コンピュータと教育　10－5
（1990. 4. 25）

問題解決における「理解」に関する一考察
－ＩＴＳの立場から－
A Model of Understanding in Problem Solving

平島　宗　河野　隆宏　中村　祐一*　溝口　理一郎　豊田　順一
Tsukasa HIRASHIMA　Takahiro KOHNO　Yuichi NAKAMURA　Riichiro MIZOGUCHI　Jun'ichi TOYODA
大阪大学産業科学研究所 (*現在, 日本ＩＢＭ東京基礎研究所)
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
(*Currently, Tokyo Research Laboratory, IBM research)

あらまし　本稿では，人間の問題解決における理解に注目し，ＩＴＳの立場より，問題の理解と解法の理解について考察した．ここで，問題の理解とは，問題に対する解決方法を明らかにすることであり，解法の理解とは，解法をよりグレインサイズの小さな解法に分解することである．これらの理解を包括的に捉えた認知モデルとして問題解決モデルを提案し，特に，問題分割による問題解決過程と，問題解決を繰り返すことによる問題解決能力の向上を，本モデル上でどのように捉えることができるかについて重点的に述べた．

キーワード　知識工学　ＣＡＩ　知的ＣＡＩ　問題解決　理解　認知モデル

１．まえがき

問題解決能力の向上を目的としたＩＴＳを高度化するためには，問題解決過程に対する認知的観点からの考察が不可欠となる[1][2]．従来提案されている問題解決過程の認知モデルの多くは，学生の問題解決の行き詰まりを知識の不足，あるいは誤りとして捉えたものであった[3][4][5]．しかしながら，必要な知識を持っているにもかかわらず，その知識を適用できずに問題解決に行き詰まるといったことが，実際の学生の問題解決には多くみられる．著者等は，このような問題解決の行き詰まりを捉えることを目的として，問題解決過程の認知モデルとそれに基づくＩＴＳについての研究を行っている[6][7]．本稿では，人間の問題解決における問題の理解と解法の理解についてＩＴＳの立場より注目し，次の三つのトピックに重点をおいて考察する．

（１）人間の問題解決過程は，問題理解過程と解法実行過程の二つの過程が再帰的に表れる複合的な過程として捉えることができる．

（２）問題解決過程におけるリソースの存在を仮定することにより，人間の問題解決操作持続能力の有限性を説明することができる．

（３）人間の問題解決能力の向上は知識の獲得としてだけでなく，知識の用い方の習熟による知識の定着としても捉えるべきである．

これらの考察に基づき，問題理解を中心として問題解決過程を捉えた，問題解決モデルを提案する．また，問題解決過程における問題分割と，問題解決を繰り返すことによる問題解決能力の向上を表す解法の定着を，本モデル上でどのように捉えることができるかについても述べる．

本稿では，問題解決における問題理解の重要性が大きく，本モデルの有用性を示しやすい，ツルカメ算等の算数の文章題を例題として用いる．

２．ＩＴＳにおける理解

理解を明示的に取り扱う能力をＩＴＳに対して付加することができれば，ＩＴＳによる教育をより高度なものとすることができる．そのためには，理解を定義する必要があるが，理解とは何かを一般的に定義することは困難である．本章では，ＩＴＳの観点より問題解決能力の向上に貢献する理解とは何かについて考察し，定義付けを試みる．

人間が問題解決能力を身につけるためには，まず解法を獲得し，さらに，その解法を用いて問題解決を繰り返すことによりその解法の用い方に習熟しなければならない．理解を既知の知識との関係付けとして捉えると，問題と解法を関係づけることにより，問題の解決方法を明らかにする理解と，解法の正当性を説明するためにその解法を浅い知識と捉えて，より深い知識

との関係づけを行う理解の二つが問題解決能力の向上に重要な役割を果たしていると考えられる．本稿では，前者の理解を問題理解と呼び，後者の理解を解法理解と呼ぶ．

問題理解では，問題の解決方法が明らかになった時点で理解したということができるが，このときどのようなグレインザイズ[1]の解法を用いて問題を理解したかによってその理解の様子が変わってくる．最も大きなサイズの解法による問題理解は，それ一つで問題の解決方法を表すような解法を用いた理解であり，問題全体の類型化とその類型を用いた解法の同定として捉えることができる．たとえば，ツルカメ算の問題をツルカメ算の解法に関係づけることによる問題理解がその例として考えられる．

