



# 1800年代英国物理教科書における“運動の3法則”の形成

塚本, 浩司

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2009-03-25

(Date of Publication)

2020-05-15

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4623

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004623>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 塚本 浩司  
博士の専攻分野の名称 博士（学術）  
学 位 記 番 号 博い第 4623 号  
学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当  
学位授与の日付 平成 21 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

1800 年代英国物理教科書における“運動の 3 法則”の形成

審 査 委 員

主 査 教 授 三浦 伸夫  
教 授 塚原 東吾  
教 授 加藤 雅之  
教 授 鏑木 誠  
教 授 蛭名 邦禎

論文審査の結果の要旨

氏名	塚本 浩司		
論文題目	1800年代英国物理教科書における“運動の3法則”の形成		
判定	合格・不合格		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	三浦 伸夫
	副査	教授	鏑木 誠
	副査	教授	蛭名 邦禎
	副査	教授	塚原 東吾
	副査	教授	加藤 雅之

要 旨

本審査委員会は、塚本浩司氏の提出した「1800年代英国物理教科書における“運動の3法則”の形成」について審査し、下記の結果を得た。

今日知られている「ニュートン力学」はニュートン自身がそのように定式化したわけではない。ニュートンが自らの力学をどのように形成したかに関しては、すでに多くの研究の蓄積がある。しかし、そのニュートンの力学がいかに「ニュートン力学」として形成され教育に取り入れられるようになったかを主題とした研究は従来ほとんどなかった。本論文は、1800年代の英国を中心にして、「ニュートン力学」とりわけ運動の3法則がどのような議論を中心にして形成されていったかを、当時の英語教科書51点を丹念に調査して歴史的に跡付けたものである。さらに、その成果が今日の物理教育にも有益に活用できることを具体例を用いて示唆しており、単に歴史研究のみならず、現代的課題に答えた独創的な研究である。

議論は、ニュートン『プリンキピア』における力学の論述を紹介した後、1800年代の英国物理教科書を4期に分けて進められる。「大陸流解析学導入以前(～1818)」、「大陸流解析学導入期(1819～1849)」、「力学概念の現代的整理(1850～1866)」

て「現代的力学教科書のルーツ(1867～)」である。

当初、基本方程式はまだ運動法則と結びつけられていかなかったが、ヒューウェルにおいて第2法則が力学の基本方程式と結びつくことになった。その後、サンデマンとランによって今日の運動法則が形成された。トムソンとテイト、そしてマックスウェルは従来衝撃力を意味していた力積概念を通常の力を意味するように拡張し、ここに力積に基づく運動論が完成した。しかし、そのアイデアはその後廃れて今日に至っているという。

以上、1800年代英国において、ニュートンの運動の3法則を重視するという土壌の中で、運動方程式は第2法則と結びつけられるようになり、力積や加速などさまざまな概念が徐々に定義されていく中で今日我々がいうところの「ニュートン力学」が形成されていく。

論文は、この力積概念を復活させれば物理教育に貢献できるであろうということをも具体例を用いて示唆することで終わる。

以上から本論文の学術的意味を指摘すると、次の点になる。

1. この主題に限った科学史研究は従来ほとんどなく、「科学の大衆化」問題の研究の一環として、本論文は運動法則定式化形成の歴史研究において貴重な成果を得た。
2. サンデマンとランの著作は従来研究の対象にもなっていないが、本論文では、運動学を独立に論じ、今日の力学教科書の起源ともなるものとして、始めて歴史的に位置づけられ適切に評価された。
3. 付録「参照した英語物理教科書一覧」は詳細な書誌内容を含み、さらに個々の内容を記載し、今後この分野の研究の基礎資料となるものである。
4. ヒューウェルは科学史上重要人物であるにもかかわらず、その力学に関する歴史研究は従来ほとんどなく、ニュートンの力学を改変したというその貢献が本論文ではじめて明らかにされた。
5. 力積概念を運動法則に復活させることで、今日の物理教育に貢献できることを示唆している。これは、科学史研究から得られた成果を教育現場へ適用するひとつの事例となる。

