

橋梁診断における知識獲得手法の提案

A Method of Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Bridge Rating System

串田守可*

徳山貴信**

宮本文穂***

By Moriyoshi KUSHIDA, Takanobu TOKUYAMA and Ayaho MIYAMOTO

The knowledge acquisition has been recognized as a major bottleneck in the development of effective knowledge-based systems in recent years. Therefore, many researchers are investigating on knowledge acquisition methodologies to overcome this problem.

In this paper, a flexible method for expressing empirical knowledge related to bridge rating acquired from questionnaires, which are filled out by bridge rating experts, is proposed by relating the knowledge with a membership function based on a fuzzy set theory. In this method, a membership function is regarded as a possibility distribution based on a theory of possibility, and a superficial possibility distribution expressed by an expanded Π function is transformed into possibility measure distribution and necessity measure distribution utilizing a concept of modal logic.

Furthermore, the proposed method has been applied to a questionnaire survey conducted to evaluate the serviceability of an existing bridge. And the validity of the method has been verified through the comparison between the subjective rating results acquired from the application of the method and the objective rating results obtained from non-destructive tests conducted for evaluating the serviceability of a same bridge.

1. はじめに

近年、土木工学分野においても各方面で種々のエキスパートシステムが構築され、一部には実用化の域にまで達しているものも見受けられるようになってきた。エキスパートシステムにおいては、その構成の核となる知識ベースと推論エンジンの完成度がそのシステムのパフォーマンスを左右すると言っても過言ではない。特に、対象領域の専門的知識を知識ベース内に、十分洗練された形で保有していることが重要となるが、本研究で対象としている橋梁の耐用性診断においては、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基づく主観的判断に依存する部分が多い。ゆえに、専門家の保有する経験的知識および必然的にそこに内在する主観的不確定性の定量化を意識した知識の抽出・表現手法を検討し、経験的知識の獲得手法を確立することは、知識の獲得作業がエキスパートシステム構築における最大のボトルネックであるという認識が定着してきていることから考えても、非常に重要な課題と考えられる。

著者らは、かねてより既存橋梁に対する耐用性診断システムの知識ベース構築を目的とした知識の獲得段階においてアンケート調査を利用した知識表現手法およびそこに内在する主観的不確定性の定量化手法を提案してきた¹⁾。しかし、主観的不確定性が内在するがゆえに、対象となる問題を可能性の観点から考えるか、あるいは必然性の観点から考えるかの対照的なアプローチが生じることから、これらに対応した柔軟な知識

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

** ㈱ 栗本鐵工所, 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, 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1)

表現手法への展開が必要であると考えられる。また、従来のアンケート調査による知識獲得手法においては、ファジィ集合 A とその補集合 $\bar{A}$ で表現される経験的知識(帰属度関数)の間に $\mu_{\bar{A}}(x) = 1.0 - \mu_A(x)$ の関係が成立する範囲内で経験的知識を表現し、主観的不確定性の定量化を試みている。しかしながら、人間が保有する経験的知識を取扱う場合、例えば、事象 A を肯定することに対する確信度(帰属度) $\mu_A(x_1)$ が0.8であり、事象 A を否定することに対する確信度(帰属度) $\mu_{\bar{A}}(x_1)$ が常に0.2($\because 1.0 - 0.8 = 0.2$)であるということは、そこに無知識の存在を認める限り、一般的に成立するとは考えられない。すなわち、補集合 $\bar{A}$ が上記の条件を満足せず、 $\mu_{\bar{A}}(x) \neq 1.0 - \mu_A(x)$ となる場合においても適用可能なように、経験的知識の表現および主観的不確定性の定量化手法を拡張しておく必要があると考えられる。

以上の考え方を基に、定量的に表現された経験的知識はシステム内に蓄積され、これらは新規に獲得された、より一層信頼がおけると考えられる知識により順次更新されていくことになる。しかし、新規に獲得された知識により、無条件にシステム内の既存の知識を自動的に置換していくことは多分に危険性をはらむ場合があると考えられ、この段階でシステム利用者あるいは作成者の判断がなされるべきであり、その際の判断基準となる定量的指標の設定が必要になると考えられる。

本研究においては、まず経験的知識の抽出手法として最適なアンケート調査手法を検討した上で、既述の改善点を考慮にいたれた経験的知識の表現手法を提案している。すなわち、アンケート調査により収集した経験的知識の表現にファジィ理論における帰属度関数を適用した上で、内在する主観的不確定性をYagerの測度²⁾により定量化し、初期設定されたみかけの帰属度関数を基にその事象に対する可能性測度分布と必然性測度分布とを表現している。さらに、可能性測度と必然性測度との差は無知に起因すると考えることにより、新たに定義した肯定の無知識および否定の無知識とYagerの測度により定量化された主観的不確定性の度合い(以後、あいまい度と呼ぶ)を比較することにより、Yagerの測度で定量化されるあいまい度の範囲を明確にしている。また、定量化された経験的知識がシステム内に既に存在する場合における新規獲得知識に対する処置(置換)の判断基準として、様相論理における可能性および必然性に対する様相測度³⁾を利用した定量的指標の設定を試みている。

次いで、これらの手法を、兵庫県土木部管轄の実橋を対象として、事前に目視調査を行った上で実施した耐用性評価に関するアンケート調査結果に適用し、耐用性評価を目的として行った実橋試験⁴⁾による客観的耐用性評価結果と比較することにより、橋梁診断に関する経験的知識がシステムの知識ベースとして有効であることの検証を行うと同時に、提案する知識表現手法の妥当性を確認している。

2. 経験的知識の抽出におけるアンケート調査の利用

橋梁診断に関するアンケート調査手法をその実施方法、回答者の選び方等々から検討することにより、以下の手順に従って実用的なアンケート調査の選択を行う。

2.1 アンケート調査の実施方法

橋梁診断における専門家の経験的知識を抽出する目的のため、アンケート作成者と回答者の質問内容における認識の差異を最小にする必要があり、そのためアンケート作成者自身がその実施場所においてアンケートの目的、回答要領、語句の説明等を行い、また回答記入中に様々な質問を受けることが可能であることが望ましい。さらに、本人の直感を優先するために回答は回答者自身により記入されなければならない。以上のことより、アンケート作成者と回答者の対面方式による集合調査法⁵⁾(一定の場所に集合した回答者に対して、調査票を配付すると共に、調査員が質問の内容や回答方法を順次説明し、回答者に一斉に回答を記入してもらう方法)が最も適していると考えられる。

