

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

兼安真也*・重松宏武

Handling of “Internal Resistance of Dry Cell”
in Elementary and Junior High School Science and High School Physics II :
Changing of brightness of miniature light bulbs connected in parallel

KANEYASU Shinya, SHIGEMATSU Hirotake

(Received September 30, 2016)

はじめに

発達段階に応じた教科学習において、教科書に掲載されている事象が必ずしも真の科学を示していない場合が少なからず存在する。その代表的な例の一つが『電池に、2個並列につないだ豆電球の明るさと1個のみつないだ豆電球の明るさの相違』である。この明るさの相違は電池の内部抵抗を考慮するか否かに左右され、考慮しない小中学校理科では明るさは変わらない（またはほとんど同じ）、一方、考慮する高等学校物理では明るさは変わると学習する。真実は後者の「明るさは変わる」である。従って、小中学校理科における指導では「明るさは変わる」という真実を「変わらないように観測させ、変わらないものとして指導する」か、あるいは「ほとんど同じだが変わった結果を示し、ほとんど同じが意味する差を児童・生徒に分かり易く説明する」必要が生じる。一般に小中学校理科の範囲では後者は難しく、前者が採用されている。この「明るさは変わらない」という事実は内部抵抗を考慮しなくてよい直流安定化電源を用いることにより簡単に解決することはよく知られている。しかしながら、教師による演示実験の場合はよいが、生徒が個人またはグループで行う実験においては、財政的理由から直流安定化電源の活用は困難と予想される。電池を用いる場合、影響の大小はあるものの、内部抵抗を完全に無視することはできない。そこで我々は小中学校理科における指導に矛盾の無い実験条件、具体的には電池を使用しても豆電球の明るさの変化が視覚的に観測できない状況（限りなく内部抵抗の影響が小さい状況）が作り出せるかどうかを、実測による検討を行なうこととした。同様に、豆電球の代わりにLEDの使用の検討も行なうこととした。本論文の前論文¹⁾において、各種電池の特性（電力消費に伴う端子電圧の時間依存と内部抵抗の時間依存）と、豆電球とLEDの特性（照度の電圧依存）、さらに数式を用いた半定量的評価を既に行っている。そこで本論文においては、続編としてこれら予備実験・事前検討の結果をもとに、小中学校理科指導に活用できる「電池を用いても限りなく明るさの変化が観測できない条件」を明らかに

* 山口大学大学院教育学研究科

するために行った実験による検証結果を報告する。

1. 明るさの変化が限りなく小さい（または無い）と期待できる実験条件

厳密には、あらゆる電池において内部抵抗が存在し、その影響を無視することはできない。しかし、その影響が小さく、照度変化を人の眼では感じ取れない状態を作り出すことは可能と考える。そのためには電池の内部抵抗が小さく、かつ電力使用に伴う端子電圧の変化量が小さい電池を用いる必要がある。予備実験¹⁾からは新品の電池においては、内部抵抗は電池の電池容量が大きいほど小さいことが示されている（内部抵抗の大きさは小さい順に単一<単二<単三<単四である）。さらに、電池の種類に着目すると充電電池、アルカリ電池、マンガン電池の順に小さい内部抵抗の値をとることも確認された（充電電池<アルカリ電池<マンガン電池）。これら検証結果から照度変化が限りなく小さい電池は最も内部抵抗の小さい『単一充電電池』を用いた場合であると考えられる。同様に、学校現場において高い頻度で用いられる単一アルカリ電池と単三充電電池も候補として検討する余地があることが示された¹⁾。本論文においては、これら3種に加え、同じく利用頻度の高い単一マンガン電池を対比項目として追加した計4種の電池に絞って実験事実による検証を行うこととした。

また、照度の絶対値及び変化はこれら電池と閉回路を組む豆電球の定格値にも左右することが考えられる。ゆえに電池と豆電球、それぞれ異なるもののペアにおいて比較検討を行なうこととした。なお、図1左図に示すように豆電球は非直線抵抗という特性を持ち、低電圧側においては傾きの大きな直線的増加を示すが、発光後は傾きが変わり緩やかな電力変化を示す。そのため、豆電球にかかる電圧変化が小さい場合は照度変化が小さいことが期待される。一方で、最近、教育現場においてよく活用されているLEDは図1右図に示すように一定の順方向電圧 V_F を印加することにより電流が流れ発光するが、発光する電圧領域は狭く、電力の電圧依存は非常に大きいという特徴を持つ。そのため、一般的にLEDは本実験には不適と考えていたが、予備実験により規格電圧と照度の電圧依存から青色LEDにおいては可能性があるという結果を得た¹⁾。よって、青色LED、さらにその対比としてほぼ同電圧で発光する白色LEDを追加採用し、実験を行なうこととした。

