

# 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 IV

## — 並列に接続した電池につながれた豆電球の明るさはどうなるか —

千々松拓矢\*・重松 宏武

Handling of “Internal Resistance of a Power Cell”  
in Elementary and Junior High School Science and High School Physics IV :  
Illuminance of a Miniature Bulb Connected to Power Cells in Parallel

CHIJIMATSU Takuya\*, SHIGEMATSU Hirotake

(Received September 27, 2019)

### はじめに

子どもの発達段階に従って、異なる科学的知識を指導する代表的な例の1つとして、豆電球のつなぎ方と明るさの関係がある。具体的には小中学校理科分野においては豆電球と乾電池からなる回路では『豆電球2個を並列につないだ場合のそれぞれの豆電球の明るさは、豆電球1個のみをつないだ場合の明るさと同じ（または『ほとんど同じ』）。』と学習するが、高等学校物理分野においては電池の内部抵抗の影響から『明るさは異なる』と学習する（例えば、**中学校教科書「未来へ広がるサイエンス2」**（塚田捷他 2016）並びに**高等学校教科書「物理」**（國友正和他 2013））。ここで、小中学校における『明るさは同じ』という表現は電池の内部抵抗の存在そのものを無視した場合もしくは限りなく小さい場合にのみ成立する結果である。一方、現実的に得られやすい『明るさはほとんど同じ』という結果は、本来は『同じ』であるが様々な誤差の影響を受け、表示される値が若干異なる可能性を考慮したものなのか、そもそも『同じではないがその差が少ない』という意味を含んだものかその本意が伝わりにくいという問題点がある。

我々は電池の内部抵抗が回路に及ぼす影響に注目し、『電池に2個並列につないだ電球の明るさと1個のみをつないだ電球の明るさの相違』について数式と実測による比較検討を行ってきた。これは本来、小中学校における指導で求められる『電球（豆電球・LED）の明るさが同じ』に即した実験条件を導き出すことを意味している。具体的には、パート I（重松他 2016）では、電池、豆

電球、LEDの特性をそれぞれ明らかにし、数式を活用した半定量的評価によって、実験に適した電池と電球の組み合わせを提案した。パート II（兼安他 2017）では、パート I で示された提案を基に実測による実験的検証を行い、電池と電球のより良い組み合わせの評価・検討を行った。そして、パート III（重松他 2017）では、汎用型LEDに比べて取り扱いが容易な豆電球型LEDや、乾電池1個でも点灯する低電圧型LEDの発売（共に豆電球ソケットと同じE10口金対応）に伴い、これらの有効性の検討を行い、パート I から継続的に行ってきた議論を完結させた。

なお、小学校第4学年においては従来我々が議論してきた『豆電球の並列つなぎ』ではなく、『電池の並列つなぎ』による豆電球の明るさの違いに関する議論がなされており、さらに差異を評価する対象物としてモーターも活用されている（例えば、**小学校教科書「新しい理科4」**（毛利衛他 2011））。そこで、パート III ではこれらの学習内容に合わせ、電池の並列つなぎによる豆電球の明るさの変化、豆電球の代わりにモーターを活用した場合における電流や電圧等の物理量の変化について、数式を活用した半定量的評価も示した。

以上の流れからこれらの半定量的評価に対する実験的検証が必要と考え、我々は新たに検証を行った。本論文（パート IV）においては、前者の電池の並列つなぎによる電球の明るさの変化に関する検討結果のみについて報告する。後者のモーターを活用した場合における電池や電圧等の物理量の変化に関しては続くパート V（千々

\* 山口大学大学院教育学研究科

松他 2020) で示す予定である。これらパートIVとVの最終的目標は、電池のつなぎ方（1個と2個並列つなぎ）の変更による電球の明るさやモーターの回転数の違いの有無を具体的に明らかにすること、さらに、小中学校の指導に沿ったより正しい結果（つなぎ方を変えても明るさや回転数が視覚的に『同じ』となる条件）を導ける実験条件を示すことである。以下、第1章では「実験方法」、第2章では従来我々が行ってきた結果を踏まえ、「明るさの変化が無い条件の事前予想」をそれぞれ示す。続く第3、4、5章においては予想に対する「実験結果」、数式との比較を行う「定量的考察」、「まとめ」をそれぞれ述べる。

