

都市高速道路交通管制の効率化に関する検討

An Investigation of Efficient Traffic Control and
Surveillance on Urban Expressway

* ** ***

秋山孝正、佐佐木綱、奥村 透

By Takamasa Akiyama, Tsuna Sasaki, Toru Okumura

There exist many complicate and uncertain situations in case of traffic control and surveillance on urban expressway. The control of the urban expressway has been depended upon the skilled operators' judgement and decision. The objective of the study is to investigate the efficient traffic control and to describe the judgement process of the actual operators. A simple model for on-ramp control is built by fuzzy reasoning. The actual data were gathered on Hanshin expressway. In addition, the changing of the model is investigated. If the traffic controller by fuzzy reasoning is established, it will become very profitable to decrease the loads of the skilled operators who make decision every time, and helpful to develop more effective operation procedure.

1. はじめに

現在都市高速道路においては多大な交通量によって慢性的な混雑を生じており、日常的な自然渋滞の発生が問題となっている。これに対して、高速道路上のできるかぎり円滑な交通を保つことを目的として交通管制が行われている。こうした交通管制も実際の現場にあっては実際の交通管制の運用をはじめとして解決すべき問題が多く残されている。交通管制において現在検討すべき方策としては多くのものが挙げられるが、基本的には以下の点が重要であると考えられる。

- ・交通管制手法の実用的改良
- ・利用者への適切な情報の伝達
- ・交通管制業務の効率の運用

第一の交通管制方法の検討については、これまでいくつかの方法が提案され実施されてきた。実際の交通状況に対しては、理論的な計算結果が必ずしも周囲のすべての状況を改善できる適切な結果を与えらるゝとはいいがたいが、交通管制の理念の検討を含めたより実用的で効率的な実際の交通制御方法の検討が重要である。第二の情報提供に関する検討は、正確な情報を利用者に伝達することで経路誘導を行うために重要な検討項目である。これらの点に対して、第三は実際の交通管制時の効率的運用をはかるものでありこれが本研究の目的である。特に現在時々刻々変化する周囲の状況にに対して管制担当者が判断を下す「入路閉鎖・ブース制限」が行われており、具体的制御内容の判断が人間に任されていることは、一部の管制担当者の労力が増大し判断のおくれや錯

* 正会員 工修 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 (〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 正会員 南海電気鉄道株式会社 (〒542 大阪府南区難波5の1の60)

誤を生じること、また管制担当者ごとの判断の差異があることなどから収集された情報を処理し適切な交通管制を実施する場合の効率性を妨げる一因となっている。そこで本研究では高速道路の現状の交通管制機構を記述するモデルを作成し、これを交通管制時に収集される各種情報の総合化と効率的利用を図るための検討資料とすることを目的としている。具体的にはまず第2章では交通管制の現状とファジィ性について検討し、第3章では実際のデータより流入制御の記述モデルを作成しその挙動に関する検討を行う。さらに第4章では実用性の面からモデルの制御内容の変更についての検討を行う。

2. 交通管制の現状

前章で述べたように都市高速道路における交通管制の方法はこれまでにいくつかの具体的な方法が提案されている。その推移をみると初期段階においては定常交通量に対して、高速道路の当該区間の交通量を容量以下に抑え、かつ高速道路の利用台数を最大にするLP制御を非定常時に対しては逐次ランプ制御、さらには緊急時制御方法が開発された。またこれらの改良として入路待ち行列を考慮したLP制御も考案されている。しかし一般街路への影響を防止しながら高速道路全線に渋滞が発生させないようにするLP制御では実用解が得られにくい面があり、一般街路への影響を防止するためには、高速道路上にある程度の渋滞を容認せざるを得ないのが現状である。またこれまでの調査研究により具体的な制御方式としては、入路制御方式が優れているとされるが全入路を制御対象とするため、設備充実の費用と時間がかかり実用的とはいえない。そこで実際には小数の入路を対象とする「入路閉鎖・ブース制限」方式による交通管制が行われている。

この方式では実際の交通管制時の意志決定は管制担当者が種々の交通状況や過去の経験に基づいて行っている。このような人間による判断の特徴は入力情報が複雑であったり、また厳密な計測の難しいファジィな量であっても総合的に判断を下せる点にある。ここでは実際の流入制御の判断において内在するファジィ性について検討する。以下代表的な事項を挙げて検討する。

(1) 観測変数に存在するファジィ性

都市高速道路の実際の制御時には各種データを収集する必要がある。たとえば渋滞長については、渋滞検知機が500m単位で設置されている関係から実際の判断においては、厳密で詳細な計測値ではなく概略値として認識されているといえる。具体的に言えば実際の判断は「～kmぐらい」といったファジィなものである場合が多いということである。

