

中学校理科教科書におけるオームの法則の検証実験

福山 豊* 東口沙都美*,**

(平成16年3月15日受理)

Consideration on Ohm's Law in the Junior High School Science

Yutaka FUKUYAMA*, Satomi HIGASHIGUCHI*,**

(Received March 15, 2004)

1. はじめに

中学校理科のなかで教えられているオームの法則の学習は、電流計、電圧計などを用いて、定量的な実験を行い、その実験結果からオームの法則を見つけださせるなど、典型的な科学的手法による学習を行っているようにみえる¹⁾。しかし、中学校で電気回路を学習した多くの生徒たちは、電流と電圧の概念の習得が十分にできていないし、電流と電圧の違いや区別もできないでいる。

中学校で学んだ理科について、高校生におこなった好嫌度調査によると、電気回路の項目は大層嫌われている学習項目としてランクされており²⁾、多くの生徒にたいして物理嫌いを起こさせる大きな要因ともなっているように感じられる。このような状況の発生は、現在発行されている教科書にも大きな責任があるとともに教える側の教材研究の不足によると思われる。そこでまず現在中学校での電気回路、特にオームの法則の取り扱いについて検討して、その指導の問題点を考察した。その後、この問題点を解決するための方法として生徒たちに電気回路の電圧、抵抗、電流の概念形成をうながすために水位差網入りパイプ水流モデル^{3),4)}を検討した。さらに、この水流モデルにより電圧、抵抗、電流の間に成り立つと予想した関係式が、実際の電気回路について成立するかどうかを、確かめる実験について考察した。

2. 中学校教科書におけるオームの法則の検証実験の問題点

現行中学校理科教科書による流れは、まず電流が流れる回路を学び、電流の大きさを測る。そのために電流計の基本操作を学んだ後、直列回路と並列回路の豆電球などの電流を

*長崎大学教育学部理科物理教室

**現在は放送大学長崎学習センター

測る実験を行う。同様にして、電圧計の基本操作を学び、先の回路の電圧を測り電圧の加法性を理解させる。その後、電熱線の回路に電流計と電圧計を組み込み、これらの測定値からx軸に電圧の値とy軸に電流の値をグラフに描かせ、電流と電圧とが比例関係にあることを見つげださせる。

生徒たちの学習は、実験観察を重視するあまりメーターのつなぎ方やよみ方を訓練する単なるテクニカル・ノウハウの訓練となっている。ほとんどの時間が測定法の学習と測定に終始しており、その後はオームの法則が $V = R I$ であることを覚えさせ、この公式を用いた計算問題の練習となる。そのため生徒たちは電流、電圧、抵抗の物理量の実在感を持っておらず、これらの概念については、生徒たちは納得できるイメージができないまま放置されている。

教科書の1番の問題点は、オームの法則を、電熱線と電源による閉じた回路に、電流計と電圧計をつないで、これから測定した電圧と電流の値から実験的に帰納的に導けるかのように思わせているところにある。実際は、電圧計は、オームの法則が成立することが確定しないと設計できないものであり、オームの法則そのものを利用して設計されている測定器である。導こうとしている法則（オームの法則）をもとに設計制作された測定器で、オームの法則を求めるという無意味な実験作業が行われていることになる。

オームの法則は、単に電流計と電圧計で測定した結果をもとに発見できるものではない。またオームが発見したやり方はこのようなものではない^{5),6)}。オームは測定できない電圧の概念と実在性をしっかりイメージし、それが原因で抵抗を持つ金属の中を電流が流れ、抵抗の大小が電流の流れを決めることと、電流の流れる大きさが抵抗に反比例することを予想して、その検証のために実験を行ったのである。

中学生の学習にも、この実験で検証する前に、電圧の概念の実在的予感とこの電圧を原因として抵抗のなかが電流が流れる様子とそのときの関係の予想を、頭の中に確かな物として感じることができるようし、その後、その予想した関係を検証するために電圧計を使用しない実験の学習プランを開発すべきである。イメージによる新しい物理量の実在の予感と、その物理量と他の物理量の関係の推理が行われて、それを検証するため、その推理から導かれる関係を実験で確かめる学習教材としたい。