また，関係づける解法のサイズが小さくなるにつれて，問題理解のために多くの解法を問題と関係づけることが必要となる．このような場合には，問題の部分ごとの類型化とそれぞれに対する解法の同定が必要となり，問題理解における問題分割と捉えることができる．たとえば，ツルカメ算の問題をツルカメ算の解法ではなく，よりサイズの小さな複数の解法と関係づけることによる問題理解がその例となる．このような問題理解は，サイズの大きな解法を用いた理解に比べて，より深い理解とみなすことができる．しかしながら，両者の相違は相対的なものであり，問題理解に関する一つの枠組みで統一的に扱うことができる．

一方，解法をより深い知識と関係づける解法理解も，理解の一つの側面を表している．ツルカメ算の解法を浅い知識と捉えると，ツルカメ算の問題をよりサイズの小さな解法を用いて問題理解することができることから分かるように，サイズの大きな解法は，サイズの小さな解法を複数用いた場合の解決方法をコンパイルしたものであるとみなすことができる．したがって，解法理解は，解法の逆コンパイル[8]として捉えることができる．解法理解の場合も関係づける深い知識のサイズによってその理解の深さは異なってくるが，それらもやはり相対的なものであり，一つの枠組みにおいて解法理解を扱うことができると考えられる．

問題理解と解法理解はいずれも本研究の中心課題であり，それぞれのモデル化について以下で詳述する．

3．人間の問題解決過程に対する考察

本章では，必要な知識を持っているにもかかわらず発生する問題解決の行き詰まりを明らかにすることを目的として，それらの原因を示唆していると思われる3つのトピック，（1）問題理解と解法実行，（2）リソースとフォーカス，（3）知識の定着，について考察する．

3．1　問題理解と解法実行

人間の問題解決過程において用いられる問題解決操作には，問題との関連において操作が持つ意味を考慮したものと，それを考慮する必要のないものが存在する．本稿では，前者を（1）意味的操作，後者を（2）形式的操作，と呼ぶ．形式的操作の例としては，方程式の解を導くときの操作や，ツルカメ算の解法等の算数の文章題を解くための解法を実行し，答えとなる値を導く際の操作などが挙げられる．文章題より立式された方程式を解く過程で行われる問題解決操作は，方程式が問題の持つどのような関係を表現したものであるかに無関係な操作である．また，ツルカメ算の解法においても，解法を実行するために必要なインスタンシエイトを行ってしまえば，どのような意味を持つ演算を行っているかに関係なく実行可能である．本稿では，解法の実体を形式的操作のシーケンスや形式的操作の集合体として定義し，このような形式的操作が行われる過程を解法実行過程と呼ぶ．

これに対して，意味的操作は問題を構造化する操作として捉えることができる．たとえば，問題に明示された関係にしたがって問題構造を生成する操作や，問題構造が暗黙的に含んでいる関係や値を領域に関する知識を用いて直接求めたり，問題構造の部分あるいは全部に対して解法を実行することによって求める操作が意味的操作である．意味的操作は，問題を構造化し解法と関係づけるために行われる操作であり，本稿ではこのような操作が行われる過程を問題理解過程とする．また，問題解決における問題分割は，解法を適用することを目的として，問題構造の部分に対して解法を適用し問題構造を洗練することであると捉えることができる．したがって，問題解決過程は，問題理解過程と解法実行過程が再帰的に現れる複合的な過程として表現することができる．このことは4．2において再び論じる．

方程式を用いて文章題を解く場合であれば，問題を構造化し方程式を立式するために十分な関係を生成するまでが問題理解過程である．また，ツルカメ算の問題を解く場合であれば，問題を構造化し，ツルカメ算の解法を適用するために十分な構造を持っていることを明らかにするまでを問題理解の過程として捉えることができる．ここで，ツルカメ算の解法が適用可能な問題構造を生成するために，問題構造の部分に対して

