

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 28 日現在

機関番号：14503

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560079

研究課題名(和文)変位電流の思考実験モデルの解析と物理教育にむけた方法論の開発

研究課題名(英文) Analysis of gedanken-experiment models of the displacement current and its generalization to physics education

研究代表者

石原 諭 (Ishihara, Satoshi)

兵庫教育大学・学校教育研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60263414

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：変位電流が磁場を作るかについて思考実験モデルにもとづいた論争が近年続いている、その論争を解決することが本研究の目的である。本研究ではその思考実験モデルについて、電磁気学の基本法則、電荷保存則、重ねあわせの原理にもとづいた一般的な考察から、モデルの詳細によらずに一般的に成立する結論を導いた。また思考実験ではなく直接的に変位電流のつくる磁場を測定する装置の作製をすすめた。先行研究では困難であった、分極電流や静電誘導の影響を取り除き、変位電流のつくる磁場と見られる初期の測定結果を得た。

研究成果の概要(英文)：In recent years there is controversy whether displacement current produces magnetic fields or not based on gedanken-experiment models. To resolve it is the aim of our research. We derived a general result that does not depend on the detail of the models, which is based only on the fundamental law of the electromagnetism, the conservation law of charge and the principle of superposition.

We also developed an apparatus for directly detecting the magnetic fields induced by the displacement current. We obtained preliminary data, which indicates displacement current, reducing the influence of polarization currents and electrostatic inductions.

研究分野：素粒子理論

キーワード：変位電流 電束密度 電磁気学 物理教育

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 電磁気学は高等学校の物理教育や理工系大学の教育の中で力学と並ぶ大きな柱となっている。また理数系教員養成でも大切な内容の一つである。なかでも変位電流は電磁波の存在に不可欠であり、電磁気学の教育の中で画龍点睛となる大切な内容である。

(2) 2012年に「変位電流」についての論争が起こっている[1]。また1960年代から米国で論争になっているようである。変位電流を否定する論文は因果関係について論じたり、あるいは認知的な観点と教育的意義について論じることで、変位電流は磁場を作らないと主張している。また変位電流を擁護する論文は、相対論的場の量子論にもとづいて、変位電流の実在性を主張している。

(3) 研究代表者は、理数系教員養成に取り組み[2]や電磁気教材についての研究[3]を通して、電磁気単元は生徒の苦手意識が強いばかりでなく、教える教員側にも苦手意識が強い事を把握してきた。背景には電磁気の現象は力学の現象に比べて「見にくい」ことがある。さらに変位電流については「測定しにくい」ことが加わる。そのため論争を生む余地が生まれている。

(4) これまで波動についての研究[4]や電磁気教材についての研究[3]での経験をもとに、論争[1]の中にいくつかの矛盾があることに気づいた。そしてこの論争は、科学哲学、教育学や相対論的場の量子論によらずとも、古典電磁気学の範囲で解決できる可能性があると考えようになった。

[1] 高橋憲明, 物理教育 **60-1**(2012) 31 「変位電流とは何か」

菅野礼司, 物理教育 **60-1**(2012) 32-37 「変位電流と磁場の関係について」

鈴木亨, 物理教育 **60-1**(2012) 38-43 「マクスウェル=アンペールの法則と変位電流」

兵頭俊夫, 物理教育 **60-1**(2012) 38-43 「変位電流は磁場を“作る”か」

斎藤吉彦, 物理教育 **60-3**(2012) 209-

212 「変位電流は磁場を創らない」を考察するモデルについて」

鬼塚史朗, 物理教育 **60-3**(2012) 218-223 「マクスウェルの電磁理論の確立過程にみる変位電流の意義」

[2] 石原 諭, 「兵庫教育大学における理数系教員養成特別プログラムのとりくみ」, 物理教育 **59-4**(2011)288-293

[3] (口頭発表) 新村晃司, 石原 諭, 庭瀬敬右, 「電磁気学における場の概念形成を目指した磁力線解析について」, 日本理科教育学会全国大会要項 **58**(2008)260

[4] 石原 諭, 佐藤光, 三宅明, 松川敦子, 「空気砲の物理」, 物理教育 **56-3**(2008)188-192

## 2. 研究の目的

(1) 2012年からの「変位電流」についての論争論争で科学的な検討が十分に尽くされているようには見えない。本研究の目的は、一言でいえば、物理学の自然法則にもとづいて、科学的な手法で理論的な側面から変位電流について検討を深めて、変位電流についての論争に決着をつける事である。

(2) 本研究は、この着想にもとづいて、論争になっている変位電流の教育に使われる物理現象のモデルについて、古典電磁気学の法則にそって分析をすすめる。そしてモデルの可否あるいは善し悪しを判断する。またモデルの可否あるいは善し悪しを判断するための基準や方法論を明確にしていく。

