

修士論文 (1986 年度)

自然の統一的認識における エントロピー的(熱学的)視点の重要性 ならびに 日本における熱学教育の状況について

信州大・理 伊達崎 広

(1987 年 4 月 20 日受理)

論文内容の要旨

現在, 自然を理解するためにエネルギー・エネルギー保存則に基づいた枠組みがよく用いられる。確かにエネルギー概念は自然を見る上で本質的であり, その重要性は大きい。しかしエネルギー保存則だけでは自然現象の進む方向を定めることはできず, それ故エネルギー保存則のみに基づいた見地は自然理解の枠組みとしては不完全なものである。これを補完して自然を正しく理解するためには, 熱力学第 2 法則に基づいた見地も同時に合わせ持たなければならない。それでは正しい自然理解の枠組みを社会構成員一人一人が認識し, 持つためにはどうすればよいか。これには様々な方法が考えられるが根本的には教育の力に依らざるをえないといえる。そこで様々な概念を形成し, 自然観・世界観を培う時期である青少年期に当る中等教育において, 上述の自然理解の枠組みが教科の中でどのように扱われており, さらに生徒がそれをどう受け取っているかが問題となる。

このことについて著者らが入手した Entropy in the school からヨーロッパの現状を概括すると以下の様になる。

- 1) 正規教育はエネルギー概念中心に構成されており, 熱力学第 2 法則的見地はほとんど含まれていない
- 2) 生徒のエネルギー概念の把握について若干の研究があり, それによるとエネルギー概念の教育は必ずしも成功していない。
- 3) まだ少数ではあるが第 2 法則を教育に取り込もうという努力・実践がなされている。

日本の中等教育もエネルギー概念を中心として構成されており, 第 2 法則の取扱いは不完全・不十分であったり, 天下りの多い。また生徒の概念把握についての調査・研究

伊達崎 広

はほとんどなされていない。この様な現状を鑑みて著者らは生徒の実状を把握するためアンケートを行うこととした。これはエネルギー・熱について、連想・短文作り・説明の三つの作業を通して生徒の持っている印象・概念を調査するものである。この結果 エネルギーは生徒の頭の中では力と強く結び付いていること、こういった概念が日常や教育の他の部分の影響を受けやすいこと等が分った。

熱力学第2法則を中等教育に取り入れるべきであるという主張は、日本ではまだごく少数である。それは第2法則の持つ概念的難しさに因るところが大きいだろう。しかし第2法則はエネルギー概念と共に自然の正しい認識のためには不可欠である。中等教育は科学的自然観を育むというその目的からいって第2法則を扱うべきである。そして現状としては、その準備のためもっと多くの努力が払われるべきである。

目 次

序章

第1章

- 1-1 科学教育の必要性
- 1-2 科学教育の困難
- 1-3 物理教育

第2章 ヨーロッパにおける熱学教育の動向

2-1 現状

- 1 背景
- 2 熱力学第1法則
- 3 熱力学第2法則
- 4 まとめ

2-2 提言と実践

- 1 序
- 2 現象論的方法
- 3 統計的方法
- 4 実験

自然の統一的認識におけるエントロピー的（熱学的）視点の重要性……

2－3 総括

第3章 日本における熱学教育の状況

3－1 小学校

3－2 中学校

3－3 高等学校

第4章 アンケート調査

4－1 日程と方法

4－2 内容と目的

4－3 アンケート結果

－1 全体

－2 エネルギーからの連想

－3 熱からの連想

第5章 まとめ

謝辞

注

参考文献

付録

付録1 Entropy in the school の概要

付録2 E. Toth の方法

付録3 中学校教科書より

付録4 高等学校教科書用指導書より

付録5 アンケート内容・説明

伊達崎 広

図表

- 図表 1 SCHAEFER の研究
- 図表 2 DAHNCKE の実験的研究
- 図表 3 第 2 法則を扱うための方法
- 図表 4 Black の研究報告
- 図表 5 現象論的方法と統計的方法
- 図表 6 Toth の熱機関
- 図表 7 Sokalski の実験
- 図表 8 教科書リスト
- 図表 9 日程の概略
- 図表 10 アンケート協力校リスト
- 図表 11 アンケート結果 全体
- 図表 12 アンケート結果 エネルギー
- 図表 13 アンケート結果 熱

付記

序章

今日、まわりを見回すとエネルギーという言葉は何処でも目にすることができる。初等教育を受ける前の児童でさえエネルギーという言葉を使っている。意味はともかく、現代社会ではエネルギーという言葉はすみずみまで浸透しているといつてよいだろう。こういったなかで、現在の自然像はエネルギー保存の法則を軸とするエネルギー的見地から描かれている。

エネルギーは、本質的な概念である。エネルギーは系の変化に際して、現象に参与するもの全てを考慮すれば一定に保たれている。エネルギーは系にある変化が起つた際、変化の前後の状態の間にどのような関係がなければならないかを指示する。しかし、これだけでは十分ではない。自然界にはエネルギー保存の法則（熱力学第1法則）とは別にもう一つの法則、エントロピー増大の法則（熱力学第2法則）があって、これが変化の起りうる方向を決定している。つまり、二つ一組で初めて完全なものとなるわけで、エネルギー保存の法則だけが強調されるのは、見方として偏っているのである。自然現象を正しく理解するためには、それをエネルギー的見地から見るだけでなく、エントロピー的見地からも見る必要がある。

上述のように現代社会は、エネルギー保存の法則だけを強調して現在にいたっている。しかしこれでは、自然・自然現象を正しく理解することはできない。そして今や、そのために大きな問題を抱え込んでしまっているといえる。例えば、原子力発電所をとってみても、エネルギー問題だけを考慮していたために、おろそかにされた面——放射性廃棄物問題、温排水公害問題など——が多々ある。その他にも、ゴミ処理問題、環境問題などエネルギー的見地のみでは正しく理解できない問題が山積みされているといつてよい。社会の生産・消費活動の中に含まれる広義の『自然現象』すなわち物質の参与する諸現象をエネルギー的見地とエントロピー的見地とを合わせ持った立場から捉えること抜きに、我々が現代社会の抱えている問題を正しく捉えることはできない。

第1章 科学教育の重要性

1-1. 科学教育の必要性

20世紀に入ってから科学、技術の発達が目覚ましいものである。そして、今や現代社会で生活する我々にとって科学は無視することのできない側面を持つようになっている。科学は、我々の個人生活から国家の政策決定に到るまで、全てではないにしても何らかの形で我々に関係を持っている。たとえば、公害、原子力発電、開発—環境問題、食品添加物など、科学的側面を抜きにしては考えることのできない問題が多い。科学は、我々の生活に大きな影響をあたえており、我々の社会に深く浸透している。そして、その中で生きる我々にとって科学をよりよく知るといふことは、科学やその発展から恩恵を受ける機会を多くし、また同様に、科学のもたらす危険を最小限に食い止める可能性を大きくするものである。

一方、我々自身に目を向けた時、我々は科学を正しく認識しているとは言いきれない。大学生においてさえ、文科系の学生の中には科学を毛嫌いしたり、理解不能なものとして疎んずる者が多い。確かに我々の一人一人が科学の全てを知ることとは不可能であるし、またそうある必要もない。しかし、物事を科学的に追求する、またそのための基礎を持つということは可能であり、この事こそが重要なのである。現在のような科学に満ちた社会に生きる我々が求められることは、単に科学を信奉あるいは排斥することではなく、科学に目を向け、その有用性、限界、危険性などについて正しく認識することである。

このことについて、イギリスの Royal Society の ad hoc 委員会は、“The public understanding of Science”¹⁾ の中で、公衆の科学理解の必要性について言及した上で、“この報告の残りの部分では、公衆の科学に対する理解を改善する方法について考察する。長期的に見た場合に、これらの中で最も重要なのは、正規の教育システム、特に学校教育である”と述べている。学校教育は、全ての人が受ける、年齢的に物の見方、考え方を確立する時期である。我々は社会の構成員全てが、科学理解の基礎と科学への関心を持つようになるために、学校での科学教育に期待することができる。

1-2. 科学教育の困難

現代は社会全体が細分化、専門化、高度化し、また個人の価値観も多様化している。さらに現在の日本の教育は全般的に受験戦争による弊害を大きく被っている。臨教審2次答申では、“過熱した受験競争や偏差値偏重の進路指導に見られる教育の現状は、(中略)知育の面においても自ら考え判断する能力を伸ばすよりも、記憶中心の知識偏重の教育の弊害を生み出している。また社会の進展に伴い、ともすれば学校教育の内容は増加し、高度化しがちである。その結果、受験戦争の過熱ともあいまって、多量の知識を詰め込む教育になったり、義務教育においてもその平等性や完結性が強調されるあまり画一的な教育、指導に陥っている傾向がある”²⁾と述べている。

さらに現行の科学教育——理科、数学は大きな問題を抱えている。理科の中でさえ物理、化学、生物、地学はその関係を全く欠いており、新しい理科Iですら上記4科目の抜粋を個々に扱っているにすぎない。また物理はその展開上、数学を必要とするにもかかわらず、実際はほとんど物理—数学間の整合は計られていない。このことに関して武庫川女大の那波信男氏は“中学以上の教育において各教科の専門性のみが強調されてバラバラになり、各教科間の関係がおろそかになっている事実には憂慮にたえない。(中略)特に物理と数学のような関連の深い教科間では十分に話し合っただけで合理的な教科過程を組んで教育的に無意味な徒労を防ぐべきであろう”³⁾と述べている。こういった状況下で、教育が科学理解の基礎や科学への関心を育むことは大変に難しいといえる。

これらの問題は、学習指導要領—教科書検定制度に起因している。また制度の規定に対して柔軟に対処できないのは、受験戦争による教育内容の硬直化が

一因である。こういった意味で科学教育の困難は、構造的であるといえる。このような科学教育への期待と教育自身の困難の中で、現在、教育の内容や方法、その他について、様々なレベルで多くの人々が努力をしている。

1-3. 物理教育

科学教育は、科学、科学的見方の基礎を提供するものである。だからその中には、必然的に、科学が対象とする自然、それを理解する枠組み、自然観が含まれてくる。現在の理科教育では、それはエネルギー、エネルギー保存則に基づいたものである。物理は言うに及ばず、その他でも例えば、生物の食物連鎖でのエネルギーの流れ、地学のエネルギー収支などがあげられる。しかし一方、現実の社会に目を向けてみれば、序章でも述べたように公害問題、放射性、産業、生活廃棄物処理問題などエネルギー的視点のみでは正しく捉えることのできない問題が山積みされている。現在の科学教育が提示する自然理解の枠組みには、この点で欠けているところがある。

このことに関して、範囲を物理に限定して以下話を進めることにする。

現在、中等教育での物理は、主に力学、波動、電磁気学を扱っている。確かにこれらの課題は、物理の中でも非常に重要である。しかしこういった物理が持つ自然理解の枠組みは、ほとんどが可逆的なものである。一方、自然現象の本質は不可逆である。“割れたガラスは、元にもどらない”ということは学校教育を受ける前の児童でも知っていることである。身のまわりを見れば可逆とみなせるものはむしろ少なく、たいていの現象が不可逆である。ここに、物理と生徒の日常経験の間にズレが生じているといえる。また上述のように、エネルギー概念とエネルギー保存則のみに基づいた可逆的な枠組みだけでは、拡散・散逸というように自然現象には一定の方向性があることを説明できない。より完全な自然理解の枠組みを目指すのであれば、可逆過程のみに偏らず不可逆な現象も取り上げ、扱うべきである。

物理でいえば、これは熱力学第2法則を扱うことに対応する。この場合、熱力学第2法則は、日常現象と物理を結び付ける上で特に重要である。しかし、一般に熱力学第2法則を中等教育で扱うことは非常に難しいと考えられている。以下、本論ではヨーロッパ、及び日本における熱学教育の状況、中等教育で熱力学第2法則を扱うことの可能性について述べる。

第2章 ヨーロッパにおける熱学教育の動向

ヨーロッパの物理教育の研究グループはユネスコの援助も得て、1975年以来、ダニューブ・セミナーと称する研究会を開いている。この章は、1983年の第6回ダニューブ・セミナーの報告書である Entropy in the school⁴⁾ に基づいている。Entropy in the schoolの概略についての説明が付録1に与えてある。

2-1. 現状

2-1-1. 背景

熱力学第1法則、第2法則の成立時期は、19世紀中頃でほぼ同じである。しかし、その成立過程は、DUITによれば⁵⁾ “熱力学第1法則は、実験的証拠から推論したものではなく、むしろ形而上学的、宗教的考察に基づいた確信によって初めは取り入れられた。また第2法則は熱の仕事への遷移という経験に基礎をおく” というように全く異なっている。その理由として、彼は、MEYESON (1930)の考えを要約して“第1法則は、その起源を主に変化の最中一定であるものを求める人類の思考の傾向に持っている。それ故、第1法則は第2法則よりも人類の心に魅力的である”と述べている。そしてさらに興味深い事実として、J. PIAGET (1973) が、第1法則と第2法則の違いについて発生学的認識論の立場から、“第1法則は、それが経験に適應させることができるまでは合理的な確信によって仮定された。第2法則は、それが合理的思考によって理解される前に経験によって暴き出されていた”という似かよった解釈を与えたということに言及している。

この見地からいくと熱力学第1法則と第2法則の間には、それを用いる人間の側に感覚的であり合理的でない差別が存在するということになる。そしてこの感覚的な差別に根ざした第2法則への不安な感情として、DUITは、

- 1) 第2法則に与えられた数学的形式は、誤解のもとである。
- 2) 保存概念は、不可逆概念よりも簡単に受け入れられる。

のふたつを挙げている。前者は熱力学第2法則の形式が不等号で与えられていることであり、後者は上述の MEYESON の主張に他ならない。このような議論の後、彼は、“学校物理教育において熱力学第2法則が小さな役割しか演じえないのは、主にエントロピー概念に対して不安な感情を持つ人々の偏見によって引き起されていると信ずるに足る”としている。

熱力学第2法則を教育の中に取り入れることに困難を感じるのは、ヨーロッパにおいても多数派である。しかし、そういった中で“情報や秩序の概念はエネルギー概念よりも理解しやすく、それ故、第2法則もまた第1法則よりも教えやすい”という主張もあがっている。

2-1-2. 熱力学第1法則

熱力学第1法則——エネルギー保存則は、非常に重要な法則である。そういった意味では、自然理解の枠組みがエネルギー概念とエネルギー保存則を中心に構成され、物理教育の中でも広く扱われるのは当然の事である。

エネルギー概念とエネルギー保存則は、物理を専門にする人、ある程度物理と深くかかわった人にとっては比較的簡単で、しかも非常に便利である。またその頻度からいって、エントロピー概念とエントロピー増大則よりもなじみの深いものである。それでは、こういった事は、学校で物理を学ぶ生徒にとっても同じであろうか。

この点に関して、G.SCHAEFERは北ドイツの16-23才の生物学科の学生に対して、キーワード“エネルギー”から連想される言葉を調べ、その結果を報告している⁵¹⁾（図表1 参照）：“エネルギーという言葉から連想されるものとして、3～5年の物理教育の後に期待できるものは“仕事”であるが、最頻連想は“力”であり、“仕事”は5位であった。また連想の多かった14の言葉のうち、9つは明らかに物理的含意を持っているものの、これらの多く（電流、熱、原子力発電所、光、等）は、テスト後のインタビューによれば物理教育のつくったものではなく、日常、特にマスメディアを通しての日常生活によって作られたものであることがわかった。だから多くの物理に関連した連想は、物理教育が有効に作用していることを意味しない。これは西ドイツの物理教育において、エネルギーと仕事の等価性が多くの努力によって念入りに作りあげられているにもかかわらず、“仕事”が5位に過ぎないという事実によって裏づけられている。（中略）他の注目すべき結果は、テスト集団が主にその中心課題に生物を選んだ生徒や、生体エネルギー現象を学んだ学生から成るにもかかわらず、生物エネルギーの含意が非常にまれであったという事実である（“ブドウ糖”“強い／強さ”“スポーツ”など下位3位）。これは再び、西ドイツの学校教育はエネルギーについての連想の枠組みに関しては、ほとんど効果的でないことを実証している。”

