

作用反作用の法則の指導に関する基礎的考察：  
ニュートンの初期衝突論の検討を中心として

|       |                                                                                                         |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | 言語: Japanese<br>出版者:<br>公開日: 2012-06-13<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 寺岡, 英男<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="http://hdl.handle.net/10098/6045">http://hdl.handle.net/10098/6045</a>                         |

# 作用反作用の法則の指導に関する基礎的考察

## —ニュートンの初期衝突論の検討を中心として—

寺 岡 英 男

(1980年8月30日受理)

### 1. はじめに

筆者は以前に、動力学の指導体系の確定化をはかる場合、ニュートン三法則をあくまでも指導体系の中心に据え、それら三法則のとりとえの立体的な論理構造を形づくる相互連関の契機をあばき出す作業の必要性を主張した。そして、そのような立場からの慣性の法則と運動の法則の指導プランを提案した。<sup>1)</sup> このプランはそれ自体いくつかの不十分な点を残しており改訂しなければならないが、もう一つの作用反作用の法則の指導についてはまったくの白紙で課題として残されていた。

一方、これまでに作成された力学の自主編成プランをみると、作用反作用の法則の指導は静力学の部分でもっぱら取り扱われ、動力学の部分では本格的には取り扱われてはいないのが現状である。動力学の部分で扱ったプランをみても、慣性の法則と運動の法則をすませたあと、運動量保存則のところと関連させて作用反作用の法則にふれている程度に終始している。

そこで、この小論では、筆者にとって残された課題となっていた作用反作用の法則の指導について、ニュートンの認識過程の一部を検討しながら、ニュートン力学の中での作用反作用の法則の位置について考察してみようと思う。そしてその考察をもとに、この法則の指導プランを構想するための一定の方向性を探ってみようと思う。なお、具体的な指導プランの提示と実験授業による検証の報告は別の機会に試みたい。

### 2. ニュートンの初期衝突論の検討

相互作用についての言及は、すでにケプラーなどにみられるようであるが、<sup>2)</sup> 作用反作用の法則を初めて定式化したのは周知のようにニュートンである。以下では、ニュートンがプリンキピアでこの法則を運動の第3法則として定式化する以前の初期の草稿(*Newton Dynamical Manuscripts*, 1664-1684)<sup>3)</sup>を手がかりに、作用反作用の法則に関してのニュートンの認識の発展過程を検討してみようと思う。

#### (1) バネモデルによる相互作用の考察

ニュートンの初期の草稿は、完全弾性衝突を扱ったデカルトとは異なり、完全非弾性衝突の分析から始まる。そのあとすぐ弾性衝突が扱われているが、初期の弾性衝突の分析の例をみてみよう。  
(the Waste Book, MS.Add. 4004. IIc)<sup>4)</sup>

「定義 5. ある物体が他物体と衝突するとき、反発させられることで、その運動の方向を失なう。物体 a と b とが c 点で出会うとすると、それらの物体自身の中のあるいはそれら物体同士のあいだにある物質の中のあるバネのような運動によって、2つの物体は分けられる。そしてバネがより鈍いかより強く／速いかによって、2つの物体はより大きい小さい力でもって反発させられる。」

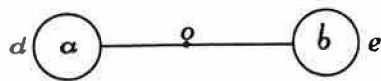


ニュートンはこの定義 5 のあとの定義 9 で「バネ」をそのまま力の定義として採用している。

「定義 9. 力とは、ある物体の他物体への圧力または押しつけることである。」

以上のような通常の弾性衝突の物理的意味の分析やそこから導出された力概念をもとに、同じ Waste Book の IIId<sup>5)</sup>では相互作用についての言及がみられる。

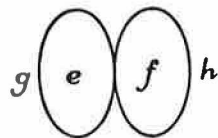
「公理 8. 2つの物体 (a と b) が互いに近づいてきて 0 点で出会うとすると、2つの運動の違いがなくなったり運動の方向を失なうようなことはない。



