

学習者モデルの利用について

大槻説乎 竹内 章
九州工業大学

知的教育システムで研究されている2種の代表的な指導方法—マイクロワールドとITS—を一つのシステムの中で相補的に用いる方法を提案する。マイクロワールドのモデル操作による発見的学習支援とITSの反復練習によるチャンク化支援は、システムと人間という二つの独立な系の振る舞いである教授と学習を、協調的に機能させることを示す。また、2つの指導法略が共存によって、学習者の主体的な学習を助長しながら、学習者を本質的な理解に導くこと、およびマイクロワールドで生成した学習者モデルが、知識の一般化のレベルと意味理解の深さを表現し、ITSで生成した学習者モデルが表現する学習者の誤り原因の治療に、重要な役割を果たすことを示す。

A STUDY ON A USE OF STUDENT MODEL

Setsuko OTSUKI and Akira TAKEUCHI

This paper proposes an idea to integrate two typical methods in intelligent computer based education systems, Micro-World and ITS, into one system complementarily. The paper shows that discovery learning by model manipulation in a micro-world and a chunking support by practice in a ITS are able to make two independent systems - a computer and a student - cooperate to achieve their individual aims - to learning voluntarily and to assist learning. It also shows that two student models constructed in the micro-world and the ITS play important roles in remedying student's serious errors.

1 はじめに

IISで未解決のまま残されている最大の課題は教授と認知の相互作用にかかわる問題であろう。学習者に深い理解を得させるための教授法の構成はIISの究極の目標であり、教材知識の獲得やその表現、誤り原因の同定、学習者モデルの構築などの研究は、この目標を実現するための手段であるといえることができる。この問題は、現在2つの異なった方法論によって研究されている。一つはIISの立場からの研究であり、もう一つはいわゆるマイクロワールドに代表される試行錯誤的操作に基づく発見的な学習を支援する研究である。¹⁾

²⁾ 本論文では、上記の二つの方法が一つのシステムの中で整合的に働いて、初めて学習者の理解を深めることができる、という立場から教授と認知の問題を考察する。

人工知能研究で開発された技術を教育システムに応用する試みは、既に豊富な経験を持っており、IISにおける方法論の一つとして定着している。一方、学習者に深い理解を得させるという教授法の目的は、人工知能の分野で研究されている学習機能とは次の二つの面で大きなギャップがある。第1に、人工知能の研究が現在到達しているマシンラーニングの成果は、IISが対象にしている人間の持つ学習能力のほんの一部を実現しているに過ぎない。特に現在の人工知能技術は、問題解決が公理に基づいて正しいか否かを証明することができ、さらに問題解決の事例から公理を導くこともできるが、なぜその公理が成立するかという、理解の本質にかかわる公理の意味を発見するには不十分である。一方、IISにおける学習の目的は、問題解決の方法を修得するだけではなく、なぜその規則を用いたか、なぜその規則が成立したかということも含めて、学習者が理解することである。第2に、マシンラーニングの目的は正しい知識を能率的に同化することであり、知識の提示方法に特別の制限はない。一方IISにおける人間の学習過程は、学習者の主体的学習意欲を助長し、創造的発見能力を醸成するものでなければならない。このような人工知能の技術では検証できない部分を補う方法を提起することも本論文のテーマである。

人間の認知過程すなわち人間がメンタルモデルをどのように獲得し、利用しているかをテーマにした研究は既にいくつか発表されている。^{3)、4)} しかしこれらの論文では、メンタルモデルの構成過程を、教授行為と学習行為との協調過程として捕えているわけではなく、むしろ自立的な学習行為の結果として捕えている。これにたいして、われわれは、自立的認知過程に基づく学習よりも、教授と認知の協調に基づく学習が、本質を理解しているか、単に暗記しているかを区別することができるので、適切な指導方法を実現することができると考えている。

