

# 曇天下の部分日食における日照及び気温変化の測定

鈴木 一将・清水 元気・伊藤 信成

## The Measurement of Sky Brightness and Air Temperature during Partial Solar Eclipse on Cloudy Weather

Kazumasa SUZUMURA, Genki SHIMIZU and Nobunari ITOH

### 要 旨

2009年7月22日、46年ぶりに日本の陸地で皆既日食が起き、日本の広い範囲で部分日食が観察された。三重県津市においても最大食分0.811の部分日食が予測されたため、三重大学構内で部分日食における日照変化を測定した。その結果、曇天下であっても部分日食による照度の低下が認められた。また津地方気象台の気温測定結果から、部分日食によるものと断定はできないものの、特異な気温低下傾向が確かめられた。さらに、本日食における観測の安全性について考察した結果、雲が厚く、可視域の光が遮光されているように感じる場合であっても、紫外域の光は十分遮光されているとは言えないことが分かった。

### 1. はじめに

2009年7月22日、日本の陸地で46年ぶりとなる皆既日食が奄美大島北部、トカラ列島、屋久島、種子島南部などで観察され、三重県でも部分日食が観察された。2009年は世界天文年<sup>a</sup>でもあり各地で日食の告知が積極的に行われ、また報道でも盛んに取り上げられたことから、多くの人が今回の日食を観察したと予想される。

日食観察を行う場合、強い太陽光から眼を保護するため、日食グラス等を用いることが強く推奨されている。雲が十分厚ければ、可視光が遮光され、日食グラスを使用せずとも欠けている太陽を見ることができる。しかし、紫外域及び赤外域の光が十分遮光されている保証はない。紫外域、赤外域の光が遮光されていなかった場合、太陽を直視することによって発症する日食網膜症など、眼への影響が懸念される。今回の日食が起こった2009年7月22日、三重県津市は曇天であると予測された。そこで、曇天下の日食における紫外域の照度の変化を測定し、雲の透過率から眼への影響を評価することを試みた。また、晴天時に比べ曇天下では変動が小さいと考えられる気温変化についても検出を

試みた。その結果について報告する。

### 2. 2009年7月22日に起きた日食の特徴

今回の日食は皆既食継続時間が6分44秒であり、今世紀最長であった。前回(2008年8月1日)の皆既食継続時間は2分30秒<sup>[1]</sup>であったので、今回は前回と比べ4分以上長くなっている。

皆既食継続時間の違いは、日食時の太陽及び月の視直径の違いによる。地球の軌道、月の軌道は楕円である。そのため、太陽、月と地球の距離は時刻により変化し、それに伴い見かけの大きさが変化する。皆既食継続時間が長くなるのは、日食の際、月がより大きく太陽がより小さく見える場合である。比較のため、今回の日食時と前回の日食時の太陽-地球間距離、月-地球間距離、及び太陽と月の見かけの視直径をTable 1に示す。

Table 1 日食時の見かけの視直径の違い

	2008.8.1	2009.7.22
太陽-地球距離 [km]	$1.523 \times 10^8$	$1.524 \times 10^8$
月-地球距離 [km]	$3.67 \times 10^5$	$3.58 \times 10^5$
太陽の視直径 [deg]	1.05	1.05
月の視直径 [deg]	1.09	1.11

a イタリアの科学者ガリレオ・ガリレイが初めて望遠鏡を夜空に向けた1609年から、400年の節目の年を記念し、国際連合、ユネスコ、国際天文学連合により定められた。

b 国立天文台天文情報センター暦計算室の計算による。  
<http://www.nao.ac.jp/koyomi/>

Table 1 より、今回の日食は前回に比べ、太陽は遠く、月は近くにあったことが分かる。そのため太陽の視直径はほぼ変化しないが、月の視直径は大きくなり、結果として長時間の皆既食となった。国立天文台の予測によれば、三重大学（三重県津市:北緯 34.733 度、東経 136.517 度）では、9:48:55 から食が始まり、11:07:28 に最大食分 0.811 となり、食の終わりは 12:27:02 であった<sup>1)</sup>。

