

# 論文 コンクリート橋診断エキスパートシステムにおける説明機能の構築と学習過程の視覚化

宮本文穂\*1・三輪宅弘\*2・中村秀明\*3・河村 圭\*4

**要旨:** 著者らは、今後予想される橋梁維持管理業務の増大による専門技術者不足に備えて、専門技術者と同程度の劣化診断を行うことができる「橋梁診断エキスパートシステム」以下(ES)を開発してきた。

本研究では、ESの実用性の向上を図るためESに不可欠な説明機能を構築し、学習過程を視覚的に支援するユーザーインターフェース(SUI(Super-User Interface))の構築を行った。そして新しく開発したESを実橋へ適用し、専門技術者によるアンケート調査結果とESによる診断結果を比較することにより、ESの実用性を検証した。

**キーワード:** BMS, エキスパートシステム, 維持・管理, 補修・補強, 劣化診断

## 1. まえがき

現在、日本に架設されている全橋梁のうち、2010年には橋齢50年以上の老朽橋の割合が約35%に達するといわれており、そのあまりの多さのため、橋梁診断に携わる専門家の不足という事態が懸念されている。

このような背景のもと、著者らは、コンクリート橋の診断を目的とした「橋梁診断エキスパートシステム」以下(ES)の開発を行ってきた<sup>1)</sup>。このシステムは、診断に携わる専門家から知識を獲得し、橋梁の目視点検程度の情報から、専門家と同レベルな耐用性診断を1スパンごとに行うことを目的としている。既存の研究では、専門家の推論過程を診断プロセスとして階層化し、この診断プロセスに従ってファジィ変数を含むプロダクションルールの抽出を行った。そして、このプロダクションルールをもとにして、階層構造ニューラルネットで形成される推論機構の構築を行った。また、推論機構がニューラルネットで構築されていることから、学習を行うことで知識をより洗練

させることができた。しかしその反面、内部構造がブラックボックスとなっており、診断結果の出力がどのような推論経過を経て推論されたのかを提示することができなかった。また、学習前後の知識がニューロンの重みで表現されているため、どのように重みが増減したのか分からないという問題があった。

そこで、上記のような問題点を解消するために、推論内容をユーザに説明するための説明機能を構築した。さらに学習前後の知識について、視覚的に検証できる学習用インターフェース(SUI(Super-User Interface))の開発を行った。そしてこれらの機能を付加したESを実橋梁に適用することにより、各機能の実用性について検証した。なお、ESはMicrosoft社のVisual Basic Ver6.0で構築している。

## 2. 説明機能の構築および学習過程の視覚化

図-1は、著者らが開発したESの各機能をモデル化したものである。前節で説明したが、既存の

\*1 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科, 工博(正会員)

\*2 山口大学大学院理工学研究科 博士前期課程知能情報システム工学専攻, 工学士

\*3 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科, 博士(工学)(正会員)

\*4 山口大学大学院理工学研究科 博士後期課程システム工学専攻, 博士(工学)

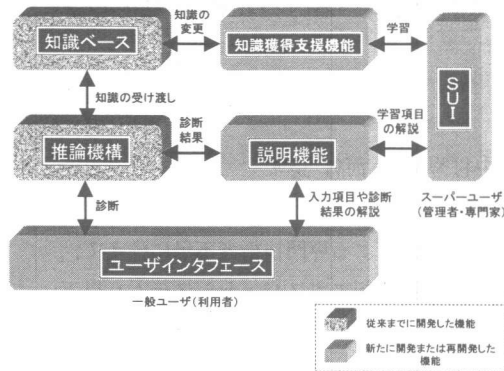


図-1 ESにおける機能構成

ESには説明機能とSUIは開発されていなかった。説明機能は、システムのブラックボックス化を防ぎ、ユーザがシステムの出力を納得して受け入れるために不可欠であるばかりでなく、知識ベースの開発者を支援するデバッグとしても極めて有用なものとなる。また、知識獲得支援機能は知識の学習を行う機能であり、SUIは知識獲得支援機能とユーザとの窓口的な役割をするインタフェースである。つまりユーザはSUIを通じて、学習時の諸設定を行うことができ、学習結果を視覚的に検証することができる。

## 2.1 説明機能の構築

システムの稼動中に、ユーザはどのようにしてそのような入力を求めるのか、あるいはなぜそのような

結果になったのか、などといった幾つかの疑問を持つかもしれない。これらの疑問を解決するための機能が説明機能である。ESの説明機能には、システムに入力する点検項目および橋梁諸元項目の意味や解釈を表示する機能(What機能)、なぜその入力が推論に必要なのかを説明する機能(Why機能)、また推論過程を詳細に説明する機能(How機能)という3種類の機能がある。

