

運動の三法則と理論体系のもつべき論理の枠組み

『山本義隆自選論集Ⅰ』が促した思索

「蝶の雑記帳 134」

1. 山本義隆の説く物理学発展史

昨年末に『山本義隆自選論集Ⅰ』（ちくま学芸文庫）を読んだ。この論集は、山本義隆さん(以後敬称略)が『磁力と重力の発見』など科学史について4冊の重厚な書籍を著していたとき、付随して書かれた文章を集めた書物である。その論集を読んで思索を促され、また、わずかに違和感を感じるころがあったので、この雑記帳で考えてみたい。

『磁力と重力の発見』は、小さな大学の教養部で物理の講義と実験の授業を担当していたとき出版され、研究室の書籍として購入した。けれども、研究論文を書くという忙しさのなかで、その大学を去りたいという募っていた思いを定年の前に実行したので、結局読むことができなかった(山本のいう大学アカデミズムの体制のもとでは、ささやかな業績でも挙げることに精出す必要があったのである)。ところが、辞表を出したあとしだいに関心は物理学の外に広がり、山本の著作に触れる機会を失い、今回この論集で初めてその考えに出会うことになった(E. カッシーラー著『認識問題』は以前に読んで、そのうちの山本が翻訳を担当した巻も読んでいた)。

そういうわけで、主に(天体)力学の発展史を扱うこの『論集 1』ではじめて、山本の科学観・物理学観を知ることになった。これを言うのは、現代の物理学研究者の端くれだった者も科学史をよく勉強したことがないことを白状するためである。プトレマイオスの宇宙論もコペルニクスの地動説も、この書物の「11. 物理学の誕生」が解説する幾何学的な図と観測データに教えられ、やっと具体的な概要を知った。

この書物の文章が口頭の講演や講義などのためにつくられ、一般の人向けに平易に書かれていることは、この書物に大いに有用さを与えている。おかげで、わたしは科学史をこれまでよりもっと深く知ることができた。

そのことを具体的な内容に触れてここに記しても、二次的な雑記帳がほかの人に役立つことはあまり期待できない。内容を知るにはこの論集を読むのが一番よい方法だろう。この書物は一般向けに平易な言葉で書かれているので、熱心に取り組めば、高校で物理を勉強しなかった人にもかなりの深度で理解可能だと思う。

それにくらべてこれから議論しようとすることは、こむずかしいことになるけれども、読んでくれる人があるだろうか。

わたしがこの雑記帳で述べたいのは、『論集 1』を読んでわずかに違和感を感じた点について、山本の科学史全体のと

らえ方とは異なる見方が可能だということである。もう一つ、力学理論の構成あるいは枠組みについては異論を提出することになる。

2. 広く歴史のなかで「文化革命」と「科学革命」を観る

山本義隆は、科学史上重要なオリジナル文献と関連する多くの科学論・科学史の文献を読みこんで、あの一連の大部の著述をした。その研究での感慨が、5 番目の「16 世紀文化革命」という論考に、「現実の科学研究というのはもっと複雑で錯綜していて、現在の理論にむかって一直線に、予定調和的に発展してきたわけではないんだ、現在評価されている業績にしても、当時の人はぜんぜん別の見方をしていたり、いまとは違う観点で、違う論理的な枠組みで物事を捉えていたケースも多く、……」という言葉で表わされている。

「5. 16 世紀文化革命」では、「文化革命」という言葉が独自の概念として提起される。わたしの知らなかったたくさんの新しい知見・考え方などだけでなく、それを生み出した社会の変化まで関連する広範な出来事が述べられている。そして、「16 世紀に知的世界、学問の世界で根本的な地殻変動があったのではないか…、その大きな地殻変動の上に、17 世紀の開化があった」と言う。

地殻変動の具体相について、それまで蔑視されてきた職人・技術者・船乗り・軍人・外科医が、実際の経験を重視す

る知、経験をさらに実験にもとづく新しい科学を対置するようになった…。それは、大学に属する知識人たちの権威を掘り崩していく…。新しく科学の営みに参加するようになった人たちは、自分たちの話す俗語で本を書きだした……。と述べられていく。山本は、16 世紀より前のルネサンスの時期から説き起こし、絵画の分野のデューラーや、わたしの知らないドイツの外科医バラケルスス・フランスの外科医パレの名を挙げていく。諸産業が発達し、技術書が出版されるが、それにはグーテンベルクの印刷機の出現が関係している……。物理学に関係することとして、イギリスの航海用具の製造職人ノーマンという人の名が挙げられて、南北方向を指す磁針が水平面から傾くこと（伏角）を発見して本に書いたことなど……。さらに、哲学や…宗教改革や大航海時代……が語られる。多岐にわたるのでこれ以上なぞることはやめよう。

ともかく、山本は、これらの 16 世紀の革新を「文化革命」と名づけてその歴史上の重要さに注目することを提案するのである。その議論は、変革を社会での動的な動きにまで立ち入って観るという点で意味があると思う。そして、鳥瞰図として見るときには無視されてきた人々の寄与を掬い出すという点でも共感できる。社会的な生き物である人間の社会と個々人は、多重に相関的に密接に関係しながら時代を生きる。大きな「歴史」だけでなく、知的領域や個々の学問分野の歴史もその切り離せない相関の中で進展する。そこに大小

の役割を担った人々がいて知的世界・学問の世界が進展したという見方は重要だと思う。

中世から近代に至る時代には、たとえば科学の分野で変化を担っていたのは比較的少数の人たちだったが、それでも、大局的に語ろうとするときには多くの参画者は割愛されることになる。現代では、諸分野が細分化されて各分野での参加者の数も増えているからよけいにそうなっているけれども、山本の見方はいっそう重要になっていると思う。

