SURE 静岡大学学術リポジトリ
Shizuoka University REpository

Development of Boost DC Current Source and Class Proposal for Fostering the Ability of Solving Technological Problems

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2019-12-24
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 嶋, 崇志, 改正, 清広
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00026965

電気回路設計による技術的課題解決力の育成に向けた昇圧型直流電流源の開発と授業提案

Development of Boost DC Current Source and Class Proposal for Fostering the Ability of Solving Technological Problems

嶋　崇志[1]，改正　清広[2]
Takashi SHIMA,　Kiyohiro KAISEI

（令和元年 12 月 2 日受理）

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop teaching materials for fostering the ability of solving technological problems through the design of electrical circuits in technology education. LED light boosting by Joule-thief circuit, which can be lighten with only one 1.5V battery cell, was chosen by a high degree of freedom in design. However, the voltage-current characteristic of each LED part is not same. Therefore, a boost type DC current source with a simple configuration was developed in order to easily use for learning of circuit design using several LED parts as energy conversion teaching material. Lesson design for fostering the ability of solving technological problem suing current source was suggested.

１．はじめに

日本産業技術教育学会により発刊された「21 世紀の技術教育(改訂)」[1]では，技術教育で育む固有の能力として，技術的課題解決力が示されている。技術的課題解決力とは，「身近な問題から環境問題に至るさまざまな問題を技術的視点で設定し，課題化して，一定の制約条件のもとで，ものづくり等を通して最適化を図りつつ解決する能力」[1]である。同文献において，この能力を育むための方法と学習活動が図 1 のように示されている。これは，「創造の動機」から始まり，「設計・計画」，「製作・制作・育成」，「成果の評価」の 4 過程を欠落なくたどらせるというプロセスである。評価・修正を繰り返しなが

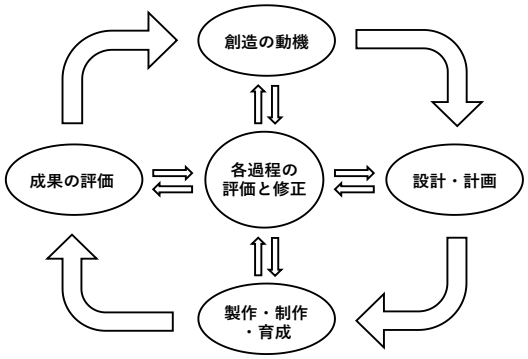


図 1　技術教育固有の方法[1]

1 教育学研究科学校教育研究専攻技術教育専修
2 技術教育系列

ら合理的で最適な解を導くこの方法を連続的に体験することにより，技術的課題解決力を高めていく。この学習過程を，平成 29 年告示中学校学習指導要領解説(技術・家庭編)において示される技術分野の学習過程と比較する。技術分野の学習過程を図 2 に示す。図 1，2 を比較すると，技術分野の学習過程は，図 1 に示す学習過程の前後に，「既存の技術の理解」と「次の問題の解決の視点」が組み込まれている点で若干の違いこそあるものの，その間の過程は表現の違いを除けば一致する。このことから，技術的課題解決力を育成する技術教育固有の方法が，中学校技術科における学習過程の大枠として位置づけられるであろう。

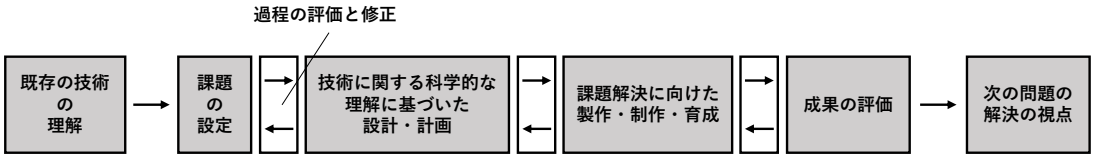
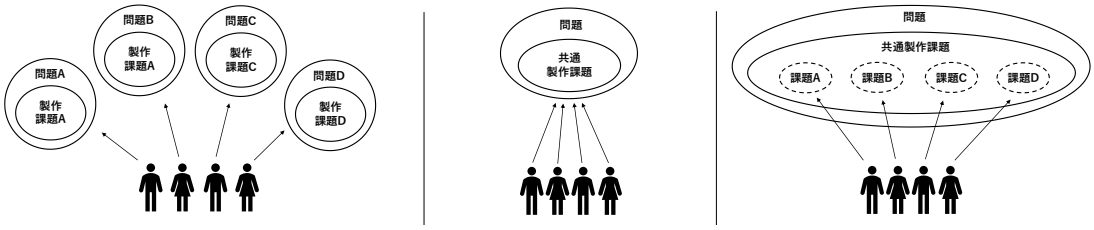