### 3. 観測装置と測定方法

照度の測定には秋月電子通商のデジタル UV 計キット (K-00068) を用いた。UV 計の写真を Figure 1 に示す。図中矢印で示した部分が受光部であり、浜松ホトニクス製短波長タイプフォトダイオード (G 5842) を用いている。UV 計の仕様を Table 2 に示す。この UV 計は 260 nm-400 nm の紫外域に感度を持っているが、分光感度特性から算出した有効波長は、341 nm であった。測定は UV 計を三重大学講堂（三翠ホール）前の広場に設置して行い、各時刻の出力を記録した。

気温変化については津地方気象台の観測結果を用いた<sup>2)</sup>。

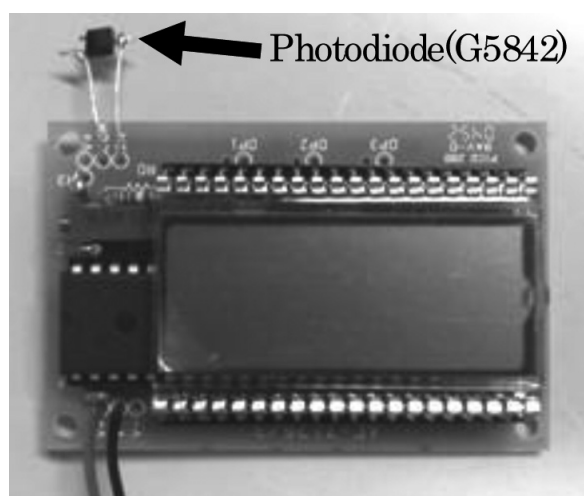


Figure 1 UV 計の写真。矢印で示した部分が受光部となるフォトダイオード。

Table 2 UV 計受光部の仕様

受光面サイズ	0.8 × 0.8 mm
感度波長域	260 - 400 nm
最大感度波長	370 nm
受光感度	0.06 A/W
上昇時間	3 μs

## 4. 結果

### 4-1. 気温変化

気温の変化を Figure 2 に示す。図中には比較のため 2009 年 7 月 6 日、7 月 17 日のデータもあわせて示す。比較に用いた 2 日は、日食当日である 7 月 22 日と同様、1 日の日照時間が 0 で、日食が起きた時間帯の風速が 5 m 以下であり、気温以外の気象条件は同等であると判断した。ただし、各日の平均気温は異なっていた。よって、日食時間帯の気温変化を比較しやすくするため、日食時間外である 9:00-9:20 及び 13:50-14:10 の気温について残差の二乗和が最小になるよう 7 月 6 日、7 月 22 日のデータを各々 +3℃、-1.4℃シフトしてある。

Figure 2 から、各日とも気温は上昇傾向を示すものの、日食開始から 1 時間以上経過した 10:50 より、7 月 22 日の気温は他の 2 日に比べ低い値で推移していることがわかる。

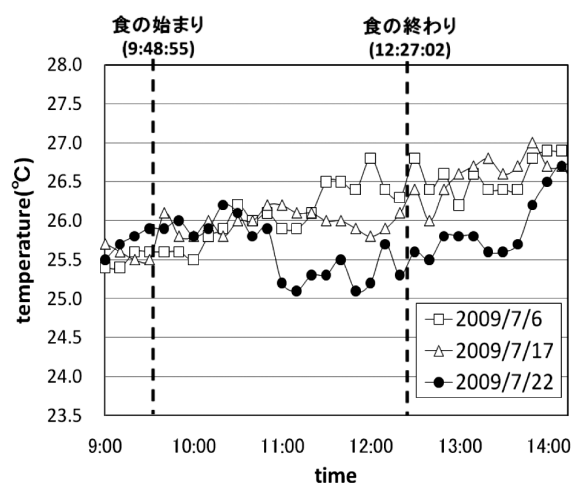


Figure 2 日食当日、及び同様の気象条件日の気温時間変化。日食時間帯の気温変化を比較しやすいように、日食時間外の 9:00-9:20 及び 13:50-14:10 の気温について残差の二乗和が最小になるよう 7 月 6 日、7 月 22 日のデータをシフトしてある。

