

ファジィ流入制御モデルを用いた交通制御方法の評価と検討

EVALUATION AND DISCUSSION ON TRAFFIC CONTROL WITH FUZZY INFLOW CONTROL MODEL

秋山孝正*・佐佐木 綱**

By Takamasa AKIYAMA and Tsuna SASAKI

Fuzzy inflow control model was introduced as an advanced control method on urban expressway. Though reality of the model was confirmed in some previous studies, variation of control method should be discussed to use the model in general aspects. First, fuzzy inflow control model was rebuilt considering practical application in the study. Database, explanatory variables, rule-base, and membership functions were investigated. Second, the control model combined with traffic simulation was proposed to show effects of rules defined for control action. Three case studies were displayed to use the model practically.

Keywords : fuzzy control, urban expressway, traffic control, traffic simulation

1. はじめに

都市高速道路の交通渋滞は交通需要の増大とともに年々激化の一途をたどり都市活動の中心的交通機能の低下は大きな問題となっている。この都市高速道路の快適性と円滑性を保つため交通管制が日常的に行われている。実際の交通管制は、的確な道路交通状態の把握と適切な判断が必要であり、このための情報の収集と処理は最も重要である。具体的には、①交通渋滞の検知、判断・制御という一連の交通渋滞対策の計算実行、結果表示等の交通管制判断機構と、②道路情報板、路側通信システムなどの情報提供の各種機構運営が交通管制システムの中心的機能となり日常的に運営されている¹⁾。

ただし現状の交通渋滞円滑化を目的とした事後的交通管制では、機械的計算結果だけでは十分ではなく、実際には高速道路交通状況に対する臨機応変な処理、経験的判断、人間の情報処理・伝達が重要な要素となっている。

たとえば阪神高速道路では、実際の流入制御判断（ランプ制限・閉鎖）等の実施は交通管制担当者に任せら

れており、ネットワーク上の交通流状態から個々のオンランプ開閉状況をいかに設定するかを総合的に判断している²⁾。交通管制担当者は短時間に各種情報を総合化し適切な制御を導く「エキスパート」といえるが、反面常時多量な情報の的確な処理が課せられ（たとえば阪神高速道路大阪地区では5分単位に75入路、64出路、160区間の交通量などの情報が随時処理され）労力甚大となり、また個人的判断の差異による制御時間の遅れ・判断の迷いなどを生じることも考えられる。また専門的な交通渋滞処理の判断能力をもつものが経験を積んだエキスパートに限定され、交通管制の非効率化の原因ともなり得る。

上記のような問題解決を図るために、人間判断の有効性を生かし、かつ計算機に判断可能なシステムを構築することを考え、具体的方法として著者らはファジィ流入制御モデルを提案した。ここでは、特に従来型制御に人間の判断を積極的に導入し、新たな効率よい制御方法をヒューリスティックに求めようとする「ファジィ制御」による定式化を試み、モデル構築のための基礎的検討を行った。本研究では、ファジィ流入制御モデルの課題とされたモデルの実用的表現と制御ルールの妥当性評価についての検討を行うものである。

* 正会員 工博 京都大学助手 工学部交通土木工学教室
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室
(同上)

2. ファジィ流入制御モデル

(1) ファジィ制御の方法

a) ファジィ推論

ファジィ推論については、すでにいくつかの文献で詳細に述べられており、ここでは簡単に紹介する。ファジィ集合 A と B のファジィ関係 R とは両者の関係を表現するファジィ集合である³⁾。具体的には、

$$R = \int_{x,y} \mu_R(x, y) / (x, y) \dots\dots\dots (1)$$

のように表現される。このメンバシップ関数 $\mu_R(x, y)$ は、 A, B のメンバシップ関数 $\mu_A(x), \mu_B(y)$ を用いて二項関係によって決定される。たとえば

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \dots\dots\dots (2)$$

のように示すことができる。このルール R の決定は Mamdani の方法といわれ⁴⁾、最も一般的な推論法である。ファジィ集合 B は以下の計算で得られる。

$$B = A \circ R = \int_Y \sup [\mu_A(x) \wedge \mu_R(x, y)] / y \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $B = A \circ R : \text{max-min}$ 計算、 \sup : 上限
この演算は「If x is A then y is B 」を表現するものである。「 x is A 」とは異なる入力「 x is A' 」による推論結果「 y is B' 」は、以下のようである。

$$B' = \int_Y \sup [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)] / y \dots\dots\dots (4)$$

ファジィ推論では $A \rightarrow B$ のファジィ関係 $\mu_R(x, y)$ を決定しておけば、「 x is A' 」の状態を示すメンバシップ関数 $\mu_{A'}(x)$ から推論結果として y の状態を示すファジィ集合 B' が求められる。

b) ファジィ制御

ファジィ制御は、ファジィ推論の制御への応用であり対象を「制御」とすることから、一般に入出力はクリस्पな（ファジィでない）数値である。すなわち制御判断は「 x が大ならば y は大」といったファジィ推論で表現され、入出力値には確定値を用いることができる。

$$\begin{cases} \mu_A(x_i) = 1, & i = s \\ \mu_A(x_i) = 0, & i \neq s \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

$$x_i \in X = \{x_1, x_2, \dots, x_s, \dots, x_n\}$$

これは $x = x_s$ のときのみメンバシップ関数値が1になることを示す。つまり入力 A' に対して出力 B の分布は、

$$\begin{aligned} \mu_B(y_j) &= \max [\min \{\mu_A(x_s), \mu_R(x_s, y_j)\}] \\ &= \mu_A(x_s) \wedge \mu_B(y_j) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

のように求められる。ここで $\mu_A(x_s)$ は確定値であり、分布をもつメンバシップ関数 $\mu_B(y_j)$ を一定の値以下としたものに相当する。さらに、出力 $\mu_B(y_j)$ の分布を制御に利用するためには、確定値への変換が必要である。このとき重心をもって代表させる方法が多く、具体的には

$$y^0 = \sum_j \mu_B(y_j) \cdot y_j / \sum_j \mu_B(y_j) \dots\dots\dots (7)$$

で得られた値 y^0 を用いる^{5),6)}。

(2) 従来のファジィ流入制御モデル

ファジィ流入制御モデルは阪神高速道路（大阪堺線）での交通制御に注目して作成されている。モデルの基本的演算手順は次のようである。①[渋滞長]、[交通需要量]の情報をファジィ推論のための変数とする。②ファジィ推論（5ルール）により制御レベル出力を算出する。③4種の制御パターン（具体的にはブース開口数）の中からレベルに対応して選択・決定を行う。

