

ファジイ経路情報に基づくネットワーク 交通流解析

秋山孝正**・邵 春福*・佐佐木綱***

本研究では交通情報整備が道路網交通流に与える影響を検討するため、ファジイ交通均衡の方法を提案する。ここではファジイ所要時間の比較法として「重心法」に加えて総時間差法を紹介する。特に三角型ファジイ数 (T.F.N.) を利用した各方法の比較と整理により一般的なファジイ均衡解を求めるアルゴリズムを作成した。また交通情報の変化が交通流動に与える影響をファジイ均衡配分の各方法によって求め、実際的な計算例を用いて応用可能性についても検討を行った。

Keywords : networks, user equilibrium, fuzzy travel time, triangle fuzzy number

1. はじめに

道路網計画に関連して、OD 交通量需要に基づいた交通現象解析を行う場合、問題となるのは OD 間の交通利用者の経路選択行動結果としての経路交通流の決定問題である。これには、Wardrop 原則を用いた均衡配分(以下「確定均衡配分法」と呼ぶ)を行う場合が一般的である。この確定均衡配分法の理論においては、完全情報を全運転者が知り、常に所要時間を最小にすることを意図して、独立して経路選択をするものと仮定している。

この仮定は、交通均衡問題を数学的に表現する上で重要なといえるが、実際の交通システムにおいては、利用者が道路条件について完全情報を入手できることや常にすべての OD ペア間の最短経路を確定的に知りうることは、情報整備の進展の目ざましい昨今においても現実的であるとはい難い^{1), 2)}。

このようなことから、均衡配分法に対する方法論面での拡張がいろいろな形で提案されている。方法論として直接的で分かりやすい方法には、利用者の交通経路選択行動の実態調査、あるいはアンケート調査結果を用いた経路選択行動モデルの構築があろう。しかしながら、実態調査・アンケート調査はいずれも実際のネットワークに対応させるには大規模化が必要で、また従来配分理論に結合することも容易ではない。

さらに、実際のネットワークの交通利用者の経路選択結果を比較的よく表現できる方法として確率均衡配分法が知られている^{3), 4)}。これは交通情報の不完全性と経路の評価関数値の不確定性などを考慮し、ロジットモデルを用いて交通利用者の経路選択行動を表現し、経路選択

を確率現象として処理する方法である。

この確率均衡配分モデルでは、運転者の所要時間に基づく経路選択を確率理論に従うものと考えている。したがって、応用面からこれらの現実的意味についての議論は今後も必要となるであろう。

またネットワークの現実的条件下での交通均衡という点では混雑した道路網にあっては、渋滞長が道路全体の容量と全体の交通需要量に対応する交通均衡から決定できると考えられることから、その取り扱い方を明らかにした研究も見られる⁵⁾。

本研究では、これらの研究に関連して、とくに利用者の所要時間認知のモデル化を基本として考える。これは利用者が、交通情報提供システムや過去の利用経験などだけから経路に関する完全情報を得ることが、現実には難しいことに着目したものである。つまり様々な形態の不完全情報のもとで、利用者は経路所要時間をおよその量として認識すると考えられる。

著者らは、この点からファジイ所要時間による人間認知モデルを用いた交通現象解析を試みた。そこで基礎的な研究として、ファジイ数による所要時間認知表現と均衡配分法への適用方法を紹介している⁶⁾。

本研究では、これらの研究成果を踏まえ、利用者認知の新たな表現方法を提案し比較、検討を行うとともに、ファジイ交通均衡配分の実用的側面についても述べる。

まず第 2 章では、経路の利用者認知所要時間に対するファジイ数を用いた表現方法において、ファジイ所要時間の比較方法として「総時間差法」を提案する。これはファジイ理論に基づく人間行動のモデル化に関する一般的な定式化を目指したものである。

第 3 章では、「総時間差法」を用いた交通量配分手順を紹介する。具体的には、三角型メンバシップ関数を用いて、既存の「重心法」の場合の算出手順と同様、確定交通量配分法の方法を利用して、Frank-Wolfe 法の修

* 正会員 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)

** 正会員 工博 (社) システム科学研究所研究員

*** 正会員 工博 京都大学教授 工学部環境地球工学教室

正として計算アルゴリズムが与えられる。

第4章では、ファジイ所要時間を考慮した交通量算出結果の実用的利用方法の議論を行うため、簡単な計算例をもとに考察を行う。ここでは、ファジイ所要時間表現の有効性が、道路網に対する認識のファジイ性の変化を2種類のケースとして設定し、その計算結果について議論するものである。

2. ファジイ所要時間の表現方法

(1) ファジイ数としての経路所要時間

さきに見たように、道路網における利用者の認知所要時間の表現にはファジイ数が利用できる。ファジイ数は実数軸上のファジイ集合であり、言語的数量「3時頃」「30分程度」などの表現に用いることができる⁷⁾。

ファジイ所要時間は、言語表現上用いられる所要時間(t_a)に関して、この値の前後に広がりを持つ認知形状を持つと考えるものである。したがって、この場合、メンバシップ関数は認知リンク所要時間に対する可能性(possibility)分布ということもできる⁸⁾。

このように認知所要時間をファジイ数と考えることは、「完全情報の仮定」の一般化であり「人間は不完全情報下においても行動を行う」と考えるものである。実際の交通システムにおいても、提供される交通情報が確定値であっても、利用者は意識内ではこれに基づいて各自の可能性分布を形成することから判断を行っていると考えられる場合が多く存在する。

