

「運動物体の衝撃力をめぐってー ガリレオ・トリチェッリ・ボレッリー」

伊 藤 和 行

1. 序

1642年1月9日、「近代科学の父」ガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei, 1564-1642) は、フィレンツェの郊外アルチェトリにある彼の住居で息をひきとった。享年78歳、『天文対話』 (*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, 1632) の出版に端を発する宗教裁判の結果、彼は数年来幽閉の身であり、また1637年には両眼とも失明していたにもかかわらず、晩年のガリレオの知的活動には衰えがみられなかったという。実際1638年には、『天文対話』と並ぶ主著である『新科学論議』 (*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*) を出版し、落下運動の法則に代表される数学的運動論を発表して近代力学の基礎を築いたのだった。その後も、ガリレオは、弟子のヴィヴィアーニ (Vincenzo Viviani, 1622-1703) やトリチェッリ (Evangelista Torricelli, 1608-1647) を相手に議論を闘わせるとともに、彼らに自らの考えを口述筆記させていた⁽¹⁾。事実彼の残した遺稿の中には、膨大な量の書簡や運動の問題に関する青年時代の手稿のほか、晩年の思索活動の成果ともいえるべき、『新科学論議』への補遺、エウクレイデス [ユークリッド] の比例論に関する小論、運動物体の衝撃力に関する論考などが含まれていた。とくに運動物体の衝撃力の問題は、『新科学論議』の執筆後、晩年のガリレオの研究の中心だったので、彼は、その論考を『新科学論議』の第五日として発表する意志を友人や弟子へ伝えていた⁽²⁾。

ガリレオが落下運動の法則を確立した『新科学論議』は四日間におよぶ対話

からなるが、数学的運動論が展開されたのは後半の第三日と第四日である。鉛直および斜面上の下降運動が論じられている第三日では、落下法則 — 落下距離は落下時間の二乗に比例する — が数学的に導出され、さらに斜面の実験によって確証されている。また第四日では、投射体の軌道がパラボラ曲線（放物線）であることが数学的に証明されていた⁽³⁾。晩年のガリレオは、そこでの議論をさらに進めて、運動物体が他の物体に衝突したときに示す衝撃力に関する理論を築こうとしていたのである。彼の衝撃力の問題への関心は古く、パドヴァ大学の数学教師時代 — 1592年から1610年まで — に著した『機械学』（*Le mecaniche*）の中で、「衝撃について」（“Della Percossa”）という章を設けて論じていた⁽⁴⁾。以降この問題に関する記述は途絶えてしまうが、『新科学論議』の執筆を始めていた1630年代前半には再び関心がよみがえっていたことが知られている。そして『新科学論議』の出版後、盲目にもかかわらず、口述筆記によって「衝撃力について」（“Della forza della Percossa”）を残したのだった。しかしこの遺稿は、18世紀に入るまで日の目を見ることはなかった。その草稿はガリレオの息子ヴィンチェンツィオ（Vincenzio Galilei, 1606-1649）からヴィヴィアーニの手に渡ったが、ヴィヴィアーニはその出版の機会を失い、彼の死後、1718年に出版された『著作集』（*Opere di Galileo Galilei*）において初めて、すでに出版されていた第五日「エウクレイデスの比例の定義について」（“Sopra le definizioni delle proporzioni d'Euclide”）の後に、第六日「衝撃力について」として出版されたのである⁽⁵⁾。

「衝撃力について」は、出版されたときにはすでに時代遅れのものとなっていたが、しかしガリレオの運動論の最終的段階を我々に示すものとして彼の運動論を考察する上で欠かせない資料である。またこの論考の存在は、ガリレオの友人や弟子の間ではよく知られており、とくにガリレオの晩年に彼のそばにいたトリチェッリ、そして17世紀後半のイタリアでもっとも優れた科学者で、ガリレオの弟子たちとも親交のあったボレッリ（Giovanni Alfonso Borelli, 1608-1679）もこの問題に関して著作を残している。本稿では、ガリレオとともにトリチェッリやボレッリの衝撃力論の検討を通して、ガリレオによって基

礎を築かれた数学的運動論がそれ以後どのように発展していったのかを論じ、黎明期にあった近代科学の17世紀イタリアにおける展開を解明する第一歩としたい。

2. ガリレオ

(i) 『機械学』

ガリレオが最初に運動物体の衝撃力の問題を論じた『機械学』は、擬アリストテレスの『機械学』に倣って、てこ、滑車、ねじ、楔といった単純機械の静力学的説明を試みたものである。同様の試みは、ガリレオ以前にも、タルターリヤ (Niccolò Tartaglia, 1499?-1557)、ベネデッティ (Giovanni Battista Benedetti, 1530-1590)、グイドバルド (Guidobaldo del Monte, 1547-1607) らの16世紀に活躍した技術者兼数学者たちによってなされており、ガリレオの問題意識は彼らの活動を引き継いだものだった。またパドヴァ大学では、16世紀後半から、擬アリストテレスの『機械学』が数学の講義の中で扱われており、ガリレオも数学教師として講じている⁽⁶⁾。『機械学』の書かれたパドヴァ時代は、後に『新科学論議』で発表される数学的運動論の基礎が築かれた時期としてガリレイの運動論の発展過程を論じる上で最も重要な期間であった。またこの時期にガリレオは実践的な数学的諸学問や技術に対して大きな関心を持ち、実際、自宅で学生たちに、実用的な数学の基礎の他、軍事技術に必要な測量術、築城術などを教授するとともに、軍事的な目的のための一種の計算尺である「軍用幾何学コンパス」を、職人を雇って製作販売していた⁽⁷⁾。『機械学』という著作もこうした現実的な関心に基づいた活動の一端だったのであり、そのことは衝撃力の考察にも現われている。というのは、衝撃を与える運動物体とは第一に杭や釘を打ち込む槌だったのである。『機械学』における衝撃力の考察の中心は、運動物体が他の物体との衝突に際して及ぼす力が、単なる物体の重さによる力に比べて非常に大きな効果をもたらすのはなぜか、またそれを測定するにはどのようにすればよいのか、ということである。彼はまず、硬い木に釘を打つ場合や、固い地面に杭を打つ場合を例に挙げて、衝撃力の効果の非

常に大きなことを説明する。

「あるきわめて堅い木に打ち込むべき釘，あるいはよく固められた地面に打たねばならない杭に上から衝撃を与えると，衝撃力だけのためにそれらが先へ押しやられるのが見られるのだから。したがって衝撃力なしでは，槌を上にしたとしても動かないだろうし，またさらにその槌よりも何倍も重い錘を載せたとしても同じである⁽⁸⁾。」

この問題は擬アリストテレスの『機械学』でも扱われていたが，ガリレオの論点は擬アリストテレスのものとは異なっていた。擬アリストテレスでは，斧で木を割る例によって，打つものが非常に軽くとも木を割ることができる理由が，運動によって重さが増加することから説明が試みられていた⁽⁹⁾。ガリレオは，擬アリストテレスの議論で問題となっている衝撃力の持つ大きな効果の発生のメカニズムの考察には向かわず，一見すると，その効果が非常に大きいために通常の力の働きとは同じレベルでは論じられないようにみえる衝撃力も，実は他の機械における作用と同様の法則に従っていることの説明を試みている。ガリレオによれば，衝撃力についても，他の力の作用と同様，「ある小さな抵抗を大きな距離だけ動かす力は，その百倍も大きな抵抗を先程の距離の百分の一の部分だけ押し動かす⁽¹⁰⁾」という，てこや天秤などの単純機械において一般的に成立する法則が適用できるのである。すなわち，

