論文

ファジィ理論に基づく 道路交通流解析に関する実証的研究[†]

邵 春福*¹ 秋山 孝正*² 佐佐木 綱*³

交通量配分は道路ネットワーク計画で中心的な交通量推計手法となっている。そこで本研究ではファジィ所要時間を用いた交通量配分を提案する。さらにこれら方法の有効性を実証的なデータから検証する。具体的には、まず道路交通センサスと交通利用者アンケート調査結果から、ファジィ所要時間の形状を検討した。ここでは、ファジィ所要時間の表現のためにリムーバルと重心値を用いた2種類の方法を提案した。いずれもファジィ所要時間の代表値から交通量推計をするモデルである。これらは、既存の数値計画法を用いた交通量配分の拡張型として定式化できる。

つぎにモデルを京都市道路ネットワークに適用し、現実規模の交通流解析を行った。とくに道路種別ごとのリンク観測交通量と推計交通量の関係から各モデルの有効性が示された。

この結果、提案したモデルは所要時間情報に対する利用者認知形態を表現でき、実用的な交通量推計が可能であることがわかった。

キーワード：ファジィ所要時間、交通量配分、道路ネットワーク

1. はじめに

道路交通流解析の方法として、従来から利用者均衡配分法(以下「確定的方法」と記す)についての数多くの研究蓄積があり、整理されている^{1),2)}。この確定方法では、交通利用者の行動に対して(a)同一な選択基準(所要時間)で独立に行動する。(b)完全な交通情報を持つ。(c)確定的に最短経路を選択する前提条件が与えられている。しかし、現存の道路交通システムでは、完全情報の提供や均質に利用者の行動管理が難しいことからこれらの前提条件が必ずしも妥当な現実現象の記述となっているとはいえない。

このような点から、交通情報の不完全性と経路に対する利用者の評価値の不確実性を考慮し、経路選択現象を確率的に取り扱う確率的均衡配分法(以下「確率的方法」と記す)が提案されている³⁾。この方法では、利用者の行動に対して(a)異なる選択基準で独立に行動する。(b)不完全な交通情報を持つ。(c)確率的な経路選択を行うという前提条件が与えられている。すなわち認知所要時間についての確率的な表現を導入した現実的改良となっている。

つまり、確率的方法では、交通利用者が異なる評価基準で経路を選択すると考えるが、本研究でのファジィ均衡では、確定的方法と同様、所要時間がファジィ数ではあるが各利用者は同一の評価基準で経路選択すると考える。すなわち、利用者行動に対して(a)同一な基準(ファジィ所要時間)で独立に行動する。(b)ファジィ数としての情報(ある意味で完全な)を持つ。(c)確定的な経路選択という前提条件が与えられている。

上記のように、認知所要時間は利用者ごとに異なり、確率的に分布するいわゆる「ランダム数」として表現できる。一方、利用者認識は情報の記述表現という意味では、「およそ30分」「約30分」というファジィ数と考えることもできる。

本研究では、ファジィ理論を適用した方法論を現実の道路交通データを用いて実証的に検討する。一つは「道路交通センサスデータ」と「道路利用者認知に関するアンケート調査結果」から、ファジィ所要時間に関する検討である。もう一つは認知所要時間をファジィ数とする理解の現実的意味と、これより得られる交通量算出結果と現実交通現象との対応に関する検討である。また道路交通情報の整備とそれに対する利用者行動の記述をもって、具体的な交通情報の運用と交通管理方策に関する考案も行う。

2. 道路ネットワーク上のファジィ所要時間

2.1 ファジィ所要時間⁴⁾

ここでは、リンクあるいは経路の認知所要時間が[最小値、最大値]を持つファジィ数であるとする。このとき、図-1は、 A 、 B のファジィ数(ファジィ所要時間)の関係を描いたものである。

[†] Empirical Approach for Road Traffic Flow Analysis on the Basis of Fuzzy Set Theory
Chun Fu SHAO, Takamasa AKIYAMA and Tsuna SASAKI

*¹ 社団法人システム科学研究所

Institute of Systems Science Research

*² 岐阜大学工学部

Faculty of Engineering, Gifu University

*³ 近畿大学理工学部

Faculty of Science and Engineering, Kinki University

図-1 ファジィ所要時間の記述

ファジィ所要時間は、所要時間(たとえば、 t_a)の持つ言語的意味を、この値の前後に広がりを持つ認知形状で表現しようとするものである。たとえば、「60分」という情報があるとき、日常言語的には「1時間くらい」の意味を持つと考える。

ファジィ所要時間は認知情報の記述を現実的に近い形としたものであり、人間は(ファジィ情報の意味での)不確定情報下で行動を行うものとしている。実際の交通システムにおいて、提供される所要時間情報は確定値として表現されるが、利用者はこの確定値に基づき各自の可能性分布を形成して認知する。

2.2 ファジィ所要時間による経路比較^{5),6)}

所要時間の可能性分布(ファジィ数)が形成されると、交通利用者は経路間でファジィ数の比較を行い、いずれの経路が有利か否かを決定する(代表値の決定)。

実数軸上のファジィ数の大小比較には、多数の方法が提案されているが、大別して(a)ファジィ数の代表値を用いる方法と(b)比較指標を用いる方法がある。このうち、すでに交通量配分への応用が提案されている前者のなかから2つの方法を述べる。

