

環境型教育システムにおける継続的対話管理

中村 祐一 平島 宗 豊田 順一
大阪大学産業科学研究所

物理の学習において、公式や法則等の基本的事項を修得した学生は次段階としてそれらの使い方を学習するために問題演習を行うことが必要となる。著者等は学生が問題演習を行う際にそれを支援するような知的問題演習システム (Intelligent Practising Problem System ; IPPS) の開発を行っている。本論文では、メタ知識をプリミティブな知識とその適用条件の組み合わせとして表現することにより学生モデルの構築及びその診断が容易に行えることを示す。また、教育戦略を明示的ルール表現として与える。以上のメタ知識表現と教育戦略により、IPPS は学生との対話の中で学生の持つ知識構造を詳細化するような助言を与える。

The learning environment for practicing problems
Yuuichi NAKAMURA, Tsukasa HIRASHIMA, Jun'ichi TOYODA
OSAKA University
The Institute of Scientific and Industrial research
8-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567 JAPAN

During the course of learning, students usually acquire skills necessary for applying basic concept to new problem or situation. IPPS (Intelligent Practising Problem System) provides the environment which guides how students acquire skills by discovery learning method. To simplify the construction of student model, a set of applicability conditions associated with primitive knowledge is represented as meta-knowledge. Hence, the incorrect use of knowledge, that is, the misconception of meta-knowledge is identified as the use of knowledge under the erroneous condition. IPPS chooses the appropriate tutoring rule suited for the misconception to give students remedial advice aimed at finding misconceptions by themselves. IPPS also aids students to reorganize their knowledge during the course of interaction with them.

1. はじめに

一般に、教科学習は二つの側面を持つと考えられる。一つは教科に固有の知識を獲得する事であり、他方は獲得した知識を実際の問題に適用して問題解決を行うことである。物理の学習も同様で、公式や法則等の基本的事項を修得した学生は次段階としてそれらの使い方を学習するために問題演習を行うことが必要となる。問題演習は獲得した知識の使い方を学習するばかりでなく、知識の再発見や知識間の複雑な構造を理解するのに役立つ。また、このようにして得られた知識は失われにくい。しかしながら、問題を解くためには学生の直観的思考や複雑な手続きが必要である。そのため、学生が問題を解けた場合は大きな効果を持つが失敗の連続だと学生は意欲を失う。問題演習を効果的に行うためには、教師が学生の問題解決を支援することが必要となる。教師が学生に対して行うこのような支援を計算機上で実現するために、著者等は知的問題演習システム (Intelligent Practicing Problem System ; IPPS) の開発を行っている。IPPS は学生の問題解決過程を理解し、学生に対して適切な助言を行うことにより教育を行う。[1]

IPPS の中では、方程式等を求める具体的手続きをプリミティブな知識として扱い、その適用の仕方に関する知識をメタ知識として扱っている。また、メタ知識をモデル化するために「関連する手続き」の定義を述べる。メタ知識のモデル化は、「関連する手続き」の中から実際に学生の用いた手続きを選択することと、学生に与えた問題からその手続きの用いられた状況 (適用条件) を抽出すること、そして手続きと状況を組み合わせることにより行う。すなわち、メタ知識は手続きとその適用条件の組み合わせにより構成される。また、IPPS の教育戦略は明示的にルール化されており、この教育ルールと学生モデルとにより学生に対して十分な教育を行える。

2. 学生自身が問題演習を行う際の問題点

問題演習は物理の学習において不可欠であるが、適切に行われなければかえって逆効果となる。学生自身が問題集等を使って学習を行う際の問題点を以下に示す。

1) 学生が自分自身で解法の評価を行えない

学生が正しい解答を得ても、やり方が問題集の解答と違っていたら、自分の解答が本当に正しいかどうかを正確に判断することはできない。また、誤った場合に学生はどの部分が誤っているのかを自分で考えなければならない。

2) 誤りに気付く時期が遅れる

学生は誤りを犯しても、それに気付かず先に進んでしまう。そのため、最初の段階で間違ってしまうと、最後まで解いてももう一度最初からやり直さなくてはならない。

3) ヒントが適切でない

問題集にかいてあるヒントは方針そのものであることが多い。そのため、学生自身の考える機会が失われてしま

う。また、ヒントは全ての学生に共通であるので学生にとって難し過ぎたり易し過ぎたりする。

4) 問題選択の方法が決まっていない

学生は問題を任意に選ぶ。そのため、問題と学生自身の能力との間に隔たりが生じてしまう。

以上のような問題点を考慮して、著者等は学生の問題演習を支援する機能を持つ IPPS の開発を行っている。IPPS は問題解決に関する詳細なモデルを持っており、学生の問題解決過程を理解できる。物理の問題を解く過程において適用すべき手続きを発見する知識が必要になるが、この知識をメタ知識として扱う。IPPS では、メタ知識をプリミティブな知識 (具体的手続き) とその適用条件の組み合わせとして表現しており、この表現を用いて学生モデルを表すことによりモデル化及び診断が容易に行える。IPPS はこの学生モデルを用いて学生に適切なアドバイスを与えるが、そのための教育戦略は明示的にルールとして表現されている。