図 2　技術分野の学習過程[2]

図 3 に，技術科で想定される課題設定の在り方を示す。ここまで述べてきた内容から，技術科では，図 3 の(a)に示すように，学習者が生活や社会の中からそれぞれ異なる問題を見つけ製作課題を設定し，解決できるまで図 1 の過程をたどることが理想的である。しかしながら，授業時間数が少なく学習内容の多い技術科にとって，(a)のような製作課題の設定は難しい。一方で，製作する課題を限定した(b)のような学習では，問題を見つけて製作課題を設定することが省かれた合目的的ではない授業になるため，技術科が求める学習とは合致しないうえに，学習者の学習意欲が低減してしまうという懸念がある[3]。ここに技術科の難しさと限界が見える。これらの制約を前提に，要素の自由度を上げ共通製作課題の幅を広げることで，(a)に近づけた学習が提供できるものと考えられる。これは(c)に示すようなイメージである。これを，エネルギー変換領域において電気回路を用いて行うことが本研究の目的であり，本教材開発にあたっての立ち位置である。電気回路は，要素の選択数が多いため，自由度の高い学習が展開できる。さらに，ブレッドボードを用いることで容易に動作の確認ができ，評価に基づく回路の修正(再設計)ができるため，技術的課題解決力を育成する学習過程の遂行に適しているといえる[4]。



(a) 個人製作課題　　(b) 小集団・全体の共通製作課題　　(c) 共通製作課題中の個人課題

図 3　技術科における製作課題設定の在り方

そこで本研究では，簡易的に LED を電流制御できる昇圧型直流電流源の開発を行う。LED は，発光色や個数，半減角，明るさ等選択要素が多く，本研究の目的に合致した電気素子であり，先行研究からも，技術科における有用性は明らかである[5，6]。一方で，LED などの半導体は，個体ごとに異なる順電圧-順電流特性(V_F - I_F特性)をもつことから，電流源や定電流回路による駆動，もしくは適切な電流制限抵抗を接続した回路での駆動が必要である[7]。これらが技術科において LED を用いた設計学習を困難にする要因として考えられている[8]。特に後者

に関しては，適切な電流制限抵抗値を選定するために，V_F - I_F特性に基づく複雑な計算を設計の都度行う必要があるため，中学生の発達段階では，難易度の高い駆動法と言える。このため，本研究では，簡単な計算で LED を電流制御できる回路の製作を行うべく前者の駆動方法を採用した。

本稿では，はじめに発振型昇圧回路の一種であるジュールシーフ回路用いた昇圧型直流電流源の開発までの流れを示し，性能評価結果を基にした教材及び授業提案を行う。

３．LED の簡易駆動に向けた昇圧型直流電流源の開発

３．１．ジュールシーフ回路の概要と課題

筆者らは，本研究にあたり，技術科において LED を乾電池 1 本(公称電圧 1.5 V)で簡易的に駆動する方法としてジュールシーフ回路に着目し，教材化に関する研究を進めてきた。ジュールシーフ回路は，図 4 に示すように，電源と 2 つのコイル，トランジスタ，負荷で構成される部品点数の少ない発振型昇圧回路である[9]。電磁誘導とコイルの充放電特性を利用し，電源電圧 E よりも高い電圧を負荷に与えることができるものである[10]。通常，LED の点灯には公称電圧 1.5 V の乾電池 2～3 本の電圧を必要とする。しかし，昇圧技術を取り入れることで乾電池 1 本分の電圧でも点灯することができる。実生活でも多く利用される電圧変換技術を簡単な回路で実現しているジュールシーフ回路は，技術教育の教材として高い有用性が期待できる。

