



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	授業書「電圧」の構想と、授業記録：「層子間相互作用」の変動の実体的イメージ化に基づく「圧力」の教材化の試み
Author(s)	倉賀野, 志郎; 中村, 美保
Citation	教授学の探究, 6, 55-73
Issue Date	1988-03-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/13551">https://hdl.handle.net/2115/13551</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	6_p55-73.pdf



# 授業書「電圧」の構想と、授業記録

「層子間相互作用」の変動の実体的イメージ化に  
基づく「圧力」の教材化の試み

倉賀野 志 郎  
中 村 美 保\*  
(北海道教育大学釧路分校)

## 第I章 「電圧」の実体的イメージ化をはかる授業書の理論的背景

### [1] 「圧力」一般の教材化の展望について：「層子—相互作用論」からみた圧力論

山本悟氏らは、「その段階に所属する現象を問題とする限り、ある段階以下の内部構造を考える必要」がなく、「現象を指定すれば、それに応じて考慮すべき特質の段階構造が決まり、したがってその時の現象を担う基本単位が決まる」として、それを「層子」として名付けている<sup>1)</sup>。例えば「電荷」という「質」をもった粒子は、「電磁的相互作用」とその粒子によって一つの「階層」を構成するものとして「層子」の一つの具体例となりうるであろう。このような「層子」としての抽出が可能であることは、最近の「素粒子論」展開にも根拠を見出すことができる<sup>2)</sup>。

この「層子」という視点からみると、「原子」は、「層子」一般の中に組み込んで考えていくことができる。同様に「圧力」も一般化して考えてみると、そこでは、「圧力」は、この「層子」間の相互作用によって作り出されているものであると考えていくことができる。また、「層子」の「圧力」として概念を一般化すると、「圧力」にも階層性があることが予測される。

今、ある層子・相互作用によって構成されている多体系を考える時、それは全体として外部に対して一つの「質」を有している。「圧力」を問題とする時、通常はその多体系の「質」は、それ自体としては安定状態に達している。そこに今、変動（衝突）が起るとする。変動は外部の作用が比較的小さい場合には線形応答反応として現れる。線形応答的に発現する現象としては物質の「弾性」などをあげることができる。板倉聖宣氏は『物理学入門』で、かつて原子論に基づく「力学」教育等を論じ、加えて、このような線形応答という視点から「圧力」教育についても展開を試みている<sup>3)</sup>。その視点からの典型教材として仮説実験授業研究会の授業書〈ばねと力〉をあげることができよう<sup>4)</sup>。（以下、授業書は〈 〉でしめす。）

この「圧力」の変動・伝播の形式・速度は、多体系の各々の層子の相互作用の形式によって異なってくる。その多体系の「質」を破壊するほどの作用を及ぼした時には、応答の限界を超えて「質」の転移が起る。より下の階層での「層子・相互作用」に基づく「質」がそこでは現れる。極端な例をあげれば、無理に電線に電子を押しこんでいけば、中性子となってやがては反発してくるようである。

このように「圧力」を一般化して考えていくと、気圧・水圧・電圧・物体の弾性等は「層子—相互作用」によって生じる「圧力」として統一的に考察していくことができるようになる。

\* (北海道教育大学釧路分校・教育方法学研究室：昭和62年度卒業生)

通常これらは、電磁的相互作用の多体系に基づいている。「層子圧力」として一般化することによって、固体の圧力（抗力・弾性力）、液体の圧力、気体の圧力（これについては教材化がなされている。粒子間の相互作用をイメージ化しやすいためか）等を統一的に把握していくことができるわけである。このことは、これらの教材の構成の「同型性」を予測させる。

これらの「三態」は層子-相互作用の形式の変化であるが、他にも「相互作用」の階層性に基づく「圧力」の階層性が存在している。その一例が「電圧」であろう。電流の「圧力」は原子レベルでのそれであり、他の物性（化学反応に基づく電池、水圧、分子間力等）は分子レベルのそれであり、階層が少し異なっているが、形式は同じである。

また、「層子圧力」としての一般化はクォーク間力、重力にまで拡大していくこともできる。前者（強い相互作用として現れる）では、それは「核」として現象しているし、後者は銀河系などの重力で結びついた多体系での「圧力」問題（重力によって生ずる「圧力波」としては「銀河」の渦状パターンを典型的なものとしてあげることができよう）として現れてくることになる。また、恒星が重力と核融合によって生じる圧力とのバランスの上に成立していることは有名なことであろう。この一般化を追及していくならば、フェルミ粒子一般の「圧力」教育を構想していくことも可能であると思われる。

## [2] とりわけ「電圧」にかかわって

結論から先に述べるならば、我々は従前の教材で扱われている「圧力」は静的にしかとらえられていない、という問題意識をもっている。その為「圧力」の「圧」の意味は実体としてはとらえられていない。これは、静的な釣り合い等の「相互作用」が微小な変動過程を経なければ理解しにくいと同じである。このような静的な状態を前提として「電圧」などを「水圧」に置き換えてみても、わかりやすさにかかわる事態はさほどは変わらないと考える。「水圧」というなんとなく日常的なものに置き換えることによって、その問題が回避されているにすぎない。まず、始めに「圧力」の実体的イメージ化にとって、その「相互作用」の変動・伝播過程の実体的イメージ化が必要であると考え<sup>5)</sup>。(また、この変動過程への着目は力学史としては仮想仕事・仮想変位の考え方にも通じるものがある。)

板倉氏は「原子論」と「圧力」とを結びつけており、その相互作用に基づく実体的イメージ化をはかり、〈バネと力〉という授業書をつくっている。しかし、そこでの「相互作用」の実体的イメージ化は不徹底であると考え。その「相互作用」の動的な変動過程までは扱われていないからである。

また水の圧力にかかわる仮説実験授業研究会の〈浮力と密度〉の授業書も現象論の域を越えていないと考える<sup>6)</sup>。そこでの「密度」は板倉氏そのものも主張している原子論的なイメージからは程遠い、比重としての扱いしかされていない。「密度」はもっと原子論的なものである<sup>7)</sup>。浮力そのものも、現象としての法則性そのものが強調されており、その「浮力」が生じる実体的な過程は問題とはされていない。

