

18 世紀ドイツにおけるニュートンの運動法則 II の受容

嶋 崎 太 一*

The Reception of Newton's Law II of Motion in 18th Century Germany

SHIMAZAKI Taichi

It is often said that Newton's Law II was neglected in 18th century Germany. In fact, also Kant's law of mechanics lacked Law II. Exactly, however, the theories of laws of motion were so various that we cannot conclude that Law II was nowhere formulated at that time. In fact, many natural philosophers who belong to Newtonian eclectics re-formulated Law II in their own ways. Their explanation of Law II was different from Newtonian mechanics today because they assumed the case where the motion is communicated by the force, which is proportional to "mv" (rather than "ma"), in the collision of two bodies. Given this, to investigate Kant's theory of mechanics, it is inevitable to consider the textbooks by Newtonian eclectics.

キーワード：ニュートン，運動法則，カント，ヴォルフ学派，ニュートン主義折衷派

はじめに

ニュートンの『自然哲学の数学的原理[*Philosophiae naturalis principia mathematica*』（以下、『プリンキピア』）の初版は、1686 年に刊行された。その後、第三編の構成の変更¹や「一般的注解」の追加などの大規模な改訂を経た第二版が 1713 年に、さらに改訂²された第三版の刊行が 1726 年に刊行された。しかし、リントの言葉を借りれば『プリンキピア』は、18 世紀においては、読まれるというよりは、むしろ単に賞賛されたに過ぎなかった。その数学的要求はきわめて高度であり、平均的な学生には絶望的に荷が重かったばかりか、多くの教授陣ですら困難なものであった（Lind 1992: 147）。ドイツにおいてはとりわけ、この指摘は当たっていたと推測される。というのは、18 世紀には『プリンキピア』のドイツ語テキストそのものが存在しなかったからである。『プリンキピア』の英語訳はニュートンの死の 2 年後にあたる 1729 年に刊行され、続いてフランス語訳が 1756 年に刊行されている。一方、ドイツ語訳は、数学者ヴォルフアーによる 1872 年の訳が初である（Dellian 2016: 33）³。つまり、18 世紀ドイツでは『プリンキピア』を読むとは、すなわち、ラテン語原典を読むということにほかならなかった。

その 18 世紀ドイツにあってニュートン受容に決

定的な役割を果たしたのが、いわゆるヴォルフ学派に属する哲学者たちであった。それは、彼らが運動法則を様々な仕方で再定式化しているからばかりではない。彼らの多くが、ラテン語のみならず、まさにドイツ語の形而上学の著作において、運動法則を再定式化しているという理由もある。ワトキンスはヴォルフ学派によるニュートン受容について、次のようにまとめている。「ニュートンの運動法則の定式化は、正確に彼の言葉で受容されることはほとんどなかった。むしろ、その定式も、また内容も、様々な程度で異なっていた。事実、ニュートンの第二法則は多くの場合、省略されるか、あるいは完全に無視されてさえいた」（Watkins 2019: 114）。18 世紀ドイツにおけるニュートンの運動法則 II⁴の省略あるいは無視は、以前から繰り返し指摘されてきた問題である（Hankins 1967: 43ff.）。

カントもまた例外ではない。カントは『自然科学の形而上学的原理[*Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*』（1786）において以下のように「力学法則」を定式化している。

- 第一法則 物体的自然のあらゆる変化において物質量は全体として同一にとどまり、増大も減少もしない。（IV 541）
- 第二法則 物質のあらゆる変化は外的原因をもつ。（いかなる物体も、外的原因によってその状態を変えるよう強制され

* 工学科・リベラルアーツ教育院講師

原稿受付 2022 年 5 月 20 日

ない限り、静止状態もしくは一定の速度で一定の方向に向かう運動状態を保ち続ける.) (IV 543)

第三法則 運動のあらゆる伝達において作用と反作用とは常に相等しい. (IV 544)

カントの力学法則において、第二法則がニュートンの運動法則 I に、第三法則が運動法則 III にあたる。やはりここでも、ニュートンの法則 II は欠落しているのである。

今日の視点から見れば、ニュートンの法則 II が変化を被る物体の運動量の変化 ma を力の測度とするのに対して、カントは運動する物体の運動量 mv を力の測度としていた。したがって、今日の古典物理学の枠組みにおいてカントの力学論と法則 II は両立しえないことは確かである。それでは、歴史的にはこの問題はどのように評価されるべきなのだろうか。この点に関してワトキンスは「カント以前のドイツにおける運動諸法則のほぼすべての議論からこの〔第二〕法則が欠落していたということを踏まえるならば、カントがニュートンの第二法則に言及していないことは、驚くべきことではなく、むしろ予想されたことである」(Watkins 2019: 115) と指摘している。

果たしてこの評価は妥当なのだろうか。本稿は、このカントのニュートン受容上の問題を解明するための基礎として、18 世紀ドイツにおけるニュートンの運動法則 II 受容のされ方を照らし出し、この法則の歴史的特質を明らかにすることを目的とする。

1. ニュートンの運動法則 II

『プリンキピア』における運動法則 II は次のとおりである。

Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressæ, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.

運動の変化は、及ぼされる起動力⁵に比例し、その力が及ぼされる直線の方角に行われる。(P 416)

この法則は、ヘッセやヤンマーによれば、この法則には二通りの解釈の道がある。一つは、力が加えられた時の経験的事実の一般化としてこの法則を捉えるものであり、もう一つは、力の量的な定義とみなすものである (Jammer 1957: 124, Hesse 1962 135f.)。ただ、『プリンキピア』では既に、運動法則に先立つ