(1) 重心値を用いた記述

この方法は「ファジィ制御」の非ファジィ化(defuzzification)でよく利用される方法である。これは図-1に示すように、メンバシップ関数分布形の重心位置に対応する確定値をファジィ数の代表値とするものである。すなわち、つぎの式により定義される。

$$t_g = \int_{t_{al}}^{t_{ar}} t \cdot \mu(t) dt / \int_{t_{al}}^{t_{ar}} \mu(t) dt \quad (1)$$

図-1の単峰型ファジィ数A、Bの場合、関数の代表値はそれぞれ t_{ag} と t_{bg} となる。また具体的なメンバシップ関数の形状として三角型ファジィ数(Triangular Fuzzy Number)を用いると、ファジィ数は式(2)に示される。

$$\begin{aligned} \mu(t) &= 0, & t &\leq t_{al} \\ &= (t - t_{al}) / (t_a - t_{al}), & t_{al} &\leq t \leq t_a \\ &= (t_{ar} - t) / (t_{ar} - t_a), & t_a &\leq t \leq t_{ar} \\ &= 0, & t_{ar} &\leq t \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入し積分すると、結局「重心法」

では、式(3)のように各ファジィ数の代表値を比較することになる。

$$t = \frac{1}{3} t_a (3 - \gamma_a + \beta_a), \quad a \in L \quad (3)$$

ここで、

t_a : 三角型メンバシップ関数の中心値(確定値)
 γ_a : リンクaのメンバシップ関数の左スプレッド
 β_a : リンクaのメンバシップ関数の右スプレッド
 L : リンクaの集合

である⁷⁾。

重心法はファジィ数の分布「重心」を代表値とするため検討は容易である。しかしながらファジィ情報をあらかじめ集約するので判断時(代表値を比較するとき)には情報の欠落が生じるといえる。

(2) 総時間差による記述

この方法は、ファジィ数同士の相違を距離指標で表現するものである⁷⁾。ここでも、さきの図-1におけるファジィ数A、ファジィ数Bについて述べる。一般にファジィ数は、「分解定理」(resolution identity)を用いて、ファジィ数の α レベル集合(区間集合)に分解できる⁸⁾。ここで α レベル集合は

$$A_\alpha = \{x | \mu_A(x) \geq \alpha\}, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (4)$$

で定義されるクリスプ集合である。

これより「ファジィ数」の演算を区間集合に対する通常の数値演算に変換できる。結局、分解定理からファジィ数A、Bは下式のように表すことができる。

$$A = \bigcup_{\alpha} \alpha \cdot A_\alpha, \quad B = \bigcup_{\alpha} \alpha \cdot B_\alpha, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (5)$$

ここでファジィ数A、Bのある α レベル集合に対する「差」を δ とすると、式(6)のようになる。

$$\delta(A_\alpha, B_\alpha) = \frac{1}{2} \{ \Delta_l(A_\alpha, B_\alpha) + \Delta_r(A_\alpha, B_\alpha) \} \quad (6)$$

ここで

$\Delta_l(A_\alpha, B_\alpha)$: ファジィ数A、Bのメンバシップ関数の α レベルの左辺値の差
 $\Delta_r(A_\alpha, B_\alpha)$: ファジィ数A、Bのメンバシップ関数の α レベルの右辺値の差

従って、ファジィ数A、Bの「差」を求めるには、 α に関する積分を行えばよい。具体的には、図-1の斜線部分を算出することになる(但し、重複部分は2度加算する)。この積分値はファジィ集合の「リムーバル」とよばれるものである⁷⁾。すなわち、

$$\delta(A, B) = \int_0^1 \delta(A_\alpha, B_\alpha) d\alpha$$

$$\int_0^1 [(a_{la} - b_{la}) + (a_{ra} - b_{ra})] d\alpha \quad (7)$$

ここでも式(2)のような三角型ファジィ数を考えれば、 A 、 B の「差」は下式になる。

$$\delta(t_a, t_b) = \frac{1}{4} \{ t_a(4 - \gamma_a + \beta_a) - t_b(4 - \gamma_b + \beta_b) \} \quad (8)$$

ここで、

$$t_i^* = \frac{1}{4} t_i(4 - \gamma_i + \beta_i), (i=a, b | \forall a \in L, \forall b \in L) \quad (9)$$

とすれば、「差」は

$$\delta(t_a, t_b) = t_a^* - t_b^* \quad (10)$$

である。すなわち、ファジィ数 A 、 B の「大小関係」は代表値 $t_i^* (i=a, b)$ の比較により計算できる。この方法を以下では「総時間差法(リムーバル法)」とする。

「総時間差法」はファジィ数の各 α レベル集合[区間数]について比較結果の総和を求めることに相当し、ファジィ数同士の全体的な「差」を示す。

三角型ファジィ数を用いる場合に限れば、いずれの方法も代表値を想定した比較であり、大きな相違は見られないが、一般的に「重心法」に比べ、「総時間差法」では、分布形の相違が現れやすい。

(3) ファジィ数の形状と所要時間情報

三角型ファジィ数では、左右スプレット(γ_a , β_a)の値により、その形状が変わる。これを利用して、利用者の認知所要時間を近似的に表現する。

たとえば、 $\gamma_a = \beta_a = 0.0$ (図-2(a))のとき、所要時間は確定値(クリスプ数) t_a となり、通常の確定所要時間と一致する。所要時間がファジィ性のない完全な情報として認知される場合に相当する。つぎに、 $\gamma_a = 0.0$ では、 $t \geq t_a$ の部分のみの直角三角形のファジィ数である(図-2(b))。これは利用者が「必ず〇〇分以上かかる」という認知に対応し、所要時間の下限値を規定することに相当する。一方、 $\beta_a = 0.0$ では、 $t \leq t_a$ の部分のみの直角三角形のファジィ数である(図-2(c))。これは利用者が「必ず〇〇分以下である」と認知し、所要時間の上限値を規定する場合に相当する。