以上のような認知所要時間が形成されると、利用者は経路間でファジイ数の比較を行い、いずれの経路が有利か否かを決定する。この選択経路に関する意思決定をモデル化することを考える。この際の具体的方法として、ファジイ数の非ファジイ化法(defuzzification)のひとつである「重心法」に従うファジイ数の代表値を用いて比較を行う手順が紹介されている。

これはファジイ制御などに含まれる方法でメンバシップ関数分布形の重心に対応する変数値をファジイ数の代表値とするものである⁶⁾。すなわち、

$$t_g = \int_a^b t \cdot \mu(t) dt / \int_a^b \mu(t) dt \quad (1)$$

たとえば図-1で示されるような、单峰型のファジイ数A, Bが存在する場合、各分布形により重み付けられた「重心」に対応する変数の代表値 t_g^A と t_g^B を用いてファジイ数間の大小関係を表わすものである。

この方法の特徴は、各分布を「重心」という代表値として取り扱うので検討は容易である。しかしファジイ情報の形状をあらかじめ集約するので判断時には情報欠落が生じているともいえる。

つまり、この方法は人間の思考プロセスとして、「ファジイ数の認知を非ファジイ化して比較する」手順をモ

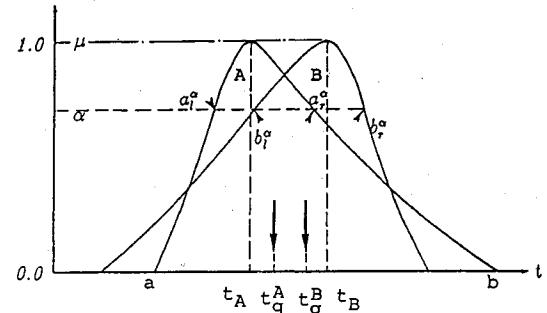


図-1 ファジイ所要時間の表現

ル化したものである。以下では、これを「重心法」と記す。これに対して「ファジイ数を（分布として）直接的に漠然と比較する」思考プロセスを考えるために、本研究では、つぎに示すような方法を用いている。

(2) 総時間差によるファジイ数の比較法

ここでは、ファジイ数の比較を記述するための方法としてファジイ数間の比較方法を提案する^{9),10)}。この方法は、実数上の区間値相互の比較をファジイ数の場合に応用した方法である。ここで「総時間差」とは、ファジイ数同士の相違を示す指標（距離）であり、数値の差とは異なる概念である。

たとえば、図-1のようにファジイ数Aとファジイ数Bによって経路Aと経路Bの認知所要時間を表すことはすでに述べた。ここで、ファジイ数を区間集合に分解して考えるため「分解定理」(resolution identity)を用いると、ファジイ数は α -レベル集合に分解できる。ここで、 α -レベル集合は、

$$A_\alpha = \{x | \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad \alpha \in [0, 1] \quad (2)$$

なる定義で表されるクリスピ集合である。つまりファジイ数の演算を通常の数値演算に変換することができる。分解定理から結局ファジイ集合A, Bは以下のように表される。

$$A = \bigcup_{\alpha} \alpha \cdot A_\alpha, B = \bigcup_{\alpha} \alpha \cdot B_\alpha, \alpha \in [0, 1] \quad (3)$$

とののファジイ集合が单峰型のメンバシップ関数を持つ場合には、この α -レベル集合は〔最小値、最大値〕の形式で表される実数軸上の区間値を示すクリスピ集合であり通常の加減等の数学演算を適用できる。

ここでファジイ数A, B間で次式の定義を用いる。

$$\Delta(A, B) = \frac{1}{2} \{\Delta_1(A, B) + \Delta_r(A, B)\} \quad (4)$$

上式において、 $\Delta_1(A, B)$ と $\Delta_r(A, B)$ は、各ファジイ数のメンバシップ関数の左辺部分（中央値より左の関数部分）と右辺部分（中央値より右の関数部分）の相違を表すものである。

具体的な算出には、ファジイ数Aとファジイ数Bの

ある α -レベルに対する偏差 δ を考えると、レベル集合の最大値同士、最小値同士の差を求めることになり、結局式(5)のようになる。

$$\delta(A_\alpha, B_\alpha) = \frac{1}{2} \{\Delta_1(A_\alpha, B_\alpha) + \Delta_r(A_\alpha, B_\alpha)\} \dots \dots \dots (5)$$

したがって、ファジィ数全体としての A, B の「差」を求めるには α に関する積分を行えばよい。すなわち、

$$\begin{aligned} \delta(A, B) &= \int_0^1 \delta(A_\alpha, B_\alpha) d\alpha \\ &= \frac{1}{2} \int_0^1 [(a_\alpha^\alpha - b_\alpha^\alpha) + (a_\alpha^\alpha - b_\alpha^\alpha)] d\alpha \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

このように、ファジィ数 A, B が各経路の所要時間を表すとき、この $\delta(A, B)$ は、各レベル集合（区間集合）について時間差を求め総和平均したものである。具体的には、図-2のような場合には、各 α -レベルでの偏差を合算したものに相当する斜線部の面積によって、数量の大小評価を行うものである。

本研究ではこの方法を「ファジィ総時間差法」と呼ぶ。これはファジィ数全体の形状比較を行うことに相当し、目的的に到着する総合的な早さを示している。これは「重心法」とは異なり分布形の変化に敏感に反応できる点が有効である。

