



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	一般教育・教養教育としての力学教授内容試論
Author(s)	大野, 栄三
Citation	教授学の探究, 16, 1-39
Issue Date	1999-03-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13609
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_p1-39.pdf



一般教育・教養教育としての力学教授内容試論

大 野 栄 三

(北海道大学教育学部)

1. はじめに
2. なぜ物理学を学ぶのか——科学教育と「Sloppy」な科学知識——
3. 直線か円か、それとも……——機械論的自然観——
4. 「1, 3, 5, 7, ……」——自然界の規則性——
5. 力とは何か——原子論的自然観——
6. 月の裏側の宇宙船——重力相互作用について——
7. 規則性再考——運動法則： $F = ma$ ——
8. 接触力と重力——法則の普遍性——
9. 科学の解釈学的次元と物理学教育——慣性の法則——
10. まとめと今後の課題

1. はじめに

大学に於ける一般教育・教養教育で行う物理教育とはいかなる教育であるべきなのか^①自分の専攻する学問領域が物理学と関係するような学生、いわゆる理工系学生は、基礎教育として物理学を学ばねばならないことは明らかであろう。しかし、人文系諸学問を専攻する学生、いわゆる文系学生も、理工系学生のための基礎教育を学んでおけばよいのであろうか。もう少し深いところから再検討してみると、そもそも理工系と人文系という具合に学生を二つのカテゴリーに分類した上で、大学初年度の一般教育・教養教育としての物理教育を考えること自体に問題があるのではないかという疑いも生じる。

高等学校に於ける現在のカリキュラムでは、物理学に関する科目を全く選択履修せずに卒業することが可能になっている。平成元年に改訂された現行の学習指導要領では、「理科のうち「総合理科」, 「物理ⅠA」又は「物理ⅠB」, 「化学ⅠA」又は「化学ⅠB」, 「生物ⅠA」又は「生物ⅠB」及び「地学ⅠA」又は「地学ⅠB」の5区分から2区分にわたって2科目」をすべての生徒に履修させるものとなっている。したがって、物理ⅠA, 物理ⅠB, 物理Ⅱ——物理Ⅱは物理ⅠBを学習した後での選択履修となっているが——のいずれも学ぶことなく卒業可能である。当然のことではあるが、大学はこのような高等学校のカリキュラムに則した入学試験を用意しなければならない。たとえば理学部化学科に入学を希望する学生は化学ⅠB&Ⅱが必須試験科目となるが、残りの物理ⅠB&Ⅱ, 生物ⅠB&Ⅱ, 地学ⅠB&Ⅱの3科目については、それらの中から1科目選択して受験することになる。当然、高等学校で物理に関する科目を全く学習して来なかった学生は、物理ⅠB&Ⅱを試験科目として選ぶことはない。

高等学校に於ける物理未履修の学生が、いわゆる理工系学生として入学してきたことによって、大学初年度の基礎教育は新しい困難に直面することとなった^②化学の基礎教育では、力学

や熱力学の基本的理解が要求される内容が多数登場する。多くの入門的教科書では、前半に気体の分子運動論が紹介されているし、中ほどからは化学反応の熱力学を学ぶことになる。高校で物理をまったく履修してこなかった学生がこのような講義を理解できなくなるというのは容易に想像できる。大学はこのような学生を対象としたリメディアル教育を検討しなければならない状況に直面している。

小学校5年生、6年生あたりから理科への興味関心を失う生徒が増加することが多くの調査結果で指摘されている。いわゆる文系というコースを選択した高校生にとって、科学にかかわる科目はなるべく少ない方が都合が良いだろう。高校で物理をまったく履修しなかった理工系学生は、中学校で学習した基本的知識、たとえば落体の運動、エネルギー保存法則、そして慣性の法則などをおおた忘れており、生活体験や常識にもとづいて物理現象を理解しようとする。科学に幾ばくかの興味をもっており、高校で理工系コースを選択した学生でさえそのような状況なのである。科学に無関心となっている人文系諸学問を専攻するいわゆる文系学生では、事態はより深刻であろう。

物理学という学問領域の基本的理解が欠落している学生は、いわゆる理工系、文系を問わず、あらゆる専攻領域に存在している。このような学生を対象として、大学に於ける一般教育・教養教育は何ができるのだろうか。これが本論文で取り扱う課題である。

- (1) ここでは一般教育と教養教育という両方の言葉で、伝統的な、アカデミックな古典を中心としたリベラル・アーツに対する批判として成立した一般教育 (general education) を意味している。通俗的会話では、一般教育と教養教育の両方の言葉が general education に対して区別なく使われていると思われるため、本論文では両方を並記した。
- (2) 大野栄三「力学概念の理解とリメディアル教育」『高等教育ジャーナル』第4号 (1998年) 24-33頁。

2. なぜ物理学を学ぶのか —— 科学教育と「Sloppy」な科学知識 ——

いわゆる理工系学生の場合には、将来、物理学領域の研究者にはならないとしても、各自の専攻分野に於いて理解しておくべき物理学的知識を教授する講義が設定されなければならないだろう。従来、物理学研究者養成のために行われていた基礎教育の教育内容や教材を活用することで、この教育目的を達成できる可能性はある。確かに、高校で物理を全く履修していない理工系学生が増加したことから、物理を履修してきた学生と同様の扱いはできない。しかし、物理学的知識自体とその研究方法、プロセスを、科学に対していくらかの関心を持つと思われる理工系学生に講義するためならば、従来の教育内容にもとづいて教材を工夫することで対応可能なのではないかと思われる。またおそらく現実には、多くの物理教育担当者が採用する戦略がこれではなかろうか。

これに対して、前節で議論したような問題を抱えた文系学生の場合は事情が異なる。高校で物理を全く履修せず、科学への関心も薄い文系学生にとって、これまでの物理学の基礎教育を転用して授業を構成することは全く無意味であろう。

いわゆる文系学生を対象として、一般教育・教養教育においてどのような物理教育を行うべきかさまざまに検討されている。そのような試みをいろいろな角度から整理することは可能であろう。たとえば、「非専門家向け教養物理教育」に対する次のような分類整理が提案されてい

る⁽¹⁾

- (1) 専門家養成用物理を大幅にレベルダウンした〈水割り物理〉
- (2) 数式ぬきの〈お話物理〉
- (3) 社会問題に傾斜する〈社会派物理〉
- (4) 日常生活に題材をもとめる〈生活派物理〉
- (5) 演示実験を中心にした〈デモンストレーション物理〉

従来の物理学研究者養成のための基礎教育を転用した物理教育は(1)や(2)に分類される講義に陥る可能性が大であろう。中学校レベルの基本的知識すら怪しい学生に対して、中学物理、高校物理を復習する——戦後の生活単元学習の大学教育版とも言える(3)や(4)の講義や、びっくり実験で学生の興味を引く(5)のような講義が考えられる。(3)、(4)、(5)に分類される物理教育が一定の成果を挙げることができるのは確かである。科学に無関心であったいわゆる文系学生が、科学に多少の興味を示し、科学は楽しいものだという印象を持って卒業してくれることは取るに足りない成果ではない。近年、相対主義の跋扈や、極端な社会構成主義⁽²⁾が提示する歪んだ科学観が科学教育に少なからぬ影響を与えている。いわゆる文系学生がそのような思想風潮を無批判に受入れてしまわないように、科学という学問領域へ誘い、その楽しさを彼らに伝えることは決して無駄なことではない。しかしながら、大学に於ける一般教育・教養教育の到達目標としてそれで充分と言えるだろうか。

今日のわれわれが物理学と呼ぶ学問領域が近代に計り知れない影響を与えたことは誰も認めるところであろう。物理学の発展は、ケプラー、ガリレオ等の時代に始まった近代科学の方法論、体系化に深く関わってきた。ニュートンが自身の力学理論の土台とした世界観は、自然科学の領域だけでなく、哲学、宗教までも含む包括的なものであった。その結果、人々は自身の世界観を全体的に構築しなおす必要に迫られたのである。近代科学的自然像はわれわれがもつ世界観の基幹的部分を構成しており、人文系学問の諸領域もその影響を免れることはできない。

経済学者レオン・ワルラスはダランベール、ラグランジュ、ラプラスらが構築した古典力学——19世紀に一応の完成を見た解析力学——をモデルとして純粋経済学を研究したと言われている⁽³⁾。また社会学者マックス・ヴェーバーの著作『社会科学と社会政策にかかわる認識の「客観性」』に目を通して、自然科学の普遍性、法則性がほんの少しでも頭の中をよぎらない読者はいないであろう。そこでは、社会科学の方法論に於ける客観性や合理性、社会科学が展開する因果的説明とその妥当性が物理学を念頭において論じられている⁽⁴⁾。

芥川竜之介は、「地球は円いと云ふことさへ、ほんたうに知つてゐるものは少数である。大多数は何時か教へられたやうに、円いと一図に信じてゐるのに過ぎない。(中略)況や更にこみ入った問題は全然信念の上に立脚してゐる。我々は理性に耳を借さない。(中略)もし嘘と思ふ人は日本に於けるアインシュタイン博士、或はその相対性原理の歓迎されたことを考へるが好い。あれは神秘主義者の祭である。不可解なる荘嚴の儀式である。何の為に熱狂したのかは「改造」社主の山本氏さへ知らない」と書いている⁽⁵⁾。この文章は、科学がある世界観を構成する要素であるとしても、その世界観の持ち主が必ずしもその科学を理解していないという状況をうまく表現している。

丸山眞男は論文「福沢に於ける「実学」の転回」の中で次のように述べている。

「つまり彼は東洋社会の停滞性の秘密を数理的認識と独立精神の二者の欠如のうちに探り当

てたのである。(中略)数理学と彼が云っているのは、厳密にいうと近世の数学的物理学、つまりニュートンの大成した力学体系を指す(中略)。これは福沢に於ていわば学問の学問であり、あらゆる学問の基底であり、予備学であった」⁽⁶⁾

福沢に於ける学問観の根本的転換、そして学問を成立させている精神のあり方そのものの変革を論じているこの論文を読み解く上で、「近世の数学的物理学」について全くの無知であることはきわめて大きな障害であろう。

20世紀に入ると、相対性理論の光速不変の原理や4次元時空間、量子力学に於ける不確定性関係や観測の問題が、それらに適合的な世界観を構築することをわれわれに要求してきた。新しい物理学理論はわれわれの常識に反する物理学的世界を体系的に構築する。そして、それゆえに独特の魅力を放っているとも言える。このような物理学の展開の皮相のみを理解して物理学の諸概念を物理学以外の学問領域で誤用すると、物理学者 Alan Sokal が「だらしのない思考(Sloppy thinking)」と呼ぶ状況が生じることになる⁽⁷⁾ Sokal がだらしのない思考であるとして引用した社会学者 Stanley Aronowitz の次のような議論が、本当に「Sloppy」であるかどうかはひとまずおくとしても、量子力学の影響を受けた独特の世界観に関係していることは誰の目にも明らかであろう。

「量子力学に於ける最近の発展によれば、原因のない結果を知ることが可能であると仮定できる。比喩的に述べるならば、結果は原因に先立ってもよい、つまり、原因が物理的に生じることに先立って結果が認識されてもよいのである。この仮説は、線形時間や因果律という伝統的概念に挑戦し、時間が逆行する可能性のあることを主張しており、あらゆる科学理論に登場する“時間の矢”という概念がどの程度本質的であるのかという問題を提起するものである」⁽⁸⁾

知識の多元主義、相対主義といった思潮は、科学の客観性や合理性をまっこうから否定する議論を——皮肉にも、できるだけ客観的かつ合理的な議論という装いを保つために、科学の諸概念を誤用しながら——展開しようとする。Sokal のいう「Sloppy」な形式で科学による武装を行うのである。その結果として、自然界を対象とした実験は科学知識の構築において何の役にも立っていない、つまり科学のもつ客観性は虚構であるとか、科学知識は社会的構成物であり、その真偽は社会的プロセス、たとえば科学者集団の話し合いで決められるといった言説が、人文系の学問領域においてある一定の支持——全体ではない——を得ている。このような言説に対して多くの科学者のとる態度は、ばからしくて無視を決め込むか、礼儀正しく冷静に(?)反対するかのいずれかであろう⁽⁹⁾ しかし、科学教育の中にもこのような言説が滑り込んでくるとなると、教育を受ける側、つまり学生はそれなりの心構えをしておく必要がある。

Ernst von Grasersfeld は、われわれは世界についての客観的で確実な知識を科学によって獲得することはできないという主観的観念論を主張する⁽¹⁰⁾ そして、この主観的観念論に付随するどうしようもなく悲観的な懐疑主義を克服するために、知識とは何かという問いかけに対して、知識とは世界の客観的な表現(representation)ではなく、われわれが経験に照らして自分自身で構成していくものであるという解答を与える。言い換えれば、人間とは独立して存在する世界について何らかの発見をするのが科学的活動であると考えるのは無意味であり、世界についての知識とは人間が経験に整合的であるように構成してきた観念に過ぎないということになる。Grasersfeld の提唱する科学教育はこのような認識論を基本としており、経験世界に対して比較的信頼でき、かつ内的整合性のあるモデルを学生自身が構成していくことがその目標と

なる。そのようなモデルが首尾よく学生自身によって構成されたかどうか、つまり教師の伝えようとしている科学的概念を学生が構成してくれたかどうかは、学生自身が自分の構成した概念を使用して世界とコミュニケーションできるか否か、つまり、学生が概念を使用して不具合が起きないかどうかで判断される。こうして学習は、観念論的、個人主義的哲学の深い影響を受けた活動となる⁽¹⁾

Grasersfeld の科学教育は初等教育において普及している構成主義の理科教育と呼ばれるものの一派である⁽²⁾ この学派は、多くの科学者がおそらく保持しているであろう素朴な科学的実在論——科学者自身がそれを意識しているかどうかは別にして——を否定する。構成主義の理科教育では、言語的コミュニケーションによって伝達される知識は概念ネットワークに組み込まれ構造化されてはおらず、あくまで受け手側、つまり学生自身が行う構成という作業を通して初めてそのような構造化が達成されるのである。したがって、教師は概念の構成自体を言語的コミュニケーションで伝達することはできず、ただ学生の構成という知的作業を援助するだけという役割を担うことになる。

このような科学教育では、学生と世界との間にコミュニケーションが成立するのであれば、また学生の経験できる世界において概念の有用性が判断できるのであれば、その限りにおいて、自由に概念の外延と内包を構成することが可能となる。言い換えれば、経験世界に適応できて矛盾が発生していないと学生自身が判断できるなら、どのように概念を構成してもよいはずである。しかし、学生と世界との間にコミュニケーションが成立するか否かということが、概念構成の達成度を判断するための基準であると仮定されているところに Grasersfeld が提唱する科学教育の問題がある。

プラグマティックに考えれば、学生が直接コミュニケーションできる、またコミュニケーションしようとする世界はきわめて限られている。多くはなんらかの情報媒体を通じた間接的コミュニケーションである。間接的コミュニケーションは直接的なやり取りを阻害する時間的、空間的隔たりを解消してくれるが、拒絶や無視が恣意的に行えるという性質を持っている。Grasersfeld の認識論によれば、学生は自分の経験世界に適応 (fit) するように、経験との矛盾を解消するように概念を構成していく。概念構成を行う途上で学生がコミュニケーションできる経験世界が限られたものであるという制約は構成の結果に少なからぬ影響を及ぼすだろう。学習後は、自分が構成した概念体系を保護するため、不都合が発生しないようにコミュニケーションを適宜選択していくことになるだろう。このような限定されたコミュニケーションによって構成された知識は、それ自体に都合の良い範囲内でのみその有用性を判断されることになってしまう。

