

学習者に高い自由度を与える対話機構をもつ知的 CAI について

正 員 小西 達裕<sup>†</sup>      正 員 伊東 幸宏<sup>†</sup>  
 正 員 高木 朗<sup>††</sup>      正 員 小原 啓義<sup>†††</sup>

The Dialogue Mechanism for the ICAI That Has the High Degree of Freedom in Student's Speaking

Tatsuhiko KONISHI<sup>†</sup>, Yukihiro ITOH<sup>†</sup>, Akira TAKAGI<sup>††</sup> and Hiroyoshi OHARA<sup>†††</sup>, *Members*

あらまし 本論文では高校化学を題材とした問題演習型知的 CAI システムの対話機構について論じる。知的 CAI において双方主導型対話を実現する上では、演習問題の解法や、さまざまなタイプの質問、システムに対する要求など、幅広い内容を学生が自由に発話できることが望ましい。そのためには、入力文の解釈においてシステムがもつ特定の知識・認識に依存せず、さまざまなタイプの知識・認識を用いて処理を行う必要がある。本論文ではこのような条件を満たす入力文解釈処理の枠組みと、対話システムの制御機構を提案する。入力文解釈においては、システムがもつ知識・認識と入力文の照合処理が中心となる。そこで入力文の文構造および文中に含まれる概念・概念間関係に対する分析から、入力文の照合を考慮した知識表現手法について述べる。更に、以上の結果を踏まえて構築した知的 CAI システムについて報告する。

キーワード 知的 CAI, 対話, 自然言語処理, 双方主導

1. ま え が き

知的 CAI において学生との対話は極めて重要な研究課題であり、これまでも内外の研究者によって数多くの研究が行われてきた<sup>(1)</sup>。知的 CAI システムにおいては、システムと学生の両方が必要に応じて対話の主導権を握ることができる、いわゆる双方主導型対話の有効性が提唱されている。双方主導型対話システムでは、演習問題の解法や、さまざまなタイプの質問、システムに対する要求など、幅広い内容を学生が自由に発話できることが望ましい。従来の研究においては、自然言語インタフェースを備え、学生の入力にある程度の自由度を与えているシステムがいくつか提案され

ている(著名なシステムとしては、SCHOLAR<sup>(2)</sup>、SOPHIE<sup>(3)</sup>等がある)。しかしながらこれらのシステムは、許容される入力内容が、教材知識や問題解決に関するものであることを前提とした意味解釈を行っており、学生に許される入力文の内容は極めて限られた範囲に限定されている。一般に学生の発話には、教授法についての要求、自分の成績の傾向についての質問、学習法についての相談など、この範囲に含まれないものも多数存在すると考えられる。従って知的 CAI においては、システムがもつ多様な情報を幅広く利用して意味解釈を行う機構が必要になると考えられる。

そこで本論文では、上述のような観点から、幅広いタイプの学生の発話を取り扱える入力文解釈の機構について論じ、具体的なシステム構築手法を提案する。またこれらの検討をもとに、高校化学の問題演習を対象として構築した実験システムについて報告を行う。

2. 基礎的考察

2.1 知的 CAI における入力文解釈の枠組み

一般に、対話システムが入力文を取り込んで応答す

<sup>†</sup> 静岡大学工学部情報知識工学科, 浜松市  
 Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu-shi,  
 432 Japan  
<sup>††</sup> (株)CSK, 多摩市  
 CSK Corporation, Tama-shi, 206 Japan  
<sup>†††</sup> 早稲田大学理工学部情報学科, 東京都  
 School of Science and Engineering, Waseda University, Tokyo,  
 169 Japan

る過程は、辞書や文法知識を用いて文構造を解析し、それから意味表現を生成する処理と、得られた意味表現をシステム内の知識や、世界モデル・学生モデルなどのデータ(本論文ではシステムの認識と呼ぶ)と突き合わせてその関係を判定し、システムの行動に反映させる処理からなると考えられる。前述のように知的CAIにおける対話は、学生に十分幅広い内容の発話を許容できることが望ましいため、この過程において自由な対話を損なわない程度の文体および文意の自由度を提供することが重要である。従来、広範な自由度をもつ入力文から一定の意味表現を生成するまでの処理については、自然言語処理の分野において比較的高い能力が実現されている(文献(9)等)。しかし、得られた意味表現と自らの知識・認識の関係を判定して、自分の行動に反映させるプロセス(これを本論文では、入力文の解釈と呼ぶ)については定説がない。

従来見られる対話型知的CAIシステムでは、この後者のプロセスで用いる知識や認識を限定することにより処理を簡便に実現しているものが多い。例えば問題演習型システムでは、教材知識およびシステムによる演習問題の求解結果を用いれば、学生の解答の正誤を判定して次の問題に進んだり、誤りを正す目的で対話を継続したり、あるいは学生の質問に適切な解答を返すなど、ある程度まで学生からの入力に合わせて自分の行動を決定すること、すなわち解釈することができる。しかし一般に学生の発話は多様であるため、上述のように解釈に用いる知識や認識を限定することは、学生に許容する発話の意味のタイプを限定することにつながる(例えば教法法についての要求や、前回解いた問題との関連についての質問など、問題演習における発話には、上の方法で解釈できないものが少なくないと考えられる。これらの場合には、教授知識、教育計画、学習履歴等、他のタイプの知識・認識を利用する必要があるのである)。

従って一般に、知的CAIにおける入力文解釈の枠組みは、特定の知識・認識に依存したものではなく、システムがもち得るすべての知識・認識を一定の方法で利用しつつ入力文の意味を同定するものでなければならない。

このことから入力文解釈処理の枠組みについて考察する。まず入力文から得られた意味表現とシステム内の知識・認識の関係を判定する処理では、特定の知識・認識に偏った処理法を用いてはならない。例えば問題の解法に関する認識を宣言的に記述しておき、あらゆる

入力文をその認識のみと照合するというようなアルゴリズムは、入力文が学生の答案であるという予断に基づいた処理であり、望ましくない。システムがもつすべての知識・認識を均一に扱いつつ、それらと入力文の関係を判定する処理としては、すべての知識・認識を宣言的に記述しておき、それらと入力文を比較して、入力文が知識・認識のどの部分と合致するか、若しくは差異をもつかを調べる、という方法が考えられる。本論文では、基本的にはこの方法を採用することにする。なお、このためにはシステムがもつ知識・認識が、そのタイプにかかわらず一定の方法で表現されている必要がある。この方法については2.2で述べる。

入力文と知識・認識の関係が明らかになると、そのことから認識の変化が生じたり、新たな認識が生成される。従って行われるべき処理は、上で判定された関係に基づいて認識の変更・生成のための規則若しくは手続きを呼び出す処理である。これは例えば、正しい問題解決過程に関する認識と関係づけられた学生の誤答をもとに、学生がどの知識を誤解しているかを推定して学生モデルを書き換える場合等にあたる。ここでは、入力文がシステムの認識のどの箇所と合致していた場合でも、一定の方法で必要な推論を起動できる枠組みが必要になる。

このようにして新たな認識が生成されると、それがシステムの行動に影響を与える場合が考えられる。本論文では、システムは何らかの目的に基づいて構築された行動計画に従って行動するものとする(これは、問題演習における教師の行動は、条件反射的なものではあり得ず、ある程度系統立てられた目的認識に基づいて行われるべきである、との見解による)。これらのことから、認識の生成処理の終了後、必要であればシステムの行動計画を修正する処理が行われるべきである。これは例えば、学生の誤りの原因が基礎知識の欠落にあることがわかった場合に、その知識を優先的に教示するよう教育計画を変更する場合にあたる。

以上のことから本論文では図1に示すような入力文解釈機構を提案する。図1中「認識の場(The system's recognitions)」はシステムがもつ知識、認識を記述した仮想的な場である。図1の認識の場に置かれた認識のタイプは一例であり、システムの目的や想定する対話の範囲により異なってくる。入力文は図中の(A)~(C)の手順で処理される。(A)は入力文から得られた意味表現をシステム中の適当な知識および認識と照合する過程を示す。(B)は照合の結果をもとに、必

