

# 数学-技術間の転移を必要とする電気回路設計法

改正清広

## Electrical Circuit Design using Positive Transfer from Mathematics to Technology Education

Kiyohiro Kaisei

### Abstract

Deeply understanding in junior high school is needed to keep the international competitiveness of our country for globalization and knowledge-based society. In the section of energy transformation technology of the technology education in junior high school curriculum, basic electric circuits for design is taught using the knowledge of scientific concepts: current, voltage, resistance in science education. However, the voltage concept is explained based on naïve physics in the opening of science textbooks; the electromotive force is shown in parallel of baseline of sentences in the following section. In this paper, I propose the design of electric circuits using graphing skill studied in mathematics education. Both naïve physics in science and graphing linear functions in mathematics can help to make a mental model of electric circuits when students study electric circuit design. The graphing procedure determines a working point of electric circuits; it shows positive transfer from mathematics to technology education because the graphing skills is used in real situations, which deepen the understanding of the electric circuit design. The technology education deals with the safety of those electrical appliances; a resettable fuse, reusable one is adapted for design of lighting for a practice.

### キーワード

電気回路, 負荷線, リセットブルヒューズ

## 1 はじめに

グローバル化, 知識基盤型社会の進展に伴い, 確かな学力, 21 世紀型スキルなど様々な学力観が提起され教育行政の取り組みに影響を与えている. 中学校技術においては, エネルギー変換に関する技術として電気回路の設計が求められている. これは平成 29 年 3 月公示の学習指導要領においても変わらない<sup>1</sup>. しかし, 電気回路中の乾電池や抵抗器, 発光ダイオード等の要素, 概念としての電圧や電流は, 理科における電気に関わる知識や技能の教授を完了し習熟しない状態で行わなければならないためその教授は一般に難しい. これは機械や力学の概念は自らを含む周囲にある様々な物体の運動を通じて因果関係つまり, その速度や力といった物理量の時間的な変化をある程度予測できるのに対し, 電気は元来不可視であるため外観から因果関係の予測そのものが困難であることも原因となる. このように, 元来不可視なものに対しては何らかの思考の上での工夫が必要であると考えられ

る. このような工夫は, 一般に学習方略とも呼ばれ, 後述するように下線引きのような低次の方略から, 図等を活用したイメージ化, そして共通の特徴を見出して分類(体制化)する高次の方略のように深い理解を行う際に必要なものもある. しかし, そのような深い理解を行うための思考スキルは, 石井が指摘しているように, 学校教育においてそのスキルの習得に着目することはそのスキルの学習自体を目的化する懸念もある<sup>2</sup>.

そこで本研究では, 一般的な電気電子回路の設計において用いられる負荷線を活用した設計学習を提案する. これは, 理科で学ぶ物理に関する知識と数学で学ぶ数量関係の可視化としてのグラフの作成・表現技能を, 技術における学習の際に「工夫」として転移させ, 技術における知識・技能の学習を, 特に設計についての理解を深めるものである.

## 2 設計学習のための電気回路

### 2.1 深い理解と学習方略

中学校理科において学習する電気は不可視な事物を学習することになるため, その概念形成は多様であり, また学習することも困難であることが指摘されている. そ

---

所属

静岡大学教育学部技術教育講座 改正清広

表1 学習方略（辰野から引用）

カテゴリー	具体的内容
リハーサル	・逐語的に反復する，・模写する，・ノートに書く，・下線を引く，・明暗をつける．
精緻化	・イメージあるいは文を作る，・言い換える，・要約する，・質問する，・ノートをとる，・類推する，・記憶術を使う．
体制化	・グループに分ける，・順々に並べる，・図表を作る，・概括する，・階層化する，・記憶術を用いる．
理解監視	・理解の失敗を自己監視する，・自問する，・一貫性をチェックする，・再読する，・言い換える
情緒的(動機付け)	・不安を処理する，・注意散漫を減らす，・積極的信念を持つ，・生産的環境を作る，・時間管理をする

