第四章　望遠鏡と精密観測

フック、レンとオズーのマイクロメーター

前章で論じたように、オズーとフックは、1665年、フックが『ミクログラフィア』で提案したレンズ研磨装置をめぐって論争を展開した。彼らはその数年後、今度は接眼マイクロメーターの先取権に関してやりとりを行なった。接眼マイクロメーターは、望遠鏡に組み込んで惑星の直径や天体同士の角距離を測る装置であり、精密な天文観測に不可欠となるものである（第39図）。以下では、フックの精密天文観測への関心を理解するために、彼らのこのやりとりと、その後のこれに関するイギリスでの議論を分析してみたい。

オズーが最初に接眼マイクロメーターの工夫に言及したのは、先の1665年の論争の時だった。彼は、フックを批判する論考の中で、惑星の直径を測定する方法を扱った著作をいずれ出版することを予告した[1]。

オズーは、1666年末のオルデンバーグ宛の書簡で、惑星の径の測定に再び触れた。この手紙の抜粋は、翌年1月の王立協会の会合で読み上げられ、『フィロソフィカル・トランザクションズ』に収められた[2]。その書簡の中でオズーは、次のように述べた。

> 私についていえば、先夏は、太陽、月や他の惑星の直径を、ピカール氏(Jean Picard)と私の方法で測ってばかりいました。私は、この方法が、これまでに使われたものの中で最高であると信じます。というのは、1フィートを29000、あるいは30000の部分に1単位の間違いもなく分割できるので、秒の単位まで測ることができるからです[3]。

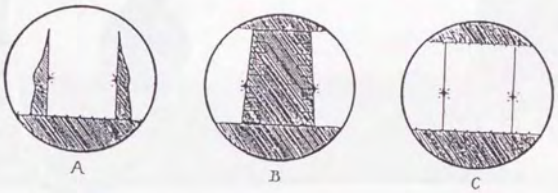
ここでは装置の具体的な構造は与えられていないが、これは明らかに接眼マイクロメーターに言及したものである。その装置は、オズーの他の著作から、第40

---

[1] 'Considerations of Monsieur Auzout upon Mr. Hook's New Instrument for Grinding of Optick-Glasses', *Phil. Trans.*, 1 (1665), No. 4, pp. 57–63 (p. 63).

[2] Auzout to Oldenburg, 18 December 1666 (O. S.), *Oldenburg Corresp.*, 3, pp. 291–300; *Birch*, 2, p. 139; *Phil. Trans.*, 1 (1667), No. 21, pp. 373–375.

[3] *Oldenburg Corresp.*, 3, pp. 293 & 297. オルデンバーグは、フランス語の原文を英訳する際に、間違って29000を24000と転記している。ここでは、原文により訂正した。



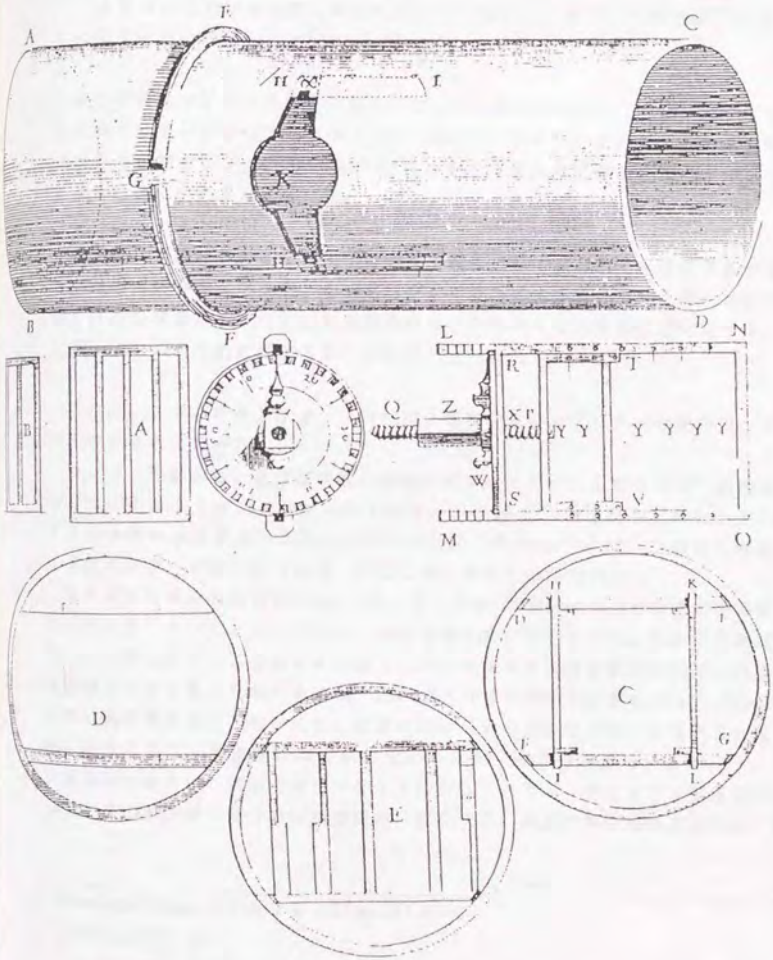
The apparent distance between two stars measured in three ways

A Gascoigne's knife-edge micrometer
B Huygens' 'virgula'
C Hooke's hair micrometer

第39図　接眼マイクロメーターのいろいろ（King(1955), p. 97 より）
接眼マイクロメーターは、望遠鏡の焦点に組み込まれる計測装置である。その本体は、幅を微調整できる一種のスリットから成る。その左右両端を、ネジ式の微調整ダイヤルを使って、観測すべき二つの部分に重ねて距離を測る。スリットの代わりに、髪の毛のように糸状のものを使うこともできる。観測対象の角距離は、計測用のダイヤルで読みとる。

第40図　オズーのマイクロメーター

（ *Oldenburg Corresp*, 2, Plate 1 ）



図のようなものであったと考えられている[4]。

オズーの手紙が会合で読み上げられた時、その記述について異議が唱えられた。その日の王立協会の記録には、次のような記述がある。

> レン博士とフック氏は、彼らがずっと前から知っていた惑星の直径を秒まで測る方法を協会に対していくつか述べたので、それらの方法を短く記述し、イギリスでは、それはまったく新しいものではないことをパリの哲学者〔オズー〕に示すように求められた[5]。

レンが接眼マイクロメーターをそれ以前から使用していたことは、様々な史料から裏付けることができる。例えば、1656年ごろのウィリアム・ペティー宛と思われる書簡でレンは、自分達が36フィートまでの長さの望遠鏡を持っていることに触れた後、次のように書いた。

> 私達は、望遠鏡を秒まで観測できる天文器具にして、これで木星の衛星や土星の月の運動を調べました。そしてヘヴェリウスのように月の図を描くだけでなく、月を測量し、その正確な地図を作り、その様々な斜面を正確に見つけ、ヘヴェリウスのそれに関する誤りを発見しました[6]。

これは、レンがオクスフォード時代に、接眼マイクロメーターを使用したことを示唆するものである。

ロンドン移動後も、彼は望遠鏡に接眼マイクロメーターを取り付けて観測を行なった。そのことは、グレシャム・カレッジの36フィート望遠鏡を記録した先のフックの手稿から分かる。これに添付された図（第34図）には、二種類の接眼マイクロメーターが描かれており、本文には、それらの説明がある[7]。

図の左下の部分の原図番号fig. 3は、フックが「網(rete)」と呼ぶタイプの接眼マイクロメーターである。これは、真鍮の板に丸い孔をあけて、髪の毛を網状に張ったものである。この格子を目盛り代わりに使って対象を観測すれば、角度の精密測定ができる。その右隣のfig. 5は、真ん中に四角い孔を開けた3フィート程の定規状の測定器具で、孔の中には、対角方向に二本の髪の毛が張られている。記号eeeeが示すのは、望遠鏡にはめ込むためのソケット部分である。このソケットを望遠鏡に固定し、定規全体をソケットに対してスライドさせると、望遠鏡の中に見える二本の髪の毛の間隔が連続的に変化する。両方の髪の毛を観測対象に重

---

[4] *Oldenburg Corresp.*, 3, Plate 1 および pp. 293 & 299.

[5] *Birch*, 2, p. 139.

[6] J. A. Bennett, 'A Study of Parentalia with Two Unpublished Letters of Sir Chirstopher Wren', *Ann. Sci.*, 30 (1973), pp. 129–147 (p. 147).

[7] Royal Society Classified Papers, vol. 20, No. 61, f. 131. 本論文付録2を参照。

ねて目盛を読めば、観測対象間の角距離が分かる。この目盛は非常に細かく振ることができるから、距離全体を千に分割することも可能である[8]。

これとは別のフックの遺稿（1693年ごろ）によれば、網状の接眼マイクロメーターは、レイタが発明してレンが完成させたものであるという[9]。フックは、fig. 5にあたる定規状の装置については発明者を記してはいない。だが興味深いことに、そのどちらもが、1665年の『ミクログラフィア』に現れた。

『ミクログラフィア』には、惑星の視差を望遠鏡を使って容易に見いだす方法を議論した部分がある。その中でフックは、惑星の視差や径の測定には、

> 網、あるいは目盛りをつけた定規を装着し、接眼レンズの内側の、それがはっきりと見えるような距離に据え付けるべきである。これによって、分、秒の測定がなされる[10]

と書いた。フックはまた、「目盛り付きの定規を装着した非常に良好な望遠鏡で」太陽などの径を観測したとも述べている[11]。このように、レンもフックも、彼らのオズーに対する主張の通り、接眼マイクロメーターに精通し、それを既に使用していたのであった。

ガスコインの先取権

1667年の3月、オズーに対して、イングランド北西部に住むリチャード・タウンリーからも異議の申し立てがあった。彼の申し立ての書簡は、グレシャム・カレッジの修辞学の教授クルーンによって王立協会にもたらされた[12]。その書簡の抜粋は、『フィロソフィカル・トランザクションズ』に収められた[13]。それは、オズーに先だって、ウィリアム・ガスコインが接眼マイクロメーターを発明していたことを主張するものだった。

前々章で述べたように、ウィリアム・ガスコインは、イングランド北西部の天文愛好家グループの一人であった。彼は、1640年ごろに、望遠照準と接眼マイクロメーターを考案した。ガスコインの手稿は、近郊の友人チャールズ・タウンリーの手を経て、その甥のリチャード・タウンリーの元に伝わっていた。タウンリーは、『フィロソフィカル・トランザクションズ』に掲載されたオズーの記事

---

[8] これと同じ装置は、1674年出版のフックのカトラー講義（*An Attempt to Prove the Motion of the Earth*、後述）にも収められている。これも参照。*Gunther*, 8, pp. 20–21.

[9] *Philosophical Experiments*, p. 272. これについては、Thomas Sprat, *The History of the Royal Society* (London, 1667), p. 314にも言及がある。

[10] *Micrographia*, p. 237.

[11] *Micrographia*, p. 230.

[12] *Birch*, 2, p. 164.

[13] *Phil. Trans.*, 2 (1667), No. 25, pp. 457–458.

に驚いて書簡を送ったのであった。タウンリーの手元に遺された手稿によれば、ガスコインは内戦以前にオズーと同様の発明をしており、惑星の直径の測定も行なっていた[14]。

タウンリーは、ガスコインの手稿類だけではなく、彼の装置の実物をいくつか持っていた。それは二本の針を用いたもので、この方法によって、1フィートを4万以上の部分に分けることができるという。ガスコインの装置は王立協会に送られ、これに対する吟味がなされた[15]。この装置の仕組みは、フックによって『フィロソフィカル・トランザクションズ』に記事として記録された[16]。これに添付された図（第41図）からも容易に分かるように、ガスコインの装置の原理は基本的にオズーのものと同じである。違いは、オズーがスリットを使用したのに対して、ガスコインがナイフの刃のような形の指針を用いたことにあった[17]。

このようにガスコインの装置が論じられた時、フックは、彼がこれとは違う原理のものをかつて発明したこと、それが定規と二本の糸から成り、対角線方向に分割を行なうものであることを述べた[18]。

フックは翌年、その工夫をヘヴェリウスに書き送るように求められた。フックの遺稿集の中には、これに該当すると推定されるものがある[19]。これによると、フックの装置は第42図のようなものだった。その原理は定規状の接眼マイクロメーターと同じであるが、この場合には定規が動くのではなく、糸の方が円に沿って動くようになっていた。フックの著作や手稿に現れる接眼マイクロメーターは、いずれもこのように観測対象に糸を重ねて使用するところに特徴があった。

先の第39図では、フックのタイプの接眼マイクロメーターをC、ガスコインのタイプのものをAとしている。この図には、この他にもう一つの方式としてタイプBが挙げられている。これは、ホイヘンスに帰されるもので、1656年の彼

---

[14] ガスコインの測定を記録している現存史料として、W. Gascoigne to Oughtred, 2 December 1640 & *c.* February 1641, in Stephen J. Rigaud (ed.), *Correspondence of Scientific Men*, 2 vols. (Oxford, 1841, repr., Hildesheim, 1965), vol. 1, pp. 33–59 (p. 52) を参照。同書のこの部分の注にあるように、これらのデータは、フラムスチードの著書に採録された。

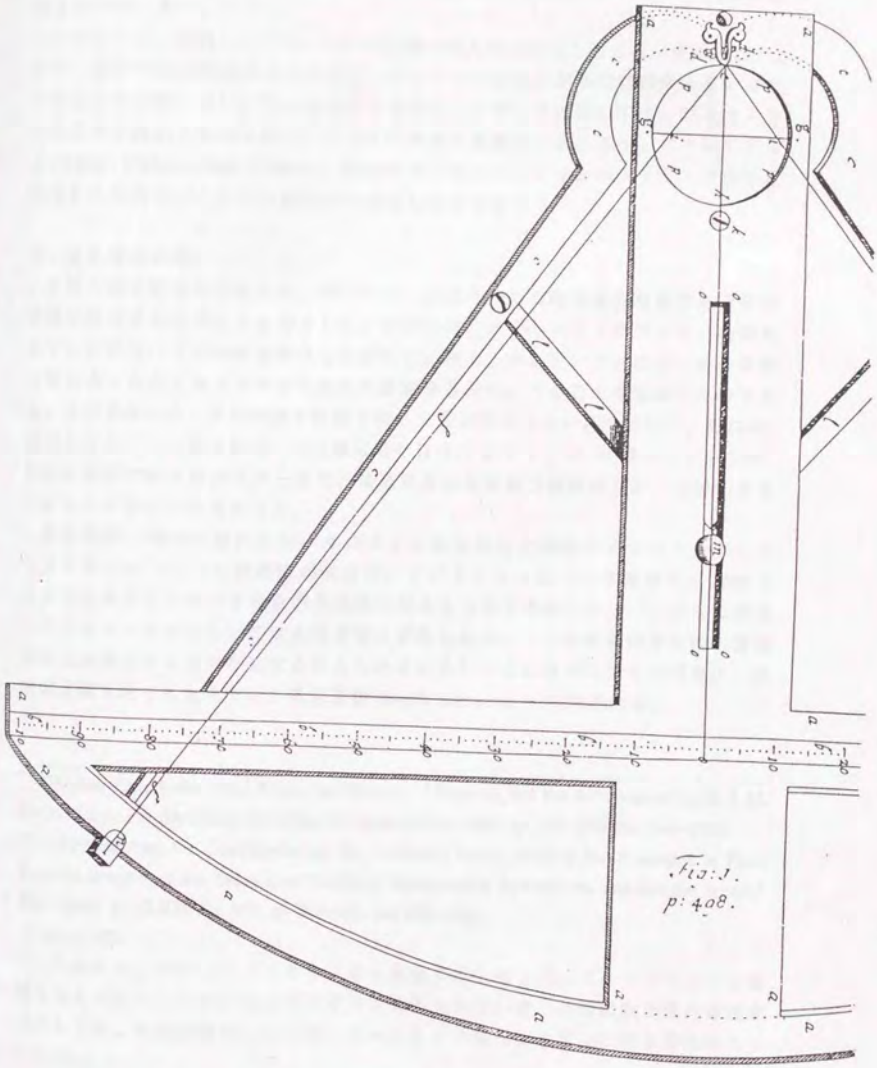
[15] *Birch*, 2, pp. 187, 189 & 197–199.

[16] 'A Description of an Instrument for Dividing a Foot into Many Thousand Parts, and Thereby Measuring the Diameters of Planets to Great Exactness &c', *Phil. Trans.*, 2 (1667), No. 29, pp. 541–544.

[17] 第41図のナイフの刃状のものの部分の左上方に、糸を用いたものも描かれている。これは、協会で「何人かの才能ある人々がより便利なものであろう」と述べたので追加された工夫だった。*Ibid*, p. 543.

[18] *Birch*, 2, pp. 188–189, 197, 199 & 204. これに関係する記事として、'More Ways for the Same Purpose, Intimated by M. Hooke', *Phil. Trans.*, 2 (1675), No. 25, p. 459.

[19] *Birch*, 2, p. 237; *Posthumous*, p. 498.



第42図　フックのマイクロメーター

（ *Posthumous*, Table 10 より）

の『土星の体系』に現れた。ホイヘンスの接眼マイクロメーターは、楔型の金属の帯を望遠鏡の焦点に入れたもので、その左右両端を観測対象に重ねて角距離を測るものだった[20]。

このように、接眼マイクロメーターは様々の人によって工夫され、使用された。だが、現存する史料から考える限り、ガスコインのものが時期的に最も早いものであることは疑いない。フックの次の世代に、イギリスにおいては、ガスコインの先取権が改めて確認された。フックの遺稿の編纂者でもあるウィリアム・デラム (William Derham, 1657–1735) は、1717年の『フィロソフィカル・トランザクションズ』の記事で、このことを明確に指摘したのであった[21]。

フックと望遠照準

それと同じ記事でデラムは、ガスコインがもう一つの精密観測装置である望遠照準の発明者であることも宣言した。デラムは、リチャード・タウンリーの保存していたガスコインの手稿類をこの時までに全て入手していた。彼は、その手稿の中にあったガスコインやその友人の書簡を基礎に、このことを立証したのである。その書簡には、天体の成す角度を測る工夫が書き留められていた[22]。それは、照準入りの二つの望遠鏡を、六分儀に取り付けたものだった。デラムにとっては、前節の接眼マイクロメーターより、望遠照準の先取権の確保の方が、この記事を寄稿した本来の目的であった。

第II部第二章でも触れたが、ガスコインの発明した接眼マイクロメーターと望遠照準という二つの精密観測装置は、オートリッドなどの手を経て、1650年代までにオクスフォードの自然学者達に伝えられたと想像される[23]。レンの接眼マイクロメーターについては本章で既に言及したが、レンの手稿の中には、望遠照準を記録したものがあったと伝えられている[24]。これはガスコイン同様に二本の望遠鏡を使ったもので、二重望遠鏡 (double telescope) とも称される。

---

[20] *Oeuvres*, 15, pp. 350–351; Albert van Helden, 'Huygens and the Astronomers' in H. J. M. Bos et al. (eds.) in *Studies on Christiaan Huygens* (Lisse, 1980), pp. 147–165 (pp. 154–155).

[21] 'Extracts from Mr. Gascoigne's and Mr. Crabtrie's Letter, Proving Mr. Gascoigne to Have been the Inventor of the Telescopick Sights of Mathematical Instruments, and not the French', *Phil. Trans.*, 30 (1717), No. 352, pp. 603–610 (pp. 603–604).

[22] *Ibid*, p. 605.

[23] この他にも、リチャード・タウンリーを経て友人のフラムスチードへという経路も考えられる。これについての研究は見あたらないが、この経路が仮に存在するとしても、それが機能したのは、オートリッド経由よりずっと後の時代のことになる。

[24] Christopher Wren, Jr., *Parentalia: Or, Memoirs of the Family of the Wrens* (London, 1750), p. 240. フックはこの発明者をレンとしているが、これはガスコインに帰せられるべきものである。*Philosophical Experiments*, p. 272; *Posthumous*, p. 502.

1674年にフックは、彼のカトラー講義、『ヘヴェリウスの著書、天文機械の第一部に対するいくつかの批判(*Some Animadversions on the First Part of Hevelius His Machina Coelestis, &c*)』(以下『批判』と略す)[25]をロンドンで出版した。この本の出版の経緯については次節で述べるが、その中でフックは、レンの発明した二重望遠鏡に言及し、「私はこの装置を使って、1665年に彗星の運動を調べた」と証言した。用いられたのは6フィートの長さの望遠鏡で、これを二台ジョイントでつないだものであったという[26]。

フックの遺稿の中には、これを記述したと思われるものがある[27]。それは第43図のような装置で、6フィートの長さの方形の望遠鏡を二つつないだものであり、レンの発明したものと明記されている。その使用法は、二つの望遠鏡で二つの天体を観測し、その際に望遠鏡相互の成す角度を測定するというものである。角度の大きさを測定するための道具は、装置の右に描かれた定規である。これで接眼部分の距離を測ることによって、天体の角距離を算出することができる。

このように、フックはレンの望遠照準を使用した。その一方で彼は、独自の望遠照準を試みた。フックが最初に望遠照準に取り組んだのは、1664年末のことと考えられる。この年の11月23日に、フックは『ミクログラフィア』の出版許可を王立協会から得た。その同じ会合で、「フック氏は望遠鏡によって分、秒までを見つける方法に言及し、それを実行するように命じられた」[28]。

フックがこれを実際に王立協会に提示したのは、1665年2月22日であり、ペストの流行で王立協会の会合が中断される数カ月前のことであった[29]。この日に、

> フック氏は、彼が工夫した新しい小さな四分儀を提出した。これによって、これまでに一般に知られている最も大きな装置よりも、より正確に天体や地上の観測をすることができるようになる。この四分儀は半径わずか17インチで、その円周を動く小さなローラーの工夫によって、非常に正確なものとなっている。

---

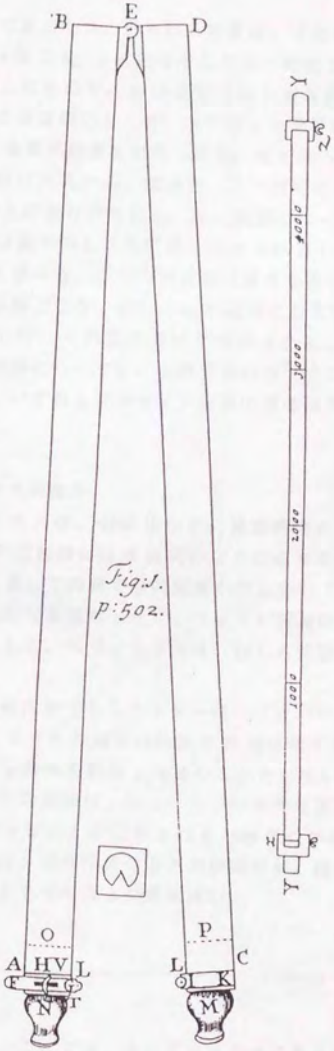
[25] *Gunther*, 8, pp. 37–114 所収。

[26] *Gunther*, 8, p. 78. 同書のp. 54で言及されているレンの望遠鏡は、これと同一のものと思われる。

[27] *Posthumous*, pp. 502–503. この本の編者のデラムによれば、この手稿には、ヘヴェリウスのために執筆したことが記録されているという。フックも、「これ[二重望遠鏡]を数年前にヘヴェリウスに知らせたと思う」と1674年に述べた(*Gunther*, 8, p. 54)。しかし、フックの手稿が実際にヘヴェリウスに送られた証拠はない。なお、王立協会に保存されたフックの手稿にも、二重望遠鏡の記述がある。Royal Society Classified Papers, vol. 20, No. 61, f. 132.

[28] *Birch*, 1, p. 496.

[29] 会合の中断は、1665年の6月28日の例会から翌年2月21日の幹事会(Council Meeting)までのことであった。例会の再開は、3月14日である。*Birch*, 2, pp. 60, 63 & 65.



第43図　レンの二重望遠鏡

（ *Posthumous*, Table 11 より）

そのため、各々の角度は実際に60分に区分され、1インチの三分の一程の長さのその各々は現実に六分割されて、10秒が分かるようになっている[30]。

フックがこの時に提出したと思われる装置は、『批判』の中で詳しく述べられた[31]。それは、第44図でfig. 1と記号をふられた装置である。これは、四分儀に二本の望遠鏡を装着したもので、apは固定された望遠鏡、ccは可動の望遠鏡を示している。どちらの望遠鏡にも、細い糸で作った十字型の照準が焦点に組み込まれている。両者は、金属反射鏡を利用したfig. 12のような工夫により、四分儀の扇の付け根の部分に開けた孔から、観測者一人で同時に覗けるようになっている。可動の望遠鏡は、リムに取り付けたfig. 11の装置によって、ネジ仕掛で精密に動かされる。四分儀の目盛りのところに据え付けられたネジの回転数から、apとccの成す角度が細かく分かる。二つの望遠鏡で異なる天体を観測すれば、この時の角度は、両者の角距離となる。また、apを底辺にして四分儀全体を垂直に据え、ccで天体を観測すれば、その星の高度が測定される。これとほぼ同じ装置は、二年後の『太陽望遠鏡について』にも再び現れた[32]。フックの装置はレンのものとは多少異なるが、いずれもガスコイン以来の望遠照準の伝統を汲むものであった。

フックとヘヴェリウスの論争

フックとヘヴェリウスは、1668年から、望遠照準の是非をめぐって論争を展開した。当時まで、天文観測には第45図のような通常の照準(plain sight)が用いられ、スリットなどを通して肉眼で星の位置が同定されていた。それはティコ以来のもので、当時一般的な器機だった[33]。フックが望遠照準を精密観測に不可欠のものと考えたのに対して、ヘヴェリウスは、むしろ伝統的なこの通常の照準による観測を弁護した。

フックの最初の伝記作者であるウォラーは、「ロバート・フック博士伝」の中で、フックとヘヴェリウスの論争の始まりを1673年ごろ、すなわちフックとニュートンが有名な光学論争を開始した後のこととしている[34]。しかし実際には、フックとヘヴェリウスの論争は、ニュートンが学界に登場する以前に始まり、ニュートンの『プリンキピア』が出版される1680年代半ばまで続いた。フックとヘヴェリウスの論争は、世代の異なる天文研究者が、精密観測器機に対してどのような対応をしたのかを考える上で興味深い。

---

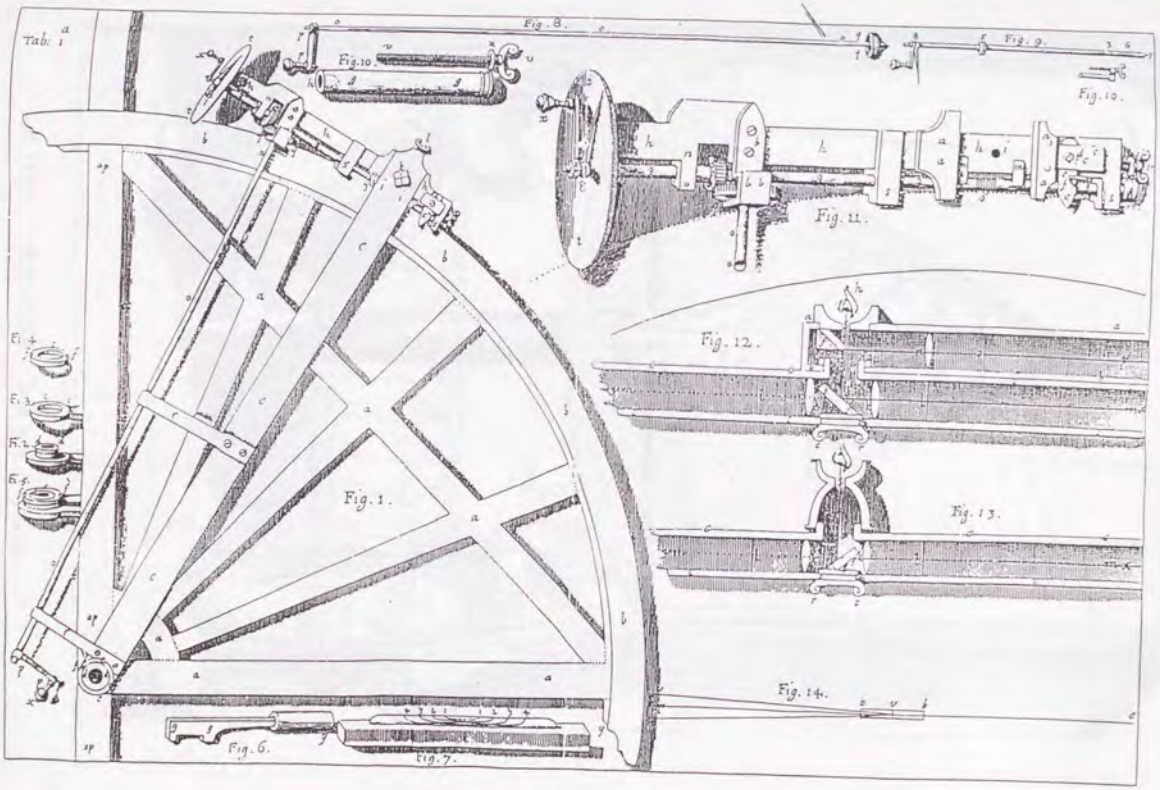
[30] *Birch*, 2, p. 18.

[31] *Gunther*, 8, pp. 82ff.

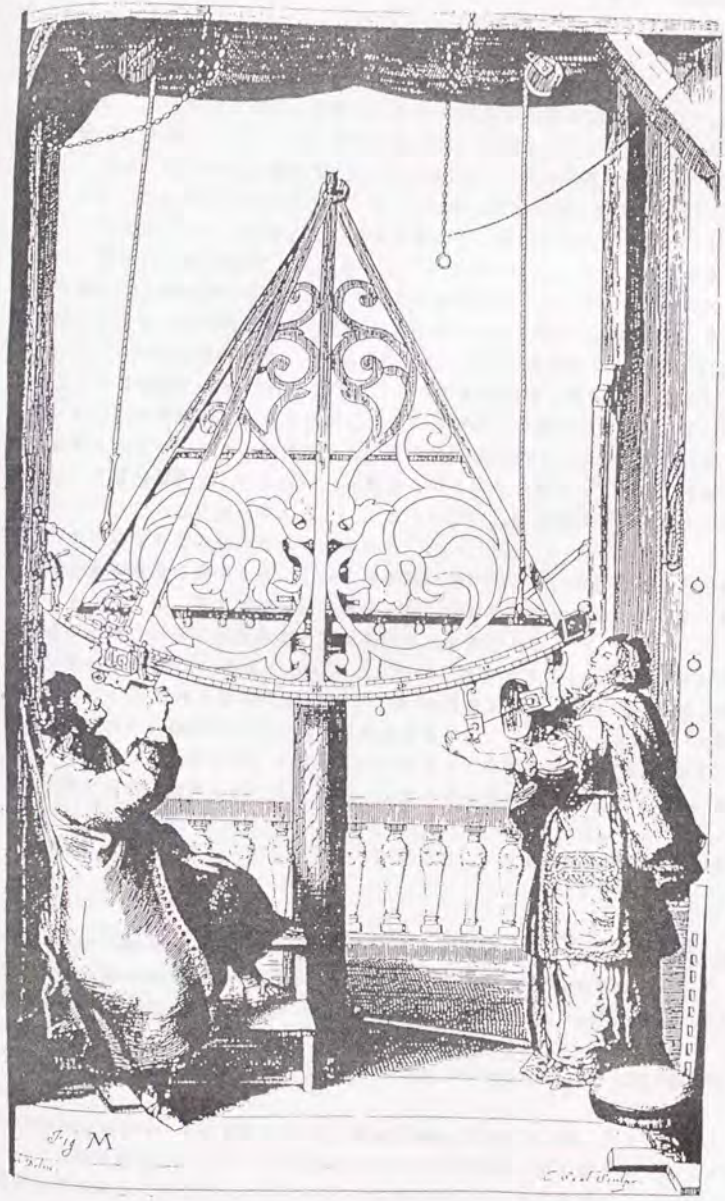
[32] *Gunther*, 8, pp. 129ff. ここでは、ネジ式ローラーに加えて、ワイヤーをリムに巻きつけて可動部分を取り付けた工夫も述べられた。

[33] *Gunther*, 8, p. 8.

[34] *Waller*, p. xv.



第44図　フックの望遠照準
（「批判」、Table 1 より）



第45図　「通常の照準」を使用した六分儀
（ *Machina coelestis pars prior* より）

フックとヘヴェリウスの論争のきっかけとなったのは、先に論じた長大望遠鏡をめぐる彼らのやりとりだった。1669年、光学器機職人コックの作製した50フィートの長大望遠鏡がヘヴェリウスに送られた。これに先だってフックは、1667年2月27日、長大望遠鏡の設置方法についてヘヴェリウスに書き送った。その手紙でフックは、星の直径や視差、星同士の距離を測定する便利な方法として、望遠照準に簡単に言及した[35]。これに対する返信で、ヘヴェリウスは望遠照準に興味を示し、観測に役立つかも知れないと、それについて詳しく書き送るように求めた[36]。だが、この時期フックは、ロンドン大火後の街の再建に忙殺されていた[37]。

フックがオルデンバーグを介して望遠照準の詳しい説明をヘヴェリウスに送ったのは、翌年の5月11日のことであった[38]。その中でフックは、二つの望遠鏡を四分儀や六分儀に取り付けて作った望遠照準を記述した。その望遠鏡の接眼レンズは、扇の中心側に置かれ、対物レンズは周の方向に向けられていた。取り付けられた二つの望遠鏡のうち、一方は固定され、他方は装置のリムにそって動く。このような構造は、前節で取り上げたフックの望遠照準（第44図）に類似している。だが、精密観測にとって重要なリムのネジ仕掛の部分の記述は、この手紙には見あたらない。また、使用されている二台の望遠鏡は、二つの四角い筒を入れ子にして伸縮可能としたもので、前節のものとはやや異なっている。望遠鏡の長さが6フィートである点から考えると、これはレンの二重望遠鏡と、フックの望遠照準の中間的な形態のものとも考えられる[39]。

装置の基本構造を述べた後、フックは手紙の後半部分を、角度目盛りを正確に振る方法に充てた。例えば四分儀の場合、正しい目盛りを与えるためには、最初に厳密な直角を作ってから角度の分割を行なう必要がある。

四分儀の扇が正しく90度であるかどうかは、次のようにして知ることができる。まず二つの照準を適当に固定して、第46図のaとbの方向にある遠くの2点を見る。次に、照準を水平に保ったまま回転して、aの方向に向いていた照準をbに向ける。こうすると、bを見ていたもう一つの照準は、c方向を指す。二つの照準が正確に直角を成していれば、このような操作を3回繰り返すと、最初bを見ていた照準は、最後には正しくaを向いているはずである。

このようなキャリブレーションの詳しい記述は、フックがこの種の器具の扱い

---

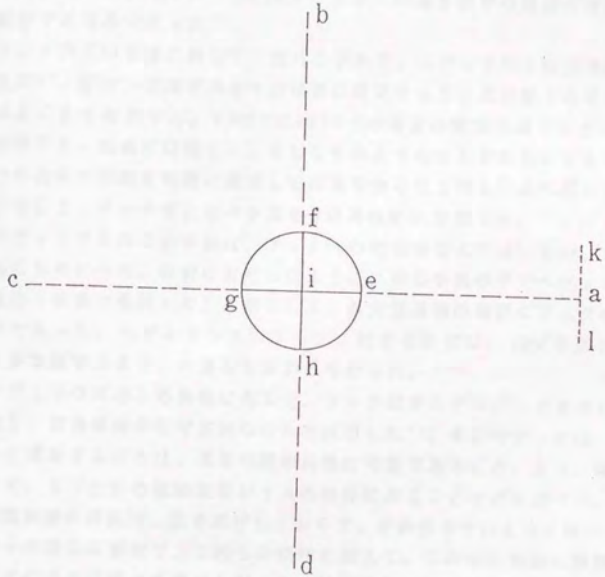
[35] Hooke to Oldenburg, c. 20 February 1667, *Oldenburg Corresp.*, 3, pp. 347–349 (p. 348); Oldenburg to Hevelius, 27 February 1667, *ibid*, pp. 350–354 (pp. 351–352 & 354).

[36] Hevelius to Oldenburg, 11 October 1667 (O. S.), *Oldenburg Corresp.*, 3, pp. 517–520 (pp. 518 & 519).

[37] Oldenburg to Hevelius, 31 January 1668, *Oldenburg Corresp.*, 4, pp. 134–138 (pp. 135 & 137).

[38] Oldenburg to Hevelius, 11 May 1668, *Oldenburg Corresp.*, 4, pp. 393–398.