「槌があり，それは4の抵抗を持ち，ある力によって動かされるとき，衝撃を及ぼす点で抵抗から自由にされると，障害に出会わないならば10歩幅だけ遠くへ進む。そしてその点に大きな梁が向かい合って置かれ，その運動に対する抵抗は4000，すなわち槌の抵抗の1000倍である（またそれは槌の抵抗を比較できないほど（senza proporzione）超えているが，不動ではない）。しかしながら，それに衝撃が加えられると，前方へ押し進められるが，それは槌の動く10歩幅の1000分の1である⁽¹¹⁾。」

この一節の議論においてガリレオの念頭にあったのはこの働きに関する静力学的考察である。てこを用いれば小さな力によって重いものを動かすことができるが、このとき、ある特定の重さを動かすのに必要な力がその重さの10分の1であるならば、その力の作用点の移動距離はその重さの移動距離の10倍であり、100分の1であるならば、100倍となるのである⁽¹²⁾。すなわち彼は衝撃力の効果を、現代的な意味での仕事、作用力の大きさと作用距離の積によってとらえ、それは、起源である運動が同一であるならば、抵抗の大小にかかわらず同一でなければならないと考えている。つまり抵抗が小さければ進む距離が大きく、抵抗が大きければ進む距離が小さくなるのである。こうしてガリレオは、衝撃力の効果においても他の機械操作におけるのと同じ法則が成り立つことから、衝撃力も他の機械的な効果と本質的には同類のものであると結論する。ここでガリレオは衝撃力を通常の力とは異なるものとして扱い、現代的な意味での仕事あるいはエネルギーに該当するものと考えていた。

このガリレオの説明は、重さと距離という日常的に経験される物理量に関する関係を、アナロジーによって、てこの働きに直感的に関係づけたものにすぎないが、この議論はのちに「衝撃について」の中で衝撃力の効果の尺度を考察する際の出発点となっている。

(ii) 「衝撃力について」

遺作「衝撃力について」のテーマは、衝撃力の効果の尺度と衝撃力の増加のメカニズムの説明であった。第一のテーマは衝撃力の尺度を見いだすこと、すなわち「衝撃力の効果と作用において、槌の重さやその運動の大小の速さがいかなる役割を果たすのかを考察しよう」と試み、可能ならば、あれこれのエネルギーを共通に測定し、充てられるべき尺度を見いだす⁽¹³⁾」ことである。ここでもガリレオは、杭打ちの例を用いて『機械学』における議論をさらに詳細に説明し、その効果の尺度として抵抗する物体の重さと移動距離の積に相当する物理量を考えている。

「同じ高さから落下する、同じ重さの衝撃がなす衝撃はつねに等しい抵抗の抵抗体のある距離だけ押しやり、そして同じ効果をなすためには、衝撃なしに圧するある特定の量の死重 (il peso morto) が必要ならば、ある他の大きな抵抗体に対して同じ衝撃を加える同じ物体が、その衝撃でもって、先にそれを押しやったときの半分の距離だけ追いやるときには、この第二の追放のためには、前述の死重の圧力では不十分で、さらに二倍の重いものが必要になると主張する。またこうして他のあらゆる比において、同じ衝撃物体によってなされた追放が短いほど反対にそれだけ同じことをなすには逆比例して圧する死重のより大きな重さが必要である⁽¹⁴⁾。」

ここで「死重」とは通常の意味の物体の重さという静力学的な力に他ならなく、運動物体の持つ力が通常の力とは異なる性質を持ち、異なるものとして扱わねばならないことを明確にするために用いられている⁽¹⁵⁾。上の一節での議論は本質的には『機械学』における議論の繰り返しであるが、この現代的な意味での仕事に対応する量が抵抗体の重さと移動距離によって決定されることについて、ガリレオはてこの働きとの類比による説明のほかに、さらに斜面運動の例を用いて説明しようと試みている。

「明らかなことは、10リッブラの錘の鉛直になされた落下は、100リッブラの錘を鉛直に、10リッブラの錘の落下の距離の10分の1だけ上昇させるのに十分である⁽¹⁶⁾。」

この一節は我々にエネルギーの保存則を思い起こさせる。ガリレオはすでに『新科学論議』において、ある高さから落下した物体は、その際に得た速さでもって、傾きがどのような斜面上でも同じ高さまで上昇することを主張していた⁽¹⁷⁾。ここでの議論は、その主張を重さの異なる物体へさらに一般化していたものと言えよう。ガリレオはエネルギーの保存則の先駆的な考えを提示し、衝撃力を普通の力すなわち「死力」とは概念的に異なる、エネルギー的な量とし

て捉えていたのだった。

第二のテーマは、衝撃力が速度の増大によって増加していくメカニズムを解明し、物体の重さは有限であるのに、衝撃力は無限に大きくなる理由を説明することである。ガリレオは衝撃力の生成のメカニズムについて以下のように述べている。

「衝撃を与える重い物体のモメントは、無数のモメントから合成され、それらの集まったものである。そのモメントの各々は、その物体自身の内在的で自然本性的なモメント（それは、その固有の絶対的な重さのモメントであり、何か抵抗するものの上に置かれたときにその物体が絶えず及ぼしているものである）、あるいは可動力のモメントのような外在的で強制的なモメントのひとつに等しい。このモメントは、物体の運動時間中に、まさに落下物体の速さが増大していくようにして等しい部分が加わって蓄積され、物体中に保存されていくのである。というのは、いかに小さくとも無数の時間的瞬間において、重い物体によって新しい等しい速さの度合が絶えず通過されていき、つねに通過した時間に獲得されたものが保持されるが、そのようにして可動体においても自然や人間の仕業によってそれに与えられた、これらの自然的モメントや強制的モメントは各瞬間に保持され構成されていく⁽¹⁸⁾。」

この一節を理解する上で鍵となる「モメント」（イタリア語では“il momento”，ラテン語では“momentum”）とは、当時の理論機械学において、てこや滑車といった単範機械の働きを静力学的に説明する際に使われていた概念で、現代的な意味での回転モーメントや斜面上での重さの分力を表わしていたが、ガリレオは、さらに運動の速さや運動力の微小量を表わすものとして動力的な意味でも用いている⁽¹⁹⁾。『新科学論議』においては、落下運動のような加速運動における速さの増加すなわち加速現象は、各瞬間に微小な速さの「モメント」