前者は予測される偶発的な交通障害が多く存在する場合の判断で、後者は比較的混雑や交通障害の少ない場合の判断であるといえる。

一般的にはこの二つのファジィ数の中間の場合である $0.0 < \gamma_a < 1.0$, $\beta_a > 0.0$ (図-2(d))のパラメータをもつファジィ数として認知所要時間を表現する。

3. ファジィ情報下の利用者均衡問題

通常の交通均衡状態はワードロップ(Wardrop)の

(a) $\gamma_a = 0.0$ 且つ $\beta_a = 0.0$ の場合

(b) $\gamma_a = 0.0$ の場合

(c) $\beta_a = 0.0$ の場合

(d) $0.0 < \gamma_a < 1.0$ 、且つ $\beta_a > 0.0$ の場合

図-2 所要時間のファジィ数としての表現

第1原理に基づいて表現される。ワードロップの第1原理は「発着ゾーン間に存在する道路ネットワーク上利用可能な経路のうち、利用される経路については所要時間は皆等しく、利用されないどの経路のそれよりも小さい」というものである。この交通均衡状態は、完全情報のもとで、利用者が合理的行動を行う場合に生じるもので、道路ネットワーク計画で想定される基本的状態である。したがって、この均衡状態の下では、利用者は経路変更によって走行時間を小さくすることはできないことに対応する。

(1) 交通均衡状態と定式化

上記の原則にしたがう交通均衡状態(ファジィではない)は、以下の等価な数理計画問題によって定式化できる¹⁾⁻³⁾。

$$\min Z = \sum_{a \in L} \int_0^{x_a} t(x) dx \quad (11)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k \in K_{ij}} x_{ijk} = T_{ij}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K_{ij}} x_{ijk} d_{aijk} = x_a, \quad \forall a \in L \quad (13)$$

$$x_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K_{ij} \quad (14)$$

ここで、

Z : 目的関数

x_a : リンク a の交通量

$t(x_a)$: x_a に対する所要時間

K_{ij} : ゾーン i, j 間の経路 k の集合

T_{ij} : ゾーン i, j 間の交通需要量

x_{ijk} : ゾーン i, j 間の経路 k の交通量

d_{aijk} : リンク a がゾーン i, j 間の経路 k に含まれるときは 1、その他は 0

I, J, L : それぞれゾーン i, j とリンク a の集合

つまり、問題は交通保存則(式(12)から式(14))の下で、道路ネットワーク全体の総走行時間最小(式(11))とする交通流を求める数理最適化問題である。

本研究で検討しているファジィ所要時間の場合は、式(11)中の $t(x)$ が、「重心法」では式(3)、「総時間差法」では式(9)により表現されることになる。したがって、通常のリリンクコスト関数値をファジィ所要時間の代表値で代替する点だけが異なることになり、結局、確定的方法と同様に一意な均衡解を持つ⁴⁾。

また計算アルゴリズムは、確定的方法を計算するための Frank-Wolfe 法を本問題に適用できる⁵⁾。計算手順上は、下記のような経路所要時間の算出部分が異なるだけである。

【確定的方法】

$$t_{ijk}^{(n)} = \sum_{a \in L} d_{aijk} \cdot t_a^{(n)}, \quad \forall i, j, k \quad (15)$$

【重心法】

$$t_{ijk}^{(n)} = \sum_{a \in L} d_{aijk} \cdot (3 - \gamma_a + \beta_a) \cdot t_a^{(n)} / 3, \quad \forall i, j, k \quad (16)$$

【総時間差法】

$$t_{ijk}^{(n)} = \sum_{a \in L} d_{aijk} \cdot (4 - \gamma_a + \beta_a) \cdot t_a^{(n)} / 4, \quad \forall i, j, k \quad (17)$$

$t_{ijk}^{(n)}$: n 回目の繰り返し計算における OD ペア i, j 間の経路 k の所要時間の代表値

$t_a^{(n)}$: メンバシップ関数の中心値で、B.P.R.関数によって決定

つまり、通常の Frank-Wolfe 法(確定的方法)では、経路所要時間は通過リンク所要時間の総和である。これに対し、改良した Frank-Wolfe 法(ファジィ均衡)では、経路所要時間は拡張原理⁶⁾に基づくファジィ数の和として算出される。

(2) ファジィ情報下の利用者均衡の概念⁹⁾

ファジィ所要時間を仮定する利用者均衡と確定的方法の相違は、図-3のように説明できる。図-3は、

図-3 ファジィ情報下利用者均衡の概念

横軸と縦軸を交通量 x と所要時間 $t(x)$ とし、特定 OD 間の 2 本経路問題を想定した利用者均衡概念を示している。所要時間関数は経路 1 について左側から、経路 2 について右側から描いている。

所要時間が確定値の場合、経路 1、経路 2 の所要時間は曲線 $t_1(x)$ 、 $t_2(x)$ で表される。一方、ファジィ所要時間を仮定する場合には、経路 1 について、 $t_{1l}(x)$ (左スプレット)、 $t_1(x)$ (中心)、 $t_{1r}(x)$ (右スプレット)、経路 2 について、 $t_{2l}(x)$ 、 $t_2(x)$ 、 $t_{2r}(x)$ のような幅を持つ関数曲線で示されている。