本論文では上記の観点から、初等数学における認知過程と教授過程との協調を実現するためのモデルの構成と利用について報告する。2章では人間の認知過程と問題の難しさに関する考察をおこない、いくつかの例を提示する。この例に基づいて、人間がどのように例題をモデル化し、一般化していくかという知識獲得過程を考察する。3章では、新しい概念を同化するときに、人間が感じる難しさの個人差について検討し、人間の全般的理解度、人間の間違いやささ、知識の理解状態、学習意欲などによって学習者の状態を表現し、教授と認知の相互作用に対するモデルを提示する。4章では教育で実際に用いられている種々の教授パラダイムが上記のモデルのどのような状況の下で有効に機能するかを考察し、教授と学習の接点、すなわちいつ、どのような形でシステムは学習に介入すべきかに関する提案を行なう。最後に、5章で、全体の総括を行い、残された問題点について検討する。

2 例題に基づく人間の認知過程

2.1 学習対象の難易に関する考察

取り上げようとする話題が難しすぎるか、易すぎるか、適当であるかということは教授行為の重要な情報である。

子供が学校で学習するときに感じる難しさは、学習対象そのものの持つ性質に基づく部分（以後、絶対的難易度と呼ぶ）と個人の属性に基づく部分がある。ここでは前者について、3章では後者を含めて考察する。

子供が初等数学で遭遇する新しい知識は次の三種に分けることが出来る。第1は、数量に伴う属性や数量間の関係に関する新しい概念である。第2は、子供が初めて出会う新しい表記法であり、第3は、既知の概念や表記法を用いた、問題解決のための新しい手続きである。

子供が学習するとき、最も難しいのは、新しい概念が、初めて出会う新しい表記法を伴う場合であると言われている。例えば、数の概念として、単なる数え上げによって、個体の数を数える知識を身に付けた子供が、10進数の概念と表記を同時に学習する場合である。99の中に9がいくつ含まれているかという問題は、数値を数字列と混同するために、この段階の子供が非常に間違いやすいと言う事実は広く知られている。この他、分数、負数、微分、虚数等の概念の導入も新しい表記法を伴うので、概念構成の難しい課題である。

新しい表記を伴う概念の意味を理解することが出来たら、次に、既に理解している種々の演算操作等の既知概念を、新しい概念の意味に整合するように拡張することが必要になる。例えば、負数の意味を理解した子供は、既に理解している自然数に対する大小関係や四則演算の概念を負数にも矛盾しないように拡張しなければならない。このように、既知の関係概念や演算操作を新しい表記を伴う概念に適用できるように拡張することは、新しい表記を伴う概念の導入に次いで難しい課題であると思われる。

新しい表記を伴う場合を除けば、新しい概念の導入は、整数係数の方程式を有理数に拡張する場合のように、既知の概念の間の自然な拡張によって理解できるので、概念構成は比較的容易であるといえる。

新しい表記を導入する場合も、そこで用いる概念が既知の場合は、容易に同化できるであろう。例えば、数の数え上げの経験によって、既に10進数が内包する再起性に気付いている子供は、容易に10進表記を理解することができる。集合の概念や集合演算についても同じことが言える。このことは、表記を含む新しい概念を導入する際の知識の提示順序についての重要な示唆を与える。

学習する対象が新しい概念や表記の導入ではなく、

既知の概念や表記を用いた問題解決の手続きである場合は、解法（アルゴリズム）の発見、選択、洗練、一般化等の、上記とは異質の難しさを伴う。次章では新しい表記を伴う概念の導入の例として、分数の計算を取り上げ、新しい手続きを発見する例として、鶴亀算を取り上げる。

