

ビデオ観測された水星食の現象時刻の解析

宮下 和久¹, 相馬 充

(2009年10月30日受付; 2010年2月10日受理)

An analysis of a lunar occultation of Mercury observed by video

Kazuhisa MIYASHITA and Mitsuru SÔMA

Abstract

A lunar occultation of Mercury was observed with video equipment on 2008 December 29 by two Japanese amateur astronomers Masayuki Ishida and Hisashi Suzuki. Although the event occurred in the daytime, the light variation during the event was successfully analyzed using Limovie, software to extract quantitative data of light intensity from video (Miyashita et al. 2006). Additionally, using the functions by Hapke (1986, 1993) for the brightness distribution on Mercury's apparent disk, we have been able to obtain precise central times of the reappearances of Mercury, which enable us to get precise lunar limb corrections.

1. はじめに

2008年12月29日昼に起きた月による水星の掩蔽は、国内のアマチュア観測者により観測が行われ、ビデオ撮影がなされた。筆者らはそれらのビデオの提供を受け、測光用ソフトウェア Limovie による測光と、それにより得られた光量変化と水星の輝度分布モデルとの比較により現象時刻の推定を行った。水星の輝度分布モデルには Hapke の関数を用いた。その結果、従来は困難とされてきた、面積のある天体の掩蔽現象から月縁を推定できるような精密な時刻データを得ることができた。本論文では現象の解析の手法と時刻測定の結果について述べる。

2. 観測

観測は滋賀県の石田正行氏と静岡県の鈴木寿氏により行われた。両氏とも、星食や接食の観測に熱心に取り組んでいるアマチュア観測者である。両観測地における星食の状況を図1に示す。この

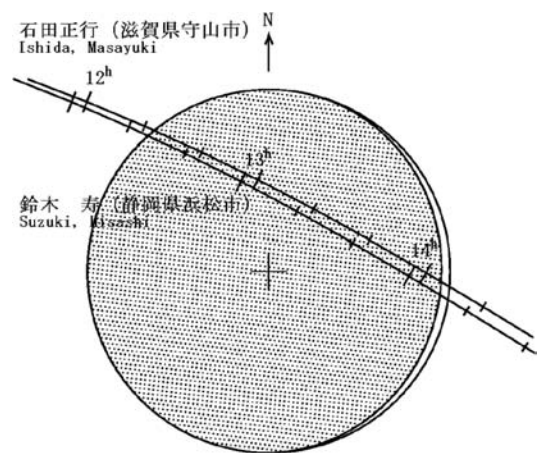


図1 水星食の状況図



図2 水星食の見られる範囲

¹ IOTA, 星食観測日本地域コーディネーター (JCLC)

表 1 観測記録と解析結果
(経緯度は世界測地系, 時刻は 2008 年 12 月 29 日の UTC)

観測者	石田正行 (滋賀県守山市)	鈴木寿 (静岡県浜松市)
観測地	東経 135° 56' 33".6 北緯 35° 06' 22".3 標高 85m	東経 137° 42' 48".4 北緯 34° 45' 53".8 標高 50m
望遠鏡	30cm シュミットカセグレン	25cm ベイカーリッチークレチアン
ビデオカメラ	WATEC WAT100N 高速シャッター使用 ガンマ補正機能 OFF	WATEC WAT100N 高速シャッター (1/10000 秒) ゲイン 手動設定 3/14 目盛り ガンマ補正機能 OFF
記録	miniDV カムコーダーに録画	miniDV カムコーダーに録画
出現中心時刻	05h 08m 24.69s ± 0.10s	05h 13m 40.16s ± 0.08s
月の秤動 (l, b)	(-3°.034, +2°.358)	(-3°.076, +2°.340)
位置角	273°.762	269°.664
月縁の高さ	-1".899	-2".283
Watts のデータ	-1".87	-2".54

星食が見られる地域は図 2 に示すとおりで, 日本は昼間の現象ながら, 南中前後の現象で, 条件の良い場所に位置していたことがわかる. 観測地や機材のデータは後に説明する解析結果とともに表 1 に示した.