この図において、確定的方法の均衡点は O に対応する。これは通常の均衡状態に対応している。つまり、 $t_1(x_1) = t_2(x_2)$ である。これに対し、ファジィ所要時間を用いると、均衡点は $ABCDEFGH$ で囲まれる範囲内のある点に対応する。実際の対応点はファジィ数の形状(あるいは代表値の決定法)に依存する。

三角型ファジィ数の場合、 $t_{1l}(x) = t_1(x) = t_{1r}(x)$ かつ $t_{2l}(x) = t_2(x) = t_{2r}(x)$ (すなわち、 $\gamma_i = \beta_i = 0, i = 1, 2$) のとき、確定的方法の均衡点に一致する(均衡点: O)。また、たとえば、 $\gamma_i = 0, \beta_i \neq 0 (i = 1, 2)$ である右スプレットのみの直角三角形の場合には、均衡点が領域 $BCDO$ にあることが分かる。

このように、ファジィ所要時間関数を考慮することによって、均衡点を確定的方法の均衡点も含んだ所要時間認知に対応した領域として捉えることができる。

4. 現実道路ネットワークへの適用

ファジィ所要時間を考慮する実用上の意味は、交通量配分で用いる所要時間関数の解釈に多様性を与えることである。すなわち現実の所要時間情報に内在するファジィ性の影響を推計交通量として表現しようとする試みである。本研究では、実証的側面から現実道路ネットワークを対象とした分析を行い、提案した方法の有効性について検討する。

また、交通量配分の計算結果は、前述の式(11)～式(14)に示すモデルで求めた道路ネットワーク上の均衡

流である。このときの発着ゾーン間の所要時間はワードロップの第1原理を満たすものである。

4.1 対象道路ネットワークの概要

(1) 対象地域

ここでは、対象地域として京都市域を用いる。また対象道路ネットワークとして、政令指定市の一般市道(都道府県道に相当)以上の道路を抽出している。

ここで図-4は対象道路ネットワークの市街地部分を示している(リンク446本、ノード302個)。また図中の「△」印は「平成2年道路交通センサス交通量調査」の断面交通量等の観測地点(228個)を示している。さらに本研究の交通量配分に用いる道路ネットワーク要素(車線数、旅行速度、交通容量など)については、上記交通量調査データを利用している。

この道路ネットワークに対応するゾーニングは、道路交通センサスのCゾーン(市内56個)としている。

(2) OD交通量

交通量配分に用いるOD交通量は、「平成2年道路交通センサス自動車OD調査」の調査データの中から、京都市の関連交通(内々、内外及び通過交通)を抽出し、四角OD表を作成している。

(3) 対象道路ネットワークの交通実態

表-1では、センサスで定義される混雑度(交通量/

表-1 観測地点混雑状況の集計結果(リンク数)
混雑度<1.0 混雑度 $\geq$ 1.0 計

道路種別	混雑度<1.0 (%)	混雑度 $\geq$ 1.0 (%)	計 (%)
高速道路と一般国道	10 (24)	31 (76)	41 (100)
指定市道 (主要地方道)	31 (40)	47 (60)	78 (100)
指定市の一般市道 (一般都道府県道)	42 (39)	67 (61)	109 (100)
合計	83 (36)	145 (64)	228 (100)

交通容量)によって、対象道路ネットワークの観測リンクでの道路種別ごとの交通混雑状況を集計している。

これをみると、道路全体で6割以上の観測リンクでは、交通混雑状態にあることがわかる。道路種別では、特に「高速道路と一般国道」における交通混雑が深刻で、8割に近い観測リンクで混雑度が1.0を越えている。

次に道路混雑と認識所要時間のファジィ性の関係について考える。

道路ネットワークにおいて交通流の円滑なときは自由走行が可能である。一方、混雑となると他車の走行の影響を受ける。従って、所要時間の予想が困難となり、認知所要時間のファジィ性は大きくなると考えられる。

4.2 所要時間の認知形状

(1) 利用者アンケート調査結果

具体的な交通利用者の所要時間に対する認知形状については、交通利用者アンケート調査結果を利用する。これは平成2年度に実施された「阪神高速道路公団モニター調査」結果から分析されたものである^{10)~12)}。

この調査結果を用いてファジィ数の認知所要時間の現実的意味を考える。

このアンケート調査では、高速道路と一般道路について、経路所要時間が与えられた場合に、それぞれ「どの程度の幅を考えているか」について質問した。この調査で、与えられた所要時間に対し、自分の日頃の利用経験を基にした認知の幅を個人ごとに求めることができる。具体的には、これらの経路所要時間を、それぞれ15分、30分、45分、60分とし、各自の想定する走行時間を「○○分~○○分」、すなわち最短と最長の形式で回答させた。被験者の有効サンプル数は58、4種類の設定時間と高速道路と一般道路の左右スプレッドごとに回答が得られている。

