

Title	デカルトにおける力学の再検討
Author(s)	武田, 裕紀
Citation	待兼山論叢. 文学篇. 2000, 34, p. 71-83
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/47908
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

デカルトにおける力学の再検討

武田裕紀

デカルトの力学の問題は、デュエムやタンヌリ、コイレらによって、20世紀の前半に通り論じ尽くされた感がある。古典力学の形成あるいは解析力学の先駆的形態という観点からデカルト自然学に光を当てたこれらの諸研究は、今なお17世紀前半の自然学を研究するものにとって基本文献であることには変わりない。彼らは、科学の発展の過程で、デカルトが果たした役割を正しく評価し、かつその限界も的確に指摘することで、デカルト自然学の正当な総合収支を示して見せた。

しかしながら、近年科学史の研究方法が多様化するにつれ、偉大な先駆者の築いた業績を踏まえた上で、デカルト自然学を別の角度から見つめ直す可能性が広がってきたように思われる。つまり、17世紀前半という科学の変革期に特有の問題群に対して、デカルトはどのような立場からアプローチしたのか？ もう少し具体的に言えば、科学上の諸問題に対して、デカルトはいかなる概念を駆使してどのようなアイデアをそこに投入したのか？ こうした視点を採用するため、我々の分析がデカルトの科学的功績よりもむしろ誤りの方を強調する結果となることもあるとしても、これは決してデカルトを一級の自然学者としての地位から失墜させることを目的としているのではなく、自然学者デカルトとしての世界観をより鮮明に描き出すことを目指しているのである。こうしたテーマは文献学的に非常に興味深い課題となりうるであろう。

今回の論考で、我々は17世紀前半の主要なテーマであった落下運動を手

がかりにデカルト自然学の問題点を探っていくことになる。そして上で述べた方針に従って、われわれはこれらの問題群に現れた「運動中心主義」とも呼べるデカルトのアプローチについて、次の3つの側面から考察する。

1) デカルトは加速運動の原因を考察するにあたって、「力」という概念をいかに理解していたか？ 2) 自然落下を数学的に記述する際、なぜデカルトは独立変数としての時間をたてることができなかったのか？ 3) デカルトはなぜ仮想仕事において仮想変位の概念を提出することができたのか？ これら3つの考察を通して、デカルト自然学の一つの側面である「運動中心主義」を確認する。

1. 力の概念

1618年から1619年にかけてのオランダ滞在中に書かれた断片である『物理数学』(*Physico-mathematica*)で、デカルトは初めて自然落下の問題に取り組んでいる。この断章を分析するに当たって注意を払わなければならない点は、これがベークマンから与えられた条件に従って「与えられた距離を落下するのに要する時間を求めよ」という自然落下に関する問いに答える、という形式を取っていることである。ベークマンがデカルトに与えた条件とは次の2点、1) 物体は重力によって常に押されていること、2) 真空、つまりなんの抵抗もない空間を落下すること、デカルトの回答は以下の通りである(図1参照)。

各瞬間ごとに、新たな力(vis)が加えられ、それによって重い物体は下に向かうこととなります。こうしていれば同じ作用によって物体のもつ力(vis)が増大していくのですが、それは横線のde、fg、hiなど他の無数の横線によって増大しているものにあたります¹⁾。

ここで注目すべきことは、デカルトは本来ベークマンに与えられた2つ

の条件に従ってこの問題に取り組んだはずであるにもかかわらず、デカルトがここで用いている「力」とはベークマンのそれとはまったく異なっている点である。もし、ベークマンの指示したとおり「物体は重力によって常に押されている」のであれば、「力」は一定なのだから、描かれるべき図は縦軸を時間、横軸を力にとった長方形になるべきである。にもかかわらず、デカルトの描いた図に従えば、時間に比例して速度ではなく「力」が増大していくことになってしまうのである。なぜ時間に比例して「力」が増大するとデカルトは考えるのであろうか。

その理由は、ベークマンの想定する力の概念とデカルトがここで問題を解くに当たって想定している力の概念の間に乖離があるからに他ならない。デカルトは、実はベークマンのように物体の外部から不断に押す力、すなわち外力として「力」という用語を理解しているのではない。そうではなくて、このテキストの後半で、物体の速度が3倍になる理由として「三倍の力で地球に引っ張られる (*triplo majori vi a terra trahitur*)²⁾」という表現を用いているように、デカルトは力という概念を「物体が下に向かっていく速度を持つために要求されるもの」と誤解してしまっているのである。その結果、落下速度が徐々に増大していくに応じて、力も増大していくという発想に至るのである。