### 1. 実験方法

電球（豆電球・LED）に対して電池1個を接続した場合と電池2個を並列つなぎで接続した場合の2種類の回路において、電流、電圧並びに照度の測定を行った。実際に使用した実験装置の外観及び電気回路を図1に示す。パートI（重松他 2016）、II（兼安他 2017）、III（重松他2017）同様に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。電池は市販の一般的な乾電池と充電電池を使用した。これら電池は個体差があることから用いた電池のメーカーや型番は記載しないこととする。ちなみに各電池の起電力（直接測定）はそれぞれアルカリ電池：新品1.603V、劣化1.336V、マンガン電池：新品1.618V、劣化1.385V、充電電池：新品1.469V、劣化1.285Vであった（公称電圧はアルカリとマンガン電池が1.5V、充電電池が1.2V）。実験は非常に短い時間の回路接続になるよう心掛けて行い、実験中における電池の電気容量の消費はほぼ無く、そのため起電力の変化は無いと仮定する。なお、測定時においては、塩ビパイプを用いた固定台で光源の先端と照度計の測定部との距離を3mmに固定し、暗幕を用いて外的照度の影響を限りなく排除することにより、照度測定値がより正確かつ再現性が高くなるよう配慮した。ちなみに、照度は距離の二乗に反比例する特性（逆二乗の法則）を持っており、照度計と光源の距離や角度、さらに太陽光や蛍光灯などその他周りの光の影響を受けて値が大きく変わる物理量である。

回路図においては電池の起電力を $E$ 、内部抵抗を $r_0$ と表記した。これら $E$ と $r_0$ は電池により個体差が生じるが、本実験においては同じ種類（アルカリ等）・同じ状態（新品）のものはそれぞれ同じ特性を持つと仮定する（図1の電池の並列回路）。

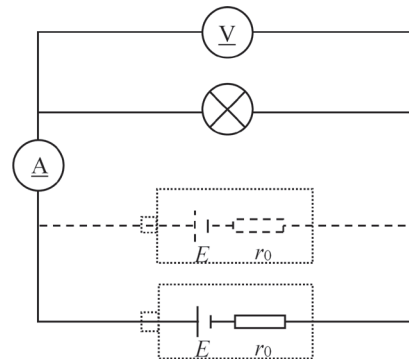


図1. 照度測定実験装置の外観（上）とその回路図（下）  
点線は電池を並列接続する場合の追加の配線を表し、下図において照度計は記入していない。

実験に使用した電球と電池の種類は表1に、それら30通りの組み合わせを表2にそれぞれ示す。電球は定格値の異なるA～E（A：豆電球（定格1.5V, 0.3A）、B：豆電球（定格2.5V, 0.3A）、C：低電圧白色LED（KN社）、D：低電圧白色LED（N社）、E：赤色LED（EJ社））の5種類を使用した。A、BはパートI及びパートIIで使用したものと同じもの（記号も同じ）であり、特性データを取得した豆電球4種類のうち、乾電池1個でも十分な光を発するかつ市販品として入手しやすいこれら2種類を採用した（他の定格3.8V, 0.3Aは定格電圧が高く十分な照度が得られないこと、定格2.5V, 0.5Aは抵抗値小さく、電池の内部抵抗の影響を受けやすいことから本実験趣旨と合わないと判断し、採用しないこととした（パートI、II参照））。また、C、D、EはパートIIIで使用したものの内、昇圧回路が内蔵され、乾電池1個の起電力に対応している低電圧型LEDの中から選択した。付加した条件としては1.5V付近の照度変化がなだらかであること、さらに入手しやすいということからC、Dを選択した。Eは1.5V付近の照度変化がなだらかであること、色の違いによる影響の可能性も考え、色の異なるものとして採用した。なお、EのLEDは低電圧型という表記はされずに販売されているが、性能（パートIII参照）から低電圧型が自明なため、ここでは名称に「低電圧」を追記して表現することとする。続いて、電池に関してはパートIIにおいては

内部抵抗が最も小さいと考えられる容量の大きい単一乾電池を主に用いて測定を行っていたが、今回は学校現場での参加型実験を行う事を考慮し、安価で一般的によく用いられている単三乾電池を使用することとし、種類はアルカリ電池、マンガン電池、充電電池の3種類を用いた。さらに、電池の劣化（容量の低下）に伴って電池の内部抵抗が大きくなることから、新品（充電電池においては完全に充電したもの）と、意図的に劣化させた電池（新品の電池に5Ωの抵抗を3時間接続したもの）の2種類の状態を各電池で使用した（抵抗に接続した時の各種電池の端子電圧の時間変化と内部抵抗の時間変化はパートI参照）。以下、本論文においては実験に用いた電球の組み合わせを表2に示した記号を用いて表すこととする。

表1. 豆電球・LEDの種類と、電池の種類とその状態

電球（豆電球・LED）	電池（単三）	電池の状態
A：豆電球（1.5V, 0.3A）	1：アルカリ	a：新品
B：豆電球（2.5V, 0.3A）	2：マンガン	b：劣化
C：低電圧白色LED（KN社）	3：充電電池	
D：低電圧白色LED（N社）		
E：低電圧赤色LED（EJ社）		

表2. 豆電球・LEDと電池の組み合わせ。表1で指定したアルファベットと数字を用いて組み合わせを示す。例えばA：豆電球（1.5V, 0.3A）と1-a：アルカリ電池-新品を用いた場合「A-1-a」と表現する。合計30通りとなる。

