T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	「決定実験」と「実験による証明」アイザック・ニュートンが用いた二つの概念の比較
Title(English)	A Comparison of Newton ’ s Use of Experimentum crucis and “ Proof by Experiments ”
著者(和文)	多久和理実
Authors(English)	Yoshimi Takuwa
出典(和文)	技術文化論叢, , No. 21, pp. 1-20
Citation(English)	TITech Studies in Science, Technology and Culture, , No. 21, pp. 1-20
発行日 / Pub. date	2018, 4

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

論文　　『技術文化論叢』第 21 号(2018 年): 1-20 頁

「決定実験」と「実験による証明」
アイザック・ニュートンが用いた二つの概念の比較

A Comparison of Newton's Use of *Experimentum crucis* and "Proof by Experiments"

多久和 理実　Yoshimi TAKUWA

はじめに

本稿の目的は，「決定実験」[1]概念の歴史を見直し，それによってアイザック・ニュートンが用いた「実験による証明」概念との違いを明らかにすることである．

「決定実験」概念（しばしば英語で crucial experiment と書かれる概念）は，競合する理論の真偽を判定することができる実験のことだと解釈されている．例えば，20 世紀にデュエム，ポパー，ラカトシュら科学哲学者たちが現実の科学において「決定実験」が存在するかどうかを問うた際にも，「決定実験」は理論の疑いのない証明あるいは反証であると解釈された[2]．このような後世の解釈に対して，本稿は，17 世紀に王立協会の会員たちが「決定実験（*experimentum crucis*）」という用語を使い始めた際には，必ずしもそのような決定力を持った概念ではなかったことを指摘する．以下で明らかにするように，当時は，学説に分かれ道があることを示して議論のきっかけを与える実験にすぎなかった．そして，ニュートンが 1672 年の論文で自身の「決定実験」を導入した際にも，それまでの「決定実験」の用例に従った使い方をしていた．これは，多くの先行研究がニュートンの「決定実験」を証明のような決定力を持つ実験と解釈しているのとは異なる主張である[3]．

先行研究が「決定実験」を証明のような決定力を持つ実験だと解釈していたために，ニュートンの実験観についての研究は大きく混乱した．ニュートンは，自身の光学理論は実験によって証明されると考えており，実験によって証明した理論は数学と同様の確実性を持つと主張していた[4]．そのため多くのニュートン研究者たちは，数学的な確実性を求めるニュートンの実験観の代表例が「決定実験」だと考えてしまった．その結果，

---

[1] 本稿では慣例に従い，ラテン語の *experimentum crucis* に「決定実験」という訳語を当てる．ただし，より役に立つ訳語として「分かれ道の実験」を 19 頁で提案する．

[2] デュエムは，「決定実験」を一方の仮説を支持し他方の仮説を却下する実験的証明だと述べ，補助仮説の存在を排除できない故にそのような実験は存在しないと主張した．ポパーはデュエムに反論し，「決定実験」は実証実験に限らず，決定的な反証実験ならば存在すると主張した．ラカトシュはポパーに反論し，実証であれ反証であれ，「決定実験」は後知恵によってしか存在しないと主張した．このような科学哲学者たちの論争により，「決定実験」概念は 17 世紀の用例を踏まえないまま現代において有名になってしまっている．Pierre Duhem, *La théorie physique: son objet, sa structure*, 2e édition (Paris: Marcel Rivière, 1914), 286. Karl Popper, *The Logic of Scientific Discovery* (London: Hutchinson, 1959), 78. Imre Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes: Philosophical Papers,* vol. 1 (Cambridge: Cambridge University Press, 1978), 111.

[3] 例えば，ニュートン研究の大家であるウェストフォールは「言葉の完全な意味における決定的な実験などありえないことは明らかである．だが当時問題となっていた二つの選択肢だけを考慮するなら，ニュートンの「決定実験」は彼の理論の競争相手である変容説を反駁したように思える」と主張した．Richard Westfall, *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton* (Cambridge: Cambridge University Press, 1980), 214.

[4] 理論の確実性についてのニュートンの主張は，第 3 節および第 5 節で詳しく扱う．

ニュートンの「決定実験」は新しい光学理論を証明すると同時に当時支配的だった「変容説」[5]を反証した，という歴史記述がスタンダードになってしまった[6].

筆者は過去に発表した論文において，ニュートンの「決定実験」の設定では変容説を反証できないことを明らかにし，ニュートンがその後 30 年間にわたって同じ形の実験を何度も改良していたことを示した[7]．この成果は，「決定実験」が理論の証明としては不十分だったことを示す証拠となっている．本稿ではさらに進めて，『光学講義』(1670 年頃)，『光学』(1704 年) のような数学的に構成した著作では，ニュートンが命題を証明するための実験を「実験による証明（proof by experiments）」と呼んでいたことを指摘する．ニュートンは同じ形のプリズム実験を，王立協会に向けて手紙を書く際には「決定実験」と呼び，自身の数学的な著作の中では「実験による証明」と呼ぶ，という名称の使い分けをしていた．ここから，「実験による証明」こそ，確実性を持って理論を証明するというニュートンの実験観を代表する概念であることを主張する．

「決定実験」概念の歴史を見直すために，本稿では，まず第 1 節でニュートンの「決定実験」および実験観についての先行研究を概観する．そして，第 2 節ではニュートンが 1672 年の論文で「決定実験」をどうのように導入したのかを見て，第 3 節ではニュートンの「決定実験」を理論の証明と見なすことの問題点を述べる．第 4 節では「決定実験」の用例の系譜を概観し，ベイコン，ボイル，フック，ニュートン以降の順序で「決定実験」の用例をたどる．そして第 5 節では，ニュートンが「決定実験」概念と「実験による証明」概念を使い分けていたことを示す.

1. 先行研究

ニュートンの実験観と王立協会の実験哲学との間の関係性を説明することは，17 世紀を対象とする先行研究において長らく課題となってきた[8]．古いタイプの関係性の説明は，ニュートンを王立協会の方法を継承し発展させた人物として描くものである[9].

---

[5] 17 世紀には変容説つまり，純粋な光が本来持つ色は白色であり，それに何らかの変容（modification）が加わることによって色彩が生じるという考え方が支配的だった．ニュートンの新理論では色彩は光線が持つ固有の性質であったのに対して，変容説では色彩は外部の要因によって何度も変えることができると考えられていた.

[6] ニュートンの「決定実験」が変容説を反証した，つまり，光線の色は屈折を被っても不変であることを示した，という見解は，例えば以下の先行研究に見られる：Westfall, *op. cit.* (1980), 214. A. I. Sabra, *Theories of Light from Descartes to Newton* (Cambridge: Cambridge University Press, 1981; first published in 1967), 241. Steven Shapin, *The Scientific Revolution* (Chicago: University of Chicago Press, 1996), 113. Peter Dear, *Revolutionizing the Sciences: European Knowledge and its Ambitions, 1500–1700,* 2nd edition (Princeton: Princeton University Press, 2009), 144. Olivier Darrigol, “The Analogy between Light and Sound in the History of Optics from the Ancient Greeks to Isaac Newton. Part 2,” *Centaurus* 52 (2010): 232.

[7] Yoshimi Takuwa, “The Historical Transformation of Newton’s *experimentum crucis*: Pursuit of the Demonstration of Color Immutability,” *Historia Scientiarum* 23 (2013): 113–140.

[8] シェイピンとシャッファーは，初期の王立協会で共有されていた規則を「ボイルの実験プログラム」と名付け，近代科学の活動や方法をめぐる哲学を特徴づけるものと見なした．その一方で，「ボイルの推奨したプログラムとニュートンの「数学的な方法」との関係はまだ十分に研究されていない」と課題を述べた．Steven Shapin & Simon Schaffer, *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life* (Princeton: Princeton University Press, 1985), 341. 彼らはこの課題を解決すべく，後にそれぞれの著作でボイルの方法とニュートンの方法の比較を試みている.

