

# 複数車線で構成されるネットワーク上の交通密度分析

福山正治

正会員 Ph.D. 倫三菱総合研究所 社会公共政策研究センター 研究部長 (〒100 千代田区大手町2-3-6)

複数車線上の交通密度分布の時間経過に伴う特性を波動理論を用い分析する。合流の際の車線移行を加味した交通流の連続式を導き、生じる衝撃波の特性を検討する。分岐車線等からの渋滞が直進車を妨げる状況を移動ボトルネックとして捕らえ、交通流の連続式を用い、車線移行により発生する渋滞の特性を明らかにする。これらの分析に加え、分岐、車線選択挙動をモデル化している。これら分析、モデル化により、疑似衝撃波の概念を用いたシミュレーションモデルで信号交差点を含み複数車線で構成される道路ネットワーク上の交通密度分析を可能とした。

**Key Words :** traffic density, hydrodynamic theory, moving bottleneck

## 1. はじめに

Lighthill and Whitham<sup>1)</sup>, Richards<sup>2)</sup>がその基礎理論を確立した波動理論は高速道路の交通流の分析、信号交差点、道路区間の交通流挙動の分析等幅広く応用されている。その中でも、Sasaki, Fukuyama and Namikawa<sup>3)</sup>、福山<sup>4)</sup>は信号交差点を含む道路ネットワーク上の交通密度の動的分析を行うモデルを提示し、波動理論の実用性の高い点を指摘している。

しかしながら、これまでの研究は、複数の車線を有する道路区間であっても、それを一つの交通流の流路とみなし、各車線独自の交通流、車線間移行による車線間の干渉等の挙動は分析の対象としていない。複数車線の道路を上空からビデオで撮れば車線間の車の動きは捉えられる。その分析、再現、また将来予測が可能であれば、施設設計、交通流制御、ドライバーへの情報提供等に有用な情報を得ることができる。

本稿の目的は、ビデオから得られる情報に匹敵する情報を含む時間経過に沿っての複数車線上での交通密度分布を求めることである。それによって、各車線の交通量、車の速度、渋滞の発生状況、総走行距離、総走行時間、時間・距離空間上での車の平均的走行軌跡、旅行時間等の把握も可能となる。

車線移行を考慮した交通流の連続条件式を導き、この条件を用い、車線移行の挙動、渋滞による車線閉塞のもたらす現象を分析する。また、他の交通挙動、例え

ば、信号の現示の変化に伴う行列の発生、消滅、車線の分岐等を踏まえた交通密度分布を求めるシミュレーションモデルを提示する。

Haberman<sup>5)</sup>は、交通流の連続式と交通量・交通密度の関係式から導かれる微分方程式を用い高速道路のランプからの需要の流入出により生ずる本線の交通流挙動の分析を行っている。車線移行による車線間の流入出と沿道と道路間の交通需要の流入出は交通流の挙動モデル化では同一視でき同じ分析手法の適用が可能である。しかし、微分方程式を直接解くHabermanの方法には適用範囲に限界があり、信号交差点での挙動の分析等を含む一般のネットワーク分析への直接の適用は難しい。

また、Gazis<sup>6)</sup>は単車線上の低速車の背後に追い越す待ちで発生する行列の挙動、いわゆる、移動ボトルネック(moving bottleneck)を取り上げている。低速車(slow-moving truck)が先頭を走行している間はその背後に高速車の行列が発生し、低速車が道路から去ると行列が解消されていくが、その過程を波動理論を用いて説明している。本稿では分岐車線から伸びる渋滞が本線の交通流をブロックし車線移行を生じさせる現象を取り扱う。これは、上述の移動ボトルネックが下流に向かうことと対比すると、本稿でのボトルネックは上流に向かう移動ボトルネックということもできる。本稿でのボトルネック分析は Gazis の単車線での基礎的分析を、複数車線の一般的な街路網の分析に拡張し、更に、車線移行の影響を考慮したものといえる。

福山<sup>4)</sup>は分岐車線から溢れた渋滞が本線交通流を妨げる現象を考慮したモデルを提示している。しかし、このモデルでは、複数車線を一路として取り扱い、また、渋滞の流れと、非渋滞の流れを一つの流れにまとめて分析する方法をとっている、車線それぞれの交通流挙動は把握されていない。

その他、高速道路上での交通流に関しては、井上<sup>5)</sup>、Okutani and Inoue<sup>6)</sup>、Stock, Blankenhorn and May<sup>7)</sup>が、街路の交通流に関しては、Stephanopoulos, Michalopoulos and Stephanopoulos<sup>10)</sup>、Michalopoulos, Stephanopoulos and Pisharody<sup>11)</sup>、池之上<sup>8)</sup>、久井、田村<sup>13)</sup>が波動理論を用いた分析を行っているが、いずれの研究も一路に対してのものであり車線間移行の挙動分析は対象としていない。

本稿は以上の研究の成果を踏まえ、波動理論の適用範囲を複数の車線上での交通流の分析にまで展開させようとするものである。

## 2. 車線移行を踏まえた交通流の連続条件式

図-1に示すように道路地点Oで2車線が1車線になる箇所を含む道路区間を考える。地点Oの下流側の車線を「車線0」、下流側車線に直進で繋がる上流側車線を「本線」、本線に合流する車線を「車線S」とする。道路に添つての座標をxとし、地点Oを原点、下流に向かって正とする。時刻はtで現す。車、衝撃波、波の速度はx軸の正方向(下流方向)へ進む場合を正とする。

車線Sを走行している車は地点Oの上流側で車線移行し、本線に合流する。一般に、ドライバーの挙動としては、前方に合流地点があることを知つており手前で余裕をもって車線移行を行うドライバーもいれば、また合流の有無を知る知らざるにかかわらず合流点直前に本線に移るドライバーもある。以下、地点Oでの合流、車線移行という表現を用いるが、渋滞時、非渋滞時にかかわらず、地点Oで合流があることを意識し、安全性を確保した上で合流、車線移行行為を対象としておく。但し、分析は全ての車が地点Oで車線移行を行っていくとして進める。

以下、一つの交通流をその交通量  $q$ 、交通密度  $k$  をカッコ内に入れた  $(q, k)$  の形で表し、「交通流  $(q, k)$ 」、「交通流が  $(q, k)$  の…」等の表現を用いる。また、図中、車線の交通容量、ジャムデンシティを  $\{ \}$  の中に示す。交通密度  $k$  が交通容量に対する交通密度  $k_c$  以下、 $k$

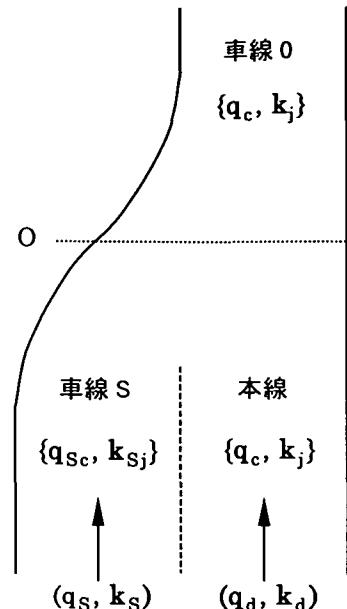


図-1 合流地点車線構成

$\leq k_c$  の交通状態を「非渋滞」、 $k > k_c$  の状態を「渋滞」と呼ぶことにする。一つの交通量  $q$  に対し非渋滞、渋滞の二つの交通密度が存在するが前者を  $K(q)$  で、後者を  $K^*(q)$  で表し、 $(q, K)$ 、 $(q, K^*)$  で交通量が  $q$  である非渋滞流、渋滞流をそれぞれ表すことにする。また、衝撃波は上下流の交通流が与えられれば特定されるが、上下流の一方は衝撃波通過以前の交通流である。それが定義済みであり明らかであれば、特定されていない側の交通流のみで言及し、「上流側交通流、または下流側交通流  $(q, k)$  の衝撃波」等ということにする。

車線0、本線の交通容量は等しく  $q_c$  とし、車線Sの交通容量は  $q_{sc}$  とする。時刻  $t < 0$  で、地点Oの上流の本線、車線Sの交通流をそれぞれ  $(q_d, k_d)$ 、 $(q_s, k_s)$  とする。本線、車線Sの交通量の和が下流車線0の交通容量  $q_c$  以下、 $q_d + q_s \leq q_c$  であれば、地点Oの上流側に渋滞が発生することはなく、車線0の交通量は  $q_d + q_s$  となる。