またサンプルにおいては、部分的な欠損値が見られたが、これは各項目のサンプルの平均値で補填するものとした。

まず平均値を用いて、認知所要時間を示したものが

図-4 京都市道路ネットワークの主要部

図-5である。これより、いずれの場合においても右スプレッドが左スプレッドより大きいことがわかる。これは日常的な交通混雑などによって、利用者は確定的所要時間の見積もりとして、より大きい安全側の値を設定すると考えることができる。また、高速道路と一般道路との比較をすると、左スプレッドは一般道路の方が大きい。また右スプレッドは所要時間の小さい場合、高速道路の方が大きい、所要時間が大きくなるにつれ、一般道路の方が大きくなる。これは、確定所要時間が小さい場合には、一般道路の信頼性は比較的高く、所要時間が大きくなると、高速道路の信頼性が高いと判断するものと考えられる。

つぎに、高速道路(阪神高速道路)と一般道路のそれぞれについて、回答値に基づいて回帰分析により、中心値の値と左・右スプレッド関係を求めた。ここでは、直線回帰・非線形回帰の両者を実行したが、推計精度の若干良好な非線形回帰分析の結果を採用した。この場合、いずれも原点を通る2次多項式で表現している。これらの関係を図-6に示す。いずれの道路においても、右スプレッドは中心値の値に対して、変化割合が逓減する傾向(つまり傾きが下がっていく)にあることがわかる。相関係数の値を添記しているが、いずれもほぼ増加傾向を表現できているものと思われる。

本研究では、この分析結果を対象道路ネットワークの交通量推計に用いる。都市間高速道路と都市高速道路の相違も考えられるが、ここでは便宜上同一の値を

図-5 所要時間のファジィ数表現

図-6 非線形近似による所要時間の認知形状

用いることができるものと考えた。

一方、高速道路利用料金を等価的な所要時間(分)に換算するための時間価値(円/台・分)として、一般的な方法を用いる。つまり、これは対象年次の国民所得、就業者数、平均労働時間及び平均乗車人員を用いて全国ベースに計算する。すなわち、

$$\text{時間価値} = \frac{\text{平均乗車人員} \times \text{国民所得}}{(\text{就業者数} \times \text{労働時間})} \quad (\text{円/台} \cdot \text{分})$$

ここでは、平成2年の値は54(円/台・分)である。

名神高速道路の場合、各IC間の利用料金は単位距離料金から設定されている。平成2年現在の単位距離料金を23円/kmを採用すると、最終的に、以下のように高速道路利用料金を等価的な所要時間が設定できる。

$$\begin{aligned} \text{等価的な所要時間} &= (\text{高速道路利用料金}) / (\text{時間価値}) \\ &= (\text{高速道路IC間利用距離}) \times (\text{単位距離料金}) / (\text{時間価値}) \end{aligned}$$

(2) 計算ケースの設定

ここでは、リンクに対するファジィ所要時間表現を用いた交通量配分を検討するため、利用者の所要時間の認知形態に対応するケース設定を行う。このためつぎの3ケースを考えた。

① ケース1

このケースは、ファジィ交通量配分の基本とするものである。上記の非線形回帰で求めたファジィ所要時間の左右スプレッド関数を用いて、各リンクの三角型

表-2 ピーク率に基づくファジィ数の設定

ピーク率 (%)	混雑度	左スプレッド (γ)	右スプレッド (β)	観測リンク数 (個)
14%未満	—	0.0	0.0	167
14%以上	0.5 未満	0.8	0.0	5
	0.5~1.0	0.5	0.0	19
	1.0~1.5	0.0	0.5	16
	1.5~2.0	0.0	0.8	14
	2.0 以上	0.0	1.0	7

のファジィ所要時間を構成する。つまり総てのリンクに共通するファジィ性を設定する。リンク交通量予測には、この三角型のファジィ所要時間関数をリンク走行時間として利用する。つまり、アンケート調査結果から得られた一般的なファジィ所要時間表現を用いて、どの程度の現況の利用者経路選択(リンク交通量)を記述できるか、確かめるものである。

② ケース 2

このケースは、道路ネットワークの混雑状況に関係するリンク交通量の変動の程度に応じて、ファジィ所要時間を設定するものである。すなわち表-2に示す既存の混雑状況から、リンク所要時間の不確定性を設定しようとするものである。具体的には、交通量のピーク率の大きい($\geq 14\%$)リンク群(61リンク)はファジィ性をもつものとし、さらに、この中で道路の混雑状況(混雑度)に応じて大きな値を与えるものとする。逆にピーク率の小さい($< 14\%$)リンク群(168リンク)は、交通量が安定なものとしクリスプなリンク群とする。

③ ケース 3

現実道路ネットワークでの交通情報提供は幹線の道路から順次に整備されることが多い。このケースでは、この状況を考慮し、道路種別ごとに認知形状を設定し、検討を行う。

高速道路については、ほぼ常時に交通情報が提供され、かつ比較的信頼性が高い。そのため、比較的に小さいスプレッドとした。

一方、一般国道については、情報提供施設整備の面では、高速道路より少なくかつ信頼性が低く、その左

表-3 道路種別ごとのファジィ数の設定

道路種別	混雑度	左スプレッド (γ)	右スプレッド (β)
高速道路	< 1.0	0.2	0.0
	≥ 1.0	0.0	0.2
一般国道	< 1.0	0.4	0.0
	≥ 1.0	0.0	0.4
主要地方道	< 1.0	0.5	0.0
	≥ 1.0	0.0	0.5
都道府県道	< 1.0	0.6	0.0
	≥ 1.0	0.0	0.6