というも、衝突のさいには2つの物体は互いに他を等しく押し、そのため一方が他方より多くの運動を失なうことはないからである。」

次の公理 9 では、上の公理 8 の物理的根拠を、IIc でみた衝突のバネモデルを駆使しながら次のように分析している。

「公理 9. 2つの等しい重さと速さの物体 (d と c) が衝突したとき、2つの物体は衝突前の接近の速さと衝突後の反発の速さとが相等しくはね返る。そのわけは、球体 e、



f がバネもしくは弾力 [springing or elastic force—筆者] をもつものと第一に仮定してみると、衝突したときにこの2つの物体はグニャッと圧縮されて楕円体となる。そして互いに他に対して運動を及ぼしあう瞬間には、物体の形は最も完全な楕円体となって、互いに他に対する圧力は最大となる。そして元の球体に戻ろうとする力が、球体を壊して楕円体にしたのと同程度に強く勢いのあるものとすれば、物体はお互いに衝突前の接近の速さと同じだけの運動を、はね返ったあとと獲得するだろう…… (後略)。」

バネモデルを武器に、歪みと今日でいう応力(この場合圧力)を、衝突 2 物体の相互作用の同等性とその結果としての運動(量)保存の物理的根拠としてとりあげ、分析してみせているのである。

## (2) 力学的矛盾を媒介にした相互作用の認識の確立

同じWaste Bookの中でもIIe<sup>6)</sup>になると、すでにこのときニュートンの中では確立されていた慣性運動に対する認識と関連させて衝突問題を分析するようになっている。この点、これまでのWaste Book IIc, IIdまでの論述とは質的に異なった分析が展開されている。つまり、これまで衝突現象での歪みをまるごと捉え、そこから直接想定されたバネのモデルによって定義された力であり相互作用であったわけだが、このIIeでは、衝突のさいに生じる物体同士の慣性運動の持続と阻止との対立、拮抗関係において力とか作用が捉えられはじめたのである。

「公理100 . すべての物体は元来、何か外的な原因によって妨害されない限り、今ある状態を持続しようとする。…(中略) 2つの等しい重さの物体 (bcpq と r) がお互いに等しい速さで衝突したとき、2つの物体はそれぞれの状態を持続しようとするのでお互いに等しく妨げあい……」

ニュートンは、この公理100でのべた、物体がその状態を持続しようとするもの、そしてそれを反対に妨げようとする原因を、それぞれ力、作用と定義している。

「公理104 . このように、速さを妨げたり促進したりするのに、諸物体の中であるものはより強く効果的な原因が必要で、あるものはより少ないというのは、どのようにしてまたどんなわけなのかが明らかとなる。そして、この原因である能力はふつう力 [force—筆者] とよばれる。さらに、この原因がその能力ないし力を、物体がその状態を持続しようとするのを妨げたり変化させるのに使ったり向けたりしたとき、その原因を、物体の持続を変化させるために作用する [to Indeavour] とよぼう」

この区別された力と作用との相互の関連性は、次の公理106になるとより明確に説明されている。

「公理106 . 物体 a と b が衝突するとき、a の進行を妨げる原因は、b が自身の速さや状態を持続しなければならない能力であり、通常物体 b の力とよばれる。そして、物体 b がこの力を a の進行を阻止しようとして使ったり向けたりするときには、a の進行を妨げるために作用するというが、それは物体の内的な努力が圧力によって現実のものとなるのであり、そして、同様の理由で、物体 b は、その力を a の進行方向に働かせるとき a の運動を促進するために努めているといえる。そのようなわけで、物体内にある力と作用 [the Force and indeavor] とがいかなるものであるか明らかである。」

この公理104と106とで明らかのように、少なくとも衝突問題に関してこの段階でニュートンが考えていた力とは、外力ではなくむしろ物体がその状態を持続しようとする能力、すなわちのちの慣性力 (vis inertia) の方であった。そして、この能力が他物体の状態を変えようとするとき、この同一の能力がこんどは作用という別の働きを担うと捉えている。ニュートンによる力学的矛盾<sup>7)</sup>の把握の最初の形態といえると思われる。

