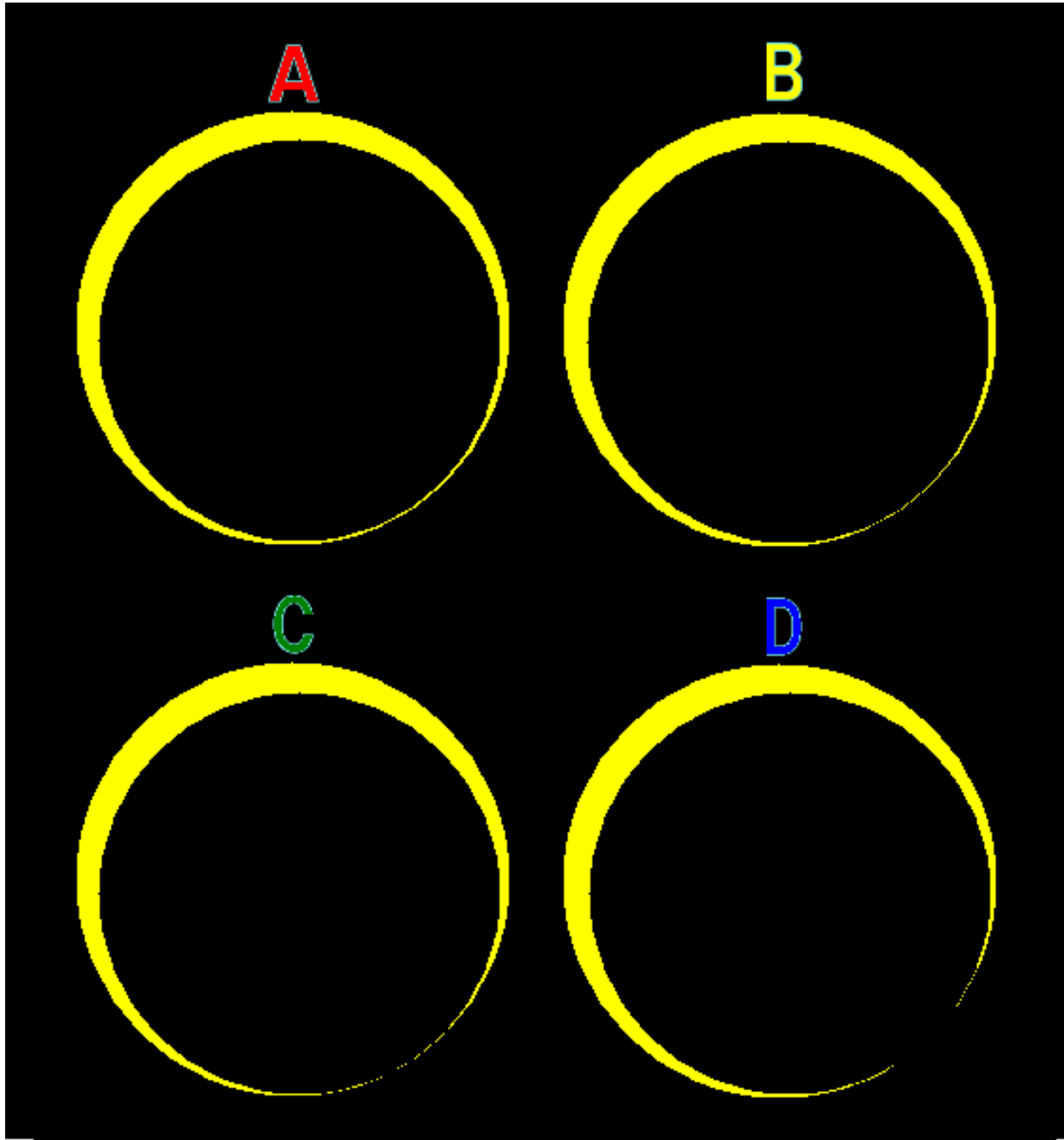


# ベイリービーズで 太陽半径を測る



金環日食限界線プロジェクト  
ベイリービーズ拡大観測チーム  
長野県塩尻市立丘中学校 宮下和久

# 見え方は A~D のどれに近い？



A 金環食

つながっている

B 金環食

ぎりぎりつながっている

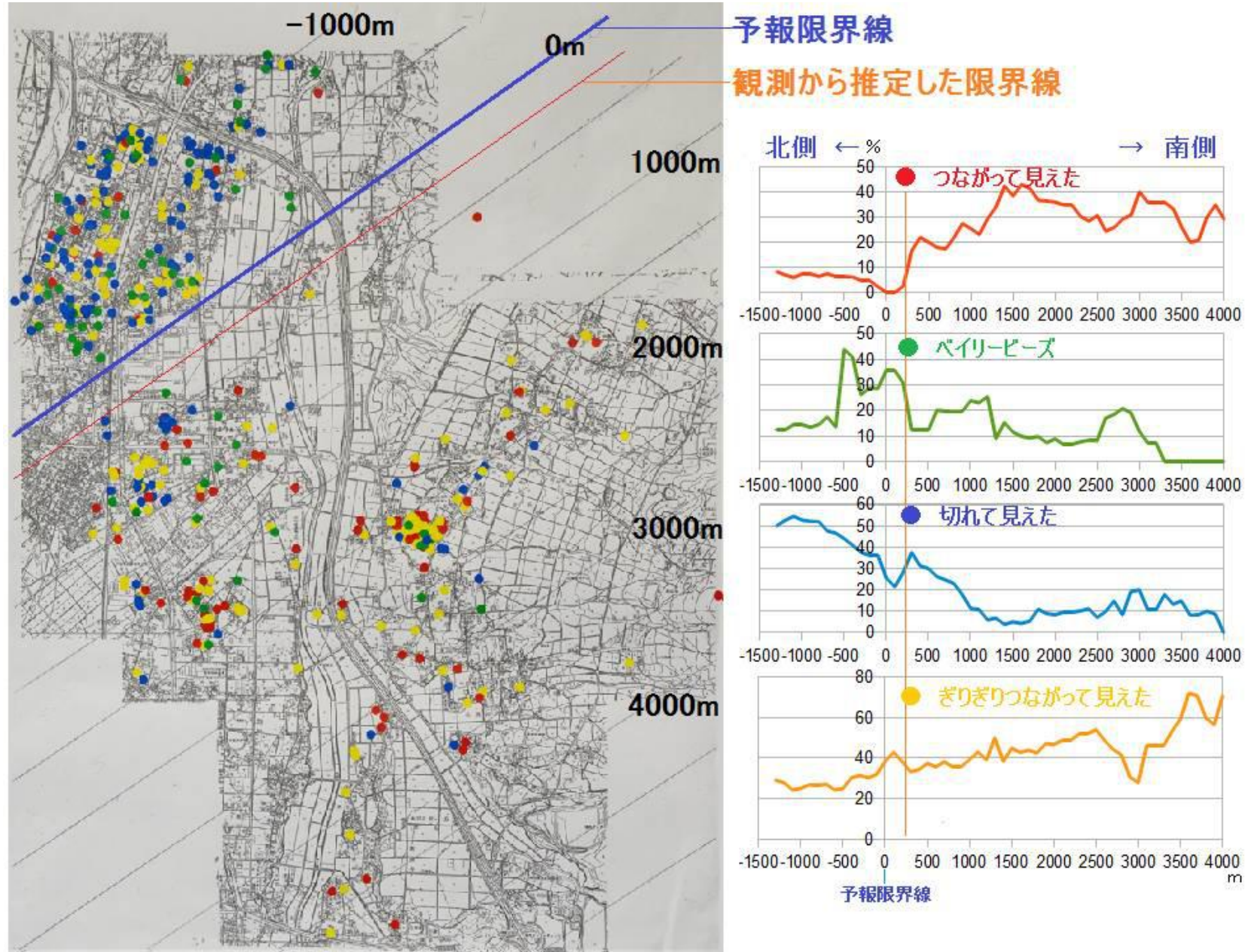
C ベイリービーズ

点々に見える

D 部分食

切れている

# 丘中学校の日食めがねによる観測





# 長で用いた観測装置

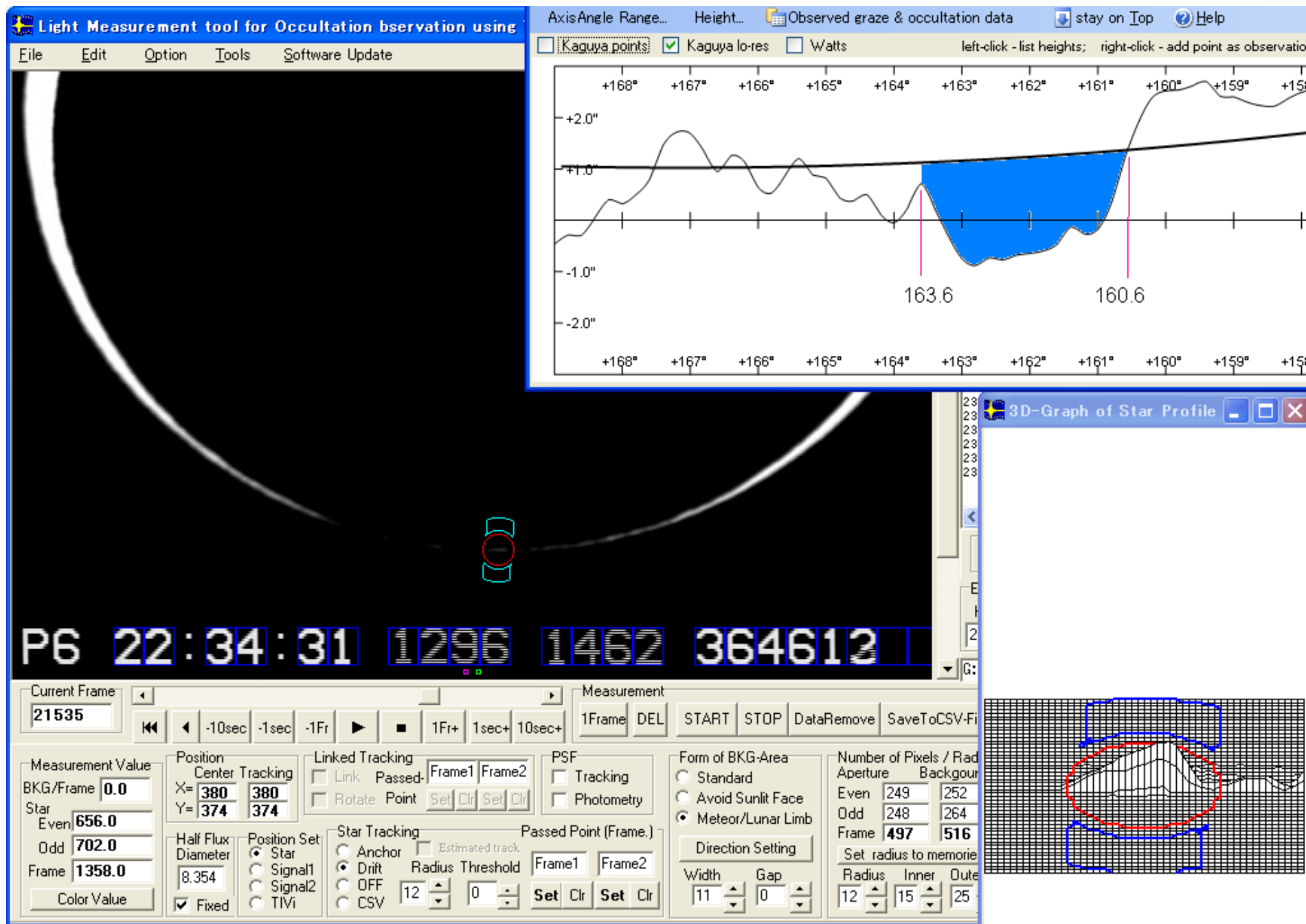






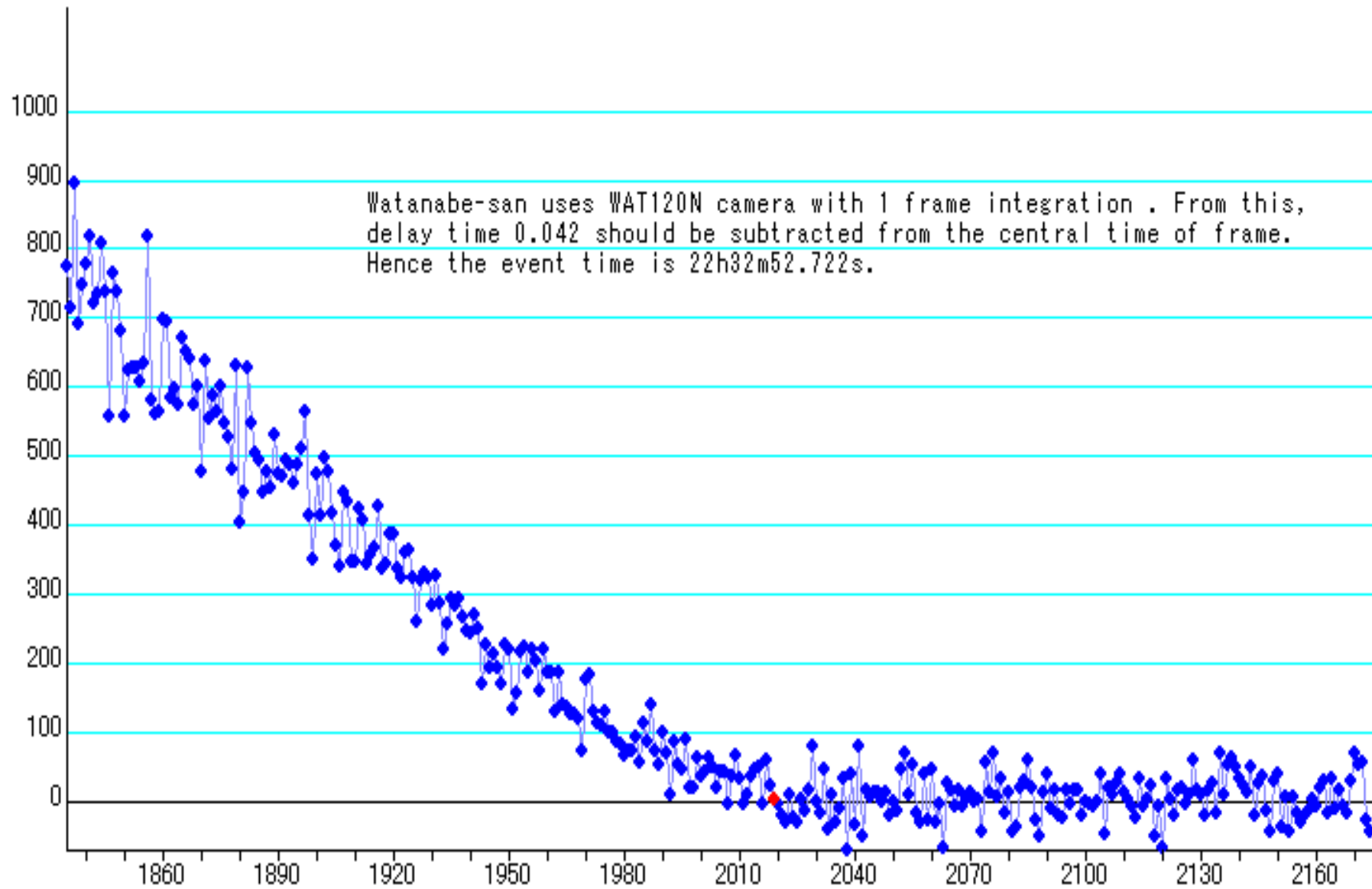


# 全国15カ所でビデオ撮影が行われた



# ビーズの光量変化 = 日食曲線

/ PSF-Frame photometry /



Frame No.2019 / Frame Centre= 22h32m52.764s, Frame End= 52.781s

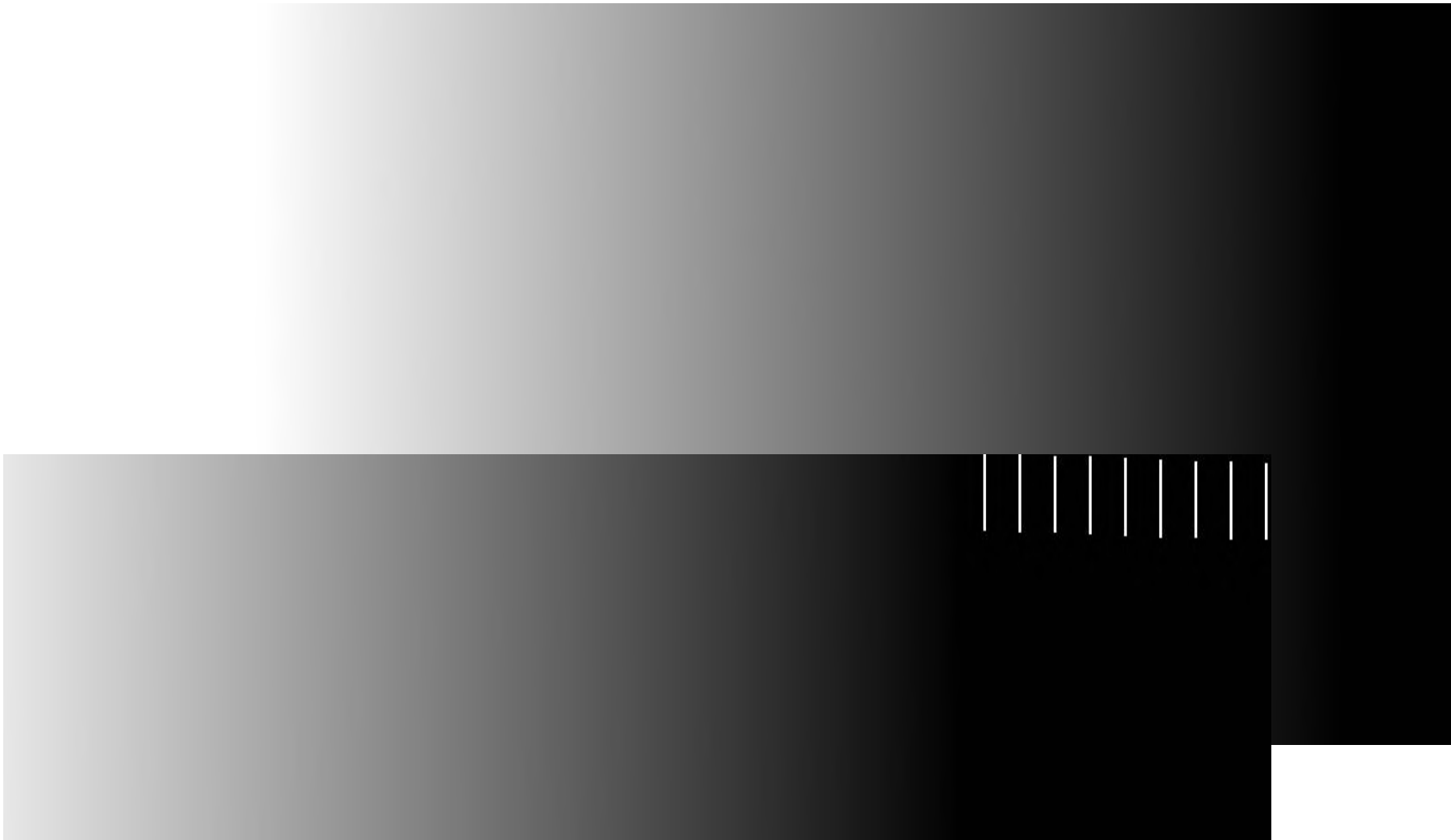


グラデーション  
のある物体は、同じ  
グラデーション  
を持った物差しで測  
ればよい。

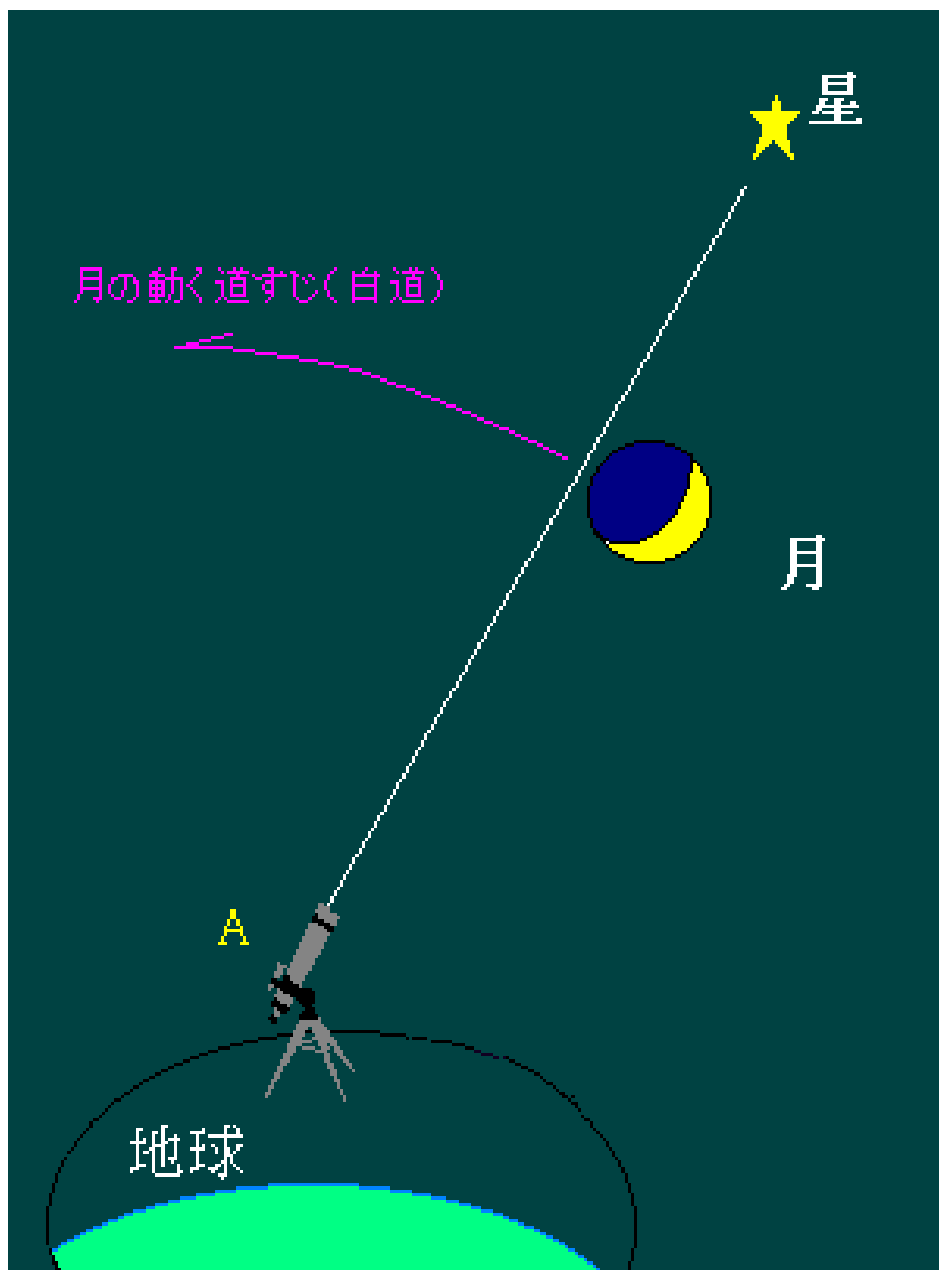


# 天体の食の場合・・・

時刻 → 相対位置 → 大きさ

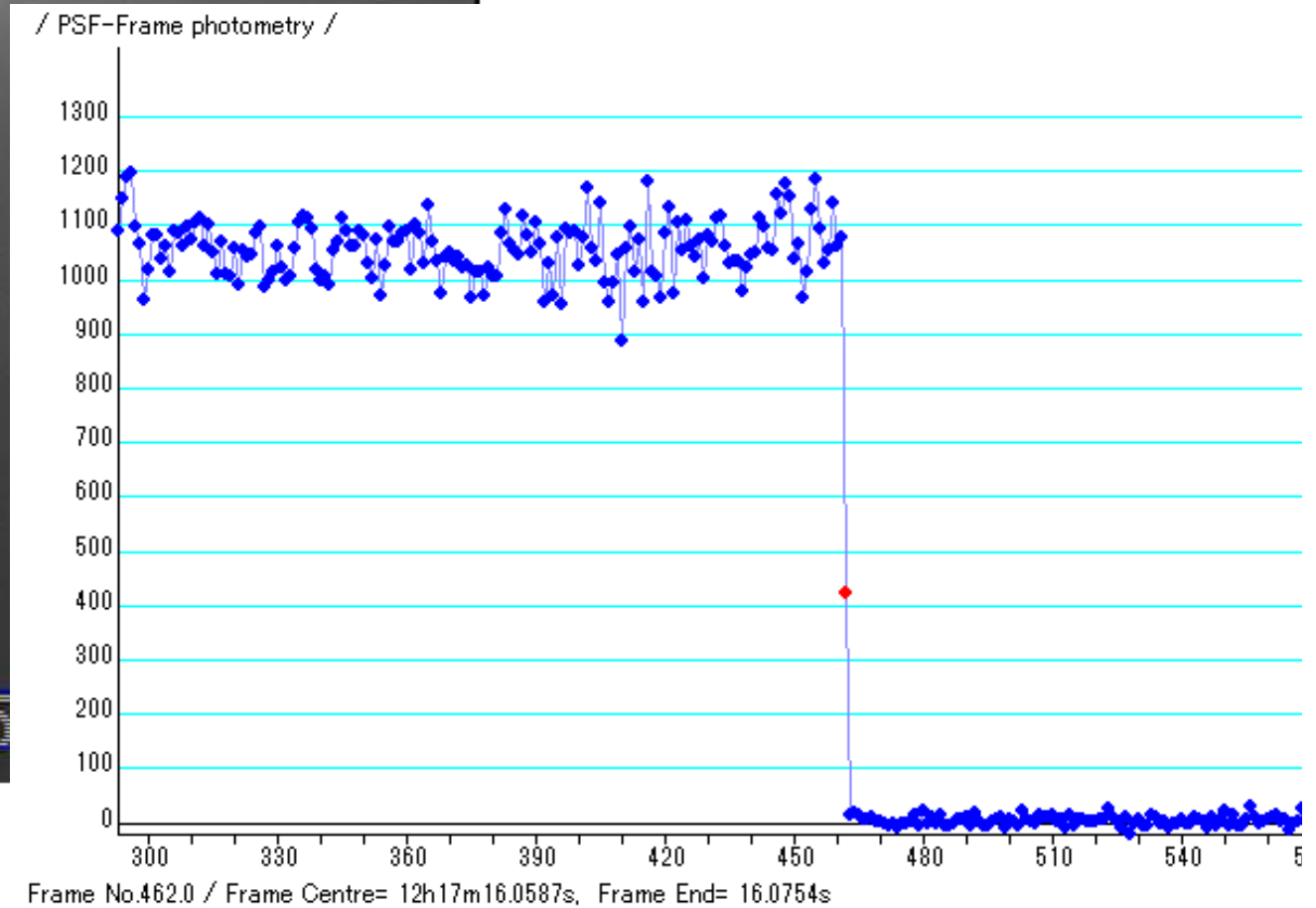


# 星食の現象時刻と時計





# 月による恒星食・・・ほぼ一瞬で消える

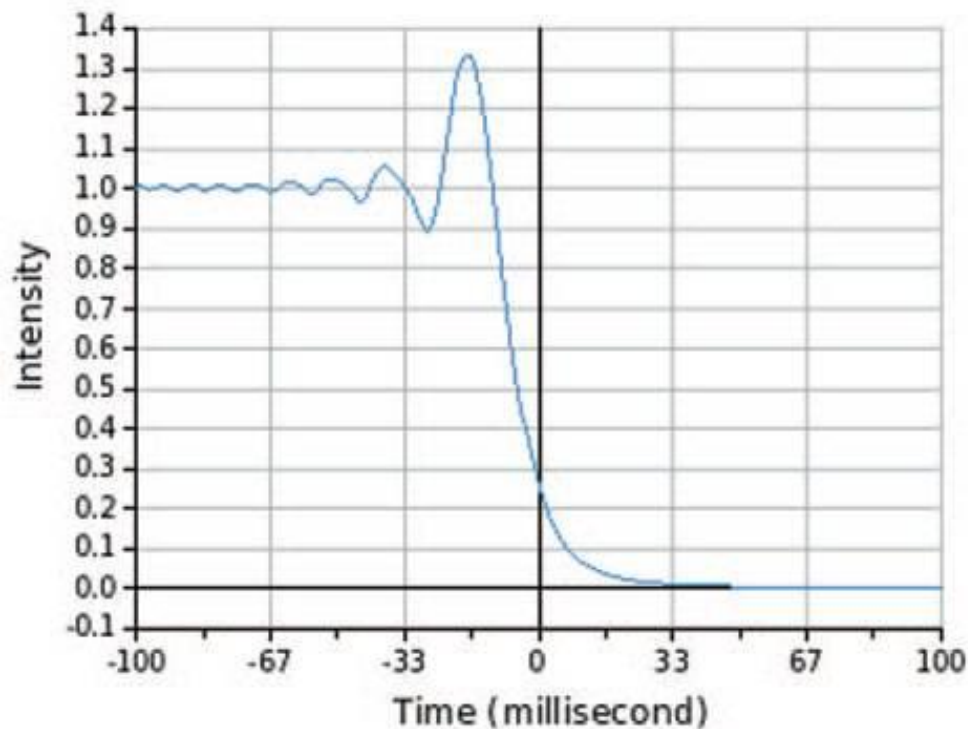


