時刻の最確値を求める　～小惑星の現象時刻の解析法～

Jan 15, 2014

宮下和久

０．序にかえて

本稿は、2014 年 1 月に、当時 Limovie に新たに実装した Asteroid Timing Guide 機能について解説する目的で執筆された。しかし諸事情により公開することができなかったものである。2021 年 4 月に、Asteroid Timing Analysis 機能に大幅な改良が加えられ、予報から得られる諸要素を用いてより実際に近いシミュレーションが作成できるようになった。これを機に、本稿も内容を新しく書き換えて、公開することにした。2014 年当時の原稿は、基本的な事柄をまとめたものであり、現在の観測や解析においてもその手引きとなりうるものと考える。そこで、改訂は、誤りの訂正や図版を最新の Limovie の解析結果に置き換えるなどした以外は、ほぼ当時のままとした。観測者の皆様の参考にしていただければ幸いである。

なお、本稿は 2014 年当時も、この改訂版についても、ともに井田三良氏からの問い合わせとお薦めにもとづいて執筆した。Limovie の改良については、渡辺裕之氏、山村秀人氏、浅井晃氏、吉田秀敏氏ほか、多くの皆様にご提案やご指摘をいただいた。皆様に深甚の謝意を表する次第である。　（May 15, 2021）

１．はじめに

小惑星による恒星食の観測からその現象時刻を求める場合の主たる困難点としては、

（１）上空の気流の乱れ等による星像が肥大したり、薄雲の影響があったりした場合に、どこを現象時刻とするとしたらよいか判断しにくい。

（２）蓄積がなされていることが多く、どのフレームをもって現象時刻としたらよいかわからない。

（３）蓄積による時刻遅延について、どのように補正を行ったらよいかよく分からない

が挙げられるだろう。最近では、観測者の観測技術の不断の進歩や、インサータが自動的に時刻を表示して人手による設定ミスがなくなったこと、解析ソフト Limovie に Asteroid Timing Guide が実装され、より確かであると考えられる現象時刻を求めることができるようになる等により、時刻測定技術が向上してきた。また、それらの結果の整約から、小惑星の形状モデルを検証できる段階に入りつつある。それだけに、今後はより精密な現象時刻を求めるための方法を確立することが求められている。

本稿の目的は、これまで曖昧であった（１）フレームや蓄積と現象時刻の関係　と（２）フレームに記録されたインサータの時刻と蓄積についての補正　についての詳細を明らかにし、上記の諸課題を解決するための基本的な事項について述べるとともに、蓄積露光されたビデオの解析のしかたについて観測者に紹介することにある。以下では、2014 年 1 月 12 日に起きた(190)Ismene による恒星食をはじめとするいくつかの観測ビデオの解析を例に解析法を具体的に示しながら説明する。

２．気流や薄雲、星が暗いなどの困難な観測条件に対して．．．．．

「可能な限り　”あるべき姿の”　ライトカーブを得る。」

正確な時刻測定のためには、掩蔽により起きた減光であることが確実であると考えられるような光量変化を得られるように気を配りながら測光を行う必要がある。ここでは、井田氏観測の(190)Ismene の例を見ながら解析法について考えていくことにする。

（１）より適切な測光モードに

PSF 測光は、ノイズの低減効果があることから、恒星食全般にわたって好適に使用することができる。PSF 測光にも、二つのモードがある。一つはデフォルトの Fixed（モデルの星像半径固定モード）と NoFixed（モデルの星像可変）モードである。コントロール領域内の FWHM ボックスの Fixed にチェックがついていれば Fixed モードである。

Fixed モードは、対象星選択時に得た半径（FWHM）を使って、その他のフレームも測光する。星像の半径（形）は、フレームによって多少変動するが、比較的小さく鋭い星像の場合には、最初に

選択した像からは大きくは外れないであろう。むしろ一コマごとに半径を最適化する方が、測光結果に不安定な要因を持ち込むであろう。との考えに基づいて、デフォルトでは FWHM の値を固定（Fixed）としている。とりわけ月による星食の場合、掩蔽中は星の明るさはゼロであり、その場合には星像の半径という概念が意味を持たない。そのため、とても暗い伴星があった場合などには、半径の値が不安定となって値のばらつきが大きくなってしまうことから、Fixed により測定する方がよい。

一方、NoFixed モードは、星像が大きくぼんやりしている場合に有効である。このような星像は、星像が、互いに同じ体積であるが丸め方により高さの異なる鏡餅（丸餅）の場合に高さに違いがあるようすを思い浮かべると理解しやすいかもしれない。FWHM が比較的大きく異なるのである。そのような場合には、FWHM の星像の値への寄与が大きくなると考えられることから、一つ一つのフレームについて異なる星像の半径を与えて測光を行う方が有利である。

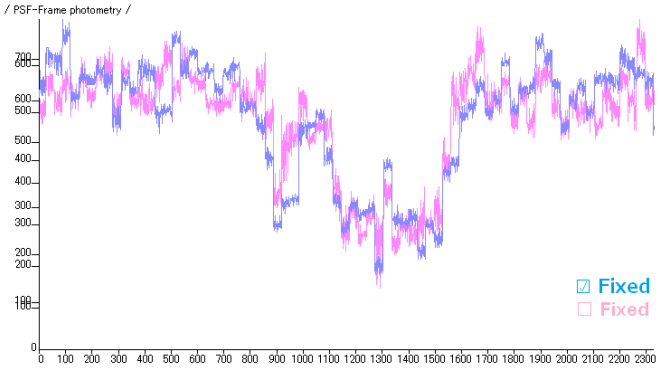


図１　１フレームごとに異なる半径の星像モデルを適用した場合(マゼンタ)との比較

両者を重ねて比較してみると、全体的に上下のばらつきが NoFixed の方が小さくなっている（図１）。僅かなりとはいえ「より確からしいライトカーブ」が得られていることを理由として、以降では NoFixed の設定により測定をおこなった。

（２）比較星を使った大気の吸収についての状況の判断と補正

薄雲の影響が考えられる場合には、視野内に写っている他の恒星と対象星の光量変化を比べてみるとよい。ここでは、単に比較する場合と、より進んで補正を行う場合の二つについて説明する。なお、補正は必ずおこなうべきこととは限らない、というのが筆者の考えである。薄雲の濃淡や形、大きさなどから、対象星の前を横切った薄雲が比較星も同様に減光させるわけでは必ずしもない。この対象星と比較星での相違は、雲が薄く、巻雲や巻積雲などの場合に顕著であろう。一方、高層雲などのように濃さの差が比較的小さい雲に対しては効果があるであろう。数少ない現象の機会をのがさず、短時間露光のフレームからの測光を行わなければならない星食観測は「特殊」である。以上より、Limovie は、観測者が必要に応じて比較星での補正ができるような仕組みとなっている。

