エキスパートシステムの現状と課題 ——次世代システムへ向けて——

正 員 大須賀 節 雄 東京大学工学部境界領域研究施設

特 集

解 説

1. はじめに

人工知能の一応用技術としてエキスパートシステムがここ 2~3 年で急速に普及し始め、産業への適用事例も増加している。使用経験の増加に伴って、現行エキスパートシステムの能力とその限界が次第に正しく認識されるようになり、エキスパートシステム技術の内容に踏み込んだ議論も行われるようになってきた⁽¹⁾。それとともに、情報処理技術としてみたときのエキスパートシステムの位置付け、将来への見通しなどに関心が高まっている⁽²⁾⁽³⁾。

エキスパートシステムが情報処理の新しい方向を示すものとして極めて重要な技術であることは間違いない。この重要性は、従来の計算機の適用が困難であった分野、特に技術系ならびに関連の諸分野に計算機を導入する可能性を期待させるからである⁽⁴⁾。これらの分野の応用は非定形的な作業を含み、かつ高度の知的能力を要するなど、手続き的な記述を主体とする従来の情報処理では方式的に適さないという性質をもっている。しかし、今日のエキスパートシステムがこの期待にこたえられるだけの能力を実現しているかという、残念ながら未だそのレベルに達してはいない。

エキスパートシステムがもつ上述の可能性はあくまで潜在的なもので、現行エキスパートシステムは、その一部しか具体化していないからである。技術系の分野にこれを適用することを前提に考えると、現行のエキスパートシステムは、これまで長い科学技術の歴史を経て育てられてきた問題解決のための科学的方法を有効に利用する方式にはなっていない。この結果がエキスパートシステムの能力の限界となって現われており、既に一部ではエキスパートシステムに対して疑問

視する兆候も現われている⁽⁵⁾。

しかし、本来のエキスパートシステムが目指すもの、それが基盤を置いている新技術がもつ可能性は、今日エキスパートシステムとして具体化されてきたものよりはるかに大きなものであって、現行システムは多様な可能性の内の一つの方式を示したに過ぎないと理解すべきであろう。以下では、エキスパートシステムを生み出した母体である人工知能の基本に戻って、今日のエキスパートシステムの性格と将来の発展性について考察する。

なお、本稿では全体的視点から議論を進めるが、エキスパートシステムの個々の技術および応用例については本特集の他の論文を参照されたい⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

2. 初期の人工知能研究——探索技法

人工知能の研究はパズルやゲームなど探索を主体とする問題を例として、一般的な探索技法を求める試みから始まったといえる^{(8)~(10)}。これらの問題は、枠組みとして

(a) 状態空間

(b) 個々の状態ごとに与えられる可能な[手]の集合

(c) 状態と手の組み合わせによって定まる次の状態の定義から構成されるという共通点を持ち、問題は“ある与えられた初期状態から目標に達するために打つべき手を見いだすこと”という形式で表わされる。

状態は、例えば基でいえば、盤面上の石の配置で定まり、[手]は石を置くことである。単純なパズルの場合を例にとると、問題解決は、(0)まず与えられた初期状態を現在状態とし、(1)現在状態のもとで可能な手の一つを選び、(2)それで達する次の状態を評価する。もしそれが許される状態ならば、新しい状態を現在状態として(1)に戻り、そうでなければ別な手を試みる。もし現在状態には一つも可能な手がないとわか

“Current State and Problems of Expert Systems-Toward Next Generation Systems”, By Setsuo Ohsuga, Member (Institute of Interdisciplinary Research, Faculty of Engineering, The University of Tokyo)

ったら、現在状態にくる前の状態に戻る（このように、木探索において、ある枝の処理がうまくいかなかったら、パラメータなどをその枝の処理前の状態に戻し、別の枝を試みるために当該枝への分岐点に戻るという制御方法を、バックトラックという）。これを繰返して目標とする状態に達する経路を見出す。これは最も単純な縦形探索と呼ばれる方法であり、このほかにも様々な探索制御の方式が考察されている。パズルは一人で、ゲームは利害の相反する二人で行うという相違はあっても、この形の問題は状態空間が厳密に定められていて、状態に対して評価値を定義することができ、その結果によって探索（すなわち問題解決）のガイドがなされるという共通の基本メカニズムをもつ。