*

さて、わたしが「文化革命」という言葉にかすかに感じた違和感を述べてみよう。文化は、大きな広がりをもち、ずいぶん長い年月をかけて変化するものである。他方で、ヨーロッパ語の革命=revolution という言葉を英英辞典で調べてみると、「complete change」と説明する。比較すれば短い期間に大きな決定的な変革が起きたときに用いられるのである（「revolution」はラテン語の「回転」から来っていて、漢語「革命」はもと王朝交代を意味したが、両方とも現代では広い事象に対して「complete change」の意味で使用される）。そういう二つの語「文化」と「革命」を接合することに、わたしの語感がためらいの反応をする。約1万年間の人類の歴史で何度か起きた文化の革命的な発展を考慮すると、16世紀は短かすぎるという気がするのである。

また、わたしが普通の「歴史書」に親しんでいて、時代区

分として「中世から近代へ」という大まかな分け方にもの足りなさを感じるせいでもある。ヨーロッパ語の「modern」は、現代に近い時代を意味するが、時間的な広がりとして現代からするとかなり前の時代も含むように使われることがある。だから普通の歴史書では、「近世 early modern times」と「近代 modern times」に分けて記述することが多い。日本史でも、中世のあとに近世をおいて、そのあとの時代を近代と呼ぶようになっている。

そこで、山本の提起する 16 世紀の「文化革命」とすでに用法がほぼ確立している 17 世紀の「科学革命」を位置づけるのに、中世・近世・近代の時代区分の観点からするのがよいように思うのである。

この時代区分では、すでに通用している 17 世紀の「科学革命」は近世に属し、山本の言う 16 世紀の「文化革命」も近世に属す。上で述べたように、文化の革命はもっと長期の歴史を観る鳥瞰図で遠望した方が落ち着きがよいので、それは、科学革命を含む大きなうねりが生じた「近世」に起きた、と観たらどうだろうか。科学革命を、長期的な大きなうねりである文化の革命の代表的な指標ととらえるのである。

過去 1 万年の人類の歴史のなかで、産業革命やアメリカ独立革命・フランス革命は、経済・政治・社会上の大変革で、近代という時代を興隆させる画期的な出来事だった。同じように、「科学革命」は、過去 1 万年の歴史のなかで、知的領

域や学問の領域での画期的変革であり、革命という言葉が適合する。そこで、その「科学革命」を含めて、近世に起きた文化全般にわたる画期的変革をまとめて「文化の革命」と呼んだらどうだろうか、とわたしは考える。

この考えを、わたしが重要だと思う近世の変革者たちの名を下の表に示して説明しよう（数字は生没年）。

この思索に関係する西欧近世の変革者たち

1500 年代

- D. エラスムス (1466－1536) 、 N. コペルニクス (1473－1543)
M. ルター (1483－1546) 、 J. カルヴィン (1509－1564)
M. モンテーニュ (1533－1592) 、 G. ブルーノ (1548－1600)
T. ブラーエ (1546－1601)

1600 年代

- F. ベーコン (1561－1626) 、 G. ガリレイ (1564－1642)
J. ケプラー (1571－1630) 、 R. デカルト (1595－1650)
B. スピノザ (1632－1677) 、 J. ロック (1632－1704)
I. ニュートン (1642－1727) 、 G. ライプニッツ (1646－1716)

1700 年代

- L. オイラー (1707－1783) 、ほかの多くの偉人の名は割愛

1700 年代後期から近代の開始 -----

産業革命、アメリカ独立革命、フランス革命

認識論 I. カント (1724－1804) 『純粹理性批判』 1781 年

文化の革命を長い時間単位で観るので、山本が掬い取ろうとした人たちの名を割愛して重要な寄与者だけしか載せられないが、変化の一面を表現できていると思う。山本の言う文化革命の起きた 16 世紀を、科学革命の起きた 17 世紀と対照させれば、それぞれの特徴と関連が視覚的に見やすいと思う。この表は、経済・政治体制に代表される社会全体の大きな革命が起きた 18 世紀後期よりも前の、近世後半期の時代的な見取り図として役立つように表現してある。表には、科学革命を認識論に結びつけた近代初頭のカントも付加した。

上の表では、ニュートンのあとに 18 世紀の科学を進展させた変革者たちの名を割愛してオイラーだけを挙げたが、近代の人たちは科学革命を享受して次の大きなうねりをつくりだし、科学全般を興隆させた。19 世紀の科学の進展は目覚ましいものだった。けれども、科学革命という用語は 17 世紀に使われる。それは、後戻りできない革命的な画期がそこにあると考えられているからである。大局的に同じような考え方をして、全般的で革命的な興隆を引き継いだ近代の前に、自然科学だけでなく人文・社会学に及ぶ広義の文化の革命は 16 世紀から 18 世紀にかけて起きた、その代表が科学革命だったという見方ができないだろうか。そのとき、山本がしたように、近世の西欧に起きた経済の発展・政治制度の改革・市民社会の形成などをもたらした人の思考と行動の開化などを、文化の革命に含めてとらえるのである。

3. 『自然哲学の数学的原理』の画期性

先ほど触れたわたしの疑問は、10 番目の「ニュートンと天体力学」の一節で生じた。「ニュートンの力学」の論理構造に関することである。この節でそれを考察しよう。

その問題を論じるには、ニュートンの『自然哲学の数学的原理』の構成を理解しておく必要がある。簡略に『プリンキピア』と呼ばれているその書物は、序文のあとに、最初の節「定義」で8つの概念の定義を与え、次の節「公理、あるいは運動の法則」で3つの運動の法則を提示して、そのあとに、第Ⅰ編と第Ⅱ編の各章を続ける構成になっている。この構成は、ユークリッドの『幾何学原論』をお手本にしている。すなわち、この書物の大部分をなす第Ⅰ編と第Ⅱ編の各章は、最初に提示される「公理、あるいは運動の法則」から演繹的に導かれる帰結を記述するのである。