[39] 二つの望遠鏡は、レンの二重望遠鏡の場合には対物レンズの部分で、フックの望遠照準の場合には接眼レンズの部分で接合されている点に注意。



第46図　四分儀の調整法を示すフックの図
（ *Oldenburg Corresp.*, 4, p. 394 より）

に通じていたことを示している。だが、初めて望遠照準を知るヘヴェリウスにとって、この説明がふさわしいものであったのかどうかは疑問である。むしろヘヴェリウスは、フックがこの装置を推奨する理由に興味を持っていたはずだからである。しかし、これについてフックは、望遠照準を持つ1ｽﾊﾟﾝ（約23センチ）の半径のものが、60ﾌｨｰﾄ（約18メートル）の通常照準の装置の精度を凌ぐとただ断言するのみであった[40]。

フックのこの主張に対して、翌月の手紙で、ヘヴェリウスは当然のごとく異を唱えた[41]。彼は、望遠照準を十分堅固に固定することは困難であり、ズレる恐れがあることを指摘する。1ｽﾊﾟﾝで60ﾌｨｰﾄの通常の装置を凌ぐことは、理論的には可能でも、現実には難しい。もしもそのようなことが本当にできるならば、いくつかの星の距離を実際に測定して結果を知らせて欲しいとヘヴェリウスは書いた。そして、データをとるべき星を8組具体的に指定した。

ヘヴェリウスのこの手紙は、フックへの批判を含んではいるが、大変友好的な内容のものだった。以前に引用したように、同じ手紙の中でヘヴェリウスは、望遠鏡に「非常に熟達した」人物として、長大望遠鏡の選択にフックの助言を求めたのであった。ヘヴェリウスのフックに対する敬意は、1674年にフックが『批判』を出版するまで、一貫して変わらなかった。

ヘヴェリウスのこの異論に対して、フックはオルデンバーグを介して再度書簡を送り、望遠照準がなぜ正確なのかを説明した[42]。そこでフックは、望遠照準を正しく装着することは、通常の照準同様に可能であること、また、精密な測定のために、ネジ仕掛の駆動装置がリムの部分にあることなどを述べた。しかし、この駆動装置の解説は、図を添付しておらず、分かりやすいものとはいえなかった。

フックはこの書簡で、これらの説明に加えて、この後の議論の展開にとって重要な次のような論点を提出した。それは、肉眼の限界に関わる問題である。

望遠鏡によって、私たちは通常の照準よりはるかに精密かつ正確に対象の詳細を見分けられるようになります。というのは、裸眼では1分を確かに見分けるのがやっとなのに、望遠鏡を使えば、楽に秒の単位まで、あるいは1秒までも目で見分けることができるからです[43]。

フックのこの主張は、実はこの時初めて現れたものではなかった。彼は、1665年にマイクロメーターに関してオズーとやりとりをしたが、この時に、ほとんど

[40] Oldenburg to Hevelius, 11 May 1668, *Oldenburg Corresp*, 4, pp. 393–398 (pp. 393 & 396).

[41] Hevelius to Oldenburg, 3 June 1668 (O. S.), *Oldenburg Corresp*, 4, pp. 443–449 (pp. 445–448).

[42] Oldenburg to Hevelius, 30 July 1668, *Oldenburg Corresp*, 4, pp. 576–581.

[43] *Ibid*, pp. 576 & 579.

の人間は、1分以下の角度を見分けられないことを指摘していた[44]。ヘヴェリウスとフックの論争は、このように、精密観測をめぐるオズーとの議論と関連を持っていた。

オルデンバーグは、1668年10月のヘヴェリウス宛の手紙で、フックが肉眼の限界を再び問題にしたことを書き送った[45]。フックは、望遠照準が、通常の照準より60倍以上正確であると述べたという。

このようなフックの主張に対してヘヴェリウスは、この年の11月から12月にかけて、二通の手紙の中で反論を展開した[46]。そこでヘヴェリウスは、小さな望遠照準は正確に観測対象に向けることができないこと、大きな望遠鏡を使った望遠照準は小さな六分儀などには使用できず、また安定して取り付けることもできないことを主張した。さらに彼は、望遠鏡が寒冷な土地では曇り易いというポーランドに固有の点も問題にした[47]。ヘヴェリウスは、望遠照準では秒単位の観測はできないとする一方で、通常の照準ならばそれが可能なこともあるとしている[48]。彼は、できればフックと直に顔を合わせて話し合ってみたいと希望し、望遠照準を装備した小さな観測装置を自分のために作るように依頼した。加えて、接眼マイクロメーターに関する情報を知らせるようにオルデンバーグに求めた[49]。

ヘヴェリウスは、その後の書簡でも望遠照準の実物を送るように繰り返し督促した[50]。だが、それは先延ばしにされるばかりで[51]、結局フックは、ヘヴェリウスに実物を送ることはなかったと思われる。フックとヘヴェリウスのやりとりも、これとともにしばらくは立ち消えとなったのだった。

『天文機械』の出版

彼らの論争に再び火を着けたのは、ヘヴェリウスが1673年に出版した『天文機械・前編』だった。この著書は長い期間をかけて準備されたもので、学界から

---

[44] Oldenburg to Auzout, 23 July 1665, *Oldenburg Corresp.*, 2, pp. 439–443 (pp. 441 & 443).

[45] Oldenburg to Hevelius, 28 October 1668, *Oldenburg Corresp.*, 5, pp. 112–117 (pp. 113 & 115).

[46] Hevelius to Oldenburg, 19 November 1668 (O. S.), *Oldenburg Corresp.*, 5, pp. 181–190; Hevelius to Oldenburg, 11 December 1668 (O. S.), *ibid.*, pp. 241–246.

[47] *Ibid.*, pp. 181–182 & 186.

[48] *Ibid.*, pp. 241 & 244.

[49] *Ibid.*, pp. 182 & 186–187. ヘヴェリウスはイギリスからの接眼マイクロメーターの情報の入手に困難を感じ、*Philosophical Transactions* がなぜラテン語でないのかをこぼしている。

[50] Hevelius to Oldenburg, 25 June 1670 (O. S.), *Oldenburg Corresp.*, 7, pp. 44–50 (pp. 45 &48); Hevelius to Oldenburg, 21 April 1671 (O. S.), *ibid.*, 8, pp. 3–9 (pp. 4 & 6).

[51] Oldenburg to Hevelius, 2 August 1669, *ibid.*, 6, pp. 161–171 (pp. 167 & 170); Oldenburg to Hevelius, 9 November 1671, *ibid.*, 8, pp. 349–353 (pp. 351 & 353).

も期待を受けたものであった[52]。

この本の中でヘヴェリウスは、彼がなぜ望遠照準を使用しないのかを説明した。その説明は、基本的にそれまでのフックとの議論の繰り返しであり、理論上うまく行くはずのものが現実にはその通りに働くとは限らないこと、望遠照準はズレ易いこと、望遠鏡の部分だけではなく、糸などで作った照準自体もズレる可能性のあることをヘヴェリウスは問題にした。このようなことを考えると、望遠照準は秒までの観測ができるどころか、分単位まで狂う。照準が眼に近いことも、狂いの原因となるという[53]。ヘヴェリウスは、望遠照準それ自体は価値があり、将来性があるものとしながらも、1ｽﾊﾟﾝのものが通常の照準を凌ぐことはないとした[54]。ヘヴェリウスは、一般の天体観測に望遠鏡が有効であることは明確に認めた。だが、望遠鏡を照準に使用することには懐疑的であり、通常の照準を拒否する理由はないとした[55]。彼は、5–10秒までの観測が通常の照準で繰り返し可能だったことを述べた[56]。

ヘヴェリウスの著書は、出版されると、さっそく本人の手でイギリスへ送られた[57]。フックは、ヘヴェリウスの望遠照準批判に対して、1673年12月11日、王立協会の会合で1時間弱に及ぶ反論を展開した[58]。しかし、その内容は残念ながら伝わっていない。

フックは翌年の1月15日、自らの主張を正当化する実験を行なった。それは、肉眼では1分以下を区分できないことを立証する実験だった。フックは、ある距離から見て1分に相当するように目盛りをつけた定規を用意し、会合の参加者全員にこれを見せた。「その距離からは、誰一人としてそれらの部分を区別できるものはいないように思われた」[59]。この実験は、翌週の会合でも繰り返された[60]。

この月のオルデンバーグの手紙によると、王立協会で望遠照準に対するヘヴェリウスの態度に異を唱えたのはフックだけではなかった[61]。だが、その記述からは、それが具体的に誰だったのかは分からない。

ヘヴェリウスの通常の照準への固執を批判する者は、王立協会の会員外にも存

---

[52] 例えば、Oldenburg to Hevelius, 23 January 1669, *Oldenburg Corresp*, 5, pp. 352–356 (pp. 353 & 355) を見よ。

[53] Johannes Hevelius, *Machina coelestis, pars prior* (Danzig, 1673), pp. 293–296.

[54] *Ibid*, pp. 299–300.

[55] *Ibid*, pp. 294–295.

[56] *Ibid*, p. 299.

[57] Hevelius to Oldenburg, 13 August 1673, *Oldenburg Corresp*, 10, pp. 139–143 (pp. 140–142).

[58] このことは *Birch* には現れないが、この日のフックの日記の記述から分かる。*Diary 1672–1680*, p. 74.

[59] *Birch*, 3, p. 120.

[60] *Birch*, 3, p. 121.

[61] Oldenburg to Hevelius, 9 January 1674, *Oldenburg Corresp*, 10, pp. 428–431 (pp. 429–430).

在した。数年後に初代のグリニッジ天文台長となるフラムスチードは[62]、ヘヴェリウスに対して批判的だった[63]。『フィロソフィカル・トランザクションズ』に掲載された1673年7月のカッシーニ宛の手紙の中で、フラムスチードは、次のように書いた。

かのヨハンネス・ヘヴェリウスは、実際に恒星の表の作成を行なっているということですが、残念ながら彼は、ガラス［レンズ］を用いない照準を使っているということなので、ティコが遺したよりも正確な位置を彼から得られるかどうかは、はなはだ疑問です[64]。

望遠照準に対するフラムスチードの信頼は、一時的なものではなかった。後に論じるように、彼は望遠照準の付いた六分儀を用いて、1676年からグリニッジ天文台でさかんに観測を行なったのである。

ヘヴェリウスは、1674年の3月のオルデンバーグ宛の手紙で、自分の経験を根拠として、フックやフラムスチードに対する名指しの批判を展開した[65]。その主たる部分は、抜粋されて、『フィロソフィカル・トランザクションズ』に収録された[66]。

そこでヘヴェリウスは、望遠照準が優れていることを立証するためには、それを使った長年の観測が必要であると述べた。彼は通常の照準による自分の観測が優れたものと認められていることを引き、望遠照準によって同様の星のカタログを作って比較してみるように求めた。

けれども、もしその仕事を全て望遠照準で行なっていたとしたら、私は観測に多くの年月を浪費し、様々の理由から、疑いなく希望を失っていたと実際に考えざるを得ません[67]。

---

[62] フラムスチードは、1677年2月8日に王立協会の会員に選出された。意外なことに、それは彼がグリニッジ天文台 (Greenwich Observatory) の台長となった2年後のことであった。このことは、当時の天文台の地位を考える上で示唆的である。

[63] フラムスチードのヘヴェリウスに対する対応を比較的詳しく扱ったものとして、Eugene F. MacPike, *Hevelius, Flamsteed and Halley* (London, 1937), pp. 78ff.

[64] 'Epistola ad clarissimum Cassinum', *Phil. Trans.*, 8 (1673), No. 96, pp. 5094–6000 (p. 6000). 『フィロソフィカル・トランザクションズ』のこの部分には、ページ付けの誤りがある。

[65] Hevelius to Oldenburg, ?16 March 1674, *Oldenburg Corresp.*, 10, pp. 514–524. この書簡にあるように、ケプラーの手稿の多くは、ヘヴェリウスに伝わっていた。

[66] *Phil. Trans.*, 9 (1674), No. 102, pp. 27–29.

[67] *Ibid.*, p. 29. このラテン文は、ヘヴェリウスの原文をかなり修正しているが、意味は本質的に同一である。cf. *Oldenburg Corresp.*, 10, p. 516.

ヘヴェリウスは、このように望遠照準に厳しい批判を与えた。そして、通常の照準はズレることがないが、望遠照準を実際に使ってみれば、それがズレることが分かるとする。望遠照準を用いている人々が、パリでは当地の緯度すら満足に決めることができないと彼は揶揄した。しかし、このヘヴェリウスの手紙の1週間ほど後、オルデンバーグは、フックとフラムスチードが、ヘヴェリウスに批判的であることを再び伝えた[68]。

フックの『批判』

フックが、グレシャム・カレッジで行なったカトラー講義をまとめた著書、『ヘヴェリウスの著書、天文機械の第一部に対するいくつかの批判』の執筆を終えたのは、1674年12月10日のことだった[69]。それは出版されると、翌年の4月、オルデンバーグの手で、ヘヴェリウスに送付された[70]。

フックの批判の要点は、ヘヴェリウスの観測の精度が、百年前のティコ・ブラーエの観測精度を越えないということにあった。その根拠としてフックは、ヘヴェリウスの観測装置とティコの観測装置の大きさが同じであること、彼ら双方がともに通常の照準を使用していることを挙げた。ヘヴェリウスは装置の目盛り付けに新しい方法を提案しているが、それは困難な方法である。だが、それ以上に、肉眼の持つ限界が妨げとなるという[71]。

ここでフックは、肉眼で識別できる限界が角度で1分であることを示すための実験を説明した。それは、櫛状に黒く塗った白い紙を使うものであった（第47図中のfig. 28とあるもの）。これを壁に張って後ろに下がりながら眺め、分割が見えなくなる距離で櫛の歯を見込む角度を計算すれば、個々人の眼の限界が定められる[72]。

フックは、ヘヴェリウスが使用した四分儀や六分儀を吟味し、それらの精度が30秒以上となることはあり得ないとしている[73]。彼は、ヘヴェリウスの望遠照準拒否を先入観によるものと述べ、望遠照準の方が取扱いが楽であるとした。フックは、レンの二重望遠鏡のタイプの望遠照準で、1665年に実際に彗星の観測をしたと記している。望遠照準では秒にとどまらず、その三分の一までの精度で観測が可能であり、1フィートの半径のものが、60フィートの通常の照準を凌ぐ。それが優れていることを知るのには、長い時間は要さない[74]。ヘヴェリウスはしばしば経験に訴えるが、そのことは、ヘヴェリウスの装置を使うのに慣れが必要であ

[68] Oldenburg to Hevelius, 23 March 1674, *Oldenburg Corresp*, 10, pp. 531–533.

[69] *Diary 1672–1680*, p. 134.

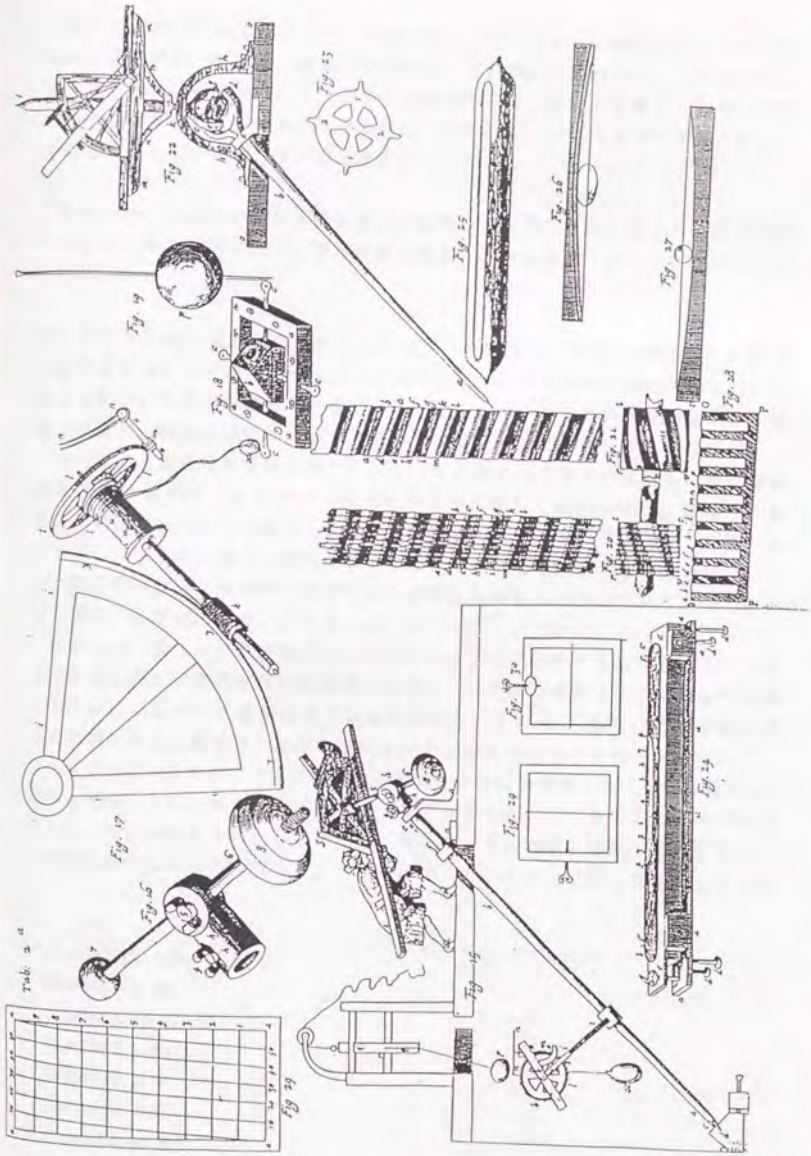
[70] Oldenburg to Hevelius, 14 April 1675, *Oldenburg Corresp*, 11, pp. 278–288.

[71] *Gunther*, 8, pp. 38–39.

[72] *Gunther*, 8, pp. 44–45.

[73] *Gunther*, 8, p. 74.

[74] *Gunther*, 8, pp. 77–79.



第47図　フックの天文諸機械

図中に fig. 15 とあるものは赤道儀。fig. 22　の赤道儀にはユニバーサルジョイントが使用されている。fig. 24–27 は水準器。fig. 28 は肉眼の限界を示すための装置。

（『批判』、Table 2 より）

るという問題点をむしろ示しているという[75]。パリの人々が緯度を決められないのは、望遠照準ではなく、通常の照準を使っているからである[76]。なるほどヘヴェリウスの多大な努力は、「天文学と航海術に非常に有益な仕事」であり、通常の照準で行なわれたものとしては高度なものである[77]。ヘヴェリウスは、ティコの誤りを正した。だが、フックは次のように言う。

> 私はなお、世間がそれを人間の努力の限界、すなわちそれより上のないものと見なして欲しくはないし、望遠照準の使用と改良を諦めて欲しくもないのである[78]。

そしてフックは、望遠照準を使っていれば、ヘヴェリウスは1割の労力で10倍正確な星のカタログが作れただろうと主張した[79]。フックは、望遠照準について知らせたのにも関わらずそれを採用しようとしないヘヴェリウスを揶揄し、「器機の改良が、何を生み出すのかを見ようではないか」と読者に呼びかけた[80]。

フックは、装置の具体的な事例として、リムにネジ仕掛で測定器を留めた望遠照準（第44図参照）を10ページ以上にわたって詳しく記述した[81]。彼はその最終的な調整法についても解説した[82]。この説明が具体的であることからも分かるように、フックは、親しい職人のトンピオンに実際にこれを作らせていた[83]。だが、図を用いた分かりやすい形でフックが望遠照準をヘヴェリウスに提示したのは、実はこれが初めてのことであった。

以上のようなフックの議論に対して、ヘヴェリウスは怒りをあらわにした。フックの『批判』が出版された直後のオルデンバーグ宛の書簡には、それまでのやりとりには見られない激情の現れが見られる[84]。それは、30年以上にもわたる天文観測の多大な努力を、精度の低いものと一蹴されたものの憤りであった。

ヘヴェリウスはまず、フックが彼の『批判』を英語で執筆したことを非難する。このようなことは、誰でもが知っているラテン語で行なうべきである。ヘヴェリウスは、争いは好まないとしながらも、自分の『天文機械』は成し遂げてきたことの歴史的な説明なのに対して、フックの言っていることは単に言葉の上のこと

---

[75] *Gunther*, 8, p. 102.
[76] *Gunther*, 8, p. 79.
[77] *Gunther*, 8, pp. 79–80.
[78] *Gunther*, 8, p. 80.
[79] *Gunther*, 8, p. 38.
[80] *Gunther*, 8, p. 81.
[81] *Gunther*, 8, pp. 82ff.
[82] *Gunther*, 8, pp. 95–97.
[83] *Gunther*, 8, p. 90.
[84] Hevelius to Oldenburg, 21 August 1675 (O. S.), *Oldenburg Corresp.*, 11, pp. 458–475.

で裏付けがないと批判した。フックは望遠照準で秒単位の観測ができると主張するが、ただそれだけで、観測という実態を伴わない。重要なのは、観測を重ねることである。だが、ティコや自分以上の正確な観測がフックにできるかどうかは疑わしい。フックは私の仕事をつまらぬものと罵っているが、他人の仕事をけなすべきではない。フックも何事かを完成すれば尊敬されるだろう。自分は自分の道で努力するが、優劣の判定は他の人々に任せたい。ヘヴェリウスは、このような内容を、彼の長い手紙の中で述べた。この書簡は、彼の存命中の最後の著書、『晩年 (*Annus climactericus*)』に収められた[85]。フックは、その時もまた王立協会でヘヴェリウスに対して望遠照準の優位を主張し、彼に対する不満を述べたのだった[86]。

ハレーのヘヴェリウス訪問

このように、フックとヘヴェリウスの論争は、平行線をたどるままであった。だが、歴史的には、望遠照準と通常照準の優劣の決着は比較的早くついた。望遠照準による観測の精度は、フラムスチードの段階で10秒程度となり、ヘヴェリウスを凌いだ[87]。フラムスチードがグリニッジ天文台で観測を開始したのは1676年。それが出版されたのは18世紀初頭のことであり、ちょうどフックの没する前後のことであった。

しかし、ヘヴェリウスの肉眼による観測は、フックが考えたのとは違って、ティコの水準に留まるものではなかった。ティコの観測の精度は1–4分程度といわれるが、これに対して、ヘヴェリウスの精度は30秒 –1分程度であり、かなりの向上が見られた[88]。

ヘヴェリウスの観測精度が予想を上回ることは、彼の天文台を訪問したエドモンド・ハレーによってイギリスに伝えられた。ハレーがダンツィヒにヘヴェリウスを訪ねたのは、1679年のことであった。

ハレーは、その3年前の20歳の時、大西洋に浮かぶセント・ヘレナ島に渡り、恒星の観測を行なった。セント・ヘレナ島は南半球に位置しており、ハレーは南

---

[85] Johannes Hevelius, *Annus climactericus* (Danzig, 1685), pp. 54–60. イギリスでこの本を紹介したものとして、ウォリスによるものがある。*Phil. Trans.*, 15 (1685), No. 175, pp. 1162–1183. なお、1675年のヘヴェリウスの書簡から1685年のこの著書までの間のフックとヘヴェリウスのやりとりについては、その存否も含めて調査がつかなかった。これは、今後の課題としたい。

[86] *Birch*, 4, pp. 459 & 461.

[87] Allan Chapman, 'The Accuracy of Angular Measuring Instruments Used in Astronomy between 1500 and 1850', *J. Hist. Astron.*, 14 (1983), pp. 133–137 (p. 134); Albert van Helden, 'The Telescope in the Seventeenth Cenruty', *Isis*, 65 (1974a), pp. 35–58 (p. 58).

[88] Chapman(1983), p. 134; Helden(1974a), p. 58; Thomas S. Kuhn, *The Copernican Revolution* (Cambridge, Mass., 1957), pp. 200–201 [常石敬一訳、『コペルニクス革命』、紀伊国屋書店、1976年、285ページ].

半球でしか観測できない南天の星表を作成した。彼が王立協会の会員に選出されたのは、それから2年後の1678年11月のことだった。この年に彼は、『南天の星のカタログ(*Catalogus stellarum austoralium*)』をロンドンで出版した。

ヘヴェリウスが若いハレーの観測に関心を持ったのは、ちょうどこの頃のことだった。一方のハレーも、この前後に、当時最も有名な学者の一人であったヘヴェリウスの観測器機や観測法を知るために、ダンツィヒ訪問を計画したのだった[89]。

ハレーがダンツィヒに着いたのは、1679年5月26日(新暦)であった[90]。ヘヴェリウスは、南天観測の経験のあるハレーの到着に非常に喜び、彼を歓待した。ハレーは7月18日(新暦)までダンツィヒに留まり、ヘヴェリウスと共同の観測を行なった。

ハレーは、二種類の照準を比較するために、ダンツィヒに望遠照準を持参した。彼は、セント・ヘレナ島の観測の際に望遠照準のついた大きな六分儀(半径5フィート)を用いており、二つの照準を比較するのに適した人物であった[91]。

彼らの観測は、ハレーが到着した日にさっそく開始された。そのすぐ後に、ハレーはジョナス・ムーア(Jonas Moore, 1617–1679)に書簡を送り、ヘヴェリウスの観測についてコメントした。その内容は、6月5日(旧暦)の王立協会の会合で、フックによって発表された。それによると、

> ハレー氏は、ヘヴェリウス氏の観測と器機を見た。それらは、非常に素晴らしいものであったが、全て通常の照準を装着していた。彼は、ヘヴェリウス氏がこれらの装置を用いて二つの恒星の距離を観測するのを見た。それらは、1分の半分まで測定ができたが、[星と星の距離が]1分以下の場合に、彼はそれをすることができなかった[92]。

このことは、人間の眼の分解能が1分であるというフックの主張を裏付けていた。だが、これは同時に、たとえ隣接する対象について肉眼の分解能が1分しかなくとも、これより大きく離れた観測対象であれば、1分以下の精度まで測定することが可能であることを意味していた。これは、フックの立論の弱点であった。

ハレーは、7月17日(新暦)、ヘヴェリウスの観測についてフラムスチードにも書簡を送った。そこでハレーは、次のように書いた。

---

[89] MacPike(1937), pp. 84–85. マックパイクは、ハレーの訪問が、ヘヴェリウスと文通のあったフラムスチードの勧めによる可能性があるとしている。なお、フラムスチードの書簡類はケンブリッジに、ヘヴェリウスの手稿類はパリにある。これらの分析には、多年にわたる国際共同研究が必要と思われる。

[90] 以下の記述は、MacPike(1937), pp. 85–89と*Phil. Trans.*, 15 (1685), No. 175, pp. 1162–1170による。

[91] MacPike(1937), p. 39.

[92] *Birch*, 3, p. 488.

六分儀による距離の測定に関しては、その測定値がとても良く合うことを知って、私は本当に大変驚きました。もし自分で目にしていなかったら、そういう話を信じることはまずできなかったでしょう。実際、私は同じ距離を何度か繰り返して測定したのですが、10秒と誤差があることはありませんでした[93]。

ヘヴェリウスはハレーの持ってきた望遠照準を使った観測も行なったが、通常の照準以上の測定をすることはできなかった[94]。

ハレーは、セント・ヘレナ島時代から後年のグリニッジに至るまで、望遠照準を使用した天文学者である。しかし、ハレーは、ヘヴェリウスの観測に対して上のような好意的な報告を行なった。ハレーは、ダンツィヒを発つ際に、ヘヴェリウスへの感謝と、彼の観測が信頼できることを保証する手紙を書き残した。

ヘヴェリウスが火事の不幸に見舞われたのは、ハレーが去って間もなくのことであった。1679年9月26日、ダンツィヒのヘヴェリウスの館は火災に襲われ、彼の天文台は破壊された[95]。幸いにも、貴重な手稿類と製本された書籍類は焼失を免れたが、未製本のものは失われた。そのため、出版されたばかりの『天文機械・後編』は、わずかな部数を除き、現在に伝わることがない。ヘヴェリウスは数年のうちに天文台を再建したが、それは元の水準に戻らなかった。ヘヴェリウスは、そのような不幸な状態の中で、1687年、生涯を閉じた。

水準器と赤道儀

これまで論じたように、フックの『批判』は、望遠照準をめぐるヘヴェリウスとの論争の一環として出版されたものだった。だが、そこには、望遠照準以外のフックの天文器機も収められた。その一つは新しい水準器であり、四分儀などを正しく垂直に据えるのに使用されるものである（第47図中の原図番号 fig. 24）。これは、水を詰めた容器に空気の泡を入れた、現在もお馴染みの装置である[96]。封入された水の中には硝酸などが混入され、不凍液の役割を果たしている。この装置を観測器機に取り付けることによって、精密に水平を得ることが可能で、そこから鉛直を得ることもできる。この鉛直は、おもりと糸を使った通常の仕掛では作ることのできない正確さを持つものであるという。

---

[93] Eugene F. MacPike (ed.), *Correspondence and Papers of Edmond Halley* (Oxford, 1932), pp. 42–43 (p. 43).

[94] *Phil. Trans.*, 15 (1685), No. 175, p. 1168.

[95] 火事の詳細については、*Correspondence and Papers of Edmond Halley*, Appendix I を見よ。イギリスでは、最初ヘヴェリウスが死んだという情報が流れた。例えば、*Diary 1672–1680*, p. 423. 彼が火災にあったことについては、王立協会で1679年12月18日に報告があった。*Birch*, 3, p. 519.

[96] *Gunther*, 8, pp. 97ff. ただし、現在のものに比べて空気の泡が大きい。

フックは『批判』で、皿に水銀を乗せたレンの水準器を紹介した[97]。しかし、フックの装置は、これに比べてかなり洗練されていた。フックがこの水準器を王立協会に示したのは『批判』よりかなり早く、1666年11月のことだった[98]。フックは、その後もいろいろのタイプの水準器を王立協会で発表した[99]。『批判』にも、第47図中のfig. 25–27のように、先のものとは異なるいくつかのタイプの水準器が収められた。

『批判』に登場するフックのもう一つの工夫は、今日の赤道儀にあたるものであった。これは、観測器機全体を、星の動きに合わせて動力で回転させる装置である[100]。高倍率の望遠鏡で観測すると星の動きは予想外に速く、自動的に星を追尾する赤道儀は、天文観測に不可欠のものとなっていく。実際、これと似た装置がヘヴェリウスによって1668年にオルデンバーグに伝えられており、この種の工夫が求められていたことが分かる[101]。

フックの装置は、第47図のfig. 15のようなものである。ここで赤道儀を駆動するのは回転軸abであり、その動力は、おもりxによって与えられる。おもりの落下運動は歯車に伝えられ、歯車の回転運動は円錐振子pによって制御される。円錐振子は普通の振り子同様に一定の回転周期を持つ。その回転が、フライホイールnnを媒介にして歯車に一様な運動を与える。

フックは、この議論の脱線として、円錐振子発明の先取権を申し立てた[102]。ホイヘンスは、『振子時計(*Horologium oscillatorium*)』(Paris, 1673)の第5部で、円錐振子を簡単に論じた[103]。フックはこれに対して、円錐振子は自分が1665年に発明し、翌年に王立協会に知らせたものであると主張した[104]。

『批判』の赤道儀を論じた部分で、フックは、ユニバーサル・ジョイントの記述も与えた[105]。ユニバーサル・ジョイントは、英語でフック・ジョイント(Hooke's joint)とも称されることから分かるように、彼の発明品である。第47図・fig. 22が示すように、ここでフックは、垂直に据えた四分儀を赤道儀で駆動する

---

[97] *Gunther*, 8, p. 101; *Birch*, 3, pp. 133, 154 & 157.

[98] *Birch*, 2, p. 128.

[99] フックが発明した様々な器機を*Birch*を中心にサーヴェーしたものとして、J. A. Bennett, 'Robert Hooke as Mechanic and Natural Philosopher', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 35 (1980), pp. 33–48がある。水準器については、この論文のnote 51を参照。

[100] *Gunther*, 8, pp. 102ff.

[101] Hevelius to Oldenburg, 19 November 1668 (O. S.), *Oldenburg Corresp*, 5, pp. 181–192 (pp. 183, 187 & 190–192). これは、ヘヴェリウスの友人のアイディアであった。フックのものとは異なり、駆動には通常の振子時計が用いられた。

[102] *Gunther*, 8, pp. 105–106.

[103] *Oeuvres*, 18, pp. 73–368 (pp. 360–365).

[104] 第I部第五章の冒頭を参照。

[105] *Gunther*, 8, pp. 108–109.

例を述べた。

フック自身がここでも言及し、『太陽望遠鏡について』で図示したように（第48図）[106]、ユニバーサル・ジョイントは、元来は時計の針を日時計の影に重ねて駆動するための工夫として考案された。それは、地球の楕円軌道運動が引き起こす太陽運動の不斉を考えるのに応用できるものとされた[107]。ユニバーサル・ジョイントは、水準器や赤道儀同様に、フックの天文研究と深い関係を持つ存在であった。

フックは、彼の『批判』を、これらの諸装置を使用する目的について記して結んだ。彼によれば、それらの工夫は、「地理学、天文学、航海術、哲学、自然学等の改善」に役立つものである。もっと具体的にいえば、大気による光の屈折が天文観測に与える影響を見いだし、恒星や惑星の位置を決定し、いろいろな場所の緯度を定め、惑星と地球の相互作用を調べ、地上の二点間の角度を測り、その二点間の距離を測定し、星の直径を定め、さらに測量を行なうのに用いられるのだった[108]。

恒星の年周視差の測定

以上のようなフックの天文器機は、当時のイギリスの天文学の伝統の延長線上にあったといえる。例えば、フックの長大望遠鏡への取り組み、あるいはそれを短縮する試みは、まさにイギリスにおける「ガリレオ・パラダイム」の上にあった。フックは、接眼マイクロメーターや望遠照準に取り組んだ。これらはともに、ガスコインによって発明され、前者はタウンリーの手で、後者はレンを媒介に、フックに伝えられたものと考えられる。それらはフックによって改良され、あるいは周辺にそれを使い易くするための新しい器機がつけ加えられた。

だが、フックの天文研究は、単に他人の行なったことの繰り返しや改良に尽きるものではなかった。フックは自ら天文観測を展開したが、以下に述べるように、彼の恒星の年周視差検出の試みは、精密な観測装置が登場し始めたこの時期になって、ようやく現実に視野に入ってきた問題であった。その課題自体は、レンによっても認識されたが、その観測が実行されることはなかった[109]。フックの年周視差の観測は、イギリスにおける「ガリレオ・パラダイム」にとって新しい問題だった。

フックの年周視差の観測に関する記録は、1666年6月20日の王立協会の記録

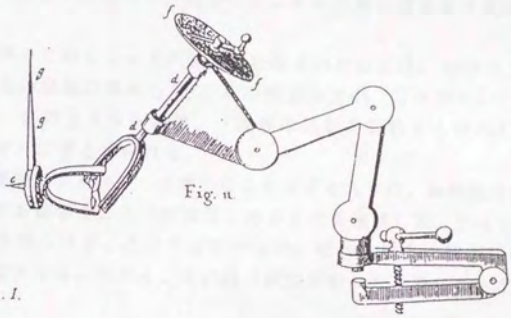
---

[106]『太陽望遠鏡について』の本文には、ユニバーサル・ジョイントの詳しい説明がある。ユニバーサル・ジョイントという呼び名は、発明者フック自身が与えた名称であった。 *Gunther*, 8, pp. 133ff.

[107] *Birch*, 2, pp. 156 & 158–160.

[108] *Gunther*, 8, pp. 111–114.

[109] Sprat(1667), p. 315; Christopher Wren, Jr., *Parentalia: Or, Memoirs of the Family of the Wrens* (London, 1750), p. 198.



第48図　日時計に使用されたユニバーサル・ジョイント
（「太陽望遠鏡について」、Table 1 より）

に最初に現れる。そこには、次のような記述がある。

彼［フック］は、地球の軌道による視差を秒単位まで観測することに乗り出した。そしてまた、筒を使用しない長い望遠鏡による観測も始めた[110]。

翌年1月9日の会合でフックは、会長からこれを早急に進展させるように勧めを受けた[111]。

年周視差観測のためにフックの装置が設置されたことは、1668年10月22日の王立協会の会合の記録に現れる[112]。その観測装置や、これを用いてフックが行なった観測は、彼のカトラー講義、『地球の運動を証明する試み』（以下再び『試み』と略す）にまとめられた。

『試み』の最初でフックは、合理的な思考をする人々に、地動説の証拠として、年周視差の観測を提供することが重要であることを強調した。ティコやリッチョーリは、視差を見つけることができなかった。だが、彼らの観測精度は30秒を越えることはなかった。だから、それは「決定実験」たり得なかったとフックは主張した[113]。

彼が言うには、観測精度は30秒どころか1分を越えることも実は困難である。観測装置は温度、湿度の影響を受け、自重でゆがみ、目盛り付けも難しい。しかし、最大の困難は肉眼の限界であり、1分以下を識別することはできない[114]。それゆえにフックは、望遠照準を使用し、装置の歪みをさけるために、全体をグレシャム・カレッジの彼の部屋に組み込んだのだった（第49図のfig. 4）[115]。

望遠鏡の対物レンズは、屋根に埋め込んだ筒の中に入れられており、接眼レンズは、階下に置かれたスツールの孔ggに組み込まれた。観測はこのスツールの下に横たわって行なわれる。天頂部分を観測対象とするのは、大気の屈折の影響を避けるためである[116]。天頂方向からの光は、大気に垂直に入射して来るので、屈折を受けない。屋根の対物レンズの焦点距離は36フィートであり、視差の検出に用いられた接眼マイクロメーターは、図中の原図番号fig. 7で示されているものだった。これは、9インチの真鍮の丸い枠に髪の毛を張ったものである。cd上の角距離は、これに斜めに交わる二本の糸を媒介に、右横の定規opで定められる。こ

[110] *Birch*, 2, p. 98.

[111] *Birch*, 2, p. 139.