ここで、技術において学習する電気回路の設計について理科における電気回路の知識を踏まえて考える前に学習そのものについて整理を行う。

教授工学において学習成果は、言語情報、知的技能、認知的方略、運動技能、態度と大別されている<sup>3</sup>。このうち、現在初等教育から高等教育まで指摘されていることとして、従来から行われてきた大学入試を頂点とする学習観である知識(言語情報)や(知的)技能の再生・再認を重視する考え方に對し、学力の三要素である知識・技能、思考力・表現力・判断力、主体性・協働性を高める教育が求められ、また大学入試の際にもそれらの能力を適切に測ることが期待されている。また、認知的方略とは、学習方略とも捉えられ、それ自体は単独として、学習成果としてみなしにくい。しかし、学習そのものを効果的に行うような活動であると指摘されており、この点を重視する教育観は現代の教育において整合的であると考えられる。学習方略について辰野が整理したもの<sup>4</sup>は、表1であり、前述したような再生・再認型の試験にも通用するリハーサル方略から学習には手間がかかるが、獲得した概念の精緻化、体制化を促せるようなイメージ化方略や体制化方略など多種多様である。

ここで中学校技術においてエネルギー変換に関する技術の電気回路の設計を検討するにあたり、その基礎的な知識を提供する理科の教科書の内容について指摘する。電気回路は電源(起電力)と導線と負荷(抵抗)からなる。この際、万有引力に関する位置エネルギーを理解の足場がけとして用い(図1(a), (b))、電気回路の基本的な法則であるキルヒホッフの第一法則(電流則)や第二法則(電圧則)を

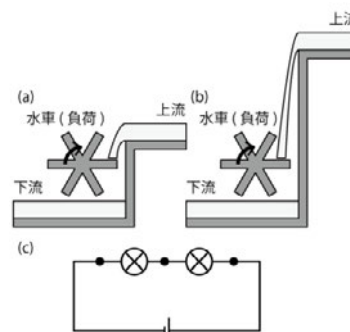


図1 理科における回路図の説明と回路図の書き方の例。(a), (b) 高度差による電圧の大きさの違い。(c) 電圧概念を指導する際には寝かせて表記されている図。

教えている。しかし、位置エネルギーや重力を理解できる絵を用いて指導するのは序盤かぎりであり、その後は高度を起電力と同一視する(比喩的に用いる)ような表記の仕方は放棄してその後は起電力の向きを横書きにするような書き方をしている(図1(c))<sup>5</sup>。しかし、電気工学関連の雑誌においてはこれとは異なり前述のような比喩的な理解が可能な表記法が提唱されている<sup>6</sup>。

上記のような既知の内容をもとに学習を深める考え方をうけない展開は、特に技術において、エネルギーや制御するための信号を表すために電圧を(独立)変数として用いる場合に、知識の活用を妨げるものと推察される。これは、通常電気回路は、スイッチのみならず、保安要素や簡単なセンサが組み込まれることが多く複雑であるためである。しかし、環境や社会に調和する技術を適切に評価し活用するための知識や技能を学習する技術科において学ぶべき中核的な概念として、システムが挙げられており<sup>7</sup>、上記のような複雑さは、前述の体制化方略とも関係するモジュールという機能要素で捨象され理解を助けることが可能となっている。

## 2.2 システムを念頭においた電気回路の表現

理科において学習する起電力は、単位が V であるが、これは電磁気学により  $J/C$  で組み立てられる。したがって、1 V の起電力は 1 C の電荷が負荷に流れることにより負荷において 1 J の仕事を行うことができる。次期学習指導要領中学校技術・家庭科技術分野では C エネルギー変換の技術の「(1) 生活や社会を支えるエネルギー変換の技術について調べる活動などを通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。電気、運動、熱の特性等の原理・法則と、エネルギーの変換や伝達等に関わる基礎的な技術の仕組み及び保守点検の必要性について理解する」とあるので、負荷が抵抗体であれば、ジュールの法則により負荷に 1 V の電圧を与え、1 A 流すことにより単位

