
研究展望

Review

研究展望

知識工学と土木構造物

KNOWLEDGE ENGINEERING AND CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

中村 秀治*

By Hideharu NAKAMURA

1. ま え が き

科学技術の急激な発展に伴う高度の構造解析技術確立への要求と、電算機の大形化、高速化が相まって、1950年代前半からマトリックス構造解析法が目覚ましい発展を遂げた。一方、人工知能(AI: Artificial Intelligence)の研究も1950年代までさかのぼることができるが、多くの研究が認知科学など基礎的なところで進められ、一般に役立ちそうな成果を生み出したのは1970年代に入ってからであった。数式処理、パターン認識、機械翻訳などが次々と人工知能の研究から独立する中で、エキスパートシステムも多方面からの注目を浴び、独立して新しい計算機利用技術としての立場を確立しつつあるのが今日の現状であろう。

過去30年間、構造解析技術と人工知能技術の接点を見出すとすれば、SACON (Structural Analysis Consultation: 5. 参照)の構築と、数式処理システム(MACSYMA, REDUCEなど)の応用などごくわずかである。やみくもに建設にまい進した戦後の時代から、安定成長期に入り、既設構造物の維持・管理に心を砕く時代へ、量から質の時代へ。この時代の移り変わりこそが両技術の接点を作り出しつつあると考えるのも誤りではないと思われる。

本文は、土木技術者の立場から人工知能研究と知識工学誕生の過程を概観し^{1)~6)}、特にエキスパートシステムを中心に知識工学と土木構造物(構造工学)がどのような形で結びつき得るのか、将来の展望まで含めて平易に幅広く紹介することを意図したものであるが、著者の浅

学が故に多くの記述もれの残ることをお許し頂きたい。

2. 人工知能と知識処理概論

本来、人工知能の研究は人間の知性に基づく行動がどのように行われているかを理解しようとするものであるが、この研究成果はさまざまな学問領域に影響を与えることになった。そのなかで、特に、思考能力をもつ機械の製作、制御装置の設計といった現実の課題に向けて新たに開拓された工学体系が知識工学である。エキスパートシステム(知識処理システムまたは専門家システム)は知識工学の主要な一分野であり、さまざまな分野の専門家の知識を引き出しやすい形に整理・保管しておき、実際の問題に対して検索・参照し、専門家の優れた判断を電算機で実現しようとするものである。したがって、現在のAIブームを正確にいえば、エキスパートシステムの構築ブームといえる。

人工知能、知識工学、エキスパートシステムなどの用語を以上のように確認したうえで、その発展過程、エキスパートシステムと数値解析の相違・特性について概観する。

(1) 人工知能と知識処理研究の歴史⁷⁾

人間と同じように考え、行動する機械を作ることは、20世紀より以前から試みられており、今日でも続いている人類の夢である。人工知能の研究もその一部であるが、今日の意味での人工知能の研究の起源は、フォン・ノイマン型計算機が発明される前後のチューリング、A.の研究まで遡ることができる。彼は計算機の能力が今日の電卓よりはるかに劣っていた時代に、計算機に数字以外の情報処理を行わせることの意味について考察を行っている。

* 正会員 工博(財)電力中央研究所耐震構造部主任研究員
(〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

人工知能という術語が使われ始めたのは1956年の夏にダートマス大学で行われた研究会（ダートマス会議）からであり、出席者の中には現在も第一線で活躍しているマッカーシー、J. ヤミンスキー、M. らが含まれていた。彼らの主張は、「学習その他の知能のどんな特徴も、原則的にはあらゆる面で常に正確に記述でき、機械がそれを模倣できる。」という大胆なものであった。この主張を裏付けるには次の2つの研究方向があることがわかる。第一は、計算機を用いて人間の知能の本質を明らかにするという方向であり、第二は、人間の行う知性的な行為を計算機に行わせるという方向である。以来、人工知能の研究はこの2つの方向がからみあいながら進展してきたといえる。

このようにして、LISP 言語の開発など、1960年代の始めまで人工知能研究の前途は非常に明るい状態であったが、それ以後は、人間にとって自明なごく簡単な問題しか解けないという事実に対する反動、機械翻訳システムの失敗などから、人工知能は何の役にも立たないという見方が支配的となった。

人工知能研究が再び注目されるようになったのは、実際的な問題を扱うために一般的なアプローチをあきらめて、専門家のもつ経験的知識を利用するようになってからである。これが今日のエキスパートシステムの基本的考え方である。1970年代には、エキスパートシステムの応用分野が拡大するにつれ、それに適切な工学分野の確立が望まれるようになってきた。そこで、1977年、「専門知識こそが力である。」のスローガンのもとに、ファイゲンバウム、E. A. によって提唱されたのが知識工学である。それ以後は、まず医学分野においてさまざまなエキスパートシステムが試作され、しだいに開発の重点は工学問題へと移っていくことになる。

1980年代に入り、わが国を含めて世界中で人工知能研究が大きな注目を集めるようになったきっかけは、第5世代コンピュータープロジェクトの発足である⁸⁾。その結果、今日では、プロトタイプまで含めると、エキスパートシステムの数は数千にもぼっており、すべてをフォローするのは不可能な状況に至っている。また、記号処理を高速に実行できるLISPマシンなどの知識処理専用機の開発、エキスパートシステム構築の効率化をねらったさまざまなツールの開発など、最近の進歩はめまぐるしい。

(2) 数値解析と知識処理の比較

では、従来型の数値処理を中心としたシステムと知識処理を中心としたシステムとは何が異なるであろうか。

構造解析で考えれば、従来型システムでは、まず、与えられた問題を有限要素法、差分法など適当な手法で離散化し、適当なソルバーを用いて数値解を求める。その

際、与えられた問題は離散化するという意味と、適当な数値解析アルゴリズムを用いるという意味で二重に近似されることになるが、いずれにしても、解析に必要な専門知識はアルゴリズムという形で定式化され、プログラムの形で記述して実行される。その結果、従来型システムでは、知識はすべてプログラム中に埋め込まれることになる。