3. 電気回路の水位差網入りパイプ水流モデル

電気回路の電圧（電位差）、抵抗、電流の概念を理解するためには、定常的な流れとそれを生じさせる原因と見なせる物理量のイメージを、生徒の頭に思い起こさせる必要がある。電圧、抵抗、電流はお互いに関係しあい機能しあっているので、三者の役割を一つに統一したモデルで表せることが望ましい。

そこで今回考察しかつ製作した水流モデルは、電圧（電位差）、抵抗、電流を、次のように対応づけ、それを実際のモデル（図1）として製作した。

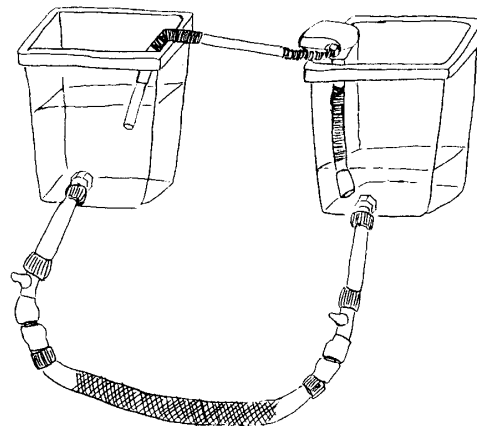


図1 水位差網入りパイプモデル

電圧（電位差）	—	水位の差
抵抗	—	網の詰まったパイプ
（導線）	—	（網の詰まっていないパイプ）
電流	—	パイプを流れる水流

この対応をもとにした水流モデルを特にほかの水流モデルと区別するために、水位差網入りパイプ水流モデルと呼ぶことにし、以後水流モデルと言うときはこのモデルを意味しているものとする。実際、この水流モデルを通して推測または類推できる概念は電気回路の概念を総合的に理解するための手助けとなる。その内容について次に述べてみることにする。

A. 水位差（電位差：電圧）

- ① パイプの両端に水位差があるとパイプの中の水が流れるが、水位差が無くなるとパイプの中の水は流れない。

（抵抗物体の両端に電位差があるとその抵抗に電流が流れる。電位差が無くなると抵抗には電流が流れない）

○今までの教科書が電流を初めに取り扱い電圧のイメージを後回しにしていたため、電流が流れる因果関係を正しく理解できなかった。

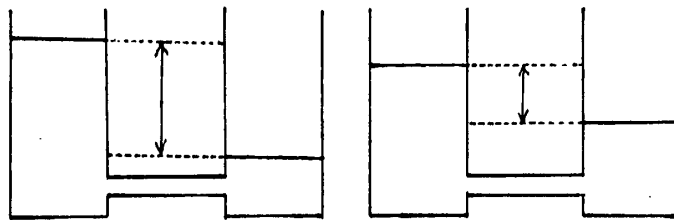


図2 水位差の大きさと流れの関係

電流が流れるための原因として電圧（電位差）があり、その結果として電流が流れるという認識を持たせることが大切である。電圧は電位の「差」であり、これを図のような体験しやすい水位の「差」でモデル化しておくことは後の学習での基礎となる。すなわち、水位差があるときは水が流れるが、水位差がないと流れないことを、流れを生じる現象の一番大事なことからして認識させることである。

- ② 水位差が大きいとパイプの中の水は速く流れる。

（電位差が大きいと抵抗に流れる電流は大きい）

○水の流れに水位差があることの重要性がわかれば、図2のように水位差の違う2つのモデルで、どちらが水の流れが速い（多く流れる）のかを生徒の経験から理解させることができるだろう。水位差の大きいものほど水の流れは大きいこと、逆に、水の流れが大きいときほど水位差は大きいこと。

B. 網入りパイプ（抵抗）

- ① 水位差が同じ大きさでも、長さや断面積が同じパイプの中の網の詰まり方で水の流れは速さが異なる。詰まっているほど流れにくい。（電位差が同じ大きさでも、長さや断面積が同じ抵抗は、物質によって電流の大きさが異なる）

