

## 多属性効用理論を応用した知識獲得方式†

満田 透†† 小林 康弘†† 野中 久典††

設計・計画問題では、複数の指標を総合的に評価して特定の代替案を選択する機会が多い。エキスパートシステムの作成に際して、この判断基準を従来のルール形式で表現するためには、判断基準を各指標の具体的な値の組合せとして明確化する必要があるが、これは専門家自身でも困難であることが少なくない。本論文では、このような場合の知識表現法および専門家の判断結果（既存の事例）からの知識獲得法を提案する。提案する手法では、多目的意志決定問題の一解法として用いられる多属性効用理論のモデル（多属性効用関数）を知識表現モデルとして利用する。まず、効用理論で用いられる分析手法により初期のモデルを決定する。次に、既存の事例とモデルから得られる結論が一致するようにモデルを修正することにより整合性のある知識を獲得する。モデルの修正は、修正候補を絞り込むための仮説選択モジュールと修正処理全体の制御を行う制御モジュールとを用いて行う。処理を効率化するために、仮説の選択、バックトラック時の戻り先の判定、等にヒューリスティクスを利用する。得られたモデルは、メタルールにより関連するルールと対応させておきルール判定時に利用する。本手法を建設作業の順序決定に関する知識獲得問題に試験的に適用し、代替案の選択に関する知識の表現法および獲得法として有効であることを確認した。

### 1. ま え が き

エキスパートシステム実用化のための技術課題として知識獲得支援技術の開発が挙げられる。エキスパートシステムの性能は知識ベースの完成度に大きく依存するため、専門家からの知識獲得は重要な意味を持つ。しかし、現実には、専門家自身でも問題解決に用いる知識のすべてを明確に意識しているわけではないため、単なるインタビューだけでは十分な知識を獲得することは困難である場合が多い。これに対し、インタビューを効果的に行う知識獲得支援手法が幾つか提案されている<sup>1)~6)</sup>。例えば、MORE は、診断問題を対象として、専門家が意識していない知識を意識させるためのインタビュー戦略を、SALT は設計問題を対象として、パラメータの設定、修正など設計手法に関する知識を獲得するためのインタビュー戦略をそれぞれ提案している。

一方、専門家が意識はしていても、言葉による表明が困難なためにルール化できない場合もある。例えば、設計案の選択において、コスト、信頼性、効率などの属性に着目することは明確になっても、選択基準となる属性値の組合せまでは明確化できない場合がある。このような問題は、上記のようなインタビューを中心とした知識獲得支援手法だけでは解決することは困難である。

設計案の選択のように複数の指標を総合的に評価して特定の代替案を選択する問題は、いわゆる多目的意志決定問題である。多目的意志決定問題の解法として AHP (Analytic Hierarchy Process)<sup>7),8)</sup>、多属性効用理論<sup>9),10)</sup>などがある。これらは、意志決定者の選好性を分析して、代替案の集合の中から特定の案を選択するための手法であり、工場の用地選択問題<sup>11)</sup>、設備投資計画問題<sup>12)</sup>などに応用されている。AHP では、主観的数値を各代替案に割り当て、この数値を代替案同士で比較した結果に基づき代替案を順序付ける。この手法は、定量化困難な指標も取り扱うことが可能、手続きが簡単などの特長を持っているが、評価の合理性、すなわち主観的数値の合理性は考慮していない。多属性効用理論では、代替案を直接評価するのではなく、定量化できる属性を選び、各属性の達成レベルに基づき代替案の評価を行う評価式を定義する。この時、評価の尺度の原点と単位を明確化することによって、尺度の性質を明らかにし、評価の合理性を考慮している。

知識獲得を専門家の判断基準を明確化することと捉えると、これらの手法のように専門家の選好性を抽出し定量化することも一種の知識獲得と考えることができる。設計・計画問題を対象にしたエキスパートシステムでは、複数の代替案の中から適切な案を選択するための判断基準、ノウハウをルール化する場合があるが、ルール化が困難な場合には、AHP、効用理論などの手法を応用することがひとつの解決策になりうる。なぜならば、これらの手法では、代替案の選択を決定するための基準を意志決定者から抽出でき

† Knowledge Acquisition Method Utilizing Multiattribute Utility Theory by TORU MITSUTA, YASUHIRO KOBAYASHI and HISANORI NONAKA (Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd.).

†† (株)日立製作所エネルギー研究所

るからである。

このような意志決定と知識の関連より、多目的意志決定問題の解決手法と知識工学の手法を融合する提案が幾つかなされている<sup>13),14)</sup>。知識獲得支援システム AQUINAS<sup>15)</sup>では、分類に必要な属性および属性間の依存関係を抽出し、ルールの構造を明確化すると共に、AHPにより各代替案の評価値を求め、これをルールの確信度として用いている。この手法は属性の抽出には有効であるが、AHPを用いているため代替案同士の比較が必要であり、代替案をあらかじめ特定することが困難な設計・計画問題では必ずしも有効とは言えない。これに対し、多属性効用理論では、モデル化にあたり各属性値の範囲さえ限定できれば、代替案を限定する必要はない。したがって、新たな代替案が発生してもモデルによる評価が可能のため、設計・計画問題への適用は有効と考える。しかしながら、この手法を知識表現の面から見直すと幾つかの問題点がある。

