

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：平成19年度～平成20年度
課題番号：19500725
研究課題名 (和文) 不均一場の日常現象から導入する物理現象の新しい表現方法の研究
研究課題名 (英文) Study of novel representation for physics phenomena introduced with inhomogeneous fields observed commonly as daily-life phenomena
研究代表者
氏名 (ローマ字)：加藤 徹也 (KATO Tetsuya)
所属機関・部局・職：千葉大学・教育学部・准教授
研究者番号：00224519

研究成果の概要：身の回りの物理現象としての電場や磁場は、場を作り出す帯電体や磁石の形に突起がある場合は特に、突起の周りで場が強いことから気づきが始まる。これらを物理の数理的扱いにつなげる資料を作成した。指先からドアノブへの放電直前の電場分布から仮想的に帯電体を変形する有限要素法シミュレーションや、それと同様の不均一電場分布の実験およびそれをシミュレーションにより説明する資料を作成した。磁石が作る磁場分布や磁石にかぶせた鉄キャップが磁場を強める効果についても、位置分解能の高い測定システムを構築して実験を行い、シミュレーションと比較した。

交付額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
平成19年度	1,700,000	510,000	2,210,000
平成20年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野:総合領域

科研費の分科・細目:科学教育・教育工学分科、細目:科学教育

キーワード:物理教育、理科教育、日常の物理現象、静電場、静磁場、不均一場、シミュレーション、有限要素法

1. 研究開始当初の背景

理科離れは、国の将来の産業に波及する重要な社会問題として、その根本的な対策が緊急の課題である。また、論理的思考や数式・数理自体が嫌われるという傾向が近年強まり、これらに依拠する物理の選択を避けることが、物理を必要とする分野の人材育成で大きな支障となっている。特に物理離れの原因のひとつに、中学校理科までの定性的理解から高校物理での定量的理解に進むときのつまずきがある。

また、ユニバーサル・アクセス型高等教育時代を迎え、入学前の履修状況はいっそう多様になると同時に、意欲的な中学・高校の生徒らが総合的学習の機会を利用するなどして、積み上げの知識を持たずに取り組めるような教育ニーズも増大している。しかし、小中高の理科教育から大学教養へ、理工系専門課程へと高度になるほど、学習の対象は自然現象を簡素化したモデルに限定されるため、興味への理解を充足できない状況を生んでいる。

2. 研究の目的

本研究課題では、生活の中で日常的に見られる「不均一」が有効利用される物理現象を対象とする。これは実感を伴って興味をひきつけやすい一方で、媒体の形状と境界条件の影響が強いため、数式で表現される学習内容との関係付けには無理があった。具体的には『物体の間の静電気・静磁気の伝達(あるいは電場・磁場の分布)』や、それと原理的には密接に関連する『固体の中での力の伝達(あるいは応力の分布)』を中心に切り上げ、その教育の中で現象の概念を数量化するプロセスを丁寧に理解させる教材を開発する。特に、現象の説明には数値シミュレーションを用い、演示を含む実験と組み合わせながら、特に「実体験に現れたり実験で使われたりするさまざまな現実的形状での説明」と、「学習内容に現れる理想的モデル形状への連続的な移行」を含むような特徴をもつ教材を作成し、そのねらいとして「均一な分布の種類と特徴を実際の分布と比較しながら、均一になる要件を整理する」「分布量の大小に関わる性質の差異に着目し、数量化に関する半定量的理解をする」を持つよう工夫することにした。

作成した教材を実際に実験・講義で使用し、実践状況を検討して、その成果としての教材をインターネット等を通じて公開することも目的とする。

3. 研究の方法

まず、不均一な静電場・静磁場に関する演示実験・学生実験を設計・実施する。学生自らが媒介物体の形状や配置をデザインし、唯一無二の境界条件設定に対応する測定結果を収集する。実験やシミュレーションは、