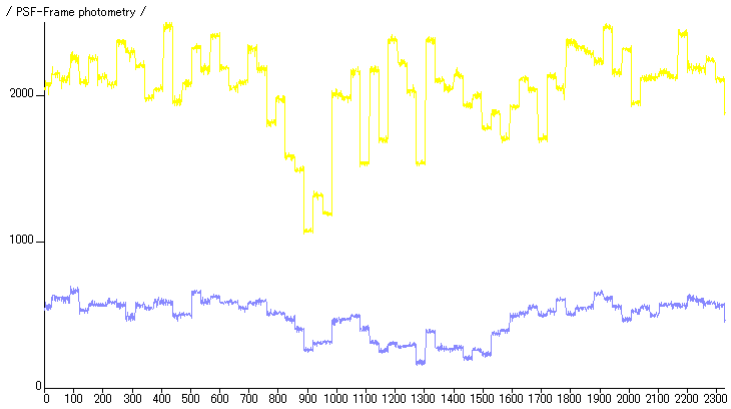


図２　付近の恒星との比較

i）　対象星との比較

図２は、視野内の 10 等級の恒星と対象星（黄色）と対象星（青色）の光量変化を比較したものである。井田氏の報告には「雲の様子を考え亀山に遠征」とあるので、遠征先にも薄雲が飛来したことが考えられる。図２のグラフからは、ちょうど現象時刻付近にその影響が現れたことを表している。対象星に見られる 1100 フレーム付近の光量の落ちこみは比較星には見られないことから、潜入は 1100 フレーム付近であろう、と推定できる。

ii） 対象星による「補正」

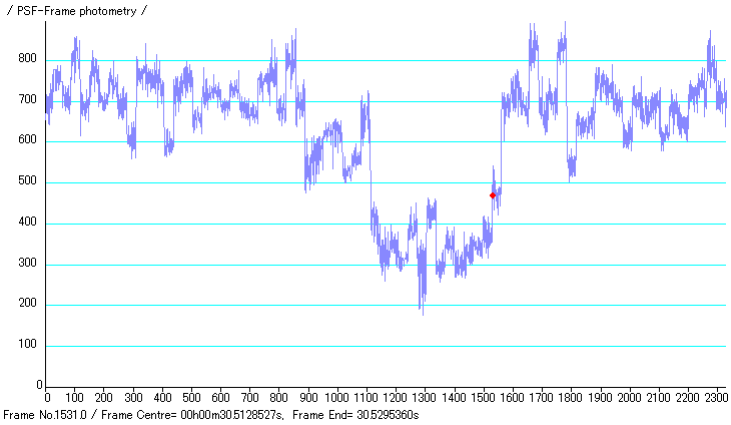


図３　比較星を用いた補正の適用結果

Limovie での補正は、次の手順でおこなう。

① グラフ上で、減光前の光量の安定している箇所をクリックする。（点が赤く表示される。）

② Correction for Absorption　ボタンをクリックし、現れた操作ウインドウの Correction ボタンをクリックする。

※蓄積ビデオの場合は、左下にある数字は１のままにすること。

~~③元に戻すときは、Restore Data ボタンをクリックする。~~　※2021.05.01 時点の Limovie 0.9.99.5A5i4 では、この Restore は利用できない。CMOS カメラへの対応のためのデータ構造の変更のためであり、今後改良される予定である。お手数でも、測光したらすぐに CSV ファイルに保存しておき、それを読み込むことで再度の比較校正処理を行っていただきたい。

※比較星のグラフを表示したくないときには、Object の B をクリックすればよい。

このようにして得られたグラフを図３に示す。補正前（図１のマゼンタ）と比較すると、特に現象前の 0-1000 フレームの光量が安定的に「一定」になってきていることが読み取れる。これは現象後も同様の傾向にある。これならば、薄雲の影響はほぼ取り除くことができ、かなり確からしい「掩蔽現象による光量変化」を得ることができたと言えるだろう。

それではこれから、このグラフを使って現象時刻を求めてみよう。そのためには、ビデオに表示されたインサータの時刻と、実際に現象が露光された時刻との差（補正値）の求め方を知らなければならない。次項では、その補正値について詳述する。

補正方法と補正が必要なシチュエーションについては、次の文書を参考にすること。

Limovie の解析結果から薄雲の影響を補正する方法

http://astro-limovie.info/jclo/doccuments/HowToAnalyze/Correction_for_Absorption_function.pdf

３．ビデオと現象時刻

（１）一般的に用いられている補正値

オーストリアの Gerhard Dangl 氏は、光り始めるタイミングをミリ秒単位でずらして発光させる LED を用いてビデオカメラと時刻の関係を精密に調べ、インサータの記録する時刻と真の時刻の関係を明らかにした[*2]。その結果をもとに、WAT100N, WAT120N, WAT910HX をはじめとするビデオカメラの各機種について、インサータが記録した時刻と、その画像が露光された時刻の間の差を、補正値として表に掲載している。

氏のサイトで述べられている補正についての考え方は、次のようにまとめることができる（図４）。

①　フレームは二つのフィールドから構成されている。 ②　フィールドにインサータが書き込んだ時刻は、そのフィールドがカメラから出力された時刻である。 ③　補正値は、一つの蓄積露光の結果である、一連の蓄積数個のフレームのうち、最初のフレームの時刻に記載された時刻（画面の二つの時刻の内早い方の時刻）から、その蓄積が露光された時間の中央に当たる時刻との差を表す。

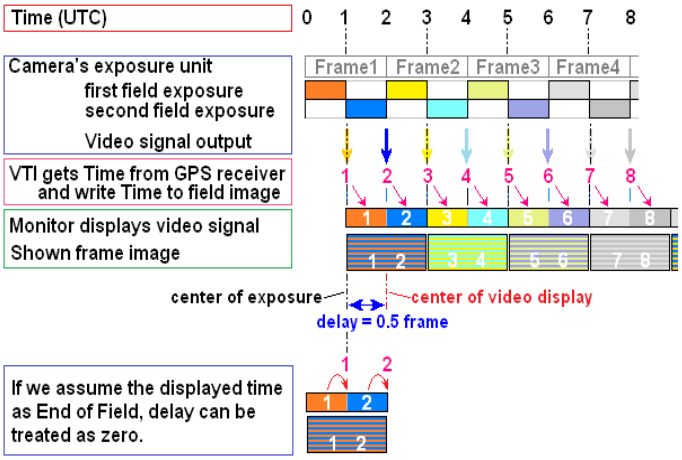
※この補正値は、表１，表２に”連続する同一画像の最初のフレームの時刻値と、蓄積露光の中心時刻との差　（秒）　”として記載してある。

（2）筆者による補正値

一方、筆者は、29.97fps というフレームレートを持つ NTSC 方式のビデオのフレームの露光タイミングが、UTC の 1 秒に対してシフトしていくことを活用して時刻を求める方法を考察した[*1]。その結果に基づき、Limovie の蓄積ビデオ解析機能で用いることができるように、補正値を求めた。これは上述の Dangl 氏の補正値とは定義の異なる値である。以下に、その詳細と活用法について述べる。

（2－1）蓄積機能のないカメラ（WAT100N など）と時刻

蓄積機能のないビデオカメラは、一定時間露光をおこなった直後（かかる時間はナノ秒のオーダーだとされている）に、その画像をアナログ信号として外部に出力する。ビデオタイムインサータ(VTI)は、その出力がなされた瞬間の時刻を GPS レシーバーから読み込んで、画像に書き込む。その結果、フレーム前半のフィールドには、前半フィールドの露光終了時刻が記録されることになる。



A frame has two inserted time. They are the time beginning output of first and second field. Non integrated video has 0.5 frame-length delay between exposure and display. However, if we regard the time of first field as Expose Center, substantially the delay can be treated as zero.

図 4

また、これらの露光から出力までのシーケンスを俯瞰すれば、ビデオ出力は露光よりも 0.5 フレーム（1 フィールド）遅れている(delay)状態にある。そのため、星食が起きた時刻を求めようとしたとき、時刻の補正値が必要となるはずである。

しかし、見方を変えると、補正値なしでも時刻を求めるのに役立てることができる。それは、最初のフィールドに書き込まれた時刻を、フィールドの出力開始の時刻ではなく、出力終了の時刻であると「見なす」ことである。図 4 のように、この見なしを適用することで、カメラのビデオ出力が、あたかもビデオの録画と同一のタイミングでなされている、すなわち遅れ(delay)がゼロであるとして扱うことができる。

以上をまとめると、蓄積機能がないアナログビデオカメラの場合、

「インサータが書き込んだ早い方の時刻値（前半フィールドの時刻値）が、露光の中央時刻を示している」

と考えて星食の現象時刻を求めることができる。

（2－2）蓄積機能つきビデオカメラ（WAT120N, WAT910HX など）と現象時刻

蓄積型ビデオカメラは、蓄積フレーム数分の露光をおこなった後、画像データとしてカメラ内のメモリに保持する。この保持された信号を、ある一定のタイミングでビデオ信号として出力する。出力は、蓄積フレーム数個のフレームとして、同一の画像信号を連続して出力する。一方、インサータは、カメラから出力されたビデオ信号に対してその「出力時点の時刻」を記録する。

