

ヨハン・ベルヌーイによる力学の原理の探求

自然学としての力学

野澤 聡

一 はじめに

ヨハン・ベルヌーイ（以下、ベルヌーイ）⁽¹⁾が活躍した十七世紀末から十八世紀の初めに掛けては、微積分学と古典力学が相継いで誕生・展開した時代であったが、そのような時代にあつて、彼は指導的役割を果たした学者の一人であつた。彼が積分算の確立に深く関わつたことや、最速降下線の問題を提起し、自らも回答して変分法への端緒を開いたことなどは周知のことである⁽²⁾。

ベルヌーイは晩年、引力概念を批判して渦動論に基づく惑星運動の説明を試みているが、それは現代から見ると非常に奇異な試みに思われる。なぜならば、彼はニュートンが『自然哲学の数学的諸原理』

（以下、『プリンキピア』）で展開した数理をよく理解し、それが惑星運動の精密な記述に有効であること、引力概念はその理論の基礎をなす前提の一つであることを理解していたからである⁽³⁾。

彼はどのような根拠で引力批判を行つたのであろうか。また、引力理論に代わる彼自身の理論の基本法則はいかなる基礎の上に構成されているのであろうか。

二 ベルヌーイによる渦動論用語と引力批判

ベルヌーイは、一七三〇年と一七三四年に惑星の運動に関するバリの王立科学アカデミーの懸賞課題

に依じて、デカルトに由来する渦動論を擁護する理論を展開し、ニュートンが『プリンキピア』で用いた引力概念を批判している。本論では、ベルヌーイの日本の懸賞論文における中心的な論点を概観し、両者の比較検討を行う。まず、彼の議論を理解するために、デカルトの渦動論を瞥見しておく。

二・一 デカルトによる惑星運動の渦動論

デカルトは渦動論に基づいて惑星運動を説明しようとした。彼の議論は『哲学原理』にまとめられている(4)。

デカルトによれば、宇宙には延長を本性とする一種類の物質が充満している(五二―三頁)。このような宇宙における物質の運動はすべて渦動(vortex)をなす。物体が充満している空間において、ある物体が移動すると、その物体の占めていた場所に別の物体が入り込む、ということが繰り返されて、初めの物体にいたる円環ができるからである(五八―九頁)。

また、運動している物体は運動し続けようとしており(第一の自然法則)、すべての運動はそれ自身としては直線的である(第二の自然法則)。宇宙における物体の運動が渦動をなすのは、周囲にある物体に衝突することによって、その物体の直進が妨げられるためであり、その際、衝突する物体間で運動のやり取りが行われる(第三の運動法則)。しかし、物体間で運動がやり取りされても、宇宙における「運動の量」(quantitas motus)⑤の総計は、宇宙生成時に神によって与えられた量から増えもしなければ減りもしない(六一―五頁)。

さて、宇宙に充満する物質は、当初、大きさも早さも等しいものだった。しかし、それらの物質は渦動が繰り返されることによって周囲が削られ、大きさが同じくらいの球(第二元素)ができ、星間を充たすことになった。また、第二元素の物質が作られる過程で生じた断片は第一元素の物質となった。太陽や恒星には激しく流動する第二元素の物質が集合している。この第一元素の中には比較的大きく、それほど速くないものも含まれており、それらが互い

に付着し、恒星表面において濃密化することによってより大きな塊をつくった(第三元素)。太陽の黒点や地球を含む諸惑星、彗星などはすべて第三元素の物質から構成されたのである(一〇三―八および一四四―五一頁)。

このような枠組みのもとで、惑星運動は次のように説明される。まず、太陽を中心とする渦と共に太陽が自転し、地球を含めた諸惑星は、太陽の周囲を運ばれる。また、各惑星を中心とする渦もあり、それによって各惑星は自転し、その惑星が衛星をもつ場合は、衛星が惑星の周囲を回転することになる。その際、諸惑星が自転する速さは太陽から遠い惑星ほど遅くなるが、これは、太陽を構成する第一元素が、周囲にある第二元素より速く回転する(9)ことよって、周囲の物体を引きずるためである(九二―四および一九六―七頁)。

デカルトの自然学は、伝統的なスコラ哲学の体系を覆して新たな体系を提示しようとする構想の一環であつて(7)、惑星運動の説明を含む自然学の部分だけで完結しているわけではない。デカルトによれ

ば、上で見た三つの自然法則は「運動の第二原因」であつて、個々の物体間における運動のやり取りを規定している。これに対し、「運動の第一原因」は神であつて、神が宇宙のうちに常に同一の運動の量を保存しているとされる(六一頁)。

