

物理法則の具体化としての測定を支援する仮想実験環境の構築

Learning by Designing Physical Experiment and a Virtual Experiment Environment for the Learning

東本 崇仁^{*1} 平嶋 宗^{*1} 竹内 章^{*2}
 TOUMOTO Takahito HIRASHIMA Tsukasa TAKEUTI Akira

^{*1} 広島大学
 Hiroshima University

^{*2} 九州工業大学
 Kyushu Institute of Technology

Acquiring the ability to connect physical laws and concrete systems are one of the most important targets in the physics learning. In usually leaning, students are required to solve exercise problems by using the physical laws. Although this practice deals with the connection from concrete systems to the physical laws, it doesn't deal with the connection from the physical laws to a concrete system. Therefore, students who can solve a problem by using a physical law, they sometimes cannot make problems that can be solved by the physical law. We, therefore, propose a virtual experimental environment where students are required to design concrete systems and to measure several attributes in order to derive an attribute. This practice is expected to be useful to learn the connection from the laws to the systems. In this paper, the implementation of the environment and the results of experimental are also described.

1. はじめに

物理において抽象的な物理法則を具体的な物理系と対応させて理解することは非常に重要である。一般的な物理の授業では学習済みの物理法則を利用して問題を解決するという課題(以下解決課題と呼ぶ)がしばしば出題され、学習者はその課題を解くことにより学習済みの抽象的な物理法則を具体的な物理系と対応付ける。このような課題では、目標となる物理量とそれを導くために必要な物理量が課題により与えられ、学習者は必要な物理法則を選択し、与えられた物理量と物理法則を対応付けることにより目標の物理量を導く、といった解決過程になっており、この過程は具体的な物理量から抽象的な物理法則を求める過程であると言える。この種類の演習を通して学習者は具体的な系から抽象的な法則を求める能力を獲得できる。

しかしながら、このような能力を獲得している学習者に対し、実験道具や測定道具等の実験環境を用意し、目標となる物理量を導くために必要な実験の方法(環境の設定や測定)を考案させる課題(以下実験方法考案課題と呼ぶ)を行わせる場合、解決できないことが多いとされている[1]。目標となる物理量を導くために必要な物理法則を物理系に合わせて選択し、実際に必要な物理量を求めるといった能力については従来の演習だけでは十分な育成がなされていないからである。これは、具体的な物理量から抽象的な物理法則を選択できる、具体から抽象への方向で対応付けを行える学習者であっても、必ずしも抽象的な物理法則を用い具体的な物理量を求めることが出来ないこと、つまり抽象から具体への対応付けを行うことができないことを意味している。学習者自身に実験方法の考案を必要とする演習を行わせることは抽象から具体への結びつけに有効であるとされている[2]が、学習者自身では実験方法の考案を行えないためその演習の支援を行うことは有効な試みであろう。そこで、本研究では実験方法の考案演習による抽象から具体への対応付けを行える能力の育成を提案し、その支援としての仮想実験環境の利用を提案する。

従来の仮想実験環境では、具体的な実験結果からの法則の新規獲得や法則の修正、つまり、具体から抽象へのアプローチを支援するものが多く[3-6]、抽象的な法則を具体的な物理系と

対応付けることを目的として仮想実験環境を利用する試みはあまりなされていない。そのため従来の仮想実験環境をそのまま実験方法の考案の演習支援として利用することはできず、新たな機能を付け加える必要が出てくる。そこで、本仮想実験環境では、(a)学習者自身で目標のために利用する物理法則を考え、それを物理系に適用するための測定方法を考案できる環境と、(b)その過程において、学習者が行き詰まりや誤りなどに陥った場合に、行き詰まりや誤りを解消するための誘導を行う機能を新たに仮想実験環境に付与することが必要となる。

