

5 小惑星ミネルバの研究

1. ミネルバによる恒星食の観測

(1) 研究の動機

2011 年 1 月 28 日に、12.6 等級の小惑星 93 番ミネルバ(推定直径 170km)が 12.9 等級の恒星 2UCAC 43944479 を隠す、という予報がせんだい宇宙館より出された。我々は恒星食という珍しい現象を浜松で見られる可能性があるという聞き、観測を試みた。恒星食を観測することで、はるか遠方にある小惑星の位置が正確に決定できることから、軌道の精度が向上することになる。また、他の地点での観測資料が得られれば、大きさや断面の形状を明らかにすることができるかとされている。

このようなことから、我々は以下の目標を立てて観測を計画した。

ア. 星食の現象時刻を正確に観測し、予報との相違を確認する。

イ. 他地点からの観測データより小惑星の形状を明らかにする。

(2) 観測方法

使用した機材とシステムは以下の通りである。

望遠鏡：高橋製作所 μ - 250 (口径 250mm, 焦点距離 3000mm) にレデューサーを使用
(焦点距離 2328mm, F=9.3)

架台：高橋製作所 EM200terma 2M 赤道儀に PC を接続しコントロール

録画システム：ワテック製超高感度蓄積型 CCD カメラ「WAT120N」で得た画像を SONY 製デジタルビデオカメラにて録画

時刻保持：GPS で得た時刻をタイムインポージャー TIVi を介して CCD 画像にインポーズ

GPS の秒信号 (100 分の 1 秒単位) をタイムインポージャー (TIVi) に同期させ録画

(3) 観測当日の状況

当日は日中から天気が良好で、空の状態も良く好条件であった。ところが、予報時刻の 20 分ほど前から、にわかにな雲が広がり、完全に見えなくなってしまった。しかし幸運にも予報時刻の約 5 分前に雲間が開け、画像を 32 フレーム (約 1 秒) の蓄積にすることで、うす雲を通して何とか星像を検出することができた。ちらつきの大きい、終始不安定な星像だったが、予報時刻より少し早めの 19h17m53s 頃に画面上で急に星が消え、減光が起こったように見えた。

観測地点データ

観測地：野口ドーム：浜松市中区野口町

東経：137° 44' 23.0"

北緯：34° 43' 07.0" (標高：17m)

(4) 画像の解析と検証

録画した画像を繰り返し再生し、予報時刻近くに光度変化があり、10 秒以上にわたって星像がほとんど消滅している様子が確認できた。現象が起こった時の天候状態から、これがうす雲による変化であることも考えられた。そこで、この光度変化が実際にミネルバによる食現象によるものか否

かを検証することにした。

光量変化の検証は以下の手順で行った。

ア. 両天体の合成等級を求めるため小惑星の明るさを 12.6 等級 (m_1)、恒星の明るさを 12.2 等級 (m_2) として、両星の合成等級 M を以下の式を使い計算した。

$$\text{合成等級 } M = m_1 - \Delta m \quad (\Delta m = 2.5 \log(10^x + 1), x = 0.4(m_1 - m_2))$$

これらの式にそれぞれの値を代入することで Δm を求めると、 $\Delta m = 0.97$ 等級となる。

従って**食の前後の明るさは 11.6 等級**となると予想される。

イ. ミネルバによる食が起こった場合、隠された恒星の明るさはゼロになるため、その間の明るさは、小惑星の明るさのみ、つまり **12.6 等級に減少**することになる。

ウ. 次に、この明るさの減少による光量の比率を計算した。

$$-2.5 \log L_m = m_1 - M$$

$m_1 = 12.6$ 、 $M = 11.6$ を代入して計算すると、 $L_m = 0.398$ と求めることができる。

即ち、食が起きている間の光量は**食の前後の約 40%**になることが予想される。

そこで、光量変化の解析のため、画像解析ソフト「Limovie」を利用した。画像から図8のような光量変化が得られた。図8で分かる通り、食の前後では測定された光量の平均値が 913.2 であるのに対し、食が起きている間の平均値が 391.8 となっており、予想された光量比である約 40%にきわめて近い結果になっている。全体にわたる光量のばらつきは、うす雲や大気の揺らぎによるものと考えられる。これにより、予想された値に相当する明らかな変化が見られることから、ミネルバによる恒星食があったことが確認できる。

