

# 天体の位置観測をする高校生や大学生のための易しい 大気差表の提案

## Easily available tables of atmospheric refraction for high school and college students observing celestial position

林 慶一

Keichi HAYASHI

甲南大学 理工学部 地学研究室

Geoscience Laboratory, Faculty of Science and Engineering, Konan University, Kobe 658-8501, Japan

(受理日 2019年7月22日)

**要旨:** 天体の位置を観測する際には、天体からの光が地球大気によって屈折するため、観測された高度は真高度よりも大きくなる。天文学の中で位置天文学が重視されていた時代や航海術で天文航法が中心となっていた時代には、観測高度を真高度に改正する方法は天文学や航海術の専門分野ではきちんと扱われてきた。しかし、天文学の中心が天体物理学となり航法がGPSなどの測位衛星システムを利用する時代になった現在、専門分野ではこの改正法が必要とされることはほとんどなくなり、専門書でも扱っているものは見当たらなくなってしまった。一方、高校生や大学生が天体の位置を観測する機会は、理科教育における主体的な探究活動が重視される中で以前よりも増えてきている。しかし、それらの研究発表では行った天体観測の精度に照らし合わせると大気差を考慮する必要がある場合でも、それがなされているものはほとんど見当たらない。この原因は、大気差を考慮しなければならないと認識しているにもかかわらず、その方法が日本語の文献やweb上では存在しないために、補正の方法がわからないという状況に置かれているからである。本論では、意欲的な探究を行う若い人達やその指導者のために、この困難を解消することを目的として、観測高度から真高度を求めための易しく使いやすい大気差表を作成して提供した。

**Abstract:** Atmospheric refraction has become less common in today's astronomy, because position astronomy is not important for many astronomers. Therefore there is hardly available tables that allows easy finding atmospheric refraction without troublesome calculations. Atmospheric refraction is, however, still essential knowledge in the astronomical observation as one of the activities of education. For high school and college students observing the position of the stars, planets, moon and sun, I created atmospheric refraction tables based on Radou's tables in the astronomical ephemeris published by Japan Coast Guard Marine Information Department in 2009. These tables and method can be viewed and downloaded at Konan University Repository.

**キーワード:** 大気差, 天体観測, 視高度, 真高度, 高校, 大学

**Key words:** atmospheric refraction, astronomical observation, apparent altitude, true altitude, high school, college

## 1. はじめに

高校生が行う天文分野の探究活動や教養・教職レベルで大学生が行う天文の実験では、天文台の大型望遠鏡を利用したり研究機関から入手したデータを利用するのではなく、自身で天体の位置を観測してそれに基づいて行われる探究がしばしば見られる。生徒や学生による自力で取得した基礎データからはじめるこのような探究は高く評価されるものである。しかし、このような地上からの観測で得られる天体の視位置は、地球大気による屈折によって低高度のものほど真位置よりも浮き上がって見えるので、ある程度の精度以上の観測結果には、大気差と呼ばれる分の角度を補正することが必要である。

## 2. 問題の所在

ところが、スーパーサイエンスハイスクールなどの質の高い高校生の探究活動においても、この補正の必要性は認識されているにもかかわらず、実際に補正が行われている例はほとんどない。このために、天体の位置や天体間の角距離、太陽や月の見え方についての観測が高い精度で行われているにもかかわらず、得られた数値から実際の自然現象をうまく説明できず、「今後の課題」となっていることが少なくない。

また、大学で開設されている基礎的な地学実験の科目では、天文分野の実験として天体観測が行われることが多いが、その内容は現代天文学の高度な機器を用いた天体観測よりも、小型の赤道儀式や経緯儀式の天体望遠鏡を用いた観測が一般的である。これは、高度な機器は一部の大学にしかなく利用が難しいこと、この科目が高等学校までの天文分野の学習の上に位置する基礎的な事柄を通常の機器を用いた実験を通して学ぶ性格を持っていること、多くの学生が理科教員の免許を取得する目的で履修しており、学校現場で用いられる地平座標や赤道座標に関して実験的に理解するための科目でもあるということなどが理由となっている。しかし、実際に観測される天体の位置は上記のように大気差による補正を行うことが必要であり、すべての観測値（視高度）はこの補正を行って真高度に変換した後に、次の処理過程に回される。この補正を行うための精度の高い資料は、位置天文学が天文学の中心であった頃とは異なり、現在では入手することがほとんど困難となってしまう。

