

# ICT を用いた教材のインタラクティブ化

とうもと たかひと

東本 崇仁

2009 年 3 月

広島大学大学院工学研究科

# 内容梗概

本研究では、ICT(Information and Communication Technology)による教材のインタラクティブ化を指向する。本研究で取り扱う教材のインタラクティブ化とは、(1) 従来の教育の現場における実施が困難な「問題作りを通した学習課題 (以下作問課題と呼ぶ)」「実験方法の考案を通した学習課題 (以下実験方法考案課題と呼ぶ)」に対するインタラクティブ化、(2) 連続した演習におけるインタラクティブ化、の2点を対象とする。

まず、(1)における各課題のインタラクティブ化の重要性について述べる。作問課題や実験方法考案課題は、従来の教育においても重要と考えられていた。しかしながら、通常の問題解決課題では正解が一意に定まるのに対し、作問課題や実験方法考案課題では正解は一意に定まらず、複数の妥当な正解が存在する。正解が一意に定まる場合は、学習者の解の正誤判定が容易であり、誤った場合の誘導も導くべき正解が決定されるため容易であるが、正解が一意に定まらない場合は、正誤判定や誤った場合にどの正解に誘導するべきであるかについて学習者の解を個別に評価する必要がある。教科書などの通常の教材では解の一例とその解説を載せることはできるが、個別の学習者の解には対応できない。教師が評価できればよいが、教室内のすべての学習者に対して評価を行うことは現実的ではない。そこで、実施が困難であるこれらの課題を現実的なものとして扱うには、学習者の解を個別に評価するインタラクティブな教材の開発が望まれる。本研究では、各課題の意味を把握し、問題解決能力を備え、学習者の解答に対してどのように間違っているかを評価できるシステムを各課題に対する教材のインタラクティブ化と呼び、ICTにより学習者の解を評価する学習支援システムの開発を行った。本論文では、システムの設計方法とシステムを用いて行った使用実験の結果を報告する。

次に、(2)連続した演習のインタラクティブ化について述べる。ある学習を終えた学習者が次の学習に進む場合、新たに提示される課題は今までの学習が反映された課題であることが望ましい。そこで、連続した演習において、学習者に対しどのような課題を提示するかを決定することは重要であり、これもまた教材のインタラクティブ化の一つといえる。そこで本研究では、連続した演習のインタラクティブ化のために、複数の課題を関連付けるとともにそこから課題間の差分の情報を取り出せる枠組みの提案と、課題間の差分を学習できる学習課題を自動生成するシステムを開発した。

以下に、本論文の各章の内容を示す。

1 章では、本研究の目的と意義、概要を説明する。

2 章では、算数の多桁減算における作問課題を取り扱う。対象が小学生であり、システムのインタフェースにおいて、複雑な理解や操作を要求することは難しいため、学習者への情報の与え方と受け取り方について工夫する必要がある。本章では、従来の作問の形式の一つである解法ベースの作問では取り扱いが難しい多桁減算に対し、新しい形式の作問として「一度学習者に問題を解決させた後に、同じように解ける問題を作成させる」といった手順での作問を提案する。さらに、提案した作問形式の詳細について述べるとともに、どの問題を同じように解ける問題とするべきであるかについて、筆算の解法の観点から問題の分類を行った。また、提案手法、問題の分類にそって開発したインタフェース・診断機能をもったシステム、実際に小学校で本システムを用いて行った使用実験の結果について報告する。

3 章では、実験方法考案課題を取り扱う。実験で対象としている領域は初等物理の力学である。また、本研究で対象としている実験は、すでに授業などで獲得済みの公式などの知識を、実際の現象を解釈するために用いるタイプの実験である。そのため、学習者は実験に必要な知識を既に有していることが前提であり、知識を利用できるかどうかが焦点となる。本実験では、測定道具をあらかじめ複数用意した上で、用意された測定道具では直接測定できない値を、他の値の測定と公式を元にした計算を通して間接的に求めることを目標とする。そのプロセスとして、目標の値を求めるために必要な知識（公式）の選択、選択した公式にしたがった道具を用いた測定、測定結果と最初に選択した公式を用いた目標の値の導出、といった段階に実験を分解した。学習者は、分解した各段階のそれぞれで誤ると予想されるため、各段階でどのような誤りが発生するかについて整理する必要がある。3 章では各段階でどのような入力を行わせるべきか、および各段階で発生し得る誤りの種類について整理し、それをもとに作成したシステムを述べるとともに、高校物理の知識を既に保持している工学系の大学生を対象に行った使用実験について報告する。

4 章では、連続した演習における学習課題の提示に関しての研究を行う。連続した演習においては、無関係な課題を学習するより、次に学習する課題は前に学習した課題の発展課題であることが望ましい。つまり、徐々に簡単な課題から複雑な課題へと移行することで、漸進的な知識獲得を行うことが望まれる。漸進的な学習を行うためには、各課題間で順序付けを行い、さらに各課題の特徴や課題間の差についての情報の付加を行い、課題の差が何であるかの情報提供を行える必要がある。そこで、各課題についてどのような情報を付加し、どのように構造化する必要があるかについて議論し、学習が進むに従ってどのように課題を提示するかについてデザインすることが重要となる。本研究では、そのための枠組みとして「マイクロワールドグラフ」を提案し、その自動構築の一部として「移行タスク」の自動生成を行うシステムを開発した。「マイクロワールドグラフ」とは、各課題の特徴をノードとし、その差および差を学習するための課題「移行タスク」をエッジとすることで、各課題間の関係を構造化したグラフのことである。「移行タスク」とは、ある課

題の学習を終えた学習者が次の課題に移る際に、移行前と移行後の差として学習すべき知識について学習可能な課題（タスク）のことである。漸進的に移行する際は、移行前の課題と移行後の課題は似通った課題であり、多くの共通部分をもっている。そのため、その差についてのみ学習を行えば効果的な学習が行える。移行タスクは、移行前と移行後で用いることができる知識の差とその差が課題のどの条件の変化により発生したものであるかを学習するための課題を与える。つまり、課題の移行に伴う条件の変化と、その変化により発生する利用可能な知識の差を獲得するためのタスクが移行タスクである。漸進的な学習においては移行の前後で差のある部分のみを学習することが効率的であり、知識の適用条件と適用する知識の変化を獲得するための移行タスクは、漸進的な学習において重要な概念であり、自動生成のメリットは大きなものとなる。また、各マイクロワールドの情報を記述する際は単独のマイクロワールドのみを理解すればよいのに対し、移行タスクを手動で生成するためには、移行の前後の二つのマイクロワールドを理解し、さらに適用条件の差とその差の影響で適用できる知識の変化がなんであるかを十分に理解しないといけないため、移行タスク手動生成作業の負荷は大きく、自動生成のメリットは大きなものとなる。以上のメリットから移行タスクを自動生成するシステムは有用である。本研究では、マイクロワールドグラフの一例として、物理の力学で用いられる方程式を利用する課題を対象としている。

最後に5章で、これらの研究についてのまとめを行う。

# 目次

内容梗概 .....	i
目次.....	v
図目次 .....	vii
表目次 .....	viii
<b>第 1 章 序論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 本研究の目的と意義.....	1
1.2 研究概要.....	3
<b>第 2 章 多桁減算における作問学習支援システム .....</b>	<b>7</b>
2.1 まえがき.....	7
2.2 多桁減算の手続き .....	8
2.2.1 多桁減算における解法ベースの作問.....	8
2.2.2 問題構造の分類 .....	9
2.3 システムの設計 .....	10
2.3.1 課題選択と問題生成 .....	10
2.3.2 問題解決 .....	11
2.3.3 作問.....	12
2.3.4 作問課題の難易度設定.....	14
2.4 使用実験.....	15
2.4.1 目的.....	15
2.4.2 利用手順 .....	15
2.4.2 システムの利用結果とその考察.....	16
2.4.3 アンケート結果 .....	18
2.5 むすび .....	20
<b>第 3 章 実験方法の考案による学習の支援環境.....</b>	<b>21</b>
3.1 まえがき.....	21
3.2 実験の目的 .....	21
3.3 仮想実験環境.....	22

3.4 実験方法の考案による学習 .....	22
3.5 実験方法考案課題 .....	24
3.6 システム設計.....	25
3.6.1 インタフェイス .....	25
3.6.1.1 公式組み合わせインタフェイス .....	25
3.6.1.2 測定インタフェイス .....	26
3.6.1.3 代入インタフェイス .....	29
3.6.2 診断機能 .....	30
3.6.2.1 構造.....	30
3.6.2.2 公式組み合わせ診断 .....	32
3.6.2.3 測定診断.....	34
3.6.2.4 代入診断.....	35
3.7 使用実験.....	35
3.7.1 システムの使用実験 .....	36
3.7.2 成績調査 .....	38
3.8 むすび .....	38
<b>第4章 マイクロワールドグラフ .....</b>	<b>41</b>
4.1 まえがき .....	41
4.2 マイクロワールドとその漸進的学習 .....	41
4.3 ICMにのっとったシステム .....	42
4.4 マイクロワールドグラフ .....	43
4.4.1 マイクロワールドの記述に関する要件 .....	44
4.4.2 マイクロワールドの記述と組織化 .....	45
4.4.2.1 マイクロワールドの記述 .....	45
4.4.2.2 マイクロワールドの組織化 .....	45
4.6 パラメータ修正規則によるマイクロワールド移行支援 .....	49
4.7 システムの試作 .....	52
4.8 むすび .....	56
<b>第5章 結論 .....</b>	<b>57</b>
付録.....	61
参考文献 .....	62

# 図目次

図 2.1 問題の分類 .....	9
図 2.2 システムの構成 .....	10
図 2.3 課題タイプの制約 .....	11
図 2.4 問題解決インタフェース .....	12
図 2.5 計算手順の例 .....	12
図 2.6 作問インタフェース .....	13
図 2.7 誤答とフィードバックの例 .....	14
図 3.1 実験方法考案課題 .....	25
図 3.2 公式選択・組み合わせインタフェース .....	26
図 3.3 初期状態測定インタフェース .....	28
図 3.4 振る舞い測定インタフェース .....	29
図 3.5 対応付けインタフェース .....	30
図 3.6 現象構造の一部の例 .....	31
図 3.7 解法構造の一部の例 .....	32
図 3.8 測定構造の一部の例 .....	32
図 3.9 学習者の利用履歴 .....	37
図 4.1 カーリングに似た状況 .....	47
図 4.2 カーリングに似た状況のマイクロワールドグラフ .....	47
図 4.3 パラメータ修正規則(1)(2) .....	51
図 4.4 システムで扱うマイクロワールド群 .....	53
図 4.5 システムで扱うマイクロワールドグラフ .....	54
図 4.6 パラメータ修正規則(a)(b) .....	54
図 4.7 出力結果(1) .....	55
図 4.8 出力結果(2) .....	55

## 表目次

表 2.1 10 分毎の 1 人当たりの作問数と正解数.....	17
表 2.2 生徒 1 人当たりの総作問数の分布と正解率 .....	17
表 2.3 各タイプ各難易度の正解率.....	17
表 2.4 各タイプの平均正解率.....	18
表 2.5 学習者へのアンケート結果.....	19
表 2.6 担任教諭へのアンケート結果.....	19
表 3.1 検出した誤りの種類と平均回数 .....	37
表 3.2 本環境利用後のアンケート結果 .....	37



# 第 1 章 序論

## 1.1 本研究の目的と意義

日本ではこれまで情報化社会の発展に伴い、情報技術：IT (Information Technology) という言葉が頻繁に用いられてきたが、近年はこの言葉の代わりに情報通信技術：ICT (Information and Communication Technology) という言葉が用いられるようになってきている（総務省「ICT 政策大綱」）。IT では情報機器である計算機のハードウェア的な技術や情報処理そのものが焦点であったのに対し、ICT では技術だけではなく情報通信におけるコミュニケーションの重要性をより一層明らかにするために、Communication と明確に表現されており、人と人、人と計算機、計算機と計算機間のインタラクション（情報交換）に焦点が当てられている。本研究では、この ICT の観点より教材のインタラクティブ化を目的とする。

人間と計算機のインタラクションは、情報工学の分野における重要な研究テーマの一つである。前述したように近年、ICT という言葉の普及とともに、計算機の内部でいかに情報を処理するだけでなく、どのような情報を計算機と人間が交換するかということに関心が集まってきた。人間が入力を行い、計算機がその入力されたデータを計算処理し、入力に対応した出力結果を人間に返す。この出力結果を人間が直接利用する、あるいは出力結果を参考に再度入力を行い、計算機からの出力を再度受け取る。この際に使用者にとって良い結果であれ、都合の悪い結果であれ、有効な出力結果を受け取ることができれば、計算機は人間にとって有用な道具である。人間と計算機のインタラクションとはこのように人間が計算機に入力をし、計算機が出力を返し、必要に応じてその入出力の作業を繰り返すといった人間と計算機の情報交換のことであり、人間と計算機のインタラクションについて研究を進めることは ICT の分野において重要な研究テーマである。現在、情報工学の分野では、計算機を単なる計算処理のためだけに用いるのではなく、人間の知的活動を支援するものとして活用する試みが数多くなされている。知的活動の一つである「学習」においても、計算機支援に関する研究は積極的になされており、学習における人間と計算機のインタラクションの高度化も試みられている[1,2,3]。さらに、近年の教育現場や一般家庭への計算機の普及やネットワークの整備にともない、計算機による学習支援に関する社

会的な期待や価値も高まってきている。

次に学習における人と人、あるいは人とモノのインタラクションを考えてみる。学習においては、学習者が導き出した解に対して、教授側が評価を与えることは重要であり、学習者は必要があればその評価により自分の解を修正し、再度評価を受け取る。このように学習者が教授側に解答を提示し、教授側はそれに対する評価を返し、必要があればその解答の提示、解答の評価の作業を繰り返すことは、学習における学習者と教授側のインタラクションである。このインタラクションが適切に行われれば、学習は効果的に進むことになる。しかし、実際の教育現場における教授側に相当する教師や教材では適切なインタラクションを行うことは容易ではない。教科書に代表される教材では、学習者の個別の解答を評価することはできず、学習者の解答が何であっても一方的に正解を押し付けることとなる。教師は、学習者の解答に対して適切な評価を行えるが、一对多という教育現場における教師と学習者たちとの関係を考えると、個々の学習者に対しての十分な評価を与えることは必ずしも容易ではない。そこで、本研究では個々の学習者へのインタラクションを目標とし、計算機を利用したインタラクティブな教材の開発を目標とする。

計算機によるインタラクションの支援の代表的なものに e-learning に関する研究があげられる。e-learning に関する研究では、マルチメディア教材を用いた個別学習や、学習者の解答状況の整理やデータマイニングを活用した授業におけるインタラクションの支援、通信技術を用いた協調学習支援などが行われている。マルチメディア教材は従来の教材では扱えなかった様々なメディアを通じた学習が扱え、またデータマイニングによる授業におけるインタラクションの支援は、学習者の解答を教師が利用しやすくすることで教師と学習者の円滑なインタラクションを支援している。協調学習では学習者間のインタラクションの支援が行われている。しかしながら、これらの研究では、学習者の解答を計算機が評価することはほとんどなく、人間間のインタラクションを支援するものが主となる。解答の評価に関しても、通常の授業で用いられる範囲の教材を対象としたものが多いため、教育現場で用いられがちな正解が一意に定まるような問題解決型の学習が主となる。問題解決型学習では正解が一意に定まるため、正誤判定はその正解との比較だけで行え、誤った場合における正解への誘導も決定的であるため、支援の行きやすい対象である。

一方、正解が一意に決まらないような学習課題も数多く存在する。たとえば、ある制約の範囲で問題を作成させる問題作り（以下本稿では作問と呼ぶ）や、ある実験の方法を学習者自身に考案させる課題（以降本稿では実験方法考案課題と呼ぶ）、などは、制約が満たされる範囲の解答であれば正解である。そのため、通常の問題解決型の学習とは異なり、学習者の解を個別に評価しなければ正誤の判定は行えず、誤っていた場合も学習者の解を評価し、どの正解に誘導すべきかを決定しなければならない。そのため、学習者本人がこれらの活動を単独で行うことは負荷が高く、インタラクションの重要性が高い課題である。しかし、同時に高度なインタラクションを要求する課題であり、一对多という教育現場での教師と学習者の関係を考えると、現実的な運用の困難な課題である。しかしながら、運

用が困難であるからといってこれらの課題が有益でないというわけではないことは周知である。

従来の e-learning に関する研究では、マルチメディアや Web の効果的な使い方や、授業そのもののシステム化に焦点があてられており、このような学習課題自体を分析し、どのような入力を学習者に行わせ、どのような評価を与えれば効果的な学習が行われるかについての研究はあまり行われていない。そこで、本研究では、人と人のインタラクションあるいは人と教科書などの従来の教材のインタラクションが困難なこれらの課題を分析し、学習者に何を行わせるべきであるかおよびそれをどう評価するべきであるかから設計し、人と効果的なインタラクションを行える問題解決能力を備えたインタラクティブな教材を開発することを目標とする。本研究では、算数の領域における作問や、物理の領域における実験方法考案課題を対象に、システムを開発した。本稿では、このように課題の意味を把握し、問題解決能力を備え、学習者の解答に対してどのように間違っているかを評価できるシステムをある課題に対する教材のインタラクティブ化と呼ぶ。

また、単一の課題の学習ではなく、課題を連続して行っていく演習を考えた場合、教材がインタラクティブであるとは、次課題がこれまでの学習を反映していることである。そこで、連続した演習のインタラクティブ化の一つの観点として、学習者にどのような課題を提示するかを決定を上げることができる。本研究ではこれを連続的な演習に対する教材のインタラクティブ化と呼び、これについての研究も行った。

## 1.2 研究概要

学習者自身による問題を作成させる作問の課題や、ある実験の方法を学習者自身に考案させる課題は、現場における一対多という教師と学習者の関係によるインタラクションの限界や、教科書に代表する教材のインタラクションの限界から、学習者に適切な評価を与えることは困難であった。同時に、難易度の高いこれらの課題では評価なしに学習を行うことは難しく、従来の教育においても重要とされていたが、現実的な実施は困難であった。本研究では、実施が困難であるこれらの課題を分析し、課題を学習させるためには学習者にどのような作業（入力）を行わせる必要があるか、適切な評価（出力）を与えるためには、入力からどのようなデータを取得し、そのデータをどう処理する必要があるかについて検討する。さらに、検討した内容に基づいて実際にインタラクティブな教材としての学習支援システムを設計・開発するとともに、開発したシステムを用いて行った使用実験の結果を報告する。さらに、教材のインタラクティブ化の一つとして、上記の個別の課題に対するインタラクションのみならず、複数の課題を連続して演習とする場合に、適切な次課題を選択するための枠組みの提案と、次課題の自動生成システムの開発を行った。本稿では、これらについての報告も行う。

本稿 2 章では、算数の多桁減算における作問の課題を対象に教材のインタラクティブ化

を行った。本章では、多桁減算と対象者の関係より新しい作問形式について提案するとともに、問題のタイプの分類を行い、それらに伴ったシステムのインタフェイス・診断機能を設計することで、教材のインタラクティブ化を行った。対象が小学生であるため、システムのインタフェイスにおいて複雑な理解や操作を要求することは難しく、学習者への情報の与え方と受け取り方の設計について工夫する必要がある。平嶋らは算数の文章題を対象とし、学習者に解法（問題の解決手続き）を与えた後に、その解法を用いる問題を作らせるといった解法ベースの作問を扱っている[9,10,11,12,13,14]。しかし、算数の文章題においては、その解法が問題に比べて比較的単純であり学習者に直接的に解法を提示することができたが、多桁減算の場合は解法が比較的複雑なため、その学習を行う学年的にも手続き自体を直接学習者に説明することは困難であり[17]、同様の方式で作問を行わせることは難しかった。たとえば、算数の文章題「太郎君が2個りんごをもっています。りんごを3個もらいました。いくつになったでしょう」に対する解法は「 $2 + 3 = ?$ 」である。しかし、多桁減算「 $732 - 535$ 」という問題に対する解法は「10の位の上の数から1引いて、1の位の上の数に10を足して、1の位の上の数から1の位の下数を引いて…」である。そのため、文章題の作問では「『 $2 + 3 = ?$ 』となる文章題を作りなさい」といった解法を提示することはできたが、多桁減算の作問を同様の形式で子どもに行わせることは難しかった。そこで、本研究では「一度学習者に問題を解決させた後に、同じように解ける問題を作成させる」といった手順での新しい作問形式を提案する。2章では、提案した作問形式の詳細について述べるとともに、どの問題を同じように解ける問題とするべきであるかについて、筆算の解法の観点から問題の分類を行った。さらに、提案手法、問題の分類にそって開発したインタフェイス・診断機能をもったシステム、実際に小学校で本システムを用いて行った使用実験の結果について報告する。

3章では、ある実験の方法を学習者自身に考案させる課題を対象に教材のインタラクティブ化を行う。実験で対象としている領域は初等物理の力学である。本章では、インタラクティブ化のために、実験の種類およびその前提についての整理、対象としている本実験において実験を実施するプロセスの設計、を行い、それらに対応するインタフェイス・診断機能を従来の仮想実験環境に導入した。本研究で対象としている実験は、すでに授業などで獲得済みの公式などの知識を、実際の現象を解釈するために用いるタイプの実験である。そのため、学習者は実験に必要な知識を既に有していることが前提であり、知識を利用できるかどうか焦点となる。本実験では、測定道具をあらかじめ複数用意した上で、用意された測定道具では直接測定できない値を、他の値の測定と公式を元にした計算を通して間接的に求めることを目標とする。そのプロセスとして、目標の値を求めるために必要な知識（公式）の選択、選択した公式にしたがった道具を用いた測定、測定結果と最初に選択した公式を用いた目標の値の導出、といった段階に実験を分解した。学習者は、分解した各段階のそれぞれで誤ると予想されるため、各段階でどのような誤りが発生するかについて整理する必要がある。3章では各段階でどのような入力を行わせるべきか、および各段

階で発生し得る誤りの種類について整理し、それをもとに作成したシステムを述べるとともに、高校物理の知識を既に保持している工学系の大学生を対象に行った使用実験について報告する。

