

『物理学史研究』の研究覚え書き

序説

研究の意義

仮説実験授業と科学史研究の関連を調べる。

ガリレオはなぜ、何のために、何を考えて落下の法則を研究したのか。

このヒントは『ぼくらはガリレオ』にあり。

板倉はなぜ、何のために、何を考えてガリレオの文献を研究したのか。

板倉と他の科学史家との違い。

矛盾論を駆使して科学史を解明という手法は他の科学史家には見られない。

研究の方針

『物理学史研究』に載っている板倉論文を読み解く。

論文の和文和訳。意識。今日の言葉と数式で記述する。

注釈をつくる。

文献学的研究。

板倉の明らかにしようとしたことの達意眼目。一言で言うと。

科学史研究と授業書のつながり

インピータス理論の持つ意義をはっきりさせる。

『物理学史研究』に書かれた論文の板倉の他の論文との関係。

論文発表の年譜を作る。

1. 『物理学史研究』の概要

『物理学史研究』が発行されたのは、1958年5月1日で板倉さんが27歳最後の日である。この日に Vol. 1 No. 1 に発行され、以後1巻5号まで板倉さんの編集で発行された。それ以後の巻は名古屋大学に引き継がれた。4号と5号の間に板倉さんは国立教育研究所に就職したため、この研究誌の編集を続けるのが難しくなったのである。

1958年5月1日『物理学史研究』Vol. 1 No. 1

1958年10月1日『物理学史研究』Vol. 1 No. 2

1959年2月15日『物理学史研究』Vol. 1 No. 3

1959年5月9日『物理学史研究』Vol. 1 No. 4

1959年10月5日『物理学史研究』Vol. 1 No. 5

編集後記を見ると、「発行が予定より大幅に遅れた」と書かれている。ということは、1年に4回発行という予定だったのだろうか。編集後記には、廣重氏の論文を少し書き直して『科学史研究』に投稿したところ、「セコハンに困る」と言われたという話が出ている。これは二重投稿は困るという意味だと思われる。板倉さんの考えでは『物理学史研究』と『科学史研究』は相並ぶものではなく、『科学史研究』は科学史の統一機関誌として、『物理学史研究』に載った論文でも、科学史研究一般にとって重要なものは『科学史研究』に出すべきであるというものである。この考えは、その後の板倉さんの研究組織論

において、『仮説実験授業研究（1期）』と『ひと』『のびのび』の関係においても同様の方針で進められた。

2. 『物理学史研究』掲載の板倉論文

1958年5月1日『物理学史研究』Vol. 1 No. 1 発行の翌日板倉28歳

「論文「古典力学と電磁気学の成立過程とその比較」のための序文

「アリストテレス力学のなりたち——原典による古典力学史——

1958年10月1日『物理学史研究』Vol. 1 No. 2 板倉28歳

「インピータス理論のなりたち」

「静力学・静水力学と重さ・軽さおよび力の概念のなりたち」上川友好と共訳編

1959年2月15日『物理学史研究』Vol. 1 No. 3 板倉28歳

[原典翻訳]「ガリレイ力学のなりたち——静力学から動力学へ〈その1〉

1959年5月9日『物理学史研究』Vol. 1 No. 4 板倉29歳

「ガリレオはいかにしてその力学を建設したか

——誰から何を学び何が独創的だったか——」

1959年10月5日『物理学史研究』Vol. 1 No. 5 板倉29歳

「落下法則への道——ガリレイ力学のなりたち〈その2〉——

大きな流れはアリストテレス力学、インピータス理論、ガリレオの力学である。第4号の論文で板倉さんは「ガリレオが古代、中世の力学理論を学んでいることは重要なことなのに重視されていない。」と主張している。

3. 一連の板倉論文の主旨——インピータスは不可欠の概念か

これらの論文の一番の要点は351ページに板倉さんが書いている。

板倉さんは、「ガリレイの力学全体の発展過程とその内容との全面的な比較検討を行った研究はない」ということに気づき、これは「研究するに値するテーマである」と考えたことで研究を始めたのである。その結論は大きく言えば、アルキメデスの静力学をアリストテレスの動力学に結びつけたということになる。その具体的な部分を見ていくと、アルキメデスの方法をインピータスとモメントという概念によって解釈し直し、その概念によって動力学を建設しようとしたということである。