## 3. 甲南大学での大気差補正の方法

甲南大学理工学部の学部共通科目「地学実験」も他大学と同様な性格の科目であり、そのために天文分野の実験として天体の位置を観測することから出発する2種類（任意の天体の地平座標での観測と赤道座標への変換、異なる方位の3天体の高度から観測地の緯度/経度を求めるサムナー法）の実験を行っている。これらの実験では、天体望遠鏡を用いた一般的な“観察”を行いながら、経緯儀（セオドライト）を用いて高度や方位角をそれぞれ $20''$ 角の精度で“観測”を行っている（図1）。このため、この精度に対応して高度に関しては $70^\circ$ （この高度での大気差は約 $22''$ ）までの天体について大気差補正を行わなければならない。 $10''$ 角のレベルの精度での大気差の資料としては、2009年度まで発行されていた海上保安庁海洋情報部発行の「天体位置表」に掲載された詳細な表と計算法を用いてきた。

しかし、この「天体位置表」は2010年に廃刊となってしまい、新たに入手することはできなくなった。甲南大学では実験に不可欠であることから毎年購入して

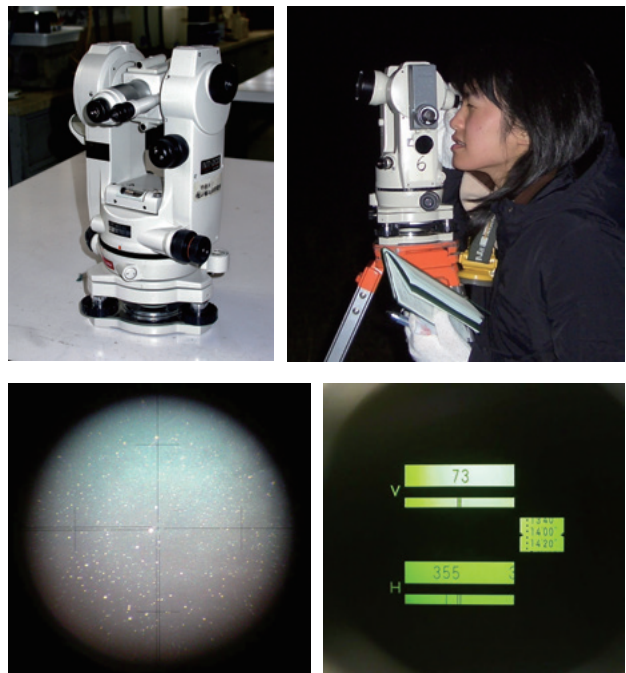


図1 経緯儀（セオドライト）と観測（上）

望遠鏡内の視野と方位角/高度の読み取り窓（下）

きたため現在でも 2010 年までの版が手元にあり、その表を利用して実験を継続することができている。この書誌は天文航法を念頭に置いて印刷されていたもので、ISBN の付されていない特殊な出版物で毎年数百部しか発行されなかったこともあり、現在図書館の文献検索等を通して入手することも困難となっている。

#### 4. 視高度・気温・気圧による大気差を概観できる表の必要性

このような事情から、現在あるいはこれから信頼できる大気差の資料を入手したいという状況に置かれた、主体的な探究活動に取り組む高校生や大学の実験に取り組む学生とそれを指導する教員にとっては、その方法がないという困難な状況になっている。気温や気圧を既定値に固定した上でのおよその数値であれば理科年表（国立天文台編，2018）の簡単な表を使うことも可能であり、数学的な処理能力が高ければ何種類か考案されている近似計算式（山田，2013 など）を使うこともできる。しかし、あらゆる高度の天体についてさまざまな温度・気圧条件下で、難しい計算をすることなく高精度の大気差を知ることができ、しかも視高度や気温、気圧による影響の大きさやその変化傾向を概観することのできる表は、大多数の人々にとって圧倒的な利便性を持つ。

そこで、本稿では直接観測を行う高校生や大学生やその指導を行う教員のために、任意の高度（天頂距離）の天体についての大気差を、標準状態の表に加えて、気温・大気圧による補正まで行うことのできる表についても提供する。具体的には、2010 版を最後に現在では入手できなくなった海上保安庁海洋情報部編纂の「天体位置表」から、大気差に関するデータを抽出してより利用しやすいものに改変した。

なお「天体位置表」に記されていた天体の位置に関する数値に対しては、物理学の高度に発展した理論からは信頼性に僅かな疑義があったが、大気差に関してはそれらの影響を受けないので現在でも十分に信頼できる数値となっている。また、ここで提示した表については、それらから初心者でも大気差を求められるように、具体的な利用方法も説明する。

### 5. 大気差表とその利用法

#### 5.1 標準状態の大気差表

表 1 は標準状態の大気（緯度  $45^\circ$ ，標高 0 m，気温  $0^\circ\text{C}$ ，水銀蒸気圧 760 mm=1013.25 hPa），水蒸気圧 6 mm）における大気差表で、1979 年版のフランス暦に示されたものを海上保安庁が「天体位置表」（2010 年版）に簡約して掲載したものを元に、次のような改良を行った。