2.2 回答者およびアンケート調査回数

回答者およびアンケート調査回数の組合せにより、種々のタイプのアンケート調査が考えられる。アンケート調査の対象となる回答者としては、任意の集団あるいはその集団を代表する特定されたグループ、少数のエキスパート等々が考えられる。また、アンケート調査回数としては、大別して1回あるいは複数回が考えられる。以下、それぞれの特性等をまとめてみる。

①タイプ1(アンケート回答者数：少人数，アンケート調査回数：1回)

実施面においては、最も簡易なアンケート調査といえる。しかし、本タイプのアンケート調査では個人個人の回答に内在するあいまいさを抽出することは困難である。従って回答者自身がその回答に対する確信の程度を把握していない場合も多く、本人記入によるあいまい度に関する質問を設定したとしても信頼度が低い。

②タイプ2(アンケート回答者数：多人数，アンケート調査回数：1回)

最も一般的なアンケート調査として多用されている。平均値、標準偏差等の統計量を使用することにより、容易に集団特性値が得られる。従って個人間の回答の相違をその集団が判定を行う主体と考えた時の回答のばらつきと考え、さらに回答の状態を適切な関数で表現することにより、後述するファジィ理論における帰属度関数と対応させて考えることが可能となる。しかしながら、真の意味で個人個人の回答に内在するあいまい度の抽出は困難である。

③タイプ3(アンケート回答者数：少人数，アンケート調査回数：複数回)

少数の回答者に複数回の同一アンケートを実施することにより、個人個人の回答に内在するあいまい度の抽出が可能となる。いわゆる時系列調査であるため、回答の変動要因には学習、忘却等様々なものがあり、その特性を十分に把握しないと、アンケート結果の有効な利用が困難となる。当然、調査期間は長期となる。

④タイプ4(アンケート回答者数：多人数，アンケート調査回数：複数回)

タイプ2と同様の集団特性値および時系列調査としての回答の時間的変化、また個人個人の回答に内在するあいまい度の抽出が可能となる。しかしながら、準備、調査期間とも各タイプの中で最も時間がかかり、実施面で困難な問題(アンケート場所の確保、回答者のスケジュール調整、etc.)が生じる場合がある。

2.3 アンケート調査方法の選択

従来より、著者らが実施してきた橋梁診断に関するアンケート調査は、上述のタイプ2、3に対応する。本来、エキスパートがエキスパートたる所以は集団の中の少数であるということを考えると、多数を対象としたアンケート調査では信頼できうる回答がそれ以外の回答のばらつきにより希釈されることが考えられる。ゆえに、理想としては少数の専門家を対象としてその経験的知識を抽出すべきであり、後述するファジィ理論における帰属度関数を同定し、回答に内在するあいまい度を明確にするためには、少数の専門家に対して多数回の同一アンケート調査を実施することが望ましいと考えられる。この場合、同一アンケートを多数回実施するほど、質問総数との関係により疲労、忘却等の影響が生じることになり、現状のアンケート調査方法では個人に与える負荷が過大になるおそれがある。ゆえに、知識獲得の初期の段階においては、グループ内でのコンセンサスが得られる平均的な集団特性値の抽出を目的とした、タイプ2のアンケート調査を実施していくことが現実的な対応と考えられる。この場合、信頼における特定のグループを選定することが重要となるのは言うまでもないが、むしろ柔軟な知識の表現手法および知識の更新基準を確立することが、優先すべき重要課題であると考えられる。

3. 経験的知識の獲得および更新手法

3.1 様相論理における可能性と必然性

数理論理学において、古典論理に可能性や必然性といった様相概念を導入した様相論理^{3), 6)}が研究されている。様相概念は、本来、自然言語を形式的に記述しようとする試みの過程で出てきたことより考えても、知識表現への適用は自然な流れであると考えられる。ここでは、命題Aに対する可能性演算子($\Diamond$)および必然性演算子($\Box$)は、否定を $\sim$ とすると次式のように定義される^{3), 6)}。

$$\Box A = \sim \Diamond \sim A \quad \text{-----}(1)$$

$$\Diamond A = \sim \Box \sim A \quad \text{-----}(2)$$

ここで、(1)式は「Aでないことが可能でない場合、Aは必然である。」、一方(2)式は「Aでないことが必然でない場合、Aは可能である。」と解釈できる。これは、可能性と必然性は双対の関係にあり、可能性から必然性が導けるし、また必然性から可能性が導けることを意味している。本研究では、(2)式の考え方を利用して、ファジィ補集合 $\bar{A}$ における必然性測度分布 $N(\bar{A})$ が求めれば、ファジィ集合Aにおける可能性測度分布 $P(A)$ は、次式により算出できると考えた。

$$P(A) = 1.0 - N(\bar{A}) \quad \text{-----}(3)$$

3.2 ファジィ理論を適用した知識表現手法

(1) 必然性測度および可能性測度

本研究では、まずアンケート調査結果における回答状態を著者らの提案した拡張 Π 関数¹⁾により近似(初期設定)することにより、回答状態をファジィ理論における帰属度関数に対応させて表現する。そして初期設定されたみかけの帰属度関数 $\mu_A(x)$ を、次式により肯定の必然性測度 $N(\mu'_A(x_i))$ および否定の必然性測度 $N(\mu'^{-}_A(x_i))$ に分割する⁷⁾。

$$\begin{cases} N(\mu'_A(x_i)) = 1.0 - F_Y(x_i), & 1.0 \geq \mu_A(x_i) \geq 0.5 \\ N(\mu'^{-}_A(x_i)) = 1.0 - F_Y(x_i), & 0.5 > \mu_A(x_i) \geq 0.0 \end{cases} \quad \text{-----}(4)$$

ここに、 $\mu_A(x_i)$: 初期設定されたみかけの帰属度($1.0 \geq \mu_A(x_i) \geq 0.0$)

$F_Y(x_i)$: Yagerの測度により定量化されたあいまい度($1.0 \geq F_Y(x_i) \geq 0.0$)

上式において、 $\mu'^{-}_A(x_i) = 1.0 - \mu_A(x_i)$ が成立する時、(4)式は次式のように表現できる。

$$\begin{cases} N(\mu'_A(x_i)) = \mu_A(x_i) - F_Y(x_i)/2, & 1.0 \geq \mu_A(x_i) \geq 0.5 \\ N(\mu'^{-}_A(x_i)) = \mu_A(x_i) - F_Y(x_i)/2, & 0.5 > \mu_A(x_i) \geq 0.0 \end{cases} \quad \text{-----}(5)$$

