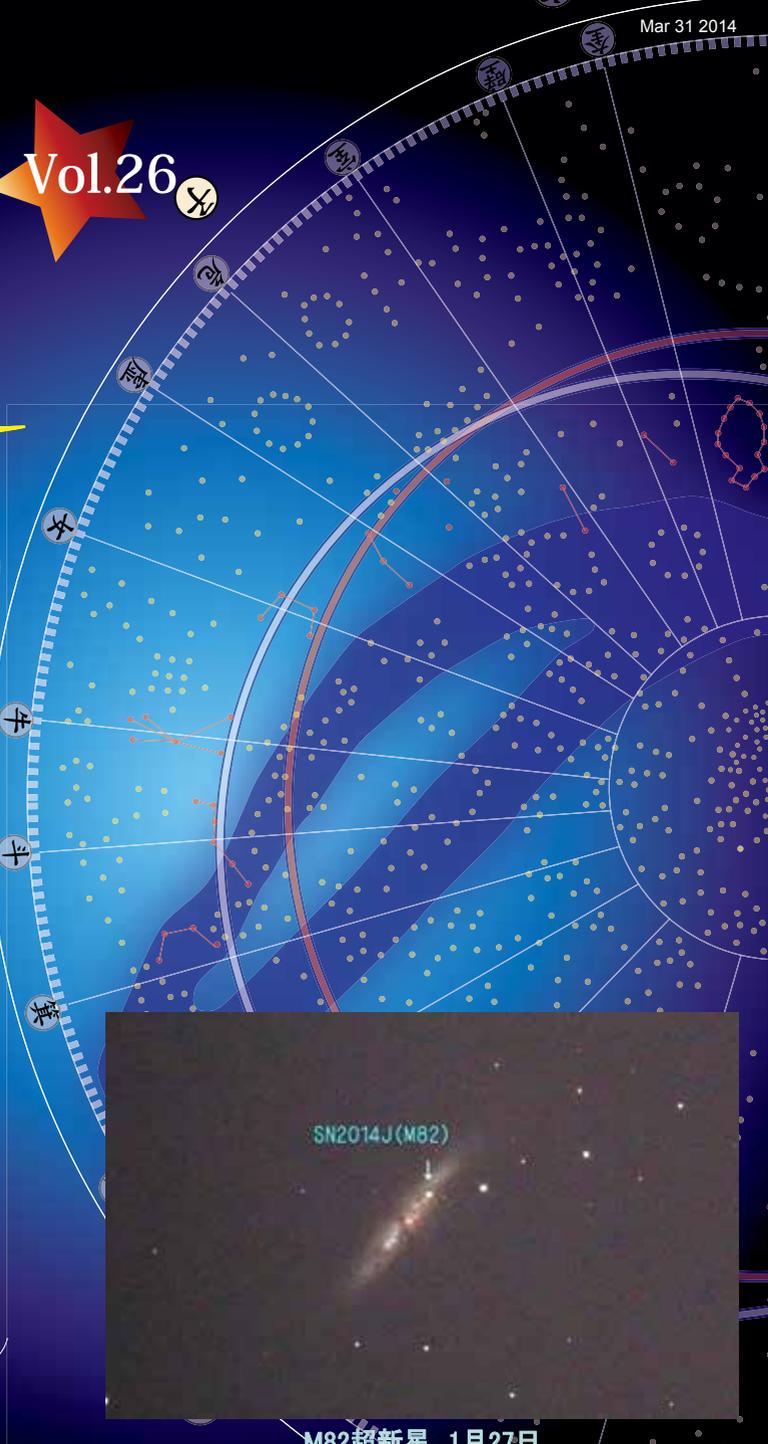


会報

Vol.26

# astron

astron



M82超新星 1月27日



NPO法人 花山星空ネットワーク

## あすとろん 第25号 目次

特集 太陽半径研究会一		
日食観測から求める太陽半径	井上 毅	1
太陽半径は変動しているか?	黒河宏企	2
賀茂川プロジェクト金環日食北限界線の解析報告	家邊國昭	19
限界線はどこだ? —その3—	山村秀人	25
「金環日食限界線研究会」チームBの観測報告	相馬 充	29
ベイリービーズのビデオ観測による太陽の周縁減光 と太陽半径の測定	宮下和久	36
初めてのボランティアの日・木星観望会	宮川美栄子	43
星空文芸欄 川柳・小噺	高尾和人他	45
切り絵 葛飾北斎「鳥越の不二」	小野隆久	47
M82 に現れた超新星 2014J	永田駿介	49
お知らせ	事務局	53

表紙画像 M82 に現れた超新星  
秋田勲氏撮像  
城陽市にて 1月27日 21時

裏表紙画像 ユカワサクラ  
編集子撮影  
京大基礎物理学研究所前にて 3月31日

特集太陽半径研究会

## 日食観測から求める太陽半径

井上 毅（明石市立天文科学館／金環日食限界線研究会）

2012年5月の金環日食では、金環日食限界線研究会（チームB）と認定NPO法人花山星空ネットワーク（賀茂川プロジェクト）により、太陽半径を求める観測が行われました。両者のそれぞれのまとめを報告することを目的として2014年2月に、「日食観測から求める太陽半径研究会」が開催されました。

本会では、まず黒河宏企さん（花山星空ネットワーク）が「太陽外層大気構造と太陽半径の観測」と題した導入講演を行ない、日食観測から太陽半径を求めるこれまでの研究例などの背景を紹介しました。続いて、花山星空ネットワークによる賀茂川プロジェクトについて、山村秀人さん（滋賀県立長浜北星高等学校）と、家邊国昭さん（花山星空ネットワーク）が解析報告しました。その後、金環日食限界線研究会チームBからの報告として、相馬充さん（国立天文台）による観測報告と、宮下和久さん（長野県塩尻市立丘中学校）から解析の報告をしました。

この度の金環日食の観測・解析は、機器の発達や大規模な観測態勢の整備、新しい解析技術の開発などにより過去に例のないものとなりました。得られた知見をまとめた本講演録は貴重な財産になるでしょう。



研究会参加者による記念写真  
（京都大学理学研究科4号館／2014年2月22日）

特集

太陽半径は変動しているか？ —測定方法の検証—

黒河宏企 (NPO 法人花山星空ネットワーク)

I. はじめに

この話のテーマは、「太陽半径がこれまでどのような方法でどの程度の精度で測られてきたのか？」を紹介することであるが、その前に、この2年間半にわたって太陽半径と関わることになった、賀茂川プロジェクトの話から始めたい。

そもそも太陽研究にとっては、日食観測と云えば皆既日食のことであり、太陽表面（光球）の外側に広がる彩層・コロナの温度や密度などの物理構造の基本的な知見はすべて皆既日食から得られたと云っても過言ではない。私も現役時代には皆既日食に5回遠征して彩層コロナの観測を行ったが、今回このようにして、金環日食で太陽半径を観測することになるとは、2年半前までは夢にも思わないことであった。

どのようにして、2012年5月21日の金環日食を観測することになったのか、賀茂川に沿って8台の望遠鏡を並べた賀茂川プロジェクトがどのようにして始まったのか、については、既に「あすとろん」19号に報告されているので、そちらをご参照願いたい。

日食当日観測終了後、新聞テレビ報道関係者の求めに応じて、観測者全員が賀茂川から花山天文台に上がり、ホットな観測映像を図書室のスクリーンに順次投影して、金環日食北限界線の予備的決定を試みる検討会を開催した。報道各社は夕方のTVニュースや夕刊・朝刊の記事を念頭に、「限界線の予想値からのずれ？」「太陽半径は標準値に比べてどうでしたか？」と攻め立てたが、「映像を見ただけでは即断できません。」「ベイリービーズの光量の時間変化をきっちり測定して初めて結果が出ます。」と答えるしかなかったのは予想通りであった。「どれくらいしたらその結果が出ますか？」という追い打ちには、「観測者の中には学校の先生もいるので、夏休みが終わる8月末くらいですかね」と答えたように記憶している。実際はほぼその通りに皆さんに頑張ってもらったので、6月23日の第1回解析検討会を皮切りに、9月17日には第6回を開催して中間結果をまとめることが出来たので、それを9月20日の天文学会24年度秋季年会で報告したのであった。

その後最終まとめに向けて、更に解析の精度を上げるべく、解析会を続けたが、次々と新しい問題点やアイデアが出て、解析を再度やり直したこともあって、とうとう観測から1年9カ月後のこの研究会の直前までに、

## ☆・太陽半径は変動しているか？・☆

解析検討会は第 16 回目を数えることになった。ある程度の期待はしていたが、ここまで続くとはとても想像しなかったことであり、チームの皆さんの粘りに改めて敬意を表したい。

### II. 太陽の素顔と周期的変動

恒星は高温のガス球であるので、大なり小なり変動しているはずであるが、夜空に輝く星は余りにも遠いので、その素顔を見ることは出来ない。それでも中には変光星と呼ばれて、その明るさの変動が観測出来る星は珍しくなく、実際に半径が脈打つように周期的に変動しているらしい脈動変光星も多く存在する。それに比して太陽は、中心核で水素がヘリウムに変わる核融合反応によって、現在最も安定した成年期を過ごしているので、内部構造モデルの計算によると、1 年間でわずか 2.4cm、100 万年間でも 24km しか半径が変動していないと考えられている。にもかかわらず、「現在までに発表されている太陽半径の測定値はかなりのばらつきや周期変動を見せているのはなぜだろうか？」この疑問に対する何らかの解答を得ようとするのが、この話の試みである。

本題に入る前に、一通り我々が太陽の素顔をみておくことにしよう。約 1500 万度の中心核で発生したエネルギーは、輻射と対流で外に運ばれて、光球と呼ばれる表面から惑星間空間に放射されている。光球面は約 5800 度でやや黄色みを帯びた白色で輝いているが、その中に黒点と呼ばれる約 4000 度の低温部分が消長を繰り返しているのが見られる（図 1）。光球の縁はくっきりとしているが、これで終わりではなく、皆既日食で月が完全に光球を隠すと、その外側には図 2 と図 3 のような彩層とコロナが見えて来る。彩層は太陽半径の約 150 分の 1 くらいの厚みしかないので、



図 1. 光球と黒点



図 2. 彩層と内部コロナ



図 3. コロナ



図 4. 水素H $\alpha$ 線で観測した彩層ジェット（飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で、西川宝氏撮影）

## ☆・太陽半径は変動しているか？・☆

光球が月によって完全に隠される皆既の始まり（第 2 接触）直後と皆既が終わる（第 3 接触）直前の約 10 秒間しか見えないが、図 2 の写真左上の明るい光球のすぐ横に少しだけ見えているのがそれである。しかし最近の太陽望遠鏡に水素 H $\alpha$  線のみを通すフィルターを付けると、図 4 のように彩層は針状に噴出している約 1 万度のジェット集合であることが判る。コロナは王冠のように見えたり（図 2）鳥の羽のように（図 3）広がって見えたりしてその神秘的な姿の正体は長い間謎であったが、20 世紀半ばになってやっと 100 万度以上という高温であることが判った。しかしなぜコロナがこのような高温になっているのかについては、現在でも未だ解明されていない。

さて、このように詳しく見れば見るほど、太陽はいつも同じ顔をしているのではなく、むしろ常に激しく変動している姿が浮かび上がってくる。その変動の源は強い磁場を持って光球に現れる黒点（図 1）であり、その黒点の数は 11 年周期で変動して（図 5）、それに伴って太陽磁場活動が大きく変動していることが判っている。図 5 で見てわかるように、この 11 年周期に加えて約 100 年単位の大きな変動も見られ、1645 年から 1715 年の間には黒点がほとんど表れない「マウンダー極小期」と呼ばれる特異な時期もあったことも判る。「最近太陽がどうも変だよ」という話が良く語られるが、それは現在の黒点数極大期が 100 年ぶりに小さいものとなっていて（図 5）、太陽磁場活動も低調になっているためである。350 年前のマウンダー極小期にはヨーロッパではミニ氷河期と呼ばれるほど異常に寒かったことから、今回の太陽活動低下がどれほど続くのか、どれほど地球気候に影響するのか気になる話であるが、この話題は次の機会に譲ることにして、最後に太陽活動と太陽定数の変化だけ、見ておくことにしよう。

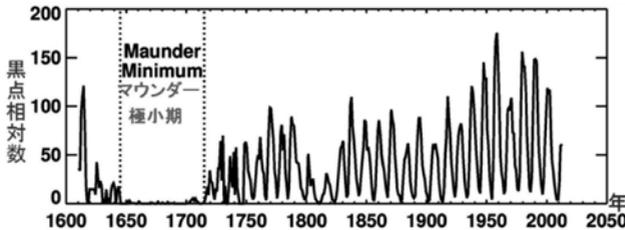


図 5. 黒点相対数の年変化  
(1610 年～2013 年) (NASA  
ホームページより)

太陽定数の変化は地上からの観測ではなかなかはっきりしなかったが、1979 年以来始まった様々な人工衛星による測定をつなぎ合わせてみると 0.1% という小さい幅ではあるが、確かに太陽黒点数の増減ときれいに同期して変動していることが明らかになっている（図 6）。さてそれでは、太陽半径も太陽活動と共に変動しているのであろうか？

☆・太陽半径は変動しているか？・☆

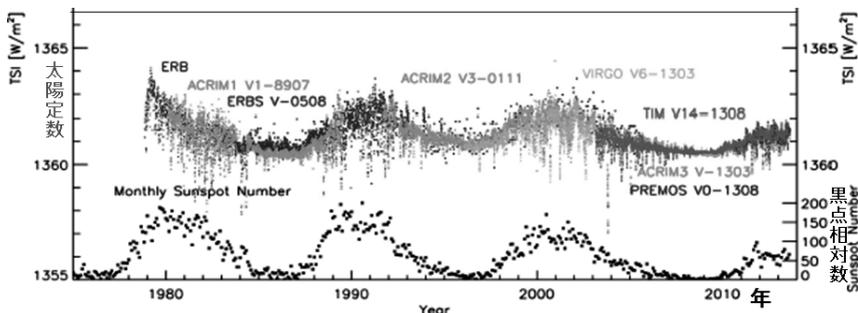


図 6. 太陽定数 (上) と黒点相対数 (下) の年変化 (1979 年～2013 年) (NASA 発表)  
太陽定数の変動と黒点数の増減は良く同期している

### Ⅲ. どこまでが太陽半径か？

地球の表面は固体なので、その上に広がる大気との境界ははっきりしているが、太陽は全体がガスなので、「どこが表面か?」「どこまでが半径なのか?」を定義しておかねばならない。言い換えれば、太陽の「どれほど深くまで見通せているか」ということである。見通せる深さは、その手前にあるガスの濃さ(密度  $\rho$ )と、ガスが光を吸収する度合い(吸収係数  $k_\lambda$ )によって決まるので、それらと距離を掛け合わせた量「光学的深さ  $\tau_\lambda$ 」が、見通す深さの尺度として使われている。即ち、図 7 で示されているように、「ある距離  $z$  までの光学的深さ  $\tau_\lambda$ 」は、「吸収係数  $k_\lambda$ 」と「密度  $\rho$ 」をかけた量を、 $z$  から  $\infty$  (観測者の位置) までの距離に亘って足し合わせた(積分した)量として、以下の式のように定義される。この式の中で、吸収係数  $k_\lambda$  は光の波長  $\lambda$  によって違うので、光学的厚さ  $\tau_\lambda$  も波長によって異なる量となっている。

$$\tau_\lambda = \int_z^\infty \rho k_\lambda dz$$

さて、実際に太陽光球表面の深さを定義する際には、可視光の真ん中付近の波長 500nm の光を利用しており、「波長 500nm での光学的深さが 1 になる深さ」を太陽光球表面として定義している。即ち、図 7 に示されているように、 $\tau_{500\text{nm}} = 1$  の深さを太陽光球表面  $z = 0$  と決めているのである。

ところで、こうして決められた太陽光球の表面と太陽中心の間の距離を図 8 では  $R_\odot$  と書いているが、これが我々の求めようとしている太陽半径であると定義して良いのであろうか? もう一度図 1 の太陽光球像を見てみよう。我々が求めようとしている太陽半径はこの太陽像の直径の半分で



