

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 GOOSSENS¹, 早水 勉²

(2012年1月16日受付; 2012年3月5日受理)

Northern Limit of the Annular Solar Eclipse on 2012 May 21 in Japan

Mitsuru SÔMA, Hiroshi ARAKI, Hiroto NODA, Seiichi TAZAWA,
Sander GOOSSENS¹, and Tsutomu HAYAMIZU²

Abstract

An annular solar eclipse will be seen in Japan on 2012 May 21. The northern limit of the annular phase passes through the Japanese Islands and there are plans to determine the limit from observations by people in schools and public observatories, but predicted lines are different between predictions by more than 2 km. In this paper reasons why such discrepancies occur in the predictions are clarified and the most accurate prediction for the limit is provided using the lunar limb profile data obtained from the Japanese lunar explorer Kaguya. Determinations of the northern limit of the eclipse are valuable for estimating the radius of the Sun.

要旨

2012年5月21日に日本で金環日食が見られる。日本で見られる金環日食としては1987年9月23日に沖縄本島で見られて以来25年ぶりになる。今回の金環日食は九州・四国・近畿・中部の各地方の南部や関東地方の大部分と東北地方の一部で見られ、金環食北限界線が日本列島を横断している。この北限界線の位置を観測から決める計画が各地の教育機関や公共天文台でなされているが、北限界線の位置が予報により2 km以上も異なるなど混乱が生じていて、観測者をどう配置すべきかという計画に影響を与えている。本論文では、予報が異なる理由を明らかにし、日本の月周回衛星「かぐや」によって得られた精密な月の地形データを使って日食時の月縁を予報し、より正確な金環日食限界線の位置のデータを提供する。限界線の位置が観測から得られると、実際の現在の太陽半径を定めるために貴重なデータになる。

1 はじめに

2012年5月21日の朝、日本では25年ぶりになる金環日食が見られる。日本の人口の約3分の2の人々が住む地域で居ながらにして金環日食が見られる。その地域には東京や大阪などの大都市も含まれている(図1)。この金環日食の北限界線が日本では熊本県に始まり、九州・四国・近畿・中部・関東の各地方を経て福島県に入り太平洋に抜けている。この限界線を実

際の観測から決めようという提案が学校教員や公開天文台関係者の間で行われている[1]。しかし、その限界線の位置は予報によって2 km以上も異なっていて、観測をどこで行うべきかについて混乱が生じている(図2参照)。なお、この金環日食の南限界線は島も含め日本の陸地を通過しない。

金環日食の限界線の位置が求められると、太陽の半径を求めるための貴重なデータになる。この論文では、日食限界線の予報計算に必要なパラメータの値に現在考えられる最も確かと思われる値を用い、さらに日本の月周回衛星「かぐや」によって得られた精密な月の

¹ NASA/Goddard Space Flight Center

² せんだい宇宙館 (Sendai Space Hall)

地形データを使って日食時の月縁の凹凸を予報して、日本における金環日食北限界線の予報位置を示す。

第2節で従来の予報の差の原因を明らかにし、第3節では太陽の半径の値について議論する。第4節では

月縁データについて解説し、第5節で金環日食の定義について議論する。第6節で限界線の位置を示し、第7節にこの論文のまとめを述べる。

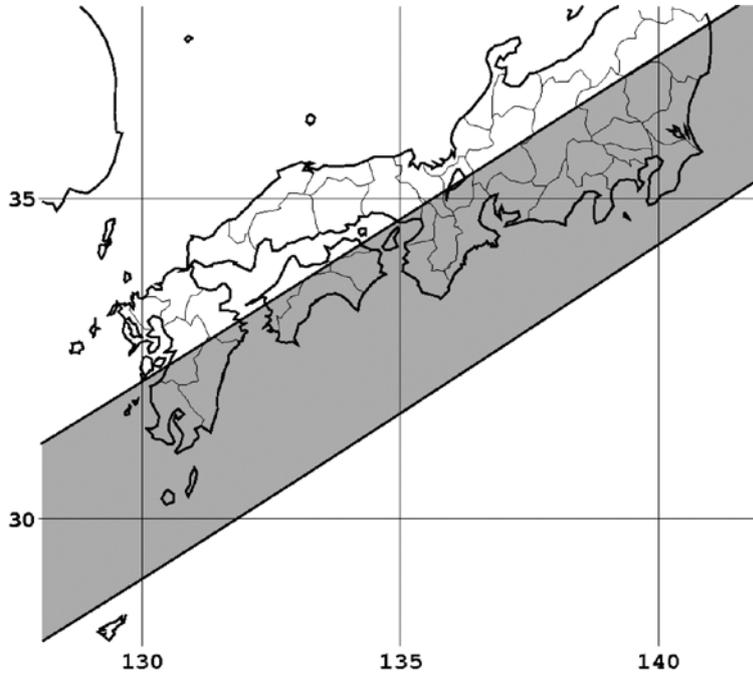


図1：2012年5月21日の日食の金環食帯。



図2：金環日食北限界線の位置の予報による違い。黒線が国立天文台暦計算室の予報、赤線が NASA Eclipse Web Site の予報。両者は約 2.7km 離れている。青線は第6節で述べる月縁を考慮した限界線。地図の場所は兵庫県明石市付近。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。

2 予報の差の原因

図2に示したように、日本における今回の金環日食の北限界線の予報位置は国立天文台暦計算室 http://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/eclipse_s.cgi と NASA Eclipse Web Site <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEgoogle/SEgoogle2001/SE2012May20Agooogle.html> で約2.7kmの差がある。国立天文台暦計算室の日月食等の計算は米英の天体暦 The Astronomical Almanac 等と同じくアメリカ JPL の DE405 [2] を使用して行われている。一方、NASA Eclipse Web Site では太陽の位置に VSOP87 [3] を、月の位置を求めるための周期項に ELP-2000/82 [4] を使用している。VSOP87 はアメリカ JPL の DE200 [5,6] に合わせてあり、太陽の位置の DE405 と VSOP87 の差は2012年において赤経 $0^{\circ}02'$ 以下、赤緯 $0^{\circ}01'$ 以下であり、これによる今回の日食限界線の位置の差は50m以下である。月の暦の ELP-2000/82 も DE200 に合わせたものだが、NASA Eclipse Web Site では月の平均黄経等の計算式に新しい Chapront et al. [7] によるものを採用していることから、月の暦は DE405 にほぼ一致している。したがって、限界線予報における差を考える際には太陽と月の暦の差はほとんど無視してよい。

