

# 非単調推論による学習者の理解の 深いモデル化について (7)

On deep modelling for a learner' s understanding  
by nonmonotonic reasoning (7)

岡本 敏雄 森広 浩一郎\*  
Toshio OKAMOTO Koichiro MORIHIRO

東京学芸大学 (\*現在 大阪大学産業科学研究所)  
Tokyo Gakugei Univ. (\* I.S.I.R. Osaka Univ.)

本稿では、非単調推論の機能を取り入れた学習者モデルの表現と利用について述べる。これまでもオーバーレイモデル、差異モデル、振動モデルのような学習者のモデル化の多くの技術と方法が提案されてきている。ここでは非単調推論の考え方を取り入れ、真理保全機構の機能を使うことにより、学習者が教授・学習過程の中で獲得する知識の深い構造をシステムがどのようにして理解するかを議論する。ある領域に対する学習者の理解の構造は、一般に彼の既存の知識間の依存関係により定まると思われる。したがって我々は彼の公理系のゆがみを理解することが重要であると考えられる。さらに本稿では、学習者モデルの状態を解釈して得られる一般的な教授規則と、適応的な教授展開を開発し得る対話管理規則について示す。

キーワード：ITS、学習者モデル、非単調推論、デフォルト推論、TMS

## 1. まえがき

ITS (Intelligent Tutoring System) において重要なことは、個別指導過程のなかで学習者の理解構造をシステムが認識し、それに適する教授戦略を展開することである。このようにシステムを知的に振る舞わせるためには、学習者の理解状況を学習者モデルとして表現し、これを認識する機能が必要とされる。

ところで学習過程において学習者は、これまでに持たない知識、あるいは既存の知識と相容れない正しい知識と遭遇する。これらの新たな知識をこれまでに持つ自己の知識の理解構造の中に同化し、知識獲得を行うことで学習を進めていくと考えられる。このプロセスの中で、学習者はこれまでの理解構造を、新たな構造へ変化させるという調節機能を働かせるものと考えられる。したがって、この学習者自らの理解構造の変化を学習の推移に応じて動的に捉えられるモデルが必要である。これまでも学習者モデルの構築の方法については、さまざまな視点からの議論<sup>(1)</sup>がなされてきている。特に、池田らは、仮説推論の枠組みを用いて、一貫性が失われたデータからのモデル推論アルゴリズムを開発している。<sup>(2)</sup>

本研究では学習者の理解構造を信念体系として捉え、学習者モデルの構成において学習者の信念体系をモデルに反映させることを試みる。このように理解構造を信念体系として捉えることで、CAIの中での知識獲得による信念体系の変化にまで踏み込んだ深いモデル化が可能になると思われる。このモデル化において信念体系を考慮するという考え方は、学習、推論等の人工知能技術の応用分野においても利用されている。<sup>(3)</sup>

ところで、本システムでは信念体系を反映した学習者モデルを構成する。しかしシステム自体が教授システムであり、学習等により学習者の信念体系が逐次的に変容していくことは明らかである。これに柔軟に対応するため、学習者モデルの構築のための推論方式にデフォルト推論<sup>(4)</sup>の技法を用いることは適切であると考えられる。

また学習者モデルに不整合が発生する場合は、学習者の回答がシステムの手続き回答と異なる場合である。これは、学習

者がその知識を十分に理解していないことが原因であると考えられる。そこで矛盾を解消した際には、学習者に確認するという教授戦略をとる。したがって、同時に矛盾を解消し得る複数世界をシステムが考える必要はなく、学習者モデルの一貫性の管理にTMS (Truth Maintenance System) <sup>(5)</sup>を用いることが妥当であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、学習者が持つ学習世界に対する信念体系を反映した形で学習者モデルを構成することを試みる。ここで学習者が持つ信念体系とは、学習者の持つ誤りも含んだ現在の学習世界に対する理解構造、すなわち学習者が持つ知識間の依存関係を、TMSにより管理可能な信念として捉えたものである。

誤りを犯している学習者が持つ学習世界に対する理解構造は、一般にその学習者独自のもの、すなわちエキスパート知識における知識の構造とは異なると考えられる。この学習者独自の理解構造を信念体系として捉え、学習者モデルに反映させることで、CAIの中での知識獲得による信念体系の変化にまで踏み込んだ深いモデル化が可能になると思われる。また学習者の誤りの原因とされる知識の欠落、知識の誤り、依存関係の誤りとしての適用の誤りを学習者モデルに表現することも可能である。

これを実現するために本システムでは、学習者モデルの構築にデフォルト推論とTMSの技法を用いることにした。これにより学習者の理解構造を信念体系として捉えることで、CAIの中での知識獲得による信念体系の変化にまで踏み込んだ深いモデル化が可能になると思われる。

また学習者モデルは、教師の想定する初期値として設定された学習者の理解構造から、システムによる学習の過程において得られた情報を用いて、真の学習者の理解構造へと書き換えられて行かなければならない。この学習者モデルと真の学習者の理解構造の関係は一種の写像と捉えることができる。したがってITSにおいては、この写像の正当性を学習の過程における情報をもとに保証していくこと、さらにこれを利

用したより適切な教授展開を可能にすることが必要である。写像の正当性をシステム側からみた言葉に言い替えるならば、学習者の理解構造の認識の完全性に相当する。すなわちシステムが対象領域についての認識論的構造を理解することを要求される。