### 4-2. 照度変化

照度の変化について、部分日食当日の 2009 年 7 月 22 日の値を Figure 3 に示す。Figure 3 の縦軸 OUTPUT は UV 計の電圧の値である。比較のため日照時間が 0.1 時間であった 2009 年 7 月 24 日の観測結果をあわせて示す。

Figure 3 に示したように、7 月 24 日について値のばらつきはあるものの、上昇傾向を示している。それに対し、7 月 22 日は下に凸の傾向を示しており、食の最大である 11:07:28 付近で照度は極小値を示し、

c 津気象台 <http://www.jma-net.go.jp/tsu/>

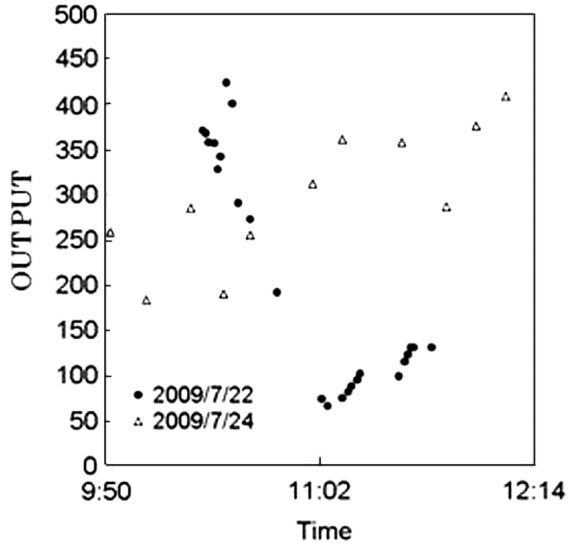


Figure 3 UV 計出力の時間変化。比較のため 7/24 の値も記載した。

その後、増加に転じた。

## 5. 考 察

### 5-1. 曇天化の部分日食における気温変化

Figure 2 に見られた日食時の気温低下傾向について、気温の推移が他の 2 日の気温の推移と異なっていることを確かめるため、仮説検定を行った。7 月 6 日、7 月 17 日の気温変化が同じであると仮定すると、同一時刻での気温の変動は  $0.3^{\circ}\text{C}$  に収まる。そこで、各時刻の気温に  $0.3^{\circ}\text{C}$  の変動幅があるとみなし、7 月 22 日の気温変化が 7 月 6 日、7 月 17 日の気温変化と同じであるとみなせるか検定を行った。 $\chi^2$  検定を行ったところ、有意水準 99.5% で仮説は棄却された。したがって、7 月 22 日の部分日食における気温の推移は、7 月 6 日、17 日の気温の推移とは異なり、有意に低い値を示していたと言える。

### 5-2. 照度変化と太陽面輝度の相関

日食による空の明るさの変化を考える場合、日食の進行に伴う食分の変化とそれによる太陽面輝度の変化を知る必要がある。ここで食分とは太陽を覆っている月の最大幅の太陽の視直径に対する比率である。いま、太陽と月が Figure 4 の位置関係にあるとする。月の視半径を  $\theta_m$ 、太陽の視半径を  $\theta_s$  とし、月と太陽の中心間の角距離を  $\theta_d$  とすると、食分  $D$  は、

