

## 知識コンパイラの構成とその応用

小高 浩† 野村 康雄† 田岡 直樹‡ 山口 高平‡ 溝口 理一郎‡ 角所 収‡  
† 関西大学 工学部 ‡ 大阪大学 産業科学研究所

従来のES(エキスパートシステム)が利用する知識は、専門家より聞き出したタスクに直結する知識(浅い知識)のみであったので、診断能力及説明機能及び知識獲得支援に限界があった。この限界は、専門家が困難な問題に直面したとき、基本的知識・原理(深い知識)に立ち戻って考察するプロセスを計算機上で実現してやれば打破されると考えられる。

本稿では、このプロセスを実現する知識コンパイラを構成するために、まず深い知識を整理し、① Device World(部品の役割、属性、動作環境、構造を記述したワールド)、② Control World(部品の観測容易性、耐久性、要性、階層性を記述したワールド)、③ Physical World(適用条件と共に記述された物理原理)、④ Interpretation World(メカのある状態を故障の仮説および徴候に対応させて解釈する知識)に分類するのが適切であることについて言及する。さらに、深い前向き推論と深い後向き推論およびルールの適用順序決定プロセスから成立する知識コンパイラについて述べ、その利用法についても言及する。

## Knowledge Compiler Based on Deeper Knowledge for Troubleshooting

Hiroshi Kodaka<sup>1</sup>, Yasuo Nomura<sup>1</sup>

Naoki Taoka<sup>2</sup>, Takahira Yamaguchi<sup>2</sup>, Riichiro Mizoguchi<sup>2</sup>, Osamu Kakusho<sup>2</sup>

1 Faculty of Engineering, Kansai Univ.

3-3-35, Yamate-cho, Suita-shi, Osaka, 564, Japan

2 ISIR, Osaka Univ., 8-1, Mihogaoka, Ibaraki-shi, Osaka, 567, Japan

Human experts turn to deeper knowledge and first principle for aid when they confront a complicated problem and had no applied heuristics(rules). This observation gives us the feeling that expert systems should have the reasoning mechanism based on deeper knowledge for high performance.

In this paper, it is discussed what kind of deep knowledge is useful to generate rules for troubleshooting and the following deeper knowledge is presented.

1. Device World which describes role, attribute, environments and structure of components
2. Control World which describes observability, durability importance and hierarchy of components
3. Physical World which describe physical principle.
4. Interpretation World for interpreting some state of object as hypothesis and symptom.

And Knowledge Compiler(KC), which generates rules for troubleshooting, is presented. KC consists of deep forward reasoning mechanism, deep backward reasoning mechanism and process for ordering generated rules. Furthermore KC turns out to refine explanation facilities and knowledge acquisition facilities.

## 1.はじめに

従来のES（エキスパートシステム）が利用する知識は、専門家より聞き出したタスクに直結する知識（浅い知識）のみであったので、以下のように診断能力と説明機能及び知識獲得支援に限界があった。

(1) 浅い知識は、図1に示すように問題記述空間の点あるいは部分空間しか処理しないために、浅い知識ベースが処理対象としない部分空間があればその部分空間に対しては対処不可能である。換言すれば、従来のESはいくつかの応用問題を解く能力があるだけで、基本を理解して様々な問題が解ける能力を持つに至っていない。

(2) 従来の説明機能は、問題解決に利用されたルールを順次提示させるだけであり、そのルールがその場面で利用されるのはなぜ正しいのか（ルールの正当性）を提示させる能力はなく、専門家だけに理解可能で初心者には理解しにくいものである。

(3) 従来のESの知識獲得支援は、メタレベルの知識により浅い知識の構造を調べ構造的に不明瞭な箇所を専門家に提示するに留まっており、専門家の誤った思い込みを正すと入った局面に使えるほど高級でない。