が付け加わり、蓄積されていくことによって説明されていた⁽²⁰⁾。さらに彼は「モメント」の概念を衝撃力にも適用することによって、衝撃力の運動の速さへの依存性を導いている。たしかに落下運動において、衝撃力の「モメント」が、運動の各瞬間に物体の重さの「モメント」から生成し、物体中に蓄積され、速さと同じように増大していくという、この説明は、物体の速さが速いほど衝撃力も大きくなるという事実と一致する。また衝撃力の「モメント」の、重さの「モメント」からの生成は、物体の重さが大きいほど衝撃力は大きくなるということをうまく説明する。一方ガリレオは運動の加速現象自体を速さの「モメント」の蓄積として捉えていた。したがって落下運動において加速現象の原因は物体の重さにある以上、速さの「モメント」と衝撃力の「モメント」とは密接な関係にあるはずである。しかしガリレオがこの問題に言及したのはこの一節だけでこれ以上議論を進めておらず、そこでも両者の関係に具体的に言及することを避けているように思われる。すなわち彼は、衝撃力の

「モメントは、重い物体の運動時間中に、まさに落下物体の速さが増大していくようにして各瞬間に等しい部分が加わって蓄積されその中に保存されていく」 (“Tali momenti nel tempo della mossa del grave si vanno accumulando di instante in instante con eguale additamento e conservando in esso, nel modo appunto che si va accrescendo la velocità di un grave cadente)⁽²¹⁾ [下線は筆者による]

と述べて、両者の増加の仕方の類似性を示唆するにとどめているのである。しかし彼はなぜ両者の関係を論じようとしなかったのだろうか。その理由としては、速さと衝撃力がまったく種類の異なる概念であること、そして両者の関係を明らかにするためには、なぜ加速が生じるのかという加速現象の理論的説明という問題を避けることができなかったことが考えられる。つまり落下運動における加速現象が物体の重さから生じる以上、速さの「モメント」が重さの「モメント」に比例すると考えることは当然であろう。事実ガリレオは、斜面

上の下降運動における加速の減少を、斜面上での重さの「モメント」[現代的な意味では重力の斜面方向の分力]の減少によって説明している。しかしこのように考えるとガリレオの業績の一つである、真空中ではすべての物体が同じ速度で落下するという運動法則の説明が困難になるのである。というのは、重さの「モメント」が物体の重さに比例することから、速さの「モメント」すなわち加速度、したがって速さも重さに比例することになってしまうからである。この問題を解決するには、ニュートンが行なったように重量と質量を概念的に区別し、物体の落下運動を引き起こす運動力がその重さに比例するとともに、運動に対する抵抗が物質質量に比例することを認めねばならなかった⁽²²⁾。

さらに重量と質量の問題は、ガリレオが衝撃力の効果の尺度の説明において斜面運動のエネルギーの保存を論じた際にも生じていた。落下物体の持つ運動の衝撃力は重さによって規定されるが、運動の方向が鉛直方向に以外に変えられたときには、衝撃力の方向は重さの働く方向とは一致しないのであるから、衝撃力に重さが関与するのはなぜかということである。また衝撃力の生成のメカニズムについて論じた際に、外部のものによって強制的に動かされたときには「外在的で強制的なモメント」の蓄積によって運動が生じると述べているが、その際に重量がどのような役割を担うかについても何も触れられていない。言うまでもなく、この場合にも鍵となるのは慣性質量であり、慣性質量としての重さの大小が物体の運動に対する抵抗力さらにはあらゆる方向の運動における衝撃力の大小を決定することがこの問題の核心であった。以下でみるように、トリチェッリやボレッリはまさにこの問題に向かい、衝撃力の考察を通じて重さと物質質量を概念的に分離しようとしていたのである。

さらに「衝撃力について」における二つのテーマの議論の間には矛盾が存在していた。衝撃力の効果を論じた際には距離がその尺度として重要な役割を果たしていたのに対して、衝撃力の生成の考察においては時間が基本的要素だったのである。落下運動において各瞬間ごとに「モメント」が加わり、その結果運動が加速されて衝撃力が増大するならば、速さと同様に衝撃力も時間に比例して増大して行くことになる。一方落下距離は時間の二乗に比例するものであ

るから、衝撃力の効果の尺度が距離であるならば、結果として衝撃力の効果の尺度も時間の二乗にならねばならなくなる。ガリレオは異なる速度の衝撃力の大きさを問題としていないのでこの問題は顕在化していないが、彼の主張した落下運動における衝撃力生成のメカニズムに従う限り、この問題は避けられないのである。

3. トリチェッリ

トリチェッリは、水銀柱を用いた真空の存在証明と大気圧の測定によって、実験物理学および気象学の先駆者として知られているが、また優れた数学者でもあった⁽²³⁾。彼は、ローマのイエズス会の学校でガリレオの高弟カステッリ (Benedetto Castelli, 1578-1643) から数学を学んだ後、1630年代は、マルケやウンブリアの諸都市の支配者でガリレオの友人でもあったジョヴァンニ・チャンポリ公 (Giovanni Ciampoli, 1590?-1643) の秘書を務めていた。1641年に彼はローマに戻り、ガリレオの『新科学論議』第三日の運動論を発展させた自らの論考に対して、カステッリや他の数学者に評価を求め、それが契機となってガリレオに紹介された。そして1641年にはカステッリの命を受け、晩年のガリレオの研究・執筆活動を助けるために、ガリレオのフィレンツェ郊外アルチェトリの住居に赴いている。彼が到着したのはガリレオの死のわずか三月程前 (1641年10月10日) のことだったが、それからその死までの間、すでに同居していたヴィヴィアーニとともにガリレオの許にとどまったのだった。

トリチェッリは、ガリレオの死後、その「トスカナ大公付き数学者兼哲学者」の地位を継ぎ、ガリレオの科学の後継者として活躍したが、1647年に39歳の若さで夭折した。この間に彼は、1643年には水銀柱によって真空の存在を証明する実験を行い、その結果がフランスへ伝えられ、パスカル (Blaise Pascal, 1623-62) の実験が行われることになったことは周知のとおりである⁽²⁴⁾。また1642年から1643年にかけて数度にわたり、フィレンツェの「アッカデミア・クルスカ」 (Accademia Crusca) で講演を行い、その概要は後に『アッカデミア講義』 (*Lezioni accademiche*, 1715) として出版された。それは12の講義からな

り、運動物体の衝撃力の問題は、第2、第3、第4講義のテーマとして、軽さや風といった自然学的問題や、数学の重要性および軍事建築などとともに論じられていた⁽²⁵⁾。

この当時、トリチェッリは「トスカナ大公付き数学者兼哲学者」の地位を継いで間もなく、『アッカデミア講義』では、ガリレオの晩年の思想を発展させることによって後継者としての自分の能力を示そうという意図を持っていた。それゆえ、第2講義「衝撃力について」(“Della percossa”)では、ガリレオが衝撃力の無限性を示すために行なったという実験に言及した後、ガリレオが晩年に考察していた問題である、運動物体の衝撃力の発生メカニズムを、静止物体の重さによる圧力との比較を通じて説明しようと試みている⁽²⁶⁾。