従来の研究においても交通制御へのファジィ理論導入について定性的にその必要性を述べている^{7),8)}。またファジィ推論と従来方法の差異を紹介するとともに、基本的モデル構造に関する各種の検討が行われ、メンバシップ関数、推論法の比較、ファジィ度の計測方法などの当該モデル固有の研究課題について整理されている^{9),10)}。またモデルの実用的側面からパラメーター推計方法¹¹⁾、制御判断変更方法¹²⁾ という点からも議論されている。

従来のファジィ流入制御モデルの課題点はいくつかあるが、なかでも交通制御効果の評価と効率的ルール作成に関して、各種の方法論的提案がなされている¹³⁾⁻¹⁵⁾。ルール変更容易性はファジィ制御の長所であり、実用的見地からきわめて重要である。こうしたことから、実際的な従来モデル改良の方向として、偶発事象等も考慮した実用的判断の追加、制御ルール表現の精緻化と制御効果検討のための有効利用などが挙げられる。

3. ファジィ流入制御モデルの改良

(1) モデル構造の改良

さきに述べたように、ここでは従来の研究成果から現実判断により即した汎用的なものとするためにファジィ流入制御モデルの改良を行う。ここでの改良視点は①対象データの変更、②入力変数の検討、③ルール構成の検討、④メンバシップ関数の変更である¹³⁾。

a) 対象データ

本研究でも従来モデルと同様、阪神高速道路大阪堺線の交通制御モデルを考える。実用性向上のために、平日の恒常的な交通現象を基本とするが、多様な交通状態を包括して考慮できるようデータを抽出した。データ属性は表-1にまとめる。対象データは平日および交通量の比較的少ない土曜日を含んでいる。また偶発事象発生時の制御を考慮して交通障害がある日も含んでいる。交通制御判断は15分ごと全87断面のデータを用いる。

ここでの制御パターンとは、交通制御実施時の堺線各入路（堺、住之江、玉出）の開口ブース数の組合せで示され、順に(5, 2, 2), (5, 1, 1), (4, 1, 1), (3, 1, 1)である。

表-1 対象データの属性

| 月 日 | 2月28日 | 10月5日 | 11月18日 |
|--------|------------|------------|-------------|
| 時 間 | 8:00~12:00 | 8:00~12:00 | 8:00~19:30 |
| 断面数 | 20 | 20 | 47 |
| 制御パターン | 1-4 | 1-4-3-1 | 1-2-4-1-4-1 |
| 備 考 | | 土曜日 | 交通障害有 |

b) 入力変数の検討

従来モデルの入力変数として「渋滞長」と「交通需要量」が用いられた。本研究ではさらに実際の管制担当者が制御決定時の判断材料としており、かつ重要と考えられる要因のモデルへの入力を検討した。これは判断プロセスの精緻化を目指したものである。

〔流入交通量〕

各入路流入交通量は5分ごとに累積され渋滞長同様に常時表示され、実際の流入制御の判断材料の1つとなる。本研究対象路線では、堺、住之江、玉出の各入路があるが、なかでも堺入路は流入交通量が多く、また環状線への距離が最大で、全路線を通過する交通を含む可能性が高いことから、大阪堺線全体の交通状態に与える影響も最も大きいと思われる。また実際の制御時に管制担当者が最も注目する箇所でもある。そこで、堺入路の流入交通量をモデル作成時の流入交通量データとする。

〔制御継続状態〕

順次計測される各種情報に加えて、その時点までの制御継続状態も判断材料の1つである。つまり各種計測指標が同じ値でも、制御実行時と制御実行前の時間帯では判断が異なる場合があるということである。

本研究ではモデルの入力変数としてパターン1を無制御時、その他のパターンを制御実施時と考え、継続制御時点数で制御継続状態を表わす変数とする。

c) ルール構成の検討

ルール構成はモデル挙動を規定するので、現況の正確な把握のもとに作成される必要がある。ここでは図-1に示すようなルール群とした。たとえば、RULE 5は、「もしCON(渋滞長)がmedium(中)でFLW(流入交通量)がbig(大きい)ときに、LEVEL(制御レベル)をhigh(高)とする」ことを示している。

このとき以下の諸点に特に注意している。

- ① 制御判断に最も影響を与えるものは渋滞長であることは現在の交通管制パターン表からも明らかである。全体的判断として渋滞長が長ければ制御レベルは大きく渋滞長が短ければレベルは小さい(RULE 3, RULE 4)。
- ② 交通需要量, 流入需要量等の制御判断時間帯の交通量関連情報は、渋滞長が中程度のときに今後の渋滞延伸・解消の判断を介し、最終的な制御レベル決

```

RULE 1: IF ACT = on
          AND CON = ge(LAC) THEN CON = CON
RULE 2: IF ACT = on
          AND CON = lt(LAC) THEN CON = LAC
RULE 3: IF CON = short THEN LEVEL = low
RULE 4: IF CON = long THEN LEVEL = high
RULE 5: IF CON = medium
          AND FLW = big THEN LEVEL = high
RULE 6: IF CON = medium
          AND FLW = not(big) THEN LEVEL = medium
RULE 7: IF AFT = on
          AND CON = not(zero)
          AND DEM = big THEN LEVEL = high
RULE 8: IF LCN = on THEN LEVEL = low
    
```

[variables] ACT:事故渋滞の有無, AFT:既渋滞の有無,
 CON:渋滞長, DEM:期待交通需要量, FLW:流入交通量,
 LAC:事故渋滞長, LCN:低制御継続の有無, LEVEL:制御レベル
 ge:grater than or equal, lt:less than, on:有, off:無

図-1 交通制御ルール (基本モデル)

定に用いる。たとえば渋滞延伸はさほどない場合でも、大きな交通需要が予測される場合制御レベルを高くすることもあるということである (RULE 5, RULE 6)。

