

科学的世界観を学習する 理科教育プログラム

個別と普遍の区別を意識した
科学概念形成へのアプローチ

平成 19 年度学部長裁量経費
成果報告書

平成 20 年 3 月

高知大学大学院教育学研究科理科専修
高知大学教育学部附属小学校理科部
高知大学教育学部附属中学校理科部

目次

前書きとして

科学的世界観を学習する理科教育プログラム(川崎) 1

総論

理科授業で出会う二つの自然観 (川崎) 5

実験体験

物理学実験体験 1 (普喜) 1 3

物理学実験体験 2 (國府) 1 9

化学実験体験 (蒲生) 2 4

生物学実験体験 (原田・伊谷) 2 6

地学実験体験 1 (田中) 3 5

地学実験体験 2 (赤松) 4 1

平成 19 年度学部長裁量経費

学部・附属共同プロジェクト研究報告

科学的世界観を学習する理科教育プログラム

一個別と普遍の区別を意識した科学概念形成へのアプローチ

研究代表者：川崎 謙

高知大学教育学部

1. 研究目的

本報告書は、平成 19 年度学部長裁量経費の配分を受けて実施された、学部・附属共同プロジェクトの成果に基づいている。本研究は、以下に述べる 3 つの目的を設定した。第 1 の目的は、「科学的見方や考え方」すなわち「科学的世界観」について、実際の理科授業に即して考察し、理解を深めることである。

周知のごとく、小学校および中学校の学習指導要領（理科）の目標は「科学的見方や考え方を養う」と結ばれている。さらにこの結びは、ごく近い将来に予定されている学習指導要領の改訂においても変更されていない。この事実は、この目的の授業実践における意義を示している。

この「科学的世界観」についての理科授業に即した考察は、中学校理科において顕著に増加する理科嫌いについての具体的な対処法への手がかりともなるはずである。なぜなら小学校理科に比較して、中学校理科において

「科学的見方や考え方」と直接かかわりあう教材がやはり顕著に増加しているからである。これら 2 つの因子がほぼ同時に増加する傾向を示すことは、これら 2 つの間に何らかの関連があることを示唆していると思われる。もしこの関連を具体的に把握することが出来るなら、理科教育に携わる総ての人々にとって喫緊の要事である「理科嫌いの増加」に対処する何らかの手がかりが得られるであろう。こうした手がかりを得る過程において、小学校理科と中学校理科の連携のあるべき姿が像を結ぶはずである。この像を具体的に描いて見せることが、本研究の第 2 の目的である。

この第 2 の目的を達成するために、教育学研究科理科専修教員と附属小学校と附属中学校の理科担当教諭が全員研究分担者として参加し研究体制を築いた。こうした体制で研究を深めることそれ自体、学部・研究科と附属学園との連携をよりいっそう緊密にするはずである。本研究の第 3 の目的をこのように設

定した。

2. 研究の実施

必要な準備期間の後，当教育学部附属小学校と中学校の理科教諭を対象に，理科専修に

所属する全教員が講義・演習実験を行うという形式で実施された。平成19年12月15日を初日として，平成20年1月26日に終了する全3日におたる日程と，担当者および講義・演習・実験体験の表題を以下に示す。

学部・附属共同プロジェクト日程

	12月15日(07)	1月12日(08)	1月26日(08)
09:45-12:00	川崎謙 計画の全体説明 および世界観とは	國府俊一郎; 普喜満生 物理実験体験	田中秀文; 赤松直 地学実験体験
13:00-15:00	川崎謙 教科書に見る 世界観の相違	蒲生啓司 化学実験体験	全員 総括
15:30-17:30	川崎謙 世界観の比較	原田哲夫; 伊谷行 生物学実験体験	全員 報告書作成準備

初日は，理科授業実践において通常は表立って意識されない「科学的世界観」に注意を向けさせるために，比較科学論（川崎 2005, 6）の立場からの講義に費やされた。世界観の辞書的説明に始まり，日米の初等教育教科書の記述を比較することによって，彼我の世界観の相違を浮き上がらせ，科学的世界観に対する理科を深めた。この部分に相当する報告は，こうした理科の授業で必然的に出会う複数の世界観についての理解を深めるための基礎を与える目的で作られている。

続く2日目と3日目の午前には，自然科学4分野の立場から実験体験が企画されている。これらの時間帯で実施されたのは，自然科学

の各分野について，小・中の理科担当教諭が経験しておくことが望ましいという基準で選定された課題に基づく実験ではない。課題は，小・中の「理科」を意識して選らばれることはもちろんであるが，その実験的活動において科学的世界観が頭になりやすいという基準で選ばれている。言い換えれば，科学的世界観が明示的に要求される結果，教師自身が混乱する（時には混乱それ自体に気づいていない）教材が注目された。このような実験的活動を通して，小・中理科の担当教諭は科学的世界観に自覚的に導かれることが期待される。これは本プロジェクトの第一の目標に他ならない。それぞれの実験体験の詳細は，各担当

者の報告に記載されている。

本研究の実施には、理科専修に所属する学部教員 9 名と、附属小・中学校の理科担当教

諭 6 名からなる計 15 名が携わった。研究代表者と分担者の所属と氏名は下記の通りである。

研究代表者：川崎 謙	高知大学教育学部（理科教育）
研究分担者：三宅 志保	高知大学教育学部（理科教育）
國府 俊一郎	高知大学教育学部（物理学）
普喜 満生	高知大学教育学部（物理学）
蒲生 啓司	高知大学教育学部（化学）
原田 哲夫	高知大学教育学部（生物学）
伊谷 行	高知大学教育学部（生物学）
田中 秀文	高知大学教育学部（地学）
赤松 直	高知大学教育学部（地学）
中城 満	高知大学教育学部附属小学校（理科）
小島 ふみ子	高知大学教育学部附属小学校（理科）
田鍋 潤一郎	高知大学教育学部附属小学校（理科）
高橋 ゆい	高知大学教育学部附属中学校（理科）
山中 孝一	高知大学教育学部附属中学校（理科）
三好 和男	高知大学教育学部附属中学校（理科）

当然のことながら、講義・演習・実験体験の受講者である附属教諭は、文字通りの受講者ではない。本研究の研究分担者として、常に自由な疑問や討論を提起することが期待されている。講義・演習・実験体験の受講者から提起された疑問それ自身、このプロジェクトの成果の核心を成すとも言えるのである。

研究分担者たる受講者がこの期待に応えた事情は、次節「**3. 主たる成果の概要**」の質問リストからも十二分にうかがえる。第 2 日目から 3 日目の午前にかけて行われた「物理

学・化学・生物学・地学実験体験」の時間帯においても、本研究の趣旨に沿う積極的な質問が提起された。これらの質問は、それぞれの報告において記述されている。

3. 主たる成果の概要

以下に、本プロジェクトの主たる成果の概要の特徴を示すものとして、本プロジェクトの初日の講義において、研究分担者たる附属小・中学校の教諭から提起された質問の一覧である。

◇ 虹の色は何色？太陽の色を何色であらわすか？などは異文化によるものか。

- ◇ 言語の数だけ世界観がある，似た言語なら世界観も似ているのか。
- ◇ そもそも文化とは何か。
- ◇ 認識が母語に左右されることはとりあえず認めよう．だとすれば，多くの言語を知っている人はいろいろな見方ができるのか，あるいはしているのか。
- ◇ 中学1分野における「自然を愛する心情」の内容は？
- ◇ 「科学的な見方」についての明確な答えはあるのか。
- ◇ 科学とは？・・・世界中誰もが同じように見られるもの．だれでも納得できるものではないのか。
- ◇ 理科が異文化体験にいいことは認めよう．だとすれば，数学はどうか。
- ◇ 小・中の理科の不連続性を克服する方策は？中学校の教諭は小学校の内容を知らないのではないか．内容の不連続性なのか．学ぶ子どもの能力の不連続性なのか
- ◇ 自然と“nature”は本当に違うのか。
- ◇ 西欧自然科学的な考えを持った子どもが「アイデア」「物質」の峻別をしているか？
- ◇ 「誤差」は物質界の出来事であることは分かった．だとすれば，オームの法則のデータと直線は物質界の中だけで説明ができないか？

当日は，このように提起された問題についてかなりの時間を割いて解説を加えた。ただし，一つ一つの質問に対して為された担当者の解説を詳述はしない。なぜなら，これらの質問の興味は多岐にわたっていることの当然の結果として，解説の及ぶ範囲も本報告書にまとめるには広すぎ，散漫の印象を与えかねないからである。それに，なによりも解説を加えた当の担当者自身，これら総ての質問に

対して完璧な解説を加えることが出来たとは思っていない。

とはいえこれらの質問は，「科学的世界観」を理解しようとする理科授業の実践者の興味が，比較科学論の立場から示され始めていることをよく示している。言い換えれば，この種の質問が理科授業の実践者から具体的に提起された事実こそ，本プロジェクトの成果なのである。

参考文献

川崎謙(2005).『神と自然の科学史』講談社.

理科授業で出会う二つの自然観

——言葉に埋め込まれている自然観——

担当者：川崎 謙

実施日：平成 19 年 12 月 15 日

9：45～16：30

場所：教育学部附属教育実践総合センター・スキル実習室

1. はじめに—国民国家の観点から

本論考は、我が国では理科教育と呼ばれている科学教育 (science education) に、政治単位としての国民国家 (nation-state) の観点から光を当てる試みである。このような考察を試みるのは、科学教育が我が国も含めたほとんど全世界の国民国家において、当該国民国家の責任の下に実施されているからである。

遅くとも 19 世紀に西欧で成立した国民国家が、国家的帰属意識 (nationalism) と民族的帰属意識 (ethnicity) との相克のために、その意義を現在では相対的に低下させていることは事実であろう。とはいえ、国民国家が科学教育に対して持つ意義は成立以来変わっていない。

義務教育—もちろん科学教育が含まれている—に責任を持つ政治単位としての国民国家は、以下の三つの特徴を持っている。

1. 個人としての国民は、政治的な自己決定力を持つ。
2. 国民の福利厚生を向上させるために、現代科学技術を導入する。
3. 普遍文明に対して、個別文化の優位性を主張する。(コーン 1990)

本論の文脈からして、とりあえず自己決定力に関する最初の特徴は措く。強調しておかなくてはならないことは、現在世界的規模で、当該国民国家の責任において奨励されている科学教育は、第 2 の特徴に基づく国民国家の要請なのであって、西欧自然科学それ自体に内在する価値によるのではないという事実である (Kawasaki 1996; 川崎 2005)。

2. 問題の所在

科学教育を実施するうえにおいて問題が生じるのは、西欧自然科学を育んだ伝統を持たない文化圏—非西欧文化圏 (Kawasaki 1996; 2002)—に成立した国民国家においてである。我が国はその典型であり、19 世紀の後半以降「文明開化」という標語の下に、西欧自然科学技術の導入と、それを可能にする科学教育の基盤を整備することに努めてきた。これを可能にしたのが、西欧自然科学を「普遍的であり誰もが学ぶべき学問」と見なす、西欧自然科学観であることはいままでのない。

しかし、ほとんど総ての非西欧国民国家において、この西欧自然科学観と第 3 の特徴との間に生じる矛盾は、現代科学技術の導入と

いう火急の要請の前に見過ごされてしまうのが常である。現代科学技術の導入を図れば、それに何らかの普遍性を認めるほかはない。

しかし、普遍性を認めること自体、第3の特徴として個別文化の優位性を主張する国民国家の存立を危うくするのである。あえて付け加えれば、第2と第3の特徴が矛盾しないのは、普遍文明として西欧自然科学を育んだ文化的伝統を持つ西欧文化圏における国民国家のみである。本論が提起しようとしている問題は、非西欧国民国家の科学教育が共有する問題でもある。

3. 科学主義・文化相対主義

我が国をはじめとする非西欧文化圏の国民国家が共有している「普遍的であり誰もが学ぶべき学問」という科学観は、「西欧自然科学それ自体に学ぶべき価値が含まれている」という誤解に直結する。この誤解の責任は、こういう科学観に基づいてしか西欧自然科学を受容できなかった我が国をその典型とする非西欧文化圏の国民国家の方にある。とりあえずは、西欧自然科学の普遍性を自ら標榜した西欧文化圏の住人の責任を問わないとしても、

こうした誤解から身を守ることができるかどうかは、西欧自然科学を相対的眺望において理解できるかどうか依存する。ここにいう「守る」とは、先の特徴3に基づいている。すなわち、「普遍文明」の役割を果たしている西欧自然科学に対して、「個別文化である非西欧文化の優位性を主張する」ことを前提として、西欧自然科学は相対的眺望に置かれなければならない。

西欧自然科学を相対的眺望におくとは、それを多くの「世界を理解する様式」の内の一つとして理解することである。この理解は現状では、「普遍文明として世界を解釈する」西欧自然科学に対して、個別文化としての「世界解釈の様式」を対置することとして立ち現れるであろう。川崎（2005）が『神と自然の科学史』で試みたことは、我が国の伝統的な世界解釈の様式を「諸法実相の枠組み」と名づけ、西欧自然科学の世界解釈の様式を「“Logos”の枠組み」と名づけて、それらを対置することであった。