$$D = \frac{\theta_m + \theta_s - \theta_d}{2\theta_s} \quad \dots (1)$$

と表せる。部分日食では  $0 < D < 1$ 、皆既日食の時には

$D \geq 1$  となる。

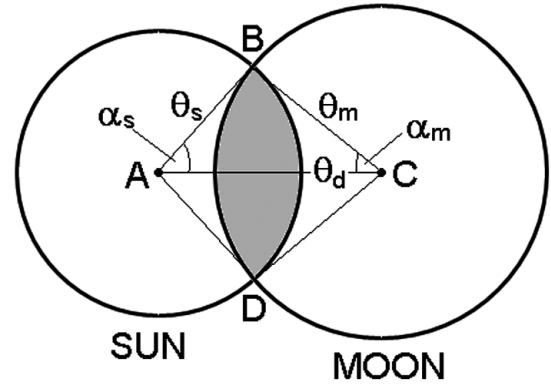


Figure 4 食分と面積比の計算における幾何関係図

本研究では、日食による日照の減少量について考える。この場合、食分ではなく太陽の欠けている部分の面積比を求める必要がある。これは Figure 4 の塗りつぶし部の面積  $S$  を求めることに相当する。面積  $S$  は扇形 ABD の面積  $S_{ABD}$ 、扇形 CBD の面積  $S_{CBD}$  の和から四角形 ABCD の面積  $S_{ABCD}$  を差し引くことで求められ、式 (2) のように表せる。

$$S = (S_{ABD} + S_{CBD}) - S_{ABCD} \quad \dots (2)$$

また、扇形 ABD、扇形 CBD の面積  $S_{ABD}$ 、 $S_{CBD}$  は、以下の式のように書ける。

$$S_{ABD} = \frac{1}{2} \theta_s^2 \cdot 2\alpha_s = \theta_s^2 \alpha_s \quad \dots (3)$$

$$S_{CBD} = \frac{1}{2} \theta_m^2 \cdot 2\alpha_m = \theta_m^2 \alpha_m \quad \dots (4)$$

さらに四角形 ABCD の面積  $S_{ABCD}$  は、

$$S_{ABCD} = \frac{1}{2} \theta_d \cdot 2\theta_{sm} \cdot \sin \alpha_s = \theta_d \theta_s \sin \alpha_s \quad \dots (5)$$

となる。よって斜線部の面積  $S$  は、

$$S = \theta_s^2 \alpha_s + \theta_m^2 \alpha_m - \theta_d \theta_s \sin \alpha_s \quad \dots (6)$$

である。なお  $\alpha_s$ 、 $\alpha_m$  は、三角形 ABC について余弦定理を用いて、

$$\alpha_s = \cos^{-1} \left( \frac{\theta_s^2 + \theta_d^2 - \theta_m^2}{2\theta_s \theta_d} \right) \quad \dots (7)$$

$$\alpha_m = \cos^{-1} \left( \frac{\theta_m^2 + \theta_d^2 - \theta_s^2}{2\theta_m\theta_d} \right) \dots (8)$$

となる。したがって、太陽全体の面積に対する欠けた部分の面積比  $R$  は、

$$R = \frac{S}{\pi\theta_s^2} = \frac{\theta_s^2\alpha_s + \theta_m^2\alpha_m - \theta_d\theta_s\sin\alpha_s}{\pi\theta_s^2} \dots (9)$$

となる<sup>[2]</sup>。

月の視半径  $\theta_m$ 、太陽の視半径  $\theta_s$ 、及び月と太陽の中心間の角距離  $\theta_d$  は、国立天文台歴計算室の津市における予報値を用いた。これらの数値をもとに  $D$ 、 $\alpha_s$ 、 $\alpha_m$  及び  $R$  を算出した。Table 3 に最大食分時 (11:07:28) の各値を示す。

