

もう  
濛 気 差

藤原裕文

(室蘭工業大学工学部)

紀元後2世紀中ごろ、アレキサンドリアで活躍したプトレマイオス(K. Ptolemaios)は、目から発する視光線は空気から水中へ進むと、物体の真の位置より上方の点にいたる直線の方に、物体が引き上げられるように見えると考えた<sup>1)</sup>。余談ながら、彼は光線が目から物体のほうへ進むと考えていたようである。さらに、半径1の円弧とそれに対応する弦長を求める三角関数表を作り、定量的に屈折の実験を行ったが、屈折の法則を見いだすまでにはいたらなかった。

天の北極に対してある角度をなす恒星の周極運動に注目したプトレマイオスは、その恒星が子午線を通過するときよりも出没時のほうが、北極と恒星のなす角度は狭く見えるることを見つけた<sup>2)</sup>。この理由として、視光線が大気圏を通過する際に、大気に含まれる水蒸気が多寡により視光線が曲がると推論した。恒星は水蒸気を含む大気がないとしたときの角度より、わずかながら上方に見える。真の方向を基準としたとき、上方に見える角度を、濛気差あるいは大気差(atmospheric refraction)という。この問題を最初に論じた科学者がプトレマイオスである。大気差の原因は、主として大気中に含まれる乾燥した空気により光が屈折されることにあり、水蒸気の大気差への影響は無視して差し支えないことが明らかにされたのは、ずっと後のことである。

大気に含まれる水蒸気が多寡により、視光線が大気圏を通過する際に曲がるというプトレマイオスの説明を知って、早速チコ(Tycho Brahe, 1546-1601)は大気差の測定を試みた。彼の得た値を表1の2列に示す<sup>3)</sup>。第1列には注目する天体の地平からの見かけの高さを角度で表示した値(=視高度,  $h$ )を示す。チコは、測定機器を大型化するだけでなく、目盛りの間を補間して読み取るための対角目盛りを取り付けたり、照準誤差を減らすための小象限儀を

発明したりして、測定精度の向上に努めた。

望遠鏡はチコの死後数年して発明され、望遠鏡に照準器を取り付けることにより、天体の位置はきわめて正確に計測できるようになった。パリ天文台長カシーニ(G. D. Cassini, 1625-1712)が測定した大気差の値を表1の3列に示す<sup>3)</sup>。参考までに、第4列には19世紀の終わりにラドー(R. Radau)が測定した大気差の値を理科年表<sup>4)</sup>から転載した。表1のチコやカシーニが測定した大気差の数値をくらべると、照準器付き望遠鏡の使用した結果はきわめて良いことがわかる。しかし視高度が45°以下(=大気差は1'以上)では、チコのように望遠鏡がなくても四分儀を改良すれば、大気差の測定が可能であることがわかる。

17世紀の中国に眼を向けると、プトレマイオス以来の、太陽が球面上を円運動するという天動説に基づいた西洋天文学がイエズス会士らにより伝えられた。中国においては、西洋天文学のなかでも暦法に限られた分野のみが重視され、受け入れられた。わが国においても事情は同じである。明代末から徐光啓らにより西洋の暦法を取り入れた暦書の編集が進められ、清代になって『崇禎暦書』(1634年)が完成した。それを整理して暦書『曆象考成(上下編)』(1723年)が再編集された。両書には、チコの開発した天文機器や測定した大気差表も掲載されている<sup>3)</sup>。やがて観測結果と『曆象考成』による推算との不一致が生じたため、新たにケプラー(J. Kepler)の惑星の楕円軌道説と面積速度一定の法則などを採用して、『曆象考成後編(耶蘇会士編)』(1742年)が編纂された。ただし、イエズス会士にはタブーであった太陽中心説にはふれられていないが、本書にはカシーニの測定した大気差表は掲載されている。

