

日食めがねによる金環日食限界線観測 —みんなで作った日食マップ—

石坂 千春*、金環日食限界線研究会*

概要

2012年5月21日の日食は日本列島を縦断するように、人口の多い地域を金環帯が通過した。日食めがねが普及して初めて起きた金環日食であり、日食めがねで観測した場合の真の限界線がどこになるのか先行研究はなかった。我々は金環日食限界線共同観測プロジェクトを立ち上げ、市民からの日食観測報告を集めて限界線の位置を決定したので報告する。

1. はじめに

2012年5月21日の日食は日本列島を縦断するように、人口の多い地域を金環帯が通過した。これは日食観測用減光フィルム(日食めがね)が普及して初めて起きた金環日食であった。

金環日食は、皆既日食に比べて月の地心距離が大きく、見かけ上、太陽よりも月が小さくなって、最大食時にも月が太陽を隠しきれず、リング状に太陽の縁が見える現象である。

観測地と月、太陽の位置関係により、日食の見え方は変わる。最大食時に月縁が太陽の縁を横切るような場所では、リングが途切れて部分食のまま終わる。金環食に見える場所(金環食帯)と、部分食帯の境界を「限界線」と呼ぶ。金環食の限界線は南北に1本ずつ存在する。

興味深いことに、金環食の限界線は(南北限界線に対して、それぞれ)3本予報されていた。

NASAの予報[1]、相馬-早水の予報[2][3]、そして国立天文台の予報[4]である。

北限界線に関して言えば、最も北にあるのがNASAの予報(以下、NASAライン)で、最も南にあるのが相馬-早水の予報(以下、相馬-早水ライン)である(南限界線では、逆に相馬-早水ラインが北、NASAラインが南)。NASAラインと相馬-早水ラインとは、直線距離で約4kmの違いがある。なお、国立天文台の予報は、NASAラインと相馬-早水ラインのほぼ中間にある。

日食めがねで観測した場合の真の限界線はどのラインに近いのだろうか？

また、限界線付近で日食めがねを使って観察した場合、太陽はリング状に見えるのだろうか？それともリングには見えないのだろうか？

日食めがねが普及したのは、2009年(世界天文年)の日食以降のことである。今回のように限界線が人口の多い地域を縦断する金環日食は、日食めがねが普及して以来、初めてのことであった。

したがって、日食めがねで観測した場合の真の限界線がどこになるのかという研究は前例がなかった。

我々は全国に呼びかけ、日食めがねを使って観測した日食が、リング状に見えたかどうかを報告してもらい、その結果から「日食めがねによる限界線」を決めることを計画した。

名づけて「金環日食限界線共同観測プロジェクト〜みんなで日食マップをつくろう！」。

日食めがねによる限界線を決める史上初の観測プロジェクトであった。

2. 金環日食予報限界線

そもそも、なぜ、予報限界線が3本もあるのだろうか。

月縁には数千mもの凸凹がある。したがって、ほぼ真円の太陽と月縁が重なると、月の谷間の部分から太陽光が漏れてくる(これを「ベイリー・ビーズ」という)。

NASAラインは、月縁の「底」だけを考慮し、月の半径を小さめにとって計算したものである。これはもともと皆既日食予報のために採用された方法である(月縁の1箇所からでも太陽光が漏れてくれば皆既日食とは言えないため、月の谷底の平均を月縁とする)。

一方、相馬-早水ラインは、日本の月周回衛星「かぐや」の観測によって精密に測定された月縁データを

*大阪市立科学館/中之島科学研究所

基に、個々の山の高さを考慮して計算したものである。相馬－早水ラインでは、月の山が1つでも太陽の縁を横切れば、金環食ではなく部分食と判定する。

なお、国立天文台の予報は、月縁の高低を平均しているのので、NASAラインと相馬－早水ラインの中間にくる。

さて、月縁での凸凹の大きさ(～10km)は、地上から見込む角度にすると、高々0.1分角である。

したがって、典型的なベイリー・ビーズの大きさも0.1分角ということになるが、日食めがねで観測して、個々のベイリー・ビーズを識別できるだろうか？

ランドルト環(視力検査の「C」)の切れ目の1分角を見分けられる視力が1.0である。原理的には0.1分角の切れ目を見分けられるのは視力10.0ということになる。

ベイリー・ビーズが連なった状態を日食めがね(肉眼等倍)で観測した時、太陽縁が途切れていることが分からず「つながった(金環)」と認識すれば、日食めがね観測における限界線はNASAラインに近くなるだろうし、「とぎれている」と認識できるのなら、限界線は相馬－早水ラインに近くなるだろう。

