

# 電磁誘導の理解における磁場の理解の影響に関する研究

理科教育専攻理科教育学領域（平野研究室） 伊藤 唯

## 【要約】

本研究は学習階層に着目し、電気と磁気の相互作用に関して、階層上のつまずきを明らかにし、その要因や学習者の概念を知るものである。階層的な理解の実態を明らかにするため、学習階層に従った質問紙を作成し、調査を行った。各問題の正誤率や問題間の分析を行うことで学習階層上のつまずきを分析した。その結果、電磁誘導が最も低次のつまずきであることが分かった。このことに鑑み、つまずきの要因を分析するために電磁誘導に関する質問紙を作成し、調査を行った後、問題を回答した際に意識した事柄や根拠を面接調査により明らかにした。その結果、誘導電流の向きや大きさ判断を困難としていることが分かった。このことに鑑み、困難としている要因を分析するため、「磁場」、「磁界」、「磁力」、「磁束」といった科学用語に対して、面接調査の回答文脈から意味内容を読み取り、教科書や物理学の専門書の定義文と比較することでイメージの差異を分析した。加えて、質問紙の回答内容と科学用語の捉え方との対応も分析した。その結果、科学用語を多様な意味で捉えていることや、磁場の向きを適切に捉えることが誘導電流の向き判断につながり、磁場の強さの密度変化を適切に捉えることが誘導電流の大きさ判断につながるということが分かった。

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景

高等学校の電磁気分野の学習は従来から学習が定着していないものの1つとして挙げられている。その中でも電気と磁気の相互作用に関する学習は特に定着しないことが指摘されている。その要因として、新村ら<sup>1)</sup>は、①電磁気分野の全体構造が見えないこと、②場の概念の理解が困難であること、③現象が目に見えず直感的な実験が行いにくいことの3点を挙げている。また、佐藤<sup>2)</sup>は物理が難しいと感じる要因の1つに生徒が物理の抽象的概念を正しく形成できていないことがあることを指摘している。

電気と磁気の相互作用に関する高校生の学習履歴を振り返れば、小学校第5学年では鉄芯を磁化した電磁石や電流の大きさに伴う電磁石の強さについて学び、中学校第2学年では、電流が磁場をつくることや、磁場中の電流が力を受けること、電磁誘導と発電について学んだ。高等学校物理基礎では、電磁誘導や交流を相互誘導に発展させて学ぶ。電気と磁気の相互作用に関する学習階層を図1に示す。

R. M. ガニエ<sup>3)</sup>の学習階層の考え方によれば、「学習は特定のルールを習得すれば、いくつかの

もっと複雑な高次のルールへの学習の転移が可能になるとされる」と示されている。電気と磁気の相互作用について、学習階層に従ったつまずきに関する研究は行われていない。よって、低次のルールの習得でつまずきなどの問題がある際に、電気と磁気の相互作用の学習内容配列上（図1）の問題の主題を明らかにし、学習者の理解形成の実態を調査する必要があると考えられる。

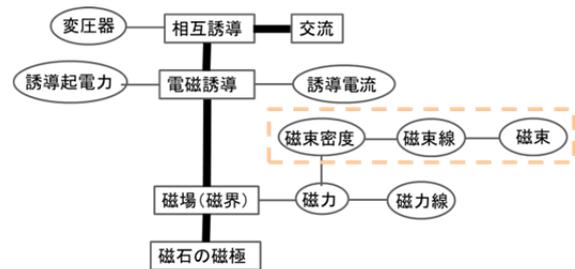


図1 電気と磁気の相互作用に関する学習階層

※□：中心概念、○：中心概念に伴う内容、

□：物理、他は物理基礎の内容

太線：学習の中核となる概念構造

### (2) 研究の目的

高等学校物理基礎の電気と磁気の相互作用の履修者を対象に、電気と磁気の相互作用の学習階層に従った階層上の理解の実態を明らかにし、R. M. ガニエの考えに基づき最も低次のつまずきに

ついて、その要因を分析する。それと共に階層的な学習者の概念の様子を明らかにする。また、最も低次のつまずきについて、生徒の理解の定着を促すために、教師が配慮すべき事項について示唆を得ることで、電気と磁気の相互作用の理解を促すことを目的とする。