# 変化がゆっくりな場合は

物理モデルと比較すれば、  
正確な現象時刻が求まる。

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

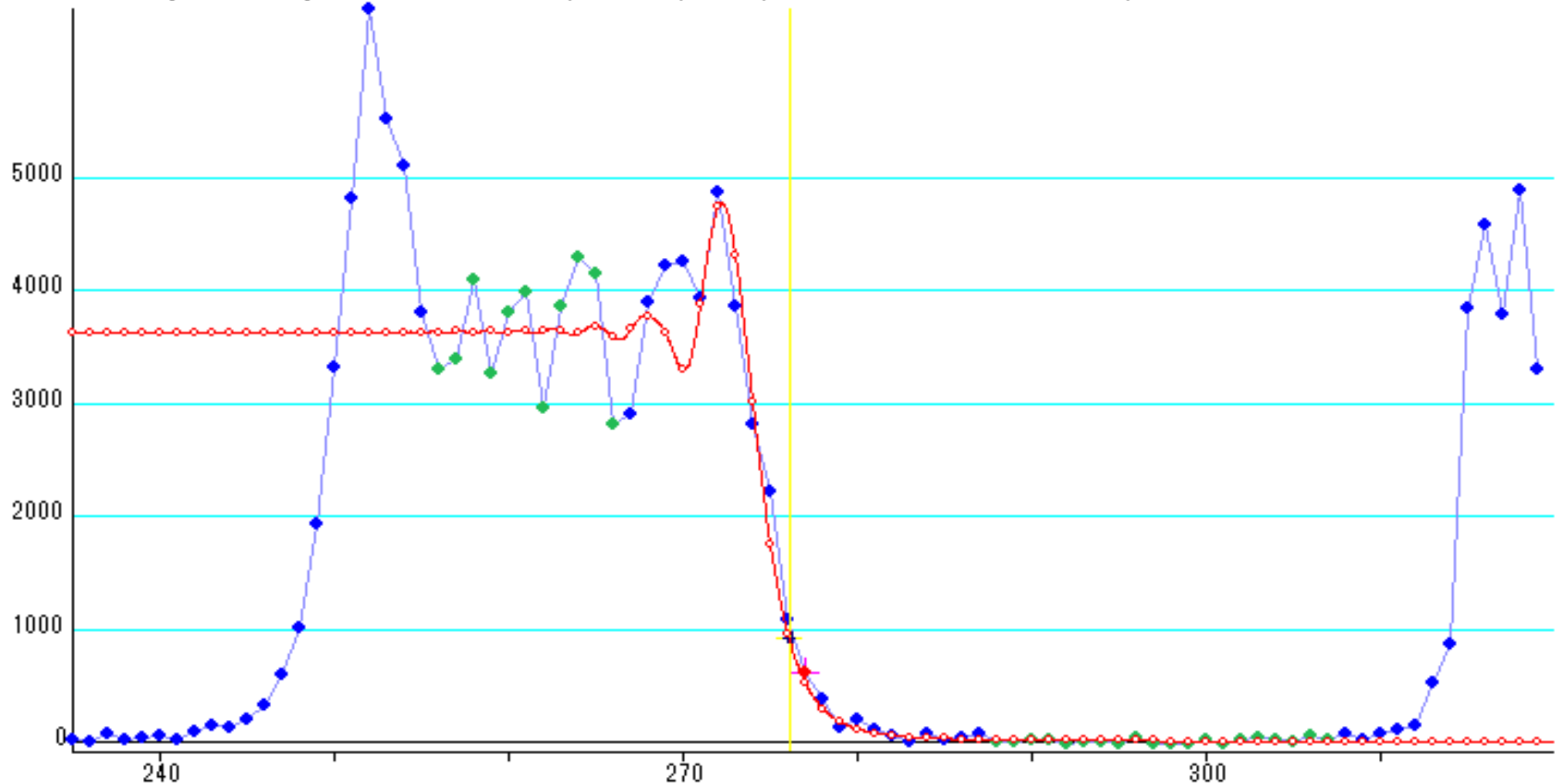
Shadow Velocity=700m/s , Distance=384400km



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

# モデルと観測の光量変化を比べて 現象時刻を精密に求める

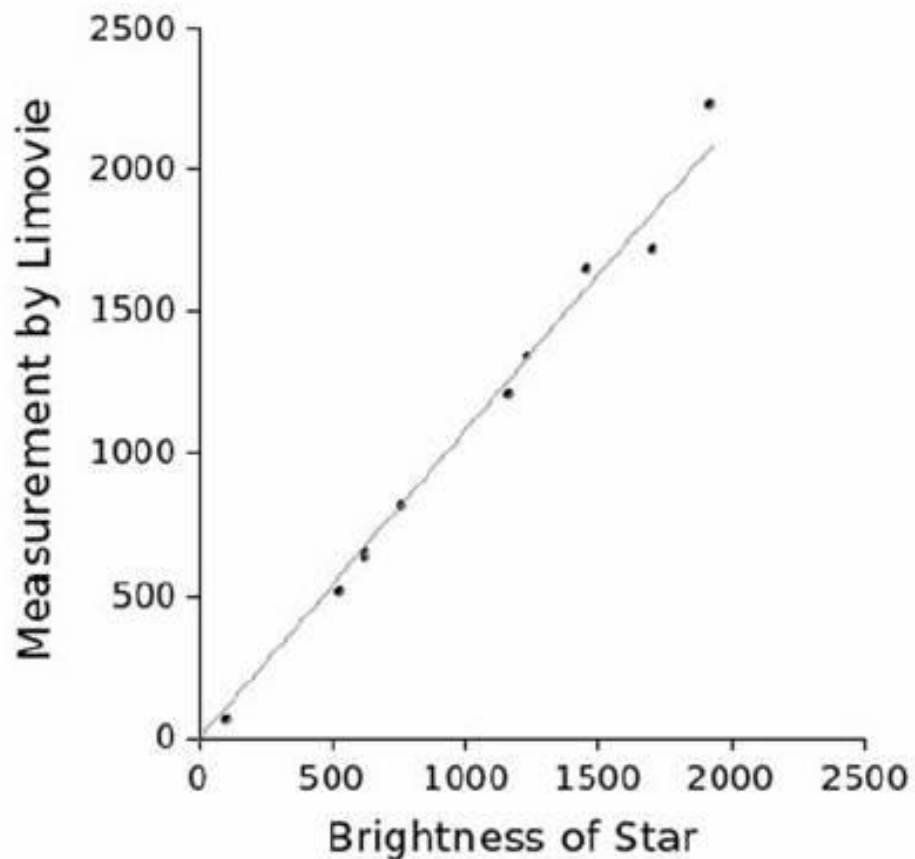
: 2010 January 1 ; K. Miyashita / PSF-Frame photometry / Object: Distance=384401km Velocity=700m/sec



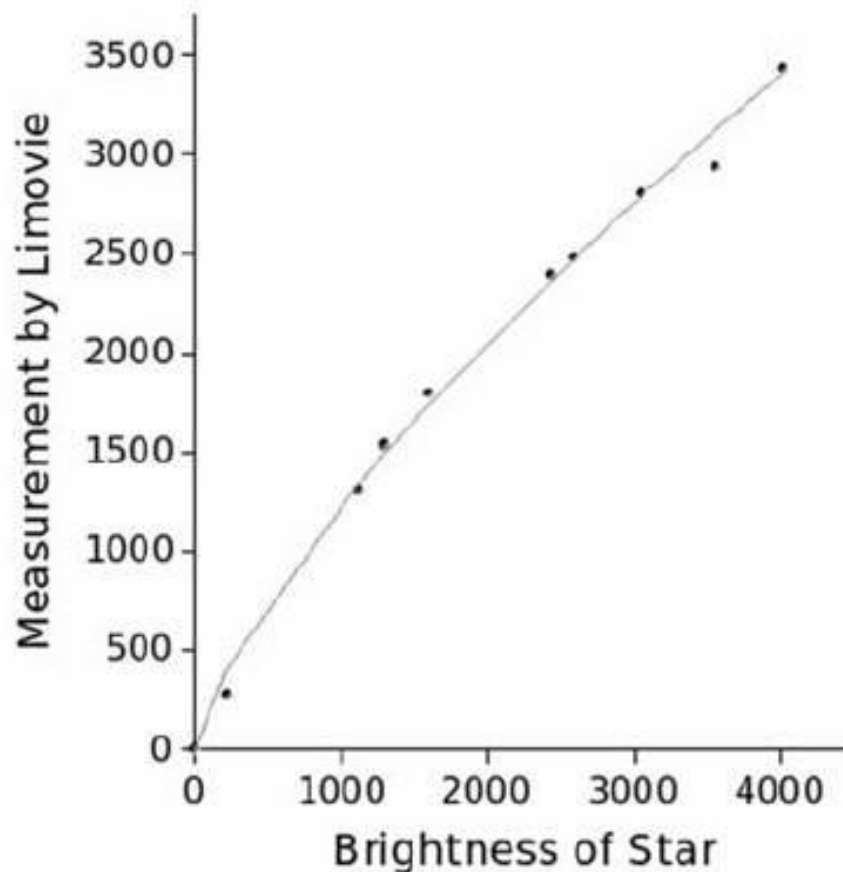
Frame No.277.0 / Event centre=Frame centre -0.031s +/-0.004s / ContactAngle=82.0deg



# 測定器としてのビデオカメラとレコーダ



$\gamma$  補正スイッチ：OFF



$\gamma$  補正スイッチ：High

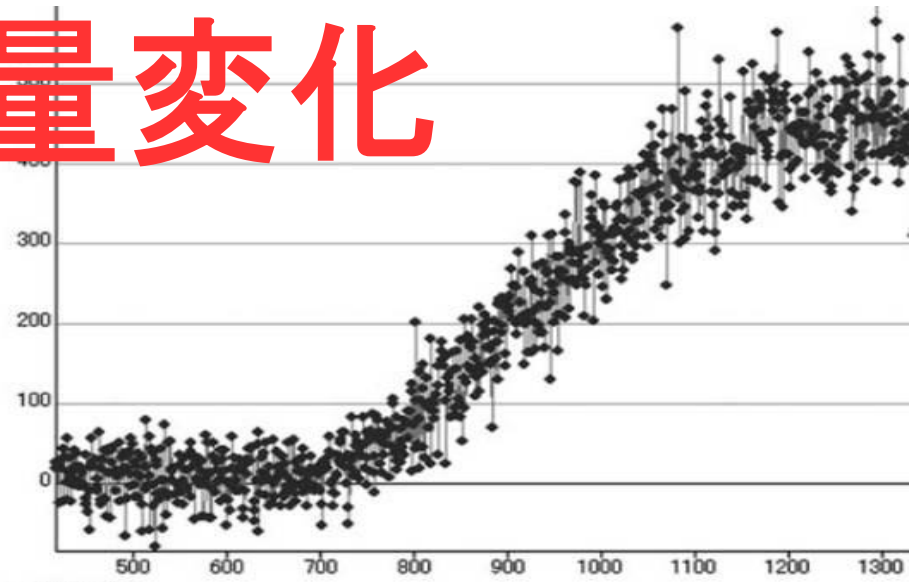
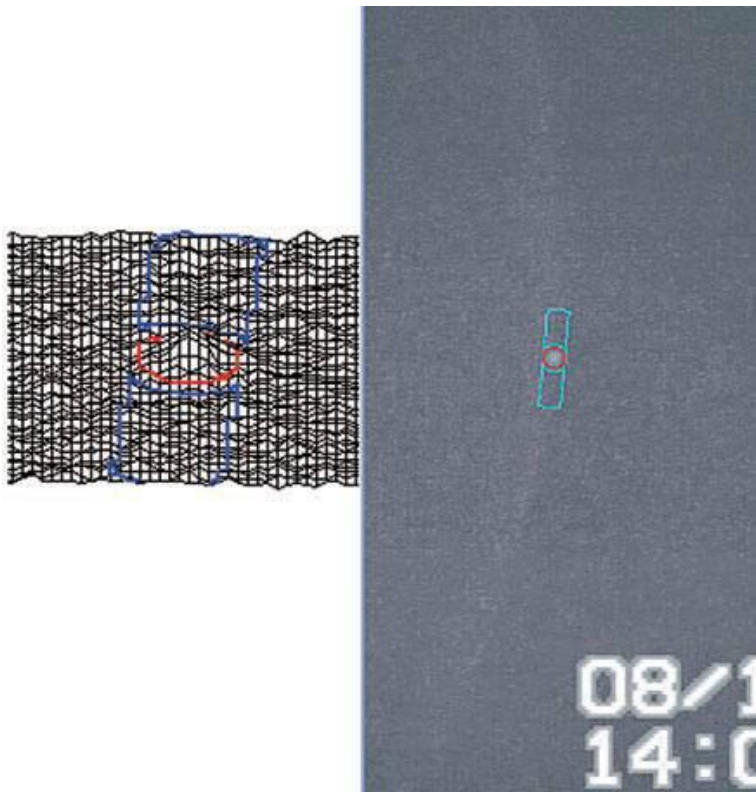
面積のある天体では  
場所により輝度が異なる

