

「問題を作ることによる学習」の知的支援環境

中野 明[†] 平嶋 宗[†] 竹内 章[†]

An Intelligent Learning Environment for Learning by Problem Posing

Akira NAKANO[†], Tsukasa HIRASHIMA[†], and Akira TAKEUCHI[†]

あらまし 知識は獲得しただけでは、実際の問題に適用できるとは限らない。したがって、知識を利用する経験を通して使いこなせるようになることを目的とした、知識定着の過程が必要となる。定着支援の手段として、知識を用いて繰り返し問題を解かせる問題解決演習のほかに、学習者自身にその知識を用いて解くことができる問題を作らせる作問演習が挙げられる。一般的に教育現場においては前者の問題解決演習の手法が用いられており、後者の作問演習は有効な手段といわれているにもかかわらず、実際に用いられることは少ない。本研究では、学習者に文章問題を作らせ、その文章問題を計算機が診断/評価/作問の誘導/誤りの修正支援/課題の提示などの処理をする知的な作問演習支援環境の開発を WWW 上でやっている。作問演習は、問題を作らせることで解法が適用できる問題の条件を考えさせ、それにより解法の定着を促す上で効果的であるとされており、その支援環境の作成は意義あるものといえる。

キーワード 作問 (problem posing), 知的学習支援システム, 知識定着, 問題解決モデル, WWW

1. ま え が き

学習者がある問題解決の方法（以下では解法と呼ぶ）を獲得しているとしても、それを使いこなせるとは限らない。解法を使いこなせるようになる（ここではこれを解法の定着と呼ぶ）ためには、その解法を実際に用いる経験を積むことが必要であるとされている。学習者に問題を解かせる問題解決演習は、最もよく用いられている方法であり、その効果も確認されている。しかしながら、解法の用い方としては、これが唯一の方法というわけではなく、ある解法で解ける問題を作る作問演習も、解法を定着させる有効な方法とされている。我々は、解法の定着を指向した「問題を作ることによる学習」を知的に支援する学習環境の実現を目指している。

「問題を作ることによる学習」の重要性は、米国の場合 Curriculum and Evaluation Standards for School Mathematics(1989), Professional Standards for Teaching Mathematics(1991) において「学習者自身が問題を構成する経験をもつことの重要性」と指摘されている。更に研究報告として、問題を作るタス

クに関する調査と分析 [1], [2], 問題を作ることによる解決能力向上効果の調査 [3], 実際の教育現場での実践 [4], [5], 作問により生成された問題の分析 [6] 等, が行われており、これらにおいても、作問の学習効果が指摘されている。

作問演習の形式は Silver らによって大きく三つに整理されている [6] ~ [8]。(1) 特定の演算関係や解法が適用できることを条件として学習者に作問させる「数式ベースの作問 (within-solution posing)」, (2) 問題設定を行える映像や図などの情報のみを学習者に提供し自由に問題を作ってもらう「場面ベースの作問 (presolution posing)」, (3) 欠損・誤りのある問題若しくは完成された問題を学習者に提供し問題の完成や正しい状態への推移、またその考察を促す「問題ベースの作問 (postsolution posing)」である。

「数式ベースの作問演習」の知的支援環境実現にあたっての最も重要な課題は、学習者の作った問題を診断する機能を実現することである。更に、学習者が問題を入力するためのインタフェース、及び診断結果に基づいた指導を行う機能を実現することが必要となる。本研究では、この診断機能を問題解決モデル MIPS [9] を用いて実現している。MIPS は問題がある解法で解けるかどうかを検証する形で問題解決を行うモデルであり、数式ベースの作問の診断に適したものとなって

[†]九州工業大学知能情報工学科, 飯塚市
Department of Artificial Intelligence, Kyushu Institute of
Technology, 680-4 Kawazu, Iizuka-shi, 820-8502 Japan

いる。問題入力インターフェースは、システムが提供した「文型テンプレート」と「概念」を取捨選択し数値と組み合わせることで単文を作問することのできるツールとして実現している。個別指導としては、誤りの指摘と課題設定の変更を行っており、誤りの指摘に関しては診断結果に基づく直接的な指摘として実現している。課題設定の変更は学習者に提供する概念集合の変更として実現している。対象解法としてはツルカメ算^{注1)}や和差算といった算数の文章問題の解法、対象者は解法を用いて問題を解けるようになった学習者とする。

我々は、上記の機能を有する知的支援環境の設計を行った。また、プロトタイプシステムを用いた使用実験によって、この環境を用いることで作問演習が成立するかどうかの検討を行った。

以下本論文では、2.において、学習者及び学習指導の立場より「問題を作ること」と「問題を解くこと」の違いについて考察する。3.では、本研究で設計した知的教育環境（以後、作問演習支援システム）について述べる。4.では、実現したプロトタイプシステムで行われる作問演習の手順について述べ、更にそのプロトタイプシステムの予備的な使用実験の結果を報告する。

2. 問題解決演習と作問演習との差異

本研究では、作問の中でも「数式（本研究においては解法がこれに相当）ベースの作問」の実現を目指している[10]~[13]。この「数式ベースの作問」は、特に解法を定着させる方法として有効であると考えからである。解法定着のためには、「解法の適用条件を的確に理解していること」が重要となる。そのために、学習者自身が解法の適用条件を明確に意識して演習を行うことは有益であると考えられる。「数式ベースの作問」の場合、適用条件を明確に意識して作らなければ、解法の適用できない問題を作ることとなる。したがって、作問を繰り返し行うことで、適用条件が意識化され、解法の定着が促進されると考えられる。これらの考えは、「数式ベースの作問」が、特に解法の適用条件を意識化させる演習であるという主張[8]、またその意識化が解法の適用条件の適切な理解に基づく使いこなし（解法定着）に効果的であることの示唆[3],[14],[15]といったものに基づいている。

本章では、学習者にとって解法を用いて「問題を解くこと」と「数式ベースの作問」によって「問題を作

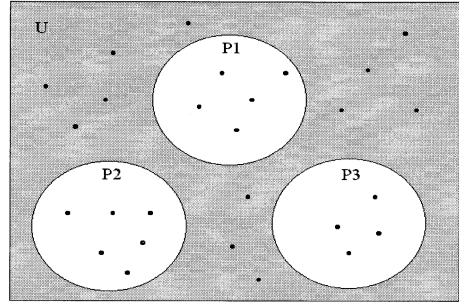


図1 解法と問題の関係の模式図

Fig. 1 A model of relation between solution-methods and problems.