要な規則や手続きを呼び出して認識内容を変化させる過程である。(C)はシステム中の認識から、教育計画(Plan for education)を決定・修正する過程である。

例えば、「0.4 gの水酸化ナトリウムを中和するには硫酸何モルが必要か」という問題を出題した場合を考える。このとき学生が「水酸化ナトリウムのモル数は4である」という発話を行ったとする(この問題の正しい解法には、水酸化ナトリウムのモル数が途中結果として現れるが、この発話では値が誤っている)。まず(A)においてこの発話は「正しい問題解決過程」「学生の問題解決過程」中に位置づけられる。次に(B)においてシステムは、学生が誤った途中結果を導いていることから、学生の誤り原因の推定などの処理を行い、「学生の問題解決過程」の内容を変更する。次に(C)では、必要があれば教育計画の修正を行う。例えば(B)の結果学生が「基礎知識である、分子量の求め方を誤っている」と判定された場合に、演習をいったん中断し、分子量の定義を復習させるように教育計画を書き換える。

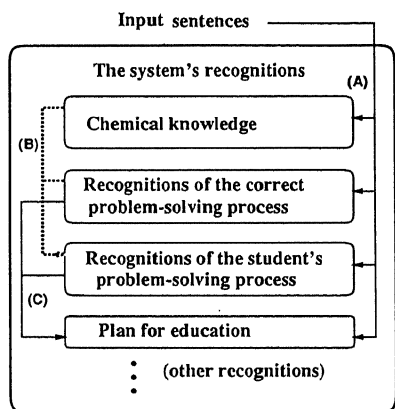


図1 入力文の解釈と行動計画への反映のプロセス  
Fig. 1 The process of interpretation of the input sentences and reflection on the plan.

## 2.2 システムがもつ知識・認識の表現法

図1に示した機構で入力文解釈を行うためには、その前提として、さまざまな表現上のバリエーションをもつ入力文から一定の意味表現を生成する処理が必要になる。本論文では、知識・認識表現として、後述するようなフレーム形式の表現を用いることにする。入力文からこのフレーム形式の知識・認識表現を生成する方法としては、文献(9)の方法などがあり、同義文に対し文体の差異がある程度吸収して比較的安定した知識・認識表現を得ることができる。以下ではまずこの一般的な認識表現手法について述べ、続いて問題演習型知的CAIにおいて特に利用価値が高いと思われるいくつかのタイプの認識について具体的に表現法を示す。更にその他のタイプの認識を表現する場合について考察する。

### 2.2.1 フレームによる認識表現

本論文における知識・認識表現は図2に示すように文中の動詞概念・名詞概念にそれぞれ対応する動詞フレーム・名詞フレームからなる。これらのフレーム中に、連用修飾・連体修飾の情報がスロットとして記述される。学生からの入力文に含まれる日本語文の構造は表1のように整理して考えることができるが、この範囲の文であればこのフレームによって意味を表現できる。またシステムの認識も、本論文で取り扱う範囲(後述)内では表1の文型の日本語文で記述できると考えられるが、この範囲に収まるものであれば同様に上述のフレームを用いて記述することができる。従って、このフレーム形式の知識・認識表現は、本論文で取り扱う範囲内で十分な表現能力をもっていると言うことができる。

#### (i) 動詞フレーム (verb-frame)

動詞フレームは文、節のように動詞を中心とする文構造(動詞句)を表現するフレームである。動詞フレームは補助詞(adjunct)スロット、格(case)スロット、属

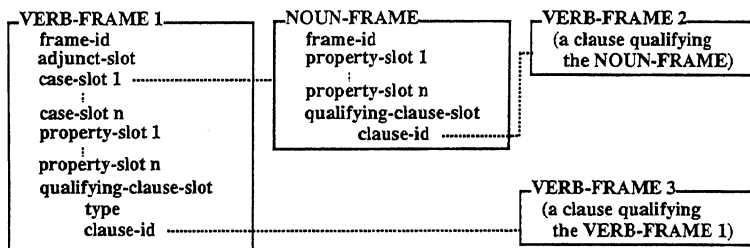


図2 認識表現の一般形  
Fig. 2 The general representation of the recognition.

表1 日本語の基本的文構造

[1] 文 (連用成分) + … + (連用成分) + 動詞 + 助動詞 + 終助詞
[2] 連用成分 a) 副詞 b) 形容詞または形容動詞の連用形 c) 連用修飾節 d) 名詞 + 格助詞
[3] 名詞句 (連体修飾表現) + … + (連体修飾表現) + 名詞
[4] 連体修飾表現 a) 関係節 (主格関係節, 目的格関係節, 所有格関係節等) b) 名詞 + 「の」 c) 形容詞または形容動詞の連体形
[5] 節 (連用成分) + … + (連用成分) + 動詞 + 助動詞

性 (property) スロット, 連用修飾節 (qualifying-clause) スロットをもつ。補助詞スロットには, 動詞が係っている助詞・助動詞のもつ情報 (テンス・アスペクト等) が記述される。格スロットは後述する名詞フレームの id を格納し, 動詞に格助詞を介して係る名詞を表現する。関係節を表現する動詞フレームでは, 動詞と先行詞との関係を表す格 (主格関係節であれば主格) についての格スロットに, 先行詞にあたる名詞のフレーム id を記述すると共に, 先行詞であることを示すフラグを立てる。属性スロットは速さ等, 動詞がもつ属性ごとに定義される。このスロットには表1に示した連用修飾表現のうち, 副詞, 形容詞, 形容動詞から得られる情報が記述される。連用修飾節スロットには動詞に係る連用修飾節を表現する動詞フレームの id と, 連用修飾のタイプを記述する。

#### (ii) 名詞フレーム (noun-frame)

名詞フレームは名詞句を表現するフレームである。名詞フレームは属性スロット, 連体修飾節スロットをもつ。属性スロットは色, 大きさ, 所有物等, 名詞がもつ属性ごとに定義される。このスロットには表1に示した連体修飾表現から得られる情報等が記述される。連体修飾節スロットには名詞に係る関係節を表現する動詞フレームの id を記述する。なお, 数式は, 名詞フレームとして表現する。

#### 2.2.2 知的CAIにおける認識の記述

次に2.2.1の表現法を用いて知的CAIに必要な認識を記述するための考察を行う。認識の記述法を定めるためには, まずその認識中にどのような概念および概念間関係が必要とされるかを調べる必要がある。以下では問題演習型知的CAIにおいて一般に利用価値が特に高いと思われる, 問題解決過程についての認識, および教育計画について具体的に述べ, 更にその他, 知的CAIシステムの質の向上に有用であると思われる種々

表2 学生の発話に含まれる基本単語

[1] 名詞 a. 化学物質を表す名詞 (亜鉛 水素 酸 等) b. 物質の属性を表す名詞 (質量 圧力 モル数 等) c. 問題解決に用いられる知識を表す名詞 (ボイルの法則等) d. 問題解決に関わるその他の概念を表す名詞 (値 等) e. 教育行為に関わる概念を表す名詞 (アニメ 誤り 解答 等) f. 形式名詞 (ことのための)
[2] 数詞 (数字 + 単位を表す語) (3g 1mol 等)
[3] 動詞 a. 問題解決行為を表す動詞 (用いる 解く 代入する 等) b. 化学反応を表す動詞 (分離する 結合する 発熱する 等) c. 化学系における構造や状態を表す動詞 (存在する 等) d. 化学系に対する作用を表す動詞 (加熱する 加える 等) e. 教育行為を表す動詞 (説明する 表示する 出題する 等) f. 行為の実行手順を表す動詞 (繰り返す 等) g. 「である」 h. 形式動詞 (いる)
[4] 形容詞・形容動詞 a. 化学物質の状態を表す形容詞・形容動詞 (高い 熱い 等) b. 教育行為の様態を示す形容詞・形容動詞 (詳しい 等) c. 「等しい」
[5] 副詞 (相当語句) (なぜ どう やって)
[6] 格助詞 (が は の に へ を まで 等)
[7] 接続助詞 (ので から て と (結果) 等)
[8] 助動詞 ( ら れ る た だ (=なら) 等)
[9] 接続詞 (か つ また は 等)
[10] 終助詞 (か ね 等)
[11] その他 記号など (? , . + * =)