- (1) 視高度，大気差，視高度  $10'$  ごとの差分の単位が 1 行目以外は省略されて数字列になっていたのを，すべての数字に  $^\circ$ ， $'$ ， $''$  の単位を付すことで，該当行だけで各欄の数値をミスなく読み取れるようにした。
- (2) 視高度が  $18^\circ$  までは  $10'$  ごとに， $25^\circ$  までは  $20'$  ごとに  $31^\circ$  までは  $30'$  ごとに， $54^\circ$  までは  $1^\circ$  ごとに，それ以降は  $2^\circ$  ごとに，合計 190 行にわたって 6 行区切りで大気差が示されていたのを，視高度の区切りの良い数値の行（ $1^\circ 00' \cdots 25^\circ 00' \cdots$  など）の数値のみをゴチックにすることで，目的の行を見つけやすくした。

高層の大気は状態が大きく変化することは少なく，標準的な状態から多少のずれが生じる程度なので，精度がそれほど高くない観測では，通常の大気差の計算は標準的な大気によって計算される。

この表は次のように利用する。まず，① 観測した天体の視高度に最も近い小さい方の数値を第 1 列（左列）で探し，次に ② その行の第 2 列（中央列）でその視高度における大気差を確認し，③ この表を使うために①で一旦切り捨てた視高度の端数分の大気差を第 3 列（右列）の  $10'$  ごとの差分から計算して，最後に ④ その値を中央列の値から引く。これらの中でやや面倒な③について詳しく説明すると，まず視高度の端数のうち  $''$  単位の部分を 60 で割って  $'$  単位の小数に換算して， $'$  単位の端数に加えて  $0.00'$  する。次に，第 3 列には視高度  $10'$  ごとの大気差の差分が示されているので，この数値に  $0.00' / 10'$  をかければよい。

（例）視高度  $12^\circ 43' 20''$  の場合で具体的に示すと，次のようになる。

$$4' 21.9'' \text{ (第 1 列の } 12^\circ 40' \text{ の行の第 2 列の大気差の値)} - 3.4'' \text{ (視高度 } 12^\circ 40' \text{ と } 12^\circ 50' \text{ 大気差の差分を示した第 3 列の値)} \times (3' + 0.33') / 10'$$



I 表 標準状態\*の大気差表 (ラド-) \*\*  
Radau's Refraction (Standard Conditions)