西欧自然科学を相対的眺望に置くことと対蹠的な態度を挙げることは、「西欧自然科学を相対的眺望に置くこと」についての理解を深めるであろう。そのような態度とは、先に言及した「普遍的であり誰もが学ぶべき学問」と西欧自然科学を見なす態度であり、「西欧自然科学それ自体に学ぶべき価値が含まれている」という西欧自然科学観である。

この態度は、「西欧自然科学は唯一の正しい世界の解釈である」ことを受け入れる、科学主義“scientism”にその根拠がある。非西欧文化圏国民国家のすべてが、特徴2に基づいて西欧自然科学を受け入れる際に根拠とした西欧自然科学観でもある。今日では、こうした西欧自然科学観に対する反省が世界的規模で始まっている（川崎 2007）。ただし本論では、科学教育におけるこの新しい潮流についての言及は行わない。

4. 教育の言語環境

論点を明確にするために、以下の議論を義

務教育に限ることとする。したがって、「教育」は、義務教育を意味すると理解されたい。

国民国家が教育の責任を担う結果として、各教科の授業は原則として国語で行われることが望ましい。国民国家という概念を18世紀後半に成立させた西欧においては、各国語こそ、普遍文明であるラテン語に対してその優位性を主張して成立した個別文化であった（コーン 1990）。教育における国語の使用は、国民国家が帝国という統治形態からの自立を主張して成立した事情と深く関わっている。

逆にいえば、国語という概念は国民国家を成立させる要件として成立したのである。国民国家としての我が国も、「日本語」という国語を必要としたのである（田中 1997, 116）。それ以後、国語施策と国語教育とは互いに協調する歴史を刻み始める（倉島 2002, 16）。なぜなら国語の学習は、国家的帰属意識を育む最も効果的な手段だからである。国民国家として成立した我が国の教育においても、教師と児童生徒の第一言語（＝母語）である国語としての日本語の使用は当然のことと考えられている。

あらゆる国民国家で、「教授言語は国語であることが望ましい」という主張は、科学教育の観点からすれば、ほとんど解決不可能な問題を引き起こしてしまう。この問題がどれほど深刻であるかは、私たちにとって大変想像し難い問題である。我が国の言語環境においては、「国語」、「公用語」、「第一言語」の区別を立てる必要を意識する局面はないといってよい。我が国の言語環境においては、国語と公用語の区別を意識する必要はないし、たと

え「土佐弁」を第一言語としていても、「伊予弁」を第一言語とする「日本人」との間で意思の疎通に困ることはない。

これに対して、筆者の友人であるフィリピン人科学教育研究者の言語環境は、私たちの想像の範囲を超えて複雑である。まず、フィリピン中部のイロイロ出身の氏の第一言語はイロンゴ語である。このような第一言語として数えうる言語は、国民国家としてのフィリピンにおいては優に100を超えているとされる。この友人の第一言語であるイロンゴ語は、国語でもなく公用語でもない。国語の扱いを受けているのはフィリピン語であり、公用語は国語に加えて英語なのである。

こうした言語環境を仮に日本に置き換えれば、次のようになるだろう。まず、「土佐弁」と「伊予弁」など異なる日本語方言の使い手の間では意思の疎通が不可能であるとしよう。このような言語環境で国民国家として纏め上げるための妥協の産物として「江戸弁」を国語とし、公用語にはこの国語に加えて、文化的伝統には何の関係もない英語を使用しているという例えが、フィリピンの言語環境については成立する。土佐弁の使い手と伊予弁の使い手が意思の疎通を図る場合には、英語が手っ取り早い方法なのである。

5. 理科の教授言語

理数教育において、児童生徒の第一言語を使用していない国民国家を挙げることは、さほど困難ではない。先のフィリピンでは、「科学」の教授言語は英語である。さらに別の友人の出身地であるモザンビークでは、ポルト

がル語である。この国は 20 近い主要な部族がから成り、それぞれが異なる部族後を持っている。その妥協の産物として、旧宗主国の言語であるポルトガル語が教授言語として選ばれたのである。

興味深いのは、マレーシアの場合である。国語は、マレーシア語 (Bahasa Malaysia) である。児童生徒の第一言語は、マレー語 (Bahasa Melayu)、中国語、タミル語などである。なお、マレー語は地域を基盤とした自然言語、マレーシア語はマレー語とほぼ同じと考えてよいが、国語としてより規範性が強いといった使い分けがなされていると思えばよい。

マレーシアでは、1957 年の独立以来、1980 年まで、理数教科の教授言語は旧宗主国の言語である英語であった。その後 1980 年以来 2003 年まで、理数教科は国語であるマレーシア語で教授された。マレーシア語を教授言語として採用にあたっては、周到な準備がなされている。その一例として、1970 年、クアラルンプール郊外に設立された、ケバンサーン大学 (Universiti Kebangsaan Malaysia, UKM) を挙げることができる。およそ 40 年前の歴史を持つ建学の精神は、「マレーシア語の自主独立性を守るとともに、個別文化とのかかわりにおいて智識を国際的に通用する事柄にすること」である。以来 UKM は、マレーシア語があらゆる方面の大学教育において効果的であることを証明し続けてきた (Abdullah & Yahaya 2006)。

このような流れは、2003 年に大きく変化した。理数教科の教授言語として英語を採用す

ることが始まり、今年 2008 年がその完成年である。我が国の小学校から高等学校に相当する学年の理数科教育は今年から、少なくとも制度の上では、英語で教授されているのである。私たちは、明治 19 年 (1896) に教科として理科が成立して以来、教授言語に関連する問題をほとんど意識して来なかった。

6. 世界観と言語

西欧自然科学と深く係わりあいながら学習を進めてゆく理科は、小学校理科においても、中学校理科においても「科学的見方や考え方を養う (平成 10 年度版)」ことがその目標である。また、ごく近い将来改訂が予定される学習指導要領案においても、この文言がそのまま残されている (参考文献 URL 参照)。このことは、理科において「科学的見方や考え方を養う」ことがどれほど重要であるかを物語っている。

このように重要な「科学的見方や考え方」とは、一つの世界観であるといえる。世界観とは、世界を見、解釈する仕方なのだから。構造主義は、この仕方と言語との間には分かちがたい関係があるとする立場を採る。

人間は生のあるがままの素材の世界と、直接ふれることはできない。素材の世界とは、混沌とでも、カオスとでもいうべき、それ自体は無意味の世界であって、これに秩序を与え、人間の手におえるような、物体、性質、運動などに仕立てる役目を、ことばがはたしていると考えざるを得ない。(鈴木 1973, 40)

国語としての日本語は、日本語に独特の仕方
で「それ自体は無意味の世界」を秩序付けて
いるのである。

日本的世界観とは、この日本語に独特の秩
序である。日本語を共有することによって、
世界を見る独特の仕方、すなわち世界観を共
有するのである。いうまでもなく、日本文化
とはこの世界観に基づく社会的・個人的表現
である。

7. 科学の言語

だとすれば、「科学的見方や考え方」を科学
的世界観と把握しなおすことによって、この
世界観は何らかの言語が要請する秩序である
ことが分かる。この言語こそ、ウォーフ(1978,
71)が表現した「平均的ヨーロッパ標準語
Standard Average European, SAE」なので
ある(川崎 2005, 54)。この言語を一括して
「西欧語」と呼ぶことにすれば、「科学的見方
や考え方」は、西欧語が「それ自体は無意味
の世界」に持ち込んだ秩序なのである。

この秩序の特徴は、プラトニズムの術語を
使えば、「イデア界」と「物質界」の二項対立
である。これら二つの領域は、それぞれの世
界の出来事を捉える器官によって峻別される。
「イデア界」の出来事は理性によってのみ捉
えられるのに対して、「物質界」の出来事は五
感によって捉えられる。秩序としての「科学
的見方や考え方」に従えばこの区別は厳密で、
五感によって捉えられる事柄は「イデア界」
の出来事ではありえず、その逆もまた然り
である。

この秩序が言語の特徴として現れるのは当

然である。本論考の文脈から重要な特徴は、
西欧語における冠詞の存在である。ラテン語
には定冠詞がないという細かい議論は措く
として(金谷 2004, 160)、西欧語の代表とし
て英語に注目することにし、“man”という名
詞を例に採ることにする。英語では、“man, a
man, the man, men, the men”という5種類
の“man”に関する表現があり、それらは適宜
に区別されて使用される。これら5つの
“man”の内、「イデア界」の出来事を表すの
にもっともふさわしいのは“the man”である
と思われる。英語を第一言語とする話者は、
それが「イデア界」の出来事であるか「物質界」
の出来事であるかを瞬時に判断し、現実の文
脈に沿って最もふさわしい冠詞との組み合わ
せを選んでいるのである。

これとは対照的に、我が国語ではそもそも
冠詞を使用しない。単数と複数の区別すらし
ないといってよい。日本語で“man”に相当す
る名詞は「人」であるが、冠詞との組み合わ
せで5種類もの表現を作る機能はない。「そ
の人」とか、「ある人」くらいの区別をするに
しても。

その結果、日本語で「科学的見方や考え方
を養う」事を試みるとき、何よりも決定的な
のは「イデア界」の出来事を表す“the man”
に当たる表現法がないことである。この言語
的事実は、日本の伝統的世界観が科学的世界
観の基礎となる二項対立的世界を構築する伝
統にないことの一つの現れにほかならない。
これこそ、理科の教授言語が国語であること
に起因する認識上の問題であり、非西欧文化
圏の国民国家に共通する問題であるといつて

よい。

8. 理科で遭遇する2つの世界観

理科の授業を日本語で受ける児童生徒は、2つの世界観に曝されているとって過言ではない。その1つは国語としての日本語が持ち込んだ伝統的な世界観であり、これは教授言語によって知らず知らずの内に持ち込まれる。他の1つは「科学的見方や考え方」と同義である科学的世界観であり、教授の目的である。

念のために再説すれば、科学的世界観は「アイデア界」と「物質界」の二項対立的世界観であり、この世界観に基づく表現方法を西欧語は組み込んでいる。他方、日本の伝統的世界観はこのような二項対立的世界観とは異質であって、日本語にはこれを表現する確立された方法はない。このことは、日本語を教授言語とする理科においては、教師の言葉遣いに何らかの工夫が必要であることを意味している。なぜなら日本語は、「科学的見方や考え方」を行うという観点からすれば、ふさわしくない言語だからである。

例えば、メダカには雌雄があるという学習を考えてみよう。これは、現行学習指導要領に示されている、「第5学年A 生物とその環境」に沿った学習である。与えられたメダカを観察した児童は、眼前のメダカ(the killifish in the beaker)からより一般的なメダカ(killifish)へと「メダカ」を抽象化し、最終的にはアイデアとしてのメダカ(the Idea of killifish)を捉えることが期待される。少なくとも、「科学的見方や考え方」を養う観点から

すれば、このように期待されなければならないのである(川崎 2005, 68)。

こうした抽象化の度合いを高める過程のそれぞれの段階において、“killifish”をふさわしい冠詞と組み合わせることによって抽象化の段階が異なっていることを表現することが出来る。しかし、「メダカ」は常に「メダカ」なのだから、このような表現による区別が出来ない。

この主張に対してすぐに予想される反論は、「それぞれの段階における『メダカ』の区別は、文脈によって適切に行われている、だから問題はない」というものであろう。そしてその通りであると賛成もする。ただし、この主張が通用するのは、「科学的見方や考え方とはどういうことか」をあらかじめ知っている教師のみである。なるほど教師は、授業が進むにしたがって、「メダカ」に関する自身の言葉遣いにおける抽象化の段階が進んでいることを意識しているであろう。しかし、学習者である児童生徒は「科学的見方や考え方とはどういうことか」を知らないのである。だからこそその学習なのだから。

9. メタ言語の役割

日本語は、科学的世界観に従う秩序を「それ自体は無意味の世界」に持ち込まない。このことが言語としての不完全性を意味しないことはもちろんのことである。私たちは、誇りを持って日本語を国語として使い続けられたい。ただしこのままでは、理科の教授言語としてふさわしくはない。

この問題を克服するためには、先に鈴木孝

夫を引用して論じた、言語と世界観の不可分性に立ち戻らなければならない。確かに言語と世界観は不可分であるが、言語がその世界観に常に閉じ込められているわけではない。言語は、持ち込んだ秩序に縛られることなく、その秩序（＝世界観）を自由に超えることが出来るのである。

その証拠は、第7節科学の言語の「この秩序の特徴は」から始まる第2段落にある。この段落は紛れもなく日本語で書かれているが、その記述の対象は科学的な世界観である。日本語は、二項対立的世界観秩序を持ち込むことはないが、二項対立的世界観秩序について語ることは可能なのである。

