

## 第4章 評価システム

### 4.1 評価システムのあり方

第2章では評価システムを作成する上での一般的留意事項について、また第3章では実際の評価方法についての研究の現状について述べてきた。実際のシステムの作成にあたっては、これらの点をふまえた上で対象となる評価の問題について詳しい検討を行なうとともに、システムの機能の内容及び適用範囲の限界について十分明らかにしておく必要がある。

2.5で述べたように、評価システムはできるだけ汎用的であることが望ましい。しかし現在のところはむしろ、個別の問題を対象としたシステムの開発・使用・評価を通じて、音の感覚量評価全般についての知見を蓄積する段階といえよう。対象を特定の領域に限定した単能のシステムは、すでにいくつか実用に供されている。4.2ではその具体例を簡単に紹介する。

より統合的な評価、心理的尺度に近い評価を自動化して行なう上では、「知識工学」の手法を利用することが有効と考えられる。

これについては4.3でその概要を説明する。

### 4.2 評価システムの具体例

音の評価システムを構成し、音そのものを評価したり、音の評価結果によって機械の運転状況などを診断するなどといったことは、多くの場合に強く要望されており、現に種々のところで使用されている。このことは、表1.1の評価対象音の分類からもその概要を推察できる。

現在、具体的に現場で使用されている音の評価システムの一例をあげると、オーディオ機器メーカーではラウドスピーカに関して、最低共振周波数の評価システム、周波数特性の評価システム、歪の評価システムなどが実用化されている。これらのシステムは、各会社で設計・構成され自動化されており、能率良くそれらの評価を行って生産に寄与している。この場合は、音の発生の条件が安定しており、心理評価値と音の物理的性質との関係が比較的容易に求められるので、早くから実用化することが出来たのである。しかし、ラウドスピーカの歪の一種であるビビリ音はその発生条件が安定していない為に、現在それのための評価システムは完全には実用化されておらず、それに関する基礎的問題の研究発表が最近も行われている状況にある。

種々の伝送回路の諸特性の評価システムが多くの工場で実用化されているのは周知の事実であり、また最近も回路に関する評価システムの研究発表が電子通信学会でも行われている。

また、ミルによる粉体の製造過程に関する評価システムなども実用化されており、機械の運転状況の診断システムは、振動計をセンサーに用いたものであるが製品としても販売されている。

さらに、音声の自動認識システム、音声の諸性質の評価システム（例えば声の良否の評価システムなど）、電話機の明瞭度に関する評価システムなど音声に関する評価システムには優れたものが多くあり、これから音の評価システムを構成するのに、有用な参考資料となるものと考えられる。

第5章 今後の課題 に述べられているように、音色の評価方法の確立および音色をきめる音

の物理的性質の究明に不十分な点が多く残されており、楽器音の音色に関する評価システムの具体化については、今後の研究に待つところが多い。

現在、音の評価システムに関する内外の研究論文が最近漸次増加しつつある傾向がみられ、今後、音の評価システムの実用化は各方面で急速に進むものと考えられる。

#### 4.3 エキスパートシステムについて

評価を自動化する、すなわち計算機に代行させる上で、「エキスパートシステム」の手法を利用することが考えられる。エキスパートシステムは異種の知識の統合や、不完全、あるいは体系化されていない知識を用いて推論を行なう方法として、最近脚光を浴びている。以下ではエキスパートシステムの歴史や基本機能について概観し、音の感覚量評価への適用可能性について検討する。

##### 4.3.1 概観

エキスパートシステムとは、医者や技術者、教育者などが行なうような高度な専門的知識を必要とする仕事を、計算機に行なわせることを目標として開発されたシステムをいう。これは人工知能の1分野として、70年代に発展してきた。現在ではこれらの研究は「知識工学」とよばれ、人工知能の中で独立した分野とみなされるようになってきており、アメリカを中心に、日本等でも研究・開発が盛んに行なわれるようになってきている。