て「定義 VIII 向心力の起動力[*quantitas motrix*]は、与えられた時間内に生じる運動に比例する、向心力の測度である」(P 407) とされ、「運動量[*quantitas motus*]は速度に物質量をかけて得られ、また起動力は加速力にその同じ物質量をかけて得られる」(ibid.) という注解があることから、既に力の定義はここで与えられているとみることもできる。それゆえ、法則 II が力の定義として意図されていたとみなすことは困難である (Jammer 1957: 124) という見方も成立する。実際のところ、「ニュートンの最も重要な功績」(Mach 1960: 243) と評価される法則 III (作用・反作用の法則) が『プリンキピア』において、そこで初めて展開される内容であるのに対し、法則 I (慣性法則) と法則 II についていえば、「ニュートンの力概念に、先行する定義には含まれていない、いかなる新たな情報も加えてはいない」(Jammer 1957: 127)。つまり、法則 II を論理的定義と位置付けるのは困難である。いずれにしても、この法則 II が経験的事実の記述という性格を強く有することは確かであり、そのことがその後の法則 II の受容の決定的な背景となった可能性はある (次節以降参照)。

さて、この法則 II は、今日では、 $F=ma$ と表記されることが多い。コーエンによれば、この法則 II が初めて微分法を含めた仕方で定式化されたのは 1716 年のハーマン『運動学[*Phoronomia*]』(Hermann 1716: 57) であるという (Cohen 1999: 113) ⁶。つまり、運動法則 II は既に 18 世紀初頭の段階で微分的に理解されていたことになるが、ニュートン自身は、微分による加速度にここで直接言及しているわけではない。

さらに、次のような文献学的事情は、やはりニュートン自身が「変化率」を想定しているわけではなかったことを裏付けるものである。『プリンキピア』の初版から第三版にかけて法則 II の表現はほぼ一貫しているが、初版と第二版の間にあたる 1692/93 年頃にニュートンが幾つか別の表現を模索していた形跡がある。そこでは「すべての⁷及ぼされる力は、[...] それ自身に比例する運動を引き起こす[*vis omnis impressa motum sibi proportionalem [...] generat*]⁸、生じる運動は、及ぼされる起動力に比例し、その力が及ぼされる直線の方角に行われる」⁹ (Add. 3965, f. 274) とされており、ニュートンが運動の変化率ではなく、「運動」がそのまま力と比例するという着想をもっていたことがうかがえる。

法則 II の解釈について、ブレイは次のように指摘している。

この法則〔法則 II〕は、微分方程式の用語で表現され、 $F=ma$ あるいは $F=md^2x/dt^2$ と書かれる、今日呼ばれるところの「ニュートンの法則」と混同されるべきではない。実際には、ニュートンがここで「運動の変化」と語るとき、彼は変化が起こる時間については何ら含みを与えていない。もし今日の用語でこの法則をあえて表明しようとするならば、それに至る最も近いものは、疑いなく $F=\Delta(mv)$ となろう。[...]この想定の下で、及ぼされる起動力とは、その用語の今日的な意味ではなく、むしろ撃力[impulse]である。(Blay 2001: 226)

同様の指摘が既に我が国でもなされている（山本 1997: 12）。 $F=\Delta(mv)$ という方程式で法則 II を考える限り、ここで力と比例関係にあるのは、加速度ではなく、直接的には、力が及ぼされる前後の運動量の差に他ならない。

コーエンが述べるように、ニュートンは法則 II において、基本的には、継続的な力ではなく瞬間的な力を想定していた（Cohen 1971: 165, Cohen 2002: 66）。つまり、法則 II において直接念頭に置かれているのは、二つの物体の衝突時の撃力に他ならないのである。もちろん、ニュートンは法則 II が継続的な力にも適用されうことを疑っていない（Cohen 2002: 67）が、コーエンによれば、あくまでそれは派生的なものとして、つまり個々の瞬間的な撃力の連続と置き換えられると考えられていた（Cohen 1971: 165）という。

ニュートンの表現において、法則 II は衝突前後における物体の運動量の変化を指標として力を見るものであった。18 世紀初期のイギリスにおけるニュートン物理学の代表的教科書であるデサグリエ『実験哲学教程[A Course of Experimental Philosophy]』では、「運動力[moving force]¹⁰は運動量と比例する」（Desaguliers 1734: 32）と明確に述べられている。こうした読解を支えるのは、ニュートンが「定義 VII」において加速量（加速力）を「与えられた時間内に生じる速度に比例する」ものとして説明しているという事実である。ここでは、微分を含む加速度 dv/dt が想定されているとみなすべきか、曖昧である。法則 II の書き方を踏まえて「定義 VII」を読み直すなら、やはりここでも微分を含む今日的な意味での加速度は直接的には想定されていないとみるべきかもしれない。デサグリエはさらに明確に、「加速力は、与えられた時間内に生じる速度によって表現され

る」(ibid.)と、さらに明確に加速力を「速度」と明言している。加速力が速度と置き換えられるデサグリエの記述において、起動力が、速度と物質量の積としての運動量に比例するものとされるのは言わば当然の帰結であったと言わなければならない。

2. ヴォルフ学派における運動法則

18 世紀ドイツの学界において支配的な影響力を有したのは、言うまでもなく、ヴォルフ学派であった。リントによれば、今日我々が物理学と呼ぶ学問は、ヴォルフにおいて四つの教科書で扱われている。すなわち、数学、目的論、(狭義の)物理学、そして実験物理学である（Lind 1992: 100）。ただしリントは注目していないが、実際にヴォルフが運動法則を主題化しているのは、むしろ形而上学の教科書、具体的にはラテン語による『一般世界論[Cosmologia generalis]』（1731）、ドイツ語による『神、世界、そして人間の魂、および全ての諸事物一般についての理性的考察[Vernünfftige Gedanken von Gott, der Welt und der Seele des Menschen, auch allen Dingen überhaupt]』（1720）（以下、『ドイツ語形而上学』）である。それは、物理学が「一般世界論と存在論から原理を借り受ける。しかし一般世界論と存在論は形而上学の部門である[...]。したがって物理学は形而上学から原理を求める」（Wolff 1728: §94）という理由による。『一般世界論』においてヴォルフは、慣性法則と作用・反作用の法則を定式化している（Wolff 1731: §309, §346）が、ニュートンの法則 II には言及していない¹¹。