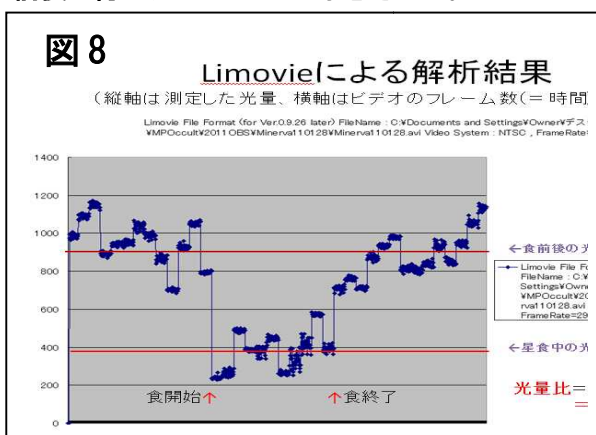


図8のグラフ上の「食開始」および「食終了」の各フレームにあたる時刻をビデオ画像から読み取り、右の結果を得た。

○減光の時刻：Limovieによる解析結果
開始：19h17m52.16s±0.54s
終了：19h18m03.90s±0.54s
食の継続時間：11.74s

(5) ミネルバの弦の長さの計算

得られた 11.74 秒の減光時間より、すなわちミネルバの断面の弦の長さを計算した。

与えられたミネルバの天球上での 1 時間あたりの移動量は以下の通りである。

$$\text{赤経方向の移動量 } dRA/h = -1.862s$$

$$\text{赤緯方向の移動量 } dDec/h = -5.73''$$

1s=15'' の換算をし、更に $\cos \delta$ (δ はミネルバの赤緯) を乗じて赤経方向の角度単位での移動量を得、両者から天球上での移動量として、23.605''/h を求めた。次に、これを 1 秒あたりの移動量に換算し、 $6.5569 \times 10^{-3}''$ /秒を求めた。最後に、この時の地心距離= 3.406417×10^8 km (=約 2.277 天文単位) から、1 秒あたりの実際の移動量を計算し、10.83km/秒を得た。

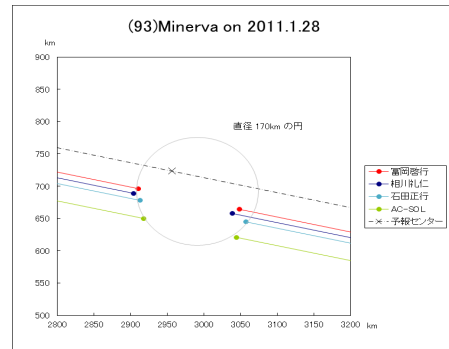
この数値に、食の継続時間である 11.74 秒を乗ずることで、観測された弦の長さが求められた。

すなわち **弦の長さ=10.83km/秒×11.74 秒=127.1km**

(6) 他の観測地点での観測データ

今回の恒星食は、我々のほかに日本国内 3 地点で減光観測に成功している。

これらのデータを元に、せんだい宇宙館の早水勉氏によってミネルバの形状を表す整約図が発表された。それが右図である。図中でAC-SOLとあるのが我々の観測データである。これによれば、ミネルバは予想経路よりも少し南にずれて通過したことがわかる。我々が食現象を観測できたのは、この南へのずれがあったことによる。4地点のデータから、ミネルバの推定直170kmに矛盾しない弦の長さが得られたことが分かる。一方、NASAのデータでは、推定直径が141.55kmとなっており、今回の観測で得られた弦の長さの最大値はこれを超えている。このことはミネルバが楕円状をしていることを意味するかもしれないが、今回の観測では形状に関する明瞭な特徴は見られない。今後の観測の積み重ねによって微妙な形状が浮かび上がる可能性があるので、それに期待したい。