+

潜入・出現に時間がかかる



ゆっくりで複雑な  
光量変化



# 小惑星表面の輝度分布

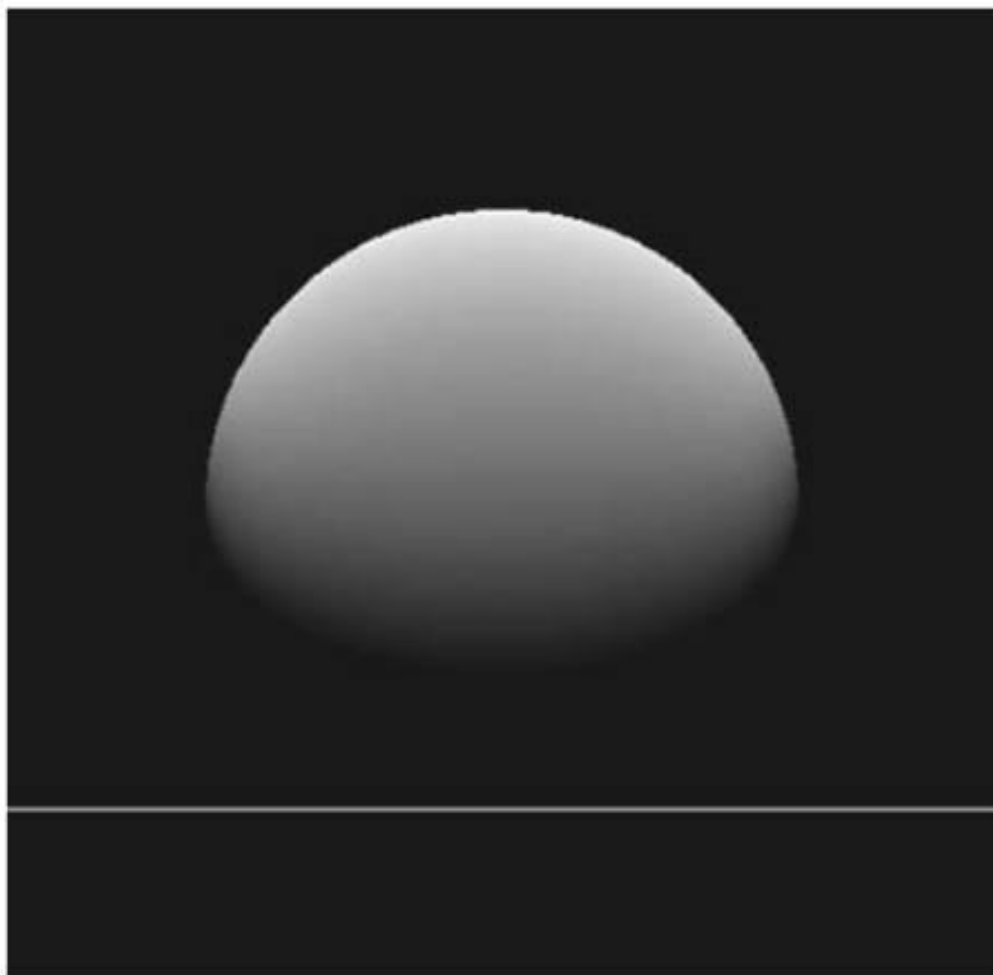


図5 Hapke の関数より計算した水星表面の輝度分布

## Hapkeの関数

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

$R$  : 反射率 (bidirectional reflectance)

$g$  : 位相角 (phase angle)

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

$\mu$  :  $\cos e$ ,  $e$  は反射角

$\mu_0$  :  $\cos i$ ,  $i$  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)

$H(\mu), H(\mu_0)$  : 複数の散乱の効果

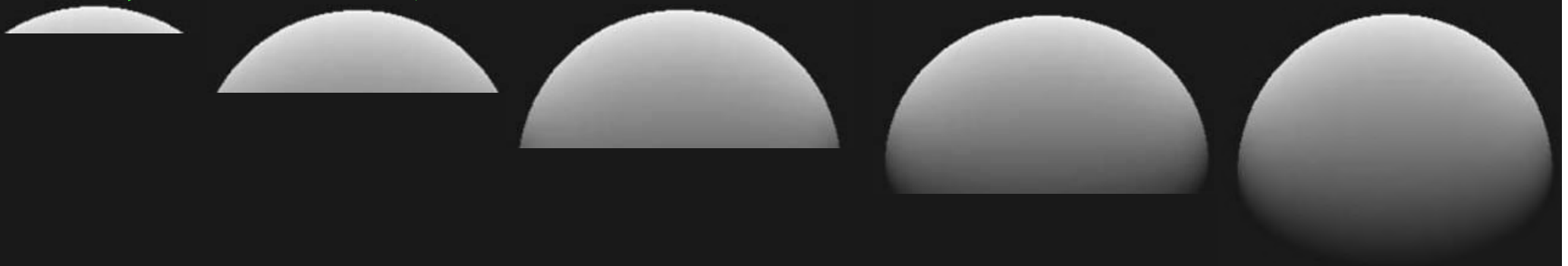
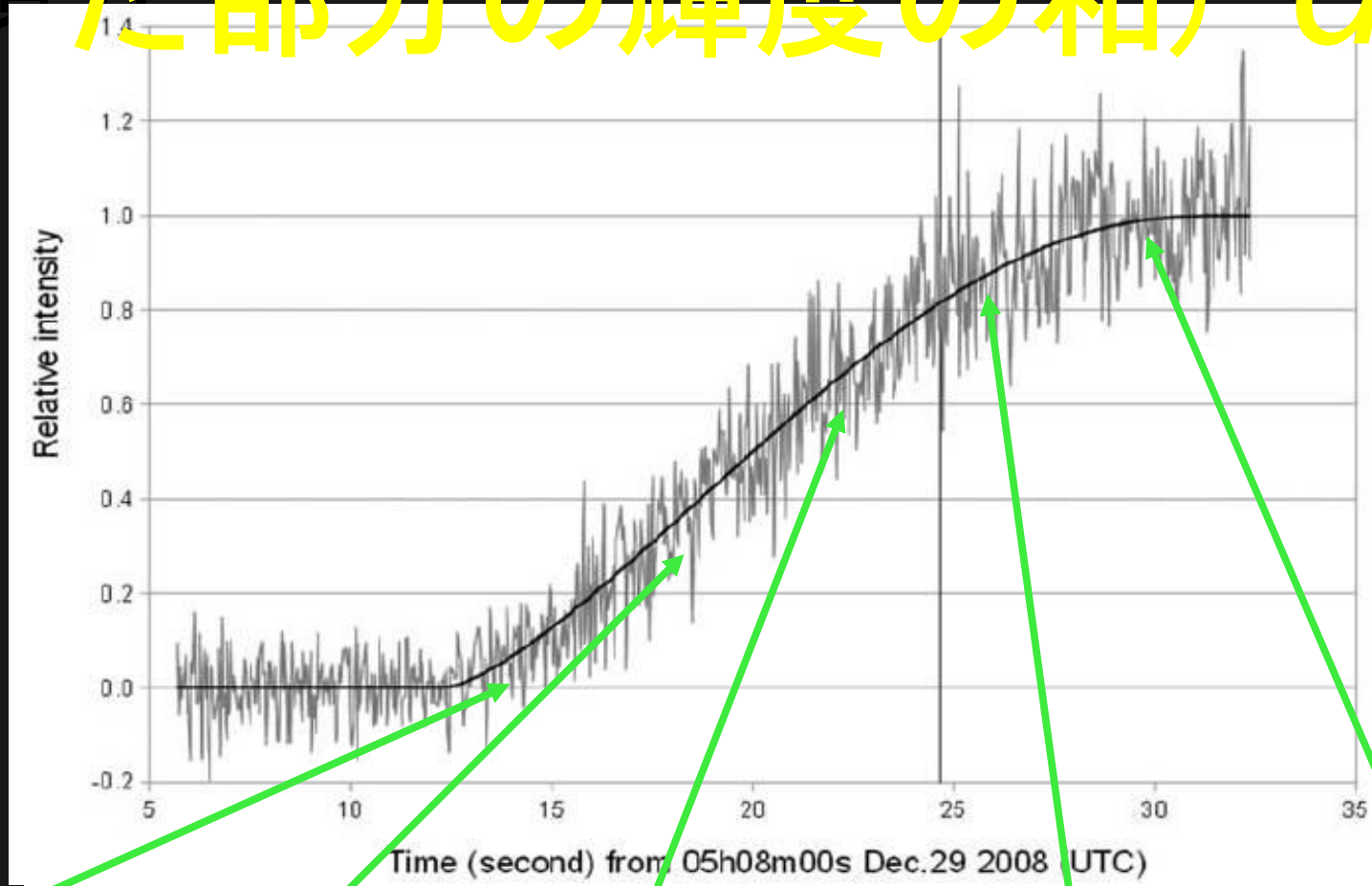
(multiple scattering function)

$S(\theta)$  : 表面の凹凸の効果 (macroscopic roughness)

$\theta$  : 表面の平均傾斜



「 $\int I dt$ 」 (単位時間に出現した部分の輝度の和)  $dt$



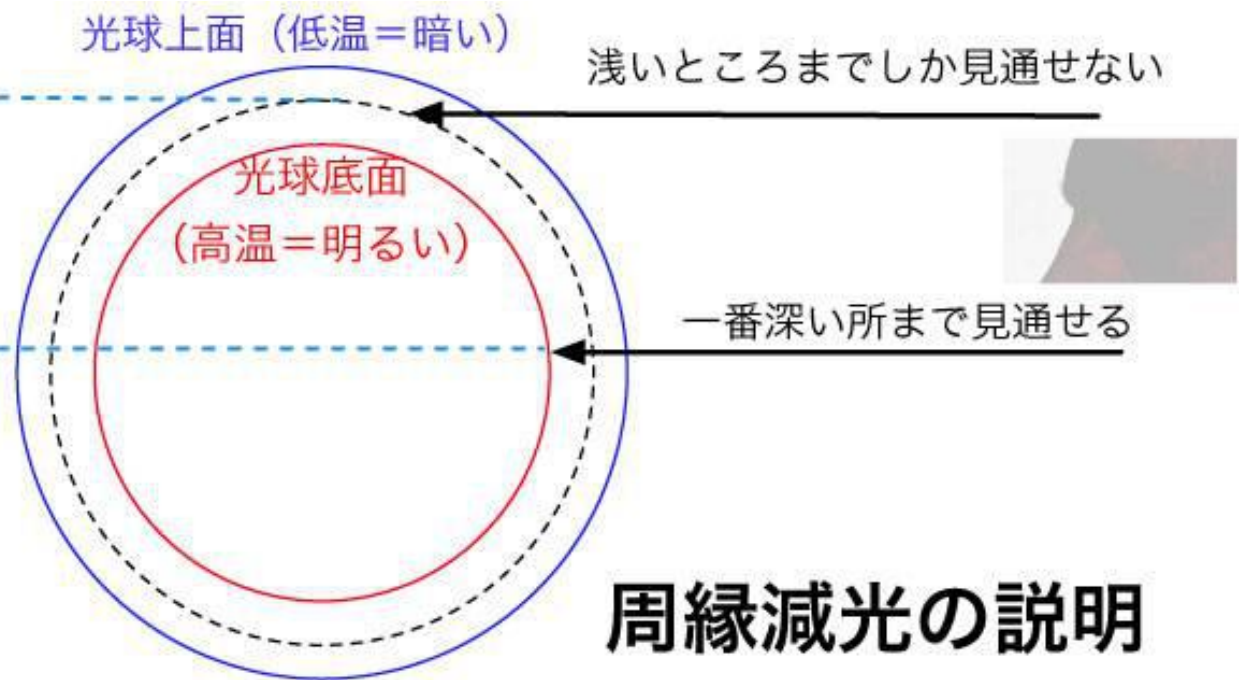
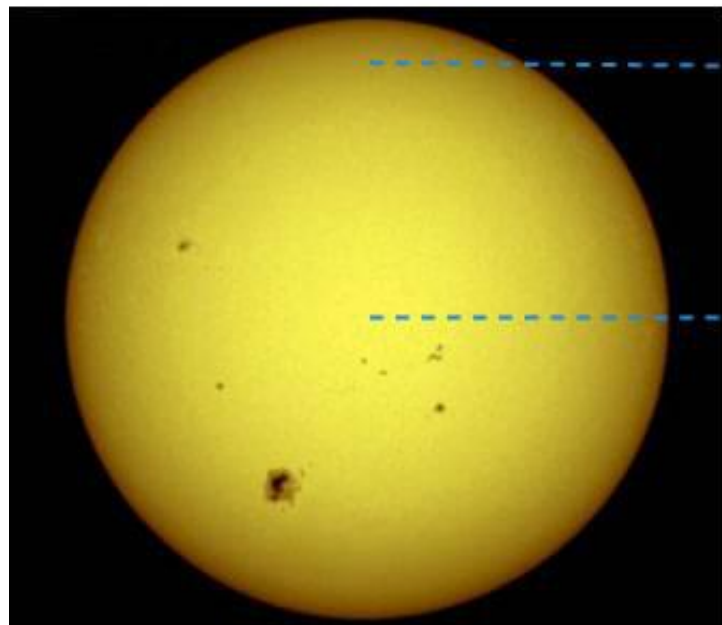
# 面積のある天体の場合

1. 輝度分布のモデルを...
2. 積分して光量変化曲線を作り
3. 観測されたライトカーブと比較する

# 太陽を測る

- i 輝度の分布
- ii ビーズの形

# 輝度の分布 …… 周縁減光

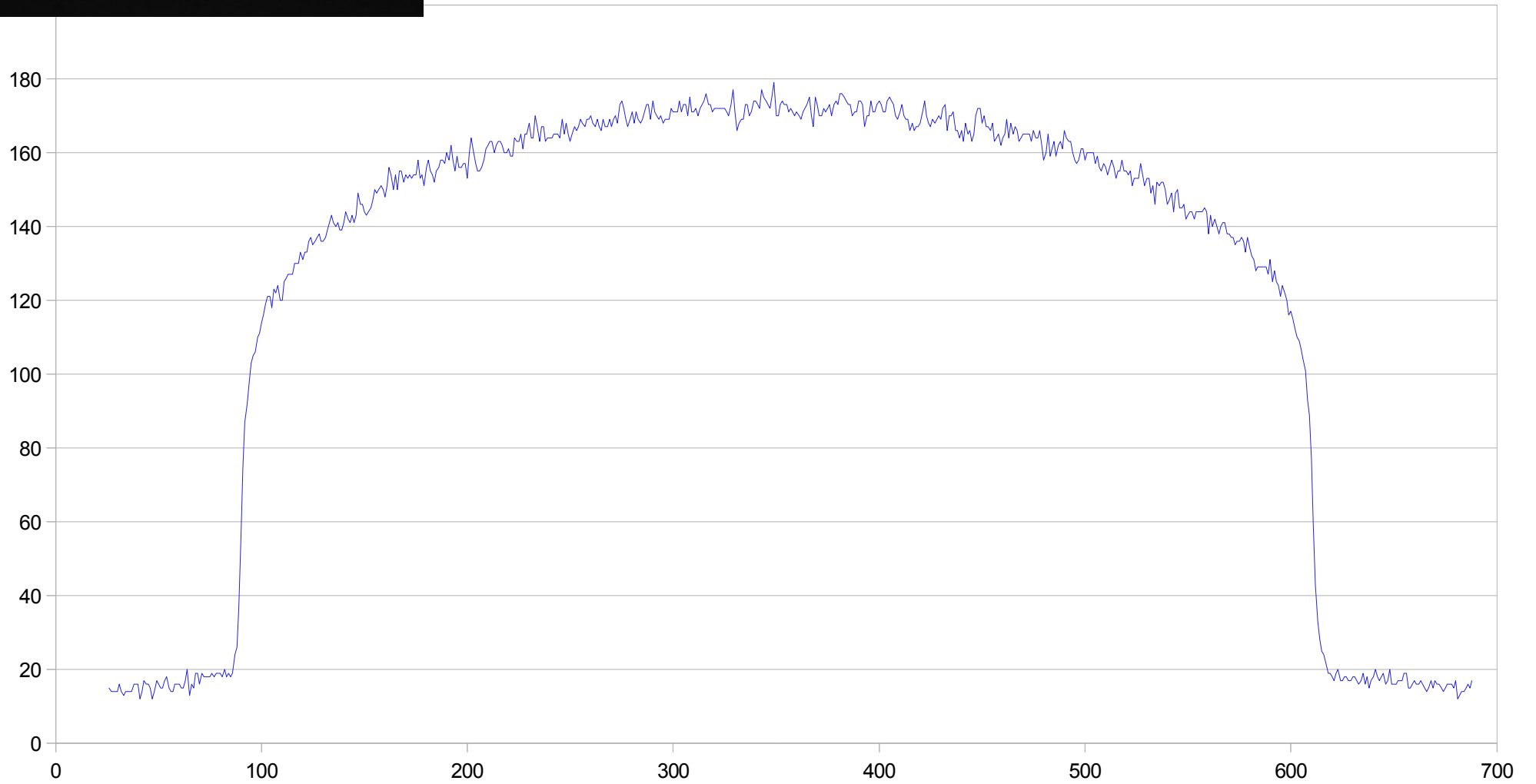






・ ビデオカメラで撮影した

太陽像 (WAT120N)