分析を進める中で，ジュールシーフ回路をパルス電流源のように利用できる条件があることを明らかにし，絶対最大定格を守った LED 回路設計が簡易化できることを示唆している[11]。具体的には，LED を直列接続で増減したときに，ピーク電流値が等しくなるよう自動的に出力する電圧を調整してくれるというものである。その実験結果を図 5 に示す。図 5 の実線は出力電圧，破線は一周期における出力電圧 90 %以上の割合を示した Duty 比である。図 5 に示す実験条件は，電源 E : 直流安定化電源(TEXIO，PR18-1.2A)1.5 V，コイルL_1，L_2 : トロイダルコア(森宮電機，TR-18-10-6)に H-PVC(協和ハーモネット，導体直径 0.65 mm)を 15 回巻き付けて製作した 250 μH(1 : 1)のトロイダルコイル，トランジスタ Q : UTC 製トランジスタ 2SC2655(Y)，抵抗R_B : 炭素皮膜抵抗 20 kΩ，負荷R_L : 超高輝度青色 LED(OptoSupply，OSUB5111A-ST)である。図 5 に示すように，LED を直列接続で増加した場合，ピーク電流値が一定となるように LED にかかる電圧が比例的に増加している。他方，Duty 比は大きく減少している。これは，出力電圧が増加したことで，1 周期における放電時間の割合が減少したことによるものである[11]。このように，LED を増加してもピーク電流値は等しくなるが，Duty 比の減少により，輝度の減少を招いてしまうことが課題として挙げられた。

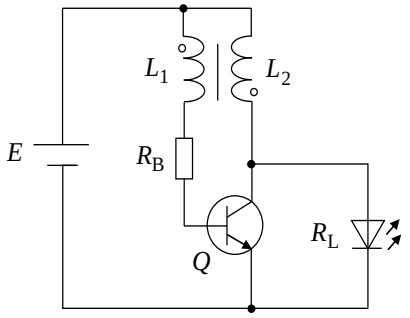


図 4　ジュールシーフ回路図

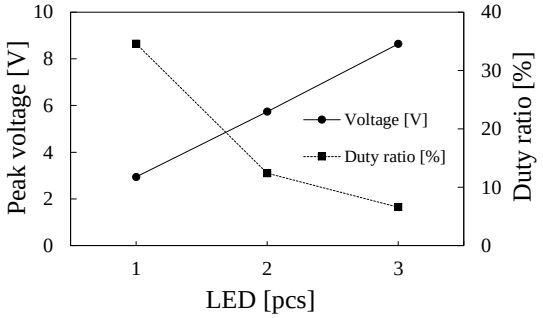


図 5　ピーク出力電圧と Duty 比の関係性

３．２．設計学習に有用な直流電流源の開発

3.1 節で挙げられた課題を解決するために，ジュールシーフ回路が生成したパルス波形を直流化し，定電流フィードバック機能を付加する方法が考えられる。ジュールシーフ回路のパルス波形は，ダイオードとコンデンサを用いることで容易に直流化することができる[12]。先行研究では，定電流フィードバックする方法としてトランジスタのベース-エミッタ電圧($V_{BE} \cong 0.6$ V)を利用した構成の回路が提案されている。回路図を図 6 に示す。LED に流れる電流はトランジスタ Q1 の$V_{BE} \div R_{adj}$により容易に決定され，定電流フィードバックによる損失はV_{BE}のみという利点がある。しかしながら，試作品を評価・改善する段階の活動においてある欠点を有する。設計変更を行う際には，LED を回路から取り外す作業が行われる。その際，ジュールシーフ回路の特性上コンデンサは数十 V 以上の高電圧で充電される。その状態で LED を回路に接続した場合，LED に高電圧がかかり劣化もしくは破損する。このため，図 6 の回路において再設計を行う際には，次のようなプロセスを踏む必要がある。1. 回路を電源から遮断する，2. LED を取り外す，3. コンデンサを短絡し接続する，4. 変更後の LED を接続する，5. 回路を電源に繋ぐ。これを設計変更の都度行う必要がある。特に，コンデンサを短絡させるような行為を生徒に行わせることは安全上の都合から避けるべきであるため，設計を重視する教材に用いることは適切ではない。

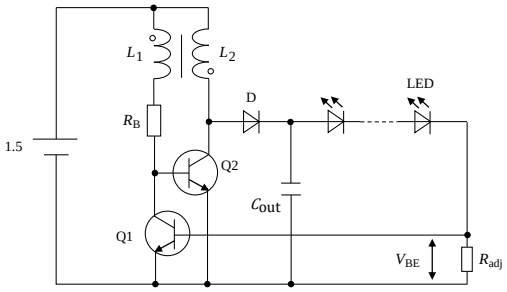


図 6　トランジスタによる FB 回路[13]

このような背景のもと，本研究では，再設計活動の中でも安全かつ適切に LED を駆動することができる回路として，図 7 に示す出力可変型低飽和レギュレータ(以下，LDO)を用いた昇圧型直流電流源の開発を行った。

