(4) ファジィ推論による経路選択行動分析モデル

MODELS FOR ANALYSIS OF ROUTE CHOICE BEHAVIOUR USING FUZZY REASONING

秋山孝正 *

Takamasa AKIYAMA

A route choice is often used to analyze travel behaviour and estimate traffic volume on urban transport networks. As the analysis for factors of diversion has been carried out, the result can be used for establishing a suitable type of forecasting model. In the study the route choice rate estimation model by fuzzy reasoning is discussed from its logical structure and accuracy for estimation. Firstly the basic fuzzy reasoning model is introduced with consideration of reality to actual traffic behavior. Secondly typical four kinds of implications are investigated comparatively to investigate their features on estimation of diversion rates. Thirdly defuzzification process in fuzzy reasoning is considered. Four defuzzification methods are mentioned to know the relationship between shapes of membership function and estimation validity.

Key Words: fuzzy reasoning, route choice model, traffic diversion

１．はじめに

都市道路網計画を検討するためには将来の交通流動を知る必要があり、この際交通均衡状態を考慮した交通量推計法が用いられることが多い。特に広域的道路網では、いわゆる「交通量配分法」として数理計画を援用した最適化計算法（ＦＷ法）や実用近似計算のための分割配分法（ＩＡ法）等が用いられる。しかしながら通常道路網は高速道路と一般道路で構成され、交通量推計では両者の交通分担関係を求めた後に各道路網上の交通量推計を行う場合が一般的である。その意味で運転者の経路選択行動のモデル化を行うことになるが、この交通行動現象の表現法として統計学的視点から導かれる関数式モデルが多く用いられてきた。これは、既存交通量のデータから推計を行う場合に計算が容易な方法であり実用性も高いとされる。しかし意思決定者（運転者）の日常的な行動を考える場合には、関数論的な行動記述が必ずしも現実的であるとはいい難い。そこで近年ファジィ推論を用いた交通行動モデルの作成が提案されており、基本的な行動記述モデルが作成されている。本研究ではこの研究成果を踏まえファジィ推論モデルの応用手順について検討する。

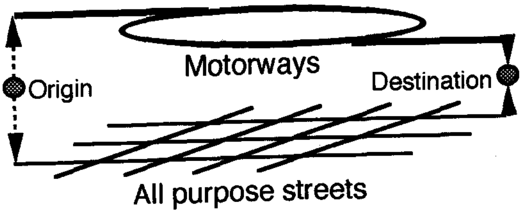
具体的にはファジィ推論を用いて人間の判断を自然な形で表現し、交通量推計問題に用いるためのモデル化を考える。まず一般的なファジィ推論モデル基本的構造について述べるとともに、推論形式を規定する「願意公式」の定義から、各種モデル化方法の比較検討を行う。さらに同様にファジィ推論手順のなかから、「非ファジィ化方法」のモデル化に対する相違点を推計精度の側面から検討する。これらの比較検討によって、ファジィ推論を交通行動モデル作成に利用する場合の有効性および留意点が整理されることになる。

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

2．ファジィ推論による交通行動記述

2－1　交通経路選択問題

道路網の交通現象をモデル化する際に経路選択が問題となることが多い。この場合の問題は図－1に示すようなものである。すなわち特定のＯＤ交通量（起終点間：出発地から目的地への交通量）に関して、利用可能な経路集合に対して各経路の選択比率を求める問題になる。都市道路網では本図のように一般道路と高速道路によって構成される場合が多く、その意味ではＯＤ間の全交通量に対する高速道路利用比率を求める問題ということもできる。交通工学において人間行動を表現するという観点からみる場合、類似の問題は多数存在する。たとえば、ここで表現している「経路」を交通機関における経路と考えると、結局交通行動者の利用交通機関選択問題となり、また個人や個別自動車の交通パターンとしての「経路」を考えると結局交通移動パターンの選択問題となる。そしていずれの場合も選択可能な代替案集合から、交通行動者が適当な選択を行うという意味で整理することができる。このような問題解決は通常、関数式モデル（対象の属性と利用率との関係を数式によって関係づけたモデル）が用いられている。関数式によるモデル表現は簡便であり、また交通量配分モデルに内包される経路選択決定のサブモデルとして有効である。しかしながら、これらは人間の行動原理を考慮したモデル化というより、実証データとの適合性を高めるための最適パラメータを統計的に決定するものである。したがって複数要因を組み合わせたモデル化などの場合に頑健性に欠ける点がある。ファジィ推論の利用はこのような問題の解決を目指したものである。すなわち運転者の意思決定を現実に近い形でモデル化するとともに、従来型の方法に比べて高い推計精度を持つモデルを作成することを目的としている。