電球 電池	A	B	C	D	E
1-a	A-1-a	B-1-a	C-1-a	D-1-a	E-1-a
1-b	A-1-b	B-1-b	C-1-b	D-1-b	E-1-b
2-a	A-2-a	B-2-a	C-2-a	D-2-a	E-2-a
2-b	A-2-b	B-2-b	C-2-b	D-2-b	E-2-b
3-a	A-3-a	B-3-a	C-3-a	D-3-a	E-3-a
3-b	A-3-b	B-3-b	C-3-b	D-3-b	E-3-b

## 2. 明るさの変化がない条件の予想

パートIII（重松他 2017）に示した数式展開の結果から、電池の内部抵抗 $r_0$ が小さく、かつ電球（豆電球・LED）自体の抵抗が大きい場合には明るさの変化が少なくなることが既に予想されている。具体的には電池の内部抵抗の大小関係は、充電電池<アルカリ電池<マンガン電池となっており、充電電池が最も内部抵抗の影響が小さい電池と言える。実際にパートII「豆電球・LEDを並列に接続した場合」（兼安他 2017）においては、充電電池を使用する条件が最も内部抵抗の影響が少なく望ましいという結論を得ており、本研究の「電池を並列に接続した場合」においても同様な結果を得ることが予想される。

また、照度の特徴を検討するために電球（A～E）の照度の電圧依存性（直流電源装置使用時）を図2に示す（重松他 2017の図2より一部抜粋）。特に乾電池の起電力である1.5V付近における照度の変化に注目すると、1.4V-1.5V間のA：豆電球（1.5V, 0.3A）とD：低電圧白色LED（KN社）の変化量が他に比べて大きくそれぞれ傾きはA：5120、D：12500 Lux/Vである。対して、B、C、Eの変化量は小さく、傾きはそれぞれB：1380、C：1390、E：1670 Lux/Vである。さらに、パートII及びIIIにおいては、豆電球に比べLEDのほうが内部抵抗の影響を受けにくいという結論が既に得られていることから、変化量の小さいLEDであるC、Eが明るさの変化が少ないことが予想される。

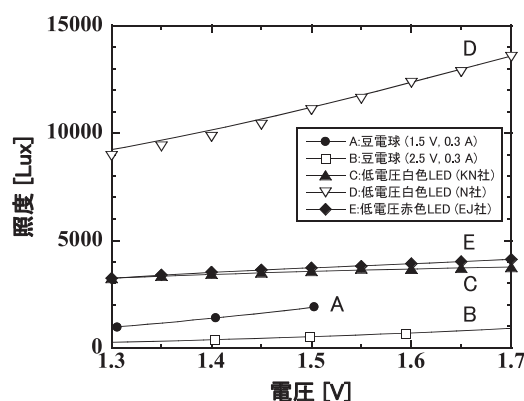


図2. 豆電球・LEDの照度の電圧依存性（重松他 2017の図2より一部抜粋。1.5V付近のみを記載）。

豆電球またはLEDそれぞれ1つに対して直流電源装置を用いた実測値。電源の内部抵抗をゼロと考え、表示した電圧は印加電圧の実測と考える。

以上のことから、最も内部抵抗の影響を受けにくく、明るさの変化が少ないと考えられる条件としては、低電圧LEDのC、Eと充電電池の組み合わせになることが予想される（具体的には表2における「C-3-a」と「E-3-a」の組み合わせ）。さらに、本研究では最も適した電球と電池の組み合わせだけでなく、多くの組み合わせの中から明るさの変化が少なく小中学校で実験を行う上で問題が生じにくいであろう条件の組み合わせの探索も行うこととする。

## 3. 実験結果

アルカリ電池、マンガン電池、充電電池における測定結果を表3、4、5にそれぞれ示す。表中において用いられた組み合わせの記号は表1及び表2中で定義された組み合わせを意味し、さらに電流値、電圧値、照度値は実測値、電力は電流と電圧から算出した計算値である。電圧においては各電池の起電力に対する比率をパー

センターで併記し、電力においては電池が1個の時の電球の電力に対する電池2個を並列につないだときの電力の比も併記した。また、縦項目「電池の数」における2個とは、電池2個を並列つなぎで接続した場合の結果を意味する。「照度」においては電池1個のときの照度に対する電池2個を並列つなぎしたときの照度の比も示し、さらに「視覚的変化の有無」に関する評価は筆頭者（千々松）の直視による個人的判断により「変化あり（大）」「変化あり（小）」「変化なし」の3段階で評価した。表3、4、5において注目すべきことはLEDにおいては電池の内部抵抗の影響をほぼ受けず、起電力とほぼ同じ電圧がLEDにかかっているが、豆電球においては電池の内部抵抗の影響を大きく受け、明確な電圧低下・電力低下が生じていることが定量的に示されたことである。特に劣化した電池においては著しい変化がある。これら差は照度の視覚による変化にも大きく影響してお

