

合流部シミュレーションモデルの開発と入路制御モデルへの展望

立命館大学理工学部教授

卷 上 安 爾

1 はじめに

2000年頭初からの一年間における阪神高速道路の利用交通量は、前年と比べて、ほとんど増加していないものの、1号環状線へ向かう放射線上りの合流部や神戸線中心部から始まる渋滞の発生状況は、その発生回数や渋滞量から見る限り増加傾向を見せ始めている。特に11号池田線上りの塚本入路を頭とする交通集中渋滞は、ピーク時には豊中南入路を越えて延伸する等、今後の景気の動向によってはさらに深刻な状況となる可能性も否定できない。このため11号池田線上り方向の交通に対する渋滞対策の検討の必要性が高まっている。この渋滞対策検討のため、1号環状線湊町合流部における改良計画の評価のため開発された合流シミュレーションモデルを活用して各放射線上りで見られるように複数の連続して設置されている入路からの交通を適切に制御する手法を検討するためのツールとして入路制御シミュレーションモデルの開発が進められている。本報告は上記合流シミュレーションモデルの概要を紹介するとともに、今後ますますその必要性が高まると考えられる放射線上り交通に対する路線制御検討に欠くことのできない入路制御モデル開発へ向けた展望を示すものである。

2 合流シミュレーションモデルの概要

2-1 シミュレーションの目的とモデルの型式

阪神高速道路1号環状線の湊町入路は環状線と15号堺線の合流部の両者の間を割り込むような構造となっている。すなわち、堺線、湊町入路、環状線の三路線が湊町付近で合流するという交通運用上厳しい構造となり、この結果、渋滞が頻発する状況となっている。このような状況を踏まえ、図-1に示す

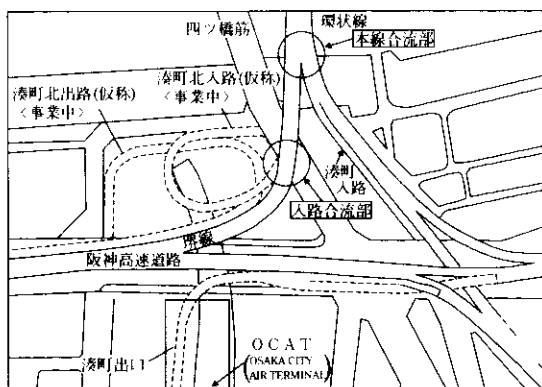


図-1 湊町出入路移設計画(案)

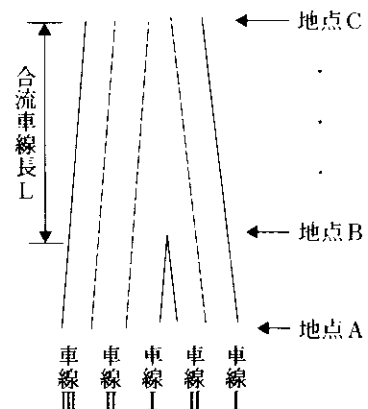


図-2 合流部幾何構造

ように進入速度の低い湊町入路を堺線の西側からサイドランプの型式で取り付ける改良整備が計画されている。検討にあたっては、「高速道路合流部における交通現象と安全評価に関する調査研究」(昭和56年)における合流シミュレーションモデルを基本モデルに、その後調査研究が進められた流入確率の理論を組み合わせて合流評価モデルが構築された。

上記合流シミュレーションモデルは合流部という比較的限られた区間内で発生する交通現象を対象としながらも、交通流を圧縮性流体として取り扱うマクロモデルで、定常流の範囲では車線間の車線変更には実測値から求められる車線移行比率を、渋滞の発生する非定常流の状態にあつては渋滞時の車線移行比率に流入確率を適用して合流部各車線の車線交通量を求め、渋滞領域の変動状況の追跡を行うモデルである。以下に合流シミュレーションモデルの概要について述べる。図-2にモデル構築の上で想定した合流部の幾何構造を示す。

2-2 合流モデルの構成と演算論理

2-2-1 概要

本モデルは、定常モデルと渋滞モデルの2つのサブモデルから成っている。定常モデルは、与えられた流入交通量に対して合流部各車線上の車線交通量を地点毎に演算して、交通密度や平均走行速度を求めるものである。渋滞モデルは、定常モデルで与えられた地点毎の車線交通量とその地点の交通容量を超過した場合、与えられた交通量のレベルのもとでの衝撃波の挙動や渋滞・非渋滞の両領域における交通密度と走行速度を演算していくものである。

