

豆電球の抵抗値

Variable Resistance of a Small Incandescent Light Bulb

井 頭 均 *

Abstract

Students in my class measured the voltage and the electrical current when a small incandescent light bulb (1.5 V, 300 mA) was powered by a dry battery. They then calculated the resistance of the light. Their results had errors ranging from $4\ \Omega$ to $6.5\ \Omega$.

I ran the same experiment to determine the cause of these errors. I found the resistance of the bulb was large when I used a new dry battery, but it was small as the battery was used up.

When a battery is exhausted and its voltage declines, the temperature of the tungsten filament decreases and as a result the resistance of the light bulb decreases. If I connect two cells in series, the temperature of the filament is over $2,000^{\circ}\text{C}$ and the result is over $6\ \Omega$.

キーワード：豆電球、温度、抵抗値、

I. はじめに

筆者は小学校教員養成課程の「理科」や「理科教育法」を担当しているが、それらの授業の中で毎年、少なくとも1回は電気をテーマにした授業を行っている。そこでは、学生が電圧計や電流計の扱い方に慣れることと、オームの法則について思い出すということを主な目的としている。最初に配線の仕方や留意点などを簡単に説明したあと、実際に豆電球を灯したときの電圧、電流の大きさを測定し、それらの結果からオームの法則を使って豆電球の抵抗値を求める実験を課している。

実験自体は中学レベルの内容であるが、日常生活のなかで電圧計や電流計をほとんど扱うことのない大学生にとっては珍しさもあって、彼らは楽しみながらも結構真面目に取り組んでくれている。最初のうちは計器類の端子と導線のつなぎ方を間違ったり、違ったスケールのメーターを読み取ったりして戸惑うこともあるが、しばらくするとほとんどの学生は正しいやり方で実験を行うことができるようになる。彼らの様子を見る限り、電圧計や電流計の扱い方に慣れるという授業の目的はある程度達成できているように思われる。

しかし、実験結果から得られた豆電球の抵抗の大

きさは、各グループでかなりのばらつきがあることが少なくない。最初のうちは目盛の読み方の誤差などが原因であろうと考えてあまり気にならなかったが、毎年同じような結果が続くので、このようなばらつきが生じるのはどうしてだろうかという疑問が少しずつ大きくなっていった。

そこで本研究では、学生に課している豆電球の抵抗値を求める実験を筆者自身も実際に行って、ばらつきが生じる主な原因について調べてみようと考えたのである。

II. 実験方法

1. 使用した主な機器や器具は以下の通り

- ・電圧計、電流計：T-3 V、T-5 V、内田
- ・豆電球：1.5 V 用、300 mA、ナリカ
- ・テスター：KF-20、カイセ
- ・乾電池：単3 ニッケル水素乾電池（エネロープ、サンヨー）、単3 アルカリ乾電池、単3 マンガン乾電池（パナソニック）

2. 対象および期日

本学教育学部の2年生96名。1グループ3～6名からなる班に分かれ、実験はグループごとに行い、測定や記録、計算などを分担して行った。結果を記

* Hitoshi IGASHIRA 教育学部教授

録用紙に記入させ、提出させた。授業は2013年6月。筆者自身が実験を行ったのは2014年2～3月。

3. 豆電球の抵抗値の求め方

- (1) 豆電球、乾電池、電圧計、電流計を接続して豆電球を点灯させ、そのときの電流と電圧を測定し、記録する。そのときの回路図を図1に示す。
- (2) 測定値を次の式に代入して、そのときの豆電球の抵抗値を計算によって求める。

$$\text{抵抗} (\Omega) = \frac{\text{電圧} (V)}{\text{電流} (A)}$$

Ⅲ. 結果

1. 学生が求めた豆電球の抵抗値

昨年度の授業で行ったときの結果を図2に示す。彼らが出した抵抗値の多くは4～5Ωの範囲に入っていて、それらの平均値は4.7Ωであった。しかし、グループの中には6.0Ωや6.5Ωもあり、かなりのばらつきが認められた。