中国の暦書『崇禎暦書』、『曆象考成』や『曆象考成後編』は、早くからわが国に舶載され、それらを基にした西洋流の暦法が、大坂の天文学者・麻田剛立や彼の門下生・高橋

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

よしとき <sup>はざましげとみ</sup> 至時や間重富らによって研究された。高橋至時から西洋の暦学の理論や天体観測の技術を学んだ伊能忠敬は、全国を測量して精密な地図を作製したことでよく知られている。彼の蝦夷地測量には、地図を作る目的のほかに、子午線1°の長さ(=緯度1°の長さ)を測定するという目的があった。彼は昼の測量が終わった後も、その場所の正確な緯度を知るため、夜に北極星の高度とそのときの南中している恒星の視高度を測定した。これらの測定値と江戸深川での測定値と実測長から、子午線1°の弧長110.7 kmを得た。これは現在わが国の緯度35°での値である110.9 kmにきわめて近い値である。測定精度を考慮すると、大気差の影響は無視してよさそうである。

中国の暦書では北京を基準に作られた数値が掲載されているので、京都、大坂あるいは江戸に当てはめるには、北京と京都、大坂あるいは江戸との距離すなわち経度を知らなければならない。まだ当時経度1°の距離は知られていなかった。カシーニは木星の衛星の食が起きる時刻をパリでの時刻表で表した。木星の衛星の食は地球上で同時に起こるから、そのとき南中している天体は経度により異なる。したがって、二地点で同時に衛星の食を観測して、二地点での天体が南中する時刻の差から、二地点の経度差を計算できる。しかし、長時間正確に動作する軽便な時計はなかったため、伊能忠敬と間重富らは、太陽が南中する時間から食の終始する時間をはかることにより、二地点の時刻の差を求めようとしたのである。彼らは何度かこれを試みたが、成功しなかった<sup>5)</sup>。もし成功していれば、彼の地図はもっと正確であったろうと思われる。彼の作成した地図は現代の地図に比べて東西にわずかに歪んでいるという。

1827年7月に、高橋景保(至時の長男)が、徳川幕府に、間五郎兵衛(=間重新<sup>かげやす</sup>、重富の長男)への天気儀(=気圧計、晴雨計)と気候儀(=温度計)の貸し出しを願い出た文書<sup>6)</sup>が残っている。これは江戸後期に活躍した天文方の実力を知る貴重な資料であると思うので、少し長いですが、その現代語の要約(拙訳)を紹介しておく。まず、大気差とは何か、その測定する必要性、測定用器具などについて説いた部分である。「測量家は常に心する品に濛気差と申すものがあります。これは地より発する蒸気にて、霧<sup>もや</sup>・霧のように、国々の土地にしたがってこの厚薄があります。普通、南地は薄く、北地は濃いものでありますが、山海江河の有無に従って厚薄となります。この濛気厚濃の地では星月はこのために真高より高く見えます。もっとも、その厚薄によって昇降度、視差の数の多寡があります。たとえば、月の出などは実の時刻より早く出て、または実の時刻より遅く入ります。これは皆濛気のなすところです。土地

にしたがってこの濛気差を測っておかなければ、推歩(=天体の運行の観察)と測量との比較は成り立たちません。これを測るには星月の測量は勿論、右の天気儀、気候儀ならびに乾燥儀(=湿度計)をもって、空気の清濁、軽重、乾湿などを日々験記の上、双方を合考・校算して求めることができます。技術的にはなかなしく精器精測なくては、容易に求められるものではありません。この儀、年来心がけておりました処、右3儀のうち天気儀が入手できませんでした。その段1818年、和蘭よりお取寄せいただき、私へお預けなされましたことに付き、そのおり、ただ今これ日々測驗しております。そうしてご当地(=江戸)の濛気差を測量するには事足りすけれども、京都・大坂にはこの様な精器がありませんゆえ、いまだ実測してはおりません」。