4章では、2章、3章までの作問や実験方法の考案課題といった、個々の課題に対する教材のインタラクティブ化への試みであったのに対し、複数の課題を対象にした連続した演習を対象とした場合のインタラクティブ化について述べる。連続した演習を考えた場合、インタラクティブであることのひとつとして、次課題がこれまで学習した課題を反映していることがあげられる。本章では、連続した演習のインタラクティブ化のために、次課題の提示のアプローチについて述べるとともに、そのアプローチのために必要な情報、その情報が付加された複数課題の構造化の枠組み、次課題の自動生成システム、について述べる。次課題提示のアプローチの一つとして、簡単な課題から徐々に複雑な課題へと移行する漸進的な学習がある。漸進的な学習を行うためには、各課題間で順序付けを行い、さらに各課題の特徴や課題間の差についての情報の付加を行い、課題の差が何であるかの情報提供を行える必要がある。そこで、各課題についてどのような情報を付加し、どのように構造化する必要があるかについて議論し、学習が進むに従ってどのように課題を提示するかについてデザインすることが重要となる。本研究では、そのための枠組みとして「マイクロワールドグラフ」を提案し、その自動構築の一部として「移行タスク」の自動生成を行うシステムを開発した。「マイクロワールドグラフ」とは、各課題の特徴をノードとし、各課題の差および差を学習するための課題「移行タスク」をエッジとすることで、各課題間の関係を構造化したグラフのことである。「移行タスク」とは、ある課題の学習を終えた学習者が次の課題に移る際に、移行前と移行後の差として学習すべき知識について学習可能な課題（タスク）のことである。漸進的に移行する際は、移行前の課題と移行後の課題は似通った課題であり、多くの共通部分をもっている。そのため、その差についてのみ学習を行えば効果的な学習が行える。移行タスクは、移行前と移行後で用いることができる知識の差とその差が課題のどの条件の変化により発生したものであるかを学習するための課題を与える。つまり、課題の移行に伴う条件の変化と、その変化により発生する利用可能な知識の差を獲得するためのタスクが移行タスクである。漸進的な学習においては移行の前後で差のある部分のみを学習することが効率的であり、知識の適用条件と適用する知識の変化を獲得するための移行タスクは、漸進的な学習において重要な概念であり、自動生成のメリットは大きなものとなる。また、各マイクロワールドの情報を記述する際は単独のマイクロワールドのみを理解すればよいのに対し、移行タスクを手動で生成するためには、移行の前後の二つのマイクロワールドを理解し、さらに適用条件の差とその差の影響で適用できる知識の変化がなんであるかを十分に理解しないとイケないため、移行タスク手動生成作業の負荷は大きく、自動生成のメリットは大きなものとなる。以上のメリットから移行タスクを自動生成するシステムは有用である。本研究では、マイクロワールドグラフの一例として、物理の力学で用いられる方程式を利用する課題を対象としている。

最後に5章で、これらの研究についてのまとめを行う。

## 第2章 多桁減算における作問学習 支援システム

### 2.1 まえがき

ある手続きを学習する上で、その手続きが適用できる問題を作ってみることが有効であることが知られている[6,7,8]. 平嶋らは、このような手続き（あるいは解法）を適用して解くことのできる問題を作るといった作問形式を解法ベースの作問と呼び、和や差の2項演算で解く算数の文章題を対象として、幾つかの学習支援システムの設計・開発を行っている[9,10,11,12,13,14]. 本研究では、多桁減算を対象とした解法ベースの作問学習支援システムの設計・開発と、その試験的な運用を行った。

多桁減算においては、計算を正しく行える学習者であっても、その際に用いた計算操作の意味や適用条件については意識的でない場合が存在すると指摘されている[15]. また筆算学習を終えた学習者であっても筆算に対する理解が十分でない学習者が存在することも指摘されている[16]. これらのことから、筆算の手続きのより深い理解へとつながることが期待できる解法ベースの作問学習を実現する意義があるであろうと筆者は判断している。

しかしながら、多桁減算の作問を学習者に行わせることは容易ではない。作問は解が一意に定まらず、学習者への個別対応が必要となる。そのため、教師と生徒が一对多の関係にある教育現場では行いづらい。そこで、計算機を用いて作問学習を支援することは有意義であるといえるが、支援のためには学習者に何を考えさせるか、その考えをどのように評価するかが重要である。つまり、学習者に何を入力させるか、その入力をどう評価するかが重要である。そこで、どのような形式で作問を行わせるか、学習者の解答をどのように評価するかを定める必要がある。

## 2.2 多桁減算の手続き

### 2.2.1 多桁減算における解法ベースの作問

多桁減算の解法は、その問題を構成する数字、つまり被減数および減数の各桁の数字間の関係によって異なったものになる。つまり、問題の構造によって使うべき適切な計算手順は異なってくるといえる。この場合の個々の計算手順は、異なる条件下で適用される解法とみなすことができる。したがって、ある解法で解ける多桁減算の問題を作成することは、その解法が適用できる問題の構造に対する理解に貢献すると期待できる。このように考えると、従来平嶋らが行なってきた解法ベースの作問と同じ図式を持つ学習活動として、多桁減算における作問を位置づけることが可能となる。

しかしながら、従来平嶋らが行なってきた算数の文章題の作問学習では、問題の構造に対して手続きが単純であるといえ、学習者に対して明示的に提示することができるものであった。これに対して、多桁減算の場合には、手続きは比較的複雑であり、手続き自体を学習者に明示することは困難である[17]。そこで本研究では、「ある問題を解かせることでその問題の手続きを意識させ、次にその問題と同じ手続きを使って解ける問題を作らせる」といった形式でインタラクションを行う[18]。この作問形式は、一般的には簡単とはいえない手続きの説明を省略することができるとともに、作問の直前に問題解決を行なえることで手続きへの意識をより高める効果も期待できるので、今後、解法ベースの作問の有力な作問形式ではないかと考えている。

また、単に学習者に問題を解かせるだけでは、その解き方を十分意識することが難しいと考え、その問題を解く上で必要となる手続きを明示させる工夫も行なった。これにより、自身が明示した手続きを参照しながら問題を作成することが可能になると共に、学習者の作った問題が不適切であった場合にも、明示された解法を参照しながらの指摘が可能となる。



## 2.2.2 問題構造の分類

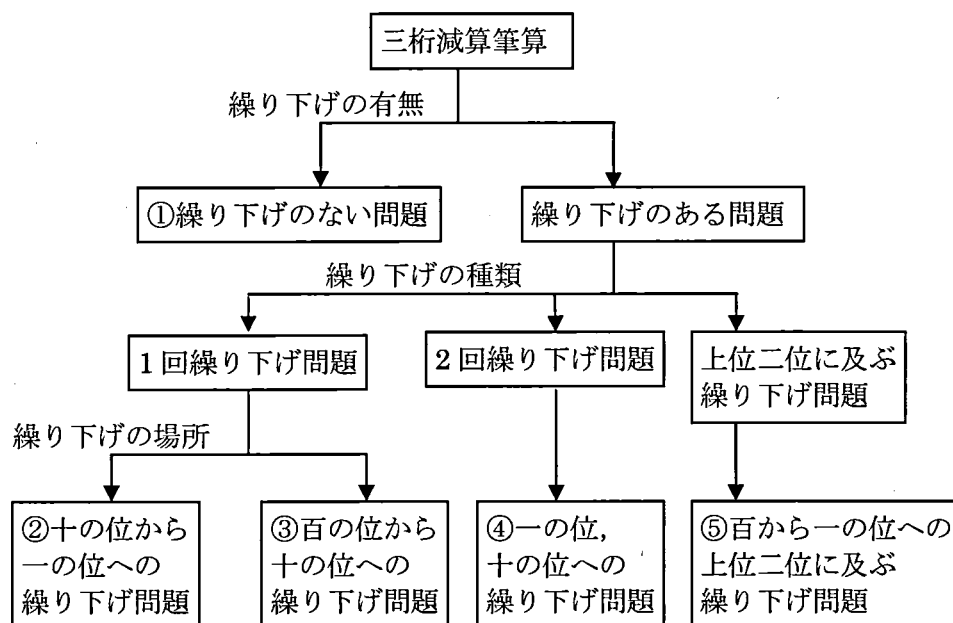


図 2.1 問題の分類

本研究では、小学校で学ぶ多桁減算の最終段階である三桁減算を学習支援対象としている。このような多桁減算の問題は、図 2.1 のように五つに分類されるのが標準的であり、数字の順に学習されていくので、この順で難しくなっていくとみなされていると考えられる。この問題の分類は、そのまま手続きの分類に対応しており、本研究における手続きとは、この五つとなり、作問においては、この五つの手続きに応じた多桁減算の問題を作成することが求められることになる。従って、学習者の解答の評価は、この分類に従って行うこととなる。

## 2.3 システムの設計

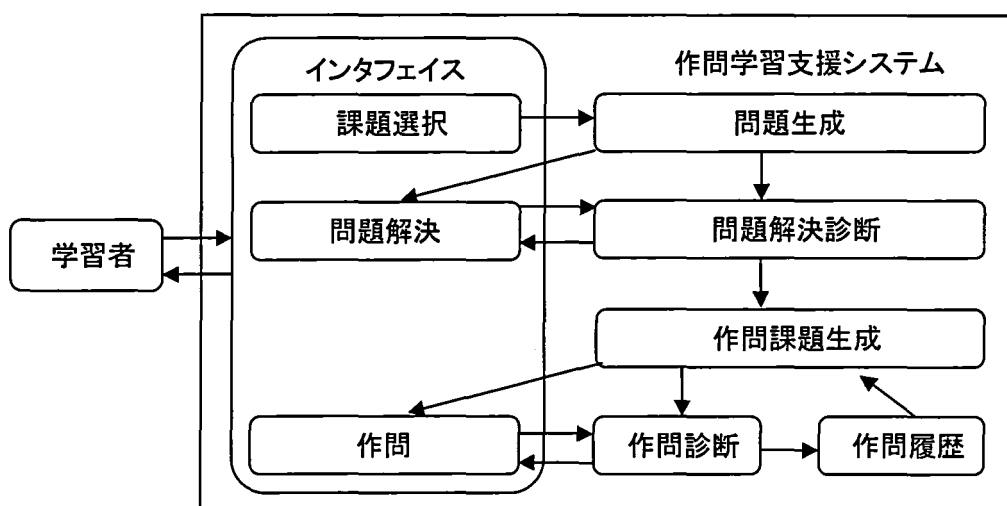


図 2.2 システムの構成

本研究で作成した多桁減算を対象とする作問学習支援システムの構成図を図 2.2 に示した。本システムはスタンドアロンの Java アプリケーションとして実装されている。以下、この構成図に沿って、構成と働きについて説明する。

### 2.3.1 課題選択と問題生成

学習者はまず課題選択インタフェイスで課題タイプの選択を行なう。ここでの課題タイプとは、図2.1に示された5つの問題のタイプのことであり、このインタフェイスにおいては単に「課題タイプ1」といった番号だけで区別されており、それぞれの番号は図2.1中の番号に対応している。学習者が任意に課題タイプを選択できるようにしているのは、学習者自身が課題を選んでいる形式にして欲しいとのシステムの設計時に受けた教師の要望を反映したものである。なお、自由に選択してよいにも関わらず、課題タイプ1を最初に選択した学習者がほとんど（後述の評価実験における被験者132人中118人、89%）であった。

学習者が課題タイプを選択すると、そのタイプの問題として解ける多桁減算を問題生成モジュールが生成する。この生成は、各課題タイプに応じて各桁の数字間が持つべき関係を満たす範囲の数字をランダムに生成することで実現している。図2.3に、課題タイプ1および課題タイプ5が満たすべき制約の記述を示した。MDは多桁減算を格納する2行3列の配列であり、1行目が被減数、2行目が減数、1～3列がそれぞれ百～一の位に対応するという構成になっている。ここで、課題タイプ1では、全ての位において被減数の値が減数の値より大きくなっていることが必要となっている。課題タイプ5では、一の位で減数が被減数より大きいため、繰り下がりの必要性が発生し、十の位の被減数が0のため、百の位から繰り下がるが必要となるような制約が与えられている。

課題タイプ1 :

$$\{MD[1][1] \geq MD[2][1] > 0, MD[1][2] \geq MD[2][2], MD[1][3] \geq MD[2][3]\}$$

課題タイプ5 :

$$\{MD[1][1] > MD[2][1] > 0, MD[1][2] = 0, MD[1][3] < MD[2][3]\}$$

図 2.3 課題タイプの制約

### 2.3.2 問題解決

生成された多桁減算の問題は、問題解決インタフェースにおいて学習者に提示される。図2.4の左半分が問題解決インタフェースである（なお、右半分は問題解決が適切に行なわれると、作問インタフェースとなる）。この問題解決インタフェースにおいては、学習者はインタラクティブに計算操作を明らかにすることが求められる。多桁減算の計算操作は、各桁の数字を対象とした引き算、繰り下がりに伴って10増やす操作、繰り下がりに伴って1減らす操作、より成り立っている。これに各桁の数字を対象とした足し算を加えた四つの計算操作を学習者に提示した上で、学習者に多桁減算を構成する数字と計算操作を選択させることで、各桁ごとの計算操作を決定していくことになる。図2.4の場合、学習者は一の位を「被減数の一の位の9, 引く, 減数の一の位の2」として説明していることになる。十の位については、まず、「被減数の百の位の5から1減らし」、次に、「被減数の十の位の4を10増やし」、そして、「被減数のその時点での十の位に存在している14, 引く, 被減数の十の位の5」としている。さらに、百の位の答えの出し方を説明しようとして、その時点での数字である4を選択している。このような多桁減算の手続きのモデル化は、バグに関する研究をベースにしており[19,20]、また、システムの設計および2.4で述べるシステム使用の準備段階において複数の小学校教諭のチェックを受けているので、妥当なものであると考えている。

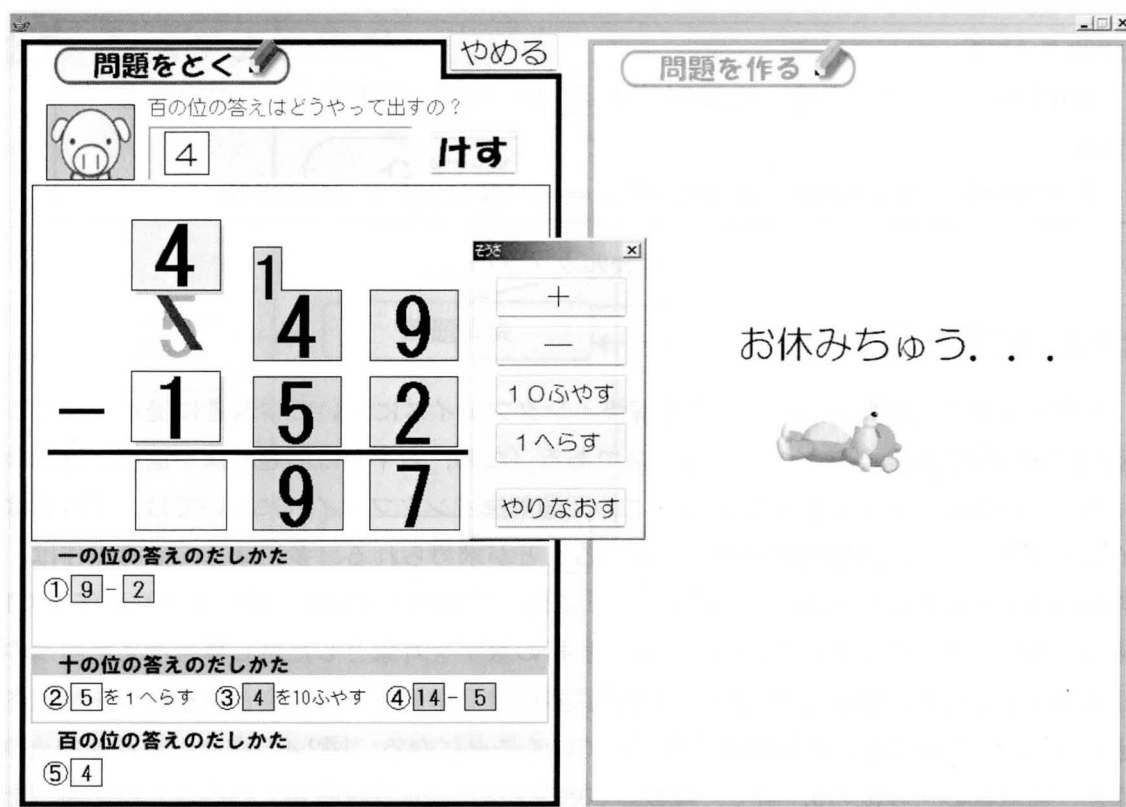


図 2.4 問題解決インタフェース

実際の計算はシステムが行うので、発生する間違いは計算操作の組み立て、すなわち計算手順の間違いのみであり、問題解決診断モジュールにおいては、計算手順の間違いを診断する。課題タイプが決まっていることから、正しい計算手順は予め分かっており、それと一致しない部分を学習者に指摘することで、システムは修正を促す。図2.5に計算手順の具体例として、課題タイプ5の一の位の計算手順を示した。

操作1：（“1減らす”，MD[1][1]）  
 操作2：（“10増やす”，MD[1][2]）  
 操作3：（“1減らす”，MD[1][2]）  
 操作4：（“10増やす”，MD[1][3]）  
 操作5：（“－”，MD[1][3]，MD[2][3]）

図 2.5 計算手順の例

### 2.3.3 作問

あるタイプの問題が正しく解決できた場合には、図2.6右のような作問インタフェースが立ち上がり、学習者に対して同じ計算手順で解ける多桁減算を作るといった作問課題が提示される。作問課題は、3.1で述べられた方法でランダムな数字を生成した後に、被減数と

減数の各桁に空欄を用意することで生成される。学習者は、その空欄に付属している上向きの矢印（1加算）と下向きの矢印（1減算）を使って適当な数字を入れていくこと行なう。図2.6の場合、減数に関しては予め数字がすべて入れられており、残り3つの空欄に適切な数字を設定することが作問の課題となっている。1つの課題タイプに対して6つの作問課題を解決すると、次の課題タイプを選択することが可能となる。つまり、多桁減算の問題を1問解くごとに、6つの作問を行うことになる。このある課題タイプに対する作問課題の難易度は、作問履歴を参照の上、空欄の数を変えることによって調整されているが、これについては、2.6.4において述べる。



図 2.6 作問インタフェース

作問診断モジュールは、解いた問題と作成した問題がそれぞれ図2.1のどのタイプに属するかを判定することで適切な問題が作成されたかの正誤診断を行う。両者が同じタイプに属する問題であった場合、システムは正解と診断し、同じ手続きを適用できる問題であったことを伝える。両者のタイプが異なる場合、システムは不正解と診断し、両者の問題が図2.1の階層構造のどの箇所ですべて初めて差異が出るかを基にフィードバックメッセージの生成を行う。同時に、解いた問題と作成した問題それぞれのタイプに対して予め用意された計算手順同士を比較することで、具体的に計算操作のどの部分が異なるかを表示する。

実際に学習者の誤答とそれに対するフィードバック例を図2.7に示す。この例では、被減

数の十の位のみの決定を求められる場合を取り上げている。解いた問題は課題タイプ4（一の位、十の位への繰り下げ問題[2回繰り下げ問題]）であるのに、学習者は課題タイプ2に属する問題（十の位から一の位への繰り下げ問題[1回繰り下げ問題]）を作成してしまっている。図2.7では、まず、計算操作が異なっている位を指摘している。さらに、図2.1の問題のタイプ分けの階層にしたがって、繰り下がりのある問題としては一致していることを指摘する。さらに、繰り下がりの回数という点で異なった計算操作になっていることを指摘している。また、提示された問題を解決する際に学習者が行った手続きの表示部の横に、学習者が作成した問題で要求される手続きを表示するとともに、手続きが具体的に異なる部分の背景を色濃く表示する。図2.7の場合、十の位の計算操作において差異が現れるため、十の位の手続きの背景部分が色濃く表示されている。

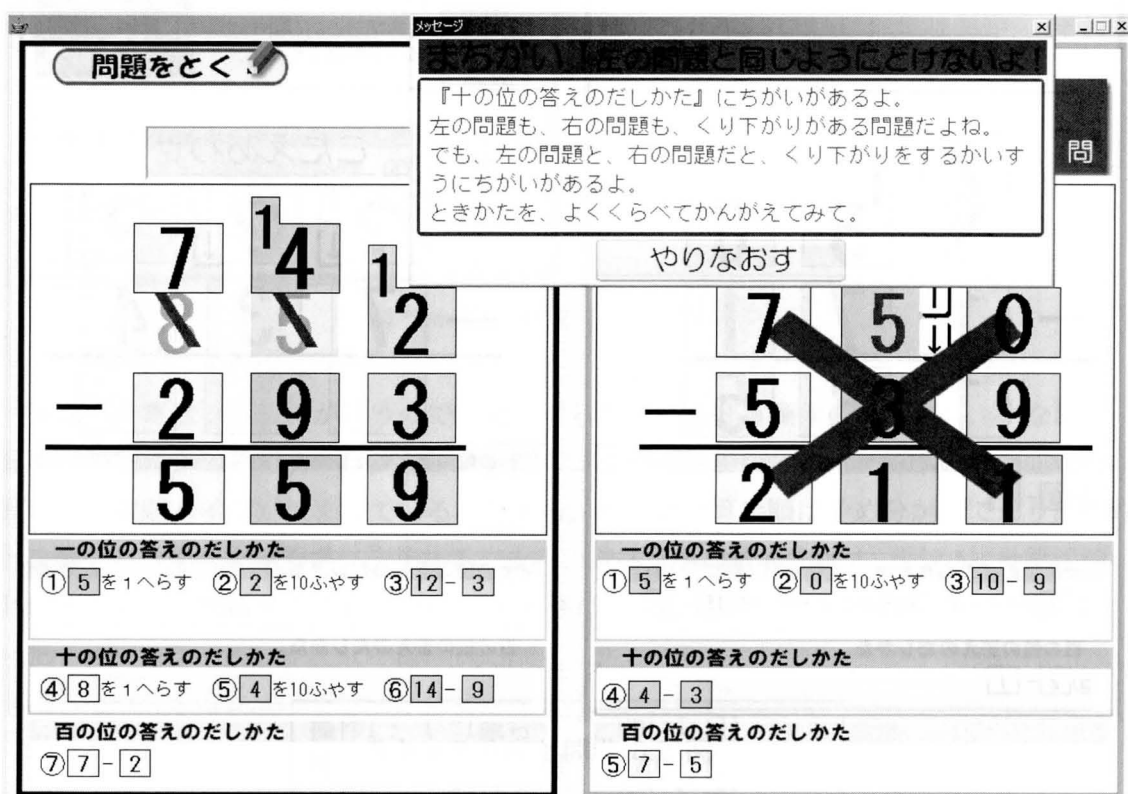


図 2.7 誤答とフィードバックの例

### 2.3.4 作問課題の難易度設定

本研究では、作問課題の難易度は、課題タイプと空欄の数で取り扱えると考えている。課題タイプに関しては、課題タイプ1～課題タイプ5の順序で計算において考慮すべき要素が増えてきており、また、教科書等においてもこの順に扱われることが多いことから、課題タイプ1～課題タイプ5の順序で難易度が上がると考えている。ただし、現在のシステム

