

電気回路と水流モデルとの類推に関する考察 (I)

——電位差 (電圧) について——

Investigation about the Analogy between the Electric Circuit and the Model of the Fluid Flow (I)

——The Electric Potential Difference (Voltage) ——

亀 山 寛

Hiroshi KAMEYAMA

(昭和55年7月31日受理)

Focusing a particular attention on the electric potential difference (voltage) in an electric circuit, We studied the reasons why the model of fluid flow has been used as an analogy with an electric circuit. It is known that two methods of the analogy for the electric potential difference, (1) the potential difference owing to the gravity and (2) the potential difference owing to the hydraulic pressure, have been used in the model of fluid flow and that these have frequently caused mistakes by both pupils and teachers. It is also found that such models of fluid flow as mix these two methods of the analogy for the electric potential difference are used in the science textbooks of a junior high school.

1. はじめに

中学校技術科2年における電気領域の学習を開始する際に、電位差 (電圧)、電流、抵抗、オームの法則、電流保存則に対する生徒の明確な理解は学習の必要条件として欠かせない。また、電気学習が相当に進んだ段階においても、種々の電気教材を学習する中で、電位差 (電圧)、電流、抵抗の概念は、絶えず生徒及び教師から吟味されている¹⁾。電気技術を学びはじめる生徒に、電位差 (電圧)、電流、抵抗、オームの法則を教える際に、これらを各々、水位差 (もしくは水圧)、水流、水流抵抗等に類推させて、理解させる方法は、古今東西を問わず、広く採用されてきた^{2), 3)} (この類推を水流モデルと呼ぶ)。水流モデルは一見、簡単で、使い易いように見える。しかし、類推の意味を吟味する事なく、水流モデルを用いて教えてゆくと、種々のつまづきを生徒と教師両者にもたらし、時には生徒に途方もない誤解を与えてしまう場合がある。水流モデルはその取り扱いの難しさから、最近では余り用いられなくなって来たともいわれている。しかしながら、現実の中学校理科教科書には水流モデルが、かなり採用されており、また、多く

の実践記録^{1),4)-6)}にもその使用例が見受けられる。そして、水流モデル成立の意味とその使用の際に生ずるつまずきの解決を求める要求^{1),4)}も強い。水流モデルの使用効果に関する研究^{7),8)}はあるが、水流モデル成立の意味や水流モデルにおけるつまずきに対する、掘り下げた考察はなおざりにされて来たように思われる。

以上のような事情を踏まえて、本テーマに関連するいくつかの論文では、次の4点を主たる研究目的としてゆきたい。第一に電気回路と水流モデルとの類推が成立する理由を考察する。第二に水流モデルにおける生徒のつまずきが持つ意味と問題点とを明らかにする。第三に水流モデルの有効性と限界とを明らかにする。第四に電気回路と水流モデルとの類推に関する考察を深める中で、電位差(電圧)、電流、抵抗の物理量を明確化し、これらの物理量を生徒に教授するに望ましい教材を探る。

本論文では電気回路における重要な三つの基本要素である、電位差(電圧)、電流、抵抗の中で、物理量の持つ概念が一番難しく、従って、もっとも教えにくいとされている電位差(電圧)に焦点を絞って考察を行なう。第2章で、水流モデルにおいて、電位差を(1)重力による水の位置エネルギー差(水位差)に対応させる場合(モデルⅠ)と、(2)水圧による圧力ポテンシャルに対応させる場合(モデルⅡ)の2通りの類推方法がある事を明らかにし、その各々について、類推が成立する理由とモデルの特徴について考察する。第3章で、中学校理科指導要領における電圧、電流、抵抗の扱い方について検討を加え、中学校理科指導要領では、電気回路三要素のうち、電流を中心にして教えるようになっている事、電位差は取り扱わない事になっている事を指摘する。第4章で、中学校理科教科書における水流モデルでは、電圧を水圧に類推させている事、モデルⅠとモデルⅡとを混在させて使用している事を指摘する。そして、モデルⅠとモデルⅡとが混在して使用されているため、水流モデル自体が生徒や教師につまずきを与え易い要素を内部に抱えている事を明らかにする。第5章で、誤りと云い難いが積極的¹⁾に推奨出来ると限らない、電圧を水圧に類推させるモデルが用い続けられてきた理由を教育的な側面から考察する。

2. 電気回路と水流モデルとの類推が成立する理由に関する考察—電位差(電圧)を中心に—

電気回路と水流モデルとの類推を考えてゆくにあたって、議論を順序だてて、複雑にしないために、最初にいくつかの限定条件を設定しておこう。第1に直流回路に限定する。直流回路に関する考察を終了した後で交流回路について考えてゆく。第2に電流には電子電流、イオン電流、分極電流、変位電流と多くの種類があるが、この中で電子電流(電子によって運ばれる電流)にのみ限定する。しかし、以下の議論は電子伝導による電流をイオン伝導による電流(固体内、液体内共)に置き換えればイオン電流にもそのままあてはまる。また第1の前提条件とも関連するが、分極電流、変位電流はさしあたって除外しておこう。

電気回路と水流モデルとの類推理由を考察する場合、電気回路の三要素の電位差(電圧)、電流、抵抗の各々を考える必要がある。しかし、電位差は因果律で言えば原因に相当する事、また、電気回路と水流モデルとの類推には、電位差を何に類推するかが重要なポイントとなる事を考えて、最初に電位差に焦点をあてて考察を行ない、後の論文で電流と抵抗について考察する事にする。論点の展開に必要なところでは、本論文においても電流や抵抗について簡単に触れるであろう。

