

第1章 ITによるシミュレーション・実験を生かした効果的な学習システム

第1節 計算機シミュレーションを用いた理数系教育電子教材の研究

〔要約〕 20世紀後半以降、学問の先端領域の多くは計算機シミュレーションと結びつくことで新たな転機を迎えてきた。また、コンピュータネットワークの普及はコラボレーションの形を大きく変えつつある。本研究では、計算機シミュレーションを用いた新しい理数系教育のコースを作成すると共に教材開発を進め、これを利用した教育を実践してきた。また、教材開発支援サイトを立ち上げ実際に利用することで教材開発時に有効なコラボレーション環境について調べてきた。ここでは、理数系教育における計算機シミュレーションの新しい可能性、及びインターネットを利用したコラボレーションと電子教材開発について報告し、今後の展開について述べることとする。

1. 研究の背景と目的

1.1 理科（物理）教育と計算機シミュレーション

多くの学問領域、特に自然科学の諸分野では、物事を定性的に理解するだけでなく、その学問領域での基礎概念に基づいて理解することが大切である。このためには、仮説に基づいた理論的な枠組みの定式化と系の振る舞いの解析方法について学習するだけでは不十分であり、自然現象に対する仮説を立て、これを実験により実証していく中で、自然の動的な振る舞いを見出していく力を育てていかななくてはならない。学生にこのような形で概念の本質を把握させるためのさまざまな試みがなされている。例えば、関連する観測事実、実験結果をマルチメディアにより提示することは、新しい概念と現象の関係を具体的なイメージを描いて理解する助けとなるし、実験を行う中でいろいろな条件を変えながら観測を繰り返す体験は、学生が新たな概念について習熟し、それを用いて思考する能力を身に付ける助けとなると考えられる。

ところで、理科（物理）の概念習得には大きく分けて理解と習熟の2つの段階があると考えられる。物理学の新しい概念を知識として身に付ける段階では、関連する自然現象を十分に観察することが有効であるし、新しい概念を活かした形で思考する能力を養う段階においては、さまざまな実験を行いその概念について実際に体感し習熟していくといった学習形態が有効になる。多くの実験と観測を繰り返す行いが効果的であることは言うまでもないが、現実の学校教育の中では、時間的、経済的な制約、安全性の問題により、限られた実験と観測しか実施できないといった現状がある。このような状況下にある教育現場をサポートするため、多くの教育関係組織でIT技術の有効性が認識され、その活用が望まれている(Bork 1991)。ここで、IT技術の発展により容易に実施可能になった計算機シミュレーションに注目する。

計算機シミュレーションは単に実験をより安価に実施するための代替物ではない。そこでは地球上では実現の難しい理想的な環境、極限状態を手に入れることも可能であるし、自然定数を変更することも容易である。また、目で見たり測定装置で計測したりできないものを可視化することもできるし、単純な作業を何億回繰り返そうと平気である。安全性という意味でも問題ない。研究現場においても、多くの実験が計算機シミュレーションという形でも実施されており、その中から多くの新たな概念が見出されてきているのである。20世紀後半以降、自然科

学の先端領域では計算機と計算機シミュレーションアルゴリズムの発展に伴って、学問の新たな進展のきっかけが得られてきているし、学問の新たなパラダイムも開拓されてきた。今や計算機シミュレーションは理論、実験と並ぶ、現代物理学の大きな柱の一本となったといっても言い過ぎではない(図 1.1.1.1)。コンピュータの高速化、大容量化と低価格化は急速に進み続け、研究の先端領域で大きな成果を上げた計算機シミュレーションが数年で学校教育野現場に導入可能なコンピュータ上で実行可能になるといった状況もある。このような中、計算機シミュレーションが学校教育の中に取り入れられていくのは、ある意味、必然であろう(和田 1994)。

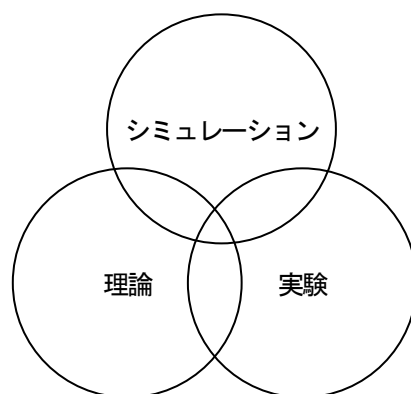


図 1.1.1.1 現代科学の3つの柱

1.2 電子教材開発

新世紀に入ってから以降、学校での教育環境における最も大きな変化の一つはインターネット接続環境の整備にある。実際、Web を効果的に利用することで従来とは異なる形の授業形態が可能になっており、さまざまな教育利用の試みが重ねられつつある。このような新しい授業形態においては、学習者が各自の進度に合わせた学習を行うことが容易であり、学習者の個性に合わせた効果的な教育が実現できると期待されている。

コンピュータネットワークの普及、ブロードバンド環境の低価格化と共に大きく進展した Web を利用したマルチメディアコンテンツの開発、配信環境も注目に値する。これにより、計算機シミュレーションを行い、その結果を可視化するための環境は非常に使い易くなってきている。1 つのコンテンツをさまざまな環境下で利用可能にするための配慮も難しくない。ただし、効果的な学習環境の構築までには多くの課題が残されている。例えば、計算機シミュレーションは比較的容易に実施できるようになってきているが、教育者が手作りで全てを作成していくにはいくつかの敷居があり、計算機シミュレーションを物理教育の中でもっと手軽に利用できるように仕組みの構築が望まれている。

このような現状にある中、効果的な電子教材、それを用いた指導例、モデルを蓄積し、必要な情報を共有していくことで、多くの教育者、学習者が効果的に電子教材に触れられる状況を目指して、多くのプロジェクトが進行している。わが国においては、教育情報ナショナルセンター (NICER) を中心に、子供から大人まで各段階別の幅広い教育情報が収集されつつあり、電子教材についても初等教育、中等教育を中心に膨大な数の教材が集められ LOM (学習オブジェクトメタデータ) を付した形で整理されている。また、指導案、実践事例、授業ビデオ等についても収集が進みつつある。

ところで、多くの学習者が共通の困難を抱える部分を除いては、特定の目的で大規模な教材開発を行ったとしても、数多くの利用者は見込めない場合が少なくない。ただし、基本的な所では普遍的に共通して利用できるパーツが存在することも確かであり、基本的なパーツを用意しそこから最適な電子教材を組み立てるといったイーजीオーダー型の仕組みを構築できれば、教材開発の敷居が下がり教材開発が進展することで大きな教育効果に結びつくと考えられる。このため、学校教育においては、その科目の理解に比較的共通したハードルを持つ特定の項目をターゲットとして、能力に合わせていろいろな方向からハードルを越えるための試みが可能な教材を充実させていくといった大規模な教材開発と、教材開発の基礎となるパーツとそれら

