

小中学校理科・高等学校物理における 「電池の内部抵抗」の取り扱いⅢ

ー 並列に接続した豆電球型LEDの明るさはどうなるのか、並列に接続した電池につながれた電球の明るさ・モーターのまわり方はどうなるのか ー

重松 宏武・内田由美子^{*1}・栗田 克弘

Handling of "Internal Resistance of a Cell"
in Elementary and Junior High School Science and High School Physics III

SHIGEMATSU Hirotake, UCHITA Yumiko^{*1}, KURITA Katsuhiko
(Received August 3, 2017)

キーワード：電池の内部抵抗、豆電球型LEDの照度、モーターのまわり方、エネルギー教育、理科

はじめに

『電池に2個並列につないだ電球の明るさと1個のみにつないだ電球の明るさの相違』に関して、電池の内部抵抗を考慮するか否かによる違いを、パートⅠ¹⁾では数式を活用した半定量的考察、パートⅡ²⁾では実測による評価・検討を行った。これらの結果から、電池の内部抵抗を学習しない小中学校理科においては、明るさの差を生じさせないためにも、豆電球-充電電池の組み合わせ（ただし、豆電球はある特定の定格値を持つものに限る）、またはLED-各種電池（アルカリ電池、マンガン電池、充電電池）の組み合わせを用いることが望ましいことが示された。なお、後者においては、リードフレームがむき出ししている汎用型LED（発光させるために必要な順電圧が乾電池1個分の電圧より高い特性を持つ）を用いたことより、乾電池1個の起電力ではLEDが発光することができず、直列つなぎした乾電池2個（起電力約3V）とそれら2組による並列つなぎされたものを電力として用いた。しかし、近年では取扱いが容易な豆電球型LED（E10ソケット対応）や乾電池1個でも発光する昇圧回路が組み込まれた低電圧型LEDなども販売されており、これらを活用することにより、より簡単に実験を行なうことが可能となっている。そのため、本論文（パートⅢ）においては豆電球型LEDと低電圧型LEDの有効性を検討するために、これらLEDを用いて、再度、電池の内部抵抗の有無が明るさにどのように影響するかを比較検討を行った結果を報告する。最終目的はパートⅠ¹⁾、Ⅱ²⁾同様に、未来の指導者、特に小中学校理科教員を目指す大学生の電気分野における基礎知識向上のための情報提供を行なうこと、さらに、矛盾の無い実験指導を将来行なうための条件（内部抵抗のある電池に2個並列につないだ電球の明るさと1個のみにつないだ電球の明るさに変化が生じない条件）を提供し、活用してもらうことである。

なお、小学校第4学年の単元「電気の働き」内では『乾電池の数やつなぎ方を変えると、豆電球の明るさやモーターの回り方が変わる』ことを学習することが小学校学習指導要領概説に示されている³⁾。つまり、ここでは豆電球やモーターそれぞれ1個に対して、乾電池の数とつなぎ方の違いによる変化を議論しており、我々が採用した電池の数を固定し、電球の数を変える方法とは異なる。そこで、本論文後半（第2章）では学習指導要領に記載されている回路を採用し、『内部抵抗のある電池を1個または並列に2個用いても、1個の豆電球（LEDを含む）の明るさやモーターのまわり方に変化が生じない条件』に関する議論を行なう。

本論文はパートⅠ¹⁾、Ⅱ²⁾に続く続編であり、これら前論文の課題を解決する内容となっている。具体

*1 山口市立大内中学校

的には、数式を活用した半定量的評価を行ったパートⅠに対し、その評価に対する実験的検証を行ったのがパートⅡである。そして、パートⅡで用いた汎用型LEDの使い勝手の悪さを解消するために豆電球型LEDと低電圧型LEDの有効性の検証を行い、さらに並列つなぎをする対象物を豆電球から乾電池へ変えたことによる評価を数式を用いて行うのがパートⅢである。話の流れを理解するためにも、ぜひ、本論文の前にパートⅠ、Ⅱに目を通して頂けると幸いである。

1. 市販の豆電球型LEDの特性

採用したLEDは『豆電球型LED』、『LED豆電球』などと呼ばれる口金E10タイプの豆電球ソケット対応したものであり、本論文では前者の『豆電球型LED』の呼称を採用する。この豆電球型LEDは単純に汎用型LEDが豆電球ソケットに組み込まれただけのものも存在するが、昇圧回路を組み込むことにより低電圧でも発光可能となったものも存在する。つまり、前者においては、従来、発光に定格2～3V以上の定格電圧を必要としていたものが、後者においては乾電池1個程度で発光可能となり、さらに豆電球のように広い電圧範囲での発光も可能となっている。ただし、基本、汎用型LED同様に極性が存在することから電池との接続においては注意が必要である（最近では無極性LEDも販売されているが、その割合は多くは無い）。また、通常の豆電球の場合、口金のタイプ（E10）やガラス球のサイズ・形状など外形全てが統一されているが、豆電球型LEDにおいては口金は同様に統一されているものの、豆電球のガラス球に相当する封止樹脂からなる部分（LED素子を湿気や外的衝撃を守るために固定するもの。樹脂は透明か、少なくとも発光波長をよく透過するものが用いられる）はドーム型という共通項はあるもののその詳細な形状や大きさはさまざまである（図1）。