専門家に対するインタビューや専門家を実施した事例から獲得した知識を知識ベースとして活用するためには、整合性が重要である。すなわち、知識ベース内に格納された知識同士や知識ベースから得られた結論と専門家が出した場合との間に矛盾点が存在しないことが要求される。多属性効用理論では、特に専門家の結論との整合性が十分ではない。この理由は、この手法が、結論と現実との一致性をあまり重視しない性格が強いためである。すなわち、この手法は、本来、代替案の直接の順序付けが意志決定者自身でも確定困難な場合に用いられるものであり、知識獲得のように専門家が出した結論との整合性はあまり意味を持たない。しかしながら、これを知識表現モデルとして利用するためには、上述したように整合性の問題を解決しなければならないが、今までにこのような観点から多属性効用関数を議論した例は見当たらない。

本研究の目的は、多属性効用理論のモデルを用いて知識を表現し、専門家の結論と整合性のあるモデルを効率的に同定し、一種の知識ベースとして利用する手法を提案することである。

## 2. 知識獲得手法の概要

### 2.1 技術課題

多属性効用理論では、意志決定者の選好性を表す次のようなモデル（多属性効用関数）を同定し、これにより代替案の選好順序を決定する。すなわち、各案

の総合評価値の大小を比較し、順序を決定する。この時、各属性の効用関数および属性の重み係数（以下、トレードオフ係数と呼ぶ）は意志決定者に対する分析に基づき決定する。

$$U(x) = \sum w_i * u_i(x) \quad (1)$$

$$\sum w_i = 1 \quad (2)$$

$$0 \leq u_i \leq 1 \quad (3)$$

$x$  : 代替案

$U$  : 代替案  $x$  の総合評価値

$u_i$  : 属性  $i$  の効用関数（評価値）

$w_i$  : 属性  $i$  のトレードオフ係数

一般に属性ごとの効用関数の同定は50-50確率くじ法による基準実験によって行われる。まず、各0.5の確率で最良の結果  $x_1$  と最悪の結果  $x_0$  を得ると仮定されたくじと好ましが同等（インディファレント）と思われる確実に結果  $x$  を得るくじの  $x$  の値を意志決定者から求め、 $u(x) = 0.5$  とする。この処理を繰り返し、何点かの代表点を求める。次に、これらの点をフィッティングすることにより関数を求める。例を図1に示す。この例では、3ケースのくじに対する値、 $x_{.50}$ 、 $x_{.25}$ 、 $x_{.75}$  を意志決定者にたずねて決定している。また、トレードオフ係数も、属性間のインディファレントな点を求めることにより決定する。

このモデルを知識表現形式として用いるためには、意志決定者が判断した代替案の選好順序（判断結果）との整合性を確保しなければならない。両者の間に相違点が存在する場合には、モデルを修正する必要がある。修正を行う場合には、意志決定者の判断結果が正しいとすると次の3点を再検討する必要がある。

- ① 属性の種類
- ② 各属性の効用関数
- ③ 各属性のトレードオフ係数

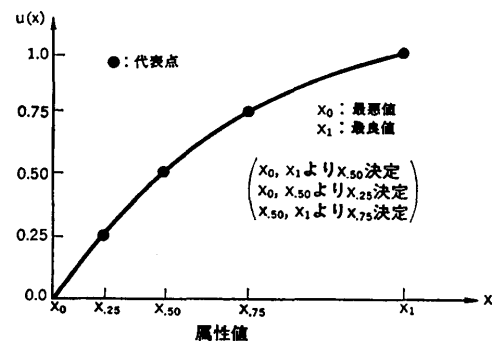


図1 単属性効用関数の例

Fig. 1 An example of utility function.

属性の選び方に対しては、例えば前述の AQUINAS の手法を応用することができるが、②、③に関しては、試行錯誤で行う以外にない。すなわち、どのトレードオフ係数を修正するのか、どの効用関数を修正するかを決定し、次にその修正量を決定し、修正後のモデルから得られる代替案の選好順序と意志決定者の判断結果とを比較する、といった処理を両者が一致するまで続けなければならない。これは、効率が悪いばかりでなく、意志決定者の判断結果を再現できる、すなわち整合性のある多属性効用関数を求めることも非常に困難である。

したがって、知識獲得の技術課題は、各属性の効用関数、トレードオフ係数を意志決定者の判断結果が再現できるように効率的に修正する手法を開発することである。修正を効率的に行うためには、モデルと意志決定者の判断結果を比較して修正対象を効果的に絞り込むことや、修正後の結果を検討し修正対象を変更するといった全体の制御を実施することが必要となる。

2.2 基本構成

本手法で対象とする問題の範囲では、選好関係に対して加法独立を仮定する。すなわち、ある属性の評価レベルは他の属性の評価レベルに影響されない。

多属性効用関数を同定することは、各属性の効用関数およびトレードオフ係数を求めることである。従来は、意志決定者に対する分析結果を用いて、効用関数、トレードオフ係数を各々独立に求めていた。本方式では、意志決定者の選好結果との比較情報をモデルにフィードバックする観点から、同定に対する次のような考え方を提案する。