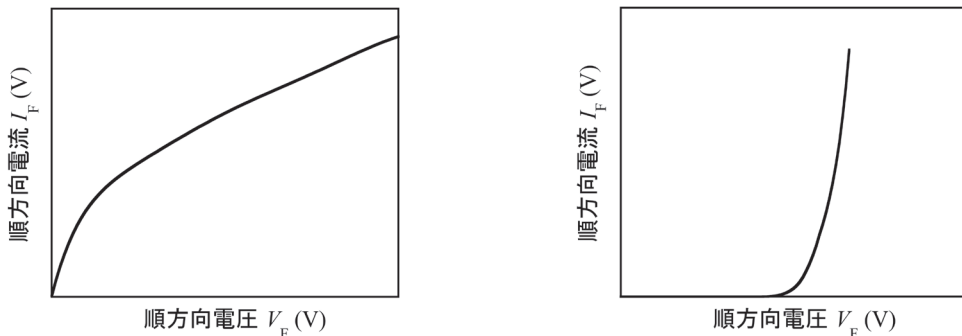


図1. 豆電球(左図)とLED(右図)の I - V (電流-電圧)特性のイメージ図^{1,2)}。
LEDは光電圧範囲が狭い。豆電球は非直線抵抗の様子を示す。

なお、補足であるが、引用文献1の図5に示されたLEDの照度の電圧依存測定において、青色LEDにおける傾きが顕著に小さいことに疑問を持ち、本実験の前に予備実験として再測定を

行った。その結果、用いたLEDメーター（照度計）においては各色に対しての強度校正を必要としているが、それがきちんとなされず、例えば、白色LEDは実際より大きく見積もり、青色LEDは小さく見積もっていたことが判明した。測定し直した正しい結果を図2に示す。青色LEDの傾きは当初の値より大幅に大きくなったが、それでも他のLEDに比べると小さいことより、当初の予定通りLEDを用いての実験を行なうこととした。検証実験のために採用した組み合わせを表1に示す。これらの実験検証結果は2章以下に詳細に述べる。なお、内部抵抗の影響を小さくする方法の1つとして電池の並列つながりが挙げられる¹⁾。しかし、予備実験によりその性能改善効果は小さく、さらに回路が複雑になることによる配線の抵抗や接触抵抗の増加など負の要因も考えられた。よって、電池の並列つながりは採用しないこととした。

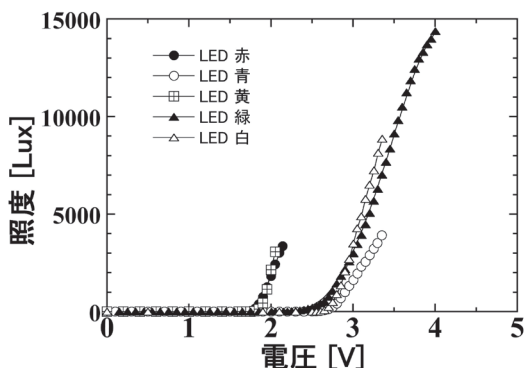


図2. LEDにおける照度の電圧依存（引用文献1の図5の改訂版）。なお、LEDには個体差もあり、同色でも最大2割程度の強度の差が観測された。

表1. 検証実験に採用した電池と電球の組み合わせ

電池 電球	アルカリ電池				マンガン電池				充電電池			
	単一	単二	単三	単四	単一	単二	単三	単四	単一	単二	単三	単四
豆電球	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	○	△
LED	○	△	△	△	○	△	△	△	○	△	○	△

2. 明るさが変化しない条件の検証 — 豆電球を使用した場合 —

本章では比較検討するための電池の候補として単一アルカリ電池、単一マンガン電池、単一充電電池、単三充電電池を採用し、各種豆電球を用いた回路における明るさの相違を検討した結果を述べる。

2-1 実験方法

定格値が異なる豆電球4種A~D（定格A: 1.5 V, 0.3 A、B: 2.5 V, 0.3 A、C: 2.5 V, 0.5 A、D: 3.8 V, 0.3 A、共に株式会社ナリカにて購入）に対して、それぞれ電池を1個または2個直列に接続した閉回路において1個の豆電球に対する電流、電圧、照度の直接測定を行った（図3）。ただし、定格A: 1.5 V, 0.3 Aの豆電球においては定格値を大幅に超える電池2個を用いた測定