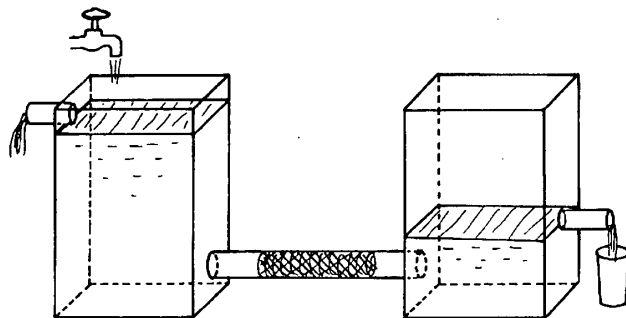


図3 水位差と水流のモデル実験

○ここでは電気回路の抵抗に対して、「網を詰めたパイプ」と見なした。これまでの水流モデルでは、抵抗の大きさをパイプの細さ（パイプが細いほど抵抗が大きい）に例えたものが多かったが、パイプの断面の大きさと長さが同じパイプは同じ抵抗の値を示すことになる。しかし、実際の抵抗の値は、同じ断面積と同じ長さであっても物質の違い（抵抗率）によって異なる。この事実を意識させるには、物質によって抵抗の違いを生じさせる度合いをパイプの網の詰まり方を変えて理解させることが適当である。抵抗の値は、物質によって大変大きな違いがあるが、実験に用いるニクロム線は銅線のおよそ100倍ほどである。そこで電気回路で用いる銅線（導線）は、ほとんど網を詰めないパイプでモデル化している。さらに言えば、水位の高い水槽の下方に接続されたパイプの近傍の水は、水位の低い水槽の下方に接続されたパイプの近傍の水より、圧縮されている。そのため、より圧縮された水は、圧縮されていない水の方へ押し流されることとなる。

② パイプの長さが長いほど、パイプの中の流れは小さい。

（抵抗の長さが長いほど、抵抗を流れる電流は小さい）

○同じ物質（抵抗率が同じ）で断面積が等しい場合、抵抗の長さが長いほど電気が流れにくい（抵抗値が大きい）ことは、網を詰めたパイプは長さが長いほど水の流れが流れにくいことに対応している。

③ パイプの半径（断面積）が大きいほど、パイプの中の水の流れは大きい。

（抵抗の半径（断面積）が大きいほど電流の流れは小さい）

○上と同様にパイプの半径が大きければ、より多くの水を流すことができることも実体験から理解することができる。

C. 水の流れ（電流）

① 回路のパイプの中はどこでも水が詰まっている。

（回路（導線や抵抗）の中は、どこも移動できる電荷（電気）が詰まっている）

○回路のスイッチを入れると+極や-極から電気が飛び出していくと考えている生徒たちは、+極から出た電流の強さは抵抗の場所で弱められ、抵抗を過ぎれば弱い流れとなると考えている。

② 水の流れはパイプの外には飛び出ない。

（電気は回路から外へは飛び出ない）

○導線や抵抗の中で電気は新しく生じたり消えたりはしないことに対応して、パイプの中を流れる水は外に漏れずに一定の量が移動することを理解できる。

③ スwitchを入れるとパイプのどの場所でも水は同時に流れ始める。

（スイッチを入れると回路のどの場所でも電気は同時に流れ出す）

○水位の高い水槽側のパイプ口の水は、水位の低い水槽側のパイプ口の水より大きな圧力で押されているため、圧力の高い方の水から圧力の低い方の水へ力が働く。圧力の高い方の水は、すぐ隣の水を押し、その水はまた隣の水を押し。このとき水は激しい分子運動を行っており、非圧縮流体であると考えられるのでこの流れは、ほぼ同時に生じることになる。

④ 回路のパイプのどこの断面積を流れる水の量もどの場所でも同じである。

（導線や抵抗のどの断面を流れる電気の量もどの場所でも同じである）

○パイプの中に詰まった非圧縮流体の水は、どこかで消えたり生じたりできないのであるから、どの場所での断面でも同じ水の量だけ移動する。

⑤ パイプの中の水は少ない距離しか移動しない。

(回路の中の電荷(電子)は少ない距離しか移動しない)