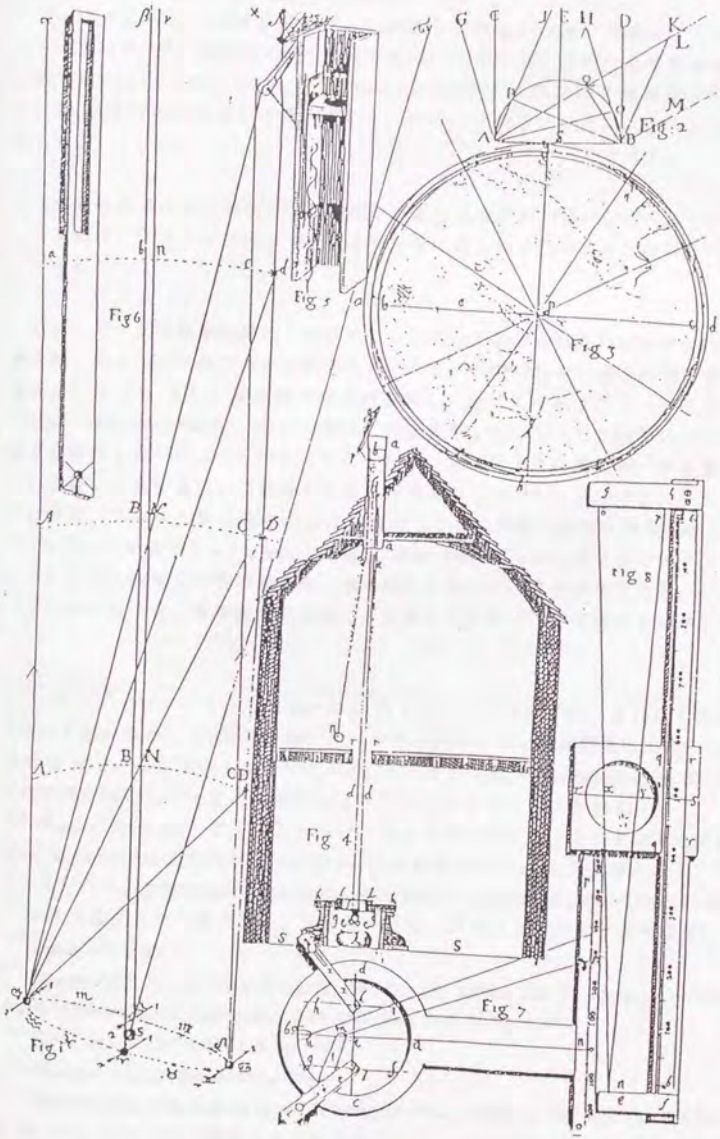
[112] *Birch*, 2, p. 315.

[113] *Gunther*, 8, pp. 3–4. 当然のことながら、ティコとリッチョーリは、コペルニクス説に反対する立場から視差を考えた。

[114] *Gunther*, 8, pp. 8–9.

[115] *Gunther*, 8, pp. 16ff.

[116] *Gunther*, 8, p. 15.



第49図　恒星の年周視差を検出するためのフックの装置
装置はグレシャム・カレッジの彼の部屋に設置された。
（『地球の運動を証明する試み』より）

うして、星の位置が精密に測定されるのだった[117]。

フックがこのような天頂儀を使って観測を開始したのは、1669年7月6日のことであった[118]。観測の対象となったのは、天頂に近い星座である竜座の中の一番明るい星（γ星）だった[119]。彼はこの観測と10月20日の観測結果を比較し、約20秒の角度の変化を見いだした。このことからフックは、次のように結論した。

竜の頭の部分にある恒星には、地球の軌道による視差が認められる。したがってこれは、プトレマイオスやティコのものに対してコペルニクスの体系の確証となる[120]。

だが、フックの観測結果は、学界で正しいものと認められたわけではない[121]。例えば、ホイヘンスはフックの研究を讃えたが、同時になお一層の観測が必要と考えていた[122]。また、望遠鏡や顕微鏡を詳しく論じたウィリアム・モリニュー(William Molyneux, 1656−1698)の『新しい屈折光学』も、フックの観測についての態度を保留した[123]。一方フラムスチードは、1694年1月に観測データを整理している際に、北極星に年周視差があることを見つけた[124]。

1725年、フックと同じ竜座のγ星を観測してその運動の不整を発見したのは、ジェームズ・ブラッドレー(James Bradley, 1693−1762)だった。彼は当時オクスフォードのサヴィル天文学教授であり、後にはグリニッジ天文台長を勤めた。

ブラッドレーは、年周視差の検出に、裕福なアマチュア天文研究家のサミュエ

---

[117] このマイクロメーターは、1669年12月2日に王立協会で紹介されたものに該当すると思われる。*Birch*, 2, p. 409. フックは『試み』で、測定器具の工夫として、第49図 fig. 8として現れるようなマイクロメーターも述べた(*Gunther*, 8, pp. 20−21)。これは既に論じたフックの手稿にも現れていたものである（第34図）。

[118] *Gunther*, 8, p. 23. フックとレンは、ちょうどこのころ、ロンドン大火記念塔(The Monument)の設計を行なっており、これを中空に作って、天頂儀とすることを考えたという。J. A. Bennett, *The Mathematical Science of Christopher Wren* (1982), p. 42.

[119] γ星エルタニン（あたま）。2.23等の巨星。グリニッジにおける天頂星。

[120] *Gunther*, 8, p. 25.

[121] Bennett(1982), p. 42; Allan Chapman, *Dividing the Circle: The Development of Critical Angular Measurement in Astronomy, 1500−1850* (New York, 1990), p. 87.

[122] *Phil. Trans.*, 9 (1674), No. 105, pp. 90−91.

[123] *Dioptrica nova* (London, 1692), p. 276.

[124] Henry C. King, *The History of the Telescope* (London, 1955), pp. 110−111; MacPike(1937), p. 26. マックパイクの議論からも分かるように、この時期には、カッシーニも年周視差が持つべき性質について論じていた。これに対するフラムスチードの批判的反応の例として、彼のレン宛の書簡が、Wren, Jr.(1750), pp. 247−254にある。

ル・モリニュー (Samuel Molyneux, 1689−1728) の観測装置を使用した。彼らの観測によれば、竜座のγ星は最大で20秒の変位を見せた。だが奇妙なことに、その方向は、年周視差で生ずるべき変位と逆向きだった。このアノマリーから出発し、観測を継続してブラッドレーが有名な光行差の発見に至ったのは、1728年のことであった[125]。

このことから分かるように、遡及的に見れば、フック自身は年周視差の観測に失敗した。年周視差の観測には、実はブラッドレーも成功せず、それが確認されたのは、ようやく1830年代のことであった。とはいえ、フックの観測は、その後の一連の年周視差の観測の導火線となった可能性が高い[126]。

フックと空中望遠鏡

フックが年周視差の観測のために用いた天頂儀は、空中望遠鏡 (aerial telescope) の一種と見なすことができる。空中望遠鏡とは、対物レンズと接眼レンズの間を結ぶ長い筒を省いた長大望遠鏡のことである[127]。長大望遠鏡は、その大きさ故に設置が困難であり、自重や風の影響で歪みが生じやすい。これを避けるために、筒を用いない望遠鏡が作製されたのだった。

空中望遠鏡のうち現在最も良く知られているのは、ホイヘンスによるものであろう（第50図）。これは、ハーグで1684年に出版された彼の著書、『簡便な天体望遠鏡 (*Astroscopia compendiaria*)』に収められたものであった[128]。

フックは、その年の6月25日に、ホイヘンスの著書について説明を与えた。その冒頭で彼は、自分がかなり以前に空中望遠鏡の発明を王立協会に知らせたことを申し立てた[129]。事実、フックが上述の天頂儀を使用したのは、1669年であ

---

[125] King(1955), p. 112; 広瀬秀雄、『天文学史の試み』（誠文堂新光社、1981年）、240ページ以下。光行差は地球の運動に伴って生じるため、年周視差に代わって地球の運動を証明する証拠となった。

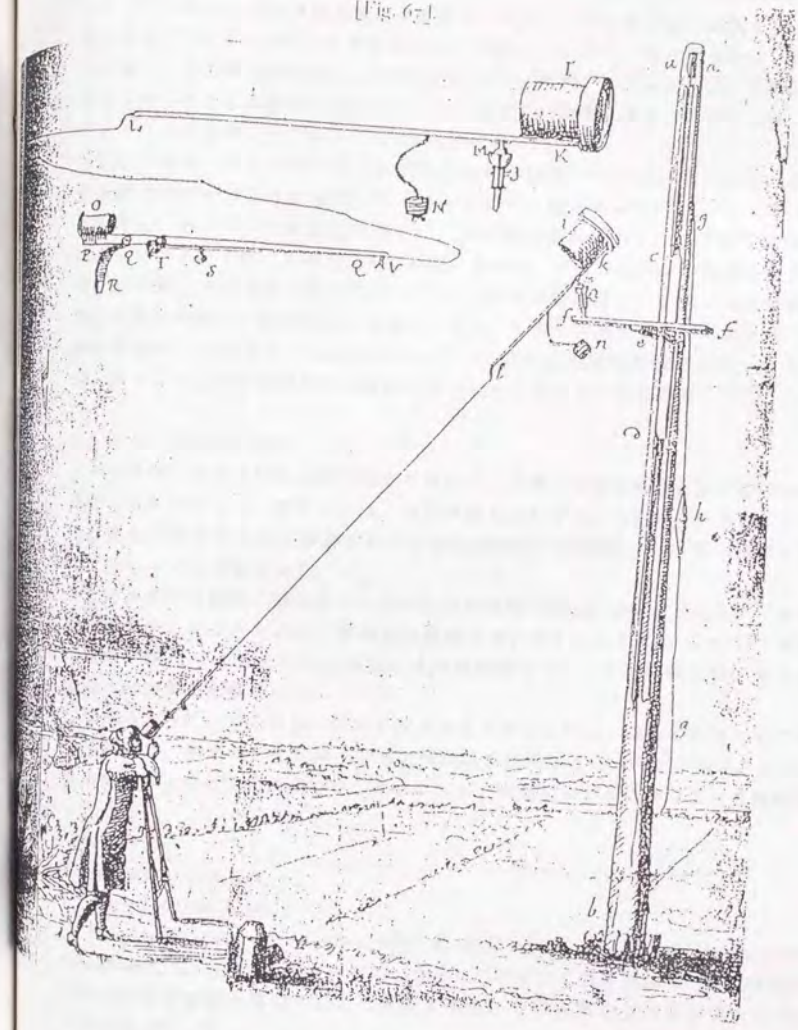
[126] フックの著書のうち、ラテン語訳のあるものは二つしかない。『試み』は、その一つである。*Conamen ad motum telluris probandum* (London, 1679). もう一つは、彼の毛細管現象論の著作である。

[127] 空中望遠鏡と長大望遠鏡は、混同されることがある。例えば、Silvio A. Bendini, 'The Aerial Telescope', *Technol. Cult.*, 8 (1967), pp. 395−401. この論文では、長大望遠鏡一般が空中望遠鏡と呼ばれている。

[128] *Oeuvres*, 21, pp. 210−231; King(1955), p. 54.

[129] *Birch*, 4, p. 308. 発表の詳しい内容については、フックの草稿が、王立協会にある。Royal Society Classified Papers, vol. 20, No. 62, ff. 137−139. フックはここで、空中望遠鏡の散乱光の処理の問題などに触れた。また、球面収差に対するホイヘンスの対応を批判し、非球面レンズに期待をかけている。フックは空中望遠鏡の先取権の主張を、彼の遺稿でも展開した。それによると、彼の望遠鏡は、ホイヘンスに20年以上先立つものだったという。*Philosophical Experiments*, pp. 390−391.

[Fig. 67]



第50図　ホイヘンスの空中望遠鏡
（ *Oeuvres*, 21, fig. 67 より）

った。それだけではなく、1678年2月にも、彼は筒のない望遠鏡について王立協会で発表した。それは、対物レンズを板に取り付けたものを作り、これと接眼レンズ入りのセルの間に紐を渡した装置で、ホイヘンスの望遠鏡と似たものを想像させる[130]。フックのこの望遠鏡に対しては、ジョナス・ムーアらから、単なる理論上のものに過ぎないという批判があった。だが、「フック氏は、実際にそれを実行したことを断言した」のだった。彼がそれに使ったレンズの中には、ヘヴェリウスに送付した長焦点のレンズもあった[131]。

しかし実は、フックのこれらの試みに先だつ1663年に、ホイヘンスは、筒のない望遠鏡のマウントに成功したことをマレーに書き送っていた[132]。しかも、この時に、ホイヘンスの書簡に対して、空中望遠鏡のアイディアがその10年前にあったことがイギリスから伝えられた。それは、ニールとレンが視差を検出するために考えた天頂儀であった[133]。フックの空中望遠鏡と、これらの空中望遠鏡の相互の関係は、現在のところ分からない。しかし、空中望遠鏡の工夫は、視差の観測にとどまらず、1684年のカッシーニの土星の衛星観測に利用されるなど、様々な人の手で現実の天文観測に奉仕したことは確かなのである[134]。

グリニッジ天文台の設立

フックがこのような天文研究に取り組んでいる時、天文学を含む数学的諸科学を支えるグレシャム・カレッジは、衰退の途上にあった。しかし、一方で、専門的な天文学研究のための機関が新たに創設された。それが、1675年に設立されたグリニッジ天文台である。

その設置の目的は、国王チャールズ二世の命令(warrant)が示すとおり、「航海術と天文学の完成のために、諸地点の経度を見いだす」ことにあった[135]。経度決定の問題は、17世紀の最も重要な技術的問題だった。その解決には、天文学のための制度が必要だった。

周知のように、ある場所の経度を決定する方法としては、磁針の偏角などの表を作ること、標準時とその地点の地方時の差を利用することなどが考えられた。標準時を知るには、正確な時計を用いる方法、木星の衛星が本体によって掩蔽さ

---

[130] *Birch*, 3, pp. 388–389.

[131] *Birch*, 3, pp. 390 & 392.

[132] Huygens à Moray, 18 novembre 1663 (N. S.), *Oeuvres*, 4, pp. 431–433 (p. 433); Bennett(1982), p. 41. ピュグリーズは、ホイヘンスがここで言及している望遠鏡を純粋な空中望遠鏡と見なすことに異論を唱え、その発明を1683年以降とした。*Pugliese*, p. 587.

[133] Moray à Huygens, 29 novembre 1663 (N. S.), *Oeuvres*, 4, pp. 443–445 (pp. 444–445). 彼らの空中望遠鏡は、アイディアにとどまった。

[134] *Phil. Trans.*, 16 (1686), No. 181, p. 83.

[135] Eric G. Forbes, *Greenwich Observatory: Origins and Early History* (London, 1975), p. 22.

れるのを用いる方法、月と太陽や恒星の距離を測定する方法、月の子午線通過を測定する方法などが知られていた[136]。

王立協会では、1662年に、航海術教師のヘンリー・ボンド(Henry Bond)の提唱した方法が委員会で検討されていた。これは、磁針の偏角などを用いるものだった[137]。1663年4月には、王立協会で、黄道帯の星をサーヴェーすることが定められた。これもまた、経度決定に奉仕する可能性のあるプロジェクトだった[138]。

ロンドン大火後の1673年、ボンドは、磁石の偏角と伏角の詳細な表を提出した。国王チャールズ二世は、これを検討するための委員会を設けた[139]。その委員会が検討を進めているちょうどその時、王と王の愛人の庇護を受けていたあるフランス人が、月を利用して経度を見つける方法があると述べた。これに関心を持ったチャールズは、このフランス人の求めに応じて観測データを与えるように通達を出し、そのために新たな委員会が組織された。

この委員会の1675年2月の会合には、ジョン・ペル、フックらの他に、陸地測量部の将軍ジョナス・ムーア、天文観測家フラムスチードなどが出席したという。フラムスチードは独学の天文観測家として知られており、パトロンのムーアの紹介でこの会合に出席したのだった。彼は、この場でフランス人の提案を非難した。だが、委員会はフランス人にデータを与えることに決定し、そのデータは、フラムスチードによって提出された。問題のフランス人は、そのデータが古すぎることに不満を表明した。

このやりとりを見て、チャールズ二世は、航海に必要な天文基礎観測データが不足していることに驚いた。そこで彼は、3月4日、フラムスチードを「天体の運行と恒星の位置の表を作成するため」の天文観測者に任命し、100ポンドの年俸を与えることとした。さらに6月には、レンの推薦に基づいて選定されたグリニッジの地に、天文台が建設されることになった。礎石は8月に置かれ、翌年の9月19日、フラムスチードはグリニッジ天文台における観測を開始した[140]。

フラムスチードと精密観測

フラムスチードは、1676年から1689年にかけて、グリニッジ天文台で約2万回の観測を行なった。その観測は、彼の没後の1725年に、『英国天文史』として出版された。これは、三千にのぼる恒星の正確な表であり、約10秒の精度を誇った。

---

[136] Robert K. Merton, *Science, Technology and Society in Seventeenth Century England* (New York, 1970), p. 167; Bennett(1982), pp. 44−45 & 50−51. 天体を利用する場合には、正確な天文表との対照が鍵となる。

[137] Hunter(1981), p. 95; *Birch*, 1, p. 104.

[138] *Birch*, 1, pp. 219, 220 & 233. フックとレンは、牡牛座を分担した。

[139] Forbes(1975), p. 15.

[140] Forbes(1975), pp. 18−23.

彼がこの観測に使用した器機は、第51図のようなものであった[141]。これは、半径7フィートの六分儀であり、ロンドンの職人、トーマス・トンピオンとエドワード・シルベスター(Edward Sylvester)の製作したものだった。国王チャールズ二世は、フラムスチードの給与は支払ったが、観測器機のための費用を準備しなかった。だから、この六分儀は、ムーアがフラムスチードに寄贈したものだった[142]。

六分儀には二台の長い望遠照準が据え付けられ、ネジで動くようになっていた。両者の成す角度は、ネジの回転数と角度目盛りから読みとることができる。これで、レンの二重望遠鏡同様、実質的に接眼マイクロメーターと等価の効果が得られた。フラムスチードの六分儀は、通常の照準に対する望遠照準の優位をいかんなく示す装置であった[143]。

フラムスチードがグリニッジで使用した器機の中には、フックが作製したものもあった。フックは、フラムスチードの庇護者であるムーアから、安価な壁四分儀(mural quadrant)を作ることを引き受けた(第52図)[144]。この装置は径が10フィートで、ロンドンのトムソン(Thomson)という職人によって作製され、1676年に天文台に設置された。しかしこれは、子午線上で星の高さを定めるという目的に耐えなかっただけではなく、操作の際にけがをしかねない代物だった[145]。

グリニッジ天文台には、フックのネジ式の3フィート四分儀もあった。こちらは、時間の決定や大気による屈折の測定などに実際に使用された[146]。この四分儀は、フックの設計に基づいてトンピオンが作製し、グレシャム・カレッジの収蔵庫に収められていたものである。それは、1677年1月の王立協会の命によって、フラムスチードに貸出された[147]。その構造は、フックが『批判』で記述した四分儀と同じで、二本の望遠鏡とネジ式駆動装置が付いていたと考えられている[148]。

---

[141] Derek Howse, *Greenwich Observatory: The Building and Instruments* (London, 1975), pp. 75–79.

[142] Forbes(1975), p. 29.

[143] King(1955), p. 107.

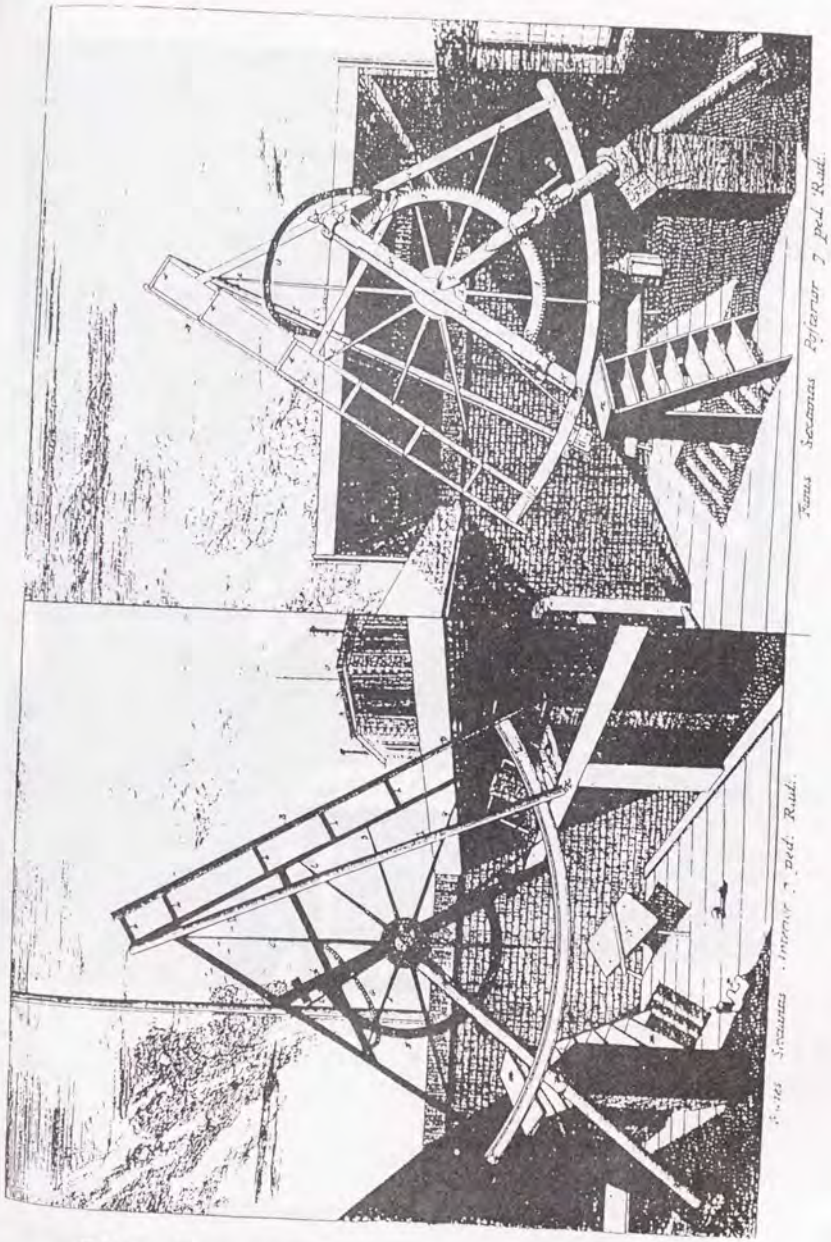
[144] Forbes(1975), pp. 29–30; Howse(1975), pp. 17–19.

[145] Flamsteed to Moore, 16 July 1678, Royal Greenwich Observatory, P. R. O. [Public Record Office], vol. 36, ff. 61–62, in Francis Baily, *An Account of the Revd. John Flamsteed* (London, 1835–7, repr. 1966), pp. 116–118 (p. 118). なお、フラムスチードの書簡については、現在ケンブリッジ大学図書館において、ウィルモス女史(Ms. F. H. Willmoth)によって書簡集の編纂が進められている。同女史のご厚意で、編纂中の原典のトランスクリプトも参照することができた。

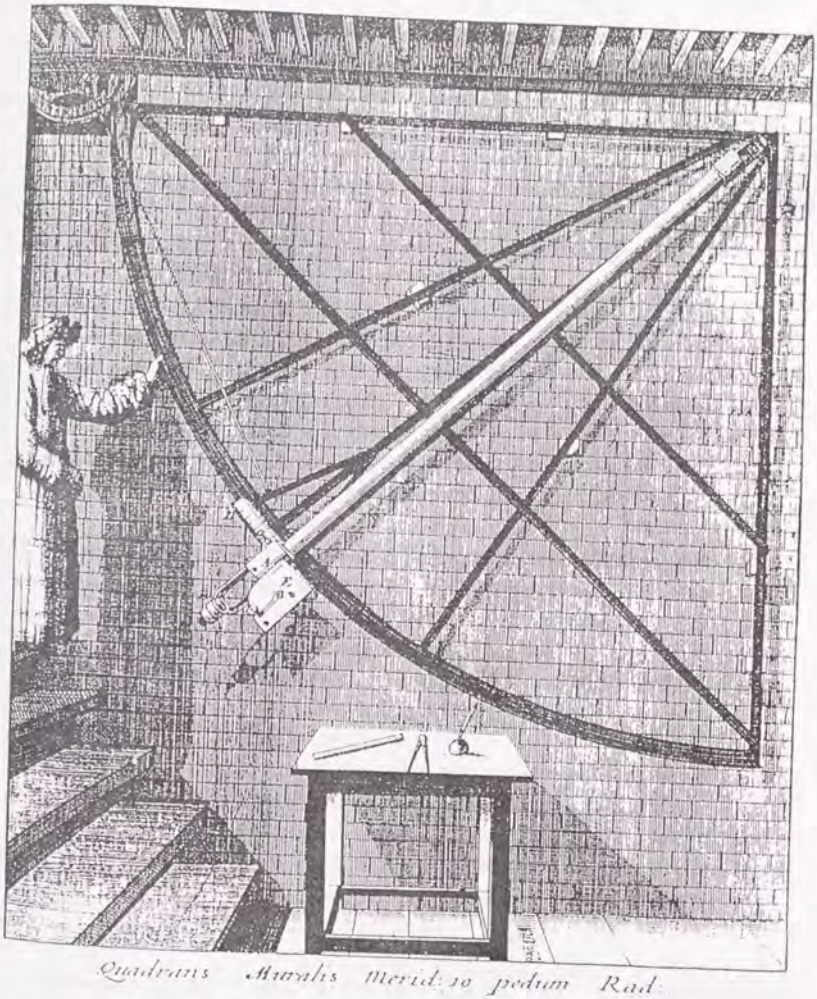
[146] Forbes(1975), pp. 31 & 36; Howse(1975), pp. 111–112; *Pugliese*, pp. 587–589; Flamsteed to ?, 24 October 1705, P. R. O. vol. 36, ff. 77–78 [ウィルモス女史提供のトランスクリプトを使用]。ピュグリーズは、フックの二つの四分儀を混同している。

[147] *Birch*, 3, p. 331.

[148] Howse(1975), p. 111. 『批判』の四分儀については、第五章参照。



第51図　グリニッジ天文台でフラムスチードが使用した六分儀
（Howse(1975), Fig. 68 より）



HOOKE'S 10-FOOT MURAL QUADRANT, ABOUT 1676

第52図　グリニッジ天文台のフックの10フィート壁四分儀
（Howse(1975), Fig. 19 より）

1679年8月、ムーアが死ぬと、フックはこれを天文台から回収した。フックは、自分の四分儀がムーアの所持品と誤解されるのを恐れたのである。フラムスチードは、フックが四分儀を留守中に無断で持ちだしたことに動転したといわれる[149]。

フラムスチードが数多くの天文観測に使用した六分儀は、望遠照準を用いたものだった。また、フックが作ったグリニッジの装置も望遠照準を使っていた。フラムスチードは、グリニッジ天文台発足の時に、二本の望遠鏡と、接眼マイクロメーターを持参していた[150]。彼は、ロンドンに移る以前の1671年、ムーアから接眼マイクロメーターをプレゼントされた。ムーアは、これをリチャード・タウンリーから得たのだった[151]。フラムスチードは、望遠照準や接眼マイクロメーターという精密観測器機に、早い時期から馴染んでいた。

このことから当然予測されることだが、フラムスチードは、通常の照準によるヘヴェリウスの観測に対して批判的な態度をとった。先に引用したように、『フィロソフィカル・トランザクションズ』に掲載されたカッシーニ宛の1673年の書簡の中で、フラムスチードは、ヘヴェリウスの観測データへの疑問を表明した。

フラムスチードは、それから約10年ほど経った1686年にも、ヘヴェリウスに批判的な態度を表明した。ジョン・ウォリスがヘヴェリウスを弁護したことに対し、フラムスチードはタウンリー宛の手紙の中で、次のように述べた。

> あなたはヘヴェリウスの本についてのウォリス博士の説明を気遣う必要はありません。彼は、ただ旧友を喜ばせようとして、彼［ヘヴェリウス］のことを良く言っているだけです。というのは、世間の他の人たちが、フック氏がどうしようもない自慢屋と思っていると彼は感じているからです。加えて、彼は大きい器機を一度も使ったことがなく、それ故に、通常の照準より望遠照準が優れていることを分かっていないからなのです[152]。

エドモンド・ハレーは、フラムスチードを継いでグリニッジ天文台の台長となった。知り合った当初の2人の協力と、その後の仲たがいは良く知られていることである。だが、ハレーもまた、ヘヴェリウスの通常の照準弁護に対しては同様に批判的だった。確かにハレーは、ダンツィヒ訪問の際に、ヘヴェリウスの通常の照準による観測が予想を越えて正確であることをイギリスに書き送った。しか

---

[149] Howse(1975), p. 112; *Pugliese*, pp. 578–579. 天文台からいくつかの観測器具を撤去することが王立協会で決定されたのは、その後の9月22日だった。*Birch*, 3, p. 504.

[150] Howse(1975), p. 107.

[151] Forbes(1975), p. 27. ムーアと会う以前に、フラムスチードが接眼マイクロメーターを持っていたという説もある。*DSB*, 'Flamsteed', vol. 5, pp. 22–26 (p. 22).

[152] Flamsteed to Towneley, 15 March 1686, Royal Society MS. 243 (F1), MS Letters: Flamsteed to Towneley 1672/3 to 1686/7, No. 67.

しそのことは、彼が通常の照準の使用を支持したことを意味するものではなかった。1686年の書簡の中でハレーは、ヘヴェリウスの『晩年』をめぐるやりとりに触れて、次のように書いた。

> あなたも良くご存知のように、ヘヴェリウス氏とフック氏の論争は、ヘヴェリウス氏のやり方からみて、望遠照準を使う全ての観測者に影響を与えるものです。私自身特にそうですが、真理を気むずかしいご老体から守ろうというのは、共通した関心事です。ご老体は、彼がしてきたよりも［観測が］上手くできるということを、信じさせようとはしてくれないのです[153]。

フックの天文研究の位置

前章と本章では、フックの天文研究を論じてきた。前章ではフックの観測の内容や長大望遠鏡との関わりに触れ、本章では接眼マイクロメーターと望遠照準を通じて、フックの精密天文観測への関わりを論じた。フックの天文学への関与は、研究者によって全く無視されてきたわけではない。ヘヴェリウスをオランダ人と誤解したピュグリーズがフックの天文学に深い関心を寄せていなかったことは明らかだが[154]、それでも彼は、彼の長大な博士論文の約4パーセントをこれに充て、ヘヴェリウスとフックのやりとりも取り上げている。

フックの天文研究自体にテーマを絞った論文としては、1989年の『ロバート・フック新研究』に、ベネットとシンプソンの二篇の論文が現れた。しかし両者とも、本論文の議論から見るならば、満足なものとは言えない。

例えば、ベネットの論文、「天文学や航海術のためのフックの器機 (Hooke's Instruments for Astronomy and Navigation)」は[155]、フックの接眼マイクロメーターや望遠照準を扱った。この論文は、フックやレンの精密観測装置がヘヴェリウスに対抗するものであったことを指摘しており、その点で、従来の研究水準を越えている。しかしベネットは、フックの天文器機を当時の天文学全体の文脈に位置づけることができなかった。ベネットは、フックが長大望遠鏡に関わったことに言及しておらず、彼の惑星観測についても論じていない。また、接眼マイクロメーターをめぐるオズーとの論争も、ベネットは扱わなかった。それは、フックの器機への貢献を、天文学ではなく、器機作製 (instrumentation) という枠組みの中で捉

---

[153] Halley to Molyneux, 27 March 1686, Eugene F. MacPike (ed.), *Correspondence and Papers of Edmond Halley* (Oxford, 1932), p. 60.

[154] *Pugliese*, p. 567. 日本でフックを取り扱った数少ない好著の一つである島尾永康、『ニュートン』（岩波新書、1979年）も、ヘヴェリウスの名前を「ヘルベティウス」と記述（81ページ）するなど、フックと天文学の関わりについては十分な扱いをしていない。

[155] *New Studies*, pp. 20–32.

えようとしてきたベネットの限界によるものと思われる[156]。

シンプソンの論文、「ロバート・フックと実用光学(Robert Hooke and Practical Optics)」[157]もまた、同様の問題点を抱えている。この論文は、リーヴやコックなどの光学器機職人と、フックの関係を詳しく扱っている。しかし、フックの光学器機が、実際にどのような研究の流れの中で要請されたのかについて、シンプソンの論文から読みとることはできない。例えば、シンプソンはフックの望遠鏡短縮の試みに言及しているが、それは単に技術的な改良の問題として扱われている。17世紀中葉に長大望遠鏡が占めていた地位と、その抱えていた問題点を天文学のコンテクストの中で勘案しない限り、フックの研究の歴史的意味は不明なままである。シンプソンは、オズー、ヘヴェリウスなどの他の自然哲学者とフックの関係も分析しておらず、精密観測という当時の重要課題もまた見落とした。

ベネットもシンプソンも、科学器機を専門とする博物館の 'curator' であるから、彼らのこのような限界は、必ずしも非難されるべきことではない。だが、実験器機という観点を離れ、科学史研究としてフックを扱う場合、彼らの研究は不十分であり、当時の天文研究の文脈を考慮することが必須であることは強調されなければならない。

これまで本論文で論じてきたように、フックの天文関係の研究は、筆者が「ガリレオ・パラダイム」と名付けたものの第二期に対応すると考えれば最も良く理解できる。フックは惑星の細部の観測を行ない、それは長大望遠鏡によって遂行された。彼は、長大望遠鏡を扱い易くするために、その短縮にも関心を持った。フックは、精密観測という、この第二期の新しい流れにも関与した。フックは、オズーと接眼マイクロメーターの問題を論じ、ヘヴェリウスに望遠照準を推薦し、自らその改良に取り組んだ。ヘルデンが指摘したように、フックとヘヴェリウスの論争は、「位置天文学の分水嶺」であり[158]、半世紀近く前にアンドレードが指摘したように、その差異は、「精度の限界」に対する態度の違いにあった[159]。

ベネットは、精密観測へのフックとヘヴェリウスの対立を、イギリスのグループとヘヴェリウスの対立というより広い枠組みから見た[160]。イギリスのグループには、ベネットの挙げたレン、フック、フラムスチードに加えて、ハレーを含めることができよう。これらの天文研究者は、望遠照準と接眼マイクロメーターという「近代的」な装置の将来性を予見し、自らそれを使用した。これに対して、彼らより一世代以上年長のヘヴェリウスには、新しい観測器機の可能性を追求する若さはもはやなかった。イギリスでは、フラムスチードが、フックの直後に、

---

[156] Bennett(1980), p. 33.

[157] *New Studies*, pp. 33–61.

[158] Helden(1974a), p. 55, n. 93.

[159] E. N. da C. Andrade, 'Robert Hooke', *Proceedings of the Royal Society*, Series A, 201 (1950b), pp. 439–473 (p. 456).

[160] Bennett(1982), pp. 42–43.

精密観測装置を駆使して、職業天文学者にふさわしい精度の天文表を完成する。望遠鏡による観測は、こうしてティコやヘヴェリウスらの水準を凌いだ[161]。

興味深いことに、フック、フラムスチード、ハレーらの人々は、今日の意味での「科学者」に近い立場にあった。すなわち、フックは王立協会の実験主任であり、またフラムスチードとハレーはグリニッジ天文台の台長だった。彼らは、自然の探求を生業（なりわい）として生活に足りる賃金を得ていたのである。このように考えると、私的な観測者であったヘヴェリウスとイギリスのグループの対立を、アマチュア対プロフェッショナルの対立と解釈することもできるのではないかと思われる。

ところで、フックを天文学における「ガリレオ・パラダイム」の歴史的な流れの中で考えた場合、第I部で示したフックとニュートンの光学論争の解釈は、十分なものだったのであろうか。次章では、‘天文観測に精通したフック’という新しい観点から、彼らの論争を捉えなおしてみたい。この観点から見ると、両者の論争は、先に示したものとはかなり違った様相を呈することになる。それはまた、ニュートンの望遠鏡の歴史的な位置づけの再解釈をも要請するものなのである。

[161] MacPike(1937), p. 14.

第五章　フックとニュートンの光学論争

ニュートンの望遠鏡の登場

第I部第六章で論じたように、ニュートンが最初に学界にその名を知られたのは、彼の反射式望遠鏡の発明によるものであった。これまでの議論で明らかになったように、「ガリレオ・パラダイム」の内容は、イギリスでも関心の的になっていた。望遠鏡は、ニュートン登場直前の王立協会でもしばしば話題となった。例えば、フックの長大望遠鏡がヘヴェリウスに送付されたのは、1669年8月のことだった。1671年の6月には、フランシス・スメズィック(Francis Smethwick)が、王立協会で彼の望遠鏡を示した[1]。このような流れを考えれば、ほとんど無名のニュートンの望遠鏡の噂が王立協会まで伝わったのは、偶然ではない。王立協会の求めに応じて、ニュートンの望遠鏡は、1671年の12月ごろ、バローの手でロンドンにもたらされた。王立協会に残されたジョン・コリンズの12月26日の書簡の草稿には、ニュートンの望遠鏡の具体的な記述が見られる[2]。彼がロンドンで目にしたその望遠鏡は、5–6フィートの屈折式望遠鏡に匹敵する倍率を持つものだった。像は隈取りの色がなくクリアーだったが、屈折式に比べると暗かった。

ニュートンが会員に選出された1672年1月11日の協会の記録は、彼の望遠鏡が提出された直後の状況を、簡潔に伝えている。

> ニュートン氏の望遠鏡の短縮の改良が取り上げられた。また、彼が王立協会に送付したその望遠鏡が吟味され、それが国王の下に持って行かれたこと、さらに、会長［ブランカー］、ロバート・マレー卿、ポール・ニール卿、クリストファー・レン博士、フック氏によってホワイトホールでそれが検討され、彼らがこれを高く評価したことが論じられた[3]。

この記録から、いくつかのことが分かる。第一に、ニュートンの望遠鏡が、当

---

[1] *Birch*, 2, pp. 484–485.

[2] Collins to Vernon, 26 December 1671, Royal Society MS 81 (Commercium Epistolicum), No. 13, p. 102.