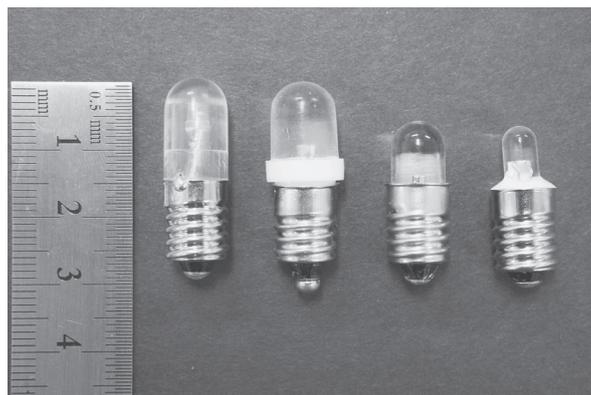


図1 代表的な豆電球型LEDの外観。発光部はドーム型の封止樹脂により構成されており、その大きさはさまざまである。

始めに今回検証に用いた豆電球型LEDの商品規格について表1にまとめる。なお、豆電球型LEDの特別な採用基準は設けず、2017年6月1日時点で個人的に入手しやすいものを採用した（全て極性あり）。続いて、これら豆電球型LEDの電圧－照度の関係の実測値を発光色ごとにまとめたものを図2（a）～（g）にそれぞれ示す。なお、測定においては、電力供給は直流安定化電源（TEXIO社製、PS20-18）、電圧測定はデジタルマルチメーター（三和電気計器株式会社製、PC-7000）、照度測定はLED照度計（TENMARS社製、TM-209M）をそれぞれ用いた。さらに、引用文献2内の図3同様に電球を固定する治具を活用し、外的照度の影響を限りなく排除した条件下において測定を行った。個体差評価のために各豆電球型LEDにおいて同型のを複数個用いて測定を繰り返したが、N社の白色（低電圧型）以外の製品においては個体差は小さく（0～最大1割以内）、再現性が確認された。個体差が観測されたN社の白色（低電圧型）は印加電圧3.2Vを超えるとLED本体に発熱が生じ、照度が時間の経過と共に減衰することが確認された。その減衰の仕方には個体差があり、ここでは平均的な変化を示したものの値を記載した。得られた結果（図2）から読み取れる特徴は以下の通りである。

- ①. 昇圧回路が入っていないと予想される豆電球型LEDは引用文献2内の図2同様に赤色及び黄色は2V弱から、他の色は2.5V強からそれぞれ発光が始まった。
- ②. EJ社及びKD社が販売している豆電球型LEDと、KN社、N社、A社が低電圧タイプとして販売されている豆電球型LEDには昇圧回路が入っており、低電圧の0.7～0.8V程度から発光が確認された。3Vや4.5Vタイプも販売している会社（KN社、N社、A社）はこれらとの差別化のためにあえて、『低電圧型』という呼称を用いているが、EJ社とKD社が販売しているものは全てが低電圧対応のものであり、『低電圧型』とは呼ばずに通常の豆電球型LEDとして販売されていると予想する。
- ③. 測定値がほぼ一致し、製品の外観も同じことから、EJ社が販売している豆電球型LED（白色、電球色）とKD社が販売している豆電球型LEDは同じ製造メーカー品（OptoSupply社製）と予想される。
- ④. 白色（低電圧型）は一様に電圧に依存して照度が増加する他の色の製品と異なり、独特な照度の強度変化をする。N社を除いたA社およびKN社においては照度変化に再現性が観測された。

結論としては、各社販売している豆電球型LEDの発光電圧領域や照度変化には大きな違い（2017年6月1日現在）があり、実験目的に合った商品を購入し、活用する必要であるということである。そのための基礎データとして、ぜひ表1及び図2を活用して頂きたい。

表1 市販されている豆電球型LEDの規格（2017年6月1日現在）。なお、使用電圧範囲は製品カタログ等に記載されている値を有効数字も含めてそのまま採用した。

項目 販売会社	LEDの色	使用電圧 範囲 [V]	輝度 [mcd]または 製造メーカー・型番	備 考
KN社	赤	3（定格）		
	黄	3（定格）		
	青	3（定格）		
	白（低電圧型）	1.5～3		乾電池1個に対応 広い電圧領域
N社	赤	3（定格）		
	青	4.5（定格）		
	緑	4.5（定格）		
	白	4.5（定格）		
	白（低電圧型）	0.7～5.0	15,000	乾電池1個に対応 広い電圧領域
Y社	赤	3（定格）		
	青	3（定格）		
	緑	3（定格）		
	白	3（定格）		
EJ社	赤	0.8～1.8	15,000 (1.2V時)	乾電池1個に対応 広い電圧領域
	青	0.8～1.8	8,000 (1.2V時)	
	白	0.8～1.8	25,000 (1.2V時)	
	電球色	0.8～1.8	14,400 (1.2V時)	
KD社	白	0.8～1.8	25,000 (1.2V時) OptoSupply社製、 OBD3-W5DK8B31F	乾電池1個に対応 広い電圧領域
	電球色	0.8～1.8	14,400 (1.2V時) OptoSupply社製、 OBD3-M5DK8B31F	
A社	白	3（定格）		乾電池1個に対応 広い電圧領域
	白（低電圧型）	1～5		