月は重心と見かけの中心の位置が異なるということで、天体暦では月の重心から見かけの中心への補正として月の黄経に $\Delta\lambda = +0^{\circ}50'$ 、黄緯に $\Delta\beta = -0^{\circ}25'$ を加えて日月食の計算を行っている。国立天文台暦計算室ではこれを算入しているが、NASA Eclipse Web Site では算入していない。この差により、限界線の位置に約1kmの差が生じる。

月の半径の採用値にも差がある。地球の半径に対する月の半径の比の値を k で表す。現在の天体暦における日月食計算では月の見かけの平均半径として $k = 0.2725076$ を採用しており、国立天文台暦計算室でもこれを使っているが、NASA Eclipse Web Site では以前に天体暦で皆既日食の継続時間の計算に使用されていた値 $k = 0.272281$ を皆既日食と金環日食の両方に使用している。つまり NASA Eclipse Web Site の予報では、太陽の全周が完全には見えていないピーズ状態のほとんどを金環日食に分類していることになる。この差によって限界線の位置に2km弱の差が生じる。

太陽・月・惑星の暦の時刻引数は地球時 TT である。日月食を予報するには一般に TT-UTC と UT1-UTC の値が必要になるが、時刻を協定世界時 UTC で与える必要がなく、地図上での限界線の位置だけが必要という場合は地球の自転角で定まる世界時 UT1 との差 $\Delta T = TT - UT1$ の値が分かればよい。国立天文台暦計算室では UT1 と UTC の差 (0.9秒以下) を無視

し、2012年の天象の予報に $\Delta T = 67$ 秒を採用している。一方、NASA Eclipse Web Site では今回の日食の予報に $\Delta T = 67.7$ 秒を採用している。この差によって限界線の位置は日本付近で東西方向に300m弱ずれる (ΔT が大きいほど限界線は東に移動する)。

3 太陽の半径

太陽の半径の値は国際天文学連合 (IAU) で 696,000 km が採用され [8,9]、日月食予報計算でこの値が使用されている。これは Auwers [10] が 1891年に求めた 1 au (天文単位) から見たときの視直径の値 $1919^{\circ}26' \pm 0^{\circ}10'$ (視半径にして $959^{\circ}63' \pm 0^{\circ}05'$) が元になっている。実際、1 au から見た視半径 $959^{\circ}63' \pm 0^{\circ}05'$ から求められる半径は $695,989 \text{ km} \pm 36 \text{ km}$ である。しかし、この値が十分な精度で測定されたものか、正確に測定されたものだったとしても、今の太陽の半径が当時と同じなのかどうかは疑問である (太陽半径の変化の可能性については、例えば Stephenson et al. [11] が扱った 1567年のローマでの金環日食の記録が現在の計算では皆既日食になるという事実があり、また Dunham et al. [12] も 1715年以後の日食の観測結果から太陽半径が変化していることを議論している)。そこで、最近の測定値の主なものを見てみよう。

Kubo [13] は 1970, 1973, 1980, 1991年の4個の皆既日食の観測結果を解析して 1 au から見たときの太陽の視半径をそれぞれ $959^{\circ}74' \pm 0^{\circ}008'$, $959^{\circ}84' \pm 0^{\circ}015'$, $959^{\circ}84' \pm 0^{\circ}012'$, $959^{\circ}88' \pm 0^{\circ}008'$ と求めた。これらは IAU の採用値より大きい値である。Fiala et al. [14] も過去の皆既日食や金環日食の観測結果から太陽半径を求めたが、その結果は使用する太陽と月の暦に依存することが示されている。Brown & Christensen-Dalsgaard [15] は High Altitude Observatory's Solar Diameter Monitor による 1981~1987年の観測から太陽半径を $695,508 \text{ km} \pm 26 \text{ km}$ (対応する 1 au から見た視半径は $958^{\circ}97' \pm 0^{\circ}04'$) と求めたが、それには系統誤差があるということで、Tripathy & Antia [16] がその系統誤差を正して最も確からしい値として $695,770 \text{ km} \pm 100 \text{ km}$ (対応する 1 au から見た視半径は $959^{\circ}33' \pm 0^{\circ}14'$) を求めた。同じころに太陽表面の波動現象の観測から推定したもの [17,18] も同様に IAU の採用値より小さな値であったが、Djafer et al. [19] は Calern CCD astrolabe [20], Solar Disk Sextant [21], Michelson Doppler Imager [22] による測定値について器械誤差の効果を検討し、1 au から見た太陽半径の値として、それぞれ $959^{\circ}811' \pm 0^{\circ}075'$, $959^{\circ}898' \pm 0^{\circ}091'$, $959^{\circ}705' \pm 0^{\circ}150'$ という、IAU の採用値より大きな値を得ている。太陽半径は、

もちろん観測する波長や太陽縁の定義の仕方にも依存するが、これらの差はこれらの違いでも説明しきれない量である。

以上のように、太陽の半径については、どれが最も確からしい値かを定めることができない。そこで、ここではIAUの採用値を使って限界線の位置を求めることにする。

なお、今回の金環日食では太陽の半径が100 km大きくなると日本付近の北限界線の位置が約300 mだけ限界線に垂直な方向で、北やや西寄りにずれることになる。

4 月縁データ

月縁には月の地形の凹凸が見られる。この凹凸の予報にはこれまでWatts [23] の月縁図が使用されていたが、月による恒星の星食や接食の観測結果から、このWattsの月縁図の基準の平均月縁は円から外れ、その中心も月の重心からずれており、そのずれの量も月の秤動によって変わる等の欠点が知られていた[24,25]。

2007年に打ち上げられた日本の月周回衛星「かぐや」はレーザ高度計LALTを搭載し、月の地形を詳細に調べた[26] このデータから地球の任意の地点から見た任意の日時の月縁の様子を得ることができる。

図3は接食の観測から得られた月縁データをWattsの月縁図および「かぐや」の測定データによる月縁と比較した1例である。これから明らかなように、「かぐや」による月縁データを使用することで、月縁の精度が格段に向上する。ただし、「かぐや」は極軌道のため、月の北極や南極付近の月縁は精度がかなり良いが、赤道付近では軌道の間隔がまばらになるため、北極や南極よりは精度が落ちることが予想されることに注意する必要がある。