このような「力」の理解は、再び落下問題を扱った1629年11月13日付けのメルセンヌ宛書簡にも確実にあらわれているものの、それ以降はここで想定されているような真空における抵抗のない状態という前提条件がデカルトの真空の不在というテーゼに抵触するため、自然落下の問題に正面から取り組むことは稀になってしまう。しかしながら、今見たような加速現象の説明方法は1644年の『哲学原理』の円運動の分析に今一度見いだすことが出来る。

デカルトは運動の相対性に注目して遠心力を説明しようとする。たとえ

ば、地球上の任意の一点Pから水平方向に放たれた玉は、点Pにとどまっている人から見れば、地球は回転しているため、空に舞い上がっているように見える。そしてこの放たれた玉は観測者の位置から加速度的にはなれていくように見える。次の引用は、『哲学原理』第3部59項の中の、なぜ小球が中心からはなれていく速度が加速的に増加していくかを述べた部分である。力 force と当時頻繁に用いられた概念である傾向力 effort (ラテン語では conatus) という用語の関係に注目しよう (図2参照)。

玉Aは最初の瞬間に伝えられた力 (force) を保持するであろう事に加えて、さらに新たな力を、その玉が中心Eから遠ざかるためになすであろう新たな傾向性 (conatus) によって獲得するであろう。なぜなら、この傾向性は円運動が続く限り続き、ほとんどすべての瞬間に更新されるからである³⁾。

この引用に見られる次の2点、1) 各瞬間ごとに傾向力 (conatus) が加わることによって新たな力 (force) は更新され増加する、2) この保持され蓄積されていく力の量が速度を決定する、は明らかに、『物理数学』でデカルトが了解していたところの力の概念と相似の関係にある。デカルトが犯した1618年の誤りは単なる偶然の産物ではなく、25年以上時を隔てた『哲学原理』に至るまでその反響を聞き取ることができるのである。それどころか、そこにはデカルトが力という用語で理解していた事態がもっとも端的にあらわれているといってもよい。要するに「力」とは外力ではなく、物体が運動を維持するために保持している何らかの「量」なのだ。

コイレはこうした思考に中世のインペトゥスの名残さえ見たが⁴⁾、この見解はデカルトの意図を十分くみ取っているとは言えないように我々には思われる。こうした「力」の概念の理解は、1632年頃執筆され1633年に出版予定であった『世界論』で、自然の法則の第一の法則として定式化さ

れるものと相克の関係にある。『世界論』で初めて表明され、以降度々主張されるこの自然の法則の骨子は、『哲学原理』で最終的に定式化されるところによると、「一旦運動を始めた物体はその運動を維持するための力を持つ」⁵⁾ことにある。デカルトが理解しているこのような力とは、まさしく物体が運動を維持するために保持している量にほかならず、それ故、速度が増すにつれて物体はその運動を保持するための力を増加させるのである。ここには物体が運動しているという事実に注目し、その運動している物体がもっている力を量的に数値化しようという発想が根底に流れている。

ここには我々がデカルトの運動中心主義と呼ぶものの第一の特徴があらわれている。つまり、デカルトは「力」という用語によって運動の原因となる外的な作用を想定しているのではない。そうではなくて、まず初めに物体が運動しているという事実に注目し、その物体がその運動状態を維持するためには「力」が必要である、という思考をたどるのである。その意味ではデカルトのいう「力」というのは運動の量化とも言えるものであり、まさしく運動しているという事実を中心に置くことにより編み出された概念なのである。デカルトの関心は、「運動が起きるには何が必要か」という問題ではなく、「物体が運動しているとはいかなる状態か」という問題にあるのだ。われわれは本論の意図をデカルトの運動中心主義を性格づけると規定したが、運動中心主義の第一の特徴は、この運動のアクチュアリズムにある。

2. 独立変数としての時間の欠如

ついで自然落下運動の数学的表記に関する1619年の『思索私記』における議論を検討してみよう。このテキストにおいて、デカルトは自然落下の数量的把握に失敗しており、1643年に至るまでその誤りに気がつくことはなかったことはよく知られているが、その誤りの最大の理由は、独立の時

間変数が欠如していることに起因している。加速現象における時間、速度、落下距離の三者の関係を図のような三角形を用いて説明するにあたって、デカルトは縦軸を時間ではなく落下距離、横軸を各落下時点における速さにとっており、独立変数としての時間概念が欠如していることは、否みようがない。このテキストに現れたデカルトの推論を四段階に分けてたどってみる（図3参照）。