[9] 例えばポプキンは，「ボイル，フック，ニュートンが発展させた経験的な科学の方法は，

一方で新しいタイプの説明は，ニュートンを王立協会の方法と対立した人物として描写するもので，ニュートンと王立協会の間で交わされた書簡の分析が進むにつれて勢力を増してきた[10]．後者の説明において，ニュートンの方法とは自然についての知識に「数学と同様の確実性（certainty）」を求めるもので，自然についての知識には「蓋然性（probability）」[11]しかあり得ないとする王立協会の方法と対立しロバート・ボイルやロバート・フックをはじめとする会員たちから非難されたという[12]．ボイルら王立協会の主導的な会員たちは蓋然論者（probabilist）であり，自然についての知識に確実性を求めようとする人々を独断論者（dogmatist）と呼んで非難した．独断論者として学会から排除された有名な例は 1660 年代のトマス・ホッブズであり，ニュートンも独断論の再来として警戒された[13]．シェイピンらの先行研究で，ニュートンの独断論，つまり実験によって証明した理論に数学と同様の確実性を求めるというやり方の代表例として挙げられるのが，ニュートンの「決定実験」だった[14]．

ところが「決定実験」概念についての研究が進むと，従来の説明に大きな問題が生じるようになった．「決定実験」という用語は，フランシス・ベイコンが提唱した「道標の事例（*instantiae crucis*）」という概念に由来している[15]．そして，この概念を拡張して「決定実験」という用語を造語したのは他ならぬボイルであり，ボイルに倣ってこの用語を広めたのはフックであったという経緯が知られるようになった[16]．すると，これま

真実を突き止めたと主張せずとも世界について偉大で有用な発見ができることを人々に示した」と述べた．またファン・ルーエンは，ニュートンの「経験に基づく科学の方法」について既に初期の王立協会で発展されていたものだと見なし，確実性の解釈はウィルキンス，グランヴィル，ボイルに類似していると述べた．Richard H. Popkin, *The History of Scepticism from Savonarola to Bayle*, revised and expanded edition (Oxford: Oxford University Press, 2003), 208–218. Henry G. van Leeuwen, *The Problem of Certainty in English Thought 1630–1690* (The Hague: Martinus Nijhoff, 1963), 106–120.

[10] こちらの解釈の代表的な例は，ニュートンの独断論を論敵に対する戦略と見なしたサブラである．Sabra, *op. cit.* (1981), 273–297. さらにシェイピンは，ニュートンの独断論を 17 世紀の知的伝統の中に位置づけることを放棄し，「科学革命」など存在しなかったという主張の根拠の一つにした．Shapin, *op. cit.* (1996), 109–118.

[11] 蓋然性という言葉は，17 世紀半ばには「確実に真とは言えないが証拠によってかなり支持されている」という意味で使われていた．Shapin, *op. cit.* (1996), 101–102.

[12] ボイルら主導的な会員たちは，自然についての知識に数学的な確実性を求めることに対して度々警告を与えていた．例えばボイル曰く「自然学的な探究においては，我々が下す決定が例え数学的な厳密性を有していなくとも，事実に極めて近づいているというだけで大抵十分なのです」など．Robert Boyle, *Hydrostatical Paradoxes, Made Out by New Experiments* (Oxford, 1666), “The Preface” (page not numbered).

[13] 王立協会の会員たちと独断論者たちの対立は，以下を参照：Shapin & Schaffer, *op. cit.* (1985).

[14] ニュートンの独断論の代表例として「決定実験」を挙げている先行研究は，Sabra, *op. cit.* (1980). Simon Schaffer, “Glass Works: Newton’s Prisms and the Uses of Experiment,” *The Uses of Experiment: Studies in the Natural Science*, edited by David Gooding, Trevor Pinch, and Simon Schaffer (Cambridge: Cambridge University Press, 1989), 67–104. Shapin, *op. cit.* (1996). など．

[15] ベイコンが提唱した *instantiae crucis* には，「決定的事例」あるいは「道標の事例」という訳語が当てられることが多い．後世の「決定実験」概念と区別するために，本稿では一般的な訳語として「道標の事例」を採用する．ハッキングは独自に「分かれ道の事例」という訳語を提案しているが，それについては本稿の最後に改めて解説する．

[16] *The Oxford English Dictionary* (*OED*) の前身である分冊版 C 項が印刷された時点で，既に「ボイルとニュートンが *experimentum crucis* というフレーズを用いた」ことは記録されてい

で数学的な確実性を求めるニュートン側の概念として扱ってきた「決定実験」を，蓋然性を重んじる王立協会側の概念として見直す必要が出てきた．現時点で，この見直しは上手くいっていない．研究者たちは依然として，「決定実験」という刺激的な用語と美しい実験をニュートンの実験観を語る上での代表例にしており，用語の由来には目をつぶったまま旧来の説明パターンが繰り返されている[17].

2. ニュートンの「決定実験」

ニュートンは 1672 年の王立協会宛の手紙「光と色についての新理論」において，「決定実験」と呼ばれる二つのプリズムを用いる実験を提案した．この手紙は王立協会の会報である『トランザクションズ』誌に掲載され，ニュートンのデビュー論文となった．論文の冒頭では，ニュートンが新しい光学理論を考案するきっかけになった実験について語られる：

> 1666年の初め（その時，球状でないレンズを磨くのに熱中していたのですが），私は三角形のガラスのプリズムを入手し，それを使って有名な色彩の現象を試してみました．そのために私の部屋を暗くし，適量の太陽光を取り入れるのに板戸に小さな孔をあけ，その入口にプリズムをおいて光を反対側の壁に屈折させました．それによって作られる鮮やかで強烈な色を眺めるのは，初めは非常によい気晴らしでした．しかし少し経って，より慎重にそれを考えてみると，私はそれが細長い形をしているのに気付いて驚きました．それは，受け入れられている屈折の法則に従うならば，円形になるはずだと予想していました[18].

ニュートンは，このスペクトルが細長くなるという効果が，ガラスの厚みや「影や闇の境界」[19]によるものであるとは考えにくかったと述べる．そして，厚みの異なるプリズムを使ったり，光が孔を通るまえにプリズムを通してみたり，二つのプリズムを互いに逆向きに組み合わせて光を通してみたり，という様々な実験を行った．そして，最終的に彼がたどり着いたのが「決定実験」だと述べる：

た．*A New English Dictionary on Historical Principles*, founded mainly on the materials collected by the Philological Society, edited by James A. H. Murray et al. (Oxford: Clarendon Press, 1887–1923), 10 vols., vol. 2, 1214．以下，*NED* と略記する．しかし，ボイルについては出典が明らかにされなかったため，ニュートン研究者の間ではそれ以後も「フックがベイコンの概念を覚え間違えて造語した」という誤解が広まった．例えば，*The Correspondence of Isaac Newton*, edited by H. W. Trunbull, J. F. Scott, A. Rupert Hall, and Laura Tilling (Cambridge: Cambridge University Press, 1959–77), 7 vols., vol. 1, 104．以下，*Correspondence* と略記する．

[17] ニュートンの実験観の代表として「決定実験」を大きく取り上げている例は，Robert P. Crease, *The Prism and the Pendulum: The Ten Most Beautiful Experiments in Science* (New York: Random House, 2003). BBC, “The Beauty of Diagrams: Newton’s Prism,” broadcast on BBC Four, 2 December 2010.［日本ではDVD発売：BBC制作，髙木隆司監訳「美しき図表の世界：ニュートンのプリズム」丸善出版，2010年．］など．

[18] *Correspondence*, vol. 1, 92. Isaac Newton, “A Letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; containing his New Theory about Light and Colors: sent by the Author to the Publisher from Cambridge, Febr. 6. 1671/72; in order to be communicated to the Royal Society,” *Phil. Trans.* 6 (1672): 3075–3076.

[19] 「影や闇の境界（termination with shadow or darkness）」は，デカルトの変容説に特有の表現「影と光の境界（les confins de l’ombre et de la lumière）」のことを指している．

> これらの疑念を徐々に取り除いていくなかで，ついに私は次のような「決定実験（*experimentum crucis*）」へと導かれていきました．
>
> 私は二つの板を用意し，一方の板を窓際に置いたプリズムのすぐ後ろに配置しました．板には小さな孔を開けておき，光線がそこを通過して，12フィート離れたところにおいたもう一方の板に当るようにしました．この板にもあらかじめ小さな孔を開けておき，入射光の一部が通過できるようにしておきました．次に，二番目の板の後ろにもうひとつのプリズムを置き，二枚の板を通過してきた光がこのプリズムを通過して屈折したのち，壁に当たるようにしました．そうしておいて，私は第一のプリズムを手にとって，その軸の回りでゆっくりと行ったり来たりさせて，第二の板に投射された像の様々な部分が，第二の板に開けられた孔を通過し，第二のプリズムで屈折されて，壁のどの位置に投射されるのかを観察しました．
>
> そうして私は，壁に投射される像の位置の変化によって，第一のプリズムの屈折によって作られた像において像の端に行くような傾向の光は，第二のプリズムにおいて，他方の端に行く傾向がある光と比較してかなり大きく屈折されることを理解しました．よって，像の長さの真の原因は「光は屈折性の異なる光線から成る」ということに他ならないと分かりました．つまり，入射角の違いを考慮せずとも，それぞれの屈折性の度合いに従って，光は壁の異なる部分に投射されていたのです[20]．

