

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

宮下和久^{*1} 早水 勉^{*2} 相馬 充

(2005年10月31日受理)

LIMOVIE, a New Light Measurement Tool for Occultation Observations Using Video Recorded

Kazuhisa MIYASHITA ^{*1}, Tsutomu HAYAMIZU ^{*2}, Mitsuru SÔMA

Abstract

We developed a new software program called Limovie to produce light curve plots of occultation events. Limovie converts a video to a light curve for a qualitative analysis of occultation events including those difficult ones with very small magnitude drops. If the video is with time insertion or with time signals recorded, the light intensity data can be outputted with the precise times automatically so that the precise times of the occultation events can be obtained. The high detail of the light curve plots of lunar occultations, especially the grazing ones, can allow the user to estimate the size of the star and the lunar limb profile features by applying Fresnel diffraction patterns to the resulted light curve. Limovie can also be used to analyze the events such as the mutual events of the Galilean satellites where the light intensity varies slowly with time. Limovie is also useful for occultations involving close double stars, allowing measuring the component magnitudes. Limovie is a free program obtainable at:
http://www005.upp.so-net.ne.jp/k_miyash/occ02/limovie_en.html.

1. はじめに

星食の現象時刻の観測には、眼視、光電測光、ビデオ撮影による観測など、いくつかの方法があるが、最近ではビデオによる方法が観測者の間で広く用いられるようになってきている。これは、星食の記録されたビデオを再生し、モニター画面を観察して、星像が消失または出現したフレームから時刻を求めるものである。ビデオは取り扱いが比較的容易で、精度が高く、客観性のある観測をすることができるなど、観測に適した多くの特徴を持っている(表1)。また、近年ビデオ録画の主力として用いられているデジタルビデオ方式によれば、アナログ方式のビデオより高精度な観測用の画像が得られると期待される(表2)。これらのビデオの特性を生かして、画像から天体の光量に関する情報を取り出すことができれば、測定された光量の変化から、

1) 時刻測定を更に高精度におこなうことができ

る。

2) 二重星、恒星の視直径、月縁の傾きなどの情報を得ることができる。

など、従来光電管を用いておこなわれてきた観測が、ビデオ画像の撮影によってもできるようになると考えられる。

これまでも、鹿児島県立錦紅湾高校天文研究部¹⁾による、月縁から出現する木星の衛星イオの視直径を推定する試みや、宮下による δ Gem接食の光量変化の測定²⁾³⁾⁴⁾など、いくつかの試みがなされてきた。しかし、これまで測光用のソフトウェアは静止画を対象としたものしかなく、動画のフレームを多数の静止画に変換する必要があるなど、測定には多くの手数と時間を必要とした。そのため、ビデオからの光量測定は限られた現象への試行にとどまっていた。

近年は、パソコンの性能が向上し、動画を扱うことも容易になってきた。そこで、動画ファイルから直接画像を読み込み、複数のフレーム画像に対して自動的に光量測定をおこなうソフトウェアを作成すれば、多くの観測に適用することができるであろう。

^{*1} 麻績村筑北村学校組合立筑北中学校
(Chikuhoku Junior High School)

^{*2} せんだい宇宙館 (Sendai Space Hall)

表 1. 星食観測機器としての、ビデオカメラおよびビデオ録画の特徴

ビデオを観測に使う上での長所

(1) 感度が高い.

最近では感度の高い天体専用ビデオカメラも市販されており、25cmの口径の望遠鏡でおよそ12.0等の恒星の星食まで観測可能となる.

(2) 1/30秒の時間分解能を持つ.

残像がなく、時間分解能を保證できる. また、偶数ライン、奇数ラインの2つのフィールドのうちどちらかは必ず露光されていることから、「録画されていない時間」が発生しない.

(3) 野外に持ち運んでの観測が可能である.

機材が小さく軽量であることに加え、バッテリー駆動が可能で、電源の必要がない.

(4) 扱いが簡単で、設置後すぐに観測に入ることができる.

撮像にパソコンを必要としないことから、配線やセットアップが簡単である. また、CCDの冷却時間は必要なく、セットアップして即観測に入ることができる. 観測開始にあたって、アパチャー位置を意識して設定する必要がない.

(5) 画像のまま記録・保存ができる

月の輝面、薄雲など、測光にかかわる、輝度値以外の情報を得ることもできる. また、テープを保存しておけば、後ほど再測定をすることも可能である.

観測に用いる上での短所

(1) 冷却されておらず、低照度部にノイズが多い. 特に、利得(ゲイン)を上げると甚だしくなる.

(2) ピクセルの輝度情報が、8ビット(256階調)であり、粗い. また、画像には圧縮がかかっていることから、恒星の等級を求めるなどの高精度の測光には向かない.

(3) インターレース方式で、それぞれ1/60秒で撮影された奇数・偶数ラインの合成画像である.

1枚の1/30秒露光の画像として理解することは正しくない.

(4) 光量に対するデータの直線性が確保されているという保証はない.

表 2. 観測に用いる上でのDV圧縮の特性

星食観測では、多くの場合、デジタルビデオによる記録が用いられている. DV方式は、フレームごとの画像信号をデジタルデータとして連続的にテープに記録する. 大きな画像データをテープの限られた領域に記録するために、データ量は5分の1に圧縮(エンコード)される. また、再生時には圧縮されたデータを展開(デコード)し、画像として表示出力される. この「圧縮と展開」の方法をコーデックと呼び、デジタルビデオにおいては“DVコーデック”が用いられている. この方式は圧縮率が高いために、元の画像が完全には復元されない「非可逆圧縮」であるが、画像劣化を防ぐために、次のような工夫がなされている.

(1) 色情報の圧縮率を高め、輝度情報は低い圧縮率となっている.

(2) 1画面をいくつかのブロックに分け、含まれるピクセル間の輝度差の大きいブロックについては圧縮率を低くし、その分を輝度差の小さいブロックでの圧縮率を上げることで、全体としての圧縮率を調整している.

これらの圧縮特性は、星食観測を目的とした天体撮像にとって都合がよい. 観測に多く用いられるモノクロカメラでは、色情報の劣化による観測値への影響はほとんどないと考えられる. また、星像はエッジの立ち上がりが大きいため、星像を含む部分は圧縮率が低くなる. そのため、星像の部分は他の部分に比べてデータの復元が良好におこなわれていると考えられる. また、圧縮方式によっては隣接するフレーム間の演算をおこなうものもあるが、DVコーデックはフレーム内圧縮であり、時間軸方向の誤差の要因にはならない.

Limovie^{*3}は、以上の検討に基づき、ビデオに記録された星食現象から、より多くの情報を測定により引き出す目的で開発された. このソフトウェアは、当初、ガリレオ衛星の相互食⁵⁾の解析など比較的明るい天体による現象の解析を目的に作成されたが、小惑星による恒星食や限界線星食に対しても用いられるようになり、更にそのほかの様々な現象についても、モニター画面の観察だけ

では得られない新たな知見を得ることができるようになってきた. 本稿では、ソフトウェアのしくみとはたらしきについて紹介するとともに、ビデオ画像を観測に用いる上での精度の検証や、解析により得られた結果についても併せて述べる.

^{*3}Limovie: LIght Measurement tool for Occultation observations using Video rEcordedの略

2. ソフトウェアの概要

2-1 開発の目的とソフトウェアの作成

星食観測において、ビデオの活用により30分の1秒の分解能で時刻測定ができるようになり、更に、GPSを利用した高精度の時計装置⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾も開発され、LEDや音声、スーパーインポーズ等によりビデオに記録することもできるようになった。これらにより得られた現象時刻からは、月縁による星食を例にとると、20mから30mの精度で月縁の地形を知ることができるなど、肉眼による観測に比べて飛躍的に高い精度で客観的な観測が可能となってきた。

しかし、星食の現象の中には、条件によって瞬間的な消失や出現ではなく、数フレームにわたる緩やかな増減光を示すものもある。そのような場合、モニター画面に映る画像を見て出現や消失を判断していた従来の方法では、どのフレームを現象時刻とするかについての判断基準を観測者の主観に頼っているため、ビデオの持つ時間分解能を十分生かしているとはいえない状況であった。また、ガリレオ衛星相互食のように数分にわたって増減光をするものもあるが、ビデオから光量を測定することは、静止画を測定対象とする従来のソフトウェアを用いては多くの手数が要である。

ビデオ観測におけるこれらの課題を解決するために、ビデオ画像を直接読み込み、撮影された天体の光量の変化を正確に測定するソフトウェアを作成することとした。ソフトウェアLimovieの満たすべき要件として次の点を設定し、開発をおこなった。

- 1) 画像をフレーム毎に測定できること。
- 2) 静止画像に用いられている方法と同様の測光方法で、ビデオ画像から可能な限り高精度の測定をおこなうこと。
- 3) 連続的かつ自動的にビデオを処理できること。
- 4) 測定画像を画面に表示し、モニターとしても用いることができること。
- 5) 時刻信号を表示または読み取りできること。
- 6) 以上を、可能な限り高速で処理できること。
- 6) 一般的に使われているパソコンおよびOSで動作すること。
- 7) グラフィカルユーザーインターフェースを持ち、アマチュア天文家が簡単に操作し、観測結果の解析に使用できること。

これらを実現するために、プログラミング環境としてBorland社のDelphi（Pascal言語）を用い

た。Delphiのコンパイラは、高速で効率の高いバイナリファイルを出力する。ビデオファイルの読み込みには、Delphi用コンポーネントTGKAVI^{*4}を用いて作成した。LimovieはWindows2000およびWindowsXPで動作する。なお、Video For Windows APIを使用することから、DV圧縮されたファイルを読み込むには、パソコンにDVコーデック^{*5}をインストールする必要がある。

このように作成されたLimovieについて、より多くの観測者が活用できるようにするために、フリーソフトとしてWebサイト上で公開した。

http://www005.upp.so-net.ne.jp/k_miyash/occ02/limovie.html（日本語サイト）

http://www005.upp.so-net.ne.jp/k_miyash/occ02/limovie_en.html（英語サイト）

2-2 処理の流れ

Limovieの基本的な測定処理と操作の流れを図1に示す。Limovieは光量の測定に特化したソフトウェアとし、測定値のグラフ化等の機能を持たせていない。これは、観測の目的により、測定値について様々な計算処理が必要になることから、特定の数値処理機能を付加するよりも、一般の表計算ソフトを活用した方が、処理の自由度が大きくなると考えたことによる。

2-3 操作性

ワープロや表計算ソフトなどの一般的なソフトウェアを利用したことのある人ならば誰でも操作できるような操作性を持たせた。Limovieの画面は大きく分けて、画像表示部、測定結果表示部、コントロール部よりなる（図2）。これらの配置は固定されており、操作のほとんど全ては、コントロール部に配置されたボタン類をクリックすることによりおこなうことができる。

光量測定に際しては、最適な結果が得られるように、開口部の直径などの設定をする必要がある。Limovieは、動作が高速であることから、何回か繰り返し測定をおこない、測定条件を決め出すこ

^{*4}TGKAVI 渡辺寛太氏作のDelphi用コンポーネント。本来Bitmap画像からAVIファイルを作成することを目的につくられたが、ビデオファイルからBitmap画像や音声データを読み出す機能も持っている。

^{*5}DV Codec : DV機器から得られたDVストリームを無圧縮映像としてデコードする機能と、無圧縮映像をDVストリームにエンコードする機能を持つ。以下のようなフリーソフトがある。

Iris (vsync氏作) <http://www.ops.dti.ne.jp/~vsync/software/dviris/dviris.html>

Panasonic DV Codec <http://www.free-codecs.com/download/Panasonic.DV.Codec.htm>

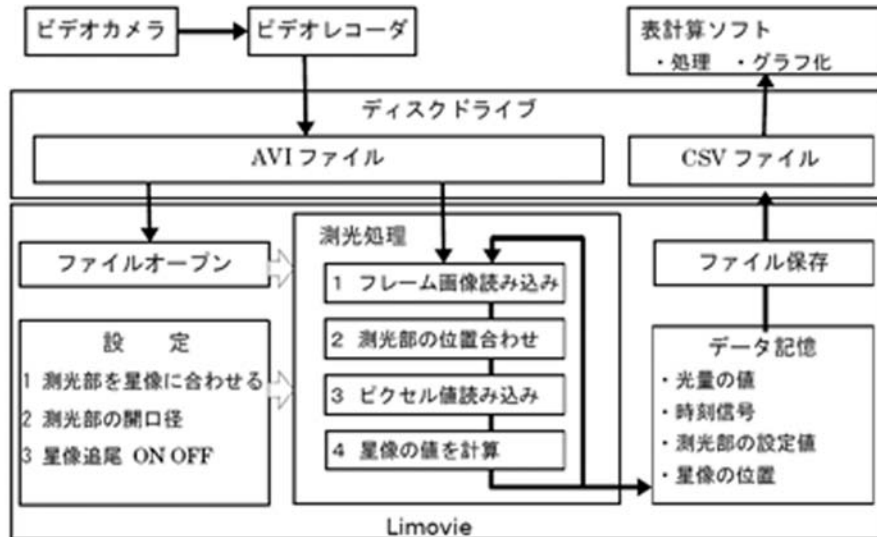


図1. Limovieの操作と処理の流れ

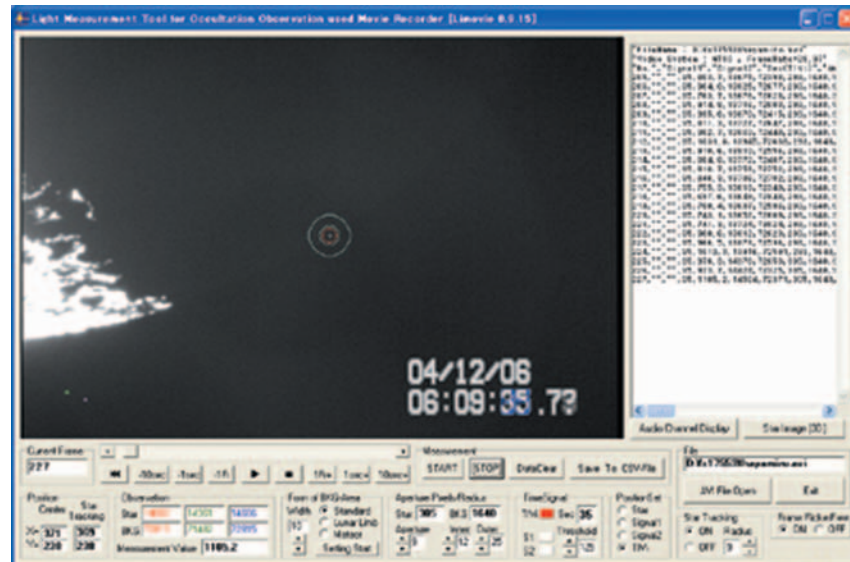


図2. ビデオ画像用光量測定ソフトウェア“Limovie(Ver. 0.9.15)”のメインウィンドウ

Limovieは、1.画像表示部(左上) 2.コントロール部(下) 3.データ表示部(右) による。

動画表示ソフトのように再生(1/2スロー再生となる)やコマ送りのできるコントロールボタン、測定の開始や終了をおこなうボタンなどがあり、簡単な操作で星像の輝度の変化を連続して測定する。