視高度 App. Alt.	大気差 Ref.	差/10'	視高度 App. Alt.	大気差 Ref.	差/10'	視高度 App. Alt.	大気差 Ref.	差/10'	視高度 App. Alt.	大気差 Ref.	差/10'
<b>-1° 00'</b>	<b>56' 27.5"</b>		<b>7° 00'</b>	<b>7' 39.3"</b>		<b>15° 00'</b>	<b>3' 41.0"</b>		<b>31° 00'</b>	<b>1' 39.7"</b>	
-0° 50'	52' 13.8"	253.7"	7° 10'	7' 29.7"	9.6"	15° 10'	3' 38.5"	2.47"	32° 00'	1' 35.9"	0.64"
-0° 40'	48' 25.5"	228.3"	7° 20'	7' 20.4"	9.3"	15° 20'	3' 36.1"	2.43"	33° 00'	1' 32.3"	0.60"
-0° 30'	45' 00.0"	205.5"	7° 30'	7' 11.5"	8.9"	15° 30'	3' 337"	2.37"	34° 00'	1' 28.9"	0.57"
-0° 20'	41' 54.7"	185.3"	7° 40'	7' 03.0"	8.5"	15° 40'	3' 31.4"	2.33"	<b>35° 00'</b>	<b>1' 25.6"</b>	0.54"
-0° 10'	39' 07.3"	167.4"	7° 50'	6' 54.7"	8.3"	15° 50'	3' 29.1"	2.28"	36° 00'	1' 22.6"	0.52"
		151.3"			7.9"			2.23"			0.49"
<b>0° 00'</b>	<b>36' 36.0"</b>		<b>8° 00'</b>	<b>6' 46.8"</b>		<b>16° 00'</b>	<b>3' 26.9"</b>		<b>37° 00'</b>	<b>1' 19.6"</b>	
0° 10'	34' 18.8"	137.2"	8° 10'	6' 39.1"	7.7"	16° 10'	3' 24.7"	2.19"	38° 00'	1' 16.8"	0.47"
0° 20'	32' 14.2"	124.6"	8° 20'	6' 31.7"	7.4"	16° 20'	3' 22.6"	2.15"	39° 00'	1' 14.1"	0.45"
0° 30'	30' 20.9"	111.3"	8° 30'	6' 24.6"	7.1"	16° 30'	3' 20.4"	2.11"	<b>40° 00'</b>	<b>1' 11.5"</b>	0.43"
0° 40'	28' 37.6"	103.3"	8° 40'	6' 17.7"	6.9"	16° 40'	3' 18.4"	2.07"	41° 00'	1' 09.0"	0.41"
0° 50'	27' 03.3"	94.3"	8° 50'	6' 11.0"	6.7"	16° 50'	3' 16.3"	2.03"	42° 00'	1' 06.7"	0.40"
		86.3"			6.5"			2.00"			0.38"
<b>1° 00'</b>	<b>25' 37.0"</b>		<b>9° 00'</b>	<b>6' 04.5"</b>		<b>17° 00'</b>	<b>3' 14.3"</b>		<b>43° 00'</b>	<b>1' 04.4"</b>	
1° 10'	24' 17.8"	79.2"	9° 10'	5' 58.3"	6.2"	17° 10'	3' 12.4"	1.95"	44° 00'	1' 02.2"	0.37"
1° 20'	23' 05.1"	72.7"	9° 20'	5' 52.2"	6.1"	17° 20'	3' 10.5"	1.93"	<b>45° 00'</b>	<b>1' 00.0"</b>	0.36"
1° 30'	21' 58.2"	66.9"	9° 30'	5' 46.3"	5.9"	17° 30'	3' 08.6"	1.89"	46° 00'	0' 58.0"	0.35"
1° 40'	20' 56.4"	61.8"	9° 40'	5' 40.6"	5.7"	17° 40'	3' 06.7"	1.86"	47° 00'	0' 56.0"	0.33"
1° 50'	19' 59.4"	57.0"	9° 50'	5' 35.1"	5.5"	17° 50'	3' 04.9"	1.82"	48° 00'	0' 54.1"	0.32"
		52.8"			5.3"			1.79"			0.31"
<b>2° 00'</b>	<b>19' 06.6"</b>		<b>10° 00'</b>	<b>5' 29.8"</b>		<b>18° 00'</b>	<b>3' 03.1"</b>		<b>49° 00'</b>	<b>0' 52.2"</b>	
2° 10'	18' 17.6"	49.0"	10° 10'	5' 24.6"	5.2"	18° 20'	2' 59.6"	1.75"	<b>50° 00'</b>	<b>0' 50.4"</b>	0.30"
2° 20'	17' 32.1"	45.5"	10° 20'	5' 19.6"	5.0"	18° 40'	2' 56.2"	1.69"	51° 00'	0' 48.6"	0.29"
2° 30'	16' 49.7"	42.4"	10° 30'	5' 14.7"	4.9"	19° 00'	2' 53.0"	1.63"	52° 00'	0' 46.9"	0.29"
2° 40'	16' 10.2"	39.5"	10° 40'	5' 09.9"	4.8"	19° 20'	2' 49.8"	1.57"	53° 00'	0' 45.3"	0.28"