本研究の目的は、上記の考え方にに基づき、学習者モデルを学習者の持つ信念体系を反映した形で構成し、学習者の理解をより深くモデル化することである。また、この学習者モデルを構築し、教授に利用する具体的なITSを構築することである。

### 3. 理論的背景

#### 3・1 デフォルト推論の適用

ITSにおいて学習者モデルの構築は重要であるが、システムが行う教授行動において学習者との1回の対話だけから学習者の理解構造を全て抽出することは不可能である。しかも、システム自身が教授システムであり、学習者の誤った理解構造を正しい理解構造へと知識構造を変化させることを目的としたシステムである。これはシステムのとる行動が学習者の持つ信念体系を逐次的に変容させていくことを示している。これらの理由によりシステムが学習者モデルを構築する場合、不完全な知識を用いて現在の学習者の理解構造をモデル化することになる。このような不完全な知識を取り扱うためには単調な推論だけでは不十分となり、学習者モデルの構成に非単調推論の枠組みが必要とされる。

本研究は、学習者の持つ信念体系を反映した学習者モデルを構成することが目的である。ここで特に問題となることは、やはり不完全な知識をもとに学習者の持つ信念体系を推論しなければならない点である。これを解消するための自然な方法は、その時点までに考えられる学習者の信念体系をもとに学習者の理解構造の推論を進めることである。このための推論形式としては、非単調論理<sup>(\*)</sup>の枠組みを持つデフォルト推論が適していると考えられる。したがって本研究では学習者モデルの構成においてデフォルト推論の手法を用いた。これにより、暗黙の内に用いた知識の存在を自然に表現できるデフォルト推論規則を用いて、学習者の持つ暗黙的な知識の依存関係をも自然に表現し学習者モデルを構築できることになる。またデフォルトを持つことにより、学習による学習者の理解構造の変化にも柔軟に対応できると考えられる。

#### 3・2 TMSの適用

本研究では3・1において示した考え方にに基づき学習者モデルの構築に非単調推論の枠組みを持つデフォルト推論を利用することとした。したがって学習者モデルの一貫性を管理するための機構が必要となる。知識ベースの一貫性管理のための枠組として様々な機構が考案されているが、本研究ではTMS<sup>(\*)</sup>を用いる。これは以下の理由に基づく。

モデルの一貫性を管理するために学習者モデルの状態を変更する方法は複数の組み合わせが考えられる。しかし、学習者モデルに表現された学習者の理解構造について発生した不整合とは、学習者の理解構造があらかじめシステムが予想した理解構造と異なる場合である。この理由の1つとしては、学習者がその知識について誤った理解構造から正しい理解構造へと移行したことが考えられる。この多くは、学習者がそ

の知識について十分な理解をしていないからであると考えられる。そこで、ここでは学習者モデルの不整合を解消した際には、学習者に理解構造を確認するという教授戦略をとることとした。これによりATMS (Assumption-based TMS)<sup>(\*)</sup>のように複数の無矛盾世界を考える必要がなくなる。よって本研究では学習者モデルの一貫性の管理機構として、TMS<sup>(\*)</sup>を用いることで十分であると考えられる。

## 4. システムの構成原理

### 4・1 システムの構成と基本的な動作

本システムの構成は、図1に示すようなシステム理念に基づいている。すなわち、教育者が仮説として設定した初期値としての学習者が持つであろう信念体系から出発し、学習プロセスを経て学習者固有の信念状態へと学習者モデルを修正する。そしてその信念状態を考慮した適切な教授の展開を行うことで、学習者に信念体系の修正、変容を行わせる。なお、システムが教授する学習世界としては、宣言的、因果的な構造を持つ学習世界を対象としている。

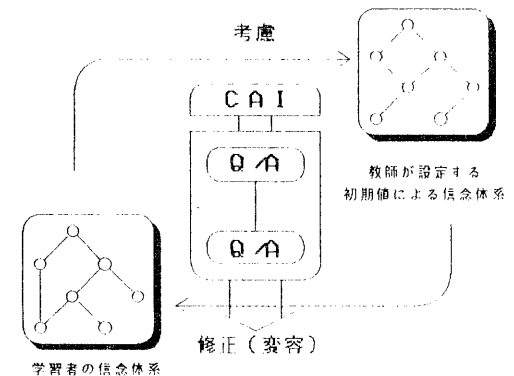


図1 本システムの設計理念

以下にシステムの基本的な動作を示す。システムは、初期値として設定された学習者の理解構造に基づき問題を出題する。これに対し学習者が回答することで学習者モデルの更新が開始される。

まず、システムは出題した問題に対する学習者の回答を診断する。この診断では、回答の正誤、学習者が回答する際に用いた知識の同定を行う。次に、診断により得られた情報からデフォルトルールを作成する。作成されたルールは、学習者の持つ知識間の依存関係、すなわち学習者が持つ信念体系を表現する。そして作成されたルールを学習世界を表現した知識ベースに適用する。本システムでは、この変形された知識ベースを学習者モデルとして利用する。

続いて、学習者モデルから学習者の誤りの原因となる知識の欠落、誤り、依存関係の誤りとしての適用の誤りを認識する。これをもとにシステムがとるべき教授戦略を決定し、学習者との対話を行う。これに対する学習者の応答を得ることで上記の流れを繰り返し、システムによる学習が展開される。なおシステムによる学習は、学習者が現在の学習世界における知識を理解したとシステムが判断した場合に終了する。

