

中学校理科「電流・電圧と抵抗」における 洗濯板モデル(washboard model)の半定量的考察

重松 宏武・棟居 翼*・松永 武**・内田由美子***・前川真利奈***・風盛 文哉***・西山 桂****

Semiquantitative Research of the Application of Washboard Model to “Current, Voltage and Resistance”
in Junior High School Science

SHIGEMATSU Hirotake, MUNESUE Tsubasa*, MATSUNAGA Takeshi**, UCHITA Umiko***,
MAEKAWA Marina***, KAZAMORI Fumiya***, NISHIYAMA Katsura****

(Received January 8, 2013)

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

はじめに

我々は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)』の提案を 2011 年に行った¹⁾。この洗濯板モデルは個々の球が通過する障害物の数が同じになるよう構成されており、転がり落ちる球の速さや時間にばらつきが少ないという改良点がなされていた。そのことから球の速さの変化を判断しやすく半定量的に電流の大きさを扱うことができるという利点を持つ。さらに、『パチンコ台モデル』における釘のように取り外しが困難な部品は用いず、容易に本体の製作並びに障害物の増減が可能なことから、教員による演示ではなく生徒参加型実験が行えるという長所も併せ持つものであった。その後翌年、洗濯板モデルを活用した授業実践を中学校で行い、中学生が容易に「電流・電圧と抵抗」をきちんとイメージできるという実証を得、洗濯板モデルの有効性を示した²⁾。本論文では引用文献 1 と 2 の続編として、この『洗濯板モデル(washboard model)』の利用・普及を目指すために、洗濯板モデルを用いた具体的な実測データを示し、さらにこのモデルの半定量的評価・検討した結果を報告する。これらの内容は洗濯板モデルを実際に活用するための大きな指標となる情報であり、モデルの提案を行った引用文献 1 の内容と実践報告を行った引用文献 2 の内容をつなげる役割も担う。これら基礎データが活用されることにより、今後広く中学校理科の学習において洗濯板モデルが活用されることを願いたい。

1. 洗濯板モデルの構成及び基本的な考え方

ここでは、引用文献 1 及び 2 において記載した『洗濯板モデル』について簡単に紹介する。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 ρ 、抵抗の断面積 S (半径 r)及び長さ l についての関係式

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{\rho l}{\pi r^2} \quad \left(= \frac{V}{I} \right) \quad (1)$$

も反映したものである。変数の組み合わせを考慮することにより、基準モデルに対応した 4 つのモデルを得ることができる¹⁾。これらモデルの具体的なイメージ図を図 1 に、さらにそれぞれのモデルを特

微付けるの変数（物理量）の関係を表 1 並びに表 2 に示す。洗濯板モデルにおいては、電流または電子の平均の速さはパチンコ玉が斜面を転がり落ちるまでの時間（時間が短い方が電子を表すパチンコ玉の速度が速いことを意味することから、正確には『時間の逆数』）とパチンコ玉の数、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ものである。つまり、電流を一定（パチンコ玉の速度をコントロールする）にすることは困難であることから、洗濯板モデルには電流一定モデルは想定されていない。