○パイプの中の水は圧力の高い方から低い方へ移動(流れ)するが、パイプの中の水が詰まっているため実際の水そのものは、ほんの少しの距離だけ移動するのである。電気の移動(電流)も回路のどの点でもほぼ同時に流れるので、電気のそのものの移動も大変早いスピードで移動していると考えている生徒たちもいる。

D. ポンプ(電池)

① 定常的に水を流し続けるための水位差を作る働きをする。

(定常的に電流を流し続けるための電位差を作る働きをする)

○電池は、+極と-極に電位差があるため電流を流す働きをするが、この流れを定常的に流れるようにするためには、この電位差を維持することが必要である。この役割は、水位の低い方の水槽から高い方へポンプで汲み上げて両方の水槽の水位差を一定にすることに对应させることができる。

ここで述べた水流モデルを実際に作成して生徒たちに見せたり考えたりして授業を行うことは大変有効であると考え、水槽2個、塩化ビニールパイプ、ジョイント、網、ポンプなどを用いて図4の基本モデルを作成した。これをもとに2本の網入りパイプを用いてa)直列抵抗(水流)モデルとb)並列抵抗(水流)モデルを作成した。

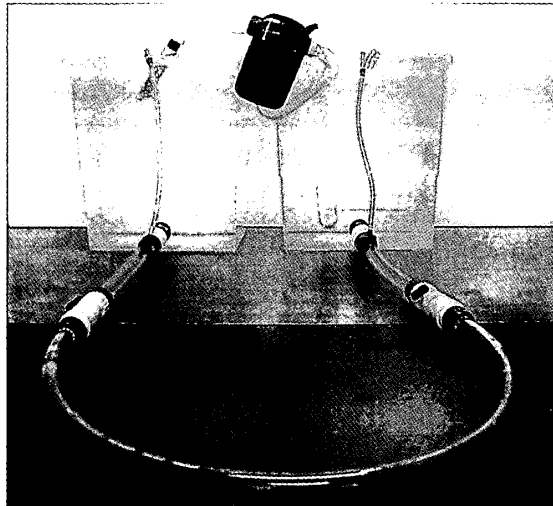


図4 水位差網入りパイプ水流モデルの実体モデル

4. 水流モデルの検討

ここで教科書などに掲載されている電気回路のモデルについてコメントしておきたい。文献Iの教科書での電気回路のモデルは、直列回路と並列回路の電流の説明と、直列回路と並列回路の電圧の説明のところで水流モデルとして図示されている。A社の電流の水流モデルとして、直列回路は川の流れ、並列回路は中の島のある川の流れの図で表している。電圧の水流モデルとして、直列回路は2段の滝によって、並列回路は並んだ2本の滝によって図で表している。しかし、抵抗のモデルが描かれていないし、電圧と電流と抵抗の間の相互の関係がわからないままである。またB社のモデルとして、電圧は同様に滝の高さ、電流は滝の落下する水、さらに豆電球やモーターを滝の下で回転させる水車で表している。だが、抵抗のイメージを描くモデルがないため、電圧、抵抗、電流の因果関係として理解することができない。

これらの教科書に限らず、電圧を水位差と考え、実際に水を高い位置から低い位置へ落

下させることでイメージさせる滝の流れや斜めのパイプなどを落下させるモデルは、電流のイメージを描かせるのには不適當である。滝の流れによる電流のモデルでは、同じ電圧でも抵抗の違いで電流の量が変えることができない。もし水車を抵抗と見なしてもその水車の違いによって流れ下る水量を変えることはできないからである。また、電流を斜めのパイプの中を落下させるモデルでは、流れ落ちることを促す原因が、2つの部分から成っていることからくる複雑さがある。1つは、この論文で論じた水平に流れるパイプの中の右の端と左の端の水圧の差による部分と、もう1つは、パイプが斜めになっているため、パイプの中の水に直接働く重力の成分による部分の合成となるための抵抗と電流の適切なモデルにはなりにくい。この複雑さと混乱をさけることを考えれば、電流のモデルとしては、ここで論じた網を詰めたパイプを水平にして水を流れるようにした方がよりよいモデルであると考えられる。

