

## 学年進行に伴う学習者の保持する電気概念の一貫性の変化Ⅱ～中学生から大学生まで～

横浜国立大学大学院教育学研究科

平島由美子

藤沢市立片瀬小学校

宮生彩子

神奈川県立横須賀工業高等学校

鈴木健介

平塚学園高等学校

茂木達也

### 1. はじめに

学校で学習する前から、学習者は、物理現象について経験的に得た知識を持っているが、そのような既有知識は科学的に誤っていることが多い。よって、学校で学ぶ科学的概念は、学習者の既有知識と矛盾することが多く、学習者にとって正しく理解するのは難しい。理科学習では、学習者持つ誤った知識に対して反証例を提示し、概念的葛藤を起こさせる教授法が有効だとされている。しかし、山縣（2004）は、既有知識と矛盾する新情報（科学的概念）が提示されたときの学習者の反応（葛藤の大きさ）には差があり、その要因として既有知識の堅固性を挙げている。また、既有知識の堅固性の指標として使用されるのは、回答の一貫性であり、誤った既有知識が堅固である（様々な問題で一貫して誤答する）方が、新情報（科学的概念）に接した後に修正されやすいことを指摘している<sup>1)</sup>。したがって、学習前に学習者がどのような誤った既有知識を持っているのかを調査する際には、学習者の回答の一貫性に着目し、学習者が持つ誤った既有知識の堅固性を把握する必要がある。また、授業改善の手立てを検討する際、学習者の誤った既有知識の堅固性を把握することで重要な示唆が得られると考えられる。

理科学習の中でも、電気回路に関する学習は、学習者の理解が困難なものの一つとされており、学習者にとって、電流・電圧・電気抵抗といった電気概念を正しく理解することは容易ではないことが指摘されている<sup>2)～5)</sup>等。これまで、著者らは、電気回路に関する指導上の留意点、実験の工夫など、小学校以降の各学校種での電気回路に関する理科授業改善の手立てを具体的に検討するこ

とを目的として、小学生から大学生までを対象として、電流や電圧に関する理解の実態を調査してきた。実態調査の対象者を小学生から大学生まで広く設定したのは、それぞれの学校種に合わせて授業内容を具体的に再検討するのに、学校種ごとに学習者が強固に持つ誤った既有知識や電気回路に関する学習内容の理解状況を把握する必要があったためである。実態調査結果については、学習者の持つ様々な誤った既有知識の堅固性や回答の一貫性に着目し、それらが学年進行でどのように変化していくのかを分析してきた。前報<sup>9)</sup>では、小学校理科の学習範囲に限定して実態調査結果を報告したが、今回は、中学校理科の学習範囲に関する調査結果を報告する。

### 2. 実態調査の概要

#### 2-1. 調査時期・対象者

2017年10月に理系学部生を対象に調査を行い、12月に小学生、中学生、高校生を対象に調査を実施した。教員養成系学部1年生については、2017年10月、2018年4月と10月、2019年4月に調査を実施した。電気回路に関する理解の状況は、中学校での電気回路に関する学習状況および高等学校での物理履修状況に影響されると考えられるため、6つのグループに分けて結果を集計した。表1に、調査対象者のグループ分けの詳細を示す。グループの名称は、< >で囲った略称で表記することとし、中学校での電気回路の学習が未習である小学校5・6年生と中学校1・2年生を<小5～中2>、中学校での電気回路の学習は既習だが高等学校で電気回路に関する授業を受けていない中学校3年生と高等学校1・2年生を<中3～高2>、高等学校で物理基礎も物理も履修し

## 学年進行に伴う学習者の保持する電気概念の一貫性の変化Ⅱ～中学生から大学生まで～

ていない教員養成系学部1年生を<教一未履修>、高等学校で物理基礎のみ履修している教員養成系学部1年生を<教一物基>、高等学校で物理基礎と物理を履修している教員養成系学部1年生を<教一物基・物>、理系学部生は<理系学部>と表記した。

なお、理系学部生70名の高等学校での物理履修状況は、物理基礎・物理履修者46名、物理Ⅰ・Ⅱ履修者24名であった。物理基礎・物理(新課程)および物理Ⅰ・Ⅱ(旧課程)の合計単位数は、どちらも6単位である。また、教員養成系学部生1年生470名の高等学校での物理履修状況は、未履修者111名、物理基礎履修者259名、物理基礎・物理履修者100名であった。

表1 実態調査対象者の6つのグループ分けと名称

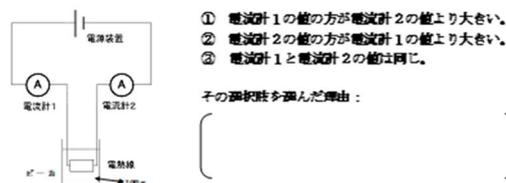
<p>&lt;小5～中2&gt; (144名)</p> <p>中学校での電気回路に関する学習は未習</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・公立A小学校5年生43名、6年生41名</li> <li>・公立B中学校1年生28名、2年生32名</li> </ul>
<p>&lt;中3～高2&gt; (225名)</p> <p>中学校での電気回路に関する学習は既習だが、高等学校で電気回路に関する授業は受けていない</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・公立B中学校3年生30名</li> <li>・公立C高等学校1年生109名、2年生86名</li> </ul>
<p>&lt;教一未履修&gt; (111名)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高校物理基礎・物理未履修の教員養成系学部1年生</li> </ul>
<p>&lt;教一物基&gt; (259名)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高校物理基礎を履修した教員養成系学部1年生</li> </ul>
<p>&lt;教一物基・物&gt; (100名)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高校物理基礎・物理を履修した教員養成系学部1年生</li> </ul>
<p>&lt;理系学部&gt; (70名)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高校物理基礎・物理を履修した理系学部生46名</li> <li>・高校物理Ⅰ・Ⅱを履修した理系学部生24名</li> </ul>

### 2-2. 質問紙調査の内容

実態調査は質問紙で実施し、回答は無記名とした。実施にあたっては、調査趣旨を説明して協力を仰いだ。小学校5年生から中学校2年生までを対象とした質問紙調査は、小学校第4学年理科で学んだ内容を理解していれば正解できる内容とし、「質問【1】豆電球の単純回路に流れる電流を矢印で示す」、「質問【2】モーターの単純回路に流れる電流を矢印で示す」、「質問【3】豆電球点灯の仕組み」、「質問【9】電池が直列につながった回路Aの豆電球の明るさと並列につなが