2° 50'	15' 33.3"	36.9"	10° 50'	5' 05.3"	4.6"	19° 40'	2' 46.8"	1.52"	54° 00'	0' 43.6"	0.27"
		34.5"			4.5"			1.47"			0.26"
<b>3° 00'</b>	<b>14' 58.8"</b>		<b>11° 00'</b>	<b>5' 00.8"</b>		<b>20° 00'</b>	<b>2' 43.8"</b>		<b>56° 00'</b>	<b>0' 40.5"</b>	
3° 10'	14' 26.5"	32.3"	11° 10'	4' 56.4"	4.4"	20° 20'	2' 40.9"	1.42"	58° 00'	0' 37.5"	0.25"
3° 20'	13' 56.2"	30.3"	11° 20'	4' 52.2"	4.2"	20° 40'	2' 38.1"	1.39"	<b>60° 00'</b>	<b>0' 34.7"</b>	0.24"
3° 30'	13' 27.7"	28.5"	11° 30'	4' 48.1"	4.1"	21° 00'	2' 35.4"	1.35"	62° 00'	0' 32.0"	0.23"
3° 40'	13' 00.9"	26.8"	11° 40'	4' 44.0"	4.1"	21° 20'	2' 32.8"	1.32"	64° 00'	0' 29.3"	0.22"
3° 50'	12' 35.6"	25.3"	11° 50'	4' 40.1"	3.9"	21° 40'	2' 30.3"	1.28"	66° 00'	0' 26.8"	0.21"
		23.8"			3.8"			1.24"			0.21"
<b>4° 00'</b>	<b>12' 11.8"</b>		<b>12° 00'</b>	<b>4' 36.3"</b>		<b>22° 00'</b>	<b>2' 27.8"</b>		<b>68° 00'</b>	<b>0' 24.3"</b>	
4° 10'	11' 49.3"	22.5"	12° 10'	4' 32.6"	3.7"	22° 30'	2' 24.2"	1.20"	<b>70° 00'</b>	<b>0' 21.9"</b>	0.20"
4° 20'	11' 28.1"	21.2"	12° 20'	4' 28.9"	3.7"	23° 00'	2' 20.7"	1.15"	72° 00'	0' 19.5"	0.19"
4° 30'	11' 08.0"	20.1"	12° 30'	4' 25.4"	3.5"	23° 30'	2' 17.4"	1.09"	74° 00'	0' 17.2"	0.19"
4° 40'	10' 48.9"	19.1"	12° 40'	4' 21.9"	3.5"	24° 00'	2' 14.3"	1.05"	76° 00'	0' 15.0"	0.19"
4° 50'	10' 30.7"	18.2"	12° 50'	4' 18.5"	3.4"	24° 30'	2' 11.2"	1.02"	78° 00'	0' 12.8"	0.18"
		17.2"			3.3"			0.98"			0.18"
<b>5° 00'</b>	<b>10' 13.5"</b>		<b>13° 00'</b>	<b>4' 15.2"</b>		<b>25° 00'</b>	<b>2' 08.3"</b>		<b>80° 00'</b>	<b>0' 10.6"</b>	
5° 10'	9' 57.2"	16.3"	13° 10'	4' 12.0"	3.2"	25° 30'	2' 05.4"	0.94"	82° 00'	0' 08.5"	0.18"
5° 20'	9' 41.6"	15.6"	13° 20'	4' 08.9"	3.1"	26° 00'	2' 02.7"	0.91"	84° 00'	0' 06.3"	0.18"
5° 30'	9' 26.7"	14.9"	13° 30'	4' 05.8"	3.1"	26° 30'	2' 00.0"	0.88"	86° 00'	0' 04.2"	0.18"
5° 40'	9' 12.5"	14.2"	13° 40'	4' 02.8"	3.0"	27° 00'	1' 57.5"	0.85"	88° 00'	0' 02.1"	0.18"
5° 50'	8' 59.0"	13.5"	13° 50'	3' 59.8"	3.0"	27° 30'	1' 55.0"	0.82"	<b>90° 00'</b>	<b>0' 00.0"</b>	0.18"
		12.9"			2.8"			0.80"			
<b>6° 00'</b>	<b>8' 46.1"</b>		<b>14° 00'</b>	<b>3' 57.0"</b>		<b>28° 00'</b>	<b>1' 52.6"</b>				
6° 10'	8' 33.8"	12.3"	14° 10'	3' 54.2"	2.8"	28° 30'	1' 50.3"	0.77"			
6° 20'	8' 21.9"	11.9"	14° 20'	3' 51.4"	2.8"	29° 00'	1' 48.0"	0.75"			
6° 30'	8' 10.6"	11.3"	14° 30'	3' 48.7"	2.7"	29° 30'	1' 45.9"	0.72"			
6° 40'	7' 59.7"	10.9"	14° 40'	3' 46.1"	2.6"	<b>30° 00'</b>	<b>1' 43.8"</b>	0.70"			
6° 50'	7' 49.3"	10.4"	14° 50'	3' 43.5"	2.6"	30° 30'	1' 41.7"	0.68"			
		10.0"			2.5"			0.66"			
7° 00'	7' 39.3"		15° 00'	3' 41.0"		31° 00'	1' 39.7"				

