

橋梁診断における経験的知識に内在するあいまいさの定量化に対するファジィエントロピーの適用

Application of Nonprobabilistic Entropy to Quantification of
Subjective Uncertainty Included in Empirical Knowledge on Bridge Rating

串田 守可* 徳山 貴信** 宮本 文穂***

By Moriyoshi KUSHIDA, Takanobu TOKUYAMA and Ayaho MIYAMOTO

Recently, the necessity of developing a computer-aided bridge rating system has been pointed out for maintenance, diagnosis, repair and rehabilitation of existing bridges. The major part of a bridge rating which is in fact the essence of the bridge rating system has been formulated based on the subjective judgement of experts in related fields. Therefore, an establishment of a method for representation of empirical knowledge and a treatment of subjective uncertainty included in the knowledge, has become very important problem for the systematization of the bridge rating.

In this paper, for the representation of the knowledge related to the bridge rating, which is collected from the bridge rating experts by questionnaires, the fuzzy set theory is applied, and the subjective uncertainty is quantified by the application of nonprobabilistic entropy to the membership functions represented by the extension Π function.

Furthermore, the validity of this representation method for empirical knowledge is verified through the application of the method to questionnaires which was conducted to the bridge rating experts.

1. はじめに

現在、社会基盤の根幹をなす高速道路網をはじめとする各種道路交通網の合理的な維持・管理が大きな社会問題となっている。特に、道路交通網の中で重要な位置を占める橋梁の適切な維持・管理は、その多種多様な損傷および損傷原因、損傷原因相互の複雑な関連性等のために、非常に困難な問題を含む場合が多くなっている。このため、近年、各方面において、合理的な橋梁診断手法の確立を目指した種々の提案がなされているが¹⁾、いまだその確立を見ないのが現状である。これは、橋梁自体が大規模かつ単産品であり、要求される耐用年数が長期であることから、現場における実橋試験および実験室における再現試験が困難であり、点検結果により現有耐荷力、耐久性、余寿命を直接求めることを不可能にしていることが主要な原因と考える。その結果、現状における橋梁の耐用性診断は、専門家と呼ばれる熟練の橋梁管理者や橋梁点検者の経験的知識による主観的判断に依存する部分が多い。

橋梁診断システムの開発へのアプローチ法には、大別して対照的な2つの姿勢があると考えられる。すなわち、客観的・定量的な情報より、問題の本質をあいまいさ無く見極めていこうとする姿勢と、主観的・定性的な情報に内在するあいまいさを認めたくえて問題の輪郭を巨視的に把握していこうとする姿勢である。当然、前者の姿勢による問題解決が最善であることに異論は無いが、これには、膨大で長期にわたる研究の積み重ねが必要となるのは明白であり、早急な橋梁診断システムの確立を要望する声との時間的ギャップがあまりに大きい。ゆえに、現状ではあいまいな知識であってもそれを許容し、定性的・定量的両方の知識を同一のシステム内に取

* 工修 榎本 鐵工所, 橋梁設計部 (〒559 大阪市住之江区柴谷2-8-45)

** 榎本 鐵工所, 橋梁設計部 (〒559 大阪市住之江区柴谷2-8-45)

*** 工博 神戸大学助教授, 工学部土木工学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

込み、必然的に導入されるあいまいさ、言い換えれば、そのシステムの信頼度を十分に把握したうえで、知識の更新・拡充をはかり、システムの信頼度を高めていくことが重要となる。この場合、特に知識の更新・拡充による知識自体の洗練およびそれに伴うあいまいさの変化に、診断結果が追従しなければならないことを十分に認識し、主観的あいまいさが内在する経験的知識をどのように抽出し、表現するかを検討することは非常に意義あるものと考えられる。

本研究においては、アンケート調査を利用して抽出した専門家の知識を、ファジ理論における帰属度関数と対応させ、形状パラメータを付加することにより拡張した Π 関数で表現する手法を提案している。そして、アンケート調査結果に内在するあいまいさを分析し、あいまいさの定量化にファジイントピ⁻²⁾・³⁾の概念を適用することにより、知識間のあいまいさの差異および学習効果による知識の洗練の定量的評価が可能であることを、代表的な帰属度関数の形状変化を想定し、それぞれに対するファジイントピ⁻値を算出し、比較することにより示している。さらに、本手法を橋梁診断の専門家に対して実施したアンケート調査結果に適用することにより、その妥当性を検証している。

2. アンケート調査結果を利用した知識の表現方法

専門家が保有する経験的知識とは過去の経験や情報の蓄積により構築されたものであり、素人の知識に比較して個人差が少なく、なんらかの統計データがその背景にあると考えた場合、工学的にも有用なものである。これらの知識には定性的に表現できるもの、あるいは定量的に表現できるものが混在しており、多少の差こそあれすべてにあいまいさが内在していると考えられる。そして、経験的知識の工学的価値とは、この内在するあいまいさの量に影響されると考えられる。一般に、あいまいさを含む不確定性は、確率・統計論的に取扱える客観的不確定性とランダムな現象として扱うことのできない主観的不確定性に大別できるが、経験的知識に内在する不確定性は後者の主観的不確定性が主なものであると考えられる。必然的に、経験的知識を表現する場合、この主観的不確定性を定量的に把握することが非常に重要となる。

一方、主観的不確定性を数学的に扱う手法として、ファジ理論の概念が、1965年に L.A.Zadehによって提案されている。本研究では橋梁診断に関する経験的知識およびそこに内在するあいまいさをアンケート調査を利用して抽出し、調査結果にファジ理論における帰属度関数を適用して、経験的知識を定量的に表現しようとしている。

2.1 帰属度関数の形状変化

専門家といえど保有する知識のレベルには様々なものがあり、知識を表現する帰属度関数の形状および内在するあいまいさの量も当然異なる。また、同一の知識であっても学習や新たな経験により帰属度関数の形状およびあいまいさは時間的に変化すると考えられる。アンケート調査による知識の抽出とは、あくまでもその時点での横断的な知識を対象にしているにすぎない。ゆえに、アンケート調査を利用して経験的知識を定量化する場合、多様な形状の帰属度関数と対応させなければならない知識が混在していることを考慮する必要がある。また、これらの知識をシステム内に定量的に取込むことができたとしても、それ以降に獲得する有効な情報・経験によるあいまいさの低減を意識した知識の洗練が必要となることから、知識表現の手段としての帰属度関数は多様な形状変化に柔軟に対応できるものでなくてはならない。ゆえに、想定される帰属度関数の形状変化を検討したうえで帰属度関数の初期設定に用いる関数および形状パラメータを決定する必要がある。図1(a)~(e)に、想定される帰属度関数の代表的な形状変化の概念図を示す。ここで、ある集合 X におけるファジ集合 A を特性づける帰属度関数を $\mu_A(x)$ とする。従って、要素 $x_i \in X$ に対する値 $\mu_A(x_i) \in [0, 1]$ は、 x_i がファジ集合 A に属する度合い（帰属度）を示す量と考えることができる。なお、後述するように、過去に著者等が実施してきた橋梁診断に関するアンケート調査においては、事前に、回答における定性的な表現と対