ここで、「かぐや」のLALTのデータから、月縁のデータを得る方法を述べておく。LALTは「かぐや」が軌道をめぐる間にほぼ1秒毎にレーザ光を発し、その軌道にそって月面上で約1.5 kmごとに月の高度データを取得した。月面上で約1.5 km間隔の経度・緯度に対する高度データが時系列で得られているのである。「かぐや」LALTの公開データには、他に全球地形グリッドデータなど他の書式のデータもあるが、今回使用したのは、ここで説明した時系列のデータである。月縁データを得るために、まず、与えられた観測地から見た与えられた時点の月の見かけの中心の月面経緯度を計算する。さらに位置角を与えたとき、その位置角方向を横切るLALTの軌道は多数存在する。そ

れらのおのおのについて、与えられた位置角に隣り合うLALTの2つの高度データを補間してその位置角方向の見かけの高度を計算する。そのような全てのデータの中から見かけの高度が最大になるものをその位置角における月縁とする。図3のb)に示した「かぐや」のデータはそのようにして位置角0°05'ごとに求めたものである。「かぐや」は月の地形を月の重心を基準にして求めたので、それによる月縁を求める際には、暦から計算される月の位置に対して形状中心と重心の差を算入する必要はない。また、発表された月の地形データの高さは半径1737.4 kmの球面からの高さになっているが、図3のb)に示した月縁ではそれを、日食等の計算で採用されている月の半径(地球の赤道半径に対する比の値 $k = 0.2725076$ [27])に対するものに変換している。なお、Wattsの月縁図のデータでは位置角の間隔が0°2'ごとになっており、図3のa)のWattsの月縁図のデータはそれにしたがって示してある。

5 金環日食の定義

月縁には凹凸があるので、皆既日食や金環日食を考える際に、月縁の山の頂を基準にするか谷間を基準にするかの問題が生じる。

皆既日食や金環日食の始め(第2接触)と終わり(第3接触)の前後には月縁の谷間から漏れた太陽の光が数珠状に連なって見える。これはこの現象を説明したBailey [30] にちなんでBailey's beads (ベイリーの数珠)と呼ばれる。金環日食の限界線上では第2接触と第3接触の時刻が一致し、それは食の最大の時刻でもある。したがって、金環日食の限界線を考える際には食の最大の前後にベイリーの数珠が見られるものを金環日食に含めるかどうかの問題になる。

仮に、ベイリーの数珠が見られるものを金環日食に含めるとすると著しい困難が生じる。例として秋田で見る日食を考える。秋田は最大食分0.89の部分日食が見られる地点に位置し、北限界線から数百キロも北に離れているのであるから、ここで見る日食が金環日食であるとは、だれも考えないはずであるが、ここでもベイリーの数珠が見られるのである。秋田で見る食の最大の頃の様子を図4に示す。月縁の凹凸は前節で述べた「かぐや」のLALTによる地形データから得たもので、拡大して示してある。この図から食の最大の頃にベイリーの数珠が現れることが分かる。この図に示したものは数珠玉が1個であるが、同じような場所で複数の数珠玉が見られるというのも珍しくはない。なお、ベイリーの数珠は第2および第3接触の際に見

られるもので、この例のように食の最大のころに見られる数珠はベイリーの数珠とは言わないだろうという誤解をされる恐れがあるので説明を付け加えるが、北限界線付近で食の最大の頃（これは前述のとおり、第2および第3接触の頃でもある）にベイリーの数珠が見られなくなる場所を探そうとすると、どんどん北上して、秋田まで行ってもまだそのような場所は見つけ

られないということを説明しているのである。

以上のことから、金環日食とは見かけ上、月が太陽の中に完全に入って、太陽の周囲のどこも月に隠されることがない現象と定義することにする。ただし、この定義はこの論文に限ったもので、一般に金環日食をそのように定義すべきだという意味ではない。