では、このインピータスとモメントという概念は必要不可欠な概念なのだろうか。無駄な回り道なのではないだろうか。この概念を科学教育で活用することができるのだろうか。また、活用することに何かメリットはあるのだろうか。

その答は、一連の論文を精読する中で明らかにしていきたい。

4. 板倉論文の歴史的位置づけ

ここで、『物理学史研究』に掲載された板倉論文の歴史的位置づけについて考察してみよう。

(1) 卒業論文・修士論文・博士論文における矛盾論の研究

(1) 卒業論文

「コペルニクスから何を学ぶか」『科学史研究』第27号 1953年11月 23歳

① 1951年(20歳) 東大教養部2年生の後半に、モスクワ大学科学史・科学哲学講義要綱を入手し、列挙されているテーマを参考に自然弁証法研究会名目で科学史のテーマを設定した討論会を開始した。その時のテーマの一つが〈コペルニクスは科学的と言えるか〉だったことで研究が始まった。

② 議論する中で明らかになったことをもとに『天動説と地動説の歴史的発展の論理構造の分析』という論文を書き上げて、自然弁証法研究会の機関誌の別冊として公表。

この論文は季節社の『科学と方法』に所収されている。

③ 「コペルニクスから何を学ぶか」『科学史研究』第27号 1953年11月 23歳

この論文は季節社の『科学の形成と論理』に掲載されている。なお、この論文の前に科学史学会で講演した原稿も残されている。③も講演原稿も科学史学会としては異例の激しい、戦闘的な内容である。そして、矛盾論を正面に押し出して、「科学史上の課題は矛盾を正しく分析することによって解決される」と主張している。

(2) 修士論文

1955年2月(24歳) 修士論文「物理学と矛盾論」提出

(ただし、提出するときは、「物理学における本質論的理論の発展法則——古典力学・電磁気学・量子力学の歴史的分析」という表題にした。108ページガリ版刷り)

1955年3月『科学と方法』別冊第6号「物理学と矛盾論」掲載。

修士論文として提出したものと同じものである。『科学の形成と論理』に収録されているのは、この論文のうちの第一部の37ページ分のみで、第二部の「電磁気学の形成過程」は収録されていない。この論文の再刊が必要であろう。

(3) 博士論文

1957年12月(27歳)

『科学史研究』に「古典力学の成立過程(1)(2)(3)」を連載開始

1957年12月(27歳)

学位論文「古典力学と電磁気学の成立過程とその比較研究」を提出

1958年12月(28歳)

理学博士の学位を受け取る。

1959年9月(29歳)

『科学史研究』に「古典力学と電磁気学の成立過程と比較研究」掲載

コペルニクス研究において、矛盾論を前面に押し出して論じた板倉聖宣は、修士論文においても矛盾の解明が理論成立の鍵であったと主張し、その主張は博士論文に引き継がれている。科学史学会の中でこのように科学史を捉えようとした論文は他には見かけない。板倉独自の見解と言うべきである。そしてまた、この見解の後継者も科学史学会の中には見当たらないようだ。このような見解は独創的すぎて、後継者が見つからないと考えたらいいのだろうか。それとも、矛盾論を論ずることなしに、科学史は記述できる。矛盾論の立場で研究することは、よけいな回り道であるということなのだろうか。このことへの解答も、板倉論文の精読を通じて明らかになっていくことを期待したい。

矛盾論にもとづく研究の成果は科学史の研究の発展のためよりは、仮説実験授業という授業の発展のために、大いに貢献したと考えられる。板倉さんの科学史研究は「基本的矛盾

盾の解明が科学的認識の成立にもっとも重要なポイントであった」ということを明らかにした。そして、その科学的認識の成立条件の研究の成果を教育へ適用したが仮説実験授業であると言えるのではないか。