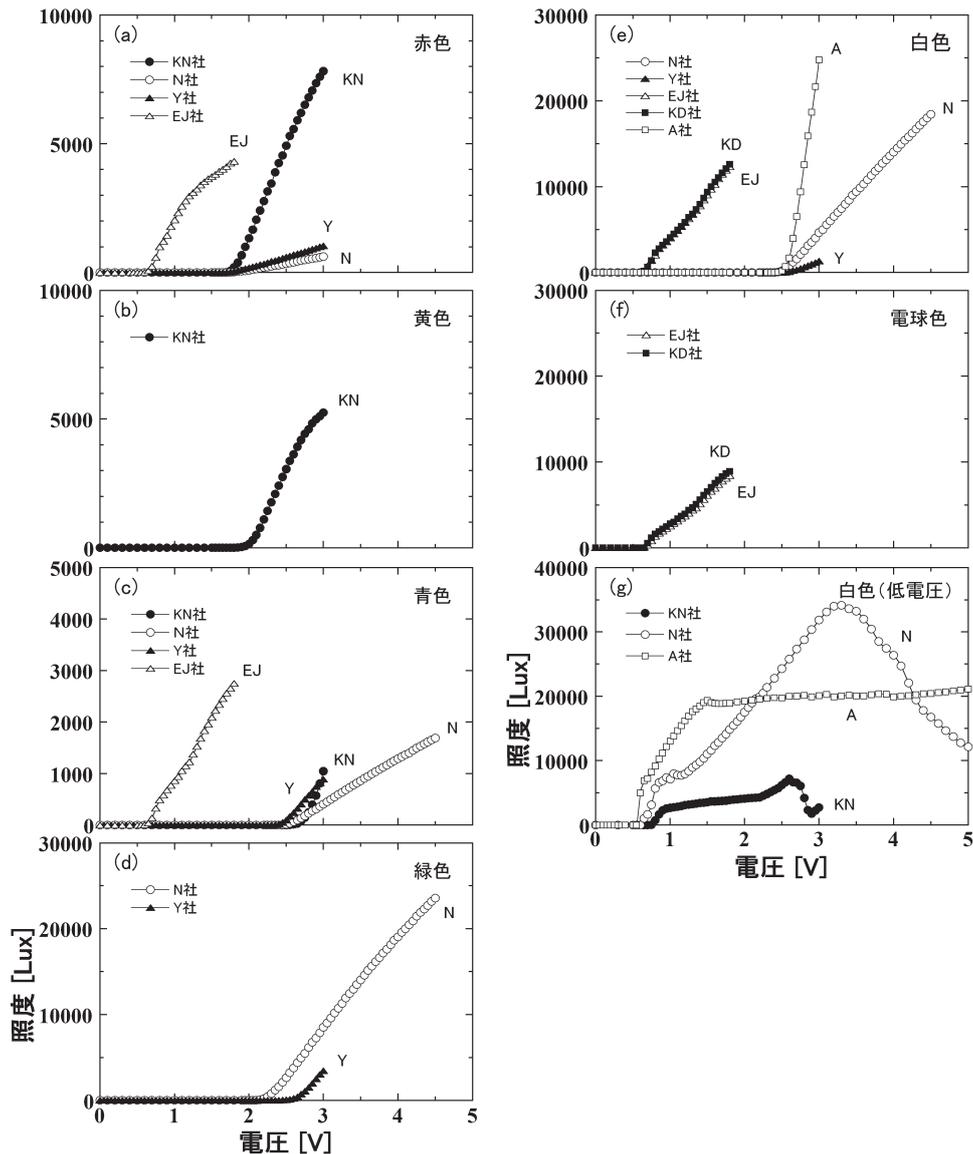


図2 各種豆電球型LEDにおける照度の電圧依存性。左側において上から、赤色、黄色、青色、緑色、右側において上から白色、電球色、白色（低電圧型）それぞれのLEDの結果である。横軸の大きさは電圧0～5Vと統一されているが、縦軸の大きさ（照度）は各色によって大きく異なるため、比較する場合は注意が必要である。