水星は 2008 年 12 月 29 日の 12 時 20 分 (JST) 頃に月の暗縁に潜入したが, 雲の通過により両氏とも観測することはできず, 14 時過ぎ (JST) に起こった明縁からの出現についてのみ観測がなされた. 昼間の現象で, 月齢はわずか 1.6, 太陽からの離角が 18° という, 空の明るい場所での現象であったが, いずれの観測も適切な感度やゲインの調整がなされていたことから, 撮影されたビデオはノイズの少ないたいへん安定した画像となっていた. また, 星像の白飛び (サチレーション) もなく, 光量変化を測定するのに最適なビデオであった.

3. 測光

これらのビデオについて, 測光用ソフトウェア Limovie¹⁾ を用いて光量変化を測定した. この現象は月の明部からの出現であり, 水星の光の量を測定するためには, 背景光の明るさを正確に差し引く必要がある. Limovie は, 地球照などの月縁の影響を最小限にするために, 背景光測定領域を長方形に設定する機能を持っている. これを月縁に沿うような方向に置くことにより, 背景光測定領域と星像測光用領域双方について, 月の明部がかかっている部分の比率をほぼ同じにすることが

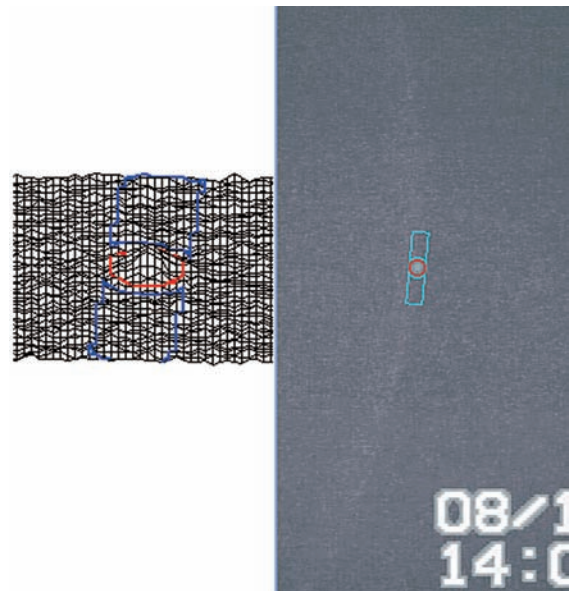


図 3 Limovie による測光

青空の中に細い月の明部が見える. 細長い長方形の背景光測定領域を用いることで月縁の影響を除いている. 画像は, 図 1 と同様に, 上の方を天の北極方向に向けて撮影されている.

でき, 精度の良い測光値を得ることができる (図 3). このようにして得られた光量変化を図 4 に示す. 光量はゆるやかな曲線を描いて増加している. 観測に用いられたビデオカメラについては, CCD が受けた光量とビデオ出力との間に直線的な関係があることが確かめられている¹⁾ ことから, 得られた曲線は実際の光量変化の様子を正確に表していると考えられる.