図－1　都市道路網の経路選択問題の例

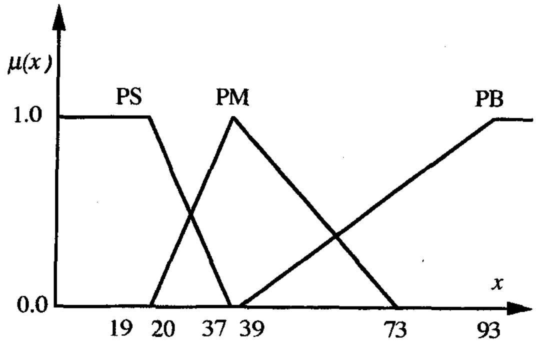
2－2　高速道路利用率推計モデル

ファジィ推論による経路選択モデルの作成手順は既存研究に述べられており[1),2)]、（１）メンバシップ関数の定義、（２）推論ルールの定義、（３）願意公式の決定、（４）演算方法の決定、（５）非ファジィ化法の定義の基本５項目の検討が必要とされている。本研究のファジィ推論モデルも以上の手順にしたがって作成されている。ここでは各項目に対するモデル化の特徴に関連する重要事項を整理して述べる。

まず交通現象分析の対象とするのは近畿地区の主要道路網であり、実際のＯＤ交通量の設定のため全対象地域を121個のゾーンに分割している。また以下でのファジィ推論モデルに関する検討においては、全ＯＤペアのなかからランダムに100個のＯＤペアを抽出し、これをモデル化の基本となる実績データとする。

つぎにモデル変数として、道路網（一般道路・高速道路）の経路選択に関する説明要因、①時間差（一般道路の利用時間t_g と高速道路の利用時間t_h との差、つまり［$t_g - t_h$］）、②単位距離料金（料金／高速道路利用距離）、③ＯＤ距離（ゼロフロー時最短経路上での距離）を用いた。これらのメンバシップ関数には三角型のファジィ数を与える（PS, PBなど）。さらに後件部に相当する高速道路利用率r_hは正規型メンバシップ関数によって定義する。これらのメンバシップ形状の決定には関して多数の方法があるが、特に高速道路料金に対する抵抗に相当する第２の要因については、運転者の意識を直接反映させるため、ファジィデルファイ法を用いた特定化を行った。図－２に示す本要因についてのメンバシップ関数は、数人の専門家による意見を収束基準を満たすまで繰り返し収集し、最終的に合意形成が行われた場合の結果が示されている。

さらに推論ルールは、いくつかのルール構成を比較検討した結果より、図－３のように構成した。このうち、主要な意思決定ルールはＲ－２～Ｒ－10であり、時間差（５種）と単位距離料金（３種）の組合せに関連して経路選択判断を記述するものである。またＲ－１はＯＤ距離の短い場合に考慮されるものである。



R-1 :	IF L IS PS,		THEN Y IS PVS
R-2 :	IF X_1 IS PVS,		THEN Y IS PVS
R-3 :	IF X_1 IS PS	and X_2 IS PS,	THEN Y IS PM
R-4 :	IF X_1 IS PS	and X_2 IS PM,	THEN Y IS PS
R-5 :	IF X_1 IS PS	and X_2 IS PB,	THEN Y IS PS
R-6 :	IF X_1 IS PM,		THEN Y IS PM
R-7 :	IF X_1 IS PB	and X_2 IS PS,	THEN Y IS PB
R-8 :	IF X_1 IS PB	and X_2 IS PM,	THEN Y IS PB
R-9 :	IF X_1 IS PB	and X_2 IS PB,	THEN Y IS PM
R-10 :	IF X_1 IS PVB,		THEN Y IS PVB

注）L；ＯＤ距離，X_1；時間差，X_2；単位距離料金
Y；高速道路利用率

図－２　メンバシップ関数（単位距離料金）

図－３　ファジィ推論のルール群

さらにファジィ推論の形式としては応用的意味から代表的方法とされる「論理積-max-重心法」（マムダニ法）を用いて基本モデルを作成し、これを推計精度面からみた各モデル化方法の比較基準として用いる。