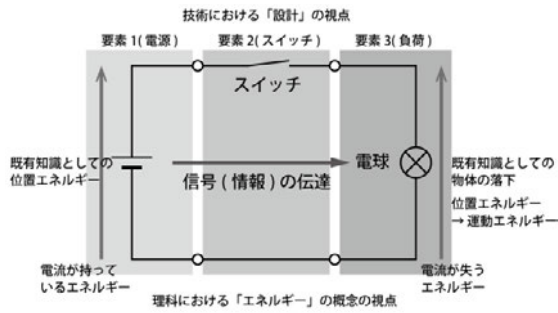


図2 技術における回路図の書き方. 各要素毎が端子の図記号によって連結されているのはモジュールへの分解性を示唆するためである.

時間あたり  $1\text{ J}$  の熱を発生するとする学習内容を構成することができる. これは, 物体を上昇させることにより, 位置エネルギーが増加し, 落下する際にそのエネルギーを運動エネルギーとして放出するということと対応が可能である. 以上から電気回路図の表記を本論文では縦書きに限定する. なお, この内容は学習方略のイメージ化方略に相当するため, あらわに教育すべきとは言えないものである. 一方, 電気回路図は  $90$  度回転させても流れる電流は変わらないため, 再生・再認といった暗記思考の学習観を持った生徒には有用感を与えるものではない. しかし, 深い理解が求められている現状から考慮すべき内容と言える. 上記を踏まえ技術において電気回路を書くとき図2のようになる. 起電力と負荷が対応し, スイッチにより左右の要素が接続されるようになっている. ここで, これらの回路要素の配置にも着目したい. このような配置も理科における回路図の表記と同様に回路の結果には影響しない. しかし, 技術における中核的概念としてシステムが指摘されていることを踏まえ, 学習内容の理解の容易さからもモジュールに分解して記述することは有効と言える.

### 3 負荷線

#### 3.1 負荷線と動作用点

負荷線とは, 負荷に加わる電圧と電流をグラフで示し

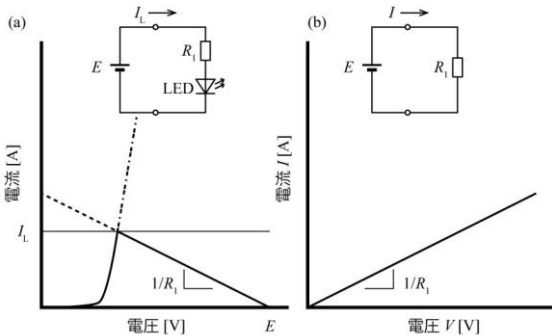


図3 負荷線. (a) LED 抵抗回路. (b) オームの法則

たものである. 負荷に電流を流した際にその両端に発生する逆起電力とも言える. 負荷線の具体的な利用方法として図 3(a)を示す. ここでは, LED と電流制限抵抗である抵抗器を乾電池 (起電力) に直列に接続したときの状況を示している. 電流制限抵抗と LED に流れる電流はそれぞれの負荷線の交点(これを動作用点と呼ぶ)によって決定できる. 図 3(a)に対し教育的な観点から詳しく説明するために図 3(b)を示す. 図 3(b)では, 横軸の成分と縦軸の成分の比例関係を示している. 中学校数学では 2 年次に一次関数, 3 年次に二次関数を指導する. 学習指導要領では, 「具体的な事象の中から二つの数量を取り出し, それらの変化や対応を調べることを通して, 一次関数について理解するとともに, 関数関係を見だし表現し考察する能力を養う。」とある. したがって, 技術を指導する段階でこのような学習内容を取り扱うことは可能である.