り、視覚的変化の有無のみをあらためて表6にまとめる。さらに、結果から得られた照度比（電池1個と並列2個の場合の違い）と主観による違い（相関）を図3に示す。表6及び図3からも照度変化という観点からLEDの有効性が容易に読みとれる結果を得た。

なお、パートIIでは主に単一電池、パートIV（本論文）では単三電池を使用したことを第一章で述べた。パートIIではさらに単三充電機も用いており、パートIVの表5で示した一部（表5のA-3-aとB-3-aのそれぞれ電池1個の場合）と同じ実験内容を既に行っている。両者において電流と電圧値は比較的一致しているが照度に差が生じている。これは用いた電球の固定台の違い（電球の固定の仕方）によるものでありこの差は本質的ではない。照度に関しては同じ条件下のもとで行った実験結果の相対比を議論すれば良く、パートIIとパートIV各々で比較検討することに問題はない。

表3. 単三アルカリ電池（1-a（新品）、1-b（劣化））を用いた各電球に対する電流、電圧、電力、照度の比較。  
上表は新品、下表は劣化の測定結果で起電力はそれぞれ1.603V、1.336Vである。

組み合わせ	A-1-a		B-1-a		C-1-a		D-1-a		E-1-a	
電球の定格	A: 豆電球 (1.5 V, 0.3 A)		B: 豆電球 (2.5 V, 0.3 A)		C: 低電圧白色 LED (KN 社)		D: 低電圧白色 LED (N 社)		E: 低電圧赤色 LED (EJ 社)	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.291	0.295	0.243	0.248	0.064	0.063	0.048	0.049	0.161	0.168
電圧 [V] ※2	1.4716	1.5204	1.4892	1.5318	1.5642	1.5768	1.5704	1.5799	1.5234	1.5505
	91.8%	94.8%	92.9%	95.6%	97.6%	98.4%	98.0%	98.6%	95.0%	96.7%
電力 [W]	0.4282	0.4485	0.3619	0.3799	0.1001	0.0993	0.0754	0.0774	0.2453	0.2605
	比 1.047		比 1.050		比 0.992		比 1.027		比 1.062	
照度 [Lux]	1456	1647	434	541	3699	3713	10400	10490	8140	8760
	比 1.131		比 1.247		比 1.004		比 1.009		比 1.076	
視覚による差	変化なし		変化あり（小）		変化なし		変化なし		変化なし	

組み合わせ	A-1-b		B-1-b		C-1-b		D-1-b		E-1-b	
電球の定格	A: 豆電球 (1.5 V, 0.3 A)		B: 豆電球 (2.5 V, 0.3 A)		C: 低電圧白色 LED (KN 社)		D: 低電圧白色 LED (N 社)		E: 低電圧赤色 LED (EJ 社)	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.266	0.271	0.226	0.228	0.074	0.073	0.045	0.045	0.123	0.127
電圧 [V] ※2	1.1374	1.2533	1.2793	1.3082	1.3253	1.3334	1.3421	1.3465	1.3049	1.3212
	85.1%	93.8%	95.8%	97.9%	99.2%	99.8%	100.5%	100.8%	97.7%	98.9%
電力 [W]	0.3025	0.3396	0.2891	0.2983	0.0981	0.0973	0.0604	0.0606	0.1605	0.1678
	比 1.123		比 1.032		比 0.992		比 1.003		比 1.045	

照度 [Lux]	340.4	623	277	313	2935	2963	7610	7650	7000	7330
	比 1.832		比 1.130		比 1.010		比 1.005		比 1.047	
視覚による差	変化あり (大)		変化あり (小)		変化なし		変化なし		変化なし	

※1 「電池の数」2個とは並列接続を意味する。

※2 下段の数値は電池の起電力に対する比率（パーセンテージ）を意味する。

表4. 単三マンガン電池（2-a（新品）、2-b（劣化））を用いた各電球に対する電流，電圧，電力，照度の比較。  
上表は新品、下表は劣化の測定結果で起電力はそれぞれ1.618V、1.385Vである。

組み合わせ	A-2-a		B-2-a		C-2-a		D-2-a		E-2-a	
電球の定格	A: 豆電球 (1.5 V, 0.3 A)		B: 豆電球 (2.5 V, 0.3 A)		C: 低電圧白色 LED (KN 社)		D: 低電圧白色 LED (N 社)		E: 低電圧赤色 LED (EJ 社)	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.285	0.293	0.237	0.244	0.065	0.064	0.045	0.046	0.147	0.156
電圧 [V] ※2	1.3961	1.4921	1.4070	1.4887	1.5394	1.5536	1.5486	1.5613	1.4550	1.4985
	86.3%	92.2%	87.0%	92.0%	95.1%	96.0%	95.7%	96.5%	89.9%	92.6%
電力 [W]	0.3979	0.4372	0.3335	0.3632	0.1001	0.0994	0.0697	0.0718	0.2139	0.2338
	比 1.099		比 1.089		比 0.9930		比 1.030		比 1.093	
照度 [Lux]	1152	1502	332	440	3102	3130	9240	9350	5090	5350
	比 1.304		比 1.325		比 1.009		比 1.012		比 1.051	
視覚による差	変化あり (小)		変化あり (小)		変化なし		変化なし		変化なし	