同じく「圧力」にかかわる「電圧」の実体的イメージ化に成功したプランは存在していないように見受けられる<sup>8)</sup>。「キルヒホッフの法則」を導入したとしても、「電圧」にかかわる法則の根拠をしめせるわけではない。

電流に関しては、粒子の保存法則に基づく、実体的イメージ化は可能であるし、教材としても組まれている。しかし、「回路」にならなければならない必然性などは問題とされておらず、

現象的に取り扱われているにすぎない。一方、電圧概念の方はまったく成功していない。「圧力」のイメージが実体化されていないからである。この原因はどこにあるだろうか。

よく、「電圧」に関して、「水流」を使ったモデルで説明することがある。「水圧」との対応もあり、キルヒホッフの法則ともよくあう。しかし、今、問題となっているのは、「電圧」がそのような性質をもつことの根拠としての「論理」を求めているのであり、このモデルは全体の回路を前提とした上で、電流が定常状態にたちいたった段階における、回路全体に対して定義できる「電圧」を問題としており、子どもに「電圧」のイメージを与えるものとはなっていない、と考える。ここでは「電圧」は回路全体の「積分」として成立しているわけである。

それに対して、問題とすべきことは、各部分における微視的な「電圧」、しかも時間的な過程であると考え。このためには、粒子間相互作用の時間的な変動過程と、その伝播という基本にまで戻って考えてみる必要がある。

松井吉之助氏は「電圧」教育に関する「研究・実践」が「ほとんど発展していない」として「電子と『場』とのかかわりで、電圧概念の形成を意図していないからである」と指摘している。氏はとりわけて、「『場』の初歩的概念をどのように導入し、それをどのように『電圧』概念に発展させていくか」について、「電圧」のゴム膜モデルと、「金属・自由電子の模型」、「電流模型」を提案している<sup>9)</sup>。

松井氏の「『場』の概念に結びつけた形で電圧」の教育を考えるべきであるという提案に賛成だが、氏のモデルとする「電圧」も回路全体に積分された段階で定義されているものであり、微視的過程の「電位差」のイメージ化をまず計るべきであると考え<sup>10)</sup>。このような時間的で微分的な過程にまで戻るとは、むずかしいことのように思われるかもしれないが、実体的なモデルに基づく定性的な議論の範囲内では、時間的に過程を追いかけるので、より現実に近い形で納得しうるモデルを提示していくことが可能であり、かえってわかりやすくなると思われる。

電流・電圧の計算は「キルヒホッフの法則」によって行なうことができる。雑多な教材を整理する上では、この法則をすぐ導入していくことは意味があろう。しかし、この法則はそのままでは今まで述べてきたように、電圧に関しては現象論である。そのような必然性は、電子の流体イメージ以外には展開されていない。このような法則が成立する背景にまで戻って考察しなければならぬと考えるわけである。この「電圧」の背景として電子・陽子間の強大な相互作用にまで戻って考察する時、法則の実体的イメージ化をはかっていくことができると考える。では、物体を陽子と電子との凝集体と見る見方は、どのような電圧観を切り開いていくであろうか。電圧はそこでは、結論から述べるならば、電荷密度とその変動・伝播として現れ、キルヒホッフの法則は時間がたつて安定した状態で成立する式であることがわかる。

+-の凝集体によって物質は安定的に存在している。両者の引力・斥力が物質世界の多様性を生み出している。この+-の電荷密度の圧縮等による歪のイメージ化で、物質の変形・圧力・電圧等を統一的に把握していくことができる。なぜなら、それらの現象は、物質そのものに起っているものである以上、+-の電荷密度の変化によって引き起されている現象に他ならないはずであるからである。圧力は気圧にしる、水圧、電圧にしる、+-の電荷間の相互作用の変化である。この点に着目しないと、圧力・物質の変形などの本質が把握されず、せいぜい、電圧に関していえば、現象的にキルヒホッフの法則に基づくものでしかなくなる。(現状の電圧・電流教育から考えるならば、これだけでも意義深い)

まず、「層子-相互作用」での「圧力」(層圧)の差は「層子間密度」の差として、「層子」の

移動を引き起す。この移動は「層圧力」が均等になるまで進行する。均等になった時点で、この移動はとまるので、この方法をもって持続的に「層子」を動かすことはできない。電流は、このような電荷間密度の持続的構成によって電子を流しているわけである。当然のことながら、この場合、電子の移動が生じているのであるから、場所によって電荷密度は勾配をもっている<sup>11)</sup>。

この+-の相互作用によって電荷移動を持続的に起こさせているのが「電池」である。これには物性的な反応に基づくものと(熱電対、圧電素子とか)、化学反応に基づくもの(通常の電池)とかが考えられる。これらは+-のバランスのくずれを埋めるべく、電荷が移動することによって起るものである。通常の電流でも同様なことが起っている。+-の電荷のずれは、電流のまわりには特別状態として現れている。これが磁場である。電線に電流が流れている状態が特殊であることは、運動している系から電線電流を見ると、帯電現象が現れることが理論的に予測されることからわかる。<sup>12)</sup>「電子間の密差」は「場」の歪を生じさせており、それは具体的に電線電流の回りにも現れているのである。このような微視的過程の「場」を想定していく必要があると考えるわけである。

このような見方をすると、ただ現象的に「回路」になることだけを知識としてもっていても簡単には答えることはできず、電荷間密度のずれとその伝播・電磁的相互作用の強さ、というような観点から考察していかなければイメージすることはできない問題にも答えていくことができるようになる。この点は、今回の「電圧」の授業書プランの中に「問題」としていくつかの部分を含み込んだ<sup>13)</sup>。