とが可能である。そこで、操作部については、一部のみを表示したり、別ウィンドウとすることは避け、全ての設定操作と設定値が常に明示されるように設計した。

操作部は、“再生”や“巻き戻し”などのビデオレコーダーに似たボタンを用意し、理解しやすくした。測定については“START”“STOP”“DataClear”“Save to CSV File”の4種類のボタンでおこなう。

2-4 測光機能

(1) ビデオ画像ファイルにおけるピクセル値

デジタルビデオカメラ（レコーダ）をIEEE1394コネクタを用いてパソコンに接続し、キャプチャをおこなうと、テープに記録されたデータをそのままの形でAVIファイルに保存することができる。

デジタルビデオの記録方式（DV方式）は、画像の水平サンプリング数720、垂直サンプリング数は480（NTSC）および540（PAL）であり、画

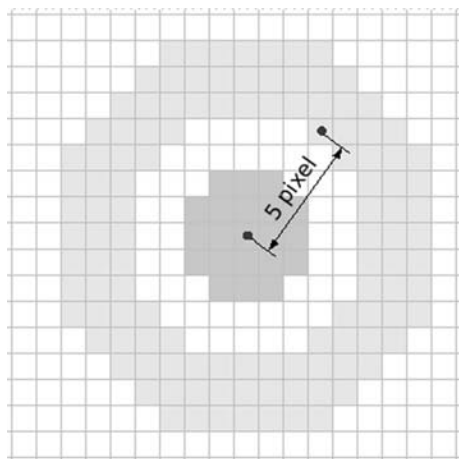


図3. 測光部のピクセル構成

中央の円形が天体用測光領域（Object Aperture, ソフトウェアではApertureと略記）、周囲のドーナツ形が背景用測光領域（Background Aperture, ソフトウェアではBackgroundと略記）である。

Limovieでは、ピクセルの中心を結んだ距離を整数に丸めたものをピクセル間距離として扱う。各領域の大きさを表す数値は、測光部の中心となるピクセルから円周を構成するピクセルまでのピクセル間距離である。

図は、Aperture Radius=2, Background Inner Radius=5, Outer Radius=7 (pixel) の設定を示す。

この場合における各領域を構成するピクセル数は、Aperture=21, Background=116である。

像のピクセル数はCCDのピクセル数と一致しない。画像サイズが一定であることは、解析をおこなうソフトウェア（Limovie）から見れば、表示や設定がしやすい利点があるが、その反面、測定においては、カメラやVCR内の信号処理の結果がCCDのピクセル値を正しく反映しているかどうかを確かめる必要がある。

量子化は8ビットであり、階調は0-255となる。これは、冷却CCDでの観測に用いられるFITSファイルの16ビット（0-65535）に比べて格段に小さい。しかし、星食観測においては比較的長焦点の望遠鏡を使うことが多く、星像を構成するピクセル数も多くなることから、この短所をある程度補うことができる。

これらの特徴を考慮した測光部の設定や、測定値の評価をおこなわなければならない。

(2) 光量の数値化

Limovieの測光部は、Aperture Photometry に対応した多くの測光用ソフトと同様に、円形为天体用測光領域（Object Aperture, ソフトウェアではApertureと略記。以下同様に略記）とそれを取り

巻くドーナツ形の背景測光領域（Background Aperture, ソフトウェアではBackgroundと略記）からなる（図3）。

光量 L は、Apertureを構成する各ピクセルの輝度を A_i 、ピクセル数を N_a 、Backgroundを構成する各ピクセルの輝度を B_i 、ピクセル数を N_b とすると、

$$L = \sum_{i=1}^{N_a} A_i - \frac{N_a}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} B_i \quad (1)$$

として求められる。

Limovieは輝度情報を得ることがその主たる目的であることから、カラー画像についてもRGBの平均値をもって輝度情報として記録している。色情報についてはファイルに記録することはないが、画面にはRGBの値を表示し、必要に応じて利用できるようにしている。

星像の大きさや背景の状況により、測光領域の大きさを変化させて測定する必要があることから、Apertureの径およびBackgroundの内径と外径を可変とすることにより対応している。Limovieでは、測光部の中心から、ApertureおよびBackgroundの縁辺を構成するピクセルまでの距離をピクセルの1辺の長さを単位として表したものを「径（外径、内径）」として扱う。

また、式（1）より、測光部の性能はそれを構成するピクセルの数に関係していることから、コントロール部にピクセル数を表示し、ノイズの影響を軽減するための目安とすることができるようにした。

(3) 測光部の設計

Limovieによる測定が静止画の場合と大きく異なるのは、多くの場合比較星を利用することができない点である。静止画において星の光度を測定するためには、既知の光度の恒星と同一の条件で測定をおこない両者を比較する。それに対し、月縁による星食のビデオには、対象となる恒星が1つしか写っていないことがほとんどである。更に、対象の恒星は、掩蔽の前から消失に至るまで、光量が100%から0%まで変化する。測光領域は、その全てを同一の設定でおこなわなければならない。また、比較星がないことから、Apertureは星像を全て含んだ形で測定をおこなうことが必要であると考えられる。このような条件の中で、精度のよい測定をおこなうために、 S/N 比の向上を目的としたしくみや機能を工夫した。ここで、星像を構成するピクセル

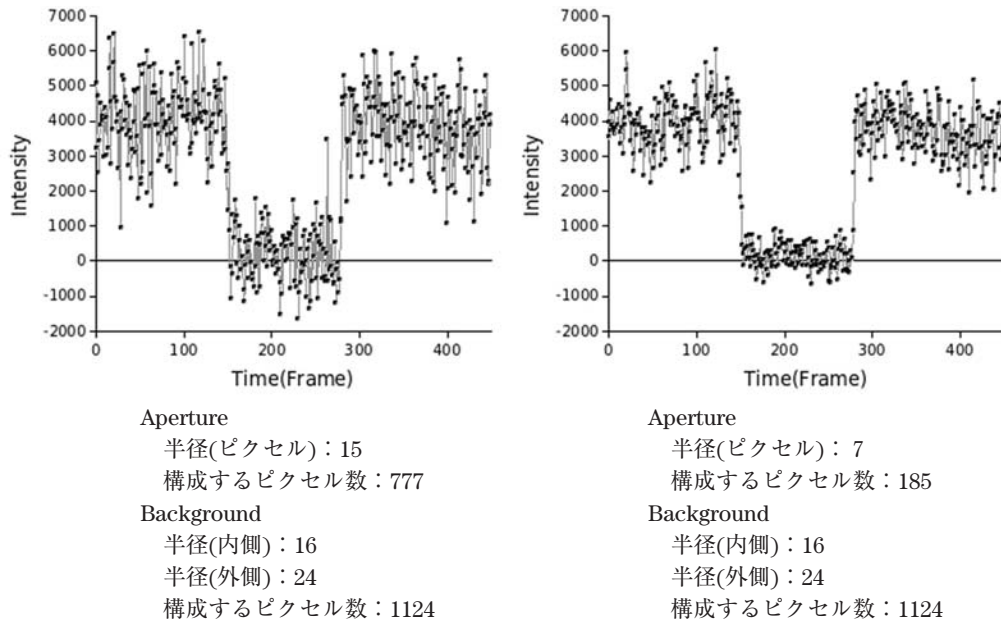


図4. Aperture径の設定とノイズ

2005年6月6日の小惑星(59)ElpisによるHIP44831の食. 辻塚隆氏撮影のビデオより.

の輝度を O_i , そのピクセル数を N_s とおき, CCDの熱ノイズ等に起因するノイズ成分を A_{ni} , B_{ni} として, 星像の全てがAperture内に含まれるとすると, 式(1)より

$$L = \sum_{i=1}^{N_s} O_i + \sum_{i=1}^{N_a} A_{ni} - \frac{N_a}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} B_{ni} \quad (2)$$

と表わされる. 画面上のノイズによる輝度値がどのピクセルでも一様の標準偏差 σ を持ち正規分布にしたがうとすると, 式の, ノイズ成分の標準偏差 S は,

$$S = \left(N_a + \frac{N_a^2}{N_b} \right)^{\frac{1}{2}} \sigma \quad (3)$$

となる.

式(3)によると, 標準偏差 S は, ほぼApertureのピクセル数(N_a)に反比例して減少し, また, ほぼBackgroundのピクセル数(N_b)の平方根に比例して減少する. したがって, Apertureは小さく, Backgroundは大きく設定することにより, 測定時のノイズを低減することができる.

このうち, Backgroundについては, 大きく設定することが望ましいが, 周囲の天体や画面の周辺減光などの影響を受けやすくなることから, むやみに大きくすることはできない. Limovieでは, 合成焦点距離5000mmの望遠鏡で拡大撮影された, 比較的大きなサイズの星像を内包することができるApertureサイズ(半径約10ピクセル)に対

し, 式(3)において充分ノイズの低減が可能と考えられる半径25ピクセルをBackgroundの半径の最大値として設計されている.

一方, Apertureは, Backgroundに比べ, サイズの設定がノイズの増減に及ぼす影響が大きい. したがって S/N 比の高い測定をおこなうためには, 可能な限り小さく設定する必要がある. 図4に, Aperture径の最適化により, S/N 比を改善した例を示す.

(4) 測光部設定の補助機能(3D-Graph)

Aperture部が確実に星像を含み, ピクセル数も可能な限り小さく設定するためには, 星像の大きさを知る必要がある. そこで, 星像付近の光量分布を視覚的に表示する. 三次元グラフ(3D-Graph)機能を作成した(図5). これは, ピクセル値を3次元のワイヤーフレームモデルで表示するもので, アフィン変換により様々な方向から立体的に見ることができる. これにより, ノイズの多い画像であっても, 星像のようすを確認することができる.

更に, 測光部の設定を補助する機能として, グラフ中にApertureとBackgroundそれぞれの境界線を表示するようにした. この表示は, 設定値をリアルタイムに反映することから, 開口径の最適な設定を容易におこなうことができる. また, 再生やコマ送りにおいてもフレーム毎に描かれた星像のようすを見ることにより, 設定が多くの画像に対して適切であるかの確認や, 星像の追尾が確

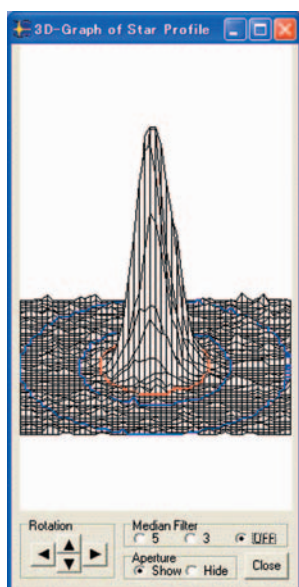


図5. 3D-Graph機能で表示した星像の輝度分布

Limovieは、測光部のピクセルの輝度分布を表示する機能を持つ。3次元グラフに加えて、Aperture, Background の各領域の境界を表示し、設定を容易におこなえるようにしている。

実になされるかどうかの検証をおこなうことができる。

(5) 星像追尾の機能

ビデオ画像は、フレームと呼ばれる静止画が次々と表示されることにより動画を実現している。Limovieは、自動的に画面を切り替えながら、

1フレーム毎に測定を繰り返していくが、このとき、星像は、大気のシンチレーションによりたえず形を変えたり位置が変わるなど揺れ動いている。また、移動観測においては、赤道儀の極軸合わせが充分でない場合もあり、星像が視野を横切って移動してしまうこともある。このような場合、測定中に、測光部の位置が不変であるとする、星像は測光領域から外れてしまうことになる。特にS/N比向上のためにApertureを小さく設定している場合には、これが顕著に起こる。この問題を解決するためには、測光部と星像の位置を合わせる処理をおこなえばよい。

Limovieの持つ位置合わせ機能はフレーム毎に自動的におこなわれ、その動作のようすから星像追尾機能（Star Tracking機能）と呼ぶ。この処理は、はじめに設定された測光部の画面上の位置を基準として、一定の半径（Star Tracking Radius）内で、星像の中心（重心）を探し、そこに測光部の中心を移動させることにより実現されている。なお測光部の移動に制限を与えているのは、星食観測において星像が消失した場合でも、ノイズの光点を追って大きく移動してしまうのを防ぐためである。

図6に、Star Tracking機能の効果を示す。追尾機能をOFFにすると、ONに比べてほとんどのフレームでApertureからの星像の外れによる輝度値の低下が見られ、甚だしいものはONの場合の50%に達している。精度のよい観測をおこなうた

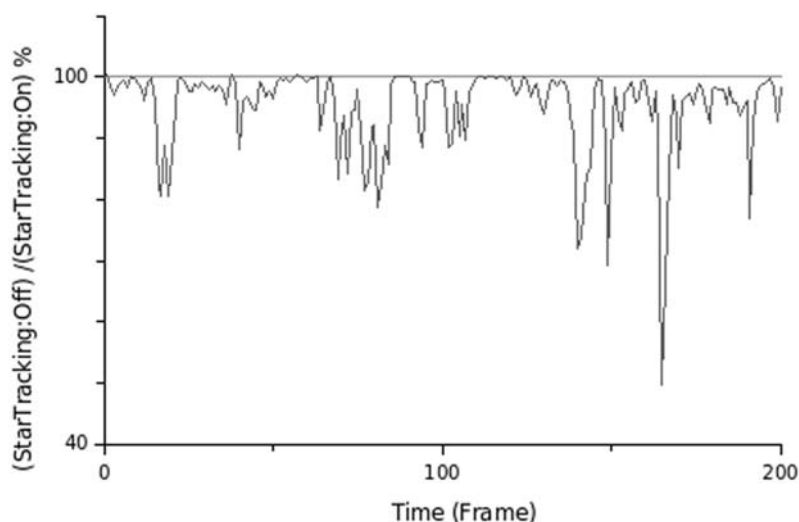


図6. Star Tracking機能のON OFFによる測定値の比較

撮影：口径250mm, 拡大撮影による合成焦点距離5800mm, ビデオカメラWAT100N
観測の状況：シンチレーション3/5, 微風による鏡筒のわずかなゆれも見られる。

Limovieの設定: Aperture 半径=10, Background 半径(内側)=14, 半径(外側)=25 (ピクセル)

ノイズ軽減のためApertureを星像ぎりぎりまで小さくして測定。図は、Startracking機能をONにしたときの値を100%としたときの、OFFにした場合の測定値の割合を表す。

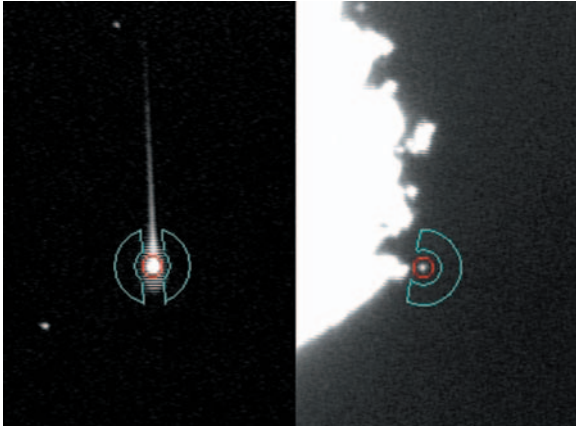


図7. 観測対象に対応したBackground領域の形
左: Meteor Mode, 右: Lunar Limb Mode.