を効果的に利用するための情報共有、開発支援体制整備といった異なるアプローチを考慮した上で、教材開発について考えていくことが重要である。また、実践的な教材開発には教師の持つ教育現場での経験、研究者の持つ専門的知識と教材開発者の電子教材開発技術を融合し、多くの学習者が持つ知識・技能・目的に合わせて開発を進めていくことも不可欠である。

1.3 本研究の目的

自然科学の最先端領域では実験により到達することの困難なシステム、自然状況について計算機シミュレーションとデータの可視化を駆使することにより論理的な帰結を得、新しい自然現象の発見に繋げていくという形態での研究が進められている。そこで利用されている計算機シミュレーションの多くは、系を単純化することで高校生レベルの数学の知識があれば十分理解可能な範囲の問題に帰着することが可能であるし、可視化されたデータは簡単な解説を加えることで読み取り理解することができる。

計算物理学の分野では、例えば、実験では到達できない高エネルギー領域の物理現象を計算機シミュレーションにより解析することで、超高温、高密度にある宇宙初期から現在の我々の住む世界がどのように実現してきたのかが解明されつつある。複雑系など新たな学問分野も生まれてきている。このような研究の現場で取り扱われているモデルはかなり込み入ったものであるが、その本質は単純化した系で十分理解できることが多い。また、計算に用いられるアルゴリズムを簡単に体験可能な身近な現象に適応することでおもしろい結果が得られる例も少なくない。

このような計算機シミュレーションに触れることで、体験することの困難な自然について視覚的、感覚的に理解することが可能となる。また、計算物理の最先端の知識に基づいて一般向け、高校生向け理数系教育を実施することで、自然科学に対して新たな側面から興味を抱かせることができると期待される。本研究は、最先端の研究でも利用されている数値シミュレーションを通じて自然科学を学習していくために必要な指導案を企画、教育に必要な電子教材の作成支援コラボレーションサイトを構築することを目的とし、具体的な教材作成と授業実施により自然科学に対する興味を喚起し、関連分野の学習促進を目指していく。

本研究の特色は、

- ・ 可視化、操作性の導入により、物理的な概念の本質に無理なく触れる。これにより理数系科目への興味を引き出す。
- ・ コンピュータの出す結果を鵜呑みにするのではなく、理数系教育の特色を活かして批判し解釈する能力を身につける。
- ・ 単純なモデルで内容を理解した後は、シミュレーションによりできるだけ現実に近い形で結果が観察できるよう工夫する。
- ・ 教材作成を支援するためのシステムとコラボレーションサイトを構築し、教育の継続性に留意する。

という点にある。

2. 研究実施計画

本研究が目的とする(1)計算機シミュレーションを利用した理数系教育指導例、モデルとこれにそった教育を実践すること、(2)このために必要な電子教材を作成すると共にこれを支援し情報を蓄積して行くためのコラボレーションサイトを構築することの2点について着実な研究を実施し、確実に成果を上げていくため、以下の様な計画と体制で研究を進めていくこととした。

2.1 計算機シミュレーションを利用した教育

20世紀の後半以降の自然科学の中に取り入れられてきた計算機シミュレーションは、自然科学進展の両輪であった理論と実験を単に補完しただけではなく、新たな学問のパラダイムを切り開いてきた。学問体系の大きな変動を受け、学校教育の内容も変化すべきではないか。本研究ではこのような点に注目し、シミュレーションを利用したコース例を作成していく。何を教育するかについてはいろいろな可能性が考えられるが、できる限り、計算機シミュレーションがその概念発見に本質的であったこと、身近な現象との関わりが深いことから話題を選択することとし、

(1) 複雑系の概念と結びついた話題

(2) 宇宙初期における物質生成に関する話題

この2つの話題を中心に研究を進める。このような新しい話題の教育は大学、大学院レベルでは多くの例があるが、そこで展開される議論の多くは高校レベルで理解可能であり、扱われている概念の多くは、分野を超えて応用されており、いろいろな場面で役に立つ可能性がある。

本研究では、主な学習者として一般市民と高校生の2つの対象を考える。一般市民に対しては物理学の持つおもしろさを実感することを、高校生に対しては自然科学の新しい概念に触れるだけではなく、実際に計算機シミュレーションを体験しその概念を用いて考察する視点を得ることを目標とした教育を実施する。これにより、計算機シミュレーション教育実施までのプロセスと必要な体制、及びその教育効果を探っていく。

一般市民向けには、最先端に立つ研究者による講演会で基本的な概念から出発して計算機シミュレーションを用いた研究の最先端の状況を学習していく形の教育を実施し、市民の反応とその教育効果を調べる事で、物理学の持つおもしろさを実感するために必要な基本要素についての研究を進める。このような講演会はアメリカ、ヨーロッパではしばしば実施されている。国内においても大規模な学会の際等に市民向けの講演会は実施されており、そういった講演会の経験を積んだ研究者によるよく練られた形での一般市民向け講演会を、国際会議等の実行委員会と連携して企画、実施する。

高校生向けには、基礎的な概念について簡単なモデルを用いて学習した上で計算機シミュレーションを体験する形の実験授業を実施し、学習者の感想とその教育効果を調べることで、計算機シミュレーションを用いた概念習得のための基本要素について研究する。高校生向け実験授業の指導案については大学で実施されている教育内容について吟味し、本質的な概念を高校生レベルの数学、物理の知識で理解可能な形で提供できるよう、地元の高校、もしくは高等専門学校の教育者と十分に連携する形で授業案を確認し、必要な教材開発を行っていく。

2.2 計算機シミュレーションを用いた電子教材

計算機シミュレーションを教育に導入する理由の一つは、新たな概念の把握と習熟のための体感型の環境を教室内に実現可能な形、予算で実現することにある。これにより、基礎概念を具体的なイメージを描きながら把握し、仮想的な体感によって新たな概念を習熟させるといった教育効果を期待している。

このような効果を狙った教育実践のため、概念把握プロセスにおいてシミュレーションの果たす役割を概観しておく。特に、自然科学の諸分野では、仮説を定式化しモデルを組み立て、実験と観察を通して仮説を検証する中で自然の姿を探っていくというプロセスを通して、新しい概念が定着していく。シミュレーションにより数値化されたモデルの振る舞いを計算し結果を可視化することは、モデルの基になった仮説について具体的な画像、映像を確認しながら検

証し、その仮説の下で何が起こるのかを考察するための補助ツールとして機能する。また、モデルを記述するパラメータ、初期状態等を変更し、仮説を異なる方向から見直していくことで、仮説の意味についてより深い理解を得、習熟するための訓練ツールとしても機能する。このようなプロセスを繰り返す中で、より新たな概念を創造する力が身についていくと期待できる。

概念定着プロセスを考えると、シミュレーションを教育で利用するメリットは、

- ・モデルの振る舞いを理解するための可視化
- ・概念を体感するためのパラメータ変更等の操作

にあると考えられる。

同様の教育効果は実験により実現することも可能である。実験では、より自然な形で新しい概念について学習する事ができるという利点もあるが、先にも述べたように学校教育の中で実施可能な実験は限られたものでしかない。シミュレーションを有効に活用することで、実験では実現の難しい体験ができ、理論的な説明だけでは把握の難しい概念の習得を促すことが可能になる。また、シミュレーションの視点を変えたりインタフェースを工夫することで、学習意欲を高めたり、個々の予備知識、スタイルに合わせた学習が可能になる等の利点がある。