我々は汎用型LEDを用いた場合、全ての電池において内部抵抗の影響を受けず、電池のつなぎ方を並列にしても照度が変わらないことを既に明らかにしている²⁾。豆電球型LEDを用いた場合も同様な結果が得られるかの検証を試みた結果、全ての豆電球型LEDにおいて照度の変化は観測されなかった（正確には、照度の差は小さく、その差は照度計においては確認できるが、視覚による定性的評価においては、その違いは全く観測されなかった）。その代表的な結果として、汎用型LEDがそのまま組み込まれたと予想されるKN社の赤色、昇圧回路が組み込まれたEJ社の青色、低電圧・広範囲対応のN社の白色（低電圧型）の3種のLEDに関する結果を表2に示す。なお、電池は市販の単三アルカリ電池（新品）を用いた。表中において電流、電圧、照度は点灯している豆電球1個に対する実測値であり、電力は電流値と電圧値から算出した計算値である。照度においては豆電球並列2個の時の照度に対する1個の時の照度の比も示し、さらに視覚による明るさの変化の有無に関する評価も掲載した。当然のことではあるが、直流安定化電源を用いた時の電圧－照度の関係から推測される値（図2）と単三アルカリ電池（新品）を用いた時の電圧－照度の値（表2）は非常に良い一致を示した。実際には他の豆電球型LEDを用いても、電池をマンガンや充電機に変更しても（新品、ある程度の使用済みでも）、あらゆる組み合わせにおいて視覚による照度の変化は観測されなかった。

ゆえに、豆電球型LEDを用いた場合は、引用文献2において示した結果同様に『電池に2個並列につないだ電球の明るさと1個のみつないだ電球の明るさの相違』は観測されず、電池の内部抵抗を学習しない小中学校理科において、矛盾の無い結果を得られることが確認された。ただし、用いたLEDは見た目が豆電球と似ているが、実際には極性はあり、電池への接続には注意が必要である。最近では無極性LEDも販売されており、これを用いることにより、さらに、豆電球との違いを感じにくいLEDの活用が可能と考える。

以上を持って、パートⅠ¹⁾、Ⅱ²⁾から継続的に議論していた内容が完結する。発光側として豆電球のみならず、LEDについても候補として取り扱っており、実際は発光機構が異なる豆電球とLEDとを同じように取り扱って良いのかという議論が残らないわけでもない⁴⁾。さらに、電流制限抵抗の必要性など豆電球とは異なる部分に関する議論もなく、LEDを正しく取り扱ってはいるとは言えない。しかし、今後ますます身の回りでのLEDの利用は進むことが予想されことから、児童・生徒に教えた物理現象を第一に考え、LEDをうまく活用することは選択肢の中の最優先すべき1つの候補であると考え。ただし、LEDを活用する場合は、指導者（教員）はLEDに関する一般的基礎知識の事前自己学習のみならず、活用する製品（LED）の特性の事前確認（例えば図2）をぜひ行って頂きたい。

表2 単三アルカリ電池（新品）を用いた場合の各種LEDに対する電流、電圧、電力、照度の違い。

用いた2個の電池の電圧は新品無負荷状態でそれぞれ1.6376, 1.6384Vであった。図2で得られた情報をもとに発光する電圧に相当する電池の数を採用し、1個の場合は前者の電池を用いた。電池の内部抵抗の影響は受けず、電圧と照度の関係は図2の結果とよく一致している。

電池の種類 及び数	単三アルカリ電池、 2個		単三アルカリ電池、 1個		単三アルカリ電池、 2個		単三アルカリ電池、 1個	
	豆電球型 LED の種類	KN社、赤色		EJ社、青色		N社、白色（低電圧型）		
LEDの数 [個]	2	1	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	0.0684	0.0709	0.1027	0.1046	0.1214	0.1220	0.0468	0.0479
電圧 [V]	3.1919	3.2126	1.5125	1.5453	3.1203	3.1625	1.5688	1.5885
電力 [W]	0.2183	0.2278	0.1553	0.1616	0.3788	0.3858	0.0734	0.0761
照度 [Lux]	8401	8450	2021	2082	35250	35920	12070	12260
	比 1.006		比 1.030		比 1.019		比 1.016	
視覚による差	変化なし		変化なし		変化なし		変化なし	

2. 乾電池の並列つなぎと内部抵抗の影響（数式を活用した整理）

我々は負荷抵抗となる「豆電球」、「LED」、「モーター」それぞれの並列つなぎに注目していたが、小学校学習指導要領概説には、小学校第4学年単元「電気の働き」内で、『乾電池の数やつなぎ方を変えると、豆電球の明るさやモーターの回り方が変わる』という学習を行なうことが記載されている⁴⁾。つまり、『電球の並列つなぎ』ではなく、『電池の並列つなぎ』に注目している。この場合も『直列つなぎ』においての変化は顕著であり大小関係の理解誤解が生じないが、『並列つなぎ』に関しては電池の内部抵抗の影響により記載内容と実験結果に矛盾を生じる場合がある^{5, 6)}。そこで、第2章では、第1章で述べた『電球の並列つなぎ』ではなく、『電池の並列つなぎ』について議論を行なうこととする。はじめに、現行の学生指導要領に沿った各検定教科書（平成22年3月または平成26年3月検定済）⁷⁾内における記述を表3にまとめる。さらに、表から読み取れる項目の中から注目すべき事項を以下に簡潔に箇条書きで示す。

- ①. 「同じ、変わらない」と「ほとんど同じ」を採用している会社数はそれぞれほぼ半数ずつであった。信州教育出版社に限っては違いが出にくいであろうモーターにおいては「変わらない」、違いが生じやすいと思われる検流計（電流の強さ）と豆電球は「ほとんど変わらない」と異なる表現を採用している。