ここで先般の回路図の書き方の制限と振り返ってこの表記上の問題について考えたい. 今回は二つの電圧と電流という物理量を具体的な事象として取り扱う. この際, 具体的な説明はないままに, 横軸を独立変数に関わる軸と置き, 縦軸を従属変数に関わる軸とおき, 因果関係を表現している. これは, 算数において直交座標の使い方

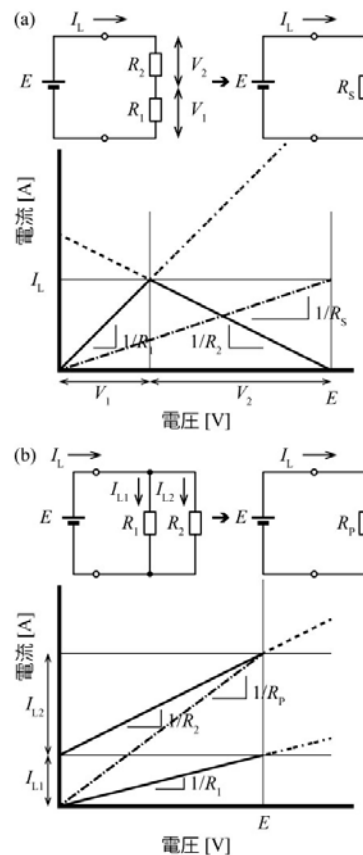


図4 合成抵抗. (a) 直列接続の場合, (b) 並列接続の場合.

を踏襲しているものの必然性は見当たらない。ここでは因果関係の原因に相当する量として横軸を独立変数として電圧、因果関係の結果に相当する量として縦軸を従属変数として電流とすると数学の作図技能を転移させやすくなる。なぜなら、教育において用いる電源は乾電池を始めとして電圧が一定の電圧電源が多いためである。このようにおくと、グラフの傾きは、負荷の抵抗値の逆数としてコンダクタンスとなる。図 3(a)では2つの要素からなる場合に相当し、後述するように直列接続の場合、電圧は分割するために、一方の電圧軸の向きを変えたとき、それぞれの線分の交点が動作点となる。

### 3.2 合成抵抗と合成容量

前項の負荷線を用いると、合成抵抗といった物理概念も理解が容易になる。図 4 に示すように抵抗器を直列接続、並列接続した場合、グラフの作図により、直列接続時および並列接続時の合成抵抗値が計算できる。これは前者がキルヒホッフの第2法則(電圧則)を、後者はキルヒホッフの第1法則(電流則)を暗に利用しており、深い理解を行う際には適当であると言える。このように理科の言語情報を、数学の知的技能を用いて表現し、技術では電気回路に流れる電流をグラフ化を通して理解するための工夫として用いることができている。