種々の教科書、専門書の中で用いられている水流モデルを検討すると、電位差を(1)重力による水の位置エネルギーの差(水位差)に対応させる場合と(2)水圧による圧力ポテンシャルに対応させる場合とがある事がわかる。多くの場合、この2つの類推方法を意識的に区別することなく、便宜主義的に用いている(初等教科書の場合特にその傾向が強い)。そして、同一著書の中でも、(1)と(2)とを別の箇所両方用いているもの、また、(1)と(2)との混合モデルを用いているもの等があり、混乱して使用されているのが現状である。静岡大学図書館に所蔵されている電気と物理関係の教科書、専門書を調査し、10種類以上の本の中で、水流モデルが用いられている事を確認したが、そのうち、(1)と(2)との違いに触れた本はただ一冊⁹⁾のみであった。(1)と(2)との違いを指摘したと云う点で貴重であり、また、以下の論旨の展開に参考になるので関係する箇所を引用しておこう。

「元来電位差といふ考は水位の差から類推したものであって、管の中に水位の差があれば水流があると同様に、導線中に電位の差があればそこに電流が流れると考へる。同じ問題をこの水位の考とは全く独立に、水圧の考から類推することも出来る。即ち管の中の2点の間に水圧の差があれば水の流れが生ずると同様に、導線の中に電気的な圧力即ち電圧の差がある時に電流が流れるとする。而して電圧の差は、電位の差と同じく、単位電量を逆に運ぶ時になされる外力の仕事で測られるから、実質的には全く同一である。」

一方、電磁気学の理論体系を重視した専門書には、“電位差”を多く用いてあり^{10),11),12)}それに対して、工学系の専門書や教科書では“電圧”が好んで用いられている事¹³⁾を指摘しておこう。また文献12)には電位差に関して非常に深い考察がなされている。

電気回路を水流モデルに類推させる場合、電位差を(1)重力による水の位置エネルギーの差(水位差)、(2)水圧による圧力ポテンシャルの2通りの対応のさせ方がある事がわかったが、この2通りの場合における類推理由を掘り下げる研究は今までのところ、なおざりにされてきたと云えよう。次にこの2通りの場合について、類推が成立する理由を考察してみよう。

2-1 電位差を重力による水の位置エネルギーの差(水位差)に対応させる場合—モデルI

モデルIの典型例は図1である。この場合、電気回路と水流モデルとの類推が成立する理由には非常に明瞭である。電位差というポテンシャル V_E は、電場 E という保存力場を前提としている。この電場と、水の位置エネルギー差(水位差)の根本要因である、(保存力場でもある)重力場との対応が成立する事が、両者の類推を可能にしている。更に掘り下げれば、静電場におけるクーロンの法則 $F_E = qq' / 4\pi\epsilon_0 r^2$ (q, q' : 電荷, r : qq' 間の距離, ϵ_0 : 真空誘電率)とニュートンの万有引力の法則 $F_M = Gmm' / r^2$ (m, m' : 質量, r : mm' 間の距離, G : 万有引力定数)との間に対応関係が存在するところに、水流モデルの類推成立の根本要因を見出す事が出来るだろう。地球の地表から d のところにある質量 m の(地表面に対する)位置エネルギー V_M は、地球の半径 D 、質量 m' とすれば、

$$V_M = V_M(d+D) - V_M(D) = \int_{\infty}^{d+D} F_M dr - \int_{\infty}^D F_M dr \doteq mdg \quad (\because d/D \doteq 0) \quad (1)$$

として求まる。 $g (= Gm' / D^2)$ は地表における重力場を表現している。 g は地球の中心点からの距離によって変化する量であるが、我々が取り扱う水モデルの高さの高低範囲では一様であるとみなしてよい(誤差が無視出来る程小さい)。

一方、平行平板間(あるいは電極間)の電場 E と、平行平板間(あるいは電極間)との関係は、

$$V_E = dE$$

となる。電荷のもつ位置エネルギーは次のようになる。

$$qV_E = qdE$$

(2)

(1)と(2)の式は、電荷 q を質量 m に、電場 E を重力場 g に、電位差 V_E を重力ポテンシャル gd に対応させる事が出来る事を示している。電場と重力場は共に保存力場である事が両者の特徴である。歴史的な側面から考えると、ニュートン力学においてポテンシャルの取り扱いが成立した後に、このポテンシャル概念を電磁気学に應用して、電気ポテンシャルの概念が形成されてきたと云える。^{14), 15)}

以上の考察にもとづいて、モデルIにおける電気回路と水流回路との類推関係を示すと、表1のようになる。ここで注意しなければならないのは、電位や電位差が、物理量の高さを意味する水位や水位差にそのまま対応するものでなく、水位や水位差のもつ、位置エネルギーや位置エネルギーの差に対応する点である。加えるに“単位質量あたり”という限定がついて、はじめて、電気ポテンシャル（電位差）に対応する物理量になり得る。水位差は以上のような意味を表わすものとする。

モデルIの最大の利点は、電位差を本来の位置エネルギー（厳密にはポテンシャル）の概念で把握出来る点であろう。

表1 モデルIにおける電気回路と水流モデルとの対応関係

(S は径の断面積, v は電子速度もしくは水分子速度, n は電子濃度もしくは水分子濃度,)

