

12 グリーンフラッシュの研究

1 研究の動機

私達は一昨年度よりグリーンフラッシュの研究を続けてきました。(文献1) これまでの観測ではこの現象を捕らえることができませんでしたが、本年度は観測システムの改良を行い、太陽の上端が分離して緑色に輝く現象の撮影に挑戦しました。あわせて、観測データを元に理論的な考察を深めることにしました。

2 観測の内容

観測は昨年度と同様に、学校南の浜名バイパス、脇の遠州灘海岸の次の地点で行いました。

東経 137° 37' 39"

北緯 34° 40' 37"

海拔 約5メートル

観測項目は現地での日没時の気温、湿度、大気の透明度、太陽の色などの測定と共にビデオカメラでの撮影を昨年度と同様に行いました。本年度の改良点は焦点距離1000mmの超望遠レンズによる記録をデジタル一眼レフカメラに変更した点です。その目的は、太陽像の解像度を上げることでした。これまでに比べて像の大きさが約1.6倍になり、上端に現れる微細な現象を撮影できると考えました。また、デジタルカメラでは撮影時刻をはじめとする正確なデータの記録が自動で行われるため、撮影後の解析の信頼性が向上するという大きなメリットがあります。



図1 新しい撮影システム

3 結果と考察

(1) 統計データ

表1 観測の集計

平成14年度	グリーンフラッシュ	0日
シーズン	緑色が強く見えた	3日
(2002年12月15日より03年2月28日まで)	普通の日没	15日
	雲中に沈んだ	51日
	小計	69日
平成15年度	グリーンフラッシュ	0日
シーズン	緑色が強く見えた	4日
(2003年11月1日より04年2月20日まで)	普通の日没	36日
	雲中に沈んだ	9日
	小計	49日
平成16年度	グリーンフラッシュ	0日
シーズン	緑色が強く見えた	2日
(2004年11月15日より05年2月3日まで)	普通の日没	11日
	雲中に沈んだ	6日
	小計	19日
3シーズン通算	総計	137日

表1にこれまでの観測集計を示します。表より分かるとおり、本年度のシーズンはこれまでに比べて日数が大きく減少しています。これは、11月の天気が極端に悪かったことによる他、条件の悪い日の観測を中止したことによります。いずれにしてもこれまで同様、典型的なグリーンフラッシュは現れませんでした。これに対し太陽像がかなりグリーンがかって見えた日はほぼ同じ程度の割合であったことが分かります。そこで、これまでの3シーズン通算9回の観測データをまとめてみました。(表2)

日	気温(℃)	気温較差(℃)	湿度(%)	湿度較差(%)	気圧(hPa)
2003年1月2日	4	-3.2	40	-10	標準
1月8日	5	-2.2	42	-8	標準
2月3日	7	-2.4	41	-6.3	標準
12月8日	11	-0.1	41	-3.2	標準
2004年1月5日	8	-1.4	38	-4.8	標準
1月28日	8	-1.4	41	-1.8	標準
2月10日	9	-1.6	60	17	標準
12月17日	12	1	32	-12.9	標準
12月21日	11	0	41	-3.9	標準
平均較差		-1.28		-4	

* 気温較差、湿度較差は各月の観測値の平均値との差をとった。

データに共通する点は、気温や湿度が月平均値よりも低いということです。(04年2月10日のデータは記録ミスの可能性が高い) これは天気が良く、水蒸気による光の吸収が少ないという最低条件を表しているものと思われます。これらの日に更に何らかの条件が重なった時にグリーンフラッシュが発生するのではないかと推測されます。