右スプレッドは高速道路より大きくなると考えた。

さらに、主要地方道と都道府県道についても、交通情報の信頼性が順次に低く、左右スプレッドも次第に大きくなると考えた。

以上の検討に基づいて、表-3に示すように、現状の混雑度も利用してファジィ所要時間関数の左右スプレッドを設定する。

5. 計算結果とその考察

ここでは前述の式(11)~式(14)のモデルに「重心法」と「総時間差法」を組み込んで各ケースに対応した交通量の推計を行った。また比較のため、従来の「確定的方法」を用いた計算も実行した。

まずリンク交通量の推計精度を検討するため前述の228箇所の断面交通量観測リンクをとりあげた。ここで表-4に「確定的方法」・「重心法」・「総時間差法」の各ケースの推計値と観測値との相関関係及び平均2乗誤差(RMS)を示している。

表-4より、ケース1で「確定的方法」(0.878)、「重心法」(0.880)、「総時間差法」(0.883)の順に相関係数が高い。ケース2で「重心法」・「確定的方法」(ともに0.878)、「総時間差法」(0.882)の順に相関係数が高い。また、ケース3では「確定的方法」・「重心法」(0.880)、「総時間差法」(0.881)の順に大きい。

以上より、いずれのケースにおいても、「総時間差法」による相関係数が最も高いことがわかる。しかしながら、相関係数の差は小さく、本質的な推計精度の相違はない。

また図-7には各方法・各ケースの推計値と観測値との分布を示している。上記(相関係数値の差異が小)からもわかるように、散布状態の大きな差異はない。ここでは「総時間差法」の結果について図示している。これらのうち(b)と(c)では若干良好な推計状況が示されている。

つぎに全体的な推計精度として、また平均2乗誤差を考える。これは表-4の右から2欄目に示されている。

表-4 各ケースの計算結果

手法、ケース		評価指標 係数相関	平均2乗 誤差	平均正負 偏差の差
確定的方法		0.878	9.854	1.939
重心法	ケース1	0.880	9.536	2.020
	ケース2	0.878	9.592	1.397
	ケース3	0.880	9.326	1.634
総時間差法	ケース1	0.883	9.245	1.545
	ケース2	0.882	9.290	546
	ケース3	0.881	9.662	2.061

る。ケース1では「確定的方法」の9854台に比べて、「重心法」の9536台は約3%減、「総時間差法」の9245台は約6%減となっている。ケース2では「確定的方法」に比べて、「重心法」で約3%減の9592台、「総時間差法」で約6%減の9290台となっている。またケース3では「確定的方法」に比べて、「総時間差法」は約2%減の9662台、「重心法」は約5%減の9326台となっている。

この結果を見ると、3者のなかでは「総時間差法」による誤差が最も小さく、「重心法」はその次にあることがわかる。

表-4と図-7より相関係数の大小と推計値と観測値との相関関係及び推計精度がわかった。つぎに過大・過小推計の傾向を考える。ここでは平均正負偏差の差を用いて検討する。「平均正偏差」 e_p とは式(18)のように、推計値>観測値の観測リンク群に対して、推計値と観測値との差の平均値を求めたものである。一方、「平均負偏差」 e_n とは式(19)のように、推計値<観測値の観測リンク群に対して、推計値と観測値との差の平均値を求めたものである。すなわち、平均正負偏差の差($e_p - e_n$)が正の場合は過大推計、負の場合は過小推計、0に近いほど推計値は観測値からの片方向への乖離が少ないことを意味する。

$$e_p = 1/L_p \cdot \sum_{a \in X} (x_a - v_a), \quad X = \{a | x_a > v_a\} \quad (18)$$

$$e_n = 1/L_n \cdot \sum_{a \in X} (v_a - x_a), \quad X = \{a | v_a > x_a\} \quad (19)$$

図-7 推計値と観測値との相関

ここで、 x_a : 観測リンク交通量の推計値

v_a : 観測リンク交通量の観測値

L_p : $x_a > v_a$ の観測リンク数

L_n : $v_a > x_a$ の観測リンク数

平均正負偏差の差($e_p - e_n$ の値)は表-4の最右欄に示されている。これを見ると、ケース1では「確定的方法」の1939台に比べて、「総時間差法」は20%減の1545台で最も小さく、逆に「重心法」は約4%増の2020台で最も大きい。ケース2では「確定的方法」に比べて、「総時間差法」は約72%減の546台と最も小さく、「重心法」は約28%減の1397台となっている。また、ケース3では「確定的方法」に比べて、「重心法」は約16%減の1634台で小さく、逆に「総時間差法」は約6%増の2061台で大きくなっている。

この結果をケースごとにみると、いずれの方法によってもケース2の平均正負偏差の差が最も小さい。また方法論的にみると、ケースによって平均正負偏差の差が違うが、ケース2に対する「総時間差法」の値が最も小さいことがわかる。すなわち、この例ではケース2と「総時間差法」との組み合わせは、全体的に観測値に対して過小・過大推計の少ないバランスのとれた推計値を求めることができることがわかる。しかしながら、この結果は本研究の計算例に対するものであり、一般的なものではない。

上記の3つの評価指標に基づき各方法について検討する。すなわち、交通量配分結果として得られるリンク交通量と観測リンク交通量の整合性から計算方法の有効性を検討する。

まず計算手法の面からみると、全般的に「総時間差法」による計算結果が最もよく、その次は「重心法」である。これは方法論的な検討でわかるように、「総時間差法」がファジィ数の α レベルに着目し、比較的にファジィ所要時間関数の細い部分まで考慮することができることによるものであると考えられる。