# 株式会社 西村製作所

代表取締役 西村 有二

〒601-8115

京都市南区上鳥羽尻切町 10 番地

TEL 075-691-9589

FAX 075-672-1338

<http://www.nishimura-opt.co.jp>

【事業内容】望遠鏡・天体観測機器製造



## CHUO

## 天体観測機器・光学機器 設計/製作



豊かな想像力と確かな技術力

有限会社 中央光学

〒491-0827 愛知県一宮市三ツ井 8-5-1

TEL:0586-81-3517 FAX:0586-81-3518

<http://www.chuo-opt.com>



ローヌ川の星月夜

ゴッホ作

[http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Starry\\_Night\\_Over\\_the\\_Rhone.jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Starry_Night_Over_the_Rhone.jpg)

☆・太陽半径は変動しているか？・☆

あり、この太陽像の中心と縁の間の距離であるはずであるが、これは上の

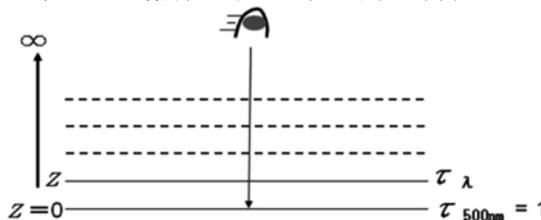


図7. 太陽光球表面（深さ  $z=0$ ）の定義：波長  $500\text{nm}$  での光学的厚さ  $\tau_{500\text{nm}}=1$

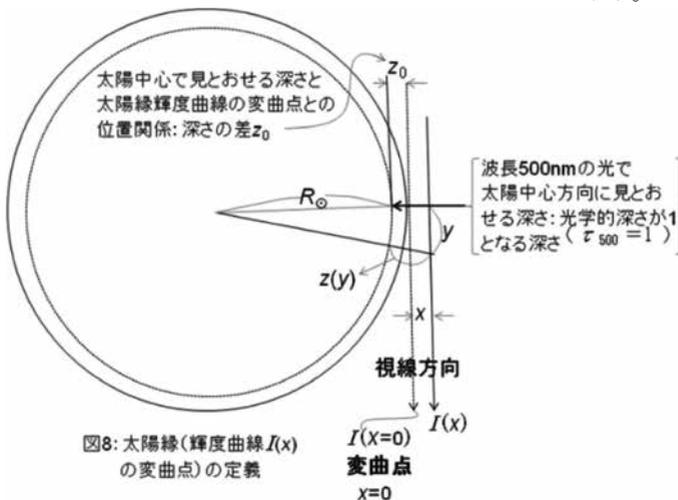
定義から決めた  $R_\odot$  と同じであると云って良いのであろうか？ どうもそうではないことは、図8を見れば明らかであろう。太陽像の縁を見る場合には、視線方向（ $y$  方向）が太陽の深さ方向と直角に近くなるので、太陽中心を見た時に定義した  $\tau_{500\text{nm}}=1$  の深さまでは見えないのである。即ち、図8では、 $y$  方向に垂直に  $x$  軸を取って、 $x=0$  に太陽縁の実線円を合わせているが、半径  $R_\odot$  の光球表面を表す点線円と実線円の半径の間には  $z_0$  の差があることがわかる。

さて、結局結論としては、太陽像の半径を求めるために、太陽像の縁である  $x=0$  の位置を正確に決定する必要があるということである。太陽縁で視線方向に観測される  $x$  方向の輝度分布  $I_\lambda(x)$  は、以下のように表される。

$$I_\lambda(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B_\lambda(z) e^{-\tau_\lambda(x,y)} k_\lambda(z) dy$$

ここで、 $B_\lambda(z)$  は、黒体輻射のプランク関数であり、

$$z(y) = (z_0 + x) + y^2 / (2 R_\odot) \quad \text{である。}$$



この輝度分布  $I_\lambda(x)$  は太陽縁では急激に減衰するので、太陽縁  $x=0$  の定義として、この輝度分布の変曲点を用いることが一般的である。

この変曲点の位置での太陽半径を  $R_i$  と

## ☆・太陽半径は変動しているか？・☆

すると、図 8 より  $R_i = R_o + z_o$  であるが、この関係は光球から彩層に至るモデル大気を用いれば計算することが出来る。実際、例えば Wittmann(1974)によると、 $z_o \sim 340\text{km}$  である。また、最近日振学によって、太陽大気の基本振動である  $f\text{mode}$  の測定から、太陽半径  $R_R$  が求められているが、この  $R_R$  は内部構造モデルで扱う表面に相当するので、 $R_o$  に近い値を与えることになる。例えば、Haberreiter et al (2008)によると、 $R_R \sim R_o + 14\text{ km}$  であるので、我々の求める  $R_i$  との間には  $R_i \sim R_R + 330\text{km}$  の関係があると考えれば良い。

### IV. 過去の観測結果

太陽の大きさは、天文学全般において基本的で重要な量であるが、日食や惑星の日面通過の予報などに必要なことから判るように、その測定は主に位置天文学の分野の仕事として位置付けられてきている。実際、現在の太陽物理学の研究者達は、「1 秒角程度の粒状斑の間に見え隠れする 0.1 秒角の磁場の輝点の消長」を追っかけてはいるが、「1000 秒角近い太陽半径が 0.05 秒角程度変化しているかどうか」について興味を持っている人は、今のところ非常に少ないというのが、現状であろう。ともあれ、これまでの測定結果を見ておくことにしよう。

#### (1) 現在の標準値

日食予報の計算や太陽半径の変動を議論する際に、現在標準値として国際的に使われている値は、なんと今から 123 年も前に、ドイツの A.Auwers(1891)によって発表された値である。「Der Sonnendurchmesser und der Venusdurchmesser nach den Beobachtungen an den Heliometern der Duetschen Venus-Expeditionen」という論文のタイトルからうかがえるように、1874 年と 1882 年の金星日面通過の際に各地に派遣された観測隊の結果を平均して、1 天文単位における太陽半径を 1919.26 秒角と求めている。即ち、この値の半分である 959.63 秒角が現在も太陽半径の国際的な標準値として用いられている。1 天文単位は  $1.49597870 \times 10^8 \text{km}$  であるので、太陽半径を長さで表わすと、 $6.9599 \times 10^5 \text{km}$  となるが、国際天文学連合では、 $6.96 \times 10^5 \text{km}$  を公認値としており、理科年表にもこの値が掲載されているので、今後長さの標準値としてはこれを使用することにする。

#### (2) 長期的変動

J.A.Eddy and A.A. Boornazian (1979)は、グリニッジ天文台の子午環による 1836 年～1953 年に亘る観測が、「1 世紀で 2.25 秒角の割合で太陽直径が減少している」ことに注目したが、Parkinson et al. (1980)は、水星日面通過や日食の観測データからこれを否定した。この J. A. Eddy は、1976

☆・太陽半径は変動しているか？・☆

年に、「マウンダー極小期は確かに存在する」という論文を雑誌 science に発表して、一躍有名になった人であるが、このグリニッジ天文台の観測については、見誤ったようである。

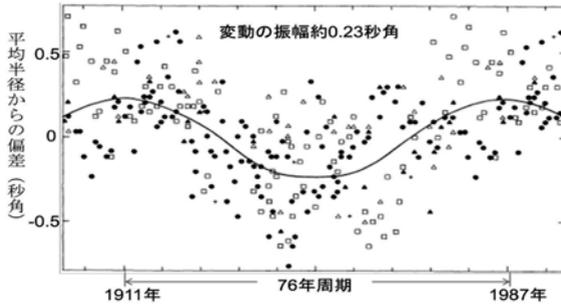


図9. 過去の様々な観測から求めた76年周期変動 (Gilliland, 1981)

また、マウンダー極小期の間の 53 年間(1666 年～1718 年)では、太陽半径が約 2 秒角増加していたという観測の報告もある (Ribes et al. (1987)) かと思います。一方では、1670 年～1990 年までの約 300 年間で、太陽半径の変動は標準値に対して約 $\pm 1.5$  秒角の範囲に 納まっているという報告 (Toulmonde(1997)) もある。更に、Gilliland(1981)は、1720 年から 265 年間の様々な観測による測定値の統計を取ることによって、図 9 のような 76 年の周期変動があることを主張している。しかしながら、図 9 から判るように、過去の観測のばらつきは余りにも大きいので、これらはいずれも周期的あるいは系統的な変動があるかどうかの議論に耐えられるほどのものではないと考えるのが妥当であろう。

それでは、最近の観測はどうであろうか？ 以下に順次、様々な観測方法を紹介しながら、どれほど信頼出来る結果が得られてきているかを見て行くことにしよう。

V. 太陽の日周運動の時間を測る

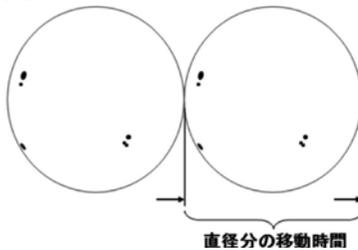


図 10. ソーラープロジェクターによる黒点のスケッチと太陽直径の測定

☆・太陽半径は変動しているか？・☆

太陽の日周運動を手軽に測るにはソーラープロジェクターを使うのが良い。これはもともと、学校で簡単に黒点のスケッチが出来るようにと考えて開発したものであるが、実際に使ってみると、誰しもが「へーこんなに太陽像が動くのか」とその速さに驚くので、天体の日周運動と地球の自転に気付く天文学体験から始めることになる。それから「折角だから、太陽像が直径分移動する時間を測定しましょう」ということになればしめたもので、この時間から太陽の視直径を計算することが出来る訳である。

(1) 子午線通過時刻の測定

前章で紹介したグリニッチ天文台のように、子午環を使った測定は、南中時に、太陽の東の縁と西の縁が子午線を通過する時刻を測定して、その差から視直径を求めたものである。昔はもちろん眼視観測であったが、最近では光電素子を使って太陽縁の検出が自動的に行なわれるようになっていいる。例えば、米国のHAO天文台のSolar Diameter Monitorは図10のような装置で、1981年以來、毎日太陽直径を測定した (Brown et al. 1982)。

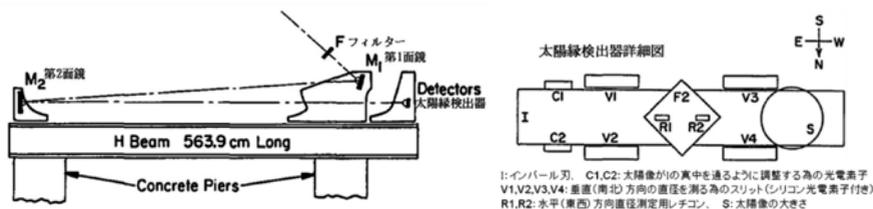


図 11. HAO 天文台の太陽直径測定器システムの模型図

この装置による6年間(1981年~1987年)にわたる測定結果は図12に与えられているようなものであった。ここでは、1 キャリントン回転周期(27.275日)に亘る平均値が示されているが、平均二乗偏差は約0.4秒角であり、この範囲を超えるような有意な変動は検出されなかった。(Brown and Christensen-Dalsgaard; 1998)

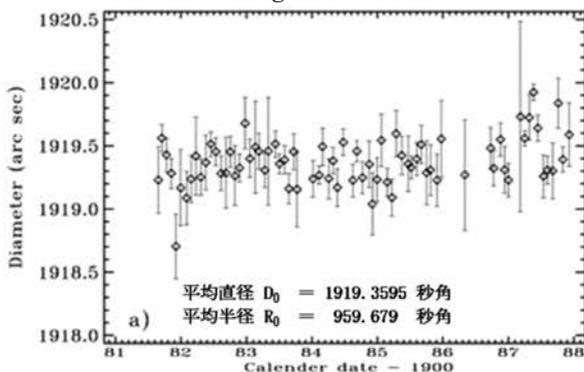


図 12: HAO 天文台の太陽半径測定結果 (1981~1988): 測定誤差を越える変動は検出されていない

☆・太陽半径は変動しているか？・☆

(2) Danjon アストロラーベによる測定

アストロラーベという、古代から天体の方向を測るために使われてきた平面アストロラーベのことを指す場合もあるが、ここで云うアストロラーベはレンズとプリズムを用いたもので、全く違うものである。20世紀初頭に考案されたが、フランスの André-Louis Danjon (1890-1967) が星の高度と時角を同時に精度良く決める本格的なものに仕上げたので、Danjon アストロラーベと呼ぶことがある。その原理は図13に示されている (Danjon 1958)。

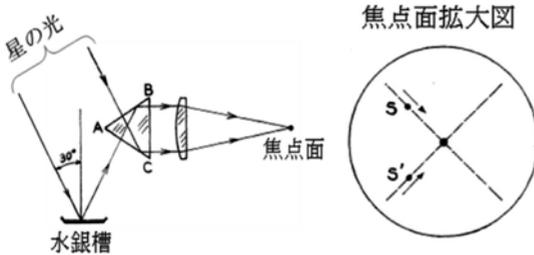


図13 (左) Danjon アストロラーベの模型図。(右) 焦点面拡大図。同じ星の二つの像  $s, s'$  が交差する瞬間を測定し、その星の天頂距離が 30 度となる時刻を決定する。

星の光の半分を水銀の表面で反射させてから、60度プリズムに入射させるので、焦点面では同じ星の二つの星像が結像するので、その星が天頂距離30度に近づくにつれて二つの星像はたがいに近づくので、交叉した瞬間を測定すれば、その星が高度60度に達した時刻が決定出来る訳である。

Danjon アストロラーベによる太陽半径の測定は、やはりフランスの Calern 天文台で、1975年から始まった。初めて聞く名前天文台であるが、地中海に面したリゾートである Nice やカンヌ映画祭で知られる Cannes に近いと聞くと、一度訪ねて見たい気もする。この改良型のアストロラーベでは、角度の違う11種のプリズムを取り替えることによって、11の太陽高度で1日最大22回まで測定することが出来た。最初は眼視測定であったが、1989年から CCD による自動観測に切り替えられた。

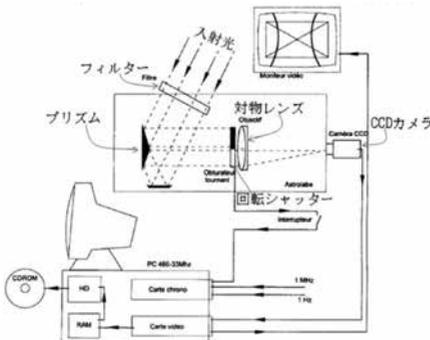


図14. フランス Calern 天文台の CCD アストロラーベ。プリズムに直接入射する光と水銀槽で反射させた光による二つの太陽像が互いに重ならないように、対物レンズの前の回転シャッターを CCD カメラのシャッターと同期させて撮影している。

## ☆・太陽半径は変動しているか？・☆

図 14 は CCD アストロラーベの模型図 (Sinceac et al. (1998) ) である。Laclare et al. (1996) は 1975 年から 1994 年に亘る Calern 天文台での太陽半径の観測結果を以下のようにまとめている。

(i) 眼視測定による平均値は 959.42 秒角で、CCD 観測の平均値は 959.40 秒角で互いに良く合っているが、両方とも標準値や他の測定より小さい。

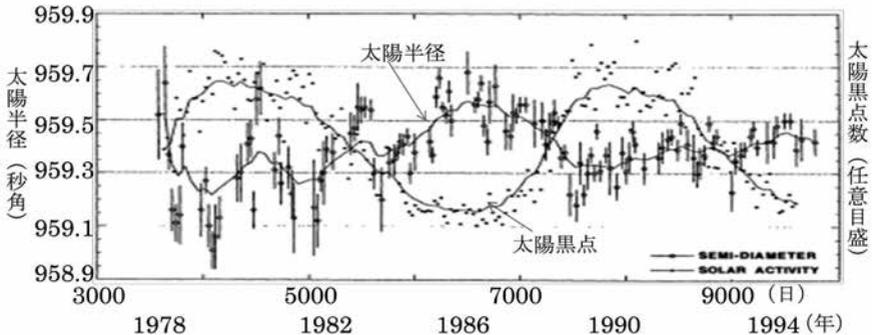


図 15. Calern 天文台で得られた 1978 年～1994 年の太陽半径の変動。各点の縦線は標準偏差。太陽黒点数の変動と逆相関となっている (Laclare et al. (1996))。

(ii) 太陽半径の月間平均値の標準偏差 (図 15 の各点に付けられた縦線) はかなり大きいものの、1978 年～1994 年の 17 年間に亘って、変動が見られ、太陽黒点数の変動と逆相関となっている(図15)。しかし、他のアストロラーベの観測では、この Calern 天文台の結果と正反対の結果も報告されている。即ち Noel(2004)は、1990 年～2003 年の 13 年間に亘って、Santiago のチリ国立天文台の Danjon アストロラーベ使って観測した結果、太陽半径と太陽黒点数の変動が非常に良い相関を示していると報告しているのである。このような異なるアストロラーベによる観測結果の違いについて、Djafer and Irbah(2012)は太陽縁の決定方法のシミュレーションから、気流の乱れの見積もり方の違いによって約 0.13 秒角の誤差が生ずることを示している。

