

実験方法の考案による学習を支援する仮想実験環境の構築

東本崇仁*, 堀口知也**, 平嶋 宗*, 竹内 章***

Virtual Experimental Environment to Support Learning by Designing Physical Experiment

Takahito TOUMOTO*, Tomoya HÖRIGUCHI**, Tsukasa HIRASHIMA*, Akira TAKEUCHI***

Acquiring the ability to use physical laws to deal with concrete physical situations is one of the most important targets in physics learning. In the learning, however, students are usually required only to solve exercise problems by using the physical laws. The students who can solve exercise problems with the laws cannot always use the laws to deal with the concrete physical situation. We, therefore, propose a virtual experimental environment where students are required to deal with physical situations with the laws measuring several attributes in order to derive an attribute. In this paper, the implementation of the environment and the results of experimental are also described.

キーワード：仮想実験環境, 実験を通じた学習, 実験方法の考案, 物理解習

1. はじめに

教育の文脈において学習者に実験を行わせる目的は、(1)実験を通して法則などを学習者自身に発見させること、(2)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、の二つに分けることができる。(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。このような探求的な実験は、科学的態度の育成、創造力の育成などの面か

ら重要であるとされている。

一方、(2)の目的の実験では、既に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により、その知識を、具体性を持ったより定着したものにすることを指向している。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、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⁽¹⁾、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。このような実験では、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、さらに(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、(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付けて用いる能力の獲得、が期待される。以下本稿では、このように

* 広島大学
Hiroshima University

** 神戸大学
Kobe University

*** 九州工業大学
Kyushu Institute of Technology

必要な公式と測定方法を考えることを実験方法の考案と呼ぶ。

しかし、授業で行われる実験では、予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、本来のこの種の実験の目的は十分達成できないといえる。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⁽²⁾。

仮想実験環境はこのような補助を提供する有望な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^{(3)~(7)}。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、これだけでは不十分であり、実験方法の考案を要求する課題の実行環境、その内容の診断機能が必要である。

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⁽⁸⁾や中池ら⁽⁹⁾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ぬ。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るとよいが、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言いがたい。

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。その特徴は、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、といった機能を有していることである。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。

2. 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、ある属性値の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ると判断できない。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



図1 実験方法考案課題

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イス、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.で述べ、その評価については4.で述べる。

3. 仮想実験環境の設計・開発

本仮想実験環境は、Microsoft Visual Basic 6.0を用いて開発され、Windows 2000及びXP上での動作が確認されている。

3.1 インタフェイス

3.1.1 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、

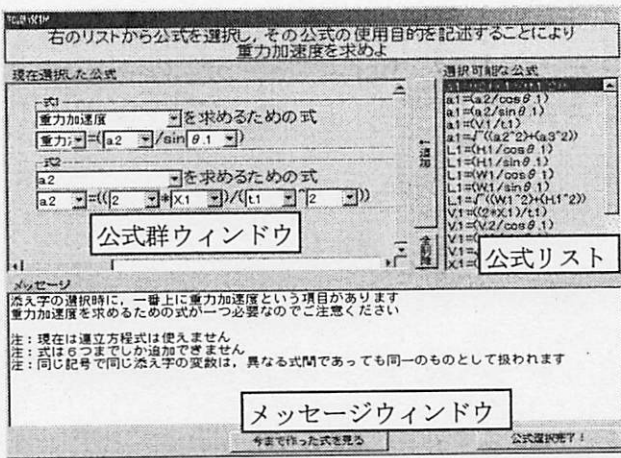


図2 公式選択・組み合わせインタフェイス

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。

3.1.2 測定インタフェイス

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イスを図3、図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4の振る舞い測定インタフェースを利用する。まず、図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。

