

# 合成磁界を視覚化する教材の開発と評価

梅田貴士・石井泰史<sup>1</sup>・前原俊信

(2011年10月6日受理)

## Development and Evaluation of a Teaching Material to Visualize Combined Magnetic Fields

Takashi Umeda, Yasufumi Ishii<sup>1</sup> and Toshinobu Maehara

**Abstract:** By making a survey of physics textbooks for the unit “Magnetic force on the current”, and a questionnaire for undergraduate students, we found that some students depend on rote learning of physics rules, e.g. the Fleming’s left-hand rule, to understand the magnetic force on the current. We proposed an understanding of the force based on Maxwell stress tensor, which represents a nature of magnetic field, by using our teaching material to visualize combined magnetic fields. The material is designed to get a real feeling on the magnetic force on the current. We also conducted a trial class for undergraduate students and got positive reactions for our material.

Key words: magnetic fields, visualization, teaching materials

キーワード：磁場、可視化、教材

## 1. はじめに

物理学では様々な自然現象に関する実験や観察から、それらの現象を説明する物理法則が発見されてきた。多くの場合、それらの法則はより単純で普遍的な原理や法則によって説明される様になり、その繰り返しのよって物理学は発展してきたと言える。このような物理学や物理法則の捉え方は、中等教育における物理的な視点からの「科学的な自然観」の一つであると言える。

また近年、ますます学習内容と日常の物理現象の関連付けが重要であるとされ、授業においても実験・観察を行うことが大切になってきている。この論文では、このような「科学的な自然観」を養う実験教材の開発を目的の一つとする。

このような実験教材の開発にあたり、特に電磁気分野に着目した。電磁気は物理学の中でも、目に見えない電界や磁界の現象が中心に取り扱われる分野であ

る。その為、学習者にとって実感を持ちにくい現象が多く、この分野に関する法則は単純なルールとして暗記されてしまう傾向がある。

物理Ⅱの「電界と磁界」の単元で取り扱う「電流が磁界から受ける力」についてもその様な内容の一つであると考え、この単元での教材を検討する。

目に見えない電磁気現象を扱う困難を克服する為に提唱された教材として、シミュレーションにより磁界を視覚的にイメージさせるものが既に存在する<sup>1)</sup>。これらの教材は視覚的なイメージを定着させるには非常に有効だが、実際の実験による実感を伴った理解には実物を用いた教材が好ましい。

しかしながら、このような磁界が形成される様子を現実環境において確認できる教材、特に磁界の合成に着目したものは少ない。合成磁界の様子を観察できる教材があれば、実験・観察においても「電流が磁界から受ける力」を磁力線の性質(Maxwellの応力)の考え方を基にして導き出す事ができ、法則の単純な適用から一步踏み込んだ理解が可能になる。

まず、指導・学習の実態を確認するため、初めにこ

<sup>1</sup> 香川県立高松桜井高等学校

の単元に関する教科書の記述についての調査と学生の実態調査を行う。次に我々が開発した実験教材の詳細について説明し、それを用いて実施された試行授業における質問紙の分析から実験教材の評価について議論する。

## 2. 教科書、学習者の実態調査

### 2.1 高等学校物理の教科書の変遷と比較

学習指導要領では取り扱い内容に関する記述が中心で、それらの説明方法に関してはほとんど指定されていないため、教科書では出版社によって異なる説明方法が採用される場合がある。本研究では、過去3回分の学習指導要領<sup>4)</sup>のそれぞれに準拠した高等学校物理の教科書<sup>5-8)</sup>において、現行の学習指導要領の「(2)電気と磁気 ア 電界と磁界 (イ) 電流と磁界」の中の「電流が磁界から受ける力」についてどのように説明しているかを調査し、説明方法ごとに分類した。結果を表1に示す。

### 2.2 大学生による学習者の実態調査と分析

国立大学教育学部理科教員養成コースの48名（主に1年生）を対象に実態調査を行った。48名のうち高校で物理を履修していたのは34名だった。電磁気の範囲の学習・理解を問うアンケートと、簡単な確認テストを行った。結果の一部を表2-4に示す。

アンケート結果から、多くの学生が電磁気の内容を困難と感じていることが分かった(Q1)。理解を困難にする理由としては、電界・磁界が見えない、3次元でイメージしにくい、法則や公式の暗記が困難と回答した人数が多かった(Q2)。また、学習の仕方については、法則を覚えている者は、暗記に頼っている傾向があり、法則の原理（なぜそうなるか、導き方、背景）まで理解していると回答したのは少数だった(Q3)。

