

# 金属導体中の電子の運動とオームの法則

— 中学校理科「電流、電圧と抵抗」における洗濯板モデル(washboard model)の提案 —

重松 宏武・棟居 翼\*・松永 武\*\*・内田由美子\*\*\*・前川真利奈\*

Electron Motion in a Metallic Conductor and Ohm's Law

: Proposal of washboard model in the unit "current, voltage and resistance"  
in science classes of junior high schools

SHIGEMATSU Hirotake, MUNESUE Tsubasa\*, MATSUNAGA Takeshi\*\*,

UCHITA Yumiko\*\*\*, MAEKAWA Marina\*

(Received September 30, 2011)

キーワード：金属の電気抵抗、電流、古典論、洗濯板モデル(washboard model)、物理教育

## はじめに

我々は、理科教員を目指す大学生並びに小・中学校理科教員を対象とした物理に関する理解力の向上を目指し、「定性的に取り扱われている事象を数式を用いた定量的な展開を行なうことによってその本質を理解する」というコンセプトのもと、さまざまな物理分野の事象についてより定量的な考察を行い、その結果を公開してきた<sup>1)</sup>。近年では指導要領改訂に伴い新しい学習内容となった小学校理科「電気による発熱」の単元において発熱体の抵抗・そこに流れる電流・回路にかかる電圧を数式を用いて展開し、発熱体が発する熱量を中学校理科の学習範囲まで発展させた系統的解釈の構築を行なった<sup>2)</sup>。本論文はこの続編として、発熱体(金属導体)に流れる電流に関してさらなる理解の向上を目指した系統的な評価を『学部・附属学校共同研究プロジェクト』の活動として行った成果の一部を紹介する。さらに、中学校理科で活用されている電流の流れや抵抗の様子を表す『パチンコ台モデル』に変わる『洗濯板モデル(washboard model)』に関する提案も行なう。

なお、金属中の自由電子の運動を正しく論じるためには実際は量子論によらなくてはならない。しかし、物理学の基礎を学習していない小中高等学校の発達段階に導入することは困難であり、ある程度の仮定や特別解で表される古典論的な取扱いに限定するものとする。

## 1. 金属導体中の自由電子の振る舞い

本章においては既に自明な金属導体における「電流と抵抗」について簡潔にまとめる。

荷電粒子の流れを電流といい、金属中では自由電子が電流を運ぶ。例えば、導線に電池をつないだときに電池が持っている起電力が導線内に電場を生じ、それによる力を受けた荷電粒子が動いて導線に一定の電流が生じる。導体のある断面を微小時間  $dt$  の間に電荷  $dQ$  が通過するとき、時間当たりの電荷

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

を電流の強さという。図1のように電子の平均の速さを  $v$ 、電荷を  $-e$ 、導体の断面積を  $S (= \pi r^2$ ; 半径  $r$ )、導線の単位体積当りの電子の数を  $n$  とすると、時間  $dt$  の間に電子は  $vdt$  進むことから、面積  $S$  を通り過ぎる電子の数は移動する空間の体積  $vSdt$  と密度  $n$  の積で  $nvSdt$  となる。従って、 $S$  から流れ出る電荷の量は

$$dQ = envSdt \quad (2)$$

と表されることから単位時間 (1 秒間) に断面を通過する電荷の総量、つまり電流  $I$  は次式でも表される。

$$I = \frac{dQ}{dt} = envS \quad (3)$$

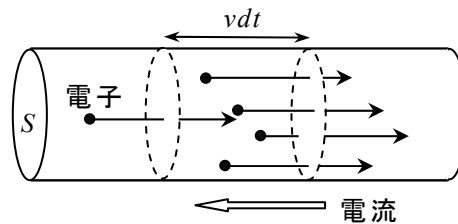


図1. 電子の流れと電流

この電流の概念を理解するうえで重要な自由電子に関して、これに働く力の関係式から中学校・高等学校で採用されている3つの概念について電気抵抗との関係も絡めて以下にまとめる。

### 1-1 電流及び電気抵抗の概念① (力のつり合いを考えた速度一定) 高校物理基礎相当

ここでは多くの高校物理の教科書で採用されている関係式を示す<sup>3)</sup>。金属導体中の金属原子は陽イオンと電子から構成されており、陽イオンは規則正しく並び、その温度に相当した熱振動をしている。これに対して電子は特定の陽イオンに拘束されることなく、自由に熱振動している。今、断面積  $S$ 、長さ  $l$  の金属導体を考え、この導体の荷電粒子は電荷  $-e$  の自由電子であり、その単位体積あたりの数を  $n$  とする。金属両端に電圧  $V$  を加えると、電場  $E (= V/l)$  が生じることから金属導体中の自由電子はクーロン力  $F (= eV/l)$  を受ける。そのため、電子は絶えず加速され、速さは限りなく大きくなるように思われているが、実際には陽イオンの熱振動によって、自由電子の動きを妨げる抵抗力が働き、電子の流れる速さは一定になる。この抵抗力は電子の流れる速さ  $v$  に比例 (比例定数  $k$ ) すると考えると、クーロン力  $F$  と抵抗力  $kv$  との釣り合いから、次式が得られる。

$$eE = \frac{eV}{l} = kv, \quad \therefore v = \frac{eV}{kl} = \frac{eE}{k} \quad (4)$$

