

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Ⅴ

— 並列に接続した電池につながれたモーターの回転はどうか —

千々松拓矢*・重松 宏武

Handling of “Internal Resistance of a Cell”
in Elementary and Junior High School Science and High School Physics V :
Illuminance of Rotation Frequency of a Motor Connected to Cells Connected in Parallel

CHIJIMATSU Takuya*, SHIGEMATSU Hirotake

(Received September 25, 2020)

はじめに

豆電球の明るさをつなぎ方について、小中学校理科分野『豆電球と電池で構成される回路』の学習において、「電池1個の時の豆電球の明るさと電池2個を並列に接続した豆電球の明るさは同じ（または「ほとんど同じ」）である（小学校）」並びに「複数の豆電球が並列につながれた回路においてはそれぞれの豆電球に加わる電圧の大きさはすべて同じで電源または回路全体の電圧の大きさに等しい（中学校）」と学習する。後者においては、電源を乾電池とするならば、豆電球を並列に複数つないでも電圧変化は起こらないことから豆電球の明るさは変わらないということを意味する。しかし、実際には電池の内部抵抗の影響から、豆電球に加わる電圧に変化が生じ、この影響のため目視による明るさの変化が生じる場合がある。この事実を踏まえ、これまでに我々は電池の内部抵抗が回路に及ぼす影響に注目し、電池と電球それぞれ1個からなる回路と比較して、電池または電球を2個並列につないだ回路における「目視レベルにおける電球の明るさに変化ない（同じ）」といえる実験条件を導くための実践的基礎研究を行った。パートⅠ¹⁾、パートⅡ²⁾、パートⅢ（第1章）³⁾では中学校における学習内容を採用し、『並列に接続した電球の明るさ』に注目した実験検証並びに数式を用いた理論的考察を行い、続くパートⅢ（第2章）、パートⅣ⁴⁾では、小学校における学習を採用し、『並列に接続した電池につながれた電球の明るさ』についての実験検証並びに数式を用いた理論的考察を行ってきた。これらの結果、最も電

池の内部抵抗の影響が少なく、明るさが変わらない組み合わせとして、充電電池と低電圧型LEDの採用を提案した。また、これらは比較的高価なため、数が必要な小学校においては予算的負担が多いことからパートⅣにおいて安価にできる異なる組み合わせとして、アルカリ電池新品と豆電球（1.5 V, 0.3A）を第二候補として提案した⁴⁾。

本論文（パートⅤ）では、パートⅣに引き続き、小学校『並列つなぎの電池の回路』に関する実験について、その対象物を“電球”から“モーター”に変更し、電球と比較したモーター利用の有用性の検討と、電池のつなぎ方によるモーターの回転数の変化について検討を行った結果を報告する。なお、モーターは電球同様に教科書内で掲載されている回路における“抵抗”であり、電球の明るさに対してモーターの回転と音の変化を比べることが可能である。ゆえに、最終目標としては前回に引き続き、電池のつなぎ方の変更（1個または2個並列つなぎ）によるモーターの回転数や音の違いの有無を具体的に明らかにすること、さらに、小学校の指導に沿った「（視覚的に）回転数は変わらない」と言える結果を導ける実験条件を示すこととした。以下、モーターを活用した実験方法並びに実験結果についてそれぞれ第1章、第2章において詳細に述べる。さらに第2章においては、得られた物理量を用いた定量的評価と五感を用いた定性的評価も行う。続く第3章ではモーターの見かけ上の抵抗値を算出し、モーターの回転数と抵抗に関する定量的考察を行う。そして、最終第4章においてこれらの結果と考察から研究全体の総括を行う。

* 下松市立末武中学校

1. モーターを用いた実験方法

採用した実験の回路図と実験装置の外観を図1に示す。5種類のモーター（詳細は1-1節に記載）と3種類の単三電池（アルカリ、マンガン、充電電池）の組み合わせからなる回路において、モーターにかかる電圧と流れる電流をデジタルマルチメーター（三和電気計器株式会社製、PC-7000）、モーターの回転数をレーザータコメーター（ライン精機株式会社製、TM-7010K）を用いて以下に示す手順①～④に従ってそれぞれ測定を行った。なお、乾電池の消費電力を抑えるために閉回路となる時間は極力短くなるように努めた。モーターには重さ1.2g、羽根の長さ約28mmのプラスチック製3枚プロペラを装着し、レーザータコメーターの測定部とモーター（プロペラの羽）の間の距離は50mmに固定した。

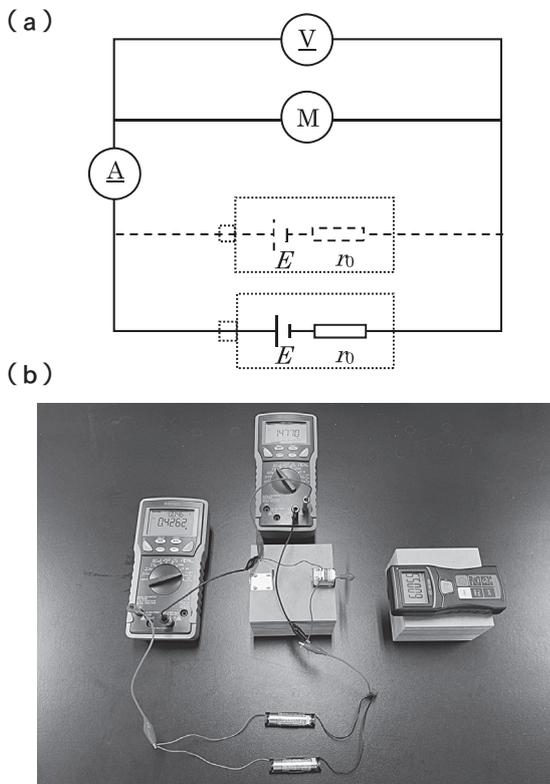


図1. 回路図 (a) 及び実験装置の外観 (b)。Mはモーターを意味し、電池の起電力を E 、内部抵抗を r_0 とそれぞれ定義した。破線は乾電池を並列に追加接続した場合のものであり、回路図内にレーザータコメーターは記載していない。

