

ファジィ真理値を用いた知識獲得手法

— 鋼橋損傷に関するアンケートの整理 —

A TECHNIQUE FOR ACQUIRING KNOWLEDGE USING FUZZY TRUTH VALUE

— ANALYSIS OF QUESTIONNAIRE FOR STEEL BRIDGE DAMAGE —

三上市蔵* 三木千壽** 土田貴敬*** 風間 徹****

By Ichizou MIKAMI, Chitoshi MIKI, Takanori TSUCHIDA and Toru KAZAMA

To develop expert systems, the method for acquiring expert's knowledge is very important. A questionnaire survey has been carried out with respect to steel bridge damage for the engineering experts in Japan. The questionnaire includes the replies with subjective fuzziness. Therefore, we try to acquire the engineering knowledge from the questionnaire to refine the knowledge base by using the fuzzy truth value.

1. まえがき

交通量の増加や車両の大型化により、道路橋において、各種部材の損傷に関する様々な事例が報告されている。1983年2月に土木学会鋼構造委員会において「疲労変状調査小委員会」が発足し、1986年に道路橋および鉄道橋の疲労変状に関する報告¹⁾がまとめられた。このように既存の土木構造物の維持・管理・補修が重要な課題となってきた。

鋼橋の疲労などに関する研究は、実橋における損傷事例からその特性および傾向を探るというアプローチを採用することが多い。文献2)では、様々な損傷事例の分析とそれに応じた対策が述べられている。これは、構造物の維持・管理業務が極めて複雑で多岐にわたり、専門技術者の知識に依存する傾向が強いためであろう。

このような分野の問題解決のために、エキスパート・システム(expert system)の研究や開発が随所で行われている。³⁾ これは専門家の高度な知識をコンピュータ上へ転移しようとするもので、AI(Artificial Intelligence; 人工知能)を応用したシステムの中でも実用化が最も期待されている分野である。しかしな

* 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (☎564 吹田市山手町3丁目3番35号)

** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (☎152 東京都目黒区大岡山2丁目12番1号)

*** 関西大学大学院 博士課程前期課程 (☎564 吹田市山手町3丁目3番35号)

**** 日本道路公団 技術部 構造技術課長 (☎100 東京都千代田区霞が関3丁目3番2号)

がら、その開発にあたり、専門家からの知識獲得が非常に困難であることが知られている。

三上らは、鋼橋の疲労亀裂に関する事例をもとに、エキスパート・システムを構築してきた。⁴⁾ また、その中で獲得した知識が十分に洗練されていない点を鑑み、収集事例の整理・分析を行い、⁵⁾ それら知識を有効に活用するための推論手法に関する研究⁶⁾ も行った。それらの研究を通じて、過去の損傷事例を用いてボトムアップ的に知識ベースを構築する場合、収集した事例の分析と吟味に多大な労力が必要となるほか、採取した事例の適否など様々な点で、専門家の意見を取り入れる必要があることがわかった。

専門家から知識を獲得するための手法として、アンケートの実施が考えられる。(財)高速道路技術センターでは、高速道路橋梁の点検マニュアルを作成するため、橋梁の健全度評価及び補強方法に関する調査研究委員会を設けた。同委員会は、点検のための調査部材や着目位置別の重要度を決定する基礎資料を得ることを目的にして、専門家に対して橋梁の損傷に関するアンケート⁷⁾ を1988年に実施した。

本論文においては、このアンケート結果を、鋼橋損傷に関する知識ベースとして利用するための方策を検討する。その際に専門家の回答に含まれているあいまいさを処理するために、ファジィ真理値^{8) 9)} の適用¹⁰⁾を試みる。

2. アンケートの内容

1988年に、(財)高速道路技術センターにおける橋梁の健全度評価及び補強方法に関する調査研究委員会は、点検のための調査部材や着目位置別の重要度係数を決定する基礎資料を得るため、一部の委員および幹事全員に対するアンケートを実施した。アンケートは鋼橋およびコンクリート橋に關して実施されたが、本論文では鋼橋に関するアンケート結果のみを利用する。

鋼橋に関するアンケートは、図-1に示すように、プレートガーダー橋、箱桁橋、上路トラス橋が対象とされた。プレートガーダー橋の場合には、部材(主桁、主構、横桁、縦桁、連結板など)と着目位置(支間部、

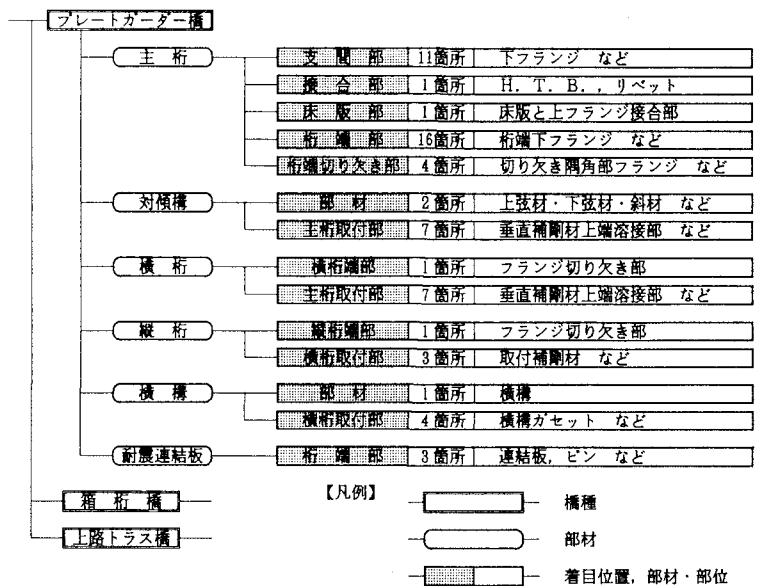


図-1 アンケート対象の橋種、着目位置、部材・部位

表-1 アンケートで定義された損傷の種類と損傷の概要

記号	損傷の種類	損 傷 の 概 要
イ	腐食	塗膜が劣化し、錆汁、孔食、欠食等がみられる
ロ	きれつ	鋼材に疲労亀裂が生じている。
ハ	破断	疲労亀裂や異常な力で断面が破断している。
ニ	変形	曲がりや座屈などの変形がみられる。
ホ	ゆるみ	H. T. B. やリベットがゆるみ、正常な機能を失っている。
ヘ	脱落	H. T. B. やリベットが抜け落ちている。
ト	接合不良	床版とフランジの接合面が離れている。ボルトやリベット連結部に肌すきがある。
チ	漏水・滲水	部材の欠損部から雨水が浸透している。漏水が箱断面内部に貯まっている。
リ	異常音	部材のきしみ音や、接合面のたたき音、きしみ音が発生している。
ヌ	異常振動	通常振動が発生しない部位に振動が生じている。