4・2 学習者モデル生成モジュールについて  
学習者モデル生成モジュールの構成を図2に示す。

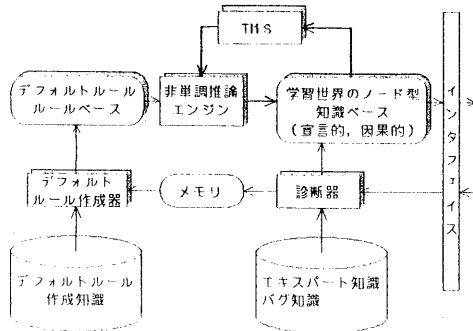


図2 学習者モデル生成モジュールの構成

システムはまず、回答を診断器にかける。診断器は、システムが持つエキスパート知識、バグ知識を用いて表面的な診断を行う。すなわち、回答の正誤、学習者が回答する際に用いた知識の同定である。

次に、デフォルトルールの作成器が、デフォルト知識の弁別規則を用いて、診断器により得られた情報からデフォルトルールを作成する。ここで作成されるデフォルトルールは、学習者の持つ知識間の依存関係、すなわち学習者が持つ信念を表現する。

続いて、デフォルト推論エンジンを用いて、作成されたデフォルトルールを、学習世界を構成する知識を表現した知識ベースに適用する。その際の知識ベースの一貫性は、TMSを用いて管理する。

上記までの過程で、学習世界を表現する知識ベースが、学習者の持つ信念体系を満足する形に書き換えられたことになる。本システムでは、この変形された知識ベースを学習者モデルとして利用する。

4・2・1 知識ベース

本研究では対象とする一般的な学習世界として、宣言的、因果的な構造を持つ世界を設定している。このような学習世界の具体例として、植物の光合成を対象世界としてシステムを構築している。

光合成に関する学習世界は、ある種の条件に依存して光合成が行なわれる世界である。この世界において条件が変化したときに、世界の構造がどのように変化するかは、各条件の間の依存関係を獲得することにより理解される。したがって光合成に関する知識の正しい依存関係を獲得することがこの世界における最終的な教授目標となる。よって光合成に関する学習世界は、本研究の具体世界として適切である。このような世界を対象として、システムは以下の方法で構築される。

学習者モデル生成のため、あらかじめ学習世界を構成する知識を意味ネットワークで表現し、これをTMSにより管理可能なノードの形式によって記述した知識ベースを用意する。この知識ベースの初期状態には、教師が想定する学習者の理解構造が設定される。この知識ベースに対し、学習者における知識の依存関係に基づき

- ①知識の状態を書き換える
- ②新たな知識を加える
- ③知識間の依存関係を設定する
- ④一貫性を管理する

の変形を施すことで知識ベースを学習者の信念体系を満足する形に変形し、学習者モデルを構成する。

知識ベースは、TMSにより管理可能な図3に示す形式で記述されている。

```
node (Id, Fact, Reason, Io) .
  Id      : ID番号
  Fact    : 知識の実体
  Reason  : 理由(付)
  Io      : 信念の状態
```

図3 ノード知識の表現形式

この知識ベースは、直接的には以下の事柄を表現する。知識に対する現在のシステムの信念の値を表す第4引数がinであるノードは、第2引数で示される知識を学習者が持つことを表す。第4引数がoutであるノードは、第2引数で示される知識を学習者が持たないことを表す。また第3引数で示されるTMS C用いるための「該知識を導いた理由」により、学習者における知識間の依存関係が表現される。

4・2・2 診断器

診断器は、システムが持つエキスパート知識、バグ知識を利用して学習者の回答を診断する。ここでの診断は最終的なものではなく、学習者モデルの構築に用いるデフォルトルールを作成するために行われる診断である。したがって診断の目的は、学習者の回答の正誤と、学習者がその回答を導く際に用いた知識を得ることである。したがって、診断器により行われる診断は、学習者の表面的な理解構造に関する診断である。

学習者の回答の正誤は、システムが生成した解答の照合がとれた場合に正答、照合がとれない場合に誤答と診断される。

学習者が回答する際に用いた知識は次の方法で同定される。回答が正答である場合には、システムが解答を生成する際に用いたエキスパート知識を学習者も用いたと診断する。誤答である場合は、エキスパート知識とバグ知識とを組み合わせて用い、学習者の回答が生成可能であるか否かを推論する。すなわち、問題解決器の推論エンジンが用いる知識をエキスパート知識に限定せず、バグ知識も用いて学習者の回答を説明すべく推論を行う。これにより、推論結果として学習者の回答が導けるならば、この推論過程に用いられた知識を学習者が持つと診断する。

診断結果が誤答であり、エキスパート知識とバグ知識との組み合わせからでは学習者の回答が生成不可能である場合、学習者が持つ知識は不明であると診断する。

4・2・3 デフォルトルールの作成器

診断器により得られた情報をもとに、学習者における知識間の依存関係を記述するルールを作成する。作成されるルールの形式は以下の図4で示すデフォルトルールである。

$$\frac{\alpha_1(x), \dots, \alpha_n(x) : M\beta_1(x), \dots, M\beta_n(x)}{\omega(x)}$$

図4 デフォルトルールの形式

学習者が持つ知識は、診断器による診断結果として得られている。これをもとに、デフォルト知識の弁別規則を用いて、学習者に用いられる知識ベース内のノードのリストを生成する。これらを図4の前提部 $\alpha_1(x), \dots, \alpha_n(x)$ , および、デフォルト部 $M\beta_1(x), \dots, M\beta_n(x)$ へと割り振ることで、条件部を作成する。結論部の $\omega(x)$ には、学習者の回答をそのまま、あるいはその否定をとって利用する。デフォルト規則の作成規則には、現在次のような規則が存在する。