3. モデル表現

知的 C A I システムの学生モデルは、学生の理解度を表現するばかりでなく、システムが学生の誤りをどのように捕らえるかを表現したものである。[2] このことは、システムの教育方針が学生モデルの表現に大きく影響することを意味している。

問題解決過程は適用すべき手続きを発見する過程とその手続きを用いて式を求める過程からなる。前者の過程の教育では、学生の持つ手続き間の構造を詳細化することが目的であり、十分な教育を行うためには詳細なモデル表現が必要である。これに対し、後者の過程の教育では、学生が式の立て方を練習するのが目的であり、簡単なモデル表現で十分である。ここでは、IPPS が学生に対して適切なアドバイスを行うために必要なモデルとその IPPS での表現形式について述べる。これらのモデルに加えて、IPPS は個々の問題に関する詳細なモデルを持っているがそれについても述べる。

3.1 メタ知識を導入した領域知識の表現

公式、法則等の個々の知識は理解しているが、問題に直面すると、それらをうまく使いこなせず、誤ってしまう学生がよくいる。学生が問題を正しく解くためには、個々の知識を理解しているばかりでなく、状況に応じて知識を発見し正しく使うことが必要となる。ここでは知識の発見と使い方を含めてメタ知識と呼ぶ。これに対して、公式、法則等の個々の知識をプリミティブな知識と呼ぶ。IPPS で扱うプリミティブな知識は、方程式等を扱う具体的手続きであり、Prolog の節として表現している。

メタ知識はプリミティブな知識の使い方に関する知識であり、IPPS のモデル表現の中では適用条件として取り込まれている。また、理想モデル中には学生の用いた手続きが妥当であるかどうかを決定するためにあるクラスを設定している。学生の用いた手続きがこのクラスに属していれば

ば妥当であるとし、属していなければ妥当でないと診断される。このクラスは「関連する手続き」の集合により規定されるが、後述の 4.1.2 で詳細に述べる。以上のメタ知識表現と手続きの属すべきクラスの表現を取り入れた理想モデルは、次のような表現形式となっている。

i_model((手続き名), (対象), (クラス),
(適用条件), (手続き)).

この中で、第4引数(適用条件)は第5引数(手続き)のメタ知識となっており、第3引数(クラス)は(手続き)の属しているクラスを表している。また、第1引数及び第2引数は学生が式を立てる前に書く説明文に対応している。IPPSは学生の説明文から(手続き名)及び(対象)を抽出し、学生の用いた手続きが理想モデル中のどの手続きに対応するかを検索する際にインデックスとして使う。「物体Aについて、運動方程式を立てる」という説明文においては、物体Aが(対象)、運動方程式が(手続き名)となる。理想モデルの表現例については、3.4の中で滑車の問題の例について示す。

3.2 学生の誤り

学生の解答中の誤りは答えを導けないものや誤った答えを導くもの等、様々なものがあるが、一般に誤りの原因は次の3種類に分類できる。^[3]

1) 知識の欠落

プリミティブな知識そのものが欠落している場合で、例えば、運動方程式を知らない、運動量を知らない等である。

2) 知識の誤り：プリミティブな知識が誤っている場合で、例えば、運動エネルギーは mv^2 であると思いついでいる等である。

3) 知識の適用に関する誤り：プリミティブな知識は知っているがその使い方を誤ってしまう場合でメタ知識の誤りである。例えば、非弾性衝突に運動エネルギー保存の法則を用いた等である。

この他に、物理問題を解く際の固有の誤りとして次のものがある。

4) 解決手続き実行中の誤り

これは適用すべき手続きは発見したが、その手続きを実行して式を得る際に誤ってしまう場合であり、ケアレスミスもこの中に入る。例えば、運動方程式を立てることは思いついたが重力による力を考慮しなかったために誤った式を立ててしまった等である。これはプリミティブな知識を実行する際に発生すると考えられる。

以上より、1), 2), 4) の誤りをプリミティブなレベルの誤り、3) の誤りをメタなレベルの誤りとする。

3.3 プリミティブなレベルの学生モデル

一般に、問題演習を行う学生はプリミティブな知識すでに理解していると考えられ、もし誤ったとしても誤りを指摘するだけで十分な教育が行える。したがって、プリミティブな知識の学生モデルは理想モデルのオーバーレイとして表現する。^[4]オーバーレイモデルは、学生の持っている

知識を正しい知識の部分集合として捉える考え方である。このため、学生の誤りは理想モデル中の手続きの欠如として表現される。IPPS では、正しい手続きに 'unknown' というインデックスをつけることによりこのモデルを表現している。欠如した知識のモデル表現を次に示す。

s_model(unknown, (手続き)).