エキスパートシステムは問題領域固有の知識の重要性を強調し、それを積極的に取込もうとする点で、それまでの人工知能研究と一線を画することができる。60年代の人工知能はゲームやパズル、定理証明といった、形式化しやすく、個別の知識に依存することが少ない問題が研究の中心となっていた。これらは「状態空間探索」という一般的手法で扱える性質のものである。そのような一般的手法では多くの「知的」問題解決に対処できないという反省から、エキスパートシステムが生まれてきた。

エキスパートシステムが対象としている領域の例としては、医療（診断、投薬処方等）、化学・生化学（分子構造解析、実験計画等）、地質調査（石油、鉍脈の探査）、故障診断（原子炉、計算機等）、電子回路設計・解析、音声認識、教育（知的CAIシステム）等々多岐にわたり、その範囲も拡大しつつある。これらの領域に共通して言えることは、

- (1) 問題解決のためには膨大な領域固有の「知識」を必要とする。
- (2) そのような知識は、全体を統一的体系として表現することが困難という意味で個別的であり、専門家の無意識下に存在しているため、明示的に説明することが難しい。
- (3) (関連して) 微分方程式や統計的手法のような数学的解析手法の利用が困難あるいは不適當である。
- (4) その反面、これらは領域固有で、外界からは「閉じた」知識であり、一般的な知識や常識からは切離して扱える。

(5) またそれらの知識は体系的にはなく、断片的であるにしても、取出して明示的に記述することが（例えば「常識」を構成する知識などと比べて相対的に）容易であるなどの点である。

エキスパートシステムの端緒となったのは、60年代後半から70年代にかけてスタンフォード大で開発された DENDRAL である<sup>1)</sup>。これは有機化合物の質量スペクトルから分子構造を決定するシステムで、現在においても、最も成功したシステムの1つとなっている。その後同じグループにより、血液疾患の診断を行なう医療システム MYCIN が開発されている<sup>2)</sup>。DENDRAL が知識とプログラムが融合した専用プログラムの色彩が濃かったのに対し、MYCIN では領域知識そのものと、推論を駆動するプログラムとの分離が計られている。MYCIN の推論駆動部は後に独立して EMYCIN というシステムになる。EMYCIN は問題領域の内容とは独立の、汎用の推論機構 (Inference Engine と呼ぶ) である。

汎用の推論機構に領域固有の知識を「知識ベース」として付加することによりエキスパートシステムを構築するという方法は、開発時間・労力の節減、知識ベースが理解しやすく、改訂が楽といった利点があるため、その後の多くのシステムで採用されている。記述システム (エキスパートシステム・シェル) には EMYCIN のほか、OPS5, KEE, KAS, AGE, ROSIE, (LOOPS) などがあり、商用化されているものもある。これらは知識表現や推論の形態が比較的単純であり、問題の性質がはっきりしている場合には有効である。そのようなシステムとしては、PROSPECTOR (地質探査)、CADEUCIUS, INTERNIST, PUFF, CASNET (医療診断)、XCON (計算機システム構成) などがある<sup>8) 9)</sup>。

これに対し、問題の性質がはっきりしていない場合にはそのような単純な機構では役に立たないことが多く、より複雑な制御が必要になる。例えば HEARSAY-II という音声理解システムでは、音素抽出、単語抽出、構文解析、意味解析等をそれぞれ司る専門システム同士が「黒板」と呼ばれる共通の記憶領域を介して、互いに協同しながら解析を進める方法をとっている<sup>3)</sup>。この場合、人間にとっては問題は見えるにもかかわらず、複雑な処理が必要であり、十分な機能を実現しているとはいえない。同様の例として、観測データから帰納的にそれを記述する法則の抽出を目指した BACON がある<sup>4)</sup>。