以上の限界は、専門家が困難な問題に直面したとき、基本的知識・原理（深い知識）に立ち戻って考察するプロセスを計算機上で実現してやれば打破されるものである。

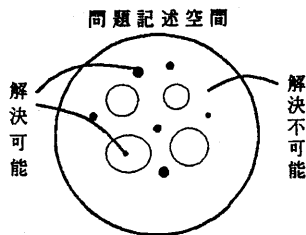


図1 浅い知識の能力

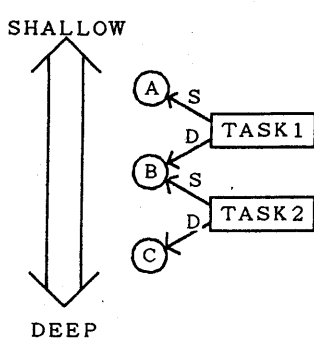


図2 深い知識の定義

本稿では、このプロセスを深い知識から浅い知識を生成するプロセスとし、そのプロセスを実現する機構を知識コンパイラと名付け、その構成法と応用について検討する。

## 2. 深い知識

深い知識 [1]-[5]はまだ統一された定義はないが、筆者らはタスクに直結した知識を浅い知識と捉え、浅い知識を生成することに関連した知識を深い知識と捉える。

「浅い・深い」という概念は、この定義からタスクによって決定されるものであり相対的に変わるもので絶対的に決定できるものではない。例えば図2では、タスク1においてはAが浅い知識でBが深い知識となるが、タスク2においてはBが浅い知識でCが深い知識となる。

本稿ではタスクをメカ（特に車）の故障診断に絞り、専門家が診断ルール（浅い知識）を生成するプロセスを考察することにより深い知識を整理した。その結果深い知識としては、①対象（としているメカ）のモデル、②物理原理、③物理状態を徵候や故障仮説に解釈する知識が必要であると判明した。

①は対象としているメカの従来の図面情報（CADデータ：部品の寸法、形状、配置など）に近いが、それだけでは診断ルールの生成には不十分である。診断ルールは対象モデルの様々な状態に物理式を順次適用することによって生成されるため、対象モデルには適切な物理式を選択するための情報が必要である。この情報には、設計者がどのような目的でその部品を組み込んだか、換言すれば『設計者が意識して部品に持たせた機能』（設計者の意図:intention）、およびその部品の使用環境が含まれる。設計者の意図としては、部品の役割がある。部品の役割とは、装置を構成する各部品を独立に考えた場合の一般的な機能(function)を指すのではなく、設計者がその対象において各部品に意図的に持たせた機能を指す。

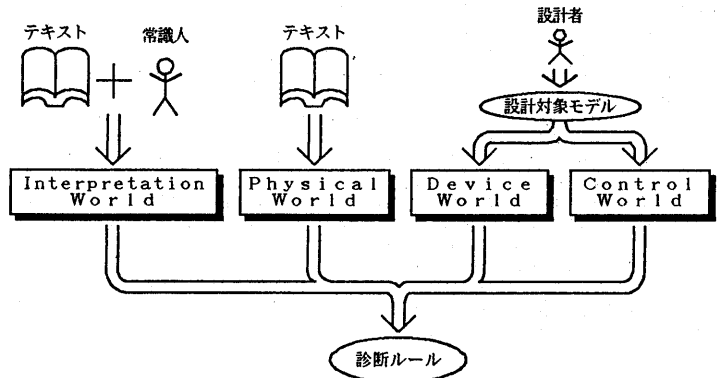


図3 深い知識

また、部品の重要性も設計者の意図に含まれる。一方、部品の使用環境とは、設計者が意識していない部品の副作用的なふるまい、およびその部品が受ける様々な作用に関する情報（動作環境）を指す。また、部品の属性、観測容易性、および耐久性も部品の使用環境に含まれる。

①の深い知識は、知識コンパイラ（深い推論）の利用法の違いから、Device World と Control World に分かれる。また ②を Physical World と呼び、③を Interpretation World と呼ぶ。従って、メカの故障診断における深い知識は、以下の4種類のワールドに分化される（図3）。

- 1 Device World (DW)
- 2 Control World (CW)
- 3 Physical World (PW)
- 4 Interpretation World (IW)

#### 2-1. Device World

DWは、構造などの知識を利用して深い推論を進めたり、物理式の適用基準を与えるためのワールドであり、

##### TEMPメータ

Role:

冷却水の温度を測定

冷却水

Role:

Xから熱(Qin)を吸収

Yに熱(Qout)を放出

Structure:

シリングとXで接続

ラジエータとYで接続

Environments:

力Fを受けて循環している

Attribute:

液体: l

流量: f

温度: T

比熱: c

図4 Device World の例

#### 熱力学の公式 1

適用条件

流体: l

吸収する熱量: Q

流量: f

比熱: c

温度変化: T1 → T2

物理式

$$T2 = \frac{Q}{c f} + T1$$

図5, Physical Worldの例

属性(attribute)、動作環境(environments)、部品の役割(role)および物品の構造(structure)を含んだ診断対象のモデルである。図4にDWの例を示す。