2. 筆者が求めた豆電球の抵抗値

このように、学生が出した豆電球の抵抗値にかなりのばらつきがあったので気になっていたが、その

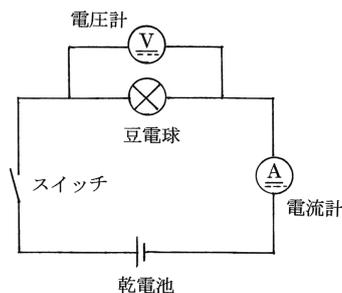


図1. 回路図

後、忙しさに気を取られてしまって、いつの間にか有耶無耶になってしまった。

半年以上も経った後（2014年の2月頃）のことであるが、期末試験や入試などが終わって時間的に多少の余裕ができたとき、授業中に行った実験のことを振り返り、豆電球の抵抗値にばらつきが出る原因について詳しく調べてみたいという思いが強くなった。そこで、学生に課している同じ実験を筆者自身の手で実際に行うことにしたのである。

(1) 乾電池1個の場合

豆電球に乾電池（単3、ニッケル水素）、電圧計、電流計を接続して回路を作って豆電球を点灯させ、そのときの電圧と電流を測定した。そして、豆電球を灯し続けたとき、電圧や電流にどのような変化が起こるのか調べてみた。また、それらの測定値をオームの法則式に代入して、豆電球の抵抗値を計算によって求めた。それらの結果を表1に示す。

最初に、乾電池の電圧を測定すると1.37Vを示したが、スイッチを入れて豆電球に電流が流れ始めると同時に、乾電池の電圧は1.27Vまで低下した。そして、数秒間に1.14Vまで低下したが、その後は電圧が低下する速度が非常に緩やかになった。

このように豆電球を灯し続けた場合、時間とともに電圧、電流ともに少しずつ低下していくことが分かる。また、両者の数値をオームの法則式に代入して計算した豆電球の抵抗値も、最初の4.0Ωから徐々に低下して、30分後には3.86Ωになっている。

(2) 乾電池2個を直列につないだ場合

乾電池1個の場合、豆電球の抵抗値は約4Ωで、多くの学生が出した値とほぼ同じ結果が得られた。しかし、学生が出した値の中には6Ω前後の大きい

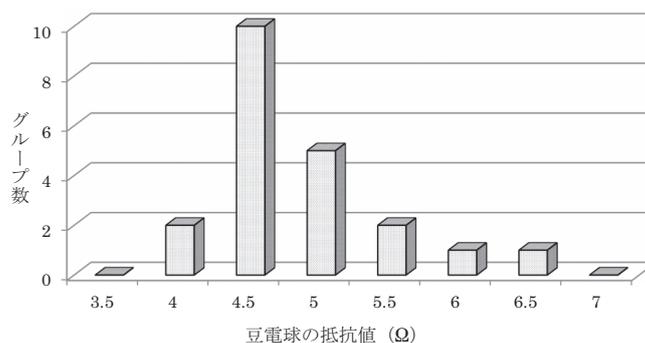


図2. 学生が出した豆電球の抵抗値 (Ω)

表 1. 乾電池（充電式）1個のときの結果

時間(分)	電圧(V)	電流(A)	抵抗(Ω)
開始直後	1.14	0.285	4.0
5	1.12	0.281	3.99
10	1.10	0.280	3.93
15	1.09	0.278	3.92
20	1.08	0.278	3.88
25	1.08	0.278	3.88
30	1.07	0.277	3.86

値が4グループもある。このような大きな抵抗値になるには、どのような条件が必要であるのかいろいろ考えを巡らせた結果、「金属は温度が低い時は電気を通しやすく、温度が高くなると電気を通しにくくなる」ということに気が付いた。豆電球のフィラメントはタングステンという金属でできているので、フィラメントの温度が高くなると電気抵抗は大きくなるはずである。フィラメントの温度が高いということは豆電球が明るく輝くことで、豆電球をより明るく灯すには複数の乾電池を直列につなげればよい。