より具体的には、学習者にある物理系においてある物理量を導くという課題を与え、(i)その物理量をその物理系から導くために使う物理法則を選択させ、(ii)その物理法則を用いてその物理量を導くための測定を行わせ、(iii)実際にその物理量を導くために測定結果を物理法則に対応付けさせる、ことを行う。よって本システムでは(1)物理法則の選択を行える環境とその診断機能、(2)測定を行える環境とその診断機能、(3)測定結果と物理法則の対応付けを行える環境とその診断機能、を持った仮想実験環境を実装することとなる。なお、目標となる物理量が直接測定できてしまう場合は、物理法則を使う必要性が出てこないことから、ここで扱う課題設定においては、目標となる物理量は別の物理量の測定値から公式を用いて導かなければならないように設定しており、このような測定をここでは「間接測定」と呼んでいる。さらに、本研究では物理の力学をそのドメインとして取り扱っており、物理法則として公式を取り扱う。

本稿では2章において解決課題と実験方法考案課題の解決過程についての記述を行う。3章では2章で記述した実験方法考案課題の解決過程にそったシステムの設計・開発について記述し、4章では本システムの評価を行う。5章でまとめる。

2. 解決課題と実験方法考案課題の解決過程

本研究では、教授された抽象的な知識としての公式から具体的な物理量を求めるための能力の育成として実験方法考案課題を取り扱う。この課題が一般的に物理で取り扱われている解決課題とその解決過程においてどのような違いが生じるかをモデルの記述を通して比較し、実験方法考案課題を学習者が行う際の困難性と教師が指導する際の困難性について記述する。

2.1 問題解決過程

一般的に物理の問題では、既に与えられた物理量から目標の物理量を導くという課題が多く出題される。本研究ではこれを物理の一般的な問題と捉え、実験方法の考案を必要とする課題と比較し説明する。以降本稿では、このような課題を解決課題と呼び、解決課題を解く過程を問題解決過程と呼ぶ。

解決課題では必要な物理量が既に与えられているため、問題解決過程は、(i) 与えられた物理量から目標の物理量を導くために利用する公式を一つ選択し、あるいは複数選択し組み合わせ、(ii) 与えられた物理量を公式に代入することで目標の物理量を導く、という過程となる。問題解決過程においては、目標の物理量と、利用可能な物理量が問題により与えられているため、それを繋ぐ公式群はほぼ一意に定まる。よって、問題解決過程のモデルは図1のようになる。

2.2 実験方法考案過程

実験方法の考案を必要とする課題を実験方法考案課題と呼ぶ。実験方法考案課題では、目標となる物理量と物理系を学習者に提示する。以下本稿では、実験方法考案課題の解決過程を実験方法考案過程と呼ぶ。

実験方法考案過程では、(i) 目標の物理量を導くために利用可能な公式を選択・組み合わせ、(ii) その公式群における変数に対応する物理量を具体的な物理系で測定し、(iii) 測定結果を実際に公式に代入する、という過程となる。

実験方法考案過程においては、目標の物理量を導くために利用可能な物理の公式やその組み合わせは多様に存在し、利用した公式により何を測定するべきであるか、どのように代入するかも異なる。そのため実験方法考案過程のモデルは図2となり、実験方法考案課題は多くの正解を持つと言える。

2.3 両解決過程の比較

実験方法考案過程が問題解決過程を最も異なる点は、(I) 公式を選択する際に複数の解が正解として考えられることと、(II) 測定という新たなプロセスが加わっていること、である。

公式を選択する際は、問題解決過程では与えられた物理量により利用可能な公式がほぼ一意に限定されるのに対し、実験方法考案過程では複数の解が正解として存在する。また、対応付けの過程においては、問題解決過程では公式を正しく選択できていれば与えられた物理量をどう代入するかは自明であることが多いが、実験方法考案過程では選択した公式の変数が実際の物理系でどうすれば測定できるかを考える必要がある。物理系に依存して利用可能な公式や、公式内の変数の測定方法は変化するため、物理系と公式と測定を統合的に判断する必要があるため、実験方法の考案は困難であると言える。