それに対して、知識処理システムでは、プログラムに埋め込まれるはずの知識をできるだけプログラムの外に出して表現しようとする。そして、この表現には数値情報よりも文字・記号の情報が用いられる。このような知識を計算機で保持する場所が知識ベースである。知識を取り出した後に残ったプログラムはもはや特定の問題には依存しない制御機構、別の言葉でいえば、知識を操作するだけの仕組みだけとなる。これが推論機構である。

その結果、知識処理の手法では従来型システムとは違った意味で、与えられた問題の近似がなされることになる。たとえば、構造物の強度を例に考えれば、構造物にひびが入っているかどうかは判断の重要な指標になり得る。知識処理ではこれを、“ひびが入っていると構造強度が低下する”という形で明示的かつ定性的に記述する。このような知識では、とりあえず他の条件（ひびの細かい形状など）を無視しているという意味で、大きな近似がなされていることとなる。また、このような知識は定性的であり、問題解決に使用するにはあいまいさを含むこととなる。知識処理システムはこのようなあいまいさを含んだ知識を操作することで何らかの解を導いていく。

(3) エキスパートシステムの特長

エキスパートシステムの特長は次の4点であろう。

- a) 従来、専門家固有のものであった専門知識を、計算機上で利用することにより共有化すること。
- b) 漠然とした形で保持・記述されていた専門家の知識・思考を計算機で処理できるように明文化すること。
- c) 新しいプログラム開発手法として、柔軟なシステムの開発に役立てられること。
- d) 新しいプログラム開発手法として、開発期間を短縮できること。

前のa), b)は、エキスパートシステムの本質は知識や思考の明文化にあるという考えに基づいている。専門家はほとんど意識せずに、素人がみれば驚くような難しい問題を扱っている。これに使う知識を紙の上を書くことさえできれば、専門家の知識を共有できるようになるということだけでも大きな意義がある。

後のc), d)は、a), b)と観点が異なるが、エキスパートシステムの開発は従来型システムより生産性が高いと

いう考えに基づいている。従来型システムの開発では、仕様決定、設計、コーディング、テストランと進んでいくが、エキスパートシステムでは知識をうまく書きとめた段階でシステムを動かしてテストし、その繰り返しの中で機能を充実させていく。

3. エキスパートシステムの基本概念

(1) 記号処理言語^{9)~12)}

LISP (List Processor) はラムダ計算という計算論物理学の理論に基づいてできた記号処理言語であり、その柔軟性、記述力の高さから人工知能研究のアセンブラといわれている。LISP は人工知能研究とともに発展しつづけており、1980年以前の代表的な人工知能システムはほとんど LISP あるいはその上で作られた言語によって開発されてきた。

LISP の特徴は次の点にある。第一に、プログラムやデータの基本的な構造がリストという形式で統一的に表現され、プログラムとデータの区別がないことが挙げられる。第二に、プログラムのすべてが関数の組合せとして書かれるので、各プログラムの機能が明確になりやすい。第三に、会話的な使い勝手のよさが挙げられる。

一方、欠点としては、プログラムやデータの構造を表現するのにカッコのみを使用するため、慣れないと非常に読みにくく、プログラム内容を理解するのが難しいことが挙げられる。

PROLOG (Program in Logic) は、1970年代にフランスで開発された論理型のプログラム言語である。PROLOG は LISP と比較するとパターン照合の機能の豊富なことが特徴である。第二に、リレーショナル・データベースとの関連が強いことが挙げられる。第三は、自然言語の処理プログラムが容易に開発できることである。

(2) 知識ベースと推論機構

一般にエキスパートシステムは、専門家の経験的知識などを整理・収集して作られる知識ベースと、この知識ベースに基づいて推論処理を行う推論機構の2つの主要なコンポーネントから構成される。知識ベースと推論機構はそれぞれ従来の計算機利用技術におけるデータベースとプログラムに相当する。ただし、エキスパートシステムでは、経験則などの判断基準を、比較的理解しやすい文字・記号情報の形でそのまま柔軟に扱う。それに対して、従来の計算機利用技術では知識をいったん定量的な数値情報やプログラムに変換して、数値を中心とした処理を行う点が大きく異なる。

このため、経験の蓄積とともに変化し得る知識の追加・修正が容易であり、高度なシステムを逐次的に開発していくことができる。また、推論機構に少し工夫を加

えるだけでコンピューターが行う推論プロセスを順次表示することができるので、分析している事象に対する利用者の理解を助け、その判断を確実にすることができる。

エキスパートシステムで処理できるように、専門知識や対象領域の構造を表わす知識を整理・定式化するには特別な工夫が必要である。このための手法を総称して、知識表現手法という。代表的な知識表現手法として、プロダクション・ルール、フレームなどがしばしば使われる。

プロダクション・ルールは知識の断片を、前提-結論、条件-結果、もしくは状態-対処法という IF-THEN 形式で表現する方法である。この表現はコンピューターに不慣れた専門家にも理解しやすく、経験的な知識を記述しやすいという特徴があるために、エキスパートシステムにはよく利用される。注意すべき点は、プロダクション・ルールでは知識をすべて IF~THEN~の形式で記述するが、この形式で表現される知識の意味付けは一通りではないことである。

IF ~ THEN ~にはまず、IF MAN (X) THEN MORTAL (X) のように、論理的に前提と結論を結び付ける意味がある。第二に、初めに述べたように、状態と対処法を表わす意味もある。これは FORTRAN などのプログラム言語で表現される IF 文の意味と同じである。また、“風が吹けば桶屋が儲かる”というような記述の場合は、因果関係を表現している。したがって、エキスパートシステムでプロダクション・ルールを使って知識を表現する場合には、これらの意味の違いを十分考慮しておかないと、誤った推論処理の行われる可能性が強くなる。これは、プロダクション・ルールという表現力の高い概念を実際の問題に適用するときの難しさを示している。