(2) 実際の運用におけるファジィ性

都市高速道路においては交通管制パターンが決められており、これにより運用が行われることになっている。しかし実際には、すべてこの管制パターンどりに行われるのではなく平面街路の状況などのいくつかの要因を考慮した上で実際の決定がなされることになる。この場合には意志決定において熟練した交通管制担当者の感覚、経験に依存するところが大きいと考えられる。すなわち、ファジィな人間の認知にもとづいて決定されるということである。

(3) 制御方法の検討におけるファジィ性

制御方法は実状に適するように随時変更改良していく必要があるが、この時、新たな制御方法は経験的にかつヒューリスティックに決定されていくものである。これまでの管制パターンの作成においても判断や経験的な知識などが重要な決定要因となっている。したがって人間の持つ専門的、経験的な知識から与えられるファジィな情報が管制方法の内容を検討していく際にも含まれていると考えられる。

3. ファジィ推論による交通管制の記述

3.1 ファジィ推論について

ファジィ集合の概念はL.A.Zadehによって提唱され人間のファジィな認識を取り扱う方法として知られている。この概念は従来の測度論、積分論あるいはクラスタリング手法、オペレーションズリサーチなどに応用されている。ここではファジィ推論の方法について簡単に説明する。

まず X を全体集合とし、 x を X の要素とする。 X 上のファジィ集合 A はメンバシップ関数 $\mu_A(x)$ によって表現される。

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

この関数 $\mu_A(x)$ は、 x が集合 A に属する程度を示す。たとえば $\mu_A(x)$ の値が0のとき x は A に全く属せず、逆に $\mu_A(x)$ の値が1のときは x は完全に A に属して

いる。また $\mu_a(x)$ の値が 0.6 といった値の場合には x が A にそれなりに属することを示している。一般にファジィ集合は以下のような表記法を用いて表現される。

$$A = \int_x \mu_a(x)/x \quad (2)$$

たとえば「5 ぐらい」の集合はこの表記法によれば

$$\{x : 5 \text{ ぐらい}\} = \cdots + 0.0/2 + 0.3/3 + 0.7/4 + 1.0/5 + 0.7/4 + 0.3/7 + 0.0/8 + \cdots$$

と表現される。 (3)

集合 A と集合 B のファジィ関係とは、たとえば「 A と B は良く似ている。」などファジィな関係を表現するものである。

$$R = \int_{x,y} \mu_R(x,y)/(x,y) \quad (4)$$

このファジィ関係 R を用いて集合 A 、 B 間の論理関係を示すことができるが、これには次のような演算を用いる。

$$A \circ R = \int_y \sup_x [\mu_a(x) \wedge \mu_R(x,y)]/y \quad (5)$$

この演算は論理的な関係「If x is A then y is B 」(もし x が A ならば y を B とする。)を表現するものである。この演算形式をもとに推論を表現しかつ先に定義したファジィ関係 R を用いるとすれば、ある入力「 x is A' 」によって得られる推論結果「 y is B' 」は次のように示すことができる。

$$B' = \int_y \sup_x [\mu_{a'}(x) \wedge \mu_R(x,y)]/y \quad (6)$$

これはファジィ関係を表現するメンバシップ関数 $\mu_R(x,y)$ を $A \rightarrow B$ の関係として決定しておけば、「 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' が求められることを示している。このような手順を踏むことで最終的にファジィな推論を表現することができる。実際には図-1 に示すようにメンバシップ関数の分布形として表現されるファジィな入力変数(fuzzy variables)によって出力側にもひとつの分布を持つファジィな変数が得られるものである。

このようなファジィ推論の方法を用いた制御問題への応用はこれまでも成果をあげており、実用的に用いられているも数例存在する。⁹⁾ また特に交通制御に用いられた一例もある。³⁾