さらに、太陽表面の明るさは一様ではなく、周縁ほど暗い。これを周縁減光という。また波長により減光の程度は異なる。このような周縁減光が起こるのは、光球の温度が外層になるにつれ低下しているためである。また、減光の度合いが光の波長によって異なるのは、波長によって光学的厚さが異なるからである<sup>[3]</sup>。日照の変化を考えるためには、この周縁減光についても考慮する必要がある。式 (10) は、Pierce & Waddell (1961)<sup>[4]</sup> における波長 320 nm での太陽中心からの距離  $r$  による太陽面輝度の相対値  $L$  を  $r$  の二次式で近似したものである。この式を用いて周縁減光を評価する。なお UV 計の有効波長は 341 nm であるが、320 nm との波長差はわずかなため波長補正は行っていない。

$$L = -0.9732r^2 + 0.2732r + 0.9836 \dots (10)$$

式 (10) を用い、周縁減光を考慮したうえで、各時刻における日食時の太陽面輝度を算出した。月により隠される太陽の面積は時々刻々と変化するため、各時刻でその面積を算出する必要がある。さらに、周縁減光の効果は太陽面の各地点で異なるため、太陽の面のどの地点が月に隠されるかについても考慮する必要がある。以上をふまえ太陽面各地点の輝度を中心地点の輝度を基準とする相対値で求めた。その合計を太陽面輝度とし、さらに非日食時の太陽面輝度を基準とした相対値を食分及び面積比と共に Table 4 に示す。

また Table 4 に示した太陽面輝度の時間変化を Figure 5 に示す。比較のため Figure 4 に示した UV 計の測定結果を再記する。Figure 5 の比較により、両者は定性的に一致していることがわかる。最大食の時 OUTPUT、太陽面輝度は各々最も明るかった時刻に

Table 3 最大食分時の各値

太陽視半径	$\theta_s$	945"
月視半径	$\theta_m$	1020"
太陽－月離角	$\theta_d$	433"
食分	D	0.8106
	$\alpha_s$	1.5218 rad
	$\alpha_m$	1.1820 rad
面積比	R	0.7770

Table 4 食分、面積比および太陽面輝度相対値の時間変化

時刻	食分	面積比	太陽面輝度 (相対値)	備考
9:48:55	0	0	1.000	食の始め
9:50:00	0.014	0.002	1.000	
10:00:00	0.142	0.064	0.969	
10:10:00	0.268	0.163	0.887	
10:20:00	0.390	0.281	0.756	
10:30:00	0.509	0.410	0.611	
10:40:00	0.622	0.542	0.452	
10:50:00	0.721	0.663	0.310	
11:00:00	0.792	0.753	0.216	
11:07:28	0.811	0.777	0.190	
11:10:00	0.808	0.774	0.202	
11:20:00	0.761	0.714	0.254	
11:30:00	0.673	0.604	0.371	
11:40:00	0.568	0.477	0.528	
11:50:00	0.453	0.347	0.686	
12:00:00	0.334	0.225	0.811	
12:10:00	0.212	0.116	0.930	
12:20:00	0.088	0.032	0.989	
12:27:02	0	0	1.000	食の終わり

比べ 16%、19%まで低下している。極小値をとるタイミング及び日照の低下割合がほぼ一致していることから、測定された日照の変化は日食によるものであると言える。しかし、OUTPUT のデータには、ばらつきがある。例えば図中に示した A、B のデータグループは他のデータ系列と比べ、系統的にずれているように見える。

そこで、Figure 5 における OUTPUT データのばらつきについて検討するため、太陽面輝度と UV 計出力の関係を Figure 6 に示す。横軸は Table 4 に示した太陽面輝度の値である。Figure 6 より、日食による太陽面輝度の増減に伴い UV 計出力も増減している。UV 計出力と太陽面輝度の関係について、正の相関は認められる。そこで、一次式で近似すると、3 種の式によりほぼ全てのデータ系列を説明できることがわかった。太陽面輝度が同値でも、UV 計の OUTPUT が異