3. ファジィ情報下の利用者均衡問題

ファジィ所要時間を考慮した場合に利用者均衡問題について、その表現方法と計算手順の点から検討を行う。以下に示す議論は一般的な単峰なファジィ所要時間に対応することができるが、ここでは三角型ファジィ数を用いた場合について検討する。

(1) 三角型ファジィ数

ファジィ所要時間を用いた経路選択現象の記述から利用者認知の取扱いが可能となった。しかしながら、実用的な配分計算アルゴリズムの検討には各リンク所要時間のファジィ数（メンバシップ関数）の定義が重要であり、これより具体的な演算内容が規定されることになる。

ここでは、ファジィ制御などの実用的分野のほとんどの研究で用いられる図-3のような三角型ファジィ数（T.F.N. : Triangular Fuzzy Number）を用いる。三角型ファジィ数の実数上の正規ファジィ集合のひとつであり、メンバシップ関数は、次式のような線形関数で示される。この線形性から応用的価値の高い表現方法となっている。

$$\begin{aligned} \mu(t) &= 0 & t \leq t_{al} \\ &= (t - t_{al}) / (t_{ar} - t_{al}), & t_{al} \leq t \leq t_{ar} \\ &= (t_{ar} - t) / (t_{ar} - t_{al}), & t_{ar} \leq t \\ &= 0 & t \geq t_{ar} \end{aligned} \dots \dots \dots (7)$$

たとえば図-3において、 t_a はファジィ数のメンバシップ関数値 $\mu(t)=1.0$ に対応する所要時間で、クリス

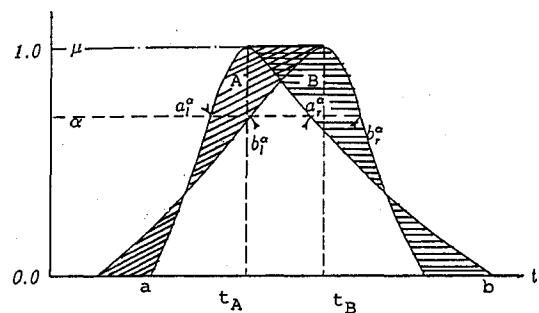
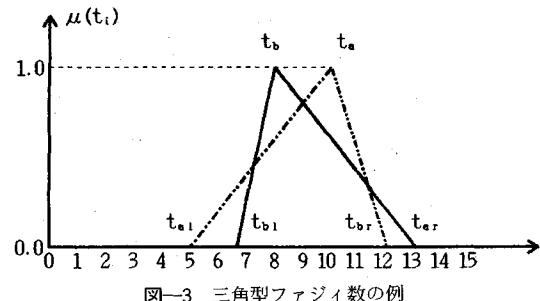


図-2 ファジィ総時間差法の概念



プ値として定義（あるいは言語表現）される場合の所要時間値であると考えることができる。

三角型ファジィ数で、 t_a はファジィ数の中心（mean）と呼ばれ、 t_{al} と t_{ar} は、それぞれリンク a の所要時間の認知幅を表し、一般にファジィ数の左右のひろがりに対応する。この値は、左スプレッド（left spread）および右スプレッド（right spread）と呼ばれる¹¹⁾。

ここで各リンクの三角形の所要時間ファジィ数の左右スプレッドをそれぞれ以下の式で表すこととする。

$$t_{al} = (1 - \gamma_a) \cdot t_a, 0 < \gamma_a \leq 1.0, \forall a \in L \dots \dots \dots (8)$$

$$t_{ar} = (1 + \beta_a) \cdot t_a, \beta_a \geq 0.0, \forall a \in L \dots \dots \dots (9)$$

γ_a と β_a はそれぞれリンク a のメンバシップ関数の左スプレッドと右スプレッドを決めるパラメータである。 L はリンク a の集合である。 γ_a と β_a の変化によって、三角形の形状を変化させることができ、利用者のリンク（あるいは経路）の所要時間に関する認識を近似的に表現できる。この設定では、基準の所要時間 t_a の値の大きさに比例して三角形の幅が決定される。こうした関係について実態調査から検討した例もあり¹²⁾、時間表現として妥当な設定である。

いま、たとえば $\gamma_a = \beta_a = 0.0$ とすれば、認知所要時間は幅を持たずクリスピ値 t_a と一致する。これは利用者が完全な情報を入手できる場合と考えられる。

また $\gamma_a = 0.0, \beta_a \neq 0.0$ とすれば、 $t \geq t_a$ の部分のみの直角三角形になる。これは利用者が「最低でも〇〇分はかかる」というように漠然と下限値を規定する場合である。一方 $\gamma_a \neq 0.0, \beta_a = 0.0$ とすれば、 $t \leq t_a$ の部分のみ

的均衡解は一致することがわかる。

(4) 計算アルゴリズム

これまでの議論からわかるように、ファジイ均衡問題の解法には、通常の均衡配分を計算するためのFrank-Wolfe法のアルゴリズムを利用することができます。「重心法」「総時間差法」の差異はあるが、一般的にはつきのような手順として示すことができる。