3.1 山本の論じていること

「ニュートンと天体力学」は、——現在の力学の教科書に書かれている“ニュートン力学”とニュートンの『自然哲学の数学的原理』の記述のあいだに相当の相違がある——という問題を論じている。要約すれば、議論は以下のである。

最初に『プリンキピア』が与える三法則が引用される。

A 法則Ⅰ すべての物体は、その静止の状態を、あるい

は直線上の一様な運動の状態を、「外力」によってその状態を変えられないかぎり、そのまま続ける。

法則Ⅱ 運動の変化は、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なわれる。

法則Ⅲ 作用に対して反作用はつねに逆向きで、[その大きさ]は相等しい。

このあと、注意しなければならない2点をあげている。

第1は、ニュートンが「定義」の節で、「物質の固有力とは、各物体が、現にその状態にあるかぎり、静止していようと、直線上を一様に動いていようと、その状態を続けようとならう内在力である…。固有力は、一番よく内容を表す名前として、慣性の力(vis inertiae)と呼ぶことができる」と書く点である。山本は、「ニュートンにあっては、〈慣性〉が〈力(vis)〉のカテゴリーに含まれ、したがって慣性運動も力による運動とみなされている」ことが第1注意点とする。つまり、力(vis)という言葉が、今日の力学で通用する力(force)の概念とは異なるように使われていることに注意しなければならない、というのである。

第2の注意点は、「法則Ⅱの〈起動力(vis motorix)〉は、現在言う力 F (ベクトル)ではなく、その持続時間 Δt に働く力積 $F \Delta t$ を指している」という点である。「したがって法則Ⅱは、微分方程式ではなく、微小時間の力積と運動量変化の関係 $\Delta(m \mathbf{v}) = F \Delta t$ を表わす」ことになる。

本稿の註：-----

今日の教科書流に 1 行の数式として表わせば、

$$\text{法則 II は、} \Delta(m \mathbf{v}) = \mathbf{F} \Delta t \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

と表現できる。ここで、 m は質量、 $\mathbf{v}$ は速度。

続いて山本は、起動力による物体の微小な移動距離は

$$\Delta s = (\mathbf{F}/2m)(\Delta t)^2$$

と書けること、したがって、時刻 t に速度 $\mathbf{v}$ で動いている物体が微小な時間 Δt 間に移動する距離 PQ は

$$PQ = \mathbf{v} \Delta t + (1/2)(\mathbf{F}/m)(\Delta t)^2$$

となることを記述し、言うならばこれがニュートンの力学の基本公式である、と言う。

本稿の註：-----

この部分は、今日の力学の教科書が与える公式

$$PQ = \mathbf{v} \Delta t + (1/2) \mathbf{a} (\Delta t)^2$$

に対応させようとしている。ここで、 $\mathbf{a}$ は加速度。

ここから、山本は次のように言う。

- ① 法則 II を「運動方程式」と理解して今日見られるように微分方程式の形 $m(d\mathbf{v}/dt) = \mathbf{F}$ で表わすと、法則 I は、その特別な場合に (右辺の $\mathbf{F} = 0$ なら、左辺の $d\mathbf{v}/dt = 0$ 、すなわち $\mathbf{v} = 0$ あるいは $\mathbf{v} = \text{一定}$) となって法則 II に含まれるから、この二つの法則を分けて書く必要はない。
この文で () 内に書いた文は本稿の説明。

㊦ 続いて山本は言う。——ニュートンの見方では法則ⅠとⅡは独立である。要するにニュートン自身の運動法則は、現在の教科書にあるニュートンの3法則とはかなり異なるのである——と。

㊧ さらに、ニュートンの『プリンキピア』に対する評言として次の言葉がある。——なおこのかぎりでは、ニュートンは力学原理を新たに提出したというより、それまでステヴィンやガリレイによって力の合成や等加速度運動について提唱されてきた個々の理論を統合したにすぎないと言える。1838年にフランスの経済学者オーギュスタン・クールノーが書いた『富の数学的原理に関する研究』にある「ガリレイによって始められニュートンによって完成された運動の法則の理論」という表現は、ほぼ実相を表わしている——。

わたしが疑問に思うのは、上の㊦～㊧の文章である。

この問題を考えるために、ニュートンの言葉づかいと今日の力学が用いる物理量の定義をもう少し比較しておいた方がよいだろう。最近わたしはカントの認識論に取り組むのに、『プリンキピア』の構成を知るために講談社のブルーバックス『プリンシピア』を取り寄せた（註：「原理」はラテン語の発音では「プリンキピア」がよいそうだ）。そこに書かれた3つの法則の部分は、上に引いた山本のAの文と差異があるが、山本が言うように用語が今日からすれば明確さを欠くせいな

のだろう。ここでは、法則Ⅱは、微小時間の力積と運動量変化の関係式① $\Delta(m \mathbf{v}) = \mathbf{F} \Delta t$ を意味するとしておこう。

3.2 『プリンキピア』が提示する力学法則

『プリンキピア』で、ニュートンは「定義」の節で次のような定義を与える。

定義Ⅰ 物質の量とは、その物質の密度と容積との相乗積をもって測られるものである（傍点は本稿の註）。

定義Ⅱ 運動の量とは、速度と物質の量との相乗積をもって測られるものである。

定義Ⅲ ヴィス インジスタ(vis inertiae)すなわち物質固有の力とは、それが静止しているか、直線上を一様に前進しているかにかかわらず、それがその内部にあるかぎり、すべての物体がその現状を保持しようとするところの一種の抵抗力である。