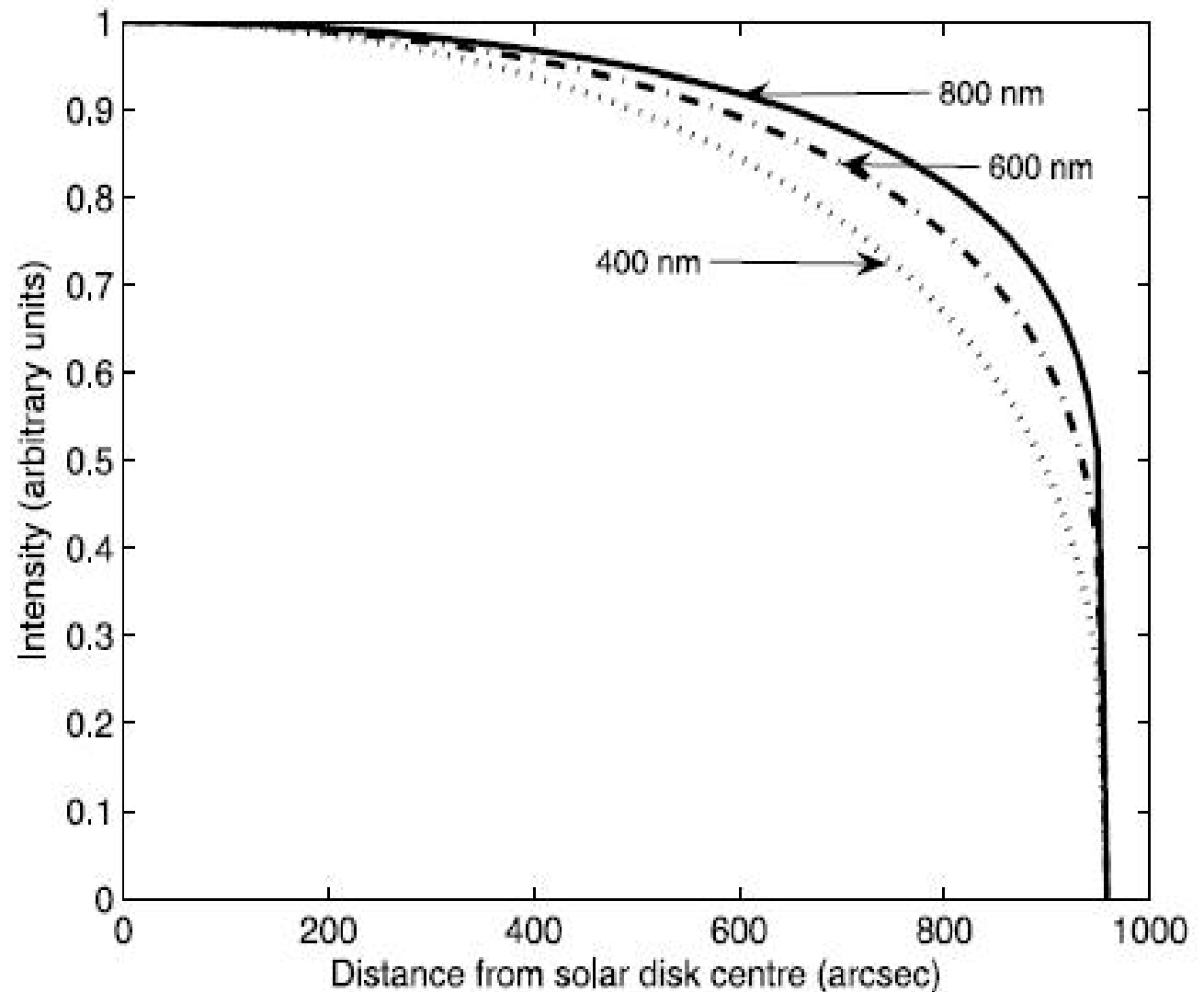


# (1) モデルから求める

- i. 観測値から得られた実験式
- ii. 大気モデルから計算

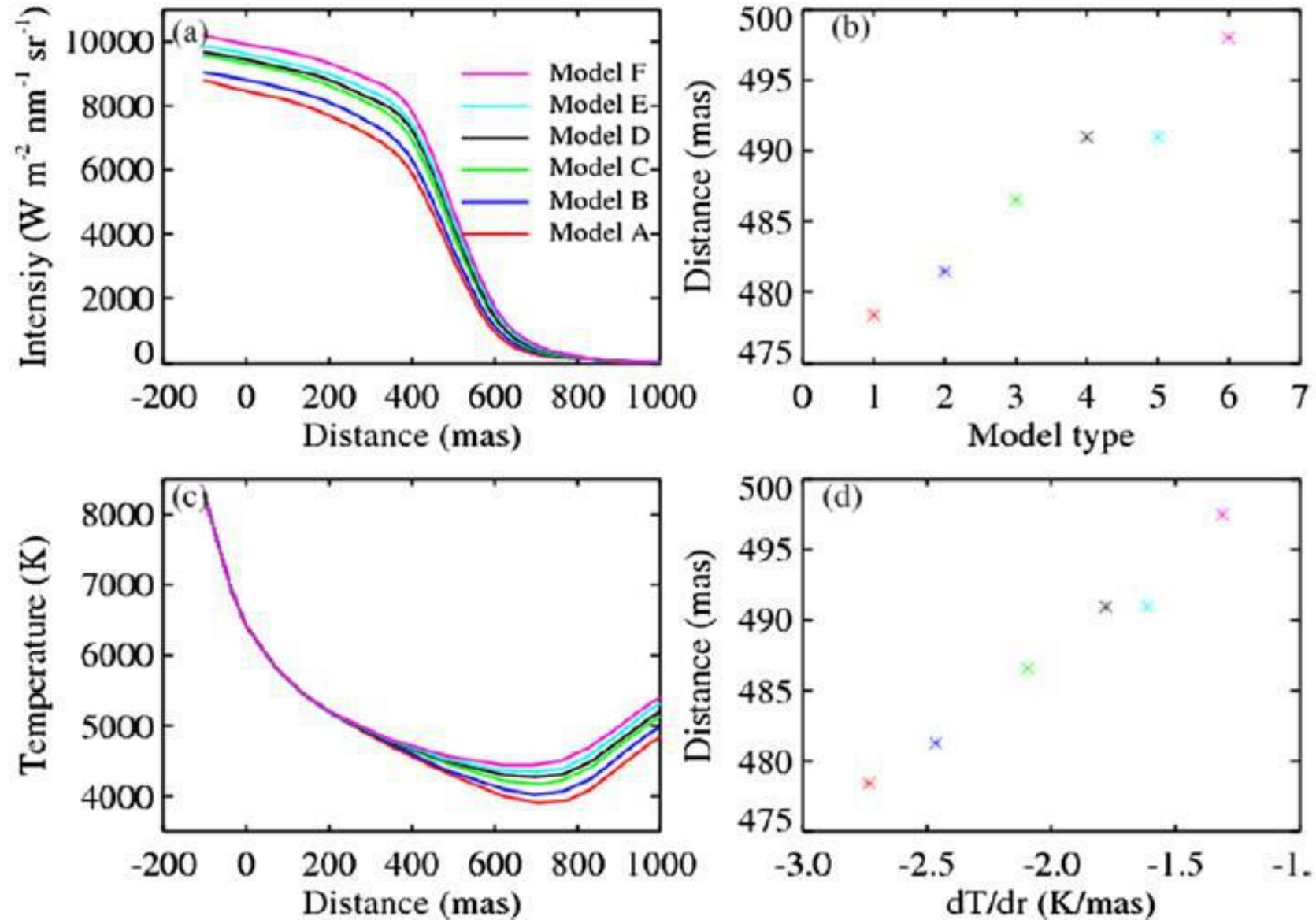
# 太陽円盤全体 … HM98 モデル

Figure 2 Solar intensity limb profiles for 400 nm (dotted line), 600 nm (dashed-dotted line), and 800 nm (solid line), based on the HM98 model. The limb profiles have been normalized to the disk centre.



$$I_L(\mu) = I_0[1 - u(1 - \mu)]$$

# 最外縁部・・・太陽の大気モデル(VAL)



**Figure 3** (a) Limb shape at 550 nm calculated using Equation (1) with the VAL atmospheric structures and Straka06 opacities, (b) the corresponding inflection point positions, (c) VAL temperature profiles for each solar condition, and (d) the relationship between inflection point position and temperature gradient.

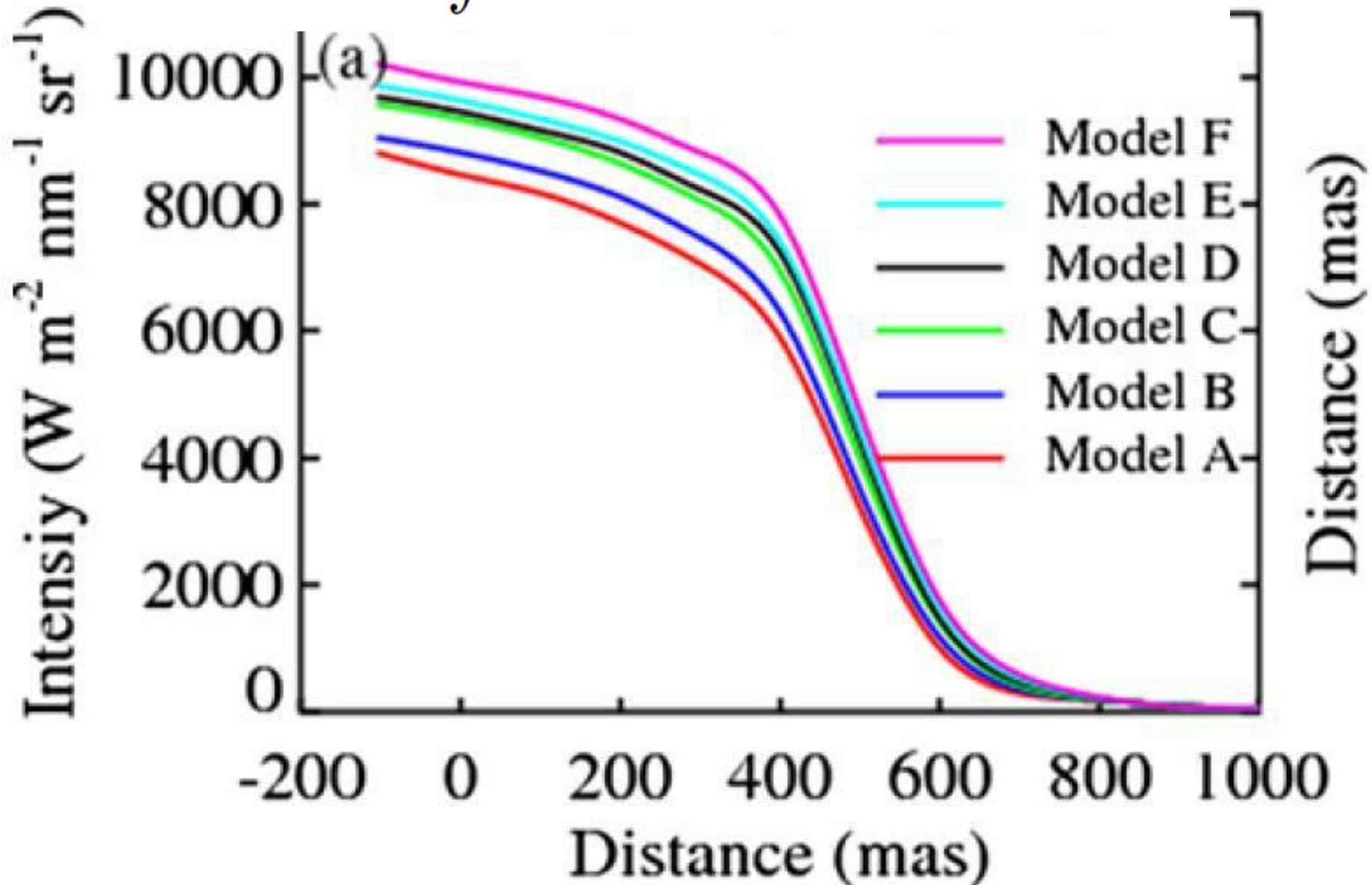
- Thuillier et. al. , 2011, The Shape of the Solar Limb\_ Models and Observations より



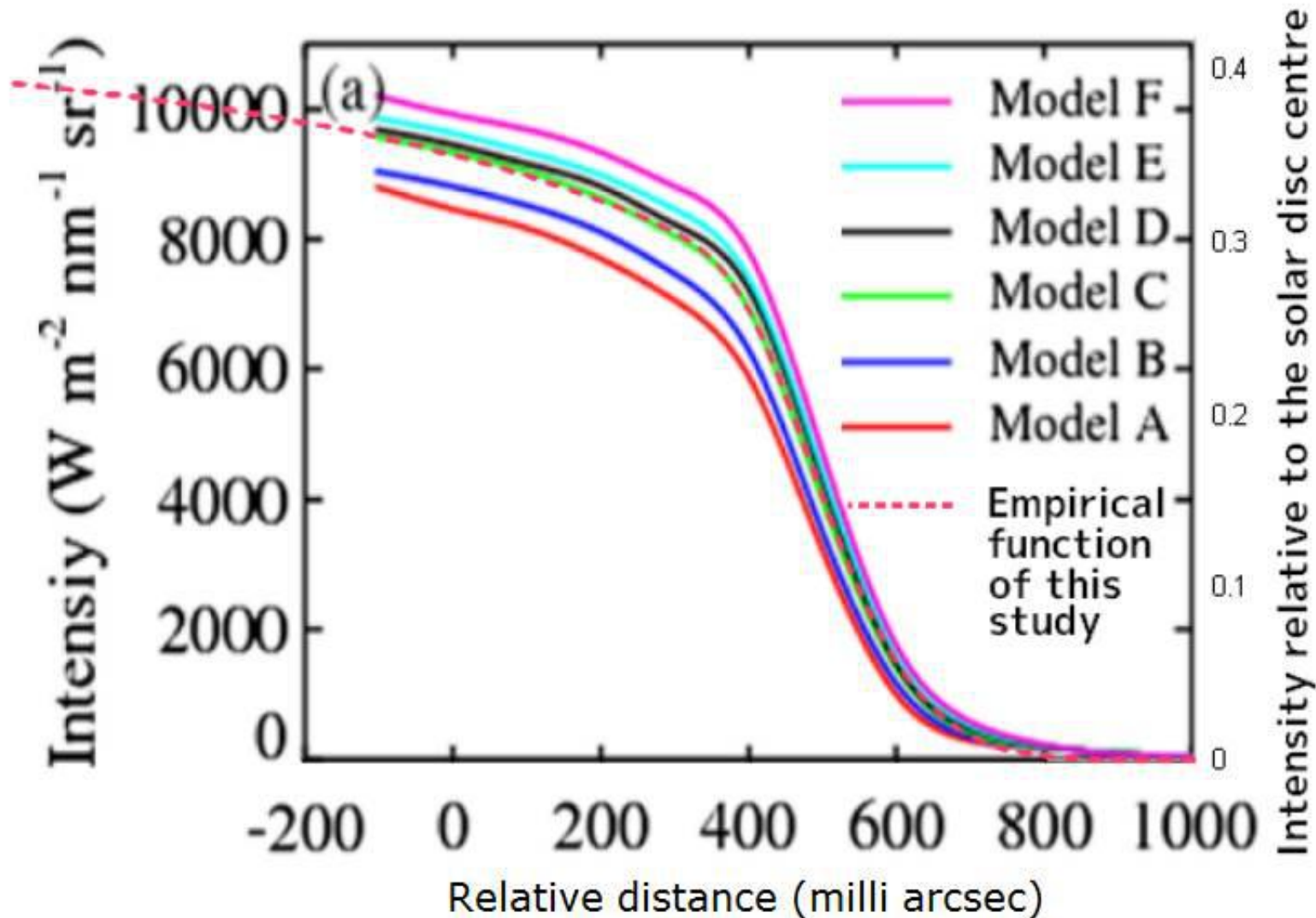
# 大気モデル(VAL)から計算された周縁減

↓

$$I(\nu) = \int S(z) \exp(-\tau_\nu(z)) \kappa_\nu(z) dz$$

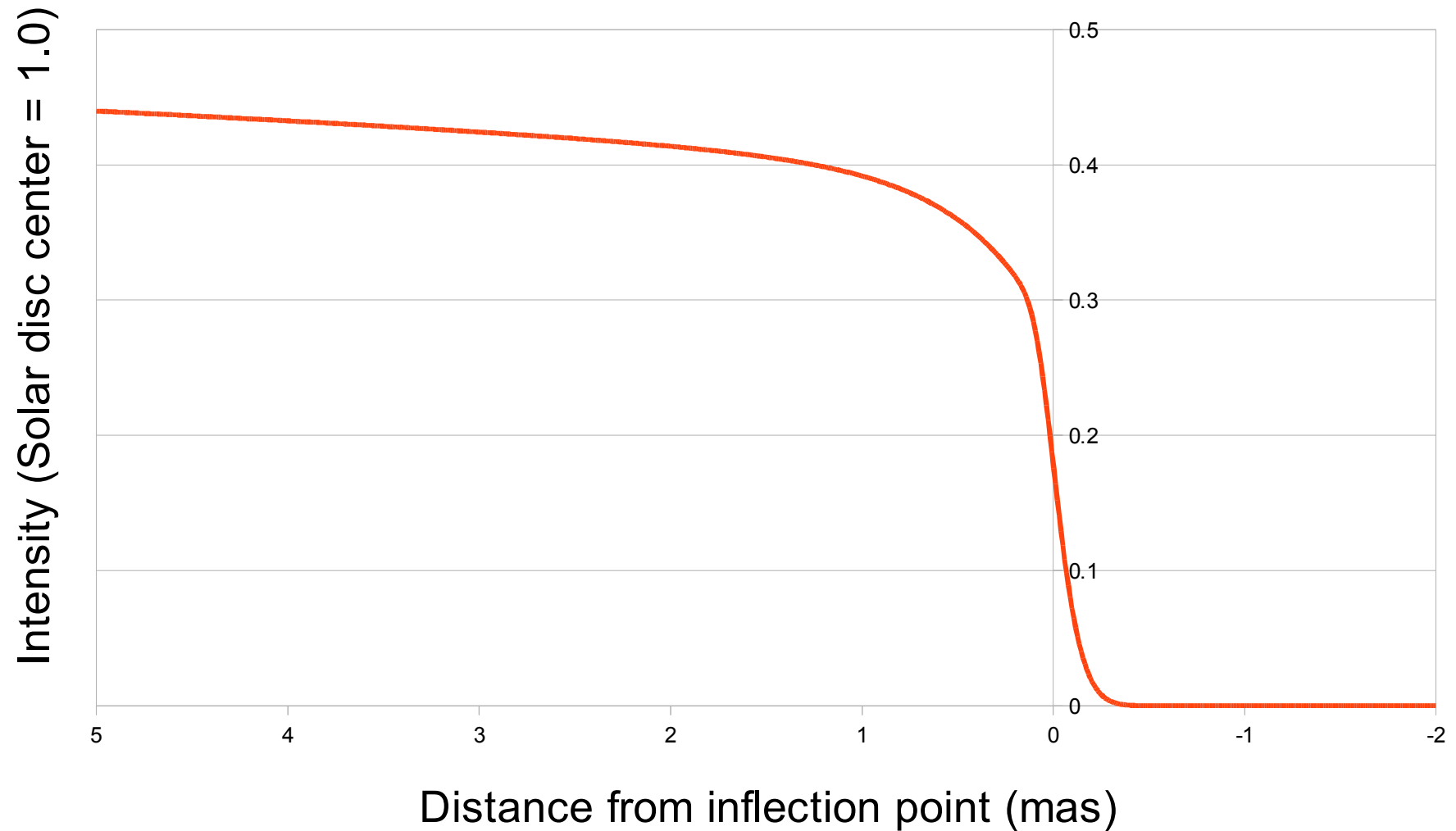


# 大気モデル(VAL-C) を実験式で表す

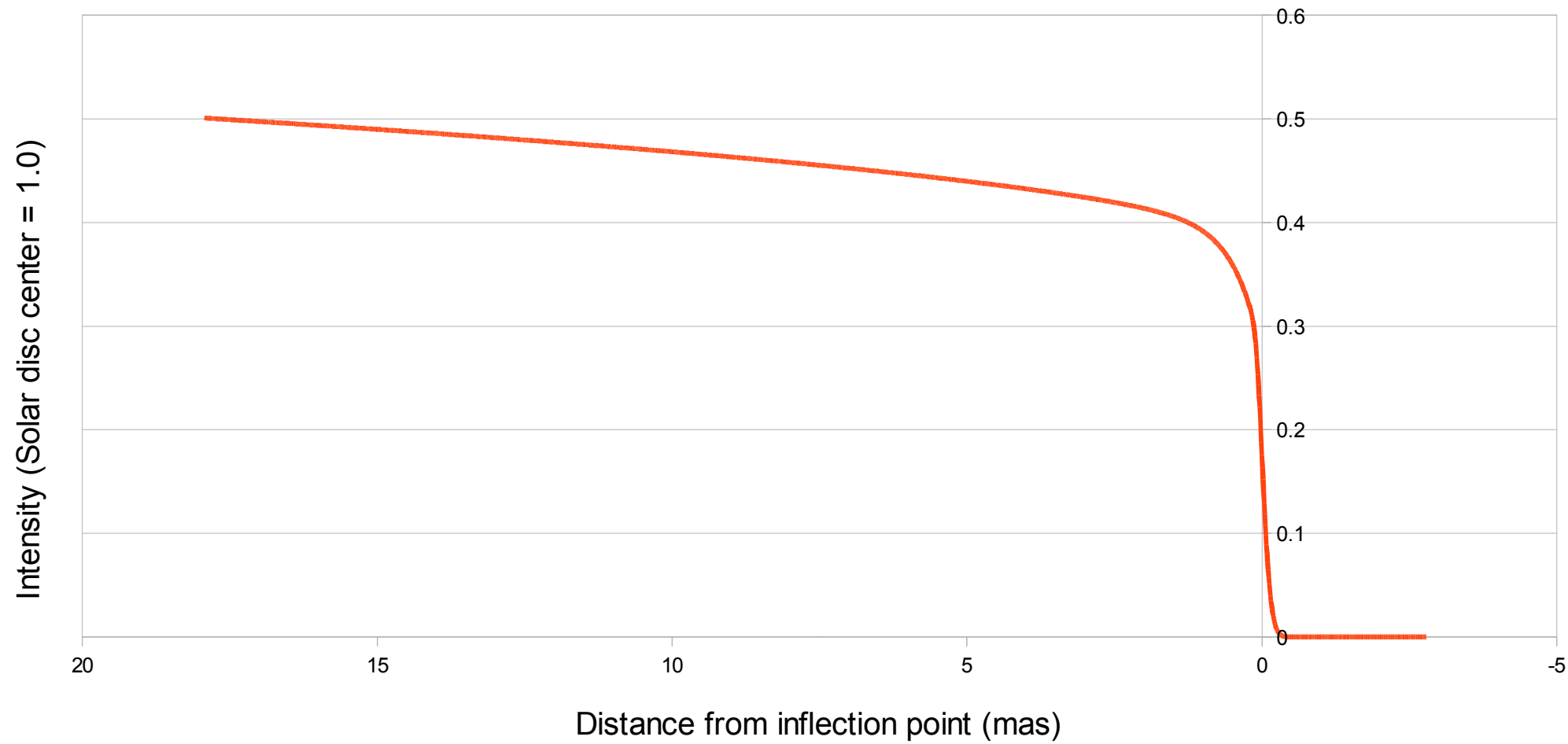


$$I(\mu) = I(0) \left(1 - u(1 - \mu^a)\right) \left(1 - e^{-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}}\right) \left(1 - b e^{-c(\mu-d)}\right)$$