$t=0$ において、上流側交通流  $(q, k)$  の衝撃波  $W_A$  が本線上地点Oに到達したとする( $W_A$  の下流側交通流は  $(q_d, k_d)$ )、であるが、以下定義済みの側の交通流は先にコメントした様に言及しない。 $q$  と  $q_s$  の和が下流車線0の容量より大、 $q + q_s > q_c$  であれば、車線0の交通量はその容量  $q_c$  となる。また、車線Sから移行していく車と本線を直進する車の合流により地点Oの上流側両車線に渋滞が発生する。

図-2 に本線での、 $t$ - $x$  平面上の車、衝撃波の軌跡、交通流の分布( )内に示す)を示す。車線 S から本線への移行車は塗りつぶした丸の位置で本線へ移り、その後、下流に向かって進む。その軌跡も図中に描いてある。車線 S から本線への車の流入交通量(単位時間あたり車線移行台数)を  $\delta$  とする。下流の車線 0 の交通量は  $q_c$  であるので、本線から車線 0 に抜ける交通量は( $q_c - \delta$ )となる。

上流へ向かう渋滞後尾の衝撃波  $W$  の速度を  $w$  とし、衝撲波  $W_A$  が地点 O に到達した後の T 時間、また、T 時間に衝撲波  $W$  が進む距離、 $-wT$ (上流に向かう  $W$  の速度は負で、その絶対値を取るために負の符号を付けている)の区間で囲まれる図中の長方形の領域、を考える。この領域内での交通流の連続性、すなわち、車の出入りの收支に着目すると、長方形の左辺および底辺からの流入台数プラス車線移行で流入した台数は長方形の上辺、および右辺から流出する台数に等しい。左辺に沿っての交通密度は  $k$ 、底辺に沿っての交通量は  $q$ 、上辺に沿っての交通量は  $q_c$ 、右辺に沿っての交通密度は、交通量( $q_c - \delta$ )に対応する渋滞側の交通密度  $K^+(q_c - \delta)$  である。

交通量には  $T$  を、交通密度には  $-wT$  を乗じ図-2 中に示すように車の台数に変換すれば、流入出の收支計算は以下のようになる。

$$-kwT + qT + \delta T = -K^+(q_c - \delta)wT + q_c T \quad (1)$$

$w$  について解くと以下を得る。

$$w = \frac{q - (q_c - \delta)}{k - K^+(q_c - \delta)} \quad (2)$$

式(1)、(2)は、 $\delta = 0$  であれば、容量  $q_c$  の地点に交通量  $q$ ( $q > q_c$ )の需要が生じている場合の通常の連続の条件、衝撲波の速度を与えていた。式(2)は、車線移行の交通量  $\delta$  ( $\delta > 0$ )により本線から下流側への実質的容量が  $q_c$  から( $q_c - \delta$ )に減少したと解釈出来る衝撲波速度を与えていた。

$\delta$  は流入として上式を導いたがそれを負とすれば流出となる。一般には流入、流出の差を  $\delta$  とし上式を適応すれば良い。例えば、車線 S に生ずる衝撲波の速度は、式(2)に於いて  $q_c$  に対応する値はゼロ(車線 S の下流側には車線が無いため)、 $\delta$  に対応する値は絶対値は等しく符号はマイナスとすることにより得られる。

式(1)、(2)で本線と車線 S の車線移行点を点 O 付近に限定した場合には 2 つの分離した車線の合流現象を分析対象としていることになる。すなわち、式(2)は高速

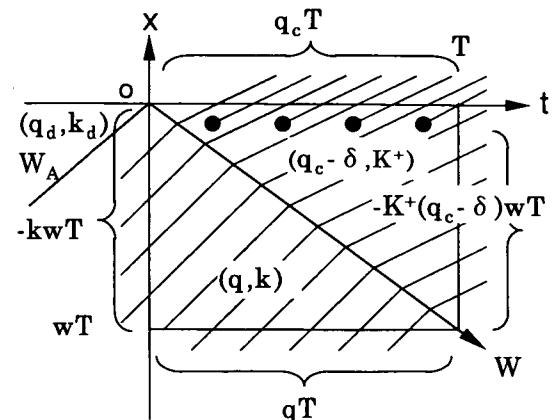


図-2 車の軌跡及び交通流の連続式の成立条件

道路の流入ランプの合流地点等での合流現象にも適用し得る。

$\delta$  の値、上流からの交通量  $q$ 、 $q_s$ 、車線の容量  $q_c$ 、 $q_{sc}$  の値により本線、車線 S に発生する衝撲波の速度は異なる。図-1 のような車線構成での合流の場合で車が渋滞後尾に到達した際には、ドライバーは渋滞長の短い方に着こうとし、結果的に渋滞後尾の位置は両車線とも等しくなる傾向にある。これまでの波動理論によるボトルネックの分析では、本線、車線 S を合わせた流路に対し一つの衝撲波速度が設定されるが、これは、両車線の渋滞後尾が等しくなるように調整された場合を想定していると解釈される。

計算上で、全車線を一流路とした結果と、車線に分けての分析を総合した結果が一致する場合としては『車線の交通容量、ジャムデンシティの総和が流路の交通容量、ジャムデンシティそれぞれに等しく、流路の  $q$ - $k$  曲線と各車線  $q$ - $k$  曲線が相似であり、更に流路の交通量(または、交通密度)、および合流比率が各車線に対する相似比に応じて車線間に割り振られている場合』がある。ここに、流路 R と車線 L の  $q$ - $k$  曲線が相似であるとは、流路 R の  $q$ - $k$  曲線上のすべての点( $q_R, k_R$ )に対し( $\alpha q_R, \alpha k_R$ )となる点が車線 L の  $q$ - $k$  曲線上に必ず一つ存在することである。ここに、 $\alpha$  が相似比である。

点( $q_R, k_R$ )に対応する車線 L の  $q$ - $k$  曲線上の点を( $q_L, k_L$ )とすると 2 つの交通流( $q_R, k_R$ )、( $q_L, k_L$ )間に、 $\frac{q_R}{q_L} = \frac{1}{\alpha}$ 、かつ、 $\frac{k_R}{k_L} = \frac{1}{\alpha}$  の関係が成立する。交通流( $q, k$ )内の車の速度(空間平均速度)は  $q/k$  であり、交通流( $q_R, k_R$ )、( $q_L, k_L$ )内の車の速度  $v_R, v_L$  は、 $v_R = \frac{q_R}{k_R} = \frac{\alpha q_L}{\alpha k_R} = \frac{q_L}{k_L} = v_L$ 、と等しくなる。衝撲波、波

の速度も交通量と交通密度の比であるので、相似の条件が成立すると、全ての車線、流路でのそれら速度は等しくなる。このことは、各車線、流路全てで対応する車、衝撃波、波の軌跡は同位置にあることを意味する。また、流路の交通量、交通密度値は各車線での値の和となる。総旅行時間、総走行距離も同様である。

$q-k$  曲線の中には、交通量  $q$ 、交通密度  $k$  を交通容量  $q_c$ 、ジャムデンシティ  $k_j$  で除し無次元化した量、 $\frac{q}{q_c}, \frac{k}{k_j}$  で表し得るものもある。例えば、2次関数の  $q-k$  曲線は  $\frac{q}{q_c} = 4 \frac{k}{k_j} (1 - \frac{k}{k_j})$  と書ける。このような場合に

は、一つの  $q-k$  曲線に相似である他の  $q-k$  曲線は単に、交通容量、ジャムデンシティを相似比に応じて変えれば得られる。この方法を用いれば、流路の  $q-k$  曲線から各車線の  $q-k$  曲線を簡便的に求めることも出来る。

### 3. 移動ボトルネックでの渋滞挙動分析

信号交差点の右左折への分岐車線に発生した信号待ち行列が直進車線に溢れ出て、直進車の流れを妨げる場合や、流出ランプからの渋滞が本線へ伸びその交通流に影響を与える場合などは車線の閉塞地点が上流へ移動する。ここでは、移動するボトルネックにより形成される渋滞挙動を分析する。

以下、Sasaki, Fukuyama and Namikawa, 福山の提案する疑似衝撃波の概念を用いるので、ここでその概要を述べる。上流側交通流( $q_u, k_u$ )、下流側交通流( $q_d, k_d$ )が接し、 $k_u < k_d$  の事象の生じた時点では交通密度不連続の境界である衝撃波が生じる。それに対し、 $k_u > k_d$  の不連続状態が生じた時点からは  $k_u < k < k_d$  を満たす全ての  $k$  に対する波が生じ、その伝播と共に交通密度は変化して行く。この連続して存在する波を下流側交通密度の小さい密度不連続境界で置き換えたものを疑似衝撃波と呼んでいる。交通密度  $k$  の波の速度は  $q-k$  曲線上の  $k$  の点における接線の傾きであるが、この波を1つの疑似衝撃波で置き換えるとすると、その速度は  $q-k$  曲線上の点( $q_u, k_u$ )、( $q_d, k_d$ )を結ぶ直線の傾きとなる。疑似衝撃波での分析は衝撃波の挙動を規定する微分方程式の近似解を与えており、その数を増すことにより近似の精度は上がる。交通密度が連続して変化する時刻、地点に生じる衝撃波の  $t-x$  平面上での軌跡は曲線となるが、疑似衝撃波を用いれば全て直線の線分の連なりで分析可能となる。