- ① 性質継承により得られる知識は、学習者の回答を結論部を持つデフォルト規則のデフォルト部とする。
- ② 誤答を再生成する際に利用された知識の中でエキスパート知識にのみ含まれている知識は、その否定形を学習者の回答を否定する結論部を持つデフォルト規則のデフォルト部とする。
- ③ 誤答を再生成する際に利用された知識の中でバグ知識のみ含まれている知識は、その否定形を学習者の回答を否定する結論部を持つデフォルト規則のデフォルト部とする。
- ④ デフォルト部とならない知識は前提部とする。

上記の各規則は以下の対応する番号に示す考え方から設定されている。

- ① 性質継承に関する知識は、学習者によって、暗黙的に使用されることが多い。
- ② 学習者がこの知識を明示的に学習することにより、現在行った誤りである回答を覆すことが多い。
- ③ この知識は学習者にとって、現在の誤った回答を導くための必要条件である。  
したがってこの知識が充足されていないことを明示的に学習することにより現在の回答を否定することが多い。

以上により作成されたデフォルト規則からなるルールベースは、学習者モデル構築のために学習世界を表現する知識ベースに適用される。学習者の回答を生成する知識がシステムの内部に存在しない場合、システムは学習者の知識と知識ベース内のノードとの依存関係を求めることができない。したがってデフォルト規則は作成されない。

#### 4・2・4 非単調推論エンジン

本システムでは、学習世界を表現する知識ベースを変形し、学習者モデルを構築するために用いる推論エンジンとして、デフォルト推論のエンジンを用いている。このように学習者が明確に意識せずに用いた知識をデフォルト部へ割り振り学習者モデルを構築することで、システムは現在の学習者の振る舞いから予想される学習者の持つ信念体系を広い範囲でモデル化することが可能である。さらにデフォルト推論の非単調性から、後に予想される学習者からの新たな知識の提示、学習者の知識の増加、変容などにもなる学習者モデルの更新に、柔軟に対応することができると考えられる。

推論エンジンにおいて用いられるルールは、デフォルト規則の作成器により作成されたデフォルト規則、システムがあらかじめ持つルール、学習者の回答から直接作成されるルールの3種類である。システムがあらかじめ持つルールは、学習者の回答に依存しない一般的な規則である。このような規則としては、学習者モデル内の階層関係に基づく性質の継承に関するデフォルト規則、学習者モデル内に発生した矛盾をTMSに通知する規則が存在する。また、学習者の回答から直接作成されるルールは、矛盾の解消方法を制限するル

ールが設定されている。システムには、学習者の直前の回答が成立しなくなる矛盾の解消方法を禁止するルールが存在する。

#### 4・2・5 TMS

TMSは、学習者モデルの中に信念の変更、矛盾点の発生が生じた場合に起動され、学習者モデルの一貫性の管理を行う。知識ベースにおける矛盾点の発生は、非単調推論エンジンが利用するルールにより発見され、TMSに通知される。

動作方法としては、学習者モデルを構成する各知識に付けられた理由付けに基づくassumption-based backtrackを行い、必要な知識のin, out値を変更する。TMSによる矛盾解消の例を図5に示す。

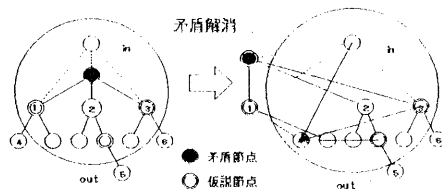


図5 TMSによる矛盾解消の例

図5の左図は、1, 2, 3の各知識がin状態であることから学習者モデルの中に矛盾が発生していることを表している。システムは、1, 2, 3の各知識に付けられた理由付けを参照することで、この矛盾が発生した原因が、4, 5, 6の知識が理由付けを持たずにout状態となっているからであることを認識する。そこで、矛盾の解消を理由付けとして、4の知識をin状態へと変更する。そしてこの知識状態の変更に基づき、個々の知識の理由付けに基づき、学習者モデル内の知識の状態を変更する。図5の右図は、この矛盾解消を行った後の学習者モデルの状態を示している。

TMSが解消を試みる学習者モデルにおいて発生した矛盾は、学習者が持つ矛盾した知識の理解構造ではない。学習者モデル内で発生している矛盾は、学習者の理解構造に対するシステムの信念の矛盾である。したがって、本システムではTMSを用いてこの矛盾の解消を行う。学習者が持つ矛盾した知識は、デフォルト部が充足されない知識として学習者モデル内に表現される。

#### 4・3 教授戦略決定モジュールについて

教授戦略決定モジュールの構成を図6に示す。

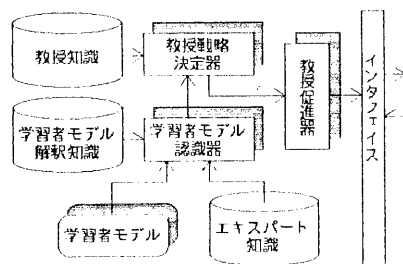


図6 教授戦略決定モジュールの構成

教授戦略を決定する段階では、学習者モデルは既に構築されている。そこで、学習者モデル認識器が、学習者モデルの解釈知識を用いて学習者モデルとエキスパート知識を比較することにより、学習者の理解構造を認識する。すなわち、学習者の誤りの原因となる知識の欠落、誤り、依存関係の誤りとしての適用の誤りを認識する。