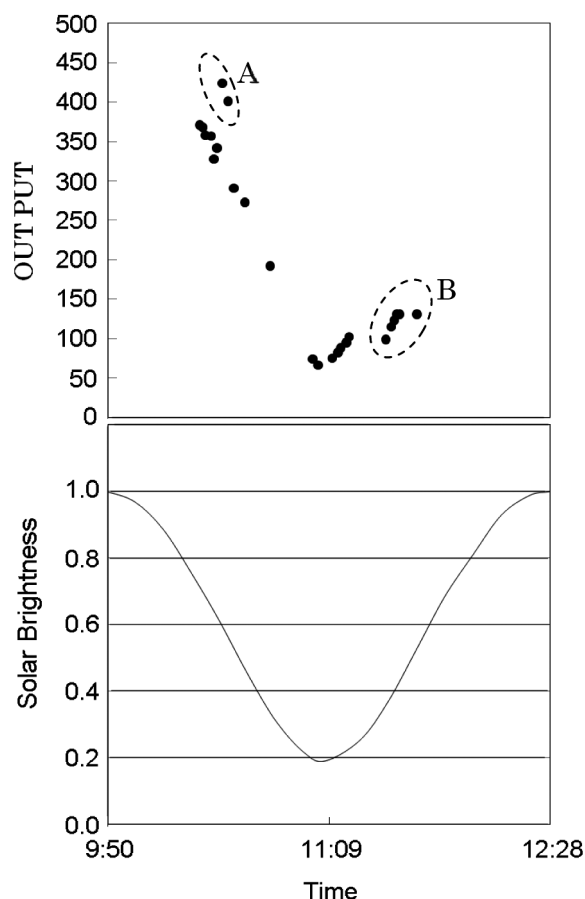


Figure 5 太陽面輝度の時間変化。上段に fig. 4、下段に太陽面輝度の時間変化を示す。

なることから、これらの系列の違いは、曇天であった日食当日の雲の厚さによるものであると考えられる。また、OUTPUT 50-100、太陽面輝度 0.2 付近に見られるデータの集合は、最大食分付近 (11:03-11:16) の UV 計出力及び太陽面輝度の変化である。これらの値は、短時間の観測中に異なる厚さの雲が太陽面を通過したことによる変化であると考えられる。以上より、曇天下における部分日食であっても、日照の低下が測定できることが確かめられた。

### 5-3. 日食観察会の安全性

本日食時、津市付近は曇天であったため日食グラスを用いず観測している人が多くみられた。そこで、日食観察会時の雲の透過率を求め日食観察が安全に行われたのか考察する。

日食観察会当日の雲の厚さに応じて、日照の透過率を算出する。快晴時の照度を  $I_s$ 、日食時（曇天時）の照度を  $I_c$  とすると日照の透過率  $T_l$  は

$$T_l = \frac{I_c}{I_s} \quad \dots (11)$$

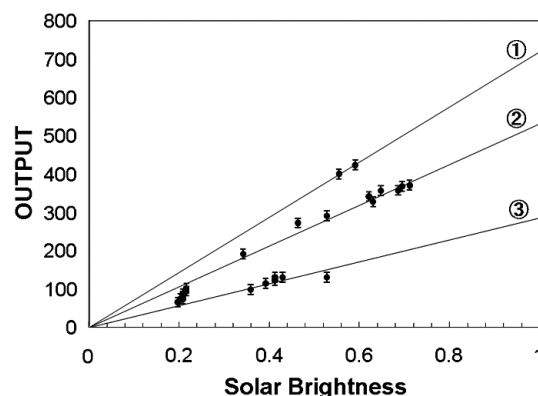


Figure 6 太陽面輝度と UV 計出力の関係。  
横軸は太陽面輝度、縦軸は UV 計の OUTPUT を表す。3 種の直線は 1 次式による最小二乗フィットの結果を示す。