(3) プロダクション・システム¹³⁾

プロダクション・ルールに基づいた知識を処理するエキスパートシステムの仕組みの1つをプロダクション・システムとよぶ。AI ツール (4. 参照) には後述する“前向き”、“後向き”の両方の推論を行えるようになっていくものが多い。また、プロダクション・システムは、LISP や PROLOG などの記号処理言語を使用すると原理的なものはごく簡単に作成することができる。ただし、これを本格的なものにしようとする、IF 部と THEN 部とを結ぶための機構を複雑化せねばならず、また、組合せの爆発にも対処しなければならなくなる。

最も基本的なプロダクション・システムは、通常、

- ① IF (前提・条件), THEN (結論・結果・対処法) の形をしたプロダクション・ルールの集合からなるルールベース
- ② 観測事実・推論途中経過を保持する作業記憶

③ 作業記憶の状態をみて適合するルールを取り出し
実行する推論機構

④ 推論で2つ以上のルールが適用可能なとき、最適
ルールを選択する競合解消

から構成される(図-1)。

推論のメカニズムは、その方向によって前向き、後ろ向き、両方向の3つに分けられる。前向き推論はIF部と作業記憶の間で照合を行い、THEN部で指示される内容に従って作業記憶の情報を書き換える方式である。一方、後向き推論は達成すべき目標が作業記憶内にあって、この目標とTHEN部の間で照合を行う。照合されて合格したルールのIF部を次の達成目標として次々に推論を繰り返す方式である。この方式は、既設構造物を診断する場合のように、現象に対する原因を絞り込んでゆく場合に適している。両方向推論は、前向き推論と後向き推論を組み合わせる方式である。たとえば、与えられたデータに基づいて前向き推論を行い、これによって得られた結論を新たな達成目標として後向き推論するものである。限定されたデータを手掛かりに、なるべく効率よく推論したいときに適している。

適用できるルールが多数存在するときの競合解消については、次のようないくつかの方式が用いられている。

- a) 重要度優先方式
- b) 詳細ルール優先方式
- c) 最近実行ルール優先方式
- d) 最近データ優先方式
- e) 並列実行方式

これらはいずれも一長一短あり、どれを採用するかは決定は各システムの性質に依存する。

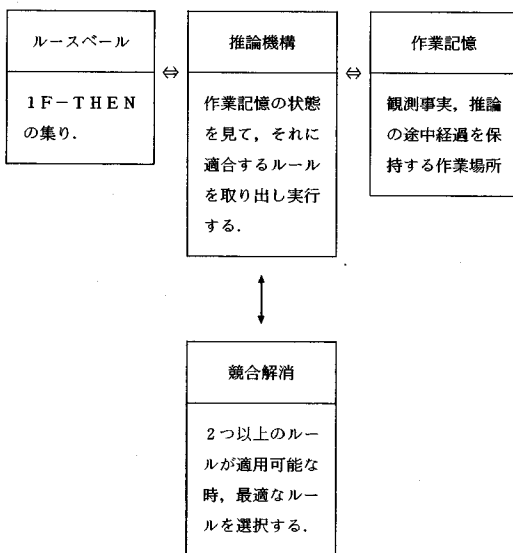


図-1 基本的なプロダクション・システムの構成

(4) フレームとブラックボード¹⁴⁾

前述のプロダクション・ルールでは、宣言的な知識をフラットに記述していたのに対し、知識処理技術というフレームは知識に構造をもたせて表現する方法である。この意味では、構造工学でいう骨組み(フレーム)構造に通ずるものがある。すなわち、フレームは、特定の対象や事象に関する情報を意味的に関連させ、しかも、個々の情報の独立性が高くなるようにまとめて蓄積するデータ構造である。

1つのフレームにはそのフレームが表現する概念を表わすフレーム名、フレームに記述すべき項目を示すスロット、スロットがもつ情報の型(属性)を示すファセット、項目値などの情報が含まれる。

1つのフレームだけを見てみるとデータベースやファイルの定義情報とあまり差は感じられないであろう。フレームによる表現の威力は、それらがいろいろな種類の概念によって結合されてはじめて発揮される。このときに特徴的なのは、上位フレームの属性や情報が、ちょうど親の性質が子供に遺伝するかのよう、下位フレームに自動的に継承されることである。

フレームのような知識表現を有効に利用するには、通常は、下位の情報だけを見るようにして、そこに何もデータが入っていないときにかぎり、上位の情報をみにいくようにすればよい。そのため、複雑な情報をコンパクトに表現でき、かつ柔軟に操作できるようになる。また、従来型のプログラムでは、主プログラムが上位にあって下位の副プログラムを制御するのにに対し、フレーム構造では下位から上位の情報が見える関係であることに注目されたい。

フレームが知識を静的に表現するのに適した方法であるのに対し、ブラックボードは推論過程で知識の変化を動的に表現するのに適した方法である。これは、知識を表現する技法というよりも、推論システムまでを含んだエキスパート・システム開発技術の1つと考えられる。つまり、知識表現手法として考えれば、ブラックボードは複数の知識源が相互に情報を交換しながら問題解決を行うための仕組みであり、推論システムとして考えれば、前述のプロダクション・システムの処理過程で使われる作業記憶を高度化して、構造化をもたせたものと考えられることができる。

ブラックボードの概念を理解するには、複数の専門家が黒板のまわりに集まって共同で作業を行う状況を想定するとよい。たとえば、船と海と空の絵からなるジグゾーパズルを3人で共同して解く場合を考えよう。このような状況では、どの担当者も互いに平等であり、協力しあって問題を解決しなければならない。各担当者は、自分の分担の仕事を進めながらも、必要に応じて他の人と共同

しなければならなくなる。たとえば、船の部分を担当した人はそれに近いピースを収集し、組み立てるとともに、空や海のピースを見出した場合にはそれを他の担当者に手渡す必要がある。ピースを組み上げる共通の作業場所のことをブラックボードという。