図1. 問題解決過程

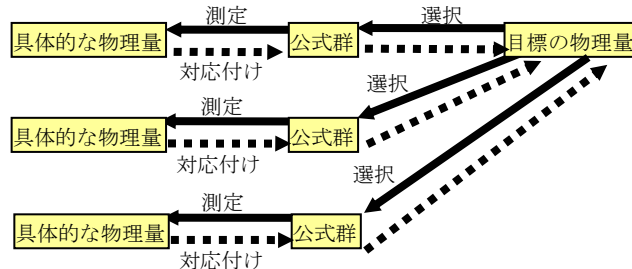


図2. 実験方法考案過程

しかし、この困難性がすなわち実験方法の考案を通して学習者が学習すべき部分である。物理系により利用可能な公式の選択や組み合わせを行える能力、公式内の変数がある物理系ではどのように測定できるかを考える能力がそれにあたり、それらは十分学習意義がある部分であると筆者らは考える。

よってこのような実験方法考案課題を学習者に演習させることは有意義な試みであると言えるが、学習者自身の手による実験方法の考案は容易ではないのは再三述べてきたとおりである。そこで、そのような演習を支援する必要があることは明白であるが、実験方法考案過程の特徴から教師による支援は負担が大きいと言える。

実験方法の考案を学習者に行わせ、それを指導する際には、学習者の解の正誤判定と正解への誘導機能が必要となる。しかし、公式の選択時においては正解が複数存在し、後の測定や対応付けもその公式に依存した解となる。正誤判定は学習者に個別に対応する必要があるため、その全ての判断を行うことは容易ではないと言える。また、正解への誘導においては、学習者の解を考慮し、最も誘導すべき正解へと誘導することが必要であるが、どの解に誘導すべきかを個別に指導することは教師にとって負担が大きいと言える。

そこで、本研究では従来の仮想実験環境に、(1)公式の選択、(2)測定、(3)対応付けについて表現できるインタフェースを導入し、各過程において正誤判定、正解への誘導を行う診断機能を追加することで、実験方法の考案を通じた学習を支援する仮想実験環境の開発を試みている。

3. システム設計・開発

本システムは、(1)公式の選択・組み合わせを行える環境とその診断機能、(2)測定を行える環境とその診断機能、(3)測定結果と公式の対応付けを行える環境とその診断機能、により構成される。実際はその他の機能として、問題提示環境(目標・実験環境を提示)も必要となる。

3.1 システムの環境

本システムでは以下の3つの環境によって、学習者が自身の考案した実験方法の表現を行える環境を提供する。

(1) 公式の選択・組み合わせ環境

本システムの目的は公式の暗記ではなく、学習済みの公式を利用し具体的な物理量を求めることである。よって、この環境で公式を詳細に記述できる必要はないため、本システムでは公式のリストを学習者に与え、そのリスト内の公式を選択、組み合わせを学習者が行える環境を提供する。

学習者はシステムが提示した公式のリストから、目標の物理量を導くために必要だと思える公式の一つあるいは複数選択し、選択した公式間を関連付けて組み合わせることにより、目標の物理量を計算するための公式群を組み立てる。

(2) 測定環境

演習におけるメイン部分であり、選択した公式群に対応した測定を行うこととなる。この環境では、実際に測定道具の選択後に、どの実験道具に対して測定を行うか、また、実験道具のどの属性に対して測定を行うか、どの時点で測定を行うかを記述させる必要があり、本システムでは測定道具の選択、測定対象としての実験道具の選択、実験道具の属性選択を事前測定と運動中の測定の2段階で測定を行える環境を実装した。

学習者は、インタフェース上に提示された実験道具(斜面、ボールなどの捜査対象)に対して、測定道具を実際に使い、実験道具の属性(速度、加速度、位置など)の測定を行うことが可能