ある代替案の総合評価値は、各属性の効用関数を与えられれば、トレードオフ係数を未知数とした関数で表現できる。したがって、一対の代替案の選好順序が与えられれば、トレードオフ係数を変数とした一つの不等式を定義できる。例えば、3属性効用関数で、代替案  $x$  が代替案  $y$  に優先する場合には、 $U(x) > U(y)$  が成り立つことから次の不等式が導出できる。

$$\begin{aligned} & \{u_1(x) - u_1(y)\} \cdot w_1 \\ & + \{u_2(x) - u_2(y)\} \cdot w_2 \\ & + \{u_3(x) - u_3(y)\} \cdot w_3 > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

すなわち、意志決定者が判断した代替案の選好順序を一対の代替案の選好順序の集合に置き換えれば、これらの関係から、トレードオフ係数を未知数とした不等式の集合を定義することができる。この時、意志決定者の判断結果を再現するトレードオフ係数を同定する

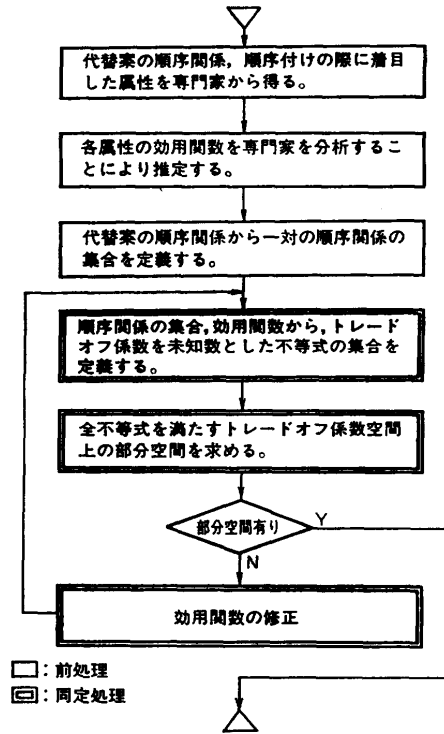


図 2 知識表現モデルの同定手順  
Fig. 2 Procedure for knowledge acquisition.

ことは、すべての不等式を満足する変数の値を求めることと等しい。すなわち、トレードオフ係数空間上ですべての不等式を満足する部分空間を求めることである。実際には、始めから正確な効用関数を得るのは困難であるため、このような部分空間は求まらないことが多い。本手法では、この時、効用関数を修正しながらトレードオフ係数を求めていくことにより多属性効用関数を同定する。処理手順を図 2 に示す。修正対象の絞り込みは、比較情報を利用して行う。絞り込みは、次の四つのレベルからなる。

① レベル 1 : 部分空間の選択

真のトレードオフ係数に最も近いと推定できる部分空間を選択し、この部分空間の係数を真のトレードオフ係数と仮定する。

② レベル 2 : 代替案の選択

選択した部分空間の係数では順序関係が再現できない代替案の対の集合から、総合評価値修正の対象とする代替案を選択する。具体例で説明する。以下のような代替案の順序関係の集合  $A$  を考える。

$$a_{i,j} \in A$$

$$a_{i,j} = \langle x_i, x_j \rangle : x_i \text{ は } x_j \text{ に優先}$$

この時、「 $x_i$  は  $x_j$  に優先」とは、 $U(x_i) > U(x_j)$  と等

価であるから、例えば、選択した部分空間のトレードオフ係数で  $a_{ij}$  が再現できない時には、 $U(x_i) \leq U(x_j)$  の関係が成立している。この時、この関係を  $U(x_i) > U(x_j)$  に修正する必要がある。それには、 $U(x_i)$  を増加させるか、または、および、 $U(x_j)$  を減少させる必要がある。

③ レベル3：属性の選択

選択した代替案の属性の中から効用関数修正の対象とする属性を選択する。例えば、 $U(x_i)$  を増加させるために、 $u_1(x_i)$ ,  $u_2(x_i)$ ,  $u_3(x_i)$  のいずれを修正するかを選択する。

④ レベル4：効用関数の修正量の決定

選択した属性に対応する効用関数の修正量を決定する。

以上のような手順で、効用関数を修正しても、全不等式を満足する係数が求まることは保証されない。なぜならば、一つの効用関数が複数の代替案に関連しているため、修正によりそれまで再現できていた他の代替案の順序関係を再現できなくなる可能性があるからである。したがって、上記の方法で効用関数を修正した後、再度評価を行い、トレードオフ係数が求まらずに修正が失敗の時には、上位のレベルへ戻って、やり直す必要がある。