[3] *Birch*, 3, p. 1. 筆者自身もこれまで誤認し、また島尾も誤って記述してきたことだが（『ニュートン』、岩波新書、1979年、58ページ）、この引用から、国王チャールズ二世がニュートンの望遠鏡を見るために王立協会を訪ねたのではなく、ニュートンの望遠鏡の方が、当時の王宮であったホワイトホール宮に見聞のために差し出されたことが分かる。

初王立協会で、望遠鏡を短縮する試みと捉えられた点である。現在でも天文愛好家の常識であるように、反射式望遠鏡は、筒体が屈折式に比べて短い。前々章で論じたように、フックは1665年に、液体を封入することで長大望遠鏡の短縮を試み、さらに翌年には、反射鏡を利用して鏡筒を短く折り畳むことを考えた。だから、ニュートンの装置が望遠鏡の短縮の方法と解釈されたことは、ごく自然の帰結であった。そしてフック自身、ニュートンの望遠鏡が発表されると、望遠鏡短縮の先取権を確保しようとした形跡がある[4]。

第二に分かることは、ニュートンの望遠鏡を検討したのが、望遠鏡に精通した人々であったことである。繰り返し論じてきたように、ニール、レン、フックは、いずれも自ら望遠鏡作製に取り組んだ経験があった。また、マレーは、ホイヘンスにイギリスの望遠鏡について書き送った人物である。彼らには、ニュートンの望遠鏡を評価する能力が十分にあった。

第三に、これらの人々によるニュートンの望遠鏡の吟味は、王立協会における報告に先だって、ホワイトホール宮殿で行なわれていた。王立協会でニュートンの望遠鏡の実物が会員に示されたのは、協会での上の報告よりさらに後の1月18日の会合だった[5]。ホワイトホール宮殿では、ニュートンの望遠鏡は国王にも示された。

付言するならば、国王がニュートンの望遠鏡に関心を持ったからといって、これを過大評価すべきではない。我々は、王の関心を根拠に、ニュートンの望遠鏡が非常に高い社会的評価を受けたと解釈しがちである。しかし、国王チャールズ二世は、フランス亡命時代から自然哲学の愛好家であった[6]。1661年に彼は、レンに月のモデルの提出を求めた。チャールズは、自ら長大望遠鏡を所持していた。1661年にホイヘンスが国王を訪問した際、彼らは土星を論じ、木星とその衛星の観測を行なった。国王がニュートンの望遠鏡に示した興味は、彼の科学への広い関心の一つに過ぎなかった。その関心は、チャールズが拡声装置 (speaking trumpet) に示したものとさして変わらないものと理解されるべきなのである[7]。

もちろん、ニュートンの望遠鏡は、王立協会で低く評価されたわけではない。オルデンバーグがニュートンに宛てて書いたように、観測対象を見つけにくいと

---

[4] フックはこれをアナグラムで示した。フックのこの望遠鏡は、屈折を用いた工夫であったという。*Birch*, 3, p. 4; Simpson(1981), pp. 116−117; *Waller*, p. xv; *Newton Corresp.*, 1, p. 4.

[5] *Birch*, 3, p. 4.

[6] Michael Hunter, *Science and Society in Restoration England* (Cambridge, 1981), pp. 130−131. チャールズ二世は同時に、空気の重さの計測に熱中している学者をからかう、当時の社会的気風も備えていた。

[7] 'Speaking trumpet' (あるいは tuba stentorophonica) は、サミュエル・モーランド (Samuel Morland) によるもので、国王はこれを船舶の連絡に使用することを考えた。Simpson(1981), p. 93.

いう批判はあったものの、それは「光学の知識と実践に最も通じた何人かの人々によって考察吟味され、彼らの賞賛を受けた」のだった[8]。そして、ニュートンの望遠鏡について、ホイヘンスに詳しい記述が送られることになった[9]。その後の評価の変遷は後に論じるにしても、ニュートンの望遠鏡は、とりあえずは学界に良好なものとして受け入れられた。

フックの反射式望遠鏡批判とニュートンの反応

このような王立協会の反応に気を良くしたニュートンは、1672年に、論考「光と色についての新理論」を協会に送り、反射式望遠鏡の背景理論を明らかにした。それは光の変容説を批判し、白色光が屈折性の異なる様々な色の光線から成ることを主張するものであった。

フックは、この論考が王立協会で発表された一週間後に、ニュートンの理論に対する辛辣な批判を展開した。フックによれば、ニュートンの主張する現象は、自分の光の理論でも説明できるという。第I部の議論で明らかにしたように、フックは、光の波動説（変容説の一種）の立場から、ニュートンの粒子説を批判した。光線が様々な屈折性を持つというニュートンの発見は、波動説とも融合し得るとフックは考えた。

フックは、ニュートンの反射式望遠鏡にも批判を加えた。彼は、屈折式望遠鏡の像に生じる虹の隈取りを取り除くのは不可能ではないと主張した[10]。フックは、自分が『ミクログラフィア』で反射式の望遠鏡と顕微鏡に言及したこと、だが、凹面による焦点が一点ではなく線であり、また、凹面鏡の反射による光の焦点からの狂いが凸面による屈折の場合より大きいことを知って、反射式望遠鏡を諦めたと書いている[11]。ただし彼は、顕微鏡については、反射式を長い間使用したという。

フックは、王立協会の報告の中で、反射鏡の望遠鏡への利用について、自分の失敗の経験も引いた。

> 私は、実際、6フィートの半径の一つで、そのいかなる効果を見いだすこともできませんでした。それは、7–8年前に、リーヴ氏がグレゴリー氏のために作ったもので、私はそれで何度か試してみました[12]。

---

[8] Oldenburg to Newton, 2 January 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 73–74 (p. 73).

[9] *Ibid.*, pp. 74–76.

[10] *Birch*, 3, p. 12.

[11] フックは、『ミクログラフィア』で反射式顕微鏡には言及しているが(p. 23)、反射式望遠鏡に触れた部分は実際には見あたらない。フックの遺品の中から発見された反射式顕微鏡は、ウォラーによって、1711年4月5日の王立協会の会合に示された。Royal Society Journal Book, 10, p. 270.

[12] *Birch*, 3, p. 12.

次節以下で詳しく論じるように、フックがグレゴリーの反射鏡を利用して実験を行なったのは事実だった。

ニュートンは、フックが王立協会で展開した批判の内容を、1672年2月20日にオルデンバーグから受け取った。翌日の返信でニュートンは、「あれだけ厳しい反対者も、あのいずれかの部分を駄目にできるようなことは何も言わなかった」と述べ、「回答はすぐに送ります」と書いた[13]。しかし、その回答が実際に送付されるまでには、4カ月近くかかった。

この回答の一部は6月12日の王立協会会合で読み上げられ、『フィロソフィカル・トランザクションズ』に収録された[14]。そこでニュートンは、凹面反射鏡と、凸面レンズの収差の大きさを比較した。両者は同一口径で、同一焦点距離を持ち、各々の曲率半径は、6万単位対1万単位であった。ニュートンは、色収差も勘案して、双方の収差の大きさを計算した。その結果は、凸レンズの収差が凹面鏡より約20倍大きいというものであった[15]。

これに対してフックは、この前後のブランカー宛と思われる手紙で、同一口径ではなく、同一曲率半径の凸レンズと凹面鏡で比較すべきであると異を唱えている[16]。作製の便宜を考えるならば、フックの言うように、曲率半径を指標にとるべきだとすることは、必ずしも不合理な主張ではない。

フックとレンは、ニュートンの反論を検討するように王立協会に求められ、次の6月19日の会合で報告を行なった[17]。さらに6月26日の会合でフックは、同一曲率であれば、レンズは反射鏡より光をよりよく一点に集めると論じた。またフックは、レンズの方が明るい像を与えることを、その次の会合でつけ加えた[18]。

ニュートンは、彼がケンブリッジ大学で行なった光学に関する講義を出版するために、1671年の終わりに準備作業を進めていた[19]。しかしニュートンは、フックの厳しい批判を前にして、この出版の作業を断念したことをコリンズに書き送った[20]。

---

[13] Newton to Oldenburg, 20 February 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 116–117 (p. 116).

[14] Newton to Oldenburg, 11 June 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 171–193; *Birch*, 3, p. 52; *Phil. Trans.*, 7 (1672), No. 88, pp. 5084–5103. ニュートンが光の粒子に随伴するエーテルの波の考えを提唱したのも、この手紙であった。第I部第六章「フックの批判」の節を参照。

[15] *Newton Corresp.*, 1, p. 173.

[16] Hooke to Lord Brouncker(?), *c.* June 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 198–205 (p. 199).

[17] *Birch*, 3, p. 19.

[18] *Birch*, 3, pp. 56–57.

[19] Richard S. Westfall, 'Newton's Reply to Hooke and the Theory of Colors', *Isis*, 54 (1963), pp. 82–96 (p. 83).

[20] Newton to Collins, 25 May 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 161–162 (p. 161).

フックとニュートンの光をめぐる論争は、1675年に再燃した。それは、ニュートンが王立協会に提出した二つの論考、「光の性質を説明するための仮説 (An Hypothesis Explaining the Properties of Light)」[21]と「観察についての講話 (Discourse of Observations)」[22]をめぐるものだった。前者は1675年の12月9日と16日に、後者は翌年の1月20日から2月10日にかけて、王立協会の例会で読み上げられた。

「光の性質を説明するための仮説」の中でニュートンは、宇宙を満たすエーテルを想定し、いわゆるニュートンリングや屈折、反射の説明を試みた。例えば、屈折は、物質の界面で、光が濃いエーテルから薄いエーテルに押し込まれるために起こるものとされた。光線は、エーテルの振動を引き起こし、これによって薄膜の色の現象が説明される。回折現象は、物質の周囲のエーテルが引き起こす屈折現象の一種であるという。この論考でニュートンは、全ての物質はエーテルが凝縮して生じたものと考えており、地上に降下するエーテルの流れが重力の原因であるという議論も展開した。

「観察についての講話」は、ニュートンリングの現象を数量的に分析して空気の厚さを算出したり、物質表面の色の原因を光の選択的な反射によって説明するものだった。これは、後の『光学 (*Opticks*)』(London, 1704) の第二篇第一部から第三部の前半までにあたる部分で、語句の若干の変更を除けば、両者はほとんど同一である。

この時の彼らの論争は、フックが、ニュートンの述べている内容の「主たる部分は『ミクログラフィア』に含まれており、ニュートンはいくつかの点を先に進めたに過ぎない」[23]と協会の会合で批判したことに始まった。これに対してニュートンは、フックが光の媒質などの点で大きくデカルトに負っていることをオルデンバーグ宛の手紙で強調した。ニュートンは、光自体を媒質の振動と見なさない点で、自分の説はフックのものと異なるという。また、『ミクログラフィア』のいくつかの観察を利用したのは事実だが、薄膜の特定の厚さをある色彩に対応させたのは、自分が最初だとニュートンは主張した[24]。

フックは、一月ほど経って、ニュートンに直接手紙を書いた[25]。それは突然の和解の申し出の手紙であり、ニュートンが自分より先へと進んだことを認めている。フックは、書簡のやりとりの仲介者オルデンバーグが、自分とニュートンと

---

[21] Newton to Oldenburg, 7 December 1675, *Newton Corresp.*, 1, pp. 362–389; *Birch*, 3, pp. 247–271.

[22] *Birch*, 3, pp. 272–278 & 280–305. なお、*Newton Corresp.*, 1, pp. 390–392 も参照のこと。

[23] *Birch*, 3, p. 269.

[24] Newton to Oldenburg, 21 December 1675, *Newton Corresp.*, 1, pp. 404–407 (pp. 405–406). また、Newton to Oldenburg, 10 January 1676, *ibid.*, pp. 407–411 (pp. 408–409) も参照。

[25] Hooke to Newton, 20 Januray 1676, *ibid.*, pp. 412–413. このやりとりについては、Alexandre Koyré, 'An Unpublished Letter of Robert Hooke to Isaac Newton', *Isis*, 43 (1952), pp. 312–337 (pp. 313–316) が参考になる。

の間を悪化させようとしているのではないかとほのめかした。フックとオルデンバーグの関係は、バネ付きテンプの先取権をめぐる問題によって、このころひどく悪くなっていたのだった[26]。

ニュートンはフックの手紙に対して、「巨人の肩に乗って」という表現を含む有名な返書を送った。ニュートンは、フックも自分も共に先人に負っているとして、フックの和解の申し出を受け入れたのであった[27]。こうして両者の光学論争は、それ以上はもつれることなく収束した[28]。

グレゴリーと反射式望遠鏡

前節の引用に現れたように、フックはニュートン批判の報告で、「7–8年前に、リーヴ氏がグレゴリー氏のために作った」反射鏡を使って望遠鏡の実験を行なったことがあると述べた。これからも分かるように、反射式望遠鏡のアイディアは、ニュートンのかなり以前に遡るものであった。

例えば、カヴァリエリ (Bonaventura Cavalieri, 1598–1647) は、凹面反射鏡を使用した望遠鏡について 1632 年に論じた。その 4 年後には、メルセンヌ (Marin Mersenne, 1588–1648) が、音の反射の拡張として反射式望遠鏡を考察した。デカルトは書簡でメルセンヌに批判的な見解を述べ、むしろ屈折式望遠鏡を推奨した[29]。

イギリスにおいては、ジェームズ・グレゴリー (James Gregory, 1638–1675) が、ニュートンに先だって、反射式望遠鏡を考案した。彼はその作製に失敗したが、彼の望遠鏡の構造はグレゴリー式と呼ばれ、カセグラン式、ニュートン式に並ぶ方法として現在知られている。大陸の反射式の伝統は散発的なものだったが、イギリスでは、グレゴリー以降反射式望遠鏡の伝統の連鎖が生まれ、それは 18 世紀にも続いて行った[30]。

---

[26] 第 I 部第七章「フックの時計研究」の節を参照。

[27] Newton to Hooke, 5 February 1676, *Newton Corresp.*, 1, pp. 416–417.

[28] ニュートンは、1672 年のフックとの最初の論争から 1675 年の論争再燃までの間に、他の人々とも光学論争を行なった。ニュートンの光の理論には、ホイヘンス、イグナス・ギャストン・パルディース (Ignace Gaston Pardies, 1636–1673)、リヌス（Linus、リエージュ在住の Francis Hall のラテン名）などからも批判が寄せられた。ホイヘンスの批判は後に取り上げるが、ニュートンは学界デビュー直後のこれらの論争に疲れ、1674 年初めごろには、王立協会をやめると言い出すほどだった（*Birch*, 3, p. 178）。ニュートンとパルディースらとの論争の詳細については、拙稿、「ニュートンの光学理論形成とその背景」、第二章を参照されたい。

[29] これらについては、Piero E. Ariotti, 'Bonaventura Cavalieri, Marin Mersenne, and the Reflecting Telescope', *Isis*, 16 (1975), pp. 303–321 の特に後半を参照されたい。また、A. D. C. Simpson, 'The Early Development of the Reflecting Telescope in Britain', unpublished Ph. D. thesis, Edinburgh University, 1981, pp. 34–43 も参照のこと。

[30] Simpson(1992), p. 77.

ジェームズ・グレゴリーは、スコットランドのアバディーン(Aberdeen)近郊の教会の牧師の息子として生まれた[31]。グレゴリーの一族は、ジェームズなどを筆頭に、六世代以上にわたって20人以上の学者をスコットランドの諸大学やオクスフォード大学に送り出した。ジェームズは、母親から初期教育を受けた。彼は、父の死後アバディーンに送られ、アバディーン大学で学んだ。早くから数学の才能を発揮したジェームズは、兄のデイヴィッド(David Gregory)[32]の勧めで研究を続け、1663年に、初期の研究をまとめた最初の著書、『光学の進歩(*Optica promota*)』を出版した。グレゴリーは、この出版の手はずを、イタリア留学の途中に立ち寄ったロンドンで1662年に整えた。パリでホイヘンスと面会を計画した彼は、わずかなタイミングのズレでそれを果たせず、そのままパドヴァ(Padova)に向かった。パドヴァ大学で彼は、カヴァリエリの弟子から教えを受けた。その地でグレゴリーは、『円と双曲線の真の求積(*Vera circuli et hyperbolae quadratura*)』(Padova, 1667)などを出版した。1668年春にロンドンに戻ると、彼のこの本は、議論の焦点となっていた。彼は、6月に王立協会の会員に選出された[33]。

グレゴリーは、この年に、スコットランドのセント・アンドリュース(St. Andrews)大学の初代の数学教授となった。それは、スコットランド出身で、王立協会と国王の仲立ちを勤め、ホイヘンスとも文通していたロバート・マレーの仲介によるものと言われている。グレゴリーはその職務を6年間勤め、1674年にエディンバラ大学の初代数学教授に転じた。彼が37歳という若さで没したのは、その翌年のことだった。その時まで、北の果てに孤立した彼とロンドンをつないでいたのは、コリンズとの手紙のやりとりのみであった。

グレゴリーの最初の著書、『光学の進歩』は、彼の初期の幾何光学研究を59の命題にまとめたものである。これは、イブン・アル＝ハイサムやウィテロを下敷きにしたものだった[34]。彼はそこで像の形成を論じ、さらに反射と屈折の並行性を論じた。それに続けて、31の天文学の命題が加えられた。

彼の望遠鏡は、光学の最後の部分にあたる命題59のエピローグに現れる(第53図・上)。これは、焦点を共有する二枚の凹面鏡を組み合わせたものであり、上方から来た光は、二回の反射の後、第一の鏡の中央に開けた孔から接眼レンズに導かれる[35]。

グレゴリーは、この望遠鏡を推奨するにあたって、三種類の方式の望遠鏡を比

---

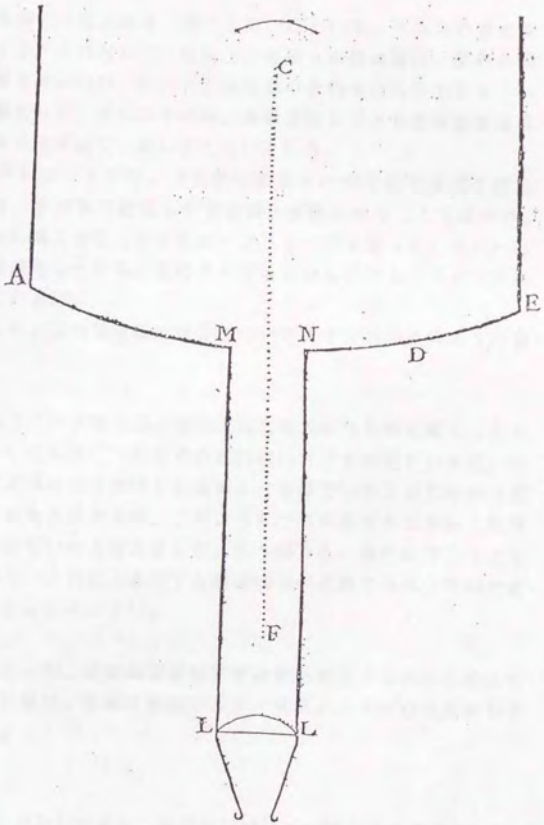
[31] グレゴリーについては、Simpson(1981), pp. 43ff.; *idem*, 'James Gregory and the Reflecting Telescope', *J. Hist. Astron.*, 23 (1992), pp. 77–92; H. W. Turnbull, *James Gregory Tercentenary Memorial Volume* (London, 1939) を参照。

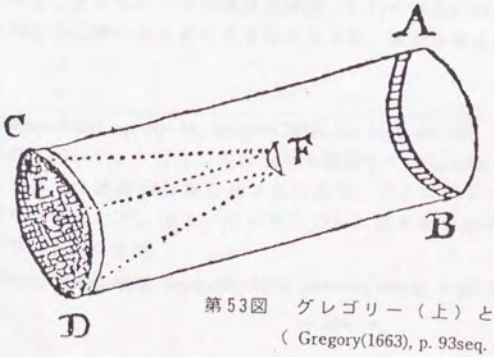
[32] ニュートン派の数学者として知られる同名のデイヴィッド・グレゴリー(David Gregory, 1659–1708)の父親にあたる。

[33] *Birch*, 2, p. 293.

[34] Simpson(1981), pp. 44–48; Turnbull(1939), pp. 454ff.

[35] James Gregory, *Optica promota* (London, 1663), pp. 92–95.





第53図　グレゴリー（上）とカセグラン（下）の反射式望遠鏡
（Gregory(1663), p. 93seq. および *Phil. Trans.*, 7 (1672), No. 83, p. 4057 より）

べた。彼は、屈折のみを用いた望遠鏡は、長くて扱いにくい上、ガラスの質が原因で像が貧困になるとする。これ対して、反射だけを使った望遠鏡は、反射の際の光のロスが大きい。最も良いのは、レンズと鏡を組み合わせたものであるという。それが、彼の望遠鏡だった。グレゴリーは、非球面のレンズや反射面を理想的なものとしたが、実際には球面でも差し支えないという。

グレゴリーは、1662年にロンドンで、『光学の進歩』の出版の手はずを整えた。この時グレゴリーは、この本で提唱した望遠鏡を実際に作ることを試みた。彼は、当時最も名の通った職人であったリチャード・リーヴを雇った。マレーはグレゴリーの本の出版を助力したから、彼にリーヴを紹介したのも、マレーではなかったかと推定されている[36]。

グレゴリーは後になって、この望遠鏡の試みについてコリンズに次のように書き送った。

> 私のリーヴ氏との実験について言えば、彼は道具上で大きな凹面を磨くことができませんでした。そして私は、（反射式の屈折式に対する長所といえば、それが短いことと、円と放物線の方が円と双曲線よりも似ていることしか知りませんでしたから）、この大きな欠点が、このような二つのわずかな長所と簡単に相殺してしまうのではないかと考えました。そう思うと、海外に行こうとしているところでしたので、これ以上苦労する価値はないと感じられ、そのため望遠鏡は決してできなかったのです[37]。

この証言から、グレゴリーが、反射式望遠鏡を望遠鏡を短縮する試みと捉えていたことが分かる。さらに彼は、球面反射鏡の方が、球面レンズより収差が小さいと考えていたのだった。

フックの反射式望遠鏡

グレゴリーがイタリアに出発したとき、彼の反射鏡はリーヴのもとに残された。そう考えれば、反射鏡で望遠鏡を試したというフックの説明は理解できる。

こうしてフックはグレゴリーの影響を被ったが、同じ1660年代に、ニュートンもグレゴリーの影響を受けていた。ニュートンは、反射式望遠鏡を作製するにあたって、グレゴリーの望遠鏡を検討したのである。だがニュートンは、グレゴリーのように筒の後ろ側に孔を開けるより、横から覗き込む方が便利と考えたの

---

[36] Simpson(1981), pp. 50–51; Simpson(1992), pp. 81 & 84–85. コリンズが仲介したという通説に対して、シンプソンは批判を展開している。彼によれば、グレゴリーとコリンズの文通は1668年に始まるもので、それはグレゴリーが望遠鏡を作製した後だったという。なお、リーヴについては本論文第II部第二章「望遠鏡職人リーヴ」の節を参照。

[37] Gregory to Collins, 23 September 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 239–241 (p. 240).

で、この方式を採用しなかった[38]。

グレゴリー式望遠鏡は、王立協会で無視されたわけではない。ニュートンの登場の後、フックはグレゴリー式の望遠鏡を組み立て、それを1674年2月5日に王立協会の会合で発表した。彼が作製した望遠鏡は、

> メルセンヌが提唱し、グレゴリー氏の光学で繰り返された方法で遂行されたものだが、以前に実際に作られたとは考えられない[39]。

この望遠鏡のもっと具体的な記述と思われるものが、フックの遺稿集の中に残されている（第54図）[40]。これはグレゴリー式の望遠鏡の一種で、接眼レンズを第一の反射鏡の中に埋め込んだものである。フックは、この望遠鏡が対象を「非常に明瞭に拡大して」見せたという。

フックが組み立てた反射式望遠鏡は、グレゴリー式のものだけではない。ニュートンが王立協会に選出された1672年1月11日の協会の議事録によれば、

> 実験主任［フック］は、［ニュートンの］その望遠鏡を自分でも作り、曇り易くない金属を見いだすように努力すると述べた[41]。

このようにフックは、ニュートン式望遠鏡の反射鏡のための良好な合金を見つけることにも言及したのだった。

フックによるニュートン式望遠鏡の作製は、光学器機職人コックを指揮して行なわれたと思われる[42]。コリンズがこの年の2月にニュートンの書簡の写しに書き留めたメモには、「王立協会が同じやり方で4フィートの長さのものをコックに作るように命じた」と記されている。それは径が4–5インチのもので、14フィートの球の一部として磨かれた[43]。リーヴがグレゴリーの望遠鏡を試みたとき、コックはリーヴの弟子としてこれに関与した。リーヴ亡き後、コックはロンドン有数の職人

---

[38] Newton to Oldenburg, 4 May 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 153–155 (p. 153).

[39] *Birch*, 3, p. 122.

[40] *Philosophical Experiments*, pp. 269–270.

[41] Royal Society Journal Book, 4, p. 223. この記述は、*Birch*には転記されていない。

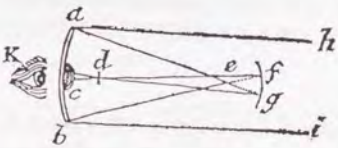
[42] コックについては、前々章の「フックと望遠鏡職人」の節を参照。

[43] *Newton Corresp.*, 1, p. 4. 原本はTurnbull(1939), pp. 221–223を見よ。原本の記述から、書簡とメモは、コリンズがジェームズ・グレゴリーに宛てた1672年2月23日付けの書簡に同封されていたことが分かる。なお、球面反射鏡の焦点距離は、曲率半径の半分である。このことから、「14フィート」は研磨面の曲率半径ではなく、直径を示していることが判明する。

Dr. HOOK'S *Invention of a Reflecting Telescope:*

WHICH I insert after the foregoing Papers, by Reason of its Congruity therewith; because I know not the Time when this Telescope was invented, whether before, or after Mr. Cassegrain's, *in* Phil. Transf. N. 83. *from which it differs in some very material Matters.* W. DERHAM.

I HAVE lately made a Telescope by Reflection, with which I look directly at the Object, and see it very distinct, and magnified. And this is by Planting a small *Lens* in the Middle of the *Object Speculum*, and Planting another small *Concave Speculum*, beyond the Focus of the *Object Speculum*; the Manner of which your Lordship will readily understand by the annexed Scheme; where *a b* represents the Object Specu-



lum, *e* the Focus of that Speculum, *f g* a small concave Speculum, serving to reflect the Rays to a second Focus *d*, where the Eye *k* sees the Object by the Help of the small *Lens c*. 'Tis easy so to contrive the Cell for the Eye, that the Rays that pass on each side of *f g* shall not disturb Vision.

WE long much to hear of Monf. *Hugenius's* Opticks and Mechanicks: They are Subjects capable of vast Improvements, and cannot be rationally expected from any more likely, than from his

第54図　フックのグレゴリー式望遠鏡への取り組み
(*Philosophical Experiments*, p. 269 より)

として高い名声を勝ち取り、フックのこの仕事に関与したのであった[44]。

フックとコックは、約1年にわたって、大型のニュートン式望遠鏡を作製しようと努力した。最初の成果は、早くも1月25日に王立協会に提示された。

> ニュートン氏の［方式による］4フィートの望遠鏡が作られた。金属の凹面は然るべく磨かれてはいなかったが、それでもかなり良好であった。とはいえ、十分なものではなかった。次の会合までに、それを完全なものにするように彼は命ぜられた[45]。

フックは、それを次の会合に提示した。望遠鏡は前回よりは改善されていたが、一層の努力を求められた[46]。その試みは順調には展開しなかったと思われる。そのため、3月14日の会合で、恐らくはこの望遠鏡とは別に、「コック氏は、ニュートン氏の発明した4–5フィートの長さの望遠鏡を協会用に作ることを命じられた」[47]。彼はそれを2週間以内に作ると約束したが、実際にコックが反射鏡を協会に示したのは、1カ月以上経った4月18日のことだった。それは鋼で作られた反射鏡で、研磨は良好ではなく、色のムラがあった。その鏡は、5月8日に、再び会合に提示された。フックは、この鏡で望遠鏡を試してみるように求められた。しかし彼は、それが正しく研磨されていないと指摘した[48]。

オルデンバーグはニュートンに、コックが4フィートの反射鏡を作製していることを知らせていた[49]。ニュートンは、7月8日にオルデンバーグに宛てた手紙で、コックの望遠鏡の進捗状況を尋ねた[50]。その2日後、王立協会は、夏の休会に入るに先だって、コックに望遠鏡を督促した[51]。ニュートンは、7月13日の手紙で、オルデンバーグに再びコックの望遠鏡について知らせるように促し、同時に鋼の反射鏡に興味を示した[52]。ニュートンはそれを鋼とアンチモンの合金と推定

---

[44] コックがグレゴリーの望遠鏡に関与したことは、Simpson(1981), p. 55, n. 48 を参照。1671年にコックの名声が確立していたことは、オルデンバーグがライプニッツに、彼の仕事を推薦したことから分かる。Oldenburg to Leibniz, 28 September 1671, *Oldenburg Corresp*, 8, pp. 277–280 (pp. 278 & 280).

[45] *Birch*, 3, p. 4.

[46] *Birch*, 3, p. 8. 2月15日の会合でフックは、「ニュートンの発明した6フィート望遠鏡を念頭に置くように」求められたが、これは何を指すか不明である。*Birch*, 3, p. 15; Simpson(1981), pp. 232–233.

[47] *Birch*, 3, p. 19.

[48] *Birch*, 3, p. 49.

[49] Oldenburg to Newton, 9 April 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 135–136 (p. 135).

[50] Newton to Oldenburg, 8 July 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 212–213 (p. 212).

[51] *Birch*, 3, p. 57.

[52] Newton to Oldenburg, 13 July 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 217–218 (p. 217).

した。ニュートンによると、このタイプの合金は固くて磨き易いが、反射が十分ではないという。彼は、できればその断片を送るように求めた。

その返信でオルデンバーグは、コックの反射鏡を説明した。それは4フィートの焦点距離を持つ直径が6インチのもので、14–5フィートの球の一部として磨かれたという。その内容は、先に引用したコリンズの同年2月のメモと本質的に同一である。この鏡は、銅、錫、錫ガラス、アンチモンと小量の砒素の合金だった[53]。それは月をはっきりと見せたが、他のものはぼんやりとしか写らなかった。オルデンバーグは、これとは別にコックの鋼の反射鏡について触れた。それは、直径3インチで、ヴェネチアの鋼 (Venice–steel) だけでできていた。その研磨は、余り良好ではなかった。

フックは、1672年の8月の中ごろから、約9フィートの反射鏡に取り組んだと推定される。フックの日記はこの年の3月10日に始まるが、現在出版されているのは8月1日の部分からである。その冒頭のページにも、反射鏡への言及がある。反射鏡の研磨について何回か言及があった後、8月23日の部分には、

> 9フィートの反射鏡を良好に磨く。夜それで月を大きくはっきりと見た[54]

と初めて径の大きさを示して反射鏡が話題とされた。8月23日に彼は、いずれかの反射鏡で火星を眺めた。だが、それは余りうまく行かなかった[55]。約9フィートの反射鏡が王立協会の会合に提示されたのは、10月30日のことだった。

> ニュートン氏の反射式望遠鏡の改良についてどんな試みがなされたか説明が求められたのに対して、フック氏は、これまで彼は、自分が設計した直径15インチ、長さ10フィートの望遠鏡のための反射鏡を磨くことのできる十分な大きさの鋳型を持っていなかったが、1–2週間のうちに入手できるであろうと述べた[56]。

この記述から、フックが新たに反射鏡を鋳造しようとしていたことが分かる。フックが必要な装置をコックから入手したのは、11月19日のことだった[57]。フックは翌日にそれを王立協会に報告した。11月27日には、この装置で作業を進め

---

[53] Oldenburg to Newton, 16 July 1672, *Newton Corresp.*, 1, p. 219. 鏡の径については、物理的な直径なのか、反射に有効な実効径なのかによって変動が生じやすい。なお、'tin–glass' が何に相当するのか調査がつかなかったので、仮に「錫ガラス」と訳した。

[54] *Diary 1672–1680*, p. 5.

[55] *Diary 1672–1680*, p. 6.

[56] *Birch*, 3, p. 58.

[57] *Diary 1672–1680*, pp. 13–14.

ていることに触れた[58]。1週間ほど経って彼は、反射鏡が間もなく完成することを予告した[59]。しかし、それは鏡の歪みなどの問題を抱えていたらしく[60]、フックは、翌1673年の1月22日になって、ようやくこれについて小論を発表した。そこでフックは、次のように述べた。

> 36フィートの球の断面である対物反射鏡［焦点距離9フィート］は、完璧に磨かれれば、100フィートの望遠鏡の対物レンズと同程度に働くのではないかと思う[61]。

フックは、2月5日の王立協会の会合で、彼の反射鏡を示した[62]。しかしその日の彼の日記には、アルンデルハウス（当時の例会の会場）では「上手く行かず」と記されている[63]。この後、フックの望遠鏡への取り組みは半年ほど見られない。

それが再開されるのは、8月のことであった[64]。フックが翌年2月に先述のグレゴリー式の望遠鏡を発表したことを考えるなら、これはグレゴリー式を作る努力であって、ニュートン式の望遠鏡に対する取り組みの続きではないと思われる[65]。

フックによるニュートン式望遠鏡作製の試みは、彼のニュートンへの批判と並行して行なわれた。フックは、単にニュートンを非難しただけではなく、自らニュートン式望遠鏡の可能性を追求していたのだった。

ニュートンは、自分の望遠鏡をプロトタイプと考えていた。彼は、自分の第一号望遠鏡は3–4フィートの屈折式にあたるものに過ぎないが、いずれ60–100フィートの屈折式望遠鏡に匹敵するものができると考えていた[66]。その主張は、上のフックからの引用と奇妙に類似している。しかし、フックは結局、当時の通常の長大望遠鏡並の能力を持つニュートンの望遠鏡を実用化することができなかった。

フックやコックがその努力をしていたちょうどその時、コリンズはグレゴリーに宛てて、次のように書いた。

> フック氏は、結核にかかっており、治る見込みはありそうには思えません。ガラス研磨職人のコックは、彼の装置も、この新しい［ニュートン式の］望遠鏡も、金属が突然曇るので、世の名声を勝ち取ることはないであろうと考えてい

---

[58] *Birch*, 3, pp. 62–63.

[59] *Birch*, 3, p. 69.

[60] *Diary 1672–1680*, p. 18 (1672年12月30日). 正しい曲面が得られたのは、1月18日のことと思われる。 *Ibid*, p. 22.

[61] *Birch*, 3, p. 72.

[62] *Birch*, 3, p. 74.

[63] *Diary 1672–1680*, p. 26.

[64] *Diary 1672–1680*, p. 54 (1673年8月11日).

[65] Simpson(1981), pp. 241–242.

[66] Newton to a Friend, 23 February 1669, *Newton Corresp*, 1, p. 3.

ます[67]。

王立協会で当初高い評価を受けたニュートンの望遠鏡は、実用化の困難が明らかになるにつれて、その将来性を疑われ始めたのであった。

ニュートン式望遠鏡の問題点

ニュートンの望遠鏡に対しては、観測対象を見つけにくいという批判が当初なされた[68]。しかしニュートンが述べたように、それは慣れの問題であり、必要があれば補助の照準を取り付けることなどで解決できるものだった[69]。

より深刻だったのは、反射鏡が抱える問題だった。ニュートンが使用した反射鏡の合金は、銅6に対して錫2を含む銀色のベル・メタル(bell-metal)と呼ばれるものを基本としていた[70]。彼は、それに砒素を加えて微小な孔ができるのを防いだ。ロンドンに送った望遠鏡の場合には、砒素の代わりに銀が使用された[71]。だが、この鏡は入射光の20ﾊﾟｰｾﾝﾄ程度しか反射しなかった[72]。レンズを使用した場合の透過光より、この鏡による反射光の方が量が少ないことは避けられなかった[73]。しかも、銅を多く含む合金は、曇り易いという欠陥を持っていた。後知恵で見るなら、ニュートンの望遠鏡は、そのままでは実用に耐えないものだった。

ニュートンの方式の望遠鏡にとって反射鏡が問題であることは、発明者自身も気づいていた。反射式望遠鏡を最初に試みたとき、ニュートンは十分な光の反射を得るのに苦労していた[74]。ニュートンは、曇りの問題も知っていた。王立協会に望遠鏡を送ってしばらくしてから、ニュートンは、「凹面鏡が水蒸気か他の原因で曇ったら、皮で拭いて」欲しいとオルデンバーグに書き送った[75]。フックもまた、この問題に気づいていた。ニュートンの望遠鏡が発表された1672年1月11日の会合で、先に引用したように、フックは「曇り易くない金属を見いだすように努力すると述べた」のだった。反射鏡に金属以外の物質を使用することは、

---

[67] Collins to J. Gregory, 26 December 1672, in Turnbull(1939), pp. 248–249 (p. 248).

[68] Oldenburg to Newton, 2 January 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 73–74 (p. 73).

[69] Newton to Oldenburg, 6 January 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 79–81 (pp. 79–80).

[70] Henry C. King, *The History of the Telescope* (London, 1955), p. 74.

[71] 望遠鏡に使用した合金についてニュートンが説明した書簡として、Newton to Oldenburg, 18 January 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 82–83; Newton to Oldenburg, 29 January 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 84–85. これらの要点は、*Phil. Trans*, 7 (1672), No. 81, pp. 4006–4007 に収められた。

[72] Simpson(1981), p. 82.

[73] Newton to Oldenburg, 26 March 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 123–126 (p. 124). この手紙の抜粋は、*Phil. Trans*, 7 (1672), No. 82, pp. 4032–4034 (p. 4032).

[74] *Phil. Trans*, 6 (1672), No. 80, pp. 3075–3087 (p. 3080).

[75] Newton to Oldenburg, 6 January 1672, *Newton Corresp*, 1, p. 80.