- (1) 静電場の分布:特殊な形状の二次元電流の電位分布
- (2) 静磁場の分布:磁石(軸対称)の周りの三次元磁場分布

について行うこととした。

また、数値シミュレーションには有限要素法ソフトウェア COMSOL Multiphysics を用いた。これにより、空間的に広がるサブドメインとその境界に物理的条件(誘電率や総電荷など)を課して要素に分割し、離散化された偏微分方程式を解き、解を可視化するという一連の有限要素法計算が容易にできる。物理現象の対象とし

ては電磁場のほか、応力場・温度場・音響場・流体場等やその連成問題に幅広く対応(一部は計算可能な対称性などに制約があり、追加モジュールで対応)する。このソフトウェアを用いてさまざまな形状や境界条件設定に対応する数値シミュレーションを個々に行い、物理法則の持つ特徴を、数多くの形状を比較する中で自然に見出せることを狙いとした教材資料を作成した。さらに、物理教育上重要な理想的形状と、身近な現象で見られる現実的形状とを見比べながら、これらを連続的につなげるための中間段階的形状を多数作り、個々に数値シミュレーションを行って補足資料とした。

上記(1)の実験は大学初等物理実験授業の学生実験(①)として実施した。低導電性ゴムシート上の任意の位置に正・負の電極を密着させて定常電流を流し、シート上の等電位点をマルチメーターで求め、連続的につないだ等電位線と、それから推測する電気力線を描画する。ゴムシート外形に対する電極位置だけでなく、ゴムシートに自由な形状で穴を設けたり、高導電性のアルミ箔を密着させたりして、学生自身の発案による形状の自由度を上げることができる。特に千葉大学教育学部での2009年度の物理学基礎実験の授業では、教員と学生の間で、連続する4週間に要する「測定→レポート提出→教員によるシミュレーション→総合考察提出」というやり取りを行い、学生が自分で創作した形状に対する正しい考察を自然に導くことができることを確かめた。

また、(1)①の実験の内容と相補的な理解を導くために、より多様な形状でのシミュレーション結果を使った説明用資料を作成した。具体的には、②電気存在を痛感する身近な現象ともいえる「ドアノブでの放電」の直前における電場分布、および③電磁気学で扱う理想形状(点・円・平面等)と現実的な物体形状との間の中間段階の形をもつ物体の電場分布を求め、説明用資料とした。得られた資料をもとに、大学普遍教育での講義や実験の授業、あるいは高校での出張授業で実際に活用し、教材資料として有用であることを確かめた。

(2)の内容については、まず磁石の近くの鉄の棒に働く磁力を、シミュレーションを通して説明する(①)。磁場分布を調べる学生実験としては、円電流の周りの軸対称三次元磁場分布を調べるものも実施しているが、 xyz の3成分を有して

三次元に分布する磁場を、教材資料として活用できるほどの精度で測定するには、センサー位置および向きについて高い精度が要求される。そこで、精密な位置設定の下で磁場3成分を得ることができるシステムを構築し、いくつかの身近なマグネットを用いて測定を行った(②)。3成分を測定するため、直交する3個のホール素子を一組とするプローブを作成した。磁場の源となる物体を数cm程度の大きさとする、その周りの磁場分布、特に、興味のある中心である不均一な部分の分布を知るには、素子の位置精度に関する分解能と安定性を0.1mm程度に抑える必要がある。そこで、ホール・プローブの水平面内の移動には精密xy自動ステージ(駿河精機KS262-200)を、鉛直方向の移動には手動ステージを使用し、制御・データ収集にはLabVIEW8.6を使った。1mm間隔で測定した場合、10cm×10cmに4~5時間を要した。使用したホール素子(旭化成HZ-116C)は小さいが、近接させて配置しても、各成分測定用素子の中心位置に1.25mm程度ずれがある。水平面内のずれはメッシュ状のデータから内挿により補完し、鉛直方向のずれは、高さをずらして再測定した。