３．含意公式によるモデル比較

３－１　各種含意公式

含意公式はファジィ推論において、推論形式を規定する主要な部分である。本研究ではモデル比較のために典型的なＴ-normとして、以下の定義式に示す形式を取り上げた[3)]。

１）論理積（logical product）　：$x \wedge y = \min\{x, y\}$

２）代数積（algebraic product）：$x \cdot y = x \times y$

３）限界積（bounded product）　：$x \odot y = 0 \wedge (x + y - 1)$

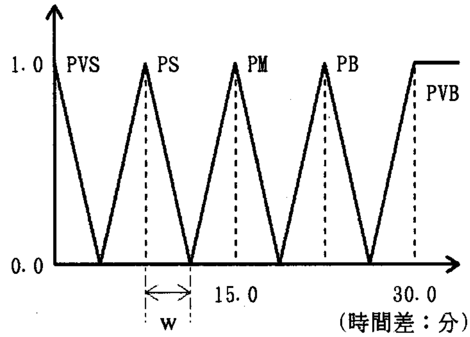
４）激烈積（drastic product）　：$x \triangle y = \begin{cases} x \cdots y = 1 \\ y \cdots x = 1 \\ 0 \cdots x,\ y < 1 \end{cases}$

これら以外のＴ-normも多数定義することができる。ここで一般的なＴ-norm演算の計算結果が論理積と激烈積の中間となることを配慮すると、上記４種のＴ-normを代表的な含意公式と考えることができる。

ファジィ推論は前件部の適合度と後件部との関係から推論を行うから、含意公式の相違は推論結果を示すファジィ数の形状の相違として現れる。この意味で経路選択モデルにおいても推論解釈が可能である。「論理積」は演算が単純でファジィ制御等で一般的に利用される。この場合後件部の上限が規定され、前件部適合性を後件部の信頼度の上限とする推論である。「代数積」の場合は相似的に後件部全情報（分布形状）を考慮できる。この点後件部の適合性は相対的に保存され論理的合理性のよい記述ができる。しかし経路選択現象のモデル化では、運転者が「ファジィ数」全体を意識して行動するかどうか不明であり、必然的な有効性を示すには至らない。また「限界積」および「激烈積」は上記の２方法と比べ、二者択一のクリスプ判断に近い解釈ができる。すなわち特定の条件が成立した場合に利用率を考える形である。これらの演算形式の解釈が難しいが、人間行動のモデル化においては特定条件下で選択行動が行われる場合を表現している。したがって、この推計法は人間が一部の情報で判断を行う形のモデルとしては有効性を持つと考えられる。

3－2　各方法の推計精度の比較

ここでは、各願意公式の推計精度からみた比較を行う。具体的には本モデルの説明変数で最も重要となる「時間差」と被説明変数「利用率」のメンバシップ関数形状の変更を考えた。たとえば「時間差」について、図－4に示すように幅（W）を規定する。このメンバシップ関数の幅を、7.5(min)を中心にして11ケースを設定した。また利用率についても12.5(%)中心に11ケースを設定し、最終的に合計121ケースのパラメータについて推計精度を比較した[4)]。



図－4　時間差メンバシップ関数の幅

推計誤差を考える場合、簡単に相関係数によって検討することもできるが、線形関係だけでなく実用的な意味から推計精度の比較するには、誤差の多少を議論する必要がある。ここでは一般的な交通現象モデルの推計精度を検討に用いる「平均2乗誤差（RMSE :root meansquare error）」を指標とした。これは実績値・推計値により以下のように定義される値である。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}_i)/n}, \qquad x_i：実績値\ \bar{x}_i\ 推計値$$

各願意公式に対して、さきの全ケースに関する推計誤差の値を算出し、推計誤差が最小となる場合を最適値と考え、このケース内容を抽出した。これらの算出結果を表－1に示す。この表からメンバシップ関数のパラメータを変化させることにより、最適値を算出すると方法間に大きな推計上の差異がない（いずれの場合も16%程度の推計誤差を持つ）ことがわかった。

表－1　含意公式によるモデル誤差比較

方法	RMSE	相関	関数幅（W,B）
論理積	0.1636	0.840	(7.50, 16.25)
代数積	0.1636	0.838	(9.00, 18.25)
限界積	0.1627	0.839	(7.50, 12.50)
激烈積	0.1656	0.833	(7.50, 12.50)