解法を適用するといった場合が考えられるが，その問題構造の部分を副問題として捉えると，問題分割による問題理解の事例とみなすことができる．

問題理解過程をより形式的に捉えると，問題理解過程において生成される問題構造は，解法を選択するためのインデックスとしての働きを持つと捉えることができる．したがって，解法選択のためのインデックスを問題より生成する過程として，問題理解過程を定式化することができる．そして，解法をその実体である形式的操作と適用の条件を表わすインデックスより構成されるものとして表現することができる．ここで，解法の検索過程におけるインデックスの照合および解法のインスタンシエイト（たとえば，方程式と等価な関係より実際に方程式を作ったり，解法の計算式に具体的な数値を割り当てたりすること）は単純なパターンマッチングであると考えることができる．このように考えると，問題解決過程は，問題理解過程におけるインデックスの生成と解法実行過程における解法の実行としてモデル化することができる．

3．2　リソース

人間の問題解決において解を導くために十分な知識を持っているにもかかわらず，問題解決が途中で行き詰まってしまうことがある．これに対して，計算機では十分な知識（規則，ルール等）があれば解は必ず導き出される．この差は，人間の問題解決の行き詰まりの原因として，知識の有無以外の要素が存在することを示している．本稿では，このような困難さを説明するために，人間の問題解決においては，問題解決操作を持続するために必要となる有限な資源（以下ではリソースと呼ぶ）が存在し，問題解決操作を行うことによってそれが消費されると仮定する．このように仮定することにより，リソースが消費され尽くしている場合には必要な知識を持っていてもそれを用いることができず，問題解決が行き詰まってしまうと説明できる．

3．3　知識の定着

人間の問題解決能力の向上には，知識量の増加だけではなく，問題解決の繰り返しを通した知識の用い方の習熟が大きな役割を果たしている．本稿では，知識の用い方の習熟を知識の定着と呼び，（1）適用条件の洗練，（2）グレインサイズの拡大，（3）知識の理解，の三つの観点より捉える．

適用条件の洗練は，一般化による知識の適用範囲の拡大と，特殊化による知識選択の際のリソース消費の削減が考えられる．また，知識のグレインサイズを拡大することにより，リソースをあまり消費しない問題解決が実現できる．これは，単に問題解決の高速化を意味するだけでなく，それまでリソースの不足により解けなかった問題の解決が可能となることを意味する．知識の理解は，2．で述べたように，知識を逆コンパイルしてより深い知識を関係づけることと捉えることができる．知識に対する理解が十分であれば，その知識が適用できるかどうか判定できない場合でも，深い知識を用いたその知識の説明に基づいて適用可能性を判定できる．また，その知識をはっきりを思い出せない場合でも，より深い知識を用いて再構成することが可能となる．

4．3では，解法の定着について問題解決モデルに基づいてより詳細に論じる．

4．問題解決のモデル化

人間の問題解決における問題理解と解法理解を包括的に捉えた問題解決モデルについて述べる．問題理解過程の詳細については，既に別稿において述べた[6][7]．本稿では問題分割と解法の定着を本モデル上でどのように表現することができるかについて重点的に述べる．

4．1　モデルの枠組み

本モデルでは，問題理解過程で生成される問題構造をネットワーク表現し，問題理解ネットワークと呼ぶ．解法はこの問題理解ネットワークをインデックスとして検索されるとし，そのとき用いられる解法側のインデックスを解法インデックスと呼ぶ．そして，問題理解過程で問題理解ネットワークに加えられる操作を全て問題理解操作と呼ぶ．ここで，問題理解ネットワークは学生がどのように問題を理解しているかを表現し，解法インデックスは解法がどのような状況において利用できると考えられているかを表す．解法の適用条件は，抽象度の異なる解法インデックスの階層構造として表現できる．また，問題理解操作には，概念を抽象化する操作やネットワークの基本構成単位である基本関係を付加する操作等がある．基本関係を付加する操作には，領域に関する知識を用いて直接基本関係を付加する基本関係付加操作と，問題理解ネットワークの部分に対して解法を適用することによって基本関係を生成，付加する基本関係生成操作がある．このような枠組みにしたがって，問題から適切な解法の解法インデックスを満たすような問題理解ネットワークを，問題理解操作を用いて生成する過程として問題理解過程