ヴォルフは『ドイツ語形而上学』において、『プリンキピア』への参照指示を付しながら、慣性法則を次のように充足根拠律から導出している。

なぜそれが無いのではなくむしろあるのかという充足根拠が無い何ものも生起しえないのだから (§30)、物体の運動もまた、ひとたびそれが定立されたならば、なぜそれが生起するのかという原因に外から突き当たらないならば、やむことはない。(Wolff 1720: §609)

こうした仕方では、あらゆる物体は当然にも、他の者によって別の状態へと置かれるまでは、その静止状態もしくは運動状態を維持し、運動において一様な運動を持続する。(Wolff 1720: §610)

ここでヴォルフは「やはり存在するものはすべて、なぜそれがあのかという充足的根拠をもつ」

(Wolff 1720: §30) という充足根拠律から、外的な原因なしに運動の変化は起こりえないという慣性法則を論理的に導出しているのである。

一方で、作用・反作用の法則の基礎づけは『ドイツ語形而上学』よりも『一般世界論』の方に詳しい。ここでは詳述を避けるが、「諸物体の作用と受動は、それらにおける偶有的変化である」という存在論の原理から「諸物体において反作用なき作用はない」(Wolff 1731: §315) という命題を導き、それに慣性原理を援用するような仕方、ヴォルフは作用・反作用の法則の形而上学的論証を進める。

ヴォルフ学派の哲学者たちも、少なからず運動法則に言及する。テュミッヒ『ヴォルフ哲学入門[*Institutiones philosophiae Wolfianae*]』(1725-6) では慣性法則が「自然の第一運動法則」と呼ばれ、作用・反作用の法則は「もう一つの自然の運動法則[*lex motus naturalis altera*]」(Tümmig 1725-6: §61) と呼ばれる。ヴォルフにおいて、慣性法則が第一法則と称されながらも、作用・反作用法則は、特段の名称を付されていないが、テュミッヒにおいて作用・反作用法則が完成法則に続き、それと対をなす法則として位置づけられることで、ニュートンの運動法則Ⅱが、ヴォルフよりも明示的な仕方、「無視」されていると言わなければならない。ゴットシェートの『全哲学第一根拠[*Erste Gründe der gesamten Weltweisheit*]』(1734) でも事情は同様である (Gottsched 1734: §370)。

確かに、テュミッヒのように、ヴォルフ学派においては、確かに慣性法則と作用・反作用の法則の二つが「運動法則」として掲げられ、ニュートンの法則Ⅱが欠落している例が多い。従来の研究でもこの点が指摘される傾向にあった。ただし、ヴォルフ学派の形而上学教科書にさらに立ち入って検討するならば、彼らの運動法則論は必ずしもヴォルフの追従ではないということがここで強調されておかなければならない。たとえば、ビルフィンガー『神、人間の魂、世界、そして可感的事物一般についての解明[*Dilucidationes philosophiae de Deo, anima, humana, mundo, et generalibus rerum affectionibus*]』では、作用・反作用の法則に始まる六つもの「運動法則」が列挙されている (Bilfinger 1725: 168ff.)。そこでは、慣性法則が第四の法則として含まれているほか、注目すべきことに、『プリンキピア』では法則の系Ⅰにあたる平行線の法則が、第五法則として、他の運動法則と同列的に扱われている。さらにロイシュ『形而上学体系[Systema metaphysicum]』は、作用には反作用が伴うことを「法則」として掲げつつ、両者の

相等性には言及していない (Reusch 1735: §562)。またロイシュは、この作用・反作用法則から慣性法則の根拠づけを行っている点でも、ヴォルフの運動法則論とは実質的に異なる議論を行っていたと言わなければならない。そして、ワトキンスも含め先行研究では指摘されてこなかったが、さらに他のヴォルフ学派の議論から一線を画すると言えるのが、バウマイスター『形而上学入門[*Institutiones metaphysicae*]』(1738) である。バウマイスターは、法則Ⅱも含めニュートンの三法則をほぼ忠実に¹²ラテン語で引用しているからである (Baumeister 1738: §444)。ここまで確認してきたように、ヴォルフ学派による運動法則論では、ニュートンの法則Ⅱが「無視」される傾向は強かったことは確かであるものの、内実は実際のところかなりの多様性が認められることも確かである。

3. ニュートン主義折衷派による教科書

3-1 カントとニュートン主義折衷派

カントは1758年の講義公告を兼ねた論文『運動と静止の新学説』において、「数学[の講義]はヴォルフの『摘要』をもとにして開始する。もしエーベルハルトの教科書を用いた自然科学¹³の講義を望む諸君があれば、その要望をかなえるべく努力するつもりである」(II 25) と表明している。翌年の『オブティミズム試論』で「今回始まる純粋数学の講義は特定の時間に行い、力学の講義はまた別の時間に行う。両方ともヴォルフ[の教科書]に基づく」(II 35) と言われていることからもうかがえるが、カントは数学講義を二つの学期にわたって開講し、一つでは代数学や幾何学、三角法を、そしてもう一つでは力学、流体静力学、気象学、水力学を講じたと推定されている (Kuehn 2001: 109)。そして、カントは応用数学としての力学とは区別された「自然科学」あるいは「物理学」の講義を、ヴォルフとは異なる教科書を用いて開講していたのである。

ここでカントが「自然科学」の教科書として挙げている J. P. エーベルハルトの著作は『自然学第一根拠[*Erste Gründe der Naturlehre*]』(1753, 41774¹⁴) である。当時のケーニヒスベルク大学講義要目によると、カントの物理学講義は1755年には始まっており、翌56年夏学期の物理学講義は「エーベルハルトの自然学第一根拠に基づく」と記されている。カントは1769/70年冬学期に至るまでエーベルハルトの同書を教科書として指定していたようである。記録上、1772年/73年の物理学講義から、エーベルハルトに代わり J. Ch. P. エアクスレーベン¹⁵の著作が指定され

