

14. インピータス理論とガリレオの理論

ここでガリレオはどのような問題に直面していたかを考察してみよう。

ガリレオは、アルキメデスの浮力の原理を落下の問題に適用しようとしていた。ガリレオはアルキメデスの静力学のすばらしさに感激して、アリストテレスがこじつけのような説明をしている物体の落下速度の問題にアルキメデスの静力学を適用することを思いつく。ものを落とそうとしている力はものの重さで、その反対向きに浮力がはたらいっている。そこで重さから浮力を引いたものがものを落とす力になる。落ちる速さはこの重力ー浮力に比例するはずだ。ここでガリレオは大前提として速さは力に比例すると考えていた。これはアリストテレスの考えで、これは間違っているが、当時はこれは自明の真理であると考えられていて、間違っていると考えることはできなかった。

この「速さは重力ー浮力に比例する」という考えは速さを終端速度と解釈すると自然の現象と一致するが、ものが落ち始めるときの加速について説明できない。ここでうまい説明法が残留力の理論だった。この残留力の理論により、落ち始めるときは次第に加速し、残留力がなくなった以後は重力ー浮力に比例した速さで落ちると考えたのである。

この考えでは、浮力がないとき、すなわち真空中では速さは重さに比例するということになる。たとえば空気中で同じ大きさの鉛（密度1）と石（密度2）を落とした場合、浮力は重力に比べるときわめてわずかであるから、鉛の方が5倍くらい速く落ちるはずということになる。しかし、実際に実験してみると、鉛と石はほとんど同時に落ちる。実験してみれば、「速さは重さに比例する」ということは間違いだとわかる。これをどのように説明したらいいかが、当時のガリレオの直面した問題だった。

このとき、ガリレオはビュリダンのインピータス理論を知ることになる。

「ビュリダン Buridan, Jean 1295年頃～1358年頃

パリ大学教授。アリストテレスの物理学に反対し、物体に衝撃を一度与えれば無限に運動を続け、天体も神によって運動を与えられれば天使の手助けは必要ないと説き、ニュートンより3世紀も前に運動の第一法則を述べている。」（『科学技術人名事典』都築洋次郎編著 北樹出版）

ビュリダンの理論はインピータスの理論と言われている。（ラテン語でインペトス、イタリア語でインペト）これは「勢いの理論」と言ってもよい。ものの重さがものにモメントまたはインピータスを与え、そのモメントまたはインピータスがものを押すと考えるのである。

14. インピータス理論とガリレオの理論

インピータス理論は、アルキメデス的な落下法則と調和させることができる。 $F = W - w$ の F を「動かす力」つまりモメントまたはインペト (M) をつくりだす力と考えればよいのである。そうすれば、 $M = \int (W - w) dx$ として M が W の物体を動かすと考えて、 $v \propto \frac{M}{W}$

(36)

$= \frac{\int (W-w) dx}{w}$ となる。ここで x は落下時間または落下距離である。
($v \propto \frac{W-w}{w}$ という式は15世紀にマルリアーニの提出していたものである。) こうすれば、落下の加速度はインピータス理論そのものと全く同じに説明できるし、そればかりではなく、すべての物体は空気中でほとんど同じ速度でおちることも説明できるのである。物体の落下の原因がその物体の重さであるという通常の考えでは、物体の重さが物体(の重さ)を押すと考えるのは困難(不可能)なのに対して、インピータスの理論ではインピータスという重さとはちがった“動かす力”を媒介としているので、この力がその重さを動かすと考えることが出来、真空中ですべての物体が同一速度でおちるということも考えられるのである。(インピータス理論以前には、ガリレオは F が物体の重さではなく物体の体積を動かすと考えていたことに注意)

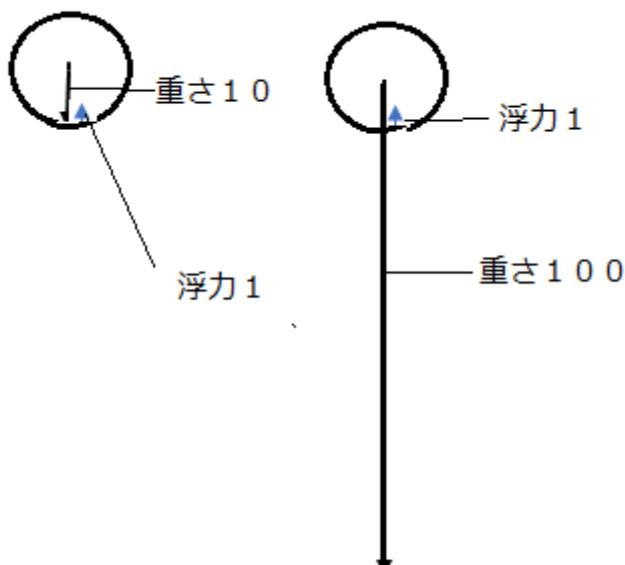
ガリレオ以前のインピータス論者たちは物体の落下速度がほとんど同じだという事実を上のように説明しなかったように思われる(この点要調査)が、それは、彼らが基礎的な運動法則として、ガリレオとちがって、アリストテレス・ブラドワーデインの法則を用いたからであらう。この法則では、 $v \propto \frac{W}{w}$ または $v \propto \log \frac{W}{w}$ で、重さの“動かすべき抵抗”は媒体であったのである。その点ガリレオはアリストテレスの法則から自由であったのでインピータスの力学から直ちに、すべての物質が同速度でおちることを結論しえたわけであって、静力学から動力学を建設するという彼の方法は成功したわけである。(この際媒体の浮力を生ずる作用と、運動に対する抵抗とが別のものだ、ということを経験していなければならぬ。)