なお、塚本氏は、本論文に関する研究として、以下の査読付き学術論文2篇を発表している。また学会発表(科学史学会、物理学会、国際物理教育学会)を計4回行い、他にも関係論文・著作(共著)を出版している。

- ・「力学教科書のルーツ『トムソン=テイト』以前」、『物理教育』、第56巻第1号(2008)、pp. 2-9。(単著)
- ・“The Blowgun Demonstration Experiment”, *The Physics Teacher*, Vol. 46(2008), pp. 334-336. (Masanori Uchinoと共著)

本研究は、1800年代英国物理教科書に基づき、そこに見られる運動方程式概念の形成と変遷を明らかにし、新たな知見を得た。こうして科学史はもちろんのこと物理教育史においても学術上価値のある貢献を行ったと認められる。

よって本審査委員会は、塚本浩司氏が博士(学術)の学位を得る資格があるものと認める。

## 論文内容の要旨

氏名 塚本 浩司

専攻 人間文化科学

指導教員氏名 三浦 伸夫

論文題目 1800年代英国物理教科書における“運動の3法則”の形成

### 論文要旨

はじめに 「力学の基本原理解はニュートンが発見し、運動方程式  $ma = F$  を含む3法則としてまとめた」というのが、今日の物理教科書の一般的な記述であり、物理を学んだ人々の常識といってもいい。

ところが、ニュートンがそれらを発表したとされる『自然哲学の数学的諸原理（以下プリンキピア）』（1687）<sup>1</sup>には運動の3法則は記載されていない、運動方程式あるいはそれに近い表現は、どこを探しても見つからない。

それでは、運動方程式を最初に定式化し、力学の基本原理解として発見したのは誰かというところ、これまでの科学史研究が明らかにしているところによると、それはオイラーである。18世紀力学史研究の大家トゥルーズデルが1960年に発表した論文<sup>2</sup>によると、1750年にベルリン・アカデミーに提出され1752年に発刊された、その名も『力学の新原理の発見』（1752）<sup>3</sup>で、オイラーは運動方程式を力学の基本方程式とした。

「〈力学原理としての運動方程式〉の真の発見者はニュートンではなく、オイラーであった」——1960年にトゥルーズデルによってこの事実が明らかにされて以来、科学史家の間では、このことはある程度常識となっている。しかし、このことは物理教育の世界ではほとんど知られていない。

そもそも古典力学は、〈力学原理として運動方程式を発見したらそれで完成〉というような単純な歴史をたどったわけではない。現代の科学史研究の成果によれば、ガリレオに端を発した古典力学は、ニュートンを経てライプニッツ、オイラー、ダランベールなど大陸の多くの科学者たちの100年ほどにわたる研究活動の結果、ラグランジュで一応の完成を見た。

しかし、そのようにして古典力学を完成に導いたオイラーやラグランジュなど1700年代の科学者たちは誰も、力学の基本原理解とニュートン『プリンキピア』を結びつけてはいなかった。今日の物理教科書に記述されている“ニュートン力学”の体系は、オイラーやラグランジュらが記述した力学体系とは大きく異なっていたのである。

<sup>1</sup> Isaac Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Londini, 1687).

<sup>2</sup> C. Truesdell, “A Program toward Rediscovering the Rational Mechanics of the Age of Reason,” *Archive for History of Exact Sciences*, 1, 4-36, 1960.

<sup>3</sup> “Découverte d'un nouveau principe de Mécanique”, *Mémoires de l'Académie des sciences de Berlin*, 6, 185-217, 1750(1752), *Leonhardi Euleri Opera Omnia* (Lausanne), Ser. 2, Vol. 5, pp. 81-108.