これを(3)式に代入することにより、導体に流れる電流  $I$  は

$$I = \frac{e^2 n S}{kl} V \quad (5)$$

となり、オームの法則より抵抗  $R$  及び抵抗率  $\rho$  がそれぞれ

$$R = \frac{kl}{e^2 n S}, \quad \rho = \frac{k}{e^2 n} \quad (6)$$

と求まる。本小節で示した関係式は高校物理において広く活用されているものであり、これら関係式を用いてジュール熱や電力量という新たな物理量に展開され、指導が行われている。

## 1-2 電流及び電気抵抗の概念②（加速度減衰モデル）高校物理発展相当

1-1 小節ではある程度時間が経って速度が一定になった場合において、力のつり合いから直接導いている。1-2 小節では運動方程式からその速度の変化を動的に導く方法を示す<sup>4)</sup>。なお、これは力学での速度に比例した空気抵抗がある場合の垂直落下運動に相当するものである。

電子の質量を  $m$  とし、電場  $\vec{E}$  の中での運動方程式を考えると、以下の式で表される。ここで、速度に比例した抵抗力が速度と逆方向に働いていると考える ( $k>0$ )。

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} - k\vec{v} \quad (7)$$

初期条件として、 $t=0$  で  $v=0$  としてこの微分方程式を解くと、速度は

$$\vec{v}(t) = -\frac{e}{k} \vec{E} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) \right], \quad \therefore \lim_{t \rightarrow \infty} |\vec{v}| = \frac{eE}{k} \quad (8)$$

と求められる。これは図 2 に示すように、時間と共に速度は増すが加速度は徐々に小さくなり、時間が経つと一定値  $eE/k$  に近づく。この値では電場による力と抵抗力とがちょうど打ち消しあって加速度 0 となっており、この解が 1-1 小節で説明した(4)式に相当する。ゆえに、(4)式は (7) 式の右辺が 0 となるベクトル表記

$$0 = -e\vec{E} - k\vec{v} \quad \therefore m \frac{d\vec{v}}{dt} = 0 \quad (9)$$

に相当するものである。なお、(8)式により関係付けられた関数に従い、図 2 に示した曲線での変化が求まるが、現実論としては立ち上がりにかかる時間は非常に短く、1-1 及び 1-2 小節で述べたモデルの場合、電子の速度は一定値  $eE/k$  で動いていると考えて良い。

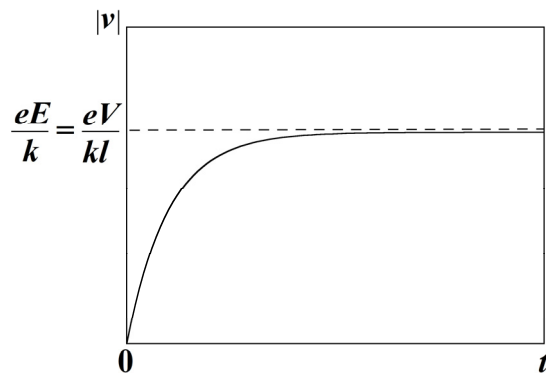


図 2. (8)式による電子の速度の時間変化。時間の経過とともに一定速度に近づく。

## 1-3 電流及び電気抵抗の概念③（等加速度衝突モデル）中学校理科相当

ここでは、さらに運動を単純化し、中学校理科において採用されている概念を紹介する。用いる式は等加速度運動のみである。具体的には電場  $E(=V/l)$  の影響により加速された電子が陽イオンとの衝突により、加速された効果を失い、再び加速が始まるといったことを繰り返すといったものである（本来、中学校理科でよく用いられている「電子が陽イオンに衝突し、加速効果を失う」という表現は誤りであるが、ここでは言及しない）。これは、1-1、1-2 小節の記述を用いると、(7)式の右辺第二項を考えず、かつスカラー表示したものに等しい<sup>4)</sup>。つまり、運動方程式と加速度  $dv/dt$  はそれぞれ

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} \Rightarrow m \frac{dv}{dt} = eE = \frac{eV}{l}, \quad \therefore \frac{dv}{dt} = \frac{eV}{ml} \quad (10)$$