## VI. 太陽像直径の直接測定

大気圏外では気流の乱れに影響されない安定した太陽像が得られるので、気球や人工衛星に搭載した望遠鏡で、太陽半径の変動を測定する試みがなされている。

### (1) 気球による観測

太陽半径とその変動、扁平度の精密測定を目的として、米国のグループ

☆・太陽半径は変動しているか？・☆

が開発して、Solar Disk Sextant (SDS)と呼んでいる望遠鏡は図 16 のようなものである。

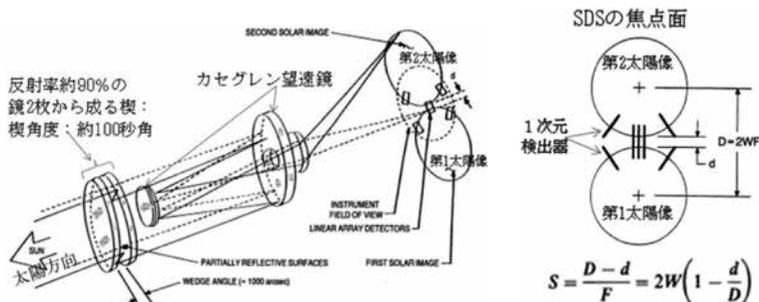


図 16. Solar Disk Sextant (SDS) 望遠鏡とその焦点面模式図と太陽半径  $S$  の決定式。

図から判るように、これは、相対する面を高精度に研磨した 2 枚の鏡を互いに約 100 秒角傾けた楔をカセグレン望遠鏡の前に置いて、焦点面に二つの太陽像を作っている。望遠鏡の焦点距離  $F$  と楔の角度  $W$  はあらかじめ測定済であるので、二つの太陽像の中心間距離は  $D = 2WF$  で与えられる。焦点面に置かれた 7 本の 1 次元アレイ検出器によって、 $d$  を精密に測定すれば、太陽の視直径は  $S = (D - d) / F$  と求めることが出来る訳である。彼らはこの装置を 1990 年、から 1996 年までの間に 5 回気球に搭載して、太陽半径の測定に成功している。この結果、1992 年から 1996 年にかけて、太陽半径は約 959.5 秒角から 959.7 秒角へ約 0.2 秒角増加しており、太陽活動とは反相関を示していると報告している (Egidi et al 2006)。しかし、一方では、気球飛行時の環境の違いによる系統誤差があったり、同じデータでも太陽縁の決め方によって、約 0.1 秒角近い差が出た (Djafer et al、2008) との報告もあり、今後の課題である。

(2) 人工衛星による観測

我々の生命は地球大気によって、危険な太陽紫外線や X 線から守られているが、その為に逆に地上から紫外線や X 線で天体を観測することが出来ない。従って、人工衛星による天体観測は、まず紫外線や X 線望遠鏡から始まったが、最近では NASA の「ハッブル宇宙望遠鏡」や日本の「ひので太陽観測衛星」のように、可視光望遠鏡も地球を回るようになった。これは、地上では気流の揺らぎのために、超微細構造の変化を正確に見ることが出来ないからである。なお、超微細構造を研究している「ひので」の空間分解能は 0.2 秒角と非常に高いが、逆に視野は狭いので、太陽直径の微細

## ☆・太陽半径は変動しているか？・☆

な変化を測定することは出来ない。

欧州と米国が協同で打ち上げた SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) の MDI(Michelson Doppler Imager)は太陽全面の磁場活動と太陽内部の構造を調べる役割を果たしたが、太陽全面像を撮影していたので、太陽直径を測ることに利用された。望遠鏡システムの分解能は約 4 秒角と良くないので、像のひずみなど様々な誤差要因を補正して太陽半径の絶対値を求めるのは簡単ではないが、2003 年 5 月の水星日面通過を利用した誤差補正などによって、 $959.28 \pm 0.15$  秒角という値を出している (Kuhn et. 2004)。また、焦点移動や温度変化などの補正を加えた結果、Bush et al (2010) は、1998 年～2010 年の 12 年間に亘って、太陽半径はほぼ一定であり、系統的な変化らしきものはあるものの、それは高々 0.023 秒角程度であり、太陽黒点数との相関もはっきりしないと報告している (図 17)。

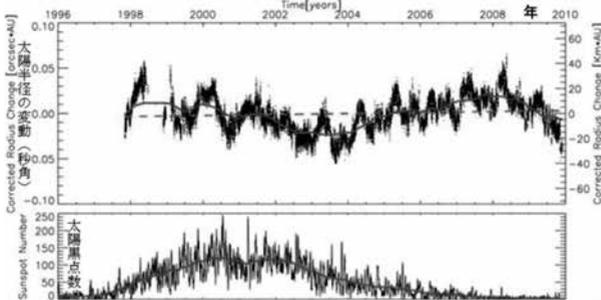


図 17. SOHO 衛星 MDI 望遠鏡による、1998～2010 に亘る太陽半径の平均値からのずれ。

## VII. 水星・金星の日面通過を用いる方法

水星や金星の日面通過の際に、接触時間の測定から太陽半径を求めることができる。この方法は17世紀以来使われてきたが、地上観測ではやはり気流の乱れによって、接触の瞬間の正確な決定が難しい。大気圏外での観測はこの気流の影響を受けないので、より良い精度が期待できる。実際、2003年5月と2006年11月の水星日面通過において、SOHOのMDIが観測しており、その結果として、 $960.12 \pm 0.09$  秒角( $696,342 \pm 65$  km)という値を報告している (Emilio,2012)。

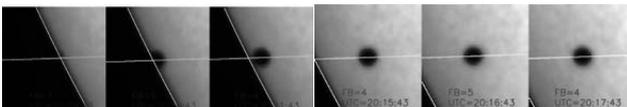


図18. SOHO衛星のMDIで観測された2008年11月の水星日面通過

## VIII. 日食観測による方法

皆既日食の利点は、大気圏外で月が太陽光球を完全に隠すので、空が暗

☆・太陽半径は変動しているか？・☆

くなくて、平素見られないコロナや彩層が見られることである。更にもう一つの利点は、月が非常に規則正しく太陽を隠したり出したりするので、太陽の光球から彩層に至る薄い層の高さ変化を精密に測定できることである。地上観測では太陽の縁の形は気流の乱れによって広げられて、そのままでは正確な強度分布が得られないが、日食の際には、図 19 のように、月の山・谷の外に出ている光量を全部足し合わせた積分値  $E$  を測定すると、そこには気流で広げられた光量がとにかく全部入っているのです、積分値の

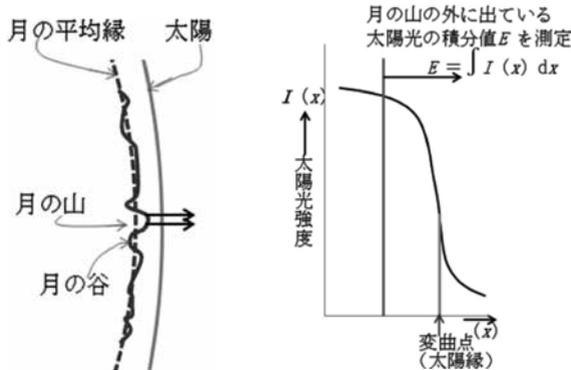


図 19. 太陽縁での太陽光強度  $I(x)$  変化 (右図) と月の山・谷の外に残る太陽光 (左図) を全部積分した値  $E$  との関係。

高さ変化  $I(x)$  (日食曲線) は、気流の乱れに影響されないものが得られる。そこでこの日食曲線を微分すれば、太陽縁の正確な輝度分布  $I(x)$  を求めることが出来る。この方法によって太陽光球から低部彩層にいたる大気モデル (温度密度分布) の検証が行われて来た (Kurokawa et al., 1974)。

また、この方法で求められた輝度分布の変曲点から太陽縁の位置が正確に決まるので (図 19)、太陽半径決定の有力な手段ともなる訳である。実際、私の大学時代の同級生である Kubo(1993)は、1970年、1973年、1980年、1991年の皆既日食で得た観測データを解析して、太陽半径を求めている。図 20 中に+印で示されているのが彼の結果である。

さて、今回の我々の観測も基本的にはこの同じ方法によるものであるが、違うのは皆既日食ではなく金環日食であるということである。金環日食の場合は、皆既日食に比べて空が格段に明るい状態のままであるので、太陽縁の輝度分布の最後の最も暗い部分は空の明るさに埋もれてしまっており求めることが出来ない。従って、Kurokawa et al.(1974)のような大気モデルの検証は期待できない。金環日食の場合果たしてどの暗さまで正

## ☆・太陽半径は変動しているか？・☆

確な輝度分布が求められるかどうか？ 今回が初めての試みであるので、実はこの点に一抹の不安を抱いていたが、この後に続く皆さんの報告で明らかにされるように、光度が急に落ちる変曲点の決定は十分な精度で可能であることが実証されたので、今後太陽半径の決定に金環日食も重要な役割を果たすことになるであろう。

### IX. 太陽大気速度場の f-mode 振動から求める方法

第III章でも述べたように、日振学によっても、太陽半径が求められるようになった。日振学という名は地球の地震による内部構造診断の方法になぞらえたものであるが、太陽大気の固有振動を測定して、太陽内部の構造を研究する手法である。太陽大気の振動は内部の対流によって叩かれて発生しているが、様々なモードの固有振動が観測されている。その中で、太陽全体が共鳴する基本振動である  $f$  mode (fundamental mode) の振動数  $\omega$  は

$$\omega = \sqrt{gk} \quad g = GM/R^2 \quad \text{水平波数 } k = \sqrt{l(l+1)}/R$$

$g$ : 重力加速度、 $G$ : 万有引力定数、 $M$ : 太陽質量、 $R$ : 太陽半径

と表されるので、結局、 $\omega \sim R^{3/2}$  として、太陽半径に関係しているので、これを測定することによって、太陽半径が求められる訳である。

但し、第III章で述べたように、この方法で求められる太陽半径  $R_f$  と第V章から第VIII章までの方法で求められる半径  $R_i$  との間には、 $R_i \sim R_f + 330\text{km}$  の関係があることを忘れてはいけない。

これまでに報告されている  $R_f$  の結果としては、標準半径  $R_0 = 695.99 \text{ Mm}$  に対して、SOHO MDI による観測からは、 $R_f = R_0 - 0.3 \text{ Mm}$  (Schou et al., 1997)、地上の GONG ネットワークの観測からは  $R_f = R_0 - 0.2 \text{ Mm}$  (Antia, 1998) などがある。

### X. まとめ

以上見てきた通り、太陽半径の精密測定に対して様々な手法で、多くの試みがなされてきているが、それらの結果が如何にばらついているかが、以下の図 20 (Emilio et al., 2012) を見ても一目瞭然である。

このような結果を総合すると、「太陽半径は変動しているか？」という今回のテーマについては、「今のところ何とも言えない」というのが私の率直な答えである。

特に第V章 (1) (2) の日周運動の時刻測定から求めた結果に大きなばらつきが見られるのは、やはり気流の乱れの影響が大きいためと考えるのが自然であろう。この意味で、今後は、気流の影響を受けない大気圏外からの観測と日食観測の継続が、「太陽半径は変動しているか？」という問題

☆・太陽半径は変動しているか？・☆

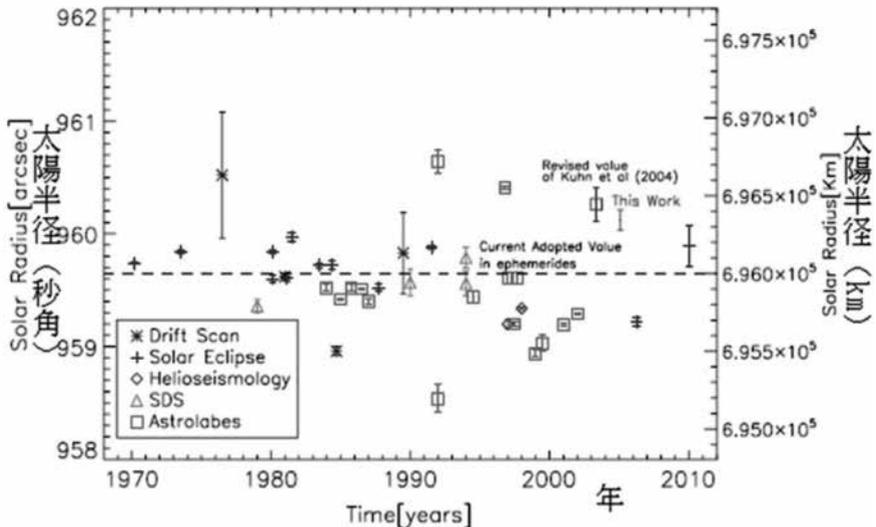


図 20. 様々な方法で求められた太陽半径 (Emilio et al., 2012)。図中で \* 印は子午線通過時の時刻測定より求めたもの (V 章 (1))、+ 印は日食観測 (VIII 章)、◇ 印は日振学 (IX 章)、△ 印は気球観測 (VI 章 (1))、□ 印はアストロラーベ (V 章 (2)) で、this work とあるのは、水星日面通過 (VII 章) による結果である。また、横軸はそれぞれの測定時の年を示している。

に対して、大きな役割を果たすであろう。現在これを主目的として約 4 年前に打ち上げられた太陽測定小型衛星 PICARD がそろそろ測定結果を出し始めている (Meftah et al. 2014) が、例えば、2012 年 6 月の金星日面通過の観測から求めた太陽半径としては、 $959.^{\circ}85 \pm 0.^{\circ}.19$  (Hauchecorne et al., 2014) を報告しているのが注目される。

最後に、今回の研究会の最大の収穫を再確認して、この話の締めくくりとしたい。それは、「金環日食においても皆既日食と同様に、高い精度で太陽半径が決定出来る」こと、「日食曲線から変曲点を求める精度を上げる手法を確立して、日食観測を継続的に行なえば、太陽半径の変動についての回答が出せる」ことへの確信が深められたことである。

参考文献:

Auwers, A., 1891, Astron. Nachr., 3068, 128  
 Antia, H.M., 1998, A & Ap. 330, 336

☆・太陽半径は変動しているか？・☆

- Bush,R.I., Emilio,M.,& Kuhn,J. R., 2010, ApJ.716,1381  
Brown,T.M.,Elmore,D.F.,Lacey,L.& Hull,H.,1982,Appl.Opt.,21,3588  
Brown,M.,and J.Christensen-Dalsgaard,1998, ApJ.,500,L195  
Danjon,A.,1958, MNRA,118.,411D  
Djafer,D.,and Irbah,A.,2012,ApJ.,750,46  
Djafer,D.,Thuillier,G.,Sofia,S.,Egidi,A.,2008,SoPh. 247,225  
Eddy, J.A.& Boornazian, A.A.,1979,BAAS 11,437  
Egidi,A.Caccin,B.,Sofia,S.,Heaps,W.,Hoegy,W.,Twigg, L.,2006,  
SoPh.,235,407  
Emilio, M. , Kuhn, J. R., Bush, R. I. & Scholl, I. F. , 2012, ApJ., 750, 135  
Gilliland, R. L.,ApJ.248,1144  
Haberreiter, M.,Schmutz, W.,& Kosovichev, A.G.,2008,ApJ.675,L53  
Hauchecorne,A., Meftah,M.,Irbah, A.,& 4coauthors,2014,  
ApJ.783, 127  
Kubo,Y.,1993,PASJ,45,819  
Kuhn,J.R.,Bush,R.I.,Emilio,M.&Scherrer,P. H.,2004, ApJ.,613,1241  
Kurokawa,H.,Nakayama,K.,Tsubaki,T.,&Kanno,M.,1974,  
SolarPhys.36,69  
Laclare,F.,Delmas,C.,Coin,J.P.,& Irbah,A.,1996,SoPh.,166,211  
Lefebvre,S.,Kosovichev,A.G.,& Rozelot,J. P.,2007,ApJ.658, L135  
Maier,E.,Twigg,L.,& Sofia,S.,1992,ApJ.,389, 447  
Meftah,M.,Hochedez,J.-F.,Irbah,A.& 26coauthors,2014,  
SoPh.289,1043  
Noel, F., 2005, SoPh,232,127  
Parkinson,J.H.,Morrison,L.V.,& Stephenson,F.R.,1980,Ntur.288,548  
Ribes,E.,Ribes,J.C.,& Barthlot,R.,1987, Natur,326,52  
Schou,J.,Kosovichev,A.G.,Goode,P.R.,& Dziembowski,W.A.,1997,  
Ap J. 489, L197.  
Sinceac,V.,Chollet,F.,Laclare,& Delmas,F.,1998,ApJ.Suppl.128,605  
Sofia,S.,Heaps,W.,Twigg,L.W.,1994 ApJ.,427, 1048  
Toulmonde,M.,1997,A & Ap, 1997, 325,1174  
Wittmann, A. 1974, Sol. Phys., 36, 65