しかし、一七世紀の後半になると、ローの『自然学概論』などによつてデカルトの自然学は彼の形而上学から切り離されて広く普及し(8)、それと共にデカルトの自然学が事実に戻するという観点から多くの反論や批判が提起されるようになった。

デカルトによる惑星運動の説明は上で見たことから明らかなように定性的である。他方、一七世紀の後半には惑星運動に関する定量的な法則である「ケプラーの法則」(9)が普及し、それに基づいて惑星の精密な位置推算が行われるようになっていた(10)。「プリンキピア」の主要部分は、ケプラーの法則から血からの逆二乗則を導くこと、および、力の逆二乗則を前提としてケプラーの法則を導くことに充てられている。

二・二一 「新論考」と「試論」

ベルヌーイの一七三〇年の論文『デカルト氏の体系と、その体系から諸惑星の軌道と遠日点を求める方法についての新論考』（以下『新論考』（11）は、パリの王立科学アカデミーが提起した懸賞課題「諸惑星の軌道が楕円形をしている理由は何か、また、その長軸の位置が変化するのは何故か」（一二三二頁）に同じ、大賞を獲得した。『新論考』において、ベルヌーイは惑星運動を次のように説明する。流体中にあって、それ自身流体からなる球（太陽）がその中心をとる軸の周りに回転することによって、球の諸部分には球の中心から遠ざかろうとする遠心力（force centrifuge）（12）が生ずる。ところが、空間には流体が充満しているので、回転している球の各部分を実際に球の中心から遠ざかることはできない。その結果、遠心力をもった流体球の各部分は外側の流体の球殻を押し。この力に比例するような摩擦力が回転している球と流体球殻との境界面に生じ、この摩擦力によって、急に接している流体球殻が回転

する。この流体球殻はまた、回転することによって遠心力を生じて外側の流体球殻を回転させる。このような過程が繰り返されて、内側の流体の運動が外側の流体へと伝わっていくのである。以上が渦動論によってケプラーの第三法則を導くベルヌーイの議論の概略である（一四五―六頁）。

太陽の周囲を回転する流体によって運ばれる諸惑星は、遠心力のために太陽から遠ざかろうとする。惑星が太陽から遠ざかると、惑星と周囲の流体との密度差が生ずるが、この密度の差は、惑星を寄り身密度の高い流体のほうへ、すなわち、太陽に近いほうへと押しやる効果を持つ。すでに見たように、太陽から遠ざかると流体の回転速度が遅くなるので、遠心力は小さくなる。他方、密度差が大きくなるにしたがって惑星を太陽に近いほうへと押しやろうとする力は大きくなる。その結果、惑星がある程度太陽から遠ざかると、惑星を太陽から遠ざける遠心力よりも密度差による力のほうが大きくなり、惑星は太陽に近づく。その後、ある程度太陽に近づくと、今度は遠心力のほうが密度差による力よりも大きく

なり、惑星は太陽から遠ざかる。このように、流体が太陽の周りを回転する間に、惑星がこの回転の動径方向に振動することによって、諸惑星の軌道は楕円形になるわけである。さらに、流体が回転する周期と惑星が動径方向に振動する周期とがわずかに異なるために、諸惑星の軌道の長軸は少しずつ移動していく。パリの王立科学アカデミーが提起した懸賞に対するベルヌーイの説明はこのようなものである（一五八〜六三頁）。

しかし、ベルヌーイ自身、この議論を長く維持することはできなかった。彼はケプラーの法則を三つとも提示しておきながら、第三法則については大雑把な量的議論を展開し⁽¹³⁾、第一法則については大雑把な定性的説明を与えるに止まっている。また、第二法則については何ら説明されていない。この第二法則を説明するために、ベルヌーイは一七三四年の論文において、『新論考』の議論に大幅な修正を加えている。

ベルヌーイの一七三四年の論文『天界の主要現象、特に、太陽の赤道面に対する諸惑星の軌道傾斜、

の自然学的原因を説明するための新しい天体の自然学についての試論』（以下『試論』）⁽¹⁴⁾は、パリの王立科学アカデミーが提起した懸賞課題「諸惑星の軌道が太陽の自転軸に関する赤道面に対して傾いていることの自然学的原因は何か、また、そうした軌道傾斜が惑星ごとに異なるのは何故か」（二六四頁）に応じ、大賞を獲得している⁽¹⁵⁾。この論文におけるベルヌーイの主眼は、惑星運動についての彼の新しい体系を提示・展開することにある。

彼は、引力仮説と渦動仮説の各々に困難があることを指摘し、二つの仮説から最も自然で最も単純な事項を選び出して、二つの仮説の中間を行くことが最も確かであるとす（二七〇頁）。ベルヌーイの言う中間の道とは、物体の衝突によって重力を説明することである。