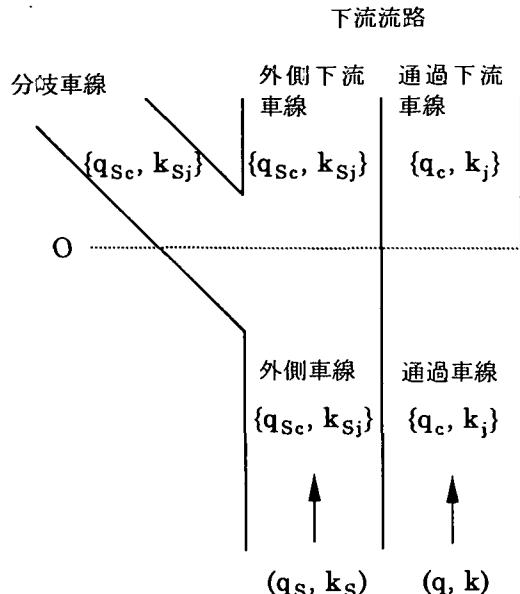


図-3 分岐地点車線構成

以下本章では、波が生じる状況下では、その波を疑似衝撃波で置き換えて分析を進める。疑似衝撃波の挙動は衝撃波と同じであり、疑似衝撃波として特別に取り扱う必要は無いので単に衝撃波として処理し分析は進める。近似に用いる疑似衝撃波数は1つとするが、複数の疑似衝撃波での近似に対しても論理展開は同じである。

図-3 に分岐地点の車線構成を示す。本線、及び分岐車線からなり、分岐車線につながる本線車線を外側車線、直進車の通過の為の車線を通過車線と呼ぶことにする。分岐車線は地点 O で外側車線から分岐する。外側車線の下流を外側下流車線、通過車線の下流を通過下流車線と呼び、両者 2 車線を下流流路と呼ぶ。

通過車線、外側車線の交通容量を、それぞれ  $q_c$ 、 $q_{sc}$ 、ジャムデンシティを  $k_j$ 、 $k_{sj}$ 、 $t < 0$  での通過車線、外側車線の交通流をそれぞれ  $(q, k)$ 、 $(q_s, k_s)$  とする。下流流路の 2 車線の交通容量、ジャムデンシティはその上流側車線のものと同じとする。また、外側車線、分岐車線の容量、ジャムデンシティも同じとする。外側車線には分岐車線へ抜ける車と、下流流路へ直進する車が走行していると想定し、直進車の交通量比率を  $\beta$  とする。以下の考察は  $q_c \geq q_{sc}$ 、 $k_j \geq k_{sj}$  の場合を想定して行う。この条件を満たさない場合には、車線移行を図ろうとする車全ての移行が出来ない場合等が生じ、以下に示すパターンとは別の取り扱いが必要となる。

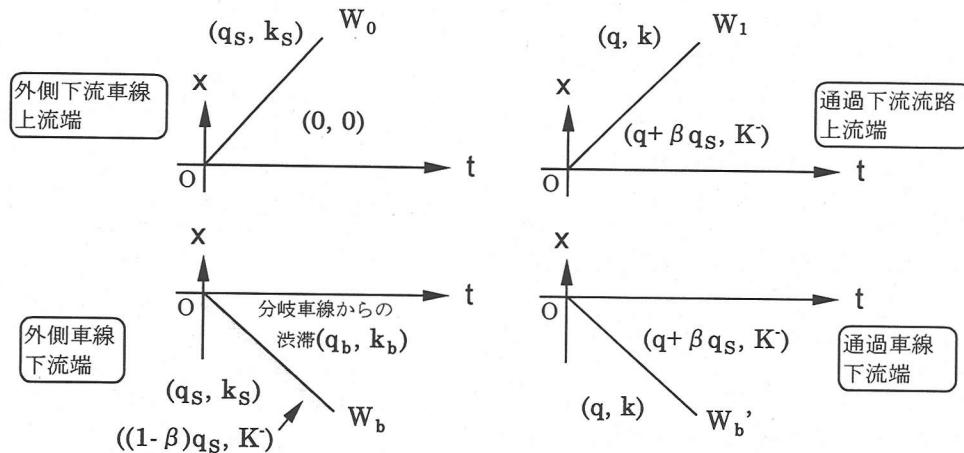


図-4 ケース 1:外側車線閉塞開始時に通過車線に渋滞が発生しない場合の交通流分布

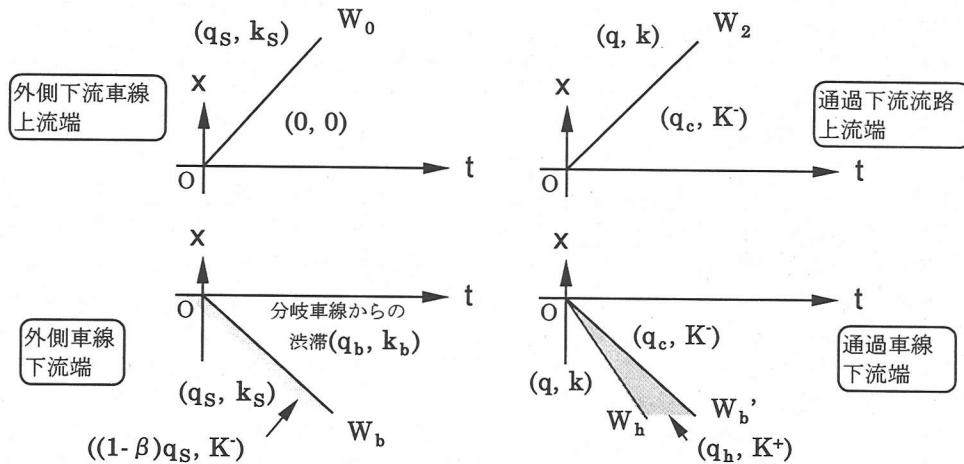


図-5 ケース 2 : 外側車線閉塞開始時に通過車線に渋滞が発生する場合の交通流分布

$t=0$  に分岐車線の渋滞が外側車線に溢れだし外側車線を閉塞し、下流流路への流れを妨げ始めたとする。この渋滞後尾の軌跡(衝撃波の軌跡)を、 $W_b$  とし、その速度を  $w_b$  とする。また、 $W_b'$  を  $W_b$  の位置に対応する通過車線の位置の軌跡とする。以下、(1)外側車線閉塞開始時点で生じる事象、(2)外側車線渋滞の上流への伝播時に生じる事象と、(3)外側車線の渋滞の解消に伴う事象に分けて説明を行う。

#### (1)外側車線閉塞開始時点で生じる事象

分岐車線から外側車線に渋滞が溢れた状況下で生じる事象は、通過車線に渋滞を生じさせるか否かで次のケース 1, 2 に分けられる。

#### ケース1:外側車線閉塞開始時に通過車線に渋滞が発生しない場合

通過車線の交通量  $q$  と外側車線から下流流路へ向かう交通量  $\beta q_s$ 、との和、 $q + \beta q_s$ 、が通過車線の交通容量  $q_c$  以下、

$$q + \beta q_s \leq q_c \quad (3)$$

であれば、交通量  $\beta q_s$  は通過車線に渋滞を発生させる事無く移行出来る。図-4 に外側車線、通過車線、下流流路における  $t$ - $x$  平面上での交通流( $q, k$ )の分布を示す。外側車線の渋滞の衝撃波  $W_b$  の上流側交通量は  $q_s$  であるが、車線移行によりその衝撃波の上流側に沿っての交通量は  $(1-\beta)q_s$  となり、速度  $w_b$  もその交通量に対してのものとなる。

通過車線では直線  $W_b'$  の下流側、上流側交通量がそれぞれ  $q + \beta q_s$ ,  $q$  となり、交通量(及びそれに対する非渋滞交通密度)が不連続に接することになる。また、交通量が  $\beta q_s + q$  の区間が生じることにより、通過下流車線には、交通流( $q$ ,  $K$ )と( $q + \beta q_s$ ,  $K$ )の領域を分ける衝撃波  $W_1$  が発生する。外側下流車線の交通量はゼロとなり、上流側交通流( $0$ ,  $0$ )の衝撃波  $W_0$  が生じる。