## 2. 電気と磁気の相互作用の階層的な理解について

### (1) 調査の目的と方法

調査は、教員養成系大学大学生125名（物理Ⅱ履修者63名、未履修者62名）を対象に行った。物理Ⅱ履修者は全員物理Ⅰを履修済みである。調査は、質問紙調査であり、問題は電気と磁気の相互作用に関する問いで構成され、図1の学習階層に従い配置した。教科書などに記載されている問題設定から、日常生活と関係付けたものまで幅広い問題設定で大問を5つ設けた。また、問題を解くだけでなく、回答する際に意識したことや根拠を記述する問題を各問題で設けた。問題の主な特徴を表1に示し、問題間の階層的なつながりを図2に示す。問3までの問題は中学校理科の履修内容を含み、問3以降からは高等学校の内容である。

各問題の全体の回答状況を分析する。加えて、全ての問題内容を詳しく学習済みである物理Ⅱ履修者を対象に、問3を中心とした問題間の回答状況について分析を行う。

表1 電気と磁気の相互作用の質問紙について

大問	問題内容	特徴
問1	棒磁石まわりの磁場	磁力線を描画させ、磁石の両極によって作られる磁場の向き・強さに関する分布イメージの確認をする
問2	電流が流れるコイルまわりの磁場	コイルまわりに生じる磁力線を描画させ、磁場の向き・強さの分布イメージの確認をする
問3	電磁誘導による、コイル近くの棒磁石を離す場合の誘導電流	コイルの近くがS極のときの誘導電流の向きや誘導電流が発生する理由としての磁場変化の説明を記述表現で確認する
問4	交流の周期的な変化の特徴	西日本で使用される交流電源の周期的変化の特徴を表したグラフを選択し、理解を確認する
問5	相互誘導による交流の変圧	交流変圧器での相互誘導の利用に関する理解をグラフを用いた表現や記述表現によって確認する

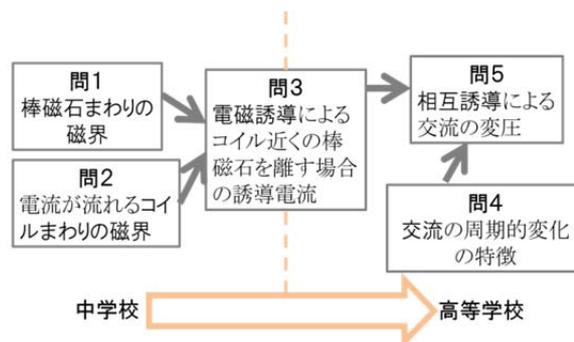


図2 問題間の階層的なつながり

### (2) 結果と考察

それぞれの問題に回答基準を設けて結果を集計したところ、全体の正答率は、問1と問2はそれぞれ約59%、約62%であった。それに対し、問3の正答率は約30%、問4は約35%、問5は0.8%という結果になった。以上のことから、問3の電磁誘導、問4の交流、問5の相互誘導の正答率が低下していることが分かる。物理Ⅱ履修者について同様にみていくと、問1と問2の正答率はそれぞれ約67%、約70%、問3と問4は約30%、問5は約2%という結果となり、全体と同様に問3以降の問題で正答率が低下した。また、図2に従い、問題間の回答状況についてクロス分析と $\chi^2$ 検定を行うことで、階層上のつまずきを明らかにした。クロス分析より、問1と問3、問2と問3の問題間で低次の問題の正答者が、高次の問題で正答群となる割合は、それぞれ約69%、約61%と高い割合を示した。しかし、問3と問5、問4と問5については、それぞれ約3%、約11%であった。続いて、 $\chi^2$ 検定の優位水準を5%とし、分析したところ、問1と問3、問2と問3、問3と問5、問4と問5の問題間で有意差が確認できた。以上のことから、問1と問3、問2と問3までは、低次の学習が高次の学習に結びついているが問3以降では結びついておらず、問3の電磁誘導、問4の交流、問5の相互誘導の理解を困難としていることがいえる。R. M. ガニエの考えに従うと、最も低次のつまずきである電磁誘導について理解を定着させることで、高次の学習の理解を促し、電気と磁気の相互作用の理解につながることができる。そのため、電磁誘導の中でのつまずきを明らかにする必要がある。このことに鑑み、電磁誘導の理解に関する調査を行った。