世界観についてこのように語る言語を、メタ言語と呼ぶことを提案したい。メタ言語は、もともとタルスキー(Tarski, A.)によって導入された(タルスキー 2004, 68)。これに従えば、メタ言語とは「言語について語る言語」である。たとえば、「日本語に冠詞は存在しない。」という日本語で書かれた、日本語についての記述はメタ言語である。もちろん、「英語には冠詞がある。」という日本語で書かれた英語についての記述もメタ言語である。今回の提案は、言語と世界観の不可分性に基づいて、世界観についての記述もメタ言語と呼ぼうというものである。

もし教師が日本語を教授言語とする理科においてメタ言語の使用に習熟すれば、「日本語は理科の教授言語としてふさわしくない」という問題の克服が可能になる。ただし、この習熟のためには、「日本語が持ち込んでいる世界観秩序と、科学的な世界観秩序の差異を理解

していること」が理科教師の必須の素養となる。そして、この差異を理解するために必要なのは、「科学を教えることに携わる理科の教員こそ、日本の伝統的世界観、自然観を意識的に学習しておかなければならない」という戦略である。

この問題は、理科が我が国において名実ともに成立した明治19以来(1886)提起されたことがない。その結果として、現在の理科教師にその素養が欠けていることは疑いない。とはいえ、「この問題の責任は個々の理科教師にはない」ということを急いで付け加えておかなければならない。この問題の最大の責任は、教員養成課程のカリキュラムにあり、敢えて言えば、教員養成課程に勤務する教員の志にある。

10. 結語として

教員養成課程は、「日本語が持ち込んでいる世界観秩序と、科学的な世界観秩序の差異」を理解させることを主眼に置くという点において、研究者養成を事とする理学部・理学研究科との決定的な差異を生じる。科学の研究者と理科の教師の違いは、日本の伝統的自然観を意識的に学んでいるかどうかである。極論すれば、科学の研究者にとって日本の伝統的自然観などは捨て去った方が勤勉な仕事が可能かもしれないのである。ただしその研究者は、文化的帰属意識の喪失という代償を払わなければならないが。

もし世界観秩序の差異に焦点を当てた理科教師の養成に成功すれば、非西欧国民国家においては相矛盾するよう見た国民国家の特

徴 2 と 3 を同時に達成させることが出来る。ただしこのためには、他ならぬ理科の教員養成課程において、日本の伝統的世界観に関する講義演習が不可欠となる。

これは、学生の立場から見れば新たな課題が課されることを意味する。またカリキュラムの立場からすれば、いわゆる「ゼロサムゲ

ーム」が展開されることであろう。この問題を単なる「ゼロサムゲーム」として終わらせないためにも、今一度教科としての理科の存在意義を、現場の立場からも、教員養成の立場からも、真剣に考察しておかなければならないのである。

参考文献

- ウォーフ, B. L. 著 池上嘉彦訳(1978). 『言語・思考・現実』弘文堂.
- 金谷武洋(2004). 『英語にも主語はなかった』講談社.
- 川崎謙(2005). 『神と自然の科学史』講談社.
- 川崎謙(2007). 科学教育における日本型自然観の位置づけ, *理科の教育*, 56(2), 8-11.
- 倉島長正(2002). 『国語100年』小学館.
- コーン, K. (1990) 「ナショナリズム」ウィーナー, P. 編『西洋思想大辞典 第3巻』平凡社, pp.435-448.
- 鈴木孝夫(1973). 『ことばと文化』岩波書店.
- 田中克彦(1997[1981]). 『ことばと国家』岩波書店.
- タルスキー, A. 著 飯田隆訳(2004[1987]). 「真理の意味論的観点と意味論の基礎」坂本百大編『現代哲学基本論文集Ⅱ』勁草書房.
- Abdullah, I. H. & Yahaya, M. (2006). Facing up to Teaching and Learning of Science and Mathematics in English at Universiti Kebangsaan Malaysia, *11th Annual International Conference 2006*, Sultan Hassanah Bolkuah Institute of Education, Universiti Brunei Darussalam.
- Kawasaki, K. (1996). The Concepts of Science in Japanese and Western Education, *Science & Education*, 5(1), 1-20.
- Kawasaki, K. (2002). A Cross-Cultural Comparison of English and Japanese Linguistic Assumptions Influencing Pupils' Learning of Science, *Canadian and International Education*, 31(1), 19-51.
- Kawasaki, K. (2007). Towards Worldview Education beyond Language-Culture Incommensurability, *International Journal of Science and Mathematics Education*, 5(1), 29-48.
- URL : http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/080216.htm (平成20年2月参照)

物理学実験体験 1

— 加速度運動をめぐって —

担当者：

普喜 満生

実施日：平成 20 年 1 月 12 日

9:45～10:45

場所：教育実践総合センタースキル実習室

物体の運動の分野から加速度運動を取り上げる。加速度運動の実験ではよく落下や斜面などが使われるが、今回摩擦のある床（水平な運動場やマットの敷いてある床など）を使ってボールの制動の実験を行った。

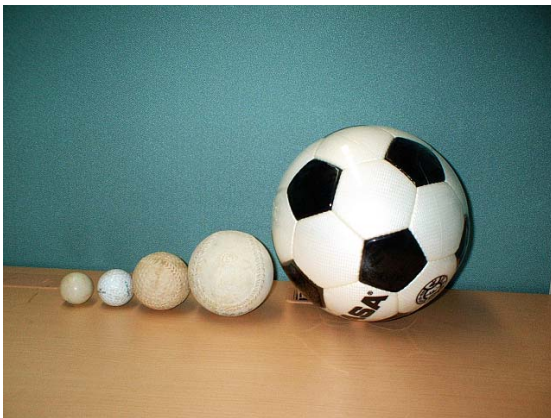


写真 1 用意したボール

ボールは小・中学校で馴染み深いものを使用した（写真 1）。実験では、2 人程度のチームとし、ボールを転がして止まるまでの制動距離と制動時間を測定する。記録の前に、ボールを転がす練習をしておくとうい。ストップウォッチで時間を、巻尺で距離を計測する。それぞれを L と T とすると、データを 8 点く

らいとり、グラフ用紙上にプロットするとよい。また長距離、中距離、短距離のデータをバランスよく取るようにするとよい。

実験を始める前に時間 T と距離 L の関係の予測を行った（資料 1-1）。次に、実験を行って実験のデータを記録しグラフ上に書いた（資料 1-2）。このグラフ上で L と T の関係を先ほどの予測と比べ考察した。資料 1-2 ではグラフの横と縦を距離と時間としているが、このグラフ用紙はトレーシング用紙を用いたので、裏返せば時間と距離の関係も見ることができる。データのプロット例を図 1 に示す。

実際にはデータがばらつくので解釈が難しい。しかし、2 次曲線を描いてガイドラインとすることで、2 次式がその背後にあることを説明する。さらに高校レベルでは摩擦のある運動として 2 次式の加速運動で説明できることを資料 1-3 で暗示した。ただし、さらに正確に扱うためには、ボールの回転と転がり摩擦を考慮する必要がある。このようなより深い理論を用いれば、離散的なデータは、連続的な関係の一部であるとして解釈可能であ

る。これらの実験と解釈の作業を通じて、データの性質を読み取る力、さらに物理の理論に興味を持つことにつながることを期待したい。

実験風景を写真2, 3に示しておく。グループで分担し楽しみながら行うとよい。



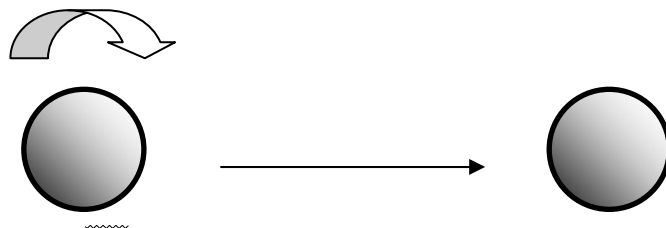
写真2 測定風景 (サッカーボール)



写真3 測定風景 (ソフトボール)

ちょっと理科実験…物理(1)

ボールを転がして止まるまでの時間と距離を計測しよう。
時間と距離にどんな関係があるだろうか。



止まるまでの時間と距離

【実験方法】

- ・ 時間の計測：ストップウォッチ
- ・ 距離の計測：巻尺
- ・ ボールの種類：サッカーボール，ソフトボール，
ゴルフボール，ピンポン球など
- ・ 床は水平とする（適当にざらざらしている方がよい）

解答群（次のうちのどれかに○を付けよ）

- （1）止まるまでの時間と距離は比例関係
- （2）止まるまでの時間は距離の2乗に比例する
- （3）止まるまでの距離は時間の2乗に比例する
- （4）止まるまでの時間と距離は上記以外の関係
- （5）止まるまでの時間と距離は無関係（ばらばら）

1) 実験データの取得

(ボールの種類 1 :)

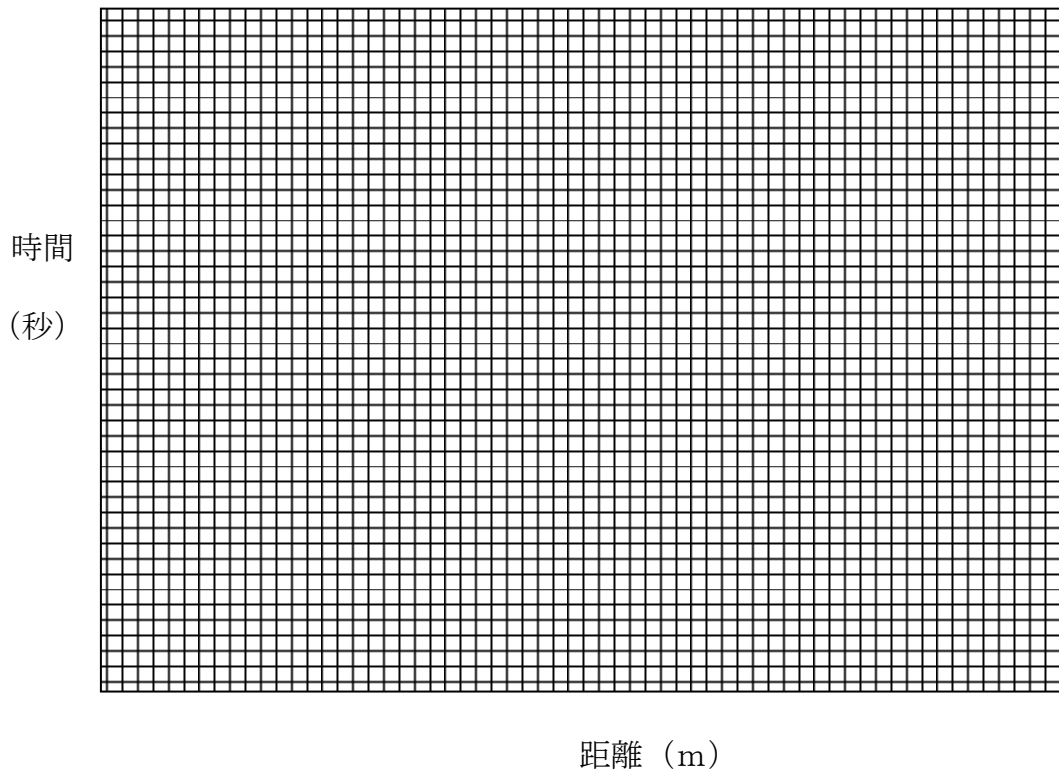
回数	1	2	3	4	5	6	7	
時間 (秒)								
距離 (m)								

(ボールの種類 2 :)

時間 (秒)								
距離 (m)								

2) グラフによる実験データの整理

グラフ用紙



□物理学による説明

理論(高校レベルの説明)

ボールが転がる時、床では一定の摩擦がはたらく。その摩擦による加速度によってボールは止まる。ボールは質点とし、回転は考えないとする。

ボールの質量を m とし、摩擦係数を μ とすると、摩擦力 F は、

$$F = -\mu mg \quad (g \text{ は重力加速度})$$

一方ニュートンの運動方程式から、ボールの受ける加速度を a とすれば、

$$F = ma \quad \therefore a = -\mu g$$

今、ボールの初速度を V_0 とすると、時間 t における速度は、

$$V(t) = V_0 + at = V_0 - \mu gt \quad \dots \textcircled{1}$$

動いた距離 x は、

$$x(t) = V_0 t - \mu gt^2 / 2 \quad \dots \textcircled{2}$$

①式を0とおき、 V_0 を求めて、それを②に代入すると、

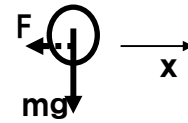
$$L = \mu gt^2 / 2$$

すなわち、距離 L は時間の2乗に比例する(ただし摩擦係数 μ は一定とした)。

この理論によれば、解答群の中で(3)が正しいことになる。...