ブラックボードの概念をサポートしているツール、システムでは、各知識源は、通常、同種の問題を解決するための知識をプロダクション・システムの形式で保持する。そして、システム全体を制御するための情報もプロダクション・システムに含むことが多い。ただし、ブラックボードの概念は柔軟すぎるため、特に、フレームの概念とブラックボードの概念の両方をサポートするシェルにおいては、両者の使い分けが難しくなる。

(5) 不確実な情報の扱い

従来型の数値解析を主体とした計算機利用技術を用いて問題解決を図る場合、対象物をモデル化する時点で原理的にその精度、もしくは近似度が定まる。また、モデルを明確にしたうえで、その解法を定式化し、プログラムを作成して解を求める。したがって、数値解析手法を用いる場合は、プログラムにおいて不確実な情報を扱う必要性はほとんどない。

それに対して、エキスパートシステムの手法では、いわゆる“専門知識”を定式化する時点で生ずる近似を、明確に意識せずに計算機に持ち込むことになる。さらに、宣言的に記述した知識を、そのまま記号的に操作するために非常に複雑な処理が必要となる。エキスパートシステムで不確実な情報を扱う手法を導入する意義はこの2点、すなわち、

(i) 専門知識の近似

(ii) 推論処理の効率化

を容易に実現することにある。

専門家から知識の断片を収集して定式化する場合、その知識を適用するためのすべての条件を網羅することは一般に困難である。また、現在の人工知能技術の未熟さのために、一度定式化できた知識に対しても、その意味する正しい解釈や処理手順を推論機構で与えることができない場合が多い。このようなとき、計算機上に蓄積した知識の近似度を表わす不確実性の尺度を導入し、それを利用した処理を行うことで、推論処理全体として正しい解を導く可能性を増すことができるようになる。さらに、こうして導入した不確実性の尺度は、推論処理を効率化するのにも有用である。推論の途中で、確からしい候補から優先的に処理を進めるという方式を採用することで、なるべく無駄を省いて、問題解決に至る道筋を発見できるようになる。

以下に、代表的な不確実な情報の扱い方として、確実性係数、ファジイ論理、階層分析法について述べる。

a) 確実性係数¹³⁾

不確実性を扱う手法として、最もよく知られており、AI ツールの多くに採用されているのが確実性係数 (Certainty Factor) の概念である。確実性係数は有名な医療診断システム MYCIN において、“A は B を暗示する。”、“C かつ D ならば E ではなさそうだ。”などの漠然とした判断に基づく推論を表現するために考え出されたものである。このような不確実性は、従来のベイズの規則に従う確率量ではうまく表わせないものである。

確実性係数は、IF-THEN ルールの形式で整理した知識の断片に、その確からしさを表わす情報として、-1 から 1 までの値 (-1 が偽、1 が真を表わす) を付けておき、推論処理の過程で生ずるあいまいさを定量的に判断する方法である。このような確実性係数は理論的根拠において問題を残すが、簡易で扱いやすいため MYCIN 後の多くの AI ツールで採用されている。

以上の確実性係数の扱いは、理論的背景をもつものではないが、Dempster と Shafer が確率論的に検討・改良を加え、確率論との関係を明確にしている。この Dempster-Shafer 理論はファジイ集合へも拡張することができ、SPERIL (建築物の被害査定システム) の推論に用いられている。

b) ファジイ論理^{15),16)}

ファジイ論理は、最近、いくつかのエキスパートシステムで適用が試みられている。通常は、ルールに用いる用語そのものあいまいな性質を認め、その処理にファジイ論理を導入する方式が多い。

ファジイ論理は真と偽 (1 と 0) のどちらかの値をとる通常の論理学の概念を拡張した考え方である。たとえば、ファジイ論理では、“X は大きい数である”という主張を、ファジイ集合で以下のように特徴づける。

$$“X \text{ は大きい}” \Leftrightarrow \begin{cases} 0 \leq X \leq 10 & \text{なら} & 0.1 \\ 10 \leq X \leq 1000 & \text{なら} & 0.2 \\ 1000 \leq X & \text{なら} & 0.7 \end{cases}$$

0.1, 0.2, 0.7 は“X は大きい”という主張の確からしさを表わす値であり、通常の論理学で用いる 0 か 1 の値を拡張したものとなっている。あいまいな主張に 0~1 の値を与える関数をメンバーシップ関数という。ファジイ集合、ファジイ関係、ファジイ推論に関する理論的記述は、他の文献を参照されたい。

前述の確実性係数やここで述べたファジイ論理の手法は、いったん知識が整理され、計算機に格納されてしまえば、その後の推論処理にある程度の合理性を与える。ところが、各ルールに含まれるあいまいさを実際にどのように与えればよいかという問いに対しては、それこそ専門知識の専門知識たるゆえんであるということで、人工知能の理論は何も答えてくれない。

c) 階層分析法^{17)~19)}

階層分析法 (Analytic Hierarchy Process) を使用すると、専門家のもつ種々の知識の重要度に従って、容易に評価項目間のウェイト付けをすることができる。この手法は、各評価項目間の重要度の比を一対比較して得たデータをもとに、各項目のウェイトを決定するもので、多目的計画問題を解く場合にしばしば用いられている。たとえば、 S_1 , S_2 , S_3 の評価項目があったとき、その重要度を W_1 , W_2 , W_3 とする。このとき、各評価項目の重要度の比についての一対比較値 (W_1/W_2 , W_2/W_3 , W_1/W_3) を利用者 (専門家) に質問する。一対比較は、5段階評価、もしくは7段階で行うのが適切とされている。一対比較に一貫性があれば、その結果得られる重要度比の行列 (一対比較行列) と各ウェイトの間に次式が成立する。

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{W_1}{W_2} & \frac{W_1}{W_3} \\ \frac{W_2}{W_1} & 1 & \frac{W_2}{W_3} \\ \frac{W_3}{W_1} & \frac{W_3}{W_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix} = 3 \cdot \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix}$$