では課題タイプは学習者自身が選ぶことになっており、難易度制御の対象となっていない。

空欄の数については、空欄の数を増やすほど学習者自身が考慮しなければならない数値間の関係が増えることから、空欄数が多いほど難易度が増すと考えている。現在のシステムでは、空欄数が1ないし2の作問課題を与える難易度ステップ1、空欄数が2ないし3の作問課題を与える難易度ステップ2、空欄数が4ないし5の作問課題を与える難易度ステップ3、空欄数が5ないし6の作問課題を与える難易度ステップ4と、空欄数に関する四段階の難易度を設けており、それぞれの課題タイプにおいて段階的に進んでいくようにしている。学習者がある課題タイプにおいてどの難易度ステップまで進んでいるかは作問履歴に記録されており、その履歴を参照することで、学習者に応じた作問課題を生成している。

なお、学習者に提供する作問課題は、課題タイプ（5タイプ）×難易度ステップ（4段階）×課題数（6課題）＝120課題となっており、120の作問を正しく行なえた場合には、本システムの利用を終了することになる。

## 2.4 使用実験

3桁減算筆算を習い終えた直後の小学3年生132名を対象として、算数の授業の一環としての本システムの利用実験を行ったので、その結果を報告する。なお、事前にクラスの担任を含めた複数の小学校教諭による本システムの試用を行い、小学校3年生で利用でき、かつ有用であろうとの判断を得ている。

### 2.4.1 目的

本実験では、本システムによって多桁減算を対象とした解法ベースの作問活動が実際に行えるかどうかを調査した。多桁減算といった解法が比較的複雑な課題を対象とした解法ベースの作問学習の支援はこれまでに実現されておらず、多桁減算を対象とした解法ベースの作問活動が行えることを示すことは、新しいタイプの学習活動を可能にする学習支援システムの実現として意義があると考えている。しかしながら、このシステムにおいて行われた作問活動が学習として意味を持っているかどうかは直接的には確認できていないと言えず、今後その学習効果を実験的に確認することが必要であるといえる。

### 2.4.2 利用手順

本利用は計算機室において一人一台の計算機を占有して行っている。利用に際しては、まず、システム利用方法に関して10分間の説明を行い、その後、約50分間システムを利用させた。システム利用後、システム利用に関するアンケートを被験者と評価利用に立ち会った各クラスの担任教諭それぞれに行った。

## 2.4.2 システムの利用結果とその考察

システム利用においては、生徒は一人当たり 122 問の作問を行い、そのうち正解は 93 問であり、正解率は 76%であった。表 2.1 にシステム利用を行った際の生徒一人あたりの作問数、正解数、正解率を 10 分区分切りで集計した結果を示した（40 分以降の欄には実施の都合で 50 分以降の利用分も含まれている）。表 2.2 に生徒一人当たりの総作問数の分布と各総作問数における正解率を示した。

表 2.1 および表 2.2 より、ほとんどの生徒が 50 分間にわたって継続的に作問を行っており、また、平均で 1 分間に 2 問、最低でも 1 問程度の作問を行えている。これに対しては、(A) 考えて問題を作っているのだろうか、(B) 何故、このような長い時間持続的に問題を作り続けることができたのだろうか、という疑問が生じる。(A) に関しては、もしランダムに数字を当てはめていったとすると、本システムの最も簡単な課題（空欄 1 つ、ある位においての大小関係のみを考慮する課題）でも正解率は約 50%であり、空欄数や課題タイプが要求する数字間の制約が多くなるにしたがって、ランダムに数字を当てはめることによる正解率はさらに低くなる。これに対して、平均正解率は 76%であり、考えながら作問していなければ出せない正解率であるといえる。また、(B) に関しては、(I) 作問自体がものめずらしかった、(II) 計算機の反応が面白かった、などが考えられるが、どの要素が最も強く働いていたのかを明確に答えることはできない。ただし、本システムの設計・開発の過程で、教師らと打ち合わせながらインタフェースの改善を行っていったが故の結果であるといえる。

また、(C) 問題を多く作った学習者と問題をあまり作らなかった学習者の差、に関して検討してみると、表 2.2 より、非常に多く問題を作る学習者と、少なく作る学習者において、正解率が低いという結果が読み取れる。これは、多く作った学習者に関しては、十分考えずに作った可能性が示唆される。またあまり作らなかった学習者に関しては、動機付けが高くなかったか、もしくは十分な能力を持ち合わせていなかった可能性が示唆される。これについては、より詳細な実験調査が必要であると考えられる。

さらに、(D) 表 2.1 において時間経過にもかかわらず正解率が変化していない理由、について検討してみる。本システムでは、同一の課題タイプに対しては、徐々に難しい課題を提示するようにしている。また、課題タイプの選択は学習者に任されているものの、簡単な順に並べることで学習者が簡単なものから選択しやすいようにバイアスをかけて提示しており、実際に、89%の生徒が課題タイプ 1 から取り組んでいたこと、難易度ステップ 1 にのみ着目すると、65%の生徒が課題タイプ 1～課題タイプ 5 の順番で取り組んでいること（学習者が無作為に選択した場合に、この順序になる確率は  $1/(5*4*3*2*1) = 0.8\%$ ）、が確認できている。このため、傾向としては学習者が取り組む課題が時間経過とともにより複雑なものとなっていったと考えられ、時間経過にもかかわらず正解率が変わらなかったことは、作問能力の向上が見られたことが示唆される。このことをさらに検討するために、



各課題タイプにおける難易度ステップ毎の正解率を表 2.3 に示した。この数字は、各課題タイプを難易度ステップ 4 まで完了した生徒のものだけを用いている。このため、少なくとも各課題タイプにおける時系列は保障されたものとなっている。この表を見る限り、各課題タイプとも、最も単純なはずの難易度ステップ 1 において最も低い正解率となっている。この数字には、ある程度システム自体への不慣れも含まれている可能性があるが、89%の生徒が最初に取り組んだ課題タイプ 1 の難易度ステップ 1 が正解率 90%であることから考えると、その他の課題タイプの難易度ステップ 1 における正解率の相対的な低さは、それぞれの課題タイプの難しさを示していると共に、その後の同じ課題タイプのより高い難易度ステップにおける相対的な正解率の高さは、その課題タイプの作問に対する学習効果を示唆するものと受け取れる。

次に、(E) 課題タイプ間の難易度について検討してみる。表 2.4 に各課題タイプの正解率を示した。課題タイプ 1 が最も正解率が高く、課題タイプ 5 が低いのは、複雑さから考えて予想通りである。しかしながら、課題タイプ 2 の低さは、予想とは異なる。課題タイプ 1 から課題タイプ 2 へは、繰り下がりの有無という大きな違いがあるが、課題タイプ 3、および課題タイプ 4 は、繰り下がりの場所および数といった比較的小さな違いしかないといえる。さらに、課題タイプ 5 は、二つ上の桁からの借りという、大きな違いが含まれることになる。これらのことから、課題タイプ 1 から課題タイプ 5 までを順番に行った場合の課題タイプの違いの大きさがこの正解率に現れたと解釈できる。

表 2.1 10 分毎の 1 人当たりの作問数と正解数

時間経過	0-10	10-20	20-30	30-40	40-	全体
作問数	25.8	26.4	21.4	22.3	25.7	122
正解数	19.1	20.9	16.8	16.8	19.4	93
正解率	74%	79%	78%	75%	76%	76%

表 2.2 生徒 1 人当たりの総作問数の分布と正解率

総作問数	60-79	80-99	100-119	120-139	140-159	160-
人数	11	26	56	29	6	4
正解率	63%	71%	86%	77%	66%	42%

表 2.3 各タイプ各難易度の正解率

(行：タイプ，列：難易度ステップ，人数：そのタイプの課題を難易度 4 まで達成した人数)

	難 1	難 2	難 3	難 4	人数
タイプ 1	90%	94%	95%	96%	97
タイプ 2	77%	85%	87%	91%	84

タイプ 3	87%	92%	93%	90%	68
タイプ 4	87%	87%	83%	89%	60
タイプ 5	77%	80%	80%	80%	54

表 2.4 各タイプの平均正解率

	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3	タイプ 4	タイプ 5
正解率	88%	73%	79%	79%	67%

本利用実験では、学習者により快適に本システムを使ってもらうことを第一義に考えたため、教師等のアドバイスに従って、学習者による自由度の高い課題選択を可能にしていた。このため、学習者の課題遂行順序と正解率等の関係の分析は容易ではなく、現時点では前述のような分析しかできていない。主に学習効果の調査を目的として行うことを予定している今後の利用実験では、課題の遂行順序とその正解率の推移を重要な情報として獲得分析できるようにする予定である。

2.4.3 アンケート結果

システム利用後の学習者へのアンケート結果を表2.6に示す。s-1, s-5より、ほぼ9割の学習者が、本システムを用いた学習を楽しんでいることが示唆される。また、s-3, s-4の結果は、8割を超える学習者が、本システムを用いた作問学習を意義のあるものと考えていることを示している。s-2の結果は、7割を超える学習者がシステムによる正誤判定および修正を役立つと思ったことを示しているが、同時に、3割には役立つという印象を与えていなかったといえる。これについては、現時点でのフィードバックは小学3年生にとっては必ずしも分かりやすいとはいえなかったことを示しているといえ、今後の改善すべき点であるといえる。

利用時に立ち会った各クラスの担任教諭のアンケート結果を表2.7に示す。t-1, t-2の結果は、学習者のs-1およびs-5の結果を教諭側から支持するものとなっている。t-3, t-4の結果は、5名中4名の教諭が本システムの利用が筆算の学習に有効と考えていることを示している。やや否定的な回答を行った1名の教諭も、t-5の質問に対しては、「少し改良すれば役に立つ」と答えており、本システムの可能性を否定しているわけではない。

これらのアンケート結果のほかに、自由記述のコメントとしては、「学力の厳しい子には、少し無理かなと思っていたが、繰り返すことでよくわかり、十分に使えると思う。」、「使い方によっては、高学年の復習でも良いし、学習の導入、はじめ、でもいいと思います。」といったものが得られた。また、t-3およびt-4に対してやや否定的な回答を行った教諭に対して行った事後のインタビューでは、学習者の能力によって効果が大きく異なるであろうこ

と、および利用中の教諭の役割がはっきりしていないこと、の指摘を受けたが、利用の仕方を工夫すれば、十分利用可能であるとのコメントを得ている。指摘の点については、現時点で十分考慮できていない点であり、今後の改善点といえる。

表 2.5 学習者へのアンケート結果

	○	△	×
(s-1)楽しく問題を作ることができたか	120	10	4
(s-2)間違ったときにパソコンが教えてくれることが役に立ったか	94	19	21
(s-3)筆算の計算のやり方をよく考えることができたか	110	22	2
(s-4)筆算の計算のやり方を考えることは、大事なことだと思うか	110	21	3
(s-5)今日の続きをもっとしたいか	118	10	5

○：はい △：どちらともいえない ×：いいえ

表 2.6 担任教諭へのアンケート結果

表 2.6-a. (t-1) 児童は楽しく筆算の問題作りを行っていたか

ほとんどの児童が楽しそうであった	4
多くの児童が楽しそうであった	1
半数以上の児童が楽しそうであった	0
楽しそうな児童は半数に満たなかった	0
ほとんどの児童は楽しそうではなかった	0

表 2.6-b. (t-2) 児童は授業の最後まで飽きずにシステムを利用していたか

ほとんどの児童は最後まで利用していた	2
多くの児童は最後まで利用していた	3
半数以上の児童は最後まで利用していた	0
最後まで利用した児童は半数に満たなかった	0
ほとんどの児童は飽きていた	0

表 2.6-c. (t-3) 児童はこのシステムを利用している間、筆算を解く手続きをよく考えていたと感じたか

非常に良く考えていた	1
よく考えていた	3
考えていた	0
少しは考えていた	1
考えていなかった	0

表 2.6-d. (t-4) このシステムを使うことが、筆算の能力の向上につながると思うか

非常に役立つと思う	1
役立つと思う	3
少しは役立つと思う	1
役立たないと思う	0
わからない	0

表 2.6-e. (t-5) 本システムが授業に役立つと思うか

このままで役立つと思う	2
少し改良すれば役立つと思う	3
大幅に改良すれば役立つと思う	0
役立つとは思わない	0
わからない	0

これらのアンケート結果から、実際に多桁減算筆算の学習を終えたばかりの児童とその担任教諭は、本システムを用いた作問活動は学習として有用であると考えていることがわかった。2.4.2 で述べたシステムの利用状況とあわせて考えると、本システムを用いて行われた解法ベースの作問活動は、十分な活動量が見られたとともに、児童や教諭から学習に有用な活動として受け入れられていたといえる。

2.5 むすび

本章では、多桁減算を対象とした解法ベースの作問学習支援システムの設計・開発と、その利用事例について報告した。作問の方式としては、多桁減算といった比較的解法の複雑な対象に対して、ある問題を解かせて、その解き方を適用できる問題を作成する、といった方式を用いて、解法ベースの作問学習を実現した。小学 3 年生を対象として算数の授業の一環として短期的に利用したところ、(1) 活発に作問を行えること、(2) 生徒および教師が学習に有用な活動として受け入れていること、が確認された。本システムを利用することの多桁減算への学習効果に関しては未だ確認できていないものの、本システムは、計算機を用いることで初めて現実的に実現可能となる新しい形態の作問学習を提案しており、これらのことが確認できたことで、学習支援システムの研究としてはある程度の意義を持っていると考えている。本システムを用いることによる学習効果の定量的な評価については、今後の課題となっている。

## 第3章 実験方法の考案による学習の 支援環境

### 3.1 まえがき

2章では、算数の領域において解法を使いこなせる訓練の一つとしての作問を紹介し、作問に対する支援の重要性を説明すると共に、実際に支援するシステムを開発し評価した。本章では、より複雑な領域としての物理に対する計算機の支援を取り扱う。ただし、物理における実験の場合、算数の問題作りとは異なり、実際の授業でも実施されることも多い。しかし、ここで実施される実験では、あらかじめ実験の手順を記した手引書を提供し、それに従い実験を行わせることが多く、学習者がその意味を十分に考えずに手引書に従い実験を行ってしまう場合も多いと考えられる。このような場合、実験による効果が十分でない場合が想定される。このため、学習者自身が実験の方法を考えながら実験を実施できるような学習環境の提供が重要な課題となっている[21]。

### 3.2 実験の目的

教育の文脈において学習者に実験を行わせる意義を、本稿では二つに分類した。

- (1)探求としての実験
- (2)設計としての実験

探求としての実験の意義は、実験を通して学習者自身に法則などを発見させることである。(1)を目的とした実験では、実験を通して得られた具体的なデータから、抽象的な法則を発見すること、あるいは既に有している法則を修正することに焦点が当てられている。このような探究的な実験は、科学的態度の育成、想像力の育成などの面から重要であるとされている。

設計としての実験の意義は、抽象的な知識として教授済みの公式などを具体的な対象系に結びつけさせることである。(2)の目的での実験では、すでに獲得済みの抽象的な知識を使って実験を行うこと、つまり獲得済みの抽象的な知識を具体的な対象系に結びつけることで、具体性をもったより定着したものにするのを指向している。(1)の目的での実験が、具体的なデータから抽象的な法則などの知識へのアプローチであったのに対し、(2)の目的での実験は、抽象的な法則などの知識を利用した具体的なデータへのアプローチであるといえる。たとえば、物理や化学などの授業において抽象的な知識として教授された公式は、物理の問題解決を通してテストで与えられる問題には利用できることになる。しかし、テストで与えられるような問題には利用できても、具体的な対象系にうまく適用できないことが多いとされており[22]、このような問題点に対して(2)の目的での実験は有効であるといえる。本研究では、(2)の目的での実験の支援を目標とする。

### 3.3 仮想実験環境

仮想実験環境は、学習者自身による実験の補助を支援する有望の枠組みの一つであるが、これまで行われてきた研究の多くは、前述(1)の実験を通じた法則の発見、を目的として進められており、具体的なデータから抽象的な法則を導き出すことの支援に焦点が当てられてきたといえる[23,24,25,26,27]。これらの研究では、学習者が試行錯誤できる実験環境の提供と、試行錯誤の結果生じた様々なデータからの法則の新規獲得や修正を促す支援、が主に行われてきた。しかし、(2)の目的での実験を通じた学習を支援するためには、環境の提供やデータから知識を獲得するための支援だけでは不十分であり、学習者自身が明示的に実験を行うことが要求される実行環境と、学習者が行った実験の診断機能が必要である。

### 3.4 実験方法の考案による学習

(2)の目的での実験では、ある値を求めることを目標として、(i)その値を求めるために必要な公式を考え、(ii)その公式が必要とする値を対象系において測定する、といった作業が行われることになる。(i)により具体的な系で利用可能な獲得済みの抽象的な公式を正しく選択できる能力の獲得、(ii)により抽象的な公式を具体的な系に対応づけて実際に用いる能力の獲得、が期待される。以下本稿では、(i)、(ii)の二つを考案することを「実験方法の考案」とよぶ。

実験方法の考案を行える仮想実験環境に関する研究としては、妻鳥ら[28]や中池ら[29]の研究があげられる。妻鳥らの研究では、実験環境の設定とその環境で発生する現象の予想を「実験計画」と呼んでおり、本稿の「実験方法の考案」とほぼ対応したタスクを扱っているが、予想と実験で発生した現象が異なった場合は、予想の修正のみが指導され、設定

した環境の修正は行われたい。つまり、知識に基づいた実験を行うのではなく、実験に基づいた知識の修正であり、(2)の目的の実験の支援とは目的が異なる。中池らの研究では、抽象的な知識として仮説を設定したのちに、具体的な系で検証するための実験方法の考案を行わせている。しかし、ここで着目しているのは一貫した仮説—検証を行うスキルの獲得であるため、測定自体は仮説の構成要素の属性が判明すれば直ちに測定可能な分野を扱っており、知識を対象系と対応付けて用いる能力の獲得は主眼となっていない。また、実験方法考案時の誤りについても明示的な支援は行っておらず、(2)を目的とした実験を支援する仮想実験環境としては不十分であるといえる。

これらに対して本研究で注目しているのは、ある知識の対象系への結びつけ自体であり、そのためには、目標達成のために必要な知識の選択と、選択した知識を元にした測定が不可欠であるという点である。もちろん、知識はどのような属性を測定すればよいか指定していると考えてよいが、その属性値をどのように測定するかは自明ではない場合が多い。たとえば、力学の知識は速度や加速度あるいは時間などの属性によって構成されており、公式を学習済みであれば、ある属性値を求めるためには他のどの属性値を測定しないといけないかは自明である。しかし、その属性値を具体的な力学系においてどのように測定する必要があるかは自明とはいえない。そして、これらのことが判断できないとすれば、力学の公式を知っていたとしても、それを具体的な力学系に結び付けて理解しているとはいえない。

本研究では、力学の学習を対象として、学習者による実験方法の考案を支援する仮想実験環境を設計・開発した。本仮想実験環境では、実験方法考案課題として、ある力学系を与え、つまりオブジェクトの配置や初期状態が既に設定されたものを与え、その系において求めるべき属性を提示し、(a)その属性値を求めるために使う公式の選択・組み合わせを行わせ、(b)それらの公式を用いてその属性値を求めるための測定を行わせ、(c)公式と測定値より要求された属性値を求めさせるといった入力を学習者に課す。以上の入力とそれに対する評価を行うために、従来の仮想実験環境に付け加える特徴として、学習者による実験方法の考案を支援することを目的として、(A)学習者が公式の選択・組み合わせを行えるインタフェイスとその診断機能、(B)学習者が測定を行えるインタフェイスとその診断機能、(C)学習者が測定値を公式に代入できるインタフェイスとその診断機能、がある。本来、前述(ii)の測定には、対象系をどのように設定するかも含んでいるが、本研究では系の設定は取り扱っておらず、予め与えることにしている。しかし、この制限上でも、与えられた系に対してどのように属性値を測定するかを考えることは容易ではなく、どのような属性値を測定できれば良いかが分からなければ公式の選択は行えないため、前述(i)、(ii)は十分な複雑さを含んでいるといえる。なお、要求された属性値が直接測定できてしまう場合は、公式を使う必要性が生じないことから、ここで扱う課題設定においては、要求される属性値は別の属性値の測定から公式を用いて求めるように設定している。

以降、本研究で取り扱う実験方法考案課題に対する考察を行い、さらに、その学習プロ

セスに基づいた仮想実験環境の設計・開発について説明する。また、実装した本環境の評価実験の結果について報告を行い、最後にまとめる。

### 3.5 実験方法考案課題

本研究では、教授された抽象的な知識としての公式を、具体的な事象に結びつけるための一つの方法としての、実験方法の考案を通した学習を取り扱う。通常の物理の授業では抽象的な知識を具体的な事例に適用させるために様々な問題を解かせる。この際の「問題」とは、「答えとして求める属性と、その答えを求めるために使ってよい属性値が予め与えられており、その間の数量関係を公式によって結ぶ」といった課題である。また「実験方法考案課題」とは、ある属性値をある力学系において求めるために必要な実験の方法を、どのような公式を用いて、どのように属性値を測定すればよいかを考えて組み立てる課題であり、力学系や利用可能な観測道具、求める属性値を制約として、公式や測定する属性値を部品として、実験方法を合成するといった課題である。

図 3.1 に実験方法考案課題の一例を示した。この課題を解くために、学習者は、(a)目標の属性値を求めるために利用可能な公式を選択・組み合わせ、(b)その公式群における変数に対応する属性値を具体的な力学系において観測道具を用いて測定し、(c)測定値を公式に代入し、課題として要求された属性値を導くことになる。ある属性値を求める際に選択した公式やその組み合わせが利用可能かどうかは、力学系において、必要な属性値を測定することができるかどうかを考えないと判断できない。また、ある公式の組み合わせを考えた場合においても、公式内の変数が対象の力学系においてどのような意味を持つかを判断しないと測定は行えず、測定値の代入も、公式と対象の系の関係の理解無しには行えない。

つまり、実験方法考案課題は、公式およびそこに含まれている属性が具体的な力学系においてどのような意味を持っているかを把握してないと、適切に答えることができない課題となっている。通常の問題解決課題においてはこのような把握は答えを導くという目的においては必ずしも必要ではないといえ、問題解決課題を解けても、実験方法考案課題が解けない場合が多いと考えられる。たとえば図 3.1 の場合、必要な属性値を与えた上で重力加速度を求めさせるといった解決課題を簡単に解決できる学習者であっても、図 3.1 の設定において適切な実験方法を考案できる学習者は必ずしも多くないといえる。

本研究では、実験方法考案課題の学習プロセスが、(a)公式の選択・組み合わせ、(b)属性値の測定(初期状態の測定と実験を行っての測定)、(c)測定値の代入からなることに基づき、それに対応した、(A)公式の選択・組み合わせ、(B)測定、(C)代入、について表現できるインタフェース、及び各過程における正誤判定、正解への誘導を行う診断機能、を備えた仮想実験環境を構築することで、実験方法の考案を通した学習を支援する環境の開発を試みている。本仮想実験環境の設計・開発については 3.6 で述べ、その評価については 3.7 で述べる。



