バルトリンと複屈折

近藤正城*

Abstract

In 1669, Erasmus Bartholin reported birefringence, a new optical phenomenon which was different from all the others known at that time. Although his *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici* generally has been mentioned merely as a report of a puzzling phenomenon that had to wait until the nineteenth century for explanation, his treatise itself offers insights that are significant in the history of optics. By analyzing these insights, this paper will shed light on some aspects of optical studies in the 17th century.

1. 序

1669 年に，当時，一般的に知られていた光の挙動とは異なる，複屈折という新しい光学現象がバルトリン（Erasmus Bartholin, 1625–1698）によって報告された．複屈折とは，光線が，ある種の物質の境界面で屈折したときに，2 つの屈折光が現れる現象のことである．この現象は，彼の著作のなかで実験とともに詳しく記述されており，その内容はヨーロッパ中ですぐに知られるようになった．

複屈折現象は，ニュートン（Isaac Newton, 1642–1727）やホイヘンス（Christiaan Huygens, 1629–1695）を始めとする多くの学者が説明を与えようと取り組んだ問題であり，光学史上，重要な発見である[*1]．しかし，通常は， バルトリンの著作の内容そのものについて触れられることはほとんどなく，その価値は，19 世紀にいかにして複屈折現象が解決されたか，という文脈において評価されることが普通である．そのため本稿では，バルトリンの著作『複屈折をするアイスランド結晶の実験[*2]』の内容を紹介することを通して，この著作の持つ価値の再考する．

* 京都大学大学院文学研究科修士課程 kondo_phs@hotmail.co.jp

*1 光学史の代表的な著作としては例えば以下のものが挙げられる． Abdelhamid I. Sabra, *Theories of light from Descartes to Newton*, London: Oldbourne Book Co., 1967., Vasco Ronchi, *The nature of light* translated by V. Barocas, Cambridge: Harvard University Press, 1970.

*2 Erasmus Bartholin, *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici quibus mira & insolita refractio detegitur*, Hafniae: Daniel Paullus, Reg., Bibl, 1669. このリプリントは次の英訳と一緒に出版されている．Erasmus Bartholin, *Experiments on birefringent Icelandic crystal*, translated by Thomas Archibald, Copenhagen: The Danish Library of Science and Medicine, 1991.

2. 複屈折現象の報告

デンマークの名家に生まれ，高い教育を受けたバルトリンは，デンマーク王フレデリック III 世がアイスランドに遠征隊を送って調達したアイスランド結晶（方解石）を観察し，その結果をコペンハーゲンで出版した[*3]．彼はその著作のなかで，方解石の示す際立った特徴を「複屈折」（Disdiacrasticum）と名づけている．その著作と方解石の標本は，すぐに，イングランドのオルデンバーグ（Henry Oldenburg, 1618–1677）やフランスのピカール（Jean-Felix Picard, 1620–1682）などの学者の手に渡り[*4]，*Philosophical Transactions* にはオルデンバーグによる要約が掲載された[*5]．こうして，複屈折という新たな光学現象がヨーロッパに広がり，ニュートンやホイヘンスらも，この現象を考察の対象として積極的に取り上げることになる．

バルトリンの著作の内容は，冒頭の謝辞，自分がなぜこのような報告をするに至ったかの経緯や，末尾に書かれた方解石の産出場所に関する情報を除けば，大きくわけて，実験と考察の 2 つの部分にわけて構成されている．前半の実験の部では，方解石についての観察・実験結果を記述し，後半の考察の部では，その結果から要請される仮説を 2 つ立て，実験結果を述べなおした 10 個の命題を証明している．ただし，ここでは命題の内容には触れず，実験の部と，考察の部の冒頭のバルトリンの議論に焦点を当てることにする．

3. 実験の部

この部は，全部で 17 の実験から構成される．実験 I–VI には方解石の外観・物理的性質が記述されている．方解石を通して見られる複屈折が最初に報告されるのは実験 VII であり，それ以降の実験では，大部分が複屈折現象の記述に割かれている．ここでは，方解石の外観・物理的性質を記述している実験 I–VI と，複屈折現象の報告・観察をしている実験 VII 以降の内容とをわけてまとめる．

3.1 方解石の外観・物理的性質（実験 I–VI）

実験 I–VI の内容は次の通りである

1. 実験 I：方解石の形・外観
2. 実験 II：方解石の電気的性質
3. 実験 III：方解石の硬度・方解石と火の反応性

[*3] J. Buchwald and K. Pedersen, “Introduction,” in Barholin, *Expriments on birefringent Icelandic crystal*, pp. 10–12. なお，バルトリンとデンマーク王の関係についてはよくわかっていない．

[*4] Ibid., pp. 14–5.