- ① 電池1個を採用した回路におけるモーターに流れる電流とかかる電圧、プロペラの回転数の測定をそれぞれ行う。
- ② 電池2個を並列つなぎに変えた回路におけるモーターに流れる電流とかかる電圧、プロペラの回転数の測定をそれぞれ行う。
- ③ ①と②の結果を踏まえ、電池1個から2個並列つな

ぎに変更した場合のモーターに流れる電流とかかる電圧、プロペラの回転数を複合的かつ定量的に比較・検討を行う。

- ④ 同時に定性的評価としてモーターの回転数変化に対する視覚的变化の有無及び聴覚的变化の有無を確認する。

本実験において採用したレーザータコメーター (TM-7010K) とは本体から発するレーザー光に対する反射光を観測することにより対象物の回転速度や回転数を非接触で測定する機器である。反射光専用の反射シールを対象物に貼ることにより正確な計測が可能となる (図2)。ちなみに測定範囲は $6.0 \sim 99999.9 \text{r/min}$ 、分解能は 0.1r/min である。なおTM-7010Kは専用アダプタを用いることにより、モーター本体に直接接触させることで回転数を計測することも可能である。しかし、本研究では小学校における回転数の変化の判別にプロペラの回転数の変化を視覚的に捉えるという点を考慮して、プロペラを用いた非接触測定を採用した。

より詳細な実験方法・手順、具体的には「採用したモーターと電池それぞれの規格」並びに「モーターの回転に関する特性」をそれぞれ1-1節、1-2節において詳細に述べる。



図2. 測定用シール (右上の灰色) が貼られたプロペラとモーター。

1-1. 採用したモーターと電池それぞれの規格

測定に使用する実験器具は学校現場での利用を想定しており、入手しやすい汎用型市販品モーターを必須条件とした。さらに同一電圧下における回転数の異なる (消費電力の異なる) 5種類を採用した。これらモーターの外観並びに規格を図3と表1にそれぞれ示す。なお、図及び表中においてモーター番号 (記号) をF~Jと指定しているが、これは同一実験の抵抗として電球を用いたパートIV⁴⁾においてA~Eを既に採用しており、継続実験の意味合いから通し番号 (記号) を用いた。F~Iは乾電池などの直流電源に接続して用いられる汎用型

モーターであるが、異なるタイプのモーターとして、太陽電池用モーター J も採用した。ちなみに、太陽電池用のモーターは一般的に小型太陽電池の起電力を想定した作りになっており、利用できる電圧範囲が低くかつ狭い。しかし、このモーターに関しては「乾電池での使用可」という記載があったため、実験に用いることとした。表 1 中に示した規格値はそれぞれのモーターの販売元の公式 web ページに記載されている値を採用した^{5, 6)}。表中の『負荷時』というものはモーターにある特定のプロペラやプーリーなどを用いて一定の負荷が与えられた状態と推測する。それによって無負荷時からの回転数の低下が起こったと考える。なお、TAMIYA 製のモーターに関しては無負荷での回転数と消費電力の値しか情報が得られなかったため、実測した値を記載した。また、すべてのモーターにおいて直流定電圧電源装置で 1.5V の電圧を加えたときの負荷時の回転数 (図 2 に示すようにプロペラ装着時の回転数) も項目最下段「1.5V 時の回転数実測値」に合わせて記載した。それぞれのモーターを比較すると、外観、回転数及び回転の力の強さ (トルク) が異なっている。例えば、モーター F (FA-130RA) は採用したモーターの中で、最も外寸が小さく、回転数が最も多いが、その分トルクが弱く適正負荷が小さい特徴がある。それに比べ、モーター I (RE-280RA) は最も外寸が大きく、トルクが強いため、適正負荷が他に比べて大きい、回転数は少ない特徴を持つ。つまり、汎用モーターでは外寸が大きいモーターほどトルクが強いが、

その分同一電圧下での回転数は少なくなるという特徴がある。また、モーター J (SOLAR MOTOR 03) に関しては、太陽電池用のモーターであるため、前述した通り、少ない電圧でも回転するように作られている。そのため、消費電力が 25mA と他のモーターに比べて非常に小さく、その分回転数が少ない特徴を持っている。

なお、余談ではあるが文献 5 以外にもモーターの製品規格の情報は公開されている⁷⁾。文献 5 (無負荷時 8600r/min, 1.5V 時) と文献 7 (無負荷時 9100r/min, 1.5V 時) との間に性能に関する数値の違いが見られたが、これは前者が乾電池を使用時、後者は定電圧電源使用時のそれぞれ物性値の値と推測する。つまり、前者は電池の内部抵抗の影響によりモーターにかかる電圧低下が発生し、それによる回転数の低下が見られる。

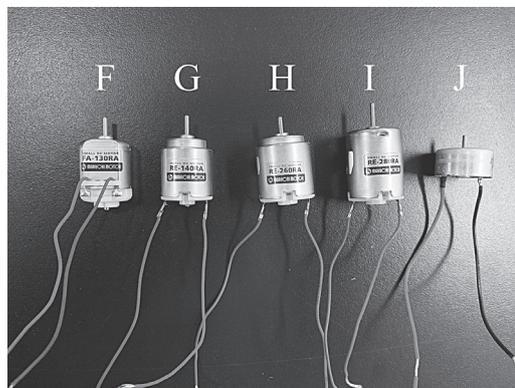


図 3. 実験に使用したモーター (記号は表 1 参照)

表 1. 実験に使用したモーターの性能^{5, 6)}。「1.5V 時の回転数実測値」においては、直流電源装置で 1.5V の電圧を加えたときの回転数 (実測値) である。