我々が今日教科書に見る、いわゆる“ニュートン力学”は1800年代末頃に成立したと考えられる。つまり、ガリレオ以降ラグランジュに至るまでの、科学研究という文脈の約100年に加えて、物理教育・啓蒙という文脈の約100年を経て作り出されたものが、今日我々が学ぶ“ニュートン力学”の体系なのである。

前者の100年に関しては、トゥルーズデルを筆頭とした科学史家たちの研究によって、かなりのところが明らかにされてきている。しかし、後者の100年に関する研究は、筆者の管見によれば見あたらない。前者を学説史的な科学史研究としたら、後者は教育・啓蒙史的な科学史研究と言え。科学者によって発見・形成された科学的真理がどのように同時代あるいは後世の人々に伝えられたかという、教育・啓蒙史的な観点からの科学史研究も前者に劣らず重要なことは当然のことである。

そこで筆者は〈古典力学はどのようにして“ニュートン力学”となってきたのか〉といった問題意識の下に、特に“ニュートン力学”の出発点とされる〈ニュートンの“運動の3法則”〉に着目し、〈これを基本原理解とする物理教科書の形成過程〉を明らかにしようと考えた。この歴史を明らかにすることができれば、今もなお、困難とされている力学教育を見直す大きな根拠ともなるはずである。

本研究ではその目的を達成するために、「〈ニュートンの“運動の法則”〉を力学原理と結びつける力学教科書は、ニュートンを重視する風潮のあった英国に大陸から解析的な力学輸入される過程で形成された」と予想し、1800年代英国ケンブリッジ大学を中心とした力学教科書の変遷を検討することによって明らかにしようとした。

そこで以下のように1800年代の英国物理教科書を以下の4期に分け、その内容を論述した。

**第I期 大陸流解析学導入以前（～1818）** ケンブリッジの1800年代初期の標準教科書とされたウッド『力学の原理』第5版(1812)と、ウーリッチ王立軍事アカデミーで教鞭をとったグレゴリー『力学論』(1815)の2つを選び、その内容を検討した。

両者とも“運動の3法則”を冒頭においており、力学の出発点として重視していた。グレゴリーの“運動の法則”はほぼニュートンに準じていたが、ウッドの場合は、第2法則は〈力と速度変化の関係〉となっていて質量に関する記述が欠落しており、その解釈も、力と運動の合成法則が強調されていた。そして、第3法則は衝突実験を例にして、運動量保存の法則を作用反作用の法則と関連づけて、慣性質量の概念を導いていた。

運動方程式については、両者とも不完全なものであった。ウッドの本は、そもそも幾何学的と比の式で記述され、力学の基本方程式に相当する式も比の形式であり、力の概念も加減力概念を使用していたため、質量の因子を欠いていた。

それに対してグレゴリーの「変化運動の式」は、流率法による微分方程式となっていたが、やはり質量の因子を欠いていた。力学現象にあてはめる解法は、現代の運動方程式による解法とほぼ同じ手法を用いていたものの、この式は〈すべての力学現象の基礎になるもの〉とはされておらず、等速運動には等速運動の、等加速度運動には等加速度運動の形式を使用していた。

これら基本方程式はまた、運動法則と結びつけられてもいなかった。

**第II期 大陸流解析学導入期（1819～1849）** ケンブリッジ大学に生涯勤め、当時の英国の知的活動に大きな影響を与えたウィリアム・ヒューウェルの書いた力学教科書を検討

した。

ヒューウェルは、力学に関する処女作『力学の基礎』(1819)で、運動の第2法則を〈力と運動の合成法則〉とした。これはウッドの第2法則を引き継いだものだった。そして第3法則を〈加速力と物質量の反比例則〉として表現し、〈静力学的な作用・反作用の法則〉は、運動の法則から除外してしまった。

この第3法則でヒューウェルは、pressure という用語を使用しているが、これは〈重力との静力学的なつりあいによって測定される力〉=静力のことである。つまり、ヒューウェルによる第3法則は〈静力学的に測定された力〉=静力と、〈動力学的に測定された力〉=加速力とを物質量を比例定数として結びつけた法則と考えることができる。そしてまた、このように慣性の大きさを定義された物質質量(慣性質量)は、重力で測定された〈物体の重さ〉と一致する。そこでこの第3法則は、静力と加速力の比例定数としての物質質量が物体の重さであることを示す法則、つまり慣性質量と重力質量の一致を述べた法則とみなすこともできる。

