

橋梁診断エキスパートシステムにおける 知識の更新手法

A Method of Inductive Machine Learning in Knowledge Base for Bridge Rating Expert System

宮本文穂*

森川英典**

益成一郎***

古川正典****

By Ayaho MIYAMOTO, Hidenori MORIKAWA, Ichiro MASUNARI and Masanori FURUKAWA

Machine learning has been a goal of AI reserchers since the beginning of AI. The aim of this paper is to discuss a method of machine learning in knowledge base including subjective information related to bridge rating for Bridge Rating Expert System. In this system, a concept of fuzzy set theory was adopted to deal with subjective information. We defined that there are essentially two major forms of machine learning in knowledge base, that is, increasing their knowledge(knowledge acquisition) and improving their skills(knowledge refinement). In this paper, two methods of knowledge refinement based on inductive learning are briefly discussed. One deals with the membership functions transplanted to the system as expert knowledge. The other deals with the effectiveness function which consists of some specific values. Moreover, these methods have been verified to be effective for this system as a result of having input some examples.

1. はじめに

知識工学の具体的な応用分野の一つであるエキスパートシステムは、1980年代から学界や産業界でいろいろな開発努力が盛んに進められるようになって既に7～8年の歳月が経っている。この間に非常に多くのエキスパートシステムが開発されており¹⁾、一部は実用的なシステムとしての運用も始まっている。しかし、現在までに開発されたエキスパートシステムの大部分はまだ試作品(プロトタイプ)の域を脱していると言ひ難く、しかも知識を自動的に更新・蓄積していくということに関しては概念、技法、用語などが十分に定着していない現状にある²⁾³⁾。更に、構築されたエキスパートシステムの実問題への適用性については未だ見通しが明らかではない部分の方が多いと考える。

従来より、本研究室において開発している「コンクリート橋診断エキスパートシステム」は、主観的あいまいさの取扱い手法としてファジ集合論を適用したこと、また、システムによる診断対象橋梁の余寿命の推定を可能にしたこと等によりかなり実用化に向けていゝが高められてきている。しかしながら、蓄積された知識は必ずしも十分であるとは言えない面を有するため、今後は知識ベースの保守及び質の向上という観点から、特に知識の更新という事に主眼をおき研究を進めていく必要があると考える。そこで、本研究では、まず「知識の更新」という概念の分類を試み、これらに対する定義付けを行った。そして、数種の入力パターンに対するシステムの診断結果を比較することにより、問題点を抽出し、その原因となっている箇所の更新を合理的に実行していく手法についての検討を行ったものである。

* 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)

** 工修，神戸大学助手，工学部土木工学科 (同上)

*** 工修，清水建設(株)，土木本部 (〒104 東京都中央区2-16-1)

**** 神戸大学大学院，工 学 研 究 科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

2. 知識の更新の定義

2.1 エキスパートシステムにおける知識更新の現状

現在、実用的エキスパートシステムの基本に従ったシステムに関してみると、殆どのシステムは知識の更新については手動で行うようになっている²⁾。ここで、「手動」とは、システムの出力結果に矛盾が生じた場合等に、知識エンジニアが専門家の知識をもとにルールを追加あるいは修正して試行錯誤することにより、知識ベースを更新していくことを意味している。今後は、経験が蓄積されるにしたがってシステムが専門家と同様のプロセスで、システム自身が学習し、自律的に知識を更新できるようになること、すなわち知識の自動更新機能を有することが望まれるが、現在の段階では「知識の更新」という言葉の定義は明確にされておらず、その概念さえ十分に定着していない状況にあるといえる。

一方、1980年代に入って、アメリカを中心に、コネクション、PDP(Parallel Distributed Processing)、ニューラルネットワーク情報処理等の名前のもとに、人間の脳の構造をヒントとした神経回路網状のネットワーク・メカニズムによる情報処理の研究がさかんに行われるようになった。これらの研究が注目に値する所以は、ネットワークが学習能力(自己組織能力)を持つことにある⁴⁾。現在はまだ基礎研究の段階であるが、将来的には、エキスパートシステムにおける知識の更新手法として応用できる可能性を十分秘めていると考えられている。

2.2 専門家とシステムの診断過程の比較

システムの「知識の更新」について検討するに当たって、まず、人間(専門家)の知識の更新方法について理解を深めることが重要であると考えられる。そこで、本節では、専門家の診断過程とシステムの診断過程をコンクリート橋を例にとって比較してみることとする。コンクリート橋の診断を行う場合、専門家は、主桁や床版のどの箇所にどのような性状(状態)でどの程度のひびわれが生じているかという事がわかれば、もしその他の情報がなくても、これまでの知識、経験に照らし合わせて、あいまいではあるが直感的にそれぞれの健全度の評価を何らかの形で行うことが可能である。これに対してシステムは、専門家の診断過程に内在する主観的あいまいさをファジィ集合論における帰属度関数等を用いて処理出来るものの、ひびわれに関するデータの他にも多くのデータの入力が必要とされ、しかも、それらの一部が不明の場合には出力結果に支障をきたし、あるいは全く推論が出来ない事態に至る。さらに、現在の知識にない条件が診断途中に与えられた時、専門家は深い知識といわれるものを動員して柔軟に対処することができるが、システムでは診断不能になってしまう。これは、図1に示すようにシステムの問題解決能力は設定領域の境界で急に無力になるが、専門家の場合には破線のように高い専門領域になってもなだらかに問題解決能力が落ちるものと考えられるためである⁵⁾。また、専門家であれば様々な経験を積んでいくうちに自ら新しいルールを発見したり、いままで知っていたルールをよりいっそう効率良く変換していくことが可能であるが、システムにはこれを行うことが出来ない。例えば知識の獲得方法では、専門家は文献を読んだり他の人からアドバイスをもらったりすることによって現在の知識に統合して新しい概念(ルール)をつくり出すことが出来るが、システムは現在のところ知識エンジニアによって直接システムの知識ベース内にデータあるいはルールを入力するしか方法はない(手動による知識の更新)。

以上のように考えると、専門家において特徴的な事は、直感に基づく知識及び深い知識を持っている事であり、逆に、システムにおいて特徴的な事は、規準に基づく知識等の浅い知識しか持っていない事であると言える⁶⁾。