シミュレーションを教育で利用するには、あらかじめ実践的なプログラミング教育を行うか、用途に合わせた教材を用意する必要がある。一部の理工系教育を除いては、後者を選択する事になる。このとき、教育目標にマッチした教材が市販されていれば良いが、コスト的に見合わない、授業に合わせた細かい改変ができない等により、実際の現場で利用できる教材は限られた分野でしか見つからないのが現状である。シミュレーションを活用しようとする場合、必要に応じて教材を開発するところから出発することになる。

前述の効果を考えると、シミュレーション教材は単に数値計算を実施するだけではなく、結果が可視化され、パラメータを操作するインタフェースを備えたものでなくてはならない(図 1.1.1.2)。このような教材の開発には、効率的な数値計算を行うための数値解析とプログラミングの能力、分かりやすい可視化のためのプレゼンテーション技能、教育的なインタフェースデザインの知識等、多くのスキルが必要になる。このため、教官が単独で教材開発を行おうとすると多くの時間を費やすことになる。

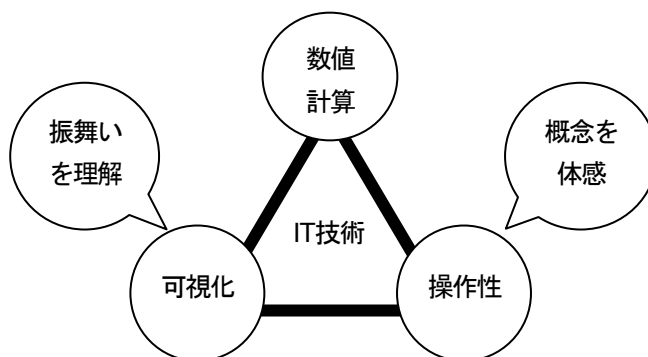


図 1.1.1.2 シミュレーションの役割

一方、教材開発のためのアプリケーションは、操作が簡単で洗練されたものが揃いつつあり、低価格な製品であっても、教材開発のために十分な機能を利用できるようになってきた。多くの製品は、SCORM等の国際規格にも対応しており、教材開発環境は成熟しつつあると考えてよい。ある程度の予備知識を持っていれば簡単に教材開発を始めることが可能であり、教材開発者の育成も比較的容易になってきている。ここでは研究成果が多くの教育機関で利用可能になるように著作権等に十分配慮した形でオリジナルの教材を開発することとした。このために、簡単なプログラミングと学部レベルの物理に関する知識のある大学院生に教材開発のための90分程度の教育を実施した上で教材開発者として開発の一部を委託することで効率的に教材開発を進める。教材開発は、簡単に実現可能なシンプルな教材から出発し、効果的な演出、情

報デザイン等を検討しつつ、より実践的な教材開発へと展開していく。さらに、実験授業の中で得られた意見等を参考に教材を評価、改善していくことにより、学校教育の中で十分使用可能で効果的な教材を開発する。

作成した教材と教材開発に用いたプログラムは原則として Web サイト上で公開することとし、これに実験授業で用いた資料、アンケート、教材開発に役立つ各種情報を加えていく形でコラボレーションサイトを構築し、実際に教材開発現場と教育現場で十分に情報を共有すると共に最先端の内容を維持していくことで、教材開発に有効なサイトについて明らかにする。サイトの構築は、できる限り管理者に負担の無い形で行うため、最新のツール利用を検討する。

3. 研究成果

3.1 新世紀型の捉え方

物理教育の現場では、多くの学習者が、いろいろな公式の組み合わせと数式の複雑な展開の中で、現象を物理的に捉えるという事がどういふことなのか見失い、物理的な概念を把握できないままになっている。学習期間を終えて、物理はおもしろくなかったといった感想を漏らす学習者も少なく無いが、こういった学習者も物理的な概念の本質が容易に理解できるものであったら異なる結果に導けるはずである。物理がおもしろくないのではなく、物理のおもしろさを実感するのが難しいのだとしたら、研究の現場でいろいろと工夫されてきた解析結果から物理的な結果を引き出すための技術を応用することで、研究の現場から物理教育を改善するための提案ができるのではないか。このような動機から、IT 技術の進展に伴う学問分野、コラボレーションツール、社会環境の変化に注目し、新世紀型の教育について考えていく。

研究現場で普及しつつある技術は、考えているモデルのパラメータを操作しながら、その振る舞いを可視化するための作業量を大幅に軽減し、一般社会で普及しつつある技術は、教材開発アプリケーションとコミュニケーションツール利用時の負担を大幅に軽減しつつある。気軽に利用できるようになった IT 技術の活用が、教育界に変化をもたらす要因の一つになると考えられる。そのような中、計算機シミュレーションを用いることで自然現象を把握する新しい視点を学校教育に導入し、研究者、教育者、学習者間で気軽にコミュニケーションできる基盤環境について研究することで、新しい教育の形を創造できると考え本研究をスタートした。

高校教育の現場では情報が必修となり、各教室にネットワーク、コンピュータと液晶プロジェクターの導入計画も進んでおり、研究現場と教育現場が連携することにより新たな教育成果を創世する最適な時期にある。このような中、最先端の計算機シミュレーションの現場と教育の現場を結びつけるこ

とで、新しいタイプの教育が創造され、理数系教育に対して長期的な成果も期待できる。本研究では、図 1.1.1.3 の様な形での研究現場と教育現場のコラボレーション環境に Wiki サイトを置き、そこでの情報共有の下、研究と教育を実践した。