さらに、(2)式における考え方を利用して、肯定の可能性測度 $P(\mu'_A(x_i))$ および否定の可能性測度 $P(\mu'^{-}_A(x_i))$ は次式により求めることができる。

$$\begin{cases} P(\mu'_A(x_i)) = 1.0 - N(\mu'^{-}_A(x_i)) \\ P(\mu'^{-}_A(x_i)) = 1.0 - N(\mu'_A(x_i)) \end{cases} \quad \text{-----}(6)$$

ここで、 $\mu'^{-}_A(x_i) = 1.0 - \mu_A(x_i)$ が成立しない時、肯定の必然性測度 $N(\mu'_A(x_i))$ および否定の必然性測度 $N(\mu'^{-}_A(x_i))$ は次式により求めることができる。

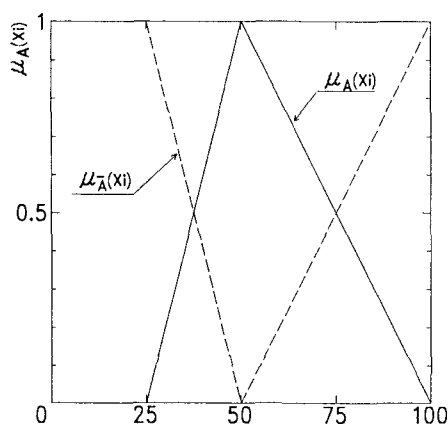
$$\begin{cases} N(\mu'_A(x_i)) = 1.0 - F_Y(x_i), 1.0 \geq \mu_A(x_i) \geq \mu_A(x_{i+1}) \\ N(\mu'^{-}_A(x_i)) = 1.0 - F_Y(x_i), \mu_A(x_{i+1}) > \mu_A(x_i) \geq 0.0 \end{cases} \quad \text{-----}(7)$$

ここに、 $\mu_A(x_{i+1}) : \mu'^{-}_A(x_{i+1}) = \mu_A(x_{i+1})$ となる x_{i+1} における帰属度

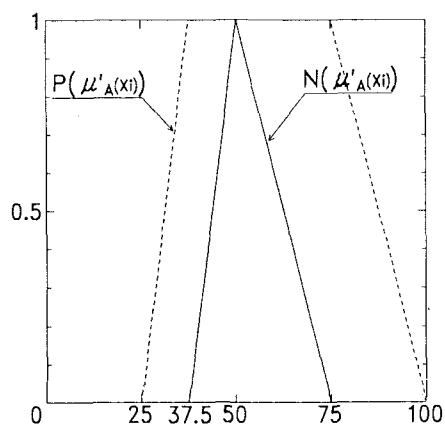
また、肯定の可能性測度 $P(\mu'_A(x_i))$ および否定の可能性測度 $P(\mu'^{-}_A(x_i))$ は、次式により求めることができる。

$$\begin{cases} P(\mu'_A(x_i)) = \min\{1.0, (\mu_A(x_i) + \mu'^{-}_A(x_i)) - N(\mu'^{-}_A(x_i))\} \\ P(\mu'^{-}_A(x_i)) = \min\{1.0, (\mu_A(x_i) + \mu'_A(x_i)) - N(\mu'_A(x_i))\} \end{cases} \quad \text{-----}(8)$$

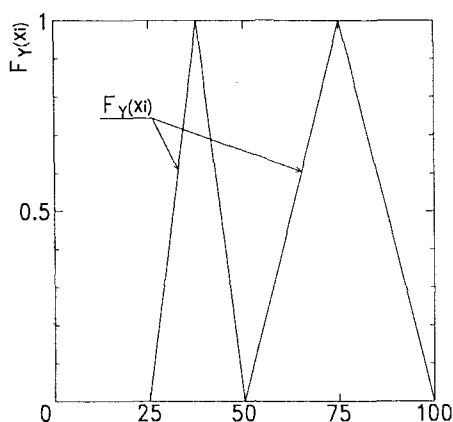
なお、一例として $\mu'^{-}_A(x_i) = 1.0 - \mu_A(x_i)$ が成立する場合における既述の考え方を概念的に図1に示す。



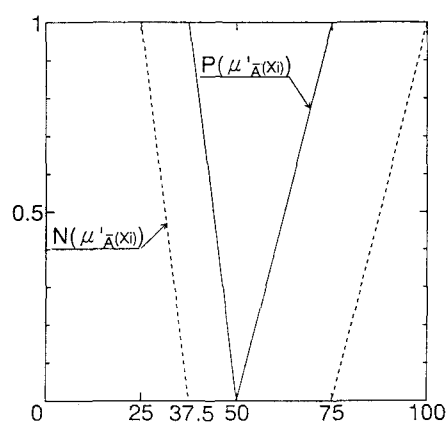
みかけの帰属度関数



肯定の可能性測度および必然性測度



Yagerの測度によるあいまい度



否定の可能性測度および必然性測度

図1 可能性測度および必然性測度の概念図($\mu'^{-}_A(x_i) = 1.0 - \mu_A(x_i)$ が成立する場合)

(2) あいまいさの定量化

従来の研究結果¹⁾を参考にして、あいまいさの定量化に、次式に示すYagerの測度を適用してみる。

$$\sum_{i=1}^n F_Y(x_i) = \{n - \sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_{\bar{A}}(x_i)|\} / n \quad \text{-----}(9)$$

ここで、 $|\mu_A(x_i) - \mu_{\bar{A}}(x_i)|$ 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なると考える。本研究においては要素 $x_i (i=1 \sim n)$ におけるこの距離 $F_Y(x_i)$ の総和を要素数 n より減じ、最大値で正規化することにより、あいまい度 $(\sum F_Y(x_i))$ を(9)式で定義し、あいまいさを定量化した。

一方、可能性測度と必然性測度との差は無知量に起因すると考えることにより、肯定の無知量 $I(x_i)$ 、否定の無知量 $I(\bar{x}_i)$ を次式により定義する。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n I(x_i) = \{\sum_{i=1}^n (P(\mu'_A(x_i)) - N(\mu'_A(x_i)))\} / n \\ \sum_{i=1}^n I(\bar{x}_i) = \{\sum_{i=1}^n (P(\mu'_{\bar{A}}(x_i)) - N(\mu'_{\bar{A}}(x_i)))\} / n \end{cases} \quad \text{-----}(10)$$