である。さらに、本システムでは、実際の実験と同様に、静的な値については事前測定(運動が開始される前の測定)で、動的な値については運動中測定で測定を行うことを要求する。移動距離などの動的変化を伴う値は単体での測定には意味が無く、時間とともに、あるいは他の動的な値とともに計測する必要がある。そこで、運動中測定では、時間と距離のように関連付けて測定しなければならない値について考慮しながら測定を行える環境を提供する。

(3) 測定結果と公式の対応付け環境

測定結果としての具体的な物理量を抽象的な物理法則としての公式に対応付けるための環境を提供する。具体的には、測定した物理量を公式に代入できる環境を用意する必要がある。

本システムでは測定結果を表の形で提示するとともに、最初に選択した公式群を同画面にて提示する。学習者は、提示された公式に、測定した値を代入することが可能な環境を提供する。

3.2 システムの診断機能

本システムでは、誤りの原因の推定などは行っておらず、各段階における誤りの箇所・種類の特定を行い、正解への誘導を行うことにより、行き詰まりや誤りの解消を目指している。正誤判定や正解への誘導を行う際は、学習者の解を判断し、最も誘導することが適切である正解パターンへの誘導を行うことを目標とする。その手法として、システムは事前に与えられた、(A)目標の値、(B)実験環境で利用可能な公式、(C)測定可能な値、から正解の経路を全て検出し、正解データベースを学習者の作業前に自動で構築することにより、正誤判定や誘導すべき正解の検出の効率化を行っている。システムによる診断は、このデータベースと学習者の解を比較することにより行う。

(1) 公式の選択・組み合わせの診断

公式の選択・組み合わせの診断は、正解データベースの公式に関する情報と比較し、マッチングにより行う。一致するものがあれば、公式の選択・組み合わせ段階では正解と診断する。一致するものが無い場合は、学習者の解答を誤りであると判断し、正解への誘導を行う。しかし、公式の選択・組み合わせ段階においては、正解が複数存在し、適切な正解パターンに誘導する必要がある。本研究では、学習者の解答と類似したパターンを検出し、そのパターンへの誘導を行うことで、学習者の表現しようとした内容を考慮した誘導を行っている。公式段階の誘導は、必要な公式の追加、不必要な公式の削除が主な内容となるため、ここで用いる類似度は、

$$\text{類似度} = \frac{\text{一致した公式の数}}{\text{学習者の公式の数} + \text{正解公式の数}}$$

の式で計算している。これは、正解に至るまでの追加と削除の回数をもっとも少ないものを正解パターンとして検出していることを意味する。具体的な正解への誘導は最も類似した正解パターンと、学習者の解答を比較し、差分を抽出したのちに徐々に正解へと誘導するといった方法を用いている。ここでの誤りは、計算式としての誤りと公式の組み合わせの誤りを除けば、現在の物理系では測定不可能な物理量が含まれている公式の存在であり、その意味によりさらに二つに分類することが出来る。測定不可能な物理量が他の公式により導かれる場合と、現在の物理系ではどうやっても導けない場合の二つである。他の公式により導ける場合は公式の追加を促し、導くことが不可能な物理量である場合はその物理量が含まれている公式の削除を促す。

(2) 測定の診断

測定の診断は、選択・組み立てを行った公式と対応する測定を行えているかについての診断を行う。この段階では既に学習者は正しい公式の選択・組み合わせを行っており、それに対応した測定すべき物理量をシステムはデータベースで把握している。測定が不十分である場合は、先ほどと同様に正解との差分をとり、段階的な正解への誘導を行う。ただし、余分な値を測定している場合は、実験において多くの物理量を計測することは有意義であり必ずしも誤りとは言えないため修正の指導は行わない。しかし、本研究の目標として、測定すべき物理量を正確に考えることも重要であるため、最終的に注意を促す。

