

## 解説

## 事例ベース形推論とその応用例†



奥田 健三†† 山崎 勝弘†††

## 1. はじめに

人間が問題解決を行う場合、いつも原理・原則や規則に基づく推論によるのではなく、失敗を含めて過去の経験、推論結果からの類推をベースとすることが多い。事例ベース形推論 (Case Based Reasoning, CBR) は 1980 年代初めごろから、主に認知科学の分野で研究が進められ、AAAI-86 の認知モデルの部門で取り上げられ、以後これに関する研究が各所で活発に行われている<sup>1)</sup>。さらに 1988 年には、事例ベース形推論に関するワークショップが開催されるなど、静かな関心が広がりつつある<sup>2)-4)</sup>。

Schank はその著書「ダイナミック・メモリ」において、「人間が理解し、学習するということ」を想起 (reminding) という現象をとおして議論し、さらに融通性のある記憶構造をいかに構築するかについて述べている<sup>2)</sup>。

想起とは一群の知識を構造化し、それを適当な時期に取り出せるという個々の人間に生じる現象である。専門家は新しい入力を受け取ると、それを評価し、以前処理したことに照らして理解する。すなわち、新経験が発生するとそれをもっとも関連深い経験と照合し、そのとき想起が発生して、新経験は旧経験を用いて索引付けされる。したがって、想起は記憶構造の自動的修正の原動力であり、理解と学習に密接に関連している。

理解とは過去の経験の中で入力にもっとも似ているものを探し出し、新入力と古い記憶との相違を示す索引から、以前の経験に照合してコード化することである。理解への鍵は、異なった経験間の本質的な類似性が記録される高水準構造を、システムがたえず作り出

すことである。このために、記憶組織パケット (MOP) と主題による組織パケット (TOP) を用いて、経験を一般化して記憶する。

Kolodner は Schank の長期記憶の認知モデルの研究をベースとして、問題解決における CBR 推論のモデルについて議論している<sup>5), 6)</sup>。Hammond は計画とゴールの相互作用に関する研究で case-based planner という用語を用いている<sup>3), 7)</sup>。一方、Carbonell は過去の問題解決における意志決定過程を再構成して、新しい問題に適用する方法について論じており<sup>8)</sup>、これは Kolodner の研究にもっとも近い<sup>9)</sup>。Schank から始まった以上の研究が事例ベース形推論の萌芽期の研究であると考えられる。

このように人間の記憶に関する認知科学の研究成果を取り入れることにより、事例ベース形推論は大きく発展することが期待される。現在、論文で取り上げられている対象課題は、発見的探索、説明の生成、物語理解、計画、設計、制御、運用、診断、法律、製造、戦術の立案<sup>9)</sup>などである。本手法は各分野でのニーズにより生まれたもので、発展途上・研究段階のものであり、まだ必ずしも体系化されてはいない。今後、各種応用に対する研究を通じて精緻化されていくものと思われる。

## 2. 事例ベース形推論の概要

## 2.1 定義

事例ベース形推論は、過去に行った推論結果をなんらかの基準に基づいてメモリに格納しておき、新たな問題が発生した場合、メモリからその問題と関連性の強い適切な事例を取り出して、必要なら修正を加えて問題の解を得ようとするものである。ここでメモリに格納された事例の集合を事例ベースという。事例ベースは将来の使用のために新しい事例を組織的に統合できなくてはならない。事例ベースの構築法について 2.2 に示す。推論は次の手順で行われる<sup>10)</sup>。

1) 事例を格納した事例ベースから現在の問題状況

† Case-based Reasoning and its Applications by Kenzo OKUDA (Dept. of Information Science, Faculty of Eng., Utsunomiya University) and Katsuhiro YAMAZAKI (Dept. of Information Science, Faculty of Sci. and Eng., Ritsumeikan University).

†† 宇都宮大学工学部情報工学科

††† 立命館大学理工学部情報工学科

に近い事例を検索する (2.3).

2) 検索された事例と現在の問題状況とを比較し、両者の関連性を評価する (2.4).

3) 現在の問題状況に適合させるため、検索された事例に修正を加える (2.5).

4) 検索された事例がもつ知識を、現在の問題状況に適用して推論を生成する (2.6).

2.2 事例の記述、事例ベースの構築法

事例の記述や事例ベースの構築法について、とくに一定の形式があるわけではないが、多くの研究がなされている<sup>11),12)</sup>。ある問題状況が与えられた場合、これに関連深い事例の検索が効率よく系統的に行われる必要がある。このために、複数の事例に共通する特徴を抽出して一般化し、かつ共通の基準からそれを区別し得る特徴により、索引付けを行う場合が多い。また、具体的な表現法としては、意味ネットワーク、木構造、フレーム表現などが考えられる。その例を次節で示すが、そこでは一般化された挿話に基づく経験 (事例) がメモリに格納されており、その構造は同様な挿話のクラスを記述する一般化された知識をもつ。個々の経験はそれが属するクラスの経験群のなかから、それを区別し得る特徴により索引付けられる<sup>6)</sup>。

2.3 事例の検索

Kolodner はメモリから出来事を検索し、新しい出来事が追加されたときにはそれを自動的に再編成する CYRUS システムについて論じている<sup>13)</sup>。挿話記憶組織パッケージ (E-MOP) はその挿話を特徴づける一般情報とその挿話を索引化する木構造からなる。図-1 に外交会談に関する MOP を示す。MOP 1 は外交会談に関する一般情報を持ち、MOP 2・3 はおのおの「ベギンとの会談」「キャンプデービット条約に関する会談」を索引化する。これらの MOP 1・2・3 はある共通の性質を記述したクラスである。個々の出来事はクラスの基準から区別し得る特徴によって索引付けされる。登場人物の索引をたどり、ベギンの索引からベギンとの会談を組織するサブ MOP が見つかる。話題の索引から SALT の索引をたどり、SALT に関する唯一の出来事である EV 2 が見つかる。

検索の手順は次のとおりである。

- 1) 索引を選択する。
- 2) 索引を操作し、出来事が見つかれば特徴をチェックし、目標の出来事かを調べる。E-MOP が見つければ1)に戻る。
- 3) 索引を選択したがもっと情報が必要ならば、精

