

補助問題の定式化

A Formulation of Auxiliary Problems

平嶋 宗* 東 正造* 柏原 昭博* 豊田 順一*

Tsukasa Hirashima Syozou Azuma Akihiro Kashihara Jun'ichi Toyoda

* 大阪大学産業科学研究所
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Ibaraki, Osaka 567, Japan.

1994年9月12日 受理

Keywords: auxiliary problem, indexing framework, intelligent tutoring system, problem control.

Summary

Auxiliary problems are very useful to assist students in problem solving. To utilize the auxiliary problems in ITS (Intelligent Tutoring System), a framework for formulation and categorization of them are indispensable. In this paper, an auxiliary problem is defined as a simplified problem from original one by dividing or specializing its problem solving process.

First, we propose a framework of problem description which consists of surface structure, solution structure and constraint structure. Surface structure describes surface features of a problem with objects, their configuration and each object's attributes given or required. This represents a problem formulation process. Solution structure is described by a sequence of operational relations which computes required attributes from given attributes. This represents a computation process. A network composed of operational relations among attributes included in the situation specific to the problem, is called constraint structure. A solution structure is part of a constraint structure.

The auxiliary problems are defined and categorized based on this description and the two simplifying operations. In this categorization, there are three types of auxiliary problems, (1) auxiliary problems with divided surface structure, which are simplified in the formulation process, (2) auxiliary problems with divided solution structure, which are simplified in the computation process, and (3) auxiliary problems with specialized constraint structure, which are simplified in the situation.

We also present two experiments for justification of this definition in mechanics problems. One is the generation experiment of auxiliary problems by persons who have experience of tutoring, and the other is analysis of the problems in exercise books which seem to be used for assisting in solving another problem. Because most of the problems are adequately categorized based on our definition, it contributes to utilize the auxiliary problems in ITS.

1. はじめに

単に正解を導かせるだけでなく、学習効果が上がるように問題解決を支援するためには、学習者自身に能動的に考えさせる工夫が必要となる[Burton 82, Fox 91, VanLehn 92]. もとの問題を単純化した補助的な問題(以下では補助問題と呼ぶ)の提示はこの種の工夫のうち最も効果的なものの一つであり、その重要性は従来より指摘されている[Polya 54, Kahney 86]. し

かしながら、問題解決に失敗している学習者に新たに問題を与えることになるわけであるから、正しい問題解決へ直接的に誘導する方法に比べてリスクの大きな問題解決支援方法であることも確かである。したがって、この支援方法を教育支援システムにおいて利用するためには、より高度な問題制御が可能でなければならない。

教育支援システムにおいて補助問題を制御するためには、まず、補助問題を計算機上で扱えるように定式化する必要がある。本研究においては、まず問題の特

微記述(以下ではインデックスと呼ぶ)のための枠組みを提案し、さらに問題の簡単化をインデックスの簡単化として定式化し、その簡単化の対象構造および方法によって補助問題の分類を行っている[平嶋 94a]。問題のインデクシングは、教育支援システムにおいて問題制御を行うための基礎であり、採用されているインデックスによってそのシステムの問題制御能力は左右される[Halff 88, Schank 90]。またインデックスの重要性は単に問題制御に対してのみならず、問題解決の支援一般に対してもいえることであり、教育支援システムに関する研究課題のうち最も重要なものの一つであると著者らは考えている[平嶋 92a, Hirashima 92b, Hirashima 94b]。

これまでの問題制御を中心とした教育支援システムの多く、例えば MALT[Koffman 75], BIP[Barr 76], SMITH[Osin 76], IMTS[MaCalla 90, Towne 88]などにおいては、問題の解決に必要な解法知識あるいはスキルの集合として個々の問題のインデックスを記述している。これらのシステムにおける問題制御は、主に学習者が問題解決に成功した場合の次の問題の選択(以下では前向き問題制御と呼ぶ)を指向したものであり、このような目的においては知識などの集合として記述されたインデックスも十分な表現力を持つと考えられる。しかしながら、問題解決に必要な知識を持っているにもかかわらず、それを適切に用いることができずに問題解決に失敗する学習者がしばしば見受けられる。このことは、知識の有無だけでなく、知識の用い方が問題解決の失敗において重要な意味を持っていることを示唆している。したがって、問題解決の失敗に対する問題制御、特にもとの問題を簡単化した補助問題を与えてもとの問題の解決を助けるといった問題制御(以下では後向き問題制御と呼ぶ)を実現するためには、問題解決過程を捉えたインデックスが必要となる。