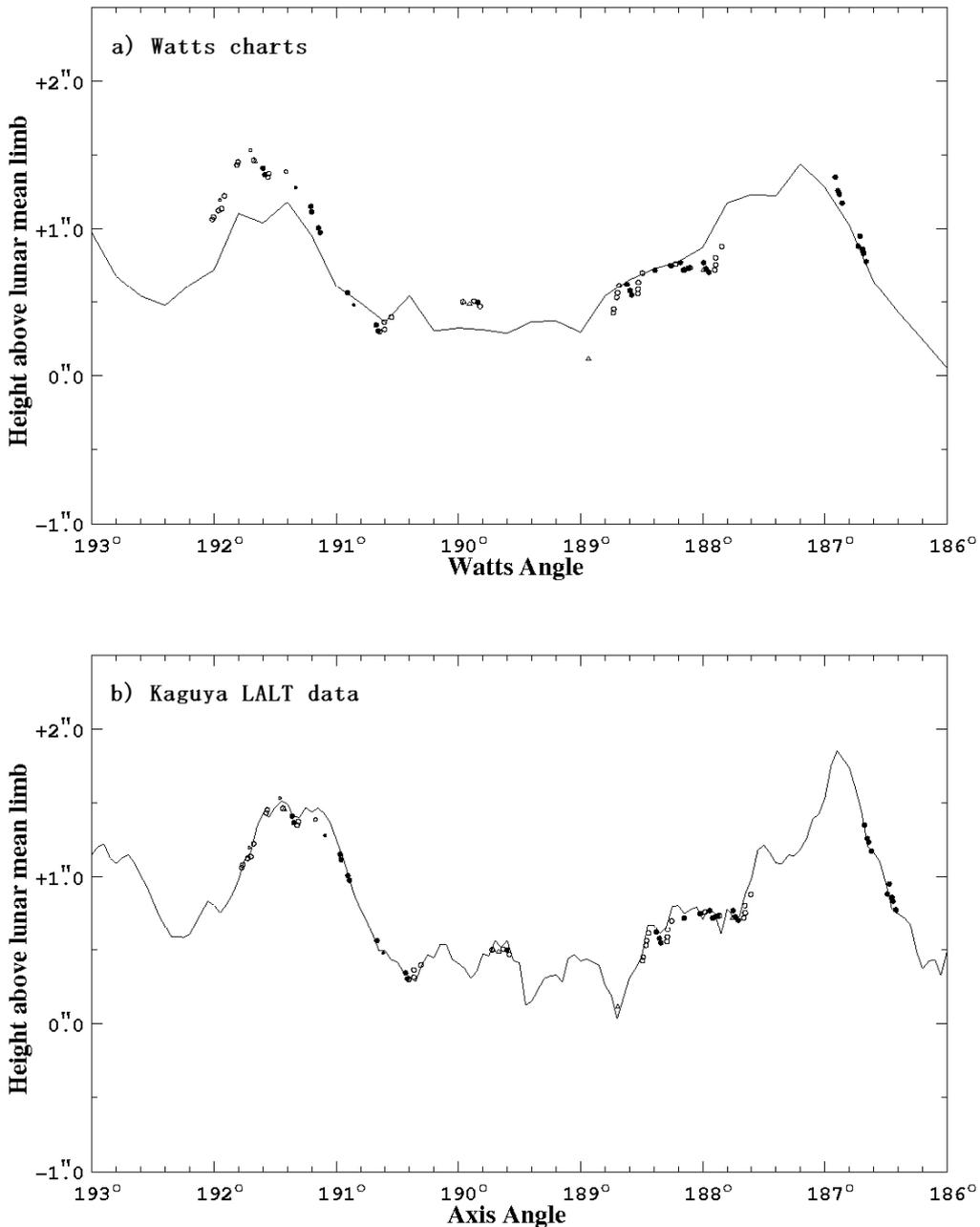


図3：接食の観測から得られた月縁と Watts および「かぐや」の月縁データとの比較の1例。接食は2009年2月17日にオーストラリアで観測されたもの。黒丸は恒星の潜入，白丸は恒星の出現，白三角は瞬間的な出現（flash）の時刻から求められた月縁の位置で，a)は Watts の月縁図による月縁と，b)は「かぐや」LALT のデータによる月縁と比較したもの。縦軸は月の半径を地球の赤道半径の対する比の値で $k = 0.2725076$ [27] とした平均月縁からのずれを月の平均距離 384,399 km [28] から見た角距離で表したもので、横軸は位置角で月の自転軸の北方向から測ったもの（Axis Angle）だが、Watts の月縁図で使用されている位置角（Watts Angle）はそれから系統的にずれていることが知られており、 $\text{Watts Angle} = \text{Axis Angle} + 0^\circ 24'$ を採用して表示した [29]。b)には横軸方向・縦軸方向とも何も補正を加えていない。

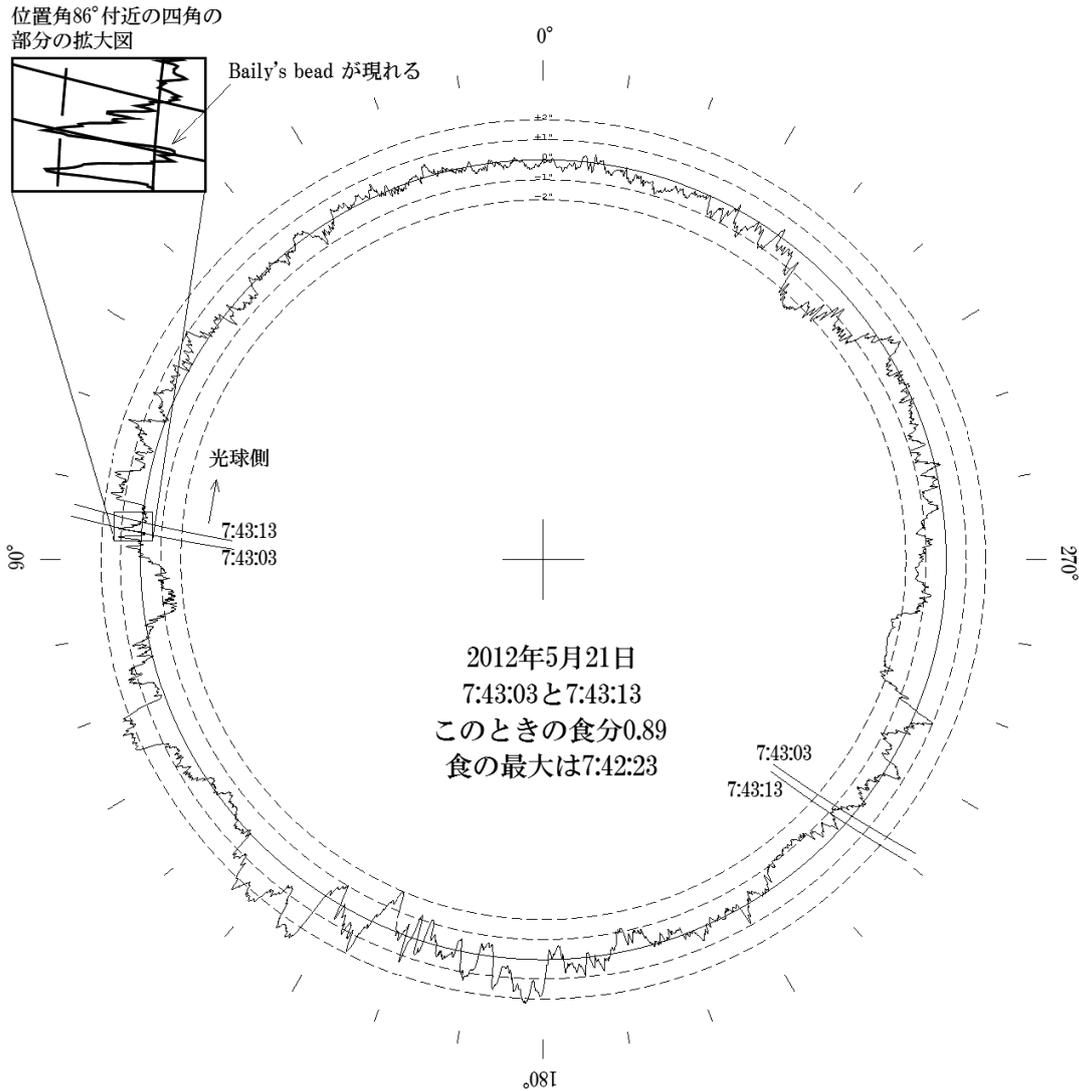


図4：秋田で見る食の最大の頃の月縁と太陽の縁の位置。時刻は日本時。月縁を拡大し、太陽の縁もそれに合わせて拡大して示している。破線と破線の間隔が $1''$ 。位置角は天の北極方向基準。位置角 86° 付近の月縁と太陽の縁の位置関係を拡大して左上に示す。7時43分03秒に数珠玉が現れることが示されている。使用した秋田の座標は東経 $140^\circ 06'$ 、北緯 $39^\circ 43'$ 、月の秤動（第6節参照）は $l = -0^\circ 769$ 、 $b = -0^\circ 111$ 、 $C = 346^\circ 332$ 。