(2) 太陽像の変形とグリーンフラッシュ

グリーンフラッシュが見える条件の第一は、太陽が非常に明るいままに沈んでいくこと、すなわち大気ของความ透明度が非常に高いことです。その次の条件は要素が非常に多く単純ではないことが分かってきました。一例として、山形県酒田市の加藤知能氏の観測結果が上げられます。(文献2) 加藤氏からの私信によれば、2004年6月2日および3日に酒田市内および近郊の2地点で同時観測を行った所、ある地点では発生したのに対し他地点では発生が無かったとの事です。この事から発生につながる空気塊、または空気層は、かなり局所的なものである可能性が考えられます。これについては、昨年の研究で、海岸の高さ数メートルの地点からグリーンフラッシュを観測する場合には、距離にして10km前後先までの、高さ数メートル程度の空気塊が影響することを明らかにしているので、充分にあり得る事だと思われます。しかし、実際に得られたグリーンフラッシュの画像から何か分かることはないので、太陽像の変形の割合とグリーンフラッシュ発生との関係を調べることにしました。このためには、グリーンフラッシュ発生時の複数の画像が必要であり、昨年度より画像を提供していただいている加藤氏のデータを利用させていただきました。そして、私達の得た太陽像との比較をすることにしました。

① 変形率の計算方法

太陽は日の入りや日の出時には、地平線付近の厚い大気の影響を強く受け、上下方向に圧縮された形になります。これに対し、水平方向の幅は原則として大きくは変化しないと考え、水平方向の横幅(太陽の視直径に相当する)に対する上下方向の長さの比率を「変形率」として算出し、この数値とグリーンフラッシュとの間に相関がないか調べることにしました。使用した画像は全て太陽の下の方の緑が水平線に接した瞬間のもので、測定については種々のタイプの画像があるため、それぞれ以下のような方法をとりました。

ア フィルム画像の場合

撮影したフィルムをイメージスキャナーによってパソコンに取り込み、液晶デ

イスプレー上で適切な拡大率にして縦横の幅をミリメートル単位で読みとった。

イ デジタル画像の場合

撮影した画像をパソコンの液晶ディスプレイ上で適切な拡大率にして縦横の幅をミリメートル単位で読みとった。

ウ プリント画像の場合

加藤氏から提供されたグリーンフラッシュ発生時の画像についてはプリント画像上で、同じく縦横の幅をミリメートル単位で読みとった。

こうして得られたデータの一覧を表3、4に示します。私達のデータと酒田市でのデータを比べてみると酒田市での変形の割合が格段に大きく、平均値で比較しても約6.2%もの違いがある事が分かります。更に、浜松市での最小値(変形度最大)が酒田市でのグリーンフラッシュ発生時の最大値に当たることが分かります。これは明らかに有意な差であると思われます。また、酒田市でグリーンフラッシュが発生する場合の変形率はどちらかという小さめ(より大きく変形している)の時の多い事が傾向として見られます。

表3 太陽像の変形率に関するデータ(浜松)

日 付	変形率(%)	見え方	備考
2002年12月28日	91%	きれいな日没	
2002年12月30日	88%	通常の日没(観望会)	
2003年1月2日	90%	グリーンに染み日没	
2004年12月8日	89%	通常の日没	
2004年12月11日	88%	分離像	
2004年12月13日	90%	通常の日没	
2004年12月17日	87%	分離像	
2004年12月21日	89%	分離像	
2004年12月22日	90%	通常の日没	
平均値	89.10%		

表4 太陽像の変形率に関するデータ(酒田)

日 付	変形率(%)	グリーンフラッシュの見え方	備考
2002年6月3日	87%	発生(大)	
2003年8月16日	82%	発生(観望会)-分離像	
2004年8月18日	82%	発生(小)	
2004年8月22日	82%	発生(観望会)-分離像	
2004年8月23日	78%	発生(大)	
2004年1月13日	84%	発生せず	
2004年4月15日	85%	発生(小)	
平均値	82.90%		

以上の結果から、傾向として以下のことが考えられます。

「グリーンフラッシュ出現時(酒田)、または太陽像の分離が見られる(浜松)場合はいずれも変形の度合いが大きい。これは、低空に密度の大きい空気層が存在することを意味するものと思われる。このような時、光の波長別の屈折