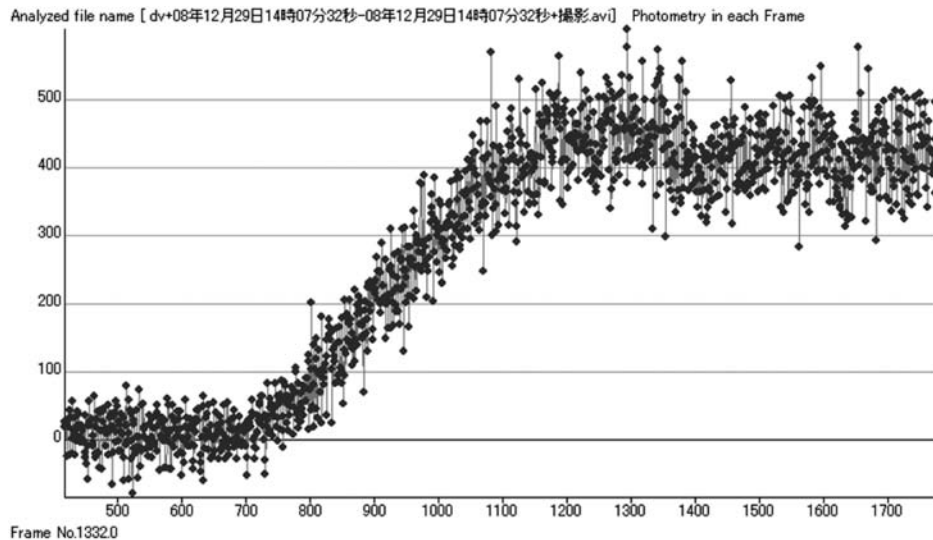


図4 測光の結果

石田氏によるビデオより得られた光量変化。復光後の振幅は、大気によるシンチレーションに加えて、ゲインが不安定になったものも含まれる。増光中にはゲインの変化は起こっていない。

4. シミュレーションとの比較と時刻測定

4.1 水星食の時刻測定の困難点

水星には、月と同じような満ち欠けがある。そのため、円形または楕円形に見える天体と異なり、一般的には現象中央時刻の光量は掩蔽前の50%にはならない。したがって、光量50%のフレームを特定してそれを現象中心時刻として推定する、という方法を用いることはできない。さらに、光量変化には大気のシンチレーションによるノイズが乗っていることから、特定の時刻のフレームをもって正確な現象時刻とすることは適切でない。また、ノイズ低減のためにフレーム間の移動平均などの処理を行ったとしても、それでは誤差を見積もる方法がない。これらの理由に加え、光電管では背景光の値を正確に差し引くことが困難であることや、眼視観測やビデオモニターの目視による方法では、月縁と水星の縁の接触の時刻について、数秒の誤差が見込まれることなどから、従来は、水星食などの面積を持った天体の掩蔽現象から正確な現象時刻を求めることは困難とされてきた。

4.2 シミュレーションモデルの作成

時刻の推定における上記の問題を解決するには、光量の観測値を、食現象において期待される光量変化のモデルによって近似させ、モデル上での現象中央時刻をもって求める時刻とすればよい。モデルが適正であれば、得られた時刻は最確値となるはずであり、誤差も計算によって見積もることが可能となる。

この方法において、正確な時刻測定を行うためには、比較するモデルは、可能な限り正確に現象の様子を表現していなければならない。Hapke^{2,3,4)}の関数(表2)を用いると、月や水星などの固体表面を持つ天体について、天体表面における反射光の強度分布を推定することができる。そこで、パソコン上でHapkeの関数により水星表面の輝度分布を計算するソフトウェア^{注1)}を作成し、図5のようなシミュレーション画像を得た。プログラムはHapke³⁾に基づいて作成し、衝効果を表す関数 $B(g)$ については、Hapke⁴⁾に示されている $B(g)=1/[1+\tan(g/2)/h]$ を用いた。ここで g は、衝の位置を 0° とした場合の、太陽の位相角である。また、単一粒子の平均散乱を表す関数^{注2)} $P(g)$ については、前方散乱と後方散乱を表す2項よりなる次式を用いた^{5,6)}。