## 3. 研究の方法

(1) 変位電流についての論争[1]では図1のような平行板コンデンサーを抽象化した「半直線電流と電荷」からなる思考実験モデルが論じられている。このモデルについて理論的な観点から、古典電磁気学の基本法則、電荷保存法則や重ね合わせの原理などにもとづいて解析をすすめた。

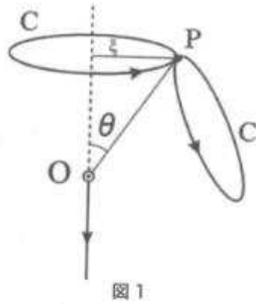


図1: 半直線電流と電荷のつくる磁場の概念説明図。(兵頭論文 [1] より引用。) Oが電荷, Oから下向きの矢印が電流,

(2) 第2年度の10月頃から研究協力者として大学院生1名がついた。それにあわせて変位電流の作る磁場について実験的な側面からも研究を開始した。図1の思考実験のもととなる平行板コンデンサーを用いる実験装置の作製を進めた。

(3) また変位電流や物理教育に関連する図書や文献を調査した。物理教育的な観点から資料を収集した。中学校, 高等学校, 大学の教科書にある記述を比較検討した。それをふまえ, 第3年度に静電気の概念形成について検討を進めた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 主な成果

① 電荷電流密度  $(\rho, \mathbf{j})$  が与えられたとき, 電磁場  $(\mathbf{E}, \mathbf{B})$  はマクスウェル方程式を同時に満たす解として求まる。ただし解が存在するためには電荷電流密度  $(\rho, \mathbf{j})$  が電荷保存則を満たす必要がある。もし電荷保存則を満たさなければ, マクスウェル方程式を同時に満たす電磁場  $(\mathbf{E}, \mathbf{B})$  の解が存在しない。重ね合わせの原理を適用する場合にも, 前提として, 電荷保存則を満たす必要があることを明らかにした。論争 [1] のなかではこの前提が考慮されていなかった。

② 保存する電荷電流密度  $(\rho, \mathbf{j})$  で  $\rho$  が時間変動する場合の分割を解析した。この  $(\rho, \mathbf{j})$  を電流の  $(\rho', \mathbf{j}') = (0, \mathbf{j})$  と電荷の  $(\rho'', \mathbf{j}'') = (\rho, \mathbf{0})$  に分割すると, どちらも電荷保存則を満たさない。したがってこれに対応する電磁場の解  $(\mathbf{E}', \mathbf{B}')$  および  $(\mathbf{E}'', \mathbf{B}'')$  は存在しない。

③ 図3のような半直線電流のモデルを解析した。これは電荷保存則を満たしているので, マクスウェル方程式を同時に満たす電磁場の解  $(\mathbf{E}, \mathbf{B})$  が存在する。しかしこ

の  $(\rho, \mathbf{j})$  を図2のように分割すると, 伝導電流由来の部分は  $(\rho', \mathbf{j}') = (0, \mathbf{j})$  の作る電磁場に相当し, 変位電流由来の部分は  $(\rho'', \mathbf{j}'') = (\rho, \mathbf{0})$  の作る電磁場に相当する。電荷  $\rho$  は時間変動しているのに, どちらの電磁場も存在しないことを示した。

$$(\rho, \mathbf{j}) \begin{array}{c} \bullet \\ \text{O} \\ \vdots \end{array} = (\rho', \mathbf{j}') \begin{array}{c} \bullet \\ \text{O} \\ \vdots \end{array} + (\rho'', \mathbf{j}'') \begin{array}{c} \bullet \\ \text{O} \end{array}$$

図2: 点電荷付きの半直線電流の分割

④ 図3のような, 一直線上を流れる定常電流の分割を解析した。「端点電荷を伴わない半直線電流」は, 電荷保存則を満たさないという意味で, 実在しないし, それで作る電磁場が存在しない。一方, 電荷保存則を満たすような「半直線電流と端点の電荷」は, 実在し, それで作る電磁場が存在する。そしてこの場合「半直線電流」と「端点の電荷」はかならず対になって存在しているので, 「半直線電流」の作る磁場の割合がいくら, 「端点の電荷」の作る磁場の割合がいくらと分けて評価することはできないことを示した。

$$(\rho, \mathbf{j}) \begin{array}{c} \vdots \\ \bullet \\ \text{O} \\ \vdots \end{array} = (\rho', \mathbf{j}') \begin{array}{c} \vdots \\ \bullet \\ \text{O} \\ \vdots \end{array} + (\rho'', \mathbf{j}'') \begin{array}{c} \vdots \\ \bullet \\ \text{O} \end{array}$$