「矛盾を解明する」とはどういうことか。たとえば、PSSSC の物理学では、力学台車に一定の力を加え、テープに打点して、「力と加速度が比例する」「質量と加速度が反比例する」ということを実験を通じて導いている。ここでは矛盾論はどこにも出てこない。

「矛盾論など振り回さなくても生徒たちは力と運動の関係を理解するのではないか」とも考えられる。しかし、授業をした教師なら、生徒がこの実験から法則を導くのは至難の業であることを知っている。力と加速度が比例関係にあるということを確認し、生徒も納得したはずなのに、別の問題を考えるときは速さは力に比例すると考えて別におかしいとも感じない生徒が大多数なのである。これほど明快な実験を見てなぜ生徒はわからないのだろうか。

もし、このような実験で力学が教えられるのであれば、仮説実験授業をする必要はないし、板倉聖宣さんの科学史研究も無用の研究ということになる。

実際には、生徒は力と運動を分離して考えていない。運動している物体を見れば、力があると考え。力という言葉を使っている、それは仕事の意味で使っていたり、仕事率の意味で使っていたり、運動量の意味だったり、運動エネルギーの意味だったりする。

そこで、教師は力の意味を限定して使うように指導する。厳密に教えようとする教師は「作用反作用の法則に従うものを力と言う」と教えたりする。その説明に納得したはずの生徒に真上に投げ上げたボールに働く力の矢印を書かせると、ヒッパルコスが残留力の理論や、ビュリダンの勢いの理論に基づく矢印を書く。ボールを投げるとボールには飛んでいく力が働いていると主張する。落ちていく石には落ちていく力が働いていると答える。いくら「作用反作用の法則に従うものを力と言う」と教えても、生徒は力の意味をもっとはるかに広い意味で使っているのである。

生徒のこのような「力」という言葉の使い方に疑問を感じない人もいる。その方が大多数だと言ってよいだろう。いや、それどころか、高校の物理の教師でも、「落ちていく力」などと言って説明をしている人もいるのである。多くの人にとって力と運動は別物ではないのである。

力と運動の法則は式に書くときわめて単純で簡単な法則に思える。ところが、生徒からすると限りなく難しいと感ずるのである。何が難しいのだろうか。

板倉さんの主張によれば、これまでの多くの力学の教え方は力と運動の矛盾を正しく解明していないまま教えているから理解できないのだということになる。生徒にとって力学を勉強するということは、テストに出る問題をどう解くかということではかない。物理がわからない、物理が大嫌いという生徒が多数出るのは必然と言わなければならない。

力と運動の教え方については多くの試みがなされてきた。しかし、その努力にもかかわらず、その試みは成功したとは言えない。仮説実験授業のみが圧倒的な成果を上げたのは、力と運動の矛盾を解明するように授業書が作られたからである。これが、仮説実験授業と他の工夫された授業との違いである。

(2) 科学組織論の研究

1956年4月頃

2年後輩の江沢洋東京都物理科学学生懇談会を組織。毎日勉強会。

そこでの講演のために科学の社会史の研究を始める。

1956年6月(26歳 大学院ドクター2年)

『科学読売』に「日本の科学と社会の歩み」を連載

1957年3月(26歳 大学院ドクター2年)

『科学史研究』に「理化学研究所における科学研究体制(1)(2)」

1957年5月(27歳)

日本科学史学会の幹事に選ばれる。

1957年5月(27歳 大学院ドクター3年)