$$P(g) = (1-c)PHG(\pi-g, b) + cPHG(\pi-g, -b). \quad (1)$$

ここで、PHGはHeney-Greenstein位相関数であり、次のように表される。

注1) ソフトウェアはBorland社(現在はEmbarcadero Technologies社が取扱い)の統合開発環境Delphi6を用いて作成した。

注2) 単一粒子平均散乱関数(英語はaverage single-particle scattering function)。

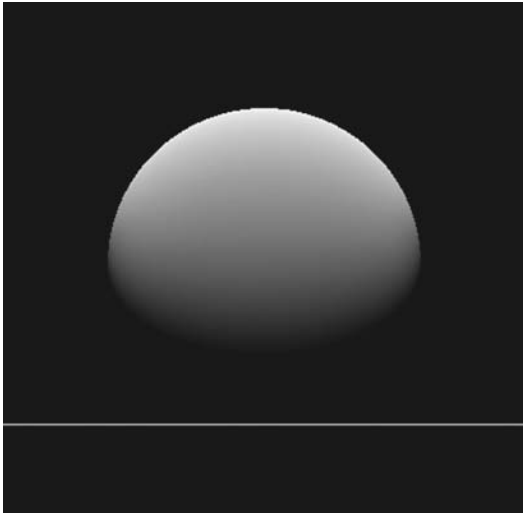


図5 Hapkeの関数より計算した水星表面の輝度分布
 月縁との相対的な位置の変化について、0.01秒間に動く角距離を1単位としてシミュレーションを作成した。この図の場合、水星の直径は2556単位となる。水星が全て明部だけ(円形)であったとしたら、約5,130,000個の数値で表面の輝度が表現されることになる。図中の水平線は平均月縁であり、図は第4接触の様子を表している。この場合、1回目のフィッティングでは、光量変化の速さが、恒星と月縁との角距離の変化から予想されるものより0.9677倍に遅くなっている。これは、月縁の傾斜を反映したものと考えられ、実際の角距離の変化(RRV)は、 $RRV = 0.2469 \times 0.9677 = 0.2389$ (arcsec/sec)であると見積もられる。また、このときの実際の月縁の接地角(RCtt)は $\cos(RCtt) = 0.9339 \times \cos(Ctt)$ の関係にあることから、 $Ctt = 25^\circ (=155^\circ)$ を代入し、 $RCtt = 28^\circ 71'$ を得た。予報のCttと比べると、月縁は $1/\cos(Ctt)$ を増大させる側に $3^\circ 71'$ の傾斜を持っていると考えられ、これより、平均月縁に立てた垂線と天の北極方向とのなす角は、現象の月縁上の位置角 $PA = 264^\circ$ から計算して、 $264^\circ - 3^\circ 71' = 260^\circ 29' (=80^\circ 29')$ となる。以上より、水星の暗径の最大方向($Q = 85^\circ 03'$)と実際の月縁に立てた垂線のなす角(RLA)は $RLA = 85^\circ 03' - 80^\circ 29' = 4^\circ 74'$ と求められた。

表2 Hapkeの関数

Hapkeの関数は一般的に次のように表される。

$$R = \frac{w\mu_0}{4\pi(\mu_0 + \mu)} \{ [1 + B(g)] P(g) + H(\mu_0) H(\mu) - 1 \} S(\theta)$$

R: 反射率 (bidirectional reflectance)

g: 位相角 (phase angle)

w: 単一散乱の反射率 (single scattering albedo)

μ : $\cos e$, eは反射角

μ_0 : $\cos i$, iは入射角

B(g): 衝効果を表す関数 (opposition effect)

P(g): 単一粒子の平均散乱を表す関数 (phase function)

H(μ), H(μ_0): 複数の散乱の効果

(multiple scattering function)

S(θ): 表面の凹凸の効果 (macroscopic roughness)

θ : 表面の平均傾斜

それぞれの関数については、Hapke^{3,4)}に示された式、および、本文中に示した式(1)、(2)に基づいて計算した。

$$PHG(T,e) = (1 - e^2) / (1 + 2e \cos T + e^2)^{3/2}. \quad (2)$$

Hapkeの関数に必要な6種類のパラメーターについては、Mallama et al.⁷⁾が、従来の地上観測に加え、SOHOにより得られた画像も用いて、水星の等級の観測値とHapkeの関数によるモデルとの比較を行い、広い範囲の位相角について適合する値として、 $w = 0.20$, $h = 0.065$, $B_0 = 2.4$, $\theta = 16$, $b = 0.20$, $c = 0.18$ を得ている。Mallamaによる解析結果は、米英暦*The Astronomical Almanac*の水星の等級の計算の基礎となっている⁸⁾。上記のパラメーターは、その解析の中で得られたものであり、水星表面の反射特性をよく表していると考えられることから、輝度分布のシミュレーションを作成するに当たって、これらの値を用いた。また、計算に用いたその他のパラメーターを表2に示す。作成したモデルを、水星の観測より得られた等級⁷⁾と比較すると、両者はよく一致している(図6)。このことから、モデルは水星の表面の輝度を適正に表していると考えられる。

