

## 虹

藤原裕文

(室蘭工業大学工学部)

わが国における虹の最も古い記録といえ、『日本書紀』巻14の一節であろう。「河上かわのほとりに虹ぬじの見ゆること蛇おろちの如くして四五丈(～10m)ばかりなり」。ここでは虹を「ぬじ」と読ませている。話の顛末は文献<sup>1)</sup>を参照してほしい。虹にまつわる不思議な言い伝えは、民族を問わず、世界各地に残されている。それはさておき、虹は光の科学史上興味ある話題を提供してくれた。虹が生じる原因はいかに説き明かされてきたのであろうか。

北宋時代の中国で政治家・学者として活躍した沈括しんかつ(1031～1095年)は、北方を旅行中に経験した虹の記録を随筆集『夢溪筆談』<sup>2)</sup>に残している。本書に収められた609項目にのぼる話題のうち、200以上の項目が自然学や科学・技術に関連した記述で占められていて、中国の科学・技術史を知るうえで避けて通るわけにはいかない貴重な随筆である。虹の水呑み伝説を認めて、「(前略) ちょうど雨があがったばかりで、虹がテントの前の溪谷におりてゆくのが見えた。わたしは同僚とともに近よってよくみると、虹の両頭りょうとうはどちらも谿川の中に垂れていた」と記している。さらに、「人をやって溪を渡らせ、虹をはさんで立たせて」、虹が立つ条件を調べて、こう述べている。「こちらとの距離は数丈(～10m)あり、その間はうすぎぬで隔てたようであった。西から東を望むと見えるが一つまり夕方の虹である一、谿川の東に立って西を望むと、太陽の輝きのために何も見えない」。そして、虹が生じる原因は、「虹とは雨の中の太陽の影である。太陽が雨を照らせばあらわれる」という。

西洋では、14世紀初頭にドイツのドミニコ会修道士ディートリッヒ(Dietrich)<sup>3)</sup>が、雨上がりの後に浮遊する水滴による太陽光の反射・屈折が虹の生じる原因ではないかと推察して、水で満たした球形のフラスコを水滴と見立てて虹のシミュレーション実験を行ったという。主虹や副虹の

見える方向、色の種類と配列などを明らかにしたこともさることながら、水を満たしたフラスコが水滴のモデルに適するという着想には、いささか驚きを禁じえない。この単純なモデルは虹の本質を見抜いたものであり、後の人々の試みた虹に関する種々の検証実験にも十分に耐えるものであった。

デカルト(R. Descartes)やニュートン(I. Newton)らに引き継がれて、虹の研究は大きく進展した<sup>4)</sup>。デカルトは自ら考え出した屈折の法則を適用して、水滴への光線追跡を試み、虹は水滴中で1, 2回反射後に、太陽光に対してそれぞれ約42°と52°傾いて円錐状に出射する光線群で形成されることを見いだした。図1に示すように、それぞれの虹を主虹、副虹という。両虹の円弧間で反射光が戻ってこないために暗くなる部分をアレキサンダー暗帯という。デカルトは光線追跡により、水滴から42°より小さい角度の出射光線群も観察者の眼に達することから、虹の円弧の内側はわずかではあるが明るくなる部分があることを示した。さらに、ニュートンは虹の色の順序・配列・広がり角などを求めた。水滴の屈折率分散のために波長により屈折方向が異なることから、波長によって少しずつ虹の円弧がずれ、主虹と副虹では色の順序が逆となることを明らかにした。主虹の広がりと色について、ニュートンの『光学』<sup>5)</sup>には、こう書かれている。「主虹は内側から外側へと進むにつれて、角度にして40°17′から42°2′の間にあり、その色は堇・藍・青・緑・黄・橙・赤であり、堇は雲の白色光と混じるので、弱く、紫がかって見える」。

16世紀中ごろに、日本人は中国系の文化とは異質の南蛮文化に遭遇した。一つは鉄砲の技術であり、他の一つは近代科学革命が成就する直前のアリストテレスやプトレマイオス以来の伝統的な自然観や宇宙観である。自然哲学の教育に携わっていたイエズス会の日本管区長・ゴメズ(P. Gomez)は、神学校で使う教科書『天球論』(1593年)を著した。西洋の自然観や宇宙観を日本人に説くため、仏教や