ること」の差について考察し、更に学習指導を行う立場からの問題解決演習と作問演習の差について検討する。

2.1 学習者にとっての差

問題解決演習において学習者は、解法が適用できる様々な問題を解決することで、解法の適用可能な状況の理解を深めることができる。しかし、一般的には学習者に提供される問題は、それまでに教授された解法を用いて正解を導き出せるものだけである。つまり、学習者にとって「与えられる問題」は「限られたいくつかの解法のいずれかで解決できる問題」である。そのため、限られた数の解法へと問題を分類することができれば、問題を解くことが可能となる。そして、この分類の際には、それぞれの解法の適用条件を正確に知る必要は必ずしもないといえる。

図1のような模式図を使い整理してみる。全体集合“U”はすべての問題、要素“.”は問題、“P_x”は解法xを用いて正解を導き出せる問題の集合(x=1, 2, …, n)のように表記する。例えば図1における“U-(P₁ P₂ P₃)”は、解法1・2・3では解決できない問題であり、ここにはそもそも解けない問題も含まれる。問題解決演習を用いた知識定着を支援する流れでは、まず解法1を獲得したばかりの学習者に対して、集合“P₁”内の様々な問題を出題する問題解決演習を行う。この際、学習者は、解法1で解決できることが前提とされているため、問題に解法1が適用可能であるかの検討を行う必要はない。つまり、この段階では解法1

(注1): ツルカメ算の問題を、 $aX + bY = c$, $X + Y = d$, ただしa, bといった適用条件(condition)をもつものとし、 $a \times b = L$, $|a - b| = N$, $|c - L| = M$, $M/N = X$, $d - X = Y$ (aとbは交換可)という計算手順(procedure)で解かれるとする。

の適用条件の限界を知る必要は必ずしもない。次に解法 2 を獲得すると、集合 “P2” 内の様々な問題から構成される問題解決演習を行った後に、集合 “P1” に含まれる問題と集合 “P2” に含まれる問題とを織り交ぜた構成の問題解決演習を行う。やはり、この場合も、演習が提供する問題は、解法 1 か解法 2 を適用すれば解決するので、集合 “P1”、“P2” のどちらに属した問題であるか分類することができれば問題を解くことができる。例えば、章末問題や中間考査といった狭い範囲から問題が出題される場合には好成績を収める学生が、広い範囲から出題される実力テストでは冴えないといったことがしばしば見受けられる。これら事例は、限られた数の解法へと問題を分類することに慣れてしまい、演習が提供する問題の範囲が小さく限られていると解法を適用できる（文脈に依存した解法の適用）が、その範囲が十分に大きくなると解法を適用できなくなるということが一因であると考えられる。

これに対して解法知識を定着させる手段として作問演習を用いた場合を考えてみる。この演習の際、学習者の作る問題は、必ずしも正しく目標の解法が適用できるとは限らないし、問題として成立するかすら保証されない。例えば、学習者が解法 1 の適用できる問題を作る際、図 1 でいうところの集合 “U-P1” に属する問題（この問題をここでは「解法適用の負例」と呼ぶ）を作ってしまう可能性が十分考えられる。適切な問題を作るためには解法の適用条件を意識して問題を作る必要があり、また「解法適用の負例」を作ってしまう、あるいはそれを「解法適用の正例」へ修正するといった経験は、学習者に「解法の適用条件の適切な理解」を促していると考えられる。

このように作問演習は、学習者自身が解法の適用条件を明確に意識する演習と考えることができ、またこの「適用条件を明確に意識すること（解法適用条件の意識化）」は、解法定着に有益であると考えられる。

2.2 学習指導上の差

問題解決演習の診断では、そのほとんどの場合において解決に用いる解法と解答は一意に決まり、解決過程のバリエーションも少数であることから正誤判断が容易といえる。また、問題解決演習の指導の際には、学習者に解かせる問題とその質をあらかじめ把握することができるため、誤答に関する対応もあらかじめ準備することができる。したがって、学習者個々に対してそれほど多様な対応を必要とせず、いっせいで授業や解説を提供した問題集による学習も成立する。

これに対して、「数式ベースの作問」の診断では、正解が「解法で解ける問題すべて」であることから、あらかじめすべての正解例を用意しておくことは不可能である。したがって、作られた問題個々について、正誤を判断することが必要となる。また正誤だけでなく、作られた問題の質を判断しなければならない。そのため作問演習を指導する場合、複数ある正答に関しては各作問された問題の質と学習者の理解状況に沿った次課題の選定を、誤答に関してはその要因修正を行う必要があり、その自由度は問題解決の場合と比較して十分大きいといえる。

このように「問題を作ることによる学習」は適切な診断と個別指導が求められるものである。知的支援環境としてはこれまでほとんど研究事例が存在しないが、診断・指導の自動化は、実現する意義の大きい研究課題であるといえる。