- ③ 偶発的事象には交通事故, 故障車, 落下物等がある。これらは道路容量の低下を招き渋滞発生原因となる。制御の判断材料として、現場情報のほか事故発生地点からの渋滞長が考えられる。事故等の与える道路障害程度と交通量の総合的情報として、この偶発事象による渋滞長は重要であると考えられる (RULE 1, RULE 2)。

従来モデルの判断構造を用いて、さらに管制担当者が時間帯に基づき経験的に認知している交通需要量と実測流入交通量を区別している。また上記のほか、渋滞解消時か否かの判断 (RULE 7) および制御継続状態の判断 (RULE 8) が含まれている。

d) メンバシップ関数の同定

メンバシップ関数形状は従来多くの研究で検討されているが、基本的に線形性と正規性をもつものが一般的である。ここではパラメーター設定の容易さ、操作性から関数形は台形を基本とした。また渋滞長および出力変数に「大」「中」「小」の3段階を考え、交通需要量は「大」、流入交通量は「大」「大でない」を考える。関数の一例を図-2に示す。ここで「大でない」はファジィ集合「大きい」の補集合を考えるが、その比較的簡単な定義として、ファジィ集合Aの補集合をメンバシップ関数 $1-\mu_A(x)$ として表現する。

e) パラメーター推計

モデル決定のためにパラメーター推定を行う。パラメーターは図-2のメンバシップ関数の図中示されているようなグラフの位置である。パラメーター探索にあたっては、従来モデルと同様、モデル適合性を基準とした段階的方法による。判断構造から渋滞長が最も重要な

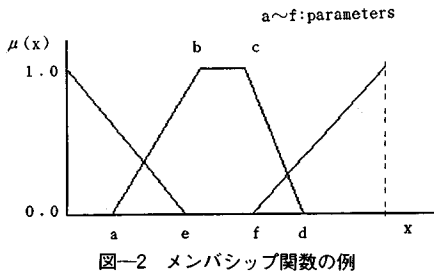


図-2 メンバシップ関数の例

判断材料であることを考慮して、第1ステップでは渋滞長だけからの判断で制御レベルを決定する形の3ルールを用いてパラメーターを決定する。さらに、第2ステップで他の入力変数のパラメーターを決定するという探索手順を用いた。実際の計算の結果、第1ステップで適合率(モデル判断合致断面数/全断面数)0.805を示す渋滞長のパラメーター群が決定された。さらに他のパラメーターを付加した全ルール群として、追加したパラメーターを探索した。このステップにおいても適合率が最大となるパラメーター群を採用し最終的なパラメーター値とした。

f) モデル再現性の検討

改良されたファジィ制御モデルが同定された。ここでモデルの現況再現性を検討する。時間的に変化する制御結果を図-3(データ2に対して)に示す。

この場合には、20断面中1断面のみ誤判断となっている。同様に各ケースごとに検討を行ったが、判断に若干差異はみられるが、全体的に良好な再現性が得られている。全断面(87時点)に対する適合率は0.91であり、個々のケースごとにも適合率は高く、11月18日が3ケース中で最も適合率は悪いが0.87となっている。

ここでは、近似的推論による制御判断記述を中心とするモデル化を行ったが、全般的傾向として判断結果の大半は、制御開始・終了時刻で実際とモデル判断のずれが1断面(15分)であり、このモデルが実際の交通状態変化に十分対応できることを示している。また誤判断は、たとえば本図では、10時には渋滞長が延伸し、モデルでは「パターン2」であるが、実際には頻繁な制御変更を控える意味から「パターン1」が実施されたものと思われる。このような制御実施の予測的判断等ルールに網羅されない判断もある。

(2) ファジィ制御モデルを用いた制御方法の評価

ファジィ流入制御モデルの改良課題の1つである制御方法の評価に注目する。具体的には、ファジィ流入制御モデルと渋滞シミュレーションを結合し、評価プロセスを内包した交通制御方法改良を検討する。

a) 流入制御ルールの改良手順

いくつかの既存システムが示すように、ファジィ制御

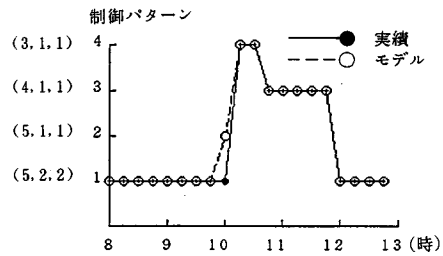


図-3 現況再現例(10月5日)

では、初期作成ルール群で実際の制御を行っても、必ずしも満足すべき効果をもたない場合が多く、普通ルール群のフィールドテストを実施してその有効性を評価し、この結果から制御内容の不十分な点を順次検討することにより、ルール変更・修正していく方法が一般的である。

本研究も基本的に同じ考え方に立脚するが、交通制御モデルの場合、実際の高速道路上で簡単にフィールドテストを実施することは難しい。たとえば阪神高速道路においても制御交通流の影響は大阪市域に伝達されるので、交通状態悪化の可能性があれば現場でのテストは危険である。そこで、本研究では交通状況変化を再現する渋滞シミュレーションモデルを利用する。

渋滞シミュレーションを用いる評価プロセスは、従来の研究でも提案されており^{14),15)}、簡単に説明する。

- ① 適当なルール群を具備したファジィ制御プロセスを作成する。前項の基本モデルルール群がこれに相当する。
- ② 次に制御判断の妥当性検討を行う。渋滞シミュレーションにより交通状況変化を知り、さらに各種評価指標を算出し現ルール群評価を行う。
- ③ 制御効果とルールの合理性を検討し、改良が必要な場合には、ルール群を再構成し新たなファジィ制御プロセスとする。メンバシップ関数等も改良可能である。
- ④ ルール改良の必要性がなければこれを採用する。これにより最終的ファジィ制御ルール群が構成される。

b) 評価のための渋滞シミュレーションモデル

1) 渋滞シミュレーションモデルの構造

本研究の渋滞シミュレーションは、制御効果の比較・評価を目的として区間ごとに車を集計し交通状態推移を追跡するマクロモデルである。モデルの構造は阪神高速道路の交通渋滞対策評価検討用モデルと同様であるが¹⁶⁾、実用的に若干改良を行った。基本的には以下2点である。