解決手続き実行中の誤りも、前述の誤りと同様に誤った手続きに 'mistake' というインデックスをつけることにより表現する。

3.4 メタレベルの学生モデル

メタレベルにおける学生の誤りには次の2つがあるが、それぞれ違ったモデル表現が必要である。

- 1) 知識を発見できない場合
- 2) 知識の使い方を誤った場合

1) の誤りは、学生が問題解決過程においてどの知識を用いるかを思いつかなかった場合である。この場合の学生モデルは、次のように用いるべき手続きに 'undiscovered' というインデックスをつけることにより表現する。

s_model(undiscovered, (手続き)).

2) の誤りは、Matz のプロセスモデルに基づいて表現している。^[5]Matz モデルでは、学生の誤りを「合理的推論の結果の誤り」として捉えている。その結果、学生の誤りを次の2つに分類している。

- a) 補間手法の誤った適用
- b) 概念変換時の誤り

a) の誤りについては、物理の問題を例として以下で詳述を述べる。b) の誤りは、学生が既知の知識と概念的差異

(問) 質量の無視できる軽い糸の両端に、質量M, mのおもりA, Bをつけ、それぞれを半径 r_1, r_2 の円盤状の定滑車にかけ、おもりを手放した後のおもりA, Bの加速度 a_1, a_2 と糸の張力 T_1, T_2 を求めよ。但し、定滑車の中心を通り板面に垂直な軸のまわりの慣性モーメントをIとする。

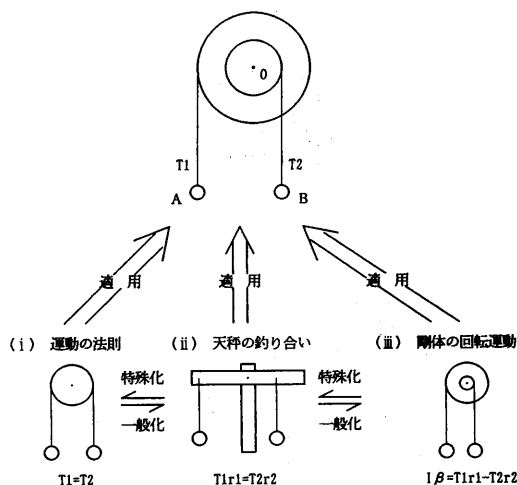


図1 滑車の問題と適用する手続きの関係図

のある知識を獲得する過程で起こる。例えば、学生が中等理科や日常的物理現象から高校物理へと適切に概念上の移行、すなわち概念変換を行えない場合に生じる。この誤りを表現するためには、問題解決知識以外の様々な知識が必要となるので、ここでは扱わない。

a) の誤りを説明するために、滑車の問題とその解き方の関係図を図1に示す。a) の誤りは、学生がある特殊な

(a) 力のつりあいの理想モデル

```
i_model(力のつりあい, Ob, 滑車,
  get_values(Ob, [モーメント, 接点, 接点],
    [0, (_, (R, left)), (_, (R, right))]),
  (力のつりあい(Ob, Form):-
    get_value(Ob, 接点, (Ob1, _)),
    get_value(Ob1, 張力, T1),
    get_value(Ob, 接点, (Ob2, _)),
    get_value(Ob2, 張力, T2),
    等式(T1, T2, Form))).
```

(b) 回転の運動方程式の理想モデル

```
i_model(回転の運動方程式, Ob, 滑車, t,
  (回転の運動方程式(Ob, Form):-
    get_values(Ob, [モーメント, 回転加速度], [I, B]),
    'I*B' (I, B, IB),
    加わるモーメントの合計(Ob, M),
    回転等式(IB, M, Form))).
```

(c) 力のつりあいの学生モデル

```
s_model(t,
  (力のつりあい(Ob, Form):-
    get_value(Ob, 接点, (Ob1, _)),
    get_value(Ob1, 張力, T1),
    get_value(Ob, 接点, (Ob2, _)),
    get_value(Ob2, 張力, T2),
    等式(T1, T2, Form))).
```