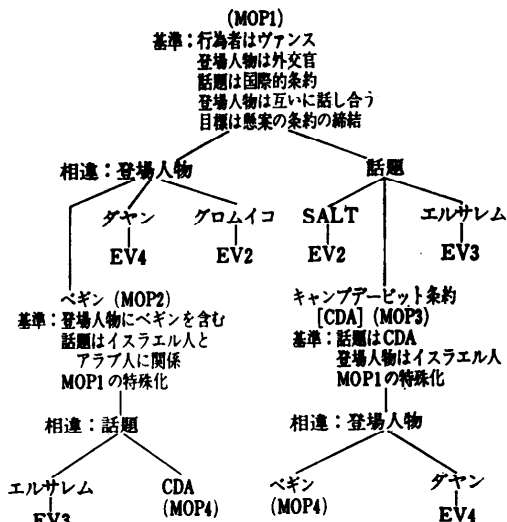


図-1 外交会談に関するエピソード記憶組織パッケージ

緻化 (elaboration) を行う。うまく見つければ2)へ行く。さもなければ関連した出来事の文脈を探す。

ここで、次の三つの質問を考える。

- (Q1) ダヤンとのキャンプデービット条約に関する会談に出席したか。
- (Q2) エルサレムでの会談に出席したか。
- (Q3) SALT について君はだれと話したか。

(Q1) に対しては、ダヤン、キャンプデービット条約いずれの索引をたどっても EV 4 を発見できる。(Q2) に関しては、場所の索引がないので検索できない。精緻化を行って、参加者に関する情報を推論し、「ベギンかダヤンかワイツマンと多分キャンプデービット条約に関する話題でエルサレムで開かれた会談」とすることにより EV 4 を発見できる。(Q3) では、SALT という話題から「外交会談」の文脈を推論し、「SALT に関する外交会談」で探す。

Barletta と Mark はロボット組立工場の故障回復における説明に基づく索引付け問題について検討している<sup>14)</sup>。事例はある故障から回復したオペレータの行為の系列からなる。応用定理 (domain theory) は機械内の症状と原因との関連を記述する。索引付けでは、各行為が正当であるか否かを、原因と症状との関連で調べる。その手順は、まずすべての徴候や観察された事実を見つけるために、事例に適用される応用定理の部分網 (説明木) を取り出す。次に、説明木において各事実が適切か不適切かを推論する。最後に、不適切な特徴を除き、残りの特徴を索引にする。適切な特徴

は一般化されて一次索引となり、事例を検索するための必要条件を示す。説明木に含まれない特徴は二次索引となり、事例を検索するための十分条件を示す。

2.4 事例の評価

事例の評価に一定の形式があるわけではないが、ここでは医療診断（心不全）を対象とした Koton の論文「原因説明における証拠に関する推論」<sup>15)</sup>を用いて説明する。

現在の問題状況と検索された事例との間には、一般に多くの類似点と相違点がある。多くの類似点があるにもかかわらず、適合を無効にするような重大な相違点をもつ場合や、逆に相違点の本質的でない場合もある。

まずこの節で使用する用語について説明する。患者に関する記述は特徴から構成される。特徴は年齢・性別・症状・検査結果・病歴・現在の治療情報などの入力データと、患者に対する原因説明（例を図-2に示す）・診断・治療勧告・結果などのデータからなる。状態とは、図-2において、大文字で記された各節を意味する。証拠とは、患者個人の特徴をいい、図-2の小文字で示された節の情報をいう。事例とは、以上の情報をすべて含んだもので、患者ごとに事例ベース

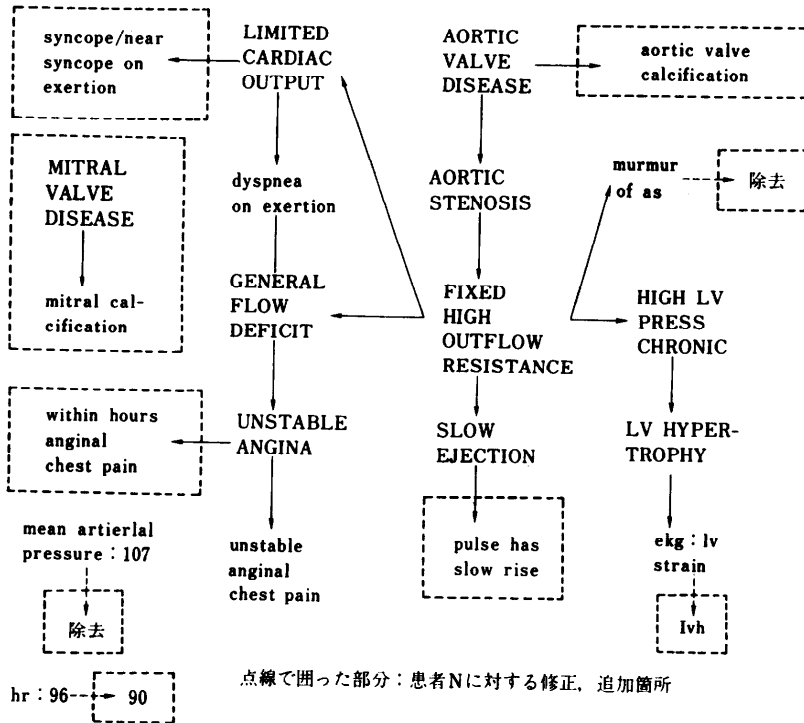
に格納されている。

検索された事例の採用を正当化するために、証拠についての推論のための原則（証拠原則）を用いる。この証拠原則は大別して三つに分けられる。

第一の原則は、検索された事例の状態が現在の問題状況により、除外されるか否かを決定するのに用いられる。すなわち、検索された事例における何かの状態に対して、ある特徴の可能性がないことが検出された場合、それを適合解から除外する。たとえば、心拍数が1分間に40という値は、高心拍数とは適合しない。

第二の原則は、検索された事例の状態と現在の問題状況との相違点が重要でないか、あるいは修正可能なことを示そうと試みる。すなわち、ある特徴が検索された事例にだけ存在し現在の問題状況にはない場合、