以上のような処理は一種の探索問題であるが、この問題では、効用関数の修正に従って探索の範囲が広がっていくという特徴を持つ。例えば、図3では、始めに与えられた効用関数をレベル0のノードと考えれば、この関数を用いた場合のトレードオフ係数空間の部分空間がレベル1のノードとなる。この各ノードに対して、総合評価値を修正すべき代替案の組がレベル2のノードとなる。この各ノードに対して、修正すべき属性の組がレベル3のノードとなる。ここで選択されたレベル3のノードに応じてレベル4で効用関数が修正される。この結果、新たな効用関数、すなわちレベル0の新たなノードが発生する。もし、意志決定者の判断結果を再現できるトレードオフ係数が求まらない場合には、このノードの下に同じような探索空間が広がる。トレードオフ係数が求まる場合には、レベル1の新たなノードは発生しない。

このような処理を計算機上で実現するため、効用関数の修正方式は、図4に示すような基本構成とする。すなわち、各レベルに対応した仮説選択モジュールとこれらを制御する制御モジュールから構成する。各レベルのモジュールは、上位レベルの修正候補の絞り込

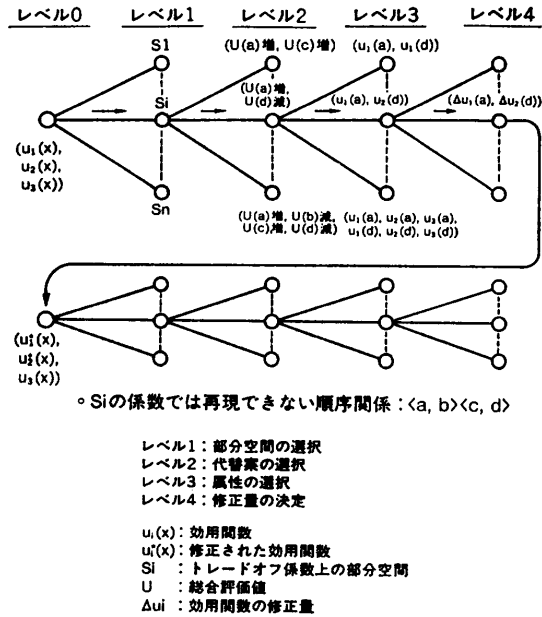


図3 効用関数修正のプロセスの例  
 Fig. 3 An example of utility function modification process.

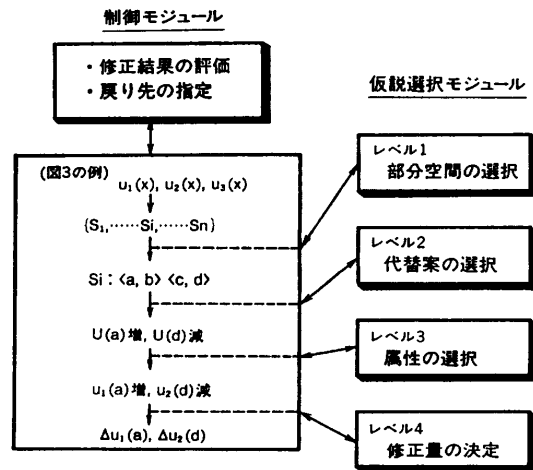


図4 基本構成  
 Fig. 4 Module configuration.

み仮説に基づき、そのレベルでの仮説を選択する。制御プログラムは、修正が成功か、失敗かを判断し、失敗の場合には、その原因に応じて、適切なレベルに戻り、仮説を選択し直す。すなわち、知的なバックトラックを行う。

2.3 ヒューリスティクスの利用

本方式では、ヒューリスティクスを利用して処理の効率化を図る。ここでいうヒューリスティクスは、対象とするドメインでの経験知識を指すのではなく、ド

メインに依存しない問題解決に関する知識であり、モデル同定のための対話プロセスをガイドすることにより処理効率の向上に寄与するものである。

上記プロセスにおいてユーザをガイドする場合、次の二つのステップが重要となる。

- (i) 修正をどのように開始するか？ 修正の着眼点を定めるステップをガイドする。
- (ii) 修正が失敗したら、どのようにすれば良いか？ 修正失敗時に対策するステップをガイドする。

前者は、修正対象の絞り込みのヒューリスティクスであり、問題を階層化して探索空間を限定することによるモデル同定の効率化の効果は大きい。

後者は、制御のヒューリスティクスであり、処理を繰り返す場合に知的にバックトラックすることにより、処理の効率化を図るものである。修正失敗が煩雑に生ずるような場合において有効となる。

知識獲得の初期のフェーズでは、(ii)よりも(i)のステップにおいてユーザをガイドすることがより重要である。

(1) 修正対象の絞り込みのヒューリスティクス

各レベルに応じたヒューリスティクスを用いる。例を以下に示す。

① レベル1 (部分空間の選択)

トレードオフ係数空間が各不等式により部分空間に分割された場合、部分空間は、多数決の原理により選択する。一例を以下に示す。

- 部分空間のなかで最も多くの不等式を満足する空間を優先的に選択する。
- 上記空間が複数あった場合には、より広い空間を優先的に選択する。

② レベル2 (代替案の選択)

ある代替案は、他の複数の代替案と順序関係がある場合が多い。したがって、一つの代替案の総合評価値に対し、矛盾する修正要求が発生することがある。したがって、それらの関係を考慮しながら修正すべき代替案を選択する必要がある。