またケースごとに見ると、ケース2、ケース1、ケース3の順に推計精度が良好であるといえる。ここでケース2は、京都市の道路ネットワークのリンク交通量の変動と混雑状況に適応して設定している。この点で、最も現実的な設定となったものとなる可以考虑ができる。これに対し、ケース1は大阪都市圏でのアンケート結果を京都市域に利用したこともあり、若干無理な設定となったものと考えられる。また、ケース3は道路種別ごとに所要時間情報を考慮するものである。しかしながら、実際、高速道路以外は所要時間を交通情報として提供されていないこともあり、実状とは異なる設定となったようである。またこ

ここでは、道路種別に交通状態と所要時間情報に対する認知の形態を設定したが、今後、その最適な幅を吟味する余地があると考えられる。

最後に、ファジィ所要時間情報を考える場合の道路ネットワーク交通流の変化の一例をケース2の計算結果を用いて検討する。ここで取り上げた代表区間は京都市南部を通過する国道1号線とこれに並行する一般市道の油小路通である。これらのリンク交通量推計結果を表-5に示す。

リンク交通量の観測値に基づく混雑度(道路交通センサス)はそれぞれ国道1号では1.88、油小路通では0.66となっている。すなわち、前者では深刻な交通混雑状態にある。また交通量の変動も比較的に大きい(ピーク率14%以上)路線でもある。これに対し、後者では交通容量上、余裕を持っている。このときファジィ交通量配分の計算結果として、「確定的方法」に対し、国道1号線では、いずれの交通量も約4%減となっている。一方、油小路通では、交通量がそれぞれ12%〔「重心法」〕と9%〔「総時間差法」〕増となっている。

これは、所要時間をファジィ量として認知する場合、交通利用者が混雑路線に対して、通常の所要時間より大きめに認識し、自己に有利な円滑に流れる路線に迂回することを間接的に表現したものであると考えられる。具体的な例は、これ以外にも多数検出できるが、何らかの理由で、リンク所要時間が不確定と考えられる場合には、本研究の方法は有効に機能すると考えられる。

このように、本研究の検討方法を道路交通管理に応用し、交通流の誘導を通じて円滑な交通流を図ることができると考えられる。すなわち、交通利用者の日常的な利用経験による自律調整あるいは交通管理者の交通情報の提供による交通誘導効果に、現実的な経路選択の側面より解釈を与えることができる。また、道路ネットワークの交通情報提供並びに交通管理方策の策定に異なった視点を与えることもできるものである。

表-5 方法による推計交通量の変化の一例
(ケース2)

路 線 名	観測地点名	観測地点番号	混雑度	確定的方法	重心法	総時間差法
一般国道1号線	伏見区下鳥羽北ノ口町	108	1.88	48,060	45,973 (-4%)	45,907 (-4%)
一般市道油小路通	伏見区毛利町	918	0.66	41,564	46,612 (+12%)	45,251 (+9%)

注：() 内の数字は確定的方法による交通量に対する増減率

6. おわりに

本研究は交通利用者アンケート調査結果と道路ネットワークの交通利用実態を用いて、実証的な面から道路ネットワークの交通流解析へのファジィ理論の適用を試みた。具体的には、二つの方法を平成2年の道路交通センサスデータと交通利用者に対するアンケート調査結果を利用し、京都市の道路ネットワークへ適用した。本研究で得られた主な結果は以下のようによりまとめることができる。

- ① 本研究での方法は、所要時間を三角型のメンバーシップ関数で記述し、その形状によって道路交通利用者の所要時間に対する認知を近似的に表現することができる。
- ② アンケート調査と交通利用実態を通じて、所要時間の認知形状を検討した結果、提案した方法はある程度交通利用者の経路選択行動を現実的に記述することができる。近年では、所要時間情報を主体とした道路交通管理方策(ITSなど)が重要となっており、その意味からも利用可能性があると思われる。
- ③ 理論上、所要時間の認知形状を三角型にする場合、「重心法」と「総時間差法」の適用容易性は同程度である。しかし、適合性については、本研究での検討から「重心法」より「総時間差法」の推計精度の面で良好であるといえる。
- ④ 「重心法」と「総時間差法」の推計結果の観測値よりの乖離程度は、ケース設定が対象道路ネットワークの交通実態に適合するかどうか依存する。
- ⑤ 京都市道路ネットワークを例として検討したが、日常的な道路混雑の程度に比例したリンク所要時間のファジィ性を考慮することが、現状記述の意味から有効であることがわかった。

本研究ではファジィ所要時間を考慮した交通量配分を現実の道路ネットワークに適用した。この方法は道路交通流解析に実用性の向上をもたらすのみならず、交通流の変化を通じて、交通利用者の経路選択行動の解釈に多様性を与えることにも意味がある。しかし、経路選択に対する異なる考え方をもつ方法(例えば、確率論的方法)との比較を行う必要があると思われる。この点については、理論面での研究も進んでおり¹³⁾、本研究においてもこれを今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 1) 加藤晃；“交通量配分の理論の系譜と展望”、土木学会論文集、pp.15-27、Vol.389/IV-8、1988
- 2) 宮城俊彦、溝上章志；“交通ネットワークフロー分析手