この一連の動作を WAT120N についてまとめたものが図 6 である。前項に記した蓄積なしのカメラの場合には、イメージセンサからの出力とカメラからの出力は「同時」であった。また、インサータの書き込んだ時刻をフィールド露光の終了時刻ととらえる（認識する）ことで、全体的な遅延を考慮することなしに露光時の時刻を調べることができることについても述べた。しかし、蓄積型カメラの場合はカメラ内のメモリに保持されてカメラから出力するまでの間に遅延が生じる。この遅延について、

「蓄積なしのカメラと同様、インサータの書き込んだ時刻は、フィールド露光終了の時刻である、と仮定した（認識した）した上で、それに対する遅延時間だととらえる（定義する）」

ことが、蓄積なしのカメラと蓄積ありのカメラ双方の時刻解析について総合的に理解する上で便利である。

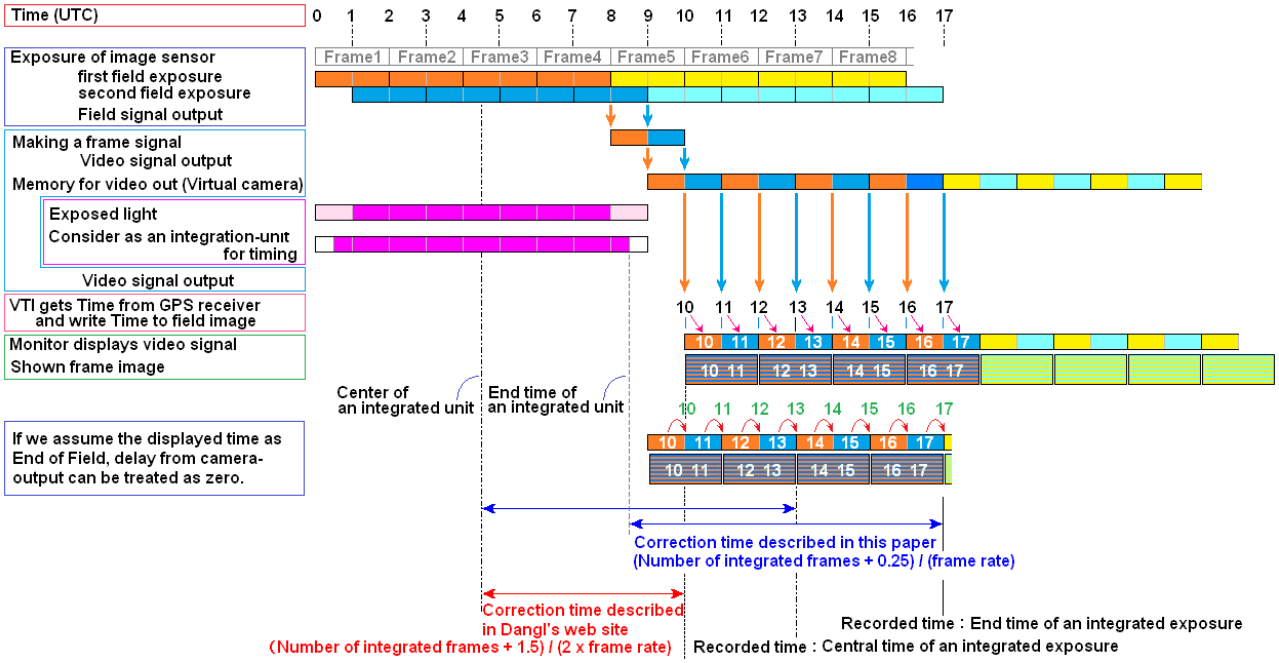


図５　カメラの動作シーケンスと、蓄積補正の考え方（WAT120N の４フレーム蓄積の場合）

なお、図中に示された時刻は、次のフレームの VTI の時刻記録を読むことによって得ることができる。

The beginning time of output frame of this integration	KIWI-OSD 以外は、(IOTA-VTI, GHS-OSD ともに) 該当フレームには表示されない。 一つ前のフレームの終わりの時刻を読むこと。
Recorded time of the center of an integrated exposure	蓄積の先頭から数えて（蓄積数/2）番目のフレームに表示されている遅い方の数字
Recorded time of the end of an integrated exposure	蓄積の一番終わりのフレームに表示されている遅い方の数字

表１　蓄積による時刻の補正値　　WAT120N

蓄積数	本稿の補正値　(同一位相における露光と出力の差) 連続する同一画像のフレームの内 [蓄積数÷2]番目のフレームに表示されている二つの時刻値と同位相の露光時刻の差　(秒)				連続する同一画像の最初のフレームの時刻値と、蓄積露光の中心時刻との差　(秒)　*2	
	A　早い方の時刻値を元に		B　遅い方の時刻を元に		早い方時刻を元に	
	秒	フレーム	秒	フレーム	秒	フレーム
0	-0.033	1.00	-0.033	1.00	-0.033	1.00
1	-0.042	1.25	-0.042	1.25	-0.042	1.25
2	-0.058	1.75	-0.075	2.25	-0.058	1.75
4	-0.125	3.75	-0.142	4.25	-0.092	2.75
8	-0.259	7.75	-0.275	8.25	-0.159	4.75
16	-0.526	15.75	-0.542	16.25	-0.292	8.75
32	-1.059	31.75	-1.076	32.25	-0.559	16.75
64	-2.127	63.75	-2.144	64.25	-1.093	32.75
128	-4.263	127.75	-4.279	128.25	-2.161	64.75