モーターの種類	F : FA-130RA	G : RE-140RA	H : RE-260RA	I : RE-280RA	J : SOLAR MOTOR 03
販売元	マブチモーター	マブチモーター	マブチモーター	マブチモーター	TAMIYA
使用電圧範囲 [V]	1.5 ~ 3.0	1.5 ~ 3.0	1.5 ~ 3.0	1.5 ~ 3.0	1.5 ~ 3.0
適正電圧 [V]	1.5	1.5	3.0	3.0	記載なし
適正負荷 [mN・m] [gf・cm]	0.39 (4.0)	0.49 (5.0)	0.98 (10.0)	1.47 (15.0)	記載なし
無負荷回転数 [r/min]	8600 (1.5 V 時)	7200 (1.5 V 時)	10900 (3.0 V 時)	8700 (3.0 V 時)	2924 (1.5 V 時)
適正電圧・負荷時の 回転数 [r/min]	6500 (1.5 V 時)	4700 (1.5 V 時)	7500 (3.0 V 時)	5800 (3.0 V 時)	記載なし
適正電圧・負荷時の 消費電流 [mA]	500 (1.5 V 時)	560 (1.5 V 時)	700 (3.0 V 時)	650 (3.0 V 時)	25 (1.5 V 時)
シャフト径 [mm]	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0 ^{※1}
重量 [g]	18	21	30	44	22.1 ^{※1}
外観寸法 [mm]	25.0×20.0	25.0×21.0	26.9×23.8	30.5×2.42	12.0×25.0 ^{※1}
1.5 V 負荷時の回転数 実測値 [r/min]	7246.6	6417.4	5468.5	3970.1	2767.2

※1 TAMIYA 製のモーター J については詳細な性能がないため、実測値を記載している。

電池においてはパートIV同様、市販の一般的な乾電池を使用し、容量は比較的小さくよく用いられる単三形、種類は1：アルカリ電池、2：マンガン電池、3：充電池の3種類を用いた（メーターや型番は非公開とする）。電池は劣化に伴って内部抵抗が大きくなるため、それぞれの電池に対してa：新品の電池、b：意図的に劣化させた電池の2つの状態を採用した。なお、充電池における「新品」とは「フル充電」させた状態を意味し、意図的に劣化させた電池とは、新品（またはフル充電）の電池に5Ωの抵抗を3時間接続した後のものを意味する¹⁾。使用した電池、その状態、それぞれの起電力並びに新品から劣化状態への電圧低下率を表2に示す。さらに、電池の種類とその状態を表す記号として数字とアルファベットの組み合わせも示す。例えばアルカリ電池（1）かつ新品状態（a）のものを「1-a」と表す。すべての電池において劣化に伴う電圧低下を示しているが、その低下率は電池の種類ごとに異なっている。特に、充電池は電圧の低下率が7%と低く、劣化による電圧低下が他に比べて緩やかであることがわかる。なお、電圧降下と同時に内部抵抗の増加現象が起こっており、電圧低下が大きいマンガン電池>アルカリ電池>充電池の順に内部抵抗が大きくなっている¹⁾。また、各電池の消耗による電圧低下は異なり、マンガン電池は常に急激な電圧低下が起こるが、アルカリ電池や充電池はある一定の電圧までは緩やかに低下し、以降は急激に電圧低下する特徴を持つ。さらに、耐久時間に関しては、マンガン電池<アルカリ電池<充電池の順に短い⁸⁾。

本小節で説明した5種類のモーター、3種類の電池と2種類の状態の組み合わせ計30通りを採用して測定を行うこととした。表1及び表2で定義したモーターの記号（F～J）、電池の種類（1：アルカリ電池、2：マンガン電池、3：充電池）さらに電池の状態（a：新品（またはフル充電）、b：劣化）による組み合わせをアルファベットと数字を用いて表すこととし、想定された組み合わせを表3に示す。例えば、モーターF（FA-130RA）とアルカリ電池（1）新品状態（a）を用いた場合、「F-1-a」と定義する。

表2. 使用した電池の種類及びその状態と起電力。
各電池の公称電圧は、アルカリ電池1.5V、マンガン電池1.5V、充電池1.2Vである。

電池の種類	状態	組み合わせ	起電力	低下率
1: アルカリ	a: 新品	1-a	1.557 V	18%
	b: 劣化	1-b	1.281 V	
2: マンガン	a: 新品	2-a	1.659 V	16%
	b: 劣化	2-b	1.396 V	

3: 充電池	a: 新品	3-a	1.377 V	7%
	b: 劣化	3-b	1.285 V	

表3. モーター（表1参照）と、電池とその状態（表2参照）の組み合わせ。表1、表2で指定した数字とアルファベットを用いて、組み合わせを示す。

モーター 電池・状態	F	G	H	I	J
1-a	F-1-a	G-1-a	H-1-a	I-1-a	J-1-a
1-b	F-1-b	G-1-b	H-1-b	I-1-b	J-1-b
2-a	F-2-a	G-2-a	H-2-a	I-2-a	J-2-a
2-b	F-2-b	G-2-b	H-2-b	I-2-b	J-2-b
3-a	F-3-a	G-3-a	H-3-a	I-3-a	J-3-a
3-b	F-3-b	G-3-b	H-3-b	I-3-b	J-3-b

1-2. 採用したモーターの回転に関する特性

直流定電圧電源を用いた時の各モーターの回転数の電圧依存性を図4（a）に、これら電圧依存性と比較対象としパートIV⁴⁾で使用した電球B（豆電球2.5V, 0.3A）の照度との比較を図4（b）にそれぞれ示す。なお、図4（b）においては、回転数と照度という異なる物理量を比較するためにそれぞれ電圧1.5Vをかけた時の回転数または照度の値を1とし、それぞれの比の変化を示した。