このような考え方で、「電圧」のみならず、既存の〈バネと力〉の授業書、〈浮力と密度〉の授業書も検討しなおしていくべきであると考えている。

「浮力」も静的に把握するならば、液体に、その液体よりも密度の小さい物質を「浮かせる」能力があるというものにしかならないが、液体のより下の方が、わずかながらも「密度」が大きくなる(粒子間相互作用が大きくなる)ことによって、その反発が粒子の運動を媒介として「浮力」となって現れるとした方が、微視的に「浮く」過程を問題としていくことができよう。このような認識は、固体の時には、バネモデルのように成立するし、水圧の場合でも今、述べたように水の「密度」が下の方で変化することによってその反作用としての上の「水」の重さを支えていると考えることができ、一般化していくことが可能である。(気体の場合は触れるまでもないであろう。近似的には、この場合にも外からの作用が小さい場合には線形応答的な反応が起る。)

事実、「浮力」の法則の基本にかかわるそもそもの基礎になる方程式は、その点における「圧力」が、それより上にある物質の質量によって生じている重量を支えている、という次のようなものである。

$$\int \rho dz = P$$

ここで、 $\rho$ は物体の密度、 $Z$ は深さ、 $P$ は圧力である。通常の「浮力」の法則は、この密度が深さによらず一定で、その圧力が、液体・気体の分子運動によってあらゆる方向を向いている、ということを仮定すると導き出すことができる。しかし、上記の基礎になる方程式は、密度が変化しても成立する式になっている。また、圧力そのものの発生の物理的意味は、そこでは問われていない。今、ここでは、この「圧力」が「密度」の微妙な変化によって生じている、つまり、 $P$ が $\rho$ の関数( $P(\rho)$ :当然 $Z$ の関数ともなる)であると把握しようというわけである。

一見すると、このように把握する方が複雑そうだが、基礎となる方程式そのものは「浮力」の法則よりも理解しやすい。この観点からの「浮力と密度」の教材も、現在検討中である。

また、このように考察することによって、電圧モデルに水圧モデルが転用しうることの本質的理由もわかってくる。「水」も力がかかることによって密度が大きくなり、その結果として「水圧」が生じていることを考えるならば、「圧力」の本質に基づきモデルが転用されていることになる。

さらに、前述のように「圧力」の階層性一般に考察をすすめていけば、他の形態の圧力一般につながる教材を「電圧」から考えていくこともできよう。今回の「電圧」の授業書プランは、「電子気体」のフェルミガスとしての性質に着目しての展開であり、フェルミ粒子が本来的にもっている「縮退圧」そのものに接近していく教材も、今後、検討課題であると考えている。また、固体のバネモデルは弾性を理解する上ではよいが、相互作用の変動・伝播の一般的な問題をイメージ化の上では電荷間相互作用からの類推が成立する「電圧」分野から入るのも一つの方法ではないだろうか。

以上の理論的視点に基づき、「電圧」の実体的イメージ化を目的とする教材を中村美保さんが、釧路分校・教育方法学研究室で検討された教材を基に「授業書」化することを試みた<sup>14)</sup>。第II章以降、その「授業書」の全体構成の視角と授業書、授業実践及び、今後の検討課題を紹介しておく。

## 第II章 授業書紹介と授業書実践報告

### [1] はじめに

この授業書の題名は「み～んなパンパン」であるが、その名の通り全てのものは陽子と電子の電気的な力によりパンパンになっており、パンパンの張り具合が電圧であることから、いろいろな電気現象を考えることがこの授業書の目的である。

授業実践をするにあたって、授業書を編集し直し、第1章：銅線の中はパンパンだ、第2章：パンパンの伝わり方、第3章：電気の通り道、第4章：電池の中はどうなってるの？の4部構成にした。今回紹介するのは、そのうちの第1、2、3章の授業記録である。

授業をしていただいたのは、今年の春同校を卒業して北海道土別管内の小学校で教師をしておられる女性で、5年生を担任している。この小学校は1学年1クラスで、全校生徒100人足らずの小さな学校である。授業をした5年生は16人(男9人女7人)で、ほとんどが農家の子である。授業書等で学習するのは初めてで、教師も授業書等を使って授業するのは初めてであった。

### [2] 授業記録

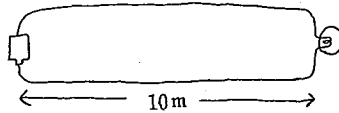
〈第1時 1987年10月21日(水)欠席2名〉

1：銅線の中はパンパンだ

#### 問題1

電池に豆電球をつないで、あらかじめつくことをたしかめておきます。今、銅線を使って、電池と豆電球を10mはなしてつなげることにします。

豆電球はつくでしょうか。



- ア つく
- イ つかない
- ウ ついてすぐ消える
- エ その他

よそう ( )

みんなで意見を出し合ってみましょう。実験してみましょう。

答	予想	変更
ア	7	8エ
イ	1	1
ウ	4	4
エ	2	1

T: 意見言ってもらうかな。どうしてつくと思ったか。

(打ち合わせ不十分のため、予想のアイウエオ順に意見を聞いた。)

たけ: つながっているからやっぱし電気が通るんだからつくんじゃないの。

T: イの人、どうしてつかないって言ったの?

さとる: あてずっぽなんだけど、銅線が長いと、えーと長いとつかないと思ったから。

T: ウの人、言える人いない? あてずっぽ? ジャあエ, その他。はい, あっこ。

あっこ: つくことはつくんだけど, 普通の長くないやつより時間が短いと思った。

T: すぐ消えるわけではないっていうこと?

あっこ: (うなづく)

T: それじゃあ, 変更したい人。

よっち: エからア。

T: 理由は?