ている (Narragon 2006)。

ワトキンスは、「(とりわけ [18] 世紀後半の) 物理学教科書の著者たちは、より経験的なアプローチを採用し、運動法則の正当化には、体系的にも数学的にも、関心をもっていなかった」(Watkins 2019: 114) として当時の物理学教科書における運動法則論を等閑視している。しかし、以下で確認するように、ヴォルフよりもニュートンに近い仕方で運動法則に関する議論がこれらのうちに見られることは事実であり、当時の教科書における運動法則論を確認することは不可欠の作業であろう。

エーベルハルトやエアクスレーベン¹は、基本的にはニュートンに従いつつも部分的にデカルト的自然観をも放棄していなかったという意味で、歴史的にはニュートン主義折衷派と位置付けられる (Lind 1992: 177f., Klemme & Kuehn 2010: 176)。リントの報告によれば、ニュートン主義折衷派による物理学の教科書は、1750 年代から 80 年代にかけて数多く出版された。エーベルハルトの教科書に続くものとして、エアクスレーベンの教科書のほか、J. G. シュテグマン『自然学序論 [Einleitung in die Naturlehre]』(17- 53) や J. J. エーベルト『自然学原理小講義 [Kurze Unterweisung in den Anfangsgründe der Naturlehre]』(1775)、J. ダンツァー『理論的・実践的自然学試論 [Entwurf einer theoretisch - praktischen Naturlehre]』(1777)、J. ベックマン『自然学講義綱要 [Grundriß zu Vorlesungen über die Naturlehre]』(1779) など多くの著作が数えられる。

以下、比較的ニュートンに忠実に三法則を定式化しているもののうち幾つかを取り上げて、18 世紀ドイツにおける物理学教科書がいかなる形で法則 II に相当するものを表現していたのかを概観しておくことにしたい。

3—2 クラッツェンシュタイン

医師、物理学者 Ch. G. クラッツェンシュタインの著した教科書『実験物理学講義 [Vorlesungen über die Experimentalphysik]』(1758) も、ニュートン主義折衷派に数え入れられる。以下で紹介するテキストと同様、そこでは、ニュートンの運動法則と同様に第一法則として慣性法則が、第二法則として運動と力の比例法則が、第三法則として作用・反作用の法則が掲げられる。

第一法則は「ひとたび運動状態に置かれた物体は、別の力がそれを妨げないなら、永遠に同じ速度、同じ方向を継続する。そして静止する物体は、それに伝達される運動力がなければ、永遠に静止するであろう」(Kratzenstein 1758: 18) と、運動と静止とをあ

くまで区別して慣性を規定するものである。第二法則には「運動の変化は常にそれを引き起こす力と比例する」(Kratzenstein 1758: 19) という表現が採用されている。続いて、「より大きい球に衝突する小さい硬球は、多かれ少なかれ引き戻される。そして大きい球は多かれ少なかれ、[その引き戻す方向へと] 速度を与える」(ibid.) とあり、衝突における速度の伝達をモデルとした説明がなされている。つまり、ここでみられるのは、静止を基礎的な状態としておきつつ、そこに運動が付加される事態を衝突時の撃力としての力でもって説明する運動観である。

3—3 エーベルト

エーベルトはヴォルフの影響をも強く受けた哲学者、文学者であるが、彼は、「経験が教える」こととして、力は「一定の規則」の下で、「一つの場合においては常に一つの変化がもたらされる」と語り、それを「著名なニュートン」の運動法則と同定している。エーベルトの慣性法則は一見して冗長であり、「あらゆる物体は、外的原因によってその状態を変化させるよう強制されるまでは、それがある状態を持続する。物体が静止しているならば、運動をもたらず力がその物体に作用するまでは継続して静止する。物体が運動状態にあるならば、ある他の力によってその運動において変化を引き起こされるまでは、その物体は一定の速度で一定の方向へと、運動することを絶やすことなく持続するに違いない」(Ebert 1775: §55) と定式化される。ここでもやはり、クラッツェンシュタインと同様、一樣運動であろうと力によってそれが引き起こされるという運動観が呈示されている。だからこそ、一樣運動を変化させる原因は「他の力」とされるのである。続いてエーベルトは「物体の運動のあらゆる変化は、それによってその運動の変化がもたらされるところの力に比例し、力が物体に作用するその方向に向かって生じる」(Ebert 1775: §56) とニュートンの法則 II を再定式化する。その注解においてエーベルトは「力は運動の原因であるから、その作用が運動そのものであり、作用する力が大きかったり小さかったりするのに従って、その運動は大きかったり小さかったりする」(ibid.) と説明を加えている。

3—4 ベックマン

自然科学者、分類学者ベックマンの教科書では、ニュートンの法則 II は「あらゆる運動は、その運動を惹起する力に比例する」(Beckmann 1779: §30) と、「運動の変化」ではなく「運動」が力に比例すると端的に語られる。ベックマンは運動力を語る際、「運動を引き起こすものは力と呼ばれる。力が運動を惹

起するならば、それは活力すなわち *vis viva* であり、反対に、運動をもたらず他の力によって運動が妨げられるならば、死力すなわち *vis mortua* と呼ばれる」(Beckmann 1779: §28) と、活力と死力という区分を導入している。ライプニッツ『力学提要』によれば活力とは、「現実の運動と結びついた通常の力」(ライプニッツ 1999: 498) であり、逆に死力とは「要素的な力」であり、そこにおいては「まだ運動が存在しておらず、ただ運動への誘発[solicitatio]が存在しているだけ」(ibid.) である。ここでは運動法則論にこの区分が導入され、起動力が活力から説明されているのである¹⁵。

3—5 エアクスレーベン

18 世紀後半のドイツにおいて最も影響力をもった物理学教科書が J. Ch. P. エアクスレーベン『自然学原理[*Anfangsgründe der Naturlehre*]』(1772) であったとされる (Clark 1997: 219ff.)。このエアクスレーベンは、ドイツ初の女医 D. Ch. エアクスレーベンの子で、1777 年に満 33 歳で夭逝するも、『自然学原理』はその後リヒテンベルクの編集協力により継承され、94 年には第 6 版が刊行されている。