1) 検索事例を用いて、現在の問題状況に欠落している証拠を見いだすことを試みる。図-2において、murmur of as（大動脈狭窄による心臓の異常音）という証拠が、検索された事例の患者Dには認められたが、これから診断しようとする新患者Nでは確認されていない。Dの場合、murmur of asはFIXED HIGH OUTFLOW RESISTANCE（固定的な高流出抵抗）の証拠であるが、Nにはこの特徴を支持する他の証拠



点線で囲った部分：患者Nに対する修正、追加箇所

図-2 心不全診断における原因説明図

として pulse has slow rise (心拍数がゆっくり上昇) が存在するので, murmur of as は除去される. 2) その特徴が原因説明に用いられていないならば, 現在の問題状況の説明のどんな状態にも影響を与えないので, その特徴は無視する. 図-2 で患者 D の原因説明に年齢情報が含まれていないので, 患者 N についても, 原因説明においてその情報は無視される. 一方, ある特徴が現在の問題状況にだけ存在し, 検索された事例にはない場合, 1) この特徴を検索された事例の原因説明における, ある状態によるものと考えようと試みる. 図-2 では MITRAL VALVE DISEASE (僧帽弁症) → mitral calcification (僧帽弁の石灰沈着) が付加されている. 2) その特徴は異常だが, 存在する状態に対する証拠でなく, また新しい状態を強く示唆しなければ, その特徴を無関係な特徴として原因説明に付加する. 一例をあげると, ある症状に対して年齢が重要な要因でない場合などである.

第三の原則は, 推論するのが容易な特定の値をもつ特徴を扱う. 1) 値が正常な場合は, 説明の必要はない. たとえば, 正常体温なら原因説明は不要である. 2) 検索された事例に, ある特徴がない場合には, 現在の問題状況にはその特徴を含まないと仮定する. 3) 数値データをそのデータを含む定性的な表現, たとえば, 「やや高い心拍数」に変更する.

### 2.5 適合のための修正

検索された事例を現在の問題状況に適合させるために, 原因説明に修正を加える例を Koton の論文<sup>18)</sup>に従って述べる.

ある状態に対するすべての証拠が除去された場合, あるいは証拠が唯一の可能な原因をもつ場合には, その状態はおのおの除去または付加される.

検索された事例で用いられた証拠が現在の問題状況にない場合, 証拠, 関連する特徴, リンクは除去される. 一方, 原因説明に証拠, 関連する状態へのリンクを付加することもできる. さらに, 二つの数値が同じ定性値をもつ場合, その定性値に置き換える. このほか, 二つの状態間に原因リンクを付加したり, 原因説明ができない場合に測定を要求する機能などがある.

図-2 では検索された患者 D の原因説明を用いて, 新患者 N の原因説明を生成する例を示している. 同図で点線で囲んだ部分が患者 N に適合させるために修正された箇所である.

### 2.6 推論の生成

前節で推論は終了し問題の解決はなされているが,

原因の説明などが必要な場合には, この段階で行われる.

一般に問題解決システムにおいて, 事例ベース形推論では適切な事例が事例ベースに格納されている場合には, 良好な応答性をもって, 適切な解が得られることが期待される. しかし, 事例が登録されていない場合には, 解が得られる可能性は低い. これに対して一般的な推論アルゴリズムでは, 処理に時間がかかることはあっても, アルゴリズムの能力に応じて柔軟な処理が期待される. そこで, 両者を併用する試みがなされている.

## 3. 事例ベース形推論の応用例

事例ベース形推論の適用は, 1. でも述べたように, 広い分野に対し試みられている. この章で触れないものに, たとえば, Lehnert による英単語発音学習システムがある. ここでは, 大容量の知識ベース中の多数の関連事例のなかから検索する方法と, 構造化されたネットワークを数値弛緩法を用いて多重の知識源を統合する方法を述べている<sup>16)</sup>. また, Ram は物語を理解するシステムを構築するにあたり, 質問を逐次生成して理解を深めていく方法を提案している<sup>17)</sup>.

### 3.1 法律問題への応用

法律の規則に従って演繹的に推論を進める場合, 過去の判例が参照される. 規則は演繹的に正しい決定を推論するために十分なほど定式化されていないし, 法律上の問題に対して唯一の正しい答はめったに存在しない. 法律の専門家は判例や事実に対して, 競合する解釈を戦わせながら推論を深めていく.

ここで紹介する Ashley, Rissland による HYPO というシステムは, 関連の深い事例を用いて, 当面する現在の問題状況に対する推論を支援する<sup>18)-20)</sup>. この場合, 関連事例に索引付けしたり, 検索するだけでは不十分で, 検索された事例と現在の状況との詳細な比較・評価が必要である.

(1) HYPO の概要と事例の検索・評価 HYPO の主要な機構は, 判例木 (claim lattice) と呼ばれる機構である. この判例木は現在の問題状況を根とし, 事例ベースから検索された概念的に近い関係にある事例群をノードとして構成される.

HYPO はある法律における主な判例の知識ベースと, 索引方式とをもっている. 索引方式は問題状況と重要な特徴を共有する判例の検索のための基準 (dimension) に基づいている. 弁護士は以下に述べる項

目に従って、判例間の関連性を評価する。

- 1) 現在の問題状況 (current fact situation, cfs) と、関連事例間の類似/相違点を明らかにする。
- 2) 現在の問題状況にもっとも適合する事例に対する結果の評価。
- 3) どの事例が強い論拠を与えるか。
- 4) 現在の問題状況を法律上の異なる観点からみた場合、強い論拠を与える事例や関係はどうなるか。
- 5) 現在の問題状況に変化を与えた場合、判例木上での判例や特徴の加除の状況。

HYPO では判例木を組み立てるために、2種類の知識を用いる。すなわち、事例知識ベース CKB に格納された現実の判例と、基準のライブラリである。CKB 中の判例は判例表現言語で記されており、階層的フレームからなる。フレームには、原告、被告、法律上の主張、有力団体、判決、事実などが含まれる。