この段階での、相互作用と運動量保存についての説明は例えば次のようになされている。

「公理121 . 2つの物体 p と r が衝突したとき、2つの物体の抵抗は同じである。それは、p が r を圧するのと同じだけ r が p を圧するからである。それゆえ、2つの物体は両方とも

等しい運動の変化を受けることになる。」

なお、ForceとIndeavourとの区別(力学的矛盾表現の最初の形態)に関連して、Waste Book IIeのあと、「運動についての小論文」(The tract de Motu)の第3版以降、ニュートンは基本的な力として固有力(innate force)と外力(impressed force)との2力を捉えていたことを指摘しておこうと思う。

ニュートンは、「運動についての小論文」<sup>8)</sup>の中でさまざまな力の分析を行ない、innate force, force of motion, exerted force, impressed force, centripetal force, resistanceを定義し<sup>9)</sup>ている。そして、法則としてこのうちinnate forceとimpressed forceをとくにあげている。定義や法則の説明内容からすれば、このinnate forceはWaste Book IIeでのForce, impressed forceはIndeavourにそれぞれ対応しているといえよう。

### (3) 運動の第3法則としての定式化へ

前述の「運動についての小論文」第3版のあとに続くと推定されている草稿(On the Motion of Bodies in uniformly yielding media, MS. Xa)<sup>10)</sup>になると、内容はもうプリンキピアを想起させるものとなってきている。

まず固有力と外力との定義からみてみよう。

「**定義12.** 物体の内的な固有の力は、それでもって物体が静止や等速直線運動の状態を持続する能力であり、それは物体の量に比例し、実際には運動状態の変化に比例して働く……」

「**定義14.** 物体に働く外力は、それでもって物体がその運動状態ないし静止の状態の変化を余儀なくさせられるものである。そのような2, 3の例としては、打撃のさいの衝撃や圧力であったり、連続的な圧力であったり、向心力や媒体の抵抗であったりする。」

このような定義のあと6つの法則が定式化されている。このうち法則1, 2, 3はそれぞれプリンキピアの3つの法則の内容に対応しているが、法則3は次のようにのべられている。

「**法則3.** どのような物体でも、他の物体に作用するのと同じだけ反作用をうける。このため、どのような物でも他を圧したりひばれば、等しく圧せられたりひばられる。…(中略)物体が、他物体に衝突しその力で他物体の運動を変化させたとき、それ自身の運動も(お互いの圧力が等しい理由で)他から同じだけの変化をこうむる。」

実際この法則は、定義12, 14から導き出されるもので、運動状態を持続するために物体が力を働かせるかぎり、他の物体に働いて当初の運動状態を変化させる外力と同一である。そしてはじめの(運動)状態の変化ははじめの力に比例し、次の変化は次の力に比例している。」

### 3. 初期衝突論の検討から得られる作用反作用の法則の指導上の若干の問題

以上のニュートンの初期衝突論の検討をもとに、作用反作用の法則の指導内容を構想するうえでの2, 3の基礎的問題について考えてみようと思う。

第1の問題は、衝突問題の分析から導き出された相互作用の認識を基礎づける、物理的根拠の豊かなイメージとその発展に関してである。

前節でみたように、ニュートンは作用と反作用が互いに等しく逆向きであることを、はじめは物体内（あるいは衝突物体間）のバネの働きを想定することによって意味づけている。<sup>11)</sup> 次のIieの段階では、慣性則の理解を前提に、慣性運動を持続しようとする能力が衝突のさい抵抗（公理、121）として働きそれが2つの衝突物体同士で等しいこと、そして他物体に対してその状態を変えようと働く作用が等しいことによって、相互作用を意味づけている。この場合とくに注目しなければならないのは、IIdまでの段階からの認識の発展は、単に定性的な意味づけから慣性則をふまえた定量的な意味づけへの認識の発展としてあるのみではないということである。相互作用が、物体の運動の内的根拠としての力学の基本的な矛盾の把握に媒介されて捉えられている点こそが、この段階での認識の飛躍の特質としてつかまれねばならないだろう。Iieの論述にみられる衝突2物体の抵抗（慣性力）が同じであること、そして互いの圧力が同じであるという相互作用についての認識は、前節でみたForceとIndeavourとの矛盾と同一性に媒介されてはじめて明確な意味をもつものなのである。