このような問題解決法は、ある意味で人間のとる方法に似ているが、ゲームプログラムは人間を越えるまでには至っていない。状態の評価や探索のような機械的な処理では人よりもはるかに速い計算機が、ゲームにおいては人に劣るのはなぜかを考えてみよう。

この種の問題は状態空間が広がると探索時間が急増して全域探索は不可能になるため、状態空間の大きさにより問題解決の手法が異なってくる。人間が碁を打つ場合、すべての可能性を考慮して手を決めている訳ではない。人間は状態の評価をよりの確に行うこともさることながら、考慮の対象にしなければならない状態の集合を効果的に絞り込んで、場合の数を減らしてしまう。これを一般的に表現したものが、例えば碁でいえば定石や格言などである。このように量が增大すると同種の問題に対しても質的に異なった方法が要求されるようになる。

定石や格言は非手続的に表現された記憶情報である。これは知識である。そして、本来、探索的に評価し、その結果によって判断するという処理を必要とした問題を、それを経ないで済ましてしまえることは、この情報がその処理に相当する効果をもつことを意味する。この効果は非常に大きなもので、許容時間内の処理が困難な問題でも知識を用いることにより解決される例が数多くあるという意味で、知識は問題解決に不可欠なものである。このようにして知識の重要性が認識され、知識を計算機でも扱えるようにする試みがためされるようになり、人工知能は知識の科学であるといわれるようになった。今日、知識工学の名のもとに、知識を問題解決に利用することを目的としたシステムが多数開発されている。

3. 知識処理の現状

知識を計算機で扱うには、まずそれを形式化して表現しなければならない。そのためには形式を前もって定義しなければならない。その形式は、

(1) その形式で現わされた情報は必ず処理可能であること

(2) その形式の範囲内で必要な意味的な表現が可能なのである。これらは相反する要求であり、うまい妥協点を見出すことが必要である。これを定めることは知識表現の問題と呼ばれる。一方、知識処理には知識を問題解決に利用する機能が必要であり、これは推論と呼ばれる機能を含む。更に知識を蓄える知識ベースを管理する機構が必要である。後述するように、推論は与えられた幾つかの表現文からこれらの表現文と同じ意味、あるいはその意味の一部を表わす別の表現文を導き出す機能である。ここで表現文といったのは、上記知識表現の定める形式で表わされた文のことである。

例えば推論の最も単純なものは、

A ; 'りんごは木から落ちれば腐る'

B ; 'りんごが (1つ) 落ちる'

という表現文の組から

C ; '(その) りんごは腐る'

を導出するようなもので、これは良く知られた三段論法である。これは単一の機能としては単純であるが、繰返し用いることにより、かなり有効性を発揮する。これらの方式はいずれも知識の表現に依存して定義され、更にこれを中核にして知識処理のシステムが構成されていく。従って、知識表現を定めることは知識処理の基本問題である。

今日、知識表現として多種類のものが提案されている。それらの基本となっているものにプロダクションルール、セマンティックネットワーク、述語論理、フレームなどがあることはよく知られている⁽¹¹⁾。このうち最初の三つは宣言形、最後のものは手続き形に分類される。前三つは同じ形のものという意味で類似である。前章では知識の必要性をゲーム問題から述べたが、これは説明の便宜のためであって、実際にはこれらの知識表現がゲームから発したわけではない。また、この両者の間に以下に述べるように大きな相違点がある。

ゲームの例では知識の概念を状態に基づいて導入した。ゲームで状態が定義できたのは、状態空間の構成が単純で、有限のデータ構造で表わされる程度のもの

だからである。状態空間は対象とする問題を構成している諸要因の組み合わせとして表われ、この意味で対象そのものを表現するものであるが、それに依存する形式の知識はその状態空間でのみ定義されており、一般化して適用範囲を広げることが難しい。一般化するには知識表現に豊富な記述力を与える必要があるが、それには、(i)状態空間の表現を強化するか、あるいは逆に、(ii)状態の概念を捨てて、知識表現を状態表現に拘束されないようにする、という二つの可能性がある。今日のエキスパートシステムが用いている諸知識表現はほとんどが後者に属し、形式の定められた状態という概念は含まない。ここで状態と呼んだが、一般的には記述される対象の正確な記述といったほうがより広い。従ってこれを捨てることは対象そのものの詳細な記述を捨てることである。