は行わないこととした（現実問題として、豆電球が切れてしまうために測定不可能である）。さらに、定格D: 3.8 V, 0.3 Aの豆電球は電池3個（直列）でも使用可能であるが、児童・生徒への実践を考慮した回路の簡素化対応により、他の豆電球の場合同様に電池の個数は2個を上限とした。また、実験装置は前論文¹⁾と同様のものを使用し、豆電球の明るさの変化は照度計による定量的変化と視覚による定性的変化両方により検証を行った。なお、照度は放射線量と同じく距離の二乗に反比例する特性を持ち、照度計の測定部と光源間の距離、または角度のずれにより値が大きく変わる物理量である。よって、本実験では照度の値がより正確に測定できるよう、豆電球を再現性よく固定できる治具（塩ビパイプ製、内径25 mm、外形32 mm）を作製し、これを用いて実験を行った（図3右図挿入図）。ちなみに、豆電球の表面と照度計の測定部との距離が3 mmとなるように豆電球を固定した。さらに、暗幕を用い、太陽や蛍光灯などの外的照度の影響を限りなく排除した環境下において実施した。

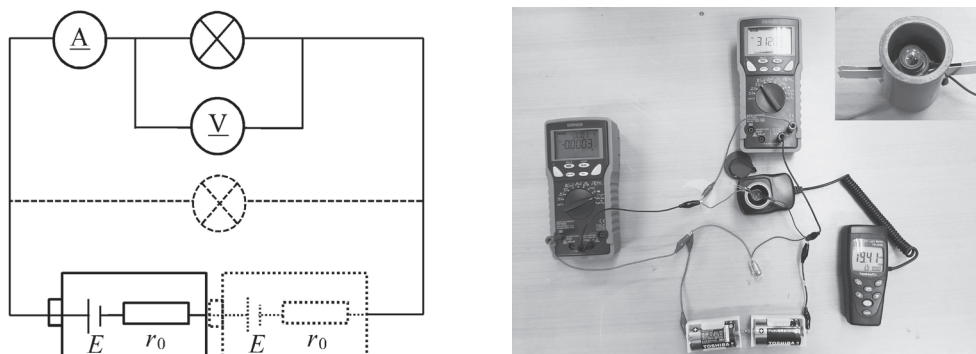


図3. 本実験の閉回路図（左図）と実際の配線の様子（右図）。照度計の測定部は机に固定し、豆電球を装着するソケットは塩化ビニルパイプに固定（右図）することで、照度の測定をより確かなものにした。

2-2 実験結果

単一アルカリ電池、単一マンガン電池、単一充電電池ならびに単三充電電池を用いた結果をそれぞれ表2, 3, 4, 5に示す。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。照度の定量的な差（比）と視覚による定性的な差の相関においては「変化無しの場合は照度比1.052~1.162」、「わずかなに変化ありの場合は照度比1.115~1.191」、「変化ありの場合は照度比1.166~1.443」という結果を得た。実際には視覚による定性的な差は個人差により大きく変わるもののため、照度比の値そのものには大きな意味はなく、1は明るさが同じで値が離れるに従って差があるという漠然としたものである。そして、それを視覚的にどう感じるかは別の話であり、絶対的な評価になりえない。しかし、比との相関（傾向）と言う意味では1~2割の比の違いを境に視覚による差が発生するという知見を得ることができる。なお、引用文献1の図4において、直流安定化電源を用いた場合の各豆電球における物理量変化が掲載されている。本実験とは電源（こちらは電池であり、内部抵抗の影響を受けている）と豆電球-照度計間の距離が異なるために絶対値を比較（一致するかどうか）することは出来ないが、両論文において矛盾の無い傾向（大小関係）を得ることはできた。図4に視覚的評価を行った例の1つとして、単一充電電池2個と定格B: 2.5 V, 0.3 Aの豆電球の組み合わせ