引力仮説の困難は次のようなものである。『新論考』においてと同じく『試論』においても、ベルヌーイは引力仮説が天体の運動を正確に説明することを認めている。惑星運動にはケプラーの法則という規則性があり、規則性はその原因が分からなくても数

学の対象となるのである。そして、規則性のある事象を説明するために数学においては仮説が用いられるが、幾何学者は事象の原因を説明しなくてもよいと彼は考えている。彼にとって、引力や真空はどのような仮説なのである(二六五頁)。すなわち、引力は、数学的仮説としては、何ら困難を有しない。

他方、自然科学者は、事象の原因を探究しようとする。自然科学における原因は明晰かつ判明でなければならず、その可能性は自明でなければならぬ(二六六頁)。この意味において、引力が自明ではないことを示すために、ベルヌーイは次のような議論を示す。

物体Aが物体Bに衝突して、AがBを動かすといふとき、我々は次のような推論を行う。

まず、物体は不可透入であり、衝撃は作用であつて、作用には作用を受けたものの状態を変えらるゝという結果がある。

また、衝撃を受けた物体は、その場所で静止するのをやめ動き出す、という以外に(もとの状態から)別の状態はない。

さらに、ある方向に(他の方向よりも)強く押された物体が、最も弱く押された方向に向かうというのは、静力学および動力学において受け入れられている一般法則である。

したがって、Aの衝突によつてBが動くことになる。

逆に、運動していない物体は、(他の物体に)働きかけることができない。なぜなら、物体における作用はその運動のみによるはずだからである。したがつて、互いに静止して離れている物体に引き合う引力を認めるのは、原因のない結果を認めることである(二六六頁)。

これに対し、渦動仮説の困難は次のようなものである。まず、従来の渦動仮説では重力をうまく説明することができない。すなわち、重力が渦動の遠心力に由来するとすれば、遠心力は回転する物体が回転軸から遠ざかるうとする力であるから、重力は渦動の軸に垂直に生ずることになる。しかし、太陽の周りにおいても、地球の周りにおいても、重力は回転軸に垂直ではなく、太陽ないし地球の中心に向

かっている。また、諸惑星の遠心力は、同じ体積の渦動物質がもつ遠心力と厳密に同じであるから、遠心力が変化しない限り、惑星と太陽の距離も変化しないことになる。しかし、惑星の軌道は楕円であるから、惑星と太陽の距離は一定に保たれてはいない。さらに、黒点の観測から求められた太陽の自転周期は、二五・五日であつて、渦動仮説とケプラーの法則から要請される三日との間に大きなずれがある。(二六八〜八頁)

しかし、このような困難にも増してベルヌーイが重視するのは、モーベルチユイが一七三二年に発表した『諸天体の様々な形について』⁽¹⁶⁾の中に述べられた、渦動仮説とケプラーの法則との整合性についての考察である。

『試論』においてベルヌーイは、『諸天体の様々な形について』の記述を要約する形で、従来の渦動仮説に基づいてケプラーの法則を説明しようとする際の困難について述べている。ケプラーの法則によれば、諸惑星が太陽を一つの焦点とする楕円軌道上を運動する際、惑星と太陽とを結ぶ動径が通過する面

積は、惑星が運動している時間に比例する⁽¹⁷⁾。渦動仮説においては、諸惑星は太陽の周りをめぐる流体によって運ばれているのだから、諸惑星の速度はそれを運ぶ流体の速度に等しい。そこで惑星と太陽とを結ぶ動径が時間に比例して増加するためには、太陽の周りを回る流体の速度が太陽からの距離に逆比例していなければならない⁽¹⁸⁾。

他方、ケプラーの法則においては、諸惑星の公転周期が軌道の平均距離の二分の三乗に比例している。このことを渦動仮説で説明するためには、先ほどと同様に考えて、太陽の周りを回る流体の速度が太陽からの距離の平方根に逆比例していなければならない。

以上の議論から明らかのように、諸惑星が流体によって運ばれるという従来の渦動仮説に基づく限り、ケプラーの第二法則と第三法則は両立できない(モーベルチユイ、一〇五〜九頁)⁽¹⁹⁾。

物体間の衝突によって重力を説明するという構想を具体化するために、ベルヌーイは「中心流」(Torrent central)という概念を導入する。「中心流」

は、微小な物体の間の衝突によって生じ、渦動の中心から周辺へ向かい、再び渦動の中心へと戻っていく。この「中心流」が逆二乗則に従う重力の原因となり、重力が諸天体の運動を説明するというのが『試論』の説明様式である。