武谷三男編『自然科学概論』第3巻に「科学者の自主的な組織」を執筆

1957年9月(27歳 大学院ドクター3年) 『科学史研究』「わが国の物理学の自立過程」

この時期には科学研究の組織についての研究を公表していた。「科学的認識は社会的認識である」というテーゼの提出はこの時期の研究にそのルーツがあると思われる。

(3) 教育との関わり

1956年6月 『科学と方法』に岩城正夫「中学生の浮力問答」掲載

大日本図書 of PR 雑誌「科学教育ニュース」の編集を通じて小島繁雄と知り合う。

1959年2月(28歳) 『科学教育ニュース』に「こんな実験はぜひやりたい」掲載

1959年6月(29歳) 国立教育研究所の研究員になる。

1959年12月(29歳) 『科学史研究』に

「理科教育におけるアリストテレス・スコラの力学観と原子論的ガリレイ的力学観」掲載

1960年2月(29歳) 座談会「これからの理科教育の方向」に出席、発言。

1960年3月(29歳) 国立教育研究所紀要23集「学力調査(理科)の補正と分析の方法について——中学理科の真の学力と見かけの学力」

1961年3月(30歳) 国立教育研究所紀要「理科学生の入試成績と在学成績」掲載

1961年7月(31歳) 『科学』に「大学の入学試験と浪人」掲載

1961年12月(31歳) 『科学朝日』

「物理教育を改革する教科書——アメリカのPSSC運動」掲載

1962年3月(31歳) 『科学読売』

「学力検査はゴマカシではいけない——正答率何%という見かけのうそ」掲載

1962年9月(32歳) 『科学読売』座談会「物理教育の革命を語る」江沢洋と企画・実行

1962年10月(32歳) 『科学読売』に「原子論から見た力学入門」連載

1963年2月(32歳) 都立教育研究所で〈物理学史と物理教育〉について講演

上廻昭氏はこの講演を聞き、研究協力者の申し入れをした。

1963年3月(32歳) 国立教育研究所紀要「理科学生の入試成績と教養成績②」掲載

1963年4月(32歳) 『科学読売』に「原子論から見た力学」連載開始

1963年7月25日(33歳) 仮説実験授業の火曜研究会開始

1963年8月(33歳) 科学教育研究協議会で仮説実験授業を提唱

5. 著書・出版

1959年9月(29歳)『玉川百科辞典物理(2)』「物理学の歴史」誠文堂新光社

1960年1月(29歳)『科学大観④』科学史特集号執筆 世界文化社

1960年9月(30歳)『現代物理学の基礎』玉木英彦と共著で出版 東大出版

1961年3月(30歳)『科学革命』に「落下法則の成立史」寄稿

1961年7月(31歳)『科学の歴史』小学館 菅井準一と共著 板倉8割執筆

1963年6月(33歳)『少年少女科学名著全集』企画会議開始

こうしてみると、板倉さんの基本的矛盾を解明する研究(博士論文につながる研究)と、科学の組織論の研究が合流して仮説実験授業が生み出されたように思われる。その中で『物理学史研究』はどのような位置を占めているのだろうか。

板倉さんの博士論文は、内容を圧縮しすぎていて、わかりにくくなっている。これをもっと詳しくわかりやすく書きたい」と板倉さん自身が書いているように、これだけの壮大な大風呂敷の議論をするには紙数が不足である。『物理学史研究』はその博士論文をさらに具体的に論ずるために創刊された学術誌なのではないだろうか。そこで板倉さんはまず、「論文「古典力学と電磁気学の成立過程とその比較」のための序文を掲載することで、この壮大な論文の意義を主張したかったのである。そして、その各論として書かれたのが、『物理学史研究』に載せられた各論文と翻訳だったのである。

5. 『物理学史研究』の研究から何がわかるか

そこで、『物理学史研究』を読むことで次のようなことが発見できるのではないかとという予想を立てられる。

①板倉さんの矛盾論の具体的な形を『物理学史研究』の論文から読み取ることができる。

②仮説実験授業の考え方のもとになっている考え方を読み取ることができる。

③授業書で取り上げられている問題の原型を見いだすことができる。

『物理学史研究』の板倉さんの論文は、大きく言って

アリストテレスの力学 インピータス理論 ガリレオの力学
が書かれている。まずはガリレオの力学から取りかかることにしたい。

6. 今回の研究の焦点

1959年5月発行の『物理学史研究』Vol.1 No.4に掲載された「ガリレオはいかにしてその力学を建設したか」を取り上げる。この論文は、板倉聖宣29歳のときの論文である。この論文の要旨は、

