

## 本 論

ここではガリレオの各時代の各論文における力学がどんなものであったか、ということをも他の力学研究者のそれと比較し、ガリレオの力学的認識の発展のプロセスをあとづける。

### A. 静力学

#### 1. アルキメデスとの関係

静力学ではまずアルキメデスからダ・ヴィンチ、カルダーノ、ベ

369

(353)

ネデッティ、グイド・ウバルドと伝わった伝統にしがっていると思われる。アルキメデスの名は彼の論文に出てくるし、ベネデッティとグイド・ウバルドとの関係は既にしばしば指摘されている。それは当時、アルキメデスの本が北イタリアで数度も印刷発行されていたことも明らかにされている。

#### え. 斜面の法則

しかし、アルキメデスや上にあげた系列の人々には見られない研究がいくつかある。例えば斜面の法則である。斜面の法則はアルキメデスによってはとりあげられていないし、ヘロンもパッポスもダ・ヴィンチも間違った法則を与えている。正しい法則を得たのは13世紀のヨルダヌス・ネモラリウスと、16世紀のステフィンである。証明の仕方といえばガリレオの方法はヨルダヌスのともステフィンのとも全くちがっている。ヨルダヌスの論文はタルターリアが編集出版しているのでガリレオが知っている可能性は大きい。しかし、ステフィンの本は1586年にライデンで出版されているが、オランダ語であり(ラテン語版は1608年)「運動について」の執筆時期がわずかにそれよりあと位なので、ガリレオがステフィンの研究を知っていたかどうか分らない。

## 1. アルキメデスとの関係

## 2. 斜面の法則

ここでの論述の要点は、ガリレオが斜面の法則を他に見られないやり方で説明しているということである。ここで、板倉さんはガリレオ以外の学者による斜面の法則研究の歴史の概観を述べている。アルキメデスの研究から引き継いだものと、アルキメデスの研究にない斜面の法則について記述している。

斜面の法則というのは、「斜面上の物体を斜面上方に動かすために必要な力は斜面の傾きが大きいほど大きい斜面の傾きが小さいほど小さい」ということである。もっと言えば、重いものを持ち上げるとき斜面の傾きをゆるくしてやれば、斜面に沿って小さい力でも持ち上げることができるということである。これは武谷三男の『物理学入門』季節社 63 ページでも取り上げられている。ステヴィンの論文は『物理学史研究』1958年10月のVol.1.No.2 209 ページに訳文が掲載されている。(板倉訳・著「インピータス理論のなりたち」)これは後日取り上げたい。

斜面の法則の正しい理解は、13世紀のヨルダヌス・ネモリウスと16世紀のステフィンによって明らかにされた。

ヨルダヌス・ネモリウス I. アシモフ『科学技術人名事典』共立出版に記述なし。『世界科学者事典』にも記述なし。

ステフィン I. アシモフ著『科学技術人名事典』共立出版には記述なし。

「ステヴィン Stevin, Simons (1548年頃～1620年)オランダの科学者、物理学において静力学と流体力学を発展させ、数学に小数記数法を導入。静力学においては力の平行四辺形を用い、動力学では滑車の系を研究した。彼は、ガリレオよりも先に、高い建物から重さの異なる二つの物体を落として、それらが同じように落下することを実験的に証明したものと考えられている。ステヴィンは自国語で論文を書いた。すべての科学者がそうすべきだというのが彼の主義であった。」世界科学者事典4物理学者 原書房より、抜粋して引用。

ステフィンの本は1586年にオランダ語で出版された。ガリレオが1608年の「運動について」の論文を書くときにステフィンの本を参考にしたかどうかはわからない。

### 3. 運動力の考え

#### 3. 運動力の考え

ともかく、その斜面の法則の導き方は独創的である。その考え方からすれば（偽）エウクレイデス、9世紀のイブン・クルラの運動力（*vistus motus*）の考えをうけつぐものである。もっとも「運動について」では運動力というような考え方は表面にはあらわれず、議論のすゝめ方はアルキメデスの純粋に数学的なやり方に近い。しかしのちの論文「機械学」（1593年〜1596年の間）では全く同じ数学的論証の中にはっきりと「運動力」という考え方が用いられ「動かす力」となっており、これが彼の力学の一つの支柱となったモメントの概念である。このモメントという考え方は内