Limovieは観測対象に応じたBackground領域の形状を持っている. 適切に設定することで, 周囲の天体の光の混入による誤差やノイズを減らすことができる.

めには, 特殊な場合^{*6}を除き, この機能をONにして測定することが必要である.

また, Star Tracking機能のもう一つの大切な役割として, 測定の再現性の確保があげられる. この機能は, 測光部を星像に合わせてマウスクリックしたときから働いており, 星像の重心位置を基準に測光がなされる. 多くの場合, 設定が同じならば複数回測定しても同じ結果を得ることができることから, 客観的な測定や検証をおこなうことができる.

(6) Background領域の形状の可変性

Limovieは, 観測目的に応じて測光部のBackground領域の形を変化させることができるように設計した. 以下にそのしくみとはたらきを述べる. (図7)

Lunar Limb Mask

月縁による星食では, 星が月の輝面の近くで隠される場合など, 厳しい条件での観測となることがある. このような場合には, Limovieを用いた測定でも, Background領域の中に月の輝面が入り, 測定に困難をきたすことも多い. そこで, Background領域の一部を直線で切り取った形(弓形)とし, 月の明部を避けることができるような機能を設けた. また, この機能は, 月の輝面だけでなく, 付近にある恒星や光芒を避ける目的で使用することもできる.

^{*6}Star Tracking機能: 付近に月の明部や地球照, 恒星などがあって追尾機能に影響が及ぶときは, この機能をOFFにする必要がある. その場合にはS/N比の低下を許容し, Apertureを広げて測定する.

Meteor Mask

流星観測への可能性が, 広瀬敏夫(掩蔽グループ, private communication)により指摘されたことから, Lunar Limb Maskと同じコードを用いて流星対応のBackgroundを開発した. これは流星の像に合わせて, Background領域の中央に直線状の隙間をつくるもので, 流星の経路の方向に合わせて向きを変えることができる. 現在, 流星の自動追尾の機能を開発中で, 完成すれば流星について様々な測定が可能となると期待される. また, この機能は流星だけでなく, 人工衛星のフラッシュの観測にも用いられてきている.

2-5 時刻信号の検出機能

星食観測の主要な目的は, 現象時刻を精度よく観測することである. そのために, 正確な時刻信号を得ることとそれを記録することは, 光量の変化の記録と並んで, 最も重要な観測項目である. 星食の観測を目的として作られたLimovieに, 時刻信号を正確に検出する機能を用意することは, 開発の大切な目標の一つであった.

Limovieは, ビデオに記録された時刻信号を自動的に検出し, フレーム毎に星像の輝度値とともに記録する機能を持っている. ここでは, GPS利用時計や短波の標準時報, 電話による時報などから得られた, LEDなどの光, 音声, スーパーインポーズの時刻信号を, Limovieが検出し記録する機能について述べる.

(1) LED光の信号

GPSによる時刻信号装置のひとつであるマイコンGHS時計⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾の時刻信号は, UTCに対して200nsec以内で合っているとされている⁽¹⁰⁾. また, この1PPSの信号に同期したLED点灯用の出力は, GPSのTTL出力に対して最大でも40 μ secの遅延であるとされている⁽¹¹⁾. このLED光を, 天体の光とともにCCD面に直接時刻信号を記録する方法は, カメラやVCRの内部回路による遅延等については考慮する必要がないことから, たいへん精度の高い時刻記録法である. この特性を観測に活用するために, LED信号をCCD面の限られた部分のみに照射し, 周囲のピクセルへの影響を低減させる装置を作製し使用してきた(図8-1). 画面に, 小さな円形に照射されたLED光でフレームの時刻が正秒であることを知ることができる.

Limovieの時刻信号検出機能は, このLED装置の信号を検出するために設計された. 専用の小さな検出部を持ち, ピクセルが一定の輝度(Threshold)に達したときに時刻信号として検出

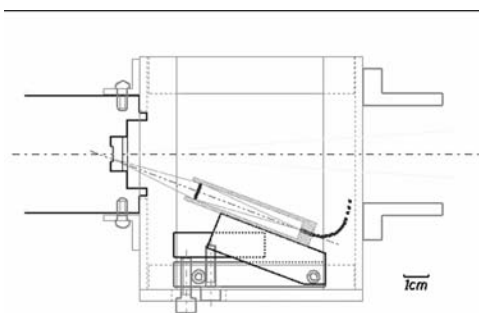


図8-1. LED光信号の記録用装置の例

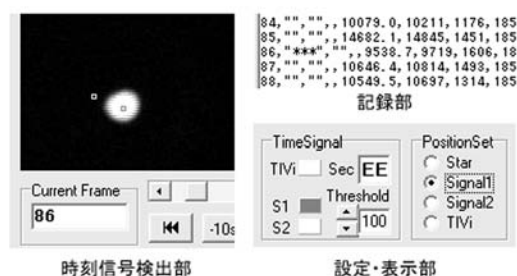


図8-2. Limovieの光信号検出部

図8. LED光時刻信号の検出

GPS利用時計のLED光による秒信号を、左のような装置によりCCD面上に照射し、現象と共に録画する。この信号を、画面上に配置した検出部(小さな四角の領域)が検出し、記録部に記号“***”として記録する。明視野照明として記録されたものも検出することができる。

し記録する(図8-2)。なお、Limovieの検出部は、ピクセルの輝度値のわずかな変化もとらえることができることから、上記のような装置以外にも、LEDを望遠鏡の筒先に取り付けて明視野照明などにより記録されたものや、光ファイバーでCCDの一部にLED光を当てたものなどからも時刻信号の検出をすることができる。

(2) 音声信号

GPS利用時計が登場する以前は、星食観測において短波放送の標準時報が時刻を得るための主要な方法であった。日本の短波JJYは既に放送を停止しているが、BPM(中国)やWWV(コロラド)、WWVH(ハワイ)などは現在も放送をおこなっており、これらの放送の利用できる地域では、標準放送を利用している星食観測者も多い。音声信号としては、このほかに、GPS利用時計の出力する1PPS同期音声出力や、GPSを接続したパソコンの発生するBEEP音をビデオに記録する方法もある。

これらの音声信号は、ビデオの録画時にマイクやVCRの音声入力に接続して簡単に記録することができる。しかし、VCRには音声を「見る」手段がないため、音声信号から時刻を得ることは困難であった。パソコンの動画編集用のソフトウェアを使うことにより、音声波形を表示させる方法もあるが、フレームと波形データの間関係を見るのが難しいものも多い。このような理由で、観測者より音声信号の可視化に対する提案と要望が寄せられたことから、新たに開発をおこない、最新のバージョンでこの機能(Audio Channel Display)を実現させた。

Limovieの扱うことのできるAVI(Type2)ファイルからは、フレーム毎の音声出力を得ることは

難しい。そこで、読み込んだファイル全てから音声ファイルを抽出し、画像と音声のフレームレートの整合をとる処理をおこなうことで、検出精度の向上をはかった。精度の検証は次のようにしておこなった。もし、映像フレームと音声データに時間的なずれが生じるとしたら、ファイルの開始点と終了点の位置がずれるか、または途中で両者の速度が変わってくるかのいずれかである。そこで、1PPSの音声時刻信号を記録した同一のビデオから、比較的長い時間キャプチャをおこなったファイル(A)と、その一部にあたる短い時間キャプチャをおこなったファイル(B)を用意する。(A)(B)それぞれのファイルに記録された音声時刻信号の立ち上がりについて、同一フレームに対する記録位置を比較したとき、もし画像と音声にずれがあれば、両者は異なった位置に記録されることになる。

Limovieの音声検出機能で比較をおこなった結果、信号の立ち上がりの位置のほとんどはフレームの長さの0.01%(0.003秒)以内で一致し、最大でも0.09%(0.03ミリ秒)の違いであった。このことから、Limovieの音声信号の検出方法においては、画像フレームと音声信号は星食観測をおこなう上で十分な精度をもって結びついていることが確認できた。

検出された音声信号は、波形グラフとして表示されるだけでなく、LED光と同様に、正秒信号として光量のデータとともに記録され、ファイルに保存することができる。

なお、短波の標準時報を用いる場合は、一般に信号レベルが低いこと、遠隔地に放送局がある場合は、電波が観測地に届くまでの遅延を考慮する必要があること、BPMはUT1に同期している場合

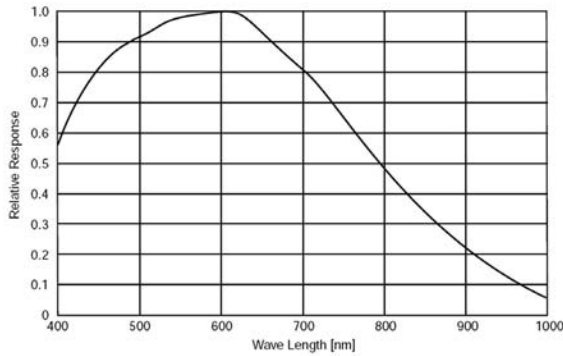


図9. ビデオカメラWATEC WAT100Nに使用されているCCD (SONY ICX428AL) の分光特性 (SONY社のウェブサイトより)

や20msec進んだ信号を放送している場合があることなど、諸条件について考慮する必要があることに注意しなければならない⁶⁾。

(3) タイムインポーズ

タイムインポーズは、GPSなどの出力する時刻信号に同期した正確な時刻を示す数値を、ビデオ画像に字幕として表示する装置であり、TIVi (誠文堂新光社)^{*7}やKIWI OSD (Geoff Hitchcock氏開発)^{*8}が一般的に用いられている。また、GPSに同期されたパソコンを用いたインポーズSTV ASTRO^{*9}もある。これらの表示について、Limovieは、予め与えてある形状パターンとの一致から数字を読み取る機能を持っている。読み取った時刻を表す数字は、光量の値などとともにフレーム毎に記録され、ファイルとして保存されることから、表計算ソフトなどで時刻を見ながら解析をおこなうことができる。現在Limovieが対応しているインポーズは、TIViとSTV ASTROである。KIWI OSDについては、数字の表示場所が移動するために対応していないが、区切り記号の点滅をLED用検出部でとらえる方法がDavid Gault (豪)により発案され、広く用いられるようになった。

3. 記録精度の検証

3-1 測光機能の検証

Limovieによる光量測定値を様々な観測に用いる上で、ビデオに記録された星像の光量が、星の光度を正確に反映しているかどうかは、たいへん重要である。しかし、ビデオカメラやVCRは、測定を目的とした機器ではないことから、録画や再

生のおりに様々な画像処理などが加えられている可能性がある。また、テープに録画する際には、コーデックにより圧縮が加えられている。これらの影響がどの程度であるかを確かめる必要があった。そこで、実際に異なる明るさを持つ天体を撮影したビデオをLimovieで測定し、その光量と星の等級について暫定的な結果を得た。詳しい結果については別に報告することとして、ここではその概略を説明しておく。

対象として散開星団M44を用いた。焦点距離が1000mm程度の望遠鏡を用いると、6等から9等にかけての、10個ほどの恒星を同一視野に入れることができる。撮影には、Watec社製モノクロビデオカメラ WAT-100Nを用いた。その分光特性を図9に示す。最近のCCDは青や緑など短波長側にも充分な感度を持っている。このカメラに、Vバンドフィルターを取り付けて撮像をおこなった。

同一の視野について、ビデオカメラの利得調整 (gain control) つまみの位置を一定にして、ガンマ補正スイッチのみをOFF, LOW, HIGHと切り替えて撮影した。なお、この観測のように、同一視野内に多くの恒星が入るようにするために、焦点距離の短い望遠鏡を使用する場合は、星像が小さくなり、ピクセルの飽和が起りやすくなるので、利得を適切に設定する必要がある。

録画にはSONY社製デジタルビデオカメラレコーダーDCR TRV10を用いた。また比較する等級のデータとしては、Hipparcos 星表に掲載されている Johnson システムのV等級を用いた。

結果を図10に示す。これによると、ガンマ補正OFFの場合、光量と等級はほぼ直線的な関係にある。カメラの仕様どおり、ガンマ補正は加えられていないことが確認できた。また、ガンマ補正を機能させた場合であるが、WATEC社の仕様ではガンマ補正がLow:0.6, High:0.45とされている。しかし、Limovieの測定値で比べた場合、Low:0.89, High:0.74と、比較的小さな補正量である。これは、補正がピクセル単位でなされるのに対し、Limovieの測定値は異なる輝度を持つピクセルの集合であるためだと考えられる。