応させた0～100の整数の中より、回答者の考えに一致するものを選び、記入する形式をとっていることから、それと対応させて図中の横軸 x_i を0～100の数値的な表現としている。以下、それぞれの形状変化について説明を加える。

① 高さの変化 (図1(a))

帰属度 $\mu_A(x_i)$ の値が全体的および部分的に、任意の値あるいは一様の比率等で増減することを示す。図1(a)は $\mu_A(x_i)$ が一様の比率で増減する場合を表現している。例えば、アンケート調査においては、回答に含まれる無回答の比率や回答の確信度により帰属度を増減させる場合等に相当する。

② 拡大化・集中化⁴⁾ (図1(b))

$\mu_A(x_i) > 0$ となる x_i の範囲が小さくなる場合を集中化とし、その逆の場合を拡大化とする。例えば、アンケート調査においては、回答の平均値まわりのばらつきの増減等に相当する。

③ 明暗強化⁴⁾ (図1(c))

$\mu_A(x_i) = 0.0, 0.5$ および 1.0 となる x_i の位置および帰属度は変化せず、 $0 > \mu_A(x_i) > 0.5$ の範囲の帰属度 $\mu_A(x_i)$ が増加し、 $0.5 > \mu_A(x_i) > 0.0$ の範囲の帰属度 $\mu_A(x_i)$ が減少する場合を明暗強化とする。例えば、知識をシステムに取り込んだ後、帰属の有無が最も不明確であった部分が、有効な情報により帰属の有無が明確になること等に相当する。

④ 帰属度が0.5となる位置の移動 (図1(d))

$\mu_A(x_i) = 0.0$ および 1.0 となる x_i は移動せず、 $\mu_A(x_i) = 0.5$ となる x_i が移動する。言い換えれば、 $\mu_A(x_i) = 0.0$ および 1.0 となる x_i 以外で帰属度 $\mu_A(x_i)$ の値が増減し、帰属度関数の勾配が変化することになる。例えば、知識をシステムに取り込んだ後、帰属の有無が最も不明確であった部分が、有効な情報によりその位置を変化させること等に相当する。

⑤ 帰属度のピーク位置の移動 (図1(e))

帰属度関数の形状を変えずに平行移動する場合、あるいは帰属度 $\mu_A(x_i) = 0$ となる x_i の位置は変化せず $\mu_A(x_i)$ が最大となる x_i の位置が変化する場合を示す。図1(e)は後者の場合を表現している。ここで、平行移動とは、知識をシステムに取り込んだ後、帰属度が最も大きい回答が、有効な情報によりその位置を変化させること等に相当する。平行移動の場合は帰属度のピーク位置まわりのばらつき・帰属度両者の変化はない。一方、図1(e)の場合は、帰属度のピーク位置付近での帰属の程度が変化し、明暗強化の形状変化も伴う。

専門家の知識には上記の特性を有する帰属度関数の形状パターンがいくつか合わさって表現されるものが混在していると考えられる。また、一旦システムに取込んだ知識も、その後の有効な情報により上記のパターンが複合した形状に修正されることが想定できる。本研究では以上を代表的な形状変化と考え検討する。

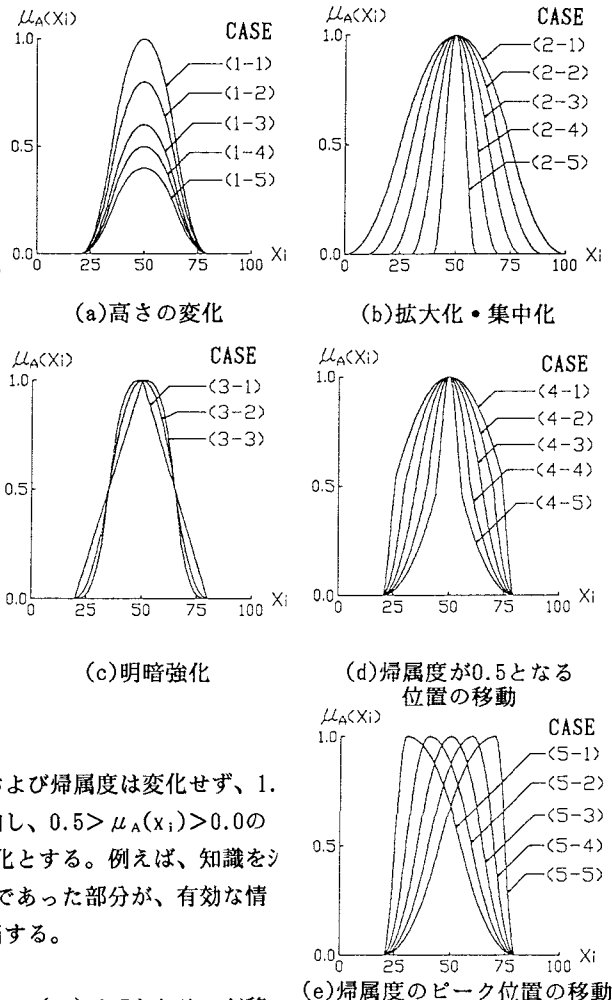


図1 帰属度関数の代表的形状変化

2.2 帰属度関数の初期設定

かねてより著者等はアンケート調査結果の回答状態を指数関数⁶⁾や Π 関数⁶⁾等で近似する手法を提案してきた。指数関数による近似は、アンケート回答結果の平均値・標準偏差より容易に帰属度関数を設定できる反面、あいまいさの適切な表現、前述の形状変化に対する柔軟な対応という点では不十分と考えられる。一方、 Π 関数は帰属度関数の高さ、広がり、偏り等の表現に柔軟性をもち、ある程度の形状変化に対してもパラメータを変化させることにより対応が可能となる。本研究では、前述の形状変化に対応可能な帰属度関数として、 Π 関数に若干の形状パラメータを付加して拡張した関数（以後、拡張 Π 関数と呼ぶ。）を提案し、次式のように定義する。なお、拡張 Π 関数の概念図を図2に示す。

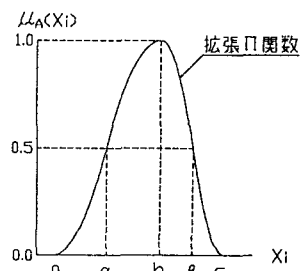


図2 拡張 Π 関数の概念図

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} 0 & (x_i \leq a) \\ k[0.5 \cdot \{(x_i - a)/(\alpha - a)\}^n] & (a < x_i \leq \alpha) \\ k[1.0 - 0.5 \cdot \{(x_i - b)/(\alpha - b)\}^n] & (\alpha < x_i \leq b) \\ k[1.0 - 0.5 \cdot \{(x_i - b)/(\beta - b)\}^n] & (b < x_i \leq \beta) \\ k[0.5 \cdot \{(x_i - c)/(\beta - c)\}^n] & (\beta < x_i < c) \\ 0 & (c \leq x_i) \end{cases} \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 $\mu_A(x_i)$ ：帰属度 ($0 \leq \mu_A(x_i) \leq 1$)

k ：帰属度 $\mu_A(x_i)$ を一様の比率により増減させるパラメータ

a, c ： $\mu_A(x_i) = 0$ となる位置 x_i を特定するパラメータ

b ： $\mu_A(x_i)$ が最大となる位置 x_i を特定するパラメータ

α, β ： $\mu_A(x_i) = 0.5$ となる位置 x_i を特定するパラメータ

n ：明暗強化の程度を表現するパラメータ ($n \geq 1$)