このような実制的制約の下で構成された科学知識の体系というのはかなり柔軟で偏っている。物理学者 Sokal の言葉をかりれば、「Sloppy」と呼んでもよい内容をもっている可能性がある。なぜなら、知識の妥当性の根拠を、世界とのコミュニケーション成立の可否や、限られた経験世界での知識の有用性の問題へと解消してしまうからである⁽³⁾ 科学知識と常識とが適応しないというのはよく知られていることである。たとえば、ふだんわれわれが目にする物体の運動というのは、摩擦力の影響が大きい運動であり、ニュートン力学よりもむしろアリストテレス的な運動学で解釈した方が自然である。「もしも、何かが常識と適応 (fit) しているなら、それはほとんど確実に科学ではない⁽⁴⁾」という言葉は、科学知識と矛盾する常識を持っている子どもを対象として科学教育を行うことの難しさを端的に表現している。

限定されたコミュニケーションで構成され、それによってしか根拠付けられていない知識は、教師が学生に構成してもらおうと計画していた科学知識と大きく食い違っていることも許される。そのため、学生によって構成された知識は様々な文脈の中で自由奔放に使用されることになる。先に紹介した Aronowitz の量子力学にもとづく世界観のような「Sloppy」と評される議論も、ある限定された知識人集団の内部ではコミュニケーションを成立させる上で何の矛盾も生みださないし、何らかの有用性すら持っているのである。しかしその集団から一歩外にでると、「Sloppy」でいかがわしい議論となりコミュニケーションは成立しなくなる。

Grasersfeld の提唱する科学教育によって初等中等教育を受けてきた学生が、知識の多元主義や相対主義といった思潮やそこで展開される科学観に触れた場合、何が起きるであろうか。上述のように Grasersfeld の科学教育は「Sloppy」な科学知識を学生が構成してしまう危険を常に孕んでいる。新しい他者とのコミュニケーションが始まったり、知識の有用性を確認するための新しい世界に直面した場合、もしも、学生の科学知識が「Sloppy」であるならば、新たな整合性を求めて自身の科学知識を再構成することは容易である。その結果、学生の科学知識は、彼/彼女が新たに触れた多元主義や相対主義が与える世界観に整合的な構造を持つように再構成されていくことになる。

「Sloppy」な科学知識しか保持していない学生に、多元主義や相対主義の科学観を教えるというのは、免疫システムのない身体にウィルスを注射するのと同じである。学生の持っている「Sloppy」な科学知識は、科学で武装した多元主義や相対主義を批判的に検討し、その思潮に同意するかしないかを判断する上でたいした役には立たない。Grasersfeld の科学教育では、科学知識を構成する認識論的基盤そのものが多元主義や相対主義の科学観と近い関係にある。向かうところ敵なしのウィルスが爆発的に増殖するように、多元主義や相対主義の科学観が何ら批判的検討を経ずに学生の概念構造の大きな位置を占めることになってもおかしくはない。

このようなウィルス増殖を予防するためのワクチン接種を適切な教授 (instruction) を通して行うことが、大学の一般教育・教養教育の務めであるというのが本論文の立場である。学生の中には批判的思考の果てに多元主義や相対主義の科学観を選択する者もいるであろう。しかし、それはあくまでも学生自身による十分な吟味があつての話である。大学の一般教育・教養教育に於ける物理教育は、まず出発点として、素朴な科学的实在論を再評価し、学生が上述のような批判的検討を行うための知的武装を可能にする教育でなくてはならない⁽⁵⁾

本論文では、以上のような観点から、物理教育の中でも特に力学に関連した教育内容構成を考察する。本節で展開した議論の一部は、学生に対して講義の方向を明らかにするための教育内容として位置づけることができるだろう。力学を取り上げるのは、特殊相対性理論が登場するまでは力学という学問領域に物理学の土台としての位置づけが与えられており、近代に於ける人々の世界観を構築する上で大きな影響を与えてきた学問領域であったからである⁽⁶⁾

本論文に於ける教育内容構成の考察は力学教育に限定されているが、大学の一般教育・教養教育として科学の諸分野を教育するより広いカリキュラムをその背景に想定している。本論文に述べる力学教育は、物理学のより現代的な成果を理解するための準備でもある。これらについては、本論文の第 10 節で改めて触れることにする。さらに、理工系学生のための実験設備が完備されていないような文系学生主体の大学に於いても実践可能であることを念頭に置いている。また、以下の諸節の内容を高等学校に於ける物理教育へと敷衍することも可能であろう。

- (1) 桑原雅子「大学改革と教養物理教育」『桃山学院大学教育研究所「研究紀要」』第7号（1998年）31-53頁。
- (2) 本論文に於ける「極端な社会構成主義」とは、科学の外的要因を過度に強調して科学という人間の知的営為を分析しようとする社会学の一派を意味する。その基本的な主張は、科学知識とは、実在のあいまいな把握によってつくられた、ある共同社会のなかでのみ有効な信念の体系にすぎないというものである。たとえば、Andrew Pickering, *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*, (University of Chicago Press, 1984)などを参照。
- (3) 森嶋通夫「思想としての近代経済学」（岩波新書，1994年）第2章。
- (4) マックス・ヴェーバー『社会科学と社会政策にかかわる認識の「客観性」』富永祐治，立野保男訳，折原浩補訳（岩波文庫，1998年）。
- (5) 『芥川龍之介全集』第13巻『侏儒の言葉』（岩波書店，1996年）35-36頁。全集の注解に「改造」社主の山本実彦が1922年にアインシュタインを日本へ招いたとある。相対性理論を理解していないのに熱狂している日本の知識人を、芥川龍之介は醒めた目で眺めている。芥川は相対性理論を理解していなかったかもしれないが、彼の世界観に科学は無縁ではなかった。
- (6) 『丸山眞男』第三巻（岩波書店，1995年）115頁。
- (7) Alan Sokal, “Transgressing the Boundaries: Towards a Transformative Hermeneutics of Quantum Gravity” in the “Science Wars” special issue of *Social Text* (1996), pp. 217-252.
Social Text へパロディ論文を投稿したSokalの行為そのものの是非については議論があるだろうが、本論文では「Sokal Affair」によって明らかになった科学的概念の乱用について注目している。「Sokal Affair」と呼ばれている事件についての簡単な紹介としては、黒木玄「ソーカル事件」『大学の物理教育』1998-2号（1998年）25-28頁や、雑誌記事“Undressing the Emperor,” *Scientific American* (March, 1998), pp. 30-31.を参照。「Sokal Affair」については多くの雑誌にさまざまな論稿が発表されている。最近のものとしては、「サイエンス・ウォーズ」『現代思想』vol. 26-13（青土社，1998年）がある。また、インターネット上での議論については、'<http://www.physics.nyu.edu/faculty/sokal/index.html>'などを参照のこと。
- (8) Alan Sokal, *ibid.*引用欧文に「linear」とあるのは「線形」と訳した。
- (9) 多元主義，相対主義の言説に対して、さまざまな学問分野に於ける研究者の反論が以下の文献にまとめられている。P. R. Gross, N. Levitt, M. W. Lewis eds., *The Flight from Science and Reason*, (New York Academy of Science, 1997).
- (10) Ernst von Glasersfeld, “Cognition, construction of Knowledge and Teaching,” *Synthese*, **80** (1989), pp. 121-140.
- (11) M. R. Matthews, *Science Teaching*, (Routledge, 1994), Ch. 7.
- (12) D. C. Phillips, “The Good, the Bad, and the Ugly: The Many Faces of Constructivism,” *Educational Researcher*, **24** (1995), pp. 5-12.
- (13) Robert Nola, “Constructivism in Science and Science Education: A Philosophical Critique,” *Science & Education*, **6** (1997), pp. 55-83. 信念を構成すれば知識として充分なのではなく、妥当な理由にもとづいて適切に構築された推論によって裏付けられていることが要求されるのだと主張し、構成主義的科学教育を批判している。
- (14) Lewis Wolpert, *The Unnatural Nature of Science*, (Harvard University Press, 1994), p. 11.
- (15) 大野栄三「教育内容からの問い直し」『大学の物理教育』97-2号（1997年）37-39頁。
- (16) たとえば、H. ヘルツ『力学原理』川上友好訳（東海大学出版会，1974年）15頁には、自然現象を力学法則に還元することが物理学の課題であると述べられている。

3. 直線か円か、それとも……—— 機械論的自然観 ——

「古典物理学的自然像が機械論的であるということについては異説は尠いであろう。しかし、その際、「機械論的」ということで就中なにを含意するかという段になると、必ずしも一義的に明晰ではない」と述べたのは哲学者廣松渉であった⁹⁾。物理教育においても、廣松の指摘するように「機械論的」という言葉の意味するところが明晰に取り扱われてこなかった。場合によっては、古典物理学が「機械論的」であるということは力学を学べば自明であり、あえて取り上げてその明晰性を云々する必要はないというような扱い方ですらあった。

古典力学によれば、物体が運動を決定するのはその初期条件と各時刻に物体へ作用する力である。これらの条件が既知であれば、物体が力学理論によって決定される軌道を機械的に運動する様子を導きだすことができる。本論文では、このような力学理論の特徴である初期条件と運動との因果的關係を機械論的自然観の一側面であると規定する。本節ではこの機械論的自然観の一側面を教育内容としていかに捉えるべきかを考察する。

これまでの物理教育では、等加速度運動の学習として、落下物体の速度と経過時間の関係や、落下距離と経過時間の関係等について教えられてきた。そしてこれが等加速度直線運動の到達点として位置づけられていた。具体的に数式で示せば、落下速度 $v(t)$ 、落下距離 $s(t)$ 、経過時間 t 、重力加速度 g 、初速度 v_0 として、

$$v(t) = v_0 + gt \quad (1a)$$

$$s(t) = v_0 t + \frac{1}{2}gt^2 \quad (1b)$$

$$v(t)^2 - v_0^2 = 2gs(t) \quad (1c)$$

となる。加速度 g を適当に修整することで、斜面をすべり落ちる物体についてもこれら関係式で理解できる。

式 (1a) から (1c) には確かに初期条件として初速度 v_0 が登場している。しかし、このような初期条件の登場の仕方は、先に述べた機械論的自然観を教えるうえで最適とは言えない。落下運動のような直線運動では、初期条件 v_0 が変化しても物体の運動する軌道が変化するわけではない。これら関係式の指導では、むしろ落下速度と落下距離それぞれの時間依存性が強調されている。つまり、式 (1a) と (1b) は、落下を初めて t 秒経過したときの速度と落下距離を求めよという問題に解答するために使用するものとして教えられ、また式 (1c) は距離 $s(t)$ 落下したときの速度を求めやすいように式 (1a) と (1b) から導出されたものである。

このようなことになる原因は、力学の学習を直線運動から始めるという伝統にある。摩擦のない平面上の等速直線運動を何とかして——ドライアイスを詰め込んだパックを利用したりして——実現させ、次にバネばかりを付けた台車を一定の力で引っ張ることで等加速度直線運動と力の関係を見せ、そして鉛直落下運動や斜面上の運動という等加速度運動に至る。直線運動から始め、かつ等速度運動から等加速度運動へと進むやり方がきわめて一般的な力学の教育内容編成である。

直線運動から学習を始めることには合理的理由は充分にある。一般的な運動、たとえば投射物体の運動は複雑であり、一般的運動を分析し単純化した特殊な運動である直線運動から力学現象の解析を始めることは教育内容の自然な編成であると思われる。戦後の高等学校物理の学習指導要領も一環して直線運動から始まる編成になっている。しかし、この編成が自然なもの

として許されるためには、ひとつの条件が満たされていなければならない。その条件とは、学生がある程度のところまで力学を学んでいってその全貌を把握することである。

直線運動から始めるというのは、特殊かつ具体的である直線運動の理解の上に学習を積み上げていき、より一般的な運動を理解することで学習を終えることを意味する。このような学習の順序が許されるためには、学生が最終的に力学の全貌をある程度把握することを前提としている。学生は力学をある程度理解したところで、はじめに学んだ特殊かつ具体的事例であった直線運動を力学理論の中にあらためて位置づけなければならない。この過程を経ることで単純な直線運動の中に存する機械論的自然観を捉えることがはじめて可能となる。この点から言えば、物理 I B で等加速度の直線運動までを学習し、物理 II で円運動などの一般的な運動を学ぶことになっている現行の高等学校学習指導要領は、物理 II の学習を終えることを前提としている教育内容編成である。したがって、現行の指導要領はいわゆる理系学生を対象としたカリキュラムとしてしか機能していないと言わざるを得ない。そして、いわゆる文系学生の多くは物理 I B のみの学習か、それすらも履修していないという現状であるため、力学と機械論的自然観の関連を議論できる段階にはないということになる。

本論文では、力学の包括的な知識体系をある程度まで理解できる段階まで付き合ってくれるような理系学生のみを対象としているのではない。むしろ、いわゆる文系学生が、必要不可欠な基本的科学知識を明確に理解した上で、力学が作り出した機械論的自然観を捉えることが目標である。そのため一般的運動から導入する教育内容編成を考え、次のような設問から始めることにする。

大砲で弾丸を標的に命中させようと考えている。そこで、大砲のねらいをまっすぐ正確に標的にあわせた。弾丸を発射すると、標的に命中するだろうか (図 1 参照)。

この設問には二通りの正解がある。ひとつの解答は標的の中央に狙った通りに命中するというものであり、もうひとつは標的の下に当たるというものである。ふたつの解答の内どちらが正解であるかは、弾丸が射出されるときの初期条件、つまり弾丸の初速度に依存している。十分な速度で射出されれば標的の中央に命中すると言えるし、初速度が小さければ、弾丸は標的に届かない。

学生がどちらの解答を与えるかは、彼/彼女の経験的知識や、設問をどのように理解したかに依存するであろう。また初速度に依存することは、それぞれの解答を与えた根拠について議論をすれば容易に結論されることであろうし、設問に対する解答の中で、既に初速度に依存すると述べる者もいるかもしれない。標的の下に当たった場合、どのように状況を変更すれば、弾丸を標的に命中させることができるかを考察してみる。弾丸を打ち出す速度を大きくするとか、標的の上の方をねらって発射するという解答は容易に得られるだろう。

以上のようなやり取りで、初期条件として弾丸の初速度の大きさだけでなくその方向という要素があることを学生が了解し、初期条件によって運動の軌道が規則的に変化することを理解してくれることを期待している。標的の下に弾丸が当たったことから、弾丸の射出方向を少し上向きに変えてみるというのは直観的に浮かぶ対応策である。それによって、弾丸の射出方向に依存して、着弾点がどのように変化するかを見ておく。弾丸が描く軌道は、初速度というベクトル量の大きさと方向に依存して規則的に変化している様子が窺えるはずである。