この結果、特にガンマ補正OFFの設定では、1. ビデオカメラでの撮像、2.VCRによる記録・再生、3.Limovieによるピクセルの輝度値の測定という観測から、天体の光量の変化や相対値を求める方法の信頼性について、一定の確認ができたと考えられる。今後は、更に、他の天体を用いて検証を進めるとともに、他のビデオカメラについても同様の

^{*7} TIVi (<http://www2.synapse.ne.jp/haya/ghstivi/ghstivi.html>)

^{*8} KIWI OSD (<http://www.pfdsystems.com/kiwiosd.html>)

^{*9} STVASTRO(<http://www.blackboxcamera.com/Stv5730a/astro.htm>)

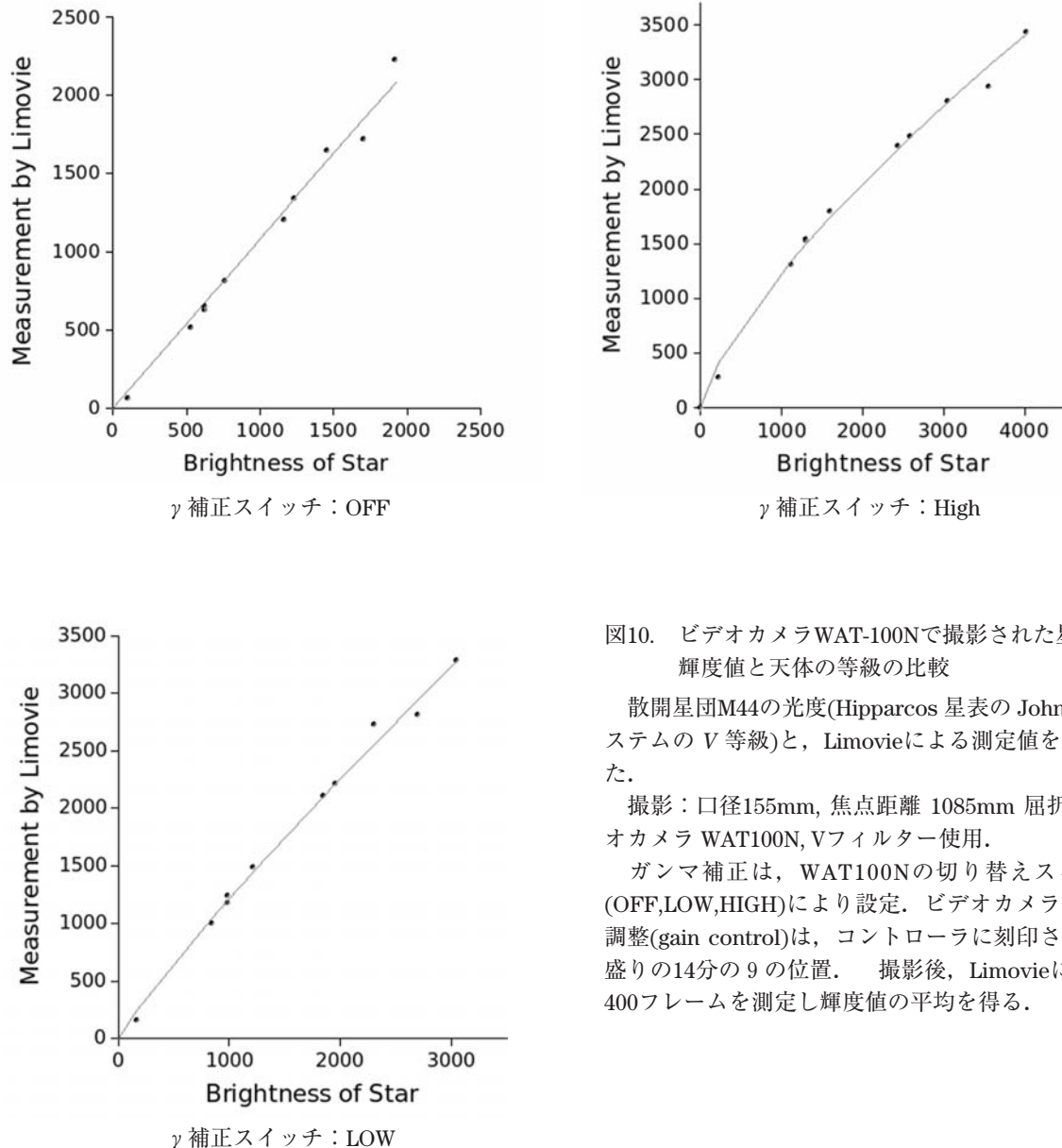


図10. ビデオカメラWAT-100Nで撮影された星像の輝度値と天体の等級の比較

散開星団M44の光度(Hipparcos 星表の Johnson システムの V 等級)と, Limovieによる測定値を比較した。

撮影: 口径155mm, 焦点距離 1085mm 屈折, ビデオカメラ WAT100N, Vフィルター使用。

ガンマ補正は, WAT100Nの切り替えスイッチ(OFF,LOW,HIGH)により設定。ビデオカメラの利得調整(gain control)は, コントローラに刻印された目盛りの14分の9の位置。撮影後, Limovieにより, 400フレームを測定し輝度値の平均を得る。

測定をおこなっていきたい。

3-2 時刻信号の記録精度の検証

ここでは, Limovieを用いて, 観測機器間の時刻信号の記録誤差を高精度に検証する方法について述べる。

VCRにおいては, 画像と音声の信号はそれぞれ独立した回路で処理された後, データとしてテープ上に記録されることから, 信号ごとに処理時間が違えば, 記録される時刻も異なることになる。これは, タイムインポーズについても同様である。これらに起因する時刻信号間のビデオへの記録誤差の検証は, 従来は, 画面を見て確認する方法でおこなわれていたため, 1 フレーム (約30分の1秒) の単位でなされていただけであった。

Limovieはこれら全ての信号を検出できること

に加え, 音声時刻信号の出力時間のフレームに対する割合を測定する機能 (図11) を持っている。これを利用して, 各信号間の記録精度の検証を試みた。日本やアメリカなどにおいてビデオ録画に用いられているNTSC方式は, 29.97フレーム/秒という整数でないフレームレートを採用している。そのため, GPS時計の出力する1PPS信号をLED光や音声でビデオに記録すると, フレームに対する信号の位置 (位相) が1秒間につき約0.001秒ずつずれていくことになる。このことを利用すると, 信号の記録時刻を1ミリ秒の精度で調べることができる。

図12は, ビデオカメラWAT-100N, レコーダーSONY DCR TRV10, およびタイムインポーズTIVIを用いた観測システムの時刻精度の検証の結果を示す。LED光および音声, インポーズとも, 全

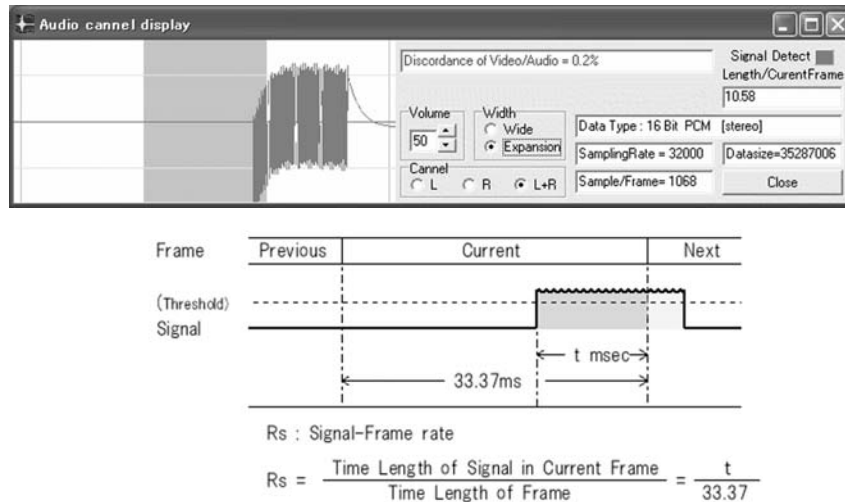


図11. 音声時刻信号検出機能 (Audio Channel Display) と時刻の高精度測定

- (上) GHS時計の秒信号音声出力の検出のようすを示す。中央の背景色がついた部分が現在表示されている画像フレームの露光時間を表す。この図では、正秒に同期した音声の立ち上がり(波形の左側)がフレームにかかっている。
- (下) 図に示す“Signal-Frame rate”は、ソフトウェアでは“Length / Current Frame”として%で表示され、フレームに対する信号の位置を表している。これにより、フレームの記録開始・終了時刻を精度よく求めることができる。

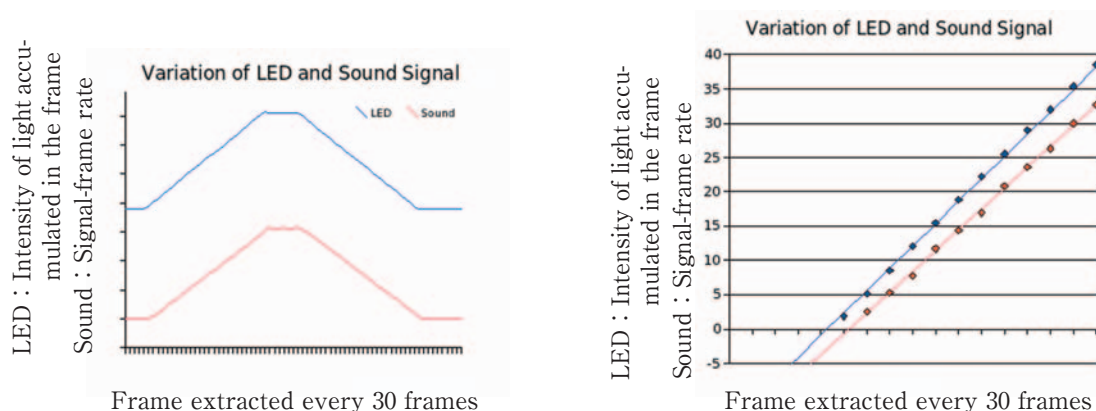


図12. 30フレーム毎に見た、フレームに対するLED光および音声時刻信号の割合

NTSCのフレームレートは29.97であり、正秒に対し、30フレームあたり約0.001秒遅れていく。

30フレーム毎に“フレームに対する信号の割合”を測定することにより、LED光と音声による時刻信号の記録位置の差を検出した。左図は、LEDと音声の位置をずらして表示してある。右図は、信号の立ち上がりの部分を拡大したもの。

てGPS利用時計 (GHS時計) の秒信号に同期させてそれぞれの信号を出力させ、DVテープに記録した。これをLimovieにより測定し、高精度であることが確認されているLED光の信号を基準として、同時に記録された他の信号の進み遅れを調べた。

その結果は、光信号の輝度値および、音声信号フレームに対する記録位置を示す R_s (Signal-Frame rate) の増減はほぼ直線に近く、ビデオカメラおよびVCRのフレームレートがきわめて安定していることを示している。また、両者の比較か

ら、音声信号はLED光信号に対して約1ミリ秒の遅れが認められた。

一方、タイムインポーズTIViについては、フレームを構成する2つのフィールドそれぞれに時刻が表示されていることから、それらの数字とUTCとの関係を明らかにする必要がある。Limovieで測定したLEDの光量とTIViの表示を比較したところ、「後から表示されるフィールド」に記録されたTIViの時刻表示は、それがフィールドの露光の開始時刻を表すと考えた場合、LED信号に対して1ミリ秒進んでいる、という結果で

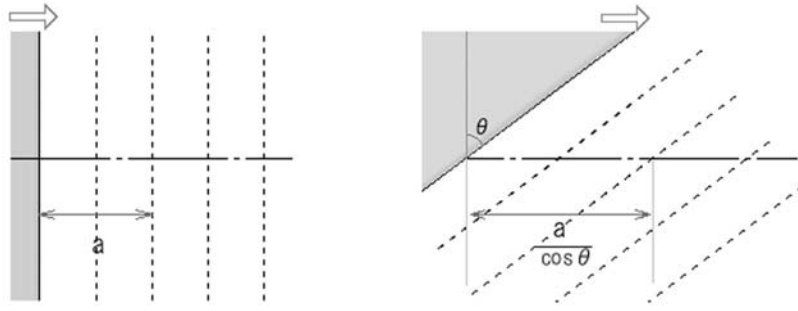


図13. 月縁が進行方向となす角と回折パターンの移動

あった。これより、「後から表示されるフィールド」に記録された時刻表示は「フレームの露光の中央の時刻」を1ミリ秒の精度で表しており、星食観測におけるフレーム毎の光量測定では、この表示をそのまま「現象時刻」として扱うことができる。

以上より、音声信号、タイムインポーズとともに、時刻測定に対して十分に高い精度をもっていることを確かめることができた。

時刻信号の記録精度は、ビデオカメラやVCRなどの機種、個体により異なるものと考えられる。観測者が自らのシステムについて、同様の方法で検証をおこなうことにより、星食観測の時刻精度について、より客観的に判断することができる。

4. 観測への応用

4-1 回折による光量変化

従来、ビデオによる星食観測においては、月縁などによる回折の影響は、誤差要因としてフレーム単位で大まかに議論されるのにとどまっていた。Limovieの活用で30分の1秒ごとに回折光の変化を定量的にとらえることができるようになったことにより、回折について考慮した解析をおこなう必要が生じた。

(1) 恒星が点光源と見なせる場合

Born¹²⁾ および Mondal¹³⁾によれば、点光源の恒星の光を、進行方向に垂直な、充分直線と見なせるような月縁がさえぎるとき、光の強度 I の変化は次の式で表すことができる。

$$I(t) = 0.5I_0[(0.5 + C(\omega))^2 + (0.5 + S(\omega))^2] \quad (4)$$

ここで、 I_0 は恒星の光度、 $C(\omega)$ 、 $S(\omega)$ は、フレネル積分で、以下の式で表される。

$$C(\omega) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \quad (5)$$

$$S(\omega) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \quad (6)$$

また、 ω はフレネル数で、以下のように表される。

$$\omega = \left(\frac{2}{\lambda D}\right)^{\frac{1}{2}} v(t - t_0) \quad (7)$$

λ は光の波長、 D は月までの距離、 v は視線方向に垂直な面にできた月の影が移動する速度である。

月縁が月の進行方向に対して垂直な状態から傾くと、図13に示すように、地上にできた月縁の影（回折パターン）の変化がゆっくり進むようになる。ここで、月縁が「月の進行方向に垂直な方向」となす角を θ とすると、フレネル数 ω は、式 (7) より、

$$\omega = \left(\frac{2}{\lambda D}\right)^{\frac{1}{2}} v(t - t_0) \cos \theta \quad (8)$$

で表される。

(2) 恒星が視直径を持つ場合

恒星が比較的近距离にあり、その直径が大きい場合、回折パターンは点光源のものと異なる。月縁による星食の場合、視直径が10ミリ秒を超えると観測への影響が大きくなってくる。

ここで、一つの点光源による回折パターン $f(t)$ を、式 (4) より

$$f(t) = 0.5I_0[(0.5 + C(\omega))^2 + (0.5 + S(\omega))^2] \quad (9)$$

とし、時間で表した恒星現象中心からの位置を x 、恒星の視半径を r 、月縁の角速度を v 、恒星の光度分布を月縁の進行に伴う時間変化で $G(t)$ と表すと、光量の変化 $I(x)$ は、

$$I(x) = \int_{x-r/v}^{x+r/v} f(t)G(t-x)dt \quad (10)$$

で表される (田中¹⁴⁾, 大金ほか¹⁵⁾).