- ②. 平成22年3月検定教科書より平成26年3月検定教科書の方が豆電球に関する記述内容が減少していた。これは取り扱いが難しいことが影響していると予想する。
- ③. もっとも詳細に記載されている出版社は大日本図書株式会社である。
- ④. 平成22年3月検定の学校図書株式会社の教科書においては我々が利用の有効性を示したLEDの実験^{1, 2)}が既に提案されていた。しかし、平成26年3月検定においてその内容は削除されている。

表3 電池の並列つなぎによる物理現象の変化に関する各検定教科書ごとの取り扱いの違い。

出版社	実験 記載項目	平成22年3月検定教科書			平成26年3月検定教科書		
		記載の有無 ^{*1}	実験結果の表現 (言葉として) ^{*2}	実験結果の表示の有無 ^{*3}	記載の有無 ^{*1}	実験結果の表現 (言葉として) ^{*2}	実験結果の表示の有無 ^{*3}
東京書籍	検流計（電流の強さ）	有	●ほとんど変わらない	◎有	有	●ほとんど変わらない	◎有
	モーターの回る速さ	有	結果の記載なし ^{*4}	無	有	●ほとんど変わらない	◎有
	豆電球の明るさ	有	●ほとんど変わらない	◎有	有 ^{*5}	—	—
		*4 コーナーでは結果が記載されていないが、全体のまとめに記載されている内容から推測すると「ほとんど変わらない」という結果を暗に示しているとも読み取れる。 *5 モーターの代わりに豆電球を用いても良いという事のみ記載。					
啓林館	検流計（電流の強さ）	有	○変わらない	○有	有	○変わらない	○有
	モーターの回る速さ	有	○変わらない	○有	有	○変わらない	○有
	豆電球の明るさ	有 ^{*6}	○変わらない	○有	有 ^{*7}	—	—
		*6 結果のみを掲載。 *7 「やってみよう」という小コーナーにおいて話題提供のみ記載。					
大日本図書	検流計（電流の強さ）	有	○同じ、変わらない	無	有	本文中に明確に評価はしていないが同じ値の実験結果を表示	◎有
	モーターの回る速さ	有	○同じ、変わらない	◎有	有	○変わらない ^{*8}	◎有
	豆電球の明るさ	有	○同じ、変わらない	◎有	有	○変わらない ^{*8}	◎有
		*8 実験結果の例としては「同じくらい」という表現も使われている。					
学校図書	検流計（電流の強さ）	有	●ほとんど変わらない	△有	有	●ほとんど変わらない	△有
	モーターの回る速さ	有	●ほとんど変わらない	△有	有	●ほとんど変わらない	△有
	豆電球の明るさ ^{*9}	有	結果の記載なし ^{*4}	無	有	●ほとんど変わらない	無
		*9 平成22年3月検定の教科書においてのみLEDや電子オルゴールでも実験実施					
教育出版	検流計（電流の強さ）	有	○変わらない	無	有	○変わらない	◎有
	モーターの回る速さ	有	○変わらない	無	有	○変わらない	無
	豆電球の明るさ	無	—	—	有 ^{*10}	—	◎有 ^{*11}
		*10「チャレンジ」という小コーナーにおいて話題提供のみ。 *11 豆電球の明るさに関する結果に対して言及はしていないが写真は掲載している。					
信州教育	検流計（電流の強さ）	有	●ほとんど変わらない	△有	有	●ほとんど変わらない	△有
	モーターの回る速さ	有	○変わらない	無	有	○変わらない	無
	豆電球の明るさ	有	●ほとんど変わらない ^{*12}	△有 ^{*13}	有	●ほとんど変わらない ^{*12}	△有 ^{*13}
		*12 実験結果の例としては「変わらない」という表現も使われている。 *13 拡大写真は無いが、回路の違いと照度の関係がよくわかる全体写真が採用されている。					

*1 教科書内において、比較実験の記載の有無。「有」は詳細に実験方法や結果が記載されているものを指し、話題提供のみの場合は「有」に分類はするが、その程度を補足として追記した。

*2 教科書本文に掲載されている実験結果の表現の違い。○は「変わらないまたは同じ」、●は「ほとんど変わらない」をそれぞれ意味する。教科書によって漢字または平仮名表記であるが、表中は漢字表記を採用した。なお、児童の実験結果を想定した例の記載において、本文中の表現との違いが発生している場合は表中において補足説明を追加した。

*3 「言葉による表現」ではなく、変化の有無が明確にわかる「写真」や「図」（閉回路として導通している場合）が掲載されている場合に「有」とした。なお、下記に示す記載内容の違いによって◎、○、△でランク付けをした。