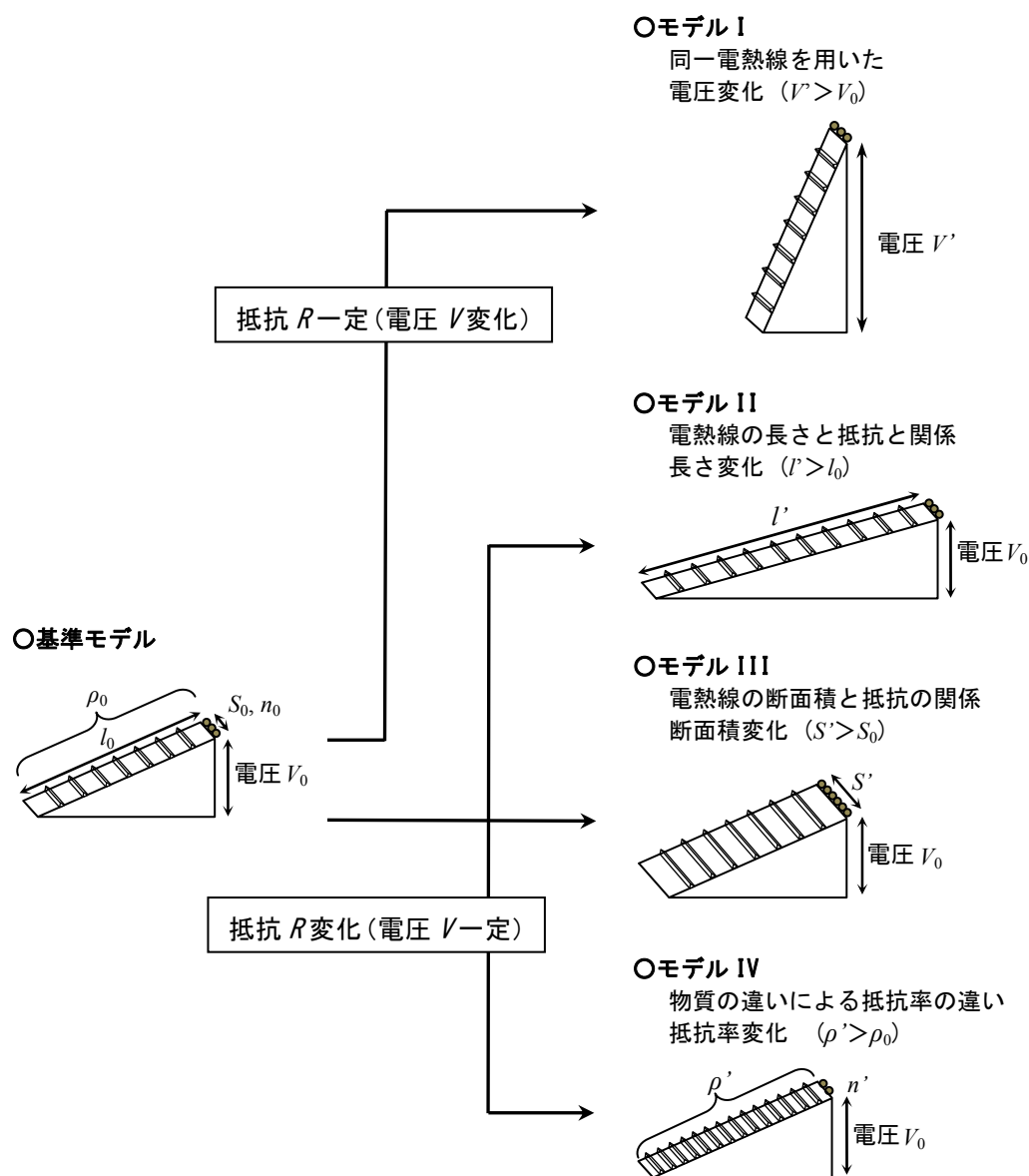


図 1. 各種洗濯板モデルの外観図。図中では落下防止用の壁はあえて描いていない。変数 ρ_0 (ρ'), l_0 (l'), S_0 (S') は (1) 式で表される物理量を表し、 n_0 , n' は導線の単位体積当たりの電子の数を意味する。モデル IV のみ n' の値をとり、他のモデルは共通の n_0 の値をとる。なお、引用文献 2 では基準モデルを B モデル、モデル II を L モデル、モデル III を C モデル、モデル IV を R モデルとそれぞれ呼び、モデル I に関しては取り扱わなかった。

実際の作製に関しては引用文献 1 の 2-1 小節に記載した内容に従い行った。具体的には「基準モデル」としては「本体長さ 455 mm×幅 60 mm×厚さ 9 mm の工作材、障害物はアクリサンデー株式会社製の三角棒 (3×1000 mm) を 50 mm 間隔で 8 本」を採用した。「モデル I」は「基準モデル」と同等、「モデル II」は「本体長さが倍の 910 mm、障害物は倍の 16 本 (同じ間隔のままとし、抵抗率は ρ_0 から変化無し)」、「モデル

III」は「本体の幅が倍の 120 mm（断面積 S' が基準モデルの 2 倍を想定）」、そして「モデル IV」は「障害物が 25 mm 間隔の計 16 本（抵抗率 ρ' が基準モデルの 2 倍を想定）」とした。電圧を意味する高さについては床から洗濯板の底面の端までの高さとした（理由は付録 1 参照）。また、電力量（発熱量）を評価するパチンコ玉の音は MASTECH 社製デジタルマルチメーター MS8209 の騒音計レンジを活用して測定した。この性能は測定範囲：35～100 dB（周波数範囲：約 100～10kHz）、精度： $\pm 3.5\%$ dB (94 dB 時) のものである。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、洗濯板モデルでは、例えば基準モデル・モデル I・モデル II においてはパチンコ玉（直径 11.1 mm）5 個を横一列に並べ、同時に落とし、距離 l_0 （または l' ）間を流れ始めから 5 個全てが流れ切るまでをストップウォッチを用いて時間を測定し、これを各モデルごとに 5 回ずつ繰り返し平均値を求めた。モデル III では単位体積当たりの電子の数は変わらず断面積が 2 倍になったことを想定していることから、倍の 10 個を横一列に並べた。一方、モデル IV は導線の材質が異なることを想定しており、単位体積当たりの電子の数は異なることから、パチンコ玉の数は自由に設定して良い。しかし、抵抗率と単位体積当たりの電子の数という 2 つの変数を用いると表 1 に示した電子の速度の関係が特定できなくなることから、あえて基準モデルと同じ 5 個に設定した（つまり、ここでは $n'=n_0$ と仮定した）。騒音計は最下に設置した障害物（三角棒）から 30 mm の位置に設置し、最大値を観測した。実際に用いた洗濯板モデル（代表として基準モデル）の外観と実践の様子を図 2 に示す。

表 1. 各洗濯板モデルの物理量の関係 1（数式）。詳細は引用文献 1 及び 2 参照。なお、引用文献 1 では基準モデルを各々 V_i , R_i , I_i , W_i , v_i ($i=1, 2, 3, 4$) とし、モデル I-IV を V_i' , R_i' , I_i' , W_i' , v_i' ($i=1, 2, 3, 4$) としているが、各モデルに対する基準モデルは同じものを意味していることから、本論文では共通の V_0 , R_0 , I_0 , W_0 , v_0 とした。