特集

賀茂川プロジェクト金環日食北限界線の解析報告

家邊國昭 (NPO 花山星空ネットワーク)

はじめに

2014年2月22日 京都大学の宇宙物理学教室の一室をお借りして、「日食観測から求める太陽半径研究会」が開かれました。2012年5月21日の金環日食から1年と9ヶ月経ちましたが、その間、鴨川プロジェクトでは16回の解析検討会と中間報告会を経て、一定の結果を得ることが出来たので、本研究会で報告をしました。ここでは、そのうち私の担当した地点5の解析方法の流れを中心にその概略を述べます。

観測

観測の当日、日の出直後は雲が少しかかっていましたが、日食が始まる頃からは晴れ渡り、絶好の観測日和となりました。刻々と欠けてゆく太陽に、シナリオ通りに観測できるよう準備に追われながら、興奮を抑えることが出来ませんでした。

望遠鏡は Vixen 口径 14cm、焦点距離 800mm、カメラは Canon Kiss 5X を使い、ISO 400、シャッター1/1600、フィルター1/8000 でした。カメラとノートパソコンを USB で接続し、インターネットの NTP サーバーから時刻を取得して、カメラの時刻を較正しながら観測を進めました。最大食付近の時刻を中心におよそ1秒ごとの写真を200枚近く撮影することが出来ました。



Fig.1 最大食あたりの撮影画像

## 日食曲線

金環日食限界線の観測の目的は国立天文台の相馬 充先生に太陽半径を 696,000km として計算していただいた限界線とのズレを観測し、太陽半径決定精度を上げることです。初め、8 地点のどこかに限界線があり、金環が切れるか、つながるかは写真を見れば簡単に見つかるものと思っていました。ところが、解析を始めて見るとそれほど簡単なことではないことがわかってきました。いくら見えていても、切れているか、つながっているかの判断がつかないのです。

そこで、国立天文台などが開発した画像解析ソフト Makali'i (マカリ) を使い解析を進めました。最大食付近で太陽縁を隠す月の山を 5 つ選び、その山頂付近の光量の変化をこのソフトで計測することから始めました。このソフトは画像の上にマウスで線分を描くとその線分の引かれた部分の光量をグラフやテキスト値で出力することが出来ます。右の図 (Fig.2) は月の山の頂上付近に 1 ピクセルごと 51 本の線分を引いて、3D グラフにしたものです。

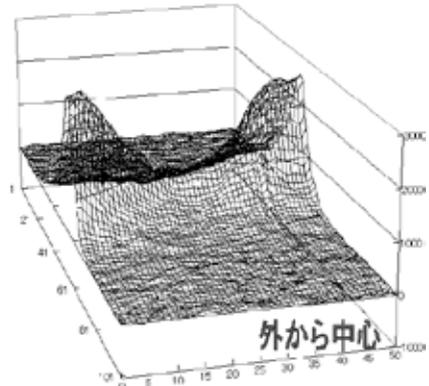


Fig.2 Makali' I の 3D グラフ

具体的には 7 時 30 分台の画像 60 枚、5 つの山について、それぞれ山の最も値の小さくなる(山の高い)部分を中心に 5 本だけ測線を引き、測光しました。1 本の測線は 101 ピクセルで、出力したテキスト値は全部で 15 万個ほど、そこからバックグラウンド値を引いたものを各時刻、各山につ

いて積分します。計算は膨大なもので、試行錯誤を繰り返し、Excel のマクロなども使う工夫をし、進めました。

この値をシーイングの影響をならすために加重平均し、時刻(秒)を変数としてグラフに表したものを日食曲線といい、地点 5 の例を左 (Fig.3) に表します。

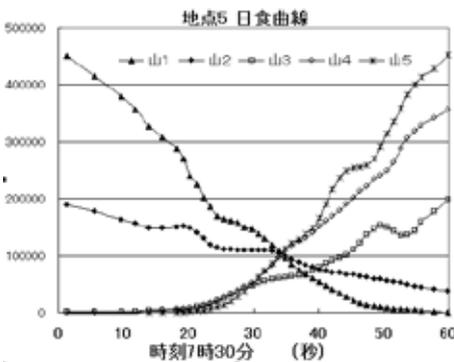


Fig.3 地点 5 の日食曲線

輝度曲線

日食曲線は月の山の頂上付近に引いた線分上の光量を総計することで、漏れる光の総量に比例する値の時間変化を表したもので、これから直接太陽縁を推定することは出来ません。太陽縁を推定するために、この日食曲線を微分します。微分をするということは単位時間あたりの変化量を計算することで、この場合、その変化の割合はその時刻に現れた（隠れた）太陽の輝度に比例した値になるはずですが。この値をやはり時刻(秒)を変数としてグラフに表したものを輝度曲線といいます。地点 5 の例を下図(Fig.4)に表します。

この例を見るとずいぶん上下にグラフが変動するのに見えますが、山 5 のグラフだけ取り出して見ると(Fig.5)、すでに観測されている太陽の周辺減光のグラフと似た曲線が描けていることがわかります。周辺減光の曲線では、その曲線の変曲点が太陽縁と言われていますので、輝度曲線の立ち上がり部分の変曲点（もう一度微分した時の最大値）を計算すれば、月の山が太陽縁から離脱（接触）した時刻が求まることとなります。

ただ、これは山 5 の例のようにうまくいくものばかりではありません。山 2 や山 3 のように山が太陽の中心方向に移動する速度の遅いものについてはどこが立ち上がりで、どこが変曲点なのか判断が難しい物もありました。そこで次に考えたのが X 軸方向の変数を時刻から移動距離（秒角）に変換出来ないかということでした。

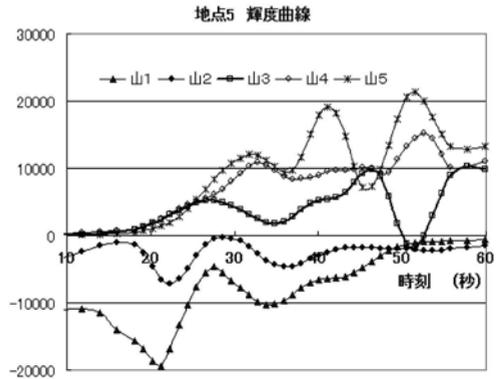


Fig. 4 地点 5 の輝度曲線

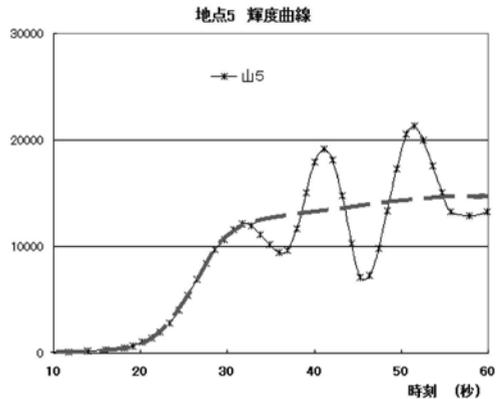


Fig. 5 地点 5. 山 5 の輝度曲線

秒角への変換

NASA の Solar Eclipse Page[2] を見てみると、当日の日食に関するいろいろな情報を入手できます。

ここから得た太陽と月の視半径を使い、下図(Fig.6)のように限界線付近の最大食時の接触点から  $\theta^\circ$  離れた場所の太陽縁と月縁との距離は計算出来ます。相馬月縁図より各山の角度を読み取り、太陽と月の相対速度もわ

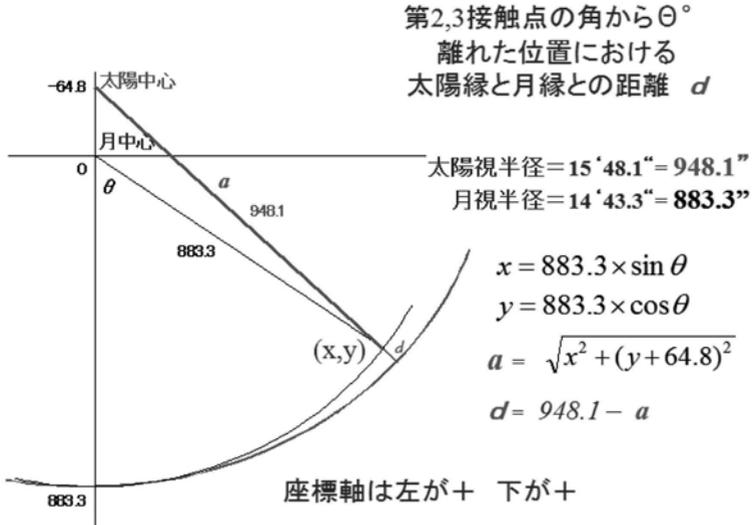


Fig. 6 太陽縁と月縁との距離

かっているのと同じようにして各時刻における月の位置を変化させて、それにとまって変わる太陽縁と月縁との距離を計算しました。それは正確にリニアにはなりません、最大食付近の時刻における各山の1秒角移動するのに必要な時間の平均(秒)(Fig.7)が計算出来ます。

これによって輝度曲線のX軸方向の変数、時刻をこの値で割ることで、輝度曲線を太陽の中心方向への移動距離(秒角)に変換して描くことが出来ました。

山1	7.9
山2	32.5
山3	-15.1
山4	-8.5
山5	-5.8

Fig. 7 1秒角移動するのにかかる時間の平均(秒)

### 秒角輝度曲線

X 軸方向の変数を太陽の中心方向への移動距離(秒角)に変換したことで、輝度曲線は概形が似てくることがわかりました。カットアンドトライで曲線を平行移動することで、地点 5 の例では 5 つの山の曲線を下図(Fig.8)のようにおおむね重ねることが出来ました。

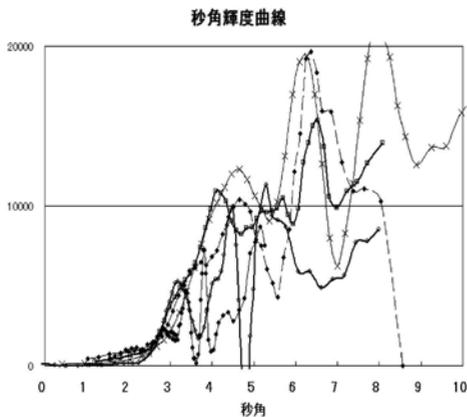


Fig. 8 秒角輝度曲線

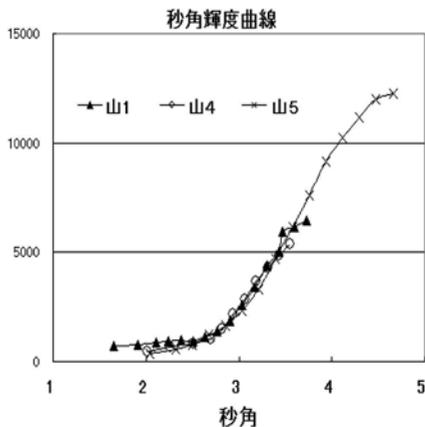


Fig. 9 3つの山の秒角輝度曲線

特に山 1、山 4、山 5 の立ち上がりの部分だけ重ねてみると、ほぼ重なります(Fig.9)。ちょうどこの辺りに変曲点があると考えられるので、3つの曲線のこの部分だけを取り出し、近似曲線式を得ます。この近似式を微分すると、この式の変曲点が求まります。3つの値はわずかにばらつきましたが、その平均値を秒角で表した変曲点とし、山 2、山 3 については慎重に平行移動を行い、同じ値を変曲点としました。

この値は各山の輝度曲線の変数を秒角に変換し、平行移動したものであるため、それぞれ平行移動を元に戻し、時間の変数に再変換することで、地点 5 の各山の接触時刻、離脱時刻 (Fig.10) を求めることが出来ました。

	推定値
山1	7時30分47秒
山2	7時30分49秒
山3	7時30分26秒
山4	7時30分23秒
山5	7時30分24秒

Fig. 10 地点 5 の接触時刻・離脱時刻

## 日食曲線から接触時刻を求める

鴨川プロジェクトでは 8 地点で観測を行いました、それぞれの地点での望遠鏡、カメラ、露出時間、フィルターなどは同じではありません。始め他の地点との比較は無理と考えていましたが、解析を進める中で、機器の不調などで観測数が少なく、輝度曲線がうまく作れない地点もありました。このような地点の観測データも活かすために、日食曲線だけで接触(離脱)時刻を求められないか考えました。

そこで、2 地点の同時刻の画像を選び出し、山 2 から同じ角度だけ離れた地点をマカリで測光します。この角度は比較的シーイングや月の山の影響を受けにくい、できるだけ大きい値を選びます。こうして測った 2 地点の光量比を一方の日食曲線にかけることで、機器などの違いを補正した日食曲線を得ることが出来ました。これを同一のグラフ用紙に重ねてみますと、かなりきれいに平行になります。この平行な 2 曲線の X 軸方向のズレが接触(離脱)時刻の違いということになります。輝度曲線を使って時刻を求めることの出来た 2 地点でこの方法で試してみるとかなり上手く合致することがわかり、結果の検証や、輝度曲線がうまく作れない地点のデータの活用に役立たせることができました。

## 終わりに

金環日食当日の観測も手探りでしたが、データの解析も手探りの状態で始めました。マカリでの測光の数の多さ、莫大なデータの数、Excel を使っても気の遠くなるような思いでした。皆さんに教えを請いながら始めた解析ですが、途中色々工夫を重ねながら、1 年 9 ヶ月でやっと形がついたという感じがします。

ひよんなことから参加させていただいた鴨川プロジェクトですが、この間、感動と緊張を感じながら過ごすことが出来ましたし、太陽半径の精度向上に寄与できたことは一生の宝となりました。

長い間、熱心にご指導いただいた黒河先生始め鴨川プロジェクトの皆様、NPO 花山星空ネットワークの皆様に改めてお礼を申し上げたいと思います。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] 2012 年 5 月 21 日の日本における金環日食限界線 相馬 充  
<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/~somamt/data/AnnularEcl.pdf>
- [2] NASA Solar Eclipse Page  
<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/solar.html>

特集

限界線はどこだ？ —その3—

山村秀人 (NPO 花山星空ネットワーク)

2012年5月21日の金環日食をNPO花山星空ネットワークでは金環日食限界線共同観測(賀茂川プロジェクト)を行い、約2年に亘り計16回の解析・検討会を開いてようやく一定の結果にたどり着くことができました。2014年2月22日(土)京都大学宇宙物理学教室の5F会議室で開かれた、「日食観測による太陽半径研究会」(金環日食限界線研究会との共催)において、その検討経過と結果を発表しました。観測の方法と初期の解析方法については、既に2回に分けて「あすとろん」(Vol.19,20)で報告をしていましたので、今回は解析結果と今後の課題について報告をします。

1. 観測概要と画像解析

金環日食では国立天文台相馬先生の予報による北限界線の位置に Sta.4 を設置して、北に 200m 間隔で 3 地点、南に 150m 間隔で 4 地点の観測 Sta. を設置しました。観測地点 (Sta.) 1~9 で、いわゆるベイリービーズの状態になった太陽縁と太陽縁に沿って移動する月の姿を口径 8~32cm の望遠鏡にデジタル一眼レフカメラをつけて 7 時 30 分代を 1 秒間隔で連続撮影を行い、RAW 画像で記録しました。

得られた RAW 画像は天体画像処理ソフト「ステライメージ」を使用して、FITS 形式に変換し、さらにカラー画像を RGB 3 原色の画像に分解して、最も画像が鮮明な G 画像を使って、測光することにしました。測光には画像解析ソフト「マカリ」を使用しました。