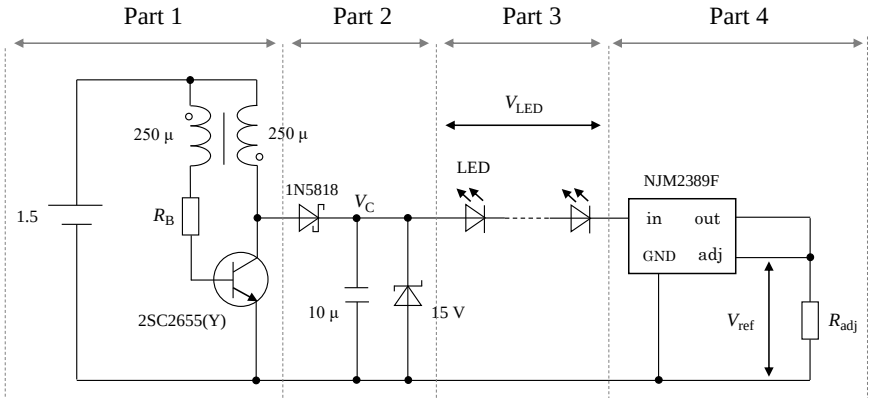


図 7　LDO による FB 回路

LDO は一般的に任意の電圧生成に用いられるが，本研究では接続方法の工夫により電流生成素子として用いている。この回路は，左から右に向けて，発振昇圧部(Part 1)，平滑部(Part 2)，負荷部(Part 3)，電流フィードバック部(Part 4)の 4 つの部分に分けられる。Part 4 では，LDO の参照電圧($V_{ref} \cong 1.26$ V)[14]を用いた定電流フィードバックが行われる。図 6 とは異なり，高電圧で充電されたコンデンサに LED を接続した場合でも，$V_C - (V_{LED} + V_{ref})$電圧は LDO にかか

るため，LED に高電圧がかかることはない。これにより，安全かつ適切に設計変更が行える電流源として利用することができる。また，Part1 のR_Bの値によって電源から回路に入力される電力を調整することができるため，負荷の消費電力に合わせて回路を最小電力で駆動することができる。

３．３．性能評価

開発した電流源について，定電流範囲とエネルギー利用効率，負荷過渡応答時間，リップル率の 4 項目に関する性能評価を行った。その中で本稿では，定電流範囲とエネルギー利用効率の 2 点に関しての性能評価結果を示す。残りの 2 点に関しては，出力電流 5 mA の条件において負荷過渡応答時間がミリ秒オーダーであり，リップル率も 5 %未満であったことから，技術科教材として問題なく使用できることは確認されている。

３．３．１．定電流範囲

図 7 に示す回路内のR_Bに炭素皮膜抵抗 1 kΩ を用いて，電流源が出力する各電流値における定電流範囲を調べた。出力する電流値は，R_{adj}を変化させて生成した 3，5，7，10 mA の 4 条件とし，高輝度赤色 LED(OptoSupply，OSHR5161A-QR)を直列接続で増加したときの電流値を図 8 に示す。図 8 に示す結果から，各電流値において高精度の定電流を供給できていることがわかる。また，それが複数個の LED を駆動できる範囲であることから十分な実用性を有することが確認された。出力する電流値が増加するにつれて次第に定電流範囲は減少するが，これは電源から回路に入力される電力が不足したことによる影響であるため，R_Bの抵抗値を減少することで解決することができる。

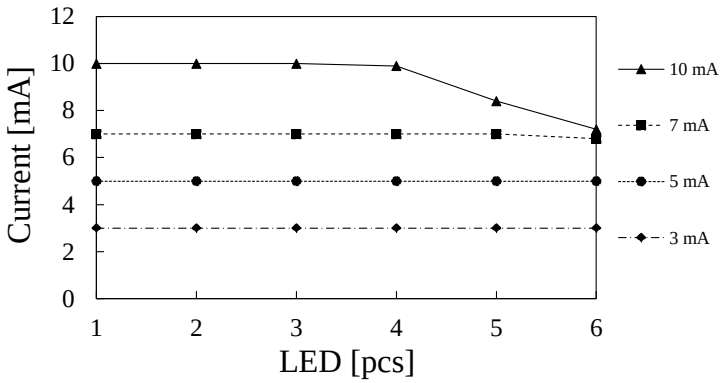


図 8　電流値と定電流範囲の関係

３．３．２．エネルギー利用効率と向上

出力電流値 5 mA の条件において，回路に入力された電力と LED で消費される電力との比からエネルギー利用効率を求めた。入力電力の測定に関しては，回路の前に入力電力測定用抵抗を接続し，そこに発生する電圧から算出する方法が考えられる。しかし，コイルの充放電を利用した発振回路の場合，測定用抵抗に流れる電流はインダクタ電流(のこぎり波)であり，変動する電圧降下が起こるため，それらを考慮した測定を行う必要がある。そこで，図 7 の発振昇圧部に抵抗とコンデンサを加えた図 9 に示す測定回路を用いて，次に示す手順で測定を行った。