問題解決過程を考慮した問題のインデクシングが行われている研究としては、SIERRA[VanLehn 87], FITS[池田 92, 松原 92]などをあげることができる。これらの研究は、計算問題などの問題がすでに定式化された表現を持つものを対象としており、その範囲で十分有用なインデックスの提案を行っていると考えられる。しかしながら、算数や数学の文章題、あるいは力学など、問題の定式化が本質的である問題領域は数多く存在する。このような問題領域を対象とした問題制御を実現するためには、定式化の過程を反映したインデックスが必要となる。また、この種の問題は背景となっている状況を持つことを考慮しなければなら

い。例えば、力学の問題には対応する実際の現象が存在しており、その問題が運動方程式で解く問題であったとしても、その現象においてはエネルギー保存則など、問題解決に直接関係しない数多くの数量関係が存在している。しかも、これらの数量関係を理解することは力学の学習において非常に重要なことである。したがって、この種の問題の制御においては、問題の背景となっている状況を捉えたインデクシングが必要となる。

本稿では以上の考察を踏まえたうえで、数量関係を用いて未知量を求めるタイプの決定問題[Polya 54]を対象として、(1)問題の定式化過程を表現するための表層構造(Surface-structure)、(2)定式化された構造に対して解を導く過程(以下では解導出過程と呼ぶ)を表現する解法構造(Solution-structure)、(3)問題の背景となっている状況を表現する制約構造(Constraint-structure)、の三つの構造によって構成された問題の特徴記述(SSC 表現)[Hirashima 94b, Hirashima 94c]をインデックスとして採用する。表層構造は問題文に明示されたオブジェクト、属性、オブジェクト間の関係を構造的に表現したものであり、解法構造は解を導くために用いられる一連の数量関係を表現したものである。また、制約構造は問題の背景となっている状況において存在する数量関係を問題解決に関係しないものも含めて記述したものである。

本稿ではこれらの構造が簡単化された問題を補助問題とする。この際、簡単化をどのように定義するかが重要となるが、本稿では最も一般的な簡単化と考えられる部分化と特殊化を取り上げ、問題解決過程の部分化あるいは特殊化に相当するように簡単化操作の定義を試みている。

問題解決過程が部分化された問題は、もとの問題解決過程で解かれるべき問題であり、もとの問題に対して簡単化されているといえる。また、問題解決過程が特殊化された問題は、もとの問題に対する解決方法だけでなく、より特殊な場合にのみ利用可能な方法も適用できる問題であり、もとの問題に対して簡単化されているといえる。本稿では、定式化過程の部分化をより定式化された表現への表層構造の洗練として捉え、もとの問題の表層構造を洗練することによって生成される問題を同等問題と呼ぶ。解導出過程の部分化は解法構造の部分化として捉え、解法構造を部分化することによって生成される問題を部分問題と呼ぶ。さらに問題解決過程の特殊化を制約構造の特殊化として捉えており、制約構造を特殊化することによって生成される問題を特殊問題と呼んでいる。ここで定式化された

3種類の補助問題は、もとの問題の問題解決過程に対して定義されたものであり、文脈独立にもとの問題より簡単になっているといえるものである。

さらに、このような補助問題の定式化が妥当であるかどうかの検証として、家庭教師経験者による補助問題の生成実験、および問題集の分析を行った。その結果、家庭教師経験者による問題の単純化はほぼ上記の三つの補助問題の範囲に限られており、また問題集中に見受けられる補助的な問題も7割強がこれらの補助問題に属しており、残りは補助以外の目的を含んでいるか、あるいは文脈を考慮して初めて補助的な問題と説明できるものであった。

以下本稿では、まず問題のインデクシングと補助問題の分類について述べ、次に本定式化の妥当性の検証について述べる。最後に、まとめと今後の課題について述べる。

2. 補助問題の分類

本章では、まず本インデクシングの基礎となっている問題解決過程の捉え方について述べる。さらに、インデックスの構成要素である、(1)表層構造、(2)解法構造、(3)制約構造についてより具体的に述べるとともに、それらの構造の部分化あるいは特殊化として定式化した三つの補助問題、(a)同等問題、(b)部分問題、(c)特殊問題について述べる。

2・1 問題解決過程

算数や数学の文章題あるいは力学の問題など、問題の定式化過程が本質的となる問題領域は数多く存在する。そして、これらの問題領域においては学習者にとっての問題解決の困難さの多くが定式化過程に存在することが明らかとなっている[Chi 81, Cummins 88, Larkin 80]。また、いくつかの問題解決のモデルにおいては、この定式化過程を問題の持つ表層的な構造(以下では表層構造と呼ぶ)の洗練として表現している[Nathan 92, Plotzner 93]。算数や数学の文章題あるいは力学の問題などにおいては、問題文中に明示的に含まれているオブジェクト、属性、オブジェクト間の関係を意味ネットワークの形式で表現したものを表層構造とすることができ、その洗練を公式などの数量関係が適用可能な表現に変換することとして考えることができる[平嶋 92a]。例えば、力学の問題文中において「なめらかな斜面」という記述が含まれていれば、表層構造においては「斜面」というオブジェクトが「なめらか」という属性を持っているとして記述される。