『◎有』 乾電池 1 個と 2 個の並列つなぎの時の具体的な対比が明確に掲載されている場合。ただし、表現方法は写真、図、数値どれでも可とする。

『○有』 2 個の並列つなぎの時の写真のみ、掲載されている場合。

『△有』 詳細な変化がわかるようなアップ写真は無いが、回路全体としての写真が掲載されている場合。

各教科書において、若干異なる表現を採用している。これは電池の内部抵抗の影響またはその他外的要因によって多少なりとも変わる場合を想定して「ほとんど変わらない」と表現しているケースと、小学校においては電池の内部抵抗を学習しないことから、内部抵抗を無視して「変わらない」を採用したケースとに分けられる。パート I¹⁾でも述べたが、これらケースは前提とした条件による違いであり、両方とも正しいと言わざるを得ない。しかし、現実問題として小中学校においては電池の内部抵抗を考慮しない（学習しない）ことから、「同じ・変わらない」が得られるように努めないといけないと考える。しかし、必ずしも作り出されているとは言いがたく、明らかに明るさが変わっていても「変わっていない」と指導者が言い張らざる負えない状況が生じることに問題があると考え。同様に「ほとんど同じ」だから得られた結果は正しいと言う場合も「同じではない」理由を明確に説明できていないことにも問題がある。「同じになるはずだが、何かしらの偶然または必然の外的影響により変わったかのように見えた」のか、もしくは「そもそも異なるが近い」というのでは現象そのものへの考え方が変わるからである。以下に小学校第 4 学年の単元に沿って内部抵抗の影響について議論を行なう。

本章で考える回路として、回路図を図 3 に示し、電池の内部抵抗を考えない場合と考える場合の各物理量を数式で表したものを表 4 と 5 にそれぞれ示す。なお、この回路は引用文献 1 内の図 9 に示した回路において電球の数を 1 個 ($n = 1$) にしたものに相当することから変数は同様のものを採用した。具体的には電池の起電力を E 、電池の内部抵抗を r_0 、電池の数を m ($= 1$ または 2)、豆電球またはモーターの抵抗を R (V)（一定値ではなく V 依存する）、この抵抗に流れる電流を I_3 、同じくかかる電圧を V_3 とそれぞれした。

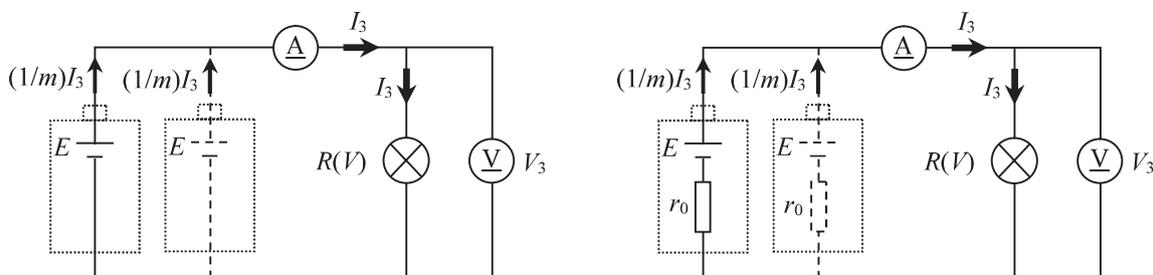


図 3 並列につながれた電池と豆電球（またはモーター）の閉回路。（左図）電池の内部抵抗なし、（右図）電池の内部抵抗あり。ただし、内部抵抗 $r_0 = 0$ とおくと左右の回路は同じである。

表 4 豆電球（またはモーター）1 個に流れる電流、かかる電圧ならびに消費電力。ただし、電池の内部抵抗を考えず、1 個、または 2 個を並列接続した場合における値（図 3 左図対応）。

電池の数 物理量	並列 2 個	大小 関係	1 個
電流 I_3	$\frac{E}{R(V=V_3)}$	=	$\frac{E}{R(V=V_3)}$
電圧 V_3	E	=	E
電力 P_3	$\frac{E^2}{R(V=V_3)}$	=	$\frac{E^2}{R(V=V_3)}$

表5 豆電球（またはモーター）1個に流れる電流、かかる電圧ならびに消費電力。
ただし、電池の内部抵抗を考慮し（ $r_0 > 0$ ）、1個、または2個を並列接続した
場合における値（図3右図対応）。

電池の数 物理量	並列 m 個（一般式）	並列 2 個（ $m=2$ ）	大小 関係	1 個（ $m=1$ ）
電流 I_3	$\frac{mE}{mR(v=v_3)+nr_0}$	$\frac{2E}{2R(v=v_3)+r_0}$	$>$	$\frac{E}{R(v=v_3)+r_0}$
電圧 V_3	$\frac{mR(v=v_3)E}{mR(v=v_3)+nr_0}$	$\frac{2R(v=v_3)E}{2R(v=v_3)+r_0}$	$>$	$\frac{R(v=v_3)E}{R(v=v_3)+r_0}$
電力 P_3	$\frac{m^2 R(v=v_3)E^2}{(mR(v=v_3)+nr_0)^2}$	$\frac{2^2 R(v=v_3)E^2}{(2R(v=v_3)+r_0)^2}$	$>$	$\frac{R(v=v_3)E^2}{(R(v=v_3)+r_0)^2}$