接合部、床版部など）に対して、損傷が生ずると思われる62箇所の部材・部位が選ばれた。専門家は各部材・部位において、表－1に示す損傷の種類について、3つの調査項目「現在の損傷状況」、「将来の損傷発生予想」および「損傷の影響度」に関する見解を求められた。ここに、「損傷

の影響度」とは、損傷が発生した場合にその損傷が橋梁の安全性に与える影響の重要度である。回答は表－2に示す3つのカテゴリA～Cを選択する形でなされた。

表－2 損傷発生 の推定と影響度に関するアンケート項目

カテゴリ	現在の損傷状況	将来の損傷発生予想	損傷の影響度
A	現在、損傷が多く発生している	将来、損傷が多く発生すると思われる	重大な損傷である
B	現在、損傷の発生は少ない	将来、損傷の発生は少ないと思われる。	重大な損傷につながるおそれがある
C	現在、損傷の発生は極めて少ないか、または全くない	将来、損傷の発生は全くないか、または全くないと思われる。	軽微な損傷である
X	無回答	無回答	無回答

3. ファジィ真理値とアンケートの分析手法

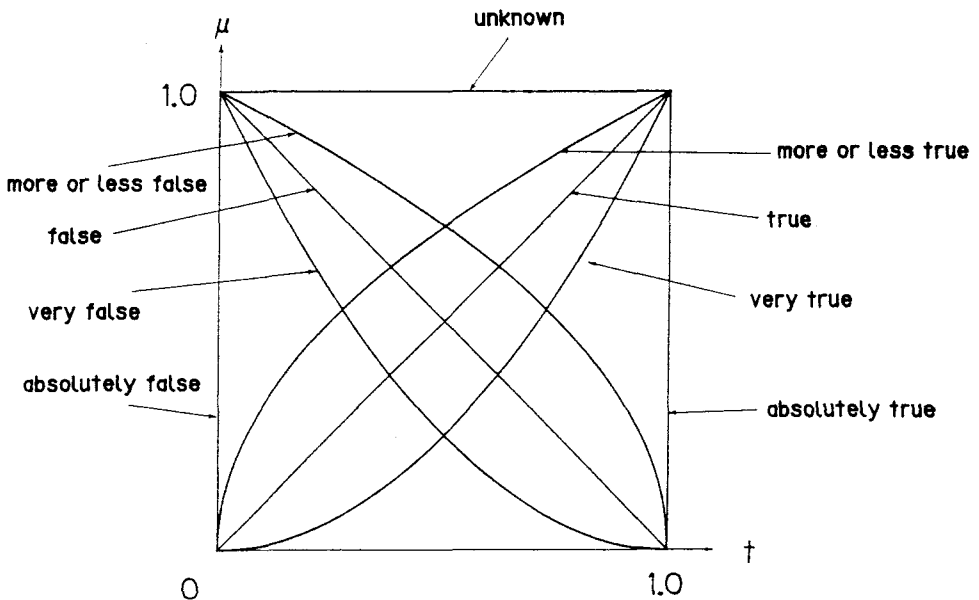
3. 1 アンケートの定量的評価

アンケート結果を定量的に評価する方法として、よく用いられるのは採点法である。たとえば、(財)高速道路調査会がまとめた斜面の危険度の判定法¹¹⁾に準ずるならば、各カテゴリに評価点3～0を設定し、各カテゴリの回答者数を乗じた和を回答者総数で割ると、平均評価点を求めることができる。

各カテゴリの評価点の決定には主観的あいまいさが存在し、定量的評価の方法としては必ずしも適当ではない。そこで、あいまいさを合理的に定量化するためにファジィ真理値の適用を考える。

3. 2 ファジィ真理値

ファジィ集合の概念が1965年にZadeh によって提唱されて以来、ファジィ理論とその応用に関する研究が



図－2 ファジィ真理値のメンバシップ関数

盛んに行われている。^{8) 9)} 土木工学分野においては、ファジィ理論の中でもファジィ推論やファジィ制御が適用されている。中でもファジィ真理値は、言語的真理値と言われ、ファジィ推論の中で間接的に利用されている例が多い。

例えば、「～は美しい」という命題を考えた場合、これの真理値として、trueとfalseのみならず、very true, very falseなどを考えることもできる。このように2値論理や、多値論理にはないような真理値をファジィ真理値という。⁹⁾

ファジィ真理値は、真理値空間 $[0, 1]$ におけるファジィ集合として定義され、メンバシップ関数を定義することができる。ファジィ真理値 τ = very true, more or less true, false などに対して、一般に図-2に示すように定義される。⁹⁾

3. 3 アンケートの回答に含まれるあいまいさ

実施されたアンケートの回答(カテゴリA～C)には、回答者の主観的判断によるあいまいさが含まれていると考えられる。例えば、「現在の損傷状況」において、カテゴリA(現在、損傷が多く発生している)と、カテゴリB(現在、損傷の発生は少ない)を回答者が明確に区分するのは不可能である。このカテゴリ分類のあいまいさを処理するためにファジィ真理値を利用する。そして、アンケートから得られた回答者数から、特定の部材・部位における各種の損傷の発生に関する知識の真理値を求めることにする。

本論文においては、図-2に示すメンバシップ関数の横軸 t は「現在の損傷状況」と「将来の損傷発生予想」においては、「損傷の発生しやすさ」を、「損傷の影響度」においては、その損傷が橋梁の安全性に与える影響の重要度をそれぞれ $[0, 1]$ に正規化した値であり、縦軸 μ は回答比率と考える。

4つのカテゴリA, B, C, Xのうち、A, Cに対するファジィ真理値はそれぞれvery true, very falseであると考えることができる。したがって、メンバシップ関数として、式(1), (2)を仮定すると、図-3に示すようなグラフで表現できる。