表3 学生の発話に含まれる文構造とその例

A. 単文相当の表現 「 $n=1$ を $PV=nRT$ に代入する」 「水素の圧力を求める」 「 $PV=nRT$ (である)」 「 $n=1$ (である)」 「気体水素は標準状態にある」
B. 連体修飾表現 (1) 関係節 (1-1) 主格関係節 「生成された物質」 (1-2) 目的格関係節 「水素のモル数を求めるのに用いる知識」 (1-3) 所有格関係節 「質量が 1 mg である亜鉛」 (2) 「数詞 + の」 「1 mg の亜鉛」 (3) 「化学物質を表す名詞 + の + 属性名詞」 「亜鉛の質量」 (4) 形容詞・形容動詞 「青い溶液」
C. 連用修飾表現 (1) 形容詞・形容動詞連用形, 副詞 「詳しく」 (2) 形式名詞 + 格助詞による表現 「水素の圧力を求めるために」 (3) 接続助詞による表現 「気体1の温度は常温なので」 「 $n=1$ を $PV=nRT$ に代入すると」 「問題を出して, 解答を評価して」 (4) 動詞連用中止法 「問題を出し, 解答を評価し」
D. 単文を等位接続した表現 「 $H^+$ イオンが溶液中にあり, $OH^-$ イオンが溶液中にある」

のタイプの認識についても, 認識表現形式を決定するための基本的な方法を示す。

#### (1) 問題解決過程, 教育計画の表現

まず, 高校化学の問題演習において, 問題の解法, および教授法に関する対話を行う際に用いられる単語のタイプ, およびそれらを用いて作られる文, 句, 節構造のタイプについて事例研究を行い, その範囲を表2, 表3のように定めた。これは, 前述のように表1の

表4 教師の認識中に記述される基本本文の意味タイプとその例

(a) 問題解決, 及び教育のための行為	
(a-1) 行為そのもの	「水素イオンの mol 数を求める」 「引数に式を代入する」 「 $1 \times 0.082 \times 300$ を計算する」 「学生に知識を説明する」
(a-2) 行為の実行法	「ボイルシャルルの法則を用いる」
(a-3) 行為の実行手順	「～を繰り返す」
(b) 問題解決に用いる知識	
(b-1) 数量関係の知識	「常温の気体であるなら、 $PV = nRT$ である」 「酸が電離して $H^+$ が生じるとき ( $H^+$ のモル数) = (酸のモル数) $\times$ (酸の価数)」
(b-2) 化学現象の推移に関する知識	「電解質が水中に存在するなら、その電解質は電離する」
(b-3) 化学物質に固有な事実に関する知識	「水の分子量は 18 である」
(c) 問題世界で成立する事実	
(c-1) 数量的事実	「硫酸の質量 = 9.8g」
(c-2) 数式的事実	「 $(H_2SO_4 \text{ の mol 数}) \times 2 = (H^+ \text{ の mol 数})$ 」
(c-3) 現象的事実	「硫酸が電離して、水素イオンを出す」
(c-4) 対話指導における事実	「学生は誤った式を用いて硫酸の質量を導いている」

表5 連体修飾表現・連用修飾表現が示す意味のタイプと例文

連体修飾表現によって示される意味関係	
a) 助詞による表現	
(1) 属性値を示すもの	「1mg の亜鉛」, 「0.3mol の水素イオン」
(2) 属性名詞を修飾し, 何かもつ属性を表すかを示すもの	「亜鉛の質量」, 「気体の圧力」
b) 関係節による表現	
(3) 化学物質を表す名詞を修飾し, その物質が化学系における状態/作用/変化にどの様に関与しているかを示すもの	「発生した気体」, 「加熱された溶液」 「結合しているイオン」
(4) 知識, 公式を表す名詞を修飾し, それがどのような問題解決行為に用いられるかを示すもの	「亜鉛のモル数を求めるのに用いる知識」 「式を立てるのに用いた公式」
(5) 修飾される名詞が, 教育計画中の行為にどの様に関与しているかを示すもの	「出題した問題」
連用修飾表現によって示される意味関係	
(1) 問題解決行為を表す文を修飾し, その行為の目的を表すもの	「水素の圧力を求めるために, 水素の体積を求める」
(2) 問題解決行為を表す文を修飾し, そこで用いる知識を表すもの	「 $PV = nRT$ を用いて, 水素の圧力を求める」
(3) 問題解決における事実を表す文を修飾し, その事実がどのような行為によって導かれたかを示すもの	「水素のモル数を求めると, モル数は 1mol である」
(4) 問題解決法を表す文を修飾し, その利用条件を示すもの	「気体 1 は標準状態であるので, ボイルシャルル則を用いる」
(5) 複数の問題解決行為の同等性を示す文を修飾し, どのような場合にその同等性が成り立つかを示すもの	「水素のモル数が $n=1\text{mol}$ である場合に, $PV = nRT$ に水素のモル数を代入することは, $PV = nRT$ に $n=1\text{mol}$ を代入することである」
(6) 現象的事実を表す文を修飾し, どのような状況においてその現象が生起するかを示すもの	「電解質が水溶液中にあるなら, その電解質は電離する」
(7) 問題解決手順を示す文を修飾し, 実行や終了の条件を示すもの	「学生が正解するまで, 例示を繰り返す」

範囲内に収まるものである。

次に, 表 2, 表 3 の範囲において表現される意味のタイプを表 4, 表 5 に示すように整理した。表 4 は表 2 に示した単文相当の表現がもつ意味の分類である。これは主に主語および述語のタイプによって分類される。(a) は学生が行う問題解決行為と, 教師の教育行為に関するものである。(b) は問題解決に用いる知識を表すものである。(c) は問題解決, および対話指導における数量概念の値や数量間関係, 生起している現象等の事実に関するものである。これらの事実は問題解決, および教育のためのプランニングにおいて初期条件・結果・知識の適用条件等の役割を果たしている。

表 5 は, 表 3 に示した連体修飾表現, 連用修飾表現がもつ意味を整理したものである。認識表現上では, 以上の意味関係が記述されなければならない。以下ではこれをもとに, 正しい問題解決過程, 学生の問題解決過程, 教育計画の各認識の記述法について述べる。

(i) 正しい問題解決過程

問題解決過程のモデル化については, 我々は既に一つの手法を提案しているが<sup>(6)</sup>, この表現手法には, 学生の発話に含まれる概念および概念間関係に対応していない部分があるため, 表 4, 表 5 中の問題解決過程に関連する概念および概念間関係を付け加えてモデル表現の拡張を行った。その結果が図 3 である。このモデルにおいてノードは表 4 の基本本文に対応している。本論文では高校化学の計算問題に一般的に用いられる問題解決行為を表 6 のように定めており, これらは化学の一般知識に記述されている。①から⑧のアークは, 表

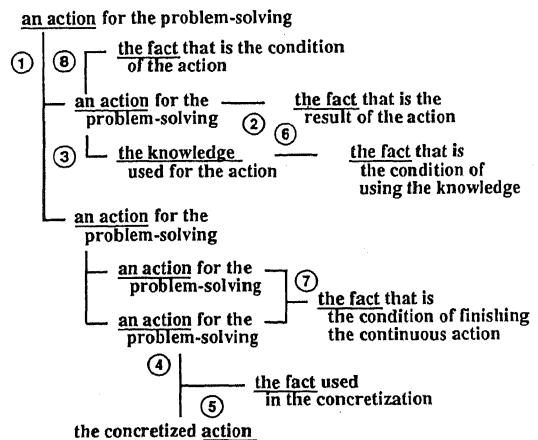


図3 問題解決に関する認識のモデル

Fig. 3 The model of the recognition of the problem-solving process.