\*緯度45°，高度0m，気温0°C，水銀気圧760mm (=1013.25hPa)，水蒸気圧6mm (=8.00hPa)。

\*\*本表の数値は、1979年版のフランス暦に示されたものを海上保安庁が天体位置表 (2010年版) に簡約して掲載したものを引用した。

表1 標準状態の大気差表

このようにして求められた大気差に対して、気温と気圧による改正を施す必要があり、それらについて次に記す。なお、気温による改正がより大きな改正になるという意味で第1改正とするのに対して、気圧による改正は第2改正と呼ばれる。

## 5.2 気温による改正（第1改正）

表2は気温が標準状態の0℃からずれていることによって生じる大気差の値を示したもので、5.1の標準状態で求められた値に改正すべき値である。前記の海上保安庁の「天体位置表」（2010年版）を元に、次のような改良を行った。

- (1) 気温、視高度、大気差改正値の単位が1行目以外は省略されて数字列になっていたのを、すべての数字に単位を付すことで、該当行だけで大きさを読み取れるようにした。
- (2) 大気差改正値は+になる場合と-になる場合があるが、「天体位置表」では、4行区切りの最初の行にだけ+,-の符号が示されていたのを、すべての数値に付すことで、初心者が符号のない-の数値を+と読み誤ることのないようにした。
- (3) 元の表の右端の列には、左の表が使えないような気温や厳密な改正値を得たい場合の計算に用いる引数だが、気温ごとに示されていたが、後記のように簡単な計算によって求まるものなので省略した。

大気差改正表（第1改正）

Radau's Refraction (1st. correction)

気温 Temperatur	視高度 App. Alt														
	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	15°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
-20℃	+91"	+70"	+57"	+47"	+41"	+36"	+32"	+28"	+19"	+14"	+9"	+6"	+4"	+3"	+2"
-15℃	+67"	+51"	+42"	+35"	+30"	+26"	-23"	+21"	+14"	+10"	+6"	+4"	+3"	+2"	+1"
-10℃	+43"	+34"	+27"	+23"	+20"	+17"	+15"	+14"	+9"	+7"	+4"	+3"	+2"	+1"	+1"
-8℃	+34"	+27"	+22"	+18"	+16"	+14"	+12"	+11"	+7"	+5"	+3"	+2"	+2"	+1"	+1"
-6℃	+26"	+20"	+16"	+13"	+12"	+10"	+9"	+8"	+5"	+4"	+2"	+2"	+1"	+1"	+1"
-4℃	+17"	+13"	+11"	+9"	+8"	+7"	+6"	+5"	+4"	+3"	+2"	+1"	+1"	+1"	0"
-2℃	+8"	+7"	+5"	+4"	+4"	+3"	+3"	+3"	+2"	+1"	+1"	+1"	0"	0"	0"
0℃	0"	0"	0"	0"	0"	0"	0"	0"	0"	0"	0"	0"	0"	0"	0"
2℃	-8"	-6"	-5"	-4"	-4"	-3"	-3"	-3"	-2"	-1"	-1"	-1"	0"	0"	0"
4℃	-16"	-13"	-10"	-9"	-7"	-7"	-6"	-5"	-3"	-3"	-2"	-1"	-1"	-1"	0"
6℃	-24"	-19"	-15"	-13"	-11"	-10"	-9"	-8"	-5"	-4"	-2"	-2"	-1"	-1"	-1"
8℃	-32"	-25"	-20"	-17"	-15"	-13"	-11"	-10"	-7"	-5"	-3"	-2"	-2"	-1"	-1"
10℃	-40"	-31"	-25"	-21"	-18"	-16"	-14"	-13"	-8"	-6"	-4"	-3"	-1"	-1"	-1"
12℃	-48"	-37"	-30"	-25"	-22"	-19"	-17"	-15"	-10"	-7"	-5"	-3"	-2"	-2"	-1"
14℃	-55"	-43"	-35"	-29"	-25"	-22"	-19"	-17"	-12"	-8"	-5"	-4"	-3"	-2"	-1"
16℃	-63"	-49"	-40"	-33"	-28"	-25"	-22"	-20"	-13"	-10"	-6"	-4"	-3"	-2"	-1"
18℃	-70"	-54"	-44"	-37"	-32"	-28"	-25"	-22"	-15"	-11"	-7"	-5"	-3"	-2"	-1"
20℃	-77"	-60"	-49"	-41"	-35"	-31"	-27"	-24"	-16"	-12"	-7"	-5"	-4"	-3"	-2"
22℃	-84"	-65"	-53"	-45"	-38"	-33"	-30"	-27"	-18"	-12"	-8"	-6"	-4"	-3"	-2"
24℃	-91"	-71"	-58"	-48"	-41"	-36"	-32"	-29"	-19"	-14"	-9"	-6"	-4"	-3"	-2"
26℃	-98"	-76"	-62"	-52"	-45"	-39"	-35"	-31"	-20"	-15"	-10"	-7"	-5"	-3"	-2"
28℃	-105"	-81"	-66"	-55"	-48"	-42"	-37"	-33"	-22"	-16"	-10"	-7"	-5"	-3"	-2"
30℃	-111"	-87"	-70"	-59"	-51"	-44"	-39"	-35"	-23"	-17"	-11"	-7"	-5"	-4"	-2"
32℃	-118"	-92"	-75"	-63"	-54"	-47"	-42"	-38"	-25"	-18"	-11"	-8"	-6"	-4"	-2"
34℃	-125"	-97"	-79"	-66"	-57"	-50"	-44"	-40"	-26"	-19"	-12"	-8"	-6"	-4"	-3"
36℃	-131"	-102"	-83"	-69"	-60"	-52"	-46"	-42"	-27"	-20"	-13"	-9"	-6"	-4"	-3"
38℃	-137"	-107"	-87"	-73"	-62"	-55"	-49"	-44"	-29"	-21"	-13"	-9"	-6"	-4"	-3"
40℃	-143"	-112"	-91"	-76"	-65"	-57"	-51"	-46"	-30"	-22"	-14"	-10"	-7"	-5"	-3"