なお、(1)式で、 $n=2$, $k=1$, $\alpha=(a+b)/2$, $\beta=(b+c)/2$ とした時、いわゆる Π 関数となる。

2.3 アンケート調査結果に内在するあいまいさ

本研究で対象とする橋梁診断に関する知識に内在する主観的不確定性には以下に示すような様々なものが定義されている⁷⁾。

- ①fuzziness 対象があまりにも複雑で理解できないことあるいは知識が不十分なために生じる不確定性。
(例：橋梁に発生する損傷は多くの要因の複合によって生じており、損傷発生による橋梁諸機能への影響は非常に複雑な関連性を有している。これらに関する質問に対して、その複雑さあるいは関連知識の不足により回答にあいまいさが含まれる。)
- ②ambiguity 自然言語に含まれるあいまいさ。
(例：“主桁がかなり錆びている”という状況を理解する場合、定性的な表現であるため個人個人の認識に差異が生じる。)
- ③vagueness 画像・写真の処理等に含まれるあいまいさ。
(例：床版のひびわれ状況の写真を基に損傷程度を判断する場合、写真の明瞭さの程度により回答にあいまいさが含まれる。)
- ④imprecision 情報の欠如による不正確さ。

(例：損傷程度に対する実橋の検証試験結果が少なく、損傷程度に関する質問に対して、情報の欠如により回答に不正確さが含まれる。)

⑤generality 多くの意味あるいは解釈が存在することによるあいまいさ

(例：“立地条件が橋梁の錆の発生に及ぼす影響はどの程度”という質問において立地条件の意味は非常に広範囲であり、回答にその認識の差異によるあいまいさが含まれる。)

アンケート調査を実施した場合、その回答には以上のあいまいさが様々な形で混在していると考えられる。本研究において定量化の対象とするあいまいさを、①fuzziness、②ambiguityの両者とする。なお、③vaguenessは、将来アンケート調査に写真等を利用する場合、特に留意しなければならないが、現在までに著者等が実施したアンケート調査においては対象外であると考えられる。また、④imprecisionを把握することは非常に重要であるが、アンケート調査結果のみによりこの不正確さを抽出し定量化することは不可能であると考えられる。ゆえに、アンケート調査結果では把握できない不正確さとして認識すべきであり、これを消去するには客観的な裏付けとしての検証試験等に依るしかないことに留意しなければならない。さらに、⑤generalityは限定された分野における専門家に対するアンケート調査を対象とした場合、十分な事前説明や用語の明確化に努力することにより消去できるあいまいさと考えられる。

前述のように専門家の経験的知識には定性的なものから定量的なものまで様々なレベルのものが混在している。また、アンケート作成者が必要とする経験的知識も定量的なものから定性的なものまで多様である。表1に質問および回答形式として考えられる内容表現によるアンケートの分類例を示す。必要とする知識が全て分類4のような定量的表現で収集できればよいのであるが、橋梁診断に関する知識等では、むしろ分類1のような定性的表現が多く、当然回答に内在するあいまいさの度合いは大きくなる。すなわち、質問が定性的な言語による表現である場合、アンケート作成者と回答者はそれぞれ異なった立場にたって内容を理解するために、「ambiguity」によるあいまいさもアンケート作成者から回答者への質問の伝達過程で変化すると考えられる。また、アンケート対象となる専門家群を知識抽出の対象となる評価母体と考えた場合、回答には前述の「ambiguity」によるあいまいさに「fuzziness」によるあいまいさが加わり、個人間での回答のばらつきとして表われる。以上の考え方を概念的に表現したものが図3である。ここで、複数の専門家に対して“主桁端部がかなり錆びている場合、主桁のせん断耐荷力に及ぼす影響はどの程度ですか？”という質問に対して“影響が著しく大の場合を100点、影響が全くない場合を0点として、適切と考えられる点数をつけてください。”という分類1のアンケート調査を実施した場合を想定し、図3に示すアンケートの受け答えに内在するあいまいさの概念を説明する。まず、アンケート作成者は“かなり錆びている。”という状況を自分なりにイメージして質問を作成する。この時の“かなり錆びている。”というファジイ集合Aに対する帰属度関数が $\mu_A(x')$ で表現されたとする。しかし、回答者はこの質問を受けて自らのイメージで“かなり錆びている。”という状況を想定するために、同じファジイ集合Aに対してアンケート作成者側の帰属度関数 $\mu_A(x')$ は回答者側の帰属度関数 $\mu_A(x)$ へ形状変化する。ここで、帰属度

表1 質問および回答の表現によるアンケートの分類例

分類	質問内容	回答内容
1	言語による定性的な表現	言語による定性的な表現
2	数値による定量的な表現	言語による定性的な表現
3	言語による定性的な表現	数値による定量的な表現
4	数値による定量的な表現	数値による定量的な表現

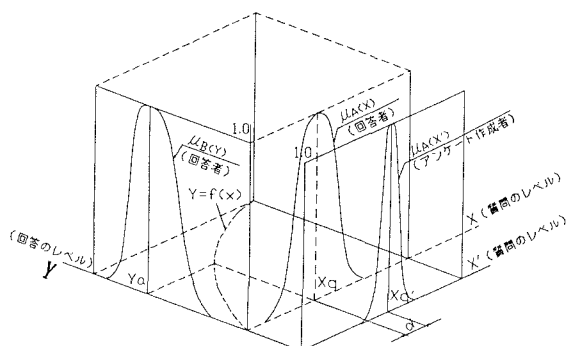


図3 アンケートの受け答えに内在するあいまいさの概念図

のピーク位置は両者の“主桁がかなり錯びている”状況に対するイメージの差異によりずれ（図中d）が生じる可能性がある。ゆえに、帰属度関数 $\mu_A(x)$ に「ambiguity」によるあいまいさが場合によっては増幅されて内在することになる。次に、回答者は自分のイメージに最も適合する“かなり錯びている。”という状態（図中 x_a ）から、自らの経験により構築してきた錯びの状態とせん

表2 表1の分類に対応させたアンケートに内在するあいまいさの種類

	質問に含まれるあいまいさ	回答に含まれるあいまいさ
分類1	ambiguity	ambiguity・fuzziness
分類2	————	ambiguity・fuzziness
分類3	ambiguity	ambiguity・fuzziness
分類4	————	fuzziness

断耐荷力の関係 f により、 $X \rightarrow Y$ （ピーク値は $x_a \rightarrow y_a$ ）への写像を行ない回答を与えるが、この回答は回答者個人個人でばらつき、専門家群を知識抽出の対象となる評価母体と考える場合、回答は帰属度関数 $\mu_B(y)$ で表現され、そこには「ambiguity」によるあいまいさと「fuzziness」によるあいまいさが混在することになる。表1で分類したそれぞれのアンケート調査結果に対応して内在するあいまいさの種類を表2に示す。これらのあいまいさを定量化することにより、アンケート調査結果に内在するあいまいさの把握が可能となる。以上のことから、アンケート調査により知識を抽出し洗練していくことを意識した場合、回答のばらつきだけでなく、アンケート作成者から回答者への質問内容の伝達過程で生じる帰属度関数の形状変化、ピーク値のずれおよびそこに内在するあいまいさの把握が重要となる。特に、定性的な言語表現により損傷状態を提示（例：“かなり錯びている。”）する場合、その状態を回答者が理解するための指標（例：腐食面積・板厚減少 etc.）を要素とした帰属度関数の把握を意識した質問を付加することが今後必要になると考えられる。