2. ミネルバの自転周期の検出

(1) 研究動機

NASAのデータよりミネルバの光度変化から約6時間の自転周期が求められたことを知った。そこで私たちが連続写真撮影からこの検証を試みた。

(2) 研究方法

ア. 写真撮影

プランを立てた2月以降、30分おきの2コマずつの連続写真を、できる限り長時間にわたって撮影した。2月13日より4月6日までの期間で合計123コマの写真を得た。

イ. 撮影システム

望遠鏡と架台は恒星食と同じ

カメラ：デジタルカメラ NIKON D5000 設定 ISO 感度：1000 露出：30秒

ホワイトバランス： AUTO 長時間ノイズリダクション：ON

ウ. 光度測定の方法

得られた123コマの写真について、以下の手順で光度測定を行った。

(ア). ミネルバの周囲にある、ミネルバに近い明るさの20個の恒星を選び出し、カタログデータ(ステラナビゲーターによる)から等級を求める。

(イ). 天体画像処理ソフト「ステライメージ」の光度測定機能により等級を決定する。

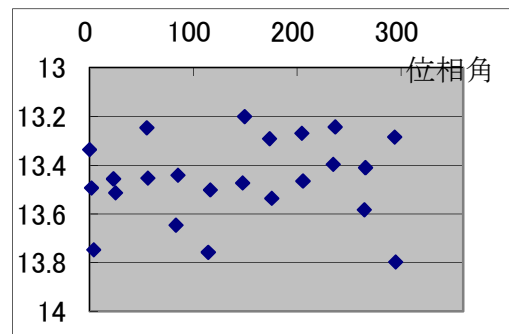
3. 結果と考察

こうして得られたデータを元に、光度変化の周期性を調べた。

結果1 次は5時間に渡るデータの得られた2月22日の結果である。ここでは、横軸に経過時間を元に、予想される自転周期5.982時間から、回転した角度、位相角を算出してグラフ化したものを作成した。位相角の計算式はエクセルの剰余関数(MOD)を利用した。すなわち

$$\text{位相角} = (\text{MOD}(\text{経過時間}, 358.92) / 358.92) * 360 (\text{度})$$

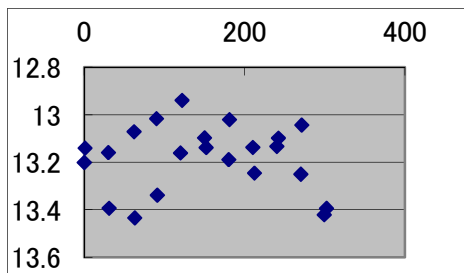
※ミネルバの自転周期=358.92分を仮定



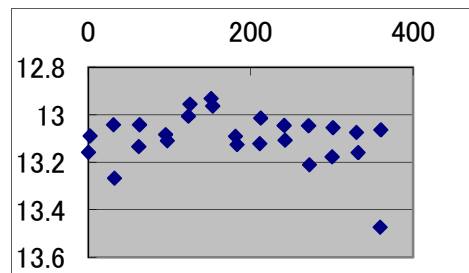
結果2 3月2日及び4日の結果を以下に示す。ここでは経過時間(分)を横軸にとってグラフ化

した。

3月2日



3月4日



考察1

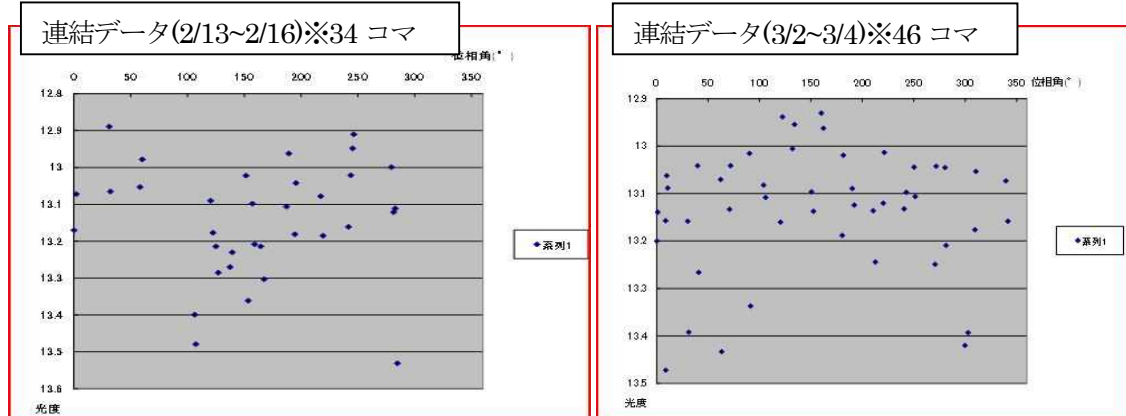
以上の結果 1、2の光度変化グラフを見る限り、明瞭な周期性を読み取ることはできない。その理由の一つは、測定サンプルの少なさにあるものと考えた。