1. a - b 間に炭素皮膜抵抗 0.1 Ω(以下，実測値の 0.098 Ω と表記)を挿入する。
2. 0.098 Ω に流れるインダクタ電流を 470 μF のコンデンサにより平滑化し，デジタルマルチメータ(Crenova，MS8233D)で測定した b - c 間電圧V_{bc}が 1.5 V になるように電源電圧 E を増加する。これにより，0.098 Ω を挿入したことによる電圧降下の影響を排除でき，Current source 部を 1.5 V で駆動したとみなすことができる。
3. デジタルマルチメータで，0.098 Ω の両端電圧を測定する。デジタルマルチメータには，インダクタ電流× 0.098 Ω により発生する変動電圧の平均値(平均電圧)が表示されるため，平均電圧を 0.098 Ω で割ることで平均の入力電流I_{in}を算出することができる。
4. Current source 部は 0.098 Ω と直列接続であるため，入力電流 I_{in}は等しい。このため，V_{ab} ÷ 0.098 × 1.5 によって Current source 部への入力電力を算出することができる。

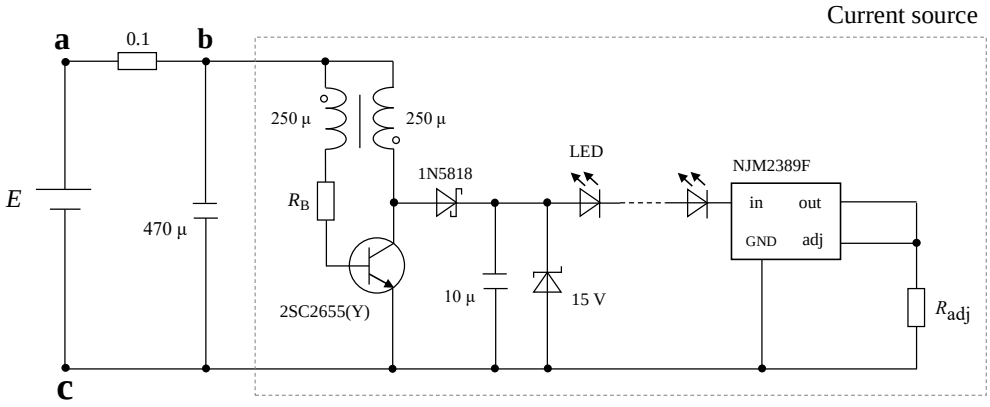


図 9　エネルギー利用効率測定回路図

上記の手順により求められた入力電力と LED で消費される電力(5 mA 時)との比から求められるエネルギー利用効率について，3.3.1 項と同条件で高輝度赤色 LED(OptoSupply，OSHR5161A-QR)を直列接続で増加したときの結果を図 10 の実線に示す。図 10 の実線に示す結果から，LED が s 個の場合はわずか 5 %程度で，5 個の場合でも 25 %程度と非常に低効率であることがわかる。ここで，電流源全体ではなく，図 7 に示す Part 3，4 にあたる負荷と LDO での損失に目を向ける。Part 3，4 に入力される電力は，Part 3 のコンデンサの電圧と LED に流れる電流(5 mA)との積で算出できる。それらが LED と LDO でどのような割合で消費されるか表したものを図 11 に示す。なお，ここでは，LDO での損失を「参照電圧での損失にあたる電流フィードバック損失」と「LDO の入出力間損