組み合わせ	A-2-b		B-2-b		C-2-b		D-2-b		E-2-b	
電球の定格	A: 豆電球 (1.5 V, 0.3 A)		B: 豆電球 (2.5 V, 0.3 A)		C: 低電圧白色 LED (KN 社)		D: 低電圧白色 LED (N 社)		E: 低電圧赤色 LED (EJ 社)	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.247	0.266	0.197	0.218	0.084	0.077	0.054	0.055	0.094	0.106
電圧 [V] ※2	0.9463	1.1331	0.9325	1.1462	1.1869	1.2733	1.2050	1.2829	1.1502	1.2231
	68.3%	81.8%	67.3%	82.8%	85.6%	91.9%	87.0%	92.6%	83.0%	88.3%
電力 [W]	0.2337	0.3014	0.1837	0.2499	0.0997	0.0980	0.0651	0.0706	0.1081	0.1296
	比 1.290		比 1.360		比 0.9829		比 1.084		比 1.199	
照度 [Lux]	73	274	37	131	2609	2755	8010	8440	4710	5310
	比 3.753		比 3.541		比 1.056		比 1.054		比 1.127	
視覚による差	変化あり (大)		変化あり (大)		変化なし		変化なし		変化なし	

※1 「電池の数」2個とは並列接続を意味する。

※2 下段の数値は電池の起電力に対する比率（パーセンテージ）を意味する。

表5. 単三充電電池（3-a（新品）、3-b（劣化））を用いた各電球に対する電流、電圧、電力、照度の比較。  
 上表は新品、下表は劣化の測定結果で起電力はそれぞれ1.469V、1.285Vである。

組み合わせ	A-3-a		B-3-a		C-3-a		D-3-a		E-3-a	
電球の定格	A:豆電球 (1.5 V, 0.3 A)		B:豆電球 (2.5 V, 0.3 A)		C:低電圧白色 LED (KN 社)		D:低電圧白色 LED (N 社)		E:低電圧赤色 LED (EJ 社)	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.285	0.289	0.234	0.237	0.070	0.070	0.044	0.044	0.142	0.145
電圧 [V] ※2	1.3987	1.4141	1.3750	1.3963	1.4302	1.4358	1.4326	1.4388	1.4110	1.4210
	95.2%	96.3%	93.6%	95.1%	97.4%	97.7%	97.5%	97.9%	96.1%	96.7%
電力 [W]	0.3986	0.4087	0.3218	0.3309	0.1001	0.1005	0.0630	0.0633	0.2004	0.2060
	比 1.025		比 1.028		比 1.004		比 1.005		比 1.028	
照度 [Lux]	1087	1154	376	407	3588	3601	10190	10210	7990	8460
	比 1.062		比 1.082		比 1.004		比 1.002		比 1.059	
視覚による差	変化なし		変化なし		変化なし		変化なし		変化なし	

組み合わせ	A-3-b		B-3-b		C-3-b		D-3-b		E-3-b	
電球の定格	A:豆電球 (1.5 V, 0.3 A)		B:豆電球 (2.5 V, 0.3 A)		C:低電圧白色 LED (KN 社)		D:低電圧白色 LED (N 社)		E:低電圧赤色 LED (EJ 社)	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.269	0.272	0.222	0.225	0.077	0.076	0.045	0.045	0.114	0.116
電圧 [V] ※2	1.2168	1.2423	1.2276	1.2484	1.2621	1.2696	1.2696	1.2742	1.2532	1.2634
	94.7%	96.7%	95.5%	97.2%	98.2%	98.8%	98.8%	99.2%	97.5%	98.3%
電力 [W]	0.3273	0.3379	0.2725	0.2809	0.0972	0.0965	0.0571	0.0573	0.1429	0.1466
	比 1.032		比 1.031		比 0.993		比 1.004		比 1.026	
照度 [Lux]	409	463	222	245	2852	2866	6970	7020	6700	6980
	比 1.132		比 1.104		比 1.005		比 1.007		比 1.042	
視覚による差	変化なし		変化なし		変化なし		変化なし		変化なし	