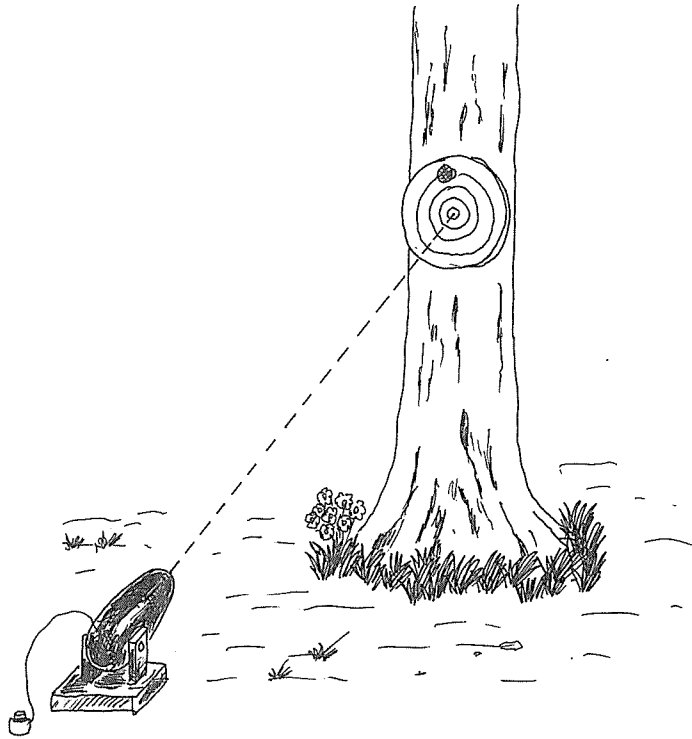


図1 標的に照準を合わせている大砲
大砲から打ち出された弾丸は標的に命中するだろうか？

この結果を体感する直観教授として、次のような活動が考えられる(図2参照)。二人一組で、ひとりが目隠しをして壁に引かれた2本の直線に挟まれた領域をねらってボールを投げる。もう一人はボールがどのように投げられたか、そしてねらった領域に命中したかを確認して、次の一投をどのように投げるか——「もう少し上向き」、「もう少し下向き」、「もう少し速く」など——を支持する。次ぎに交代して同じことをする。この活動を通して、ボールを投げるときの条件がボールの運動とどのように関係しているかを考察する。ボールを投げる人と壁の間に2本の直線よりもやや高い障害物を置くと、より複雑な運動をコントロールしなければならないので、初期条件依存性がいっそう明らかになる。また、投球の結果をビデオテープに記録しておき、仲間の指示によってボールの軌道がどのように変化したのかを確認することも有効であろう。

弾丸を標的に命中させるような物体の運動は一般的な、つまり直線運動ではない運動である。しかし、そのような一般的運動をコントロールして物体を標的に命中させようとする行為は、多くの学生が子ども時代に経験していることであろう。たとえば、フレーベルは少年の衝動的行為として次のようなことを述べている。

「生命の衝動に従うという点では、少年は、もっともっと、ほとんど信じられないほど、近視的である。別の少年は、隣の建物の小さな窓をめがけて、なんとかそれにあててやろうと実に真剣に努力しながら、長いこと、石を投げていた。しかし、そのさい、かれは、石が自分の欲求ないし願望どおりに窓にあたれば、窓は必ず二つに割れるはずだなどとは、予感もしていな

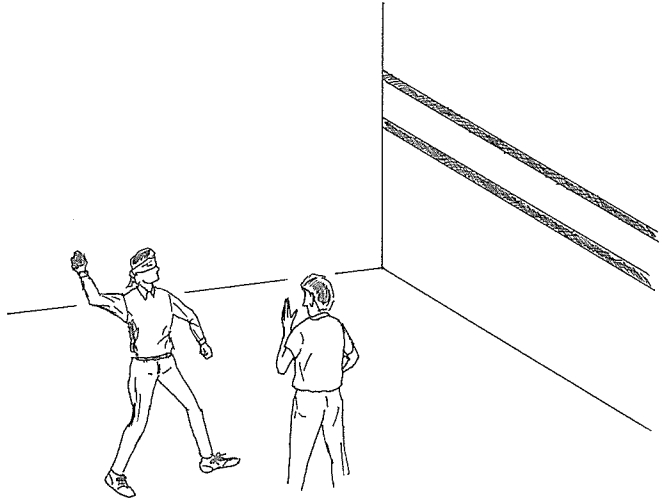


図2 ボール投げの活動

壁にある2本の線の間を狙って、目隠しした人がボールを投げる。もう一人は投げる方向やボールの速さについて支持をだす。壁との間に障害物を設けると、制御しなければならないボールの運動が複雑になる。

かったし、いわんや自分にそう言い聞かせたりなどは、全くしていなかった。石が命中する。窓はがちゃんとなる。少年は、その場に根が生えたように立ちすくむ⁽²⁾

単純な直線運動というのは、身の回りの物体の落下という現象を目撃することでなじみ深いものではある。しかし、運動の制御という観点から見ると、直線運動、たとえば落下運動というのは面白みに欠ける運動である。せいぜい途中で落下をくいとめるというのが達成感ある運動の制御といえる。しかし、物体を標的めがけて投げるという運動は、一般的で複雑な運動ではあるが、その運動を自分自身で制御するということ——標的に向かって物体を投げ出すときの方向や力の入れ具合——を身体感覚を通して強く実感できる運動である。われわれはこのような強い実感から機械論的自然観を捉えるための分析的思考に踏み出すことにする。

(1) 廣松渉『事的世界観への前哨』（勁草書房、1975年）156頁。

(2) フレーベル『人間の教育』荒井武訳（岩波文庫、1964年）上巻163頁。

4. 「1, 3, 5, 7, ……」——自然界の規則性——

標的をまっすぐにねらって発射した初速度の小さい弾丸の運動を調べてみる。先に確認したように、弾丸は標的への直線軌道から下方へと離れていく。その隔たった距離を一定時間間隔で測定する（図3参照）。その結果が、たとえば表1に与えられた値になったとしよう⁽¹⁾

測定結果を表1で与えた。ここでの目的は測定方法の学習ではなく、結果の中にある規則性へ目を向けさせることである。測定が煩雑になるようであれば実際に行わなくてもよいと思われる。表1にある距離 $L_1, L_2, ……$ を眺めてどのような規則性を発見できるだろうか。幾人かの学生が、 $L_2/L_1=2^2, L_3/L_1=3^2, L_4/L_1=4^2$ という規則性を見いだすかもしれない。また、直

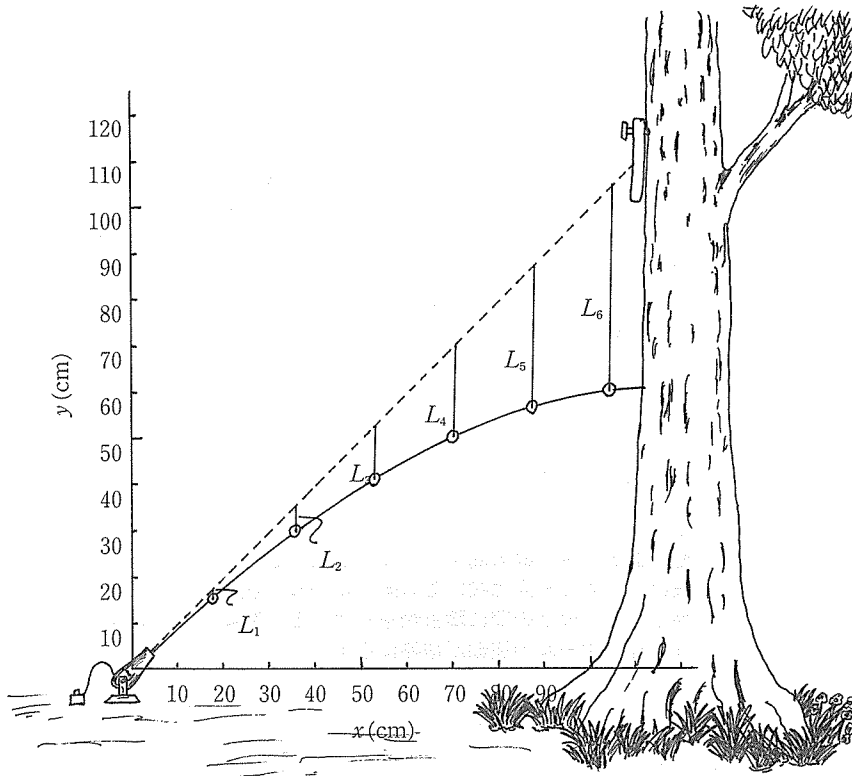


図3 弾丸の運動

標的をまっすぐに狙って発射したが、弾丸の初速度が小さく、標的を狙った直線の弾道からはずれて下方へ落下している。0.05秒間隔で弾丸の位置を測定した。距離 L_i ($i=1 \dots 6$) は直線弾道からずれて下方へ落下した距離。

表1 弾丸の位置

時間 t (秒)	位置 x (cm)	位置 y (cm)	下方へのずれ L (cm)
0	0	0	0
0.05	17.63	16.41	$L_1=1.22$
0.10	35.18	30.30	$L_2=4.88$
0.15	52.64	41.67	$L_3=10.97$
0.20	70.00	50.54	$L_4=19.47$
0.25	87.29	56.92	$L_5=30.37$
0.30	104.49	60.83	$L_6=43.66$

0.05秒ごとに測定した弾丸の位置と、標的をねらった直線軌道からずれて下方へ落下した距離 L_i ($i=1, 2, \dots, 6$)。

線軌道から下方へずれていく距離 L_1 の増加率に注目させれば、 $(L_2 - L_1)/L_1 = 3$, $(L_3 - L_2)/L_1 = 5$, $(L_4 - L_3)/L_1 = 7$ といった規則性を見つけだすかも知れない。また、水平方向には同じ時間に等距離進んでいることにも注目したい。

このような斜め方向へ投射された物体の運動が持つ規則性が、水平方向への投射運動や、鉛直方向の落下運動においても見られることを確認しておく（図4参照）。ガリレオ・ガリレイは1609年にアントニオ・デ・メディチに宛てた手紙の中で次のように書いている。

「ところで、いま私は残った問題に取り組んでいる。それは投射体の運動で、多くは砲撃に関係する。最近私はつぎの事を見出した。平原より高いところに大砲をすえ、完全に水平に向けて発射する。火薬の多少にかかわらず、やっと弾丸が砲から飛び出すほどにしても、弾丸は地上めがけて同じ速度で落ちてゆく。したがって、いかなる水平投射においても、ボールは地上に同時に着く。投射が長くても、短くても、あるいは投げ出されるやいなや真っ直ぐ落ちてくも」⁽²⁾

力学教育においてこのような実験を考察することはこれまでも行われており、それらを参考にして教材化する必要がある⁽³⁾

以上のような実験と考察によって見出された規則性を次のように整理しておく。

規則性A 「0.05秒ごとに落下していく距離 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n, \dots$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) には、 $L_n/L_1 = n^2$ という関係が成り立つ」
 規則性B 「0.05秒ごとに落下していく距離 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n, \dots$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) には、 $(L_{n+1} - L_n)/L_1 = 2n + 1$ という関係が成り立つ」
 規則性C 「水平方向には、0.05秒ごとに同じ距離だけ進んでいる」

しかし、これらの規則性を学生が見いだした時点でこの設問の目標が達成されたのではなく、そこから規則性についての学習が始まるのである。

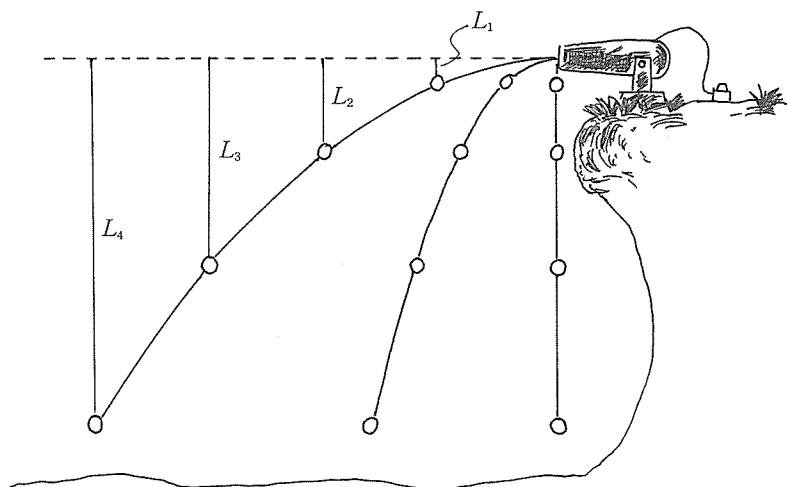


図4 水平方向の投射運動

表1の測定結果から計算すると、 $L_2/L_1=4.00$ 、 $L_3/L_1=8.99$ 、 $L_4/L_1=15.96$ 、 $L_5/L_1=24.89$ 、 $L_6/L_1=35.79$ となるが、この結果から規則性Aが成立していると判断する根拠は何だろうか。

同じように、 $(L_2-L_1)/L_1=3.00$ 、 $(L_3-L_2)/L_1=4.99$ 、 $(L_4-L_3)/L_1=6.97$ 、 $(L_3-L_2)/L_1=8.93$ 、 $(L_3-L_2)/L_1=10.89$ となるが、この結果から規則性Bが成立していると結論できる根拠は何だろうか。

この設問に対して、より精密な測定を行えばよいという解答が学生から出されるだろう。それはここで論じている規則性A、B、そしてCを確認していく上でのひとつのやり方ではある。しかし、空気抵抗がある場合には、高精度の測定を行っても、得られる結果は規則性A、B、そしてCが与える数値に漸近していく傾向を示さない。仮に、測定精度の向上で、ある規則性が主張する数値に近づいていく傾向が得られるような状況であったとしても、単なる測定精度の向上だけでは、物理学が探究している自然界の規則性を本質的に理解したことにはならない。

学生が初等・中等教育で学んできた理科教育では、多くの場合、実験によって得られた一連の測定値からある規則性らしき結果——たとえば、 $(L_2-L_1)/L_1=3.00$ 、 $(L_3-L_2)/L_1=4.99$ 、 $(L_4-L_3)/L_1=6.97$ 、 $(L_3-L_2)/L_1=8.93$ 、 $(L_3-L_2)/L_1=10.89$ ——が導出できたならば、ある規則性、たとえば、先に述べた規則性Bが見いだされたと即断して授業を先に進めている。つまり、そのように即断された規則性から落体の法則である式(1b)へ誘導したり、逆に、式(1b)を用いて規則性の確からしさを確認したりするのである。

ここには教える側と学ぶ側の双方に、授業では明示的に語られることのないひとつの理解がある。つまり、お互いに何とかしてある規則性を見いだして、そこに落ち着くべきであるという前提で実験結果を眺め、そして解釈しているのである。実験自体も、予めねらっている規則性を捉えやすい結果が得られるようにお膳立てしてあると言えなくもない。このような傾向が生じるのは、物理学という学問の性質から考えて当然とも言える。物理学とは、自然界が普遍的法則性を有していることを前提として、より普遍性の高い自然界の法則性を見いだそうとする知的営為に他ならないからである。しかし、物理学とは何であるのかをこれから学ぼうとしている学生、特に、いわゆる文系学生はこの暗黙の了解について一度は明示的に考えてみる必要がある。

学生らは初等、中等教育において、まず初めに規則性ありきで学習してきたのではないだろうか。規則性があることは当然とされており、それがあから教える側には教えることがあり、学ぶ側には記憶することがあったのではなかろうか。われわれが授業の前提としている自然界の規則性とはどのような性質なのかあらためて考えてみなければならない。

物体の落下というのは、われわれにとってきわめて普遍的な現象である。その現象が示す規則性——先に述べた規則性A、B、そしてC——を本質的に理解するためには、その背後にある普遍的法則や理論を明らかにし、規則性を説明してくれる理論について考察しなければならないのである。先に述べた初期条件とその後の運動の軌道との因果的関係を時間的に跡付けただけでは不十分であり、その軌道を決定している力の介在を議論する必要がある。そこで、落下という現象を引き起こしている原因である力、重力についての学習へと進むことにする。