（先ほど山本が言っていたのは、この定義Ⅲのことである）。

定義Ⅳ 物体に加えられた力とは、物体が静止しているか、直線上を一様に前進しているかにかかわらず、その状態を変えるために働かれた作用である。

定義Ⅴ・Ⅵ・Ⅶ・Ⅷは求心力に関することだから、今からする議論には直接関係しないので省略する。

ここで無視していけないことは、『プリンキピア』では、

定義Ⅰ～Ⅷのあとに「注」が加えられて、その主要部分が次のように書かれていることである。

注 時間・空間・場所および運動などには、万人周知のものとして、その定義を与えることはしない。

だから、「定義」の節では、**時間・空間・場所・運動**は、既知とされ、そのほかに4つの物理量、**物質の量・運動の量・vis inertiae・物体に加えられた力(状態を変える作用)**が、新たな概念として導入されているのである。

空間・場所・運動は、人間に既知の時間と長さで実際に計器で測って数字で表現できる。定義Ⅰに出る容積は物差しで測ることができる。もう一つ出る「物質の密度」の定義は与えられていないが、定義Ⅰは、「物質の量は密度と容積との相乗積をもって測られる」と言っているから、密度も既知とされているのである。しかし、密度を測るためには「重さ」が必要である。すると、時間と長さが常識的概念だったように、重さも、日常用いる度量衡の慣例のやり方で天秤で測ることのできる「重さ」と想定するほかない。そうすれば、密度も測ることのできる量となり、物質の量は測ることのできる量ということになる。

しかしこの解釈だと、定義Ⅰの言う「物質の量」とは、端的に物質の「重さ」と言うことになる。ニュートンはなぜそんな回りくどい言い方で「物質の量」を定義したかという疑問が残る。このことはあとの考察でまた触れよう。ともかく、力学の研究を実行に移すには「測る」という行

為を行なわなければならないから、力学を立ち上げる段階では、「物質の量」は天秤で測って求めることができるとしておこう。

ところで、速度は、時計と巻き尺があれば測ることができる。したがって、定義Ⅰと定義Ⅱの与える物質の量と運動の量は測ることができることになる。つまり、最初の2つの物理量、**物質の量と運動の量**の定義は明確で数式で書き表わすことができる。今日の用語で、物質の量とは質量のことで、運動の量とは運動量のことである。

それに対して、定義Ⅲと定義Ⅳの与える物理量は言葉で表現されていて、とまどいなく数式で表現することがためられるのである。しかし、定義Ⅳが与える**物体に加えられた力**あるいは**状態を変えるために働かれた作用**を、山本がしたように今日の用語「力積」とするなら、法則Ⅱは、数式でまぎれなく①のように書き下すことができる、定義Ⅲについては、*vis inertiae* すなわち**物質固有の力**あるいは**一種の抵抗力**を今日の用語「慣性」と言い換えれば、以下で述べるように、それを数式で表現することはむずかしい。

以上のように考えれば、ニュートンの与える運動の3つの法則は、定義の明確な概念で述べられた法則と言うことができる。

問題は、ニュートンの与える運動の3つの法則が構築する力学が今日の力学の教科書に表現される運動の3つの法則が

構築する力学と同じであるか、それとも、山本が言うようにかなり異なるかである。

3.3 現代流の力学が提示する力学法則

上の問題を考えるためには、今日の力学で運動の 3 法則がどのように提示されているかを明確にする必要がある。ところが、教科書によって運動の 3 法則の記述にはゆらぎがあるうえに、しばしば今考えようとしている問題に関して不十分な書き方しかされていない。それは、大学生のための力学の教科書の多くが練習問題の解法に注意を向けているからである。以前にわたしはそういう書き方とは異なる物理学の概説書を試み、『大人に語る物理 モノとコトの世界』と名づけた（教養課程の物理学の授業をしていた大学を退職したあと、それまでの欲求不満を解消するために自分流の書き方をした。物理学から遠ざかって久しい人に理解してもらえるように書いたつもりである。その pdf ファイルがホームページ「白江庵雑記」に公開してある。<http://hakkoan.net/CCP003.html>）。そこでした「運動の三法則とその解説」に少し手を加えて示そう。今の問題を理解するのに役立つと思う。

運動の 3 法則は次のように表現できる。

B 法則 I（慣性の法則）

他から力を受けない物体は、静止したままかあるいは一定速度の直線運動を続ける。速度が変化したらその

原因を他からの作用(力)に求めることができる基準の座標系を慣性系と呼ぶ。

法則Ⅱ（運動方程式）

慣性系で運動を観測すれば、物体に他から力が作用すると加速度が生じ、生じる加速度 $\boldsymbol{a}$ は力 $\boldsymbol{F}$ に比例し質量 m に反比例する。

$$\text{運動方程式} \quad m \boldsymbol{a} = \boldsymbol{F}. \quad \cdots \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$$\text{加速度} \quad \boldsymbol{a} = d\boldsymbol{v}/dt = d^2\boldsymbol{r}/dt^2.$$

ここで、位置座標ベクトルを $\boldsymbol{r}$ と表わした。

法則Ⅲ（作用反作用の法則）

慣性系で観測すれば、2つの物体AとBの間に力が働くとき、AがBに及ぼす力とBがAに及ぼす力とは大きさが等しく反対向きである。

Bのように表現した運動の法則がどのような論理構造をしているか注意深く考えてみよう。

運動方程式②で、 $\boldsymbol{F} = 0$ のときには加速度 $\boldsymbol{a} = 0$ が得られる。すなわち、力が働かなければ、加速度が生じず速度が変化しないという第Ⅰ法則と同じ結果が得られる。では何のために第Ⅰ法則があるのだろうか。第Ⅰ法則は、運動を観測する座標系として慣性系を指定しているのである。…駅を出発する電車に乗っていて、自分の電車の方が動き始めたのに、隣に停車していた電車の方が動き出したと錯覚した経験があるだろう。動き出した電車を基準の座標系にとると、「進