- ① 大阪堺線を対象とした放射線単路部モデルである。構造は比較的単純であり計算時間も大きくない。

② モデル簡略化のため流入需要交通量を OD 別に
取り扱わず流入交通量から設定・算出する形となっ
ている。

モデルの概要を表一2に記す。[1]の分割程度は、
一般的渋滞シミュレーションにも同様な設定がみられ
る。[2]の分岐率は放射線上りを単路として容易に取り
扱うための設定である。[3]、[4]の考え方も従来
型渋滞シミュレーションと大きな変更点はない。[5]
の K-V 特性は従来から用いられている指数関数型とす
る。また計算上重要な各区間条件はなるべく現実に近い
形で設定した。さらに最下流部処理は、実測5分間断面
交通量を受け入れ可能量として外生的に与えた。また計
算上用いる流入需要量算出法では実測流入交通量に実測
待ち台数データ(昭和60年2月28日)を加算し1時間
単位で集計し、これをモデル計算では15分単位の交通
需要量に修正した¹⁶⁾。

表一2 渋滞シミュレーションモデルの概要

- [1] タイムスライス:10秒, 各区間分割:200~400m
区間内の交通状態は一樣とする
- [2] 分流部処理:1時間単位に分岐率を与える。
- [3] 上流より各区間の交通状態を順次算出する。
- [4] 当該区間流入量は交通需要量・受入可能量より決定。
- [5] 各区間のK-V特性

$$V = \begin{cases} \alpha \cdot \{1 - (K/K_j)\}^\beta & : V \leq V_f \\ V_f & : V \geq V_f \end{cases}$$

V_f : 自由速度, K_j : 区間jの飽和密度
 α, β : パラメータ

2) 各種評価指標

渋滞シミュレーションにより渋滞発生時の都市高速道
路交通状況が計算され、実施した流入制御の効果の各種
評価値が得られる。具体的には各出力変数より制御効果
の評価に利用可能な要因を抽出した。以下に具体的な評
価出力値についてその概要を述べる。

【渋滞状況】

交通渋滞変化は、各区間の5分単位の渋滞状況(渋滞
か非渋滞か)より判断する。評価指標として渋滞区間の
区間長を連続的に加算し渋滞長とする。この値から当該
時間内の最大渋滞長等の渋滞変化指標が算出される。ま
た渋滞継続時間や総渋滞量(渋滞区間長を時間断面ごと
に累積)を算出することができる。

【断面交通量】

交通状態は区間ごとに記述され、5分間の入路・区間
断面交通量が得られる。入路断面交通量を全時間で累積
すれば総流入台数となり、入路から環状線合流部までの
平均走行距離を乗ずると総走行台キロ指標が算出され
る。

【待ち行列台数】

交通需要量と流入交通量の関係から待ち台数を計算で
きる。待ち行列台数は都市高速道路の流入不能交通量で

平面街路への交通制御の影響指標といえる。この値を時
間断面ごとに累積し総待ち時間(台・時)とする。

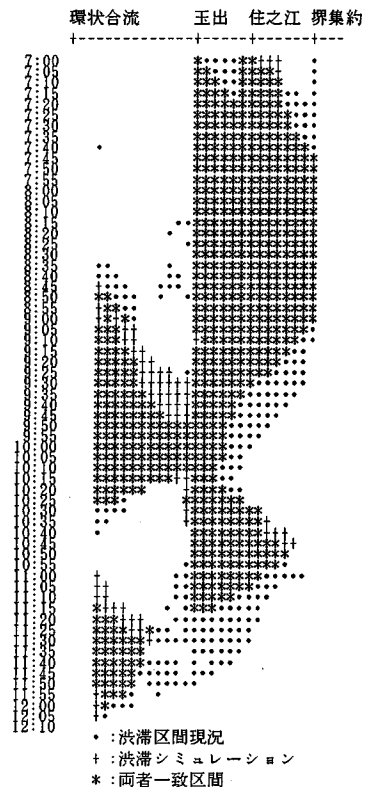
【旅行時間】

各区間旅行時間は区間存在台数の変化から求められ
る。任意ランプ間の旅行時間は、両ランプ内区間の旅行
時間を加算して得られる。これは、渋滞程度の所要時間
としての評価値と考えられる。また各入路ごとの旅行時
間と流入台数の積和より総旅行時間が得られる。

3) モデルの現況再現性

評価指標を現実的なものとするため、シミュレーショ
ンモデルの現況再現性を検討する。基本ケースとしたの
は、ファジィ制御モデル作成時に用いた昭和60年11月
18日である。当該日は、早朝玉出合流部から渋滞発生し、
その後四ッ橋先頭の渋滞が延伸する対象路線の典型的渋
滞状況が生じている。ただし10:30頃から偶発事象(積
載物落下)による渋滞が発生し、このとき渋滞が下流側
に伸びている。

現況再現のため諸定数を設定し、シミュレーションを
実施した。偶発事象に関しては対応区間に一時的閉塞を
外生的に与えた。当該日の渋滞延伸状況と渋滞シミュ
レーションを用いた現況再現の計算結果を図一4に示
す。



図一4 渋滞シミュレーションの現況再現

渋滞状況の実績と計算値を比較すると、午前11時頃の環状線合流部先頭の渋滞発生時刻が多少早期となり、また車線閉塞条件の与え方によるものと思われるが、実際より渋滞解消が早期に算出されている（・印部分）。他の時間帯では渋滞延伸状況に大差はなく、偶発事象による渋滞変化も表現されている。これらよりほぼ良好な現況再現結果が得られていると思われる。

c) 流入制御評価モデルの作成

渋滞シミュレーションモデルと流入制御モデルを結合して、評価プロセスを内包した結合モデルを作成する。モデルの全体構成とその評価計算プロセスを図-5に示す。外生的に流入需要量を与えると、渋滞シミュレーションから5分ごとに交通状態が出力される。この状態変数は、渋滞状況、各入路流入交通量等でありファジィ流入制御モデルへの15分ごとの入力変数となる。ファジィ流入制御モデルはこれら入力より、15分ごとに制御パターンを推論し出力する。実制御としてはランプ開口数の変化の情報が渋滞シミュレーションモデルに入力される。この後は同様な手順が繰り返されることになる。