2-2-2 定常モデル

①車線交通量の計算

各車線各地点の交通需要は、時間帯毎に与えられる車線別流入交通量調査結果から得られる移行比率を乗じて求めるものとする。ただし、ランプ移設計画においては、湊町入路は堺線第一車線の路側に取り付けられるため、最大車線変更数は、堺線と環状線の間に取り付けられている現在の湊町ランプの最大2回の車線変更と比べて、4回と多くなっている。この点を考慮し、ランプ設置計画におけるサイドランプからの流入する交通の車線移行は、地点間の車線変更を2ブロックずつ下流側へずらしながら車線変更をするものとした。

②平均走行速度と交通密度の計算

平均走行速度は、前提条件に従い、K-V特性にグリーンシールドの線形式を適用し、車線*x*の地点*i*における平均走行速度は下記の式から求める。

$$\left. \begin{array}{l} \text{非渋滞時； } V_x(i) = V_f - \frac{V_f}{k_j} k_x(i) \\ \text{渋滞時； } V_x(i) = V_f - \frac{V_f}{k_j} k'_x(i) \end{array} \right\} \dots\dots (1)$$

ここに *i*；測定番号 *k_j*；最大交通密度 *V_f*；自由走行速度

上記K-V特性式の係数を定めるにあたって、車線別の交通量と速度の調査結果から求めた速度と密度を図-3に示すように速度、密度平面上に、渋滞、非渋滞別にプロットし、非渋滞、渋滞流に対応するK-V特性式を定めた。

さらに合流車線においては、図-4に示すように最大交通密度(*k_j*)を車線幅員に比例して変化させることを考えるものとしている。

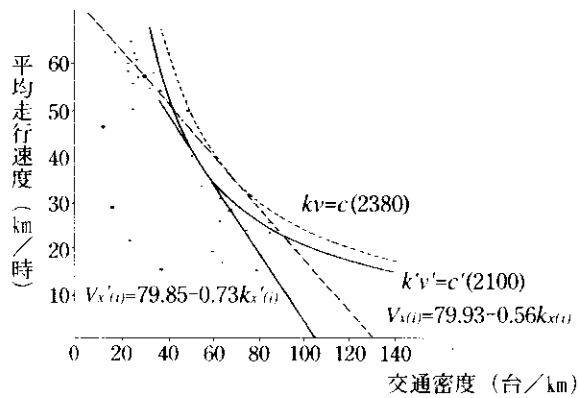


図-3 速度・密度特性

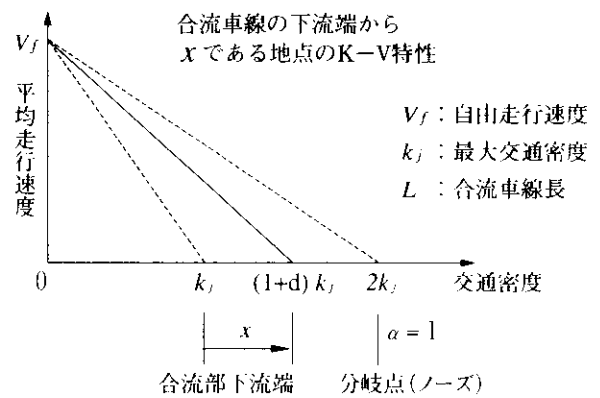


図-4 速度・密度特性

2-2-3 渋滞モデル

① 渋滞挙動の定式化

定常モデルは、単に上流から合流部への流入需要が与えられたとき、車線移行比率に従って車線変更の台数が計算され、合流車線を含む全ての車線の任意の測点の車線交通量が算出されるが、計算された車線交通量がその地点の車線交通容量以下で実際に渋滞を引き起こさずに合流部を通過していくことを保証しているものではない。渋滞モデルでは超過需要が発生しているかどうかを検査し、もし超過需要が発生している場合、渋滞領域がどのような挙動を示すかを追求するものである。

まず、渋滞の始まる地点は、定常モデルから計算される車線交通量が車線の地点容量を超過する地点とする。上記の判断基準によって渋滞の発生が初めて認められた時間帯の車線交通量は、以下の通り車線別地点交通量の補正計算を行う。