さらに上記のような作図による物理量の深い理解は、

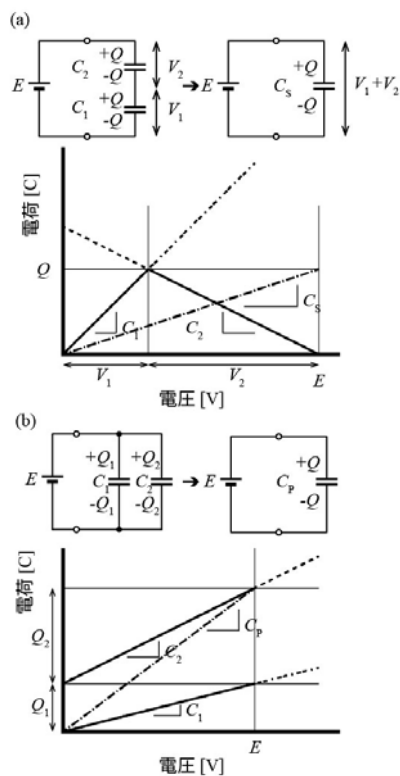


図 5 合成容量。(a) 直列接続の場合、(b) 並列接続の場合。

高等学校への接続を加味すると、静電容量についても同様の点が指摘できる。コンデンサは、小学校6年の理科で「電気を蓄えるもの」として取り扱われるが、高等学校の物理で直列接続および並列接続時の合成容量の計算方法(知的技能)が教授される。この際にもこのような図式的説明は有効となる。図5のように横軸に電圧を、縦軸に電荷を置いたとき、その傾きは静電容量となり、直列接続時は電圧を分割することで静電容量(線分の傾き)は減り(静電容量は減り)、並列接続時は電荷が増え、静電容量(線分の傾き)は増える(静電容量は増える)。これらの関係式を含む内容は中学校技術では扱えない。しかし、部品として、静電容量は大きい耐電圧が2.7V程度と小さい電気二重層キャパシタを、過放電に注意を要する二次電池の代替物として用いる際に実用性の高い耐電圧5V程度に増加させたい場合に用いることができる。これは直列接続を行うことによって、それぞれに加わる電圧が部品の定格を超えないことを示すことができるだけでなく、結果としての静電容量がもとの静電容量よりも減少することをグラフ化によって体験的に理解させることができる。また、555 タイマーICのような時定数(コンデンサを含む)を使用する回路で用いる場合、動作時間を設計させるために用いることもできる。

## 4 設計学習における負荷線による転移

### 4.1 設計学習における負荷線

技術において負荷線を用いた先行研究としては道法らの研究がある。道法らは情報機器を利用し計測を自動化することで、照明機器としてのLEDに対する保護抵抗の選択を促すというものであった<sup>8</sup>。しかし、負荷線そのものの価値についての言及は見られない。技術においては、環境や社会と調和した設計に基づき部品を組み立て機器の機能を実現する。これは必ずしも理想的な電氣的(物理的)特性や部品を追求する姿勢とは異なり、求められる制約条件に見合ったものを選択するトレードオフの概念(技術における習得すべき中核的概念<sup>9</sup>)と言える。そのため、用いる部品は製品を製造する程度の精度を持ったものを選択する必要があるため、結果として必ずしも均一なものではなく、一定の製造上の公差を持つことになる。たとえばLEDであれば、加える電圧により流れる電流が10倍変化する場合も生じる。このため、通常は、道法らが行っている通り、保護抵抗ないしは電流制限抵抗により、LEDに加わる電圧、すなわち順方向電圧の変化に対して負荷電流の変化が少なくなるように設計する。しかし、電流制限抵抗とも呼ぶように単に大きな電流が流れるの

を阻止するという視点だけでなく、適切に流れる電流を設定するために接続しているという視点も可能である。このために負荷線を用いることもできる。

#### 4.2 負荷線を用いたLEDの負荷電流の設計

LEDに負荷線を用いる際には前述の通り、LEDの順方向特性と電源電圧から伸ばした抵抗器の負荷線の交点により負荷電流を求めることができる。このため、仮にLEDへ与える負荷電流にディレーティングをかけ、絶対最大定格の0.8倍程度となるような電流値を設定すれば、その際にLEDの両端に加わる電圧と電流から最適な電流制限抵抗の値が求められる。

#### 4.3 負荷線を用いたリセットブルヒューズの適用

前項の回路には安全に対する配慮を盛り込むことを考え、ヒューズを用いることもできる。ヒューズは通常低融点の合金に過電流が一定時間流れることによるジュール熱によって溶断する。このため、保安が目的とはいえ、不便である。これに対し、近年小型電気機器の二次電池の保護用として再利用可能なリセットブルヒューズが用いられることが多くなってきた。リセットブルヒューズは、導体である炭素粒子を練りこんだ絶縁性樹脂でできており、過電流が一定時間流れることによって発生するジュール熱により絶縁性樹脂が膨張し、結果として炭素粒子によって作られた導電性ネットワークが部分的に切断し高抵抗化するものである。リセットブルヒューズは、過電流により加えた累積熱量により抵抗値が変化するため、応答時間は過電流の流し方によって変化する。ここでは、過電流を流す前と後の概念図を示すと、図6のように負荷電流 $I_L$ が過電流になろうとすると、リセットブルヒューズのコンダクタンスが急激に低下するため(傾きは

減少し)、結果として負荷において事故があっても適切に回路が遮断される。

エネルギー変換の技術における電気回路の設計については次期学習指導要領には、「問題を見い出して課題を設定し、電気回路又は力学的な機構等を構想して設計を具体化するとともに、製作の過程や結果の評価、改善及び修正について考えること。」とある。電気回路を構想し、設計する場合、負荷 $R_L$ に定格電流を100mAと設計する場合、100mAを大きく超える異常電流に対して例えば200mAのリセットブルヒューズを選択させることで、負荷や電源での事故を未然に防止することができる電気回路を設計することができる。