※1 「電池の数」2個とは並列接続を意味する。

※2 下段の数値は電池の起電力に対する比率（パーセンテージ）を意味する。

表6. 豆電球・LEDの組み合わせと視覚的照度差

電球の種類 電池の種類		豆電球		低電圧LED		
		A	B	C	D	E
アルカリ 電池	新品 1-a	○	△	○	○	○
	劣化 1-b	×	△	○	○	○
マンガン 電池	新品 2-a	△	△	○	○	○
	劣化 2-b	×	×	○	○	○
充電電池	新品 3-a	○	○	○	○	○
	劣化 3-b	○	○	○	○	○

○…変化なし △…変化あり（小） ×…変化あり（大）

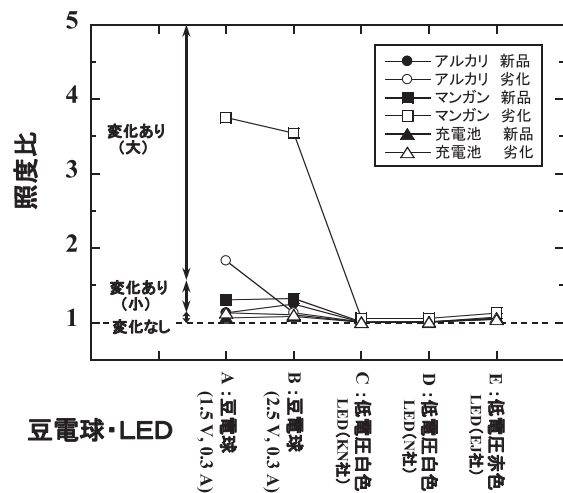


図3. 照度比と視覚的主観の相違

照度の比と視覚的变化の相関は、「変化なしの場合」の照度比は1.002~1.132、「変化あり(小)」の場合の照度比は1.130~1.325、「変化あり(大)」の場合の照度比は1.832~という結果を得た。つまり、1.13付近で「変化なし」と「変化あり(小)」の境界があり、1.325~1.832の間に「変化あり(小)」と「変化あり(大)」の境界があることを意味する。照度比は1を基準にどれだけ照度が増えたか(ここでは並列に接続することでどのくらい増えたか)を漠然と表している値であり、さらに視覚による変化の感じ方には個人差があることから、明確な判断材料とは言えない。しかし、視覚による差がどのくらいの定量的差に相当するかということの情報を得ることは大切であり、今回の測定で照度変化が約10%~20%の間に明るさの変化を感じ取る境界があるという実験的事実を得ることができたことに対しての意義があると考えている。

続いて表3~5に示した結果から得られた電球の電圧比と照度比の相関を図4に示す。これらの比は電池1個の時の電球の電力または照度に対する、電池2個を並列つなぎで接続したときのこれらの物理量の比を意味する。全ての低電圧LEDは電池の種類や劣化状態に大きく左右されることなく、明るさの視覚的变化の差が無いという結果を得られ、それを支持するように電力に変化があっても有意な照度変化が観測されなかった。それに対して、豆電球においては電力変化に対応して照度の変化が顕著に見られ、同時に視覚的变化も観測された。特にB:豆電球(2.5V, 0.3A)では、充電電池-新品(3-a)を除いて明るさの変化が感じられるという結果となった。これは2章において示した予想を支持する結果であり、さらに照度の電圧依存性が大きいDのLEDにおいても他のLED同様に照度変化が小さい(ほぼ無い)結果を得た。これは表3、4、5が示すように電圧変化が非常に小さく、照度が増えるまでの影響を与えなかったこと、さらに豆電球に比べ、LEDの照度は非常に大きいことから、人の目では変化を感じ取りにくくなっていることも影響したと考える。ゆえに、2章において示した予想通り、豆電球に比べ低電圧LEDの方が実験に適していることが改めて示された。

次に、電池の種類に着目すると、充電電池は新品(3-a)、劣化(3-b)共にすべての豆電球・LEDを用いても視覚的变化はなく実験に適していることがわかる。逆に、アルカリ電池、マンガン電池においては劣化による内部抵抗の増加が顕著であり、電力比を見ても、電力が大きく増加していることがわかる。特に、マンガン電池劣化(2-b)の豆電球A、Bの結果においては「変化あり(大)」という結果を得ており、マンガン電池の有用性が低いことが示された。