田中¹⁴⁾ によれば, 周辺減光の変光パターンへの影響はあまり大きくないとされていることから, ここでは周辺減光のない一様円盤として扱うこととし, 恒星の横方向の光度分布を $G(x)$, 恒星の光度 (光量) を L (一定) として,

$$G(x) = \frac{2L}{\pi r^2} \sqrt{(r^2 - \phi^2)} \quad (11)$$

のように扱った.

(3) シミュレーション

観測結果と比較するために, 星食時の光量の変化についてのシミュレーションをおこなった. な

お, 星食観測における対象星の多くは暗い星であり, フィルター等をつけずに撮像することが多い. そこで, シミュレーションにおいても, 光の波長については400nmから780nmまでを数値積分し, 白色光として扱っている. 使用されるCCDの分光特性は様々であることから, 波長ごとの感度は一定であるとして計算した. また, 望遠鏡の口径については, アマチュア観測家が用いる口径は多くの場合50cm以下であるため, 考慮に入れていない. このようにして作成したシミュレーションを, 図14に示す. 幾何学的な食の時点における光量は, 点光源では25%, 視直径が大きくなるにしたがって50%に近づく.

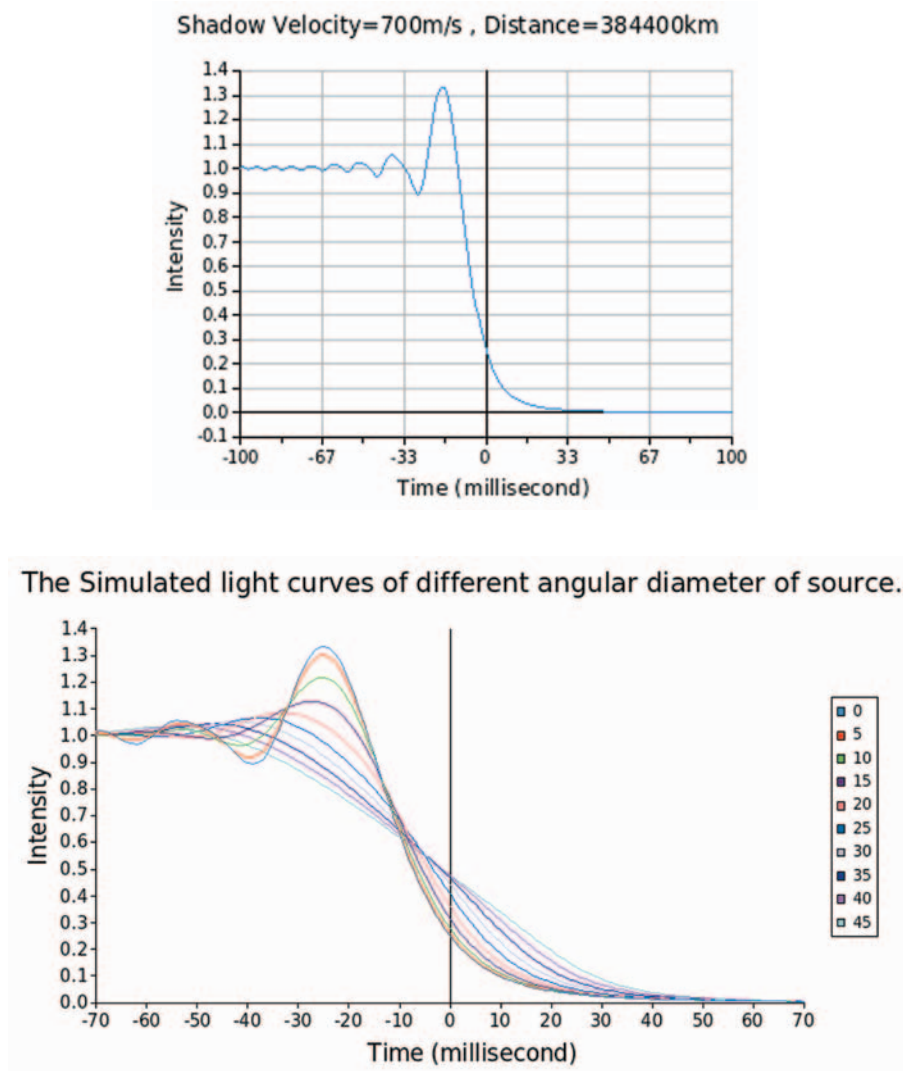


図14. 月縁による星食の光度変化のシミュレーション

(上) 月縁が月の進行方向に垂直な場合について計算したもの. 光度値の変化の速さは, 主に影の速さのちがいに大きく変化する. 図は, 日本を含む中緯度帯における条件を元に作成した例. 光の波長については400nmから780nmまでを積分し, 白色光として計算した.

中央の縦線は幾何学的現象中心の時刻を表す.

(下) 恒星が視直径を持つ場合の光量変化. 視直径0秒角から45秒角の恒星について計算した. 光の波長は, 上図同様白色光. 月の影の速度を500m/s, 月までの距離を 3.8×10^5 kmとして計算. 双方とも, 個々の観測については距離や速度, 角速度について補正して用いる.

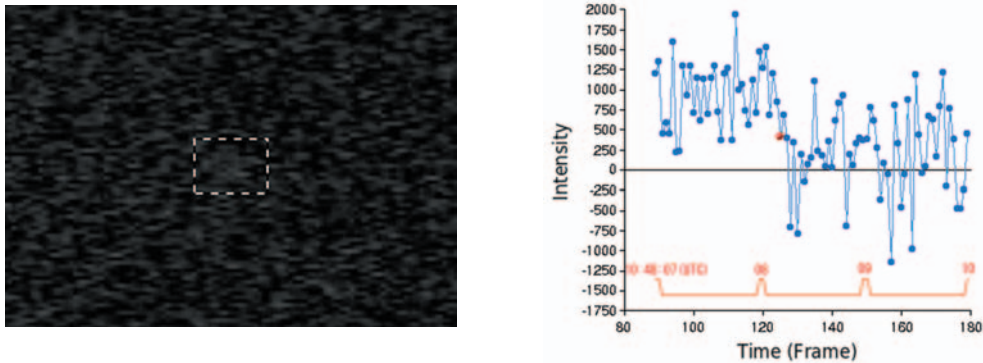


図15. S/N比の低い画像より現象時刻を求めた例

- (左) シンチレーションでゆらぐXZ27317の星像(2002年10月13日(UTC)). キャプチャした画面を拡大してある. 点線に内接する, ぼんやり光る部分が星像. モニター画面で見ても消失したフレームを特定できず, 時刻測定することができなかった.
- (右) Limovieによる解析. グラフより, 潜入が10:48:08.00(UTC)からの数フレームで起きていることがわかる. 潜入前と潜入後の光量差の25%の付近にあるフレームであること, 画面の星像と3Dグラフを見比べ, 10:48:08.17(UTC)までは, 星像らしい淡い光のかたまりが見えるが, 以降のフレームにはランダムにノイズが乗っていることを確認し, 現象時刻を10:48:08.20(UTC)(図中の赤い点)と判断した.

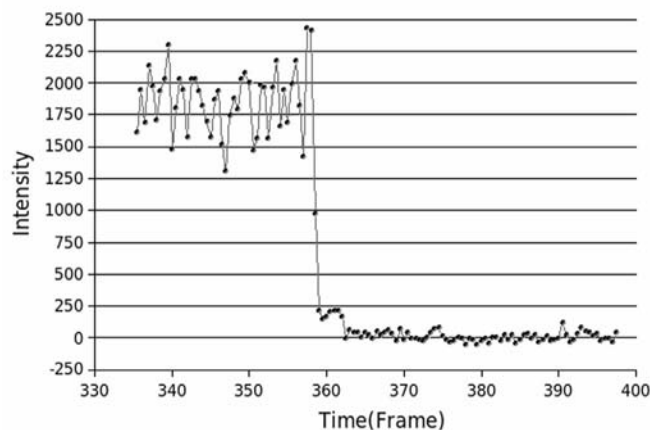


図16. 角距離の小さな重星の星食における光量変化

2000年11月4日(UTC)のXZ29252の星食. モニター画面では数フレームにわたるゆっくりした光量変化に見えたが, 重星かどうかははっきりしなかった. Limovieによる解析では, 重星の特徴である2段階の減光が現れている. グラフはフィールド単位の測光機能の試作バージョンによる解析結果.

4-2 月縁による星食の解析

ここでは, Limovieの機能を活かした観測の例を示す.

(1) 微光天体の現象時刻の測定

高感度ビデオカメラの普及に伴い, 9等級から10等級という光度の暗い恒星の食も観測されるようになった. 微光星の観測では, ビデオの利得(ゲイン)を高くして撮影するために, 画面にはノイズが増え, ざらついて見えるようになる. また, 薄雲や近くにある月の輝面などの影響により, バックグラウンドが明るくなることも多い. このような場合, 星像はバックグラウンドの光やノイズに埋もれてしまい, 見えにくくなる. 従来, モニター画面を観察する方法では, ノイズの中で

星像がどれかがわからなくなり, 何度もコマ送りや巻き戻しを繰り返しながら現象を示すフレームを探すことも多く, 中には, 現象時刻を特定することができない画像もあった.

このような画像であっても, Limovieの持つ, 測定値のグラフ, 3D-Graph, モニター画面という3つの面からの情報を用いることで, 比較的容易に現象時刻の特定が可能である. 図15は, モニター画面の観察による方法では現象時刻を測定することのできなかった微光の恒星の食を, Limovieで解析して現象時刻を得た例である. 現象時刻の星像消失の前後でノイズの振幅が重なっている場合であっても, 静止画面をよく観察することや, 誤差を大きく見積もることなどにより,

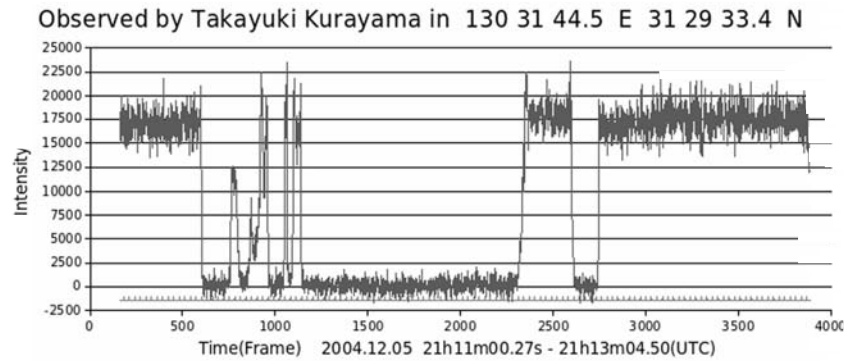


図17. 2004年12月5日(UTC)のXZ17553の限界線星食の光量変化

客観性のある時刻測定が可能である。

また、同一視野に他の天体が写っていれば、掩蔽による減光と雲による減光を区別するための比較星として用いることができることから、条件の悪い観測の検証に対しても有効に用いることができる。

(2) 離角の小さい重星の検出

食される恒星が重星であった場合、離角が大きければモニター画面を目視する方法でも主星と伴星それぞれの消失、出現を判別することができる。しかし、離角が小さく、両者の差が数フレーム以下になると、この方法では判別が難しくなる。そのため、従来、単に「ゆっくりした現象」であるという形で、増減光の開始時刻と終了時刻が記録、報告されているものの中には、重星によるものも含まれていると考えられる。

このような近接の重星による光度変化については、Limovieの測定結果をグラフ化すると、2段階の増減光を示すことで判別することができる。図16は、モニター画面による解析で、「緩やかな減光」とされたものであるが、それが何に起因するかは不明であった。得られたグラフは2段階の減光を示しており、重星によるものである可能性が高い。離角の小さい重星であっても、複数の観測があれば、主星、伴星それぞれに対して、精度の高い現象時刻を測定することができ、両者の離角や位置角の推定に役立てることができると考えられる。

また、これまでフィールド単位の解析の有効性に関しては、星像を構成する半分のピクセルについての測定になることや、ノイズの影響の大きさについてなど、様々な議論があった。この測定結果から、測定の対象によっては有効な情報が得られると考えられる。そこで、次期バージョンには機能として盛り込むべく、現在開発中である。

4-3 限界線星食の解析

(1) 限界線星食における現象時刻の測定

限界線星食の観測は、月縁の地形を調べることに加え、月の黄緯方向のずれや星表の系統誤差などを調べるための重要なデータになる。観測できる場所が限られており、移動観測が必須であるため、可搬性に優れ、電源等の要らないビデオ観測は、眼視観測とともに重要な観測手段となっている。ここでは、限界線星食における増減光の光度変化をLimovieにより測定することで現象中心時刻が精度良く求められるという実例を示し、同時に従来のモニター画面の観察による時刻測定の検証についても報告しておく。

限界線星食では、月縁が月の進行方向と平行に近く、回折パターンの変化が遅くなるために、増減光の変化がゆっくりとなる。この増減光は、数フレームからときには1秒以上におよぶものもある。このようなゆっくりした潜入や出現の場合、従来のモニターの画面の観察による方法では、増減光の開始フレームと終了フレームを特定できない。そのため、従来の観測は増減光の開始時刻と終了時刻を記録し報告する、という方法でおこなわれてきた。