ここで、 $\mu_{\bar{A}}(x_i) = 1.0 - \mu_A(x_i)$ が成立する場合、(4)式および(6)式より、 $\sum I(x_i) = \sum I(\bar{x}_i) = \sum F_Y(x_i)$ となる。これより、みかけの帰属度関数に対するYagerの測度は帰属度関数 $\mu_A(x)$ を可能性分布関数とみなした場合の無知の度合いを示していることが分かる。 $\mu_{\bar{A}}(x_i) \neq 1.0 - \mu_A(x_i)$ となる場合、(7)式および(8)式より、 $\sum I(x_i)$ および $\sum I(\bar{x}_i)$ は次式のように算定される。

$$\sum_{i=1}^n I(x_i) = \sum_{i=1}^n I(\bar{x}_i) = \sum_{i=1}^n F_Y(x_i) - [\sum_{i=1}^n \{\max(0, (1.0 - (\mu_A(x_i) + \mu_{\bar{A}}(x_i))))\} / n] \quad \text{-----}(11)$$

ここで、図2に概念的に示したみかけの帰属度関数を用いて表す無知量 $\sum \text{UNK}(x_i, \bar{x}_i)$ 、矛盾量 $\sum \text{INC}(x_i, \bar{x}_i)$ は次式により定義される。

$$\sum_{i=1}^n \text{UNK}(x_i, \bar{x}_i) = \sum_{i=1}^n \{\max(0, (1.0 - (\mu_A(x_i) + \mu_{\bar{A}}(x_i))))\} / n \quad \text{-----}(12)$$

$$\sum_{i=1}^n \text{INC}(x_i, \bar{x}_i) = \sum_{i=1}^n \{\max(0, ((\mu_A(x_i) + \mu_{\bar{A}}(x_i)) - 1.0))\} / n \quad \text{-----}(13)$$

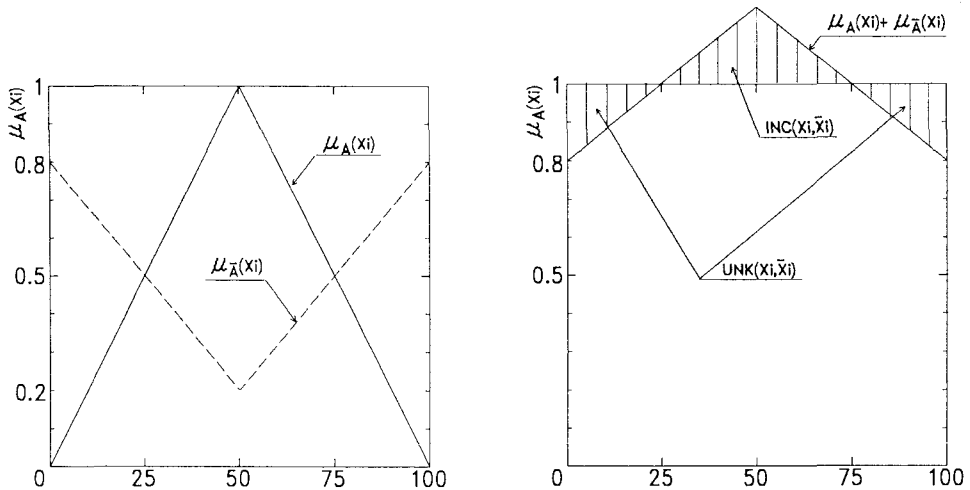


図2 無知量および矛盾量

すなわち、Yagerの測度は、肯定あるいは否定の無知量 ($\sum I(x_i)$ or $\sum I(\bar{x}_i)$) と肯定に対するものか否定に対するものか特定できない無知量 ($\sum UNK(x_i, \bar{x}_i)$) が加算されたものとなっている。なお、矛盾量 ($\sum INC(x_i, \bar{x}_i)$) はYagerの測度に含まれていないことに留意する必要がある。

(3)獲得された知識の更新に対する判断基準の設定

上述までの手法により定量化された知識に対して、新たな情報による新規の知識が獲得された場合、既存の知識をどういった手順で更新していくかの判断基準となる定量的指標について検討してみる。いまファジィ集合Bの要素がファジィ集合Aに属するかどうかを考えた場合、「不可能性」、「可能性」、「偶然性」、「必然性」の4様相が生じることが知られている³⁾。ここで、「可能性」とは「偶然性」と「必然性」により構成され、その事象に対する無知な部分が存在するがゆえ生じる「偶然性」が「必然性」に加わることにより「可能性」が定義できると考えられる。これらの4様相の内、「可能性」、「偶然性」、「必然性」は次式で表すことができる。

$$\text{可能性} : \text{POS}(A/B) = \max_{x_i} \{ \min(\mu_B(x_i), \mu_A(x_i)) \} \quad \text{-----}(14)$$

$$\text{偶然性} : \text{CON}(A/B) = \max_{x_i} \{ \min(\mu_B(x_i), (1 - \mu_A(x_i))) \} \quad \text{-----}(15)$$

$$\text{必然性} : \text{NEC}(A/B) = \min_{x_i} \{ \max((1 - \mu_B(x_i)), \mu_A(x_i)) \} \quad \text{-----}(16)$$

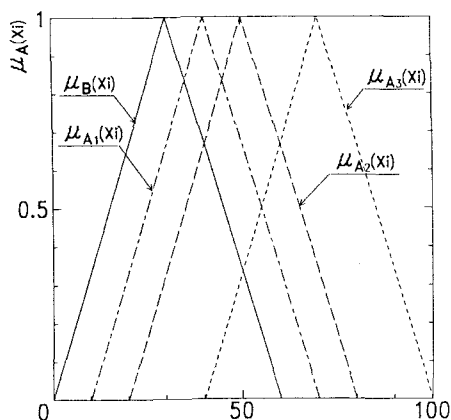
ファジィ集合Aを既存の知識と考えた場合、式(14)～(16)は、新たな情報により新規に獲得された知識に関する可能性分布Bに基づいた既存の知識の様相を示していると考えられる。本研究では、新規に獲得された知識からみた既存の知識の様相を評価する指標として、次式で示される可能性指標P(A/B)および必然性指標N(A/B)を定義する。

$$P(A/B) = \text{POS}(A/B) / \max \{ \max_{x_i}(\mu_B(x_i)), \max_{x_i}(\mu_A(x_i)) \} \quad \text{-----}(17)$$