3. 2 流入制御記述モデルの作成

つぎに実際にモデルを作成するための検討について述べる。まずここでは実際の交通管制状況をファジィ推論によって表現する際の全体構成について述

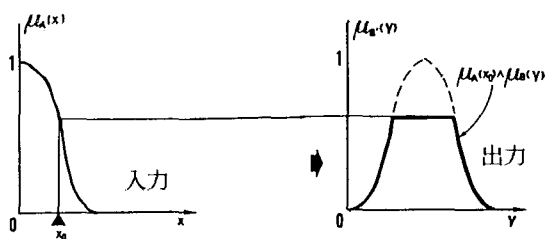


図-1 ファジィ推論の例

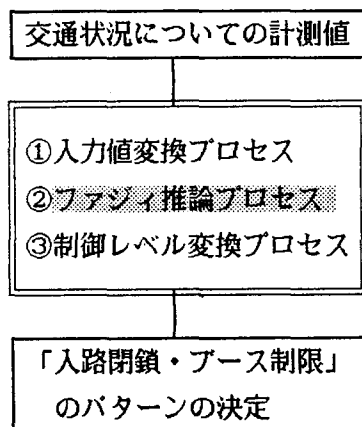


図-2 モデルの基本構造

べる。ファジィ推論においては、入力、出力ともに「ファジィ量」であって、数学的にはそれぞれがメンバシップ関数としての分布を持つ。したがってモデル作成上問題となるのは次の2点である。

- ①実際の判断材料となる計測変数、あるいは経験的な変数をファジィ推論への入力として表現すること。
- ②推論結果のファジィ的な数量値を実際の制御行動に対応させること。

この2点に留意しモデルの全体構造を考えたものが図-2である。具体的には入力情報として渋滞状況、交通状況を表す変数をそれぞれ妥当な形の入力変数に置き直していくつかのルール集合を用いたファジィ推論の演算を行う。さらに交通制御の必要性あるいは制御の程度が一定の数値として出力されるがこれを実際に交通制御に対応したブース制限、入路の閉鎖といった形に変換するプロセスを取る。このような手順で実際の交通管制担当者の判断を近似的に表現することができると考えた。具体的な内

的な傾向である。実際に用いたものは昭和60年1月8日における渋滞の延伸状況とそれに対する入路閉鎖、ブース制限の記録結果である。

(5) ファジィ推論による制御プロセス

本項ではファジィ推論過程を含む具体的な交通制御の記述のプロセスの作成について述べる。

●ルールの作成

ルール推論では推論内容をルール群によって表現するものであり、ルール構成はモデルの挙動そのものを規定することになる。またこうした方法は明示的に判断内容を示すことができるので有効である。モデルでは比較的単純なルール構成で推論時の判断がされるように次のような構成とした。

- ①渋滞長に関しては長い、中程度、短いという3つの区別を行いこれがそれぞれ制御レベルの大、中、小の認識に対応するであろうと考えた。
- ②渋滞長が長い場合や逆に短い場合には交通状態に対する認識が明らかであり、予想される交通需要の変動とは無関係に制御の程度が決定される。これに対し渋滞長が中程度の場合には今後渋滞が増大するか否かが判断材料になると考えた。

以上のような検討に基づいて実際のモデル内で用いられるルールの構成を示したものが表-2である。このモデルでは条件付命題で内容が表現されることになっており「If ... then ~」（もし...ならば~とする。）という形式の一群のルールによって判断内容が論理的な関係として示されることになる。

●メンバシップ関数の設定

さきに決定したルールにしたがって演算を行うためには、「大きい」、「小さい」といった概念をメンバシップ関数として示さねばならない。メンバシップ関数の設定は、こうしたファジィ変数の定義に等しく、大別して離散集合と連続集合によるものが存在する。これまでの研究により両者の長所、短所が整理されている。本研究では一般に操作性の良さからよく用いられる次の関数形を用いた。

$$\mu_m(x) = \exp\{-1/2(x-m/s)^2\} \quad (7)$$

この関数は[0,1]で定義されるもので中央値 m の周辺に鐘状に分布する形状であり、2つのパラメータ m, s を決定することで関数形を設定できる。

●出力形式

実際の制御においては制御はいくつかのパターン

表-2 モデルでの制御ルール構成

R-1: IF	CON = short	THEN	LEVEL = low
R-2: IF	CON = medium AND DEM = small	THEN	LEVEL = low
R-3: IF	CON = medium AND DEM = medium	THEN	LEVEL = medium
R-4: IF	CON = medium AND DEM = big	THEN	LEVEL = high
R-5: IF	CON = long	THEN	LEVEL = high

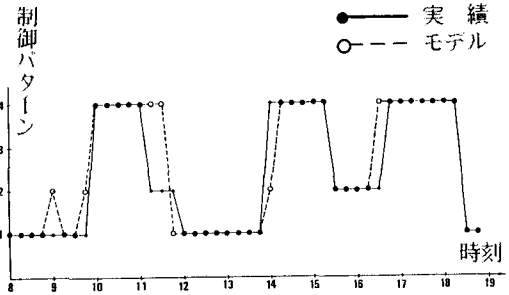


図-4 モデルの計算結果

によって記述される。現実には先にあげた4つのパターンによって生起するパターンが分類される。そこで本研究ではファジィ推論の出力として得られる制御レベルをそれぞれの制御パターンに変換してモデルからの出力とした。このときの制御レベルとパターンとの関係は先の表-1に示されている。