エアクスレーベン『自然学原理』ではニュートンの三法則がかなり忠実に再定式化されている。

- 1 あらゆる物体は、他の力によってその状態を変化させられないかぎり、その静止あるいは一定方向への一様な運動という現在の状態のうちにとどまる。
- 2 運動の変化は起動力に比例し、力が物体に作用する方向に向かって生じる。
- 3 反作用は常に作用と等しい。

(Erxleben 1772: §49)

エアクスレーベンはこの三法則を呈示するにあたって「これまでの検討から、ニュートンが示し[...]たような普遍的運動法則の正当性は明らかである」(i- bid.) として、各法則の論証をそれ自体としては回避している。第二法則に関して言えば「運動は、それによって運動自身がもたらされるところの力に常に比例することは争えないところである」(Erxleben 1772: §38) が、その運動の量すなわち運動量は「質量と速度の積に比例する」(Erxleben 1772: §40)、また力とは「その自らの運動の量に依存する」(Erxleben 1772: §43) という先行する議論から導かれるものと考えていると推定される。つまりここでは、運動の変化を、衝突における「運動の伝達」(Erxleben 1772: §43) により衝突する側の物体の

運動量が衝突を受ける側の物体に伝達されるという単純な図式が想定されていたと思われる。

このように、当時のニュートン主義折衷派による教科書では、経験的に得られることとして運動法則を呈示しつつ、「運動の変化」をむしろ「運動」として理解し、ある物体から他の物体へと運動量(力)が伝達されることによって運動が生じるという事態から法則 II を理解する傾向が一般的に多くみられた。このように法則 II を理解するとき、引き起こされた運動の変化から力を測る、いわゆる「ニュートン力学」とは乖離した力概念をここに読み取らざるをえない。だからこそ、物体の「活力」から法則 II が説明されるようなことも起きていたのである。しかし、前節の検討を踏まえれば、ニュートン自身の叙述からはむしろ、忠実ではないにせよ、歴史的には必然的な帰結だったと言えるかもしれない。

4. エーベルハルトの運動法則論

4—1 エーベルハルトの運動法則

エーベルハルトは、ハレで活動した医者、物理学者で、ニュートン主義折衷派の中でも最初期に属する。

エーベルハルト『自然学第一根拠』によれば、「物体の普遍的性質に依存する運動の法則は普遍的運動法則[*allgemeine Gesetze der Bewegung*]と名付けられる。そして、物体の特殊な性質に影響力をもつ法則は「運動の」特殊法則と呼ばれる」(Eberhard 1774: §57)。エーベルトは、我々は実験のみによって普遍的運動法則に行き着くことはない。なぜなら「特殊な性質を欠いたいかなる物体も我々は有さない」からである (ibid.)。そのため実験によって得られた「特殊法則」から「普遍的法則」へと至るために我々は「抽象[*Abstraktion*]」という手続きを経なければならぬのである (ibid.)。このように、運動法則が経験から導出されるものであることを認めつつ、経験と普遍的運動法則の間に一つの断絶を認めるのである。この抽象化あるいは一般化の手続きの正当化にエーベルハルトは触れていないように思われるが、「自然の類比性」を基礎に置き、たとえば「我々が手に触れる諸物体は不可入的であることが見いだされ、それにより不可入生がありとあらゆる物体に普遍的な性質であることが結論される」(P 795f.) という、ニュートン『プリンキピア』における「哲学する規則 III」の方針が暗黙裡に継承されているとみることはできよう。

エーベルハルトの呈示する運動法則は、ニュートンのそれとは異なっている。エーベルハルトは第一

法則として「運動は、物体へと作用する力に比例する」(Eberhard 1774: §58) を挙げる。第二法則は「物体 A の作用は〔物体〕B からの反作用と等しい」(Eberhard 1774: §60)、そして第三法則は「同時に反対の方向へと働く力は互いに打ち消され、いかなる運動も引き起こさない。力が等しくないならば、運動はより大きい力の方向へと続き、確かに力は区別される」(Eberhard 1774: §61)、そして第四法則は、「同時に二つの力によって物体が、平行四辺形の諸辺の位置へと駆り立てられるならば、物体は平行四辺形の対角線を、諸辺を通りすぎるであろう時間と同じ時間に通る」(Eberhard 1774: §62)。このようにエーベルハルトの運動法則は、慣性法則をもたず、ニュートンの法則 II にあたるものを第一法則として、法則 III に当たるものを第二法則として掲げるものであった。『プリンキピア』における「系 I」に相当する内容が第四法則として、法則 II や法則 III に相当する法則と同列の地位を与えられている点は特記されるべきであろう。

4—2 慣性から法則 II へ

エーベルハルトは慣性法則を運動法則として定式化していないが、ニュートンの法則 II にあたる第一法則を慣性原理から導いている。エーベルハルトによれば慣性とは「物体が自らその状態を維持しようとする能力」(Eberhard 1774: §49) である。エーベルハルトは物質の慣性を「抵抗」から説明する。「物体は本性上、それが静止しているときに運動に対して抵抗するのみならず、それがひとたび運動しているときにその運動を絶やそうとするあらゆる力に対しても抵抗する」(ibid.) というのがエーベルハルトによる慣性の説明である。エーベルハルトはここでヴォルフら同様、充足根拠律を援用する。エーベルハルトは、次のような推論によって慣性あるいは抵抗を一つの力とみなす見解を提示している。すなわち、物体の抵抗のうちに運動の変化の充足根拠が見いだされ、事象の充足根拠は力である。それゆえ、抵抗もまた力である、と (Eberhard 1774: §42)。実際にエーベルハルトは慣性力[vis inertiae]の概念を導入している (Eberhard 1774: §50) ¹⁶。

エーベルハルトは、衝突時などにおいて力が作用することを「力の適用」と呼び、「力の適用を要すること」を「抵抗」と定義する (Eberhard 1774: §41)。つまりエーベルハルトは、力が適用されなければならない限り変化が生じないという慣性の事象を「抵抗」と呼ぶのである。そして、力の適用を受けていない物体 B に対して物体 A が衝突したと仮定すると、物体 A の力が B に適用される。これが「運動の伝達」