- a) 渋滞発生が認められる車線へその隣接車線からの車線移行は生じないものとして、当該車線上の走行をそのまま継続するものとする。
- b) 渋滞発生が認められる車線から隣接車線への車線移行は非渋滞時の車線移行比率にこの車線移行比率を計測した時間帯の流入確率と a) の条件で補正した隣接車線の交通量に対応する流入確率の比率を乗じた値で車線移行量を求めて地点別車線交通量を求めるものとする。
- c) 当初の計算結果から渋滞の発生が認められた車線上で超過需要の状態には至らない場合には、上記の補正計算結果を各地点別の車線交通量として確定し、K-V特性式と連続方程式から平均走行速度と交通密度を求める。
- d) 補正計算の結果でも超過需要の発生が認められる場合には、補正計算の結果から得られる車線交通量と超過需要に基づいて、以下の渋滞領域の追跡計算を行う。ただし、渋滞が発生した車線では渋滞発生地点から下流の車線交通量は、渋滞発生地点の車線交通量を交通容量 (Q_A) におきかえて下流地点の車線交通量を求めるものとする。

結果として得られる合流車線の測点 i の渋滞・非渋滞領域の車線交通量 (q, q') と密度 (k, k') が求められると、合流部先端から生じた渋滞の衝撃波の移行速度 $s(i)$ は、

$$s(i) = \frac{q - q'}{k - k'} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

2-3 シミュレーションの結果と考察

シミュレーションの演算結果から得られた現況および改良後の渋滞領域の変動状況と走行速度の分布状況を図-5および図-6に示す。

図から湊町ランプを堺線路肩側へ移設する改良案では、流入車両の環状線内側（東側）への車線変更が下流側へずれ込むと想定しており、6:15~6:25と6:35~6:40で見られるように非渋滞時での渋滞の立ち上がりが現況と比べて1ブロック下流側へずれ込んでいる点が改良後の特徴となっている。また、渋滞の発生は6:25~6:30で完全に抑えられており、全体的に軽減されている。

さらに、完全な渋滞状況となった6:40~6:45においては、現況では合流車線の右側車線に渋滞が延伸しているのに対して、改良案ではセンターランプへの変更を反映して合流車線の左側車線である堺線第1車線上に渋滞が延伸しており、改良後の道路構造を反映した渋滞発生パターンとなっている。