#### 2-2. Control World

CWは、深い推論の結果生成されたルールを診断に適用するときの順序を決めるためのワールドであり、各部品の観測容易性(observability)、耐久性(durability)、重要性(importance)の3つからなる。

観測容易性(observability)は、診断の段階で観測の容易な徴候からチェックしたいので、条件部に書かれた徴候のチェックが容易なルールの優先順序を高くし、チェックが困難なルールの優先順序を低くするために用いる。例えば、自動車のエンジンの場合、観測が容易な冷却水の量をチェックするルールは優先順序が高くなり、観測が困難なウォーターポンプの動作をチェックするルールは優先順序が低くなる。

耐久性(durability)は、耐久性の低い部品の方が壊れやすいので、結論部で耐久性の低い部品をチェックするルールの優先順序を高くし、耐久性のある部品をチェックするルールの優先順序を低くするのに用いる。例えば、耐久性の低い定期交換部品であるファンベルトの状態をチェックするルールの優先順序は高くなり、耐久性の高いウォーターポンプの状態をチェックするルールの優先順序は低くなる。

重要性(importance)は、装置内で重要な部品は、その故障が装置全体に対して非常に大きな損害を与える可能性があるため、重要性の高い部品をチェックするルールは適用の優先順序を高くし、重要性の低い部品をチェックするルールの優先順序を低くするのに用いる。

以上の3つの評価基準の他に、故障原因として装置のどのレベルまで調べればよいかを示す部品の階層性(hierarchy)が考えられるが、これはDWの構造情報から得られる。

(メカの状態) 計器Xが測定する物理パラメータ

Yの値が基準外である

(徴候) 計器Xの示す値が基準外である

(メカの状態) 部品Xの役割(role)が否定されている

(故障仮設) 部品Xが故障している

(メカの状態) 経路Xの断面積が規準値以下

(故障仮設)

1. 経路Xに物が詰まっている
2. 経路Xが細くなっている
3. 外力によって経路Xが細くなっている
4. 経路Xの構成物質が変形している

図6 Interpretation Worldの例

### 2-3. Physical World

PWは、深い推論を進めるときに重要な役割を果たすワールドである。物理式は、適用条件と共に記述され、値が元来与えられるべき変数（原因を表す変数）が右辺、その式を計算することによって値が求まるべき変数（結果を表す変数）が左辺という形式で書かれている。また、変数の値は定量値ではなく、+（基準値以上）、0（基準値）、-（基準値以下）という3つの定性値をとる。図5にPWの例を示す。

### 2-4. Interpretation World

IWは、ルールを生成するプロセスで停止条件となるワールドであり、メカのある状態（推論ノード）を故障の徴候および故障仮説に対応させて解釈するための知識からなる。実際には、DWの知識をアクセスして初めて解釈が成立する形式で書かれている知識と直接メカの状態を解釈できる形式で書かれている知識が存在する。図6にIWの例を示す。

### 2-5. 各ワールドの特徴

Van de Veldeは文献[6]において、深い知識の持つ特徴として、①ドメイン依存 ②タスク独立 ③構造化を挙げ一般的に論じている。しかし深い知識は前述したように4種類のワールドに分化するため、この議論は雑駁であると言わざるを得ない。すなわち、深い知識の特徴を一概に述べることは不可能であり、各ワールドの特徴を分析すれば表1の通りになる。すなわち、PWだけがドメイン・タスクを変えても共通に使える知識であり、DWとCWは対象に関連した知識であるので、ドメインが変われば取り替える必要があり、タスクに対しても完全に独立でない。例えば、CWには部品の耐久性および重要性等があるが、この知識が車の運転操作支援にも利用されるとは考えにくい。またIWは、タスクが変わっても共通に使える場合があると考えられるが、基本的には診断とか運転支援等のタスクに依存した知識であるため、タスクが変われば取り替える必要があり、またローカルな知識であり構造化もされていない。