このように，「決定実験」にたどり着く前の試行錯誤からその結果にいたるまで，冗長な経緯の説明が続いている．これは，無駄のない数学の証明というよりも，読者の心のうちに実験の場面をイメージさせて仮想目撃者にするというボイルの文章技法に似ていると見ることができる[21]．ただ，ニュートンの説明は実験の再現を容易にするほど詳細ではなかった．ボイルの文章技法との最も大きな違いは，ニュートンが論文で「決定実験」の実験図を与えなかったことである．先行研究では図 1 や図 2 のような実験図が「決定実験」の図として引用される場合があるが，これらは後に出版された『光学』(1704 年；1722 年）から取られたものなので，注意が必要である[22]．

文面を素直に読むと，この「決定実験」は「光は屈折性の異なる光線から成る」という結論を導くだけで，色に関しては何も言っていないことがわかる．よって，先行研究のように「決定実験」が「色彩の変容説」を反証と主張するには無理がある[23]．論文「光と色についての新理論」の中での，「決定実験」の役割は何だったのだろうか．それは，上記の「決定実験」の説明の直後に書かれている：

> これを理解したとき，私は前述のガラス磨きの仕事をやめました．というのもこの性質があるせいで，望遠鏡の性能には限度があるとわかったからです．限界があるというのは，（全ての人々が従来考えてきたような）光学の著者たちの指示に従っ

---

[20] *Correspondence*, vol. 1, 94–95. Newton, *op. cit.* (1672), 3078–3079. 鉤括弧は筆者が追加.

[21] ボイルの用いた 3 つの技法については，以下を参照：Steven Shapin, “Pump and Circumstance: Robert Boyle’s Literary Technology,” *Social Studies of Science* 14 (1984): 481–520.

[22] 図 1 は『光学』の Fig. 18 であり，対応するのは第 1 篇第 1 部命題 2 を証明するための第 1 篇第 1 部実験 6．図 2 は『光学』仏訳第 2 版の章頭飾りにするためにニュートンが描いたスケッチであり，対応するのは第 1 篇第 2 部命題 2 を証明するための第 1 篇第 2 部実験 5. MS 361 (New College, Oxford), f. 45v. いずれの実験も，『光学』の中では「決定実験」とは呼ばれていない．Isaac Newton, *Opticks: or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light* (London, 1704), 30–32, 88–89.

[23] 脚注 6 参照.

> た真の形のガラスを求めるというのではなく，光それ自体が異なる屈折性をもつ光線という，多くの成分からなる混合物だからなのです[24].

つまり，「決定実験」は屈折式望遠鏡の限界を主張し，反射式望遠鏡を提案するための導入という役割を担わされていた．そのためには，屈折式望遠鏡に限界を与える「光の異なる屈折性」つまり光の欠陥だけを述べれば十分なのであった．

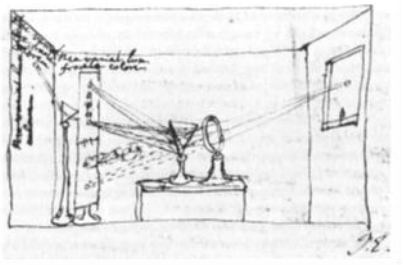

図 1.
二つのプリズムを用いる実験

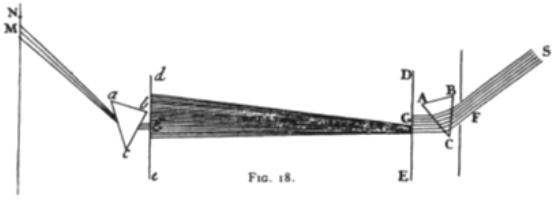

図 2.
二つのプリズムを用いる実験(レンズ追加)

3. ニュートンの「決定実験」を理論の証明と見なすことの問題点

反射式望遠鏡を提案するための導入にすぎなかった「決定実験」を，シェイピンらの先行研究はなぜニュートンの独断論の代表例として挙げたのだろうか. ニュートンの独断論を説明する際に，彼らはしばしば論文「光と色についての新理論」から次の一節を引用する：

> 自然学者は［色についての］学問の数学化をほとんど期待していないでしょうが，そこには光学のほかの全ての部分にあるのと同様の確実性があると私は断言します．なぜなら，それらについて私がこれから述べますことは仮説ではなく，大変厳密な結果であり，他のものではないからとか，すべての現象を説明できるからそうなのだ，などという単なる推論による憶測なのではなく，直接，何の疑いも挟む余地のないような仕方で，実験という手段によって示されたものであるのです．これらの実験についての経緯の説明（historical narration）は記述を退屈で不分明なものにするでしょう．よって私はまず理論を述べ，その後で多くの実験からほんの一，二の事例を確認のために添えることにしましょう[25].

伝統的に自然学に属するとされていた「色についての学問」に対して，数学に属している光学と同様の確実性を要求する，というニュートンの主張には，彼の独断論者としての態度がよく表れていると言える．そのため，冗長な経緯の説明を省くために添えられた一，二の実験のうちの一つが「決定実験」だと解釈すれば，確実性を持って理論を証明する実験の例として「決定実験」を挙げるのはもっともな流れかもしれない．

けれども筆者は，「決定実験」と上記の独断論は性質が異なるものであることを二つの根拠から主張したい．第一の根拠は，論文の構成である．「決定実験」が登場するのは論文の冒頭であり，反射式望遠鏡の提案の導入になっている．そして，反射式望遠鏡について述べた後には，「光は異なる屈折性の光線から成る」という主張を繰り返して論文の前半部が終わる．論文の後半部は「次に，色の起源が明らかにされるような，光

---

[24] *Correspondence*, vol. 1, 95. Newton, *op. cit.* (1672), 3079.
[25] *Correspondence*, vol. 1, 96–97.

線の別の重要な欠陥について説明しましょう」[26]という一文で始まる．つまり，色について書かれているのは後半部だけなのである．上記の独断的な一節が書かれているのは，後半部の二文目以降であり，その後に，光と色についての 13 箇条の理論が列挙される．まとめると，論文の前半部と後半部は，形式（経緯の説明か，数学的か）の面でも，内容（屈折性か，色か）の面でも，性質が異なる[27]．そのため，前半部に登場する「決定実験」が，後半部に登場する 13 箇条の理論の確認のために添えられた一，二の実験のうちの一つだという解釈は成り立たない．

第二の根拠は，王立協会側の校閲である．上記の独断的な一節は論文「光と色についての新理論」からの引用と言われることが多い．しかし，それは不正確である．正確には，ニュートンの手紙からの引用であり，先の一節は『トランザクションズ』誌に載った論文には印刷されなかった．印刷されなかったのは，次のような経緯のためである．1672 年 2 月 6 日付のニュートンの手紙は，早くも 2 月 8 日の王立協会の会合で読み上げられ，翌週 2 月 15 日の会合ではロバート・フックが検討結果を報告した．この，「考察」と呼ばれるフックの報告は非常に手厳しいものであった．フックはニュートンの理論は仮説にすぎないと主張し，「それが唯一の仮説だとは思えないし，数学の証明のように確実であるとも思えない」と批判した[28]．フックは，蓋然性を重んじる王立協会の規則に背いた独断論者として，ニュートンを非難したのだ．その結果，2 月 19 日付の『トランザクションズ』誌に論文を掲載する際に，事務総長ヘンリー・オルデンバーグが不適切だと思われる文章を削除してしまったのである．この削除された部分については，公刊されている書簡集に詳しく記載されている[29]．後半部は独断的な一節が大胆に削除されてしまった一方で，前半部は「決定実験」を含めてほとんど改変されなかった．ここから，「決定実験」という言葉や用法に関しては，王立協会の規則に合っていると判断されたのだと考えられる．

以上の二つの根拠から，手紙「光と色についての新理論」の前半部と後半部は，形式の面でも内容の面でも性質が異なっていたと筆者は主張する．前半部は王立協会の流儀に合い，後半部は流儀に合わないために拒絶されたのだった．よって，ニュートン「決定実験」を数学の証明のような決定力をもつ実験と解釈するのは不適切である．

4. 「決定実験」概念の系譜

ここで一度，ニュートンが 1672 年の論文を書く以前にどのような「決定実験」の用例があったのかを見ておこう．実は，ニュートン以前の「決定実験」の用例はボイルとフックのものしか知られていない (表 1.)．よってニュートンは，この二人の用例から「決定実験」概念を知り，どのように使えばいいのかを学んだということになる[30]．

1672 年にニュートンが自身の「決定実験」を導入して以降は，この実験に対する賛否の手紙が王立協会に寄せられたこともあり，ニュートンの「決定実験」のことを固有名

---

[26] *Correspondence*, vol. 1, 96. Newton, *op. cit.* (1672), 3081.