次いで、プログラムは、求められた輝度分布から、月縁に対する任意の水星の向きに対して、0.01秒ごとに月縁が掩蔽しながら移動した場合に起こる光量変化を計算する。なお、この解析においては、月縁の起伏が及ぼす影響は小さいと判断し、月縁が直線であるとの仮定のもとに計算を行った。

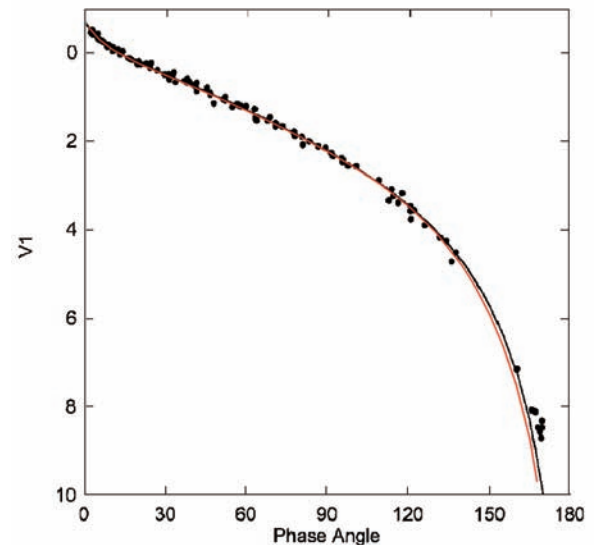


図6 モデルと等級の観測値の比較

Mallama et al.⁷⁾のFig. 11と比較した。赤い曲線が、作成したシミュレーションモデルより得られた等級。衝効果も含め、様々な位相での水星の等級を高い精度で再現できていると考えられる。

表3 現象時刻における金星と月の物理量

現象時刻：2008年12月29日5時8分 (UTC) = 2008年12月29.214日
水星：
視直径：5.90 秒角
位相 (i)：55.89 度
暗径の最大の方向 (Q)：85.03 度
月：
月縁の位置角：264 度
月縁と垂直方向の相対角速度 (RV)：0.2469 秒角 / 秒
接地角 (Ctt)：155 度
(接地角の意味は本文参照)