率の違いが大きくなると考えられ、これがこうした現象の発生につながったのではないか。」

(3) 上空で分離して見えたグリーン太陽像について

① 分離した太陽像

これまでの私達の観測では、肉眼ではつきり確認できるような、典型的なグリーンフラッシュは見るできませんでした。しかし、撮影用の望遠レンズや双眼鏡を通して、太陽がまだ上空にあってかなり明るい状態の時、その上の縁が一部分離して見えることがありました。その際に一瞬緑色に輝いて見えるケースが多くありました。しかし、これまでのフィルムによる撮影では、その緑色を写す事ができませんでした。この原因は、焦点距離が足りず解像度が充分でない事と、適切な露出が得られなかった事にあると考えました。これを解決するための方法がデジタルカメラによる撮影です。その結果、本年度ついに、緑色に輝く分離した太陽像を捕らえる事に成功しました。(図2)

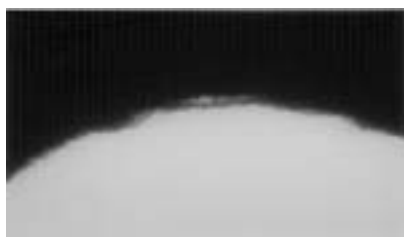


図2 分離して緑色に輝く太陽

このような分離現象は、酒田市での画像にも見られるもので、一種のグリーンフラッシュ現象に相当すると考えられます。そこで、これまでに撮影したフィルムから分離現象が見られるものを集め、そのデータを調べました。統計的には日の入り時の撮影映像55回中の9回に分離画像があったのに対して、日の出時では16回中1回もありませんでした。このように、分離現象が確認されたのが全て日の入り時であることは注目すべきことです。またその際に見える太陽の全体像は、縦にいくつかのスライスされたような形に見えました。これには、日の入り時には気温の異なる空気層が何層にも重なって分布する事が考えられます。また、次の(4)で理論的に考察す

るような太陽の日周運動による効果が大きく関わっているものと考えます。

(4) 日の出のグリーンフラッシュは起こるのか。

これまで私達が目にしてきた文献にはいずれも、グリーンフラッシュは「日出又は日の入り時に見られる」と書かれていました。しかし示されている画像は一例を除き、日の入り時に撮られたものばかりでした。日の入り時に観測しやすい理由としては、①目にする確率が高いこと、②太陽が沈む位置がはっきりわかるため、その瞬間が捕らえやすいこと、③写真に撮るための適正露出を得やすいことなどがあげられています。(文献5)しかし一方で、明け方の方が大気の透明度が高いことや夜間の冷却によって地表付近に冷たい空気塊がしやすいなどの好条件が得られることが予測されます。それにもかかわらず日の入り時の画像が多いことには何か他の理由があるのではないかと考えました。

そこで、今回は日の出時の観測も行い、原因を調査してみました。日の出時の画像が得られたのは03年12月に3回、04年1月に10回、同2月に3回の合計16回でした。しかし、そのいずれの機会にもグリーンフラッシュは観測されず、上端が分離した太陽像を見る事はありませんでした。一方で低温の大気層による効果と思われる、極端な変形を見せた太陽像が得られたことがありました。(図3、4)



図3 2004年1月4日朝



図4 2004年2月18日朝

このように、日の入り時とは異なった結果を生じた原因として以下のような仮説を立てました。「日の入り時の太陽の日周運動は、太陽の上端を引き離す方向に働くが、日の出時ではこれが逆になり、緑色の太陽像が分離しにくいためである。」