1	足して10になる数を見つける。例えば $10 = 5 + 5$
2	次に鶴5匹の足の数と亀5匹の足の数を足して、 30本を出す。 $2 \times 5 + 4 \times 5 = 30$
3	30本を26本と比べると、足の数が4本多すぎることがわかる。 $30 - 24 = 4$
4	頭数を変えずに足の数を減らすためには亀を減して、同じ数の鶴と入れ替えればよい。
5	1匹入れ替えると足の数は2本減る。
6	足の数を4本減らせるためには亀を2匹だけ鶴に入れ替えればよい。
7	鶴の数は $5 + 2 = 7$ となり、 亀の数は $5 - 2 = 3$ となる。

図1-A 鶴亀算の最初のモデル

2. 2 人間の認知過程と操作環境

2. 2. 1 解法発見の例

A 鶴亀算の最初のモデル化

問題： 鶴と亀と合わせて10匹います。足の数は全部で26本です。鶴と亀はそれぞれ何匹いるでしょう。

前提1：鶴と亀の足の数も含めて、学習者は文章の意

味を理解している。

前提2：自然数の四則演算も理解している。上記の問題を解くときの最も一般的な子供の考え方には、頭数10匹に注目して解き初める場合と、足の数26本に注目して解き初める場合がある。しかし一般に知られている鶴亀算の解法を最初から思い付く子供は少ないであろう。

10匹に注目して解き初めた子供の考えを辿ると図1のようになる。この問題解決の方法は、4で行き詰まる場合が非常に多い。行き詰まった場合には自由に操作できる鶴と亀の模型を画面に用意して、自分のウィンドウに必要なだけコピーして、思考錯誤を助ける操作ができる環境を設定すると、行き詰まりから脱出する助けになるであろう。その他、いつ、どのような介入が必要かという問題については3章で考察する。

B 解法の一般化

この方法を学習者が一般化するためには、同様な問題を何度か解く必要がある。その過程を省略すると、一般化されたモデルは図1-Bになる。

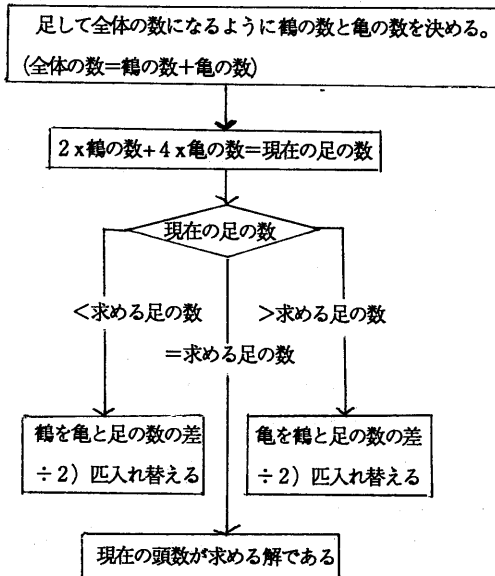


図1-B 鶴亀算の最初の一般化

この図で重要な部分は、図1-Aの3が分岐していることであろう。これを学習者自身が発見するように導くには上例のように足の数が30本より少ない場合に加えて、30本より多い場合が対比できるように問題を提示する必要がある。

C 解法の洗練

上のように一般化された解法の最初の部分の、2つの未知数に対して拘束条件が1つしかないことに着目すれば、図1-Cのような、計算量を最小にする解法を発見することができる。すなわち、鶴か亀のどちらか一方の数を0にして、他方の数を与えられた全体の数に等しいと考え、足の数の計算も簡単になり、分岐もなくなるということ気付かせる必要がある。この部分を学習者に発見させるためには鶴や亀の模型の操作ではなく、計算の手間に焦点を絞った環境を用意しなくてはならない。