【A】損傷が多く発生している。

$$\mu = t^2 \quad (0.0 \leq t \leq 1.0) \quad (1)$$

【C】損傷の発生は極めて少ない、または全くない。

$$\mu = (1 - t)^2 \quad (0.0 \leq t \leq 1.0) \quad (2)$$

また、カテゴリXは無視することも考えられるが、ここではファジィ真理値をunknownとみなし、メンバシップ関数を式(3)のように仮定することにした。

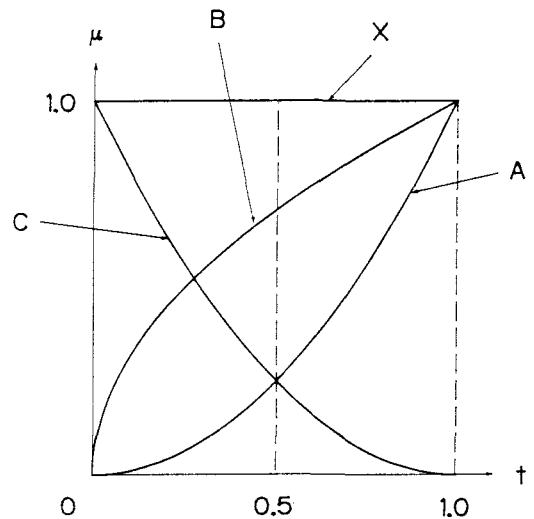


図-3 各カテゴリに対するファジィ真理値のメンバシップ関数【ケースⅠ】

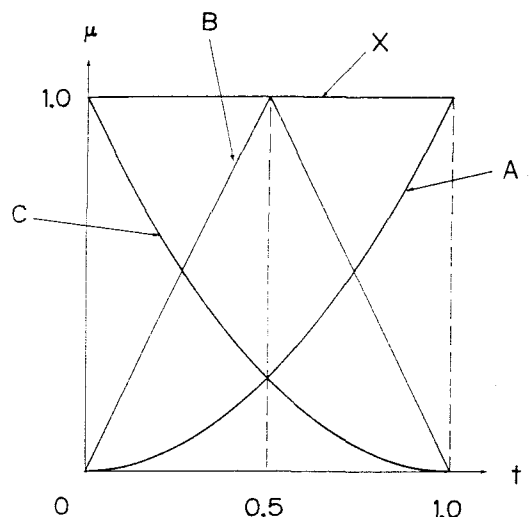


図-4 各カテゴリに対するファジィ真理値のメンバシップ関数【ケースⅡ】

【X】無回答。

$$\mu = 1 \quad (0.0 \leq t \leq 1.0) \quad (3)$$

最後に、カテゴリBの解釈があいまいであるので、ここでは、カテゴリBに関するメンバシップ関数として3種類を考える。

(1) ケースⅠ

カテゴリBの回答に対するファジィ真理値をmore or less true であると考え、メンバシップ関数として式(4)を仮定すると図-3に示す曲線が得られる。

【B】損傷の発生は少ない。

$$\mu = t^{1/2} \quad (0.0 \leq t \leq 1.0) \quad (4)$$

(2) ケースⅡ

カテゴリBの回答に対して、別のメンバシップ関数を用いるほうがよい場合も考えられる。すなわち、式(4)の代わりに式(5)を仮定する。

【B】損傷の発生は少ない。

$$\begin{aligned} \mu &= 2t & (0.0 \leq t \leq 0.5) \\ \mu &= 2(1-t) & (0.5 \leq t \leq 1.0) \end{aligned} \quad (5)$$

このケースの場合、各カテゴリに対するファジィ真理値のメンバシップ関数は図-4のようになる。

(3) ケースⅢ

カテゴリBの回答に対するファジィ真理値をmore or less falseであると考え、式(4)の代わりに式(6)を仮定する。

【B】損傷の発生は少ない。

$$\mu = 1 - t^2 \quad (0.0 \leq t \leq 1.0) \quad (6)$$

このケースの場合、各カテゴリに対するファジィ真理値のメンバシップ関数は図-5のようになる。

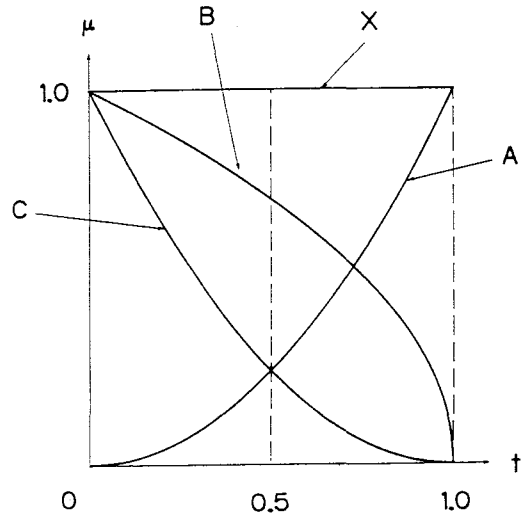


図-5 各カテゴリに対するファジィ真理値のメンバシップ関数【ケースⅢ】

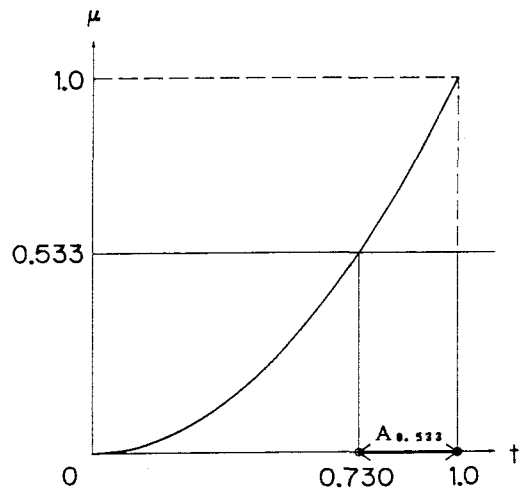


図-6 メンバシップ関数の α -カット
【カテゴリA/ケースⅠ】

3. 4 アンケートの集計方法

「現在の損傷状況」に関するアンケート結果の集計の一例を示す。メンバシップ関数として、ケースⅠを用いる。全回答者に対する回答数とその比率を表-3のように得られたとする。カテゴリA（損傷が多く発生している）の回答比率 P_A が0.533であるが、メンバシップ関数を回答比率 P_A で α カット¹²⁾すると図-6に示すように、 α レベル集合 $A_{0.533}$ として $[0.730, 1.000]$ が得られる。これは「カテゴリA（損傷が多く発生してい

表-3 各カテゴリの回答者数と計算結果の一例
【主桁・支間部・下フランジ/ケースⅠ】

カテ ゴリ	回答 者数	比率 ①	α -レベル集合	代表値 ②	比率×代表値 ③=①×②
A	8	0.533	$[0.730, 1.000]$	0.865	0.461
B	5	0.333	$[0.111, 1.000]$	0.556	0.185
C	1	0.067	$[0.000, 0.741]$	0.371	0.025
X	1	0.067	$[0.000, 1.000]$	0.500	0.034
計	15	1.000	—	—	0.705

る)の回答者が考えている損傷発生に関する真理値のあいまいさを示す範囲」とみなすことができる。つまり、そのカテゴリについての回答比率が上昇すれば、得られた真理値のあいまいさは減少し、 α レベル集合の幅は小さくなる。そして、カテゴリAの代表値 t_A としては、得られたクリスプ集合の中央値をとることにする。