表6 一般的な問題解決行為の例

[属性概念] を求める [数値] を [公式] に代入する [知識] を用いる [式] を計算する [方程式] を解く
---

5に示した連用修飾表現による意味関係に対応する。従ってこのモデルは上述のフレームにより表現できる。

①は問題解決行為間の目的手段関係である。②は問題解決行為と、その結果の関係である。③は問題解決行為と、そこで利用される知識の関係である。④は問題解決の進行に伴って問題解決のための計画が具体化してゆく過程を表現する。⑤は④の表現する過程に対して、その根拠となる事実を関連づけたものである。例えば、問題解決の初期段階において「公式1に気体1の圧力の値を代入する」という副目標がある場合、「気体1の圧力は1.1 atmである」という数値的事実を根拠として「公式1に(気体1の圧力)=1.1 atmを代入する」というより具体的な副目標が生成される。⑥は知識の適用条件と、それを満たす事実の関係である。⑦は問題解決行為の繰返しと、その終了条件を表す。⑧は問題解決行為実行の前提条件である。

この認識の構築については、文献<sup>6)</sup>で述べた手法が利用できる。本論文では省略する。

(ii) 学生の問題解決過程

学生モデルに記述すべき情報は一般に多様であるが、ここでは学生がどのように問題を解いているかを記述する学生モデルを考える。このとき、問題解決過程の表現法として(i)と同様の手法を用いることができる。

5.で述べるシステムでは、学生の誤り原因推定等の処理を簡便化するため、この認識にいくつかのフラグを付加する。まずこの認識に対する確信度を、各ノードに対するフラグで記述する。フラグは初期状態で与えられたノード、システムの推定により構築したノード、学生の発話から直接裏づけられたノードに対して、それぞれ{0,1,2}の値をとる。また各ノードについて正しい問題解決過程と一致しているか否かを表す正誤フラグをもつ。

(iii) 教育計画

教育計画は、(i)と同様に、教育行為間の目的手段関係や、教育行為の具体化のプロセスによって表現できる。そこでここでは教育計画を、(i)と同様の方法でモデル化する。実際の教育計画をこの方法で記述した例を図4に示す。但しこの図では、知識については省

Teach how to solve the problem

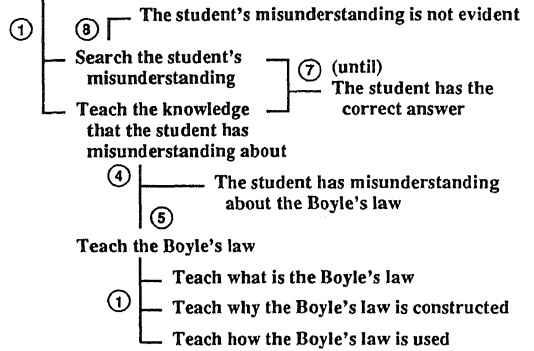


図4 教育計画の記述例

Fig. 4 An example of the representation of the plan for education.

略した。この教育計画の作成については3.3.1で述べる。

(2) その他のタイプの認識

その他のタイプの認識についても、(1)と同様にして表現法を定めることができる。すなわち、その認識に照合されるべき入力文の例を収集し、それらの文に含まれる語彙、文型を整理する。更に文を単文単位に分割してそれらの意味関係を整理することにより、認識中に記述されるべき関係を定める。

3. 知的 CAI における入力文解釈処理

3.1 入力文の認識への照合

ここでは図1(A)の過程について考察する。

2.2で示したフレームによる知識・認識表現は、表層文の係り受け構造に対応した構造をもつ。そのため入力文から得られたフレームとシステムの認識の比較は、フレーム間の修飾・被修飾関係を再帰的にたどることによって行える。アルゴリズムの概略を下に示す。

[認識と入力文の比較処理アルゴリズム] 入力文の主動詞に対応する動詞フレームについて、以下の動詞処理を行う。

[動詞処理] 入力文より生成された動詞フレームを受け取り、以下の処理を行う。

① 動詞フレームの case スロットに格納された各名詞フレームについて、下に示す名詞処理を起動し、認識中で相当する名詞フレームの id を受け取る。

② 上で得られた名詞フレーム同士を結び付ける動詞フレームを認識中から検索し、入力文の動詞と一致しているものだけを残して③へ。

③ 入力された動詞フレームの連用修飾節スロット

表7 入力文と認識の照合における条件の緩和

照合対象	緩和される条件
数量概念 ある公式	数量概念が一致していれば数値は異なってもよい 含まれる変数が一致していれば演算子は異なってもよい
ある数式	正しい式に対して項の過不足があってもよい 含まれる変数と項の数が一致していれば、数値・演算子は異なってもよい
疑問詞	正しい式に対して項の過不足があってもよい 疑問詞は全ての語との照合が許される

に格納された動詞フレームに対して動詞処理を起動する。そこで得られる認識中の動詞フレームと、被修飾側の動詞に対応する認識中の動詞フレームとの関係が、入力文上で指定されている関係と一致しているものだけを残して④へ。

④ ここまでで得られた認識中の動詞フレームの各々について、その属性スロットの内容を調べ、入力文から生成された動詞フレームの属性スロットの内容と一致する認識中の動詞フレーム id を出力とする。

[名詞処理] 入力文より生成された名詞フレームを受け取り、以下の処理を行う。

① 入力された名詞フレームに対応する名詞フレームを認識中から検索する。但しこの際、入力文が教師の認識と完全に一致しなくとも照合がとれることが望ましい場合があるため、緩和条件を定める必要がある。緩和条件の例を表7に示す。

② 上で得られた認識中の名詞フレームの各々について、その属性スロットの内容を調べ、入力文から生成された名詞フレームと矛盾するフレームを除いて③へ。

③ 残った名詞フレームと入力文から生成された名詞フレームそれぞれに係る関係節を比較し、矛盾するフレームを除く。すなわち、まず入力文から生成された名詞フレームの連体修飾節スロットに格納された動詞フレームについて、先行詞が格納されている case スロットの格タイプを記憶しておく。次いでこの動詞フレームについて動詞処理を起動する。そして得られた認識中の動詞フレームが、②で残った名詞フレーム、若しくは同じ概念を表す名詞フレームを、上で記憶した格と同じ格を表す case スロット内にもつか否かを調べる。条件を満たした名詞フレームの id を出力とする。但し、表7の条件により照合が行われた場合、処理結果である名詞フレームの id に、入力語が何であったかを添えて出力する。

以上のアルゴリズムにより、認識のタイプによらず入力文との比較を行うことができる。

ここまでで問題となるのは、入力文に何らかの誤りが含まれている等の原因で、入力文からフレーム形式の表現を生成できない場合、およびフレーム形式の表現を生成できても認識と対応づけられない場合である。これらの場合は、誤りのレベル等に応じて、次のように対応する。

(1) 入力文からフレーム形式の表現を生成できないもの

文法的に文と認められないものや、対象としている語彙や文体を逸脱したもの等がこれにあたる。この種のもは本研究では取扱いの対象としない。従ってこのような入力があった場合、学生に再入力を促す。

(2) 直接認識と対応づけられない場合

(i) 緩和条件を利用すれば対応付けができる場合

学生の解答で数値や式などが誤っている場合がこれにあたる。この場合、上述のように緩和条件を用いて照合に許容性をもたせることによって、システムの認識に位置づけられ、解釈される。

(ii) 緩和条件を用いても対応づけが不可能な場合

システム中に該当する認識や知識が存在しない場合等がこれにあたる。この種の文は解釈ができないので、学生に再入力を促す。従って、なるべく広い範囲の入力文が上記の緩和条件に吸収されるように配慮する必要がある。そのためにシステムがもつ知識の範囲を広げたり(例えば、直接問題解決に利用しない知識も用意しておく)、学生の誤りの予測を認識としてもつ、等の方法が考えられる。