# VAL-C モデル (実験式)

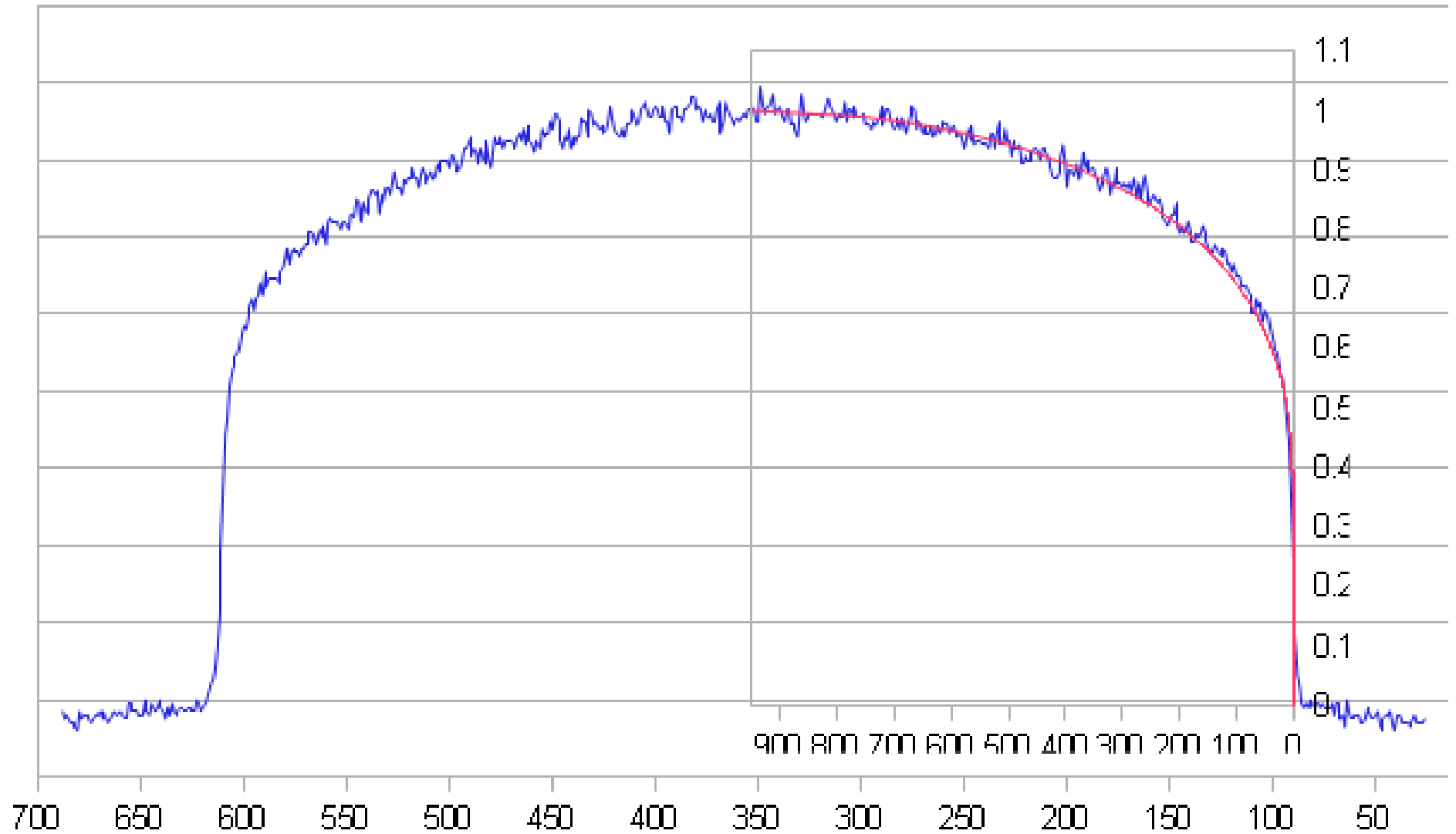


$$I(\mu) = I(0) \left(1 - u(1 - \mu^a)\right) \left(1 - e^{-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}}\right) \left(1 - b e^{-c(\mu-d)}\right)$$

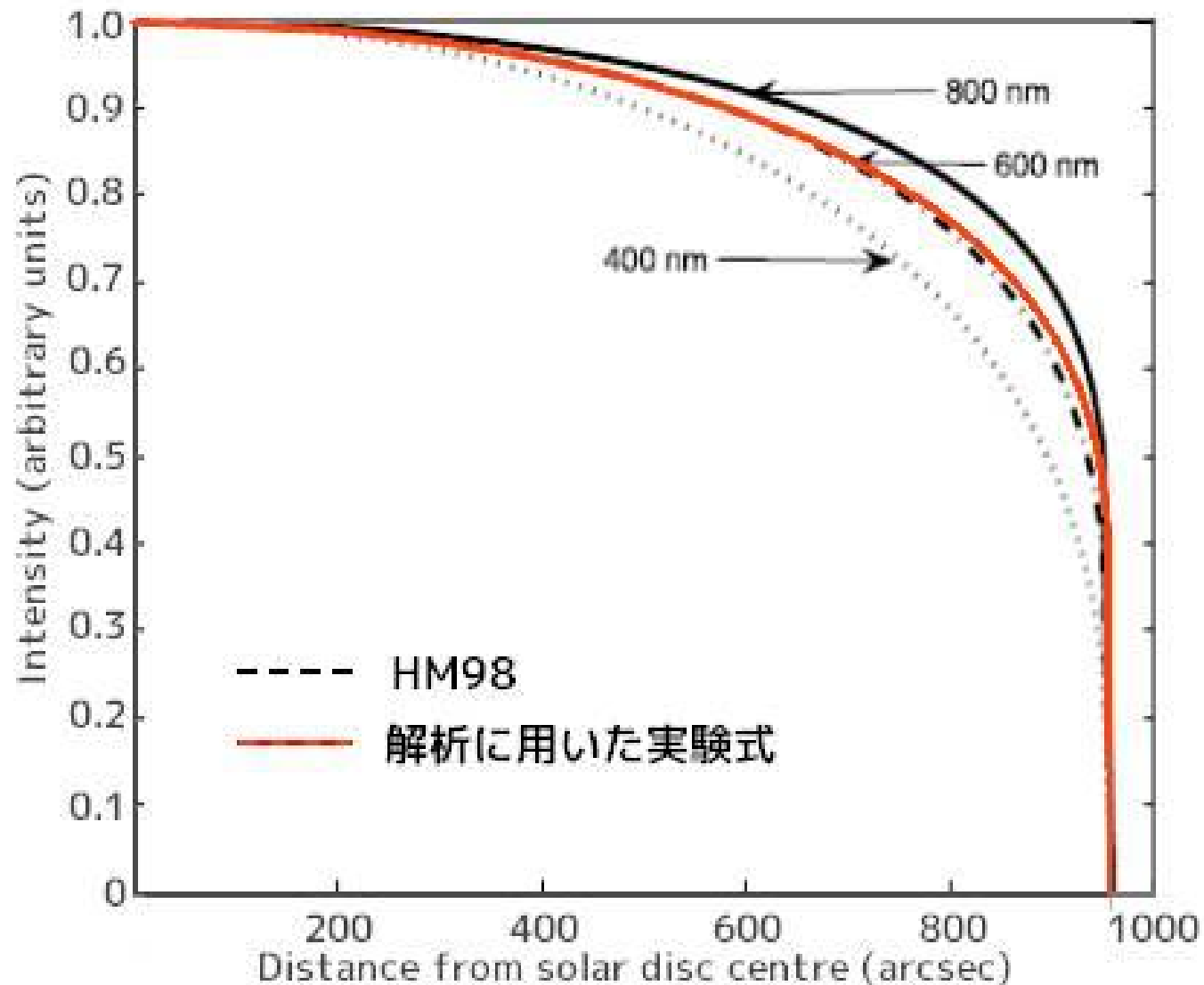




# ビデオ画像との比較



# HM98モデルとの比較



# (2) 観測から求める

Light Measurement tool for Occultation observation using Video Recorder [Limovie 0.9.98.1]

File Edit Option Tools Software Update

U 22:28:47.956

Limovie File Format (for Ver.0.9.26 later)  
"FileName : H:\Eclipse\0wada\0wada-2nd.avi"  
"Video System : NTSC , FrameRate=29.97"  
"Time",,, "Centre of", "End of",,, "Resu"  
"Detect", "VT1", "Frame", "Frame",,, "Sour"  
"No.", "Field1", "Field2", "H", "M", "S",,, "

Gamma Reverse Correction  
 OFF  Measure  Field 1.00  Fast

End Time of Field Exposure (Field1=Centre of Frame)  
h m s [Field1] [Field2] Threshold S1 S2  
80  IOTA

H:\Eclipse\0wada\0wada-2nd.avi

Current Frame: 592

Measurement: 1Frame DEL START STOP DataRemove SaveToCSV-File Capture Open AVI Load CSV Exit

Measurement Value  
BKG/Frame 0.0  
Star Even 0.0  
Odd 0.0  
Frame 0.0  
Color Value

Position Center Tracking  
X= 419 419  
Y= 129 129

Half Flux Diameter 0.000  
 Fixed

Position Set  
 Star  
 Signal1  
 Signal2  
 TIVi

Linked Tracking  
 Link Passed- Frame1 Frame2  
 Rotate Point Set Clr Set Clr

Star Tracking  
 Anchor  Estimated track  
 Drift Radius Threshold Frame1 Frame2  
 OFF 11 95 Set Clr Set Clr  
 CSV

PSF  
 Tracking  
 Photometry

Form of BKG-Area  
 Standard  
 Avoid Sunlit Face  
 Meteor/Lunar Limb

Direction Setting  
Width 18 Height 51

Number of Pixels / Radius  
Aperture Background  
Even 468 1  
Odd 450 1  
Frame 918 2  
Set radius to memoried