図-2にESの入力画面の例を示す。この画面は主桁診断項目の一つである『曲げひび割れ』の損傷状況を入力する画面である。下線が引かれた入力項目をクリックすれば、What機能およびWhy機能のどちらを実行できる。

### 2.1.1 What機能の構築

ユーザは、システムに入力を行う際に、各入力項目の意味や定義を正しく理解しておくことが前提となる。なぜなら、間違った解釈で入力されたデータで推論を行ってしまうと、信頼性のない誤った診断結果が出力されてしまう危険性があるからである。そこで、点検項目および橋梁諸元項目の辞書的な意味や、ESにおける入力項目の解釈を表示するWhat機能を開発した。この実行画面を図-3に示す。この例は、図-2における[遊離石灰]のWhat画面である。この例のように、[遊離石灰]などといった文字だけでは説明しきれない項目については、図や写真を同時に表示することでより詳細な解説を行う。解説文は主に参考文献[2]から

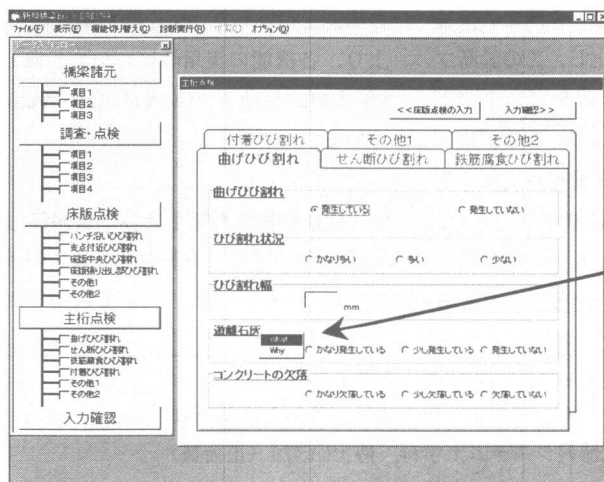


図-2 ES入力画面(例:『曲げひび割れ』)

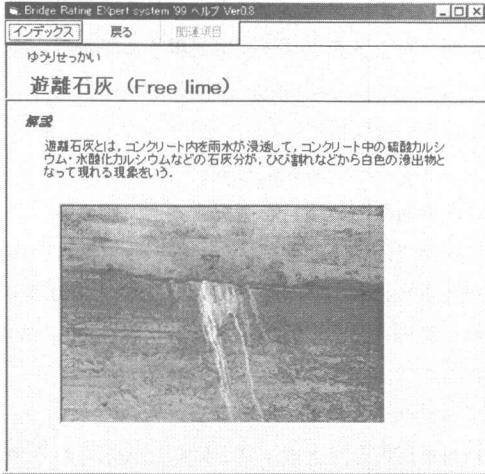


図-3 What 機能実行画面

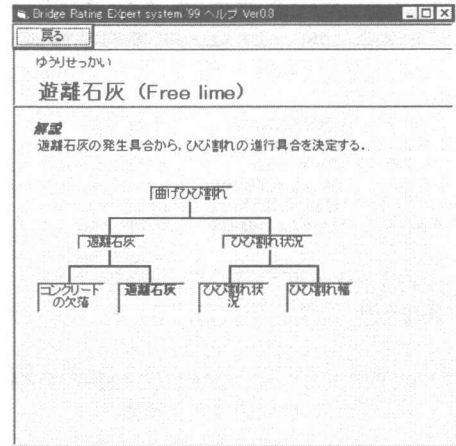


図-5 Why 機能実行画面

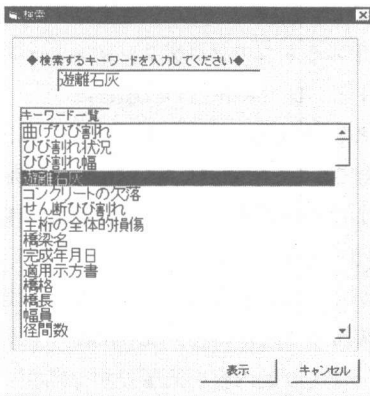


図-4 点検項目の検索画面

引用している。この What 機能により、ユーザが各入力項目の定義を容易に参照することが可能となり、入力時に誤解を招く危険性が軽減できると考えられる。さらに、表示した項目に対して関係のある項目を参照できるので、ユーザは他の項目と関連付けながらクリックした入力項目の意味を理解することができる。また図-4 に示されるような検索ツールの開発により、ES へ入力する点検項目の一覧の中からの検索が可能となっている。この検索ツールによって、What 機能は簡単な用語集としても扱える。