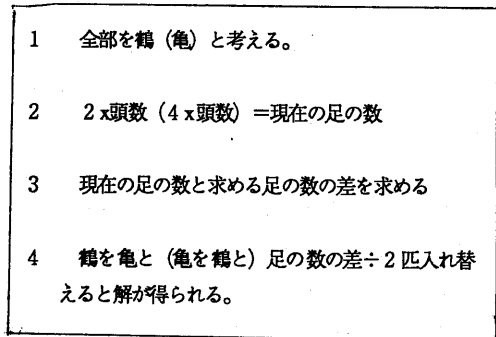


図1-C 鶴亀算の洗練された一般化

D 高次の一般化

足の数に注目して解く考え方も、わずかな違いはあるが、例えば、図1-Dのように、頭の数に注目した場合と類似の方法でモデル化できる。鶴と亀を他のものに変えたり、足の数を変えることによる一般化は2.1で述べた既知の概念の自然な拡張に当たるので省略する。解法に対する一般化のレベルや事例に関する思考錯誤の過程は学習者モデルに保存され、4章で述べ

るように、この方法を用いた問題解決を行なう場合の指導方略の資料として重要な役割を果たす。

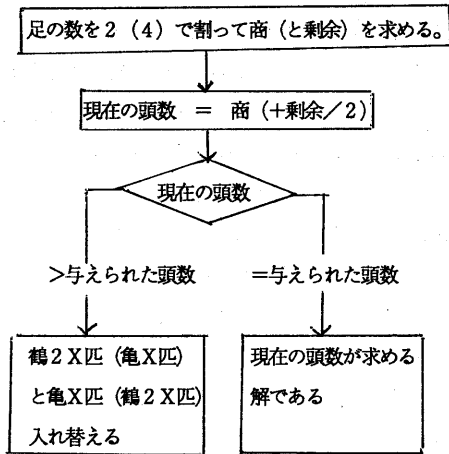


図1-D 足の数から出発する鶴亀算の一般化

2. 2. 2 表記法を伴う新しい概念の導入

新しい概念を初めて理解する場合は、次のような2つの条件を満たす図の操作と説明が必要である。第1に、一つ概念を説明するための図は複数例を提示しなければならない。理由は2. 2. 1の鶴亀算の一般化の時と同様に、特定の図に即した特殊な概念を一般化することを防ぐためである。第2は概念の内包的な意味の多面性を正しく一般化することができるように、提示の種類と順序を考慮することである。

ここでは分数の導入を例にして説明する。分数の概念の導入には、自然数の四則演算と公倍数、公約数を理解しているという前提が必要である。上記の条件1を満たすためには、同じ分数を表す種々の操作、例えばパイを分割する操作、コップの水を分割する操作、いくつかの基石をとり分ける操作などを用意する必要がある。第2の条件を満たすためには、例えば割合を示す分数(割合分数)と定まった量を示す分数(量分数)の区別を理解するための操作を容易にする必要が

ある。すなわち「バケツの水を3分の2移す」と「バケツの水を3分の2リットル移す」操作の違いを理解させることである。また自然数と分数との関係についても発見的な理解が得られるような図形操作ができるようにする必要がある。

マイクロワールドの利点は、広く認められているように、学習者の主体的な発見を通して理解を深めると言う点が最も重要であるが、その他に学習目標に対する学習者の認知のレベルを知ることができるという利点がある。すなわち、学習者の操作の手順と結果から、学習者が獲得した概念のレベル、すなわち特定の図に関して理解しているだけか、いろいろな図を一般化して、抽象化された概念を理解したのか、既知の背景知識との関係を把握しているかどうか等をシステムが同定するために、操作環境や話題や、その提示順序を任意に設定できることである。図を示して、同じ分数を示す他の例を作らせたり、分数そのものを答えさせたりすることによって、学習者がどのレベルの概念を獲得しているかを判断することができる。新しい概念の導入に関する、この意味理解度のレベル同定はマイクロワールドの段階での学習者のモデル化の重要な機能であり、モデル化の結果は後述の定着学習の段階での誤り同定において、間違いが本質的であるかどうかを判定し、適切な教授法を決定するうえで重要な役割を果たすことになる。