直感に基づく知識は、問題解決に際して極めて

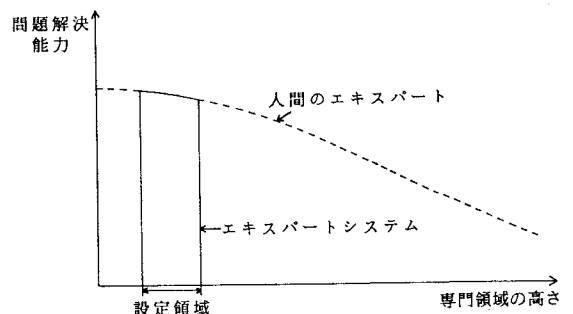


図1 専門領域の高さ及び問題解決能力の観点からみた専門家とシステムとの相違

効率が良いが、定式化するのは非常に困難である。それだけにこのような知識をうまく定式化して知識ベースに蓄積することが出来れば、システムの高度化にすぐに役立てることが出来る。ただし、深い知識を伴わない場合、条件の変化に対応しきれなくなる事が考えられる。したがって、主に、直感に基づく知識を対象にして「知識の更新」について検討する事が理想的だといえる。

2.3 知識の更新に関する定義

ここで、「知識の更新」という概念を、大きく分けて「知識の獲得」と「知識の洗練」の二つに分類されるものとし、それぞれを以下のように定義した（図2参照）。

- ①知識の獲得(knowledge acquisition)：問題が設定された時に、今までの知識及び事実を考慮に入れたうえで新しい知識の定式化を行うこと。
- ②知識の洗練(knowledge refinement)：獲得した知識を用いて知識ベースを構築し、それを基にシステムを運用していくが、その時に生じる知識の矛盾性、冗長性等をなくし、正解に近づけるように知識の確からしさを向上させること。

図2は、上述2種類に分類した「知識の更新」の概念を模式的に示したものである。すなわち、外部からある刺激(例えば橋梁診断を行うこと等、いわゆる問題の設定)が与えられた時、まず始めに今までに蓄積されている知識の中からその問題を解決するために必要となる専門的な知識や一般的な知識等を取り出し、これと文献など外部から入ってくる情報(事実)を取りまとめ、整理することによって問題に対するぼんやりとしたイメージ(概念)を形成する。このイメージを煮つめてさらに集約していくことによってある規則性を発見し、その規則性を定式化することが可能となり、これを基にして問題解決のためのある手順が出来上がる(ルールの生成)。ここまでが上述した「知識の獲得」であると定義する。

これらのルールを新たに獲得した知識として頭の中(知識ベースの中)に蓄積していくが、ただ漠然と蓄積するのではなく、きちんと整理され、またこれらをどのような状況に応じて用いればよいか、ルールを実行するにあたってのある制約されるべき条件(拘束条件)も付け加えられ、蓄積されていく。こうして出来た一連の手順を用いて、今度は実際に与えられた問題を解決していくが、どうしても現在の手順やルールでは矛盾が生じてくる場合がある。このような時は、いったん今まで構築してきた知識ベース、拘束条件などを見直し、問題点がどこにあるかを検討し、改善していく。そして、改善後のルールを新しい知識として蓄積していく。このプロセスが「知識の洗練」に当たると定義する。しかし、なお問題が解決できない場合には、文献等から更に新たな情報を取得するなどして、再び概念をまとめ、ルールを作り直すことが必要となる。すなわち「知識の獲得」の領域に戻っていくことになる。

このように「知識の獲得」は、まだはっきりと固まっていない概念をある程度固まった知識にする(定式化)ことを意味し、また「知識の洗練」はある程度固まった知識を状

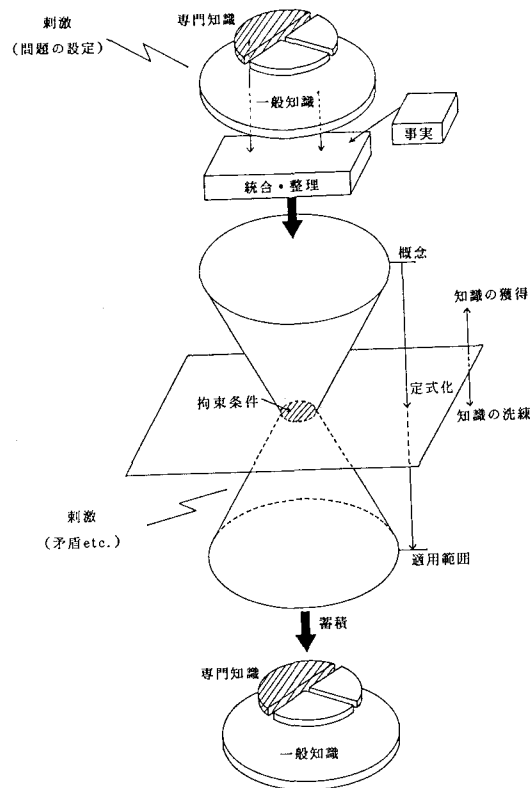


図2 「知識の更新」の模式図

況に応じて適用していく内に、より一層効果的で充実した知識へと磨きををかけていくことだということが出来る。

3. 知識の更新に関する手法

3.1 「橋梁診断エキスパートシステム」における知識の更新

表1 初期入力条件 (EXAMPLE 1～6)

橋 梁 名	EXAMPLE	架設箇所	(田園地区)
橋 長	43.9 m	—	(一般道路)
幅 員	7.3 m	—	—
主桁本数	4	拡 幅	さ れ た
主桁スパン	14.6 m	勾 配	小 さ い
床版スパン	1.5 m	信 号	な し
床 版 厚	37 cm	路面ひびわれ	な し
橋 齢	1	路面の平坦性	殆ど平坦
形 式	単 純 橋	交 通 量	少 な い
断 面	T 型	大 型 車	通行しない
断面寸法	大 き い	振 動	小 さ い
支 承	単純支持	高 欄	大 き い
不等沈下	な し	横 桁	あ る
示 方 書	昭和53年	排 水 管	あ る
等 級	1 等 級	ポップアウト	な し

「橋梁診断エキスパートシステム」におけるシステムの推論過程⁷⁾に関しては、まず、橋梁諸元、環境条件、交通量及び目視点検程度の情報等から、診断プロセスの下位goalに、専門家の知識としてシステムに移植した帰属度関数 (π 関数パラメータ) が決定される。これをDempsterの結合則を基に上位sub goalへと結合していく。そして上位のsub goalである耐荷性、耐久性の項目に結合する前に、影響度と信頼度という2つの特性値を用いて一種の重み付けを行ない、橋梁の耐用性診断結果の出力を行っている。この診断システムは、2.3節で述べた「知識の更新」の内、「知識の獲得」まではほぼ終了していると考えられ、今後は一層システムの質を向上させるために「知識の洗練」を行う必要があると考えられる。

上述の事柄を考慮に入れ、まず、診断システムに様々な例題を入力し、診断過程及び出力結果を検討することによって、本システムに生じる問題点及び矛盾点の原因となっている箇所をピックアップする事とした。入力するデータとして(EXAMPLE 1)から(EXAMPLE 7)までの7通りに変化させたものを入力した。表1は、(EXAMPLE 1)から(EXAMPLE 6)についての初期入力データを、また、表2は(EXAMPLE 7)についての初期入力データを示したものである。ここで、(EX-