この構造に対して公式などの数量関係を適用するためには、「なめらか」という属性記述を「摩擦係数0」という数量的な属性記述に変換しなければならない。数量関係が適用可能なように洗練された表層構造のことをここでは定式化構造と呼ぶ。定式化構造に対してさらに数量関係を用いた変換を加えていくことによって、最終的に求めたい解を含んだ構造を生成することができる。ここではこの構造を目標構造と呼ぶ。

このように考えると、問題解決過程は、(1)問題文から表層構造を生成する過程、(2)表層構造から定式化構造を生成する定式化過程、(3)定式化構造から数量関係を用いて解を含んだ目標構造を生成する解導出過程、の三つの段階に分けることができる。この問題解決過程を図1に図式化した。

定式化過程で行わなければならない作業は、表層構造と定式化構造との差の補間である。表層構造が決まれば適切な定式化構造を決定することができるので、ここでは定式化過程を表現する特徴記述として表層構造を用いる。解導出過程で行わなければならない作業は、解導出のために用いられる一連の数量関係で表現することができる。これがいわゆる解法であると考えられるので、ここでは、この一連の数量関係を解法構造と呼び、定式化構造から目標構造を生成する過程を表現する特徴記述として用いる。

また、解法構造に含まれる数量関係は、その問題が対象としている状況に存在する数量関係の一部にすぎない。問題が対象としている状況に存在している数量関係の理解は、特に力学などの問題領域において単に問題を解くよりも本質的なことであり、同じ状況を対象としている問題を把握しておくことは、問題の制御を行ううえでの必要性が高い。本稿では、問題が対象としている状況に存在する数量関係をすべて表現したものを制約構造と呼び、問題の特徴記述の一つとして用いている。

この問題解決過程についての考察は、問題の特徴づけるうえでこれら三つの構造が必要であることを主張

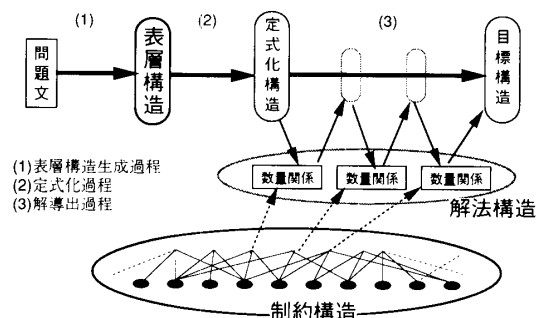


図1 問題解決過程の図式化

するためのものであり、問題解決手順やそこで用いられている知識について言及するものではない。以下本稿では、本章で述べたインデックスに基づく補助問題の定式化とその検証について述べるが、個々の学習者の状態や問題演習の文脈などを考慮したうえで適切に問題を制御するためには、具体的な問題解決手順やそこで用いられている知識の質が非常に重要となってくることは明らかであり[伊藤 92]、これらについてのより詳細な検討が今後の主要課題の一つとなっている。また、問題文からの表層構造を生成する際の困難さについては、国語力の問題と考えて特徴づけのなかに取り上げていないが、実際には問題解決の困難さの一つの要因と考えられるので、今後検討しなければならない課題である。

2.2 同 等 問 題

表層構造がもとの問題よりも定式化構造に近いものに変換された問題は、その定式化過程がもとの問題に比べて部分化されていることになり、もとの問題よりも簡単な問題となっているといえる。解法構造はもとの問題のものが保存されることから、本稿ではこの問題を同等問題と呼ぶ。例えば、図2の問題1の表層構造は図3のように表現することができる。長方形のノードはオブジェクトであり、楕円ノードは属性を表している。また円形ノードはオブジェクト間の関係を表している。さらに、known, answer はそれぞれの属性が問題中に明示的に与えられている属性(入力属性),あるいは求められている属性(出力属性)であるこ

- (問題1) 傾斜角 θ のなめらかな斜面上に、質量 M のブロックを静かに置く。そのときブロックの斜面方向の加速度はいくらか。重力加速度は G とする。
- (問題2) 速さ v_0 で鉛直上向きに上昇しているエレベータからボールを静かに離れた。 t 秒後のボールの速さを求めよ。ただし重力加速度を G とする。
- (問題3) ボールに鉛直上向きの初速度 v_0 を与えた。 t 秒後のボールの速さを求めよ。ただし重力加速度を G とする。
- (問題4) 質量 M のブロックを滑らかな斜面にのせる。重力加速度を G とする。
- (4a) 斜面上に平行な向きのブロックの加速度を求めよ。
- (4b) ブロックが S だけ進んだときブロックの速さはいくらか。
- (問題5) 質量 M のブロックを摩擦のある斜面に置く。その台の傾斜角度を θ 、重力加速度を G とする。また台とブロックの間の摩擦係数を μ とする。初速度が0のとき、ブロックの加速度を求めよ。