【計算手順】

- step 1 初期経路交通量 $x_a^{(1)}$ を与える。ここでは、最短経路配分で $x_a^{(1)}$ を求める。
- step 2 ファジイリンク所要時間 $t_a^{(n)}$ に基づく所要時間代表値の計算（中央値 t_a をBPR関数によって決定する。）
- step 3 拡張原理⁶⁾によるファジイ経路所要時間の算出
- step 4 各ODペアでのファジイ所要時間に基づく最短経路を探索する。
- step 5 ファジイ所要時間に基づく最短経路に需要交通量をall or nothing法で配分し、 $y_a^{(n)}$ を求め、探索方向

$$y_a^{(n)} - x_a^{(n)}, \forall \in L$$

を決定する。

- step 6 一次元探索によって目的関数 Z を最小にする探索ステップ α^* を求める。
- step 7 $x_a^{(n+1)} = x_a^{(n)} + \alpha^* \cdot (y_a^{(n)} - x_a^{(n)})$, $a \in L$ により解を更新する。
- step 8 交通均衡の判断基準が満足されたら、終了し、そうでなければ、 $n=n+1$ にして step 2 へ戻る。

ここでの判断基準はすべてのリンクに対して、

$$\left| \frac{x_a^{(n+1)} - x_a^{(n)}}{x_a^{(n+1)}} \right| \leq \epsilon, \quad \forall \in L$$

ϵ は微小数である。

以上の手順は、各比較法における具体的な計算部分の変更を要するが共通して用いることができる。

たとえば、step 2 と step 3 では、拡張原理に基づくファジイ経路所要時間の算出が必要となるが式(10)あるいは式(10)の定義からそれぞれつきのようない演算として実行することができる。これらの計算の内容は【三角型ファジイ数の加法】のルールを用いることによって、各リンクの所要時間から経路所要時間を求めたものと見なすことができる。

【重心法】

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

【総時間差法】

$$t_{ijk}^{(n)} = \sum_{a \in L} d_{ajk} t_a^{(n)} (4 - \gamma_a + \beta_a) / 4, \quad \forall jk$$

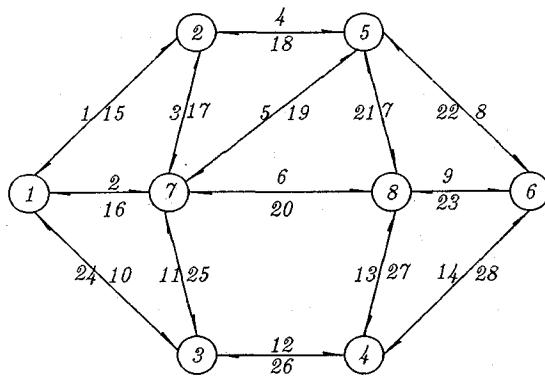


図-4 計算対象ネットワーク

$t_{ijk}^{(n)}$: ODペア i, j 間の経路 k のファジイ所要時間の代表値

以上のように「総時間差法」は、定義では若干複雑であるが、計算アルゴリズムの上では確定配分法のリンク走行時間関数を変更することで、「重心法」同様簡単に実行することができる。

4. 数値計算例とその考察

ここでは、ファジイ均衡配分の実用的利用を目指した検討を行う。特に交通情報のファジイ性に関連して、現象記述の方法と方法間の比較を中心に述べる。

(1) 基本ケースの設定

ここでは、図-4の道路網を考える。本例は交通情報の変化を考慮するため、都市高速道路のような情報施設が整備された高規格道路を含むような道路網を想定したものである。具体的には、リンク6が高規格道路に相当するものとし、他は一般道路であると考えている。

表-1に示すようなOD交通と表-2に示すネットワーク条件を用いて配分計算を行う。とくにファジイリンクについては、修正B.P.R.関数にスプレッドを付加したファジイ所要時間を与える。

またリンク6に対しては、都市高速道路の例を参考とし通行料金(450円)を時間評価値(50円分/台)により換算して、これを定数項として修正B.P.R.関数に追加して用いることにした。

基本ケースを算出するため、下記のa~dのリンクの異なる所要時間の認知状態を考える。

- a. 交通情報が比較的明確に得られ、一般に確定（ファジイ性の微小な）所要時間を持つリンク
- b. 当該区間の交通情報が完全ではなく、所要時間がある値の前後に広がりを持つと認知されるリンク
- c. 交通障害事象（交通渋滞、交通事故など）により、通常、構造的算出標準時間より多くの時間を要すると考えられるリンク
- d. 円滑交通が生じる場合が多く、標準的時間かそれ

表一 OD 需要交通量

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	500	500	1000	1000	2000	500	500
2	500	0	1000	1000	1000	1000	500	1000
3	500	1000	0	500	1000	2000	500	1000
4	1000	1000	500	0	1000	500	1000	500
5	1000	1000	1000	1000	0	500	500	500
6	2000	1000	2000	500	500	0	1000	500
7	500	500	500	1000	500	1000	0	500
8	500	1000	1000	500	500	500	500	0

表二 各リンクの設定条件

リンク番号	クリスピ条件		ファジイ条件	
	t°(分)	C(台)	γ	β
1	15	4000	0.4	0.2
2	10	4000	0.1	0.5
3	10	4000	0.2	0.2
4	15	4000	0.4	0.2
5	10	4000	0.2	0.2
6	8	6000	0.0	0.0
7	10	4000	0.2	0.2
8	15	4000	0.4	0.2
9	10	4000	0.1	0.5
10	15	4000	0.2	0.4
11	10	4000	0.2	0.2
12	15	4000	0.2	0.4
13	10	4000	0.2	0.2
14	15	4000	0.2	0.4

[Note] t°: リンク初期所要時間, C: リンク容量

(対称道路網; 片方向のリンクの数値を示す)

以下の所要時間で通行できると認知されるリンクすなわち, aは従来の完全情報の仮定を満たすクリスピなリンクであり, 逆にbは, 不完全な情報しか得られないリンクである. またc, dも不完全情報のリンクであるが, 道路状況から通常の所要時間の傾向(予想より早く通過できるか否か)を判断できるリンクである. この設定は表二に示す β , γ の値に対応している. [たとえばリンク1 ($\gamma=0.4$, $\beta=0.2$) は $\gamma \geq \beta$ であることからタイプdに分類されることがわかる.]