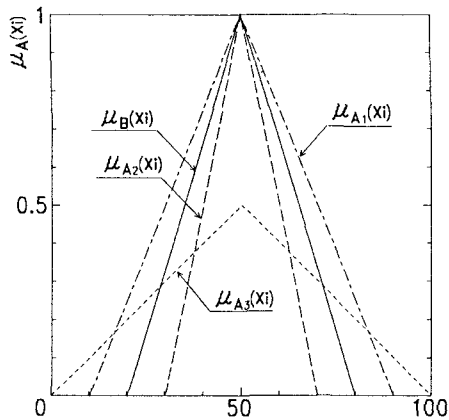
$$N(A/B) = [\text{NEC}(A/B) / \{ \text{CON}(A/B) + \text{NEC}(A/B) \}] \times P(A/B) \quad \text{-----}(18)$$

図3に新規獲得知識(ファジィ集合B)に対する既存の知識(ファジィ集合A)の状態を種々設定した場合の可能性指標P(A/B)および必然性指標N(A/B)の算出結果の一例を帰属度関数と併せて示す。なお、ここでは、 $\mu_A(x_i) = 1.0 - \mu_B(x_i)$ が成立すると仮定している。これらは既存の知識を新規獲得知識により置換するかどうかの判定を下すしきい値として利用することができる。例えば、獲得された知識により、知識ベースを構築していく場合、個々の知識の洗練度は異なることが想定され、それぞれに、適当なしきい値を与え、洗練されるにつれてこのしきい値も高めていくことによって、無条件で自動的に知識を置換することによる単純なミスを防ぐことができると同時に、しきい値の値により、その知識の洗練度を把握することが可能になる。図3を参考にしたしきい値の設定例について以下に述べる。

知識の洗練度が低い段階においては、可能性指標P(A/B) ≥ 0.5 が成立する場合、新規獲得知識により既存の知識を置換する。P(A/B) < 0.5 となる場合、新規獲得知識により既存の知識を置換するかどうかをシステム利用者あるいはシステム作成者が検討する。これは、知識洗練の初期段階においては帰属度関数の形状変化は平行移動¹⁾あるいはそれに類似した形状変化¹⁾が主たるものであると考えることにより、必然性指標によるしきい値を設けないことで、かなり大幅な帰属度関数の形状変化を許容させることができる。一方、知識がかなり洗練されたと判断できる段階においては、可能性指標P(A/B) ≥ 0.5 かつN(A/B) ≥ 0.5 が成立する場合、新規獲得知識により既存の知識を置換する。そして、本条件が成立しない場合、新規獲得知識により既存の知識を置換するかどうかをシステム利用者あるいはシステム作成者が検討する。これは、知識洗練がある程度達成された段階では帰属度関数の形状変化は明暗強化¹⁾あるいは縮小化¹⁾が主たるものであると考えることにより、必然性指標によるしきい値を設けることで、帰属度関数の形状変化をかなり抑制することが



	$P(A_i/B)$	$N(A_i/B)$
集合 (B, A_1)	0.833	0.277
集合 (B, A_2)	0.667	0.111
集合 (B, A_3)	0.333	0.000



	$P(A_i/B)$	$N(A_i/B)$
集合 (B, A_1)	1.000	0.571
集合 (B, A_2)	1.000	0.400
集合 (B, A_3)	0.500	0.385

図3 可能性指標および必然性指標

できる。

以上は、しきい値の一設定例であるが、さらに多段階のしきい値の設定を行うことにより、知識の洗練度を十分考慮した知識更新に対するシステムの柔軟な対応が可能となる。

4. 「旧大橋」に対する実橋試験およびアンケート調査の実施と本手法の適用

アンケート調査により収集した経験的知識が橋梁を診断する上で有用な知識となりうるかどうかを検証すると同時に、提案する知識表現手法の妥当性を確認するために、実橋の耐用性診断を目的とした以下に示すアンケート調査および実橋試験⁴⁾を行った。

①橋梁診断に携わる専門家31名による目視調査および耐用性診断アンケート調査

②非破壊試験(静的載荷試験, 重錘落下振動試験)および主桁構成材料試験

4.1 旧大橋の概要

旧大橋は、試験実施時(平成3年12月)で橋齢62年(昭和4年度竣工)となる、5主桁を有するRC単純T桁橋3連よりなる。本橋の一般図を図4に示す。本橋は近年の交通量の増加により、主桁・床版共に損傷が発生しており、老朽化に伴う撤去および新橋への架け替えが管理者側で既に決定されていた。

4.2 実橋試験結果の概要

(1) 非破壊試験結果

軸重既知の試験車(20tonトラック)を各主桁に最も不利になる位置に載荷し、たわみを測定した結果、スパン1, スパン2共に、主桁Eの剛性が他の主桁に比べて大きいことが推測された。また、重量300kgfの重錘を橋面上に落下させ、入力および応答加速度の関係にモーダル解析を適用することにより算出した振動特性

より、同様に主桁Eの剛性が他の主桁に比べて大きいことが推測された。さらに、重錘落下振動試験による振動特性を実測値として構造同定(SI)法を適用し、スパン1の主桁曲げ剛性を同定した結果を表1に示す。表より、主桁A,B,C,Dの剛性の低下が認められるが、主桁Eの剛性はほとんど低下していないことが分かった。

(2) 主桁構成材料試験

主桁より採取したコンクリートコアに対して実施した材料試験(圧縮強度、中性化深さなど)結果より、主桁Eではほとんど劣化が見られず、主桁A,B,C,Dについては、圧縮強度が小さく、中性化深さが大きいことから、かなり劣化が進行していることが分かった。

(3) 安全性評価指標の算定

SI法によって同定されたコンクリートのヤング係数、各主桁、床版の断面2次モーメントを基に、安全性評価指標(破壊安全率、安全性指標、破壊確率)を算定した結果、全ての評価指標

において主桁Eの指標が最も危険となった。これは、主桁Eの剛性が大きく、従って断面力が主桁Eに大きく分配されることになる結果に基づいて評価されたものである。

(4) 余寿命評価⁶⁾

試験結果を基に不確定解析に基づく寿命予測法を適用した結果、破壊基準を破壊確率(P_f)=0.075~0.125と設定した場合、供用年数100~130年で主桁Aが破壊基準に到達する結果が得られた。すなわち、現在の橋齢を考慮すると、余寿命は40~70年程度と推測された。