電 気 回 路			水 流 モ デ ル		
電 場	E	$[V/m]$	重 力 場	g	$[N/kg] = [J/kg \cdot m]$
電 位		$[V]$	位置エネルギー (水位)		
電 位 差	$V = Ed$	$[V]$	単位質量あたりの位置エネルギー (水位差)		
			$v = gd$		$[J/kg]$
電子の電荷	e	$[C]$	水分子の質量	m	$[kg]$
電 (子) 流	$I = nevS$	$[A]$	水 流	$i = nmvs$	
抵 抗	R	$[\Omega]$	抵 抗	r	
オームの法則	$I = V/R$		オームの法則に対応すべき式	$i = v/r$	

モデルIの不都合な点は、地上でという束縛条件下では重力場が一定であり、変える事が出来ない点である。一方、電気回路では電位差を変化させる事によって、電場は自由に变化出来る。この事情のため、モデルIの使用の際に、種々の不都合が生じる。例えば、電位差を2倍にする場合の水流モデルIへの類推を考えてみよう。水流モデルにおいて、単純に水位差 d を2倍にする事が考えられる(図1)。しかし、図1のようにすると抵抗体の長さが2倍になる事になり、この点で電気回路の抵抗体と対応しなくなる。最初から抵抗体を図2のように傾けておく事によって、上の問題を解決出来ない事はない。図2の場合、みかけの重力場を $g \sin \theta$ に減少させている事になるが、重力場自体の大きさは g で一定である。

モデルIにおいて、水分子をパチンコ玉のような固体球に置き代えてよい(パチンコ玉モデルと呼ぶ)。水流モデルでは、あくまで水分子の流れであり、液体の流れを想定している(液体の性質はない方がモデルとしてむしろ望ましい)。電流の大きさは電子流の速度だけでなく、電

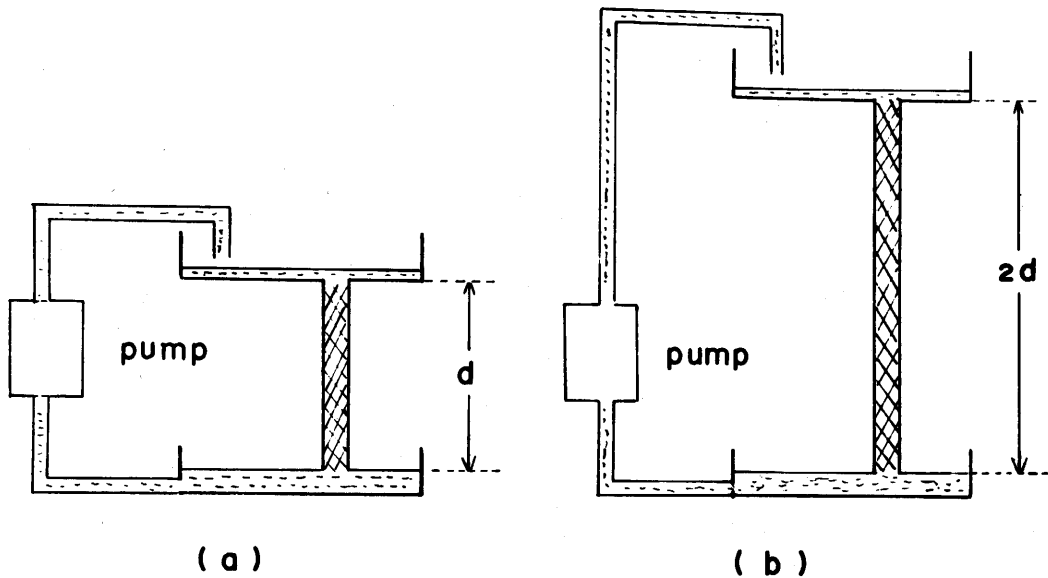


図1 水流モデル(I), (a)電位差 V に対応, (b)電位差 $2V$ に対応。

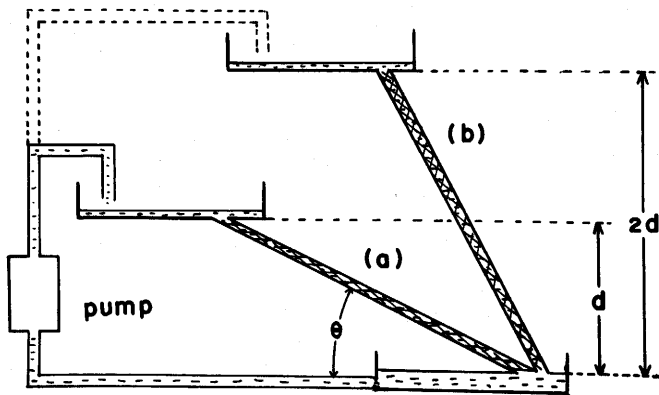


図2 抵抗体の長さが一定の水流モデル(I), (a)電位差 V に対応, (b)電位差 $2V$ に対応。

子濃度にも大きく依存する。電子流は濃度に変化し得る点で、気体的な性質を所有している（物性論で云う電子気体である）。パチンコ玉モデルでは電子気体的な振舞を表現出来る点で、実際の電子流の様に近づくと云える。中学校の教科書でも、図3のようなパチンコ玉モデルが用いられている。¹⁶⁾パチンコ玉モデルの成立の理由は、モデルIと全く同様であるから、パチン