インピータスの理論で落下運動を説明してみよう。

[問題]

大きさが同じで重さが10の球と重さが100の球を同時に落とすと、その速さはどうなるか。インピータス理論ではどうなると考えられるか。

それぞれにはたらく浮力を1とすると、



重さ10の球

ものに加わる力 $W-w=10-1=9$

10秒間落下し続けたときのモメント（あるいはインピータス）は

$M=9 \times 10=90$ のインピータスで重さ10の球を動かす。

→速さは $90 \div 10=9$

重さ100の球

ものに加わる力 $W-w=100-1=99$

10秒間落下し続けたときのモメント（あるいはインピータス）は

$M=99 \times 10=990$ のインピータスで重さ100の球を動かす。

→速さは $990 \div 100=9.9$

重い球の方が速く落ちるが、速さは9.9と9であり、その差はわずかである。10倍も違うということはない。

これは、実際に観察されることによく合っている。

それでは、この理論で真空中の落下運動について考えてみよう。

真空中の落下の場合、浮力は0である。

重さ10の球

球に加わる力 10

10秒間落下し続けたときのモメント（あるいはインピータス）

$$M = 10 \times 10 = 100$$

10の重さの球を100のインピータスで動かす。

$$\rightarrow \text{速さは } 100 \div 10 = 10$$

重さ100の球

球に加わる力 100

10秒間落下し続けたときのモメント（あるいはインピータス）

$$M = 100 \times 10 = 1000$$

100の球を1000の力で動かす。→速さは $1000 \div 100 = 10$

すなわち真空中でも重くても軽くても同じ速度で落ちる。

インピータス理論によると真空中ではみな同じ速度で落ちるはずということになる。これはインピータス理論の方がアリストテレスの理論よりも落下運動をずっとうまく説明するということである。

インピータス理論をまとめてみよう。

$W-w$ がモメントあるいはインペトを作り出す。

このモメントあるいはインペトをMとすると

$$M = \int (W-w) dx$$

と表される。この式は $M = (W-w) x$ と書いても実質同じことである。

このMが重さWの物体を動かす。物体の速さvは

$$v \propto \frac{M}{W} = \frac{\int (W-w) dx}{W}$$

となる。この式の意味するところは、

モメントあるいはインペトが2倍ならば、速度は2倍になる。

モメントあるいはインペトが同じで、重さが2倍なら速度は1/2になる。

xは落下時間、または落下距離である。

xを落下時間tとすると、

$M = (W-w) t$ となり、モメントまたはインペトは $W-w$ の生み出す力積ということになる。これは正しい理論である。

$F=ma$ の両辺時間tをかけると $Ft=mv$ となり

$$Ft \text{ を } M、m \text{ を } W \text{ とおくと、} \quad M=Wv \quad \text{ゆえに} \quad v = \frac{M}{W}$$

インピータス理論と運動方程式から導かれる結論は一致した。

x を距離 s とすると、

$M = (W - w) s$ となり、モメントまたはインペトは $W - w$ のする仕事ということになる。
 $v = F s / m$ でこれは正しくない。しかし、摩擦力があつて、物体が等速運動するとき
外力がした仕事と摩擦力がした仕事が打ち消し合つて運動エネルギーは変化しないので、
その意味ではこの式も正しいと言えないこともない。

この理論では力×時間がインピータスなのか、力×距離がインピータスなのかがはっきり
していない。当時はこの区別が意識されることもなかったのであろう。

当時の理論をことばで書くと次のようになると思われる。

「ものに力のある時間加えらるとものにインピータスがたまる。」

「ものに力を加えてある距離動かすとものにインピータスがたまる。」

このインピータス理論の利点は

「重さが重さを動かす」という考え方は不可能であるのに対して、「重さがインピータ
スを作り出し、重さではないインピータスという勢いが重さを動かす」と考えることを可
能にしたことである。