表2 初期入力条件 (EXAMPLE 7)

橋 梁 名	EXAMPLE	架設箇所	(寒冷地区)
橋 長	43.9 m	(幹線道路)	(工場地区)
幅 員	7.3 m	—	(海岸地区)
主桁本数	4	拡 幅	な し
主桁スパン	14.6 m	勾 配	大 き い
床版スパン	1.5 m	信 号	あ る
床 版 厚	37 cm	路面ひびわれ	あ る
橋 齢	100年	路面の平坦性	凸凹している
形 式	単 純 橋	交 通 量	非常に多い
断 面	T 型	大 型 車	多 い
断面寸法	小 さ い	振 動	大 き い
支 承	単純支持	高 欄	小 さ い
不等沈下	かなり大きい	横 桁	な し
示 方 書	大正8年	排 水 管	な し
等 級	1 等 級	ポップアウト	かなり発生

表3 入力した7例のデータの概要

入力データ名	初期条件	入力の概要
EXAMPLE 1	良	最も健全な橋梁として床版の「最も悪い床版の損傷」・「床版中央のひびわれ」について、ひびわれは殆どなく、ひびわれ幅も0.01mmとしてある。主桁については「曲げひびわれ」を最小(床版と同様にひびわれ幅0.01mm)に入力してある。
EXAMPLE 2	良	最も健全度の低い橋梁として床版、主桁に関して全て最悪の状態にしてある(ひびわれ幅1.0mm)。
EXAMPLE 3	良	床版について「最も悪い床版の損傷」・「床版中央のひびわれ」の2つを最悪の状態にし、主桁については「曲げひびわれ」を最悪にしてある(ひびわれ幅1.0mm)。
EXAMPLE 4	良	床版について「最も悪い床版の損傷」・「支承のひびわれ」を最悪の状態とし、主桁については「せん断ひびわれ」を最悪の状態にしてある(ひびわれ幅1.0mm)。
EXAMPLE 5	良	床版について「床版中央のひびわれ」を最悪の状態にし、主桁は「腐食ひびわれ」を最悪にしてある(ひびわれ幅1.0mm)。
EXAMPLE 6	良	床版について「支承のひびわれ」を最悪の状態にし、主桁は「付着ひびわれ」を最悪にしてある(ひびわれ幅1.0mm)。
EXAMPLE 7	悪	EXAMPLE 2と同様に最も健全度の低い橋梁として床版、主桁に関してすべて最悪の状態にしてある(ひびわれ幅1.0mm)。

AMPLE 1)から(EXAMPLE 6)については、橋齢や大型車交通量等に対して最も良好な初期入力データを与え、(EXAMPLE 7)については比較的悪い初期入力データを与えている。また、橋梁の損傷に関するデータについては、(EXAMPLE 1)は最も健全度が高くなるように、(EXAMPLE 2)及び(EXAMPLE 7)は最も健全度が低くなるように、そして、(EXAMPLE 3)から(EXAMPLE 6)については床版及び主桁のひびわれに関するデータを変えてそれぞれ入力した。表3はこれらの入力データの概要を、また表4(a)~(d)は、本システムの出力した、初期入力条件を同一とし、その後のシステムからの質問に対する回答を種々に変えた(表3参照)(EXAMPLE 1)から(EXAMPLE 6)までの出力結果の内、一例として(EXAMPLE 1)~(EXAMPLE 4)までをまとめて示したものである。表4から、一例として主桁耐荷性診断結果に関する検討の結果として挙げられる問題点としては、①橋梁の損傷に関する入力データ全体を最も悪く入力した(EXAMPLE 2)は、入力データの一部にしか損傷を与えていない(EXAMPLE 3~6)の出力結果より健全側に評価されている。②(EXAMPLE 3)は、橋梁損傷の内、曲げひびわれのみを最悪に入力し、(EXAMPLE 4)はせん断ひびわれのみを最悪に入力したものであるが、実際の橋梁での主桁耐荷性に関しては、前者のひびわれより後者的の方が危険側に評価される必要があると考えられるにもかかわらず、(EXAMPLE 4)の方が(EXAMPLE 3)よりも少し健全側に評価されている、等がある。このような診断システムに生じる問題点を検討した結果を基に、以下にその原因となっている箇所についてまとめている。

①各sub goalでの帰属度関数の結合の影響
：各sub goalでの帰属度関数は、下位goalの幾つかの帰属度関数をDempsterの結合則を用いて結合していく事により決定される。そして、上位sub goal(耐荷性・耐久性)でのみ各sub goalの診断結果に及ぼす影響を考慮に入れるために信頼度・影響度の2つの特性値を用いてsub goalのいわゆる重み付けを行っている。しかし、上位sub goalでのみ重み付けを

表4 (a) (EXAMPLE 1)を入力した推論結果
(最も健全度を良好とした例)

判定項目	平均健全度	DANGER	SLIGHTLY DANGER	MODERATE	SLIGHTLY SAFE	SAFE	FUZZINESS
床版	設計	76.1	0.0	0.0	0.194	0.235	0.382
	施工	50.0	0.139	0.241	0.241	0.139	1.0
	路面状態	88.4	0.0	0.0	0.003	0.464	0.072
	供用状態	91.5	0.0	0.0	0.0	0.329	0.109
	最悪の床版の損傷	94.0	0.0	0.0	0.198	0.802	0.030
	ひびわれ						
	支保付近ひびわれ						
	床版中央ひびわれ	58.8	0.238	0.158	0.013	0.304	0.441
	床版の全体的損傷	87.1	0.167	0.142	0.084	0.293	0.335
	床版耐荷性	76.3	0.007	0.079	0.254	0.293	0.367
主桁	床版耐久性	86.5	0.0	0.0	0.024	0.492	0.484
	床版耐荷性	89.6	0.0	0.0	0.015	0.387	0.598
	設計	80.1	0.0	0.027	0.554	0.377	0.236
	施工	50.0	0.139	0.241	0.241	0.139	1.0
主桁	供用状態	77.3	0.0	0.0	0.172	0.587	0.241
	曲げひびわれ	85.0	0.0	0.0	0.057	0.480	0.463
	せん断ひびわれ						
	腐食ひびわれ						
	付着ひびわれ						
	主桁の全体的損傷	85.0	0.0	0.0	0.057	0.496	0.447
	主桁耐荷性	68.2	0.039	0.230	0.131	0.292	0.308
	主桁耐久性	79.0	0.0	0.0	0.086	0.682	0.231
	主桁耐荷性	83.4	0.0	0.0	0.016	0.645	0.339
	主桁耐荷性						