階層分析法はこれを利用して、一対比較行列の固有値、固有ベクトルを求めることで、各 W_i を求めるものである。上式が成立していれば、一対比較行列はランク1で、評価項目数 n に等しい固有値をもつ。そこで、実際に得られた固有値の大きさと n とを比較することで、結果の信頼度を調べることができる。これには、通常、Consistency Index $CI = (\text{固有値} - n) / (n - 1)$ 、ならびに、Consistency Ratio $CR = CI / CI^*$ が用いられる。ただし、 CI^* は全くランダムな一対比較行列から実験的に得られる CI のことである。通常、 CI , CR とも0.1以下なら整合的である (使用できる) とされている。

エキスパートシステムをうまく設計するためには、専門知識を的確に表現することが重要である。工学的な事象を対象とする場合、推論処理を行ううえで意味をもつ構造・単位は、フレームを用いると比較的容易に表現することが可能である。一方、階層分析法を適用する場合、評価すべき項目を適切に選択するために、対象をうまく階層化、構造化できるかどうかのポイントとされている。フレームで知識を表現することは、そのための枠組みを与えることにもなる。

エキスパートシステムでは、推論結果を評価するのに専門家の経験則の果たす役割が強いが、不確実な情報を扱わなければならない場合に、使われる知識の重要性を客観的に決定する適切な手段はほかにない。したがって、この目的で階層分析法を適用することは非常に有用と考えられる。

4. エキスパートシステムの構築技術

エキスパートシステムを構築するにあたっては、基本概念と同時にエキスパートシステム特有の構築技術についての知識が重要である。それらは、知識をいかに収集・整理して、記号的に記述するかという点に集約される。

(1) エキスパートシステムの構築手順

実用性の高いエキスパートシステムを構築するためには、適切な問題を選択することが重要である。そのためには、次の5つの条件のうちのいくつかを満たすことが必要であろう。

- ① 狭い分野を対象にすること。
- ② 高度の専門知識が必要な分野であること。
- ③ 記号処理が問題解決の中心となる分野であること。
- ④ 緊急度が低い分野であること。
- ⑤ 対象構造物についての専門知識が利用できること。

開発方式としては、途中でプロトタイプシステムを順次、利用者・専門家に提示しながら機能を充実させていくという段階的手探りの開発が行われる。これにより、専門家からの知識の収集・整理ならびにシステムの性能向上が図られる。

(2) 知識の収集・整理²⁰⁾

専門家から専門知識を引き出すには、知識エンジニアが専門家の問題解決プロセスを観察し、必要な情報をインタビューで入手するなどの方法がとられる。特に、アメリカではこの方式により、知識エンジニアと専門家が明確に役割を分担してシステム開発する方式が確立してきたように思われる。この方式は、欧米のように自分の意見をはっきり口に出して論理的に表現することが習慣になっている環境下、または、厳密な形で記述されたマニュアルの類がすでに存在し、それに従って作業を行うことに慣れている環境下では有用であろう。

しかし、わが国の習慣からは、この方式は必ずしも適切ではないと考えられる。それは、協調してボトムアップに問題解決に携わる、あるいは、フレームワークを厳密に定めずまま意志決定を行うといった日本型問題処理方式と合致しにくい側面を有するからである。実際のエキスパートシステム開発においては、問題解決の知識を確定するまでに数多くの議論が必要な場合が多く、専門家へのインタビューという単純な方式以外のアプローチが必要となる。

(3) 対象のモデル化

工学問題を対象としたシステムの場合、問題解決に必要な経験的ルールに加えて、たとえば構造物の構成情報のような対象物そのものの知識も備えていなければなら

ない。これには、通常、フレームなどの概念を用いてモデル化することで行われる。このようなモデルは推論処理に利用されるほか、専門家向きの利用者インターフェースとしての役割も果たす。すなわち、知識の収集、獲得、伝達を容易にするものとして利用される。

(4) 従来型システム、プログラムとの融合

先に述べたように、知識処理技術は知識を定性的もしくは記号的な情報として表現することで、従来ならば困難な問題の解決を可能にするものである。しかし、現在の技術水準では、エキスパートシステムで扱える問題は量的にも質的にも、知識を提供した専門家であれば正しく解ける段階にとどまっている。一方、従来型の数値解析システムは人手では手におえないほどの大量かつ高速な処理を可能としており、土木構造分野の問題解決に大きな威力を発揮している。したがって、土木構造分野において実用に耐えるエキスパートシステムを開発するためには、経験的な知識を中心とした手法に加えて、従来型システムのもつデータ蓄積機能、高速計算機能をうまく利用することが必要である。これによって、はじめて人手では解けないレベルの問題解決に利用できるようになる。

エキスパートシステムと結合すべき従来型システムは、数値計算プログラム、データベースシステム、利用者インターフェースプログラムの3つに分類することができる。

エキスパートシステムに結合する数値計算プログラムは、経験則だけで解決のつかない構造物の状態を詳しく知るのに役立つ。結合方式としては、数値計算プログラムをメインにして、パラメーターの設定などの問題解決の一部にエキスパートシステムを使う方式と、逆に、エキスパートシステムをメインにして、サブルーチンとして数値計算を使う方式とが考えられる。

データベースは、知識ベースの情報を補う意味で役立つが、データベースをエキスパートシステムで使用するかどうかはシステムの扱う情報の量と複雑さとのトレードオフで定まると考えてよい。すなわち、フレーム、ルールなどの知識ベース構築の手法では、データベースよりはるかに複雑な情報を表現できるが、扱い得る情報量が少なくなる。一方、データベースを利用すれば、データ構造は単純であるが、繰返しを含むような大量データの保存が可能となる。

利用者インターフェースの問題は、エキスパートシステムの対話処理機能と関係する。たとえば、推論処理の経過を説明するための機能を実現しようとする、図形表示など従来型プログラムでなければ実現しにくい機能が必要となる。