	電圧	抵抗	電流	電力量	電子の速度
基準モデル	V_0	R_0	I_0	W_0	v_0
モデル I (電圧変化 $V_1 > V_0$)	V_1 ($> V_0$)	$R_1 = R_0$	$I_1 = \frac{V_1}{V_0} I_0$	$W_1 = \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^2 W_0$	$v_1 = \frac{V_1}{V_0} v_0$
モデル II (長さ変化 $l' > l_0$)	V_2 ($= V_0$)	$R_2 = \frac{l'}{l_0} R_0$	$I_2 = \frac{l_0}{l'} I_0$	$W_2 = \frac{l_0}{l'} W_0$	$v_2 = \frac{l_0}{l'} v_0$
モデル III (断面積変化 $S' > S_0$) (半径変化 $r' > r_0$)	V_3 ($= V_0$)	$R_3 = \frac{S_0}{S'} R_0$ $= \left(\frac{r_0}{r'}\right)^2 R_0$	$I_3 = \frac{S'}{S_0} I_0$ $= \left(\frac{r'}{r_0}\right)^2 I_0$	$W_3 = \frac{S'}{S_0} W_0$ $= \left(\frac{r'}{r_0}\right)^2 W_0$	$v_3 = v_0$
モデル IV (抵抗率変化 $\rho' > \rho_0$)	V_4 ($= V_0$)	$R_4 = \frac{\rho'}{\rho_0} R_0$	$I_4 = \frac{\rho_0}{\rho'} I_0$	$W_4 = \frac{\rho_0}{\rho'} W_0$	$v_4 = \frac{\rho_0}{\rho'} \frac{n_0}{n'} v_0$

表 2. 各洗濯板モデルの物理量の関係 2（電流と電子の速度）。これは表 1 中の各モデルの変数と、その変数と電流・電子の速度との数式的関係をまとめたものである。ここで書かれている変数は(1)式同様に一般式を意味する。なお、本文で示すようにモデル IV においては導線の単位体積当たりの電子の数に変化は無いと仮定したことにより ($n' = n_0$)、電子の速度は $v \propto 1/\rho$ となる。

	変数	電流	電子の速度
基準モデル	—	$I = \frac{VS}{\rho l}$	v
モデル I (電圧変化 V)	V	$I = \left(\frac{S}{\rho l}\right) \times V \propto V$ (比例)	$v \propto V$ (比例)
モデル II (長さ変化 l)	l	$I = \left(\frac{VS}{\rho}\right) \times \frac{1}{l} \propto \frac{1}{l}$ (反比例)	$v \propto \frac{1}{l}$ (反比例)
モデル III (断面積変化 S) (半径変化 r)	S または r	$I = \left(\frac{V}{\rho l}\right) \times S \propto S$ (比例) $I = \left(\frac{V\pi}{\rho l}\right) \times r^2 \propto r^2$	v (不変)
モデル IV (抵抗率変化 ρ)	ρ	$I = \left(\frac{VS}{l}\right) \times \frac{1}{\rho} \propto \frac{1}{\rho}$ (反比例)	$v \propto \frac{1}{\rho n}$ (反比例)

実は『洗濯板モデル』の実験において事前に理解しないといけない重要な関係式は表 2 の中に示された式である。例えば、各モデルの変数 (V , l , S , ρ) を代表して変数 x と置き換えて考えるとモデル I と III の電流 $I(x)$ は

$$I(x) \propto x \quad (2)$$

と比例関係にあり、一方、モデル II と IV に関しては

$$I(x) \propto \frac{1}{x} \quad (3)$$

と反比例の関係にある。同様に速度 $v(x)$ について考えると、モデル I は

$$v(x) \propto x \quad (4)$$

と比例関係にあり、モデル II と IV は

$$v(x) \propto \frac{1}{x} \quad (5)$$

と反比例となる（ただし、モデル IV では単位体積当たりの電子の数 n を変数として取扱っていない）。さらに、モデル III においては速度に変化は無く一定値を取る。

$$v(x) = \text{const.} \quad (6)$$

つまり、我々が提案する『洗濯板モデル』は(2)–(6)式で表される関係を正確にとはいえないが、少なくとも大小関係を反映したモデルである。そして、その正確度を検証することが本論文の目的の 1 つでもある。

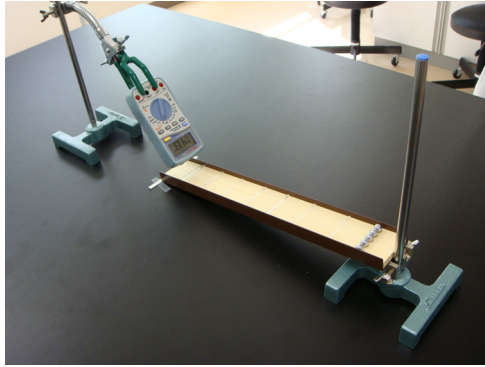


図 2. 洗濯板モデルの外観(a)と実践の様子(b)。パチンコ玉を落とす人、時間をはかる人、騒音計を観測する人の最低 3 名以上の人員を要する。

なお、実験は図 2 に示すように、パチンコ玉を落とす人、時間を計る人等複数人で分担せざるを得ない。このことは落下時間の測定ミスを生じさせる可能性が高くなることを意味しており、実験誤差を生じさせないためにも実験者の意志の疎通が大切である。さらに、複数のグループで同時に実験を行った場合は周りの実験の音の影響で騒音計の値が正確に測定できない場合があるため注意が必要である。また、一般的に測定値の定量化を行うと計測値（この場合、ストップウォッチの時間や騒音計の計測値）を得ることばかりに気持ちが入ってしまい、実験者が実験途中に何か得よう・学ぼうとする姿勢を失わせる可能性もある。定量化は実験結果をよりわかり易くまとめるための手段でしか無く、重要なことは五感で物理現象の変化を直に感じ取ることである。『洗濯板モデル』の実践に限ったことではなく、『デジタル化・定量化』の落とし穴に落ちないように指導者は注意を払って頂きたい。