そこで次に、短い期間内に撮影された画像からの光度を連結してグラフ化を試みることにした。その方法は以下の通りである。

①それぞれのセットの最初の写真の撮影時刻にミネルバが地球に向けている面を、位相角0度とし、時間経過による自転角度(=位相角)を計算した。

計算式は前述の2月22日分の結果と同じく、エクセルの剰余関数(MOD)を利用した。

②こうして求めた位相角(0度~360度)に対する測定等級をプロットして周期性を検出する。



考察2

以上のように連結させてみたが、やはり明瞭な周期性を読み取ることはできなかった。

そこで、自転の周期性が検出できなかった理由について以下のように考えてみた。

①実際の光度変化が予想より小さかった、または時間による変動が大きかった。

②光度測定に使用した画像が少なく、信頼できる光度が求められなかった。

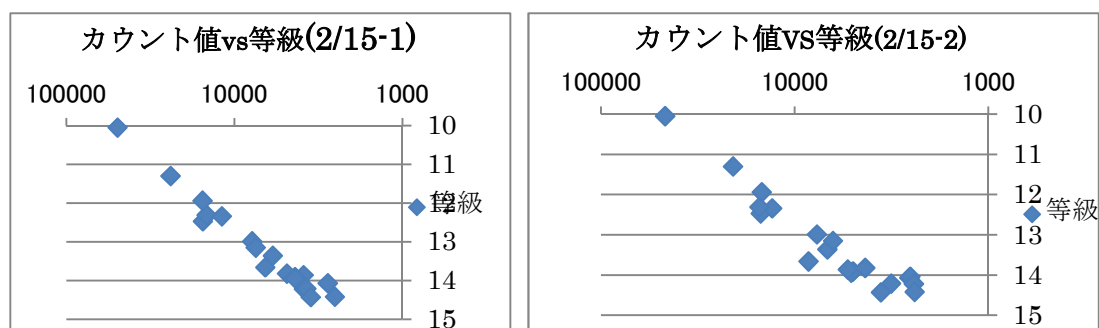
③ステライメージの光度測定機能のシステム的な理由で、十分に信頼できる光度値が得られなかった。

④光度測定に使用した画像(JPEG)が、この研究には適切ではなかった。

そこで、上記③、④について今回使用した画像に関するステライメージの光度測定システムについて、信頼性の検証を行うことにした。

考察3 ステライメージによる光度測定精度の検証

今回の計測に利用した画像のサンプル調査を行なった。方法は、計測値と等級の関係をグラフ表示することで、その相関性を検証した。結果は以下に示すとおりで、縦軸にステラナビゲータに表示された等級データを、横軸にステライメージから得たカウント値を対数表示でグラフにしたもので



ある。

上記の結果で分かる通り、等級とカウント値にはかなり良い比例関係が成立しているものの、2/15の1, 2の比較で分かるように、連続して撮った画像間でもカウント値に大きなばらつきが見られ、場合によっては0.5等級程度の差が出る可能性があることが推測される。このことより、ミネルバの実際の光度変化は、この測定誤差内にあるものと予想される。

そこで、今後は、以下のようなより高い精度の光度測定を行う方法を考えたい。

- ① 光量測定に十分なカウント値を得るために、より集光力の大きな望遠鏡を利用する。
- ② ミネルバは、赤外領域の光を多く含むものと予想される。今回利用した通常のデジタルカメラでは赤外域の光をカットしているため、天体写真用に改造されたカメラの利用を考えたい。
- ③ より精度の高い測光をするためRAW画像の利用を考えたい。
- ④ 今回は、ミネルバの自転周期6時間を超える連続写真が撮れなかったので、来年の衝の時期に、より長時間の撮影を行い、誤差をできる限り小さくしたい。

4. まとめと反省

ミネルバによる恒星食は、うす雲を通しての悪条件だったが幸運にも減少を捕らえられ、信頼できるデータが得られた。実際に恒星が急に消えた時には大きな感動があった。

探査機による観測以外では得られない遠方の小惑星の大きさや形状が、このような観測で分かることを知り、貴重な体験だった。今後も機会があれば観測にチャレンジしていきたい。

また、自転周期の検出は撮影方法の工夫や機材の選択等で精度を上げることができると考えられる。今回の経験を元に、今後、公共天文台の大型機材の利用や、画像の処理方法などを研究していきたい。

5. 謝辞

今回の研究にデータを提供して下さった「せんだい宇宙館」の早水勉様、及び富岡啓行様、相川礼仁様、石田正行様には深く感謝を申し上げます。

<参考文献>

- ・天体観測の教科書 星食・月食・日食観測[編] 広瀬敏夫編 (誠文堂新光社)
- ・ステラナビゲータ Ver. 9 (アストロアーツ 2010)
- ・ステライメージ Ver. 6 (アストロアーツ 2009)
- ・動画解析ソフト Limovie (フリーウェア)
- ・せんだい宇宙館 HP (<http://uchukan.satsumasendai.jp/>)
- ・NASA HP (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=93>)
- ・JOIN (Japan Occultation Information Network) メーリングリスト