具体的な測光方法やそのデータの解析は全くの手探り状態で、試行錯誤の連続でした。解析方法の詳細については家邊さんが別に報告をされていますのでそれをご覧ください。

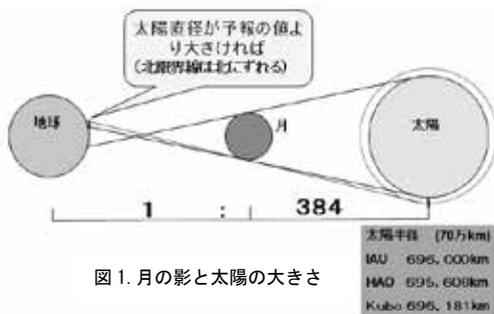


図1. 月の影と太陽の大きさ

2. 限界線の位置と太陽半径

金環日食の北限界線の位置を決めることは、月の影の大きさを決定することになります。月観測衛星かぐやにより精度良

☆・限界線はどこだ？ -その3- ☆

く決定された月の大きさや精密な月や太陽の位置予報とあわせて計算された月の影の予報位置と比較することにより、結果的には3桁精度で統一して使用されている太陽半径の696,000kmの値を、数十kmのケタまで求めることが出来ることとなります。

### 3. 限界線の位置決定

#### (1) 予報の限界線

国立天文台の相馬先生に、太陽半径が予報で使用されている696,000kmを用いて、Sta.1~9の観測地点での月縁と太陽縁との5秒毎の位置関係を示す図を作成していただき(図2)、月の各山(1~5)と太陽縁との接触

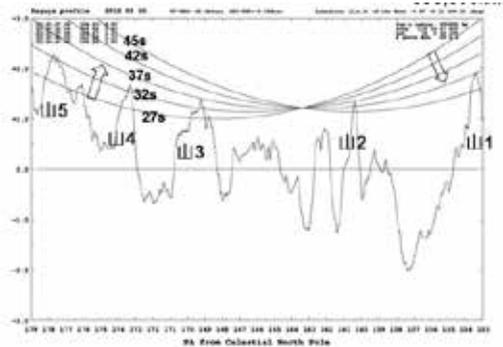


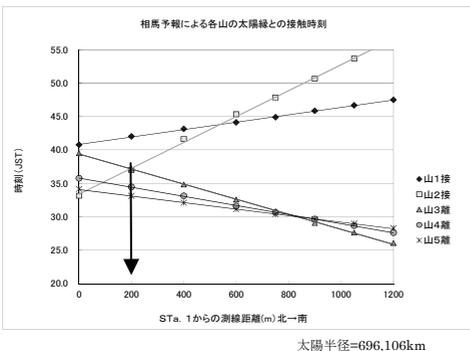
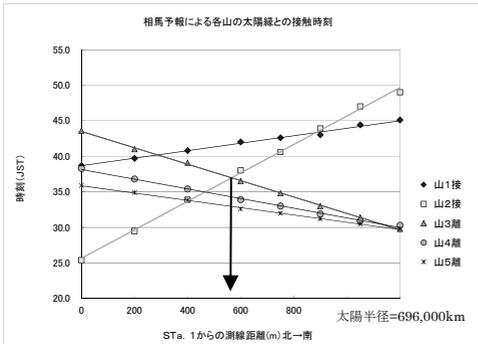
図2. Sta. 4の太陽縁と月縁の相対位置  
(月縁の凹凸を60倍に強調してあるので太陽縁の曲率は逆になっている)

時刻を内挿法で求めて、ひとつのグラフにしました。(図3上)

さらに、太陽半径が696,106kmにしたときの月縁と太陽の位置関係を示す図も作成していただき、同様に各山と太陽縁との接触時刻を求めて、グラフにしたものが左下の図です。(図3下)

二つのグラフを比較すると、微妙に各山の接触時刻が違っていることに気づきます。特に山2と3の接触時刻は大きく異なり、限界線の位置(下向き矢印)も566m地点から北方の200m地点に移っています。

図3. 相馬予報による各山の接触時刻と北限界線の位置



(2) 観測による限界線

一方、観測から得られた各 Sta. 毎の月の山(1~5)と太陽縁との接触時刻は、家邊さんの報告にある方法を用いて、ようやく決定することができ図 4 のグラフにまとめました。

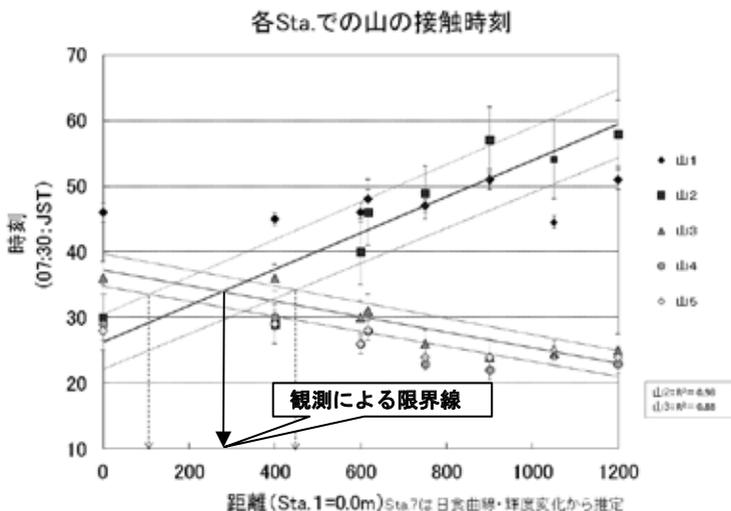


図 4. 観測から得られた各山の接触時刻と北限界線の位置(山 1, 4, 5 の近似直線は省略)

この図 4 から得られた観測による限界線の位置を Sta.1 から 276m 南の地点と決めることが出来ました。図中の破線の矢印は山 2, 3 の接触時刻の誤差による限界線の位置のズレの最小と最大の位置を示しています。

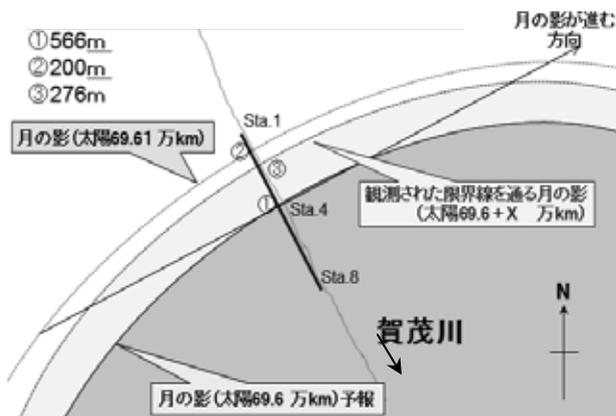


図 5. 地上に映った月の影と太陽半径と限界線の位置の関係

### (3) 観測による太陽半径

相馬予報による限界線の位置、観測により求めた限界線と太陽半径との関係は図5のようになっています。太陽の大きさと月の影の大きさは、比例しています。そこで、限界線の位置の関係から比例配分で、太陽の大きさを決定できます。

	図 5	太陽半径	限界線の位置
予報	①	696,000 km	566 m
	②	696,106 km	200 m
観測	③	$696,000 + \Delta R$ km	276 m

この方法で求めた太陽半径は  $696,084\text{km} \pm 50\text{km}$  となりました。

## 4. まとめと課題

### (1) まとめ

日食の観測と1年9ヶ月にわたる16回の解析・検討会で分かってきたことをまとめると次の4点になります。

- ①北限界線を挟んだ150~200m 間隔(全長1200m)の8地点(+別地点1ヶ所)で、1秒間隔の小望遠鏡による金環日食の画像を得た。
- ②北限界線の位置を予報限界線(太陽半径696,000km 使用)の北側290mと求めた。
- ③金環日食の観測により求めた太陽半径は  $696,000 + 84 \text{ km} (\pm 50\text{km})$  になった。
- ④日食の限界線の位置を観測することで、数10kmの精度で太陽半径を決定することができることがわかった。

### (2) 課題

以上のように、限界線の位置決定により太陽半径を求めて来ましたが、その過程で得られた各観測地点(Sta.1~9)の山1~5の接触時刻の値を使って、予報による接触時刻との比較により、各山別に太陽半径の $\Delta R$ (予報に用いた値からの違い)を求められることに気づきました。この方法による解析も行って、さらに解析精度を上げることができそうな可能性が出てきました。その結果については、次回の報告に回したいと思います。

## 5. 謝辞

この報告に至るまでに、プロジェクトのメンバーの方はじめ、16回にわたる解析・検討会でのご指導をいただいた黒河先生、各観測点での月縁図を数回作成していただいた国立天文台の相馬先生に厚く御礼を申し上げます。

特集

## 「金環日食限界線研究会」チームBの観測報告

相馬 充（国立天文台）

### 金環日食限界線研究会の成り立ち

この研究会は、日本の広い地域で金環日食が見られることになっていた日のちょうど1年前の2011年5月21日に東京理科大学で行われた第1回金環日食シンポジウムで明石市立天文科学館の井上毅さんが明石市内で金環日食の限界線を観測から求める計画を発表したことに始まると言えるだろう。同年9月12日には西はりま天文台公園の時政典孝さんから、限界線の位置が図1に見るように、予報により異なるのは何故かという問い合わせが私のところに寄せられた。時政さんは、井上さんや岡山商科大学附属高校の畠浩二さんとともに小中学校や高等学校に限界線観測呼び掛けを計画しているとのことであった。同年9月20日には、せんだい宇宙館の早水勉さんにより私が計算した月縁の凹凸を考慮した金環日食限界線の位置が



図1 金環日食北限界線の位置の予報による違い。この地図の場所は兵庫県明石市付近。NASA Eclipse Web Siteと国立天文台暦計算室が予報していた北限界線の位置は約2.7km離れていた。この背景地図等データは国土地理院の電子国土Webシステムから提供されたものである

ウェブ上で公開された。このころ同時に早水さん・井上さんと私とで限界線観測について議論していた。なお、限界線が予報によって異なる理由や月縁を考慮した限界線については論文[1]を参照のこと。

2011年10月29日には日本科学未来館で第2回金環日食シンポジウム「みんなで楽しむために」が開催され、限界線観測計画について紹介された。限界線観測の意義としては、太陽半径を精密に決定するのに役立つことが示された。太陽半径は国際天文学連合で696,000kmを採用しているのに対してNASAのサイトで695,508kmが与えてあるなど、太陽半径に500km程度の不確定さがあることが明らかにされたためである。2012年1月9日には井上さんの提案により明石で「2012年金環日食限界線観測研究会」が開かれ（提案は2011年11月30日に行われた）、具体的な観測方法等が話し合われ、それに基づいて2012年1月13日に金環日食限界線観測メーリングリストが立ち上げられ、そのメーリングリストでの議論を元に同年2月3日にはR、B、Mの各チームで観測に取り組むことが決定された。Rチームは「日食めがねによる限界線観測」、Bチームは「ベイリービーズ観測による太陽直径の決定と限界線の詳細位置決定」、Mチームは「多地点日食画像撮影と教育映像作成」をそれぞれ行うチームである。それと同時に、各地で金環日食限界線の観測と限界線の決定を行うL計画という地域グループによる活動も行うことになった。同年3月10日には明石市立天文科学館で明石ミーティングが開かれ、この場でさらに具体的な観測方法が話し合われた。同年3月18日には金環日食限界線研究会の公式ウェブサイトが立ち上げられ、研究会の取り組みが公開されるとともに、一般の方へ観測の協力が呼び掛けられた。その結果、同年5月21日の日食当日からウェブを通じて報告があった日食めがねによる観測者は約15,000人に達した。また、全国23の地域グループも独自に観測を行い、これらの地域グループの参加者は合計約30,000人に達した。

## 月縁データ

チームBは金環日食の始めと終わりの前後（金環日食限界線付近では食の最大時のころ）に現れるベイリービーズの明るさの変化を捉え、太陽の縁が月縁に掛かった時刻を精密に測定することが観測の目的になる。これを解析するには月縁の凹凸が正確に分かっている必要がある。ここでは、月縁データがどのくらい正確に分かっているかについて説明しておく。

アメリカのC.B. Wattsは1963年に、地上から撮影した月縁写真から作成した月縁図を発表した。しかし、その月縁データは誤差が大きく、月縁データがないところもあるなど、欠点が指摘されていた。

日本の月周回衛星「かぐや」は2007年9月14日に打ち上げられ、2009

☆「金環日食限界線研究会」ちーむ B の観測報告☆

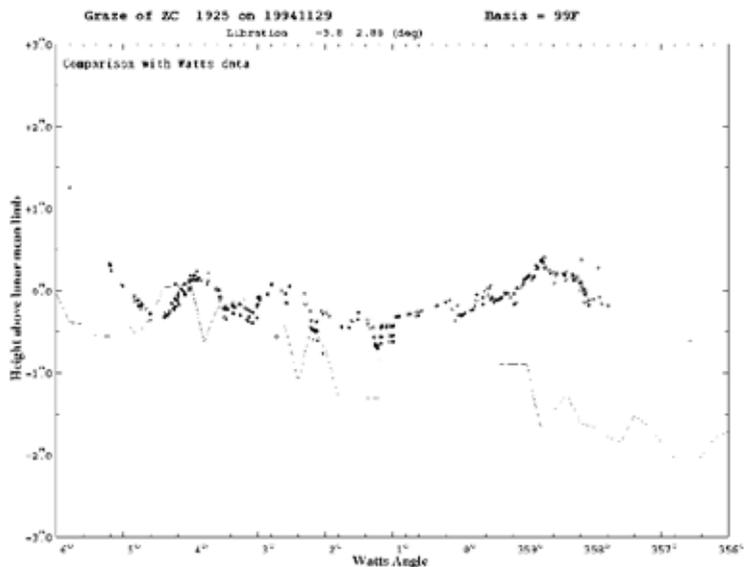


図 2 1994 年 11 月 29 日のスピカの接食の結果と Watts の月縁図

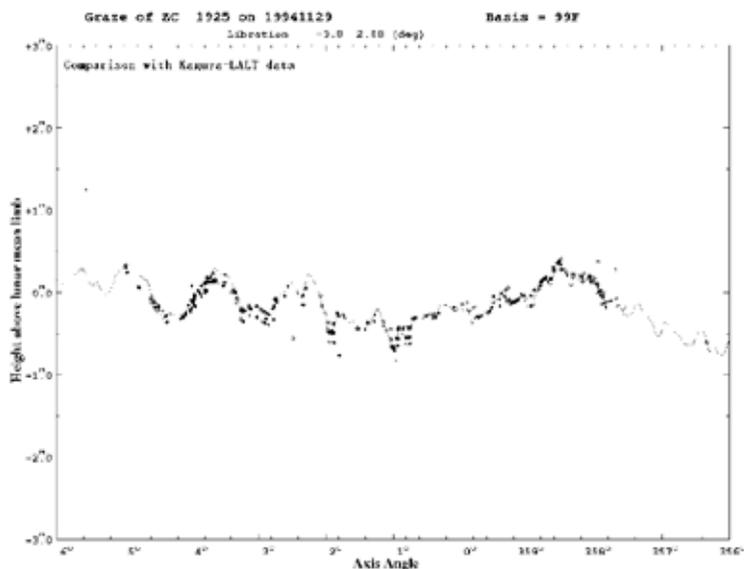


図 3 1994 年 11 月 29 日のスピカの接食の結果とかぐやの月縁

☆「金環日食限界線研究会」ちーむ B の観測報告☆

年 6 月 11 日に月面に制御落下したが、その間、レーザ高度計 LALT (Lunar Altimetry) で月の地形を精密に計測した。このデータを用いることで任意の時刻に任意の地点から見た月縁の凹凸を知ることができる。

一方、恒星が月の縁すれすれをかすめる接食を星食限界線付近の複数地点で観測することで月縁の凹凸を知ることができる。図 2 は 1994 年 11 月 29 日に日本で観測されたおとめ座の 1 等星スピカの接食から得られた月縁を Watts の月縁図と比較したものである。横軸は月の自転軸から反時計回