### 2.1.2 Why 機能の構築

ユーザがシステムに入力するとき、なぜこの入力項目が推論に必要なのか、といった疑問が生じることがある。この疑問に対して解説を行うのが

Why 機能である。ES においては、診断プロセスを表示することで解説を行っており、Why 機能実行画面を図-5 に示す。これは、入力項目「遊離石灰」と「コンクリートの欠落」から下位 Goal である「遊離石灰」が診断され、同様に、「ひび割れ状況」と「ひび割れ幅」から「ひび割れ状況」が診断されることを意味している。さらに、「遊離石灰」と「ひび割れ状況」から Sub Goal『曲げひび割れ』が診断される。このように、点検項目および橋梁諸元項目に対して、システムがどのような診断プロセスをたどるかを表示することによって、ユーザは推論手順を把握することができるとともに、同時になぜそのような入力項目が必要なのかといった疑問も解消できる。

### 2.1.3 How 機能の構築

How 機能とは、システムがどのような推論をもとにして推論結果を得たのかをユーザに説明する機能である。ES の How 機能は、次の3つの表示機能から構成されている。

- ①平均健全度
- ②前件部メンバーシップ関数
- ③プロダクションルール

推論過程についての詳しい説明は参考文献[1]に委ねるとして、以下は How 機能の画面構成について述べる。

図-6 は ES の診断結果表示画面である。この画

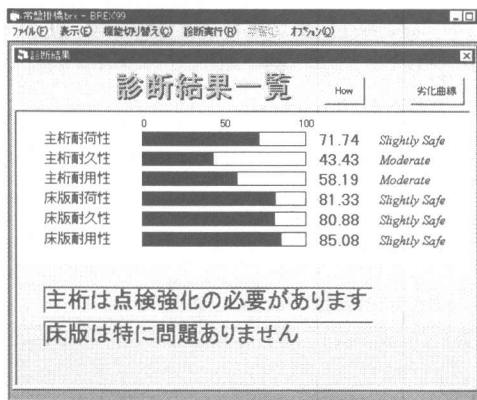


図-6 診断結果表示画面

面では、主桁と床版それぞれにおける耐荷性、耐久性、耐用性の健全度評価を表示している。画面右部に示した数値が各 Goal の平均健全度であり、現在の健全度を 100 点満点で評価している。この時、図-6 のような結果がなぜ得られたのかユーザは疑問に思うかもしれない。このような場合には、画面上部に位置する How ボタンをクリックすることで、How 機能が実行される。

図-7 は How 機能の実行画面である。以下、How 機能における 3 つの表示機能について順次説明していく。

### ①平均健全度の表示

画面左部にツリー状に表示されているのが ES の診断プロセスである。各 Sub Goal と下位 Goal の平均健全度は、項目名の右の括弧内あるいは画

面下部のステータスバーに表示される。このように診断プロセスをツリー状に表現することで、ユーザは推論過程を階層的に段階を追って視覚的にかつ体系的に判断できる。

### ②メンバーシップ関数の表示

詳細を知りたい項目を選択すると、画面右下部には推論で用いた前件部メンバーシップ関数の形状が表示される。ここで、横軸は入力値であり 0.0 が最も悪い状態、1.0 が最も良い状態を表している。

### ③プロダクションルールの表示

項目を選択したとき、②と同時に表示されるのが画面右上部のプロダクションルールである。画面のように、[遊離石灰]の平均健全度を推論するために用いる 9 つのプロダクションルールが表示されている。また Rate という項目はルールの支持率である。最も支持率の高かったルールにおいては、着色することで強調している。画面の例では、システムはルール番号 6 のルールを 91.4% 支持したということがわかる。

以上のような表示機能により、ユーザは推論過程を確認することができ、また知識ベースの開発者にとっても推論内容を把握できる有効なデバックとなる。さらには、ES 内の推論過程がブラックボックス化する危険性を軽減することができる。