4. 研究成果

(1) 静電場の分布

① 特殊な形状の二次元電流の電位分布

実験装置の配置を**図1(a)**、中央にハート形の切り抜きのある低伝導性ゴムシート上に記録された学生の実験結果のスキャンを**(b)**、それに基づくシミュレーションを**(c)**に示す。

測定結果としての等電位線は、**図1(b)**の上での正負の電極を取り囲む同心円状、あるいは中央の切り抜きから上下に伸びる放射状の曲線群である。背景の理論の説明があっても、多くの学生は自分で設定した境界条件等に対する等電位曲線の形状を予想できず、精度の不安を抱えながら実験していたが、シミュレーションと比較することで、誠実な測定がもたらす十分な実験精度に満足していた。また、測定結果から学生が予想して描く電気力線(正負の電極に端点をもつ、等電位線に直交する曲線群)には十分な配慮がされていないことが多かったが、学生はシミュレーションの結果と対比することで、自ら容易に自分の描いた電気力線の修正方法およびその必要性を理解した。**図1(b)(c)**に対応する他の学生の実験結果とシミュレーション

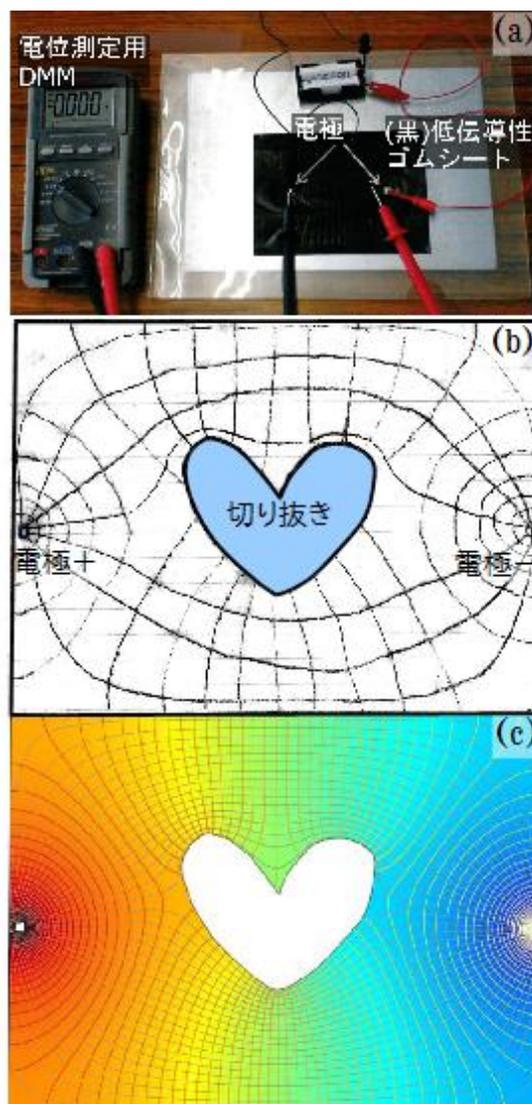


図1

の例を下記URIにて暫定的に公開している。

<http://www.e.chiba-u.jp/~tkato/2009EP/equipotentials.html>

② ドアノブでの放電直前の電場分布

二次元モデルによる等電位線、および比較的小さい電気エネルギー密度をカラーコードであらわしたシミュレーション結果の例を**図2**に示す。ここでドア・ドアノブは接地され、腕・手は大きな電気容量の体に接続されて一定電位になっているものとし、いずれも二次元導体とした。ドアノブに最も近い中指の先だけではなく、薬指や人差し指の周りに等電位線の密集領域があり、強い電場があることが分かる。