図3: 直線電流の分割

⑤ 変位電流がつくる磁場測定装置については, 設計, 製作, 改良を繰り返し, 初期の測定結果まで得た。先行研究では誘電体入のコンデンサーであったが本研究では空気コンデンサーを用いた。そして分極電流による効果を除去し, 変位電流による効果のみを検出できるようにした。また先行研究ではコンデンサーに正弦波を印加していたが, 本研究では矩形波を印加した。そして静電誘導と変位電流の効果を判別できるようにした。

(2) 成果の国内外での位置付けと インパクト

① マクスウェル方程式，電荷保存則，重ね合わせの原理にもとづいて「変位電流は磁場を作らない」という，点電荷つき半直線電流モデルによる論証が，成立していないことを明らかにした。これは古典電磁気学のみを用いた初等的な考察であり，高等学校および大学初年級での物理教育に資することが期待される。

② 我々の研究では，重ね合わせの原理と電荷保存則だけにもとづいている。しかも近接作用か遠隔作用かの描像を特定していない。そのため，われわれの導いた結論は適用範囲が広く一般性が高い。

③ 高等学校や大学の教科書に記載されている思考実験モデルと同じ原理の装置で，変位電流の作る磁場と見られる信号を測定できたことは画期的である。

### (3) 今後の展望

① 変位電流の磁場への寄与については，教育上の位置づけが明確でなく，100年にわたって議論が出ては消えている。本研究のような，古典電磁気学の基本法則に基づいた解析をふまえて，過去の議論についても検討をすすめたい。

② 我々の研究では，結論に一般性をもたせるために，近接作用と遠隔作用を明示していなかった。一般性は失うが，近接作用あるいは遠隔作用の立場を明示した上で，より強い結論を導くことを目指す。また我々の研究結果では具体的で詳細な解析が無く，基本法則にもとづいた抽象的な議論になっていた。より具体的な現象やモデルにもとづいて解析を進めたい。

③ このような解析の知見をふまえて，実験の困難な状況での思考実験モデルの妥当性を判断する方法論を検討していきたい。

④ 変位電流のつくる磁場測定装置で検出された磁場が，変位電流由来との確証を得るには実験装置の改良が必要である。測定装置のノイズの除去などの改良を進めたい。また理論的な解釈についても検討が必要である。それらをふまえて変位電流のつくる磁場の測定を進めたい。また高等学校の理

科教育で教具として使用するために，装置の安全性や簡易性を高める必要がある。

⑤ 静電気の概念形成については，中学校や高等学校で実践をし効果を検証する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計 2 件)

- [1] 伊藤克己，石原 諭: 変位電流の作る磁場測定装置の作製，近畿の物理教育，査読有，**22**(2016)，10-13
- [2] 石原 諭: 変位電流と重ね合わせの原理について，物理教育，査読有，**61-4**(2013)，187-189

### [学会発表](計 6 件)

- [1] 石原諭，電流にもとづいた静電気の概念形成について，日本物理教育学会近畿支部 第 44 回物理教育研究集会，2015 年 11 月 21 日，流通科学大学大阪オフィス (大阪府大阪市)
- [2] 伊藤克己，石原諭，変位電流の作る磁場測定装置の作製について，日本物理教育学会近畿支部 第 44 回物理教育研究集会，2015 年 11 月 21 日，流通科学大学大阪オフィス (大阪府大阪市)
- [3] 伊藤克己，石原諭，変位電流の作る磁場測定装置の作成～変位電流は磁場をつくるか？～，日本物理教育学会年会 第 32 回物理教育研究大会，2015 年 8 月 9 日，九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)
- [4] 石原諭，静電気と電流の概念接続について，日本物理教育学会年会 第 32 回物理教育研究大会，2015 年 8 月 8 日，九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)
- [5] 石原諭，変位電流についての一考察 — 重ね合わせの原理から — ，日本物理教育学会近畿支部 第 42 回物理教育研

究集会, 2013年11月23日, 大阪教育  
大学天王寺キャンパス(大阪府大阪市)

- [6] 石原諭, 電磁場の重ね合わせの原理と  
変位電流について, 2013年8月10日,  
日本物理教育学会年会 第30回物理教  
育研究大会, 東北大学片平キャンパス  
(宮城県仙台市)

[図書](計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石原 諭 (ISHIHARA, Satoshi)

兵庫教育大学・学校教育研究科・准教  
授

研究者番号 : 60263414

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :

### (4) 研究協力者

伊藤 克己 (ITO, Katsumi)