ただし、床の状況によって摩擦係数 μ は一定でないことがあるので注意を要する。

この解き方は厳密には正しくないが、ボールの回転を含めた正しい解き方(大学レベル)で解いて同じ結果を導くことができる。



制動距離と時間

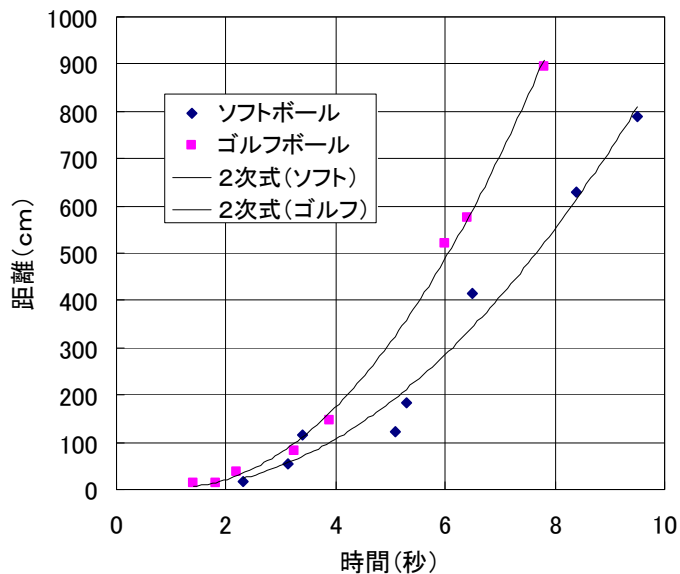


図1 実験結果の例：データ点に加えて最小自乗法で求めた2次式を実線で入れている。

物理学実験体験 2

— 慣性の法則をめぐって —

担当者：國府 俊一郎

実施日：平成20年1月12日

10:55~12:00

場所：教育学部教育実践センタースキル室

1. はじめに

慣性の法則は中学3年の理科で初めて学ぶテーマである。これは力学の中心概念でありながら、その教科書での扱いは1ページ程度に過ぎない。しかもその半分を図が占めているので、わずか5〜6行というのが普通である。この慣性の法則を直観的に把握出来ていない事が、たいていの場合、力学さらに物理を以後理解出来なくなる原因になる。慣性の法則が理解しにくいのはある意味で当然であって、それは日常の生活での経験に反しているからである。我々は力と運動について「物体は力を加えると動きだし、力を加えるのを止めるとやがて止まる」という常識を持っている。この事実を幼い時から記憶のなかに刷り込んで成人した大人は改めてその事を疑う動機を持たない。人間は慣性の法則について正しい理解を得るまで古代ギリシャ以降1600年近くを要した。慣性の法則を教えるという事は、これを現代の15才前後の生徒の思考の中で再び再現させようとする訳であるから本来簡単な試みではないはずである。この困難な試みに対して教科書の記述では明らかに不十分である。

2. 慣性の法則の歴史的経緯

(日常の経験) 古代のギリシャ人は種々の常識を体系的に記述する中で「物体とは本来静止しているものである。それを無理に人間が動かそうとするから、いずれ止まってしまう。これは本来の姿に戻る訳であるから、言わば当然の現象である」と表現した。これは一応はもっともらしい説明である。地球上で生活する我々にとっては、この説明で矛盾をきたす事はほとんどない。

しかしこの説明には奇妙な点がある。「物体が動いているか、止まっているか」という判断は、それを観察する人間によって違う。Aさんが「物体が速度 v で動いている」と観測するのに対して、物体と同じ速度で動いているBさんから見れば、「物体は静止している」と見える。AさんとBさんでは主張が異なるが、どちらが優位であるかを決める事は出来ない。つまり物体は絶対的に動いているか止まっているかを論じる事には意味がない。むしろ観測者に対して相対的に動いているか止まっているかを決める事にこそ意味がある(ガリレオの相対性)。とす

れば、「物体は本来静止している」という説明は観測者によっては正しくない訳であって、もともと意味をなさない。更にまた「力が働いているかどうか？」というのは観測者に依らずに決まっている事実のはずであるが、それが運動の状態という観測者に依存する記述と結び付いているのは奇妙である。

(ガリレオの疑問) そこでガリレオは敢えて現実ばなれをした極限的な場合を考えた。物体と接触している面と間の摩擦をどんどん少なくしていくと、物体が静止するまでにかかる時間はどんどん長くなる。その極限として摩擦をゼロにする事が出来れば、物体はいつまでも止まらないはずである。とすれば、「物体は本来静止している」という主張は誤りではないであろうか？ いっそのことこれまでの主張を180度変えてしまえばどうなるか？つまり「物体は本来動いているものである。それに逆らう力が摩擦力として働くから物体は止まるのだ」と考える。もしこの説明の方が、多くの現象をより自然に説明出来るのなら、こちらの方が真実だという事になる。生徒が慣性の法則の意味を真に理解するのはこの事実気がつく時である。

先程のガリレオの相対性を思い起こせば、この新しい説明の中で、「物体は動いている」という部分は、もう少し正確に表現しなくてはならない。「物体は力を加えられなければ、本来観測者が最初に見た運動の状態を続けるはずある。」物理学は人類がこの

事実初めて気がついた瞬間に始まったと言っよう。すべてはここから始まったのである。この説明は「力」という概念を新たに定義した事になっている。「力とは、物体の運動状態を変える働きをもつものである。」(ここで言う「力」とは「力の釣合い」で登場する「力」と同じものであろうか？この点は後で改めて立ち戻ろう。)

(直線速度の登場) 先に出てきた「運動の状態」とは曖昧な表現であるが、これが何を指すかを更に正確にする必要がある。運動状態を指定する最も簡単で自然な量は速度である。「同じ運動状態を続ける」とは、速度が一定のままという事を指している。ここで速度の概念をより一般化して、速度の大きさだけでなく速度の方向までも含めて「速度ベクトルが一定のままという意味に解釈しよう。これは一見すると微妙な違いにすぎない様に見えるが、実はここには1つの大きな概念上の飛躍が含まれている。慣性の法則は、力が加えられなければ、直線状の運動を続けると主張するのである。直線とは幾何学に起源を持つ概念である。ここに初めて幾何学上の概念が、力学の概念「力」と結びつけられたのである。直線は我々の日常生活では、机の上で、あるいは有限の大きさを持つ建造物の上で実現される。しかし現実には直線はどこかで曲げられて有限の大きさに止まらざるを得ない。直線の概念を貫く為には、無限遠の虚空から直線が来て、無限遠の虚空へと去っていくというイメージを認めざるを得なくなる。その背後にはどこま

でも際限なく続く虚空の宇宙というイメージを頭の中に設定する必要があるのである。有限の閉じた宇宙を頭に描いて暮らしてきた人々は、この新しい世界像を認める事は容易ではなかった。自然の合理的理解の前提となる宇宙観の変更が、慣性の法則の本質的な把握を可能にしたのである。(この点については現代に生きる生徒は古代のギリシャ人よりも有利な位置にいると言えるであろう。)

(加速度の必然性) 慣性の法則は更に次の事を意味している。「物体は力 F が加わると、速度ベクトルが変化する。」これを最も簡単に表現すれば、「速度変化の割合」は「力の大きさ」に比例する、という事になるであろう。「速度変化の割合」を加速度と呼ぶ。するとこの関係は「力の大きさ」と「それによって生じる加速度の大きさ」は比例するという事になる。ガリレオの相対性を認めれば、速度とは観測者同志の相対的な関係を表す変数に過ぎない。つまり運動の原因と結果を直接に表す量ではなく、誰がそれを見たかによって何とでも変わらう量である。それに対して、速度がどのように変化したか？(加速度)は誰がそれを見たかによらない。その物体の運動そのものに関する本質的な量である。力学の基本法則は、運動の原因である力とその結果である加速度を直接に結びつける形をしていなければならない。

(質量の定義) ここで言う比例定数とは何か？日常の経験で我々は「重い」物体ほど運動状態を変えるには大きな力が必要

とを知っている。例えば、止まっている自転車を速度 v で動かすよりも止まっている自動車を速度 v で動かす方がもっと大きな力を要する事を知っている。そこで比例定数として質量を用いるのが最も自然である。力 F と加速度 a を結ぶ関係として「 $F=ma$ 」が生まれた。これをニュートンの運動法則と呼んでいる。これは慣性の法則から自然に生まれ出た自然界で最も基本的な法則のひとつである。この $F=ma$ において $m=F/a$ と読めば、これは逆に質量の新しい定義にもなっている。基本法則においては、基本的な物理量(この場合は F と m と a) は相互に自分自身を定義しあう関係にある。

(静止と運動) ここで先程の疑問に戻ろう。 $F=ma$ は「力の釣合」もその1部に含んでいるであろうか？力が釣合っている時には、物体は静止しているので $v=0$ 故に当然ながら $a=0$ 。したがって $F=ma$ より $F=0$ となる。 F として物体に加わっているすべての力を考えると $F=(すべての力の和)$ 、であるから(すべての力の和) $=0$ となる。これはまさに釣合の関係である。従って「力の釣合」に現われた力 F と「運動を変える力 $F = ma$ 」の F とは同じものである。(つり合いは小学校以来の理科のテーマである。せつかく慣性の法則を学習して、両者の内的連関を理解せずに終われば、「仏造って魂入れず」という結果になるであろう。)

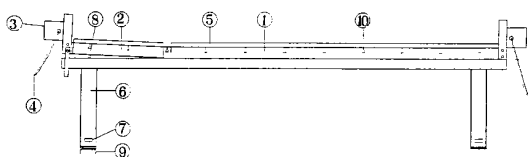
この静止している場合を静力学と呼び、人間が大昔に巨大建造物を作った頃から経

験的にその中味を認識していた。一方残りのすべての場合を動力学と呼ぶ。一般に動いている物体を記録にとどめるのは難しい。一瞬のうちに終わってしまう現象を記録しその様子を詳しく解析して法則を見出すというのは長らく人間の力を越えていた。ガリレオに至って初めてその手がかりが得られたのである。

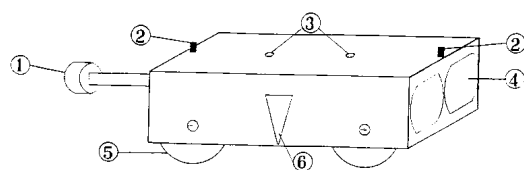
古代のギリシア人にとって静止と運動はまったく別の問題であった。この一見異なる2つの問題が「慣性の法則」を認める事により1つの枠の中に収まる事になった。ひとたび『物体は本来静止しているものである』という前提から『物体は本来同じ運動状態を続けるものである』という前提へと転換すると、より多くの事実がより自然に説明されるようになった。この事実が「前提を転換した」ことが正しい判断であった事を雄弁に物語るのである。

3. 力学台車による実験

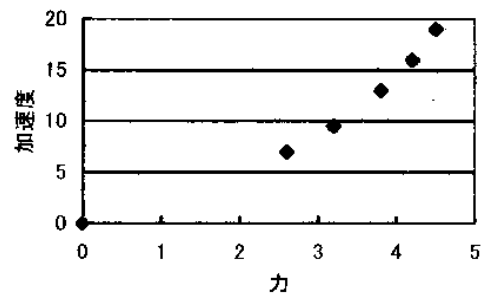
今日でも教室で加速度の大きさを簡単に測定してみせるのはあまり簡単ではない。下図の様なガイドトラック（島津理化製）の上を



力学台車



を走らせ、引いた力と加速度の関係を図にしよう。



このように実験データはかなり直線からばらつくのが普通である。これから力 $F = ma$ が自然に導かれる印象を洗えるには精度が足りないように見える。(最近低価格で手に入るようになった高速連写が可能なデジタルカメラを用いると、ある程度は改善が可能である。)しかし我々は実験精度を上げていくと直線に接近していく事に疑いや不安は持っていない。それはそうならざるを得ないという論理的な根拠があるからである。物理で取り上げる事実には、実験して初めて確認できる事実と、実験せずとも論理的にそうならざるを得ない事実とがある。理科では生徒に実験をさせるのが生徒の理解を深める為の決め手になるという通念が一般的である。これが正しい場合は多々あるが、しかしテーマによってはこれはナイーブに過ぎる考え方である。この力学台車の実験が生徒に慣性の法則を理解させる上でどの程度の効果があるかは議論の余地がある。少なくとも結果は慣性の法則に矛盾はしていない。しかし生徒が真の理解を得るのは、生徒がその論理的な必然性を掴んだ時である。

4. 質疑

以上の主旨に対して付属小学校の中城先生より、「子供によって認識の発展速度が各々に異なるので、必ずしも中学3年の段階にこだわらず、各人に適した年令で理解できれば良いのではないか？」との発言があった。これはもっともな見解である。しかし生徒のとしての現実、この「おおらかな学習モデル」のまさにその逆を行くものである。教科書で中途半端な説明に出会い、それが入学試験に出題されるので短時間で正答を用意する事を要求され、その対策として相当量のドリルを課される。大量の物理嫌いを作り出す条件は整っているというべきであろう。

5. おわりに

以上述べて来た様な中学校および高校の段階で物理の初歩を学ぶ際に生徒が感ずる心理的な困難は、欧米の生徒にとってもアジアの生徒にとっても同じである。これには文化的な背景は特に関係がない。もともと欧米の生徒にとってもアジアの生徒にとっても簡単に理解できる課題ではないので