カテゴリB, C, Xに対しても同様の処理を行い、式(7)により真理値 t を集計する。

$$t = \sum_{i=A, B, C, X} P_i t_i \quad (7)$$

また、メンバシップ関数の違うケースⅡおよびⅢについても、同様に表-4, 5のように計算することができる。

4. アンケートの集計結果とその利用

本研究では、プレートガーダー橋の62箇所の部材・部位に関して真理値の集計を行った。集計した結果の一部を表-6に示す。表-6の上段は実際に得られた回答数であり、下段は本手法により求められた真理値である。網かけの箇所は常識的にあり得ない項目であり、この部分の真理値は0として取り扱う。この真理値は、「現在の損傷状況」および「将来の損傷発生予想」の場合には、各部材・部位における各損傷の発生の可能性を、「損傷の影響度」の場合には、各部材・部位における各損傷の影響の重要度を表す。

4. 1 現在の損傷状況と将来の損傷発生予想との関連

まず、「現在の損傷状況」に関する真理値と「将来の損傷発生予想」に関する真理値の関連について調べてみる。表-1に示した「損傷の種類」の中で、回答すべき部材・部位の数の多い「腐食」、「亀裂」、「変形」、「破断」に関して「現在の損傷状況」と「将来の損傷発生予想」の相関を求めた結果を図-7~10に示す。ただし、メンバシップ関数はケースⅡである。また、「亀裂」に関するケースⅠ, Ⅲの結果を図-11, 12に示す。

図-7~10から、「腐食」の場合、真理値が大きいものが多く、いずれの部位・部材においても「腐食」は発生するものであると専門家がとらえていることを示している。逆に「変形」の場合、「腐食」と逆の傾向を示しているものと考えられる。

別の角度から見れば、「腐食」および「変形」において、その発生場所を特定するほどの明確な知識は得られていないと考えることができる。それと比較すると、「亀裂」の場合、真理値の大きさにかなりのばらつきが見られ、損傷場所を特定するのに有効な知識がかなり明確に存在するものと考えられる。

各損傷に対する相関係数がかなり高い値を示しているが、これは「現在の損傷状況」から「将来の損傷発生予想」の推定が行えることを意味している。そして、(1, 1)を通る回帰直線を仮定すると、直線の t_x 軸切片の値は、現在損傷が発生していない場合の将来の発生度を示しているものと考えられる。図-7~10から見れば、変形や腐食に比べて、破断や亀裂に将来の危険性を考えていることを示している。図-8および図-11, 12からわかるように、「現在の損傷状況」と「将来の損傷発生予想」の間の関係において、この切片の値から見ても、ケース別による違いはほとんど見られないことがわかる。

表-4 各カテゴリの回答者数と計算結果の一例
【主桁・支間部・下フランジ/ケースⅡ】

カテゴリ	回答者数	比率 ①	α -レベル集合	代表値 ②	比率×代表値 ③=①×②
A	8	0.533	(0.730, 1.000]	0.865	0.461
B	5	0.333	(0.167, 0.833]	0.500	0.167
C	1	0.067	[0.000, 0.741]	0.371	0.025
X	1	0.067	[0.000, 1.000]	0.500	0.034
計	15	1.000	—————	—————	0.687

表-5 各カテゴリの回答者数と計算結果の一例
【主桁・支間部・下フランジ/ケースⅢ】

カテゴリ	回答者数	比率 ①	α -レベル集合	代表値 ②	比率×代表値 ③=①×②
A	8	0.533	(0.730, 1.000]	0.865	0.461
B	5	0.333	[0.000, 0.816]	0.408	0.136
C	1	0.067	[0.000, 0.741]	0.371	0.025
X	1	0.067	[0.000, 1.000]	0.500	0.034
計	15	1.000	—————	—————	0.656

表-6 アンケート回答数とファジィ真理値による集計結果【ルートガード橋／現在の損傷状況／ケースⅠ】

部 材	着目 位置	損傷の種類 部材・部位	イ				ロ				ハ				ニ				ホ			
			腐 食				きれつ				破 断				変 形				ゆるみ			
A 主 桁	a 支間部	① 下フランジ	8	5	1	1	0	2	12	1	0	1	12	2	1	7	6	1				
			0.705				0.143				0.142				0.433							
		② 下フランジ板継ぎ溶接部	8	3	2	2	0	4	10	1	0	1	13	1								
			0.674				0.237				0.097											
		③ ウェブ	5	5	4	1	1	3	10	1	1	2	11	1	0	10	5	0				
			0.546				0.240				0.196				0.552							
		④ ウェブ板継ぎ溶接部	4	5	4	2	0	3	10	2	0	2	13	0	0	5	9	1				
			0.519				0.232				0.098				0.286							
		⑤ 下フランジ・ウェブ溶接部	6	5	2	2	0	4	10	1	0	3	11	1								
			0.621				0.237				0.190											
		⑥ 上フランジ・ウェブ溶接部	4	7	2	2	1	6	8	0	1	4	9	1								
			0.595				0.346				0.286											
		⑦ 垂直補剛材下端部	6	5	2	2	2	3	9	1	0	3	11	1								
			0.621				0.296				0.190											
		⑧ カバープレート端部、 側面溶接部	6	4	3	2	0	4	10	1	0	2	12	1								
			0.591				0.237				0.143											
		⑨ 上フランジ	4	6	4	1	0	2	12	1	0	1	13	1	0	3	11	1				
			0.532				0.143				0.097				0.190							
		⑩ 上フランジ板継ぎ溶接部	4	6	3	2	0	2	12	1	0	1	13	1								
			0.556				0.143				0.097											
		⑪ 添加物等取付ブラケット 付け根の溶接部	7	4	2	2	2	5	7	1	1	6	7	1	1	5	8	1				
			0.645				0.383				0.381				0.332							
	b 接合部	① H. T. B. リベット	7	5	2	1	4	8	2	1	5	9	1	0	1	6	7	1	6	6	3	0
			0.654				0.620				0.696				0.381				0.614			
	c 床版部	① 床版と上フランジ接合部	7	7	1	0					2	7	6	0								
			0.702								0.449											
	d 桁端部	① 桁端下フランジ	11	3	0	1	1	6	7	1	1	4	9	1	1	8	6	0				
			0.818				0.381				0.286				0.458							
		② 端垂直補剛材下端の溶接部	11	2	0	2	3	5	7	0	0	4	10	1								
			0.815				0.404				0.237											
		③ ウェブ・下フランジ溶接部	9	4	0	2	3	4	7	1	1	2	11	1								
			0.742				0.395				0.196											
		④ ウェブ	7	7	0	1	1	3	10	1	0	2	12	1	1	9	5	0				
			0.710				0.240				0.143				0.520							