最近ではエキスパートシステムが一種のブームの感を呈しているが、たとえ汎用のシェルを用いるにしても、専門的知識を抽出し、計算機に利用できる形に表現するという仕事には多くの困難がともなう。知識の自動獲得 (教科書等からの抽出、データからの帰納等)、知識間の不整合・矛盾の検出、知識の学習等は現在のエキスパートシステムの重要な課題であり、多くの研究が必要とされている。

これはシステムの構築段階にあってはもちろんだが、実際のコンサルテーションを行なう場合でも同様である。例えば医療システムでは所見や問診、検査等は人間に委ねられているが、その段階ですでにかなりの専門知識が必要とされている。

#### 4. 3. 2 知識表現

エキスパートシステム・シェルでは知識は「ルール」として表されることが多い。ここでいうルールとは、

もし <条件> ならば <動作> をせよ。  
という形のものであり、入力データや推論の結論から<条件>が成立つことがわかればルールが起動され、<動作>が実行される。例えば下は MYCIN のルールの例である<sup>2)</sup>。

```
IF 1) the infection is primary-bacteremia, and
   2) the site of the culture is one of the sterile sites, and
   3) the suspected portal of entry of the organism is
      the gastrointestinal tract,
THEN there is suggestive evidence (.7) that the identity of the
      organism is bacteroides.
```

上の.7はルールの確信度を表わしており、真(+1)と偽(-1)の間の値をとる。  
推論は確信度を最大にする方向に進められていく。このように、数値パラメタ等を用いることにより、推論の制御や結果の信頼性を表わす方法は他のシステムでもとられている。

ルールによる記述では、概念間の関連が明示的には示されない欠点がある。概念同士に階層的な関連性がある場合には、「フレーム」という表現がよく用いられる<sup>5)</sup>。

フレームは概念を表わすデータ構造で、その概念の属性や、概念の上下関係等、他のフレームとの関係が記述される。例えば下の例を見てみよう。

```
フレーム： 哺乳類
  上位フレーム： 動物
  下位フレーム： 人間、...
  足           ： 4本
  体温         ： 温血
```

```
フレーム： 人間
  上位フレーム： 哺乳類
  足           ： 2本
  身長         ： (標準値 165cm)
```

```
フレーム： A氏
  上位フレーム： 人間
  身長         ： 180cm
```

```
フレーム： B嬢
  上位フレーム： 人間
```

上で人間の足の本数、体温を尋ねると、前者は人間フレームの属性から2本、後者はフレームの階層をたどって温血という答えが返ってくる。哺乳類の足の本数4本は下位フレームにさえぎら

れて見えない。またA氏、B嬢の身長を尋ねると、前者は180cm、後者は上位フレームの標準値165cmという答えになる。

知識表現にはこのほかにも、述語論理を用いる方法（最近脚光を浴びている PROLOG はその1例）や意味ネットなどがある。いずれにも共通しているのは、記述が基本的には静的で、時間的に変動するデータや、動的な依存関係にある概念の記述が難しい点である。時間を考慮した表現方法としては非単調論理や時相論理が、動的に依存しあう概念の表現には「拘束関係」に関する研究が最近では行なわれている。またエキスパートシステムからは少し離れるが、ダイナミック・プログラミングの手法を応用することも各方面で試みられている。

エキスパートシステムにおける知識表現は上記のように、記号的に表わすことを前提としている。もちろんこれは数値的なデータを扱えない、あるいは統計的手法と無縁であるという意味ではない。MYCIN の確信度のように、一種の確率的指標を推論に利用するシステムは多いし、内部に統計処理を付加することも可能である。また上述の DENDRAL, HEARSAY-II, BACON などは生の観測データがシステムへの主要な入力である。しかし DENDRAL においては質量スペクトルのピーク（に対応する分子団）、HEARSAY-II においては音響データから得られる音素という、いずれも抽出された特徴がシステムの処理対象であり、特徴抽出そのものはサブシステムにより行なわれている。また BACON では比較的簡単な解析関数しか扱えない。つまり、特徴抽出そのものをエキスパートシステムの仕事としているものは（あるにしても）少ない。