Radius Inner Outer  
2 13 25

Star Image [3D] Update Setting Items

Measurement / View Option  
 Show Field Interval  
 Field Measure 1

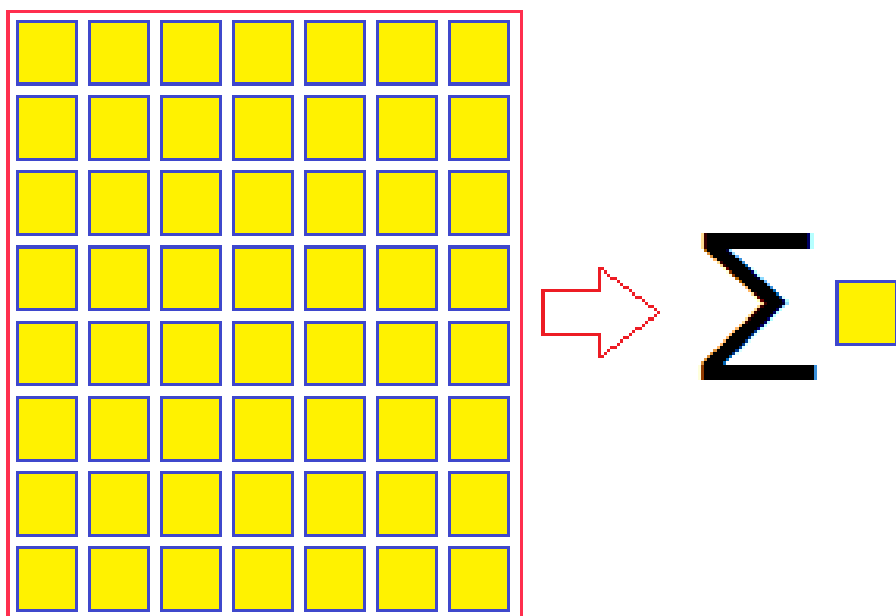
DShow  
Frame Rate 29.97

Field Order  
 Even first  
 Odd first

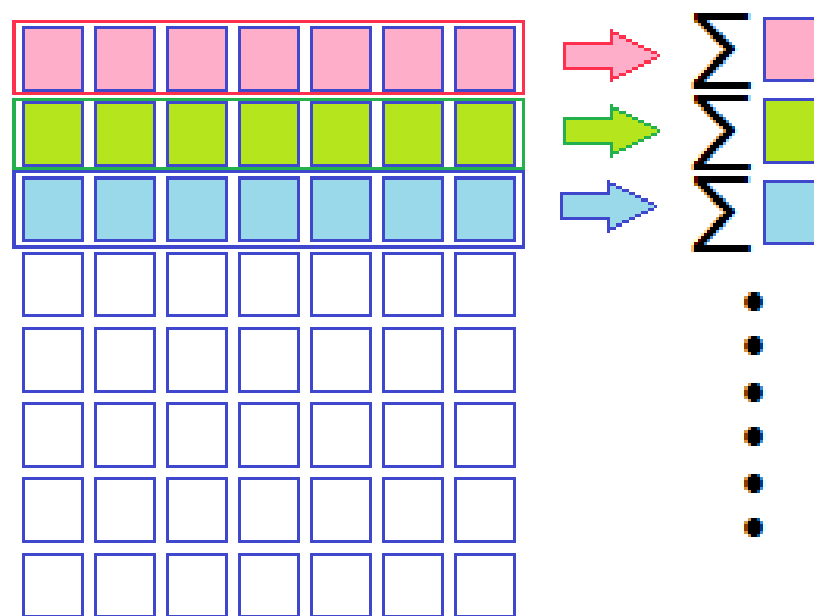
Graph  
Current Object A B C

# 周縁減光をとらえるために...

Aperture photometry

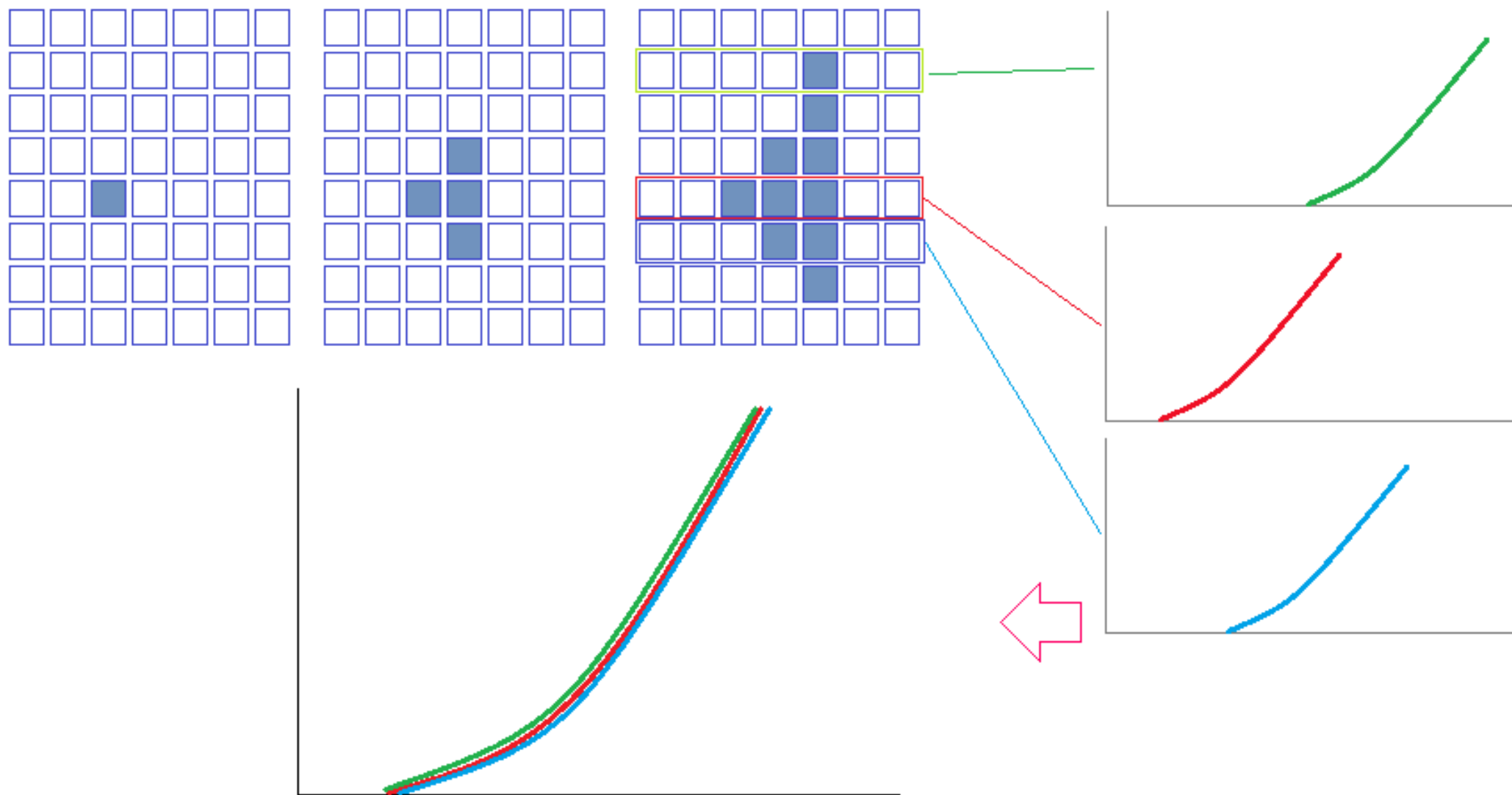


Linear aperture Photometry



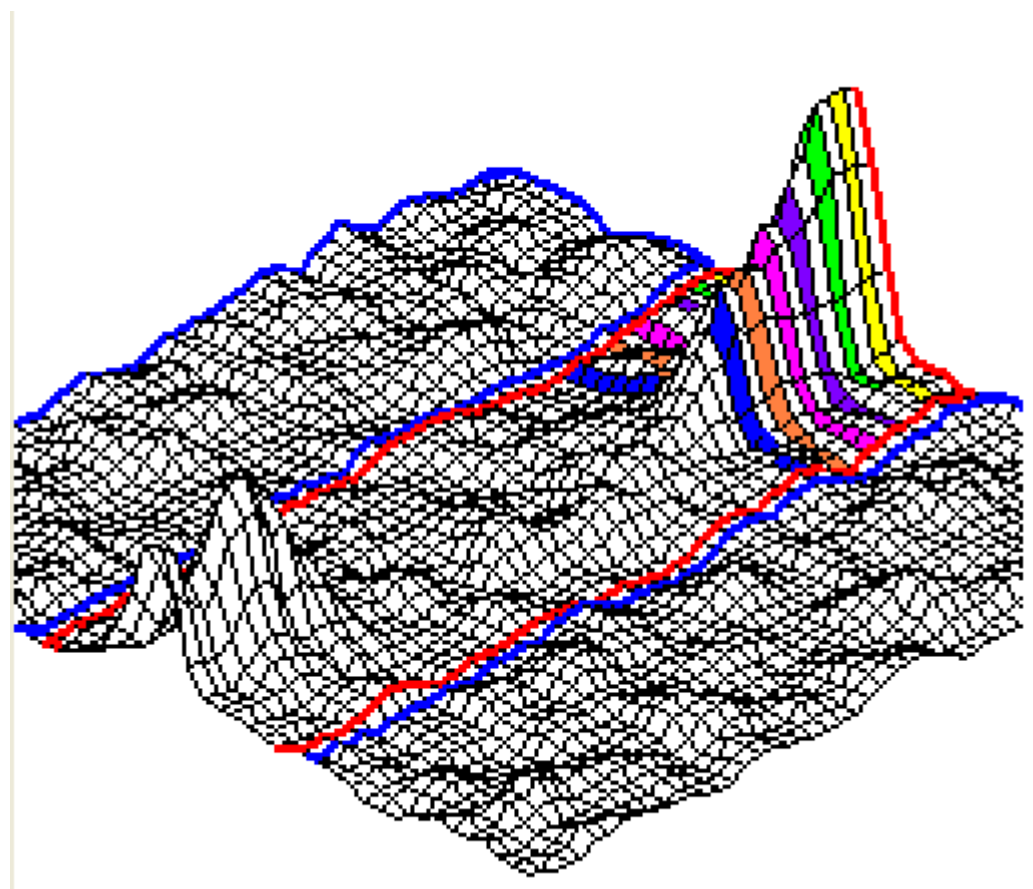


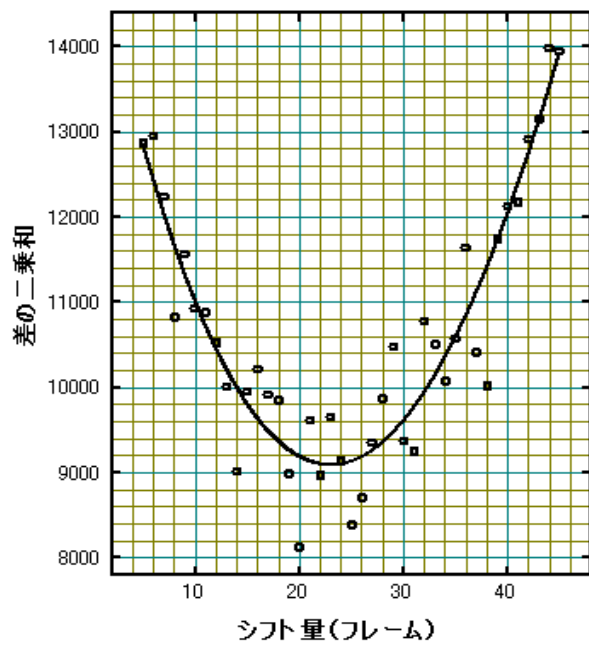
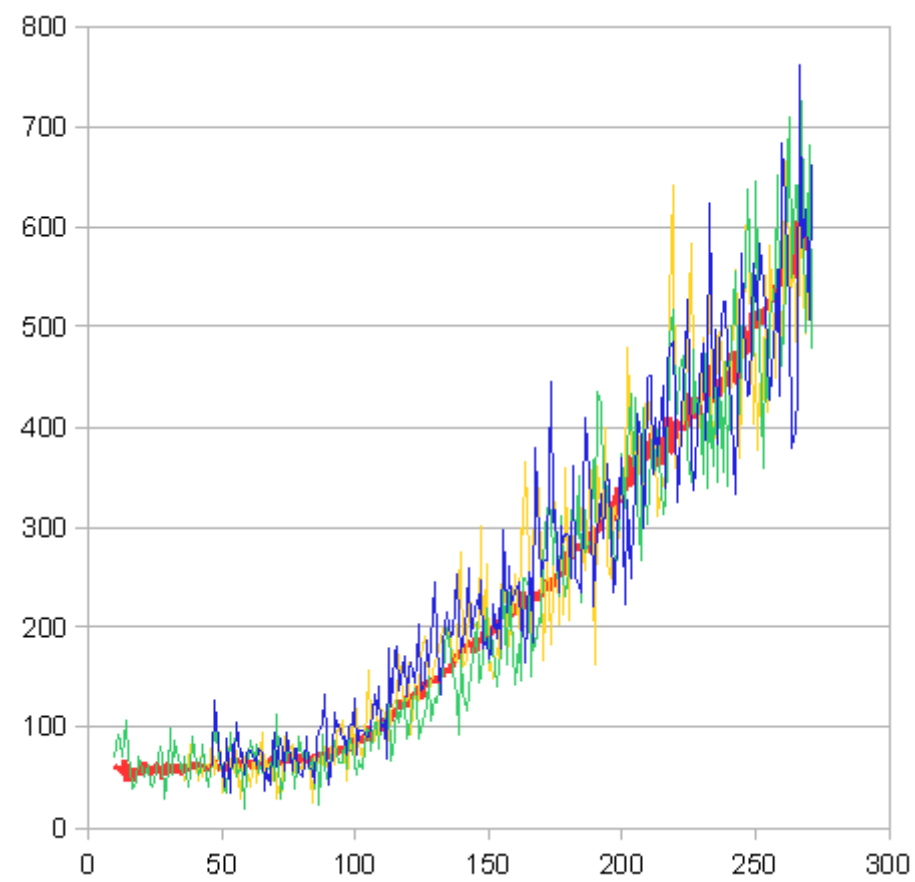
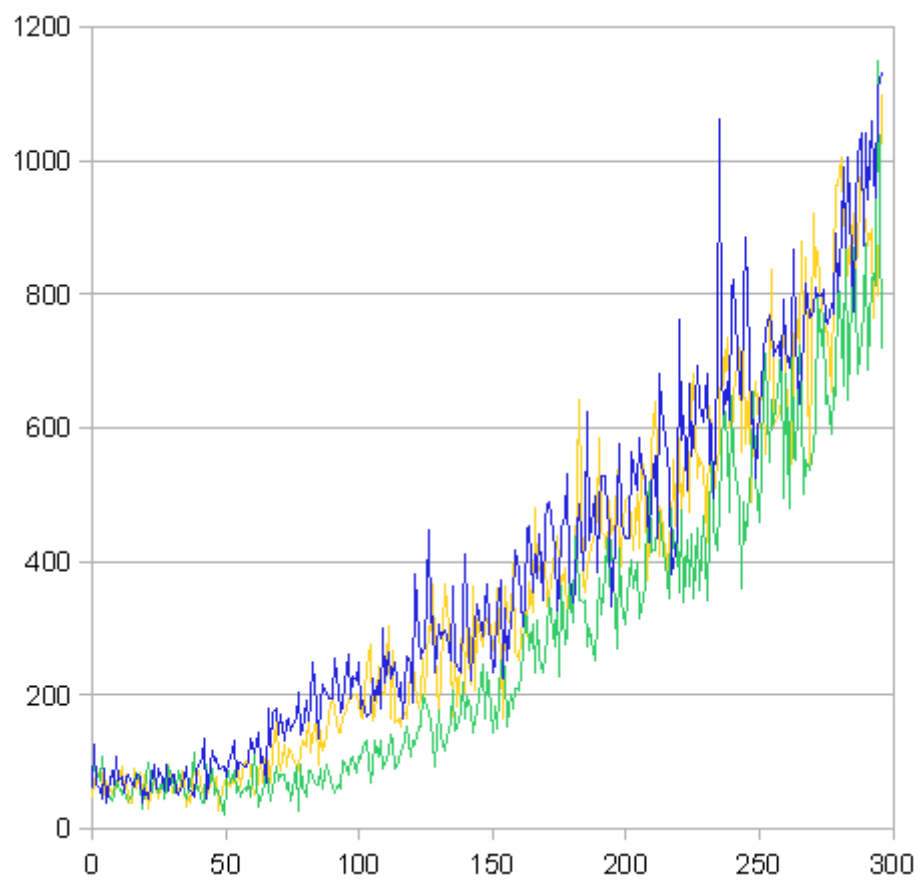
# 時間軸をずらして重ね合わせる



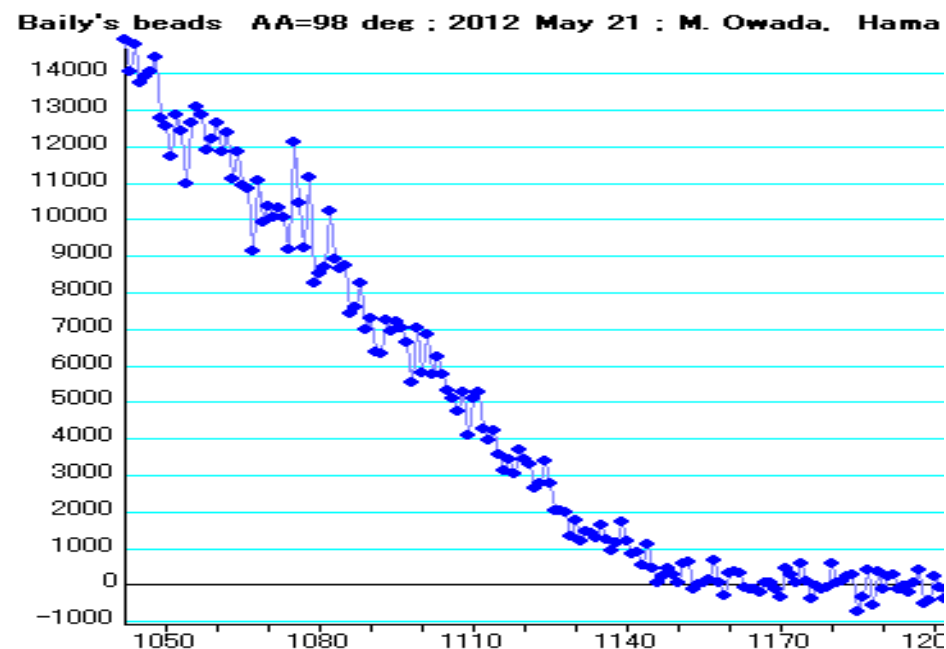
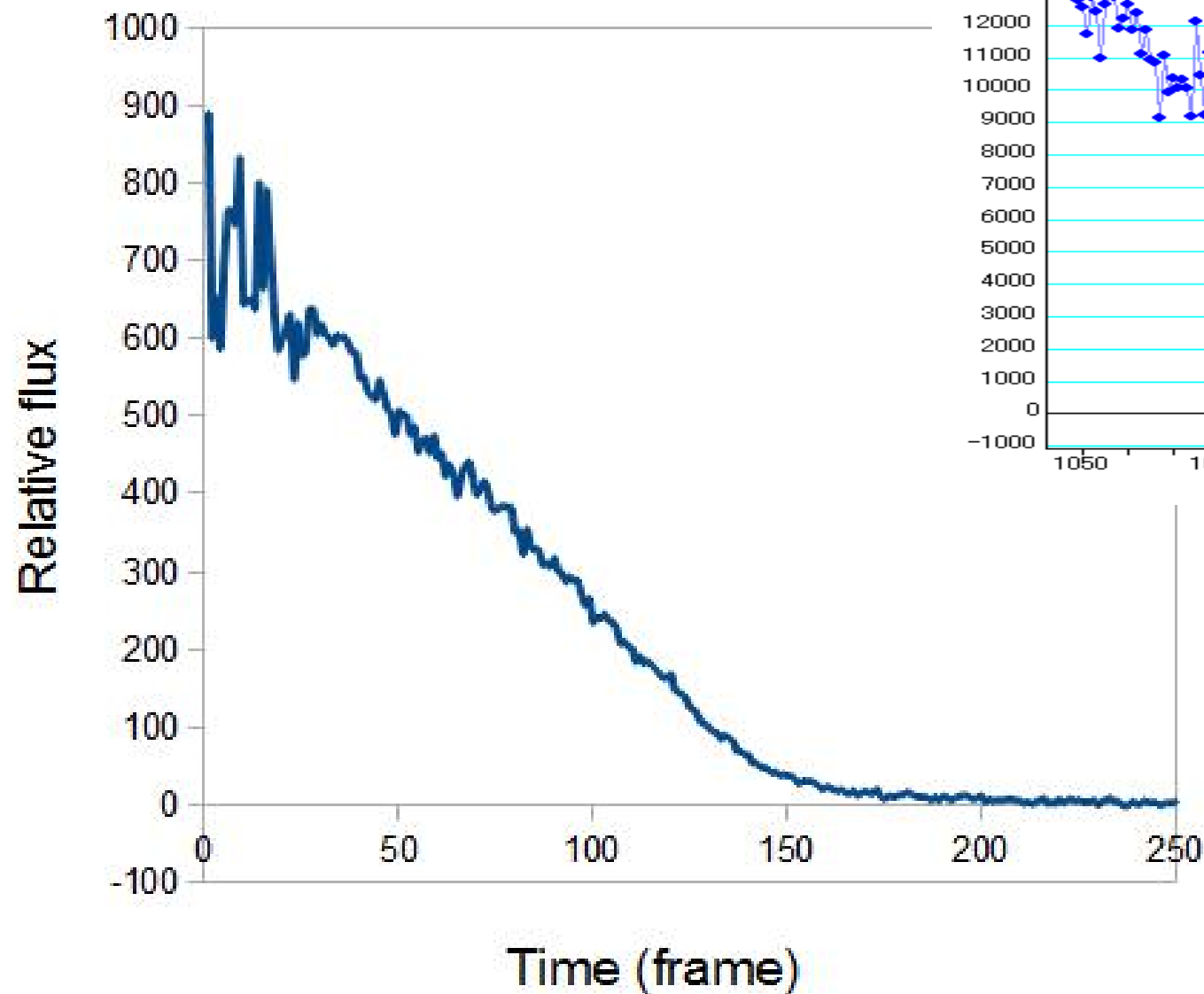
cultivation bservation using Video Recorder [Limovie 0.9.98.1]