図2 理想モデルと学生モデルの例

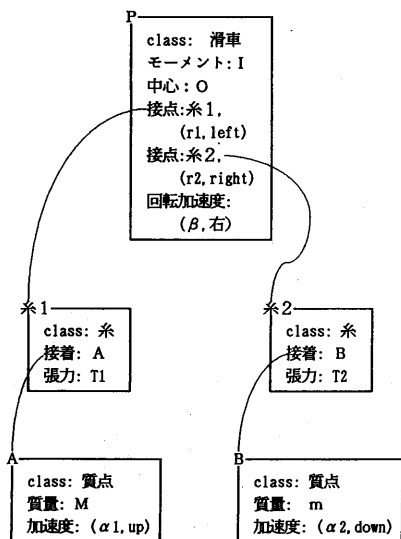


図3 問題の意味ネット表現

状況で適用できる既知の手続きを拡大解釈し、別の状況下で適用するとき生じる。図中(i)の手続きは、一般の運動方程式の問題を解くときによく用いる手続きである。一般に運動の法則等を学習するとき、(i)の手続きが $I=0, r1=r2$ という特殊な条件下でしか適用できないことはあまり強調されない。そのため、学生は図のようなモーメントの問題を与えられると、よく知っている(i)の手続きを拡大解釈して使ってしまう、そのために誤りが生じる。ここでの拡大解釈は一般化のしすぎを意味し、システム内の表現では適用条件の中に取り込まれている。このような一般化のしすぎを Matz モデルの中では般化補間手法と呼んでいる。(ii)で用いる手続きは、 $I=0$ という条件下でしか適用できない手続きであり、(i)と同様に般化補間手法により説明できる。(i)(ii)(iii)の手続きの間には、図のようにそれぞれ一般化、特殊化の関係がある。

図2に手続き(i)(iii)の理想モデルと(i)の手続きを図1の問題に適用した場合の学生モデルを示す。例えば(a)の理想モデルの第4引数はモーメントが0であり、2つの半径が等しいことを示している。学生モデルは、次のように適用条件と手続きの組み合わせからなる。

```
s_model(<適用条件>, <手続き>)
```

理想モデルの適用条件はその手続きが使える状況を示し、学生モデルの適用条件は実際に学生がその手続きをどのような状況下で使ったかを示す。学生モデルの適用条件は個々の問題により一意に決まる。図1の滑車の問題の適用条件は、すべての条件において適用できることを示す't'となる。(c)で表現されている学生モデルの第1引数は't'となっているが、このことは学生がどのような状況下でもこの手続きを適用できるとしていることを示している。

この他に、学生の思い付いた手続きが妥当でない場合がある。例えば、衝突する物体に運動方程式の手続きを用いる場合等がこれにあたる。この場合の学生モデルは、妥当でない手続きに'undirected'のインデックスを付ける。

3.5 問題の計算機内での表現

正しく問題解決を行うためには問題中の個々の物体の属性や物体間の関係等を正確に把握しなければならない。人間の教師は問題文と与えられた図等から、それらの属性や関係を抽出する。学生が問題から得られる情報を抽出できなかったり、誤って抽出した場合、教師は抽出すべき情報を学生に示すことにより教育を行う。このことは、教師が問題に関する詳細なモデルを持っていることにより可能になると考えられる。IPPSも教師の持つと思われるモデルと同等に詳細なモデルを持っている。図3に、図1の滑車の問題の計算機内での表現を示す。問題表現は意味ネットとして表してあるので、複雑な物体間の関係も柔軟に表現できる。[6]

4. IPPS の構成

著者等が開発中の IPPS の全体の構成を図4に示す。

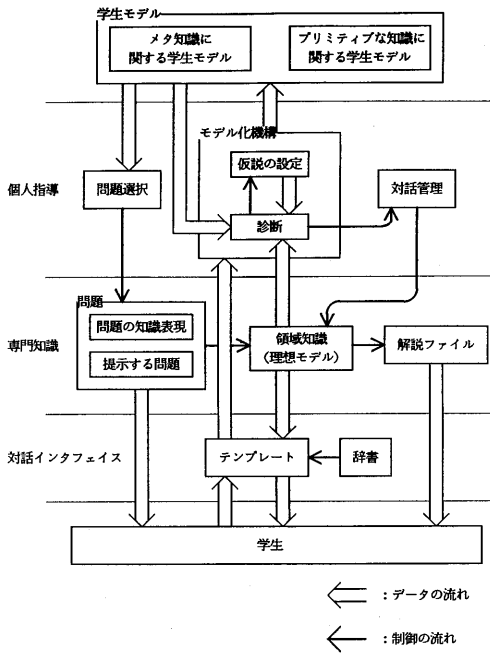


図4 システム構成図

IPPS の個人指導モジュールは、学生の個人指導を行うばかりでなく、システム全体の動作の制御を行う最も重要なモジュールである。IPPS の個人指導モジュールは、4つの構成要素を持つが、ここでは実際の動作に従ってこれらの機能を説明する。まず、システムは学生に問題を与える。どの問題を選択するかは問題選択機構が管理する。次に、学生の回答からモデル化機構が学生の理解の状態をモデル化する。さらに、できあがった学生モデルと理想モデルを比較することにより、誤りを発見するのが診断機構である。診断機構は、誤りの発見の他に、その誤りが3章で述べたどの誤りに属するかを診断する。そこでの診断結果を基にして、対話管理機構が次に学生に何を言えば良いかを決定し、理想モデルに指示する。一つの問題が終了すると、システムは次の問題を与える。以上を繰り返すことにより、システムは教育を行っていく。この中で、問題選択機構、及び対話管理機構は、システムの教育戦略を決定するもので、IPPS ではそれぞれ明示的にルール化している。また、モデル化機構、及び診断機構は、システムが教育を行うのに補助的役割を果たす。^[7]以下では、それぞれの構成要素について詳述する。