このような考え方は生徒にもしばしば見られる。現代の立場から見れば、重さという概
念が質量という意味で使われたり、重力という意味で使われたりするために生ずる混乱で
あるということになる。重さが重さを動かすのではなく、重力が質量を動かすというこ
なのである。しかし、この時代にそのような考え方をすることはできなかった。インピー
タスという概念を導入することで、落下運動をうまく説明できるようになったというべき
であらう。

インピータスの理論を式で表すと

$$v \propto \frac{M}{W}$$

となる。

ここで、 W は動かす原因ではなく、モメントあるいはインピータスによって動かされる
ものということになる。質量と重力の区別という問題の解決への第 1 歩と言うべきである。

極地方式という理科の教育方法がある。この極地方式研究会では慣性の法則を次のよう
に教えることを提案していた。

「ものに力を加えらるとものに運動エネルギーが蓄えられる。この運動エネルギーのため
にもものは動き続けるのだ。」

この説明法は、生徒に受け入れられやすい。この運動エネルギーはインピータスそのも
のと言ってもよい。しかし、次のような疑問を持つ生徒には有効な教え方ではない。生徒
の中には「その運動エネルギーは動いていくにだんだん減っていく心配はないのだろうか。」
これに対する的確な説明法はないように思う。教師は「理由もなく運動エネルギー
が自然に減ることはない」と教えるだろう。しかし、減衰することを心配している生徒に
はその説明は何の役にも立たない。

仮説実験授業の《力と運動》の授業書がある。この中で、台車に一定の力を加えたら速さはどうなるかという問題がある。この実験結果は「引っ張っている間じゅう、どんどん速くなる」ということなのであるが、この結果を説明するお話で「力は「速さ」を追加する」という言い方で、インピータスの理論に近い説明の仕方をしている。そして、力×時間という物理量力積を導入して説明しているのである。この説明の方が、運動エネルギーで説明するよりすぐれていることは、『たのしい授業』で板倉さんが書いていたが、今その本が見つからない。

いずれにせよ、仮説実験授業の中にインピータスの理論のすぐれたところは取り入れられているのである。

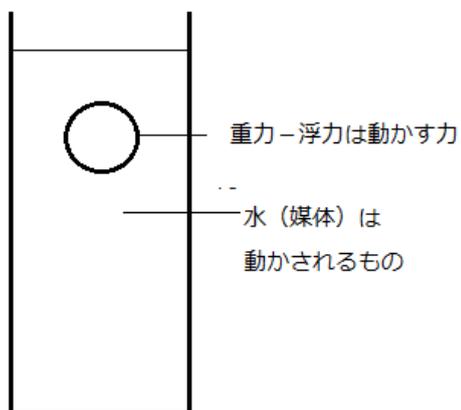
さて、板倉さんによると、ガリレオ以前にはインピータスの理論を用いて、落下速度が同じという議論をした学者はいないと言う。それはなぜだろうか。

それは、ガリレオ以前の学者たちはインピータスの理論を用いるとき基本法則として、アリストテレス・ブラドワーデインの法則を用いたからであるという。

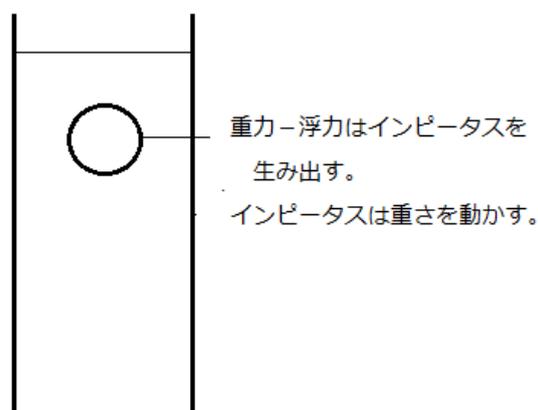
アリストテレス・ブラドワーデインの法則については板倉さんは『物理学史研究』Vol.1No.1の「アリストテレス力学の成り立ち」で詳しく述べているので、後で取り上げることにする。

アリストテレスによれば、速さは合力の大きさに比例する。このとき、 $W-w$ は何に作用する力なのだろうか。アリストテレスにとっては、ものは力を加える物体であり、その力を受けるのは媒体と考えるしかなかった。しかし、ガリレオはこのアリストテレスの考えから自由だったので、力を受けるのが落ちていく物体であると考えることができたのである。

アリストテレスの考え



ガリレオの考え



この点はインピータスのところで再検討したい。

要約

ガリレオは静力学の方法を動力学に適用しようとした。そのとき、インピータス理論を受け入れて、インピータスがものを動かすという考えから、真空中ではすべてのものが同速度で落ちることを導き出したのである。