(Eberhard 1774: §44) である。

エーベルハルトは法則 II にあたる第一法則の根拠を次のように説明している。

すべての運動する物体は速度を有する (§54)。それゆえ〔物体〕B は速度を有する。B が既に速度をもっており、かつ〔物体〕A が B になおも作用するならば、再び速度が生成する。それゆえ、作用が常に等しい大きさなのであれば、速度は二重に大きくなるに違いない。三番目の作用に際して、速度は三倍の大きさになり、すべて以下同様のことが妥当するというのは明らかである。(Eberhard 1774: §58)

この説明は、ニュートンが法則 II に対して与える「ある力がある運動を生ずるものとする、2 倍の力は 2 倍の運動を、3 倍の力は 3 倍の運動を[...]生ずるであろう」(P 416) という説明と酷似している。しかし、実はエーベルハルトの論述はニュートンよりも明瞭だと言えよう。というのは、エーベルハルトの慣性（抵抗）論においては、力の「伝達」という視点が明示化されているからである。エーベルハルトの運動論を支えているのは、微小な力から物体の力になるという、力についての原子論の見方である。エーベルハルトは『自然学第一根拠』において物体が無限には分割されえない (Eberhard 1774: §29) ことを確認した上で、「それ以上は分割されない、この究極的な物体諸部分を、物体の諸要素[Elemente]と名付けるほかない」(Eberhard 1774: §30) という。『自然学第一根拠』よりもこの原子論的な見方が明確に示されているのが『論文雑録第 2 部』(1766) に収録された論文「運動とその伝達についての考察」である。そこでは、こうした「要素」は、はっきりと「単純実体」あるいは「モナド」¹⁷とも言われている。そしてエーベルハルトは「こうした要素の中に物体の本質的な力が内蔵する。より適切に言えば、この要素は力に他ならない」(Eberhard 1766: §6) と言う。つまりエーベルハルトは実体が力を有するという動力学的な自然観に基づき、微小の力の作用から法則 II を説明していたのである。

エーベルハルトも、カントや前節まででみた諸テクニストの著者たちと同様、速度と質量の積（運動量 mv ）を力とみなす (Eberhard 1766: §14)。上の第一法則の説明は、物体 A が B に衝突する際に力が三つに三等分されて伝達される場面を例示したものであると言える。このようにエーベルハルトは、ヴォルフ学派と同様、充足根拠律を基礎として慣性原理を

置きつつ、運動量 mv を測度とする力の伝達という観点からニュートンの法則 II にあたるものを定式化しているのである。

5. 結論と展望

18 世紀ドイツでは、ニュートン主義折衷派に属する学者たちにより、運動量に比例する力の伝達という観点からニュートンの法則 II が正当化されていたことが本稿の考察で明らかとなった。つまり、法則 II は、今日の視点から見れば異様というほかないが、運動量 mv が伝達されるという意味で、かつ充足根拠律に基づく慣性概念を基礎としつつ、独特の仕方です 18 世紀ドイツにおいて受容されていたのである。そして、運動の力の測度を運動量とするのは、確かに今日の視点から見れば非ニュートン的な運動観であるが、ニュートン自身の叙述を見る限り、決して奇妙なことではなかったと言えるだろう。

カントが使用していたエーベルハルトやエアクスレーベンの教科書も含め、当時のドイツにおいて法則 II をこのような仕方です基礎づける試みは少なからず見られた。こうした状況を踏まえるならば、カントがニュートンの法則 II を受容してこなかったことを一概に「予想されたこと」とすることはできないだろう。カントが応用数学ではなくまさに「自然科学」として理解していたものは、少なくとも彼の講義においては、エーベルハルトやエアクスレーベンのテキストで語られている運動論だったからである。カントの運動観において、果たして当時の法則 II の受容のされ方から見ても、それを置く余地がなかったと言えるのか否かについては慎重に検討されなければならない。カントの力学[Mechanik]は基本的にまさに運動の伝達を扱う学であり (IV 536)、当時の法則 II の受容史と同じ概念的な土壌をカントも有していたと言わなければならないからである。

運動量 mv を力の測度としていた点においてカントは当時のニュートン主義折衷派とも軌を一にしていた。しかし、カントは基本的に一様運動を運動の変化とはみなさず、運動量の変化をもって運動の変化とするニュートン的な視点を有していた点 (A 207/B 252 Anm.)、そして運動論においてモナド論的あるいは原子論的な見方を否定していた点 (IV 503) などにおいて、エーベルハルトなどとは異なる地点にいたことも確かである。これらの点を踏まえカントの力学論と当時の法則 II の受容史との連関については稿を改めなければならない。

引用・参考文献

カントからの引用は、慣例に従い、『純粋理性批判』については原版の頁番号を、第一版を A、第二版を B として本文中に記した。カントのそれ以外の著作は、アカデミー版全集の巻番号をローマ数字で、頁番号をアラビア数字で本文中に記した。

ニュートン『プリンキピア』からの引用は、コーエンとホイットマンによる英訳 *The Principia* (1999) の頁番号を「P」に続けて記した。なおラテン語原文は、オックスフォード大学歴史学部を中心とする「ニュートンプロジェクト」の Web サイト (<https://www.newtonproject.ox.ac.uk/> 2022 年 5 月 19 日閲覧) を確認した。

