

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00961

研究課題名(和文) シミュレーションによって支援された発見と検証の討論型物理実験教材の開発

研究課題名(英文) Development of Discussion-Based Learning of Physics Experiment with Discoveries and Verification Supported by Simulations

研究代表者

加藤 徹也 (Kato, Tetsuya)

千葉大学・教育学部・教授

研究者番号：00224519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：身の回りの現象における電場や磁場は目に見えず、また、具体的な物体形状に強く依存している。高校・大学で学ぶ物理では数式で表現される数量関係に重点が置かれるため、具体的な形状での議論を進めるのは難しい。本研究では、実験で扱う形状およびそれを理解するうえで手掛かりを与える形状でのコンピュータ・シミュレーションを行い、その資料を用いた討論活動を通して、学習初心者でも理解すべきことを発見し、あるいはすでに理解したことを検証するようにした。また、電磁誘導が関与する力学現象を観察させるために動力不要の実験器具を製作した。そのシミュレーション資料をもとに渦電流を考察する討論活動を促すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物体形状の関わるデータの空間分布は、最近では日常の気象ニュース等で見慣れており、地理的形状と物性の対応関係は議論しやすい土壌が既にある。このようなデータ分析能力を活用・促進し、学習初心者には扱いが難しい抽象的概念である電場や磁場についての資料をもとにした言語活動が、各概念が定着していない学習者でも可能にすることができた。Society5.0でのデータ活用社会において、物理という教科の将来の学習スタイルへの示唆が得られたものといえる。

研究成果の概要(英文)：The electric and magnetic fields in the phenomena around us are invisible and strongly depend on the concrete object shape. In physics studied in high school and university, since the emphasis is placed on quantitative relationships expressed by mathematical formulas, it is difficult to proceed with discussions in concrete shapes. In this research, we conducted computer simulations on the shapes handled in physics experiment and on additional shapes that provide clues for understanding them. Through discussion activities using the materials, we tried to verify that even beginners could discover what they should understand or verify what they had already understood. In addition, in order to observe the mechanical phenomenon involving electromagnetic induction, we made experimental equipment that does not require electric power. Based on the simulation data, we were able to encourage discussion activities to consider eddy currents.

研究分野：物理教育

キーワード：物理教育 有限要素法シミュレーション 電場・磁場 物理実験 電磁誘導 渦電流

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

科学教育において実験は、その理論的枠組みあるいはモデルを現実世界の中で対象化する上で欠かせないものである。そして、理論的なモデルのあてはめにより数値を得たりその誤差を論じたりするだけでなく、個々の活動時間の中で行われる目的・目標を確認したり、他者に自ら得た結果を報告しその意義を論じるレポートを作成したり、それらを口頭で発表するなどの活動を組み込むことで、21世紀型の新しい能力の育成につながる重要な側面を持っている。しかし、履修課程の中に位置付けられた授業として、実験は一般的に、観測・測定器具の扱いやモデルに関わる数式・数値の扱いについてのスキル習得のためのトレーニングとしての側面が強い。実験テーマの数が多くないため、取り上げられる理論やモデルは装置や試料に紐付けられたデータ処理を行うための枠組として与えられ、いわば参照資料となっていて深く考えないことが多い。

しかしながら昨今では個々の授業時間の中で、学習内容に直接即した基礎力に関するスキル習得にとどまらず、学習内容の意味付けを学習者自らが行うメタ認知学習活動を支援し、関連する言語活動を通じた批判的思考や知識の拡張を促進させるなど、高い次元の学習スキルを組み込むことが重視されるようになってきた。このような、いわゆるアクティブ・ラーニングの観点で見直すと、従来の実験授業には、その可能性を広げる上で次のような障害が見出される。

限られたハードウェア資源に対応して、取り扱える対象・テーマが限定的である

物理モデルで解析するための制約が多く、身近な現象とはかけ離れた印象を与える

背景となる理論・概念やモデルを説明する数式に対応し、履修者のレベルが限定的であるこれらの問題点の根源は、教材が本物であることが学習者の意欲を向上させる上で欠かせないことにある。実態としてはそこに二面性があり、実験テーマは教員側からすれば、物理モデルを持つべき科学的な設定が完備されたものだが、受講生側からすれば、現実とはかけ離れた特殊な状況で成り立つ仮想世界のものとなる。これらの問題を克服し、身近な現象への理解やその説明への共感を足がかりとして実験の対象・テーマを正しく受け止めさせる必要がある。

一方で定量的議論は外すことができない。調べる量は直接測定できず、測定可能な量の測定値の組み合わせで初めて得られる。それには物理モデルでの量の定義と式で表された関係があり、測定誤差の議論にはその式が必要になる。したがって、物理モデルによる量の定義や式表現を闇雲に信じさせることなく、受講生に納得させる方法論の開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、物理実験において扱うべき物理モデルをシミュレーション図解という取り組み安い資料で覆い隠し、その背後に存在する物理法則を、グループ討論を通して拾い上げるといった方法を提案する(図1)。読み取り方を習得すれば、複数のシミュレーション図を通して背後の法則を推察することが可能であり、討論を通してそれを言語化させる活動を行いながら、実験で取り上げるテーマを自然に限定化していくという、測定以前の活動を実験授業・講座に組み込むのである。