図2 問題例

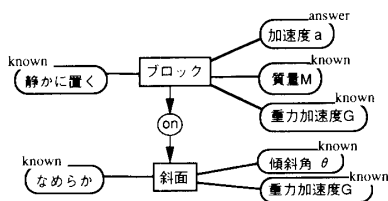


図3 表層構造

とを示している。この表現中には、「静かに置く」、「なめらか」といった数量的記述へ変換すべき属性が含まれている。これらの表現を「初速度0」、「摩擦係数0」とすることは問題解決過程で必然的に行われることであり、このように変換された表層構造を持つ問題はもとの問題よりも単純化されているといえる。同等問題のもう一つの例としてオブジェクトの削除を伴う場合を示す。図2の問題2の表層構造と定式化構造はそれぞれ図4(a), (b)のように表現することができる。つまり、表層構造から定式化構造をつくるためには、「エレベータ」というオブジェクトを削除し、その属性である「初速度 V_0 」を「ボール」の属性にする必要がある。図2の問題3はこのように洗練された構造を直接的に表層構造として持つ問題であり、解導出過程で必要となる操作は問題2と同じであるが、問題の定式化過程が単純化されていることから同等問題であるといえる。

2.3 部 分 問 題

図2の問題4bについての解法構造を図5に示した。楕円で囲まれたものが属性であり、長方形で囲まれたものが数量関係となっている。known, answer は表層構造と同じ意味であり、derived は解を導く過程で得られる中間属性であることを示している。この中間属性を入力属性あるいは出力属性に変更することに

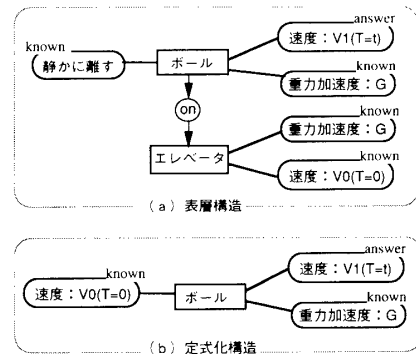


図4 表層構造の洗練

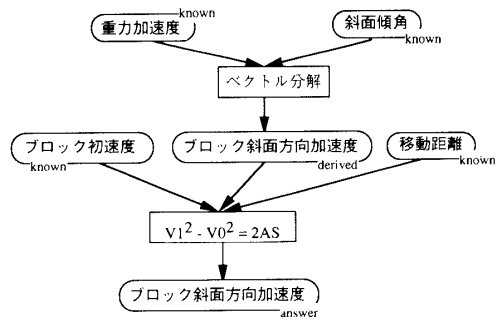


図5 解法構造

よって、解法構造の部分構造を取り出すことができ、これを解法構造の部分化と呼ぶ。部分化された解法構造を持つ問題は、もとの問題の解決過程で解かれるべき問題とみなすことができ、もとの問題よりも簡単になっているといえる。このような問題を部分問題と呼ぶ。例えば、図2の問題4aは問題4bの解法構造中においては中間属性であるブロックの斜面方向の加速度を出力属性としており、問題4bの解法構造を部分化することによって生成される部分問題の一つとなっている。

2.4 特殊問題

制約構造は問題の背景となっている状況に存在する属性間の数量関係を表したものである。図6に制約構造の一例を示した。この制約構造は、問題1、問題4a、問題4bに共通のものであり、これらの問題が同じ状況を背景とした問題であることを意味している。左側の楕円ノードはその状況に存在する属性を列挙したものであり、右側の長方形ノードは属性間を結ぶ数量関係を示している。制約構造中において入出力属性が決まれば、それらの間を結ぶ構造として解法構造は決定される。

この制約構造中の属性をある値にすると、その属性、およびそれに関連するいくつかの属性を省略することができるようになることがある。例えば、摩擦係数を0にすれば、摩擦係数を省略することができるとともに、摩擦力なども省略することが可能となる。このような属性値の変更を属性値のデフォルト化と呼んでいる。属性値のデフォルト化によって、制約構造はもとの制約構造に比べてより特殊な状況しか表さない単純化されたものとなる。これを制約構造の特殊化と呼び、特殊化された制約構造を持つ問題を特殊問題と呼んでいる。図7に図2の問題5の制約構造の一部を示したが、この制約構造に対して摩擦係数をデフォルト化する