をモデル化する．

従来の問題解決過程のモデルでは知識の不足と誤りのみを取り扱っており，知識を持っているにもかかわらずそれを用いることができないといった状態を捉えることができなかった．これは，知識が問題に対して適用可能であると気付く過程，Prologを用いた知識表現を例にとれば節のユニフィケーションの過程，についてのモデル化がなされていないためである．本稿で論じる問題理解過程のモデルは，この知識検索の過程をモデル化したものであり，知識を持っているにもかかわらずそれを用いることができないといった状態を，適切な問題理解ネットワークを生成できない状態，あるいは適切な解法インデックスを持っていない状態として捉えることができる．

4．2　問題分割のモデル

本モデルでは，問題解決過程における問題分割を，問題理解ネットワークの一部に対する解法の適用と，その結果を用いた問題理解ネットワークの洗練として表現することができる．したがって，本モデルでは，問題分割を問題理解過程の一部として取り扱うことができる．より具体的には，基本関係の生成操作は，副問題の生成と解法の適用といった問題分割による問題理解を行う操作である．

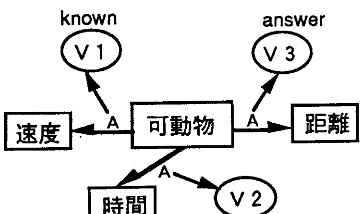
以下では，まず解法をプリミティブな解法とそうでない解法に分類し，その分類に基づいて問題分割の類型化を行う．

4．2．1　公式解法とマクロ解法

一般に解法は，よりサイズの小さな解法に分解することができる．解法のサイズをこのように相対的なものとして捉えた場合，プリミティブな解法を設定することが必要となる．プリミティブな解法はそれ以上分解できない，あるいは分解する価値を持たない解法として，それ以外の解法と区別して考えることができる．本モデルにおいては，プリミティブな解法を公式解法と呼び，それ以外の解法をマクロ解法と呼ぶ．以下，公式解法とマクロ解法について考察する．

解法には，解法インデックスと形式的操作の関係が自明であり，その解法の解法インデックスを満たす問題に対してその形式的操作を実行することが，一般的な法則として捉えることができるものがある．これとは反対に，解法インデックスと形式的操作の関係が不透明であり，その解法インデックスを満たす問題に対してその形式的操作を実行することが，どのような法則に従うものであるかが分かりにくくなっているものもある．たとえば，速度と時間より移動距離を求めるために用いられる解法は，図1のような解法インデックスと形式的操作により構成されるが，この解法における解法インデックスと形式的解法の関係は，算数の文章題の問題演習を行うような教育レベルにおいては自明であり，一般的な法則に従って演算操作を行う解法として捉えることができる．これに対して，図2のようなツルカメ算の解法では，解法インデックスと形式的操作の関係が，どのような法則に従っているか分かりにくくなっている．

従っている法則が自明であると意識されているような解法については，多くの場合，特に問題解決の場面においてはそれ以上分解することの教育的必要性は小

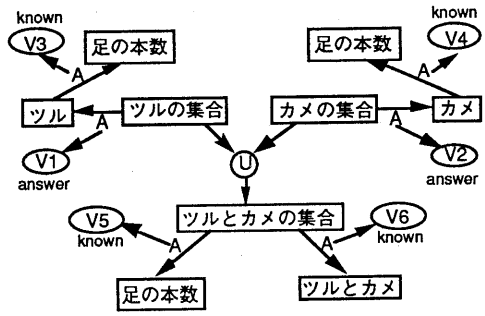


(a) 解法インデックス

V３＝V１×V２

(b) 形式的操作

図1　公式解法



(a) 解法インデックス

V6 × V3 = X
| V5 − X | = Y
| V4 − V3 | = Z
Y ÷ Z = V2
V6 − V2 = V1

(b) 形式的操作

図2　マクロ解法

さいので，そのような解法を公式解法とする．しかしながら，公式解法を一般的に設定することは困難である．なぜならば，法則が自明であるかどうかは，個人や問題領域あるいは教育目標によって異なってくると考えられるし，また，自明と思うことが適当であるかどうかも教育の場面によって違ってくる．したがって，システムを構築する際に教育的観点から設定する必要がある．本稿では，ツルカメ算の解法などの算数の文章題に対する解法を定着させることを目的として，算数の文章題の問題演習を行う教育の場面を想定した公式解法の設定を行っている．