なお、このニュートンの力学的矛盾の捉え方に関連して最近の力学論争にも簡単に言及しておこうと思う。

菅野礼司氏は、力学論争のそもそもの発端者である田中一氏が、加速度運動の内部矛盾を加速性の契機と等速性の契機として捉えていることを批判し、同時に岩崎允胤・宮原将平氏の「慣性と力」としての力学的矛盾の捉え方にも疑問を呈し、あらたに「力と慣性抗力」を力学的矛盾として考えるべきであると主張している。<sup>12)</sup>

菅野氏のいう慣性抗力は、「加速度運動と共にある非慣性系において現われる見掛けの力」という狭義の意味（いわゆる今日の慣性力）ではなく、「物質が普遍的に有する慣性に内在する加速度に逆らう力」として考えられている。この点菅野氏のいう慣性抗力はニュートンの慣性力と同一であり、ニュートンの力学的矛盾の捉え方も菅野氏のものと同一であるといえよう。

第2の問題は、当初ニュートンは力として外力ではなく物体が固有にもつ内在的な慣性力の方を考えていたのに、なにゆえのちには外力(impressed force)に代表させるように変わっていったかという問題である。

これに関しては次のように説明することができると思われる。すなわち、「物体は、それに加えられた他の力が物体の状態を変えようとする場合にだけ、この（固有）力を働かせるにすぎない」<sup>13)</sup> のであり、慣性力はあくまで「潜勢的な」<sup>14)</sup> 力である。力の客観的な定式化をしようとすれば、このような慣性力は適当ではない。そこで、この慣性力が相互作用の過程で顕在化し、他物体に対して「対象化された」<sup>15)</sup> 外力(impressed force)の方で力を定式化したものと思われる。これを可能にしたのも、第1の問題でみたように力学的矛盾と同一性を「力と慣性力」と捉えていたからであることはいうまでもない。

第2の問題と関連して、第3にはニュートンのいう作用の意味内容について問題にしてみようと思う。

プリンキピアで完結化されている第3法則は、ひき続く系VIなどの内容から、力の相互作用ばかりでなく仕事(率)や回転モーメントの問題にもあてはまる広義の法則として解釈されている。そのため例えば板倉聖宣氏は、「力と反力の法則」で十分であるから、作用反作用の法則を前者の意味で用いる旨の見解を出している。<sup>16)</sup>

ところでニュートン自身の捉えていた意味はどうであったのか。ニュートンは本来的な力である慣性力が相互作用の過程で他物体に対しその運動状態を変えるように働く、その働きを作用とよんでいたのである。その働きは一定の時間化を要するから(前節でみた衝突論のはじめの時期は、これを歪みとバネの力というバネモデルで見事に捉えている)、ニュートンのいう作用とは $\int F dt$ すなわち力積を意味するものであったといえよう。

なおこの点で、ニュートン力学とりわけ3つの運動法則の中での力積概念の重要性があらためて明らかとなる。力積という物理量に担われた作用の結果の測度として運動量が位置づき、作用反作用の法則を量的に裏づけるものとして運動量保存則が導き出される。一方、第3法則で示した相互作用の一側面を抽象した第2法則においても、力積が定式化の不可欠の物理量として貫かれている。

最後の問題は、科学教育の中での力学教育の役割に関してである。

この力学教育の役割に関しては、身近なマクロ物体の運動を対象とする力学によって近代科学が成立し、それを基盤に他の諸科学が発展していったことから、できるだけ早期に本格的な力学教育を行なうことの意義が民間教育運動の中で広く主張され、筆者もこの意義についてのべておいた。<sup>17)</sup> この意義についてニュートンの初期の衝突論をもとに改めて考えてみると、相互作用やそれに基づく力の概念の形成過程は、科学的認識の典型的な過程として位置づいてくることが再確認される。科学的認識の過程について岩崎允胤・宮原将平は、レーニンの「並存から因果性へ、<sup>18)</sup>そして連関と相互依存との一つの形式から他のいっそう深い、いっそう普遍的な形式へ」という指摘をふまえて、例えば次のようにのべている。