[27] 論文の前半部と後半部で形式が違うことに関しては，ピーター・ディアも指摘している．ただし，ディアは前半部を根拠に「ベイコンの方法を王立協会が理解しニュートンが洗練させた」という主張を組み立てている．Dear, *op. cit.* (2009), 143.

[28] *Correspondence*, vol. 1, 113.

[29] *Correspondence*, vol. 1, 105. 削除された部分は，次のように改変されて印刷された．「これ［色の起源］に関して，まず理論を先に述べ，その後でそれをテストするために一，二の実験を残りの見本として与えることにします」．Newton, *op. cit.* (1672), 3081.

[30] ニュートンは論文中でフックの『ミクログラフィア』に言及しているため，執筆時にはフックの用例を知っていたはずである．*Correspondence*, vol. 1, 99. Newton, *op. cit.* (1672), 3084.

詞のように指す用例が多くなった．その期間にも，フックやホイヘンスの著作にはそれぞれ独自の実験を「決定実験」と呼んだ用例が存在する．17 世紀の用例に共通するのは，それ以前の用例を真似しながら徐々に広まっていたという点である．1704 年になると「決定実験」は辞典に載るようになり，きちんと定義されるようになった．

表 1. 17 世紀の *experimentum crucis* 用例

年代	著者	著作	内容	ベイコン由来を明記
1620	F. ベイコン	**『ノヴム・オルガヌム』**	*instantiae crucis* 定義	
1662	R. ボイル	**『空気のバネと重さに関する弁論』**	水銀柱	○
1665	R. フック	**『ミクログラフィア』**	ガラス板干渉	○
1672	I. ニュートン	**「光と色についての新理論」**	2 つのプリズム	×
この後，ニュートンのプリズム実験を指す用例が約 20 件				
1674	R. フック	**『地球の運動を証明する試み』**	年周視差	×
1694	C. ホイヘンス	5 月 29 日付ライプニッツへの手紙	氷州石	○
1704	J. ハリス	**『学芸事典』**	*experimentum crucis* 定義	×

ゴシック体は当時出版されたもの

4. 1. フランシス・ベイコン

この節では，フランシス・ベイコンが「決定実験」の元になった概念をどのように提唱したのかを見ていく．ベイコンが「道標の事例」について書いたのは，『ノヴム・オルガヌム』（1620 年）の第二巻である．ベイコンは「破壊の部門」と呼ばれる第一巻で人間の精神を取り巻く 4 つのイドラを摘発し，「建設の部門」と呼ばれる第二巻で新しい帰納法を提示した．「道標の事例」は，新しい帰納法の補助手段として紹介された 27 個の特権的事例のうちの第 14 番目であった：

> 特権的事例の一つとして，第 14 に「道標の事例（*instantiae crucis*）」をあげよう．この語は，分かれ道に立てられて，それぞれの道の行く先を指示し表示する十字（*crux*）から転用したものであって，これを私は「決定的事例」とも「裁決的事例」とも呼び，また，ある場合には，「神託的事例」とも「命令的事例」とも呼ぶことにしている．その理由は次の通りである．すなわち，ある本性の探究に際して，それと一緒にいくつもの本性が生起することが度重なって，通例のようになっているので，二つの，時にはもっと多くの本性のうちいずれに，探究されている本性の原因を帰属させるべきかについて，知性が決定しかね，ためらう場合に，「道標の事例」は（探究されている本性に関する限り）これらの本性のうちの一つとの交わりは信用のおける断ち切りがたいものであるが，もう一つとの交わりは変わりやすく引き離されるあることを明示し，こうして問題は解決され，前者の本性は原因として受け入れられ，後者の本性は捨てられ退けられるのである．したがって，この種の事例は，非常に明るい光を投ずる，いわば大きな権威をおびたものであって，解明の過程は，ときとして（*quandoque*）この事例において集結し，この事例によって完成される[31]．

ベイコンはこの後，「道標の事例」の具体例として，潮の干満，日周運動，重さ，磁石と接触した鉄釘の極性，月の実体，投射体の運動，焔の膨張，焔の消滅といった八つの

[31] Francis Bacon, *Francisci de Verulamio, summi Angliae cancellarii, Instauratio magna. Multi pertransibunt et augebitur scientia* (London, 1620), 258–259.

本性の探求について，競合する理論の対立構造（潮の干満についてならば，海水の前進後退説と上昇下降説）がわかるように列挙した．そして，具体例を紹介した後に，以下のように述べて，この第 14 番目の特権的事例についての説明を締めくくった：

> 私がこの事例についてかなり長々と取り扱ったのは，人々が蓋然的な推理によってではなく，「道標の事例」と光をもたらす実験とによって自然について判断することを，少しずつ学び知って，それに習熟するようにさせたいと思うからである[32].

「決定実験」という用語は，ベイコンの「道標の事例」と，それを導く「光をもたらす実験」という二つの言葉が後の時代に融合されて誕生したのだと考えられている[33].「道標の事例」は，確かに他の特権的事例と比べて比較的丁寧に説明されているとは言え，この事例だけが 27 の事例の中で特に重要視されているわけではない．実際，ベイコンが第二巻の最後に全ての特権的事例を列挙した際にも，他の事例と同列であり，全ての事例が複合的に新しい帰納法の助けになるとされた[34]. ベイコンによって導入された「道標の事例」を見る限り，その概念を引き継いでいる「決定実験」は証明のような決定力を持つ概念だとは思われない.

科学哲学者イアン・ハッキングも同じことを指摘しており，「解釈の過程はときとしてそこで終わり，完成される」という表現に注目して，「道標の事例」は「ときとして」決定的なだけにすぎず, 直ちに競合する理論を却下するものではないと解釈している[35]. 一方の道を進んだとしても，他方の道は即座に却下されて消えるわけではなく，ハッキングの言葉で言えば「足跡をたどって引き返す」[36]ことも可能な概念なのである.

4.2. ロバート・ボイル

この節では, ベイコンの「道標の事例」の概念を引き継いで, ボイルがどのように「決定実験」という用語を導入したのかを見ていく．ボイルが「決定実験」という用語を最初に使ったのは,『空気のバネと重さに関する学説の弁論』(1662 年）という本の第 5 章「山の頂上でのトリチェリの実験とその他の試行において起こったことについての (現在の論争に関する）考察」の冒頭だった．この章でボイルは，トリチェリの水銀柱の上部に現れる空間の解釈についてフランシス・リヌスに反論した．この論争において競合していたのは，ボイルの主張する空気の重さ説（空気の重さによって水銀は上方に押される，空間の変化は圧力による）と，リヌスの主張する真空嫌悪説（真空を嫌うために水銀は上方に引かれる，限界があるため空間が生じる）であった：

> しかしながら, その効果が圧力に由来しようと引力に由来しようと (一般に言えば,

---

[32] *Ibid.*, 273.

[33] 例えばローンは,「決定実験」という用語が「道標の事例」と「光をもたらす実験」の混同によって誕生したと指摘をしている．ただし，この混同を行ったのはフックであると誤解している．J. A. Lohne , “ Experimentum crucis,” *Notes Rec. Roy. Soc.* 23 (1968): 179.

[34] ベイコンは「道標の事例」の役割を,「離別の事例」とともに「誤った形相や原因を受け入れぬように守ることによって知性を助ける」とまとめている．Bacon, *op. cit.* (1620), 357–360.

[35] ハッキングは，ラカトシュら科学哲学者たちがベイコンを誤解していると指摘する．Ian Hacking, *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science* (Cambridge: Cambridge University Press, 1983), 249–250.

[36] *Ibid.*, 251.

> 実際には後者は前者に還元できるように見えるけれども），もしもそのような効果が，圧力が原因であり引力が原因ではない場合に，従うべき理由がある実験を見つけたならば，我々は満足することができるでしょう．そして，そのような「決定実験（*experimentum crucis*）」（我らが著名なヴェルラム卿の言葉）は，パスカル氏の見事な観察によって我々にもたらされました[37].

ベイコン（領地ヴェルラミウムからヴェルラム卿と呼ばれた）は「決定実験」という用語を使わなかったにもかかわらず，ボイルはこのようにベイコンの言葉として広めた．ここでボイルが「決定実験」として言及しているパスカルの観察というのは，1647 年に行われた，トリチェリの水銀柱をピュイ・ド・ドーム火山の山頂に運び上げるという実験だった．パスカルの実験によると，麓から約 3000 フィートの高さの山頂では水銀の高さが 2 と 1/4 インチだけ下がったという．水銀柱を運び上げた高度と，水銀の高さの相関を述べた後，ボイルは次のようにまとめた：

> よってこの注目すべき現象は, 明らかに我々の仮説に従い, 敵対者の仮説に従わず, この実験は両者の間の論争を判定するように見えます．なぜならこの場合，実験者は（他の実験でしているように）管中の水銀の下降が引き起こされるのは，外の気圧の現象によるのではなく，（容器中の）外の空気の超自然的な希薄化や膨張のせいだと装うことができないからです[38].