2. 洗濯板モデルの測定結果

1 章で述べた実験条件における各々のモデルに関する得られた測定結果（パチンコ玉の落下時間）の考察を各小節（2-1 小節～2-4 小節）にそれぞれ示す。さらに、電力量（発熱量）を仮想した障害物を超える時の音に関する検討は全てのモデルをまとめて 2-5 小節に示す。

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は同一抵抗（同じ幅、同じ長さの洗濯板）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）を流れる電流（パチンコ玉の落ちる時間の逆数）を比較するものである。つまり、落ちる時間の差を比べて電流の大小の比較を行っている。電圧を意味する高さを 80, 100, 130, 150 mm を採用し、モデルⅠに関する実験結果を表 3 に示す。ここで、高さ 80 mm 未満は全てのパチンコ玉が傾斜を最後まで転がり落ちないために除外し、さらに 150 mm より高角では傾斜を転がるというよりはむしろ跳ね落ちる状態となることから、モデルの意図を反映していないと判断し、除外した。

表 3. モデルⅠにおける実験結果。角度に関する説明は付録 1 参照。下線は基準として用いた値

想定している物理量	モデルⅠの実験結果				
電圧	高さ[mm]	80	100	130	150
	角度[°]	8.99	11.56	15.47	18.11
	時間 t [s]	<u>1.95</u>	1.80	1.59	1.51
電子の平均速度	斜面を転がり落ちる平均速度[mm/sec]	<u>233.3</u> (455/1.95)	252.8 (455/1.80)	286.2 (455/1.59)	301.3 (455/1.51)
電子の平均速度(比)		<u>1</u> (1.95/1.95)	1.08 (1.95/1.80)	1.23 (1.95/1.59)	1.29 (1.95/1.51)

電流（比）		同上	同上	同上	同上
-------	--	----	----	----	----

表3において、実験条件として変えたものは高さであり、そこから得られる結果は時間のみである。そしてここから求められた斜面を転がり落ちる平均の速さを電子の平均の速さと仮想して議論を行うこととなる。表には斜面を転がり落ちる平均の速さを示したが、そもそもこの値の絶対値には物理的意味も重要性も無い。特定の変数（モデルⅠでは電圧に相当する高さ）を変えることによってこの速度がどのように変化するかの比が大切となる。つまり、斜面の距離はこのモデルでは問題にはならず、表に示したように例えば、高さ 80 mm の場合を『基準モデル』とし、それぞれ得られた時間の逆数の比（速度を意味する変数）を求めれば良い事となる。さらに電流に関しては、電流と電子の流れに関する以下の関係式から導き出せば良い¹⁾。なお、ここで e は電荷素量を表す。

$$I = envS \quad (7)$$

モデルⅠでは単位体積当りの電荷の数 n も断面積 S も変化がなく定数として取扱って良く、(7) 式は $I \propto v$ と表されることより、電子の速度の関係そのものが電流の大小関係にも反映することがわかる。結論としては同一抵抗 R の場合、電圧が大きくなると電子の速度も電流の大きさも大きくなるという関係をきちんと表した結果を得た。そのことは『電圧の増加 ($V_1 > V_0$) により、導体中の自由電子の速度 ($v_1 > v_0$) は早くなり、単位時間あたりに移動する電子の数が多くなる。その結果、電流量は多く流れるようになった ($I_1 > I_0$)』という物理現象を説明したこととなる。注意事項としては引用文献1でも述べたように『洗濯板モデル』は『パチンコ台モデル』同様に定性的な概念形成（物理量の大小関係のみ）を理解するためのモデルであり、その点では十分な役割を果たしていると言える。しかし、『パチンコ台モデル』で議論された「オームの法則が定量的に説明できない」や「発熱の公式に従わない」など³⁾といったことが、『洗濯板モデル』でも同様に起こっていることを忘れてはいけない。本稿ではこれらの矛盾を詳細に数式を用いて示すことはしないが、理想的な関係との違いを可視化するために実験結果を図3に改めて示す。横軸は下段に電圧を意味する高さを記し、高さ 80 mm を基準とした高さの比（無次元）を上段に記した。縦軸は斜面を転がり落ちる平均速度の基準値に対する比を表し、電子の平均の速さを仮想した値もしくは電流の大きさを仮想した値を意味するものである。このモデルにおいては(7)式からわかるように電子の平均の速度と電流の値は同じ変化をすべき物理量となる。残念ながら大小関係は保たれているものの電圧と電流の比例関係は全く保たれていないことがわかる。