表1 電流が磁界から受ける力の向きの説明

準拠する 学習指導要領	1973 (S57)	1988 (H1)	1998 (H10)	
教科書 (出版社数)	物理 (3社) <sup>5)</sup>	物理II (7社) <sup>6)</sup>	物理I (6社) <sup>7)</sup>	物理II (6社) <sup>7)</sup>
項目	説明のある出版社数			
フレミングの 左手の法則	1	6	6	6
右ねじ(外積)	1	4	0	5
合成磁界	2	2	0	1
その他	1 (実験)	1 (※)	0	0

※電流の作る磁界がU字型磁石に及ぼす力の反作用

表2 Q1「あなたにとって電磁気の範囲の学習の難易度はどうでしたか。」の回答

選 択 肢	人 数
1. 簡単	2
2. やや簡単	3
3. どちらともいえない	16
4. やや難しい	10
5. 難しい	12
6. 無回答	5

また、電流が磁界から受ける力の向きを求める簡単なテストに対し、Q3で「法則の原理まで理解している」と答えた学生が、「法則を暗記している」と答えた学生に比べ平均点が有意に高い(p<0.05)という結果が得られた。

大学受験を既に終えた大学生が対象であることを考慮すると、電流が磁界から受ける力の向きの学習では、フレミングの左手の法則などを単純に暗記するよりも、より基本的な原理法則(Maxwellの応力)から他の法則を導けるように理解する方が、法則の適用ま

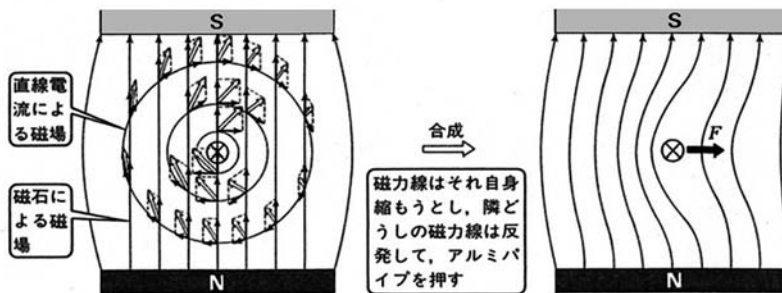


図1 合成磁界による電流が磁界から受ける力の向きの説明 (高等学校物理II 数研出版 H.7.1.10)

表3 Q2「あなたが電磁気の学習において理解が困難だったところがありますか。ある場合はその理由として考えられるものを選んでください。」の回答

選 択 肢	全 体	物 理 履 修 者
1. 電界, 磁界が見えない	10	9
2. 3次元でイメージしにくい	11	10
3. 法則や公式を覚えるのが困難	16	13
4. 電界と磁界が混同する	9	7
5. その他	3	2
6. 無回答	4	11

※複数回答者あり。

表4 Q3「あなたは現在, 電磁気の内容をどのくらい理解していますか。」の回答

選 択 肢	全 体	物 理 履 修 者
1. 法則を暗記している (語呂合わせなども含む)	16	12
2. 法則は覚えていない	22	16
3. 法則の原理まで理解している。 (なぜそうなるか・導き方・背景など)	5	4
無回答者	5	2

表5 Q3の回答とテストの平均点

Q3の回答	人数	平均点
1. 法則を暗記している	16	3.13
2. 法則は覚えていない	22	2.91
3. 法則の原理まで理解している	5	5.80

で含めた理解の長期的な定着が行われていると考えられる。

### 3. Maxwellの応力による考え方

高等学校の物理の教科書では, 電界や磁界の様子を表現するために電気力線や磁力線を使っている。電気力線や磁力線の性質として, 「1本の電気力線は縮もうとし, 電気力線どうしは互いに反発すると考えれば, 電気力線の分布や電気力の様子をうまく説明できる<sup>6)</sup>。」との記述もある。この説明の根拠となるのがMaxwellの応力<sup>8)</sup>である。

電気力線や磁力線にはその至る所で, 力線に沿って張力(Maxwellの張力)がはたらいており, その張

力によって力線は縮もうとする。また, 力線は隣の力線から張力と同じ大きさの圧力(Maxwellの圧力)を受けており, その圧力によって反発する。これらの張力と圧力を含めて, Maxwellの応力といい, 電気力線や磁力線は, 張力で圧力を支えていると考えられる。