DUITは、斜面を滑り降りたボールが反対側の斜面のどこまで上がるか、ということについての生徒の理解を調査した DAHNCKE(1973)の研究から1つの例を引用している（図表2 参照）。調査結果は、問題解決にエネルギー保存の原理を用いた生徒は、やはり少なく、日常言語や通路の幾何学的性質によって説明するものが多いということを示していた。この例からも、エネルギー保存の原理は、生徒に把握され、使いこなされているとは言い難い、と DUIT は結論している。さらに彼は、PIAJET, ROGERS, JOHNSTORN, MACDONALD, WEBB、そして自らの研究を加えた一連の熱力学第1法則に関する報告から、“熱力学第1法則を理解することは、学校物理教育を受ける生徒・学生にとって少しも簡単な課題ではないと要約することが許されると考える”と結論している。

2-1-3. 熱力学第2法則

DUITによると⁵²⁾、熱力学第2法則の学習について、第1法則に見られるような実験的研究はごく少数しかない。彼は、その中のいくつかを紹介している。それによると、生徒・学生は、第2法則の概念についてほとんど何ももっていない（ERICKSON, 1979）か、あってもごく表面的である（JOHNSTON, MACDONALD, WEBB, 1977）と述べている。また、機会(Chance)の概念の形成についての研究（PIAJET 1973, 1975）から、不可逆性理解の前提としての機会(Chance)の概念の発達、可逆性の操作とその発達とに密接に関係があるとしている。

そして、第2法則を中心概念にすえるものとしてエネルギー劣化の概念をとりあげ、これが日常の意味でのエネルギー概念に含まれているか、という問題

を提起し、“含まれている”と考える人々(の論文)として、SCHLICHING AND BACKHAUS (1980), OGBORN (1981), SOLOMON (1982) を挙げている。しかし、DUIT自身のドイツでの研究によれば、エネルギー劣化の概念は、エネルギーの日常的な意味のなかには含まれていなかったとしている。

2-1-4. まとめ

以上のことから、エネルギー概念とエネルギー保存則は、物理の側に立つ者が考えているほど簡単なものではなく、それを学ぶ生徒・学生の側からすれば、かなり難しいものであることが結論される。DUITはこの点に関して“エネルギー保存の原理を主として定性的感覚の範囲(無からは何も生ぜず、無は何にもならない)を超える方法によって理解することは(中略)容易なことではない”としている。また、SCHEAFERの報告は、エネルギー概念は物理教育の中で扱われたあとでさえ、強く日常概念と結びついていることを指摘している。

第2法則は、まだ各国でもほとんど教育の中に取り入れられておらず、したがって、これに関する実験的研究も少ない。また生徒・学生のなかに第2法則・エントロピー概念が見られないのも、この点から言って当然のことであるといえる。

以上、熱学教育はその第1法則、第2法則共に大きな問題と困難を抱えている。DUITは、まとめとして次のように述べている。“私達が、エネルギー保存やエネルギー劣化を学校で扱うためのさらに進んだ計画を必要としているということに疑いがない。しかし今しばらくは、エネルギー概念の中核となる側面の学習について実験的研究を実行することが、よりさしせまったことであるように思える。”

2-2. 実践と提言

2-2-1. 序

今まで、熱力学第1法則、第2法則についての生徒・学生の理解をそれぞれ別個に見てきた。その中で生徒の理解は日常経験に強く結びついていることが明らかになった。それゆえ、エネルギーについての教育は、エネルギーという言葉が日常世界で持っている意味合いから隔絶して行うことはできず、したがって物理の側の都合だけでなく、エネルギーが生徒・学生の生活の中でどのようにイメージされているかを十分に考慮した上で行われなければならないのである。このことは、エネルギー保存則についても同様である。教育の内容と生徒・学生の日常経験の間に大きなズレがあってはならず、もしそういったものがあれば、それを解消するよう努力がなされなければならない。

さらに、エネルギーについてのもうひとつの側面、第2法則につながる劣化の側面をどう扱うかが問題となる。第2法則を教育に取り入れるにあたっての姿勢は、セミナーの参加者の中でも“エネルギーについていえたことからすれば、第2法則は日常経験と非常に良く一致しているのであるから、物理教育の

内容はもっと第2法則との対応を重視すべきである。”という積極的なものから、“日常経験が我々に、一方に進むのと同様に逆に進むことのできる事象とそうでない事象との区別を教えているという事は認めるが、これは、このことからエントロピー概念まで行くことが容易であるという事を意味しない。”という消極的なものまで様々である。しかし、エネルギー概念とエネルギー保存則のみの教育が、第2法則の側面も持つように拡張できるという点については一致しており、その方法についても様々なものが挙げられている。（図表3参照）以下ではエントロピー概念の教育のための現象論的方法、統計的方法、また数は少ないが第2法則に関連した実験の例を紹介する。

2-2-2. 現象論的方法

現象論的方法には、様々なものがある。ここではその中で有力であると思われるエネルギーの質、エネルギー劣化・散逸を扱う方法を取り上げる。

・エネルギーの質、エネルギー劣化・散逸

P.BLACK⁹⁾は、“エネルギー保存の原理を扱う前に、エネルギー劣化・散逸について取扱うべきである”と積極的に主張している。彼は彼自身の調査に基づいて、エネルギー教育をする以前はエネルギーという言葉からの生徒の連想は生活関連のものが多く、また物理でいうエネルギー保存というものは生徒の日常経験の中にはない、ということを示した。日常言語での“保存”と、エネルギー保存の原理で意味されるところの“保存”は、その語義が異なっており感覚的なずれを生じているとしている。そしてさらに、エネルギー保存の原理の陳述のうち“エネルギーは創りだされない”ということは容易に受け入れられるが、“エネルギーはなくならない(not destroyed)”ということは受け入れられない、としている。この例としてある生徒の主張¹⁰⁾を挙げている。これは、生徒が経験するエネルギー散逸は、見かけ上エネルギーがなくなるように見えるため、エネルギー保存の原理が納得できないという意味である。このことから、BLACKは言葉上の問題、経験との食違いを解消するため、エネルギー保存の原理を扱う前に、エネルギーの劣化・散逸について取扱うべきだと主張している。そして彼はこの立場から実際に授業を行い、エネルギー保存の原理のみを扱った場合（旧課程）とエネルギー保存の原理の前にエネルギー劣化・散逸について扱った場合（新課程）との生徒の理解の比較を行っている。旧課程は1980年、新課程は1982年のもので、それぞれエネルギーの授業の最後に同じ問題を課し、その結果を比較している。問題は“ゴルフの打った球は、跳上りの高さを徐々に低くしてくりかえし跳ねながら前へと進み、そしてとまった。生じたエネルギー変化の全てをできる限り完全に書きなさい”というものであった。彼の調査結果は、図表4に示してある。内容的に“変換と散逸”が述べられているものを正解とするが、これは旧課程⇒新課程で15%から40%へと注目すべき進歩を示している。またおなじテストのなかで、エネルギー保存の原理の正しい表現を与えた者の比率（図表4 参照）からいっても、“変

換と散逸”グループは良い成績をおさめている。これらのことから、BLACKは“散逸についての教育はエネルギー保存の原理についての混乱を解消するのに有効である”と結論している。

エネルギー劣化・散逸を扱うべきであるという主張は他にも、DUIT, P. HAUSSLERらがしている⁹⁾。彼らは、物理教育は生徒たちに社会でのエネルギー問題の理解を助長するようなエネルギー概念を実際に提供することができるか、という問に対する答えとして、“伝統的な方法を受け継いだ物理教育の中で生徒の獲得したエネルギー概念は、エネルギー問題の理解には役立たない”とし、この理由として、エネルギー劣化がこの年齢段階での物理教育に少しも含まれていない、ということを挙げている。

また、D.LIJNSEはほぼ同様の見地から、エネルギーの消費や消耗を扱うことによってエネルギー保存の原理と日常経験の間のずれは避けられると言っている¹⁰⁾。そして、この様な方法が取り入れられる理由として、SOLOMON(1983)を引用して、“なされなければならない事は、生徒の心の常識の領域を対応する科学的領域で置き換える事ではなくて、生徒がその直面する実際の状況からの機能的、対話的な要求に従って二つの領域の切り替えを学ぶ事である”としている。

この様な、エネルギーの質を扱う方法としては、より物理的なものとして、エクセルギー概念を導入する方法が提案されている。エクセルギーは、環境との平衡状態を基準としており、その点でエネルギー問題で意味されるところのエネルギーとも一致するものである。エクセルギー概念を使うことの提唱者はH.J.SCHLICHTING¹¹⁾である。

・まとめ

現象論的方法は、生徒・学生は日常経験の枠の中で物事を捉えようとする傾向があるということに根ざしたもので、日常言語の中のエネルギーの意味や生徒の日常経験を出発点としている。これはその意味で、従来の物理教育と生徒の日常経験の間にあったズレを解消する可能性を持っている。

しかし、現象論的方法もいくつかの欠点を持っていることは否めない。¹²⁾

まず第一点として、この方法で第2法則を扱おうとすると、極めて定性的にならざるをえない。これは、第2法則を定性的に扱うだけで良いとすれば欠点とは言えなくなるが、単純にエントロピーということに注目すれば、生徒は多くの場合、それがなんであるかを知ることができない。また、エントロピーと熱とを混同する危険がある。これらの欠点はエントロピー概念自体が高度に日常的でないことによっていえる。

第二点として、このような計画は、物理教育の多くの徹底的な改革なしではなしえないということである。この方法は、日常との接点に重点が置かれているのであるから、現在の体系重視で抽象的な物理教育がこの方法を取り入れた時、変革を迫られるのは当然のことといえる。

2-2-3. 統計的方法

この方法には、大別して情報理論によるものと微視的状态数の計算によるものの二つがある。

・情報理論によるもの

この方法の提唱者としては、R.U.SEXL⁷⁾ A.PFLUNG¹²⁾らがあげられる。

この方法は、はじめに情報の単位、bit を定義する。そして様々な情報源、例えばアルファベットから始まって人間の遺伝子、テレビの画面などに含まれる情報量を bit を使って表わす。さらにそれが本何冊分になるか、テレビコマーシャル何秒分に当るかなどを求め、情報量の計算に慣れる。然る後、情報からエントロピー、熱力学へと結びつける。SEXLの方法では、気体の真空中への自由膨張を用い、情報単位から熱力学単位への正しい換算が成し遂げられるように係数を選んでいる。

情報理論は、利点として情報量が明確な解釈（yes/no型質問の数）を持っていることがあげられる。また微視的状态数計算の方法と比べれば、身のまわりや科学の他の分野への応用が多い。しかし欠点としては、導入初期の事例が物理の事例としては不適切であり、的外れであること、また物理と結びつける際は、微視的状态数計算の方法に頼らざるを得ないことがあげられる。

・微視的状态数計算によるもの

この方法の提唱者としては、E.TÓTH¹³⁾があげられる。彼女は既にこの方法に従って教科書¹⁵⁾を書いており、ハンガリーのグラマースクールで使っている。TÓTHのエントロピー導入の方法の概略は、付録2に示してある。

この方法は、文字通り粒子の微視的状态数を数えるものである。従って、生徒が原子・分子モデルについての予備知識、数学についての予備知識を持っていることが前提とされている。またあまり難しい数学を使わなくてもすむように、導出過程に細心の大きな注意が払われなければならない。コンピューターシミュレーションなどの生徒の興味・関心を引く方法の導入や、その他いろいろな工夫の余地は残されているが、この方法がハンガリーにおいてもグラマースクール（上級学校進学を目指す学校）の生徒に対してしか行われていない事から分かるように、一般の生徒にとっては程度が高すぎる点に難がある。

利点としては、物理的意味が明確であり、物理的応用が豊富であることがあげられる。また、先程の欠点を逆にいえば、生徒が必要とされる前提条件を満たしていれば、不可逆性やエントロピーについて比較的簡単に良く理解できる方法であるといえる。

統計的方法と現象論的方法の統合が、DUIT, HAUSSLERらによって試みられている。その図式を、図表5に示す。

2-2-4. 実験¹⁶⁾

熱力学第2法則に関する実験は、ほとんど紹介されておらず、数が少ない。その理由として第2法則の学校実験は、あっても平凡であったり、間接的であ

ったりするという事があげられている。

・さいころゲーム

不可逆性の理由を説明する可能性のある実験として、さいころゲームがある。

まず紙に書かれた二つの部屋と番号付けされたおはじきを用意する。初めおはじきは片方の部屋へ全て置く。そしてさいころを振って、それぞれのおはじきが左右どちらへ行くかを決めていく。この過程を全てのおはじきに対して数回から数十回繰返し、おはじきの配置を調べる。最も多いのは、左右同数ずつおはじきが分けられる配置であり、このことから不可逆性の統計的解釈へと進むのである。

さいころゲームは、生徒が実際に行うという点、また非常に安価である点が評価できる。おはじきの数がある程度多くしても良い。(20個程度)しかし、一般に繰返し行わなければ意味がなく、時間がかかるといえる。

このゲームをコンピューターに代行させることもできる。そうすれば時間を節約でき、一度に扱うおはじきの数も100, 200と多くできる。また見た目も生徒の興味を引くものに工夫できるだろう。気体の真空への自由膨張を原子・分子レベルでシュミレートするのは、この方法の精巧な例である。ただし前提として、コンピューターがなければならない。またソフトを作るには(買う場合は別として)、教師の多くの努力と時間を必要とする。また生徒は直接手を下さず見ているだけなので、見て終わりということも危惧される。

・熱機関¹⁶⁾ (図表6 参照)

E.TÓTHは、フランスの Prof. DELACOTE の考えに基づいた熱機関を紹介した。

装置が水に浮かべられ、ろうそくの火によってラセン状の銅管の中の水が熱せられると、水は低温と高温の密度差のため上方へと流れる。浮き円盤の底から出ている管の両端は、それぞれ曲げられており、それによって流れる水は円盤を回転させる。この時の円盤の回転数を測定する。これを、装置をいれた容器全体を温め、いろいろな水温について繰返し、円盤の回転数の変化を調べる。これによって、熱機関は温度差がなくなると動かなくなること示す。この実験は、安価、安全で生徒が行うことができる。しかも、熱機関についての半定量的実験である。

・統計的温度概念へのモデル実験¹⁷⁾ (図表7 参照)

この実験はポーランドのSOKALSKIによって考案された。

4×7×10mmのアルミニウムの小直方体 100個程を、ラウドスピーカーに取付けた振動板の上にばらまき、ある電圧をかけて振動させる。そして振動を止め、縦、横、平、それぞれの状態の小直方体の数を数える。これによって、ボルツマン分布が得られる。またスピーカーにかける電圧を変え、スピーカーの振幅を変化させて、それぞれの状態の数の測定を繰返し、そのデータから温度概念を統計的解釈のもとに導入する。¹⁸⁾

2-3. 総括

以上を念頭においてヨーロッパにおける熱学教育の状況を概括すると、

- 1) 熱学教育、特に熱力学第2法則についての教育での取扱いの現状は日本とあまり変わらない。つまり熱力学第2法則は、学校教育においてほとんど取扱われていない。
 - 2) 熱力学第1法則、第2法則がどのように教育の中で扱われて、それがどの程度生徒によって理解されているかについて若干の研究が行われている。
 - 3) こういった中で熱力学第2法則を積極的に取扱っていかうという動きが起ってきている。
- というようになる。