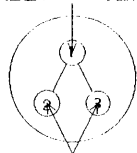
次に学習者モデルの状態、解釈に基づいて、教授戦略決定器が、教授知識を用いて次の教授行動を決定する。ここでは、学習者とシステムの対話の大きな流れを決定する主題となる知識、次に学習者に教授すべき具体的な知識、そしてその知識を教授する方法が決定される。この決定に基づき教授促進器が学習者への提示物を作成し、インタフェイスを介して学習者に提示することでシステムが学習者に応答する。

#### 4・3・1 学習者モデル認識器

学習者モデル認識器は学習者における知識の依存関係が矛盾のない形で表現されている学習者モデルを解釈し、学習者が現在犯している誤りについてその原因の認識を行う。学習者の誤りとは、エキスパート知識では説明できない学習者の知識のことである。学習者の誤り自体はエキスパート知識を用いることでシステムは判断可能である。これに対し、学習者の誤りの原因はエキスパート知識とこれを用いる問題解決器だけでは知ることはできない。しかし学習者の誤りの原因を知ることができるならば、その原因を学習者から除去することで学習者の誤りを回避することができる。すなわち学習者の誤りの原因をシステムが認識できるか否かは、学習者への適切な教授方法の決定に直接関与する。

本システムの学習者モデル認識器は、依存関係を反映した学習者モデルの構造をエキスパート知識の構造と比較することにより、知識の欠落、知識の誤り、知識間の依存関係の誤りとしての適用の誤りを認識することができる。以下にシステムが認識する誤りの原因と、エキスパートにおいて図7に示す形式で表現された知識に対する誤り原因を表現した学習者モデルの状態の例を示す。

注目している知識



依存している知識

図7 エキスパートにおける知識の状態

##### [1] 知識の欠落

学習者が欠落している知識の学習者モデルにおける表され方は、2通りの場合が存在する。1つは学習者モデルに表現されていない知識である。もう1つはエキスパート知識には存在するが、学習者モデルにおいてout状態のノードにより表現されている知識である。pなる知識がout状態にあるとは、学習者はpなる知識を持つことはないというシステムの信念を表現している。したがってこのような知識も学習者が欠落している知識として認識される。

知識の欠落を原因とした誤りは、上記の学習者が欠落して

いる知識を用いて次のように表される。学習者が誤りを犯している知識とは、エキスパートと異なる知識である。このような知識の中で、依存関係の低位の部分に学習者が欠落している知識が存在する知識を、知識の欠落を原因として誤りを犯している知識と呼ぶ。これを学習者モデルにおける知識の状態とエキスパート知識の状態の差としてまとめると、知識の欠落を原因とする誤りは以下のいずれかの条件を充たす知識として表現される。

- ① エキスパート知識には存在するが、学習者モデル中には存在しない知識
- ② エキスパート知識に存在し、学習者モデル中にout状態で存在し、理由付けとなる知識がin, out状態を無視すればエキスパートと等しい知識
- ③ エキスパート知識にその否定が存在し、学習者モデル中にはin状態で存在し、両者の理由付けがin, out状態を無視すれば等しい知識

これは直観的には、正しくはin状態にあるべき知識の一部がout状態となっているために現在の誤りが発生している知識である。したがって欠落している知識すなわちout状態の知識がin状態となれば解消される誤りである。また原因となる知識は、①の場合は当該知識、②、③の場合は、理由付けを行っている知識中のout状態にある知識である。

上記②、③の状態を、図8に示す。

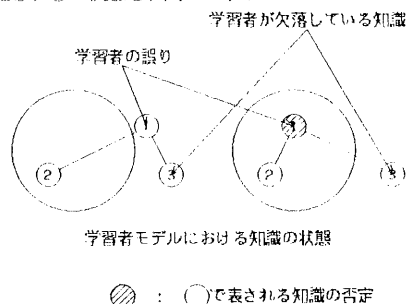


図8 知識の欠落を原因とする誤りの状態

##### [2] 知識の誤り

学習者の知識の誤りは、エキスパート知識と異なる知識を持つことである。しかしここで用いる知識の誤りを原因とする誤りという場合の原因となる知識の誤りは、やや範囲が狭い意味での知識の誤りである。この意味での知識の誤りも、学習者モデルにおいて2通りの表され方をする。第1の場合は、学習者モデルに存在するが、エキスパート知識には存在しない知識の中で理由付けを持たない知識である。これはシステムでは説明できない学習者の知識を示している。第2の場合は、エキスパート知識においてその否定形をとった知識が正しいということを証明できる知識のうち、学習者モデルにおいてin状態として表される知識である。

知識の誤りを原因とした誤りは、次のように表される。すなわち普通の意味での誤りを犯している知識の中で、依存関係の低位の部分に学習者が上記の意味で誤りを犯している知識が存在する知識を、知識の誤りを原因として誤りを犯している知識と呼ぶ。これを学習者モデルにおける知識の状態と

エキスパート知識の状態の差としてまとめると、知識の欠落を誤りとする誤りは以下のいずれかの条件を満たす知識として表現される。

- ① 学習者モデル中に理由付けを持たない in 状態で存在し、エキスパート知識には存在しない知識
  - ② エキスパート知識に存在し、学習者モデル中に out 状態で存在し、理由付けとなる知識の内いくつかの否定を採るとエキスパートの理由付けと等しくなる知識
  - ③ エキスパート知識にその否定が存在し、学習者モデル中には in 状態で存在し、理由付けとなる知識の内いくつかの否定を採るとエキスパートの理由付けと等しくなる知識
- これは直観的には、正しくは out 状態にあるべき知識の一部が in 状態となっているために現在の誤りが発生している知識である。したがって誤りを犯している知識すなわち in 状態の知識が out 状態となれば解消される誤りである。また原因となる知識は、①の場合は当該知識、②、③の場合は、理由付けの比較の際、否定を採った知識である。