と表せる。Figure 6 に示した各系列について、非日食時の OUTPUT を一次の近似式より算出し  $I_c$  とした。また、晴天時 (2009 年 8 月 26 日) の OUTPUT を  $I_s$  とし透過率  $T_l$  を求めた。しかし、UV 計出力は照度に対応するため、これだけを基に太陽からの直達光の透過率を議論することはできない。そこで、日照の透過率から、直達光の透過率を推定することを考える。雲に含まれる微水滴の総量である雲水総量 (LWP: Liquid Water Path)、微水滴の有効半径 ( $r_e$ )、光学の厚さ ( $\tau$ ) の間には式 (12) の関係がある<sup>[5]</sup>。

$$\tau = \frac{3}{2} \cdot \frac{LWP}{r_e} \quad \dots (12)$$

LWP については、日照の透過率から推定することができる<sup>[5]</sup>。さらに直達光透過率 (TF) と光学の厚さの間には式 (13) の関係がある。

$$TF = e^{-\tau} \quad \dots (13)$$

以上式 (12)、(13) より太陽の直達光の透過率を求めることができる。日照の透過率、LWP、 $\tau$ 、直達光の透過率を Table 5 に示す。表中の①、②、③は Figure 6 の各系列を指す。計算の際、 $r_e$  の値として平均的な微水滴径である  $8 \mu\text{m}$  を採用した<sup>[5]</sup>。比較のため、日食観察時の安全基準値として株式会社ビクセンが太陽観察最適数値<sup>d</sup>と定めている JIS 規格「フィルタレンズおよびプレートの遮光能力値」(JIS-T-8141)<sup>e</sup> のシャ光度番号 13 の透過率をあわせて示す。Table

d Vixen 日食グラス

[http://www.vixen.co.jp/se/safe\\_sp.htm](http://www.vixen.co.jp/se/safe_sp.htm)

e 日本工業標準調査会

<http://www.jisc.go.jp/app/pager?id=156102>

Table 5 雲の透過率および紫外線形透過率の安全基準値

	$I_c$	$I_s$	日照の透過率 ( $T_i$ )	LWP [mm]	$\tau$	直達光の透過率 (TF)
①	720.1	1092	0.6595	0.020	3.8	$2.4 \times 10^{-3}$
②	531.8	1092	0.4870	0.039	7.3	$6.7 \times 10^{-5}$
③	286.1	1092	0.2620	0.099	19	$8.7 \times 10^{-10}$
安全基準値	—	—	—	—	—	$7.6 \times 10^{-8}$

5 からわかるように、日食観察会当日の直達光の透過率は、最も雲が厚かった系列③のとき安全基準を満たしていた。しかし、系列①、②のときは安全基準を満たしておらず、肉眼で太陽観測を続けることは危険であったといえる。

## 6. まとめ

本研究では、曇天下の日食において日照及び気温変化の検出が可能か否かの検証を行った。

気温変化について、部分日食によるものと断定はできないが、特異な低下傾向を示すことが確かめられた。また、日照について曇天下における観測であっても部分日食による照度の低下が認められた。

さらに、日食観測の安全性について考察した結果、雲が厚く、可視域では問題なく観測できたとしても、紫外域の光が遮光できていない場合があることが確かめられた。今後、日食を安全に観察するため、曇天下であっても、安全基準値を満たす遮光能力を持った日食グラス、フィルタ等の使用を徹底することが必要である。

## 参考文献

- [1] 国立天文台, 理科年表 2006, 丸善 p.81 (2005)
- [2] 長谷川一郎, 天文計算入門, 恒星社厚生閣, pp.119-130 (1978)
- [3] 桜井隆, 小島正宣, 小杉健朗, 柴田一成, 太陽, 日本評論社, pp.114-115 (2009)
- [4] Pierce, A. K. • Waddell, J. H., Analysis of Limb Darkening Observations, Memoirs Royal Astron. Soc., Volume 63 pp.89-112 (1961)
- [5] A. Slingo, A GCM Parameterization for the Shortwave Radiative Properties of Water Clouds, Journal of Atmospheric Sciences, Volume 46, Issue 10, pp.1419-1427 (1988)