コ玉モデルはモデルIの変型モデルと考えられる。

2-2 電位差（電圧）を水圧による圧力ポテンシャルに対応させる場合—モデルII

モデルIIの1例として、後に示す図5がある。電位差（electric potential difference）は電圧（voltage 古くは electric pressure の名称もあり。）とも呼ばれており、工学系の本や中学校理科教科書では電圧という呼び名の方が用いられている。電圧という言葉は水圧という言葉より直観的に思い浮かばさせる。電位差（電圧）を水の圧力差に対応させる類推はモデルの成立理

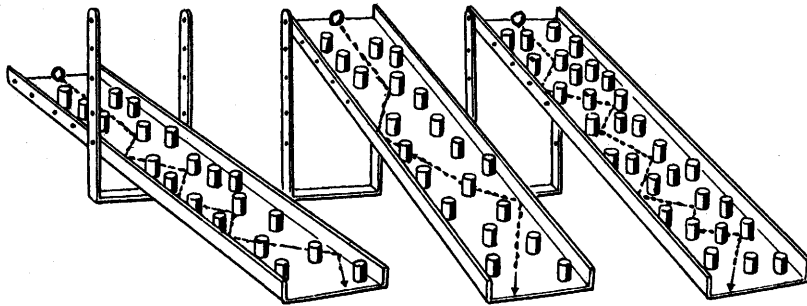


図3 パチンコ玉モデル (大日本図書社教科書より)
モデルⅠの変型である。

由を深く掘げて吟味する事なく、多用されてきた。

物理学では圧力は単位面積あたりの力と定義されるのに対して、電位差は単位電荷に対する位置エネルギーと考えられている。一方、水流モデルを用いている現場の実践家より、「電圧はエネルギー概念なのに、力概念に属する圧力に対応させる事は正しい類推なのか」と云う疑問が提出されている。¹⁾ 本節では、この疑問に解答を与える事を1つの目的とし、また、水流モデルⅡにおいて、電位差に類推させる物理量は何が望ましいかを明らかにしたい。

電位差に対応させる物理量は、圧力 P (N/m^2) というより、むしろ、圧力によって水の中に蓄えられる、単位質量あたりの位置エネルギーと考えた方が正しい類推である。水分子間には結合力が働いていて、水分子間を圧縮するとその間に弾性エネルギーを位置エネルギーとして蓄える。これは、圧縮されたばねが弾性エネルギーを位置エネルギーとして、バネ内に蓄えるのと同様な状態にあると云える。水中に蓄えられる、単位質量あたりの位置エネルギーを本論文では圧力ポテンシャルと呼ぼう。圧力と圧力ポテンシャルとは厳密に区別される物理量である。圧力ポテンシャルは P/ρ (ρ : 密度)¹⁾ に等しく、次元は $\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} = \text{J}/\text{kg}$ である。圧力ポテンシャルはモデルⅠにおける重力ポテンシャル gd に対応している。

一方、モデルⅠにおける重力場に対応する物理量は、モデルⅡにおいては「圧力場」であり、圧力場は $(1/\rho) \text{grad } P$ で表わされる。圧力場は電場に対応する。圧力場の担い手は水分子自身であり、また、圧力場の伝播速度は水中の音速である。圧力場の強さ $(1/\rho) \text{grad } P$ によって、水分子群は加速される。そして、水流が水や管壁等の衝突によって抵抗を受け、水流群の速度が一定値にとどまり、更に、群速度の大きさが圧力ポテンシャルに比例すれば、電気回路と圧力場回路との類推が成立する。以上の考察をまとめると表2のようになる。

モデルⅡは重力場を前提としてないところにモデルⅠと大きな違いを示している。従って、例えば宇宙を飛行する宇宙船内の無重力状態においても、ポンプで水圧(例えば後に示す図5のような水流回路)を作り出してやれば、圧力場回路を成立させる事は可能である。更に、圧力場の大きさは、水圧を変化させる事によって自由に値を変化させる事が出来、この点で、重力場の値が固定されているモデルⅠとは対照を示している。また、水流は水分子の移動であるから、圧力場の担い手自身が移動する点で、電気回路やモデルⅠの重力場回路と違いを示している。

次に、普通よく行なわれる「電圧」を「水圧」差に類推させる事の意味の吟味を行なってみ

表2 モデルIIにおける電気回路と水流モデルとの対応関係
(表記は表1に準ずる。)

電 気 回 路			水 流 モ デ ル		
電 場	E	[V/m]	圧 力 場	$(1/\rho)\text{grad } P$	[J/kg·m]
電 位 差	V	[V]	圧力ポテンシャル	$v=P/\rho$	[J/kg]
電子の電荷	e	[C]	水分子の質量	m	[kg]
電 (子) 流	$I=nevs$	[A]	水 流	$i=nmvs$	
抵 抗	R	[Ω]	抵 抗	r	
オームの法則	$I = V/R$		オームの法則に対応すべき式	$i = v/r$	