における結果を示す。豆電球の光源部を観察すると豆電球 1 個の場合と 2 個の場合における明るさに違いは観測されなかった。

表 2. 単一アルカリ電池を用いた場合の各種豆電球に対する電流、電圧、電力、照度の違い。
(上表) 電池 1 個、(下表) 電池 2 個の場合。

電池の種類及び数	単一アルカリ電池、1 個							
	A: 1.5 V, 0.3A		B: 2.5 V, 0.3 A		C: 2.5 V, 0.5 A		D: 3.8 V, 0.3 A	
豆電球の定格								
豆電球の数 [個]	2	1	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	0.305	0.313	0.246	0.247	0.393	0.402	0.184	0.186
電圧 [V]	1.333	1.443	1.431	1.484	1.307	1.408	1.443	1.450
電力 [W]	0.407	0.452	0.352	0.367	0.514	0.566	0.266	0.270
照度 [Lux]	1420	1897	574	679	697	985	188	225
	比 1.336		比 1.183		比 1.413		比 1.197	
視覚による差	変化あり (小)		変化あり (小)		変化あり (小)		変化あり (小)	

電池の種類及び数	単一アルカリ電池、2 個							
	A: 1.5 V, 0.3A		B: 2.5 V, 0.3 A		C: 2.5 V, 0.5 A		D: 3.8 V, 0.3 A	
豆電球の定格								
豆電球の数 [個]	2	1	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	\		0.335	0.341	0.521	0.545	0.258	0.261
電圧 [V]			2.720	2.923	2.425	2.700	2.808	2.952
電力 [W]			0.911	0.997	1.263	1.472	0.724	0.770
照度 [Lux]			7830	9130	9500	13710	3189	3792
			比 1.166		比 1.443		比 1.189	
視覚による差			変化あり (小)		変化あり (小)		変化あり (小)	

表 3. 単一マンガン電池を用いた場合の各種豆電球に対する電流、電圧、電力、照度の違い。
(上表) 電池 1 個、(下表) 電池 2 個の場合。

電池の種類及び数	単一マンガン電池、1 個							
	A: 1.5 V, 0.3A		B: 2.5 V, 0.3 A		C: 2.5 V, 0.5 A		D: 3.8 V, 0.3 A	
豆電球の定格								
豆電球の数 [個]	2	1	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	0.308	0.310	0.243	0.245	0.392	0.397	0.182	0.183
電圧 [V]	1.365	1.438	1.415	1.468	1.317	1.393	1.407	1.467
電力 [W]	0.420	0.446	0.344	0.360	0.516	0.553	0.256	0.268
照度 [Lux]	1429	1851	552	656	659	909	166	209
	比 1.295		比 1.188		比 1.379		比 1.259	
視覚による差	変化あり (小)		変化あり (微小)		変化あり (小)		変化あり (小)	

電池の種類及び数	単一マンガン電池、2 個							
	A: 1.5 V, 0.3A		B: 2.5 V, 0.3 A		C: 2.5 V, 0.5 A		D: 3.8 V, 0.3 A	
豆電球の定格								

豆電球の数 [個]	2	1	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	\		0.330	0.331	0.520	0.539	0.254	0.257
電圧 [V]			2.694	2.801	2.418	2.653	2.733	2.837
電力 [W]			0.889	0.927	1.257	1.430	0.694	0.729
照度 [Lux]			7610	8800	8940	12320	2530	2944
視覚による差			比 1.156		比 1.378		比 1.164	
	変化あり (微小)		変化あり (小)		変化あり (微小)			

表4. 単一充電電池を用いた場合の各種豆電球に対する電流、電圧、電力、照度の違い。
(上表) 電池1個、(下表) 電池2個の場合。

電池の種類及び数	単一充電電池、1個							
豆電球の定格	A: 1.5 V, 0.3A		B: 2.5 V, 0.3 A		C: 2.5 V, 0.5 A		D: 3.8 V, 0.3 A	
豆電球の数 [個]	2	1	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	0.306	0.308	0.239	0.241	0.394	0.395	0.180	0.179
電圧 [V]	1.366	1.415	1.365	1.410	1.342	1.383	1.384	1.405
電力 [W]	0.418	0.436	0.326	0.340	0.529	0.546	0.249	0.251
照度 [Lux]	1477	1712	471	542	758	881	154	162
	比 1.159		比 1.151		比 1.162		比 1.052	
視覚による差	変化あり (微小)		変化無し		変化無し		変化無し	

電池の種類及び数	単一充電電池、2個							
豆電球の定格	A: 1.5 V, 0.3A		B: 2.5 V, 0.3 A		C: 2.5 V, 0.5 A		D: 3.8 V, 0.3 A	
豆電球の数 [個]	2	1	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	\		0.334	0.332	0.542	0.542	0.252	0.257
電圧 [V]			2.764	2.801	2.618	2.698	2.746	2.808
電力 [W]			0.923	0.930	1.419	1.462	0.692	0.722
照度 [Lux]			7880	8640	12180	13440	2867	3147
			比 1.096		比 1.103		比 1.098	
視覚による差	変化無し		変化無し		変化無し			