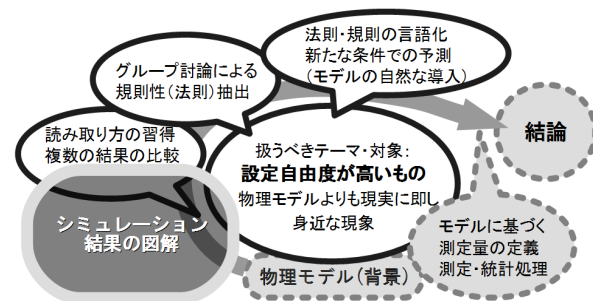


図1 本研究で提案する物理時実験の方法

本研究期間に明らかにしたいことは、このような方法論で行う実験授業・講座が、クラスの中に学習課程上の理解度にばらつきがあっても、受講生の活動やレポート作成において十分機能するものとなりうるということである。また、一般社会で様々なシミュレーション結果がカラフルに表示されており、自分の手で起こる物理現象に対応するような具体的資料や、自ら条件を変化させて結果の変化を観察できれば、学生・生徒にとって物理現象への興味を深める契機となることが期待できる。

3. 研究の方法

(1) 現行の物理実験テーマについて、身近な物体と物理モデルの中間の形状での有限要素法シミュレーションを行い、それによる多数の資料を整理して、グループ討論のための足がかりを与える素材資料として用意する。

(2) それを活用した実験授業を行い、実践の結果のアンケート調査やインタビューにより、資料や実施方法の改善を図る。

(3) 授業・講座実践中に受講生が発想した設定条件でシミュレーションを行うための環境整備をし、実施する。

なお、有限要素法シミュレーションでは、対象となる形状やそれを囲む空間をすべて細分化し、そのひとつひとつ(有限要素)の内部では物理量を均一なものとして近似し、それを変数として、隣接する有限要素との間で考慮すべき空間的な変化を物理法則(微分方程式)に合わせた関係式にしたうえで、有限要素の数の数倍に当たる変数の連立方程式を解く。注目する物体の周りの空間にも物理量が広がること、またその外部境界があることにより分布が影響を受けてしまうため、対象物よりもはるかに大きな空間での計算が必要となる。また、有限要素への細分化(メッ

シュの適用)は近似の精度に関わるだけでなく、計算結果が有意義なものとして収束するか否かに関わる重要なプロセスである。さらに、結果をわかりやすく表示するためにも十分効率的なアルゴリズムが必要となる。そこで、本研究でのシミュレーション計算に当たっては市販ソフトウェア COMSOL Multiphysics Ver.5 を用いた。これにより 2 次元、軸性対称 3 次元、一般の 3 次元空間で分布する物理量の計算が可能であるが、特に本研究では、物理学学習初心者が理解できる結果表示が求められるので、結果の表示には 2 次元あるいは 3 次元空間の 2 次元断面を用いた。

4. 研究成果

(1) 教育学部の物理実験の授業において、導体シートを用いた有限 2 次元定常電流場(静電場)の電気力線や等電位線を決定する「等電位線実験」の導入において実践を行った。この実験では導体外縁や電極の形状といった境界条件が任意に設定でき、予想と結果を比較する等の言語活動が可能である。絶縁壁や導体壁あるいは凸部や凹部など特徴ある形状の周りでの電位分布の性質について学生が自ら発見することをねらいとして資料を作成した。高校物理を十分理解している学生とそうでない学生が混在する中、シミュレーション画像をカード化し、物体形状や位置を変化させた数枚を比較させ、学生どうしでの表現を求め、討論により発見を共有させた。学生は自分のことばで表現するために物体形状を擬人化し、形状の変化を説明するのに脚色を行う傾向があったものの、ガウス定理的な流束の総和を示唆する表現も見られた。教員養成の立場では不正確な表現の裏に潜在する物理的に正しい意図を汲み上げ、正確な用語に置き換えさせる訓練が重要である。事後アンケートでは「物体同士を近づけたり遠ざけたりするときの変化について理解を深められた」という指摘があった。この成果をもとに、実験テキストには実験条件の場合および同じ形状で異なる条件の場合のシミュレーション資料を組み込み、予習の段階で検討を進めることができるようにした(図 2)。

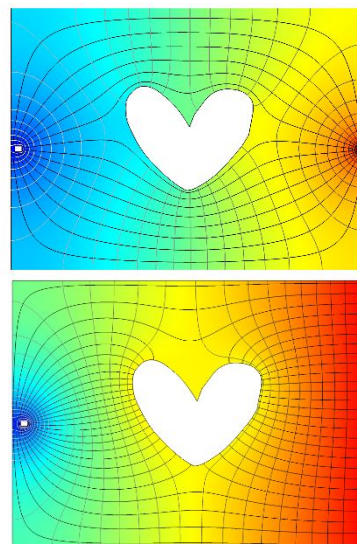


図2 ハート形を切り抜く例(上)と、導体に置き換えた場合の電気力線・等電位線のシミュレーション(下)

