

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

関西大学工学部 正会員 三上 市藏
東京工業大学工学部 正会員 三木 千壽
関西大学大学院 学生員 土田 貴敬

1. まえがき

交通量の増加や車両の大型化などにより、道路橋においても、部材の疲労損傷に関する事例が報告されるようになった。土木学会においても、1983年2月に鋼構造委員会で「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。

鋼橋の疲労に関するメカニズムには不明な点が多く、文献²⁾は、様々な損傷事例の分析に重きを置いており、文献^{3)～14)}も、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している。一般に、構造物の維持・管理業務は極めて複雑で多岐にわたり、必要な知識が明確にされていないのが現状で、専門技術者の経験的な知識に依存する傾向が強い。

著者らは、この点に着目し、過去の損傷事例を調査・分析し、鋼橋の点検業務から補修工法の選定に関する流れを知識ベース化し、エキスパートシステムを構築した。^{15)～17)}しかし、事例から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と考えられる。

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が、¹⁸⁾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、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、専門家に対するアンケート¹⁹⁾を1988年に実施した。

本論においては、このアンケート結果を知識ベースにおける知識として利用する方策を検討する。その際に専門家の回答に含まれるあいまいさを処理するため、ファジィ真理値^{17) 20)}の適用を試みた。

2. アンケートの内容

アンケートは鋼橋およびコンクリート橋に関して実施されたが、本論では鋼橋に関するアンケート結果を利用する。鋼橋に関するアンケートの内容の一部を図-1に示す。プレートガーダー橋、箱桁橋、下路トラス橋、上路トラス橋が対象とされ、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、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対して、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「損傷の重要度」に関する見解を求められた。回答は表-2に示す3つのカテゴリ（A～C, 1～3, イ～ハ）を選択する形でなされた。