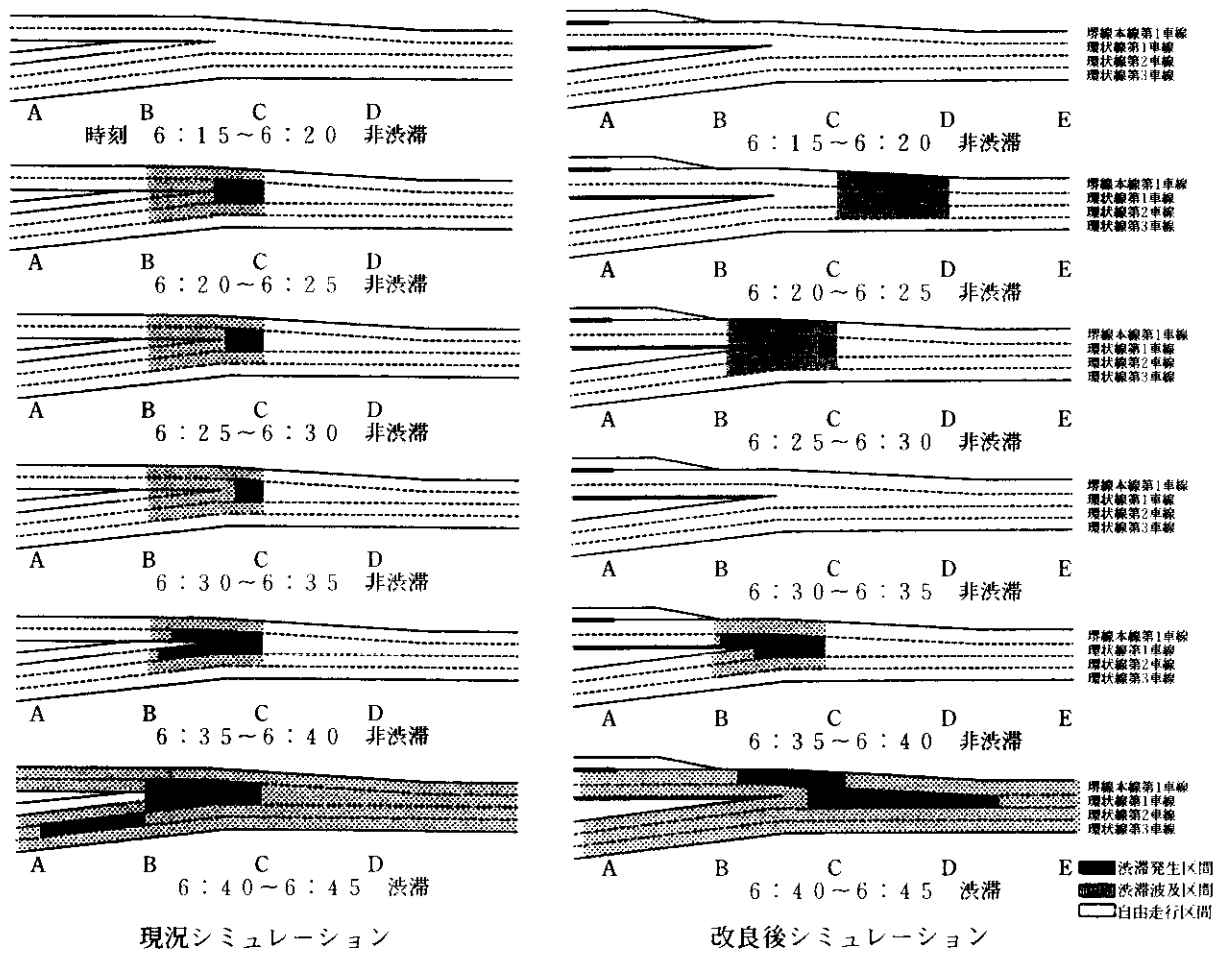
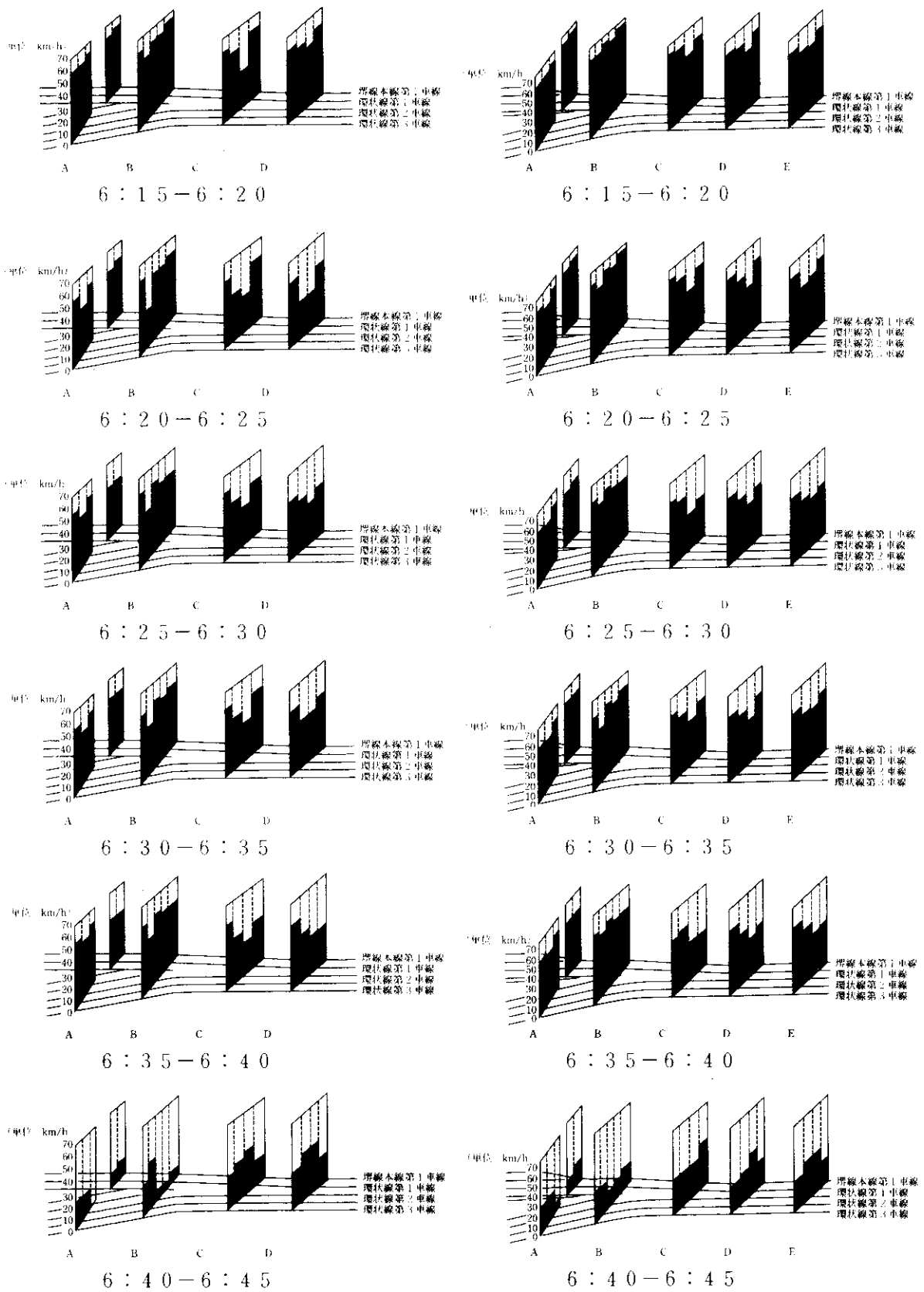