(2) 高校生 30 名程度を対象に、「科学とシミュレーション：磁界と渦電流」と題した高大連携講座において、磁界の可視化や電流の磁気効果、および電磁誘導により非磁性導体内に誘起される電流(渦電流)について、実験・観察とシミュレーションを組み合わせた説明を行った。高校生の多くはまだ高校物理を学習していないため、導入の説明を実験とともに進めたものの、渦電流という現象の理解は難しく、関連する力学現象で手応えを感じさせることから始める必要があった。そこで、直径 30cm のアルミ円板に軸を立て、電気的な動力なしで容易に回転できるように装置を作成し、その近くにネオジウム磁石を置いた場合に磁石にかかる力を容易に観察できる補助装置も作成した。同様な実験講座は千葉市科学フェスタや千葉大学学園祭において一般市民向けに実施した。この場合の有限要素法シミュレーションは、アルミ円板や磁石を取り巻く空気の 3 次元領域を対象とし、また、磁極とアルミ円板との間で磁界が急激に変化するなど、計算コストが高いものとなった。結果の例(図 3)にみられるように、アルミ円板を高速で回転させると前方に広がる誘導電流が後方より広範囲に広がること、また、最も電流密度の高い領域が磁石直下よりも前方にずれることが明らかである。このことが、受講者が体験する電磁ブレーキや磁気浮遊の説明につながることを説明した。

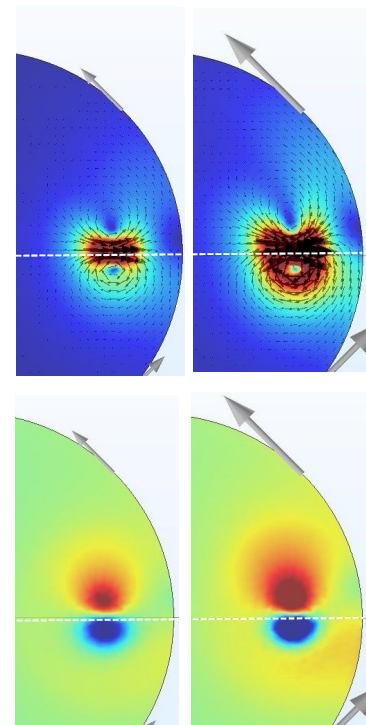


図3 回転するアルミ円板上、磁石直下付近に誘導される渦電流強度と向き(上)、およびそれがつくり出す磁界強度(下)。円板の回転速度の目安を円板の外の矢印で示した。

(3) 受講生が境界の形状など設定を変更してシミュレーションを行うため、ネットワークで接続された PC 上のアプリケーション・ソフトウェアを通してサーバー上で計算を行う COMSOL Server を利用したが、3 次元空間を要する渦電流実験では計算コストを下げなければサーバーの負荷が大き過ぎることが判明した。2 次元空間の等電位線実験に適用すべく変更を行った。

本研究で展開した手法は、目前で起こる実験で学習者が得た結果を、日常的で身近な現象や、数式で記述される物理モデルに結びつけるうえで重要な方法論である。特に、学習上での進捗によらず、高校・大学・教員研修の物理教育で適用することができる。今後、さらに広範囲の現象についての資料作成や、学習者が自ら条件設定を変えて行うシミュレーションの実践を進める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 森重比奈・加藤徹也	4. 巻 68
2. 論文標題 Arduino UNO を用いた磁気浮遊装置の開発と分析 -- 磁界センサによる位置制御と浮遊の磁界分布 --	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 千葉大学教育学部研究紀要	6. 最初と最後の頁 pp.375-384
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 高重正明・加藤徹也・西脇洋一	4. 巻 26(1)
2. 論文標題 グラフィットの磁気浮上を活用した力学実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 大学の物理教育	6. 最初と最後の頁 pp.12-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 西脇洋一・加藤徹也・高重正明	4. 巻 43(2)
2. 論文標題 グラフィットの磁気浮上を利用した回転運動実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 応用物理教育	6. 最初と最後の頁 pp.39-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 加藤徹也	4. 巻 66(1)
2. 論文標題 擬人化・脚色による身近な物理現象への注視	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 千葉大学教育学部研究紀要	6. 最初と最後の頁 pp.415-422
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20776/S13482084-66-1-P415	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 加藤徹也
2. 発表標題 等電位線実験のためのFEMシミュレーションにより支援された導入教材の開発
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤徹也
2. 発表標題 渦電流による磁気浮上のデモンストレーション実験ならびにFEMシミュレーション
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤徹也
2. 発表標題 有限要素法シミュレーションを用いた物理実験の導入教育
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤徹也
2. 発表標題 シミュレーション画像を用いた物理法則の発見的導入
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----