このように，ボイルにとっては「論争を判定する」ように見えたパスカルの実験であったが，リヌスにとってはそうでなかった．既にリヌスはパスカルの実験の追試を別の低い山で行っており，麓と山頂で水銀の高さに違いを見出さなかった．ボイルが「決定実験」という用語を最初に使ったのは, 彼にとって論争を判定するように思われる実験が, 論敵にとっては説得力を持たないという状況を読者に訴えるためであった．

ボイルは続けて，イングランドの山々でパスカルの実験の追試が行われたこと，自身も「器用な人物」[39]の助けを得てウェストミンスター寺院で追試を行ったこと，などを記録した．しかし，多くの追試報告や目撃者が存在するにも関わらず，ボイルは決して自分の仮説が確実なものだとは述べなかった. ボイルは個々の追試で水銀の高さが下がる程度にばらつきがあったことを認め, 個々の場所や時間における空気の密度やその他偶然によるのだろうと補助仮説を追加することで自身の仮説を守った．

ボイルの用例からわかる「決定実験」の特徴をまとめると，第一に，進行中の論争において分かれ道になり得る実験を当事者が提案している．第二に，必ずしもこの実験において論争は決着せず，補助仮説が追加されたり，補強のための別の実験が紹介されたりしている．よって，「決定実験」は冗長な経緯の説明が続く実験報告の導入のような役割を担っていたと言える．

---

[37] Robert Boyle, *A Defence of the Doctrine touching the Spring and Weight of the Air, proposed by Mr. Robert Boyle, in his new Physico-Mechanical Experiments; against the objections of Franciscus Linus* (London, 1662), 48.

[38] *Ibid.*, 49.

[39] *Ibid.*, 52. 「器用な人物（ingenious man）」とはフックのことを指していると解釈されている．*The Works of Robert Boyle*, edited by Michael Hunter and Edward B. Davis (London: Pickering and Chatto, 1999–2000), 14 vols., vol. 3, 52.

4.3. ロバート・フック

歴史上二番目に「決定実験」という用語を使った人物として知られているのは，ボイルの助手を務めていたフックである．フックは『ミクログラフィア』（1664 年）の観察 9 の冒頭において，薄くはがした白雲母に色の筋が現れる現象（現在では薄膜干渉として知られている）を観察した．フックは続いて，2 枚のガラス板を押し付けるという実験を考案し，白雲母と同様の色を見出した．さらには，薄く伸ばした透明液体や薄く吹いたガラス，薄い透明な泡などにおいて同様の色を作り出した．フックは 2 枚のガラス板の実験について，次のように述べた：

> しかしながら，あらゆる種類の色が透明物体の中でつくられるということは何よりも大変注目すべきことです．デカルトは，彼のいわゆる小球が屈折によって極性を得ると考えていますが，この場合にはそのような屈折はまったく生じません．というのは，平滑な板の場合には（デカルトの『気象学』第 8 章第 5 節の原理によると）二度目の屈折は，彼の仮定した回転小球を調整して，それ以前の一様な運動に戻してしまうことになるのが明らかだからです．
>
> この実験はそれゆえ，我らの偉大なヴェルラム卿が「決定実験（*experimentum crucis*）」と呼んでいるものの一つであり，私たちが色の真の原因を研究するための方針を決める上でのひとつのガイド，道標として役に立ちます[40]．

このように，フックは 2 枚のガラス板の実験を「決定実験」の一例だと主張した．「我らの偉大なヴェルラム卿」という表現は，ボイルの「我らの著名なヴェルラム卿」という表現に似通っている．フックは前節で扱ったボイルとリヌスの論争に助手として携わっていたため，その際にボイルの「決定実験」の用例について学んだのだと考えられる．フックは自ら導入した「決定実験」について次のように説明を加えた：

> ［この実験は］次のようなほかならぬ否定の情報を我々に与えます．色の生成にはプリズムに見られるような大きな屈折も必要でないし，プリズムとガラス球の両方に見られるような「光と影の境界」[41]も必要としません．同様に我々は今，それがどんな肯定的で積極的な指示をもたらすのか知りたいので，もう少し詳細かつ厳密にそれを調査する必要があります．よりよく行うには，光と屈折の本性に関して一般的な何らかを仮定することが必要となります[42]．

フックはこのように，ガラス板の「決定実験」がデカルトの光学理論を否定する情報を与えると言いつつも，具体的にどのような学説を肯定するのかは断定しなかった．「決定実験」は，この時点でデカルトの光学理論以外の道が存在していることを示すだけで，分かれ道の先がどうなっているのかについては明かさなかった．

フックはこの後，ダイヤモンドの発光についての機械論的な考察から「光は媒質の脈動である」という仮説を展開した．光の脈動の強弱の順番によって様々な色彩現象を説明することを試み，最後に白雲母に戻ってきて色の筋がどのように生じるのかを説明した．フックはこの仮説が確実なものだとは述べなかった．フックは仮説を検証するため

---

[40] Robert Hooke, *Micrographia: or, Some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses* (London, 1665), 54.

[41] 「光と影の境界（determination of light and shadow）」は，デカルトの変容説に特有の表現「影と光の境界」のことを指している．脚注 19 参照．

[42] Hooke, *op. cit.* (1665), 54.

には，色を生じるのに必要な板の厚さの最大値や最小値を求めることが必要だと認めた．しかし，「これらの色づいた板はあまりにも薄く，また私の顕微鏡はあまりにも不十分なため，これまでのところ成功していません」と述べ，今後の研究に期待しながら観察 9 を終えた[43]．

フックの用例からわかる「決定実験」の特徴をまとめると，第一に，既存の学説に反論を試みる際に方針を決めるガイドを論争の当事者が提案している．第二に，この実験だけでは分かれ道の一方について否定的な情報を与えただけであり，もう一方の道に何があるのか知るための新たな仮定や実験の導入が議論の中心になっている．よって，「決定実験」は一連の議論の導入のような役割を担っていたと言える．既に論争になっているのか，これから論争を始めるのか，という違いはあるものの，章の冒頭で議論を始めるきっかけとして「決定実験」を利用している点はボイルの用例と共通している[44]．

4.4. ニュートン以後の「決定実験」用例

改めて第 2 節のニュートンの「光と色についての新理論」を振り返ると，ニュートンはボイルやフックの用法に忠実に「決定実験」概念を利用していたことがわかる．彼らの用法には，「決定実験」を手紙（ボイルやフックの場合には著作のある節）の冒頭で導入し，続いて冗長な経緯の説明を伴いながら本題の内容を展開する，という共通点が存在する．「決定実験」は分かれ道の存在を知らせて議論のきっかけにするものであるから，ニュートンが手紙の後半部で言及した（そして手紙では具体的には内容を明かさなかった）「数学的な確実性を持って」理論を証明する実験とは性質が異なるものであった．

ニュートン以降の時代の用例についても簡単に見ておこう．ニュートンの「決定実験」の追試をめぐって大きな論争が起こったこともあり，1672 年以降はニュートンのプリズム実験のことを固有名詞のように指す用例が多くなった[45]．その中でもフックとホイヘンスは独自の実験を「決定実験」と呼んでいるのでその用例を紹介しよう．

フックは『ミクログラフィア』を出版してから 9 年後に，『地球の運動を証明する試み』（1674 年）という著作の冒頭で再び「決定実験」という概念を利用した．ここでフックが「決定実験」と呼んだのは，ティコ・ブラーエやリッチョーリが試みた年周視差の観測であった．年周視差の観測は，ティコ体系とコペルニクス体系の分かれ道となると考えられていたが，彼らは視差を見つけることはできなかった．フックは「観察はより高い精度を必要とするので，この［ティコらの］「決定実験」は力を持ちません」[46]と

---

[43] *Ibid.*, 47–67. 観察 9 の考察の続きにおいて，フックは「道標の事例（*instancia crucis*）」という用語も使っている．この言葉は，ベイコンの *instantiae crucis* を単数形（*instantia crucis*）にして英語風に綴ったものだと考えられる．透明な球表面において斜めの波動によって生じる色を計算した際に，フックの仮説では色の生成を説明できるがデカルトの理論では色が生じないことになる．

[44] フックの「決定実験」はベイコンの用例やボイルの用例とは異なり，競合する理論の対立構造がはっきりしていないという点はドミトルも指摘している．Claudia Dumitru, “Crucial instances and crucial experiments in Bacon, Boyle, and Hooke,” *Society and Politics* 7 (2013): 45–61. ただし，脚注 43 で挙げた「道標の事例」では対立構造になっているので，あまりこの違いを強調する必要はないと考える．

[45] 表 1 で省いた，プリズム実験のことを固有名詞のように指す「決定実験」の用例の一覧表は，筆者の修士論文を参照．多久和理実「18 世紀イタリアにおけるニュートン光学理論の受容」東京工業大学，2010 年，20–21 頁．

[46] Robert Hooke, *An Attempt to Prove the Motion of the Earth from Observations* (London, 1674), 4.