よっち: 遠くの発電所からでもつくんだから, つくだらう。

(この後廊下で実験する)

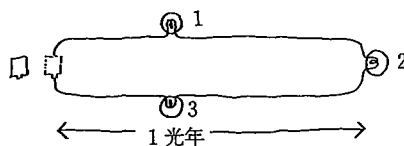
答え ア

銅線がどんなに長くても, 豆電球はつくのです。

問題2

下の図のように, 3つの豆電球がつないであります。1と3の豆電球は電池から同じきょりにあります。2の豆電球は電池から1光年はなれています。

もし, このようなものを作ったとしていち, にのさんで同時に+と-をつなぐと, 豆電球はどういう順番につくでしょうか。



ア 1-2-3の順

イ 3-2-1の順  
 ウ 全部いっしょ  
 エ 1, 3のつぎに2がつく  
 オ 2のつぎに1, 3がつく  
 カ その他  
 よそう ( )  
 みんなで話し合ってみましょう。

T: イの人で理由言える人。

とのり: 電気の行く道は1本だけだから, +の方からいって(+の方から2へ指さして)こう行く。

T: ウの人。

あっこ: 初めは, 1と3が先について2だと思ったんだけど, 電気の速さは速いからと思ってそれで(+と-から一緒にきて)パッとつく。

ア	1	1
イ	6	4
ウ	4	6イ, エ
エ	1	0
オ	2	3
カ	0	0

T: はい, じゃあオの人。

たけ: +だけでも電気はつかないし, -だけでも電気はつかないから, +と-がずーっと行って一番初めにぶつかったところが2で, そこから一番初めに電気がついて, ここで1と3。

釧路から東京までは1,000 kmで, ジェット機を使うと1時間はんでつきます。もしも, ジェット機のかわりに光を使うと約0.003秒(ほんのいっしゅん)でついてしまい, 1秒間では, 150往復してしまいます。このくらいの速さの光が1年かかってつきよりのことを1光年といいます。(約10,000,000,000,000 km, とにかく, はてしなく長いきょり)

本当は, この部分は問題2のところで一緒に配って, 予想する前に読むはずだったのだが, 手違いにより予想の後に配った。

答え エ

1と3の豆電球がほとんど同時について, その後に2がつきます。

豆電球がつくということは電池から電気が流れているからです。電気の伝わる速さは光の速さと同じくらいです。ですから2の豆電球がつくのは電池と線をつないでから約1年もかかるのです。

ところで, なぜ1, 3がはじめにつき2があとにつくのでしょうか。

子どもたちから, 「パンパンって何?」とか「なんで+や-だけで電気がつくの?」という声がたくさん上がり, 知りたくてたまらないようである。

その答えをいうまえに, 電気とは何か考えてみましょう。

お話

電気には2つあって、+（プラス）の電気と-（マイナス）の電気があります。+の電気をもっているつぶを「陽子」（ようし）、-の電気をもっているつぶを「電子」（でんし）といい、どちらも目に見えないほどの小さなつぶです。すべてのものは、この陽子と電子のつぶつぶでできています。水も空気も、人間もみんなそうです。

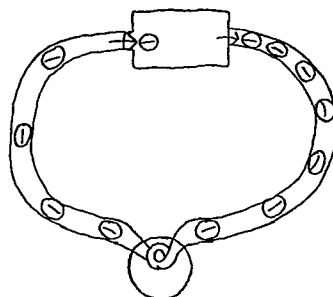
すべてのものは、陽子と電子による電気のでパンパンになっています。フェライトビジャクを陽子と電子のかわりにしてパンパンのようすを見てみましょう。

（図省略）

さきほど、豆電球がつくのは、電気が流れているからだといいました。電気の正体は、じつは電子なのです。電子が動くと、電気が流れたことになります。

では、問題2の場合を考えてみましょう。電池の一極がわは、電子をおし出そうとする力があり、+極がわは、電子を引き入れようとする力があります。電池の一極に銅線をつなぐと、一極から銅線の中に電子がづぎづぎとおし出されます。銅線の中は、電子の数がふえることになるので、一極に近い方からしだいにパンパンになっていきます。+極では、銅線の中の電子を電池の中に引き入れます。すると、銅線の中は電子の数がへって、しだいにスカスカになっていきます。

銅線を電池の一極と+極に同時につなぐと、一極からは電子がとび出し、+極では+極にむかって電子が動きます。ですから、一極がわの1と+極がわの3の豆電球が先につき、2の豆電球が後につくのです。



ここでは、教師は、みんなで手をつないで並んだとき、端の人が押ししたり引っ張ったりするとみんなほどの様に動くか、ということを利用して説明した。フェライトビジャクを使った実験も考えたが、うまくできなかったので、この部分のイメージ化のための教具は今のところない。

〈第2時 10月22日（木）欠席1名〉

## 2：パンパンの伝わり方

### 問題3

電気が伝わる速さは光の速さと同じくらいでしたね。では電気をおこしている電子1つ1つが銅線の中を動く速さはどのくらいでしょうか。

- ア 光の速さくらい（1秒間で300,000 km）
- イ 飛行機の速さくらい（1秒間で200 m）
- ウ 車の速さくらい（1秒間で10 m）
- エ 人の歩く速さくらい（1秒間で1 m）
- オ エよりもおそい

カ その他

よそう ( )

みんなで意見を出し合ってみましょう。

T: Aの人で理由言える人。

とものり: 電気の伝わる速さは光と同じくらいなんだから、たとえ銅線の中でも同じじゃないか。

T: みんなも同じ意見かな。

イヤウの人はあてずっぽだった。この後、エに変更した人がいるが理由はきかなかった。

ア	5	5
イ	7	5
ウ	3	3
エ	0	2イイ
オ	0	0
カ	0	0

答え オ

電池からとび出した電子が銅線の中を通り、豆電球を通りぬけ、電子をひきこんでいる+極にたどりつく速さは、人が歩く速さより、もっとおそいのです。

例えば、下の図を見て下さい。電池から出た電子が3m先の豆電球のところにたどりつくのには、6秒もかかります。

(図省略)

でも変ですね。電気が伝わるのは、光の速さと同じくらいのはずです。

さあフェライトビシヤクを使って、電気の伝わる速さをみてみましょう。フェライトビシヤク1つ1つが動くのはおそいですが、はしっこのフェライトビシヤクは、すぐにとび出します。

これが電気の伝わる速さなのです。

(図省略)

この部分は、私も教師も「どうしてだろう」と不思議に思うところなのだが、子供たちにはとてもよくわかったようである。

お話 直流と交流

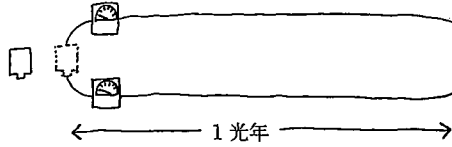
今までみてきたのは、電流がいつも同じ方向に動いている「直流」という電気のことです(電池もこのなかまです)。この直流の他に、みなさんの家で使っている電気のように「交流」というものもあります。