表4 (b) (EXAMPLE 2)を入力した推論結果
(最も健全度を悪くした例)

判定項目	平均健全度	DANGER	SLIGHTLY DANGER	MODERATE	SLIGHTLY SAFE	SAFE	FUZZINESS
床版	設計	76.1	0.0	0.0	0.194	0.571	0.235
	施工	94.6	0.0	0.0	0.0	0.180	0.820
	路面状態	88.4	0.0	0.0	0.003	0.464	0.532
	供用状態	66.2	0.0	0.116	0.387	0.269	0.228
	最悪の床版の損傷	39.4	0.191	0.473	0.138	0.038	0.161
	ひびわれ						
	支保付近ひびわれ	39.1	0.193	0.468	0.145	0.037	0.157
	床版中央ひびわれ	36.8	0.199	0.467	0.138	0.037	0.158
	床版の全体的損傷	42.3	0.139	0.503	0.143	0.041	0.173
	床版耐荷性	39.0	0.197	0.396	0.161	0.055	0.190
主桁	床版耐久性	52.3	0.132	0.297	0.189	0.161	0.221
	床版耐荷性	51.3	0.151	0.323	0.096	0.250	0.180
	床版耐荷性	48.2	0.144	0.372	0.068	0.191	0.225
	設計	60.1	0.0	0.027	0.554	0.377	0.042
主桁	施工	94.6	0.0	0.0	0.0	0.180	0.820
	供用状態	77.3	0.0	0.0	0.172	0.587	0.241
	曲げひびわれ	42.3	0.266	0.426	0.0	0.059	0.249
	せん断ひびわれ	40.0	0.301	0.405	0.0	0.056	0.237
	腐食ひびわれ	39.3	0.269	0.448	0.018	0.051	0.216
	付着ひびわれ	40.3	0.305	0.397	0.0	0.057	0.241
	主桁の全体的損傷	42.3	0.283	0.313	0.104	0.048	0.247
	主桁耐荷性	58.4	0.134	0.253	0.115	0.175	0.323
	主桁耐久性	70.2	0.113	0.036	0.085	0.480	0.285
	主桁耐荷性	72.3	0.162	0.024	0.013	0.410	0.391

行うだけでなく、「ひびわれ」等の項目が含まれる下位sub goalでの結合の際にも、橋梁の診断結果に及ぼす影響を考慮に入れ、何等かの重み付けが必要となると考える。

② π 関数パラメタ：これは専門家に対するアンケート調査によって定量的に得られるデータを、システム内の知識として知識ベース内にa、b、cというパラメタ(3.2節参照)を用いることで、帰属度関数として表現するものである。しかし、多数のアンケート調査項目に基づいて決定されるパラメタa、b、cの値の中には、専門家の誤解や認識不足によって誤差の入ったものが含まれている可能性もある。これらの値は知識として移植がおこなわれた後は、人間が手を加えない限りシステム内で自動的に変更されることはない。

③ 影響度：影響度は、耐荷性、耐久性の評価を行う際に、各sub goalの状態を表す帰属度関数を橋梁全体の状態を表す帰属度関数に写像するための関数であり、sub goalの種類に応じてそれぞれ3種類(1.影響が小さい、2.影響は中程度である、3.影響が大きい)のうちどれかを選択するよう設定されている。このようにしてそれぞれのsub goalの橋梁の状態推定に与える影響の程度に応じた重みを付けることになっている。しかし、例えば主桁に関する「施工」と「ひびわれ」のsub goalのように、(3.影響が大きい)をとるような項目であっても、それぞれの項目が実際の橋梁の状態に与える影響の度合は微妙に異なっていると考えられる。このため、各sub goalに影響度の特性値を与える場合には、上述のような3種類の特性値の内、同じものをとるsub goalであっても、それぞれ微妙に特性値が異なるようにした方が適切であると考えられる。

本研究では、以上に挙げた問題点の解決法として帰属度関数及び影響度の2つに注目した知識の更新手法を提案する。

3.2 帰属度関数に関する手法

3.2.1 π 関数パラメタの更新

アンケート調査によって収集した専門家の知識は、 π 関数及びS関数((1),(2)式)を用いて帰属度

表4 (c) (EXAMPLE 3)を入力した推論結果
(曲げひびわれの損傷を卓越させた例)

判定項目	平均健全度	DANGER	SLIGHTLY DANGER	MODERATE	SLIGHTLY SAFE	SAFE	FUZZINESS
床	設計	78.1	0.0	0.0	0.194	0.571	0.235
	施工	94.6	0.0	0.0	0.0	0.180	0.820
	路面状態	88.4	0.0	0.0	0.003	0.484	0.532
	供用状態	66.2	0.0	0.116	0.387	0.269	0.228
	床版中央ひびわれ	66.2	0.0	0.116	0.387	0.269	0.228
版	最悪の床版の損傷	39.4	0.191	0.473	0.138	0.038	0.181
	支持部近辺ひびわれ	42.3	0.139	0.503	0.143	0.041	0.173
	床版中央ひびわれ	42.3	0.139	0.503	0.143	0.041	0.173
	床版の全体的損傷	43.0	0.142	0.376	0.212	0.089	0.182
	床版耐久性	51.3	0.151	0.323	0.096	0.250	0.190
主	床版耐久性	50.4	0.122	0.373	0.074	0.208	0.226
	設計	60.1	0.0	0.027	0.554	0.377	0.042
	施工	94.6	0.0	0.0	0.0	0.180	0.820
	供用状態	77.3	0.0	0.0	0.172	0.587	0.241
	曲げひびわれ	42.3	0.286	0.426	0.0	0.059	0.249
桁	せん断ひびわれ	42.3	0.233	0.408	0.0	0.055	0.303
	腐食ひびわれ	53.4	0.127	0.357	0.095	0.146	0.275
	付着ひびわれ	58.9	0.126	0.246	0.060	0.338	0.233
	主桁の全体的損傷	42.3	0.233	0.408	0.0	0.055	0.303
	主桁耐久性	57.7	0.120	0.306	0.008	0.282	0.305

表4 (d) (EXAMPLE 4)を入力した推論結果
(せん断ひびわれの損傷を卓越させた例)