3. 知的支援環境

本章では、本研究において実現を目指している「数式ベースの作問」の形式による「問題を作ることによる学習」の知的支援環境の構成について述べる。本環境の構成図を図 2 に示した。図 2 中の、作問インタフェース (Problem Posing Tools)、文章問題診断部 (Diagnosis Module)、個別指導部 (Support Module) が本研究での課題であり、これらについては、次節以降で更に述べる。

本環境では、ネットワーク経由で利用可能にするために、Client-Server 方式による通信機能、個別支援のための個人情報管理部 (Individual Information Manager) も実装されており、通信機能を Java 言語によって構築しているため、WWW 上でのマルチプラットフォームな利用が可能である。

3.1 作問インタフェース (Problem Posing Tools)

本システムでは、「文型テンプレート」「概念」「数値」の組合せとして問題入力を行う作問インタフェースを実現している。具体的には、1 文が一つの主張を表現するテンプレート（これを文型テンプレートと呼ぶ）をシステムから提供する。この文型テンプレートは主語や目的語等の部分に空欄をもつ。この空欄にシステムから提供されている概念集合から選択した概念と数値を入力し、単文を作成する。こうして生成された複数の単文より、問題は構成させることになる（4.1 のシステムの利用手順において更に述べる）。作成され

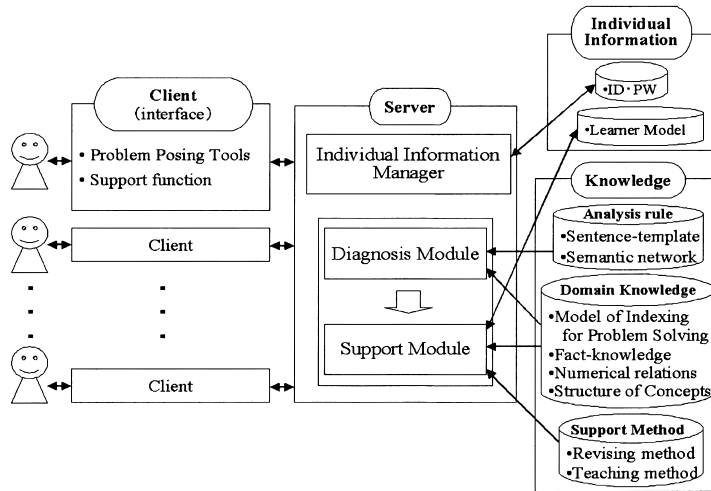


図2 フレームワーク
Fig. 2 The framework of this ILE.

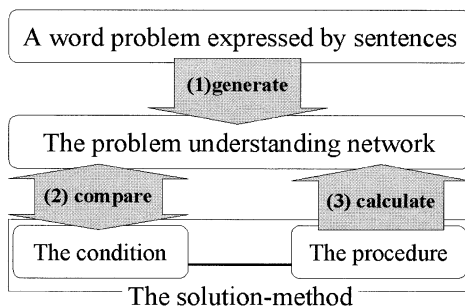


図3 文章問題診断の流れ
Fig. 3 A flow of diagnosis in this ILE.

た問題は、意味ネットワーク表現に変換され、問題診断部に渡される。

Silverらは「数式ベースの作問」において学習者が行う作業を、「数式が適用できるように概念や数値を組み合わせて問題設定を設計すること」と「問題設定を自然言語化すること」の二つに分けて考えることができるとしており[6]、本システムによる作問は、そのうちの「問題設定の設計」のみを扱っていると見ることができる。「学習者に解法の適用条件を意識化させる演習」として「数式ベースの作問」を実現という観点においては、本システムのような作問インタフェースは妥当であると考えている。しかしながら、より豊かな作問演習を実現する上で、「自然言語化」の作業を取り扱えるようなインタフェースと、自然言語処理機能を

実現していくことは必要であり、今後の課題であると考えている。

本プロトタイプシステムの作問インタフェースによりツルカメ算は図4のように作ることが可能である。

3.2 文章問題診断部 (Diagnosis Module)

ここでは、ツルカメ算等の算数の文章問題を対象とした問題解決モデルMIPS[9]を用いて問題解決を試みる。MIPSにおける問題解決は、図3に示す流れによって実現されている。

(1) 問題理解ネットワーク (problem understanding network) の生成行程：文章問題を概念と数量間の意味関係を表すネットワークに置き換える(図3中のgenerateに相当)。このネットワークを問題理解ネットワークと呼ぶ。

(2) 解法の適用条件 (condition) との比較行程：解法が適用できることを前提とすることで、問題理解ネットワークから解法適用に必要な数量関係を取り出したの検証や、不足している数量関係には相当する情報を問題理解ネットワークに追加し補完を行うことで、解の適用可能な問題理解ネットワークを構築する(図3中のcompareに相当)。解法適用に不足・冗長している情報、そもそも関係が誤っている情報の同定を行うことが可能である。

(3) 解の導出行程：数量関係から解法の計算手順 (procedure) に従って解の導出を行い、更に導出された解が概念にふさわしいかの検証を行う(図3中の

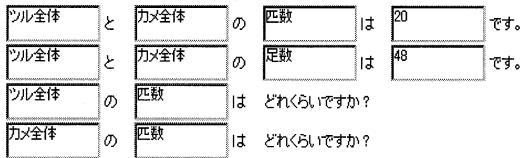


図 4 作問インタフェースを用いた文章入力
Fig. 4 An example of a problem posed in the ILE.