行方向に力が働いていない隣の電車に加速度が生じた」ように見える。このような座標系では、第Ⅰ法則が成り立たないのである（第Ⅱ法則も困ったことになる）。第Ⅰ法則は、動き始めの電車のような加速度運動する座標系から運動を記述しない、ということを主張しているのである。… 経験上、地上で起きる運動は地面に立って眺めると第Ⅰ法則（慣性の法則）がほぼ成り立つので、地面に固定した座標系を慣性系と見なそう（地球の自転や公転は速度の向きも変わるから本当は加速度運動であって、地面は厳密には慣性系ではないのだが）。同じく月や人工衛星の運動については地球に原点を置く座標系がほぼ慣性系で、地球の公転については太陽に原点を置く座標系がほぼ慣性系である。

第Ⅰ法則を満たす慣性系から観測して物体の速度に変化が生じれば、他の物体からの力が原因である。質量が分かっている、働く力が知られれば、第Ⅱ法則の式②から加速度を求めることができる。そうすれば、→速度→位置とさかのぼってその物体がどのような軌道を描いて運動するかを予言することができる。こういう意味で、式②は運動方程式とよばれる。力学を学んだことのない人は、物体が運動しているのを見ると運動の方向に力を受けていると考えがちである。しかし第Ⅱ法則は、速度は必ずしもその瞬間に力が働いていることを表わしてはいず、各瞬間に加速度が力と比例関係にあることを規定するだけである。物体が静止しあるいは等速で直線運動するのは力が働いていないからだ。物体の動きに

変化が現われたとき、つまり速さや方向を変えたとき、物体に力が働いたのだ。天秤と物差しと時計があれば、物体の質量と加速度を測定できる。こう考えると、運動方程式は力の定義を与えていると見ることもできる（そう見れば、力は、②によって測ることのできる質量・距離・時間で表わせる）。

第Ⅲ法則は、力というものの性質を決めている。力は、2つの物体のあいだに働く相互作用としてある。あなたは日頃、遠心力という言葉を使うだろう。しかし、遠心力の反作用は何かと問われれば答えに窮するだろう。遠心力は第Ⅲ法則という力とは違ったものなのだ。運動方程式②は、慣性系だけで成立し、加速度運動する座標系から見れば遠心力のような作用反作用の法則に従わない“力”が現われて、修正された式になる。

さて、3.2で質量は一応測ることができると考えたが、Bの形式での運動の法則で出てくる質量は、運動の3つの法則の論理構造の上では、まだ未定義量であると言える。第Ⅲ法則は、その定義を与える役目を担っている。作用・反作用を及ぼしあっている2つの物体AとBを想定しよう。力の大きさは等しいから、生じる加速度の(方向を除いた)大きさ $a_A \cdot a_B$ と質量 $m_A \cdot m_B$ の間には、 $m_A \times a_A = m_B \times a_B$ の関係が成り立つ。したがって、質量比は $m_A : m_B = a_B : a_A$ となる。加速度の大きさ a_A と a_B は測定可能量だから、質量比 $m_A : m_B$ を求めることができる。原理上このやり方で、ある基準のモノに対する

比で他のモノの質量を決めることができる。

結局、運動の三法則は互いに支えあって、慣性系・力・質量という三つの概念を定義しているのである。いったんこの枠組みが確定すれば、力学では、運動方程式が中心的役割を果たすことになる。

さらに、よくよく考えると、運動方程式と万有引力の法則とは別の法則であると考えることができる。2つの法則に現われた質量が同じであるという保証は必ずしもない。運動方程式に現われた質量を慣性質量と呼び、万有引力に現われる質量を重力質量と呼ぶ。あるモノの重力質量を m 倍するとき、加速されにくさを表わす慣性質量も m 倍で増えるという保証はない——ということだ。しかし、経験上2つの質量のあいだに測定の精度にかかる差異は見つからない。一般相対性理論では両者を同一のものとする。そこで、通常、両者を区別することなく単に質量と呼ぶ。

3.4『プリンキピア』と今日の力学の論理構造の比較

3.2でかなり踏み込んだ考察をしたので、問題のおおよそを把握することができる。3.3で見た今日の力学の論理構造を参照すれば、『プリンキピア』の運動の三法則が明確になってくる。

Bの形式での法則Ⅰが二つの文章からなることは重要である。Bの形式での法則Ⅰでは、前の文とうしろの文は別の

ことを規定しているのである。Aの形式での法則Ⅰもよく見ると、単純な単文ではない。“外力”によってその状態を変えられないかぎりという条件をつけて、法則Ⅰは、観測者から見て静止か等速直線運動である特殊な運動状態だけを記述しているのである。しかも、この回りくどい文をよく噛み砕いて読むと、物体の運動状態を描写しているだけでなく、同時に観測者が準拠している座標系も指定していることが判る。それは、観測者が加速運動をしているか物体が加速運動をしている場合には、この文章が成り立ちがたいことから知られる。すなわち、この文章は、観測者が静止か等速直線運動をしていて、物体の運動が静止か等速直線運動の場合に成立することが判る。例外として、ロープが切れて落下している窓のないエレベータの中の人とその箱の壁と床は自分と同じく静止していると見るような場合があるが、その例外は法則Ⅱ・Ⅲと両立できない。だから、法則Ⅰが法則Ⅱ・Ⅲといっしょにあると考える場合にはそういう例外は除外される。したがって、法則Ⅰは、観測者が準拠する座標系を静止か等速直線運動に限定し、物体の運動が静止か等速直線運動の場合にだけ成立する運動について言っているのである。