4.3 アンケート調査

(1) アンケート調査の概要

本アンケート調査は兵庫県土木部道路建設課に所属する専門技術者28名、大学の研究者3名に対して実施されたものであり、回答者に回答用紙とともに橋梁台帳を配付し、実際に橋梁を詳細に目視、観察しながら回答を行う形式としている。なお、アンケート作成者は全員に同行することにより、アンケート内容について詳細な説明をすると共に回答者からの質問を常時受け付けることを可能にした。すなわち、前述のタイプ2のアンケート調査法を採用した。なお、本アンケート調査は回答者自身が目視調査を行い、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していないが、質問内容に「ambiguity」¹⁾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結果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している。ただし、今回のアンケート調査では $\mu_A(x)$

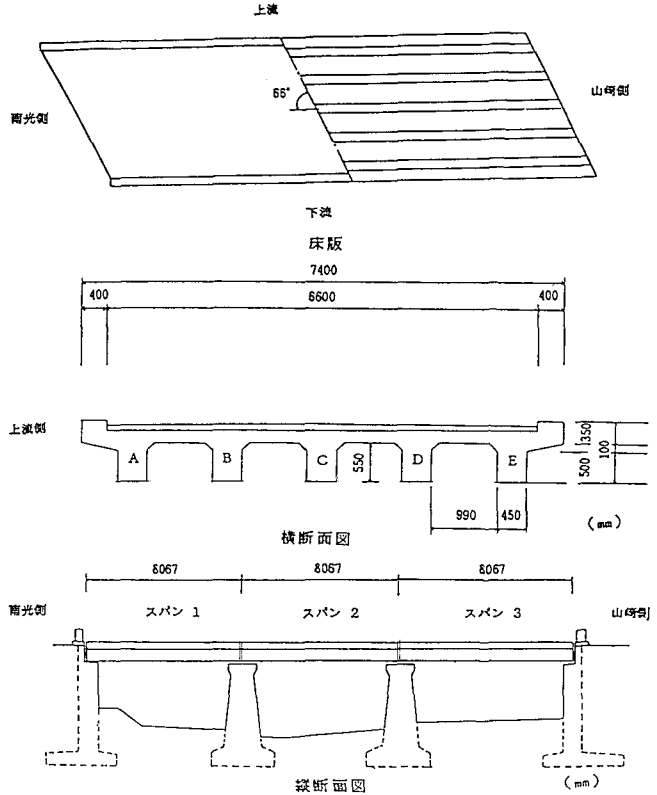


図4 一般図(旧大橋)

表1 主桁曲げ剛性の同定結果

	設計値	同定値
主桁 A	9.636	4.192
主桁 B	9.636	4.047
主桁 C	9.636	4.047
主桁 D	9.636	4.047
主桁 E	9.981	9.432

($\times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{m}^2$)

$\neq 1.0 - \mu_A(x)$ となる状態は想定していない。アンケート調査の質問内容はひびわれ状況からみた橋梁の健全度に関する項目、床版および主桁の「材料劣化」、「施工状態」等からみた健全度に関する項目、「耐荷性」、「耐久性」、「耐用性」等の橋梁機能からみた健全度および余寿命等に関する項目より構成されている。なお、健全度は100点満点の数直線上に点数で評価したものを回答として要求している。点数による健全度評価基準の目安は以下のようにした。

- 100: ほとんど損傷を受けておらず、全く健全な状態(safe)
- 75: 少し損傷が生じているが、あまり問題にならない状態(slightly safe)
- 50: 損傷状態は良くもなく悪くもない普通の状態(moderate)
- 25: かなりの損傷が生じており、何らかの対策が必要であると考えられる状態(slightly danger)
- 0: 損傷は最悪の状態(danger)

(2) ファジィ理論の適用による知識表現

回答結果における平均値および標準偏差を基に拡張II関数の形状パラメータ¹⁾を決定し、みかけの帰属度関数を設定した上で、可能性測度および必然性測度を算出した。主桁の「耐荷性」、「耐久性」、「材料劣化」およびひびわれ状況からみた「主桁A、Eの健全度」に関するアンケート結果の肯定に関する可能性測度分布および必然性測度分布を図5、図6に示す。また、Yagerの測度により算出したあいまい度を表2に示す。

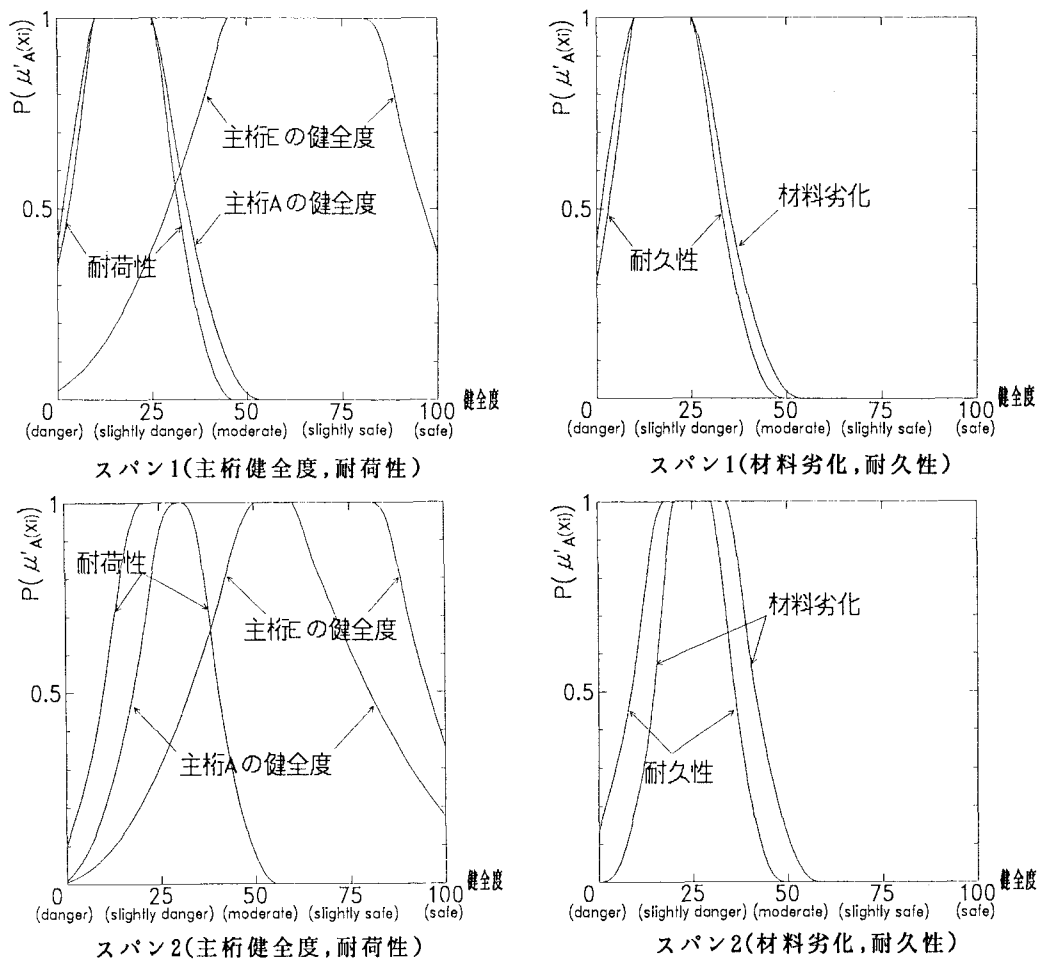
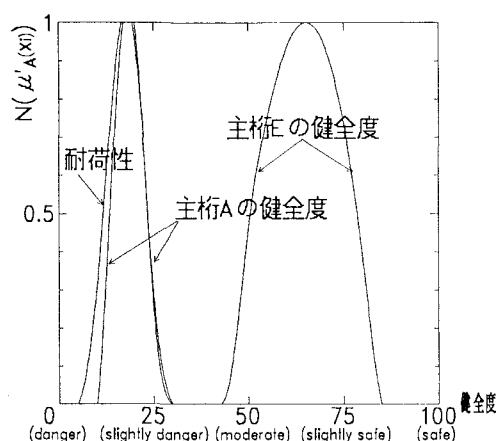
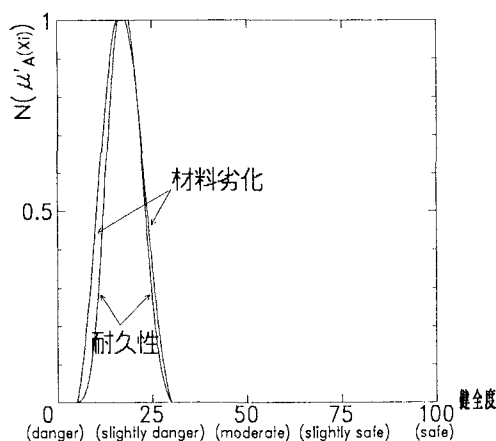