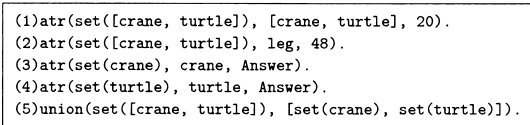


図 5 問題の内部表現例
Fig. 5 An example of internal description of a problem.

calculate に相当)。

本文章問題診断部では、これら三つの段階に演算行程を分割し実現している。この診断手法の詳細は参考文献 [9] に記しており、次項以降は、各行程ごとの処理の際に同定される「誤り」を中心に述べる。

3.2.1 問題理解ネットワークの生成

この段階では、文としての誤りが診断される。まず、作問インタフェースで作られた単文は、基本関係^(注2)に変換される。例えば、図 4 に示す四つの単文は、それぞれ図 5 に示す基本関係の (1) ~ (4) へ変換される。次に、いくつかの結合規則を用いて基本関係間の結合を行い、問題理解ネットワークを生成する。図 4 の場合、結合規則により図 5 に示す結合関係 (5) が検出され追加されたものを問題理解ネットワークとする。これを図的に表現すると図 6 の実線で囲まれたネットワークとして表現できる。

この段階で診断される誤りとは、(1) 基本関係の誤り、(2) 基本関係間の結合の失敗、の 2 種類に分けられる。個々の基本関係の検証は、領域知識を用いて行われる。基本関係の誤りは、更に、(1a) 属性の誤り (例えば、ツルの角)、(1b) 属性値の誤り、がある。属性値の誤りは更に、固定値の誤り (例えば、ツルの足の数は 4 本) と値の範囲の誤り (例えば、リンゴの値段が - 100 円) に分けることができる。個々の基本関係が検証されれば、次に基本関係間の結合を行う。結合できる基本関係が一つもない場合は、問題として解釈できないと診断する。結合できない基本関係が存在した場合には、無意味な文の存在と診断される。基本関

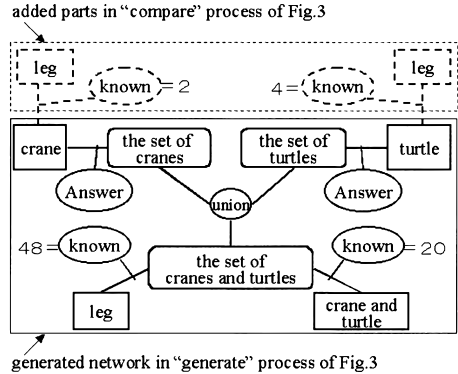


図 6 問題理解ネットワーク例 (1)
Fig. 6 An example of a problem understanding network.

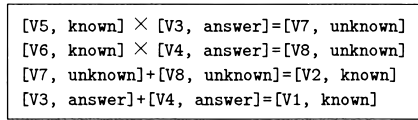


図 7 ツルカメ算の汎用解法インデックス
Fig. 7 The generic ISM (Index of Solution-Method) of "crane-turtle method."

係の結合によって生成された問題理解ネットワークは、次の段階に送られる。

3.2.2 解法の適用条件との比較

問題文に解法が適用できるかどうかの診断を行う。以下、まず MIPS における問題理解ネットワークの処理の流れについて簡単に述べた後に、診断される誤りについて説明を行う。

3.2.2.1 処理の流れ

MIPS では、文章問題に対してある解法が適用可能かどうかを、問題より生成された問題理解ネットワークが、その解法についての適用条件を数量関係として表現した汎用解法インデックス [9] を説明できるかどうかによって判定する。ツルカメ算の汎用解法インデックス^(注3)は図 7 となる。汎用解法インデックスを説明するとは、各項に問題理解ネットワークを構成している基本関係を割り当て、システムのもっている基本関係間の演算関係知識で照合可能な数量関係を作ること

(注2): MIPS では、オブジェクト、属性、属性値からなる関係を基本関係と呼び、図 5 のように atr (オブジェクト、属性、属性値) と記述する。基本関係は問題理解ネットワークの構成単位である。

(注3): ツルカメ算となるための、2 元連立方程式を表現し、変数 V1 ~ V8 には概念 (基本関係) が代入され、各変数は概念の数値状態 (known: 既知数・unknown: 未知数・answer: 求める値) を属性値としてもつ。

[V5, known] × [number of cranes, answer]=[V7, unknown]
 [V6, known] × [number of turtles, answer]=[V8, unknown]
 [V7, unknown]+[V8, unknown]=[total number of legs, known]
 [number of cranes, answer]+[number of turtles, answer]=[total number of cranes and turtles, known]

図 8 汎用解法インデックスへの割付け例
 Fig. 8 An example of an assignment for the generic ISM.

[number of legs of a crane, incomplete] × [number of cranes, answer]=[total number of legs of cranes, unknown]
 [number of legs of a turtles, incomplete] × [number of turtles, answer]=[total number of legs of turtles, unknown]
 [total number of legs of cranes, unknown]+[total number of legs of turtles, unknown]=[total number of legs, known]
 [number of cranes, answer]+[number of turtles, answer]=[total number of cranes and turtles, known]

図 9 演算関係知識を用いた検証
 Fig. 9 Check of the assignment by using fact-knowledge and operational-knowledge.