- 法の現況と課題”、高速道路と自動車、pp.24～33、Vol. 31、No.2、1988
- 3) Daganzo C.F., Sheffi Y.; “On Stochastic Models of Traffic Assignment”, Transportation Science, Vol. 11, No.3, pp.253～274, 1977
- 4) 邵春福、秋山孝正、佐佐木綱；“ファジィ情報下のネットワーク利用者均衡配分の方法”、交通工学、Vol.25、No.5、pp.13～23、1990
- 5) 秋山孝正、邵春福、佐佐木綱；“ファジィ経路情報に基づくネットワーク交通流解析”、土木学会論文集、No. 449/IV-17、pp.145～154、1992
- 6) 本多中二、大里有生；“ファジィ工学入門”、海文堂、1989
- 7) Arnold Kaufmann and Madan M. Gupta : “Introduction to Fuzzy Arithmetic Theory and Applications”, Van Nostrand Reinhold Company, 1989
- 8) 寺野寿郎、浅居喜代治、菅野道夫；“ファジィシステム入門”、オーム社、1987
- 9) 邵春福；“都市交通管理計画へのファジィ理論の応用に関する研究”、京都大学学位論文、1991
- 10) 秋山孝正、片岡孝視、佐佐木綱；“旅行時間情報提供に関する利用者意識について”、第11回交通工学研究発表

会論文集、pp.133～136、1991

- 11) T. Akiyama, C.F. Shao and T. Sasaki : “Traffic Flow on Urban Networks with Fuzzy Information”, Mem. Fac. Eng., Kyoto Univ. Vol.56, No.2, pp.19-40, 1994
- 12) 邵春福、秋山孝正；“ファジィ経路選択に基づく道路交通流解析を用いた実証的研究”、第2回ファジィ土木応用シンポジウム講演論文集、pp.77～85、1994
- 13) 安田幸司、和田芳典、秋山孝正；“ファジィ交通量配分の各種定式化について”、第12回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.695～696、1996

(1997年5月1日 受付)

(1997年9月25日 再受付)

[問い合わせ先]

〒600 京都市下京区四条通烏丸西入月鉾町62番地
住友生命ビル8階
社団法人 システム科学研究所 調査研究部
邵春福
TEL : 075-221-3022
FAX : 075-231-4404
E-mail : shao@issr-kyoto.or.jp

著者紹介

邵春福 (Chun Fu SHAO)

社団法人システム科学研究所 調査研究部

1982年、中国西安公路交通大学自動車系卒業。同年、同大学助手。1991年、京都大学大学院交通土木工学専攻博士後期課程修了。工学博士。同年、社団法人システム科学研究所研究員。現在同研究所主任研究員。ファジィ理論とニューラルネットワークの都市交通管理計画への応用、交通計画などの研究及び業務に従事。日本ファジィ学会、土木学会、交通工学研究会などの会員。

秋山孝正 (あきやま たかまさ)

岐阜大学工学部土木工学科

昭和58年 京都大学大学院工学研究科修士課程交通土木工学専攻修了。同年4月 京都大学工学部交通土木工学教室助手。平成2年4月 講師。平成6年4月 岐阜大学工学部土木工学科助教授。都市高速道路の交通制御、交通安全対策、ファジィ理論の交通計画への応用などの研究に従事。日本ファジィ学会、国際ファジィシステム学会、システム制御情報学会、土木学会、交通工学研究会、日本都市計画学会、世界交通学会、歴史文化学会会員。工学博士。

佐佐木 綱 (ささき つな)

近畿大学理工学部

1953年、京都大学工学部土木工学科卒業。1955年、同大学大学院修士課程修了。1957年、熊本大学工学部講師。1960年、京都大学工学部数理工学科助教授。1962年、工学博士。1966年、同大学工学部交通土木工学科教授。1994年、京都大学名誉教授、近畿大学理工学部教授、現在に至る。交通工学、地域計画及び風土工学などに関する研究に従事。著書に「交通流理論」、「都市交通計画」、「交通工学」、「女らしさ・男らしさ」、「風土とまちづくり」など。土木学会、OR学会、日本都市計画学会、歴史文化学会などの会員、交通工学研究会理事、世界鬼学会会長。

Empirical Approach for Road Traffic Flow Analysis on the Basis of Fuzzy Set Theory

by

Chun Fu SHAO, Takamasa AKIYAMA and Tsuna SASAKI

Abstract :

The traffic assignment is regarded as the most important estimation technique of traffic flow in urban network planning. In this study, traffic assignment models with fuzzy travel time are introduced. The applicability of the proposed model is investigated with empirical data. Firstly, the shape of the membership function for fuzzy travel time is considered from the data in the road traffic census and the road user questionnaire survey. Secondly, two different methods such as a removal model and a gravity model are proposed to represent fuzzy numbers. Both models estimate traffic flow with representative value of fuzzy travel time. They can be formulated as extensions of an equivalent mathematical programming for conventional traffic assignment. Lastly, the models are applied to analyze the traffic flow on the network of Kyoto city as a real scale example. Particularly, the models are confirmed to be practical with consideration of the relation between observed values and estimated values for traffic in different types of roads.

As the results of the study, it is concluded that the proposed models enable to describe the perception of drivers for travel time information and they can provide the practical estimation of traffic flows.

Keywords : Fuzzy Travel Time, Traffic Assignment, Road Network

Contact Address : **Chun Fu SHAO**

Division of Survey & Research, Institute of Systems Science Research

8F Sumitomo Building, 62 Tsukihoko cyo,

Shijo Karasuma, Shimogyo-ku, Kyoto, 600, Japan

TEL : 075-221-3022

FAX : 075-231-4404

E-mail : shao@issr-kyoto.or.jp