370

(354)

容的にはヨルダヌスの「位置による力」と同じ考えの上に立つものである。さらにいえば、「新科学対話」（1636年完成）中であらわれる斜面の法則の導出の仕方は前のものと全く異なり、ヨルダヌスの仮想仕事の考えを用いたものである。

この部分が板倉論文の論点であるように思える。ガリレオの斜面の法則の導き方を分析している。

その特徴は「運動力」という概念を用いて説明していることである。この運動力というのは何なのだろうか。

「運動について」では運動力の考え方を使っていない。

『機械学』1593年〜1596年では、「運動力」の考えを使って論証している。

『新科学対話』1636年ではヨルダヌスの仮想仕事の原理を使っている。

ここには、これ以上の説明がないので、この内容の理解は後日の課題として先に進むことにする。

今後調べるべきこと

ヨルダヌスの位置による力

ヨルダヌスの仮想仕事の原理

## B. 力学の方法

### 5. アルキメデスとアリストテレスの方法

#### B. 力学の方法

##### 5. アルキメデスとアリストテレスの方法

ここでアルキメデスとステフィンの方法とをそれぞれに対立するアリストテレスの方法と比べて述べておく必要がある。

アリストテレスは哲学者として全自然現象を包括的に考察しようとした。そして彼をうけついだ力学の研究者たちは静力学的な問題をもアリストテレスの動力学と関連づけて考察しようとした。これが仮想変位（仕事）、運動力の考えを生み出したのである。

ところが運動の現象は容易にとらえるものではない。これに厳密な幾何学的方法を適用するには、あまりにも複雑である。そのような理由によるのであろう、アルキメデスは自らの研究の範囲を幾何学を厳密に適用できる静力学に限ったのである。ステフィンの場合はもっとはっきりしている。彼は、ただ一つ運動の問題を取り扱った。しかしそれは、アリストテレスの落体の法則が正しくないことを示し、運動とそれに反ぼす抵抗の法則が幾何学的に取りあつかえないということを示すためであった。ステフィンは間違った理論にすまむまいとして幾何学的厳密性にとどまったのである。

371

アリストテレスは全自然現象を包括的に考察しようとした。

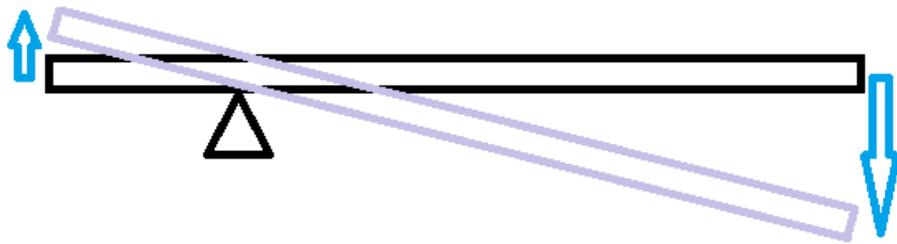
静力学的な問題を動力学と関連づけて考えようとしたために、仮想仕事の原理や、運動力の考えを生み出したのである。

仮想仕事の原理とは簡単に説明するとういう考えである。

自転車という物体を初めて見た人が、これがどんなしくみのものかを調べようとするときにどんなことをするだろうか。自転車の各部分を少しだけ動かしてみて、それが他の部分にどのような動きを生み出すかを見ようとするだろう。ペダルを少し動かして、後輪が少し回転することをみて、この自転車という物体の構造を理解していこうとするだろう。

この「少し動かしてみる」というやり方が「仮想仕事の原理」なのである。

少し動かすということが、「力を加えて移動させる」すなわち仕事である。少しというのは、 $\Delta x$ で、この $\Delta x$ は0に限りなく近いという考えからすると、実際には動かしていない。すなわち仮に動かしたと仮定するというこで「仮想仕事の原理」というのである。