王立協会で話題になった[76]。だが、それは実用化されることがなかった。

1672年3月4日、オルデンバーグは、リエージュの数学者であるスリューズ(René-François de Sluse, 1622-1685)に宛てて手紙を書いた。そこで彼は、ニュートンの「長い望遠鏡を短くする」工夫、すなわち反射式望遠鏡に触れた。彼はコックが実用大の反射鏡を作製していることについても知らせたが、これが50フィートの屈折式望遠鏡を越えるには、「それ［屈折式望遠鏡］と同じだけ光を反射」しなければならないと述べた[77]。

ニュートンは、同じころにオズーからも批判を受けた。オズーの手紙は失われており、内容は正確には分からない。だが、ニュートンの回答から、オズーの論点を推定することができる。問題となったのは、鏡の反射の量の少なさと、曇りの問題であったと思われる[78]。ニュートンはオズーへの回答の中で、「金属の新しい研磨法が見つかるかも知れない」と将来の可能性を示唆し、もしそれが見つかったなら、水蒸気中の酸の精気(acid spirit)による腐食を避けるために、「乾燥させ空気から遮断する」ことで曇りを長い間防止することができると述べた。さらにニュートンは、反射光を横方向に取り出すのに、平面鏡に代わって直角プリズムの全反射を使用することを提案した[79]。

このようにニュートンは、実際に作製された反射式望遠鏡の実用性ではなく、その将来の可能性に訴えた。しかし、このころオルデンバーグからニュートンに送られた手紙は、ニュートンの望遠鏡が既に曇っていることを伝えていた[80]。

前節で述べたように、フックはニュートンの望遠鏡が登場してから約1年間にわたって、実用レベルのニュートン式望遠鏡の作製に努力した。筆者が調べた限りでは、17世紀の間に良好な反射鏡がイギリスで登場したという証拠はない。このことは、ニュートンの望遠鏡が、鏡の反射率の低さと曇りという実用上重要な二つの問題を克服できなかったのではないかという疑いを強めるのである。

シンプソンが示唆したように、ニュートンの望遠鏡は、初期に歴史的な役割を

---

[76] 1月25日に、ボイルの作った不透明ガラスと、トーマス・ブラウン(Thomas Brown)宛に送付されてきたアイスランドの黒い石を反射鏡に使うことが検討された。*Birch*, 3, pp. 4 & 7-8.

[77] Oldenburg to Sluse, 4 March 1672, *Oldenburg Corresp.*, 8, pp. 571-579 (pp. 572-573 & 575).

[78] Newton to Oldenburg, 30 March 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 126-130 (pp. 126-127). この一部分の抜粋は、*Phil. Trans.*, 7 (1672), No. 82, pp. 4034-4035.

[79] *Newton Corresp.*, 1, pp. 127-128. ニュートンは彼の *Opticks* でも、光を取り出すのにプリズムを利用した反射式望遠鏡を提示した。Book I, Part 1, Prop. 7, Prob. 2, pp. 79-80［邦訳、科学の名著、第6巻、『ニュートン』、朝日出版、1981年、67-70ページ］.

[80] 3月16日付のこの手紙自体は失われたが、その内容に言及しているものとして、Newton to Oldenburg, 19 March 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 121-123 (p. 121).

果たした[81]。だが、それは理論的な可能性の提示にとどまり、その実用化は、18世紀を待たなければならなかった。

グレゴリーとニュートンの論争

グレゴリーは、1672年2月23日、コリンズからニュートンの望遠鏡について記した手紙を受け取った[82]。コリンズはさらに、3月14日の手紙で、フックとニュートンのやりとりに簡単に触れた[83]。4月9日の返信で、グレゴリーは、

> 私はニュートン氏の実験に非常に驚きました。それは、自然哲学全体の大きな変化を生み出すかも知れません[84]

とニュートンの光に関する実験を賞賛した。彼はまた、フックとニュートンの論争にも興味を示した。

グレゴリーがニュートンの望遠鏡にコメントしたのは、8月6日のコリンズ宛の書簡が最初であった。そこでグレゴリーは、次のように述べた。

> 接眼レンズと平面鏡の距離が近いので、ニュートン氏の望遠鏡の方が、私が『光学の進歩』で言及したものより優れているかも知れない[85]。

ニュートンとグレゴリーがコリンズを仲介にやりとりを始めたのは、カセグラン(Cassegrain)の望遠鏡が登場してからである。ニュートンの望遠鏡の情報はフランスにも伝わったが、これに対して、フランスから先取権の申し立てがあった[86]。それによれば、ニュートンのものとほとんど同じ望遠鏡が、約3カ月前に、カセグランによって公にされたというのである[87]。その望遠鏡は、むしろグレゴリーのものに類似していた。両者の違いは、第二反射鏡が凹面ではなく、凸面鏡となっている点だけだった(第53図・下)。この方式の長所は、口径を大きくとれること、反射が軸方向に起こるため自然であること、筒の後ろ側から観測するの

---

[81] Simpson(1981), p. 226.

[82] *Newton Corresp*, 1, pp. 4–5 & 7; Turnbull(1939), pp. 221–223.

[83] Collins to Gregory, 14 March 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 118–119 (p. 118).

[84] J. Gregory to Collins, 9 April 1672, in Turnbull(1939), pp. 226–231 (p. 226).

[85] Gregory to Collins, 6 August 1672, in Turnbull(1939), pp. 240–241 (p. 241). この手紙の一部分は、*Newton Corresp*, 1, p. 228 にも見られる。

[86] 詳しい経過については、Simpson(1981), p. 212 を参照されたい。

[87] カセグランがどのような人物なのかは、ほとんど知られていない。一説によるならば、彼は'Collège de Chartres'の自然学の教授であり、あるいはまた、ルイ一四世(Louis XIV)に仕える彫刻家だったともいわれる。それ以上のことは、全く分からない。Simpson(1981), p. 212.

で周囲の余分な光が入り込まず、対象を見つけ易いことであるとされた。

オルデンバーグは、1672年5月2日に、ニュートンにこの望遠鏡について伝えた[88]。ニュートンは2日後にこれに回答を与えたが、彼はカセグランの望遠鏡に対して批判的だった[89]。ニュートンは、自分はグレゴリー式の構造を検討した上で接眼レンズを横に付けることを選んだと述べた。さらに彼は、カセグランの方式の欠点を七項目挙げた。その要点は、光は垂直より斜め方向により良く反射されること、カセグランの使った凸面鏡に比べて平面鏡の方が作りやすいこと、カセグラン式の場合には凹面と凸面の狂いが強め合い、しかも凸面部分で光が分散して像が暗くなることであった。ニュートンはさらに、なぜ軸方向の反射が自然なのかという疑問も投げかけた。

グレゴリーは、9月ごろになってようやくニュートンのこの批判を入手し、カセグランの望遠鏡に好意的なコメントをコリンズに送った[90]。グレゴリーは、カセグラン式の長所として、凹面鏡と凸面鏡を近づけることができるので誤差を小さくできること、同じ効果を得るのにニュートン式に比べて望遠鏡の長さを半分以下にできること、凸面鏡を移動して倍率を変化させられることを挙げた。さらに、光線の反射は、ボールと同じで、斜めより垂直に入射した方が良好であると述べた。

ニュートンはこれを知って、12月10日にコリンズに宛てて疑問を書き送り、その内容はグレゴリーに転送された[91]。ニュートンはまず、球面反射鏡では凸面より凹面の方が幾何学的に収差が小さいことを指摘し、カセグラン式よりもグレゴリー式の方が優れているとした。その上で、両方式双方に当てはまる批判を述べた。それは、第二反射鏡を自分のように平面とした方が、それを曲面で作るより反射が良好であるとする主張だった。ニュートンによれば、光の反射は物質の固い部分で起こるのではなく、二つの媒質の境界で起こる。だから、それはボールの反射というよりは、水面における石の反射のようなものである。水面の場合、垂直に入射した石は水の中に入り込んで反射されない。だから、鏡でも、光が斜めに入射した方が反射は良好であるという。ニュートンは加えて、曲面の場合には、倍率を低くすると第二鏡の曲率が大きくなり、入射してくる光を邪魔することも指摘した。ニュートンは、グレゴリー式では、直径を大きくしようとすると第二鏡が相対的に大きくなるという問題もあるという。ニュートンによるなら、接眼レンズが横にあっても底にあっても、周囲の散乱光による問題は同じである。

---

[88] Oldenburg to Newton, 2 May 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 150–152.

[89] Newton to Oldenburg, 4 May 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 153–155. フランス側の主張とニュートンの主張は、一部に手を加えて、『フィロソフィカル・トランザクションズ』に収められた。*Phil. Trans.*, 7 (1672), No. 83, pp. 4056–4059.

[90] Gregory to Collins, 23 September 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 239–242. グレゴリーは、この手紙に、事故によるロンドンからの郵便の遅れを記している。

[91] Newton to Collins, 10 December 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 247–255.

しかし、反射鏡の真ん中に孔をあけて研磨することは、技術的に困難である。ニュートンは、カセグラン式の光路誤差に関するグレゴリーの考察を批判し、正確な平面反射鏡の場合、それは鏡同士の距離 EF（第 53 図・下図を見よ）によらないとした。望遠鏡の筒の長さを短くできる点については、ニュートンはカセグラン式の長所を認めている。だが、倍率の変化は、自分の方式でも可能であると述べた。ここで彼は、第二鏡に曲面鏡を使用すると視野が狭くなる (overcharge) 可能性があることを指摘した。ニュートンは、カセグランの方式にレンズを加えて、正立像を得ることにも考察をめぐらせた。手紙の終わり近くでニュートンは、グレゴリー用にリーヴが作った反射鏡を使ってフックが行なった実験に言及した。ニュートンは、フックの反射式望遠鏡の試みが失敗したのは、単に鏡が良好でなかっただけに過ぎないという。

ニュートンのこの手紙に対して、3 カ月ほど経った翌年の 3 月 7 日に、グレゴリーは手紙を送った[92]。そこでグレゴリーは、光は斜め入射の方が反射が大きいというニュートンの批判を受け入れた。だが、斜めに光が入射する場合には、鏡の表面の傷が引き起こす像の乱れの問題があると述べた。彼はまた、光路の誤差に関する自分の考えは誤りだったことを認めた。しかし、平面鏡を推奨するニュートンが反射式顕微鏡では曲面鏡を考えたことの矛盾に触れ、婉曲な批判を加えた。また、自分とリーヴらの試みは、やってみたうちに入らないほどのものだと書いた。手紙の追伸でグレゴリーは、自分の方式の 6 フィート望遠鏡を理論的に考察し、実験に待つべきだとは断りながらも、鏡面の曲がりによって失われる光の量は余り多くないことを示そうとした。

これに対して、ニュートンは 4 月 9 日に再び手紙を送った[93]。その冒頭でニュートンは、表面に凸凹があっても斜めの反射が垂直反射より良好であるという議論を難解な表現で展開した。次に、ニュートン式で倍率をどのようにして変化させるのかというグレゴリーの疑問に答えて、図入りで自分の工夫を説明した。これは、第二鏡として、直角プリズムを使用するものだった。その表面は少し丸くしてあり、レンズの役割をするようになっている。その位置の変化で、倍率を変動させることができる。ニュートンは、グレゴリーが先の手紙で触れた望遠鏡の具体例も引きながら、グレゴリー式の観測視野の狭さを問題にした。先の手紙でグレゴリーは、ニュートンがこの点を批判したのに答えて、曲面第二鏡を用いた望遠鏡で視野が狭くなることはないと反論していた。ニュートンは、自分が顕微鏡でなぜ曲面の第二鏡を使用しなかったのかについても触れている。しかし、グレゴリーは、ニュートンが顕微鏡に平面鏡を使用しなかった理由を問題にしたのであり、ニュートンはグレゴリーの論点を誤解している。

グレゴリーは、5 月 13 日に、ニュートン宛の返信をコリンズに送った[94]。そ

[92] Gregory to Collins, 7 March 1673, *Newton Corresp*, 1, pp. 258–262.

[93] Newton to Collins, 9 April 1673, *Newton Corresp*, 1, pp. 269–272.

[94] Gregory to Collins, 13 May 1673, *Newton Corresp*, 1, pp. 278–280.

の冒頭でグレゴリーは、傷があっても斜めの反射の方が良好というニュートンの議論は理解しがたいとした。さらに、曲面プリズムを使用することは、光路の逸れを起きやすくするものであり、ニュートンが見つけた光の分散も起こると批判した。これに続く議論は理解しやすいものとはいえないが、不要な光の混入を避けながら視野を確保する方法を論じているように思われる。グレゴリーは、ニュートンが反射式顕微鏡で第二鏡を省いた理由に納得を示さなかった。最後にグレゴリーは、回折に関係する一つの現象に言及して、彼の手紙を結んだ。

グレゴリーは、この手紙を送った後にロンドンを訪問した。ニュートンとのやりとりは、出発に先立つ彼のこの手紙で途絶えた。それは彼が、ロンドンからの帰途にケンブリッジに立ち寄り、ニュートンと面会したためとも言われる[95]。

このように、グレゴリーとニュートンは、約1年間にわたって、コリンズを仲介者として論争を行なった。この論争では、反射式望遠鏡の抱えている鏡の合金の困難は問題とならなかった。その代わりに論争の的になったのは、ニュートン式、グレゴリー式、カセグラン式という三種類の反射式望遠鏡の優劣の問題であった。

興味深いことに、グレゴリーはニュートンの光の理論を批判しなかった。ガラスによる光の分散の現象は、当然の前提とされていた。フックもプリズムによる光の分散の存在は認めているから、色彩による光線の屈折性の違いというニュートンの斬新な考えは、学界に容易に受容されたことがうかがわれる。だが、ニュートンの光のモデルに批判を浴びせた点では、フックはグレゴリーと違っていた。

ニュートンは、ホイヘンスとも望遠鏡をめぐるやりとりを行なった。次節で見るように、ホイヘンスもニュートンの光の分散の発見を受け入れた。しかしホイヘンスは、フック同様に、ニュートンの光の粒子説と、それに付随する色彩発生メカニズムを批判した。

ホイヘンスとニュートンの論争

本論文の第II部第一章で述べたように、王立協会では、会合で話題になった重要な事項を、ホイヘンスに知らせるのを常としていた。オルデンバーグがニュートンの反射式望遠鏡の発明をホイヘンスに知らせたのは、1672年1月1日（旧暦）のことだった[96]。オルデンバーグはニュートンの望遠鏡について簡単に書き記し、詳細を後便で送ると述べた。

「長い望遠鏡を相当に短くする」という文言をタイトルに含むその詳細な解説は、ニュートンの点検を受けた後に、15日付けのホイヘンス宛の短い手紙に同封された[97]。ホイヘンスは、これらの二つの手紙に対して2月3日（旧暦）に返

[95] Turnbull(1939), p. 4; *Newton Corressp*, 1, p. 277.

[96] Oldenburg to Huygens, 1 January 1672 (O. S.), *Oldenburg Corresp*, 8, pp. 443–447 (pp. 444 & 445–446).

[97] *Newton Corresp*, 1, pp. 74–76; *Oldenburg Corresp*, 8, pp. 470–473.

事を書いた[98]。そこでホイヘンスは、ニュートンの望遠鏡が、単に長さを短くするためではなく、凹面鏡の収差の方が凸面ガラスによる屈折よりも小さいことを計算で考慮した上のものであることが分かったと述べた。ホイヘンスは、光を良く反射する金属を手に入れるのが重要であること、放物面鏡の方が鏡の形状として理想的であることに触れた。

当然のことながら、ホイヘンスはまだ、ニュートンの色彩論については知らされていなかった。ニュートンの理論が王立協会で発表されたのは、ホイヘンスに手紙が送られた5日後のことだったのである。オルデンバーグは、1月ほど経ってニュートンの光の理論の概要を簡単にホイヘンスに書き送った[99]。

ホイヘンスがニュートンの理論的側面に関して最初のコメントを送ったのは、3月30日（旧暦）だった。そこでホイヘンスは、次のように書いた。

> 私は、ニュートン氏が望遠鏡のレンズと鏡の効果について書いた最新のものを見て大変にうれしく思いました。彼は、私と同じように、その二つの表面の傾き (inclinaison) のために、対物凸レンズの屈折が欠陥を持っていることに気づいたと分かりました。彼の新しい色彩の理論については、非常に素晴らしいものとは思いますが、全ての実験と合致するか見てみる必要があります[100]。

ここからは、ホイヘンスがニュートンの色彩論に必ずしも賛成していないこと、また、ホイヘンスがニュートンの望遠鏡の長所を、自分と同様に「レンズ表面の傾き」を避けた点にあると考えたことが分かる。つまり彼は、ニュートンの反射式望遠鏡が新しい色彩論に基づいていることを理解せず、幾何学的な収差を避ける工夫と捉えていた。

ホイヘンスとニュートンが本格的な議論を開始したのは、ホイヘンスの6月

---

[98] Huygens to Oldenburg, 3 February 1672 (O. S.), *Oldenburg Corresp.*, 8, pp. 517–522 (pp. 517–518 & 520–521).

[99] Oldenburg to Huygens, 11 March 1672, *Oldenburg Corresp.*, 8, pp. 584–586 (pp. 584–585). シンプソンは、この時ホイヘンスは別の経路を通じてニュートンの理論の内容を知っていたと指摘している。しかし、その根拠としてシンプソンが挙げたホイヘンスの論考の中には、これに当たるものは見あたらない。Simpson(1981), p. 125; *Journal des Sçavans*, 3, 29 février 1672, pp. 23–28.

[100] Huygens to Oldenburg, 30 March 1672 (O. S.), *Oldenburg Corresp.*, 8, pp. 635–638 (pp. 635 & 637). 原文のフランス語の 'inclinaison' は「傾き」の意味であり、「性質」の含意はないことに注意。後者には 'inclination' が使用される（例えば、『仏和大辞典』、白水社、1981年、1316–1317ページを見よ）。なお、ニュートンはこのコメントをオルデンバーグから仏語のまま知らされたが、それは文章の順番を変えるなど、ホイヘンスの表現に手を加えたものだった。Oldenburg to Newton, 9 April 1672, *Newton Corresp.*, 1, pp. 135–136 (p. 135) を参照。

21日の書簡からである[101]。そこでホイヘンスは、ニュートンがもっと大きな望遠鏡を作ることを望んだ。これは、ホイヘンスが実用レベルの望遠鏡を重視しているものと解釈できる。続いて彼は、反射鏡の金属が重要であるという先の手紙の主張を繰り返した。ホイヘンスは、自分も最近ブロンズで鏡を作ってみたが、金属が柔らかすぎてうまく行かなかったと述べた。ホイヘンスは、ニュートンの光の理論にも触れた。彼は、それが正しい可能性が高い (vlaisemblable) としながらも、レンズの収差については、ニュートンの見解を受け入れていない。彼は、ニュートンに従えば色収差はレンズの口径の 1/25 の大きさになるが、それほどの収差は実験では認められないと指摘した。

この手紙の主要な部分は、ニュートンに転送された[102]。オルデンバーグは手紙の終わりで、ニュートンに返信を書くようにそれとなく勧めている。ニュートンの返書は、7月8日にオルデンバーグに送付された[103]。そこでニュートンは、色収差の大きさが口径の 1/25 となるというホイヘンスの主張に対して、図を示して自分の計算を説明した。ニュートンによれば、収差は高々 1/50 程度であるという。この手紙は 10 日程たって、若干字句を改めて英語のままホイヘンスに転送された[104]。

ホイヘンスは、9月17日に、簡単に前の手紙にコメントした[105]。彼はそこで、自分の収差の計算が間違いであったことを認めた。しかし一方で、ニュートンの色彩論については、なおも可能性の高い仮説としてのみ受け取るべきであるとした。なぜなら、「事態は十分に他でも有り得るから」である。ホイヘンスは、ニュートンの理論を唯一の説明方法とは考えなかった。

ホイヘンスが『フィロソフィカル・トランザクションズ』の記事などを見て再びニュートンの理論を論じたのは、翌 1673 年 1 月 4 日の書簡だった。この手紙で初めて、ホイヘンスは自分の光の理論を明らかにしてニュートンを批判した。

> 私には、黄色と青色を機械論的に運動の性質から説明する仮説で、全てを説明するのに十分であると思えます。他の色彩について言えば、より深く力を与えたものが（フック氏のプリズムで現れたように）暗く深い赤と青となり、これ

---

[101] Huygens to Oldenburg, 21 June 1672 (O. S.), *Oldenburg Corresp*, 9, pp. 116–120 (pp. 117–119).

[102] Oldenburg to Newton, 2 July 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 206–208. 先の場合同様、オルデンバーグは原文に若干手を加えている。

[103] Newton to Oldenburg, 8 July 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 212–213.

[104] Oldenburg to Huygens, 18 July 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 165–167.

[105] Huygens to Oldenburg, 17 September 1672 (O.S.), *Oldenburg Corresp*, 9, pp. 247–251 (pp. 247–249). これをニュートンに転送した手紙は、Oldenburg to Newton, 24 September 1672, *Newton Corresp*, 1, pp. 242–244 (p. 243).

らの四つから、他の全ての色彩が合成されます[106]。

第I部第六章で見たように、フックは色彩を、光の強いパルスと弱いパルスの順番の組み合わせに還元した。彼はその両極端を赤と青として、他の色彩は、両者の合成によって作られるものと考えた。ホイヘンスはフック同様に、光は運動、すなわち一種の振動であると捉えた。ホイヘンスは原色を黄色と青色としたが、彼の理論と、赤と青を振動の基本のセットとするフックの理論の構造は類似している。ホイヘンスは、光線の屈折性が色彩によって異なることを重要な問題と見なしたが、しかしそれは所詮偶然 (accident) 的なものであるという。ホイヘンスは、ニュートンは結局色彩の差異については説明を与えていないと批判した。そして、白色を黄色と青色から合成することは、試すに値するものであると述べた。ホイヘンスは色収差の問題に触れ、12フィートの対物レンズで作った像は、口径の1/50という計算上予測される収差に比べて鮮明であることを指摘している。だから、「実験はニュートン氏が考えていることと合致しない」という。

これに対するニュートンの返事は、4月3日にオルデンバーグに送付され、ほぼそのまま『フィロソフィカル・トランザクションズ』にも収録された[107]。その前半でニュートンは、ホイヘンスの二原色体系を批判し、全ての色を黄と青の2色から作ることはできないと述べた。海の波は無限の多様性を持つのであり、2種類しか波がないとしたらかえって奇異である。だから、仮に光がエーテル振動であっても、二原色説は受け入れることのできないものである。ニュートンは、自分の理論は仮説ではなく事実であると強調した上で、光線の屈折性の差異を再び述べた。ニュートンは、これに続けて、2種類の光から白色を作ることができるという一見矛盾した主張を過去に述べたことがあることを認めた[108]。それは、これらの2色が、多数の他の色の複合であるからだという。2色からの白色の合成を述べた際に、ニュートンは、原色と複合光の差異も説明していた。だが、原色と複合光の区別はさほど単純なものではなく、白色光を全ての光線の集まりとするニュートンの理論と全く矛盾して感じられることは間違いなかった。ニュートンは手紙の後半で、実際の色収差の寄与が理論より小さい理由を説明した。彼によれば、口径の1/50の収差を持つ光は、レンズによって最大に逸らされたものであるという。大部分の光は、口径の1/100以下の収差しか持たない。しかも、

---

[106] Huygens to Oldenburg, 4 January 1673 (O. S.), *Oldenburg Corresp.*, 9, pp. 380–384 (pp. 381 & 383). これをニュートンに転送したものは、Oldenburg to Newton, 18 January 1673, *Newton Corresp.*, 1, pp. 255–257. ホイヘンスの手紙の一部は英訳されて、*Phil. Trans.*, 8 (1673), No. 96, pp. 6086–6087 に収められた。

[107] Newton to Oldenburg, 3 April 1673, *Newton Corresp.*, 1, pp. 264–267. これは、Oldenburg to Huygens, 7 April 1673, *Oldenburg Corresp.*, 9, pp. 570–572 と同時にホイヘンスに転送されたと思われる。また、*Phil. Trans.*, 8 (1673), No. 97, pp. 6108–6111 を見よ。

[108] *Newton Corresp.*, 1, p. 179.

収差の大きい光は、分散した分だけ眼に与える印象が少ないから、色収差は小さく見えるという。

このニュートンの主張に対して、ホイヘンスは5月31日に手紙を送った[109]。この短いコメントでホイヘンスは、白色は二つの色から合成できるといいながら、一方で白色を作るには全ての原色が必要というニュートンの主張の矛盾を取り上げて、「彼は熱心に自分の主張を守っている」と皮肉った。その一方で、色収差の大きさについては、ホイヘンスはニュートンの説明を受け入れた。

しかしそうだとすると、望遠鏡を完全なものにする唯一の方法は凹面反射鏡だと提案した時に私たちに信じさせようとしたような光学ガラス［レンズ］の光の収差が、それほどの欠点ではないと彼は認めたことになります。彼の発明は確かに良いものです。しかし、私の経験によれば、素材の欠陥のために、それは実行が困難です。そのことは、デカルト氏が、形が難しいので双曲線を使えなかったようなものです。だから、私たちは球面ガラスに頼るべきだと思います。私たちはそのおかげをすでに十分被っており、望遠鏡の長さを長くしたり、ガラス自体の性質を改善することによって、まだ一層完璧なものにすることができます。

色収差の影響が大部分の光についてレンズの径の1/100以内であるというニュートンの説明からは、色収差の問題はさして重要ではなく、ガラスレンズを拒否する必要はないという結論が導出可能だった。

ホイヘンスはニュートンの一方的な態度に業を煮やしたらしく、その2週間ほど後にオルデンバーグに送った手紙の中で、ニュートンとは「これ以上論争したくない」と論争打ち切りを宣言した[110]。

それを知らないニュートンは、6月23日に先のホイヘンスの手紙に返事を送り、2色で作られる白と太陽光の白を区別する方法を説明した[111]。彼は反射式望遠鏡を実際に作るのが難しいことは認めたが、自分の方法で大きいものも作ることが可能であるとしている。

だが、これらの反論に、当然のことながらホイヘンスからの返事はなかった。

---

[109] Huygens to Oldenburg, 31 May 1673 (O. S.), *Oldenburg Corresp*, 9, pp. 674–676. これをニュートンに転送したものとして、Oldenburg to Newton, 7 June 1673, *Oldenburg Corresp*, 9, pp. 285–287. その要点は、『フィロソフィカル・トランザクションズ』に収められた。*Phil. Trans.*, 8 (1673), No. 97, p. 147.

[110] Huygens to Oldenburg, 14 June 1673 (O. S.), *Oldenburg Corresp*, 9, pp. 28–33 (pp. 29 & 31).

[111] Newton to Oldenburg, 23 June 1673, *Newton Corresp*, 1, pp. 290–297. これを転送したものは、Oldenburg to Huygens, 27 June 1673, *Oldenburg Corresp*, 9, pp. 58–69.

ニュートンの望遠鏡の運命

ニュートンは、望遠鏡や光の理論をめぐって、以上のような論争を展開した。ニュートンはこの他にも、前述のように、パルディース、リヌスなどからも批判を受けた。従来の科学史では、彼らとの論争に大きな比重を充ててきた。しかし、パルディースやリヌスの批判は、ニュートンの実験に対する単なる事実誤認に基づくものであって、重要ではない[112]。我々が重視すべきなのは、フックやホイヘンスのように望遠鏡や光の理論に精通した人々の批判であり、グレゴリーのように、自ら望遠鏡を提唱した人物の考察であるはずである。

これまでに論じてきたこれらの人々のニュートンへの対応を単純化して整理すると、次の表のようになる。

第5表・ニュートンへの対応

（○印：ニュートンの主張を認めた　×印：認めなかった）

	フック	ホイヘンス	グレゴリー
色による光線の屈折性の差異	○	○	○
光のモデル（色彩の発生ﾒｶﾆｽﾞﾑを含む）	×	×	言及せず
ニュートンの望遠鏡の是非	×	×	△（他の反射式と比較）

このように、色彩による光線の屈折性の差異についてのニュートンの発見と、それによる白色光の分散の現象は、正しいものとして認知された。しかし、その現象に対するニュートンの説明と、その現象が屈折式望遠鏡の改良の妨げになる

[112]例えば、ニュートンの書簡や論文の選集である、I. B. Cohen (ed.), *Isaac Newton's Papers and Letters on Natural Philosophy* (Cambridge, Mass., 1958) を見よ。この Chap. II のタイトルは 'Newton's papers on the improvement of the telescope and on physical optics' であるが、重要でない論敵であったパルディースやリヌスとニュートンとのやりとりを多数収める一方で、極めて重要な論敵であるホイヘンスの書簡はわずか2通しか収めず、グレゴリーとの論争に至っては全く取り上げていない。なお、パルディースはニュートンの実験装置を誤解し、リヌスは実験条件を誤解した。

ほど重大であるという彼の主張を、フックとホイヘンスは認めなかった。ニュートンとは異なるタイプの反射式望遠鏡の可能性を考察したグレゴリーは別として、フックとホイヘンスは、屈折式望遠鏡の一層の改良を考えていた。彼らにとって、反射式望遠鏡の鏡の合金の抱える問題もまた、それを避ける理由だった。

フックもホイヘンスも、論争の後に自分の光の波動説を放棄することはなく、屈折式望遠鏡に対する期待も変わらなかった。例えばフックは、1681年5月ごろに行なったと思われる講義の草稿で、次のように述べた。

> 光とは発光する物体の部分の独特(peculiar)な運動に他ならず、それが発光物体を取り囲む流体に影響するのである。その流体は、完全に流動的で完全に濃密なために、それ以上圧縮されることがない。しかし、発光体に隣接するその部分は動かされ、その流体の広がり全体が同様に動かされる。・・・(中略)・・・周囲の媒質へのこの運動の伝播を、我々は媒質の中の光と呼ぶ[113]。

光を物体の運動が引き起こす媒質中の運動と見なすその説明は、『ミクログラフィア』の光のモデルと基本的に同一である。

ニュートンと論争した後も、フックが屈折式望遠鏡を使用し続けたことは疑いない。なぜなら、ニュートンと論争を始めて2年後の1674年に、フックは著書『試み』で長大屈折式望遠鏡による恒星の年周視差の検出を論じたのである。また、『太陽望遠鏡』の中でフックが長大望遠鏡の短縮を考察したのは、さらにその2年後のことだった。

ホイヘンスが光の波動論者の立場を変えなかったことは、彼が1690年にライデンで出版した『光についての論考(*Traité de la lumière*)』から明白である[114]。この中で彼は、

> ニュートン氏が実験によって見事に示したように、屈折自体の内に光線の完全な収束を妨げる特性が存在する

と、屈折による光の分散の主張を認めた。だが、ホイヘンスにとってこれは、光の波動説と矛盾するものではなかった。

ホイヘンスが屈折式望遠鏡の探求を継続したことは、彼がニュートンとの論争

---

[113] *Posthumous*, pp. 113–117.

[114] *Oeuvres*, 19, pp. 451–537 (p. 524) [邦訳、科学の名著、第2期10巻、『ホイヘンス――光についての論考他』、朝日出版、1989年、302ページ]. ホイヘンスの光学理論については、Alan E. Shapiro, 'Kinematic Optics: A Study of the Wave Theory of Light in the Seventeenth Century', *Arch. Hist. Exa. Sci.*, 12 (1973), pp. 134–264, Chap. 5 & 6 に詳しい。また彼の幾何光学については、Takehiko Hashimoto, 'Huygens, Dioptrics, and the Improvement of the Telescope', *Historia Scientiarum*, 37 (1989), pp. 51–90 を見よ。

の最中の 1673 年に書き記した本の原案、「幾何光学の内容についての計画 (Projet du contenu de la dioptirique)」から分かる。この著作には八つの章が計画されており、そのうち第 4–6 章がレンズの屈折に充てられることになっていた[115]。ホイヘンスが空中望遠鏡を述べた『簡便な天体望遠鏡』を出版したのは、これから 10 年ほど経った 1684 年のことであった[116]。

ホイヘンスがこの時期にレンズの改良に実際に取り組んでいたことは、1685 年に彼を訪問したウィリアム・モリニューが、ホイヘンスに様々なレンズ磨き装置を見せてもらったことから分かる[117]。

このように、フックとホイヘンスは、ニュートンの分散現象発見の寄与を認めながらも、彼の光の理論や反射式望遠鏡を受け入れなかった。

長大望遠鏡への関心は、1680 年代以降になっても王立協会で諸処に見られた。例えばレンは、彼が設計したクライスト・チャーチのトム・タワーに天文台を設置することにしたが、それに必要な装置として、1681 年に、「大きな望遠鏡を建て、操るためのポール」を挙げた[118]。これは、長大望遠鏡の設置を示唆しているものと思われる。彼はまた、1703 年 2 月の王立協会の会合で、「ホイヘンス氏が協会に寄贈された望遠鏡を［セント・］ポール寺院に設置し、天文観測を行なうことを提案した」[119]。

ホイヘンスの寄贈した望遠鏡とは、長大望遠鏡のための有名な 123 フィートのレンズのことであった。このレンズは、1686 年 6 月にホイヘンスの兄のコンスタンティンが作製したもので、1692 年に王立協会に寄贈された[120]。それは、何人かの王立協会の会員に貸し出して使用された[121]。例えば、1713 年 2 月には、フックの遺稿集の編者であるウィリアム・デラムがこれを借り受け、5 年後に返却した。1718 年には、ジョン・パウンド (John Pound, 1669–1724) が借用し、1728 年に、彼の協力者である甥のブラッドレーによって返却された。ホイヘンスのレンズが

---

[115] *Oeuvres*, 13, pp. 731–745. 前掲、『ホイヘンス』に収められた解題 (pp. LXVIff.) も参照のこと。

[116] 前章の「フックと空中望遠鏡」の節を参照。

[117] William Molyneux, *Dioptrica nova* (London, 1692), pp. 223–224; Robert Smith, *A Compleat System of Opticks* (1738), Book 3, pp. 281–301; *Oeuvres*, 8, p. 528.

[118] Bennett(1982), p. 42; Wren to Bishop Fell, 3 December 1681, in W. Douglas Caröe '*Tom Tower': Christ Church, Oxford* (Oxford, 1923), p. 31. これに加えて、望遠照準付きの四分儀も必要なものに挙げられた。

[119] Royal Society Council Minutes, 2, p. 169 [1703 年 2 月 16 日].

[120] *Oeuvres*, 15, pp. 23–25; *Oeuvres*, 10, p. 231; Albert van Helden, 'The Telescope in the Seventeenth Century', *Isis*, 65 (1974a), pp. 38–58 (p. 46, n. 44). ヘルデンがここで述べているように、このレンズについては、その作製年を 1656 年とする誤解が散見される。なお、このレンズは現存する。

[121] Simpson(1981), p. 196.

王立協会に寄贈されたころ、イギリスでも長大望遠鏡のレンズ作製の努力は続けられていた。例えば、1692年の2月24日の王立協会の会合で、「ハレーは望遠鏡のための長大レンズを磨くエンジンを提案した」のであった[122]。

このように、長大望遠鏡の探求は17世紀後半にも続けられ、18世紀の初頭になってもそれは実際に使用された[123]。シンプソンに従うならば、このような中で、ニュートンの望遠鏡は、「忘れられたわけではないが、18世紀初頭には、ほとんど視野から消えてしまった」[124]。なぜなら、ニュートンは白色光がレンズの一つの焦点に集まらないことを理由に反射式望遠鏡の優位を主張したが、シンプソンによれば、

> 王立協会の［ニュートンの］その望遠鏡の長所に対する反応には、このような哲学的な基礎はなかったのである。そして、・・・（中略）・・・その発明に対する王の庇護を求めていたために、協会はおそらくはモーランドの拡声装置(speaking trumpet)に対するのに何か似た実践的で戦略的な潜在的可能性を探していた。しかし、その潜在能力を理解するためには、原理と技術をより大きな装置を作るために拡張できることが証明されなければならなかった。そうして初めて、その発明は成功であると言えたのである[125]。

これまでのように光学理論に偏向した歴史記述であれば、ニュートンの望遠鏡は偉大な発明と考えられるべきものであろう。光学史として、それは間違っているとはいえない。しかし、「ガリレオ・パラダイム」の流れから歴史を追ってきた我々は、'望遠鏡は天文観測に用いるもの' であるという基本的な事実を忘れることはできない。そのことは、ニュートンの望遠鏡が登場した同じ日の協会の会合で、カッシーニによる新しい土星の衛星の発見が論じられたことが象徴的に示している[126]。この立場からニュートンの反射式望遠鏡を見直してみると、これまでとは違った歴史記述が可能となる。

これまでに本論文で何度か述べてきたように、ニュートンの望遠鏡は、王立協会で長大望遠鏡の筒を短縮する試みと捉えられた。そして『光学』においてニュートン自身も、自らの望遠鏡を、「望遠鏡を短くすること」として提示した。しかし、ニュートンが王立協会に示したプロトタイプの望遠鏡は、3–4フィートの屈折式望遠鏡程度の能力しかないものだった。フックは1660年代に60フィートの屈折

---

[122] Royal Society Journal Book, 8, p. 99.

[123] King(1955), p. 65.

[124] Simpson(1981), p. 287. ニュートンの望遠鏡が忘れられていない根拠としては、John Harris, *Lexicon technicum* (London, 1704), 'Telescope, Reflecting' [p. 773] での言及を見よ。ただし、ここでも合金の困難が指摘されている。

[125] Simpson(1981), p. 114.

[126] *Birch*, 3, p. 3.