### ケース2: 外側車線閉塞開始時に通過車線に渋滞が発生する場合

通過車線の交通量と車線移行する交通量の和が、通過車線の交通容量を越える場合、

$$q + \beta q_s > q_c \quad (4)$$

には、円滑な車線移行はできなくなり、通過車線への移行点の上流に渋滞が発生する。以下、交通量  $\beta q_s$  の全てが通過車線に移行すると想定する。実際には外側車線から通過車線へ移行する機会を見いだせず、渋滞解消迄その車線に留まる車がある場合も考えられるが、渋滞が長くなるとこの可能性は少なくなると想定される。

図-5 に外側車線、通過車線、下流流路における  $t$ - $x$  平面上での交通流( $q$ ,  $k$ )の分布を示す。通過車線の  $W_b'$  下流側交通流は交通容量  $q_c$  となる。今、上流側の渋滞の交通量を  $q_b$  とする。

$W_b'$  を境に交通量、交通密度は不連続であるが、交通流の連続の条件は満たしている必要がある。 $W_b'$  の下流側においては、外側車線から移行していく交通量  $\beta q_s$  を除くと、その交通量は( $q_c - \beta q_s$ )、交通密度は、 $K^-(q_c - \beta q_s)$  である。 $W_b'$  は速度  $w_b$  で移動しているので、式(2)の条件が満たされている必要があり、従って  $q_b$  は以下の式を解くことにより求められる。

$$w_b = \frac{q_b - (q_c - \beta q_s)}{K^+(q_b) - K^-(q_c - \beta q_s)} \quad (5)$$

第2章での車線減少の場合は式(5)で  $w_b=0$  と置いた場合に相当する。この場合は、 $q_b = q_c - \beta q_s$  である。すなわち、閉塞地点が移動しない場合はその上下流の交通量は等しい。但し、交通密度は異なる。

2次式の  $q$ - $k$  曲線では、式(5)は  $K^+(q_b)$ について解くことが出来、以下を得る。

$$K^+(q_b) = k_j \left\{ 1 - \frac{w_b}{v_f} - \frac{K^-(q_c - \beta q_s)}{k_j} \right\} \quad (5)'$$

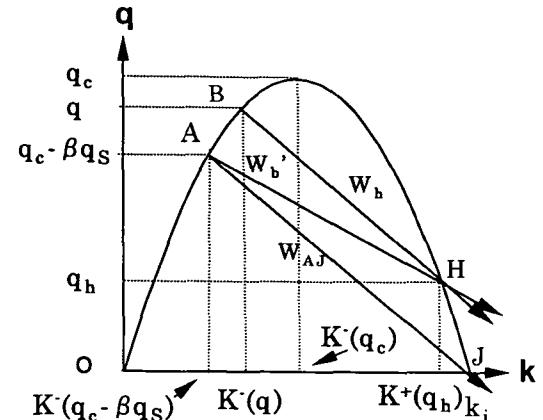


図-6 通過車線上衝撃波の  $q$ - $k$  曲線上の解釈

図-6 に式(5)の解釈を通過車線の  $q$ - $k$  曲線上で示す。図-6 中の点 A が交通流( $q_c - \beta q_s$ ,  $K^-$ )に対応する。点 A からの傾き  $w_b$  の直線(図中  $W_b'$ )が、 $q$ - $k$  曲線の渋滞領域に交わる点、H が式(5)を満たす交通流( $q_b$ ,  $K^+$ )に対応する点である。

$K^+(q_b)$  の値は、ジャムデンシティ、 $k_j$  を越えないもので、 $W_b'$  の傾きの絶対値の最大は、図中点 A と点 J(交通密度  $k_j$  の点)を結ぶ直線  $W_{AJ}$  の傾きとなる。 $W_{AJ}$  が  $W_b'$  となるのは  $q_c = q_{se}$ ,  $k_j = k_{sj}$  の場合で、 $W_b'$  の上流側の交通量はゼロ、交通密度はジャムデンシティとなる。

$q \leq q_c$  の条件、また不等式(4)の条件から  $q$  は条件、 $q_c - \beta q_s < q \leq q_c$  を満たす。 $q$ - $k$  曲線上で、交通流( $q_b$ ,  $K^+$ ), ( $q$ ,  $K$ )の境の衝撃波、 $W_b$  の速度を示す直線は、 $q$  がこの不等式を満たしていることから、図-6 中の点 B, 点 H を結ぶ直線、 $W_b$  の様に位置することになる。 $W_b$  の上流方向への伝播速度は  $W_b$  の伝播速度より速く、時間の経過と共に、交通流( $q_b$ ,  $K^+$ )の区間長は増加する。その状況も図-5 に示してある。その他通過下流車線には、下流側交通流( $q$ ,  $k$ )、上流側交通流( $q_c$ ,  $K$ )とする衝撃波  $W_2$  が、また、外側下流車線には、ケース 1 の場合と同様、上流側交通流( $0$ ,  $0$ )の衝撃波  $W_0$  が生じる。