そこで、2個の乾電池（単3、ニッケル水素）を直列につないで豆電球を灯し、その時の電圧と電流を測定し、計算から抵抗値を求めた。結果を表2に示す。

最初に2個の乾電池を直列につないだときの電圧を測定すると2.84Vであったが、スイッチを入れて豆球を灯すと同時に、電圧は2.6Vに低下した。その後、数秒間で2.43Vまで低下し、あとは時間の経過とともに電圧、電流ともに徐々に低下を続けた。同様に、最初6.2 Ω であった抵抗値も徐々に小さくなり、30分後には5.91 Ω になった。

(3) 3個の乾電池を直列につないだ場合

フィラメントの温度をさらに上げると、豆電球の抵抗値はどのような値になるのかを調べる目的で、

表 2. 2個の乾電池を直列につないだときの結果

時間(分)	電圧(V)	電流(A)	抵抗(Ω)
開始直後	2.43	0.392	6.20
5	2.38	0.387	6.15
10	2.33	0.381	6.12
15	2.30	0.380	6.05
20	1.08	0.377	6.02
25	1.08	0.375	5.92
30	1.07	0.372	5.91

表 3. 3個の乾電池を直列につないだときの結果

時間(分)	電圧(V)	電流(A)	抵抗(Ω)
開始直後	3.4	0.455	7.47
3	3.4	0.443	7.67
5	3.4	0.432	7.87
6	3.4	0.425	8.00
7	3.3	0.420	7.86

3個の乾電池（単3、ニッケル水素）を直列につないで豆電球を灯し、電圧と電流を測定した。

最初に乾電池の電圧を測定すると4.2Vであったが、スイッチを入れると同時に電圧は3.9Vに低下した。その後、数秒間で3.4Vに低下したが、あとは低下速度が非常に小さくなった。電圧の低下とともに、電流も徐々に低下したが、抵抗値はこれまでとは異なり、最初の7.47 Ω から徐々に大きくなり、6分後には8.0 Ω になった。そして7分20秒後に豆電球は切れてしまった。

(4) 4個の乾電池を直列につないだ場合

乾電池（単3、ニッケル水素）の電圧は5.3Vを示したが、スイッチを入れると直ぐに4.7Vに低下した。その時の電流は0.563Aで、抵抗値は8.35 Ω である。しかし、45秒後に豆電球は切れた。他の豆電球を使って同じ実験を3回くり返したが、結果は1回目と同様に、しばらくすると豆電球は切れてしまった。スイッチを入れてから電球が切れるまでの時間は32秒、43秒、40秒で、4回の平均は40.0秒となる。

3. 常温で豆電球の抵抗値を求める

これまでの実験では、豆電球を灯したときの抵抗値を求めていた。この結果、乾電池の個数や消耗状態によって電圧や電流が違っているのでフィラメントの温度が異なり、抵抗値に大きな違いが生じることが分かった。そこで、豆電球を灯さない状態でその抵抗値を測定する方法について考えたのであるが、この方法は比較的容易に見つけ出すことができた。テスターを使って豆電球の抵抗を測定すれば、フィラメントにはごく微量の電流は流れるが、あまり温度が

表 4. 4個の乾電池を直列につないだ場合

時間(秒)	電圧(V)	電流(A)	抵抗(Ω)
開始直後	4.7	0.563	8.35
40	4.6	0.550	8.36

変わらない状態で抵抗値が測定できることに気が付いたのである。

テスターの取り扱い説明書に従って操作し、最初にテスターの両極の棒をショートさせてメーターの針を0Ωにアジャストした後、豆電球の抵抗値を測定しようとした。しかし、テスターの針が安定するまでに5～6分以上かかったり、豆電球の抵抗値が小さ過ぎて正確な抵抗値が測定できないなど、実際に行うと様々な問題が生じた。

テスターの針が安定しないのはテスター内に使われているマンガン乾電池が古いからではないかと考え、充電式の乾電池に交換したところ解決することができた。しかし、500Ωまで測定可能なテスター(チャンネルを切り換えれば50万Ωまで測定可能)で、1Ω前後の抵抗値をある程度精密に測定するにはどうすればよいかという問題に関しては、よい解決策を思いつくまでに1週間以上もかかってしまったのである。