したがって, これらはファジイ数形状の相違を表現することになる. つまり計算上は右・左スプレッドの大小の相違に相当する. 以下の分析においては, リンクの各タイプを, それぞれ(a)「確定リンク」, (b)「対称リンク」, (c)「右大リンク」(右スプレッド大のリンク), (d)「左大リンク」(左スプレッド大のリンク)とよぶこととする.

基本ケースでは, 所要時間に対する認識に基づいたネットワーク均衡フローは確定的リンク所要時間に対し

表三 リンクフローとその変化

リンク番号	リンク条件	確定的均衡時	交通均衡フローと変化割合	
			重心法	総時間差法
1	L	1678	+256(+15%)	+202(+12%)
2	R	3014	-170(-6%)	-130(-4%)
3	S	2545	+103(+4%)	+84(+3%)
4	L	3525	+107(+3%)	+80(+2%)
5	S	3131	-17(-0%)	-0(-0%)
6	C	5702	-28(-0%)	-26(-0%)
7	S	2206	-130(-6%)	-93(-4%)
8	L	2964	+215(+7%)	+165(+6%)
9	R	1923	-142(-7%)	-104(-5%)
10	R	1939	-43(-2%)	-22(-1%)
11	S	3214	-14(-0%)	-12(-0%)
12	R	3643	-72(-2%)	-58(-2%)
13	S	3487	+8(+0%)	+8(+0%)
14	R	2623	-72(-3%)	-59(-2%)

[note] 収束判断基準: $\epsilon = 0.005$, <リンク: L : 左大, C : クリスピ, R : 右大, S : 対称>

て, 可能性を残したものとして議論するものである. この均衡フローと確定的均衡フローとの差異を明確にするのが本ケース設定の目的である.

(2) 基本ケースの計算結果

ここでは所要時間に対する認識の変化および記述方法による選択行動の変化を考察するために, 各交通量配分の結果として得られるリンク交通量を示し, さらに方法間の相違について検討する.

【リンク交通量算出結果】

確定均衡配分・ファジイ均衡配分(重心法・総時間差法)の演算を基本ケースに対して行った結果得られた各リンク交通量を示したものが表三である.

この表では, 重心法・総時間差法に基づいた配分計算を実行した場合に, 確定均衡配分結果に対してどの程度相違した交通均衡状態が得られるかを考えるものである.

各タイプに属するリンクの交通量の変化傾向をもとに, ファジイリンクの設定に対応した交通状態表現上の相違を観察することができる. いくつかの特徴的な点を以下に整理する.

① 確定リンク(リンク6)

表三に示すようにこのリンクのフローは確定均衡の場合と比べて大きな相違はない. このリンクは高速(有料)道路と仮定されている. この場合の設定では, 平面道路の交通状態認知に変化が生じても高速道路において

通行料金による交通抵抗の大きさを上回るような顕著な影響を受けていないことがわかる。

② 対称リンク (条件:S)

対称リンク同士の所要時間の大小比較は確定値の場合と同様の意味を持つ。したがって表-3に示すように、これらリンクはクリスピの場合と比べて、当該リンクのファジィ性よりも関連リンクの影響を大きく受ける。交通量が減少した代表的なリンクはリンク7(-6%:重心法)であり、また増加した代表的なものはリンク3(+3~4%:両方法)である。

このリンク7のフロー減少はリンク8とリンク9などの所要時間の認知変化が、またリンク3のフロー増加はリンク1とリンク2の所要時間の認知変化と関連していると考えられる。すなわち隣接リンク相互の交通量バランスの影響が大きいようである。

③ 右スプレッド大リンク (条件:R)

この場合、当然な帰結ではあるが、クリスピの場合と比べてこれらのリンク交通量は小さくなる。なかでも、変化が最も大きいのはリンク9(-7%:重心法)である。これは当該リンク自身の所要時間が大きめに認識されている(つまりファジィ数の設定)が直接的に反映したものと考えられる。

④ 左スプレッド大リンク (条件:L)

この設定を行うことによる影響は、基本的に当該リンクの走行時間減少効果として現れる。したがって、リンク交通量は、当然の帰結として増大することになる。右スプレッド大リンクの設定と比べて相対的スプレッドの片寄り(中心値からのずれ)が小さいが、リンク交通量の変化量はこれらのリンクより大きい。

特にリンク1では、均衡時のリンク交通量が最も少ないにもかかわらず、結果的に全リンク中で変化量・変化割合(+12~15%:両方法)とも最も大きくなっている。

つぎにこれらのリンク交通量変化を道路網全体で見たものが図-5である。この図からつぎのことがわかる。(リンク線の太さ:変化量200台以上, 100台以上, 100台未満の3段階で表示している。)