表5. 単三充電電池を用いた場合の各種豆電球に対する電流、電圧、電力、照度の違い。
(上表) 電池1個、(下表) 電池2個の場合。

電池の種類及び数	単三充電電池、1個							
豆電球の定格	A: 1.5 V, 0.3A		B: 2.5 V, 0.3 A		C: 2.5 V, 0.5 A		D: 3.8 V, 0.3 A	
豆電球の数 [個]	2	1	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	0.305	0.304	0.237	0.236	0.385	0.390	0.183	0.176
電圧 [V]	1.311	1.360	1.334	1.368	1.259	1.310	1.331	1.355
電力 [W]	0.400	0.413	0.316	0.323	0.485	0.511	0.244	0.238
照度 [Lux]	1186	1413	422	469	532	653	127	138

	比 1.191	比 1.111	比 1.227	比 1.087
視覚による差	変化あり（微小）	変化無し	変化あり（小）	変化無し

電池の種類及び数	単三充電電池、2個							
豆電球の定格	A: 1.5 V, 0.3A		B: 2.5 V, 0.3 A		C: 2.5 V, 0.5 A		D: 3.8 V, 0.3 A	
豆電球の数 [個]	2	1	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	\		0.332	0.332	0.530	0.533	0.248	0.247
電圧 [V]			2.704	2.758	2.470	2.598	2.601	2.648
電力 [W]			0.898	0.916	1.309	1.385	0.645	0.654
照度 [Lux]			6760	7540	9670	11460	2320	2551
視覚による差			比 1.115 変化あり（微小）		比 1.185 変化あり（微小）		比 1.100 変化無し	



図4. 豆電球の明るさの変化が見られない様子。単一充電電池2個と豆電球（規格B:2.5 V, 0.3 A）を用いた場合で、左図が豆電球2個、右図が豆電球1個の時の様子を表す(表4下表に対応)。

表2～5に示した結果を元に、各豆電球における物理量の大小関係をまとめた結果を表6に示す。豆電球は非直線抵抗のため一定な抵抗値を持たなくとも、同一電圧を印加した場合の大小関係は明確であり、大きい順にD: 3.8 V, 0.3 A、B: 2.5 V, 0.3 A、A: 1.5 V, 0.3A、C: 2.5 V, 0.5 Aとなる。豆電球の抵抗と電池の内部抵抗は直列つなぎの関係にあり、豆電球の抵抗値が大きいほど、乾電池の内部抵抗の影響は小さくなると考えて良い。しかし、内部抵抗の影響は小さい（つまり、豆電球にかかる電圧は高い）が、流れる電流と電力が共に小さくなることから、結果として照度は小さくなるという欠点を持つ。また、各電池において内部抵抗の大きさも考慮すると、アルカリ電池やマンガン電池を用いた場合は「変化無し」という結果は得られず、『電池は充電電池を採用し、豆電球は抵抗値の大きい定格D: 3.8 V, 0.3 AまたはB: 2.5 V, 0.3 Aを候補とし、照度の大きさを考慮しつつ事前予備実験結果を考慮して最終候補を選択する』ことが良いと考える。

なお、電池と豆電球の組み合わせによっては非常に強い照度を持ち、直視することが好ましくない場合もある。そのときは壁に反射させた光を見せるなど、配慮が必要である。

表6. 各豆電球に関する物理量の大小関係の概略（傾向）。
大きさは①, ②, ③, ④と順に大きくなることを意味する。

豆電球の種類		D: 3.8 V, 0.3 A	B: 2.5 V, 0.3 A	A: 1.5 V, 0.3A	C: 2.5 V, 0.5 A
原因	抵抗 ¹⁾	大④ ←	③ ←	② ←	小①
測定結果	電流、電力	小① →	② →	③ →	大④
	電圧	大④ ←	③ ←	② ←	小①
	照度 ¹⁾	小①	②	大④	③
内部抵抗の影響		小① →	② →	③ →	大④