4.1 モデル化と診断

3章で述べたように、学生モデルはプリミティブなレベルとメタレベルとで別々のモデルを持っている。プリミティブなレベルのモデルはオーバーレイモデルであるので、モデル化は診断機構により発見された誤りを理想モデルから

取り除くことにより行える。すなわち、モデル化は診断と等価になる。メタレベルのモデル化は、仮説の設定と検証を繰り返すことにより行う。また、メタレベルの診断は学生モデルと理想モデルの適用条件を比較するだけで行える

4.1.1 プリミティブなレベルのモデル化、及び診断

前述のように、プリミティブなレベルのモデル化は診断と等価である。そこで、ここでは学生の誤りの診断について述べる。3.2 で、プリミティブなレベルの誤りは、知識の欠落、誤った知識、解決手続き実行中の誤り、の3種類があることを述べた。以下では、この3つの誤りについてそれぞれ診断法を述べる。

1) 知識の欠落

システムが適用すべき手続きを学生に与えても、学生が全く式を立てられない場合や、学生がその手続きを知らないと答えた場合、学生はその手続きに関する知識が欠落していると診断される。

2) 誤った知識

ある手続きに関して学生の立てた式とシステムの立てた式が違っている場合、学生はその手続きに関して誤った知識を持っていると診断される。例えば、運動エネルギーに関して、学生は mv^2 という式を立て、システムが $(1/2)mv^2$ という式を立てたとき、システムは学生は運動エネルギーに関する知識が誤っていると診断する。

3) 解決手続き実行中の誤り

解決手続き実行中の誤りを説明するために、図1の中の物体Aに関する運動方程式を考える。図5に正答と誤りの例を示す。図に示すように学生の誤りには、(1)必要な項が抜けている、(2)余分な項がある、(3)(4)符号が違っている、等がある。人間の教師はこれらの誤りを式の形状だけから判断できる。IPPS もこれと同じように正答と学生の立てた式の形状を比較することにより誤りを診断する。理想モデルによって正答がどのように導かれるかを計算木として表したのが図6である。計算木のノードは式を得るための手続きであり、説明の便宜上 node-1 等の番号を付ける。また、下位の手続きは上位の手続きの副手続きとなっている。IPPS はこの計算木を用いて正答と学生の式の比較を行う。(1)~(4)の誤りは次のように診断される。

(1) node-9 が欠落している。

Mg を考えていない。

(2) node-5 が違っている。

+mg は、余分な項である。

正答 : $M\alpha 1 = T1 - Mg$

(1) : $M\alpha 1 = T1$

(2) : $M\alpha 1 = T1 - Mg + mg$

(3) : $M\alpha 1 = T1 + Mg$

(4) : $M\alpha 1 = Mg - T1$

図5 運動方程式の正答と誤りの例

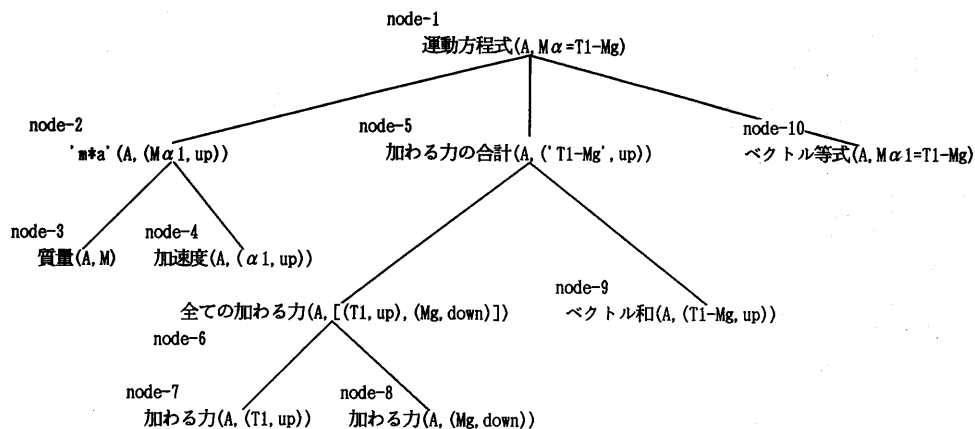


図6 計算木

- (3) node-9 が違っている。
Mg の方向が反対である。
- (4) node-10 が違っている。
左辺と右辺の方向が違っている。

1) 及び 2) の誤りについては 'unknown' というインデックスを付け、3) の誤りについては 'mistake' というインデックス付ける。インデックス付けられた手続きの集合が学生モデルとなる。