① ファジィ所要時間の設定による主たる交通量変化はネットワークの上部分(リンク1~リンク9)で生じている。つまり下部分の変化量は少なく、いずれも100台未満の変化である。

② 交通量変化の傾向は、この場合、クリスピリンク(リンク6)に隣接するいくつかのリンクの交通量が減少し、この部分にあった交通が外周リンクに転換した形になっている。

【方法間の相違】

これらの方法による理論上の差異はすでに前述されているので、この基本ケースでは計算結果について検討する。これについて以下のことがわかった。

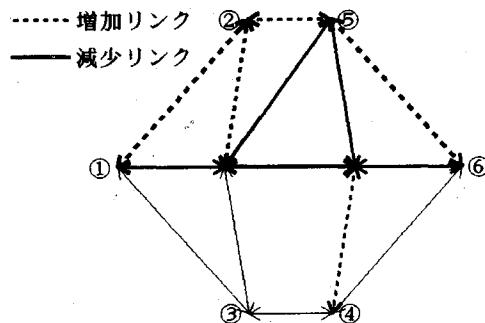


図-5 リンク交通量の変化

① 当然の帰結ではあるが、同一条件下で得られる配分結果は、両方法間で大きな相違がないことがわかった。これはアルゴリズム中にファジィ所要時間の比較結果が大きく違わないことを示すものである。

② 確定均衡配分との比較においては、「重心法」の確定解との差異は「総時間差法」の場合より大きい。これは三角型のような正規・凸型のメンバシップ関数を仮定するとき、「重心法」を用いると「総時間差法」に比べて、確定所要時間からの乖離がより大きい代表点を採用することになることに起因するものと考えられる。(この具体的な関係は式(10)と式(11)の比較することから知られる。)

(3) 計算例とその考察(その1)

以下では、ファジィ均衡配分の応用的意味を考察するため、交通情報変化を生じるケースについての計算結果から具体的な検討を行う。

まずここでは計算例として「混雑リンクに対する交通対策効果」を考える。たとえば、道路網での混雑部分に對してバス路線の変更、道路施設整備などの円滑化方策から利用者の所要時間認知が変化する場合を想定する。計算例として、基本ケースでは所要時間の右スプレッド大($\gamma=0.1, \beta=0.5$)と設定されたリンク2とリンク9の認知が左スプレッド大($\gamma=0.5, \beta=0.1$)なる場合を設定した。これは交通混雑対策が実施後に利用者が従前より所要時間が減少する傾向にあると認識すると考えたものである。交通状態は新しい均衡状態となり、これらの比較によって議論を行うものである。ここでは、傾向変化を簡単に調べることを目的とするため「総時間差法」を用いた場合の結果を示している。

表-4に示す計算結果より以下のことがわかる。基本ケースからスプレッド形状が変化したリンク2のフローは10%増加、またリンク9のフローは14%増加した。つまり所要時間での最大40%程度の認識変化が交通量では1~2割程度の影響として現れることがわかる。

また基本ケースで左スプレッド大であったリンク1とリンク8はそれぞれ11%, 6%の減少が見られる。リン

表-4 リンクフローとその変化（単位：台）

リンク	基本ケース	応用計算例 1
1	L	1934 L -1720 -214(-11%)
2	R	2844 L +3123 +279(+10%)
3	S	2648 S -2458 -190(-7%)
4	L	3632 L -3597 -35(-1%)
5	S	3123 S +3146 +23(+1%)
6	C	5674 C -5693 -19(-0%)
7	S	2076 S +2270 +194(+9%)
8	L	3179 L -2992 -187(-6%)
9	R	1781 L +2036 +255(+14%)
10	R	1896 R -1830 -66(-3%)
11	S	3200 S +3237 +37(+1%)
12	R	3571 R -3564 -7(-0%)
13	S	3495 S -3467 -28(-1%)
14	R	2551 R -2502 -49(-2%)

[note] L:左スプレッド大; C:クリスプリング
R:右スプレッド大; S:対称リンク

ク1はリンク2に、リンク8はリンク9に近接することからその影響を受けたものであると思われる。

さらに交通量で変化の大きいものは、対称型のリンク7の9%増加とリンク3の7%減少である。リンク7の増加はリンク9の関連経路に当該リンクが含まれることによると思われる。またリンク3のフロー減少は関連ODのうちリンク16を含む経路への交通の移行があったことによると思われる。

この例は、道路改良などの個別施設整備が間接的に利用者認知に影響を与える場合を想定したものである。つまりリンク交通容量の増加はないが、副次的施設に関する交通対策の影響が、特に利用者認知を介して波及的に伝達された結果を把握することができる。その意味で、道路網における環境対策等が間接的に道路網円滑化に与える影響を計測する方法を考えることもできよう。

(4) 応用計算例とその考察（その2）

つぎに交通情報の状況変化に関連した考察を行う。都市高速道路などではすでに旅行時間の情報提供が実行されている。この状況下では、高速道路リンクは確定所要時間で認知されると考えられる。

このとき高速道路リンク（リンク6）の交通情報提供が一部分不可能となったとき（車両検知器の故障、交通渋滞による所要時間予測精度減少など）、利用者は以前の走行経験からリンク所要時間を判断する。