述べ，より高い観測精度を実現するために工夫を凝らした天頂儀を導入した[47]．このように，フックの二度目の「決定実験」の用例も，分かれ道の存在を知らせて議論のきっかけにするものだった．

クリスティアーン・ホイヘンスは 1694 年 5 月 29 日付のライプニッツ宛の手紙の中で，「決定実験」という概念を利用した．ホイヘンスは王立協会の会員たちとの文通の中でこの概念のことを知ったようである[48]．ホイヘンスが独自に「決定実験」と呼んだのは，氷州石による複屈折であった．ホイヘンスは，複屈折を光の粒子説と波動説の分かれ道となる事例だと考えた．ホイヘンスは，ニュートンの光の粒子説では互いに進路を妨げないように希薄で分離している必要があるので，レーマーが計算したような光速を説明できないと考えた．さらに続けて，「彼ら［ニュートンやその支持者たち］の仮説は屈折の法則，特に氷州石の屈折を説明できず，私にとってヴェルラム卿が呼ぶ「決定実験」として役に立ちます」[49]と述べた．ホイヘンスはこの後，複屈折を説明する仮説を具体的に紹介することはなかった．ホイヘンスの用例は，否定の情報を与えて話題を提供したに過ぎなかった．

18 世紀に入ると，この時代の研究でしばしば参照される『学芸事典』(1704 年) に「決定実験」という用語が掲載された．これによって「決定実験」概念は，それ以前の用例を真似しながら徐々に広まっていく段階を脱し，次のようにきちんと定義が与えられるようになった：

> 「決定実験（*experimentum crucis*）」とは，異なる道が交わるところに立てられて，旅人を正しい進路へ指示する十字（cross）のような実験で，人々を指示し導いて，彼らが問うている事物の本性の正しい知識へと向かわせるものである[50]．

この項目ではベイコンの名前こそ言及されなかったものの，ベイコンが提唱した「道標の事例」によく似た説明文が与えられている．一方，「色」の項目ではニュートンの「決定実験」が「異なる屈折性」を示す実験として紹介され，「トリチェリの実験」の項目ではボイルの「決定実験」が水銀上昇の原因の判定方法として紹介された．既に論争が決着しつつある実験例が紹介されたことによって決定力が強調される側面はあったものの，辞典で定義されたのはボイルの用例に忠実な「決定実験」であり，ニュートンが目指していた「数学と同様の確実性」をもって理論を証明する実験とは異なるものであった．18 世紀に出版された他の辞典でも，同じ説明文が引き継がれた．

5. ニュートンの「実験による証明」

「決定実験」がボイルの方法に則った概念だとするなら，これはニュートンの独断論を表すものだとは言えない．では，ニュートンの独断論が表れている概念は何なのだろうか．それは，ニュートンが数学的に構成した著作の中で実験をどのように扱っている

---

[47] フックは自身の装置によって年周視差を観測したと主張したが，学界では認められなかった．詳しくは以下を参照：中島秀人『ロバート・フック』朝倉書店，1997 年，209–212 頁．

[48] 例えば，1672 年 7 月 1 日付の手紙でニュートンの「決定実験」について王立協会に質問を書き送っている．*Oeuvres complètes de Christiaan Huygens*, edited by D. Bierens de Haan, Johannes Bosscha jr., D. J. Korteweg, A. A. Nijland, and J. A. Vollgraff (The Hague: Martinus Nijhoff, 1888–1950), 22 vols., vol. 7, 185.

[49] *Ibid.*, vol. 10, 613.

[50] John Harris, *Lexicon technicum; or, an Universal English Dictionary of Arts and Sciences* (London, 1704), “experimentum crucis” (page not numbered).

のかを見ればわかる．

ニュートンの独断論が最もよく表れている著作は，『光学講義』である．これは彼が 1670 年頃にケンブリッジ大学のルーカス講座で行った光学についての講義録であり，死後 1729 年になってから出版された[51]．『光学講義』は第 1 部「光線の屈折について」と第 2 部「色の起源について」の二部構成になっている．第 1 部は講座の前任者であるアイザック・バローに倣った伝統的な幾何光学の境界線の内側での議論であり，第 2 部からニュートン独自の挑戦が始まる．第 2 部の初回である第 1 講のまとめを見てみよう：

> ところで，何も数学的学問に関係ないと言われているような色の本性についての考察に私が着手する間に，私が職務の境界線を越えたと見なされないために，もしも私が再びこの企ての理由について注意を促すならば，それは無駄ではないでしょう．屈折の特性と色の特性の間の密接な関係は，確かにあまりに大きいので，別々に説明することができません．一方の特性について正しく知ることを望む人は，他方を知らねばなりません[52]．

このようにニュートンは幾何学，天文学，地理学，光学，静力学のような数学的科目を教えるべきルーカス講座において色について扱うことを弁解していた．というのも，光の反射や屈折を扱う光学は，伝統的に数学 (幾何学) に属する量的な学問だとされており，一方で，色は伝統的に自然学に属する質的な学問だとされているからである．ところが，ニュートンは屈折性と色がどちらも光に固有の性質だと気付いてしまった．そのため，数学の講義の中で屈折性と共に色についても扱うというのだ：

> 色の生成はあまりに多くの幾何学を含んでおり，色についての知識は多くの証拠によって立証されているので，ほかならぬ色自身のせいで，このように数学的学問の境界線を少なからず拡大することに私が着手することが可能なのです．なぜならばちょうど，天文学，地理学，航海術，光学，機械学が，それらの中で，自然学の事物について，天や地や船舶，光，そして位置の変化について扱うとしても，数学的知識だと見なされているように．このように，例え色が自然学に属しているとしても，数学的な推論によって扱われる範囲では，色についての知識は数学的であると見なされるべきです[53]．

ニュートンはこのように，自然学に属していた色を幾何学の中に取り込むことによって，数学の境界線を拡大することを試みた．そして，質的に扱われてきた色を量的に扱うために導入したのが実験であった．そのため，第 2 部第 1 節のタイトルとして「色についての学説をプリズムの実験によって証明する」[54]ことを宣言している．このように，数学的な推論に準ずる確実性をもつものとして扱われている実験のことを，本稿では「実

---

[51] 講義録は MS Add. 4002 と MS Dd. 9.67 という二種類の手稿が存在する．前者が全 18 講なのに対して，後者は増補改訂されて二部構成の全 31 講になっている．ニュートンの死の翌年に，MS Dd. 9.67 の第 1 部だけが英訳されて出版された．MS Dd. 9.67 全体が出版されたのは死から二年後であった．Isaac Newton, *Lectiones opticae, annis 1669, 1670, et 1671 in scholis publicis habitae; et nunc primum ex MSS. in lucem editae* (London, 1729).

[52] Newton, *op. cit.* (1729), 152.

[53] *Ibid.*, 152–153.

[54] *Ibid.*, 145.

験による証明」と呼ぶことにする[55].「実験による証明」は『光学講義』の中でも第 2 部第 1 節だけに見られる形式であり, 伝統的な幾何光学の境界線の内側で議論を進める第 1 部や,「様々な色の現象」を列挙する第 2 部第 2 節には登場しない.

「実験による証明」という形式は，後に出版された『光学』(1704 年) の第 1 篇にも登場する.『光学』の第 1 篇は数学的に構成されており，次のような一文から始まる：

> 本篇での私の意図は，光の諸性質を仮説によって説明するのではなくて，推論と実験によって提案し，証明することである[56].

ニュートンはこのように数学に倣った形式で構成することを宣言し，最初に「従来光学で研究されてきたものの要点」[57]を定義および公理とその解説という形で述べた．そして，第 1 篇第 1 部では屈折性についての 8 つの命題を，第 1 篇第 2 部では色についての 11 の命題を導入した. それぞれの命題の後には,「実験による証明(proof by experiments)」という見出しが付いた実験リストが与えられ，命題を証明した.「実験による証明」は『光学』の中でも特に数学的に構成されている第 1 篇第 1 部および第 2 部だけに見られる形式である．ニュートン環についての観測を列挙する第 2 篇や，回折現象についての観測を列挙する第 3 篇には見られない[58].