なおこの(A)の処理において、入力から得られた意味表現をすべての知識・認識と照合することが処理効率上問題になる場合には、優先的に照合すべき認識のタイプを入力文中の語彙や文体からヒューリスティックにより判断し、ある一箇所に位置づけられた時点で照合を打ち切る、という方法が考えられる。5.で述べる実験システムもこの方法を用いている。この場合問題になるのは、一般には一つの入力文が認識中の複数の箇所に位置づけられ得る可能性があるにもかかわらず、一つの箇所に位置づけられた時点で処理が終了してしまうという点である。そのためにこの方法で(A)の処理を行う場合には、位置づけられた箇所と同等の意味をもつ他の箇所の認識についても適宜変更が成されるよう配慮する必要がある。これは(B)の処理で呼び出す認識生成規則(手続き)を追加することで実現できる。

### 3.2 認識の変更および生成について

ここでは図1(B)の過程について述べる。ここで行う

表8 取り扱う入力文の種類と文内容

文の種類と文内容	例文
(1) 平叙文 (解法に関する表明) 途中結果に関するもの 知識に関するもの 問題解決行為に関するもの	気体1の圧力は1atmである $PV=nRT$ である 公式1に気体1の圧力を代入する
(2) 疑問文 (解法に関する質問) 途中結果の確認 知識内容の確認 利用すべき知識は何か  知識の適用条件は何か 行うべき問題解決行為は何か	気体1の圧力は1atmですか $PV=nRT$ ですか 何をを用いて気体1の圧力を求めますか なぜ $PV=nRT$ を用いるか 気体1の圧力を求めるために何をすればいいですか 現象を図で説明して下さい
(3) 命令文 (教示に関する要求)	

れるべき処理内容は、照合された認識のタイプ(正しい問題解決過程, 教育計画, 等), 照合された位置(求解結果か, 用いた知識か, 等), 照合の程度(緩和条件の適用状況), 入力文の種類(平叙文, 疑問文, 命令文)によって定められる。従ってこれらの組に対して起動すべき処理ユニットを定義しておき, (A)の結果に基づいて処理ユニットを呼び出す。

以下, 表8に示す範囲の入力文を取り扱うものとして, 起動される処理ユニットの処理内容を文の種類ごとに示す。システムがもつ認識は, 正しい問題解決過程, 学生の問題解決過程, 教育計画, 化学の一般知識, およびこれらの分類に含まれないタイプの認識(以下では単に「その他の認識」と呼ぶ)の5タイプとする。ここでの処理結果がシステムの行動に反映されるしくみについては, 3.3で枠組みを, 3.4で問題演習のための教育計画に関する具体的な例をそれぞれ述べる。

### 3.2.1 平叙文に対する照合結果からの処理

表8の範囲では, 平叙文は学生の問題解決過程, および正しい問題解決過程と照合される。この場合に行われる処理の内容を以下に示す。

① 入力文が学生の問題解決過程に, 表7の緩和条件に基づいて照合されている場合, 学生の問題解決過程を入力文に基づいて書き換える。書き換えた部分に関する確信度は2とする。また正しい問題解決過程を参照して評価を行い, 正誤を記録する。更にここで書き換えた点を出発点として新たに求解を行い, その結果を学生の問題解決過程に書き込む。この部分の確信度は1とする。処理終了。

② 入力文が学生の問題解決過程に完全に一致している場合, 一致した部分の確信度を2とする。処理終了。

③ 入力文が学生の問題解決過程に位置づけられず,

正しい問題解決過程に位置づけられた場合には, 学生が解法を変更したものとしてそれまでの学生の問題解決過程を破棄し, 正しい問題解決過程を学生モデルにコピーする。

④ 入力文が正しい問題解決過程にも学生の問題解決過程にも位置づけられず, 化学の一般知識にのみ位置づけられる場合, 学生の主張と解法の関係を同定できない旨の認識を「その他の認識」に書き込む。

⑤ 上記のいずれにも該当しない場合, 入力文の解釈は失敗となり, 学生に再入力を促す。

### 3.2.2 疑問文に関する照合結果からの処理

疑問文のタイプは, 確認のための疑問文(Yes/No疑問文)と疑問詞を含む疑問文(Wh疑問文)に分類される。以下それぞれのタイプに対する処理内容を示す。

#### (i) 確認のための疑問文の処理

① 入力文(疑問文である旨の記述を除く)が正しい問題解決過程と完全に一致した場合, 質問内容と, それが正しい旨を記述した認識を生成する。

② 入力文が正しい問題解決過程と緩和された条件内で一致した場合, 学生の質問内容と, 正しい答を記述した認識を「その他の認識」に書き込む(但し, それを答えるか否かは教育戦略により判断される)。

③ 入力文が正しい問題解決過程に位置づけられず, 化学の一般知識に位置づけられた場合, 質問内容と正誤を記述した認識, および学生が解法に無関係な事柄に着目しているという認識を「その他の認識」に書き込む。

④ 上記のいずれにも該当しない場合, 入力文の解釈は失敗となり, 学生に再入力を促す。

#### (ii) 疑問詞を含む疑問文の処理

学生への回答として, 疑問詞と照合された事柄を認識として残す事を除いては, (i)と同様の処理を行う。

### 3.2.3 命令文に関する照合結果からの処理

表8の範囲では, 命令文は教育計画と照合される。この場合に行われる処理の内容を以下に示す。

① 入力文が教育計画内の行為と一致しており, 今後それを実行する予定である場合, 学生にその旨の返事をするべきである, という認識を「その他の認識」に書き込む。

② 入力文が教育計画内に位置づけられなかった場合, 予定にない教示法を指定していると考えられるので, 入力文から行為を表す動詞フレーズを生成し, 「学生が～することを望んでいる」という認識を「その他の認識」に書き込む。この認識は3.3で述べる教育計画



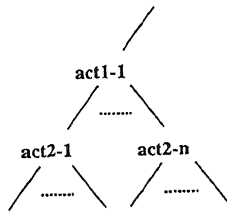


図5 教育計画の一般構造

Fig. 5 The general structure of the plan for education.

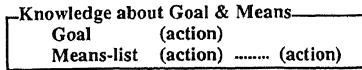


図6 目的手段型知識

Fig. 6 Knowledge about Goal & Means.

の作成および修正の機構により行動に反映される。

### 3.3 認識からの教育計画の生成と修正

ここでは図1(C)の過程について考察する。

#### 3.3.1 計画の作成について

教育計画の表現にはさまざまな手法が考えられるが、ここでは2.2で述べた方法を用いる。図4の形式をもつ教育計画を教育行為に着目して単純化すると、教育の最終目的である行為を根とし、その行為を細分した行為列を葉とする木構造によって表現できる。すなわち教育計画は図5のような構造をもつ。但し図5における行為 (action) は、次のようなタイプに分類できる。

- (a) 無条件行為：任意の場合に実行
- (b) 条件付き行為：条件が満たされる場合のみ実行
- (c) 繰返し型行為：条件が真になるまで繰返し実行

このような教育計画を生成するための最も簡単な方法は、目標行為とその行為を細分化した行為列の関係を記述した知識を用いて、教育の最終目標(知識の伝達)を図5の形式に展開することである。この形式の知識を、本論文では目的手段型知識と呼ぶ。目的手段型知識は図6のような構造をもつ。一般に目標行為(Goal)および手段列(list of means)は、問題に依存しない、教育の一般的方法が抽象的に記述される。目的手段型知識の例を表9に示す。

例えば、「中和について教える」という目標に対して「ある化学現象について教えるためには、その現象が生起する条件を示し、その現象に関わる演習問題を作成し、その問題について演習を行う」という知識を用いて「中和について教えるためには、中和が生起する条

表9 目的手段型知識の例

- ・ある問題の解き方を教えるためには、学生にその問題を出し、学生の誤りを修正することを、学生が正解できるまで繰り返す。
- ・学生の誤りを修正するためには、その誤りを指摘し、誤り原因を特定し、もし誤り原因が知識の誤解ならば、[学生が誤解している知識]を教える。もし誤り原因が前提となる事実の誤りならば、その誤りを修正する。
- ・学生の誤り原因を特定するためには、[誤り箇所の前提である事実]について質問する事を、学生の誤りが認識されるまで繰り返す。