各代替案の総合評価値  $U$  に対する修正要求を分類すると図5のようになる。本手法では、まず、代替案を図5の3タイプ (free, fix, conflict) に分類する。free とは、修正方向、修正量をユニークに決定できる代替案、fix とは、修正方向のみをユニークに決定できる代替案、conflict とは、矛盾する修正方向を持つ代替案である。さらに、再現できない順序関係に関する

- A : 代替案対の集合 ( $A=A_{OK}+A_{NG}$ )
- $A_{OK}$  : 順序関係が再現できている集合
- $A_{NG}$  : 順序関係が再現できていない集合
- $\langle x, y \rangle$  : 代替案の順序付,  $x$ は $y$ に優先

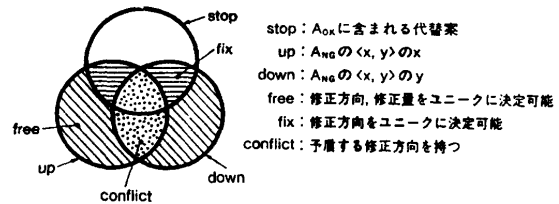


図5 代替案に対する修正要求の分類  
Fig. 5 Modification requirement for planning alternatives.

る代替案の組合せを上記3タイプの組合せに分類し、次の優先規則に従って修正すべき代替案を選択していく。組合せは、以下の6通りとなる。

- $\langle \text{free}, \text{free} \rangle$
- $\langle \text{free}, \text{fix} \rangle$
- $\langle \text{free}, \text{conflict} \rangle$
- $\langle \text{fix}, \text{fix} \rangle$
- $\langle \text{fix}, \text{conflict} \rangle$
- $\langle \text{conflict}, \text{conflict} \rangle$

各タイプでの選択のヒューリスティクスは、例えば次のようになる。基本的には、修正に対する自由度の高い代替案を優先する。

- $\langle \text{free}, \text{fix} \rangle$  : free の代替案を優先的に選択する。すなわち、修正による他の代替案の順序関係への影響の少ないほうを優先する。
- $\langle \text{fix}, \text{fix} \rangle$  : 再現できている順序関係を保存する可能性の高い代替案を優先的に選択する。例えば、 $\langle x, y \rangle$  が再現できていなくて、 $\langle x, p \rangle$ 、 $\langle y, q \rangle$  が再現できているなら、代替案  $y$  の総合評価指標を減少させるよりも、代替案  $x$  を増加させていたほうが、再現できている関係は保存される可能性が高い。

③ レベル3 (属性の選択)

レベル2で選択した代替案に対し修正対象とする属性選択に関するヒューリスティクスは、レベル2と同様、修正に対する自由度に基づく。ある代替案の総合評価値の修正方向が与えられた場合には、その代替案の各属性の効用関数から得られる評価値のすべてに対し、総合評価値の修正方向と同じ修正方向を定義する。この例を図6に示す。今、属性値を幾つかの区間に分け、区間ごとに修正方向を定義すると、各属性値の区間は、レベル2と同様三つのタイプに分類できる。各代替案に対して修正する属性を選択する時は、

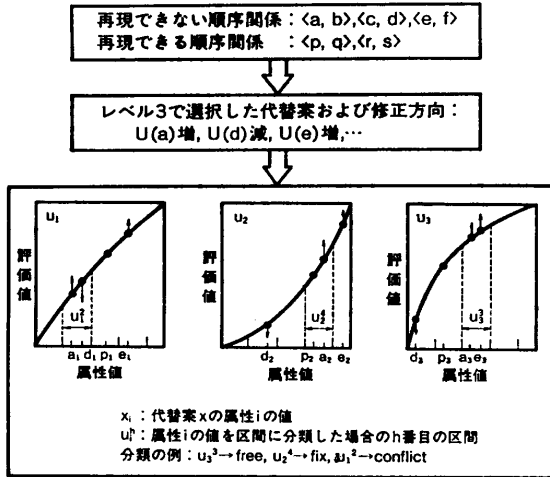


図 6 属性評価値に対する修正要求の分類  
 Fig. 6 Modification requirement for utility function values.

free, fix, conflict の順序で選択する。最も高い優先レベルの属性が複数存在する場合には、以下のような優先基準に従う。

- free の属性が複数の場合には、その属性値の区間に存在する他の修正すべき代替案の属性値の数が多いう方を優先する。すなわち、修正の効果が広範囲になるほうを優先する。
- fix の属性が複数の場合には、再現できている代替案の順序関係を保存する可能性の高いほうを優先する。

④ レベル 4 (修正量の決定)

各属性の修正すべき属性評価値、および修正方向に基づき、修正量を決定する。修正量は、修正対象を含む代替案の対  $\langle x, y \rangle$  に対し、 $U(x) > U(y)$  を満足する値である。ある属性評価値が複数の代替案に関連しているために複数の異なる修正量が要求される場合には、絶対値が最大の値を選択する。このようにして各属性値の評価値を修正した後改めてフィッティングにより効用関数を求める。