例えば、プロダクションルールでは IF-THEN の形式を定め、THEN 部分に結論を、IF の部分にはこの結論を導くための前提部として必要最小限の条件を書くことによって知識を表わす方式である。上述の表現 A の例で示すと、'IF りんごが木から落ちる、THEN りんごは腐る' となる。このように IF-THEN の形式をもつものはルールとか規則と呼ばれる。ルールのみでは結論は得られず、'りんごが落ちた' という事実ないしは、データにこのルールを適用することによって結論が得られる。ルールが適用できるのは事実あるいは質問がルールの前提部もしくは結論部と一致する場合に限られる。同じプロダクションルールというクラスに分類されていても、言語によっては変数を含み、そこに代入される値の範囲内での一致が許されるものがあり、当然記述力も上がる。前提部に複数の条件を置くこともできる。

また、入力として事実データを受け取り、その中の一つと前提部が一致するルールを選んで適用し、その結論部に記載されている動作を行うという方式の前進推論や、入力は質問であって、結論部がこれに一致するルールを見いだしてその前提部を新たな質問とし、質問に一致する事実が見い出されるまでこれを続ける後進推論など、推論の制御方式の異なるシステムがこの範囲内で可能である。

一般に知識処理ではルールも事実も複数であって、ルールの組がルールベースといわれる。あるいはこれに普遍的な事実を加えて知識ベースとして与えられている。ここで注意すべきことは、ルールの表現についても、またこのルールが適用される事実の組についても、対象を厳密に記述する情報あるいは状態を定義する諸要因のなかで、当面の問題に直接関連する一部の

情報のみが含まれ、対象や状態空間を定義する枠組みはここにはもはや存在しないことである。

このように対象や状態の表現に縛られない知識の表現は常に外部に対して開いたものになり、言語としては適応性が増し、広い範囲の応用に適用できることから、DENDRAL、MYCIN などの初期のエキスパートシステムが開発され、人々の関心を集めた。更に、知識を蓄える知識ベースと、その知識を問題解決に利用する推論機構が分離され、汎用のツールが商用化し始めた⁽²⁾。

実用的な問題は一般に複雑な構成をもち、問題解決の過程に応じて、利用される知識の種類が異なる。すべての知識を単一の知識ベースに蓄えて用いる構成のシステムではあまりに単純であり、状況に応じてこれらを使い分けられるように、知識を前もって分割しておいた方が少なくとも効率が良い。単一の知識ベースでは、知識が増すほど必要な知識を探し出すための時間も増加するからである。このように知識を分割し、複数の知識源を会話理解に用いるという方式をとったものが HEARSAY II である。処理対象である音声入力を信号レベルから音素へ、音素から文字へ、文字から語へ——というように、順次処理していく過程で用いられる知識は異なるため、異なる知識源に入れられる。音声情報は黑板と呼ばれる作業場所におかれ、そこに各知識源からの知識が作用して協調的に処理が進められる。これは黑板モデルと呼ばれる。これは知識表現の形式というよりはシステムの形式を表わす。

黑板モデルを一般化して広い範囲の問題解決ツールとすることを意図したものに AGE、ART、ESHELL などがあるが、この方式では一般に黑板上の対象に適用する各知識源の制御問題が生ずる。また黑板上に置かれるものは処理対象のモデルであるが、会話処理のように対象が定まっているときは別として、一般化したシステムとするときは、モデルを表現するための手段、特にデータ構造を定義しなければならないが、それがなされていない。その必然的な結果として、ある程度の一般性のある構造概念をもち、制御構造はユーザ自身が定義できるフレームシステムへの依存もしくは共用が行われる傾向がある。