上記の②、③の状態を図9に示す。

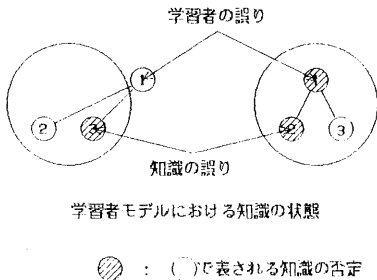


図9 知識の誤りを原因とする誤りの状態

### [3] 知識の適用の誤り

本システムでいうところの知識の適用の誤りとは、知識の依存関係の誤りである。すなわち学習者モデルに存在する知識であって、その知識の理由付けがエキスパート知識と異なる理由付けを持つ[1]、[2]に該当しない知識である。したがって知識の依存関係の誤りとして認識された誤りは、学習者モデルに表されている知識の in, out 状態を変更しただけではエキスパート知識と同じ構造へ戻ることはない。

この場合の原因となる知識は、理由付けとなっている知識の中でエキスパートと異なる知識である。すなわち知識の状態の差異ではなく、知識の構造の差異に注目した誤りの原因である。

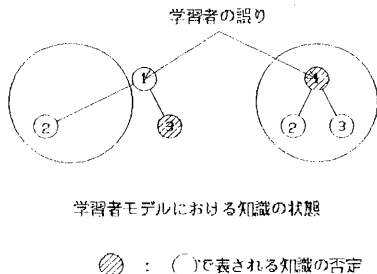


図10 知識の適用の誤りを原因とする誤りの状態

図10 知識の適用の誤りを原因とする誤りの状態

### 4・3・2 教授戦略決定器

システムにより決定される教授戦略は、それまでの教授展開、学習者との対話の流れを無視したものであってはならない。すなわち、何らかの主題を持った形で展開されるべきである。したがって、システムが一貫した教授を展開するため、教授すべき具体的な知識を決定する前に主題となる知識を決定する。教授の展開によって学習者モデルの状態が変化しても、その主題となる知識はその下に含まれる知識が全て理解されるまで固定する。

主題となる知識の決定は、以下の方法で行われる。現在教授が展開中の主題が存在する場合、これが理解されるまで主題となる知識の変更は行われぬ。展開中の主題が存在しない場合は、学習者モデル中の依存関係を半順序関係と見て、「下位の部分に誤りを多く持つ極大元」となる誤りの知識を主題となる知識として設定する。

学習者に教授する具体的な知識は、基本的に、主題となっている知識からみて下位の部分に含まれる誤った知識の中から決定する。この中で、上位に含まれる誤りが最も多い知識を教授する具体的な知識として設定する。以上の決定方法の例を図11に示す。

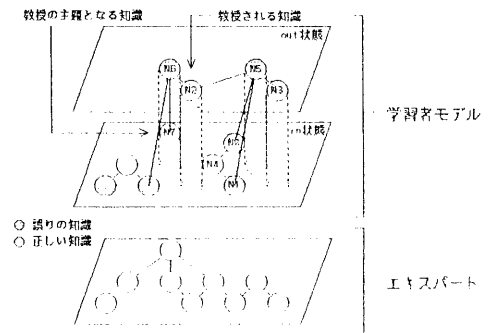


図11 教授される知識の探索・決定方法

しかし、上記の決定方法だけでは、局所的に必要な教授の展開が不可能である。すなわち、学習者モデルにおいて矛盾の解消が行われた場合の処理である。この場合、TMSが矛盾解消を行うために in, out 状態を変更した知識を教授すべき具体的な知識として設定する。決定された教授すべき具体的な知識に対する教授方法は、その誤りの原因の種類に応じて教授知識を用いて決定される。

知識の欠落、誤りが原因となる知識の場合、原因となる知識の正しい in, out 状態を教授することで学習者の理解構造を正しい理解構造に変化させることが可能である。したがって、原因となっている知識の確認、指摘、正しい知識の in, out 状態の提示を行う。また、依存関係の誤りとしての適用の誤りである場合には、正しい知識の in, out 状態を教授しただけでは不十分であり、正しい依存関係を教授する必要が生じる。したがって、原因となっている知識の確認、指摘、現在の依存関係の説明、正しい依存関係の提示を