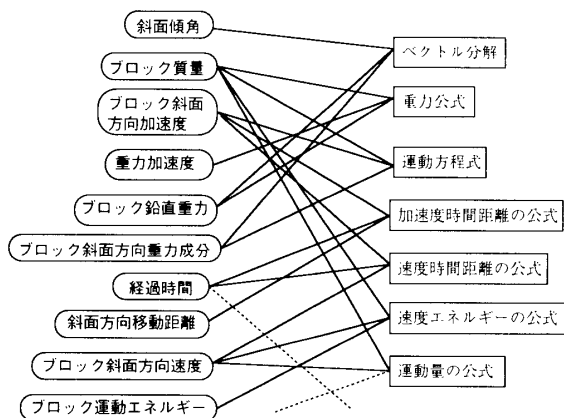


図6 制約構造

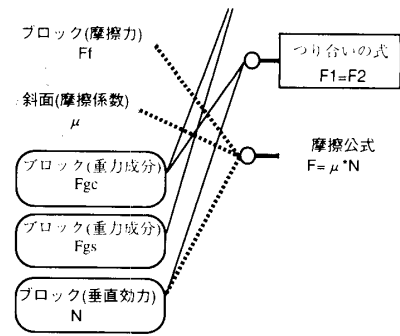


図7 制約構造の特殊化

ると摩擦係数は0となり、破線で示された属性および数量関係が省略された摩擦係数が0の状況だけを表現する制約構造となる。このように制約構造が特殊化されると、例えばブロックの運動方程式がもとの制約構造では $ma = mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta$ であったのが、特殊化された制約構造に対しては $ma = mg \sin \theta$ のように摩擦がない場合にのみ成立する単純化されたものとなり、運動方程式を利用する問題は単純化されることになる。

3. 検証

本研究では、問題解決過程に対する考察に基づいて補助問題をトップダウンに定義している。したがって、何らかの方法で本定義の妥当性を検証する必要がある。本章では家庭教師経験者による補助問題生成実験、および市販の問題集(物理の問題集4冊について力学と電磁気の単元を対象とした)の分析について述べる。以下では、2章で定義した3種類の補助問題を特に基本補助問題と呼ぶことにする。

3.1 補助問題生成実験

家庭教師経験者15名を対象として各被験者に力学の問題を3題与え、学習者がその問題の解決に行き詰まっている場合を想定してもらい、問題解決の補助となるような問題を作成するように依頼した。その結果、総計65題の問題が生成された。その内訳は、同等問題8題、部分問題30題、特殊問題25題、その他2題であり、基本補助問題が97%を占めた。また、3種類の基本補助問題がそれぞれある程度の数だけ作成されている。これらの結果は、本稿で述べた基本補助問題の定義が、人間による問題解決の補助を目的とした問題の単純化をよく再現していることを示している。

その他の2題は同一被験者が作成したものであり、行詰りの原因となりそうな要素だけを取り出した問題となっている。このため、問題を構成する部品がその

要素を顕在化するために都合の良いものとなっており、基本補助問題の範囲からはずれた問題となっている。例えば、複合滑車の問題に対しておもりと糸だけの状況を設定して、糸にかかる張力を求めさせる問題を作成した場合がこれに相当する。しかしながら、このような問題はあらかじめ基本問題としてある程度用意することが可能であり、また、被験者からもまず基本補助問題に属する問題を与え、それでも行詰りが解消されない場合に用いるとのコメントを得ている。

3・2 問題集の分析

問題集の分析においては、問題解決の補助となっていると思われる問題を抽出して、それらの問題が本補助問題の範囲に入るか、そして、入らない場合はその理由づけが可能であるかを調べた(ただし、具体的に数値あるいは文字式を求めるタイプの問題に限った)。調査の対象としたのは、(1)ヒント、(2)参照問題、(3)小問、の3種類である。ヒントは問題の変換とみなせるものが多く見られるので、調査の対象とした。例えば、斜方投上げ問題で最高点の高さを求める問題に対する、「最高点では速度の鉛直成分が0となる」といったヒントがこれに相当する。参照問題は、ある問題を解くうえで参考にするように指示されている問題であり、補助的な問題として用いられていると考えられる。例えば、斜方投上げ問題に対して、鉛直投上げ問題を参照するように指示されている場合などが見られる。小問は、一般に前の小問を利用して後の小問を解くことが多いので、調査の対象とした。例えば、問題4aと問題4bの関係が例となる。