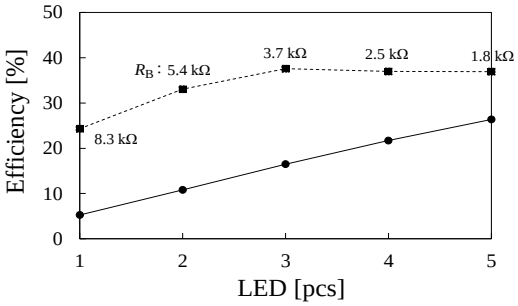


図 10　電流源のエネルギー利用効率

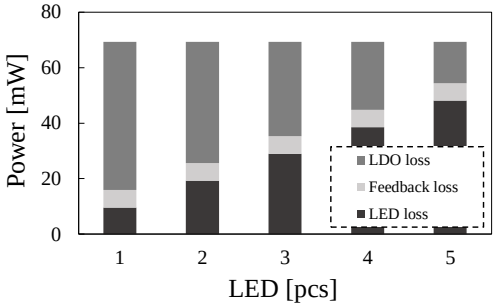


図 11　Part3, 4 での使用電力比

失」の 2 つに分けて考えることとする。「電流フィードバック損失」は，$V_{ref} \times I_{LED}$で算出され，「LDO の入出力間損失」は，$(V_C - V_{LED} - V_{ref}) \times I_{LED}$で算出できる。図 11 に示すように，Part 3，4 に入力された電力の多くは LDO の入出力間で損失していることがわかる。特に，LED が 3 個以下の場合は約 50 %以上に上っている。他方の電流フィードバック損失は電流源の設計上やむを得ない損失であり，これ以上の減少は見込めない。このことから，LDO の入出力間損失を減らすことが，効率向上に寄与することになる。

データシート[14]より，本研究で使用している LDO(NJM2389F)は，5 mA を出力する際の最小入出力間電圧差が約 0.02 V である。つまり，LDO の入出力間損失がほとんどない状態で回路を駆動することができる。Part 3，4 に入力される電力は Part 1 のR_Bで調整することができるため，LDO の入出力間損失が最小になるときの最適R_Bで駆動した際のエネルギー利用効率を調べた。その結果を図 10 の破線に示す。破線部に示したのは最適R_Bの値である。実線と破線を比較すると，最適R_Bで駆動することにより，最適値で約 40 %まで向上することが確認された。

続いて，さらなる効率向上を目的とし，Part 1 内の最適トランジスタの選定を行った。トランジスタは，ベース-エミッタ間電圧V_{BE}とコレクタ-エミッタ間飽和電圧$V_{CE(sat)}$で発生する損失が Part 1 での損失に影響を与える。トランジスタに流れる電流($I_C = h_{FE} \times I_B$)の関係を踏まえてV_{BE}と$V_{CE(sat)}$での損失を比較すると，$V_{CE(sat)}$はV_{BE}に比べて大きな損失が発生することになる。そこで，$V_{CE(sat)}$の大きさによる利用効率への影響を明らかにするために，コレクタ電流 100 mA の条件において，UTC 製トランジスタ 2SC2655(Y)よりも$V_{CE(sat)}$の大きな TOSHIBA 製トランジスタ 2SC2458(GR)と，$V_{CE(sat)}$の小さな UTC 製トランジスタ 2SD468L(C)を選定し[16][17]，エネルギー利用効率の比較を行った。実験は，図 9 に示す回路を用いて LED に流れる電流を 5 mA に設定し，高輝度赤色 LED(OptoSupply，OSHR5161A-QR)5 個を最適R_Bで駆動した条件で行った。その結果を表 1 に示す。表 1 内の$V_{CE(sat)}$値は，各データシートの表内から読み取った値である。表 1 に示すように，トランジスタの$V_{CE(sat)}$は，小さい方から 2SD468L(C)，2SC2655(Y)，2SC2458(GR)である。エネルギー利用効率の高さは，前述した順番と一致する。この結果から，$V_{CE(sat)}$とエネルギー利用効率の関係性が明らかとなり，最適トランジスタは，$V_{CE(sat)}$の小さなトランジスタであることが示唆された。

表 1　$V_{CE(sat)}$の異なるトランジスタによるエネルギー利用効率の比較

型番	$V_{CE(sat)}$(mV)	入力電力(mW)	出力電力(mW)	効率(%)
2SC2458(GR)	130	15.43	4.83	31.30
2SC2655(Y)	43	11.90	4.83	40.59
2SD468L(C)	40	11.23	4.83	43.01