直流では、電子はゆっくりではありますが、電池の一極から出て、銅線の中を通過して、やがて+極にもどってきます。ところが、交流はちがいます。家で使う電気は発電所でつくっていますが、発電所にある電子が、みなさんの家までくることはありません。電子は、1mmくらいのはばで、同じ所を行ったり来たりゆれ動いているだけなのです。発電所は、電子を家まで流しているのではなく、行ったり来たりさせる役目をしているだけなのです。

このお話は、子どもにはよくわからなかったようである。直流は一方は電子をいつも押し出し、もう一方ではいつも電子を引っ張っているが、交流というのは、両側とも電子を押し出す

のと引っ張るのを交互にやっている, というような説明にしたらよかったのではないだろうか。子どもたちは, 直流, 交流という言葉を知らなかったようだ。

問題1



図のように電池の近くに電流計がつないであります。この電流計はとてもびんかんで、少しの電流でも針が動きます。でも、1光年先で銅線は切れています。強力な電池をつないだ時、電流計の針は動くでしょうか。

- ア 動く
- イ 動かない
- ウ いっしょに動く
- エ その他

よそう ( )

みんなで話し合ってみましょう。

T: アにした人手を上げてください。

ちほ: この前やった時に3つの豆電球があってそのつく順番をやった時に、1と3が初めについたのでアにしました。

T: この前どの順番につくかやった時に、1と3が先についたからこの切れてるところにつく前にもう電流が流れているっという考えかな? じゃあ、イの人。

ともりの: 先が切れてるんだから、通り道がないから絶対電気は流れない。

T: ウは? いない。それじゃあ、エの人。

たけ: 動くんだけど、上の方しか動かない。

(この後変更する人をきく)

T: エにかえた人はどうなるのかな。

さとの: 上は絶えず動いていて、下は少し動いてその後止まってしまう。

よっち: 同じ。

T: それじゃあ、どうしてそう思う?

やっちゃん: 一極から電子が押し出されてきて、1光年離れた所で切れていても、電池がなくなるまでは上の方の電流計は動いていて、+極は下の電流計の1光年離れた所にその電子を引っばって、少しついてから……

ともりの: やっちゃんに聞くんだけど、その流れて行った電気はどこに行くんですか。

やっちゃん: そこまで考えてない。

ア	7	4ウ
イ	1	3アウ
ウ	6	4ア
エ	1	4アウウ

エの意見は、大変ユニークである。子どもたちには、引っばるのは大変だが押し出すのは出

来そうに思えたのだろう。

答え ア

電池には、1光年先が切れていることなんかわかりません。ですから、電池と銅線をつなぐと、一極からは電子がとびだしてパンパンになり、電流計を通して1光年先までパンパンが伝わります。+極では、電子を引き入れてスカスカになり、1光年先までスカスカが伝わります。そして、1光年先までくると、もうそれ以上線はないので、電子の動きの波は銅線の切れている所から順に電池に向かって止まっていきます。

ですから、パンパン、スカスカが伝わって、止まるまでの間、約2年間は電流計の針が動いていることになります。

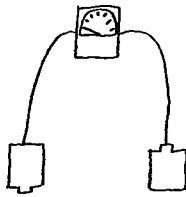
### 3: 電気の通り道

電池に電流計をつないでみます。電流計の針はどうなるでしょうか。やってみましょう。

(図省略)

#### 問題5

びんかんな電流計を下の図のようにつないだら、針は動くでしょうか。



ア 動きつづける

イ 動かない

ウ 動いてとまる

エ その他

よそう ( )

意見を出し合ってみましょう。

T: アの人手を上げて。

とのり: +と-があるからちゃんと電気が流れると思う。

T: イは? なんとなく。じゃあウの人。

たけ: まず、一極側で電気を送り込んで、そして一ペンスツて動いたら、今度+側にすいこんで、そしてまた-側ですいこんでいってやっていったら、動いて止まる動いて止まるになる。

さとる: かわりばんこに動いている。

T: エ、その他の人。

まさる: 多分……ウの逆だと思う。

T: ウの逆ってことは? あっ、最初に入れたらすぐには動かなくて、ちょっとたってから動くってことだね。

ア	7	6	ウ
イ	3	4	ア
ウ	4	4	ア
エ	1	1	

答え ウ

電池がわかれていても、一極は電子を出し、+極は電子を引き入れます。

問題4では、銅線の先が切れているし今の問題では電池が分かれていて、つながっていません。もし、つながっていれば、電子は電池と銅線の中をぐるぐるまわるので、能率が

いいですね。でも、どこかが切れていれば、まわることはできません。もうこれ以上電子を動かすことが出来なくなった時、電気は止まります。

答のウは、一瞬だけ動くという意味なのだが、子どもたちはそれが連続して動いていると考えたようである。しかし、本当は子どもたちの考えた方が正しいかも知れない。問題4と、電池のしくみを考えれば、+と-が同時に同じように動かなければならない必然性はない。

<第3時 10月23日(金)欠席1名>

お話

銅線が電池につながっていると、電子が動くのはかんたんです。でも、銅線は陽子と電子がはちぎれそうなほど、バンバンになっています。ですから銅線が電池につながっていないときは、電子を1つ銅線の中におしこむには、とても大きな力が必要です。どのくらいの力かというと……

20 tのトラック(大型トラック)を50,000,000,000台もち上げる力と同じくらいの力が必要なのです。

(図省略)

問題6

下の図のようにアルミはくの上に電池と豆電球をつないでみました。豆電球はつくでしょうか。

ア 3つともつく  
 イ 3ともつかない  
 ウ つくのとつかないのがある  
 エ その他

①の答え( )  
 ②の答え( )

意見を出し合ってみましょう。  
 実験してみましょう。

T: まず①の方から意見言ってもらおうと思います。  
 あさみ: アルミは電気を通すから、全部一極とアルミがついていて、アルミはくに-の電気が通っていて、+の所に豆電球がついていて一極と回るよう