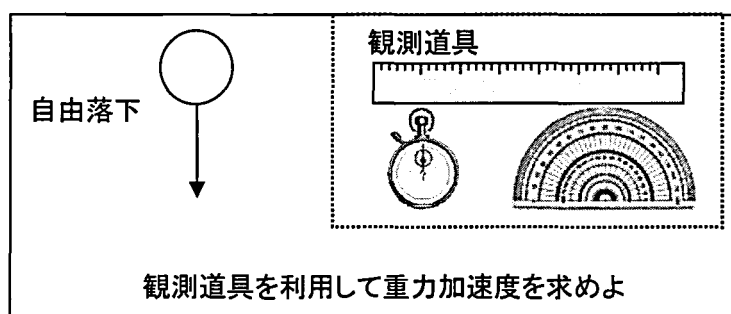


図 3.1 実験方法考案課題

## 3.6 システム設計

本仮想実験環境は、Microsoft Visual Basic 6.0 を用いて開発され、Windows2000 及び XP 上での動作が確認されている。

### 3.6.1 インタフェイス

#### 3.6.1.1 公式組み合わせインタフェイス

開発したインタフェイスを図 3.2 に示した。獲得済みの公式を具体的な対象系に結びつけることを目的とした場合、必ずしも公式を記述させる必要は無いと考え、このようなインタフェイスを用いている。公式リストには利用可能な公式が一覧表示されており、利用者はリストから任意の公式を選択し、追加ボタンを押し、公式群ウィンドウに追加する(本環境では、公式は全 20 種で、6 つまで組み合わせることができる)。公式群ウィンドウでは選択済みの公式の詳細な設定として、各変数の設定や、公式の利用目的を設定する。変数の設定では、変数の添え字選択や、どの変数が課題の目標の属性であるかの選択を行う。利用目的の設定では、目標を求める式であるか、他の式のどの変数を求める式であるかを記述する。同一の添え字を持つ同一の属性は、異なる公式間でも同一の属性として扱われることとし、この取り決めと公式を利用する目的により公式の組み合わせを行う。たとえば、重力加速度  $g$  が目標のとき、式 1 :  $a_1 = a_2 / \sin \theta_1$ 、式 2 :  $v_1 = a_1 t_1$  を選択後に、式 1 :  $a_1$  を目標  $g$  とし、式 1 :  $a_2$  と式 2 :  $a_1$  を添え字の統一 (共に  $a_1$  にするなど) により同一の属性とした後、式 1 の利用目的を目標を求めるため、式 2 の利用目的を  $a_1$  を求めるためとすることで、 $g = a_1 / \sin \theta_1$ 、 $a_1 = v_1 / t_1$  とする式の組み合わせを行える。また、メッセージウィンドウには操作法や診断メッセージが表示される。

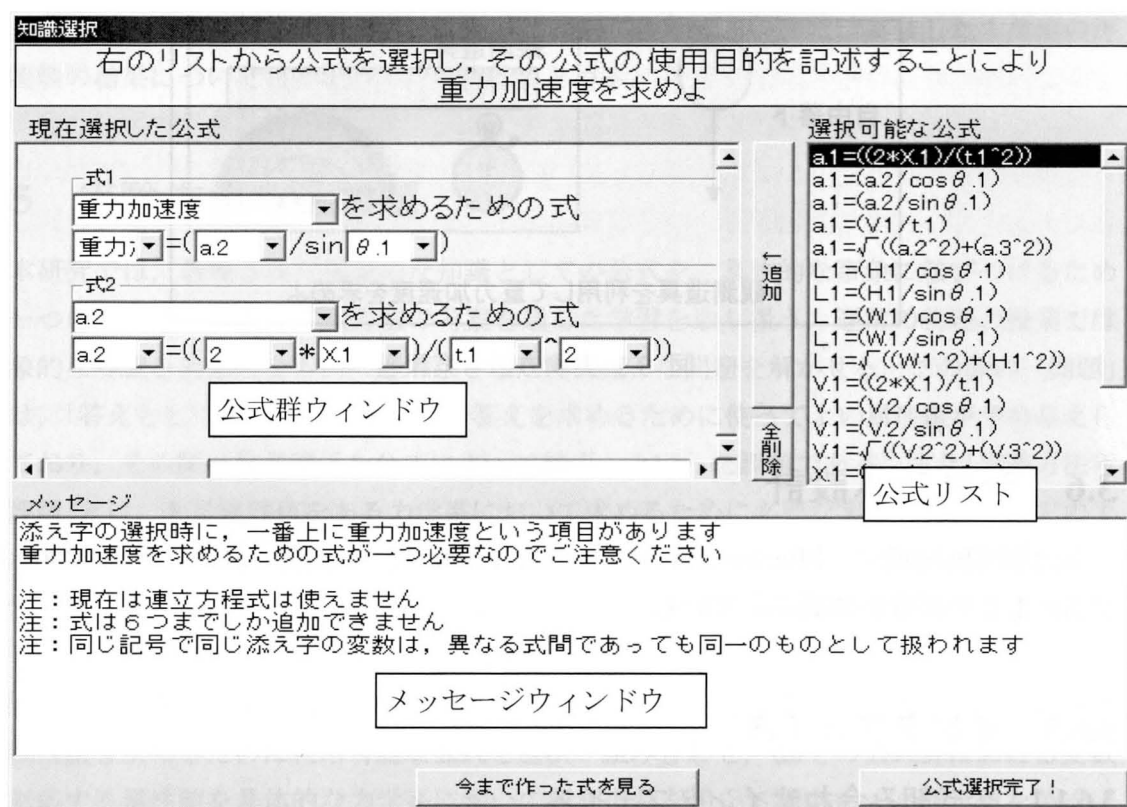


図 3.2 公式選択・組み合わせインタフェース

### 3.6.1.2 測定インタフェース

測定では、課題で設定された観測道具を選択し、対象の力学系の様々な数値を計測する。本研究の目的においては、たとえば、速度を測定する際に「速度を測定する」という宣言だけで測定が行われるのでは不十分であり、学習者自身に何らかの測定操作を行わせる必要がある。本仮想実験環境では、個々の観測道具に、一つ以上の測定可能な属性を設定し、その属性の値については制限無く測定可能であるとしている。たとえば、ものさしにより全ての対象の長さや位置を制限無く測定することが可能である。測定は、観測道具の選択後に、(I)対象とするオブジェクトまたはオブジェクトの部分を選択し、観測する属性を選択することを要求する。(II)方向性のある属性の場合（物体の移動距離、速度など）はどの方向に対して測定するかについても追記し、(III)静的な値については初期状態の測定（運動が開始される前の状態の測定）、動的な値については振る舞いの測定（運動中の測定）、を要求する。さらに、移動距離などの動的な値は単体での測定に意味は無く、複数の属性と共に測定する必要があるため、振る舞いの測定では、(IV)複数の属性の同時点での測定を行う。これらにより、単に公式における属性が「速度」、「加速度」であるといった理解だけでは測定が行えず、各属性が、(I)どの対象のどの部分の(II)どのような方向に(III)どのような時点で(IV)どのような属性とともに測定するかを力学系において考慮しないと測定が行えないようになっている。

実装したインタフェースを図 3.3, 図 3.4 に示す. 表示例では, 課題で利用可能な観測道具 (測定能力) は, 分度器 (角度), ものさし (位置, 長さ, 距離), 時計 (時間) で, 観測対象は斜面上の物体 (半径, 移動距離[斜面平行], 移動距離[斜面垂直], 移動距離[水平], 移動距離[鉛直]), 斜面傾斜部分 (長さ), 斜面鉛直部分 (縦幅), 斜面水平部分 (横幅), 斜面と水平線の交点 (以降斜面の角度 1 と呼ぶ), 斜面と鉛直線の交点 (以降斜面の角度 2 と呼ぶ), 場 (時間) となっている.

図 3.3 は初期状態測定において斜面の角度 1 を測定している例である. 観測道具リストから道具を選択すると力学系ウィンドウにその道具が表示される. 道具を動かし測定可能な対象に近づけると対象の測定可能な属性が表示される. 事前測定では属性を選択すると直ちに属性値が結果として与えられ, 測定値リストには属性名=値の形式で追加される. 例では観測道具として分度器を選択し, 対象として斜面と水平線の交点, 属性として角度を測定している.

振る舞い測定では同時に測定する属性の設定インタフェースとして図 3.3 のインタフェースを利用し, 実際に運動をシミュレートし, 運動中に測定を行うために図 3.4 の振る舞い測定インタフェースを利用する. まず, 図 3.3 のインタフェースで, 初期状態測定と同様の手順で同時に観測したい属性を全て選択する. 必要な属性を全て選択したと判断した学習者は「次のステップに進む」ボタンで図 3.4 のインタフェースに移行する. ここでは先ほど選択した属性が全て測定予定値リストに追加されている. 運動の開始ボタンを押すとシミュレート画面で運動がシミュレートされる. 運動中に測定ボタンを押すとその時点で測定予定値リストの属性値が全て同時に測定され, 図 3.4 の測定値リストに表形式で追加される. たとえば, 「運動開始からの時間」と「そのときの物体の斜面平行方向の移動距離」を測定するには, 図 3.3 のインタフェースで「場(時間)」と「物体(移動距離[斜面平行])」を追加しておき, 図 3.4 で運動中に「場(時間)」と「物体(移動距離[斜面平行])」を測定することで, 「時間」と, 「時間と同時に測定した物体の移動距離[斜面平行]」を測定できる. 測定が十分だと感じた学習者はさらに「次のステップに進む」ボタンを押すことで診断が行われ正解であれば次に進む. 誤っていればその旨を伝えるメッセージがメッセージウィンドウに表示される.

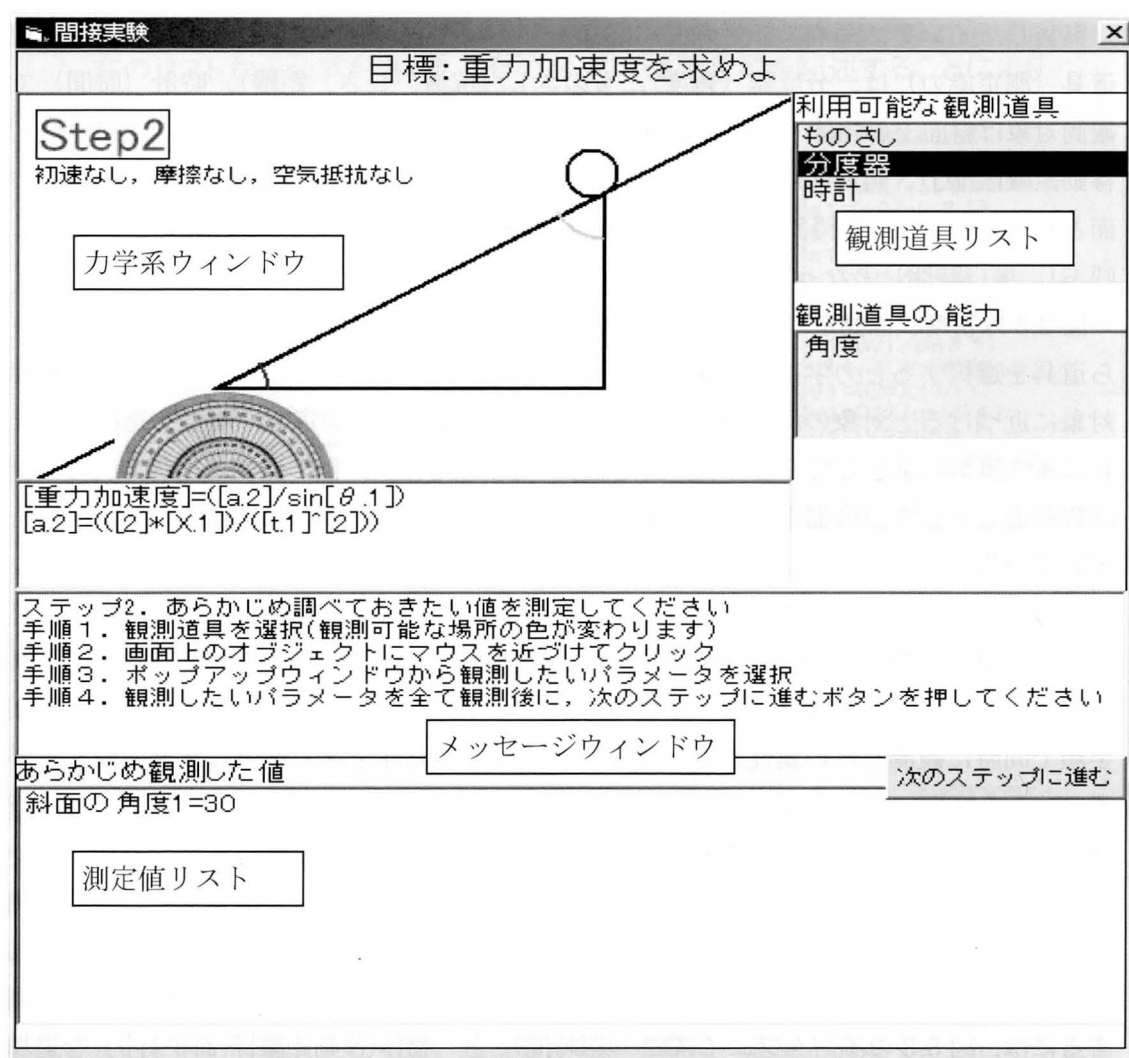


図 3.3 初期状態測定インタフェース

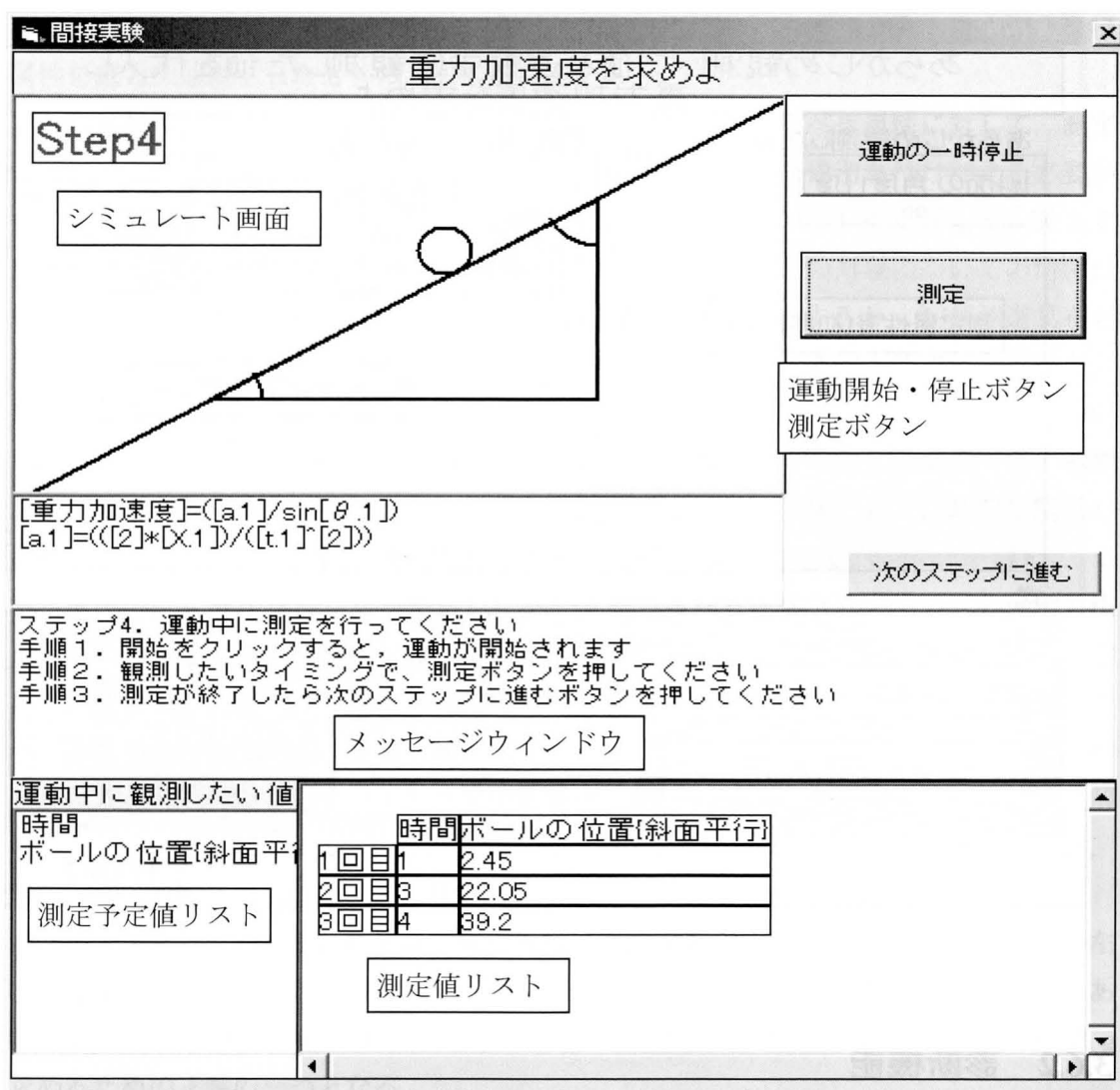


図 3.4 振る舞い測定インタフェース

### 3.6.1.3 代入インタフェース

代入では、測定値と公式の結びつきを表現させ、目標の属性値を求める式を完成させる。実装したインタフェースを図 3.5 に示す。公式群表示ウィンドウでは公式選択・組み合わせインタフェースで設定した公式が表示される。ウィンドウ内において枠線で囲まれており、文字が色濃く表示されている部分が、公式における未知変数である。未知変数に、測定値（斜面の角度 1，時間，物体斜面平行な移動距離の測定値など）を表形式で表した測定値表（初期状態，振る舞い）から値を選択し代入することで、目標の属性値を求めるための式を作る。代入が完了した学習者は「代入完了」ボタンを押す。診断の結果問題がなければ課題は完了となる。誤りが存在した場合はその旨を伝えたダイアログボックスが表示される。

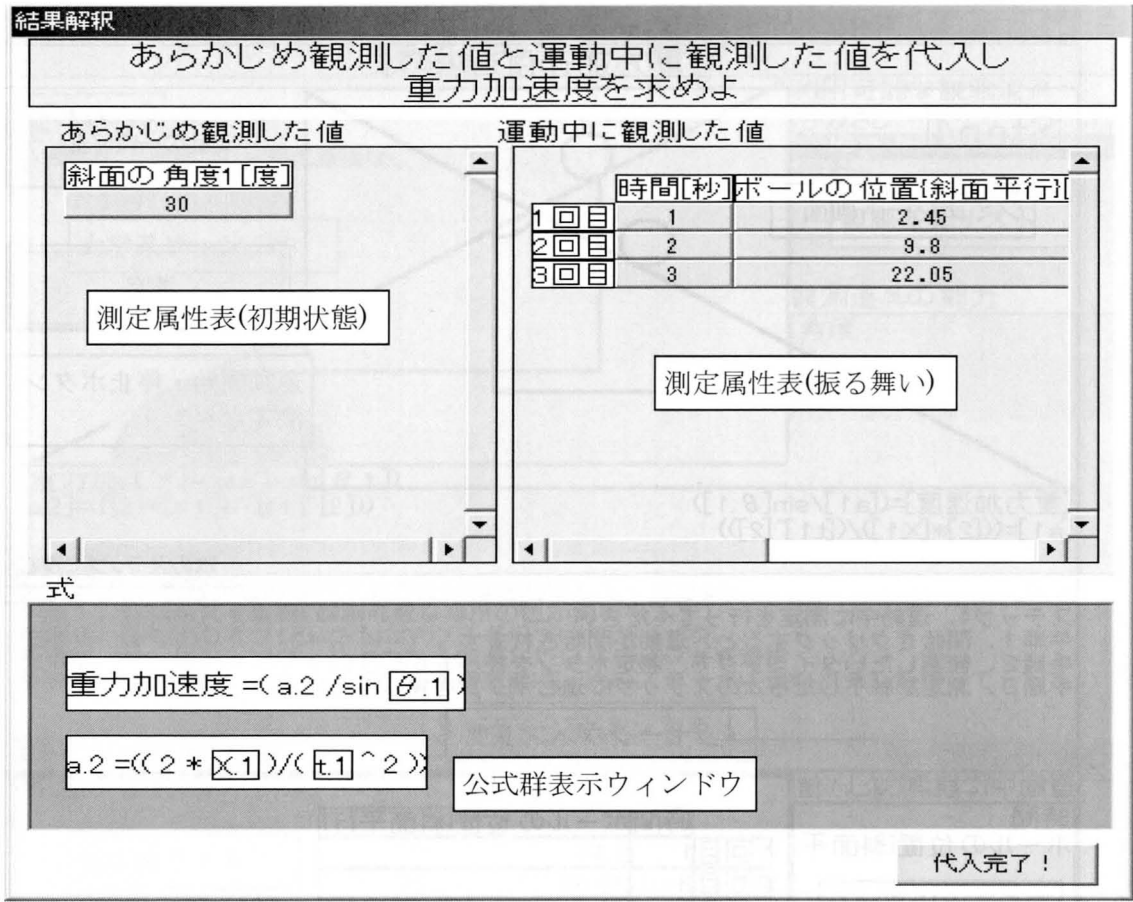


図 3.5 対応付けインタフェース

### 3.6.2 診断機能

本仮想実験環境における診断は、Hirashima らの現象構造および解法構造の枠組み[30]に本研究の特徴である測定に関するデータ構造として測定構造を付加した形で行われる。診断は、インタフェースごとに独立に行われている。本節では、測定構造及びそれを利用した診断について説明する。

#### 3.6.2.1 構造

現象構造は、ある物理状況に存在する全ての属性とそれを関連付ける物理法則を記述するための枠組みを提供し、現象構造にさらに目標の属性、既知の属性値を与えることで目標の属性をルート、中間変数を中間子、既知の属性値をリーフ、公式を各ノード（属性）間のリンクとした木である解法構造を生成できる。本環境では、この解法構造と後述の測定構造を用いて診断を行う。本課題は、通常の問題と異なり既知の属性値は存在しないため、利用可能な観測道具から観測可能な属性を求め、それをリーフとした構造を生成する。観測道具をどのように用い測定を行うかにより、目標を求めるために使える正解の公式の

組み合わせは複数存在する．図 3.6 は本環境の事例における現象構造の例，図 3.7 は目標の属性を重力加速度としたときの解法構造の例である．

実際に本課題を行うためには，木のリーフ，つまり測定されるべき属性に対して，測定のための情報を含む必要があり，解法構造に測定のためのデータ構造を付け加える必要がある．本研究では，測定のためのデータ構造を測定構造と呼ぶ．図 3.8 は図 3.6，図 3.7 に対する測定構造の例である．通常の問題においても属性値やその対象についての情報は一般的に含むが，測定に関してはさらに，(a)どの観測道具を利用するか，(b)観測道具をどの方向に向けて測定するか，(c)ある属性値の変化が他の属性値の変化と関連がある場合，つまり，ある属性値の変化に伴い他の属性値が変化する場合，関連のある属性，について記述する必要がある．関連がある属性には様々なものが存在するが，本環境では，初期状態の測定と，振る舞いの測定を用いることで，時間に関する関連，および時間に関係した属性（速度や移動距離など）間に関する関連のみを取り扱っている．