「認識は、並存と継起などというような必然性以前の認識から、必然性のなかでの低い段階としての量的依存関係(質的に区別された諸現象のあいだの)や、さらに因果性へ、ついでより高い段階としての相互作用へ、さらに高い段階として、矛盾を媒介とする自己運動の総体的な現実性にいたる発展をおこなう」<sup>19)</sup>

このような科学的認識過程の本質を、ニュートンによる力学の体系化の過程は典型的に担っているといえる。したがって、力学の基本的概念・法則の形成をはかる場合、そうした概念の形成過程の重要な環をとりあげ、それを発生的・論理的にたどれるような指導過程が用意されるならば、生徒は一つの典型的な科学の方法を習得することができるだろう。そのためにも、動力学の指導体系の中に作用反作用の法則の指導が正当に位置づけ直されねばならない。

## 〈注〉

- 1) 寺岡英男「ニュートン三法則を中心とした力と運動の指導」北海道大学教育学部紀要, 第25号, 1975年
- 2) マックス・ヤンマー『力の概念』(高橋毅・大槻義彦訳) 講談社 1979年 p.87, p.94
- 3) J.W. Herivel, Background to Newton's Principia, pp. 199~326  
 なおこのNewton Dynamical Manuscriptsのうち、Waste Bookでの衝突論に関して吉仲正和氏の研究があり小論でも参考にした。吉仲正和「初期ニュートンの衝突論」『科学史研究』No. 121 1977年春 pp.56~60
- 4) Ibid., pp. 136~140
- 5) Ibid., pp. 140~152
- 6) Ibid., pp. 152~161
- 7) この公理106にみられるニュートンの力と運動の矛盾の認識の意義について、筆者は前掲1)の論文の中でふれておいた。前掲1)pp.151~152
- 8) J.W. Herivel, Background to Newton's Principia, pp. 257~303
- 9) ニュートンのこの時期の諸力の扱いと最終的にはinherent force とimpressed force とにまとめられていく過程の分析は次の文献が参考になる。  
 R.S. Westfall, Force in Newton's Physics: London, Macdonald, 1971pp. 431~456
- 10) J.W. Herivel, Background to Newton's Principia, pp. 304~315
- 11) 大学の力学教科書のうち、大野陽朗編『新編物理学基礎』では冒頭にいきなりニュートンの第3法則が述べられ、しかもこの作用のメカニズムをバネの歪で説明している点、構成の方法が興味深い。
- 12) 菅野礼司「力学における矛盾概念について」『唯物論』7, 汐文社1977年
- 13) ニュートン『自然哲学の数学的諸原理』世界の名著26, 河辺六男訳中央公論社 1971年 p.60
- 14) 吉仲正和『力学的世界の創造』中公新書 1979年 p.156
- 15) 飯田洋治氏は、このような慣性力と外力との関係について、「K自らの慣性力 $-ma$ を他の物体 $k'$ に  $\langle 力 \rangle -f'$  として対象化することによってのみ自分の力を表現できるのである。こうしてはじめて $f$ の反作用の力 $-f'$ となる。従って、 $-ma = -f'$ の等式が成り立つ」として、リンネルの価値が上着の使用価値で表現されるのと同じ関係と捉えているが、筆者もこの見解を支持する。飯田洋治「力と慣性力の矛盾について」(未発表) 1977年
- 16) 板倉聖宣『物理学入門』国土社 1964年pp.110~112
- 17) 前掲1)
- 18) レーニン『哲学ノート』, 全集第38巻, p.191
- 19) 岩崎允胤・宮原将平『現代自然科学と唯物弁証法』大月書店 1972年 p.278



**謝辞**

この小論の作成にあたり、1977年以降力学教育について検討する場と、貴重な助言をいただいた北海道大学教育方法研究室理科サブグループの、高村泰雄先生、倉賀野志郎氏（現北海道教育大学釧路分校）、若菜博氏（大学院生）に深く感謝したい。