### 3. 電磁誘導と誘導電流の理解の関係について

#### (1) 電磁誘導に関する調査の目的と方法

調査は、教員養成系大学大学生 50 名を対象に質問紙調査を行った。電磁誘導に関する質問紙を作成し使用した。大問 1 は教科書で扱われていない問題設定で構成し、大問 2 は教科書でよく扱われている問題設定で構成した。具体的な質問紙の問題内容と特徴を表 2 に示す。

表 2 電磁誘導に関する質問紙について

大問	問題内容	特徴
問1	正方形や台形の形をしたコイルが一定の速さで一様な磁場を横切る際の、正方形のコイルに生じる電流と時間のグラフを選択肢の中から選ばせ、台形のコイルの電流と時間のグラフを記述させる	<ul style="list-style-type: none"> <li>コイルの形の違いにより、コイルを貫く磁力線の変化量が異なることで誘導電流の大きさが異なることを抽象的に判断できることを確認する</li> <li>誘導電流の生じる向きが判断できることを確認する</li> </ul>
問2	2つの棒磁石間にある円形コイルに流れる誘導電流の向きと、向きを逆にするための操作方法を尋ねる	<ul style="list-style-type: none"> <li>誘導電流の生じる向きが判断できることを確認する</li> <li>誘導電流の向きを変化させるための操作が複数個回答できることを確認する</li> </ul>

#### (2) 電磁誘導に関する結果と考察

質問紙調査の分析は質問紙を全て回答した学生 35 名を対象とした。回答基準を設けて、正誤を定め、さらに誤答の回答内容には、誘導電流の向きや大きさ判断に着目して 6 つの分類基準を設けた。分類内容と、各分類の該当割合を表 3 に示す。

全ての問いで時間変化に伴って誘導電流の向きと大きさの変化の判断ができていない学生はいなかった。よって、誘導電流の向きや大きさ判断を困難としていることがいえる。しかし、この困難であることの要因は明らかになっていない。そこ

表 3 電磁誘導に関する質問紙の回答分類と結果

回答内容の分類	学生 N=35(%)	
正答	0(0.0)	
誤答パターン	①誘導電流の向きは判断できるが、誘導電流の大きさを判断できない	7(20.0)
	②誘導電流の大きさは判断できるが、誘導電流の向きを判断できない	4(11.4)
	③教科書に記載されている磁石と円形コイルに関する誘導電流の向きを判断することはできるが、それ以外の設定では判断できない	3(8.6)
	④誘導電流が流れる条件が判断できない	7(20.0)
	⑤誘導電流に関する学習が全く定着していない	8(22.9)
	⑥その他	6(17.1)

で、誘導電流の大きさや向き判断を困難としている要因を明らかにするために面接調査を行った。

#### (3) 誘導電流に関する調査の目的と方法

誤答パターン①から⑥に分類された学生の中から、回答内容に特徴のある学生を 8 名（物理 I・II 履修者）を抽出し、面接調査を行った。8 名それぞれの質問紙の回答内容から、誘導電流の大きさや向きを判断する際に必要な事柄（磁束や磁力の変化、磁場と磁場にかかるコイルとの関係など）の捉え方の特徴を読みとり、表 3 の分類との対応を表 4 に示す。誤答パターン②は、磁束の変化を捉えることができていない考え方と、磁束と誘導電流の流れる向きとの関係を捉えることができていない考えの 2 種類があったため、2 名の被験者を設けた。誤答パターン⑥は、独自の考えを明確にして質問紙を回答していた考えの異なる 2 名を被験者に設けた。

面接は 1 人当たり約 15 分で行い、電磁誘導に関する質問紙を回答する際に意識した事柄や根拠を聞く内容とした。

表 4 被験者 8 名の内訳

分類	被験者	被験者の回答内容の特徴
誤答パターン	① I	コイルを貫く磁束の変化量と誘導電流の大きさの関係が理解できていないのではないかと
	② II	磁束の変化が起きている場面を十分には確認できていないのではないかと
		コイルを貫く磁束と誘導電流の流れる向きとの関係を理解していないのではないかと
	③ IV	誘導電流の向きが変わるのではなく、誘導電流の大きさが増減すると考えているのではないかと
	④ V	独自の考えをもっているのではないかと
	⑤ VI	コイルを貫く磁場の変化量と誘導電流の関係について独自の考えをもっているのではないかと
	⑥ VII	誘導電流についてコイルの総面積で捉えるなど、独自の考えをもっているのではないかと
		VIII