※　数値の赤色で示した部分は、図6から計算した値と Dangl 氏のサイトの数値と異なる部分。

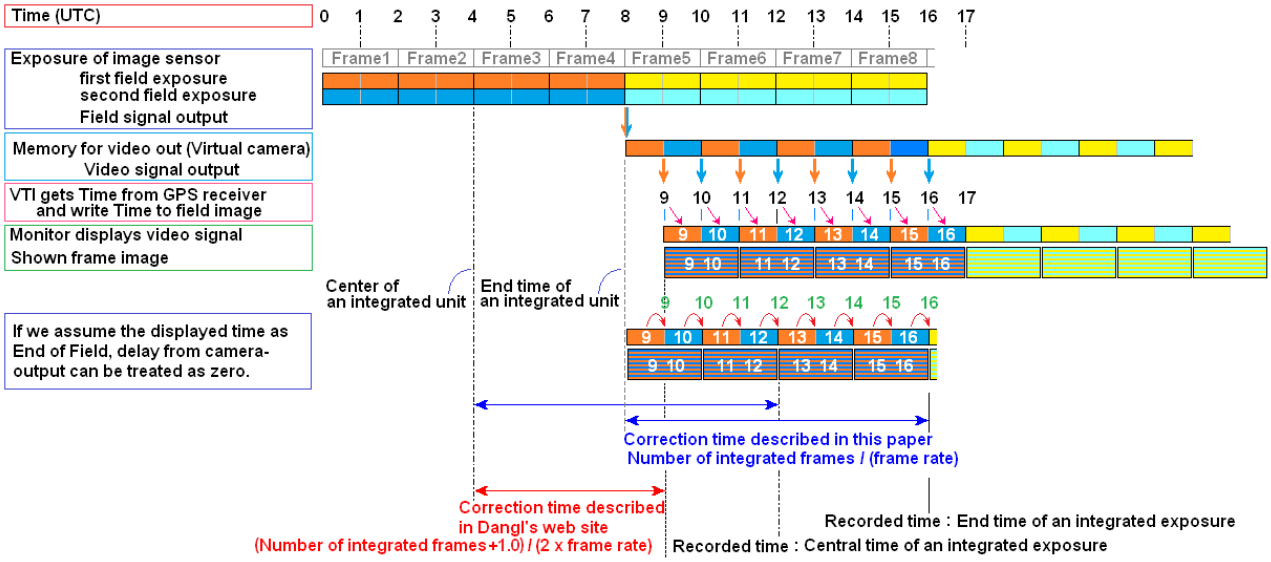


図６　カメラの動作シーケンスと、蓄積補正の考え方（WAT910HX）

表２ 蓄積による時刻の補正値　WAT910HX

蓄積数	本稿の補正値　(同一位相における露光と出力の差) 連続する同一画像のフレームの内 [蓄積数÷2]番目のフレームに表示されている二つの時刻値と同位相の露光時刻の差　(秒)				連続する同一画像の最初のフレームの時刻値と、蓄積露光の中心時刻との差　(秒)　*2	
	A　早い方の時刻値を元に		B　遅い方の時刻を元に		早い方時刻を元に	
	秒	フレーム	秒	フレーム	秒	フレーム
0	-0.017	0.50	-0.017	0.50	-0.017	0.50
1 (1/60 x2)	-0.033	1.00	-0.033	1.00	-0.033	1.00
2 (1/60 x4)	-0.058	1.50	-0.067	2.00	-0.050	1.50
4 (1/60 x8)	-0.125	3.50	-0.133	4.00	-0.083	2.50
8 (1/60 x16)	-0.259	7.50	-0.267	8.00	-0.150	4.50
16 (1/60 x32)	-0.526	15.50	-0.534	16.00	-0.284	8.50
32 (1/60 x64)	-1.059	31.50	-1.068	32.00	-0.551	16.50
64 (1/60 x128)	-2.127	63.50	-2.135	64.00	-1.084	32.50
128 (1/60 x256)	-	-	-	-	-2.135	64.00

WAT910HX では、画像データを保持するメモリの数が 254 である関係から、1/60 x256 モードの場合、254 フィールド(=127 フレーム)の蓄積であるとされている。現在までのところ、このモードについては調査していないことから、表の数値は空欄のままとなっている。

（２－３）　カメラの動作の様子

上記のカメラ動作シーケンスの推定と補正値については、ビデオの画面から確認してみよう。方法は、GPS 受信機から得られる UTC（１ PPS）に同期した LED 光をビデオカメラで撮影し、ビデオ出力にタイムインサータにより時刻を書き込んで録画する。画面に写った LED が光り始めたフレーム画像があれば、それは、フレーム露光の終了直前に UTC の正秒を迎えたことを意味している。この関係を使って、カメラの動作を確認することができる。また、インサータ KIWI-OSD は、フレームの露光開始、中央、露光終了の３つの時刻値が表示されていることから、この確認に便利である。図７，図８に、正秒の LED 光が光り始めた画面の様子を示す。

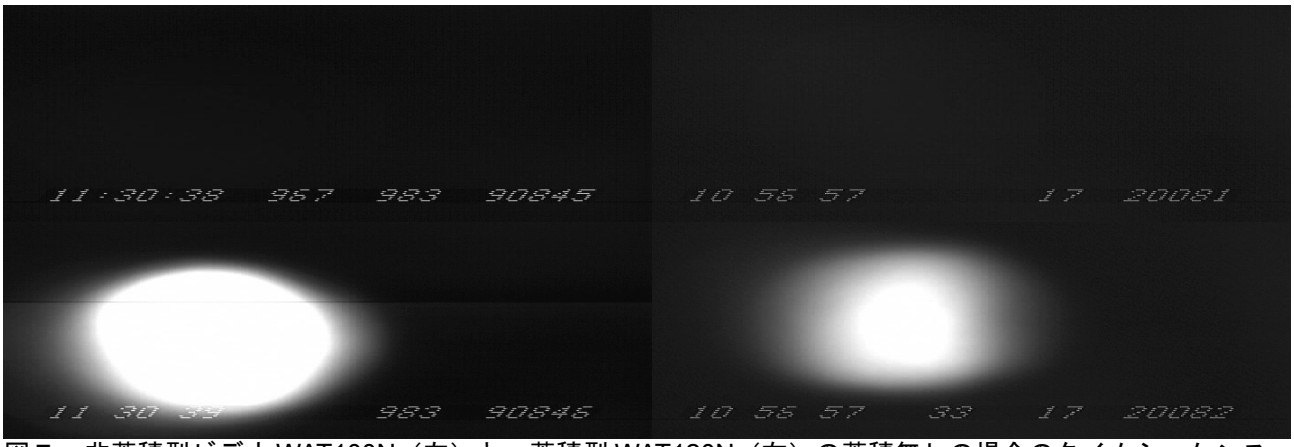
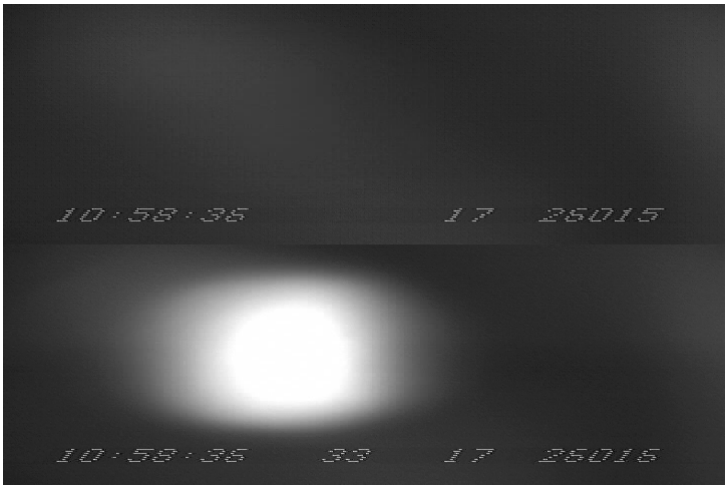


図７　非蓄積型ビデオ WAT100N（左）と、蓄積型 WAT120N（右）の蓄積無しの場合のタイムシーケンス

KIWI-OSD の LED の光り始め（正秒に同期）をとらえたフレーム。WAT100N は、x.967 秒、x.983 秒、x.000 秒の三つのインサータの数値を記録したフレームに正秒の LED が写り始めている。つまり、露光終了ぎりぎりに LED が光り始めたということである。したがって、「3 つの数値のうち最も遅いもの」が「フレームの露光の終了時刻」を示していることになる。GHS-OSD など一般的なインサータは、二つの時刻を表示することが多いが、それは、フィールドの露光終了時刻を示していることになる。これまで筆者は WAT100N などの非蓄積型カメラの出力について VTI の示す時刻のうち、早い方の時刻がフレームの露出中央時刻を表している（つまり、二つのフィールドのうち早い方のフィールドの露光終了時刻を表している）、と記述してきたが、その根拠が左の画像である。

一方、WAT120N の場合は、露光終了時刻として記録された VTI の数値（3 つの内、最も遅い時刻）は、x.033 秒である。これは、WAT100N の場合と比べて 0.033 秒遅い。したがって、WAT120N でゼロ蓄積をしている場合には、-0.033 秒が本稿で表現するところの「補正値」である。



WAT120N で、2 フレーム蓄積で LED の光り始め（正秒）を記録したフレームである。WAT100N 風に時刻を読み取ると、このフレームの露光開始が x.000 秒、露光中央が x.017 秒、露光終了が x.033 秒である。

この光は、後発フィールドにとらえられたものであるから、先発フィールドは後発フィールド終了より 2.5 フレーム早く露光を開始している。したがって、フレーム露光の中央は実際の露光終了より 1.25 フレーム(0.042 秒)手前である。

一方、左図は 2 蓄積のうち最初のフレームであるから、露光終了時刻が蓄積の中央を示している。上記から、実際の露光中央は表示から読み取る露光中央より 0.033 秒+0.042 秒=0.075 秒手前である。これが表１に示した本稿の時刻補正値である。