一方、人によって使う日食めがねが違うし、視力もバラバラなので、金環食-部分食の境界ははっきりと線引きできない可能性もある。

ともかく、日食めがねで観測した場合の真の限界線がどこになるのかという研究は前例がなく、実際に調べてみることにしたのだ。

3. OかCか…報告の呼び掛け

「日食めがねによる限界線」を統計的に決めるためには、できるだけ多くの報告を集める必要があった。

そこで我々はプロジェクトのホームページ[5]を用意し、日食を見た一般の方々にパソコンや携帯電話、スマートフォンから報告してもらうこととした。最近の携帯電話ではGPSで位置情報の取得ができることから正確な位置情報の取得も容易である。これは世界天文年2009「めざせ1000万人！みんなで星をみよう！」[6]の手法を発展させたものである(当サイトの製作を担当したチーム・メンバーには、「めざせ1000万人」からの参加者も含まれていた)。

報告の敷居を低くするために、入力してもらう項目はシンプルに、

- (a)名前(公開/非公開を選択)
- (b)位置情報(GPS読み取り/地図指定)
- (c)見え方:金環に見えたか、とぎれたか
- (d)コメント(天候状況など)

という基本情報のみとした。

見え方については、最大食時刻に日食めがねで見

た日食が、「O(オー:つながった)」だったか、「C(シー:つながらなかった)」だったか、「?(わからなかった)」か、の三択とした。

報告の受付は2012年5月21日07:00に開始し、リアルタイムにホームページ[5]のマップ上に報告マークを掲載した。

マップに表示されるマークは「O」か「C」か「?」。結果はOかCか?か、オーかシーか…?そして、5月21日を迎えた。

4. 感動的な日食マップ

2012年5月21日、悪天候や厚い雲に泣いた観測地もあったが、雲間に見えた日食は、日本全国の人々の心を光の環でつないでいった。

プロジェクトサイトへの報告がどうなっているか気になりつつも、プロジェクトメンバーは、それぞれの観測、イベント対応で、てんてこ舞いであった。自らの観測が悪魔のような天候によって阻まれたところもあった。

そして、月の影が抜け、一息つけた午前9時、メンバーがプロジェクトのホームページをチェックすると、そこには感動的な光景が広がっていた。

日本列島の上に、OとCの花が咲いていた！いや、全国各地からいただいた報告が、見事に“金環の実”を結んでいたのだ！

初めて日食マップを目にしたメンバーは、みな一様に、鳥肌が立ったという。



図1 みんなでつくった日食マップ

金環日食限界線共同観測プロジェクトのトップページ[5]。最大食時のリングの見え方についての報告「つながった」「つながらなかった」「わからなかった」がそれぞれ、「O」「C」「?」で表示されている。

5月21日21:00で一旦締め切った報告総数は、11,647人。うち「O(つながった)」5,099人、「C(つながらなかった)」5,356人、「?(わからなかった)」1,192人であった。

5. どこに限界線?

さて、では、日食めがねで観察した場合の限界線は、どこにあったのだろうか?

次のような方針でデータを分析し、日食めがねによる限界線の位置を決定した。

まず、日食めがねによる限界線(以下、Oライン)は、予報限界線、たとえば相馬-早水ラインもしくはNASAラインに平行であると仮定した。

ついで、予報限界線からの観測者の距離を計算した。なお、観測者の標高(ジオイド高)hによって、月(と太陽)を見込む角度が変わるので、観測者の位置(緯度・経度)は、最大食時の太陽の高度z・方位に応じて、標高0m地点での位置(緯度・経度)に補正した(補正量 $\Delta = h \cdot \cot(z)$)。