- (1) 本論文では速度に比例した空気抵抗が働いていると想定して理論計算した結果を用いて議論を進めている。小数点以下第2位の精度で数値を与えているが、それは議論の本質を左右するものではない。適当な教具を使って実測した精度の低い結果を用いても、講義の展開は本論文と同様である。しかし、学生にとってはデータが現実味のあるものになるため、なるべく教具による実測値を利用するのがよいだろう。
- (2) スティルマン・ドレイク『ガリレオの思考をたどる』赤木昭夫訳（産業図書、1993年）151頁。
- (3) 板倉聖宣「授業書〈力と運動〉とその解説」『科学教育研究』第6号（国土社、1971年）201-202頁。また、沿直方向の落下運動の規則性を調べる実験として、J. E. Gartrell, Jr, *Methods of Motion*, (NSTA, 1998), pp. 50-54. がある。

5. 力とは何か——原子論的自然観——

弾丸の運動が示す規則性を理解し、それが自然界の普遍的法則性——これが物理学に於ける探究の対象である——の現れであることを確信するためには、運動の原因である力について考察しなければならない。なぜ運動の変化にあのような規則性があるのか。それは弾丸に力が働くからである。力とは何か。重力である。その重力とは何かという具合に事が進むと思われるのだが、ふつうの力学教育ではこのような筋の運びは採用されない。

初等・中等教育に於ける伝統的な力学教育では、力は運動の変化の原因であるとして登場する。このように力を定義してみたところで、力そのものについては何も明らかにはならない。なぜならば、運動が変化したのはなぜかという問いに対して、運動を変化させる力が働いたからと答えたのでは、力と運動の関係が納得できるだけであり、力そのものが何であるのかを詮索する上で助けにはならない。

物理学に於ける力とは直接観察することが不可能な概念である。われわれは日常経験から、力は直接観察可能なものであると考えがちである。「綱引きでは思いっきり力を出して引っ張ろう」とか、「彼は力があるから」などとと言うとき、あたかも力を観察可能なものとして取り扱っている。しかし、綱引きの時に湧いて出てくる力は見えないし、彼を解剖しても力はどこにも観察されない。われわれにとって観察可能なのは、実は物体の運動であり力ではない。したがって、直接観察することが無理な力そのものを議論するよりも、観察可能な運動という現象に焦点をあわせるほうが得策であるということになり勝ちである。

伝統的な力学教育では、力そのものを真正面から探究するよりも、その機能を理解していくことに重点が置かれている⁹⁾。これは、上で述べたように力が観察不可能な概念であること、また、まず古典力学を教えることが教育の目標とされていることを考えれば、ある意味で当然と言える。物理学者ヴァイツゼカーが述べているように、「一般力学の教えるところは、実際にいかなる類いの力が存在しなければならないかという点にはない」のである¹⁰⁾。つまり、古典力学の範囲内では、力学を学びながら、力をどのように表現すれば運動の変化を議論することが可能となるのかを明らかにしていくことしかできないのである。

力とは運動の変化の原因であるとひとまず了解しておいて、どれだけの大きさの力がいつ、どこで、どの方向に働いたのか、その結果、物体の運動がどのように変化したのかを学習する。そうやって、力の表現の仕方——通常の理科教育では、専ら巨視的物体の運動を取り扱うため、巨視的な力の表現となる——と力と加速度の関係を理解していくのである。

このような内容の配列は、古典力学のみを教育内容として、いわゆる理系学生を対象に授業

を行う場合には問題はないかもしれない。彼/彼女らは力学をある程度学んでその全貌を把握した後、力学以外の領域へと学習を進め、将来、力とは何かという問題にゆっくりと立ち向かう準備をしていけばよいのである。それまでは伝統的やり方で理解しておけば良いし、むしろ伝統的やり方で学ぶ古典力学を自家薬籠中の物にしておくことが専門家になるために要求される。しかし、理系学生を対象としたこの系統的やり方を、いわゆる文系学生に要求するのは酷であろう。われわれは力とは何かという問題を真正面から取り扱うために、古典力学という枠の外に出なければならない。

力という概念を教育内容として真正面から捉え直すためには、機械論的自然観のもう一つの側面——ひとつは初期条件と運動の因果的關係性である——を射程に入れなければならない。それは、すべての自然現象が物質を構成している微小な粒子、いわゆる原子の運動へと還元して理解することができるという原子論的自然観である。このような世界観に立てば、力は原子間の相互作用に帰着する。これは、アイザック・ニュートンが『プリンシピア』の執筆時から既に構想していたことであろう。『プリンシピア』第1版の序文でニュートンは次のように述べている。

「私は他の自然現象も力学の諸原理から同種類の推論によって導きだされるのではないかという希望をもっている。というのは、私は多くの理由から、それらの現象もすべて、ある種の力に依存するものではないのか、その力によって物体の各微小部分は、まだ知られていない原因により、あるいはたがいに相手方へと押しやられて規則正しい形に凝集したり、あるいはたがいに反発しあって遠ざかったりするのではないかと想像させられるからである。これらの力がまだ知られていないために、哲学者たちはこれまで自然の探究を企てたが、失敗に終わったのである。しかし私は、ここに述べられた諸原理が、哲学のこの方法あるいはより正しい他の方法に対して何らかの光明を与えるであろうことを望むものである」⁽³⁾

このような原子論的自然観を構想することによって、「有機体主義的な全体論に対して、機械論的な要素主義が存在論的な基礎づけを与えられることになった」⁽⁴⁾のである。そして、ウェストフォールの言葉を借りれば、デモクリトス的な粒子論・機械論の伝統とピュタゴラス的な数学的伝統が、力の概念をとおしてニュートンによって一つに総合されたのである⁽⁵⁾このふたつの伝統が総合されて描きだされた自然像は、先に述べたようにわれわれの世界観に大きな影響を与えてきた。このような原子論的自然観の重要性を考えれば、それを射程に入れて力学教育の内容を再検討してみることは、けっして無意味な試みではない。

初等的な力学教育では、剛体性、不可入性という特徴をもっているものとして物体を扱うか否かは、教える状況に依存して臨機応変に判断されている。物体とは、ある一定の空間を占有しており、運動前後だけでなく運動中もその形は変化しないとみなされる場合もあれば、衝突現象や力積を教えるときのように、ゴムまりのようにグニャリと変形するのが物体であると教えたりする。

原子論的自然観では、物質を構成している原子という微小な存在は、剛体性、不可入性という表象に適合的である⁽⁶⁾素朴な原子的存在はいかなる場合も形をかえず、ある一定の微小空間を占めている不可入体である。巨視的物体は剛体性と不可入性を備えた微小な原子が凝集してできているが、それ自体は剛体性や不可入性といった特徴を示すわけではない。巨視的物体が他の物体と衝突した場合、原子を凝集させている力と衝突により加わる力との関係で、原子そのものは全く変形しないが、それらの位置関係が変化して、巨視的物体の形状は変形する。

本論文では、力の概念の学習を行う土台として、ニュートンの時代の素朴な原子論的自然観そのままではなく、現代物理学の成果を使って適宜洗練した原子論を用いることにする。まず、巨視的物体とは微小な原子が多数集合したものであるとする。厳密な議論を行うならば、数種の元素からなる化合物や分子性結晶などがあるが、本論文では、物質は同一の微小な構成単位が強い引力で凝集することによって存在していると考え。また、本論文の範囲内では、原子が原子核と電子からなる等のより微細な構造については触れない⁽⁷⁾。そういった意味では、ふつうに原子や分子とよばれている物体の微小な構成単位を、便宜上、原子と呼んでいることになる⁽⁸⁾。

講義では、物体は剛体性と不可入性をもった微小な粒子である原子の集合であるという了解から始める。物体を構成する原子の間には強い引力——この引力は距離が離れると急激に小さくなる——が働いており、この引力によって物体はひとつのまとまりとして運動すると考える。原子を凝集させて物質を構成させているこの引力については、接触力を学習する際に取り扱うことにし、次節で述べる物体間の重力相互作用の授業では、巨視的物体は強い引力で結びあった微小な原子の集団であることを前提とする⁽⁹⁾。

- (1) 大野栄三「明治期物理教科書に於ける力の概念の取り扱い」『教授学の探究』第15号（1998年）21-37頁。
- (2) C. F. v. ヴァイツゼカー『自然の統一』斎藤義一、河井徳治訳（法政大学出版局、1979年）141頁。
- (3) アイザック・ニュートン『プリンシピア』中野猿人訳（講談社、1977年）10-11頁。
- (4) 廣松渉『事的世界観への前哨』（勁草書房、1975年）152頁。
- (5) Richard S. Westfall, *Force in Newton's Physics: The Science of Dynamics in the Seventeenth Century*, (Elsevier, 1971), p. 512.
- (6) 廣松渉、前掲書、153頁。
- (7) 原子についての量子力学的理解は別のまとまりある単元として検討することを想定している。本論文第10節を参照。
- (8) 授業で原子という用語を使うことの是非については、さらに検討が必要だろう。原子という言葉で学生がイメージする素朴な世界観を有効に利用しようという目論みがあるのだが、あいまいな定義であるという欠点を内包している。
- (9) 本論文では、接触力についての学習は重力相互作用と運動の第二法則を学んだ後に設定している。しかし、まず接触力に関して理解を深めた後で重力相互作用を学ぶという配列も可能ではある。どちらが望ましいか判断するためには、さらなる検討が必要と思われる。

6. 月の裏側の宇宙船——重力相互作用について——

前節で述べた物質の原子論的描像を了解した上で、先に述べた落下運動の規則性を考察するのであるが、その前にそのような落下を引き起こす力、重力について学習する。弾丸の軌道を調べて導出した前述の規則性A、B、そしてCが生じるのはなぜかを考えた場合、すぐにそれは物体が重力によって地球に引っ張られているからであると思ひ浮かぶであろう。

重力の性質について、知っていることをすべて挙げてください。

「巨人、引力」「何だい其巨人引力と云ふのは」「巨人引力と云ふ題さ」「妙な題だな、

僕には意味がわからんね」「引力と云ふ名を持つて居る巨人といふ積りさ」「少し無理な（積り）だが表題だから先づ負けて置くと仕様。夫から早々本文を読むさ、君は声が善いから中々面白い」「雑ぜかへしてはいかんよ」と予じめ念を押して又読み始める。

ケートは窓から外^{そと}面を眺める。小児が球を投げて遊んで居る。彼等は高く球を空中に擲^{なげう}つ。球は上へ上へと^{しぼら}のぼる。暫くすると落ちて来る。彼等は又球を高く擲つ。再び三度。擲^{なげう}つ度に球は落ちてくる。何故落ちるのか、何故上へ上へと^{なげ}のぼらぬかとケートが聞く。「巨人が地中に住む故に」と母が答へる。「彼は巨人引力である。彼は強い。彼は万物を己れの方へと引く。彼は家屋を地上に引く。引かねば飛んで仕舞ふ。小児も飛んで仕舞ふ。葉が落ちるのを見たらう。あれは巨人引力が呼ぶのである。本を落す事がある。巨人引力が来^{なげ}ひといふからである。球が空にあがる。巨人引力は呼ぶ。呼ぶと落ちてくる」⁽¹⁾（夏目漱石、『吾輩は猫である』から）

1. すべての物体に作用する引力である。

重力はすべての物体に作用する。重力が作用しない物体は、残念ながら今のところない。もしあれば、どんな楽しいことができるだろうか。重力は物体を構成している微小な原子一個一個に作用している。あらゆる原子の間に働く重力は引力である。これも今のところ例外は見つかっていない。

2. 重力は相互作用であり、作用を及ぼす物体（原子）と作用が及ぼされる物体（原子）の両方が存在して、はじめて生じる引力である。そして、作用を及ぼす側は、同時に、作用を及ぼされる側でもある。原子AとBの2個があるとき、それらの間に働く重力は引力で大きさが互いに等しい。つまり、 $f_{AがBを}$ （AがBを引っ張る重力）= $f_{BがAを}$ （BがAを引っ張る重力）である（したがって、重力に関しては、運動の第3法則が自ら満足されている。図5(a)参照）。

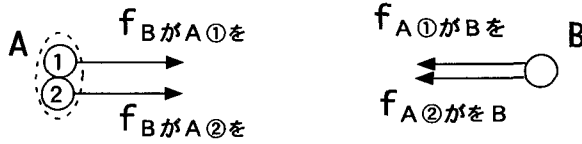
原子1個からなる物体A —— つまり原子それ自体なのだが —— と、原子1個からなる物体Bの間の重力相互作用を考える。上述の性質から、物体Aの原子が物体Bの原子を引っ張る重力は、物体Bの原子が物体Aの原子を引っ張る重力と同じ大きさである。これは、ニュートンの運動の第三法則である作用・反作用の法則が、重力相互作用に関して言えば自ずから成立していることを示している。

作用・反作用の法則が成立する力は、その起源をたどればひとつの相互作用に帰着する。作用と反作用という二つの巨視的力は、実は、一つの相互作用の分離不可能な成分に対応しているのである⁽²⁾

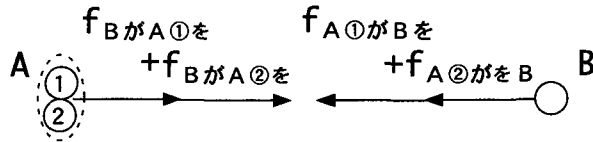
次に、物体の質量と重力はどのように関係しているのだろうか。物体Aだけが原子2個によって構成されている図5(b)の場合を考えよう。物体Bは原子1個とする。物体Aが物体Bを引っ張る重力 $f_{A全体がBを}$ は、物体Aを構成する2個の原子各々が物体Bを引く重力 ($f_{A(1番目の原子)がBを}$ と



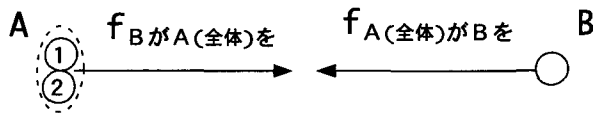
(a)



(b)



(c)



(d)

図5 重力相互作用

(a)は原子Aと原子Bの間の重力相互作用。(b)から(d)は物体Aが原子A①と原子A②からなるときの、物体Aと物体Bの間の重力相互作用を分析している。(b)は各原子の間の重力相互作用を表している。(c)はそれら相互作用の総和、(d)は物体Aと物体Bに作用する重力の大きさが等しく、向きが反対の引力であることを示している。

$f_{A(2番目の原子)がBを}$ の総和である。 $f_{A(全体)がBを} = f_{A(1番目の原子)がBを} + f_{A(2番目の原子)がBを}$ 。一方、物体Bが物体Aに及ぼす重力は、物体Bが物体Aを構成する2個の原子をそれぞれ同じ強さの引力 ($f_{BがA(1番目の原子)を}$ と $f_{BがA(2番目の原子)を}$) で引っ張る。 $f_{BがA(全体)を} = f_{BがA(1番目の原子)を} + f_{BがA(2番目の原子)を}$ 。物体Aの全体は、結果として、個々の原子に働く力の2倍の力で引っ張られていることになる。個々の原子の間に作用する重力は互いに等しいので、 $f_{A(1番目の原子)がBを} = f_{A(2番目の原子)がBを} = f_{BがA(1番目の原子)を} = f_{BがA(2番目の原子)を}$ となる。したがって、図5(d)に示されているように、 $f_{A(全体)がBを} = f_{B(全体)がAを}$ である⁽³⁾