と表される。陽イオンに衝突して止まるまでの時間を $\tau$ とすると、衝突直前の速度は

$$v_{\max} = \frac{eV}{ml} \tau \quad (11)$$

と表され、速度の時間変化は図3に示す時間変化をする。

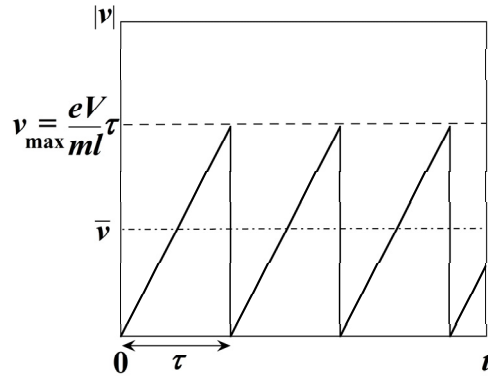


図3. (10)及び(11)式により表される電子の速度の時間変化。

図3より、平均の速さは

$$\bar{v} = \frac{eV}{2ml} \tau \quad (12)$$

と表されるが、実際に進む距離は短く衝突にかかる時間も平均より長かったり短かったりする衝突の間の自由運動の分布を考慮すると平均として用いた係数 1/2 は出てこなくなる<sup>5)</sup>。つまり、電子の速度として考えるべき速さは

$$v = \frac{eV}{ml} \tau \quad (13)$$

と表され、導体中に流れる電流  $I$  は

$$I = en \left( \frac{eV}{ml} \tau \right) S \quad (14)$$

抵抗  $R$  は

$$R = \frac{ml}{e^2 n \tau S} \quad (15)$$

と導かれる。結論として、速度が安定するまでに要する時間は短く 1-1、1-2、1-3 小節全てのモデルにおいて一定速度と考えてよくなる。1-1 小節(4)式、1-2 小節(8)式の係数  $k=m/\tau$  と置くと<sup>4)</sup>、上で述べた3つのモデル全ての平均速度は

$$v = (4)式 = (8)式 = (13)式 = \frac{eV}{ml} \tau \quad (16)$$

そして、抵抗  $R$  は(15)式 (= (6)式) で表される同一な値を得る。

力学と異なり、電気分野は視覚的理解が難しいために、中学校理科における「電流、電圧、抵抗」の概念理解は『水流モデル』や『パチンコ台モデル』に頼っているのが現状である。例えば、『パチンコ台モデル』は図4に示すように、落差を電位差、釘を陽イオン、パチンコ玉が斜面を落ちる速さ(時間)を電流と対応させたものである。ただし、本来、陽イオンの熱振動や不純物が電気抵抗の原因であるのに、陽イオンとの衝突という表現を用いたり、電場で加

速されていない時及び衝突直後の速度をゼロとしていることを始め、多くの矛盾に対して厳しい議論がされている<sup>6)</sup>。さらに、現実には自由電子の速度は非常に遅いにも関わらず、『パチンコ台モデル』では高速で端から端まで移動するという誤解を生む可能性があることにも問題はある。本論文においては引用文献6で議論内容の詳細な紹介も、改めての議論も行うことはしない。ただ言えることは、『パチンコ台モデル』は事実を厳格に反映しているものではなく、ある視点から見て理解しやすいだろうと考えた定性的なモデルに過ぎないということである。パチンコ玉は釘に正面から当たって速度が無くなることはほぼありえないにも関わらず、図3の速度変化を表しているとした時点で、本来は既に問題だったのである。そのため、『パチンコ台モデル』

は釘で表した落下の妨げになるものが「抵抗」を意味し、同じ大きさの抵抗であるならば、落差（電位差）を大きくすると電子（パチンコ玉）の速度（電流）は速くなるという概念理解を主目的としたものであると好意的に解釈すべきである。

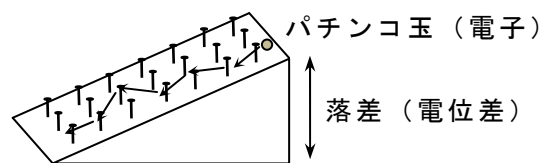


図4. パチンコ台モデル

## 2. 中学校理科における『洗濯板モデル(washboard model)』の提案

1章においては古典論による数式を用いて電流に関する概念の説明を行った。特に中学校理科においては1-3小節で述べた概念を『パチンコ台モデル』を活用して生徒に対して定性的な説明を行っているケースがある。従来の『パチンコ台モデル』では、同一抵抗下（釘の本数同じ）での電位差（落差）によるパチンコ玉の速度（電流）の変化を測定するか、同一電位差（落差）で抵抗の変化（釘の本数の変化）によるパチンコ玉の速度の変化を測定するということが一般的活用であった。ここでは我々が行った引用文献2の結果を踏まえて、金属導体の抵抗の長さや半径の依存性も考慮した『洗濯板モデル(washboard model)』の紹介を行う。これは1章で述べた概念③(1-3小節)でなく、概念②(1-2小節)に近いものであり、物体の重力による加速度を持った速度の増加を行なうが、傾斜上の抵抗によりその加速度が弱まるといったものである。しかし、速度は増え続けるため図2のように電子の速度が安定する状態を示すことはできていない。あえて言うが、このモデルは決して物理量の定量的評価を目指したものではない。実のところ、より具体性を考慮し模索したが十分な結果は得られなかった。そこで、方向転換し、生徒が簡単に扱え、材料費が安く、そして概念理解しやすい教材開発を主体におくこととした。本モデルの利点は以下の通りである。