彼は、例として1000リーブラの重さの球を載せたときに壊れる大理石のテーブルを取り上げている。まず100リーブラの球が上に置かれてもテーブルは壊れなく、したがってこの物体の「モメント」は、それ自身では、テーブルを壊すことはできない。その物体は絶えず各瞬間に100リーブラの「モメント」あるいは「力」(la forza)でテーブルを押しているが、同時にテーブルは同じ力で抵抗している。次に、同じ100リーブラの重さの球を10個取り、それらの力をひとつの球の中に閉じ込めて1000リーブラの力を持たせるとするとすれば、その力はテーブルの抵抗に勝っているから、それをテーブルの上に置くと、後者を壊すだろう。ここでは物質の量を10倍にしたが、その代りに時間を10倍にして、各瞬間にその球が圧迫している「モメント」を保持する方法を見いだすならば、同じ結果を得ることができるだろう⁽²⁷⁾。泉から湧き出る水を溜めるように、重さから生まれる「モメント」も蓄積されるのであって、物体の落下運動においても同様のことが生じているのである。

「ガリレオが自然加速運動について与えた定義自体が衝撃力に関するこの語[モメント]を明らかにするのに十分である。…重さという泉を開き、重い球を高く持ち上げて再び下降するときに、10の瞬間だけ空中にとどまることができ、そしてその結果、そのモメントを10だけ生み出すことがで

きるようにする。これらのモメントが保存され互いに結合すると主張する。以上のことは、落下する重いものや加速運動に関する絶え間ない経験から可能である。というのは、重い物体は、落下の後で、静止していたときに持っていたよりも大きな力を持つことが知られているから⁽²⁸⁾。」

トリチェッリは、「それらすべてのモメントは、内的な重さが、それまでの運動時間すべてにおいて生み出した⁽²⁹⁾」ものであって、重さから各瞬間に「モメント」が生じ、その蓄積の結果が衝突の際に衝撃力として現われると述べ、運動物体の持つ力の生成のメカニズムを明確に示している。さらに彼は、ガリレオが触れなかった「モメント」と速さの関係に関しても言及している。

「落下する重いものにおける速さは、何かあとから生じるもの、まさに降下する物体の内在的なモメントから引き起こされた結果に他ならない。そして内在的なモメントはある種の先行するものであって、大小の速さの唯一の原因であり、何らの速さの助けや同伴もなしにそれ自体によって存在し存続しうるのである。…速さはそれ自体によっては内在的なモメントなしではもはや存続し得ないのである⁽³⁰⁾。」

こうして、落下運動における加速現象が、重さから生じる「モメント」の蓄積の結果としての速さの増大として説明される。しかしながらトリチェッリはこの関係を定式化して一般的な理論として展開することがなかったし、また前節で触れた加速現象の理論的説明という問題も解決されずに残されていた。というのは、彼自身も認めているようにこの説明には大きな問題点があったのである。その問題点とは時間の無限分割性に関するものである。ある有限の時間には無数の瞬間が存在する以上、その間に「モメント」も無限に蓄積されるはずであるのに、実際には速さも衝撃力も有限であって、無限に増大することはないのはなぜか。それに対し、トリチェッリは、たしかに速さは有限であるが、しかし静止しているときには速さは零であるのに対し、落下後の速さは有限で

あっても零ではないのだから無限倍になっていると答える。しかしもちろんこれは言い逃れに過ぎなく、その問題点は解決されていないが、無限小をめぐる問題を解決するにはさらに一世紀以上を待たねばならなかった。

トリチェッリの考察のもう一つのテーマは、ガリレオも論じた衝撃力の効果の尺度に関するものである。トリチェッリによれば、もし衝撃力が一瞬の間に働くならば—そのようなことが起こるのは、衝突する物体が完全剛性体すなわちまったく変形しない物体の場合である—その効果は無限になるだろうが、実際にはまったく変形しない物体は存在しなく、衝撃はある有限の時間間隔においてなされるから効果も有限になる。たとえば重い物体が落下によって、その「モメント」を100倍にしたときには、それが一瞬の間にその力すべてを及ぼすならば、抵抗体は100に応じた力を感じるだろう。しかしたとえば10の瞬間においてなされるとすると、一度に10ずつ感じることになる⁽³¹⁾。

ここでトリチェッリは衝撃力を力と時間によって測ろうと考えているが、これは現代的な意味では力積に対応するものである。この考えは、各瞬間に重さのモメントから速さが生じるという彼の運動の加速の説明からみても自然な結論だった。一方ガリレオは前章で見たように、衝撃力を力と距離とによって測ろうとしていた。奇妙なことだが、自らの見解とガリレオの見解との違いについてトリチェッリは気づいていなかったようである。というのも、彼がガリレオのもとを訪れたのはその死の三ヶ月前であって、彼はガリレオとこの問題について十分な議論をできなかったと思われ、またガリレオの手稿を所有していたヴィヴァーニはそれを公開しなかったからである。

しかしトリチェッリは気づかぬうちにガリレオの考察を乗り越えていた。その点が明らかとなるのは、「打撃」(l'urto) すなわち外的な力によって引き起こされる運動の結果としての衝撃力に関する議論においてである。「打撃」とは、「人工的な衝撃」(la percossa artificiale)、衝突する二つの物体のうちの少なくとも一つが外的な原因によって運動しており、投射体や槌とは違って、「水平運動や上昇運動によって、衝撃を与えるときに内的な重さがまったく働

き得ない場合における⁽³²⁾」ものである。この「打撃」の効果は、通常の衝撃と同様に運動物体の物質量あるいは重さと速さに依存するのではなく、物体を動かす運動力によって決定されると、トリチェッリは主張する。なぜなら、たとえば綱で引かれた船が岸に衝突したときに与える「打撃」は、同じ人間によって引かれた軽い樅の棹が及ぼすものと同じなのだから。というのは、

「槌や、その対象に対して大きな効果をもって打撃を与える、水平線上の投射体の力は、それに速さを与えた機械によって押し込められた力に他ならず、まさにその機械から与えられたのと数において同じ力である。そして衝撃が大きいのは、打撃を与える物体の物質量や重さ、速さが大きいからではなく、押しやられることに対する運動体の不服従が大きいからであると主張する⁽³³⁾。」

岸に衝突する物体による「打撃」は、その綱を引く力の蓄積によるのであって、「物質は、力、インペト、モメントの隠れ家にすぎなく、それ自体としては死んでおり、働く力を妨げるあるいは抵抗するのにしか役立たない⁽³⁴⁾。」それにもかかわらず重い物体ほど大きな力を及ぼすように見えるのは、「速さを与えられることに対してより大きな不服従を示す物体は、ある速さで運動させられるのに対して大きなインペトが押し込められる⁽³⁵⁾」からである。

「打撃」力の大きさを決定する外的な運動力とは、ある力がある時間のうちに物体に働いたときに蓄積された全体量、すなわち現代的な意味での力積である。さらにトリチェッリは、同じ速さで運動する物体では重いものほどより大きな「打撃」力を示すように、物体の運動への抵抗としての重さすなわち慣性質量が衝撃力の大きさを決定すると考える⁽³⁶⁾。しかしここで物体の重さと運動への抵抗の大きさとはいかなる関係があるのであろうか。日常的経験から重い物体ほど運動に対して大きな抵抗を示すことは明らかであるが、重さと抵抗との具体的な関係についてトリチェッリは何も言及していない。また力積によって規定される物体に与えられた運動力と物体の運動の速さとの関係も明確には