人は非常に多様な知識をもっているが、思考時にそのすべてを使っているわけではなく、場面によって関連する知識の範囲を限定している。このメカニズムは機械による処理の場合でも効果的である。フレームはもともと当面の思考範囲を定める枠組みといった概念であるが、知識処理に利用されるようになった。これは特定の場面ごとの固有の知識をフレームという枠に

納めているという点では黒板モデルとの共通性をもつ。更にこれらフレーム同士をメッセージの交換によって関係づける機構を有し、黒板モデルで難点であった複数知識源の制御に相当する問題を、ユーザに委ねることによって解消し、更に、属性の継承機構のある点も長所の一つとして強調されている。メッセージ交換の手順をあらかじめ指定するということは手続き的方法を導入することを意味する。手続きによる表現は静的な問題の記述には向いているから、固定した対象の情報を前もって与えておき、それを認識に利用するような問題では特に不都合はないが、対象や環境が変化する設計のような問題には必ずしも適切なものとはいえない。それにもかかわらず、試験的なシステムから実用目的に発展するとともに、知識工学はこのように宣言形の表現から手続き的な表現に戻る傾向が一部に現われているのが現状である。

4. エキスパートシステムの問題解決能力

ここでエキスパートシステムの利用に関し、問題解決能力という観点から二つの単純な事実注目する。一つは、問題解決には与えられる問題に依存して必要な方法があること、もう一つはエキスパートシステムの有効性は通常問題解決にあたっている人、もしくは機械との相対的能力評価によって定まることである。

第一の点は極めて当然のことであるが、この単純な事実が今日のエキスパートシステムで十分に考慮されているとはいえない。エキスパートシステムあるいはそれを形成する技術としての知識処理システムは、あくまで与えられた問題に対して、その解決を目的とした知識を適用するシステムであって、システム自体が直接問題を解決するわけではない。従って、これは問題解決に必要な手段を知識として表現することができなくてはならない。

これまで人によって扱われてきたあらゆる分野の問題に対してそれぞれ至る問題解決の方法やそのための理論が開発されてきた。例えば、人は制御問題に対して系の周波数特性を求め、また特性を容易に把握するための図形的な表現法を開発した。計画問題に対しては PART 図による手法や、グラフ理論や各種 OR 的手法を用いるなどの方法を開発してきた。一般論として、科学技術の分野では、対象に関する検証や評価をできる限り確実に行いながら思考を進めるのが普通で、いわばこれが科学的方法論の基本になっている。このために多くの分野で解析的評価方法やシミュレーションなどの技法が開発されてきた。

これらの方法はそれぞれの問題に対して人がその能

力の範囲で最も有効なものとして開発してきたものであって、これより強力なものでない限り、おいそれとはほかの方法で置き換えられるものではない。また新しい方法が開発されたとしたら、それは従来の方法を包含するものでなければならない。今日、エキスパートシステムは問題解決の新しい方法を与えるもののように受け取られているが、上述の意味で、より強力な方法に成り得るものであるなら、エキスパートシステムはこれら問題ごとに開発されてきた問題解決の方法を利用できるシステムになっていなければならない。しかし現行エキスパートシステムは必ずしもそのようなっていない。

これらの方法は定式化がなされているなら形式的に表現することが可能であり、現に人はこれらを一定の形式で表現することによって普遍的なものにし、かつ使いやすくしている。今日のエキスパートシステムも、それを利用するにはまず第一にそれを表現できなければならない。すなわちこれは知識表現の問題である。しかも知識処理の問題としては特定の問題向きに解決手法を記述する専用システムとするのでは不十分で、これを一般的なツールとすることを考慮しなければならない。すなわち知識処理の技術としては広い範囲の問題に対し、それぞれの問題向きの手法を記述できる一般性のある、しかも記述力の高い知識表現言語を与えることが要求される⁽⁸⁾⁽¹¹⁾。

この面から前記の知識表現を考察してみよう。対象や状態の概念を除去することは、対象の内部に立ち入らず、外部から観察できる対象の性質を言語的に記述することに与えることである。上記問題解決の諸方法は対象の詳細な記述の上に定義されているものであるから、少なくともこのような表現に対してはこれら問題解決の諸方法は適用できない。すなわち、対象の記述をもたないエキスパートシステムはこれらの手法が必要な範囲の問題解決には不向きである。これは問題解決システムとしてのエキスパートシステムの有効性を著しく削減する。