- ①. パチンコ台モデルのようにパチンコ玉が確率に依存した跳ね返りがなく、皆一様に障害物と接することより、パチンコ玉の速度及び到着時刻の差が小さい。つまり、異なった条件下の結果と比較がしやすい。⇒ただし、『パチンコ台モデル』がうまく表現していた自由電子のドリフトの様子や平均速度の意味合いを殺してしまうという大きな欠点を生じさせている。
- ②. 全て両面テープによる材料の接着を行なっており、脱着が楽かつ自由に障害物の数や位置を変えることができる。つまり、さまざまな条件を想定した実験がしやすい。
- ③. 材料費は安く、かつ作りやすいことより、教師による演示型では無く生徒参加型の授業

展開ができる。

- ④. 同一金属導体における抵抗の変化がこの導体の長さや半径（断面積）に依存していることとの概念理解ができる。

以下に、これら利点が反映された『洗濯板モデル』の作り方(2-1 小節)並びにモデルに関する物理量を半定量化により得られた結果(2-2 小節)を示す。

## 2-1 洗濯板モデルの作り方

『洗濯板モデル』は教師による演示型教材ではなく、生徒が各自で実験・観察できる参加型教材を目指した。「早い（製作時間）、安い（材料費）、わかりやすい（原理）」を基本に、工作板、プラスチック製アングル、アクリル製三角棒のみの構成であり、『パチンコ台モデル』における釘の代わりに設けられた障害（三角棒）の上をパチンコ玉が転がり落ちるという単純なものである。外観が昔懐かしの『洗濯板』に似ていたことより『洗濯板モデル(washboard model)』と命名した。我々が用いた材料を表 1 に示す。なお、ここで示した特定した材料を用いる必要性は無く、身近にある安価な代替材料で簡単に作製可能である。

表 1. 洗濯板モデル製作用材料（近所のホームセンターで購入）

| 構成部 | 製品名            | 大きさ (mm)     | 備考                                  |
|-----|----------------|--------------|-------------------------------------|
| 本体  | 工作材            | 910×9×120    | 太モデル用、価格 600 円程度                    |
|     |                | 910×9×60     | 細モデル用、価格 300 円程度                    |
| 外枠  | ホワイトアングル 20×20 | 20×20×1000   | 株式会社光モール、品番 247、硬質 PVC 製、価格 140 円程度 |
| 障害物 | 三角棒            | 3×1000       | アクリサンデー株式会社、価格 50～70 円程度            |
| 接着  | 超強力両面テープ       | 0.6×19×10000 | 住友スリーエム株式会社、品番 PVG-12、価格 1000 円程度   |
| 落下物 | パチンコ玉          | 直径 11.1      |                                     |

製作にあたっては工作材の長さ半分である 455 mm を基本形としてパチンコ玉の落下を防ぐ外枠（ホワイトアングル）も同様の長さにカットして用いた。一方、障害物（三角棒）は工作材の幅 60 または 120 mm でカットした。『パチンコ台モデル』においては釘の数の増減に手間がかかったが、本モデルは全て両面テープを用いた接着を行っており、非常に手軽に障害物の数の増減が可能である。洗濯板モデルの外観図と実物写真を図 5 に示す。

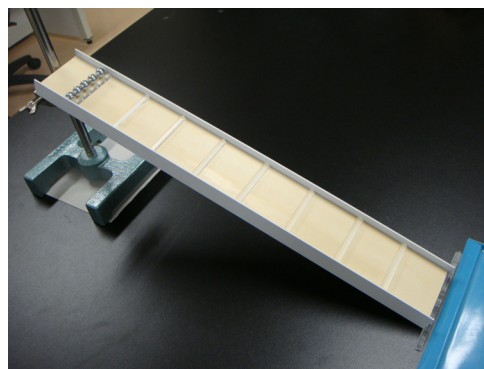
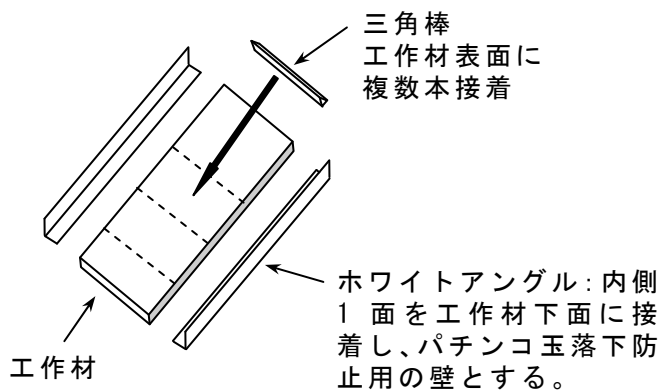