件を示し、中和に関する演習問題を作成し、その問題について演習を行う」という計画を生成する。

一般に、教育計画の作成は次のような手順で行う。

① 目標行為と合致する目標行為部をもつ目的手段型知識を検索する。

② 検索された知識の手段列部について、抽象概念の名詞句を具体化するために、次のような処理を行う。まずこの名詞句について上述の名詞処理を起動し、認識中にこの概念の具体値が記述されているかどうか調べる。もしあればそれを結果とする。ない場合には、抽象概念を修飾している連体修飾表現に応じて定義した専用手続きを呼び出す。

③ 目標行為と、②の処理を施した手段列を接続する。

#### 3.3.2 計画の作成と実行の手順

計画の実行は、次のような手順で行う。

① 計画木の葉にある未処理の行為中で、先頭の行為に着目する。

① 着目した行為が条件づけ行為であり、条件の真偽を確認済でなければ条件の真偽を確認する。条件が偽なら、着目した行為を処理済とし、①へ。条件が真なら、実行内容に着目して③へ。

② 着目した行為が繰返し型行為であり、終了条件の真偽を確認済でなければ条件の真偽を確認する。条件が偽なら、条件を未確認状態に戻してから、実行内容に着目して③へ。

条件が真なら、着目した行為を処理済とし、①へ。

③ 着目した行為に実行手続きが定義されていれば実行する。①へ。さもなければ④へ。

④ 上記のいずれでもない場合、3.3.1に述べた方法で計画を作成する。①へ。

#### 3.3.3 教育計画の修正について

実行中の行動計画を外部の状況に応じて修正するためには、行動計画中に記述されたシステムの行動と任意の外界状況の関係を評価し、計画の妥当性を検証する能力が必要である。しかしこれは一般には困難な問

表 10 学生の発話タイプと、教師の対応

(1) 学生による解答(途中結果), 解法, 専門知識についての 言明に対する教師の対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>知識, 手続きの理解度に関する評価が向上した場合, その知識, 手続きの教示は教育計画から除かれる.</li> <li>同じく, 評価が低下した場合, 教示の必要がないと判断していた基礎知識の教示が教育計画に追加される.</li> <li>不明であった誤り原因が明らかになった場合, 誤り原因同定のための行為は教育計画から除かれる.</li> <li>誤り原因の推定結果が妥当でないことが判明した場合, 誤り原因の教示対象を変更する.</li> <li>学生の全般的な能力水準に関する評価が変動した場合, 学生の能力水準に基づいて選択された教授法の見直しを行う.</li> </ul>
(2) 学生による解答(途中結果), 解法, 専門知識についての 質問に対する教師の対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>知識, 手続きの理解度に関する評価が低下した場合, 教示不要と判断していた基礎知識の教示が教育計画に追加される.</li> <li>不明であった誤り原因が明らかになった場合, 誤り原因同定のための行為は教育計画から除かれる.</li> <li>誤り原因の推定結果が妥当でないことが判明した場合, 誤り原因の教示対象を変更する.</li> <li>学生の全般的な能力水準に関する評価が変動した場合, 学生の能力水準に基づいて選択された教授法の見直しを行う.</li> </ul>
(3) 教授法(アドバイスの提示法, 教示の手順, 教示の 詳細度等)に関する学生の要求に対する教師の対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>特に不都合がない限り, 学生の要求に応じた教授法で教示を行う. また, それが効果をあげた場合, 以後の教授法決定においてこれを参考にする.</li> </ul>

題である。そこで本論文では、対象を問題演習型 CAI に必要な計画修正能力とし、比較的簡便な方法でこれを実現する手法について検討する。

(1) 取り扱う学生の発話のタイプと、教師の対応  
学生が自由に行う発話には、直接学習に関係しないものまでを含めるとさまざまなものがあるが、その中で特に、教師が教育計画を修正して対応する必要があるものは、表 10 に示すようにいくつかのタイプに限定できると考えられる。そこで、表 10 に示したタイプの発話に対する対応を実現することを考える。

(2) 教育計画・認識の変化・計画修正内容の関係  
一般に教育計画に修正が必要になるのは、ある特定の認識内容を前提として計画を作成しているときに、学生の発話などによって、その認識内容が変化してしまったような場合であると考えられる。これには次のような場合がある。

① 条件づけ行為の条件が真であることを確認して以後の行動を決定したが、後になってその条件が成り立たないことが明らかになった場合(例えば、ある基礎知識が既習であることを条件として別の知識を教示し

表 11 手段選択の前提になる認識に変化があった際の教育計画修正

予め作成された教育計画	教育計画作成の前提になった認識	学生の発話による認識の変化内容	教育計画の修正内容
学生の理解状態把握のための計画 ・誤り原因の同定	学生の誤りの原因が不明確である	学生からの質問等により誤り原因が明らかになった	誤り原因推定のための質問や推論などを計画から除く
教示のための計画	学生の理解水準とそれに適した教示法についての認識 学生の理解水準とそれに適した教示法についての認識	学生の理解水準に関する認識が変化した 学生が教示法に不満を持っていることが明らかになった	学生に適した教示法をもとに計画を再構築する 学生の望む教示法をもとに計画を再構築する
・知識の教示	学習の前提となる基礎的な知識は学習済みである 教育目標である知識は未習得である	基礎的な知識が理解されていないことが判明した 教える予定の知識を学習済みであることが判明した	現行の計画の先頭にその基礎知識の教示を追加する その知識の教示を計画から取り除く
・求解手続きの教示	学生はその結果を求めることができない	学生はその結果を正しく求められるようになった	求め方の教示を計画から取り除く

表 12 計画の具体化に利用される認識に変化があった際の計画修正

抽象概念を含む教育計画の例	計画の具体化に利用される認識	学生の発話による認識の変化内容	教育計画の修正内容
[最も理解度の低い知識] について説明するための計画	学生モデル上の各知識の理解度	学生モデル上の理解度の評価値が変化した	新しい評価値に基づいて該当する知識を選び直し、計画中の概念を置き換える
[学生の誤答原因である誤った知識] を修正するための計画	学生の誤答箇所、及び学生が用いた知識についての認識	学生の問題の解き方が教師の想定と異なることが判明した	学生の解き方を再評価し誤答原因を調べ、計画中の概念を置き換える
[学生の解答の矛盾点] を提示する計画	学生の問題解決過程についての認識	学生の問題の解き方が教師の想定と異なることが判明した	学生の思考の矛盾点を再評価し、計画中の概念を置き換える

ている途中、学生からの質問によって、その基礎知識の理解が不十分であることが明らかになった場合)。

② 計画中の抽象的概念を、システム中の認識を用いて具体化した。後からその認識内容が変化した場合(例えば、「学生の理解度が最も低い知識を説明する」という目標を、「最も理解度の低い知識は知識*i*である」という認識から、「知識*i*について教示する」と具体化した後で、「知識*i*より知識*j*の方が理解度が低い」ということが明らかになった場合)。

そこで表9に示した状況について、どのような認識の変化がどのような計画の修正をもたらすかを表11,表12に整理した。表11は上の①の場合に、また表12は②の場合に関するものである。但し表12の項目については、教材知識・学生モデルの表現手法等に大きく依存するため、代表的な例を挙げた。これらの表によれば、教育計画、計画作成の際に参照した認識、その認識の変化内容、教育計画の修正内容の関係をいくつかのパターンに整理することができる。

### (3) 計画修正のための知識と推論

(2)に述べたことから、教育計画、認識の入力文による変化、教育計画の修正内容の3者関係を知識として記述し、これを用いて計画を修正することが可能であると考えられる。そこで、本論文で紹介するシステムでは、このタイプの知識(以後、計画修正知識と呼ぶ)を利用して学生と対話を行うことにする。

計画修正知識の記述法について述べる。この知識は条件部(condition part)と帰結部(modifying-part)から構成される(図7)。まず条件部には、計画修正の対象となる教育行為と、修正のきっかけとなる認識がフレーム形式で記述される。帰結部にはその教育行為に対して行うべき修正のタイプ(削除・追加・概念の置換え・再計画のいずれか)と、タイプに応じた修正内容(追加の場合、追加すべき行為。概念の置き換えの場合、置き換えの対象となる概念)を記述する。計画修正知識の例を表13に示す。

計画修正のための推論は、認識の変化に応じて適宜実行される必要がある。これは、3.3.2で述べた計画実行のための処理において、①の処理を行う度に以下の処理を行うことで実現される。まず変化が生じた認識と合致する条件部をもつ計画修正知識を検索する。検索された知識をもとに、修正を要する教育行為が計画中に含まれるか否かを調べる。条件が満たされた場合には、帰結部に従って、教育計画に対する書換えを行う。

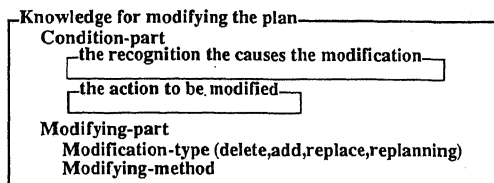


図7 計画修正知識

Fig. 7 Knowledge for modifying the plan.