学習者が分数の概念を同化したことが同定できると、次は、大小関係や加減乗除のような既知の関係概念や操作概念を、分数という新しい分野に拡張する段階に進む。この段階では、獲得した新しい概念は加減乗除のような既知の概念と同様に、一般化されたモデルとして、学習者に抽象的に理解されているが、この二つの概念を矛盾なく適用するためには、再び、具象の世界に戻って、例題からの操作的学習が必要になる。まず、自然数の足し算で、数え上げによって自然に獲得していた数の大小関係を分数に適用するためには、分数を比較できるようにする操作が必要になる。その操作は、既知の公倍数を求める操作であることに気付くのが、最初概念の拡張である。この部分の発見的な学習ができれば、記号操作の手続きは容易に

学習でき、つぎにそれを用いて加減操作を拡張することもできる。加算、減算に必要な話題の提示順序や、その後の乗算、除算の同様な方法については省略する。

このようなプロセスを経ることなしに、分数の演算の手順に対する正しい理解に到達することは、不可能であろう。一般に新しい表記を伴う概念や、新しい手続きの学習は具体的な例示の操作による概念の理解に始まって、一般化、洗練、既知の概念との同化、の過程を繰り返して、初めて深い理解に到達することができると考えている。

3 ITSにおける教授と認知の協調モデル

3.1 個人差のモデル化

既に述べたように学習時に子供が感じる難しさは、扱う目標知識の絶対的難しさのほかに、子供によって異なる難しさがある。後者は子供の個人差によるものと、学習時の子供の心身の状態によるものに分けることができる。個人差の表現には、学習目標をどれくらい早く達成したかという、学習速度と、どのくらい深く理解しているかという学習達成度と、どの学習形態が適しているかという学習形態の適応性等があるが、個別学習の場合は、学習速度の個人差は学習時間の長短で吸収することができる。また、学習形態は、教育内容に依存する部分が、個人差に依存する部分よりも教育的観点からは、はるかに重要である。すなわち、新しい概念の導入には、既に述べたマイクロワールドによる操作環境が適しているし、理解した知識を定着させるためには、その知識を使った問題解決を繰り返し訓練するドリルの形態が適している。したがって、個人差に関する情報でモデル化が意味を持つのは知識の理解度に関する場合だけである。

ある学習者の理解度は、個別の知識に対するものと、学習者の全般的な理解能力の2種類に分けることができる。個別の知識の理解度はマイクロワールドにおける知識獲得のレベルと、定着のための問題解決時の誤り履歴との2種の情報によって同定することができる。前者は概念や手続きをどのレベルまで一般化し、その意味をどの程度理解しているかを示しており、本質の

理解度と呼ぶ。後者はその知識を使った最近N回の問題解決において、正しく使った知識とその知識を使うべきであった回数との比で表すことができ、その知識の定着度と呼ぶ。知識の定着度が1に十分近い場合、その学習者はその知識をチャンク化していると呼ぶことにする。チャンク化した知識は教授の対象にする必要がないという点で、チャンク化は重要な情報である。学習者の全般的な理解度は、既学習知識の中で、正しく使われた延べ回数と、間違っただけの場合も含めてその知識が使われた延べ回数の比によって定義する。

一方、システムは学習時の心身の状態について、客観的に把握する手段を持たない。したがって、心身の状態は、学習の結果が、システムの予想と比較して、予想以上であるか、予想どおりであるか、予想以下であるかによって決定することにする。予想以上の場合には学習者が積極的に努力していると考え、予想以下の場合にはその時点で、学習者の平常とは異なる何らかの不都合が発生していると考え、この情報を「やる気」と名付ける。やる気の算出を正確に行うためには、現在対象にしている目標知識を、その学習者がどの程度正しく学習することができるかという予想を学習者モデルから正確に推定することが必要になる。この推定は次の方法で算出し、その知識に対する「レディネス」と呼ぶ。