2-3 数式を活用した定量的考察

本節では得られた実験結果と数式との整合性について検討を行なう。具体的な例として表2に示された単一アルカリ電池と豆電球B: 2.5 V, 0.3 Aを用いたペアを考える。引用文献1の2-1節に示された考え方を採用すると、電池1個に対して豆電球並列に2個もしくは1個の回路において、豆電球1個に流れる電流 I_2 、かかる電圧 V_2 、電力 P_2 は表7上表に示される関係式によって表される。ここで、 E は電池の起電力、 $R(V)$ は電圧 V に依存する豆電球の抵抗、 r_0 は電池の内部抵抗をそれぞれ意味する。数式を比較すると全ての物理量において分子の差はなく、分母において豆電球の抵抗 $R(V)$ に加えられる電池の内部抵抗 r_0 の係数にのみ違いがある。この差が各物理量の差を生じさせる原因となっている。なお、基本となる値は引用文献1の結果を参照すると $E = 1.612$ V (引用文献1中の図2左図より)、 $R = 6.04$ Ω (引用文献1中の図4中図、 $V_2 = 1.43$ Vの時より)、 $R = 6.15$ Ω (同左、 $V_2 = 1.48$ Vの時より)、 $r_0 = 0.237$ Ω (引用文献1中の表1及び図2左図より)と与えられ、計算により求めた予想(計算)値も表7に記載する。また同様に、電池を直列に2個接続した場合の数式による計算値並びに求められた数値を表7下表に示す。ここで引用文献1から $E = 1.612$ V(引用文献1中の図2左図より)、 $R = 8.41$ Ω (引用文献1中の図4中図、 $V_2' = 2.72$ Vの時より)、 $R = 8.73$ Ω (同左、 $V_2' = 2.92$ Vの時より)、 $r_0 = 0.237$ Ω (引用文献1中の表1及び図2左図より)を採用した。

豆電球(定格B: 2.5 V, 0.3 A)における物理量に関して、実測値(表2)と計算値(表7)を比較するとおよそ7%以下の違いしかなく、表2に示された実験値の正当性と引用文献1を始め数式を活用した考察に関する正当性も示される結果が得られた。つまり、表2等で示した実験値を得ること、さらに計算値と比較することは重要であるが、これら値がどのような物理量と関係を持つかと言うことを理解する事(表7の数式理解)も起こった現象を理解する上で非常に大切と考える。

表7. 内部抵抗を持つ電池を用いた場合における電球に対する電流、電圧、電力の計算値並びに大小関係。(上表)電池1個、(下表)電池2個の場合。電池を単一アルカリ電池、電球を定格B: 2.5 V, 0.3 Aの豆電球を採用した時の計算値も記載する。

電球の数 物理量		単一アルカリ電池、1個		
		並列2個	大小関係	1個

電流 I_2	$\frac{E}{R(v=v_2)+2r_0}$	<	$\frac{E}{R(v=v_2)+r_0}$
	計算値 0.247		計算値 0.252
電圧 V_2	$\frac{R(v=v_2)E}{R(v=v_2)+2r_0}$	<	$\frac{R(v=v_2)E}{R(v=v_2)+r_0}$
	計算値 1.495		計算値 1.552
電力 P_2	$\frac{R(v=v_2)E^2}{(R(v=v_2)+2r_0)^2}$	<	$\frac{R(v=v_2)E^2}{(R(v=v_2)+r_0)^2}$
	計算値 0.370		計算値 0.392

電球の数 物理量		単一アルカリ電池、2個		
		並列2個	大小関係	1個
電流 I_2'	$\frac{2E}{R(v=v_2')+4r_0}$	<	$\frac{2E}{R(v=v_2')+2r_0}$	
	計算値 0.345		計算値 0.350	
電圧 V_2'	$\frac{2R(v=v_2')E}{R(v=v_2')+4r_0}$	<	$\frac{2R(v=v_2')E}{R(v=v_2')+2r_0}$	
	計算値 2.897		計算値 3.058	
電力 P_2'	$\frac{4R(v=v_2')E^2}{(R(v=v_2')+4r_0)^2}$	<	$\frac{4R(v=v_2')E^2}{(R(v=v_2')+2r_0)^2}$	
	計算値 0.998		計算値 1.071	