ここで, 「電流が磁界から受ける力の向き」について, 紙面に垂直に流れる直線電流が作る磁界と紙面に平行で一様な磁界の合成磁界の様子から考える。

図2のような2つの磁界を合成すると, 合成磁界は図3のようになる。この磁力線にMaxwellの応力がはたらくと考える。張力により磁力線は縮もうとし, さらにそれに垂直に圧力も加わるので曲げられた磁力線は直線に戻ろうとする。そのためには電流の位置を動かすしかなく, 電流には太い矢印の方向に力がはたらくことが分かる。このように, 「電流が磁界から受ける力の向き」は合成磁界の様子から導くことができる。

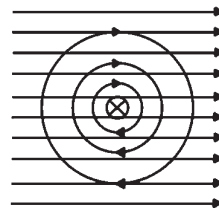


図2 合成前の磁界

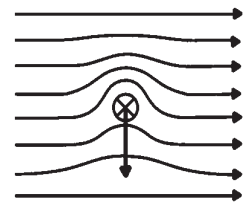


図3 合成後の磁界と電流にはたらく力

## 4. 合成磁界観察教材

### 4.1 教材研究

「電流が磁界から受ける力の向き」の学習にMaxwellの応力の考え方を利用するため, 直線電流の作る磁界と磁石の作る磁界の合成を示せるような教材を開発した。基本方針として,

1. 磁界やその合成の様子を実際に観察できる。
2. 演示実験, そして生徒実験が可能な教材にする。

を重視した。

磁界の様子を実際に観察する既存の教材として, 『立体磁界観察槽(株式会社内田洋行)』などいくつかの教材会社から発売されている。また, 岐阜工業高等学校で『「電流と磁気」の提示教具<sup>2)</sup>』という名称でシリコンオイルと鉄粉の入った容器に電流を通せるようにした教具を開発されている。しかし, 合成磁界を示すのに適したシリコンオイルの粘度や演示に適した鉄粉の量などの条件設定が可能なように, 教材を自作した。

教材は、図4のように、鉄粉とシリコンオイルの入った容器の中に導線を通し、外部に磁石を置き電流の作る磁界と磁石の磁界の合成の様子を鉄粉の様子から観察するというものである。鉄粉は針状のものの方が磁化した際に両端にN極、S極がきれいに現れるため、磁界の観察が容易であることが分かっている<sup>3)</sup>。針状鉄粉はスチールウールを薬味おろし器で摩り下ろして使用した。導線部分は生徒実験でも使用する場合を考慮して、実験時に大電流が流れないように100回巻きのコイルを利用した。コイルの1辺を直線電流と見立てて導線に流した電流の100倍の電流が通るようにした。

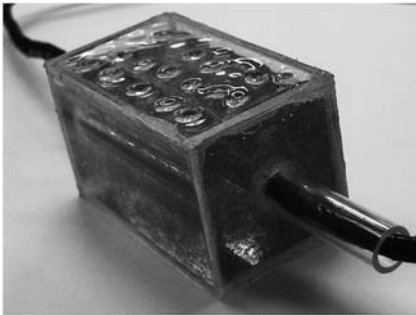


図4 針状鉄粉とシリコンオイルの入った容器

検討の結果、シリコンオイルは動粘度300cSt（センチストークス）のものを使用し、導線に流す電流の強さは1A（100回巻きコイルで合計100A）とした。容器のサイズは5.6cm×5.6cm×10.0cm、パイプは外径1.5cm 内径1.0cmである。密封してあり、振るなどして手軽に攪拌できる。

#### 4.2 装置の概要

観察のための教材装置の概要を図5に示す。観察部分の手前に方位磁針を設置することで電流を流す前に磁石による磁界の向き（N極、S極）を確認できる。また、方位磁針が導線のすぐ下にあるため電流を流すと電流の作る磁界の向きに磁針が反応してしまうが、これは右ねじの法則を用いて電流の流れる向きを確認できる。発光ダイオードをコイルと並列に接続することで電流が導線の中をどちらの向きに流れているかを示すことができるようにした（図6）。

観察部分の手前に方位磁針を設置することで電流を流す前に磁石による磁界の向き（N極、S極）を確認できる。また、方位磁針が導線のすぐ下にあるため電流を流すと電流の作る磁界の向きに磁針が反応してしまうが、これは右ねじの法則を用いて電流の流れる向きを確認できる。発光ダイオードをコイルと並列に接続することで電流が導線の中をどちらの向きに流れて