「中心流」の導入に際して、渦動を構成する物質は二種類に分けられる。「第一元素の物質」(matière du premier élément)は第一元素の物質が集まってできたものであり、第一元素の物質の流体の中に拡散している。第二元素の物質は密集しておらず、諸惑星に対する抵抗もごくわずかである(二七三〜八頁)⁽²⁰⁾。

ここでベルヌーイは、彼の導入した二種類の元素がデカルトのいう元素とは性質と起源が異なることを注意している。先に見たように、デカルトの第一元素の物質は、物質間の衝突によって第二元素が形成される際に生じた断片であって、いくらでも「細分可能」(divisible)であるが、必ずしも現実無限に分割されているわけではない。これに対し、ベルヌーイは、彼のいう第一元素の物質が「現実無限

に分割されている」(réellement divisée à l'infini)ものであること、すなわち、無限小(infiniment petite)の粒子であることを強調する(二七五頁)⁽²¹⁾。

太陽においては第一元素の物質が激しく流動しており、それに伴って第二元素の物質も激しい衝突を繰り返している。このような衝突が太陽という狭い範囲で行われるので、第二元素の物質からなる粒子が非常に大きな速さで絶えず周囲に拡散していくことになる。光と熱はこの粒子が拡散することによって伝達される。先に見たように、第一元素にはまったく抵抗がなく、第二元素の物質は密集していないので、太陽から拡散した粒子はほとんどまっすぐに星間を進んでいくことができる。太陽からは常に粒子が拡散し続けているが、同時に粒子が渦動によって戻ってくるので、粒子の核酸は決して衰えない(二八三〜六頁)。重力はこの過程で生ずる。

惑星を構成する物質には隙間が多く、太陽から離れていく「中心流」の粒子は小さいので、「中心流」の粒子は簡単に隙間を通り抜けていくことができる。ところが、太陽へ戻っていく「中心流」の粒子

は三つ以上が結合して比較的大きな塊となっているため、惑星と遭遇すると、衝突によつて惑星を太陽のほうに押すことになる。つまり、重力は、「中心流」を構成する複数の粒子が結合した比較的大きな塊が惑星を押す圧力なのである（二九七頁）⁽²²⁾。

また、太陽表面から出た粒子は球面上に等しく拡散していき、出ていった分だけ渦動によつて太陽に戻ってくる。そのため、「中心流」を構成する粒子の量は、太陽からの距離によらず一定である。その結果、粒子の分布密度は太陽からの距離の二乗に逆比例して変化することになり、「中心流」の粒子と惑星の衝突頻度も同じ割合で変化することになる。このようにして、重力は太陽からの距離の二乗に逆比例して変化するのである（二九八頁）。

さらに、ベルヌーイは、諸惑星の中心に「小さな太陽」（「中心流」の源）を想定することによつて、諸惑星の重力も説明できると考えている（三〇〇頁）。

さて、渦動を構成する二種類の元素は『新論考』におけるのと同じく、ケプラーの第三法則を充たすような速度で太陽の周囲を回転する。しかし、『新論

考』とは異なり、こうした渦動の回転速度は惑星の公転速度より遥かに小さい。先に指摘したように、太陽黒点の観測から求められる太陽の自転周期は約二五・五日であり、これが太陽表面における渦動の回転周期であるとして、穀惑星の軌道上における渦動の回転周期を求めると、水星、金星、地球、火星、木星、土星の順に、五四年、一四〇年、二三〇年、四二八年、二七一五年、六七四四年となるからである。従つて、太陽の周囲を回転する渦動は、惑星運動にほとんど寄与せず、逆に、渦動の抵抗をうけて惑星の公転速度は僅かながら減速される（三〇六―七頁）。

ベルヌーイによれば、諸惑星の軌道面が狭い範囲に集中しているのは渦動のためである。渦動がわずかずつ惑星に作用し続けたため、惑星の軌道は、今日見られるように、ほぼ渦動の赤道面に一致するようになったのである（三一〇頁）⁽²³⁾。これはバリの王立科学アカデミーの課題の前半部分、すなわち「諸惑星の軌道が太陽の自転軸に関する赤道面に対して傾いていることの自然学的原因は何か」に対す

るベルヌーイの解答になつてゐる。

『試論』における惑星運動を説明する議論は以上のようなものである。

ここで『新論考』と比較しながら『試論』の議論の特徴を考察することによつて、冒頭にあげた問い、すなわち、ベルヌーイが引力を批判する根拠と引力理論に代わる彼の理論の基本法則、を考へてみたい。