った回路Bの豆電球の明るさ(単純回路との比較)」の全4問で調査した。中学校3年生から大学生を対象とした質問紙調査の質問は、小・中学校で学んだ内容を理解していれば容易に正解でき、全9問によって電流・電圧の理解の状況を調べた。電流保存の法則については、状況依存の有無を確認するため、状況を変えて同じ内容を複数回問うた。これは、概念獲得の状況を複数の問題場面から見ることにより、既有概念の堅固性を把握するためである。電流に関しては、小学校5年生から中学校2年生を対象とした調査で使用した質問【1】～【3】に加え、「質問【4】電熱線の前後で電流の値はどうかを問う」、「質問【5】80Ωと20Ωの抵抗の間に電流計を入れて電流を測定するが、抵抗の順番を入れ替えたなら値はどうかを問う」の5問で調査した。電圧については、「質問【6】直列回路の電圧」、「質問【7】並列回路の電圧」、「質問【8】直列回路および並列回路に流れる電流の計算」、「質問【9】8種類の回路A～Hの豆電球の明るさ(単純回路との比較)を問う」の4問で調査した。なお、質問【9】の回路AとBは、小学校5年生から中学校2年生を対象とした質問紙の最後の質問にあたる。図は、回路図と実体図を混ぜるようにした。また、電流保存の法則に関する質問は、電圧に関する質問の間に差し込むようにした。なお、調査開始時に、大学生に対しては、中学校学習範囲(乾電池の内部抵抗や豆電球の非直線抵抗等は考えない)で解くように伝えた。図1に質問【4】を示す。

問題5. 下の図のような回路を組み立て、まずビーカーの中の水の温度を測りました。次に電圧を一定にして電流を流したところ、水の温度が上昇していきました。この実験中、電熱線の前後につないだ2つの電流計で電流の値を測定しました。電流計1と電流計2の値は、どうなっていると思いますか。次の選択肢から1つ選んでOをつけてください。また、その選択肢を選んだ理由も書いてください。



- ① 電流計1の値の方が電流計2の値より大きい。
- ② 電流計2の値の方が電流計1の値より大きい。
- ③ 電流計1と電流計2の値は同じ。

子の選択肢を選んだ理由:

[ ]

図1 質問【4】電熱線の前後の電流値

### 3. 調査結果

全調査対象者が回答している質問【1】～【3】、【9】の回路AとBについての結果は、前報<sup>5)</sup>で報告した。加えて、電熱線に関する質問【4】も<小5～中2>は回答していないが、他グループの質問【1】～【3】の結果を考察する際にその結果も合わせて報告した。今回は、こ

## 学年進行に伴う学習者の保持する電気概念の一貫性の変化Ⅱ～中学生から大学生まで～

れまで報告していない中学校理科の学習範囲である質問【5】～【9】の調査結果について述べる。

### 3-1. 回路内の2つの抵抗器の入れ替え

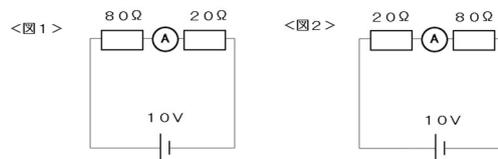
図2に質問【5】を示す。質問【5】では、左の<図1>回路内の電流計と右の<図2>回路内の電流計が示す値がどうなるかを問うた。図3に結果を示す。

高等学校で物理を学んでいても誤答する学生が認められる。多かった誤答は、「右の<図2>の回路の電流計が示す値の方が大きい（選択肢②）」であった。理由を見ると、「電流計手前の抵抗が小さいから」、「抵抗が小さい方が強い電流が流れるから」、「抵抗の小さいものを通るときの方が電流は大きい」、「最初に抵抗の大きい方を流れようとする」と電流は流れにくくなるから」といった内容が多く認められた。つまり、「右の<図2>の回路は電流計の手前により小さな抵抗（20Ω）があり、電源の+極から流れてきた電流が流れやすく電流計は小さな値を示す」という考えを示していた。これは「電流消費の考え」とは異なり、誤答者は「抵抗＝障害物」と捉えて、その部分で電流が円滑に流れなくなると考えていることが示唆された。「20Ωしか堰き止められない」と書いていた大学生も認められた。

これに対し、「左の<図1>は電流計の前に80Ωの大きな抵抗があり、右の<図2>の20Ωよりもより多くの電気が消費されてしまうから」という「消費の考え」を理由に書いているのは少数であった。ここから、質問【1】～【5】で誤答した学習者の多くが複数の考えを保持していて、負荷に電流が流れる状況に応じて、負荷で発熱するので電流が消費されると考えたり、負荷が抵抗（障害物）となりそれ以降電流が流れにくくなると考えたりすることが示唆される。つまり、電流が流れて豆電球が光ったり電熱線が発熱したりする眼に見える形での変化がある状況では、そこで電流が消費されるという考えが優勢となるが、電流が流れても抵抗器に眼に見える形での変化がない状況では、抵抗器が障害物となりそれ以降電流が流れにくくなるという考えが優勢になることが示唆された。なお、選択肢①を選んだ理由を見ると、そのほとんどが選択肢②を選んだ理由と同じ内容だった。よって、選択肢①を選んだのは、乾電池の電気用図記号の見方を誤って判断していた、あるいは、電流の「逆流」の考えを持つだけで考え方は同じだと考えられる。なお、質問【5】の理由を見ると、回路について

全体を見ず部分的に推測する傾向があり、学習者は電流計の手前にある抵抗の大小だけで直列回路の電流値を推測することが明らかになった。実際、オームの法則を使って“ $10/80=0.125$ 、 $10/20=0.5$ ”と計算している小さなメモが記入されている回答や“電流＝電圧÷抵抗なので、20Ωに10Vでは0.5A、80Ωに10Vでは0.125Aになるから”と理由を具体的に説明している回答が複数あった。つまり、このような理由を書いている回答者は、電源電圧がどこにかかるのかを考えていないことが示唆された。

問題6. 下図のような2つの回路があります。回路内の電流計の値はどうなりますか。次の選択肢から1つ選んで○をつけてください。また、その選択肢を選んだ理由も書いてください。



- ① 図1の電流値の方が図2よりも大きい  
 ② 図2の電流値の方が図1よりも大きい  
 ③ どちらも同じ大きさ
- その選択肢を選んだ理由：

図2 質問【5】80Ωと20Ωの順番を替えた際の電流値

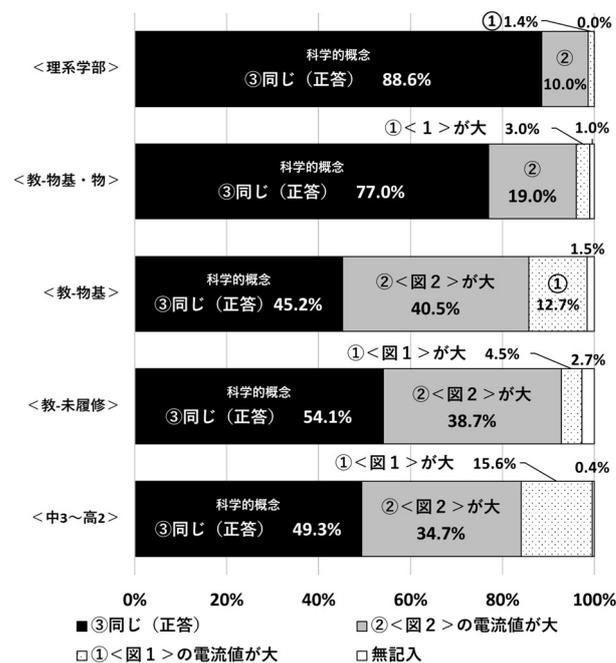


図3 質問【5】の回答

### 3-2. 電流保存の法則に関する回答の一貫性

質問【1】【2】では単純回路（負荷は豆電球、モーター）の電流、質問【3】では豆電球点灯の仕組み、質問【4】では単純回路（負荷は電熱線）の電流、質問【5】では80Ωと20Ωの直列回路に流れる電流を問うたが、電流保存の法則が理解され定着していれば、迷う