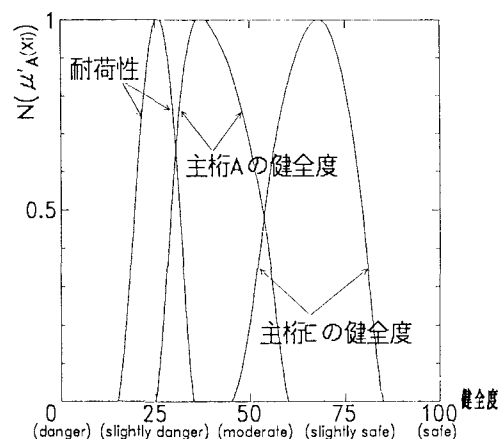
図5 アンケート調査結果の可能性測度分布



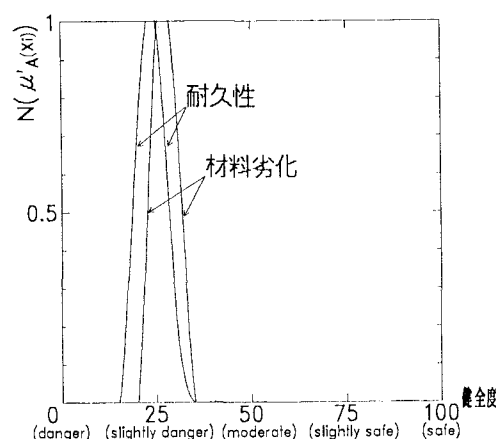
スパン1(主桁健全度, 耐荷性)



スパン1(材料劣化, 耐久性)



スパン2(主桁健全度, 耐荷性)



スパン2(材料劣化, 耐久性)

図6 アンケート調査結果の必然性測度分布

ここで、「材料劣化」および「主桁A, Eの健全度」は目視による損傷状態より、ある程度直接的に評価できる項目であるが、「耐荷性」、「耐久性」は、損傷程度から橋梁の状態を推定しなければならない項目である。なお、ひびわれ状況からみた「主桁A, Eの健全度」と「耐荷性」、「材料劣化」と「耐久性」を損傷とそれにより影響を受ける橋梁機能であると考え、それぞれ同一評価軸上に表わした。表2、図5および図6を考察することにより、以下の点が特徴的な項目として挙げられる。

①スパン1, スパン2とも主桁Aと主桁Eの健全度評価に極端な差異が見られる。すなわち主桁Eの健全度は可能性測度分布においては moderate から slightly safe の範囲の状態を、また必然性測度分布においては slightly safe を大きく支持している。これに対し、主桁Aの健全度は、可能性測度分布においてスパン1では slightly danger を、スパン2では slightly danger から moderate

	スパン1	スパン2
材料劣化	0.199	0.191
主桁A健全度	0.203	0.407
主桁E健全度	0.403	0.384
耐荷性	0.192	0.199
耐久性	0.185	0.184
耐用性	0.174	0.196

の範囲の状態を大きく支持している。また、必然性測度分布においては、スパン1では slightly dangerを、スパン2では slightly danger と moderateの中間付近をそれぞれ大きく支持している。一方、主桁の耐荷性は可能性測度分布および必然性測度分布とも slightly danger を大きく支持しており、特にスパン1の必然性測度分布においては、主桁Aの健全度の分布形状とほぼ一致している。これより、専門家は平均的な損傷評価というより、最も損傷の進行している箇所によって全体的な耐荷性評価を行っていると考えられる。

②スパン1、スパン2とも全体的な主桁の材料劣化の程度は、可能性測度分布および必然性測度分布両者において slightly dangerを大きく支持している。同様に主桁の耐久性についてもスパン1、スパン2において slightly dangerを明確に支持している。このように、主桁の耐久性の可能性測度分布および必然性測度分布は主桁の材料劣化の両分布形状とかなりの一致が見受けられることより、専門家は材料劣化の程度から耐久性を評価していることが推察される。