よう。圧力の次元は $N/m^2 = N \cdot m/m^3 = J/m^3$ となる事から、次のように圧力を解釈出来る。圧力 $P [N/m^2]$ によって水の体積中に位置エネルギーが蓄えられるが、この“単位体積”あたりの位置エネルギーは $P [J/m^3]$ に等しいとみなす事が出来る。そして、単位体積あたりの位置エネルギーをポテンシャルとみなせるから、この量に電位差を対応させる事も可能である。この場合、“圧力”そのものが“電圧”に対応するのではなく、あくまで、単位体積あたりの位置エネルギーが電位差（電圧）に対応する量となると考えなければならない。しかしながら、このようにすると、電気回路における電荷に対して、体積を類推させざるを得ない結果になる。これに対して、筆者は次に示す4点の理由で、重力場、圧力場共に質量を電荷に対応させた方が望ましいと考えた。

- (1) モデルIの重力場において、質量が電荷に対応する事。
- (2) 近代物理学では金属、半導体内における電流を電子流ととらえている事（波動モデルより、むしろ、粒子モデルを採用している事）。
- (3) 流体力学では、圧力場と重力場とが共存する場合が取り扱われる事が多く、この点からも共通の物理量に対応させた方が望ましい。
- (4) 水流モデルでは重力ポテンシャルが圧力ポテンシャルに転化する場合がある事（この例については後述する）。

以上の理由から、電位差に対応させる物理量は圧力 P でなく、圧力ポテンシャル P/ρ とした方が望ましい事になる。しかしながら、水流モデルでは非圧縮流体を対象としており、密度 ρ は一定であるから、単位質量あたりの位置エネルギー P/ρ と単位体積あたりの位置エネルギー P との間に取り扱いの違いは生じないと考えてよいだろう。

3. 中学校理科学習指導要領における電圧、電流、抵抗の取り扱い

現行の技術科教科書では、電気技術の基本的物理量の“電圧”，電流，抵抗は生徒には既知なものとして、何の説明もなく突如として出て来る。現行では理論的な事は理科で学習する事となっているためか，“電圧”，電流，抵抗の説明が載せられてない。一方、技術科での電気の学習時期は理科での電磁気の学習時期より早いと云う問題点があり、この点については多くの人から指摘されている¹⁸⁾ので本論文では触れない。電圧，電流，抵抗の理論的な面の学習は理科で行なう事になっているので、本論文の分析は主として、中学校理科教科書、および、中学校理科学習指導要領を用いて行なう。

現行の教科書は学習指導要領に準じて書かれているので、最初に中学校理科学習指導要領で、

“電圧”，電流，抵抗がどのように扱われているかを検討してみよう。

中学校理科学習指導要領44年度版¹⁹⁾と52年度版²⁰⁾における電圧，電流，抵抗等の言葉の頻度数を表3に示した。

表3 中学校理科学習指導要領における電磁気学の基本的物理量の取り扱い頻度数

	電 圧	電位(差)	電 流	抵 抗	電 界	磁 界
44年度版	9	0(0)	23	2	0	6
52年度版	7	0(0)	26	2	0	4

抵抗は電気抵抗を意味する場合のみ数えた。表3より，電流の使用頻度数は23～26回あり，電圧，電流，抵抗の中で電流に一番力点が置かれている事がわかる。そして，「金属を流れる電流は，電子の流れである」と電流の定義も明記してある。一方，電圧に関しては，電位差という言葉は用いられてなく，電圧に統一してある。そして，電圧という言葉は7～9ヵ所用いられているが，電圧とは何であるかについては何も云ってないのが特徴である。わずかに44年度版で「電力は，電圧エネルギーが単位時間に熱や仕事に変わる割合」(傍点本論文著者による。)の表現がみられ，電圧がポテンシャル(単位電荷あたりの位置エネルギー)である事を匂せている。抵抗は用いられている箇所がわずか2ヶ所であり，例えば44年度版では，オームの法則を説明したところと電力のところとに使用されている。しかし，抵抗そのものの物理的意味については記述されてない。

電流や電圧を用いて，キルヒホッフの法則とか，発熱作用とか等の，電流や電圧の作用や，あるいは電流と電圧との間の関係については相当精しく述べられているが，かんじんの電圧の定義付けがなされていないところに1つの大きな問題点があると思われる。電圧は電流に従属しない別の独立した物理量であるから，電圧が何であることを明確にする事は，電気回路を理解するために必要とされる事であろう。

電圧，電流，抵抗に関連して，電位，電界，磁界がどのように扱われているかを調べた(表3)。理科指導要領では電位と電界は教える事項だとは明記されてない事がわかる。電圧とは本来，電位差というべき物理量である。もし電位を取り扱わないとしたら，電位差(電圧)とは何かが本質的に把握出来ないだろう。やさしくという配慮から，電位や電位差を取り扱わない事になっていると推定される。しかし，生徒に対する容易さという配慮が，生徒にとって理解するために本質的に必要で，かつ，重要な基本的事項を無視している結果になっていないかを吟味する必要があると思われる。なお，電界に対応する，磁界が相当精しく扱う事になっている事を付記しておく。

4. 教科書にみられる電気回路と水流モデルとの類推に関する検討

昭和53年度発行されている中学校理科教科書すべて(東京書籍²¹⁾大日本図書¹⁶⁾学校図書²²⁾教育出版²³⁾啓林館²⁴⁾の5社)を検討対象とした。必要によっては，昭和50年度以前の版も利用した。5社の教科書中で，学校図書，教育出版，啓林館の3社の教科書で水流モデルが使用されている。