ある特定の領域の問題に対して、原告/被告側の強みと弱みを構成する事実の集まりを整理したものが基準である。図-3 はその例で、6つの基準からなり、そこに記された事実の程度に応じて原告の立場は強められる。この基準を用いて、判例をいろいろな観点から評価することができ、したがって特定の法的主張の視点からの重要な特徴を強調することができる。基準はフレーム形式の知識源である。第一に、プログラムは、基準が判例に適用できるか、あるいは基準の前提条件を用いて、その基準がニアミスであるか否かを調

べることができる。ここでニアミスとは、すべてではないが、いくつかの前提条件が満たされていることをいう。第二に、HYPO は基準中の着目しているスロットを用いて、その基準に従って判例を比較する。

図-3 の Bribe-Employee のスロットには、被告が原告の従業員に転職を勧めるために提供した事実が記述される。スロット値の例として、昇給、昇進、株の贈与、買収行為をしない、などがある。第三に、HYPO は基準の索引により、類似の判例を検索することができる。

図-4 は問題状況を判例表現言語を用い、事実の記述 (factual predicate) を行い、ある特定の法的事実の真偽を述べる。現在の問題状況を HYPO に入力すると、基準のライブラリを走査し、図-5 のような判例解析レコードを生成する。このレコードは、適用可能な事実の記述、適用可能な基準、ニアミスの基準、潜在的な主張、関連のある判例を含んでいる。

HYPO は判例解析レコードを用いて、図-6 のような判例木を構成する。CKB から取り出した判例を、問題状況と判例の基準の重なりぐあいを調べて、判例木上に配置する。言い替えば、それらの判例が現在の問題状況に対して、どれだけ関連性があるかを具体的に示す。この場合、根にもっとも近い節点に問題状況にもっとも関連のある判例が配置される。

(2) 適用例 次に企業秘密の横領についての例を示す。図-3 は基準を示し、図-4 は Telex 対 IBM の判例に基づく cfs を示す。図-3 にあって図-4

- \*1. Brought-Tools: 原告の元従業員が原告のノート、図面、ツールを被告に渡した。
  - 2. Competitive-Advantage: 原告の秘密情報に対する被告のアクセスは、被告に利益をもたらした。
  - \*3. Disclose-Secrets: 原告はその秘密を部外者に自発的に明かさなかった。
  - 4. Noncompete-Agreement: 原告の従業員は守秘契約を結んでいた。
  - 5. Bribe-Employee: 被告は原告の従業員を転職のため買収した。
  - \*6. Vertical-Knowledge: 原告の秘密は顧客の business methods に関するものではなかった。
- \* 図-4 の例での基準に含まれていない基準 (ニアミスの基準)

図-3 基準 (企業秘密の横領の例)

- 5. Bribe-Employee: Telex は同社への転職の誘いとして、IBM の Merlin プロジェクトの元従業員に給料の増加、株式の取得、ボーナス (1人あたり 50万\$) を提供した。
- 4. Noncompete-Agreement: すべての IBM の元従業員は同社と守秘契約を結んでいた。
- 2. Competitive-Advantage: IBM の企業秘密にアクセスしたので、Telex は競争製品をより短期間に、かつ少ない費用で開発した。

図-4 Telex 対 IBM における cfs

適用可能な事実の記述: exist-corporate-claimant, exist-confidential-info, employee-switched-employers, . . .  
 適用可能な基準: Agreement-Not-To-Disclose, Bribe-Employee, Competitive Advantage  
 ニアミスの基準: Brought-Tools, Disclose-Secrets, Vertical-Knowledge  
 潜在的な主張: Trade secrets misappropriation, breach of nondisclosure agreement  
 関連のある判例: Midland Ross, Data General, Structural Dynamics, Raycorp vs. Tronic, Modern Controls

図-5 cfs に対する判例解析レコード

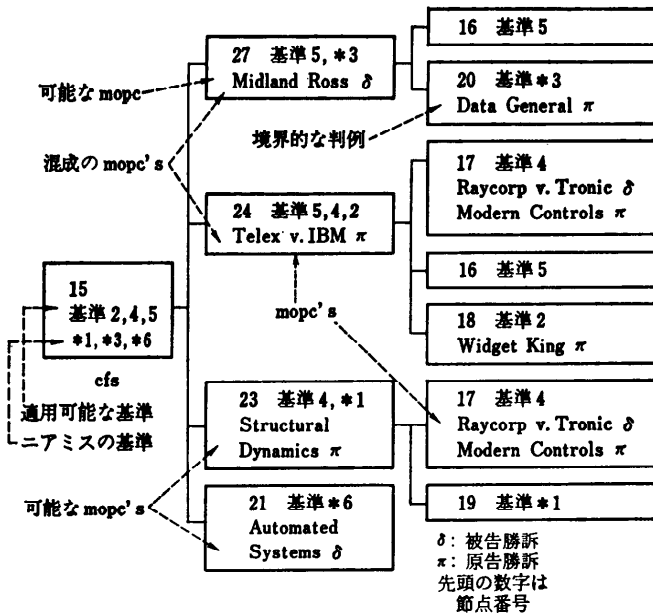


図-6 判例木

にない基準はニアミスの基準である。図-5 はその cfs に対する判例解析レコードであり、図-6 はこの場合の判例木である。

図-6 は企業秘密の横領という観点から、図-4 の cfs を解析するために構成されており、mopc's とは、cfs ともっとも関連の深い判例 (most-on-point cases) を表す。根の節点 15 は cfs であり、6つの基準が示されている。No. 15 以外の節点は企業秘密に関し、cfs と関連の深い判例を示している。ニアミスを含まない、根にもっとも近い節点 24 が mop'c となるが、そうでない節点 27, 23, 21 はニアミスの基準を含んでおり、事実上仮想的な変化を与えた場合で、可能な mopc's を意味する。図-6 で mopc's は節点 24 のほか、節点 17 の判例がある。葉の節点 16 などは cfs との関連性は小さくなる。

mopc's を含む判例木の主要な枝は、cfs に関する議論の一つの道筋を示す。節点 17 にみられるように結果の異なる判例が含まれる場合もある。節点 20 はニアミスの基準だけであって特定の基準についての極端な場合を示している。節点 27 と 24 のような仮想的な混成の mopc's は、原告と被告に対して下された異なる mopc's の特徴を組み合わせたものである。