3. 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盛んに行われ

表-1 アンケートで定義された損傷の種類

記号	損傷の種類	記号	損傷の種類
イ	腐食	へ	脱落
ロ	きれつ	ト	接合不良
ハ	破断	チ	漏水・滯水
ニ	変形	リ	異常音
ホ	ゆるみ	ヌ	異常振動

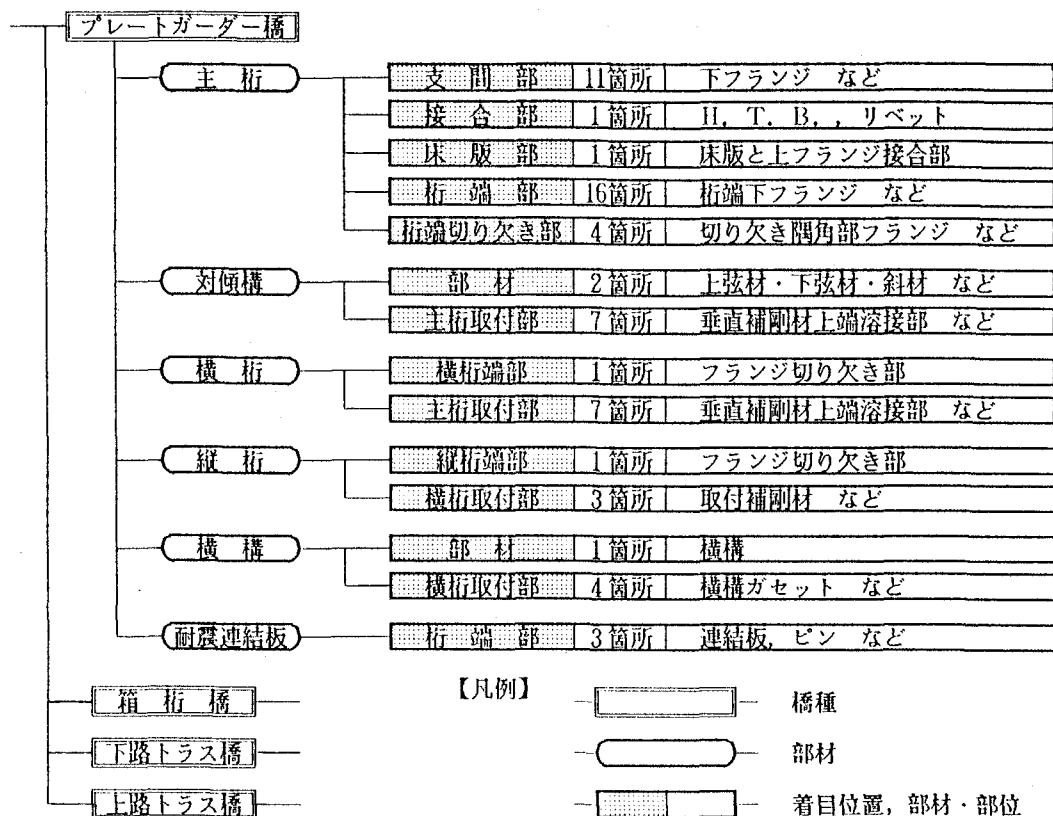


図-1 アンケート対象の橋種, 着目位置, 部材, 部位

ている。¹⁹⁻²¹⁾

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。²⁰⁾

ファジィ真理値 τ とは、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 $\tau = \text{very true, more or less true, false}$ などに対して、一般に図-2に示すように定義される。¹⁹⁾

表-2 損傷発生 の推定と重要度に関するアンケート項目

現在の損傷状況		将来の損傷発生予想		損傷の重要度	
記号	項 目	記号	項 目	記号	項 目
A	現在、損傷が多く発生している	1	将来、損傷が多く発生すると思われる	イ	重大な損傷である
B	現在、損傷の発生は少ない	2	将来、損傷の発生は少ないと思われる。	ロ	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	3	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。	ハ	軽微な損傷である
X	無回答	4	無回答	ニ	無回答

4. アンケートの分析方法

アンケートの回答(A～C, 1～3, イ～ハ)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。したがってファジィ真理値を利用し、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。図-2に示すような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、「損傷の重要度」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る。また、縦軸 μ は回答比率と考える。本研究では、ファジィ真理値に関するメンバシップ関数の選択に関して3種類のケースを考える。

(1) ケース I

4つのカテゴリA, B, C, X(または1, 2, 3, 4またはイ, ロ, ハ, ニ)に対するファジィ真理値をそれぞれvery true, more or less true, very false, unknown であると考え、メンバシップ関数として、次式を仮定すると、図-3に示すようなグラフで表現できる。

【A】腐食が多く発生している。

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

【B】腐食の発生は少ない。

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

【C】腐食の発生は極めて少ない、または全くない。

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

【X】無回答。

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

「現在の損傷状況」に関するアンケート結果より集計の一例を示す。回答数とその比率が表-3のよう
に得られたとする。現在の損傷状況に関するカテゴリAの回答比率 P_A が0.533であるなら、メンバシップ関数を α カット²¹⁾すると図-4に示すようなクリスプ集合 $[0.730, 1.000]$ が得られる。これは「カテゴリA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。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とする。