E-mail: h-fuji@mmm.muroran-it.ac.jp

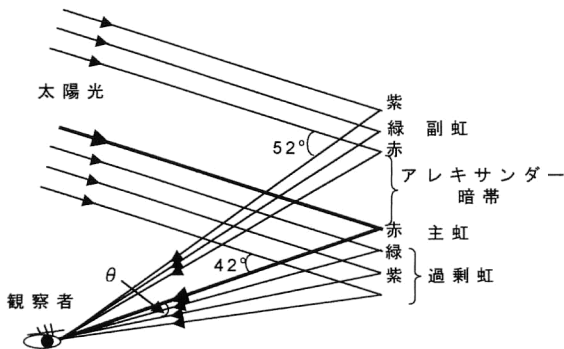


図1 主虹、副虹の見える方向とアレキサンダー暗帯、デカルト線（太線）からのずれ角を $\theta$ で表す。

儒教の言葉を借用した。17世紀後半に小林謙貞はこの日本語訳からキリスト教に関する部分を削除・再編集して『二儀略説』（1683年以前）<sup>6)</sup>を著した。参考までに本書名の「二儀」とは、天文と地理を意味する。

前おきが長くなったが、『二義略説』の「虹の事」<sup>6)</sup>の一部を引用する。「虹の質は露を含んだ雲である。この虹は常に朝日か夕日かに向かって立つものである。本来この虹の体は円相であるけれども、わが地平では半分のみが見える。日輪（＝太陽）が高く上るにしたがって、虹は次第に短くなってゆく。また日輪が西の山に傾くにしたがって、虹は大に現れる」。さらに、「日輪の光があまりに稠くなると虹となる。（中略）上る温湿の気が窪かになって光を受けることにより虹となる。（虹は）日輪と対面する」と虹の原因を述べている。上る温湿の気が窪かになって光を受けることにより虹を生じると説明している。しかし、当時の人々は光の反射以外の屈折や散乱などについての科学的知識を全く持ち合わせていなかったことから推察すると、精一杯の説明であったといわざるをえない。虹の色についても、「真実の色にはあらず。ただ露を含んだ雲に日光がさし当たるときに、かりに色づいて見える」とこみいった説明である。虹の色と真の色とを区別して、「四大の熱・湿・寒・乾が和合してできる」ものが真の色であり、アリストテレス以来の西洋の伝統的な考え方に基づく。すでに触れたように、四大とは、物質を構成する地・水・火・風（＝空気）の四元素を表し、四つの性質、すなわち熱性・寒性・乾燥性・湿性を有する。

次に、江戸時代に広く読まれた百科事典『和漢三才図会』（1713年）<sup>7)</sup>の巻第三の「虹蜺」（＝虹）の項目を紹介する。まず、ある天文書を引用して、「虹蜺は日の気が下がり垂れて動いて地下の熱気を吸い、湧き上がって起こるのである。その場所があるときは井（＝水を汲み取る所）にあたり、あるときは池にあたる。それでこれを見る人が、虹が水を吸うのだと思うのである。実際は水を吸うのではな

い」と沈括のいう虹の水飲み伝説<sup>2)</sup>は否定されている。続けて、「虹が日光に映える色は紅緑である。紅は火、緑は水である。水火の交りである。だから必ず（虹は）日の方に向かう。中天に日光が照り輝いているようなときには虹はでない」という。紅緑の虹は、熱性と乾燥性をもつ火（日に通じる）と、寒性と湿性をもつ水との混合により発生するというわけである。陰陽五行説を拠りどころにした虹の発生の説明であるが、この説は江戸時代の知識人の多くが共有していた考え方である。