では現行エキスパートシステムの有用性はどのようなところにあるのであろうか？これは、上記の方法論を直接には必要とせず、言語的な記述に基づいて結論に至る形の問題であることは明らかである。この有効性はまず対象分野に関係がある。例えば、法律のように言語を中心に知識が表現される分野がある。しかし産業や技術の分野では、多かれ少なかれ上述の対象の評価の部分を含んでいるので、このような粗い分類は適切ではない。それより各分野においてその技術的な成熟度や問題の性質、すなわち問題の解として何が求

められ、何が与えられた条件であるか、などの分析を通してこの有効性を理解することが必要である。例えば、新しい分野で、対象の構造などの詳細が全くわからず、外部からの観察だけが利用可能な情報である場合、我々は得られた知識を言語的に、あるいはただかデータの形式で利用するしかない。このような分野では経験則が重要で、現行エキスパートシステムが役立つと期待される。例えば、人体のような複雑な構造をもった対象を扱う医療の分野ではこのような段階の情報が多い。

しかしその分野が急速に発展している場合には、ここにエキスパートシステムを無条件に導入できるとはいえない。科学技術の発展とはより正しく対象を知ることであるから、昨日まで言語的に表現されていた知識が今日は対象の構造と性質の関係の記述に変わり、より複雑な構造表現を必要とするようになるからである。例えば医療の場合でも、近年の医療エレクトロニクスの発展は人体の部分ないし全体の構造と疾病との関連の形の情報が多く用いられるようになったことを示している。このためのエキスパートシステムは対象そのものを表現できるものでなくてはならない⁽⁴⁾⁽¹²⁾。

第3章で、知識表現の記述力を高めるには、対象構造の表現を捨てた現行エキスパートシステムの方式とは逆に、対象構造の表現を強化する方式があると述べたが、これがその意味である。構造の表現は知識表現言語の静的な対象の記述力の問題であるが、このほかにエキスパートシステムにはその分野の発展に歩調を合せて成長するという動的な性質が要求される。これが満たされないとエキスパートシステムは常に時代遅れのものになる。それには分野の発展に応じて常に新しい知識を与え、あるいは更新することが必要になる。今日のエキスパートシステムではこれは知識獲得の問題として人が行うことを前提にしているが、現実にはこれは面倒なものである⁽¹⁴⁾。もしエキスパートシステムが対象を詳細に表現するとともに、これに前記問題解決の諸方法を適用しながら対象の詳細化を含めて知識の生成や更新をインタラクティブに計算機内で実現できるなら、エキスパートシステムは常に最新の知識を保有することになる。次世代エキスパートシステムとしてはこのような方向に進むべきである⁽⁵⁾⁽¹⁵⁾。

なおこれと逆に、ある分野が十分に成熟し、かつその分野に普遍的な目的がある場合にも現行方式のエキスパートシステムが役立つ場面がある。例えば化学の分野で、ある特定の生理活性をもつ化学構造物を生成したいという場合を想定しよう。研究を通してそのような活性をもつ分子構造の構造的特徴が確定的に求ま

っている場合、あるいは更に進んでそのような構造をもつ化学物質の生成法を知れば十分に目的を達する場合、それらを言語的な知識として表現することができる。今日のエキスパートシステムはこのような使い方を想定していたものであろう。但しこの際でも、与えられた生理活性をもつ分子構造の特徴が確定されているものは化学分野全体では、むしろ少数であり、薬品などの開発に際しては、むしろ与えられた性質をもつ分子構造の特徴を探ることが目的になっているという現状を理解した上でエキスパートシステムを導入する必要がある。