## 学年進行に伴う学習者の保持する電気概念の一貫性の変化Ⅱ～中学生から大学生まで～

ことなく容易に正解できると考えられるが、正答率が低く、状況が変わると正解できなくなることが明らかになった。電流保存の概念を持っているのか、各グループについて質問【1】～【5】の回答の一貫性について調べた結果を、図4に示す。

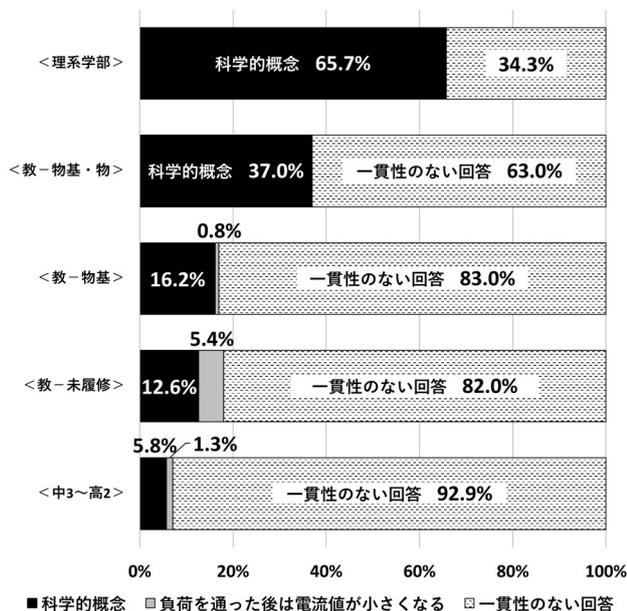


図4 電流保存の法則に関する回答の一貫性

各グループの質問【1】～【5】全てに正解した回答者の割合は、<中3～高2>は5.8%、<教-未履修>は12.6%、<教-物基>は16.2%、<教-物基・物>は37.0%、<理系学部>は65.7%であった。一貫して「負荷を通った後は電流が小さくなる」という誤った考えを保持していた回答者の割合は、<中3～高2>は1.3%、<教-未履修>は5.4%、<教-物基>は0.8%であった。高等学校で物理基礎と物理の両方を履修し、高等学校でも電気回路に関して学んでいる<教-物基・物>および<理系学部>では、一貫して「負荷を通った後は電流が小さくなる」と誤答した者はいなかった。しかし、大学入試で物理で受験し、大学入学後も理系の専門科目を学んでいる<理系学部>であっても、質問【1】～【5】すべてに正しく回答できたのは65.7%であり、残り34.3%はどこかで間違えている。特に正答率が低いのが質問【4】と【5】で、<理系学部>の質問【4】（電熱線の発熱）の正答率は81.4%、質問【5】（80Ωと20Ωの抵抗器の入れ替え）の正答率は88.6%であり、それら両方に正答できた回答者は77.1%であった。理由を見ると、質問【4】で“電流は一定”として正しく回答している学生でも、質問【5】では

“電流計の位置から考えると<図2>の値の方が大きい”と理由を書いて誤っている状況があった。逆に、質問【5】で“直列回路なら電流は同じ大きさになる”、“図1と図2で合計の抵抗は等しいから電流は同じ”、“合成抵抗は同じなので電流の値は同じ”として正しく回答している学生でも、質問【4】では“水を温めるのに電気エネルギーが使われて電流は小さくなる”、“水の温度上昇によって電気エネルギーが熱エネルギーに変化し電流が消費された”、“なんだかわからなくなってきました”と理由を書いて誤っている状況があった。<理系学部>であっても、中学校理科の学習内容を理解できていない学生が存在することが示唆された。質問【1】～【5】において、回路内の負荷装置の違いによって正しく回答できたり誤って回答したりしている学習者、つまり、状況に依存して考えが変わってしまう学習者の割合（一貫性のない回答者の割合）は、<中3～高2>は92.9%、<教-未履修>は82.0%、<教-物基>は83.0%、<教-物基・物>は63.0%、<理系学部>は34.3%であった。回路内の負荷装置が違うだけで電流の捉え方が変わる学習者がこれだけ存在することを踏まえると、理科授業では、単純回路および直列回路での負荷装置前後の電流測定を、負荷装置を変えて繰り返し行う必要があると考えられる。

### 3-3. 直列回路の電圧と電流

電圧に関する質問は、2問用意した。1つは質問【6】で、図5に示すように、同じ種類の乾電池と豆電球をつないで豆電球1個（ア）の単純回路および豆電球2個（イとウ）の直列回路を作り、各豆電球の両端の電圧の値がどうなっているか、また、豆電球の明るさ、回路に流れる電流を問うた。正答は、“豆電球イとウにそれぞれかかる電圧は、豆電球アの半分である。 $V_{AB}=V_{A'B'}+V_{BC}$ であり、豆電球アとイの両端の電圧は違うが、豆電球イとウの両端の電圧は同じである。豆電球イとウに流れる電流は、豆電球アに流れる電流の半分になる。豆電球の明るさは、 $A>I=U$ となる。2つの回路の各点を流れる電流は、 $A=B>A'=B'=C'$ となる”である。小問（1）の答えは豆電球アとイにかかる電圧は違うので「②  $V_{AB}$ と $V_{A'B'}$ の値は『違う』」、小問（2）の答えは豆電球イとウにかかる電圧は同じなので「①  $V_{AB}$ と $V_{BC}$ の値は『同じ』」だが、小問（1）（2）の両方に正解した回答者の割合は、<中3～

学年進行に伴う学習者の保持する電気概念の一貫性の変化Ⅱ～中学生から大学生まで～

高2>は20.9%、<教-未履修>は38.7%、<教-物基>は38.6%、<教-物基・物>は72.0%、<理系学部>は74.3%であった。高等学校で物理まで履修し、高等学校でも電気回路について学習している2つのグループでは正答率が7割を超えた。しかし、残り約3割の学生は不正解で、電源電圧が左の回路では豆電球1つにかかるのに対し、右の回路では豆電球2つにかかることを理解できていない。質問【5】に加え、この質問【6】からも、電源電圧がどこにかかるのかを考えない回答者がかなり多いことがわかった。