### (2)外側車線渋滞の上流への伝播時に生じる事象

上述ケース 1 の状態、すなわち、外側車線には渋滞があるが、通過車線には発生していない状態、が  $t_1$  時

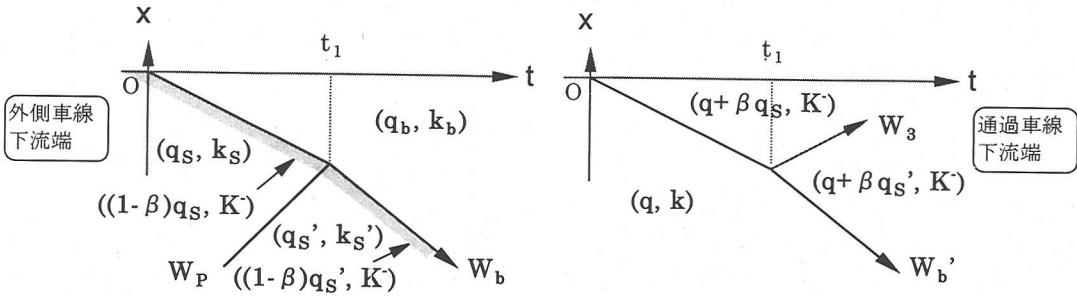


図-7a ケース3: 外側車線で  $W_b$  と  $W_p$  が衝突、通過車線に渋滞発生無し

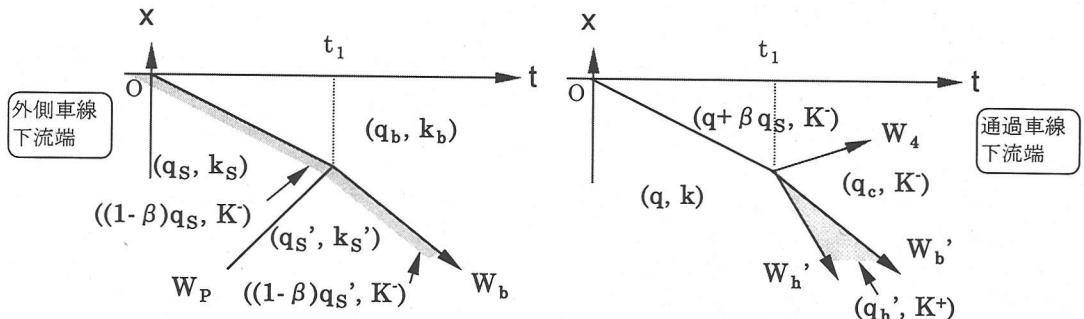


図-7b ケース4: 外側車線で  $W_b$  と  $W_p$  が衝突、通過車線に渋滞発生

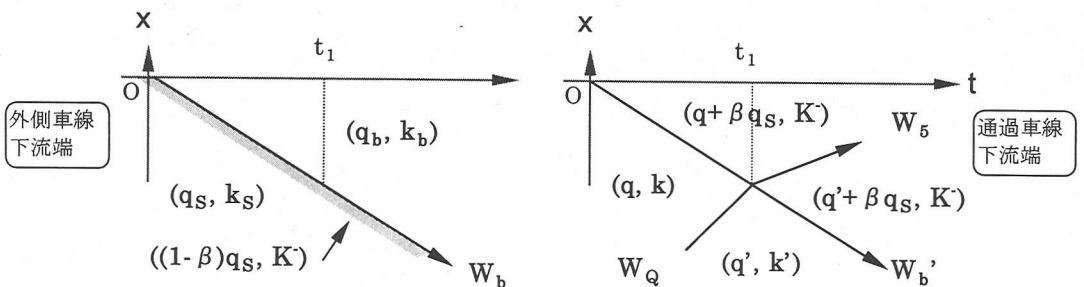


図-7c ケース5: 通過車線で  $W_b'$  と  $W_Q$  が衝突、通過車線に渋滞発生無し

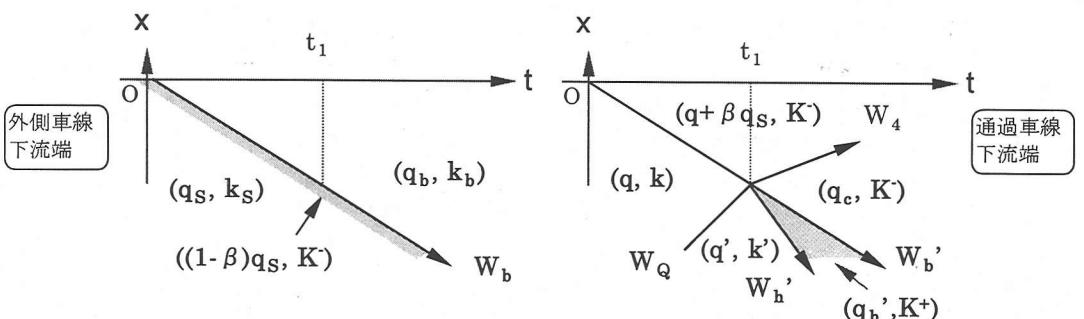


図-7d ケース6: 通過車線で  $W_b'$  と  $W_Q$  が衝突、通過車線に渋滞発生

図-7 分岐車線からの渋滞によって生ずる道路区間内での交通流挙動

間経過した時点で、上流からの衝撃波が外側車線の  $W_b$ 、または、通過車線の  $W_b'$ に到達した場合を整理分析する。この場合も通過車線に渋滞が発生する場合としない場合があり、四つの場合に分けられる。

図-7a, b には外側車線の  $W_b$  に上流からの衝撃波  $W_p$ (上流側交通流( $q_s$ ,  $k_s$ '))が到達した場合の t-x 平面での事象を描いている。これは、図-4, 5 の分岐点での事象を道路区間の途中に移したものとなっている。図-7c, d は通過車線の  $W_b'$ に上流からの衝撃波  $W_q$ (上流側交通流( $q'$ ,  $k'$ ))が到達した場合の図である。また、図-7a, c は通過車線に渋滞の発生の無い場合の、図-7b, d は通過車線に渋滞の発生がある場合の図である。

図-7a の外側車線の図(左側の図)には、 $W_b$  と  $W_p$  が  $t=t_1$  に衝突し新たな衝撃波(図中矢印を付けた太線)を生じさせている状況が描かれている。一般に 2 つの衝撃波が衝突すると、その 2 つに挟まれる領域は閉じ、新たに、上流側衝撃波の上流の交通流と、下流側衝撃波の下流の交通流との間の衝撃波が発生する。図では  $W_b$  と  $W_p$  で挟まれる交通流( $q_s$ ,  $k_s$ )の領域が閉じ、交通流( $q_b$ ,  $k_b$ )と交通流( $q_s'$ ,  $k_s'$ )の領域に挟まれる衝撃波が発生している。

衝突の結果として  $W_b$  の軌跡が定まれば、それに対応し右図に示す通過車線上の  $W_b'$ の軌跡が決まる。以下、各図に対応する交通流の条件、生ずる衝撃波、その特性等をまとめると。

ケース 3: 外側車線で  $W_b$  と  $W_p$  が衝突、通過車線に渋滞発生無し(図-7a)

この事象の生じる条件は  $q + \beta q_s' \leq q_c$  であり、ケース 1 の場合での  $q_s$  を  $q_s'$ に置き換えたものである。 $t=t_1$  以降、 $W_b'$ の下流側交通量は  $q + \beta q_s'$ となる。また、 $t=t_1$  に上流側交通流、( $q + \beta q_s'$ ,  $K$ )下流側交通流( $q + \beta q_s$ ,  $K'$ )である衝撃波  $W_3$  が  $W_b'$ から下流方向に分岐する。以下の 3 ケースにおいても、 $W_b'$ の下流に生じる交通流に応じて  $W_3$  の様に下流に向けて衝撃波が発生するが、それらは図中に示すに留め、文中では特に言及しない。

ケース 4: 外側車線で  $W_b$  と  $W_p$  が衝突、通過車線に渋滞発生(図-7b)

ケース 2 の場合と同様、 $q + \beta q_s' > q_c$  であればの上流側に渋滞が発生する。渋滞の交通流を( $q_b$ ,  $K'$ )、渋滞

上流側衝撃波を  $W_b$ ’とし図中に示している。これらの決定方法はケース 2 で( $q_b$ ,  $K'$ ),  $W_b$ ’を求めた方法に準ずる。下流側交通量は容量  $q_c$  となる。

ケース 5: 通過車線で  $W_b'$ と  $W_q$  が衝突、通過車線に渋滞発生無し(図-7c)

$W_q$  の上流の交通量  $q'$ と外側車線から移行してくる交通量  $\beta q_s$ との和、 $q' + \beta q_s$  が通過車線の交通容量、 $q_c$  以下、 $q' + \beta q_s \leq q_c$  であれば、通過車線に渋滞は発生しない。 $t=t_1$  以降、 $W_b'$ の下流側交通量は  $q' + \beta q_s$  となる。

ケース 6: 通過車線で  $W_b'$ と  $W_q$  が衝突、通過車線に渋滞発生(図-7d)

ケース 5 の場合に対し、 $q' + \beta q_s > q_c$  であればの上流側に渋滞が発生する。ケース 4 の場合と同様、渋滞の交通流( $q_b$ ',  $K'$ )、渋滞上流側衝撃波  $W_b$ '決定方法はケース 2 で( $q_b$ ,  $K'$ ),  $W_b$ 'を求めた方法に準ずる。 $W_b$ 'の下流側交通量は容量  $q_c$  となる。

### (3)外側車線の渋滞の解消に伴う事象

$W_b$  に下流からの衝撃波が到達した場合、すなわち、分岐車線からの渋滞の解消時の事象を分析する。渋滞が解消に向かえば、外側車線から通過車線へ移行する車はなくなりボトルネックは消失する。分析対象は通過車線に渋滞がある場合、無い場合に分けられる。外側車線上を上流へ向かう衝撃波、 $W_L$ (下流側交通流( $q_b$ ',  $k_b'$ )))が、 $t=t_2$  に  $W_b$  に到達した場合の t-x 平面での交通流挙動を図-8a, b に示す。図-8a, b は図-4, 5 の事象下を想定して描いてあるが、図-7 の場合でも同じように考えることが出来る。以下、各図に対応する交通流の条件、生ずる衝撃波、その特性等をまとめる。

ケース 7: 通過車線に渋滞の存在しない場合(図-8a)

外側車線では、 $W_b$  と  $W_L$  の衝突後、上流側交通流( $q_s$ ,  $k_s$ )の衝撃波  $W_T$  が発生する。通過車線では、その衝突時点で  $W_b$ 'の伸びは止まり、その先端からは下流側交通流( $q + \beta q_s$ ,  $K'$ )、上流側交通流( $q$ ,  $k$ )である衝撃波  $W_6$  が発生する。

ケース 8: 通過車線に渋滞の存在する場合(図-8b)