判定項目	平均健全度	DANGER	SLIGHTLY DANGER	MODERATE	SLIGHTLY SAFE	SAFE	FUZZINESS
床	設計	78.1	0.0	0.0	0.194	0.571	0.235
	施工	94.6	0.0	0.0	0.0	0.180	0.820
	路面状態	88.4	0.0	0.0	0.003	0.484	0.532
	供用状態	66.2	0.0	0.116	0.387	0.269	0.228
	床版中央ひびわれ	66.2	0.0	0.116	0.387	0.269	0.228
版	最悪の床版の損傷	39.4	0.191	0.473	0.138	0.038	0.181
	支持部近辺ひびわれ	38.8	0.199	0.467	0.138	0.037	0.158
	床版中央ひびわれ	38.8	0.199	0.467	0.138	0.037	0.158
	床版の全体的損傷	40.8	0.211	0.341	0.154	0.101	0.194
	床版耐久性	51.3	0.151	0.323	0.096	0.250	0.190
主	床版耐久性	50.1	0.159	0.343	0.067	0.198	0.234
	設計	60.1	0.0	0.027	0.554	0.377	0.042
	施工	94.6	0.0	0.0	0.0	0.180	0.820
	供用状態	77.3	0.0	0.0	0.172	0.587	0.241
	曲げひびわれ	40.0	0.301	0.406	0.0	0.058	0.237
桁	せん断ひびわれ	40.0	0.301	0.406	0.0	0.058	0.237
	腐食ひびわれ	50.3	0.420	0.042	0.0	0.158	0.380
	付着ひびわれ	56.0	0.174	0.222	0.108	0.191	0.304
	主桁の全体的損傷	50.3	0.420	0.042	0.0	0.158	0.380
	主桁耐久性	68.2	0.233	0.015	0.0	0.382	0.370

関数として表現されている。また、図3は、 π 関数パラメータを模式的に表現したものである。ここで、 c は帰属度関数のピーク位置を表し、 a, b はピークから左右への知識のあいまいさのばらつきの程度を表したものである。

$$\pi(u; a, b, c) = \begin{cases} S(u; c-a, c-a/2, c) & (u \leq x) \\ 1 - S(u; c, c+b/2, c+b) & (u > x) \end{cases} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、

$$S(u; x, y, z) = \begin{cases} 0 & (u \leq x) \\ 2 \cdot \left(\frac{u-x}{z-x} \right)^2 & (x < u \leq y) \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{u-z}{z-x} \right)^2 & (y < u \leq z) \\ 1 & (z < u) \end{cases} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 c の値を中心にして左側及び右側へのばらつきは、専門家の持っている知識がどの程度あいまいであるかを示す一つの指標であり、その範囲が広いほどあいまいさが増大していくことになる。これは、「橋梁診断エキスパートシステム」だけに限ったものではなく、人間の専門家（エキスパート）であっても、あいまいさの大きな知識を基にして橋梁診断を行った場合には診断された結果はあまり信用することが出来ないことになる。

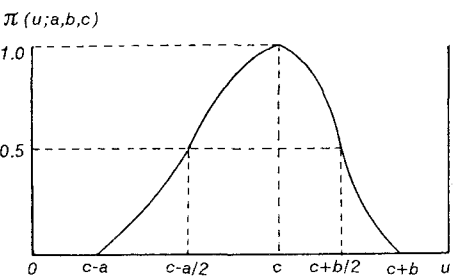


図3 π 関数パラメータの模式図

しかし、人間（専門家）の場合には、実橋現場非破壊・破壊試験などを繰返し体験している内に、更に専門的な経験・知識を積んでいき、今までは考慮に入れることが出来なかった異なった観点からの項目についての新たな知識を獲得することも可能となる。また、実橋試験等から得られた客観的診断結果が、自分の知識による評価と異なる場合には、その知識を診断結果に近づけるように修正を加えていくはずである。更に、このような知識が再び他の実橋試験の診断結果と比較される場合に、この2つが適合していれば、その知識に対してある確信を持つことが出来るようになり、今まで有していた診断結果に関するあいまいさが徐々に減少してくる。そして次のステップに橋梁診断を行う際には、今までよりも更に正確な診断を行えるようになる。つまり人間（専門家）の場合、まず始めに今までの知識を実橋試験などの診断結果と合致するように近づけ、その後様々な橋梁に対して何度もその知識が実橋試験の判定結果と適合する場合には、今までばらつきのあったものがある一定の範囲内に収まるようになるものと考えられる。

以上のことは、本システム内に蓄積されている帰属度関数のパラメータの更新によって実行することが可能であると考えられる。すなわち、本システムの出力結果と比較できる何らかの客観的な指標を考慮に入れることが出来る場合には、図4 (a) のように、まず、 π 関数パラメータのピーク位置 c を左右に α だけ平行移動することによって正しい評価に近づけようとし、その後繰返しシステムを試行して、パラメータを移動した事で指標として与えられたものと評価値が何度も一致する場合には、図4 (b) のように帰属度関数の裾野を β の分狭めることが可能となる。

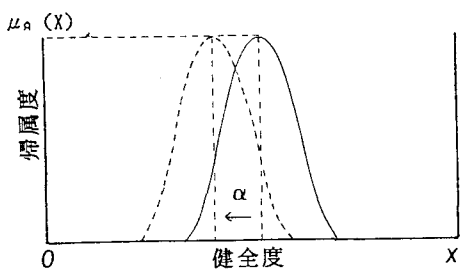


図4 (a) パラメータ更新の例
(左右に移動する方法)

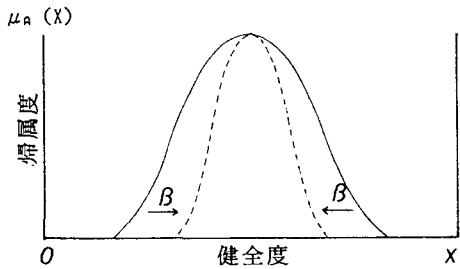


図4 (b) パラメータ更新の例
(裾野を狭める方法)

3.2.2 上位sub goalに指標が与えられた場合の更新

前節で述べたように、ある客観的な指標を与えることで知識を更新していく手法としては、診断プロセスの下位goalにあたる π 関数パラメータ a 、 b 、 c の数値を変更していくものを挙げた。これは、知識を洗練するという点から見ると最も好ましい手法の一つであると考えられる。しかし、客観的な指標が与えられる項目は下位goalだけでは限らず、それらの上に位置するsub goalで与えられる可能性もある。そこで、指標を考慮に入れるべき項目が、帰属度関数を結合した後の上位sub goalである場合には、その下位goalにあたる π 関数パラメータを修正していく方法を以下に示す。

①平行移動するための方法：下位goal“A”及び“B”の結合後の帰属度関数 $\mu_{AB}(X)$ と客観的な指標とを比較した場合、その評価値（ピーク位置）について両者に α だけ隔たりがあったと仮定する（図5参照）。この時、 $\mu_{AB}(X)$ は、隔たりのあった α の量だけ指標の評価した方向に平行移動しなければならない。この時、結合前の下位goal“A”、“B”それぞれの帰属度関数を $\mu_A(X)$ 、 $\mu_B(X)$ とすれば、各々の帰属度関数を α の分だけ $\mu_{AB}(X)$ と同じ方向に平行移動させる。この様にして得られた

