_L で、 T'_0 なる車頭時間であり、交差点を車両は T_0 なる車頭時間で出て行く。信号1周期 (この場合は $T_R + T_G$) で平均化した車頭時間は(3.3)式となることはすでに述べた。さて、この図は、渋滞に至る条件 ((4.4)式) で描かれている。すなわち、赤信号で出来た待ち車両群が青信号時間内に捌けない状態である。このような場合、(5.3)式に示すように、待ち行列は成長し渋滞にいたる。ボトルネックゾーンの車速 V_{BZ} は、信号1周期間 (T) の車両スループットが n_G ((2.5)式) である

から、距離に換算すると $n_G L_0$ である。よって V_{BZ} は

$$V_{BZ} = \frac{n_G L_0}{T} \quad (5.4)$$

となる。

6. 渋滞予測のアルゴリズムとシミュレーション

6.1 シミュレーションの対象

ここでは交差点をとりあげる。通常の交差点は図2.1で $L_B = 0$ である (同時赤信号が無視できる)。前述の理論で示して来たように、交差点交通流を支配するパラメータは

T'_0 : 進入車両群の自由走行時の平均車頭時間 [s] (測定値、変数)

T_0 : 交差点を出る車両列の平均車頭時間 [s] (測定値; 交差点、車種に依存するが、2.5秒とする)

V_L :自由走行時の平均車速[m/s] (測定値 ; 法定速度 40 km/h =11.1 m/sとする)

L_0 :停止車列中の車両1台あたりの平均車頭距離[m](測定値 ; 車種混合率で異なる。ここでは普通車列として 5.1 mとする³⁾)

T :信号周期[s] (設定値 ; 制御パラメータ)

T_R :赤信号時間[s] (設定値 ; 制御パラメータ)

T_G :青信号時間[s] (設定値 ; 制御パラメータ)

n_G :青信号スループット (測定値 ; T_0 と T_G に依存する (式 (2.5)))

である。これらのパラメータを導入して図2.1をシミュレータWATSimにより動的に(視覚的に)表現することを試みる。この目的は上記制御パラメータの設定の違いによる渋滞状況の違いを実態的に示すことにある。交通流と信号う時間の関係から渋滞の発生と解消の様子を知ることが出来、これから実用上の知見を得ることを期待する。

6.2 アルゴリズム

1) 交差点交通流の制御パラメータの設定

i) T'_0 (上流の自由走行車の平均車頭時間): 何秒に1台走行しているかを与える (最小値は約2.0[s]³⁾)

ii) n_G (青信号時間 T_G で交差点を出る最大通過車両数): T_G を与えて計算値を使用する。

iii) 信号時間 : $T(= T_R + T_G)$ 自由に与えることが出来る。交通流が小さいときは短く設定するのが旅行時間の短縮の意味でよい⁵⁾。

2) ボトルネックゾーンと待ち行列に着目したパラメータ設定 (渋滞予測)

図2.1の L_{BZ} (ボトルネックゾーン)と(待ち行列長)の成長・消滅が渋滞の予測である。上記 i),ii), iii)をこの目的に着目して変動させる。これによって渋滞最小化のパラメータの組み合わせが存在するか否か知見が得られる。

6.3 シミュレーション結果

図6.1はWATSimによるシミュレーションの結果を示す $t-s$ ダイヤグラムである。ある基点から、交差点まで400mと設定した。ダイヤグラムの左側の数値である。縦線の1目盛りは1分にして表示してある。これは可変である。一定の信号周期で、赤信号と青信号の時間が等しく(黄信号を無視する)1レーンの交差点で1方向のみを考える。6.1で述べた条件で変数として T'_0 を考える。最初の5分間をTime period 1、次の5分間をTime period 2, ..., Time period 5まで設定したが、図は、Time period 3の最初の部分までである(12分)。各Time periodの設定値は、以下の通り