#### (4) 誘導電流に関する結果と考察

誘導電流について判断する際に時間変化を考えたことがある被験者は 1 人もいなかった。これは、教科書で誘導電流について、時間変化を伴ったものが全く扱われていないため、誘導電流と時間変化との関係を考えたことがないことが要因だと考えられる。一方で、誘導電流が磁場の変化と関係していることを被験者全員が知っていた。

### ▽誘導電流の向き判断について

質問紙の大問1の、コイルが一樣な磁場を横切る問題では、被験者IV・VIII以外はフレミングの左手の法則を用いて回答した。被験者IVは、手を使って判断することは覚えているが、詳しいことは忘れてしまったと回答した。被験者VIIIは磁場の向きを磁石のN極とS極に当てはめて、N極が近づくと右ねじの法則から反時計回りに流れると回答するなど、独自の考えをもっていた。大問2の棒磁石と円形コイルの問題について、被験者全員が右ねじの法則を用いて回答した。その後、それぞれの法則を用いずに判断する方法や根拠を尋ねたところ、法則を用いずに回答できた被験者はいなかった。それにも関わらず、誘導電流が生じる条件について尋ねると、導体のまわりの磁力線が変化することにより、その変化を妨げる方向に生じるということを知識として被験者全員がもっていることが読みとれた。よって、知識をもっている向き判断と関係付けることができていないことがいえる。質問紙で誘導電流の向き判断ができた被験者Iも同様の回答をしたことから、現時点では向き判断ができていても、法則の使い方（フレミングの左手の法則の左手の中指が電流、人差し指が磁場、親指が受ける力の向きを表すことや、右ねじの法則の右手の親指が磁場、その他の指が電流の向きを表すことなど）を忘れてしまうと向き判断ができなくなる可能性があることが分かった。

以上のことから、全体として現象の原理を理解せず、判断するための手段としてフレミングの左手の法則や右ねじの法則を暗記している傾向が強いことがいえる。その要因として、教科書では、電磁誘導はコイルを貫く磁力線の数が変化するとき、磁力線の変化を妨げるような向きに生じると記載しているが、法則との関係を明記していないことが考えられる。

誘導電流の向き判断ができた被験者I以外の各被験者の特徴を表5に示す。

被験者II・III・IV・V・VII・VIIIは、知識はもっているため、誘導電流により発生する磁力線の向きは判断できるが、誘導電流の向きを判断することに応用できていないことが分かった。前述した

教科書の誘導電流の向きに関する記載内容から、誘導電流によって生じる磁力線の向きは判断できるが、誘導電流の向きを判断することにつなげることができていないことが要因であると考えられる。

被験者II・III・IV・V・VIIは、時間変化と誘導電流の向きとの関係が分からず、導体のまわりの磁力線の変化を把握することができなかった。被験者VIは知識はあるが、誘導電流の向きとの関係が全く分からなかった。以上より、誘導電流により発生する磁力線と誘導電流との関係や時間変化と誘導電流との関係が定着していないことがいえる。

表5 誘導電流の向き判断の特徴

被験者	誘導電流の向き判断の特徴
II・VII	時間変化に伴ってコイルを貫く磁力線の変化と向きとの関係を把握できていない
III・IV	知識はあるが、向きを判断することはできず、電流と時間の関係のグラフの表し方も分かっていない
IV・V	知識はあるが2つの棒磁石の間にある円形コイルの場合以外は、判断できない
VI	知識はあるが、何が関係するのか全く見当がつかない
VIII	知識をもっており、知識と独自の法則で判断している

### ▽誘導電流の大きさ判断について

被験者I・II・III・IV・VII・VIIIは大きさ判断の際に、磁場がかかるコイルの面積に着目していることが分かった。それにも関わらず、磁場がかかるコイルの面積の変化に適切に着目でき、大きさが判断できたのは被験者II・IIIのみである。被験者Vは大きさ判断に関係する事柄の検討がつかず、被験者VIはコイルが一樣な磁場を横切る際に、磁場がかかるコイルの変化方向に対して垂直な長さに着目して大きさ判断をしていた。質問紙の誘導電流の大きさ判断ができていない被験者の特徴を表6に示す。

被験者I・IV・VII・VIIIは、コイルの面積が関係するという知識はもっているが、面積の何に着目すべきかを適切に判断できていない。教科書では、円形コイルのまわりやコイルの中で棒磁石を近づけたり、遠ざけたりする例を用いて図と共に説明を記載している。この例は、コイル全体の磁場がほぼ一樣に変化し、磁場にかかるコイルの面積が常に一定であるため、磁場にかかるコイルの面積変化に着目する機会がないことが要因であると考えられる。