$\mu'_A(X)$ 、 $\mu'_B(X)$ を結合すると、 $\mu_{AB}(X)$ が α の分移動した結果として得られる帰属度関数 $\mu'_{AB}(X)$ に一致する。

②裾野を狭めるための方法：仮に、上位のsub goalの帰属度関数 $\mu_{AB}(x)$ の裾野を β の分だけ狭めなければならない場合には、下位goalのそれぞれの帰属度関数 $\mu_A(x)$ 、 $\mu_B(x)$ の裾野もまた β だけ狭めることで評価に対するあいまい量を減少することが出来る（図6参照）。

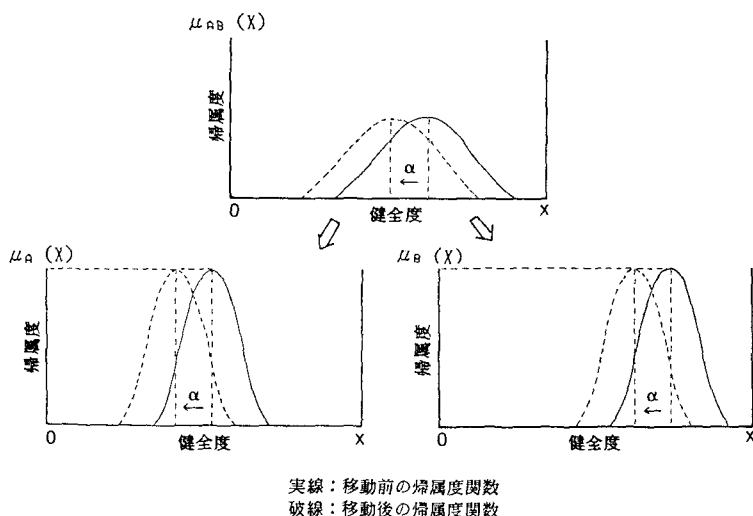


図5 平行移動による更新手法

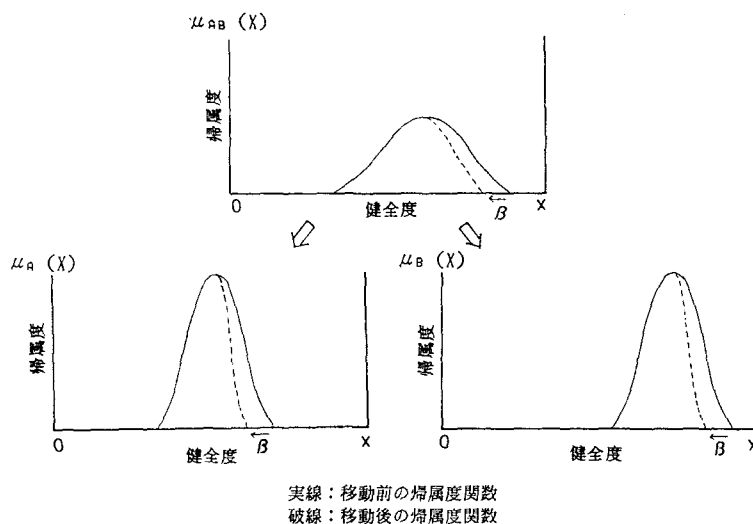


図6 裾野を狭める事による更新手法

3.3 影響度に関する手法

3.3.1 現行の影響度

現在の診断システムでは影響度を3種類の特性値として以下のように設定し、各sub goalの種類に応じてこれらを与

えるようになっている。

$$1: \text{Low Influence} \quad (y=100-(100-x)^2/100) \quad \cdots\cdots(3)$$

$$2: \text{Midium Influence} \quad (y=x) \quad \cdots\cdots(4)$$

$$3: \text{High Influence} \quad (y=x^2/100) \quad \cdots\cdots(5)$$

しかし、例えば主桁の「設計」と「せん断ひびわれ」のsub goalの橋梁の状態に与える影響の程度はどちらもHigh Influence(影響度3; 図7参照)と考えられ、対応する関数を取るように設定されているが、それぞれの項目が橋梁の状態に与える影響の度合は更に微妙に異なっていると考えたほうが適当であると考えられる。このように3種類の関数の内、同じものをとるsub goalであっても、その項目ごとに関数は微妙に異なるはずである。この事を考慮に入れて、以下に影響度の変更手法について述べる。

3.3.2 影響度の更新手法

現診断システムでは、影響度1と影響度3(図7参照)の特性値はそれぞれ2次曲線として表現されている。例えば、影響度3をとる項目で写像後の帰属度関数と与えられた指標とを比較した結果、評価値の出力が客観的指標に比べてまだ健全側にある状況が生じたとする。この時、影響度の曲線は更に影響を増すために、図7の曲線3'のようにかなりカーブのきついものに変更されなければならない。また、その逆の場合には、影響度は曲線3''のように影響を減少するように変更しなければならない。このことは影響度1の曲線についても同様のことがいえる。このようにして変更するための曲線の式は影響度1、3について次式のように双曲線で与えるようにすれば簡単に扱い易いと考えられる。

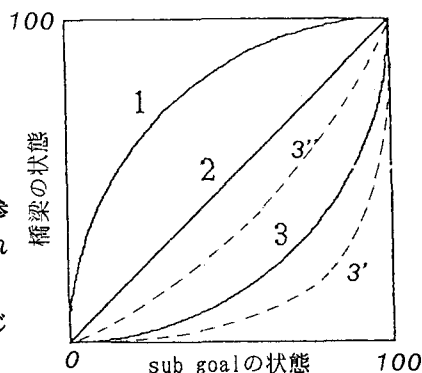


図7 影響度の模式図

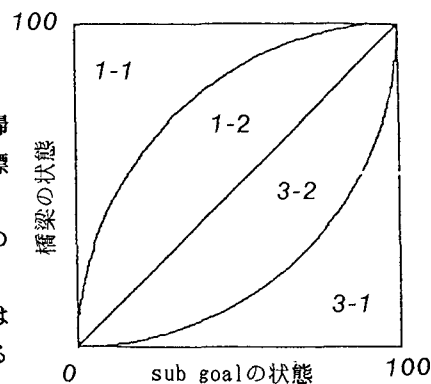


図8 影響度の持つ領域

$$1: y = \frac{-b}{x+\phi} + (100+\phi), \quad b = \phi * (100+\phi) \quad \cdots\cdots(6)$$

$$3: y = \frac{-b}{x-(100+\phi)} - \phi, \quad b = \phi * (100+\phi) \quad \cdots\cdots(7)$$