3. あいまいさの定量化

3.1 あいまいさの定量化へのファジィエントロピーの適用

Shannonの情報理論において重要な意味合いを持つものとしてエントロピーが定義されている⁸⁾。これは対象とする系で、ある事象が生起するかしないかの不確かさの度合いを表わしている。これを基に、対象をファジィ集合で表わしたときのあいまいさの程度を表わす指標としてファジィエントロピーが提案されている。

本研究では、あいまいさを測る尺度として、このファジィエントロピーの考え方を適用する。ファジィエントロピーの関数形は一意的に決定されるのではなく、次の4条件を満足するものとして、後述する種々の概念が提案されている。^{2), 9), 10), 11)}

- ① $\mu_A(x_i) = 0.0$ および 1.0 の時、 $d(A) = 0$
- ② $\mu_A(x_i) = 0.5$ の時、 $d(A)$ は最大値をとる。
- ③ $\mu_A^*(x_i) \geq \mu_A(x_i) \dots\dots \mu_A(x_i) \geq 0.5$
 $\mu_A^*(x_i) \leq \mu_A(x_i) \dots\dots \mu_A(x_i) \leq 0.5$
 の時、 $d(A) \geq d(A^*)$ となる。
- ④ A の補集合を $\bar{A}$ とし $\mu_{\bar{A}}(x_i) = 1 - \mu_A(x_i)$
 の時、 $d(A) = d(\bar{A})$ となる。

ここで、 $\mu_A(x_i)$:ファジィ集合 A の x_i における帰属度
 $d(A)$:ファジィエントロピー

(1) De Luca & Terminiによる定義⁹⁾

$$d_L(A) = k \left[\sum_{i=1}^n \{ -\mu_A(x_i) \cdot \log_2 \mu_A(x_i) - (1 - \mu_A(x_i)) \cdot \log_2 (1 - \mu_A(x_i)) \} \right] \dots\dots (2)$$

Shannonの情報理論で使われるエントロピー関数を導入したものであり、 $\{ \}$ の中は要素 x_i が集合Aに帰属する
 かないかという事象の平均情報量を表わしており、 $d_L(A)$ は全ての要素 $x_i (i=1 \sim n)$ について総和したもの
 である。

(2) Kaufmannによる定義¹⁰⁾

$$d_K(A) = \sum_{i=1}^n | \mu_A(x_i) - \mu_{A_{1/2}}(x_i) | \quad \dots\dots\dots(3)$$

$\mu_{A_{1/2}}(x_i)$ は集合Aの1/2-カット集合であり、 $d_K(A)$ はファジィ集合Aとそれに最も近いクリップ集合との距離の
 総和を示す。この定義の概念図を図4に示す。

(3) Yagerの測度¹¹⁾

$$d_Y(A) = n - \sum_{i=1}^n | \mu_A(x_i) - \mu_{\bar{A}}(x_i) | \quad \dots\dots\dots(4)$$

$| \mu_A(x_i) - \mu_{\bar{A}}(x_i) |$ はファジィ集合Aとその補集合 $\bar{A}$ との距離を示し、その距離が大きくなればなるほどあ
 いまいさが小さくとなると考え、要素 x_i におけるこの距離の総和を要素数 n より引くことにより、 $d_Y(A)$ を算出
 している。この定義の概念図を図5に示す。

(4) Vagueness 関数²⁾

$$\begin{aligned} d_V(A) &= 2 \mu_A(x_i) \quad \dots\dots\dots \mu_A(x_i) \in [0, 0.5] \\ d_V(A) &= 2 - 2 \mu_A(x_i) \quad \dots\dots\dots \mu_A(x_i) \in [0.5, 1] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(5)$$

著者等¹²⁾が提唱してきたあいまいさの測度と同様のものであり、またファジィエントロピーの4条件も満足する
 関数である。この定義の概念図を図6に示す。

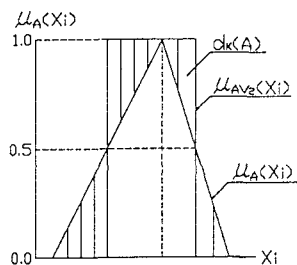


図4 Kaufmannの定義

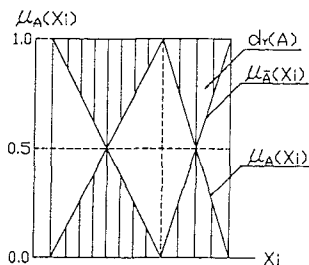


図5 Yagerの測度

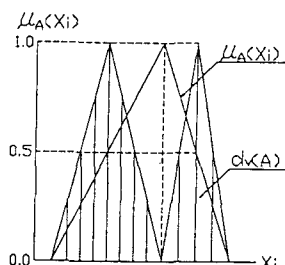


図6 Vagueness関数

これらの概念図より明らかなように、ファジィエントロピーの値（以後、あいまい度と呼ぶ。）を各定義式で与え
 られる最大値でそれぞれ正規化すると、 $\mu_{\bar{A}}(x_i) = 1 - \mu_A(x_i)$ という条件の基で、(3)～(5)式は同一の値とな
 り、Kaufmannの定義式およびVagueness 関数はYagerの測度に包括されることが分かる。ゆえに、De Luca &
 Terminiによる定義式(2)およびYagerの測度式(4)を本研究におけるあいまい度の定量化に適用する。

4. 帰属度関数の形状変化とあいまい度の変化

帰属度関数の形状変化に伴うあいまい度の変化を上述の2種類のファジィエントロピーを適用することにより、
 定量的に検討する。図1に示す帰属度関数の形状変化に対してあいまい度 $d_L(A)$ (式(2))、 $d_Y(A)$ (式(4))を算
 出する。ここでは帰属度関数 $\mu_A(x)$ の横軸を0～100点と考え、5点ピッチで20分割 ($x_i, i=1, 2, \dots, 21$) し、
 それぞれのあいまい度を加算し、あいまい度の最大値21(あいまい度の最大値 $1.0 \times$ 分割点数21)で正規化す
 る。図1の形状変化に対応する形状パラメータの値を表3に示し、それぞれのあいまい度の算出結果をまとめ
 て図7(a)～(e)に示す。これらより、以下のことが明らかとなる。

① 高さの変化によるあいまい度の変化 (図7(a))

高さの変化に対する感度は図示の範囲内で若干 $d_Y(A)$ の方が $d_L(A)$ に比べて高い。帰属度の最大値の高さが
 低くなるにつれてあいまい度は増加するが帰属度の最大値が0.6より低くなると、むしろあいまい度は減少