結合モデルを用いて、ルール変更のない場合の制御行動および交通渋滞状況を算出し基本ケースを作成した。外生的流入交通量としては昭和60年11月18日のデータを用いた。平常時の交通制御評価を目的とし当該日の車線障害要因は除外した。したがって、この際のモデルから得られる渋滞状況は図-6に示すようになる。これは以下で交通状況の改善効果を検討する際に有効である。また各評価指標の項目とその値を表-3に示す。交通制御プロセス検討の際はこの値を評価基準（基本ケース）とする。なお時間帯は午前7時から午後1時である。

d) モデルによる交通制御効果の評価

ファジィ流入制御モデルを用いた交通制御方法検討には主として2方法が考えられる。各種入力のメンバシップ関数の変更およびファジィ推論ルールの変更である。

本研究ではこれらを踏まえて次の具体的検討を行う。第1は渋滞長に対する認識程度の変更をメンバシップ関数変更により検討する。第2は制御継続時間に関するルール変更である。これは判断内容変更の一例である。また第3は現行制御よりレベルの高い制御を想定したルール追加について検討する。このような各種変更に対して比較的対応が容易である点はルール型記述モデルの長所であるといえる。

4. 交通制御内容の変更と評価

(1) 渋滞長認識について変更

ここでは、渋滞長に関するメンバシップ関数を変化させモデル挙動の変化から、渋滞状況や各種評価項目の比較を行う。実際の制御判断では、渋滞長に関する制御必

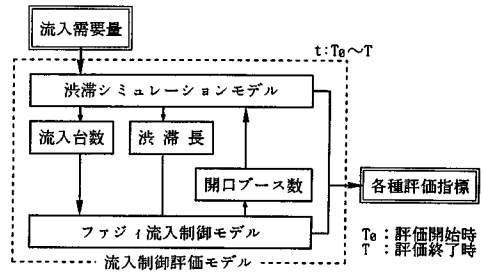


図-5 流入制御の評価手順

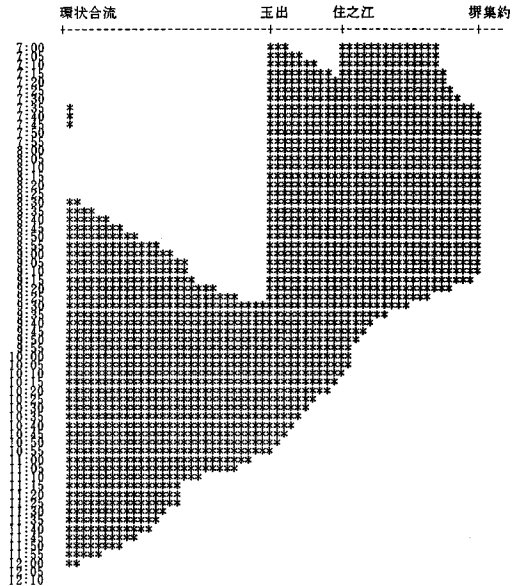


図-6 評価基本ケースの渋滞状況

表-3 基本ケースの各評価指標値

| | | |
|---|----------------|----------|
| ① | 流入交通量 [堺] | 16231 |
| | (台) [住之江] | 4183 |
| | [玉出] | 4738 |
| ② | 最大渋滞長 (km) | 9.0 |
| ③ | 最大待ち台数 [堺] (台) | 198 |
| ④ | 総渋滞量 (km) | 31.3 |
| ⑤ | 総旅行時間 (台・時) | 7947.5 |
| ⑥ | 総走行台キロ (台・km) | 257971.8 |
| ⑦ | 総待ち時間 [堺] | 233.0 |
| | (台・時) [住之江] | 0.0 |
| | [玉出] | 0.9 |
| ⑧ | 制御継続 [堺] | 2.5 |
| | 時間(時) [住之江] | 3.0 |
| | [玉出] | 3.0 |

要性への認識程度を変更することに相当している。

渋滞長による判断に関して現在より高レベル流入制御を実施する場合を検討する。具体的には渋滞長の「長い」の判断基準（メンバシップ関数値が1となる点、基本モデルでは6.1 km）を3 km, 4 kmとし、これに対応するパラメーターを用いて計算を行う。渋滞長の「長い」という認識が変化することで全体の関数構成が変化す

る。ある程度の渋滞延伸を容認する実際の制御に対し、渋滞長が小さくて制御を要するいわば強い制御を行った場合、交通状態変化を検討する。

具体的な結果として、各種評価項目の算出結果を表-4に示す。また制御パターンの出力結果を図-7および図-8に示す。渋滞状況については、両ケースとも9:00前後に若干の渋滞減少がみられる程度で、図示すべき時系列的变化はなくここでは省略する。これらの計算結果より以下のことがわかる。

- ① この変更では渋滞長に対して判断が敏感となるため流入制御は基本ルールの判断結果に比べて早期に開始される。3 km, 4 km の両ケースとも基本ケースより1断面早く8:45に制御が開始されている。
- ② 早期の制御が行われた結果、基本ケースでの9:05から9:30の渋滞が一部解消されている。高速道路上の渋滞量はわずかではあるが(約1%)改善方向に向かっている。両ケースでは大差がないが3 kmに設定した方が、渋滞量が少ないことから、渋滞長の短い場合にも高レベルの制御を行えば渋滞量減少が可能であるといえる。

表-4 渋滞長認識の変化に対する評価

| No | 評価指標 | n = 4.0 (km) | n = 3.0 (km) |
|----|----------------------------------|---|---|
| ② | 最大渋滞長 (km) | 8.6(-0.4) | 8.6(-0.4) |
| ④ | 総渋滞量 (km・時) | 31.0(-0.2) | 30.9(-0.4) |
| ⑤ | 総旅行時間 (台・時) | 7900.1(-47.4) | 7889.9(-57.8) |
| ⑦ | 総待ち時間 [堺] (台・時) [玉出] | 246.3(+13.3) 33.2(+32.3) | 252.5(+19.5) 33.2(+32.3) |
| ⑧ | 制御継続 [堺] 時間 (時) [住之江] [玉出] | 2.75(+0.25) 3.25(+0.25) 3.25(+0.25) | 3.00(+0.50) 3.50(+0.50) 3.50(+0.50) |