①静力学、動力学の豊富なアイデア、経験の3つが揃わなければ、ガリレオの力学は建設されなかった。

②ガリレオの偉大さはそれ以前や当時の他の力学研究と対比してみることで、理解しうる偉大さとして認められるだろう。

③ガリレオの力学の建設は革命的なことであり、その具体的な成り行きを分析してその意義を確定することが必要である。

これらが「結論」として書かれていることをさらに要約したものである。しかし、この文は、この研究の意義を的確に表現しているようには思えない。これをどう表現すべきかは、この論文を精読した後、改めて考えることにしたい。

アリストテレス力学の分析メモ

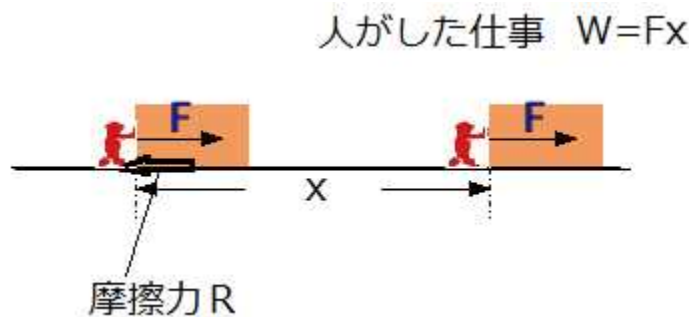
2017年5月20日

渡辺規夫

板倉さんのガリレオについての論文を分析する中で、アリストテレス力学について分析する必要が出てきたため、板倉さんのアリストテレスの力学を分析した論文を読みながら、そのメモをとったものである。

アリストテレスの力学は一面の正しさとそれを適用外の問題に適用したため間違いに陥ったということの両面を持っている。

人が物体に力 F を加えて、距離 x だけ移動させることについて考察してみよう。



このとき力 F のする仕事 W は $W = F x$ で表される。

両辺を時間 t で割ると

$$\frac{W}{t} = F \frac{x}{t}$$

$P = F v$ (仕事率 = 力 × 速さ)

と変形できる。

ここで加える力 F は、摩擦力 R と同じ大きさである。(物体が加速されない場合)

すると、 $P = R v$

$$v = \frac{P}{R} \quad \text{すなわち} \quad \text{速さ} = \frac{\text{仕事率}}{\text{抵抗}}$$

と書くことができる。(これは正しい。)

アリストテレスは重さが2倍になれば速さは2倍、抵抗が2倍になれば速さは2分の1になると考えたのである。

アリストテレスは仕事率 P を動力 P 、抵抗 R を動かされるものと考えた。このとき、動力という考え方を仕事率と解釈すれば間違っていないが、力と解釈すると間違っていることになる。アリストテレスの力概念は力なのか、仕事なのかその区別ははっきりしない。

この考えを落下運動に適用してみよう。

アリストテレスは落下運動における動力 P は重さ W で、抵抗 R は媒体の密度 d' と考えた。

そこで、 $v \propto \frac{W}{d}$

ということになる。この考えが落体に関するアリストテレスの法則である。
この理論を具体的な問題に当てはめて考えてみよう。

[問題]

1 g の砂粒と 1 0 0 0 g の石を水の中で落とすとその落下速度はどうなるか。

予想

ア、1 0 0 0 g の石は 1 g の砂粒の 1 0 0 0 倍の速さで落ちる。

底に着くまでの時間は 1 0 0 0 分の 1 である。

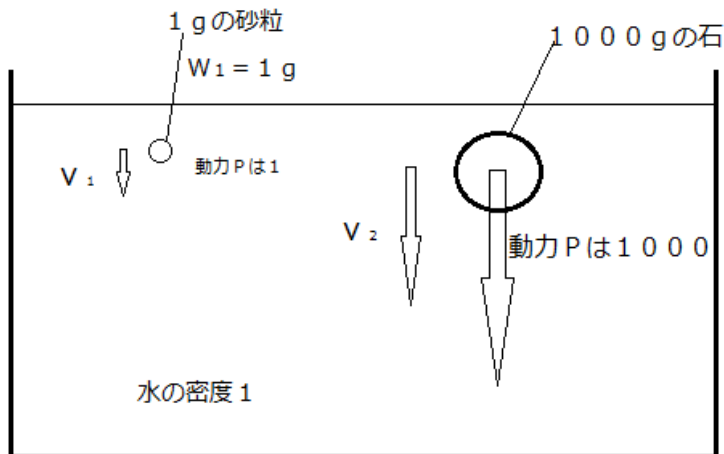
イ、重い石の方が速く落ちるが、1 0 0 0 倍速いということはない。せいぜい 1 0 倍から 1 0 0 倍程度速いだけ。底に着くまでの時間は 1 0 分の 1 から 1 0 0 分の 1 程度