W:spred of membership function of t_s-t_h
B:spred of membership function of r_h

また同表より最終的に得られる関数の幅の決定値は若干異なることがわかる。たとえば、「代数積」では変数の関数幅が全体的に大きい箇所にパラメータが存在している。また「限界積」、「激烈積」の場合、被説明変数の関数幅は小さくなる。関数幅を小さくすることは、複数のメンバシップ関数の重複部分を減少させる意味を持つので、この結果はクリスプ推論に近い形式であることがわかる。しかしながら全般的に見て、いずれの願意公式を用いても最適パラメータ近傍の値を設定する場合には、推計精度が大きく変化することは少なく、特に実用面から高速道路利用率の推計精度の優劣を議論できる範囲には入っていないようである。

以上の考察から、含意公式として各方法の大きな差異はないことがわかり、またメンバシップ関数の形状変化の与える影響も全体の推計有意性の意味からは、それほど大きくないことがわかった。

3－3　推論形式の変更

上記の4種の推論形式の他に、本研究では「代数積－加算－重心法（ＰＳＧ法）」による推計精度についても同様の手順で検討した。この推論は含意公式に代数積を用いる点では、前述第2の方法と同じであるが、非ファジィ化の際に各メンバシップ値の加算を行う点で異なる。これは願意公式に代数積を用いた推論方法の意味上の改良と考えられ、この場合の誤差最小ケースは、RMSE=16.16%(W=8.25, B=any)であった。

ここではＰＳＧ法の採用によって若干推計精度の向上が見られ、また利用率の幅は今回のケース設定では、任意の値でよいことがわかり、その意味では頑健なモデル構築が可能であることがわかる。従来の研究に見られるように「代数積－加算－重心法」はファジィ推論の実用的な改良法として有効であることがわかる[2)]。

4．非ファジィ化法によるモデル比較

ファジィ推論の演算手順において、各ルールの推論結果であるファジィ数を確定数に変換する非ファジィ化（defuzzification）は人間認知のモデル表現とその解釈を考慮する上で重要である。本研究ではファジィ推論モデルを構成する場合の代表的な非ファジィ化法を取り上げ、これらの具体的な演算方法の整理と高速道路利用率推計時の推計精度の点から各方法の比較検討を行った。

4－1　非ファジィ化法

推論結果であるファジィ数から、実用的な確定値を得るための「非ファジィ化法」には数多くのものがあるが、ここでは代表的方法とされる以下の４種類を取り上げた[3),4)]。

①重心法　推論結果のファジィ集合C’の重心を代表点ｚとする。

②中央値法　推論結果のファジィ集合C’の面積を２等分する点を代表点とする。

③高さ法　C_iの代表点z_iをファジィ集合C_i’の高さh_i’で荷重平均を取る。すなわち、

$$z = \frac{z_1 h'_1 + z_2 h'_2 + \cdots + z_n h'_n}{h'_1 + h'_2 + \cdots + h'_n}$$

④面積法　C_iの代表点z_iをファジィ集合C_i’の面積S_i’で荷重平均を取る。すなわち、

$$z = \frac{z_1 S'_1 + z_2 S'_2 + \cdots + z_n S'_n}{S'_1 + S'_2 + \cdots + S'_n}$$

各方法を大別すると、①、②は統合されたファジィ集合から代表点を求める方法であり、③、④は各推論規則から得られた個々のファジィ集合の特性を利用して代表点を求める方法であるといえる。

4－2　推計精度からみた各方法の比較

各非ファジィ化法に対して、含意公式に対する検討と同様、メンバシップ関数の幅を変化させて推計結果の精度比較を行う。したがって、対象ケースは同じく121 ケース（11×11）である。具体的には、ファジィ推論手順の「min-max-*」部分の演算において非ファジィ化部分(*)に対して「重心」（基本モデル）および上記３種の方法を用いて利用率推計を行った。つまり含意公式部分はいずれも「論理積」型であり、「重心」による非ファジィ化を行えば「マムダニ法」と一致する。この場合も高速道路利用率推計をさきに抽出した100サンプル（実績値）について算出し、モデルの推計精度の指標としてＲＭＳ誤差と相関係数を算出した。