図17は、Limovieにより測定した2004年12月5日のXZ17553の限界線星食の光量変化である。恒星XZ17553 (HIP57083) の視差は $0.02713''$ 、色指数($B-V$)は0.617、スペクトル型はG0であり、直径が太陽と同程度とされる。また重星コードもないことから、恒星を点光源として扱い、複雑な増減光は月縁の地形を反映していると考えて、幾何学的中心時刻の光量を掩蔽前の25%として現象時刻を求めることにする。Limovieより得られたグラフから光量が25%のフレームを特定し、その時刻を記録すれば、他の星食と同様、30分の1

表3. 画面の観察による時刻判定とLimovieによる解析の比較

現象	フレーム	観測当時のモニターによる解析 (M)			Limovieのフレーム 画像に表示される 星像の観察 (F)			Limovieの解析に よる光量25%のフ レームの時刻 (L)			(L)-(M) sec	(L)-(F) sec
		h	m	s	m	s		h	m	s		
D	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	15.11	21	11 14.93 21 11 15.06 21 11 15.19		21	11	15.09	-0.02	+0.03
Flash R	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	20.01 21 11 20.32		20.00 20.20 20.40		21	11	20.23	-0.09	+0.03
Flash D	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	21.75		21.33 21.60 21.87		21	11	21.57	-0.18	-0.03
Flash R	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	23.52		23.37 23.67 23.97		21	11	23.77	+0.25	+0.10
Flash D	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	23.89		23.97 …		21	11	24.27	+0.38	…
Flash R	減光直前 中央時刻 消光完了			…		完全に消失しない 完全に消失しない …		21	11	24.74	…	…
R	減光直前 中央時刻 消光完了			…		復光の速さが異なる 復光の速さが異なる …		21	11	25.27	…	…
D	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	27.06		21 11 26.91 21 11 27.04 21 11 27.17		21	11	27.04	-0.02	0.00
R	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	29.86		21 11 29.81 21 11 29.93 21 11 30.04		21	11	29.94	+0.08	+0.01
D	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	30.56		21 11 30.38 21 11 30.55 21 11 30.71		21	11	30.54	-0.02	-0.01
R	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	31.29		21 11 31.21 21 11 31.41 21 11 31.61		21	11	31.41	+0.12	0.00
D	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	32.96		21 11 32.81 21 11 32.93 21 11 33.04		21	11	32.94	-0.02	+0.01
R	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	12.73		21 11 12.12 21 11 12.71 21 11 13.29		21	12	12.48	-0.25	-0.23
D	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	21.98		21 11 21.53 21 11 21.88 21 11 22.23		21	12	21.86	-0.12	-0.02
R	減光直前 中央時刻 消光完了	21	11	26.42		21 11 26.37 21 11 26.45 21 11 26.53		21	12	26.41	-0.01	-0.04

2004年12月5日(UTC)のXZ17553の限界線星食(倉山高幸氏撮影)のビデオの解析。

(M) 観測当時の、モニター画面の観察による時刻測定、(F) Limovieのフレーム画像で現象開始直前と完了の時刻を求め、現象時刻がその中間であるとしたもの、(L) Limovieによる測定と回折パターンを比較し、光量が25%にあたるフレームより求めた時刻。(M)と(F)は測定者が異なる。

(L)-(M), (L)-(F)は、Limovieの測定を基準にした測定時刻の差。+は進み、-は遅れを表す。

秒の精度で幾何学的中心時刻を求めることができる。

表3は、この観測をおこなった当時に星食国際中央局ILOCへ報告した時刻と、Limovieを用いて再度測定された時刻の比較である。Limovieでは、光量の変化の測定に加えて、画面表示とコマ送りの機能を用いてモニターの観察と同様の方法も試みた。これは、フレーム毎の画像を注意深く観察し、増減光の開始直前と、完了のフレームの時刻をそれぞれできる限り正確に求め、両者の中央の時刻を現象時刻と考え記録するものである。比較の結果から、Limovieの画面を観察する方法で求めた時刻は、多くの場合、Limovieの光量25%の値と一致している。これは、現象中央時刻から、視覚的に認識できる消失および出現までの時間がほぼ等しいためと考えられる。このことから、Limovieを活用できない場合であっても、増減光

の開始および完了の時刻がわかれば、幾何学的現象中央時刻を推定できる可能性がある。しかし、モニター画面の観察による方法では、時に0.1秒以上にもおよぶ個人差が生じており、また、ゆっくりした変化や、月縁地形の変化などによる一様でない増減光が起こっている場合には、現象時刻に0.1から0.2秒におよぶ誤差が生じていることから、その適用については注意が必要である。

これに対してLimovieの光量測定を活用する方法では、測光部の設定が同じであれば、測定者による測定値の差異は発生しない。また、増減光のようすを測定値やグラフから読み取ることにより、多くの場合、±1フレームで回折パターンに一致させることができる。また、月縁の地形の変化により光量変化の形が複雑になった場合でも、現象時刻を特定することができる。これらから、従来の方法に比べて客観的で精度の高い時刻測定

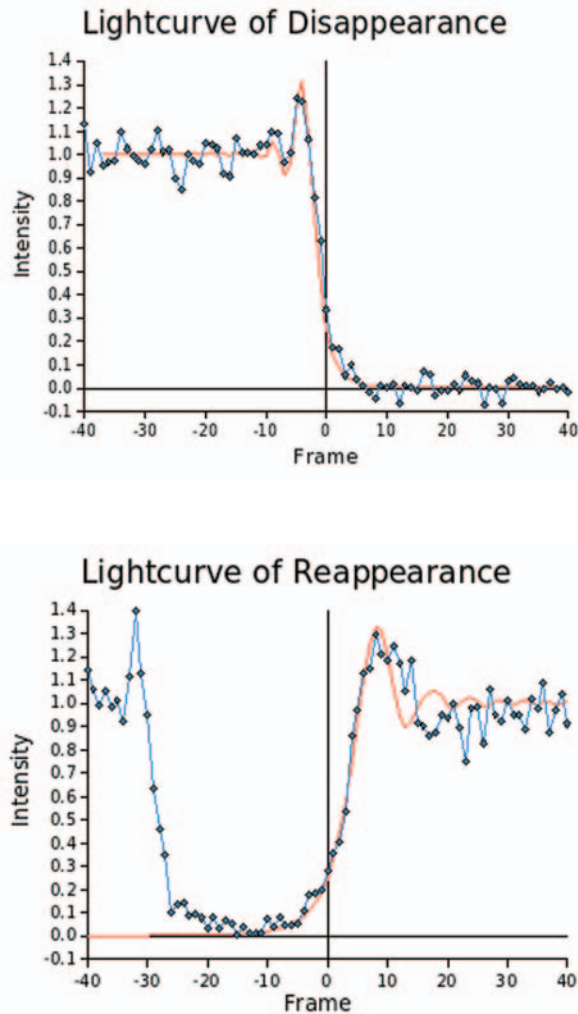


図18. 限界線星食の光量変化と回折パターンの比較
(上) 1回目の潜入の光量変化。月縁が進行方向に垂直な場合と比較して7.6倍の時間がかかっており、月縁が月の進行方向となす角は7.5度ほどであったと考えられる。

(下) 4回目の出現の光量変化。進行方向に垂直な月縁の15倍の時間がかかり、進行方向と月縁のなす角は約3.5度であったと考えられる。また、観測された光量の変化は単純な形ではなく、付近の細かい地形(傾斜)の影響が考えられる。ここでは、最も変化の大きい部分に回折パターンを一致させている。

ができると考えられる。

(2) 光量変化からの月縁地形の推定

限界線星食のゆっくりした光量変化からは、現象時刻に加え、月縁の形状に関する情報が得られる。4-1に示した、式(8)より、回折パターンの変化の速度は、月縁の進行方向に対する傾きにより異なる。そこで、シミュレーションによりゆっくりした光量変化のパターンを作成し、Limovieによる光量変化と比較することにより、月縁の形状についての情報を得ようと試みた。

(1) に述べたように、XZ17553は視直径が小

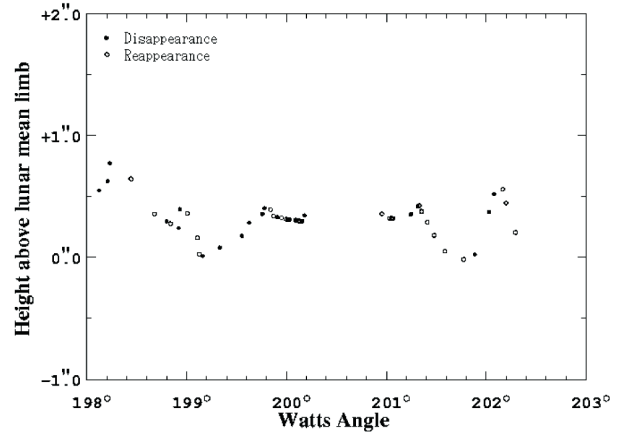


図19. 時刻観測より得られた月縁地形(整約図)
鹿児島県谷山港におけるXZ17553の限界線星食(2004年12月5日(UTC))の時刻観測より得られた月縁の地形。

さく点光源として扱ってよいと考えられる。これをもとに、回折によるパターンと観測された光量変化を比較した。方法としては、

1. 完全に復光した後の光量の平均値を1.0として扱う。
2. 現象中心時刻と考えられる25%となる箇所では測定値とシミュレーションパターンを一致させる。

という条件で、測定値とシミュレーションパターンを比較し、2乗誤差が最小になるようにした。

図18に比較のようすを示す。観測とシミュレーションはよく一致しており、光量変化が月縁による光の回折により起こっていることを示している。図19は、限界線星食の現象時刻の観測より求めた月縁の地形(整約図)である。個々の潜入・出現時の光量変化を図18に示したように回折パターンと比較して、各現象点における月縁の傾きを推定した。

図20は、3名の観測者のビデオについて、月縁上の各位置(点)に、傾斜角(直線)を書き込んだものである。これによると、月縁上のほぼ同じ地点の観測では、回折パターンより求めた傾斜角により一致がみられる。また、傾斜角を示す直線は、ほぼ隣接する地点を向いている。測定された月縁の各地点間においても起伏の変化があるはずであることを考えると、回折パターンを用いて求めた傾斜角は、実際の地形をかなりよく表しているということができる。

以上の結果は、限界線星食における光量変化の測定から月縁の傾斜角を求めることで、月縁地形についてより詳しい推定が可能になることを示唆している。この解析法により、単独の観測など、

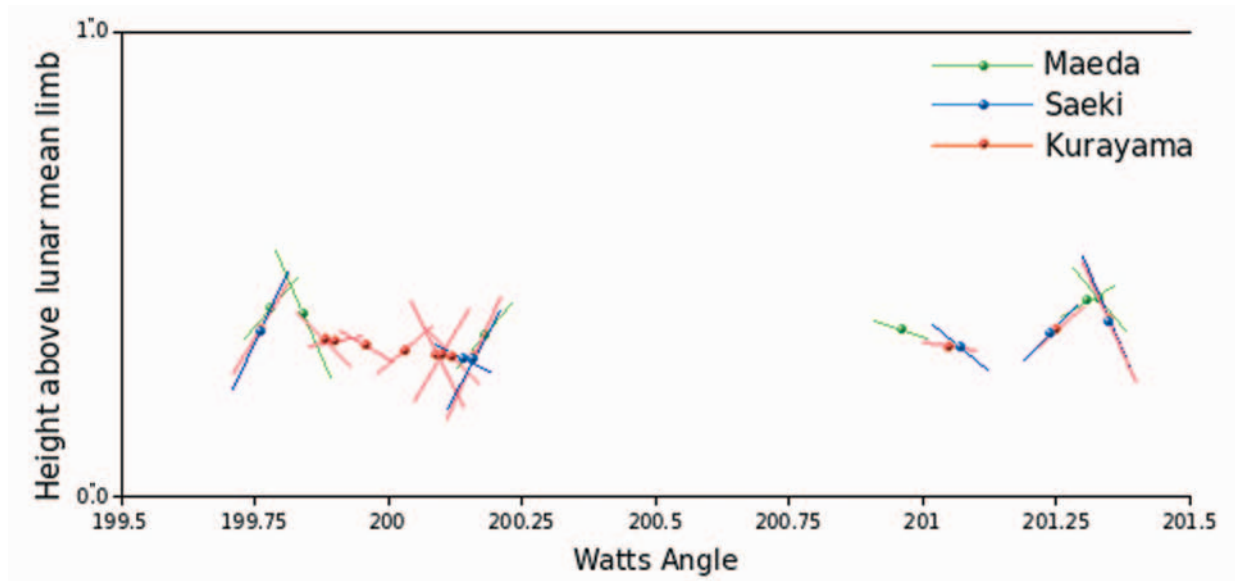


図20. 光量変化より得られた月縁の傾き
光量変化と回折パターンの比較より求めた月縁の傾斜角を，時刻測定から求めた月縁に書き加えた。
Watts角 199.5° から201.5° 付近の3名の観測者が撮影したビデオによる。

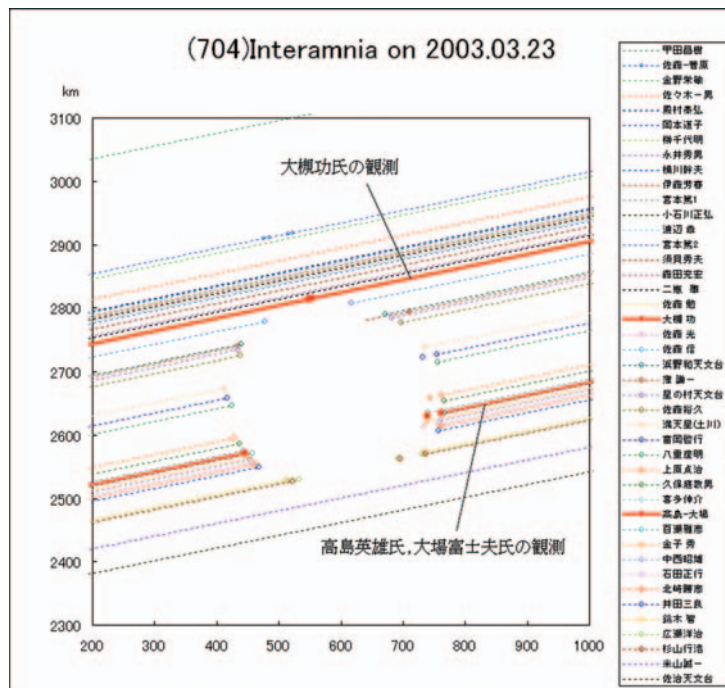


図21. 小惑星(704)Interamnia による恒星食 整約図

観測数が少ないときでも，従来より多くの情報が得られると期待される．現在までに複数の観測者より得られている解析はこの1例だけであることから，今後，他の観測においても検証を進める必要がある．