以上の議論から、物体を構成する原子の個数が異なる物体AとBの間にも、同じ大きさの引力が作用することがわかる。重力に関しては物体AとBのそれぞれを構成する原子が幾つであっても、物体AからBに作用する重力と物体BからAに作用する重力は同じ大きさになり、いわゆる運動の第3法則である作用・反作用の法則は自ら満足されていることが理解できる。

3. 重力の大きさは、相互作用する各々の物体の質量⁽⁴⁾ (物体を構成している原子の総数×原子の質量) に比例している。

この性質は上述の議論で物体Aを構成する原子の数を2個から増やしていくことで説明できる。物体Aを構成する原子数が2個になれば、重力の大きさは2倍に、3個になれば3倍に、 n 個になれば n 倍の重力になる。非常に多数の原子から構成される巨視的物体の重力は、構成原子のすべてが重心に集合した場合の重力と同等である。これについては、重力の距離依存性を取り扱った後で議論する。

本論文では、物体の質量を原子の総数×原子の質量としている。物質を構成する元素は、不安定なものまで含めれば、現在、112種類が確認されている⁽⁵⁾先に述べたが、本論文では数種類の元素からなる化合物や分子結晶などを厳密に区別して議論していない。物質を同一の微小な構成単位に分割し、その微小な構成単位を便宜上、原子と呼んでいる。したがって、最も単純な描像として、一定の質量を持つ同一の原子が多数集合しているのが巨視的物体であるとする。原子の質量は、およそ 10^{-27} kg程度である。重力相互作用は物体を構成している原子の数に比例している。しかし、さまざまな物体間の重力相互作用を統一的に取り扱うためには、(物体を構成する原子の総数)×(物体を構成する原子1個の質量)として導出した物体の質量を考えたほうが便利である。

4. 重力の大きさは、相互作用している原子間の距離の2乗に反比例している。

重力は、原子間の距離が、2倍、3倍、4倍、…… n 倍、……と離れていくと、 $1/4$ 、 $1/9$ 、 $1/16$ 、…… $1/n^2$ 、……と弱くなっていく。これを直観的に説明してくれるのは、ファラデーがクリスマス講演で行った実験であろう⁽⁶⁾ランプから放射される光のように、原子から重力と呼ばれるなんらかの作用が放射されていると考え、それが距離の2乗に反比例して弱められていくことがわかりやすい(図6参照)。

地球に引っ張られているボールのような物体は、いつも地球の中心に向けて引っ張られている。これが許されることは、たとえば、中心対称に集合した原子数十個と1個の原子との間の重力相互作用を具体的に考えてみればよい(図7参照)。

図7の作図はコンピュータ・グラフィックスの動画を使って個々の引力ベクトルが加えあわせられていく様子を描画すると、引力の総和が原子集団の中心(図7での点S)に向かっていく様子がわかりやすい。この結果を利用して、多数の原子から構成される巨大な物体が1個の原子に及ぼす重力は、すべての原子が中心にあると考えて計算した重力相互作用と同じ大きさになることを確認する。

以上の結果を、次の関係式を使ってまとめておく。

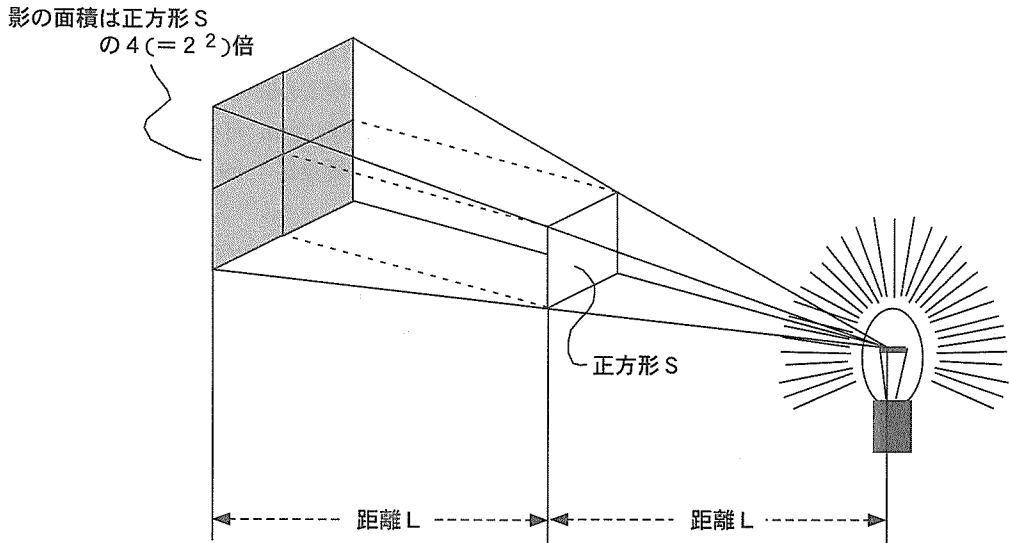


図 6 重力相互作用の距離依存性
重力相互作用が距離の 2 乗に反比例して減衰していくことを直観的に把握するための実験
(第 5 節の参考文献(6)参照)。

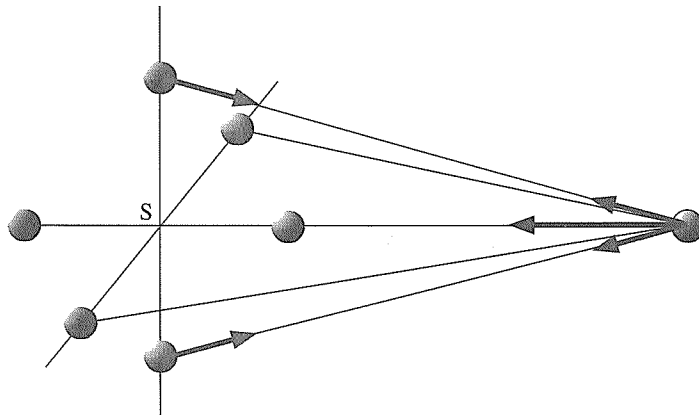


図 7 中心対称に分布した原子からの重力相互作用
簡単のために少数の原子が点 S のまわりに対称に分布している場合を示している。灰色の矢印は各原子間の重力相互作用を、黒色の矢印は物体に作用する重力の総和である。

物体 A から物体 B に作用する重力
 = 物体 B から物体 A に作用する重力

$$= \frac{(\text{物体 A の質量}) \times (\text{物体 B の質量})}{(\text{物体 A と物体 B の間の距離})^2}$$

上述の重力の性質 1 から明らかなように、身の周りの品物にはさまざまな物体から重力が作用している。その具体的大きさを比較しておく?

机の上にある万年筆に作用している地球からの重力、月からの重力、太陽からの重力を比べてみよう。万年筆は 20 グラム、地球の中心と万年筆の間の距離は 6370 km、地球の質量は 5.98×10^{24} kg、月と万年筆の間の距離は 384000 km、月の質量は 7.35×10^{22} kg、太陽と万年筆の間の距離は 150000000 km、太陽の質量は 1.99×10^{30} kg であるとする。

月の質量が地球の 0.0123 倍、月と万年筆の間の距離は地球と万年筆の間の距離の 60.3 倍である。したがって、月から万年筆に作用する重力は $0.000003 \times$ (地球から万年筆に作用している重力) である。同様にして、太陽の質量が地球の 333000 倍、太陽と万年筆の間の距離は地球と万年筆の間の距離の 23500 倍であることから、太陽から万年筆に作用する重力は、地球から万年筆に作用する重力の 0.0006 倍である。

地表にある万年筆に作用している重力と、50 階建てのビルの屋上 (高さ 200 m) に置いてある万年筆に作用する重力の大きさを比べなさい。

地表にある万年筆と地球の中心との距離を 6370 km とすると、50 階建てビルの屋上にある万年筆と地球の中心との距離は 6370.2 km となる。したがって、50 階建てビルの屋上にある万年筆に作用する重力は、地表にある万年筆に作用する重力の 0.99994 倍になる。つまり、重力の作用は約 0.006% 減少する —— 地表で考えれば、約 1 mg 分の質量が万年筆から削り取られるのに相当する —— ことになる。50 階建てビルの屋上ぐらいの高さの違いでは重力は変化しないとする近似が妥当であることをこの結果は示している。それでは、エベレスト山の頂上付近 (高さは 8800 m とする) に万年筆を置いた場合はどうなるだろうか。

月の裏側を宇宙船が飛行 (または着陸) しているとしよう。宇宙船に作用している重力は次のどれだろうか (図 8 参照)。

- (ア) 地球からの重力は月によって遮られているから、月から宇宙船に作用している重力だけである。
- (イ) 地球も月も宇宙船の足下にあるから、宇宙船に作用している重力は地球からと月からの重力の総和である。
- (ウ) 宇宙空間は無重力だから、宇宙船には重力が作用していない。

この問題の解答は、これまでに学んできたことから自明ではないと考える学生もいるかもしれない⁹⁾ 先に述べたファラデーの実験のように、地球から重力相互作用として何らかの作用が放射されていると仮に考えたとしてしよう。ランプからの光が途中の物体によって遮られるように、月によって重力相互作用として地球から放射されているものは遮られるのか否かということが問題になる。重力相互作用を遮ることの可能な物質は現時点ではない。将来にわたって、そのような物質がありそうにも思えない。重力相互作用を、ランプから光が放射されるように、地球から何らかの作用が放射されていると考えてよいのだろうか。もしそうなら、それは何なのだろうか。これらの疑問について議論することは本論文で考えている一連の講義の範囲を越え

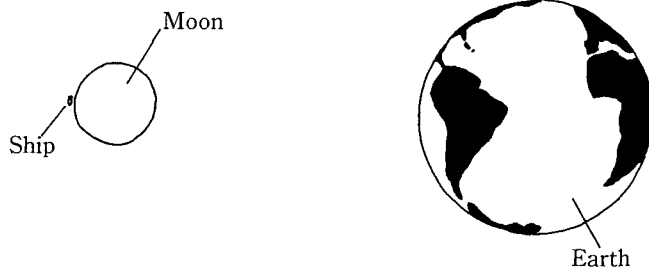


図8 月の裏側を飛んでいる宇宙船

る高度な内容と関連してくる⁹⁾物理学という学問の奥行きを学生に触れさせる程度で次に進むことにする。

- (1) 『漱石全集』第一巻（岩波書店、1993年）、64頁。
- (2) 力が相互作用に帰着することについては、岩崎允胤、宮原将平『現代自然科学と唯物弁証法』（大月書店、1972年）275-277頁を参照。たとえば、275頁にある次の文章は古典力学における力の取り扱いを明確に述べている。
「さて、古典力学では、質点についての一体問題に考察の基本点がおかれているために、その質点に外から及ぼす作用という意味で力の概念が出てくるが、もともと自然は多様な相互連関をおこなう統一的なものである。この相互作用を捨象し、当の質点に及ぼす作用のみが力として古典力学ではとりあげられる」
また、力学教育における相互作用の問題については、次の参考文献でも取り扱われている。
寺岡英男「授業書「力学」」高村泰雄編著『物理教授法の研究』（北海道大学図書刊行会、1987年）所収。ただし、この文献では相互作用から物体の衝突問題へと巨視的レベルの議論が展開されている。
- (3) ここで力の合成、厳密な言い方をすれば、重力の合成を前提としている。平行に作用する2つの力の合成はほとんどの学生が直観的に理解していると思われる。学生の理解度とあわせて、必要であれば、重力が合成可能なベクトル量であることを説明しておく。しかし、さらに厳密な言い方をすれば、一般相対性理論は重力が非線形であることを示しており、ベクトル和が成立しないことになる。
- (4) 厳密に言えば、重力質量であるが、この段階では、重力質量と慣性質量の区別は議論せず、どちらも質量とする。
- (5) Peter Armbruster and Fritz P. Hessberger, “Making New Elements,” *Scientific American* (Sept. 1998), pp. 72-77.
- (6) ファラデー『力と物質』稲沼瑞穂訳（岩波文庫、1949年）36-38頁。
- (7) 本文で展開していく計算では、いわゆる文系学生には馴染みのない数量を取り扱うことになる。特に 5.0×10^{-24} といった表記について事前に説明しておく必要がある。また、比の指導についても若干の復習が必要となるだろう。定量的議論を避けて通ることは、物理学の持つ精密科学、数理科学としての側面に目を向けないことになる。文系学生を対象とした講義でも量的把握は重要である。
- (8) いわゆる理工系学生ばかり20数名のクラスに於いて、同様の問題に対して宇宙船には月からの重力のみ作用すると解答した学生が数名いたことを筆者は経験している。この設問は、本節の冒頭で学生に考えさせ、重力相互作用の一連の学習が終了した後で再度取り組んでみるという使い方も考えられる。また、初等教育の段階では、空気存在と重力などの遠隔相互作用の有無を関係づける傾向にあるという報告もある。たとえば、V. Bar, B. Zinn and E. Rubin, “Children’s ideas about action at a distance,” *Int. J. Sci. Educ.*, **19** (1997), pp. 1137-1157.

(9) この設問から、「場」の概念を用いて相互作用を論じる教育へと展開することが可能であろう。また、重力相互作用は、静止質量がゼロ、スピン2の粒子が担っていると理論的に考えられている。そのような粒子と物質との相互作用が問題となる。

7. 規則性再考——運動法則： $F = ma$ ——

前節で引用した『吾輩は猫である』の一文は、猫の主人が中学校用英語読本を翻訳している場面である。この文章は漱石が当時の中学校用英語教科書の一文をヒントに創作したものと考えられている⁽⁹⁾ その内容から明らかなように、「巨人、引力」とは地球が地上の物体を引っ張るだけの力になっている。これは前節で述べたように、重力という相互作用の一つの成分、つまり地球が地表の物体、たとえば球を引っ張っている作用を力として捉えているだけである。地球が球を引っ張るときには同じ強さで球が地球を引っ張っているという事実には注意が払われていない。これは漱石が悪いのではなく、地球の質量がきわめて大きいため、地球が地表の物体を引っ張っているようにしか見えないからである。どうして地表の物体が地球を引っ張るという相互作用の成分はわれわれの注意を引かないのであろうか。それを理解するためには重力が作用した結果、物体がどのような運動を開始するのかを考えなければならない。

重力相互作用について学習した後、標的をまっすぐねらった直線軌道からはずれて落下していく弾丸が示す規則性について再考する。われわれの目的は、重力が作用するとなぜこのような規則性が生じるのかを明らかにすることにある。そのために次のような簡単な実験を行う⁽²⁾

実験① 右手に本、左手に紙を持って同じ高さにします。同時に両手を離すとどうなりますか。

ア. 本と紙は同時に床に落ちる。

イ. 本の方が先に床に落ちる。

ウ. 紙の方が先に床に落ちる。

実験② 次に本の上に紙を置いて先程と同じ高さに持ち上げます。手を離すとどうなりますか。

ア. 紙は本の上にとったまま同時に床に落ちる。

イ. 本の方が先に床に落ち、紙は後からふわりと落ちる。

ウ. 紙の方が先に床に落ちる。

紙はしわのない平らなものでもよいが、ゆるくまるめた形にして行ったほうが実験②で意外性を出せるだろう。実験①では空気抵抗があるため、本が先に落ちる。しかし、実験②では、本と紙が同時に床に落ちる。この実験結果を手がかりにして、規則性A、B、そしてCについて考えてみよう。