4．授業提案

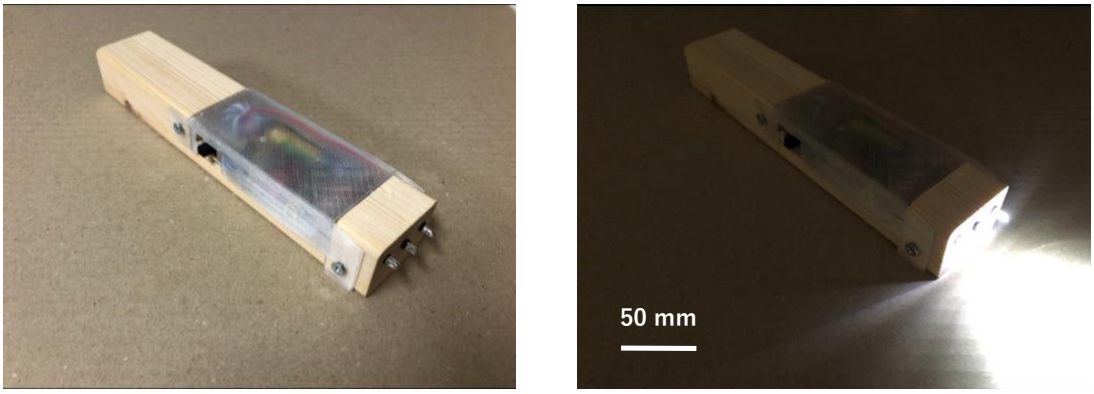
本章では，開発及び評価した電流源を用いた授業展開を示す。なお，教材は「乾電池 1 本で光る災害用 LED 懐中電灯」とした。製作した教材の写真を図 12 に示す。図 12(b)は，超高輝度白色 LED(OptoSupply，OSWT3166B)3 個を 5 mA で点灯させた時の様子である。懐中電灯は，木材を鋸とノミを用いて加工した土台にブレッドボード型ユニバーサル基板と電池ボックスを実装するというシンプルな構成である。基板がむき出しになることを防ぐために取り付けられ

たカバーは，3D プリンタにより印刷した。懐中電灯を選択した理由は，明るさや色，照射角度など設計要素が多く，生徒が個々で異なる課題を設定することができ，図 3(C)に示す授業が展開できると考えたからである。学習指導要領への対応としては，C 領域(エネルギー変換の技術)において，(1) - イに対応させ，昇圧技術に関して実感を伴いながら理解すること，また(2) - イに対応させ，図 2 に示したプロセスで設計を具体化する活動を中心に行う。

授業は，表 2 に示す 4 段階構成とした。本稿では，本研究が目的としている技術的課題解決力の育成において中核をなす活動が含まれる第 2 段階と第 3 段階の活動について示す。活動内容の詳細は表 3 の通りである。

第 2 段階では，電流源を用いた設計を具体化する活動に向けた基礎実験を行う。技術的課題解決力を育成するためのプロセスは，図 1 に示すように，試作品を製作し，試作品の評価・改善を繰り返すことで構想したものに近づけるというものである。構想の実現に向けて設計を具体化する活動を行うにあたっては，その学習を行えるだけの知識及び技能を有していることが前提となる。このため，設計を具体化する活動(第 3 段階)を行うための準備期間として第 2 段階を設けた。ここでの定着度が第 3 段階での活動に大きく影響するものと考えられる。設計の具体化において重要となるブレッドボードの基本的な操作については，第 1 段階のジュールシーフ回路の製作と併せて習得済みとして進めることとする。

第 3 段階では，第 2 段階の基礎実験をもとにした構想の決定，試作品の製作，試作品をもとにして設計を具体化する活動を行う。この段階での活動が図 1 に示すプロセスと一致し，技術的課題解決力の育成に寄与することになる。



(a) 消灯時　　(b) 点灯時

図 12　製作教材

表 2　4 段階で表した授業展開

段階	活動内容
1	導入・ジュールシーフ回路を用いた昇圧の実感を伴った理解
2	電流源を用いた設計を具体化する活動に向けた基礎実験
3	基礎実験をもとにした設計を具体化する活動
4	外枠の製作・実装

表 3　第 2，3 段階での活動内容の詳細

第 2 段階	第 3 段階
＜電流値の計算方法を習得＞ LED に流れる電流値は，「$1.26 \div R_{adj}$」で決定されることを理解し，目的とした電流値をつくるためのR_{adj}を算出できるようにする。また，試作品製作時の参考になるよう，電流値と LED の明るさの関係性を掴む。 ＜個数・半減角による照射面積の違いを理解＞ 半減角の異なる LED を比較し，照射面積の違いに気付かせる。また，照射面積は LED の数で変化させられることも併せて理解させる。 ＜回路の最適電力駆動法の習得＞ 3.3.2 項の実験から，電流源は LED の数と電流値によって最適なR_B値を有している。そこで，自らが設計した回路を最適駆動電力で動作させるためのR_B値の調整方法を理解する。R_Bに可変抵抗を用いた場合について示す。方法は，テスタでR_{adj}の両端が 1.26 V になっているかを確かめながら，R_B値の抵抗値を増加させることである。	＜自分だけの懐中電灯を構想＞ 使用場所・使用状況を考慮した懐中電灯を構想する。その際に，明るさや照射面積などできるだけ具体的に構想させる。 ＜構想に向けた設計の具体化＞ ① 第 2 段階で行った 3 つの基礎実験で得られたデータや感覚的な理解をもとに，構想を実現できると考えられる試作品を製作する。 ② その後，試作品を評価し，構想との違いを整理することで改善点を明確にする。 ③ 改善点をさらに具体的に示す。電流値や LED の個数等を詳細に整理する。 ④ ③で整理した値をもとに再設計を行う。 ⑤ 再設計後，構想と一致するかを評価する。 ※①～⑤までのプロセスを構想と一致するまで繰り返すことで技術的課題解決力を高めていく。その際ワークシートを活用し，プロセスを重視するよう配慮する。