補正した観測者の位置で、予報限界線からの距離を計算し、予報限界線の位置を原点(0km)として、北側を負に、南側(中心線側)を正にとり、500mずつ重複させた1km幅の帯内における「リングになった(O)」報告の割合、および「迷った(?)」の割合をプロットする。

今回は、観測報告数の多かった北限界線付近の報告データを解析する。予報限界線の北側では「O(つながった)」という報告は少なく、南側では「O」報告が多くなる。

予報限界線からの距離に対する「O」の割合をグラフにプロットすると、どこかで傾きが一番大きくなり、そこでは「迷った(?)」の割合も一番大きくなるだろう。

日食めがねによる限界線(Oライン)は、「O」グラフにおいて最も傾きが急になる場所であり、「迷った(?)」という報告が最も多い(ピークを形成する)場所であるはずである(図2)。

さて、相馬-早水ラインやNASAラインからの観測者の距離を計算するために、相馬-早水ラインやNASAラインの近似式を求めた。

日本列島付近の予報限界線の位置データをMSエクセルの回帰分析にかけると、下記のような直線で近似できた。

(1) 相馬-早水ラインの近似式
 (北緯) = 0.510719・(東経) - 34.2906 ± 0.003°

(2) NASAラインの近似式
 (北緯) = 0.510714・(東経) - 34.2433 ± 0.004°

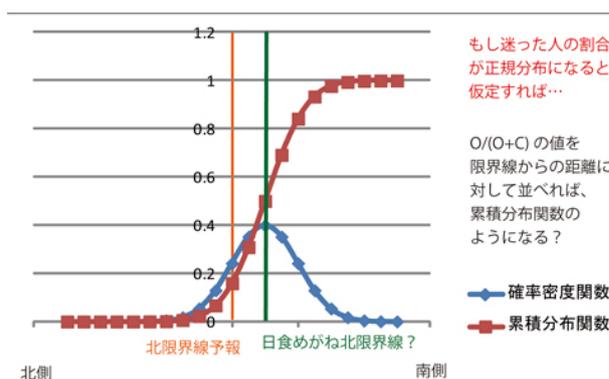


図2 報告の分布(予測グラフ)

予測限界線からの距離に応じて、北側では「O(つながった)」という報告は少なく、南側では「O」報告が多くなる。その場所での観測者のうちの「O」の割合 $[O]/([O]+[C]+[?])$ をグラフにした時、傾きが一番大きい場所は、「まよった」人の割合がピークになる場所でもあり、そこが、日食めがねによる限界線である。

誤差0.003度は北緯35度付近では約340mに相当する。「O」分布を求める際に帯を500mずつ重複させたのは、この340mの誤差の影響を抑えるためである。

なお、予報限界線の近似式と観測者との距離を求める際、地球回転楕円体も仮定したが、今回の解析に必要なのは、予報限界線から南北10kmほどの範囲の報告だけなので、直線距離で計算しても結果に違いはない。

6. 結果

解析には、6月22日までに報告された観測者データを用いた。

報告数は2,008件、合計14,808人、うち「リングになった」7,943人、「欠けたまま」5,356人、「わからなかった」1,346人であった(重複報告や天候不順によって最大食を観測できなかったものも含む)。

6-1. 全データ

相馬-早水ラインに対し、「O」報告の割合を、500mずつ重複させながら1km幅で集計したグラフを図3に示す。

横軸の負は相馬-早水ラインの北側、横軸の正は相馬-早水ラインの南側である。

かなりデコボコがあるが、大雑把な傾向としては、前章で記述したように、南側に行くほど、「O(金環になった)」割合が増えており、相馬-早水ラインの辺りが中間点になった。