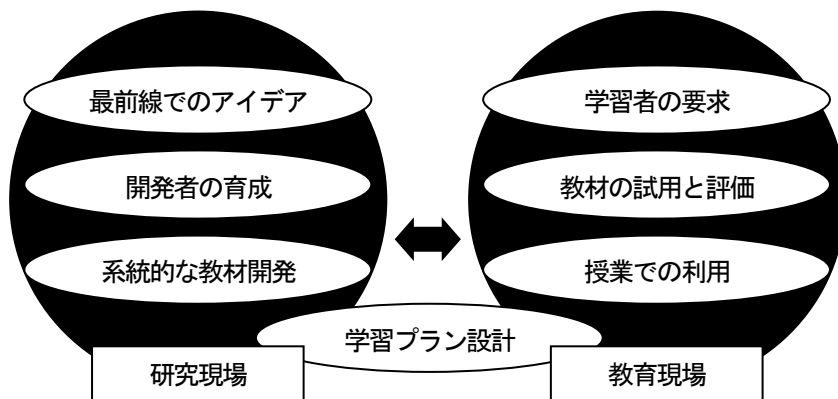


図 1.1.1.3 研究現場と教育現場の連携

3.2 市民講演会

最先端の研究成果を定性的に理解することは、計算機シミュレーションを用いた物理現象の解析への興味を喚起すると考えられる。このため、奈良で開催中の国際会議実施委員会と連携し、一般向けの分かりやすい講演で知られた B. ピーターソン教授による市民講演会を平成 15 年 7 月に実施した。講演題目は「クォークの閉じ込め」であった。現存する最高速コンピュータを駆使した宇宙初期における物質の生成の研究と関係した話題である。物理学を学んでいる学生、専門家以外からも広く聴衆を募るため、インターネット上で呼びかけるだけではなく、地元の駅等にポスターを貼り、教育関係期間に呼びかける等の工夫をした。また、地元の関係者には中学生、高校生の子供を持つ知人に直接声を掛けてもらう等努力した。その結果、聴衆は中学生から社会人まで 60 名以上が集まり、その中の学生 24 名、社会人 31 名がアンケート調査に回答を寄せてくれた（表 1.1.1.1）。回答者の平均年齢は 33.4 歳であった。

表 1.1.1.1 アンケート結果の概略 1

本日の講演は分かり易かったかですか？			
	分かり易かった	ふつう	難しかった
学生	18 名	4 名	2 名
社会人	23 名	7 名	1 名
講演はおもしろかったですか？			
	おもしろかった	ふつう	おもしろくなかった
学生	15 名	9 名	0 名
社会人	25 名	6 名	0 名
講演内容は役に立ちそうですか？			
	役に立ちそう	わからない	役に立ちそうにない
学生	10 名	14 名	0 名
社会人	14 名	13 名	3 名

他にも自由に意見を記入する欄には、「専門外の素人にとっても、分かり易かった」、「物理がこんなに理解できるとは思わなかった」、「初めて物理が面白いと感じた」等の意見があり、多くの聴衆が意外に分かりやすいという印象と非常におもしろいという感想を持ったことが分かる。今回は純粋に理論的な話題であったため、「実験などを行い、聴衆も参加できるようにして欲しい」とか「実際に役に立つのだろうか」といった意見も寄せられたが、「またこのような講演を開催して欲しい」といった声も多く、先端科学の現状に対する社会の要求が決して低くないことが明らかになった。次回は、平成 17 年 1 月 14 日に自然の持つ対称性を話題に小学生を聴衆とした講演会を開催することになっている。

3.3 複雑系の教育と実験授業

現行の物理教育カリキュラムには、自然に対する計算機を用いたアプローチについての基礎は含まれていない。本研究では、新しいパラダイムとして複雑系をとりあげ、1 コマ分の授業カリキュラムと電子教材を作成した。教育目標として、(1) カオス、複雑系に注目し、コンピュータを用いたアプローチとそこから得られる自然に対する新たな認識に触れる。(2) シンプルなモデルから複雑な現象が説明されうることを体感する。(3) 複雑な現象の中にも何らかの規

則性があり，シンプルなモデルから複雑な自然の振舞いを理解しうることを知る。の3つを置き，2次方程式の意味が理解できていることを前提にストーリーを組み立てた。

これを用いた実験授業は，大島商船高等専門学校の計3クラスで行っている。学生の内訳は情報工学科の3年生43名，電子機械工学科の3年生43名と4年生36名である。授業の最後にWeb上でアンケート調査を行った。これには118名の生徒が回答を寄せてくれた(表 1.1.1.2)。

表 1.1.1.2 アンケート結果の概略2

本日の授業は分かりましたか？		
よく分かった	だいたい分かった	ほとんど分からなかった
7名	82名	29名
本日の授業はおもしろかったですか？		
おもしろかった	ふつう	おもしろくなかった
41名	61名	16名
本日利用した教材の意図は分かりましたか？		
よく分かった	だいたい分かった	ほとんど分からなかった
8名	65名	45名
本日利用した教材はおもしろかったですか？		
おもしろかった	ふつう	おもしろくなかった
63名	45名	10名

今回の授業は大学院で実施している複雑系の授業数回分から基本要素を抜き出し45分授業で実施したが，教育目標として上げた(1)，(2)から(3)に進むまでを学習し，さらにシミュレーションを用いて体感するには時間が短く，多くの生徒が(1)，もしくは(2)までに留まってしまい，「ほとんど分からなかった」と回答している生徒も少なく無い。今回利用した教材に単一のゴールは定められていない。学習者にはこのような問題の経験が浅く，ある意味ストレスとなったようであるが，このような問題の経験は自然科学へのアプローチを知る上で重要と考えている。教育効果を考え教材は娯楽性をおさえてデザインしたが，シミュレーション教材自体については多くの生徒が興味を示し，アンケートの自由記入欄でも教材の使いにくかった点や追加して欲しい機能を含めいろいろな意見が寄せられ，その後の教材の改善に役立っている。今回の実験授業は各生徒がシミュレーションを操作する形で進めたが，アンケート調査では，多くの生徒が通常の板書で式を展開しながら進められる物理は分かりにくく，現実との関係も把握できないと感じていることも明らかになっている。なお，平成17年2月初めに大島商船高等専門学校，及び呉工業高等専門学校で実験授業を開催する計画で準備を進めている。

3.4 Wiki を用いた教材開発支援

コラボレーションの基盤としてはWeb利用が一般的である。特に，共有する情報の拡充，コミュニケーションの活性化と参加者増大を図るためにも，より簡易な形でアクセスできる環境が望ましい。これを実現するWebツールとしてWikiの利用が考えられる。Wikiでは，誰もが掲載された情報をブラウザで閲覧できるだけでなく，簡単な操作で情報を掲載，修正することができる。例えば，パソコン上で開発中の教材プログラムを掲載するだけであれば，ブラウザを使ってサイトにアクセスし，マウスによる操作を行うだけである。また，基本的なコミュニ

ケーションツールがあらかじめ用意されており，新たなサイト構築も容易である。

我々は，FreeStyle Wiki サイトを立ち上げ電子教材の開発基盤として利用し，計算機シミュレーションを用いた物理教材等の開発を進めた。(稲垣ほか 2004) Wiki ツールは，電子教材開発関係者間のコミュニケーションを活性化するだけでなく，開発における試行錯誤の履歴，各種記録の利便性を高め，情報の蓄積が進むことが明らかになった。これまでの多くのプログラム開発では完成したコンテンツ，及びプログラムは公開できても，開発途上にあるプログラムが完成するまでの過程は蓄積すること自体にかかる手間を考えると，分かりやすい形で公開することは難しかった。このような情報の蓄積と公開を容易にするといった点で構築した Wiki サイトは大きな成果を上げている。