さらに水位差モデルと呼んでいる場合にも、我々が論じているものとは異なってモデルが用いられていることがある。その1つは、落下する前の水の高い方の高さ、落下した後の水の低い方の高さとの差をさして水位差と呼んでいることがある。この場合はいずれにせよ、電流に見立てた水が上の場所から下の場所へ流れ下ることになり、すぐ上で議論したように分かりやすい抵抗と電流に見立てたモデルを作りにくい。我々がこの論文で議論しているモデルの水

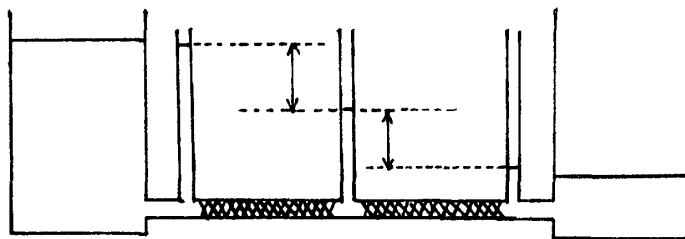


図5 パイプの途中の水位の観測

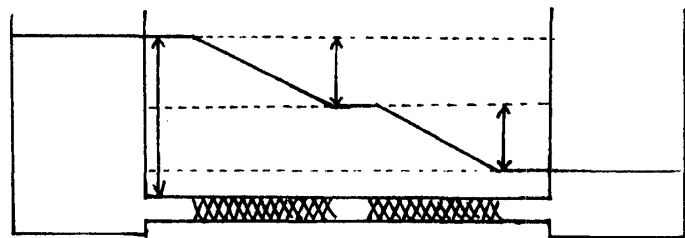


図6 水位差による電圧降下の理解図

位差とは、抵抗に見立てた網入りパイプを水平に置き、その両端の2つの水槽でのこれらのそれぞれのパイプの出入り口の付近での圧力の差を発生させる要因となっているそれぞれの水槽の水の高さの差を意味している。このモデルで水位差を電位差に例えたのは、後に高校などで電位や電圧降下を学習するときにもある対応があることを示すことができるからでもある。図5に示すように、直列抵抗に対応した実体モデルの網がないパイプの場所に、小さな塩ビのパイプを差し込み（この場合3箇所）、これらを支えて垂直に立ててみる。その結果は図5に示したように左から右へ順に3本の塩ビのパイプの水位は低くなっていることが見て取れる。これはオームの論文^{5),6)}にも述べられている図6に示すような電圧降下の概念を理解する面白い展開が可能となる。このように水平な網入りパイプとそれを結合した2つの水槽の水位差を、抵抗と電位差（電圧）に見立てたモデルは、我々には目に見えない現象を扱う電気回路の学習に、電流、抵抗、電位差（電圧）の相互の関係を理解させることのできる点で利用可能なモデルと思われる。

5. オームの法則の実験検証

ニクロム線などの抵抗に流れる電気回路について、上で述べた水位差網入りパイプ水流モデルでイメージし、それをもとに電気回路の規則性を予測したことがどこまで正しいかは、実際に実験をして確かめる必要がある。そのためには、電圧、抵抗、電流をどのように数量化できるか、どのように計測できるかを考える必要がある。まず電流はどのように測ればよいか。電流はその周りに磁石を近づけるとその磁石に力を及ぼす磁気作用があることが知られている。そこで電流の大きさは、電流の流れる導線の上方に吊るした磁石の偶力の大きさに比例すると仮定すると、磁石の回転角度を電流の大きさで見なす電流計ができる。このようにして電流計が準備できる。

次に電圧（電位差）はどのようにして測ったらよいだろうか。電位差は水位差のように直接私たちの目で見ることができない。そのため電位差を定量化しそのような概念が確かに有用な量として考えられるためには、電圧を電流とは独立した量として測定されねばならない。そこで電流を測るために電流の磁気作用が手助けをしたように、電圧を直接測るために何（現象または法則）が手助けしてくれるだろうか。残念ながら電圧を直接測るための手助けしてくれる法則は見つけることができない。それにいろいろの金属や抵抗をつないだ回路で水位差に対応する電圧（電位差）は常に一定である保障もない。では抵抗はどのようにして数量化できるだろうか。ある一つの抵抗物質の一定の長さを抵抗の一つの単位とし、その何倍の長さになっているかで抵抗の大きさを測ることにする。