電気回路の三要素，電圧，電流，抵抗の中で，理解する事が一番難かしいのは電圧であると云える。各社の教科書では，電圧に対して，「電流を押し流す働き(大日本図書)」，「電流を流

そうとするはたらき（東京図書，啓林館）」，「回路に電流を流すはたらき（教育出版）」，「電流を流すはたらきの大きさを表す量（学校図書）」とほとんど同様な定義をしている。そして，「電圧の大きさの単位はボルトで，記号Vで表す。たとえば，1.5ボルトの電圧は1.5Vとかく。電圧計は電圧をはかるしかけである（東京図書）」と説明している。「電流を流すはたらき」と

いう電圧の定義の説明に対する盲点は「はたらき」について明確な説明が加えられてない点であろう。生徒が「『はたらき』って何ですか¹⁾」という疑問を持つのは当然であり，また，教師側が「はたらき」の説明に苦しむと思われる。これらの電圧に関する疑問に答える方法の1つとして，水流モデルが考えられる。水流モデルが使用されている教科書を，更に個別に電圧を中心に検討してみよう。

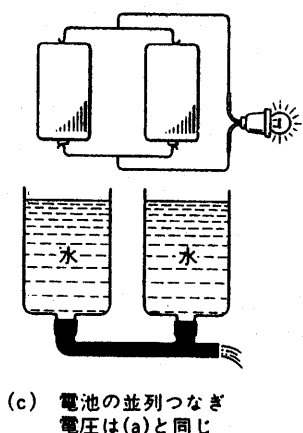
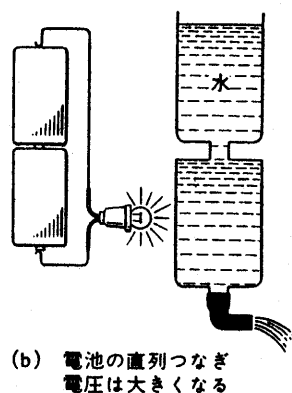
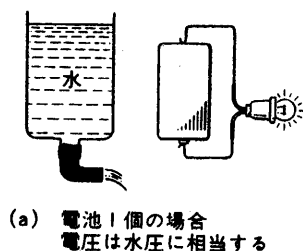


図4 学校図書教科書における水流モデル，モデルIとIIとの混合モデルである。

53年 学校図書

図4のような水流モデルの例を示し，「電池の電圧は水そうの底にはたらく水の圧力にたとえて説明できる。水が水そうの底におよぼす圧力は水の深さが深いときほど大きくなる。したがって，水压で水をおし出すはたらきは，(b)のように二つの水そうを上下につないだときは(a)より大きくなるが，(c)のように水そうを水平につないだときは(a)の場合と同じになる。」として，電池の並列と直列接続における電圧の機能を説明している。この例は，水流モデルでよく見られる典型的な問題点をいくつか含んでいるので，少し詳しく述べてみよう。

- (1) 電圧（電位差）は力と云うより，単位電荷あたりの位置エネルギーである。一方，生徒は水压を単位面積あたりにはたらく力として学習する。水压から類推すると，生徒は力の概念で電圧をとらえてしまう結果にならないだろうか。
- (2) 第2章で考察したように，水流モデルでは電位差は(1)重力による水の位置エネルギー差（水位差），(2)水压による圧力ポテンシャル，の2通りの対応のさせ方がある。上述の例は，この2通りの方法が混在している。このように，2通りの類推方法が混在した水流モデルの使用例は，この例の他にも数多く見受けられる点を指摘しておこう。上述の例において最初に前提として存在するのは重力場である。そして，重力場中に置かれた容器に水を満たした状態を考えると，重力場によって，水压もしくは圧力場が形成される。電圧に類推させている物理量はこ

の水圧であって、水の位置エネルギーの差ではない。すなわち、出発点に重力場を設定したが、電圧を類推させるところで、圧力場モデルを使用した事になる。上述の例で生徒に電圧を教える時、重力場における水の位置エネルギーの差（水位差）の事も、生徒や教師の思考の対象となる可能性があり、モデル自体が内部に混乱の要素を秘めていると云える。

(3) 電池は水そうの水位が減少しないように水を注ぐ役割（例えばポンプ）に対応する。電圧の類推は行なわれているが、電池のはたらきについては触れられていない。

ここで、(2)に関連して、液体の圧力だけを問題にする場合においても、理科教育関係者の間より、「重力と無関係に働く液体の圧力と、重力による圧力との区別²⁶⁾」をつける必要性が唱えられている事を指摘しておく。

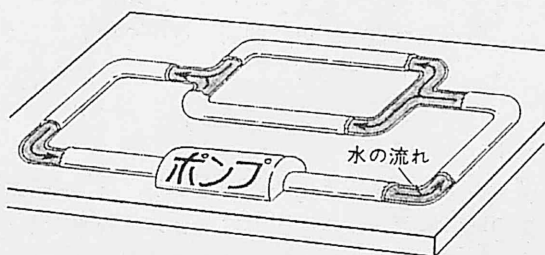


図5 学校図書社教科書における水流モデル、モデルIIの1例である。

一方、同一教科書において、図5のような例が載せられている²⁷⁾が、この例は圧力場（モデルII）のみの類推を用いているので、問題点(2)、(3)はなくなる。しかし、電圧に対応させる圧力が量として視覚化されない欠点をもつ。