ある。

むしろ困難として起こりそうなのは、「力、運動、仕事」といった我々が日常的によく使う多義的な意味を持った言葉に対して生徒は物理を学ぶ以前にすでに具体的なイメージを持っているはずであるが、物理ではそれらの言葉に対してある1つの側面から見た、しかも相当に割り切った定義と解釈を与えるという点であろう。この点に違和感を覚える生徒がいたとしても不思議な事ではない。(将来に物理を使う少数の人間を除いて)全員に、この定義に全面的な承認を与えたり、自分の感覚の1部にまで溶け込んでしまう事を要求する必要はない。

平たく言えば、全員が物理に洗脳されてしまう必要はないであろう。ただこれらの日常的によく使う多義的な意味を持った言葉に対して、このような定義を与える「物理という思考の体系」があるという事を知ることが精神生活を豊かなものにしていくはずである。

化学実験体験

— 銅と酸素が化合するときの質量の変化を調べる —

担当者：蒲生啓司

実施日：平成20年1月12日

13:00—15:00

場所：教育学部3号棟化学実験室

薬品および器具

銅粉，ステンレス皿，薬さじ，薬包紙，電子てんびん，三角架，ガスバーナー。

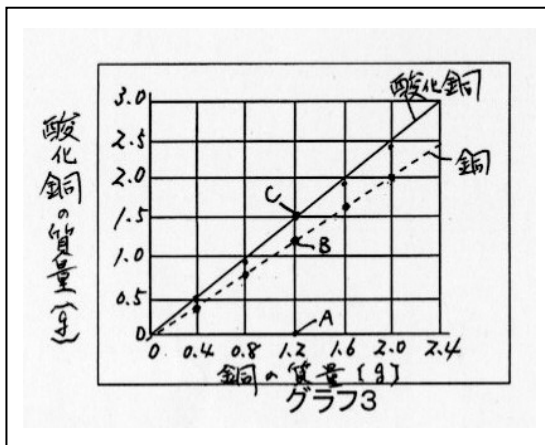
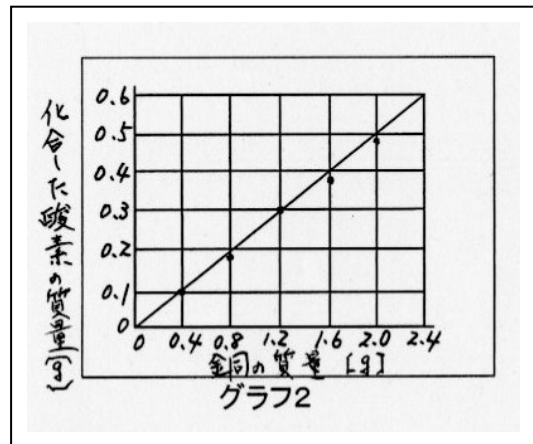
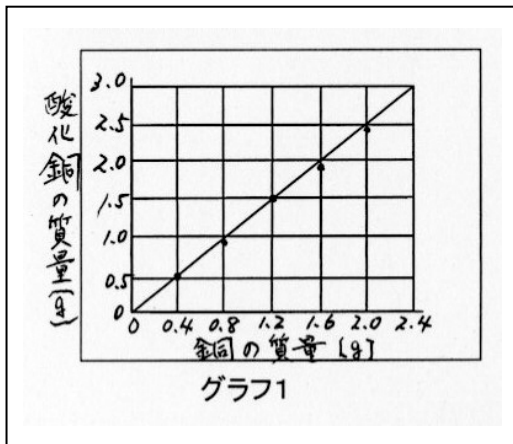
実験方法

- ① 5枚のステンレス皿の質量をそれぞれ量った後に，銅粉の0.4，0.8，1.2，1.6，2.0gをそれぞれのステンレス皿に量り取る。
- ② 銅粉を皿全体に広げ，銅粉全体の色に変化するまでよく加熱する。冷えてからステンレス皿ごと質量をはかる。
- ③ 質量の変化があったら，薬さじでこぼさないようによくかき混ぜる。
- ④ ②・③の操作をくり返し，質量の変化がなくなったら，生成した酸化銅の質量と，銅と化合した酸素の質量を算出する。
- ⑤ 実験結果をもとにグラフを作成する。



結果

	1	2	3	4	5
銅 [g]	0.4	0.80	1.20	1.60	2.00
酸化銅 [g]	0.5	0.98	1.50	1.97	2.49
酸素 [g]	0.1	0.18	0.30	0.37	0.49



考察

銅の質量をいろいろに変えて、それぞれの酸化銅の質量を量ると、上のグラフ（1～3）のような結果が得られた。グラフ3を用いれば、ACの長さは、銅1.2gが酸素と化合してできた酸化銅の質量であり、ABは銅の質量であるから、 $AC - AB = BC$ は銅と化合した酸素の質量である。ACが1.5g、ABが1.2gであるから、BCが0.3gとなり、銅：酸素=1.2：0.3=4：1の割合で化合

していることがわかる。

銅の質量と加熱後に生成する酸化銅の質量との間には、比例の関係を見出すことができるが、実測値は必ずしも直線状にのっていないことがわかる。同じく、銅の質量と化合した酸素の質量との間には、比例の関係を見出すことができるが、実測値は必ずしも直線状にのっていないことがわかる。

生物学実験体験

— アメンボ実験と貝殻の計測 —

担当者：原田 哲夫

伊谷 行

実施日：平成 20 年 1 月 12 日

15:00～17:00

場所：教育学部実践センター

1. はじめに

理論値と実測値が異なることは、生物学の世界でも当たり前にあることである。生物界の営みの中で、もちろん私たちはその中の法則性（理論値）を見つけようとする。自然科学はその Idea 界を垣間見ようとする営みまたは挑戦と言える。その際私たちは“サンプリング”という手法で“母集団”を推定するわけである。理科教育の現場ではあながちこのプロセスが欠けるかまたは意識しない傾向にある。このことは、実験・実習の時間を十分に取れない傾向にあることも関係する。また、科学論文を書く際の最近の卒論生や院生に見られる“結果”と“考察”の混同は、さしずめ、プラトンが“idea”界を指差すのに、アリストテレスが下界（下界の現象）の現象を指すことの違いの意味を理解しない（またはしようとしな）いことと同じに見える。高等教育の現場でさえこのような危機的状況にある今、“理論値”と“実測値”の違いを考えさせる本プロジェクトは日本の理科教

育にとって大いに意義のあるものと言える。

生物学分野において、定量的データを得て、背後にある法則と比較するような実験プログラムはいくつか考えることができる。本プロジェクトの趣旨に最も合致する生物学分野の実験は、メンデル遺伝学における分離の法則であろう。つまり、優性の対立遺伝子をホモに持つ純系と、劣性の対立遺伝子をホモに持つ純系を掛け合わせてできたヘテロ接合体を自家受精させてできた子孫の表現型形質が、優性と劣性が3対1の比になるというのが、法則上の値である。一方、エンドウを用いて実際に得られるデータは3対1に近いが正確に3対1という訳ではなく、その乖離を体験してもらえば良い。しかし、残念ながら、このような長期の飼育と繁殖が必要な実験を小中学校で実施するのは困難である。そこで、本実験体験では、手軽に行うことができる、行動学分野の実験と形態学分野の計測を体験してもらうことにした。

2. アメンボ実験 (原田 哲夫 担当)

2-1. 背景と内容

今回モデル実験として取り上げたのは、アメンボ(*Aquarius paludum*)成虫の走光性のメカニズムについてである¹。アメンボ成虫は冬の間陸上で過ごす。その間休眠という特殊な生理状態にあって、乾燥や低温に対する耐性が強く、代謝も低く抑えられているので餌なしでも飢えない。越冬する場所は落ち葉の下や樹の皮の裏など比較的暗くて温かいところである。この間、光から避ける、即ち負の走光性を示す²。春になると、休眠は終了し、暗い越冬場所から、明るい水面に移動(多くの場合飛翔による)し、秋までに繁殖によって3-4世代を繰り返す。この間強い正の走光性を維持し、飛翔によって生息する水面を変えても新しい水面を探索するのに走光性は有効である。水面は鏡のように明るいからである。

さて、このように生態学的に意義深い走光性であるが、このメカニズムは比較的単純である。走光性に関与する光入力場所は複眼である。正の走光性の場合、右複眼から入力された光情報は、左3肢の運動出力を促進(または右3肢の運動出力の抑制)し、左複眼からの入力は、右3肢の運動出力を促進(または左3肢の運動出力の抑制)する。正の走光性の場合、反対側促進系(または同側抑制系)のメカニズムが存在する。逆に負の走光性の場合、右複眼からの光入力は、右3肢の運動出力を促進(または左3肢の運動出力の抑制)し、左複眼からの入力は、左3肢の運動出力を促進(または右3肢の運動出力の抑制)す

る。負の走光性の場合、同側促進系(または反対側抑制系)のメカニズムが存在する。このメカニズムを持ち、光源に対しどのような角度にいても、最終的には光源の方向(正の走光性)か、光源とは反対の方向(負の走光性)に向かって歩く。このメカニズムが上記の“アイデア”即ち、法則性に当たる。

2-2. 実験方法

では実際にこれを確かめる実験をし、実測値を求めてみる³。ここで、使用するアメンボ成虫は、4月-7月に野外から採集したものか、秋に捕まえても、長日条件で1-2ヶ月飼育したものを使用する。これらの成虫は確実に正の走光性を示すからだ。これは図3のような実験で確かめられる。正の走光性を示すことをまず確認する。次に複眼の右側のみからの光入力を行えば、正の走光性の場合、光入力した側と反対側の左側3肢の運動が促進され、アメンボは右回転するはずである。この場合、左複眼からの光入力を遮断しなければならない。その方法として、黒マスカラを用いる。図2のように、黒マスカラを虫針の先端で掻き取り、実体顕微鏡の下で、アメンボ成虫の左複眼に塗る。この場合、塗り残しが少しでもあれば結果はうまく出ない。塗った後、図3のように実験水槽の中に入れ、アメンボが右回転するかどうか確かめる。確かめたら、同じ個体を用いて、逆の複眼を塗って見る。マニキュアは乾燥すればアメンボの複眼を傷つけることなく簡単にはがすことができる。はがした後、今度は右複眼に黒マニキュアを塗り、実験水槽の中で、左回転す

るかどうかが確かめる。室温は 20℃～25℃で行い、実験用水槽の下には放射状に 24 区画に分けた赤いシートを置く。赤色はアメンボにとって非可視光だからである。今回は行わなかったが、負の走光性を示す個体を用意（短日、低温で飼育された個体）すれば、正の時とはまったく逆の回転方向を示すはずである。

2-3. デモ実験の実施結果と意見

上記のような内容を説明（図1）した後、今回の体験では、デモ実験的にアメンボの複眼にマスカラを塗ってもらい、本当に回転するかどうかを確かめてもらった。附属小学校・中学校の先生方からは、「マスカラを本当にアメンボの複眼に塗ることができるのか？」とか「難しそう」などといった意見や感想が事前にあったが、実際行ってみると案外簡単にマスカラを塗れることがわかったようだ。また、マスカラを塗った後、本当に理論通りに回転したり、回転までは行かないものの、予想した方向に曲がって歩いたり、また全く回転せず光源の方向へまっすぐに歩くものなど、様々な結果を得ていた。「ネタとしては面白く小学生にも使える」「小学生に実体顕微鏡の下でのマスカラ塗りは無理では？」などと言った意見があった。

2-4. 今回の実験における“アイデア”＝法則性＝理論値と実測値

強い正の走光性を示す個体を使い、マスカラを光漏れなく塗り、適切な実験条件で行えばほぼ 100%予想通りの方向に回転するはずである。しかし、実測値ではそうはならない

ことが多い。もちろん、マスカラ塗りが不完全な場合や、光源のほかに光があり、光勾配がうまくできていない場合や、使用したアメンボが晩夏から秋に採取したものであれば、予想通りには回転しない。

実験者の条件整備に全く落ち度がない場合でも、理論値と一致しない場合がある。例えば、活動性が非常に低く、歩行行動が抑えられている場合である。その際、腹部末端を機械的に刺激すれば、活動性が高くなる。そして、実験水槽に置いた場合、回転せずに驚動的に跳躍行動を示す場合がある。また、わずかに予想する方向に曲がるが直進とさほど変化がない場合もある。この場合の理論値と実測値の違いの説明として、以下のことが考えられる。このアメンボの走光性を支配しているメカニズムの仮説として有力なのは、アメンボは、正の走光性を担う入力―出力回路（半側系神経経路）と、負の走光性を担う同側系神経経路の2つを持ち、夏は反対側系、冬は同側系のみ神経経路の疎通を良くしているというものである¹。この場合何らかの原因で本来伝わるべき回路の疎通がわるくなって光入力がうまく伝わらないということは十分に考えられ、その場合、実測値が理論値どおりにならないことが考えられる。

どのようなレベルの原因であっても、実測値が理論値とずれた場合、その原因となる可能性を理科の授業の中で考察することは、科学的に物を考えるという能力を鍛えることにつながる重要な機会となることは間違いない。

2-5. 引用文献

1. 原田哲夫: (1996) アメンボ科昆虫における走光性の季節的变化. *比較生理生化学* **13**: 107-115.
2. Harada, T.: (1991) Effects of photoperiod and temperature on phototaxis in a water strider, *Gerris paludum insularis* (Motschulsky). *Journal of Insect Physiology*, **37**: 27-34.
3. 原田哲夫: (1997) 理科教材としての『アメンボ[*Aquarius paludum* (Fabricius)]における走光性実験』高知大学教育学部研究報告 第1部 **53**: 45-52.