第2節では、Entropy in the school にあげられていた実践と提言のうちの一部を紹介した。その他にも、いろいろな試みが提案されている。しかし、学校教育はこれまでエントロピーなしでやってこれたという事実に着目すれば、エントロピー概念をその中に導入するにあたっては、

- 1) 説得力のある、そして簡単な方法が、エントロピー概念の導入に際して見出されなければならない
 - 2) 多くの興味ある、そして動機づけとなる例が、エントロピー概念の助けをもって自明でない結果を得られるところに見出されなければならない
- ということに注意する必要がある¹¹⁾として、第2法則、あるいはエントロピー概念を実際に導入することの難しさもまた指摘されている。また、多くの方法の中でどれが一番よいかを決定することはできなかった。その理由として、
- 1) どの方法の価値も、その教育の目的に大きく影響を受ける。
 - 2) どの方法の価値も、生徒の年齢や予備知識に左右される。
 - 3) どの方法の価値も、教師の知識、経験に左右される。
- などが挙げられている。¹²⁾

第3章 日本における熱学教育の状況

現在日本の教育は、文部省による学習指導要領・教科書検定制度によって、その内容が規定されている。そこでまず日本の熱学教育の現状について、学習指導要領・教科書・指導書を通して概観する。

3-1. 小学校

理科教育は、小学校低学年から始められる。小学校理科教育の目標を学習指導要領¹³⁾から要約すると、

低学年	自然に接する
中学年	自然に対する興味を育てる
高学年	自然について考える

という中で自然を愛する豊かな心情を培う、となっている。小学校については、教科書を入手していないので、さらに学習指導要領に基づいてその内容を述べ

伊達崎 広

る。熱学教育に関係するものだけを抜粋すると、

2年 温かさによって、物が水にとける速さに違いがある

4年 溶けた物は、水の中に広がっていること

空気及び水を熱したり冷したりしたときの様子を調べ、温度によってそれらの体積が変わることを理解させる。

ア. 空気及び水は温度が変わると体積が変わるがその程度に違いがあること

イ. 水は温度によって水蒸気や氷に変わることを理解させる

6年 物を温めた時の変化を調べ、物の温まり方を理解させる

ア. 金属を熱すると、熱は熱したところから順に伝わっていくこと

イ. 熱の伝わりやすい物と伝わりにくい物とがあること

ウ. 空気や水が温まるのは、体積変化によって起る空気や水の移動によること

エ. 物は、温度によって体積は変わるが全体の重さは変わらないこととなり、温かさ・温度の概念を中心に物質の変化の様子・仕方を扱っている。

小学校は初等教育に属しており、その中での理科教育は児童の身のまわりの出来事に即した事項を実験・観察を通して扱っている。従って、熱学関係の教育も児童の身のまわりから題材を選び、具体的な現象を出発点として、事象の性質を定性的に取扱っている。

不可逆性は、児童にとって日常経験からある程度あたりまえのことである。“自然は不可逆である”ということ、日常から例を引いて説明はできるが、それが児童にとってどんな意味を持つか疑問である。不可逆性は日常に良く見られるが、その意味するところは大変複雑であり、そういった説明が単なる言葉の言いかえに終わってしまう可能性は大きい。

3-2. 中学校

学習指導要領¹³⁾によると、中学校は小学校の時に得た自然に対する理解を深め、自然を愛する心の育成と共に、自然を冷静に見つめ、自然を科学的に追求する姿勢を育てることが必要とされる。小学校での知識をもとに、科学的見地の第一歩を踏み出す段階であるといえる。

学習指導要領では、理科第1分野の目標の1つとして

1-(1) 物質やエネルギーに関する、事物・現象の中に問題を見だし、自然を調べていく過程を通して規則性を発見したり、自然現象を説明したりする方法を習得させる

をあげている。そして、熱学関係の教科内容は、第1分野において、

6-ウ-イ) 熱によって仕事をさせることができ、仕事をすることによって熱を発生させることができること

があり、さらにエネルギー教育としては、

6-オ-ア) エネルギーは、外部に対してすることができる仕事で測られるこ

と

ーイ）重力による位置エネルギーは、物体の置かれた高さと質量とに関係すること

ーウ）運動エネルギーは、物体の質量と速さとに関係すること

ーエ）位置エネルギーと運動エネルギーは、互いに移り変わる事

ーオ）日常生活では、資源やエネルギーが有効に利用されていることがある。不可逆性の取扱いについて、学習指導要領は何も述べていない。

次に、教科書について見る。ただし、教科書は1社 東京書籍²⁰⁾のものしか入手できなかった。従って、以下に述べることは資料が不足しているということから、全体に対してあてはまるかどうか疑問が残る。しかし、学習指導要領・教科書検定制度の規制があること、入手した高校の教科書は出版社によって特に顕著な違いが見られないこと等を考え合わせれば、全体的外れということはないであろう。

以下、東京書籍の教科書の内容に沿って熱学関係の事項の取扱いを見ていくことにする。

まず、“電流による発熱”の個所で、“熱量はどのようにして決めるか（本文）”“熱は一方通行（コラム）”などを取り上げている。前者はその結論を熱量＝1×（水の質量）×（水の温度）としている。後者は不可逆性に関係するものであり、定性的注意程度ではあるが不可逆性が紹介されている。ただこの部分が他の関連する事項と切り離されて孤立しているのは、残念である。熱学に関係する所はもう1個所あり、こちら側が主である。7章エネルギー2-2 熱のエネルギー で扱われている。“仕事による熱の発生”“熱による仕事”の2節がある。ここでは、金属粒を攪拌して温度上昇を測定する実験があげられている。この実験では、攪拌回数と温度上昇の関係を考察の対象としている。

エネルギー教育は、まず各種エネルギーについて扱い、その後、“いろいろなエネルギーの移り変り”“エネルギーはどのように利用されるか”といった節を設けている。後者には、“熱はにげていく”という項目があり、“熱の全部を仕事にかえることはできない”ことを扱っているが、その理由としてあげられているものはいずれも本質的でなく、熱機関に低温熱源が必要なこと（熱が逃げていくのではなく、熱を捨てる必要があるということ）は述べられていない。（付録3 参照）

中学校段階では、不可逆性という言葉は出てこないが、その内容の一端は紹介されている。しかしそれが内容的に不完全であるといわざるを得ないのは、残念である。またヨーロッパで述べられたことが日本にもあてはまるとすれば、エネルギー教育を効果的に行うにはエネルギー劣化・散逸をエネルギー保存の原理の前に扱う方が良いと言えるが、そうはなっていない。全体的に見て、不可逆性の取扱いは定性的であることはよいとしても、その構成や取扱いは中途半端であるといわざるを得ない。

3-3. 高等学校

学習指導要領²¹⁾では、高等学校理科の目標は、“実験・観察などを通して、自然を探究する能力と態度を育てるとともに自然の事物・現象についての基本的な科学概念の理解を深め、科学的な自然観を育てる”となっている。中学校段階では具体的な問題に対処して、その解決ができるようになることが望まれていたが、高等学校ではそこからさらに一歩進んで、偏りのない自然観、科学的な自然観を育てることが目標とされている。熱に関する内容は、気体の分子運動の章で扱われている。その章の中で不可逆性については、“熱に関する自然現象では力学現象と違って不可逆なものがあることを定性的に扱う。広義のエネルギー保存についても触れる”となっている。

わが国で発行されている高校物理の教科書は、昭和61年現在で全部で17冊ある。この論文ではそれぞれの教科書をそれに付けられた固有のコード〔(4-017)等〕によって示す。コードと当該教科書の対応は図表8に示してある。

教科書はその全てが、先の学習指導要領をうけて熱力学第2法則を定性的に扱っている。不可逆現象がまず定義され、その例²³⁾がいくつか挙げられる。第2法則の記述は、不可逆現象を扱った後、“熱現象は不可逆である”という簡単なものに留めているものから、最も多いのが、“ひとりでに起る現象では熱は常に高温の物体から低温の物体へ移る”というものである。また中には、“力学的な仕事は全部熱に変えることもできるが、逆に、他に何の影響も残さず、熱を全部仕事に変えることはできない”(4-017)といった記述も見られる。何らかの形で熱力学第2法則の名称を出しているものは7冊である。エネルギーの質に言及したり(9-004)、第2法則の分子運動論的解釈を述べているもの(4-017, 2-016, 183-027)は少ない。また何らかの形で永久機関を取り上げているのは、(4-017, 11-020, 104-026)などである。この他に(4-017)では、時間の進む向きについても述べている。

指導書では、不可逆性を説明するために、さいころゲーム・統計的方法・現象論的方法・歴史的方法など様々な方法が紹介されている。そのなかには、ヨーロッパで紹介された“エネルギー劣化”(ここではエネルギー消費)に言及することや、また不可逆変化についてどの程度まで教えるか等、興味深い例もある。しかし、これらの項目の取扱いがどの程度教育現場で実現されているかについて、今のところ資料がない。今後の研究・報告が待たれるところである。指導書にある指導上の注意は一部の抜粋を付録4に示す。

第2法則の取扱いが、現在定性的なものに限定されているのは、学習指導要領・教科書検定制度のもたらした結果であろう。高校物理教育における第2法則・不可逆性の比重は極めて軽いといえる。内容の取扱いは、その直前に分子運動論を扱っていながら、それをほとんど利用しておらず、不可逆性だけが突然単独で現われ、他の部分との関連も希薄である。全般に第2法則・不可逆性に関する教育は、周到に用意されているとはいえない。

第4章 アンケート調査

4-1. 日程と方法（日程の概略は、図表9に記した）

修士課程の1年目の最初の6ヵ月は、エントロピーについて基本的な勉強をし、統一的自然像の確立のためには、エネルギー的な視点だけでなくエントロピー的視点にも立たなければならないことを認識した。つづいて1985年10月頃から、Entropy in the school の講読に入った。アンケート調査実施を思い立ったのは、Entropy in the school によってヨーロッパの動向にふれ、日本の現状を把握したいと思ったためである。時期的には、上記報告書を読み終えた1986年7月頃である。

8月末に物理教育国際会議が東京で開かれたが、Entropy in the school の編集者である G.Marx 教授やその弟子の E.Tóth 博士らは、準備のためかなり早い時期から来日していた。私の所属する研究室ではこの両先生を8月上旬松本に招いて、信州大学で講演をしていただいた。これらの講演に触発されたこともアンケート調査実施の動機としては大きいものである。

実際に企画に入っていたのは、9月初旬である。アンケート草案、内容説明書の作成にかかり、途中物理学会物理教育分科会での発表の準備のため一時中断して、10月上旬に完成した。指導教官にアンケート内容、アンケート実施のために必要な手続きなどについて相談し、10月中旬に中学・高校の教諭である父と叔父を介して調査依頼を行った。その結果、東京都内中学校 5校、同高等学校 2校、愛知県内高等学校 7校の協力を得ることができた。（図表10 参照）また、11月上旬に自分の母校にも協力をお願いし、快諾していただいた。

また父の勤務する中学校で予備調査を行ってもらい、現場の先生方の意見を拝聴した。その結果、冗長であった前文を書き換えたが、設問内容を変更する必要はなかった。

その後アンケート調査は、11月中旬から12月上旬にかけて各協力学校で実施され、12月中旬から下旬にかけて郵送されてきた。そして、到着分から予備集計にはいった。本集計ではコンピューター処理をするため、データを記号化する必要があり、予備集計はそのために、どのような解答があり、どれが多いか等を調べるものである。この様なことから予備集計は手作業によるところが多く、またアンケート回収総数（中学生 1866名、高校生 1616名、計 3482名）が膨大なこともあり、予想外に手間取った。現在、中学向け設問4、7、高校向け設問10、13（中高とも“エネルギー”という語からの連想、“熱”という語からの連想を問う）についての予備集計を終了している。1月に入ってから、本集計のためのプログラム作成に着手し、中旬に完成した。現在、データファイルの作成に取りかかっている。本集計では、上記以外の設問の集計、設問間の相関を取る予定である。

この論文につづく今後の作業計画は上述のとおりであるが、この論文では、以下、予備集計に基づいた議論を行う。

4-2. 内容と目的

アンケートは、4つの主要な部分に分けられる。第1の部分は、回答者の学年、性別、志望、物理の授業を受けたかどうか等を調べる。この部分は、回答者の属性を明らかにし、アンケートの他の部分とどのような関係があるかを見るために使う。第2の部分は、回答者が物理(理科)から受ける感じ、物理が身のまわりで役に立っている例などを問う。この部分は、物理に対する生徒の感じ方の傾向を調べるものである。例えば、高校向け設問8、9は、回答者自身と物理、社会と物理のかかわりについて回答者自身はどう感じているかを調べ、どの程度物理が生徒の生活の一部として把握されているかを明らかにすることを目的としている。第3の部分は、エネルギーに関して生徒の持っているイメージ・概念を調査する。エネルギーについて、連想・短文作り・説明という3つの作業を通して生徒がエネルギー概念をどのように捉え、またどう使っているかを明らかにする。第4の部分は、熱に関して上記のエネルギーと同様のことを行う。熱はエネルギーと違って、それ自身が単独で扱われることは少ない。その取扱われ方の違いが、エネルギーとの比較においてどのように現われるかを見る。以上がアンケートの主要な内容である。アンケートの内容は、付録5に示してある。

相関は上記4つの主要部分間をクロスしてとる予定である。例えば、第2の部分と第3の部分の間をとれば、物理教育の有無・物理への関心とエネルギー概念の把握のされ方に何か関係を見出すことができるかもしれない。このように相関をとることは非常に興味深いと言えるが、これはこの論文以後の作業として行う予定である。この論文では、予備集計の段階で学年・性別・志望とエネルギー・熱からの連想についてクロス集計を行ったので、それについて結果を報告する。

4-3. アンケート結果

4-3-1. 全体

図表11は、中学全体と高校全体の答えと答えの数(上位11位)の比較である。

まず回答の全体を概観してみると、中学・高校生ともに、自分の生活の中の言葉を連想する傾向があることが分かる。特に熱からの連想では、上位4位(あつい、火、太陽、風邪)は日常経験的、感覚的な連想であるといえる。その中で、高校生はエネルギー問題やそれに関連してエネルギーを得るための手段への連想(水力、省エネ、地熱、原子力**)をあげている。

次に連想を問う設問での無回答者数に注意すると、熱では中学から高校で12.6%から14.0%とほとんど変化は見られないが、エネルギーでは16.1%から7.2%と半分以下に減少している。エネルギーは、周知のとおり理科教育全般で多面的に取扱われている。しかし一方、熱は“化学反応で熱が発生する”とか“回路に電流を流すことによって熱が発生する”というように何かの結果として扱われることはあっても、熱とは何であるかということ自体を問題にする

自然の統一的認識におけるエントロピー的（熱学的）視点の重要性………
ことは稀で、物理の“気体の分子運動”の個所で扱われているのみである。これは単純に考えるならば、中学・高校を通してエネルギーは扱われているが、熱を扱うのはごく一部である、という事実によっているといえる。ここでは無回答者数は、教育の中でのその言葉が扱われる頻度・方法を反映していると理解できる。