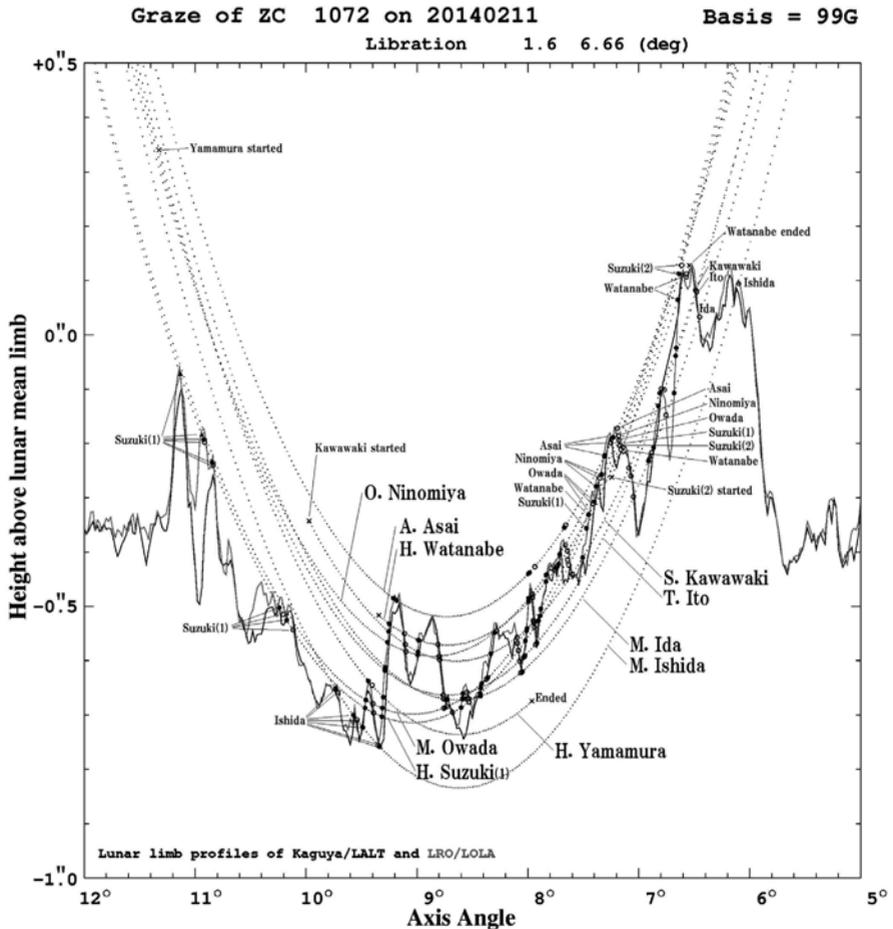


図 4 2014 年 2 月 11 日の ZC 1072 の接食の結果とかぐやと LOLA の月縁

りに測った位置角(単位は角度の度で、1度は月面上で約30kmに当たる)、縦軸は平均月縁からのずれ(単位は地球から見た角度の秒で、1秒は月面上で約1.8kmに当たる)、●と○はそれぞれ恒星が潜入と出現をした月縁上の点を示し、図中の曲線は Watts の月縁図による月縁(実線部分は精度が高く、破線部分は外挿によるもので精度が悪いとされていることを意味する)である。Watts の月縁図は実線部分でも実際の月縁から大きくはずれているところがあることがよく分かる。図3は同じ接食の結果を「かぐや」の得た精密月面地形から求めた月縁と比較したものである。フィッティング等は何も行っていない生のデータであるが、両者はかなりよく合っていることが分かる。これは恒星の予報位置、月の予報位置、月縁データがすべて正確であることを意味している。

精密月面地形は米国 NASA が 2009 年 6 月 18 日に打ち上げた LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) に搭載された LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) でも観測された。こちらはデータ量が膨大で「かぐや」のデータに比べて扱いにくいのが難点だが、このデータからも月縁の凹凸が求められる。これは「かぐや」のデータによる月縁とかなりよい一致を見せるが、ときに差のあることがある。

図4は2014年2月11日に日本で行われた ZC 1072 (ふたご座の 6.0 等星) の接食の結果を「かぐや」と LOLA の月面地形データから作成した月縁と比較したもので、この接食の結果では、場所によって「かぐや」のデータによく合うところと LOLA のデータによく合うところがあるが、「かぐや」と LOLA のデータの差が比較的大きい位置角  $6.7^\circ$ 、 $7.2^\circ$ 、 $8.6^\circ$ 、 $10.9^\circ$  などでは LOLA のデータが接食の結果とよく合っている。

図5は2011年11月3日に日本で行われた ZC 3121 (みずがめ座の 8.1 等星) の接食の結果を「かぐや」と LOLA の月面地形データから作成した月縁と比較したもので、この場合は接食から得られた月縁地形の高さをすべて  $0.07''$  だけ低くしないと「かぐや」や LOLA のデータと合わないことが判明した。これは恒星の位置にこれだけの誤差があることを意味する。恒星の位置の計算には Hipparcos 星表のデータを用いているが、この星表は1990年代初頭に行われた観測によっており、それから20年余り経って、固有運動の誤差が現れたと見られる。このような誤差が明らかになるのも、精密な月縁データが存在するおかげである。

## チーム B の観測

すでに述べたように、チーム B のベイリービーズ観測は太陽の半径を正確に決めることを目的としている。観測地により、また同一地点でも時刻によってベイリービーズは太陽縁のいろいろな場所に現れるので、それら

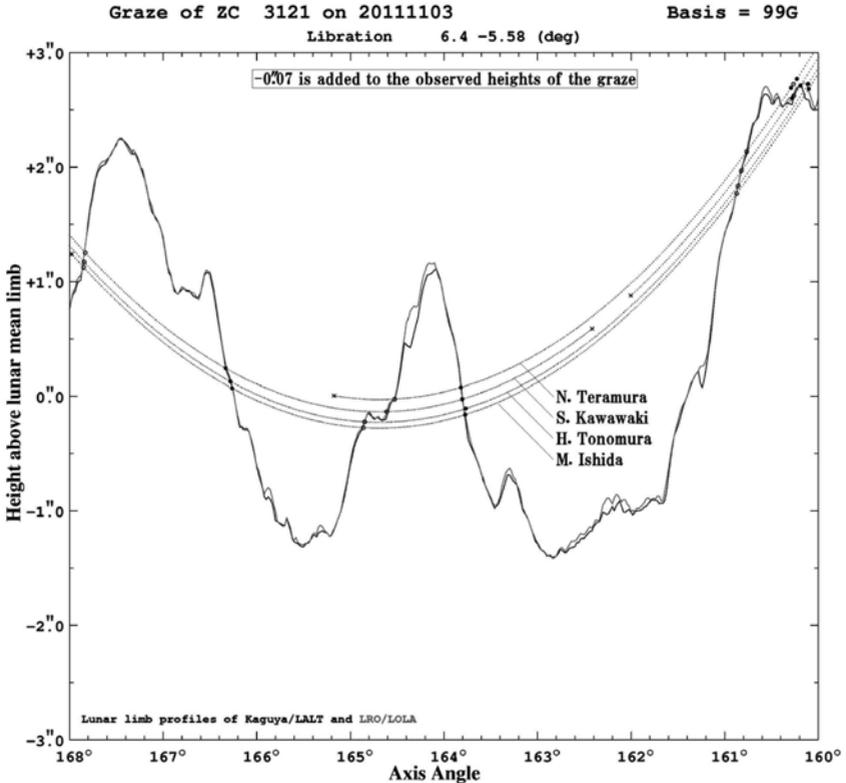


図5 2011年11月3日のZC 3121の接食の結果とかぐやとLOLAの月縁

を解析すれば、太陽半径の赤道方向と極方向の半径の差も得られる可能性があるし、また、別の年の観測と比較することで、太陽半径が年ともに変化しているかどうかということも判明するだろう。

2012年5月21日の日食当日は雲に覆われて観測できなかったところもあったが、最終的には17地点で合計120を超えるベイリービーズの光度変化を、早水さんによって各ビーズの明滅の時刻が測られた。その時刻を元にして、「かぐや」のデータによる月縁と比較し、太陽半径として採用値の696,000kmに対していくらの補正が必要になるかを各観測地ごとに調べた結果が表1である。

各観測地ごとの補正值の精度はかなり良いことが分かるが、別の観測地の値と比べるとばらつきが大きい。これは観測地ごとに太陽の縁の別の場

☆・「金環日食限界線研究会」ちーむ B の観測報告・☆

所を測っているためであると考えられる。つまり、観測地ごとに、ビデオに写っている太陽の縁の明るさが異なっているのである。これは、太陽の縁をどのように定義するかという問題と関連する。

太陽の縁がどのように定義され、それによる太陽半径をビデオに記録されているベイリービーズの光度変化からどのように求めるかについては、宮下和久さんの報告を参照していただきたい。

表 1 ビーズの明滅の時刻から求めた太陽半径補正

代表者	数	半径補正 (km)	代表者	数	半径補正 (km)
比嘉 義裕	7	+ 17±35	宮下 和久 <sup>#</sup>	5	-767±26
小和田 稔	17	+ 11±12	渡辺 裕之 <sup>*</sup>	2	-156±35
高村 裕三郎	17	+ 28±16	洞口 俊博 <sup>*</sup>	6	-477±78
山村 秀人	12	+ 12±19	谷川 智康	6	-116±49
赤津 芳春	12	- 10±20	佐藤 信	1	- 58
外村 一	5	- 15±22	渡辺 文雄 <sup>‡</sup>	3	-221±63
岸本 浩	9	- 30±15	渡部 勇人 <sup>*</sup>	2	- 48±70
松井 聡	5	- 13±34	富岡 啓行	5	+131±33
大西 浩次 <sup>†</sup>	1	- 20			

\*輝度低い †雲多し ‡ドリフトあり #緑色フィルター使用

参考文献

[1] 「2012年5月21日の日本における金環日食限界線」相馬 充, 荒木博志, 野田寛大, 田澤誠一, Sander Goossens, 早水 勉, 『国立天文台報』第15巻, 1-11, 2012,

<http://www.nao.ac.jp/contents/about-naoj/reports/report-naoj/15-12-1.pdf>

特集

# ベリリービーズのビデオ観測による太陽の周縁減光と太陽半径の測定

宮下和久（金環日食限界線研究会）

## 1. はじめに

2012年5月21日の金環日食に際して金環日食限界線観測プロジェクトにより全国各地（20カ所）でビデオによるベリリービーズの観測がなされた。これらのビデオについて筆者が解析を担当し、太陽の周縁減光と太陽半径を求める作業を行った。また、観測や解析における課題を明らかにするために、2013年5月10日にオーストラリアで見られた金環日食の観測を行った。ここではその結果について述べる。なお、本稿の内容の一部はあすとりん20号に投稿してあることから、図表も含めて重複する部分があることをご容赦いただきたい。

## 2. ビーズの光量変化の測定

周縁減光や太陽半径を調べるためにベリリービーズをビデオで観測することのメリットは二つある。一つは、画像として記録されることで、ビーズに対応する月縁地形をかぐやなどの地形データから得て解析することができる。もう一つは、多数のフレームを露出の切れ間がなく撮影できることから、ノイズ低減に有利である点である。

観測されたビデオを Limovie というビデオ用測光ソフトで解析し、光量変化のグラフを得た。ビーズの光量変化は、（第3接触の場合で説明すると）最初は直線的に減光していき、消え際に弧を描くような形で

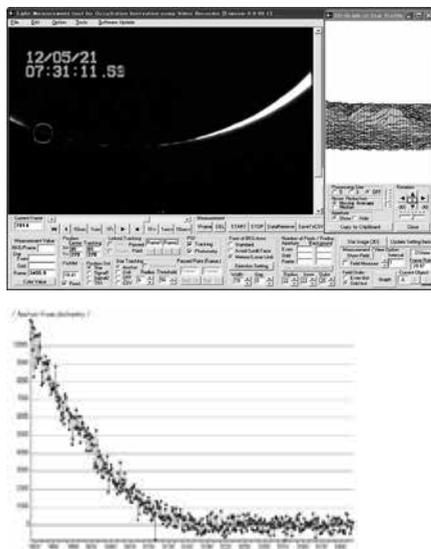


図1 ベリリービーズの光量変化 解析とその結果

傾きが変化し、その後傾きが小さくそして一定になって、ビーズが消える。これは、ほぼ全てのビーズについてあてはまる特徴である。この光量変化は従来日食曲線と呼ばれ、それを微分することで太陽円盤の最外縁部の輝度分布が得られるとされてきた。しかし、ビーズの光量変化は月縁地形の影響を受けているはずであり、微分して得られた曲線は、月縁地形（谷の形）のもたらず変化を色濃く反映している可能性が高い。周縁減光と太陽半径を得るために、光量測定の方法と解析のためのいくつかの工夫をした。それについて以下に述べる。

### 3. 太陽大気モデルと太陽円盤の光強度分布

太陽の縁辺部の輝度分布については、太陽の大気モデルから得られたグラフが Thuillier たち(2011)の論文に掲載されている(図2)。

このグラフには最外縁部の1秒角ほどについてしか示されていないが、後ほど述べる解析を行うためには、更に太陽円盤の内側までの輝度分布が必要となる。そこで、観測とモデルを比較するために、より太陽円盤の中心方向まで計算できるような実験式を作成した。実験式は、従来使われている最も簡単な実験式を含むいくつかの項の積の形で、VALモデルから推定される輝度分布を表現している。これにより、太陽円盤中央付近から、太陽の最外縁部までを良好に表現することができる。

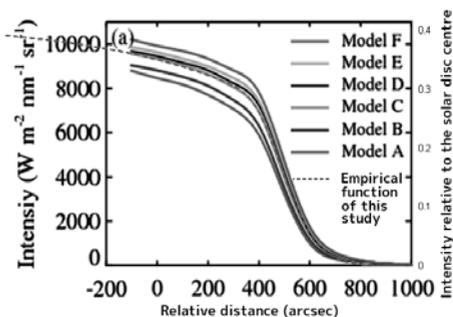


図2 太陽表面付近の大気モデル (VAL) より計算された太陽円盤最外縁部の輝度分布 (Thuillier, 2011) と、より内部まで表現した実験式 係数は  $u:0.643$ ,  $a:0.92$ ,  $b:0.69$ ,  $c:-330$ ,  $d:0.2954$ ,  $\sigma: 0.021$

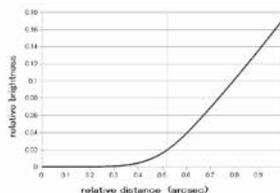


図3

実験式を積分して作った「日食曲線」

### 4. モデルから日食曲線をつくる

## ☆・ベリールビーズのビデオ観測による太陽周縁減光と太陽半径の測定・☆

観測と比べるために、実験式を積分(数値積分)して「モデルの日食曲線」をつくった。観測との比較の第一歩として、できたモデルの曲線を観測された日食曲線に合わせてみると、いくつかのビーズでほぼ一致した。しかし、日食曲線モデルとあまり合致しないものも多く見られた。これは月縁の山谷の影響に加えて、月縁と太陽縁のなす角が大きく変化していくためだと考えられる。

### 5. 月縁の地形の影響を補正

そこで、地形による補正を行うことにした。方法は、谷の中に等間隔に測点を取り、それぞれの出現時刻に合わせて積分する、というものである(図4)。結果、地形を考慮したシミュレーションの日食曲線は、ほぼ全ての観測の日食曲線に良好に一致した(図5)このような手法を各ビーズに適用することで、より正確な太陽半径を求めることができると考えられる。

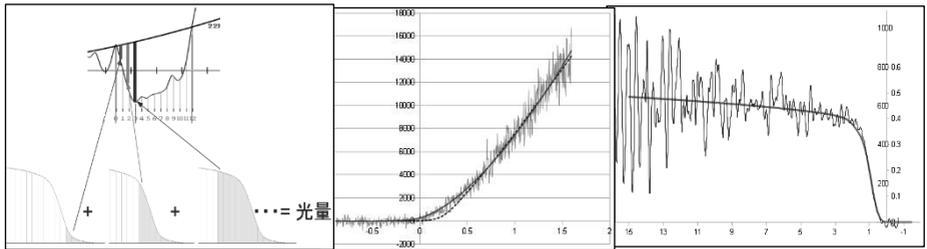


図4 (左) 月縁地形を考慮したシミュレーション

かぐや及び LRO/LOLA の地形データについて月縁の位置角  $0.05^\circ$  毎に求め、それぞれの地点での光量を、実験式を積分することにより推定した。

図5 (中) シミュレーションの比較

月縁地形を考慮したシミュレーション(赤実線)は地形を考慮していないもの(黒破線)に比べて、観測値とよく一致した

図6 (右) 地形を考慮した日食曲線のシミュレーションと観測値の双方を同様に移動平均処理した後微分した結果との比較

### 6. 変曲点付近の輝度分布

#### (1) 地形を考慮した日食曲線を微分した曲線と観測結果を比べる

前項で述べたように、ベリールビーズは月の地形を反映しており、観測さ

## ☆・ベリービーズのビデオ観測による太陽周縁減光と太陽半径の測定・☆

れた日食曲線を微分しただけでは周縁減光のようすを得ることができない。そこで、観測された日食曲線を微分したものと、地形を考慮してモデルを元に作ったシミュレーションとの比較を試みた。