なお、この式では、 ϕ の値が小さいほど弧の大きい双曲線になり、大きいほど弧の小さい双曲線へと変化していく。

次に、あるsub goalにおいて、与えられた客観的指標とシステムの出力した評価値とを比較した場合に、客観的指標の方がシステムによる評価値の出力より健全側にある場合には、影響度の特性値を良好な方向にもっていく必要がある。このために、客観的指標とシステムによる評価値がどの程度離れているかその比率を考慮に入れながら、図8に示したように影響度1の関数の場合には $\phi=50$ を基準に、(1-1)の領域に入るようにし、システムの出力結果に矛盾が生じないものとなるように ϕ の数値を決定していく必要がある。また、影響度3の場合にも同様に、 $\phi=50$ を基準に、(3-2)の領域に入り、出力結果に矛盾が生じないものとなるように ϕ の数値を決定していく必要がある。このようにして新たな影響度を獲得するものとする。また、評価値の方が客観的指標よりも健全側にある場合には、上述と逆の作業を行うことで影響度を変更していくことになる。このようにして変更した各sub goalについての影響度は引き続いてシステムを運用する際にも、同様の方法で変更を積み重ねていき、最も好ましい(合理的な)関数へと更新していくことが出来ることになる。

なお、影響度2の関数についても、出力結果に矛盾が生じないよう式(6)及び(7)の内どちらかをを用いて上述の変更を行っていけば良い。

4. システムへの適用

4.1 客観的指標の設定

3.2及び3.3節で述べたような手法は、全てある客観的な指標と比較することでシステム出力の最適化を行おうとするものであり、これらを知識の更新として本システムに組み込むためには新たに客観的な指標を設定する必要性が出てくる。以下、コンクリート橋において客観的指標として考えられるものをピックアップしてみる。

(1)目視試験：目視により床版及び主桁のひびわれ状況、遊離石灰の有無及び錆汁の有無などが調査される。この場合の客観的な指標として与えられるものは、ひびわれ密度が考えられる。これは、床版の使用性や耐荷力にはほぼ対応していると考えられる⁸⁾。

(2)静的載荷試験：既知の重量の試験車を各主桁ごとに最も不利となるように載荷して、各主桁の4等分点でそれぞれのたわみを測定するものである。この場合の客観的指標としては、たわみの分布から、System Identification法を適用して求まる主桁の剛性⁹⁾とすることが考えられる。

(3)重錘落下振動試験：重量300kgfの重錘を、落下させた場合の重錘の入力加速度及び主桁の4等分各点の応答加速度を測定するものである。これから得られる橋梁の振動特性に基づいた、損傷位置及び損傷程度などが客観的指標となる⁹⁾。

(4)主桁破壊試験：RC床版で縁切りを行って各主桁を独立させ、単純支持のRC-T桁として中央載荷を行い、破壊に至らせることにより、主桁の耐荷力及び破壊形式を明らかにするものである。これによって現有耐荷力、曲げ破壊及びせん断破壊に対する破壊安全率を求めることができ、これが客観的指標となる⁹⁾。

(5)主桁構成材料試験：各主桁構成材料の強度及びコンクリートの耐久性を判定するために、主桁破壊試験終了後、コンクリートコア抜き、鉄筋採取を行い、コアに関しては圧縮強度試験及び中性化深さ測定を、また鉄筋に関しては引張り試験を行う。これによって、コンクリートの材料劣化の程度やその耐久性を知ることができ、また鉄筋が腐食によってどの程度強度低下しているかを知ることができ、これが客観的指標となる⁹⁾。

以上のような実橋試験等から得られる各段階での評価結果及び最終的な橋梁の耐用性診断結果の蓄積は、診断システムの知識更新に必要な指標として客観性があり、信頼性の高いものとして採用できる。このため、診断対象橋梁に対する非破壊及び破壊試験から得られる客観的指標と診断システムによる評価結果を、goal及び各sub goalで比較することが可能となれば、システムの知識更新に対してかなり有効なものとなり得ることになると考えられる。

4.2 客観的指標との比較

実橋試験などから得られた橋梁の状態(健全度)を表す客観的な指標と本システムの診断した評価値とを比較した場合に、評価値が客観的な指標と適合しない場合には、まず、帰属度関数のピーク位置を基準にして移動するものとする。この時、下位goalの帰属度関数と客観的な指標を比較する場合には、ピーク位置は一つだけであるので問題はないが、上位sub goalでは、帰属度関数を結合したものであるため、結合する帰属度関数の数に応じてピーク位置は幾つも存在するという場合が生じる。このため、どのピークを基準にして帰属度関数を移動させるのが最も好ましいかを考慮に入れる必要がある。

このため、各goal及び各sub goalにおいて客観的指標と比較する基準としては平均健全度及び比較対象となる上位sub goalの帰属度関数の基になっている下位goalのピーク位置が集中している箇所(図9参照)等が考えられる。この内、前者は、診断対象とされる帰属度関数の重心 x_g を求めたものである。これは、帰属度関数のピーク位置にばらつきがあった場

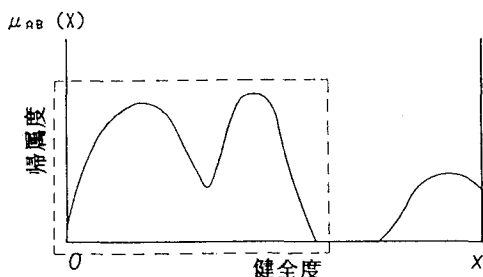


図9 ピーク位置の集中する箇所(破線部)

合でもそれら全体の平均を取るために結果は評価値の中央に集中し易くなる。このため、客観的指標と比較する基準として、このような特性を有するものとするのはあまり好ましくないと考える。一方、後者は、下位goalの帰属度関数のピークがある一定の範囲に集中しているため、結合後は図9の破線部の範囲にピーク位置が集中した帰属度関数となる。これは、橋梁の状態を表現する基礎となった各goalの帰属度関数の多くのがこの範囲にあると考えられるため、最も重みを有する箇所であると考え、診断対象となるsub goalでの結合後の帰属度関数と、予め与えられた5種類の状態を表す診断用帰属度関数(図10参照)との合致度が最も大きい状態(safe, slightly safe, moderate, slightly danger, danger)の箇所を客観的指標と比較するものとした。この考え方は、帰属度関数の移動を対象とした場合のみならず、影響度を変更していく際の客観的指標と帰属度関数を比較する場合についても適用が可能である。