(2) 制御のヒューリスティクス

効用関数を修正した後、改めて不等式を再定義しても、すべての不等式を満足する部分空間が求まらない場合には、修正結果を評価し、適切なレベルまで戻って仮説を選択し直す。戻り先の判定、仮説の再選択に対するヒューリスティクスの例を以下に示す。

(a) 戻り先の判定

① レベル 4 で効用関数修正後、全不等式を満足する部分空間が求まらず、再現できない順序関係の数が

修正前より減少した場合には、新たに発生した探索空間のレベル 1 へ戻る。

② レベル 4 で効用関数修正後、関数の増加減の傾向が初期の傾向と異なる場合には、レベル 3 へ戻る。

③ レベル 3 で選択した属性がすべて conflict であるならば、レベル 2 へ戻る。

(b) 仮説の再選択

① 上記②の理由でレベル 3 に戻った場合で、前回選択した属性以外に、free の属性があれば、これも同時に選択する。

② 上記③の理由でレベル 2 に戻った場合で、その代替案と対をなしている代替案が free であれば、この代替案を選択する。

3. 適用結果および評価

3.1 手法の適用評価

開発した手法を実現するプロトタイププログラムを作成し、実際の問題を近似した問題に試験的に適用した。ここで、対象としたのは、建設工事の作業順序に関する知識である。専門家にインタビューした結果、次のような知識が得られた。「区画内に始めて配管を取り付ける場合には、配管の系統、配管の口径、機器との接続法を同時に考慮して作業順序を決める。」しかし、どのように考慮するかは明確ではなかった。すなわち、属性値の組合せの関係として明確化できなかった。このような知識の獲得は、本手法の適用対象である。

まず、多属性効用理論における加法独立が成りたつことを確認した後、専門家から、図 7 に示すような各属性の効用関数の初期値を得た。属性値が連続量ではなく一次系、二次系といった離散値であるため、効用関数はフィッティング式ではなく評価値そのものとした。この時、各評価値の上下限値を専門家に指定させた。また、専門家がこれまでに決定した作業順序から

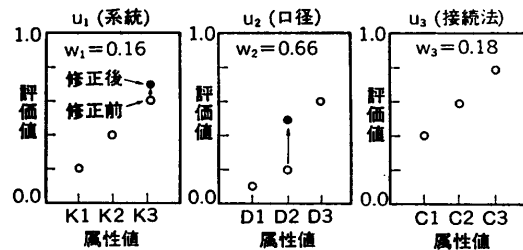


図 7 各属性の効用関数およびトレードオフ係数  
 Fig. 7 Examples of utility function and trade-off coefficient.

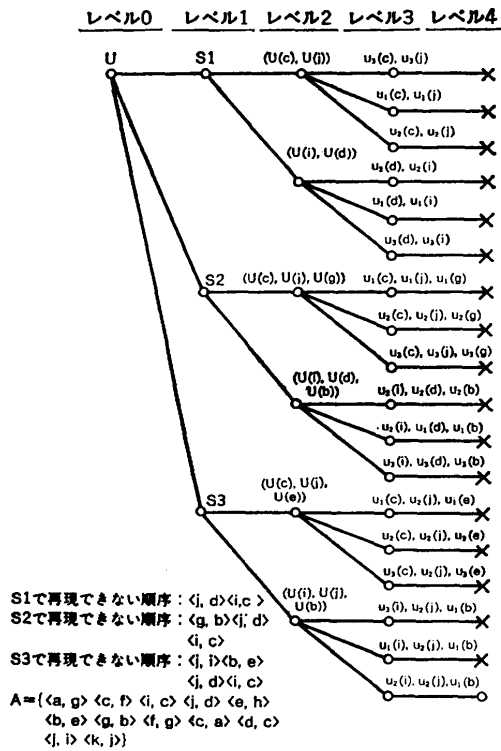


図 8 探索履歴の例

Fig. 8 An example of modification process.

作業同士の順序比較を 12 件定義した。これらの入力データに基づき、本手法により知識表現モデル、すなわち多属性効用関数を同定した。修正対象とする効用関数の探索の履歴を図 8 に示す。レベル 4 では、属性評価値を修正した結果、その値が始めに与えた上下限値を越えた場合には、修正は失敗と判定した。このようなヒューリスティクスを 32 件利用した。この例では、部分空間 S1, S2 では、モデルは同定できなかった。部分空間 S3 のトレードオフ係数では、<i, c>, <j, d>, <b, e>, <j, i> の順序関係が再現できない。この時、i, j, b を修正作業として選択し、i, j に対しては  $u_2$  を、b に対しては  $u_1$  を修正属性として選択した場合に、すべての順序関係を再現できるモデルが同定できた。処理プログラムは COMMON-LISP で記述し、同定までの処理時間は約 1.0 MIPS のワークステーションで約 30 秒であり、現実的な時間内でモデルの同定が可能である。最終結果を図 7 に示す。

同定したモデルを用いた知識は、図 9 のような形式で表現する。この時、モデルを用いて作業の優先度を判定する関数をあらかじめ定義しておき、条件 4 の判定時には、この関数が自動的に呼ばれるようにメタルールで関係付けておく。この結果、本手法によれば

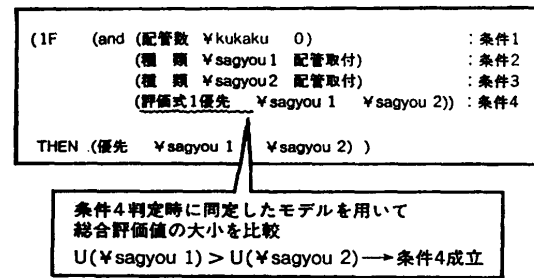


図 9 効用理論のモデルを用いた知識表現の例

Fig. 9 An example of knowledge representation using multiattribute utility function.