[他項目は変化なし]

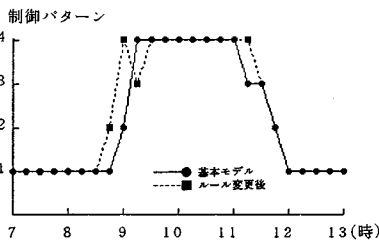


図-7 モデル出力結果 (渋滞長: 4 km)

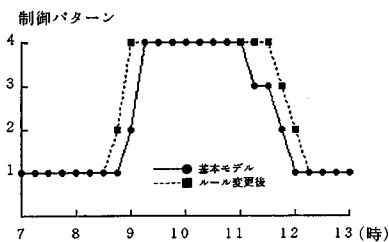


図-8 モデル出力結果 (渋滞長: 3 km)

- ③ 渋滞が玉出入路を越えた9:30以降においては、両ケースとも基本ケースと同じくパターン4の制御が続き、制御を実施した後の渋滞状況に変化はみられない。このように渋滞自身の変化には大きな影響を与えないが、制御判断結果としては渋滞長が3 km程度でも高レベルの制御を実施することになり、渋滞解消時にも両ケースとも一部基本ケースより強い制御となっている。

- ④ 平面街路への影響として総待ち時間をみると、各入路でこの値が増加している。この制御内容変更は街路には不必要な交通量増加をもたらすことがわかる。

以上のことより渋滞長からみた制御認識レベルはメンバシップ関数の一部変更により記述できることがわかった。また変更程度により必ずしも常時同一傾向の制御結果を与えるわけではない。しかし、影響程度は大きくないが制御効果も予期した方向に移行することがわかる。

(2) 制御継続状態ルールの変更

制御継続状態に関する制御内容の検討を行う。基本モデルに含まれる知識は「無制御が続けば、制御レベルは低い」である。これは渋滞が環状綜合流部から堺線方向へ発生延伸時の管制担当者の沈思熟考型判断を記述したものと見える。つまり「未制御時にはしばらく様子を見る」ことに対応し制御実施を若干順延することになる。

ここでは効率的制御の意味から、この制御判断の遅れをなくし、さらに強制的制御は早期終了するように制御内容の検討を行った。具体的には次のようである。

[削除ルール]: IF LCN=on THEN LEVEL=low
[追加ルール]: IF CON=dec

AND CNT=long THEN LEVEL=low

これは、前述の無制御時のルール(図-1, RULE-8)削除による制御開始遅延回避に加えて、制御継続の長期化を制限する追加ルール[CON=dec:渋滞解消時である, CNT=long:制御継続時間が長い]により制御終了が早くなる。つまり全体的に予防的制御内容が得られることになる。また削除・追加ルールはともに1つであり、結果的に総ルール数の増減はない。

ここで用いる制御継続時間に対するメンバシップ関数(「長い」)を図-9に示す。制御実施中の時間断面数を入力変数とし関数値は直線的に変化するものとした。

ルール変更後のファジィ制御モデルの判断を図-10に示す。制御パターンはさきに検討したように、早期に開始・終了している。特に10時以降のパターン変化ではこの傾向が顕著である。しかし交通状態統計指標値は変化していない。また渋滞状況変化もほとんどない(以上のことから、これらの図表は割愛する)。したがってこの制御内容変更後の交通状態変化は少ないといえる。

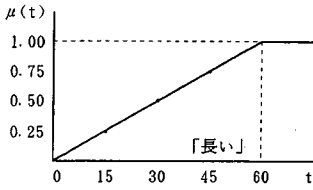


図-9 制御継続時間のメンバシップ関数

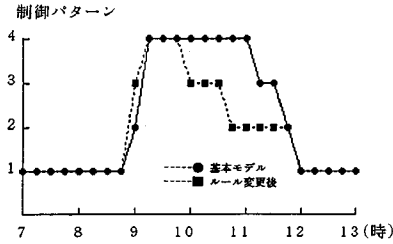


図-10 モデル出力結果(制御継続ルール変更)

これは主として流入交通量の変化がないことに起因している。つまり流入需要量の少ない時間帯では、交通制御(開口ブース減少)が実施されても、流入量はブース容量に達せずその影響を受けない。特に渋滞解消時の10時から11時30分頃にはこの傾向が強く、制御結果は大きく変化するが渋滞状況は変化していない。これは評価モデルの構造上の問題もある。シミュレーションでは流入需要交通量はブース開口数に依存せず一定(当該時間帯の制御緩和も交通状態に影響を与えない)とした際の結果であることを留意しておく必要がある。

しかしながら、この制御変更に対する1つの検討結果は特に交通状態悪化を招かないという結果であるから、結論としてこの早期制御実施も可能であるといえる。特に同一オンランプの長時間閉鎖は特定利用者の高速道路利用を阻害することからも「早期閉鎖解除」の実用有効性は示唆されるものである。

(3) 交通制御パターンの追加

ここでは交通管制要領改訂案に基づく制御パターンの追加に関する検討を行う。阪神高速道路では交通管制要領が作成され実際に運用されている。そして道路網変化や交通流動変化に伴い具体的改訂が検討される。本研究で対象とした堺線上りに関連した変更の一例として、新しい制御パターンの追加を検討する^{2),15)}。

追加する制御パターン(以後「パターン5」とよぶ)は、制御パターン4より高レベルの制御として環状線合流部からの渋滞が、西大阪線分流(3.1 km 地点)と玉出入路(6.1 km 地点)間の区間まで延伸した場合に玉出・住之江両入路で30分ごと交互にブース閉鎖を実施するものである。ここで2段階推論プロセスが用いられている。つまり従来モデルの推論後に制御パターン変更

有無に関する第2段階の推論を実行する。具体的には、
[第2段階ルール]

RULE-A: IF CPN=4

AND CON=ge(L*) THEN CPN=5

RULE-B: IF CPN=4

AND CON=1 t(L*) THEN CPN=CPN

RULE-C: IF CPN=not(4) THEN CPN=CPN

CPN: 制御パターン, (CPN=1, 2, 3, 4, 5)