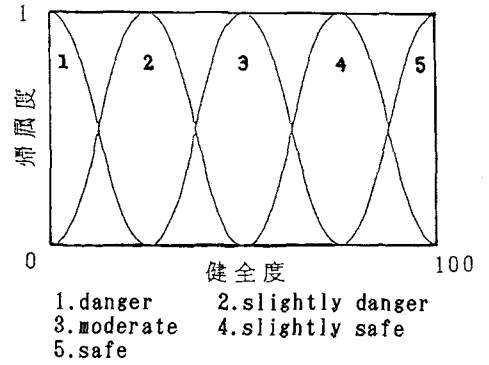


図10 診断用帰属度関数の模式図

4.3 知識更新の有効性の検証

3.で、知識の更新手法として、帰属度関数に関するものと影響度に関するものの2つの手法を提案した。ここでは、これらの手法を診断システム内に組み込んだ結果、知識の更新に関して有効性があるか否かを、実際に本システムからの出力結果の変更過程で検証することにする。

まず、帰属度関数に関する手法として、上位sub goalの内、主桁の「せん断ひびわれ」の項目について、現在の診断結果よりも平均健全度が5.0だけ低くなるように π 関数パラメータを変更する。すなわち、「せん断ひびわれ」の項目に関係する各帰属度関数のピーク位置を5.0ずつ移動してみる。これより得られた帰属度関数移動前後の診断結果を表5に比較して示す。これより、帰属度関数移動後の平均健全度は明かに5.0分健全度の低い方向に移動(知識の更新)していることがわかる。また、表5の中でGG2は、さらにその健全な方(右側)の裾野を3.0だけ狭めたものの診断結果を示したものである。その結果、帰属度関数の裾野を狭めたことで、さらにdangerを大きく支持するように知識が更新されたことが分かる。

次に、影響度に関する手法についてその有効性を検証してみる。ここでは、影響度の変更後に現在の診断結果よりも健全度が悪く評価されるように、特に主桁のひびわれに関する判定項目に対して、図7の中で1の影響度曲線を与えるsub goalについてはさらに弧の小さな曲線($\phi=100$)に、また、3の影響度曲線を与えるsub goalについては弧の大きな曲線($3': \phi=20$)になるよう影響度を変更してみる。これより得られた影響度変更前後による

表5 帰属度関数変更によるシステムの推論結果の例

	判定項目	平均健全度	DANGER	SLIGHTLY DANGER	MODERATE	SLIGHTLY SAFE	SAFE	FUZZINESS
GG0	せん断ひびわれ	17.2	0.333	0.597	0.07	0.0	0.0	0.196
GG1	せん断ひびわれ	12.2	0.413	0.583	0.0	0.0	0.0	0.164
GG2	せん断ひびわれ	12.0	0.42	0.56	0.0	0.0	0.0	0.162

GG0:帰属度関数変更前の結果 GG1:帰属度関数移動後の結果
GG2:帰属度関数の裾野を狭めた後の結果

表6 影響度変更によるシステムの推論結果の例

	判定項目	平均健全度	DANGER	SLIGHTLY DANGER	MODERATE	SLIGHTLY SAFE	SAFE	FUZZINESS
gg1	主桁耐荷性	59.4	0.134	0.253	0.115	0.175	0.323	0.373
	主桁耐久性	70.2	0.113	0.036	0.085	0.48	0.285	0.365
	主桁耐荷性	72.3	0.162	0.024	0.013	0.41	0.391	0.135
gg2	主桁耐荷性	52.5	0.191	0.23	0.097	0.148	0.273	0.444
	主桁耐久性	59.3	0.196	0.134	0.067	0.377	0.225	0.451
	主桁耐荷性	57.0	0.242	0.136	0.01	0.314	0.299	0.127

gg1:影響度変更前の結果 gg2:影響度変更後の結果

主桁耐用性（耐久性及び耐荷性）の本システムによる診断結果例を比較して示したものが表6である。ここで、影響度変更前（gg1）の「耐用性」、「耐荷性」、「耐久性」に関する推論結果の平均健全度は、それぞれ59.4、70.2、72.3であるのに対し、影響度変更後（gg2）の平均健全度は、それぞれ52.5、59.3、57.0と、全体的に低い値を示すように更新されていることがわかる。また、支持程度の大きい評価値についても同様に、全体的にdangerを大きく支持するように更新されていることがわかる。

以上のことから、 π 関数パラメータ及び影響度を変更することは、知識を更新する手法としてある程度有効であることが検証されたと考えられる。

5. 結論

本研究では、「橋梁診断エキスパートシステム」を実用化に向けて更にレベルアップする為に、「知識の更新」について検討を行った。すなわち、「知識の更新」を「知識の獲得」と「知識の洗練」に分類して、その定義付けを行い、概念、用語を確立した上で、知識の更新手法を提案した。以下に、本研究で得られた成果をまとめる。

(1)「知識の更新」について定義付けを行った事で、今まであいまいであった知識更新機能に関する概念や用語を確立することが出来た。

(2)エキスパートシステムの診断過程と専門家による診断過程とを比較する事で、システムと人間の有する知識の相違性を明確化した。

(3)橋梁診断エキスパートシステムに何種類かの特徴的なパターンを入力し、推論結果を考察する事で、現在のシステムに生じる矛盾点あるいは問題点をピックアップした。これにより、システムのどの部分の知識を更新する事が最も有効か明らかにする事が出来た。

(4)「知識の洗練」の方法として、帰属度関数及び影響度を変更する2つの手法を提案し、診断システム内に組み込んだ結果、その有効性をある程度検証することが出来た。

なお、今後の課題として、本研究では、①「知識の洗練」手法として帰属度関数及び影響度に注目したが、さらに合理的な手法の検討、②実橋試験などから得られる客観的な指標をどのgoalあるいはsub goalにおいて具体的に診断システムと対応させて更新するかについての検討、及び③「知識の更新」の内、「知識の獲得」に関するシステムの知識自動更新手法について検討すること等が挙げられる。

参考文献

- 1) Proceeding of the IABSE Colloquium on Expert System in Civil Engineering, IABSE, Bergamo, Italy, 1989.10、2) 土木学会関西支部共同研究グループ 報告書（代表者 古田 均）：橋梁構造物の総合健全性評価に関する調査研究、1990.6、3) 白石、古田他：学習機能を持った橋梁設計支援エキスパートシステムに関する研究、構造工学論文集、VOL. 36A、1990.3、4) 麻生秀樹：ニューラルネットワーク情報処理、産業図書、1988、5) 上野晴樹：知識工学入門、オーム社、1985、6) 中村秀治、寺野隆雄：土木構造物エキスパートシステム、オーム社、1987、7) 宮本、益成、西村：コンクリート橋診断エキスパートシステムの開発と実用化、第9回設計における信頼性工学シンポジウム前刷集、1989.11、8) 松井、前田：道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案、土木学会論文集、第374号/1-6、1988.10、9) 宮本、西村、堀：既存橋梁の耐用性診断とその検証法、財団法人建設工学研究所「研究報告」第29号、1987.12

(1990年10月12日受付)