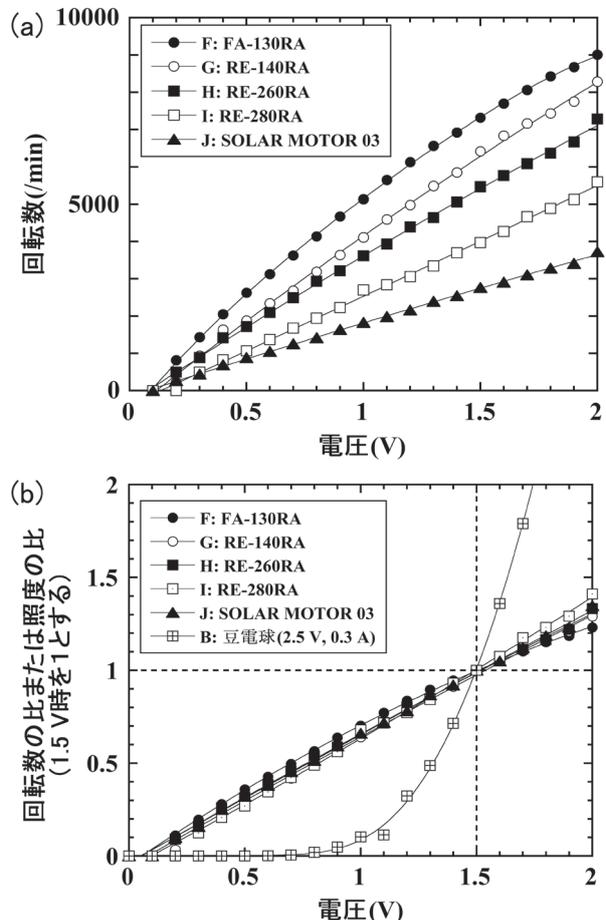


図4. モーターの電圧依存性 (a) 及び電球との比較 (b)

図4 (a) からすべてのモーターにおいて電圧0.1Vをかけても回転せず、0.2V以上において電圧に依存し回転数が増加することがわかる。その変化はすべて上に凸であり、回転数の大小関係は表1に示すものを支持する結果を得た。なお、直流定電圧電源を用いて得られた電圧1.5V時における回転数(表1最下段)は、内部抵抗の影響が無いことから公開されている「適正電圧・負荷時の回転数(乾電池使用時と予想)」より大きい値を得た。また、図4 (b) のグラフの形状に注目すると、モーターの回転数の比の電圧依存性はすべてのモーターではほぼ同じ変化を示すことが読み取れる。一方、豆電球の照度はモーターの回転の場合と異なり、下に大きく凸の変化を示している。これは電圧変化に対して照度が大きく変化しやすいことを意味している。ちなみに、図4 (a), (b) に示されたモーターの回転数の変化傾向はモーターの発電作用によって逆起電力が発生することが関係している。逆起電力とは、モーターに加わる電圧の上昇に伴って、回転数が増加していくが、同時に逆方向に起電力も大きくなることである。そのため、加わる電圧が大きくなるほど、逆起電力が発生し、回転数の増加量は小さくなる特性がある⁹⁾。したがって、我々が求めている電池のつなぎ方を電池1個から、電池2個並列接続に変更しても「変化が無い」という結果はモーターの方が得られやすいと考えられる。実際に2019年の小学校理科検定教科書では、“電球”ではなく“モーター”に接続したプロペラの回転を使用しているものがほとんどであり、豆電球に関しては「発展」というコラ

ムの内容で使用されている程度である¹⁰⁻¹³⁾。

2. 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4、5、6にそれぞれ示す。表中の項目「組み合わせ」は表3に示したモーターと電池の組み合わせを意味し、項目「電池の数」における2個とは、「2個並列に接続した場合」を意味している。電流値、電圧値、回転数は実測値を表し、電力値は電流値と電圧値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テージで併記し、電力と回転数においては電池1個の時の電力と回転数に対する電池2個を並列に接続したときの電力及び回転数の比も併記した。この比の値は1に近いほど、変化が小さいという事を意味している。さらに、「視覚による差」「聴覚による差」においては筆頭著者(千々松)の目視と傾聴による判断により、「変化なし」・「変化あり(小)」・「変化あり(大)」の3段階で評価した。ちなみに、「変化なし」とは全く変化のない場合、「変化あり(小)」とは何度か接続を繰り返すと変化が認識できる場合、「変化あり(大)」は1度の接続変化で明確な変化が観測できる場合をそれぞれ基準として採用した。

本研究においては1章で述べた通り、得られた物理量を用いた定量的評価と五感を用いた定性的評価を行っており、前者を2-1節、後者を2-2節において表4~6の結果を参照しつつそれぞれ詳細に解説を行う。

表4. 単三アルカリ電池(1-a(新品)、1-b(劣化))を用いた各モーターに対する電流、電圧、電力、回転数の比較。上表は新品、下表は劣化の測定結果で起電力はそれぞれ1.557V、1.281Vである。

組み合わせ	F-1-a		G-1-a		H-1-a		I-1-a		J-1-a	
モーター	F : FA-130RA		G : RE-140RA		H : RE-260RA		I : RE-280RA		J : SOLAR MOTOR 03	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.458	0.492	0.418	0.420	0.270	0.272	0.166	0.166	0.040	0.040
電圧 [V] ※2	1.351	1.420	1.353	1.418	1.385	1.435	1.414	1.452	1.506	1.511
	86.8 %	91.2 %	86.9 %	91.1 %	89.0 %	92.2 %	90.8 %	93.3 %	96.7 %	97.0 %
電力 [W]	0.619	0.699	0.566	0.596	0.374	0.390	0.235	0.241	0.060	0.060
	比 1.129		比 1.053		比 1.044		比 1.026		比 1.000	
回転数 [r/min]	6729.6	6989.1	5947.6	6101.9	5234.5	5373.1	3920.0	3957.5	2675.1	2684.9
	比 1.039		比 1.026		比 1.026		比 1.010		比 1.004	
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	
聴覚による差	変化あり(大)		変化あり(大)		変化あり(大)		変化あり(小)		変化なし	

組み合わせ	F-1-b		G-1-b		H-1-b		I-1-b		J-1-b	
モーター	F : FA-130RA		G : RE-140RA		H : RE-260RA		I : RE-280RA		J : SOLAR MOTOR 03	