3. 明るさが変化しない条件の検証 — LEDを使用した場合 —

本章では2章で用いた豆電球の代わりに、青色LED（定格1.9-2.3 Vまたは2.9-3.2 V、Optosupply社製 8 mmサイズ、OSUB8131A）と、同じ電圧領域で発光する白色LED（定格3.0-3.6 V、Optosupply社製 8 mmサイズ、OSWT8131A）を用いて検証を行った結果を報告する（規格電流20 mA）。なお、これらの色のLEDを採用した理由は1章において述べた照度の電圧依存性のみでなく、回路内に電流制限抵抗を用いずに電池2個で発光することが可能であることも挙げられる¹⁾。なお、LEDの点灯は電圧制御では無く、電流制御が基本であり、電流制限抵抗または定電流ダイオードを用いる回路が一般的である^{3,4)}。しかし、今回は豆電球のケース同様に簡単な回路の取扱いを第一に考えたことによる対応（電流制限抵抗または定電流ダイオードを用いない）であることをご了承いただきたい。単一アルカリ電池、単一マンガン電池、単一充電池ならびに単三充電池を用いた測定結果を表8, 9, 10, 11にそれぞれ示す。当初考えていた予想と異なり¹⁾、全ての場合において、数値的にも視覚的にも明るさの変化が全く観測されなかった（視覚としては図5、定量的比は表8~11に示された結果からほとんど差が無い（0.997~1.056））。これは、LEDに流れる電流はごく少量であり、電池の内部抵抗が影響するだけのLEDにかかる電圧・電力変化が無いことが原因である。そして、それにより照度変化も

生じなかったと考える。つまり、引用文献1においては印加電圧が変わることを前提に照度の電圧依存を基準に考えていたが、そもそもLEDにおいては数が1個であろうと並列2個であろうと印加電圧に全くと言っていいぐらい変化が無いことから照度の差が生じることはなかったのである。ゆえに、明るさの変化を観測させない方法として電池2個に対して、豆電球の代わりとして青色または白色のLEDを用いるということが非常に有効な組み合わせであることが明らかとなった。

なお、本論文での実験はアルカリ電池とマンガン電池は新品未使用のもの、充電電池においてはフル充電したものを用いた。表に示す結果が電池の一番良い状態であり、電池の劣化に伴ってはアルカリ電池とマンガン電池の場合は照度の差が大きくなったが、充電電池においてはずっと照度の差は観測されなかった。ゆえに充電電池の場合はフル充電である必要さえ無いという結論を得た。

表8. 単一アルカリ電池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。

電池の種類及び数	単一アルカリ電池、2個					
	青色2.9-3.2 V		青色3.4-3.8 V		白色3.0-3.6 V	
LEDの規格						
LEDの数 [個]	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	0.0194	0.0213	0.0071	0.0071	0.0215	0.0220
電圧 [V]	3.0894	3.1005	3.1080	3.1135	3.0891	3.1016
電力 [W]	0.0599	0.0660	0.0220	0.0221	0.0664	0.0682
照度 [Lux]	1107	1121	655	656	4750	4940
	比 1.013		比 1.002		比 1.038	
視覚による差	変化なし		変化なし		変化なし	

表9. 単一マンガン電池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。

電池の種類及び数	単一マンガン電池、2個					
	青色2.9-3.2 V		青色3.4-3.8 V		白色3.0-3.6 V	
LEDの規格						
LEDの数 [個]	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	0.0146	0.0154	0.0057	0.0057	0.0158	0.0167
電圧 [V]	3.0268	3.0436	3.0477	3.0575	3.0266	3.0399
電力 [W]	0.0441	0.0469	0.0173	0.0174	0.0478	0.0508
照度 [Lux]	861	907	561	570	3764	3974
	比 1.053		比 1.016		比 1.056	
視覚による差	変化なし		変化なし		変化なし	

表10. 単一充電電池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。

電池の種類及び数	単一充電電池、2個					
	青色2.9-3.2 V		青色3.4-3.8 V		白色3.0-3.6 V	
LEDの規格						
LEDの数 [個]	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	0.0077	0.0078	0.0034	0.0036	0.0081	0.0081
電圧 [V]	2.9490	2.9536	2.9307	2.9309	2.9174	2.9200

電力 [W]	0.0227	0.0230	0.0100	0.0106	0.0236	0.0236
照度 [Lux]	603	620	427	429	2180	2180
	比 1.028		比 1.005		比 1.000	
視覚による差	変化なし		変化なし		変化なし	

表11. 単三充電電池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。

電池の種類及び数	単三充電電池、2個					
LEDの規格	青色2.9-3.2 V		青色3.4-3.8 V		白色3.0-3.6 V	
LEDの数 [個]	2	1	2	1	2	1
電流 [A]	0.0059	0.0062	0.0027	0.0036	0.0073	0.0073
電圧 [V]	2.9128	2.9134	2.9077	2.9309	2.9072	2.9083
電力 [W]	0.0172	0.0181	0.0100	0.0106	0.0212	0.0212
照度 [Lux]	469	470	364	363	2002	2096
	比 1.002		比 0.997		比 1.047	
視覚による差	変化なし		変化なし		変化なし	