述べられていなかった。

ガリレオが落下運動のみを考察したのに対して、トリチェッリは水平方向の強制運動の衝撃力を「打撃」として、落下運動による衝撃力と区別することによって、重さが必ずしも衝撃力の基本要素ではないことを明らかにした。このことはトリチェッリの大きな業績であるが、しかしこの二つの運動の区別は可能なのだろうか。たしかにアリストテレスの自然学においては、自然運動と強制運動は本質的に異なる運動だった。しかしそのような区別は本質的ではないという主張こそガリレオの重要な功績だった。たしかに自然落下運動と外的な強制力による運動は、トリチェッリの言うようにその起源においては異なるが、しかし運動の結果だけを見るならば、両者を区別することは不可能である。ガリレオが『新科学論議』の中で述べているように、自然落下運動の後で、その速さが失われないようにして運動の方向を水平方向に変えるならば、それはもはや水平方向の強制運動と本質的には変わらないはずなのである⁽³⁷⁾。

トリチェッリが鉛直方向の落下運動と水平方向の強制運動を区別せざるを得なかった第一の理由は、両者で運動の発生過程がまったく異なっていたことだった。さらにもう一つの理由は、水平方向の運動の場合には重さが関与し得ないのに対して、落下運動の場合には重さと運動の方向が一致することによって、重さが衝撃力に関与しているように思われたことである。それゆえ水平方向の運動と鉛直方向の運動を統一的に論じるには、衝撃力はエネルギーであって、重さのような力とはまったく異なる物理量であることを認める必要があったのである。トリチェッリの衝撃力の考察は、水平方向という重力が関与しない運動においては衝撃力の本質的な要因は重さではなく、運動に対する抵抗力の源泉としての物質質量であることを示したが、鉛直方向と水平方向の運動を統一的に扱うには、重力質量と慣性質量、力とエネルギーとの区別が必要だった。

4. ボレッリ

科学史上、ボレッリは医療物理学派の先駆者として知られ、彼の『動物の運動について』(*De motu animalium*, 1680-1) では、筋肉の働きが静力学的に説

明され、さらに神経や心臓の機能が機械とのアナロジーによって考察されている⁽³⁸⁾。また彼は、トリチェッリ亡きあとの17世紀後半のイタリアにおいてもっとも優れた数学者・物理学者であって、『自然学的原因から導出されたメディチ星の理論』(*Theoricae medicorum planetarum ex causis physicis deductae*, 1666)では惑星の楕円軌道の力学的説明を試みている⁽³⁹⁾。彼は、ナポリで生まれ、ローマでカステッリのもとでトリチェッリらとともに数学を学んだ後、1637年以降メッシーナ大学で数学を講じた。1656年から1667年にかけて、ピサ大学の数学教師を務めているが、この時期は、フィレンツェで創設された科学アカデミー「アッカデミア・デル・チメント」(*Accademia del Cimento*)の活動期間(1657-67)に重なり、そこではヴィヴィアーニとともに中心的な役割を果たした。

このトスカナ時代に、ボレッリはガリレオの弟子たちと交遊を深めることを通して、ガリレオやトリチェッリの衝撃力の理論に関心を持つようになり、その結果生まれたのが『衝撃力論』(*De vi percussiois*, 1667)である。事実彼は、「序文」(“Proemium”)において、ガリレオやトリチェッリの衝撃力の無限性や重さの役割に関する見解を提示し、その問題点の解決がその著作の主要な目的であると述べている⁽⁴⁰⁾。しかしこの著作は、ガリレオやトリチェッリの論考とは異なり、300頁にも及ぶものであり、その内容も、表題の運動物体の衝撃力および物体の衝突の問題の他、加速運動や投射体の運動、振り子の運動といった運動に関わる様々な問題、さらには磁石の引力のような運動以外のテーマも論じられている。それゆえ以下では衝撃力に関する見解に限定して彼の思想を検討する。

ボレッリはまず、衝撃力が重さという静止力に比べて無限に大きいことを指摘する。衝撃力と重さの力を比較するには、両者の及ぼす共通の結果を検討すればよいが、その例として「木や他の固い物体に打たれた杭や釘⁽⁴¹⁾」を挙げ、槌の最初の打撃によるのと同じだけ釘を打ち込むには、単に重さだけによる場合には非常に重い物体が必要だが、二度目、三度目の打撃に対しては、さらにいっそう重い物体が必要であり、結局無限に重い物体が必要なことになってし

まう。

「同じ槌の、同一のインペトゥスによる連続する衝撃はすべて、いつもある程度釘をいっそう深く打ち込むが、この打ち込みが単純的な重さによってなされ得るには、物質量が絶えず無限に増加しなければならない。かくてその同じ槌の打撃のエネルギーは、これらすべての重さに等しく、したがって同じインペトゥスで運動するその槌の衝撃力は、任意の示し得る重さの圧迫力よりも大きくなる。よって衝撃力は無限性を持つことがわかる⁽⁴²⁾。」

衝撃力は重さに比べれば無限である以上、「一個の小槌の衝撃のエネルギーが任意の示し得る重さに等しいということは誤りなのである⁽⁴³⁾。」この主張自体は、ガリレオやトリチェッリも述べていたことであるが、ボレッリはさらに、衝撃力と重さはまったく異なる種類の量である、すなわち両者は、比較の可能な同一の種類に属するものではないことを明瞭に述べている。

「単純的な重さとインペトゥスは同じ類の量ではなく、したがって両者の比較は行われ得ないし、互いに何の比も持ち得ない。そしていかなる量も他の類の量の尺度とはなり得ない。ちょうどそれは、線分が音や重さの尺度とはなり得ないように⁽⁴⁴⁾。」

それでは衝撃力はいったい何によって測られるのだろうか。この問題に関して、ボレッリは、運動は重さを増大させるというアリストテレスの説を批判し、重さは衝撃力と無関係であると主張する。もし運動のインペトゥスが物体の重さを増大させるとするならば、上方へ向かう運動の場合にはどうなるだろうかと彼は問う。重さは下方へ働くのに対し、運動力は上方へ向かうはずであり、後者は前者を助けるどころか、むしろ妨げるのではないだろうか。したがって運動のインペトゥスは重さには無関係なのであり、「衝撃力は上方へなされよ

うと、下方や水平方向へなされようと、重さの好意的なもしくは敵対的な作用によってはまったく変化させられないことが結論される⁽⁴⁵⁾。」

上方への運動の例から明らかなように、重さは衝突において何の働きもしない以上、衝撃力の尺度としては考えられない。そこでその尺度として、物体の「物質量」(moles corporea)が考えられている。ボレッリは、衝撃力の源泉ともいべき運動力の尺度として物体の「物質量」と運動の速さを挙げ、運動力は両者に比例すると主張し、とくに運動力の「物質量」への比例性を、粒子論に基づいて説明する。

「岩石全体がある定まった速さで運動することを観察する。……その個々の粒子が等しい速さで運動することは明瞭にわかる。そして全体の岩石はある定まった運動力によって押されるので、たしかにそれだけ多くの等しい粒子に運動力は分割されると考えられるから、岩石の任意の粒子は運動力によって押されることが必然であるように思われる⁽⁴⁶⁾。」