表-4に示すように、カテゴリB, C, Xに対しても同様の処理を行い、次式により真理値 t を集計する。

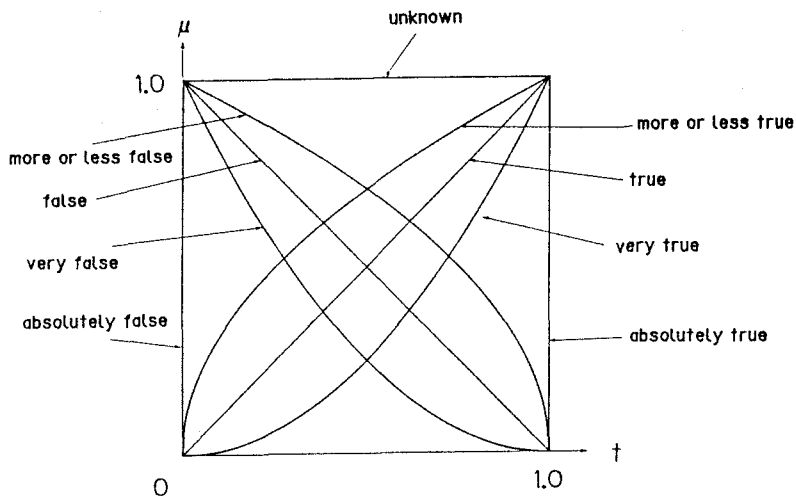


図-2 ファジィ真理値のメンバシップ関数¹⁹⁾

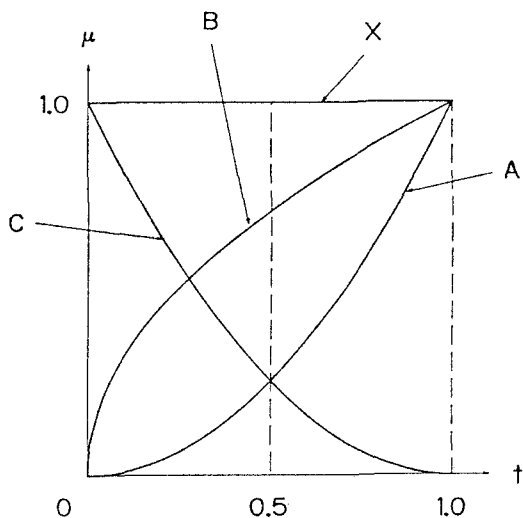


図-3 各カテゴリに対するファジィ真理値のメンバシップ関数【ケース I】

$$t = \sum_{i=A, B, C, X} P_i t_i \quad (2)$$

カテゴリ1～4, またはイ～ニの場合も同様に集計を行うことができる。

(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(1.b)の代わりに次式を定義する。

【B】腐食の発生は少ない。

$$\begin{aligned} \mu &= 2t \quad (0.0 \leq t \leq 0.5) \\ \mu &= 2(1-t) \quad (0.5 \leq t \leq 1.0) \end{aligned} \quad (3)$$

したがって, 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。

(3) ケースⅢ

カテゴリBの回答に対する第3のメンバシップ関数として, 式(1.b)の代わりに次式を考えることもできる。

【B】腐食の発生は少ない。

$$\mu = 1 - t^2 \quad (0.0 \leq t \leq 1.0) \quad (4)$$

したがって, 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-6のようになる。

5. 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-5に示す。表-5の上段は回答数であり, 下段は求められた真理値である。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, 「損傷の重要度」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。

求め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。損傷の発生する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重要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「損傷の重要度」に関する真理値の相乗平均として得られる真理値を求めた。そして, 何らかの損傷が生じることを重視する立場から, ある部材・部位における各損傷の種類に対する真理値のうち, 最大値を採用する。

表-3 各カテゴリの回答者数と回答比率
(主桁/支間部/下フランジ)

記号	項目	回答数	比率
A	腐食が多く発生している。	8	0.533
B	腐食の発生は少ない。	5	0.333
C	腐食の発生は極めてすくない, または全くない。	1	0.067
X	無回答。	1	0.067
計		15	1.000

表-4 真理値の計算結果【ケースⅠ】

記号	比率 ①	α -レベル集合	代表値 ②	比率×代表値 ③=①×②
A	0.533	(0.730, 1.000]	0.865	0.461
B	0.333	(0.111, 1.000]	0.556	0.185
C	0.067	[0.000, 0.741)	0.371	0.025
X	0.067	[0.000, 1.000]	0.500	0.034
計	1.000	———	———	0.705