4-3-2. エネルギーからの連想

・アンケート結果と考察

図表11から分かるように、エネルギーからの連想では‘力’が多いことが目立つ。中学生では、全体の23.5%が‘力’を連想している。高校生では18.3%に減少しているが、それでもまだ高い値であるといえる。また図表12からはエネルギーからの連想と学年・性別との関係を見ることができる。それによると‘力’という連想は、中学では一貫して多く、高校では男子では多少減少しているものの、女子では中学と変わらず多い。中学から高校にかけての男子の‘力’の連想の減少は、エネルギーが、中学3年理科第1分野・高校理科I・高校物理などで集中的に扱われていることから、エネルギー教育のある程度の成果であるといえるだろう。しかし中学1年から‘力’の連想が多いこと、女子では変化のないこと、男子でも約1/5は‘力’を連想していることを考え合わせると、エネルギーと力は中学校以前から結び付いており、その結合は非常に強いものであることが分かる。そしてこの点に関して、現在のエネルギーに関する教育は、あまり有効でないと結論できる。したがって、エネルギーと力との区別をどのように与えれば両者の概念を明確に区別してそれぞれを正しく認識できるようになるかがエネルギー教育の一つの課題となるであろう。

中学生において‘光’は、1年生、2年生では5～8%が連想したに過ぎないが、3年生では男子13.0%、女子15.9%にも達している。これは中学理科第2分野で、3年次に光合成を扱っているということを反映していると考えられる。

高校生における‘原子力’は、中学におけるより男女ともに増加している。特に女子では、中学(8%以下)から高校1年(20.6%)で大幅増となっている。これは、高校理科I“人間と自然”の中で原子力の活用について扱っているためであると考えられる。

高校生における‘カロリー’は、男子では全学年とも1%前後でほとんどないに等しいが、女子では2年8.0%、3年10.0%がこれを連想している。これは、アンケートの中である女子が‘家庭科のカロリー計算’としていることから女子選択の家庭科に由来した連想であるといえる。

以上三つの例を挙げたが、これはエネルギーが中学・高校を通して様々な個所で取扱われており、エネルギーという語からの連想もそれらの影響を強く受けているということを示していると考えられる。

中学生と高校生の連想の差で注目すべきは、‘運動エネルギー’と‘位置エネ

ルギー’である。両者とも中学ではほとんど見られなかったのが、高校では前者が7位(7.2%)、後者が11位(4.3%)である。運動エネルギー・位置エネルギーは、ともに高校物理の始めの方、力学の中で扱われている。従って、これらの語が連想されるのは物理教育の効果であるといえる。しかし、このことをもって物理教育がエネルギー概念の形成に有効に作用しているといえるだろうか。例えば運動エネルギー、位置エネルギーのすぐ後に扱われるエネルギー保存の原理についての連想は、高校生全体で計26名(1.6%)があげているにすぎない。また上述の‘力’に関することもあり、これに関しては否定的にならざるを得ない。

・ヨーロッパとの比較

DUITは、ドイツでの自分自身の研究によれば、エネルギー劣化の概念はエネルギーの日常的な意味の中には含まれていなかったとしている。(2-1-3 参照) 当調査でも予備集計でエネルギーからの連想を全て調べたが‘消費’‘なくなる’といった回答がごく少数の者によってあげられたのみであって、エネルギーからの連想は、直接的にはエネルギー劣化の概念とは結び付いていなかった。

SHAEFER の調査との比較は、興味深い。それはこの調査の原形の一つが彼の調査であり、結果を直接的に比較できるからである(図表1 参照)。彼の調査では、1位 force 2位 current 3位 atomic 4位 heat 5位 work となっている。連想される内容は日本と西ドイツでほとんど変化はないが、異なるのは‘仕事’である。西ドイツでこれを連想したのは5位であるが、日本では中学・高校合わせて16名 0.5%(中学 2名 0.1%, 高校 14名 1.0%)にしかない。これは、当調査では別にエネルギーとは何かを直接問う設問が在り、そちらとの関係があるのかもしれない。しかし、連想を問うという同じ形式で行われた調査であり、その結果の比較であることを考慮に入れば、やはりこの違いは大きいと言わざるを得ない。日本でもエネルギーと仕事の等価性には言及しているのであるから、その点をSHAEFER の見地でいえば、日本のエネルギーに関する物理教育は成功していないということになるだろう。

4-3-3. 熱からの連想

・アンケート結果と考察

図表13には、熱からの連想を上位14位まであげてある。

熱に関するこのような調査は、Entropy in the school でも紹介されておらず、また日本でも目につく限りでは見当らなかった。よって、この結果をどのように評価して良いのか明確な視座には立てない。しかし、いくつか気付いた点があるので、それを述べる。

熱からの連想は、中学・高校を通して日常経験的、感覚的なものが多い。また学年別に見ても、順位は入れ代わるものの連想の内容にはほとんど変化が見られない。熱からの連想をとった理由は、エネルギーと教育の中に現われる頻度に違いがあるので、それがどのように連想に影響するかを見るためであった。

ここでは、上記の違いがそのまま結果に表われているといえる。熱は教育の中で重要性が低いものとして現状では扱われているため、教育の内容に依存した連想は少なく、物理教育を受けた後でも連想は日常からのものが多くなるのであろう。

一方、物理教育による影響であるといえる連想もいくつかある。それは‘エネルギー’と‘摩擦’である。‘エネルギー’は、中学11位（3.6%）から高校5位（7.6%）であり、‘摩擦’は、中学（0.6%）から高校9位（4.1%）と変化している。

ここで‘エネルギー’についてであるが、これはエネルギーからの連想に‘熱’が多かったから逆にここでは‘エネルギー’があげられているのではない、ということに注意すべきである。エネルギーからの連想の‘熱’は、まだ概念化できていないエネルギーを身近かな日常概念である熱に置き換えたのであり、熱からの連想の‘エネルギー’は、日常概念である熱を学習から得た科学概念であるエネルギーに結び付けたのである。

熱とは何かということに対して、物理の側に立つ者が高校の物理教育を受けた生徒に期待する回答は、分子運動である。このことを連想の問題にあてはめて考えてみると、熱からの連想で‘分子運動’をあげているものはほとんどいなかった⁴⁵。このことを単純に捉えれば、物理教育は熱をあまり扱わないばかりでなく、唯一扱っている個所でさえ、生徒の概念形成に役立っていないということになってしまう。これは回答の仕方が、‘何か’と問うか、‘連想’と問うかでは大きく違ってくるので言い過ぎの感もあるが、そういう傾向があるということとは否めないであろう。

第5章 まとめ

本論文では、自然理解のためには現行のように熱力学第1法則を考慮するだけでは不十分で、第2法則的視点を合わせ持つことが重要であるという立場から熱学教育の現状を見てきた。まずヨーロッパでは、生徒の現状を把握する努力がなされる一方、第2法則を教育に取り入れる実践例がいくつかあった。日本では、高校物理が不可逆現象を定性的に扱っているが、その取扱いは不十分である。また、ヨーロッパのような見地に立って研究や実践をする例もほとんど見られないといえる。現状では、第2法則に関して、教えない⇒知らない⇒必要ない⇒教えない、という悪循環が続くのみで何の解決にもならないといえる。

エネルギー概念の教育は、ヨーロッパにおいてもあまりうまくいっていないことが指摘されている。日本で我々が行ったアンケート調査も、エネルギーと力の間の概念的癒着というような簡単には解決できない障害を物理教育が抱えていることを示した。

また一方でアンケート調査は、エネルギー・熱からの連想の比較から、これらの概念は日常経験と強く結び付いていること、教育の中でどう扱われるかに

伊達崎 広

よって大きな影響を受けること等、これらの概念が持つ幾つかの側面を明らかにした。この意味では、教育——ここでは物理教育——は生徒の概念に（少なくとも連想には）影響を与えており、今後、教育内容・方法のいっそうの研究・実践が望まれるところであるといえる。

熱力学第2法則を中等教育の中に取り入れる努力は、日本でもごくローカルには行われている。しかし、第2法則を定性的を超える範囲で扱うことは、一般に難しいとされてきた。今、我々はヨーロッパの例を学び、第2法則を理論的に扱うことさえ不可能ではないことを知った。また科学教育(物理教育)が、科学的な自然観を育み、より広い視野を提供することを目標とするのであれば、自然法則の根幹の一つである熱力学第2法則が教育の中で軽視されて良い理由はどこにもないといえる。このような見地に立てば、もっと多くの時間と努力が第2法則を取扱うために必要とされるべきである。

いま我々に必要とされるのは、第2法則に困難を感じ続けることではない。本来なければならないものがないという現状を鑑みれば、そういった欠落を慎重に、しかも一刻も早く是正することが必要であるといえるだろう。

謝辞

本研究・論文を通して、調査の難しさ、集計作業の手際、文章表現など、自分の未熟さを改めて痛感しました。ここにこうして論文をまとめることができたのは、ひとえに関係する皆さまの暖かいご支援、ご協力のおかげであると思います。

本研究に対し、あらゆる面で熱心なご指導、ご検討下さった物性研究室の勝木 渥教授に深く感謝いたします。また、様々なご指導下さった犀川和彦講師に感謝いたします。本研究の過程で貴重な意見を寄せて下さった三輪 浩教授、寺尾 冽助手に感謝いたします。

アンケート調査の実施にあたり、大変ご尽力下さった北原福二教諭、伊達崎 義信教諭、伊達崎 勲教諭に深く感謝いたします。またアンケートを引き受けて下さった協力校の先生方、アンケートに答えて下さった生徒の皆さんに深く感謝いたします。

□□□□ 注 □□□□

- +1 エネルギー保存の法則がうまく理解されていない例として次の様な生徒の意見が紹介されている。

“私、エネルギー保存の法則を信じていません。だって、先生が電池と電球を持っているとします。すると電池は電気エネルギーを持っていますね。それで電球では光と熱が出ます。いいですか、熱は逃げていっちゃうし、光は闇に消えてしまうと思うんです。だからエネルギーは消えてしまう。ほら、おかしいでしょ！”

この例では、エネルギーの散逸ということが、扱われていなかったため、生徒がエネルギー保存の法則を納得できなくなっている。
- +2 1986年秋（9月27日）の物理学会物理教育分科会でこの実験を紹介したところ、ある先生から“この実験を生徒が面白いと思うだろうか、私にはそうは思えない”という意見をいただいた。
- +3 不可逆現象の例として多いのは、水にインクを落した時のインクの拡散、たばこの煙の拡散、物体の運動（振子や台車）が摩擦や空気抵抗によって止まってしまうことなどである。このような例を上げた後、熱の移動も不可逆であるということを述べている。
- +4 原子力などエネルギーを得る手段は、高校 理科 I で扱われている。よって、このような傾向は、教育の影響ということが出来る。これについては後述する。
- +5 “熱とは何か”と問う設問ではごく少数ながら‘分子運動’と答える者もいた。連想の設問でも一人もいないという訳ではないが、非常に稀であった。

- 1) "The Public Understanding of Science", Report of a Royal Society ad hoc Group endorsed by the Council of the Royal Society.
邦訳 大山雄二 : "公衆に科学を理解してもらうために"
『科学』56 21-29, 96-102, 171-181
- 2) "臨教審第二次答申" 『文部時報』昭和61年4月臨時増刊号 pp.4-129
- 3) 那波信男 : "物理教育の今後の課題" 『物理教育通信』42号 P.77
- 4) Entropy in the School, ed. by G. Marx, Roland Eötvös Physical Society, Budapest 1983 (以下この本からの引用は、E.S.と略す)
- 5) R.Duit : "Is the second law easier to understand than the First law" E.S. pp.87-99
- 6) G.Schaefer : "Energy, Information, Order in the head of our student" E.S. pp.56-86
- 7) R.U.Sexl : "What you always wanted to know about entropy and never dared to ask", Chairman of ICPE and IUPAP, E.S. pp.101-110
- 8) P.Black : "Life world and Science world" E.S. pp.43-55
- 9) R.Duit and P.Haussler : "Dealing with energy degradation in grades 5 to 10" E.S. pp.388-396
- 10) P.Lijnse : "Energy and Quality", E.S. pp.404-418
- 11) H.schlichting and U.backhaus : "From energy evaluation to exergy" E.S. pp.228-242
- 12) The report on Workshop D, led by J.Ogborn,
"Approach to teaching thermodynamics" E.S. pp.477-480
- 13) A.Pflung : "Real system on the one way road toward disorder" E.S. pp.323-341
- 14) E.Tóth : "A statistical way to second law at 17" E.S. pp.424-435
- 15) E.Tóth : MODERN PHYSICS, National Center for Education Technology, Veszprem-Hungary 1986.
- 16) The report on Workshop F, led by C.Sükösd,
"School experiment for the second law" E.S. pp.498-500
- 17) K.Sokalski : "Experimental Investigation of the second law" E.S. pp.342-354
- 18) 『小学校指導書理科編』 文部省, 昭和53年3月
- 19) 『中学校指導書理科編』 文部省, 昭和53年3月
- 20) 『新編 新しい科学 62年度中学用 第1分野 下』 p.27, p.172, 東京書籍
(著者名は、図表8に示す)
- 21) 『高等学校学習指導要領解説 理科編, 理数編』 文部省, 昭和54年5月

□□□□ 付録1 Entropy in the school の概要 □□□□

ヨーロッパの物理教育の研究グループはユネスコの援助も得て、1975年以来、ダニューブ・セミナと称する研究会を開いている。Entropy in the school は、1983年5月の第6回ダニューブ・セミナの報告書である。この報告書には、開会の挨拶をかねた G. Marx の報告（Entropy in the School？学校でエントロピーを教えるだって？）のほか、5分野にわたる31報告、6つのワーク・ショップのまとめ、1つの円卓討論のまとめ、閉会講演、および参加者リストがのっている。

参加者リストから地域別・国別の参加者数をまとめてみると、次のようになる：

西欧 [35] : オーストリア3, デンマーク1, フィンランド4
フランス1, 西ドイツ8, イタリア5, オランダ4
ノルウェー1, スウェーデン1, スイス1, イギリス6
東欧 [37] : チェコスロバキア1, ハンガリー28, ポーランド5
ユーゴスラビア3

アフリカ [3] : アルジェリア1, シエラレオネ2

アジア [2] : 中国1, インド1

アメリカ [2] : 米国1, ベネズエラ1

合計79名。

5分野とそれぞれの報告数（=全体会場での講演+文書またはワークショップでの報告）は、

Origins（歴史的起源） 3（=2+1）

Children（児童生徒の認識過程・認識状況） 3（=3+0）

Background（理論的背景） 7（=5+2）

Heat（熱学的取扱） 6（=4+2）

Statistics（統計力学的取扱） 5（=3+2）

School（小・中・高校での教育実践） 10（=4+6）

で、全体講演21，その他13の計34報告である。

6ワークショップ・円卓討論のテーマは、以下の通り。

- A. 児童・生徒はエントロピーを理解できるか？
- B. 熱力学の歴史的アプローチ
- C. 小・中・高校教育でのマイクロコンピュータ
- D. 熱力学授業へのアプローチ
- E. Decision Making Game（代替エネルギー計画立案ごっこ）
- F. School Experiments for the Second Law（熱力学第2法則のための学校実験）

円卓討論。「いろいろな国での熱力学第2法則の教授」

対象となる生徒は高校の 17⁺の学年 (17才以上ということか。だとすれば、日本の高校3年に相当)。14⁺の学年で、2つの小部屋とコインのゲーム (はじめ一方にコイン全部をいれておきサイコロを振って、出た目にしたがってコインを一方から他方に移す) をやっており、コインの配置方法の多い状態へ移って行くということを、生徒たちはすでに経験している。このような伏線が前もって張ってある。

さて、N個の粒子が体積V中にある、このときの粒子の配置の仕方の数をYとする。(ふつうWを使うところを、Wは仕事を表わすのに使ったから、生徒の混乱を避けるためにYを使う。) 体積がV + ΔVになったときの配置方法の数をY' とすれば

$$\begin{aligned} Y'/Y &= ((V + \Delta V)/V)^N = (1 + \Delta V/V)^N \text{であり、対数をとれば} \\ \ln(Y'/Y) &= \ln Y' - \ln Y \equiv \Delta \ln Y \\ &= N \ln(1 + \Delta V/V). \quad \text{①} \end{aligned}$$