表1 深い知識の特徴

項目	ワールド			
	P	D	C	I
ドメイン独立	○	×	×	○
タスク独立	○	△	△	△
構造化	○	○	○	×

### 3. 知識コンパイラ

知識コンパイラ（KC：Knowledge Compiler）は、深い知識より診断ルールを自動生成するプロセスである深い推論を実現する機構であり、図7にその概要を示した。すなわち初期徴候が与えられると、KCはDWとPWを利用して深い前向き推論を行い最終的にIWを利用して故障仮説を生成する。また、KCは生成された故障仮説から、やはりDWとPWを利用して深い後ろ向き推論を行いIWを利用して関連する徴候をすべて生成する。以上の3種類のワールドにより、初期徴候を条件部に含むすべてのルールが生成されるが、これらのルールの適用順序をCWにより決定する。以下、深い前向き推論と深い後ろ向き推論およびルールの適用順序決定プロセスについて詳しく述べる。

#### 3-1. 深い前向き推論

深い前向き推論では、まず与えられた初期徴候から計器のroleにより初期ノードを生成し、制約伝播を行う。例えば徴候が“TEMPメータが80℃以上”であるとき、DWの“TEMPメータ”のroleより“冷却水温度が80℃以上”という初期ノードを生成する。ただし、メカが異常な状態の時に、計器が測定するレンジを初期徴候とする。

次に制約伝播プロセスについて述べる。制約伝播プロセスは、DWとPWの知識の適用（マッチングと物理式の定性的な解釈）の繰り返しである。DWとPWの適用優先順序は基本的には差はない（本KCではDWが先に適用されている）が、DWは構造等の情報を利用して制約伝播が可能になる場合に適用され、PWは物理原理を考えて制約伝播が可能になる場合に適用される。

以下、PWの適用法について述べる。マッチングは、深い前向き推論が結果から原因を探る過程であるので、推論ノードが言及している部品の物理パラメータと物理

深い前向き推論 → 深い後ろ向き推論 → 適用順序決定

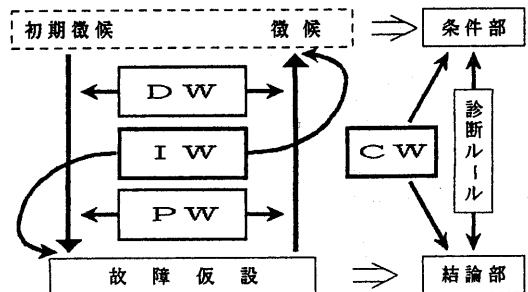


図7 知識コンパイラの概要



数には値が伝播されない。例えば推論ノード”オイルが圧送されない”にマッチする物理式は、 $F = \rho QV$ であるが、 $Q$ （-）から他の原因を表す変数 $\rho$ と $V$ へ値は伝播されず、結果を表す変数 $F$ のみに伝播し $F$ の値が（-）に決まる。

このようにして得られた推論ノードは、微候生成用のIW適用することにより適用可能ならばその推論ノードを微候とし、不可能ならば上記のプロセスによりさらに新しい推論ノードを生成する。

以上のプロセスを繰り返すことにより、故障仮説に関連するすべての微候を生成し、完全なルールとなる。図10に”オイル不足”という故障仮説から関連するすべての微候を生成するプロセスを示し、図11に完成されたルールを示す。

### 3-3. 適用順序

深い（前向き・後ろ向き）推論によって生成された診断ルール群は、CWの観測容易性によりルールの条件部を評価し、CWの耐久性、重要性および階層性によりルールの結論部を評価することによりルールの適用順序が決定される。例えば、以下のA-Cのルールが生成され、その適用順序について考える。

- A: IF TEMPメータが80℃以上  
ファンがぐるぐる回る  
THEN ファンカップリングの故障
- B: IF TEMPメータが80℃以上  
異常音がる  
THEN ウォータポンプの故障
- C: IF TEMPメータが80℃以上  
オイルプレッシャーランプの点灯  
エンジンの異常振動  
THEN オイル不足

観測容易性の観点からは、 $B \rightarrow C \rightarrow A$ の順であり、耐久性の観点からは $C \rightarrow B \rightarrow A$ であり、重要性の観点からは $B \rightarrow C \rightarrow A$ であり、階層性の観点からは $C \rightarrow A \rightarrow B$ であるので最終的な適用順序は $C \rightarrow B \rightarrow A$ となる。