Time period 1	Time peirod 2
$T'_0=5(sec)$	$T'_0=4(sec)$
$T_0 = 2.5(sec)$ 時速 40 km 大型車混入率 = 0 % 青信号時間=赤信号時間= 50(sec) 黄信号時間 = 0 (sec) その他	

6.1に述べたように、進入車両の自由走行時の平均速度 40 km/h では青信号スループット n_G は $T_G = 50(sec)$ で16台であるが、WATSimのシミュレーションでは、19か20台であった。

7. おわりに

筆者らの道路交通のダイナミクスに関する一連の研究を、交通渋滞の原因となる障害

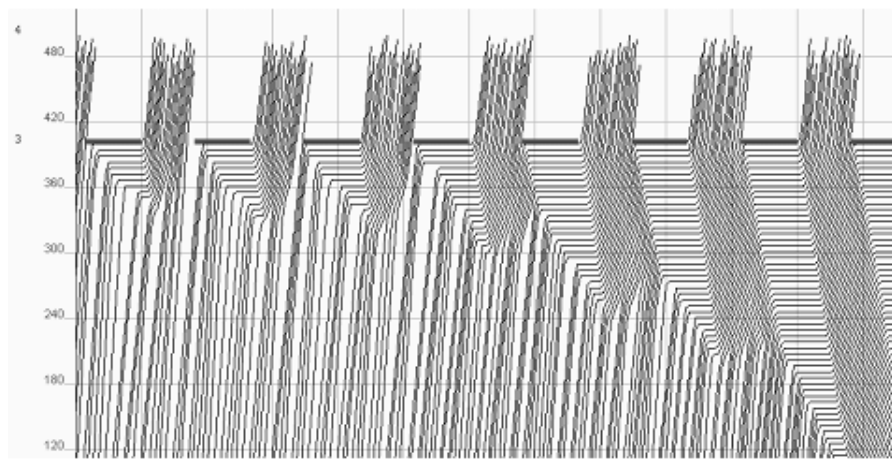


図 6.1 WATSim によるシミュレーション結果(t-s ダイアグラム)

をボトルネックゾーンの導入によって、一元的に取りまとめた。これを実感的に把握するにはシミュレーションが最も効果的であることから、WATSimなるシミュレータによって、単一の交差点を例にシミュレーションを試みた。この結果から、このシミュレータもひとつの道具として活用できることが分かった。今後さらなる試みを遂行し、交差点交通流の最適化パラメータの抽出、複数交差点へ拡張し、一般都市道路交通のスムーズ化に資する資料が得られることを期待したい。

文献

- 1) 高木(他)：“道路交通のダイナミクス(Ⅰ) - (Ⅷ) ”、情報処理学会ITS研究会資料サブタイトル
(Ⅰ) 車両の発進特性と交差点スループット (2000.3.3)
- () 交差点車列生成とショックウエーブの挙動 (2000.5.25)
- () 交差点で生じる車列形成のダイナミクス(2000.9.18)
- () $t-s$ ダイアグラムの定式化の基礎考察 (2000.11.9)

- (V) 疎な交通流下における単一交差点の信号の最適制御へのアプローチ (2001.3.2)
- (VI) 疎から蜜に向かう交通流 (2001.9.6)
- (VII) 交差点におけるショックウエーブと平均流量 (2002.9.3)
- (VIII) ボトルネックと交通流(2003.5.23)

2) WATSim(Wide Area Traffic Simulator) 米国KLD社(日本語版ユーデック株式会社)

3) 高木、谷口、藤木、神村、鈴木：“交差点における車両の挙動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 (平成13年7月)

4) 佐々木貴広：“交差点交通流のショックウエーブ論的解析と交通信号の車流適応制御法の検討[II]”、東北文化学園大学卒業研究概要集(2002年度)

5) 中村英樹：“高級な道路の供給から合理的な機能の提供へ”交通工学、Vol. 38 (2003増刊号)、pp.5-13 (平成15年10月)