『新論考』において、惑星運動の主たる原因は太陽の周囲を回転する渦動であつた。この場合、惑星は渦動に運ばれることによつて公転しており、惑星の公転周期と渦動の回転周期は一致している。従つて、惑星の運動を説明することは、渦動の運動を説明することに他ならない。このような『新論考』の理論は、先に見たデカルトによる惑星運動の渦動論と基本的には異ならない。『新論考』の理論は、デカルトの説明をもとにして、惑星運動がケプラーの法則にしたがうように定量化したものである。

これに対し、『試論』においては「中心流」が惑星運動の主たる原因とされている。「中心流」を構成す

る微粒子は、太陽から出ていくときは単独なので惑星を構成する物質にある隙間を容易に通り返けることができるためにほとんど衝突しないが、戻るときには幾つかが結合して塊になつており、通り抜ける際に惑星と衝突して、惑星を太陽に向かつて押す。この圧力が重力となつて惑星を動かすのである。この場合に、「中心流」によつて生ずる力の大きさは、逆二乗則に従つて変化すると想定されており、その結果、惑星運動はケプラーの法則にしたがうことになるのである。

次に、太陽の周囲を回転する渦動の役割について考へてみる。上で見たように、『新論考』では、太陽の周囲を回転する渦動が惑星を連んでゐる。一方、『試論』では、惑星を動かしているのは重力を作り出す「中心流」である。「中心流」が枯渇しないのは、出ていく分だけ粒子が戻つてくるという意味で渦動論的であるが、『新論考』とは異なり、太陽の周囲を回転してはいない。

もちろん、『試論』においても太陽の周囲を回転する渦動は存在しており、それはケプラーの第三法則

を充たすような速度で回転している。しかし、その速さは小さく、重力によって運動する惑星の速さの約二三〇分の一しかないため、むしろ、惑星の運動に対し、僅かではあるが抵抗することになる。この僅かな抵抗によって、諸惑星の軌道面は、渦動の赤道面とほぼ一致するようになるのである。また、惑星の形が完全な球形でなく、回転楕円体であるため、惑星が渦動からうける抵抗はそれぞれの惑星の形に応じて異なっているが、これによって惑星の軌道傾斜が惑星ごとに異なることが説明されるのである。このように、『試論』においては、太陽の周囲を回転する渦動が「中心流」によって生じた惑星軌道の分布の仕方を説明する役割を担っているのである。

重力についてはどうであろうか。『新論考』において重力はほとんど問題にされていない。上で見たように、諸惑星の運動は渦動の運動に他ならず、渦動は回転による遠心力と流体間の摩擦力によって伝達されていくので、惑星運動を説明するために重力という概念は必要ないのである。これに対し『試論』

では、上で繰り返し述べているように、重力の原因として「中心流」が想定されている。重力を自然的に説明しようとするならば、何らかの物体間の衝突を考えざるをえない。というのも、先に引力仮説の困難のところで見たとように、ベルヌーイにとつては、物体の作用はその運動のみによるものだからである。そして、『試論』においては、「中心流」を構成する粒子の振る舞いが運動の伝達法則にしたがっているということが、繰り返し強調されている。このように、『試論』においては、天体における重力の数学的性質についてはニュートンの『プリンキピア』に沿うものであるとされる一方で、その原因は、「中心流」を構成する粒子と惑星および微粒子相互が運動伝達の法則に従って衝突することであるとされるのである。

引力仮説が惑星運動を精密に記述するのに有用であることは、『試論』においても、『新論考』と同様に認められている。さらに『試論』では、数学的仮説としての引力はまったく問題がないとされている。惑星運動はケプラーの法則という規則性がある。

り、規則性はその原因が未知でも数学の対象となる。そして、規則性のある事象を説明するために数学においては仮説が用いられるが、それは事象の原因を述べるものでなくとも構わないとベルヌーイは考えている。

しかし、事象の自然学的原因としての引力は『新論考』においても『試論』においても認められていない。その最大の理由は、引力が物質が何も介在しない真空中で、物体間に働く性質を持つことである。上でも指摘したように、ベルヌーイにとつては、物体の作用はその運動のみによらねばならないからである。

『新論考』において、事象の自然学的説明は運動の諸法則によって与えられることが示唆されていたが、それが具体的にはどのようなものであるのか明らかにされてはいなかった。『試論』においては、上で見たように、「中心流」を構成する微粒子が惑星と衝突することによって惑星が運動するという仕方では惑星運動が説明されている。ベルヌーイによるこのような説明様式は、引力批判の根拠となった「物自