4.1.2 メタレベルのモデル化、及び診断

メタレベルの誤りには、1)知識を発見できない場合、2)知識の使い方を誤った場合、があることを 3.4 で述べた。ここでは、この2つの場合に分けて、モデル化及び診断方法を述べる。

1) の誤りは、問題解決過程において次にどの手続きを用いるかを学生が思いつかなかった場合である。システムと学生との対話の中で、学生から「適用すべき手続きを思いつかない」という意志表示があったとき、システムはその次に適用すべき手続きを検索し、その手続きに 'undiscovered' というインデックスを付け、それを学生モデルとする。また、診断は 'undiscovered' のインデックスを探すだけで行える。

2) の誤りは、学生がある特殊な状況下でしか使えない手続きを拡大解釈して、より一般的な条件下で使ってしまったために生じる誤りである。この誤りのモデルは、適用条件と学生が実際に用いた手続きの組み合わせにより表される。学生の用いた手続きの同定は、仮説の設定と検証を繰り返すことにより行う。仮説の設定を説明するために、再び図6の滑車の問題とその解き方の関係図を用いる。この中で、運動の法則、てんびんのつりあい、剛体の回転運動、を互いに関連する手続きと呼ぶ。関連する手続き間には、図のように適用すべき条件に関して必ず一般化、特殊化の関係が存在する。仮説の設定は、関連する手続き集合の中から、一つずつ手続きを選択することにより行う。次

に、選択された手続きにより得られる式が、学生の立てた式と一致するかどうかの検証を行う。検証は前節の解決手続き実行中の誤りで用いた診断方法により行う。この際、仮説として選択された手続きと、学生の用いようとしている手続きが一致していても、それぞれの立てた式が一致しない場合がある。この場合、診断機構はその仮説を棄却してしまい、正しい仮説が選定されない。これを防ぐために IPPS は仮説により立てられた式と学生の立てた式との違いをもう一度学生に尋ねることにより確認を行う。診断機構は項の欠落や違い等を正確に指摘できるので、十分な確認が行える。適用条件は、理想モデル中の関連する手続き集合の適用条件から、条件項目を抽出し、その条件項目とシステムが学生に与えた問題とを比較することにより行う例えば、滑車の問題では条件項目としてモーメント I の値及び半径 r_1, r_2 の関係が抽出される。問題の中でそれらの条件項目はそれぞれ $l \neq 0, r_1 \neq r_2$ となっているので、適用条件は 'l' となる。2) の誤りの診断は、理想モデル中の手続きの適用条件と学生モデル中の手続きの適用条件を比較するだけで行える。

これに加えて、学生の思い付いた手続きが妥当でない場合がある。学生の思い付いた手続きの妥当性の診断は、その手続きが理想モデルによって用いられる手続きと同じクラスに属しているかどうかにより行う。妥当でない場合、学生の思い付いた手続きに 'undirected' のインデックスを付ける。

4.2 対話戦略

IPPS は、学生の理解の状態に応じて次の教育を行っていく。IPPS の対話戦略は図7に示すように明言的にルール化している。[8]そのため、ルールの削除、追加が可能であり、対話戦略の変更が容易に行える。

システムが学生に行う対話は、学生の誤りの指摘及び学生が正答を得るためのヒント等がある。以下では、プリミティブなレベルとメタレベルをわけて、IPPS の行う教育

```

対話ルール1
if 学生の立てた式が間違っていたら
then 違っていることを指摘し、修正するように指示する
対話ルール2
if 学生の立てた式が間違っていたら
then 違っている部分を狭めて指摘し、修正するように指示する
対話ルール3
if 学生の立てた式に、必要な項が欠落しているとき
then なぜその項が必要か、を説明する。
対話ルール4
if 学生の立てた式の中に、余分な項があるとき
then 必要な項について説明する。
対話ルール5
if 学生の立てた式の中に、反対符合の項があったら
then なぜその項が反対符合なのかを説明する。
対話ルール6
if 学生の立てた式の両辺の符合が、反対であるなら
then なぜ両辺の符合が反対なのか説明する。
対話ルール7
if 学生が、与えられた手続きを全く実行できないなら
then 解説ファイルにより、その手続きを説明する。
対話ルール8
if 学生が、最終的に正しい式を立てられないなら
then 正答と解説を与える。
対話ルール9
if 学生が適用すべき手続きを思いつかないとき
then 考えるべき対象を指摘する。
対話ルール10
if 学生が適用すべき手続きを思いつかないとき
then 適用すべき手続きとそれに関連する手続きを選択肢として与え、どの手続きを用いるかを尋ねる
対話ルール11
if 学生が適用すべき手続きを思いつかないとき
then 適用すべき手続きを指摘する。
対話ルール12
if 学生が妥当でない手続きを適用したら
then それが妥当でないことを指摘する。
対話ルール13
if 学生が誤った補間手法を行ったら
then 学生に条件項目のチェックを行わせる。
対話ルール14
if 学生が誤った補間手法を行ったら
then 与えられた条件下では、その手続きは使えないことを指摘する。