電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.308	0.332	0.308	0.342	0.214	0.220	0.146	0.150	0.030	0.030
電圧 [V] ※2	1.091	1.173	1.093	1.073	1.157	1.220	1.197	1.243	1.273	1.293
	85.2 %	91.6 %	85.3 %	83.8 %	90.3 %	95.2 %	93.4 %	97.0 %	99.4 %	101 %
電力 [W]	0.336	0.390	0.343	0.403	0.248	0.269	0.175	0.187	0.038	0.039
	比 1.161		比 1.175		比 1.085		比 1.069		比 1.026	
回転数 [r/min]	4913.7	5328.1	4570.3	4902.3	4176.1	4495.4	3269.5	3382.8	2257.6	2297.6
	比 1.084		比 1.073		比 1.076		比 1.035		比 1.018	
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	
聴覚による差	変化あり (大)		変化あり (大)		変化あり (大)		変化あり (小)		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. 単三マンガン電池 (2-a (新品)、2-b (劣化))を用いた各モーターに対する電流、電圧、電力、回転数の比較。
上表は新品、下表は劣化の測定結果で起電力はそれぞれ1.659V、1.396Vである。

組み合わせ	F-2-a		G-2-a		H-2-a		I-2-a		J-2-a	
モーター	F : FA-130RA		G : RE-140RA		H : RE-260RA		I : RE-280RA		J : SOLAR MOTOR 03	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.332	0.406	0.346	0.380	0.250	0.256	0.154	0.160	0.030	0.030
電圧 [V] ※2	1.291	1.367	1.236	1.344	1.293	1.384	1.347	1.412	1.438	1.466
	77.8 %	82.4 %	74.5 %	81.0 %	77.9 %	83.4 %	81.2 %	85.1 %	86.7 %	88.4 %
電力 [W]	0.429	0.555	0.428	0.511	0.323	0.354	0.207	0.226	0.043	0.044
	比 1.294		比 1.194		比 1.096		比 1.092		比 1.023	
回転数 [r/min]	5594.7	6055.6	5275.6	5702.7	4853.8	5178.1	3707.1	3870.0	2158.9	2236.4
	比 1.082		比 1.081		比 1.067		比 1.044		比 1.036	
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	
聴覚による差	変化あり (大)		変化あり (大)		変化あり (大)		変化あり (大)		変化なし	

組み合わせ	F-2-b		G-2-b		H-2-b		I-2-b		J-2-b	
モーター	F : FA-130RA		G : RE-140RA		H : RE-260RA		I : RE-280RA		J : SOLAR MOTOR 03	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.194	0.238	0.222	0.260	0.167	0.189	0.118	0.133	0.034	0.034
電圧 [V] ※2	0.814	0.917	0.791	0.961	0.850	0.998	1.021	1.118	1.225	1.265
	58.3 %	65.7 %	56.7 %	68.8 %	60.9 %	71.5 %	73.1 %	80.1 %	87.8 %	90.6 %
電力 [W]	0.158	0.218	0.176	0.250	0.142	0.1885	0.121	0.149	0.047	0.043
	比 1.381		比 1.422		比 1.328		比 1.234		比 1.033	
回転数 [r/min]	3143.7	3920.6	3040.7	3617.3	3129.0	3710.8	2244.9	2733.3	2159.5	2254.7
	比 1.247		比 1.190		比 1.186		比 1.218		比 1.044	
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	
聴覚による差	変化あり (大)		変化あり (大)		変化あり (大)		変化あり (大)		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. 単三充電電池 (3-a (新品:フル充電を意味する)、3-b (劣化))を用いた各モーターに対する電流、電圧、電力、回転数の比較。上表は新品、下表は劣化の測定結果で起電力はそれぞれ1.377V、1.285Vである。

組み合わせ	F-3-a		G-3-a		H-3-a		I-3-a		J-3-a	
モーター	F : FA-130RA		G : RE-140RA		H : RE-260RA		I : RE-280RA		J : SOLAR MOTOR 03	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.396	0.422	0.396	0.428	0.272	0.274	0.150	0.158	0.030	0.030
電圧 [V] ※2	1.303	1.329	1.295	1.312	1.304	1.314	1.312	1.339	1.365	1.374
	94.6 %	96.5 %	94.0 %	95.3 %	94.7 %	95.4 %	95.3 %	97.2 %	99.1 %	99.8 %
電力 [W]	0.516	0.561	0.513	0.562	0.355	0.360	0.197	0.212	0.041	0.041
	比 1.087		比 1.096		比 1.014		比 1.076		比 1.000	
回転数 [r/min]	6034.5	6256.1	5761.9	5879.0	4957.2	5036.1	3660.8	3657.2	2440.1	2450.1
	比 1.037		比 1.020		比 1.016		比 0.999		比 1.004	
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	
聴覚による差	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	F-3-b		G-3-b		H-3-b		I-3-b		J-3-b	
モーター	F : FA-130RA		G : RE-140RA		H : RE-260RA		I : RE-280RA		J : SOLAR MOTOR 03	
電池の数 ※1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
電流 [A]	0.356	0.374	0.332	0.346	0.220	0.226	0.140	0.144	0.030	0.030
電圧 [V] ※2	1.172	1.205	1.186	1.213	1.205	1.225	1.205	1.232	1.244	1.249
	91.2 %	93.8 %	92.3 %	94.4 %	93.8 %	95.3 %	93.8 %	95.9 %	96.8 %	97.2 %
電力 [W]	0.417	0.451	0.394	0.420	0.265	0.277	0.169	0.177	0.037	0.038
	比 1.082		比 1.066		比 1.045		比 1.047		比 1.027	
回転数 [r/min]	5615.4	5789.6	4902.4	5037.4	4397.9	4659.5	3243.2	3331.3	2229.3	2233.6
	比 1.031		比 1.028		比 1.059		比 1.027		比 1.002	
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	
聴覚による差	変化あり (小)		変化あり (小)		変化あり (小)		変化あり (小)		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