図2 アメンボの片方の眼にマニキュアを塗る。

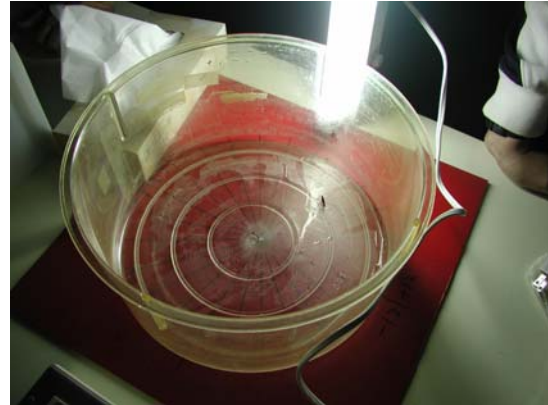


図3 行動実験 (走光性のメカニズム)



図1 講義風景



3. 貝殻の計測 (伊谷 行 担当)

3-1. はじめに

本実験体験は、対数と線形回帰を用いるため、小中学校の教材としては直接使うことはできない。高知県の身近な自然物を用いて、頭の体操として行うものである。

生物の重さは、生物の長さとのような関係があるだろうか？ 例えば、長さが2倍になれば、重さは何倍になるだろうか？ ここで、生物を角砂糖に置き換えてみる。1辺が1cmの立方体をした角砂糖を用いて、1辺が2cmの角砂糖の立方体をつくるためには、もとの角砂糖が8個必要である。長さが2倍になれば、面積は 2×2 の4倍になり、体積は $2 \times 2 \times 2$ の8倍になる。密度が同じであれば、重さも8倍になる計算である。つまり、角砂糖の立方体の重さはその長さの3乗に比例する。

生物の体でも、生物のかたち (shape) は大きさ (size) が変化しても一定であり、相似の関係がある、生物のからだの密度は大きさが変化しても一定である、という2つの条件が成り立てば、生物の重さは生物の長さの3乗に比例するという法則が成り立つことが期待される。この法則について、浜辺に打ちあがった貝殻を用いて体験してもらった。貝殻を用いる理由は、高知県は大規模な砂浜海岸が発達するため海岸に行けばいくらかでも貝殻が手に入り、また、飼育や標本固定の手間が不要であるという、材料の入手・管理のしやすさのためである。

3-2. 材料と方法

高知県黒潮町入野浜で採集したベンケイガイとフジノハナガイの長さ (殻長) と殻の重さ (殻重) をノギスと電子天秤を用いて計測した。

殻重 (y) が殻長 (x) の3乗に比例するかどうかを検討するために、両者の常用対数をとって、 $\log y$ と $\log x$ の関係が傾きが3の1次式になるかどうかを、マイクロソフト社の表計算ソフト Excel を用いて確認した。

一般に、生物現象の多くの形質の間には、 $y = a x^b$

という関係があることが経験的に知られており、これをアロメトリー式という。

この両辺を対数で割ったかたちが
 $\log y = b \log x + \log a$

という1次式になる。貝殻の長さとの関係が、角砂糖と同じであれば、この b の値が3となる。



図4 ベンケイガイの殻長を計測



図5 フジノハナガイの殻長を計測



図6 殻重を計測



図7 エクセルを使ってグラフを作成

0.026 g から 18.699 g であった。以下に全計測結果を示す。

表1 ベンケイガイの測定結果

ベンケイガイ殻長 (mm)	ベンケイガイ殻重 (g)
6.19	18.699
5.72	14.262
4.14	7.3
2.51	1.7
2.23	1.641
2.34	1.087
2.05	0.815
1.93	0.833
1.71	0.687
1.55	0.401
1.38	0.375
1.4	0.253
1.31	0.234
1.34	0.345
1.1	0.165
1.2	0.213
1.06	0.11
0.8	0.06
0.64	0.036
0.66	0.026

このデータを散布図に表すと以下のようになる。

3-3. 結果

ベンケイガイ 20 個体を計測した結果、殻長は 0.64 mm から 6.19 mm であり、殻重は

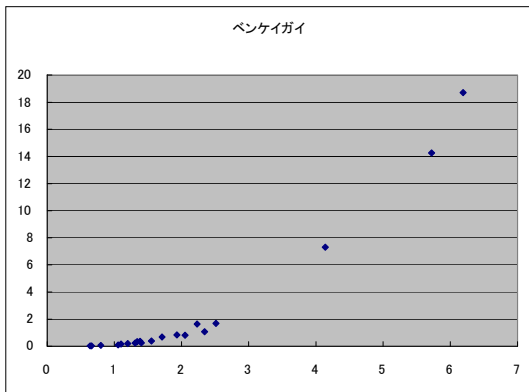


図8 ベンケイガイの殻長 (x) と殻重 (y) の関係

このままでは、殻重 (y) が殻長 (x) の3乗に比例するかどうか、判断がつかないために、常用対数を取り散布図に表すと以下のようになる。

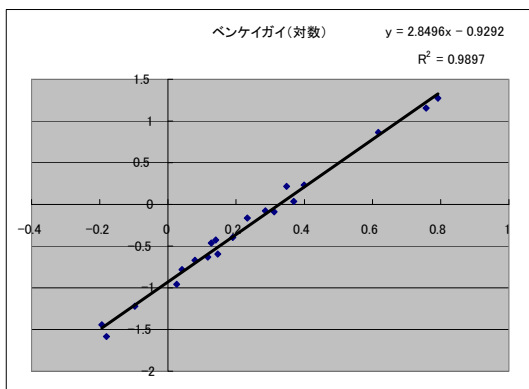


図9 ベンケイガイの殻長 (log x) と殻重 (log y) の関係

このように、 $\log x$ と $\log y$ は直線的な関係となり、線形回帰を行うと、その傾きは2.85となった。つまり、ベンケイガイの殻重は殻長の2.85乗に比例していた。この操作をExcel上で行うためには、散布図をグラフ機能で作成したあと、プロットを右クリックし

て「近似曲線の追加」メニューを開く。「線形近似」を選択して、オプションメニューから「グラフに数式を表示する」をチェックすれば良い。

Excelでは、累乗回帰も行うことができ、対数を用いなくても、 y が x の何乗に比例するかを計算できる(先ほどの操作で、「累乗近似」を選択する)ので、参考として以下に図を示す。

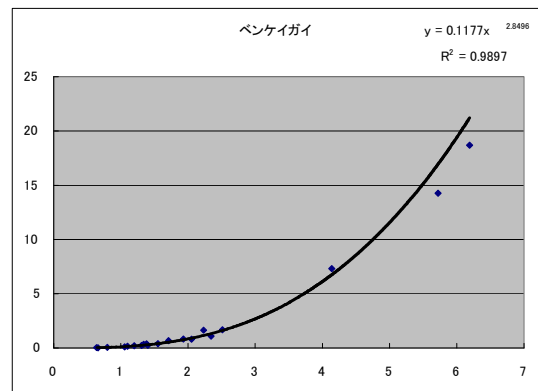


図10 ベンケイガイの殻長 (x) と殻重 (y) の関係 (累乗回帰)

同様に、フジノハナガイ 14 個体を計測した結果、殻長は 1.3 mm から 2.0 mm であり、殻重は 0.164 g から 0.588 g であった。解析の結果、フジノハナガイ殻重は殻長の 2.93 乗に比例していた。以下に全計測結果と解析結果を示す。

表 2 フジノハナガイの測定結果

フジノハナガイ殻(mm)	フジノハナガイ殻重(g)
2.0	0.588
2.0	0.644
1.9	0.504
1.9	0.576
1.8	0.591
1.7	0.347
1.7	0.461
1.7	0.456
1.6	0.343
1.6	0.407
1.6	0.397
1.5	0.306
1.4	0.215
1.3	0.164

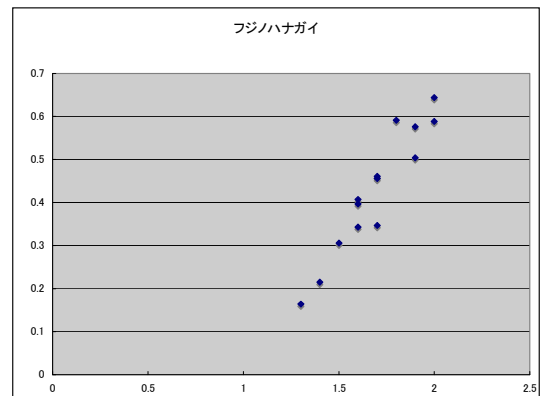


図 1 1 フジノハナガイの殻長 (x) と殻重 (y) の関係

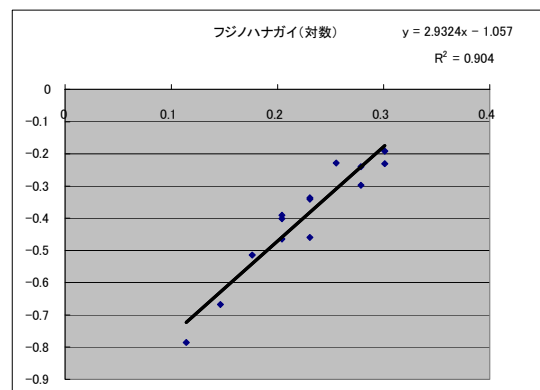


図 1 2 フジノハナガイの殻長 (log x) と殻重 (log y) の関係

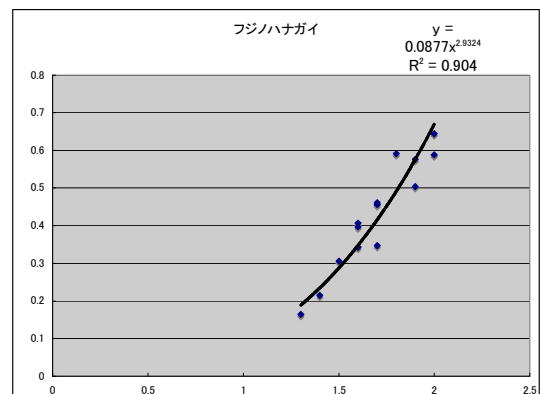


図 1 3 フジノハナガイの殻長 (x) と殻重 (y) の関係 (累乗回帰)

3-4. 考察

ベンケイガイやフジノハナガイといった、実際の生物の貝殻においても、角砂糖と同じように、重さは長さの3乗に近い値で比例関係があった。しかし、厳密に3乗に比例するわけではなく、これは個々の生物の種によって固有の値を持っている。また、同じ種でも地理的に変異があったり、環境によって異なる値を取ることが知られている。逆に考えると、どれほど3と異なる値を個々の生物が持っているかが、その生物の成長や生態を考える上で重要となる。

3-5. 貝殻計測の質疑応答

田中：地質学分野でも古生物学で似たような研究を見たことがあります。

伊谷：同じものです。

田中：今回の体験のようにかたちだけではなく、恐竜の歩く歩幅なども推測していました。

伊谷：現在、生きているさまざまな生物で、からだの大きさと歩幅なり、生活圏の大きさなり、あらゆる生物の形質について、アロメトリー式をつくります。そして、化石種のように、現在生きていない生物でも、化石の形態の情報とアロメトリー式をあわせて、化石種の生態を類推するわけです。このような方法は、種間アロメトリーと言います。それに

対して、今回行った、個々の種の成長に関する記述式を種内アロメトリーと言います。

附中の先生：生徒の身長や体重の関係にも使うことができますか。

伊谷：使うことができますが、男子と女子で分けた方が良いかもしれません。

田中：子どもと大人で違うということはありませんか？

伊谷：2次性徴を示す形質については、発育段階に応じて、アロメトリー式が変わることがよくあります。多くのエビやカニでは、雄同士が雌をめぐって闘争を行うときにハサミ脚を使うことから、成熟した雄ではハサミ脚が巨大となります。2次性徴の開始前と後では、ハサミ脚の大きさに関するアロメトリー式が異なります。

附小の先生：あとになって、きれいな直線関係が見られて面白かったのですが、はじめのうち、対数を利用する意味がよく分かりませんでした。

伊谷：説明が足りなくて申し訳ございません。対数の利用から、小中学校の授業でこの題材を直接使うことはできませんが、身近な自然を題材にして、単純な関係を見ることができます。また、貝殻にいろいろなかたちがあることを、手に取ってさわって実感するだけでも面白いと思います。