図８　WAT120N 2 フレーム蓄積のタイムシーケンス

以上が、蓄積型カメラの露光と時刻の関係の基本的な事項であるが、それを元に、現象時刻をどのように求めたらよいかを以下に述べる。

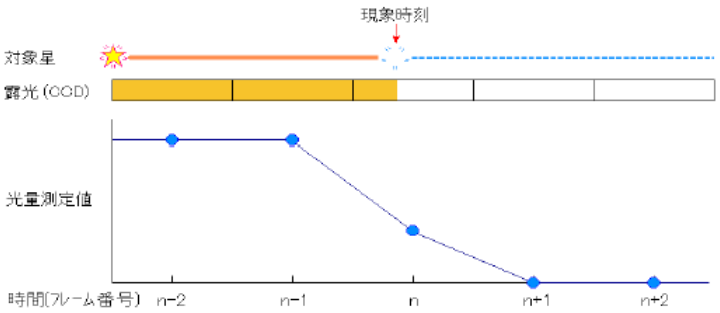
３．蓄積ビデオへの星食現象の「写り方」と時刻解析
～ビデオ画像を目視して時刻を求める場合～

星食が起きるときの光量の変化は、隠される天体が恒星であれば、フレネル回折の曲線を描く。ただし、この項の議論においては、理解しやすくするために便宜上「瞬時に消えた」として扱うことにする。

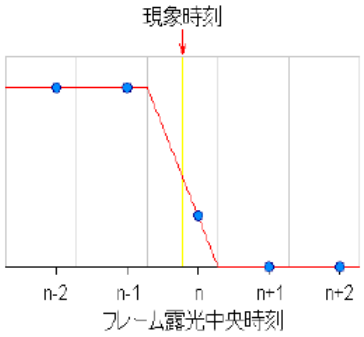
（１） 蓄積ビデオに記録された星の明るさと、 現象の起きたタイミング

この項を読む前に、星食観測ハンドブック 2014 の p98～100 の
（６）星食の光量変化とフレーム　①星食の光量変化が瞬時であると仮定した場合
にぜひ目を通しておいていただきたい。

蓄積ビデオの１つの蓄積は「フレームレートの低い蓄積なしビデオと同じである」と考えると理解が容易になる。従来のビデオ映像は、NTSC の場合１秒間に 30 フレーム(正しくは 29.97 フレーム)の画像が次々に表示される。これに対して、パソコンなどの動画では、フレームレートを自由に設定して撮影できるようになっていることが多い。たとえば、フレームレートが１となっていれば、１秒間に１コマの撮影をして、１秒に１回画面が切り替わる。ここでは、このフレームレート=1 のビデオの切り替わりのタイミングが標準時(UTC)の正秒に正確に同期していた場合を想定して、そのようなビデオが星食を記録したらどうなるかを考えてみることにしよう。



図－８　ビデオへの星食の記録



図－９　モデル値の移動平均との重ね合わせ

図９　フレームと星の光量　　星食観測ハンドブックより

左の図（図中に図－８とある）のように、露光が始まって露光期間の 1/3（この場合には 1/3 秒）の時点で星が急に消えたとすると、光量は 1/3 となる。逆に言えば、光量が 1/3 であれば、蓄積開始から 1/3 秒後に潜入が起きたと考えられる。

（２） フレーム画像の目視から**現象時刻を求める**

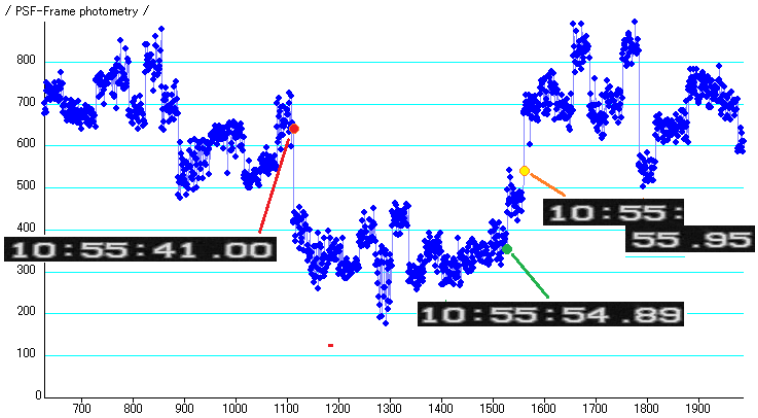


図 10　(190)Ismene による恒星食　2014 年 1 月 12 日 井田氏観測

図 10 は図３と同じライトカーブ（WAT120N により撮影）とインサータの時刻の関係を示したものである。時刻は同一の蓄積を示す一連の（３２個の）フレームのうち、最後のフレームに表示されているうちの遅い方の時刻である。この時刻を基準にすると、現象時刻を求めたり推定したりすることができるようになる。

以下に、潜入と出現の場合について、その方法を述べる。

（２－１）光量が一気に変化する場合　（図 10 の潜入について）

図 10 の赤い点で示すフレーム(No. 1111 フレーム)からその次のフレーム(No.1112 フレーム)にかけて、一気に光量が低下している。このビデオは 32 フレーム蓄積であるので、No. 1111 フレームまでの 32 フレームの蓄積期間と No. 1112 フレームからの 32 フレームの蓄積期間との境目（瞬間）に恒星の潜入が起きたと考えられる。この「蓄積の境目」は、境目の直前のフレームの露光終了時刻を（見かけ上）示す時刻に表 1 の補正値（負の数）を加えることで現象時刻を求めることができる。

潜入　10h55m41.00s – 1.076s = 10h55m39.924s （小数点以下 2 桁に丸めると 10h55m39.92s ）

光量が一気に変化する場合は．．．
変化する 1 つ前の蓄積のうち、最後のフレームに表示された遅い方の時刻（蓄積の終了時刻）に補正値を加えることで、現象時刻を求めることができる。

（２－２）光量が段階的に変化する場合　（図 10 の出現について）

図 10 の緑の点で示すフレーム(No. 1527 フレーム)からその次のフレーム(No.1528 フレーム)にかけて、光量が増加している。また、黄色の点で示すフレーム(No. 1591 フレーム)からその次のフレーム(No.1592 フレーム)にかけて、光量が増加している。そしてそれ(No.1592 フレーム)以降は、復光後の大気のシンチレーションによる振れ幅の中に収まっているように見える。ただし、No.1528 フレームから No. 1591 フレーム（緑色の点の次から黄色の点まで）の蓄積単位は、No.2000 付近に見られる大気のシンチレーションによる光量低下と、数値的には大きな差がない。それから考えると、No.1528 から No. 1591 のフレームも大気の影響によるものである可能性がある。食現象か大気の現象なのか区別がつかないが、No.2000 付近のような光量低下は多く見られるわけではないので、あくまでも「比較的」ではあるが、No.1528 から No. 1591 は食現象である可能性の方が大きいと考えて、時刻を求めることにする。

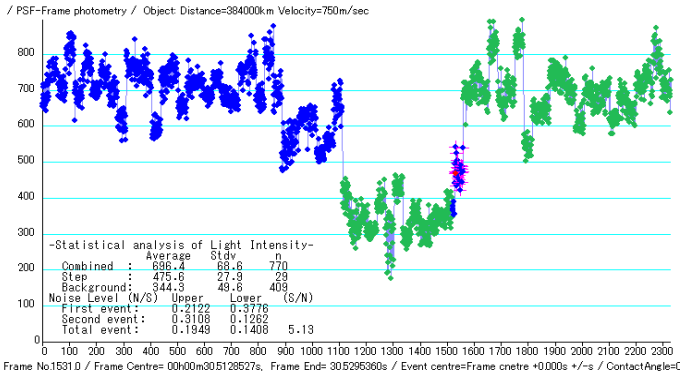


図１１

図１１でマゼンタの＋で表した点は、上記の No.1528 から No. 1591 の蓄積である。これを「中間値の蓄積」と呼ぶことにし、その光量と潜入時の光量、および復光後の光量の平均値をそれぞれ求めると、