杉田玄白の弟子・広瀬周伯の著した『三才窺管』（1808年）<sup>8)</sup>に「蜺蝮」という項目がある。それによると、「（前略）今二つの山がここにある。人が前山の下を過ぎるとき、虹がその麓から起こるのを見る。ここは日光が山麓の雨足を照らす故に、虹はその麓より起こるようなものである。もし人がその麓を去って後山の下に至れば、虹はまたその山の麓から起こるように見える。このように、これを見るのに定まった場所はなく、ただ日と雨と人目とにしたがって移るときは、虹はいわゆる地の熱気が湧きめぐるって起こるというのではないことは明らかである」。周伯は『天経或問』（1675年）に述べられた虹の地の熱気説をきわめて論理的に否定している。もし地の熱気説が正しいのなら、虹は定まった場所に立つことになるから、人が移動すると、後山からは虹は見えなくなるはずであるという。ちなみに、明の游子六の著した『天経或問』は、刊行後まもなくわが国に舶載され、間接的ながら西洋天文学を伝えるものとして大きな影響を与えた。虹の実証的な説明という点で、『三才窺管』のほうが『和漢三才図会』より一歩先んじるのは、両書の刊行時期に100年の差があり、この間に蘭学の影響を強く受けているからであろう。なお両書名の「三才」は天・地・人を意味する。

江戸時代後期、つまり蘭学から洋学への発展段階を迎えたころ、ニュートンの光学が移入された。虹の説明にも、西欧の実証的かつ合理的な思考がうかがえる。例をあげると、青地林宗の著した『気海観瀾』（1827年）<sup>9)</sup>がある。わが国で最初に刊行された窮理学書であり、かつ広く読まれた。「虹」の項目には、「太陽と雨脚と正しく相對し、光線が雨滴に反射・屈折し、三稜玻璃（＝プリズム）が諸色を現すような現象に似ている。太陽が地平上に高ければその弧は短く、低ければその弧は長く（後略）」と記されている。筆者の手持ちの資料などを調べた限り、虹は太陽光線の雨滴による屈折・反射により生じると明記したのは、わが国では、本書が最初ではないだろうか。また「色」の項目には、プリズムで太陽光を受けて紙上に映すと、赤・深黄・淡黄・緑・石青・紫・紺の七色が現れると述べている。彼

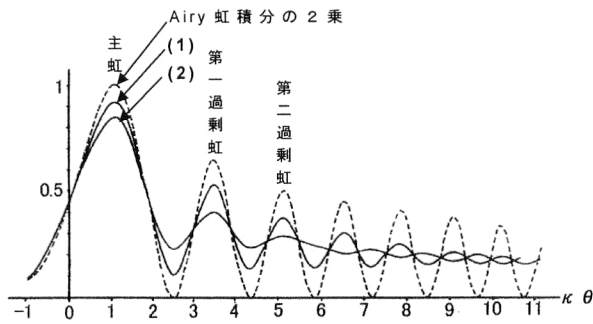


図2 虹の強度分布. 点線:エアリー虹積分の2乗(点光源), 実線:愛知・田中館による計算結果(太陽光源), (1)  $r=0.25$  mm, (2)  $r=0.5$  mm.

の娘婿・川本幸民は江戸時代において評価の最も高い窮理学書『気海観瀾広義』(1851~1858年)<sup>10)</sup>を著した. その「光」の項目において、『気海観瀾』の「虹」と似た内容を述べて、「虹の弓形をなす理やその大きさと太陽の高さの関係は、度学(=数学)を推しはかってこれを知ることができる」と付言している. しかし、虹の形成を数学的に議論できるようなレベルには至らず、またディートリッヒのモデル実験<sup>9)</sup>やデカルトの実験や光線追跡<sup>4)</sup>によるようなやり方も行われず、定性的説明の域を出なかった.

デカルトやニュートンは、幾何光学的考察から主虹や副虹の位置や色の順序などを明らかにした. しかしながら、主虹の内側付近にできる過剰虹の出現、主虹と副虹の間のアレキサンダー暗帯における光強度分布の滑らかな減少、水滴の大きさによる虹の色調の違いなどを説明するには、幾何光学は無力であった. 19世紀にはいると、ヤング(T. Young)は、光波の干渉という画期的な理論に基づいて、これらの問題を説明した. さらに1838年にエアリー(G. B. Airy)は水滴からの出射波面を求め、フラウンホーファー回折理論を適用し、回折像強度分布を計算した. 水滴が小さくなる場合の虹の色調変化、主虹の位置が幾何光学の結果から計算された円弧の下方側に少しずれること、円弧の下方に過剰虹が現れること、水滴が小さくなるとアレキサンダー暗帯において光強度が滑らかに減少することなどを見いだした<sup>11)</sup>. その結果を図2中の点線で示す. 縦軸は光の強度(エアリーの虹積分の2乗)、横軸は太陽光線と観察者方向への回折光のなす角度 $\theta$ に比例した量 $\kappa\theta = 2.142(r/\lambda)^{2/3}\theta$ である(図1参照). ここで、 $r$ は水滴の半径、 $\lambda$ は光の波長である. 横軸のゼロの位置 $\theta=0$ では、幾何学光学から得る虹の位置(最小偏角)を表す. 図2の左側の極大から、主虹、第1過剰虹、第2過剰虹などである. 詳細は文献<sup>11)</sup>を参照していただきたい.