表3 形状変化に対応する形状パラメーターの一覧表

	高さの変化					拡大化・集中化					明暗強化					$\alpha \cdot \beta$ の変化					bの変化				
CASE	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	5-5		
k	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
a	20	20	20	20	20	0	10	20	30	40	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20		
b	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	30	40	50	60		
c	80	80	80	80	80	100	90	80	70	60	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80		
α	35	35	35	35	35	25	30	35	40	45	35	35	35	25	30	35	40	45	25	30	35	40	45		
β	65	65	65	65	65	75	70	65	60	55	65	65	65	75	70	65	60	55	65	65	65	65	65		
n	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		

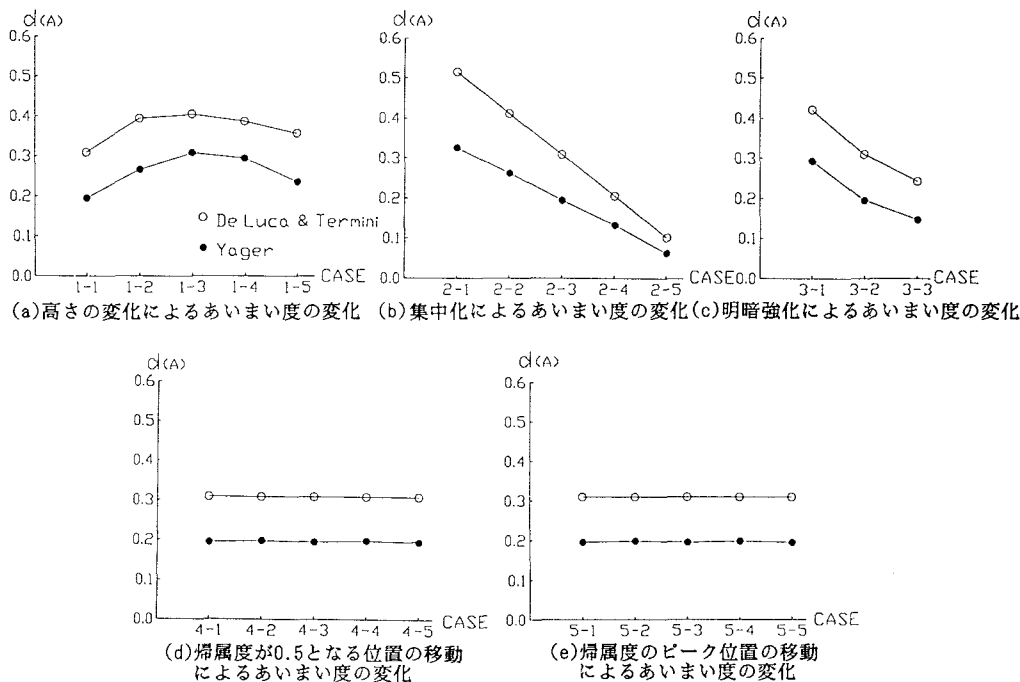


図7 ファジエントロピーによるあいまい度の算出結果

する傾向にある。これは、集合Aの補集合Aに対する帰属度を $\mu_{\bar{A}}(x_i) = 1 - \mu_A(x_i)$ であると仮定してあいまい度を算出しているために集合Aに対する帰属度が低くなることは同時にそれを否定する補集合Aに対する帰属度が高くなり、両者の距離が大きくなることから、あいまい度が減少する傾向が表われる。

② 拡大化・集中化によるあいまい度の変化 (図7(b))

集中化に伴って、あいまい度は大きく減少する。集中化に対する感度は図示の範囲内で $d_L(A)$ の方が $d_Y(A)$ に比べて高い。あいまい度の減少に対して集中化による形状変化は最も効果があり、これは後述する帰属度が0.5となる点の移動によるあいまい度の変化の傾向をみても、形状の先鋭化よりむしろ裾野の狭まりがあいまい度の減少に大きく影響していると考えられる。

③ 明暗強化によるあいまい度の変化 (図7(c))

帰属度が0.5となる点を中心に帰属度関数の勾配が急になるほど、あいまい度は減少する。すなわち、初期設定された帰属度関数に最も近いクリップな集合に移行しようとする形状変化であり、集中化ほどではないにしろあいまい度の減少にかなり影響する。

④ 帰属度が0.5となる位置の移動によるあいまい度の変化 (図7(d))

帰属度が0となる点を固定した上での拡大化・集中化といえるが、あいまい度の顕著な変化は見られず、形状の先鋭化に対するあいまい度の減少も見られない。

⑤ 平行移動および帰属度のピーク位置の移動によるあいまい度の変化（図7(e)）

形状の偏平化に対するあいまい度の顕著な差異は認められない。また、形状変化なしに平行移動する場合あいまい度の変化は無い。しかし、システムに取込んだ後、何等かの有効な情報により帰属度のピーク位置を移動させる場合、あいまい度の減少が生じるはずであるが帰属度関数の形状を基に算出するフジィメントでは評価できず、集中化等による強制的な形状変化によりあいまい度を低減させることが必要になると考えられる。

以上の結果をまとめると、あいまい度の変化が著しいのは、帰属度関数の拡大化・集中化および明暗強化に対してであり、逆にいえば、知識の更新・拡充によるあいまい度の低減には、これらの変化が可能となる情報の提供が有効であると考えられる。

全般的にみて、図示の範囲内では帰属度関数の形状変化に対するYagerの測度式によるあいまい度 $d_Y(A)$ とDe Luca & Terminiの定義式による $d_L(A)$ の傾向的な差異はほとんどないといえる。ただし、フジィメントの条件式より明かなように両者とも正規化したあいまい度は最大値1.0、最小値0.0をとることから、最大(小)値付近のあいまい度を算出し比較した結果、あいまい度の変化に対する感度について以下のことがいえる。

- (1) 高さの変化に対してはあいまいさが小さくなるにつれて、 $d_L(A)$ の感度は $d_Y(A)$ より高くなる。
- (2) 集中化が進みあいまいさが小さくなり最小値に近づくにつれて、 $d_L(A)$ の感度は $d_Y(A)$ より高くなり、一方、拡大化が進みあいまいさが大きくなり最大値に近づくにつれて、 $d_Y(A)$ の感度は $d_L(A)$ より急速に高くなる。
- (3) 明暗強化が進みあいまいさが小さくなるにつれて、 $d_L(A)$ の感度は $d_Y(A)$ より高くなり、逆にあいまいさが大きくなるにつれて $d_Y(A)$ の感度は $d_L(A)$ より高くなる。

すなわち、あいまいさの大きい範囲でYagerの測度式によるあいまい度 $d_Y(A)$ は感度が高く、逆にあいまいさの小さい範囲でDe Luca & Terminiの定義式による $d_L(A)$ の感度が高くなる。橋梁診断に関する知識の初期設定においてはあいまいさの大きい知識を取扱わねばならないため、当該問題に対するあいまいさの定量化にはYagerの測度 $d_Y(A)$ の方がより適切であると考えられる。さらに、橋梁診断に関する知識において $\mu_{\bar{A}}(x_i) = 1 - \mu_A(x_i)$ が成立しない場合、例えば、ある事象の肯定に対する確信度（帰属度）が0.2であるが否定に対する確信度（帰属度）が0.8も支持できない場合等において、Yagerの測度は集合Aとその補集合 $\bar{A}$ の距離に基づいてあいまい度の大小を定義しているため、これに対しても拡張が可能となる。