[*5] “An account of sundry experiments made and communicated by that learn’d mathematician, Dr. Erasmus Bartholin, upon a crystal-like body, sent to him out of Island” *Philosophical Transactions*, 67, 1670/71, pp. 2039–48.

4. 実験 IV：方解石と硝酸（aqua fortis）の反応性
5. 実験 V：方解石の仮想展開図
6. 実験 VI：方解石の平面角・立体角の測定

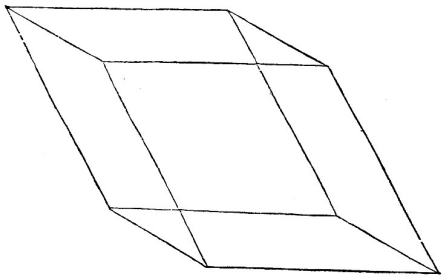

図 1　方解石の外観（*Experimenta*, p. 2 より）

実験 I では，方解石の外観が記述されている．バルトリンは，方解石がほとんどの場合，平行四辺形に囲まれた立体になる（図 1）ことを報告し，結晶の特定方向への割れやすさ（劈開性）を観察した．この性質は，バルトリンが複屈折現象を考察する際の重要な足がかりになる．

3.2　複屈折現象の観察（実験 VII–XVII）

実験 VII において，初めて複屈折現象が報告される．バルトリンは「この実験は［私の］目と精神をかなり長い間占有して、私がそのときに探求しようと決めていた他のことから呼び戻した．なぜなら，私は，それが屈折に関して何か根本的なことに触れていることに気づいたからだ」[*6]と語る．彼が注目したのは「他の透明な物体——たとえばガラス，水など——を通して現れる物体の像が，同じ場所に少なくとも 1 つだけ現れる一方で，これら［方解石］の 1 つ 1 つを通しては，2 つの像として観察される」[*7]という事実である．

この 2 つの像に関して，実験 XIII で奇妙な性質が報告される．それは，方解石の底面を地面に接触させたまま回転させたときに，一方の像は動かずにそのままの状態を維持するが（C），もう一方の像は方解石の回転にともなって，動かない像のまわりを回る（B）という現象である（図 2）．

一言補足しておけば，通常の透明物質（ガラスなど）ではこうした現象は起こらない。ガラスを方解石と同じ形に切って，実験 XIII と同様の条件で回転させてみても，その屈折像は動かな

*6 “Detinuit diutius & oculos & mentem hoc experimentum, & ab aliis avocavit, quae persequi suo tempore statueram; cum animadverterem me Dioptrices quaedam fundamenta de Refractione attigisse.” Bartholin, *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici*, p. 12.

*7 “Jam, cum species objecti per corpora pellucida alia apparens, ut per vitrum, aquam, aliaque, eadem & simplex saltem repraesentetur; horum singula, dupla conspicientur imagine,” ibid., p. 13.