図 5. 洗濯板モデルの外観図(a)と実物写真(b)。傾斜の変化は実験用スタンドを用いた。

なお、抵抗率 $\rho$ の意味合いとして、抵抗率の大小は三角棒の数を増やすか、三角の1辺が長い製品（5×1000 mm）を活用すればよい。さらに、本モデルは概念形成(大小関係のみ)で定量化は求めている。それゆえ、三角棒の本数や間隔はその差が明確に分かれる適切な条件を模索して各自で決めればよい。電流はパチンコ玉が傾斜を転がり落ちるまでの時間、電圧は本体一片の最大高さ、電力量（発熱量）は障害物を超えるときの音が相当すると仮定して実験を行う。中学校理科においてはこの障害物が現実論として何を表しているかの言及をおこなうかどうかは教員の判断に委ねたい。

## 2-2 各種洗濯板モデル

『洗濯板モデル』はオームの法則に従った3つの変数(電圧 $V$ 、電流 $I$ 、抵抗 $R$ )に対してのものではなく、この中の抵抗についてさらに抵抗率 $\rho$ 、抵抗の断面積 $S$ 及び長さ $l$ についての関係式

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho l}{\pi r^2} \quad (17)$$

も反映したものである。変数の組み合わせを考慮した結果得られたモデルを表2に示す。なお、ここで示した可能な組み合わせ以外にも『抵抗 $R$ を変化』+『電流 $I$ 一定』とし、電圧 $V$ の変化を見るというものも考えられる。しかし、現実問題として電流を一定に調整する（パチンコ玉の速度をコントロールする）ことは困難なことより、『電流 $I$ 一定』モデルは考えないこととした。以下小節において、表2に示すおのこのモデルについて特徴を述べる。

表2. 洗濯板モデルの各種特徴

| 抵抗の情報     |                        | モデルの特徴                    |
|-----------|------------------------|---------------------------|
| 抵抗 $R$ 一定 |                        | 電圧 $V$ 変化（モデルI；2-2-1小節）   |
| 抵抗 $R$ 変化 | 変数（長さ $l, l'$ ）        | 電圧 $V$ 一定（モデルII；2-2-2小節）  |
|           | 変数（断面積 $S, S'$ ）       | 電圧 $V$ 一定（モデルIII；2-2-3小節） |
|           | 変数（抵抗率 $\rho, \rho'$ ） | 電圧 $V$ 一定（モデルIV；2-2-4小節）  |

### 2-2-1. モデルI(同一抵抗 $R$ に対して電圧 $V$ を変える)

モデルIは同じ幅、同じ長さの洗濯板（同一抵抗）を用いて、洗濯板の最大高さを電圧とみなし、この電圧の異なる同じ洗濯板（抵抗）上に同じ数のパチンコ玉を落とすことによって、転がり落ちる時間の差を比較するものである。本来は、電子は金属導体（抵抗）内に満たされており、連続的に傾斜を落とさないといけなのだが、本モデルではパチンコ玉は一行または横数列を並べて、落ちる時間の差を比べて電流の大小の比較を行なうこととした。モデル実験の外観図を図6に示す（ $V_1 < V_1'$ ）。図中では落下防止用の壁はあえて書いていない。