豆電球1個の抵抗値が小さ過ぎるのであれば、10個、20個の豆電球を直列につないで測定し、それを10等分、または20等分すればよいのである。振り子の周期を測定するとき、誤差を小さくするために1往復ではなく、10往復あるいは20往復の時間を測定して、1往復の周期を出すのと同じ。後から考えれば何でもないことのようにであるが、その時は視野が狭くなって、なかなか解決策が見いだせなかった。

10個の豆電球を直列につないで、その抵抗値をテスターで測定したところ、平均で10.2Ωという結果が得られたので、常温時における1個の豆電球の抵抗値は約1.0Ωであるという結論になった。

4. マンガン乾電池1個で豆電球を灯し続けたときの電圧、電流の変化

乾電池1個と2個を使った実験では、豆電球を点灯して30分間の電圧、電流の変化を調べたが、乾電池の消耗が電圧や電流、豆電球の抵抗値に影響を及ぼしていると思われる結果が得られた。また、豆電球の抵抗値を測定するためにテスターを用いようとしたとき、テスターの調子がなかなか安定しなかったが、その原因が中に入っていた乾電池の消耗が主な原因であった。そこで、豆電球をさらに点灯し続けたときの電圧や電流、抵抗値にどのような変化が生じるかについて調べることにした。

そこで、購入したばかりの新しいマンガン乾電池

(単3、1.5V用)に豆電球、電圧計、電流計をつないで回路を作り、豆電球を灯し続けたときの電圧、電流の変化を調べた。とりあえず今回は、乾電池の電圧が0.1V以下になるまで行うことにした。結果を図3に示す。

(1) 電圧の変化(図3の◇)

最初に、使用前の乾電池の電圧を測定すると1.67Vを示したが、これを豆電球につないでスイッチを入れると同時に、電圧は1.30Vに低下する現象がみられた。その後10～15分間の間、電圧計の針が動いているのが分かる程度の速さで電圧が降下していく。その後は、電圧降下の速度はやや緩慢になるが、1時間を過ぎる頃から徐々にスピードが増してくる。2時間20分を過ぎた頃、電圧は0.5V以下となった。

3時間以降になると電圧降下が徐々に緩慢となり、電圧が0.1Vになったのは3時間20分後であった。予定では電圧が0.1Vになった時点で実験を止めることにしていたが、時間的にもまだゆとりがあったので、実験をもう少し継続することにした。

豆電球を点灯してから約4時間経過したとき、電圧が不安定になり、0.08～0.10Vの範囲で揺れるように変化するのが見られた。最終的には豆電球を灯し始めてから5時間10分まで実験を続けたが、その時の電圧は0.03V、電流は0.035Aであった。

(2) 電流の変化

この回路に流れる電流の変化を図3の△で示したが、電圧の変化と非常によく似た曲線となっている。すなわち、電流は最初0.3Aであったが、時間とともに低下を始める。それも最初の10分間はやや急激に低下するが、その後低下速度はやや緩慢になり、2時間を過ぎる頃から電流の低下速度は増す。3時間半を過ぎた頃から電流の低下は緩慢になり、最終的に5時間10分後には0.035Aになった。