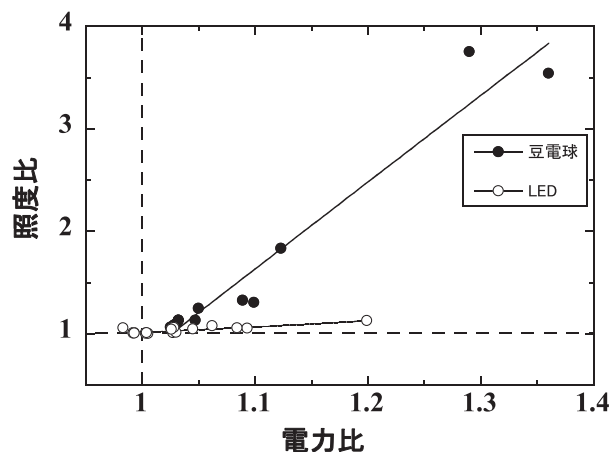


図4. 電球(豆電球とLED)における電力比と照度比の関係。表6における30通りの組み合わせを豆電球12通り、LED18通りをそれぞれ同一のマーカで表示。

#### 4. 定量的考察

測定結果をもとに数式(パートIII 重松他 2017)との関連性の検討を行う。物理量として電池の起電力を $E$ 、内部抵抗を $r_0$ 、豆電球に流れる電流を $I$ 、加わる電圧を $V$ 、消費電力を $P$ 、電圧依存する電球の抵抗を $R(V)$ とそれぞれ定義し、図1に示した回路を考える。電池を1個もしくは2個並列つなぎした時の電球に流れる電流 $I$ 、かかる電圧 $V$ 、電力 $P$ の比較を表7に示す。この表からは電池の内部抵抗の項の影響が異なる(同じ分子で統一すると分母の差が顕著に理解できる)ことから、電池を並列つなぎした場合の電球の方がより明るくなることが一目瞭然である。

表7. 電池の内部抵抗を考慮した場合における電池1個と2個並列つなぎした時の電流、電圧、消費電力の計算値の比較(図1参照)。

電池数 物理量	1個	大小 関係	並列2個
電流 $I$	$\frac{E}{R(V) + r_0}$ ( $= \frac{2E}{2R(V) + 2r_0}$ )	<	$\frac{2E}{2R(V) + r_0}$
電圧 $V$	$\frac{R(V)E}{R(V) + r_0}$ ( $= \frac{2R(V)E}{2R(V) + 2r_0}$ )	<	$\frac{2R(V)E}{2R(V) + r_0}$
電力 $P$	$\frac{R(V)E^2}{(R(V) + r_0)^2}$ ( $= \frac{2^2R(V)E^2}{(2R(V) + 2r_0)^2}$ )	<	$\frac{2^2R(V)E^2}{(2R(V) + r_0)^2}$

ここで、具体的な例として、A-1-a（豆電球1.5V, 0.3A、アルカリ電池、新品）の組み合わせについて考える。計算には、既知の物理量として起電力 $E = 1.603\text{V}$ （表3参照）、電球の抵抗 $R(V) = 5.00\Omega$ （パートI（重松他2016）中の図4参照）、電池の内部抵抗 $r_0 = 0.398\Omega$ （パートI（重松他2016）中の表1参照）をそれぞれ採用し、得られた計算値と実験による実数値との比較を表8に示す。なお、表中の増加率とは電池の個数を1個から2個並列つなぎに変更した時のそれぞれの物理量の増加率を示している。計算値の増加率に比べ、測定値の増加率が若干低いが、表7に示した通り、並列につながり電池の数が増えるとそれぞれの物理量の増加が確認された。ただし、C：低電圧白色LED（KN社）に限っては、すべての電池において、2個並列つなぎに変更したときに電流値 $I$ が減少している（表3、4、5参照）。これはそもそも豆電球の抵抗の概念をLEDに用いることに問題があるが、強いて同じとするならば、流れる電流は微小であり、電力を含めた他の物理量を比較するとそれらの変化はほとんどない。これは実験環境による誤差の範囲内の逆現象であり、基本、LEDを用いた場合には照度も含めあらゆる物理量において有意な変化はないと考えることが妥当と考える。

表8. 数式によって得られた計算値と実際の測定値。

電池の数 物理量	計算値			測定値		
	1個	2個	増加率	1個	2個	増加率
$I[\text{A}]$	0.297	0.308	3.70%	0.291	0.295	1.37%
$V[\text{V}]$	1.4848	1.5416	3.84%	1.4716	1.5204	3.32%
$P[\text{W}]$	0.4409	0.4753	7.71%	0.4282	0.4485	4.74%

## 5. まとめ

本論文では、「電池のつなぎ方（1個と2個並列つなぎ）の違いによる電球（豆電球・LED）の明るさの変化の有無を具体的に明らかにすること」「小中学校の指導に沿ったより正しい結果（つなぎ方を変えても明るさや回転数が視覚的に『同じ』となる条件）を導ける実験条件を示すこと」の2点を目的として、実験・考察を行った。前者については、一部の電球を用いた場合を除いて、数式展開同様に電池を2個並列接続した回路の方が電流、電圧、電力及び照度が大きくなっていることが具体的に明らかとなった（表3、4、5参照）。ただし、前述したとおり、C：低電圧白色LED（KN社）に関しては電池2個並列接続時の電流が本来増加すべきところが低下する傾向が見られた。この現象が起こる明確な原因はわからないが、本研究目的である「明るさの違い」という点では結果に矛盾を与えていないことからここではこれ以上踏み込まないこととする。