2-1. 得られた物理量定量的結果及び評価

表4、5、6から、全ての組み合わせにおいて、電池1個を接続した回路に比べ、電池2個を並列に接続した回路の電流、電圧、電力、回転数の値がそれぞれ大きいことがわかる。具体例として組み合わせF-1-a (FA-130RA、アルカリ電池、新品)を挙げると、それぞれ電池を1個から2個並列接続に変更した時の物理量変化は、電流値が0.458→0.492Aと7.4%、電圧値が1.351→1.420Vと5.1%、電力値が0.619→0.699Wと12.9%、回転数が6729.6→6989.1r/minと3.9%、それぞれ増加している。また、これらの増加率を比較すると、回転数の増加率が電流、電圧、電力に比べて低い値を示していることがわかる。このことは電流や電圧の変化量に比べ、回転数は大きく変化しないことを示しており、1-2節で示したモーターの特性が顕著に表れている。

続いて、電流値に注目すると、モーターの種類ごとに異なる値となっており、これは、それぞれのモーターの見かけの抵抗値が異なることを表している。これらの抵抗値については第3章にて詳細に述べる。また、各電圧値においては、モーターは自身の回転によって逆起電力が発生する性質により、全てのモーターにおいて電圧値は使用した乾電池の起電力よりも低い値となっている。

ここで、電池の種類ごとの回転数に注目する。具体的な例として、モーターF (FA-130RA)と各電池の新品状態(a)を用いたときの回転比(アルカリ電池1.039 (F-1-a)、マンガン電池1.082 (F-2-a)、充電電池1.037 (F-3-a))を考える。電池の種類ごとに回転比を比較すると、マンガン電池>アルカリ電池>充電電池の順に回転比が大きく、その原因はそれらの内部抵抗の大きさに起因していると考えられる。さらに、電池の状態に注目する

と、新品状態（a）に比べ、劣化状態（b）の電池を用いた場合の回転比の値が大きく、電池の劣化に伴った起電力の低下と劣化に伴う内部抵抗の上昇が影響していると考えられる。特にマンガン電池（2）を使用したときの回転比に注目すると、太陽電池用モーターであるモーターJ（SOLAR MOTOR 03）を除いたモーターにおいて、新品状態（2-a）における回転比が、1.044~1.082であるのに対し、劣化状態（2-b）では回転比が1.186以上の値を示しており、劣化に伴って回転比が非常に大きい値を示していることがわかる。すなわち、電池1個から2個並列つなぎに接続を変更した時の回転比の値が小さくなるための電池の条件としては、内部抵抗の小さい充電電池を用いること、さらに、電池の状態は、新品状態の電池を使用することが望ましいことを示している。

続いて各モーターの回転比に注目すると、汎用モーターであるF~Iとの間に大きな違いはないが、モーターJ（SOLAR MOTOR 03）に関しては他のモーターと異なり、電池2-b（マンガン電池-劣化状態）を用いた場合でも回転比が1.044と比較的低い値を示しており、採用したモーターの中で最も内部抵抗の影響を受けにくく、回転数の変化が少ないモーターであると言える。このことは、モーターJが太陽電池用のモーターであるために、モーターの抵抗値が大きく、回路に流れる電流が0.03-0.04Aと他のモーターに比べ小さいため、電池の劣化による起電力の低下や内部抵抗の上昇の影響を受けにくいことが考えられる。

2-2. 五感を用いた定性的評価

視覚的変化及び聴覚的変化は共に個人の主観による判断によるため、計画的な判断材料とは言い難い。しかし、五感を用いた観測は小学校においてよく用いられる手法であり、大勢で確認し合うグループ学習においては有効な判断手法である。ここでは視覚及び聴覚を用いた定性的評価について述べる。始めに表4~6に示した結果から、視覚的変化の有無を表7に、聴覚的変化の有無を表8にそれぞれまとめる。

表7. モーターの組み合わせと視覚的差

電池・状態		モーターの種類				
		F	G	H	I	J
1: アルカリ	a: 新品 1-a	○	○	○	○	○
	b: 劣化 1-b	○	○	○	○	○
2: マンガン	a: 新品 2-a	○	○	○	○	○
	b: 劣化 2-b	○	○	○	○	○
3: 充電電池	a: 新品 3-a	○	○	○	○	○
	b: 劣化 3-b	○	○	○	○	○

○…変化なし △…変化あり(小) ×…変化あり(大)

表8. モーターの組み合わせと聴覚的差

電池・状態		モーターの種類				
		F	G	H	I	J
1: アルカリ	a: 新品 1-a	×	×	×	△	○
	b: 劣化 1-b	×	×	×	△	○
2: マンガン	a: 新品 2-a	×	×	×	×	○
	b: 劣化 2-b	×	×	×	×	○
3: 充電電池	a: 新品 3-a	○	○	○	○	○
	b: 劣化 3-b	△	△	△	△	○

○…変化なし △…変化あり(小) ×…変化あり(大)

表7からは採用した電池と状態、さらにはモーターの種類組み合わせ全てにおいて視覚的変化が観測されなかったことがわかる。一方、聴覚的変化は電池としては3-a（充電電池-新品状態（フル充電））、モーターとしてはJ（SOLAR MOTOR 03）のどちらかを選択すると変化が観測されない結果を得られた。本実験においては聴覚と視覚を同時に考慮すべきものであり、「電池のつなぎ方の変更（1個または2個並列つなぎ）によるモーターの回転数や音の違いは無い」という理解を促進するためには後者の条件（電池3-a（充電電池-新品状態（フル充電））またはモーターJ（SOLAR MOTOR 03）の使用）を採用することが最適という結果を得た。

次に、定性的評価である視覚的変化及び聴覚的変化に加え、定量的評価である回転数の比を考慮して検討を行う。図5に全ての条件から得られた回転数の比と視覚的変化と聴覚的変化の有無（定性評価）について示す。