図5. LEDの明るさが変化していない様子。単一充電電池2個と青色LED（規格2.9-3.2 V）を用いた場合で、左図がLED、2個、右図が1個の時の様子を表す（表10に対応）。なお、直視による観測だけでなく机にあてた光にも変化が見られなかった。

4. まとめ

『電池に2個並列につないだ豆電球（またはLED）の明るさと1個のみつないだ豆電球（またはLED）の明るさは同じ』という小中学校理科指導に合う実験条件の検証を行い、電池と電球のよりよい組み合わせの提案を行った。得られた適切な組み合わせを表12に示す。豆電球を基準にすると、アルカリ電池やマンガン電池は用いず、充電電池を利用することが望ましいという結果を得た。その場合、豆電球の種類も重要要素の1つであり、豆電球の定格値を考慮した選択が必要である（今回の結果からは定格3.8 V, 0.3 Aもしくは2.5 V, 0.3 Aが適しているという結果を得た）。一方、LED（青色、白色）を用いる場合は全ての電池において使用可能であった。そもそも豆電球とLEDでは発光の機構が異なり、LEDを豆電球のように『抵抗』という概念で考えて良いものではなく、さらには電流の流れる『極性の有無』の違いなどから安易に同等なものとして取扱ってよいものではない。しかし、『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明るさは同じ』＝『両ケースにおいて、電球1個にかかる電圧及び流れる電流は共に同じ』という並列つなぎの特性を理解する方法としては十分、活用できるものとする。一方で、本論文では触れなかったが、電球を直列つなぎした場合の学習を想定すると、豆電球を使用した場合は弱くなるが発光することから実験は成立するが、LEDにおいては1個にかかる印加電圧の低下に伴い、発光しなくなり、実験そのものが成立しない。このように、LEDは豆電球のような汎用性が無いという欠点を併せ持つため、指導者が何を目的に実験を行なうかをきちんと考えてLEDを活用すべきである。

本論文の目的は明るさの変化が無い状態を作り出す条件を見つけ出すことであるが、この状態を活用したさらなる発展的学習も考えられる。具体的には①：表4, 5で示された視覚的な差が無い実験を行い、小学校理科で学習する「明るさに変化は無い」ことを証明する。②：続いて回路に電流計、電圧計、照度計を組み込み定量的な測定を行い、実際は物理量に変化があるということを示し、その影響は電池が持つ内部抵抗であることを理解させるというものである。この例のように、本論文で得られた情報をもとに、さまざまな授業展開が期待される。

表12. 実験により得られた本論の目的を満たす電池と電球の組み合わせ。豆電球4種とは定格1.5 V, 0.3 A、2.5 V, 0.3 A、2.5 V, 0.5 A、3.8 V, 0.3 Aを意味する。

電池の種類 \ 電球の種類	豆電球4種	LED (青色、白色)
単一アルカリ	×	◎
単一マンガン	×	◎
単一充電電池	○ (一部のみ可)	◎
単三充電電池	○ (一部のみ可)	◎

理科指導においては生徒たちが自ら実験を行い、考えを深めることは生徒たちの科学的思考力を育むうえで重要なことと考える。そのためにも発達段階に沿った「その年代における真と見なされる科学 (将来的に偽となる可能性を含む)」を導くための指導者の事前準備・事前理解は非常に大切と考える。疑似的に真とされた科学は、生徒が精密な実験を行えば行うほど矛盾が生じ、理解を混乱させる場合がある。本論文においては並列つなぎされた電球を例に挙げ、その矛盾の発生を事前に防ぐ1つの方法を提案し、検証を行った。本論文に示された結果・知見が指導者並びに教員を目指す大学生にとって少しでも役立てて頂けると幸いである。

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27, 28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 (2016): 山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要, 第42号, pp. 79-88, 「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 - 並列に接続した豆電球の明るさはどうなるのか -」.
- 2) 小野寺力, 吉田雅昭 (2011): 日本物理教育学会誌, 第59巻, pp. 212-215, 「LEDの電圧電流特性の検討」.
- 3) トランジスタ技術編集部編 (2008): 『高輝度/パワーLEDの活用テクニック』CQ出版社.
- 4) 長谷川竜生, 上原信知, 釜野勝 (2012): 『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.