これに続いて、間五郎兵衛への気圧計と温度計の貸し出しを願い出た部分を紹介しておく。「しかるところ、今度間五郎兵衛が伺い出府し、対面いたし、濛気差測量の話にも及びました。同人は父以来大坂にて測量御用をあい勤めおりますので、できれば大坂においても濛気差を測驗したいと申しております。そういうわけで、私のお預かりしている天気儀2器のうち1器、気候儀3器のうち1器を3、4カ年の間間五郎兵衛へお預けいただきますようお願いいたします。尤も2器ともに年来役所にて測ってきた品であります。ただ蜜製精巧の品ゆえに、この器が無ければご当地とこれを比較することはできません。よってこの段お伺いいたします」。間重新は大坂において、温度、気圧の測定のほか、天気模様、雲の有無、空気の清濁の記録を残している。江戸や大坂での観測結果が濛気差研究の資料として使われたかは不明であるという<sup>6)</sup>。

ここで、簡単な大気層モデル<sup>7)</sup>を考えて大気差を求めてみる。すなわち、地表面は平らで、大気層は上層ほど屈折率は小さくなる平行な薄い各層からなると仮定する(図1参照)。j層の屈折率を $n_j$ 、屈折角を $\theta_j$ とすると、屈折の法則から、jの値にかかわらず $n_j \sin \theta_j$ は一定となる。大気圏外と地上での屈折率を1と $n$ とする。注目した天体の真の高度(=真高度)を $h_0$ 、見かけの高度(=視高度)を $h$ とすれば、 $\sin(90^\circ - h_0) = n \sin(90^\circ - h)$ となる。大気差は $R = h_0 - h$ であり、 $|R| \ll 1$ の近似では、

$$R = (n-1) \tan(90^\circ - h) \quad (1)$$

$n=1.000219$ では、 $R$ は度分秒で表すと

$$R(\text{秒}) = 58'' \tan(90^\circ - h) \quad (2)$$

この値を表1の第5列に示す<sup>7)</sup>。これは $h > 30^\circ$ であれば

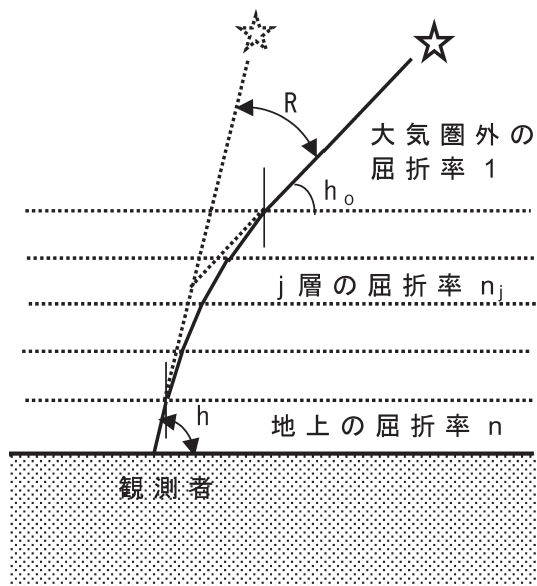


図1 平らな地表面に平行な多数の大気層よりなるモデルによる大気差  $R$  の説明.  $R = h - h_0$  ( $h$ : 視高度,  $h_0$ : 真高度).

ラドーの値との差はたかだか  $1''$  である.

さて、高橋景保が天気儀と気候儀の貸し出しを願い出た文書に戻って、その内容を若干吟味してみたい。「測量家は常に心ずる品に濛気差と申すものがある。これは地より発する蒸気にて云々」とあるように、高橋景保はプトレマイオスと同じく大気差の原因は水蒸気にあると考えていたが、実際には乾燥空気いりおもての分圧に比べて水蒸気いりおもての分圧は小さく、水蒸気の影響は無視できる。