測定構造では，解法構造（現象構造）において記述される属性全てについての測定方法が記述されるべきであり，そこで用いられている属性と同一であることが区別できる記述方法が必要となる．図 3.8 では，ある属性を表す記号，添え字の組み合わせはユニークであり，測定構造，解法構造，現象構造において同一属性には同一の記述が用いられていることによりこれを行っている．そのため，この測定構造は，解法構造のリーフに接続（解法構造のリーフの属性に対して，測定方法の情報を付与）することができる．本環境では，この測定構造を解法構造のリーフに接続したデータを用いて診断を行う．

本環境の例では， $g=a_1/\sin \theta_1$  と  $x_1=(1/2) a_1 t_1^2$  の式の利用，斜面の角度： $\theta_1$  を斜面の左下に分度器をあて測定，移動距離： $x_1$  を斜面上の物体にものさし（巻尺）を斜面平行にあて時間  $t_1$  と共に測定，時間： $t_1$  はストップウォッチ（時計）で測定，という方法が目標  $g$  を求めるための正解の一つとなる．

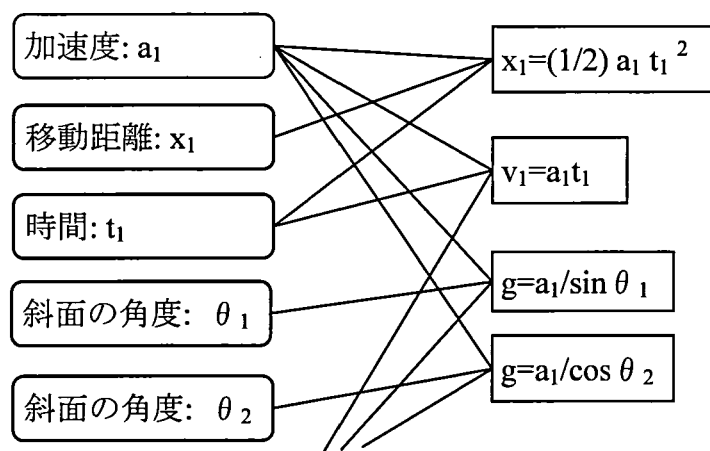


図 3.6 現象構造の一部の例

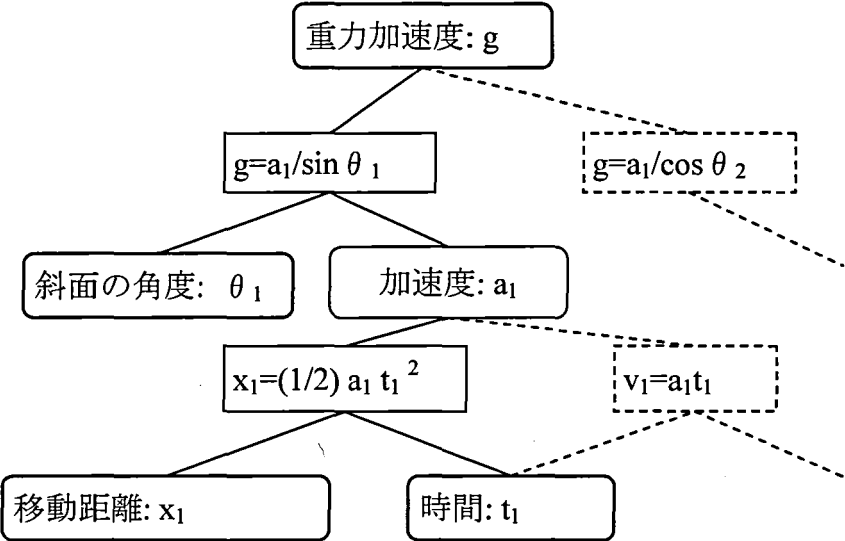


図 3.7 解法構造の一部の例

- ・ 加速度：  $a_1$ 
  - －対象：斜面上の物体
  - －道具：加速度測定器
  - －方向：斜面平行
- ・ 移動距離：  $x_1$ 
  - －対象：斜面上の物体
  - －道具：ものさし，巻尺
  - －方向：斜面平行
  - －関連：時間  $t_1$
- ・ 時間：  $t_1$ 
  - －対象：斜面上の物体
  - －道具：ストップウォッチ，時計
  - －関連：移動距離  $x_1$
- ・ 斜面の角度：  $\theta_1$ 
  - －対象：斜面の左下の角
  - －道具：分度器
- ...

図 3.8 測定構造の一部の例

3.6.2.2 公式組み合わせ診断

本環境では，学習者の解答が，解法構造の複数の正解のうちのどれか一つに該当すれば正解と判断している．学習者の解がどの正解にも一致しない場合は，学習者の解を考慮せずに特定の正解に誘導するのではなく，学習者の誤答に合わせ誘導する解を適切に選択することが望まれる．本研究では，「学習者の修正の手間がもっとも少ない正解」に誘導を行



うことで、学習者の解を考慮した誘導を行えると考える。公式の組み合わせを修正する際は、式の追加・削除が主になるため、追加・削除が「最小手数で誘導できる正解」は、「学習者の修正の手間がもっとも少ない正解」の一つであると考えることができる。

学習者の解は、選択した式について利用目的（目標の属性のため、または、ある中間変数のため）を記述させることにより、目標の属性をルート、未知変数（測定すべき変数）をリーフとし、中間変数（属性）を中間子とし、公式でノード間にリンクをはった木として表現できる。これにより、解法構造と同じ構造で表現でき、その比較により差（修正の手数および修正内容）を取得することが出来る。そのためのアルゴリズムは以下のとおり。

1. 学習者の木と正解の木をそれぞれルートから対応する公式（リンク）同士を比較していく。
2. 一致しない公式が発見された場合、その公式より下位の部分について、学習者の木の公式を全て削除リストに追加。正解の木の公式と利用目的の組を全て追加リストに追加。また、以降その下位部は検索しない。
3. 全ての公式の検索が終われば終了。削除リストと追加リストの公式の数の和が修正のために必要な手数となる。

以上より、学習者の解をある正解に修正するために必要な手数および必要な修正内容（追加リストと削除リスト）を取得できる。修正に必要な手数が最小の正解が「最小手数で誘導できる正解」となる。例えば、正解の一つが「 $g$  のための式： $g = a_1 / \sin \theta_1$ 、 $a_1$  のための式  $x_1 = (1/2)a_1 t_1^2$ 」で、学習者が解を「 $g$  のための式  $x_1 = (1/2)g t_1^2$ 」のみとした場合、ルート  $g$  の下位の公式で不一致する。よって、学習者の公式  $x_1 = (1/2) g t_1^2$  を削除リストに追加し、正解の公式  $g = a_1 / \sin \theta_1$  と利用目的  $g$ 、公式  $x_1 = (1/2) a_1 t_1^2$  と利用目的  $a_1$  を追加リストに追加する（削除1，追加2で手数3）ことで手数と修正内容を取得できる。また、アルゴリズムで完全一致する学習者の解は手数が0となり、正解の一つであると判断できる。

本研究では、ある誤った公式以下の構造は全て修正されるが、最小の手数の誘導を考えた場合、下位の構造を保持したまま、上位を入れ替えることが適切という立場も考えられる。例えば、「 $g = a_1 \cos \theta_1$ 、 $x_1 = (1/2)a_1 t_1^2$ 」を「 $g = a_1 \sin \theta_1$ 、 $x_1 = (1/2)a_1 t_1^2$ 」に誘導するためには、「 $g = a_1 \cos \theta_1$ 」と「 $g = a_1 \sin \theta_1$ 」を入れ替えることも考えられる。しかし、本研究では、解法構造におけるある中間変数を表すノードに対し、そのノードより下位の部分木は、その中間変数を求めるための解法木であり、その中間変数に関する考え方が間違っていたとすると、それ以降の木は全て修正されるべきと考え、修正を行っている。

誘導の際には、メッセージウィンドウで段階的な診断メッセージが表示される。これは、最初から修正に必要な情報全てを与えた場合、学習者が考える機会を失うためである。誤りが発見された場合は、まず「誤りが存在します」と誤りの存在のみ指摘する。学習者がこの時点で修正を行えば、インタフェイスを用いて修正し、再度診断を受けることがで

きる。修正を行えない場合は、診断メッセージと共に表示される「詳細表示」ボタンを押すことで、さらに詳細なメッセージについて、「削除すべき式が存在します」「追加すべき式が存在します」などの誤りの種類（追加・削除）、「 $g$  のための式を追加してください」「 $a_1$  のための式を追加してください」などの誤りを修正するための情報の一部を表示、「式  $g=a_1\cos\theta_1$  を削除してください」「 $g$  のための式  $g=a_1\sin\theta_1$  を追加してください」「 $a_1$  のための式  $x_1=(1/2)a_1t_1^2$  を追加してください」などの誤りを修正するための情報を全て表示、の順で段階的に提示される。

### 3.6.2.3 測定診断

本環境では正解しない限り次のインタフェースに移行できないため、測定の診断時には学習者の公式の組み合わせは既に正解であることが保障されている。そこで、その解法構造のリーフを検索し、対応する測定構造を参照することで、測定すべき属性およびその測定方法を取得できる。また、学習者は測定インタフェースを用いて、初期状態の測定と振る舞いの測定から、変化の無い属性と変化のある属性をそれぞれ測定することができ、初期状態の測定では、道具、対象、属性、方向を選択することにより、学習者の行動を属性名（対象、道具、方向）という入力データとして取得、振る舞いの測定では、さらに関連付ける属性の選択により、属性名（対象、道具、方向、関連）の形でデータを取得、することができる。このため、学習者の解は測定構造と比較可能な形として取得でき、比較により正誤判定、正解への誘導を行う。そのアルゴリズムは以下のとおり。

1. 解法構造のリーフの属性とその測定方法（測定構造）の組を必須測定リストに代入する。
2. 必須測定リスト内の要素を一つ取り出し、学習者の測定結果と比較する。
3. 属性、測定方法（対象、道具、方向（、関連））がともに一致するものがある場合、対応する学習者の測定には以降比較の対象としないように正解フラグを付け、6に進む。
4. 属性、測定方法がともに一致する測定結果がない場合、不足測定リストにその要素を追加する。
5. 属性は一致するが、測定方法が一致しない測定がある場合、測定方法の修正で正解へ誘導できるので、対象となる学習者の解を全て修正候補リストに追加し、不足測定リストの要素と対応させ、6に進む。
6. 必須測定リストが空でなければ2に戻る。

この結果、不足測定リストに要素が存在する場合は、それが修正すべき測定となる。不足測定リストの要素を参照することにより、どの属性についての測定が不十分であるかを検出でき、さらにその属性の修正候補リストが存在した場合は学習者の解の測定方法の修正により正解にいたれることが判明し、修正候補リストが存在しない場合は、その属性は

全く測定されていないことが判明する。なお、修正候補として一度提示された学習者の解には、提示済みフラグをつけ、以降は修正候補としては提示されない。

測定においても診断メッセージは段階的に表示され、学習者は自分の誤り状態に合わせてメッセージを受け取り、適切なタイミングで修正することができる。測定においては、「測定すべき値が測定できていません」と誤りの存在のみの指摘、「 $x_1$ に相当する属性を測定してください」などの誤りの種類（測定すべき属性）についての表示、「 $x_1$ は属性：移動距離については測定できていますが、測定方法の方向の部分が誤りです」などの誤りを修正するための情報の一部を表示、「 $x_1$ を斜面平行な移動距離として、時間  $t_1$  とともに振る舞いの測定において測定してください」などの誤りを修正するための情報を全て表示、の順で提示する。

### 3.6.2.4 代入診断

代入においては、公式内の未知変数に対応する適切な測定方法の属性値を代入できているかを測定構造にそって、属性の誤り、対象の誤り、方向の誤り、関連の誤り、から診断する。誤りが存在する場合はその旨をダイアログボックスにて表示する。

代入においても診断メッセージは段階的に表示される。代入では、誤りの存在のみの指摘、「 $x_1$ に代入すべき値が間違っています」などの誤りの種類（誤りの箇所）の表示、「 $x_1$ に代入している測定結果の属性が間違っています」「 $x_1$ に代入している属性の測定方法が間違っています」などの誤りを修正するための情報の一部を表示、「 $x_1$ には、時間  $t_1$  に対応する斜面平行な移動距離を代入してください」などの誤りを修正するための情報を全て表示、の順でメッセージを表示する。

## 3.7 使用実験

ある一つの実験方法考案課題に対する妥当な公式の組み合わせは一般に複数存在し、測定、代入は公式群により正解が異なる。したがって、その答えの正誤判断自体、個々の答えに対して行う必要がある。また、誤りや行き詰まりに対する指導を行う際にも、どの正解に誘導すべきかを学習者の現在の状態から判断することが求められる。つまり、実験方法考案課題を支援するためには、個々の学習者に応じた高度な個別対応が求められることになる。したがって、実験方法考案課題は、3.6 で述べたような仮想実験環境を実現することによって初めて現実的な課題として取り扱うことができると考えられる。この意味において、本環境を用いて実験方法考案課題を学習者が遂行できることを示すことができれば、本研究の意義を示すことになると考えている。

このような観点より、本環境の評価実験として、大学生に本環境を利用してもらい、使用履歴およびアンケートを採った。加えて、本環境の利用後の被験者に実験方法考案課題を紙上で解いてもらった。この成績については、さらに、本環境を利用せずに実験方法考案課題を解いてもらった場合の成績との比較を行った。

### 3.7.1 システムの使用実験

使用実験は工学部大学生 15 人（以降被験者群 A と呼ぶ）に行ってもらった。最初に本仮想実験環境の利用法について説明を 10 分間行った後、本環境を用いて 3. で説明した斜面上を初速 0 で移動する物体における重力加速度を道具をものさし、分度器、ストップウォッチに限定した上で様々な方法で測定してもらった課題に 50 分間取り組んでもらった。その後紙上で重力加速度の測定方法を記述させる実験方法考案課題 5 問を制限時間 50 分で解いてもらった。図 3.1 は実際に紙上で与えた自由落下を通して重力加速度を測定する実験考案課題の一つである。そのほかには、斜方投射より重力加速度を測定する課題、単振動振り子より重力加速度を測定する課題、滑車の両端に質量の異なる物体が下がっている状態で重力加速度を測定する課題、円運動している物体で遠心力の式より重力加速度を測定する課題を出題した。本環境で用いた課題と、紙上で用いた課題は、重力加速度の測定という面で共通しているが、これは学習者の目標の属性が何であるかについて認識する際の負担を軽減している。しかしながら、それらの課題の具体的な状況や、解決の際に用いる道具や公式、および公式の組み合わせ方法、測定方法は全て大きく異なる問題であり、学習者の一般的な実験方法考案課題に関する能力の向上を測定できる課題であると考えている。これらの課題を行ってもらったうえで、本環境および実験方法考案課題についてのアンケートを行った。

本環境の利用時間中に行われた、公式の選択、組み合わせに関する設定、測定、代入のそれぞれ 1 回の操作を 1 行動と換算し、50 分間における一人当たりの平均の行動回数を 5 分毎に集計したものをグラフ化したものが図 3.9 である。図 3.9 では、最初の 15 分間は徐々に行動回数が増加しており、その後は、最後まで安定した行動回数がみられている。また、学習者は平均 2.6 課題について実験方法の考案を正しく行うことができ、これらの課題遂行中に各被験者に対して表 3.1 のように多くの誤りを検出しフィードバックを返すことができた。これらのことから、学習者が本環境を用いた課題遂行を時間内において継続的にしており、また、本環境から多くのフィードバックを受け取っていたといえる。

アンケート結果は表 3.2 にまとめた。多くの被験者は、測定時の道具の使い方が現実の実験と違いとまどった、公式の選択インタフェイスが難解であるなどの理由で、現時点の本環境は使い難いと考えているが、与えられたフィードバックは正解への誘導として有効であり、本環境は力学学習の役に立つと考えているようである。また、課題としての実験方法考案課題の有効性については、多くの被験者が高く評価しており、本環境についての評価よりも高い傾向にあった。これは、使い勝手を中心として本環境を改良する必要性を示唆している。

これらの結果より、本環境を用いた実験方法考案課題の実施が可能であり、また、その実施は使い勝手の面で問題はあるが、概ね被験者には受け入れられたと筆者は判断してい

る.

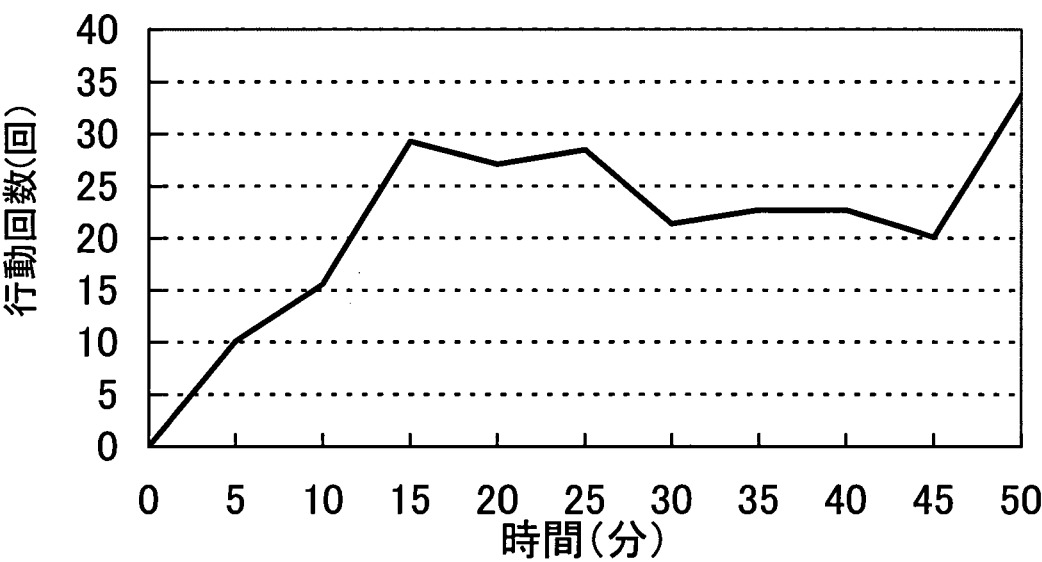


図 3.9 学習者の利用履歴

表 3.1 検出した誤りの種類と平均回数

	公式選択・組み合わせ時	測定時	代入時
誤り平均回数	9.3	4.9	3.5

表 3.2 本環境利用後のアンケート結果

アンケート項目	回答結果(人)			
	思う	多少思う	あまり思わない	思わない
1. 本仮想実験環境を使いやすいと思うか	0	0	11	4
2. 本環境のフィードバックは修正に役立つと思うか	2	11	2	0
3. 本環境は力学学習に役立つと思うか	3	9	3	0
4. 実験方法考案課題の演習は意味があると思うか	11	4	0	0

### 3.7.2 成績調査

本仮想実験環境の利用後に紙上で行った実験方法考案課題の結果は、平均 3.5 課題（分散：1.7）正解であった。この正解数の意義を検討するために、同じ課題を異なる大学生・大学院生（10 名、同一学科、別学年、以降被験者群 B と呼ぶ）に行ってもらったところ、平均 1.0 課題（分散：2.2）しか正解できず、本環境を利用した被験者群 A と、利用していない被験者群 B の差は、Mann-Whitney の検定では、 $p = 8.77 \times 10^{-4} (< 0.01)$  となり、有意な差があると判定された。さらに、この結果は実験方法考案課題への慣れによる差の影響が大きいかもしれないと考え、別の大学生（9 名、同一学科、別学年、以降被験者群 C と呼ぶ）の被験者に対して、実験方法考案課題がどのような課題であるかの説明とその解決事例（本仮想実験環境で取り扱った課題と同様の課題）の解説および試行を 10 分間かけて行った後、同様の課題を行ってもらうと、平均 1.3 課題（分散：1.6）正解するという結果となった。Mann-Whitney の検定によると課題の説明を行った被験者群 C と、説明を行わなかった被験者群 B の成績は有意な差は無く ( $p = 0.49$ )、説明を行ったが本環境を利用しなかった被験者群 C と、本環境を利用した被験者群 A の成績は有意な差が生じた ( $p = 5.91 \times 10^{-4} (< 0.01)$ )。つまり、有意な差が現れたのは本環境を利用した被験者群 A と他の被験者群との間でのみである。

これら成績調査は、本環境と紙上の課題は異なる解法を要求される課題であったにも関わらず利用者とその他の被験者の間に大きな差がでたこと、および同大学同学部というほぼ同一の母体に関してその差が出たことから、本環境の利用の学習効果は十分期待できると考えられる。今後は、異なる目標の課題に対しても同様の効果が現れるかについて、事前・事後テストを行うことにより成績の変化をより詳細に調査していく予定である。

## 3.8 むすび

前章が算数の領域という比較的単純な領域について計算機の支援により初めて現実的となる課題に対するインタラクションの設計を行ったのに対し、本章では物理の力学学習を対象領域として、実験方法の考案を通した学習を支援することを指向した、仮想実験環境の設計・開発と、実現した仮想実験環境の試験的利用の結果について報告した。実験方法の考案は、教育において実験が活用される重要な目的のひとつといえるが、実際の教育現場では、その困難さや個別対応の必要性のために、十分に学習課題として実施されているとは言えず、本章で述べたような知的な支援の必要性が高い課題であると考えられる。

本章では、仮想実験環境に対して付加した、(A)公式の選択・組み合わせを行えるインタフェースとその診断機能、(B)測定を行えるインタフェースとその診断機能、(C)測定値と公式の代入を行えるインタフェースとその診断機能、について説明し、これらの機能を用いて行った試験的利用の結果、本仮想実験環境を用いた実験方法考案課題の実施が可能であること、およびその実施について被験者は意義のあることであると判断していること、さ

らに、その実施が実験方法考案課題に対する成績の向上に寄与する可能性があることが示された。

上記の結果と同時に、本環境の使い勝手がまだ不十分であることも指摘されており、この点の改善は重要と考えている。また、本環境を用いることで、どのような学習効果があるかについても十分な実験を行えているとはいえない。今後は、使い勝手を中心に本環境の改良を進めるとともに、本環境を用いることで、どのような点で、どの程度の学習効果が見込めるのかをさらに調べていく予定である。