体の作用は物体の運動のみに由来する」とする彼自身の主張に適合している。この「中心流」を構成する微粒子と惑星の衝突あるいは微粒子相互の衝突は、「運動の伝達法則」に従って行われている。天体における重力の数学的性質は、ニュートンの『プリンキピア』に沿うものであるとされる一方で、その原因は、「中心流」を構成する微粒子と惑星および微粒子相互が運動伝達の法則に従って衝突することであるとされるのである。このように、『試論』においては、事象の自然学的説明は「運動の伝達法則」によって与えられることが明らかにされている。

四 結論

ベルヌーイにとつて、引力は惑星運動の原因にはなり得ない。

彼は天体の運動を正確に説明する際に引力という仮説が有用であることを理解していた。惑星運動にはケプラーの法則という規則性があり、規則性は、その原因が分からなくても数学の対象となるのであ

る。そして、規則性のある事象を説明するために用いられる仮説の原因は、数学において説明されなくてもよい、と彼は考えている。すなわち、引力は数学的仮説としては何ら困難を有しない。

しかし、ベルヌーイが求めたのは、自然科学的説明であった。自然科学的説明は、事象が他ならぬそのよ
うな仕方で生起する理由を説明するものである。彼
にとつて、物体の作用はその運動のみに由来するも
のであった。物体が運動の状態を変えるには衝撃と
いう作用が原因となるが、これは他の物体との接触
によつてのみ得られる。ところが、引力は静止した
物体から、離れた物体に何らの媒介もなく作用し得
る。このような引力概念を認めることは、原因のな
い結果を認めることに他ならない。引力は事象の原
因にはなり得ない。なぜなら、物体の作用は物体の
運動のみに由来するはずであるから、というのがベ
ルヌーイの引力批判である。

けれども、引力仮説を数学的仮説としての有用性
は認めつつ、自然科学的原理としては認めないとい
う態度は、ベルヌーイにおける数学と自然科学の関係を

考える上で深刻な影を落としている。数学的仮説に
は、彼が認める命題と両立しないものの、事象を説
明するのに有用なものがあつたことを彼は認める。彼
は、数学的仮説と彼が認める命題が両立しない場
合、彼が認める命題に背馳しないような仮説を選択
すべきであるとしている。しかし、このような規則
を定めても、そもそも数学がなぜ自然科学に有用なの
かは不明である。彼は「運動の法則を作るときに、
自然は幾何学を参照したかのようなのである」(五八頁)
と言わざるを得ないのだ。

ヨハン・ベルヌーイが求める事象の自然科学的説明
は「運動の伝達法則」によつて与えられる。彼が『試
論』で到達した惑星運動の説明様式において、惑星
運動の主たる原因は、太陽の周囲を回転する渦動に
代つて新たに導入された「中心流」である。「中心
流」を構成する微粒子が惑星と衝突することによつ
て惑星が運動する、というベルヌーイによるこのよ
うな説明様式は、引力批判の根柢となつた「物体の
作用は物体の運動のみに由来する」とする彼自身の
主張に適合している。この「中心流」を構成する微

粒子と惑星の衝突あるいは微粒子相互の衝突は、「運動の伝達法則」に従って行われている。このような仕方では、惑星運動は「運動の伝達法則」に規定されているのである。

この「運動の伝達法則」は、衝突における物体の振る舞いを規定する法則であり、ホイヘンスが数学的に見事に定式化している⁽²⁴⁾。紙幅の関係で詳述することはできないが、ベルヌーイは一七二七年の論文において、この「運動の伝達法則」を二つの保存法則として再構成している⁽²⁵⁾。二つの保存法則とは、「向きの量」の保存と、「活力量」の保存である。ここで「向きの量」とは、系の重心の速度と系の全質量の速度との積であり、現在の運動量に相当する。また、「活力」とは、現在の運動エネルギーに相当する概念である。ある物体の「活力」は、その物体の質料と速度の二乗との積である。彼は力学の基本法則を、保存法則として把握しようとしたのである。

ベルヌーイが晩年に取り組んだのは自然学として

の力学であり、その基本法則は二つの保存法則である。このことは何を意味しているのであろうか。

ここでデカルトによる惑星運動の説明を振り返ってみよう。二・一節で見たように、デカルトは太陽の周囲を回転する渦動によって惑星運動を説明した。しかし、彼の運動論の根幹には第二原因として三つの自然法則があり、さらに、第一原因としての神によって、宇宙のうちには常に同一の運動の量が保存されている。このようなデカルトの説明様式と『試論』におけるベルヌーイの説明様式が非常に近いものであることは容易に分かる。