6 限界線の計算

The Astronomical Almanac 等の天体暦では月や惑星の暦にアメリカ JPL が 1997 年に作成した DE405 [2] が採用されているが、JPL ではその後も精密な月や惑星の距離観測と VLBI 観測の結果を加えて順次に暦の改良を行っており、現在の最新版は 2011 年に作成された DE424 になっている。ただし、DE422、DE423 は水星探査機、DE424 は火星探査機のために作られたもので、一般に使用する場合、特に月の精密位置データは、2008 年に作成された DE421 [31] を使うことが推奨されている [32,33]。2012 年における DE405 と DE421 との差 (DE421 から DE405 を減じた値)

は月の赤経が $+0''.003 - +0''.006$ 、赤緯が $-0''.004 - +0''.004$ 、距離が $0\text{m} - +2\text{m}$ 、太陽の赤経が $-0''.001$ 、赤緯が $-0''.002 - +0''.002$ 、距離が $-16\text{m} - +17\text{m}$ で、これらの差が今回の限界線の位置計算に及ぼす効果は 10m 程度であるから、ほとんど無視できる量である。ここでは DE421 を使用して限界線の位置を計算する。

第2節で述べたように、日食等の予報計算には TT-UTC と UT1-UTC の値が必要である。今回の日食のときには $TT-UTC = 66.184\text{s}$ と確定しているが、UT1-UTC の確定値はまだ不明である。この予報値は週に1回発行される IERS Bulletin-A に掲載されている。日食時の値には 2011 年 9 月 29 日付 [34] で予想されていた値 $UT1-UTC = -0.58\text{s}$ を使用する。この結

果, $TT-UT1 = 66.76s$ となる (第2節で述べたように, この値は, 国立天文台暦計算室の予報で $67s$, NASA Eclipse Web Site では $67.7s$ を使用していた). この誤差は $0.05s$ 以内と考えられ, これによる限界線の位置の誤差は $20m$ 以下である. なお, 日本の中央標準時 (JST) は UTC と $JST = UTC + 9h$ の関係にある.

第4節で述べたように, 月縁データには「かぐや」の LALT によるデータを使用する. そのため, 暦から求めた月の位置に対して月の形状中心と重心の差に関する補正は行わない.

日食当日の7時30分 (JST) において北限界になるのは東経 $135^{\circ}19'$, 北緯 $34^{\circ}49'$ 付近の地点である. ここにおいてこの時点に月を見たとき, 月の見かけの中心点の月面経度 l と月面緯度 b と自転軸の位置角 C は $l = -0^{\circ}664$, $b = -0^{\circ}137$, $C = 346^{\circ}325$ である. これは

DE421 の月の秤動のデータに対して慣性主軸から地球の平均方向と平均の自転軸を基準とした座標系への補正 [35] を行って求めたものである. この補正は, DE421 等の秤動を与える座標系が月の慣性主軸に準拠しているのに対して, 「かぐや」の LALT の月面地形データが地球の平均方向と平均の自転軸を基準にしているために行ったものである. 上記の東経 $135^{\circ}19'$, 北緯 $34^{\circ}49'$ の地点で見た食の最大の頃の月縁とその前後の太陽の縁の位置を10秒毎に図5に示す. 図の縮尺に対して月縁を拡大して示し, 太陽の縁もそれに合わせて拡大しているため, 太陽の縁の曲率は実際とは反転していることに注意してほしい. この図から, この場所では第5節で定義した意味での金環日食にはわずかにならないことが分かる.