公式解法とマクロ解法は同一の形式で表現することが可能であり，それらを用いた問題解決過程を形式的に記述すれば全く同様であると考えられる．しかしながら，解法インデックスと形式的操作の対応関係の理解が容易な公式解法を用いて問題解決を行った場合と，解法インデックスと形式的操作の関係が明らかでないマクロ解法を用いて問題解決を行った場合とでは，直観的には異なったものとして捉えられると考えられる．このような観点より，次節では公式解法とマクロ解法を区別して取り扱い，問題分割の類型化を行う．解法のサイズについては，４．３．２において詳細に論じる．

４．２．２　問題分割の類型化

前述のマクロ解法と公式解法の分類に基づいて，問題分割による問題解決を類型化すると，次の４つのパターンが考えられる．

（１）マクロ解法による副問題の生成 →
　　副問題に対する公式解法の適用

（２）マクロ解法による副問題の生成 →
　　副問題に対するマクロ解法の適用

（３）公式解法による副問題の生成 →
　　副問題に対するマクロ解法の適用

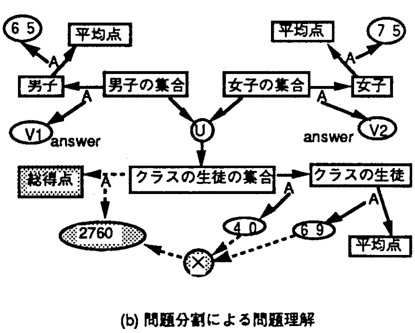
（４）公式解法による副問題の生成 →
　　副問題に対する公式解法の適用

パターン１の例としては，図３(a)に示した平均点の問題をツルカメ算のマクロ解法を用いて解決する場合が考えられる．図３(b)の実線部分が図３(a)の問題に対する初期問題理解ネットワークとなっている．ツルカメ算の解法を用いて解を導くためには，総得点に関する基本関係を問題理解ネットワーク対して付加する必要がある．したがって，総得点を求めることが副問題として生成される．この副問題は，［総得点］＝［人数］×［平均点］の法則に従う公式解法を用いて解決することができ，図３(b)の破線部分のように基本関係を生成，付加することができる．

パターン２の問題分割が行われる例としては，図４(a)の問題を過不足算の解法とツルカメ算の解法を用いて解く場合が考えられる．この問題の初期問題理解ネットワークは，図４(b)の実線部分として表現することが

A組の人数は40人で,テストの平均点が69点でした.
男子の平均点は65点,女子の平均点は75点になりました。
男女それぞれの人数は何人ですか.

(a) パターン１の問題例

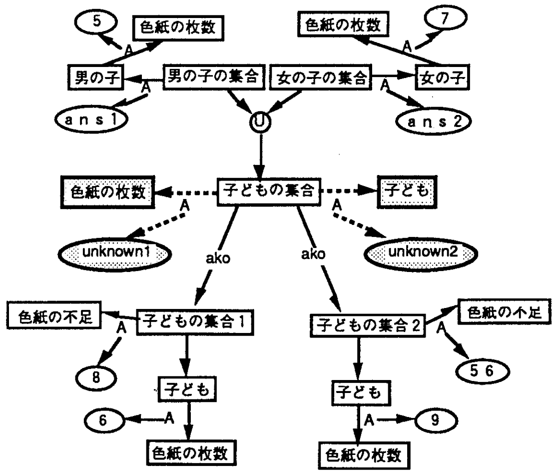


(b) 問題分割による問題理解

図3　問題分割による問題理解(1)

色紙を一人に６枚ずつ分けると８枚不足し、一人に９枚ずつ分けると５６枚不足します。この色紙を男の子に５枚、女の子に７枚配るとちょうど配りきることができました。男の子は何人いますか？　女の子は何人いますか？

(a) パターン２の問題例



(b) 初期問題理解ネットワーク

図4　問題分割による問題理解(2)

ある船がＡ港から運河を通ってＲ川に入り、川の下流のＢ港まで行きました。全行程４７ｋｍで５時間かかりました。この船はＲ川を４０ｋｍ上るのに５時間、下るのに４時間かかります。運河は静水であるとして、運河の距離を求めなさい。