一次文献

- Baumann, L. A. (1785): *Entwurf der Naturlehre*, Halle.
 Baumeister, F. (1738): *Institutiones Metaphysicae*, Wittenberg.
 Beckmann, J. (1779): *Grundriß der Naturlehre*, Göttingen.
 Bilfinger, G. B. (1725): *Dilucidationes philosophiae de Deo, anima, humana, mundo et generalibus rerum affectionibus*, Tübingen.
 Desaguliers, J. Th. (1734): *A Course of Experimental Philosophy*, London.
 Danzer, J. (1777): *Entwurf einer theoretisch-praktischen Naturlehre*, Augsburg.
 Eberhard, J. P. (⁴1774): *Erste Gründe der Naturlehre*, Halle.
 Eberhard, J. P. (1766): *Vermischte Abhandlungen aus der Naturlehre, Arzneigehrtheit und Moral, Zweiter Teil*, Halle.
 Erxleben, J. C. P. (1772): *Anfangsgrunde der Naturlehre*, Göttingen.
 Ebert, J. J. (1775): *Kurze Unterweisung in den Anfangsgründen der Naturlehre*, Leipzig.
 Hermann, J. (1716): *Phoronomia sive de viribus et motibus corporum solidorum et fluidorum libri duo*, Amsterdam.
 Gottsched, J. Ch. (1734): *Erste Gründe der gesammten Weltweisheit*, Leipzig.
 Kratzenshtein, Ch. G. (1758): *Vorlesungen über die Experimentalphysik*, Kopenhagen.
 Reusch, J. P. (1735): *Systema metaphysicum*, Jena.
 Tümmig, L. Ph. (1725-6), *Institutiones philosophiae Wolfianae*, Frankfurt.
 Wolff, Ch. (1720): *Vernünftige Gedanken von Gott, der Welt und der Seele des Menschen, auch allen Dingen*

- überhaupt, Halle.
- Wolff, Ch. (1728): “Praemittitur Discursus praeliminaris de philosophia in genere”, in: *Philosophia raitonalis sive Lociga*, Frankfurt & Leibzig.
- Wolff, Ch. (1731): *Cosmologia generalis*, Halle.
- ライプニッツ (1999): 『ライプニッツ著作集 3 数学・自然学』(下村寅太郎ほか編), 工作舎.
- 二次文献
- Blay, M. (2001): “Force, Continuity, and the Mathematization of Motion at the End of the Seventeenth Century”, in: Z. Buchwald & I. B. Cohen (ed.), *Isaac Newton’s Natural Philosophy*, Massachusetts.
- Bierbrodt, J. (2000): *Naturwissenschaft und Ästhetik 1750-1810*, Würzburg.
- Clark, W. (1997): “German Physics Textbooks in the Goethezeit, Part 1 and 2”, in: *History of Science* 35.
- Cohen, I. B. (1971): *Introduction to Newton’s ‘Principia’*, Harvard.
- Cohen, I. B. (1999): “A Guide to Newton’s Principia, in: I. Newton”, in: I. B. Cohen & A. Whitman (ed.), *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*, London.
- Cohen, I. B. (2002): “Newton’s Concepts of Force and Mass, with notes on the Laws of Motion”, in: I. B. Cohen & G. E. Smith (ed.), *The Cambridge Companion to Newton*, Cambridge.
- Dellian, E. (2016): “Aus der Einleitung des Herausgebers zur ersten Ausgabe”, in: E. Dellian (tr.) *Mathematische Grundlagen der Naturphilosophie*, Sankt Augustin.
- Hankins, Th. (1967): “The Reception of Newtons Second Law of Motion in the 18th Century”, in: *Archives internationals d’histoire des sciences* 20.
- Hesse, M. B. (1962): *Forces and Fields: the Concept of action at a Distance in the History of Physics*, Mineola & New York.
- Jammer, M. (1957): *Concepts of Force*, Mineola & New York.
- Klemme, H. F. & Kuehn, M. (ed.) (2010): *The Boomsbury Dictionary of Eighteenth-Century German Philosophers*, London & New York.
- Kuehn, M. (2001): *Kant: A Biography*, Cambridge.
- Lind, G. (1992): *Physik im Lehrbuch 1700-1850*, Berlin, Heidelberg.
- Mach, E. (1960): *The Science of Mechanics*, La Salle.

- (Originally published in 1893).
- Narragon, S. (2006):
<https://users.manchester.edu/FacStaff/SSNaragon/Kant/Lectures/lecturesListDiscipline.htm#physics> (2022 年 5 月 19 日閲覧)
- Simmert, S. (2018): “Kosmologie”, in: R. Theis & A. Aichele (ed.), *Handbuch Christian Wolff*, Wiesbaden.
- Van den Berg, H. (2014): *Kant on Proper Science*, Dordrecht.
- Wakins, E. (2019): *Kant on Laws*, Cambridge.
- Zammito, J. H. (2017): ““Proper Science” and Empirical Laws: Kant’s Sense of Science in the Critical Philosophy, in: M. C. Altman (ed.), *The Palgrave Kant Handbook*, London.
- 山本義隆 (1997): 『古典力学の形成：ニュートンからラグランジュへ』, 日本評論社.

- ¹ 初版では 9 つの「仮説」から始まる第三編は、第二版において「哲学する諸規則」と「現象」とに再構成された。この改訂の詳細は Cohen (1999: 198f.) を参照。
- ² 第三版では、「哲学する諸規則」I～III に加えて IV が追加されている。現在もっとも読まれている『プリンキピア』はこの第三版に基づくものである。第三版への改訂の経緯については Cohen (1999: 260) を参照。
- ³ 1988 年にはデリアンによる独訳が出版され、これが 2016 年までに版を四度重ねて出版されている。つまり、『プリンキピア』の本格的な独訳は、これまで二種類しか出版されてこなかったのが実情である。
- ⁴ 本稿では、ニュートンの運動法則を I, II, III で記し、それ以外のテキストで様々な形で示される「運動法則」を、混同を防ぐために第一法則、第二法則、第三法則と記した。
- ⁵ ニュートンの *vis motrix* を、定訳にしたがって本稿では「起動力」と訳出した。ただし、この語の翻訳は微妙な事情にある。カントは *bewegende Kraft* (Kräfte) を *vis motrix* と対応させている (I 18) が、カントにおける *bewegende Kraft* は「運動力」が定訳となっている。ニュートンの場合には、起動力 [quantitas motrix] という概念が運動量 [quantitas motrix] とは別の概念として存在し、起動力とは起動力を力に言わば落とし込んで得られる概念であるため、「運動力」という訳語が不適切なのは明らかである。逆にカントにおいては、明確に力は運動量 *mv* を測度としていることから「運動力」という訳語が適切であろう。本稿では、この点を考慮してニュートンの *vis motrix* は「起動力」、18 世紀ドイツにおける *vis motrix* あるいは *bewegende Kraft* は「運