oftware Update

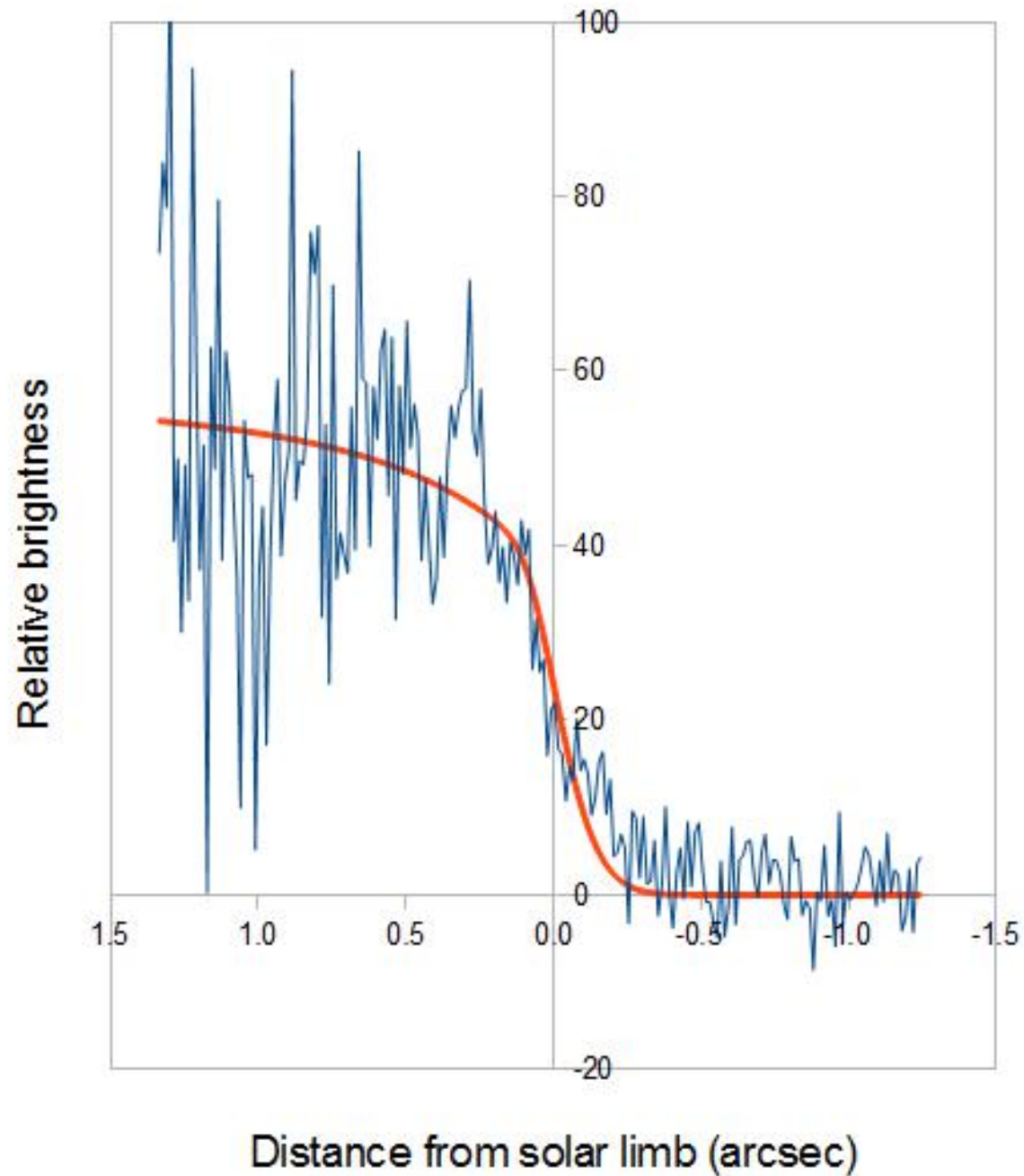




# Linear aperture から得られた日食曲線



# ビデオから得られた周縁減光



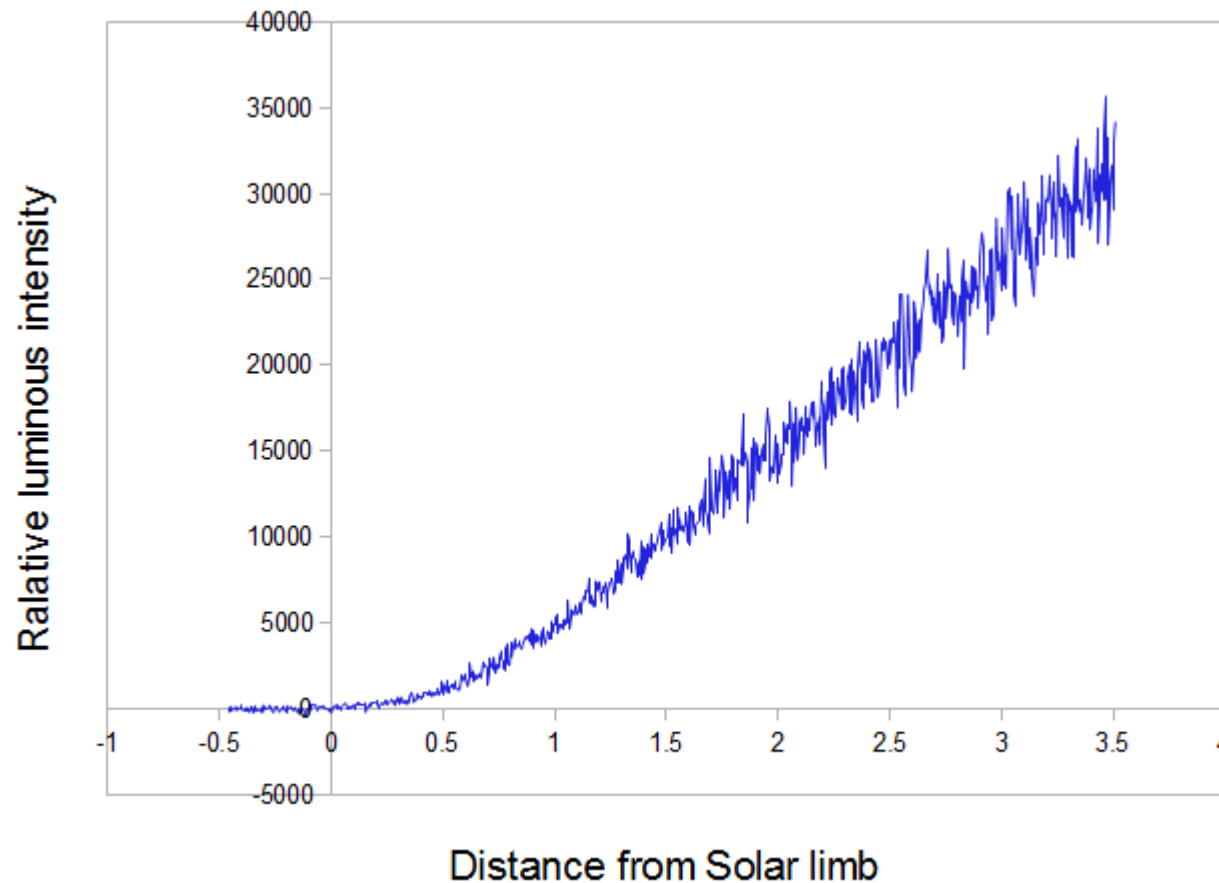


# 間接的な周縁減光の求め方...

## ビーズの光量変化を微分



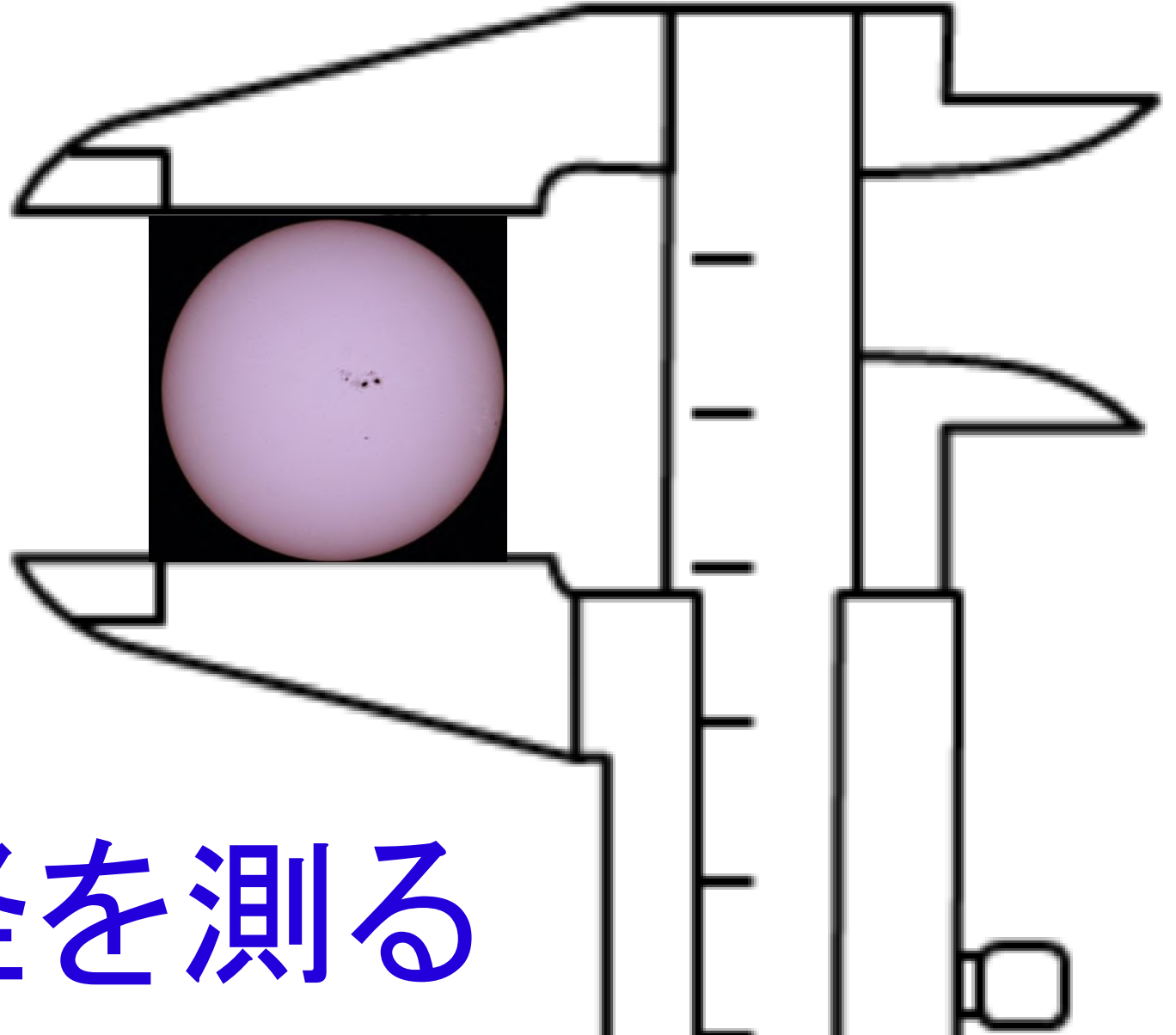
## 地形を考慮したモデルと比較



# 地形を考慮した日食曲線を微分

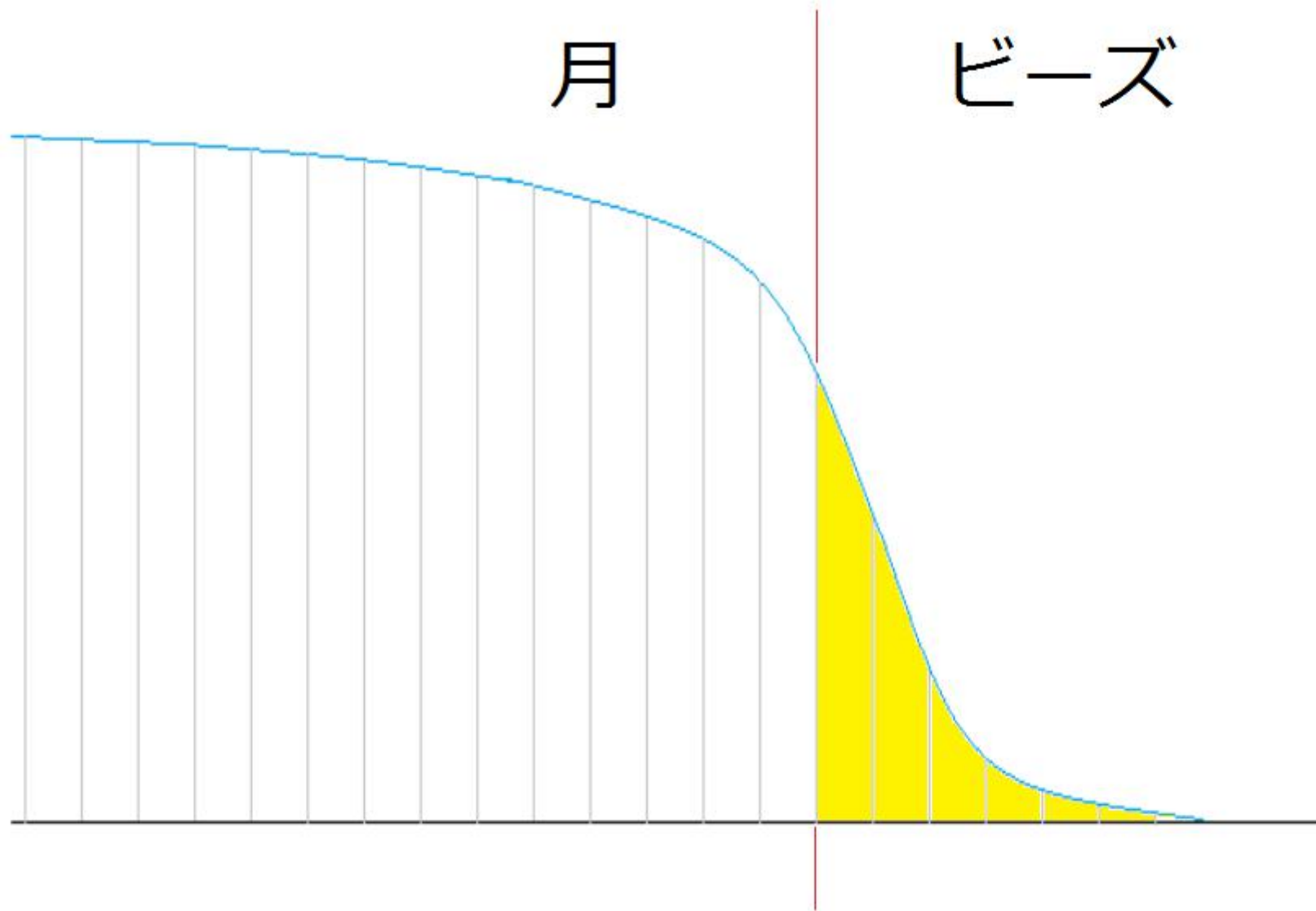


# ものさし=モデル日食曲線

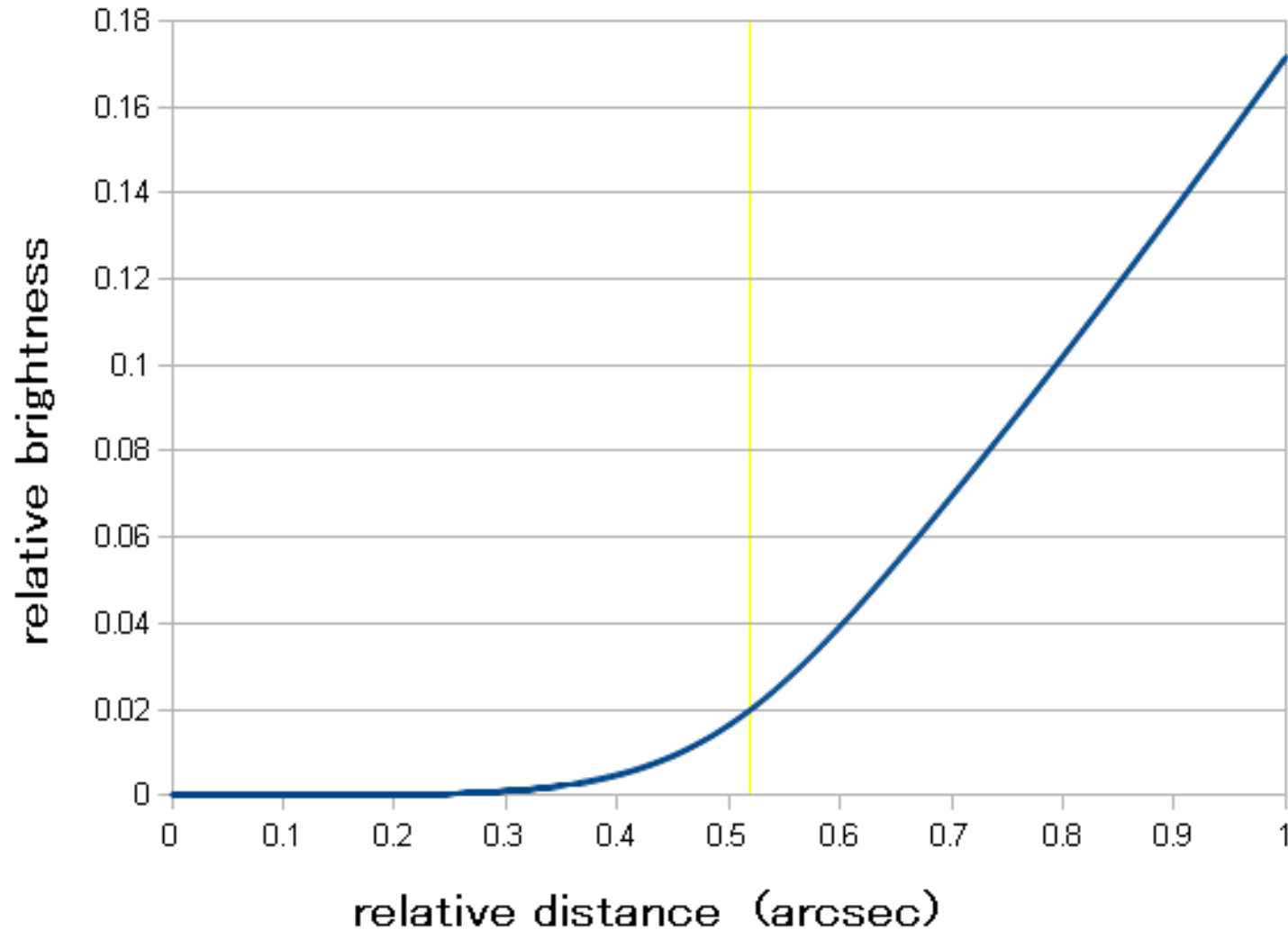


太陽半径を測る

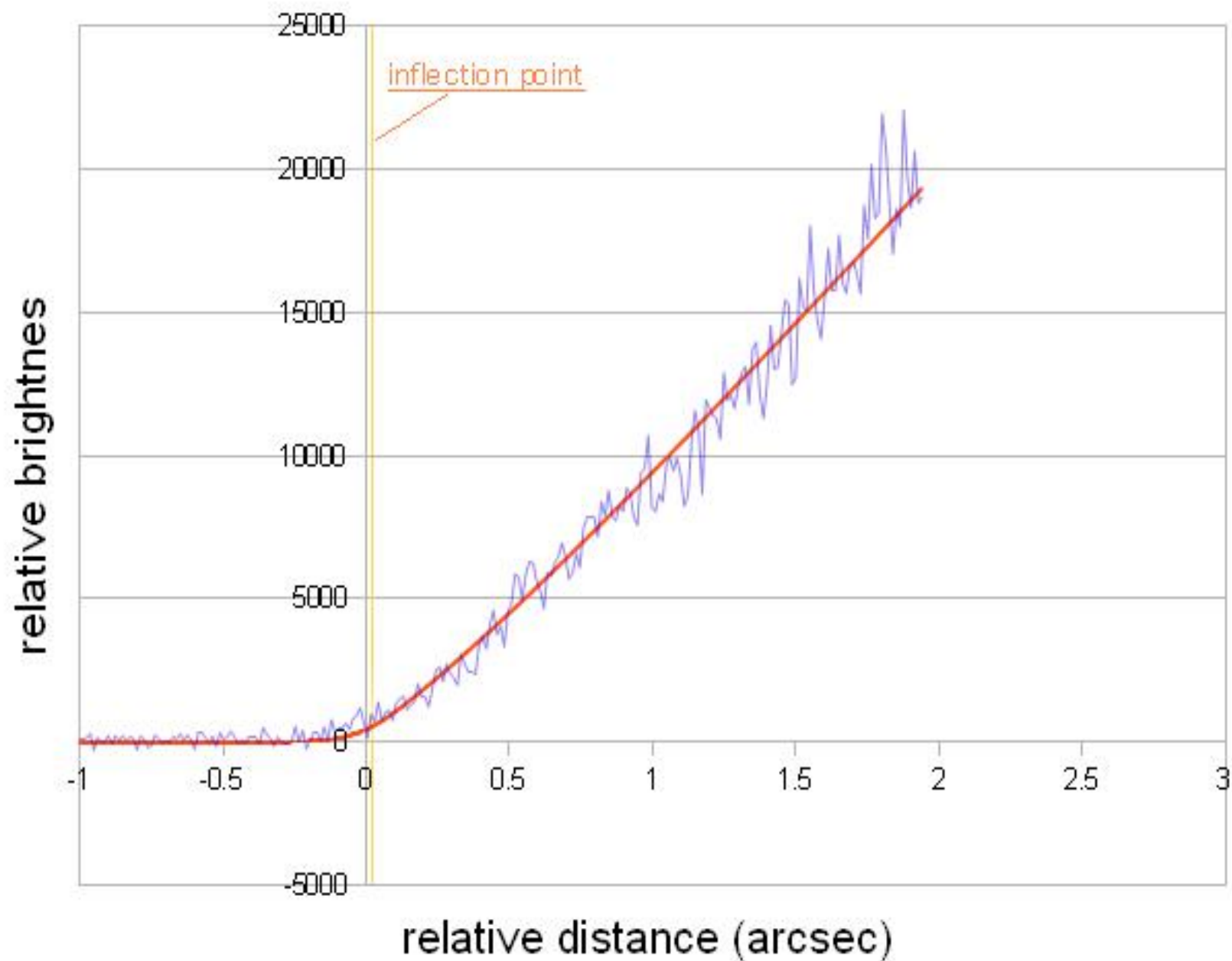
# モデルを積分し、日食曲線を「つくる」



# モデルを積分し、日食曲線を「つくる」

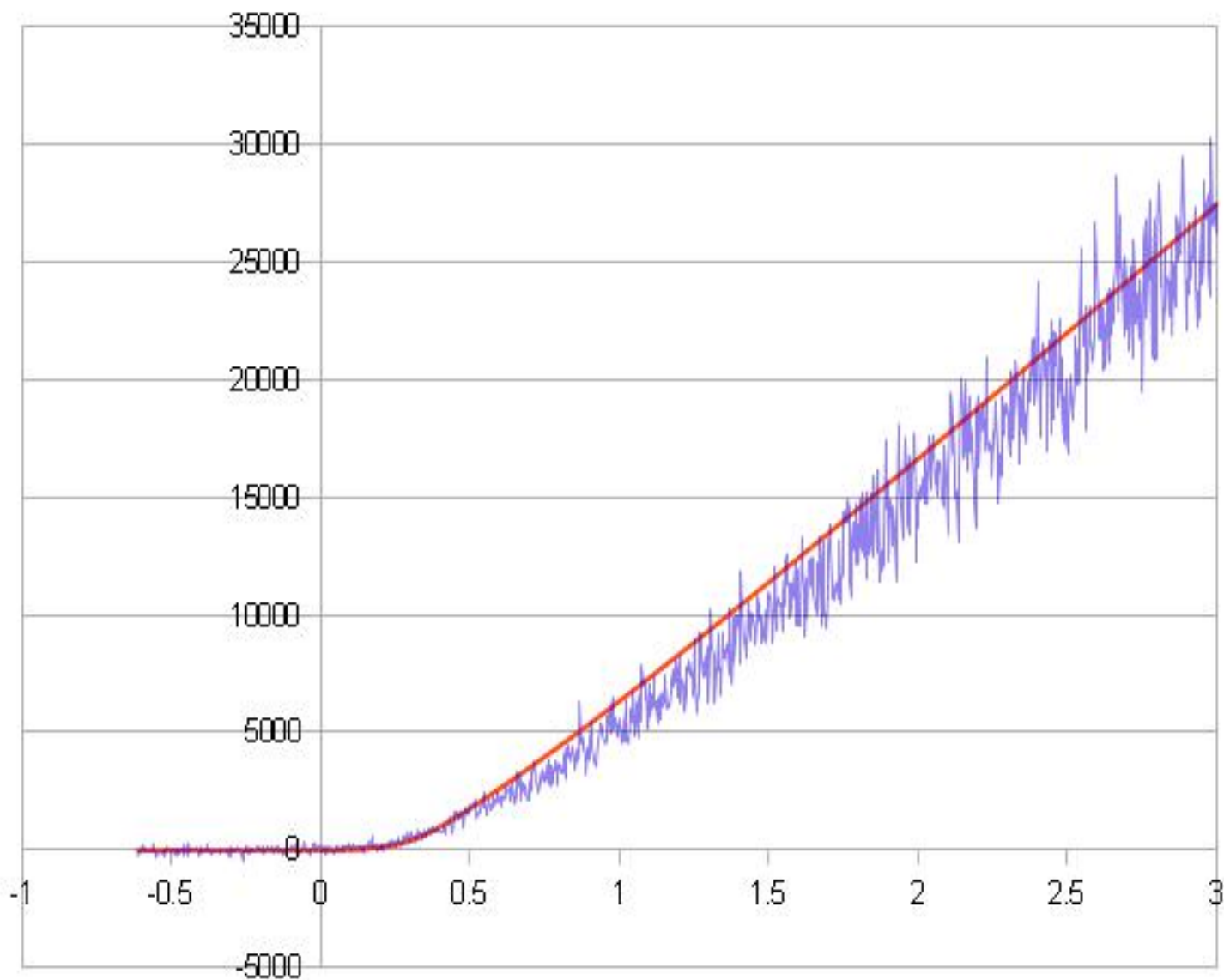


# 観測と比較してみると...





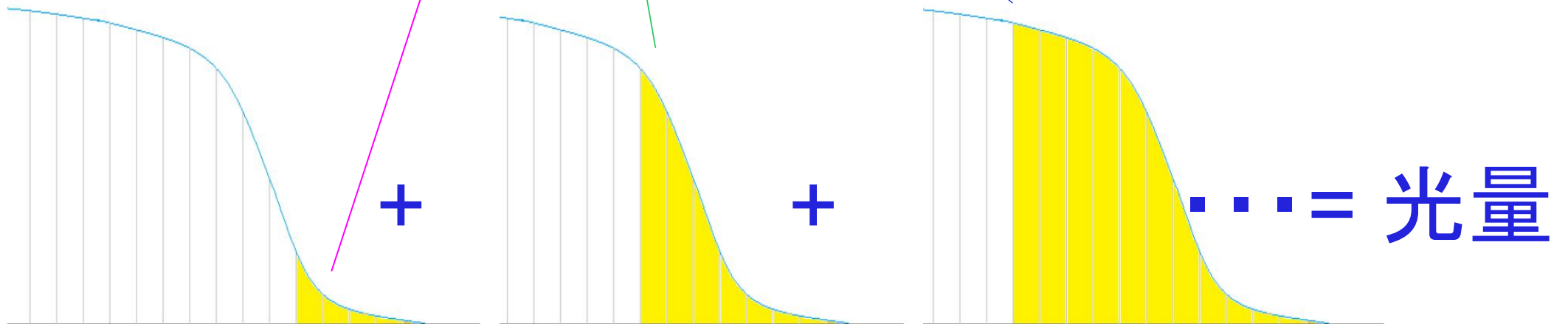
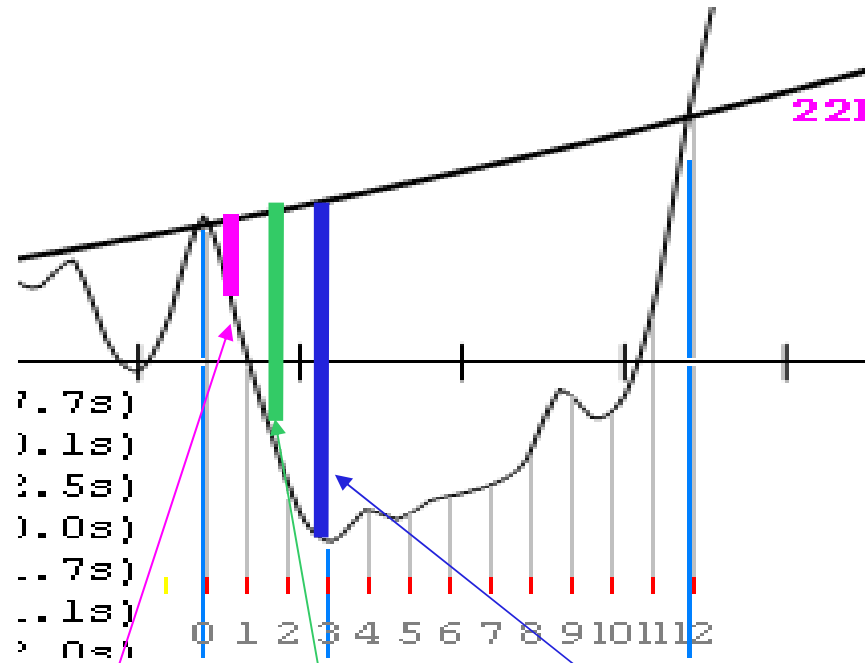
# 単純な積分ではフィットしない