図5　パターン3の問題例

ある仕事を４人で５日間したら１８万円もらえました。同じ仕事を２人で１５日すると、全部でいくらもらえるでしょう？

図6　パターン4の問題例

できる．ツルカメ算の解法を用いて問題に対する解を求めるためには，子どもの人数に関する基本関係と色紙の総枚数に関する基本関係を付加する必要がある（図4(b)の破線部分）．これらの基本関係を付加するためには，人数と枚数の値を求めなければならない．これらの値は過不足算の解法を用いることにより求めることができる．したがって，この問題解決は，ツルカメ算の解法を適用するために人数と色紙の枚数を求める副問題を生成し，それらの副問題を過不足算の解法を用いて解決するといった，マクロ解法による問題分割とマクロ解法による副問題の解決の例となっている．

パターン３の問題分割が行われる例としては，図５の問題を時間と速度から移動距離を求める公式解法と流水算，およびツルカメ算のマクロ解法を用いて解く場合が考えられる．この問題は，運河の距離を求めているので，船の静水での速度と船が運河を通過するためにかかった時間が明らかになれば，公式解法を用いて求めることができる．船の静水での速度は，流水算の解法により導くことができる．また，船が運河を通過するためにかかった時間は，ツルカメ算の解法を用いて導くことができる．このとき，ツルカメ算の解法を用いるためには船の静水での速度が明らかになっている必要があるので，初期問題理解ネットワークを流水算の解法により洗練することによって初めてツルカメ算の解法が適用可能となる．

図６の問題をパターン４の問題分割だけで解決すると，その問題解決過程は次のようになる．まず，いくらもらえるかは，［もらえる金額］＝［一日一人あたりの金額］×［のべ日数］の公式解法を用いることにより求めることができる．一日一人あたりの金額とのべ日数が分かっていないので，これらを求めることが副問題となる．一日一人あたりの金額は，［一日一人あたりの金額］＝［もらった金額］÷［のべ日数］の公式解法を用いることにより求めることができるし，のべ日数は，［のべ日数］＝［人数］×［日数］の公式解法を用いて求めることができる．

このような公式解法のみによる問題解決過程をコンパイルすることにより，図７のような解法インデックスと形式的操作で構成される，のべ算のマクロ解法を生成することができる．一般に，マクロ解法はこのように公式解法を用いた問題分割による問題解決をコンパイルしたものとして捉えることができる．

４．３　解法定着のモデル

知識の定着が，（１）適用条件の洗練，（２）解法のグレインサイズの拡大，（３）解法の理解，の三つとして捉えることができることは，既に３．３において述べた．ここでは，本問題解決モデルに基づく解法定着のモデル化について述べる．適用条件の洗練は解法インデックスの階層構造の拡大，洗練として表現できる．また，解法のグレインサイズの拡大は，よりサイズの小さな解法を用いた問題解決過程のコンパイルとして表現することができる．解法の理解は，解法のグレインサイズの拡大とは逆に，サイズの大きな解法をよりサイズの小さな解法を用いた問題解決過程に分解できることであり，これを逆コンパイルと呼ぶ．

４．３．１　適用条件の洗練

解法インデックスの抽象度の高さと問題理解のために消費されるリソースの量は，トレード・オフの関係にある．抽象度の高い解法インデックスは解法に汎用性を持たせるために重要であるが，これを用いて解法を選択する場合には，問題理解ネットワークと解法インデックスを関係付けるために多くの問題理解操作が必要であり，多くのリソースが消費される．

逆に，抽象度の低い解法インデックスは，それを用いて解法を選択する場合には，問題理解ネットワークを解法インデックスと関係づけるために必要な問題理解操作が少なくてすみ，リソースを消費しない．しかしながら，その解法インデックスを利用できる問題の範囲は狭く，解法に汎用性を持たせることはできない．

このようなことから，解法の用い方に習熟するためには，必要に応じて抽象度の異なる複数の解法インデックスを持つ必要があると考えられる．つまり，抽象度の高い解法インデックスだけでなく，重要問題や頻出問題等については抽象度の低い解法インデックスを持っていることが解法をうまく用いるために不可欠となる．