ウ、重い石の方が 2 ~ 3 倍速い。

エ、同じ速さ

オ、砂粒の方が速い。

アリストテレスの法則で考えてみよう。



砂粒の落ちる速さ v_1 は $v_1 = \frac{W_1}{d} = \frac{1}{1} = 1$

石の落ちる速さ v_2 は $v_2 = \frac{W_2}{d} = \frac{1000}{1} = 1000$

よって、1 0 0 0 倍重いものは 1 0 0 0 倍速く落ちる。

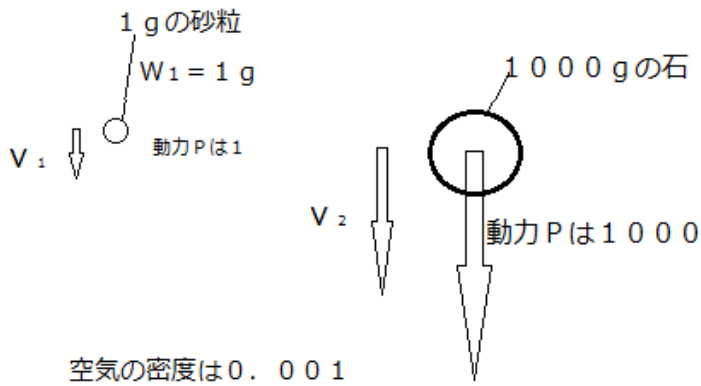
これは、観察結果と一致しているように思える。水の中を砂粒はゆっくり落ちていく、もっと小さい粒は沈殿するのに時間がかかる。

アリストテレスはこのことから、

落下速度 v は $v \propto \frac{W}{d}$

という考えは正しいと考えた。

空気中での落下についてはどうなるだろうか。アリストテレスの考えを空気中での落下の問題に適用してみよう。



砂粒の速さは v_1 は $v_1 = \frac{W_1}{d} = \frac{1}{0.001} = 1000$

石の速さは v_2 は $v_2 = \frac{W_2}{d} = \frac{1000}{0.001} = 1000000$

すなわち、石は砂粒の1000倍の速さで落ちることになる。これは観察結果と一致しない。これは、アリストテレスの理論の弱点である。

真空中での落下はどうなるだろうか。

$$v = \frac{W}{d} = \frac{1}{0} = \infty$$

すべてのものは真空中では落下するのに時間がかからない。これはありえない。だから、アリストテレスは、真空は存在しないと考えた。

この「10倍重いものは（Wが10倍のものは）10倍速く落ちる」という考えは、アリストテレスだけでなく、現代の子どもたちの考えでもある。これが《力と運動》の授業書に「10倍重いものは（Wが10倍のものは）10倍速く落ちる」という選択肢が入っていることの起源である。