被験者V・VIは磁束密度が変化すると誘導電流の大きさが変わるという知識はあるが、棒磁石と円形コイル以外では応用できなかった。教科書で棒磁石と円形コイル以外の誘導電流現象を取り扱うことがないため、質問紙の大問1のような様々な形をしたコイルの誘導電流の大きさを判断することができなかつたといえる。

表6 誘導電流の大きさ判断の特徴

被験者	誘導電流の大きさ判断の特徴
I	コイルの面積変化に着目しているが、時間変化に伴って増減を考えることができていない
IV	磁場に入っているコイルの総面積で誘導電流の大きさが変化すると考えている
V	何の関係するか全く見当がつかない
VI	コイルの変化方向に対して垂直の長さに着目している
VII	コイルの区間ごとの総面積に着目している
VIII	コイルの全体の形で判断している

以上より、誘導電流の向きや大きさの判断を困難としている要因の1つに、磁場の理解が影響していることがいえる。このことに鑑み、誘導電流を理解する際に必要となる「磁場」に関係のある科学用語に対する被験者の捉え方について分析を行った。

#### 4. 磁場に関する科学用語の捉え方について

##### (1) 調査の目的と方法

被験者IからVIIIの誘導電流のつまずきの要因に関する調査で行った面接調査の回答内容から、「磁場」、「磁界」、「磁束」、「磁力」について文脈から意味内容を読みとり、各校種の教科書や物理学の専門書から各レベルの定義文を定めて比較し、科学用語のイメージを分析した。

##### (2) 結果と考察

全被験者の分析対象とした科学用語の意味内容は、中学校理科教科書から、高等学校物理基礎・物理Iの教科書レベルであった。全被験者が高等学校物理IIまで履修しているにも関わらず、物理IIや物理学の内容はほとんど触れることなく回答していた。

被験者Iは、誘導電流が流れる条件に付いて、「コイルの中の磁場の量が増えたときに、その変化を打ち消す方向に電流が流れる」と回答しており、「磁場の量」に「磁力線」のイメージを当て

はめている。同様の問いに対し、被験者IIは「磁力の大きさが逆になるように電流が流れる」と回答しており、「磁力の大きさ」に「磁束」のイメージを当てはめている。コイルと磁場との関係については「コイルの中の磁場の線の数が変わるから電流の大きさも変わる」と回答しており、「磁場の線の数」に「磁束線」のイメージを当てはめている。被験者IIIは誘導電流が流れる条件について「コイルのある面積に入る磁束の量、変化量で電流の大きさが変わってくる」と回答しており、ある面積当たりで考えているため、「磁束の量」に「磁束密度」のイメージを当てはめている。また、磁場と磁束を区別せず使用している。被験者Vは誘導電流が流れる条件について「コイルを通る磁束密度の量が増えたとき流れる」と回答しており「磁束密度の量」に「磁束」のイメージを当てはめている。被験者VIは誘導電流が流れる条件について「今ある状態から、磁束の数が増えたり減ったりすると流れる」と回答しており、「磁束の数」に「磁束」のイメージを当てはめている。誘導電流と時間の関係について「コイルの面積の分だけ磁場の量が増えると思った」と回答しており、「磁場の量」に「磁束」のイメージを当てはめている。

このようにして回答内容から科学用語の意味内容を読みとった。

- ・被験者I・IVは「磁場の量または大きさ」に「磁力線」のイメージを当てはめている。
- ・被験者IIは「磁力の量または大きさ」に「磁束」のイメージを当てはめている。「磁場の線の数」に「磁束線」のイメージを当てはめている。
- ・被験者IIIは「磁場」と「磁束」をほぼ同様のものだというイメージで捉えている。ある面積に着目しているため「磁場の量」または「磁束の量」に「磁束密度」のイメージを当てはめている。
- ・被験者Vは「磁束密度の量」に「磁束」のイメージを当てはめている。
- ・被験者VI・VII・VIIIは「磁束の数」と「磁場の量」に「磁束」のイメージを当てはめている。