このようなエキスパートシステムの目的は、利用者たる人に、既に確立されている知識を伝達することである。これは対象構造を表現し、それによって知識自体の生成に関与するといった次世代エキスパートシステムがもつ開発的な性質のものと異なる。知識伝達形のエキスパートシステムがもつ効用はそれを利用する人（あるいは機械）との関係によって定まる。もし人が容易に利用できる知識しか提供できないなら、エキスパートシステムの効用は乏しい。従って、エキスパートシステムとしては、知識の量、質あるいは知識を用いて結論を導くまでの時間など、何らかの点で人に優れた面を備えることは絶対的な条件といつてよい。これは本節の冒頭にあげた二つの事実の第二のことであることはいうまでもない。伝達形エキスパートシステムの効用が利用者の能力との比較によって定まるということは、この実用性が労働者の質、その他の社会環境にも依存して評価が定まることを意味する。

伝達形の利用を徹底させていくと、遂には知識ベースと推論機能を一体化した人工知能チップのような概念に到達する。このようなチップの利用価値はかなり高いことが予想される。現在の人工知能が実現しているのは演えき推論と呼ばれるものであるが、これはルールの組の中で与えられた条件に合うものを選び出して忠実に実行する機構である。ルールとして一定の変換則を与えておけばこれは変換素子として働く。ルールは後に書込めばよいので、これは汎用の変換用チップとして利用できよう。このような最も低いレベルの利用から上記知識伝達まで、現行エキスパートシステムは知的処理のうちでも低レベルの範囲、前記知識開発形の利用にかからない範囲、で用いれば十分に効用を発揮するであろう。

5. む す び

人工知能の分野では記号処理をベースにした知識処理が最近著しい発展を遂げている。本稿は人工知能の

経過と現状について簡単にサーベイした後、エキスパートシステムを産業分野に利用する際の問題点について述べた。今日のエキスパートシステムには対象を詳細に記述するという機能が欠けているため、これまで技術分野で開発されてきた科学的方法論が十分に適用できない。このため利用範囲は技術の発展段階の一部に限定される。しかしこれは知識処理の本質に関する議論とは関係ない。今日のエキスパートシステムは推論機能を利用するという特徴をもつ知識処理技術の最も単純な実現形態の一つにすぎない。本来の知識処理には従来の情報処理技術のもとでは困難であった多くの問題に計算機の利用を可能にすることが期待されており、このためには次世代エキスパートシステムとして、より広範囲の問題に適用できるシステムの開発が急がれる。これには新しい知識表現言語の開発が必要である。限られた紙面で十分意を尽くしていないが、関連する諸問題について参考文献を御参照いただければ幸いである。(昭和 61 年 9 月 16 日受付)

文 献

- (1) 「知識工学特集号」 情報処理学, 26, 12 (昭 60-12)
- (2) 上野: 知識工学入門 (昭 60) オーム社
- (3) 大須賀: 「知的情報処理の現状と課題」計測と制御 25, 4, 299 (昭 61-4)
- (4) 大須賀: 次世代 CAD/CAM のための知識処理の応用 (昭 60-11) マグロウヒル・ブック
- (5) 大須賀: 「人工知能の現状と今後の動向」日本機械学会誌 89, 815, 1112 (昭 61-10)
- (6) 石塚: 知識の表現と利用, 知識ベース入門 (大須賀編著) 第 1 章 (昭 61) オーム社
- (7) F. Hayes-Roth, D. Waterman, & D. Lenet (ed.): Building Expert Systems (1983) Addison-Wesley
AIUEO (訳): エキスパートシステム (昭 60) 産業図書
- (8) 志村: 機械知能論 (昭 58-7) 昭晃堂
- (9) 白井・辻井: 人工知能 (昭 59-5) 岩波書店
- (10) E. Rich: Artificial Intelligence (1983) McGraw-Hill
広田・宮村 (訳): 人工知能 (1), (2) (昭 59) マクワウレルブック
- (11) 大須賀: 「知識表現に関する一考察」人工知能学会誌 1, 1, 20 (昭 61-9)
- (12) 大須賀: 「コンピュータによるモデリング」精密機械 51, 6, 53 (昭 60-6)
- (13) 大須賀: 「知識の獲得と学習」情報処理 26, 12, 1520 (昭 60-12)
- (14) 大須賀: 「知的モデル構築支援方式による問題解決システム」信学論誌 J 69-D, 7, 1009 (昭 61-7)