問題集の分析結果を表1に示した。ヒントは全部で141個調べたが、そのうち、問題の変換とみなせるものが69個あり、これらはすべて基本補助問題として解釈できた。また、特殊問題に相当するものは見つからず、同等問題と部分問題に相当するものが同じ程度存在していた。これはヒントによる問題の単純化が問題解決過程の部分化としてしか行われていないことを意味し

ており、ヒントが直接的にもとの問題の解決を支援しようとするものであることから、妥当な結果であると考えられる。問題の変換として解釈できなかった残りのヒントは、注目すべき公式やオブジェクト、属性、あるいはよくある誤りなどを指摘するものであった。

参照問題については全部で120組調べ、基本補助問題に属する問題が全部で70個見つかった。そのうち特殊問題が52個と多いのは、背景となる状況が徐々に一般的になるように問題集の問題系列が組み立てられているので、特殊問題としての参照問題を設定しやすいからであると考えられる。また、部分問題がないのは、部分問題は小問として容易に設定できるので、わざわざ他の問題を参照する必要がないからであると考えられる。次にその他の問題について考えてみる。参照問題についてのその他の問題は、50個存在していた。そのうちの大半を占める47個は三つの構造とも部分化および特殊化に関してもとの問題と包含関係になく、それぞれの一部を共有しているような問題であった。このような問題は文脈独立には単純化されているかどうかを判定することはできないが、問題集は固定された文脈を持っているので、学習者が問題集の設定した順序どおりに問題を解いていったという前提のもとで簡単かどうかを判定することができる。このような文脈に依存して補助となるかどうかが決まる問題を、応用的補助問題と呼ぶことにする。参照問題におけるその他のうち3個存在していた入出力交換問題は、もとの問題の入力属性の一部を出力属性と交換したものであり、解法構造を構成する数量関係および属性まで一致しているが、入出力属性が入れ換わっているものである。このような問題も、学習者が以前にこの問題を解けていることが問題解決の補助となる前提であり、応用的補助問題に属するものである。また、入出力交換問題は、問題解決に用いた数量関係をさまざまな問題設定に対して用いることが可能なことを学習者に伝える手段とも考えることができ、この場合には問題解決の補助以外の目的が含まれることになる。参照問題では基本補助問題に属さないものの割合がほかと比べて大きい。これは参照問題が基本的には補助としてではなく、その問題を解かせること自体を目的として問題集中に配置された問題から選ばれているため、必ずしも都合の良いものが見つからないからであるとも考えられる。

小問については全部で308組調べ、基本補助問題に属するものが220個見つかった。部分問題が非常に多いのは、段階的に部分解を導き出しながら最終的な解に近づいていくという形で用いられる小問が多いこと

表1 問題集の分析結果

		ヒント (141個)	参照問題 (120組)	小問 (308組)
基本補助問題	同等問題	30	18	0
	部分問題	39	0	191
	特殊問題	0	52	29
	小計	69	70	220
その他の問題	入出力交換問題	0	3	7
	部分共有問題	0	47	0
	入出力属性変更問題	0	0	77
	出力属性同一問題	0	0	4

を示している。また、特殊問題が存在することは、最終的に解決したい状況での問題解決を行う前により簡単な状況での問題解決を行わせる形で用いられている小問があることを示している。同等問題が存在しないのは、本稿で定義している同等問題の定義では数値を導く行為が含まれていないために、小問としての設定が困難であるためと考えられる。小問についてのその他のうち、大半の77個を占める入出力変更問題は、制約構造までは同じであるが入出力属性が異なっているために解法構造がもとの問題と異なっているものである。このような問題は、一部の数量関係が同じであるので応用的補助問題ともみなせるが、問題の背景となっているさまざまな数量関係に気づかせるための問題とも解釈可能である。また、その他のうち7個は参照問題の部分で述べた入出力交換問題である。その他のうち4個存在していた出力属性同一問題は、三つの構造ともに大きく異なっているが、出力属性のみ一致している問題であり、この問題は補助としての意味は薄く、学習者にいろいろな問題を解かせる意味で設定されていると考えられる。

4. ま と め

補助問題の提示とそれに基づく指導は、問題解決支援のための最も重要な方法の一つである。しかしながら、補助問題の定式化およびその分類整理はこれまでにほとんど試みられておらず、知的教育支援システムにおける利用についても十分な検討が行われていなかった。本稿では、補助問題をもとの問題の解決過程を部分化あるいは特殊化したものとして補助問題を定式化している。さらに、これらの操作を加える対象として、(1)表層構造、(2)解法構造、(3)制約構造、の三つの構造によって問題の特徴づけるインデックスを用いている。これらの補助問題の定式化の妥当性を検証するために、(a)家庭教師経験者による補助問題の生成実験と(b)問題集の分析を行った。この結果、人間による問題の単純化、および文脈に依存せずに単純化されていると判定できる問題は、本稿で定義した補助問題の範囲にほぼ収まっていることが明らかとなった。以上のことから、本稿で述べた補助問題の形式的な定義は十分妥当なものであったと考えられる。また、例題にあげたようないくつかの力学の問題については、もとの問題のインデックスから補助問題のインデックスを生成する機能がすでに実現されており、引き続き取り扱える問題範囲の拡張を行っている。