月縁の様子は場所と時刻で変化するが, 図4と図5

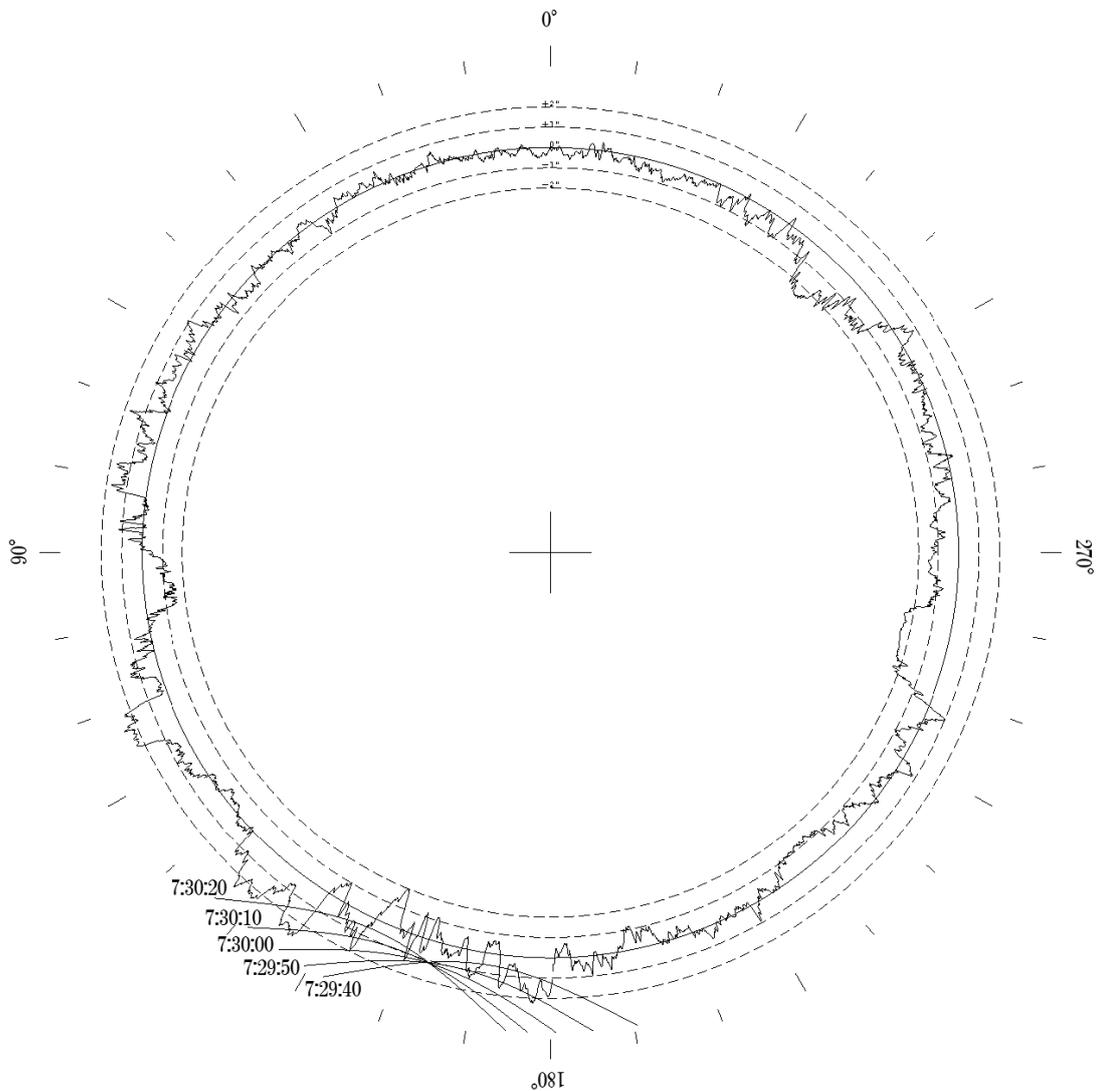


図5：東経 $135^{\circ}19'$, 北緯 $34^{\circ}49'$ で見る食の最大の頃の月縁と太陽縁の位置. 時刻は日本時. 月縁を拡大し, 太陽の縁もそれに合わせて拡大して示しているため, 太陽の縁の曲率は実際とは反転している. 破線と破線の間隔が $1''$. 位置角は天の北極方向基準. 月の秤動は $l = -0^{\circ}664$, $b = -0^{\circ}137$, $C = 346^{\circ}325$.

の月縁を比較しても、ほとんど差がなく、日本における今回の金環日食の予報ではこのいずれを用いても問題はない。そこで、図5に示した月縁データを使って、

金環日食の限界線を求めた結果、日本付近では、北限界線は月縁で $1^{\circ}13' - 1^{\circ}14'$ だけ外に、南限界線は $0^{\circ}22' - 0^{\circ}23'$ だけ内側にずれることが判明した。これは月

表1 北限界線の予報位置.

JST	東経	北緯	東経 (+1")	北緯	高度	方位角	PA	AA
h m s	° ' "	° ' "	° ' "	° ' "	°	°	°	°
7 22 00.0	129 15 00.1	31 44 35.1	129 17 10.2	31 44 09.4	23.35	79.90	163.68	177.36
7 22 30.0	129 41 10.0	31 57 37.3	129 43 18.1	31 57 10.7	23.86	80.26	163.66	177.34
7 23 00.0	130 06 44.6	32 10 24.3	130 08 50.9	32 09 57.0	24.35	80.61	163.64	177.31
7 23 30.0	130 31 46.3	32 22 57.2	130 33 50.8	32 22 29.1	24.84	80.96	163.62	177.29
7 24 00.0	130 56 17.1	32 35 16.6	130 58 20.0	32 34 47.8	25.32	81.31	163.60	177.27
7 24 30.0	131 20 19.0	32 47 23.3	131 22 20.2	32 46 53.8	25.78	81.66	163.58	177.26
7 25 00.0	131 43 53.5	32 59 17.9	131 45 53.3	32 58 47.6	26.24	82.00	163.56	177.24
7 25 30.0	132 07 02.4	33 11 00.9	132 09 00.7	33 10 30.1	26.69	82.35	163.55	177.22
7 26 00.0	132 29 46.9	33 22 33.0	132 31 43.9	33 22 01.6	27.14	82.69	163.53	177.21
7 26 30.0	132 52 08.4	33 33 54.7	132 54 04.1	33 33 22.6	27.57	83.04	163.52	177.20
7 27 00.0	133 14 08.1	33 45 06.3	133 16 02.6	33 44 33.7	28.00	83.38	163.51	177.19
7 27 30.0	133 35 47.1	33 56 08.3	133 37 40.5	33 55 35.2	28.42	83.73	163.50	177.18
7 28 00.0	133 57 06.6	34 07 01.2	133 58 58.8	34 06 27.5	28.84	84.07	163.49	177.17
7 28 30.0	134 18 07.3	34 17 45.2	134 19 58.4	34 17 11.0	29.25	84.42	163.48	177.16
7 29 00.0	134 38 50.2	34 28 20.8	134 40 40.3	34 27 46.0	29.65	84.76	163.47	177.15
7 29 30.0	134 59 16.2	34 38 48.2	135 01 05.3	34 38 12.9	30.05	85.10	163.47	177.14
7 30 00.0	135 19 26.0	34 49 07.6	135 21 14.1	34 48 32.0	30.44	85.45	163.46	177.14
7 30 30.0	135 39 20.3	34 59 19.6	135 41 07.5	34 58 43.4	30.83	85.79	163.46	177.13
7 31 00.0	135 58 59.9	35 09 24.1	136 00 46.1	35 08 47.5	31.21	86.14	163.45	177.13
7 31 30.0	136 18 25.3	35 19 21.6	136 20 10.6	35 18 44.5	31.58	86.48	163.45	177.13
7 32 00.0	136 37 37.2	35 29 12.2	136 39 21.7	35 28 34.7	31.95	86.83	163.45	177.12
7 32 30.0	136 56 36.1	35 38 56.1	136 58 19.7	35 38 18.2	32.32	87.18	163.45	177.12
7 33 00.0	137 15 22.5	35 48 33.5	137 17 05.4	35 47 55.3	32.68	87.52	163.45	177.12
7 33 30.0	137 33 57.1	35 58 04.7	137 35 39.2	35 57 26.1	33.04	87.87	163.45	177.12
7 34 00.0	137 52 20.2	36 07 29.9	137 54 01.5	36 06 50.8	33.40	88.22	163.45	177.13
7 34 30.0	138 10 32.2	36 16 49.0	138 12 12.8	36 16 09.7	33.75	88.57	163.45	177.13
7 35 00.0	138 28 33.7	36 26 02.5	138 30 13.6	36 25 22.7	34.09	88.92	163.46	177.13
7 35 30.0	138 46 25.1	36 35 10.4	138 48 04.2	36 34 30.2	34.43	89.27	163.46	177.13
7 36 00.0	139 04 06.6	36 44 12.7	139 05 45.1	36 43 32.3	34.77	89.62	163.46	177.14
7 36 30.0	139 21 38.7	36 53 09.8	139 23 16.5	36 52 29.0	35.11	89.98	163.47	177.14
7 37 00.0	139 39 01.8	37 02 01.7	139 40 38.9	37 01 20.6	35.44	90.33	163.48	177.15
7 37 30.0	139 56 16.1	37 10 48.6	139 57 52.6	37 10 07.1	35.77	90.69	163.48	177.16
7 38 00.0	140 13 22.0	37 19 30.5	140 14 57.9	37 18 48.6	36.09	91.04	163.49	177.16
7 38 30.0	140 30 19.8	37 28 07.5	140 31 55.1	37 27 25.4	36.41	91.40	163.50	177.17
7 39 00.0	140 47 09.8	37 36 39.9	140 48 44.5	37 35 57.4	36.73	91.76	163.51	177.18
7 39 30.0	141 03 52.2	37 45 07.6	141 05 26.3	37 44 24.8	37.04	92.12	163.51	177.19
7 40 00.0	141 20 27.4	37 53 30.8	141 22 00.9	37 52 47.7	37.35	92.48	163.52	177.20