動力」と訳し分けている。なお、ライプニッツの翻訳としては、vis motrix に対して「原動力」という語を当てることもある（ライプニッツ 1999: 386）。

⁶ ハーマン自身の表現は、力を測度の時間微分と質量の積に等しいとする $G = M dV : dT$ である

（Hermann 1716: 57）。

⁷ 原文では「自由物体に[in corpus liberum]が加筆され、かつその加筆が抹消された形跡がある。

⁸ ニュートンの手稿はケンブリッジ大学デジタルライブラリーから閲覧することができる。この箇所は <https://cudl.lib.cam.ac.uk/view/MS-ADD-03965/558>（2022年5月19日閲覧）であり、活字に起こされたものとしてはCohen（1971: 163）を参照した。以下同様である。

⁹ <https://cudl.lib.cam.ac.uk/view/MS-ADD-03965/557>（2022年5月19日閲覧）

¹⁰ デサグリエにおいて、ニュートンの vis motrix と一見して対応する語は moving force である。ニュートンの英語訳では vis motrix の訳語としては motive force (power)が定着している。むしろ moving force はカントの運動力[bewegende Kraft]の英訳として定着している語である。そして、運動量と比例するとされている点でやはりカントの bewegend Kraft と近い射程を有している。そのことから本稿ではここで moving force を「運動力」と訳した。ニュートン主義に基づく教科書であるデサグリエのテキストにおいて vis motrix にあたる語が moving force であるという点は、当時のニュートン受容を象徴する事象であると言ってよいだろう。

¹¹ ジンメルトは、『世界論』第310節から第312節までがニュートンの法則 II に該当すると指摘している（Simmert 2018: 211）が、ここでは運動が直線方向に作用することなどが述べられているが、力との比例という法則 II の中核的部分は少なくとも明示的には語られておらず、この箇所をもって法則 II とみなすのは無理があるだろう。

¹² 原文は以下の通りであり、いくつかの相違点はあるが、およそ文意は大きくは異ならないとみなしてよいだろう。

Newton (1726)

I Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum suum mutare.

II Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressæ, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.

III Actioni contrariam semper & æqualem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse æquales & in partes contrarias dirigi.

Baumeister (1738)

α Corpus omen perseverat in statu suo quiescendi

vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur, statum illum mutare.

β Mutatio motus proportionalis est vi motrici impressæ, et sit, semper secundum lineam rectam, qua vis illa imprimatur.

γ Actioni contraria semper et æqualis est reaction] sive corporum duorum actiones in se mutuo sunt æquales. Et in contrarias partes diriguntur.

¹³ 応用数学と自然学とを最初に区別したのは、バルディングー（E. G. Baldinger）であったとされる。バルディングーはア・プリオリな応用数学に対し、経験的な学として自然学を置いた。またバルディングーは、自然学を自然記述 [Naturgeschichte]とも区別した（Zamitto 2017: 487）。当時、物理学と自然学は互換的な概念であり、徐々に自然学は「自然科学」という語に置き換えられていったとザンミートは言う。ただし、当時の自然学、あるいは自然科学には、エーベルハルトもそうであるように、今日でいう化学、生物学、地質学、鉱物学、計測学、解剖学、生理学、物理学と多くの領域を包含するものであった（Bierbrodt: 2000: 57）。なおザンミートによればカントの『自然科学の形而上学的原理』がこの「意味論的変動」に一定の力をもった（Zamitto 2017: 488）。なお、カントはこの講義公告において「自然科学」という語を用いているが、エーベルハルトやエアクスレーベンの著作名は「自然学」である。さらに言えば、カントの物理学講義は「自然科学」や「物理学」、「理論物理学」などの名称が付されていた（Narragon 2006）。なおエーベルハルトらによる当時の教科書における物理学の区分については van den Berg（2014: 160ff.）を参照。

¹⁴ 本稿では、『論文雑録』の内容に言及のある1774年の改訂増補版から引用する。

¹⁵ 本稿は当時の活力論争及びそれに関連するカントの処女作『活力測定考』には踏み込まない。当時の力概念と活力概念との関連については稿を改めて論じる予定である。

¹⁶ ただし、エーベルハルトは、慣性力について「我々はそれを物体に備わる特殊な力として表象することはできない。なぜなら、慣性の概念は運動の伝達から[...]帰結するものだからである」（Eberhard 1774: §50）として、慣性力を物体の有する固有の力とみなすことを否定している。同様に『論文雑録第2部』の論文においては、「物体は慣性のいかなる特殊な力をも有していない。我々が物体の慣性と呼ぶものは、そのための根拠が現前するまでは変化しえないあらゆる諸状態の持続にすぎない」（Eberhard 1766: §11）と述べている。慣性が衝突などの「運動の伝達」の場面でのみ見いだされるものであるというエーベルハルトの慣性観には、「物体は、それに加えられた力が物体の状態を変えようとする場合にだけ、この力を働かせるにすぎない」

(P 404) というニュートン『プリンキピア』の言明が反映されていると思われる。

なおカントはさらに明確に慣性力概念を退けている (IV 550)。

- ¹⁷ エーベルハルトはそこで、単純な存在者の力の作用は「内的な作用」と「外的な作用」とに区分されるとして、内的な作用がもたらすものを「表象」、外的な作用がもたらすものを「運動」としている。

その上で「力の内的な作用と外的な作用とは、同じ単なる変容である」ことが「きわめて確からしい」としながらも、表象を自然学の探究の対象から除外している (Eberhard 1766: §185)。このように、エーベルハルトのモナド論は、物理的な物体の微小部分に還元されるヴォルフのモナド論よりも、表象的側面をもあわせもつライプニッツ本来のモナド論に近いものであったと言える。