L*: 制御変更基準距離(通常 L*=6.1 km)

この手順はまず、従来モデル推論により制御パターンが算出された後、制御パターン4では特定区間渋滞長を考慮しさらに程度の高い制御をするか否かを検討する。ここで四ッ橋先頭の渋滞長(CON)が特定値(L*)以上の場合には制御パターン5とするものである。

このように2段階推論で「パターン5」が導かれるが、この制御方式は従来「おのおの最低1ブースの閉鎖」を条件としていた玉出・住之江入路に対して、「一方のブースは完全閉鎖する」とした場合である。したがって路線全体でも入路閉口ブースは1ブース減少する場合を設定している。ここでは①どの程度渋滞が延伸したらパターン5を実施するか、②玉出・住之江のいずれを先に閉鎖するかを検討する必要がある。本研究で具体的には以下の3種類を検討した。

- ① 渋滞長 6.1 km 以上のとき玉出・住之江の順に閉鎖する。
- ② 渋滞長 6.1 km 以上のとき住之江・玉出の順に閉鎖する。
- ③ 渋滞長 5.0 km 以上のとき玉出・住之江の順に閉鎖する。

(6.1 km は玉出入路の位置, 5.0 km は堺線入り対象区間のほぼ中間地点である。)

これらの比較より、パターン5の制御導入時の効果を調べ、モデル判断内容を検討した。判断結果の推移をそれぞれ図-11～図-13に示す。また具体的な渋滞状況変化は、各ケースとも比較的類似しており、渋滞減少の最も著しいケース3を代表的形として図-14に示している。

また各種評価指標値を各ケースごとに表-5に示す。この評価モデルにおいてはブース閉鎖時の高速道路へ流入不可能であることから、非制御時には流入交通量と待ち台数として計上されるべき交通量を併せてブース閉鎖時の平面街路へ迂回交通量として計算した。

これらの図表から次のことがわかる。まず渋滞状況は「パターン5」の制御実施により渋滞が大きく解消された。このため渋滞継続時間は短くなり制御パターンは当然ながら「パターン4」にかわって部分的に「パターン5」が現われている。また「パターン5」実施以後には、基

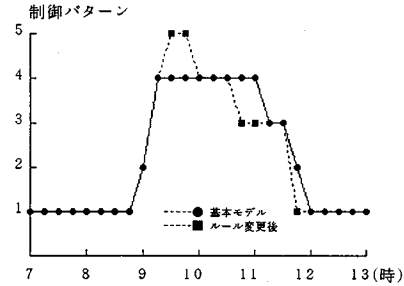


図-11 モデル出力結果 (制御パターン追加①)

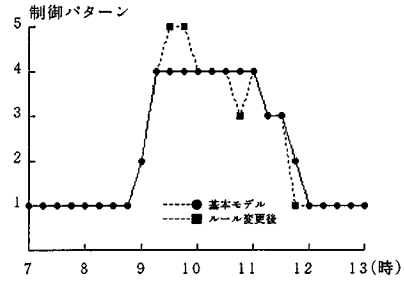


図-12 モデル出力結果 (制御パターン追加②)

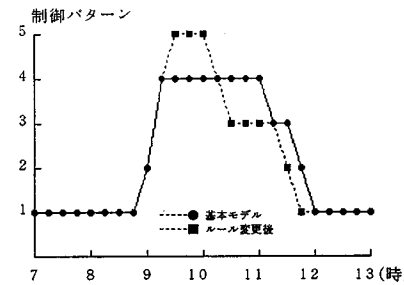


図-13 モデル出力結果 (制御パターン追加③)

本ケースと比べ、レベルの低い制御を行っており、各ケースとも渋滞早期解消に大きな効果を挙げている。

またケース間比較では、③は「パターン5」が3断面(45分)に現われ、ブース閉鎖時間も長い。このため渋滞解消効果も最高となっている。またケース①と②は玉出・住之江の閉鎖先行性を評価することになるが、実際には玉出入路の流入交通需要量が多く、ブース閉鎖効果が大きく現われ、渋滞量26.9 km時とケース①が渋滞解消の程度は高い。反面平面街路への迂回交通量も318台と①の方が多いため。総合的にみれば①と②の制御有効性には大きな差異はないというべきであろう。

以上のように、従来よりレベルの高いブース閉鎖・制御を導入することで渋滞状況に大きな改善が得られる。

また玉出・住之江の各入路の閉鎖順序に際しては、渋滞解消効果では差異は少なく、実際の運用時に平面街路への影響を考慮して、状況に応じた閉鎖順序決定が妥当

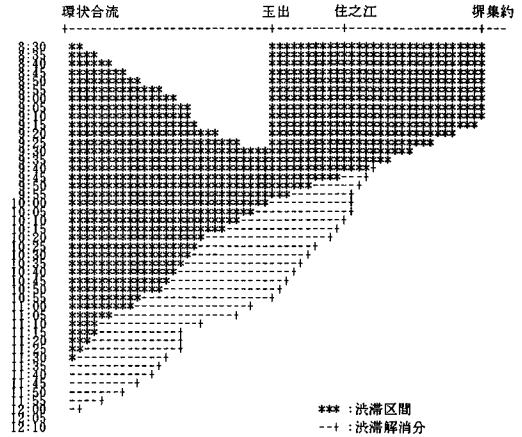


図-14 制御ルール追加(ケース3)による渋滞状況変化

表-5 制御パターン追加に対する評価

| No | 評価指標 | ケース1 | ケース2 | ケース3 |
|----|----------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| ① | 流入交通量 [住之江] (台) [玉出] | 0 -318 | -291 0 | -121 -318 |
| ④ | 総渋滞量 (km) | -4.4 | -4.1 | -5.7 |
| ⑤ | 総旅行時間 (台・時) | -689.0 | -631.5 | -857.4 |
| ⑥ | 総走行台キロ (台・km) | -1942.7 | -2383.8 | -2933.3 |
| ⑧ | 制御継続 [堺] 時間 (時) [住之江] [玉出] | 0 -0.25 -0.25 | 0 -0.25 -0.25 | -0.25 -0.25 -0.25 |

[他項目は変化なし]