	← ① →		← ② →	
ア	14	13	2	3ウ
イ	1	0	1	2ウ
ウ	0	27イ	12	9
エ	0	0	0	1ウ

になるから。

T：イの人は当てずっぽかな。

(①で予想の変更を聞く)

T：②にいきます。アの人、手を上げて。

りえ：アルミホイルは電気を通すから、銅線のような役目をしていると思うから。アルミホイルに一極がついていて、+極から豆電球につながっている銅線をつけているから、電気がつくと思う。

さとる：わからない。

T：わからない？もう一回大きい声で言ってくれる？

りえ：アルミホイルが銅線のような役目をしているから、丸くつながっているような感じだから。簡単に言えば、丸くつながっているようだからつくと思う。

まさる：ほんとならしい理由だぁ。

たけ：1番目をアにしたから、2番目もアじゃないか。

T：(①も②も) 同じだと思った？じゃあイの人。何となく？ウの人も何となく？

(②の変更を聞く)

T：その他に変更した人、どういうことかな。

よっち：え〜と、豆電球が点滅する。

(みんな爆笑)

T：いやぁ、あるかもしれないよ。

(子どもたちもめている)

この後①と②の実験をした。子どもたちは「ついた、ついた」と大騒ぎ。特に②がついた時は、びっくりしていた。

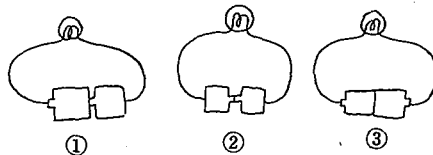
答え ①も②もア

電子の通り道があれば、電気が流れます。この場合はアルミはくが電子の通り道になるので、全部つくのです。

アルミはくや銅線は金属でできています。金属はもともと自由に動くことのできる電子をたくさんもっています。ですから、電気が流れやすいのです。金属でできているものを通り道にすると、電気がうまく流れるのです。

### 問題7

電池を図のように3通りにつなぎました。豆電球はつくでしょうか。



ア 全部つく

- イ 全部つかない
- ウ ①だけつく
- エ ②, ③がつく
- オ その他

よそう ( )

みんなで話し合ってみましょう。

実験してみましょう。

T: アの人は? 何となく? イは?

よっち: ぼくはずっと間違えているから、裏をかいた。

T: 裏をかかかれている? (笑) ジャあ、ウの人。

ともはる: ②と③が一と一と、+と+だから、やっぱりつかないと思う。

T: はい、他の意見ない?

やっちゃん: 似たようなもんだな。

ひろみ: 真面目に考えた。

たけ: えー、その顔があ。(爆笑)

ともりのり: ①は、ちゃんと、何て言うか普通の電池みたいに、ちゃんと向いているから。

T: ①は、普通の電池1本みたいにちゃんとなってる。他にないですか。

やっちゃん: ともはる君と同じように、①が+と-がついていて電気がつくと思って、(②と③は)+と+、-と-がついているからつかないと思う。その例として、懐中電灯で、もし+と+をくっつけて入れてもつかなかった。

T: やったことあるんだね、これは。オの人3人いたけど、一人ずつ言ってもらおうか。

さとのり: ぼくは①はちゃんとして②は点滅して③はつかないとおもうんだけど。理由は、①はそのまま電子がぐるぐる回ってるからいいんだけど、②はずっと押し出す-があるので、ずっと押し出していると点滅して、そいで(③は)+と+は電子を吸い込むから、銅線の中はスカスカになって、これはつかないとおもったから。

たけ: ①と②がついて、③がつかない。

T: なんで②がつくの? さとると同じかな。

たけ: 電子がヒューンと入って……

(子どもたち笑う)

まさる: たけひこ君(たけ)に言われました。

T: たけと同じ。変更の人いない?

変更する人がいなかったのには驚きました。オにした3人の意見はユニークで、②がつくという考えは、問題4の一の方だけ動くという意見と同じように、電子を引っぱると、銅線の中の電子が少なくなるので困るが、電子を押し出すのは出来そうだ、という気持ちがあるのだろう。また、ここでも、点滅するという意見が出たことにも注目したい。

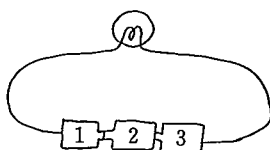
この後実験をして確かめました。

ア	1
イ	1
ウ	10
エ	0
オ	3

答え ウ

①は電池2こ分の力で豆電球をつけることができます。②と③は電子をおし出す力やひっぱる力がぶつかりあってしまうので豆電球をつけるほどの強い電気は流れません。

問題8



3つの電池を上図のようにつなぐと豆電球はつくでしょうか。

- ア つく
- イ つかない
- ウ ついてすぐきえる
- エ その他

よそう ( )

みんなで話し合ってみましょう。

実験してみましょう。

T:アの人,手を上げて。

とっち:なんとなく。

やっちゃん:3の方の勢いが強くて3の方が押して,1の方は……わかんなくなっちゃった。

ちほ:とっちが言えればいいんだよ。

とっち:2と3が左向きで,こっち側(右側)は2と3で2個あって,こっち側(左側)は1個。2個ある方が強いので,つく。

T:はい,それじゃあ,イの人。

ちほ:ただ単純に考えるとイになるので,つかないにしました。

ともりの:さっきの実験(問題7)でこんなふうになってつかなかったから。

たけ:ただ,さっきの問題の②に,ただまん中に電池を入れただけっていう……。それに2と3の電池2個と押し出す力が協力しないと豆電球はつかないんだから,強い電気が流れないんだから,3個にしたらもっと強い電気が流れて,ぶつかり合いがひどくなって,なおさらつかなくなる。

あさみ:ともりの君と同じで,問題7のことを考えれば,同じだと思う。

りえ:1の電気と3の電気の銅線につながっている方が一極なのでつかないと思う。

T:ウの人は?何となく?じゃあエ,その他。

さとの:ついてからすぐは消えないんだけど,しばらくついてから消えてしまう。

ア	4
イ	7
ウ	3
エ	1

ここでも変更者はいなかった。子どもたちは,今まで学習してきたことから「それならこの問題はこうなるはずだ」という,確固たる意見を持って予想していることがわかる。

この後の実験では,豆電球がつくと,「え~,ウソー」という驚きの声が上がった。

答え ア

2と3の電池で2こ分の電気を流そうとしますが、1の電池が逆向きに電気を流そうとします。1と2の電池は力がぶつかり合ってしまうので、電池の役目をはたしません。ただの電気の通り道になってしまいます。ですから、3の電池1こ分の力で電気が流れます。