### 5 リセットブルヒューズを用いた電気回路の設計

#### 5.1 リセットブルヒューズの電気的特性

平易な電気回路としてLEDを負荷として用いた場合、流れる電流は単体の定格電流が20mA程度であることから数本をまとめても高々100mA程度である。これは用いる電源が乾電池と仮定すると容量が1000mAh程度であることから10時間利用できる点で適当な消費電流値であると言える。この程度の電流値を保持できるリセットブルヒューズに関しリトルヒューズ製のリセットブルヒューズ<sup>9</sup>の特性を調べた結果、表1となった。ここで室温の抵抗値とは、28℃の室温環境下での抵抗値をデジタルマルチメータで測定した値である。トリップ電流とはリセットブルヒューズが高抵抗化する電流値である。定格の値が小さくなるにつれて室温での抵抗値は低いことがわかる。

表1 リセットブルヒューズの特性

型番	定格電流 [mA]	トリップ電流 [mA]	室温での抵抗値 [ $\Omega$ ]
RXEF005	50 mA	100 mA	8.7 $\Omega$
RXEF010	100 mA	200 mA	4.6 $\Omega$
RXEF020	200 mA	400 mA	3.1 $\Omega$

#### 5.2 グラフを用いた過電流保護機能付きLED回路の設計

ここではリトルヒューズ製のリセットブルヒューズを用いた設計例を図7に示す。LEDは白色LEDを用いるため、電源は3V以上を必要とし、加えて放電終止電圧程度(0.8Vの4倍として3.2V)でも点灯させる必要性からアルカリマンガン乾電池4本で6V程度とする。また、単極単投スイッチを用いた調光の機能も付加している。

使用時は、スイッチS1を閉じLEDを点灯させる。また、スイッチS2を閉じ、光量を増加することもできる。回路が短絡した場合のような非常時には、リセットブル

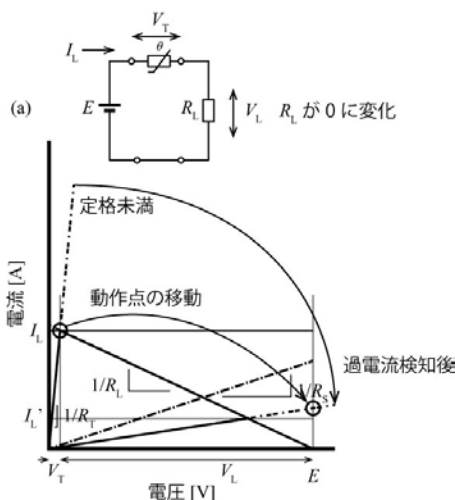


図6 リセットブルヒューズを用いた回路設計。

ヒューズにより自動的に電流値を制限し、過電流による乾電池の異常過熱等を防止する。

グラフを用いた過電流保護機能付きLED回路の設計については、以下に手順を示す。完成写真を図7(c)に示す。

1. 回路の設計要素として、直流電源としての乾電池の電源としての放電特性とLEDが発光するための乾電池の使用本数について整理する。この結果、乾電池3本(赤色、黄色等)ないしは4本(白色、青色等)を選択する。
2. 用いるLEDで発光させる電流値をデータシート等から定格以下となる電流値(ディレーティングをかけた値)から選択し、その合計値を算出する。ここではLEDとして、LED & Application TechnologiesのOSWT3166Bを用いたため、電流値の絶対最大定格は25 mAであることから20 mAを2本用いることとした。
3. 2で得た合計値を上回る値を定格とするリセットブルヒューズを選択する。ここでは50 mAとした。
4. 用いるLEDの電圧電流特性を得る。ここでは20 mA付近の電圧電流のみ取得できればよいが、全体の測定結果を図7(b)に示す。