エアリーの虹の理論では太陽を点光源とみなしている.

実際には太陽は見込み角が32'の拡がりをもつので、より厳密な光強度分布の計算にはこのことを考慮する必要がある. この計算は2人の日本人によりなされた. 19世紀の終わりに長岡半太郎は光源の見込み角を考慮して、望遠鏡における円形開口のフラウンホーファー回折像を計算した<sup>12)</sup>. そして、彼の提案を受けて、愛知敬一と田中館寅士郎<sup>たなかだてとらしろう</sup>は、太陽の見込み角32'を考慮してエアリーの虹の理論に適用した成果を欧州の学術誌に英文で公表した<sup>13)</sup>. これらの文献<sup>12,13)</sup>は日本人が明治時代に外国の学術雑誌に発表した、数少ない光学論文のひとつである. 図2中の実線は、彼らが数値計算した結果の1例<sup>13,14)</sup>である. 波長を $\lambda = 589.3$  nm, 水滴の屈折率を $n = 1.333$ として、虹の強度分布を、 $\kappa\theta$ の関数として示している. 図中の実線の(1), (2)は太陽の見込み角32', 水滴の半径はそれぞれ $r = 0.25$  mm, 0.5 mmである. 水滴の半径が大きくなると、光強度の極大と極小の差が減るだけでなく、その極大と極小の位置もずれる. 水滴が大きくなると二次や三次の過剰虹の存在が認められなくなる場合も生じる. また、図示していないが、横軸を $\theta$ で表示すると、短波長になるにつれて光強度の極大や極小を示す曲線は右側に移動するので、実際に観察できる虹の色調の違いは少なくなることも明らかにした.

愛知と田中館がエアリーの虹理論を太陽光源に拡張してから、ちょうど100年経過したことになる.

## 文 献

- 1) 宇治谷 孟訳: 日本書紀(上). 講談社学術文庫(講談社, 1994).
- 2) 沈括: 夢溪筆談, 梅原郁訳注(平凡社, 1979).
- 3) R. ハレ: 世界を変えた20の科学実験, 小出昭一郎, 竹内敬人, 八杉貞雄訳(産業図書, 1974).
- 4) 西條敏美: 虹(恒星社厚生閣, 1999).
- 5) I. ニュートン: 光学, 鳥尾永康訳(岩波書店, 1999).
- 6) 小林謙貞: 二儀略説, 広瀬秀雄校注. 近世科学思想 下(岩波書店, 1979).
- 7) 寺島良安: 和漢三才図会 1, 島田勇雄・竹島淳夫・樋口元巳訳注(平凡社, 1985).
- 8) 広瀬周伯: 三才窺管, 青木国夫解説. 江戸科学古典叢書 38(恒和出版, 1983).
- 9) 青地林宗: 気海観瀾, 三枝博音編. 日本科学古典全書 6巻(朝日新聞社, 1942).
- 10) 川本幸民: 気海観瀾広義, 三枝博音編. 日本科学古典全書 6巻(朝日新聞社, 1942).
- 11) 鶴田匡夫: “虹”, 光の鉛筆(新技術コミュニケーションズ, 1984) pp. 240-251.
- 12) H. Nagaoka: “Diffraction phenomena in the focal plane of a telescope with circular aperture, due to a finite source of light,” *Philos. Mag. J. Sci.*, **45** (1898) 1-23.
- 13) K. Aichi and T. Tanakadate: “Theory of rainbow due to a circular source of light,” *Philos. Mag.*, **58** (1904) 598-610.
- 14) 愛知敬一, 田中館寅士郎: “虹の説”, *東洋学芸雑誌*, **23** (1906) 331-335.