三重県の渡部勇人氏の観測した AA=131° 付近では、起伏の少ない月縁と太陽縁がほぼ平行である、という特徴があった。しかも、渡部氏のビデオはシンチレーションノイズの少ない画像であったことから、日食曲線を微分することで、比較的美しい輝度分布を得ることができた。なお、この図は、地形についてや、平滑化についても考慮したシミュレーションとの比較である。シミュレーションと観測が、特に変曲点付近でたいへんよく一致している。(2) ビデオ画像から直接周縁減光をとらえる

前項に述べたが、地形の影響を除くことが正確な周縁減光をとらえる上で必須である。しかし、フラッシュスペクトルを利用する従来の方法はこの点についてほとんど考慮されていない。それを考慮するためには太陽縁の円周方向に対して垂直な、極めて狭い範囲について測定する必要があるが、それでは大気の影響による像の揺らぎにより、微分された結果は振幅の大きなグラフになってしまう。

本研究では、この点を次のようにして解決した。(以下、第 3 接触で太陽縁が顔を覗かせてくる場合として説明する。) まず、他の解析に用いられてきた四角形の測光エリアを改良し、太陽縁に垂直な幅 1 ピクセルの細長い測光エリア (単位エリア) を並べたものとして扱う。実際には、幅 1 ピクセル、長さ 25 ピクセルの単位エリアを

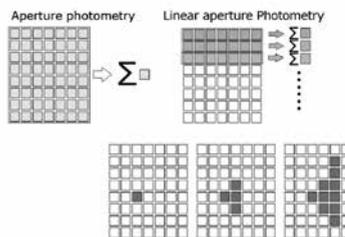


図 7 直線状の測光領域

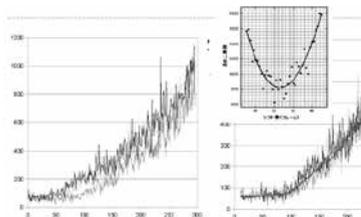


図 8 測光結果の重ね合わせ

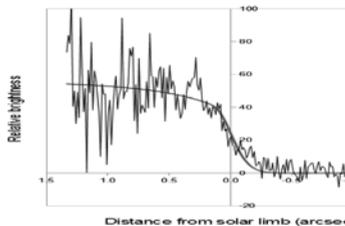
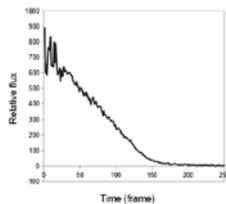


図 9 得られた日食曲線 (上) と周縁減光 (下)

## ☆・ベリービーズのビデオ観測による太陽周縁減光と太陽半径の測定・☆

25 個並べたものとして測定用に用意した (図 7)。各単位エリアは、月の地形の影響で出現しはじめの時刻は異なるが、それぞれの光量変化はほとんど同じものであると期待される。そこで、それらの光量変化曲線同士を、最もよくフィットするように最小自乗法を用いて重ね合わせて、一つの日食曲線とした (図 8, 9 (左))。図 9 左側の図の左端の振幅の大きいところは重ね合わせが少ない部分である。重ね合わせが大気の揺らぎを大きく改善している様子を見ることができる。この日食曲線を微分して、図 9 (右) のように良好な周縁減光の様子が得られた。

### 7. 太陽半径を求める

#### (1) 周縁減光と太陽半径の定義

従来、観測的には周縁減光の変曲点 (輝度の傾きが最も大きい位置) をもって太陽縁として定義して太陽半径が求められてきている。本研究でも、ビデオ観測から周縁減光の様子をとらえることができたことから、周縁減光の変曲点を太陽縁と「定義」することにより太陽半径を求めることができるはずである。ところが、ビデオから周縁減光が精度良く求められるのは、現在のところビデオ画像の水平・鉛直方向に平行な太陽縁に対してだけであり、それ以外のビーズには直接周縁減光を求める方法は適用できない。

そこで、本研究では、太陽縁の観測から得られた周縁減光の変曲点ではなく、VAL モデルを元に作成した周縁減光モデルの変曲点と定義する。このモデルを元に、地形データを加味して積分し、モデル日食曲線を作成する。周縁減光のモデルが実際をよく表現できているならば、このモデル日食曲線は実際の日食曲線に一致するであろう。地形データには日本の探査機かぐや、およびアメリカの LRO/LOLA のデータを用い、太陽半径を 696000km ちょうどと仮定したときの、ビデオの 1 フレームごとの月縁と太陽縁の角距離を国立天文台の相馬充氏に計算いただいた。

#### (2) 地形を考慮した日食曲線モデルとの比較

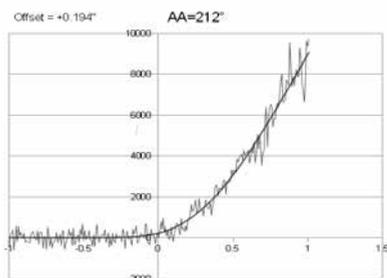


図 10 観測結果とシミュレーションの比較 (愛知県立一宮高校の観測結果)

☆・ベリービーズのビデオ観測による太陽周縁減光と太陽半径の測定・☆

このようにして得られたモデル日食曲線と観測との比較を、図 10 に示す。どの観測でもモデルと観測は良く一致していることから、これを用いて太陽半径を求めた。もし実際の太陽半径が上記仮定よりも大きいときは、観測された日食曲線はモデルよりも図の左側に向かってずれることになる。両者をフィットさせるためにモデル日食曲線を移動させると、それが上記仮定値に対する太陽半径の補正值である。

8. 求められた太陽半径の値

画像が安定している 5 か所の観測について太陽半径を求めた。図 1 2 に結果を示す。

太陽縁上のどの経度でも、最大値として求められている値はほぼ一定である。図中で高緯度側に小さい値がいくつか見られるが、これは観測時あるいはキャプチャ時にゲインが小さくなって暗い部分が写っていないものであると考えられる。現在ゲイン設定の影響について検討をしているが、この点が明らかになれば、解析に適する観測の条件を決め出すことができると期待される。

ゲインの低い観測を除くと、現在のところ太陽半径として、**696134 +/- 22 km** を得た。なお、この値は今後のより詳細な解析により異なってくる可能性がある。

9. まとめと今後の課題

日食曲線の微分と地形を考慮したシミュレーションモデルがよく一致することから、太陽縁を「周縁減光の変曲点」で定義して測定することが可能になったと考えられる。更に、今回確かめつつあるように、月の地形を考慮すると、従来のフラッシュスペクトル等の観測に比べ、

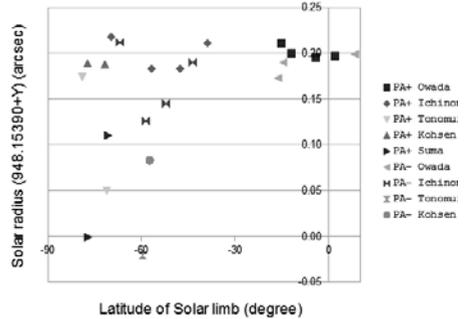


図 11 得られた太陽半径 横軸は緯度

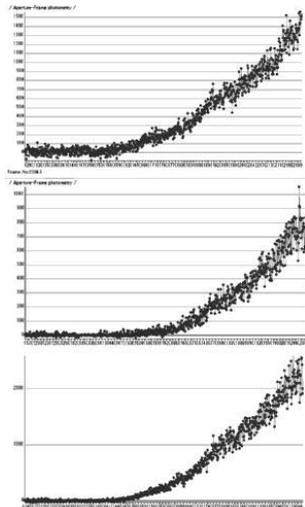


図 12 光電測光フィルターを用いた観測結果 上から、フィルター無し、B, R

## ☆・ベリービーズのビデオ観測による太陽周縁減光と太陽半径の測定・☆

谷全体での比較が可能となるため、精度の高い太陽半径が求められると考えられる。今後の日食にも本研究の手法を適用して、太陽の半径の変化があるかどうかについての観測をおこなってきたい。

また、オーストラリアの金環日食では、残念なことにうす雲がかかり、太陽半径を求めるのに十分なビデオを得ることができていない。それでも、光電測光用フィルターを用いてベリービーズの色ごとの光量変化をとらえることができた (図 12)。これから、青色では日食曲線の立ち上がりが遅くなることが明らかになった。青色で観測する場合には、ゲインの狭いビデオ観測では不利になると考えられる。また、赤い色のフィルターでは、比較的ノイズが少ない結果が得られている。更に、フィルターなしの赤色フィルターの結果の間には大きな差がない。このこととビデオカメラのスペクトル特性から、フィルターなしで行われた 2012 年の観測は、赤フィルターに近い特性を持っていると考えられる。

### 謝 辞

本研究を行うに当たり、国立天文台の相馬充先生には、太陽縁と月縁の角距離を精密に計算していただいた。また京都大学の黒河宏企先生には、太陽最外縁部の輝度分布を含む大気物理について懇切なご教示をいただいた。また、遊馬製作所の遊馬弘氏には、無理なお願いを聞いていただき 4 連鏡筒を製作いただいた。感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1]Kurokawa. et. Al., The continuum of the extreme limb and the chromosphere at the 1970 eclipse, *Solar physics* 36(1974) 69-79
- [2]Vernazza, J. E., Avrett, E. H., & Loeser, R. 1981, Structure of the chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun, *ApJS*, 45, 635.
- [3]D. Hestroffer, and C. Magnan, Wavelength dependency of the Solar limb darkening, *Astron. Astrophys.* 333, 338-342 (1998)
- [4]S. Lefebvre et. al., Solar radius measurement at Mount Wilson Observatory, *The Astronomical Journal* 649:444-451, 2006
- [5]G. Thuillier et. al., The Shape of the Solar Limb: Models and Observations, *Solar Phys* (2011) 268: 125  
<http://planetarynames.wr.usgs.gov/jsp/FeatureNameDetail.jsp?feature=74425>

## 初めてのボランティアの日・木星観望会

宮川美栄子（NPO 会員）

3月の連休の真ん中だというのに、100人位のファンが花山天文台に集まった。とても寒くて足下からシンシンと冷えてくる様な夜だったけれど、きれいに晴れた空には目的の木星が真っ先に輝きだした。徐々に増えてくる星を見つけ、みんなに色々と教えていただきながらオリオン座や双子座、冬の大三角などを確認できた。

3月22日初めての受付経験で、何をしたらよいのかわからずベテランの人が一人で何役もこなされ、申し訳ない状態だった。作花先生も受付でNPOの宣伝をし勧誘されているのに、私は何も出来なかった。なかなか言葉が出ないのだ。人の波が受付から消える時間帯には、先生を囲んで色々お話を伺うことが出来た。中でも竹取物語の話は興味深かった。日本最古のかな文学の中に出てくる5人の貴公子が、当時の朝廷の高官がモデルだったらしいとか、かぐや姫は決してなよなよしたお姫様ではないとか、かぐや姫が慕っていたのは文武天皇だったとか、富士の山と呼ばれた由来とか……。へ～?!と思える事ばかり、知らぬ事ばかりで意外だった。

最後のグループが受付を終わると、他の人のお言葉に甘えて、45cm望遠鏡での木星観望のグループに加わらせていただいた。肉眼でもきれいに見えている木星が、望遠鏡を通してさらにはっきりと横の縞模様までもが目に映る。そして一度はみたいと思っていた4つの衛星、ガリレオ衛星がきれいに一つの面に並んで見えた。実際は60個以上の衛星が発見されていると聞いたが、400年以上も前に観られたというこの4つの月を観ることに時代を超えた夢、ロマンを感じる事が出来た。望遠鏡を通して観る限り、この最も大きな惑星、木星が地球の径の10倍以上もあるとは信じがたいし、あの有名な大赤斑が地球を3個飲み込むくらい大きさ聞いても全く実感できない。でも、とにかくすごい!! 普段見ないものを観ることが出来たというだけで、こんなに興奮し感動できるものが最近あったらどうか?

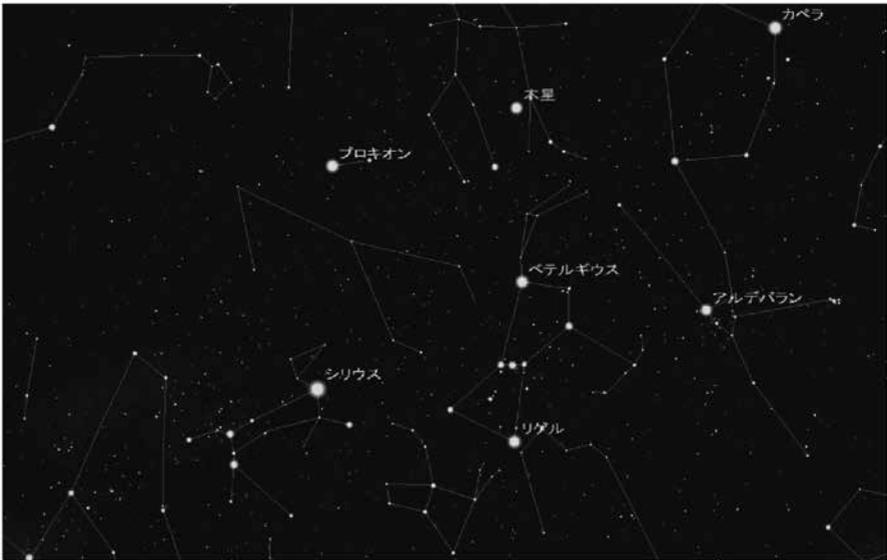
☆・初めてのボランティアの日・木星観望会・☆

木星にも土星のようなリングが発見されているらしいが、土星のリングが氷を主成分としているのに対して、木星のリングは構成成分が小さな、小さな塵で、短時間で木星に吸い込まれてしまうものらしい。実存し続けているのなら、一度でいいから観てみたいものだ。

天文学もきちんと勉強していないし、空の星のこともほとんど知らないけれど、澄んだ星空を観るときのときめき、幸せ感は人類が地球上に現れた頃からず〜と続いている、人間に与えられた神様からの贈り物のように感じられた。

寒い冬の仕事帰りに、オリオン座のベルトの3つ星を見つけると、なくなった家族の3人に会えたように思えて、いつも心の中で話しかけていたものだった。こんな幸せを知らないまま過ごしている人たちが居るならば、一人でも多くの人に教えてあげたい。この充実感と感動と幸せを。

寒空に 輝く星は 春を告げ、  
木星と 四つの月が 勢揃い、  
この歳で 感動新た 観望会



当日見られた西南の夜空 ステラリウム使用 (編集子)

星空文芸欄 川柳・小噺

高尾和人他(NPO 法人花山星空ネットワーク)

誰も来ぬ未来にも無いタイムマシン

月に住む古希になっても夢を持つ

青春は宇宙時間で瞬く間

気にしない太陽消える超未来

人類が火星に行けばE・Tですか

高尾和人

宙の旅 スーパーフレア 気を付ける

ビッグバン ぼくがするのは ビッグベン

星空や 思いをはせる 時の旅

死ぬ前に 会ってみたいな 宇宙人

影浦亮平

飛蚊症 私の目にも 星が増え

エレベータ 行ってみたいな よその星

影浦千鶴

探査船 もうおばさんよ 月の姫

影浦秀人

宙ガール 何があなくても 宙がある

ドレ金星 ミファ(見張) っているよ ソラガール

宙好きの 娘のカレは ポアくんカレ 宇佐美 悟

金星を金返せと読み違え  
超新星なんか凄そうでも見たい

新大阪子

宇宙落語ホームページに載せている、ごくありふれた小噺です…

宇宙箱舟ー1

自他ともにオシドリと認める仲の良い老夫婦が宇宙箱船の抽選会に参加した。

夫は外れたが、妻がみごと乗船券を引き当てた。

「おめでとうございます、奥様は箱舟に乗って滅亡寸前の地球から脱出する権利を手に入れました。」

しかし、残念なことに、この乗船券ではお一人しかご乗船になることができません。

抽選立会人は2人の顔を交互に見較べながら、「さあて、どうぞされますか？」

夫は妻の顔を食い入るように見詰めながら、「私と一緒に地球に残るよね。結婚する時に誓ったじゃないか、ともに白髪になるまで二人は離れないって」

すると、妻はにっこりと微笑んで、「アンタの頭からは、とつくに毛が無くなっているじゃない」

宇佐美 悟

## 切り絵 葛飾北斎「鳥越の不二」

切り絵製作 小野隆久（京都芸術高等学校 1年）

江戸時代後期に活躍した天才浮世絵師・葛飾北斎。

彼が描いた「富嶽百景」の中に一つに、「鳥越の不二」という絵があります。背景にある富士の手前には、巨大な球体が描かれています。

実は、これは江戸時代の天文台の様子なのです。

日本発の大規模な改暦事業を成し遂げた天文学者・渋川春海は、神田駿河台に天文台を設置したといわれています。

しかし、この天文台は、春海が改暦を成功させた後に取り壊されてしまいました。実は、当時の天文台は改暦のためにだけ建てられていたため、改暦がすむと必要がなくなり、すぐに取り壊されたのです。こうして幾つかの天文台の設置・取り壊しを経て、1782（天明2）年に浅草に設置されていたのが、葛飾北斎の描いた浅草天文台だったのです。「鳥越の不二」の「鳥越」の由来は、浅草天文台が現在の浅草橋3丁目界隈の鳥越神社のほど近くにあったためといわれています。