```

図7 対話のためのルールの一部

的対話について述べる。

4.2.1 プリミティブなレベルの教育

対話ルール1～対話ルール8が、プリミティブなレベルの教育を行うためのルールである。s_model のインデックスが 'unknown' であるとき、すなわち学生がある手続きを知らなかったり、誤って記憶していた場合に教育を行うのが対話ルール6である。この場合の教育は解説ファイルを提示することにより行う。解説ファイルには個々の手続きに関する簡単な説明文が入っている。残りのルールは解決手続き実行中の誤りを教育する際のルールであるが、図6の計算木を用いて説明する。計算木は手続きの呼び出し関係を表して、上位の手続きで得られる式は下位で得られる式を合成したものとなっている。前節で述べたように、プリミティブなレベルの誤りは計算木のノードの欠落、誤りとして診断される。誤りの原因となったノードを学生に示せば、誤りを直接指摘したことになる。(対話ルール3～対話ルール6) 例えば、「T1 の符合が逆です」「T1 が抜けています」等である。しかしながら、教育的観点から考えると、学生にとってどこが誤りを知ることよりも、なぜ誤りを生じたのかを理解する方が重要である。誤りの理解に最も効果的なのが発見学習である。これは学生自身

が誤りに気付くようにするものである。^[9] 学生の発見学習を促すために、IPPS は学生に誤りの原因となったノードより上位のノードを与える。例えば、「 $Ma1=Mg$ が誤っています。修正して下さい。」(対話ルール1) 等である上位のノードを与えても、学生が誤りを発見できない場合 IPPS は一つ下位のノードを与える。このように、一つずつ下位のノードを与えることにより、学生に対する誤りの指摘は分かり易いものとなる。

実際に学生が物理問題を解くときの一つの問題点として物体間の関係、物体の属性等を正確に捉えられない場合がある。これを図6の計算木でいうとリーフの部分、すなわち加速度、張力等の具体的値を問題から抽出する手続きの実行がうまくいかないと考えられる。学生がこのような誤りを犯す場合、人間の教師は抽出すべき値を学生に示すことにより教育を行う。例えば、「物体 A には、上向きの張力 T1 がかかります。」等である。このような指摘は、教師が問題に関する詳細なモデルを持っていることにより可能になると考えられる。3.5 において、IPPS も教師の持つと思われるモデルと同等に詳細なモデル表現を持っていることを示した。この問題表現機能により、IPPS は学生に示すべき部分の抽出、及びその説明が行える。

4.2.2 メタレベルの教育

学生のメタレベルの誤りには、手続きを発見できない場合、般化補間の誤った適用、妥当でない手続きを適用した場合、等がある。学生が適用すべき手続きを発見できない場合、適切なヒントを与えることが必要となり、般化補間の誤った適用に対してはその誤りを指摘することが必要となる。

学生が適用すべき手続きを発見できないとき、IPPS はヒントを出すために対話ルール9～11を用いる。対話ルール9は最も具体的ヒントを出すためのルールであり、例えば、「A について運動方程式を立てなさい。」等であるこれに対して、対話ルール11は最も抽象的ヒントを出すためのルールであり、例えば、「物体 A について考えなさい。」等である。また、対話ルール10は、前記2つのヒントの中間のヒントを出すルールとなっている。対話ルール10により、IPPS は関連する手続きを選択肢として学生に出題することができる。この選択肢は、学生にとってヒントとなるばかりでなく、手続き間の一般化、特殊化の関係を考えさせることになる。そのため、学生は関連する手続き間の知識構造をより詳細化することができ、認識を深める。

学生が般化補間手法を誤って適用した場合、その手続きの適用が誤っていることを学生に指摘するためのルールが対話ルール13、14である。対話ルール14は、誤りを直接指摘するためのルールであり、対話ルール13は条件項目を学生にチェックさせることにより誤りに気付かせようとするルールである。これらのルールは、学生に適切な誤り指摘を行うという観点からは不十分であり、より詳細なルールを作ることが今後の課題の一つである。

```

選択ルール1
if s_modelの第一引数が'unknown'である手続きが存在するとき
then その手続きを用いるような基本問題を与える。
選択ルール2
if s_modelの第一引数が'undiscovered'である手続きが存在する
とき
then その手続きを用いるような基本問題を与える。
選択ルール3
if s_modelの第一引数が'indirected'である手続きが存在する
とき
then その手続きを用いるような基本問題を与える。
選択ルール4
if s_modelの適用条件が理想モデルの適用条件と一致していない
且つ
手続きが存在するならば
then その手続きを用いるような問題を与える。
選択ルール5
if s_modelの第一引数が'mistake'である手続きが存在するとき
then その手続きを用いるような問題を与える。