図-5 渋滞領域の変動状況



現状シミュレーションにおける速度分布状況

改良後シミュレーションにおける速度分布状況

図-6 速度分布状況

3 入路制御モデルへの展望

3-1 開発の目的とモデルの機能

冒頭1で述べたように11号池田線上り塚本ランプ合流部から、加島、豊中南ランプまでの区間に着目し、上流部の交通状況が下流部の渋滞発生に及ぼす影響を評価するとともに、各入路における交通規制等の施策を講じた場合、渋滞発生が及ぼす効果も推定可能なモデルを開発する必要がある。さらにノンストップ自動料金収受システム（ETC）の導入に伴って、これまでランプメータリング等の実施を妨げていた人手による料金の徴収が将来的には廃止されていくことも想定できる状況にあるので、上記ランプメータリングを含む入路制御方式の効果や問題点、一般道路への影響等検討を進めていく必要にせまられている。このような検討を進めていくうえで、まず入路制御方式が高速道路本線の交通に及ぼす影響を評価するためのシミュレーションモデルの開発が必要となる。

このためのモデルには以下のような機能が求められる。

- ①メータリングレート等の制御パラメーターに対応して、与えられた高速道路本線の道路と交通の条件のもとで、交通量、速度、渋滞長等の交通流の特性値の変動が追跡できること。
- ②本線合流区間上での車線変更禁止の有無や合流する入路上の制御パラメーターの変動等交通と制御の条件の変化に対応した交通流の変動状況が追跡できること。

3-2 適用モデル

上記の目的を達成するために、現在東名・名神高速道路の旅行時間の予測や迂回誘導の効果予測に適用されている高速道路渋滞シミュレーションモデルに、前項2で紹介した合流シミュレーションモデルを併用することを試みる。両モデルともに交通流を圧縮性流体として取り扱うマイクロモデルであるが、高速道路渋滞シミュレーションモデルは、検討対象の高速道路区間を車線数や交通容量のような道路条件及び入出路からの交通に起因する交通量の変動のない小区間に分割し、交通量を5分～15分間隔の入出路間のOD表の型で入力し、渋滞長の変化と対応して、各小区間の交通量・走行速度・旅行時間の変動を追跡することが可能であり、入路制御方式の検討過程で要請されるモデルの機能①に対応するものである。

ただし、上記高速道路渋滞シミュレーションモデルは、時間毎の交通量を入出路を結ぶOD表の型で入力するため、メータリングレート等の制御パラメーターの変動をOD表の操作で反映できるものの、合流区間の本線走行車線・追越車線間の車線変更禁止のような車線間の交通変動に影響を及ぼす交通運用の差違をモデルのアウトプットに反映させることはできない。したがって合流部における交通流特性は合流シミュレーションモデルを先行させて追跡し、合流区間の断面交通容量の変化として把握し、その結果を本線渋滞シミュレーションモデルに入力して、総合的な制御効果の評価ができる入路制御シミュレーションモデルの構築を試みる。以下に本線渋滞シミュレーションモデルの概要について記述する。

3-2-1 本線渋滞シミュレーションモデルの演算論理

a) 基本式

いま現時間帯における高速道路本線上の区間で、交通容量、交通量、平均走行速度を以下のように定める。

$c(i)$; 区間 i の交通容量 (台/時)

$q(i)$; 区間 i の交通量 (台/時)、渋滞時には $q'(i)$

$v(i)$; 区間 i の平均走行速度 (km/h)、渋滞時には $v'(i)$

また各区間において、交通量が与えられ、渋滞・非渋滞の条件が定めれば、図-7に示すように速度と交通量の容量比との関係から平均走行速度を算出する関数 $f(i)$ 及び $f'(i)$ を想定することができる。すなわち、(4) 式のように表わせる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{非渋滞であれば、} v(i) = f\{q(i)/c(i)\} \\ \text{渋滞であれば、} v'(i) = f'\{q(i)/c(i)\} \end{array} \right\} \dots\dots (4)$$