53年 啓林館²⁸⁾

図6のような水流モデルの例を示し、「AとBとの高さの差が大きい程、水圧が大きいので、水圧が大きいほど水の流れが速くなる」としている。図6の例においても、図4の例における問題のうち、(1)と(2)とは同様に指摘される。更に、圧力の差を圧力としている点や、どの部分が圧力が高いのか明示されていない点が問題点であろう。電池の役割については、明確な対応があり、図4の問題点(3)は取り除かれている。

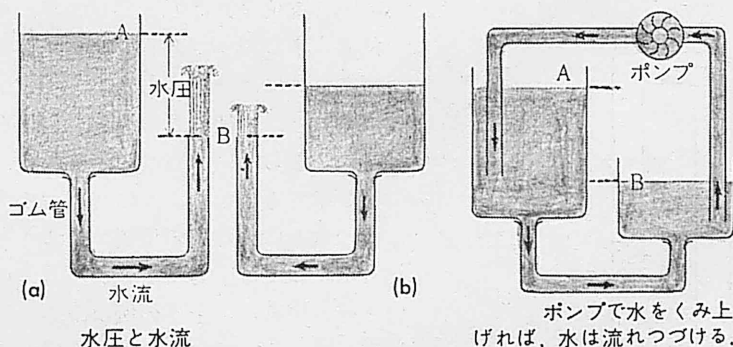


図6 啓林館社教科書における水流モデル、モデルIとIIとの混合モデルである。

50年 教育出版²⁹⁾

図7のような水流モデルの例を示している。電圧をポンプによる水圧に類推しており、モデルIIに属するタイプである。しかし、この例は水流回路全体で高低差があるため、重力場の影響も入るようになっている。圧力場の他に重力場が混在してくると事柄が複雑になり、つまり

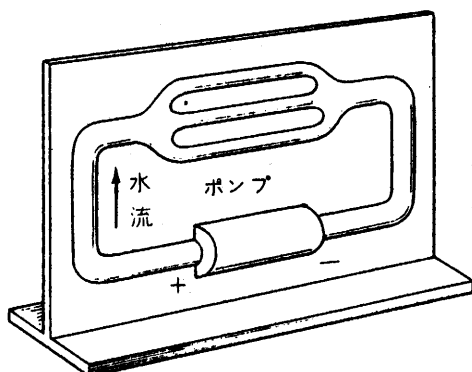


図7 教育出版社教科書における水流モデル

きを呼び易い原因となる。これを避けるためには、水流回路全体を同一平面に配置した図5の例が望ましいであろう。

以上、3社の中学校教科書における水流モデルの例を検討したが、共通点としてあげられる事は、3社の教科書共、電圧を水圧と対応させている点である。この事についての考察は次の章で行なう。

4. 討 論

電気回路と水流回路との類推において、電位差を

- (1) 重力による水の位置エネルギーの差(モデルⅠ)、
- (2) 水圧による圧力ポテンシャル(モデルⅡ)と2

通りの類推方法がある事を明らかにした。元来、電位差は単位電荷あたりの位置エネルギー、すなわち、ポテンシャルという物理量である。水流モデルで類推させる場合、対応する物理量はポテンシャルに属するものでなければならないという立場から、上記のモデルⅠ、Ⅱにおける類推させる物理量が考え出された。一方、古来より、水流モデルで水圧を電位差(電圧)に類推させる事がしばしば行なわれてきたが、このように水圧を電圧の類推として用いるのは適当なのかという問題が残る。検討の結果、電位差に水圧を対応させるのは全く誤りであるとは云えないが、余り望ましくないという事と共に、むしろ電位差には圧力ポテンシャル P/ρ を対応させた方がよい事を明らかにした。望ましくない類推(電位差に水圧を類推させること)が、歴史的にも、現在の教育体系の中にも使用され続けてきた。この類推が用い続けられてきた理由を歴史と教育の両面から明らかにする事が必要であろう。歴史的な面からの科学史、技術史的検討は膨大な考証が必要とされ、紙数の限られている本論文では論じつくせそうにもないので、今後の課題とする。本論文では教育の面から考察する事にし、歴史的な関わりは教育の立場から必要な範囲で触れる事にする。

中学校理科教科書における水流モデルでは、電圧を水圧に対応させているが、その理由について次の5点考えた。

- (1) 中学校理科指導要領で電位、電位差を教える事になっていないため。

中学校指導要領では電圧という言葉は用いられているが、電位、電位差は一度も使用されていない。このため、中学校理科教科書で電圧を水圧に対応させる事になる。水位差に対応させるモデルⅡを用いようがない。

- (2) エネルギーよりは力の概念で教える方が、生徒の日常生活の感覚にも合致し、理解されやすいと考えられており、それゆえ、力の概念に近い水圧を電圧に対応させるため。

物理学を全く学んでいない生徒でも、“馬鹿力がある。” “すもうには力が必要だ。” のように力という言葉をよく用いる。それに対して、エネルギーという言葉は余り用いない(仕事という言葉は用いられるが、これは“work”の意味であって、“energy”を意味してない)。生徒の日常生活の感覚にある力概念に頼って、電圧を教え、電圧を水圧に対応させる事になるが、この事が長期的視野でみると、正しい電位差の概念を得させる事をかえって難しくしている結果になってないか吟味する必要があると思われる。