4-4 小惑星による恒星食への応用

小惑星による恒星食は，歴史的には1958年小惑

星 (3) Juno による8等星の食がスウェーデンで観測されたことが最初でまだまだ歴史が浅く，現在アマチュアのアマチュアの天文愛好家の間でも特に人気の高い観測分野である．

観測の目的は，第一には小惑星の形状を明らかにすることである．また副次的に，恒星に不可視の伴星が検出されたり，変光曲線から恒星の視直径が推定されることもある．Limovieにより掩蔽

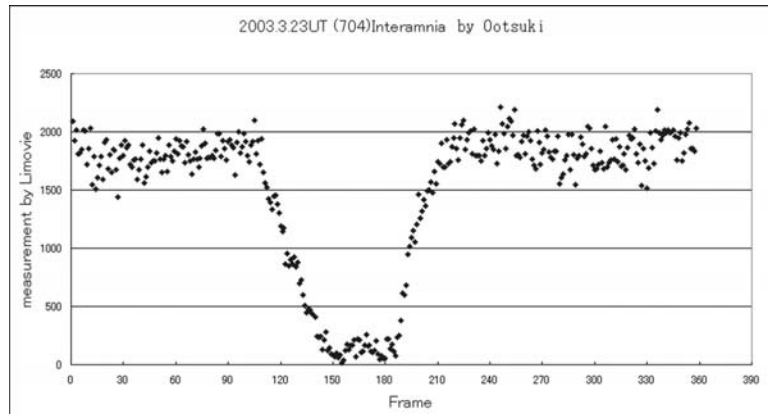


図22-1. 限界線付近における光量変化

機材：31cm F5.8 Newton, Or18mm, ホームビデオコリメート
 保時：GHS時計, TEL時報 観測者：大槻 功 Isao Ootsuki (宮城県丸森町)

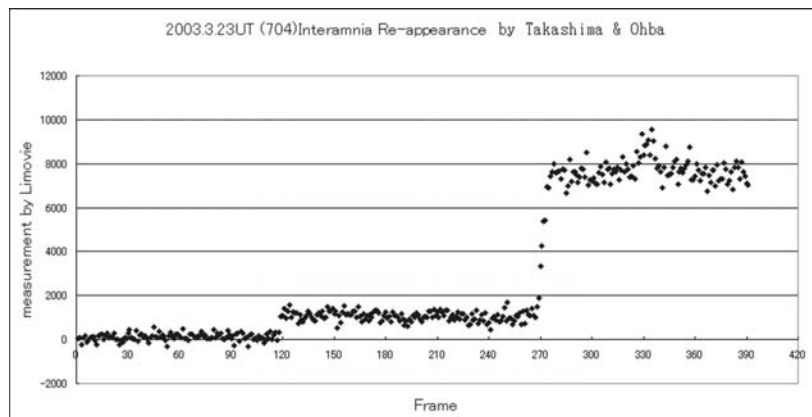


図22-2. 伴星・主星の出現による光量変化

機材：21cm F12 Newton, WAT-100N 保時：GHS時計, TIVi
 観測者：高島英雄, 大場富士夫 Hideo Takashima, Fujio Ohba (千葉県柏市)

図22. 小惑星（704）Interamnia による恒星食の光量変化

の瞬間の映像を解析することで、これらの現象を定量的に評価でき、これまでにない新たな知見を得ることができる。その解析例を以下に示す。

(1) 重星の解析

2003年3月23日に観測された小惑星（704）Interamnia による恒星HIP 36189（6.7等）の食を、Limovie により再評価した2例を示す。多数の観測の中でも特徴的な大槻功氏（宮城県丸森町）と高島英雄氏, 大場富士夫氏（千葉県柏市）の観測を、Limovie により測定した結果、モニター画面の観察では得られない情報が抽出された。

大槻氏の観測位置は、小惑星の影の限界線上に当たっていた（図21）。このため、掩蔽の時間が極めて短く、緩やかな潜入と出現が起こった。大槻氏のビデオでは、潜入と出現のそれぞれにおよそ40フレーム（=1.3秒）を要しており、さらに掩

蔽中にも複雑な変化のあることが浮き上がった（図22-1）。これらは恒星の視直径と小惑星の縁の複雑な凹凸のためと考えられる。

高島氏らのビデオでは段階的な増光が記録され、観測直後から恒星が不可視の重星であることが判明していた。Limovieの光量測定グラフからも、伴星の出現を明らかに認めることができる（図22-2）。恒星HIP36189は K0型星（ $B-V=1.04$ ）であり、太陽の30倍ほどの視直径を持つと考えられる¹⁶⁾。そこで、現象時刻については、復光後の約50%の光量のフレームを幾何学的中心として求めた。伴星出現から主星の出現までの時間は121フレーム、5.033秒 $\pm$ 0.033秒である。小惑星の角速度2.55ミリ秒角/秒より、主星と伴星の離角の小惑星の進行方向についての成分は、12.8ミリ秒角と考えられる。

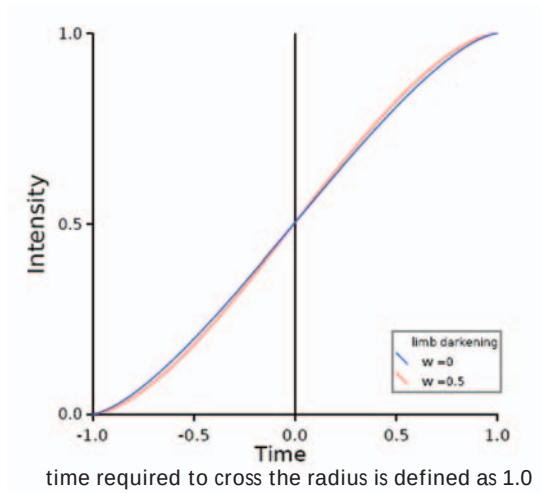


図23-1. 回折の影響がないと仮定した場合の光量変化のシミュレーション

青：一様円盤が直線状の縁から出現する場合の光量変化

赤：周辺減光について、 w (中央の光量に対する周辺部の減光の割合)が0.5の場合の光量変化。

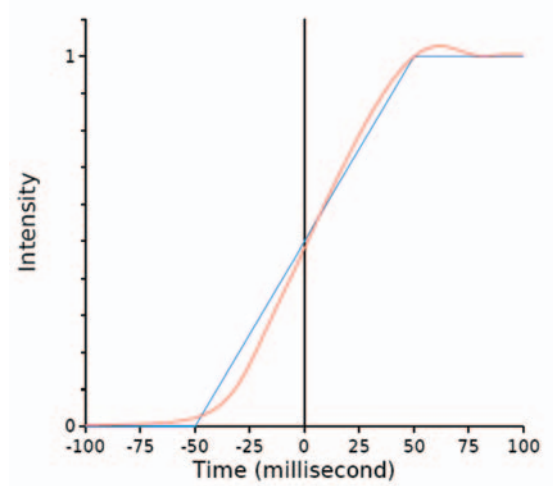


図23-2. 回折の影響を考慮した光量変化のシミュレーション

赤：回折の影響を考慮した光量変化

青：一定の割合で増加する場合を仮定。

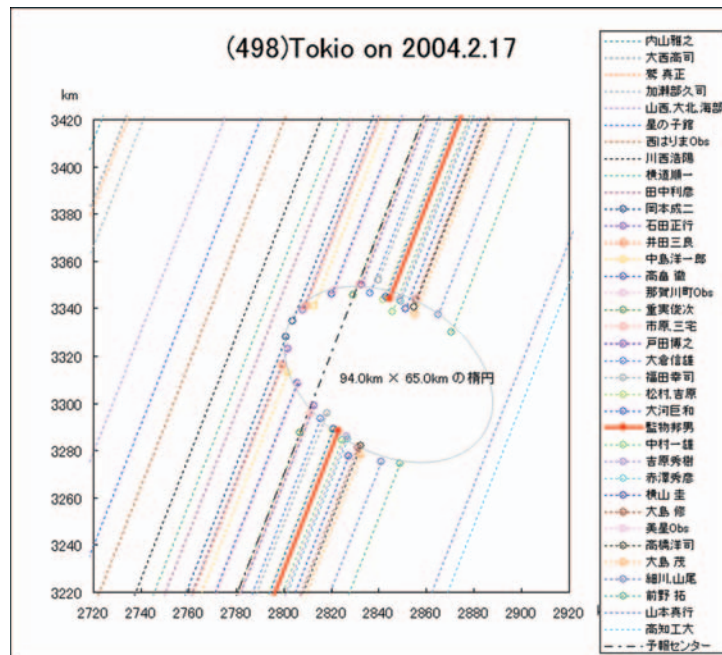


図24. 小惑星(498)Tokio による恒星食 整約図

また、光量の測定から、伴星は復光時の $13.8 \pm 0.3\%$ の明るさであることが新たに分かった。これより、伴星と主星+伴星の等級差は、 2.15 ± 0.50 等であると推定される。

(2) 恒星の視直径の推定

従来、ビデオ観測からの恒星の視直径の推定は、モニター画面の観察により、増減光に要した時間

をフレーム数単位で求め、小惑星の移動の角速度にこの時間を乗ずることによりおこなわれてきた。しかし、この推定法には次の問題点がある。まず、フレームという33ミリ秒の幅を持った単位をもとに推定されたこと、もう一つは、月縁等が恒星面を横切る時間中の光量変化が一定であると仮定している点である。

•	01:35:24.13
•	01:35:24.18
•	01:35:24.20
•	01:35:24.23
•	01:35:24.28
•	01:35:24.30
•	01:35:24.33
•	01:35:24.38
•	01:35:24.40
•	01:35:24.43
•	01:35:24.48
•	01:35:24.50

•	01:35:34.38
•	01:35:34.42
•	01:35:34.45
•	01:35:34.48
•	01:35:34.52
•	01:35:34.55
•	01:35:34.58
•	01:35:34.62
•	01:35:34.65
•	01:35:34.68
•	01:35:34.72
•	01:35:34.75

図25. Tokioによる恒星HIP65791の食の連続画像
7 から 8 フレームほどで、ゆっくりと減光，増光するようすが観察できる。
機材：31.5cm F15 カセグレン, WAT-100N 保時：GHS時計, TIVi
観測者：監物邦男 Kunio Kenmotsu (岡山県倉敷市)

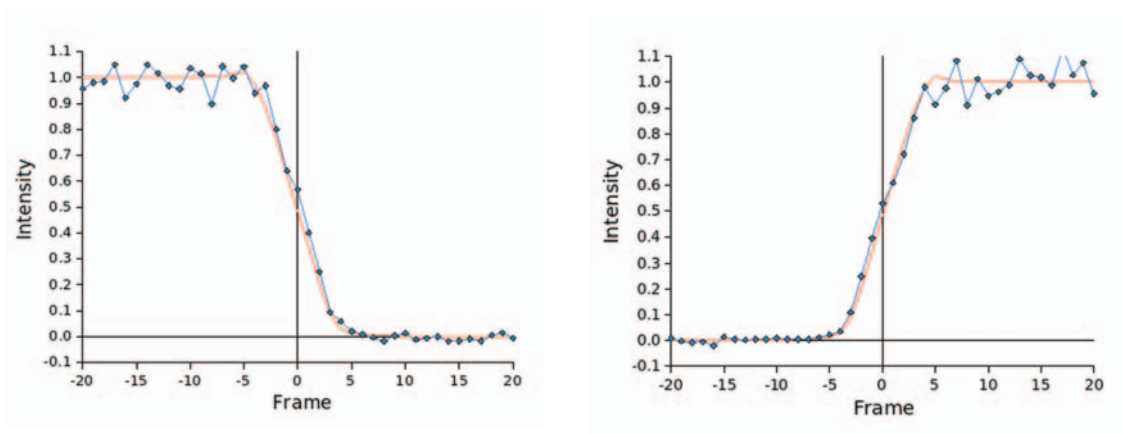


図26. 小惑星(498)Tokio による恒星食の光量変化と回折パターンの比較
図25と同じ，監物邦雄氏撮影のビデオより測定したもの。

図23-1に，回折を考慮する必要がないと仮定した場合の星食における光量変化を示す。これによれば，現象中央時刻付近の直線的な部分の傾きは，光量変化が一定と仮定したときの傾きに比べて，約1.27倍の大きさになり，恒星に周辺減光がある場合はこの傾きは更に大きくなる。また，回折を考慮したシミュレーション（図23-2）においても，傾きに関しては回折がないとした場合とほぼ同様である。したがって，この傾きの違いを考慮することなしに，視直径について議論することはできないことになるが，従来の画面の観察による方法では，傾きの程度を直接知る方法がない。

一方，Limovieによる光量測定を用いる方法で

は，各フレームの光量の値と回折パターンを数値で比較できることから，より精度の高い視直径の推定をおこなうことができると考えられる。そこで，小惑星による恒星食の現象を撮影したビデオについて，恒星の視直径をLimovieの測定値を用いて求め，従来のフレーム数による推定法との比較をおこなった。

測定の対象として，TokioによるHIP65791（7.3等）の食（2004年2月17日）のビデオを用いた。この現象は，前述の2003年（704）Interamniaによる掩蔽と並び，国内で最も成功した観測である。多数の観測が寄せられて，94.0km×65.0km の楕円形の形状が浮かび上がっている。対象星