さて、一般に系が部分系1、2よりなるとし、部分系での粒子の配置の仕方の数をそれぞれY₁, Y₂ とすれば、

$$Y = Y_1 \cdot Y_2,$$

変化が起こる方向はYが増す方向なので、変化が起こった後の配置の仕方の数をY' とすれば、

$$Y' > Y$$

これを部分系のY₁, Y₂ で書くと、

$$Y_1' \cdot Y_2' > Y_1 \cdot Y_2,$$

対数をとると、

$$\ln Y_1' + \ln Y_2' > \ln Y_1 + \ln Y_2$$

移項して、

$$\begin{aligned} \Delta \ln Y_1 &\equiv \ln Y_1' - \ln Y_1 \\ &> -\Delta \ln Y_2 \equiv -(\ln Y_2' - \ln Y_2). \quad \text{②} \end{aligned}$$

この変化のさい微量の熱ΔQが系2から系1へ流れたとする。部分系の得た熱をそれぞれΔQ₁, ΔQ₂とすれば、

$$\Delta Q_1 = -\Delta Q_2 = \Delta Q. \quad \text{③}$$

③を②でわると、

$$\Delta Q_1 / \Delta \ln Y_1 < \Delta Q_2 / \Delta \ln Y_2.$$

いま、熱が2から1へ流れたとしたので、2の温度が1の温度より高いことになるが、上の不等式の大小関係は、温度の大小関係と同じである。そこでΔQ / ΔlnY は温度に比例する量だと考えて、

$$kT \equiv \Delta Q / \Delta \ln Y \quad \text{④}$$

によって温度Tを定義する。

自然の統一的認識におけるエントロピー的（熱学的）視点の重要性……

さて、この T は気体温度計の温度（絶対温度）と一致するだろうか。

ある理想気体 1 モルの系（体積 V ，圧力 P ）に微量の熱 ΔQ が入ってきて、体積が ΔV だけ増したとする。ただし、熱が微量なので、温度・圧力の変化は無視できるとする。すると、

$$\Delta Q = P \Delta V \quad (5)$$

①と⑤を④に代入すると、

$$\begin{aligned} k T &\equiv \Delta Q / \Delta \ln Y \\ &= P \Delta V / N \ln(1 + \Delta V / V) \quad (6) \end{aligned}$$

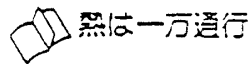
$$\therefore P \Delta V / \ln(1 + \Delta V / V) = N k T$$

$\Delta V / V \ll 1$ とすれば、分母 $= \Delta V / V$ 。したがって⑥は $P V = N k T$ となり、 $k = R / N$ に選べば、 T は絶対温度と一致する。⑥を書きなおして、 $\Delta Q / T = k \Delta \ln Y$ 、 $k \Delta \ln Y$ を ΔS と書けば、 $\Delta S = \Delta Q / T$ 。

このやり方の巧みなところは、さきにエントロピーに相当すること（粒子の配置方法の数と変化の方向の関係）よく教えておいて、あとから温度を導入するところにある。あとから導入された温度は日常的に経験している量なので、普通のやり方で $\Delta S = \Delta Q / T$ によって導入されたエントロピーに抱くような違和感を抱かずにすむ。

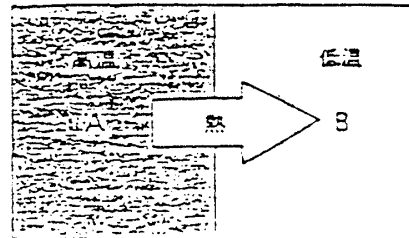
E.Tóth: "A Statistical Way to Second Law at 17⁺ in Hungary" Entropy in the School pp. 424-435 (1983)

△ P.27 単元「熱量はどのようにしてきめるか」コラム より



熱は一万通行

熱湯を入れたビーカーAを、水を入れた水槽Bの中に入れておくと、Aの温度は下がり、Bの温度は上がって、やがて、同じ温度になる。



このようなとき、AからBへ「熱」が移ったという。熱はかならず、高温の物体から低温の物体に移り、低温の物体から高温の物体に移るようなことはない。つまり、熱は一万通行である。

△ P.172 単元「エネルギーの移り変りと利用」本文 より

6. エネルギーはどのように利用されるか

いままで、エネルギーがいろいろなすがたに移り変わることを学んだ。また、水の位置エネルギーや運動エネルギー、石油や石炭のもつ化学エネルギーによって発電機を回し、電流が得られることも学習した。

〔熱はにげていく〕 石油や石炭などを燃焼させ、機械を動かして仕事をさせるばあい、熱のぜんぶを仕事に変えることはできない。たとえば、石油を燃料とするディーゼル機関車のばあい、全体の熱の20～35%ぐらいしか利用できない。自動車のばあいも、利用できるのは30%ぐらいである。

これは、機械が動いたり、物体が動いたりするときには、摩擦によって仕事の一部が熱になってしまうことが1つの原因である。また、熱は、温度のより低いところへ移っていく性質があるため、発生した熱のかなりの部分が空気中や地面、宇宙空間などへにげていくためである。「熱はエネルギーの墓場である。」といわれるのは、このような理由からである。

わたしたちが、熱のエネルギーを利用するばあいは、熱のこの性質を考えて、効率よく利用しなければならない。

△ 大日本図書 『改訂 物理 指導書』 p.356 資料編 より (抜すい)
(対応教科書 4-017)

物理の話題5 エネルギーの消費と保存則

○ 教授上のポイント

高校で学習する物理は、だんだん日常生活と関係がうすくなってきていると感じている生徒は少なくない。エネルギー保存の法則もその一つである。そこで、日常生活でよくいわれている“エネルギー消費”と“エネルギー保存の法則”の関係をわかりやすく説明する工夫・研究が必要である。これは以下、話題中にあるように熱力学第2法則に関連するものであり、不可逆現象と日常生活との関係を説明する必要がある。不可逆現象をエントロピー増大と結びつけることもあるが、エントロピーは他の物理量と違って理解しがたいものであるので、むしろ日常の諸現象で熱廃棄と結びつけて“エネルギー消費”の意味と“エネルギー保存”との関係を説明するのが一つの方法と考えられる。

エネルギー問題は今後ますます重要問題となり、政治・経済・社会と密接に関連してくるので、科学的な理解・判断が下せるように生活を指導することは極めて重要である。

△ 数研出版 『改訂 高等学校 物理 指導書』 p.75 より (抜すい)
(対応教科書 104-014, 104-026)

解説 不可逆変化はどの程度まで教えるか

不可逆変化をどの程度教えるべきかは一つの課題である。それには以下で述べるような三つの段階が考えられるが、現場の事情に応じて適当な段階までにされてさしつかえないものと思われる。

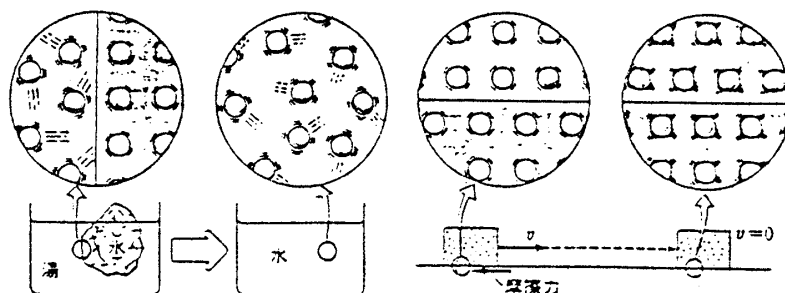
〔第1段階〕エネルギー保存の原理について付加的に不可逆変化のことを例にあげて説明するのが必要最小限の取扱いであろう。物理現象はエネルギーが保存するように起るが、エネルギーが保存しさえすればどのようにでも現象が起りえるかというのではなく、エネルギー一定の条件の下にある向きに変化が起り、その逆向きには起らないことがあるのを知らせる。そして、その例として「熱は高温から低温に移る」こと、および「熱はそのままでは仕事に変わらない」という熱力学第2法則の内容を示す。

〔第2段階〕不可逆変化の起る向きは、分子運動がますます乱雑になる向き(エントロピー増大の向き)であることを示すのは第2段階で、これによって変化の方向に一定の基準があることを知らせるのは、理解を一段と深めることになる。図59は、上にあげた熱力学第2法則の内容の変化の向きがいずれも分子運動が増々乱雑になる向きであるということを示すためのものである。ただしここでは、なぜそのような向きに変化が起るかということまではつっこんではいない。

伊達崎 広

〔第3段階〕なぜ分子運動がますます乱雑になるように変化が進行するか、その確率論的理解が第3段階であろう。この段階までつっこむ必要はないと思われるが（生徒の質問に備えるということとは別に）教える側が十分に基礎を理解しておくことは、ことばの端々ににじみでる余韻というものが生徒の理解をどれだけ助けるか知れないものがある。

(a) 熱は高温の物体から低温の物体へ移る (b) 物体の運動エネルギーは摩擦熱に変わる



●図 59 不可逆変化と分子の熱運動

△ 大原出版 『物理 改訂版 指導書』p.117 より (抜すい)

(対応教科書 100-024、100-025)

○ 「熱」の「仕事」への転換はたいへんむづかしい

1. 仕事に熱に転換することは「自然な変化」である。たとえば手をこすり合わせる仕事をすれば、熱が発生していることを素直に認めることができる。

2. しかしながら、その逆は「不自然な変化」であって簡単には起らない。これが「熱」の本質が何であるか容易にわからなかった原因の一つであり、「熱の利用」が「力学的な機械」よりも遅れ、ワットまで待たなければならなかった理由である。

3. ここでは熱が仕事に転換していると思われる例を具体的に示すことから入ることにする。図2の噴水実験を紹介する。

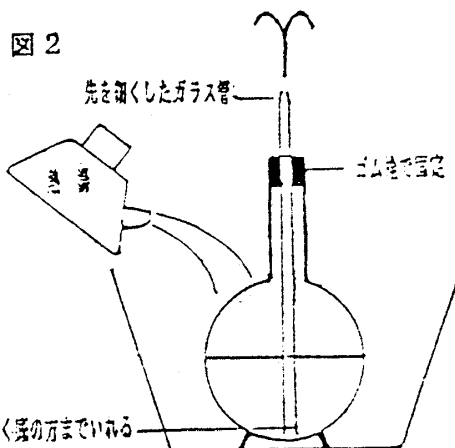
この実験は、たいへん興味をひく実験であり、かつ容易にできる実験であるから、ぜひ示して導入実験として位置づけたい。

この実験において「フラスコ内の水と同温の水をかけたのでは、このようにならない」ことを具体的に示す。

4. この段階では「熱」が「仕事」に転換したといいきれない（一つのサイクルを形成したときはじめてそのようにいえるので）。したがって「熱の移動」がある場合「仕事」が得られる、と結論しておく。

5. 次に蒸気機関の例をあげる。これにいたって生徒は「熱」は「仕事」転換していることを素直に認める。

しかしながら、「熱」の「仕事」への転換を定量的に追求する、いわばジュールの実験の逆のタイプの実験はまだ体験していないし、その手だてもないわけである。



□□□□ 中学向けアンケート

アンケートに協力してくださるみなさんへ

私は、理科の教師になることを志している者です。私は、みなさんがた中学生が理科を好きかきらいか、理科の中に出てくるいろいろな考えがわかりやすいか、わかりにくい、よくわかっているかどうかなどをしらべて、今後の理科教育を充実させるための研究をしたいと思っています。つきましては、次のアンケートに答えてください。

0. 学年 中学（1，2，3） 性別（男，女） ○をつけて下さい。

1. 理科が好きですか。 ○をつけて下さい。

好き きらい どちらともいえない

2. 理科というと、どんな感じがしますか。

「

」

3. 理科があなたの身のまわりで役に立っていると思われることがありますか。あればその例をいくつか書いて下さい。

「

」

4. エネルギーという言葉から思いうかぶ言葉を思いついた順にいくつでも書いて下さい。

「 ① ② ③

」

5. エネルギーという言葉を使って短い文をいくつか作ってみて下さい。

「

」

6. エネルギーとは何でしょうか、思いつくまま気楽に説明してみてください。

「

」

7. 熱という言葉から思いうかぶ言葉を思いついた順にいくつでも書いてください。

「 ① ② ③

」

8. 熱とは何でしょうか、思いつくまま気楽に説明してみてください。

「

」

アンケートに協力していただき、本当にありがとうございました。

0. 学年 中学(1, 2, 3) 性別(男, 女)

⇒学年と性別を明らかにする。

1. 物理に興味を持っていますか。

⇒物理と他の科目の好き嫌いを調べる。

2. 理科というと、どんな感じがしますか。

⇒理科に対して生徒がどのような感情を持っているかを調べる。

3. 理科があなたの身のまわりで役に立っていると思われることがありますか。
あれば、その例をいくつか書いて下さい。

⇒理科と生徒の周りの日常世界との関わりを生徒自身がどのように捉えているかを調べる。

4. エネルギーという言葉から思いつく言葉を思いついた順にいくつでも書いて下さい。

⇒ヨーロッパで行われた調査から取ったもので、生徒の連想の枠組みの中でエネルギーがどうとらえられているかを調べる。できれば、結果をヨーロッパのものと比較したい。

5. エネルギーという言葉を使って短い文をいくつか作ってみて下さい。

⇒これもヨーロッパで行われた調査から取ったもの。生徒がエネルギーという言葉をもどのように使うかを調べ、エネルギー概念の捉え方の特徴を見出す。

6. エネルギーとは何でしょうか、思い浮かぶまま気楽に説明してみてください。

⇒生徒がエネルギーをどのように捉えているかを調べる。

7. 熱という言葉から思いつく言葉を思いついた順にいくつでも書いてください。

⇒エネルギーは非常に抽象的な概念である。それに較べて物理的に難解であるが、より日常的・具体的である熱を取り上げ、それが生徒の連想の枠組みにどのように取り込まれているかを調べる。

8. 熱とは何でしょうか、思い浮かぶまま気楽に説明してみてください。

⇒これも、エネルギーとの対照という意味では設問7と同じ主旨である。熱という日常現象を生徒がどのように概念化しているかを調べる。

以上

□□□□ 高校向けアンケート

アンケートに協力して下さる皆さんへ

私は、物理の教師になることを志している者です。私は、皆さん方高校生が物理を好きか嫌い、物理の中に出てくるいろいろな考えが分かり易いか分かりにくい、良く分かっているかどうか等を調べて、今後の理科教育を充実させるための研究をしたいと思っています。つきましては、次のアンケートに答えて下さい。

0. 学年 高校（1，2，3） 性別（男，女） ○をつけて下さい。

1. あなたは何系志望ですか。 ○をつけて下さい。

文系 理系 その他

2. 次の科目のうち、好きなものに○、嫌いなものに×、どちらともいえないものに△を付けて下さい。

物理 化学 生物 地学 数学

3. 物理に興味を持っていますか。 ○をつけて下さい。

持っている 持っていない どちらともいえない

4. 物理というと、どんな感じがしますか。

「

」

5. 物理というと、どんなことを連想しますか。

「

」

6. あなたは物理の授業を受けましたか（受けていますか）。 ○をつけて下さい。

受けた 受けている 受けていない

7. 物理を受けた人、受けている人へ、物理はおもしろかった（おもしろい）ですか。また、その理由があったら書いて下さい。

おもしろい おもしろくない どちらともいえない

理由「

」

8. 物理があなたの身のまわりで役に立っていると思われることがあれば、その例をいくつか書いて下さい。

「

」

伊達崎 広

9. 物理は社会でどのように使われていますか、思いつくままに書いてください。

「

」

10. エネルギーという言葉から連想される言葉を思いついた順にいくつでも書いて下さい。

「 ①

②

③

」

11. エネルギーという言葉を使って短い文をいくつか作ってみて下さい。

「

」

12. エネルギーとは何でしょうか、思い浮かぶまま気楽に説明して下さい。

「

」

13. 熱という言葉から連想される言葉を思いついた順にいくつでも書いてください。

「 ①

②

③

」

14. 熱とは何でしょうか、思い浮かぶまま気楽に説明してみてください。

「

」

アンケートに協力していただき、本当にありがとうございました。

□□□□ アンケート設問事項に関する説明 (協力して下さる先生方へ)