区間 i の交通量 $q(i)$ は現時間帯 T における交通需要を $D(T)$ に等しいから、この渋滞・非渋滞の走行速度と各区間の交通量からシミュレーション対象区間の走行時間、総走行時間を求めることが可能となる。また渋滞・非渋滞の両領域が混在する区間における両領域の境界に生ずる衝撃波の追跡と、旅行時間の推定は合流シミュレーションと同様に以下のように行われる。

いま時間帯 T において初めて区間 j で交通需要が容量を超過したものとすると、このとき区間 j よりも下流の各区間については、 $q(i) = c(j)$ と置き換えれば (1) 式が適用可能である。上流側の各区間について、渋滞領域については、 $q'(i) = c(j)$ 、非渋滞領域については、 $q(i) = D(T)$ と置き換えれば、区間 i における衝撃波の伝播速度 $\gamma_i(i)$ は、(3) 式から求めることができる。さらに衝撃波が時間帯 T の間に区間 i を通過したものとすれば、衝撃波が区間 i の上流端を通過する時間 $t(i)$ は下記のとおりである。

$$t(i) = \sum_{k=j-1}^i [L(k) / \{-\gamma_i(k)\}] \dots\dots\dots (7)$$

このとき、区間 i の渋滞領域における交通量は $q'(i)$ 、非渋滞領域での交通量は $q(i)$ であるから、この時間帯 T における区間 i の平均交通量 $q_a(i)$ は、図-8に示すような時間・空間の平面上において渋滞・非渋滞の領域面積で $q'(i)$ と $q(i)$ を加重平均することにより求めることができる。

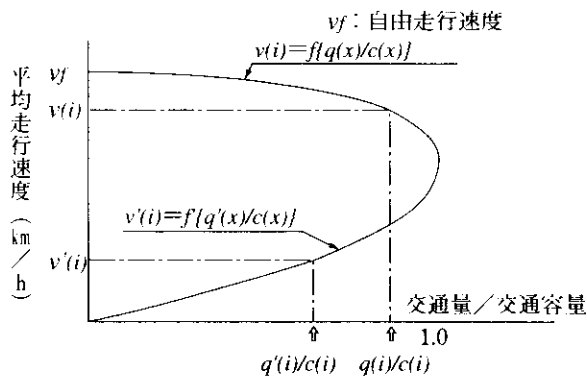


図-7 速度特性と速度算定の基本式

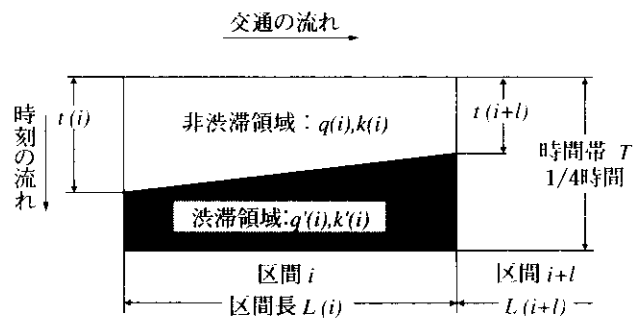


図-8 時空平面上における区間 i の交通量と平均密度

3-2-2 適用条件

本両モデルを入路制御シミュレーションモデルとして適用していくにあたって、留意しなければならない点を取りまとめると以下ようになる。

現行阪高速道路交通管制システムにおける車両検知器からの情報は全て5分間隔でとりまとめて交通量、オキュパンス、走行速度の予測値等が出力される。したがってメータリングレート等の制御パラメーターの変更も5分定時毎に可能なように、OD表、小区間交通容量とQ-V特性曲線等交通流特性値算定の基礎となる基本関数、入力データの修正が必要となる。また、本渋滞シミュレーションモデルには流体モデルの特徴の1つである需要の瞬間伝達性のための上流端からの流入需要の不自然な下流側へ

の伝播という欠陥を補うため、1シミュレーション時間帯に相当する旅行時間を形成する小区間をまとめて大区間とし、大区間の切目でシミュレーション時間帯をずらせる入力需要の時間シフト機能が整備されているが、大区間の旅行時間が1シミュレーション時間帯である5分間のプラス、マイナス1分以下になるよう、渋滞時でも小区間の旅行時間が1分以下になるような小区間長とすることも必要となる。また、合流シミュレーションモデルの結果を受けて合流部の交通容量を変化させていくことも想定しているため、現行モデルのシミュレーション実施時間帯を通して容量を一定に保っている現行プログラムを修正する必要もある。