「天気儀、気候儀ならびに乾燥儀をもって、空氣の清濁、輕重、乾湿などを日々驗記の上、双方を合考・校算して求めることができます」と述べている。地球を包む大気層では、地上での屈折率  $n-1$  はそこでの大気密度  $\rho$  に比例する。すなわち、 $n-1 \propto \rho$ 。  $\rho$  はそこでの大気圧  $P$  に比例し、温度  $273+T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) に反比例するので、 $n-1 \propto P/(273+T)^2$  となる。大気差の測定には、天気儀（気圧計）と気候儀（温度計）を用いるが、水蒸気の屈折率への影響は無視でき、乾燥儀（=湿度計）の必要性はない。密度  $\rho$  はその土地の重力加速度を考慮した気圧と温度で決まる。理科年表によると、重力加速度は沖繩県の西表島いりおもてで  $9.7901$  (N/kg)、北海道の稚内で  $9.8064$  (N/kg) であり<sup>4)</sup>、重力加速度は緯度が高くなるにつれて大きい。空氣の密度  $\rho$  は地表面上空へゆくにしたがって低くなり、屈折率は小さくなり  $1$  に近づく。「普通は南地は薄く、北地は濃いものでありますが云々」ということは、緯度の高い北の

表1 チコ、カシーニ、ラドーの測定した大気差。

視高度 $h$	濛 気 差			式 (2)
	チコ	カシーニ	ラドー	
$0^{\circ}$	$34'00''$	$32'20''$	$34'23''$	$\infty$
$5^{\circ}$	$14'30''$	$10'32''$	$9'48''$	$11'03''$
$10^{\circ}$	$10'00''$	$5'28''$	$5'17''$	$5'29''$
$15^{\circ}$	$7'30''$	$3'38''$	$3'33''$	$3'36''$
$20^{\circ}$	$4'30''$	$2'39''$	$2'38''$	$2'39''$
$25^{\circ}$	$2'30''$	$2'06''$	$2'03''$	$2'04''$
$30^{\circ}$	$1'25''$	$1'42''$	$1'40''$	$1'40''$
$45^{\circ}$	$0'05''$	$0'59''$	$0'58''$	$0'58''$
$60^{\circ}$	—	$0'34''$	$0'33''$	$0'33''$
$75^{\circ}$	—	$0'16''$	$0'16''$	$0'16''$
$90^{\circ}$	—	$0'00''$	$0'00''$	$0'00''$

文献 3), 4) より転載

地方では、普通は温度が低く重力加速度が大きくなるから、 $\rho$  が高く屈折率が大きくなる。したがって北ほど大気差が大きくなると考えられるからである。

また「月の出などは実の時刻より早く出て、または実の時刻より遅く入ります。云々」について、実の時刻とは（大気がないとした場合に）月の中心が地平にある時をさす。地平の大気差は  $34'$ （表1の視高度  $0$  のラドーの値）であり、月の視直径  $31'$  よりも大きい値であるので、月の出は月の中心が地平にある実の時刻よりも、高度に換算して  $34'$  前に月が出ることになる。月の没も同様に説明される。

江戸後期におけるわが国の天文学といえば、曆算中心の天文学であった。しかし、観測データを利用して正確な曆を作るには、わが国ではまだ知られていなかった地球の大きさやその形状を知る必要があった。そのために測天量地に濛気差までも考慮していたふしがあることに、驚きを新たにせざるをえない。

## 文 献

- 1) G. ガモフ著、鎮目恭一、野上茂吉郎訳：1 物理の伝記。物理学の探検（白楊社、1992）。
- 2) ダンネマン著、安田徳太郎訳編：大自然科学史2（三省堂、1977）。
- 3) 藪内 清：中国の天文曆法。第一部中国の天文曆法（平凡社、1973）21-176。
- 4) 国立天文台編：理科年表（丸善、2003）。
- 5) 渡邊一郎：伊能測量隊まかり通る、第3章（NTT出版、1997）73-112。
- 6) 渡辺敏夫：近世日本天文学史下、第13章（恒星社厚生閣、1987）847-855。
- 7) 鈴木敬信：新天文学通論、第4章（地人書館、1971）33-45。