0. 学年 高校(1, 2, 3) 性別(男, 女)

⇒学年と性別を明らかにする。

1. あなたは何系志望ですか。

文系 理系 その他

⇒社会一般で通用している分類に従って生徒进行分类する。

2. 次の科目のうち、好きなものに○、嫌いなものに×、どちらともいえないものに△を付けて下さい。

物理 化学 生物 地学 数学

⇒物理と他の科目の好き嫌いを調べる。

3. 物理に興味を持っていますか。

4. 物理というと、どんな感じがしますか。

5. 物理というと、どんなことを連想しますか。

⇒物理に対して生徒がどのような関心を持っているかを調べる。

6. あなたは物理の授業を受けましたか（受けていますか）。

⇒物理がどの程度の割合で生徒に履修されているかを明らかにし、他の設問に対する答えと物理履修との相関の有無を見る。

7. 物理を受けた人、受けている人へ、物理はおもしろかった（おもしろい）ですか。また、その理由があったら書いて下さい。

⇒物理を履修している（した）生徒が、物理を面白いと感じたかどうかを調べる。

8. 物理があなたの身のまわりで役に立っていると思われることがあれば、その例をいくつか書いて下さい。

⇒物理と生徒の周りの日常世界との関わりを生徒自身がどのように捉えているかを調べる。

9. 物理は社会でどのように使われていますか、思いつくままに書いてください。

⇒物理が社会でどのように使われているかについて、生徒はどのように考えているかを調べる。

10. エネルギーという言葉から連想される言葉を思いついた順にいくつでも書いて下さい。

⇒ヨーロッパで行われた調査から取ったもので、生徒の連想の枠組みの中でエネルギーがどうとらえられているかを調べる。できれば、結果をヨーロッパのものと比較したい。

11. エネルギーという言葉を使って短い文をいくつか作ってみて下さい。

⇒これもヨーロッパで行われた調査から取ったもの。生徒がエネルギーという言葉をもどのように使うかを調べ、エネルギー概念の捉え方の特徴を見出す。

12. エネルギーとは何でしょうか、思い浮かぶまま気楽に説明して下さい。

⇒第1に、物理教育の成果が見られるか、第2に、生徒がエネルギーをどのように捉えているかを調べる。

13. 熱という言葉から連想される言葉を思いついた順にいくつでも書いてください。

伊達崎 広

⇒エネルギーは非常に抽象的な概念である。それに較べて物理的に難解であるが、より日常的・具体的である熱を取り上げ、それが生徒の連想の枠組みにどのように取り込まれているかを調べる。

14. 熱とは何でしょうか、思い浮かぶまま気楽に説明してみてください。

⇒これも、エネルギーとの対照という意味で設問13と同じ主旨である。熱の説明として高校物理履修者には、分子運動に基づいたものが期待できる。

以上

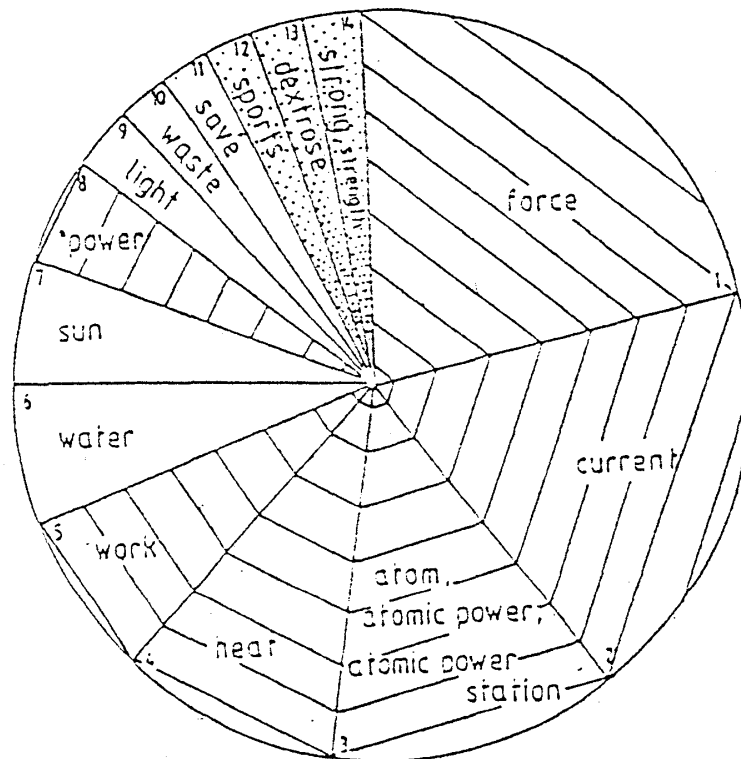
□□□□ アンケート前文（書きかえ前）

私は、物理の教師になることを志している信州大学大学院理学研究科物理学専攻物性物理学講座の修士課程2年に在学中の伊達崎 広という者です。私は、皆さん方高校生が物理を好きか嫌い、物理の中に出てくるいろいろな考えが分かり易いか分かりにくい、良く分かっているかどうか等を調べて、日本の物理の教育がこれで良いのかどうかを研究したいと思っています。このアンケートは、エネルギーや熱のことを皆さんがどう思っているかを調べるためのものです。試験ではありませんので、思った事をそのまま書いて下さい。

（中学向けの場合、3行目 高校生⇒中学生 それ以外、中学・高校とも同じ）

図表1 SCHAEFER の研究 エネルギーへの連想の上位14位の相対比率

対象は北ドイツの生物学を学ぶ学生 156人。



斜線部分は物理教育と密接に関連した連想

点を打った部分は生物学的な事項と密接な連想

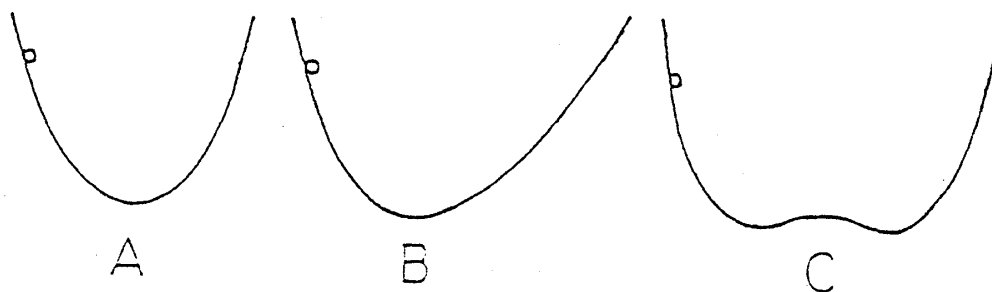
空白部分は教育外の日常生活からの連想

G.Schaefer : "Energy, Information, Order in the heads of our students"

E.S. p.77

図表 2 DAHNCKE の実験的研究

問題 次を示す3つの図において、ボールが印された点から放された時、ボールは反対側の斜面をどこまで登るか、ただし摩擦はないものとする。

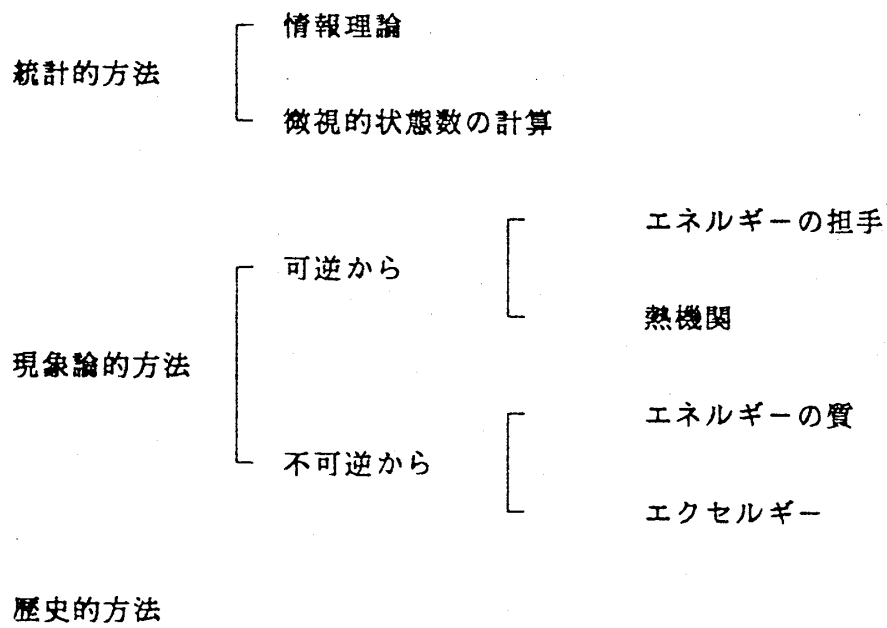


結果		正しい高さ の予言	説明にエネルギーを使う	説明にエネルギー保存則をつかう
斜面 A		47	35	26
斜面 B		26	26	18
斜面 C		33	22	15

* 第10学年——7～10学年に物理教育を受けた後——の学生、171名を対象

- ◇ 通路B, Cの正しいボールの高さを解答した学生数は、通路Aにおけるより少ない
- ◇ 解答を説明する時、エネルギーは少数の学生に使われたにすぎない
- ◇ エネルギー保存の原理は、さらに少数の学生が論じたにすぎない
- ◇ 多くの説明が、日常経験から生じた考え（振動 等）や通路の幾何学的性質の陳述（通路A, Cの対称性 等）によっている

図表 3 第 2 法則を扱うための方法



図表4 Black の研究報告

year	No. of pupils	Omit	L.W	S-R	T	T-D
1980	46	17	9	30	30	15
1982	56	14	12	6	29	40

表中の数字は、パーセント数である。

1980年：旧過程 - エネルギー散逸は扱わず、エネルギー保存則を教える。
 1982年：新過程 - エネルギー散逸について扱った後、エネルギー保存則へ進む

Omit : 無回答

L.W (Life World): 生活世界の概念のみを使った説明

S-R (Storage) : エネルギーはもとの系に蓄えられているという概念を使った説明 (もしエネルギーが創りだされたり、消失したりしないなら、エネルギーは何らかの方法で蓄えられ、まだそこになければならない)

(Reversible): エネルギーは可逆であるという考え、またエネルギーは物質のあり方に関係するという考えを使った説明 (エネルギーが保存するならば、ものはそれが最初あったのと同じ状態に戻されなければならない)

T (Transformation) : 簡単な変換のモデルを使った説明、しばしば機械的学習からやみくもに用いられる

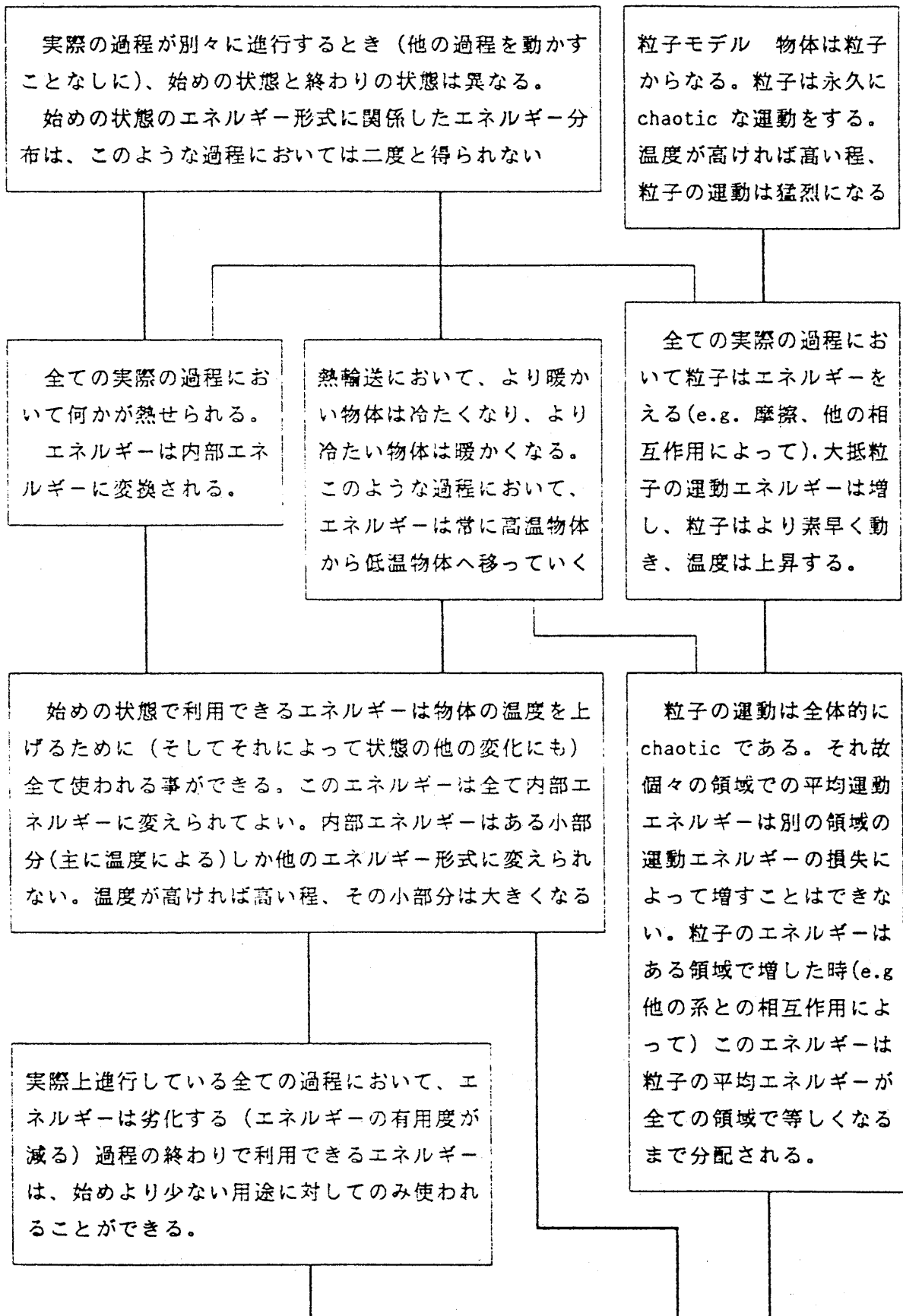
T-D (Transformation and dissipation) : 変換と散逸の概念を使った説明 (エネルギーは変換する時、もれでるような形に変化しなければならなかった。これが物体が結局静止してしまう原因である)