表4に示した通り、電池の内部抵抗を考えない場合は豆電球（またはモーター）に流れる電流 I_3 、かかる電圧 V_3 、消費電力 P_3 それぞれに違いは無い。例えば、電池の起電力 $E=1.5V$ とした場合における I_3 、 V_3 、 P_3 の抵抗値 R の依存性を図4に示す。抵抗 R が増加しても電圧 V_3 は E と同じ一定値 $1.5V$ をとり、電流 I_3 及び電力 P_3 は抵抗値 R に反比例して減少する。そして、これらの値は電池が1個でも2個でも同じ値をとる。この結果に従って、豆電球の明るさ及びモーターのまわり方は「変わらない」または「同じ」と表現しているのである。続いて、乾電池の内部抵抗 r_0 を考えた場合の変化を図5に示す。上段が電流 I_3 と電圧 V_3 について、下段には電力 P_3 に関する抵抗値依存性を示している。上下段両方において左から内部抵抗 $r_0=0.1, 0.5, 1.0\Omega$ の時の値をそれぞれ示している。内部抵抗を考慮することにより、電流 I_3 、電圧 V_3 、電力 P_3 全てにおいて電池1個より2個を並列つなぎした場合の方が大きな値を示した。これは豆電球を用いた場合はより明るくなり、モーターを用いた場合はより速く（単位時間当たりの回転数が増す）回転するようになることを意味している。さらに、その差は内部抵抗が大きくなるにつれて大きくなっている。これは内部抵抗の小さい新しい電池の場合は明るさやまわり方の差は小さいが、使用により電池の内部抵抗が大きくなるにつれてそれらの差は大きくなることを意味している。つまり、差を小さくするためには新しい乾電池もしくはフル充電した充電電池を用いるべきであることがわかる¹⁾。ちなみに教師用指導書においては踏み込んだ具体的な説明は無いものの、いくつかの指導書においては「新しい電池」や「フル充電した充電電池」を使用すべきという用いるべきという記述がなされている⁸⁾。このことが教育現場で行なわれていれば、多少なりとも児童の実験学習がうまく行く確率が高くなるものと思われる。

第2章においては、上で示した通り、数式を活用した検討結果を示した。より正確に理解及び評価するためには実測との整合、具体的には、数式を用いた考え方が電球の明るさやモーターのまわり方に実際どのように影響しているか検討する必要がある。これら検証は本論文に続くパートIV（執筆中）にて示したい。

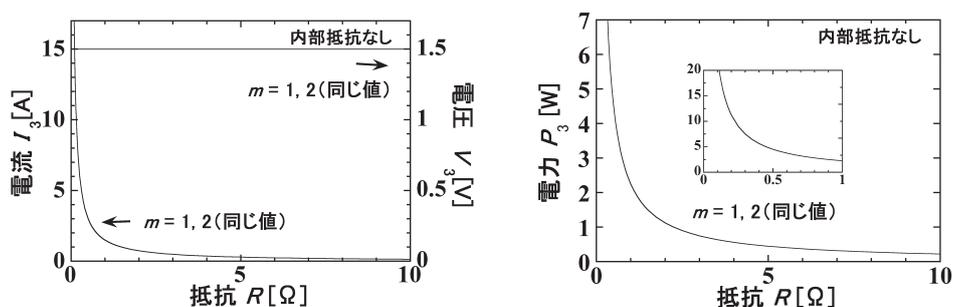


図4 豆電球（またはモーター）に流れる電流とかかる電圧の抵抗値依存性（計算値）（左図）。
同じく電力の抵抗値依存性（計算値）（右図）。共に電池の内部抵抗を考えない場合。