本がおよそ300頁であったとする。本を構成している原子の量は、紙を構成している原子の量のおよそ300倍としてよいだろう。すると、地球から本に作用する重力は、地球から紙に作用する重力の約300倍の大きさになる。しかし、本は紙の300倍の力で引かれているにもかかわらず、紙と同時に床に落ちてくる。本と紙はどちらも最初は静止していたのだが地球からの

重力によって運動を始める。静止の状態から同じように速度を増加していき床に衝突する。つまり、地球との間の重力相互作用が300倍の強さになっても、構成原子の数が300倍になったために物体の加速の仕方が変化しないように思われる。このような状況を学生に理解してもらうため、この現象を表現できると考えられそうな2つの単純な関係式を用意する。

実験①と実験②の結果から考察して、物体の運動、物体の構成原子の数、そして物体に働く重力の間に成り立つできるだけ簡単な関係式として次のDとEを考えてみた。

$$\text{関係式D: } \frac{\text{物体に作用する重力}}{\text{物体を構成する原子の質量} \times \text{原子の総数}} = \text{物体の加速度 (速度の変化)}$$

$$\text{関係式E: } \frac{\text{物体に作用する重力}}{\text{物体を構成する原子の質量} \times \text{原子の総数}} = \text{物体の速度}$$

関係式DまたはEが成立するとすると

本の加速度 または 本の速度

$$= \frac{\text{地球から本に作用する重力}}{\text{本を構成する原子の質量} \times \text{原子の総数}}$$

$$= \frac{\text{地球から紙に作用する重力} \times 300}{\text{紙を構成する原子の質量} \times \text{原子の総数} \times 300}$$

$$= \frac{\text{地球から紙に作用する重力}}{\text{紙を構成する原子の質量} \times \text{原子の総数}}$$

= 紙の加速度 または 紙の速度

となるため、本と紙の加速度もしくは速度が等しいことになる。本と紙が同時に床に落ちることは説明できそうである。しかし、どちらの関係式が妥当な法則なのだろうか。

・関係式Dの妥当性を主張する意見

「本と紙はどちらも静止しているところから運動を始めている。だから、本と紙で同じなのは、それらの速度の増加の仕方、つまり加速度である。」

・関係式Eの妥当性を主張する意見

「本と紙は同じ運動をしながら床に落ちるのだから、いつも本と紙は同じ速度で運動していることになる。」

これらの意見を参考にしながら、関係式Dと関係式Eのどちらが妥当か検討せよ。関係式DまたはEが間違っているとする理由を実験①や実験②の状況を利用して考えよ。

関係式Dは、 $F=ma$ として知られているニュートンの運動の第二法則である。関係式Eは、 $F=mv$ という、アリストテレス的運動学を数式で表現したものになる。関係式Eに対しては、次のような反論が可能である。

反論1「関係式Eでは、物体が落下するとき速度が増加するのは物体に作用する重力が増加するからである。前節で万年筆に作用する重力を計算した際に、地表での重力と50階建てのビルの屋上で重力を比較した。その結果は一千分の一以下の差しかなかった。1mの高さから本を落とした場合、落下途中の本と紙に作用する重力はほとんど一定であると考えてよい。1mの高さから床まで落下していく間の重力の変化は数百万分の1である。重力はわずかに変化するだけであるにもかかわらず、速度は大きく変化する。したがって、関係式Eはおかしい」

反論2「1mの高さから本を落としたとき、本は静止の状態から徐々に速度を増加して落下する。2mの高さから本を落としたときも同じである。2mの高さで本から手を離し、1mの高さまで落下してきたところを考えてみよ。高さ1mの地点を本はある速度で通過していく。1mの高さから本を落としたときも、2mの高さから本を落としたときも、高さ1mの地点を通過するときには同じ大きさの重力が作用している。にもかかわらず本の速度は異なる。したがって、関係式Eはおかしい」

関係式Dを選択することは学生にとって簡単かもしれない。しかし、別の関係式Eに対する合理的な反論を考察することは、心理的にはそれ程自明なことではない。確かに、関係式Dを支持する証拠を集積して、その普遍妥当性を確認すれば充分のように思われる。しかし、関係式D以外の結論が誤りであることを合理的・積極的に論証してみるプロセスは教育上無意味ではない。ある一般的な規則を確認する場合、われわれはその規則が妥当であることを支持する証拠を集めて規則を確認しようとするが、その規則を反証するような事例について考察すべきことに気付かないという傾向がある⁹⁾

重力の性質を考察したときに、重力相互作用の大きさは物体の質量に比例するとした。これは微視的議論からも妥当と考えられるのだが、もし仮に比例していなければどうなるかを推論してみよう。重力相互作用が物体の質量の1乗ではなく、1.01乗に依存しているとしよう。このとき上記の本と紙の落下の実験はどのような結果になるだろう。

$$\begin{aligned} \text{本の加速度} &= \frac{\text{地球から本に作用する重力}}{\text{本を構成する原子の質量} \times \text{原子の総数}} \\ &= \frac{\text{地球から紙に作用する重力} \times (300)^{1.01}}{\text{紙を構成する原子の質量} \times \text{原子の総数} \times 300} \\ &= \frac{\text{地球から紙に作用する重力}}{\text{紙を構成する原子の質量} \times \text{原子の総数}} \\ &= 1.06 \times \text{紙の加速度} \end{aligned}$$

この結果から明らかのように、本の加速度は紙の加速度の1.06倍になる。つまり重力が相互作用している物体の質量に比例していなければ、落下運動をする物体の加速度はその質量に依存して異なっているということになる。今までのところ、このような結果は観測されていない¹⁰⁾。これまで、重力相互作用が物体の質量に比例しているとしてきたが、そのときの質量——重力質量と呼ばれる——が運動法則「 $F=ma$ 」に登場する質量 m ——慣性質量と呼ばれる——と等価であるというのは自明なことではない。重力質量は重力相互作用の源であり、他者の存在、つまり他の重力質量があって、はじめて自分自身を動かそうとする重力相互作用を生み出す。一方、慣性質量は静止や等速度運動という定常状態を破ろうとする外部からの力に抗して

物体が抵抗する傾向と関係している。つまり、慣性質量とは重力質量で生みだされた重力相互作用によって物体が加速されるとき抵抗の本質と見なすことができる。重力質量と慣性質量は全く等価であると考え、重力相互作用が慣性質量に比例しているということに深い意味を見いだしたのはアインシュタインである。

このような考察を通して、「(物体に作用する重力)/(物体を構成する原子の質量×原子の総数)=物体の加速度」という関係が成立していることを確認していく。

地表の物体に地球から作用する重力の反作用として、地表の物体から地球に作用する重力を考えよう。この相互作用の成分は地球にどのような運動を起すだろうか。具体例として万年筆と地球の間の重力相互作用を考えよう。地球の質量 $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ は万年筆の質量 20 g のおよそ 3×10^{26} 倍である。重力は相互作用であるから、地球に作用する万年筆からの重力は万年筆に作用する地球からの重力に等しい。

$$\begin{aligned} \text{地球の加速度} &= \frac{\text{地球に作用する万年筆からの重力}}{\text{地球の質量}} \\ &= \frac{\text{万年筆に作用する地球からの重力}}{(3 \times 10^{26}) \times \text{万年筆の質量}} \\ &= 3.3 \times 10^{-27} \times \text{万年筆の加速度} \end{aligned}$$

地球の質量が大きいので、万年筆の加速度に比べて、地球の加速度はきわめて小さい。

地表の物体が落下するにつれて、物体と地球の中心との距離は徐々に減少していくのだが、物体に作用している重力は数百万分の1の変化しかない。物体に作用する重力は一定と考えてよく、関係式Dが成立するならば、物体の加速度も一定となる。したがって、落下する物体の運動は、常に加速度が一定である運動、等加速度運動とみなせる。

重力が作用することによって等加速度運動が生じるという知見にもとづいて、標的をねらって打ち出された弾丸の運動から得られた規則性A、B、そしてCを再考していく。水平方向には重力が作用しないので、運動は変化せず規則性Cが得られる。垂直方向については、重力が作用して等加速度運動を行うことになる。その場合に、規則性AやBが導出されることを指導するについてはさまざまな試みがある⁹⁾ 本論文ではこの部分、および、 $F=ma$ の微分方程式としての取り扱いの詳細は省略し、重力以外の力についての考察に移ることにする。なぜなら、われわれはまだ重力相互作用に対してのみ、 $F=ma$ の関係を理解しただけなのである。

(1) 『漱石全集』第一巻(岩波書店、1993年)586頁。

(2) Alan Cromer and Christos Zahopoulos, *Project SEED Sourcebook of Demonstrations, Activities, and Experiments*, (Northeastern Univ., 1993), p. 72. に同じ実験が自由落下を指導するためのものとして掲載されている。

(3) たとえば、P. N. ジョンソン=レアード『メンタルモデル—言語・推論・意識の認知科学—』海保博之監修、AIUEO訳(産業図書、1988年)32-38頁。片面に数字、もう片面にローマ字が書かれているカードがあると。このカードには、「もしも、片面にローマ字の母音が印刷されていれば、その裏面はかならず偶数である」という普遍的規則性があると考えられる。ここに「E」、「K」、「4」、「7」の4枚のカードがあるとき、この中から、できるけ少ない枚数のカードをめくって上の一般的規則が成立していることを確認したい。このような問題に直面したとき、一般に、人は「E」のカードをめくることはすぐに思いつく。しかし、「7」のカードをめくって、一般的規則が誤りであることを積極的に確認しようとする人は少ない。

(4) 慣性質量と重力質量が一致すること、つまり等価原理が成立していることを確認した過去の実験例を学生に

紹介しておく。古典的なところでは、Eotvosの実験がある。また第5の相互作用の検証実験としてより高精度の重力相互作用の測定が行われたが、次の文献にそれらが紹介されている。Allan Franklin, *The rise and fall of the fifth force*, (AIP, 1993).

- (5) たとえば、大田邦郎「高等学校における微積分の初歩としての二次関数の指導過程」『北海道大学教育學部紀要』第40号(1982年)31-87頁。

8. 接触力と重力——法則の普遍性——

前節で運動方程式 $F=ma$ を導入したが、そのときの力 F は物体間の重力相互作用であった。重力以外の物体間の相互作用でこの運動方程式が成立するかどうかは、そこまでの議論だけからではけっして自明な事ではない。多くの力学教育では、運動方程式 $F=ma$ が、ある事例で成立していることを確認すると、それ以後はきわめて普遍的な関係式としてそれを取り扱っている。しかしながら、運動方程式 $F=ma$ をあらゆる種類の力 F に対して普遍妥当することが当然であるかのごとく見えるのは、力 F を運動の原因というきわめて抽象的な概念としてはじめから導入しているためである。多様な相互作用に対して運動方程式が成立するかどうかは自明なことではない。

われわれがこの宇宙にある物体を認識できるのは、我々自身を含む物体が相互作用するからである。われわれを取り巻く世界では、多数の物体が様々な相互作用を行っているように見える。しかし、現代物理学は一見多様に見える相互作用を4つの基本的な相互作用——重力相互作用、電磁気相互作用、強い相互作用、弱い相互作用——の現れであると結論している。物の落下は日常見られるありふれた運動である。この運動を引き起こす原因が重力相互作用にあることはすでに議論した。日常生活では、落下運動以外に、物体と物体が衝突、接触して運動が起きることが頻繁に見られる。そのような運動の原因として背後に想定される力が接触力(contact force)である。物を押したり引いたりする力、摩擦力、空気抵抗などが接触力になる。この接触力は電磁気相互作用——厳密に言えば、パウリの排他原理等を考えなければならず、量子力学の助けを必要とするが——によって説明される。この接触力に対して、前節で議論した運動方程式が成立するかどうかを考えなければならない⁽¹⁾

原子が強い引力相互作用で集合することで巨視的物体を構成しているというのが原子論的自然観である。原子の結合様式を現代物理学の言葉で表現すれば、金属結合、イオン結合、共有結合、ファン・デル・ワールズ結合となる。本論文で構想している一連の講義では、これら結合様式の詳細については考慮せず、原子を凝集させる結合相互作用として定性的に把握し、巨視的物体の運動を引き起こす接触力を学ぶことにする⁽²⁾

物体を構成する原子は、通常、まわりの他の原子と一定の間隔をとった安定な位置にある(図9(a))。何らかの外部からの原因で原子間距離がひろがったとすると、2つの原子には引力が作用する(図9(b))。このとき、互いの原子に働く引力は大きさが等しい。したがって、重力の場合と同様に、原子のレベルで作用・反作用の法則が自ずから成立していることになる。逆に、外部からの作用で原子間の距離が縮んだときには、2つの原子には同じ大きさの斥力が作用する(図9(c))。この場合も作用・反作用の法則は自ずから成立している。このような性質をもった原子間の相互作用が巨視的な接触力を生みだしている。したがって、重力と同様に、巨視的な接触力も作用・反作用の法則を満足する⁽³⁾

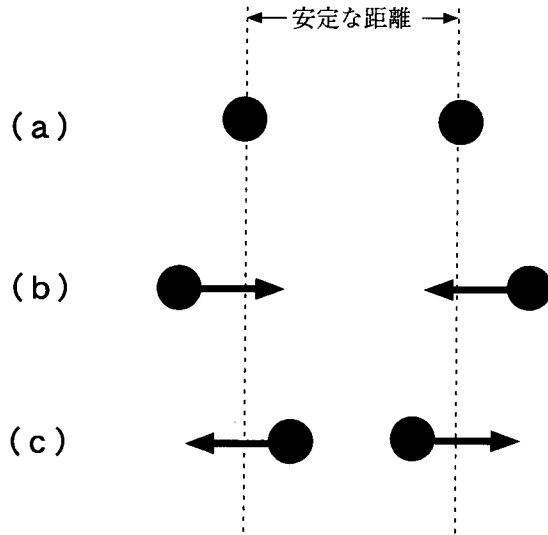


図9 原子間の引力・斥力相互作用
 (a)原子が安定な距離を保っている。(b)原子間距離が増加した場合、引力相互作用が発生する。(c)原子間距離が減少した場合、斥力相互作用が発生する。

接触力の原子論的描像に慣れるために、原子1個が机の上に落ちてくるところを想像してみよう。机の質量は30 kg、原子と机の重心は最初、50 cmであったとする。また地球の質量は 5.98×10^{24} kg、原子と地球の中心との距離は6370 kmであるとする。原子に作用する机からの重力と地球からの重力を比較してみると、机から原子に作用する重力は地球から原子に作用する重力の 8.1×10^{-10} 倍となる。問題にあるような状況では、原子に作用するのは地球からの重力だけとみなしてよい。原子が机に接近しても、それ自身の重力質量がきわめて小さいため、机との間には非常に弱い重力相互作用しか生じない。この結果から、机に落ちてくる原子に作用するのは、地球から作用する重力と机の原子との間に生じる接触力を考慮すればよいことがわかる。

以上のことを確認した上で、原子が地球から引っ張られて机の上へ落ちてきた状況を原子論的に分析する。原子が机に接近するにつれ、原子には重力以外に机の原子との間に、上で述べた接触力の起源となる結合の引力が生じる(図10(a))。机の原子にも同じ引力が作用して安定な位置からずれるのだが、ここでは机の原子が互いに強く結合しているとして、その変化は無視する。原子がさらに机に接近すると、結合の引力は斥力へと変化していく(図10(b))。さらに原子が机に接近すると、斥力が重力と同じ大きくなる(図10(c))。ここが原子にとって安定な位置である。さらに原子が机に近づくと、斥力が重力よりも大きくなり、原子は上方方向へはじき返される(図10(d))。落ちてきた原子は図10(c)の安定な位置に落ち着くことになる。ここで注意すべきことは、図10(c)及び(d)では注目している原子に重力と斥力の二つの相互作用が働いているということである。