③ 物体形状と電場分布

図2で使った腕・手を孤立させ帯電させた場合、および円形状で孤立・帯電する場合との間

の中間段階で、周りに生じる電場分布を**図3**に示す。手のような複雑な形状の物体の周りに生じる電場の分布は、物体から遠ざかるほど複雑さの無い丸い分布に近づいて行くことがわかる。また、最も等方的な形状である円形から歪ませた場合は、とがった部分に電荷が集中し、その周りに強い電場ができることがわかる。

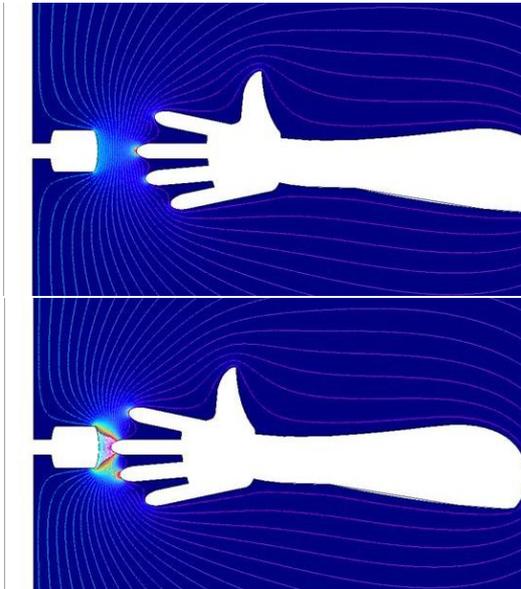


図2

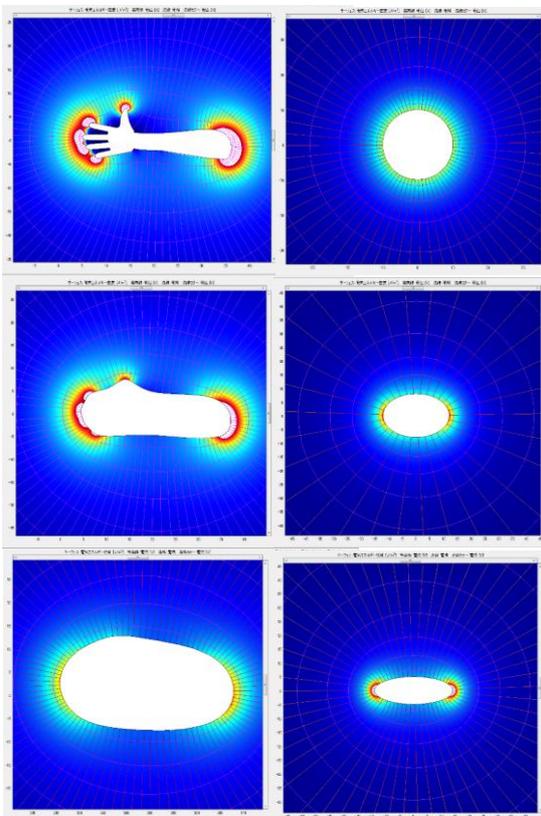


図3

(2) 静磁場の分布

① 磁石の近くの鉄の棒に働く磁力

鉄は自発磁化のない高透磁率の、また磁石は自発磁化を持つ比透磁率1の材質として、鉄の棒をやや大きな棒磁石と距離をあけて並べた場合の磁場分布を二次元問題として有限要素法により求め、対称軸上の磁場の強さをプロットした**図4**。挿入図のカラーコードは磁場強さに対応し、周りの空間では、磁石が作る磁場と、磁化された鉄の棒が作る磁場が(対称軸上では磁場方向が同じなのでこれら二つのスカラー和として)重なる。後者の磁場は、鉄の棒に誘起される磁極の強さや分布を表し、**図4 (b)**のように鉄の棒が磁石に近接する場合は、磁石に面した側の誘起が反対側の誘起より強いことが顕著である。棒の上でのN極とS極の総量は原理的に等しいので、面の中央の磁化が角での磁化に比べ十分弱い(磁石とは反対側の面)かそうでない(磁石に面した側)かがわかる。鉄に作用する磁力の原因についての一般的説明「磁石が鉄の上に等量のN極・S極を誘起し、磁石の作る磁場の強さがこれらの磁極の位置で異なること」を、現実形状のもので確かめることができた。なお、棒磁石の内部の反磁場は強いが鉄の棒の内部は弱い。これは比透磁率の設定の影響である。