これまでベルヌーイは『新論考』から『試論』に移行することによってニュートンの体系に妥協的になったと評価されてきた⁽²⁶⁾。確かに、惑星運動の主たる原因は太陽の周囲を回転する渦動ではなく、重力がニュートンの言うような数学的形式に従うことを認めたという意味では、デカルト的自然学から離れ、ニュートンの体系に近づいたと言えることができるだろう。

しかし、『新論考』においてもベルヌーイは数学的

仮説としての引力については有用性を認めこそすれ、何の困難も認めていなかった。幾何学者は、規則性のある事象を説明するために仮説を立てる際、その仮説の原因を説明しなくてもよいのである。

一方、彼自身繰り返し強調しているように、彼が認めているのは事象の自然科学的説明であり、そのための自然科学的原因である。そして、引力が彼の求める自然科学的原因になり得ないことは『新論考』においても『試論』においても主張されていることである。さらに、『試論』において、『プリンキピア』に述べられているような数学的形式に従う重力を認められたといっても、その原因として中心流の粒子と惑星との衝突が想定されねばならなかった。彼が求める説明はこのような物体間の衝突を想定することによってはじめて達成されるのである。

太陽の周囲を回転する渦動によって惑星運動を説明するというのは確かにデカルトの自然科学の特徴であった。それは『試論』においては放棄されている。しかしベルヌーイは惑星運動の原因に物体間の衝突による運動の伝達を置き、運動伝達の法則を「向き

の量」の保存と活力量の保存という二つの保存則の形で把握している。事象の原因を保存則に求めるのは、『哲学原理』におけるデカルトの自然科学の非常に忠実な再現であって、この点において、『試論』は『新論考』よりもはるかにデカルト的なのである。

註

(1) ベルヌーイ一族は十七世紀後半から十八世紀に何人もの著名な学者を輩出している。本研究で扱うヨハン・ベルヌーイは、一六六七年生まれ、一七四八年没。

(2) 中村幸四郎『近世数学の歴史、微積分の形成をめぐる』日本評論社、一九八〇年、二五二頁
Michel Blay, *La naissance de la mécanique analytique*, PUF, 1992, p.77ff.

(3) ベルヌーイが逆二乗則に向かう向心力のもとでの物体の軌道が円錐曲線になりうることを、運動方程式を積分することによって示したことは有名である（山本義隆『古典力学の形成』日

本評論社、一九九七年)。

(4) 『哲学原理』への参照は、すべて、アダム・タ
ンヌリ版著作集の第八巻によって行い、ページ
数のみを示す。

(5) デカルトの場合、運動の量は、物体の速度と大
きさの両方に比例する(六一頁)。他方、衝突
で、物体間で運動のやり取りが起きる場合、物
体には動かしたり抵抗したりする力(vis)がある
といわれるが、この力も物体の大きさや速度に
比例する(六六―七頁)。「運動する物体が持つ
力」という言葉は今日では意味をなさないが、
一七世紀から一八世紀にかけてはよく用いられ
た概念であった。例えばベルヌーイは別の論文
において、「様運動にある物体が持つ力を「活
力」(force vive)と呼んでゐる。cf. Johann
Bernoulli, "Discours sur les Loix de la
Communication du Mouvement", in *Johannis
Bernoulli... Opera Omnia tam antea sparsim edita,
quam haecenus inedita*, Lausanne et Geneve,
1742(repr. Olms 1968), tom. III, p.23. T.L.Hankins,

"Eighteenth-century attempts of the vis viva
controversy", in *Isis*, 1965(56), pp.281-29

(6) デカルトは、小さい物体ほど速く動くことがで
き、また、運動が変化しやすいと考えている
(二〇四―五頁)。

(7) 小林道夫『デカルト哲学の体系——自然学・形
而上学・道徳論』勁草書房、一九九五年、三一
一年 Daniel Garber, *Descartes' Metaphysical
Physics*, The Univ. of Chicago Press, 1992, p.307.

(8) E.J.Aiton, *The Vortex Theory of Planetary Motions*,
New York, 1972, pp.66-73; P.Mouy, *Le
Développement de la Physique Cartésienne 1646-
1712*, Paris, 1934, pp.113-7.

(9) 以下、慣用に従って「ケプラーの法則」という
呼称を用ゐる。

・第一法則——各惑星は太陽を一つの焦点とす
る楕円状を動く。

・第二法則——惑星と太陽とを結ぶ線分は等時
間に等面積を被つ。

・第三法則——惑星の公転周期の二乗は軌道の

半長径の三乗に比例する。

(例えば、鈴木敬信『天文学通論』、地人書館、一九八三年、七四)

なお、ケプラーの三法則の表現は一八世紀に至っても一定していない。cf. Domenico Bertoloni Meli, *Equivalence and Priority Newton Versus Leibniz*, Oxford, 1993, pp.33-37.