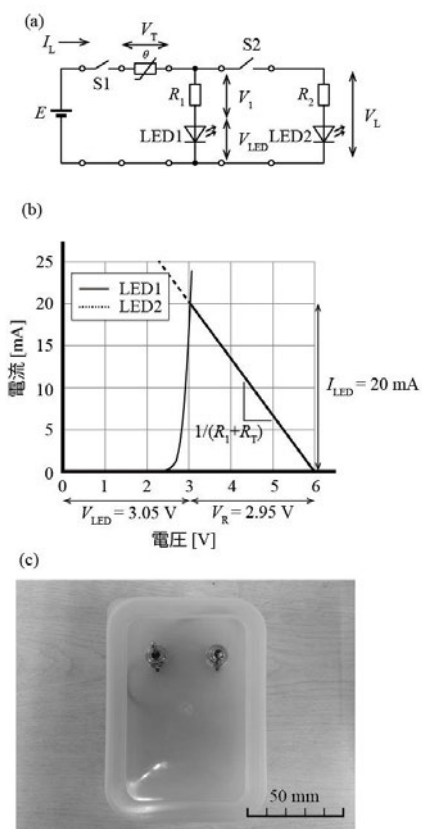


図7 グラフを用いた過電流保護機能付きLED回路の設計。(a) 回路図。(b) 実測したLEDの電圧電流特性と負荷線、動作点。(c) 製作品写真。

5. 電流制限抵抗を設計する。なお、この際は電流制限抵抗にリセットブルヒューズの抵抗値を盛り込む。図7(b)をもとに、ここでは抵抗値は147.5  $\Omega$ となるが、リセットブルヒューズ分の抵抗値(8.7  $\Omega$ )があるため、用いる抵抗  $R_1, R_2$ は130  $\Omega$ とする。

## 6 まとめ

本論文では、教育の現代的課題として教科の深い理解を行うために、数学、理科、技術で横断的に課題解決を行なうために学習方略の重要性を指摘した。特に回路図の表記法に制限を設けることにより、素朴理論である物体の落下に関する知識から起電力のはたらきや負荷でのエネルギー変換に対応づけることが可能となり、電気に関わるエネルギー変換に関する技術の設計の学習に役立つことを指摘した。またそのような図式化の応用として、負荷線の有用性に着目し、数学における作図を不可視な物理量の理解の補助に関係づけた。作図による設計の具体例として過電流保護機能を持つLED回路の製作例を示した。

## 参考文献

1. 文部科学省「学習指導要領(平成29年3月公示)」(2017).
2. 石井英真『今求められる学力と学びとは-コンピテンシー・ベースのカリキュラムの光と影-』日本標準(2015)14.
3. Robert M. Gagné, Walter W. Wager, Katharine C. Golas John M. Keller『インストラクショナルデザインの原理』, 鈴木克明, 岩崎信監訳, 北大路書房(2007)57-64.
4. 辰野知壽『学習方略の心理学-賢い学習者の育て方』図書文化社(1997).
5. 理科の世界, 大日本図書(2014)158-177.
6. 黒田徹, 馬場清太郎, 下間憲之「回路図の描き方コンセンサス」, 『トランジスタ技術SPECIAL No.136 電気の単位から! 回路図の見方・読み方・描き方』, CQ出版社(2016)60.
7. 西岡加名恵『アクティブ・ラーニングをどう充実させるか 資質・能力を育てるパフォーマンス評価』明治図書(2016)76-78.
8. 道法浩孝, 山岡慎太郎『PC計測・設計シミュレーションを導入した電気回路設計学習教材の開発』「日本産業技術教育学会誌」, 第58巻, 第2号(2016)91-99.
9. Littelfuse 「POLYSWITCH RESETTABLE DEVICES Radial-Leaded Devices」 [http://www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/resettable\\_ptcs/littelfuse\\_ptc\\_rline\\_catalog\\_datasheet.pdf](http://www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/resettable_ptcs/littelfuse_ptc_rline_catalog_datasheet.pdf) (閲覧日: 2017年8月18日).