したがって、ある物体を二等分しても、「物質量」とともに運動力も二等分されるので速さは変わらず、また反対に同じ速さで運動する二つの同じ物体が結合されるならば、速さは変わらないが運動力は二倍になる。一方二つの等しい物体においては、その運動力は速さに比例するので、よって運動力は「物質量」と速さ、すなわち現代的にいえば運動量に比例することになる。こうしてボレッリは、「衝撃力のエネルギーは、衝突する物体のインペトゥス [速さ]のみならず、その物質量によっても測られる⁽⁴⁷⁾」ことを明瞭に述べていた。そして彼は、落下運動においては、物体内で重さから生まれる連続的な衝撃によって運動力が増加していくことを指摘し、トリチェッリと同様、加速現象を動力学的に説明する。

このボレッリの運動力と「物質量」の比例性に関する粒子論的説明は、ガッサンディ (Pierre Gassendi, 1592-1655) の影響を受けたものである。ガッサンディは原子 (アトム) 論を展開した際に、物体の重性や慣性といった基本的性

質を原子の属性によって説明していた⁽⁴⁸⁾。このガッサンディの影響は、運動物体の衝突という、ガリレオやトリチェッリの論じていない問題に関する議論においてははっきりみられる。ボレッリは衝突の問題を論じるに当たり、まず衝突の際に衝撃を受ける方の物体が衝突後に移動する場合には、「速さの減少」が衝撃力の尺度となることを原理として前提し、それから衝突の法則を導いている。すなわち、ある運動物体が静止物体に衝突する際の衝撃力は、その衝突前の速さと衝突後の速さの差によって測られるのである⁽⁴⁹⁾。また衝突する二つの物体が運動している場合には、両者の相対的な速さによって衝撃力は決定されることを指摘した後、様々な場合の直線上での衝突に関する規則を求めている。そして平面や運動物体に対する斜めの方向からの衝突や、柔らかい物体の衝突へと進み、入射角と反射角が等しいという反射の法則を導出するとともに、柔らかい物体の衝突においてはその法則が適用できないことを主張した⁽⁵⁰⁾。この二つの運動物体の衝突の問題は、デカルト（René Descartes, 1596-1650）が『哲学原理』（*Principia philosophiae*, 1644）の中で取り上げたものであり、運動力を運動量すなわち物質質量と速さによって規定したのも彼だった⁽⁵¹⁾。ガッサンディは、その議論を批判的に発展させ、完全剛性物体の衝突問題を原子論に基づいて展開していた。

ボレッリの議論では、運動物体の衝撃力が速度に決定されるのことは当然のこととされ、ガリレオにおけるようなエネルギーに関する議論は全く見られない。これは、ボレッリがガリレオの考察を実はよく知らず、実際にはデカルトとガッサンディ、とくに後者の見解から自らの考察を始めたからだだった⁽⁵²⁾。

5. ガリレオ科学の終焉

ガリレオの論考「衝撃力について」は、彼の数学的運動論がまだ発展途上にあり、多くの問題を含んでいたことを示している。加速の生成のメカニズムや衝撃力の効果の尺度の問題にみられるように、運動の原因としての「力」と運動の結果としての「力」をどのように運動に関係づけるのか、またその際に最も重要な概念であった重さ（重力質量）と物質質量（慣性質量）をどのように区

別するのかがということが問題だった。トリチェッリ、そしてボレッリによって、ガリレオではまだ未分化だった重さと物質量の概念は、落下運動以外の運動における物体の抵抗と衝撃力の考察を通して区別された。とくにボレッリでは、運動力の「物質量」と速さへの比例性として理論化された。またこの衝撃力の考察は、ガリレオの残した問題である、落下運動における加速現象の動力学的説明に対して、その理論的基盤を提供するものとなっている。

トリチェッリとボレッリはともにガリレオの考察を出発点として自らの運動論を展開していったのだが、両者の間には論点に大きな違いが存在した。ボレッリでは、ガリレオやトリチェッリの論じていない衝突の問題が重要なテーマとなっており、そこにはイタリアの外からの影響が重要な役割を果たしていた。トリチェッリが衝撃力について論じたのはガリレオの死後すぐだったが、ボレッリの『衝撃力論』の出版はそれから20年後のことであり、その間、イタリアでは運動の問題に関してほとんど進展がみられなかったの対し、アルプスの北なかでもフランスでは、デカルトやガッサンディらによって運動物体の衝突に関する議論が展開されていた。前節でも触れたように、ボレッリにおける衝突の問題の考察は、こうした新しい動向に対応したものであったのである。ガリレオの「衝撃力について」とトリチェッリの『アッカデミア講義』は、18世紀に入るまで出版されなかったために、その内容はイタリアの中、それもかなり限られた範囲でしか知られず、17世紀後半における運動論にテーマを提供するものとはなり得なかった。その時期に中心的問題となったのはまず衝突の問題であり、次いで1686年のライプニッツの論文に端を発する「活力」論争だった。ライプニッツは、運動物体の持つ力の尺度として、デカルトの提案した運動量を退け、「活力」(vis viva)―物質量と速さの平方の積―を主張し、これ以後、ヨーロッパの学者たちは、デカルト派とライプニッツ派に分かれ18世紀中頃まで論争を続けたのである⁽⁵³⁾。この論争のテーマは、すでにガリレオの衝撃力に関する論考においても加速の生成のメカニズムにおける運動量と衝撃力の効果の尺度における仕事との対立という形で現われていたが、彼の考察がこの論争に影響を及ぼすことはなかったのである。

ボレリ以降、我々は、17世紀イタリアにおいて注目すべき運動論を見いだすことはできない。彼の『衝撃力論』が出版された1667年に、トスカナにおける科学的活動の中心だった「アッカデミア・デル・チメント」は、その唯一の活動記録である『自然実験報告集』(*Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento*)を出版し、その短い活動に幕を下ろしている。ボレリは、ヴィヴィアーニとともにこのアカデミーにおいて中心的な役割を果たしていたが、前年の1666年にヴィヴィアーニとの反目からすでにピサを去って、メッシーナに戻っていた。これ以降、トスカナ科学は、ガリレオやトリチェリ、ボレリらの時代の輝かしい栄光を取り戻すことはなかった⁽⁵⁴⁾。