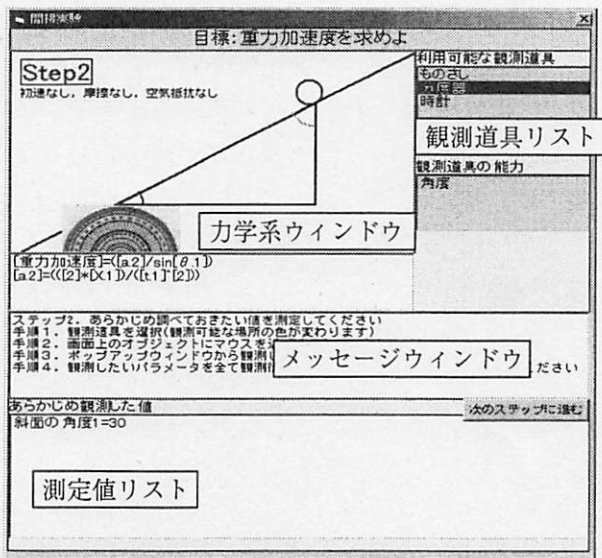


図3 初期状態測定インタフェース

3.1.3 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

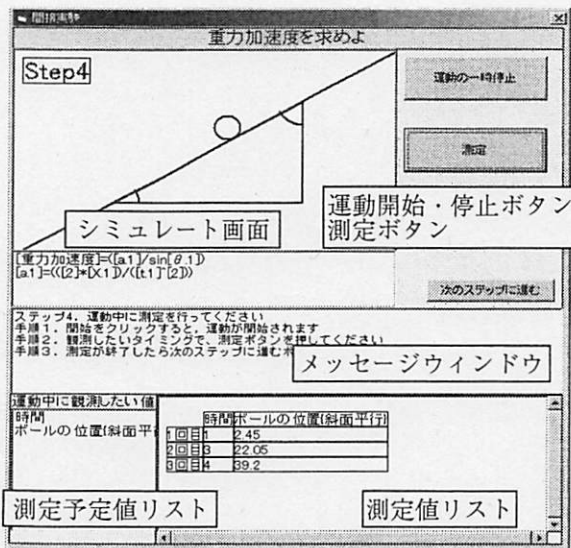


図4 振る舞い測定インタフェース

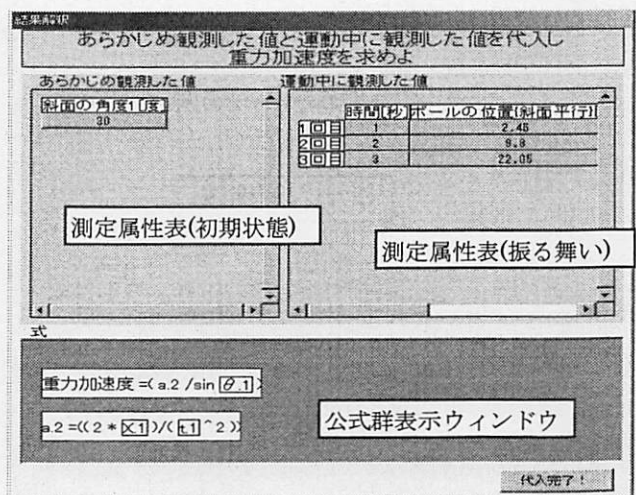


図5 対応付けインタフェース

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。

3.2 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⁽¹⁰⁾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。

3.2.1 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

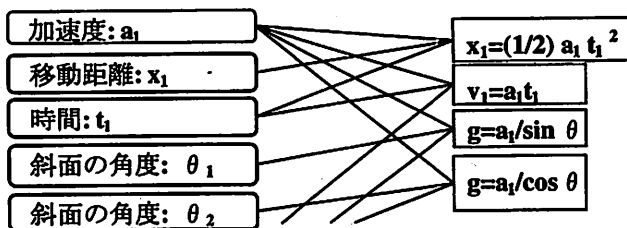


図6 現象構造の一部の例

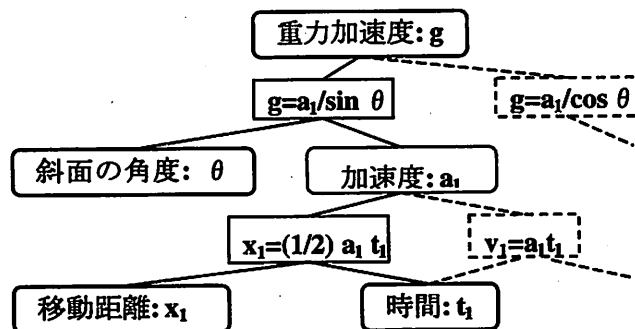


図7 解法構造の一部の例

存在する。図6は本環境の事例における現象構造の例、図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8は図6、図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

- ・ 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 : θ_1
 - 対象 : 斜面の左下の角
 - 道具 : 分度器

図8 測定構造の一部の例

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： θ_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。

3.2.2 公式の組み合わせ診断

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 $x_1=(1/2)a_1 t_1^2$ 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。

3.2.3 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。

3.2.4 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 と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。