#### 4.3.3 エキスパートシステムの特徴

数学的解析手法と比較すると、エキスパートシステムには次のような長所・短所が考えられる。

##### 長所

- (1) データの扱いが一元的ではなく、局所的な重みづけが可能である。
- (2) データの局所的変動による影響の全体への波及が押えられる。
- (3) データの欠落、信頼性の低いデータ、異常値等に対処できる。
- (4) 処理の過程が直観的に理解しやすく、処理の説明機能が簡単に作成できる。
- (5) 教育用システムへの転用等、付加的な利用価値がある。

##### 短所

- (1) 処理過程の安定性・頑健性に問題があり、思わぬエラーが潜んでいる可能性がある。またそのようなエラーは、知識が分散しているために発見が困難である。
- (2) 複雑なシステムの場合、システムの動作を把握するのが困難になる。
- (3) 現在のところ、データ獲得にあたっては人手による記号化の段階を経なければならないことが多い。
- (4) 対象についての深い知識、あるいは専門家の存在が必要である。開発が段階的、試行錯誤的で、時間がかかる。

#### 4.3.4 音の感覚量評価への適用

以上をふまえて、音の感覚量評価へのエキスパートシステム技術の適用可能性について検討してみる。

まず問題なのは利用の目的は何かという点である。そのような目的として、例えば次のようなものが考えられる。

##### 1) 評価システムそのものの作成

物理量や、表現語、その他の形態による音の表現、環境等の条件、場合によっては評価の指針等を入力し、目的とする評価を行なうシステムを作成する。

##### 2) 実験を管理するシステム

評価の指標を得るのに必要な心理学実験を管理・実行するシステムを作成する。言いかえれば、実験を自動化するシステムを作成する。これにより、実験やデータの整理にかかる時間や手間を軽減できる。実験計画を支援するシステムも可能性として考えられる。

##### 3) 実際の評価を行なうシステム

物理量、抽出された特徴、その他の形態による音のデータ、環境等の条件を入力し、それに対する感覚量評価を結果として出力する。これにはさまざまな内容が考えられるが、入力音により惹起される表現語を答える、入力音をカテゴリ分類する（楽器を当てる等）、基準音の知識ベースをもとに異常音を検出する（心拍等）、音の表現語や環境記述などから発音源を特定するなどはその一例である。

##### 4) 仕様に仕上がった音の合成

表現語による表現やその他の指定に仕上がって目的とする音を、シンセサイザー等により作成する。あるいはそれに見合う楽器や楽曲を選択する。

##### 5) 環境設計等へのアドバイス

音の感覚量評価に基づいて、音響空間や環境設計、あるいは環境音設計等へのアドバイスを与える。

##### 6) その他

どのようなシステムを作るかは目的に応じて変化する。しかし複数のシステムを作る場合でも、共通の知識ベースが利用できることが望ましい。

次にどのようなデータをシステムに与えるかが問題となる。音の物理量を生データとして入力する場合、そこからどのような特徴を、どのように抽出するかがわかれば都合がよい。そのためには第1章に示された音の諸側面の分類、及び3.2に紹介されたような音の心理的性質を物理的性質に対応させる研究が重要である。

この場合抽出自体はエキスパートシステムの仕事とはいえないので、むしろ抽出された特徴の方をシステムへの入力と考えるべきかもしれない。一方、生データから特徴抽出自体をシステムに行なわせることは、上述のように現段階の技術では困難が多く、将来の研究の進展に委ねるしかない。いずれにせよ、対象とする音が（楽器音に限られるといったように）限定される場合に

は、取扱いはより楽になる。

一方表現語のような言語的データの場合にはエキスパートシステムとの相性がよく、その枠組の中で十分扱うことが可能である。そのためには階層的に整理する等、表現語 (= 概念) 同士の関係が明示的に構造化されていれば、より高度な推論を行なっていく手がかりとなる。