●パラメータの決定

本研究においてはメンバシップ関数の形は決定されているので実際に決定すべきパラメータはメンバシップ関数のパラメータである。ファジィ推論の方法においては現在のところ実績に対して最適解を求める方法が一般には存在しない。そこで本研究においてはパラメータの存在範囲を定めその範囲内において乱数を発生させこのうちで最も適合性のある値を持ったものをパラメータ値として考えた。この結果モデルの具体的構造が決定される。

3.2 モデルの挙動と考察

さきに求められたパラメータによってモデルが決定される。この結果、入力変数として渋滞長と流入需要量が与えられると推論が行われ、これにより制御パターンが決定されるという構造をとる。ここで

モデルの決定に用いたデータによってモデルの実際の現象に対する説明程度を見るために、モデルでの出力値と実際の制御結果とを比較し時間断面に対する変化として図示したものが図-4である。この計算結果より以下のことがいえる。

- ①全断面を比較して、全体的に現状の制御パターンとよく一致しておりモデルによる説明程度は高いと考えられる。(適合度：制御パターンが計算と実績の一致した断面の数を全断面の数で除した値は0.848であった。)
- ②制御パターンの変化を見ると実際の制御においてはパターン間の遷移は比較的大きく変化する。すなわち隣接するパターンでなくとも遷移が起こるが、モデルではレベルの順を追って変化し過渡的な状態を示すパターンが発生する。

以上の検討は「ある日におけるある担当者」の判断を比較的良好に表現することができることを示している。さらにこのモデルの妥当性については、当該路線の他の日のデータについても説明可能であることを調べる必要がある。ここでは具体的な内容については省略するが、数ケースについての検討を行い本例と同様な比較的良好な結果を得ている。

4. 制御方法の変更についての検討

ファジィ推論による交通制御方法の最も特徴的な点は、経験則によってファジィ変数の定義、使用する説明変数の選択、推論規則の構成などを状況に即して追加、変更、削除を行ってファジィ推論内容の変更が可能である点である。本研究の例では「大きい」「小さい」といったファジィ変数を用いたルール構成が人間の感覚に近い形で表現されていることからこれを吟味し言語レベルで変更することができることに対応する。したがって検討の結果、新たに制御に必要となるルールについては新変数の導入とルール内容の変更を行うことで対応することができる。ここでは変更の一例として、先の表-2で示した5つのルール群に渋滞に対する制御時間に関するルールを一つだけ追加する場合を考えた。具体的には、次のようなルールを追加した。

R-6 : TIME = long THEN LEVEL = low

渋滞制御の継続時間が増大することは、特定のオンラインを閉鎖し続けることになり、利用者不満を

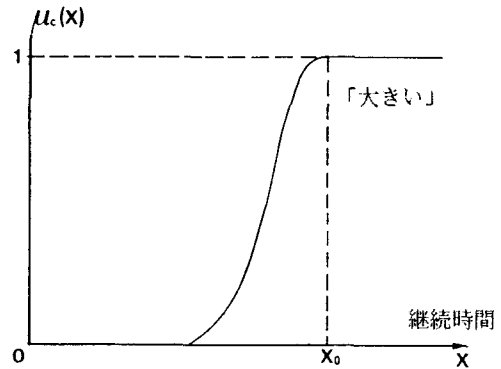


図-5 制御継続時間のメンバシップ関数

表-3 ルール変更後の計算結果

No.	時刻	$x_0=1$	$x_0=2$	$x_0=3$	x_0 ナシ
1	8:00	1	1	1	1
2	8:15	1	1	1	1
3	8:30	1	1	1	1
4	8:45	1	1	1	1
5	9:00	2	2	2	2
6	9:15	1	1	1	1
7	9:30	1	1	1	1
8	9:45	2	2	2	2
9	10:00	4	4	4	3
10	10:15	4	4	4	4
11	10:30	3	4	4	4
12	10:45	2	4	4	4
13	11:00	2	4	4	4
14	11:15	2	3	4	4
15	11:30	2	2	4	3
16	11:45	1	1	1	2
17	12:00	1	1	1	1
18	12:15	1	1	1	1
19	12:30	1	1	1	1
20	12:45	1	1	1	1
21	13:00	1	1	1	1
22	13:15	1	1	1	1
23	13:30	1	1	1	1
24	13:45	1	1	1	1
25	14:00	2	2	2	2
26	14:15	4	4	4	4
27	14:30	4	4	4	4
28	14:45	3	4	4	4
29	15:00	2	4	4	4
30	15:15	2	4	4	4
31	15:30	2	2	2	2
32	15:45	2	2	2	2
33	16:00	2	2	2	3
34	16:15	2	2	2	2
35	16:30	2	2	2	4
36	16:45	2	2	3	4
37	17:00	2	2	2	4
38	17:15	3	3	3	4
39	17:30	3	3	3	4
40	17:45	3	3	3	4
41	18:00	3	3	3	4
42	18:15	2	2	2	4
43	18:30	1	1	1	1
44	18:45	1	1	1	1