また、本仮想実験環境では、限定的な事例についてのみしか現状では実装できていないが、その適用範囲は、(a)道具を使った測定、かつ(b)式を用いて測定後、結果を式に代入し目標を求める、というタイプの実験であればその範囲に含む。これは、物理状況内には測定可能な属性が存在し、かつ、それらの属性は公式を用いて結びつけることが可能であるという前提が含まれているからである。この前提が含まれる物理状況であれば、先述した現象構造を記述することが可能である。また、測定可能な属性が存在し、その測定の方法が設定可能であるため、測定構造は記述可能となる。よって、測定可能な属性をリーフにもつ解法構造の構築が可能となる。同様の理由で、3.2 で記述した「実験を通して法則などを学習者自身に発見させること」を目的とした探求的な実験においては、実験の過程そのものが異なるため範囲には含まれない。

本環境の範囲としては、例えば、電気回路において電圧と電流から抵抗値を求める、波動において振動や周期から波長を求める、などの力学以外の範囲や、さらに、ユーイングやサールの装置を利用した Young 率の測定や、melde の実験などの範囲も含まれる。本環境では、これらの範囲は現在は実装していないが、現象構造、測定構造の記述および問題のグラフィカルな記述を行えばこれらの範囲について扱うことも可能であり、これらの範囲にも対応した環境の開発、評価も今後の課題といえる。しかし、これらの複雑な実験では正解となる解法が限定的であり、本環境で支援する範囲として適切ではない可能性があることも追記しておく。

## 第4章 マイクロワールドグラフ

### 4.1 まえがき

2章では算数という比較的簡単な領域において、計算機の支援なしには実現が困難な課題としての作問学習を扱った。計算機による支援のために、学習者に何を入力させ、それをどう評価すべきかを議論するとともに、実際に開発したシステムを用いた使用実験を行った。3章では物理の力学というより複雑な領域についても、同様に扱えるかを試みた。2章3章では、単一の課題を学習する際に、学習者に何を入力させるべきか、それをどのように評価すべきかについて設計を行ってきた。

しかしながら、学習を進める上では、単一の課題における学習だけではなく、他の課題の学習へ移行するために何を行うべきかといった議論もまた重要である。ある課題Aを学習するためには、その前に課題Bを学習しておいた方が良いといった課題の系列や、課題Aから課題Bに移行する際に1から学習を始めるのではなく前に行った課題を踏まえて克服すべき内容のみを学習できる課題（移行のための課題）、についての議論も重要である。そこで、本章では課題を移行する際に学習者に何を入力させ、それをどう評価する必要があるか、学習者にどのような課題を与えるべきであるかを議論する。

### 4.2 マイクロワールドとその漸進的学習

ある現象の理解を深める上で、その現象を体験することは非常に有効とされている。この体験を教育的観点から擬似的に与えることを目的とした、シミュレーションに基づく学習環境（Simulation-based Learning Environment: SLE）が、これまで数多く研究・開発されてきており、特に探索的学習を促進する上できわめて有用であることが実証されてきた[31,32,33,34]。

SLEにおいては、単にある現象を体験し理解させるだけでなく、その現象を徐々に複雑なものとしていくことで、より複雑な現象の理解へとつなげていくことが効果的であるとされており、このようなアプローチはICM(Increasingly Complex Microworld)と呼ばれる[35,36]。ここでマイクロワールドとは、教育的観点から作られたある具体的な現象のシミュレーションであり、学習者がその現象の背景となる法則や原理について理解可能であ



るように取り扱う範囲を限定しているという意味において「マイクロ」な「ワールド」である。すなわち ICM とは、学習者にとって理解が容易な単純なマイクロワールドから始めて、徐々に複雑なマイクロワールドへと漸進的に移行させることにより、結果として複雑なマイクロワールドの理解を達成させる学習支援法である。これまで、ICM に基づく様々な SLE が研究・開発され、それらの有用性の検証も行われている[36,37,38]。

ICM に基づく SLE における重要な課題の 1 つとして、提供するマイクロワールドの適応的制御をあげることができる。従来の研究においては、注意深く設計された固定的なマイクロワールド系列に従ってマイクロワールドの移行を進めるものがほとんどであった。このような固定的なマイクロワールド系列は、平均的な学習者を想定したものであり、個々の学習者にとって必ずしも適したものとは限らない。計算機を用いた学習支援の高度化を指向した場合、学習者個々の能力や興味あるいは学習履歴に応じたマイクロワールドの適応的制御は不可欠な要素技術となる。

### 4.3 ICM にのっとったシステム

ICM に基づく漸進的学習を支援する SLE は、これまでもいくつか開発されてきた。例えば、QUEST[38]や ThinkerTools [37], DiBi [39] においては、単純な現象から始めて徐々に複雑な現象を学習させるため、学習者に徐々に複雑な状況やタスクを与えるマイクロワールド系列が設計されている（例えば、定性的な振る舞いから定量的な振る舞いへ／電圧の値から変化量へ／等速直線運動（摩擦なし）から等加速度直線運動（摩擦あり）へと移行させる）。一方、'intermediate model（媒介モデル）'[40,41] や WHY[42,43] においては、あるモデルの振る舞いをより理解し易い別のモデルの振る舞いによって説明するため、1つの現象を様々な視点から見たモデルの組が設計されている（例えば、マクロなモデルの振る舞いをミクロなモデルの振る舞いからの創発として説明する）。しかしながら、これらのシステムは上述の限界を持つ。すなわち、これらは固定的なマイクロワールド系列を持つのみであり、適応的に用いるためには、各学習者についてどのマイクロワールドを次に学習すべきか／いつそれに移行すべきかを決定することのできる人間の教師が不可欠である。また、たとえマイクロワールドを適応的に選択するためのルールの組を記述することが可能な場合でも、それらがモデルの差分に基づくものでなければモデルに基づく説明を生成することができず、移行に伴う課題や説明の記述はアドホックなものにならざるを得ない。このことは、近年の洗練された教授法を持つ（ICM に基づかない）SLE [31,32,33]についても同様である。それらにおいては領域および教授知識がフレームに基づいて記述されており、システム自身はモデルの差分に基づく推論能力を持たない。GMW の枠組みは、マイクロワールドの特徴およびマイクロワールド間の関係を明示的に記述しておくことにより、上記の問題の解決を図るものである。GMW によるシステム構成法および学習支援法の妥当性は、次の諸研究によっても示される。すなわち、Maani らは、対象系を様々な視点や粒度で見たり、その時間的发展を予想したりする「システム思考」の技

能が、複雑な系を対象とした問題解決能力に大きく影響することを実験的に検証した[44]. このことは、本枠組みの教育的な妥当性を示している. また, Raubal らは, 実空間における経路探索を対象として, 様々な状況やそこで得られる (不完全な) 知識から目標となる状況や知識を探索していく認知過程のモデルを明らかにし, その形式化を試みている[45]. これは, 本枠組みの認知的な妥当性を示すと共に, GMW 上での教授・学習の文脈を同定・制御する機能を設計する際の 1 つの方法を提供する. マイクロワールドでの課題遂行における学習者の行動を評価するための, 種々の有用な測度も提案されている[46].

## 4.4 マイクロワールドグラフ

マイクロワールドの適応的制御を目指す場合に生じる主な課題としては, (1) 移行という観点からのマイクロワールド間の関係の記述, (2) 移行に伴って発生する学習者にとって克服すべき課題の抽出とその対応への支援, (3) 学習者の理解状態に応じたマイクロワールドの選択, をあげることができる. 従来の研究においては, (1) と(3) は固定的なマイクロワールド系列を決定した時点で解決される課題であり, (2) はその固定的なマイクロワールド系列における比較的少数の移行関係に関して検討を行えばよいことであつた. したがって, システム作成者や教授者が注意深く設計することで解決可能な課題であつたといえる.

本稿では, SLE におけるマイクロワールドの適応的制御を指向して, 上記の課題(1) および(2) に対する 1 つの解決手法を提案する. すなわち, まず(a) 個々のマイクロワールドの特徴およびマイクロワールド間の関係を記述する枠組みを提案する. この枠組みはマイクロワールドグラフ (Graph of Microworlds: GMW) と呼ばれ, 1 つのマイクロワールドにおいて習得すべき知識およびそのために遂行すべきタスクの記述をノード, 2 つのマイクロワールド間におけるこれらの差分の記述をエッジとするグラフ構造である.

GMW においては, ある 2 つのマイクロワールド間の移行が教育的意味を持つとき, 両者をエッジで結び, 隣接させることになる (教育的意味の詳細は 4.4.2.2 で述べる). また, この枠組みに基づいて, (b) 隣接する 2 つのマイクロワールド間の移行に伴って克服すべき課題を抽出してタスクとして提示する機能, およびそれに関するモデルに基づく説明を生成する機能の実現手法を提案する. ここで, マイクロワールドグラフは, それ自身個々のマイクロワールドの特徴やそれらの間の関係を自動生成するものではなく, その記述は人間が行う必要がある. また, その枠組みは, 上記の課題(1), (2) を解決するためにはそれらの内容に関してどのような情報を記述すれば十分かを領域独立に規定するものであり, 実装レベルの書式やその推論方式は, 対象領域毎に用意する必要がある. しかし, マイクロワールドグラフは, マイクロワールドの特徴やそれらの間の関係を記述するための統一的な枠組みを与えるものとなっており, この記述に基づくことで, 従来アドホックに定められていたマイクロワールドの隣接関係やその差分を組織的に取り出すことが可能となり, それらに基づくことで, 隣接関係の移行のためのタスクやそのタスクに関する説明を自動的に生成することが可能となる. 上記の課題 (3) については, 課題(1), (2) を解決した上

で初めて検討可能な課題であること、および学習者モデリングや教授目標の設定など、他の要素技術に関連付けながら幅広く論じる必要があることから、本稿の範囲とはしていない。

#### 4.4.1 マイクロワールドの記述に関する要件

マイクロワールドにおいて、学習者は(t1) ある状況で対象系の振る舞いを予測することに加えて、(t2) 状況の変化に伴う系の振る舞いの変化を予測することも求められる。すなわち、マイクロワールドにおけるタスクには、これらの各々に対応する 2 種類のものが存在する。特に後者は、状況の変化はしばしば予測に必要なモデルの変化を伴うという意味において、より複雑な現象の理解にとって本質的である。学習者は、あるモデルを用いてタスクを遂行できるだけでなく、与えられた状況に対して適切なモデルを選択できなければならない。よって、本研究の目標は、(1) モデルの組とそれらの間の差分を記述する枠組みを提案すること、およびその記述に基づいて(2) 学習者に適応的にマイクロワールド（状況とそのモデル、および遂行すべきタスク）を提供すると共に、状況の変化に伴うモデルの変化に関する説明を生成する機能を実現することである。

物理系のモデルは、そのモデルが有効である範囲外へと状況が変化したときに変更される（注<sup>1</sup>）。この有効範囲は、「モデル化仮定」（モデルが有効であるために成立すべき仮定）として記述される。本研究では、モデル化仮定として次の項目を考える（注<sup>2</sup>）。

(a1) 系の物理構造：物理的存在物（オブジェクト）、それらの間の関係、それらの属性、およびモデルにおいて考慮されるべき物理プロセス

(a2) 考慮されるべき系の振る舞いの範囲（例えば、モデルの時空間的な範囲、動作モードなど）

(a3) 系の境界条件

モデル化仮定の変化は物理系のモデルの変化（物理系の振る舞いの変化）を引き起こし、両者の関係を因果的に理解することは、教育的観点から見て重要である。よって、本枠組みは、モデル（の変化）のみならずモデル化仮定（の変化）の記述をも含むものでなければならない。また、学習者にモデルの変更を促す（モデル間の差分を考えさせる）タスクの記述も必要である

上記の議論に基づいて、次節では、マイクロワールドの記述と組織化に関する枠組みを提案する。

注<sup>1</sup> 物理の問題解決について、本稿で用いる用語を付録に示す。

注<sup>2</sup> Falkenhainer らによる議論[47]に基づき、独自に再分類した。

## 4.4.2 マイクロワールドの記述と組織化

### 4.4.2.1 マイクロワールドの記述

各マイクロワールドについて、次の情報が記述される。

- (m1) 対象とする物理系とその1つのモデル
- (m2) 系の物理構造：物理的存在物（オブジェクト）、それらの間の関係、それらの属性、およびモデルにおいて考慮されるべき物理プロセス(a1)
- (m3) 考慮されるべき系の振る舞いの範囲(a2)
- (m4) 系の境界条件(a3)
- (m5) モデルに基づく推論のために必要な技能（例えば、方程式の解法など）
- (m6) モデルを理解するために遂行すべきタスク

項目(m2), (m3) および(m4) は、物理系のモデル(m1) が有効であるためのモデル化仮定の有意味な組み合わせを表す。項目(m5) は、タスクを遂行するためにモデルと共に用いられる技能を表す（例えば、定量モデルにおける数値計算など）。項目(m6) は、学習者に対して提示されるタスクを表し、その遂行に必要な知識が ((m1)~(m5) の部分集合として) 付されている。

モデルに基づく推論の観点からは、タスクには2種類のものが存在する。1つは、当該のマイクロワールドにおけるモデルを用いて遂行可能なタスクであり、もう1つは、別のマイクロワールドへの移行（すなわち別のモデル）を必要とするタスクである。先述のタスク(t1) はすべて前者であり、タスク(t2) のうち状況の変化がモデル化仮定の変化を引き起こさないもの、つまりモデルの変更を必要としないタスクもこれに相当する。これらをMW内タスクと呼び、その遂行のために必要な知識は、当該のマイクロワールドの項目(m1)~(m5) を用いて記述される。タスク(t2) のうち状況の変化がモデル化仮定の変化を引き起こすもの、つまりモデルの変更を必要とするタスクは後者に相当する。これをMW間タスクと呼び、その遂行のために必要な知識は、移行前/後のマイクロワールドの項目(m1)~(m5) を用いて記述される。MW間タスクの記述には、移行すべきマイクロワールドへのポイントが含まれる。

### 4.4.2.2 マイクロワールドの組織化

前節のように記述されたマイクロワールドの組を組織化するための枠組みとして、マイクロワールドグラフ (Graph of Microworlds: GMW) [48,49] を提案する。これによって、各学習者に対して適応的にマイクロワールド系列を生成することが可能となる。GMWは、モデル化仮定の変更により物理系のモデルがどのように変化するかを記述するための枠組みであるモデルグラフ (Graph of Models: GoM) [4,5] を拡張したものである。GoMの各

ノードは対象とする物理系の可能なモデルを、各エッジはモデル化仮定の変更（モデルの移行と呼ぶ）を表しており、主として観測データからのモデル同定や故障診断などに用いられる。GMW においては、GoM のノードをマイクロワールドへ、エッジをマイクロワールド間の可能な移行へと拡張している。すなわち、マイクロワールドのモデルを理解することによって習得できる知識、およびそのために遂行すべきタスクという 2 つの教育的概念を導入している。各マイクロワールドにおいて習得できる知識（目標知識と呼ぶ）は、モデル、モデル化仮定、およびモデルと共に用いられる技能（すなわち(m1)~(m5)）であり、その習得を促すために提示すべき MW 内タスク（すなわち(m6)）も併せて記述される。また、GMW において、ある 2 つのマイクロワールド間の目標知識の差分が十分小さく教育的意味を持つと見なせるとき、両者はエッジで結ばれる（隣接する）。エッジには、両者の目標知識の差分、およびその習得（マイクロワールドの移行）を促すために提示すべき MW 間タスクが記述される。ここで、マイクロワールドの移行が教育的意味を持つとは、両者のモデルをその順序で学習することが、何らかの教授・学習の文脈において「既習のモデルの発展としての新しいモデルの学習」と見なせることを表す。例えば、図 4.2 において、MW-1 と MW-2 は多くの状況を共有しており、摩擦およびそれに起因する加速度の有無のみが異なる。すなわち、「水平面上の直線運動」という状況に注目したとき、後者は前者を一般化した（発展させた）ものとなっている。また、同図の MW-1 と MW-4 も多くの状況を共有しており、各々が対象とする時間的・空間的範囲のみが異なる。すなわち、「（障害物のある）水平面上における直線運動」の時間的推移に注目したとき、後者は前者を（時間的に）発展させたものと見なすことができる。しかし、このような関係为目标知識（の差分）の記述から形式的に決定することは困難であるため、マイクロワールド間の関係づけは、（想定される）何らかの教授・学習の文脈に基づき、GMW の記述者の判断で行うものとする。このようにして記述された GMW においては、1 つのマイクロワールドには目標知識の差分が小さい幾つかのマイクロワールドが隣接しており、教授・学習の文脈に応じて次に学ぶべき適切なマイクロワールドを、学習支援システムが選択することが可能となる（ただし、教授・学習の文脈の推定とそれに基づくマイクロワールド選択の機構は、本稿の範囲外である）。

GMW 上での学習においては、それを構成するマイクロワールドの目標知識（およびその差分）のすべてまたは一部が学習目標として設定され、また、各々に対応するタスクのすべてまたは一部の達成の成否を診断することにより、それぞれの達成度が評価される。タスクの遂行を支援するための手段（観測・操作ツールなど）は、各々のマイクロワールドにおいて適宜提供されるものとする。

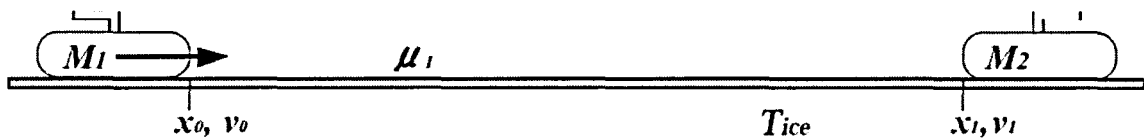


図 4.1 カーリングに似た状況

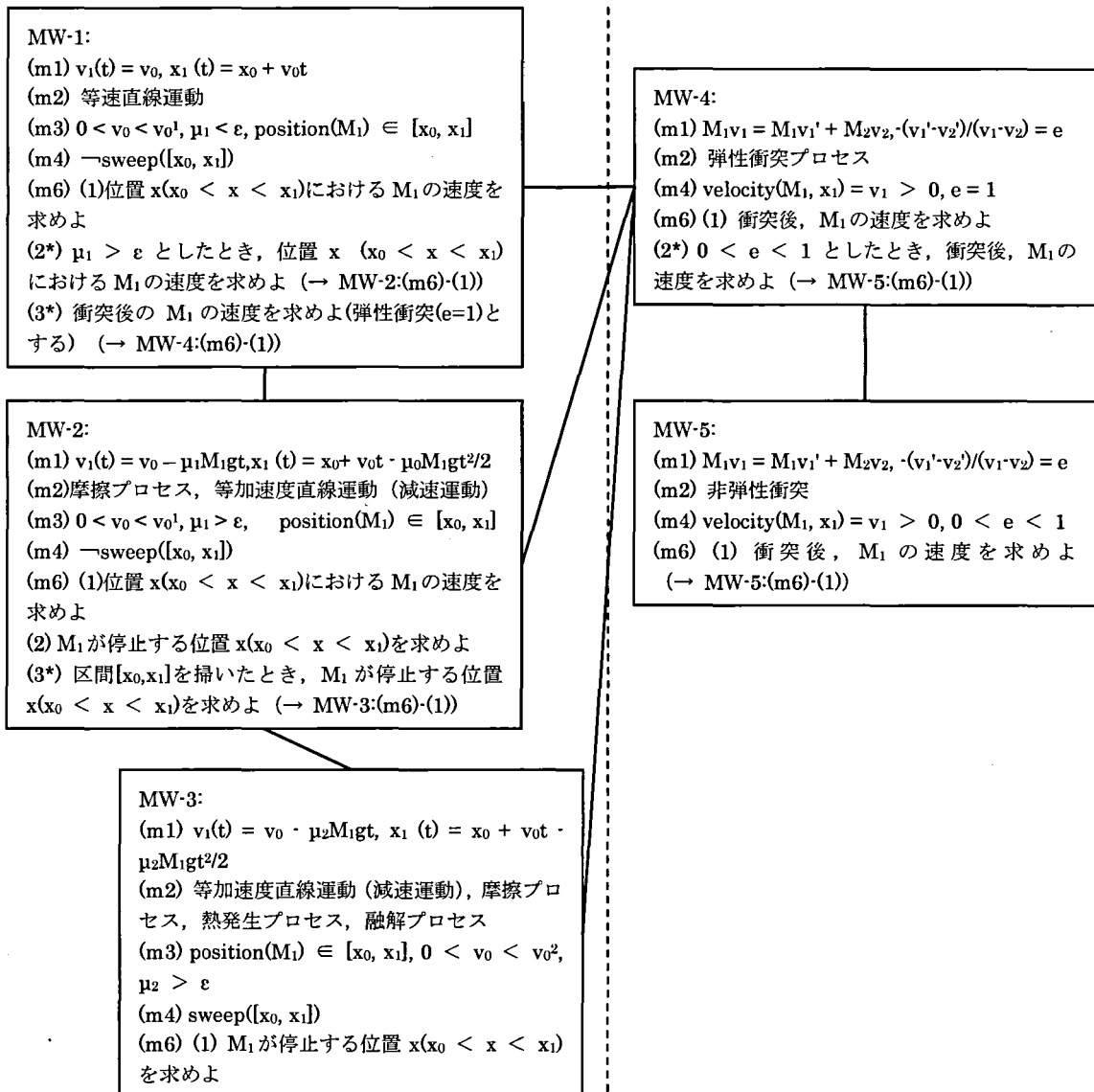


図 4.2 カーリングに似た状況のマイクロワールドグラフ

## [例 1] カーリングの例題(1)

図 4.1 は, カーリングに似た状況設定を示している. ストーン  $M1$  は, 位置  $x_0$  においてプレイヤーにより初速度  $v_0$  で投射され, 位置  $x_1$  に置かれたストーン  $M2$  に衝突するまで氷上を右方へ滑走する. ただし, 氷上の摩擦が無視できず, 十分な初速度が与えられなければ, 衝突せずに  $x_0$  と  $x_1$  の間 (区間  $[x_0, x_1]$  と表記する) で停止する. また, プレイヤーの判断により,  $M1$  の滑走前にこの区間をブルーム (箒) で一様に掃いておくこと

もある。

この物理系の振る舞いをモデル化するとき、様々な物理構造（例えば、摩擦を無視できる／できない、箒で掃く／掃かない、定性／定量的な属性の考慮）や振る舞いの範囲（例えば、衝突前／後の区間、衝突の瞬間）、および境界条件（例えば、初速度が大きい／小さい）が考えられ、それらに対応した複数のモデルが存在する。これらのモデルは、各々を理解するために遂行すべきタスクと共に、図 4.2（注<sup>3</sup>）に示されるような GMW へと組織化される（ここでは、各マイクロワールドの特徴(m1)～(m6)は簡単な assertions のリストとして記述されている）。