このような場合は渋滞状況などの関連情報や時間帯から認知が形成されるので、ファジイ性の増大につながる。計算例ではリンク6の左スプレッドを確定値に固定し、右スプレッドを $\gamma=0.0$ から $\beta=1.0$ まで（ファジイ数中心より10%から100%まで増加）0.1ごとに増加させてフロー変化を検討する。高速道路リンク以外の条件はすべて基本ケースと同様である。

代表的例（ $\gamma=0.0$ 、 $\beta=1.0$ ）の計算結果を表-5に示す。リンク6の認知所要時間の右スプレッドを確定値の2倍と設定してもリンクフローは高々8%の変化である。つまり道路網全体からみて、当該リンクの所要時間認知の変化による影響は小さいことがわかる。

この実際的な意味を考えると、道路網全体の情報施設が十分でなく、本例のようにファジイリンクが多数存在する状況下では、代表的な一区間だけのリンクの所要時間の認知変化の道路網交通量への影響は微小であり、ファジイ性の増大にも弾力的であるといえる。

また交通量では高速道路の連結リンクが影響を受けやすく、計算法の相違はあるものの、リンク5で3~4%、リンク7では5~8%程度の増加が見られる。

高速道路（リンク6）と並行する一般街路（リンク4）の交通量をリンク6の右スプレッドとの関係として示したもののが図-6と図-7である。ここで破線は、確定所要時間とした場合のリンクフローを示している。

2つのリンクを比較することにより、高速道路の所要時間認知の変化から生じる当該リンクフローと代替リンクフローの変化を検討することができる。ここで知られる主要な事実は以下の諸点である。

① リンク6（高速道路リンク）の交通量はこの所要時間のファジイ性増加に伴い減少する。特に最大点（ $\beta=1.0$ ）では、確定均衡の場合と比べて6%程度少なくなっている。

② リンク4（並行一般道路）の交通量は高速道路所要時間のファジイ性増加に伴い増大する。最大点（ $\beta=1.0$ ）確定均衡より5%程度の増加がある。これは主に高速道路利用交通の転換によると考えられるが、交通量の変化量が小さいことから、リンク6の関連リンクに分散的に分担されることがわかる。

③ リンク6のフローはファジイ性の増加に対して単調減少を示している。これに対してリンク4では全体的には増加傾向にあるが、必ずしも単調増加ではない。これはリンク6を含んだ経路交通量がいくつかの代替経路に適宜分担される状況を示すものである。

以上のように「重心法」「総時間差法」とともにファジイ所要時間の表現の変更により交通情報変化に関連する交通状態の考察に利用できることがわかる。全般的に「重心法」に比べ「総時間差法」は若干傾向変化が小さいが、実用的には大きな問題ではなく、ファジイ数の形状比較の

表-5 リンクフローとその変化(単位:台)

リンク番号	基本ケース			応用用計算例2		
	条件	①	②	条件	重心法	総時間差法
1	L	1934	1880	L	-395(-2%)	-33(-2%)
2	R	2844	2884	R	-331(-1%)	-18(-0%)
3	S	2648	262	S	-2554(-4%)	-42(-2%)
4	L	3632	3608	L	+80(+2%)	+58(+2%)
5	S	3123	3131	S	+3973(+4%)	+3215(+3%)
6	C	5674	5676	R	-2786(-5%)	-209(-4%)
7	S	2076	2113	S	+2241(+8%)	+112(+5%)
8	L	3179	3129	L	+298(+0%)	+28(+0%)
9	R	1781	1819	R	-1704(-3%)	-66(-4%)
10	R	1896	1907	R	+1963(+4%)	+1949(+2%)
11	S	3200	3202	S	-3240(-1%)	-53(-2%)
12	R	3571	3585	R	+3655(+2%)	+67(+2%)
13	S	3495	3495	S	-3486(-0%)	-17(-0%)
14	R	2551	2564	R	+2611(+2%)	+44(+2%)

[note] L:左大, C:クリスプ, R:右大, S:対称

①:重心法, ②:総時間差法

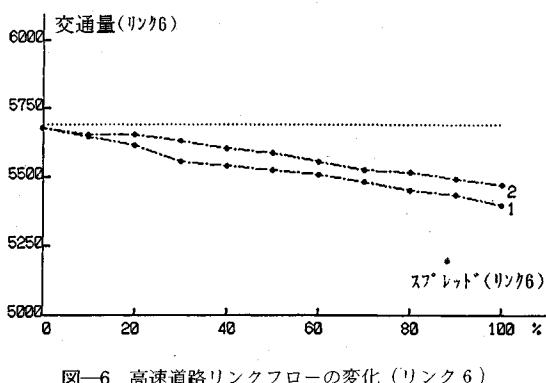


図-6 高速道路リンクフローの変化(リンク6)

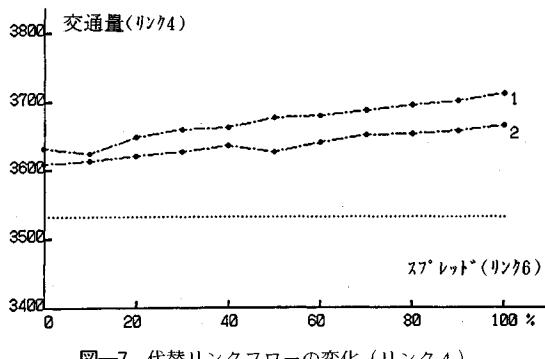


図-7 代替リンクフローの変化(リンク4)