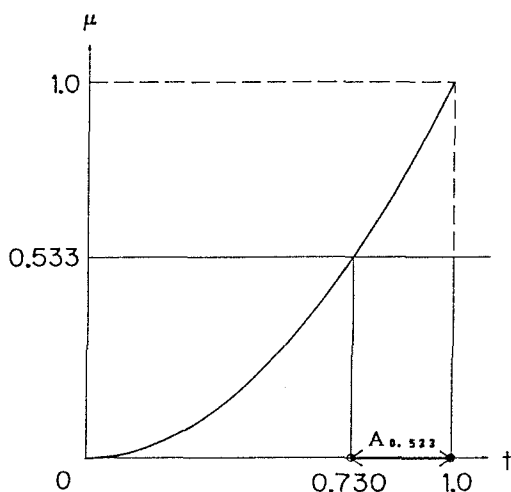


図-4 メンバシップ関数の α -カット【ケースⅠ】

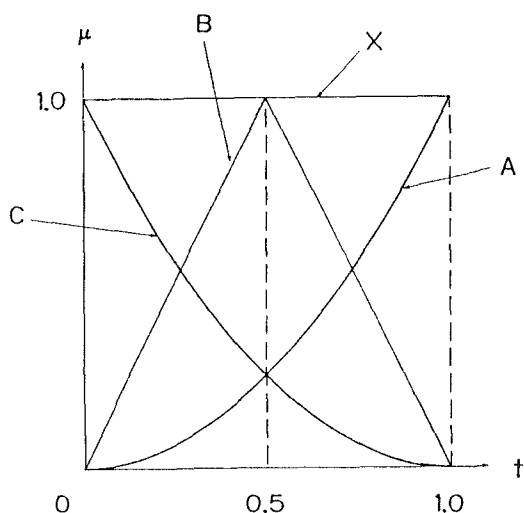


図-5 各カテゴリに対するファジィ真理値のメンバシップ関数【ケースⅡ】

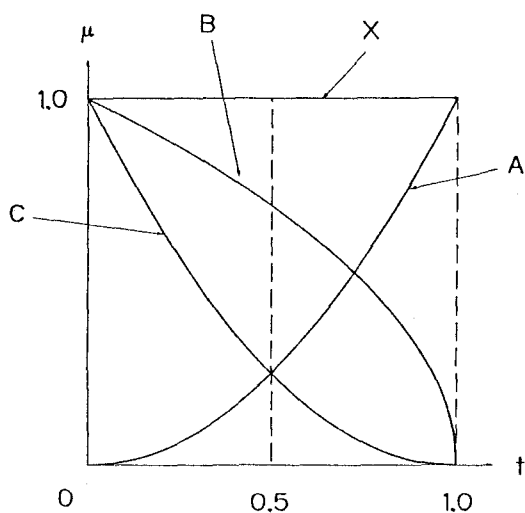


図-6 各カテゴリに対するファジィ真理値のメンバシップ関数【ケースⅢ】

ケースⅠの集計結果を基にソートし、62箇所の着目位置における上位10箇所を示すと、表-6のようになる。同様に、ケースⅢの集計結果を基にソートした結果は表-7のようになる。対傾構や横桁の主桁取付部における垂直補剛材上端とウェブとの溶接部（着目位置；B-b-②，C-b-①，C-b-②）が、表-6，7ともに上位にランクされている。この損傷構造は横分配作用による疲労亀裂の発生しやすい構造として紹介されており¹⁴⁾，アンケートの結果からの確かな知識が得られていることがわかる。

また、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ができる。ケースⅠは「少なくとも腐食が発生する可能性を重視する解釈」，ケースⅢは、「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。ケースⅡは「ケースⅠ，Ⅲの中間をとる解釈」と考えられる。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が、定期的実施される日常点検業務においては、ケースⅢを利用するのが適当で、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、ケースⅠを利用するのが適当と考えられる。

次に、知識ベースシステムへの適用を考える。得られた真理値は、知識ベースに記述される知識の重みづけの方法として採用することができる。一般に知識の重みづけは、確信度を用いて行われることが多い。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が、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。本手法を用いれば、多数の専門家の意見を集約した重み