4. 評価実験

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.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。

4.1 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9である。図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行っており、また、本

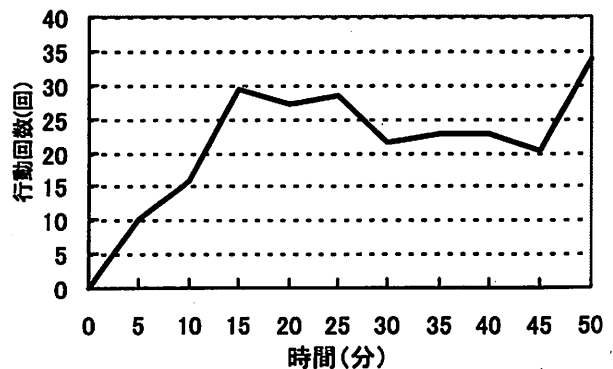


図9 学習者の利用履歴

表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
平均回数	9.3	4.9	3.5

表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	思 あ ま り 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

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2にまとめた。多くの被験者は、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らは判断している。

4.2 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いと、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。

5. おわりに

本論文では、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、本論文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。

本論文では、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イスとその診断機能、(B) 測定を行えるインタフェイスとその診断機能、(C) 測定値と公式の代入を行えるインタフェイスとその診断機能、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っ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、1.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、ユース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。

(2005年11月30日 受付)

参 考 文 献

- (1) 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）
- (2) 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）
- (3) White, B. Y. and Frederiksen, J. R.：“Causal model progressions as a foundation for intelligent learning environment”，*Artif. Intell.*, vol.42, pp.99-157（1990）
- (4) Reimann, P.：“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）
- (5) Ueno, M., Fujii, K. and Tsushima, K.：“Interactive learning environment for dynamics:IPE”，*IEICE, Trans. Inf. & Syst.*, vol.E77-D, no.1, pp.138-146（1994）
- (6) 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）
- (7) 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）
- (8) 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 EX-ERT”，*電子情報通信学会誌，D-I, Vol.J83-D-I, No.6*, pp.550-560（2000）
- (9) 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）
- (10) Hirashima, T., Niitsu, T., Hirose, K. et al.：“An Indexing Framework for Adaptive Arrangement of Mechanics Problems for ITS”，*IEICE TRANS. INF. & SYST.*, VOL.E77-D, No.1（1994）

著者紹介



東本 崇仁

2003年九州工業大学情報工学部卒業。2005年同大大学院情報工学研究科博士前期課程了。現在、広島大学大学院博士後期課程在学中。既習の公式を用いた間接測定を学習者に要求する実験を対象とした学習支援環境の研究、学習者の漸進的学習を支援するための適応的な実験系列の提供を可能にするマイクロワールドグラフの自動構築手法の研究、学習者自身に問題を作成させる作問学習の知的支援システムの研究に従事。電子情報通信学会学生会員。



堀口 知也

1987年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1989年同大学院理工学研究科修士課程了。1997年大阪大学大学院工学研究科博士課程了。同年、神戸商船大学講師。2001年同助教授。2003年神戸大学海事科学部助教授。工学博士。知識工学の教育応用に興味を持ち、知的学習支援、情報可視化システムの研究に従事。1996年度人工知能学会研究奨励賞、2002年度人工知能学会研究会優秀賞受賞。電子情報通信学会、情報処理学会、教育システム情報学会、日本教育工学会、日本認知科学会、日本教育心理学会、IAIED 各会員。



平嶋 宗

1986年大阪大学工学部応用物理学科卒業、1991年同大大学院博士課程了。同年同大産業科学研究助手、九州工業大学情報工学部助教授を経て、2004年広島大学大学院工学研究科教授。知的学習支援システム、情報フィルタリングなどの研究に従事。1993年度人工知能学会全国大会優秀論文賞、ED-MEDIA95優秀論文賞、1996、1998、1999年度人工知能学会研究奨励賞、ICCE2001優秀論文賞、情報

処理学会、教育システム情報学会、教育工学会、IAIED、AACE 各会員。



竹内 章

1976年九州大学工学部造船学科卒業、1978年同大大学院修士課程了。九州大学工学部助手、講師を経て、1989年九州工業大学情報工学部助教授。現在、同教授。工博、知的教育システム、ヒューマン・マシンインタフェースなどの研究に従事。情報処理学会、人工知能学会、教育システム情報学会等各会員。