である。このため実際の「パターン5」制御実施を検討するためには平面街路状況の把握可能性が課題となる。

(4) 流入制御ルール改良についての整理

ファジィ流入制御モデルと渋滞シミュレーションを結合し、制御内容の評価検討を行った。以下特にモデルのルール変更とその評価について中心に述べる。

- ① 本研究では制御の改善策として、(a) 渋滞長の認識変更、(b) 早期の制御解除、(c) 高レベル流入制御の設定について検討した。いずれの場合もルール変更時に予想される制御結果・制御効果の方向性と計算結果は一致し、渋滞シミュレーションを併用した有効な制御効果算出システムが構築された。
- ② 具体的なルールのもつ影響に対しての検討結果から (a) は堺線のみを対象にした際には大きな改善とはならず、制御ルール変更の必要性は乏しい。また (b) の渋滞解消時の早期閉鎖解除は利用者のブース閉鎖に対する忌避感からも検討が望まれるが、計算結果では早期制御解除による渋滞状況悪化は考えられず、このルール採用も可能であるといえる。(c) は最も渋滞状況を変化させる制御ルール群であるといえる。したがって現実的な実施方法を考えたうえでファジィ流入制御モデルの導入が望まれる。

- ③ モデルの評価結果については、計算結果が渋滞シミュレーションに依存するため、すべての妥当性を言及することは難しい。実用性を考えれば、評価用渋滞シミュレーション改良を含めて、さらに現実の交通状況を正確に認知できるシステムを構築する必要があるとともに、ファジィ制御モデル改良のためのヒューマンインターフェースの合理的導入を検討すべきである。これは制御検討に際して人間の認識を考慮する有力な手段となる。

5. おわりに

本研究では、まず従来のファジィ流入制御モデルについて検討した。また実用的視点からファジィ流入制御モデルの改良を行った。さらに、渋滞シミュレーションを用いることによって交通制御効果を検討し最終的には交通制御ルール変更による制御内容改善を目指した。

ファジィ制御の知識表現方法はプロダクションシステムの形であり、本研究で行ったように制御方式変更によるモデル構造変化を容易に記述できる。またファジィ制御は手続き言語 (FORTRAN, BASIC 等) により十分実用的なモデル作成が可能である。これが本来数値的処理を基本とする渋滞シミュレーション計算との結合においても有意性を与えるものである。

またファジィ制御の実際への適用という点では、すでに各所の著述にあるようにファジィ理論を従来方法と対置するべきではなく¹⁷⁾、判断の安全幅と考えることができる。したがって交通制御においても、今後のモデル向上から従来の LP 制御等の研究成果を知識として用いることも可能であると考えられる。

最後に今後検討すべき主要な課題を述べる。

- ① 本研究では交通制御効果の検討に渋滞シミュレーションを用いたが、現在のファジィ流入制御モデルでは、この評価結果が次期の制御内容を規定しない。実用的には、予見的評価を含んだ推論モデルを構築することで、より複雑な交通現象に対処できると思われる。
- ② すべての交通制御問題が、ファジィ制御方法で解決するものではない。現実的にも都市高速道路の複数路線の同時制御には応用が難しい。したがって、交通工学的なファジィ制御適用範囲を詳細に検討するとともに、関連の知識工学手法の援用も検討する必要がある。

謝 辞：最後に本研究を遂行するにあたって、暖かいご支援を頂いた福山大学工学部 井上矩之教授、計算

等にご尽力頂いた広川誠一氏（現在・千葉県）に感謝の意を表する次第である。また資料収集では阪神高速道路公団大阪管理部に、図面作成には京都大学大学院 楊海君にご協力頂いた。ここに記し謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 阪神高速道路公団：阪神高速道路のしごと，1988。
- 2) 阪神高速道路公団・(財) 高速道路調査会：阪神高速道路の交通管制に関する研究報告書，1983。
- 3) 水本雅晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988。
- 4) Pappis, C.P. and Mamdani, E.H. : A fuzzy logic controller for a traffic junction, IEEE Trans SMC-7-10, pp. 707-712, 1977.
- 5) 山崎 東・菅野道夫：ファジィ制御，システムと制御，Vol. 28, No. 7, pp. 442-446, 1984。
- 6) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，1988。
- 7) 秋山孝正・佐佐木綱・奥村 透：都市高速道路交通管制の効率化に関する検討，土木計画学研究・講演集，No. 8, pp. 129-135, 1986。
- 8) 阪神高速道路公団：交通管制における収集情報の総合化と効率化に関する検討業務報告書，1985, 1986。
- 9) Sasaki, T. and Akiyama, T. : Development of Fuzzy Traffic Control System on Urban Expressway, Control in Transportation Systems (1986), Proc. of the Fifth IFAC/IFIP/IFORS International Conference, pp. 215-220, 1987.
- 10) 秋山孝正・佐佐木綱・奥村 透・広川誠一：ファジィ流入制御モデルの作成と検討，土木計画学研究・論文集，No. 4, pp. 93-100, 1986。
- 11) 秋山孝正・奥村 透：ファジィ制御手法による高速道路交通管制のモデル化，第29回システムと制御研究発表講演会講演論文集，pp. 215-216, 1985。
- 12) Sasaki, T. and Akiyama, T. : Traffic Control Process of Expressway by Fuzzy Logic, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 26, No. 2, pp. 165-178, 1988。
- 13) 佐佐木綱・秋山孝正・奥村 透・広川誠一：高速道路におけるファジィ交通制御モデルについて，第2回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 50-55, 1986。
- 14) Sasaki, T. and Akiyama, T. : Fuzzy On-ramp Control Model on Urban Expressway and Its Extension, Proc. of the Tenth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp. 377-396, 1987。
- 15) Akiyama, T. and Sasaki, T. : Extended Fuzzy Traffic Control on Urban Expressway, Preprints of Second IFSA Congress, pp. 278-282, 1987。
- 16) 井上矩之・秋山孝正・辻本賀一：情報提供のための渋滞、旅行時間予測シミュレーションモデル，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，IV-8-1-2, 1986。
- 17) 秋山孝正：ファジィ理論の土木計画分野における適用に関する整理と展望，土木学会論文集，第395号/IV-9, pp. 23-32, 1988。

(1989.3.8・受付)