このように，教材開発に有用な Wiki サイトであるが，これだけで教材開発を進めることはできない。開発した教材を評価するためにも，教材の配信は必須であるが，配信する教材の品質保証，セキュリティ対策を行うには，教材開発を統括するマネージャーにより掲載情報が十分に管理されたサイトが必要となることが明らかである。(図 1.1.1.4) このためには，教材開発のためのサイトと教材配信のためのサイトを異なるポリシーで用意する必要がある。また，サイト間での情報の連携をどのように進めていくかも考えておかなくてはならない。今回構築したサイト (<http://www.riise.hiroshima-u.ac.jp/ePhysics/>) では，開発サイトと配信サイトを図 1.1.1.4 の形に分け，教材開発を行っている(稲垣ほか 2004d)。今回開発した教材数は 70 程度であり，これだけであれば，サイト間での情報の連携，教材の品質管理等は研究代表者が手作業で実施することで十分であった。

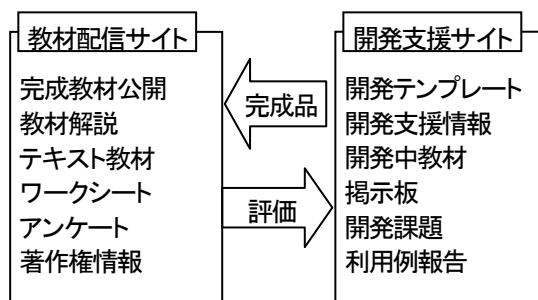


図 1.1.1.4 教材開発サイクル

3.5 開発した教材例

本研究では，高校生向け物理教材例を 6 つのカテゴリーに分け開発した。教材はできる限り一般的な環境で利用できるよう，インターネットを通じて配信しブラウザで表示できるとし，さまざまな OS で使用可能でファイルサイズも小さい Flash (Macromedia 社) で作成した。基本的なシミュレーションは Flash 上の ActionScript で記述できる(稲垣ほか 2004b,)。以下では，物理学を専門とする大学院生の協力の下で作成した物理教材の一部について報告する。なお，全ての教材は Web サイト (<http://www.riise.hiroshima-u.ac.jp/ePhysics/>) 上で公開している。

(1) 非弾性衝突

慣性系では，エネルギー(運動エネルギー+位置エネルギー)が保存する。ところで，身近な現象においては，このエネルギーと運動量が必ずしも保存していないように見える例が少なくない。例えば，ボールが壁に衝突すると，ボールの持つエネルギーの一部が熱エネルギー等にその姿を変え，ボールの持つエネルギーが減少する。

図 1.1.1.5 は地面とぶつかりながら進むボールの振る舞いを可視化している。学習者はボールの位置，速度等の初期条件，重力加速度，地面とボールとのはね返り係数を操作しながらボールの振る舞いの変化を観測することができる。速度ベクトルを表示することもできる。コマ送りや巻き戻しを行ってボールの従う運動方程式と実際の運動を比較することも可能である。

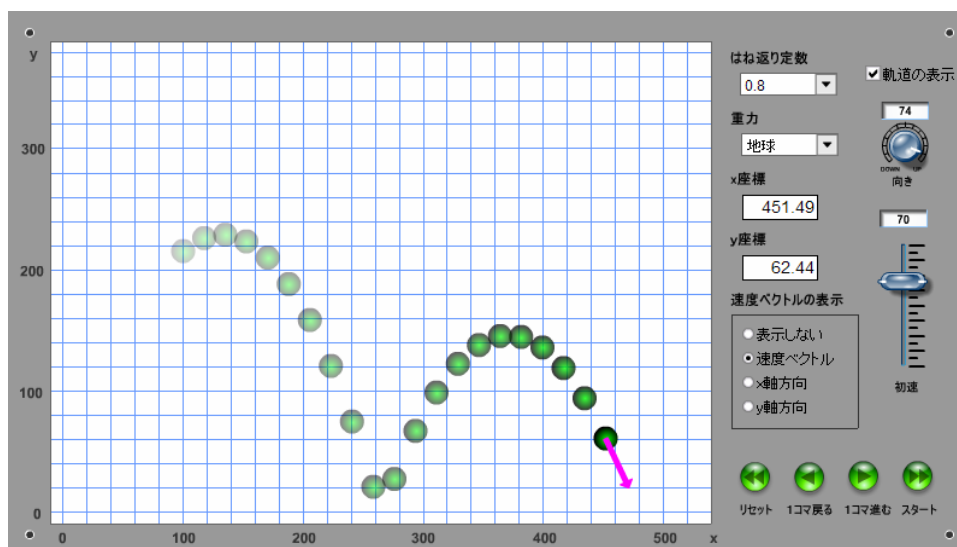


図 1.1.1.5 非弾性衝突

(2) 荷電粒子と電磁場

荷電粒子があると、その周りには電場ができる。また、荷電粒子が運動するとその周りの電場が変化し、磁場が生成される。図 1.1.1.6 では、荷電粒子の周りの電磁場を可視化している。

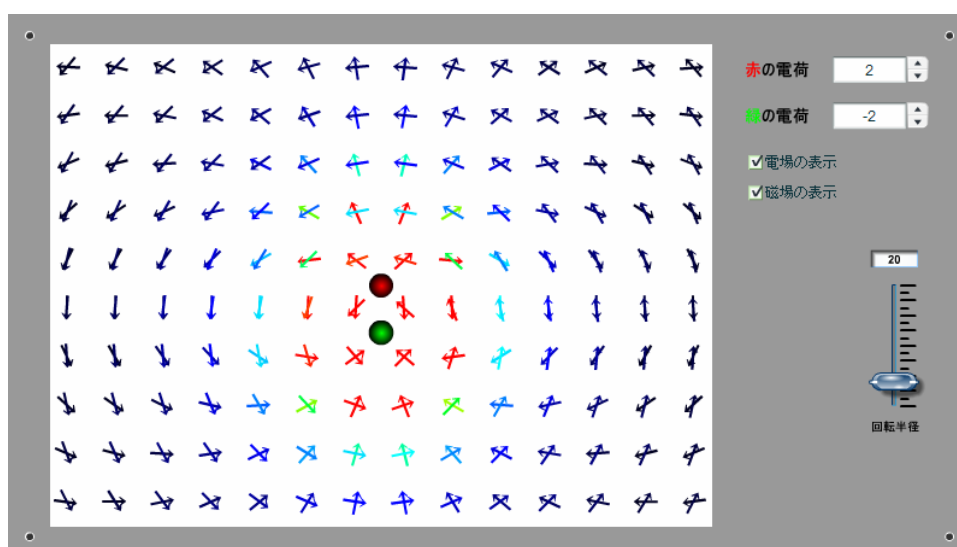


図 1.1.1.6 荷電粒子と電磁場

荷電粒子が急激に加速すると電磁波が放射されるが、本教材では、荷電粒子の運動が光速に近づき相対論的な効果が無視できなくなるような状況まではカバーしていないため、電磁波が放射されることは無い。この点を明確にした教材を作成すべきであり、現在、検討中である。

(3) 熱

温度、圧力は、系の中の分子、原子の持つエネルギー、衝突での運動量の交換と結びついた物理量である。熱平衡状態では、気体分子は温度に応じたエネルギーで分布する。逆に言うと、気体の温度は気体分子の持つエネルギーで決まる。