である。ここで基本関係間の演算関係知識とは、「ツルの足の本数」×「ツルの匹数」=「ツル全部の足の総本数」といった知識である。

つまり、処理行程は(1)問題解決ネットワークの基本関係を用いて、汎用解法ネットワークのV1~V8に割当てを行う、(2)基本関係間の演算関係が成立するかどうかを演算関係知識によって調べる、(3)属性値に関して検証する、の3段階から構成される。

図 8 は、図 6 の問題理解ネットワークに対して処理行程(1)で行われている割当ての一例である。

次に処理行程(2)において、これをシステムのもつ演算関係知識で説明しようとする、図 9 のような説明の可能性が検出される。基本関係間の演算関係をすべて説明できた場合を「潜在的説明可能」とする。ここで「潜在的」と呼ぶのは、属性値の状態の検証をまだ行っていないためである。潜在的説明可能とならない場合は、処理行程(1)へ戻る。

処理行程(3)では、割り当てられた各基本関係が、汎用解法インデックスの示す各属性値の状態と一致するか検証する。図 9 の場合、「ツルの足の本数」と「カメの足の本数」に相当する部分が known でなければならないのに、問題理解ネットワークには相当する基本関係が存在しないので、値は known から incomplete となっている。incomplete な状態がない場合は、説明可能といい、次の 3. 2. 3 の行程へ移行する。incomplete な状態がある場合は、システムのもつ基本関係や基本関係間の演算関係を用いて、この incomplete な状態の解消を行う。図 9 の場合には、システムのもつ基本関係「ツルの足の本数は 2」と「カメの足の本数は 4」

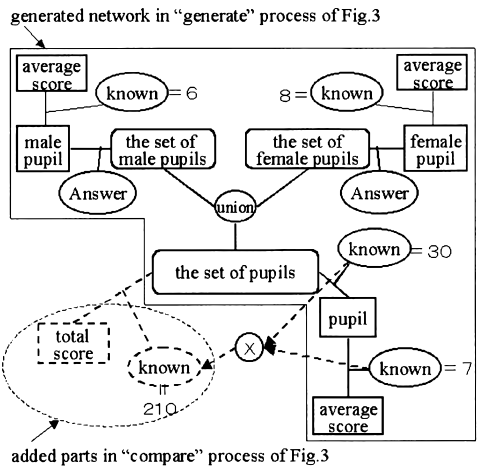


図 10 問題理解ネットワーク例(2)
 Fig. 10 An example of a problem understanding network.

によって、汎用解法インデックスは説明可能となる。図 6 の破線で囲まれた部分は、この操作によって追加される。システムのもっている基本関係で補完できる時、その基本関係は、問題文に明示的に存在する必要のない常識的な情報であったと判断し、誤りとは判断しない。

また、図 10 のような問題(男女の平均点を使った問題)の場合、問題文中には「ツルとカメの足の総本数」に相当する「クラスの総得点」が現れておらず、「クラスの総得点」に関して incomplete となる。これは、基本関係間の演算関係である、「クラスの平均点」×「クラスの数」=「クラスの総得点」を用いるこ

とにより説明可能となり、図 10 の破線部分が補完される。

3.2.2.2 診断される誤り

診断される誤りは、(1) 基本関係の不足、(2) 冗長な基本関係、(3) 解法を適用する上での数量的な拘束条件の違反、である。

(1) の基本関係の不足は、説明できる割当てがない場合として診断される。これは更に、(1a) 潜在的説明可能であるが incomplete が説明できない場合と、(1b) 潜在的説明可能な割当てが見つからない場合、に分けられる。(1a) の場合には、解消されない incomplete の基本関係が不足していると診断できる。例えば、図 6 に相当する問題で、「ツルとカメの総匹数」が欠けている場合がこれに相当する。このような場合には、どの情報が欠けているかまで診断できていることになる。(1b) の場合、指定されている解法への適用は不可能と診断することになる。ここではある解法の適用を前提とした診断を行っており、他の解法で解けるかどうかの診断は行っていない。

(2) の冗長な基本関係とは、説明に利用されない基本関係が存在することであり、その基本関係がなくても解法が適用できることを意味する。これは誤りとはいえないが、解法の適用条件を意識化するという観点からいえば、指摘することは必要といえる。

(3) については、例えば、ツルカメ算で、イヌとカメの足についての問題を作ったような場合である。このとき、双方とも足の数が 4 本であるため、変数 $V5$ と $V6$ とが、その後ろに続く足の数からは区別が困難となる。そこで、ツルカメ算の汎用解法インデックスに更に、 $V5 = V6$ という拘束条件の追加が必要となる。このように、解法適用の数量的な条件を、問題理解ネットワークが満たしているかどうかでも診断できる。

3.2.3 解の導出

問題理解ネットワークとしてある解法が適用可能と診断されれば、次にその解法を用いて数量計算を行う。この段階で診断される誤りは、答に相当する属性値が、許容される範囲に入っていない場合である。例えば、ツルの総匹数が小数や負の数になる場合などがこれに相当する。属性値の許容範囲は、システムの領域知識としての基本関係に記述されており、それを参照することにより、この誤りを診断することになる。

3.3 個別指導部 (Support Module)

本システムでは、個別指導として、(1) 作問に誤りがあった場合の指摘、(2) 作問課題の難易度操作、を

行う。(1) 誤りの指摘の場合、現時点では、3.2 で診断された結果に基づいて、どのような誤りであるかを指摘するだけであり、より高度な指導は今後の課題である。(2) 段階的な作問演習支援に関しては、本システムでは、学習者に概念集合を提供し、そこから概念を取捨選択することで作問を行わせていることから、作問課題の難易度は、この概念集合の操作によって行う。つまり、作問に成功した学習者には、作問された問題の質と、利用されている概念や数値及び構造 (0 次, 1 次, 2 次) から判断し、より難しい作問が行えるような概念集合を提供したり、あるいは、ある特定の概念を用いて作問することを促す。また、作問に行き詰まっているような場合には、扱いのやさしい概念を提供したり、利用できる概念を減らして必要十分なものだけにする。このような作問課題の制御を行うためには、作られる問題の難易度を判断することができなくてはならない。3.4 において、本研究で用いている問題の難易度判断の基準について述べる。

3.4 問題の難易度

問題の難易度を判断する基準として、(a) 問題構造、(b) 構成概念、(c) 数量の性質、を用いている。この三つの基準は更に詳細に分割されるが、本論文では次章で述べるプロトタイプシステムに実装された部分にのみ説明を行う。この実装された基準は、文章問題の難しさの基準 [12], [13] の一部を実装したものである。