それに対して、『プリンキピア』の法則Ⅱは、そのような静止か等速直線運動とは異なる運動状態をもたらす“外力”がある場合の運動を規定する。つまり、ニュートンの定式では、法則Ⅰと法則Ⅱは、それぞれ区別できる運動状態に対応するように設定されるのである。だから、法則Ⅰと法則Ⅱは

二つとも必要な法則である。

ひるがえって、今日の力学形式での法則Ⅱは、 $F = 0$ のときには加速度 $a = 0$ を導いて、たしかにニュートンの法則Ⅰの記述する運動状態も重複して含んでいる。しかし、法則Ⅱそれ自身は、それを適用できる条件である慣性系を規定してはいない。だから、今日の力学形式での法則Ⅱは、法則Ⅰのうしろの文の慣性系の規定を欠くことができない。

したがって、ニュートンの定式では、法則ⅠとⅡは独立で必須であるし、今日の力学の定式でも、法則ⅠとⅡは、一部に重なりをもつけれども両方とも必須なのである。山本の言う④と㊦はこのことを見誤っている。なぜ山本さんがそのような文章を書いたのか、わたしは理解できないで困っている。

このように④および㊦の前半の文で述べられた見解が当たらないとすると、ニュートンの運動の三法則と今日の力学の運動の三法則とは、論理構造として基本的に同じだということになる。すると、差異が生じるとすれば、数学的な定式化で起きるだろう。ところが、両者を比較すれば、言葉で提示された三法則を数式化するとき差異の生じる余地があるのは、第Ⅱ法則だけである。

山本が㊦で「ニュートン自身の運動法則は、現在の教科書にあるニュートンの3法則とはかなり異なる」と書く問題点は、㊦よりも前のところで、——ニュートンの法則Ⅱは数式で①のように $\Delta(mv) = F \Delta t$ と表現されるが、それは、今日

の法則Ⅱの運動方程式すなわち微分方程式② $m \mathbf{a} = \mathbf{F}$ ($\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt = d^2\mathbf{r}/dt^2$) とかなり異なる——と具体的に書かれている。言葉を足せば、『プリンキピア』は微小時間 Δt のあいだの運動量の変化 $\Delta(m\mathbf{v})$ は働く力積 $\mathbf{F} \Delta t$ に等しいとするのに対し、今日の力学の定式では力 $\mathbf{F}$ が働くとき質量 m の物体の位置座標は微分方程式 $m d^2\mathbf{r}/dt^2 = \mathbf{F}$ に従って変化する。

山本の主張にはたしかに一理ある。ニュートンがしたように微小変化を幾何学的な図形で表現して論じるのは、今日の微分方程式を解析的に解くものと同じではない。しかし、一般に微分・積分の創始者はニュートンとライプニッツだとされていることを無視してもいけないだろう。微小変化は、極限操作 $\Delta t \rightarrow 0$ によって微分に近づく。ニュートンに微分的な考察がまったく無かったとすることはできない。

たしかに山本の言うように、ニュートンが、重力を受ける物体の運動で、楕円軌道や放物線軌道に加えて双曲線軌道にたどり着いていたか定かではない。それは、微積分の問題を解析的に解くことができるようになって可能になったというのが正しい。つまり、運動の第Ⅱ法則をオイラーのように位置座標についての2階の微分方程式に定式化し、その方程式を解析的に積分して解くことではじめて、初期条件に応じた位置座標が時間的に描く軌道が楕円や双曲線になることを導出することができる。オイラーによるその定式化は、ニュートンの定義Ⅳ「物体に加えられた力」ではあいまいだっ

た「力」の概念を明確にしたのでもある。

しかし、オイラーによって緻密にされた力学は、ニュートンが『プリンキピア』で提起した力学と質的に異なるのではない。だから、今でも教科書に書かれている力学がニュートン力学と呼ばれるのである。運動方程式を2階の微分方程式に表わす力学に対して、18世紀中期に、オイラーに続くダランベール・ラグランジュ・ハミルトンたちによって、異なる定式化が行なわれた（解析力学と呼ばれ、力学入門の教科書には載らない。ハミルトンの一般化した運動方程式は2階の微分方程式ではない）。異なる定式だがその解析力学も、ニュートンやオイラーの力学から離脱したものではなく、ニュートンやオイラーの力学と同等な力学体系を与える。

だから、先に述べたこと、「ニュートンの運動の三法則と今日の力学の運動の三法則とは、論理構造として基本的に同じ」ということは無視してはいけない重要なことである。解析力学もニュートンが提起した運動の三法則が与える枠組みの外に出たのではない。こういうわけで、ニュートンやオイラーの力学と解析力学はまとめて古典力学と呼ばれて、アインシュタインの相対性理論と区別される。

このことを考えれば、力学体系の画期的な法則化・創立（revolution=complete change）は、ニュートンの『プリンキピア』においてなされたと言ってさしつかえない。ニュートンのあとのオイラーと解析力学がなした力学の精緻化と

一般化は、革命的な前進を引き継ぐ大きなうねりととらえることができる。山本が言う⑨は、科学史的な観点からして適切ではないと思う。

つけ加えれば、山本は天体力学での万有引力の発見に主題をしぼりこんで、万有引力の発見がニュートン一人によってなされたのではないことを強調したいのである。その科学史上の前進の過程をよく汲み取ることは重要だと思う。

けれども、万有引力が距離の2乗に反比例するというものを科学的に確立したのがニュートンであることは動かせない。上に見た力学体系の発展史において、ニュートンが運動の3法則を発見したと言うのは重要である。そしてニュートンは、ケプラーの発見した3法則と万有引力が距離の2乗に反比例するという事象を、自身の提出した運動法則に基づいて演繹的に説明した。つまり、「万有引力の法則」は「ケプラーの法則」の理由づけを与え、万有引力はその理由づけを運動の3法則に負っているのである。だから、運動の法則というときの「法則」は、論理の階梯で位置づければ、万有引力の法則と呼ばれるときの「法則」の基礎にあるのだ（力学の事象では、重力のほかに電気力や磁気力などがあることを思い起こそう）。