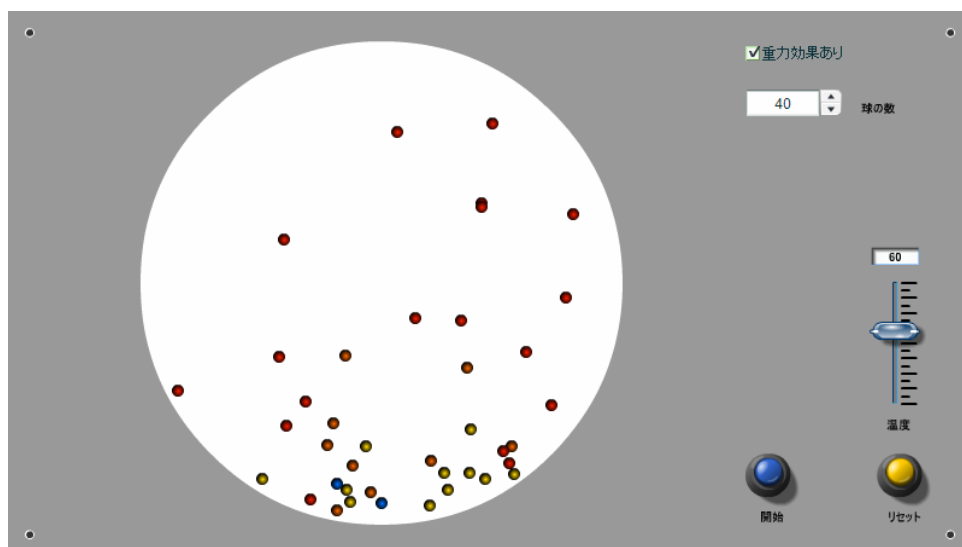


図 1.1.1.7 熱

図 1.1.1.7 では、周囲の壁が巨大な熱浴になっているとし、熱浴の温度変化に応じて系を構成する粒子の運動が変化する様子を可視化している。学習者は温度と粒子数、重力の効果を通して振る舞いの変化を観察する。この教材では、各粒子の持っているエネルギーに応じて色を変えることでエネルギー分布が分かる様にしている。パソコンですぐにできるシミュレーションの限界として、粒子同士は相互作用しないと仮定している。

(4) 3 体問題

高校の物理学の教科書では 2 体問題は扱うが、3 体問題に触れることはない。これは、3 体問題が、特別な対称性を持つ場合を除き解析的な取り扱いができないためである。このような本質的に解析的な取り扱いができない問題について、計算機シミュレーションを用いて近似的に解くことができる。

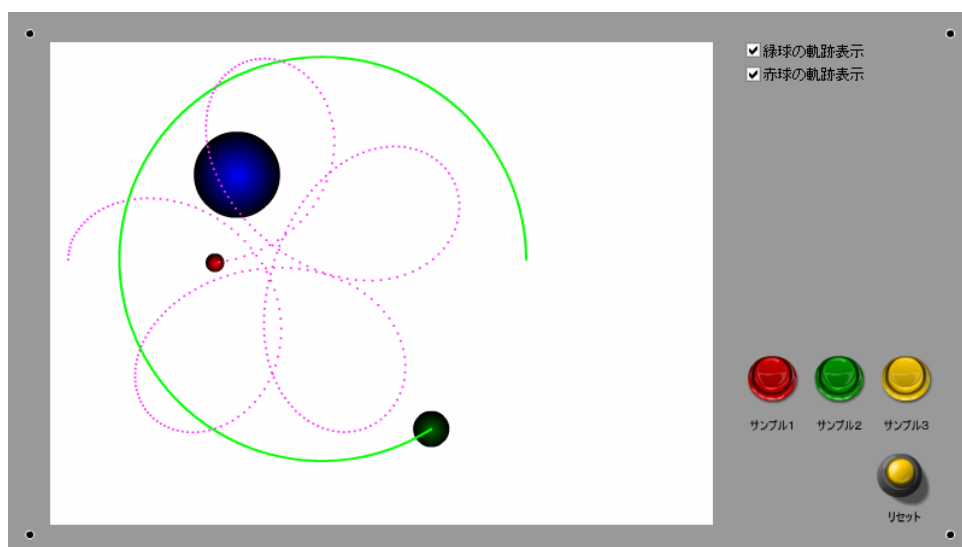


図 1.1.1.8 3体問題

図 1.1.1.8 では質量の異なる 3 つの粒子の運動を可視化している。学習者は最も軽い赤い粒子の初期条件を自由に設定することができる。また、特徴的な初期条件についてのサンプルを用意することで、興味深い現象を見逃す事の無いように配慮している。サイト上にある 2 体問題を可視化した教材と比較することで、3 体問題は 2 体問題と大きく異なり予測不可能な程複雑な軌道を粒子が描く場合がある、つまり軌道のカオス性が観察できる様にしている。パソコンですぐにできるシミュレーションの限界として、ここでも、粒子同士は相互作用しないと仮定している。

(5) ライフゲーム

3 体問題の教材でも見たように、単純なルールでも、場合によって系は非常に複雑な振る舞いをする。多くの系では、複雑な振る舞いの中に単純なルールが隠されており、最終的な振る舞いはルールに応じた規則性を持っている。

図 1.1.1.9 はスクリーンセーバ等によく見かけるライフゲームである。そのルールは、自分が生きている場合、自分を囲む 8 個のセルのうち 2 個もしくは、3 個が生きている場合のみ生き残り、自分が死んでいる場合は、自分を囲む 8 個のセルのうち、3 個が生きている場合のみ新たに誕生する。学習者は、単純なルールの中で生きているセルの初期配置を自由に設定し、僅かな初期配置の差が結果を大きく変えてしまうことを観察できる。本教材は実験授業の中でも利用し、授業後のアンケート結果を参考に、設定したパターンを一時的に記録する等、操作性の改善を行った。