式望遠鏡を盛んに使用し、ヘヴェリウスは1673年の『天文機械・前編』で、150フィートの望遠鏡を論じていた。これらに比べると、ニュートンの望遠鏡の能力は余りにもお粗末だった。フックらは、ニュートン式の望遠鏡を大きくする努力を行なった。だが、それは合金の問題のために成功しなかった。ニュートンもまた、1679年ごろ、光学器機職人のコックに依頼して、反射鏡を鋳造してもらっている。これは、彼が反射式望遠鏡の改良を続けていたことを示すと思われる[127]。だが、その成功は知られていないのである[128]。従って、ニュートンの望遠鏡は実用化を果たせず、天文観測器機としては失敗だったことになる。それは、当然のごとく歴史の「視野から消えてしまった」のである。そして、ベックラー(Zev Bechler)が明らかにしたように、ニュートン自身も、フックの批判を受けた後に、色消しレンズを作って屈折式望遠鏡を改良しようとしていた形跡がある[129]。

これに関連して述べるならば、望遠鏡だけではなく、ニュートンの光学理論もまた影響力を失っていた可能性がある。というのは、オルブリー(William Albury)の研究によるなら、1690年に王立協会でホイヘンスの『光についての論考』が話題になったとき、既にニュートンと近しかったはずのハレーが、ニュートンの理論を知らなかった形跡が見られるというのである[130]。

このように考えると、フックのニュートンに対する批判は、望遠鏡の改良に関心を持つものとしてごく常識的なものであったと考えられる。フックの批判が非常に辛辣なものであったことは、確かに問題かも知れない。しかし彼は、ニュートンの光の分散現象の発見を正当に受け入れた。彼が批判したのは、その背後にある光のモデルだった。後知恵で考えれば、波動論的な光学理論もまた、粒子論的な理論同様に構築可能なものだった。フックは、反射式望遠鏡の実用性に疑問を提示した。そして反射式望遠鏡は、事実実用化が困難だった。フックの否定的な対応は、歴史の展開の中では、ひどく「合理的」な判断であったように思われる。フックの批判に対して、「あれだけ厳しい反対者も、あのいずれかの部分を駄目にでき」ることはなかったと考えたニュートンの方が、望遠鏡の観測器機としての役割を理解していなかったのではなかろうか。

当時の望遠鏡の水準と、望遠鏡の観測器機としての意味をニュートンが十分に理解していなかったとするならば、彼は、実用を重んじる数学的諸科学に対して、

---

[127] Newton to Hooke, 28 November 1679, *Newton Corresp.*, 2, pp. 300–304 (p. 303).

[128] *Ibid*, p. 304, n. 6.

[129] Zev Bechler, '"A Less Agreeable Matter": The Disagreeable Case of Newton and Achromatic Refraction', *Brit. J. Hist. Sci*, 8 (1975), pp. 101–126 (p. 109).

[130] William R. Albury, 'Halley and the *Traité de la lumière* of Huygens: New Light on Halley's Relationship with Newton', *Isis*, 62 (1971), pp. 445–468. これは、ハレーの先のレンズ磨きの探求とも一致する。なお、ニュートンの光学理論が18世紀に持った影響力を過大視することに対して疑問を提示した論文として、G. N. Cantor, 'The Historiography of "Georgian" Optics', *Hist. Sci*, 16 (1978), pp. 1–21.

フックより遠くにいたことになる。事実、ニュートンの『光学』は、反射式望遠鏡に触れているにも関わらず、天文観測には注意を向けていない。またニュートンは、フックのように実際の天文観測に寄与することもなかった。

ニュートンの探求一般を考えても、望遠鏡に限らず、彼の研究に新しい実験観測装置が寄与することが少なかったことは興味深い[131]。なるほど、いわゆるニュートンリングを考察した装置は彼の工夫である。しかし、それに用いられたレンズも板ガラスも、特に目新しい実験器具ではなかった。プリズムにしても、それは同様である。彼の力学研究の場合にも、その理論は彼の実験観測の成果とは言い難い。

これに対して、フックの観測装置は、真空ポンプにしても、顕微鏡にしても、望遠鏡にしても、機械的な新しい工夫と、職人の協力によるものだった。彼は、このような新しい装置で未知の現象を見つけることによって自然学的探求を進めた。

実践とのつながりの希薄さと、観測器機の使用がプリミティブである点で、ニュートンの自然研究は思弁的であり、フックの研究とは性格を異にしている。このようなニュートンが王立協会で支配的になって行ったことは、当時進行していたグレシャム・カレッジの衰退と、数学的諸科学からの王立協会の距離の増大を象徴しているように思われる。

ニュートン式望遠鏡の復活

本章を結ぶにあたって、18世紀におけるニュートンの望遠鏡の復活、より正確に言えば、反射式望遠鏡一般の興隆について簡単にまとめておきたい[132]。

確認しておかなければならないのは、17世紀において、ニュートン式に限らず、反射式望遠鏡は「重要な存在ではなく」[133]、ニュートンの望遠鏡にしても、「まだ面白いおもちゃに過ぎなかった」ことである[134]。ニュートン式望遠鏡の長所といえば、そのプロトタイプが実際に機能するということだけだった[135]。

その状況が変化したのは、1720年ごろのことであった。1717年に王立協会の会員に選ばれた数学者ジョン・ハドレー(John Hadley, 1682−1744)は、1719−20年ごろ、ニュートン式の望遠鏡を作った。これは、焦点距離5フィート3インチの金属鏡を用いた口径6インチの大型の反射式望遠鏡である。この装置は約200倍の倍率を持

---

[131] ここでは、ニュートンの錬金術的探求については除外して考えている。錬金術の目的もまた実用ではなかったことに注意。詳しくは、拙稿、「ニュートンの錬金術」、下坂英他編、『科学と非科学のあいだ』(木鐸社、1987年)、27−67ページ所収。

[132] Simpson(1981), Chap. 4.

[133] Helden(1974a), p. 49.

[134] King(1955), p. 65.

[135] Simpson(1981), p. 64.

つもので、1720年に彼は、これで土星を観測した。彼がどのような金属を用いて鏡の抱える問題をクリアしたかは知られていないが、それが実用的な装置であったことは間違いない。この望遠鏡は、1721年1月12日に王立協会に示され、検討のためにグリニッジ天文台のハレーに送られた。ハレーはこの望遠鏡に強い印象を受け、それがホイヘンスの123フィートのレンズを凌ぐと書いた[136]。このことは、反射式望遠鏡が、ようやく屈折式望遠鏡のレベルに追いついたことを意味する。

反射式望遠鏡を商業的な成功に導いたのは、ジェームズ・ショート(James Short, 1710−1768)の功績だった。ショートはエディンバラの職人であったが、能力が認められてエディンバラ大学に出席するのを許された。1725年にエディンバラ大学の数学のポストを占めたニュートン主義者のコリン・マクローリン(Collin Maclaurin, 1698−1746)は、1734年に書いた手紙の中で、ショートの仕事を賞賛した。ショートは、1736年にロンドンを訪ねて王立協会の人々に強い印象を与え、翌年会員に選出された。彼は、1738年、ロンドンのストランドに程近い場所に店を構えた。当初彼の望遠鏡は、ガラスに銀を貼った鏡を使用していた。しかしガラス自体の欠陥に気づいた彼は、金属鏡へと移って行った。彼の成功は放物面状の反射鏡によるもので、鏡には銅と錫が使用されていたという[137]。彼は、ヨーロッパ各地の主要な天文台に望遠鏡を供給した。ショートは望遠鏡で財をなし、没したときには2万ポンドの蓄えを持っていた。ショートによって、1740年までに、反射式望遠鏡は確立したと考えられる[138]。

しかし、このようなショートの望遠鏡の大部分は、グレゴリー式だった。グレゴリー式は作製がたやすく、その正立像が地上での使用にも向いていた[139]。ハドレーの場合もショートと同様だった。ハドレーの作ったニュートン式は2台しか知られておらず、その後彼は、グレゴリー式を作製したのだった[140]。1736年、王立協会は、様々な望遠鏡作製者の反射式望遠鏡の腕比べを行なった。その時にも、有力な作製者から、グレゴリー式やカセグラン式の望遠鏡が提出された。カセグラン式は、凹面と凸面の球面収差が相殺するという長所があり、さらにグレゴリー式に比べて筒が短い点で優れていたのだった[141]。

ショートは、ニュートン式の望遠鏡をグリニッジ天文台用に納めた。だから、彼はニュートン式を軽視したわけではない。だが、ニュートン式望遠鏡は、実用化された反射式望遠鏡の一つに過ぎなかったのである。

反射式望遠鏡が確立したことは、屈折式望遠鏡が衰退したことを意味しはしな

---

[136] Simpson(1981), p. 292; King(1955), pp. 77−78.

[137] Simpson(1981), pp. 320ff.

[138] Simpson(1981), p. 323.

[139] King(1955), pp. 85−86.

[140] Simpson(1981), pp. 293−294.

[141] King(1955), p. 75.

かった。光学器機職人達は、屈折式にも注意を払った[142]。ベネットによれば、グレゴリー式は主にアマチュアによって用いられ、プロフェッショナルの天文学者は、屈折式を使用していた。

その状況が変化したのは、ジョン・ドロンド(John Dollond, 1706−1761)がレンズを分割したマイクロメーターを考案し、これを反射式望遠鏡に応用してからであるという[143]。このマイクロメーターは、1754年に王立協会で発表された。しかし皮肉なことに、このドロンドこそ、その4年後に色消しレンズの特許を取得し、屈折式望遠鏡の像の虹の隈取りの問題を最終的に解決した人物だった。

屈折式望遠鏡は、現在でも反射式望遠鏡と併用されている。なぜなら、屈折式望遠鏡は反射式よりも安定した像を示すので、特に位置天文学に適しているからである[144]。そして、18世紀の前半には、イギリスと大陸において、まさに位置天文学の興隆が見られたのであった[145]。

---

[142] King(1955), p. 144.

[143] 筆者とのケンブリッジでの面会（1993年2月18日）の際のベネット氏の証言による。

[144] 広瀬秀雄、『天文学史の試み』（誠文堂新光社、1981年）、185ページ。

[145] King(1955), p. 99.

結　論

本論文では、第Ⅰ部の前半においてフックの科学活動のバックグラウンドを論じ、第Ⅰ部の後半では、これまでの科学史研究が解明してきたフックの科学研究の概要を明らかにした。そこに現れたフックの像は、顕微鏡観察や地質学などの優れた面があるものの、総じて言えば凡庸な科学者であるに過ぎなかった。

本論文の第Ⅱ部は、このようなフックに対する評価を、彼の天文研究の分析を通じて改めることを試みた。そこで詳しく論じられたように、フックの天文研究は、筆者が「ガリレオ・パラダイム」と名付けた17世紀の重要な研究伝統の上で展開された。「ガリレオ・パラダイム」は、ガリレオが提起した太陽系天体の諸現象を解明する研究プログラムであり、試行錯誤の結果発明された長大望遠鏡を使用して、その研究が取り組まれた。「ガリレオ・パラダイム」は、ホイヘンスのような大陸の科学者の興味を引いただけではなく、イギリス革命期から王立協会初期にかけての科学者によっても盛んに研究された。彼らは、望遠鏡を用いた観測によって、月面の詳細な地図を作成し、土星の奇妙な形状の秘密を解き明かそうとした。フックの天文研究は、このようなイギリスの「ガリレオ・パラダイム」の延長上に現れたものだった。フックは、長大望遠鏡の可能性をめぐってフランスのオズーと論争する一方で、長大望遠鏡を活用して、惑星の細部などの観測を行なった。フックの観測の水準は、パリの天文台で活躍したカッシーニにも匹敵するものであった。当時フックは長大望遠鏡に通じた人物と見なされ、フックの望遠鏡は、有力な天文観測者であったポーランドのヘヴェリウスから賞賛を受けた。

フックは「ガリレオ・パラダイム」の第二期の人物であり、この時期にこのパラダイムの課題となった天体の精密観測にも関与した。彼は、接眼マイクロメーターの改良に取り組むとともに、望遠照準の有効性をめぐってヘヴェリウスと論争を展開した。彼はまた、精密観測装置を用いて、恒星の年周視差の検出を試みた。望遠鏡による精密観測は、フラムスチード、ハレーといった新世代の天文学者によって、フックの活動の頂点の時期に設立されたグリニッジ天文台で、やがて大きく花開く新しい潮流であった。

このようにして本論文は、フックが天文学という科学革命の重要な要素において高い地位を占めていたことを明らかにした。このような観点からは、フックを平凡な科学者と見ることはもはやできない。

しかしながら、筆者のこの結論は、次のような批判を免れないであろう。なるほど、フックの天文研究は高水準のものであったかもしれない。だが、そのことは、フックが科学革命の主役であったコペルニクス、ガリレオ、ケプラー、そし

てニュートンといった一流の科学者と同水準の学者であることを証明するものではない。本論文の議論は、フックが凡庸な科学者でなかったことを示すのに成功したのかもしれないが、結局のところフックは、ハレーやフラムスチード同様に、一流の科学者の傍らに地位を占めたに過ぎないのではないか。

筆者はこのような見方を批判するものであるが、筆者の見解を明らかにするためには、フックの科学研究の性格について、改めて考察をめぐらす必要がある。

スティーブン・シェイピンは、『ロバート・フック新研究』に収められた論文、「フックとは誰だったのか」[1]において、フックの性格づけを試みた。シェイピンは、当時「実験哲学者 (experimental philosopher)」と呼ばれるためにはジェントルマン (gentleman) の社会階層に属することが必要であったこと、そしてフックはその資格を欠いていたことを指摘した[2]。その一方でシェイピンは、フックを職人階層の人物と考えることもできないことも示した[3]。フックは職人を指揮したが、日記に現れるフックは職人を呼び捨てにしていた。彼は、自分がメカニックと同列視されないように用心し、不当に低い扱いに対しては怒りを露にした。

シェイピンの論文は、否定による消極的なフックの位置づけの試みだが、それに約10年先立つ論文でベネットは、シェイピンより積極的にフックを定義しようとした。ベネットは、フックの器機 (instrument) への貢献に注目した。彼は、フックの技術的寄与を科学の副産物に過ぎないとするエスピナスの見解を批判し[4]、次のように述べた。ベネットによれば、フックの仕事は、

> ［ロバート・］レコードやディッグズに遡る、イギリスの数学的諸科学の研究と実践の中の、長く確立された器機作製 (instrumentation) の伝統の延長として最も良く理解できる[5]。

ベネットの「数学的諸科学」という用語は、学者 (scholar) と職人 (mechanic, craftsman) の伝統を二分して近代科学の形成を考えようとする観点を克服するために導入された[6]。ベネットは、学者の科学的営みと職人の技術的営みを媒介す

---

[1] Steven Shapin, 'Who Was Robert Hooke?' in *New Studies* (1989), pp. 253–285.

[2] Shapin(1989), pp. 253 & 260.

[3] Shapin(1989), pp. 262–263 & 266.

[4] Margaret 'Espinasse, *Robert Hooke* (London, 1956), p. 74; J. A. Bennett, 'Robert Hooke as Mechanic and Natural Philosopher', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 35 (1980), pp. 33–48 (p. 41).

[5] Bennett(1980), p. 44.

[6] J. A. Bennett, 'The Mechanics Philosophy and the Mechanical Philosophy', *Hist. Sci*, 24 (1986), pp. 1–28 (p. 1). 当然のことながら、学者と職人の関係という問題は、近代科学の起源をツィルゼルが高等職人に求めたことを念頭に置いたものである。Edgar Zilsel, 'The Origins of William Gilbert's Scientific Method', *J. Hist. Ideas*, 2 (1941), pp. 1–32［青木靖三訳、『科学と社会』、みすず書房、1967年、第5章所収］.

る領域として、この概念を定立した。数学的諸科学は、航海、地図作製、天文学などの応用数学的探求を意味するものであり、航海術などの実践と結びついた研究だった。グレシャム・カレッジは、この研究伝統を支えるために設立された制度であった[7]。そして、フックやレンは、グレシャム・カレッジの幾何学と天文学という数学的諸科学の学問分野の教授として、この伝統の上にあった[8]。

しかしベネットは、フックを単純に数学的諸科学の探求者と見なしたのではなかった。ベネットは、17世紀に、応用的な数学的諸科学とは別に、自然世界を因果的、理論的に考察する「自然哲学」の伝統が存在したことを指摘した[9]。フックの特色は、数学的諸科学の伝統を追求しただけではなく、

> それを、誰にも増して、自然に対する新しい研究の態度に対しても適用したことにある。その態度は、イギリスではウィリアム・ギルバートとフランシス・ベーコンに源を持ち、初期王立協会の特色であった自然哲学へと発展したものであった[10]。

つまり、フックは数学的諸科学を支えると同時に、その技術的な装置を、科学実験器機 (scientific instrument) として自然哲学に応用したのだった。

佐々木は、これと関連して興味深い主張をしている。彼は、ベーコンの学問思想の本質を特徴づけて、次のように述べた。ベーコンの思想の根幹は、

> 中世からルネッサンスにかけて特に西ヨーロッパで発展したさまざまな機械的技芸を意図的に振興し、それを「実験科学」と名づけられるべき新しい形態の自然誌・自然哲学として彫琢することであった[11]。

佐々木は、科学に基礎をおく技術、すなわち科学技術に対比する形で、このような機械的技芸に基づく実験科学を、「テクノロジー科学」と名付けた[12]。彼は、このような理念はベーコンやガリレオによって唱道されたが、それが本格的に定着したのは、1660年の王政復古の後に組織された王立協会であるとした[13]。

佐々木の「テクノロジー科学」の概念は、数学的諸科学の自然哲学への応用というベネットの考えを、より明確に言語化したものと見なすことができる。しかし、両者の考えの間には、微妙な差異がある。第一に、ベネットが、佐々木の言

---

[7] J. A. Bennett, *The Mathematical Science of Christopher Wren* (Cambridge, 1982), pp. 7–9.

[8] Bennett(1980), p. 44.

[9] Bennett(1986), p. 2.

[10] Bennett(1980), p. 44.

[11] 佐々木力、『近代学問理念の誕生』（岩波書店、1992年）、474ページ。

[12] 同上書、475ページ。

[13] 同上書、490ページ。

う「テクノロジー科学」の背後に数学的諸科学の存在を考えたのに対し、佐々木は、この種の技術と科学の媒介領域について触れなかった。第二に、ベネットは数学的諸科学の自然哲学への応用を王立協会の初期までの特色としたのに対し、佐々木は、「テクノロジー科学」を現代にまでつらなる伝統と見なした。

実験科学の伝統の問題については、論文、「物理科学の発達における数学的伝統と実験的伝統」において、クーンが興味深い分析を加えている。クーンは、物理的諸科学のうち、古代から存在する天文学、静力学、光学、数学、和声学の五分野に、比較的新しい位置運動の分野を加えて、「古典的諸科学」と称した[14]。古典的諸科学は経験的な要素を含むが、それは精密な実験観察の成果と言うよりは、日常経験の産物であった。クーンは古典的諸科学と対比されるものとして、「ベーコン的諸科学」というものを考えた[15]。17 世紀に現れたベーコン的諸科学は、それが用いた実験の方法や目的の点で古典的諸科学と違っている。古典的諸科学において、実験は思考実験であったり、既に知られていることを確認するためのものであった。しかし、

> ギルバート、ボイル、フックのようなその様式［ベーコン的諸科学］の実践者たちが実験をするときは、すでに分かっていたことを立証したり、当時の理論の拡張に必要な細部の決定を目的としたりすることはほとんどなかった。その代わりに彼らは、それ以前には観測されず、しばしば存在すらしなかった状況下で、自然がどのように振舞うかを観察したいと考えた[16]。

ベーコン的諸科学で実施される実験は、「人間の強制的な介入なしではけっして実現されないような条件下において、自然を提示する」ものであり、「望遠鏡、顕微鏡、温度計、気圧計、空気ポンプ、電気量計、その他の新しい実験装置」を駆使してなされるものであった[17]。

しかしクーンは、ベネットや佐々木とは違って、科学革命期の「古典的諸科学の概念上の変革に対しては、ベーコン主義の寄与はごく小さかった」[18]と考えた。彼は、ベーコン的諸科学は、化学、電気、熱などの分野で、18 世紀に興隆したと見なしている。

ベネットが指摘した通り、ベーコン的諸科学の典型を化学等に求めるクーンの見方は問題を含むものである[19]。なぜなら、クーンのいうような実験的方法は、

---

[14] Thomas S. Kuhn, *Essential Tension* (Chicago, 1977), pp. 35–41 [佐野正博・安孫子誠也訳、『本質的緊張』、上、みすず書房、 1987 年、 52–57 ページ].

[15] *Ibid*., pp. 41–52 [邦訳、 57–72 ページ].

[16] *Ibid*., p. 43 [邦訳、 60 ページ].

[17] *Ibid*., p. 44 [邦訳、 61 ページ].

[18] *Ibid*., p. 45 [邦訳、 62 ページ].

[19] Bennett(1986), pp. 5–6.

それ以前の数学的諸科学にも広く見られるからである。しかし、クーンの考察は、ベーコン的諸科学、あるいは「テクノロジー科学」と呼ばれるものの特性に関する優れた知見を与えてくれる。この種の科学における実験とは、器機を使用して、普通では見ることのできない現象を観察し、新しい理論を与えるものであった。その器機は、ベネットが述べたように、技術的な実践から持ち込まれたものであった。

用語の混乱を避けるために、ベネット、佐々木、クーンらの議論から抽出されたこのような科学的営為を、以下では「実験哲学」と称することにしよう。

佐々木が指摘したように、実験哲学の起源は、少なくともガリレオにまで遡ることができると思われる。そのことは、実は本論文の議論にも現れていた。というのは、本論文が「ガリレオ・パラダイム」と称するものは、レンズ作製の技芸の結果発明された望遠鏡を用いて、それまで全く未知だった天体の諸現象を解明する研究伝統だからである。それは、ガリレオに始まり、フックにも引き継がれた。

天文研究に限らず、17世紀中葉に展開されたフックの科学研究の多くの部分は、実験哲学にあてられた。第6表は、フックの業績の抜粋資料集であるガンターの『オクスフォードの初期の科学』の第6巻および第7巻に添付された索引を基礎として、フックの主だった仕事をキーワードとして抜き出したものである。ここでは、抽出されたキーワードを、性格別に4種類に分類している[20]。このうちbに分類されるものは航海術などの応用に結びつくものであり、フックが数学的諸科学の伝統を引いていることを示している。これに対して、cに分類されるものは、直接の応用を念頭においたものというよりは、むしろ科学研究のためのものである。しかもそのほとんどは、真空ポンプ、顕微鏡、望遠鏡といった実験器機によって探求されるものだった。すなわちそれは、実験哲学に分類されるべきものである。

ところでこの実験哲学の伝統は、18世紀に向かって王立協会に順調に引き継がれていったのであろうか。ベネットが考えたように、実験哲学が栄えたのは、初期王立協会までと考えるべきではないかと思われる。それを象徴するのが、17世紀中葉に活躍したフックの科学と、世紀末に勢力を増したニュートンの科学の性格の差異である。

その差異は、反射式望遠鏡に対するフックとニュートンの対応に象徴的に現れた。フックはニュートンの望遠鏡に批判を加えたが、彼がその可能性を否定したのは、反射式望遠鏡が実用化できないと考えたからであった。事実、反射式望遠鏡では木星の衛星程度しか見ることができず、惑星の細部の観測に使用されてい

[20]キーワードの選択にあたっては、索引における出現頻度だけではなく、本論文執筆の過程で得た知見も考慮した。なお、これらのキーワードを4項目に截然と区分するのは必ずしも容易ではない。常に中間的な性格を持つものが存在するからである。しかし、ここで重要なのは、この分類の細部の適・不適をあげつらうことではなく、フックの研究のおおよその傾向を知ることである。

第6表　フックの研究の分類

（*Gunther*, 6, 7 に添付された索引より作成）

a. 純粋技術的な色彩の濃いもの

測量　建築　時計　火薬（ｴﾝｼﾞﾝ）　ランプの改良　帆　馬車の改良
風車　ポンプ　フェルト作り　眼鏡　メダル作り　遠方とのｺﾐｭﾆｹｰｼｮﾝ

b. 技術と理論の中間的なもの

天候　気圧計　雨量計　水圧　風力計　湿度計　比重　water−poise　磁石
水深測定　測定器具の改良（水深・時間）　振子　空気抵抗　弾性　反射鏡
ﾏｲｸﾛ・ﾒｰﾀｰ　ﾕﾆﾊﾞｰｻﾙ・ｼﾞｮｲﾝﾄ　赤道儀　天体観測器機の目盛　レンズ
遠方の知識

c. 実験哲学の色彩の濃いもの

呼吸　真空ポンプ　気圧　空気の重さ　空気の希薄化　水中の空気　泡
水の成り立ち　毛細管　親和性　混合による体積変化　燃焼　光の屈折
光の色　ｶﾞﾗｽ・ﾎﾞｰﾙ　重力　惑星の観測　望遠鏡　彗星　地球史　月蝕
落体の力　太陽の距離　太陽望遠鏡　顕微鏡　微生物　昆虫の羽
博物学的観察（生物・鉱物）　化石　結晶　土と塩

d. その他

天体の運動　直線運動からの逸れ　科学の方法　落雷　音楽　普遍言語

た屈折式望遠鏡に比べるとそれはひどく劣っていた。新しい現象を見いだすことを旨とする実験哲学の立場からすれば、ニュートンの望遠鏡は不満足な装置であった。これに対してニュートンは、光についての理論的考察から、反射式望遠鏡の将来的可能性を唱道して止まなかった。その主張は、確かに長い目で見れば正しいものであった。だが、17世紀においては、長大望遠鏡のような後世から見れば一見漫画的な装置の方が、実験哲学に貢献するものだった。

つまり、フックの科学が実験哲学的なのに対して、ニュートンの科学は理論的であり、クーンのいう古典的諸科学の性格を濃く持っていたのである。ニュートンは光学を実験的に探求した。だが、クーンが述べたとおり、ニュートンがそのために使用したプリズムは、水を満たした中世の球形容器の延長線上にある古典的なものであった[21]。ニュートンは反射式望遠鏡を作製したが、その望遠鏡は素人が自作できる程度のものだった。これに対して、フックの長大望遠鏡は、実験器機職人との協力でようやく作製できる、まさに実験哲学にふさわしいものであった。それは、ニュートンの望遠鏡のように木星の衛星の存在を改めて確認するために用いるものではなく、天体の未知の現象を発見するための装置であった。

光学に限らず、ニュートンの科学研究は一般に理論的な色彩が強かった[22]。彼の『プリンキピア』は、新しい実験観測の結果として作り上げられたというよりは、コペルニクス、ケプラー、ガリレオらの探求を総合した理論的構築物であった。もちろんニュートンは天文観測データを利用した。しかし、それは彼自身が観測したものではなく、フラムスチードのような観測家に依拠したものだった。ニュートンの力学は、まさにクーンの言う古典的諸科学に該当するものであった。

17世紀の後半、ベネットのいう数学的諸科学の衰退が見られた。グレシャム・カレッジが没落し、新たに創設された王立協会でも、数学的諸科学に関連する関心は低くなっていった。これに伴って、数学的諸科学と近縁の実験哲学の活動が低下したと考えることは、不合理ではないと思われる。そしてそれと入れ替わるように、理論的なニュートン・パラダイムが興隆していったのではなかろうか。このような仮説の探求は、魅力ある研究プログラムであると思われる。

この仮説の是非は別としても、以上のような議論から、17世紀イギリスに、科学に関わる少なくとも四つの営為が共存していたと結論することができる。その最初は、職人の技芸の伝統であり、中世以来発達を遂げたものであった。その伝統と科学的な実践を媒介する領域として形成されたのが、ベネットのいう数学的諸科学の伝統である。それは、実用を念頭に置いて展開されるものだった。実験哲学の伝統は、この数学的諸科学を、科学的な実験に適用するものであった。もちろん、自然世界の探求は、実験的にのみ行なわれるものではない。ニュートンに見られるように、理論哲学とでも称される自然の理論的な探求がこれとは別に存在した。実験哲学と理論哲学は、ともに自然哲学の領域を形成するものだが、

[21] Kuhn(1977), p. 45 [邦訳、62ページ].

[22] ここでは、ニュートンの錬金術の探求については除外して考えている。

自然を解明するためのアプローチが異なっていた。このような考えを整理すると、第7表のようになる。

第7表　科学に関わる17世紀の営為

技芸
数学的諸科学
実験哲学 ｝ 自然哲学
理論哲学 ｝ 自然哲学

この分類を前提とすると、従来の科学史記述は、理論哲学の歴史に著しく傾いたものであったことが分かる。例えば、科学革命の中心である天文学の革命を記述する際には、コペルニクス、ティコ、ケプラー、ガリレオ、ニュートンというような発展史を記述するのが最も普通であろう[23]。そして、その延長上には、解析力学の発展史が加えられるのである。そこでは、主に天文学の力学的発展史に重点が置かれ、この立場からは、土星の正しいモデルといった、天文学的な発見は全て見失われてしまう。

実験哲学的な伝統に着目した場合、我々は天文学の歴史をこれとは異なる形で描くことができる。その歴史記述では、望遠鏡という装置によって科学者に与えられた未知の現象の解明、すなわち「ガリレオ・パラダイム」が中心的な位置を占めるであろう。その歴史の主な登場人物は、ケプラーやニュートンではなく、リッチョーリ、ヘヴェリウス、ホイヘンス、カッシーニ、レン、フックといった人々である。また、フック以降の時代であれば、フラムスチード、ハレー、ブラッドレー、ハーシェルなどの人物が視野に入り、天文学の制度としてのグリニッジ天文台にも焦点を当てることができる。このような歴史は、通常の科学史の教科書には見ることができない。

筆者は、理論哲学を中心とする歴史記述より、実験哲学を中心とした歴史記述の方が正しいと主張しようとするのではない。重要なことは、理論哲学の歴史とは別に、科学史を実験哲学の歴史として描くこともできるという事実なのである。

なるほど、理論哲学の側面で、フックはニュートンにおよぶ科学者ではなかった。しかし、実験哲学の伝統というもう一つの流れに着目するなら、フックは歴史的に極めて重要な位置を占めていた人物として浮かび上がってくる。天文学の分野では、彼は長大望遠鏡の改良に取り組み、カッシーニの水準に迫る観測を行なった人物であった。フックは精密観測器機の重要性を唱え、自らこれを用いて観測に取り組んだ。フックは、天文学以外の分野でも実験哲学に寄与した。彼は、

[23]例えば、Thomas S. Kuhn, *The Copernican Revolution* (Cambridge, Mass., 1957), Chap. 6ff. [常石敬一訳、『コペルニクス革命』、紀伊国屋書店、1976年]を見よ。

顕微鏡によって、それまで未知だった微小世界を初めて解明した。また、真空ポンプを実用化することによって、彼は、新しい実験のための空間を作りだした。17世紀に、人類は望遠鏡、顕微鏡、真空ポンプという、人間の感覚の領域を越える世界を知るための三つの装置を手にした。フックは、この装置すべてに関与した。特にそのうちの二つは、フックの手によって実用的な実験装置となった。このような意味で、フックの貢献は、理論哲学におけるニュートンに匹敵するものがあると考えられる。

フックの実験哲学への寄与は、彼の数学的諸科学との関与を基礎としていた。彼は実験器機に詳しく、職人と協力してその作製、改良に取り組んだ。このような彼の活動は、ホイヘンスと共通する側面がある。もちろん、ホイヘンスはフックとは違って、理論哲学においても優れた仕事を行なった。だが、ホイヘンスは同時に、自らレンズを磨き、長大な望遠鏡を使用して土星の諸現象を解明した。ホイヘンスの時計の改良への取り組みは、典型的な数学的諸科学の営為であった。マホーニィは、「フックのような人々の退屈で汚れた経験的研究」[24]とホイヘンスの研究を区別したが、実際にはフックもホイヘンスも、数学的諸科学と実験哲学の双方に関与したのだった。その研究のあり方は、実践的な技術的改良と疎遠なニュートンと対照的だった[25]。マホーニィの視点は、むしろニュートンにより良く当てはまるものであったのである。

1703年3月3日、フックは67歳で没した。彼は、1697年に足のむくみを訴え、目眩で階段から落ちる有り様だった。そのころから眼が見えなくなり、最後には読み書きもできなくなった。彼は寝たきりとなり、死を迎えた[26]。彼のこのような衰弱は、糖尿病が原因とも言われている[27]。

彼の遺骸は、彼が最期まで住んだグレシャム・カレッジから、ビショップスゲート・ストリートを渡って、向かいのセント・ヘレン教会(St. Helen's)へと運ばれ

---

[24] Michael S. Mahoney, 'The Measurement of Time and Longitude at Sea' in H. J. M. Bos et al. (eds.), *Studies on Christiaan Huygens* (Lisse, 1980), pp. 234–270 (p. 260) [佐々木力訳、『歴史における数学』、勁草書房、1982年、227ページ].

[25] もちろんこのことは、ニュートンの研究が、当時の社会・経済的要求を反映していたとするゲッセンの観点と矛盾するものではない。社会の要求は、理論的営為に間接的に影響を与えるのである。B. Hessen, 'The Social and Economic Roots of Newton's "Principia"' in *Science at the Cross Roads* (2nd ed., London, 1971), pp. 147–212 [秋間実他訳、ベー・エム・ゲッセン、『ニュートン力学の形成』(法政大学出版局、1986年)、ロシア語からの訳].

[26] *Waller*, p. xxvi.

[27] J. C. Kassler and D. R. Oldroyd, 'Robert Hooke's Trinity College "Musick Scripts": His Music Theory and the Role of Music in His Cosmology', *Ann. Sci*, 40 (1983), pp. 559–595 (p. 590).

た。彼の埋葬には、「街にいた王立協会会員全員が立ち会い・・・（中略）・・・彼の類い希な功績に敬意を払った」[28]。だが、彼が教会のどこに葬られたかは、現在では知られていない。

フックは、自らの遺産を、自然知識の改善のために使うことを生前口にしていた。しかし、遺書を書くのを先延ばしにしたために、それはかなわぬこととなった[29]。フックの蔵書を含む財産は、オークションで売却されて散逸した[30]。

彼の自然学研究の遺稿と日記は、親族の手に残った。手稿類は王立協会の書記のウォラーに預託され、1705年に遺稿集として出版された[31]。その後、フックの日記も親族からウォラーに与えられた。フックの手稿類は、ウォラーの没後、デラムに渡された。デラムは、1726年にフックの遺稿集を新たに出版した。フックの手稿はその後王立協会に戻ったが、遺稿集に収められたものの多くと、フックの日記は、ここで行方が分からなくなった。その日記が再び見いだされたのは、ようやく1891年のことだった[32]。

フックの名声は、彼の没後約40年間は保たれたといわれる[33]。しかしフックの記録は、彼の日記が行方不明となったように、徐々に失われて行った。1710年にロンドンを訪問したドイツ人の記録によれば、グレシャム・カレッジの王立協会の部屋には会員の肖像画があり、その中で、ボイルとフックの絵が目だっていた[34]。しかし、現在ではその肖像画の行方は知られていない[35]。

---

[28] *Waller*, p. xxvi.

[29] *Waller*, p. xxvii.

[30] フックの遺した財産の詳細については、'Hooke's Possessions at His Death: A Hitherto Unknown Inventory' in *New Studies*, pp. 287–294. フックの蔵書のリストについては、Leona Rostenberg, *The Library of Robert Hooke* (Santa Monica, 1989). ただし、これに収められているブリティシュ・ライブラリー所蔵の蔵書リストのファクシミリ版は、印刷の際のミスのために、筆者所蔵のものに限らず、原本のp. 18 (p. 222)が欠落している。より完全なリストとして、H. A. Feisenberger, *Sale Catalogues of Libraries of Eminent Persons: Vol. 11, Scientists* (London, 1975), pp. 37–116. 欠落該当部分はp. 56にある。フックの蔵書の概要を述べたものとしては、*idem*, 'The Libraries of Newton, Hooke and Boyle', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 21 (1966), pp. 42–55.

[31] *Diary 1672–1680*, pp. v ff.; *Posthumous*, 'The Publisher to the Reader'.

[32] *Diary 1672–80*, p. vi.

[33] 'Espinasse(1956), pp. 6–7.

[34] Zacharias Conrad von Uffenbach, *Herrn Z. C. von U. merkwürdige Reisen durch Niedersachsen, Holland und Engelland* (Ulm und Memmingen, 1753–54), p. 551. これには、英語訳がある。*London in 1710 from the Travels of Zacharias Conrad von Uffenbach*, trans. W. H. Quarrell (London, 1934), p. 102.