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 ($l > l_0$) 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る。具体的には基準モデルより2倍の長さの抵抗を想定し、基準モデルとの対比を行った。ここで基準モデルとはモデルⅠの結果そのものであり(表4)、各々の同一電圧下での仮想された電子の平均の速さ(比)と電流の大きさ(比)を議論することとなる(表5)。基準モデルに対して、高さ 80, 100 mm の場合は傾斜角度が小さくなりパチンコ玉は下まで落下することができなかった。そのため、高さ 130 及び 150 mm の場合のみの比較した結果である。電圧一定であるならば、理論的には速さが 1/2（時間は2倍）、電流も 1/2 となるが、実験結果は共に高めの値の 0.82 が得られた。この変化の様子を図4に示す。理想関数としては(3)、(5)式で表される反比例の関係を持つことから、さらに長さの異なる複数の洗濯板を作製し、実験を行った場合は下に凸の変化することが期待される。なお、この現象は『同一電圧下において、抵抗の長さの増加 ($l_2 > l_0$) により、導体中の自由電子の速度 ($v_2 < v_0$) は遅くなり、単位時間あたりに移動する電子の数が少なくなる。その結果、電流量は小さくなる ($I_2 < I_0$)』という物理現象を説明したこととなる。実験モデルとしては『抵抗に対応する洗濯板の長さが長くなり（傾斜角度が小さくなる）、見ただけで電子を意味するパチンコ玉の落下速度は遅くなっている。単位時間あたりに移動する玉の数は減少したのだから電流は小さくなる』と定性的にも理解すれば良い。

表 4. 基準モデル（モデルⅠの結果に相当）。このモデルはモデルⅡ、Ⅲ、Ⅳに対する基準となる。

想定している物理量	基準モデル				
電圧	高さ [mm]	80	100	130	150

	角度[°]	8.99	11.56	15.47	18.11
	時間 t [s]	1.95	1.80	1.59	1.51

表 5. モデル II における実験結果。比は表 4 の基準モデルで求められた値との比である。このモデルでは距離が 2 倍になっており、表 3 でいう斜面を転がり落ちる平均速度は高さ 130 mm の場合で $(2 \times 455) / 3.90$ [mm/sec] となる。

想定している物理量	モデル II の実験結果				
電圧	高さ[mm]	80	100	130	150
	角度[°]	5.04	6.31	8.21	9.49
	時間 t [s]			3.90	3.70
電子の平均速度(比)				0.82 ($2 \times 1.59 / 3.90$)	0.82 ($2 \times 1.51 / 3.70$)
電流(比)				同上	同上

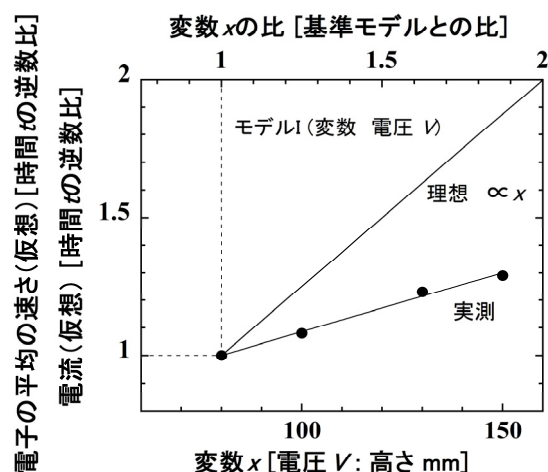


図 3. モデル I の結果（同一抵抗 R に対して電圧 V を変えた場合）。傾きが正という事では大小関係が保たれているが、比例関係という理想直線からは大きく外れた結果となった。

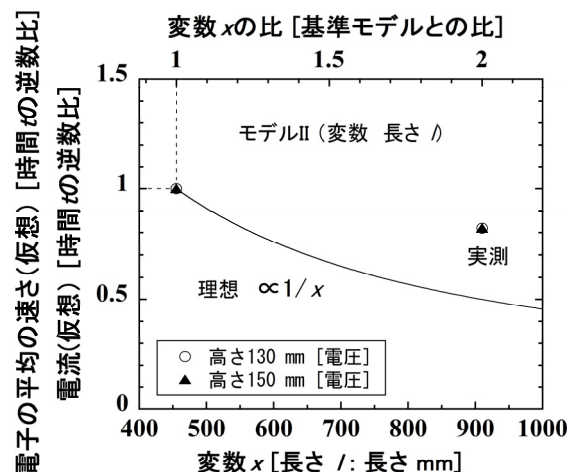


図 4. モデル II の結果（長さ l の違いにより抵抗 R が異なる場合）。傾きが負という事では大小関係が保たれているが、理想値からは大きく外れた結果となった。

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示すモデルである。今回は断面積 S が 2 倍になったことを想定した実験を行い、得られた結果を表 6 及び図 5 に示す。表 1 より理論的には速さ（時間）に変化は無いが、電流が 2 倍となる。これは、基準モデルが 2 つ横に並んでいると考えることが出来、長さも障害物も変わっていないことより、落下時間に変化が無いであろうことはすぐわかる。そして断面積が倍となり、パチンコ玉の数が倍になったことから、(7) 式により電流 I が 2 倍になることが簡単に導かれる。このことは単純には『パチンコ玉の落下時間は変わらないことから電子の平均の速さは変わらないが、球の数が増えたことにより、電流は増えている』という定性的・感覚的な学習につながる。