ただし、正規分布でフィッティングしてみると分散が5

km以上もあるため、日食めがねによる限界線（Oライン）がNASAライン（相馬-早水ラインの北側約4km）付近にある可能性も排除できない。

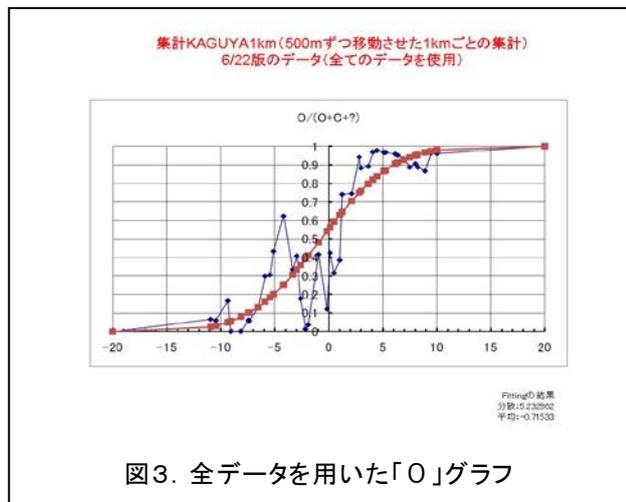


図3. 全データを用いた「O」グラフ

6-2. データ修正

図3において、相馬-早水ライン付近で、「O」が大きく減少しているが、天候が「曇」もしくは「雨」で最大食時に観測できなかったにもかかわらず、「つながらなかった(C)」と報告した明石市の小学校2団体の影響が大きい(図4)。



図4 明石～大阪付近の報告マップ(拡大)

限界線付近では、「O(つながった)」という報告と「C(つながらなかった)」という報告が混在している。また、完全に金環帯であるはずなのに「C」と報告しているものもある。特に、ある小学校は、天候不良のため最大食時に観測できなかったため、「欠けたまま」と報告している。

そこで、この2校のデータを削除したものが、図5である。

また、図5の傾き(確率密度)をプロットしたのが図6であり、「？」の割合をプロットしたのが図7である。

図5を見ると、相馬-早水ラインで「O」の割合がΓ関数的に急激に増加し、「？」の割合(図7)もδ関数的な鋭いピークをもっていることがわかる。

すなわち、日食めがねによる限界線（Oライン）は誤差±500mで相馬-早水ラインとピッタリと一致した。

観測は簡単なガイドラインこそホームページで告知したものの、各観測者にまかせており、使用した日食めがねの種類も、天候も、天文学(日食)に関する知識量も統一(制御)されたものではないにもかかわらず、多数のデータ(観測者からの善意の報告)を統計的に処理することにより、極めて正確にOラインの位置を求めることができたことは、おどろくべきことである。

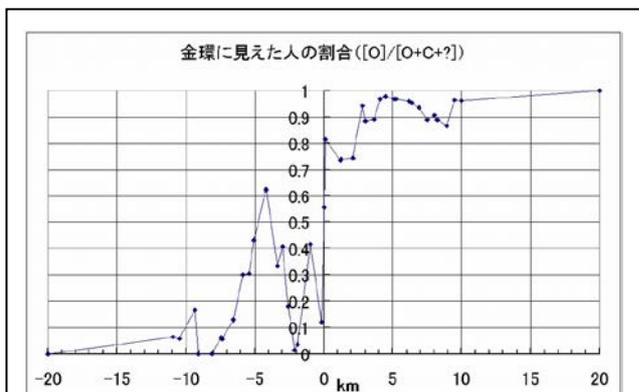


図5. 2校を除去した修正後の「O」グラフ

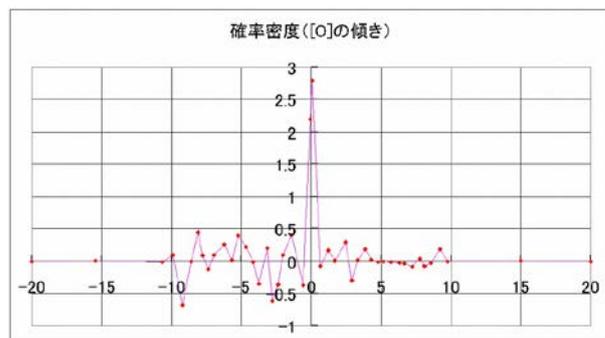


図6. 図5の傾き(確率密度分布)

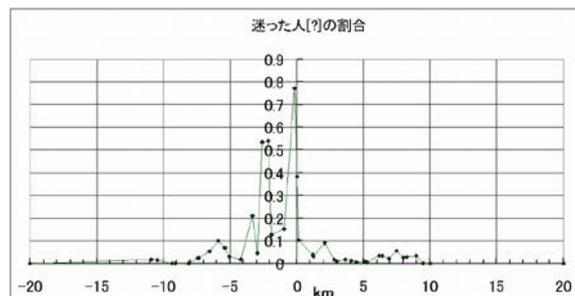


図7. 「？」の割合

6-3. 天候の影響

前節では、日食めがねによる限界線（Oライン）が相馬-早水ラインと一致したことを述べたが、図5で、相馬-早水ラインの北側4km付近（NASAライン上）にも「O」のピークがある。