小問(3)の正答は、豆電球の明るさは「③  $A > I = U$ 」だが、正答率は、<中3～高2>は37.8%、<教-未履修>は50.5%、<教-物基>は54.1%、<教-物基・物>は77.0%、<理系学部>は85.7%であった。図6に結果を示す。誤答では、“直列回路ならすべての豆電球ア、イ、ウの両端の電圧は常に一定である。どちらの回路も同じ種類の乾電池と豆電球なので、豆電球ア、イ、ウの明るさは同じで②  $A = I = U$  となる”という考えと、“乾電池の+極に近い豆電球アとイは同じ電圧（電源が同じならば、1つ目の豆電球の時点で電圧は同じという記述もあり）で、豆電球ウはイの後にあるので電圧は低くなる（低い電圧が流れ込んでくるという記述もあり）ので、豆電球ア、イ、ウを明るい順番に並べると⑤  $A = I > U$  となる”という考え、“右の回路は豆電球が2つあるので、豆電球アもイも乾電池の+極側にあるが豆電球イの方が暗くなる。また、豆電球イで電流が消費される（流れにくくなる）ので、豆電球の明るさは①  $A > I > U$  となる”という考えの3つが代表的なものであった。なお、回答の理由をみると、明らかに「電流」と「電圧」を混同している回答者が存在することがわかった。誤答②  $A = I = U$  を選択した回答者は「直列なら常に一定」という強固な考えを持ち、2つの回路内の豆電球（抵抗）の数の違いに着目できていない状況がある。誤答⑤  $A = I > U$  を選択した回答者も、左右の回路内の豆電球の数が違うことに着目せず、「同じ電源から流れ出る電流は常に同じ」という考えを持つと同時に、先の質問【4】【5】で述べた「電流が負荷で消費される」や「電流は負荷（抵抗、障害物）で流れにくくなる」の考えを持つことが示唆された。誤答①  $A > I > U$  を選択した回答者は、左右の回路内の豆電球の数が違うことに着目できているが、「電流が負荷で

消費される」や「電流は負荷（抵抗、障害物）で流れにくくなる」の考えを持つと考えられる。

図5 下の図のように同じ種類の乾電池と豆電球をつないで、2つの回路をつくりました。それぞれの回路で、豆電球の両端の電圧  $V_{AB}$ 、 $V_{A'B'}$ 、 $V_{BC}$  を測定しました。電圧の値は、どうなっていると思いますか。選択肢から1つ選んで、○で囲んでください。また、その選択肢を選んだ理由も書いてください。

(1) 電圧  $V_{AB}$  と  $V_{A'B'}$  の値をくらべると、  
 ①  $V_{AB}$  と  $V_{A'B'}$  の値は「同じ」      ②  $V_{AB}$  と  $V_{A'B'}$  の値は「違う」  
 その選択肢を選んだ理由： \_\_\_\_\_

(2) 電圧  $V_{BC}$  と  $V_{A'B'}$  の値をくらべると、  
 ①  $V_{BC}$  と  $V_{A'B'}$  の値は「同じ」      ②  $V_{BC}$  と  $V_{A'B'}$  の値は「違う」  
 その選択肢を選んだ理由： \_\_\_\_\_

(3) 豆電球ア、イ、ウを明るい順番に並べたとき、どれが正しいと思いますか。選択肢から1つ選んで番号を○で囲んでください。また、その選択肢を選んだ理由も書いてください。  
 ①  $A > I > U$       その選択肢を選んだ理由： \_\_\_\_\_  
 ②  $A = I = U$   
 ③  $A > I = U$   
 ④  $I = U > A$   
 ⑤  $A = I > U$   
 ⑥ その他 ( \_\_\_\_\_ )

(4) 上の2つの回路の各点A、B、A'、B'、C' を流れる電流の大きさは、どうなっていると思いますか。選択肢から1つ選んで番号を○で囲んでください。また、その選択肢を選んだ理由も書いてください。  
 ①  $A = B = A' = B' = C'$       その選択肢を選んだ理由： \_\_\_\_\_  
 ②  $A = A' > B = B' > C'$   
 ③  $A = B > A' = B' = C'$   
 ④  $A > B > A' > B' > C'$   
 ⑤ その他 ( \_\_\_\_\_ )

図5 質問【6】直列回路の電圧、電流、豆電球の明るさ

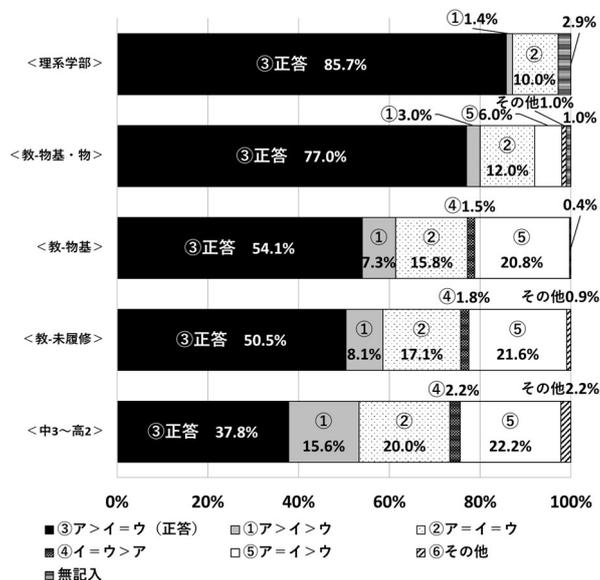


図6 質問【6】(3) 豆電球の明るさに関する回答

小問(4)の正答は、2つの回路の各点を流れる電流は「③  $A = B > A' = B' = C'$ 」だが、正答率は、<中3～高2>は20.9%、<教-未履修>は26.1%、<教-物基>は18.5%、<教-物基・物>は33.0%、<理系学部>は35.7%であった。図7に結果を示す。