表 6. モデル III における実験結果。比は表 4 の基準モデルで求められた値との比である。

想定している物理量	モデル III の実験結果				
電圧	高さ[mm]	80	100	130	150
	時間 t [s]	2.07	1.86	1.68	1.58

電子の平均速度(比)		0.94 (1.95/2.07)	0.97 (1.80/1.86)	0.95 (1.59/1.68)	0.96 (1.51/1.58)
電流 (比)		同上×2	同上×2	同上×2	同上×2

2-4 モデル IV (物質(抵抗率 ρ)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(抵抗率 $\rho' > \rho_0$)による抵抗の違いによる電流の変化を理解するためのモデルである。今回は抵抗率が2倍になったことを想定した場合を採用し、得られた結果を表7及び図6に示す。単位体積当たりの電子の数に変化は無いと仮定したことより、(3)、(5)式で表されるように電流と電子の速度共に抵抗率に対して反比例の関係が成り立ち、電圧一定であるならば、理論的には速さが1/2(時間は2倍)、電流も1/2となることが予想される。実験結果は理想に近い値では無いが、抵抗率が大きくなると値が小さくなるという傾向は支持する結果となった。なお、本来このモデルは抵抗率 ρ と単位体積当たりの電子の数 n の2つの変数を考慮する必要があった。現実論としては単位体積当たりの電子の数は「(1原子当たりの伝導電子の数) / (1原子当りの体積)」から簡単に導き出すことが可能である。しかし、この値は個々の物質特有の値であり⁴⁾、この値を考慮した、より詳細な検討は洗濯板モデルのような簡易なものでは困難である。そのため、現時点においては単位体積当たりの電子の数 n の変化の考慮を行わなかった。結果としてこのモデルは『抵抗率を意味する障害物の増加に伴い、パチンコ玉の速度が低下した。そのため単位時間あたりに移動する玉の数は減少したことにより電流が小さくなった』と説明できる。

表7. モデル IV における実験結果。比は表4の基準モデルで求められた値との比である。

想定している物理量	モデル IV の実験結果				
電圧	高さ [mm]	80	100	130	150
	時間 t [s]	2.87	2.22	2.07	1.95
電子の平均速度(比)		0.68 (1.95/2.87)	0.81 (1.80/2.22)	0.77 (1.59/2.07)	0.77 (1.51/1.95)
電流 (比)		同上	同上	同上	同上

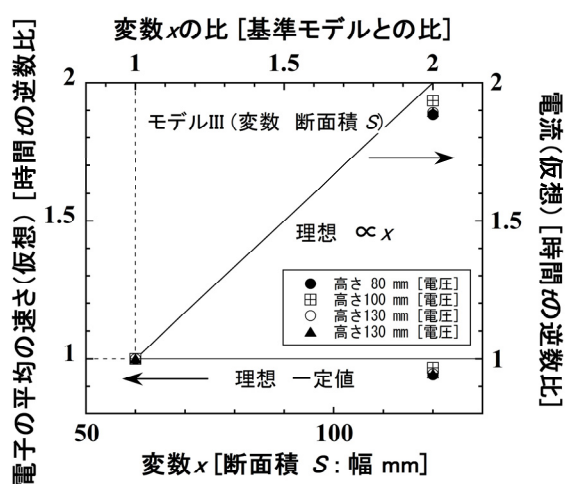


図5. モデル III の結果(断面積 S または直径 $2r$ の違いにより抵抗 R が異なる場合)。断面積 S に対して、電子の平均の速さは不変であるが、電流に関しては比例関係となる。実験結果は非常に良い一致をした。

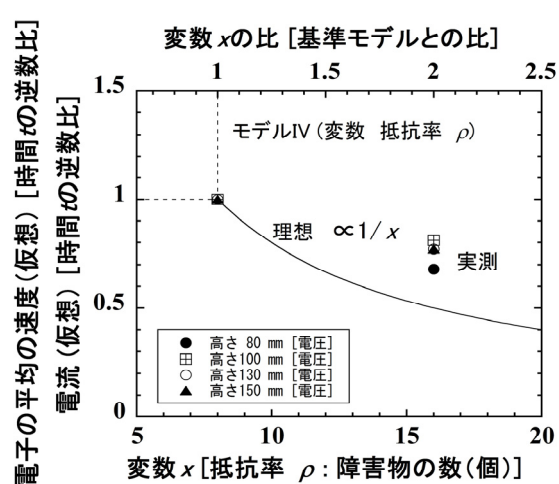


図6. モデル IV の結果(物質(抵抗率 ρ)の違いにより抵抗 R が異なる場合)。傾きが負という事では大小関係が保たれているが、理想値からは大きく外れた結果となった。

2-5 電力量（発熱量）を仮想した障害物を超える時の騒音

本論文で示したモデルは電子の速度及び電流の大きさ以外にも抵抗の電力量（発熱量）も想定し、それを仮想するものとしてパチンコ玉が落下するときの騒音を採用していた。全てのモデルの実験において得られた結果を表8と図7に示す。表1に示す結果からは電力量はモデルⅠにおいては電圧の2乗に比例する変化が求められ、同一電圧下のモデル間比較としてはモデルⅠを基準として、モデルⅡとⅣは1/2へ減少し、モデルⅢは2倍に増加することとなる。一方、得られた結果としては