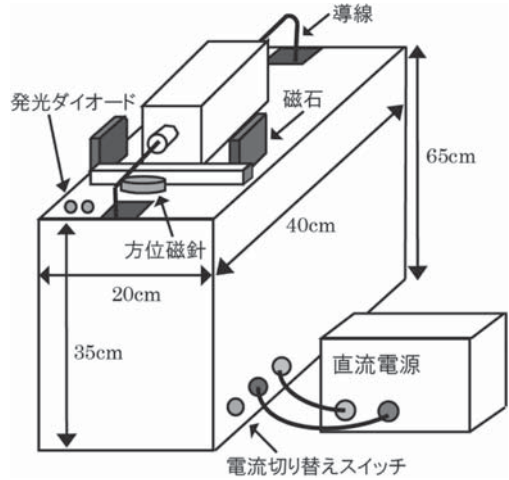


図5 教材の概要図



図6 電流と磁石の作る磁界の向き

いるかを示すことができるようにした（図6）。

教材を用いて観察した、直線電流の作る磁界、磁石の作る磁界、その合成磁界の写真を図7～10に示す。このように、直線電流の作る磁界（図7）、磁石の作る磁界（図8）、それらの合成磁界の様子（図9、図10）をシリコンオイル中の針状鉄粉の様子から観察することができた。

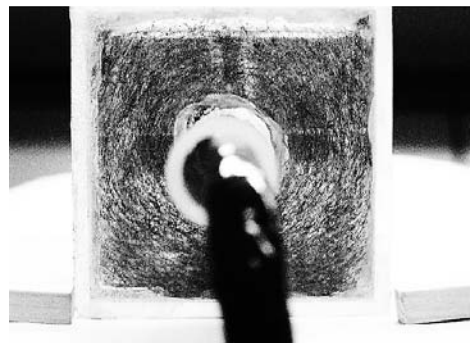


図7 直線電流の作る磁界





図8 磁石の作る磁界（両側に磁石あり）



図9 合成磁界（上が強め合う）



図10 合成磁界（下が強め合う）

## 5. 授業実践と評価

### 5.1 大学生への授業実践

開発した教材を用いて国立大学教育学部理科教員養成コースの46名（多くが実態調査を行った者）を対象に45分間の授業実践を行った。

授業では、ワークシートを用いて直線電流の作る磁界と磁石の作る磁界の合成を行い、合成磁界の磁力線の様子を考えさせた。次に、磁力線の性質（Maxwell

〔課題1〕

各点での直線電流の作る磁界と磁石の作る磁界を合成し、合成磁界全体の様子を考えよ。磁石の作る磁界は各点で同じ大きさ、電流の作る磁界は同じ円状の点は同じ大きさ（例に合わせる）とする。（電流は紙面の表から裏へ流れている。）

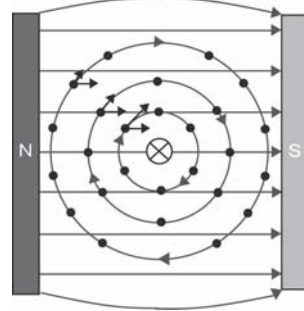


図11 ワークシート（一部）

の応力)の説明を行い、電流が磁界から受ける力の向きを考えさせた。その後、本教材を用いて磁界の合成の様子を実際に観察した。今回は合成磁界の確認という形で本教材を利用した。最後にアンケートを行い、本教材の評価を行った。学生に作業をさせたワークシートの一部を図11に示す。

授業を行った結果、各点での磁界の合成は学生にとって簡単な作業であったようだが、各点での合成磁界の向きをなめらかな曲線で結び、磁力線をかく作業でつまずく学生が多く見られた。特に、磁界が打ち消し合って弱まる側の（今回のワークシートでは下側）磁力線がかけない学生が多く見られた。

### 5.2 教材の評価

授業の最後に講義を受けた学生全員にアンケート調査を行い本教材の評価を行った。アンケートの結果を表6-7、図12-14に示す。

これらの結果から、本教材は目的とした「磁界やその合成の様子を実際に観察できる。(Q3)」「合成磁界の様子から電流が磁界から受ける力の向きを導くことができるような授業に利用することができる。(Q4)」という2点において、学生から肯定的な評価を受けた。

表6 Q1「『電流が磁界から受ける力の向き』を求める方法として、この授業を受ける前から知っていた」と回答した人数。

フレミングの左手の法則	磁界の合成	右ねじ(外積)
45	12	31

※複数回答者あり

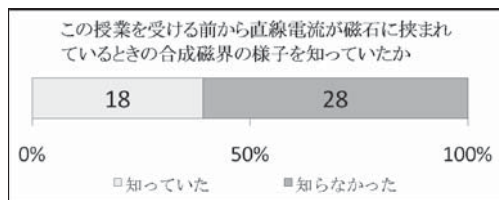


図12 Q2の回答 (数字は人数)