地学実験体験 1

— 振子の振動周期 —

担当者：田中秀文

実施日：平成 20 年 1 月 26 日

(開始時刻～終了時刻) 9:50～11:00

場所：メディアの森コラボレーションルーム

1. はじめに

地学分野の特徴は地球、惑星、宇宙に関するありとあらゆる現象を扱うことである。しかし、その手法の多くは物理学、化学、生物学の応用で、地学独自の手法はないと考えられていることが多い。大学入試センターの時間割で、地学が物理学の裏になっていることもその現われかもしれない。しかし、地学特有の考え方や手法はあり、それを代表するのが地質学であろう。露頭で地層を観察し、遠い過去に起こったであろう事象を推測し、当時のその場所の環境やひいては地球の歴史について考察する。

地学分野の特徴として、「巨大な時間や空間で起こる事象を扱う」という表現がある。これは地学分野の他分野との決定的な違いを非常に良く表した表現であろう。特に前者の、地球が巨大な時間をかけて築き上げた事象という視点は、それなりの教育をしないとなかなか養われない。例えば、砂岩や礫岩などの堆積岩は、これだけ科学技術が発達した現代でも我々は同じものを作る

ことができない。似たようなものは作れても、それが本物と異なることは素人でもすぐ判断できるであろう。その理由は我々には長大な時間が欠けているからである。

今回の企画は、川崎 (2005) による、オームの法則を導く測定のような実験を行うことである。すなわち、グラフにプロットされた、ばらつく観測データから、その裏に潜む法則を導くような実験を行う。残念ながらこの観点からは地質学分野の実験を考え出すことはできなかった。一方、天文学分野では、惑星の公転周期と公転軌道半径のデータからケプラーの第 3 法則「公転周期の 2 乗は軌道半径の 3 乗に比例する」を導く演習が考えられる。この演習は科学史上も重要な発見となった法則について学ぶ良い機会になると思われる。また、火星の軌道と木星の軌道の間を無数に周回している小惑星帯の発見を予言した「ボーデの法則」も、それ自身は特に重要な法則へとは発展しなかったものの、グラフにプロットされたデータからその奥にある何かを推

測する良い例になると考えられる。しかし、これら天文学の演習は別な機会に行いたい。結局、内容は物理学実験であるが、地球の重力加速度が得られるという意味での地学実験として、振子の周期測定を実施した。

2. 振子の振動周期

振子の周期が何によって決まるかを実験を通して考える。使用する振子は島津理化製で、直径約 4 cm の鋼鉄製の金属球をピアノ線で吊るしたものである。このような振子は、質点を糸で吊るした振子と見なせるので単振子とよばれ、剛体振子とは区別される。支点の部分は直径約 2 cm の金属のつり環でできており、その内側をナイフエッジの上に乗せて振動させる。金属球の重さ、振動の振幅、振子の長さの 3 つのパラメータについて、周期への影響を観察する。なお、以下の測定法は力武ほか (1978) によっている。

2 - 1. 振動の与え方

振子を一定の垂直面内で滑らかに振動させることは容易ではなく、通常用いられるテクニックは次の通りである。



図 1. 単振子の構造

輪状にした木綿糸を金属球の真ん中に添え

て横へ引っ張り、糸の先を壁などに固定する。安定したら、糸をマッチの火などで焼き切り、金属球に振動を与える。

2 - 2. 長さの測定法

振子の長さ L とは、つり環の内側上端から金属球上端までの長さ l に金属球の半径 r を加えたものである。 l はノギスで比較的正確に測定できるが、 l の測定はそれほど容易ではない。振子を吊るした状態で測定することが理想であるが、ここでは横にした 1m のスケールに振子を沿わせて測定する。

2 - 3. 周期の測定法

振子が振動していないときのピアノ線の位置を基準にするために、その位置を基準線として支柱などに印しておく。周期 T としては、振子が基準線を右から左へ（または左から右へ）通過した時点から再び同様に通過するまでの時間を測定する。時間の測定にはストップウォッチを使用する。測定誤差を減らすために、表 1 のように連続して 10 回毎に経過時間を記録するテクニックを用いる。具体的には、実験者の 1 人が振動の 10 回毎に合図をし、他の実験者がその経過時間を記録する。この方法により、 $50 \times T$ の測定値が 5 個得られるので、その平均値を 50 で割って周期とする。また、0 回目をストップウォッチの 0 秒に合わせる必要がないのもこの方法の利点である。

表 1. 周期の測定法

回数	時間(a)	回数	時間(b)	b - a
	分 秒		分 秒	分 秒
0	0 21.8	50	2 02.6	1 40.8
10	0 42.0	60	2 22.3	1 40.3
20	1 02.0	70	2 42.7	1 40.7
30	1 22.1	80	3 02.8	1 40.7
40	1 42.3	90	3 23.2	1 40.9
b - a = 50Tの平均 1分 40.7 秒				
$T = 1分 40.7 秒 / 50 = 2.01 秒$				

3. 実験

振子の振動周期に関係するかもしれない3つのパラメータについて、以下の手順で実験を行う。

3 - 1. 実験 1 : 球の重さの影響

標準の金属球よりも小さい金属球が用意してあるので、2種類の球の質量を測定記録する。両者とも振子の長さが 25cm 程度でほぼ等しくなるようにピアノ線の長さを調節する。それぞれの振動周期を測定する。

3 - 2. 実験 2 : 振幅の影響

振動の振幅としては、金属球の基準の位置から最大の振れまでの横方向の距離をとる。実験 1 で使用した標準の振り子を、振動の振幅を 2 cm, 4 cm, 6 cm 程度に変えてそれぞれの振動周期を測定する。

3 - 3. 実験 3 : 長さの影響

振子の長さを 25cm, 50cm, 100cm 程度に変えてそれぞれの振動周期を測定する。

4. 実験結果

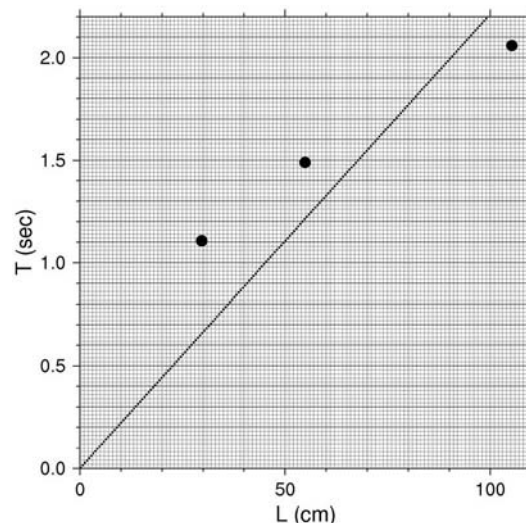


図 2. 実験結果 (Tを縦軸, Lを横軸に取る)

時間的制約から、振子の長さとの関係を考える実験 3 だけを行った。周期の測定は 2 グループに分かれて実施した。表 2 は実験 3 のまとめであり、詳細な測定データは付表として本報告の最後に載せる。なお、振子の長さが最も短い 1 番目の実験については、2 グループのそれぞれが測定したため、2 つの測定値が得られたが、最終値としてはその平均値を使用した。

表 2. 実験結果のまとめ

実験	3 - 1	3 - 2	3 - 3
L (cm)	29.65	54.85	105.25
T (秒)	1.107	1.489	2.059

この結果から明らかなことは、振子の長さが長いほど周期が長いことである。そこで、最も簡単なデータのまとめ方は、周期

T を縦軸に、振子の長さ L を横軸に取ったグラフを描くことで、図2のようになった。なお、直線は最小2乗法でフィットした原点を通る直線 ($y = ax$) である。一般的な直線 ($y = ax + b$) でフィットさせない理由は、振子の長さを短くしていくに従い周期が短くなる極限として、 $L=0$ では $T=0$ になるはずだと考えられるからである。



写真. 周期測定の様子

5. 考察

T と L の関係は、原点を通るはずだという制約を加えると、直線関係からは程遠い。しかし、グラフを良くみると上に凸の曲線のようにも思える。

そこで、 T に対して L の平方根をプロットすれば直線になるかもしれない、と考えて描いたグラフが図3であり、データが見事に直線状に並ぶのが分かる。なお、グラフはWessel and Smith (1998)によるGMTを利用し、横軸には、データをその値通りにプロットすれば、実質はそのルートになる目盛りを取ってある。中学校レベルでは、平方根を電卓で計算してからプロットする

のも良いであろう。

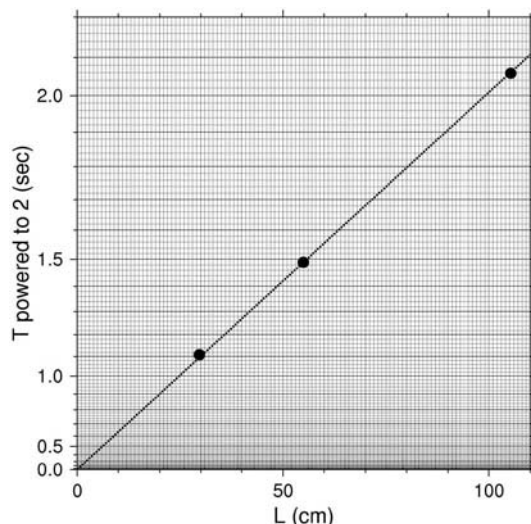


図4. 実験結果 (T を2乗目盛りでプロット)

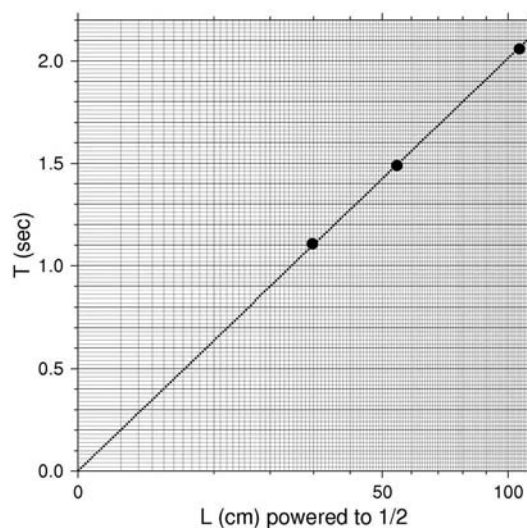


図3. 実験結果 (L をルート目盛りでプロット)

しかし、小学校ではルートは無理であるという場合には、 T を2乗してからグラフ

にすることももう1つの手段として考えられる。その考えの下に作成したグラフが図4で、今度はデータをそのままプロットすれば、実質はその値の2乗になるような目盛りを縦軸に取ってある。

最後に、今回の測定結果から得られた地球の重力加速度 g を、振子の周期を与える公式、

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}$$

から逆に計算し、3回の測定について表3にまとめた。

表3. 実験から求めた重力加速度 g

実験	3-1	3-2	3-3
L (cm)	29.65	54.85	105.25
g (cm/s ²)	955.2	976.7	980.1

これらの結果を国立天文台(2007)による理科年表に載っている値と比較した。興味深いのは、振子の長さが長くなるほど、

高知における実測値(979.626 cm/s²)に近づくことである。その理由は、 L や T の測定においては、その値が大になるほど測定誤差の割合が減るためと考えられる。特に時間の測定は困難であるので、ゆっくりした振動となる最後の実験において最も正確な測定が可能であったのであろう。

6. 参考文献

- 川崎謙, 『神と自然の科学史』, pp.222, 講談社, 東京, 2005.
- 国立天文台(編), 『理科年表』, pp.1034, 丸善, 東京, 2007.
- 力武常次・山崎良雄・田中秀文, 『地球物理学: 実験と演習』, pp.178, 学会誌刊行センター・学会出版センター, 東京, 1978.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith, New, improved version of Generic Mapping Tools released, *Eos Tran. Am. Geophys. Union*, **79**, 579, 1998.