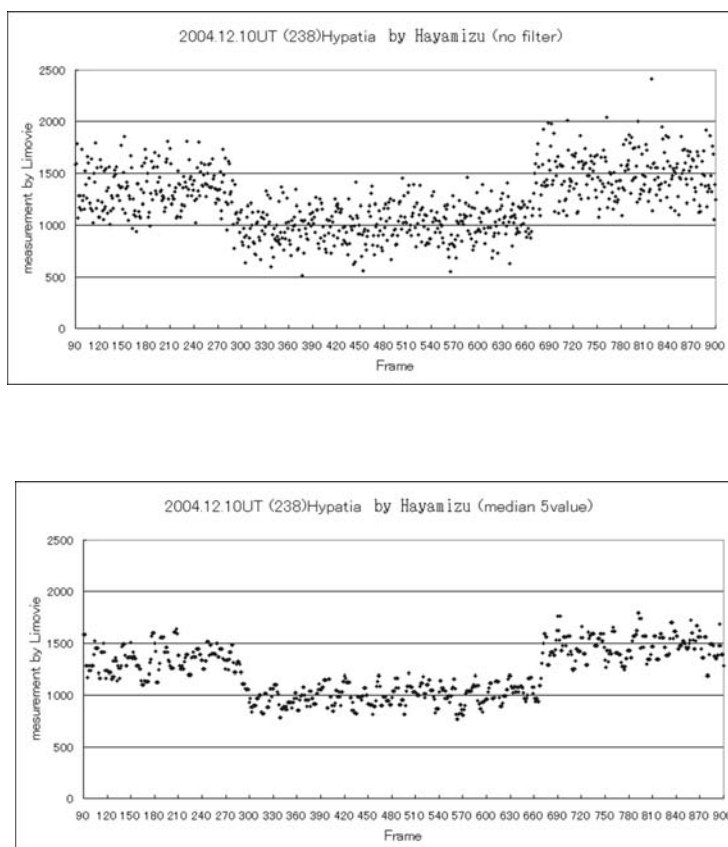


図27 小惑星(238)Hypatia による恒星食の光量変化

(上) Limovieによる測定値

(下) メジアン(中間値)フィルター／5 値の中間値

機材：50cm F12 カセグレン, I.I. 保時：GHS時計, TIVi

観測者：早水勉 Tsutomu Hayamizu (鹿児島県薩摩川内市)

HIP65791はスペクトル型K4IIIの赤色巨星であり、直径は太陽の約30倍であるとされる¹⁶⁾。Hipparcos星表の与える視差は、0.00242角秒で、視直径は0.68ミリ秒角であると考えられた。恒星の視直径が比較的大きいことから、恒星の部分食による緩やかな減光増光が観測されている。測定したビデオを撮影した監物邦男氏(倉敷市)の観測位置は、整約図(図24)のように小惑星のほぼ中央部であることも判明しており、現象時に小惑星の縁は、経路に対して垂直に近いと考えられる。

図25に示すように、モニター画面の観察では、7から8フレームかかって減光、増光がおこなわれたことがわかった。これより、従来の経過時間と角速度による方法によれば、視直径は0.77ミリ秒から0.87ミリ秒であると考えられる。

一方、この観測に対して、Limovieにより光量測定をおこない、回折パターンと比較した結果を、図26に示す。これより、視直径は約0.96ミリ秒角と求められた。上記の、経過時間による方法によ

る値に比べて約1.2倍の大きな値となっている。

(3) 減光の小さい現象の解析

小惑星による恒星食では、掩蔽の起こる直前と終了の直後は、小惑星と恒星の合成した明るさとなり、掩蔽の期間中は小惑星のみの明るさまで減光する。むしろ、恒星が小惑星よりも十分に明るい減光の大きな現象の方が観測しやすい。

2004年12月10日小惑星(238) Hypatia による恒星食は、小惑星と恒星がほぼ同等級で、減光は0.7等と推定されていた。このため掩蔽の期間中も小惑星が明るく映し出されており、ビデオの映像フレームを時系列に並べても食の瞬間を特定することは容易でない。

一方、ビデオ映像からLimovieにより光度を散布図(図27)に示すと減光と復光の時間を特定することが容易にできるようになる。更に、このデータに対して、メジアン(中間値)フィルターを施すと細かいノイズが減少し、より明確に変光曲線が浮かび上がった。

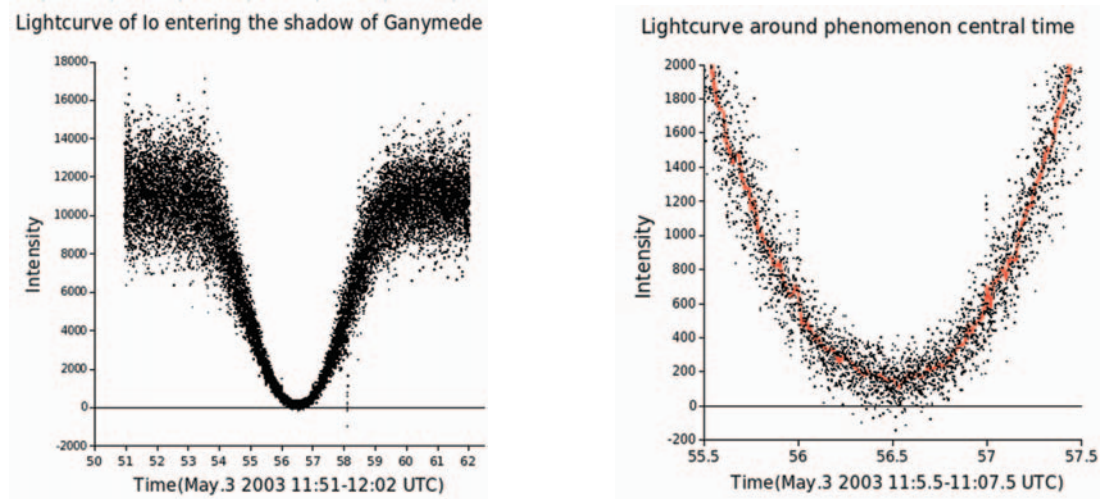


図28. ガリレオ衛星相互食(2003年5月3日(UTC) Ganymedeの影によるIoの食)における衛星Ioの光量変化

- (左) 現象全体の光量変化. 11:58頃, 一時, 光量が大きく外れているのは, 望遠鏡が揺れてしまったことによる.
- (右) 減光が大きくなった部分を拡大した. 11:56:00および11:57:00に見られる光量の突出した部分は, LED時刻装置の正秒予告信号の明るい光を拾ったもの. 図中の赤い折れ線は, 1秒ごとの積分値の変化を示す.

眼視による観測では経験的に0.5等の減光までが観測の限界とされている. 0.5等の減光は37%の減光に相当するが, Limovieのグラフからはこの差でも十分に検出できよう. すなわち, ビデオ映像がLimovieで解析されることによれば, このような極めて減光の少ない恒星食の解析も可能となることが期待できる.

また, このように, ノイズに対して減光幅の小さい現象については, このほかに平均値による方法や, インテグラルプロットなどの方法がある. どのような場合にどの手法が有効であるのかについては, これから明らかにしていかなければならない.

4-5 ガリレオ衛星相互食の解析

Limovie開発のきっかけとなった現象である. 2003年5月3日に, 木星の衛星であるGanymedeの影の中にIoが入り込むという現象があった. 減光の継続時間は約6分であり, 比較のためにその前後も測定すると, 少なくとも10分間の光量測定が必要である. その間のフレーム数は18000におよび, 静止画用の光度測定ソフトを用いて処理することは, 実際上不可能である. この測定を効率よくおこなうためにLimovieを開発した. 現象の長さが数分におよぶゆっくりした変化をとらえるためには, フレームの光量を秒単位, あるいは数秒単位で積分して用いると, シンチレーションの

影響などを軽減することができる. Limovieは時間積分の機能は持っていないが, 表計算ソフトの扱いの工夫により, それらの処理をおこなうことができる.

測定結果を図28に示す. 最も光量が少なくなった時刻は2003.5.3 11:56:30(UTC)頃である. この現象は, 減光が最大となる時刻について11:56:19(UTC)⁵⁾および11:56:22(UTC)¹⁷⁾と予報されていた. 現象は, 予報より約10秒遅れて起こったことになる. 秒毎の平均を表す折れ線が示す数秒単位の振幅は, 大気シンチレーションの影響と考えられる. それ以上の周期を持つゆっくりとした変化は, 食の現象のようすを表すと考えられるが, 特に56:00頃から56:30頃にかけては, ほぼ直線状に減光している. 増光側では, 同様の現象が56:50頃から57:10頃にかけてみられる. これらはイオの表面もようの影響と考えられるが, 詳しくは今後の精査の結果を待ちたい.

5. おわりに

5-1 まとめ

Limovieの作成と観測への応用をおこなう中で, 以下の点が明らかになってきた.

- 1) ビデオ観測には, 手軽に高精度の時刻記録ができることと, 移動観測が可能であるという大きな特徴がある. 作成したソフトウェアLimovieは, パソコンにキャプチャしたビデオ

オフファイルから光量を測定するソフトウェアであり、従来光電管等を用いて固定観測でしか得られなかった光量変化について、定量的な測定が可能である。

- 2) Limovieでは、測光部の適切な設定により、ノイズの多い画像からも光量を精度よく測定することができる。現在、既知の恒星の等級をもとにビデオ画像より得られた光量と比較することでビデオに記録された天体の光量は、実際の光量を正確に反映していることが確認できつつある。
- 3) Limovieを星食観測に用いることにより、時刻測定をより精度よく客観的にこなうことができるようになった。また、撮影機器や時刻信号の精度の検証をおこなうこともできることから、星食観測の精度を更に高めることが期待される。
- 4) 最近多く用いられるようになったビデオ観測から、恒星食における光量変化を測定することにより、掩蔽される恒星の直径、重星の検出、掩蔽する天体の縁の地形など、現象時刻以外にも様々な情報を得ることができることが期待される。

以上のように、Limovieを用いることにより、時刻観測の精度の向上をはじめ様々な新しい知見を得ることができると考えられる。

5-2 今後の課題

Limovieはこれまでに海外も含めた多くの観測者によって活用されるようになってきており、その解析の対象は作者の予想を超えて、接食や小惑星による恒星食、流星、人工衛星におよぶ幅広いものとなってきた。それとともに、様々な機能の提案や改善の要望が寄せられるようになってきている。Audio Channel Displayのように、海外のアマチュア天文家からの具体的な提案に基づいて作られた機能もあり、これらの改良は、新たな解析方法の実現や精度の向上に結びついてきた。現在も、フィールド毎の測光など開発中のものも含め、多くの提案や要望のリクエストを抱えている状態である。今後は、観測者の声に応じて更なる機能の充実をはかるとともに、測定精度を高める工夫や新たな解析の手法について、様々な現象の解析をとおして明らかにしていきたい。

謝 辞

渡辺寛太氏は、すぐれたコンポーネント

TGKAviを作成し、フリーウェアとして公開されている。Limovieの画像読み込み機能はこのコンポーネントを使用することにより実現している。ソフトウェア作成にあたっては、同氏から多くのご教示をいただいた。

David Herald 氏 (豪) は、オーストラリアおよびニュージーランドにおいて観測者にLimovieを紹介し、分かりやすく有用な英文マニュアル“LIMOVIE. DOC”を作成された。この文書は、現在、Limovieの公式マニュアルとして活用されている。また、David Dunham 氏 (米)、David Gault 氏 (豪)、Steve Preston 氏 (米) はじめIOTAの皆様、および井田三良氏、広瀬敏夫氏 はじめ日本の掩蔽メーリングリストJOINの皆様には、観測において活用いただくとともに、Limovieのよりよい活用法と精度の高い測定法について様々な工夫をされ、新たな提案をいただくとともに、観測者に紹介していただいた。大槻 功、高島英雄、大場富士夫、監物邦男、辻塚 隆、前田利久、隈元郁朗、佐伯和久、倉山高幸の各氏には、貴重な観測のビデオを提供いただいた。降幡 均氏はじめ天平の森天文同好会の皆様には、日頃の観測や議論をとおして、多くの励ましをいただいた。これらの皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 鹿児島県立錦江湾高等学校天文研究部：2001年8月16日 木星食の観測，天文学会ジュニアセッション (2002)。
- 2) 広瀬敏夫：星食ガイド，天文ガイド2001年2月号，144-145。
- 3) 広瀬敏夫：星食ガイド，天文ガイド2001年5月号，144-145。
- 4) 広瀬敏夫：星食ガイド，天文ガイド2001年6月号，140-141。
- 5) 相馬 充：ガリレオ衛星の相互現象を見よう，月刊星ナビ 2003年2月号，24-30。
- 6) 相馬 充，早水 勉：1等星食のビデオ観測キャンペーンから求めた精密月縁データ，国立天文台報，5, 29-41 (2001)。
- 7) 早水勉，下代博之，相馬充：GPS利用の汎用高精度時刻保持LSIの開発，日本天文学会春季年会講演予稿集，V27b (2000)。
- 8) 早水勉，下代博之，相馬 充：星食から生まれたGHS時計，天文月報，93，720-727 (2000)。
- 9) 山崎利孝，相馬充，辰巳大輔，早水勉，下代博之：星食観測用GHS時計の運用と評価実

- 験, 国立天文台技術系職員会議主催 技術シンポジウム (2001).
- 10) 早水 勉, 下代博之, 相馬 充, 橋口 隆 : GPSによる汎用時刻保持装置の開発, 国立天文台報, **5**, 73-79 (2001).
- 11) 早水勉, 瀬戸口貴司, 相馬 充 : 掩蔽観測の組織化と近年の成果, 日本天文学会 秋季年会講演予稿集, B05b (2003).
- 12) M. Born and E. Wolf : Principles of Optic : Electromagnetic Theory of Propagation, *Interference and Diffraction of Light* (7th edition), University of Cambridge (2002).
- 13) S. Mondal : High angular resolution studies of late-type stars by lunar occultation in near-infrared. Thesis submitted to Gujarat University (2004).
- 14) 田中済 : 星食の高時間分解能測光観測による恒星視直径の測定, 天文月報, **74**, 346-349, (1981).
- 15) 大金要次郎, 大倉信雄, 仙石新, 奥村雅之, 鳥居泰男, 相馬充, 田中済 : 星食測光観測による α Tauの視直径の測定, 日本天文学会 秋季年会 講演予稿集 N57a (1998).
- 16) C.O Wright, M.P. Egan, K.E Kraemer, and S.D. Price : The Tycho-2 Spectral Type Catalog, *Astron. J.*, **125**, 359-363, (2003).
- 17) J.-E. Arlot: Predictions of the mutual events of the Galilean satellites of Jupiter occurring in 2002-2003, *Astron. Astrophys.*, **383**, 719-723 (2002).