- (10) Wilson, "Predictive astronomy in the century after Kepler" in Taton & Wilson(eds.) *Planetary astronomy from the Renaissance to the rise of astrophysics* (The general history of Astronomy, Vol.2, Part A), Cambridge 1989, pp.161-206.

- (11) "Nouvelle pensées sur le système de M.Descartes, et la manière den déduire les Orbites et les Aphélies des Planètes" ベルヌーイの著作からの引用は、現在のところ唯一の著作集である Johann Bernoulli, *Johannis Bernoulli... Opera Omnia tam antea sparsim edita, quam haecenus inedita*, Lausanne et Geneve, 1742. から行い。以下で言及する論文はすべて上記著作集第三巻におよめられている

ので、以下では特に注記しない限り、著作集第三巻の頁数のみを示す。

- (12) このような運動の理解は、デカルトに由来する。先に見たように、すべての運動はそれ自身としては直線的である(第二の自然法則)ことから、円運動をしている物体には、その軌道の中心から常に遠ざかるような傾向があるとデカルトは述べている(六二―四頁)。ベルヌーイも同様な説明を行っている(二三七頁)。

- (13) 本論文では、紙幅の関係で定量的議論の検討は省略した。

- (14) "Essai d'une Nouvelle Physique céleste, servant à expliquer les principaux Phénomènes du Ciel, et en particulier la Cause physique de l'inclination des Orbite des Planètes par rapport au plan de l'Equateur du Soleil"

- (15) パリの王立科学アカデミーは、一九三二年にも同じ懸賞課題を提起したが、このとき大賞獲得者はお出なかった。cf. E.J.Aiton, *The Vortex Theory of Planetary Motions*, New York, 1972, pp.219-228.

- (16) Maupertuis, *Discours sur les differences figures des Astres in Œuvres de Maupertuis*, Lyon, 1768(repr. Olms 1974), tom.I.
 ダランベールは『百科全書』の序文において、フランスで始めてニュートンの引力仮説に公然と支持を表明した著書であるという評価を行っている。cf. P. Brunet, *L'introduction des Théories de Newton en France au XVIIIe siècle avant 1738*, Paris, 1931(repr. Geneva, 1970), p.203; E.J. Aiton, *The Vortex Theory of Planetary Motions*, New York, 1972, p.201
- (17) 今日で言う第一法則と第二法則であるが、モーペルチュイの記述に従った。もちろんモーペルチュイは「第一法則」、「第二法則」という区別を設けていない。
- (18) これは、厳密には諸惑星が円軌道を描く場合にしか成り立たないが、ここではモーペルチュイの記述に従った。
- (19) 同様な指摘は、『プリンキピア』の「一般的注解」(Scholium Generale)にも見られるが、ベルヌーイは言及していない。
- cf. I. Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, the Third Edition(1726) with Variant Readings, Koyré & Cohen (eds.), Cambridge U.P., p.759.
- (20) デカルトとは異なり、元素、恒星、惑星の形成過程には言及していない。
- (21) ベルヌーイはまた、硬さの概念についても、デカルトとは異なる説明を与えている。デカルトにおける硬さとは、物体の諸部分が接触して静止していることに他ならない(ベルヌーイ、二七四頁 デカルト、七一頁)。これに対し、ベルヌーイは、硬さを生む結合力には静止とは別の原因があると述べている(二七五頁)。
- (22) 「中心流」を構成する粒子が、太陽に向かうときに大きな塊となる理由は述べられていない。
- (23) 他方、彗星の軌道が不規則であるのは、彗星が土星の軌道より外側に長い間滞在しているため、渦動による変化が小さいためであるとベルヌーイは考えている。

- (26) Ch. Huygens, *De motu corporum ex percussione in Œuvres complètes de Christiaan Huygens*, Société Hollandaise des Sciences(eds.), La Haye, 1888-1950, tom. XVI.
- (27) Johann Bernoulli, "Discours sur les Loix de la communication du Mouvement", in *Johannis Bernoulli... Opera Omnia tam antea sparsim edita, quam hactenus inedita*, Lausanne et Geneve, 1742 (repr. Olms 1968), tom. III.
- (28) cf. E.J. Aiton, *The Vortex Theory of Planetary Motions*, New York, 1972; W.R. Shea, "The Unfinished Revolution: Johann Bernoulli(1677-1748)and the Debate Between the Cartesians and the Newtonians", in Shea(ed.) *Revolutions in Science: Their Meaning and Relevance*, Science History Publications, 1988.

(のちろ ェとし) 京都大学)