同様に、力学教育でよく登場する机に上におかれた本に働く力のつりあいを考えてみよう。本は多数の原子から構成されているが、それら原子のすべてに地球からの重力が作用して

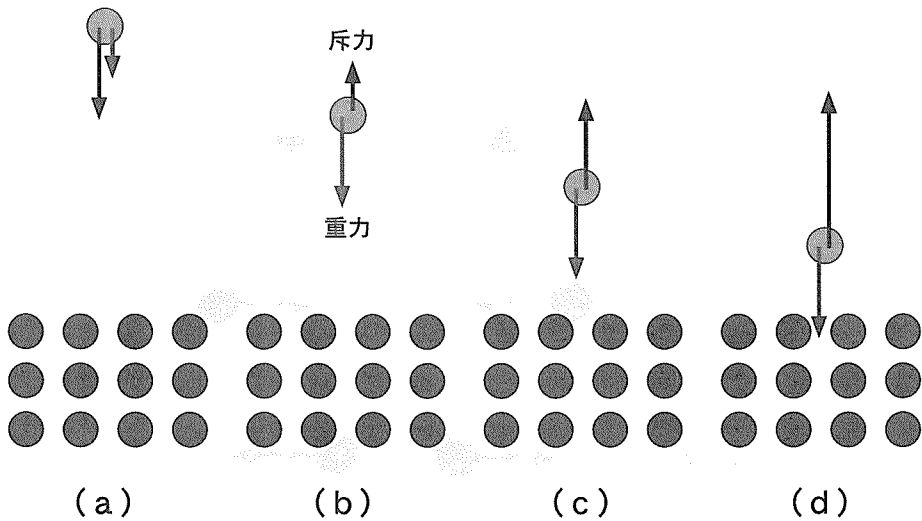


図 10 一つの原子と机との間の相互作用

(a)落下してくる原子には重力と机の原子からの引力が作用している。(b)原子は机に接近し、机の原子からの相互作用が斥力へ変化する。(c)重力と斥力が釣り合った状態。(d)原子がさらに机に接近し、斥力が重力よりも大きくなった状態。

いる。一方、本と机が接している境界では、本を構成する原子と机を構成する原子の間に接触力を構成している斥力が作用している。地球から作用する重力と机から作用する斥力が釣り合ったところで本は静止する。通常の静力学の授業では、本を構成している原子すべてに作用している相互作用を加えあわせて、本に働く重力と机からの抗力という巨視的な二つの力が釣り合っていると考える (図 11)。

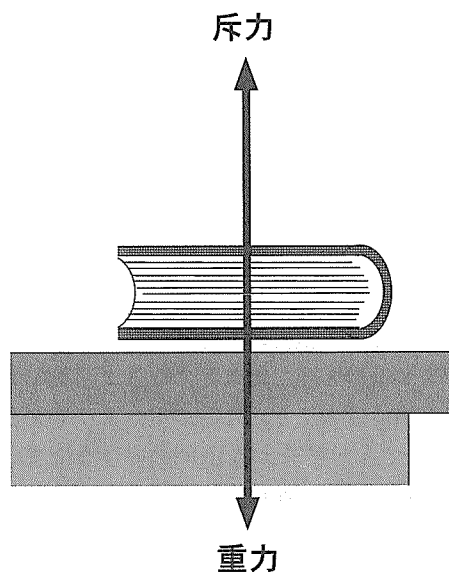


図 11 机の上に置かれた本

本を構成する原子の振る舞いをさらに詳しく見てみよう。今、仮に重力が作用しない状況で本と机が接しているとしよう。本と机が接している境界では、本の原子と机の原子は斥力と引力が釣り合う安定な距離を保っている。ここで重力が下向きに作用したとする。図12の本の第1層の原子は重力のため机に接近していき、本の原子に作用する斥力は増加する。第1層の原子だけを考えると、机からの斥力と重力が釣り合ったところが安定な位置である(図12(a))。しかし、第2層の本の原子も重力の作用で下に降りてくる。第1層の原子には第2層の原子との間に斥力が作用する。この結果、第1層の原子はさらに机に接近することになり、机から第1層の原子に作用する斥力が増加する。結局、重力+第2層の原子から第1層の原子へ作用する斥力=机から第1層の原子へ作用する斥力となったところで、第1層の原子に作用する相互作用は釣り合う(図12(b))。第2層の原子についても同様で、第3層の原子の接近によって生じる斥力を考えれば、重力+第3層の原子からの斥力=第1層の原子からの斥力というように近似して考えることができる。したがって、本に重力が作用すると、原子間の距離——図12では、たとえば第1層の原子と第2層の原子間の距離——が減少する。つまり、本は重力によって少し押しつぶされているのである(4)

物体の運動を引き起こす物体間の相互作用について考えるとき、重力相互作用以外にここで述べてきた近距離で作用する引力と斥力を忘れてはならない。それは、物体を押ししたり引いたりするときや、物体と物体が接触したときに生じる相互作用である。2つの物体AとBが接近してくると、その境界面での原子間には斥力が生じる。仮に物体Aを右から押し続けたとする

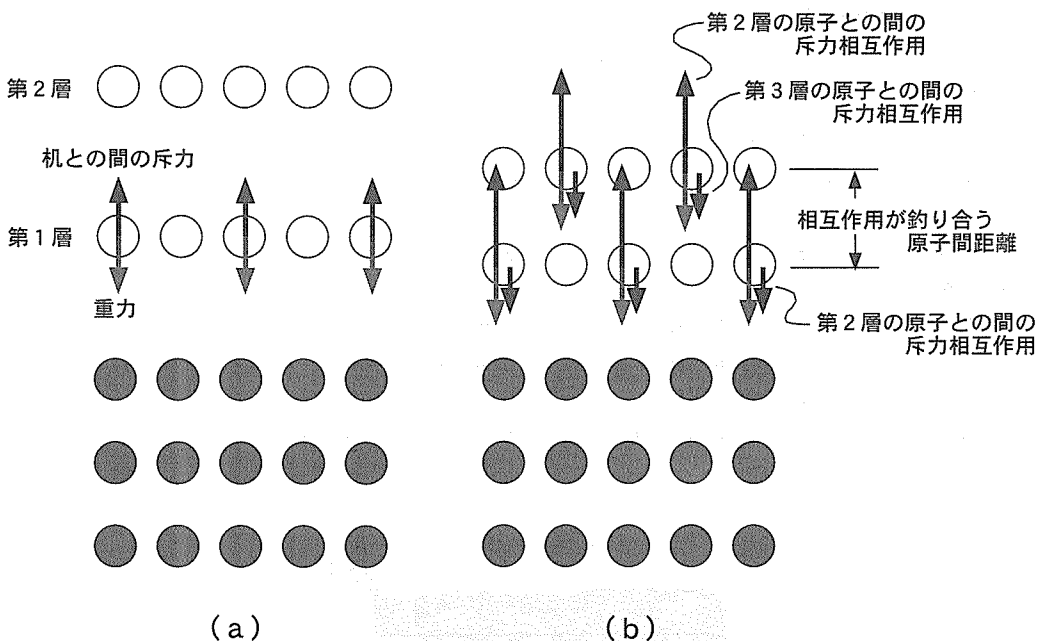


図12 本の原子と机との相互作用

○は本の原子, ●は机の原子を表している。(a)本の原子の第1層に作用する重力が、机の原子から本の原子の第1層に作用する斥力と釣り合っている仮想的状況。(b)第1層の原子に第2層の原子からの斥力が作用している状況。本の原子の第1層と第2層の間の距離は相互作用が釣り合うところまで減少する。

と、物体Bは斥力のために左へと運動を始めることになる。

このような相互作用によって引き起こされる運動が、前節で述べた $F = ma$ と同じ関係を満足しているかどうかを確認しておく必要がある。さまざまな実験があるが、ここでは、図13のような装置を使ってひもで台車を引く運動を考える。ひもに付けたおもりには作用する重力は、ひもを引っ張り、滑車を通してひもの張力は台車を引っ張る。おもりが1個の場合と、2個の場合で台車の運動を比較する。さらに、おもりが2個で台車の質量を台車2台分にしたときの台車の運動を先の実験結果と比較する。その運動がおもり1個で台車1台を引っ張ったときの運動と同じになることを確認する。

ひもと台車を原子論的に眺めれば、図14のようになる⁽⁵⁾ おもりを固定した状態では、ひもを構成する原子と台車を構成する原子はそれぞれ安定な位置にある(図14(a))。台車を固定したままおもりから手を離すと、ひもがおもりに引っ張られる。その結果、ひもを構成している原子は安定位置からずれ、原子間の距離は増加し、その間に引力相互作用が発生する(図14(b))。ひもの原子と台車の原子との境界——実際には、ひもを台車のフックに縛りつけたり、接着剤で接合しているが——に於いても原子間距離が増加し、ひもの原子と台車の原子の間に引力が生じる。

このような実験を通じて、重力と同様に接触力についても次の関係式、つまり $F = ma$ の関係が成立していることが結論される。

$$\frac{\text{物体に作用する接触力}}{\text{物体の質量}} = \text{物体の加速度}$$

「他の自然現象も力学の諸原理から同種類の推論によって導きだされるのではないか」というニュートンの言葉を先に紹介した。重力相互作用による運動を分析することで得られた関係式を、その他の相互作用に普遍化して考えるという背後には、そのような普遍化が妥当であるに違いないという信念があるのは確かである。しかしながら、普遍化の妥当性を検討するために批判的・合理的な手続きが必要でもあることを確認しておくことが重要なのである。

- (1) 強い相互作用は、原子を構成するための非常に強い原子核内部の相互作用である。弱い相互作用はベータ崩壊を理解する上で重要な素粒子間の相互作用である。これら2つの相互作用は、本論文で取り扱っている巨視的物体の力学を理解する上での相互作用としては重要な役割を果たさない。
- (2) Frederick Reif, *Understanding Basic Mechanics*, (John Wiley & Sons, 1995), pp. 102-104. で、接触力の原子論的起源が簡単に述べられている。
- (3) 近接する原子間の相互作用を微視的に眺めた場合、力の釣り合った平衡状態では作用・反作用が成り立って

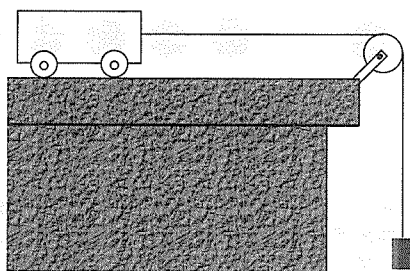
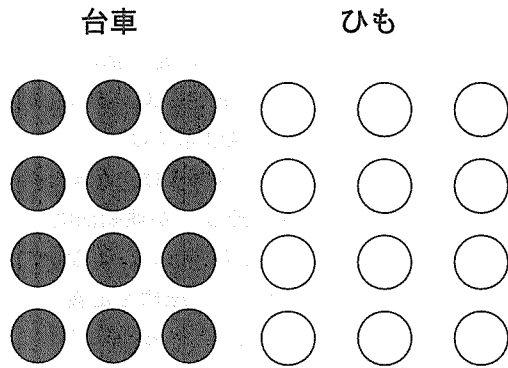


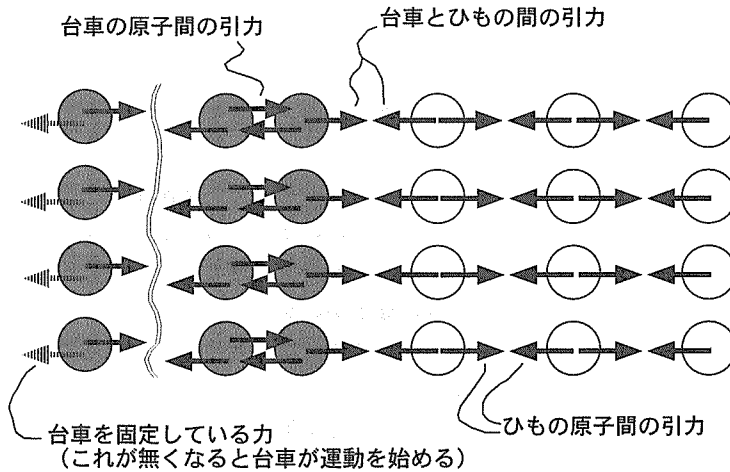
図13 台車とおもり

いると言える。しかし、平衡状態へ遷移する過程では、厳密に言えば、作用・反作用の法則は満足されない。たとえば、Arnold B. Arons, *Teaching Introductory Physics*, (John Wiley & Sons, 1997), pp. 78-80.

- (4) 重力がきわめて小さい宇宙空間では、重力によって押しつぶされるという効果はない。人間が宇宙に長期間滞在して重力の小さい環境に適応してしまうと、ふたたび地球に戻ったときさまざまな障害が発生する。たとえば、Ronald J. White, "Weightlessness and the Human Body," *Scientific American* (Sept. 1998), pp. 58-63. 日本語訳は「宇宙は人間のからだをどう変えるか」と題して日経サイエンス 12月号に掲載されている。
- (5) F. Reif, *Op. cit.* (n. 2), p. 103 に Fig. C-3 としてバネと球についての同様の図が掲載されている。



(a)



(b)

図 14 台車とおもりの原子間の相互作用
○がひもの原子，●が台車の原子を表している。(a)ひもにも台車にも力が作用していない状態。(b)ひもがおもりで引かれている状況。

9. 科学の解釈学的次元と物理学教育 —— 慣性の法則 ——

慣性の法則とは運動の第一法則とも呼ばれており、あらためて物体に力が加わりさえしなければ、物体はその速さを変化せずに等速直線運動を行うという法則である。標的をねらって打ち出された弾丸の運動から得られた規則性Cは慣性の法則によって説明できる。弾丸は水平方向には力が働いていない——実際には空気抵抗が働いているが、小さくて無視できるとする——ため、その方向に等速度運動しているのである。

如何なる力も作用していない物体というのは外延が空の概念である。つまり、そのような物体は具体的には存在しない。したがって、慣性の法則の指導も理想的な条件を設定した思考実験となりがちである⁽¹⁾ 経験を外挿して理想的状況を想定するような思考実験では、摩擦の大きい日常の現象とは一見矛盾する慣性の法則を学生らに充分納得させることはできないであろう。このような問題点を踏まえた上で、慣性の法則のさまざまな指導方法が検討されてきた⁽²⁾

慣性の法則が成立する座標系を慣性系と呼ぶ。慣性系ではニュートンの運動法則が成立する。この場合のニュートンの運動法則が成立するという意味は、実際に物体に作用している力 $F_{\text{実際}}$ に作用している力がわかっている場合に、物体が示す加速度 a が運動法則 $F_{\text{実際に作用している力}} = ma$ を満足するということである。しかしながら、如何なる力も働いていない物体が実在しないように慣性系も実在しない。なぜなら、ある物体を基準にして座標を定義したとしても、その物体にはわずかではあろうが力が作用しており加速度運動しているからである。

慣性系が実在しないからといって慣性の法則が不要であると結論するのは誤りである。慣性の法則は運動法則を決める場合の基準となる座標系を、それが実在するかどうかはひとまずおくとして、措定するために必要不可欠である。