このように HYPO では、過去の判例を利用している。いろいろな観点からの分析が可能のように考慮されている。

### 3.2 電力系統事故復旧支援への応用

電力系統は地域的に大きな広がりを持ち、落雷をはじめ構成機器の故障による停電事故に対して、自動的に保護するシステムが確立している。しかしきわめてまれではあるが、広域の停電事故に対しては、システムのもつ多様性から完全な自動保護は困難であり、運転員の判断に委ねられている。

停電状態を回復するための事故時復旧制御はその性質上緊急を要するので、高い処理性が望まれる。その解決法の一つとして、過去に得られた典型的な復旧案の事例を事例ベースに蓄えておき、これを積極的に利用する方法が考えられる。文献 21), 22) では、事例ベース形推論と一般的な復旧アルゴリズム (以下に述べる復旧方策を、任意の系統に適用できるように記述したもの) とを併用し、両

者の特徴を活かすシステムについて記されているが、ここでは事例ベース形推論についてその概要を述べる。

#### (1) 問題状況の把握

事故にともなう保護装置動作に基づいて、停電の領域、停電電力を求める。

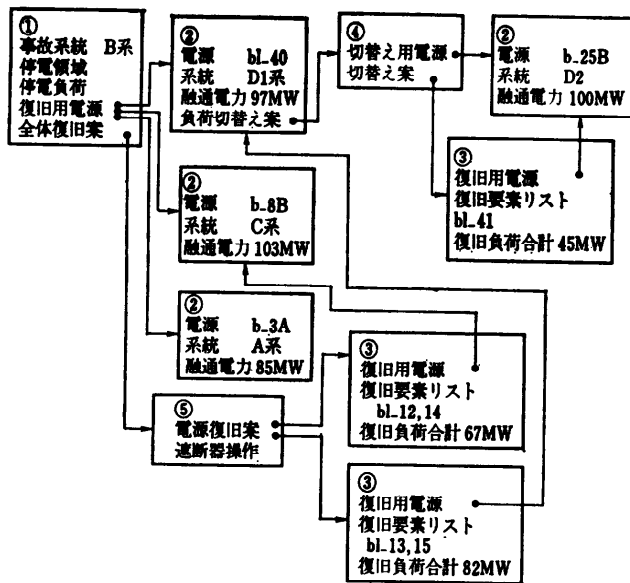
#### (2) 問題状況に関連の大きい事例の検索

事例ベースからの事例の検索法は全体の処理性に大きな影響を与える。そこで事故系統、停電領域、停電電力、事故要素、設備停止要素などの重要なパラメータに着目し、問題状況にもっとも近い事例を検索する。

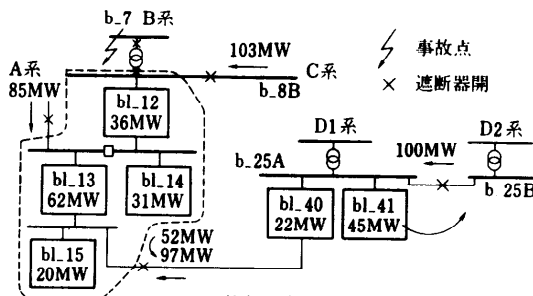
電力系統では一部の設備停止 (保守などのため、その設備を系統から切り離すこと) による系統の接続状態の変更や、時々刻々変化する負荷など、系統状態は多様性に富むので、復旧操作案の事例は膨大な数になる。したがって、事例ベースに格納する事例の選定基準の確立と、効率のよい検索を可能とする事例ベースの構築が肝要である。

#### (3) 検索事例の問題状況への適合のための修正

問題状況と一致する事例があれば、そのまま利用できるが、一般には検索された事例になんらかの修正を加えて問題状況に適合させることが必要である。問題状況にもっとも近い事例を事例ベースから選択する。次に、事例を参考にして各復旧用電源による復旧案を



(a) 事例フレームの構成例



(b) 系統図

図-7 事例フレーム説明図

立てる。それらを組み合わせて、停電が解消できるかを調べ、可能ならばその案を候補として採用する。もし不可能ならば復旧電源間での負荷分担の調整、さらには負荷切替えによる送電電力の増強を行い、事例の復旧案を修正して当該事故に適用する。これらのことを実現するために、復旧手順を示す事例フレームは、復旧案、復旧用電源、負荷切替え案、電源復旧案、全体復旧案の5種のフレームから構成されており、各フレームに格納された事例を用いて復旧案を作成する。図-7はB系停電において、C系からbL<sub>12</sub>, 14へ、D1系(D2系への負荷切替えによる45MWの送電可能電力の増強を行う)からbL<sub>13</sub>, 15への送電による復旧案と事例フレームの構成を示す。

(4) 事例ベース形推論の評価

実規模大のモデルシステムでの実験によれば、系統構成

が複雑な場合は、一般的な復旧アルゴリズムによるよりも、事例ベースによるほうが処理時間は短い。次に事例ベースによる推論の柔軟性を評価するため、当該事故と検索された事例間に多少の条件の相違がある場合の適合修正の可能性を調べた。すなわち、変圧器バンクの設備停止時の停電事故に対して、設備停止をしていない標準状態での復旧事例で妥当な復旧案を作成できるか否かについて実験を行った。その結果、事例ベースによる場合、設備停止のない状態に比べると処理時間は多少長くなるものの、一般的な復旧アルゴリズムによるよりも処理性は優れている。さらに、負荷状態の変化に対する事例ベース形推論の柔軟性をみるため、標準状態に対して系統内の各負荷の値を一律に30%減と15%増にして実験を行った。その結果、いずれの場合も処理時間、復旧パターンともに妥当な結果が得られた。一連の実験結果によれば、

比較的少数の事例ベースを用いて各種系統条件に対応して復旧案を作成できる見通しを得た。

3.3 その他への応用

(1) 発見的探索

Bradtke と Lehnert は発見的探索問題における事例ベース形推論の有効性を検討している<sup>23), 24)</sup>。8パズルにおいて、探索空間とオペレータが与えられたとき、探索を導く事例を使用する。事例は開始状態から最終状態への状態リストとして与えられ、空間を枝刈りし、探索を促進する評価関数として作用する。事例として次の3種類を用いる。