② 身近なマグネットの周りの磁場

3種類のマグネット(**図5**に示す)について、その周りの磁場の分布を調べた。形状等は(a)が

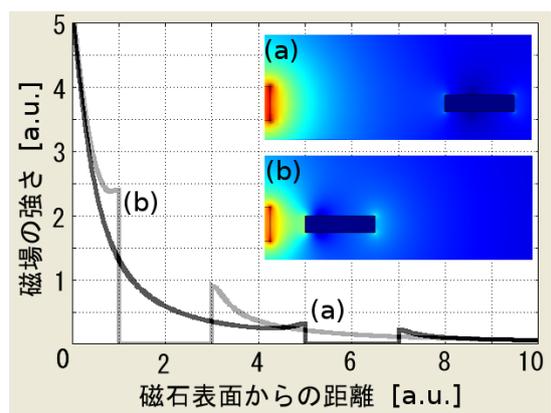


図4



図5

回転対称軸に沿って磁化した円筒形磁石(内・外径が 25.2、30.0mmφ、高さ 9.0mm)、(b)は回転対称軸に沿って磁化した円盤型磁石(直径 30.0mmφ、厚さ 5.05mm)、(c)は(b)を鉄製キャップ(内・外径 32.8、36.8mmφ、深さ 5.50mm、高さ 7.20mm)の中に収めたものである。いずれも対称軸を鉛直に設置して磁石上方の水平面内で磁場分布を測定した。

(a)については磁石上面から高さ 11.63mm での100mm×100mmの範囲で、1mmステップ 10201 格子点のデータを示す。磁場の x 、 z 成分の分布を図 6 (1)、(2)に、中心を通る断面($Y=50$ mmの直線)上での磁場 x 、 z 成分の変化を図 6 (3)、(4)に、それぞれ示す。図 6 (3)、(4)には磁石とその周りの一般的説明で使われる磁力線のイメージをデータに重ねて描いている。