行う。教授すべき具体的な知識が、矛盾解消に基づいて設定された場合、矛盾の解消方法の妥当性を学習者に対し確認する。

教授戦略に関する知識の例を表1に示す。

表1 教授戦略知識の例

矛盾解消の状況	教授戦略、規則例	初期フレーム例
時間的制約に前後する知識を学習者に提示する。前後する知識は、その内容を要約しない、要約しなければならない学習者モデル	前後の知識と学習する知識を学習者に提示する。前後する知識は、その内容を要約しない、要約しなければならない学習者モデル	学習した知識を要約し、内容を要約しない。
矛盾の存在を認めとする理由が既に存在しない	知識の存在することを示す新情報の提示する。新旧の知識のあいだに、その知識について説明する。 rule (R1): [over (R1), lesson (R1), info (R1), explain (R1)] 知識の存在を示す新しい知識を提示し、新旧の知識のあいだに、その知識について説明する。 rule (R2): [over (R1), lesson (R1), info (R1), explain (R1)]	学習者に知識を提示し、説明する。
正しい知識の存在を否定する理由が既に存在しない	学習者から、その知識を提示し、新旧の知識のあいだに、その知識について説明する。 rule (R3): [over (R1), lesson (R1), info (R1), explain (R1)]	学習者に知識を提示し、説明する。
矛盾の存在を認めとする理由が既に存在しない	学習者から、その知識を提示し、新旧の知識のあいだに、その知識について説明する。 rule (R4): [over (R1), lesson (R1), info (R1), explain (R1)]	学習者に知識を提示し、説明する。
矛盾の存在を認めとする理由が既に存在しない	学習者から、その知識を提示し、新旧の知識のあいだに、その知識について説明する。 rule (R5): [over (R1), lesson (R1), info (R1), explain (R1)]	学習者に知識を提示し、説明する。

システムと学習者の対話を一貫したものにするために、主題を設定し上記の規則で決定された教授戦略を展開した。しかしこれだけでは、意味的には対話が連続していても矛盾解消の連続的な発生など、状況によっては対話が病的なサイクルに陥る可能性が考えられる。この原因は、その時点までの対話の流れが考慮されていないからである。これを避けるためには、システムの対話を管理する必要がある。

このための対話管理は、決定された教授戦略と、今までに行われてきた対話の状況に基づいて行われる。すなわち、現在の学習者に対し教授すべき知識と、その方法が決定されていたとしても、対話の流れの中で適切でないと判断されたならば、他の教授行動がとられることになる。この対話管理のために用いる規則の例を表2示す。

表2 対話管理のための規則の例

対話の状態	ルールの例	教授規則の高水準
主題の変更	主題となる知識が変更されたならば、前主題の完了を学習者に示し新たな主題を説明する。	前主題の完了を高め前主題を提示する
教授対象となる知識の変更	教授の対象となる知識が変更されたならば、前回の対象知識を確認し、今回の知識との関係を説明する。	前対象知識の確認新たな対象知識との関係を説明する
直接の矛盾発生	教授戦略により決定された主題に矛盾が生ずる。	矛盾を提示し、学習者モデルに提示された状態まで復帰する。
矛盾解消の方法	すでに、矛盾解消する停止中の対話がある場合は話題は継続する。	対話を継続する。
矛盾解消の方法	決定された知識が現在の知識より主題とあれば、話題を継続する。	対話を継続する。
矛盾解消の方法	決定された知識が現在の知識より主題とあれば対話を変更する。	話題を変更し、その後、停止状態まで復帰する。

#### 4.3.3 教授促進器

決定された教授すべき知識と教授内容に基づき、学習者に提示するメッセージ、次問題等の具体的な内容を作成する。教授すべき知識はあらかじめシステムに用意されている。この知識はフレームの形式で、エキスパート知識、バグ知識により導かれる知識に対応して用意されている。知識の内容は対応する知識の説明の詳細さ、種類のスロットにより分類されている。各スロット値に対応するデータは、他のフレームであるかまたはフレーム名、スロット名に対応して記述され

たテキスト形式のデータである。教授促進器は、教授戦略決定器により知識の説明を行うことが決定された場合、決定された教授すべき知識に対応するフレームをもとにして、決定された教授方法に沿ったメッセージを組み上げる。

教授戦略決定器により知識の確認、指摘を行うことが決定された場合、このフレームは用いられない。知識の確認を行う事が決定された場合、学習者モデルに表現される知識の状態を学習者に確認するメッセージを作成する。また知識の提示をすることが決定された場合には、エキスパート知識を用いて正しい知識の状態と依存関係を提示するメッセージを作成する。

矛盾に基づく教授戦略が選択された場合、学習者モデルの中で直接矛盾している知識は学習者モデルの中に表現されている。またこれらの原因となった知識も仮説ノードのリストとして学習者モデルの中に表現されている。これを利用して学習者に提示するメッセージを作成する。

教授促進器による作成は、対話管理のための規則による制御を受けた上で開始される。したがって、ここで作成された内容は直接学習者に提示される。

### 5. システムの具体的な動作の例

図12に示す対話例を用いて、システムの動作を具体的に説明する。

```

>>>では、桜は二酸化炭素を出しているのでしょうか？
>桜は二酸化炭素を出す
そのとおりです。桜は二酸化炭素を出します。わかったみたいですね。これからその調子でがんばって下さい。では、きのこは二酸化炭素を出しているのでしょうか？
>きのこは二酸化炭素を出すことはない
あなたは、きのこは植物の一部分であることではないかと思っているようですね。本当のところをもう一度答えて下さい。
>きのこは植物の一部分である
あなたは、植物は呼吸をしますと思いませんか？
>植物は呼吸をする
あなたは、呼吸は二酸化炭素をつくると思いませんか？
>呼吸は二酸化炭素をつくらない
あなたは、前に呼吸は二酸化炭素をつくらないと答えていましたね。本当はどちらなのかなと答えて下さい。
>呼吸は二酸化炭素をつくらない
あなたの考えは間違っています。正しくは、呼吸は二酸化炭素をつくります。正解を答えて下さい。
>呼吸は二酸化炭素をつくらない
あなたは、きのこは二酸化炭素を出すことはないかと思っているようですね。本当のところをもう一度答えて下さい。
>きのこは二酸化炭素を出す
そのとおりです。きのこは二酸化炭素を出します。これからその調子でがんばって下さい。では、...