東経と北緯は第5節に与えた金環日食の定義による金環日食北限界線の経緯度である。(+1")として与えた経緯度の地点は、月の半径が角度で 1" だけ大きいとして求めた限界線の位置で、そこは、食の最大のときに、月縁の凹凸の中で太陽の縁に近い点が太陽の縁とは 1" だけ離れている、つまり、金環食帯の中にあるが、観測の分解能が 1" の場合には金環日食とは判断されない可能性がある地点の限界である。PA と AA は接触点 (月縁の凹凸は考慮しないで月の見かけの形を円としたときの接触点) の位置角で、見かけの月の中心を基準にして、それぞれ天の北極方向と月の自転軸の北側から測った角である。

の半径にして北限界線は $k = 0.272854$ を、南限界線は $k = 0.272439$ を用いることに対応する。用いるべき k の値は場所により若干異なるはずだが、その差の効果は、今回の場合、限界線の位置にして 10 m 程度なので、予報では無視しうる。これは今回の日本における金環日食の限界線上で見る接触点の位置角が場所によってあまり変化しないことが効いている（下に述べる表 1 の PA および AA の値を参照）。そこで限界線全体についてこの k の値を使用する。限界線の位置の計算方法は天体暦で採用されている方法 [36] と同じである。先に書いたように、日本では南限界線は陸地を通らないので、北限界線のみ位置のデータを表 1 に示す。高度と方位角は限界線上から見た太陽の高度と方位角で、高度は水平線から天頂に向かって測り、方位角は北から東回りに測る。明石付近の限界線の位置は図 2 に書き込んでおいた。日本全体について北限界線の位置を Google マップに示したものは鹿児島県薩摩川内市せんだい宇宙館のウェブサイト <http://sendaiuchukan.jp/event/news/2012eclipse/2012eclipse-map.html> に示してあるので参照されたい。なお、この予報の経緯度は世界測地系の準拠楕円体の表面に対するものである。観測地がその準拠楕円体から h の高さにある場合は、限界線の位置は太陽の方位角方向に $h \cot$ （高度）だけずれる。 h は標高にジオイド高 [37] を加えたものであるが、予報の段階では標高を用いてもほとんど問題ない。

前述のとおり、金環日食の限界線の位置が観測から求められると、太陽の半径を求めるための貴重なデータになる。ただし、金環日食の限界線付近では、望遠鏡を使った観測でも、望遠鏡の分解能や大気の揺らぎ等の影響に加えて、皆既日食とは違って周りからの強い光のノイズを受ける厳しい環境下での観測になるため、金環日食になったかどうかを判断するのが困難で、限界線の位置が正確には定められないということが起こりうる。そのため、太陽の半径を正確に求めるためには、限界線決定のための観測と並行して、ベイリーの数珠が現れたり消えたりする時刻を正確に測定する観測 [38] を行うことも必要であろう。その際、光学機器の性能やノイズの状態によって太陽の縁のどの強度の場所を測るかに差が生じる可能性があるため、数珠の光度変化も測定することが必要になろう。それを精密な月縁地形を考慮して解析すれば太陽の輝度分布（太陽中心からの角距離と見かけの明るさとの関係）を求めることも可能になる。これによって、太陽縁の輝度分布の変曲点で定義される太陽縁の位置を $0''.01$ 程度の高精度で得ることも可能になるであろう。これは太陽半径にして約 10 km に相当する。

7 まとめ

2012年5月21日には日本の広い地域で見られる金環日食が起こる。この金環日食の限界線やベイリーの数珠を観測することは太陽の大きさを精密に決定するために有用である。従来発表されていた予報では、パラメータの値の差により、限界線の位置が異なっていた。この論文では、その限界線の予報位置を、計算に必要なパラメータの正確な値と精密な月縁データを用いて表 1 に示した。限界線の観測に役立てられたい。

参考文献

- [1] 畠 浩二, 時政典孝, 井上 毅: “金環日食限界線を全国でつないでみよう”, 第 2 回 金環日食シンポジウム「みんなで楽しむために」2011 年 10 月 29 日, 日本科学未来館 (2011).
- [2] Standish, E.M.: “JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405”, *JPL Interoffice Memorandum*, IOM 312.F-98-048 (1998).
<ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/ioms/de405.iom.pdf>
- [3] Bretagnon, P. and Francou, G.: “Planetary theories in rectangular and spherical variables - VSOP87 solution”, *Astron. Astrophys.*, **202**, 309–315 (1988).
- [4] Chapront-Touzé, M. and Chapront, J.: “The lunar ephemeris ELP 2000”, *Astron. Astrophys.*, **124**, 50–62 (1983).
- [5] Standish, E.M.: “Orientation of the JPL Ephemerides, DE200/LE200, to the Dynamical Equinox of J2000”, *Astron. Astrophys.*, **114**, 297–302 (1982).
- [6] Standish, E.M.: “The Observational Basis for JPL's DE200, the planetary ephemeris of the *Astronomical Almanac*”, *Astron. Astrophys.*, **233**, 252–271 (1990).
- [7] Chapront, J., Chapront-Touzé, M., and Francou G.: “A new determination of lunar orbital parameters, precession constant and tidal acceleration from LLR measurements”, *Astron. Astrophys.*, **387**, 700–709 (2002).
- [8] IAU: “Proceedings of the Sixteenth General Assembly, Grenoble 1976”, *Trans. IAU* **16B**, 58 (1977).