続いて後者の『明るさが変わらない』条件を以下にまとめる。

### 1) 明るさの変化が無い組み合わせ『○』

- ・低電圧LED（C、D、E）+すべての電池
- ・すべての電球+充電電池（新品、劣化）
- ・豆電球（A）+アルカリ電池（新品）

なお、これらの組み合わせの中でも「電球は低電圧LED、電池は充電電池を使用する」ことが最も望ましく、さらには「電池は新品を用いること」が望ましいという結論を得た。2章においては照度の電圧依存性が低い低電圧LED（C、E）を最有力候補と示していたが、図4に示すようにLEDにおいては電圧の変化は豆電球に比べて小さく、さらに照度変化はほとんど生じないことからDのLEDも含めて全ての低電圧LEDを採用してよいという結果を得た。また、LEDの色に関しては白色と赤色のみしか検証を行っていないが、色の違いによる変化が得られることは無く、他の色に関しても同様な結果が得られると予想する。また、マンガン電池の使用に関しては避けた方がよいという結果を得た。同様に変化があった条件を以下に示す。

### 2) 明るさの変化が少しある組み合わせ『△』

- ・豆電球（A、B）+マンガン（新品）
- ・豆電球（B）+アルカリ（新品、劣化）

### 3) 明るさの変化が大きい組み合わせ『×』

- ・豆電球（A）+アルカリ電池（劣化）
- ・豆電球（A、B）+マンガン電池（劣化）

結論として低電圧LEDの有効性が示された。しかし、LEDは豆電球とは異なり、電流の向きが逆であると点灯しないという特徴があり、その指導の配慮が必要になる。具体的には、現行の学習指導要領に従うと第6学年においてLEDを活用するが、前倒して並列つなぎを学習する第4学年にLEDの性質を指導する必要性が生じる。なお、この指導を省くために無極性の低電圧LEDを活用するという案もある。ただし、極性・無極性に関わらず、豆電球タイプの低電圧型LEDや充電電池は共に豆電球や乾電池と比べて高価であり、児童生徒が一人ひとり扱う可能性のある学校現場では、金銭的負担が大きくなる。そのため、安価な条件として、「豆電球とアルカリ電池の新品」を用いることにより明るさの変化が無いという状況を作り出すことが可能であるため、一般的な活用としてはこちらをお勧めしたい。今回の例では特にA-1-a（豆電球1.5V, 0.3A、アルカリ電池、新品）の組み合



わせを候補に挙げる。

以上をもって「電池のつなぎ方（並列）と電球の明るさとの関係」に関する研究報告を終了します。続くパートV（千々松 2020）においては電球にかわり、モーターに接続したプロペラの回転数の変化について、同様の実験を行った結果を報告する。電球の照度は明るさの変化を視覚を活用して静的に感じ取ることに對し、プロペラの回転数は、動体視力によって変化を動的に感じ取ることになるため、我々人の目では電池の接続方法を変更したことによる変化が電球に比べて感じにくいことが予想される。したがって、電球を用いた実験よりも、より変化が少なく、小学校における学習に即した結果が得られることが期待される。次回パートVをもって、これまで研究してきた一連の「電池の内部抵抗と並列つなぎの関係性」について完結したい。

## 引用文献

- ・磯田誠・宮花昂平（2014）「豆電球と乾電池を用いる直流電気回路の小中学校教員養成教育」科学教育研究38, 27-33.
- ・兼安真也・重松宏武（2017）「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 -並列に接続した豆電球の明るさはどうなるのか-」山口大学教育学部研究論叢 66 第3部, 149-160.
- ・國友正和他（2013）『高等学校教科書「物理」』新興出版 啓林館.
- ・重松宏武・兼安真也・吉村大介（2016）「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-」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.
- ・重松宏武・内田由美子・栗田克弘（2017）「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 -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-」山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要 44, 113-122.
- ・塚田捷他（2016）『中学校理科教科書「未来へひろがるサイエンス2」』新興出版社啓林館.
- ・毛利衛他（2011）『小学校理科教科書「新しい理科4」』東京書籍.

【過去の論文内容の修正】

パートII（兼安他 2017）中の表11において数値の記載ミスがあり、以下のように訂正いたします。  
下線部が修正箇所です。

（兼安真也・重松宏武（2016）「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 – 並列に接続した豆電球の明るさはどうなるのか–」山口大学教育学部研究論叢 66 第3部,  
149-160.）

表11. 三充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]	0.0059	0.0062	<u>0.0032</u>	<u>0.0033</u>	0.0073	0.0073
電圧 [V]	2.9128	2.9134	2.9077	<u>2.9109</u>	2.9072	2.9083
電力 [W]	0.0172	0.0181	<u>0.0093</u>	<u>0.0096</u>	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	