- 同一モデル間においては、電圧が高くなるに従って電力量は上がる（このことは洗濯板の一方の高さが高くなるにつれて、騒音が大きくなることを意味する）。
- 同一電圧において電力量は基準モデル（この場合、モデルⅠが基準モデルに相当する）に対して、モデルⅢは増加し、モデルⅡ、Ⅳは低下する（モデルⅠを基準にして、モデルⅡとⅣの騒音は小さく、モデルⅢの騒音は大きくなる）。

という事実を得、これらは大小関係に限って言えば、表1の関係性を十分に満たすものであった（図7）。注意点としてはそもそも音の単位は基準値との比の対数であり、音の大小としての差は大きいとしても数値としての差は小さく表示される（具体的にいえば6 dBほどの差があれば実際の音の大きさは2倍になる）。このことを考慮すると、表1から得られる理想的関係（電力量はモデルⅠにおいては電圧の2乗に比例する変化が求められ、同一電圧下のモデル間比較としてはモデルⅠを基準として、モデルⅡとⅣは1/2へ減少し、モデルⅢは2倍増加する）を他の実験値同様にある程度は支持する結果を得たと考えて良い。

表 8. 各モデルにおける騒音（電力量を仮想したもの）

モデル	電圧	高さ[mm]	80	100	130	150
Ⅰ	電力	音[dB]	86.4	88.4	88.9	89.1
Ⅱ					86.0	87.3
Ⅲ			91.3	90.4	92.6	94.3
Ⅳ			84.9	86.8	86.3	88.3

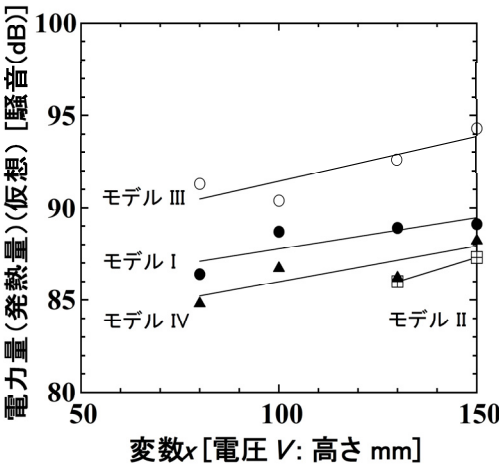


図 7. 各モデルにおける騒音に関する実測値（電力量を仮想）

おわりに

本論文は、広く中学校理科の学習において『洗濯板モデル(washboard model)』の利用・普及を推進することを期待して、このモデルの半定量的評価・検討した結果を報告したものである。これら基礎データが活用されることにより、今後広く中学校理科の学習において洗濯板モデルの実践が行われることを期待したい。理科離れ、特に物理離れと言われている近年においては、定性的な小中学校での学習から、いきなり定義・原則で固められた定量に重きを置いた数式展開重視の高校物理との大きなギャップに生徒・学生がついていけないことも大きな要因な1つであると考え。発達段階に応じた定性から定量への変換が大切であり、中学生はその変革期となる重要な時期と認識し、『洗濯板モデル(washboard model)』のような半定量化した実

験学習は非常に意義があるものとする。しかし、本文でも述べたが、定量化は実験結果をよりわかり易くまとめるための手段でしか無く、実験を通じた個人個人の感覚（五感）を大切にしたい中学校理科学習を行って欲しい。

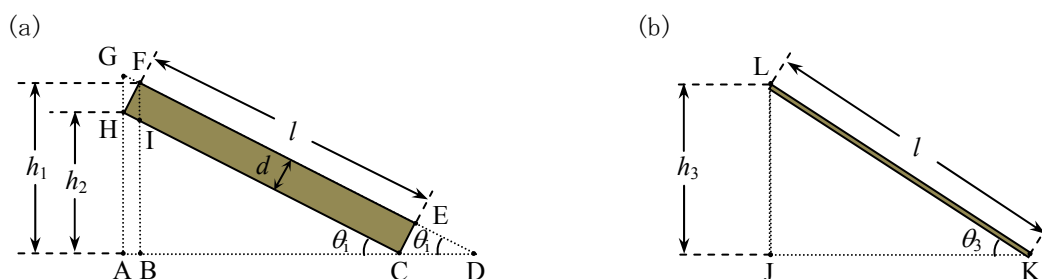
引用文献

- 1) 重松宏武, 棟居翼, 松永武, 内田由美子, 前川真利奈 : 「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 —」, 山口大学教育学部研究論叢第 61 号, 195-206, 2011.
- 2) 松永武, 重松宏武 : 「中学校理科「電流・電圧と抵抗」における洗濯板モデル (washboard model) を活用した授業実践」, 山口大学教育学部 学部・附属教育実践研究紀要第 11 号, 13-24, 2012.
- 3) 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, 2002
岐阜物理サークル : 『岐阜物理サークルニュース集 vol.8』, 1056-1060&1070-1077, 1987.
岐阜物理サークル : 『岐阜物理サークルニュース集 vol.9』, 1314-1324, 1988.
「FN の高校物理」 : <http://fnorio.com/index.htm> (項目「物理」-「電気」-「オームの法則」)
- 4) 水谷宇一郎 : 『金属電子論 上』, 内田老鶴圃, p.27, 1995.
齊藤幸喜, 宮代彰一, 高橋清 : 『電磁気学の基礎』, 森北出版, p.75, 1997.