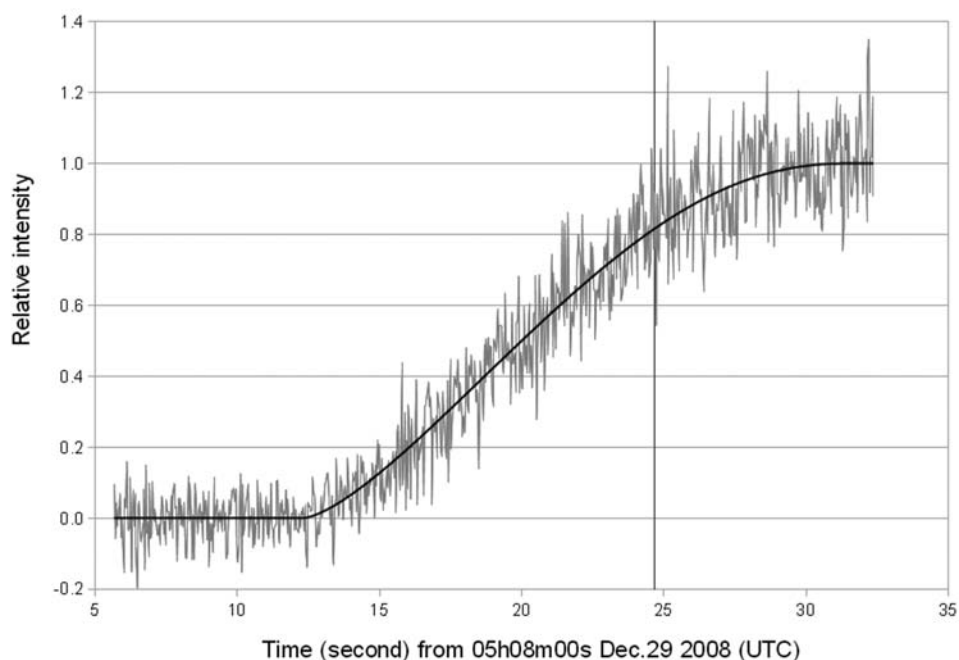


図7 モデルによる近似

石田氏の観測とモデルとの比較。月縁の傾きを考慮した結果、良好な近似をおこなうことができた。

4.3 モデルとのフィッティングと現象時刻の推定

モデルと観測値のフィッティングは、2回おこなう。1回目は、月縁の傾斜がないとした場合のモデルとの比較である。星食観測では、月縁に立てた垂線が月の進行方向に対してなす角を接地角 (Ctt; contact angle) とよぶ。光量変化の速さは $1/\cos(\text{Ctt})$ に比例し、月縁が月の進行方向に平行に近くなるほど光量変化はゆっくりになる。そこで、星食現象の月縁上の位置角および月の進行方向から求められる接地角を用いて光量変化の速度を計算し、1回目のフィッティングをおこなう。

一方、実際の月縁は平均月縁に対して傾いていることから、通常はこの段階ではモデルと観測より得られた増減光に要する時間は一致しない。そこで、モデルの光量変化を時間軸方向に伸縮させ

て、観測された各フレームの光量との差の二乗の和が最も小さくなるように逐次近似を行い、月縁の傾斜の効果を推定する。さらに、得られた月縁の傾斜より決定される「水星と月縁の方向角」を用いてモデルを再度作成し、2回目のフィッティングをおこなう。こうすることにより、実際の現象に近いモデルとの比較ができると考えられる。フィッティングの結果を図7に示す。

4.4 誤差の見積もり

上記のフィッティングからは、現象時刻を正確に求めることができるが、時刻誤差を計算に基づいて求めることはできない。そこで、誤差のみを求めるための方法として、光量変化が直線になるように時間を部分的に変化させてから、最小二乗

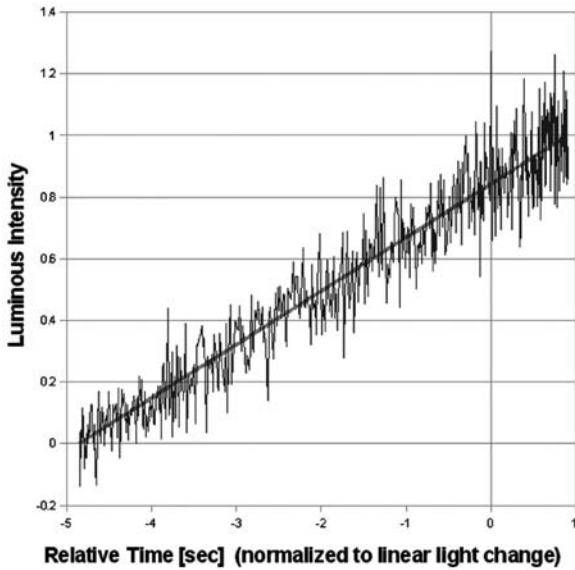


図8 誤差の見積もり

モデルについて、時間を光量の関数で表し、 $t=f(i)$ とする。ここで、現象時刻 (t_0) の近傍の光量の変化率を db (% / 秒)、現象時刻の光量を b とすると、任意の光量 I に対応する直線に正規化された時刻 T は、 $T=(I-b)/db+t_0$ として表される。図は、 T を横軸にとって測定値の変化を描いたもの。これにより現象中央時刻近傍での誤差という形で、最小二乗法により時刻の誤差を求めた。

表4 算出された係数と時刻の誤差

	石田氏の観測	鈴木氏の観測
$a \pm E_a$	0.8400 ± 0.0050	0.8251 ± 0.0046
$b \pm E_b$	0.05196 ± 0.000620	0.05508 ± 0.000602
現象時刻	± 0.10 秒	± 0.08 秒