これらの考察の結果、数量化できるのは、電流と抵抗の二つであることがわかる。この二つの量から、前の節でイメージ化したような、水位差に対応した電圧が電源に固有な量として存在し、水流が抵抗に反比例し、水位差に比例する関係が導けるかを直接実験して確かめることが必要である。

ここでは最も簡単な生徒実験を考えよう。新しい乾電池1個と電流計1個ニクロム線2, 3個にみのむしクリップ付導線2本を用意する。まず1本のニクロム線の回路を組み、その中に組み込んだ電流計の値をよむ。次に2本, 3本のニクロム線を直列につないで回路を組み、そのときのそれぞれの電流計の値をよむ。このときニクロム線がそれぞれ1本, 2本, 3本のときの抵抗 R と電流 I を掛け算すると、どの場合もほぼ一定の値になるがわかる。さらに乾電池を2個直列にして、乾電池1個の場合と同じ実験をすると、このときの電流の値がほぼ2倍になる。その結果、このときの抵抗と電流の積は乾電池電池1個のときのおよそ2倍となることがわかる。これらのことから、抵抗と電流の積で表される物理量は、水流モデルの水流を作る原因としての水位差に対応し、電気を流す原因を創る電圧（電位差）としての物理量を定義することができる。実際には、いわゆる内部抵抗があるので抵抗が小さいところでは、電流は完全には上の値より少ない値となるがここでは深入りしない。ただ、オームはこの内部抵抗の存在を正しく理解していたためオームの法則を導くことができた⁷⁾。

6. おわりに

ここで電圧計について述べておく。電圧は、はじめ、抵抗物体に電流が流れたとき、抵抗と電流の積として定義され、これが電磁気の中で有用な物理量として認知されてきたものである。そしてこの電圧と定義された量がこの回路の電源として電流を流す働きを示す

量として、接続する抵抗には関係なく電源固有の能力を表す独立した物理量とみなされた結果、温度が一定の抵抗物体には、電圧 V と抵抗 R と電流 I の間に $I=V/R$ という自然の法則が存在することを見出したわけである。電圧は抵抗や電流とは独立した物理量ではあるが、抵抗と電流計を用いなければ測定することはできない。このことから電圧計は、電流計をオームの法則を用いて、電流計の中の抵抗とそこに流れる電流の値を掛け合わせた値を電流値の代わりに目盛り表示したものである。

ここで中学校などでのオームの法則の検証のために教科書等に記述され、実験されているやり方に再度ふれておこう。ここで検証すべきとされているオームの法則の実験は、電流計でその回路の抵抗を流れる電流を、オームの法則をもとに作られた電圧計を使って電圧を測定し、 $I-V$ グラフから電流が電圧に比例しているとしてオームの法則を導き出すという循環論法的なやり方を行っている。このような実験が、何十年も日本のほとんどすべての中学校で行われているのは教科書検定があるからとはいえ不思議なことである。

この問題を解決するために、3節でオームの法則を理解するためのイメージをつくる水位差網入りパイプ水流モデルと導入し、その特徴について述べ4節では他のモデルについても言及した。さらに5節では、このイメージから電気回路に成り立つと仮定した関係を検証する実験について考察した。今後の課題としては、これらの内容を生徒たちに実際に授業してみて、その結果が生徒たちに本当に受け入れられる教材となっているかどうかの検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、A. 中学校理科用教科書「新しい科学1分野上」、東京図書(2001)
B. 中学校理科用教科書「中学校理科1分野上」、大日本図書(2001)
- 2) 川村康文：物理教育，45-4(1997)213
- 3) 福山豊，西和幸：物理教育，38-2(1990)88
- 4) 福山豊：物理教育，48-6(2000)538
- 5) 安田徳太郎訳・編：「新訳 ダンネマン大自然科学史9」(三省堂，1979) 286
- 6) 森ゆりこ：科学技術史，第3号(1999) 7
- 7) 後藤尚久：「なっとくする演習・電磁気学」(講談社，1998) 92