外側車線での事象、通過車線での  $W_b$ 'の挙動は図-8a の場合と同じである。 $W_b$ 'の伸びが止まった点から渋

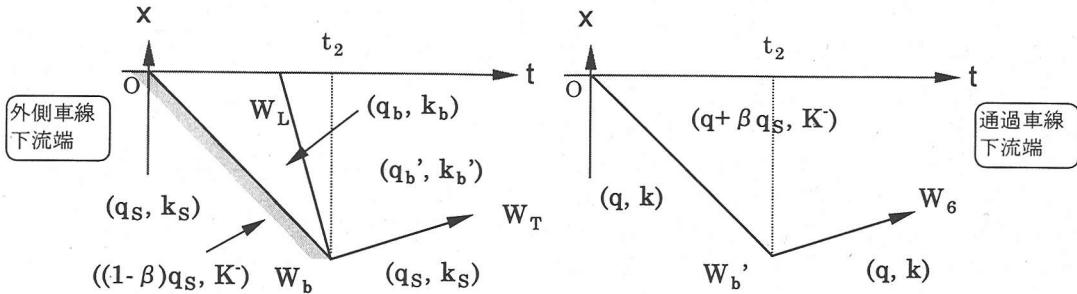


図-8a ケース7:通過車線に渋滞の存在しない場合

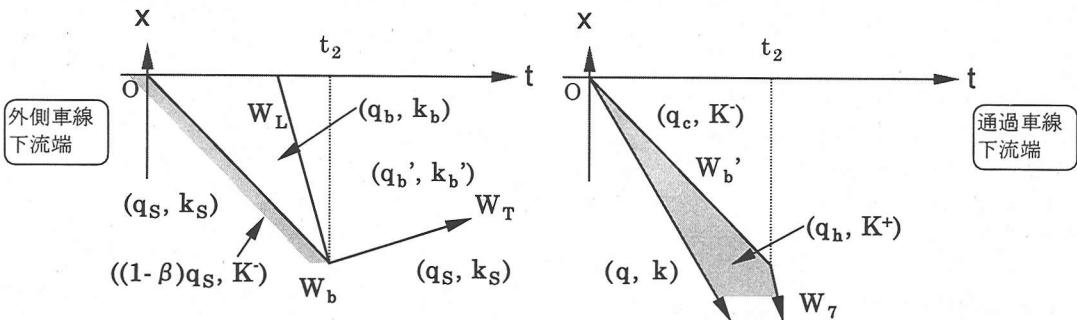


図-8b ケース8:通過車線に渋滞の存在する場合

図-8 分岐車線からの渋滞の解消に伴う交通流挙動

滞の解消が始まると、それに対応する衝撃波は下流側交通流( $q_c, K^-$ )、上流側交通流( $q_h, K^+$ )の  $W_7$  となる。ここでは、交通密度  $K^-(q_c)$  から  $K^+(q_h)$  に亘る連続した波を疑似衝撃波  $W_7$  で置き換え近似している。

以上、本線が2車線の場合を対象に考察してきたが、通過車線が複数の場合もダミーの道路区間を挿入することにより上記と同様の分析の適用が可能である。たとえば、通過車線が2車線の場合で、それらを通過車線1、通過車線2とし、通過車線1が外側車線と隣接しているとする。この場合には通過車線1のダミー区間を分岐車線に、通過車線1、2のダミー区間の上流車線を外側車線、通過車線に見なし、また外側車線の下流車線が存在しない場合とすれば良い。分岐の場合に限らず、渋滞回避の車線移行の生じる地点があらかじめ特定出来る場合には同様の考え方での分析が可能である。

#### 4. 交通密度分布構築シミュレーション

福山は信号交差点を含む道路網を、道路区間一方向をリンクとするネットワークでモデル化し、そのネットワーク上の交通密度分布を構築していくシミュレーションモデルを提示している。信号現示の変化、衝撃波・疑似衝撃波の衝突、リンクへの流入出等の事象で衝撃波、疑似

衝撃波は発生するが、それら衝撃波、疑似衝撃波は  $t$ - $x$  平面上に交通密度の不連続の境界を描きつつ進む。これらの交通流の挙動の分析を通じ、交通密度分布は以下の2ステップの繰り返しで描き得ることを示している。

- 衝撃波、疑似衝撃波の発生、衝突などの事象のなかで最も早い時点に生じる事象を見い出す。
- その事象に応じ衝撃波、疑似衝撃波を発生させる。

上記シミュレーションの原理は、道路網を構成する道路区間を車線に分割しモデル化したネットワークに対しても適用可能である。ネットワークが車線で構成されれば、第3章ケース1~8での車線移行、合流に伴う交通現象も衝撃波・疑似衝撃波を発生させる事象としてシミュレーションの中に取入れることが出来る。

車線で構成されているネットワークの場合、車の走行経路は車線選択の連なりで特定することになる。ネットワーク上での交通流の分析で車線選択に関係する事象としては、車線の分岐地点での交通流の分岐、および道路区間途中での目的地への経路選択に伴う車線移行がある。以下、これらの2事象を本シミュレーションで処理する方法をまとめる。

### (1) 単車線から2つの単車線への分岐

単車線道路の2つの単車線道路へ分岐、単車線道路から2車線道路への移行、また、信号右左折車線から本線への流入地点等での分岐を処理する必要がある。これらの分岐では上流での車線移行は無く、一つの分岐先からの渋滞が他分岐先への車の流れを妨げればそれらは渋滞の中に留まることになる。第3章での分岐の際でも、分岐車線から本線への渋滞車列の延伸以前から通過車線に渋滞があり、その渋滞で車線移行による回避が出来ない場合には同じ状況下として取り扱うことになる。

分岐車線を車線1、車線2とし、分岐元車線からそれら車線への交通量の分岐率をそれぞれ  $p$ 、 $(1-p)$ とする。分岐元車線が交通流( $q$ ,  $k$ )の状態、従って、車線1, 2は交通流( $pq$ ,  $K'$ ),  $((1-p)q, K')$ の状態である時点からの事象を考える。以下の2つの場合に分け処理し得る。

i) 上流からの衝撃波(上流側交通流( $q'$ ,  $k'$ ))が分岐点に達した場合

車線1, 2の上流端から、上流側交通流がそれぞれ( $pq'$ ,  $K'$ ),  $((1-p)q', K')$ の衝撃波を発生させる。

ii) 車線2から衝撃波(下流側交通流( $q_b$ ,  $k_b$ ))が分岐元車線に達した場合

分岐元車線の下流端交通量は式  $q_b/(1-p)$ で計算されるが、交通量は分岐元車線の交通容量  $q_c$ 、以上にはなり得ないので以下の2つの場合に分けられる。

a.  $q_b/(1-p) \leq q_c$  の場合

分岐元車線の下流端から下流側交通流( $q_b/(1-p)$ ,  $K'$ )の衝撃波を、車線1の上流端からは上流側交通流( $pq_b/(1-p)$ ,  $K'$ )の衝撃波を発生させる。

b.  $q_b/(1-p) > q_c$  の場合

分岐元車線の下流端から下流側交通流( $q_c, K'$ )の衝撃波を、車線1, 2の上流端からは上流側交通流がそれぞれ( $pq_c, K'$ ),  $((1-p)q_c, K')$ の衝撃波を発生させる。

上記 ii)では車線2からの渋滞の衝撃波の延びを対象としたが、車線1からの渋滞の場合も同様に処理し得る。また b. の場合は車線2からの衝撃波が渋滞の解消の衝撃波である場合のみが対象となり、それが渋滞後尾である場合は考慮する必要はない。単車線が2車線以

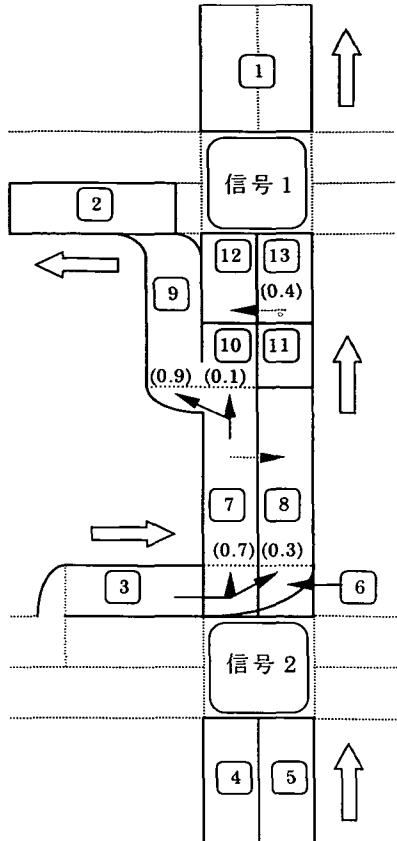


図-9 計算例として用いる道路の車線構成

上へ分岐する場合にはダミーの車線を導入することにより対応出来る。

### (2) 車線選択挙動による車線移行

ドライバーは沿道からの影響、右左折の影響の無い車線を選択しつつ走行し、目的地へ分岐する交差点に近づくと、右左折等の出来る車線へ移行する傾向にある。本シミュレーションでは、車線移行可能区間を設定し、そこでの車線移行率を与えることにより車線選択挙動に対応する。一車線から隣接する車線への移行が生じる場合、前者を移行元車線、後者を移行先車線と呼ぶことにする。下流から渋滞が延びてきた際の、渋滞の移行地点の特定のため、車線移行可能区間の上流端は車線移行が生じうる最上流端に設定しておく。この最上流端の候補地点としては、分岐地点の下流側で分岐車線からの渋滞の影響を受けず、また交通量も少なくなっている地点等となる。車線移行可能区間の下流端は分岐、合流点の上流地点とすれば良い。