(3) 測定結果と公式の対応付けの診断

測定結果と公式の対応付けについての診断は、測定時と同様に既に正解済みの公式の選択・組み合わせから、代入すべき値・箇所を参照する。誤りの種類は、属性の誤り、対象の誤り、時点の誤りの3種類にわけ、システムではどの誤りに分類されるかの診断を行う。属性の誤りとは、公式では速度を意味する箇所に、測定結果として質量を代入するなどの、全く異なった属性の対応付けによる誤りである。対象の誤りとは、属性については正解だが、異なる対象について、または対象の異なる部位についての、対応付けによる誤りである。例としては、異なる物体の質量を対応付ける、異なる部分の角度を対応付けるなどがある。時点の誤りとは、動的な値に関して、関連付けされた測定値を対応付けるべき箇所に無関連な測定値を対応付ける、もしくは無関連である必要がある測定値に関連付けた測定値を対応付ける、の2種類である。

4. 評価実験

本章では開発したシステムを評価するために行った実験とその結果について報告する。評価実験は、システムを開発するにあたり、開発する意義について調査するために実験方法考案課題の困難性についての事前調査、実際に作成したシステム自体がどの程度有効であるかの評価実験、また、その結果を裏付けるための補足実験の3つを行った。

4.1 事前調査

本研究では、最初に公式を具体的な物理系に対応付けることの困難さについて調査した。本調査の目的は、実験方法考案課題を学習者が行えないことを確認するとともに、同じ公式の利用を必要とする解決課題については解決可能であることを調査し、実験方法考案課題独自が持つ困難性を調査することである。

本調査は工学部大学生・院生合計 10 人に、ある物理量をある物理系における間接測定によって導く方法を問う課題(実験方法考案課題)を 5 課題解かせた後(制限時間 50 分中平均 50 分使用)、同様の物理量を課題により既に与えられた物理量(実験方法考案課題における測定すべき物理量に対応)から導く課題(解決課題)を 5 課題解かせる(平均時間 50 分中平均時間 40 分使用)ことにより行った。成績は両課題とも 5 課題で最大 5 点中、実験方法考案課題についての平均点は 1.0 点となり、解決課題の平均点が 3.5 点となった(表 1)。また、t検定では、 $p=0.001(<0.01)$ となり、有意な差があるという結果になった。

このことより、解決課題において必要な公式を選択し、組み合わせ、実際に利用することができる学習者であっても、実験方法考案課題について同じように公式を利用できない学習者が多いことが明らかになった。実験方法考案課題の能力は解決課題を解くことでは育成されず、独自の演習が必要であるといえる。

表 1. 実験方法考案課題と解決課題の成績比較(最高 5 点)

	実験方法考案課題	解決課題
平均点	1.0	3.5

表 2. 検出した誤りの種類と平均

	公式選択・組み合わせ時	測定時	代入時
平均点	9.3	4.9	3.5

表 3. 事前調査時とシステム利用後の成績比較(最高 5 点)

	事前調査	システム利用後
平均点	1.0	3.5

表 4. 3段階の成績比較(最高 5 点)

	事前調査	課題説明後	システム利用後
平均点	1.0	1.3	3.5

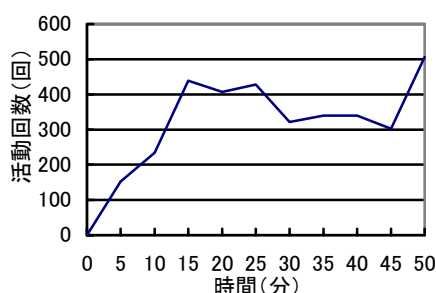


図3. 学習者の活動履歴

4.2 システムの評価

本節では、システムの利用可能性についてと、有効性について行った評価実験について説明する。

評価実験は事前調査時と同大学の同学部の大学生 15 人(事前調査時とは異なる学生)に対し、システムの説明 10 分を行った後、システム利用を 50 分行わせ、その後事前調査時と全く同様の実験方法考案課題を 5 課題(制限時間 50 分)解決させた。ただし、システムで取り組ませた課題は、この 5 課題のいずれとも同一の課題ではない。