今後の主な課題としては、まず、補助問題の持つ問題解決の補助効果の分類整理とそれに基づく運用法の検討があげられる。本稿では補助問題の定式化と分類を行ったが、これはあくまで補助問題を教育支援システムにおいて取り扱っていくための形式的な枠組みを与えるものであった。各補助問題はそれぞれ問題定式化過程、解導出過程、問題の背景となっている状況を単純化したものであり、それぞれに対して困難さを感じている学習者に対して有効であると考えられるが、個々の学習者や問題演習の文脈に応じて補助問題を効果的に運用するためには、具体的な問題解決手順やそこで用いられる知識の質をより詳細に検討したうえで、個々の補助問題の効果を分類整理する必要がある。さらに問題演習の文脈や学習者の知識状態のモデル化といったことも不可欠である。これらの情報を用いることによって個々の補助問題により詳細な意味づけが可能となり、学習者に与える負荷を制御した運用が実現可能になる[Kashihara 94]。また、補助問題の提示は、学習者の問題解決の行詰りの箇所を診断するためにも有効であり、したがって、今後は診断という目的も考慮した運用が必要と考えられる。

さらに、現在、補助問題を用いた後向き問題制御を基本とした学習者主導型の問題演習支援環境の作成を計画している[平嶋 94d]。この環境においては学習者は自分で解く問題を選択することが許されており、その問題が解けない場合にはシステムが補助問題を用いて行詰りの診断および問題解決の誘導を行う。この際、いったん学習者が解決可能な問題にまで問題を単純化し、もとの問題と学習者が解決可能な問題の差異を難しさの原因として明らかにしたうえで、その差異を補間する行為として問題解決を誘導する方法を採用する予定である。また、学習者がやり残している問題があれば、その問題に取り組むように示唆する。さらに、任意の問題間の関係についての説明を行う。これらのいわゆる Problem Navigation 機能は、教育支援システムの主目標である、「個別指導」と「学習者主導」の双方をバランス良く実現するために不可欠であり、本研究の成果を活用するために最も適したアプリケーションの一つであると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、(財)電気通信普及財団の援助による。また、本研究について熱心に御討論いただいた豊田研究室 IKC グループの皆様へ感謝します。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Barr 76] Barr, A., Beard, M. and Atkinson, R. C.: The Computer as a Tutorial Laboratory: the Stanford BIP Project, *Int. J. Man-Machine Studies*, Vol. 8, pp. 567-596 (1976).
- [Burton 82] Burton, R. R. and Brown, J. S.: An Investigation of Computer Coaching for Informal Learning Activities, D. Sleeman and J. S. Brown (eds.), *Intelligent Tutoring Systems*, pp. 79-98, Academic Press (1982).
- [Chi 81] Chi, M. T. H., Feltovich, P. J. and Glaser, R.: Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices, *Cognitive Science*, Vol. 5, pp. 121-152 (1981).
- [Cummins 88] Cummins, D. D., Kintsch, W., Reusser, K. and Weimer, R.: The Role of Understanding in Solving Word Problems, *Cognitive Psychology*, Vol. 20, pp. 405-438 (1988).
- [Fox 91] Fox, B. A.: Cognitive and Interactional Aspects of Correction in Tutoring, P. Goodyear (ed.), *Intelligent Tutoring System: Evolutions in Design, Teaching Knowledge and Intelligent Tutoring*, pp. 149-172, Albex Pub. Corp. (1991).
- [Halff 88] Halff, H. M.: Curriculum and Instruction in Automated Tutors, M. C. Polson and J. J. Richardson (eds.), *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*, pp. 79-108, Lawrence Erlbaum Associates (1988).
- [平嶋 92a] 平嶋 宗, 中村祐一, 池田 満, 溝口理一郎, 豊田順一: ITSを指向した問題解決モデル MIPS, 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 3, pp. 475-486 (1992).
- [Hirashima 92b] Hirashima, T., Kashiwara, A. and Toyoda, J.: Providing Problem Explanation for ITS, C. Frasson, G. Gauthier and G. I. McCalla (eds.), *Proc. ITS'92* (Lecture Notes in Computer Science 608), pp. 78-83, Springer-Verlag (1992).
- [平嶋 94a] 平嶋 宗, 東 正造, 柏原昭博, 豊田順一: 事例に基づく問題解決の誘導, 人工知能学会研資, SIG-IES-9401-2, pp. 7-12 (1994).
- [Hirashima 94b] Hirashima, T., Niitsu, T., Hirose, K., Kashiwara, A. and Toyoda, J.: An Indexing Framework for Adaptive Arrangement of Mechanics Problems for ITS, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol. E77-D, No. 1, pp. 19-26 (1994).