(5) エキスパートシステム構築の環境²¹⁾

最近では、AI ツール(エキスパートシステム構築用ツール)の数が急激に増加している。これらは、パソコンで動く廉価なものから、専用ハードウェアを必要とする高価なものまでさまざまである。推論エンジンの開発までシステム開発者が行っていた数年前の状況と異なり、エキスパートシステム開発にこれらのツールの果たす役割が大きくなってきている。

ツール選択の基準は次のようになるであろう。

- a) エキスパートシステムの勉強段階
 - ・ルールを中心としているかどうか
- b) フィージビリティスタディの段階
 - ・専用のハードウェア、ソフトウェアは必要かどうか
 - ・教育・サポートは十分かどうか
 - ・原理は何か、使い勝手はよいか
 - ・導入実績はどうか
- c) プロトタイプ開発レベル
 - ・教育・サポートのレベルは高いかどうか
 - ・ユーザインターフェースの機能はどうか
 - ・デモプログラムはどうか
- d) 実用化レベル
 - ・既存システムとの連係は可能かどうか
 - ・処理の高速性は要求されるかどうか
 - ・どのような利用環境を想定するかどうか
 - ・開発を委託するかどうか

5. 土木構造物のエキスパートシステム構築の現状

(1) 国内、外でのエキスパートシステム構築の具体例^{22)~25)}

土木構造物に対するエキスパートシステム構築については多くの情報が飛び交っているが、それらを分類すると、ほぼ「分析型」と「合成型」に分けられる。「分析型」が、対象を細かく分類して解を絞り込んでいくのに対して、「合成型」は、小さな部分解を組み合わせながら制約条件を満たす解を導いていくものである。一方、産業への応用という立場からみれば、「診断」、「計画」、「設計」、「制御」の4つに分類するのが適当であろう。

両分類の関連は、次のようになるであろう。

「分析型」……「診断」、「設計」の一部、「計画」の一部、「制御」

「合成型」……「設計」、「計画」

この中で、土木構造物において「制御」の問題は、交通制御、出水予測に基づく連接水系の発電計画などごく少数であり、ほとんど「診断」、「設計」、「計画」の問題といえる。構造解析結果あるいは別途開発されたデータベースを用いて、エキスパートシステムで判断するケー

スが多いのも、土木構造物の1つの特徴であろう。

土木構造物に関して、現在までに構築されたといわれるエキスパートシステムの名称（正式の名称を開発元から聞いたわけではないので、誤りがあるかもしれない）を列挙すると以下のとおりである。これらを概観することにより、土木構造物に関するエキスパートシステム開発動向を具体的に把握できるであろう。なお、構成、機能まで公開されたシステムはきわめて少ないため、実用段階にあるもの、プロトタイプ段階にあるものなどさまざまなと考えられ、一部はアイデア段階にとどまっている可能性のあることをお断りしておきたい。

[診 断]

- a) 鋼構造物の寿命予測エキスパートシステム
- b) コンクリート劣化診断システム
- c) RC床版の耐用性評価エキスパートシステム
- d) 鉄道設備の故障診断エキスパートシステム
- e) 建物の耐震性診断エキスパートシステム
- f) 建物の安全性診断、被害査定エキスパートシステム
- g) 溶接不良評価エキスパートシステム
- h) 地盤診断、改良システム
- i) 塗膜診断エキスパートシステム
- j) 海外工事のクレーム問題処理エキスパートシステム

[計 画]

- a) 土地利用企画提案システム
- b) 振動（騒音、薬物、排ガス）公害予測システム
- c) 杭打ち工法選択エキスパートシステム
- d) 防水工法選択エキスパートシステム
- e) 山留め工法選択システム
- f) 土留め壁形式選定エキスパートシステム
- g) トンネル掘削助言システム
- h) 斜面安定工法選択システム
- i) 建設工事災害予知エキスパートシステム
- j) 作業停電計画作成エキスパートシステム
- k) 地理解析と地図作成エキスパートシステム

[設 計]

- a) 変電所のレイアウト設計支援エキスパートシステム
- b) 建築法規コンサルテーションシステム
- c) 有限要素構造解析に対するコンサルテーションシステム (SACON)
- d) 橋梁形式選定システム
- e) 溶接設計支援システム
- f) 耐震設計基準コンサルティングシステム
- g) 地盤液状化判定システム
- h) 基礎杭形式選定システム

- i) 想定地震推定システム
- j) 地盤解析エキスパートシステム
- k) 港湾形状決定エキスパートシステム

[制 御]

この場合、かなり速い現象を人間に代わってリアルタイムで制御するのは現状では難しい。アナログ量⇒A/D変換⇒数値処理⇒知識処理、という一連の処理をリアルタイムで高速に行えるコンピューターは、現時点ではきわめて限られている。したがって、オンライン・リアルタイムのエキスパートシステムは現時点で実用段階に至ったものはない。

- a) 発、変電所の運転支援エキスパートシステム
- b) シールド掘削機に取り付けたジャッキ操作エキスパートシステム
- c) 列車運行、運転管理エキスパートシステム
- d) 下水処理制御システム