- ① Random: ゴールから約50手ランダムに歩き、その逆をとる。
- ② Human: 人間に任意のボード状態を示し、人間の解から生じる系列を記録する。
- ③ Perfect: ランダムボードを選び、そこからの最短解を生成する。

事例の索引関数として、ゴールボードまでの距離に関するもの3種類と、隣接ボードの比較に関するもの4種類の合計7種類を用いる。前者は、ゴールボードまでの距離、ゴールボードとそれを180°回転したものまでの距離、及びゴールボードとそれを90°, 180°, 270°回転したものまでの距離である。後者も同様である。

状態に粗の索引関数を適用し、整数の集合に写像す

る。同じ整数値に写像された複数の状態をゴール等価状態と呼ぶ。実験結果から、ゴール等価状態の数に比例して性能が向上すること、及びユニークな状態数が多いほど性能が向上 (Human→Perfect→Random の順に向上) することを示している。なお、事例による探索が失敗したときには、標準的な発見的探索技法を用いる。したがって、事例ベースが大きくなると解を発見できる可能性も大きい、発見できない場合にはオーバーヘッドが増大するので、その間のトレードオフを考慮する必要がある。

(2) 説明の生成

Kass と Leake は予期しない出来事が起こったときに創造的な説明を作る過程に事例ベースを用いている<sup>10)</sup>。3歳の競争馬 Swale の謎の死を例にして、候補となる説明の収集、それが新しい状況にどれだけ合うかの評価、及び不適切な説明の改訂に焦点を当てている。事例を表現するために、説明パターン (XP) を用いる。それは仮説と仮説間を結合する信念サポートネットワークである。仮説は前提、中間仮説、及び結論からなる。

SWALE システムは次の3モジュールからなる。

① ACCEPTER: 例外の検出と特徴づけを行った上、XP を検索し評価する。XP を受理すると、説明によって仮定された事項を含むように、システムの信念を更新する。受理した XP を一般化して事例としてメモリに保存する。

② EXPLORATORY SEARCHER: 通常の探索が失敗したとき、例外の普通でない特徴による索引付け、及び受理されなかった XP ライブラリへの索引付けの二通りの検索方法により候補 XP を探す。

③ TWEAKER: 適用されなかった XP を修正することによって付加 XP を生成する。修正の方法として、あいまいな説得力のない説明の詳細化、詳細すぎる説明から細部を除く一般化、及び新状況に適用したときに起こる不一致を一般性を変えずに直す置換がある。

このように、説明の検索、評価、修正における多くの問題を扱っている。

(3) 計画

計画の実行時に多数の要求がランダムに発生する場合には、それらを事前に立案することができない。Hammond は複数代理店の収集・配達サービスを対象として、事例ベース形計画・学習

の問題を探求している<sup>25), 26)</sup>。この問題では、荷物を集め目的地に配達するための全トラックの運行管理を行う。すなわち、客からの注文が入ると、どのトラックで集配するか、収集と配達の手順、及びトラックの経路を決めた上、立案した計画の実行を監視する。トラックの台数、荷台スペース、立案時間など限られた多くの資源の管理が必要であるので、徹底的な事前立案は不可能である。また、多くの要求がランダムに発生するので、それらを併合して最短経路で集配する計画が必要である。あるトラックの移動中に、通過場所に関連した新しい要求が発生すると、現要求と新要求を併合して一つの計画にできるか、かつ結果の経路が再使用に値するかを検討する。具体的には、新要求の場所と現要求の場所を併合する経路を徹底的に調べ、最短経路を見つける。さらに、生成された経路に簡単な地理的ヒューリスティクスを適用して、その併合が合理的であれば、それを事例として保存する。

(4) 制御

前節の電力システムの制御の他の例として、Kopeikina らによる電話の通話量管理について示す<sup>27)</sup>。制御応用の場合、所要時間内での応答、優先割り込み処理が要求される。通話量管理に対する CBR システムの概要を図-8 に示す。入力データを前処理部で分析し問題表現 (PS) を構成する。現在の入力データが過去に扱われた問題と同じならば、Monitor に渡される。

もし問題が新しくれば、その PS は Indexer/

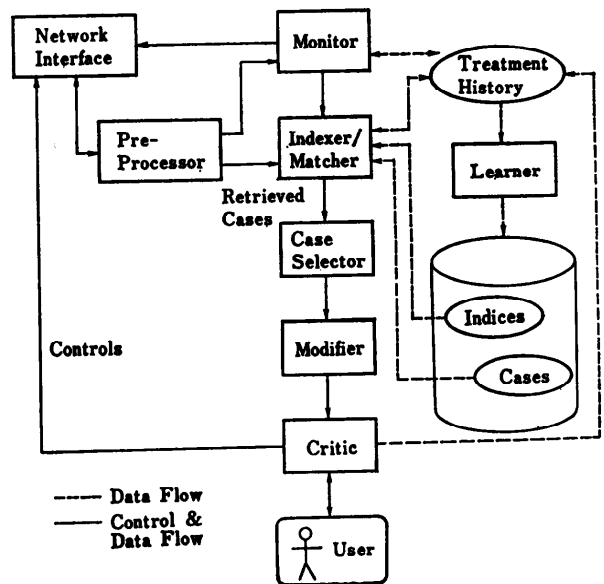


図-8 通話量管理システム



Matcher (I/M) に移される。I/M は現在の PS と類似した事例を検索するもので、索引付きのグラフ構造で構成されている。時間的制約条件を満たすため、状況の分類数の対数に比例した時間で処理することを期待しており、best-first spreading-activation と呼ばれる探索過程を用いている。

Selector は I/M で選ばれた事例のさらに厳格な適合を行う。ここでは、1)現在の PS と選ばれた事例間の適合の度合、2)成功/失敗の評価、の二つの過程からなる。Modifier は選ばれた事例を現在の問題状況に適用する。強力な類似性の適用により、格納された事例の適合性を高めることができ、それによって予期せぬ状況への適合能力を高め、格納すべき事例の数を減らすことが可能になる。このことは時間的制約のある応用には重要である。修正が成功すれば、その結果が Critic に移される。Critic は領域固有の手続きを用いて、その結果が既知の失敗の結果に導くことがないかを評価する。もしある計画が拒否された場合には、Modifier は事例の別な修正を試みる。Selector は異なる事例を選ぶか、I/M は他の候補事例を検索する。ユーザと Critic が現在の問題状況の処理計画の適用を承認したならば、Network Interface に送られ、その計画は Treatment History に記録される。