- [Hirashima 94c] Hirashima, T., Kashiwara, A. and Toyoda, J.: An Indexing Framework for Adaptive Problem Sequencing and Problem Simplification, *Proc. 7th Australian Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pp. 552-559 (1994).
- [平嶋 94d] 平嶋 宗, 柏原昭博, 豊田順一: 後ろ向き問題制御のためのインデクシング手法, 教育工学関連学会連合第4回全大(1994).
- [池田 92] 池田 満, 溝口理一郎: ITSのための汎用フレームワーク FITSの開発, 信学論, Vol. J75-A, No. 2, pp. 314-322 (1992).
- [伊藤 92] 伊藤 紘二, 伊丹 誠, 宮本 健: 学習支援環境 CAFEKSにおける問題解決支援機構の試作, 信学論, Vol. J75-A, No. 2, pp. 332-342 (1992).
- [Kahney 86] Kahney, H.: *Problem Solving: A Cognitive Approach*, The Open University (1986).
- [Kashiwara 94] Kashiwara, A., Sugano, A., Matsumura, K., Hirashima, T. and Toyoda, J.: A Cognitive Load Application Approach to Tutoring, *Proc. 4th Int. Conf. on User Modeling*, pp. 163-168 (1994).
- [Koffman 75] Koffman, E. B. and Blount, S. E.: Artificial Intelligence and Automatic Programming in CAI, *Artif. Intell.*, Vol. 6, pp. 215-234 (1975).
- [Larkin 80] Larkin, J. H., McDermott, J., Simon, D. P. and Simon, H. A.: Model of Competence in Solving Physics Problems, *Cognitive Science*, Vol. 4, pp. 317-345 (1980).
- [MaCalla 90] MaCalla, G. I.: The Search for Adaptability, Flexibility, and Individualization: Approaches to Curriculum in Intelligent Tutoring Systems, Jones, M. and Winne, P. H. (eds.), *Adaptive Learning Environment: Foundation and Frontiers*, pp. 91-122, Springer-Verlag (1990).
- [松原 92] 松原行宏, 中向井正人, 長町三生: 対話型教材知識構築ツールに基づく因数分解ITSと教授戦略構築手法, 人工知能学会研資, SIG-IES-9203-4, pp. 23-30 (1992).
- [Nathan 92] Nathan, M. J., Kintsch, W. and Young, E.: A Theory of Algebra-Word-Problem Comprehension and Its Implications for the Design of Learning Environments, *Cognition and Instruction*, Vol. 9, No. 4 (1992).
- [Osin 76] Osin, L.: SMITH: How to Produce CAI Courses Without Programming, *Int. J. Man-Machine Studies*, Vol. 8, pp. 207-241 (1976).
- [Plotzner 93] Plotzner, P.: How Quantitative Problem Solving in Mechanics Improves by Qualitative Reasoning, *Proc. AI-ED93*, pp. 282-289 (1993).
- [Polya 54] Polya, G.: *いかにして問題を解くか*, 丸善(1954).
- [Schank 90] Schank, R. C.: Teaching Architectures, Northwestern Univ. Institute for the Learning Science, TR #3 (1990).
- [Towne 88] Towne, D. M. and Munro, A.: The Intelligent Maintenance Training System, Psotka, P., Massey, L. D. and Mutter, S. A. (eds.), *Intelligent Tutoring Systems: Lessons Learned*, pp. 479-530 (1988).
- [VanLehn 87] VanLehn, K.: Learning One Subprocedure per Lesson, *Artif. Intell.*, Vol. 31, No. 1, pp. 1-40 (1987).
- [VanLehn 92] VanLehn, K., Jones, R. M. and Chi, M. T. H.: A Model of the Self-Explanation Effect, *J. Learning Science*, pp. 1-59 (1992).

[担当編集委員・査読者: 伊藤 紘二, 竹内 章]

—— 著 者 紹 介 ——

平嶋 宗(正会員)は, 前掲(Vol. 10, No. 3, p. 402)参照.



東 正造(学生会員)

1994年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。現在奈良先端科学技術大学院大学修士課程在学中。人工知能、特に知識工学、自然言語処理に興味を持つ。

柏原 昭博(正会員)は, 前掲(Vol. 10, No. 3, p. 402)参照.

豊田 順一(正会員)は, 前掲(Vol. 10, No. 1, p. 87)参照.