1直角二等辺三角形において、ABCは空間 espace (運動 mouvement) を表している。点Aから辺BCに至る空間の不等性は運動の不等性を表している。故に、2ADはADEで表される時間で通過されるであろうし、DBはDEBCで表される時間で通過されるであろう。そこでは、3より小さい空間はより遅い運動を表すのである。しかしながら、4ADEはDEBCの3分の1であり、従って距離ADは距離DBより3倍遅く通過されるであろう⁶⁾。

1) 三角形の面積はデカルト自身によってかっこ内で「運動」と言い換えられている。この「運動」という語は、下線部3にある「より遅い運動」という表現を考慮に入れば、物体が落下していく速度のことを指し示していることは明らかであろう。したがって三角形は頂点Aから底辺BCに向かって面積が広がるにつれて、落下する物体の速度も増大することを示している。しかしながら下線部2はこうした三角形の面積の定義にいと容易に抵触してしまう。2) この箇所で見逃すべきは2点である。一つは三角形の縦軸を時間ではなく距離と取っている点、そして二つめは、これが我々の現在の分析にとってより重要なことなのだが、三角形の面積が縦軸で示された距離を落下するのに必要とされる「時間」を示すとしている点である。これは三角形の面積を落下する物体の「速度」であると定義した下線部1の記述とは明らかに反することである。ここではさしあたってこ

の時間と速度の混乱という事態だけを押さえておこう。

3) 続く下線部3で、デカルトは「小さい面積はより遅い運動を示す」と述べ再度三角形の面積を速度に関係づけた上で、4) 下線部4ではもう一度下線部2と同様に縦軸で示された距離を通過するのに必要な時間を、与えられた三角形の面積を手がかりにして求めようと試みる。

このようにデカルトは図の三角形の縦軸を時間ではなく落下距離としており、そのため1638年には「速度は落下距離の2倍に比例する (en proportion double de l'espace)⁷⁾」と表明するに至る。つまり、独立変数としての時間概念の欠如であり、デカルトがこの欠点に気づき時間変数を導入することによって自然落下の問題を解決するのは1643年以降のことではない。では、なぜデカルトは、ベークマンのように時間変数の存在に気がつかなかったのであろうか？

その根本的な理由は、「運動」という語の特異な使い回しにあらわれている。デカルトは、三角形の縦軸を距離にとり、各距離における「運動」を求めようと試み、そしてそれが三角形の横軸で表された部分に相当すると考える。「運動」とは、「より遅い」といった修飾語から判断すれば落下地点における「速さ」であろうが、それは距離/時間として厳密に概念化されたものではなく、「物体が動いている」という事実注目した「物体が移動する変化の程度」と思われる。しかるに運動の中に時間が含まれている(運動は必然的に時間を要する)⁸⁾ため、運動の合計(面積)の逆数が与えられた距離を通過するのに要する時間に相当する(運動の量が多いほど与えられた距離を短い時間で通過できる)、とデカルトは考えることが可能になるわけだ。この運動理論ないし時間論は、「時間は運動により、また運動は時間により測られる」、「時間とはまさに前と後に関しての運動の数である。」と述べたアリストテレスの延長上にあると言ってよい。アリストテレスの時間概念は以下の引用に如実にあらわれている。

時間が経ったと我々が言うのは、運動におけるより先とより後との知覚を受け取るちょうどその時に、である。(……)より先とより後を知覚するとき、ちょうどその時、時間があるという。というのはこれが、すなわち、より先とより後に関しての運動の数が時であるから。だから時間は運動ではなく、数を持つ限りでの運動である⁹⁾。

これは、デカルトの運動中心主義のもう二つめの側面である。つまりデカルトは物体が運動しているという事実に注目して、落下運動のどの地点でどれだけの運動(速さ)を持っているかを調べ、そこから落下に必要な時間を割り出そうとしたのである。ニュートンのように絶対時間、絶対空間の枠組みの中で運動(速さ)を規定するのではなく、まずはじめに運動ありきなのだ。独立変数としての時間の欠如はこの運動中心主義から派生することになるであろう。

3. 仮想変位

仮想変位の原理に関するデカルトの構想は、1637年から1638年に至る一連の書簡、とりわけ1638年7月13日付の書簡において、もっとも包括的に展開されている。数学者でもあり科学史家でもあったデュエムは、後にベルヌイイによるこの原理の完全な定式化の発見に方向付けを与えたのはこのデカルトの方法であろうと推測しているように、この書簡は静力学の分野において非常に科学の歴史への貢献度の高いものである。その特徴についてデュエムは互いに関連した次の3点にまとめている。1) デカルトは仕事の概念は基本的には時間には関与しないことを明確に理解していた。2) その結果、彼は釣り合いにおいて考慮に入れなければならないのは、ガリレオが主張したように仮想速度ではなく、仮想の変位であるということを正確に洞察していた。3) こうして時間変数に基礎を置く動力学とは区別さ