本システムのプロトタイプでは表 1 に示した作問課題の難易度テーブルをもつことで段階的にツルカメ算の作問課題を設定している。表 1 に示す「問題構造」では、3.2 で述べた問題理解ネットワークに対する基本関係の付加操作が必要ないものを 0 次、単なる基本関係の付加操作が必要ならば 1 次、演算関係を用いた付加操作が必要ならば 2 次、というように区別する。表 1 に示す「問題が取扱う状況 (構成概念)」では、構成される概念の抽象度による区別 [9] と、問題文全体が表現する状況から区別する。この状況とは、物体の固体数や属性数によって表現される演算関係をもとに構成された状況ならば「オブジェクト」とする等である。プロトタイプシステムでは「オブジェクト」のみを扱っている^(注 4)。表 1 に示す「数値の性質」は属性値が属性に対して離散量なのか、連続量なのか、更に連続量の中でも平均量なのかを区別する。

(注 4): ツルカメ算の解法では、ほかにも「イベント」や「変化量」の問題がある ([12], [13] 参照)。

表1 ツルカメ算の問題の難易度テーブル

Table 1 A table of problem difficulty of "crane-turtle method."

段階	問題構造	問題が取扱う状況 (構成概念)	数値の性質
1	0/1 次問題	オブジェクト (ツル・カメ・足)	離散量
2	0/1 次問題	オブジェクト (生物・足)	離散量
3	0/1 次問題	オブジェクト (生物・体の部位)	離散量
4	0/1 次問題	オブジェクト (自然物)	離散量
5	0/1 次問題	オブジェクト (自然物)	連続量
6	2 次問題	オブジェクト (自然物)	平均量

例えば、初めてシステムを利用する学習者には第1段階の問題を作問できる環境を提供する。具体的には、システム側は概念パネルに「ツル・カメ・足」に関した概念のみを提供するため、学習者が正しい問題文を作問したならば、概念の結合関係が図6に示す問題理解ネットワークとなるような文型パネルと概念との組合せの考慮がなされる。同時に、解法適用の負例となる組合せも多数存在する(問題設定における数量の組合せも含める)。つまり、学習者は「解法適用の正例」を文型パネルや概念や数値の取捨選択の作業によって行っているといえる。第1段階での作問に成功した学習者には、ツルとカメだけでなく動物を用いた作問のための概念集合(第2段階)を提供する。

概念の取捨選択例として、ツルカメ算においてツル、イヌ、カメ、足の概念が与えられている場合を示す。イヌとツルの足、カメとツルの足を用いた問題はツルカメ算として成立するが、イヌとカメの足では問題として成立しない。この例のように、ツルカメ算の性質つまりは適用条件を意識して取捨選択を行わなければ、「解法適用の負例」を生成することになる。学習者は、3.2に示すような「解法適用の負例」が発生しないように、意識して概念を取捨選択しなければならない。

ある段階の作問演習において、学習者が文章問題を正しく作った場合、より高い難易度の問題の作問演習が可能な環境を提供する。例えば、学習者が表1における第1段階の文章問題を作ったときには、第2段階の問題を作問できる環境を提供する。本システムでは、概念構造の差に関する演習(第1~5段階)を終えた学習者に対しては、問題構造の差に関する演習(第6段階)を提供する。この第6段階の演習では、学習者

に「クラスの平均点と人数から男女の人数を導く2次問題のツルカメ算」を作問してもらうことを目指す。このように本システムは段階的な作問演習を実現している。

作問の支援としては、学習者が作った問題の診断とその診断結果に基づく誤りの種類と箇所の指摘を実現している。更に、システムは各段階で作成し得る問題を把握しているので、例えば、2次問題が作成可能であるのに作成していない場合には、付加する基本関係を直接与えない問題を作成するようにアドバイスする。図10の平均点の問題の場合であれば、「クラスの総得点を使わずに問題を作って下さい」というアドバイスとなる。これらの支援は、学習者が問題を作ってシステムがそれを診断することを前提としたものであり、学習者が作問に行き詰まっている場合の支援については今のところ実現していない。作問における学習者の行き詰まりを診断し、行き詰まりを解消するように誘導する機能の実現は今後の課題となっている。

4. プロトタイプシステム

本章では、本研究で実現を目指している知的支援環境のプロトタイプシステムについて述べる。4.1では、本プロトタイプシステムが実装している「数式ベースの作問」の実行手順を述べる。

現時点までに、3.で述べた機能の実現がされており、これらの機能を用いることによる一連の作問演習が成立すると考えている。そこで4.2では、大学生を被験者として使用実験を行った結果を報告する。これはあくまで本システムを用いて作問演習が行えるかどうかを確認するものであり、学習効果を検証するものではない。学習効果の検証実験に関しては、使用実験によって得られた問題点を改良し、また計算機を使い慣れない学習者にでも容易に本システムを使えるようにインタフェースの洗練を行った上で、行うことを予定している。

4.1 利用手順

現在公開しているプロトタイプシステム^(注5)の使用手順を以下に示す。

(1) ブラウザから公開ページにアクセスする：公開ページでは、プロトタイプシステム利用の諸注意と

(注5): 本システムはすでに以下の URL で公開している。
<http://www.minnie.ai.kyutech.ac.jp/nakano/ILE/interface.html>
 サーバの不具合等で利用できない場合、御意見・感想は
nakano@minnie.ai.kyutech.ac.jp 以下に御連絡下さい。