『光学講義』および『光学』に登場する「実験による証明」には次のような特徴がある．まず，証明すべき命題の直後に配置されているということである．これは，否定の情報を与えるだけに留まったり実験結果の支持する内容が不明確だったりした「決定実験」とは大きく異なる特徴である．ニュートンは，まず理論を命題として与えて,「実験による証明」を続けた．また「実験による証明」は目的の命題を証明するのに特化した実験であるので，自然状態からかけ離れた人工的な設定であることが多い．ベイコンの実験が「自然の秘密を白状させるために拷問する」[59]ものであるとすれば，ニュートンの「実験による証明」は，どのように拷問すれば目的の命題について白状するのかを調べ尽した上で, 最も効果的に白状するものを経緯や失敗事例の説明を省いて簡潔に紹介したものと言えよう[60].

「実験による証明」と「決定実験」の概念の違いをより具体的に理解するために,「決定実験」と呼ばれた二つのプリズムを用いる実験と同じ形の実験が「実験による証明」として扱われた場合にどう記述されているか見てみよう. 二つのプリズムを用いる実験

---

[55] 『光学講義』および「光学の基礎」には,「実験による証明」という名詞ではなく,「実験によって証明される」というフレーズが登場する．*Ibid.*, 152. MS Add. 3970 (Cambridge University Library), f. 409r.

[56] Newton, *op. cit.* (1704), 1.

[57] *Ibid.*, 12.

[58] 正確には，第 2 篇と第 3 篇には観測の列挙ではない部分も存在する．第 2 篇第 3 部は天然物の永久色についての 20 の命題を含む．しかし，これらの命題は論証されるだけで実験が与えられていない．また，第 3 篇の後半では 31 問の「疑問」が (初版では 16 問) 列挙される．これらは問題提起だけで論証されておらず，証明となる実験も存在しない.

[59] Bacon, *op. cit.* (1620), 118.

[60] 経緯や失敗事例を省いた簡潔な説明しか載っていないため，同時代の学者たちがニュートンの「実験による証明」を追試するのは困難だった．追試の困難を解決するために，王立協会の公開実験において実験主任ディザギュリエがどのような工夫や情報を補ったのかについては，筆者の研究ノートを参照されたい．多久和理実「ニュートン・プログラムはどのように受容可能になったのか」『技術文化論叢』16 号，2013 年，1–20 頁.

は，手稿を含むニュートンの著作物のうち 16 点に登場する（表 2）．最初の 1 点は「色について」という題の学生時代の実験ノートであるが，この時点では 64 種類の実験が列挙されるだけで実験の結論や役割はまだ明確になっていなかった．うち 11 点は，王立協会に送ることを念頭に置いて書かれた手紙とその草稿であり，「決定実験」という名称を用いていた[61]．残り 4 点は，数学的に構成した『光学講義』『光学』およびその草稿であり，「実験による証明」という役割が明記されていた．名称の違いから，ニュートンは，王立協会に向けて手紙を書く場合には「決定実験」と呼び，自分の著作の中で数学的に扱う場合には「実験による証明」として扱う，という使い分けをしていたことがわかる．

表 2. ニュートンの著作に登場する 2 つのプリズムを用いる実験

年代	著作	名称	内容	形式
c. 1666	MS Add. 3976「色について」	実験 44 実験 45	異なる屈折性 色の不変性	
c. 1669	MS Add. 4002「光学講義」草稿 1	第 3 講命題 2	異なる屈折性	実験による証明
c. 1670	MS Dd.9.67「光学講義」草稿 2	第 2 部第 2 講命題 1 第 2 部第 3 講命題 2*	異なる屈折性 色の不変性*	実験による証明
1672	**2 月 6 日付ニュートンの手紙 「光と色についての新理論」**	*experimentum crucis*	異なる屈折性	
	4 月 13 日付ニュートンの手紙 パルディのへの回答	*experimentum crucis*	異なる屈折性	
	6 月 10 日付ニュートンの手紙 パルディへの回答	*experimentum crucis*	異なる屈折性	
	6 月 11 日付ニュートンの手紙 フック「考察」への回答	*experimentum crucis*	異なる屈折性	
1675	**11 月 13 日付ニュートンの手紙 リヌスへの回答**	*experimentum crucis*	異なる屈折性	
1676	**2 月 29 日付ニュートンの手紙 リヌスへの回答**	*experimentum crucis*	異なる屈折性	
	8 月 18 日付ニュートンの手紙 ルーカスへの回答	*experimentum crucis*	異なる屈折性	
	11 月 28 日付ニュートンの手紙 ルーカスへの回答	*experimentum crucis*	異なる屈折性	
1678	3 月 5 日付ニュートンの手紙 1	*experimentum crucis*	異なる屈折性	
	3 月 5 日付ニュートンの手紙 2	*experimentum crucis*	異なる屈折性	
c. 1690	MS Add. 3970「光学の基礎」	実験 6 397r 実験 25** 420r	異なる屈折性 色の不変性**	実験による証明
1704	**『光学』**	第 1 篇第 1 部実験 6 第 1 篇第 2 部実験 5**	異なる屈折性 色の不変性**	実験による証明
c.1722	MS Add. 3970 手紙草稿	*experimentum crucis*		

* 2 つのプリズムを用いる実験のヴァリエーション（第一のプリズムの後方にレンズを追加）
** 2 つのプリズムを用いる実験のヴァリエーション（第一のプリズムの手前にレンズを追加）
ゴシック体は当時出版されたもの

『光学講義』および『光学』において「実験による証明」として扱われる場合を詳しく見てみよう．「異なる屈折性」についての命題と「色の不変性」についての命題に対して，それぞれよく似た二つのプリズムを用いる実験が証明として割り振られている（図 3 から図 6）[62]．実験配置をよく見てみると，「色の不変性」の証明として扱われて

[61] ただし 1677 年 9 月に王立協会の事務総長オルデンバーグが亡くなったため，1678 年の手紙は論争相手であるアンソニー・ルーカスに直接送られている．
[62] 『光学講義』においては，第 2 部命題 1「異なる色は異なる屈折性の光線に対応する」と第 2 部命題 2「光線の形相あるいは色を生じる傾向は，屈折によって変わらない」が，それ

いる実験には，二つのプリズムに加えてレンズが追加されている．これは，第一のプリズムと板の小孔だけでは光線の色を十分に分離できないため，第二のプリズムで屈折させた際に隣色が混入して色が変わってしまうという問題に対処したためである．二つのプリズムを用いる実験は，「第一のプリズムで大きく／小さく屈折した光線は第二のプリズムでも再び大きく／小さく屈折される」という結果から「異なる屈折性」の証明としては十分であっても，第二のプリズムで隣色が混入してしまうために「色の不変性」の証明として不十分だったのだ[63]．そのため，ニュートンはレンズを用いて光線の幅を絞ることによって色の分離精度を上げて「色の不変性」の証明を実現した．結果として，『光学講義』の中でよく似た形の二種類の実験がそれぞれ異なる命題の証明として登場することになった．さら『光学講義』の草稿が書かれてから『光学』が書かれるまでの 30 年余りの期間に，レンズの位置を第一のプリズム後方から前方に移動するという改良も行われた（図 4 と図 6 を比較）[64]．ニュートンの「実験による証明」概念とは，このように目的とする命題の証明に最適化された実験であり，最適化することによって数学のような確実性を可能な限り追求していた．

「実験による証明」と「決定実験」の概念の違いをまとめる．第 2 節で見たように，二つのプリズムを用いる実験が「決定実験」と呼ばれていた時には，それまでの「決定実験」概念の用例に従って分かれ道の存在を知らせるだけで，対応する理論は断定されなかった．そのため，この実験が「色の変容」と「色の不変性」の分かれ道であると誤解した学者たちが追試を試みた際に，隣色が混入するという実験結果が大きな論争を巻き起こしてしまった[65]．一方，ニュートンが数学的に構成した『光学講義』および『光学』の中で「色の不変性」の「実験による証明」として紹介したのは，二つのプリズムを用いる実験にレンズを追加して色の分離精度を上げたものだった．目的とする命題の証明になり得る精度まで改良された「実験による証明」こそ，数学のような確実性を求めていたニュートンの実験観を代表する概念であると言える．

ぞれ「異なる屈折性」と「色の不変性」に当たる．『光学』においては，第 1 篇第 1 部命題 2「太陽光は屈折性の異なる光線からなる」と第 1 篇第 2 部命題 2「全ての均質光は，その屈折性の度合いに応じた固有の色を持っている．その色は反射と屈折によって変化させることはできない」が，それぞれ「異なる屈折性」と「色の不変性」に当たる．それぞれの命題には証明として複数の実験が配分されているが，本稿では「決定実験」概念との比較を目的としているため，二つのプリズムを用いる実験だけを取り上げる．また，『光学』の本文には「色の不変性」を証明するための実験図が含まれていない．しかし『光学』仏訳第 2 版では，図 2 で引用したスケッチを基にした第 1 篇第 2 部実験 5 の実験図（図 6）が章頭飾りとして導入された．章頭飾りの右上には「屈折された光は色を変えない（*Nec variat lux fracta colorem*）」というモットーが書き込まれている．Isaac Newton, *Traité d'optique*, 2e édition, traduit par Pierre Coste (Paris, 1722), 1.