- (3) 昔から電圧を水圧に対応させる類推が用いられてきたため。

歴史的には西欧において、electric pressure (電圧) と云う言葉は water (or hydraulic) pressure (水圧) と云う言葉との類推より作られたと云える。電圧が電位差 (ポテンシャル) と明確にとらえる事が出来なかった時代に、水の圧力に対応させて、電圧という物理量をとらえた。日本においても、この事がそのまま導入され、現在まで慣用されてきた。慣用に従って教科書はこの類推をそのまま用いてきたとも考えられる。

- (4) 水圧と電圧の両方の言葉の中で“圧”という文字と発音が共通なため。

この点も現実にはないがしるに出来ない理由になっている。電圧という言葉と水圧という言葉の中で、“圧”という文字と発音が共通な事は、一見、物理概念までも共通であるかの如き錯覚を与える。

- (5) 水圧という物理量は電圧に対応する物理量、圧力ポテンシャル (P/ρ) に近いため。

この事は理論的というよりむしろ、直感的に感じとられ、水圧を電圧に類推させる事が行なわれてきたと云った方がよいだろう。

以上の理由から、水圧を電圧に類推させるモデルが中学校理科教科書に採用されていると考えられる。一方電位差には本当は圧力ポテンシャル P/ρ を類推させる方が望ましい。しかし、圧力ポテンシャルは力学や水力学を相当学んでないと理解出来ない難しさを持っており、加えるに、目に見えない性質のものである。水流モデルを用いるならば、むしろ、電位差には水位差 (位置エネルギーの差) を類推させる (モデル I) の方が望ましいと思われる。水位差 (位置エネルギーの差) の方が電位差概念に近いものを類推させている事になるからである。これが本論文において到達した結論である。また、本論文の水流モデルに関する考察を深めるなかで、電圧という言葉は水圧を連想させる点で、電圧という言葉の用語としての妥当性を吟味する必要があるのではないかという問題点が浮きばりにされてきた。電圧という語のかわりに例えば電位差という語を用いた方が望ましいのではないかという問題を提起をし、かつ、この点が今後の課題である事を確認して本論文を終えたい。

最後に本論文に関して、コメントを頂いた林弘文、碓寛両氏に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 小川顕世：「わからないこと (その I)」, 『技術教育』10月号, P.35, 1975年
- 2) J.C.Maxwell : “On Faraday's lines of forces” Trans. Cambridge Philosophical Soc.
10 (1856), (Scientific Papers I, P.155)
- 3) 末武国広：『基礎電気回路 I』(培風館), P.2, P.6, P.27, 1978年
- 4) 池上正道：「水にたとえて電気を教える」, 『技術教室』12月号, P.13, 1978年
- 5) 大村吉郎：「オームの法則について—中 2—」, 『理科教室』1月号, P.59, 1980年
- 6) 河野義顕：『技術の電気 (基礎篇)』(立川印刷所), P.15, 19, 22, 56, 58, 70.
- 7) 井藤芳喜：「理科教育におけるモデルの価値と利用」, 『島根大学教育学部紀要』3巻, P.84, 1970年
- 8) 井藤芳喜：「モデルを利用した電気教材の学習とその効果」, 『島根大学教育学部紀要』12巻, P.35, 1978年
- 9) 竹内潔：『新高等物理学下巻』(岩波書店), P.181, 1954年
- 10) 本多光多郎：『物理学通論』(内田老鶴圃), 1925年
- 11) 竹山説三：『電磁気学現象論』(丸善), 1965年

- 12) 熊谷寛夫：『電磁気学の基礎—実験室における—』(裳華房), 1975年
- 13) 川上正光：『電子回路Ⅰ～Ⅳ』(共立), 1965年, 及び, 宇田新太郎：『無線工学Ⅱエレクトロニクス編新版』(丸善), 1974年
- 14) 矢島祐利：『電磁場の発展史』(河出書房), P.10, 1947年
- 15) ダンネマン：『新訳ダンネマン大自然科学史8』(安田徳太郎訳・編, 三省堂), P.124, 1979年
- 16) 坪井忠二, 岩崎八州民他43名：『新版中学校新理科1分野下』(大日本図書), P.39, 1978年
- 17) 今井功：『流体力学(前編)』(裳華房), P.49, 1973年
- 18) 浜賀哲洋, 田中通義, 中橋政則：「技術科の電気学習内容の検討—電気学習におけるレディネスについて—」, 『日本産業技術教育学会誌』22号, P.15, 1980年
- 19) 文部省：『中学校学習指導要領』, P.71, 1969年
- 20) 文部省：『中学校学習指導要領』, P.43, 1977年
- 21) 蓮沼宏, 藤井隆他28名：『新編新しい科学1分野下』(東京書籍), 1978年
- 22) 伏見康治, 前川文夫他23名：『中学校理科第1分野下』(学校図書), 1978年
- 23) 和達清夫, 西沢一俊他16名：『新版中学校理科第1分野下』(教育出版), 1978年
- 24) 伊勢村寿三他23名：『新訂理科1 一下』(啓林館), 1978年
- 25) 文献 22), P.8
- 26) 林淳一編：『物理の指導計画』(国土社), P.66, 1971年
- 27) 文献 22), P.5
- 28) 文献 24), P.62
- 29) 和達清夫, 西沢一俊他14名：『改訂標準中学理科第一分野下』(教育出版), P.74, 1975年