その後ヒューウェルは、この第3法則の表現を「静力と起動力の比例法則」として書き換えた。このように起動力(=質量×加速力)を導入することによって、静力と起動力の比例関係というシンプルな形式で第3法則を表現することができるようになった。

ヒューウェルは1828年の論文「フランスの著者たちが述べている動力学の原理について」で、当時のフランスの力学書の著者たち(ポアソンやラプラス)が、この2つ(ヒューウェルによる第2、第3法則)を一つにまとめて「第2法則」としていることが述べられている。ヒューウェルはこの論文で、これらをなぞ別個の法則にしなければならないかを述べ、フランスの著者たちを批判した。その1つはフランスの著者たちが力と運動の合成法則を証明する際に衝撃力の大きさを力積と混同している点であった。そしてもう1つは、第2法則とした〈力と運動の合成法則〉と、第3法則としていた〈静力と起動力の比例法則〉はたがいに独立で、一方を証明したからといってもう一方が証明できる性質のものではないとの主張であった。

1834年頃から、ヒューウェルは理性のみから導き出される“必然的真理”を、理性の外からの働きかけによってえられる“経験的真理”より上と見なし、力学を幾何学と同様でできるだけ必然的真理の体系として構築しようとしてその体系化を試みた。

その中で、第2法則、第3法則が場合分けによって整理され、すべての動力学的な定義も公理から導き出されるような体系化がこころみられた。また、第3法則の中にダランベールの原理も組み込まれた。

また、ヒューウェルは、1834年の著書で、「第2法則の解析的言語への翻訳」として、

$$\frac{d^2x}{dt^2} = X, \frac{d^2y}{dt^2} = Y, \frac{d^2z}{dt^2} = Z$$

を導出し、それを「運動方程式の導出」とした( $X, Y, Z$ は力の $x, y, z$ 座標成分)。この式は加速力の概念を用いていたので、質量の因子がないが、それ以外は今日の運動方程式とほぼ同じであった。ヒューウェルは第2法則を力学の基本方程式と結びつけたのである。

このヒューウェルの力学教科書のスタイル、特に3法則の表現は同時代の英国の力学教科書に大きな影響を与え、多くの教科書がその形式に倣うこととなった。

第III期 力学概念の現代的整理(1850~1866) サンデマン『質点の運動論』は、運動の3法則を

第1法則 慣性の法則

第2法則 力の動力学的効果と静力学的効果の比例法則

第3法則 作用・反作用(力と反力)の法則

として、当時かなり普及していたヒューウェル流の第2、第3法則を第2法則として1つに統合し、第3法則に作用・反作用の法則を復活させた。

ヒューウェルが第2法則を〈力と運動変化の法則〉第3法則を〈比例定数としての質量の導入〉としたのは、両者が互いに独立であって、互いを導き出せないというのがその理由であった。それにたいしてサンデマンは、力と運動変化の比例関係を述べれば必然的に比例定数の存在が明確になり、比例定数の定義も同時に述べるべきだと考えた。

さらに、これまで使用されていた“加速力”という用語を排除し、〈力の加速的効果〉あるいは単に加速度という用語を使用し、第2法則の解説で、静力学的な力 $p$ と加速度 $a$ 、質量 $m$ の関係式

$$p = ma$$

を導出した。

このように、サンデマン『質点の運動論』は、ヒューウェルによって普及した3法則を本来のニュートンの表現に近い形に回帰させ、しかも今日運動方程式とされる関係式を第2法則と結びつけた。

ただ、サンデマンが記述していた関係式 $p = ma$ は、今日の運動方程式のようにすべての力学問題に適用しうる基礎方程式とされてはいなかった。サンデマンは、運動の法則とは別の章で、

$$\frac{d^2x}{dt^2} = X, \frac{d^2y}{dt^2} = Y, \frac{d^2z}{dt^2} = Z$$

を、「質点の自由運動の方程式であり、第2法則の解析的言語への翻訳」とした。これはヒューウェルの「第2法則の解析的言語への翻訳」と全く同じ式であり、質量の因子が抜けている。サンデマンはヒューウェルとは違い、 $X, Y, Z$ を「力の加速的効果」と呼んで力とは厳密に区別し、この式を使い、質点に関する力学問題を解く基本方程式としていた。