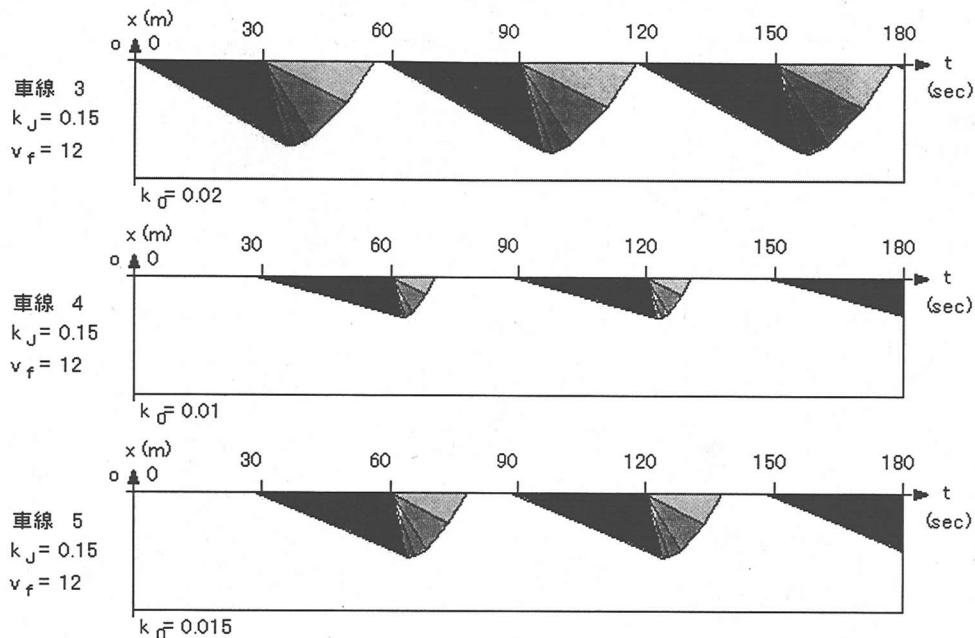


図-10 計算対象となる道路区間への流入需要

車線移行は車線移行可能区間のどの地点でも、ドライバーが移行を意図し、車間ギャップが見いだされれば行われる。しかしながら、本モデル化では、移行先車線の下流からの渋滞の延びへの対処、モデルの簡素化の理由から、全ての車線移行は車線移行可能区間上流端でなされると想定する。これにより、単車線の分岐と類似のモデル化が可能となる。たとえば、上述の分岐の処理の際の車線 1, 2 を移行元車線、移行先車線に、また、分岐元車線を移行元車線の上流車線に対応させれば良い。以下、車線移行処理の際の考慮事項をまとめる。

#### a) 移行元車線上流端への上流からの衝撃波の到達

- ・ 上述分岐の i) と同様に衝撃波を発生させるが、移行先車線の流れにはその上流車線からの交通量を加える。
- ・ 移行先車線に渋滞があり車線移行が制限される場合は、車線移行を意図する車により移行元車線の上流車線に渋滞が生じる。この渋滞の衝撃波を発生させる。
- b) 移行元車線下流からの衝撃波の上流端への到達
- ・ 上述分岐の ii) と同様に衝撃波を発生させるが、移行先車線の流れにはその上流車線からの交通量を加える。
- c) 移行先車線下流からの衝撃波の上流端への到達
- ・ 移行先車線の上流車線の交通量がゼロの場合は 分岐の ii) と同様の処理で衝撃波を発生させる。
- ・ 移行先車線の上流車線の交通量がゼロでない場合は、移行元車線、移行先車線の上流車線双方に渋滞流は延びるので、それらの下流端に衝撃波を発生させる。こ

の際、渋滞がジャムデンシティでない場合(渋滞解消時で車が流れている場合等)には上流車線双方から移行先車線へ流入する交通量は等しい(交互に合流している)とする。

・ 移行元車線、移行先車線には、分岐の ii) と同様の処理で衝撃波を発生させる。ただし、b) の場合、移行元車線からの移行交通量の減少分は移行先車線上流車線から下流への流出増となり、移行先車線の交通流は変化しない。移行先車線上流車線では渋滞の解消速度が早まるので、それに対応した疑似衝撃波を発生させる。

## 5. 計算例

図-9 に示す車線構成の道路を例により交通密度分布を求める。上方に向かう一方向 2 車線道路に、信号 1 で左方向に、信号 2 で右方向に、交差する一方向 2 車線の道路がある場合を想定している。対象とする車線は番号を付けている 13 車線である。車線 1, 2 はネットワーク下流端での流出先を特定するための流路、車線であり、交通密度分布算定対象とはしていない。車線長は、車線 3~5 が 80m, 7, 8 が 100m, 9 が 40m, 12, 13 が 35m, 6, 10, 11 が 5m である。計算対象車線のジャムデンシティは 0.15 台/m で、自由走行速度は 12m/秒である。q-k 曲線は 2 次式としている。

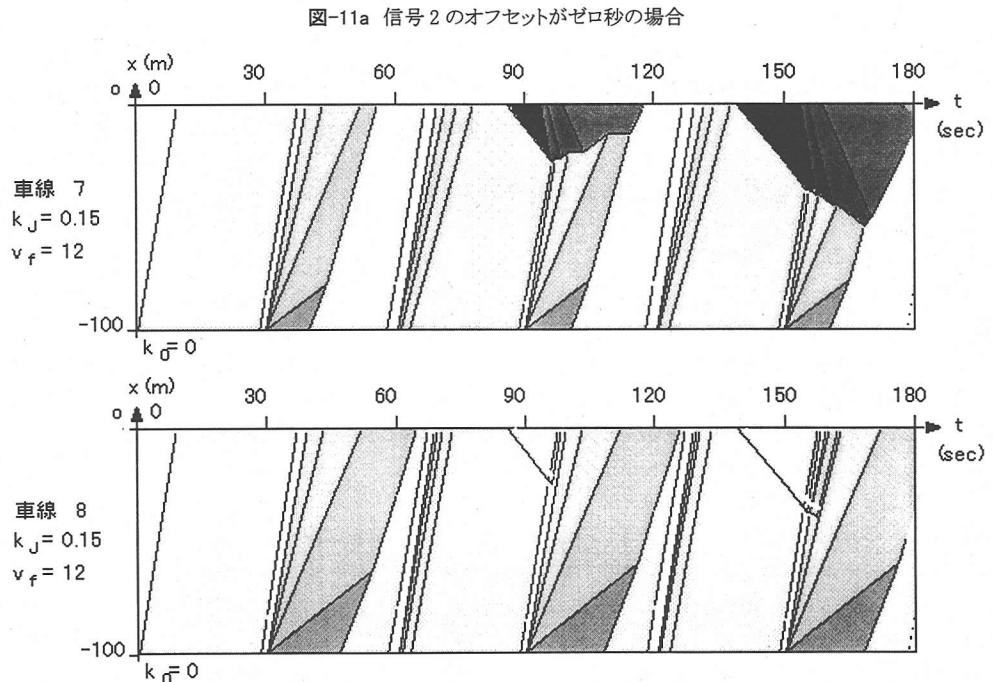
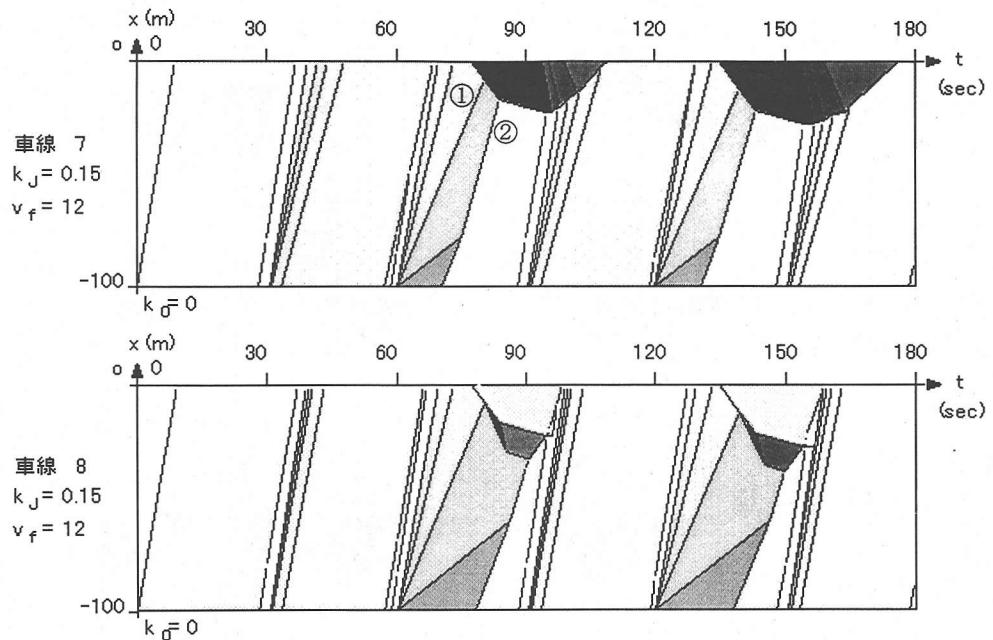