さらに、言語表現として評価システムに有用なのは音そのものの表現よりはむしろ、環境その他、外的要因の記述と考えられる。例えば環境音設計の場面において、「病院のような静かな場所」とか「人の出入りの激しい場所」といったような内容の扱いはエキスパートシステムに向いている。

どのような処理内容がエキスパートシステム向きであるかについては問題を明確に識別した上でさまざまな角度から検討する必要がある。上記の項目のうち、現在のエキスパートシステム技術でも比較的扱いやすいと考えられるのは、実験計画/管理、仕様記述に基づく音合成などであろう。実験計画システムでは音そのものの知識に加えて一連の実験手法に関する知識も必要になる。このような知識は、表 3. 1 に示された手法の分類とともに、それぞれの特性、適用条件、コスト等を記述したものになる。また実験の遂行にあたっては評定者の応答に応じてその進め方を調整するような機能が考えられる。実験計画を行なうシステムとしては遺伝子組替え実験を計画する MOLGEN があり<sup>6)7)</sup>、実験管理については知的 CAI システムと関連づけられる。

シンセサイザで新しい音を合成する場合、直接そのパラメタを調整するのではイメージに合ったものを作るのが困難なことが多い。イメージ的記述から音を合成するシステムとして、例えば次の例のようなルール記述やユーザとのやりとりが想定できる (これは特定のシステムによる表現ではないが、ルール形式や自然言語インターフェースの利用などは現存のシステムに見合ったものになっている)。

#### ルール A

もし ピアノ音を作る  
ならば アルゴリズムを X にセットし、  
エンベロープを Y にセットし、  
パラメタ Z を値 n にセットせよ。

#### ルール B

もし 澄んだ音にする  
ならば パラメタ W の値を i だけ変化させ、  
パラメタ V の値を j だけ変化させよ。

#### 応答例 (下線がユーザの入力)

....

どのような音を作りますか?

ピアノのような音

どのような場所で鳴らしますか? 下から選んで下さい。

....

コンサート・ホール

わかりました。

ルール A を起動します。

繊細で柔かく

わかりました。

ルール X, Y, Z を起動します。

鳴らせ

(音を鳴らす)

もっと澄んだ音

わかりました。

ルール B を起動します。

鳴らせ

(音を鳴らす)

取消し

わかりました。

演奏

どの曲がよろしいですか？下から選んで下さい。

....

11 (番)

(演奏する)

もっと高音に伸びを

わかりました。

....

このようなルールの作成は体系だったものではなく、経験に基づくものにならざるを得ないが、ルールの反復的見直しにより有効に機能することが期待できる。またシステムが示した音の印象を表現語で表わしてもらうことにより、ルールの自動生成を行なうことも考えられるだろう。もう1つの例として、異常音検出は基準音の十分なサンプリング・解析が行なわれるならば実現可能であり、実用性も高いと考えられる。

最後に付加しておきたいのは、このようなシステム作成を目的ではなく、手段とする考え方である。つまりシステム作成にあたっては問題に関わる概念等を明確にし、定式化することが必要になるわけだが、逆に考えればシステムの動作をチェックしながらその過程を繰返すことにより、それまで意識されていなかった概念が明らかになる可能性がある。この場合、真の目的は感覚量評価に関する知識の明確化ということになる。ただし、現実問題としてはこれには多くの困難が伴う。



#### 4.3.5 計算機環境

ここで述べたようなエキスパートシステムを実際に作成する際に、考慮すべき点をいくつかあげておく。

数年前まではエキスパートシステムはもっぱら大型計算機の TSS 環境上で作られていた。これらは数億円以上するのが普通で、OS 環境も良好とはいえ、計算機の専門家でなければ使えなかった。これに対し、最近では高機能ワークステーションやパーソナルコンピュータでも利用が可能になってきている。特に XEROX 1100 シリーズや Symbolics Lisp Machine のような高機能ワークステーションは（エキスパートシステムの主な開発言語である）lisp をベースにした、エキスパートシステム専用システムといえる。高機能ワークステーションは安いものは数百万円、上記のもので2～3千万円のオーダーである。またパーソナルコンピュータは1～3百万円で一式が揃う。ただし、処理能力からみてパーソナルコンピュータで実用的なシステムを作ることは難しい。