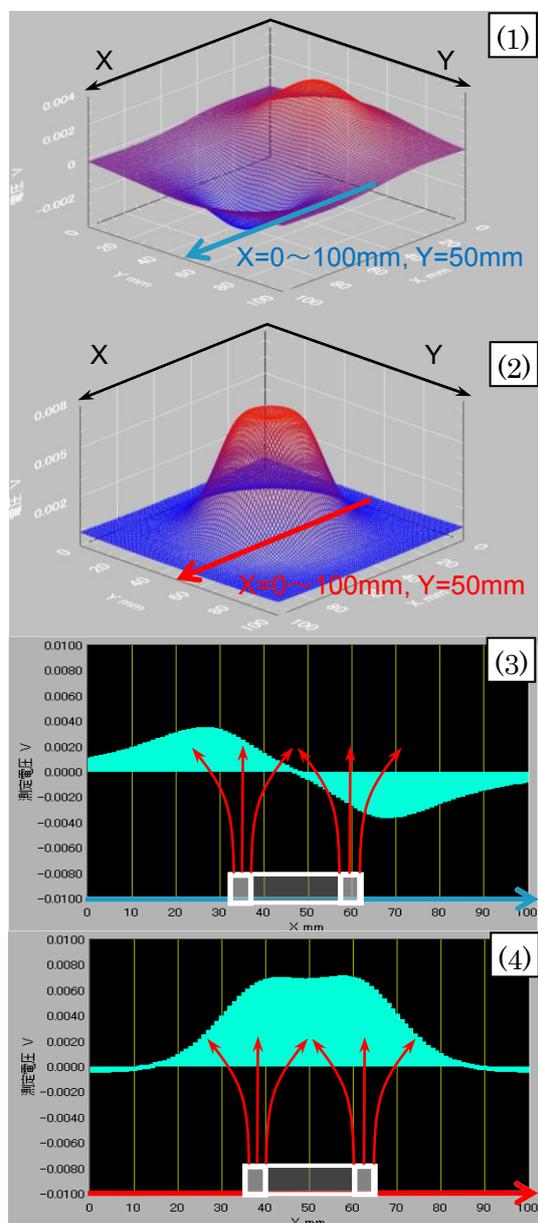


図 6

測定面と磁石の距離は磁石の内半径程度であるにもかかわらず、磁場の x 成分は一般的説明と大きくずれた分布となった。つまり、左右の部分から出る磁力線の反発が強く、磁場の向きが鉛直になるのは中心軸上であって磁石直上ではない。断面上ではない磁石の部分(あるいはそこから出ている磁力線)が中心軸方向に傾きそうな磁力線を傾かないよう囲い込んでいる結果といえる。磁石に近接した空間ではその効果が小さいので、たとえば磁石中心では磁場 z 成分は反転する。

(b)については磁石上面からの高さ 6.80mm の 200mm×200mmの範囲を 10mm(磁石近傍は 1mm)ステップで測定した。磁場 x 成分を図 7 (1)、プローブ高さを 1.25mm上げて測定した同じ高さでの磁場 z 成分を図 7 (2)に示す。また、中心直上を原点として、中心から x 方向にプローブを移動させたときの、磁場の x 、 z 成分が変化する様子をそれぞれ図 7 (3)、(4)に示す。ただし、その高さは、6.80 と 5.55mm の測定から内挿した 6.35mmである。さらに、それらに対応する有限要素法(3次元軸対称静磁場モード)のシミュレーション結果を図 7 (5)、(6)に示す。いろいろな高さでのシミュレーション結果と比較すると、実験結果と一致の度合いが高いものは少し高さがずれていた。実験結果には磁石の中の磁化が均一でない様子も見られ、図 7 (3)、(4)はプローブ移動の位置により異なるグラフになった。シミュレーションは均一磁化分布を仮定している。

(c)については磁石上面からの高さ 6.35mm (鉄キャップの先端からの高さは 5.90mm)において同様の測定とシミュレーションを行った結果が図 8 (1)~(6)である。図 7 (3)~(6)と図 8 (3)~(6)とは円盤状磁石表面からの距離は同じものになっているが、(c)は鉄キャップのためにマグネットの縁に突起があり、(b)の測定とは高さの意味が異なる。鉄キャップをつけた効果として、他の鉄板に吸着する力は、磁場の z 成分の強さとして現れるものと考えられるが、測定結果およびシミュレーションの結果では、期待されたおりのマグネットの縁における磁場の集中のほか、マグネット中央付近も含め、全体的に磁場の強さが大きくなっていった。その理由は、ひとつには鉄はもともと強磁性体であるので、磁化すれば「より大きな磁石」となることが考えられる。また、鉄キャップは磁力線の流れを変え、磁石下面から下方に出てゆく磁力線を鉄キャップに導くこ

とで、縁のすぐ横の円盤状磁石の上面に、より強い磁化を誘起する効果も持っている。特にキャップの中の磁石が弱い場合、鉄キャップがなければ縁の付近では自発磁化に分域ができやすく、そのため磁化分布に乱れを生じやすい。鉄キャップは、それを抑える効果もあるものと考えられる。

(3) 展望

より強力な磁石やさまざまな形状に切断したゴム磁石による磁場分布、空中に浮遊する磁石コマ等の遊び道具など、興味を引きやすい実例の測定を進めている。開発段階にある光弾性効