ある知識に対するレディネスは、その知識の絶対的難易度(2.1参照)が高ければ、低くなり、その知識の前提知識(その知識を理解するために必要な知識)の定着度が低ければ、低くなるはずである。しかし全般的理解度が高い学習者は、低い学習者よりもよく理解するであろうから、全般的理解度が高ければ、レディネスも高くなると考える。したがって、レディネスRは、絶対的難易度Xと、すべての前提知識の定着度の平均値Yと、全般的理解度Zの関数として下式のように表される。

$$R = Y \cdot f(X) + C \cdot Z \cdot (1 - Y) \cdot f(X)$$

ただし前提知識が未学習の場合は既学習世界に到達するまで多重階層世界⁵⁾を遡る。したがってYはそれを含めた広義の前提知識の理解度の

平均値となり、 $0 \leq Y \leq 1$ 、 X は遡った未学習世界の絶対的難易度の和となり、 $0 \leq X$ 。
 f は単調減少関数。 C は定数で、 $0 < C < 1$ 。

上の式によってレディネスが決まれば、やる気は実際にその知識を学習した結果得られた理解度とレディネスの比の時間変化で与えられる。レディネスは次に学習する世界を選ぶときにも用いることができる。やる気はKR情報の選択や、指導パラダイムの選定の情報として用いる。

3. 2 人間の学習過程のモデル

一般に人間がある知識を初めて学習する場合は、まずその新しい知識そのものを理解する段階と、その知識の使い方を理解する段階と、その知識をチャンク化するまでの段階の3つに分けることができる。知的CAIのMHM(多重階層知識表現)⁵⁾ではこの3つの段階は同じ目標知識をもつ部分世界として表現されている。⁶⁾

図2はこの3つの世界の相補的な機能を表現したものである。左側のモデル操作による思考錯誤の部分は新しい知識の意味や使い方を理解する部分で、2章と3章で述べたように、マイクロワールドによって実現する。右側の記号操作による知識利用の訓練部分については既に報告済み^{7)、8)}である。

このモデルで、教授と認知がどのように関係するかは4章で考察する。

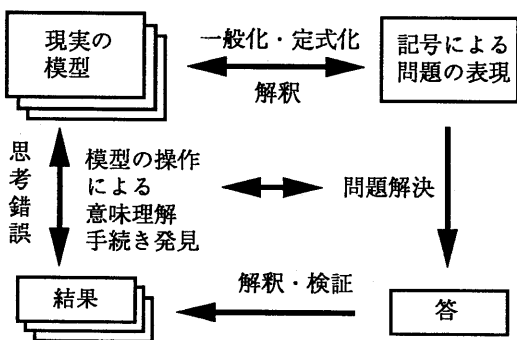


図2 人間の学習過程のモデル化

4 学習と教授の協調過程

学習者と知的CAIシステムとは、それぞれ独立した分散系であり、目的、機能、構成などは全く違っている。これらの独立な系が自己の目的を達成するためには、相互作用によって得た情報から目的達成に必要な知識を獲得する必要がある。これが学習者モデルを構成する目的である。

マイクロワールドの操作で得られる学習者モデルには、学習者の認知のレベルと各々のレベルでの意味理解度が記録される。知識の定着化過程で得られる学習者モデルには、学習者が獲得した知識とその誤り原因などが記録される。前節で述べた学習者の状態は、システムの状態(話題の選定、新しい概念の導入、新しい手続きの導入、定着のための訓練、誤り原因同定、質問の応答など)の遷移履歴と共にセッションの間だけ保存される短期記憶として記録される。

われわれは既に、学習者の間違いや行き詰まりに対して、経験的に有効であると考えられている教授パラダイムについて報告した。⁷⁾

マイクロワールドで構成した学習者モデルによって、知識に対する学習者の深い理解がどの程度得られているかを判定できるので、定着段階での学習者の間違いが、単なる記憶間違いやスリップ(英会話で主語が3人称単数の場合、動詞にsを付けることを知らないながら、つい間違っ喋ってしまう時のような、不注意による間違い)によるものか、又は深い理解の欠如によるものかが区別できる。これを利用して、誤り原因を治療するための教授パラダイムを次のように選定する。