その根拠は以下の通りです。

① 日の出入りに関する理論的考察

天体は日周運動によって1分間あたり角度の $15'$ ずつ移動します。従って視直径 $32'$ の太陽は約2分でその直径分移動することになります。このことから、日の出、日の入りに要する時間を約2分である、と誤って述べている文献がありました。(文献5)しかし、実際には日の出、日の入りの際の太陽の動きは水平線に対して傾きを持つので太陽の下端が水平線に接してから、上端が水平線下に完全に隠れるまで(日の出ではこの逆)の所要時間は季節により、また観測地の緯度により異なります。更に、これに大気屈折による浮き上がりの効果が加わります。そこでまず、この所要時間を計算により求める事にしました。

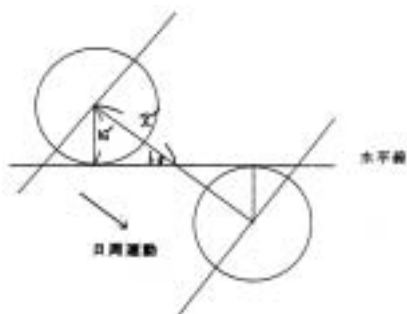


図5 地平線に対する太陽の動き

図5のように、太陽の下端が水平線に接してから上端が水平線に沈むまでの赤経方向の移動量を $2X'$ と考えます。太陽の視半径を $16'$ とすれば、太陽中心の移動方向が地平線に対してなす角度 j を求める事によって X が求まる事になります。この角度 j は、観測地の緯度 ϕ と天体の赤緯 δ によって決まります。その関係式は、 $\cos j = \sin \phi \cdot \sec \delta$ となります。(文献4)

この式に、浜松市($\phi = 34^\circ 41'$)での冬至の頃($\delta = -23.4^\circ$)、山形県酒田市($\phi = 38^\circ 54'$)での夏至の頃($\delta = +23.4^\circ$)の条件を

入れて計算すると以下の値が得られました。

浜松市 $j = 51.7^\circ$ 酒田市 $j = 46.8^\circ$

この角度 j を使うことで図中の太陽の移動量 $2X'$ が計算できます。また、赤緯 δ での日周運動による移動量は天の赤道上で値に $\cos \delta$ を乗じて計算できます。そこで、赤緯 23.4° (+でも-でも同じ)における1分間当たりの日周運動による天体の移動量は、 $15' \cdot \cos \delta$ で与えられる事になります。従って、 $(2X') \div (15' \cdot \cos \delta)$ の計算をおこなう事によって、日の入り(日の出)の所要時間を計算する事ができます。計算結果は、

浜松市 2分57.6秒 酒田市 3分10.8秒

となり、グリーンフラッシュの観測には、より長く観測が可能な高緯度地のほうが有利な事が分かります。ちなみに極地域では、太陽は地平線に対しほぼ水平に移動するため、極めて良い条件でこの現象を観測できる事が知られています。これまでに観測された最長記録は南緯 78° の南極大陸で1929年10月16日に観測された35分間だとのことです。(文献4)

② 理論値と実測値の比較

このようにして求めた理論値と実際のどの程度異なるかを、これまでに撮影されたビデオ画像より調べてみました。過去三シーズンのビデオテープより、日没の全過程が鮮明に記録されている良好なもの8回分を選びました。そして太陽の下端が水平線に触れてから完全に沈むまでの所要時間を測定しました。時間の測定は、テープにインポーズされているタイムカウンターを利用しました。(0.01秒まで表示されていますが、0.1秒まで読み取りました。)

その結果は以下の通りです。(表5)

番号	時期	所要時間
①	02年12月	3分04.1秒
②	"	3分02.0秒
③	03年1月	3分10.2秒
④	2月	3分03.0秒
⑤	11月	3分15.0秒
⑥	12月	3分04.2秒
⑦	04年1月	3分08.0秒
⑧	2月	3分07.4秒
平均		3分06.7秒