減光中　　：　344.3
中間値の蓄積：　475.6
復光後　　：　696.4

となる。この中間値の高さを求めると、

(475.6-344.3) ÷ (696.4-344.3) =0.373

となる。したがって、蓄積期間を 100 としたとき、その 37%前に復光が始まったと考えることができる。時間に直すと 32 × 0.37 ÷ 29.97 = 0.395 秒になり、オレンジ点(No. 1591 フレーム)の露光終了の時刻より、この時間だけ引き算すれば現象時刻が求まる。ただし、表 1 より、蓄積カメラの補正値である -1.076 秒を加えなければならない。これより、

現象時刻 = 10h55m55.95s – 0.395s – 1.076s = 10h55m54.479s ＝ 10h55m54.48s

のように求めることができる。

光量が階段状に変化する場合は、
階段のステップ（中間値）の蓄積の最後のフレームに表示された遅い方の時刻（蓄積の終了時刻）Te 、掩蔽されていないときの光量 La , 中間値の光量 Lm, 減光時の光量 Lo , フレーム露光時間 E, カメラの遅延補正値 D(負の数)とすると、現象時刻 T は、

減光時　T ＝ Te – {1 - (Lm-Lo) / (La – Lo)} * E + D
復光時　T ＝ Te – (Lm-Lo) / (La – Lo) * E + D

のように求めることができる。

４．本稿やLimovieはなぜ「連続する同一画像の最初のフレームの時刻値と、蓄積露光の中心時刻との差」を補正値として用いないのか

「連続する同一画像の最初のフレームの時刻値と、蓄積露光の中心時刻との差」
を補正値に用いる、ということは、次のような値を得ることができる、ということである。

「一定の蓄積表示が終わり、新しい画面に切り替わった最初のフレームを表示させる。そのフレームの数値のうち、早い方の数値を読み、その値に補正値（マイナスの値）を加えると、そのフレームの画像が示している蓄積の露光中央時刻が求まる」

これを使って掩蔽現象の起きた時刻を求める場合、そこには次のような考え方が根底になければならない。

中間値なり見えなくなるなりしたフレームがあったとき、それはそのフレームのどこで起きたかは（必ずしも）明確でない。しかし、そのフレーム内のどこかで起きたはずである。したがって、その蓄積の中央時刻を現象時刻として扱い、可能性として蓄積開始から始まり蓄積終了までの間が誤差の範囲である。

実は、この考え方は、蓄積のないビデオの画面目視の観測で慣例的に行われてきたことそのものである。

NTSCは約30分の1秒、という短い時間の露光のフレームの連続でビデオが構成されている。そこで、「フレーム露光の中央時刻をそのフレームを代表する時刻、すなわち現象が起きた時刻」として扱い、誤差として蓄積期間に当たる時間を数値として与える、という考え方である。これにしたがって、従来は、たとえば　12h34m56.78s +/- 0.04s　のように、全て同じ誤差値0.04sで誤差が表現されることが多かった。また時刻値は、現象（減光・増光を示すフレーム）に表示される2つの時刻値のうち、早い方、つまり、そのフレームの露光の中央時刻が報告されたのである。

しかし、一見確実に思われるこの方法には、問題点がある。それは、**中間値の見られない**、急に光量が変化したような場合について顕著に表れる。（実際に観測してみると、中間値が明瞭に見られない現象の方がむしろ多いのではないだろうか。）中間値のない光量変化、すなわち、明るかったフレームから、一気に暗いフレームに転じたということは、**フレームとフレームの境目で減光が起きた**ことを示している。（回折により、減光には少し時間がかかるが、多くの場合、フレーム露光長に対して短い時間と考えることができるので、ここでは回折の影響がないとして説明をおこなう。）

このような場合、現象の時刻は、どのフレームのどの時刻を読んで求めたらよいだろうか。それは、暗くなったフレームの露光開始の時刻であるはずである。ところが、KIWI-OSD以外のインサータには、フレーム開始の時刻を示す時刻値は表示されず、露光中央時刻と露光終了時刻が示されるだけである。そこで、暗くなるひとつ手前のフレームの終了時刻（2つ表示されている時刻値のうちの遅い方の時刻値）を読むのである。フレームの露光終了時刻=次のフレームの露光開始時刻（切り替えはマイクロ秒のオーダーで行われる）であるから、そのようにしてフレームの露光開始の時刻を求めるとよい。

このことを理解した上で、上記の「フレームの露光中央時刻を現象時刻の報告値とする」という考え方をふりかえると、報告値は2分の1フレームの誤差を「確実に」持っていることになる。測定に関する一般論としては、「測定値は最確値」であるべきである。予め2分の1フレームの誤差を「確実に持っている」ような現象時刻の値は、得られるべき最確値であるはずがない。

この問題は、蓄積ビデオの場合更に深刻になる。

直前の蓄積の光量がほぼ100%で、そのフレームからの蓄積の光量がほぼゼロだった場合、現象は蓄積の境目から「本稿の補正値のように**ほぼ蓄積数分**」だけ前に起きているはずである。しかし、**「連続する同一画像の最初のフレームの時刻値と、蓄積露光の中心時刻との差」**の補正値（**蓄積数のほぼ半分しかない！**）を引き算したら、それはその**蓄積の露光中央**を求めることになってしまう。もし本当にそのタイミングで潜入が起きたのなら、その蓄積は立派な中間値（50%）を持っていることだろう。これでは想定したシチュエーションとは大きく異なってしまう。そして少なくとも蓄積の長さの半分の「**誤解による人為誤差**」が星食観測に恒常的に入り込むことになってしまう。32フレーム蓄積ならば0.5秒である。

また、誤りのもう一点は、上記とも関連するが、掩蔽現象がフレーム露光中のどこで起きたかわからない、という前提である。これは、蓄積していないビデオを使った一般の星食について、かなり以前からあった考え方である。しかし、繰り返すが、**フレームのほぼ真ん中で潜入が起これば、必ず中間値を持つフレームができる**。どこで起きたかは計算または推定可能である。ノイズが大きくて、現象がどこで起きたか精密には解らないとしても、その「解らない程度」は、ノイズによる振幅でやはり推定可能である。上記にも述べたように、従来、WAT100N を用いて撮影したビデオについて、フレームの露光の長さ（約 1/30 秒）を誤差として与えることについて合理的な説明をおこなってこなかったことは、それが「安全」であることは確かではあるものの、こういった「誤解」の温床となっている、という意味で、**現象のとらえ方として**極めて好ましくないことである、というのが筆者の意見である。

５．Limovie のフィッティング機能で現象時刻を求める場合

※　この項は、最新の Limovie を用いての解析法に合わせて、全面的に改定した。（May 15, 2021）

星食現象における光量変化は、パルス波のように瞬時に星が消えたり現れたりするのではなく、フレネル回折の曲線を描く。一般的にはその変化速度が大きいことから、瞬時であるように感じられることが多いだけである。ここでは、前項で述べた「中間値による現象時刻の推定」を一歩進めて、フレネル回折とのフィッティングにより時刻を求める方法について考察する。また、それを元に作製された Limovie の Asteroid timing guide 機能の使い方についても述べる。

（１） 基本的な考え方

Asteroid timing guide の基本的な考え方は、月による恒星食におけるフレーム単位のフィッティングと同じである。フレーム単位のフィッティングでは、フレネル回折のカーブをフレームに対して星食現象の起きるタイミングを様々に変えて数値積分をおこなうことで、フレーム毎の光量変化のモデルを作る。それが最も良く観測から得られた「フレーム毎の」光量の変化と合うタイミングを現象時刻とするのである。

小惑星による恒星食でも同様にフィッティングができるはずであるが、蓄積露光がなされている場合には適用できない。その光量変化は階段状になるが、当然のことながら「ほぼ瞬間的」であるフレネル回折の変化は、実際の観測の変化の最も大きいところ、すなわちこの場合には蓄積と蓄積の境目にフィットされてしまう。中間値を持つ蓄積があったときは、その中間値蓄積の前後の境目のどちらかにフィットするであろう。真の時刻が蓄積と蓄積の境目だけに存在するわけではないことは当然であるから、**蓄積露光のなされたビデオをそのままの形でフィッティングを行ってはならない。**