表2 気温による大気差改正表

表 2 は、次のように利用する。横軸に視高度、縦軸に気温が、飛び飛びの値で示されているので、それぞれについて観測値を挟む 2 つの改正値 4 つを見て、按分して数値を求める。ただし、観測機器の精度が多くの場合 20" 程度以上であることを考慮すると、それほど厳密な計算は必要ないことがわかる。本稿を利用しようとする観測者は、零下や 40°C を超えるような気温条件下で観測することはほとんどないと思われるので、この表により改正値を求めることができる。

また、数° 以下の視高度では大気吸収による減光が大きくなるため、恒星を観測することは少ないと考えられるが、太陽や月・明るい惑星の場合には数° 以下の視高度での観測も考えられる。したがって、このような場合の改正値は表の左下では 2' を越えていることから、高度測定の精度が 2' 以下の観測機器を使用する場合は、この改正が必要であることを意味する。方位角や高度を測定する際に用いる経緯儀（セオドライト）では 20" 程度の精度があるので、この気温による改正は、一般的にも考慮する必要がある。

表 2 の -20°C ~ +40°C の範囲外の気温や、さらに厳密な気温改正値を得たい場合には、次の方法で計算できる。標準状態の大気差を  $R_0$ 、気温を  $t$  とすると、

$$\text{気温による改正値 } R_1 = R_0 + R_0 A \alpha (1 + 0.00367 t) / (1 + \kappa t) \quad \text{-----} \quad \text{①}$$

ここで、 $A = (-0.00383 t) / (1 + 0.00367 t)$  で、 $\alpha$  および  $\kappa$  は表 3 に掲げた値である。

式で計算する場合の引数： $\alpha$  と  $\kappa$

視高度 App. Alt.	-1°	-0°	1°	2°	4°	6°	8°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
$\alpha$	2.053	1.677	1.444	1.299	1.152	1.087	1.055	1.037	1.017	1.009	1.005	1.004	1.002	1.002
$\kappa$	0.00688	0.00554	0.00475	0.00429	0.00392	0.00378	0.00373	0.00367						

表 3 気温による改正を式で計算する場合の引数

なお、視高度 10° 以上では、 $\kappa = 0.00367$  となるため、①式は、

$$R_1 = R_0 + R_0 A \alpha \quad \text{-----} \quad \text{②}$$

となり、さらに視高度 45° 以上では、 $\alpha = 1$  となるため、①式はさらに、

$$R_1 = R_0 + R_0 A \quad \text{-----} \quad \text{③}$$

となる。

(例) 上記の例の視高度 12° 43' 20" (ここでは' 単位以下を四捨五入して 13° としよ) の天体の観測を行ったときの気温が 15°C であれば、第 1 改正は次のようになる。

-17" (14°C, 10° の値) と -12" (14°, 15° の値) から、-14" (14°C, 13° )  
 -20" (16°C, 10° の値) と -13" (16°, 15° の値) から、-16" (16°C, 13° )

したがって、-15" (15°C, 13° ) となる。

### 5.3 気圧による改正 (第 2 改正)

表 4 は気温が標準状態の 1 気圧からずれていることによって生じる大気差の値を示したもので、5.1 の標準状態で求められた値に改正すべき値である。前記の海上保安庁の「天体位置表」(2010 年版) を元に、表 2 の場合と同様に、すべての数字に単位を付し、+ または - の符号を付け加える改良を行なった。また、元の表の右端の列には、左の表が使えないような気温や厳密な改正値を得たい場合の計算に用いる引数が、気圧ごとに示されていたが、下に記すように簡単な計算によって求まるので省略した。



大気差改正表 (第2改正)

Radau's Refraction (2nd. correction)