### 3-4. 深い推論と浅い推論の比較

Van de Veldeは、文献 [6] において同様に深い推論と浅い推論の比較を行っており、表2に示す通りである。

ドメインに関しては両推論法とも独立であるが、タス

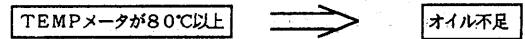


図9 深い前向き推論により生成された不完全なルール

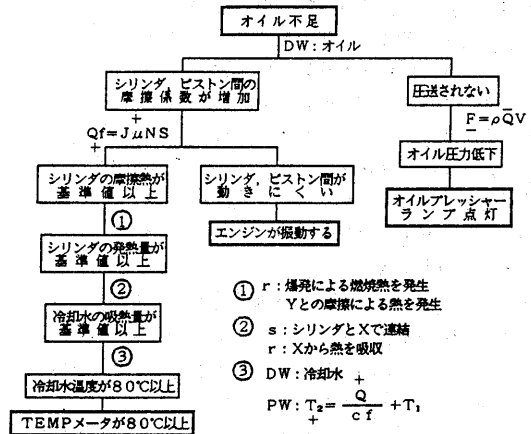


図10 深い後向き推論による微候の生成

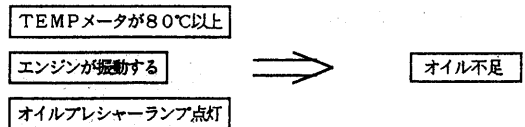


図11 深い後向き推論により生成された完全なルール

表2 推論法の比較

項目 \ 推論法	浅い推論	深い推論
ドメイン独立	○	○
タスク独立	○	×
効率の良さ	○	×

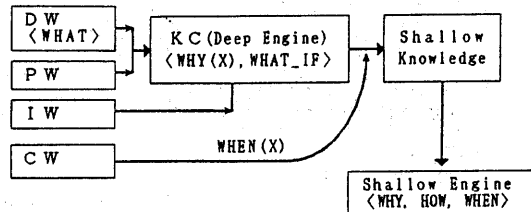


図12 KCと深い説明機能との関連

クに関しては深い推論法は独立でない。例えば、故障診断ルールの条件部の徴候は温度や圧力であるが、ある基準値を越えているか下回っているかが主問題となることが多く、深い推論の技法としては制約伝播でかなりカバーできると考えられる。一方、運転操作支援では、“右に曲がりたい”等のユーザの欲求から操作法を生成する必要があるため、操作法は時間的に変化する制約伝播の他に予測の技法 [7]が必須となる。この様に生成される浅い知識の内容が違えば、その生成法も変わるため、深い推論はタスク依存であることが分かる。また、浅い推論で利用する浅い知識はタスクに直結しているためタスクの処理効率は良いが、深い知識はタスクと直結していないためタスクの処理効率は悪い。

#### 4. 知識コンパイラの応用

以上、KCの基本設計について述べたが、診断型ESの診断能力を向上させる見通しはついたと考えられる。本節では、KCの説明機構および知識獲得支援機構への応用について考察する。

##### 4-1. 説明機構への応用

ルールの正当性を中心に説明機能を拡張する試みは、文献[8,9]を通してすでに見られるが、ここではKCと深い説明機能との関連について述べる(図12)。診断ルールを用いた説明に関しては従来の WHY と HOW の他に、ルールの適用順序を示す WHEN を考える。これは、診断ルールが適用される適用順序をそのまま提示するものである。

次に深い知識を用いた説明を考える。ルールの正当性に関する説明は、仮説から徴候を導くプロセスを示すことにより可能であり、WHY(X) (X:ルール番号)で処理される。WHENの正当性、つまりルールの適用順序の正当性に関しては、KCがCWを用いてルールに順序付を行うプロセスを示すことにより可能であり、WHEN(X)で処理される。さらに、メカに関する構造や機能に関する説明 WHAT を考える。これは、深い知識のうち、DWをそのまま提示することによって処理される。最後に、ある仮定において発生するイベントに関する説明 WHAT\_IF を考える。これは、ある仮定において起こりうることをシステムにシミュレートさせ、そのときに発生するイベントを説明するものとなる。