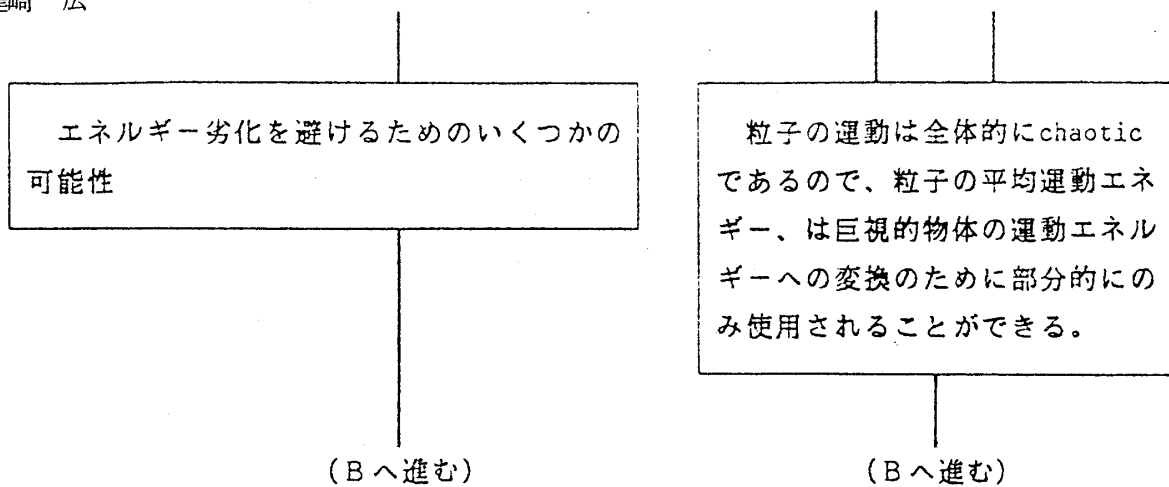
1982年においてエネルギー保存の原理の正しい表現を与えた者の数

Omit	} 18人中 6人	T : 16人中 9人
L.W		
S-R		T-D : 22人中 19人

図表5 現象論的方法と統計的方法

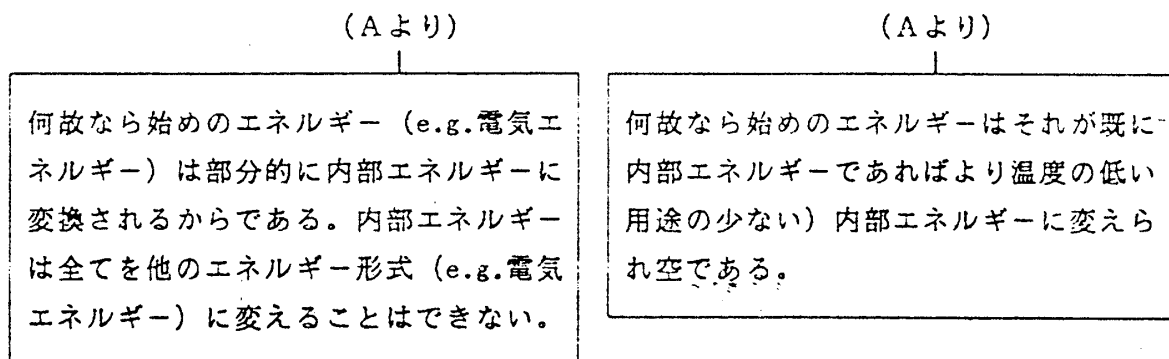
A. エネルギー劣化を扱うことについての教科題目図式





B. エネルギー劣化を避けるためのいくつかの可能性

それぞれの過程においてエネルギーは変換される（エネルギーの獲得もエネルギーの損失もない）、しかしエネルギーの用途は減る．．．

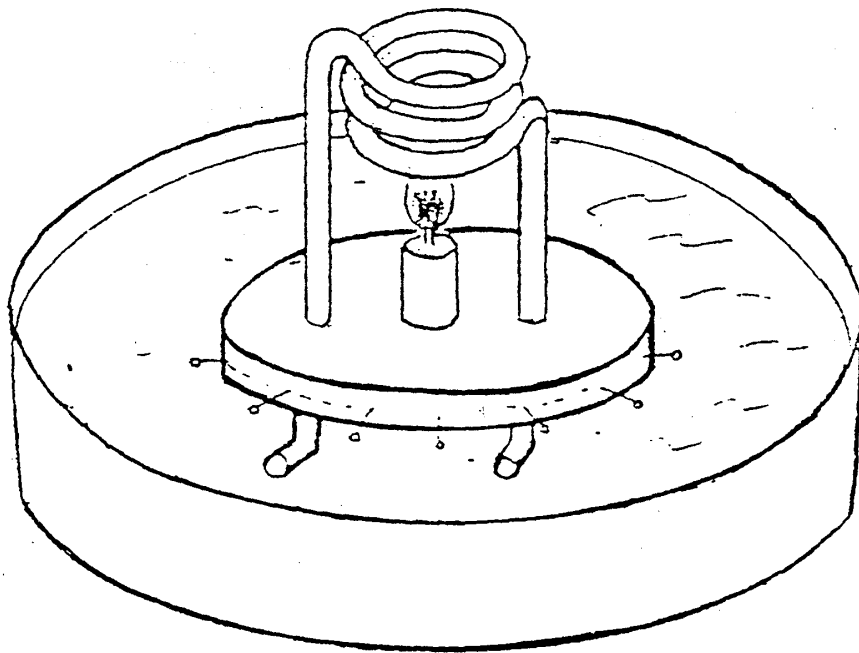


エネルギー劣化の縮小のために、例えば次のような可能性がある。

- 可能性1 過程において何かを温めるために“使いつくされる”エネルギーを可能な限り小さくするように注意する。例えば、車を止めるために運動エネルギーの余剰は摩擦によってエネルギーを使い果たす代わりに（発電機を使って）電気エネルギーに変換できる。
- 可能性2 さけがたいエネルギー損失を別な方法で使う。例えば、発電所の熱損失を家や養魚池を暖めるのに使う。
- 可能性3 我々が必要とするところでエネルギーを保つための断熱剤
例：魔法びん、家の断熱剤
- 可能性4 反対流の原理の使用による熱消失を最小にする注意。居間の暖かい（しかし、使い果たした）空気を冷たい新鮮な空気に変えるとき二つの壁を持った管を使うことができる。暖かい空気は外へ行き、入ってくる冷たい空気が温められる。

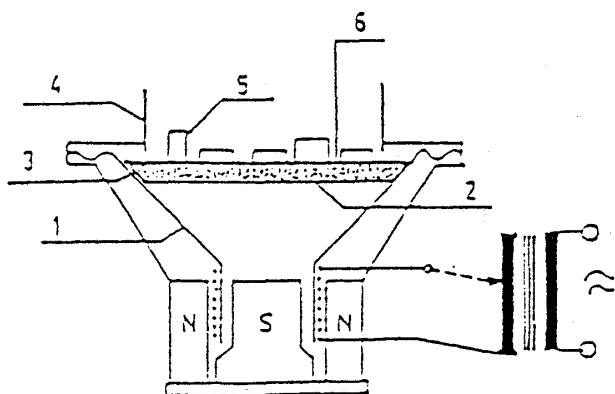
エネルギー劣化を縮小する上述の可能性について考えて下さい。さらなる例を見出すことを試みて下さい。

図表6 I6th の熱機関



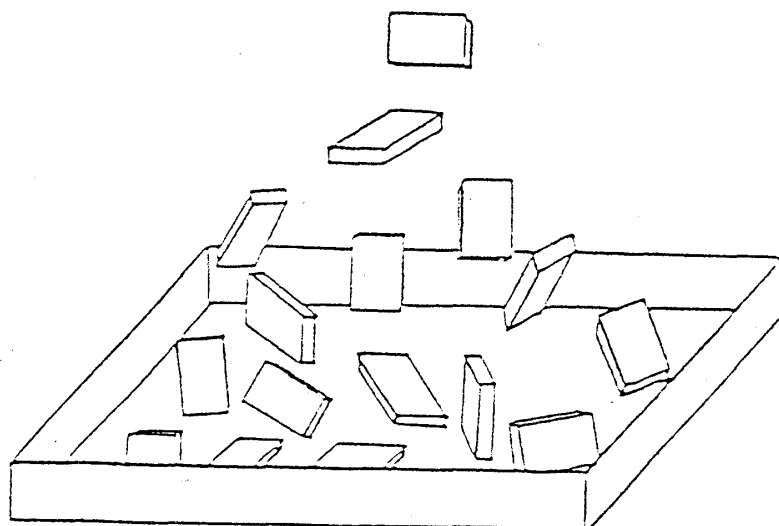
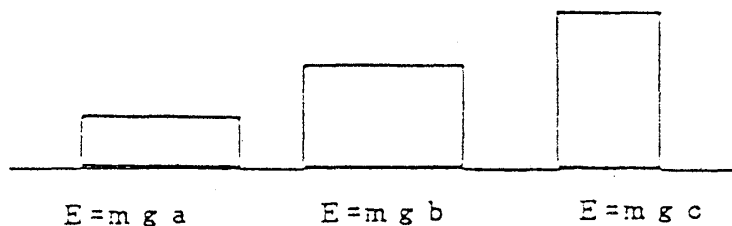
図表 7 Sokalski の実験¹⁷⁾

装置

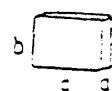


- 1. ラウドスピーカーの膜
- 2. 発泡スチロール板
- 3. にかわ
- 4. ブロック気体の容器
- 5. ブロック粒子
- 6. 硬い厚紙

ブロックの安定な状態

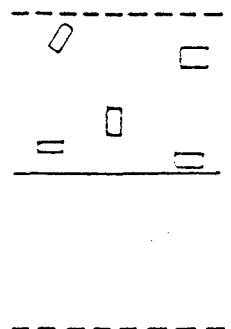
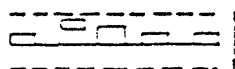


ブロック気体



$a = 3.93\text{mm}$
 $b = 7.00\text{mm}$
 $c = 10.04\text{mm}$

ブロック気体の運動



スピーカーにかける電圧を変えると振幅が変わる。
 それぞれの電圧に対して、 E_a , E_b , E_c の状態にある
 ブロックの数を数える。

図表8 教科書リスト

1. 書式説明

▽〔教科書コード〕 『教科書名』 出版社

(代表)著者名

別記著者名

2. 中学校 (入手した1冊のみ)

▽〔2理-732〕 『新編 新しい科学』 東京書籍

顧問	茅 誠司	藤井 隆	蓮沼 宏	
監修者	近角聡信	長倉三郎	江上信雄	海野和三郎
	水野丈夫			
その他	上田誠也	木水要治	小泉貞明	島田昌敏
竹村安弘	丹治一義	辻井達一	中西 稔	中村次郎
蜂谷 剛	原 襄	広瀬 弘	船元重治	三浦 登
綿坂邦彦	江里口博	上田 進	大澤啓治	川崎哲行
佐藤道幸	柴田恒郎	清藤義夫	高山茂治	武田一美
外ノ池善一	中原正木	堀田清史	宮川保之	山本信雄
若林慎治	東京書籍株式会社		ほか4名	

3. 高等学校

▽〔2-012〕 『精選物理』 東京書籍

近角聡信

田沼清一	長谷川博一	三浦 登	永嶺謙忠	小間 篤
豊田博慈	大川吉昭	荒川辰雄	東京書籍株式会社	

▽〔2-016〕 『改訂 物理』 東京書籍

近角聡信	田沼清一	長谷川博一		
三浦 登	永嶺謙忠	小間 篤	豊田博慈	大川吉昭
荒川辰雄	東京書籍株式会社			

▽〔4-017〕 『改訂 物理』 大日本図書

西川哲治				
有馬朗人	平川浩正	吉本 市	鈴木増雄	後藤道夫
高野茂宏	片岡謙寿			

伊達崎 広

▽〔7-013〕 『高校 物理』 実教出版

江沢 洋

沖山幸太郎 小田切理文 佐藤敏彦 鈴木 将 横田憲治
井口磯夫

▽〔7-018〕 『物理 改訂版』 実教出版

楠川絢一

高見頼郎 早川禮之助 沖山幸太郎 池原 宏 近藤正二郎
江平 清 小田切理文 内川輝臣

▽〔9-004〕 『物理』 開隆堂

富永五郎 朝倉利光
熊谷隼二 榊谷正行 辺見龍夫 太田三郎

▽〔9-019〕 『新・物理』 開隆堂

富永五郎 朝倉利光
熊谷隼二 榊谷正行 辺見龍夫 太田三郎

▽〔11-020〕 『高等学校 物理 改訂版』 学校図書株式会社

霜田光一

江渡明穂 中込八郎 平田邦男 広井 禎 宮沢弘成

▽〔15-021〕 『物理 改訂版』 三省堂

小出昭一郎 阿部龍蔵
有山正孝 宅間 宏 堀 素夫 大森賢三 小野祐一
武田祐治 前川法久

▽〔35-022〕 『高等学校 物理 新訂版』 清水書院

阿部聖仁 上坪宏道 市村宗武 阿部光衛
飯島 正 山本明利

▽〔61-008〕 『高等学校 物理』 啓林館

岡崎小天 大川章哉 斉藤晴男 鈴木 皇 中野薫夫
兵藤申一 山崎和夫 奥野 勉 倉庸康 日浦貫一
松山安重 (付記参照)

▽〔61-023〕 『高等学校 物理 改訂版』 啓林館

(入手していない)

自然の統一的認識におけるエントロピー的（熱学的）視点の重要性……

▽〔100-024〕 『物理 改訂版』 大原出版

福田信之 高野文彦

唐木 宏 藤崎達雄 青木秀夫 坂田正司

▽〔100-025〕 『高校物理』 大原出版

長原幸雄 藤崎達雄 生源寺希三郎 内川英雄 唐木 宏

青木秀夫 坂田正司 高橋 健

▽〔104-014〕 『高等学校 最新 物理』 数研出版株式会社

後藤憲一

小田 稔 宮本重徳 小暮隆夫 井上喜助

▽〔104-026〕 『改訂版 高等学校 物理』 数研出版株式会社

後藤憲一

小田 稔 宮本重徳 小暮隆夫

▽〔183-015〕 『高等学校 新物理』 第一学習社

木村仁泰

吉川圭二 中村英二 巻田泰治 室長大應 今岡 弦

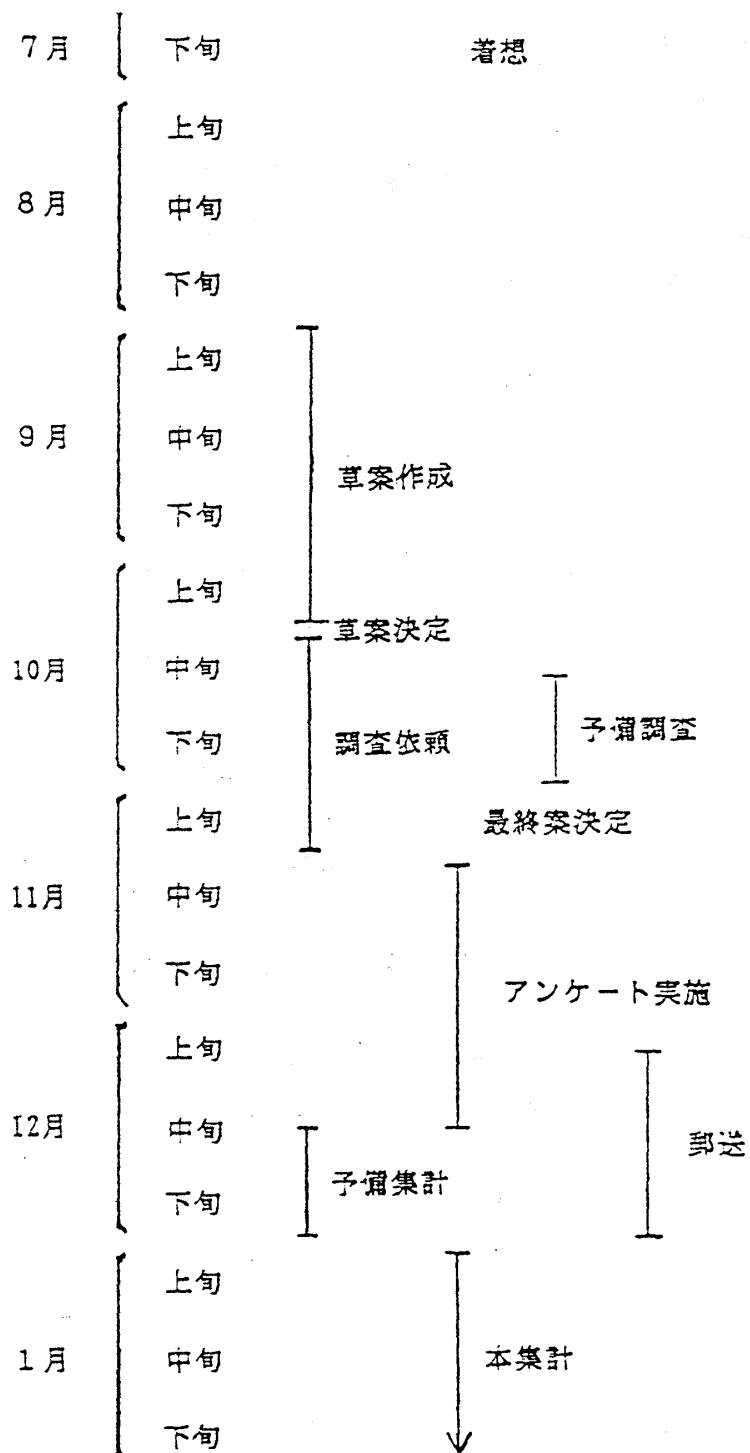
▽〔183-027〕 『高等学校 改訂 物理』 第一学習社

三宅和夫

福井崇時 佐川 敬 吉沢康和 藤本文範 福岡敏行

石川英雄 中神雅之 難波 陽 藤倉 済

図表 9 日程の概略



この日程は、昭和61年7月から昭和62年1月までのものである。

図表10 アンケート協力校リスト

1. 中学校	：葛飾区立	常盤中学校
		高砂中学校
		新小岩中学校
		小松中学校
		奥戸中学校
		私立 芝中学校
2. 高等学校	：愛知県立	古知野高等学校
		小牧工業高等学校
		小牧高等学校
		西春高等学校
		丹羽高等学校
		犬山南高等学校
		犬山高等学校
	東京都立	葛飾商業高等学校
	埼玉県立	北越谷高等学校
	私立	芝高等学校