3-3 合流シミュレーションモデルを組み合わせた入路制御モデルへの展望

合流区間における渋滞の発生は合流車線に接する本線車線の合流車線テーパー端としてよい。合流部実態調査の結果から渋滞発生時の合流区間上・下流端における走行・追越両車線および入路からの5分間交通量、および渋滞時の交通容量を決定した後、合流モデルを以下のように稼働させ、自由流状態の交通容量から渋滞時交通容量への移行状態におけるさばけ台数（以後、遷移交通容量という）を求める。すなわち、合流部上流端の本線車線交通量と合流部からの流入交通量を合流シミュレーションモデルに入力して合流部接続車線（通常走行車線）上の渋滞領域の延伸状況を追跡するとともに、車線変更禁止区間（があるのであれば）下流端または渋滞発生地点から追越車線への車線変更台数を求め、当該シミュレーション時間帯終了までの追越車線の平均交通量を求め、この値を当該シミュレーション時間帯の遷移交通量とする。以上の操作によって本線上の渋滞が両車線共に発生する前の状況、すなわち合流交通を受け入れる側の車線には渋滞の発生が見られるものの、それ以外の車線上の交通は流れているという過渡期の状況が再現される可能性が生まれてくるものと考えられる。当該シミュレーション時間内で追越車線の交通量が渋滞時交通容量に達していなければ、次のシミュレーション時間帯において同様の操作を行うことにより、合流シミュレーションにより、合流部での渋滞状況と遷移交通容量を求める。

以上の合流シミュレーションの結果を受けて渋滞シミュレーションモデルを稼働して現況シミュレーションを実施する。ただし、本線渋滞シミュレーションモデルにおいては、渋滞領域の変化も含めた交通流の特性は車線別に追跡していないので、渋滞領域の車線別配分を別途行い、この結果に基づいて交通量、平均走行速度、総旅行時間、総旅行距離等を算定する。以上の結果を実態調査結果や交通量、走行速度、旅行時間等の交通管制システムからの出力と比較照合してモデルのキャリブレーションを行った後、メータリングレートに対応したランプメータリング実施のためのOD表を作成し、同様の操作を行って、入路制御の高速道路本線上の制御効果を求め、さらに制御パラメーターを変更して比較検討の対象になる制御案の作成を行う。以下の操作フローチャートに示すと図-9のとおりとなる。