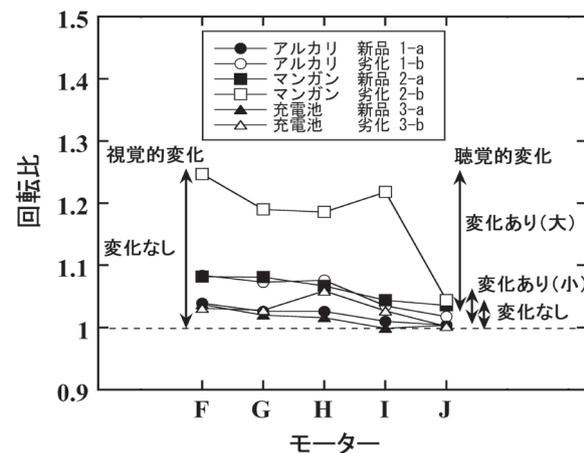


図5. モーター種類とそれぞれの回転比。矢印で示した部分は左が視覚的変化、右が聴覚的変化の有無を示している。

視覚的変化については、すべてのモーターと電池の組み合わせにおいて「変化なし」という結果が得られているが、このことは、回転比0.999~1.247の範囲（表4~6参照）では我々の動体視力では違いが観測されない

ことを意味している。続いて、聴覚的变化に注目すると、“回転の音”の違いは“回転の速さ”より敏感に感じ取ることができ、聴覚的評価と回転数の比の値はそれぞれ「変化なし」は0.999~1.044、「変化あり(小)」は1.010~1.059、「変化あり(大)」は1.026~1.247であった(表4~6参照)。比の値が重なっている領域に関しては、個人の聴覚の誤差の影響もあるが、条件(モーターの種類や電池の種類や状態)の違いによる必須的な重なるの可能性も十分に考えられる。

3. モーターの見かけの抵抗値の算出及びモーターの回転数との相関

本章においては第2章によって得られた測定結果をもとに、各モーターに流れる電流及びかかる電圧の間接測定からオームの法則により、各モーターの見かけの抵抗値を算出し、回転数の変化との相関について検討を行う。表4~6に示した電池1個を使用した時の電流、電圧の実測値をもとに各モーターの見かけの抵抗を算出した値を表9に示す。

パートIVまでに使用していた豆電球の抵抗に関しては非直線抵抗であり、電流依存性が高い特徴がある¹⁴⁾。モーターの抵抗値も豆電球と同様に加わる電圧によって変動する非直線抵抗であるが、加えて、モーターには回転することによる逆起電力の発生がある。そのため、厳密にはオームの法則を用いてモーターの抵抗値を算出することはできない。しかし、ここでは小中学校段階の学習を考慮してモーターの“見かけの抵抗値”として表9の値を採用することとした。モーターの回転数と抵抗値の関係性に注目すると、回転数が多いモーターほど見かけの抵抗値は小さい。具体的には5種類の中で回転数の多いモーターF(FA-130RA)とG(RE-140RA)では、各電池での抵抗値の平均がそれぞれ3.53Ωと3.46Ωと

小さく、回転数の少ないモーターJ(SOLAR MOTOR 03)では、41.84Ωという大きい値をとる。特にモーターJについては電池のつなぎ方を変更しても、定性的変化(視覚的、聴覚的)は「変化なし」という結果が得られていることから、抵抗値が大きく回転数の少ないモーターの方が「電池のつなぎ方を変更しても回転数が変わらない」という結果を得やすいと考えられる。これについては、電池の内部抵抗に比べ、モーターの見かけの抵抗値が大きいことにより、内部抵抗を無視できる状態になるためである。ちなみに、新品状態の単三乾電池の内部抵抗の値はアルカリ電池0.398Ω、マンガン電池0.714Ω、充電電池0.140Ωという結果(実測例)を得ている¹⁾。また、豆電球の抵抗値は規格値からそれぞれ豆電球(1.5V, 0.3A)で約5Ω、豆電球(2.5V, 0.3A)で約8.33Ωであり、モーターJの抵抗値が他に比べて非常に大きいことがわかる。

4. まとめ

本論文では、モーターを使用した回路において、電池のつなぎ方を1個から2個並列つなぎに変更したことによる回転数の変化の有無について具体的に明らかにすること、さらに小学校教育での指導に沿ったモーターの回転数の変化が「変化なし」と言える結果を導ける条件を示すことを目的に測定実験及び定量的・定性的考察を行った。始めに、測定の結果から得られた、モーターと電池の組み合わせと回転数の定性的変化の有無について改めて条件を以下に示す。

- 1) モーターの回転数の変化がない組み合わせ『○』
 - ・モーターJ(SOLAR MOTOR 03) + 全ての電池
 - ・すべてのモーター + 電池3-a(充電電池-新品(フル充電)状態)

表9. 各組合せのモーターの見かけの抵抗値(間接測定)。網掛けの色は聴覚的变化の有無であり、最も暗い色を示している部分が「変化あり(大)」、2番目に暗い色は「変化あり(小)」、網掛けされていない部分は「変化なし」である(ただし、平均値の欄を除く)。なお、充電電池の「新品」とは「フル充電状態」を意味する。

電池・状態		モーター				
		F:FA-130RA	G:RE-140RA	H:RE-260RA	I:RE-280RA	J:SOLAR MOTOR 03
1: アルカリ	a: 新品 1-a	2.95	3.24	5.13	8.52	37.65
	b: 劣化 1-b	3.54	3.55	5.41	8.20	42.43
2: マンガン	a: 新品 2-a	3.89	3.57	5.17	8.75	47.93
	b: 劣化 2-b	4.20	3.56	5.09	8.65	36.03
3: 充電電池	a: 新品 3-a	3.29	3.27	4.79	8.75	45.50
	b: 劣化 3-b	3.29	3.57	5.48	8.61	41.47
平均値		3.53	3.46	5.18	8.58	41.84