法を適用した。具体的には、時間のスケールについて、モデルが示す現象中央時刻の近傍での時間の長さを 1.0 (基準) として扱い、他の時間帯での時間の進み方を、モデルの光量の増加量に合わせて変化させている。その結果、図8に示すように直線として扱うことが可能となり、最小二乗法により一次式 $I=a+b \times T$ に近似させることができる。ここで、 I は出現後を 1.0 としたときの光量、 T は光量変化が直線となるように正規化した時間、 a, b は定数である。これより、係数 a, b の誤差 E_a, E_b を求めることができるが、 E_a は光量についての誤差であり、これを時刻に直さなければならない。時刻誤差 σ_t は、

$$\sigma_t = |Ea| / (|b| + |E_b|) \quad (3)$$

で求めることができる。石田氏の観測では $\sigma_t = 0.10$ 秒、鈴木氏の観測では、 $\sigma_t = 0.08$ 秒と求めら

れた (表4)。以上より、現象時刻として次の値を得た。

石田氏の観測 $5\text{h } 08\text{m } 24.69\text{s} \pm 0.10\text{s}$ (UTC)
 鈴木氏の観測 $5\text{h } 13\text{m } 40.16\text{s} \pm 0.08\text{s}$ (UTC)

5. 月縁の地形の推定

月と惑星の位置計算には JPL の最新のこよみ DE421⁹⁾ を用い、月の半径として 1738.0908km を採用して、今回の水星食の現象時刻から月縁のデータを求めた。この月の半径の採用値は、現在の地球の赤道半径の採用値 6378.137km と、日月食に用いることとされている月の半径と地球の赤道半径の比の値 $k=0.2725076$ ¹⁰⁾ から得られるもので、月の地形図作成の際の基準となる月の平均半径 1737.4km¹¹⁾ とは異なることに注意を要する。結果は表1に示してある。月の秤動は Eckhardt^{12,13)} に基づき、米英暦 *The Astronomical Almanac* 掲載の月の秤動と同じ定数を採用して計算した。解析に際して、結果を月のこよみの与える重心に準拠する値にするため、月の位置には重心と形状中心の差の補正を行っていない。求めた位置角は月の自転軸の北極方向から反時計回りに測った角である。また、月縁の高さは月の採用半径からのずれを月の平均距離 384399.05km¹⁴⁾ から見た値に換算している。表1には比較のために、Watts¹⁵⁾ による月縁データも示した。

月縁データは日食の解析から太陽の直径の変化を求める際にも重要である¹⁶⁾。詳細な月面地形は、日本の月探査衛星「かぐや」により求められた¹⁷⁾。そのデータの精度を調べるためにも、今回得られたような月縁データは貴重である。

なお、上記に加え、月縁の傾斜として次の値が求められている。

石田氏の観測： $1/\cos(Ctt)$ を増大させる側に $3^\circ:7$ 、
 鈴木氏の観測： $1/\cos(Ctt)$ を増大させる側に $5^\circ:7$ 。
 ここで Ctt は接地角である。

6. 結論

水星食を撮影したビデオから光量の変化を測定し、水星の光量分布モデルとの比較により幾何学的現象中央時刻を推定した。光量変化はモデルとたいへんよく一致していることから、高い精度で

現象時刻を求めることができたと考えられる。また、測定された現象時刻は良好な整約結果を示していることに加えて、月縁の傾斜に関する情報も得られることから、月縁の地形を求めるデータとして有用である。従来、面積を持った天体は食現象の測定に適さないとされてきたが、表面の輝度分布を見積もることが可能な天体においては、この手法を用いることにより、恒星による掩蔽と同様に、月縁の形状のデータを得るなどの精密な位置測定に対して用いることができるようになると期待される。

なお、前述の Hapke の関数を用いると、任意の位相角に対する水星の等級を計算することができる。理科年表や暦象年表の水星の等級の位相角による変化の式は Danjon¹⁸⁾ によっているが、これは位相角 169° 付近で実際より 0.6 等も暗いなど、誤差が無視できないことが明らかになっている¹⁴⁾。理科年表暦部や暦象年表を利用する際には、その点に注意されたい。現在の米英暦では、最近の SOHO 宇宙船の観測結果も含めて求められた Hilton⁸⁾ による計算式が用いられているが、これは Hapke の関数を用いて計算したものとよく一致している。