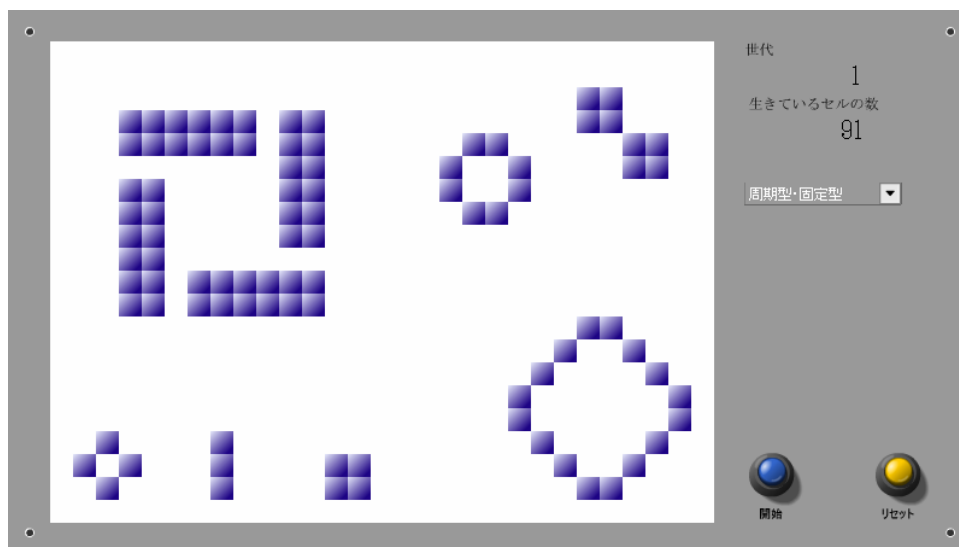


図 1.1.1.9 ライフゲーム

(6) 動く万華鏡

ActionScript では、パソコンに接続した Web カメラから映像を取得することができる。この機能を活用して作成した教材例が図 1.1.1.10 である。ここでは、Web カメラの画面を正三角形の形に切り抜き、これを 9 枚、左右反転しつつ張り合わせている。各画面はクリックすると左右反転するようになっている。

本教材は回転、反転といった変換の下での対称性の概念について学ぶために作成したが、Web カメラを教材の映っている画面自体に向けることで、合わせ鏡のように同じ形が徐々に縮小さ

れながら繰り返されフラクタルの導入にも利用可能である（図 1.1.1.10）。

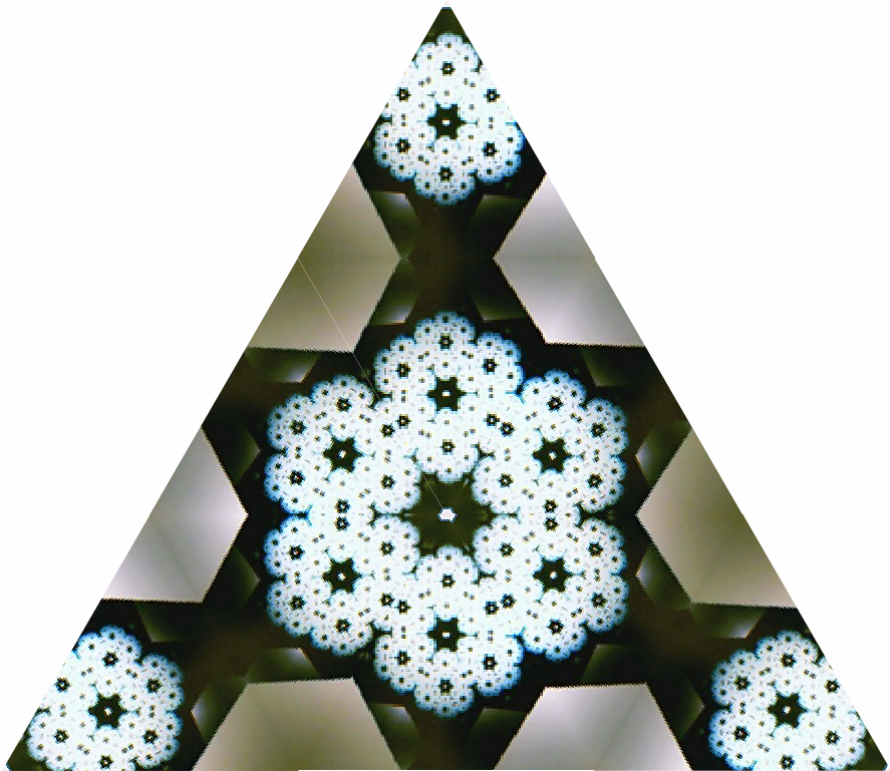


図 1.1.1.10 動く万華鏡

ここで紹介した教材中，前半(1)～(3)は現在高校で行われている物理教育における概念習得を促すことを目的として系統的に開発した教材であり，後半(4)～(6)は学問の最先端の状況を意識した新しい教育の試みのために開発した教材である。このような開発が教材開発に当たった大学院生に与える教育効果についてのアンケート調査を実施しているので，その結果の概略を表 1.1.1.3 に示しておく。

表 1.1.1.3 アンケート結果の概略 3

これまでに習得していなかった物理学の知識、技能が必要になりましたか？			
高校レベルの知識	大学レベル	大学院レベル	専門家レベル
0 名	3 名	0 名	0 名
計算機シミュレーションの知識、技術が必要になりましたか？			
高校レベルの知識	大学レベル	大学院レベル	専門家レベル
0 名	3 名	0 名	0 名
その他の知識、技術が必要になりましたか？			
理科教育	数学教育	芸術、デザイン	その他
2 名	0 名	0 名	1 名
研究と両立させるとして仕事の量は適当でしたか？			
多い	適当	自分で調節した	少ない
0 名	1 名	2 名	0 名

回答者が3名と少なく統計的な意味は無いが、回答を寄せてくれた全ての学生が、物理学、計算機シミュレーションについて、大学時代に身に付けるべき知識で習得していなかった知識を勉強し直しており、専門分野の基礎をより深く理解するのに役立ったようである。各自の研究に支障が無かったかも知れるが、そこは、各自で適当に調整できるよう配慮してある。

なお、ActionScriptによる教材開発に興味を持たれた方には、簡単なコンテンツ作りを試みてもらえるだけの情報を教材開発支援サイトで公開している。教材の細かい仕様等についても自由に改変可能な様にソースプログラムも公開し、教材に関する意見等を書き込むための掲示板も用意している（稲垣ほか 2004c）。

4. まとめと今後の課題

最後に、今回の研究で明らかになったことについてまとめ、新世紀型理数系教育のために、今後考えていかななくてはならない課題について述べておく。

4.1 研究現場からの新しい教育

手軽に利用できるツールの開発と各種機器の普及は情報の発信を容易にし、研究現場と教育現場間の距離を縮めている。インターネットを利用して研究者が教育現場に最新の情報を提供することも難しくなく、実際に多くの研究者は研究成果を分かりやすい形で公開している。このような状況下で、研究者から提供される情報を教育現場で活かしていくためにも、研究者と教育者の間を繋ぎ教育をデザインしていく必要がある。本研究では、学問の新たなパラダイムを意識し、国際会議の主催者と一般市民、研究者と学校現場を一時的に結びつけ効果的な教育のデザインを行うことで、理数系教育への興味を喚起し、最先端分野の進展と結びつけた教育の実践ができた。ここでの試みは一時的なものであるが、最先端の研究者に導かれて研究の現場に触れる体験がもたらす教育効果は小さく無い。

今回の実践の中では、研究者が教育のデザインと関係組織間での連携をマネジメントしたが、そこで必要となる活動の一部は地方自治体等のサポートを受けることができた。多くの地方においても講演会、実験授業の開催に必要な基本的な体制は整っており、そのような体制と研究機関での連携した取り組みは難しくない。大学等の研究者が研究成果の単なる公表ではなく、日々の成果に根ざした教育のデザインとマネジメントを心掛けることで、多くの地方で同様の試みは可能である。本研究での実践例をきっかけにして、同様の教育をより広い地方で、定期的実践し、各種情報を蓄積していくことで、新しい教育の形を創造できると考えられる。このためにも、今後もこのような連携と情報共有を継続していくことが重要である。