## 学年進行に伴う学習者の保持する電気概念の一貫性の変化Ⅱ～中学生から大学生まで～

直列回路を流れる電流は常に一定なので「① $A=B=A'$   
 $=B'=C'$ 」とする回答が多く、「直列なら常に電流は一定」とする短絡的な考えが強固に保持されている。理由として“電流は直列ならどこも同じ”、“直列回路の電流は一定だから”などの記述が認められ、回路内の抵抗の違いには眼を向けず、直列につながっていれば豆電球の数に関係なく電流は同じになると短絡的に考えていることが示唆された。そこには、強固に保持された「同じ電源から流れ出る電流は常に同じ」という誤概念があると考えられる。他方、「② $A=A' > B=B' > C'$ 」を選んだ学生の回答理由を見ると、“だんだん流れる電流は弱くなっていく気がする”、“豆電球で電流がどんどん少なくなると思う”、“1つの抵抗を通るごとに電流は小さくなるから”などの記述があった。この選択肢を選んだ回答者は「同じ電源から流れ出る電流は常に同じ」という誤概念に加え、質問【4】【5】で述べた「電流が負荷で消費される」や「電流は負荷（抵抗、障害物）で流れにくくなる」の考えを持ち、電源の+極に近い豆電球アとイには同じ大きさの電流が流れてくるが、その後、電流は豆電球を通るたびに小さくなっていくと捉えていると考えられる。

### 3-4. 直列回路に関する回答の一貫性

次に小問(1)～(4)の回答の一貫性に関して分析した。正答は、②-①-③-③である。図8に結果を示す。小問(1)～(4)全問正答率は、<中3～高2>は6.7%、<教-未履修>は16.2%、<教-物基>は12.4%、<教-物基・物>は27.0%、<理系学部>は27.1%であった。全問正答者は、中学校で学ぶ直列回路に関して科学的に正しく理解していると考えられるが、その割合は<理系学部>でも3割未満であった。正答の他に、誤ってはいるものの、回答者なりのルールに沿った一貫性のある考えが2種類見られた。誤答①-①-②-①は、“豆電球ア、イ、ウの両端の電圧はすべて同じで $V_{AB}=V_{A'B'}=V_{B'C'}$ 。豆電球ア、イ、ウの明るさもすべて同じで $A=I=B=A'=B'=C'$ ”という考え方である。誤答①-②-⑤-②は、“電源の+極に近い豆電球アとイの両端の電圧は同じだが、豆電球イの先にある豆電球ウの両端の電圧は小さくなるので、 $V_{AB}=V_{A'B'} > V_{B'C'}$ 。電源の+極に近く最初に電流が流れ込む豆電球アとイは明るい、豆電球イの後にある

豆電球ウは暗く、 $A=I > U$ 。2つの回路の各点を流れる電流の値は豆電球を通るたびに小さくなり、 $A=A' > B=B' > C'$ となる。”という考え方である。正答②-①-③-③、誤答①-①-②-①、誤答①-②-⑤-②を除く回答は、理解が定着しておらず、回答者なりの確固たるルールがない「一貫性のない回答」である。

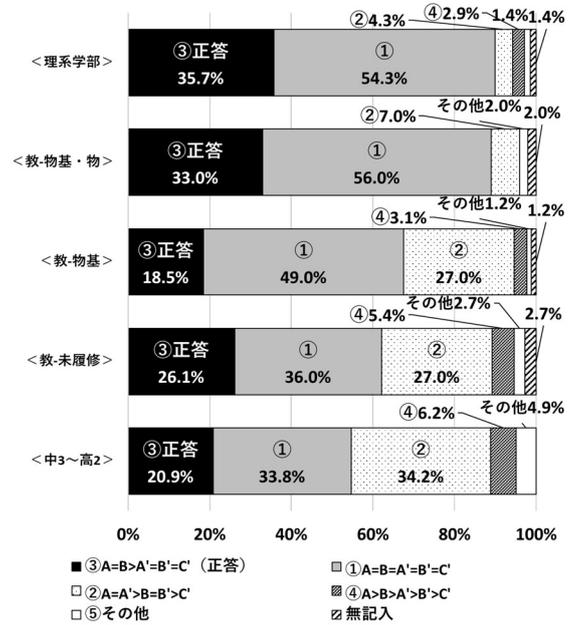


図7 質問【6】(4) 電流に関する回答

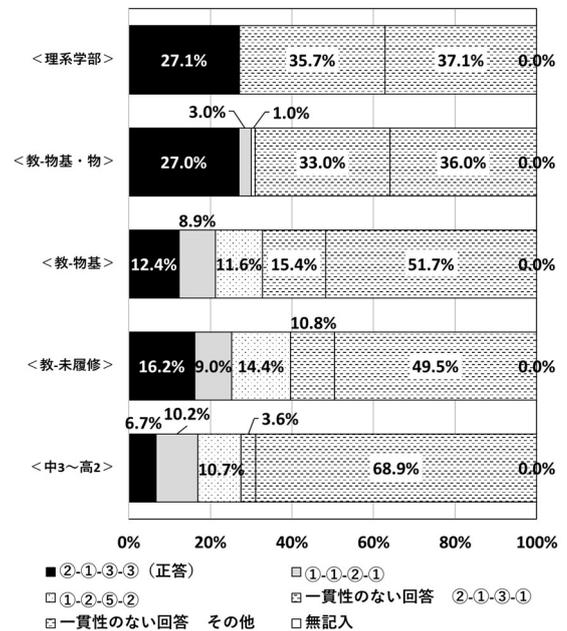


図8 質問【6】小問(1)～(4)の回答パターン

「一貫性のない回答」の割合はどのグループでも大きく、7割を超えた。小問(1)～(3)で正答していても、小問(4)で誤答である①を選択するケースが多いことが明らかになった。なお、小問すべてが無記入であった回答はなかった。

### 3-5. 並列回路の電圧

図9に質問【7】を示す。豆電球2つの並列回路での豆電球の両端の電圧を問う質問【7】では、豆電球の一方が明るく点灯し他方は暗いという条件を付けた。正答率は、〈中3～高2〉は39.6%、〈教-未履修〉は43.2%、〈教-物基〉は51.0%、〈教-物基・物〉は71.0%、〈理系学部〉は81.4%であった。

質問4.

下の図のように乾電池と豆電球をつないだところ、豆電球の明るさに差がありました。このとき、それぞれの豆電球にかかっている電圧はどうなっていると思いますか。選択肢から1つ選んで、○で囲んでください。また、その選択肢を選んだ理由も書いてください。

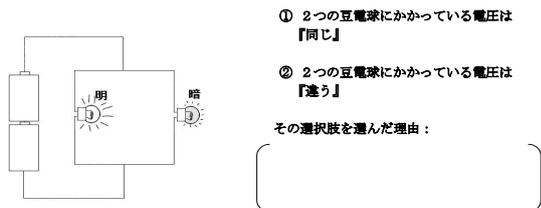


図9 質問【7】並列回路の電圧

いずれのグループにおいても、「② 電圧は違う」の選択理由は、“明るさが違うから”、“明るさが違うなら電圧も違う”、“電圧が同じなら明るさも同じはずだから”がほとんどで、視覚情報を優先して推測や判断をし、それを答えの根拠とする回答者が多いことが示唆された。ここでも、電源電圧が2つの豆電球それぞれにかかることを理解していない状況が認められた。