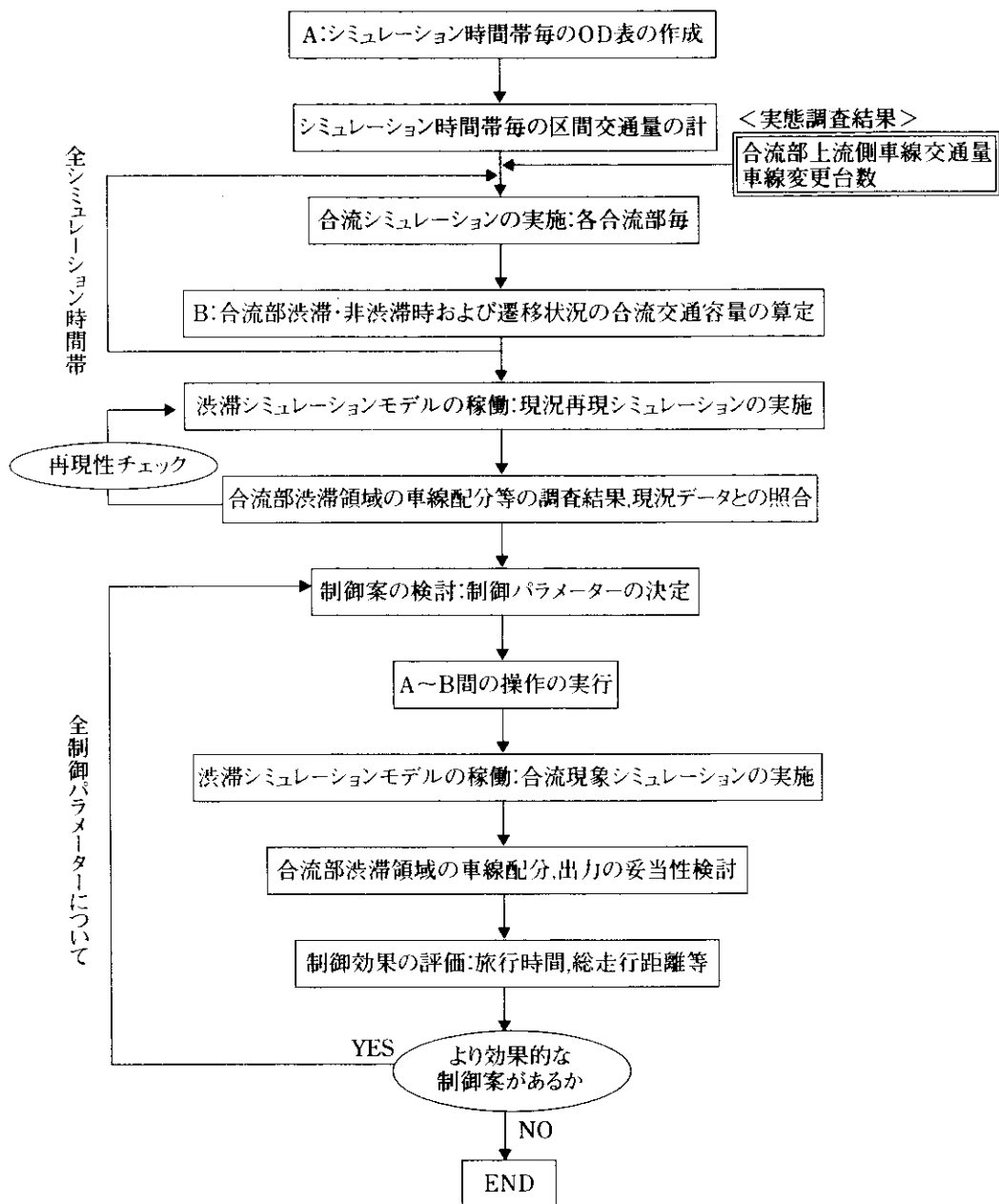


図-9 合流部シミュレーションモデルの流れ

4 おわりに

これまでに合流シミュレーションモデルと本線渋滞シミュレーションモデルに基づいて開発が行われている入路制御モデルの展望を述べてきた。本モデルは渋滞の激化が予想される阪神高速道路大阪地区の放射線や神戸線に見られるように相連している入路からの交通が集中して発生する渋滞の緩和と交通流の改善を目指して路線制御の実施方法を検討するために開発されるものであり、これまでに行われたような渋滞発生の起点となるような入路のみに注目するのではなく、その前後の入路からの交通に対しても制御を試みて路線全体としての効果的な交通渋滞対策の検討の一助とすることを目指している。ただし阪神高速道路のように広大な阪神地区を網状にカバーしている高速道路網の交通対策はあくまで

も高速道路網全体の効率、ひいては地域全体の交通の円滑化を目指すべきものであり、本入路制御モデルの活用にあたっては以下の諸点に十分は配慮が加えられるべきである。

①高速道路網全体の効率的運用

阪神高速道路における交通運用の基本則はまず、大阪地区にあつては目的地への径路選択上、交通が集中してしまう環状線における交通の円滑化であり、神戸地区にあつては三宮を中心とする中央部からの交通負荷の軽減である。このためには環状線あるいは中心部からの流出交通の促進が第一目標である。一方、本入路制御モデルは例えば11号池田線塚本入路を頭とする渋滞の対策として連続する入路の制御方針を作成するためのツールであり、放射線全体の効率化を計ったために環状線の交通状況の悪化を招くといった状況を作ってしまうようなことを行つては絶対にいけない。LP制御の実行解——を念頭においたシミュレーションの実施、あるいは環状線での最高交通量を求めるためのシミュレーションの実施といった網全体の効率化をねらつたシミュレーションの実施が望まれる。

②道路網全体の効率化

さらに、上記のような合流交通制御の検討にあつては、流入ランプに接続する一般道路への影響も考慮しておく必要がある。この点については、現況のランプ流入交通量および制御により増減する流入交通量にもとづく接続道路の車列の延伸状況等を検討することにより、その影響を把握するようにならなければならない。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団；阪神高速道路合流部の交通現象と安全評価に関する調査報告書，昭和58年3月
- 2) Yasuji Makigami et al; On a Simulation Model for the Traffic Stream in a Freeway Merging Area, Proceedings of the 8th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, University of Toronto Press 1991, pp427—451.
- 3) 卷上安爾他；高速道路の単路部渋滞モデルについて，交通工学 Vol.18, No.2 1983. pp3—16.
- 4) Yasuji Makigami et al; A Basic Study of Expressway Travel Time Estimation Using A Bottleneck Simulation Model, Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Pergamon, 1996 pp55—77.
- 5) 阪神高速道路公団；大阪都心部における合流現象検討業務報告書，平成11年3月
- 6) Yasuji Makigami et al; Basic Study on a Simulation Model for the Traffic Stream on Urban Expressway Merging Area, Proceeding Vol.1 9th IFAC Symposium Control in Transportation Systems 2000, 2000, Braunschweig, Germany, pp89—94.