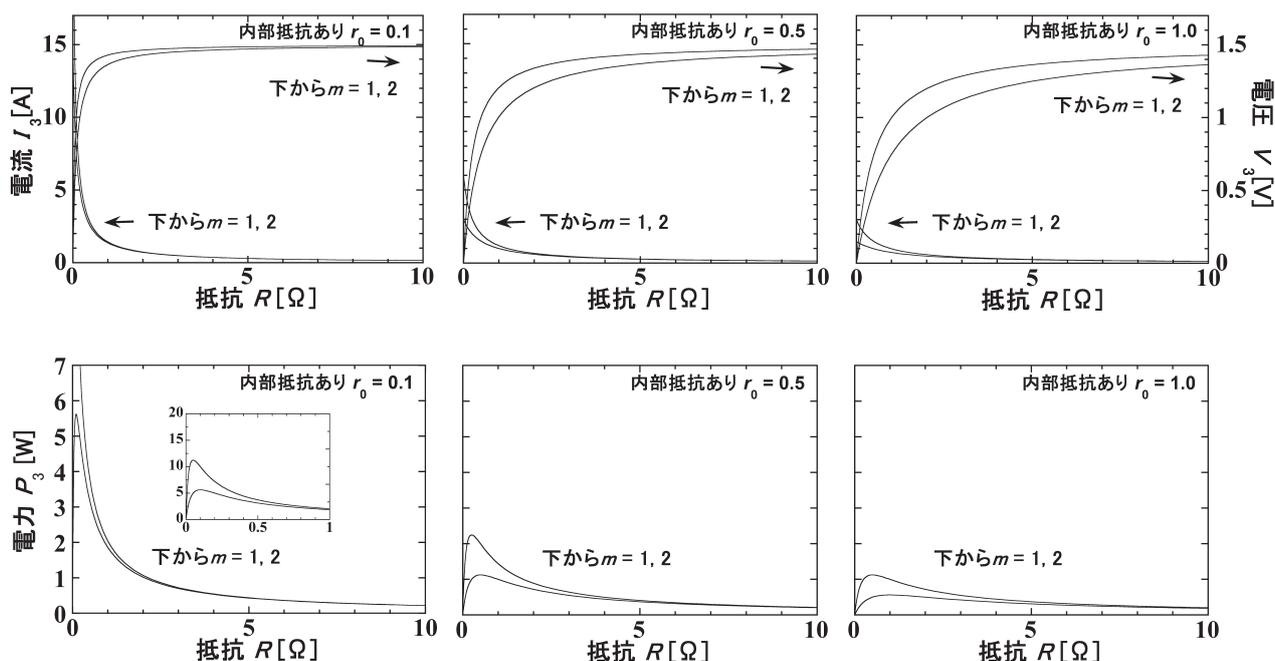


図5 豆電球（またはモーター）に流れる電流とかかる電圧の抵抗値依存性（計算値）（上段3図）。同じく電力の抵抗値依存性（計算値）（下段3図）。共に電池の内部抵抗を考慮しており、左から内部抵抗 $r_0=0.1, 0.5, 1.0\Omega$ とした。

なお、豆電球においては一定の抵抗値を持たないが（非直線抵抗）、そもそも抵抗値が小さいことから内部抵抗の影響を受けてしまう場合が多い¹⁾。図5を見てもわかるように負荷抵抗 R が大きくなるとあらゆる物理量において差はほとんど無くなってしまふ。また、第2章始めに「『直列つなぎ』における変化は顕著であり問題が生じないが」という表現を用いたが、確かに直列つなぎされた乾電池2個を用いると1個の場合より豆電球に流れる電流は顕著に大きくなるが、実験結果として厳密に2倍になることはまずありえない。ここには『電池の内部抵抗』のみならず、高校物理で学習する『豆電球の非直線抵抗』という新たな課題が発生しており、指導者は児童が理解し満足できる説明ができない状況に陥る可能性が高いと予想する。つまり、乾電池の並列つなぎのみならず、直列つなぎにも大きな課題が残っていると云わざるを得ない。この課題は一連の論文（パートI～IV^{1, 2)}）とは異なる課題のため、解決のための評価・検討はいずれ改めて行いたい。

おわりに

本論文において、『電池に2個並列につないだ電球の明るさと1個のみつないだ電球の明るさの相違』に関して内部抵抗を考えない小中学校理科における実験検証の方法の1つとして豆電球型LEDの使用を提案した。もちろん、豆電球型LEDにもLED同様に極性が存在し、発光機構等異なる特徴が多く存在することから豆電球かのように取扱うことに問題が無いわけではない。しかし、電池の内部抵抗の影響を考えことなく、視覚的に照度の変化が全く無いことを容易に作り出せることに関しては非常に有益と考える。理科または物理としてどこの現象に注目するのか、そしてその現象に対してどのように指導・説明するのがきちんとしていけば良いと考える。論文後半（第2章）においては小学校第4学年の学習指導要領に示された内容同様に電池の並列つなぎに注目した数式による評価を示した。この実測・検証について近い将来、パートIVとして公開し、一連の「電池の内部抵抗」の取り扱いに関する議論・評価を完結させたい。

なお、本稿で述べた内容の一部は中国地区エネルギー環境教育実践助成（平成29年度）により活動を行ったものである。ここに感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 重松宏武・兼安真也・吉村大介：「小中学校理科・高等学校物理における「電池の内部抵抗」の取り扱いⅠー並列に接続した豆電球の明るさはどうなるのかー」山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要 42, 79-88, 2016.
- 2) 兼安真也・重松宏武：「小中学校理科・高等学校物理における「電池の内部抵抗」の取り扱いⅡー並列に接続した豆電球の明るさはどうなるのかー」山口大学教育学部研究論叢 66, 149-160, 2016.
- 3) 文部科学省：『学習指導要領解説 理科編（平成20年8月）』大日本図書株式会社.
- 4) 長谷川竜生・釜野勝・上原信知：『図解入門よくわかる最新LEDの基本と仕組み』秀和システム, 2012.
- 5) 鬼塚史朗：「電池の直列接続と並列接続では豆電球はどちらが明るいのか」理科の教育 50, 40-41, 2001.
- 6) 津田俊信：「電池の並列つなぎと内部抵抗」理科の教育 47, 322-323, 1998.
- 7) 例えば、検定教科書『みんなと学ぶ 小学校理科 4年』学校図書株式会社.
- 8) 例えば、教科書用指導書 指導編（朱書）『新編 新しい理科 4』東京書籍株式会社.