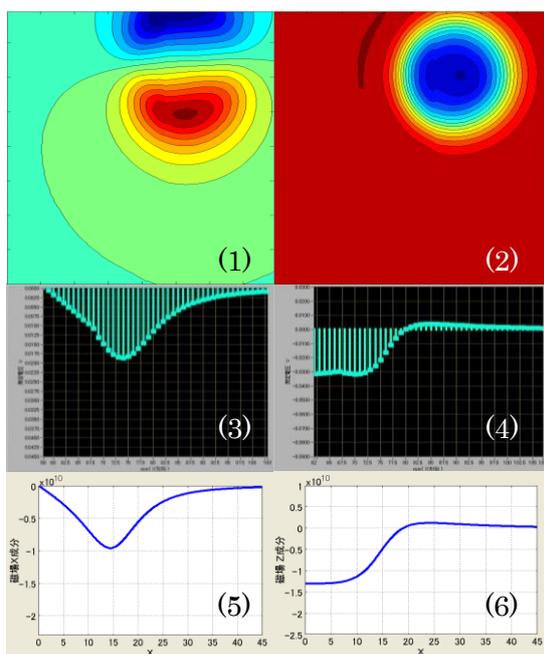


図7

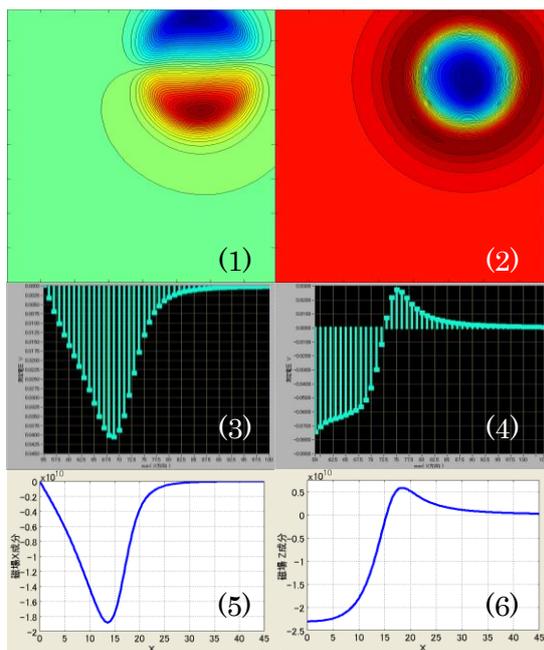


図8

果を使った応力場の測定も含めて、不均一場の現象を簡単な物理モデルに適用する可能性とその限界を明確にすることが課題として残った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

1. 加藤徹也「不均一分布を通して考える身近な電場の物理現象」千葉大学教育学部研究紀要(査読無), Vol.57, pp.325~334, (2009)
2. Tetsuya Kato and Masahiko Muro, "Physics Education Using Examples of Inhomogeneous Fields in Daily-Life Phenomena", *AIP Conference Proceeding* (査読有), 掲載予定.

[学会発表](計2件)

1. 加藤徹也「身近な不均一場現象による物理教材の提案」日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学 2008.9.20.
2. Tetsuya Kato and Masahiko Muro, "Physics Education by Inhomogeneous Fields in Daily-Life Phenomena", *International Conference of Physics Education 2009*, Bangkok, 2009.10.21.

[その他](計2件)

1. 室真彦「高精度位置分解能をもつ磁場分布測定装置の開発」千葉大学大学院教育学研究科 平成 21 年度修士論文 2010.3.
2. ホームページ (随時更新予定)
<http://www.e.chiba-u.jp/~tkato/BorderlessPhysicsEducation/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 徹也 (KATO Tetsuya)
千葉大学・教育学部・准教授
研究者番号:00224519

(2) 研究分担者 (平成 19 年度のみ)

東崎 健一 (TOZAKI Ken-ichi)
千葉大学・教育学部・教授
研究者番号:30102031

松田 哲 (MATSUDA Satoshi)
千葉大学・普遍教育センター・教授
研究者番号:00092099

(3) 連携研究者

なし