図表11 アンケート結果 全体

A. エネルギー

	中学生	%	高校生	%	合 計	%
1	力	23.5	太 陽	22.3	力	21.1
2	太 陽	18.4	原子力	20.0	太 陽	20.2
3	電 気	13.3	力	18.3	原子力	15.3
4	石 油	11.8	熱	16.6	熱	13.9
5	熱	11.5	電 気	13.2	電 気	13.2
6	原子力	11.2	石 油	12.6	石 油	12.2
7	光	8.9	運動E	7.2	光	7.7
8	体 力	5.9	光	6.3	体 力	4.3
9	パワー	4.7	水 力	4.7	水 力	4.1
10	食 物	4.0	省エネ	4.6	パワー	4.1
無回答		16.1		10.9		13.7

B. 熱からの連想

	中学生	%	高校生	%	合 計	%
1	熱 い	31.7	熱 い	30.6	熱 い	31.2
2	火	23.3	風 邪	20.7	太 陽	20.7
3	太 陽	20.7	太 陽	20.7	風 邪	19.7
4	風 邪	18.8	火	14.1	火	19.0
5	湯	9.3	エネルギー	7.6	湯	7.9
6	体 温	8.2	湯	6.2	体 温	6.4
7	ストーブ	4.7	ストーブ	4.9	エネルギー	5.5
8	光	4.1	体 温	4.4	ストーブ	4.8
9	赤	4.1	摩 擦	4.1	赤	3.5
10	病 気	3.8	病 気	3.1	病 気	3.5
11	エネルギー	3.6	地 熱	3.0	光	3.4
無回答		12.6		15.6		14.0

中学生 1866人、高校生 1616人、合計 3482人

図表12a アンケート結果 エネルギー 中学生〔数値は%、（ ）内は人数〕

	連 想	1年男 (337)	1年女 (229)	2年男 (474)	2年女 (228)	3年男 (391)	3年女 (207)	合 計 (1866)
1	力	20.0 (67)	26.2 (60)	24.5 (116)	33.3 (76)	18.2 (71)	23.2 (48)	23.5 (438)
2	太 陽	14.8 (50)	8.7 (20)	19.8 (94)	21.1 (48)	19.9 (78)	25.6 (53)	18.4 (343)
3	電 気	13.6 (46)	13.1 (30)	16.0 (76)	11.8 (27)	11.8 (46)	11.1 (23)	13.3 (248)
4	石 油	16.0 (54)	11.4 (26)	15.0 (71)	7.0 (16)	10.0 (39)	7.2 (15)	11.8 (221)
5	熱	10.4 (35)	5.2 (12)	11.6 (55)	9.2 (21)	15.6 (61)	14.5 (30)	11.5 (214)
6	原子力	10.1 (34)	4.8 (11)	17.7 (84)	7.9 (18)	14.6 (57)	2.4 (5)	11.2 (209)
7	光	5.9 (20)	5.2 (12)	7.6 (36)	6.6 (15)	13.0 (51)	15.9 (33)	8.9 (167)
8	体 力	8.6 (29)	8.7 (20)	4.6 (22)	8.8 (20)	3.6 (14)	2.4 (5)	5.9 (110)
9	パワー	5.3 (18)	2.2 (5)	4.2 (20)	4.4 (10)	6.6 (26)	4.3 (9)	4.7 (88)
10	食 物	3.6 (12)	2.6 (6)	3.6 (17)	3.5 (8)	4.6 (18)	6.3 (13)	4.0 (74)
11	水 力	2.1 (7)	0.9 (2)	5.1 (24)	3.1 (7)	6.4 (25)	1.0 (2)	3.6 (67)
12	力リツ	4.2 (14)	3.5 (8)	5.3 (25)	2.2 (5)	1.8 (7)	1.4 (3)	3.3 (62)
13	省エネ	4.5 (15)	7.4 (17)	3.6 (17)	3.9 (9)	0.0 (0)	1.4 (3)	3.3 (61)
14	火 力	3.0 (10)	1.3 (3)	4.2 (20)	0.9 (2)	5.1 (20)	0.5 (1)	3.0 (56)
14	水	3.6 (12)	1.7 (4)	3.2 (15)	3.5 (8)	2.0 (8)	4.3 (9)	3.0 (56)
16	資 源	2.7 (9)	0.9 (2)	1.7 (8)	4.4 (10)	1.3 (5)	4.8 (10)	2.4 (44)
	無回答	16.6 (56)	30.1 (69)	12.0 (57)	16.2 (37)	12.3 (48)	15.9 (33)	16.1 (300)

図表12b アンケート結果 エネルギー 高校生〔数値は%、()内は人数〕

	連 想	1 年男 (221)	1 年女 (155)	2 年男 (309)	2 年女 (226)	3 年男 (513)	3 年女 (192)	合 計 (1616)
1	太 陽	26.2 (58)	41.7 (48)	15.2 (47)	23.5 (53)	18.1 (95)	30.7 (59)	22.3 (360)
2	原子力	23.1 (51)	20.6 (32)	21.4 (66)	5.8 (13)	24.6 (126)	18.6 (36)	20.0 (324)
3	力	15.4 (34)	21.3 (33)	18.1 (56)	29.6 (67)	12.3 (63)	21.9 (42)	18.3 (295)
4	熱	16.7 (37)	19.4 (30)	14.2 (44)	14.6 (33)	15.6 (80)	23.4 (45)	16.6 (269)
5	電 気	17.6 (39)	12.2 (14)	11.7 (36)	8.4 (19)	12.3 (63)	21.9 (42)	13.2 (213)
6	石 油	19.0 (42)	15.5 (24)	13.9 (43)	8.4 (19)	7.6 (39)	18.8 (36)	12.6 (203)
7	運動E	5.0 (11)	1.3 (2)	8.4 (26)	4.9 (11)	11.7 (60)	3.1 (6)	7.2 (116)
8	光	6.8 (15)	8.4 (13)	3.6 (11)	6.6 (15)	5.7 (29)	10.0 (19)	6.3 (102)
9	水 力	6.3 (14)	12.9 (20)	3.2 (10)	2.2 (5)	4.7 (24)	1.6 (3)	4.7 (76)
10	省エネ	6.3 (14)	1.3 (2)	4.2 (13)	7.1 (16)	3.7 (19)	5.7 (11)	4.6 (75)
11	位置E	1.8 (4)	0.6 (1)	3.6 (11)	3.5 (8)	8.6 (44)	1.0 (2)	4.3 (70)
12	資 源	3.6 (8)	4.5 (7)	5.2 (16)	4.0 (9)	1.4 (7)	4.7 (9)	3.5 (56)
13	火 力	4.5 (10)	7.7 (12)	3.2 (10)	0.0 (0)	4.3 (22)	0.5 (1)	3.4 (55)
14	パワー	5.9 (13)	0.6 (1)	4.2 (13)	2.7 (6)	3.3 (17)	2.1 (4)	3.3 (54)
15	加力	0.9 (2)	1.9 (3)	1.3 (4)	8.0 (18)	1.0 (5)	10.0 (19)	3.2 (51)
16	核	3.6 (8)	1.3 (2)	4.5 (14)	2.2 (5)	3.5 (18)	1.0 (2)	3.0 (49)
	無回答	5.4 (12)	15.5 (24)	12.6 (39)	18.6 (42)	9.4 (48)	5.7 (11)	10.9 (176)

図表13a アンケート結果 熱 中学生〔数値は%、（ ）内は人数〕

	連 想	1 年男 (337)	1 年女 (229)	2 年男 (474)	2 年女 (228)	3 年男 (391)	3 年女 (207)	合 計 (1866)
1	あつい	26.7 (90)	58.5 (134)	31.9 (151)	22.4 (51)	21.7 (85)	39.1 (81)	31.7 (592)
2	火	24.0 (81)	39.7 (91)	27.6 (131)	11.0 (25)	17.1 (67)	19.3 (40)	23.3 (435)
3	太 陽	18.7 (63)	21.0 (48)	30.8 (146)	13.6 (31)	15.6 (61)	20.8 (43)	20.7 (386)
4	風 邪	10.1 (34)	21.8 (50)	21.1 (100)	14.0 (32)	24.0 (94)	19.3 (40)	18.8 (350)
5	湯	9.5 (32)	14.4 (33)	7.6 (36)	5.7 (13)	8.2 (32)	13.5 (28)	9.3 (174)
6	体 温	6.5 (22)	16.2 (37)	9.5 (45)	3.9 (9)	5.6 (22)	8.7 (18)	8.2 (153)
7	ストーブ	5.6 (19)	3.1 (7)	6.1 (29)	1.3 (3)	6.4 (25)	1.9 (4)	4.7 (87)
8	光	5.3 (18)	3.9 (9)	3.4 (16)	2.2 (5)	4.1 (16)	6.3 (13)	4.1 (77)
9	赤	5.0 (17)	10.5 (24)	3.2 (15)	2.6 (6)	1.5 (6)	3.9 (8)	4.1 (76)
10	病 気	5.9 (20)	2.6 (6)	5.1 (24)	0.4 (1)	3.6 (14)	2.9 (6)	3.8 (71)
11	エネルギー	5.3 (18)	2.2 (5)	3.4 (16)	2.2 (5)	5.1 (20)	1.4 (3)	3.6 (67)
12	気 球	3.0 (10)	3.5 (8)	5.3 (25)	3.5 (8)	2.1 (8)	1.9 (4)	3.4 (63)
12	暖かい	5.6 (19)	3.5 (8)	2.5 (12)	3.1 (7)	2.8 (11)	2.9 (6)	3.4 (63)
14	沸 騰	1.8 (6)	3.1 (7)	2.5 (12)	3.1 (7)	1.5 (6)	2.9 (6)	2.4 (44)
14	電 気	0.9 (3)	2.2 (5)	2.1 (10)	1.8 (4)	3.1 (12)	4.8 (10)	2.4 (44)
16	炎	1.5 (5)	3.5 (8)	2.5 (12)	1.3 (3)	1.5 (6)	3.9 (8)	2.3 (42)
	無回答	16.0 (54)	24.9 (57)	8.2 (39)	3.9 (9)	13.3 (52)	11.6 (24)	12.6 (235)

図表13b アンケート結果 熱 高校生〔数値は%、()内は人数〕

	連 想	1 年男 (221)	1 年女 (155)	2 年男 (309)	2 年女 (226)	3 年男 (513)	3 年女 (192)	合 計 (1616)
1	あつい	25.3 (56)	32.3 (50)	32.4 (100)	34.1 (77)	26.3 (135)	40.1 (77)	30.6 (495)
2	風 邪	24.0 (53)	20.0 (31)	20.7 (64)	20.8 (47)	18.5 (95)	23.4 (45)	20.7 (335)
3	太 陽	29.4 (65)	33.0 (51)	11.7 (36)	27.4 (62)	14.6 (75)	21.9 (42)	20.7 (334)
4	火	20.4 (45)	13.5 (21)	14.2 (44)	17.3 (39)	9.4 (48)	16.1 (31)	14.1 (228)
5	エネルギー	8.6 (19)	9.0 (14)	5.5 (17)	4.4 (10)	9.2 (47)	8.3 (16)	7.6 (123)
6	湯	7.7 (17)	4.5 (7)	5.8 (18)	5.8 (13)	4.3 (22)	12.0 (23)	6.2 (100)
7	ストーブ	7.7 (17)	0.6 (1)	5.8 (18)	0.4 (1)	6.2 (32)	5.2 (10)	4.9 (79)
8	体 温	4.5 (10)	4.5 (7)	4.5 (14)	4.9 (11)	2.1 (11)	9.4 (18)	4.4 (71)
9	摩 擦	3.6 (8)	4.5 (7)	4.5 (14)	0.9 (2)	5.8 (30)	3.1 (6)	4.1 (67)
10	病 気	4.5 (10)	2.6 (4)	3.6 (11)	2.1 (5)	3.5 (18)	1.0 (2)	3.1 (50)
11	地 熱	5.4 (12)	5.8 (9)	1.9 (6)	1.8 (4)	2.5 (13)	2.1 (4)	3.0 (48)
12	赤	3.2 (7)	7.7 (12)	1.3 (4)	4.4 (10)	2.1 (11)	0.5 (1)	2.8 (45)
13	光	4.5 (10)	3.9 (6)	2.6 (8)	3.1 (7)	1.4 (7)	2.6 (5)	2.7 (43)
13	電 気	2.3 (5)	5.8 (9)	1.9 (6)	2.1 (5)	2.1 (11)	3.6 (7)	2.7 (43)
15	暖かい	3.2 (7)	1.9 (3)	3.2 (10)	0.4 (1)	3.3 (17)	1.0 (2)	2.5 (40)
15	やけど	1.8 (4)	0.6 (1)	1.9 (6)	1.3 (3)	3.3 (17)	4.7 (9)	2.5 (40)
	無回答	7.7 (42)	18.1 (28)	17.8 (55)	18.6 (42)	13.8 (71)	7.3 (14)	15.6 (252)

□□□□ 付記 □□□□

本論文 p.16 では、高校教科書は 17冊であると書いたが、これは教科書図書館にあったものが 17冊であったためである。また、図表 8 教科書リスト (p.45)において、〔61-008〕は信州大学教養部にあったもので、〔61-023〕が教科書図書館にあったものである。

尚、付録 4 (p.29) の指導書は、全て教科書図書館で筆写したものである。

教科書図書館：教科書研究センター付属 教科書図書館

(東京都) 本塩町20-2 Tel 03-355-3625 館 26