うす雲が掛かった状態でごくわずかに金環食から外れた“カチューシャ食”を観測すると、「つながった（金環）」と認識する可能性はないだろうか？

天候状態が「晴れた」場合と「うす曇」の状態に分け、グラフを作成した（図8、図9）。

「晴れた」と報告した人数は6,815人、「うす曇」と報告した人数は1,375人であった。

たしかに、「うす曇」の状態では、相馬-早水ラインのかなり北側でも「O」と報告しているが、NASAライン付近にピークを作っていたのは、「晴れた」グループであった。

うす雲の影響で金環に見えたのではなく、NASAライン付近の観測者には実際に「金環」に見えたようだ。

事前予報で、NASAラインを知っていた場合、“希望的観測”として、金環に見えることを期待するのが人情であろう。図8のグラフは観測者の心理を反映しているのかもしれない。

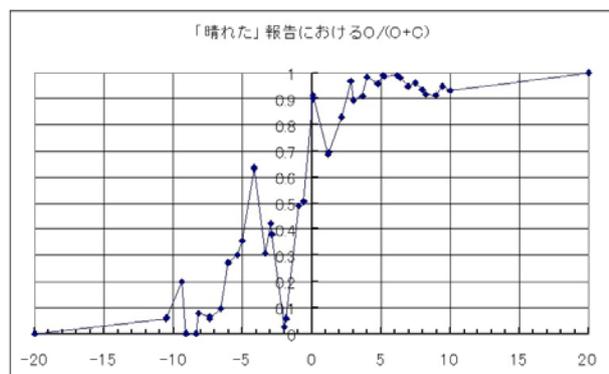


図8. 「晴れた」報告のみのOグラフ

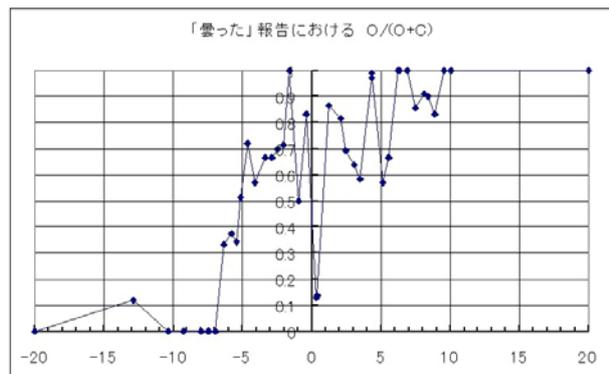


図9. 「うす曇」のみのOグラフ

6-4. 団体による報告の影響

図7で「？」の割合が、相馬-早水ラインの北側2~3 km付近でも明らかなピークがあるが、これは、「個人」による報告である。

個人報告のみの「O」分布をグラフにしたのが図10である。個人による報告数は1,860人であった。

相馬-早水ラインの南北10kmの範囲で、ゆるやかに増加している傾向が読み取れる。

データ数が少ないので確たることは言えないが、図10の傾向が日食めがねによる本来の見え方を反映しているのだとすると、図5~7の見事なOラインは相馬-早水ラインを挟んだ団体の報告による影響が大きいかもしれない。