部 材	着目 位置	損傷の種類 部材・部位	ヘ				ト				チ				リ				×			
			脱 落				接合不良				漏水・滯水				異常音				異常振動			
A 主 桁	a 支間部	① 下フランジ																	0	2	11	2
																			0.187			
		② 下フランジ板継ぎ溶接部																				
		③ ウェブ																	0	4	9	2
																			0.277			
		④ ウェブ板継ぎ溶接部																				
		⑤ 下フランジ・ウェブ溶接部																				
		⑥ 上フランジ・ウェブ溶接部																				
		⑦ 垂直補剛材下端部																				
		⑧ カバープレート端部、 側面溶接部																				
		⑨ 上フランジ																				
		⑩ 上フランジ板継ぎ溶接部																				
		⑪ 添加物等取付ブラケット 付け根の溶接部																				
	b 接合部	① H. T. B. リベット	4	10	1	0	2	8	4	1												
			0.708				0.531															
	c 床版部	① 床版と上フランジ接合部					3	9	3	0	6	7	2	0	2	6	7	0				
							0.608				0.653				0.397							
	d 桁端部	① 桁端下フランジ									7	5	2	1								
											0.654											
		② 端垂直補剛材下端の溶接部																				
		③ ウェブ・下フランジ溶接部																				
		④ ウェブ																	0	7	6	2
															0.424							

【凡例】

A	B	C	X
真理値			

A：現在、損傷が多く発生している。

C：現在、損傷の発生は極めて少ない、または全くない。

B：現在、損傷の発生は少ない。

X：無回答。

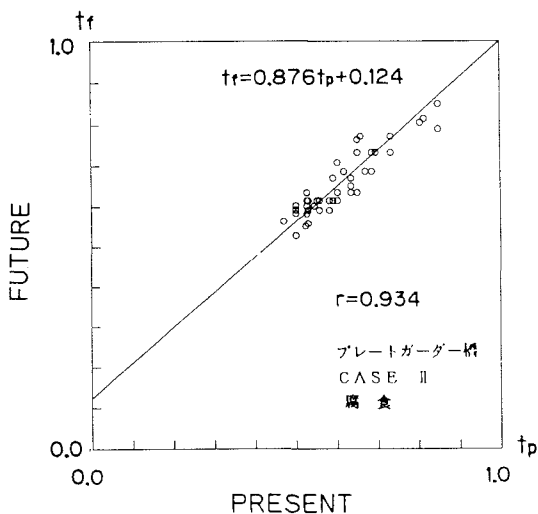


図-7 「現在の損傷状況」と「将来の損傷発生予想」との相関関係

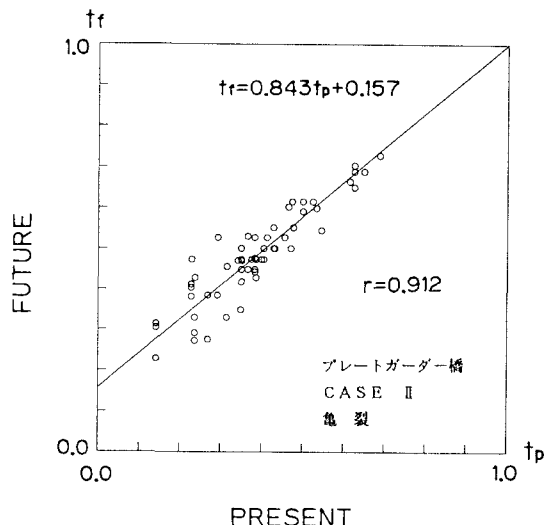


図-8 「現在の損傷状況」と「将来の損傷発生予想」との相関関係

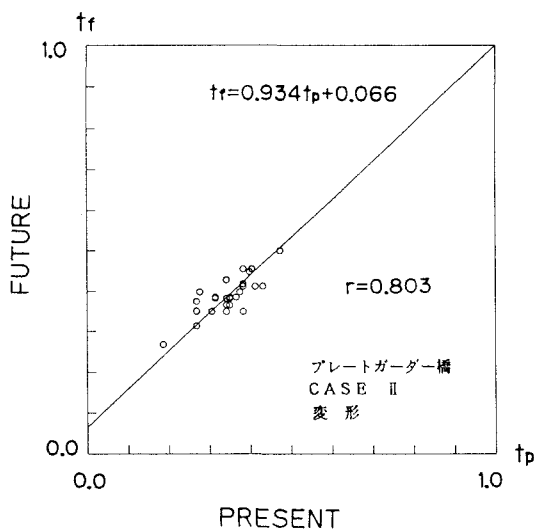


図-9 「現在の損傷状況」と「将来の損傷発生予想」との相関関係

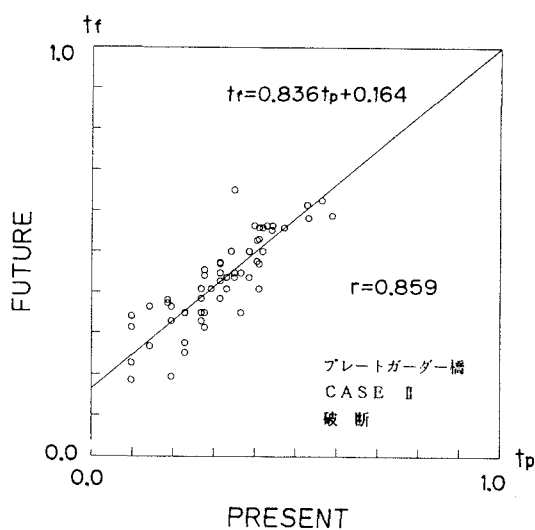


図-10 「現在の損傷状況」と「将来の損傷発生予想」との相関関係

4. 2 橋梁点検箇所の特定に関する知識

得られた真理値を橋梁の点検箇所の特定に利用することを考える。損傷の発生場所をリストアップするだけでなく、そこに発生するであろう損傷の影響度を考慮する必要がある。そこで、「将来の損傷発生予想」に関する真理値と「損傷の影響度」に関する真理値との相乗平均を求めた。そして、表-1に示す10種類の損傷のうち何れかが生じる部材・部位を特定するため、各部材・部位における各損傷に対する真理値のうち、最大値を採用することにした。

ケースIの集計結果を基に最大値に関してソートし、62箇所の着目位置をランク付けした。上位10箇所を示すと、表-7のようになる。上から順番に見ていくと、まずウェブ(A-a-③)は高い値を示している