れた「自立した学問」¹⁰⁾としての静力学の領域をうち立てた。

これらのデュエムの見解はデカルト研究者の間でも広く受け入れられており、事実前者の2点に関しては全く議論の余地がないほど正当であると思われる。しかしながら、第3の点に関しては、デカルトの自然落下の法則理解を考慮に入れるなら、必ずしも動力学と静力学の両者の間に明確な概念的区別があるとは言えない。というのも、デカルトは自然落下の法則の分析にあたって、前章で確認したように、落下速度が時間ではなく落下距離に応じて増大していく運動であると1643年に至るまで誤って理解していたからである。換言すれば、仮想仕事の問題に限定するならば、仕事の分析にあたって時間を排除したという事実が必ずしも、静力学を「自立した学問」として理解していた根拠にはならないのである。以下、この点をテキストを追いつつ確認する。

この仮想変位の問題は1637年10月5日の書簡でも検討されている仕事の概念の延長上に位置する。一連の考察においてデカルトは、確かに力(force)という用語を用いており仕事(travail)とは述べてはいないとはいえ、「天秤の両側のおもりが釣り合うのは距離(腕)の違いであって、速度の違いではない」¹¹⁾と主張し、仕事を考察するにあたって時間を考慮に入れる必要はないことを明確に洞察しているのである¹²⁾。

さらに引き続き仕事一般に関する原理を拡張した1638年7月13日の書簡は、仮想変位の概念を導入することにより、部分的に仮想仕事の原理を打ち出すことに成功している。デカルトは「物体がある位置にあるとき、それを支えて落下しないようにするために用いなければならない力は、それを支える力がそれを高めるためにも、またそれが低下するときそれにつき従うためにも行わなければならない運動の始まりによって測られなければならない」¹³⁾、つまり釣り合い状態にあつて仕事が保存されるには、その力は運動の無限小の変位によって測られなければならない、と主張する。

以下の図（図4参照）は、この事態をさらに具体的に分析するため、斜面上におかれた物体Fが円球EDG上の点Dにおいて力Hによって支えられている状態を示したものである。

私が単に落下するのではなく落下しはじめるといっている点にご注目下さい。考慮しなければならないのはこの落下の始まりのみであるからです。従って、例えばこの重い物体が点Dにおいて、ADCが、そう仮定されているような平面上に支えられているのではなく、EDGのような球面、あるいは他の何らかの仕方で曲がった面であっても、点Dにおいて、それと接すると想像された平面がADCと同じでさえあれば、この物体は、力Hにとっては、平面ACに支えられている時以上の重さも、それ以下の重さも持たないでしょう。なぜなら、この物体が、点DからE、あるいはGの方へと曲面EDGを上ったり下ったりして行こう運動は、平面ADCで行う運動とはまったく別のものですが、しかしEDG上で点Dにある時は、ADCで行う運動とまったく別のものですが、ADC上にあるときと同じ方向にすなわちAまたはCの方向に動くように決定されるであろうからであります¹⁴。

このようにデカルトは、釣り合いにおいて考察されなければならないのは釣り合っている状態からの仮想の変位であり、ゆえに移動する方向への射影された力である、ということをはっきりと見抜いているのである。こうした視点は、仮想の速度すなわちモメントの概念に依って同じ問題にアプローチしたガリレオと比較してみても独自のものであり、また静力学の本質に肉薄したものといえるだろう。何故なら、時間という要因が考慮される必要はないという仕事の概念の本質は、仮想の速度ではなく仮想の変位を中心におくことによってより鮮明になるからである。

このように速度ではなく変位に注目することは、我々が今回議論しているデカルトの運動中心主義の第3点に相当する。ただし仮想仕事における運動中心主義が、じつは惨めな失敗に終わった自然落下における運動中心主義の延長上にあることも指摘しておかなければならない。というのも、第2章で論じたように、自然落下に措いてもデカルトは落下する物体の位置の変化（移動）を分析の中心に置き、それぞれの位置における速度を求め、しかる後に与えられた距離を通過するために要する時間を算出する、すなわち独立の時間変数を排除してしまっているからである。このように少なくとも数学的分析にあらわれた手法から見る限りでは、自然落下という動力学と仮想仕事という静力学の間に、デュエムが指摘するような概念上の区別は見いだしがたいと言わざるを得ない。見方を変えれば、自然落下に関する議論の失敗はデカルトの運動中心主義の負の遺産であり、一方仮想変位は同じく正の側面ということができるのである。