招きまた待ち行列の増大など不都合を生じる。そこである程度の制御時間の許容される時間を設定しあ

まりに制御の継続時間が長くなれば制御レベルを下げるという形の制御ルールを付加したわけである。このモデルではルールの間がORで結合されていることから、その他の既存のルールについては変更する事なく新たなルールの影響のみを追加することができる。このとき追加したルールに対応するメンバシップ関数を示したものが図-5である。この関数形からわかるように制御継続時間が「長い」という認識の基準となるのが、 x_0 の値であり、これをこの値よりも渋滞渋滞による制御時間が増大すれば制御をひかえめにすることを示している。

ここで、この変数以外の入力変数のパラメータ値および入力値については前章によるものを用いている。またここでの制御継続時間は実際の制御パターンの2, 3, 4の何れかが行われている場合の継続時間とした。表-3に x_0 の値を1, 2, 3時間とした場合のそれぞれについて計算した結果をしめす。この結果次のことがわかる。

- ①制御継続時間の制約を加えていることから、全体的にルール変更のない(x_0 なしの場合)の制御に比べてパターンのうち制御段階の小さいものが多く現れるひかえめな制御となっている。
- ②当然のことながらモデルでの出力は基準値 x_0 が小さいほど、長時間にわたる制御をひかえる方向に出力パターンが変化していることは顕著である。特に渋滞の慢性的となっている午後のパターンにこの傾向が明らかである。

5. おわりに

都市高速道路における交通制御は現在入路閉鎖ブース制限という形でありLPなどの理論的制御解の存在や、過去の経験の蓄積である管制要領などの存在にもかかわらず、現実の交通状態によって管制担当者の判断に任されている。こうした現状にあっては判断は熟練した管制担当者に行かえず、これまでこうしたことが交通管制の効率化を妨げる一因となっていた。本研究では管制担当者による判断を明示的に言語ルールとして表示しモデルを作成し、さらに実際のデータによって検討を行った。この結果人間の判断過程をわかりやすい形で表現することが可能となり、管制担当者の判断を代替的に行いうるシステムの構築の可能性が示された。

実用性という点から今後の課題としては以下のことが挙げられよう。

- ①今回の研究では問題の単純化のために単一の路線について検討したが、実際の制御行動は複数路線のオンランプを同時に制御対象として運営されており、今後一路線だけでなくいくつかの入路の関係も考慮したモデルとする必要がある。
 - ②モデルでは実際の運営の効率化を図ることは可能であるが、交通流の円滑な流れを考えた効率的な制御結果をもたらすか否かについての検討は行われていない。そこで制御結果を評価できるような(たとえばシミュレーションといった)方法を導入し真に有効な方法を探索する必要がある。
- 最後に本研究を終えるにいたり、データの収集等でご協力いただいた阪神高速道路公団、地域交通計画研究所に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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 1985,3
- 2) E.A.Mamdani, Application of fuzzy algorithm for control of a simple dynamic plant, Proc.IEE, Vol.121, No.12, pp.1585-1588, 1974.
- 3) C.P.Pappis and E.H.Mamdani, A fuzzy logic controller for a traffic junction, IEEE Trans SMC-7-10, pp.707-712, 1977.
- 4) 佐佐木綱、秋山孝正、奥村透、交通管制の効率化をめざした流入制御記述モデル 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集 4 pp.463-464, 1985.
- 5) 秋山孝正、奥村透、ファジィ制御手法による高速道路交通制御のモデル化 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.
- 6) 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.
- 7) 菅野道夫、あいまい集合と論理の制御への応用、計測と制御、vol.18, No.2, pp.8-17, 1979.
- 8) 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.
- 9) 稲葉則夫 実用化が始まったファジィ理論●2 日本では電車の自動運転、浄水場の制御などに利用 日経エレクトロニクス '84.12月号, pp.183-192, 1984.