当時の記録によると天文台は周囲約93・6m、高さ約9・1mの築山の上に、約5・5m四方の天文台が築かれ、43段の石段がありました。台上には簡天儀と象限儀がすえられ、張り出しの舞台は地平近くの日月食を観測するための場所となっていました。

「鳥越の不二」に描かれている球体のものは簡天儀で、主に天体の角度などを測定するものでした。

この絵が描かれたのは、天保元（1830）年、北斎が75歳のときです。北斎は絵を描く際に、狩野派や琳派などさまざまな流派を取り入れて絵を描いていますが西洋からの技法なども取り入れました。

この天文台が行った改暦事業は、これまでに行われていたものとは大きく異なるものでした。それ以前の改暦は、中国や日本での天文観測の記録をもとに行われましたが、これに西洋の天文学が初めて導入されたのです。鎖国中だった当時の日本には考えられないことだったでしょう。

西洋天文学による改暦を行おうとしたのは八代将軍だった徳川吉宗。吉宗といえばテレビでおなじみの“暴れん坊将軍”として儉約的な享保の改革を断行し、「目安箱」や町火消し、「小石川養生所」をつくったことで有名です。

☆・切り絵 葛飾北斎「鳥越の不二」・☆

しかし、吉宗には意外にも「科学者」としての一面もありました。若いころから、気象観測や天文学に興味があった吉宗は、自ら天文観測を行い、江戸城内に雨量計をつくり観測記録を残すなど天文にも強い関心をもっていたのです。

1745(延享2)年、将軍職をゆずった吉宗は本格的な改暦事業に乗り出します。渋川春海が改暦を行った貞享暦の誤っている部分を調べて、西洋の天文学を取り入れて、さらに正確にしようとしたのですが、春海が作った暦にはほとんど誤差がありませんでした。しかし、それでも吉宗は半ば強引に改暦計画を推し進めようとしたのです。

吉宗が試みた新たな暦「宝暦暦」は1754(宝暦4)年に完成しました。結果的には宝暦の改暦計画は幕府の天文方に優秀な人材がいなかったため成功したとは言えませんでした。一方、民間の天文学による天文の研究のきっかけにもなりました。



江戸の浮世絵師・葛飾北斎が描いた浅草天文台はこのような歴史があったのです。

図は『江戸の天文学』に載っている絵を基にして、切り絵として仕上げました。後ろ姿の侍の袴のシワまで再現できました。

参考文献

『江戸の天文学』 中村士監修 角川学芸出版  
歴史をつくった先人たち 日本の100人 徳川吉宗  
<http://kyodokan.exblog.jp/> 「北斎の富士」新聞連載 第6回「鳥越の不二」：青森県立郷土館ニュース

## M82 に現れた超新星 2014J

永田駿介（鳥取県立米子工業高校 2年）

1月21日英国の Steve J. Fossey 氏がおおぐま座の距離およそ 1200 万光年にある銀河【M82 (NGC 3034)】に超新星 2014J を発見しました。超新星は普通 16,17,18 等といった暗いものが多いですが今回の超新星は 10.5 等と極めて明るいもので、デジタル一眼のような普通のカメラ※1での撮影もでき更には天体望遠鏡を使えば眼視観測も可能な明るさです。皆さんの中にも実際にこの超新星を観測された方も多いと思います。残念ながら明るさのピークは過ぎてしまい 2014 年 3 月 2 日には 12.2 等まで暗くなっていますが機会があれば是非観測をしてみてください。

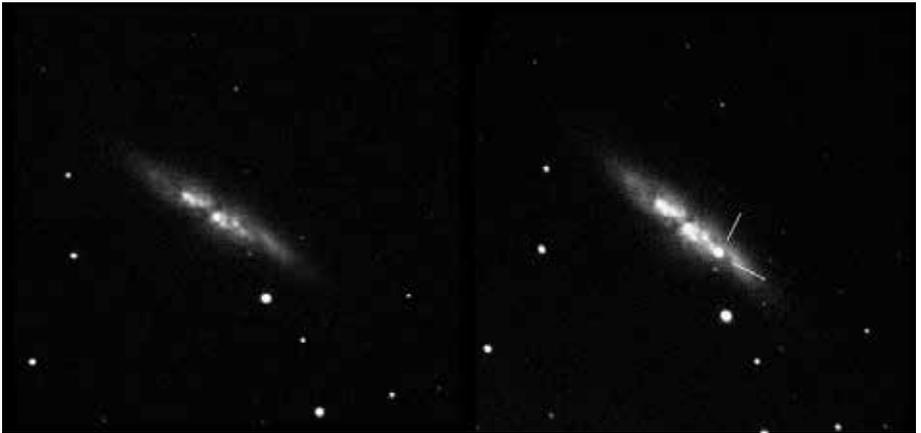


図1 超新星 2014J の写真(2014 年 1 月 29 日撮影)

右画像の印の星が超新星です。左画像は 2013 年 10 月 28 日撮影のもので超新星の姿はありません。

20cm 反射望遠鏡 (SC) +冷却 CCD カメラにて 40 秒露出

鳥取県西伯郡南部町にて 永田駿介撮影

さて、そもそも超新星とはどのような天体なのでしょう？もの凄く産まれたてほやほやの新星で分かりやすいように「超」新星と名付けられているのでしょうか？実はその逆で年老いた星（恒星）が一生を終えるときに起こす大爆発のことで決して星が産まれるという現象ではありません。では私たちの一番身近で輝いている恒星「太陽」もその一生を終えるときに超

新星として大爆発を起こすのかというところではありません。星にも軽い星や重たい星があります。星は分子雲と呼ばれる領域で形成されます。そのガスが収縮されて次第に内部の温度が高くなって光りだします。これが星の卵で「原始星」と呼ばれています。そのまま収縮が続いていけば中心温度と密度が高くなって核融合反応（水素（H）がヘリウム(He)・・・と変わっていく）が起き主系列星という星の一生の中で最も安定した状態になります。但し太陽の 0.08 倍以下の質量の星はこの核融合反応が起こりません。このような星を「褐色矮星（かつしょくわいせい）」と呼びます。主系列星となった後の恒星の一生の終わり方にもいろいろなものがあり太陽の 0.46 倍の大きさの星は長い年月をかけ核融合を行い燃料（水素 H）を使い果たした後中心部分だけが残った言わば星の残骸となります。このような星を「白色矮星（はくしょくわいせい）」と呼びます。太陽と同じくらいの大サイズの星もこの白色矮星になるのですが、それまでの過程が少し異なっていて中心で燃料（水素 H）を使い果たすと膨張し赤い（つまり低温）の星になります。このような星を「赤色巨星」といい太陽もおよそ 50 億年後にはこのようになると言われています。赤色巨星の外層のガスは徐々に星から離れ宇宙空間に放出されますが中心には同じように白色矮星が残り周りには惑星状星雲が形成されます（例：こと座のリング星雲やこぎつね座の亜鈴星雲で 2014 年では 10 月 18 日土曜日の観望会で天気が良ければ観望していただけます。）ではそれより質量の大きな星の一生はどのようにして終えるのでしょうか。太陽の 8 倍以上の質量の星は核融合が進み 水素 H →ヘリウム He→炭素 C→ネオン Ne→酸素 O→ケイ素 Si と元素が作られ最終的に鉄 Fe が出来たところでこれ以上元素が作られなくなります。そうすると中心部が重力によって急激に収縮し重力崩壊を起こし自分の星が吹き飛んでしまうほどの大爆発を起こします。これが「II 型超新星爆発」で吹き飛ばされたガスが超新星残骸（例：おうし座のかに星雲やはくちょう座の網状星雲）となり、その中心は中性子星として残ります。中性子星というのはこのような星の中心部分が急激に収縮したのですが、トルマン・オッペンハイマー・ヴォルコフ限界といい中性子星が存在できる質量の大きさには限界があります。中性子星の質量が 3 倍以上になるとその



図 2 惑星状星雲の例（亜鈴星雲 M27）  
2011 年 8 月 8 日 長野県乗鞍高原にて  
撮影：永田駿介

中性子星になっても自分の重力をさらに支えきれずブラックホールになると考えられています。ブラックホールになる星の質量はおよそ太陽の 30 倍以上であると考えられています。

超新星の種類にはⅡ型超新星の他にもう 1 つ **I 型超新星** という物があります。2 つの恒星が互いの引力で回り合ってるものを**連星**(明るい方を主星、暗い方を伴星と呼ぶ) と言いますが、白色矮星でこの連星をつくってる星でもう片方の星のガスが白色矮星に降り積もっていき白色矮星の質量の限界(チャンドラセカール限界)まで達すると自らを支えきれなくなり大爆発を起こします。これが I 型超新星爆発です。今回 M82 に現れた超新星 2014J はその後の観測により Ia 型超新星ということがわかりました。a というのはケイ素 Si の吸収線がみられるということからこのような表記がされています。(例：ヘリウム He の吸収線がみられた場合は Ib 型超新星と表記される。)

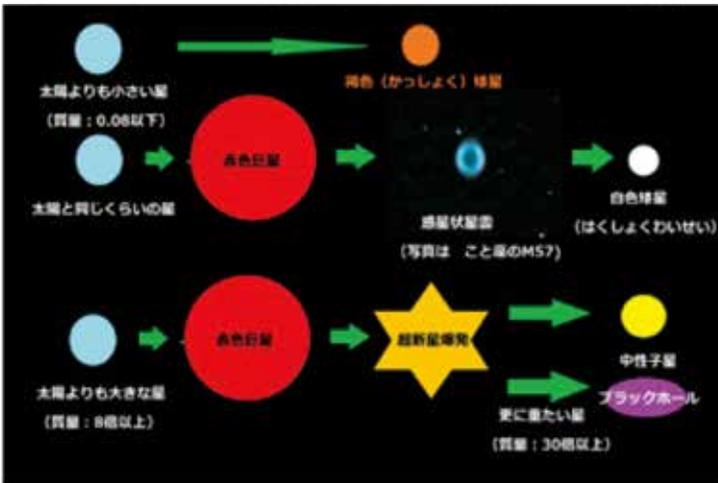


図 3  
星の一生  
(自作図)

※1 超新星の観測にはデジタル一眼のようなカメラではなく冷却 CCD カメラという特殊なカメラが使われます。

### 参考文献

- <http://www.astroarts.co.jp/news/2014/01/23sn2014j/index-j.shtml>  
<http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-recent-sn/5321>  
 中野主一 天文ガイド 2014年3月号 p. 1

プラネタリアムのなかでは、  
おおきな宇宙への夢が  
育っています。



## コニカミノルタ プラネタリアム株式会社

東京事業所 〒170-8630 東京都豊島区東池袋3-1-3

TEL (03) 5985-1711

大阪事業所 〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町2-3-10 西本町インテス11階

TEL (06) 6110-0570

東海事業所 〒442-8558 愛知県豊川市金屋西町1-8

TEL (0533) 89-3570

URL: <http://pla.konicaminolta.jp>

# HERO

一人ひとりが HERO ! アナログ人間の味方です !

## 株式会社ヒーロー

代表取締役 岡村 勝

〒532-0011 大阪市淀川区西中島 6 丁目 6-6 NLC 新大阪 11 号館 7 階

TEL: 06-6309-5265 FAX: 06-6309-5285 <http://www.herojp.co.jp>

### 【事業紹介】

#### ・ソフトウェア開発

物流業務システム、スマートフォンアプリ、各種ゲーム etc.

#### ・技術者派遣 (流通分野、SNS 分野) ・コンサルティング

#### ・製品販売 ~英雄(ヒーロー)シリーズ~

楽図英雄 (図面付受注書作成システム)、勤怠英雄 (就業管理システム)

#### ・アニメパンフ「キャラクター+ストーリー」でわかりやすく会社案内・観光案内・商品説明。用途いろいろ !



# Advanced Engineering Services



株式会社エイ・イー・エス  
Advanced Engineering Services Co.,Ltd.

株式会社エイ・イー・エスは

航空宇宙で培った技術を基に、  
お客様のニーズにあったあらゆる分野に  
おける設計、製造、試験を提供いたします。  
さらに、自社製小型衛星の打上げを  
平成 26 年 5 月 24 日に予定しています。



AES Small Satellite

〒305-0032 茨城県つくば市竹園 1-6-1

TEL: 029-855-2001 FAX: 029-855-9815

## 事務局からのお知らせ

今年の桜は、「一夜で二、三分咲きから八分咲きになった」という声が聞かれましたが、この冊子が皆さんのお手元に届く頃には、新緑がきらきらと輝いていることと思います。

さて、その黄緑が濃い青葉が変わる頃、5月11日(日)には、第7回通常総会と第13回講演会を開催致します。既にご報告しましたように、お陰さまで、昨年末に認定NPO法人に指定されましたが、それに伴って、事業報告書など、京都市への提出期限が早くなりましたので、総会の開催日も前倒しになっています。今回は定款の一部を改訂する必要がありますので、万障お繰り合わせの上ご出席頂きますようお願い致します。

また今年も、楽しいイベントを以下のように順次開催して行きたいと準備していますので、是非皆様方の積極的なご参加をよろしく願致します。

4/26(土)：第47回花山天体観望会「火星と木星」

5/11(日)：第7回通常総会・懇親会、  
第13回花山星空ネットワーク講演会

5/24(土)：第48回花山天体観望会「土星」

7/21(月・祝日)：第49回花山天体観望会「土星と夏の星座」

8/3(日)～8/5(火)：第8回子ども飛騨天文台天体観測教室

9/6(土)：第50回花山天体観望会「名月と名曲」

10/11(土)～10/13(月)：第6回飛騨天文台自然再発見ツアー

### 編集後記

1 昨年5月の金環日食において行われた賀茂川プロジェクトの観測結果に基づき、今年2月に「日食観測から求める太陽半径研究会」が開かれました。これは本NPOの貴重な研究活動であり、今回その全発表結果を掲載しました。「あすとろん」は本NPOの活動を紹介し、また会員間の理解を深めるために発行されている季刊誌です。今後さらに内容を充実していくために、会員の皆様から天文ニュース、普及活動報告、思い出の星空、天文書・ソフト、和歌・俳句・川柳、天体写真・イラストなど投稿、また掲載された記事へのご意見などをお寄せくださるようお願いいたします。

原稿締め切り日は3の倍数月の15日で、投稿に関しては、なるべくテンプレート(Word)を<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/hosizora/astron.html>からダウンロードして、エディタに書いたテキスト文をそこにコピー貼り付けして作成して下さるようお願いいたします。原稿作成のお問い合わせや送付先は

[astron@kwasan.kyoto-u.ac.jp](mailto:astron@kwasan.kyoto-u.ac.jp)です。

編集子

## 基礎物理学研究所前のユカワサクラ



### NPO法人花山星空ネットワークへの入会方法

住所・氏名・連絡先電話番号を電子メール または電話でお知らせ下さい。

電子メール：hosizora@kwasan.kyoto-u.ac.jp、電話：075-581-1461。

入会申込書と会費の振込用紙を郵送いたします。

- (1) 正会員（一般）・入会金 2,000円・年会費 3,000円  
（学生）・入会金 1,000円・年会費 2,000円
- (2) 準会員 ・入会金 1,000円・年会費 2,000円
- (3) 賛助会員 年額1口以上 （1口30,000円）

### 発行人 NPO法人花山星空ネットワーク

〒607-8471 京都市山科区北花山大峰町 京都大学花山天文台内

Tel 075-581-1461 URL <http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/hosizora>

### 印刷所 株式会社あおぞら印刷

〒604-8431 京都市中京区西ノ京原町15

2014年3月31日発行

定価：400円