5. 橋梁診断に関するアンケート調査結果に対する適用例

著者等は過去数年間にわたって、橋梁診断エキスパートシステムの知識ベース構築のために、兵庫県土木部道路建設課に所属する専門技術者等に対して、橋梁の耐用性評価に関するアンケート調査を実施してきた。¹⁾そこで、本研究で提案する知識の表現およびあいまいさの定量化手法の妥当性を検証するために、これらのアンケート調査結果を再整理し、以下のような検討を加えた。

5.1 アンケート調査の概要

(1) アンケート調査¹⁾

兵庫県土木部道路建設課に所属する管理者11名、大学関係の研究者3名、橋梁メーカーの設計者6名からなる20名に対して実施したものであり、耐用性評価試験の対象となる橋梁を実際に目視調査した後に橋梁の健全度に関するアンケート調査を行っている。回答者は下記に示す基準と対応する0～100の整数の中から、目視調査の結果適当であろうという点数をほぼ直感的に記入している。表4にアンケート調査結果を示す。

100：設計、施工共に問題のない架設直後の状態。

75：わずかに劣化しているが何等憂慮なく健全な状態。

50：供用年数からいえば、これといって良くもなく悪くもなく普通の状態。

25：これ以上悪化すれば、補修・補強が必要になる限界の状態。

0：橋梁としての機能が皆無で、取り壊しを待つみの状態。

なお、本アンケート調査は回答者自身が目視調査を行ない、自身の評価軸において損傷状態を把握していることから、損傷状態を数値的に表現はしていないが表1に示す分類2のアンケート調査と同等と考えられ、質問内容に「ambiguity」によるあいまいさは含まれておらず、回答のばらつきをアンケート調査に含まれるあいまいさの総和と考えることができる例として位置付けるものとする。

(2)アンケート調査2¹⁾

上記アンケート調査の一環として同時に行われたものであり、対象を鉄筋コンクリート橋にしぼり損傷およびその原因、あるいは損傷に対する補修の要否の考え方について、下記に示す基準を参考に回答者の考えに一致するものを0～100の整数の中から選び、点数の記入を求めたものである。表5にアンケート調査結果の一部を示す。

100：全くその通りで、疑う余地はない。

75：その様に考えてほぼ間違い無いが、稀に例外もある。

50：二つに一つはその考え通りであろう。

25：稀にその様なこともあるが、何ともいえない。

0：全く間違った考えである。

なお、本アンケート調査は表1に示す分類1のアンケート調査に該当すると考えられるが、質問内容に含まれる「ambiguity」によるあいまいさの把握を意識した質問はされていないため、回答のばらつきに内在する「ambiguity」と「fuzziness」によるあいまいさの両者を検討の対象とする例として位置付けるものとする。

(3)アンケート調査3¹⁾

兵庫県土木部道路建設課に所属する専門技術者21名に対して実施されたものであり、対象を鉄筋コンクリート橋にしぼり、橋梁の状態を提示し、それに対する橋梁の安全性の評価を求めたものである。回答者は下記に示す安全性のレベルと対応する0～100の整数の中から、提示された状態に対して適当であろうという点数をほぼ直感的に記入している。表6にアンケート調査結果の一部を示す。

100：なんら憂慮もなく100%安全と評価できる要因である。

75：ほぼ安全と評価できる要因である。

50：これといって良くもなく悪くもなく普通の状態である。

25：ほぼ危険と評価できる要因である。

0：100%危険と評価できる。

なお、本アンケート調査も表1に示す分類1のアンケート調査に該当すると考えられ、質問内容に含まれる「ambiguity」によるあいまいさの把握を意識した質問はされていないため、この場合も回答のばらつきに内在する「ambiguity」と「fuzziness」によるあいまいさの両者を検討の対象とする例として位置付けるものとする。

5.2 帰属度関数の形状決定およびあいまい度の算出

表4～表6に示された回答結果より無回答を削除した後、下記の手順に従って形状パラメータを決定し、帰属度関数を設定したうえでYagerの測度式を適用することによりあいまい度 $d_v(A)$ を算出する。

b：全てのデータの平均値とする。

α, β ：上記平均値より小さいデータの平均値を α とし、大きいデータの平均値を β とする。

a, c：上記平均値より小さいデータの平均値b回りの標準偏差 σ_L を求め $a=b-3\sigma_L$ とする。同様に、上記平均値より大きいデータの平均値b回りの標準偏差 σ_R を求め $c=b+3\sigma$ とする。

なお、kはアンケート回答結果中の無回答率に基づいて帰属度を低減させる考え方¹³⁾もあるが、今回は無回答を削除したうえで $k=1$ としてデータ整理を行った。また、比較的あいまい度を大きく算出させるために $n=2$ とした。なお、アンケート調査1, 2, 3の結果に対してそれぞれ設定された帰属度関数を、図8, 9, 10に示し、対応するあいまい度の算出結果を表7にまとめて示す。これらの結果より以下のことが明らかとなる。

表4 橋梁の耐用性評価に関するアンケート調査1の結果

	(回答)健全度に対する評価点																			
床版の健全度	75	75	80	70	75	50	75	75	85	20	50	50	75	70	75	75	50	80	60	40
主桁の健全度	75	75	70	50	75	50	63	50	50	15	25	25	70	65	75	75	50	70	45	35
総合的な健全度	75	75	70	60	75	50	70	50	60	15	30	40	60	70	75	75	50	75	50	38
経験年数	10年未満(12名)												10年以上(8名)							

表5 橋梁の耐用性評価に関するアンケート調査2の結果

		(回答)評価点																			
質問	1	25	25	25	50	0	75	75	75	25	25	50	25	100	75	75	75	25	25	70	2
質問	2	75	25	20	75	—	100	73	100	90	50	75	75	100	75	50	75	75	50	80	40
質問	3	75	75	100	25	0	25	90	75	90	90	25	75	100	100	75	50	50	75	60	100
質問	4	50	0	25	25	0	25	65	25	60	50	50	50	100	—	25	25	0	50	50	75
質問	5	—	25	75	—	—	75	90	100	95	—	50	25	100	100	—	—	50	60	80	75
質問	6	—	75	75	50	—	75	83	100	80	50	75	25	100	100	75	50	75	70	50	75
質問	7	50	—	60	—	25	50	63	75	70	75	50	75	100	75	75	50	100	50	60	95
質問	8	50	50	50	—	—	50	88	50	50	25	25	0	100	75	50	0	50	75	50	75
質問	9	0	50	50	50	—	50	60	75	50	50	50	0	0	50	50	0	25	70	10	50
経験年数		10年未満(12名)												10年以上(8名)							