表13 計画修正知識の例

- ・学生の誤りを修正するための計画を実行中に、学生がその誤りを修正した事が新たに認識されれば、その計画は削除される。
- ・誤り原因を同定するための計画を実行中に、誤り原因が新たに認識されれば、その計画は削除される。
- ・ある知識を教えるための計画を実行中に、その知識が理解済である事が新たに認識されれば、その計画は削除される。
- ・ある知識を教えるための計画を実行中に、その知識の前提となる知識が理解済でない事が新たに認識されれば、その計画の先頭に、前提となる知識を教えるという目的を挿入する。
- ・[学生が誤解している知識]を教えるための計画を実行中に、[学生が誤解している知識]が新たに認識されれば、この計画を作成しなおす。
- ・ある問題の解き方を教えるための計画を実行中に、学生から質問が行われたと認識されれば、その計画の先頭に、その質問内容を評価して学生に返答するという目的を挿入する。

計画の作成と修正の例を以下に示す。今、システムが「単元1を学習させる」という目的をもつものとする。この目標は、目的手段型知識によって「単元1を学習させるために、知識1,知識2を教示する。」と展開され、更に、「知識1を教示するために、知識1を利用できる事例を示し、知識1を利用できる例題を出題し、その解答を評価してアドバイスを行う」と展開される。計画修正知識としては「『ある知識を教示する』という目標があり、『その知識の理解度が十分高い』という認識が生じた場合(以上条件部)、その目標を教育計画から取り除く(以上帰結部)」をもつものとする。この計画を実行中に学生の発言があり、「知識1の理解度が十分高い」という認識ができたこととすると、これが上の計画修正知識の条件部に一致するので、計画の修正が行われ、「知識1を教示する」という目標が教育計画から削除される。そして「知識2を教示する」という目標から実行が再開される。

### 3.4 問題演習のための教育計画の構築と修正

本研究で構築したシステムにおいては、表9に示した目的手段型知識、表13に示した計画修正知識を用いて対話を行う。

表9の目的手段型知識により構築される計画は、学生の誤りの検出と発見を繰り返す、単純なものである。

この計画に従って行われた質問に学生が答えると、3.1, 3.2で述べた機構により学生の問題解決過程が書き換えられる。学生の問題解決過程は、この計画中の「誤り原因の同定」および「前提である事実」の同定の際に参照される。誤り原因の同定においては、学生の誤った答同士が、学生の問題解決過程において前提と帰結の関係にあるとき、前者を後者の原因であると判定する(例えば、ある数値についての誤った解答が、それを求めるのに用いた計算式の誤りによって説明できる場合などである)。

表13の計画修正知識は、上述の単純な計画の実行中に、学生の質問や解答修正、要求が行われた場合の対応を定義したものである。これらの入力により学生の問題解決過程が書き換えられ、それに伴って、学生が誤りを修正したこと、誤り原因が明らかになったこと、知識が理解済であると明らかになったこと、等が真となった場合、表13の知識が発火して計画を書き換える。また教授法に対する要求では、入力文解釈結果が直接計画修正知識を発火させて計画を書き換える。

#### 4. システムの制御機構

一般に学生の発話は、教師が発言を促した場合だけではなく、任意の時点でされる。そこで入力文は任意の時点でシステムに取り込めることが望ましいが、そのためには、計画の作成、条件の確認、実行、修正が、入力文の解釈処理に対して均一なタイミングで起動できる制御機構が必要になる。これらの処理はいずれも特定のタイプの認識をきっかけに行われるため、着目した認識に対して、システムが行うべき処理のタイプを記述した知識を定義することができる。これを

表14 制御知識の例

(1) 行動計画中の行為に関する認識に着目した場合
定義された実行手続きを呼び出し、実行した行為に処理済のマークを付ける。
・条件付または繰り返し型行為であり、真偽が未確認であれば、真偽判定の処理を呼び出す。条件に判定済のマークを付ける。
・条件付行為で、条件が真であれば、実行内容部に着目点を移す。
・条件付行為で、条件が偽であれば、その行為に処理済のマークを付け、次の行為に着目点を移す。
・繰り返し型行為で、終了条件が真であれば、その行為に処理済のマークを付け、次の行為に着目点を移す。
・繰り返し型行為で、終了条件が偽であれば、繰り返しの実行内容部に着目点を移し、条件に付けられた判定済のマークをはずす。
・実行手続きが定義されていない行為であれば、目的手段型知識を用いて計画を作成する。
(2) 入力文により変化した認識に着目した場合
計画修正用知識を用いて計画を修正する。

制御知識と呼ぶ。制御知識の例を表14に示す。この時以下の①～③を繰り返すことで、上の条件を満たす制御が可能になる。

① 着目すべき認識を決定する。計画の修正を計画の実行に優先させるために、入力により変化した認識を最優先とする。そのような認識がなければ、教育計画木の葉にあたる行為のうち、未処理でかつ最初に実行されるべき行為に着目する。

② 着目した認識に対して制御知識を参照し、処理タイプを決定して、定められた処理を行う。

③ もし学生からの入力文があれば、これを解釈する。

#### 5. システムの構成

本論文で報告するシステムの構成を図8に示す。このシステムは高校化学の問題演習対象教科とし、以下の四つの処理ユニットをもつ。

(1) 問題解決部 (Problem-solving Unit)

与えられた問題を専門知識を用いて解き、図3に示した認識表現の形式で出力する。

(2) 対話制御部 (Interaction Unit)

4.で述べた基本処理サイクルを実行する。

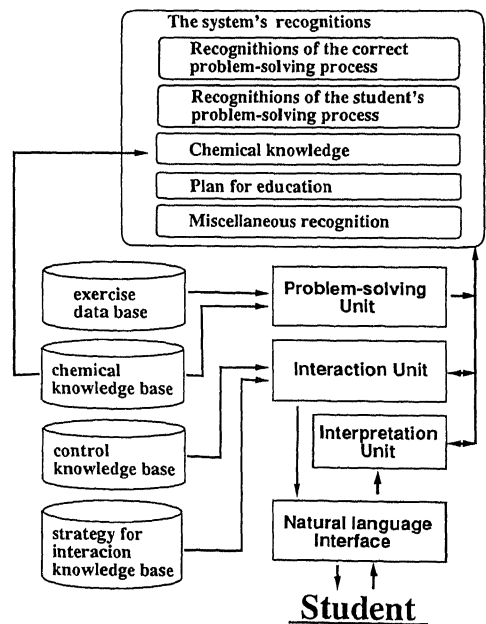


図8 システム構成

Fig. 8 The architecture of our ICAI system.