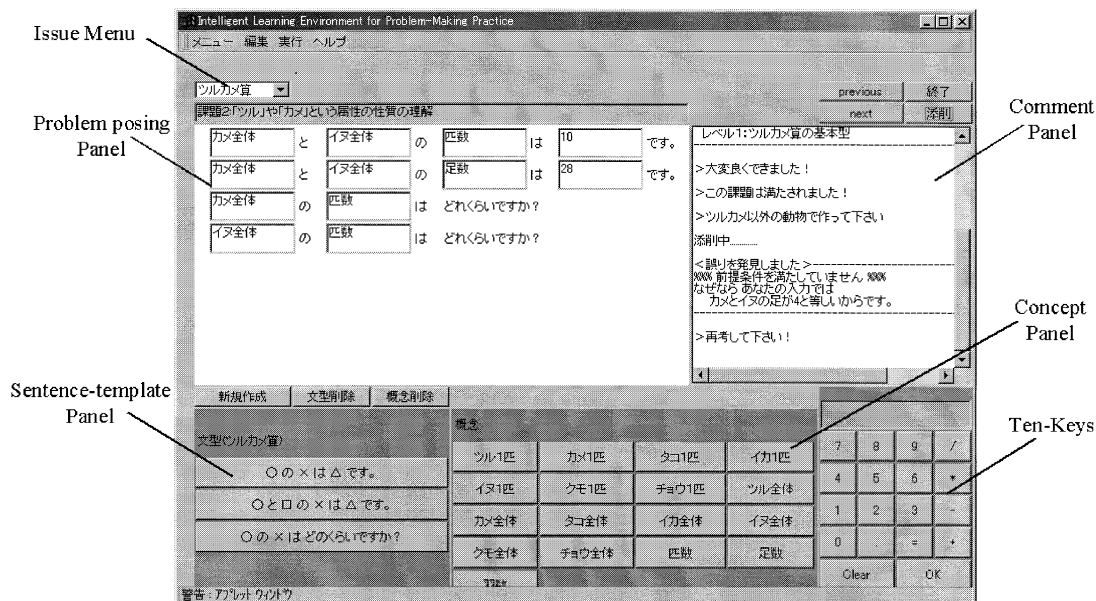


図 11 インタフェース
Fig.11 Interface.

利用環境（特に解像度）別のインタフェースプログラムへのリンクが記載されている．利用環境に応じてリンクを選び，プロトタイプシステムへアクセスする．

(2) 個人認証を行う：プロトタイプシステムの利用は，まず個人認証を行うことから始まる．新規利用者はユーザ登録を，継続利用者は個人認証を行う^(注6)．

(3) 作問演習の開始：個人認証に成功すると，図 11 に示すようなウィンドウが表示される．作問演習はすべてこのウィンドウを通して行う．

- 利用者はまず，課題選択パネルで演習する解法を決定する．

- 選択した解法を初めて利用する学習者の場合には，演習導入の為のメニューが概念パネルに提供され，演習開始のメニュー選択後は通常の作問演習を行う．メニューとしては，ヘルプ機能・デモンストレーション機能のほかに，このシステムを利用した作問演習の導入段階も用意している．この導入段階とは，あらかじめ文型テンプレートとその組合せを固定して問題作成パネルに提示し，学習者はその空欄を埋めるだけの作問演習である．

- 継続利用の学習者の場合には，学習進度に応じてシステムから文型テンプレートパネルと概念パネルに文型テンプレート群と概念群が提供される．

(4) 文章の生成：

- 文型テンプレートを選択する．行動結果は問題生成パネルに反映され「複数の空欄をもった文」が表示される．

- 問題生成パネル中の空欄を埋める概念，または数量を選択する．数量の選択の場合は，テン・キーの数字ボタンを用いて空欄に埋める数値を作り，同パネル中の OK ボタンで問題生成パネルに反映される．

(5) システムへの添削要求：コメントパネル上方の添削ボタンから行う．

(6) 診断結果：コメントパネルに表示される．図 11 はプロトタイプシステムの使用例で，学習者が 3.4 で示した「解法適用の負例」である「カメとイヌの足の概念を用いたツルカメ算の問題」を作成し，システムからの診断結果を受け取った状況である．

- 妥当な問題と診断された場合は，問題の解答と，評価，次課題が表示される．

- 誤りが検出された場合は，表示されるメッセージに沿って修正作業を行う．

(7) システム終了：コメントパネル上方の終了ボ

(注6)：プロトタイプシステムでは，ID やパスワードに関して情報隠蔽を施していないので，それぞれ適当な設定が望ましい．

表2 アンケートの結果
Table 2 The results of the questionnaire.

設問番号	良い	悪い	どちらともいえない
(1)	9	0	0
(2)	8	0	1
(3)	8	0	1

タンによって行う。

4.2 予備的な使用実験

家庭教師などの学習指導を経験したことのある大学生・大学院生を被験者として本プロトタイプシステムの予備的な使用実験を行った。被験者は表1に示す段階1の演習から実験を始め、教える立場からの考察をしてもらっている。アンケートは以下で行った三つの設問、(1)問題を作ることが解法定着に効果があると思うか、(2)本プロトタイプシステムが解法定着に効果があると思うか、(3)本プロトタイプシステムの使い勝手、更に、プロトタイプシステムに対する意見を述べてもらった。集計結果を表2に示す。

表2の設問(1)において、作問演習には数量構造の理解と解法の定着効果があるとすべての被験者が答えており、作問演習に一定の学習効果があると認識されていることの裏付けといえる。また、表2の設問(2)においては、本システムの解法定着効果もよい評価が得られており、本システムの目指している作問演習が有望であることを示している。しかしながら同時に、被験者からは、学習者に対して積極的な支援を提示できていない点に関していくつかの意見が得られた。例えば、システム操作や作問作業の行き詰まりに対する配慮、誤り行動に対するリアルタイムな支援、問題理解ネットワークのイメージを用いた支援、問題の難易度評価を用いた他問題との比較や位置付けの可視化などである。表2の設問(3)において、本システムの使い方や作問方法に関しての問題点はほとんど上げられていない。