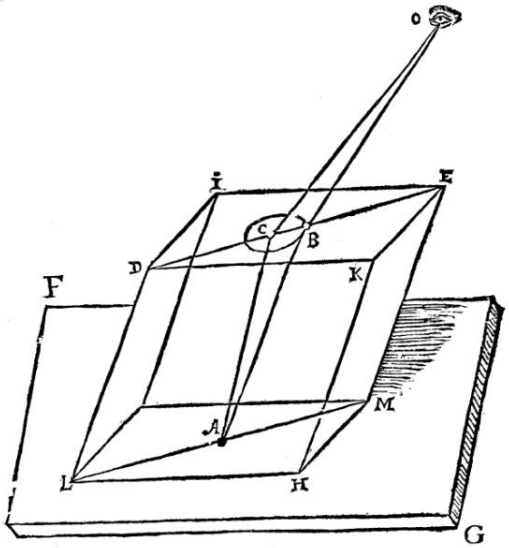

図２　方解石の回転に伴って動く片方の像（*Experimenta*, p. 19 より）

いことがわかるだろう．バルトリンが，この点に複屈折の「異常」さを見たとしても不思議ではない．

その現象に関する観察はさらに進められるが，最も重要な分析が行われているのは実験 XVI においてである．バルトリンは最初に，当時よく知られていた法則――光は１つの境界面（入射面）において一度だけ屈折する――を引き合いに出す．そしてこの法則と，方解石を通して見られる現象――1 つの境界面（入射面）しか持たない方解石から２つの像が生じてくる――が相容れないことを指摘するのである．こうした，法則と現象の不一致が，バルトリンをさらなる考察へと駆き立てたのであった．そしてバルトリンは，２つの像が生ずるのは，方解石を通して２種類の屈折が生じるからだと考えた．彼は，その一つを「通常屈折」（Refractio Solita），もう一方を「異常屈折」（Refractio Insolita）と名づけている．実験 XIII の結果で見たように「異常屈折」の異常さは，その屈折像が方解石の回転とともに動くという性質を持っている点である．こうしてバルトリンは，複屈折を「通常屈折」と「異常屈折」という２つの要素からなると考えて分析していく．

次にバルトリンは，その２つの違いを考察するために次のような実験を行う．まず，図３に示されるような，方解石の上面と底面の平行四辺形の鋭角を二等分する対角線を考え，切断面 NRTS を仮想する．A は底面に描かれた点であり，屈折像を観察しやすくするために線分 BC が A を通って引かれている．M と O は観測者の目の位置を表し，M は上面の NR に対して垂直に目を置いた状態を示し，O は考えられた切断面 NRTS の傾き RT の平行線上に目を置いた状態を示している．ここでバルトリンは，方解石を実験 XIII のように回転させる．すると，観測点 M からは，屈折することも動くこともない像 V（DH）と屈折して動く像 X（EI）が観察

され，観測点 O からは，屈折するが動かない像 Y（FK）と屈折しないが動く像 Z（GL）が観察される．

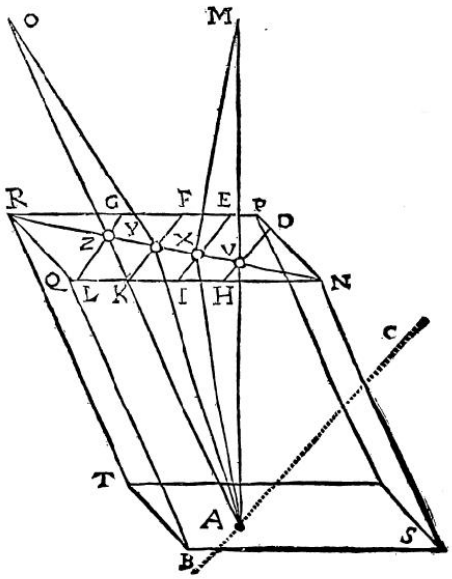

図 3　通常屈折と異常屈折の違い（*Experimenta*, p. 31 より）

この実験結果で問題になるのは X と Z である．V と Y に関しては，特に問題なく，通常屈折による現象として説明することができる．というのも，V に関していえば，観測点 M と点 A を結んだとき，その線は上面 NR に対して垂直なのだから，V は屈折されずに目に届いた像として考えることができるだろうし，Y に関しては，OY が境界面に対して垂直ではなく，傾いているのだから Y は屈折を被って O に届いた像として理解することができるだろう．しかし，それと比べたときの X と Z は明らかに異常である．目が M にあるとき，X は本来，見えるはずがない（屈折するはずがない）のであり，目が O にあるとき Z も同様に，見えるはずがない（屈折しなくてはならない）のである．すなわち，異常屈折は，境界面 RN に垂直に入射した光を屈折させ，切断面 NRST の側面の傾きに対して並行に入射した光線は屈折させない．バルトリンは異常屈折の性質をそのように考えたのである．

4.　考察の部

バルトリンは，前節の実験結果を中心に考察を展開する．まずこの部の冒頭で「我々はこれらの現象にはっきりとした原因があることを疑わない」[*8] という確信が表明され，その確信にした

[*8] “non dubitamus, quin statae horum phaenomenon sint causae,” ibid., p. 42.