ここで、各マイクロワールドにおける目標知識の内、それぞれが対象とする物理プロセスおよびそのモデルが学習目標として設定されているものとする。MW-1 の MW 内タスク (1) により等速直線運動を学習した学習者に、MW-1 の MW 間タスク(2\*)を提示したとする。このとき、タスクにおける状況の変更により摩擦が無視できなくなるため、学習者は MW-2 への移行を促される（このタスクの遂行により、MW-1 と MW-2 の差分である「等加速度直線運動（減速運動）」および「摩擦プロセス」を学習すると期待される）。一方、MW-1 の MW 間タスク(3\*)を提供したとき、MW-1 において考慮外であった振る舞いの範囲（衝突後）を考慮する必要が生じるため、学習者は MW-4 への移行を促される（このタスクの遂行により、MW-1 と MW-4 の差分である「弾性衝突プロセス」を学習すると期待される）。

また、MW-2 において MW 間タスク(2\*)を提示した場合、学習者が MW-2 で習得した知識や技能のみを用いると、誤った解を導出することになる。この誤りは学習者に「熱発生プロセス」と「融解プロセス」の学習、すなわち MW-3 への移行を促す。同様に、MW-4 の MW 間タスク(2\*)は、学習者に「非弾性衝突プロセス」の学習、すなわち MW-5 への移行を促す。

数学的には、これらのモデルの幾つかを 1 つの（パラメータが連続的に変化する）モデルとして記述することも可能である（例えば MW-1, MW-2 および MW-3）。しかし、教育

---

注<sup>3</sup>

1.  $v_{10}$  と  $v_{20}$  は、摩擦係数の値がそれぞれ  $\mu_1$  と  $\mu_2$  であるときに、衝突が起きるための  $M1$  の最小の初速度である。
2. 区間  $[x_0, x_1]$  における摩擦係数の値が  $\varepsilon$  よりも小さい／大きいとき、摩擦力を無視できる／できない。
3. アスタリスク (\*) が右肩に付されているタスクは、移行すべきマイクロワールドへのポインタを持つ MW 間タスクである。
4. 各 MW において、(m2), (m3) および(m4) 間の因果関係は明示的に記述されているものとする。

的観点から見ると、これらは質的に異なる物理構造を対象としており、各々の習得を促すタスクおよびその遂行のために与えるべき支援やツールなども異なったものとなる。よって、これらを 1 つのマイクロワールドとした場合、教材や教授・学習支援に関わる多くの知識を互いの整合性をとりながら記述する必要が生じる。これに対し、これらを複数のマイクロワールド (GMW) とする場合、これらの知識の記述は、各々のマイクロワールドおよびそれらの間の関係に関わるものにモジュール化された比較的単純なものとなり、互いの整合性をとるための負荷が軽減される。

## 4.6 パラメータ修正規則によるマイクロワールド移行支援

本章では、マイクロワールドの移行を支援する 1 つの方法について述べる。本研究では、マイクロワールドの移行 (状況の変化) に伴うモデルの変化 (差異) を、次の 2 つの場合に分けて考えている。第 1 は、2 つのモデルの間に「一般化/特殊化」の関係が認められる場合であり、第 2 は、そのような関係が認められない場合である。例えば [例 1] の MW-1 は、MW-2 において  $\mu 1$  の値が無視できるほど小さい状況を対象としており、前者のモデルは後者のそれを特殊化したものとなっている。MW-2 と MW-3、MW-4 と MW-5 のモデルについても同様の関係が成り立つ。これに対して、MW-1 (または MW-2、MW-3) と MW-4 のモデル間の差異は、考慮すべき空間的・時間的範囲 (すなわち振る舞いの範囲) の変化によるものであり、「一般化/特殊化」の関係は認められない。また、衝突前後の速度変化を定性的に表すモデルや衝突の機構を分子レベルで表すモデルを考えたとき、これらと MW-4 との差異は対象系を捉える際の視点 (粒度) の変化によるものであり、やはり「一般化/特殊化」の関係は認められない。後者の場合、移行先のマイクロワールドにおいては移行前に学習した知識や技能に基づく解法が実行できず (例えば、図 4.2 の MW-1 から MW-4 へ移行する場合)、このことは、次のマイクロワールドへの移行、すなわち新しい知識や技能の学習を十分に動機付けると考えられる。一方、前者の場合、移行先のマイクロワールドにおいても以前の解法がそのまま実行できる場合が多い (例えば、図 4.2 の MW-1 から MW-2 へ移行する場合)。よって、学習者は以前に習得した (移行先のマイクロワールドにおいては不適切な) 知識や技能を用いて誤った解を導出しながらそれに気づかず、マイクロワールドの移行が適切に行われない場合が考えられる。そこで、本稿では、前者の場合を対象とした支援の方法を考案する。

このような場合、学習者が用いた以前のモデルが新しい状況において何故不適切であるか、(その状況において適切である)「正しい」モデルとどう異なるかを説明する必要がある。すなわち、誤ったモデルと正しいモデルの振る舞いの差異をそれらのモデル化仮定の差異に関係付ける (すなわち、観察可能な結果をその原因に関係付ける)、モデルに基づく説明が生成できなければならない。本節では、その 1 つの手法として、パラメータ修正規則を用いた説明生成[48,49,50,51] について述べる。

GoM の枠組みは、それぞれのモデル化仮定の変更が、モデルに基づいて計算されるパラ



メータの値に定性的にどのような影響を与えるかを記述した「パラメータ修正規則」の組を持つ（注4）。それらを用いて、現在のモデルにより計算されるパラメータの値（予測）と実際の系において測定される値（観測）とが異なるとき、適切なモデルの移行を推論することができる。パラメータ修正規則は次のように記述される。

If モデル化仮定 `assump` が（部分的に）`assump'` に変更されたとき，  
Then 幾つかのパラメータの値が定性的に変化する／変化しない（増加／不変／減少）

これは、状況の変化により物理系のモデルが変化した場合、系の幾つかのパラメータの値が増加／不変／減少することを意味している。パラメータ修正規則を用いることで、GMW におけるマイクロワールドの移行を支援する機能を、次のように実現することができる。まず、両者に照合するパラメータ修正規則が探索される。次に、照合した規則を参照して、状況がそのように変化したときに当該のパラメータがどのような値をとるか（または変化するか）を問う MW 間タスクが、同定あるいは生成される。学習者がタスクの遂行に困難を持つとき、2つのモデルにより計算されるパラメータの値の差異とそれらのモデル化仮定の差異を関係付ける説明が生成される。このようにして、マイクロワールドの移行の必要性を、学習者が誤って予測した現象とマイクロワールドにおいて観測された現象の差異に基づいて説明することが可能となる。

#### 〔例2〕カーリングの例題(2)

図 4.2 における GMW のパラメータ修正規則のうち、2つを図 4.3 に例示する。一方は MW-1 から MW-2 への移行に関するものであり、もう一方は MW-2 から MW-3 への移行に関するものである（それぞれ、〔例1〕の書式に照合する `production rules` として記述されている）。

---

注4 GoM では、隣接するモデルが何らかの（「一般化／特殊化」を含む）「近似」の関係にある場合のみが扱われる。

**PC-Rule-1:**

IF position( $M_1$ )  $\in [x_0, x_1]$ ,  $0 < v_0 < v_0^1$ , not sweep( $[x_0, x_1]$ ) and changed( $\mu_1 < \varepsilon \Rightarrow \mu_1 > \varepsilon$ ) and changed(consider(等速直線運動)  $\Rightarrow$  consider(等加速度直線運動(減速運動))) and considered(摩擦プロセス)

THEN decrease(velocity( $M_1, x$ ))

**PC-Rule-2:**

IF position( $M_1$ )  $\in [x_0, x_1]$  and consider(等加速度直線運動(減速運動), 摩擦プロセス) and changed( $0 < v_0 < v_0^1 \Rightarrow 0 < v_0 < v_0^2$ ) and changed( $\neg$ sweep( $[x_0, x_1]$ )  $\Rightarrow$  sweep( $[x_0, x_1]$ )) and considered(熱発生プロセス, 融解プロセス)

THEN change(friction( $M_1, \text{ice}$ ) =  $\mu_1 \Rightarrow$  friction( $M_1, \text{ice}$ ) =  $\mu_2$ ,  $\varepsilon < \mu_2 < \mu_1$ ), increase(velocity( $M_1, x$ ), position( $M_1, v_1 = 0$ ))

図 4.3 パラメータ修正規則(1)(2)

PC-Rule-1 を用いると, MW-1 から MW-2 への移行を促すためには, 摩擦係数  $\mu_1$  が増加したときの  $M1$  の速度 (の変化) について問う MW-1 の MW 間タスク(m6)-(2\*) が適切であることが推論される. 一方, PC-Rule-2 を用いると, MW-2 から MW-3 への移行を促すためには, 氷の表面が掃かれたときの  $M1$  の止まる停止位置(の変化)を問う MW-2 の MW 間タスク(m6)-(3\*) が適切であることが推論される. 学習者がこれらのタスクの遂行に困難を持つとき, これらの規則およびマイクロワールドに記述された情報を用いて, モデルに基づく説明が生成される.

なお, パラメータ修正規則は特定のマイクロワールド間の関係に付されるのではなく, より一般的な状況の変化を対象として記述される. すなわち, 個々のマイクロワールドにおける状況やタスクの記述とは独立に記述される (ただし, 照合のため, 両者は同じ書式に従う必要がある). 例えば, 図 4.6 のパラメータ修正規則 PC-Rule-a は, 図 4.5 の GMW における MW-b から MW-a への移行タスクを自動生成するために適用されるが, その条件部 (状況の変化) はこれらのマイクロワールドにおける状況 (の変化) の一部 (1 つの質点が空中にある/斜面上にある) に照合しているに過ぎない. 換言すれば, 同規則は他のマイクロワールド間の関係にも適用可能な汎用性を持つものとなっている. 対象領域において頻出するこのような部分的状況 (の変化) を対象とするパラメータ修正規則の組を記述しておくことで, GMW のすべてのエッジを逐一吟味することなく, MW 間タスクを自動生成することができる.

## 4.7 システムの試作

本稿で提案した枠組みを用いて複数のマイクロワールドを記述し、ICM に基づく漸進的な学習を支援するための機能を持つシステムのプロトタイプを実装した。すなわち本システムは、(1) 現在のマイクロワールドから移行し得るマイクロワールドの候補の生成、および(2) マイクロワールドの移行を促進するための MW 間タスクと説明の生成、を行うことができる。前者は、GMW において現在のマイクロワールドに隣接するマイクロワールドの組を移行の候補とすることで実現される。さらに、それらの各々と現在のマイクロワールドの目標知識の差分をとることにより、各々の移行において克服すべき課題を抽出することができる。後者は、移行前後のマイクロワールドにおけるモデル化仮定の差分に左辺が照合するパラメータ修正規則を用いて実現される。すなわち、そのような状況の変化が起こったときに右辺に記された物理量（パラメータ）がどのように変化するかを問う MW 間タスクや、それに関する説明が自動生成される。なお、本実装では、各マイクロワールドの特徴(m1)～(m6) は簡単な assertions のリスト（対象とする幾つかの例題を扱える程度の述語や関数が用意されている）として記述され、それらの差分はリスト間の差分をとることによって抽出される（差分を表す述語（図 4.3, 図 4.6 の **changed** など）を用いた assertions として宣言される）。差分と照合すべきパラメータ修正規則は、その書式に従う **production rules** として記述される。照合した規則の右辺に現れるパラメータを含む (MW 内) タスクが移行前のマイクロワールドに存在すれば、それに規則の左辺が示す差分を条件として加えたものを、MW 間タスクとして自動生成する（タスクの問題文や説明文は、これらの assertions にそれぞれ簡単なテンプレートを適用することによって生成する）。

システムの動作を確認するため、複数のマイクロワールドからなる比較的複雑な例題（大学入試問題レベル）を GMW を用いて記述するとともに、パラメータ修正規則を併せて記述し、その記述に基づいてあるマイクロワールドからの移行先の候補と、各々についての MW 間タスクおよび説明を生成させた。図 4.4 にシステムで扱った状況を示し、図 4.5（注<sup>5</sup>）に各マイクロワールドの記述と隣接関係を記述した GMW を示す。また、図 4.6 にパラメータ修正規則の一部を示す。以上の内容をシステムに入力した結果、出力された MW 間タスクとそれらの説明を図 4.7 に例示する。例えば MW-b から MW-a へ移行する場合、両者における状況の差異は、質点 A が空中に存在するか斜面上に存在するかである。この差異は質点 A の加速度の値に影響するが、学習者がそれに気づかず MW-b において習得した解法をそのまま MW-a で実行する可能性がある。したがって、このような状況の変化に伴う質点 A の加速度の変化を問うタスクを、MW 間タスクとして提示することが望まれる。このとき、システムは確かに、この状況の差異に照合する PC-Rule-a を用いて、モデル化

---

注<sup>5</sup>  $a_A, a_B$  は、それぞれ質点 A の加速度、質点 B の加速度である。滑車 Q の加速度は  $\alpha$  である

仮定（およびモデル）が変化した結果質点 A の加速度が減少するという情報を取得し、そのことを問う MW 間タスクを生成しており、さらに、モデルとその振る舞いの変化に関する説明を、この情報に基づいて生成していることが図 4.7 よりわかる。同様に MW-e から MW-d に移行する場合は、PC-Rule-b に基づき、滑車が加速度を持たない場合か持つ場合かの差異が影響する A の加速度の値の変化を問うタスクを、MW 間タスクとして提示し、モデルとその振る舞いの変化に関する説明を生成していることがわかる。一方、[例 1, 2] の例題における GMW の記述（図 4.2）およびパラメータ修正規則（図 4.3）をシステムに入力した結果、出力された MW 間タスクとそれらの説明を図 4.8 に例示する。この場合においても、抽出されたマイクロワールド間の状況の差異に照合するパラメータ修正規則に基づいて、それぞれの状況の変化に伴うパラメータの変化を問う MW 間タスクおよびモデルとその振る舞いの変化に関する説明を、適切に生成していることがわかる。

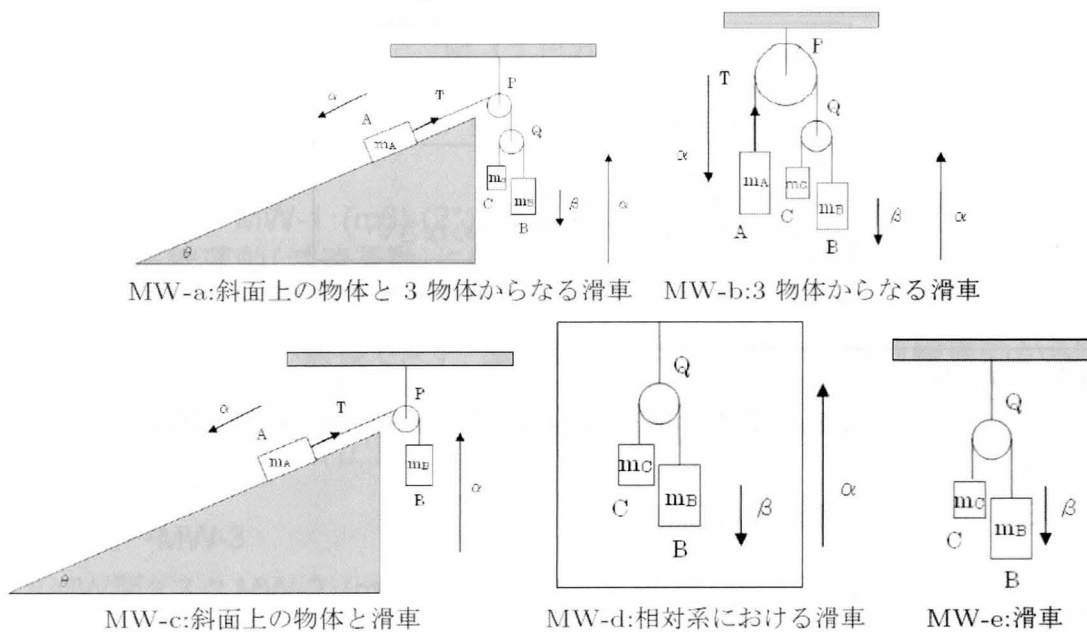


図 4.4 システムで扱うマイクロワールド群

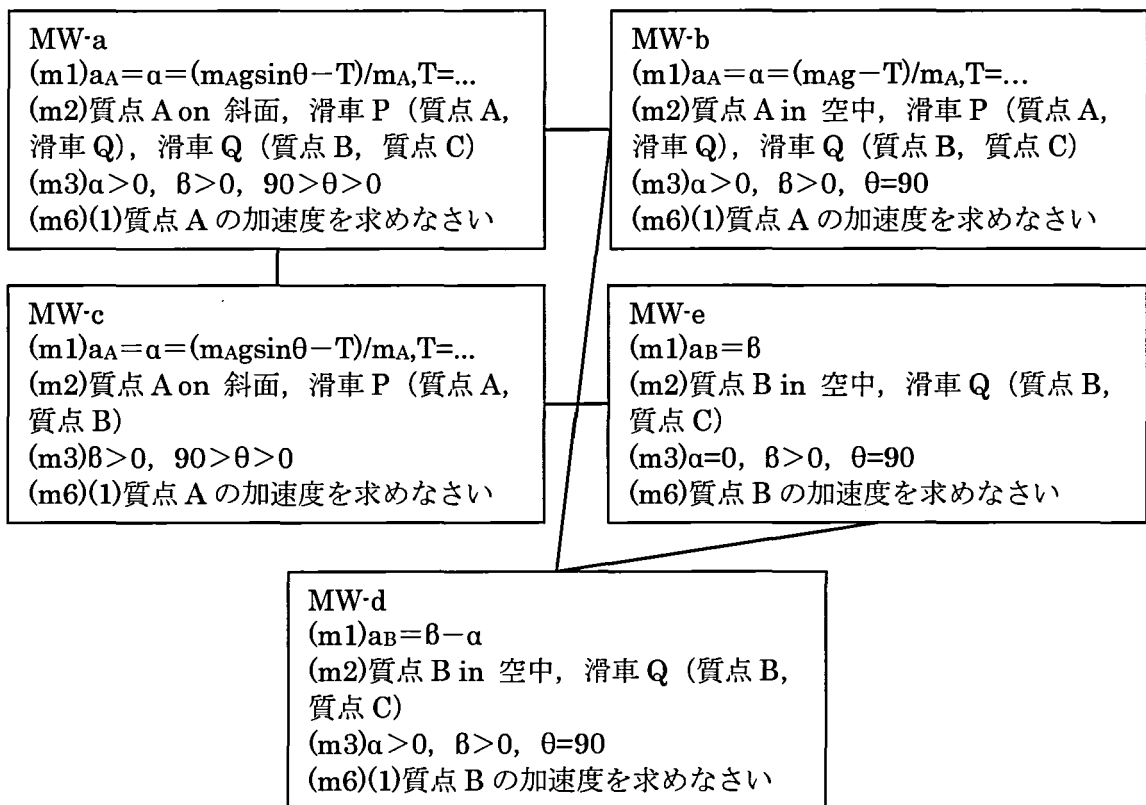


図 4.5 システムで扱うマイクロワールドグラフ

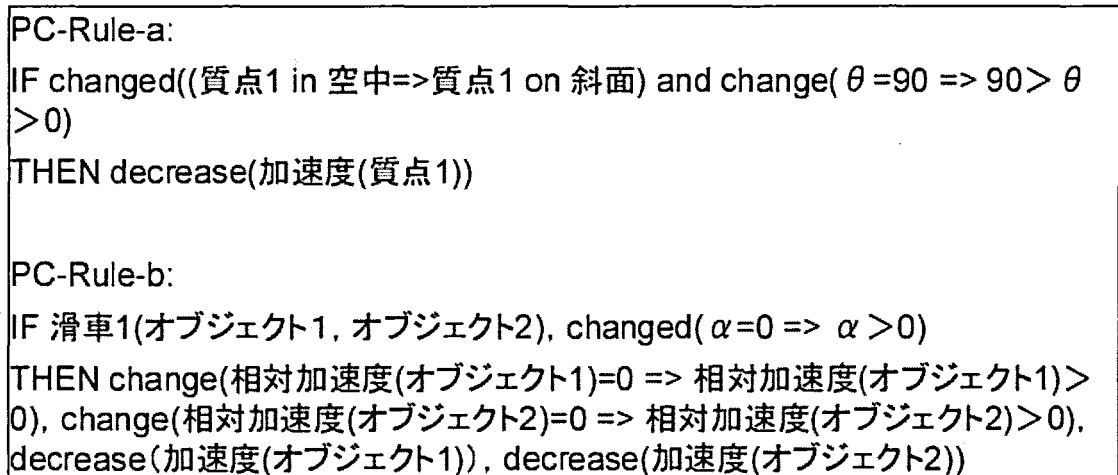


図 4.6 パラメータ修正規則(a)(b)

## MW-b→MW-a

(MW間タスク MW-b:(m6)-(2\*)) 空中にある質点Aが, 斜面上に配置された場合の, 質点Aの加速度を求めなさい(→MW-a:(m6)-(1))

(説明) 空中にある質点Aが, 斜面上に配置される事により, 質点Aの加速度が,  $(m_A g - T)/m_A$  から  $(m_A g \sin \theta - T)/m_A$  へと変化(減少)する.

## MW-e→MW-d

(MW間タスク MW-e:(m6)-(2\*)) 滑車Qの加速度  $\alpha > 0$  のとき, 質点Bの加速度を求めなさい(→MW-e:(m6)-(1))

(説明) 質点B, 質点Cをつるしている滑車Qの加速度  $\alpha$  が0から正になることにより, 質点Bの相対加速度  $\alpha > 0$  になり, 質点Cの相対加速度  $\alpha > 0$  になり, 質点Bの加速度が  $\beta$  から  $\beta - \alpha$  へと変化(減少)する.

図 4.7 出力結果(1)

## MW-1→MW-2

(MW間タスク MW-1:(m6)-(2\*)) 摩擦係数が無視できず, 等速直線運動から等加速度直線運動(減速運動)になり, 摩擦プロセスを考慮しなければならないとき, 位置xにおける $M_1$ の速度を求めよ(→MW-1:(m6)-(1))

(説明) 摩擦係数が無視できず, 摩擦プロセスを考慮し, 等速直線運動から等加速度直線運動(減速運動)へと変化することにより, 質点 $M_1$ の位置xにおける速度が,  $v_0$  から  $\sqrt{v_0^2 - 2(\mu_0 M_1 g)(x - x_0)}$  へと変化(減少)する.

## MW-2→MW-3

(MW間タスク MW-2:(m6)-(3\*)) 区間 $[x_0, x_1]$ を箒で掃き, 熱発生プロセスと融解プロセスを考慮しなければならないとき,  $M_1$  が停止する位置を求めよ(→MW-3:(m6)-(1))

(説明) 箒で掃き, 熱発生プロセスと融解プロセスを考慮することにより, 摩擦係数が  $\mu_1$  から  $\mu_2$  へと変化(増加)する. これにより, 質点 $M_1$ の速度 $v_1$ における位置が,  $\frac{v_0^2 - v_1^2}{2\mu_1 M_1 g} + x_0$  から  $\frac{v_0^2 - v_1^2}{2\mu_2 M_1 g} + x_0$  へと変化(減少)する

図 4.8 出力結果(2)

これらの結果から, GMW の枠組みを用いてマイクロワールドの組およびそれらの間の関係を記述することで, 各々の移行において克服すべき課題を抽出してタスクとして提示する機能, およびそれに関するモデルに基づく説明を生成する機能を実現できることが確認された.