謝辞

石田、鈴木 の両氏は、日中の現象という厳しい条件にも関わらず観測に取り組み、質の高い観測ビデオを提供くださった。また、シミュレーションの作成にあたっては、Anthony Mallama 氏からご指導をいただいた。これらの皆様に感謝する。

参考文献

- 1) 宮下、早水、相馬 (2006), 「ビデオ画像用光量測定ソフトウェア Limovie の開発と星食観測への応用」, 国立天文台報, **9**, 1-26.
- 2) Hapke B. W. (1981), "Bidirectional reflectance spectroscopy. III. Correction for macroscopic roughness", *Reports of Planetary Geology Program*, p. 475.
- 3) Hapke B. (1984), "Bidirectional reflectance spectroscopy. III-Correction for macroscopic roughness", *Icarus*, **59**, 41-59.
- 4) Hapke B. (1986), "Bidirectional reflectance spectroscopy. IV-The extinction coefficient and the opposition effect", *Icarus*, **67**, 264-280.
- 5) Helfenstein P., Hillier J., and Veverka J. (1997), "Albedo dependence of particle phase functions for planetary regoliths", *Icarus*,.
- 6) Domingue D., Hapke B.W., Lockwood G.W., and Thompson D.T. (1991), "Europa's phase curve: Implications for surface structure", *Icarus*, **90**, 30-42.
- 7) Mallama A., Wang D., Howard R.A. (2002), "Photometry of Mercury from SOHO/LASCO and Earth-The Phase Function from 2 to 170° ", *Icarus*, **155**, 253-264.
- 8) Hilton J.L. (2005), "Improving the visual magnitudes of the planets in the Astronomical Almanac. I. Mercury and Venus", *The Astronomical Journal*, **129**, 2902-2906.
- 9) Folkner W.M., Williams J.G., and Boggs D.H. (2008), "The Planetary and Lunar Ephemeris DE421", JPL Interoffice Memorandum 343R-08-003.
- 10) IAU (1983), "Proceedings of the eighteenth General Assembly", *Transactions of the International Astronomical Union*, **XVIII B**, p. 71.
- 11) Seidelmann P.K., Archinal B.A., A'hearn M.F., Conrad A., Consolmagno G.J., Hestroffer D., Hilton J.L., Krasinsky G.A., Neumann G., Oberst J., Stooke P., Tedesco E.F., Tholen D.J., Thomas P.C., and Williams I.P. (2007), "Report of the IAU/IAG Working Group on cartographic coordinates and rotational elements: 2006", *Celestial Mech. Dyn. Astr.*, **98**, 155-180.
- 12) Eckhardt D.H. (1981), "Theory of the libration of the moon", *The Moon and the Planets*, **25**, 3-49.
- 13) Eckhardt D.H. (1982), "Planetary and earth figure perturbations in the librations of the moon", in *High Precision Earth Rotation and Earth-Moon Dynamics*, ed. O. Calame, pp. 193-198.
- 14) 相馬 (2009), 「暦象年表改訂版の問題点」, 国立天文台報, **12**, 1-11.
- 15) Watts C.B. (1963), "The Marginal Zone of the Moon", *Astronomical Papers Prepared for the Use of the American Ephemeris and Nautical Almanac*, **17**, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- 16) 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., Warren W.H. (2009), “Baily’s beads atlas in 2005–2008 eclipses”, *Solar Physics*, in press.
- 17) Araki H., Tazawa S., Noda H., Ishihara Y., Goossens S., Sasaki S., Kawano N., Kamiya I., Otake H., Oberst J., and Shum C. (2009), “Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from kaguya-LALT Laser Altimetry”, *Science*, **323**, 897–900.
- 18) Danjon A. (1949), “Photométrie et Colorimétrie des Planètes Mercure et Vénus”, *Bull. Astron.*, **14**, 315–345; Danjon A. (1953), “Erratum”, *Bull. Astron.*, **17**, 363.