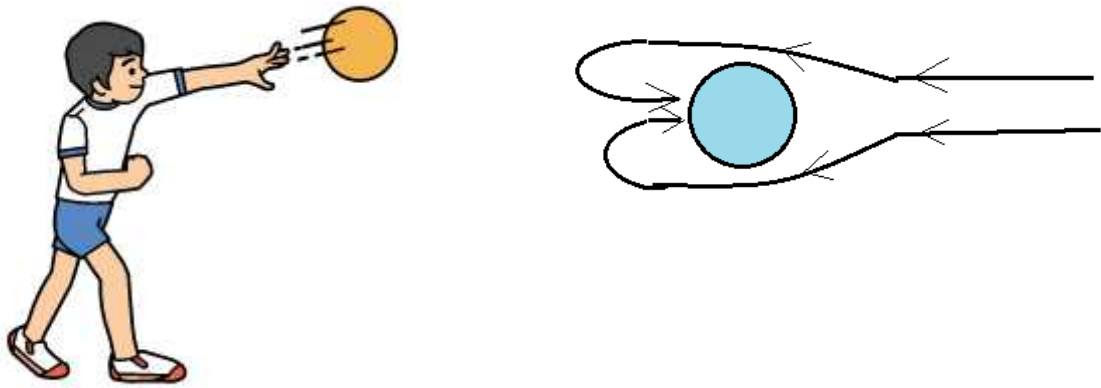
ピロポノスのアリストテレス批判

ガリレオ以前の科学者たちの考えを知るために『科学革命』森北出版に収録された板倉さんの「落下運動の成立史」を読んでみよう。

ピロポノスのアリストテレス批判

石を投げたときに石が飛び続けるのはなぜか。

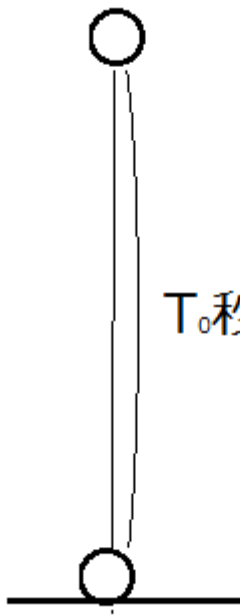
アリストテレスは、ものが動かされるときは必ず動かすものがなければならないと考えた。動かされるものは動かすものから押されているから動くというのである。この押す力は接触していない限り作用しない。この考えを投げた石に適用すると、石は何かから力を受けていなければならない。その何かというのは接触している空気しかない。そこで、投げられた石は後方の空気が石を押すから飛び続けるのだと考えたのである。



ピロポノスはこれを批判した。大風でも石を飛ばせないのに、こんなことは不可能だというのである。ピロポノスは手が石を押す力が石の中に残っていて、この込められた力が石を押し続けると主張した。

そして、「10倍重い石は10倍もはやくは落ちない」ことを指摘してアリストテレスは間違っていると主張したのである。

ピロポノスは「落下速度は重さに比例する。」ということは疑いえないと考えた。真空中ならそうなるというのである。



ここで、ピロポノスのいう速度というのは、現在物理学で言う速度とは違うことに注意しなければならない。ピロポノスは落下して地面に着くまでの時間 T_0 の逆数を速度と考えたのである。

真空中の落下速度は重さに比例するというのは、

$$T_0 \text{秒かかる} \quad \frac{1}{T_0} \propto W$$

ということなのである。

これは、変わった考え方だと思う人がいるかも知れない。しかし、速度というのは、日常生活では1秒間に進む距離、単位は m/s で表される量として扱われていない。オリンピックの100メートル走で「どちらが速いか」というときに、秒速で比べる人はいない。100メートルを何秒で走るかで、その数値が少ないほど速いという判断をしている。

先日、スポーツジムでウォーキングマシンで歩いていたら、速度というメーターの横にペースというメーターがあるのに気がついた。その単位は min/km であった。「1キロメートルを何分で歩くか」という物理量をペースと呼んでいるのである。

「学校までどのくらいの速さで行くのか」と聞かれて、「 $○○ m/s$ 」と答える人はいない。「 $○○分かかる$ 」と答えるのである。実は、日常ではピロポノスのように、一定の距離を進むのにかかる時間の逆数を速さと呼んでいるのである。このとき、途中で速くなったり遅くなったりしても、かかる時間の逆数を速さと呼んでいるのである。ピロポノスにとっては、途中で速くなるかどうかは問題ではなく、ものを落としたときにかかる時間の逆数のことを速さと呼んでいるのである。むしろ今日物理の授業で当然の如く教えられている速度概念のほうが、日常的な判断の仕方からすると変わった考え方であるとも言えるのである。