③全般的にみて、専門家は損傷程度(材料劣化、ひびわれ状況からみた健全度)から橋梁機能(耐荷性、耐久性)を評価する場合、本橋のように損傷がかなり進行している状況においては、橋梁機能に対する評価は損傷程度に対する評価よりも、さらに厳しいものとなっているように推察される。また、図示していないが、主桁の耐荷性、耐久性および耐用性を同一の評価軸上で表現した場合、耐用性が最も厳しい評価となっている。これは、事前に耐荷性と耐久性の両者を考えあわせた結果として耐用性を評価するように説明しているために、専門家は、ある程度以上損傷が進行している場合には評価結果が最終的に厳しくなるように診断していると考えられる。

④表2より、主桁A、Eの健全度を除いた項目に対してあいまい度($\sum F_V(x_i)$)は0.17~0.20の範囲となっており、材料劣化程度や耐用性など橋梁諸機能の評価に対してかなり確信度の高いアンケート調査結果が得られていることが分かる。逆に言えば、橋梁の全体的な劣化状況がかなり進行していることを示していると考えられる。ただし、スパン1における主桁Aの健全度を除いたその他の主桁健全度の評価において、あいまい度が0.40前後と若干大きな数値を示している。すなわち、本アンケート調査結果では橋梁の全体的損傷評価においてあいまい度が小さく、部分的損傷評価(主桁A、Eの健全度)においてあいまい度が大きくなる傾向が見られる。

⑤可能性測度分布と必然性測度分布の両面から専門家の評価結果を考察する事により、可能性の観点から考えた専門家の巨視的な評価あるいは必然性の観点から考えた評価結果内での強調されるべき評価範囲を明確に表現し把握することが容易となった。

4.4 アンケート調査結果と実橋試験結果の比較

以上のように考察した各項目を実橋試験結果と比較検討して以下にまとめる。

①非破壊試験結果および主桁曲げ剛性の同定結果(表1)より、主桁Eはかなり健全な状態にあり、主桁Aは大きく曲げ剛性が低下していることが分かる。このような主桁の曲げ剛性低下の程度と主桁健全度のアンケート調査による評価結果とはかなりの一致が見られる。

②5主桁の内、主桁Aを含む4主桁において材料劣化が相当進行していたことが、主桁構成材料試験結果より明らかになっており、主桁の材料劣化および耐久性に関するアンケート調査による評価結果と一致している。

③主桁の耐荷性を破壊安全率、安全性指標および破壊確率を基に定量的に評価した場合、荷重分配の影響で主桁Eが最も危険となり、損傷程度による評価結果とは逆の結果になった。一方、アンケート調査による評価においては損傷の最も進行した主桁における損傷程度より耐荷性を評価していると推察されることから、専門家ですえも予想し得なかったと考えられる。すなわち、損傷程度と最も重要な橋梁機能の一つである耐荷性を、荷重効果を考慮した上で評価する場合、アンケートによる知識からのみでは不十分であり、客観的裏付けのある定量的関係を求めておく必要があると考えられる。

④不確定解析による評価結果では本橋スパン1の余寿命は約40～70年という算定結果となった。一方、アンケート調査結果においては31名中25名が余寿命は10年以内という回答を行っており、両者の評価結果に大きな差異が見られた。専門家は橋梁の一般的な耐用年数である約50年を評価軸の最大値として設定し、そこに損傷程度を考慮して余寿命評価を行っているためにこのような差異が生じたと推察できる。すなわち、アンケート調査結果のみによる余寿命評価はかなりの誤差が生じると考えられる。また、アンケート調査により余寿命に関する質問を行う際に、イメージすべき限界状態を明示しなかったため、専門家は使用限界状態を想定し、比較的短期間の余寿命を回答したと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた主な成果について以下にまとめる。

- (1) 様相論理における可能性や必然性といった様相概念を、従来より著者らが提案してきたファジィ理論を適用した知識の表現手法に導入することにより、あいまいさが内在する経験的知識を可能性および必然性の両面から表現することを可能にする柔軟な知識表現手法を提案することができた。さらに、ファジィ集合Aとその補集合 $\bar{A}$ で表現される経験的知識(帰属度関数)の間に $\mu_{\bar{A}}(x) = 1.0 - \mu_A(x)$ の関係が成立しない場合においても適用可能なように本知識表現手法を拡張することができた。
- (2) 本研究で新たに定義した肯定の無知量および否定の無知量とYagerの測度により定量化されたあいまい度を比較することにより、Yagerの測度で定量化されるあいまい度の範囲を明確にすることができた。
- (3) 本知識表現手法により定量化された経験的知識がシステム内に既に存在する場合における新規獲得知識に対する処置(置換)の判断基準として、様相論理における可能性および必然性に対する様相測度を利用した定量的指標を提案することにより、知識の洗練度を考慮した知識の更新に対するシステムの柔軟な対応が可能となることが示唆できた。
- (4) 本知識表現手法を、実橋を対象として実施した耐用性評価に関するアンケート調査結果に適用し、耐用性評価を目的として行った実橋試験による客観的耐用性評価結果と比較することにより、橋梁診断に関する経験的知識がシステムの知識ベースとして有効であることの検証を行うと同時に、提案する知識表現手法の妥当性を確認することができた。なお、本知識表現手法の妥当性の確認は、実施したアンケート調査結果において $\mu_{\bar{A}}(x) = 1.0 - \mu_A(x)$ なる関係が成立していると仮定した上で論じており、 $\mu_{\bar{A}}(x) = 1.0 - \mu_A(x)$ なる関係が成立しないと考えられる場合についての本手法の妥当性の確認については今後の課題としたい。

謝辞

「旧大橋」に対する実橋試験およびアンケート調査の実施に際して、兵庫県土木部道路建設課の皆様の御協力を得たことを付記し、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 串田守可, 徳山貴信, 宮本文穂: 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, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 571～584, 1992. 3.
- 2) 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.
- 3) 水本雅晴: Fuzzy集合と様相性, 別冊・数理科学, pp. 76～84, 1988. 10.
- 4) 財団法人建設工学研究所: 県道53号線「旧大橋」耐用性診断試験報告書, 1992. 3.

- 5) 辻新六,有馬昌宏:アンケート調査の方法,朝倉書店,1989.
- 6) 田中英夫:可能性・必然性によるファジィモデリング,ファジィ学会誌,Vol.2, No.1, 1990.2.
- 7) 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.
- 8) 宮本文穂,森川英典,北村敦彦,石川浩:統計データに基づくコンクリート橋の構造安全性評価と余寿命評価,第11回材料・構造信頼性シンポジウム前刷集, pp.128~133, 1992.12.

(1992年9月21日受付)