#### (5) 設計

設計業務を進める場合、類似事例が多く存在する標準製品の設計を支援するシステムが築山、仲谷らにより報告されている<sup>28),29)</sup>。ここでは Navinchandra による CYCLOPS というシステムについて述べる。設計にあたり、幾何学的なモデリングシステムや有限要素法などの解析ツールを含む CAD システムが利用され、過去の事例を設計の過程で積極的に利用することが試みられている。CYCLOPS は景観の設計に適用することを目指している<sup>30)</sup>。

問題解決の過程は、1)問題の発見、2)一致するゴール、サブゴールの設定、3)ターゲットの問題に直接または類似的に適合する事例の検索、4)その事例から関連知識を抽出するために、現在の問題の説明の利用、5)すべてのサブゴールを満足するまで上記プロセスの繰返し、の段階をとる。

システムのコアは統合モジュールと評価モジュールからなる。前者は明細化された設計表現内で動作し、部分的な設計を生成する。後者は有望な代替案を選ぶために、ヒューリスティクスを適用する。後者の事例の検索、適合について簡単に触れる。

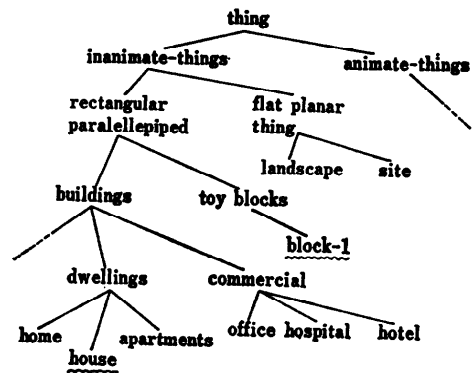


図-9 オブジェクト階層木

事例の検索は事例ベースと現在の設計目標の特徴との適合に基づいて行われる。その適合法には、1)直接適合 (direct match)、2)緩和適合 (relaxed match)、3)系統的適合 (systematicity-based match) の三つの方法がある。1)では事例ベースと設計目標の属性が等しければ、その事例をそのまま適用する。2)では事例ベースと設計目標の属性が図-9 のようなオブジェクト階層木において、一定リンク数以内の葉同士の適合を試みる。CYCLOPS では6リンク以内の適合を認めているので、たとえば、図-9 において、block\_1 と house との適合は可能である。3)では事例ベースと設計目標との類似的な適合を見いだすために、共通属性よりむしろ属性間の共通な原因関係の発見を重視する。

#### (6) 診断

診断についての研究として、2.4、2.5 で述べた心不全の診断の例のほか、スキーマに基づく推論による医療診断<sup>31)</sup> などがある。ここでは Hammond と Hurwitz による機械の故障診断の例について述べる<sup>32)</sup>。

ここで述べるシステムは、説明を組み立てるために原因推論を用いた第一原理 (first-principle) システムと、あらかじめ決められた症状の集合を既存の説明に関係付ける関連 (associational) システムとからなり、診断と説明の生成を行う。前者は因果関係の規則を用いて原因を推論するので、柔軟性を有するが、過去の推論結果をシステムが保持していないので処理性は劣る。後者は故障についての因果関係のヒューリスティックを用いるので、処理性は優れているが柔軟性に欠ける。このシステムは、説明に基づく学習と事例ベース形推論を用いて、両者の欠点の解決を試みている。

このシステムは各種知識として、ベース中の説明、

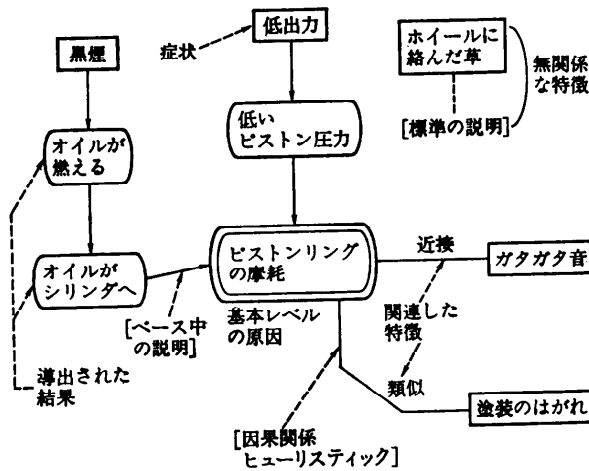


図-10 故障診断説明図

機械の機構や内部の相互関連を記述した標準モデル、機構の動作を記述した使用モデル、及びその説明などを有する。

事例ベース診断は次の手順で進められる。1) 観察可能な特徴を用いて、事例を検索、2) 検索された説明と、現在の問題状況との適合、3) 物理的な説明とのずれは、因果関係のヒューリスティクスを用い後向き推論により修正、4) 各種知識ベース間のリンク付け、特徴の索引付け、などがなされる。論文に述べられている芝刈機の故障診断の例を図-10に示す。この図で四角は症状であり、各種の知識を用いて、基本レベルの原因である「ピストンリングの摩耗」を推論する模様を示す。

### 3.4 応用例の評価

上述のように広い分野を対象として研究が進められているが、いずれも研究段階のものである。これらの中には実用規模に近い形での検討が進められており、実用化の可能性の大きなものも見受けられる。事例ベース形推論の導入により、人間の知的活動の中心である記憶、学習、問題解決の方法を計算機上に構築することができれば、問題解決システムの推論能力の向上に寄与するものと期待される。

## 4. おわりに

事例ベース形推論の研究の歴史はまだきわめて浅く、解決すべき課題は多い。2.2~2.6で述べた基本手法の各段階の精緻化は、認知科学の成果の導入や関連する分野の研究<sup>33),34)</sup>、各応用分野での研究の成果を取り入れて発展していくものと思われる。