(2) エクスパートシステムを構築する際の留意事項

土木構造物のエキスパートシステムを大まかに「診断」、「計画」、「設計」、「制御」に分類して概観してきたが、ここでは、今後エキスパートシステムを新たに構築するとすれば、どのような点に留意すべきか考察する。

a) 構築対象の選定

4. (1)でも述べたとおり、次の5つの規準のいくつかを満たすことが必要であろう。

① 狭い分野を対象にすること。

[例] 各種構造物の劣化度診断システム、各種工法の選択システム、各種構造物の被害査定システム

② 高度の専門知識が必要な分野であること。

[例] 数値解析ストラテジーのコンサルティングシステム、各種構造物の劣化度診断システム、各種工法の選択システム、各種構造物の被害査定システム

③ 記号処理が問題解決の中心となる分野であること。

[例] 各種機器の運転支援システム、各種構造物の被害査定システム

④ 緊急度が低い分野であること。

[例] 耐震設計基準、想定地震動推定などのコンサルティングシステム

⑤ 対象構造物についての知識が利用できること。

[例] 構造形式選定、レイアウト決定などの設計支援システム

b) 既存システムとの関係

土木構造物に対しては、原子力プラントの運転制御におけるような本来知識工学が得意とする動的問題は少ない。また、あいまいさと経験則のみが前面にでる医療診

断とも趣を異にしている。したがって、エキスパートシステムの専門家サイドからみて、必ずしも人工知能技術を最大限活用し得る領域とはいえないのであるが、土木構造物の性質上やむを得ないことである。そこで、エキスパートシステム単独で構成するよりも、既存の数値解析システム、質的量的に豊富な情報をもつデータベース、あるいは、種々のセンサーを用いた計測システムと結合して用い、これらシステムのパラメーター制御あるいはフロントエンド・システムとしての位置付けのもとに構築するのが得策であろう。

c) 記号処理言語の特性の有効利用

土木構造物に対して記号処理言語は、「FORTRAN のような数値解析言語より使い勝手の良い高級言語」という認識も成り立ち得る。

d) 構築目的の明確化

- 「誰が、何のために使うものなのか？」
 組織内における技術の継承に役立てるのか？
 専門知識の整理、明文化、共有化に役立てるのか？
 ライン作業の合理化に役立てるのか？
 顧客に対するサービスに役立てるのか？

などの構築目的を確認し、その目的に沿って構築すべきである。通常、プロトタイプまでは簡単に構築できたとしても、実用段階まで高めるのは難しい。したがって、「誰が、何のために使うものなのか？」の問いかけは常に必要である。

e) 開発体制（作業メンバーの選定）

作業メンバーの選定は、

- 「コンピューターに精通した専門家が、同時にすべての知識を提供する専門家である」

が理想であるが、少なくとも、

- 「コンピューターについてはほとんど何もわからないが、ノウハウだけは豊富な専門家と、知識エンジニアが協力しあう」

ような体制を組めることが重要である。もし、事情が許さず、

- 「知識伝達者と知識エンジニアが協力して開発するが、真のノウハウは知識伝達者のさらに向こうにある」

という場合は、知識エンジニアに真のノウハウが伝達しきれないものと考えべきである。

f) 構築用ツールの選択

構築目的、知識取得状態によって、構築用ツールの選択(4.(5)参照)も重要であろう。

- ・知識がきれいに分類できている場合
 - ……パソコン上で作動するツールで十分である。
- ・どう知識を表現してよいか、よくわからない場合

……機能豊富なツールを用いるべきである。

・実用に役立てる場合

……既存システムと整合性のよいツールを採用すべきである。

g) その他

特に土木構造物の診断システムの場合、ユーザーに対して、より人間的なものを感じさせることが強く望まれよう。診断は事故調査でもない限り緊急を要することは少なく、むしろ、多くの人の理解を得ながら徐々に方針を決めていくという性格が強い。したがって、データ入力後、瞬時に答のみ出力するシステムはなかなかユーザーに受け入れられない。答のみはどのように優れたものであっても、推論過程の説明がなされないなら、公共的性格の強い土木構造物の性格上、利用されることはないものと考えべきである。特に、工事が高くなるほどなおさらである。ユーザーと一緒に会話し、考えながら結論に導いていき、推論過程を十分に理解させるような充実した説明機能がポイントである。

6. 今後の展望^{36), 37)}

既存あるいは、開発中のエキスパート・システムを「診断」、「設計」、「計画」、「制御」に分類したがそのいずれを取っていても、土木構造物の場合、専門家の知識の検索、参照が主体である。人間の直感ではなく、技術計算結果、客観的データに基づく判断が重要な点は、土木構造物の大きな特徴といえる。したがって、実用段階のシステムに移行していく際には、次のような点で改良、開発がなされるであろう。

(1) 従来型システムとの融合

- ・既存の技術計算（数値計算）システムとの密接な連携、協調。
- ・質、量ともに豊富なデータベースとの連携。
- ・センサー類の開発。

【例】地盤、岩盤あるいはコンクリート内の状態把握。

鋼、コンクリートなどの経年劣化把握。

など、関連技術との一体となったシステム開発の重要性がさらに高まるであろう。同時に、このような開発過程で、人工知能技術に対する新たな価値観が生じてくるものと思われる。それらは、AI研究者の間ではすでに広く認識され、一部は批判もあるところであるが、

- a) 記号処理言語に対する高級言語という認識。
- b) 知識を整理して問題を明確にするのに有効という認識。
- c) 仕事を単位を分散するのに有効（ルールを断片的に書いておけばよい）という認識。
- d) ルール自体の変更が容易であること。

(2) 知識獲得, 整理方法の洗練

すでに産業界において, エキスパートシステム構築における専門知識, 経験則の収集の難しさが指摘されている。これを打開するためには, 人工知能技術そのものの進歩も必須であるが, 専門家と知識エンジニアの協調的, 効率的知識移転・伝達法が確立されていくであろう。

(3) 知識表現, 推論機構の改善

土木構造物において, 時間ファクターの入った問題, 動的問題などの少ない点は前述のとおり明らかであるが, 今後は履歴が問題となる現象を全く除外することはできない。この場合, 時間変化情報の取り扱いが大きな検討課題となろう。

(4) エンドユーザー用インターフェースの改善

不確実な情報の取扱いと同時に, 言葉や数量を中間にはさんだのではその段階で誤差が入るようなデータに対する対処法, すなわち, エンドユーザー用インターフェースの改善が図られるであろう。

【例】 ・ひびわれ状態の説明。

- ・腐食状態の説明。
- ・騒音状態の説明。
- ・感覚的表現。

“景色が良い。”、“景観が悪くなった。”、“環境が悪くなった。”、“あの構造物にはなんとなく不安を感じる。”、“あの構造物は地震に弱そうだ。”