これらの上で利用できるエキスパートシステム・シェルもいくつか商用になっており、OPS5, LOOPS, KEE などがその例である。これらはシステムとは別売になっているのが普通であり、高機能ワークステーションで1千万円程度、パーソナルコンピュータ用で数十万円程度する。ただし大学のような非営利団体の場合、安く、あるいはタダで手に入れられるものもある。

このほか、音そのものを扱う場合には A/D 変換器やデジタル・シンセサイザー、音響機器が必要になるが、これについては省略する。

開発の期間は、従来は数人年以上かかるのが普通であった。しかしこれはシェル開発も含めてのものであり、汎用シェルを用いる場合には数カ月から1年で、ある程度のものできる。しかし目指す性能を達成するためには、システムが一応完成したあとでも絶えず見直し、場合によっては全く作り直すことが必要である。

要員としては、やはり計算機の素人では無理で、ある程度エキスパートシステムに通じた技術者が不可欠である。某社が行なっている、知識工学技術者の教育プログラムを受講するには百万円以上の授業料を払わなければならない。もちろん、対象領域に通じた専門家の密接な協力は何より重要である。過去の事例としては、よほど計算機に理解のある専門家でない限り、十分な協力を得るのは難しいことが報告されている。

#### 文献

- 1) Barr, A., Feigenbaum, E.A. et al (eds) 田中幸吉、淵一博（監訳）：  
人工知能ハンドブック（全3巻）、共立出版（1983）。
- 2) Hayes-Roth, F., Waterman, D.A., Lenat, D.B. (eds) AIUEO（訳）：  
エキスパート・システム、産業図書（1985）。
- 3) McCorduck, P., 黒川利明（訳）：コンピュータは考える、培風館（1979）。
- 4) 溝口文雄、北沢克明：知識工学入門、講談社ブルーバックス（1982）。

- 5) Schank, R. : The Cognitive Computer, Addison-Wesley,  
石崎俊他(訳) : 考えるコンピュータ、ダイヤモンド社 (1985).
- 6) Winston, P., 長尾真、白井良明 (訳) : 人工知能、培風館 (1980).

#### 参照・参考文献

- 1) Buchanan, B.G. & Feigenbaum, E.A. : DENDRAL and Meta-DENDRAL : Their Applications Dimension, Artificial Intelligence, vol.11 (1978) pp.5-24.
- 2) Buchanan, B.G. & Shortliffe, E.H. : Rule-Based Expert Systems : The MYCIN Experiments of the Heuristic Programming Project, Addison-Wesley (1983).
- 3) Erman, L.D., Hayes-Roth, F. Lesser, V. & Reddy, D. : The HEARSAY-II Speech-Understanding System : Integrating Knowledge to Resolve Uncertainty, Computing Surveys vol.12, no.2 (1980) pp.213-253.
- 4) Langley, P.W. : Rediscovering Physics with BACON.3.,  
Proc. of IJCAI 6, pp.505-507. (1977).
- 5) Minsky, M. : A Framework for Representing Knowledge, in Winston, P.(ed.).  
The Psychology of Computer Vision. McGraw-Hill (1975).  
白井良明他 (訳) : コンピュータ・ビジョンの心理、産業図書。
- 6) Stefik, M. : Planning with Constraints (MOLGEN: part 1),  
Artificial Intelligence, vol.16 (1981) pp.111-139.
- 7) Stefik, M. : Planning and Meta-Planning (MOLGEN: part 2),  
Artificial Intelligence, vol.16 (1981) pp.141-169.