4.2 教育効果の評価

数ヶ月間、継続的に実施される教育であれば教育効果の評価にさまざまな視点の導入が可能であるが、1回だけの実験的な試みの場合、定量的な評価は困難なのが現状である。本研究では市民講演会、実験授業の効果をアンケート調査により評価した。市民講演会の場合はアンケート用紙を配布し質問項目を絞り込み事で多くの聴衆が回答を寄せてくれた。実験授業では端末室でWebサイト上のシミュレーションを実施したため、該当ページからアンケート用のWebサイトにリンクを張ることでアンケート調査を実施した。ほぼ全ての生徒が回答し、約4割の生徒は自由記述欄に意見を記入してくれた。教材開発者を対象としたアンケートも実施した。

今後、計算機シミュレーションを利用した教育を多くの学校現場で展開し、現在の理数系教育を変えていくには、ここでの評価は十分とは言えずより客観的で定量的な評価システムを構

築する必要があると実感している。教育内容とその効果だけではなく教育実施プロセスまでを含めた形で評価を行い、実際に学校現場に導入する場合に必要なコスト等を定量的に示していく必要もある。また、異なるプロジェクト間で国際的に教育を評価し改善していく大きな体制も築いていかなくてはならないし、研究者と教育現場間のコラボレーションについても評価法を開発する必要がある。

4.3 効果的なシミュレーション教材を目指して

教育改革が進展し扱いやすい教材開発環境が整ってきたことで、現在いろいろな形で教材開発が進められており、今後、飛躍的に電子教材が充実していくことと思う。今回の開発においても、90分程度の講習会から出発して約1年間の開発期間で70以上の教材を開発することができた。アンケート結果からも、このような開発が大学院生の教育にも効果を上げると期待できる。教材開発の一部を大学院教育に取り入れることで飛躍的に教材数を増やしていくことも可能であり、その様な体制で多くの教材が開発されている例もあるが、授業での使用に耐えるだけの品質を保証するためにも、そこには学習者、教育現場との連携をどのように取っていくのかといった課題がある。

大規模なシミュレーションにおいては数値計算速度が問題になることも多いし、3次元の複雑な形状をどのような形で可視化すれば分かりやすいか、数式を多用する分野では式の展開をどのように表示するかといった基本的な課題も残されている。仮想的な体験で終わらないために現実の自然現象との対比をどのように実施するのかについても検討が必要である。これらについては、急速に進化するIT技術の動向を睨みながら、解決策を模索し、より教育効果の高い教材を作成したいと考えている。また、教材例の中でWebカメラを利用した例を紹介したが、周辺機器を効果的に利用し新しいタイプの教材を開発していくことで、教育方法の革新に繋げて行くことが可能になるかもしれない。このような可能性についても、教材開発サイトを運営し、開発を継続する中で探っていきたい。

4.4 コラボレーションからコミュニティーへ

本論では、電子教材開発コラボレーションの基盤環境としてWikiを利用したサイトを構築しその役割と可能性について調べた。容易にサイト構築が可能で、情報の掲載、修正方法を簡単にするツールは他にもあるが、Wikiは、普及状況、無料利用可能な事からも、教育現場に最も導入し易いツールの一つである。そこには、特別これといった目新しい機能があるわけでは無いが、気軽に利用できるという点から普及してきた。本研究の中でも、気軽に情報を掲載できることから、開発途上のプログラムの修正過程から議論の様子まで従来までとは異なり動的な情報の蓄積を促すといった効果が得られている。

このような、Wikiを用いた教材開発コラボレーションは、新たなプロジェクトの立ち上げ時には、手軽にサイト構築が可能であるが、情報の蓄積が進むと、サイトの再構成が必要になる。まず、蓄積した情報の検索方法を準備しなくてはならない。このため、開発の進展状況に応じて、データベースと連携した開発支援サイトを用意する必要がある。また、コラボレーション全体の輪を広げ、コラボレーションを核とした新たなコミュニティーが形成されることで、継続的な教材開発の道が開けると考えている。そこでは、マネージャー機能の分担が重要になり、より組織化された体制の下、教材配信サイトへの教材掲載に対する審査制度を敷く等、さらなるプロセスが必要になる。本研究で利用した基盤環境がこのような発展のための支援体制を確立するためのきっかけとしての役割が果たせればと考えている

参考・引用文献

- Bork, A. (1991) 21世紀に向けた学校教育とコンピュータ. (塚本榮一訳), 丸善株式会社
- 稲垣知宏, 太田朱美, 佐々井祐二, 隅谷孝洋, 長登康, 中村純, 平方正樹, 福永優 (2004) シミュレーションを用いた物理教育. 計算工学会講演会論文集, **9** : 721-724
- 稲垣知宏, 太田朱美, 隅谷孝洋, 長登康, 中村純, 平方正樹, 福永優 (2004b) ActionScript を用いたシミュレーション教材開発. 第2回日本WebCTユーザカンファレンス予稿集, 31-35
- 稲垣知宏, 太田朱美, 隅谷孝洋, 長登康, 中村純, 平方正樹, 福永優, 藤原隆浩, (2004c) ActionScript で電子教材を作ろう. 第二回WebCT研究会予稿集 : 69-73
- 稲垣知宏, 太田朱美, 佐々井祐二, 隅谷孝洋, 長登康, 中村純, 平方正樹, 福永優, 藤原隆浩, (2004d) Wiki による電子教材開発コラボレーション. 日本教育工学会第20回全国大会講演論文集 : 775-776
- 和田正信 (1994) コンピュータ物理の功罪. 共立出版

Web サイト

ePhysicsプロジェクト <http://www.riise.hiroshima-u.ac.jp/ePhysics/>
 教材開発支援サイト <https://www.riise.hiroshima-u.ac.jp/wiki/ePhysics/>

課 題 番 号	1 5 0 2 0 2 4 4		
研 究 課 題	計算機シミュレーションを用いた理数系教育電子教材の研究		
研究代表者	稲垣 知宏 広島大学・情報メディア教育研究センター・講師		
研究分担者	中村 純 広島大学・情報メディア教育研究センター・教授		
	隅谷 孝洋 広島大学・情報メディア教育研究センター・助教授		
	長登 康 広島大学・情報メディア教育研究センター・助手		
	佐々井 祐二 大島商船高等専門学校・助教授		
	深澤 謙次 呉工業高等専門学校・助教授 (平成 16 年度のみ)		
補 助 金 額 (千円)	平成 14 年度	平成 15 年度	平成 16 年度
	—	3,600	4,100
H14 研究課題	—		
連 絡 先	E-mail : inagaki@hiroshima-u.ac.jp		