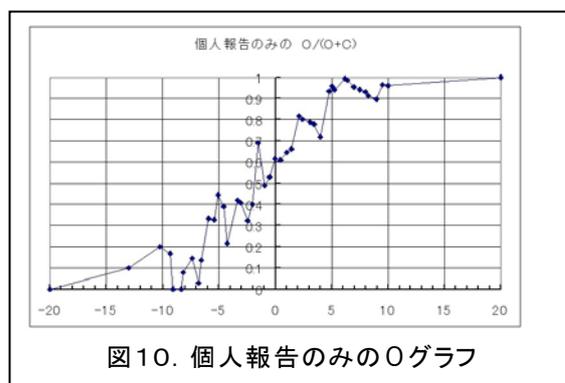


図10. 個人報告のみのOグラフ

7. まとめ

2012年5月21日、我々は日食めがねによる限界線決定という世界初の試みを行なった。

日食めがねによる限界線（Oライン）は誤差±500mで相馬-早水ラインと一致した。

統計的に言えば、肉眼等倍（日食めがね）観測でも、ベイリー・ビーズを識別できる、という結論になる。

ところで、誤差±500mは、太陽の半径に換算すると、±180kmに相当する。

太陽の半径は、1891年に測定された696,000kmが公式な値であり、現在でも-500~+200kmの誤差が存在する。

今回報告した日食めがねによる限界線観測は、これまでの誤差を凌駕する精度で太陽半径を決定できたことも示唆している。

一般市民の善意の報告を集め、集計することで、非常に価値の高い科学的データを得られるのである。

本プロジェクトに参加、協力してくれた全ての皆様に感謝するとともに、いつかまたこのようなプロジェクトで大きな実を結ぶことを心から祈願する。

※以上の結果については、日本天文学会2012年秋

季年会において発表した。

文 献

- [1] NASA、エクリプスWEBサイト、
<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEgoogle/SEgoogle2001/SE2012May20Agoogle.html>
- [2] 相馬 充、「かぐやによる月縁を考慮した2012年金環日食予報」、<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/~somamt/se2012.html>
- [3] せんだい宇宙館2012年5月21日金環日食、
<http://sendaiuchukan.jp/event/news/2012eclipse/2012eclipse-J.html>
- [4] 国立天文台、2012年5月21日金環日食、
<http://naojcamp.mtk.nao.ac.jp/phenomena/20120521/>
- [5] 金環日食限界線共同観測プロジェクト、
<http://www.eclipse2012.jp/>
- [6] 世界天文年2009「めざせ1000万人！みんなで星を見よう」、天文教育 2010年7月号、p.50、
<http://star2009.jp>

※金環日食限界線研究会

井上 毅(明石市立天文科学館):代表
時政典孝(西はりま天文台公園)
大西浩次(長野工業高等専門学校)
相馬 充(国立天文台)
早水 勉(薩摩川内市せんだい宇宙館)
安藤亨平(郡山市ふれあい科学館)
石坂千春(大阪市立科学館)、
鶴浜義治(つるちゃんのプラネタリウム)
福原直人(星が好きな人のための新着情報)
岸本 浩(兵庫県立須磨東高校)
半田利弘(鹿児島大学)
有本淳一(京都市立塔南高校)
近藤正宏(郡山市ふれあい科学館)

谷川智康(三田祥雲館高校)
洞口俊博(国立科学博物館)
島 浩二(岡山商科大学附属高等学校)
西野藍子(大阪市立科学館)
高橋 進(ダイニックアストロパーク)
井上和俊(元大阪府立箕面高校)
山村秀人(滋賀県立長浜北星高校)
艶島憲昭(熊本県民天文台)
松井聡(長野県上田市)
鈴木康史(明石市立天文科学館)
比嘉義裕(ひが企画)
佐藤信(仙台天文同好会)
薄 謙一(福島県郡山市)
山内 誠(宮崎大学)
渡部勇人(三重県いなべ市)
高村裕三朗(愛知県立一宮高校)
小和田稔(静岡県浜松市)
高島英雄(千葉県柏市)
富岡啓行(茨城県日立市)
河野健太(宮崎県小林西高校)
斉藤 泉(栃木県子ども総合科学館)
船越浩海(岐阜県ハートピア安八)
是恒邦通(明治大学天文部OB)
安藤和真(せんだい宇宙館)
塩田和生(日食情報センター)
百瀬雅彦(塩尻星の会)
武島佑季(帝京大学)
野澤 恵(茨城大学)
福本晃造(神戸市立工業高等専門学校)
福士碧沙(ワオコーポレーション)
竹内彰継(米子高等専門学校)
渡辺文雄(上田創造館)
渡辺裕之(岐阜県不破郡垂井町)
宮下和久(塩尻市立丘中学校)
壺井宏泰(兵庫県立北須磨高等学校)
(順不同、敬称略、所属は2012年現在)