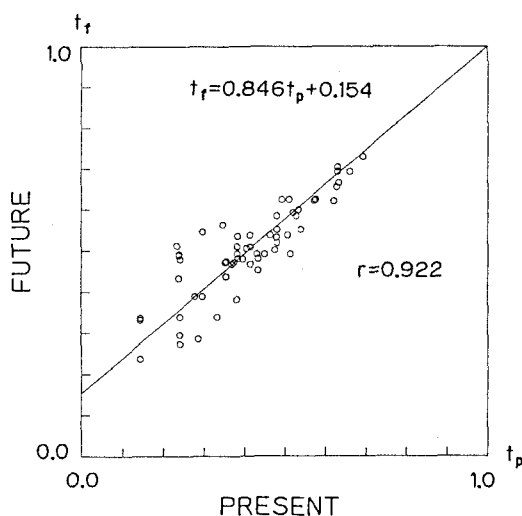


図-7 亀裂に関する現在の損傷状況と将来の損傷発生予想との相関【ケースⅡ】

表-5 アンケート回答数とファジィ真理値による集計結果
(プレートガーダー橋/現在の損傷状況/ケースI)

対象 ケース 種別	部材 着目位置	プレートガーダー橋 (I)-1 現在の損傷状況 部材・部位	損傷の種類														
			イ 腐食	ロ きれ つ		ハ 破 断		ニ 変 形		ホ ゆる み							
A 上 桁	a 支間部	① 下フランジ	8	5	1	1	0	1	12	2	1	1	7	6	1	1	
			0.705		0.143		0.142		0.433								
		② 下フランジ板継ぎ溶接部	8	3	1	2	2	0	4	10	1	0	1	13	1	1	
			0.674		0.237		0.097										
		③ ウェブ	5	5	1	4	1	1	3	10	1	1	2	11	1	1	
			0.546		0.240		0.196		0.552		0.10		5	0	1		
		④ ウェブ板継ぎ溶接部	4	5	1	4	2	0	3	10	2	0	2	13	0	1	
			0.519		0.232		0.098		0.286		0.5		9	1	1		
		⑤ 下フランジ-ウェブ溶接部	6	5	1	2	2	0	4	10	1	0	3	11	1	1	
			0.621		0.237		0.190										
		⑥ 上フランジ-ウェブ溶接部	4	7	1	2	2	1	6	8	0	1	4	9	1	1	
	0.595		0.346		0.286												
⑦ 垂直補剛材下端部	6	5	1	2	2	2	3	9	1	0	3	11	1	1			
	0.621		0.296		0.190												
⑧ カバープレート端部 側面溶接部	6	4	1	3	2	0	4	10	1	0	2	12	1	1			
	0.591		0.237		0.143												
⑨ 上フランジ	4	6	1	4	1	0	2	12	1	0	1	13	1	1			
	0.532		0.143		0.097		0.190										
⑩ 上フランジ板継ぎ溶接部	4	6	1	3	2	0	2	12	1	0	1	13	1	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	1	2	2	2	5	7	1	1	6	7	1	1			
	0.645		0.383		0.381		0.392		6		6	3	0				
b 接合部 c 床版部 d 桁端部	b 接合部	① H. T. B. , リベット	7	5	1	2	1	4	8	2	1	5	9	1	0	1	
			0.654		0.620		0.696		0.381		6		6	3	0		
		① 床版と上フランジ接合部	7	7	1	1	0	2	7	1	6	0	1	1	1	1	
			0.702				0.449										
		① 桁端下フランジ	11	3	1	0	1	1	6	7	1	1	4	9	1	1	
			0.818		0.381		0.286		0.458								
		② 端垂直補剛材下端の溶接部	11	2	1	0	2	3	5	7	0	0	4	10	1	1	
			0.815		0.404		0.237										
		③ ウェブ-下フランジ溶接部	9	4	1	0	2	3	4	7	1	1	2	11	1	1	
			0.742		0.395		0.196										
		④ ウェブ	7	7	1	0	1	1	3	10	1	0	2	12	1	1	
	0.710		0.240		0.143		0.520										