段階での検討も可能であり有効性が高い。

5. おわりに

本研究は道路網の交通流解析に対してファジイ理論の

適用を考え、ファジイ所要時間の認識と「総時間差」による定量的処理方法を検討し、「重心法」と併せて一般的なファジイ交通量配分の計算手順を整理した。

また現実に発生する交通情報変化と交通流動の関連から、ファジイ交通流解析の有効性を示す計算例を紹介した。これらの検討から得られた主な研究成果をまとめると以下のようである。

① リンク交通条件のクリスピ表現に比べ、ファジイ数の表現を用いると、利用者が現実にも認知すると思われる時間幅をモデル内に記述することができる。とくにパラメータ α と β の妥当な設定で、ファジイ情報下での利用者認知の形状を規定できる。

② 「重心法」と「総時間差法」の比較整理により、ファジイ所要時間を用いた交通量配分の一般的な記述ができた。とくに三角型ファジイ数を導入することで、アルゴリズム上は既存配分手法に所要時間の代表値関数を付加することで、容易に修正できることがわかった。

③ 配分計算より得られるファジイ均衡解は経路所要時間のメンバシップ関数形状に依存して決定されるため、実用上は認知形態の規定が重要である。しかしながら、この方法は確定計算法での解も含む一般的拡張となっており、従来解を含んだ考察が可能である。

④ 「重心法」と比較提案した「総時間差法」は、均衡解は若干異なるが適用上の有効性は同程度である。ただし、この方法は詳細なファジイ性の差異を取り扱うことができ、選択行動の記述モデルとしての現実性も含めて期待できる方法である。

⑤ ここでは、交通情報と交通流動の視点から「交通円滑化対策の評価」と「高速道路の情報提供施設の機能低下の影響」について検討した。本研究でのべた方法は、さらに多様な情報問題へ応用可能性を持つものである。

本研究で示したような交通情報と道路交通流動の関係から、とくに興味深い問題は「適切な情報提供と交通管理の関係」を知ることである。したがって、ここでは新しい行動規範を持つ交通量配分モデルを作成したというより、ファジイ所要時間を取り扱うための修正を行ったと考えれば妥当である。その意味から、本研究の今後の具体的な課題として、①利用者の情報の認知形状についての実証的な調査と検討¹⁴⁾、②経路選択行動の多様性とその記述に関する検討¹⁵⁾、③現実道路網における交通情報要素を考慮した実用的配分への応用¹⁶⁾などがあげられ、これらの研究の知見を整理統合することで多数の問題解決に有力な方法となりうると考えられる。

なお本研究は著者のひとりである邵春福の京都大学学位論文の一部であることを付記する。

謝辞：本研究を終えるにあたって、貴重な御助言を頂いた岡山大学工学部井上博司助教授、岐阜大学工学部宮

城俊彦教授に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 加藤晃：交通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方法の現況と課題，高速道路と自動車，Vol. 31, No. 2, pp. 24～33, 1988.
- 3) C.F. Daganzo and Y. Sheffi : On Stochastic Models of Traffic Assignment, Transportation Science. Vol. 11, No. 3, pp. 253～274, 1977.
- 4) Robet, B. Dial : A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model Which Obviates Path Enumeration, Trans. Res. 5, pp. 83～111, 1971.
- 5) 井上博司：混雑した道路網の交通均衡およびその数値解法，土木学会論文集，第 365 号/IV-4, pp. 125～133, 1986.
- 6) 寺野寿郎・浅居喜代治・菅野道夫：ファジイシステム入門，オーム社，1987.
- 7) 秋山孝正：ファジイ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，Vol. 395/IV-9, pp. 23～32, 1988.
- 8) 邵春福・秋山孝正・佐佐木綱：ファジイ情報下のネットワーク利用者均衡配分の一方法，交通工学, Vol. 25, No. 5, pp. 13～23, 1990.
- 9) Arnold Kaufmann and Madan M. Gupta : Introduction to Fuzzy Arithmetic-Theory and Applications, Van Nostrand Reinhold Company, 1989.
- 10) 邵春福・秋山孝正・佐佐木綱：ファジイ経路旅行時間に基づく道路網交通流解析に関する比較研究，第 10 回交通工学研究発表会論文集, pp. 57～60, 1990.
- 11) 本多中二・大里有生：ファジイ工学入門，海文堂，第 3 章, 1989.
- 12) 邵春福：都市交通管理計画へのファジイ理論の応用に関する研究，京都大学学位論文，1991.
- 13) 第 18 回土木計画学講習会テキスト：交通ネットワークの最新理論と応用，土木学会計画学研究委員会編, pp. 49～66, 1987.
- 14) 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，第 11 回交通工学研究発表会論文集, pp. 133～136, 1991.

(1991.8.14 受付)

TRAFFIC FLOW ANALYSES ON NETWORKS WITH FUZZY ROUTE INFORMATION

Takamasa AKIYAMA, Chun-Fu SHAO and Tsuna SASAKI

This paper develops a traffic assignment model which can describe the route choice behavior of motorists with fuzzy information. It is called a fuzzy user equilibrium assignment proposed as an extension model with Wardrop's user equilibrium criterion. First, route travel time is defined as a TFN (Triangle Fuzzy Number) to represent consciousness of drivers. Second, comparison methods among fuzzy travel times is mentioned to construct practical traffic assignment model. It proved that the proposed algorithm gives the unique solution with similar way of the conventional deterministic approach. Third, variation of traffic flow under various pattern of fuzzy route information is analyzed with numerical example.