- [9] Archinal, B.A., A'Hearn, M.F., Bowell, E., Conrad, A., Consolmagno, G.J., Courtin, R., Fukushima, T., Hestroffer, D., Hilton, J.L., Krasinsky, G.A., Neumann, G., Oberst, J., Seidelmann, P.K., Stooke, P., Tholen, D.J., Thomas, P.C., and Williams, I.P.: "Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009", *Celest. Mech.Dyn.Astr.*, **109**, 101–135 (2011).
- [10] Auwers, A.: "Der Sonnendurchmesser und der Venusdurchmesser nach den Beobachtungen an den Heliometern der deutschen Venus-Expeditionen", *Astronomische Nachrichten*, **128**, 361–376 (1891).
- [11] Stephenson, F.R., Jones, J.E., and Morrison, L.V.: "The solar eclipse observed by Clavius in A.D. 1567", *Astron. Astrophys.*, **322**, 347–351 (1997).
- [12] Dunham, D.W., Sofia, S., Fiala, A.D., Muller, P.M., and Herald, D.: "Observations of a probable change in the solar radius between 1715 and 1979", *Science*, **210**, 1243–1245 (1980).
- [13] Kubo, Y.: "Position and Radius of the Sun Determined by Solar Eclipses in Combination with Lunar Occultations", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **45**, 819–829 (1993).
- [14] Fiala, A.D., Dunham, D.W., and Sofia, S.: "Variation of the Solar Diameter from Solar Eclipse Observations, 1715-1991", *Solar Physics*, **152**, 97–104 (1994).
- [15] Brown, T.M. and J. Christensen-Dalsgaard, J.: "Accurate Determination of the Solar Photospheric Radius", *Astrophys. J.*, **500**, L195–L198 (1998).
- [16] Tripathy, S.C. and Antia, H.M.: "Influence of Surface Layers on the Seismic Estimate of the Solar Radius", *Solar Physics*, **186**, 1–11 (1999).
- [17] Schou, J., Kosovichev, A.G., Goode, P.R., and Dziembowski, W.A.: "Determination of the Sun's Seismic Radius from the SOHO Michelson Doppler Imager", *Astrophys. J.*, **489**, L197–L200 (1997).
- [18] Antia, H.M.: "Estimate of solar radius from f-mode frequencies", *Astron. Astrophys.*, **330**, 336–340 (1998).
- [19] Djafer, D., Thuillier, G., and Sofia, S.: "A Comparison among Solar Diameter Measurements Carried Out from the Ground and outside Earth's Atmosphere", *Astrophys. J.*, **676**, 651–657 (2008).
- [20] Chollet, F. and Sincaec, V.: "Analysis of solar radius determination obtained by the modern CCD astrolabe of the Calern Observatory. A new approach of the solar limb definition", *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **139**, 219–229 (1999).
- [21] Djafer, D., Thuillier, G., Sofia, S., and Egidi, A.: "Processing Method Effects on Solar Diameter Measurements: Use of Data Gathered by the Solar Disk Sextant", *Solar Physics*, **247**, 225–248 (2008).
- [22] Kuhn, J.R., Bush, R.I., Emilio, M., and Scherrer, P.H.: "On the Constancy of the Solar Diameter. II", *Astrophys. J.*, **613**, 1241–1252 (2004).
- [23] Watts, C.B.: "The marginal zone of the moon", *Astron. Papers American Ephemeris*, **17**, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. (1963).
- [24] Van Flandern, T.C.: "Some Notes on the Use of the Watts Limb-Correction Charts", *Astron. J.*, **75**, 744–746 (1970).
- [25] Morrison, L.V. and Appleby, G.M.: "Analysis of lunar occultations – III. Systematic corrections to Watts' limb-profiles for the Moon", *Mon. Notices Roy. Astron. Soc.*, **196**, 1013–1020 (1981).
- [26] Araki, H., Tazawa, S., Noda, H., Ishihara, Y., Goossens, S., Sasaki, S., Kawano, N., Kamiya, I., Otake, H., Oberst, J., and Shum, C.: "Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry", *Science*, **323**, 897–900 (2009).
- [27] IAU: *Transactions of the International Astronomical Union*, Volume XVIII B, (ed.) R.M. West, Dordrecht, Reidel, Proc. 18th General Assembly, Patras(1983).
- [28] 相馬 充: "暦象年表改訂版の問題点", *国立天文台報*, **12**, 1–11 (2009).
- [29] Sôma, M.: "An analysis of lunar occultations in the year 1955-1980 using the new lunar ephemeris ELP2000", *Celes. Mech.*, **35**, 45–88 (1985).
- [30] Baily, F.: "On a remarkable phenomenon that occurs in total and annular eclipse of the sun", *Mon. Notices Roy. Astron. Soc.*, **4**, 15–19 (1836).
- [31] Folkner, W.M., Williams, J.G. and Boggs, D.H.: "The Planetary and Lunar Ephemeris DE421", *JPL Interoffice Memorandum*, IOM 343R-08-003 (2008) and *JPL Interplanetary Network Progress Report*, 42–178 (2009).
ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph
http://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-178/178C.pdf
- [32] Folkner, W.M.: "Planetary ephemeris DE423 fit to Messenger encounters with Mercury", *JPL Interoffice Memorandum*, IOM 343R-10-001 (2010).
ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/

- [33] Folkner, W.M.: README.txt file of DE424, JPL (2011).
<ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/>
- [34] IERS: IERS Bulletin-A, Vol. XXIV, No. 039(2011).
ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/reports/iers/bulletin_a/volume_xxiv/iers_bulletina.xxiv_039
- [35] Konopliv, A.S., Asmar, S.W., Carranza, E., Sjogren, W.L., and Yuan, D.N.: “Recent Gravity Models as a Result of the Lunar Prospector Mission”, *Icarus*, **150**, 1–18 (2001).
- [36] Nautical Almanac Offices: *Explanatory Supplement to the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac*, Her Majesty’s Stationery Office, London (1961).
- [37] 国立天文台編: “日本のジオイド高分布図”, *理科年表*, 平成 24 年, 809 (2011).
- [38] Sigismondi, C., Dunham, D. W., Guhl, K., Andersson, S., Bode, H., Canales, O., Colona, P., Farago, O., Fernández-Ocaña, M., Gabel, A., Haupt, M., Herold, C., Nugent, R., Oliva, P., Patel, M., Perello, C., Rothe, W., Rovira, J., Schaefer, T., Schnabel, C., Schwartz, D., Selva, A., Strickling, W., Tegtmeier, A., Tegtmeier, C., Thome, B., and Warren, W. H.: “Baily’s Beads Atlas in 2005 – 2008 Eclipses”, *Solar Physics*, **258**, 191–202 (2009).