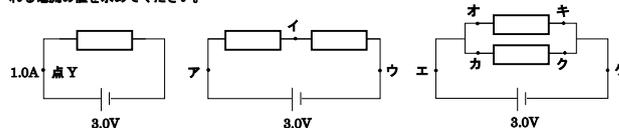
### 3-6. 直列回路と並列回路の電流

図10に質問【8】を示す。内容は、中学校第2学年で学習する直列回路および並列回路の電流の値を問うものである。中央の直列回路では、抵抗器2つに電源電圧3.0Vが加わるので流れる電流は0.5Aであり、ア、イ、ウの各点で0.5Aとするのが正答である。正答率は、〈中3～高2〉は3.1%、〈教-未履修〉は10.8%、〈教-物基〉は14.7%、〈教-物基・物〉は59.0%、〈理系学部〉は72.9%であった。一番多い誤答は、ア、イ、ウの各点で1.0A（抵抗器が一つの単純回路と同じ値）とするものであった。これは、質問【6】の小問(4)と同様に、回路内の抵抗の違いに着目せず、電源電圧がどこにかかるのかも考えず、「同じ電源から流れ出る電流は常に同じ」という誤概念や「直列なら常に一定」とする短絡的な考えが表出していると考えられる。この誤答の割合は、〈中3～高2〉は53.8%、〈教-未履修〉は59.5%、〈教-物基〉は62.2%、〈教-物基・物〉は28.0%、〈理系学部〉は22.9%であ

った。右の並列回路では、どちらの抵抗器にも電源電圧3.0Vが加わるので、各抵抗器に流れる電流はそれぞれ1.0Aであり、オ～クは1.0A、エとケは2.0Aとなる。正答率は、〈中3～高2〉は1.3%、〈教-未履修〉は4.5%、〈教-物基〉は7.3%、〈教-物基・物〉は50.0%、〈理系学部〉は60.0%であった。最も多かった誤答は、オ～クは0.5A、エとケは1.0Aとするものであった。ここでも回路内の抵抗の違いに眼を向けず、電源電圧がどこにかかるのかも考えていない回答者が存在する状況が認められた。

問題7.

電気抵抗の値が同じ抵抗器、同じ直流電源(3.0V)を使用して、下図のような3つの回路をつくりました。左の回路の点Yに流れる電流が1.0Aだったとき、右2つの回路の点ア～ケに流れる電流の値を求めてください。



真ん中の回路：ア ( ) A、イ ( ) A、ウ ( ) A  
 右の回路：エ ( ) A、オ ( ) A、カ ( ) A  
 キ ( ) A、ク ( ) A、ケ ( ) A

図10 質問【8】直列回路の電流、並列回路の電流

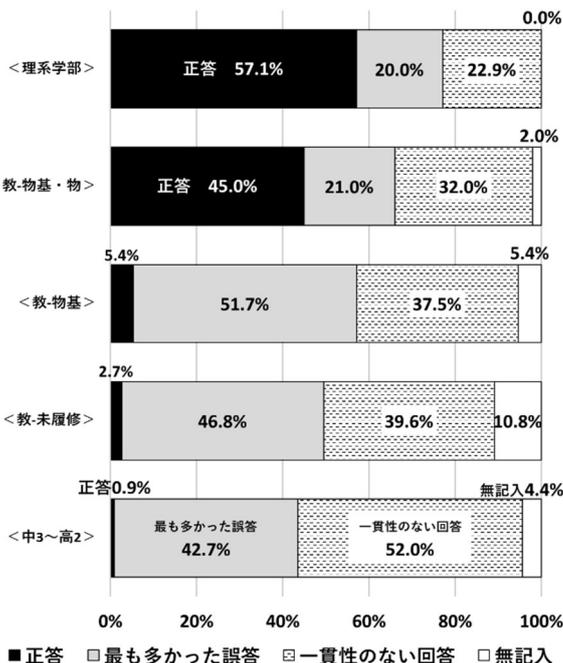


図11 質問【8】の回答

「同じ電源から流れ出る電流は常に同じ」との思い込みがあるのか、“すべての回路の電源は同じなので、左の回路にある電源から1.0A流れ出るなら右の回路でも電源が同じで状況は同じなので、エは1.0A。それが2つに分かれて各抵抗器に流れ込むのでオ～クは0.5A。そして、ケはキとクが合流するので1.0Aとなる。”と考

## 学年進行に伴う学習者の保持する電気概念の一貫性の変化Ⅱ～中学生から大学生まで～

えていることが示唆された。この誤答の割合は、<中3～高2>は47.1%、<教-未履修>は53.2%、<教-物基>は60.2%、<教-物基・物>は26.0%、<理系学部>は28.6%であった。

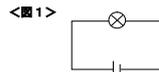
直列回路と並列回路に流れる電流の値の回答パターンを調べ、結果を図11に示した。高等学校物理を履修していないグループでは、どちらも正しく理解できている回答者の割合はわずかであった。一番多かった誤答は、「中央の直列回路ア、イ、ウには1.0Aの電流が流れる。右の並列回路のエには1.0Aの電流が流れ、それが半分に分かれて各抵抗器に流れるのでオ～クは0.5A、それが合流してケでは1.0Aとなる。」であった。この考えは、古屋・戸北(2001)が示した「交通流モデル」である。古屋・戸北は、「交通流モデル」は、調査した小学校6年生から大学2年生まで学年が上がるにつれ、ほぼ単調に増加し、大学2年生では約8割を占め、「科学的モデル」は1割にも満たないと報告している<sup>3)</sup>。今回の調査では、高等学校で物理まで履修した2つのグループでは正答率が約4～5割となり、「交通流モデル」は約2割に下がっていた。高等学校物理での電位や電位差(=電圧)などの学習が「交通流モデル」を解消するのに役立っている可能性がある。なお、古屋・戸北の調査した大学生は、高等学校での物理履修状況が不明である。

### 3-7. いろいろな回路の豆電球の明るさ

図12に質問【9】を示す。<図1>の単純回路の豆電球の明るさと、<図2>のA～Hの回路の豆電球の明るさを比較する問題である。単純回路の豆電球よりも明るい場合は◎、同じなら○、暗ければ△を記入する。図

13に各回路の正答率を示す。A～Hすべてに正解した割合は、<中3～高2>は6.7%、<教-未履修>は15.3%、<教-物基>は20.5%、<教-物基・物>は34.0%、<理系学部>は48.6%であった。A～Hの回答を調べると、誤ってはいるが回答者なりのあるルールに従って考えた回答の組み合わせパターンが7つ見つかった。これを誤答a、b、c、d、e、f、gと呼び、表2に示した。表2には、回答理由の記述から読み取った各誤答の考え方のルールも示した。A～Hすべてに無記入だった場合は「無記入」とした。正答、各誤答と一つだけ答えの異なる回路がある誤答を、それぞれ正答-1、a-1、b-1、c-1、d-1、e-1、f-1、g-1と呼び、割合をグラフに示した。図14に回答組み合わせパターンの割合を示す。学習者が強固に持ち判断基準として活用している誤ルールを踏まえ各学校種の授業改善に向けた具体的な実験の工夫が検討できると考えられる。