対象 ケース 種別		プレートガーダー橋 (I)-2 ケースA		損傷の種類												
現在の損傷状況 部 材 ・ 部 位		ヘ 脱 落		ト 接 合 不 良		チ 漏 水 滲 水		リ 異 常 音		ヌ 異 常 振 動						
部 材	着目位置															
A 上 桁	a 支間部	①	下フランジ							0	2	1	1	2		
		②	下フランジ板継ぎ溶接部								0.187					
		③	ウェブ								0	4	9	1	2	
		④	ウェブ板継ぎ溶接部								0.277					
		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	1	0	2	8	4	1				
	c 床版部	①	床版と上フランジ接合部						3	9	3	0	6	7	2	0
	d 桁端部	①	桁端下フランジ								7	5	2	1		
		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			

A | B | C | X
真理値

A : 現在, 損傷が多く発生している。

B : 現在, 損傷の発生は少ない。

C : 現在, 損傷の発生は極めて少ない, または全くない。

X : 無回答。

表-6 「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の最大値によるソーティング)

部 材	番 号	損傷の種類 部材・部位	損傷の種類										最大値
			イ 腐食	ロ きれつ	ハ 破断	ニ 変形	ホ ゆるみ	ヘ 脱落	ト 接合不良	チ 漏水・ 滲水	リ 異常音	ヌ 異常 振動	
A	a	3 ウェブ	0.614 0.563 0.501	0.658 0.622 0.574	0.554 0.546 0.529	0.755 0.498 0.275						0.508 0.432 0.348	0.755 0.622 0.574
A	c	1 床版と上フランジ接合部	0.653 0.603 0.539		0.650 0.626 0.591				0.710 0.557 0.399	0.734 0.618 0.490	0.667 0.515 0.339		0.734 0.626 0.591
B	b	2 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.522 0.503 0.474	0.731 0.675 0.611	0.675 0.660 0.635							0.403 0.391 0.370	0.731 0.675 0.635
B	b	3 垂直補剛材上端スカーラップ	0.522 0.503 0.474	0.723 0.647 0.565	0.629 0.594 0.550							0.398 0.383 0.358	0.723 0.647 0.565
A	d	8 ソールプレートと上巻の取付ボルト	0.721 0.628 0.523	0.547 0.506 0.453	0.565 0.546 0.516	0.529 0.498 0.433	0.611 0.538 0.453	0.607 0.552 0.486	0.573 0.506 0.426				0.721 0.628 0.523
A	b	1 H. T. B. , リベット	0.632 0.567 0.490	0.627 0.573 0.506	0.719 0.652 0.575	0.505 0.428 0.343	0.681 0.611 0.530	0.699 0.619 0.530	0.634 0.507 0.382				0.719 0.652 0.575
B	b	1 垂直補剛材上端溶接部	0.522 0.503 0.474	0.718 0.640 0.555	0.662 0.620 0.568							0.403 0.391 0.370	0.718 0.640 0.568
A	e	3 切り欠き隅角部のフランジ-ウェブ溶接部	0.593 0.614 0.531	0.715 0.708 0.694	0.695 0.692 0.685								0.715 0.708 0.694
C	b	2 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.547 0.519 0.480	0.713 0.673 0.624	0.642 0.623 0.591							0.442 0.419 0.387	0.713 0.673 0.636
C	b	1 垂直補剛材上端溶接部	0.547 0.519 0.480	0.713 0.673 0.624	0.653 0.619 0.573							0.428 0.413 0.387	0.713 0.673 0.624

上段：ケースⅠによる真理値 中段：ケースⅡによる真理値 下段：ケースⅢによる真理値

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Ⅲの最大値によるソーティング)