```

(注) >は学習者の回答を示す

図12 システムによる対話の例

対話のための初期値として、学習者は桜と茸が植物であること、呼吸作用に関することを理解していると学習者モデルに設定されている。この状況において図12に示した対話は、以下のシステムの判断により決定された教授戦略に基づき学習者で行われたものである。

学習者が桜は光合成をするという正答を回答したため、システムはこの解を生成したエキスパート知識「植物は呼吸し二酸化炭素を出す」を学習者が用いたと診断した。したがってこの知識の依存関係を学習者モデルに記述した。初期値として設定された学習者モデルをデフォルトとして、学習者は茸も二酸化炭素を出すという信念をもつとシステムは予想し

ている。

しかし学習者が、同じ植物である苺については二酸化炭素を出さないと回答した。この回答は、現在の学習者モデルと直接的に相容れないため、表1に示した規則に基づき学習者に回答を再確認している。しかし学習者が同じ回答を主張したため、表2に示した規則に基づき苺と二酸化炭素に関する対話を判断し、学習者モデルに不整合が発生したことをTMSに通知してこの不整合を解消する。

この不整合の解消方法として、苺は植物であるという信念を学習者が持たないとする方法がTMSから通知された。システムはこれを学習者に提示し、確認を求めたが否定された。このため他の解消方法を検討し、呼吸作用が二酸化炭素をつくらぬという知識を学習者から得ることが出来た。これにより新たに観測された学習者の信念を学習者モデルに記述する。

これにより学習者モデル認識器において、苺は二酸化炭素を出さないという学習者の誤りは、呼吸が二酸化炭素をつくらぬという知識の欠落が原因であること、更にそれは呼吸が二酸化炭素をつくらぬという知識の誤りが原因であることが判明した。以上のことから4・3・2の決定方法を用いて、学習者に呼吸が二酸化炭素をつくらぬという知識を持たせるために、呼吸が二酸化炭素をつくらぬという知識を除去するという教授戦略が決定される。ここでは、除去すべき知識を直接指摘している。

矛盾解消の実施にともなう戦略による教授が完了したので、システムは停止されていた苺と二酸化炭素に関する対話を再開する。この知識についても学習者が正答を回答したため、正しい知識を獲得したとシステムは判断し、教授の対象となる知識を他の知識へと変更する。そのためにこの時点で現在の話話が終了したことを学習者に通知している。

## 6. むすび

本研究では学習者が持つ学習世界における知識の依存関係を学習者モデルに取り入れることで、学習者の理解構造を信念体系の変化にもなって動的に捉え、これを因果モデルとして表現する学習者のモデル化の一方法を示した。またこの方法で構築された学習者モデルの解釈方法とその一般的な教授戦略の例を示した。

今後検討すべき課題としては、次の点が考えられよう。学習者モデル生成のためのルールベースは、学習者における知識の依存関係を適切に反映せねばならない。したがって、デフォルトルールの作成方法の正当性と、作成されたルールベースの妥当性を学習実験を重ねて行い検証する必要がある。

また我々は、学習者の回答間における直接的な類似性からモデルの成長を行うITS<sup>(10)</sup>をすでに構築しているが、この手法では、学習者の振る舞いの組み合わせによる爆発を生ずる可能性が存在する。それゆえ、抽象化された学習者の因果モデルのレベルでの変化を類推等の方法で認識させる必要がある。

## 参考・引用文献

- (1) de Kleer, J. : An assumption-based truth maintenance system, *Artificial Intelligence*, Vol.28, pp. 127-162 (1986).
- (2) Doyle, J. : A truth-maintenance system, *Artificial Intelligence*, Vol.12, pp.231-272 (1979).
- (3) McDermott, D. and Doyle, J. : Non-monotonic logic I, *Artificial Intelligence*, Vol.13, pp.41-72 (1980).
- (4) Poole, D., Goebel, R. and Aleliunas, R. : Theorist: A Logical Reasoning System for Defaults and Diagnosis, in N. Cercone and G. McCalla (Ed.), *The Knowledge Frontier: Essays and the Representation of Knowledge*, pp.331-352, Springer (1987).
- (5) Reiter, R. : A logic for default reasoning, *Artificial Intelligence*, Vol.13, pp.81-132 (1980).
- (6) VanLehn, K. : Student modeling, Polson, M. C., Richardson, J. J. : *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*, pp.55-78, Lawrence Erlbaum Associates publishers (1988).
- (7) 池田, 溝口, 角所 : 学生モデル記述言語SMDIと学生モデルの帰納推論アルゴリズムSMIS, *信学論D-II*, Vol. J72-D-II, No.1, pp.112-120 (1989).
- (8) 岡本 : 知的CAIのための教授世界知識の表現とその推論の方法, *信学論D*, Vol. J70-D, pp.2658-2667 (1987).
- (9) 岡本, 松田 : 知識獲得指向の高次推論型学習者モデルの構成について, 「教育におけるコンピュータ利用の新しい方法」シンポジウム論文集, pp.189-197, 情処学会 (1989).
- (10) 岡本, 松田 : 知的CAIにおける幾何の証明計画の認識と学習機能について, *情処論*, Vol.30, No.8, pp.1046-1058 (1990).
- (11) 岡本, 森広 : 非単調推論による深い学習者の理解のモデル化について (6), *信学技法*, Vol.90, No.391, A190-76, pp.1-8 (1991).
- (12) 小林 : 知識獲得と学習に関する技術動向, A Iの最新技術動向講習会, pp.97-117, 信学会情報システム研究グループ (1990).