(1) 本質的な意味の理解ができていない学習者に対しては、2章で述べたように、常にマイクロワールドに戻って、具体的な図形操作や記号操作を行う過程で誤りを矯正することが原則である。この環境で使用する教授パラダイムを下に示す。教授パラダイムを用いた介入による学習者の負担は下の番号の順序で軽くなる。

- 1) 誤りの内容を知らせる。
- 2) 正しい知識や解法について説明する。
- 3) 教育目標を易しいものに変更する。

(2) 概念や手続きの意味理解ができていない学習者にはできるだけ介入しないことが原則である。この場合は、次の教授パラダイムを用いる。介入による学習者の負担は下の番号の順序で軽くなる。

- 1) 誤りがあることだけを知らせる。
- 2) ヒントを与える。適応指導原理⁸⁾に基づいて、元の問題の解決過程から学習者の理解度に応じた抽象度の誤り原因を切り出して、指導する。
- 3) マイクロワールドで学習した具体的な事例を用いて反例を示す。
- 4) マイクロワールドで、その学習者が理解した一般化した事例で反論する。
- 5) 計算間違いをしていて、逆関数を知っている場合には、検算を促す。

本質的な意味の理解ができていない学習者に対して、ヒントを与えたり、反論したり、反例を示しても、混乱が深まるばかりで、役に立たない。したがって、どのような教授パラダイムを用いるかは、まず、学習者が本質を理解しているかどうかで区別する必要がある。すなわち上記のように、誤り知識に対する学習者の理解が、十分であるかどうかにしたがって、間違いに気付かせるための教授パラダイムと、知識の意味をもう一度理解させるための教授パラダイムに分離しなければならぬというのが、この章の主張である。それぞれの分類の中では、学習者の理解度の大きさに応じて、介入の度合いを軽くする教授パラダイムを用いることが必要である。

5 おわりに

多重階層知識表現における知識の分割と順序付けに基づく2種の指導法略、すなわちマイクロワールドによるモデルの操作環境と反復練習によるチャンク化環境が、教授と学習を協調的に整合することを述べた。2つの指導法略は学習者の主体的な学習を支援するうえで互いに相補的な役割を果たし、マイクロワールドで生成した学習者モデルの情報は一般化のレベルと意味理解の深さを表現し、反復練習の時の学習者モデルの知識表現と共に誤り原因治療に重要な役割を担うこ

とを述べた。

このような目的でマイクロワールドを使う場合、一般化のレベル同定のための操作環境を設定する方法を確立する必要がある。操作環境の枠組みと共に今後に残された問題である。

[参考文献]

- 1) Greeno, J., Productive Learning Environment, Proc. of ARCE, pp. 1-11, 1990.
- 2) Hennessy, S., Shopping on Mars-An Intelligent Computer Tutor for Arithmetic, ibid, poster session.
- 3) VanLehn, K., Two Pseud Students-Application of Machine Learning to Formative Evaluation, Proc. of ARCE, pp.181-190.
- 4) Envision Theory, see, eg. Artificial Intelligence and Tutoring systems by Etienne Wenger, Morgan Kaufmann Publishers, INC. 1987.
- 5) 大槻、竹内：自然言語対話のモデルとCAIへの応用、情報処理学会論文誌、vol.25-4, 1983.
- 6) 大槻、竹内：知的CAIにおける柔らかいシナリオの生成、人工知能学会研究会、SIG-HICG -8904, 1990.
- 7) 大槻、竹内：知的CAIにおける高度個別化の研究、情報処理学会研究会報告、vol.90, no.30, 1990.
- 8) 竹内、有村、大槻：ユーザモデルを用いた個人差のある対話について、電子情報通信学会、人工知能と知識処理研究会資料、1990年10月。