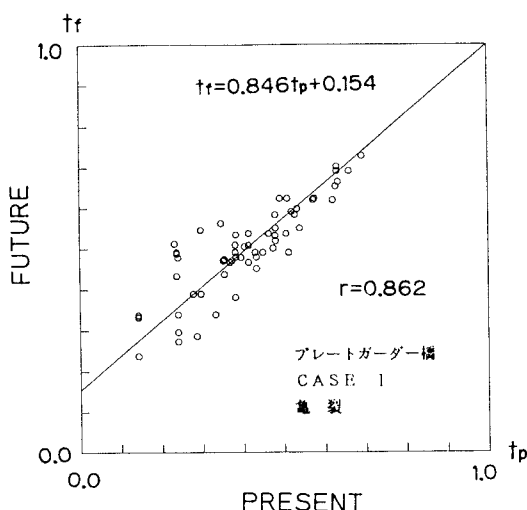


図-11 「現在の損傷状況」と「将来の損傷発生予想」
との相関関係

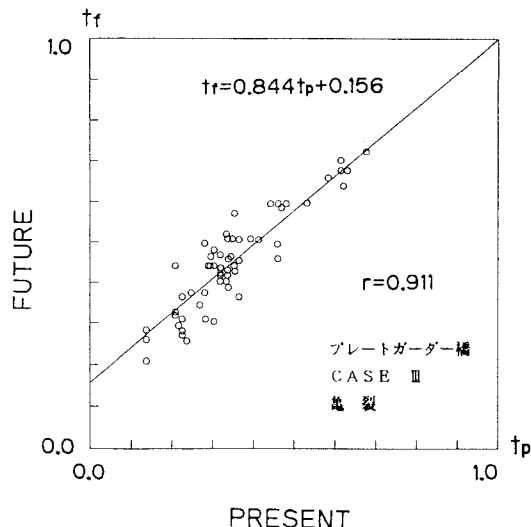


図-12 「現在の損傷状況」と「将来の損傷発生予想」
との相関関係

ものの、場所の特定があいまいなため、知識としては扱いにくい。床版と上フランジ接合部（A-c-①）は主に腐食や漏水などRC床版側の原因による損傷が重視されている結果であろう。対傾構〔B〕の主桁取付部〔b〕における垂直補剛材上端とウェブとの溶接部（B-b-②），横桁〔C〕の主桁取付部〔b〕における垂直補剛材上端とウェブとの溶接部（C-b-①），垂直補剛材の上端の溶接部やスカーラップ部における損傷（B-b-①，B-b-③，C-b-②など）が上位にランクされているのがわかる。これらの損傷箇所は、横分配作用などによる2次応力による疲労亀裂の発生しやすい構造として多くの文献^{13)~19)}において紹介されている。また、主桁などの桁端切り欠き部に生じやすいとされる応力集中による亀裂（A-e-③）に関する知識も表-7から得られているのがわかる。これらの損傷箇所が「亀裂」の項目においてかなり高い値を与えていることから、アンケートの結果がかなりの確であることがわかる。

同様に、ケースⅢの集計結果を基にソートした結果は表-8のようになる。ケースⅠと同様の傾向が見られるが、桁端切り欠き部に関する損傷が比較的注目される。

次に、「亀裂」に関する真理値を用いてランク付けを行った結果を表-9, 10 に示す。ここで上位にラン

表-7 「損傷の重要度」を考慮した「将来の損傷発生予想」のランキング【ケースⅠ】

部材	着目位置	損傷の種類 部材・部位	損傷の種類										最大値
			腐食	き裂	破断	変形	ゆるみ	脱落	接合不良	漏水・滯水	異常音	異常振動	
A	a	③ ウェブ	0.614	0.658	0.554	0.755						0.508	0.755
A	c	① 床版と上フランジ接合部	0.653		0.650				0.710	0.734	0.667		0.734
B	b	② 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.522	0.731	0.675							0.403	0.731
B	b	③ 垂直補剛材上端スカーラップ	0.522	0.723	0.629							0.398	0.723
A	d	⑧ ソールプレートと上巻の取付ボルト	0.721	0.547	0.565	0.529	0.611	0.607	0.573				0.721
A	b	① H. T. B. , リベット	0.632	0.627	0.719	0.505	0.681	0.699	0.634				0.719
B	b	① 垂直補剛材上端溶接部	0.522	0.718	0.662							0.403	0.718
A	e	③ 切り欠き隅角部のフランジウェブ溶接部	0.593	0.715	0.695								0.715
C	b	② 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.547	0.713	0.642							0.442	0.713
C	b	① 垂直補剛材上端溶接部	0.547	0.713	0.653							0.428	0.713

表－8 「損傷の重要度」を考慮した「将来の損傷発生予想」のランキング【ケースⅢ】

部材	着目位置	損傷の種類 部材・部位	イ	ロ	ハ	ニ	ホ	ヘ	ト	チ	リ	ヌ	最大値
			腐食	き裂つ	破断	変形	ゆるみ	脱落	接合不良	漏水・滲水	異常音	異常振動	
A	e	③ 切り欠き隅角部のフランジ－ウェブ溶接部	0.531	0.694	0.685								0.694
A	e	② 切り欠き隅角部のウェブ	0.553	0.647	0.607	0.422							0.647
C	b	④ 上フランジとウェブの溶接部	0.480	0.622	0.636							0.387	0.636
B	b	② 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.474	0.611	0.635							0.370	0.635
C	b	② 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.480	0.624	0.591							0.387	0.624
C	b	① 垂直補剛材上端溶接部	0.480	0.624	0.573							0.387	0.624
B	b	④ 上フランジとウェブの溶接部	0.495	0.596	0.615							0.369	0.615
A	e	① 切り欠き隅角部フランジ	0.561	0.607	0.553	0.350							0.607
A	d	① 桁端下フランジ	0.604	0.475	0.476	0.385				0.439			0.604
A	d	② 桁垂直補剛材下端の溶接部	0.595	0.478	0.447								0.595

表－9 「亀裂」に関する「将来の損傷発生予想」のランキング【ケースⅠ】

部材	着目位置	損傷の種類 部材・部位	ロ
			き裂つ
B	b	② 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.731
B	b	③ 垂直補剛材上端スカーラップ	0.723
B	b	① 垂直補剛材上端溶接部	0.718
A	e	③ 切り欠き隅角部のフランジ－ウェブ溶接部	0.715
C	b	② 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.713
C	b	① 垂直補剛材上端溶接部	0.713
A	a	② 下フランジ板継ぎ溶接部	0.681
C	b	③ 垂直補剛材上端スカーラップ	0.679
C	b	④ 上フランジとウェブの溶接部	0.674
A	e	② 切り欠き隅角部ウェブ	0.671

表－10 「亀裂」に関する「将来の損傷発生予想」のランキング【ケースⅢ】

部材	着目位置	損傷の種類 部材・部位	ロ
			き裂つ
A	e	③ 切り欠き隅角部のフランジ－ウェブ溶接部	0.694
A	e	② 切り欠き隅角部ウェブ	0.647
C	b	② 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.624
C	b	① 垂直補剛材上端溶接部	0.624
C	b	④ 上フランジとウェブの溶接部	0.622
B	b	② 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.611
A	e	① 切り欠き隅角部フランジ	0.607
B	b	④ 上フランジとウェブの溶接部	0.596
C	b	③ 垂直補剛材上端スカーラップ	0.593
A	a	⑧ カバープレート端部、側面溶接部	0.577