## (3) 入力文解釈部 (Interpretation Unit)

入力文を3.で述べた方法でシステム内の認識表現に位置づけ、入力文に対応する認識を生成する。

## (4) 自然言語インタフェース (Natural language Interface)

入力文を解析して認識表現を生成する。またシステムが出力する自然言語文を認識表現から生成する。

またシステムは入力文の解釈のために、正しい問題解決過程、学生の問題解決過程、教育計画、化学の一般知識、の4種類の認識を記述する領域、および以上の分類に含まれないタイプの認識 (miscellaneous recognition) を記述する領域をもつ。化学の一般知識の表現法については本論文では省略する (文献(6)参照)。

T: ある気体の分子量は2である。この気体 6G を 温度 300K で大きさ 1L の容器に入れた時圧力は何 ATM になるか?  
 S: ((kitail no mol ha (12 mol) desu)  
 ((P = N \* R \* T / V) ni kitail no mol wo dainyuusuru)  
 ((P = 12.0 \* 0.082 \* 300 / 1))  
 (kitail no aturyoku ha (295.2 atm)))  
 T: [ある気体のモルは 12 モルである] という文ですが (学生モデルとの照合結果: 成功 (数値が異なる)) (正誤の評価: 誤り) 正しくありません  
 T: [P=N\*R\*T/V にある気体のモルを代入する] という文ですが (学生モデルとの照合結果: 成功) (正誤の評価: 正しい) これは正しい行為ですね  
 T: [P=12.0\*0.082\*300/1] という文ですが (学生モデルとの照合結果: 成功) (正誤の評価: 誤り) 正しくはありませんが 前の解答とは整合していますね  
 T: [ある気体の圧力は 295.2ATM である] という文ですが (学生モデルとの照合結果: 成功) (正誤の評価: 誤り) 正しくはありませんが 前の解答とは整合していますね  
 T: [ある気体のモルは 12.0 モルである] というのは誤りですが なぜそのように考えたかですが ... モルを 求めるための計算式を答えて下さい  
 S: (n = 6 \* 2)  
 T: [N=6\*2] という文ですが (学生モデルとの照合結果: 成功 (演算子が異なる)) (正誤の評価: 誤り) 正しくありません  
 T: [N=6\*2] というのは誤りですが なぜそのように考えたかですが ...  
 S: (nani wo motii-te kitail no mol wo motomeru ka ?)  
 T: (正しい問題解決過程との照合結果: 成功 (N=W/M)) [N=W/M] です  
 S: (kitail no mol ha (3 mol) desu)  
 T: [ある気体のモルは 3 モルである] という文ですが (学生モデルとの照合結果: 成功 (数値が異なる)) (正誤の評価: 正しい) そうですね ある気体のモルを求めることはできるようになりましたね ある気体の圧力を答えて下さい  
 S: (kitail no aturyoku ha (73.8 atm) desu)  
 T: [ある気体の圧力は 73.8ATM である] という文ですが (学生モデルとの照合結果: 成功) (正誤の評価: 正しい) そうですね  
 T: これでこの問題は解けるようになりましたね 終了です

図9 対話例

Fig. 9 Example of the dialogue.

## 6. 処理例

以上の検討に基づいて作成したシステムによる対話指導例を図9に示す。このシステムは現在ワークステーションSun-3上にKyoto Common Lispを用いて構築されている。プログラムはLispソースコードで約230KBである。ここで用いた問題はモルの定義式  $N = W/M$  と、ボイルシャルル則  $PV = nRT$  を用いて気体の圧力を求める問題である。システムは解答文を1文ずつ各タイプの認識と照合し、学生の問題解決過程を書き換えつつ、評価を行う。この例では学生がモル数  $N$  を誤っているため、システムはこの誤りを出発点として問題を解き直し、学生が誤った計算式を立てること、誤った最終結果を導くことを学生の問題解決過程上に予測している(3.2.1参照)。学生に対する応答は、この予測と、解法の正誤に基づいて行う。学生は教師の振舞いにかかわらず、任意の時点で質問や解答を入力できる。教師はこのような入力に対して、必要ならば計画の修正を行う。例では、気体のモル数についての解答を学生が修正したことに伴って、「気体のモル数の求め方を教える」「気体のモル数についての誤り原因を調べる」等の計画が削除されている。

## 7. むすび

本論文では、知的CAIと学生の対話において学生の自由度を高めるために、入力文とシステムがもつさまざまな知識・認識を照合して解釈を行う手法を提案し、またこの方法で入力文解釈を行うシステムの実現法を示した。本論文においては高校化学を題材としたが、ここで述べた手法は、システムの推論結果(問題解決結果、計画の作成結果等)に関する学生とのやりとりを想定した場合、他教科を題材とするシステムにも応用が可能であると考えられる。

今後の課題としては、計画修正知識のより一般的な記述手法に関する検討、本論文で扱わなかったタイプの認識に関する検討(例えば学生モデルに関しては、本論文では比較的簡便な方法で、現在演習を行っている問題の解法についてのみモデル化しているが、人間の教師はこのほかにも学生についてのさまざまな認識をもっていると考えられる)、およびそのような認識に基づく教育戦略知識の整備等を行う必要があると考えている。

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金(研究題目「ICAIにおける対象モデルとそれに基づく

概念形成知識獲得支援に関する研究」重点領域研究03245219)の援助を受けて行われた。

### 文 献

- (1) 岡本敏雄, 溝口理一郎監訳: “知的CAIシステム”, オーム社(1990-07).
- (2) Carbonell J. R.: “Mixed-initiative mancomputer instructional dialogues”, bbn rep., No. 1971, Bolt Beranek and Newman, Inc., Cambridge, Mass. (1970).
- (3) Brown J. S., Burton R. R. and de Kleer J.: “Pedagogical, natural language, and knowledge engineering techniques in SOPHIE-I, II and III”, Intelligent Tutoring Systems, eds. In D. Sleeman and J. S. Brown, pp. 227-282, Academic Press, London (1982).
- (4) 大槻説乎, 竹内 章: “知的CAIにおける“柔らかいシナリオ”の生成”, 人工知能学会ヒューマンインターフェースと認知モデル研究会資料, SIG-HIGG-8904, pp. 21-28 (1990).
- (5) 奥畑健司, 野村康雄, 池田 満, 溝口理一郎: “高度個別教育のための教授知識とそのスケジューリング機構”, 信学技報, ET89-12, AI89-12 (1989-04).
- (6) 小西達裕, 伊東幸宏, 高木 朗, 小原啓義: “ICAIにおける知識の成立原理の教示と対象世界のシミュレーション”, 信学論(D-II), J73-D-II, 7, pp. 1007-1018 (1990-07).
- (7) 小西達裕, 西角恵輔, 伊東幸宏, 高木 朗, 小原啓義: “知的CAIにおける対話制御に関する研究”, 人工知能学会第3回全大, 10-5 (1989-07).
- (8) 阿部康昭, 中島 要: “環境状態に合わせた問題解決を行う自律ロボットの制御構造”, CSK 技術通信, 19, 17, pp. 38-49 (1989).
- (9) 高木 朗, 伊東幸宏: “自然言語の処理”, 丸善(1987-07).
- (10) 渡辺成良, 洪澤良裕: “スクリプトに基づいた個別指導: 回路解析のスキル獲得のための知的CAIにおける直接的指導方略”, 人工知能学会誌, 6, 6, pp. 912-919 (1991-11).
- (11) 渡辺成良, 桑田喜隆, 水田哲生: “回路演習解答文の誤り発見のための答案診断システム”, 人工知能学会誌, 3, 3, pp. 368-378 (1988-05).

(平成3年10月7日受付, 4年2月14日再受付)

### 伊東 幸宏



昭55早大・理工・電子通信卒。昭62同大学院博士後期課程了。同年、早大・理工・電子通信助手。現在、静岡大・工・情報知識工学科助教授。工博。自然言語処理、知的CAIなどに興味をもつ。情報処理学会、人工知能学会各会員。

### 高木 朗



昭47早大大学院理工学研究科入学。昭49同大学院博士後期課程編入。昭56同大学院研究生。現在(株)CSK勤務。工博。自然言語処理に興味をもつ。情報処理学会、人工知能学会各会員。

### 小原 啓義



昭26早大・第一理工・電気通信卒。昭32同大学院博士課程了。現在、早大・理工・情報教授。工博。著書「電子計算機」など。

### 小西 達裕



昭62早大・理工・電子通信卒。平4同大学院博士後期課程了。平3早大・理工・情報助手。現在、静岡大・工・情報知識工学科助手。工博。人工知能、特に知的CAIに興味をもつ。情報処理学会、人工知能学会各会員。