部 材	番 号	損傷の種類 部材・部位	損傷の種類										最大値
			イ 腐食	ロ きれつ	ハ 破断	ニ 変形	ホ ゆるみ	ヘ 脱落	ト 接合不良	チ 漏水・ 滲水	リ 異常音	ヌ 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	0.593 0.614 0.531	0.715 0.708 0.694	0.695 0.692 0.685								0.715 0.708 0.694
A	e	2 切り欠き隅角部のウェブ	0.581 0.571 0.553	0.671 0.662 0.647	0.613 0.612 0.607	0.527 0.479 0.422							0.671 0.662 0.647
C	b	4 上フランジとウェブの溶接部	0.547 0.519 0.480	0.674 0.654 0.622	0.666 0.656 0.636							0.442 0.419 0.387	0.674 0.656 0.636
B	b	2 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.522 0.503 0.474	0.731 0.675 0.611	0.675 0.660 0.635							0.403 0.391 0.370	0.731 0.675 0.635
C	b	2 垂直補剛材上端のウェブとの溶接部	0.547 0.519 0.480	0.713 0.673 0.624	0.642 0.623 0.591							0.442 0.419 0.387	0.713 0.673 0.624
C	b	1 垂直補剛材上端溶接部	0.547 0.519 0.480	0.713 0.673 0.624	0.653 0.619 0.573							0.428 0.413 0.387	0.713 0.673 0.624
B	b	4 上フランジとウェブの溶接部	0.526 0.515 0.495	0.666 0.637 0.596	0.653 0.639 0.615							0.417 0.397 0.369	0.666 0.639 0.615
A	e	1 切り欠き隅角部フランジ	0.594 0.583 0.561	0.623 0.619 0.607	0.566 0.562 0.553	0.533 0.446 0.350							0.623 0.619 0.607
A	d	1 桁端下フランジ	0.660 0.638 0.604	0.534 0.511 0.475	0.518 0.503 0.476	0.497 0.447 0.395				0.618 0.534 0.439			0.660 0.638 0.604
A	d	2 桁垂直補剛材下端の溶接部	0.670 0.628 0.595	0.592 0.541 0.478	0.518 0.489 0.447								0.670 0.638 0.595

上段：ケースⅠによる真理値 中段：ケースⅡによる真理値 下段：ケースⅢによる真理値

づけが可能になる。著者らは、鋼橋の疲労損傷に関して、因果ネットワークを用いた知識ベース¹⁷⁾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。この真理値を用いて、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。

さらに、「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。「亀裂」に対する真理値について相関係数を求めると、ケースⅠ、Ⅱ、Ⅲとも0.85以上の高い値となった。ケースⅡについて、回帰分析結果もあわせて図-7に示す。これは「現在の損傷状況」が明確であれば、かなりの精度で「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。この結果から、橋梁の余寿命推定といった分野への適用も考えられる。

6. あとがき

本研究においては、側高速道路技術センターの実施したアンケート調査結果に対して、ファジィ真理値を適用した。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といえる。そして、得られた真理値の利用法について論じた。

多大な労力を費やして貴重なアンケートを実施された側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、データの計算および図表作成に、関西大学工学部生北岸秀一君の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

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) 阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における土木構造物補修事例集，阪神後続道路公団保全施設部，1982.7.
- 4) 西川和宏：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.
- 5) 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.
- 6) 西川和宏：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.
- 7) 阿部英彦・谷口紀久・阿部充：鋼鉄道橋における疲労問題と補強，橋梁と基礎，Vol.17，No.8，pp.24-29，1983.8.
- 8) 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.
- 9) 手塚茂樹・池田良典：鋼Ⅰ型支点切欠き部の補修，橋梁と基礎，Vol.17，No.8，pp.56-64，1983.8.
- 10) 今井宏典・山崎隆生・藤野勘滋・水元義久：鋼構造物の変状と補修，橋梁と基礎，Vol.17，No.8，pp.65-69，1983.8.
- 11) 西川和宏：プレートガーダー橋の疲労損傷事例，道路，pp.58-63，1985.7.
- 12) 阿部英彦・阿部充・谷口紀久：鋼鉄道橋の疲労変状—垂直補剛材下端—，構造工学論文集，土木学会，Vol.32A，pp.41-48，1986.3.
- 13) 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.
- 14) 三木千壽・坂野昌弘・舘石和雄・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.
- 15) 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.977-990，1989.3.
- 16) 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，1989.10.
- 17) 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.
- 18) 側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.
- 19) 水本雅晴：ファジィ論理とファジィ推論，数理科学，No.284，1987.2.
- 20) 水本雅晴：最近のfuzzy集合論，数理科学，No.191，pp.15-20，1979.5.
- 21) 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.