次の第4章では、なぜ電池には電子を押し出したり引っ張ったりする力があるのかということ、物質がもともと持っているパンパンの大きさの違いによって電子の移動が起こる（電気陰性度）ことから説明した。授業にはかけたが、その授業記録は今回は省かせていただく。理論的にも、まだ検討が必要である。

### 〔3〕感想文

（注：原文はほとんどひらがななので、ページ数削減のため漢字になおしました。）

#### <すみか>

（問題が）全然あわなかった。最後のやった、電気が通るかをやって、不思議なことがあった。肉や玉ねぎは電気が通らないかなと思ったけれど、通ったので不思議だった。もう1回やりたいです。

#### <ちほ>

電池3つ使った実験であれがつくとはとても信じられなかった。いろんなことがわかったので、家族で問題を出し合ったりして、みんなに教えてあげようと思った。一番最後の実験の時、食べ物ももったいなかった。

#### <りえ>

問題1、2は休んでいてやらなかったが、きっと実験はおもしろかったと思う。そして問題3では、人の歩く速さよりも遅いということで、とてもびっくりしました。それから問題4で、1光年先で銅線が切れているのに電流計の針は動くので、不思議だと思った。問題5は、最初の予想であっていたのにかえてしまったので、残念だったと思った。問題6は予想が2つあって、2つとも当たって良かったなあと思いました。問題7は、あっけないぐらい簡単だったから、予想は言うまでもなくあってました。そして問題8では、予想外で驚きました。そして、私たちの身の回りの物に電気があったかどうかという実験はためしたものの全部に電気が流れていたの、とっても不思議に思いました。

#### <あさみ>

いろいろな実験があったけど、ほとんどの予想が外れた。乾電池を2~3つつなげる実験は不思議についたし、アルミはくにつけてやるのもちゃんとついたし。一番心に残っているのは最後の実験で、「何でも電池になる」といって、リンゴやゼリー、イモ、さしみ、カレー、オロナミンC、ジャム、コーヒー、マヨネーズ、ソース、シャンプー、ビール、キウイフルーツ、バナナなどいっぱい「ブスブス、ブスブス」ってさしていったのが一番でした。

#### <ともみ>

初めの時、学校を休んでいてわからなかったけど、実験や予想をしたりするのは、とても楽しかったです。とても自分のためになったような気がします。

#### <あっこ>

私は、途中から休んで出来なかったのも、やってないことは楽しかったか楽しくなかったかよくわかりませんが、やったもので一番楽しかったのは、フェライトじしゃくを使って実験したのがおもしろかったです。どんなふうにおもしろかったかという、じしゃくを使って実験したのでおもしろかったです。

#### <ひろみ>

初めは、パンパンの意味がわからなかったけど、問題や実験をやったので、だんだんわかるようになってきました。みんなは、フェライトじしゃくや電池の実験や他にもいろいろな実験をやって、とても楽しいと思いました。でも私の一番楽しかったことは、最後の実験です。ゼリーやヨーグルトやオロナミンCを実験にやって、ちょっといたましいと思いました。

#### <とっち>

みんなパンパンというのは、初め意味がわからなかったけれど、やってみるとちょっと意味がわかった。それと10mのやつ問題は(当り前なので)おもしろくなくて、最後の問題はもったいなかったけれど、おもしろかった。それとカメラで写している時、なぜかぼくがたくさん写っていたのでいやだった。それと、楽しかったけれど楽しくないのとあったです。

#### <よっち>

ぼくは一番初めに、みんなパンパンという意味がわかりませんでした。だけど6ページでようやく意味がわかりました。ぼくは、直面目に考えたのに全然当たらなかったのもうやけになってわざとまちがうようにしました。でも全然当たらないで、結局一問しかできなかったけど、問題や実験はとてもおもしろかったです。でも一番最後の実験は、ゼリーやヨーグルトがとてももったいなかったです。

#### <やすお>

最初は、みんなパンパンの意味がわからなかったけど、最後の方で意味がわかった。じしゃくの実験や豆電球や最後の方でいろんな果物で実験したんだけど、少しいたましかった。いろんな実験をして終わったんだけど、もっともっとずっと続けてほしかったです。いろんな実験をして楽しかったです。

#### <まさる>

全体通して見ると、とてもおもしろかったです。とても心に残ったことは、問題8です。これはどうしてかという、2つ分と1つ分は2つの電池の方が多いし、1つと1つがぶつかると動かないけど、もう1つあるのだから、その電池で動かすのがすごかった。ぼくは動かないかと思ったけど、電気が通ったので不思議だった。それと、いたましかったのは最後の実験で、食べ物を使って電気を通すなんて知らなかったけど、とってもいたましかったなあと思いました。

#### <ともり>

1光年とかのが、特に難しかった。簡単なのは、わかりきったのです。楽しかった。

#### <たけ>

一極だけで電気がつくとは不思議だ。それと、とても楽しかった。もう一回やってほしい。それと、最後の実験はいたましいものばかり使っていて、オロナミンCを飲みたかった。