一つの解法に関する複数の解法インデックスは，それぞれを構成している概念の抽象度の違いにより階層的に表現することができ，この階層構造全体が解法の

適用条件を表している．適用条件の洗練による解法の定着は，この階層構造の拡大，洗練として表現することができる．

4．3．2　解法のグレインサイズの拡大

3．3で述べたように，グレインサイズの大きな解法は，問題解決能力の向上のために不可欠である．たとえば，4．2で取り上げた図4や図5の問題を公式解法のみを用いて解くことは非常に困難であると考えられるが，ツルカメ算や過不足算といったサイズの大きなマクロ解法を用いて解けば，高速かつリソースをあまり消費せずに解を導くことができる．

しかしながら，サイズの大きな解法の汎用性はサイズの小さな解法に比べて低いものとなる．したがって，解法の適当なサイズは，問題領域や学習進度に依存して決定されるものであり，一般的に決定することは困難であると考えられる．たとえば，扱う問題が比較的大きく，しかもバリエーションが少ないといった場合には，サイズの大きな解法が有効であり，また，多くのバリエーションが考えられる場合には，サイズの小さな解法が適している．本稿で例として用いたツルカメ算等の算数の文章題に対するマクロ解法は，領域の性質に即したサイズの解法となっていると考えられる．

したがって，問題解決を支援するＩＴＳを構築する際には，問題領域，教育目標，学習進度等を考慮して学生に対して獲得させる解法のサイズを設定することが不可欠となる．しかしながら，本質的には解法のサイズは相対的なものであり，本モデルにおいてもサイズの異なる解法を全く同一の枠組みにおいて捉えることができる．

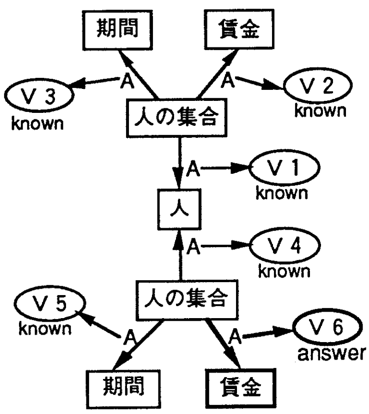


図7　のべ算のマクロ解法

4．3．3　解法の理解

ここでは，解法理解の典型的な例として，ツルカメ算の解法等のマクロな解法を，公式解法を用いて理解する場合について述べる．マクロ解法中の形式的操作と公式解法を関連づけるために，まず，形式的操作の扱う数値に対して意味付けを行う．形式的操作には，意味付けすることによってそのまま公式解法と関連づけることができるものと，何らかの解釈を加える必要があるものがある．

たとえば，図6の問題に対して適用できる，のべ算のマクロ解法の解法インデックスと形式的操作は図7のように記述することができるが，この形式的操作は，容易に公式解法と関係づけることができる．

これに対して，ツルカメ算の解法の形式的操作は，そのままでは公式解法と関連づけることが困難である．たとえば，図1の形式的操作の最初の操作に対して意味付けを試みると，

（ツルとカメの総匹数）×（ツルの足の本数）＝X

となり，Xに対して意味付けできるような公式解法は存在しない．このとき，［ツルとカメの総匹数］を［全てツルと思ったときのツルの総匹数］と解釈すると，

（動物の匹数）×（体の一部の数量）＝（体の一部の総数量）

の公式解法と関連づけることができ，Xは［全てツルと思ったときの足の総本数］と意味づけることができる．

このように逆コンパイルを行うために特殊な解釈が必要な場合には，図表等と対応づけて，加えられた解釈の妥当性を説明することが有効であると考えられる．たとえば，ツルカメ算の場合であれば，表を用いて解を導く方法と公式解法による解決過程を対応づけて説明することができる．解釈の方法や図表との対応づけの方法を一般的に示すことは困難であるが，それらの方法を数え上げることは可能と考えられる．この数え上げと数え上げられた方法を用いた解法理解支援システムの開発は今後の課題の一つである．

5．まとめ

本稿では，人間の問題解決における問題の理解と解法の理解を包括的に捉えた問題解決モデルについて述

べた．本モデルは，（１）問題理解と解法実行の複合的な過程としての問題解決過程のモデル化，（２）リソースの概念の導入による問題解決操作持続能力の有限性の説明，（３）問題解決の経験の蓄積による解法知識の定着のモデル化，さらに（４）必要な知識を持っているにもかかわらず発生する問題解決の行き詰まりの説明等，ＩＴＳにおける重要な問題を統一的に扱うことのできるモデルとなっている．