電流の変化は電圧の変化に非常によく似ているが、電圧の変化よりもやや遅れて変化する傾向がみられる。

(3) 豆電球の点灯状況

明るく灯っていた豆電球は時間とともに徐々に暗くなり、2時間25分で、部屋の照明を消して暗くすると、フィラメントが赤くなっているのがやっと見

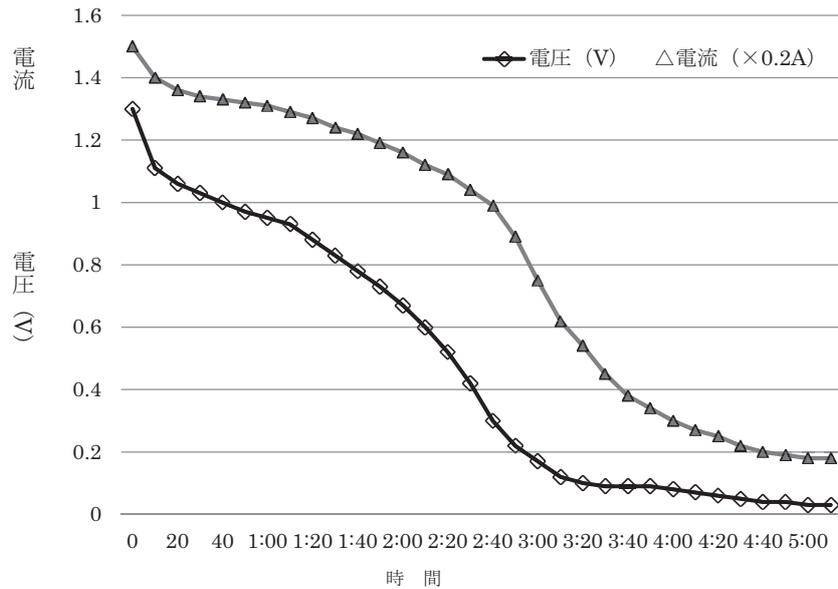


図3. マンガン乾電池の消耗経過

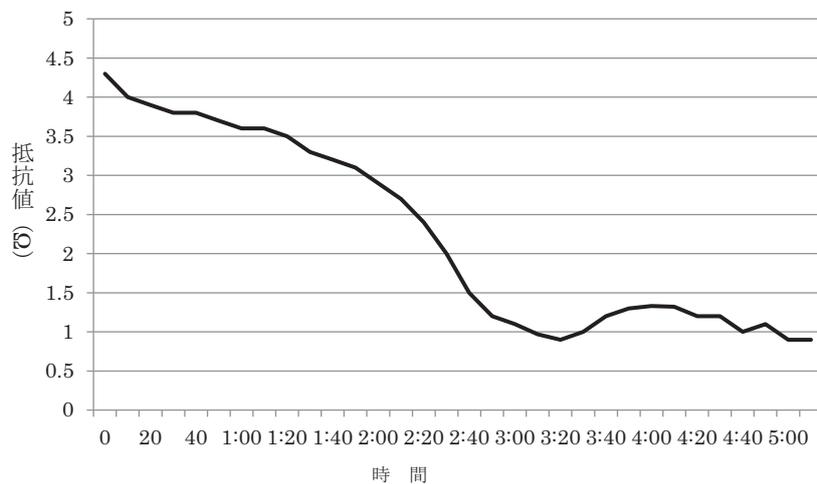


図4. 抵抗値の変化 (Ω)

える程度になる。2時間27分後、フィラメントが赤くなっているのが認められなくなった。その時の電圧は0.43 V、電流は0.211 A。

(4) 豆電球の抵抗値の変化

マンガン乾電池に豆電球をつないで灯し続け、5時間以上をかけて乾電池が消耗していく過程を調べたが、電圧とともに電流の大きさも測定していたので、オームの法則式から豆電球の抵抗値を求めることができる。そこで、計算によって、この間の豆電球の抵抗値の変化を求めた。結果を図4に示す。

IV. 考察

乾電池に豆電球をつないで灯し、そのときの電圧

と電流を測定した結果から豆電球の抵抗の大きさを求める今回の課題は、先ほども述べたように内容的には中学校レベルの簡単なものである。私自身もそのように考えて、授業の一環として学生に課していたものの、これまで本格的な実験を自分自身で行ったことはなかった。しかし、実際に行ってみるとソケットの接触が悪かったり、テスターが説明書どおりに反応しなかったりするなど想定外の出来事が少なからず起こってくる。今回の実験で、理科という科目が教科書での学習だけでは不十分であることを改めて感じさせられた。

1. 学生が求めた抵抗値について

対象がそれほど多くはないが、今回課したような

実験のやり方では結果にばらつきが生じることが分かった。これらの原因としては、①豆電球の製品間の誤差、②電圧計、電流計など計器類の誤差、③目盛りを読み取る際の誤差、④電源の乾電池の消耗状況から生じる誤差、⑤実験の設定条件の違い、⑥その他などが考えられる。