7. 付表

測定データ : L=29.65cm (中城・田鍋)

回数	時間(a) 分 秒	回数	時間(b) 分 秒	b - a 秒
0	0 02.4	50	0 57.3	54.9
10	0 12.4	60	1 08.4	56.0
20	0 24.2	70	1 19.4	55.2
30	0 35.1	80	1 30.1	55.0
40	0 46.2	90	1 41.5	55.3
$b - a = 50T$ の平均				55.28 秒
$T = 55.28 \text{ 秒} / 50 = 1.1056 \text{ 秒}$				

測定データ : L=29.65cm (高橋・山中・三好)

回数	時間(a) 分 秒	回数	時間(b) 分 秒	b - a 秒
0	0 13.4	50	1 08.4	55.0
10	0 24.4	60	1 20.0	55.6
20	0 35.4	70	1 30.8	55.4
30	0 46.4	80	1 42.0	55.6
40	0 57.4	90	1 53.0	55.6
$b - a = 50T$ の平均				55.44 秒
$T = 55.44 \text{ 秒} / 50 = 1.1088 \text{ 秒}$				

測定データ : L=54.85cm (高橋・山中・三好)

回数	時間(a) 分 秒	回数	時間(b) 分 秒	b - a 秒
0	0 09.0	50	1 23.4	74.4
10	0 24.0	60	1 38.4	74.4
20	0 38.8	70	1 53.4	74.6
30	0 53.6	80	2 08.2	74.6
40	1 08.8	90	2 23.0	74.2
$b - a = 50T$ の平均				74.44 秒
$T = 74.44 \text{ 秒} / 50 = 1.4888 \text{ 秒}$				

測定データ : L=105.25cm (中城・田鍋)

回数	時間(a) 分 秒	回数	時間(b) 分 秒	b - a 秒
0	0 02.8	50	1 44.8	102.0
10	0 23.4	60	2 06.6	103.2
20	0 44.1	70	2 27.0	102.9
30	1 04.6	80	2 47.8	103.2
40	1 25.1	90	3 08.6	103.5
$b - a = 50T$ の平均				102.96 秒
$T = 102.96 \text{ 秒} / 50 = 2.0592 \text{ 秒}$				

地学実験体験 2

— 鉱物の面角の測定 —

担当者：赤松 直

実施日：平成 20 年 1 月 26 日

11:00～12:00

場所：メディアの森電子会議室

1. はじめに

導入として、岩石と鉱物の違い、鉱物の定義等をまず説明した。話の内容はおおよそ以下のとおりであった。

岩石、鉱物、結晶

岩石を作っている結晶のことを**鉱物**とよぶ。例えば、花崗岩を構成している石英、長石、黒雲母といった粒が**鉱物**である。鉱物の定義をより正確に述べると、「天然に産し、物理的・化学的に均質で一定の化学式をもつ結晶質の固体」ということになる。

結晶とは、原子が規則的・周期的に配列している固体のことである。

鉱物は化合物（あるいは単体のこともある）であり、岩石は複数種の**鉱物**が集まった混合物であるとも言える。

花崗岩を構成する石英の結晶は、他の**鉱物**結晶が周囲を取り囲んでいるため、本来の形にはなれない。このような結晶を**他形**結晶という。一方、本来の形（石英の場合、六角柱）になった結晶のことを**自形**結晶とよぶ。石英のうち自形結晶に成長したもの

が水晶である。



図 1. 授業開始直後の様子.



図 2. 授業の様子. 岩石・鉱物・結晶とは...

面角一定の法則

17世紀後半、デンマークの物理学者ステノをはじめとする多数の学者は、「同一物質の結晶では対応する面と面との角度が一定不変である」として、これが**面角一定の法則**である。

結晶には、しばしば特定方向に平行に割れる性質（**劈開**）がある。このことを根拠に、フランスの鉱物学者であるアユイ（1743-1822）は、

「全ての結晶は、それぞれに特有な形をした基本単位の集合である」

と考えた。例えば、

- ・平行六面体の結晶は小さな平行六面体のブロックが集まってできたもの
- ・正八面体の結晶は小さな立方体のブロックが集まってできたもの

といった具合である。

ちなみに、アユイが活躍していたのはX線の発見（1895）以前のことであり、結晶中で原子が規則的・周期的に配列していることがまだ明らかにされていない時代のことであった。現在我々が共有している結晶の定義「原子が規則的・周期的に配列している固体」も当時はなかったことになる。

現在では、結晶は**単位格子**とよばれる基本単位の繰り返しからなるとされている。単位格子の形状により、世の中にある結晶は7種類の**結晶系**に分類されている（表1）。

なお、結晶に割れやすい面（劈開面）ができるのは、アユイが考えていたように単位格子ブロックの境界で割れやすいからな

のではない。結晶構造において原子間の結合力の弱い面が、ある方向で存在しているときに劈開面ができるのである。

表1. 7つの結晶系とその単位格子形状

結晶系	単位格子形状
三斜晶系	平行六面体
単斜晶系	底面が平行四辺形の角柱
斜方晶系	直方体
六方晶系	底面が菱形の角柱（菱形の内角は 60° ないし 120° ）
三方晶系	立方体の1本の立体対角線 の方向に引き伸ばすか縮めた形
正方晶系	正四角柱
立方晶系	立方体

2. 結晶面の交角の測定および結果

以下の鉱物結晶（図3参照）について、接触測角器を用いて受講者に結晶面の交角を測定してもらった。

- 1) 水晶（三方晶系）
六角柱の結晶
- 2) 蛍石（立方晶系）
劈開面で割られた八面体の結晶
- 3) 灰ばんザクロ石（立方晶系）
菱形十二面体的な結晶
- 4) 方解石（三方晶系）
劈開面で割られた平行六面体の結晶
- 5) 黄鉄鉱（立方晶系）
五角十二面体の結晶



図3. 使用した鉱物結晶. 水晶 (左上), 蛍石 (左下), ザクロ石 (右上), 方解石 (中央上), 黄鉄鉱 (右下). 蛍石の大きさが約 1 cm.

水晶 (三方晶系, 六角柱)

六角柱における隣接する柱面の交角を測定してもらった (図4)。交角 (内角での値) はどこをとっても 120° であると判断した。

蛍石 (立方晶系, 八面体)

八面体の隣接 (稜を共有) する結晶面の交角を測定してもらった。交角 (内角) はほぼ 109.5° (補角は 70.5°) であると判断した。

ザクロ石 (立方晶系, 菱形十二面体的)

隣接する結晶面の交角を測定してもらった。稜を共有する隣接面の交角は 120° (図5)、頂点を共有する隣接面の交角は 90° となると判断した (図6)。

方解石 (三方晶系, 平行六面体)

平行六面体において、対応する面角はどこをとってもほぼ等しいと判断した。

黄鉄鉱 (立方晶系, 五角十二面体)

十二面体において、対応する面角は、どこをとってもほぼ等しいと判断した (図7)。

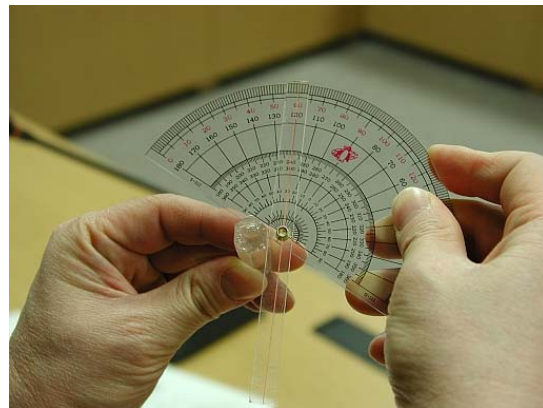


図4. 水晶における柱面の交角測定. 隣接する柱面のなす角度は、どこをとっても 120° とみなせそうである。



図5. ザクロ石における隣接 (稜を共有) する結晶面の交角測定. この角度は 120° とみなせそうだ。



図6. ザクロ石における隣接 (頂点を共有) する結晶面の交角測定. この角度は 90° とみなせそうだ。

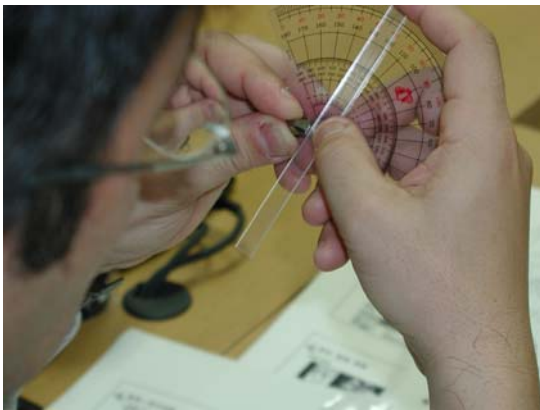


図7. 黄鉄鉱における隣接する結晶面の交角測定.

3. 講演者と受講者とのやりとり

今回の実験体験において、講演者と受講者との間で、およそ以下のようなやりとりがあった。

水晶六角柱における柱面の交角測定

講演者：

水晶の結晶を輪切りにしたときの断面の形は、いびつな六角形になっていて、正六角形ではありません。ですが、柱面の交角は、どこをとっても一定で、 120° といった「きりのよい角度」になっているはずです。確かめてみてください。

受講者の反応：

本当だ。どこの交角をみても 120° になっていますね。

螢石の隣接する結晶面（稜共有）の交角測定

講演者：

正八面体について、隣接する面の交角がどれだけになるか、幾何学的に求めることができます。私は次のように考えました。

隣接する面のなす角度（補角）は、2つのベクトル $\mathbf{a} = (1, 1, 1)$ と $\mathbf{b} = (1, -1, 1)$ とがなす角度 θ であるということになります。この角度を求めることにします。

\mathbf{a} と \mathbf{b} との内積を考えると、

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \cos \theta$$

の関係が成り立ち、 $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = 1 - 1 + 1 = 1$ 、

$|\mathbf{a}| = |\mathbf{b}| = \sqrt{3}$ です。したがって、

$$\sqrt{3} \sqrt{3} \cos \theta = 1$$

$$\cos \theta = 1/3$$

$$\theta = \cos^{-1}(1/3) = 70.53^\circ$$

ということになります。

もし、螢石八面体の隣接する結晶面のなす角度（補角）が正八面体のそれと等しいはずだと考えるならば、 70.53° になるべきですね。角度を測定するとどうになりましたか？

受講者の返答：

この測角器では、 0.5° くらいまでなら正確に測れると思えます。約 70.5° になります。

講演者：

今の測定では、「 70.5° になるべきだ」という考えがあったから、そのように読めたのかもしれませんが、もし、正八面体の面角と同じになるべきだという考えを持たない人が測定したとしたら、「きりのよい角度である 70° です」と答えるかも知れませんか。

ザクロ石の隣接する面の交角測定

講演者：

ザクロ石のこの角度（稜を共有する隣接面の交角）を測ってみてください。 120°

くらいになっていませんか？

受講者の返答：

はい、 120° です。

講演者：

では、こちら（頂点を共有する隣接面の交角）はどうでしょうか。 90° くらいでしょうか。

受講者の返答：

はい、 90° ですね。

方解石と黄鉄鉱における面角測定

講演者：

ここにある方解石と黄銅鉱については、私は「面角が何度になるべきだ」という理屈を知りません。きりのよい角度になっていないかもしれませんが、対応する面と面との角度がほぼ一定であるということは、確認いただけることと思います。

受講者：

（一応納得した模様）

講演者：

一つ言えることは、「対称性が低い三斜晶系の結晶では、 90° とか 120° とかいったきりのよい角度があらわれるはずがない」ということです。つまり、きりのよい角度の現れる結晶とそうでない結晶があるのです。

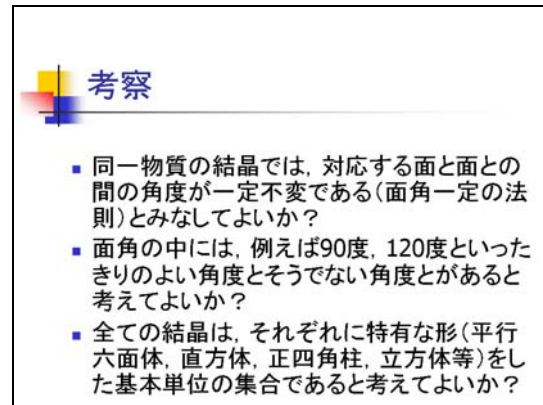
終わるにあたって

講演者：

そろそろ時間ですので、最後のスライドを示して終わりとさせていただきます（図8）。これは、「問題提議」のスライドで、私はこれに対してお答えするのは

控えようかと思います。

ありがとうございました。



考察

- 同一物質の結晶では、対応する面と面との間の角度が一定不変である(面角一定の法則)とみなしてよいか？
- 面角の中には、例えば 90° 、 120° といったきりのよい角度とそうでない角度とがあると考えてよいか？
- 全ての結晶は、それぞれに特有な形(平行六面体、直方体、正四角柱、立方体等)をした基本単位の集合であると考えてよいか？

図8. 「問題提議」のスライド

受講者：

自然界に、このように規則正しい形の物が存在しているのは不思議なことだと感じました。

講演者：

鉱物結晶のこのような規則正しい性質に接し、「これは自然界の摂理なのだ」といったある種の感動が私たちに出てくるのではないのでしょうか？

こういった感情も、ひょっとして「自然を愛する心」の一種なのではないでしょうか...

川崎先生：

この種の感情は、私たち日本人が古来より持ってきた感情とは異質のものであるということが出来ます。西洋の人たちは、五官で認識できる「物質界」とは別に、理性で認識できる「イデア界」が存在する、といった一種の信仰をもった人たちです。このような二項対立的な世界観があったからこそ、自然現象を分析的に眺

めるといった手法が西洋において発達してきたのです。一方、私たち日本人には二項対立的な世界観はありません。自然現象を分析的に眺めるというよりは、自

然と友達になり、自然界にある多種多様なものを集めて楽しむというのが、古くからの日本の文化であったのです。