図-11 分岐車線からの渋滞により形成される交通密度分布

車線 6 は左折車線から本線への流入の際の分岐のため挿入したダミーの車線である。分岐率は車線 7, 8

に対し、それぞれ、0.7, 0.3 としている。車線 7 は車線 9, 10 に分岐し、分岐率はそれぞれに対し、0.9, 0.1 である。車線 9 から 7 に渋滞が延びてきた場合に車線 8 が移行

先車線になるとする(図中破線の矢印で移行方向を示している)。車線 12, 13 は車線選択挙動による車線移行可能区間で車線移行率は、0.4 としている(図中破線の矢印で移行方向を、( )内に移行率を示している)。車線 10, 11 は車線移行可能区間上流端を特定するために挿入した車線である。

信号 1, 2 の周期は 60 秒で、上方向、左折を第 1 現示とそれに交差する方向を第 2 現示としている。スプリットは全て 28 秒とし現示間に 2 秒の全赤時間をとっている。

交通需要は車線 3, 4, 5 に車線に沿っての初期交通密度を与えることにより発生させている。各初期交通密度は、それぞれ、0.02 台/m, 0.01 台/m, 0.015 台/m である。信号 1, 2 の間のオフセットが 0 の場合での車線 3, 4, 5 の交通密度分布を図-10 に示す。疑似衝撃波数は非渋滞側、渋滞側それぞれ 4 つとしている。ジャムデンシティを黒、交通密度ゼロを白とし、その間の交通密度は階調の異なる灰色で示す。図中各車線の図の左下の  $k_0$  は初期交通密度分布の値である。この図の交通流の分布が車線 7, 8 への流入需要となる。

図-11 にシミュレーションの結果として得られる交通密度分布を示す。図-11a, b はそれぞれ信号 1, 2 間のオフセットがゼロ、30 秒とした場合の図である。各図、車線 7, 8 を並べている。車線 7 での渋滞は左折車線 9 より延びてきた渋滞である。車線 7 のジャムデンシティの上流側の軌跡が第 3 章で述べた  $W_b$  である。それに対応する車線 8 の  $W_b'$  の軌跡は下部を白抜きにして表示している。

図-11a の車線 7 での 2 周期目に着目すると、渋滞後尾には上流車線 4 からの流れが来ており、上流から到達した衝撃波①により車線 8 の  $W_b'$  の上流に車線移行による渋滞が発生している。これは第 3 章のケース 6 の渋滞発生事象である。その状態下に、更に衝撃波②が到達し、交通密度の異なった渋滞領域が生じている。渋滞解消開始時、 $W_b'$  の先端からは第 3 章ケース 7 の衝撃波が発生していることも分かる。第 3 周期目にも同じ現象が見られる。

図-11b では  $W_b'$  の上流に渋滞は発生していない。これは、 $W_b$  に到達している上流からの需要が車線 3 から車線 7, 8 に分岐した流れであり、図-11a の場合に比べて需要が少ないからである。この例から、オフセットで渋滞後尾への到達需要を制御し渋滞の発生を回避することも可能な場合があることが分かる。

車線 8 の  $W_b'$  に到達した衝撃波は第 3 章のケース 5 の衝撃波を生じさせている。

## 6.おわりに

複数車線上での交通流挙動を波動理論を用い分析した。合流の際の車線移行を加味した交通流の連続条件を検討し、そこに生じる衝撃波の速度を導いた。分岐車線からの渋滞を上流へ向かう移動ボトルネックとして捕らることにより、車線間の相互作用を踏まえた交通密度分布を描き得た。更に、分岐、車線選択挙動での車線移行のモデル化により、時間・距離平面上での交通密度分布をシミュレーションで構築し得ることを示した。

数値計算例を通じて理論的検討に即した交通密度分布パターンがシミュレーションで得られる事を示した。また、需要の条件によっては、オフセットにより車線移行による渋滞の発生を制御し得ることも明らかにした。

本稿では、信号交差点を含む街路網を対象に考察を行ったが、高速道路を含むネットワークへの拡張も可能と考えられる。モデル化にあたってはトールゲートでの待ち行列の処理等を更に取り入れる必要がある。

本稿で示したシミュレーションは信号交差点、車線構成等、道路を構成する基本的要素、および個々の信号の制御パラメータ設定を踏まえた上で、道路ネットワーク全体を捕らえるモデルとなっている。原理的にはネットワーク規模には制約は無い。ネットワークを構成する信号数、車線数が多くなれば、計算機容量、計算時間等の制約は生じるが、これらは複数の計算機をネットワーク化するなどで対応可能と考えられる。従って、本稿のシミュレーションモデルの適用範囲は広く、例えば、局所的には単独交差点の構造、制御パラメータ値の交通流に与える影響の評価、また、ネットワーク全体に亘っては、広域交通制御の効果評価を行うための渋滞発生状況、旅行時間の予測等にも適用可能と考えられる。

今後、画像処理技術の進歩等により、収集できる交通情報も多量となり、それら情報をいかに効果的に制御、設計に反映させ得るかが課題となってこよう。本稿での交通密度のシミュレーションは多量の情報を包含する動画像の分析の一手段であり、現在は人の目でしか捕ら得ない情報をコンピューターで機械的に処理するシステムの一端を担い得ると考えられる。

## 参考文献

- 1) Lighthill, M.J. and Whitham, G.B. : On Kinematic Waves II : A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads, *Proc. Roy. Soc. Ser.A*229, No. 1178, pp.317-345, 1955.
- 2) Richards, P.I. : Shock Waves on the Highways, *Oper. Res.*, Vol. 4, No. 1, pp. 42-51, 1956.
- 3) Sasaki Tsuna, Masaharu Fukuyama and Yoshiharu Namikawa : An Approximative Analysis of the Hydrodynamic Theory and a Formulation of a Traffic Simulation Model, *Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 1984 VNU Science Press, pp.1-20.
- 4) 福山正治:波動理論モデルによる交通密度分析, 土木学会論文集, No.488/IV-23, pp.31-40, 1994.4.
- 5) Haberman Richard : *Mathematical Models-Mechanical Vibrations, Population Dynamics, and Traffic Flow*, Prentice-Hall, Inc., pp385-393, 1977.
- 6) Gazis Denos C., Editor : *Traffic Science*, John Wiley & Sons, Inc., pp67-69, 1974.
- 7) 井上矩之:都市間高速道路の交通制御に関する基礎的考察, 京都大学博士論文, 昭和 48 年.
- 8) Okutani Iwao and Noriyuki Inoue : Estimation of Traveling Time Between Ramps and Discharge Control on Expressway. *Proc. of JSCE*, No. 211, pp.100-112, March 1973.
- 9) Stock, W.A., Blankenhorn, R.C. and May, A.D. : Freeway Operations Study - Phase III, Report No.73-1 The FRQ3 Freeway Model, The Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Special Report June 1973.
- 10) Stephanopoulos, G., Michalopoulos, P.G. and Stephanopoulos, G. : Modeling and Analysis of Traffic Queue Dynamics at Signalized Intersection, *Trans. Res.*, Vol.13A, pp.295-307, 1979.
- 11) Michalopoulos, P.G., Stephanopoulos, G. and Pisharody, V.B. : Modeling of Traffic Flow at Signalized Links, *Trans. Sci.* Vol. 14, pp.9-41, 1980.
- 12) 池之上慶一郎:系統信号における過飽和交通流の波動理論による研究, 科学警察研究所報告交通編, Vol.24, No.1, pp.12-22, 1983.
- 13) 久井守, 田村洋一:複数リンクからなる系統信号システムの待ち行列と衝撃波の動的解析, 土木学会論文集, No.431/IV-15, pp.87-96, 1991.7.

(1996.11.28 受付)

## AN ANALYSIS OF TRAFFIC DENSITY ON ROAD NETWORK COMPOSED WITH PLURAL LANE LINKS

Masaharu FUKUYAMA

The behavior of traffic density on plural lanes is analyzed applying hydrodynamic theory. The flow continuity, including an effect of vehicle lane change at a merging point, is derived in a form of a shock wave velocity. This equation is used to analyze a moving bottleneck on a main road caused by congestion spilled from a branching lane. It is shown that shock waves are formed when vehicles change lanes to avoid slower traffic, thus eventually blocking the faster moving lane. A simulation method which uses a concept of quasi-shock waves is applied to draw a traffic density distribution on the time distance space of the road network composed with signal intersections and plural lane links.