ここで、科学の進展について、物理学者武谷三男の「三段階論」を思い起こすのがよいだろう。武谷三男は、今考えて

いる天体の運動と力学についての理論の発展を分析し、その三段階論を提唱した。すなわち、物理学（自然科学一般に当てはまると考えることができる）の発展において、現象論的段階・実体論的段階・本質論的段階の三つの階梯を経過する、と考えた。そこでは、コペルニクスとティコ・ブラーエの天文観測は現象論的段階、ケプラーの法則の発見は実体論的段階、ガリレイとニュートンによる運動の法則の発見と運動の実体間の相互作用による説明は本質論的段階、と呼ばれる。物理学の発展を段階的に動的にとらえるこの「三段階論」は傾聴に値する。武谷はさらに量子力学の発展も「三段階論」でとらえ、三段階的発展は螺旋的に進むとし、一つの三段階的発展で本質論的段階に至れば、また次の三段階的発展が続くと考えた。この考え方は、ここで考えている科学史を観るのにも当てはまる、と思う。

「三段階論」で言えば、画期的な発展は本質論的段階に至ったときになされた、と見ることになる。この見方でも、力学と天体の運動学の画期的変革（revolution = complete change）はニュートンによって達成されたのである。

4. 自然科学と認識論の関係

自然科学の発展をとらえる科学史を、さらに人間の知識の拡大の問題として考えてみよう。その場合、山本の言うように密接に関連する文化の進展も考慮することになるだろう。そして、人類の知識の拡大は、人間が向き合っている対象世

界の理解の進展だから、自然についての知識拡大の問題は、自然界についての人間認識の深化にかかわる認識論上の問題とすることができる。じつは、それを考えるのがこの思索の主な目的だった。

この関連でわたしが前から考えていたことは、力学が本質的な段階に至ったとき、哲学の側からそれを最も深く受けとめたのがカントだったということである。カントは、ヨーロッパの東北の辺境で1724年馬具職人の子として生まれたが、援助する人がいて大学まで進むことができた。文化の革命の恩恵を受けた人と言える。カントにとって幸運だったのは、発展しつつあった物理学など科学の授業も受けて、当時の哲学者のうちで科学について最も知識の深い一人となったことである。

認識論を中核とする『純粋理性批判』の初版が出たのは1781年である。先に示した表を見れば、カントがその著作をつくりだしていた10年間はちょうど近代への転換のうねりの高まりの時期だったことが知られる。その時期には、ニュートンが基本的枠組みを与えた力学はさらに精緻・一般化の段階に至っていた。カントは書齋にルソーの肖像画を飾っていたというから、西ヨーロッパで発展していた人文社会学と自然科学一般はもちろんのこと、体系化の進んだ力学についての知識も得ていたにちがいない。

人間の思考は、外界にある対象——自然物とその運動変化

——を認識することで始まる。その認識・思考というものを、それまでの哲学者の誰もしなかったほどカントは深く検討して、その仕組みを学的に整った形に構成して見せた。それがカントの認識論だとわたしは考える。その認識理論の手本となったのは、ガリレイとニュートンによって基本的な枠組みが与えられた力学だった。ニュートンは、力学を哲学の伝統に則って『自然哲学の数学的原理』という著書にまとめていた。カントの時代に力学は伝統的な自然哲学の方法を超えて発展したが、哲学者カントは、力学の対象への接近法と研究方法、体系の論理的な構成と推論のやり方などから、広く認識と思考の問題を哲学史上はじめての形の構成にまとめ上げたのである。この見方は、カントの批判哲学について広く認められていることだろう。

山本も、『純粹理性批判』第2版の序文でガリレイの名が出る一節を、天野貞祐訳の講談社学術文庫から引用している。ここでは、篠田英雄訳の岩波文庫から、山本の引用した一節を含む部分を引用しよう。

次に自然科学について言えば、この学が坦々たる学問の大道を発見するまでは、その進歩は数学に比して遙かに遅々たるものであった。…この発見にますます拍車をかけるようになったのは、つい一世紀半ばかり前のこと…。しかし自然科学における発見も、数学の場合と同じように、考え方の急速な革新によってのみ説明することが

できるのである。なお私はここで、経験的原理を基礎とする自然科学だけを考察の対象にするつもりである。

自然科学者たちの心に一条の光が閃いたのは、ガリレイが一定の重さの球を斜面上で落下させた時であった。… こうして自然科学者たちは次のことを知った、即ち、——理性は自分の計画に従い、自ら産出するところのものしか認識しない、——また理性は一定不変の法則に従う理性判断の諸原理を携えて先導し、自然を強要して自分の問いに答えさせねばならないのである。… 互いに一致する多くの現象が法則と見なされているのは、理性の原理に従ってのみ可能である。また実験は、理性がかかる原理に従って案出したところの物である。理性はこのような原理を一方の手に握り、またこのような実験を他方の手にもって、自然を相手にしなければならない、それはもちろん自然から教えられるためであるが、しかしその場合に理性は、生徒の資格ではなく本式の裁判官の資格を帯びるのである。… 理性は、自然から学ばねばならないことやまた理性自体だけではそれについて何も知り得ないようなことを、自分自身が自然のなかへ入れたところのものに従って、これを自然のうちに求めねばならない、という考えである。十数世紀に互って模索を続けることしかできなかった自然科学は、考え方のかかる革新によってはじめて一個の学としての確実な道を歩むことになったのである。