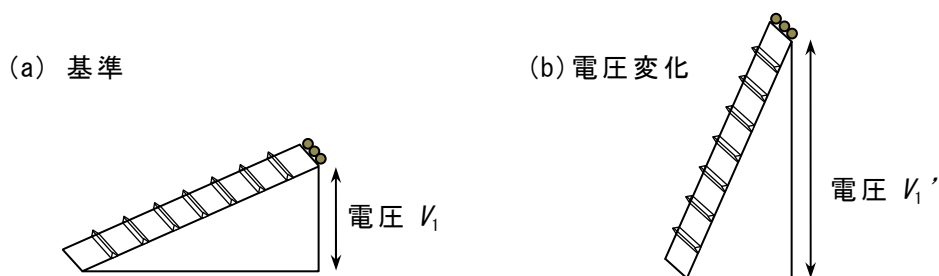


図6. モデルIの外観図。斜面の長さ・幅・障害物の数は等しく、傾斜角度のみが異なる。

基準となる図 6(a)の電圧  $V_1$  に対して、変化させた電圧  $V_1'$  を取る系が図 6(b)であり、それぞれの図に対応する物理量（電圧  $V_1$ 、 $V_1'$ 、抵抗  $R_1$ 、電流  $I_1$ 、 $I_1'$ 、電力量  $W_1$ 、 $W_1'$ 、電子の速度  $v_1$ 、 $v_1'$ ）を表 3 にまとめる。電圧が高くなる分、元の電圧との比( $V_1'/V_1$ )を係数とした電流及び電子の速度の増加、発熱量においてはこの係数の二乗をかけた値への増加が起こる。ただし、この『洗濯板モデル』は従来の『パチンコ玉モデル』同様に物理量の変化（比の値）を忠実に満たしていることは無く、変化の大小のみを理解するためのものである。

表 3. モデル I における金属導体（抵抗）に関する物理量

| 物理量          | モデル I(電圧小) (図 6(a))                               | 大小関係 | モデル I(電圧大) (図 6(b))   |
|--------------|---|------|---|
| 電圧           | $V_1$   | <    | $V_1'$  |
| 抵抗           | $R_1 = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho l}{\pi r^2}$ | =    | $R_1 = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho l}{\pi r^2}$                         |
| 電流           | $I_1 = \frac{V_1}{R_1}$                           | <    | $I_1' = \frac{V_1'}{R_1} = \frac{V_1'}{V_1} I_1$                          |
| 電力量<br>(発熱量) | $W_1 = V_1 I_1 t = R_1 I_1^2 t$                   | <    | $W_1' = V_1' I_1' t = R_1 I_1'^2 t = \left(\frac{V_1'}{V_1}\right)^2 W_1$ |
| 電子の速度        | $v_1 = \frac{I_1}{enS}$                           | <    | $v_1' = \frac{I_1'}{enS} = \frac{V_1'}{V_1} v_1$                          |

### 2-2-2. モデル II(長さ $l$ の違いにより抵抗 $R$ が異なる場合)

モデル II は同一電圧下での長さの異なる ( $l < l'$ ) 金属導体（抵抗）間の電流の違いを理解するためのモデルであり、図 7 に外観図、表 4 にそれぞれの物理量について示す。図 7(a)が基準になる系であり、図 7(b)が金属導体の長さが長くなったことを表している。表 4 からは抵抗体の長さが長くなることにより、抵抗( $R_2'$ )が  $l'/l$  倍へ増加し、その逆数に相当する比に電子の速度( $v_2'$ )及び電流( $I_2'$ )の値が小さくなることが読み取れる。

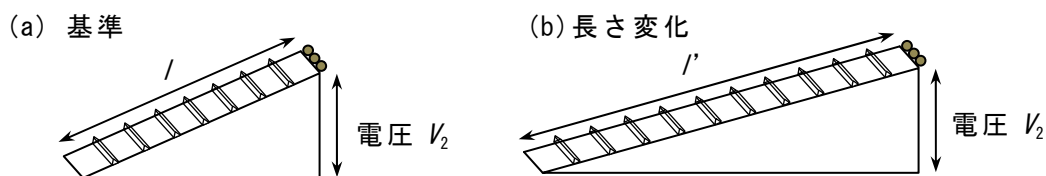


図 7. モデル II の外観図。斜面の長さのみが異なる。単位長さあたりの障害物の数は等しい。

表 4. モデル II における金属導体（抵抗）に関する物理量

| 物理量 | モデル II(長さ小) (図 7(a)) | 大小関係 | モデル II(長さ大) (図 7(b)) |
|-----|----------------------|------|----------------------|
| 長さ  | $l$                  | <    | $l'$                 |
| 電圧  | $V_2$                | =    | $V_2$                |



|              |   |   |  |
|--------------|---|---|--|
| 抵抗           | $R_2 = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho l}{\pi r^2}$ | < | $R'_2 = \rho \frac{l'}{S} = \frac{\rho l'}{\pi r'^2} = \frac{l'}{l} R_2$ |
| 電流           | $I_2 = \frac{V_2}{R_2}$                           | > | $I'_2 = \frac{V_2}{R'_2} = \frac{l}{l'} I_2$                             |
| 電力量<br>(発熱量) | $W_2 = V_2 I_2 t = \frac{V_2^2}{R_2} t$           | > | $W'_2 = V_2 I'_2 t = \frac{l}{l'} W_2$                                   |
| 電子の速度        | $v_2 = \frac{I_2}{enS}$                           | > | $v'_2 = \frac{I'_2}{enS} = \frac{l}{l'} v_2$                             |