ルール、メタルール、手続き的関数、それぞれ 1 件を用いてすべての配管据付作業に適用可能な汎用的な知識を表現することが可能となる。このような知識を知識ベースに格納しておけば、新たな作業の集合が与えられた場合でも、自動的に作業の順序付けを行うことができる。

以上の結果から、各属性の評価レベルが他の属性の評価レベルに影響を受けない場合、すなわち加法独立が成立する場合には、専門家が判断した代替案の選好順序から、半自動的に判断に関する知識を獲得することが可能であることを確認した。本手法は、複数の属性を総合的に評価して対象の順序付けを行う際の知識を対象とした汎用的な知識表現法および知識獲得法として有効であると言える。

加法独立が成立せず、ある属性の評価レベルが他の属性の評価レベルに依存する場合には、レベル 3 の修正属性の選択が複雑となるが、それ以外は基本的には加法独立が成立する場合と変わらない。この場合には、レベル 3 において、いずれかの属性の評価レベルを仮りに固定し、加法独立が成立する形まで修正対象の候補となる属性を減らすことにより、対処可能と考える。

本手法を知識獲得支援システムとして表現するためには、トレードオフ係数空間上の部分空間の表示、効用関数の表示などのためにインタフェースを充実させる必要がある。これにより、モデル同定のプロセスの把握が可能となり、ヒューリスティクスの改良に役立てることができる。

### 3.2 本手法を統合した工事計画支援システム

開発した知識獲得手法を実際の計画業務に応用する場合、潜在的に、次の二種類の問題がある。

- (a) 属性の数、事例の数等の問題のサイズが大きくなり、計算量の面でモデルが困難に直面すること。

- (b) 多属性効用関数の同定のために、既存の計画事例のレビュー等、ユーザに強いる負担が大きくなること。

手法の適用評価に用いた建設工事の計画の分野では、実際の業務において、設計図面やマスタスケジュールを参照しつつ、試行錯誤的に計画を立案している。既に紹介したように、まとまった形では、標準的な計画のガイドラインや事例が現状では存在しないため、専門技術者が対話的に判断し作業順序を決めている。

プラントにおいて、工事の単位となる区画には、百のオーダーの機器や配管が存在する。属性の数は、機器にもよるが、重要なものが数種類ある。計画に際して、専門技術者は、個々の機器のレベルよりも、属性に注目した抽象度の高いレベルで問題を把握し、多くの場合、対象により決まる二、三の属性に注目して、作業順序を決定している。当面、このドメインにおいて、工事計画を支援するエキスパートシステムもマン・マシン対話による処理を基礎とする必要がある。

このドメインの事情より、当面獲得の対象と成る知識は、比較的単純なもの、例えばルールにすれば条件節の少ないものが主体を占める。したがって、本手法の導入に当たって、上記(a)の問題は緊急性が高くない。むしろ、今回の適用評価の経験を通じて、対策を要するのは(b)の問題である。以下に、この問題に対する一つのアプローチを検討したい。

プラント・エンジニアリングの分野においては、コンピュータグラフィックスを用いたシミュレーション・システムが、設計のツールとして開発されている<sup>16)</sup>。シミュレーション・システムは、工事の状況をその進捗を追って視覚化するポテンシャルを有しているもので、対象とする区画の状況を把握しつつ、機器や配管の搬入、据付等作業のタイミングを評価するのに適している。

今回開発した知識獲得手法を、全体としての工事計画支援システムに統合していく枠組として、シミュレーション・システムを用いた事例の収集が考えられる。この分野でのエキスパートの知識の明確化が進んでいないことから、最初から完成度の高い経験則が抽出できるとは限らない。しかし、途中段階での知識は、ユーザから拒否される事例を生み出すというフィードバックのメカニズムにより、多属性効用関数の形で、ユーザの判断に近い判断をするような知識に修正されることになる。

本手法による知識獲得は、基本的には、シミュレーションのツールを用いたマン・マシン対話による作業順序の決定プロセスのバックグラウンド・ジョブとして実行できる。このように、シミュレーション・システムを中心とする対話的な工事計画支援システムに統合することにより、知識獲得のためのユーザの負担を軽減できる。

#### 4. ま と め

多目的意志決定問題の一解法である多属性効用理論のモデル(多属性効用関数)を知識表現モデルとして利用し、専門家が判断した代替案の選好順序から、判断の基準となる知識を獲得する手法を提案した。この手法によれば、判断基準を属性値の組合せの関係として明確化困難でも、考慮すべき属性が明らかであれば、事例からの半自動的な知識の獲得、すなわちモデルの同定が可能となる。モデルの同定は、専門家とモデルとから得られる代替案の選好順序を比較し、この結果に基づきモデルを修正することにより行う。修正では、修正候補を絞り込むための4段階の仮説選択モジュールと全体を制御する制御モジュールとを用いる。処理を効率化するために、仮説の選択等にヒューリスティクスを用いた。