結論

我々は今回の分析では自然落下および仮想変位の問題に焦点を絞ってその運動中心主義とも呼べるデカルト自然学の特徴について、3つのテーマから検証してみた。こうした極めて初期からあらわれる運動を分析の中心に置く態度は、数学的分析の面では1643年前後に自然落下の正確な定式化に至るまでは少なくとも保持され、物理的原因の分析のレベルでは『哲学原理』に至るまでデカルト特有の「力」という概念にあらわれているのである。そして、運動の第一原因として「神は世界の創造において物質と共に運動をおき」、「それを通常の協力によって常に保存している」¹⁵⁾とデカルトが主張する時、この運動中心主義は形而上学的にも保証されるのである。

図1

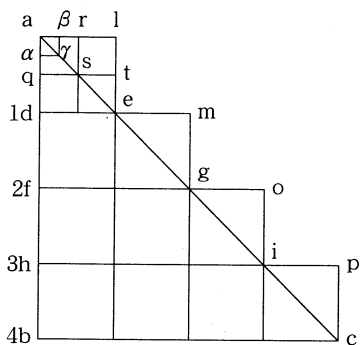


図2

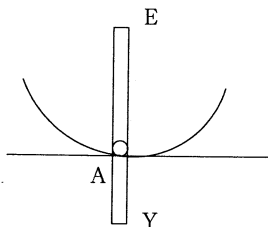


図4

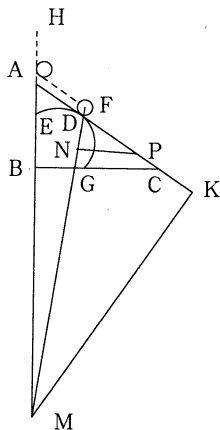
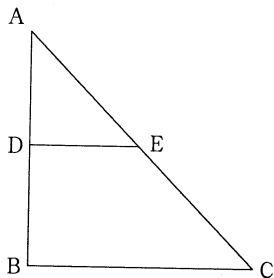


図3



注

- 1) 『物理数学』、A. T. X, p. 75。デカルトに関する引用参照は、*Œuvres de Descartes*, éditées par Charles Adam et Paul Tannery, réédition Vrin-C. N. R. S., 11vol., 1964-1974。以下A. T.と略記する。本稿ではこのテキストを基に、邦訳などを参照しつつ翻訳し、必要に応じて原文を記載した。
- 2) 『物理数学』、A. T. X, p. 77。
- 3) 『哲学原理』第3部59項、A. T. IX-2, p. 133。この箇所は、同じ59項の後半部分との繋がりを重視するなら、回転速度と遠心力の大きさの関係を論じているようにも読めるが、第58項からの論理的展開を重く見て、われわれは回転速度一定の場合の遠心力の大きさをデカルトは詳述している

と理解することにする。

- 4) Alexandre Koyré, *Etudes galiléennes*, Hermann, 1939, p. 124.
- 5) 『哲学原理』第2部43項、A. T. IX-2, p. 88。下線は論者による。
- 6) 『思索私記』、A. T. X, pp. 219-220。
- 7) メルセンヌ宛書簡、1638年10月11日、A. T. II, p. 387。この *en proportion double de l'espace* という表現はかなり曖昧であるが、いずれにしてもデカルトが、速度は何らかの形で落下距離に比例すると考えていたことだけは間違いのないところであろう。
- 8) 事実、『規則論』によればデカルトは「速さは運動の次元である」と考えている。A. T. X, p. 114。
- 9) アリストテレス、『自然学』、アリストテレス全集 3, 岩波、1968、IV 11, 219a 22-b3。
- 10) Pierre Duhem, *Les origines de la statique*, 2vol., Paris, 1905, tome 1, p. 346。
- 11) メルセンヌ宛書簡、1638年9月12日、A. T. II, p. 354。
- 12) これに関しては、小林道夫、『デカルト哲学の体系』、勁草書房、1995、pp. 352-355。
- 13) メルセンヌ宛書簡、1638年7月13日、A. T. II, p. 229。
- 14) 同上、A. T. II, pp. 233-234。
- 15) 『哲学原理』第2部36項、A. T. IX-2, p. 83。

(大学院後期課程修了)