### 2-2-3. モデル III (断面積 $S$ または直径 $2r$ の違いにより抵抗 $R$ が異なる場合)

モデル III は同一電圧下での断面積または直径の異なる抵抗間の電流の違いを理解するためのものであり、図 8 に外観図、表 5 にそれぞれの物理量について示す。金属導体の断面積が大きくなることにより、抵抗 ( $R_3'$ ) は減少、電子の速度 ( $v_3'$ ) は変化無し、電流 ( $I_3'$ ) は減少することが読み取れる。ここで、注意しないとイケないことは、本来、電気が流れる空間は 3 次元であるものを 2 次元として幅のみで置き換えていることである。さらに、幅を大きくしても単位幅あたりのパチンコ玉の数は同じにしないとイケない。なぜならば図 8 で示したものは同一物質を想定しており、単位体積当たりの自由電子の数  $n$  が等しいことから容易に理解することができ、そのため同一傾斜を下るパチンコ玉の速度は等しく ( $v_3 = v_3'$ )、(3) 式での断面積の差により電流 ( $I_3'$ ) が大きくなる事実を忠実に反映している。

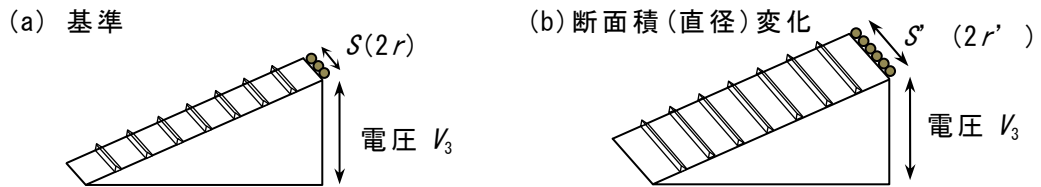


図 8. モデル III の外観図。斜面の幅のみが異なる。単位幅当たりのパチンコ玉の数が等しい。

表 5. モデル III における金属導体 (抵抗) に関する物理量

| 物理量     | モデル III (面積小) (図 8(a))                            | 大小関係 | モデル III (面積大) (図 8(b))   |
|---------|---|------|--|
| 面積 (直径) | $S \quad (2r)$                                    | <    | $S' \quad (2r')$   |
| 電圧      | $V_3$   | =    | $V_3$  |
| 抵抗      | $R_3 = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho l}{\pi r^2}$ | >    | $R'_3 = \rho \frac{l}{S'} = \frac{\rho l}{\pi r'^2} = \left(\frac{r}{r'}\right)^2 R_3$ |
| 電流      | $I_3 = \frac{V_3}{R_3}$                           | <    | $I'_3 = \frac{V_3}{R'_3} = \left(\frac{r'}{r}\right)^2 I_3$                            |

|              |   |   |   |
|--------------|---|---|---|
| 電力量<br>(発熱量) | $W_3 = V_3 I_3 t = \frac{V_3^2}{R_3} t$ | < | $W_3' = V_3 I_3' t = \left(\frac{r'}{r}\right)^2 W_3$ |
| 電子の速度        | $v_3 = \frac{I_3}{enS}$                 | = | $v_3 = \frac{I_3'}{enS'}$                             |

2-2-4. モデル IV (物質 (抵抗率  $\rho$ ) の違いにより抵抗  $R$  が異なる場合)

モデル IV は同一電圧下で異なる物質 ( $\rho < \rho'$ ) による抵抗の違いによる電流の違いを理解するためのものであり、図 9 に外観図、表 6 にそれぞれの物理量について示す。モデル IV においては抵抗を表す(17)式の分子の項の増減を意味しており、長さ  $l$  に関するモデル II 同様に抵抗 ( $R_4'$ ) が変数の比 ( $\rho'/\rho$ ) に相当して増加し、その逆数の比に相当して電流 ( $I_4'$ ) 及び発熱量 ( $W_4$ ) の値が小さくなることを表している。なお、速度 ( $v_4'$ ) においては物質固有の単位体積当たりの自由電子の数も影響し、さらに  $n/n'$  の比をかけた値となる (単位幅当たりのパチンコ玉の数も変える必要が生じる)。