５．おわりに

本研究では，中学校技術科エネルギー変換領域において，電気回路設計の具体化による技術的課題解決力の育成を目的として，昇圧型直流電流源の開発及び性能評価を行った。また，その教材を利用した授業を提案した。まず，中学校技術科における学習過程の大枠として，技術的課題解決力を育成する技術教育固有の方法を示し，製作課題設定の在り方を検討した。検討した学習を行うために，選択要素が豊富にある LED に着目し，電流制御が必要な LED を簡易的に駆動できる昇圧型直流電流源を開発した。性能評価の結果，回路のエネルギー利用効率は 40 %台と低いものの，本研究が目的とする学習を十分に行える種々の性能を有することが明らかとなった。これにより，中学生が電気回路の設計において抱えていたつまずきの解消に繋がると期待できる。また，回路の設計が簡易化されたことで，電気回路を用いた技術的課題解決力育成のためのプロセスを取り入れられる可能性が示唆され，本稿ではその一例を提案した。

今後は，エネルギー利用効率の更なる向上を検討するとともに，提案した教材と授業により，技術的課題解決力が育成するかを授業実践により明らかにしていく。

参考文献

[1] 日本産業技術教育学会：21 世紀の技術教育(改訂)，p.4，6(2012)，http://www.jste.jp/main/-data/21te-n.pdf(最終アクセス日：2019 年 7 月 18 日)

[2] 文部科学省：中学校学習指導要領解説　技術・家庭編，開隆堂出版，pp.18-23(2017)
[3] 紅林秀治：設計を中核とした技術教育の提案，教科開発学論集，第 3 号，pp.151-158(2015)
[4] 山口亮輔：生徒の構想を具体化できる LED 照明器具の題材開発，日本産業技術教育学会誌，第 54 巻，第 4 号，pp.237-240(2012)
[5] 中原久志・森山潤・上野耕史：LED 照明機器の製作を通して工夫・創造力を育成するエネルギー変換学習の題材開発と試行的実践，日本産業技術教育学会誌，第 58 巻，第 1 号，pp.21-29(2016)
[6] 藤川聡・安東茂樹：エネルギー変換に対する生徒の関心・意欲を育てる「青色 LED インテリアランプ」の開発と実践，日本産業技術教育学会誌，第 53 巻，第 2 号，pp.107-114(2011)
[7] 塚本勝孝・延原高志：高輝度/パワーLED 活用のすすめ，溝口早苗：高輝度/パワーLED の活用テクニック，CQ 出版社，pp.9-20(2008)
[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，pp.91-99(2016)
[9] Ranadip Roy：Harnessing power in the apartment from the water supply with overvoltage protection, International Journal of Issue 7，pp.14211-14214(2017)
[10] Eka Nuryanto Budisusila, Bustanul Artifin：Joule-thief circuit performance for electricity Conference Series，Materials Science and Engineering 190，pp.1-6(2017)
[11] 嶋崇志・改正清広：教材化に向けたジュールシーフ回路におけるパルス電流源的動作の有用性の検討，日本産業技術教育学会誌，第 61 巻，第 2 号，pp.147-155(2019)
[12] Sajjad Haidar：MOSFET-based Joule Thief steps up voltage，EDN Network，February 23，2015，https://www.edn.com/design/power-management/4438702/MOSFET-based-Joule-Thief-steps-up-voltage(最終アクセス日：2019 年 5 月 24 日)
[13] 赤松武史：1 石ポケット LED ライト，トランジスタ技術 2000 年 4 月号, CQ 出版社, pp.270-271(2000)
[14] 新日本無線：出力可変型低飽和レギュレータ(NJM2387/89)データシート，pp.1-5(2016)
[15] UNISONIC TECHNOLOGIES CO., LTD：2SC2655 データシート，p.3(2016)
[16] TOSHIBA：2SC2458 データシート，p.2(2004)
[17] UNISONIC TECHNOLOGIES CO., LTD：2SD468L データシート，p.3(2016)