これは、ピロポノスの速度概念の方がいいと言っているわけではない。 m/s という考え方をして初めて運動を数学的に的確に把握できるようになったのは事実である。しかし、そういうことが確立する以前には、われわれが日常生活で使っている「一定の距離を進むのにかかる時間の逆数」を速度と考えることはむしろ普通だったということ指摘しているのである。

ピロポノスの考え

落下速度が重さに比例することは疑いえない。真空中ならそうなるはずだ。
媒質中では媒質の密度 d' に比例した時間 T_r だけ遅れる。

$$T_r \propto d' \text{ より 比例定数を } k_2 \text{ とすると、 } T_r = k_2 d'$$

そこで、地面に着くまでの時間 T は

$$T = T_0 + T_r = \frac{k_1}{W} + k_2 d'$$

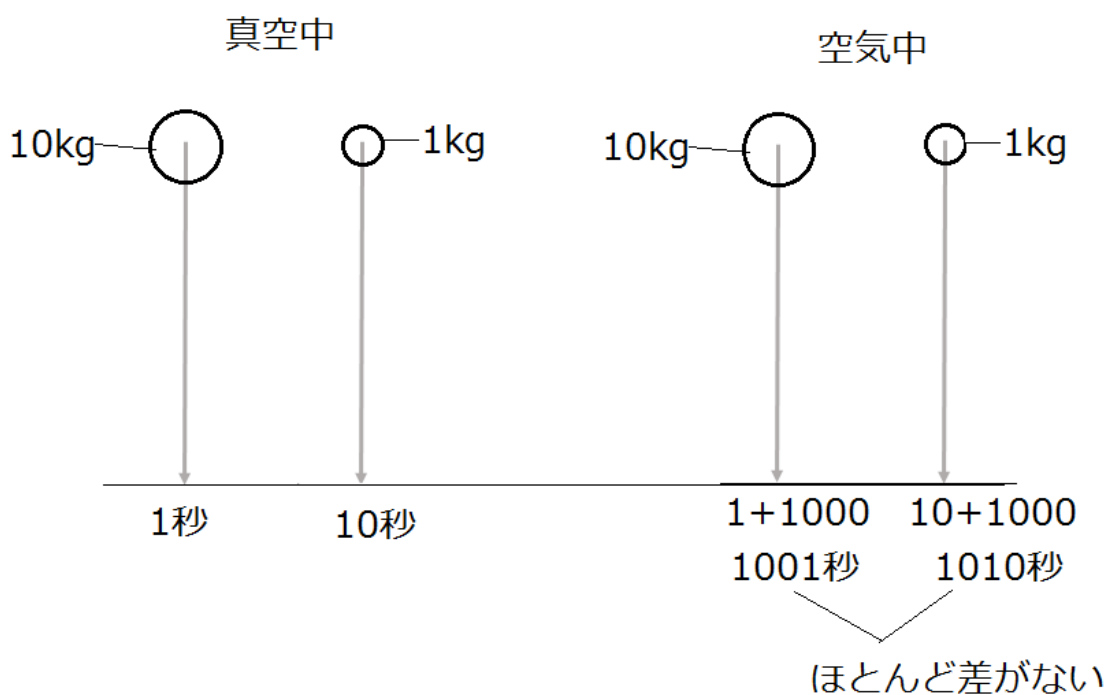
この式の意味は、 $d' = 0$ 、すなわち真空中では $T_r = 0$ このとき W が大きいほど、地面に着くまでの時間は短い。

$T_0 \ll T_r$ のとき、すなわち媒質の密度が大変大きいとき、 $T \approx k_2 d'$

つまり、密度が大きいほど、地面に着くまでの時間がかかる。(速度が小さい)

媒質の密度が大きいときは、地面に着くまでの、ものの重さとはほとんど関係がない。

空気の $k_2 d'$ がきわめて大きいとき、たとえば $k_2 d' = 1000$ とすると



これによって、真空中では重いほど速く落ちるが、空气中ではほとんど同じ速さで落ちるということが説明できると考えたのである。

具体的に数値を入れて考えてみると、ピロポノスの考えは無理があるように思える。しかし、ピロポノスにとっては、このような具体的な数値を入れることは思いも寄らないことだったに違いないと思う。