## 4.8 むすび

本稿では、SLE におけるマイクロワールドの適応的制御を指向して、(1) 移行という観点からマイクロワールドおよびそれらの間の関係を記述する枠組みであるマイクロワールドグラフ (GMW) を提案し、その枠組みに基づいて、(2) マイクロワールド間の移行に伴って克服すべき課題の抽出とその習得の支援機能 (MW 間タスクおよびモデルに基づく説明の生成) を実現するための一手法を提案した。本手法により、ICM に基づく SLE における高度な個別学習支援が可能になると期待される。

本稿の成果は、要求される機能を明確にした上で必要な知識の記述の枠組みを与え、その実現手法を具体化した点にある。GMW の記述は人間が行う必要があるが、その枠組みに従う限り、マイクロワールド間の関係を (アドホックな記述によるのではなく) 組織的に取り出すことができる。GMW に基づくものと同等の振る舞いをするシステムを 1 つのマイクロワールドとして実装することは可能であるが、その場合、対象となる教材の規模が大きくなるにつれ、教材・教授に関わる多くの知識や推論規則 (モデルやパラメータの切り替え規則を含む) を、互いの整合性をとりながら記述することは困難となる。これに対し、GMW ではこれらを複数のマイクロワールドとしてセグメント化することにより、個々のマイクロワールドやそれらの間の関係を比較的単純な記述とすることができ、記述者の負荷が軽減される。[例 1,2] や 6. の例題に示した通り、モデル化仮定やパラメータ修正規則によるモジュール性の高い記述を用いることで、記述すべき知識の一部 (MW 間タスクやその説明) が自動生成可能となることから、このことが示されていると考える。しかし、このように一定程度の負荷が軽減されてもなお、実際に GMW およびパラメータ修正規則を記述することは少なくない労力を必要とする。このため、その支援法の検討が今後の課題となる。現在、個々のマイクロワールドとそれらの基盤となる GoM とを分離して記述する方法[48] や、オーサと対話しながら MW 間タスク生成のための情報を補完する手法[49] などの検討を行っている。一般に、GoM およびパラメータ修正規則の記述を自動化することは難しいが[4]、モデル間の関係が限られた形式を持つときに後者を自動生成する手法は存在する[52]。今後、これらの手法の導入も含めて検討していく予定である。

## 第5章 結論

近年の ICT という言葉の普及は情報をただ処理するだけではなく、どのように交換するかということへの関心の表れであり、本研究における、一方的に情報を与えるだけではなく、学習者からの情報を評価する ICT によるインタラクティブな教材は、重要な研究テーマである。教育現場においては、教師が高度な個別インタラクションを行うことは困難であり、教科書は一方的な情報の提供でしかない。しかしながら、効果的な学習を望むのであれば、学習者に対して個別にインタラクションできることが重要である。本研究では、個別に学習者の解答を評価することが特に重要な正解が一意に定まらない課題に対し、課題を分析し、適切なインタフェースと評価機能を兼ね備えたシステムを開発した。本システムは、各課題に対してシステム自身が問題解決能力を保有していることが特徴であり、そのため正解が一意に定まらない課題に対しての評価も行える。さらに、各課題に対するインタラクティブ化だけでなく、複数の課題を対象にした演習時におけるインタラクティブな教材の一つとして、学習者の進度に合わせた学習課題の提供のための枠組みの提案と、計算機による適切な次課題提供の支援も行った。

2章では、算数の多桁減算の領域において、計算機の支援なしには効果的に実施することが困難である課題を対象に、計算機による学習支援を行った。多桁減算の領域では、従来対象としてきた文章題と比べ、問題に対して解法が複雑であり、従来の解法を直接提示する解法ベースの作問学習支援の枠組みをそのまま利用することができなかった。そこで、本研究では、一度学習者に問題を解決させることで、解法を直接提示することなく学習者に理解させ、その後に問題を作らせるという形式を提案した。本形式は、多桁減算の範囲のみならず、一般に解法を提示することが複雑な領域における効果も期待される。また、多桁減算において重要である「繰下げ」の概念に基づいて問題を分類することが重要であると考え、その分類に基づき学習者の解を評価する学習支援システムを開発した。学習支援システムは、提案した形式に沿って、問題解決インタフェース、作問インタフェースの二つのインタフェースが組み込まれ、作問インタフェースでは問題の分類に沿った評価をフィードバックとして与える。本システムは事前に現場の教員に使ってもらい、対象学年の生徒が利用可能であり、有用であろうとの評価をもらった上で使用実験を行った。短期的な利用であったが、(1)活発に作問を行えること、(2)生徒及び教師が学習に有用な活動と



して受け入れていること、が確認された。本システムを利用することの学習効果に関しては未だ確認できていないため今後の調査が必要であるが、本システムは計算機を用いることで初めて現実的に実現可能となる新しい形態の作問学習を提案しており、(1)(2)が確認できたことは、学習支援システムの研究として意義を持っていると考えている。

3章では、物理の力学の領域において、計算機の支援なしには効果的に実施することが困難である実験という課題を対象に、計算機による実験を通した学習の支援を行った。教育現場では、人的問題や時間的問題、環境的問題から複数の学習者で一つの実験を実施することが多く、これでは学習者が十分に実験の意味について考えることができないと筆者は考える。そこで、計算機を用いて仮想的に実験を行える環境を用意し、適切なフィードバックを与えることで、学習者自身が実験方法を考案できる学習支援システムを開発した。従来の仮想実験環境の多くが単なる実験を実施できる環境を用意するだけだったのに対し、本システムでは、(A) 公式の選択・組み合わせを行えるインタフェイスとその評価機能、(B) 測定を行えるインタフェイスとその評価機能、(C) 測定値を公式に代入できるインタフェイスとその評価機能を仮想実験環境に付加した。これにより、学習者に実験方法を考案することを要求するとともに、その評価を与える学習支援システムとなっている。使用実験の結果から、(3)本システムを用いて実験方法の考案による学習が実施可能なこと、(4)被験者が学習に有用な活動として受け入れていること、が確認された。また、(5)実験方法の考案に関する成績の向上に寄与する可能性があることも示された。本システムは計算機を用いることで初めて現実的に実現可能となる実験方法の考案を通した学習を対象としており、(3)(4)が確認できたことは、学習支援システムの研究として意義を持っていると考えている。同時に、成績の向上の可能性が示唆されたことは有用な結果であるといえる。ただし、どのような点で、どの程度の学習効果が見込めるかについては、今後より詳細な調査が必要であると考えている。

2章・3章が個々の課題におけるインタラクティブ化であったのに対し、4章では、複数の課題を連続して演習するための教材のインタラクティブ化を行った。現象の体験による理解を疑似的に与えることを目的としたシミュレーションに基づく学習環境 (SLE) を用いて学習する際は、現象を徐々に複雑なものへと移行していくことでより複雑な現象への理解へとつなげていくことが重要であるといった ICM (Increasingly Complex Microworld) というアプローチが提案されている。マイクロワールドとは、学習者が理解可能な範囲で取り扱う範囲を限定しているという意味で「マイクロ」な「ワールド」である。ICM に基づく SLE における重要な課題として、提供するマイクロワールドの適応的制御が挙げられる。この課題として (I) 移行という観点からのマイクロワールド間の関係の記述、(II) 移行に伴って発生する学習者にとって克服すべき課題の抽出とその対応への支援、(III) 学習者の理解状態に応じたマイクロワールドの選択、があげられる。本研究では、(I) (II) に対する一つの解決手法として、(a) 個々のマイクロワールドの特徴及びマイクロワールド間の関係を記述する枠組みとしてマイクロワールドグラフを提案し、(b) マイクロワールド

間の移行に伴って克服すべき課題を抽出してタスク（移行タスク）として提示する機能およびそれに関するモデルに基づく説明を生成する機能の実現手法を提案した。移行タスクは、ICM にアプローチにそって学習する上で重要なタスクであるが、移行前後のマイクロワールドの特徴を理解しなければ生成できないため手動生成のコストは高い。移行タスクに関する説明も同様である。そのため、本研究における移行タスクとその説明の自動生成機能は有用であるといえる。

本研究は、個々の課題に対して問題解決能力を保有するインタラクティブな教材の開発と、複数の課題を連続して演習するためのインタラクティブな教材の開発を行った情報工学的にも教育学的にも近年の ICT の流れから重要な研究であったと筆者は考えている。

最後に、本研究における現状の課題と本研究で開発したインタラクティブな教材の適用可能性と今後の展望について述べる。本研究、2 章、3 章では、それぞれ算数、物理についてのシステムを開発したが、その評価についての問題がある。算数、物理などの領域においては、一般的に問題解決課題が実施される。そのため、従来の教育と本システムによる効果を比較するための尺度の一つとして問題解決課題に対する能力の向上幅についての調査が考えられる。しかし、本研究では、問題を解ける学習者であっても、十分に理解しているとは限らないという前提で、他のタイプの問題を行わせることが目的となっている。そのため、本研究で期待する能力とは、問題解決能力以外の能力である。しかし、これらの新しい学習に対する診断が難しいことはすでに述べてきた。そのため、これらの新しい能力についての測定方法についての定量的な方法を提供することは難しく、本研究の価値が分かりづらいものとなっている。しかし、今後多桁減算であれば、解法と問題の性質の関係を理解できることを重要視しており、その評価方法の一つとして、学習者に問題の性質を分類させるテストの実施なども考えられる。また、3 章で行ったように、より直接的に実験方法の考案が行える能力の調査も考えられる。実際に 3 章では実験方法の考案についての成績は向上し、能力向上の可能性が示唆された。

本研究で開発したこれらのインタラクティブな教材の適用可能な範囲は広くはない。本研究 2 章で行った多桁減算に関する分類は異なる領域で使えるものではない。もちろん、和算や乗算といった共通部分の多い領域であれば、分類内容自体は変える必要があるが、システムを少し改変するだけで適用可能となる。しかし、共通部分の少ない領域や他の科目や同じ科目であっても共通部分の少ない領域に適用する場合は、多くの変更が必要となる。これは本研究で対象としている範囲が、簡単に解を求められる範囲ではなく、正誤判断や正解への誘導を行うために十分な設計を行う必要があることが要因である。問題解決課題であればどのような解決のために必要なオペレータは多くの教師・研究者が知る既知のものであるが、問題解決以外の解が一意に定まらない本研究で対象としたような領域では、どのような初期状態を与え、どのようなオペレータ、終了状態を設定するかを明らかにしていかなければならない。3 章の実験方法の考案についても同様である。3 章のシステムは 2 章のシステムよりも適用可能な範囲は広く、力学であれば本システムの現象構造や

道具の情報を組みかえれば利用可能である。しかし、電気の領域などの物理の他の拡張するためには、どのような情報を学習者に与えるかといった初期状態についての議論や、何をどのように測定させるかといったオペレータ、結果として何を求めさせるかといった終了状態について設計しなおす必要がある。また、本研究では算数や物理といった範囲を対象としたが、国語などで初期状態やオペレータ、終了状態の規定が行えない、つまり論理的に正解が導けない領域については取り扱うことはできない。これらの領域については、本システムで行ったような設計が行えないため、今後も対象とする予定はない。

# 付録

## 物理の問題解決に関する用語

問題は、ある具体的な物理系（対象系）とその境界条件、および対象系のどのような振る舞いに注目するかを指定した質問の組として与えられる（前二者を合わせてシナリオと呼ぶ）。問題が与えられると、質問への解を得るために十分なモデルを、領域理論の適切な部分集合を具体化することによって生成する。モデルは、対象系に含まれる属性の間に成り立つ制約の集合である。

領域理論からモデルを生成する際、問題によって決まる種々のモデル化仮定が用いられる。モデル化仮定は、対象系をモデル化する際の視点や粒度、考慮すべき空間的・時間的範囲や系の動作範囲などを規定するものであり、具体化された制約が有効であるための条件を表す。

対象系（またはそのモデル）<sup>4</sup>の各属性がある時刻にある値をとっていることを系の状態といい、あるシナリオにおいて系がある状態をとっていることを状況という。一般に、シナリオの摂動や系の状態変化により状況が変化すると、モデルすなわち制約集合（の一部）が変化することがある。このとき、変化する制約に対応して、対象系に適用される領域理論（の部分集合）およびモデル化仮定が変化する。マイクロワールド（microworld: MW）は、対象系の 1 つのモデルと、それを学習するために行うべきタスクとを含む（後者は上記の質問に相当する）。タスクには、当該のモデルを用いて解が得られるものと、指定された状況の変化に伴い別のモデルが必要となるものがある。前者を MW 内タスク、後者を MW 間タスクと呼ぶ。

## 参考文献

- [1] 大槻説子, “高度個別教育における知識情報処理 -ITS の機能とふるまい-,” 人工知能学会誌, Vol. 1, No. 2, pp. 196-201, 1986.
- [2] 溝口理一郎, “誤りを科学する -学習者モデルの構築-,” 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 348-353, 1995.
- [3] 波多野誼余夫, “理解と教授の相互差量,” 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 354-360, 1995.
- [4] S. Addanki, R. Cremonini, J.S. Penberthy, “Graphs of models,” Artificial Intelligence, Vol. 51, pp.145-177, 1991.
- [5] S. Addanki, R. Cremonini, J.S. Penberthy, “Reasoning about assumptions in graphs of models,” Proc. of IJCAI-89, pp.1432-1438, 1989.
- [6] S.I. Brown, M.I. Walter, “Problem Posing: Reflections and Applications,” L.E.A., 1993.
- [7] E. A. Silver, J. Cai, “An Analysis of Arithmetic Problem Posing by Middle School Students,” Journal of Research in Mathematics Education, Vol. 27, No. 5, pp. 521-539, 1996.
- [8] 中野洋二郎, 坪田耕三, 滝井章, “子どもが問題をつくる,” 東洋館出版社, 東京, 1999.
- [9] A. Nakano, T. Hirashima, A. Takeuchi, “Problem-Making Practice to Master Solution-Methods in Intelligent Learning Environment,” Proc. ICCE'99, pp. 891-898, 1999.
- [10] 中野明, 平嶋宗, 竹内章, “「問題を作ることによる学習」の知的支援環境,” 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J83-D-I, No. 6, pp. 539-549, 2000.
- [11] 中野明, 平嶋宗, 竹内章, “演算の理解を指向した知的作問学習支援環境,” 人工知能学会論文誌, Vol. 17, No. 5, pp. 598-607, 2002.
- [12] 中野明, 柳原健志, 平嶋宗, 岡本真彦, 竹内章, “和と差の二項演算に関する作問学習支援環境利用による算数能力への影響調査,” 日本教育工学会論文誌, Vol. 28, No. 3, pp. 205-216, 2004.
- [13] 平嶋宗, “「問題を作ることによる学習」の分類と知的支援の方法,” 教育システム情

- 報学会研究報告, Vol. 20, No. 3, pp. 3-10, 2005.
- [14] 横山琢郎, 平嶋宗, 岡本真彦, 竹内章, “単文統合としての作問を対象とした学習支援システムの設計・開発,” 教育システム情報学会誌, Vol. 23, No. 4, pp.166-175, 2006.
  - [15] L. B. Resnick, “Constructing Knowledge in School,” In *Development and Learning, Conflict or Congruence?*, edited by L. S. Liben, Hillsdale, N.J., LEA., pp. 19-50, 1987.
  - [16] 森田英嗣, “「誤りから学ぶ」環境の開発研究,” 日本教育工学雑誌, Vol. 18, No. 1, pp. 1-13, 1994.
  - [17] 市将治, “筆算の計算手続きの自己説明支援環境,” 九州工業大学卒業論文集, 2003.
  - [18] 市将治, 東本崇仁, 平嶋宗, 竹内章, “問題作成による手続きの意識化を促進する筆算学習支援環境,” 教育システム情報学会 30 周年記念全国大会講演論文集, pp. 211-212, 2005.
  - [19] J. S., Brown, R. B. Burton, “Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematical skills,” *Cognitive Science*, Vol. 2, pp. 155-191, 1978.
  - [20] 平嶋宗, 得能加奈, 竹内章, “多桁減算におけるバグの可視化の試み,” 日本教育工学会雑誌, Vol. 25, Suppl., pp. 173-178, 2001.
  - [21] 福山欣之, 正司和彦, “実験計画を支援するアイデアプロセッシング教材の開発と授業実践,” 日本教育工学会第 11 回大会, pp. 577-578, 1995.
  - [22] 湯澤正通, “認知心理学から理科学習への提言,” 北大路書房, 1998.
  - [23] B. Y., White, J. R. Frederiksen, “Causal model progressions as a foundation for intelligent learning environment,” *Artif. Intell.*, Vol. 42, pp. 99-157, 1990.
  - [24] P. Reimann, “Eliciting Hypothesis-Driven Learning in a Computer-Based Discovery Environment,” in *Intelligent Learning Environment and Knowledge Acquisition in Physics*, eds., A. Tiberghin and H. Mandl, pp. 137-150, 1991.
  - [25] M. Ueno, K. Fujii, K. Tsushima, “Interactive learning environment for dynamics: IPE,” *IEICE, Trans. Inf. & Syst.*, Vol. E77-D, No. 1, pp. 138-146, 1994.
  - [26] 竹内章, 吉田裕之, 藤田智之, 石橋和子, “知識の適用能力獲得のための知的学習環境の構成とばね学習への応用,” 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J83-D-I, No. 6, pp. 523-530, 2000.
  - [27] 正田久美子, 草野隆太郎, 中村学, 大槻説乎, “電気回路の知的マイクロワールドに関する研究,” 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J83-D-I, No. 6, pp. 531-538, 2000.
  - [28] 妻鳥貴彦, 金西計秀, 矢野米雄, “間接操作・間接実行型 Mediator を利用した実験計画支援環境 EXERT,” 電子情報通信学会誌 D-I, Vol. J83-D-I, No. 6, pp. 550-560, 2000.
  - [29] 中池竜一, 三輪和久, “グラフ作成を通じた仮説検証プロセス学習支援システムの検

- 討,” 人工知能学会第39回知的教育システム研究会資料, SIG-IES-A302-07, pp. 33-38, 2003.
- [30] T. Hirashima, T. Niitsu, K. Hirose, et al., “An Indexing Framework for Adaptive Arrangement of Mechanics Problems for ITS,” IEICE TRANS. INF. & SYST., Vol. E77-D, No. 1, 1994.
  - [31] M.D. Merrill, “Instructional Transaction Theory (ITT): Instructional Design Based on Knowledge Objects,” In Reigeluth, C.M. (Ed.), *Instructional Design Theories and Models Vol.II: A New Paradigm of Instructional Theory*, pp.397-424 (Chap. 17), Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates (1999).
  - [32] D.M. Towne, “Learning and Instruction in Simulation Environments,” Educational Technology Publications, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
  - [33] D.M. Towne, T. de Jong, H. Spada(Eds.), “Simulation-Based Experiential Learning,” Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993.
  - [34] E. Wenger, “Artificial Intelligence and Tutoring Systems: Computational and Cognitive Approaches to the Communication of Knowledge,” Morgan Kaufmann, 1987.
  - [35] R.R. Burton, J.S. Brown, G. Fischer, “Skiing as a model of instruction,” In Rogoff, B. and Lave, J. (Eds.), *Everyday Cognition: its development in social context*, Harvard Univ.Press, 1984.
  - [36] G. Fischer, “Enhancing incremental learning processes with knowledge-based systems,” In Mandl, H. and Lesgold, A. (Eds.), *Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems*, Springer-Verlag, 1988.
  - [37] B. White, J. Frederiksen, “ThinkerTools: Causal models,” conceptual change and science education, *Cognition and Instruction*, Vol. 10, pp.1-100, 1993.
  - [38] B. White, J. Frederiksen, “Causal model progressions as a foundation for intelligent learning environments,” *Artificial Intelligence*, Vol. 42, pp.99-157, 1990.
  - [39] K. Opwis, “The flexible use of multiple mental domain representations,” In D. Towne, T. de Jong and H. Spada (Eds), *Simulation-based experiential learning*, pp.77-90, Berlin/New York: Springer, 1993.
  - [40] J. Frederiksen, B. White, “Conceptualizing and constructing linked models: creating coherence in complex knowledge systems,” In Brna, P., Baker, M., Stenning, K. and Tiberghien, A. (Eds.), *The Role of Communication in Learning to Model*, pp.69-96, Mahwah, NJ: Erlbaum (2002).
  - [41] J. Frederiksen, B. White, J. Gutwill, “Dynamic mental models in learning science: the importance of constructing derivational linkages among models,” *Journal of*

- Research in Science Teaching, Vol. 36, No.7, pp.806-836, 1999.
- [42] A. Collins, D. Gentner, "Multiple models of evaporation processes," Proc. of the Fifth Cognitive Science Society Conference, 1983.
  - [43] A.L. Stevens, A. Collins, "Multiple models of a complex system," In Snow, R., Frederico, P. and Montague, W. (Eds.), Aptitude, Learning, and Instruction (vol. II), Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1980.
  - [44] K.E. Maani, V. Maharaj, "Links between systems thinking and complex decision making," System Dynamics Review, Vol.20, No.1, pp.21-48, 2004.
  - [45] M. Raubal, M. Worboys, "A Formal Model of the Process of Wayfinding in Built Environments," Proc. COSIT'99, 1999.
  - [46] D.E. Howie, K.J. Vicente, "Measures of operator performance in complex," dynamic microworlds: Advancing the state of the art, ERGONOMICS, Vol. 41, No.4, pp. 485-500, 1998.
  - [47] B. Falkenhainer, K.D. Forbus, "Compositional Modeling: Finding the Right Model for the Job," Artificial Intelligence, 51, pp.95-143. 1991.
  - [48] 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗, "マイクロワールドグラフにおける移行タスクとその自動生成," 教育システム情報学会 第31回全国大会講演論文集, pp. 437-438, 2006.
  - [49] 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗, "マイクロワールドグラフにおける移行タスク自動生成システムの構築," 人工知能学会 全国大会 (第21回) 論文集, 2007.
  - [50] T. Horiguchi, T. Hirashima, "Graph of Microworlds: A Framework for Assisting Progressive Knowledge Acquisition in Simulation-based Learning Environments," Proc. of AIED2005, pp.670-677, 2005.
  - [51] T. Horiguchi, T. Hirashima, "A simulationbased learning environment assisting scientific activities based on the classification of 'surprisingness'," Proc. of ED-MEDIA2004, pp.497-504, 2004.
  - [52] D. Weld, "Approximation Reformations," Proc. of AAAI-90, pp.407-412, 1990.