クされた損傷箇所は、疲労亀裂の発生しやすい構造ディテールを示している。表－7、8とは異なり、カバープレート端部、側面溶接部（A－a－⑧）、下フランジ板継ぎ溶接部（A－a－②）などがリストアップされている点が注目される。

文献4）の鋼橋疲労亀裂に関する事例のうち、プレートガーダー橋に関するものを表－11に示す。ここには、対傾構と主桁の連結部、横桁と主桁の連結部、切り欠き構造に関する損傷箇所が挙げられている。これは「亀裂」に関する真理値のランキング（表－9、10）の妥当性を示すものと考えられる。

4. 3 ケース別の比較

プレートガーダー橋の62個の損傷部位に関するケース別の真理値を図－13に示す。若干の値の違いはあるが、点検すべき部材・部位に関しては、ほぼ同様の結果が得られた。ただし、ケースⅠとⅢのメンバシップ関数の違いを考えると、ケースⅠ、Ⅲで値に大きな差が出ている部位においては、カテゴリBの回答者数が

多かったことを意味しているため、知識としては、かなりのあいまいさを含んでいるものと考えられる。表-7、8においても、ケースⅠではリストアップされているウェブ（A-a-③）や床版と上フランジ接合部（A-c-①）などは、ケースⅢにおいてはリストアップされていない。これらは、あいまいな知識であると言える。また、図-13からは、損傷部位12（主桁支間部のH.T.B.）や31,32（桁端部切り欠き部の・・・）などが、あいまいさの少ない知識として挙げられる。

ケースⅠ、Ⅱ、ⅢのカテゴリBに対するメンバシップ関数の相違は次のように解釈することもできる。ケースⅠは、カテゴリBを選んだ回答者が多い場合には、損傷が発生する方向に評価するので、「少なくとも腐食が発生する可能性を重視する解釈」である。逆にケースⅢは、カテゴリBを選んだ回答者が多い場合には、損傷が発生しない方向に評価するので、「腐食が確実に発生する場合を重視する解釈」と考えられる。従って、ケースⅡ

表-11 鋼橋疲労亀裂に関するデータベースの内容

損傷構造	損傷部分	損傷要素	継手種類	フックに於ける目位置	データベースの事例件数	真理値
対横構と主桁の連結部	垂直補剛材 主桁上フランジ	隅肉溶接	T継手	B-b-①	21	0.718
	垂直補剛材 主桁腹板	隅肉溶接	T継手	B-b-②	10	0.731
	垂直補剛材	垂直補剛材	スカーフ部	B-b-④	6	0.666
	主桁腹板 主桁上フランジ	主桁腹板	T継手	B-b-⑤	5	0.723
横構と主桁の連結部	垂直補剛材 主桁上フランジ	隅肉溶接	T継手	C-b-①	7	0.713
	垂直補剛材	垂直補剛材	スカーフ部	C-b-④	6	0.674
	主桁腹板 主桁上フランジ	主桁腹板	T継手	C-b-⑤	5	0.679
	垂直補剛材 主桁腹板	隅肉溶接	T継手	C-b-②	2	0.713
主桁の垂直補剛材取付部	主桁腹板 垂直補剛材	主桁腹板	T継手	A-d-①	3	0.545
	主桁腹板 垂直補剛材	隅肉溶接	T継手		1	
主桁の継手	主桁下フランジ	fl-g溶接	突合せ継手	A-a-②	3	0.681
主桁切り欠き部	主桁腹板 主桁下フランジ	隅肉溶接	T継手	A-e-③	2	0.715
主桁のガールト取付部	主桁下フランジ ガールト	隅肉溶接	重ね継手	A-d-⑤	2	0.618
縦桁と横桁の交差部	縦桁下フランジ 横桁腹板	縦桁下フランジ	T継手	D-b-②	2	0.601
横構と主桁の連結部	垂直補剛材 fl-gガールト	fl-g溶接	突合せ継手	E-b-③	1	0.568

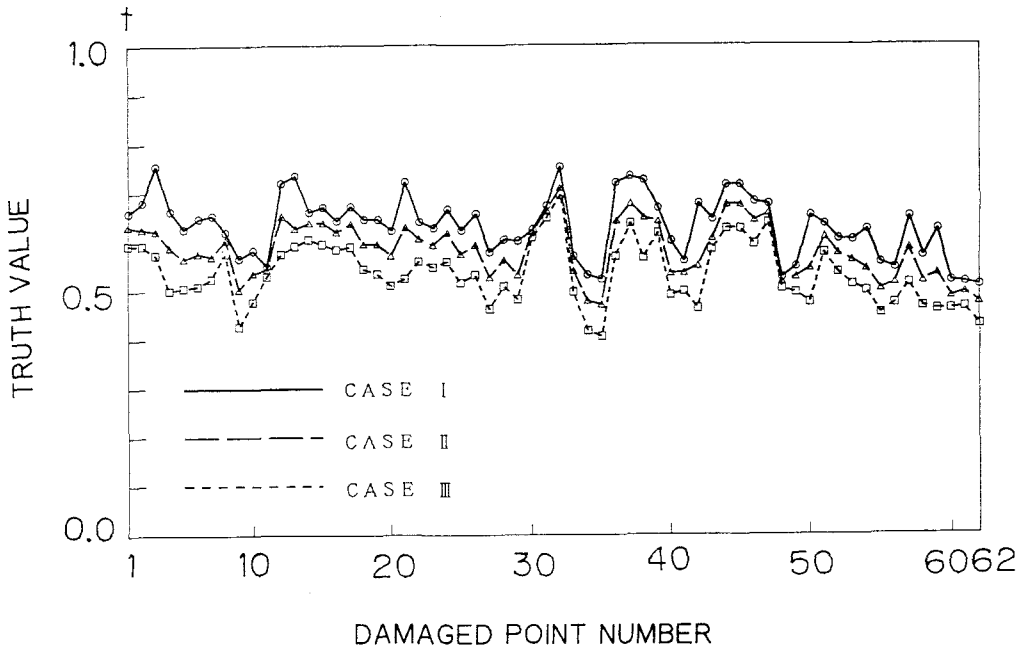


図-13 各損傷部材・部位における「損傷の重要度」を考慮した「将来の損傷発生予想」に関する真理値のケース別による比較

は「ケースⅠ、Ⅲの中間をとる解釈」である。

どのケースのメンバシップ関数を使用すべきかは、真理値の利用方法に依存する。例えば、定期的を実施される日常点検業務においては、少ない期間と手間で確実に発生している損傷を発見しなくてはならないという立場で考えて、ケースⅢを利用するのが適当であると思われる。また、数年に一度といった大規模な点検作業が実施される場合には、逆に、小さい損傷であっても大きな損傷に進展する可能性まで考慮した点検を実施しなくてはならないため、ケースⅠを利用するのが適当と考えられる。