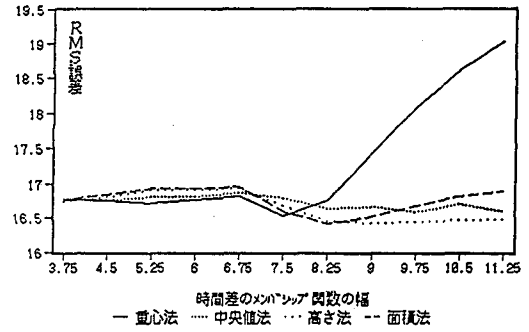
表－２　非ファジィ化法によるモデル誤差比較

方　法	最小値	最大値	関 数 幅（W, B）
重 心 法	0.1636	0.1887	(7.50,　16.25)
中央値法	0.1628	0.1674	(9.75,　6.25)
高 さ 法	0.1626	0.1676	(9.00,　----)
面 積 法	0.1624	0.1679	(8.25,　10.00)

W:spred of membership function of $t_e - t_h$
B:spred of membership function of r_h

表－１は、各非ファジィ化法を用いた場合の全ケースの中でのＲＭＳ誤差の最小値、最大値を示したものである。誤差最小のケースを取り出すとすれば、各方法とも同程度の推計が可能であるといえる。また本例では、若干ではあるが面積法が最も良好な推計結果を与えている。さらに、メンバシップ関数幅変更の影響は最大値との差異によりわかるが、重心法以外は比較的ケース間の推計差異は少ないといえる。つぎに時間差関数幅の影響を見るために、転換率関数幅を固定し（Ｂ=12.5）、説明変数である時間差の関数幅Ｗを変化させた場合の推計誤差を図－５に示す。Ｗ（メンバシップ関数の重複）が小さい場合には、重心法の推計誤差が小さく、またＷの増加に伴って重心法では他に比べて急激に誤差が大きくなることがわかった。このことから重心法は時間差メンバシップ関数設定の影響を敏感に反映することがわかる。さらに相関係数を用いて以上の検討を行ったが傾向は同様であった。

5. おわりに



図－5　非ファジィ化法によるモデル精度比較

経路選択現象を記述するファジィ推論モデルを構築するための、含意公式と非ファジィ法についてそれぞれ推計精度の点から比較検討を行った。この結果以下の諸点が明らかになった。

①推計精度の点では、含意公式・非ファジィ化ともに方法間の大きな差異が見られない。したがって、ファジィ推論ルール群を決定した後に生じる各推論手順の方法選択の影響は比較的小さい。したがって必要な推計精度を持つ経路選択モデルの構築上でファジィ推論の頑健性を生かすことができる。

②非ファジィ化で「重心」を用いると、説明変数のメンバシップ関数の設定に関連して推計精度の変化が大きい。これはパラメータ設定上好ましくないが、一方実績データとの適合性を考慮したモデル推計条件の善が容易となることを示すものである。

③「論理積－加算－重心法」は推計精度面で有効であり、経路選択モデルにおいても基本的推論手順として利用できる。また近年提案されている「代数積－加算－重心法」はこの改良法として利用可能である。

以上のようにファジィ推論モデルは経路選択行動記述においても、多数の演算形の規定が容易で、頑健性を持つ推計が可能である。またファジィ推論形式の規定後、実績値との適合性からモデルパラメータの推計には、試行錯誤的な方法を用いてきた。この点について、ファジィ推論過程のような高度な非線形性を持つモデルに対する最適化技法として遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）の利用が提案されている。本研究と同種の問題に関するメンバシップ関数のパラメータ決定を行った報告によれば、試行錯誤法に比べて若干の推計精度の向上が見られることが知られている[5)]。今後は推論ルールの具体的な構成方法なども含めた、モデル構成と演算形式について議論を進めていく必要があると考えられる。

なお本研究の遂行にあたり、邵春福氏（（社）システム科学研究所）および川崎恭子（旧姓：中村）氏に計算実行の面で多数のご協力をいただいた。またデータ収集等で阪神高速道路公団ならびに㈱地域交通計画研究所の御協力を得た。ここに記し感謝の意を表する次第である。

参　考　文　献

1）秋山孝正・邵春福・佐佐木綱：ファジィ理論を用いた転換率推計モデルについての比較研究，土木計画学研究・論文集，No. 8，185-192，1990.

2）秋山孝正：ファジィ推論によるモデル構築手順とその応用的意義について，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集４，pp. 185-192，1990.

3）水本雅晴：わかりやすいファジィ理論Ⅲ－ファジィ推論とファジィ制御，コンピュートロール，No. 28，pp. 32-45，1989.

4）秋山孝正・中村恭子・邵春福：ファジィ推論による経路選択モデルの推計精度について，第７回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 519-522，1991.

5）秋山孝正：ファジィ理論を用いた道路交通流解析，土木計画学研究・論文集，No. 11，1993.