利用可能性については、公式を 1 つ選択、組み合わせに関する設定を 1 つ変更、測定 1 回、代入 1 回をそれぞれ 1 行動と換算し、50 分間の全員の行動回数の合計を時間軸でグラフ化したものを図 3 にあわす。図 3 より、システムに慣れるまでの最初の機関は回数が少ないが、その後学習者の行動回数の減少は特に見られなかったことから、飽きることなく最後まで利用を行えたシステムであると言える。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、システムでは表 2 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出来た。よって、学習者が実験方法の考案課題を行える環境であり、システムは学習者に対し多くのフィードバックを与えることが出来たといえる。

有効性については、事前調査時とシステム利用後の実験方法考案課題に関する成績の差について比較した。システムを利用していない学習者の実験方法考案課題の平均点は事前調査時の結果より 1.0 点であったのに対し、システム利用した学習者の平均点は 3.5 点であった(表 3)。t 検定では、 $p=6.2 \times 10^{-4}$ (<0.01)となり、有意な差が有るとの結果であった。このことから、

システムの利用により実験方法考案課題の演習が行えたのではないかと期待する。

4.3 システムの再評価

しかしながら、50 分の利用という短時間の利用において、成績が飛躍的に向上していることから、事前調査時は単に課題に不慣れだっただけではないだろうかという意見も当然考えられる。少しのきっかけだけで実験方法考案課題が容易に解決できるようになるのであれば、本システムが有効であるとは評価することは出来ない。そこで追加の実験として、同大学の同学部の大学生 9 人に対し、事前調査時と同様の課題を 5 課題(制限時間 50 分)出題する前に、別の考案課題を一つ例として、10 分間説明を行った。その結果と先ほどの結果を表 4 で統合した。実験方法考案課題説明後の結果は、平均点 1.3 点であり、t 検定による事前調査と課題説明後の実験方法考案課題の成績は有意な差は無く($p=0.62$)、課題説明後とシステム利用後の成績は有意な差が生じた($p=1.0 \times 10^{-3}$ (<0.01))。

標本数が少なく、学生間で成績にばらつきがある可能性があるため断定は出来ないが、少しの説明では成績向上は見られず、システムの利用後の結果と大きな開きが出たことから、システムを利用した演習は実験方法の考案の演習として有効であったと筆者らは捉えている。

5. おわりに

本研究では、すでに獲得している抽象的な公式を、具体的な物理系に結びつけることを支援するための、仮想実験環境の設計・開発を行い、評価を行った。このような学習目的での仮想実験環境の活用はこれまでに行われておらず、本研究は、仮想実験環境に新しい役割を与えるものと考えている。

今後の課題として、学習者の学習状態に応じた課題の選定機能の実装を予定している。そこで、課題で用いる物理系を学習者の状態に合わせて漸進的に変化させる必要があり、物理系間の関係をシステムが把握するとともに、学習者の学習状態の把握も必要となる。そこで、各物理系および物理系間の関係に関する記述方法と、学習者の状態に関する記述方法を提案する必要がある。今後は、この二つの記述方法を考案するとともに、適切な次課題の導出方法についての検討を行う。

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, Nov.1995.
- [3] 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(2000/6).
- [4] Akira Takeuchi, Hiroyuki Yoshida, Tomoyuki Fujita, and Kazuko Ishibashi: An Intelligent Advisor for an Interactive Learning Environment, Proc. of, ED-MEDIA98, pp.1366-1371, 1998.
- [5] M. Ueno, K. Fujii, and K. Tsushima: Interactive learning environment for dynamics: IPE, IEICE, Trans. Inf. & Syst, vol. E77-D, no. 1, pp. 138-146, Jan. 1994.
- [6] K. D. Forbus and B. Falkenhainer: Self-explanatory simulations: An integration of qualitative and quantitative knowledge, Proc. AAAI-90, pp.380-387, 1999.