注

- (1) 青木靖三『ガリレオ・ガリレイ』、岩波新書、1965年、183-187頁。Geymonat, L., *Galileo Galilei*, Torino, 1957, 1969, pp. 235-256.
- (2) Favaro, A., "Avvertimento", in *Le opere di Galileo Galilei*, a cura di A. Favaro, quarta edizione, Firenze, 1968, vol.8, pp. 26-33; Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, a cura di A. Carugo e L. Geymonat, Torino, 1958, p.848.
- (3) 第一日では、位置運動を初めとする自然学的問題への数学の適用の是非などの様々な問題が論じられており、真空中では、すべての物体が同一の速さで落下するということを証明する思考実験が説明されている。第二日では、物質の外的な破壊力に対する抵抗力という機械学的問題が論じられている。これは現代の我々から見れば意外な感じを受けるが、そもそも『新科学論議』の正式の標題は『機械学と位置的運動という二つの新しい科学に関する論議と数学的証明』だったのである。このように運動論と機械学が一つの著作の中に存在し得た理由は、ガリレオの運動論の起源が、ルネサンスの機械技術者による機械学の伝統にあったことにある。この点は、以下で検討するように、ガリレオの衝撃力の理論の考察においても重要である。ガリレオの運動論とその背景に関しては、伊東俊太郎『ガリレオ（人類の知的遺産31）』、講談社、1985年、および拙稿「ガリレオの運動論とその背景」、佐々木力編『科学史』、弘文堂、1987年、75-107頁参照。
- (4) Galileo Galilei, *Le mecaniche*, in *Le opere*, vol. 2, pp. 188-190. 邦訳としては、ガリレオ『レ・メカニケ』、豊田利幸訳、『世界の名著21ガリレオ』、中央公論社、1973年、267-270頁があるが、引用はすべて拙訳である。
- (5) ルネサンスにおいては、エウクレイデス〔ユークリッド〕の『原論』第五卷における一般量の比例論に関して多くの数学者が論考を著わしていた。Cf. Giusti, E., *Euclides reformatus: La teoria delle proporzioni nella scuola galileiana*, Torino, 1993. また第五日の邦訳としては、斎藤憲「ガリレオ『新科学論議』断片「エウクレイデスの比の定義について」の翻訳と検討」、『AZZURO』(東京大学イタリア語イタリア文学研究室紀要)、第1号、1994年、142-166頁。
- (6) Cf. Drake, S., "Introduction", in Drake S. and Drabkin, I. E., *Mechanics in Sixteenth-Century Italy*, Madison, 1969, pp. 3-60; Rose, P. L. and Drake, S., "The Pseudo-Aristotelian Questions in Mechanics in Renaissance Culture", *Renaissance Studies*, 18 (1971), pp. 65-104.
- (7) 青木靖三、前掲書、34-39頁。Cf. Geymonat, L., op. cit., pp. 38-44; Favaro, A., *Galileo Galilei e lo Studio di Padova*, Firenze, 1883, ristampa, Padova, 1966, vol. 1, pp. 139-192; Galilei, G., *Compasso geometrico e militare di Galileo Galilei*, a cura di R. V. Caffrelli, Pisa, 1992.

- (8) Galileo, *Le mecaniche*, in *Le opere*, vol. 2, p. 188.
- (9) 「もしひとが木片の上に大きな斧を置き、その〔頂点〕に重い荷物を置くならば、比に値する何らの〔大きさ〕にも木を分割することはない。がもしひとが斧をあげてそれで打つならば、たとえ打つものが、上に置かれるるものや下に圧するものより、むしろはるかにより小さい重さを持っていたても、それは〔木を〕分割する。以上の事は何故にそうなのだろうか。あるいはすべては運動によって生じ、また重さは重さの運動を、それが静止しているときよりも運動しているときに、より多く生じるからなのだろうか。そこで〔重さが木の上に〕置かれているときは、重さからの運動は起こらないが、それが動くときは、〔その〕運動と打つものの運動とが起こる。」アリストテレス、『機械学』、副島民雄訳、『アリストテレス全集10小品集』、岩波書店、1969年、181-182頁。
- (10) Galileo, *Le mecaniche*, in *Le opere*, vol. 2, p. 188.
- (11) Ibid., pp. 189-190.
- (12) 我々から見れば、直接重さと力の積によって仕事に当たる物理量を規定した方が議論が明瞭になるにもかかわらず、ガリレオはそうせずに議論を複雑にしているのはなぜか、疑問に思われるかもしれない。しかしガリレオにとっては重さと距離という異なる量の積が何を意味するかまったく不明であり、そのような量を定義することは無意味であった。またガリレオの用いていた数学的道具は比例論のみであって、比において比較される量は同種のものであることが、ガリレオにおける数学的運動論を我々にとって理解しづらいものにしている。なお古典力学が現代的な代数的フォーマリズムによって表わされるようになったのは、18世紀中頃以降のことである。
- (13) Galileo, “Della forza della percossa”, in *Le opere*, Vol. 8, p. 323. 「衝撃力について」の内容に関しては、cf. Caverni, R., *Storia del metodo sperimentale in Italia*, Firenze, 1890-1909, vol. 5, 1898, ristampa, Bologna, 1970, pp. 111-194; Moscovici, S., “De la force de la percussion. Remarques sur la dialogue de Galilée”, *Revue d'histoire des sciences*, 15 (1963), pp. 97-137; Westfall, R. S., *Force in Newton's Physics. The Science of Dynamics in the Seventeenth Century*, London, 1971, pp. 36-40.
- (14) Galileo, “Della forza della percossa”, in *Le opere*, Vol. 8, p. 340.
- (15) のちにライプニッツが運動物体の持つ力を「活力」(vis viva)と呼んでいることは興味深い。Cf. Garber, D., “Leibniz: Physics and Philosophy”, in N. Jolley, ed., *The Cambridge Companion to Leibniz*, Cambridge, 1995, pp. 270-352. また「活力」をめぐる論争に関しては、本稿注(53)の文献を参照。
- (16) Galileo, “Della forza della percossa”, in *Le opere*, Vol. 8, p. 341.
- (17) Cf. Galileo, *Discorsi*, in *Le opere*, vol. 8, p. 242-244.
- (18) Ibid., p. 344.
- (19) ガリレオも『機械学』では、静力学的な意味で「モメント」を定義している。Cf. Galileo, *Le mecaniche*, in *Le opere*, vol. 2, p. 159. ガリレオにおける「モメント」の概念に関しては、cf. Galluzzi, P., *Momento: Studi galileiani*, Roma, 1979; Biagi, M. L. A., *Galileo e la terminologia tecnico-scientifica*, Firenze, 1965, pp. 44-54.
- (20) ガリレオは、『新科学論議』第三日で、「均等加速運動あるいは一様加速運動とは、静止を離れると等しい時間のうちに等しい速さのモメントムが付け加わるものをいう」と定義している。Cf. Galileo, *Discorsi*, in *Le opere*, Vol. 8, p. 198. [ガリレオ『新科学論議』、拙訳、伊東『ガリレオ』、235頁]
- (21) Galileo, “Della forza della percossa”, in *Le opere*, Vol. 8, p. 344.
- (22) あらゆる物体が等しい速度で落下する、すなわちすべての物体に関して落下の加速度が等しいことは、現代的に説明すれば、落下運動を引き起こす物体の重さがその質量に比例するのに対し、運動の加速度は質量に反比例するために、落下運動の加速度が質量に依存しないことによる。なお、この重力質量と慣性質量の等価性を理論的に説明したのがアインシュタインの一般相対性理論である。ガリレオにおける落下運動の加速現象の理論的説明の問題に関しては、拙稿「ガリレ

オの斜面運動の原理」、『イタリアーナ』（日本イタリア京都会館誌）、第16号、1987年、35-45頁参照。

- (23) トリチェッリの生涯および業績に関しては、cf. Belloni, L., "Introduzione", in *Opere scelte di Evangelista Torricelli*, a cura di L. Belloni, Torino, 1975, pp. 7-42; Gliozzi, M., "Evangelista Torricelli", in C. C. Gillispie, et al., eds., *Dictionary of Scientific Biography*, New York, 1970-80, Vol. 13, pp. 433-439; Galluzzi, P., "Vecchie e nuove prospettive torricelliane", in AA. VV., *La scuola galileiana: prospettive di ricerca*, Firenze, 1979, pp. 13-51.