付録 1.

『洗濯板モデル』は『パチンコ台モデル』同様に斜面の一方の高さを電圧（電位差）と仮定している。得られた物理量を半定量化するにあたっては、板本体の厚さの影響やどこを高さとして想定するか、さらには転がり落ちる斜面の距離をどう定義するかが大切な事項となる。また、本文で述べたように、電圧を想定した高さが第一に重要ではあるが、他のモデル、特に抵抗の長さが異なるモデル（モデル II）を検討するに当たっては洗濯板本体がなす傾斜角度も 1 つの指標となる。そのため、ここでは、洗濯板本体の厚さ d と長さ l となす角度 θ の関係を考えることによって、実験を行うにあたっての電圧を想定した高さの定義や斜面距離の定義について説明を行う。

はじめに洗濯板の断面図を図付 1 に示す。ここで、(a) 図は本体の厚さを考慮したものであり、それぞれの頂点または交点を意味し、床から板の上部までの高さを基準として考えた場合を高さ h_1 、床から板の下部までの高さを基準とした場合を高さ h_2 とした。一方、(b) 図は本体の厚さを考えない場合であり、高さを h_3 とした。



図付 1. 洗濯板モデルの断面図。高さ（電圧）と傾斜角度の関係

(a) : 洗濯板の厚さを考慮した場合、(b) : 厚さを 0 と考えた場合。なお、角度 θ_1 は高さの基準を h_1 とした時が、 $i=1$ であり、 h_2 を基準とした場合が $i=2$ とする。

始めに高さの基準を h_1 と仮定した場合について考える。例えば $\triangle FHI$ と $\triangle CAH$ （または $\triangle DEC$ と $\triangle DBF$ ）の相似関係から

$$h_1 = l \sin \theta_1 + d \cos \theta_1 \quad (\text{付 1})$$

を得、三角関数の合成を行うことにより (付 1) 式は

$$h_1 = \sqrt{l^2 + d^2} \sin \left(\theta_1 + \sin^{-1} \left(\frac{d}{\sqrt{l^2 + d^2}} \right) \right) \quad (\text{付 2})$$

と表される。ゆえに角度 θ_1 は

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{h_1}{\sqrt{l^2 + d^2}} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{d}{\sqrt{l^2 + d^2}} \right) \quad (\text{付 3})$$

と求まる。次に h_2 を高さの基準として仮定した場合について考える。単純に $\triangle ACH$ を考えることによって、以下の関係式を得る。

$$h_2 = l \sin \theta_2 \quad (\text{付 4})$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{h_2}{l} \right) \quad (\text{付 5})$$

最後に厚さを考えない $l \gg d$ の場合 (究極として $d=0$) (図付 1(b)) は (付 1) 式と (付 3) 式の d に対する極限 0 を考えればよく、それぞれ以下のように表されることとなる。

$$h_3 = l \sin \theta_3 \quad (\text{付 6})$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{h_3}{l} \right) \quad (\text{付 7})$$

ここでは高さをそれぞれ別途の式で表したが、電圧 (高さ) を基準に考える場合、 h_1, h_2, h_3 はそれぞれ同じ高さを意味することとなる。つまり、おのおの $h_1=h_2=h_3$ の場合を比較すればよく、(付 2) 式、(付 4) 式、(付 6) 式から $\theta_1 < \theta_2 = \theta_3$ の関係を得る。これら得られた関係式を用いて代表的な同一高さ h_i ($i=1 \sim 3$) に対して得られた具体的な角度 θ を表付 1 に示す。

表付 1. 各モデルにおける斜面の傾斜角度。 h_i ($i=1, 2, 3$) は図付 1 中の高さに相当する。

条件 [mm]		θ_1 [°] ($d=9$ mm)	θ_2 [°] ($d=9$ mm)	θ_3 [°] ($d=0$ mm)
[モデル I, III, IV] $l=455$ $d=9$ (または 0)	$h_i=80$	8.99	10.12	10.12
	100	11.56	12.70	12.70
	130	15.47	16.60	16.60
	150	18.11	19.25	19.25
[モデル II] $l=910$ $d=9$ (または 0)	$h_i=80$	4.48	5.04	5.04
	100	5.74	6.31	6.31
	130	7.65	8.21	8.21
	150	8.92	9.49	9.49

表付 1 で得られた重要な情報は大きくは 2 つである。一つ目は h_2 を電圧を表す高さとするれば、図付 1 中の FE 間と HC 間が同じ長さ l を考えればよくなり、これはより簡単な数式で表され、かつ板の厚さを考えなくてよいケース (図付 1(b)) と同等と考えて良い点である ($\theta_2 = \theta_3$ となる)。二つ目は本文 2-2 小節で示したように実験可能な角度範囲に対する高さが求まるということである。ちなみに有効角度が約 $8 \sim 19^\circ$ ということがモデル I からわかっていることから、モデル II の有効高さは式 (付 4) から約 300 mm までは可能であることが導かれる。