```

図8 問題選択のためのルールの一部

学生が妥当でない手続きを適用したとき、そのことを指摘するためのルールが対話ルール12である。この場合の教育は、学生にその手続きが適用できないことを指摘し、その手続きを適用できる対象の例を示すことにより行う。

4.3 問題選択

教師が学生に問題演習を行わせていく場合、次のようにして問題を選択すると考えられる。

- 1) 学生の問題解決過程から弱点を抽出し、それを補うような復習問題を与える。
- 2) 教師が予め持っているコースウェアに従って、学生に問題を与える。
- 3) 学生の能力に応じて、易しい問題や難しい問題を学生に与える。

図8に問題選択のためのルールの一部を示すが、これらのルールは学生の弱点に応じて問題を出す場合、すなわち

- 1) の場合に対応している。選択ルール5は、学生が実行を誤った(mistake)手続きを解決過程に含む問題を出題するためのルールである。例えば、学生が運動方程式の手続きを実行中に誤ったら運動方程式を用いて解く問題を出題する、等である。

システムが2)のような機能を持つためには、教師の持つコースウェアをシステム内に取り込まなければならないが、オーサリングシステム等の実現例から考えて容易に行えると考えられる。

- 3) の機能、すなわち学生の能力の診断であるが、これもオーサリングシステム等で用いられている学生の能力を解けた問題の数等により決定する方法が最も簡単で的確であると考えられる。いずれにしても、2)と3)は密接に関連する機能であり、システムの長期戦略を決定する重要な要素となる。

5. むすび

学生自身が問題演習を行う際の問題点について考察し、その問題点を補うための知的問題演習システムIPPSの枠組みとその中での教育について述べた。IPPSはスーパーミニコンMV/8000上にMV-Prologを用いて実現中である。IPPSの特徴をまとめると次のようになる。

- 1) メタ知識をプリミティブな知識とその適用条件として

表現している。その結果、学生モデルの構築及び診断が容易になった。

- 2) 教育戦略を明示的にルール化している。
- 3) 学生の知識構造を詳細化するような対話を行う。

4.1節で述べたように、プリミティブな知識のモデル化をオーバレイモデルとして簡略化しておこない、メタ知識のモデル化に般化補間による誤りを適用することにより、モデル化が容易に行えることを示した。本モデル化手法は物理だけに留まるものではなく、様々な領域で適用できると考えられる。そのことを示すために、著者等は一次方程式を教育するシステムを開発中である。今後の課題としては、教育戦略を充実させることにより学生モデルを有効に使うことが挙げられる。

謝辞

日頃、熱心なご討論、有益な御助言をいただく大阪大学産業科学研究所上原邦明助手並びに中村孝技官に深く感謝します。

[参考文献]

- [1] Brown, J. S., Burton, R. R. and de Kleer, J.: Pedagogical, natural language and knowledge engineering techniques in SOPHIE I, II and III, in Sleeman, D. et al. (ed.), Intelligent Tutoring Systems, pp. 227-282, Academic Press, London (1982).
- [2] 木村他: 知的C A Iシステムにおける学習者モデルの動向, C A I学会, VOL. 4, n0 3 (1985).
- [3] 田中・淵監訳: 人工知能ハンドブック II, 共立出版(1983).
- [4] Goldstein, I, P.: The Genetic Graph: A representation for the evolution of procedural knowledge, in Sleeman, D. et al. (ed.), Intelligent Tutoring Systems, pp. 51-77, Academic Press, London (1982).
- [5] Matz, M.: Toward a process model for high school algebra errors, in Sleeman, D. et al. (ed.), Intelligent Tutoring Systems, pp. 25-50, Academic Press, London (1982).
- [6] 淵一博監訳: 人工知能の基礎—知識の表現と理解, 近代科学社.
- [7] 河合他: 論理プログラムと帰納推論による汎用知的C A Iシステム”, 情報処理学会論文誌, vol. 26, No 6 (1985).
- [8] 竹内他: 知的C A Iにおける誤答原因の同定と適応指導について, 情報処理学会第33回全国大会, 7L-6 (1986).
- [9] Collins, A.: Processes in acquiring knowledge, in R. C. Anderson, R. J. Spiro, and W. E. Montague (Eds.), Schooling and acquisition of knowledge, pp. 339-363 Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum (1976).