上記の①～⑥のうち、①と②については、例外的に不良品がなくはないが、可能性としては非常に低い。③については、最小の目盛りの間を目測で10等分して読み取るときに個人差があるので避けて通ることはできないが、桁としては0.1Ω程度の範囲である。

そこで、同様の実験を筆者自身が実際に行って、上記の④～⑥の原因を中心に原因を探ることとしたのである。

2. 筆者が求めた豆電球の抵抗値について

(1) 乾電池1個の場合

豆電球に電流を通す前の乾電池の電圧は1.37 Vを示したが、スイッチを入れると同時に1.27 Vに低下した。この現象は、乾電池自体の内部抵抗が原因であると考えられる。ここでは豆電球が点灯してから30分間、電圧、電流の変化を測定した結果、電圧、電流ともに低下したが、これは乾電池の消耗が主な原因であると考えられる。

電圧と電流の測定値から求めた豆電球の抵抗値は最初4.0Ωで、この数値は多くの学生が出した抵抗値とほぼ同じ数値であった。時間の経過とともに抵抗値が減少するのは、乾電池の消耗によって豆電球にかかる電圧、電流が低下して、電球のフィラメントの温度が下がるからだと考えられる。白熱球のフィラメントはタングステンと呼ばれる金属でできており、金属は温度が高いほど電気抵抗が大きく、温度が低いほど電気抵抗が小さいからである。

(2) 乾電池2個以上の場合

学生が出した豆電球の抵抗値のなかには6 Ω前後の大きな値があるが、豆電球の抵抗値を大きくするには、点灯時の温度をもっと高くすればよいはずである。一番手っ取り早い方法は、電源の乾電池の数を増やせばよい。そこで、直列につなぐ乾電池の数を2個、3個、4個と増やし、同様の実験を行ったのである。

2個の乾電池を使ったときの豆電球の抵抗値は

6.2Ωで、学生たちが出した抵抗値の大きいほうの値とほぼ同じであった。これは、彼らが乾電池を1個ではなく、2個を直列につないで実験していたということが間接的ではあるが、ある程度証明されたことになる。

同様に乾電池3個、4個を直列につないで豆電球を点灯させ、電圧と電流の変化を30分間継続して記録しようとしたが、3個の場合は7分20秒後に、4個の場合は45秒後に電球が切れてしまい、実験が継続できなくなってしまった。

白熱電球のフィラメントのタングステンの融点は3,382℃で、金属のなかで融点が最も高い。したがって電球が切れる寸前のフィラメントの温度はそれに近い高温に達しているものと考えられ、電気抵抗も大きくなったのではないだろうか。

通常、白熱電球が白色の光を出して灯っているとき、フィラメントの温度は1,500℃～2,500℃である。タングステンの電気抵抗率は銅の約3.2倍であるが、フィラメント部分を細く長くして抵抗値が大きくなるようにしてある。

3個の乾電池を使ったとき、時間とともに電圧、電流は低下傾向がみられるのに、抵抗値は7.47Ωから若干大きくなり、6分後には8Ωになり、7分後にはまた少し抵抗が小さくなっているが、これらの原因については今のところよく分からない。

3. 常温下での豆電球の抵抗値

豆電球を灯さないで抵抗値を測定するにはテスターを用いればよいということを思いつくのは比較的容易であったが、実際にやってみるとテスターが安定しなかったり、手元にあるテスターでは豆電球の抵抗値が小さ過ぎて正確に測定できないなどのハプニングがあった。電気に詳しい人にとっては当り前のことであっても、テスターをほとんど使ったことがない筆者にとっては、いろいろ苦労が絶えない。それでもそのような困難におつかったとき、筆者の極めて少ない知識や経験を使って、一つひとつの問題を工夫しながら解決していくことは、研究者にとって大きな喜びとなる。

テスターがうまく作動しない問題に関しては、中の乾電池を交換することと、安定するのに5～10分間かかることを学ぶことで比較的容易にクリアすることができた。しかし、最小目盛りが1Ωのテスターを使って、1Ω前後の豆電球の抵抗値を測定す