#### <やっちゃん>

いろいろな実験ができたので楽しかった。いろいろなことを実験でわかった。楽しかった。全部電子でできているということが、びっくりしました。

### <ともはる>

最初は、みんなパンパンの意味がわからなかったけど、10 mとかいろいろな実験をして楽しかったし、当り前の問題もあったし、そして最後はいたましかった。

### <さとる>

いろいろな実験があっっておもしろかった。乾電池を3つつなげる実験は、まさかと思うことがおきた。10 mの銅線は、豆電球がつかないと思ったがついた。その他の問題も、なかなか当たらなくておもしろかった。もう最後の方になると、やけになって、ありえないことに予想をつけた。最後の実験は、いろいろな物を使っての実験だったが、いたましい物がたくさんあった。オロナミンCやヨーグルト、もういらない、食べられないのかなぁと思ったが、最近の製造年月日になっているヨーグルト、その他いろいろな物があった。いろいろな物につこんだ十と一の鉄板をふいたが、ベトベトして気持ち悪かった時もあった。最初わからなかったパンパンの意味もだいたいわかってきた。けれども、よくわからないこともあった。なぜ乾電池は電気(電子)を流すかもわかった。電解質というものをはじめで知ったし、食塩水もその仲間だとわかったし、いろいろな勉強にもなった。もっともっと、もっともっと……続けてほしかった(もっとは何回続けてもきりが無い)。P 25で終わってしまって残念だった。家に帰っても、いろいろな実験をもう一度やってみたいと思う。今度は、もっといろいろな実験のできるおもしろい勉強をやって下さい。

### [4] 評 価

全体を通して見ると、子どもたちは大変自由な発想でもって授業に取り組んでいた。各自予想を立てるときも「電気がつくのはパンパンが……」とか「今までのこと考えたら……」などと言いながらワイワイやっていた。問題2, 4, 5, 6, 7, ではこちらの予測を超えた意見が出て驚いた。特に問題5以降、電子が動いて止まるの連続であるという意見があったが、良く考えてみると子どもの言った通りで、電気の流れは動いて止まる、動いて止まるという波になっているはずである。子どもは我々おとなを遙かに超えた存在であることがよくわかった。子どもの創造力を十分に引き出すことが出来たことは大変良かったと思う。そういう意味では、今までにない電気に関する新しい試みの授業書と言えよう。

しかし、理解度という点に関しては、全員が完全に理解出来たかということ、そうではなかったと思う。フェライトじしゃくを使ってパンパンの様子は見せたが、電池が電子を押し出した引引っ張ったりする力があるという所で、イメージをつかむ教具がなく、また授業書で扱った内容自体も難しいものだったと思う。けれども、実体的イメージをつかむための教具が乏しいながらも、問題を予想する際にパンパンモデルによって考えて意見を出し合っていたのを見ると、かなりの水準でパンパンのイメージをつかんでいたように思う。授業書の中で「電圧」という言葉は出てこないが、しきりに出てくる「パンパン」具合がまさしく電圧である。

今後、更に実体的イメージを把握するための教具等を工夫し、授業書を検討して、より理解度の高いものにしていくよう努力したい。

### [註]

- 1) 山本悟他『科学と認識構造』昭和堂 1984年。
- 2) 例えばF. クローズ(井上健訳)『宇宙という名の玉ねぎ』(上・下)吉岡書店 1985年。

- 3) 板倉聖宣『物理学入門』国土社 1964年。
- 4) 板倉聖宣『仮説実験授業——〈ばねと力〉によるその具体化』仮説社 1974年。同様な視点に基づくものとして、極地方式研究会の「変形と力」のテキスト、中村啓次郎『〔力〕・〔回路〕をどう教えるか』日本書籍 1985年等がある。
- 5) 「相互作用」の変動・伝播という視点から構成した「力学」「電磁気学」の授業書が高村泰雄編『物理教授法の研究』（北大図書刊行会・1987年）に掲載してある。この「電圧」の授業書は、そこでの電磁気学の「授業書」の姉妹編としての性格もっている。
- 6) 仮説実験授業研究会編集『仮説実験授業研究』No. 5/6 仮説社 1975年〈浮力と密度〉の授業書。
- 7) 高村泰雄「理科における〔よい教材〕の基本条件」p. 76~78、鈴木秀一編『良い教材悪い教材』所収 日本標準 1985年／板倉聖宣前掲『物理学入門』p. 10~11。
- 8) 「電圧・回路」にかかわる教材のいくつかを具体的に挙げてみると、例えば次のようなものがある。仮説実験授業研究会〈電圧と電流〉（『科学教育研究』No. 8/No. 12 国土社 1972・73年）、〈電池と回路〉（『仮説実験授業研究』No. 12 仮説社 1977年）、〈豆電球と回路〉（『科学教育研究』No. 9 国土社 1972年）、〈電流〉（『科学入門教育』No. 3 つばさ書房 1984年）／科教協道央支部札幌サークル・編『電気と磁石』道民教発行 1983年／京都理科サークル編著『物理教育入門』新生出版 1979年、“電流と電圧”／中村啓次郎前掲『〔力〕・〔回路〕をどう教えるか』。
- 9) 中村吉之助「電子時代の電圧概念の形成について」『理科教室』1987年11月号所収／松井吉之助「たのしくわかる中学校理科の授業」（第2分野下）あゆみ出版“電圧”。
- 10) 電子密度の差を、電子の移動の原因とし、「電気の強さ（電圧）——2物体間の気体の圧力差（電子の圧力差）」という本論と似たような主張を佐藤文夫・和田武久の両氏（「電圧をこう教えた」『理科教室』新生出版 1976年11月臨時増刊号）が行なっている。松井氏は、前掲論文で、この展開を「〔場〕の概念の形成を意図していないので、電圧概念としては不十分である」として退けている。しかし、回路全体の積分によって規定させる「電圧」・「場」概念をこれに対置しても「不十分」さはまぬがれない。
- 11) 電子の密度に基づく「電圧の波」によって交流電流をイメージ化した図版が、後藤尚久『アンテナの科学』（講談社・1987年）p. 74-77にある。
- 12) R. P. ファインマン『電磁気学』岩波書店 1969年“電磁場の相対性”。
- 13) 今回の「電圧」の授業書では、電子間の密度の差をフェライト磁石を使ってイメージ化することを試みた。科教協東北地区協議会編『やさしくて本質的な理科実験』（1）（評論社 1978年）“フェライト磁石の利用・その1”を転用している。
- 14) 「授業書にとって本質的なことは、授業書が授業の法則性を教材の構造と教授過程を統一した形式で客観的かつ具体的にとりだしており、したがってその指示により展開される授業がすべての生徒に水準の高い科学的概念や法則の習得を確実に保障するということである。」高村泰雄前掲『物理教授法の研究』p. 8。