- 質問1: スパン中央に通行軌跡のある床版はそうでないものより劣化している。
 質問2: 両端の主桁が不等沈下している床版はそうでないものより劣化している。
 質問3: 冬季、ひびわれにつららができているものは補修しなければならない。
 質問4: 排水施設がしっかり作用していない橋では必ず漏水が起っている。
 質問5: 床版の適用示方書が昭和39年以前なら配力鉄筋が少なすぎる。
 質問6: 床版の主筋方向ひびわれが大きいなら配力鉄筋が少なすぎる。
 質問7: 主桁のせんだんひびわれの最大値が0.3mm以上なら補修しなければならない。
 質問8: 主桁の橋軸方向のひびわれは主鉄筋が腐食している証拠である。
 質問9: ひびわれの原因は鉄筋量の不足である。

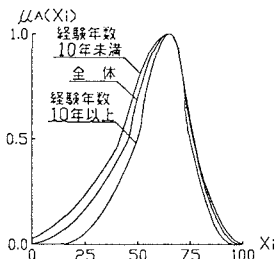
表6 橋梁の耐用性評価に関するアンケート調査3の結果

(回答) 安全性に対する評価点																					
状態 1	50	80	50	60	50	75	40	40	50	30	30	50	75	75	60	75	50	50	30	30	90
状態 2	40	60	40	50	25	50	20	40	10	20	20	40	50	50	40	50	20	25	20	25	70
状態 3	70	100	70	80	50	100	75	40	40	50	40	60	100	100	90	100	50	50	50	50	95
状態 4	30	80	40	55	25	75	20	20	25	20	30	50	40	50	78	50	20	25	30	40	80
状態 5	30	70	30	40	10	50	0	0	0	0	0	30	20	25	60	25	10	25	10	30	70
回答者No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

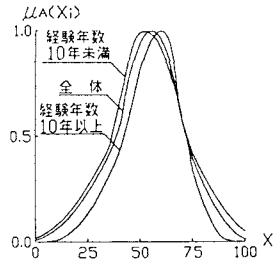
- 状態1: 配力筋が不足し、1方向ひびわれが発生している。
 状態2: 配力筋が不足し、2方向ひびわれが発生している。
 状態3: 床版厚不足が2cm未満
 状態4: 床版厚不足が2cm以上5cm未満
 状態5: 床版厚不足が5cm以上10cm未満

表7 アンケート調査結果に内在するあいまい度の算定結果一覧

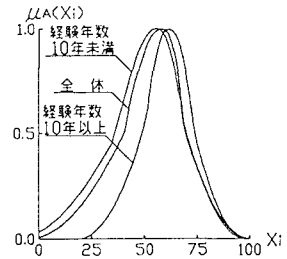
	アンケート調査1			アンケート調査2									アンケート調査3				
	床版	主桁	全体	質問1	質問2	質問3	質問4	質問5	質問6	質問7	質問8	質問9	状態1	状態2	状態3	状態4	状態5
全体	.326	.352	.337	.478	.444	.490	.443	.449	.380	.344	.449	.342	.338	.296	.371	.397	.386
10年未満	.358	.379	.359	.442	.478	.484	.366	.475	.475	.298	.388	.285	—	—	—	—	—
10年以上	.272	.279	.256	.482	.355	.272	.490	.297	.297	.274	.473	.397	—	—	—	—	—



(a) 床版の健全度



(b) 主桁の健全度



(c) 総合的な健全度

図8 帰属度関数の比較 (アンケート調査1)

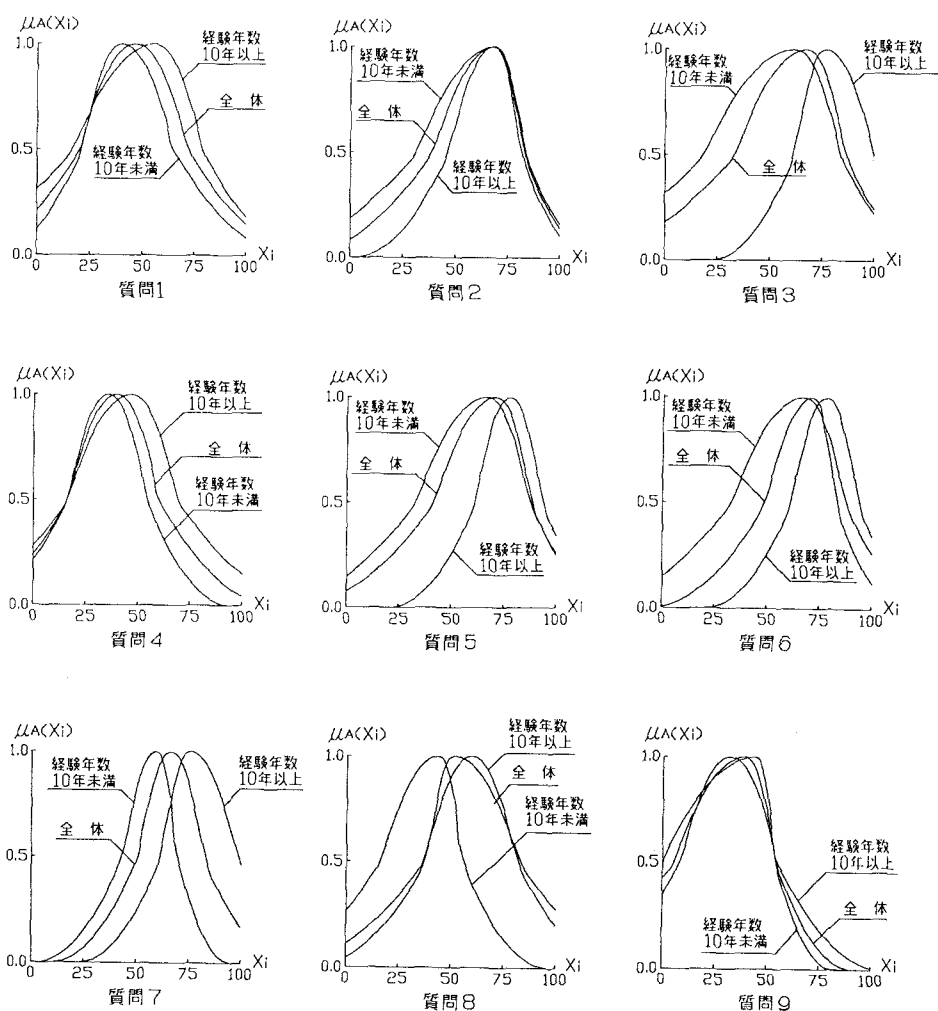
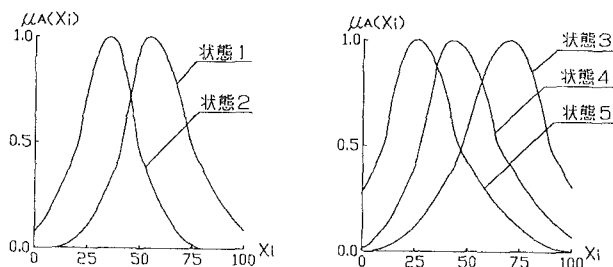


図9 帰属度関数の比較 (アンケート調査2)



(a)損傷種類(配力筋不足・ひびわれ) (b)損傷種類(床版厚不足)

図10 帰属度関数比較 (アンケート調査3)