この文章を読むだけでも、カントが科学史と科学革命についての的確に把握していたことが判る。

上の引用文はまた、『純粹理性批判』が提示する認識論の基本的な考え方を明らかにして、カントが人間の認識の働きをどのように考えたかをよく教えてくれる。わたしの言葉で言えば次のようになる。

認識主体である人間は外界の対象と相対する「構え」において（その構えのなかで対象と相互作用をして）、対象としての自然物とその動きを認識するのである。カントは、認識の働きは螺旋的な段階を経て動的に進むと考える。すなわち、身心としてある人間の精神作用は、大まかに感性・悟性・理性に分節してとらえることができるが、その三つの能力は統合的に働くのである。ごく簡略して言えば、感覚器官が働いて感性が対象を直感的に把握し、直感は判断を行なう悟性によって表象・概念に高められ、理性がさらに概念を論理的に関係づけて観念的な把握に至る。ただし、推論を事とする理性はどこまでも思考を推し進めて理念に至ろうとする。

この見方をさらに具体的な概念で表現して、カントは、直感の「形式である時間と空間」、悟性が事物事象を分節して判断するための「範疇」と、「論理」による判断の関係づけを、鍵となる概念として論述して、認識理論を構造的に組み立てていく……。

カントの認識論で力学が決定的に重要な役割を果たしたことが、時間と空間を哲学史上初めて立論の基礎的概念として位置づけたことに表われている。このことをわたしなりの言葉で書いてみよう。

カントの眼前にあった力学で、時間と空間は物の運動を記述するのに欠かすことのできない物理量である。その概念がどのようにして人間に与えられるかを、カントは、人間に生得的に具わる「感性」という能力によって「直感」にもたらされると規定して、時間と空間を「直感の形式」と表現した。すなわち、人間が外界の対象を認識するのに感覚器官が働いて直感を形成するのだが、人間の感性にはその経験的な働きが発現する前に（先験的に）物を時間・空間において観るという能力が具わっていて、（数学的に表現すれば）直感が把握した物はすでに時間と位置の関数としてある、ということである。認識論は自然科学を基礎づける学と言えるが、今日の生物学が逆に、人間の先験的（生得的）に物を時間・空間において観るという能力は進化の途上で獲得されたと説明して、認識論と生物学は循環的に自己無撞着な理論を構成する、とわたしは考える。

感性によって時間と位置の関数として把握された対象物は、人間精神のもう一つの能力としての「悟性」が「範疇」に分節する働きによって具体性を帯びた「表象」として把握される。さらに、「悟性」の論理的関係づけの働きが対象物

と認識主体の関係や対象物どうし関係を判断し把握して、事物と事象が「概念」として諸関係のなかに位置づけられる。感性から悟性への認識段階で、対象世界は、諸事物・諸事象の概念の体系へと整理して構成される（認識される）ことになる。自然科学の研究は、対象世界を概念体系化する営みとすることができるだろう。

人間の理性は、そういう感性と悟性をも統合する精神的働きとすることができる。その理性つまり思考能力は、悟性にもたらされた諸概念をさらに可能な論理の構成に高めようとする働きである。ところが、理性は、悟性がもっていた感性とのつながりを忘れるほどに可能な論理構成を試みて、概念を組み立てていこうとする。そうして得られた理性概念（理念）は、経験可能な対象世界から超出することもいとわない。カントはそれを「超越」と呼んで超越することを戒める。カントの認識論は、「対象と認識主体が相対する世界」をあたかも外から眺めることができるかのように、しかも「超越」せずに対象世界と認識主体を認識しようとする枠組みを提出するのである。

この認識のあり方をカントは、コペルニクスが地球中心の地動説から宇宙の中に地球を含めた惑星を置いて観る枠組みを提唱したことになぞらえて、「コペルニクスの転回」と呼んだのである。しかし、現在でも認識論の哲学的な「構え」はよく理解されていないのか、自然科学者がしばしば概説書

を著すとき、人間に可能な経験を超越した“理念”で語ろうとしているように見える。

ここでは科学の認識を考えているから、経験科学とは異なる実践生活での理性の働かせ方の問題に立ち入ることはすまい。ただ、カントは、実践理性についても、経験的世界についての科学的認識の内容に入りこんで矛盾することがないように、実践理性の法則をただ形式だけを規定する「法則」にとどめた、ということを忘れてはいけなだろう。

カントは、人間理性が本性的にやむにやまれず追窮して、かろうじて超越せずに踏みとどまっている「理念(理性概念)」を「統整的原理」と呼んだ。「統整的原理」は、真理として証明されてあるわけではないが、過ちに陥らずに世界を整序して観るために人間に要請されているのである。その要請を深く受けとめなければならない、とわたしは思う。

さて、この節でわたしが言いたかったのは、カントの認識論が自然科学と無撞着な理論となるような枠組みを与えているということ、そして、ユークリッドの『幾何学原論』とニュートンの『自然哲学の数学的原理』を模範として構成されているということである。言い換えると、カントは、「科学革命」をよく理解した上で、自然科学を基礎づけることが可能な認識論を提起したのである。カントの認識論は、論理の枠組みがニュートンの『自然哲学の数学的原理』の論理の枠組みと相似になるような形式にまとめられている、とわた

しには見える。

このことを、先に示した“文化の革命”をとらえようとする表を参照して考えてみよう。すると、近世のデカルト以来の哲学的成果を継承して近代への変革期の波頭に立っていたカントが、近世のガリレイが開発した科学的研究法とニュートンの『自然哲学の数学的原理』とが代表する「科学革命」を受けとめて、“哲学の革命”を成し遂げたと言うことができないだろうか。こう言うのは、書斎の壁にモンテーニュの銅像の写真と並べてカントの銅像の写真を貼りつけている者のひいきが過ぎるだろうか。

2025 年 2 月雨水

海蝶 谷川修