これらに対して, レーザーディスクを利用し画像を活用する, または, 騒音, 音声に対してテープレコーダーを活用する, などはただちに気付き, かつ, 実行可能な事柄であろう。

(5) 問題の違いに応じた適切なアプローチ法の確立

診断/設計/計画/制御など, 分野ごとのツールが確立してくるであろう。種々のエキスパート・システムの目的によって異なるはずの特徴を分析・把握して, エキスパートシステムのタイプごとに適切な構築方法を定めていくことも行われよう。

参考文献

- 1) 中村秀治・寺野隆雄：土木構造物のエキスパートシステム入門, オーム社, 1987年11月(予定)。
- 2) Hayes-Roth, F., Waterman, D. A. and Lenat, D. B. ed. : Building Expert Systems, Addison-Wesley, 1983.
- 3) Waterman, D. A. : A Guide to Expert Systems, Addison-Wesley, 1985.
- 4) 上野晴樹：知識工学入門, オーム社, 1985年。
- 5) 小林重信：知識工学, 昭晃堂, 1986年。
- 6) 上野晴樹・石塚 満：知識の表現と利用, 知識工学講座2, オーム社, 1987年。
- 7) マコーダック, P. (黒川利明訳)：コンピューターは考える, 培風館, 1983年。
- 8) 元岡 達・喜連川優：第五世代コンピューター, 岩波書店, 1984年。
- 9) 黒川利明：電子計算機のプログラミング, LISP入門, 培風館, 1983年。
- 10) ウィンストン, P. H. and ホーン, B. K. P. : LISP, 邦訳 白井良明・安倍憲広：LISP, 培風館, 1982年。
- 11) 中島秀之：PROLOG, 産業図書, 1983年。
- 12) 後藤滋樹：PROLOG入門, サイエンス社, 1984年。
- 13) Shortlife, E. D. : Computer-Based Medical Consultation : MYCIN, Elsevier, 1976, 邦訳 神沼真二・倉科周介：診療コンピューターシステム, 文光堂, 1981年。
- 14) ウィンストン, P. H. (白井良明・杉原厚吉訳)：コンピュータービジョンの心理, 産業図書, 1979年。
- 15) Zadeh, L. A. : Making Computer Think Like People, IEEE Spectrum, Vol. 21, No. 8, pp. 26~32, 1984年。
- 16) 数理科学特集：ファジイ論理とその応用, 数理科学, 1987年。
- 17) Saaty, T. L. : A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structure, J. of Mathematical Psychology, 15, pp. 234~281, 1977年。
- 18) Saaty, T. L. : The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980年。
- 19) Zahedi, F. : The Analytic Hierarchy Process — A Survey of the Method and Its Applications, INTERFACES, Vol. 16, No. 4, pp. 96~108, 1986年。
- 20) 諏訪 基, 他：エキスパートシステム開発事例にみる知識獲得の諸相, 計測と制御, Vol. 25, No. 9, pp. 801~809, 1986年。
- 21) 寺野隆雄：エキスパートシステム開発ツールの一評価法, 人工知能学会大会, 1987年。
- 22) 中村秀治・松浦真一・寺野隆雄・篠原靖志：水力鋼構造物の寿命予測エキスパートシステムとその適用, 土木学会論文集, No. 374/I-6, 1986年。
- 23) Ishizuka, M., Fu, K. S. and Yao, J. T. P. : SPERIL-1 : Computer-Based Structural Damage Assessment System, Purdue Univ., Civil Eng., CESTR-81-36, 1981年。
- 24) 石塚 満：建築物被害査定エキスパートシステム, 情報処理学会論文誌, Vol. 24, No. 3, 1983年。
- 25) 小川 均・田村進一：建築物安全度査定システム SPERIL-IIとその制御理論, 人工知能学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 109~115, 1986年。
- 26) 早川和一：コンクリート技術相談システムの開発, 富士通ジャーナル, Vol. 12, No. 1, 1986年。
- 27) 磯田八郎・寺野隆雄：接続水系の翌日発電計画エキスパートシステム, 昭和61年電気学会全国大会, pp. 1936~1937, 1986年。
- 28) Faught, W. S. : Functional Specifications for AI Software Tools for Electric Power Applications, EPRI Report, NP-4141, Research Project 2582-1, August, 1985年。
- 29) Bennett, J. S. and Engelmores, R. S. : SACON : A knowledge-based Consultant for Structural Analysis, Proceeding of the Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence, August, 1979.

- 30) Melosh, R. J., Marcal, P. V. and Berke, L. : Structural Analysis Consultation Using Artificial Intelligence, NASA Conf. Publ. No. CP-2059, pp.175~194, 1978.
 - 31) 日本機械学会：日本機械学会誌 特集 機械工業における AI 応用, Vol. 89, No. 815, 1986 年.
 - 32) 長沢孝次：鉄道における知識工学の応用, 日本機械学会誌, Vol. 89, No. 815, 1986.
 - 33) 今野英山：造成計画立案を支援する土地利用企画提案システム, OHM 別冊エキスパートシステムの実務, オーム社, 1987.2.
 - 34) 吉田健一, ほか：知識工学の変電所レイアウト・システム CAD への応用, 日立評論, Vol. 67, No. 12, pp. 45~48, 1985.
 - 35) 丹羽克彦：個別受注, 単品生産に対応する建築法規コンサルテーションシステム, OHM 別冊エキスパートシステムの実務, オーム社, 1987.2.
 - 36) 寺野隆雄：電力分野における人工知能適用の将来展望, 電気四学会関西支部専門講習会講演論文集, pp. 91~98, 1987 年 2 月.
 - 37) 上野晴樹：エキスパートシステム—研究動向と技術的課題一, 人工知能学会誌, Vol. 1, No. 1, 1986.9.
(1987.7.31・受付)
-