がって「推論によって見出されたというよりはむしろ，上述の実験によって認識された」[*9]という，２つの仮説が立てられる．

> 第一に，光線が屈折されずに透明物体を通過する特定のラインがあるということを仮定しよう．［光線が］そこへ近づくか，もしくは離れると，ルネ・デカルトによって説明されている『屈折光学』第一章の規則にしたがって屈折が生ずる．［中略］第二に，光線の，もしくは対象から発せられた像の半分は，光線が物質であろうと非物質であろうと，通常屈折によって，もう一方の半分は異常屈折によって屈折するということを仮定しよう．[*10]

第一の仮定で述べられている「特定のライン」は，通常屈折と異常屈折では異なっている．通常屈折を生じさせるラインは境界面と垂直である．一方，異常屈折を生じさせるラインは境界面に対して垂直ではない．つまり，それは通常屈折のラインに対して傾いていると考えられている．そして，ここで考えられている「傾き」に関しては，実験Ｉで観察された方解石の劈開性（特定方向への割れやすさ）が，念頭におかれている．こうしてバルトリンは，ガラスなどの透明物質とは違って，方解石が２つの「ライン」を持っていると考えたのであった．さらにここで，第二の仮定が成り立つとして，境界線に対して垂直に入射する光線を考えよう．光線の半分は，通常屈折にしたがうのだが，ここでは光線と通常屈折の「ライン」が一致しているので，屈折は起こらないだろう．これによって１つの像が生じる．そして残りの半分は，異常屈折にしたがうのだが，ここでは光線と異常屈折の「ライン」が一致しないので，屈折が起こるだろう．これによってもう１つの像が生じる．こうして，第一と第二の仮説が前提されれば，複屈折現象が説明できるというわけである．ここで１つ重要なのは，異常屈折が通常屈折と同様に，正弦法則に従うと考えられていることである．バルトリンにとって，異常屈折の「異常」さは，通常屈折の「ライン」に対して異常屈折の「ライン」が傾いていることに帰される．

以上のように，バルトリンは，光線が屈折しないで通過する「ライン」という概念を持ち込んで，正弦法則を維持したまま，複屈折現象を解決しようとした．ここに，彼が行った考察の独自性があると言えるだろう．

5. 結論

1669 年に出版されたバルトリンの『複屈折をするアイスランド結晶の実験』は，複屈折という新しい光学現象を報告し，ヨーロッパに広めたという意味でもちろん重要な著作であるが，ここまで見てきたように，そこには，ただ単に未知の現象を報告したという以上に豊かな内容が含まれていることがわかる．

---

*9 “non tam argumentis investigatas, quam superioribus experimentis cognitas.” Ibid., p. 42.

*10 “Primo, supponamus esse lineas aliquas, per quas radii irrefracte diaphanum transeunt, ad quas, vel a quibus Refractiones fiunt, juxta regulas a Renato Des-Cartes Cap. I. Dioptricorum expositas. [...] Deinde, supponamus dimidium luminis, vel speciei ab objecto diffusae, sive illud materiale fuerit, sive immateriale, refringi secundum Refractionem Solitam, dimidium vero secundum Refractionem Insolitam:” Ibid., p. 42–43.

そのなかでは，実験の対象となる方解石の外観・物理的性質に始まり，方解石を通して見られる現象についてさまざまな実験・観察がなされていた．さらに，報告はそこでとどまるのではなく，当時の光学的な知見にうまくそぐわない複屈折という現象に対する，積極的な考察へと向かうのである（その正誤は別として）．その考察のなかで特に注目すべき点は，光が屈折されずに通過する「ライン」という概念であった．バルトリンは，屈折の原因を「ライン」から逸脱した光線に求め，正弦法則を保存したまま，複屈折を説明しようと試みたのである．

本稿では，1669 年に出版されたバルトリンの著作の内容を紹介してきた．そこで報告されていた「複屈折」は，後に解決されることを待つ現象ではなく，当時の光学研究の文脈のなかで解決されるべき現象であった．この著作と，同時代になされた光学に関する論考とを比較検討することによって，17 世紀の光学史に実りある研究を提示することが可能になるだろう．