- (24) Cf. Middleton, W. E. N., "The Place of Torricelli in the History of the Barometer", *Isis*, 54 (1963), pp. 11-28.

- (25) 『アッカデミア講義』に収められている12の講義の表題は以下のとおりである。

第1講義 「アッカデミア・クルスカへの入会を許可されたことについてのアッカデミア会員への謝辞」

第2・3・4講義 「衝撃力について」

第5・6講義 「軽さについて」

第7講義 「風について」

第8講義 「名声について」

第9講義 「数学への称賛の序言」

第10・11講義 「軍事建築について」

第12講義 「黄金の世紀への称賛」

テキストとしては、*Opere di Evangelista Torricelli*, vol. 2, Faenza, 1919, pp. 5-32 を用いた。なお *Opere scelte di Evangelista Torricelli*, pp. 125-138 にも収められている。Cf. Westfall, op. cit., pp. 125-138; Moscovici, S., "Torricelli's Lezioni accademiche and Galileo's Theory of Percussion", in E. McMullin, ed., *Galileo: Man of Science*, New York-London, 1967, pp. 432-448.

- (26) トリチェッリによれば、ガリレオは、パドヴァ時代に、弓のたわみによって衝撃力を測る実験と、鉛の球の変形から衝撃力を測る実験を行っていた。Cf. *Opere di Torricelli*, vol. 2, pp. 22-24.

- (27) Ibid., p. 8.

- (28) Ibid., pp. 8-9.

- (29) Ibid., p. 22.

- (30) Ibid., p. 22.

- (31) Ibid., p. 12.

- (32) Ibid., p. 25.

- (33) Ibid., p. 30.

- (34) Ibid., p. 28.

- (35) Ibid., p. 30.

- (36) 現代の理論に従えば、作用力を f 、作用時間を t 、物体の質量を m 、速さを v とすると、 $ft = mv$ となる。しかしトリチェッリもガリレオと同様に異なる物理量の積を考えることはなく、比例論によって論じていた。

- (37) Galileo, *Discorsi*, in *Le opere*, vol. 8, pp. 244-245.

- (38) ボレリの生涯と活動に関しては、cf. Baldini, U., "G. A. Borelli", in *Dizionario biografico degli italiani*, vol. 12, Roma, 1970, pp. 543-551; "Gli studi su G. A. Borelli", in *La scuola galileiana*, pp. 111-135; Settle, Th. B., "G. A. Borelli", in *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 2, pp. 306-314. また医療機械論に関しては、King, L. S., *The Philosophy of Medicine. The Early Eighteenth Century*, Cambridge, Massachusetts, 1978, pp. 95-124.

- (39) Cf. Koyré, A., *La révolution astronomique*, Paris, 1961, pp. 430-520.

- (40) Borelli, *De vi percussione*, "Proemium". ボレリの衝撃力の理論に関しては、cf. Romano, R., "G. A. Borelli: 《Il meraviglioso problema della forza ed energia infinita della percossa》", *Annali*

- dell'Istituto di Filosofia, Facoltà di Lettere e Filosofia, Università degli Studi di Firenze, 5 (1983), pp. 97-125; Westfall, op. cit., pp. 213-230.
- (41) Borelli, *De vi percussiois*, p. 195.
- (42) Ibid., p. 196.
- (43) Ibid., p. 199.
- (44) Ibid., p. 252.
- (45) Ibid., p. 295.
- (46) Ibid., p. 34.
- (47) Ibid., p. 67.
- (48) Cf. Bloch, O. L., *La philosophie de Gassendi*, Hague, 1971, pp. 208-227; Brundell, B., *Pierre Gassendi: From Aristotelianism to a New Natural Philosophy*, Dordrecht, 1987, pp. 76-81.
- (49) たとえば、運動物体 A が速さ VX で、静止物体 C に衝突するときに、物体 A が物体 C に及ぼす衝撃力は VX 全体ではなく、その部分 VZ によって測られる。ここで VZ は、VZ 対 VX が、物体 C の物質質量と、物体 A と物体 C の物質質量の和との比に等しい $[VZ : VX = C : (A + C)]$ ような量である。というのは、もし衝突後に物体 C が静止しているならば、衝撃力は VX 全体によって測られるが、実際には衝突後に物体 C も A とともに運動し、運動力は A と C の両方に分散するので、衝突後の速さ ZX は物質質量に反比例し、すなわち $ZX : VX = A : (A + C)$ となる。そこで衝撃力は速さの減少分 VZ が尺度となる。ここで VZ は、 $VZ = VX - ZX$ であるから、先の比例式より、 $VZ : VX = C : (A + C)$ となる量である。Cf. Borelli, *De vi percussiois*, pp. 68-69.
- (50) Ibid., pp. 80-149.
- (51) Descartes, R., *Principia philosophiae*, in *Oeuvres de Descartes*, tome VIII-I, publiées par Ch. Adam et P. Tannery, Paris, 1964, pp. 65-70. [デカルト『哲学原理』井上・水野・小林・平松訳, 朝日出版社, 1966年, 86-92頁]
- Cf. Garber, D., *Descartes' Metaphysical Physics*, Chicago, 1992, pp. 231-262; "Descartes' Physics", in J. Cottingham, ed., *The Cambridge Companion to Descartes*, Cambridge, 1992, pp. 286-334; Scott, J. F., *The Scientific Work of René Descartes*, London, 1952, pp. 158-166; Westfall, op. cit., pp. 56-109.
- (52) ボレリ自身、『衝撃力論』の「序論」で、ガリレオの衝撃力の無限性に関する実験については、メルセンヌ (Marin Mersenne, 1588-1648) の著作の記述 (*Reflexiones physico-mathematicarum* [Novarum observationum tomus III, Paris, 1647, Tome ii] の第23章) によっていると述べている。Cf. Lenoble, R., *Mersenne ou la naissance du mécanisme*, Paris, 1971, xxix-xxx.
- (53) Cf. Iltis, C., "Leibniz and the Vis Viva Controversy", *Isis*, 62 (1971), pp. 21-35; "The Decline of Cartesianism in Mechanics: The Leibnizian-Cartesian Debates", *Isis*, 64 (1973), pp. 356-373.
- (54) 『自然実験報告集』は、その標題の通り様々な実験の報告集であって運動についてはまったく論じられていなかった。「ガリレオ学派」(la scuola galileiana) の科学に関しては、Cf. AA. VV., *La scuola galileiana*, Firenze, 1979; Baldini, U., "La scuola galileiana, in *Storia d'Italia. Annali 3: Scienza e tecnica nella cultura e nella società dal Rinascimento a oggi*, a cura di G. Micheli, Torino, 1980, pp. 381-463; Biagi, M. L. A. e Basile, B., a cura di, *Scienziati del Seicento*, Milano-Napoli, 1980; Segre, M., *In the Wake of Galileo*, New Brunswick, 1991; Bucciattini, M. and Torrini, M., a cura di, *Geometria e atomismo nella scuola galileiana*, Firenze, 1992.