20××年、ニュートン氏は目を覚ますと、自分が窓のない箱の中にいることを発見しました。今、箱は高いところから図15のように落下しているのですが、彼には箱の外の状況がわかりません。箱の一方の壁には非常ボタンがあり、これを押すとパラシュートが開きます。地上には彼と仲の悪いフック氏がいて、箱が落ちてくるのを呑気に眺めています。

箱の中のニュートン氏はどのように感じるでしょうか。遊園地のフリーフォールと同じで無重力のように感じます。ニュートン氏のそばには一個の万年筆がありフワフワと浮いて目の前で静止しています。彼は自分自身に何らかの力が作用しているとは考えません。なぜなら、彼には箱の外の様子がわからないからです。ニュートン氏は誰かが自分を眠らせて、宇宙船の中に閉じ込めたなど考えました。彼は、万年筆には何も力が働いていないので、加速度 $a_{\text{万年筆}} = 0$ と結論しました。

箱の外のフック氏は、箱、ニュートン氏、万年筆に地球からの重力が作用していることがわかっています。つまり、 $F_{\text{地球が万年筆を}} \neq 0$ です。さてここで、ニュートン氏の携帯電話の呼び出し音が鳴ります。ニュートン氏は仲の悪いフック氏から、自分が箱の中にいて、万年筆といっしょに落下しているから早く壁の非常ボタンを押すようにと電話で教えてもらったとしましょう。

ニュートン氏は万年筆に重力が作用しているかもしれないと考えました。しかし、携帯電話が鳴る前、彼は万年筆が静止、つまり加速度 $a_{\text{万年筆}} = 0$ であると結論してしまし

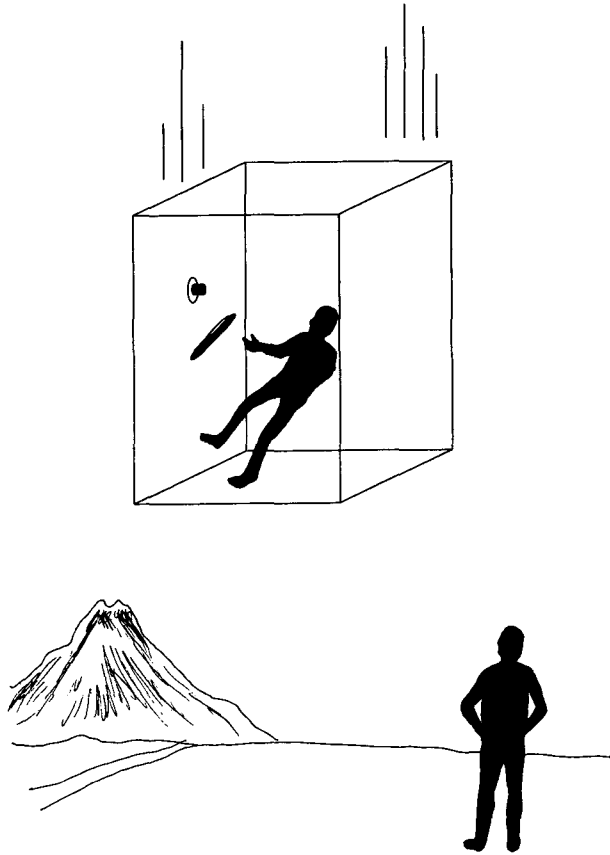


図15 箱の落下

た。もしも、その結論が正しければ、 $F_{\text{地球が万年筆を}} = m_{\text{万年筆}} \times a_{\text{万年筆}}$ と $a_{\text{万年筆}} = 0$ から $F_{\text{地球が万年筆を}} = 0$ となります。ニュートン氏は普遍的な運動法則 $F = ma$ が間違っているはずはないと考え、万年筆には何も力が働いていないし、落下してもいないのだと結論しました。つまり、ニュートン氏はフック氏が嘘をついていると考えたのでした。そして、非常ボタンを押しませんでした。さて、この議論のどこがまちがっているのでしょうか。普遍的な法則である運動法則 $F = ma$ は場合によっては成立しないのでしょうか。

この設問では、ニュートン氏を基準にした座標系は落下運動という加速度運動をしており慣性系ではない。ニュートン氏の座標は非慣性系であり、そこでは運動法則 $F_{\text{実際に作用している力}} = ma$ が成立しない。重力が働いていても、つまり $F \neq 0$ でも $a = 0$ となる。ニュートン氏を基準にした非慣性系は落下運動しており、その加速度と万年筆の加速度が等しい。その結果、ニュートン氏には万年筆の加速度が0と思われたのである。運動法則が実際に作用している力に対して成立する、つまり $F_{\text{実際に作用している力}} = ma$ が成立するためには、その運動を観測している基準になる座標系が慣性系でなければならない。または、見かけの力——上述の設問では、上向きで大きさが $F_{\text{地球が万年筆を}}$ と同じ——が作用しており、 $F_{\text{実際に作用している力}} + F_{\text{見かけの力}}$ が物体に作用してい

る正味の力であると考え、運動法則 $F=ma$ が成立しているとする。上の設問の場合は、 $F_{\text{実際に作用している力}}+F_{\text{見かけの力}}=0$ であるため、加速度が 0 となる。

この設問を考察した後、地球が慣性系か否かということを説明する。地球は太陽のまわりを公転運動し、かつ自身の地軸のまわりで自転運動している。したがって、その表面にいるわれわれは慣性系にいるとしてまわりの運動現象を眺めてよいのだろうか。これは物体の落下運動の加速度を精密に調べればよい。もしも、地表のわれわれが非慣性系であるならば、その加速度運動のために、落下運動の加速度が幾分相殺されるような現象が見られるはずである。地球上の緯度の異なる複数の地点での測定結果を紹介し、地表のわれわれを基準とした座標系は、厳密に言えば非慣性系であるが、慣性系と近似しても差し支えないということを簡単に紹介しておく⁽³⁾

この設問は、慣性の法則が成立していることを積極的に支持するものではない。つまり、氷の上を滑るアイスパックという経験を外挿して慣性の法則の洞察に至るのと同質のことを期待していない。実際に作用している力に対して運動法則 $F_{\text{実際に作用している力}}=ma$ が成立するのは慣性系であること、そして慣性の法則は慣性系とは何かを規定していることを示している。

慣性の法則の指導において、従来の指導プランは、この法則をいかに解釈するかによって決定されていたと言っても過言ではない。慣性の法則についての解釈は次の 3 つに大別できるだろう。

- (1) 運動法則を決める場合の基準となる座標系、つまり慣性系が存在すると指定する役割を担っている。
- (2) 慣性の法則とは、あらゆる物質がそれ自体で本質的に持っている性質である。
- (3) 運動法則 $F=ma$ で、 $F=0$ ならば $a=0$ であるから、慣性の法則は運動法則に含まれる。

しかしながら、いわゆる文系学生を対象とした力学教育の内容を考える場合、ある特定の解釈に基づいて教育内容を構成するのではなく、いくつかの解釈そのものをそれらの歴史性も含めて取り扱わねばならないと思われる。

上記設問は明らかに解釈(1)に基づいている。この 3 つの解釈のどれを採用したとしても、多くの力学の専門的教科書を読み進む上での大きな支障とはならないだろう。少なくとも、力学の諸法則を道具として使用して力学問題を解決することだけが目的ならば何も問題はない。なぜなら、慣性の法則を上記の 3 つの解釈のどれに基づいて了解しているかは解答に影響を与えないからである。しかし、力学の解釈学的次元を問題とする場合には、どの解釈を採用しても同じであるというわけにはいかない。マッハとレーニンが初等力学の問題に取り組んだとき、二人ともおそらく正しい解答を与えるだろう。しかし、彼等が自身の解釈に基づいて問題をどのように捉えているかという点では質的に異なるはずである⁽⁴⁾

文系学生が自然科学に接したときに感じるのは、近寄り難い超越論的雰囲気ではなかろうか。佐々木力は 20 世紀における科学思想の転回を吟味し、科学の「解釈学的構造を明確に抽出する試み」の重要性を論じている。その中で、彼は次のように述べている。

「科学といえども、自律的なわけではなく、歴史的な生活世界に拘束されているのである。(中略)。解釈学的洞察の役割は、科学が超越の世界に不当に舞い上がろうとするのをこの世に係留することなのである。そして、解釈学的哲学が科学の自律性に異議申し立てをするからといって、「非合理主義」を称揚するわけでは無論ない」⁽⁵⁾

ここに述べられていることを科学教育に引きつけて考察してみることがわれわれに要求され

ている。自然科学が解釈学的要素を持つかぎり、人文科学という解釈学的知的営為と自然科学の間には何らかの共通項が存在するはずである。本論文での学習を踏まえた上で、科学の解釈学的構成要素をいわゆる文系学生へ教えることは、その共通項を学生に伝えることであり、教育上きわめて重要である。

これまでの科学教育に於ける科学史の取り扱いでは、常に新しい概念や理論の創造という歴史的事象に焦点を定めて教育内容が構成されていた。つまり、俗に科学革命と呼ばれるエポックメイキングに深く関与した人物、たとえばガリレオやニュートンが取り上げられる。一昔前であれば、啓蒙主義的理性が自律的に活動した結果素晴らしい成果が得られたという総括に基づいて、科学の優秀性を喧伝する教材が作製されたであろう。現在では、科学と技術・社会との関係が射程に入っており、無批判な科学主義への傾倒を免れてはいるが、講義の眼目となるのはやはり革命的な創造の行為を多面的に理解することなのである。しかしながら、いわゆる文系学生を対象とした場合、過去の天才の洞察ではなく、むしろ科学的概念や理論の解釈の変遷とそのさまざまな次元での影響、そして、そこに在る「解釈学的循環」の中に、教育内容としての価値を積極的に見出す試みが必要であると思われる⁽⁹⁾

- (1) 板倉聖宣「授業書〈力と運動〉とその解説」『科学教育研究』第6号(国土社, 1971年)。それまでの慣性の法則の指導方法が整理されており、それらの多くが理想的な状況を用いた思考実験になっていることが指摘されている。
- (2) 寺岡英男「授業書「力学」」高村泰雄編著『物理教授法の研究』(北海道大学図書刊行会, 1987年)所取には、それまでの慣性の法則の指導方法が批判的にレビューされている。
- (3) 測定結果としては、たとえば、『パークレー物理学コース1 力学 上』(丸善, 1975年)127-128頁を参照のこと。このとき、円運動、回転運動についての議論に深入りすることは避けなければならない。
- (4) 本文の設問でニュートン氏をマッハ氏へ、フック氏をレーニン氏へと置き換えて、設問文の意味を考えてみるのもおもしろい。
- (5) 佐々木力『学問論』(東京大学出版会, 1997年)第三章を参照。本文中での引用文は137頁。「20世紀における科学思想の転回」岩波講座『現代思想』1『思想としての20世紀』(岩波書店, 1993)初出。
- (6) 本論文では紙数の関係から、物理学の解釈学的次元と科学教育の関係について充分考察することができなかった。稿を改めて議論することとし、本論文では課題の所在を示唆するにとどめる。

10. まとめと今後の課題

本論文では、大学の一般教育・教養教育に於いて、いわゆる文系学生を対象とした力学教育の教育内容の一部を紹介した。それらを以下に要約しておく。

- (1) 機械論的自然観の一側面
初期条件とその後の運動の間の因果的関係性について学ぶ。
- (2) 規則性と普遍的法則
普遍的法則性の有無という観点から、自然界に見られるさまざまな規則性を比較する。
- (3) 機械論的自然観の一側面
原子論的自然観の理解。古典物理学的な原子の描像から力学現象の分析的考察へと進む。
- (4) 重力相互作用
原子間の相互作用として重力相互作用を理解する。

(5) 運動法則 $F = ma$ (本論文では詳細は省略した)

(6) 接触力について

運動法則 $F = ma$ が接触力に対しても成立するか否かを考察し、その普遍性を認識する。

(7) 慣性の法則

運動法則 $F = ma$ の普遍性と関連して、慣性の法則について考える。また、慣性の法則の解釈の多様性から、科学の解釈学的次元と科学教育の関係という課題があることを指摘する。

本論文では教育内容構成と教材(案)の一部を論じたわけであり、講義による実践を行うための具体的な授業プランは提示されていない。カリキュラム研究として完成させるためには、具体的な授業プランと授業実践による評価が必要である。高等学校における理科の履修状況に関してさまざまな履歴をもっている学生を対象とした実験授業であることが望ましい。それらは今後の課題である。

本論文で考察した教育内容の背後には、科学の諸分野から構成されるより広いカリキュラムの存在を想定している。ここでは、物理学関係のカリキュラムの中での本論文の位置づけを論じておく。

本論文の教育内容は物理学への誘いという役割を担っており、物理学関係のカリキュラムの最初に位置けられる。本論文での力学教育の後には、力学関係の非線形科学が教育内容として配置される必要がある。なぜならば、非線形科学によって、近代の機械論的自然観で捉えることのできない世界の様相を理解できるからである。従来は線形では取り扱えないという否定的な意味が非線形性に付与されていたが、近年、非線形性はその本質であるような現象が注目を集めている¹⁾。本論文で展開されている力学教育の後に非線形科学の教育が配置されることによって、現代物理学の与える力学的自然観の形成を目的としたカリキュラム上のまとまりが完成する。

本論文で取り扱った原子論は古典物理学の範囲内で描かれる素朴な描像である。教育効果は期待できるものの、自ずから限界があることは明らかであろう。したがって、カリキュラムの次に位置すべきは量子力学的世界像の理解である。そこでは原子の構造とそのふるまいについての現代物理学の発展と成果を学ぶことになる。

従来の物理学教育には、力学と原子物理学以外の領域として、熱力学、統計力学、電磁気学が含まれている。いわゆる文系学生を対象とした物理学教育カリキュラムが、これら領域を網羅的、体系的に取り扱っておくべきかどうかは今後さらに検討を要する課題である。本論文の教育内容は、粒子論的な世界観に基づいていると言えるだろう。その意味で、場の概念を導入する電磁気学の教育は重要な役割を担っている²⁾。熱・統計力学の教育については、より広い科学教育全体のカリキュラムの中へ配置することが可能と思われる。熱力学については、環境科学の教育との関連でその基本的概念と法則を取り上げることが可能である。また、統計力学については、化学反応の際に考察する気体分子運動論を題材として展開できるだろう。

最後に、本論文で考察した教育内容と教材(案)は、高等学校での科学教育に於いても有効であろうと思われる。対象学生が高校生であることを考慮した教材の具体化を検討する必要があるのは当然であるが、彼等にそれまでとは異なった観点で物理学を理解してもらえるのではなかろうか。近年、中学校での教育内容の一部を高等学校へ廻すことによって教育内容の削減を行おうとする傾向にあるが、そのようなカリキュラムは中学校と高等学校に於ける科学教育を同質化するだけであろう。明確な線引きが可能とは思わないが、16歳あたりからの子どもの

発達段階を視野に入れ、科学という知の体系への初等教育にはない新たなアプローチを高等学校で展開すべきではなかろうか⁹⁾しかしながら、高等学校の教育内容そのものが中学校の単なる延長と見なされる流れの中では、新しいことは大学で始めるしかないのかもしれない。

- (1) たとえば、吉田善章『非線形科学入門』（岩波書店、1998年）を参照。
- (2) 倉賀野志郎「授業書「電磁気学」」高村泰雄編著『物理教授法の研究』（北海道大学図書刊行会、1987年）所収。
- (3) たとえば、モーリス・ドベス『教育の段階』堀尾輝久、斎藤佐和訳（岩波書店、1982年）では、発達・教育の段階として16歳前後で新たな段階へと成長することが述べられている。