## 2.2 SU1 の構築

ES における知識獲得とは、ニューラルネット

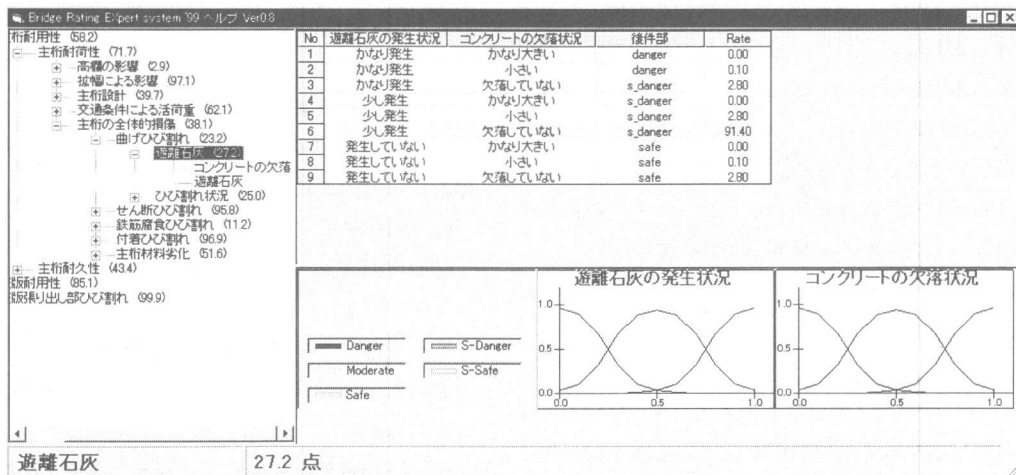


図-7 How 機能実行画面

を形成しているニューロンの重みと閾値を変化させていくことである。具体的には専門家に対するアンケートによって得られた教師データを用いて、これらのニューロンの値を変化させることで、知識ベースに格納されたプロダクションルールとその前件部メンバーシップ関数を専門家の知識に近づけていくのである。そこで、初期状態（プライヤ）で設定された知識がどのように変化したのかを検証するためのインタフェースを開発した。このインタフェースは、学習の諸設定をする機能と学習結果検証機能とに分けられ、特に、これらの機能は内部知識を直接書き換えるため、権限を持ったシステム管理者や専門家（Super-User）に対してのみにしか開放されないことから、SUI(Super-User Interface)と呼ぶこととする。

### 2.2.1 SUI の実行画面

図-9は学習を行う際の諸設定を行う画面である。画面下部において点検データと教師データの各ファイルを入力し、画面上部において学習率や学習回数を決する。また、25個のSub Goalの内、全てのSub Goalまたは、そのうちのどれか一つについて学習させるかを設定できる。これは不具合な学習をした場合、Sub Goalごとに学習設定を変更

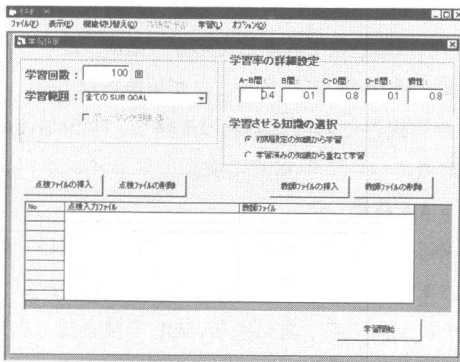


図-9 学習の諸設定画面

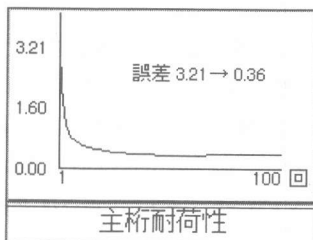


図-10 誤差推移画面の一部(『主桁耐荷性』)

して再学習することを考慮したためである。その他、初期状態（プライヤ）から学習するのか、もしくは以前学習した状態から学習するのかという選択ができる。さらに学習率を自動的に探索するアニーリングも設定可能である。

### 2.2.2 学習結果の検証

学習結果を検証するため、実際に架設されている橋梁にESを適用し、SUIが視覚的に検証しやすいかどうかを確認した。そのために、ESへ入力するための点検データと学習用データを、橋梁診断に携わっている専門家に依頼して実橋を調査してもらい、システム入力用のアンケートに答えてもらった。このアンケート結果をもとに、システムへの点検データならびに学習用データの入力を行った<sup>1)</sup>。なお、今回調査を行った橋梁スパンは山口県内に架設してあるコンクリート橋5橋9スパンである。

全標本学習法を用いて、プライヤの状態から学習を行い、SUIの学習結果検証機能により学習結果の検証を行った。なお、学習回数は100回とした。ここでは例として、Sub Goal『主桁耐荷性』の診断結果について述べる。図-10は学習結果検証画面から『主桁耐荷性』について抜粋したものである。図から読み取れるように誤差が3.21から0.36へと大幅に減少しており、学習がうまく行われていることが分かる。ここで述べる誤差とは、ニューロンの出力と教師データとの差の絶対値を学習スパン数足したものを100で割った数であるので、今回の実験では1スパンあたり平均4点の誤差がみられた。