蓄積ビデオから得られる画像は、一つの蓄積について一つである。ただ、ビデオであるから、蓄積数分のフレームが出力されているだけで、基本的にはそれらのデータは同じ値である。したがって、測定も各蓄積について一回なされればよく、フィッティングも「蓄積につき一回」なされればそれでよい。これより、フレーム単位ではなく蓄積単位でフィッティング処理をおこなう必要があることがわかる。Limovie の Asteroid timing guide は、この「蓄積毎に一つのデータにまとめる」作業を主としておこなう。またそれに先立ち、後ほどフィッティングに備えて、必要な諸パラメータを入力・計算するようになっている。

（２）Asteroid Timing Guide の使い方　（蓄積カメラ使用の場合）

Limovie 0.9.99.5A シリーズ搭載の機能について、以下に操作概要と、実際の操作について示す。

1．　測光を行う。（できるだけ比較星の測光も行うようにする。比較星は主星と同程度あるいは明るい星であることが望ましい。）

2．現象について記載された OCCElmnt ファイルを用意する。（詳細は OCCULT4 のマニュアル参照）

3．Asteroid Timing Guide ボタンをクリック

現れたウインドウで、OCCElmnt ファイルを読み込み、該当の現象をクリック。

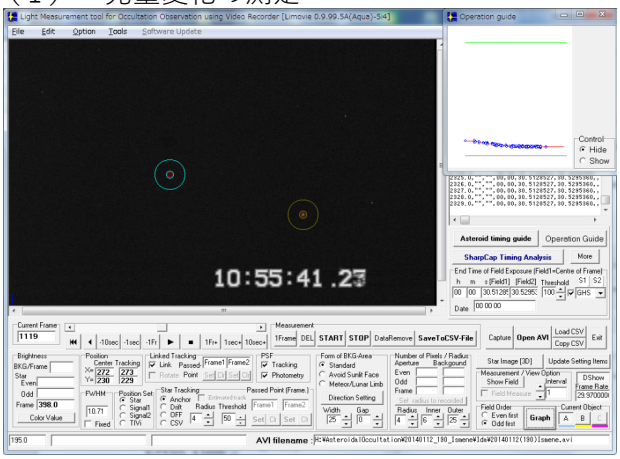
※　これで、回折シミュレーションを作成するパラメーターも自動的にセットされる。

４．観測者名とカメラを入力
５．自動的に読み込まれていなければ、画面を見て、時刻を入力。（ビデオのどの部分の時刻でもよい）
６．7. Processing for Integrated Analog video ボタンをクリックし
７．7-1 Set integrated frames　コンボボックスで蓄積フレーム数（この場合は 32）をセットして、
８．7-2 Find the first frames for measurement　ボタンをクリック
９．蓄積のはじめが 1 となっているかを確認
１０．7-4 Make a measurement for integrate video　ボタンをクリック
１１．これ以降は、蓄積なしの場合と同様に　回折シミュレーションとのフィッティングをおこなう。

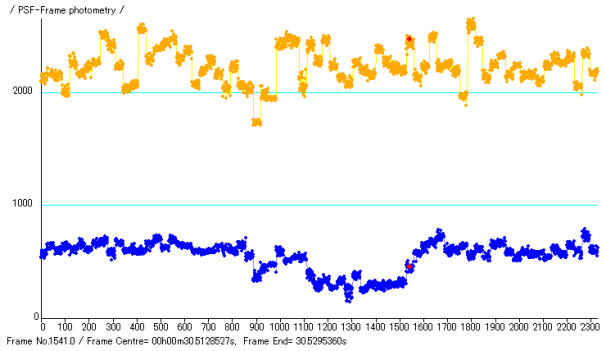
（3）解析例

以下に、第 2 項と第 3 項に示した　(190)Ismene による恒星食（2014 年 1 月 12 日 井田氏観測）を例に、具体的な解析操作を示す。また、閲覧時の煩雑さを避けるために、図番号は振らないこととする。

（1）　光量変化の測定

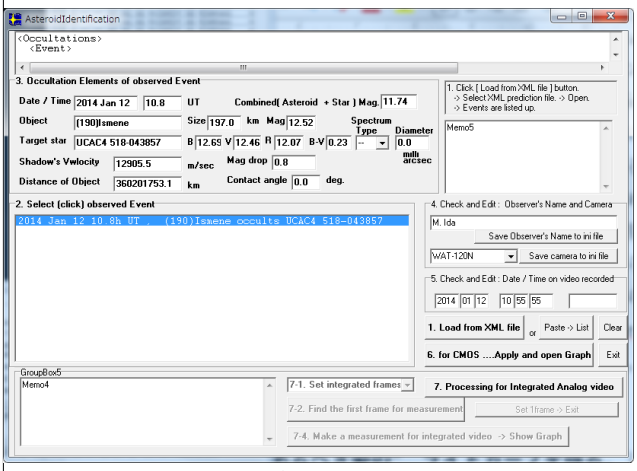


（2）　測光結果



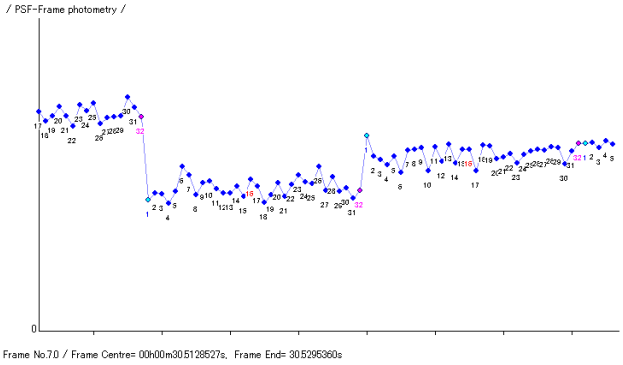
青：　対象星　　黄色：比較星

(3)　Asteroid Timing Guide



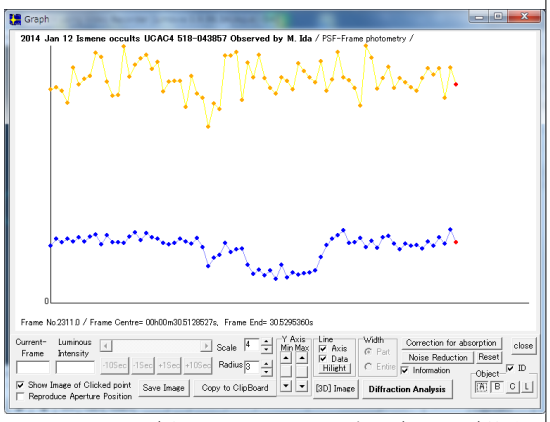
OCCelmnt ファイルを読み込んだところ。
影の速度や小惑星までの距離は自動的に取得される。
この後、 7. Processing for Integrated Analog video ボタンをクリックし、 7-1 Set integrated frames　コンボボックスで蓄積フレーム数（この場合は 32）をセットして、
7-2 Find the first frames for measurement
と操作。

（4）　7-2 Find the first frames for measurement の結果



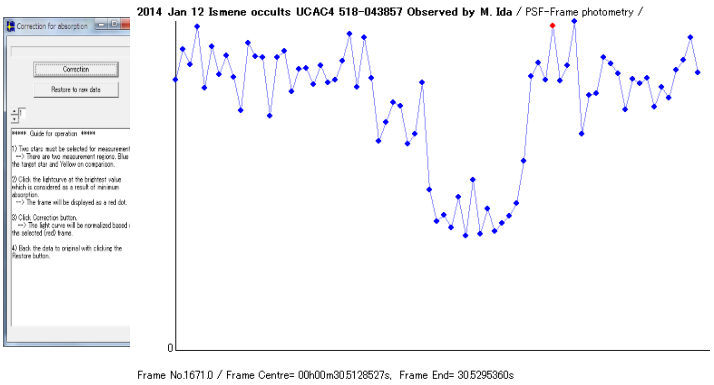
ひとつの蓄積が 1 で始まり 32 で終わることから、適切な蓄積の区切りが見つけられたことを示している。
この後、
7-4 Make a measurement for integrate video
をクリックすると、この 32 個のフレームの値が平均されて 1 つの測点（蓄積時間を露光時間とする 1 つのフレームとして扱われる）にまとめられ、後のフィッティング処理に用いられていく。