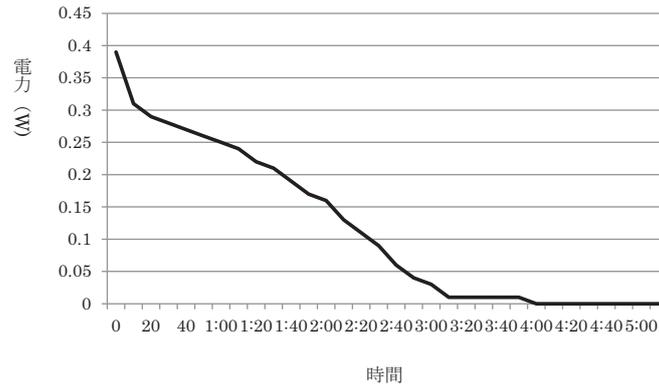


図5. 電力 (電圧×電流、W)

ると、測定する度に 0.7Ω から 1.2Ω くらいのばらつきが生じてしまう。そこで、いろいろ考えを巡らした結果、電球を10個直列につないで抵抗値を測定すれば、抵抗値は 10Ω 前後となり、ばらつきが小さくなるのではないかという考えに至ったのである。後で考えれば何でもないことであるが、この考えに至るのに筆者は1週間以上も要した。

結論として、常温下での 1.5V 用の豆電球の抵抗値は約 1Ω であるということになった。

4. マンガン乾電池の消耗経過

マンガン乾電池を豆電球につないで点灯させ続けて電圧、電流を測定していくと、結果的にはマンガン乾電池の消耗経過を調べる実験になってしまった。これをみると、マンガン乾電池の電圧は 1.3V から10分後には 1.1V に低下し、40分後には 1.0V にまで下がり、電球も暗くなってしまふ。マンガン乾電池にとって、豆電球につないで灯し続けるというのは、 300mA 近くの電流が流れ続けることになり、半分ショートさせた状態に近いほど大きな負荷であることが分かる。

電力 (W) = 電圧 (V) × 電流 (A) であるから、マンガン乾電池を 1.5V 用の豆電球につないで灯したときの電力の変化を調べると、図5のようになった。 1.5V 用の豆電球を 1.5V の乾電池につないで灯したときの電力 (ワット数) を計算で求めると (抵抗を約 4Ω とする)、電流が 0.375A ($1.5\text{V} \div 4\Omega$) で、電力は $1.5\text{V} \times 0.375\text{A} = 0.56\text{W}$ となる。

しかし、実際には新品の乾電池であっても電圧は約 1.3V に低下するので、電流は $1.3\text{V} \div 4\Omega = 0.325\text{A}$ となり、 $1.3\text{V} \times 0.325\text{A} = 0.42\text{W}$ となり、約 0.4W 程度となる。マンガン乾電池の場合は、スイッチが入ると同時に電圧が 1.3V に低下したが、

その後も電圧の低下は進行し、10分後には 1.11V に、30分後には 1.03V に下がって、電球の明かりが徐々に暗くなってしまふのである。

今後の研究としては、同様の実験をアルカリ乾電池やニッケル水素乾電池を使って行い、マンガン乾電池に比べてどのような違いがあるのか調べてみたい。

参考文献

- ・井頭均 2013 理科の研究 尼崎出版。
- ・石井忠浩監修 2009 自由自在在中学理科 受験研究社。
- ・菊池誠 1993 電気のしくみ小事典 講談社。
- ・斎藤晴男 1992 高等学校物理 I B 啓林館。
- ・鈴木智恵子 1990 身近な現象の物理と化学 東海大学出版会。
- ・藤城敏幸 1988 生活の中の物理 東京教学社。
- ・藤瀧和弘 2012 電気の基本としくみ 秀和システム。
- ・望月傳 2000 電気の極意 技術評論社。
- ・文部科学省 2008 小学校学習指導要領 理科。
- ・山田ふしぎ 2005 中学生理科の自由研究 誠美堂出版。