本モデルでは，問題理解過程を解法選択のためのインデックスを問題より生成する過程と捉え，さらに解法実行過程を選択された解法を実行する過程として捉えることにより問題解決過程のモデル化を行っている．また，本モデルではインデックスの生成を問題の構造化として捉えており，問題理解操作は問題の構造化を行う意味的な操作であり，解法実行操作は問題の持つ意味を考慮しない形式的な操作であるとしている．さらに，問題分割による問題解決は，問題構造の洗練を目的とした，問題の部分構造に対する問題理解操作および解法実行操作の適用としてモデル化されている．

解法は，解法側のインデックスである解法インデックスと，解法が選択されたときに実行する形式的操作により表現されている．また，従っている一般的な法則が自明であり，解法インデックスと形式的操作の関係が直観的に明らかな解法を公式解法と呼び，解法のプリミティブとした．さらに，公式解法よりグレインサイズの大きな解法をすべてマクロ解法とし，よりグレインサイズの小さな複数の解法を用いた問題解決過程をコンパイルしたものであるとした．本モデルでは，解法をグレインサイズにかかわらず全く同様に表現し取り扱うことが可能であるが，解法のプリミティブおよびグレインサイズは教育的観点から重要であり，対象領域，教育目標あるいは学習進度等を考慮して設定する必要がある．

本モデルでは解法の定着を，（１）適用条件の洗練，（２）グレインサイズの拡大，（３）解法の理解，の三つの観点から捉えた．適用条件の洗練は，解法インデックスの階層構造の拡大，洗練として表現されており，グレインサイズの拡大は問題解決過程のコンパイルとして，また解法の理解は逆コンパイルとして表現されている．問題解決能力の向上は，解法の獲得に加えて，これらの解法の定着が大きな役割を果たしており，理解の意味を広くとると，解法を獲得したり，適用条件を洗練したり，あるいは適切なグレインサイズにコンパイルしたりすることもすべて理解と捉えることができる．したがって，解法の獲得と解法の定着を合わせて広義の解法理解とすることができ，さらに逆コンパイルによる解法理解は，狭義の解法理解と考えることができる．

このように，本稿で提案したモデルは，問題解決過程および解法の定着を記述するための枠組みを提供している．しかしながら，人間の問題解決や解法の定着過程等のトレースについては考察が不十分である．今後は，本枠組みに基づく問題解決に関する記述を用いたＩＴＳの実現と，ＩＴＳをさらに高度なものとなるためにどの程度のトレース能力を持つ必要があるかについての考察を行わなければならない．

参考文献

[1] Wenger, E.: “Artificial Intelligence and Tutoring Systems", Morgan Kaufmann Pub. Inc.(1987).

[2] 平島他：“認知的考察に基づく知的ＣＡＩのための学生モデルの生成法：プロセス駆動型モデル推論法”，信学論(D-II), J73-D-II, 3, pp.408-417(1990).

[3] 池田他：“学生モデル記述言語ＳＭＤＬと学生モデルの帰納推論アルゴリズムＳＭＩＳ", 信学論(D-II)，J72-D-II, 1, pp.112-120(1989).

[4] 竹内他：“摂動法による学習者モデル形成と教授知識について", 情処学論，28, 1, pp.54-63(1987).

[5] 岡本：“知的ＣＡＩのための教授世界知識の表現とその推論方法", 信学論(D), J70-D, 12, pp.2658-2667(1987).

[6] 平島他：“ＩＴＳを指向した認知モデルと教育戦略”，情報処理学会「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，pp.55-64(1989).

[7] 平島他：“問題理解モデルの実現とＩＴＳへの応用ー問題解説と問題生成ー”，人工知能学会研究会資料，SIG-KBS-8905-7, pp.49-56(1990).

[8] Clancy, W.J.: “From GUIDON to NEOMYCIN and HERACLES in Twenty Short Lessons: ONR Final Report 1979-1985", AI Magazine, Vol.7, No.3, pp.40-60(1986).