次に、同じく『主桁耐荷性』において学習前後の前件部メンバーシップ関数の出力を示す。学習前が図-11であり、学習後が図-12である。この2つを比較すると、学習後では全ての下位GoalについてDangerを表すメンバーシップ関数が右にずれていることが分かる。このことは、ある程度損傷の少ない良好な状態を診断するときも、Dangerであるという度合いが、学習前と比べて増えていることを意味している。また、「交通条件の活荷重」においてDangerのメンバーシップ関数が最も

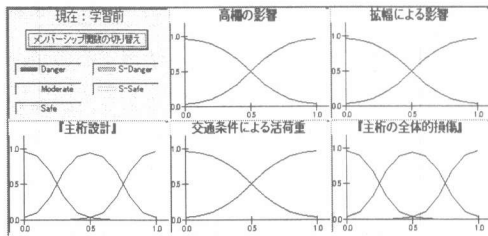


図-11 学習前のメンバーシップ関数

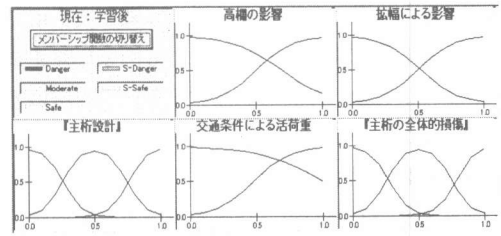


図-12 学習後のメンバーシップ関数

表-1 学習によって変化したプロダクションルール

No	高欄の影響	拡幅の影響	主桁設計	交通条件による活荷重	主桁の全体的損傷	学習前	学習後
22	safe	danger	danger	safe	danger	s_safe(75.00)	s_danger(24.78)
23	safe	danger	danger	safe	moderate	s_safe(75.00)	moderate(49.59)
28	safe	safe	moderate	safe	danger	s_safe(75.00)	s_danger(28.36)
29	safe	safe	moderate	safe	moderate	safe(100.00)	s_safe(74.92)

大きく右にずれている。このことから、「交通条件の活荷重」は『主桁耐荷性』を診断するときに、学習前と比べて Danger であるという度合いが大きく増え、専門家が「交通条件の活荷重」の健全度は『主桁耐荷性』に大きく関与していると考えたことが読み取れる。

次に、学習によって変更された『主桁耐荷性』のプロダクションルールを表-1に示す。『主桁耐荷性』において、変更されたルール（後件部が変化したルール）は36個のうち4個であった。表においても、学習後のルールは学習前と比べて低く評価されるようになったことが分かる。特に学習前のルール番号22と23において『主桁の全体的損傷』は Danger や Moderate でも、後件部命題は Slightly Safe と『主桁耐荷性』には影響しない場合であった。しかし、学習後にはルール番号22は Slightly Danger に変化し、ルール番号23は Moderate と差が現れるようになった。また、ここでは省略したが、『主桁耐荷性』以外のほかの Sub Goal においても上記のようにルールが変化した。

以上のように学習結果検証機能で学習後のルールを検証することが視覚的に容易にできるようになった。しかし、学習したスパン数が9スパンと少ないことより、学習に偏りが生ずるなど学習がうまく行われていないルールもあることも分かった。

### 3. まとめ

本研究は、ES をより実用的なものにするため、診断結果に対してユーザが納得しやすい説明機能を構築した。また、学習後の知識を視覚的に検証しやすいインタフェースを構築した。そして、このシステムを山口県下の実橋梁に適用し、SUI の検証を行った。

以下に本研究で得られた成果をまとめる。

- ① 実用的なエキスパートシステムに必要な不可欠である説明機能を構築し、入力項目の意味 (What)、入力項目の必要性 (Why)、どのような推論過程で診断したのか (How) といったユーザの疑問に答えることが可能となった。
- ② 学習過程における誤差の推移や、学習前後の知識について視覚的に検証できるインタフェースを構築した。
- ③ 本システムを山口県下の実橋梁に適用し、専門家のアンケート結果をもとに学習を行った。そして、その学習結果を SUI で検証し、SUI が視覚的に検証しやすいことを確認した。

### 参考文献

- 1) 三宅秀明, 山本秀夫, 中村秀明, 宮本文穂: 階層構造ニューラルネットワークを用いた橋梁診断エキスパートシステムの既存橋梁への適用, 第14回ファジィシンポジウム, FF2-2, pp819-822, 1998,6
- 2) 建設省土木研究所: 土木研究所資料 橋梁点検要領(案), 1988.7.