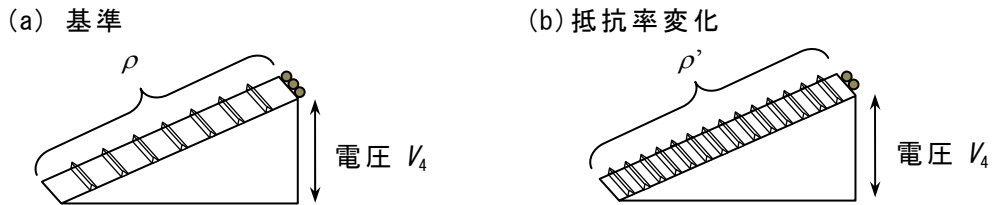


図 9. モデル IV の外観図。障害物の数と単位幅当たりのパチンコ玉の数が異なる。

表 6. モデル IV における金属導体 (抵抗) に関する物理量

| 物理量          | モデル IV (抵抗率小)<br>(図 9(a))                         | 大小<br>関係 | モデル IV (抵抗率大) (図 9(b))  |
|--------------|---|----------|---|
| 抵抗率          | $\rho$  | <        | $\rho'$   |
| 電圧           | $V_4$   | =        | $V_4$   |
| 抵抗           | $R_4 = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho l}{\pi r^2}$ | <        | $R_4' = \rho' \frac{l}{S} = \frac{\rho' l}{\pi r^2} = \frac{\rho'}{\rho} R_4$ |
| 電流           | $I_4 = \frac{V_4}{R_4}$                           | >        | $I_4' = \frac{V_4}{R_4'} = \frac{\rho}{\rho'} I_4$                            |
| 電力量<br>(発熱量) | $W_4 = V_4 I_4 t = \frac{V_4^2}{R_4} t$           | >        | $W_4' = V_4 I_4' t = \frac{\rho}{\rho'} W_4$                                  |
| 電子の速度        | $v_4 = \frac{I_4}{enS}$                           | 不確定      | $v_4' = \frac{I_4'}{en'S} = \frac{\rho}{\rho'} \frac{n}{n'} v_4$              |

我々が提案する『洗濯板モデル』は中学校理科単元「電流、電圧と抵抗」において行なう 4 つの対比実験 (図 6,7,8,9) を通じて、金属導体 (抵抗体) の長さ・断面積の大きさ (半径) ・抵抗率の違いによる電流の大きさや電子の速度の変化を視覚を通じて概念理解を行なうものであ

る。それは抵抗が抵抗率と長さに比例し、断面積に反比例するという事象理解の基礎を作り、高校で学習する(17)式の事前学習にも相当する。今後、『洗濯板モデル』を用いた具体的な有効性の検証並びに教育現場における実践を行い、より良い教材としての確立を目指した研究を行なう。

## おわりに

本論文において提案した『洗濯板モデル』は『パチンコ台モデル』同様に電子の速度の変化が電圧比に比例（モデル I）、金属導体の長さの逆数比に比例（モデル II）、電気抵抗率の逆数比及び単位密度当たりの電子の数の逆数比に比例（モデル IV）といった定量的な関係を忠実に再現してはいない。例えば、それぞれのモデルを反映した2つの斜面を作製し、パチンコ玉を落とすことによる速さや音の大小関係を比較することに特化したものである。しかし、力学分野と違ってイメージしにくいものを「あえて」可視化することに第一の意義を導くべきと考え、中学生に対する「電流、電圧、抵抗」に関する概念理解においては十分役立つものと考え。しかし、一方で、教員を目指す大学生並びに理科を指導している小・中学校教員は隠れている仮定や問題点を理解しつつ、その中でもより定量的に理解・議論して欲しい。本論文においてはさまざまなモデルの場合における解釈のみの提案であったが、具体的にパチンコ玉を用いた『洗濯板モデル』の実験評価・検討並びに教育現場における実践を現在行っており、『洗濯板モデル』の効果的な活用法に関する具体的紹介を、近い将来別紙にて実践報告を行いたい。

なお、本研究は山口大学教育学部附属教育実践総合センター平成23年度学部・附属共同研究プロジェクト『採択課題「中学校理科物理領域における教材開発と効果的な活用法についての実践」（重松宏武、松永武）』からの研究助成により活動を行った。ここに感謝申し上げます。

## 引用文献

- 1) 例えば、佐々木英樹、重松宏武：「エネルギー変換の定量的理解に関する研究 — 中学校理科におけるコンデンサーを用いた授業のデザイン —」 山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要 第31号 (2011) 59-70.  
内田由美子、吉岡真志、重松宏武：「銅線の電気抵抗の温度変化 — 中学校理科における発展学習に向けた定量的考察 —」 山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要 第32号 (2011) 17-26.
- 2) 重松宏武：「小中学校理科「電気による発熱」に関する基礎研究 — 定量的理解度向上のための数式の活用 —」 山口大学教育学部研究論叢 第61号 (2011) 181-194.
- 3) 例えば、國友正和他9名：『高等学校 物理 II』数研出版.
- 4) 黒沢達美：「電流と電気伝導」共立出版.
- 5) ファインマン、レイノン、サンズ：「ファインマン物理学 II 光・熱・波動」第18章 岩波書店.
- 6) 愛知・岐阜物理サークル：「いきいき物理わくわく実験 1」日本評論社 96-98.  
岐阜物理サークル：岐阜物理サークルニュース集 vol.8 (1987) 1056-1060, 1070-1077.  
岐阜物理サークル：岐阜物理サークルニュース集 vol.9 (1988) 1314-1324.  
「FNの高校物理」：<http://fnorio.com/index.htm> (項目「物理」-「電気」-「オームの法則」)