図11. まず、乾電池1個と豆電球1個を導線でつないで<図1>のような回路をつくり、豆電球の明るさを調べました。



次に、<図1>で用いたものと同じ種類の乾電池と豆電球を使って、<図2>のA～Hのようにつないで回路をつくり、それぞれの豆電球の明るさを調べました。このとき、<図1>の豆電球よりも明るくなるつなぎ方には◎、同じ明るさになるつなぎ方には○、暗くなるつなぎ方には△を[ ]に書いてください。また、それぞれ、解答の理由も“余白に”書いてください。

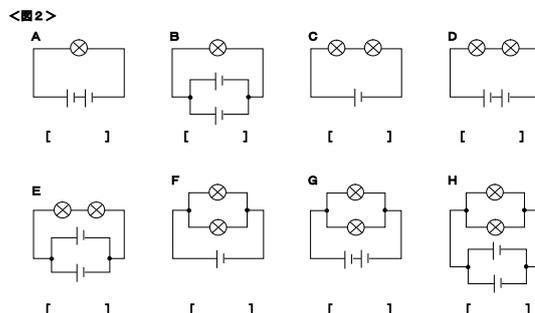


図12 質問【9】いろいろな回路の豆電球の明るさ

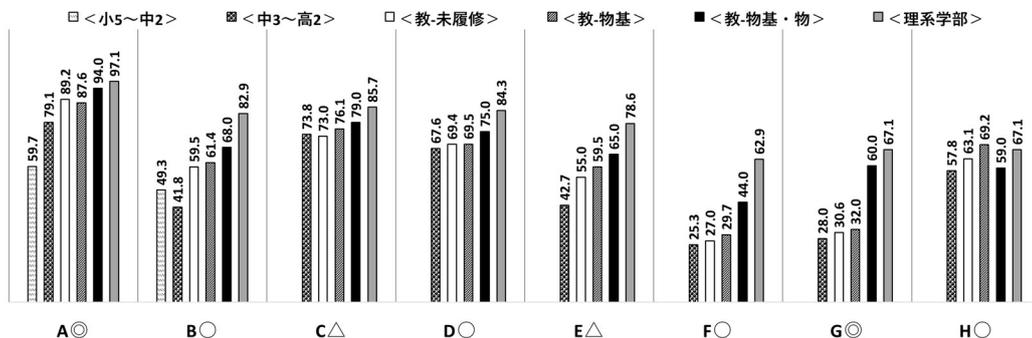


図13 質問【9】の各回路の正答率(%) (<小5～中2>は小学校で学ぶ回路AとBのみ回答)

表2 代表的な回答の組み合わせパターン(誤答a～g)と学習者の誤ルール

回路	誤答 a	誤答 b	誤答 c	誤答 d
	電池2個直列なら電流もしくは	電池2個なら直列でも並列でも	電池2個直列なら電流もしくは	電池2個直列なら1本道で電池

学年進行に伴う学習者の保持する電気概念の一貫性の変化Ⅱ～中学生から大学生まで～

	電圧は電池1個の2倍、2個並列なら電流もしくは電圧は電池1個と同じ。 豆電球2個なら直列でも並列でも電流は2つに分配・消費。	電流もしくは電圧は電池1個の2倍。 豆電球2個なら直列でも並列でも電流は2つに分配・消費。	電圧は1個の2倍、2個並列なら電流もしくは電圧は1個と同じ。豆電球2個直列なら1本道で1個と変わらず、2個並列なら電流は2つに分配・消費。	1個と同じ電流、2個並列なら合わさって電流もしくは電圧は電池1個の2倍。 豆電球2個なら直列でも並列でも電流は2つに分配・消費。
A	電池2個直列で2倍→○	電池2個で2倍→○	電池2個直列で2倍→○	電池2個が直列で同じ→○
B	電池が2個が並列で同じ→○	電池2個で2倍→○	電池が2個が並列で同じ→○	電池2個が直列で合流して2倍→○
C	豆電球2個で半分ずつ分配→△	豆電球2個で半分→△	豆電球2個が直列で同じ→○	豆電球2個で半分→△
D	電池2個直列で2倍 豆電球2個で半分ずつ分配→○	電池2個で2倍 豆電球2個で半分→○	電池2個直列で2倍 豆電球2個が直列で同じ→○	電池2個が直列で同じ 豆電球2個で半分→△
E	電池2個が並列で同じ 豆電球2個で半分ずつ分配→△	電池2個で2倍 豆電球2個で半分→○	電池2個が並列で同じ 豆電球2個が直列で同じ→○	電池2個が直列で合流して2倍 豆電球2個で半分→○
F	豆電球2個で半分に分かれる→△	豆電球2個で半分→△	豆電球2個並列で半分に分岐→△	豆電球2個で半分→△
G	電池2個直列で2倍 豆電球2個で半分に分かれる→○	電池2個で2倍 豆電球2個で半分→○	電池2個直列で2倍 豆電球2個並列で半分に分岐→○	電池2個が直列で同じ 豆電球2個で半分→△
H	電池2個が並列で同じ 豆電球2個で半分に分かれる→△	電池2個で2倍 豆電球2個で半分→○	電池2個が並列で同じ 豆電球2個並列で半分に分岐→△	電池2個が直列で合流して2倍 豆電球2個で半分→○