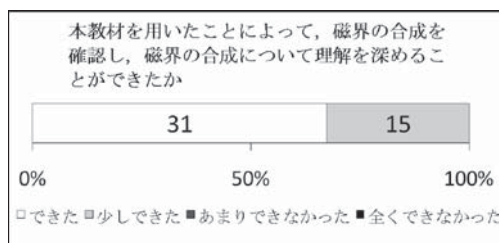


図13 Q3の回答 (数字は人数)

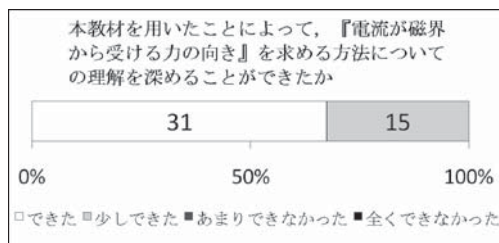


図14 Q4の回答 (数字は人数)

表7 Q5「教材や指導法について」の自由記述

- ・映像では見えにくいので直接見せたほうがよい。
- ・針状鉄粉の動きがもっと分かったほうがよい。
- ・磁力線の性質を図示したほうがよい。
- ・磁界は目に見えないので見ることができる教材はよいと思う。
- ・分かりやすかった。

## 5. おわりに

本研究ではまず、高等学校物理Ⅱの「電流と磁界」において教科書比較調査や大学生による学習者の実態調査を行った。それをもとに「電流が磁界から受ける力の向き」の学習において、磁力線の性質 (Maxwellの応力) の考え方を基にした指導方法に利用するための教材として、磁界の合成の様子を視覚的に捉えられるような教材の開発を行った。

さらに、大学生への授業実践として、ワークシートで磁界の合成を考えさせ、磁力線の性質 (Maxwellの応力) から力の向きを導かせた後に、本教材を用い

て直線電流の作る磁界と磁石の作る磁界の合成磁界を実際に観察させた。この授業実践の後のアンケート調査により、本教材が学習者の理解を深めることに役立ったという結果を得ることができた。

## 【引用文献】

- 1) 独立行政法人科学技術振興機構 理科ねっとわーく<一般公開版> (<http://rikanet2.jst.go.jp/>)
- 2) 岩田永吉：『「電流と磁気」の提示教具』、[http://www.gifu-net.ed.jp/ssd/sien/gakuryoku\\_koujou\\_project2/12industry/kyouzai/gaiyou2/k2-008/k2-008.htm](http://www.gifu-net.ed.jp/ssd/sien/gakuryoku_koujou_project2/12industry/kyouzai/gaiyou2/k2-008/k2-008.htm)
- 3) 藤村 康男：『磁力線観察具』、J-tokkyo、<http://www.j-tokkyo.com/2003/G01R/JP2003-098240.shtml>
- 4) 『高等学校学習指導要領解説 理科編 理数編』、実教出版、1979；同、実教出版、1989；同、大日本図書、2005。
- 5) 『新訂版物理 B』、大日本図書、1967。  
『物理Ⅱ』、第一学習社、1974。  
『改訂版高等学校物理Ⅱ』、数研出版、1976。
- 6) 『高等学校物理Ⅱ』、第一学習社、1995。  
『詳説物理Ⅱ』、三省堂、1995。  
『物理Ⅱ』、実教出版、1995。  
『高等学校物理Ⅱ』、新興出版社啓林館、1994。  
『高等学校物理Ⅱ』、数研出版、1995。  
『高等学校物理Ⅱ』、学校図書、1994。  
『物理Ⅱ』、東京書籍、1995。
- 7) 『高等学校物理Ⅰ』、第一学習社、2005。  
『高等学校物理Ⅱ』、第一学習社、2005。  
『物理Ⅰ』、三省堂、2005。  
『物理Ⅱ』、三省堂、2005。  
『物理Ⅰ』、実教出版、2005。  
『物理Ⅱ』、実教出版、2005。  
『高等学校物理Ⅰ』、新興出版社啓林館、2007。  
『高等学校物理Ⅱ』、新興出版社啓林館、2007。  
『高等学校物理Ⅰ』、数研出版、2006。  
『高等学校物理Ⅱ』、数研出版、2006。  
『物理Ⅰ』、東京書籍株式会社、2005。  
『物理Ⅱ』、東京書籍株式会社、2005。  
『物理Ⅰ』、大日本図書、2005。  
『物理Ⅱ』、大日本図書、2005。
- 8) 三谷健次：『電磁気学』、共立出版、1971；『演習電磁気学Ⅱ』、共立出版、1977。