事例ベース形推論の課題としては以下の事項があげ

られる<sup>10)</sup>。

- 1) 膨大になることが予想される事例ベースからの、効率的な事例の検索法。
- 2) 事例が将来にわたって有効であるためには、事例ベースの構成はどうあるべきか(事例ベースの構築法と拡張性)。
- 3) 旧事例の適用性はどのように決められるか(事例ベースへの登録基準)。
- 4) 現在の問題状況への、検索された事例の適合修正法。
- 5) 旧事例からの洞察は新しい状況にどのように適用されるか。

謝辞 おわりに本解説をまとめるにあたり、貴重なご言をいただいた上智大学伊藤深氏、NTT情報通信処理研究所石田亨氏に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 西田：米国における人工知能研究の近況，京大工学部情報工学教室第109回情報工学研究談話会(1987)。
- 2) Schank, R. C.: *Dynamic Memory*, Cambridge University Press (1982). 黒川利明・黒川容子共訳，ダイナミック・メモリ，p. 255, 近代科学社。
- 3) Hammond, K. J.: *Case-Based Planning*, Proc. Workshop on CBR by Defense Advanced Research Projects Agency, Florida, pp. 17-20 (1988)。
- 4) Kolodner, J. L.: *Extending Problem Solver Capabilities through Case-Based Inference*, Proc. 4th Annual Int. Machine Learning Workshop, pp. 167-178 (1987)。
- 5) Kolodner, J. L.: *Retrieval and Organizational Strategies in Conceptual Memory: A Computer Model*, Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates (1984)。
- 6) Kolodner, J. L.: *A Process Model of Case-based Reasoning in Problem Solving*, Proc. IJCAI, pp. 284-290 (1985)。
- 7) Hammond, K. J.: *Planning and Goal Interaction: The Use of Past Solutions in Present Situations*, Proc. AAAI-83, pp. 148-151。
- 8) Carbonell, J. G.: *Derivational Analogy and its Role in Problem Solving*, Proc. AAAI-83, pp. 64-69。
- 9) Dupuy, C. T. N.: *Military History and Case-Based Reasoning*, Proc. DARPA WS, pp. 125-135 (1988)。
- 10) Kass, A. M. and Leake, D. B.: *Case-Based Reasoning Applied to Constructing Explanations*。

- tions, Proc. DARPA WS, pp. 190-208 (1988).
- 11) Kolodner, J.L.: Retrieving Events from a Case Memory: A Parallel Implementation, Proc. DARPA WS, pp. 233-249 (1988).
  - 12) Stanfill, C. and Waltz, D.L.: The Memory-Based Reasoning Paradigm, Proc. DARPA WS, pp. 414-424 (1988).
  - 13) Kolodner, J.L.: Organization and Retrieval in a Conceptual Memory for Events or CON54, Where are you ?, Proc. IJCAI, pp. 227-233 (1981).
  - 14) Barletta, R. and Mark, W.: Explanation-Based Indexing of Cases, Proc. AAAI-88, pp. 541-546.
  - 15) Koton, P.: Reasoning about Evidence in Causal Explanations, Proc. DARPA WS, pp. 260-270 (1988).
  - 16) Lehnert, W.G.: Case-Based Problem Solving with a Large Knowledge Base of Learned Cases, Proc. AAAI-87, pp. 301-306.
  - 17) Ram, A.: AQUA: Asking Questions and Understanding Answers, Proc. AAAI-87, pp. 312-316.
  - 18) Ashley, K.D. and Rissland, E.L.: Compare and Contrast, A Test of Expertise, Proc. AAAI-87, pp. 273-278.
  - 19) Rissland, E.L. and Ashley, K.D.: Credit Assignment and the Problem of Competing Factors in Case-Based Reasoning, Proc. DARPA WS, pp. 327-344 (1988).
  - 20) Ashley, K.D. and Rissland, E.L.: A Case-Based Approach to Modeling Legal Expertise, IEEE EXPERT, fall, pp. 70-77 (1988).
  - 21) 奥田, 渡辺, 山崎, 馬場: 事例ベース形推論による二次系統の事故時復旧支援方式, 電学論, B108巻, 12号 (1988).
  - 22) 渡辺, 奥田, 山崎, 馬場: 事例ベース形推論を用いた電力系統事故時復旧支援システム, 情報処理学会第36回全国大会, 7Q-6 (1988).
  - 23) Bradtke, S. and Lehnert, W.G.: Some Experiments with Case-based Search, Proc. AAAI-88, pp. 133-138.
  - 24) Bradtke, S. and Lehnert, W.G.: Some Experiments with Case-based Search, DARPA WS, pp. 80-93 (1988).
  - 25) Hammond, K., Converse, T. and Marks, M.: Learning from Opportunities: Storing and Reusing Execution-Time Optimizations, Proc. AAAI-88, pp. 536-540.
  - 26) Hammond, K.J.: Opportunistic Memory: Storing and Recalling Suspended Goals, Proc. DARPA WS, pp. 154-168 (1988).
  - 27) Kopeikina, L., Brandau, R. and Lemmon, A.: Case Based Reasoning for Continuous Control, Proc. DARPA WS, pp. 250-259 (1988).
  - 28) 築山, 仲谷: 事例ベース型概念設計支援システム SUPPORT (1), 情報処理学会第38回全国大会, 3W-2 (1989).
  - 29) 築山, 仲谷: 事例ベース型概念設計支援システム SUPPORT (2), 情報処理学会第38回全国大会, 3W-3 (1989).
  - 30) Navinchandra, D.: Case Based Reasoning in CYCLOPS, a Design Problem Solver, Proc. DARPA WS, pp. 286-301 (1988).
  - 31) Turner, R.M.: Organizing and Using Schematic Knowledge for Medical Diagnosis, Proc. DARPA WS, pp. 435-446 (1988).
  - 32) Hammond, K.J. and Hurwitz, N.: Extracting Diagnostic Features from Explanations, Proc. DARPA WS, pp. 169-178 (1988).
  - 33) Pearce, D.A.: The Induction of Fault Diagnosis Systems from Qualitative Models, Proc. AAAI-88, pp. 353-357.
  - 34) Falkenhainer, B.: The Utility of Difference-Based Reasoning, Proc. AAAI-88, pp. 530-535. (平成元年9月6日受付)