気圧 Atm. Pre.	視高度 App. Alt.														
	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	15°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
980 hPa	-30"	-24"	-20"	-17"	-15"	-13"	-12"	-11"	-7"	-5"	-3"	-2"	-2"	-1"	-1"
985 hPa	-26"	-21"	-17"	-15"	-13"	-11"	-10"	-9"	-6"	-5"	-3"	-2"	-1"	-1"	-1"
990 hPa	-21"	-17"	-14"	-12"	-11"	-9"	-8"	-8"	-5"	-4"	-2"	-2"	-1"	-1"	-1"
995 hPa	-17"	-13"	-11"	-10"	-8"	-7"	-7"	-6"	-4"	-3"	-2"	-1"	-1"	-1"	0"
1000 hPa	-12"	-10"	-8"	-7"	-6"	-5"	-5"	-4"	-3"	-2"	-1"	-1"	-1"	0"	0"
1005 hPa	-7"	-6"	-5"	-4"	-4"	-3"	-3"	-3"	-2"	-1"	-1"	-1"	0"	0"	0"
1010 hPa	-3"	-2"	-2"	-2"	-1"	-1"	-1"	-1"	-1"	-1"	0"	0"	0"	0"	0"
1015 hPa	+2"	+1"	+1"	+1"	+1"	+1"	+1"	+1"	0"	0"	0"	0"	0"	0"	0"
1020 hPa	+6"	+5"	+4"	+4"	+3"	+3"	+2"	+2"	+1"	+1"	+1"	0"	0"	0"	0"
1025 hPa	+11"	+9"	+7"	+6"	+5"	+5"	+4"	+4"	+3"	+2"	+1"	+1"	+1"	0"	0"
1030 hPa	+15"	+12"	+10"	+9"	+8"	+7"	+6"	+5"	+4"	+3"	+2"	+1"	+1"	+1"	0"
1035 hPa	+20"	+16"	+13"	+11"	+10"	+9"	+8"	+7"	+5"	+4"	+2"	+2"	+1"	+1"	0"
1040 hPa	+24"	+20"	+16"	+14"	+12"	+11"	+10"	+9"	+6"	+4"	+3"	+2"	+1"	+1"	+1"

表 4 気圧による大気差改正表

表 4 は、次のように利用する。横軸に視高度、縦軸に気圧が、飛び飛びの値で示されているので、それぞれについて観測値を挟む 2 つの改正値 4 つを見て、按分により数値を求める。ほとんどの場合に、この表により改正値の影響を見積もることができる。表からわかるように 1 気圧からの気圧のずれによる大気差への効果は気温による効果よりも 1 桁ほど小さく、観測機器の精度が多の場合 20" 程度以上であることを考慮すると、実際的には、地平線近くの太陽や月、明るい惑星を観測する場合に考慮する必要があるという程度である。

これをもう少し詳しく見てみると、方位角や高度を測定する際に用いる経緯儀 (セオドライト) では 20" 程度の精度があるので、これと同じ -20" を越える改正は、高度 3° という低い天体では 990hPa 以下になると必要であるが、高度 5° 以上の天体ならば 980hPa でも補正の必要はなくなる。通常の地上環境では視高度 10° 以下になると大気による吸光に加えて地上光の影響も大きくなっての天体観測が難しくなるので、実際に影響が出てくるのは例外的な観測の場合と言える。

一方、気圧が異常に高い 1035 hPa 以上という条件では、視高度が 5° 以下の天体を観測する場合に影響が出てくる。しかし、これも日本ではほとんど生じ得ない条件である。

このように影響が小さいことから、ほとんどの場合にこの表により改正値の影響を見積もることができるが、表の範囲外の気圧時や、さらに厳密な気圧改正値を得たい場合には、次の方法で計算できる。

大気圧を  $H$  (hPa) とし、まず  $B = H / 1013.25 - 1$  を求め、これを用いた次式で求まる。

$$\text{気圧による改正値 } R_2 = R_1 B \beta \text{ ----- ④}$$

ここで、 $R_1$  では 5.2 の気温による改正を施した大気差の値で、 $\beta$  は表 5 で  $R_1$  を引数として内挿により求めた値である。

式で計算する場合の引数:  $\beta$

第1校正後の大気差 Ref.	0'	5'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'
$\beta$	1	1.003	1.012	1.026	1.041	1.058	1.076	1.095	1.114	1.133	1.152	1.171	1.189

表 5 気圧による改正を式で計算する場合の引数

6. おわりに

本稿は甲南大学の機関リポジトリで web 上で公開することにより誰もがアクセスしてダウンロードできるようにしており、これによってこの大気差表が広く役立てられることを期待する。なお、ここに提示した大気差

表のデータは元々公開されていたものであり，利用にあたって本論文を引用していただくことを求めるものではない。

#### 参 考 文 献

海上保安庁海洋情報部編 (2009) 天体位置表. 日本水路協会, 485 p.+ 6s.

国立天文台編 (2018) 理科年表 2019 (平成 31 年). 丸善, **92**, 160.

山田 洋 (2013) 太陽の南中高度に関する大気差の影響～「平均大気差のオリジナル近似関数の計算結果について～. 天文教育, **25** (5), 11-14.