	誤答 e	誤答 f	誤答 g	正答
回路	電池が2個なら直列でも並列でも電流2倍。豆電球2個直列なら1本道で1個と変わらず(数は関係なし)、2個並列なら電流はそこで枝分かれ。	電池2個直列で電圧2倍、2個並列で電圧同じ。豆電球2個直列で抵抗2倍となり、電流流れにくい。豆電球2個並列で抵抗半分となり、電流流れやすい。	電池2個直列で電流2倍、2個並列で電流分岐。豆電球2個直列なら1本道で数は関係なし、2個並列なら電流は枝分かれ(2つに分岐)。	電池2個直列で電圧2倍、2個並列で電圧同じ。豆電球2個直列なら豆電球1個にかかる電圧は電源電圧の半分、2個並列なら各豆電球に電源電圧がかかる。
A	電池2個で2倍→○	電池2個直列で電圧2倍→○	電池2個直列で2倍→○	電池2個直列で電源電圧2倍→○
B	電池2個で2倍→○	電池2個が並列で電圧同じ→○	電池が2個が並列で分岐→△	電池2個が直列で電源電圧同じ→○
C	電球の数に関係なし→○	電球2個直列で抵抗2倍→△	電球2個が直列で同じ→○	電球2個直列で電圧は半分→△
D	電池2個で2倍、電球の数に関係なし→○	電池2個直列で電圧2倍 電球2個直列で抵抗2倍→○	電池2個直列で2倍 電球2個が直列で同じ→○	電池2個直列で電源電圧2倍、電球2個直列で1個にかかる電圧は半分→○
E	電池2個で2倍、電球の数に関係なし→○	電池2個が並列で電圧同じ 電球2個直列で抵抗2倍→△	電池2個が並列で分岐 電球2個が直列で同じ→△	電池2個が直列で電源電圧同じ、電球2個直列で1個にかかる電圧は半分→△
F	電球が直列のところでは分かれ→△	電球2個並列で抵抗半分→○	電球2個並列で電流分岐→△	並列で各電球に電源電圧がかかる→○
G	電池2個で2倍 電球が直列のところでは分かれ→○	電池2個直列で電圧2倍 電球2個並列で抵抗半分→○	電池2個直列で2倍 電球2個が直列で電流分岐→○	電池2個直列で電源電圧2倍、並列で各電球に電源電圧がかかる→○
H	電池2個で2倍 電球が直列のところでは分かれ→○	電池2個が並列で電圧同じ 電球2個並列で抵抗半分→○	電池2個が並列で分岐で半分 電球2個並列で電流分岐→△	電池2個が直列で電源電圧同じ、並列で各電球に電源電圧がかかる→○

学年進行に伴う学習者の保持する電気概念の一貫性の変化Ⅱ～中学生から大学生まで～

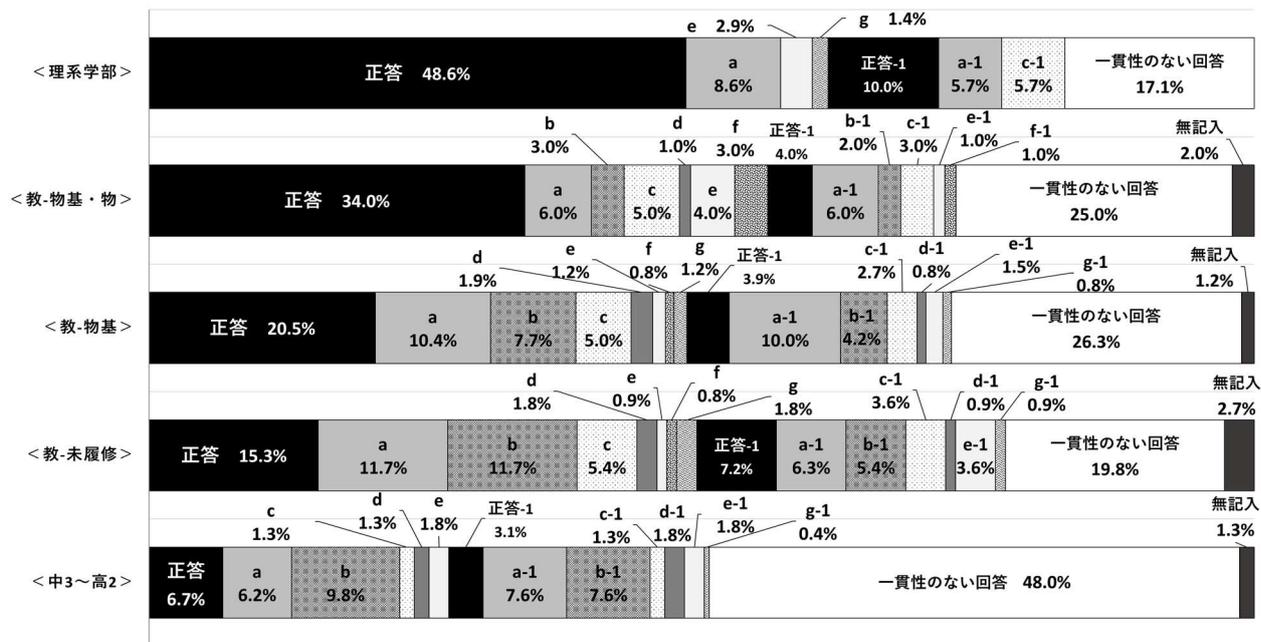


図 14 回答の組み合わせパターンの割合

4. まとめ

今回の調査結果から、学習者は電気に関して自分なりの考えを持ち、その考えは強固で変容しにくく、学習者にとって電流や電圧を正しく捉え理解するのは容易ではないことが示唆された。高等学校物理まで履修していても、小・中学校の学習内容を理解できていない大学生がいることが明らかになった。また、電流が負荷で消費される（電流消費説）、電流は負荷から先で流れにくくなる、直列なら〇〇は常に一定（〇〇は電流や電圧などが入る）、同じ電源から流れ出る電流の量は常に同じ（定電流電源説）など、強固に保持される複数の誤概念を把握できた。また、電圧概念を理解できていない、回路全体を見ず部分的に推測をする、電源電圧がどこにかかるのかを考えない学習者が多いことも明らかになった。また、誤ってはいるものの学習者が強固に保持し、問題を解く際に活用している7種類の誤ルール（信念体系、理論）を把握できた。こうした誤った考えは、小学校理科では電圧を扱わず、中学校理科では電圧を電位差として捉えないまま、電圧は電流を流す働きであるといった説明的な定義のみが導入されて学習が進むことが影響している可能性があると考えられる。今後、今回の調査で明らかになった各学校種での学習者の既有知識の堅固性（回答の一貫性）を踏まえ、授業の流れを具体的に検討して実践したい。その際、電気回路の学習内容は、学習者の持つ誤った既有知識と科学的概念の隔たりが大きい

ことを考慮し、学習者の素朴な疑問を解消する手立てを講じる必要があると考えられる。

謝辞

調査にご協力いただきました児童・生徒・学生および教員の皆様に感謝いたします。本研究は、JSPS科研費17K01021、21K02899の助成を受けて実施しました。

引用・参考文献

- 1) 山縣宏美：「素朴概念の修正に影響する既有知識の堅固性の要因の検討」、京都大学大学院教育学研究科紀要、第50号、pp.241-252、2004
- 2) 門馬徳夫、吉田俊博：「中学生の電流理解に関する実態調査報告（1）」、福島大学教育実践研究紀要、第41号、pp.85-92、2001
- 3) 古屋光一、戸北凱惟：「並列・直列回路における電流の流れ方の認識に関する実態調査」、科学教育研究、Vol.25、No.2、pp.90-101、2001
- 4) 金子健治：「中学生の電流保存概念についての研究：抵抗が2個存在する直列回路を例として」、理科教育学研究、50（1）、pp.13-19、2009
- 5) 平島由美子、宮生彩子、鈴木健介、茂木達也：「学年進行に伴う学習者の保持する電気概念の一貫性の変化」、教育デザイン研究、第14号、pp.149-158、2023