多くの被験者が「磁場」という科学用語を多様に用いていることや、「磁場」以外の科学用語をほとんど使用せず回答していることが分かった。こ

のことから、科学用語の用語間の関係性の理解が定着していないことがいえる。

被験者Ⅰ・Ⅳは質問紙で誘導電流の向き判断ができており（被験者Ⅳは教科書に記載されている棒磁石と円形コイルに関する誘導電流の向きのみ判断できる）、他の被験者と異なり、「磁場の量または大きさ」に「磁力線」のイメージを当てはめていることが分かる。空間の各点で、磁場の向きに沿って引いた線が磁力線であることから、磁場の向きに着目できていることが分かる。よって、磁場の向きに着目することが誘導電流の向き判断につながる事が考えられる。

被験者Ⅱと被験者Ⅲは質問紙で誘導電流の大きさ判断ができています。他のグループと異なり、磁束線や磁束密度に着目していることが分かる。磁場の強さを定義したものが磁束密度であり、磁束密度の様子を表したものが磁束線であることから、磁場の強さの密度変化に着目することが、誘導電流の大きさ判断につながる事が考えられる。

被験者Ⅵ・Ⅶ・Ⅷと被験者Ⅴは、誘導電流に関する知識はあるものの、質問紙の向きも大きさも判断することができなかった。この4名の被験者は「磁束」に着目していることが分かる。磁束は、ある断面を貫く磁束線の本数のことである。つまり、磁束線の本数には着目できているが、磁場の向きや大きさに着目できていないことや、磁束という大きな空間で捉えていることが、誘導電流について適切な判断ができない要因だといえる。

## 5. 考察

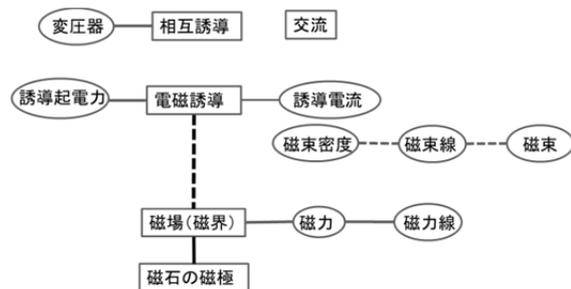
本研究の結果から明らかとなった学習者の階層的な理解の要素を図3に示す。

磁力がはたらく空間が磁場であり、磁力の向きを磁力線で表すことは大多数の学習者が理解している。また、磁場に伴う概念には磁力・磁力線だけでなく、磁束密度・磁束線・磁束があることも知っている。しかし、磁力の強さを表すものが磁束密度であるというつながりを理解していない。また、磁束密度の様子を表すものが磁束線であり、ある断面を貫く磁束線の本数が磁束であることを適切に理解している学習者は少なく、磁束密度・磁束線・磁束の関係を曖昧に捉えている学習者が

多いことが分かった。磁力・磁力線は中学校で学習する内容であり、高等学校物理基礎でも再び学習するが、磁束密度・磁束線・磁束は高等学校物理の学習内容となる。そのため、体系的な理解が乏しく、用語間のつながりを適切に捉えることが困難になっているといえる。

以上のことから、学習階層上の最も低次なつまずきが電磁誘導となった要因として、磁場の理解の影響が考えられる。電磁誘導に磁場が関係することは分かるが、磁場に関する理解が定着していないため、誘導電流との関係性を捉えることが困難となっているといえる。さらに、低次の学習内容である電磁誘導と交流につまずきがあることが、高次の相互誘導と結びつけて考えることができない要因であるといえる。

この結果を受けて、図3を図1の学習階層に近づける必要がある。つまり、低次の学習を定着させることが大切であるといえる。磁場に関する用語間のつながりを理解させることや、電磁誘導で教科書に記載されている問題場面のみを扱うのではなく導体の形状や種類、時間変化などを扱うことで理解が深まると考える。以上のことから、学習階層を意識した指導を行うことで、学習の体系的な理解を促すことができるといえる。



※実線：適切につなぐことができている

破線：適切につなぐことができていない

図1でみられる実線の空白：つなぐことができていない

図3 電気と磁気の相互作用の階層的な理解

### 【引用・参考文献】

- 1) 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釈について」、『日本理科教育学会第58回全国大会発表論文集』, 2008, p. 260.
- 2) 佐藤革馬：「抽象的概念の獲得に向けてアンケートを用いた実践」、『物理教育』, Vol. 59, 2011, pp. 46-49.
- 3) R. M. ガニエ著, 金子敏・平野朝久翻訳：『学習の条件』第3版, 学芸図書, 1982.