アンケート調査1は回答者自体が目視調査を行っている点から、最も信頼がおける有効なデータと考えられる。ここで、経験年数10年未満、10年以上の回答者をそれぞれグループ化し、それぞれの帰属度関数および全体のデータによる帰属度関数を比較したものを図8に示す。図8より明らかなように経験年数10年以上の回答者群の帰属度関数のばらつきは少ない。これは、表7にもあいまい度の定量的な差異として表われている。全体のデータによる帰属度関数は当然ながら両者の中間的な形状となる。また、経験年数による差異を学習効果によるものと考え、図8(a),(b),(c)より集中化、図8(b),(c)より帰属度のピーク値の移動、図8(b)より明暗強化の形状変化の傾向がみられることがわかる。これは経験年数に伴う有効な情報によるあいまい度の減少が代表的な形状変化として表われたものと考えられる。なお、本橋梁に対する実橋試験¹⁾から若干の劣化はあるものの橋齢のわりには十分健全な状態であることが検証されており、経験年数10年以上の帰属度関数のピーク位置が健全度の高い方を支持しているのは妥当な結果であると考えられる。

アンケート調査2は橋梁の損傷に対する考え方の妥当性に対して回答を求めたものであり、質問は言語により定性的に表現されている。経験年数10年未満、10年以上の回答者をそれぞれグループ化し、それぞれの帰属度関数および全体のデータによる帰属度関数を比較したものを図9に示す。これより、一見してそれぞれの帰属度関数の形状の差異がアンケート調査1より大きいことが分かる。これは、言語に含まれるあいまいさのために質問内容の認識が経験年数の差異となって表れているものと考えられるが、表7より質問1, 4, 8, 9では経験年数10年以上の回答に含まれるあいまい度のほうが経験年数10年未満の回答に含まれるあいまい度より大きくなっている。すなわち、経験を積むことにより多様な損傷状態やそれに対する処置に遭遇する機会が増え、質問内容が十分に限定できない場合、逆にばらつきが大きくなり、その結果あいまい度が大きくなる場合が生じると推測できる。また、表7より質問3, 5, 6, 7における経験年数10年以上の回答のあいまい度が小さくなっているが、特に、質問5, 7には質問内容に数値的表現が含まれており、質問内容がある程度明確に表現しているものと考えられる。ここで、経験年数による差異を学習効果によるものと考えた場合、質問2, 3, 5, 6, 7に対する帰属度関数の形状変化には明らかに集中化の傾向が見られる。なお、今までに実施してきた、検証試験および目視調査の結果等を参考にすると経験年数10年以上の帰属度関数ピーク位置は経験年数10年未満の帰属度関数ピーク位置に比べて妥当な位置を支持していると考えられる。

アンケート調査3は損傷状態の程度の差異を言語により表現し、それに対する橋梁の安全性を評価したものである。図10(a),(b)に、損傷種類別に分類した帰属度関数を示す。それぞれの図において損傷状態は状態番号が増えるにつれて劣悪になる。図10より、帰属度のピーク値は損傷状態が劣悪になるにつれて、安全性が低下する傾向を顕著に表現している。また表7から、状態1より状態2に対する回答の方があいまい度が低くなっており、これは損傷状態が劣悪になるにつれて、確信を持って評価することができることを表わしている。状態3～5では状態4のあいまい度が最も大きい。これは帰属度のピーク位置からも判断できるように状態4は良くもなく悪くもなく普通の状態を支持しているため、状態3や5に比べて明確な判断を下すのがより困難であるため確信が持てずあいまい度が大きくなったものと考えられる。また、全体的な帰属度関数の形状変化としては帰属度のピーク値の移動の他に、劣化の程度が進むにつれて集中化、明暗強化の傾向がみられる。

全般的にみて、アンケート調査1は回答者自身で目視調査を行ったうえで実施しているため、信頼度の高い調査結果となっておりあいまい度も小さい。一方、アンケート調査2は質問内容に対する回答者の把握の点で若干不備があると考えられる。また、アンケート調査3のように同様の損傷に対する損傷程度のパターンがいくつか準備されている場合、比較対象があることにより回答者に損傷状態をイメージさせることが容易になると考えられる。

6. まとめ

本研究では橋梁診断システムの実用化に向けて、経験的知識の表現およびそこに内在するあいまいさの定量化について検討を加えた。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) アンケート調査結果に含まれるあいまいさを定義し、アンケート内容に対応するあいまいさの分類を試み、今後のアンケート調査における留意点を明確にした。
- (2) 拡張 Π 関数を利用することにより経験的知識を表現したうえで、内在するあいまいさの定量化にファジィエントピーの概念を適用することにより、アンケート調査により抽出した知識間の特性を把握することをおる程度可能にした。さらに帰属度関数の代表的形状変化に対する各定義式によるあいまい度の算出結果を比較することにより、橋梁診断に関するあいまい度の定量化に対してYagerの測度式が有効であることを明らかにした。
- (3) 現在までに実施した代表的な橋梁の耐用性評価に関するアンケート調査に本手法を適用し、想定した帰属度関数の形状の差異および形状変化が実際問題に対して適切であることを確認したうえで、本手法の妥当性を検証した。

参考文献

- 1) 西村昭、藤井学、宮本文穂、梶谷義昭、春名真義：既存橋梁の耐荷力評価とその検証に関する研究(上),(下), 橋梁と基礎, Vol. 21, No. 2, 3, 1987
- 2) 本多中二：ファジィエントピーとはなにか, 数理科学, No. 294, pp. 54-61, 1987. 2.
- 3) 清水昭雄：ファジィエントピー理論に基づいたファジィ推論方式の試み(第一報), ファジィシステムシンポジウム講演集, pp. 83-91, 1990. 9.
- 4) 水本雅晴：ファジィ理論とその応用, サイエンス社, 1988. 2
- 5) 串田守可、徳山貴信、宮本文穂：鋼橋損傷要因の階層化におけるファジィ階層化手法の適用について, 日本ファジィ学会誌, Vol. 3, No. 4, 1991. 11
- 6) 西村昭、藤井学、宮本文穂、小笠勝：構造物の健全度診断へのファジィ集合論の適用に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第380号, pp. 365-374, 1987. 4
- 7) J. Yao and H. Furuta: Probabilistic Treatment of Fuzzy Events in Civil Engineering, Probabilistic Engineering Mechanics, 1-1, pp. 58-64, 1986
- 8) C. E. Shannon: A Mathematical Theory of Communication, Bell System Tech. J. 27, 379 and 623, 1948
- 9) A. De Luca & S. Termini: A Definition of a Nonprobabilistic Entropy in the Setting of Fuzzy Sets Theory, Information and Control, 20, pp. 301-312, 1972
- 10) A. Kaufmann: Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets, Academic Press, 1975
- 11) R. R. Yager: On the Measure of Fuzziness and Negation Part I: Membership in the Unit Interval, Int. J. of General Systems, 5, pp. 221-229, 1979
- 12) 西村昭、藤井学、宮本文穂、富田隆弘：橋梁診断のシステム化に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第378号, pp. 175-184, 1987. 2
- 13) 林一平、宮本文穂：ファジィ集合論を利用した配水管事故要因の階層化と配水管事故予測への応用, 建設工学研究所報告, 第32号, pp. 21-56, 1990. 11

(1991年9月30日受付)