[35] ロンドン科学博物館図書室 (Science Museum Library) の肖像画カードには、フックの肖像が一枚も知られていないことがはっきりと記録されている。

筆者が本論文のための調査をロンドンで本格化させた1992年の春、シティーで大きな爆弾テロが起こった。フックの眠るセント・ヘレン教会は、それによって甚大な損害を被った。原因は何にせよ、放置されれば、歴史の手がかりは、このように次々と失われていく。

フックは、実用目的のための数学的諸科学と、それに支えられた実験哲学の双方に関わった。そのような研究活動のあり方は、研究開発に関わる学問営為、すなわち今日工学と呼ばれるものと通じるものがある。フックの像をより詳しく知ることは、実験科学の歴史についての知見だけではなく、今日の社会の運命を左右している工学の展開を理解する鍵を与えてくれる可能性がある。

だからこそ、我々は、フックの記録が様々の原因で永久に物理的に消し去られないうちに、それを再発掘し、フックをよりよく知る必要があると思われる。

最後に、本稿が明らかにしたことを改めて結論的に総括するならば、以下のようになる。

本稿第Ⅰ部の前半では、これまで十分に解明されてこなかったフックの前半生に焦点を当て、フックの父親の遺書という新史料、フックの出身校であるウェストミンスター・スクールで得た新データなどを活用し、その実像を描いた。さらに、フックの住居であり、所属機関でもあったグレシャム・カレッジの形成に触れ、実用を重視する社会人教育機関というこのカレッジの性格を浮き彫りにした。

第Ⅰ部の後半では、先行研究を整理することによって、フックの科学研究がこれまで科学史研究者によってどのようにとらえられてきたかを示した。そこで論じたように、従来のフック像は、顕微鏡観察、地質学、技術的発明などで部分的に見るべきものがあったとはいえ、全体としてみればフックは凡庸な科学者であったというものであった。

第Ⅱ部では、フックの天文研究に着目することによって、このような従来の見方を覆した。その出発点は、フックの光学理論が、波動説として一貫した体系を持っていたという筆者の発見にある。筆者の発見以前には、フックの色彩論は混乱に満ちたものと考えられてきた。だが、筆者は、ニュートンとフックの1672年の光学論争の分析を通じて、フックの理論が優れたものであったことを解明した。本稿では、このようなフックの光学研究についての分析を発展させ、フックの光学への関心が、光学自体を目的とするものではなく、むしろ天文研究への関わりに起源を持つものであったことを明らかにした。フックは、17世紀後半に大きな意味を持っていた、天文学における「ガリレオ・パラダイム」の主流の研究者であった。このパラダイムの課題は、ガリレオの望遠鏡による発見を発展させ、太陽系の天体の精緻な知識を得ることであった。この目的を達するために、焦点距離が極めて長い「長大望遠鏡」が使用された。この種の取り組みは、フックに限られることなく数々の人の手によって遂行された。本稿では、その例として、ホイヘンスやレンなどの研究にも触れた。フックは大陸からイギリスに伝播した「ガリレオ・パラダイム」を引き継ぐ人物であり、職人と協力して長大望遠

鏡の改良に努力し、自ら木星や土星などの太陽系天体の観測を展開した。その成果の一部は、彼の顕微鏡観察書である『ミクログラフィア』にまで現れた。フックの観測は当時の優れた天文観測家ヘヴェリウスの目にとまり、フックは彼から長大望遠鏡の注文を受けるほどだった。フックは「ガリレオ・パラダイム」を引き継いだだけではなかった。彼は、望遠照準や接眼マイクロメーターの重要性を強調し、本稿で詳細に論じたように、伝統的な観測法に拘泥するヘヴェリウスと約20年に渡って論争を行なった。このフックの立場は、精密な位置天文学という新しい課題へとつながるものであり、それはグリニッジ天文台という制度に結実した。このような議論から、フックが当時一流の天文研究者として活躍したことが明らかになり、天文学という科学革命の重要な分野に貢献した人物としてフックの再評価を行なうことができた。

これが本稿の得た最も重要な結論であるが、この結論の重要性を一層明確にするために、フックを実験観測の重要人物として見るべきことも指摘した。すなわち、フックの天文学における貢献は、ニュートンのような理論的なものではなく、むしろ実験観察におけるものであった。筆者が「ガリレオ・パラダイム」と名付けた伝統の存在は、17世紀に、力学的な理論天文学以外に観測天文学が重要な分野であったことを我々に教える。フックは、真空ポンプ、顕微鏡、望遠鏡という、17世紀の極めて重要な三つの実験装置全てに深く関与したのであり、理論的な科学とは区別される実験的な科学の分野において、フックの歴史的な意味は考察されなければならない。

（完）

付 録

付録１・フックの父 Rev. John Hookeの遺書

Hampshire Record Office 1648B09/1.

綴は現代化し、省略形は本来の形に戻した。なお、[ ]は、原文が読みとり難いものを推定したことを示す。以下の転記は、公文書館の許可を得てなされたものである。

In the name of God Amen the 23th day of September Anno Domini 1648, I John Hooke of the parish of Freshwater in the Isle of Wight and county of Southampton, being in good health and perfect memory, thanks be given to Almighty God, do make and ordain my last Will and Testament in manner and form following. First I bequeath my Soul into the hands of almighty God, my Creator and saviour, not doubting but that for the infinite mercies and merits of Christ, my Redeemer, he will receive it into glory, and my Body I commend unto the Earth from where it came steadfastly believing the resurrection thereof to life eternal. Item I give unto the poor of this parish 5[s]. Item. I give and bequeath unto my son John Hooke, three score pounds of lawful English money to be paid unto him after this manner, viz. when his apprenticeship is out, twenty pounds; within one year next after ten pounds; and at the end of his covenant years the remainder of the three score pound, and if my Overseers and his Master see that he plays the good husband with the stock I have given him, I give him yet ten pounds more to be paid unto him within twelve month next after his last pay. Item I give unto him a bedstead feather bed and and[sic] all that belongs thereto, the great thick chest, the great bell skillet, a plate and a pottinger and one saucer, the best brass candlestick, a joined stool or the money they are worth. Item I give and bequeath unto my son Robert Hooke forty pounds of lawful English money, the great and best joined chest, and all my books. Item I give and bequeath unto my daughter Anne Hooke, thirty pounds of lawful English money, one bedstead feather bed, the green rug with all things belonging unto the said bed. Item I give and bequeath unto my daughter Katherine Hook, thirty pounds of lawful English money, the cupboard in the hall, and the great brass pan. And if it shall please God to take any of these my children out of this life before they come to the age of 21 years, my will is that the portion or portions of him, her or those deceased, shall equally be divided between the survivor or survivors of them. The rest of all my goods and chattels as well movable as unmovable (except [that] indoors all wainscot and benches all the glass windows in the dwelling house, the two stoves in the kitchen, all which things I will shall remain and be unto the longest liver of my wife, son John and my daughter Katherine). My debts legacies and funeral expenses discharged, I give and bequeath unto my wife Syssile Hook whom I make and ordain my full whole and sole executrix of this my last will and Testament provided always and my will is that if my executrix depart this life before she can prove my Will, then it is my will that the remainder of my goods not bequeathed shall so be divided among all my children that no one of them shall have a greater portion than the other. And this care and trust I commend unto my worthy and well beloved friends, Mr Cardel Goodman, Mr Robert Urrey and

Mr Nickles Hockley, whom I humbly entreat to be my Overseers and entrust to order all things according to their wisdom and discretion allowing them fully their expenses for their pains taken herein, and in witness that this is my true last will and Testament I have set to my hand and seal the day and year first above written.

Legacies due to my children, which their Grandmother Ann Giles gave unto them as will appear by her Will, viz.

To my daughter Anne Hook 40 pounds

To my daughter Katherine Hooke 20 pounds

To my son John Hooke 10 pounds

To my son Robert Hooke 10 pounds

Nich: Hockley

per me [Johannes] Hooke [Cler]

(seal)

付録２・ロンドン王立協会所蔵のフック手稿より
Royal Society Classified Papers vol.20 (Hooke Papers), No.61
グレシャム・カレッジ中庭の望遠鏡

(f. 129r)

This was set up about the middle of the quadrangle of Gresham College A Mast or Pole of firr AB about 50 foot long and 14 inches in Diameter at the lower end, tapering a litte upward being about ten ihches Diameter at the top. this was framed into a cross of timbres at the botom DDD spreading About 8 foot from the middle ways from the end of which cross fowr braces CCCC were inclined towards the pole & framed into it at v. the whole cross and about 6 foot of the pole and braces were set down into the ground and buried. The earth being [rammed?] down upon it. and about 3 foot of the braces appeared above ground. each of these braces had a hole, in it at about 2 footabove ground through wch staple firr the axis of the cylinder n [?] easily be put & fastened. this cylinder n had one end of it in a hoe in the pole at x and the other part was held by the movable staple put into the braces and was turned by the handle p and served to wind up the chord yy which went through ye pully l and then through the pully m and fastened at l. The pulley l hung by the crook k of the movable arme of iron at the [top?] and this hung from the Iron e which by the help of a small handle i on the Inside of it might easily be turned round about the spindle at the top. for on the top of the pole was put a cap of the form 2 out of which Rose a spindle of iron 2 with a round knob 2 upon which rested the eye e of the iron arm chk. On this spindle was a vane f and at the top was fixed the figure of [土星の印] made according the hypo=sesis of Sr. Chr: Wren and soe placed that by viewing of it from severall [stations?] ase the appearances of the phases of Saturne were plainly exhibited. The more full account of which will be hereafter added in his own Description of it by the turning of this arm and the removall of the winch at the bottom into another [?] the tube could be elevated on anyside of the pole and soe could be made use of to view any part of the heaven.

The tube first made for this pole was about 40 foot long and served to make use of an object glasse fo 36 foot. It was made of wainscote [?] about 1/3 of an inch in thickness of gleued and nayled together in a square forme and on the uper side of it were severall places so open for putting in the object glasse and for cleansing the dust & cobwebs out of the tube the inside of this tube, was seperated wth many square partitions perforated wth holes bigg enough for the use of the object glasse. by wch greater or lesser apertures of pastboards could be placed as there was occasion into one of these partitions which was movable and could be drawn out and slipped into an other place as occasion required neerer or further distant from the eye, was lett in the object glasse whose focus was 36 foot distant and would bear an aperture of about two inches.

(f. 130r)

To strenghen this tube and keep it the better from bending downwards there was fixed underneath the middle of it (by severall small bracketts ttt on each side of it) a plank of wainscote [edgways?] of about 1·1/2 inch thick and about 25 foot long and 8 inches broad on the middle which made the tube when it was hung by the middle to stand straight though at other times [it made] it bend upwards, this about the middle of this tube was fixed a square [band?] of iron which had two pins of iron on each side upon which pins it was suspended in a handle of iron like that of a Bucket. the whole tube soe that like a beame it could be moved upwards or downwards to any inclination to the perpendicular.At the end of the tube next the eye was a square tube of wood so slide to and fro wthin the [?] of it, to adjust them to a [true?] length, to the end of wch was screwd the cell or round tube that held the eye glasses of wch there were 4 where of more or fewer were used according as a larger or lesser part of the object was to be seen at once. for by the meanes of these 4 all used together a large part of the object could be brought to the eye very well proportions wthout colours and yet much magnifiyed which could not be soe well performed by one or two alone though somewhat of the brightenesse of the object was lost by the many refraction and the quantity of the glasses through which the Ray passed. More of which I shall discourse afterwards where I come to explaine some other glasses which I made use of at the same places The end of the tube next the eye was some wt heavier then the other where yt object glasse was placed, and soe scrued to keep it down upon the rest which was made to stay it steadily toward the object at which it was directed The Rest was of the forme described in the 2d figure the lower part was somewt like a painters isle having 3 leggs lll to make it stand more steadily upon the head of [wch?] 22 were fixed two wooden screws 33 about 2 foot long each of them had a nutt 44 to be screwed higher or lower, on which lay a barr with a hole at each end as 55 upon which the end of the tube next the eye rested whilst an object was viewed through it and according as the object did rise or fall the position of the tube was by screwing these nutts downwards or upwards adjusted to it.

With this and wth another of 28 foot in length a great number of astronomicall observations were made both by Sr.Christopher Wren about the figure of Saturn and adjusting its theory which you will finde afterwards more at large explained by himself. And Describing the figure of the phase of the moon, from which he composed a Globe of the Body of the moon Representing all its asperities and various appearances by the light of the Sun or a [?] [falling?] upon & by which he adjusted a theory of its libration. This Globe has ever since been kept in his Majestys closet of Rarities at white hall the Description

(f. 131r)

Description whereof shall be here inserted by and by. Mutlitudes of other were made by Mr Laurence Rooke both of those and the other planets for the Rectifying their theorys by accurate & pertinent observations Most of which have been [?] his death [lost?] to the great detriment [?] of that [?]. But some which he made for the Rectifying the theory of the Satellites of Jupiter I

have procured from the right Reverend father [in?] God Seth Lord Biship of Sarum to whom amongs other things he [?] them.

That those kind of observaions might be made the more accrately Sr. Chr Wren first contrived A Rete or net of hairs strained in a frame to be made And placed in the focus of the object & Eye Glasses, which being [then?] as distinct and plaine as the object it self magnifiyed both by the object & eyeglasses and strained as it were upon that [?] scrued like the square Delineration often drawn upon an originall by painters in order to copy it more exactly. The Net was made after the frame represented in the 3 figure where aaaa Represents a square plate of Brasse of the bigness of the [?] of the tube at the place where it was put bbb separetely on Aperture or Round hole cuts through the [?] plate as bigg as the area that could be seen by the Eye glass [?]: de, de, de, signify fine hairs strained parallell to & at equall distances from each other over the said hole, the ends being putt through small holes in the plate and and e and there fastned fg, fg, fg are other hairs strained at Right angles in the former and of the same distance from each other as the former, the two [middle?]. most of these two rowes of hairs crossed each other at right angle exactly in the center of this hole of the brasse plate and consequently(the glasses being duely disposed) in the very axis of [?].

Now though these hairs being exactly placed as is here said doe divide the picture of the object made at the focus of the object glass exactly in to equall squares, yet being viewd through the eye glass. they are plainely of a Differing figure, the parts both of the picture it self and of the Net being more magnyfyed towards the edges then in the middle and consequently the further Distant a part eyes from the axis the more does it appear by the Refraction of the eye glasse to be thrown outwards and further from the center of the glasse then it ought to be supposing it were seen wthout a glass or with a glasse of a true figure as wth a double hyperbolicall Convex. soe that the hairs all but the [two?] that crosse each other in the center which keep their streightness and [decussation?] at Right angle all the other appear bent from the middle or center and all the angles except those made wth the two middle crossing hairs, on rendred oblique some more acute others made obtuse then a right angle. Not wthstanding which they are equally usefull in Determing both the positions and Distances of the part of the picture from one another. the picture it self being in the same manner vitiated by the refraction as the figure of the nett This bending of the thread Sr Christopher Wren examined both by theory and tryal and found them to be very nier of an hyperbolick figure, especially when viewed wth a planoconvex eye glasse whose flat side was turned towards the figure of this nett as it appears by the refraction of the Eye glasse is represented in the 4th figure where &c

(f. 131v)

Now this net thus placed thoguh it were very visible or when the air is well inlightned by ye [sign of the moon] or twilight in the [fog?] time or when the moons face [was?] [observed?] like black lines crossing each other upon it, yet in a Dark night when there is neither moon shine nor

[?] light to help though, the sky be very cleer & bright the hair of this net are very hard to be discovered. Sr Christopher and the others contrive the use of a very small lamp hung & poysed like a sea compasse in an box by the side of the tube when this Net was placed and by a hole cuts through the side of the tube and covered wth an oyled paper Soe much of the light of that lamp passed through that oyled paper and shined upon ye hairs as made there just visible as whiter lines then the Dark other between the starrs. and thereby the net became usefull in the taking the positions and Distances of them one from another. the thing is soe obvious that I think it needs not a figure farther to explaine the manner of it.But because these Distances of the hairs were not just acccommodated to every distances that was necessary to be maken very exactly [?] therefore [made?] use of two threads or hairs strained Diagonally on a Ruler cutt through in the middle of it for the whole length and Divided equally into a 1000 parts making the thread to crosse just at the beginning of that Division and to spread to the Diameter of a degree at the end of that Division and by a socket made wthin the tube by which the Ruler could be slid to & fro at the frams upon the nett he was able to take Distances exactly to lesser then the thousanth parts of a Degree that is 3 or 4 seconds and by the parts proportionall even to less then a seconds. the forme of this is Descriebed in the 5th figure.when aaaa Represents the Rule about 3 foot long bbbb. the aperture or hole cuts through the middle of it cd cd the two thread hairs or wires extend the length of that aperture Diagonally and crosseing each other at c just at the beginning of the Divising on the [?] and spreading to the Distance of one Degree as d.d. opposite to 1000 1000 the end of the divided line eeee is the socket in which it slided forwards or backwards as there was occasion that is still the points where the middle [line?] of the nett crossing these diagonall threads appeared so [coverd?] the two stars or other 2 pairs whose Distance was inquired

(f. 132r)

But because by this single net and diagonall thread small Distances only could be thus exactly taken by the help of the telescope the same person [?] and caused to be made another Instrument by which way any Distance could be taken wth the same accuratenesse even to 60 Degrees or a distant of a Quadrant which because exceeding plaine and yet exceeding [say?] for use and as accurate as I suppose and hath seen yet made I shall Describe more particulary. The Designe of the [mechanism?] was an easy and practicable way how two persons might make us of two telescopes freely and wthout Disturbance to each other and yet at the same time the angle made by the two optick axes of those telescopes in wch two distant objects were seen by the two observers at the same instant might be measured & determined.To perform this as it ought to be and yet wth the greatest care & plainessest made this following Instrument which from its fabrick I call the Angletelescope. There are four particulars in wch it is remarkable f.first for the manner of joyning them together wth a joynt soe as to open to any inclination and yet to keep both in the same plaine where the one of the threads of each nett kept in the plaine in which it opend and the other threads which were at right angle with the former kept their parallelisme.Secondly for the manner of measuring that inclination or Angle Thirdly for the Rest

on which the Instrument was elevated to view coelestriall objects soe contrived that each observed And [toward?] his own object without Disturbing the other forthly for the stayy by which Each observed [directed?] his own telescope to his own object and followd the motion of it steadlily and wth ease each of these I have Described and Explained a part and joined them altogether wth the manner of observing in the figure In the first figure is Represented the two telescopes joyned together at the end next the object glasse by a joynt. The telescopes each of six foot in length and 4 inches square of thin wainscote [?] wrongly and glewd together the object glasse drawing of that length they [?] fastened in convenient cells of box and will bear an aperture of about one inch and an half and that they may not be [?] or [?] out of their place when there is occasion to cleanse them there [are?] litte doores to open in the [?] of the tube by wch wth a cloth the inside both of the object & eye glasse may be cleansed from Dust or other foulnesse. The nest are fitted and fastened as in the former telescope, only whereas there were many hairs crossing each other in the Great telescope in these there were only the two middle most which crossed each othe in the axis. there were also two other sights made after the manner represented in the figure where aka represents the aperture or hole made through the thin brasse plate the center of which is c, bcb representing a triangle of the same plate not cut away but left as a dark triangle to guide the eye in a Dark night wthout the help of the lamp to bring the small starr to touch the point c. it is also of use for the better Discovery of the Satellites about Jupiter & Saturne or the small starrs lying about & neer a great and bright on

(f. 133r)

when the body and glare of the great one is hidden and shadowed from the eye by the apex of this triangle as any one upon tryall with easily find.

付録3・『フィロソフィカル・トランザクションズ』に掲載されたフックに関係する論文

1665

'A Spot in one of the belts of Jupiter',
vol. 1 , No. 1, p. 3.

'Mr. Hook's Answer to Monsieur Auzout's Considerations, in a Letter to the Publisher of these Transactions',
vol. 1, No. 4, pp. 63−73.

1666

'Of a permanent Spot in Jupiter: by which is manifested the Conversion of Jupiter about his own Axis' (Anonymous note on observations by Hooke),
vol. 1, No. 8, pp. 143−145.

'An Appendix to the Directions for Seamen, bound for far Voyages' (Anonymous description of two sounding instruments "contrived by Hooke"),
vol. 1, No. 9, pp. 147−149.

'Some New observations about the planet Mars, communicated since the Printing of the former sheets' (Anonymous note on observations by Hooke),
vol. 1, No. 11, p. 198.

'A Method, by which a Glass of a small Plano−convex Sphere may be made to refract the Rayes of light to a Focus of a far greater distance, than is usual',
vol. 1, No. 12, pp. 202−203.

'Some Considerations Touching a Letter in the Journal des Scavans of May 24, 1666',
vol. 1, No. 13, pp. 228−230.

'A new Contrivance of Wheel−Barometer, much more easy to be prepared, than that, which is described in the Micrography; imparted by the Author of that Book',
vol. 1, No. 13, pp. 218−219.

'The Particulars Of those Observations of the Planet Mars, formerly intimated to have been made at London in the Months of February and March A. 1665/6',
vol. 1, No. 14, pp. 239−242.

'Some Observations Lately made at London concerning the Planet Jupiter',
vol. 1, No. 14, pp. 245−246.

' A late Observation about Saturn made by the same',
vol. 1, No. 14, pp. 246–247.

' Observation made [by Hooke et al.] in several places, Of the late Eclipse of the Sun, which hapned on the 22 of June, 1666',
vol. 1, No. 17, pp. 295–296.

' Inquiries for Turky' (Attributed to a "Mr. H." who may well be Hooke),
vol. 1, No. 20, pp. 360–362.

1667

' Directions for Observations and Experiments to be made by Masters of Ships, Pilots, and other fit Persons in their Sea–Voyages',
vol. 2, No. 24, pp. 433–448.

' More Wayes For the same Purpose [dividing a foot into many thousand parts], Intimated by M. Hooke',
vol. 2, No. 25, p. 459.

' An Account of an Experiment made by Mr. Hook, of Preserving Animals alive by Blowing through their Lungs with Bellows',
vol. 2, No. 28, pp. 539–540.

' A Description Of an Instrument for dividing a Foot into many thousand parts',
vol. 2, No. 29, pp. 541–544.

1668

' A Contrivance To make the Picture of any thing appear on a Wall, Cub–board, or within a Picture–frame, &c., in the midst of a Light room in the day–time; or in the Night–time in any room that is enlightened with a considerable number of Candles',
vol. 3, No. 38, pp. 741–743.

1670

' Some Communications, confirming the present Appearances of the Ring about Saturn, by M. Hugens de Zulechem and Mr. Hook',
vol. 5, No. 65, p. 2093.

1671

' Observations made by Mr. Hook of some Spots in the Sun',
vol. 6, No. 77, p. 2295.

' Observations made by the same of the late Eclipse of the Moon, the 8th. September, 1671',
vol. 6, No. 77, p. 2296.

1674

' An Account of what hath been observed here in London and Derby, by Mr. Hook, Mr. Flamsteed, and others, concerning the late Eclipse of the Moon of Jan. 1, 1674/5',
vol. 9, No. 111, p. 237.

1679

' P. Fran, Lana's way of making a Flying Chariot, with an examination of the grounds and principles thereof',
[Philosophical Collections, No. 1].

1681

' An Optical Discourse of R. H. proposing a way for helping shortsighted or purblind eyes',
[Philosophical Collections, No. 3].

' A Mechanical Discourse of R. H. containing a description of the best form of Horizontal Sayls for a Mill, and the ground of the inclined Sayls of Ships',
[Philosophical Collections, No. 3].

1686

' Some Observations, and Conjectures Concerning the Chinese Character. Made by R. H. R. S. S.',
vol. 16, No. 180, pp. 63–78.

' A Description of an Invention, whereby the Divisions of the Barometer may be enlarged in any given proportion',
vol. 16, No. 185, pp. 241–244.

1687

' Observations nonnullae Eclipseos Nuperae Solaris, Mai, 1. St. vet. diversis in locis habitae, &c cum Regia Societate Communicatae' (Observations of Hooke and Halley),
vol. 16, No. 189, pp. 370–371.

1688

' Two Astronomical Observations of the Eclipses of the Planet Jupiter, by the Moon in March and April last, made at London',
vol. 16, No. 181, pp. 85–87.

'A Relation of the great effects of a new sort of Burning Speculum lately made in Germany: taken from the Acta Eruditorum of the Month of January last' (produced by Hooke, with remarks on his similar invention),

vol. 16, No. 188, pp. 352–354.

'Account of Books. Propositiones Hydrostaticae...Auth. Francisco Jessop, Arm. Lond. 4to. 1687' (Account read by Hooke to the Royal Society, Feb. 15, 1687/8'; Royal Society Journal Book, vol. 8),

vol. 16, No. 191, pp. 440–442.

1693

'The Abstract of two Letters sent some time since by Mr. Anth. Van Leeuwenhoeck to Dr Gale and Dr Hooke',

vol. 17, No. 196, pp. 593–594.

'...another Method of making such Discoveries by the help of a Particlular kind of Water–Poise, by Robert Hooke, M. D. and R. S. S.',

vol. 17, No. 197, pp. 637–639.

'"Additional Note" to a paper by Dr. Lister giving a transcript from Micrgraphia on the wings of insects',

vol. 17, No. 199, pp. 691–692.

'An Account of Dr. Burnet's Book, Entitled, ARCHEOLOGIAE Philosophicae...1692' [Almost the same as Bodleian Lib. MS. Eng. Misc. C. 144],

vol. 17, No. 201, pp. 796–812.

1696

'An Account of the Quantities of Rain fallen in One Year in Gresham College...',

vol. 19, No. 223, p. 357.

1701

'An Account of Dr Robert Hook's Invention of the Marine Barometer, with its Description and Uses by E. Halley, R. S. S.',

vol. 22, No. 269, pp. 791–794.

参考文献一覧表

原　典

Aubrey, David

Brief Lives, Chiefly of Contemporaries, Set Down by John Aubrey, between the Years 1669 & 1696, Andrew Clark (ed.), 2 vols. (Oxford, 1898).

Brief Lives, Richard Barber (ed.), (Woodbridge, 1982).

Aubrey's Brief Lives, Oliver Lawson-Dick (ed.), (London, 1992).

Auzout, Adrien

Réponse de Monsieur Hook aux considerations de M. Auzout (Paris, 1665a).

Lettre à monsieur l'Abbé Charles (Paris, 1665b).

Baily, Francis

An Account of the Revd. John Flamsteed (London, 1835-7, repr. 1966).

Barrow, Isaac

Euclidis elementorum libri XV (Cambridge, 1655).

Lectiones opticae et geometricae (London, 1674).

Birch, Thomas

The History of the Royal Society of London, 4 vols. (London, 1756-1757).

Black, Joseph

Lectures on the Elements of Chemistry, 2 vols. (Edinburg, 1803).

Boyle, Robert

The Works of Honourable Robert Boyle, 6 vols. (London, 1772).

Experiment and Considerations Touching Colours (London, 1664, repr., New York, 1964).

A Collection of Letters Illustrative of the Progress of Science in England form the Reign of Elizabeth to that of Charles II, James Orchard Halliwell (ed.), (London, 1841, repr. London, 1965).

Correspondence of Scientific Men, Stephen J. Rigaud (ed.), 2 vols. (Oxford, 1841, repr. Hildesheim, 1965).

Evelyn, John

The Diary of John Evelyn, E.S. de Beer (ed.), 6 vols. (Oxford, 1955).

Flamsteed, John

Historia coelestis Britannica (London, 1725).

Gregory, David

Elements of Catoptrics and Dioptrics, 2nd ed. (London, 1735).

Gregory, James

Optica promota (London, 1663).

Gunther, Robert W. T.

Early Science in Oxford, 14 vols. & suppliment (Oxford, 1920–1945).

vol. 6–7 Extract from *Birch* (1930)

vol. 8 The Cutler Lectures (1931)

vol. 10 Tract on Cappillary Attraction & Diary, 1688–1693 (1935)

vol. 13 *Micrographia* (1938)

Halley, Edmond

Correspondence and Papers of Edmond Halley, Eugene F. MacPike (ed.), (Oxford, 1932).

Harris, John

Lexicon technicum (London, 1704).

Hauksbee, Francis

Proposals for Making a Large Reflecting Telescope (London, [1725]).

Hevelius, Johannes

Selenographia (Danzig, 1647).

Dissertatio de nativa Saturni facie (Danzig, 1656).

Machina coelestis, pars prior (Danzig, 1673).

Annus climactericus (Danzig, 1685).

Holder, William

Treatise on the Natural Grounds and Principles of Harmony (London, 1694).

Hooke, Robert

Micrographia (London, 1665) [板倉聖宣・永田英治訳『ミクログラフィア』、仮説社、1984年（部分訳）].

The Posthumous Works of Robert Hooke, Richard Waller (ed.), (London, 1705, repr., New York [Johnson Reprint], 1969, London, 1971).

Philosophical Experiments and Observations of the Late Eminent Dr. Robert Hooke, William Derham (ed.), (London, 1726, repr., 1967).

The Diary of Robert Hooke M. A., M. D., F. R. S., 1672–1680, Henry W. Robinson & Walter Adams (eds.), (London, 1935, repr., 1968).

◎フックの諸著作については、Gunther, Robert W. T. の項目も参照されたい。

Huygens, Christiaan

Œuvres complètes de Christiaan Huygens, 22 vols. (La Haye, 1888–1950).

Treatise on Light (London, 1912), trans., Silvanus P. Thompson.

The Pendulum Clock (Ames, Iowa, 1986), trans. Richard J. Blackwell.

Knox, Robert

An Historical Relation of the Island of Ceylon (London, 1681) [フックによる序を収める].

Lyell, Charles

Principles of Geology, 3 vols. (London, 1830–1833).

Martin, Benjamin

Biographia philosophica (London, 1764).

Molyneux, William

Dioptirica nova (London, 1692).

Newton, Isaac

Philosophiae naturalis principia mathematica (London, 1687) [*Mathematical Principles of Natural Philosophy* (London, 1936), trans., Andrew Motte, rev. Florian Cajori; 河辺六男訳、『ニュートン――自然哲学の数学的諸原理』、中央公論社、1971年].

Opticks: Or a Treatise of the Reflection, Refractions, Inflections and Colours of Light (London, 1704) [島尾永康訳、『光学』、岩波書店、1983年（第三版からの訳）；科学の名著、第6巻、田中一郎訳、『ニュートン――光学』、朝日出版、1981年（第四版からの訳）].

Optical Lectures (London, 1728).

Lectiones opticae (London, 1729).

The Correspondence of Isaac Newton, H. W. Turnbull et al. (eds.), 7 vols. (Cambridge, 1959–1977).

The Optical Papers of Isaac Newton, Alan E. Shapiro (ed.), (Cambridge, 1984–[刊行中]).

Oldenburg, Henry

The Correspondence of Henry Oldenburg, A. R. Hall & M. B. Hall (eds.), 11 vols. (Madison, Wisconsin & London, 1965–1977).

Oughtred, William

Arithmeticae in numeris et speciebus institutio...(London, 1631); 2nd ed., *Clavis mathematicae* (London, 1648) [英訳、 *Key of Mathematics* (London, 1647), trans. Robert Wood].

Pepys, Samuel

The Diary of Samuel Pepys, Henry B. Wheatley (ed.), (London, 1899−1920), 10 vols. [臼井昭訳、『サミュエル・ピープスの日記』、国文社、 1987 年 −(刊行中)].

Power, Henry

Experimental Philosophy (London, 1664, repr. New York, 1966).

Priestley, Joseph

The History and the Present State of Discoveries Relating to Vision, Light, and Colours (London, 1772, repr., New York, 1978).

Riccioli, Giovanni Battista

Almagestum novum (Bologna, 1651).

Smith, Robert

A Compleat System of Opticks (1738).

Sprat, Thomas

The History of the Royal Society (London, 1667).

Statvta antiqva vniversitatis Oxoniensis, Strickland Gibson (ed.), (Oxford, 1931) [英訳、 *Oxford University Statutes* (London, 1845), trans. G. R. M. Ward].

Uffenbach, Zacharias Conrad von

Herrn Z. C. von U. merkwürdige Reisen durch Niedersachsen, Holland und Engelland (Ulm und Memmingen, 1753−54) [英訳、 *London in 1710 from the Travels of Zacharias Conrad von Uffenbach* (London, 1934), trans. W. H. Quarrell].

Wallis, John

A Defence of the Royal Society (London, 1678).

Waller, Richard,

'The Life of Dr. Robert Hooke' in *Posthumous*, pp. i−xxviii.

Ward, John

The Lives of the Professors of Gresham College (London, 1740).

Weld, Charles R.

A History of the Royal Society, 2 vols. (London, 1848).

Wilkins, John

The Mathematical and Philosophical Works of the Right Rev. John Wilkins (2nd ed., London, 1802, repr., 1970).

Wood, Anthony

Athenae Oxonienses, 1st ed., 2 vols. (London, 1691–2).

Athenae Oxonienses, 2nd ed., 2 vols. (London, 1721).

Wren, Christopher, Jr.

Parentalia: Or, Memoirs of the Family of the Wrens (London, 1750).

研究論文等

Adamson, Ian

'The Foundation and Early Histoy of Gresham College London, 1596–1704', unpublished Ph. D. thesis, Cambridge University, 1975.

'The Royal Society and Gresham College 1660–1711', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 33 (1978), pp. 1–21.

'The Administration of Gresham College and Its Fluctuating Fortunes as a Scientific Institution in the Seventeenth Century', *Hist. Educ*, 9 (1980), pp. 13–25.

Aggasi, Joseph

'Who Discovered Boyle's Law?', *Stud. Hist. Phil. Sci.*, 8 (1977), pp. 189–250.

Albury, William R.

'Halley and the *Traité de la lumière* of Huygens: New Light on Halley's Relationship with Newton', *Isis*, 62 (1971), pp. 445–468.

All Saints Church: An Account of a Heritage (Isle of Wight, 1977).

Allen, Phyllis

'Scientific Studies in the English University of the Seventeenth Century', *J. Hist. Ideas*, 10 (1949), pp. 219–254.

Andrade, E. N. da C.

'The Real Character of Bishop Wilkins', *Ann. Sci.*, 1 (1936), pp. 4–12.

Isaac Newton (London, 1950a).

'Robert Hooke', *Proceedings of the Royal Society*, Series A, 201 (1950b), pp. 439–473 [also printed in Series B, 137, pp. 153–187].

'Robert Hooke, 1635–1703', *Nature*, 171 (1953), pp. 365–367.

'Robert Hooke', *Scientific American*, 191 (1954), pp. 94–98.

'Robert Hooke, F. R. S.', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 15 (1960), pp. 137–145.

Ariotti, Piero E.

'Bonaventura Cavalieri, Marin Mersenne, and the Reflecting Telescope', *Isis*, 16 (1975), pp. 303–321.

Armitage, Angus

'"Borell's Hypothesis" and the Rise of Celestial Mechanics', *Ann. Sci.*, 6 (1950), pp. 268–282.

'William Ball', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 15 (1960), pp. 167–172.

Arnol'd, V. I.

Huygens and Barrow, Newton and Hooke (Basel, 1990).

Badcock, A. W.

'Physical Optics at the Royal Society, 1660–1800', *Brit. J. Hist. Sci.*, 1 (1962), pp. 99–116.

Barker, Felix, and Jackson, Peter

The History of London in Maps (London, 1990).

Barker, G. F. Russell

Memoir of Richard Busby (London,1895).

Batten, M. I.

'The Architecture of Robert Hooke', *The Times*, 14 February 1935.

'The Architecture of Robert Hooke', *Walpole Society*, 25 (1936–7), pp. 83–113.

Bechler, Zev

'Newton's 1672 Optical Controversies: A Study in the Grammar of Scientific Dissent' in

The Interaction Between Science and Philosophy (Atlantic Highlands, N. J., 1974), Yehuda Elkana (ed.), pp. 115−142.

'"A Less Agreeable Matter": The Disagreeable Case of Newton and Achromatic Refraction', *Brit. J. Hist. Sci.*, 8, (1975), pp. 101−126.

Bell, Walter G.

The Great Fire of London in 1666 (New York, 1920, repr.1971).

Ben−David, Joseph

The Scientist's Role in Society (Englewood Cliffs, N. J., 1971) [潮木守一・天野郁夫訳、『科学の社会学』、至誠堂、1974年].

Bendini, Silvio A.

'The Aerial Telescope', *Technol. Cult.*, 8 (1967), pp. 395−401.

Bennett, J. A.

'A Study of Parentalia, with Two Unpublished Letters of Sir Christopher Wren', *Ann. Sci.*, 30 (1973), pp. 129−147.

'Hooke and Wren and the System of the World', *Brit. J. Hist. Sci.* 8 (1975a), pp. 32−61.

'Christopher Wren: Astronomy, Architecture and the Mathematical Sciences', *J. Hist. Astron.*, 6 (1975b), pp. 149−184.

'Robert Hooke as Mechanic and Natural Philosopher', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 35 (1980), pp. 33−48.

The Mathematical Science of Christopher Wren (Cambridge, 1982).

'The Mechanics Philosophy and the Mechanical Philosophy', *Hist. Sci.*, 24 (1986), pp. 1−28.

'Hooke's Instruments for Astronomy and Navigation' in *New Stuides* (1989), pp. 20−32.

Berry, Arthur

A Short History of Astronomy (London, 1898, repr. New York, [Dover Pub.], 1961).

Biswas, Asit K.

'The Automatic Rain−Gauge of Sir Christopher Wren, F. R. S.', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 22 (1967), pp. 94−104.

Bloor, David

Knowledge and Social Imagery (London, 1976) [佐々木力・古川安訳、『数学の社会学』、培風館、1985年].

Bonelli, M. L. Righini and Helden, A. van

'Divini and Campani: A Forgotten Chapter in the History of the Accademia del Cimento', *Annali dell'Instituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze*, 6 (1981), pp. 2–176.

Bradbury, S.

The Evolution of the Micrscope (Oxford, 1967).

'The Development of the Reflecting Microscope', *Microscopy: J. Quekett Microscopical Club*, 31 (1968), pp. 1–19.

Brewster, David

Memoirs of Life, Writings and Discoveries of Sir Isaac Newton, 2 vols. (Edingburgh, 1855).

Burtt, E. A.

The Metaphysical Foundations of Modern Science (London, 1924) [市場泰男訳、『近代科学の形而上学的基礎』、平凡社、1988年].

Butterfield, H.

The Origins of Modern Science, 1300–1800 (London, 1957) [渡辺正雄訳、『近代科学の誕生』、全2巻、講談社、1978年].

Cajori, Florian

William Oughtred (Chicago, 1916).

Cantor, G. N.

'The Historiography of "Georgian" Optics', *Hist. Sci.*, 16 (1978), pp. 1–21.

Optics after Newton (Manchester, 1983).

Caröe, W. Douglas

'Tom Tower': Christ Church, Oxford (Oxford, 1923).

Carozzi, Albert V.

'Robert Hooke, Rudolf Erich Rapse, and the Concept of "Earthquakes"', *Isis*, 61 (1970), pp. 85–91.

Centore, F. F.

Robert Hooke's Contributions to Mechanics (Den Hague, 1970).

Chapman, Allan

'The Accuracy of Angular Measuring Instruments Used in Astronomy between 1500 and 1850', *J. Hist. Astron.*, 14 (1983), pp. 133–137.

Dividing the Circle: The Development of Critical Angular Measurement in Astronomy 1500–1850 (New York, 1990).