図のようなテコがあるとしよう。図の板の右端を仮に10 cm下げたとしよう。すると、左端は1 cm上がるはずだ。仮に右端に力を加えて動かしたとすると、左端は10分の1しか上がらない。そこで、仕事は損も得もしないという原理原則から考えると、左端がものを押し上げる力は右端を押し下げる力の10倍になるはずだ。これが仕事の原理である。このとき、「仮に動かしたとすると」と考えて実際には動かさないで問題を解くことが、「仮想仕事の原理」を使って問題を解くということなのである。

このテコの問題は静力学の問題である。すなわち、静止しているものの力のつりあい（あるいは力のモーメントのつりあい）の問題である。この問題をアリストテレスの後継者たちは、動力学的手法——すなわち、仮に動かしたとするとと考えるやり方——で問題を解いたのである。静力学の問題も動力学と関連付けて解こうとしたというのはこういうことなのである。

[運動力の考えとは何か]

運動力について、ガリレオはインペト（衝動）という言葉を使ったり、モメントという言葉を使ったりしている。モメントについては、ガリレオの『機械学』に説明がある。『物理学史研究』Vol.1 No.3(1959年2月)原典翻訳「ガリレオ力学のなりたち——その一、静力学から動力学へ」原典翻訳 4.2（モメントとは何か——その1——）の中でガリレオは棒ばかりで支点から遠いおもりが軽くても支点から近い重いおもりよりも下に行くモメント、インペト（衝動）が大きいので重いおもりの下に行くインペトに打ち勝つことができるという趣旨のことを述べている。(285ページ)

この問題においても棒ばかりを静力学的に力（のモーメント）の釣り合いの問題としてとらえるのではなく、動力学にとらえていると言える。

しかし、動力学はとらえるのが難しい。そこで、アルキメデスもステフィンも、静力学の範囲に限って問題を解決しようとしたのである。

## 6. ヘロンの方法

(255)

### 6. ヘロンの方法

上のように考えれば、アリストテレスの流れをくむ力学の方法が哲学的・動力的と特長づけられるのに対して、アルキメデスのそれは幾何学的・静力的と特長づけられるであろう。

ところでアリストテレスとアルキメデスの典型的に対立する力学の方法の他にさらにアレクサンドリアのヘロンやパプスの力学などは一つの独立な特長をもっているように思われる。それは哲学的・動力的ともいえないし、幾何学的・静力的ともいえない。この力学は技術的ということが出来るであろう。単一機械を用いて仕事をするような問題は単に静的な取扱いをするアルキメデス、ステフィンなどによつては論じられなかったし、哲学者たちによつても論ぜられなかったのである。

アリストテレスの力学の方法——哲学的・動力的

アルキメデスの力学の方法——幾何学的・静力的

ヘロン、パプスの力学の方法——技術的

「ヘロン 1世紀頃のギリシャの技術家。アレキサンドリア

近代的な技術的能力の持ち主。水蒸気を管から噴出させることによって球を回転させる装置を作った。蒸気によって、ドアや彫像を自動的に動かす装置も作った。力学についての論文を書いた。単純な機械（てこ・滑車・輪軸・斜面・ねじ・くさび）を使えば力の向きを変えてしかも力を大きくすることができる」と述べた。力を大きくするには、力が作用する距離が短くなるという犠牲を伴うことを明らかにし、アルキメデスのこの原理を拡張して、それを法則化した。」（I. アシモフ著『科学技術人名事典』共立出版より抜粋）  
パプスについては、I. アシモフ著『科学技術人名事典』共立出版に記述なし。

このような問題をアルキメデス、ステフィン、哲学者たちは論じなかった。

アルキメデスは、単一機械について論じていないのだろうか。板倉さんは「単一機械を用いて仕事をするような問題」と言っている。アルキメデスは力のつりあいの問題を扱ったのだが、仕事の原理としてはとらえていなかったということなのだろうか。