提案する手法を建設作業の順序決定に関する知識に試験的に適用した結果、専門家が行った順序付けを再現できる知識の獲得ができた。本手法は、従来のルール形式では獲得が困難である設計案の選択などに関する知識、すなわち複数の属性を総合的に評価して代替案を順序付ける知識に適用することが可能である。特に、対話的な計画支援システムに、本手法を統合することにより、多属性効用関数の同定におけるユーザの負担を軽減できる。

知識獲得は、エキスパートシステム実用化の重要な技術課題の一つであり、本手法はその解決策として有効なアプローチと考える。知識獲得方式の汎用性という面からは、加法独立が成立しない選好関係の取扱い、複数の専門家の取扱い等、が今後の課題である。

#### 参 考 文 献

- 1) Kahn, G. et al.: MORE: An Intelligent Knowledge Acquisition Tool, *Proc. of IJCAI-85*, pp. 581-584 (1985).
- 2) Kahn, G. et al.: Strategies for Knowledge Acquisition, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. PAMI-7, No. 5, pp. 511-522 (1985).



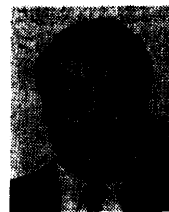
- 3) Marcus, S.: Knowledge Acquisition for Constructive Systems, *Proc. of IJCAI-85*, pp. 637-639 (1985).
- 4) Marcus, S.: Taking Backtracking with a Grain of SALT, *J. Man-Machine Studies*, Vol. 26, No. 4, pp. 383-398 (1987).
- 5) 川口ほか: インタビュー形式でユーザーと対話するデータベース論理設計支援システム, *信学論*, Vol. J 70-D, No. 11, pp. 2243-2249 (1987).
- 6) 川口ほか: インタビューシステムのためのシェル, SIS の開発, 人工知能学会第1回全国大会論文集, 6-21 (1987).
- 7) Satty, T. L.: *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill (1980).
- 8) Belton, V. and Gear, T.: *On a Shortcoming of Satty's Method of Analytic Hierachies*, *Omega* 11, pp. 228-230 (1983).
- 9) Keeney, R. L. and Raiffa, H.: *Decisions with Multiple Objectives, Preferences and Value Tradeoffs*, John-Wiley & Sons (1976).
- 10) 市川: 多目的決定の理論と方法, 計測自動制御学会 (1980).
- 11) 刀根: ゲーム感覚意志決定法, 日科技連出版 (1986).
- 12) 野村ほか: 企業内の設計・計画・評価問題における多目的最適化手法の応用, システムと制御, Vol. 28, No. 11, pp. 651-659 (1984).
- 13) 田村: FMS スケジューリングにおける多目的評価と知識工学, 大阪大学知識工学研究会第3回研究会資料 (1986).
- 14) 小林: 多目的意志決定—知識工学方法論, システムと制御, Vol. 31, No. 4, pp. 275-285 (1987).
- 15) Boose, J. H.: Use of Repertory Grid-centered Knowledge Acquisition Tools for Knowledge-based Systems, *Proc. of 2nd AAAI Knowledge Acquisition for Knowledge-based Systems Workshop*, pp. 2.0-2.19 (1987).
- 16) 好永ほか: 三次元プラントレイアウト計画 CAD システム, 日立評論, Vol. 68, No. 4, pp. 325-330 (1986).

(平成元年5月19日受付)  
(平成2年4月17日採録)



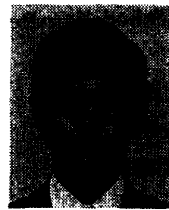
満田 透 (正会員)

昭和28年11月13日生。昭和52年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。昭和54年3月同大学院理工学研究科修士課程修了。同年4月(株)日立製作所エネルギー研究所入所, 現在に至る。BWR 炉心運転管理システムの開発, 配管レイアウト CAD システムの開発に従事。電気学会, 日本原子力学会, IEEE などの会員。



小林 康弘 (正会員)

昭和22年10月21日生。昭和45年3月東京大学工学部原子力工学科卒業。昭和50年3月同大学院原子力工学専攻博士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。昭和53年4月より同社エネルギー研究所勤務, 現在に至る。原子力プラントの信頼性・安全性, 新型 BWR 炉心の概念設計, 省エネルギー面からのシステム評価, プラント設計自動化の研究開発に従事。工学博士。人工知能学会, 電気学会, 日本原子力学会, IEEE, AAAI などの会員。



野中 久典 (正会員)

昭和37年生。昭和59年大阪大学工学部原子力工学科卒業。昭和61年同大学院修士課程修了。同年(株)日立製作所エネルギー研究所入社。知識工学的手法を用いるプラント建設工程計画支援システムの開発, 非線形最適化システムの開発に従事。日本原子力学会会員。