変化が無いと言える条件としては以上の2点が挙げられる。これは第3章で述べた通り、モーターに関しては、抵抗値が電池の内部抵抗にくらべ大きいものを使用することで、電池の内部抵抗を無視できる状態を作り出すことができる点、電池3-a（充電電池-新品（フル充電））に関しては、使用した電池の中で最も内部抵抗が小さいという点がこれらの結果を得られたと言える。そのため、モーターについては、モーターJ（SOLAR MOTOR 03）を使用すること、電池は充電電池のフル充電のものを使用することを推奨する。また、最も理想的な組み合わせとしては、これら2つを使用した組み合わせ（J-3-a）である。続いて、回転数の変化がある条件を以下に示す。

2) モーターの回転数の変化が少しある組み合わせ『△』

- ・モーターI（RE-280RA）+電池1-a, 1-b（アルカリ電池-新品状態または劣化状態）
- ・モーターF, G, H, I +電池3-b（充電電池-劣化状態）

3) モーターの回転数の変化が大きい組み合わせ『×』

- ・モーターF, G, H +電池1-a, 1-b（アルカリ電池-新品状態または劣化状態）
- ・モーターF, G, H, I +電池2-a, 2-b（マンガン電池-新品状態または劣化状態）

変化がある条件としては、一般的なモーターF～Iとアルカリ電池またはマンガン電池の組み合わせを選択した場合が挙げられる。特に電池2-b（マンガン電池-劣化状態）使用時はモーターの回転比の値が大きくなるため、マンガン電池の使用は避けていただきたい。

次に、本実験の測定結果である“モーター”を使用した回転数の変化とパートIV⁴⁾にて行った“電球”を使用した明るさの変化についての比較を行う。本実験の測定で得られた回転比とパートIVの照度比を比較すると、回転比の値の方が小さく（パートIV図3参照）、電球よりもモーターを使用することが適していることが明らかとなった。また、定性的評価を見ても、モーターの視覚的变化に関してはすべての組み合わせで「変化なし」という結果が得られており、電球に比べ、モーターを使用することが適していることがわかる。ただし、モーターを使用する注意点として、回転によって逆起電力が発生する特徴を持つことから、電流計、電圧計による物理量の測定において、オームの法則が成り立たない。そのため、定量的に数値を扱う中学校ではモーターの使用は注意する必要がある。一方、定量性の求められていない小学校

では特に注意する必要はなく、並列つなぎの学習においては、モーターを使用することを推奨する。

以上を持って、パートIから継続的に行ってきた「回路における並列つなぎと豆電球の明るさ・モーターの回転数との関係」に関する研究報告を終了とする。ここで改めてパートI～Vの研究成果をまとめる。パートI～III（第1章）では中学校における学習内容を採用し、『並列につながれた電球の明るさ』に注目した実験考察を行った¹⁻³⁾。具体的には、パートIにおいては、電池、豆電球、LEDの基本的特性並びに数式による半定量的考察を行い、続くパートIIにて、パートIでの数式を基に実測及び結果の考察を行った。結論として、電池はフル充電の充電電池を、電球はLEDを使用することが最も適していた条件であることが示された。また、パートIII（第1章）にて、近年登場した「豆電球型の低電圧型LED」を用いた追加測定結果が示され、LED同様の有効性があることが示された。続いて、パートIII（第2章）～Vでは小学校における学習を採用し、『並列につながれた“電池”に接続された豆電球の明るさ・モーターの回転数』に注目した実験考察を行った^{3, 4)}。パートIII第2章において、並列につながれた電池を含む回路における数式展開を示し、その数式を基にパートIVでは電球（豆電球・低電圧型LED）について、本論文（パートV）ではモーターについてそれぞれ実測した結果と考察を示した。結論として、パートIVでは、電池はフル充電の充電電池を用いること、電球は低電圧型LEDを用いることが適した条件であり、パートVでは、前述した通り、電池はフル充電の充電電池を用いること、モーターは太陽電池用のモーターを用いることが望ましいという結論を得た。これまでの研究を総括すると、電池は内部抵抗の小さいとされる「充電電池」を使用し、その状態はフル充電のものを使用することが最も望ましく、電球は「低電圧型LED」、モーターは「太陽電池用」を使用することで、内部抵抗の影響が受けにくい状態を作ることが可能であることが示された。これらの本研究結果を基に電池の内部抵抗の存在を留意した実験器具の選択と授業の実践の参考になると幸いである。また、電池の内部抵抗が並列回路に与える影響の詳細な理解のため、本論文と合わせて、パートI～IVそれぞれにも目を通していただきたい。

参考文献

- 1) . 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.
- 2) . 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.
- 3) . 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.
- 4) . 千々松拓矢・重松宏武 (2020) 「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－」山口大学教育学部研究論叢 69, 203-212.
- 5) . マブチモーター株式会社.”マブチの工作用モーター”.
<https://www.mabuchi-motor.co.jp/motorize/branch/motor/>
(参照2020-9-1)
- 6) . 株式会社タミヤ. “タミヤソーラー工作 シリーズソーラーモーター03”.
<https://www.tamiya.com/japan/products/76011/index.html>
(参照2020-9-1)
- 7) . マブチモーター株式会社. “商品検索”.
<https://product.mabuchi-motor.co.jp/search.html>
例えば、FA-130RAにおいては
<https://product.mabuchi-motor.co.jp/detail.html?id=9>
(参照2020-9-1)
- 8) . 井頭均 (2015) 「乾電池の種類の違いによる消耗経過の比較」教育学論究 7, 11-20.
- 9) . 谷腰欣司 (2004) 『小型モーターのしくみ』電波新聞社.
- 10) . 毛利衛他 (2019) 『新しい理科4』東京書籍.
- 11) . 石浦章一他 (2019) 『わくわく理科4』啓林館.
- 12) . 養老孟司他 (2019) 『未来をひらく 小学理科4』教育出版.
- 13) . 霜田光一他 (2019) 『みんなと学ぶ小学校理科4年』学校図書.
- 14) . 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学校教員養成教育」科学教育研究 38, 27-33.