Clay, R. S. and Court, Thomas H.

'Note on the Introduction of the Field Lens in the Microscope: Dr. Henry Power and His Letters', *Journal of the Royal Microscopical Society*, 54 (1934), pp. 23–28.

Cohen, I. B.

'Newton, Hooke, and "Boyle's Law"', *Nature*, 204 (1964), pp. 618–621.

Costello, W. T.

The Scholastic Curriculum at Early Seventeenth Century Cambridge (Cambridge, Mass., 1958).

Court, Thomas H., & Rohr, Moritz von

'New Knowledge of Old Telescopes', *Transactions of the Optical Society*, 32 (1930–1), pp. 113–122.

Dennis, Michael Aaron

'Graphic Understanding: Instruments and Interpretation in Robert Hooke', *Sci. Context*, 3 (1989), pp. 309–364.

Dewhurst, Kenneth

Thomas Willis's Oxford Lectures (Oxford, 1980).

Dostrovsky, Sigalia

'Early Vibration Theory: Physics and Music in the Seventeenth Century', *Arch. Hist. Exact Sci.*, 14 (1974–75), pp. 169–218.

Drake, Stillman

Galileo at Work (Chicago, 1978) [田中一郎訳、S・ドレイク、『ガリレオの生涯』、全3巻、共立出版、1984–1985年].

Duck, Michael J.

'Newton and Goethe on Colour', *Ann. Sci.*, 45 (1988), pp. 507–519.

Eldridge, R. J.

Newport, Isle of Wight in Bygone Days (Isle of Wight, 1952).

'Espinasse, Margaret

'Robert Hooke on His Literary Contemporaries', *Rev. Engl. Stud*, 13 (1937), pp. 212–216 [Wattie, Margaret の名で出版].

Robert Hooke (London, 1956).

Feingold, Mordechai

The Mathematicians' Apprenticeship: Science, Universities and Society in England, 1560–1640 (Cambridge, 1984).

Feisenberger, H. A.

'The Libraries of Newton, Hooke and Boyle', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 21 (1966), pp. 42–55.

Sale Catalogues of Libraries of Eminent Persons: Vol. 11, Scientists (London, 1975).

Feyerabend, Paul

Against Method (London, 1975) [村上陽一郎、渡辺博訳、『方法への挑戦』、新曜社、1981年].

Forbes, Eric G.

Greenwich Observatory: Origins and Early History (London, 1975).

Frank, Robert G., Jr.

'Science, Medicine and the Universities of Early Modern England', *Hist. Sci.*, 11 (1973), pp. 194–216.

Harvey and the Oxford Physiologists (Berkeley & Los Angeles, Califolnia, 1980).

Geikie, Archibald

English Science and Its Literary Caricaturists in the Seventeenth and Eighteenth Centuries (n. p., 1914).

Gouk, Penelope

'The Role of Acoustics and Music Theory in the Scientific Work of Robert Hooke', *Ann. Sci.*, 37 (1980), pp. 573–605.

Hall, A. R.

'Sir Isaac Newton's Note-Book, 1661–65', *Cambridge Historical Journal*, 9 (1948), pp. 239–250.

'Robert Hooke and Horology', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 8 (1951a), pp. 167–177.

'Two Unpublished Lectures of Robert Hooke', *Isis*, 42 (1951b), pp. 219–230.

Hooke's Micrographia, 1665–1965 (London, 1966a).

' Mechanics and the Royal Society, 1668–70', *Brit. J. Hist. Sci.*, 3 (1966b), pp. 24–38.

' Did Hooke Concede to Newton?', *Isis*, 58 (1967), pp. 402–403.

' Horology and Criticism: Robert Hooke', *Studia Copernicana*, 16 (1978), pp. 261–281.

Hall, M. B.

' Further Optical Experiments of Isaac Newton', *Ann. Sci.*, 11 (1955), pp. 27–43.

' Why Blame Oldenburg', *Isis*, 53 (1962), pp. 482–491.

' Oldenburg and the Art of Scientific Communication', *Brit. J. Hist. Sci.*, 8 (1965), pp. 277–290.

' Sources for the History of the Royal Society in the Seventeenth Century', *Hist. Sci.*, 5 (1966), pp. 62–76.

' Huygens' Scientific Contacts with England' in *Studies on Christiaan Huygens* (Lisse,1980), H. J. M. Bos et al. (eds.), pp. 66–82.

Hall, A. R. and M. B.

' Further Notes on Henry Oldenburg', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 23 (1968a), pp. 33–42.

' The Intellectual Origins of the Royal Society——London and Oxford', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 23 (1968b), pp. 157–168.

Hartley, Harold

' Sir Paul Neile, F. R. S.', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 15 (1960), pp. 159–165.

Hartley, Harold, and, Hinshelwood, Cyril

' Gresham College and the Royal Society', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 16 (1961), pp. 125–135.

Harwood, John T.

' Rhetoric and Graphics in *Micrographia*' in *New Studies*, pp. 119–147.

Hashimoto, Takehiko

' Huygens, Dioptrics, and the Improvement of the Telescope', *Historia Scientiarum*, 37 (1989), pp. 51–90.

Helden, Albert van

' Christopher Wren's *De Corpore Saturni* ', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 23 (1968), pp. 213–229.

' Eustachio Divini versus Christiaan Huygens: a Reappraisal', *Physis*, 12 (1970), pp. 36–50.

' The Telescope in the Seventeenth Century', *Isis*, 65 (1974a), pp. 38–58.

' Saturn and His Anses', *J. Hist. Astron.*, 5 (1974b), pp. 105–121.

' The Historical Problem of the Invention of the Telescope: 1611–1650', *Hist. Sci*, 13

(1975), pp. 251–263.

'The Astronomical Telescope', *Annali dell'Instituto e Museo di Storia della Scienza*, 1 (1976), pp. 13–35.

'The Invention of the Telescope', *Trans. Am. Phil. Soc.*, 67, part 4 (1977a), pp. 1–67.

'The Development of Compound Eyepieces, 1640–1670', *J. Hist. Astron.*, 8 (1977b), pp. 26–37.

'Huygens and the Astronomers', *Studies on Christiaan Huygens* (1980), H. J. M. Bos et al. (eds.), pp. 147–165.

'Divini and Campani', *Annali dell'Institute e Museo di Storia della Scienza di Firenze*, 6 (1981), pp. 2–176.

Hendry, John

'Newton's Theory of Colour', *Centaurus*, 23 (1980), pp. 230–251.

Henry, John

'Occult Qualities and Experimantal Philosophy', *Hist. Sci.*, 24 (1986), pp. 335–381.

'Robert Hooke, The Incongruous Mechanist' in *New Studies* (1989), pp. 149–180.

Herivel, John

The Background to Newton's Principia (Oxford, 1965).

Hervey, Helen

'Hobbes and Descartes in the Light of the Correspondence between Sir Charles Cavendish and Dr. John Pell', *Osiris*, 10 (1952), pp. 67–91.

Hesse, Mary

'Hooke's Philosophical Algebra', *Isis*, 57 (1966a), pp. 67–83.

'Hooke's Vibration Theory and the Isochrony of Springs', *Isis*, 57 (1966b), pp. 433–441.

Hessen, B.

'The Social and Economic Roots of Newton's *Principia*' in *Science at the Cross Roads* (London, 1931, repr. 1971), pp. 151–212 [秋間実ほか訳、『ニュートン力学の形成』、法政大学出版局、1986年].

Hill, Christopher

Intellectual Origins of the English Revolution (Oxford, 1965) [福田良子訳、『イギリス革命の思想的先駆者たち』、岩波書店、1972年].

Hill, C. R.

'The Iconography of the Laboratory', *Ambix*, 22 (1975), pp. 102–110.

Hoppe, Edmund

Geschichte der Optik (Leipzig, 1926).

Howse, Derek

Greenwich Observatory: The Building and Instruments (London, 1975).

Howse, Derek and Finch, Valerie

'John Flamsteed and the Balance Spring', *Antiquarian Horology*, 9 (1976), pp. 664–673.

Hunter, Michael

Science and Society in Restoration England (Cambridge, 1981).

The Royal Society and Its Fellows, 1660–1700 (Bucks, England, 1982a).

'Reconstructing Restoration Science: Problems and Pitfalls in Institutional History', *Soc. Stud. Sci.*, 12 (1982b), pp. 451–466.

'A "College" for the Royal Society: the Abortive Plan of 1667–1668', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 38 (1984), pp. 159–186.

Establishing the New Science (Woodbridge, 1989).

Hunter, Michael, & Schaffer, Simon (eds.)

Robert Hooke: New Studies (Woodbridge, 1989).

Ito, Yushi

'Hooke's Cyclic Theory of the Earth in the Context of Seventeenth Century England', *Brit. J. Hist. Sci.*, 21 (1988), pp. 295–314.

Jacob, J. R. and Margarett C.

'Scientists and Society', *J. Euro. Stud.*, 1 (1971), pp. 87–92.

'The Anglican Origins of Modern Science', *Isis*, 71 (1980), pp. 251–267.

Jacob, Margarett C.

The Newtonians and the English Revolution, 1689–1720 (New York, 1976) [中島秀人訳、『ニュートン主義者とイギリス革命』、学術書房、1990年].

Jacquot, Jean

'Sir Charles Cavendish and His Learned Friends', *Ann. Sci.*, 8 (1952), pp. 13–27 & 175–191.

Johnson, Francis R.

'Gresham College', *J. Hist. Ideas*, 1 (1940), pp. 413–438.

Jones, Everett L.

'Robert Hooke and *The Virtuoso*', *Modern Language Notes*, 66 (1951), pp. 180–181.

Jourdain, P. E. B.

'Robert Hooke as a Precursor of Newton', *Monist*, 23 (1913), pp. 353–384.

Kargon, Robert H.

'Walter Charleton, Robert Boyle and the Acceptance of Epicurian Atomism in England', *Isis*, 55 (1964), pp. 184–193.

Atomism in England from Hariot to Newton (Oxford, 1966).

'The Testimony of Nature: Boyle, Hooke and the Experimental Philosopy', *Albion*, 3 (1971), pp. 72–81.

Kassler, J. C. and Oldroyd, D. R.

'Robert Hooke's Trinity College "Musick Scripts": His Music Theory and the Role of Music in His Cosmology", *Ann. Sci.*, 40 (1983), pp. 559–595.

Kearney, H. F.

'Puritanism, Capitalism and the Scientific Revolution', *Past and Present*, No. 28 (July 1964), pp. 81–101.

Scholars and Gentlemen, Universities and Society in Pre-Industrial Britain, 1500–1700 (London, 1970) [中山茂・高柳雄一訳、『科学革命の時代』、平凡社、1972年].

Science and Change, 1500–1700 (London, 1971).

Kemsley, Douglas

'Religious Influences in the Rise of Modern Science', *Ann. Sci.*, 24 (1968), pp. 199–226.

Keynes, Geoffrey

A Bibliography of Dr. Robert Hooke (Oxford, 1960).

Keynes, John Maynard

'Newton the Man' in *The Royal Society Newton Tercenterary Celebrations* (Cambridge, 1947), pp. 27–34, and also in his *Essays in Biography* (Suffolk, 1951), 310–347 [熊谷尚夫・大野忠夫訳、「人間ニュートン」、『人物評伝』、岩波書店、1961年、315–328ページ].

King, Henry C.

History of the Telescope (London, 1955, repr., New York [Dover], 1979).

Koyré, Alexandre

'A Note on Robert Hooke', *Isis*, 41 (1950), pp. 195–196.

'An Unpublished Letter of Robert Hooke to Isaac Newton', *Isis*, 43 (1952), pp. 312–337.

From the Closed World to the Infinite Universe (Baltimore, 1957) [横山雅彦訳、『閉じた世界から無限宇宙へ』、みすず書房、1973年、野沢協訳、『コスモスの崩壊』、白水社、1974年].

Kuhn, Thomas S.

The Copernican Revolution (Cambridge, Mass., 1957) [常石敬一訳、『コペルニクス革命』、紀伊国屋書店、1976年].

The Structure of Scientific Revolution (Chicago, 1962) [中山茂訳、『科学革命の構造』、みすず書房、1971年].

Essential Tension (Chicago, 1977) [佐野正博・安孫子誠也訳、『本質的緊張』、全2巻、みすず書房、1987–1992年].

'Mathematical versus Experimental Tradition in the Development of Physical Science' in his *Essential Tension* (1977), pp. 31–65.

Lakatos, Imure

The Methodology of Scientific Research Programmes (Cambrige, 1978).

Lamprecht, Sterling

'The Role of Descartes in Seventeenth–Century England', *Studies in the History of Ideas*, 3 (1935), pp. 181–243.

Laudan, Lawrence

'The Clock Metapher and Probabilism: The Impact of Descartes on English Methodological Thought, 1650–65', *Ann. Sci.*, 22 (1966), pp. 73–104.

Leewen, H. G. van

The Problem of Certainty in English Thought, 1630–1690 (Den Hague, 1906).

Lindberg, David

Theories of Vision from Al–Kindi to Kepler (Chicago, 1976).

Lloyd, Claude

'Shadwell and the Virtuosi', *Publications of the Modern Language Association of America*, 44 (1929), pp. 472–494.

Lohne, J. A.

'Hooke versus Newton: An Analysis of the Document in the Case on Free Fall and Planetary Motion', *Centaurus*, 7 (1960), pp. 6–52.

'Isaac Newton: The Rise of a Scientist, 1661–1671', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 20 (1965), pp. 125–139.

'Experimentum Crucis', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 23 (1968), pp. 169–199.

London Topographical Society

The A to Z of Elizabethan London (London, 1979).

The A to Z of Restoration London (London, 1992).

Lysaght, D. J.

'Hooke's Theory of Combustion', *Ambix*, 1 (1937), pp. 93–108.

McKie, Douglas

'The Origins and Foundation of the Royal Society of London', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 15 (1960), pp. 1–37.

MacPike, Eugene F.

Hevelius, Flamsteed and Halley--Three Contemporary Astronomers and Their Mutual Relations (London, 1937).

Mach, Ernst

Die Mechanik in ihrer Entwicklung (Leipzig, 1883) [伏見譲訳、『マッハ力学』、講談社、1969年].

Mahoney, Michael S.

'The Measurement of Time and Logitude at Sea' in *Studies on Christiaan Huygens* (Lisse, 1980), H. J. M. Bos et al. (eds.), pp. 234–270 [佐々木力訳、『歴史における数学』、勁草書房、1982年、第5章所収].

Manuel, Frank E.

A Portrait of Isaac Newton (Cambridge, Mass., 1968).

Mason, Stephen F.

A History of the Sciences (London, 1953) [矢島祐利訳、『科学の歴史』、全2巻、岩波書店、1955–1956年].

Matzke, Edwin B.

'The Concept of Cells Held by Hooke and Grew', *Science*, 98 (1943), pp. 13–14.

Mayo, Thomas

Epicurus in England, 1650–1725 (Dallas, 1934).

Merton, Robert K.

Science, Technology and Society in Seventeenth Century England (New York, 1970) [Originally published in *Osiris* in 1938].

Social Theory and Social Structure (New York, 1949, enlarged ed., New York, 1968) [森東吾ほか訳、『社会理論と社会構造』、みすず書房、1961年].

Middleton, W. E.

The History of the Barometer (Baltimore, 1964).

'A Footnote to the History of the Barometer: An Unpublished Note by Robert Hooke', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 20 (1965), pp. 145–151.

Millington, E. C.

'Theories of Cohesion in the Seventeenth Century', *Ann. Sci*, 5 (1945), pp. 253–269.

Mills, A. A.

'Newton's Prisms and His Experiments on the Spectrum', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 36 (1981), pp. 13–36.

Mills, A. A. and Turvey, P. J.

'Newton's Telescope: An Examination of Reflecting Telescope Attributed to Sir Isaac Newton in the Possession of the Royal Society', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 33 (1979), pp. 133–155.

Milt, Clara De

'Robert Hooke, Chemist', *J. Chem. Educ*, 16 (1939), pp. 503–510.

More, Louse Trenchard

Isaac Newton (New York, 1934).

Mory, S. S.

'Kepler's Optics: A Study in the Development of Seventeenth Century Natural Philosophy', unpublished Ph. D. thesis, Indiana Univ., 1971.

Moyer, A. E.

'Robert Hooke's Ambiguous Presentation of "Hooke's Law"', *Isis*, 68 (1977), pp. 266–275.

Mulligan, Lotte

'Anglicanism, Latitudinarianism and Science in Seventeenth Century', *Ann. Sci.*, 30 (1973a), pp. 213–219.

'Civil War Politics, Religion and the Royal Society', *Past and Present*, No. 59 (May 1973b), pp. 92–116.

Mulligan, Lotte and Glenn

'Reconstructing Restoration Science: Styles of Leadership and Social Composition of the Early Royal Society', *Soc. Stud. Sci.*, 11 (1981), pp. 327–364.

Nakajima, Hideto

'Two Kinds of Modification Theory of Light: Some New Observations on the Newton–Hooke Controversy of 1672 Concerning the Nature of Light', *Ann. Sci.*, 41 (1984), pp. 261–278.

'Robert Hooke's Family and His Youth', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 48 (1994), pp. 11–16.

Nicolson, Marjorie

'The Early Stage of Cartesianism in England', *Stud. Philol.*, 26 (1929), pp. 356–374.

North, John

'Thomas Harriot and the First Telescopic Observations of Sunspots' in John W. Shirley (ed.), *Thomas Harriot* (Oxford, 1974), pp. 129–157.

Oldroyd, D. R.

'Robert Hooke's Methodology of Science as Exemplified in His Discourse of Earthquakes', *Brit. J. Hist. Sci.*, 6 (1972), pp. 109–130.

'Some "Philosophical Scribbles" Attributed to Robert Hooke', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 35 (1980), pp. 17–32.

'Some Writings of Robert Hooke on Procedures for the Prosecution of Scientific Inquiry, Including His Lectures of Things Requisite to a Natural History', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 41 (1987), pp. 145–167.

'Geological Controversy in the Seventeenth Century' in *New Studies* (1989), pp. 207–233.

Olmsted, J. W.

'The "Application" of Telescopes to Astronomical Instruments, 1667–1669', *Isis*, 40 (1949), pp. 213–225.

Pannekoek, A.

A History of Astronomy (London, 1961).

Patterson, Louise D.

'Robert Hooke and the Conservation of Energy', *Isis*, 38 (1948), pp. 151–156.

'Hooke's Gravitation Theory and Its Influence on Newton, Part 1', *Isis*, 40 (1949), pp. 327–341.

'Hooke's Gravitation Theory and Its Influence on Newton, Part 2', *Isis*, 41 (1950), pp. 32–45.

'A Reply to Professor Koyré's Note on Robert Hooke', *Isis*, 41 (1950), pp. 304–305.

'Pendulums of Wren and Hooke', *Osiris*, 10 (1952), pp. 277–321.

Popkin, Richard H.

The History of Scepticism from Erasmus to Descartes (Assen, 1960) [野田又夫・岩坪紹夫訳、『懐疑』、紀伊国屋書店、1981年].

Powell, Anthony

John Aubrey and His Firends (London, 1948, revised repr., Reading, 1988).

Pugliese, P.

'The Scientific Achievement of Robert Hooke: Method and Mechanics', unpublished Ph. D. thesis, Harvard University, 1982.

Pumfrey, Stephen

'Ideas above His Station: A Social Study of Hooke's Curatorship', *Hist. Sci*, 29 (1991), pp. 1–44.

Rabb, Theodore K.

'Religion and the Rise of Modern Science', *Past and Present*, No. 31 (July 1965), pp. 111–126.

Rappaport, Rhoda

'Hooke on Earthquakes', *Brit. J. Hist. Sci.*, 19 (1986), pp. 129–146.

Reddaway, T. F.

The Rebuilding of London after the Great Fire (London, 1940).

Reif, Patricia

'The Textbook Tradition in Natural Philosophy, 1600–1650', *J. Hist. Ideas*, 30 (1969), pp. 17–32.

Robert T. Gunther and the Old Ashmolean (Oxford, 1985), A. V. Simcock (ed.).

Robinson, H. W.

'Hooke's Pocket Watch', *Ann. Sci.*, 4 (1939), pp. 322–323.

'Robert Hooke as a Surveyor and Architect', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 6 (1949), pp. 48–55.

'An Unpublished Letter of Dr. Seth Ward Relating to the Early Meetings of the Oxford Philosophical Society', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 7 (1950), pp. 68–70.

Ronchi, Vasco

Storia della Luche (Bologna, 1939) [英訳、*The Nature of Light* (London, 1970), trans. V. Barocas].

Rosenfeld, Léon

'La théorie des couleurs de Newton et ses adversaries', *Isis*, 9 (1926), pp. 44–65.

'La premier conflit entre la théorie ondulatione et théorie courpsculaire de la lumière', *Isis*, 11 (1928), pp. 111–122.

Rostenberg, Leona

The Library of Robert Hooke (Santa Monica, 1989).

Royal Society

The Record of the Royal Society of London, 4th ed. (Oxford, 1940).

Sabra, A. I.

'Newton and the "Bigness" of Vibrations', *Isis*, 54 (1963), pp. 267–268.

Theories of Light from Descartes to Newton (London, 1967, repr., Cambridge, 1981).

Samuel Hartlib and the Advancement of Learning, Charles Webster (ed.), (Cambridge, 1970).

Sargeaunt, John

Annals of Westminster School (London, 1898).

Sasaki, Chikara

'Scientific Studies at Oxford and Cambridge in the Seventeenth Century', *Historia Scientiarum*, 20 (1981), pp. 57–75.

Scala, G. E.

'An Index of Proper Names in Thomas Birch, *The History of the Royal Society*', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 28 (1974), pp. 263–329.

Schaffer, Simon

'Glass Works: Newton's Prisms and the Uses of Experiment' in *The Uses of Experiment*, David Gooding et al. (eds.), (Cambridge, 1989), pp. 67–104.

Schuster, J.

'Descartes and the Scientific Revolution, 1618–1634', unpublished Ph. D. thesis, Princeton Univeristy, 1977.

Scriba, Christoph J.

'The Autobiography of John Wallis, F. R. S.', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 25 (1970), pp. 17–46.

Shadwell, Thomas

The Virtuoso (Lincoln, 1966), Marjorie Hope Nicolson and David Stuart Rodes (eds.).

Shapin, Steven and Schaffer, Simon

Leviathan and the Air–Pump (Princeton, 1985).

Shapiro, Alan E.

'Kinematic Optics: A Study of the Wave Theory of Light in the Seventeenth–Century', *Arch. Hist. Exact Sci.*, 12 (1973), pp. 134–266.

'Newton's Definition of a Light Ray and the Diffusions Theories of Chromatic Dispersion', *Isis*, 66 (1975), pp. 194–210.

'The Evolving Structure of Newton's Theory of White Light and Color', *Isis*, 71 (1980), pp. 211–235.

Shapiro, Barbara J.

'Latitudinarianism and Science in Seventeenth–Century England', *Past and Present*, No. 40 (July, 1968), pp. 286–316.

John Wilkins, 1624–1672 (Berkeley and Los Angeles, 1969).

'The Universities and Science in Seventeenth Century England', *J. Brit. Stud*, 10 (1971), pp. 47–82.

Simpson, A. D. C.

'The Early Development of the Reflecting Telescope in Britain', unpublished Ph. D. thesis, Edinburgh University, 1981.

'Newton's Telescope and the Cataloging of the Royal Society's Repository', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond*, 38 (1984), pp. 187–214.

'Richard Reeve––The "English Campani"––and the Origins of the London Telescope–Making Tradition', *Vistas Astron*, 28 (1985), pp. 357–365.

'Robert Hooke and Practical Optics: Technical Support at a Scientific Frontier' in *New Studies* (1989), pp. 33–61.

'James Gregory and the Reflecting Telescope', *J. Hist. Astron.*, 23 (1992), pp. 77–92.

Singer, B. R.

'Robert Hooke on Memory, Association and Perception', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 31 (1976), pp. 115–131.

Singer, Charles

'The First English Microscopist: Robert Hooke', *Endeavour*, 14 (1955), pp. 12–18.

Sorrensen, Richard John

'Scientific Instrument Makers at the Royal Society of London, 1720–1780', unpublished Ph. D. thesis, Princeton University, 1993.

Steffens, Henry John

The Development of Newtonian Optics in England (New York, 1977).

Stimson, Dorothy

'Ballad of Gresham College', *Isis*, 18 (1932), pp. 103–117.

'Puritanism and the New Philosophy', *Bull. Int. Hist. Med.*, 3 (1935), pp. 321–334.

Stone, Laurence

'The Educational Revolution in England, 1560–1640', *Past and Present*, No. 28 (July 1964), pp. 41–80.

Stone(1974) については、*The University in Society* の項目を見よ。

Studies on Christiaan Huygens (Lisse, 1980), H. J. M. Bos et al. (eds.).

Stukeley, William

Memoirs of Sir Isaac Newton's Life, 1752 (London, 1936).

Symonds, R. W.

Thomas Tompion (London, 1951).

Tanner, Lawrence E.

Westminster School (London, 1934).

Tawney, Richard H.

'The Rise of the Gentry, 1558–1640', *Econ. Hist. Rev.*, 11 (1941), pp. 1–38 [「ジェン

トリの勃興」、浜林正夫訳、『ジェントリの勃興』、5-80ページ所収].

Taylor, E. G. R.

The Mathematical Practitioners of Tudor & Stuart England (Cambridge, 1954, repr., 1970).

Turnbull, G. H.

James Gregory Tercentenary Memorial Volume (London, 1939).

'Samuel Hartlib's Influence on the Early History of the Royal Society', *Notes Rec. Roy. Soc. Lond.*, 10 (1952-3), pp. 101-130.

Turner, A. J.

'Hooke's Theory of the Earth's Axial Displacement: Some Contemporary Opinions', *Brit. J. Hist. Sci.*, 7 (1974), pp. 166-170.

Turner, Gerald L. E.

'The History of Optical Instruments', *Hist. Sci.*, 8 (1970), pp. 53-93.

Turner, H. D.

'Hooke and Theories of Combustion', *Centaurus*, 4 (1956), pp. 297-310.

'Robert Hooke and Boyle's Air Pump', *Nature*, 184 (1959), pp. 395-397.

The Uses of Experiment, David Gooding et al. (eds.), (Cambridge, 1989).

The University in Society, L. Stone et al. (eds.), vol. 1 (Princeton, 1974).

Victoria County History, vol. 5, *Hampshire & Isle of Wight* (London, 1912).

Villamil, Richard De

Newton the Man (London, 1931).

Vyver, Van de

'Lunar Maps of the Seventeenth Century', *Vatican Observatory Publications*, 1 (1971a), pp. 69-83.

'Original Sources of Some Early Lunar Maps', *J. Hist. Astron.*, 2 (1971b), pp. 86-97.

Wallis, Peter and Ruth

Newton and Newtoniana: A Bibliography (Folkstone, 1977).

Waters, David

The Art of Navigation in England in Elizabethan and Early Stuart Times (London, 1659) in 3

vols.

Webb, Geoffrey

Wren (London, 1937).

Webster, Charles

'Richard Towneley and Boyle's Law', *Nature*, 197 (1963), pp. 226–228.

'The Discovery of Boyle's Law and the Concept of Elasticity of Air in the Seventeenth Century', *Arch. Hist. Exact Sci.*, 2 (1965), pp. 441–502.

'Henry Power's Experimental Philosophy', *Ambix*, 14 (1967), pp. 150–178.

The Great Instauration (London, 1975).

Westfall, Richard S.

'Unpublished Boyle Papers Relating to Scientific Method', *Ann. Sci.*, 12 (1956), pp. 63–73 & 103–117.

Science and Religion in Seventeenth Century England (New Haven, 1958).

'The Development of Newton's Theory of Color', *Isis*, 53 (1962a), pp. 339–358.

'Newton and His Critics on the Nature of Colors', *Arch. int. d'hist. sci.*, 15 (1962b), pp. 47–58.

'The Foundations of Newton's Philosophy of Nature', *Brit. J. Hist. Sci.*, 1 (1962c), pp. 171–182.

'Newton's Reply to Hooke and the Theory of Colors', *Isis*, 54 (1963), pp. 82–96.

'Isaac Newton's Coloured Circles twixt Two Contiguous Glasses', *Arch. Hist. Exact. Sci.*, 2 (1965), pp. 181–196.

'Newton's Optics: The Present State of Research', *Isis*, 57 (1966), pp. 102–107.

'The Science of Optics in the Seventeenth Century', *Hist. Sci.*, 6 (1967a), pp. 150–156.

'Hooke and the Law of Universal Gravitation' *Brit. J. Hist. Sci.*, 3 (1967b), pp. 245–261.

The Construction of Modern Science (New York, 1971) [渡辺正雄・小川真里子訳、『近代科学の形成』、みすず書房、1980年].

Never at Rest: A Biography of Isaac Newton (Cambridge, 1980a) [田中一郎・大谷隆昶訳、『アイザック・ニュートン』、全2巻、平凡社、1993年].

'Newton's Marvelous Years of Discovery and Their Aftermath', *Isis*, 71 (1980b), pp. 109–121.

'Robert Hooke, Mechanical Technology and Scientific Investigation' in *The Uses of Science in the Age of Newton* (Berkeley and Los Angeles, 1983), pp. 85–110.

Westminster School

Commemoration of the Bicentenary of the Death of Richard Busby (London, 1895).

Williams, E.

'Hooke's Law and the Concept of the Elastic Limit', *Ann. Sci.*, 12 (1956), pp. 74–83.

Willmoth, Frances

Sir Jonas Moore (Woodbridge, 1993).

Winkler, Mary and Helden, Albert van

'Johannes Hevelius and the Visual Language' in *Renaissance and Revolution*, J. V. Field and Frank A. James (eds.), (Cambridge, 1993), pp. 97–116.

Wright, Michael

'Robert Hooke's Longitude Timekeeper' in *New Studies* (1989), pp. 63–118.

Ziggelaar, August. S. J.

Le physicien Ingace Gaston Pardies S. J. (1636–1673), (Copenhagen, 1971).

Zilsel, Edgar

'The Origins of William Gilbert's Scientific Method', *J. Hist. Ideas*, 2 (1941), pp. 1–32 [青木靖三訳、『科学と社会』、みすず書房、1967年、第5章所収]。

邦語文献

ヴァヴィロフ、エス・イ

『アイザク・ニュートン』（東京図書、1958年）、三田博雄訳。

ウェストフォール、R. S.

『アイザック・ニュートン』（平凡社、1993年）、全2巻、田中一郎・大谷隆昶訳。

オーブリー、ジョン

『名士小伝』（冨山房、1979年）、橋口稔他訳。

ガリレオ・ガリレイ

『天文対話』、全2巻　（岩波書店、1959–1961年）、青木靖三訳。

『星界の報告・他一編』（岩波文庫、1976年）、山田慶児・谷泰訳。

クーン、トーマス
『科学革命の構造』（みすず書房、1971年）、中山茂訳。
『コペルニクス革命』（紀伊国屋書店、1976年）、常石敬一訳。
『本質的緊張』、全2巻（みすず書房、1987-1992年）、佐野正博・安孫子誠也訳。

ゲッセン、ベー・エム
『ニュートン力学の形成』（法政大学出版会、1986年）、秋間実ほか訳。

小柳公代
「パスカルにおける実験の研究」、『自然』、1978年5月号、68-77ページ。
『パスカル・直観から断定まで』（名古屋大学出版会、1992年）。

佐々木力
『科学革命の歴史構造』、全2巻（岩波書店、1985年）。
『近代学問理念の誕生』（岩波書店、1992年）。

ジェイコブ、マーガレット
『ニュートン主義者とイギリス革命』（学術書房、1990年）、中島秀人訳。

島尾永康
『ニュートン』（岩波新書、1979年）。

『一七世紀危機論争』（創文社、1975年）、今井宏編。

ツィルゼル、E.
『科学と社会』（みすず書房、1967年）、青木靖三訳。

ドレイク、S.
『ガリレオの生涯』、全3巻（共立出版、1984-1985年）、田中一郎訳。

中島秀人
「ニュートンの光学理論形成とその背景」、東京大学大学院修士論文、1982年。
「ニュートンの光学」、吉田忠編、『ニュートン自然哲学の系譜』（平凡社、1987年a）、185-222ページ。
「ニュートンの錬金術」、下坂英他編、『科学と非科学のあいだ』（木鐸社、1987年b）、27-67ページ。
「ニュートンに消された男――ロバート・フック」、『科学朝日』、1993年8月号、99-103ページ。

ニュートン、アイザック
『ニュートン－－自然哲学の数学的諸原理』（中央公論社、1971年）、河辺六男訳。
『ニュートン－－光学』（朝日出版、1981年、第四版からの訳）、科学の名著、第6巻、田中一郎訳。
『光学』（岩波書店、1983年、第三版からの訳）、島尾永康訳。

バターフィールド、H.
『近代科学の誕生』、全2巻（講談社、1978年）、渡辺正雄訳。

ピープス、サミュエル
『サミュエル・ピープスの日記』（国文社、1987年－[刊行中]）、臼井昭訳。

ヒル、クリストファ
『イギリス革命の思想的先駆者たち』（岩波書店、1972年）、福田良子訳。

広重徹
『物理学史』、全2巻（培風館、1968年）。

広瀬秀雄
『天文学史の試み』（誠文堂新光社、1981年）。

ファイヤアーベント、P. K.
『方法への挑戦』（新曜社、1981年）、村上陽一郎訳。

フック、ロバート
『ミクログラフィア』（仮説社、1984年、部分訳）、板倉聖宣・永田英治訳。

ブルア、デイビッド
『数学の社会学』（培風館、1985年）、佐々木力・古川安訳。

ベーコン、フランシス
『ベーコン・学問の進歩、ノヴム・オルガヌム、ニューアトランティス』（河出書房、1966年）、服部英次郎ほか訳。
『学問の進歩』（岩波書店、1974年）、服部英次郎・多田英次訳。
『ベーコン』（中央公論社、1979年）、福原麟太郎編。

ベン＝デービッド、J.
『科学の社会学』（至誠堂、1974年）、潮木守一・天野郁夫訳。

ホイヘンス、クリスチャン
『ホイヘンス－－光についての論考他』（朝日出版、1989年）、科学の名著、第2期第10巻、原亨吉ほか訳。

ボイル、ロバート
『ボイル－－形相と質の起源』（朝日出版、1989年）、科学の名著、第2期第8巻、赤平清蔵訳。

ポプキン、リチャード H.
『懐疑』（紀伊国屋書店、1981年）、野田又夫・岩坪紹夫訳。

松尾幸季
「動物精気についての脱線：17世紀科学における『精気』概念の転換(1)－－H・パウアを中心として」、『生物学史研究』、第37巻、1980年、16-34ページ。

マッハ、エルンスト
『マッハ力学』（講談社、1969年）、伏見譲訳。

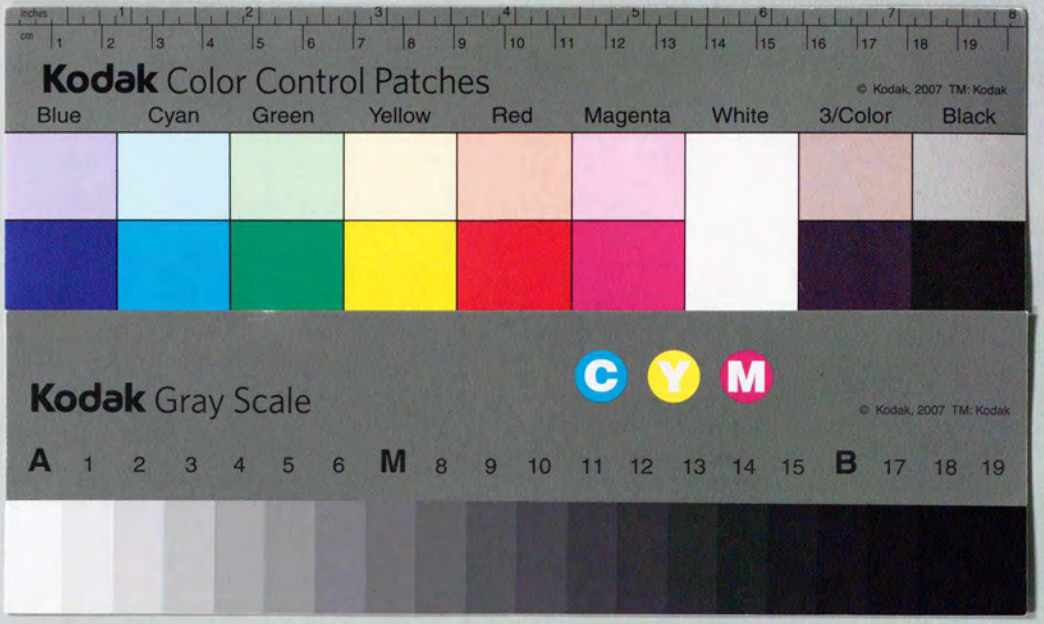
マートン、R. K.
『社会理論と社会構造』（みすず書房、1961年）、森東吾ほか訳。

マホーニィ、マイケル S.
『歴史における数学』（勁草書房、1982年）、佐々木力編訳。

メイスン、S.
『科学の歴史』、全2巻（岩波書店、1955-1956年）、矢島祐利訳。

吉本秀之
「ロバート・ボイル－－人と仕事」、科学の名著、第2期第8巻『ボイル』（朝日出版、1989年）、ci-clxiページ。

渡辺正雄ほか
「資料－－デカルト・フック・ホイヘンスの光学」、『科学史研究』、第15巻、1976年、39-48ページ。


inches
cm
Kodak Color Control Patches
© Kodak, 2007 TM: Kodak
Blue
Cyan
Green
Yellow
Red
Magenta
White
3/Color
Black
Kodak Gray Scale
C
Y
M
© Kodak, 2007 TM: Kodak
A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19