[63] 『光学講義』の第 2 部命題 2 において，レンズなしの場合に実験が完璧ではないことをニュートンは認めている．例えば，隣色が混入するために，黄が赤と緑を生じ，緑が黄と青を生じ，青が緑と紫を生じた．Newton, *op. cit.* (1729), 164–165.

[64] レンズをプリズムの前方に持ってくることによって，レンズの絞る作用が光線の幅に大きく影響を与えて，プリズムによる分散はあまり影響を与えないように工夫している．

[65] 隣色が混入すると「屈折によって新たな色が生じた」という結論になってしまい，変容説の証拠と解釈された．詳しくは以下を参照：Takuwa, *op. cit.* (2013), 120–123.

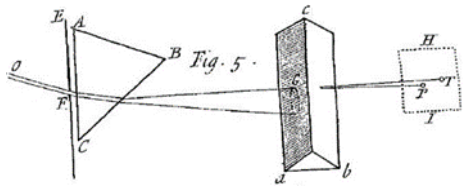

図 3.
『光学講義』「異なる屈折性」の証明

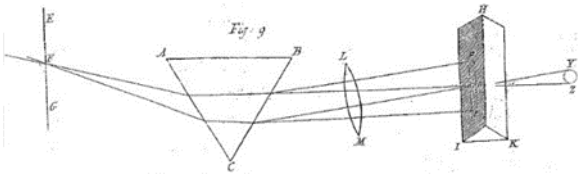

図 4.
『光学講義』「色の不変性」の証明

図 5.
『光学』「異なる屈折性」の証明

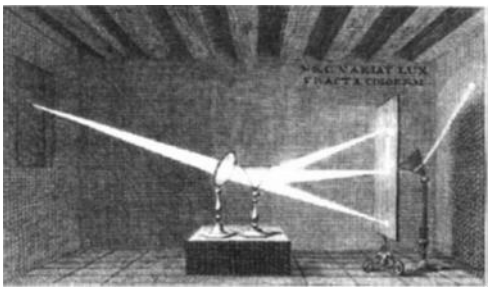

図 6.
『光学』「色の不変性」の証明

6. 結論

「決定実験」は，実験によって証明した理論に数学と同様の確実性を求めるというアイザック・ニュートンの実験観を代表する概念ではなかった．ニュートンが 1672 年の論文で導入した「決定実験」は，ボイルやフックの「決定実験」の用例に忠実であり，論争に分かれ道があることを示して議論のきっかけを与える実験にすぎなかった．「決定実験」概念は，数学的な確実性を求めるニュートン側の概念ではなく，蓋然性を重んじる王立協会側の概念であると見直さなくてはいけない．ニュートンの実験観の代表となるのは，『光学講義』および『光学』の数学的に構成された部分に登場する「実験による証明」概念である．ニュートンは，実験を命題の証明になり得る精度まで改良してから，証明すべき命題の直後に「実験による証明」として配置していた．

おわりに

17–18 世紀に「我らがヴェルラム卿の」という枕詞と共に語られていた *experimentum crucis* は，あくまでもフランシス・ベイコンの経験に基づく帰納法を想定しており，数学の証明のような強制力を持つ概念ではなかった．本来のラテン語の「(分かれ道にある）十字の実験」という意味を離れて，現在イメージされるような数学の証明のような強制力を持つようになったのは，「決定的な実験（crucial experiment)」という英訳を与えられた時点だと考えられる[66]. 英語の crucial という形容詞は, 本来はラテン語の crucis に由来する「十字の」という意味しか持っていなかった．この形容詞が「決定的な」という意味で初めて使われたのは，ジョン・ハーシェルが『自然哲学研究に関する予備的考察』（1830 年）の中でベイコンについて解説した時だと言われている[67]：

---

[66] 例えば，イグナス・パルディが 1672 年 6 月 30 日付の手紙でニュートンの「決定実験」についてフランス語で「十字の実験（experience de la croix)」という訳語をあてていることから, 当時は文字通りの意味で理解されていたことが推測される. *Correspondence*, vol. 1, 205.
[67] “crucial”の本来の意味は「十字の」であり，「十字切開（crucial incision)」のような熟語で使われた．*NED*, vol. 2, 1214.

> ここで，ベイコンが「決定的事例（crucial instances）」と呼んだものの利用を我々は見出します．それは，各々が一方を選ぶような同様の類推を持っている二つの原因のうち，どちらかに決めるように前進させる現象です．ここで同じく，単なる受身の観測とは区別されるために，実験が有用であると気付きます．我々は組み合わせを作って「決定的（crucial）な種類の実験」を行い，両原因のうち，一方が故意に除外され，他方が故意に認められるように実行に移します．結果として生じる現象と試験されている分類との一致，不一致によって我々は判定を決めるのです[68].

ハーシェルの英訳を契機に，「（分かれ道にある）十字の実験」は，一致，不一致を判定するように道を選択させる「決定的な実験」に様変わりを始めた．同時に英語の crucial という形容詞が「決定的な」という意味を持つようになったために，*experimentum crucis* とその英訳である crucial experiment は，「決定的」であるという言葉の先入観から逃れられなくなったと考えられる[69].

イアン・ハッキングは，ベイコンが科学哲学者たちに誤解されていることを嘆き，「決定的」と解釈されることの多いベイコンの*instantiae crucis*について「もっと文字通りの，そしておそらくもっと役に立つ訳語は「分かれ道の事例（instances of the crossroads）」というものであろう」と述べた[70]．ハッキングは17世紀の*experimentum crucis*の用例については何も言及していない[71]．しかし筆者は，「我らがヴェルラム卿」を掲げる初期の王立協会での用例については，ハッキングに倣って「決定実験」ではなく，「分かれ道の実験」と翻訳することを提案したい．このような訳語を与えれば，数学的な「実験による証明」を目指していたニュートンの独断論との違いが明確になり，混同されることはなくなるだろう．18世紀から19世紀のハーシェルに至るまでの*experimentum crucis*の用例がどのようになっていたのかについては，今後の研究の課題として残されている．

本研究はJSPS科研費 16J05232の助成を受けたものです.

---

[68] J. W. Herschel, *A Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy* (London, 1830), 150–151. 鉤括弧は筆者が追加.

[69] 脚注 2 および 3 参照.

[70] Hacking, *op. cit.* (1983), 249.

[71] ハッキングは，17 世紀のボイルやフックらの用例も知らないし，19 世紀のジョン・ハーシェルの英訳のことも知らないようだ．ハッキングは，ベイコンの記述と 20 世紀の科学哲学者たちの批判を見比べただけで，その鋭い感性によって「道標の事例」および「決定実験」をめぐる議論の問題点に気付いてしまったようだ.

A Comparison of Newton's Use of *Experimentum crucis* and "Proof by Experiments"

Abstract

Yoshimi TAKUWA

This study demonstrates that contrary to the prevalent perception that Isaac Newton's *experimentum crucis* was experimental proof of his optical theory, the typical experimental approach to prove his theory with mathematical certainty was "proof by experiments."

The term *experimentum crucis* originated from Francis Bacon's *instantiae crucis* and was brought into use by early members of the Royal Society, notably Robert Boyle and Robert Hooke. Boyle and Hooke used this term at the start of their arguments to characterize such experiments as showing that there is a fork in the road in the theories at issue. When Newton introduced his version of *experimentum crucis* in the beginning of his letter "New Theory about Light and Colours" (1672), he was using the term in the same manner as Boyle and Hooke had done. In contrast, in the latter half of the letter where Newton insisted that his theory had mathematical certainty, he did not specify an experiment with which to prove that the color of a light ray is not mutable by refractions. Thus *experimentum crucis* should not be deemed as an approach designed by Newton in pursuing mathematical "certainty," but one applied by him to follow those early members of the Royal Society who attached importance to the "probability" of knowledge on nature.

In fact, I argue that Newton was well aware that the setup of his *experimentum crucis* was insufficient to prove the immutability of colored rays and subsequently made improvements. In the mathematically composed parts of his *Lectiones opticae* (c. 1670) and *Opticks* (1704), Newton improved every experiment so that it reached enough accuracy to prove his propositions. He presented his theory about light and colors as propositions, each followed by its "proof by experiments." This method, rather than *experimentum crucis*, was Newton's typical approach to pursue mathematical "certainty."