以上のように、深い知識を充実させることによって、説明機能は従来より大きく向上することが期待される。

##### 4-2. 知識獲得支援機構への応用

現在の知識獲得支援機構[10]-[13]は、メタレベルの知識を利用し、入力知識をチェックしたり知識ベース中の不明瞭な構造を見つけることにより、知識ベースを洗練化することに重点がおかれている。しかしながら、このアプローチでは、診断ルールの正当性等、意味的な考慮を全く行わずに知識獲得支援を実現しているため、ある程度洗練化された知識ベースの性能向上、あるいは専門家の誤った思い込みという局面の適用には限界があり、受身的な知識獲得であると言える。そこでKCの利用が考えられる。完全なKCが構築できれば、知識獲得は必要ないはずであるが、現時点ではその様なKCの構築はなかなか困難であり、KCを専門家の知的パートナーと見なす方が現実的であろう。すなわち、専門家を与える診断ルールとKCの生成した診断ルールが異なり、専門家の方に誤りがあればその生成プロセスを提示することによりその誤りを改めさせることが可能である。すなわち、従来の知識獲得支援機能の限界を打破でき、知識獲得支援をインタビュー[13]に関連づけければ、深い知識がインタビューのドライバーとして利用できることが分かる。また、専門家の方が正しければ、深い知識が不足していることが考えられ、原理の再発見につながる可能性がある。

#### 5. おわりに

本稿では故障診断ルールの生成の観点から深い知識を整理し、それを利用する知識コンパイラの構成と説明機能および知識獲得支援機構への応用について述べた。

今後の課題としては、

1. PWの適用において、マッチングに使用する情報の表現形式をきめること
2. 現在、生成された診断ルールは中間仮説がなく、それを生成させること(DWにおいて複合部品、例えば冷却系、を記述すればよい)

等が残されているが、この問題点を克服してインプリメントを進める予定である。また、本知識コンパイラは、新しいメカを設計した時点でそのメカを診断するESが構築できるという設計と診断を融合した第3世代シェルの中核となるものであり、他のドメインおよびタスクを通して本シェルの有効性を検討していきたいと考えている。

参考文献

- [1] P. E. Hart: "Direction for AI in the eighties" SIGART, 79, p.79 (1982)
- [2] D. Michie: "High-road and low-road programs" AI Magazine, 3(1), pp.21-22 (1982)
- [3] B. Chandrasekaran and S. Mittal: "Deep versus compiled knowledge approaches to diagnostic problem-solving" Developments in expert systems edited by M. J. COOMBS, pp. 23-34, Academic Press (1984)
- [4] N. Yamada and H. Motoda: "A Plant Diagnosis Method Based on the Knowledge of System Description" Journal of Information Processing 7, 3, pp.143-148 (1984)
- [5] 上野: "対象モデルの概念に基づく知識表現について—深層知識システムへのアプローチ—" 電子通信学会、人工知能と知識処理研究会資料、A186-4 (1986-4)
- [6] Van de Velde, W.: "Explainable Knowledge Production" 7th European Conference on Artificial Intelligence, pp.8-22 (1986-7)
- [7] de Kleer, J. and Brown, J. S., "Qualitative Physics Based on Confluences", Artificial Intelligence, 24, 1, pp.7-83, (1984)
- [8] W. R. Swartout: "XPLAIN: A System for Creating and Explaining Expert Consulting Programs" Artificial Intelligence, 21, 3, pp. 285-325 (1983)
- [9] R. Neches, W. R. Swartout and J. Moore: "Explainable (and Maintainable) Expert System" Proc. of IJCAI'85, 1, pp.382-389 (1985-8)
- [10] R. Davis and D. B. Lenat: "Knowledge-Based Systems in Artificial Intelligence" MacGrow-Hill (1982)
- [11] P. Politekis and S. Weiss: "Using Empirical Analysis to Refine Expert System Knowledge Bases" Artificial Intelligence, 22, pp. 23-48 (1984)
- [12] G. Kahn, S. Nowlan and J. McDermott: "MORE: An Intelligent Knowledge Acquisition Tool" Proc. of IJCAI'85, 1, pp.581-584 (1985-8)
- [13] 川口、溝口、山口、角所: "データベースの論理設計を支援する知的インタビューシステム", 情報処理学会、知識工学と人工知能研究会、48-1, (1986-9)
- [14] 山口、溝口、杉原、小高、野村、角所: "エキスパートシステムにおける高級な説明機能" 情報処理学会第30回全国大会, pp. 1511-1512 (1985-3)
- [15] 山口、溝口、小高、川口、野村、角所: "エキスパートシステムにおける定性的推論と深い説明機能" 情報処理学会第31回全国大会, pp. 953-954 (1985-9)
- [16] 山口、溝口、小高、野村、豊田、角所: "深い知識を利用した知識コンパイラの構成" 電子通信学会、人工知能と知識処理研究会資料、A186-7 (1986-4)