これらの数値はいずれも計算による理論

値よりも大きくなっています。これには大気による浮き上がりの効果や太陽像の輪郭のゆらぎが大きく関係しているものと思われます。

③ 日の出時にグリーンフラッシュが起こりにくい理由

これらの結果から、日の入り時に、太陽は地平線に対して $32' / 186.7 \text{ 秒} = 0.17' / \text{秒}$ のスピードで沈んでいくことがわかります。このことから、日の入り時では太陽のグリーンの上縁はその下にある黄色から赤までの太陽像から離れる方向に日周運動が働くのに対し、日の出時ではその逆に緑色の太陽像を黄色から赤の太陽像が覆うように働くことが予想されます。一方、グリーンフラッシュの幅は最大でも角度の $1'$ 程度までで、見える時間も普通 1 秒間程度までとされています。これが、日の出時にグリーンフラッシュ現象が起こりにくい最大の原因ではないかと考えます。事実、これまでに撮影した日の出時の太陽画像に上端が分離した画像が一度も写らなかったわけで、少なくともその原因の一つがここにあったのではないかと考えられます。

(5) 遠州灘ではなぜグリーンフラッシュが見られないか。

私達の観測では過去 9 回、水平線に太陽が沈む直前に強い黄緑色に見える現象を観測しました。しかし、加藤氏の撮られた写真のような見事な緑色の像を見ることはありませんでした。その理由は正確には分かりませんが、恐らく遠州灘の海面上の大気の擾乱にあるものと思われます。前年度の報告にも述べたように、加藤氏の撮影した水平線上の太陽像と遠州灘のものを比べると、遠州灘では上冷下暖の空気層が存在する場合に典型的な鏡像が幅広く写っています。さらに、そのゆらぎの程度も極めて大きくなっていることが分かります。これらより、緑色の太陽像とそのすぐ下の黄色の太陽像が混じり合った状態で沈んでいくのだと考えられます。ちなみに、グリーンフラッシュ発生時、酒田市での海水温と気温の差を調べると最大でも 3°C 程度なのに対して、冬季の遠州灘では 10°C 前後で、海水温が気温に比べて非常に高くなっていることが分かります。特に、透明度が高い冬型の

気圧配置の日には乾燥した北西風が強く吹き、海面からの水蒸気の供給と空気の擾乱が非常に大きくなると考えられます。

5 まとめ

ここまでの観測と収集データ、そして理論的考察を総合して、遠州灘ではグリーンフラッシュ観測が難しい事が明らかになったと思われます。しかし、太陽が上空にある時にこれに相当する現象が起こっている事を確認できた事が大きな収穫です。いずれにしてもこの現象は、極めて多くの要因を含み、微妙な大気の状態によって生ずる事が考えられます。日頃何気なく見ている日の入りや日の出にも色々な見え方があるのだということを知り、それも全て地球に厚い大気の層が存在することで起こっているのだと言う事を改めて認識し、地球という天体についての理解も深まったように思います。

6 謝辞

今回も前年度に引き続き、山形県酒田市在住の加藤知能氏より貴重なデータと有益な助言をいただくことができました。ここに深く感謝の意を表したいと思います。また、新たな撮影システムの導入にあたり、山崎自然科学教育振興会より多額の助成金をいただきました。あわせて感謝申し上げます。

7 参考文献

- 1 「緑閃光～グリーンフラッシュの見える条件について」 浜松湖南高校自然科学部天文班 2004 (平成 15 年度第 20 回山崎賞論文)
- 2 「私信」 加藤知能氏 2003、2004
- 3 「四訂新版 現代天文学事典」 荒木俊馬著 恒星社 1971
- 4 「新訂天文学通論」 鈴木敬信著 地人書館 1973
- 5 「空の色と光の図鑑」 齋藤文一、武田康男著 草思社 1995
- 6 「太陽からの贈りもの～虹・ハロー・光輪・蜃気楼」 R.Greenler 著 丸善 1992
- 7 「光の気象学」 柴田清孝著 朝倉書店
- 8 「二つの極～北極・南極からのメッセージ」 小口高他編 丸善