このサンデマン『質点の運動論』の多くの特徴を引き継いだのが、ラン『運動論』である。ランは序文でサンデマンの教科書から多くを学び模倣したことを宣言し、さらにサンデマンの教科書を改良した。

ランは、サンデマンの運動の3法則をうけついで上で、加速力を排除し加速度という用語を使用するだけでなく、サンデマンの使用していた「力の静力学的効果、加速的効果」という用語も使用せず、単に「力、加速度」という用語に統一した。そして第2法則と

$$F = ma$$

を結びつけた。しかも、この式から微分方程式をたてて力学問題に適用することもしている。

このラン、サンデマンの教科書にはさらに現代の教科書の原型ともいえるある特徴を備えていた。それは運動学 (Kinematics) の独立である。力と運動を論じる前に、運動の数学的扱いである運動学に一章がもうけられるのは、現代の多くの力学教科書がとる構成である。しかし、サンデマンの教科書が登場する以前の力学教科書でこの形式をとる物はほとんどみられなかった。この〈運動学の力学からの分離〉の必要性は、フランスのアンペールの主張として、ヒューウェルが『帰納的諸科学の哲学』(1840)で紹介していた。サンデマン、ランはこのアンペールの主張を受けて、力概念に言及しない「運動学」を冒頭に分離したのだと思われる。両者とも、本文に運動学 (Kinematics) の用語は記述されていないが、サンデマンの序文には、「運動学的」(Kinematical)、ランの序文には (Kinematics) の語がみられ、運動学独立の必要性とその意図が述べられていた。

第IV期 現代的力学教科書のルーツ (1867～) ラン『運動論』(1859)の8年後に出版されたトムソン&テイト『自然哲学論』(1867)と、マクスウェル『物質と運動』(1876)の2冊を中心に論じ、その後の物理教科書への影響を論じた。トムソン&テイトは、サンデマンやランなどの構成をさらに徹底して推し進めており、運動学 (Kinematics) と題する章が登場し、第一分冊の本文437ページ中204ページが割り当てられている。そして運動の3法則は、ニュートン『プリンキピア』からほぼそのままの形で記載されおり、運動方程式も

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = X, M \frac{d^2y}{dt^2} = Y, M \frac{d^2z}{dt^2} = Z$$

という形で第2法則と結びつけた。

また、マクスウェルは、著書『物質と運動』(1876)で、これまで衝撃力を測定する量とされた impulse を拡張して、通常の力にも適用できる量として再定義した。そして、力積 (impulse) による運動方程式を提唱した。マクスウェルがこのように運動方程式を再定式化したのは、新しく拡張した力積概念の有効性を強く認識していたからだと思われる。このマクスウェルの力積による運動方程式は、1900年代になっても、いくつかの代表的な教科書に継承されたが、現代までにいつのまにか忘れ去られてしまっている。この要因として推測されるのは、impulse という用語がもともと衝撃をイメージする用語だったこともあったからかもしれない。

結論 上記の事実から、〈第2法則を力学の基本方程式と等価な法則とした〉功績を与えるわけにはいかない。結局のところ、〈運動方程式を基本方程式とし、それを第2法則と結びつけた教科書〉は、1800年代英国の〈ニュートンの運動の3法則重視〉という土壌での、ヒューウェルからマクスウェルまでの一連の継承の結果、力の概念、数式的表現、法則の整理などいくつかの課題が解決されていく中で形成されたというほかはない。

本研究が明らかにした、「古典力学がニュートン『プリンキピア』以降、200年近くもの間、多くの研究的・教育的な概念の拡張と修正を積み重ねてはじめて今日の形をとるようになった」という事実、そして、「現代の〈第2法則と  $F = ma$  を原理とする力学教育の体系〉は決して絶対的なものではなく、たまたま現代にこの形式が継承された」とも言える歴史的事実は、現代における力学の教育研究にもまだまだ創造的な研究の余地が充分残されているということを示すものといえるだろう。