4. 4 知識ベースシステムへの適用

次に、知識ベースシステムへの適用を考える。三上らが構築したエキスパート・システム（ES）⁴⁾は、鋼道路橋（桁橋、トラス橋およびアーチ橋）上部構造の溶接構造に発生する疲労亀裂を対象に、疲労亀裂の点検から補修方法選定に至る3つのESからなる。

第1のESでは、構造形式、桁形式、平面形から、該当する損傷事例にみられる損傷構造を捜し出し、これを点検すべき部材・部位としてリストアップする。第2のESでは、このリストに基づいて点検・調査を行い、損傷が発見された場合、損傷構造、損傷部分、損傷要素、継手種類、溶接種類を入力して、損傷要因レベル1、損傷要因レベル2および継手の作用力を推定する。第3のESでは、補修の必要性がある場合、第2のESにより提示される損傷要因と作用力に、点検から与えられる亀裂様式、亀裂方向の情報を加え、補修方法が選定される。

今回実施されたアンケートは、点検のための調査部材や着目位置別の重要度係数を決定する基礎資料を得ることを目的にしているため、第1のESに関する知識ベースに利用できると考えられる。文献4)で作成された知識ベースは、エキスパート・シェル「Super-BRAINS」を用いたプロダクション・ルールにより書かれている。そこでは知識の重みづけは主観的な数値を確信度として与えていたが、確信度は知識の確からしさを $[-1, 1]$ または $[0, 1]$ に正規化した値であるため、ここに得られた真理値を適用することができる。一般に、この値は少数の専門家らによって主観的につけられることが多いが、本手法を用いて算出された真理値は、多数の専門家の意見を集約しているものと考えられる。

また、三上らは、第3のESに関して、因果ネットワークを用いた知識ベース⁶⁾を構築したが、定義された因果関係はすべて事例より抽出した「必然性を持つ関係」として定義されている。この方法を用い、因果関係の強さおよび各損傷の重要性に関する重みづけを行うことによって、知識ベースを洗練することができる。

5. あとがき

本論文は、(財)高速道路技術センターの実施した高速道路橋の損傷に関するアンケート調査結果から、各部材・部位に損傷が発生する可能性を真理値として算出する方法を提案した。アンケート回答に含まれる主観的なあいまいさを評価するためにファジィ真理値を適用した。そして、利用されるべきメンバシップ関数として3種類のものを提案した。この結果得られた真理値は、0であれば損傷は全く発生せず、1であれば損傷は必ず発生するという専門家の知識である。

得られた真理値を検討し、次のようなことがわかった。

- (1) 「現在の損傷状況」の真理値と「将来の損傷発生状況」の真理値の間には、高い相関関係が存在する。
また、損傷の種類ごとの真理値の分布は、各損傷の種類に対する専門家の印象を反映したものであると判断できる。
- (2) 「将来の損傷発生状況」の真理値に「損傷の影響度」の真理値を考慮することにより、橋梁の点検箇所

を特定するための知識を獲得することができる。また、「亀裂」に関する真理値をソートすることにより、疲労亀裂の発生しやすい構造を特定するための知識を獲得することができる。

- (3) ファジィ真理値のメンバシップ関数に3種類を仮定したが、ケース別の真理値の違いは、獲得された知識のあいまいさを示している。
- (4) 知識ベースシステムのルールの重みづけに利用すれば、多数の専門家の意見を集約した上での確信度を合理的に求めることができる。

最後に、多大な労力を費やして貴重なアンケートを実施された(財)高速道路技術センターに敬意を表したい。また、本研究を行うにあたって、データ計算および図表作成にあたって、関西大学工学部北岸秀一、河合義勝両君の協力を得た。ここに感謝の意を表す。本研究は平成2年度文部省科学技術研究費試験研究B(1)(代表研究者 三木千壽)の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 鋼構造委員会疲労変状調査小委員会：鋼橋の疲労変状調査，土木学会論文集，No.368/I-5，pp.1-12，1986.4.
- 2) Fisher, J. W.・阿部英彦・三木千壽：鋼橋の疲労と破壊—ケーススタディー—，建設図書，1987.
- 3) 三上市蔵：エキスパートシステムの土木関連応用事例と問題点，土木学会西部支部／九州橋梁・構造工学研究会講習会テキスト「土木におけるE SとC A D」，pp.13-24，1989.10.
- 4) 三上市蔵・三木千壽・田中成典：鋼道路橋の疲労亀裂に関するルールとフレームによる知識ベース・エキスパートシステム，構造工学論文集，Vol.35A，pp.977-990，1988.3.
- 5) 三上市蔵・三木千壽・田中成典・本田博幸・土田貴敬：エキスパートシステム構築のための鋼橋疲労損傷事例の分析と知識の整理，土木情報システムシンポジウム講演集，pp.181-188，1989.10.
- 6) 三上市蔵・三木千壽・田中成典・土田貴敬：鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムのための因果ネットワークによる推論手法，構造工学論文集，Vol.36A，pp.1003-1014，1990.3.
- 7) (財)高速道路技術センター：橋梁の健全度評価及び補強方法に関する調査研究(その2) 報告書，1989.2.
- 8) 水本雅晴：ファジィ論理とファジィ推論，数理科学，No.284，pp.10-18，1987.2.
- 9) 水本雅晴：最近のfuzzy 集合論，数理科学，No.191，pp.15-20，1979.5.
- 10) 三上市蔵・三木千壽・土田貴敬：ファジィ真理値を用いた鋼橋損傷アンケートからの知識の獲得，土木情報システムシンポジウム講演集，pp.247-254，1989.10.
- 11) (財)高速道路調査会：地すべり及び斜面崩壊の防止対策の調査手法に関する研究，1977.3.
- 12) 寺野隆雄・浅居喜代治・菅野道夫：ファジィシステム入門，オーム社，1987.
- 13) 西川和廣：道路構造物の損傷例，補修例—主として橋梁について—，道路，pp.44-47，1982.11.
- 14) Fisher, J. W.・三木千壽：米国の溶接橋梁に生じた疲労被害例，橋梁と基礎，Vol.16，No.10，pp.18-24，1982.10.
- 15) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，Vol.17，No.8，pp.19-23，1983.8.
- 16) 三木千壽・Fisher, J. W.：海外の橋梁における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，Vol.17，No.8，pp.30-34，1983.8.
- 17) 西川和廣：プレートガーダー橋の疲労損傷事例，道路，pp.58-63，1985.7.
- 18) 三木千壽・西川和宏・Fisher, J.W.：鋼橋の疲労損傷とその検査，橋梁と基礎，Vol.20，No.5，pp.17-21，1986.5.
- 19) 三木千壽・坂野昌弘・館石和雄・福岡良典：鋼橋の疲労損傷データベースの構築とその分析，土木学会論文集，No.392/I-9，pp.403-410，1988.4.

(1990年10月12日受付)