（５）　7-4 Make a measurement for integrate video の結果



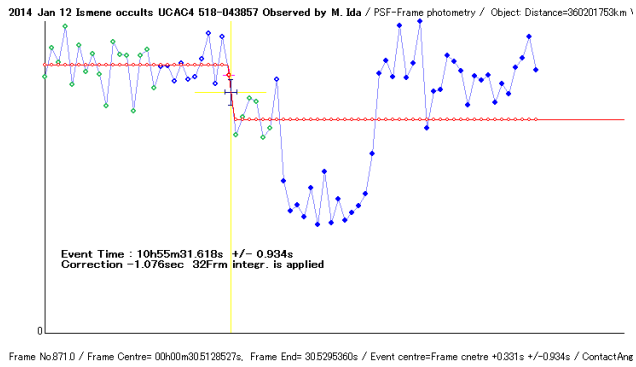
Object の A（青で示された対象星） B（黄色で示された比較星）の両方を表示させたところ。両者とも蓄積毎に１つの点としてまとめられた。

（６）　Correction for Absorption の結果

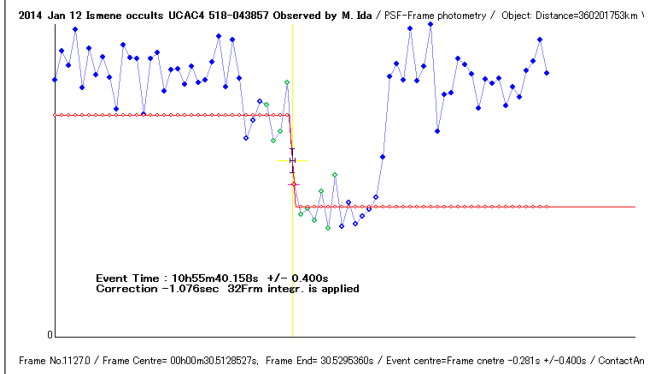


グラフウインドウのコントロール部右側にある Correction for Absorption ボタンをクリックし、現れたウインドウで Correction ボタンをクリックすると、薄雲などによる吸光が補正されたグラフを得ることができる。補正が完全でない可能性もあるが、潜入時に段階的減光も見られることから、重星の現象を示している可能性もあると考えられる。

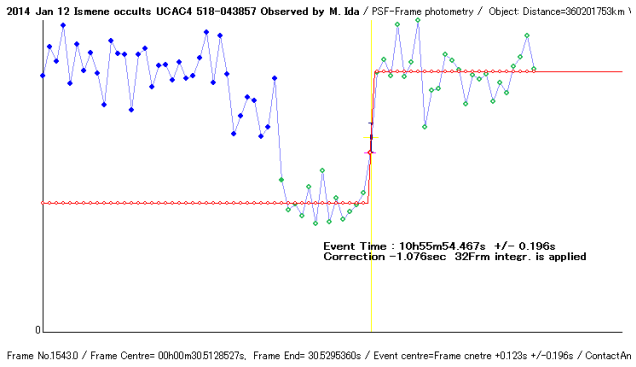
（７）　重星と思われる減光の時刻の測定



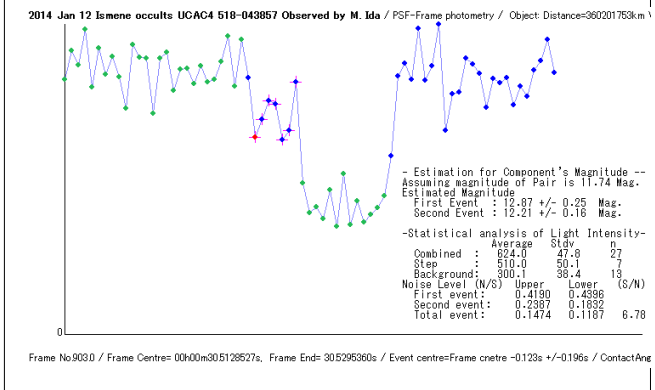
（８）　主たる減光の時刻の測定



（９）　出現の時刻の測定



（１０）　重星の等級の推定



このようにして求められた時刻値を、第３項でのフレーム目視で求めた時刻値と比較してみよう。

	フレーム目視	回折シミュレーションとのフィット
重星の可能性		10h55m31.618s +/- 0.934s
主たる潜入	10h55m39.924s	10h55m40.158s +/- 0.400s
出　　現	10h55m54.479s	10h55m54.467s +/- 0.196s

この比較から、両者の差はわずかである。フィッティングの方が正確である、という保証はないが、想定誤差 1σ の値が付けられることで、得られた時刻の精度を表現できるという利点がある。

６．まとめ

（１）本稿および Limovie で採用している時刻補正値は、露光と同位相の出力の位置（フレーム）間の時間差を示すものであり、フレーム目視および Limovie のフィッティングの双方に対し、様々な現象について柔軟かつ有効に応用することができる。

（２）フレーム（蓄積）の光量は、重星によらない瞬時の増減光の現象でも中間値を持つことがある。その場合は、中間値の値を比例配分することで、フレーム露光時間（蓄積時間）よりも小さな時間分解能で現象時刻を求めることができる。

（３）Limovie の Asteroid Timing Guide 機能を使うことにより、蓄積分の複数のフレームを１つにまとめて、フィッティングにより現象時刻を求めることができる。

７．おわりに

「Limovie に表示される補正値が、一般的に流布している補正値（表１，２の右端に示された補正値）と異なるのはなぜか？」　本稿の草案を書いた頃から今日に至るまで、このような質問をたいへん多くの方々からいただいた。しかし、それに答えるためには、本稿を見ればご理解いただけると思うが、多くの言葉を使い、ややこしいことがらを説明しなければならない。ひととおり書き上げたものの、皆様に理解していただくために充分ではなかった上、それから多忙が重なったことでそのまま凍結された状態になってしまった。また、星食観測ハンドブック 2014 までは本稿に述べた「好ましい補正値」が掲載されていたが、本稿の公開がないままでは皆様への説明ができないことから、それより後の巻では「一般的に流布している補正値」を掲載することにし、補正の基準フレームについては曖昧な記述にとどめていたのである。

ただし、この「一般的に流布している補正値」は、厳密には補正値とは呼べないものであり、単にフレームの露光中央時刻を求めるための方法に過ぎないことは第４項に述べたとおりである。そこで、2021 年の初頭から、説明用図版を作成し直してより直感的に理解しやすいものとし、Limovie の最新版の機能での説明に書き換えるなど、細部にわたっての改訂を試みてきた。まだ充分であるとは思えないが、補正値についての解説を望む声もお寄せいただいたことから、不完全を承知で公開することとしたものである。急いで仕上げたものであるので、拙稿には筆者の誤りや勘違いも多数あることと思われる。読者諸氏のご教示をいただければ幸いである。

参考文献

１．ビデオ画像用光量測定ソフトウエア Limovie の開発と星食観測への応用 , 宮下和久ほか, 国立天文台報 第９巻, 1－26（2006）

２．Video exposure time analysis from recordings with video time insertion, Gerhard Dangl, November 2013, http://www.dangl.at/ausruest/vid_tim/vid_tim1.htm

３．星食観測ハンドブック 2014, 星食観測日本地域コーディネーター編 http://astro-limovie.info/jclo/doccuments/Handbook/index.html