プロトタイプシステム利用の感想としては、表1における難易度の第6段階目である2次問題の生成は、大学生に対しても非常に難しいことの指摘があった。ツルカメ算を解けたとしても、解法の適用条件を明確な形で把握していないことの現れだといえる。また、評価に関する意見として、問題を解く際の計算作業の手間に関する評価の追加要求があった。これは本プロトタイプシステムにおいて、入力された数値の内容が0や1といった少量の場合や計算結果に0が現れる場

合など問題解決時における手間の考慮である。この問題評価に関しても更なる分析が必要である。

以上の結果は、予備的なものではあるが、本研究及び本システムによる「数式ベースの作問」の実現に対する有用性を示唆している。この使用実験によって得られた問題点を改良し、また計算機を使い慣れない学習者にでも容易に本システムを使えるようにインタフェースの洗練等を行った上で、学習効果の検証実験を行う予定である。

5. む す び

本論文は2.において問題解決演習と作問演習との違いを明確化し、3.では作問演習支援システムの構成と、その主な三つのモジュール、作問インタフェースと文章問題診断部、個別支援部について述べた。また4.ではプロトタイプシステムについての予備的な使用実験の報告とその考察を示した。

使用実験の結果は、本システムが有望であることを示唆しているが、現在のところ、実際の学習者を対象として学習効果を上げるためには、使い勝手、行き詰まりを解消する指導などの課題が残されている。今後は本システムの完成度を高めた上で、実際の小学生を被験者とする使用実験を行い、作問に関する他分野の研究と同様の作問演習の効果分析・問題解決演習との比較実験などを行い報告する予定である。また本研究において、作問演習についての知的支援環境の基盤を用意することができたといえることより、今後は「数式ベースの作問」のみならず、他の作問形式についての検討も予定している。

文 献

- [1] E.A. Silver and J. Mamona, "Posing mathematical problems: An exploratory study," J. Research in Mathematics Education, vol.27, no.3, pp.293-309, 1996.
- [2] L.D. English, "Children's problem posing within formal and informal contexts," J. Research in Mathematics Education, vol.29, no.1, pp.83-106, 1998.
- [3] 岡本真彦, "問題解決スキーマの獲得における問題作成の効果," 日本教育心理学会第38回大会発表論文集, vol.38, 1996.
- [4] 清水静海監修, 静岡県湖西市立岡崎小学校著, 子供がつくる算数—算数的活動の楽しさ・算数のよさ, 東洋館出版社, 東京, 1999.
- [5] 中野洋二郎, 坪田耕三, 滝井章編著, 子どもが問題をつくる, 東洋館出版社, 東京, 1999.
- [6] E.A. Silver and J. Cai, "An analysis of arithmetic problem posing by middle school students,"

J. Research in Mathematics Education, vol.27, no.5, pp.521-539, 1996.

- [7] 石田一三, 井上 豊, “作問の指導について,” 日本数学会教育学会誌, vol.65, no.6, pp.109-112, 1983.
- [8] 崎谷信也, “CREAR: 生きる力をはぐむ算数授業の創造 第三巻,” 日本文教社, 1999
- [9] 平嶋 宗, 中村裕一, 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,” 人工知能誌, vol.7, no.3, pp.475-486, 1992.
- [10] A. Nakano, T. Hirashima, and A. Takeuchi, “Problem-making practice to master solution-methods in intelligent learning environment,” Proc. ICCE'99, pp.891-898, 1999.
- [11] 中野 明, 平嶋 宗, 竹内 章, “算数の文章問題を対象にした作問演習支援システムとその評価,” 情処学九州研報, pp.141-148, 1998.
- [12] 中野 明, 平嶋 宗, 竹内 章, “解法定着のための作問演習支援システムの作成,” 教育システム情報学会第24回全国大会講演論文集, pp.89-92, 1999.
- [13] 中野 明, 平嶋 宗, 竹内 章, “「問題をつくることによる学習」の支援環境の実現,” 知的教育システム研究会第27回論文集, pp.19-24, 1999.
- [14] 藤本 保, 糸井尚子, 小林順子, 算数・数学能力を育てる, サイエンス社, 東京, 1996.
- [15] 清水静海監修, 算数のよさを追求する授業—見通し・操作・一般化—, 東洋館出版社, 東京, 1989.
(平成11年10月18日受付, 12年1月11日再受付)



竹内 章 (正員)

1976 九大・工・造船卒。1978 同大学院修士課程了。九州大学工学部助手, 講師を経て, 1989 九州工業大学情報工学部助教授。現在, 同教授・工博。知的教育システム, ヒューマン・マシンインタフェースなどの研究に従事。情報処理学会, 人工知能学会, 教育システム情報学会等各会員。



中野 明

1998 九工大・情報・知能情報卒。同年同大学院入学。推論技術を応用した計算機システムの高度利用に関する研究と開発に従事。nakano@minnie.ai.kyutech.ac.jp



平嶋 宗 (正員)

1986 阪大・工・応用物理卒。1991 同大学院博士課程了。同年大阪大学産業科学研究所助手。現九州工業大学情報工学部助教授。人間を系に含んだ計算機システムの高度化に興味をもち、特に知的学習支援システム及び情報フィルタリングの研究に従事している。1993 年度人工知能学会全国大会優秀論文賞, ED-MEDIA'95 優秀論文賞, 1996 年度・1998 年度人工知能学会研究奨励賞, 人工知能学会, 情報処理学会, 教育システム情報学会, 教育工学会, IAIED, AACE 各会員。tsukasa@ai.kyutech.ac.jp