# 谷の形によって光量変化が異なる



# 月縁地形を考慮する必要がある

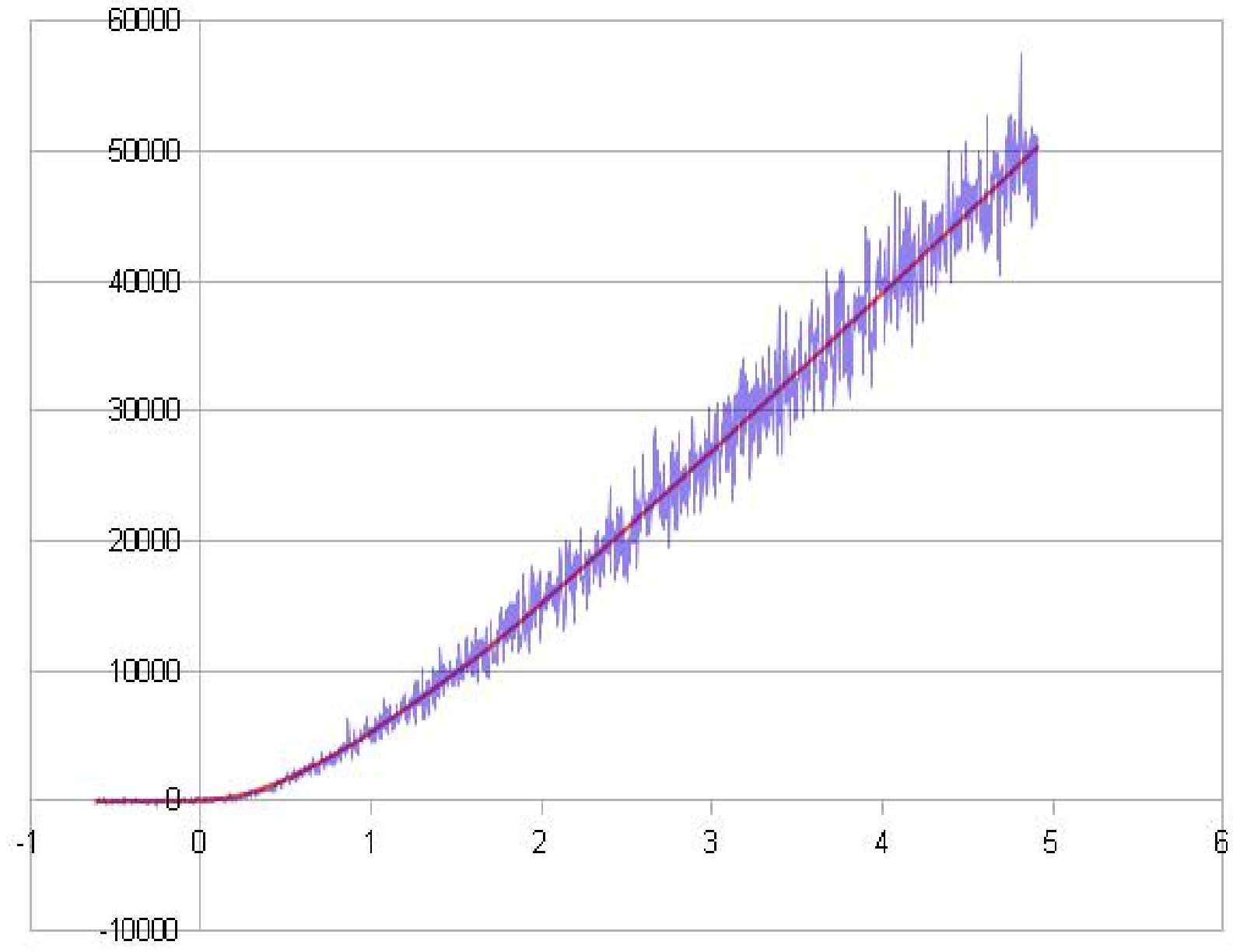


# 太陽縁と月縁の各距離 かぐやの月縁データより

234	0.2471	0.2476	0.2721	0.1303	0.1845	0.2893	0.269	0.2832	0.2276	0.2141	0.1224	0.1921	0.1701	0.1301	0.1302	0.1399
109	0.2346	0.2351	0.2596	0.1179	0.172	0.2768	0.2565	0.2707	0.2151	0.2017	0.1099	0.1796	0.1577	0.1176	0.1177	0.1274
098	0.2218	0.2223	0.2467	0.105	0.1592	0.264	0.2437	0.2578	0.2023	0.1888	0.0971	0.1668	0.1448	0.1048	0.1049	0.1146
856	0.2093	0.2098	0.2343	0.0925	0.1467	0.2515	0.2312	0.2454	0.1898	0.1764	0.0846	0.1543	0.1324	0.0923	0.0924	0.1022
731	0.1968	0.1973	0.2218	0.0801	0.1342	0.239	0.2188	0.2329	0.1774	0.1639	0.0721	0.1419	0.1199	0.0799	0.08	0.0897
602	0.1839	0.1845	0.2089	0.0672	0.1214	0.2262	0.2059	0.2201	0.1645	0.1511	0.0593	0.129	0.1071	0.067	0.0672	0.0769
477	0.1714	0.172	0.1964	0.0547	0.1089	0.2137	0.1934	0.2076	0.1521	0.1386	0.0468	0.1166	0.0946	0.0546	0.0547	0.0644
352	0.159	0.1595	0.184	0.0422	0.0964	0.2012	0.181	0.1951	0.1396	0.1261	0.0344	0.1041	0.0822	0.0421	0.0422	0.052
224	0.1461	0.1466	0.1711	0.0294	0.0835	0.1884	0.1681	0.1823	0.1267	0.1133	0.0215	0.0913	0.0693	0.0293	0.0294	0.0391
099	0.1336	0.1342	0.1586	0.0169	0.0711	0.1759	0.1556	0.1698	0.1143	0.1008	0.0091	0.0788	0.0569	0.0168	0.017	0.0267
026	0.1211	0.1217	0.1461	0.0044	0.0586	0.1634	0.1432	0.1573	0.1018	0.0883	-0.0034	0.0663	0.0444	0.0044	0.0045	0.0142
155	0.1083	0.1088	0.1333	-0.0084	0.0457	0.1506	0.1303	0.1445	0.089	0.0755	-0.0162	0.0535	0.0316	-0.0085	-0.0083	0.0014
279	0.0958	0.0963	0.1208	-0.0209	0.0333	0.1381	0.1178	0.132	0.0765	0.063	-0.0287	0.041	0.0191	-0.0209	-0.0208	-0.0111
408	0.0829	0.0835	0.108	-0.0338	0.0204	0.1253	0.105	0.1192	0.0636	0.0502	-0.0415	0.0282	0.0063	-0.0338	-0.0336	-0.0239
533	0.0704	0.071	0.0955	-0.0462	0.0079	0.1128	0.0925	0.1067	0.0512	0.0377	-0.054	0.0157	-0.0062	-0.0462	-0.0461	-0.0364
658	0.058	0.0585	0.083	-0.0587	-0.0045	0.1003	0.0801	0.0942	0.0387	0.0253	-0.0665	0.0033	-0.0186	-0.0587	-0.0585	-0.0488
786	0.0451	0.0457	0.0701	-0.0716	-0.0174	0.0875	0.0672	0.0814	0.0259	0.0124	-0.0793	-0.0096	-0.0315	-0.0715	-0.0714	-0.0616
911	0.0326	0.0332	0.0577	-0.084	-0.0299	0.075	0.0547	0.0689	0.0134	0	-0.0918	-0.022	-0.0439	-0.084	-0.0838	-0.0741
036	0.0201	0.0207	0.0452	-0.0965	-0.0423	0.0625	0.0423	0.0564	0.0009	-0.0125	-0.1042	-0.0345	-0.0564	-0.0964	-0.0963	-0.0866
165	0.0073	0.0078	0.0323	-0.1094	-0.0552	0.0497	0.0294	0.0436	-0.0119	-0.0254	-0.1171	-0.0473	-0.0692	-0.1093	-0.1091	-0.0994
129	-0.0052	-0.0046	0.0198	-0.1219	-0.0677	0.0372	0.0169	0.0311	-0.0244	-0.0378	-0.1296	-0.0598	-0.0817	-0.1217	-0.1216	-0.1118
414	-0.0177	-0.0171	0.0074	-0.1343	-0.0801	0.0247	0.0045	0.0187	-0.0369	-0.0503	-0.142	-0.0723	-0.0942	-0.1342	-0.134	-0.1243
543	-0.0305	-0.03	-0.0055	-0.1472	-0.093	0.0119	-0.0084	0.0058	-0.0497	-0.0631	-0.1549	-0.0851	-0.107	-0.147	-0.1469	-0.1371
668	-0.043	-0.0425	-0.018	-0.1597	-0.1055	-0.0006	-0.0209	-0.0067	-0.0622	-0.0756	-0.1673	-0.0976	-0.1195	-0.1595	-0.1593	-0.1496
797	-0.0559	-0.0553	-0.0308	-0.1725	-0.1183	-0.0135	-0.0337	-0.0195	-0.075	-0.0884	-0.1802	-0.1104	-0.1323	-0.1723	-0.1722	-0.1624
921	-0.0684	-0.0678	-0.0433	-0.185	-0.1308	-0.0259	-0.0462	-0.032	-0.0875	-0.1009	-0.1926	-0.1229	-0.1448	-0.1848	-0.1846	-0.1749
046	-0.0809	-0.0803	-0.0558	-0.1975	-0.1433	-0.0384	-0.0586	-0.0445	-0.1	-0.1134	-0.2051	-0.1353	-0.1572	-0.1972	-0.1971	-0.1873

国立天文台 相馬充先生に計算いただいた

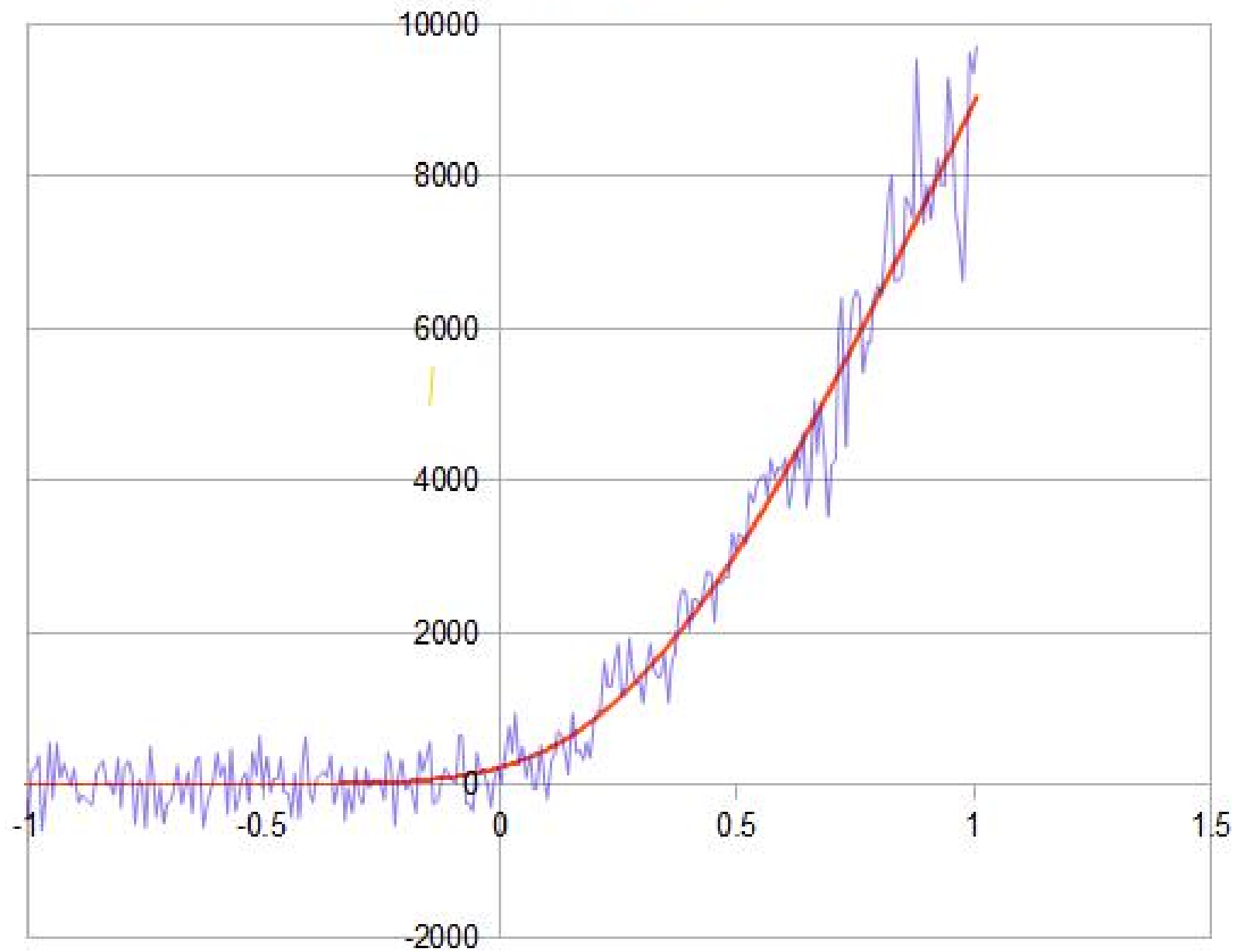
# 月縁地形を考慮して作った日食曲線



# 和田氏の観測

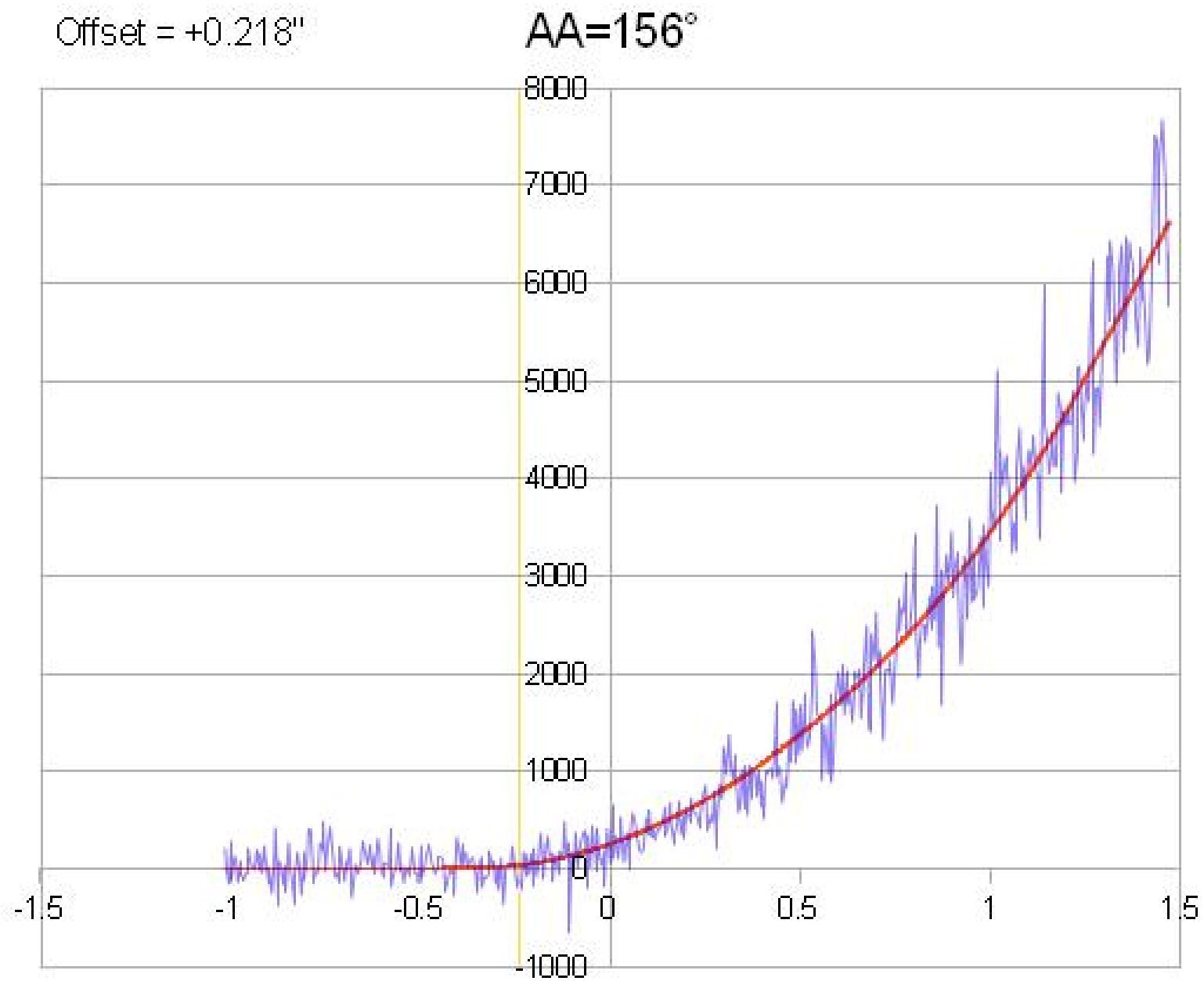
Offset = +0.194"

AA=212°





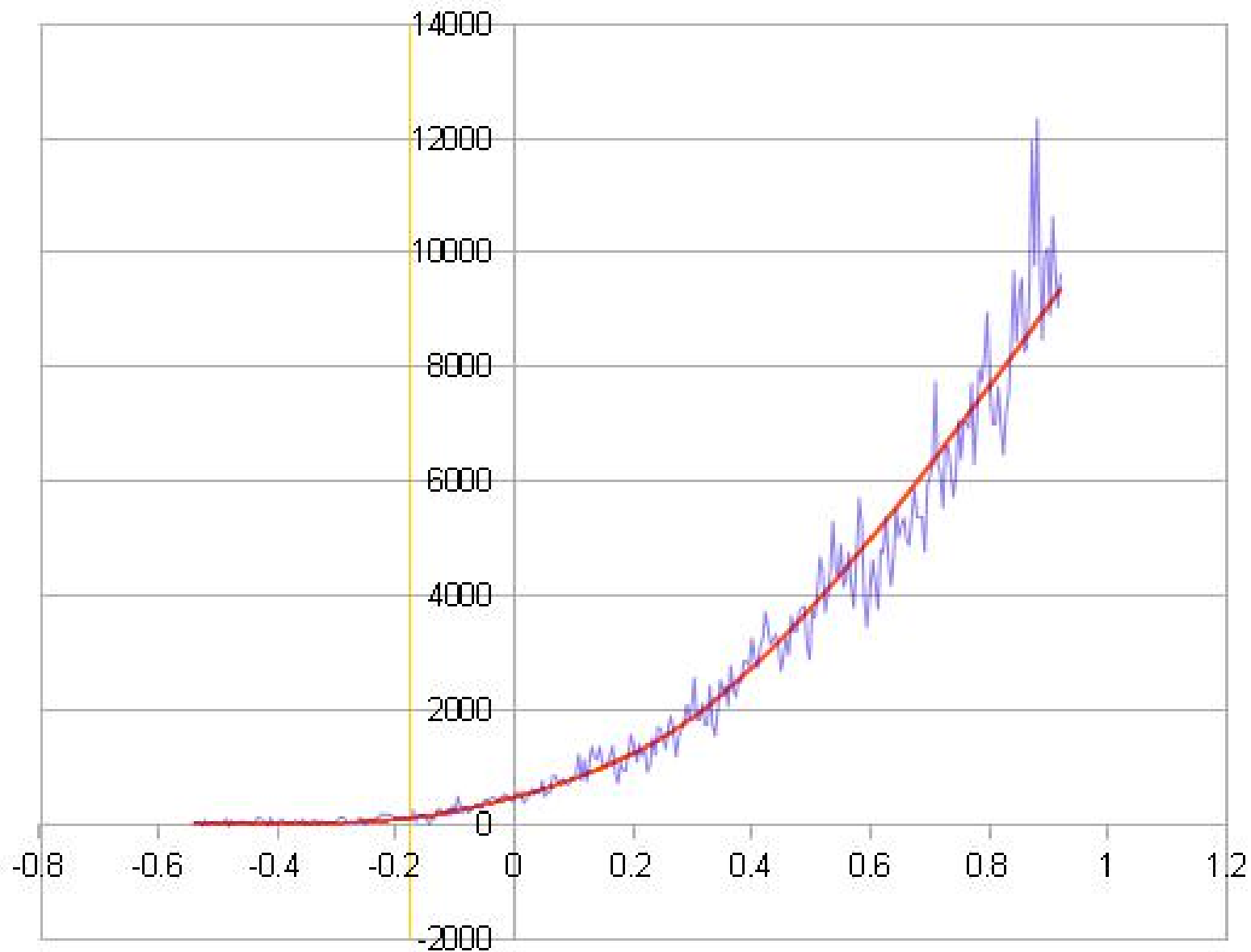
# 1校の観測



# 1等の観測

Offset = +0.188"

AA=156°



# 解析可能なビデオ

- 視野内での移動がない
  - … 極軸が合っている。
  - … コントローラで移動させていない。
- ゲインが適切に設定されている

# 現在までに求められた太陽半径

測定値 - 696000km

小和田氏の観測 : +0.198 +/- 0.055 秒角  
+ 132 +/- 40km

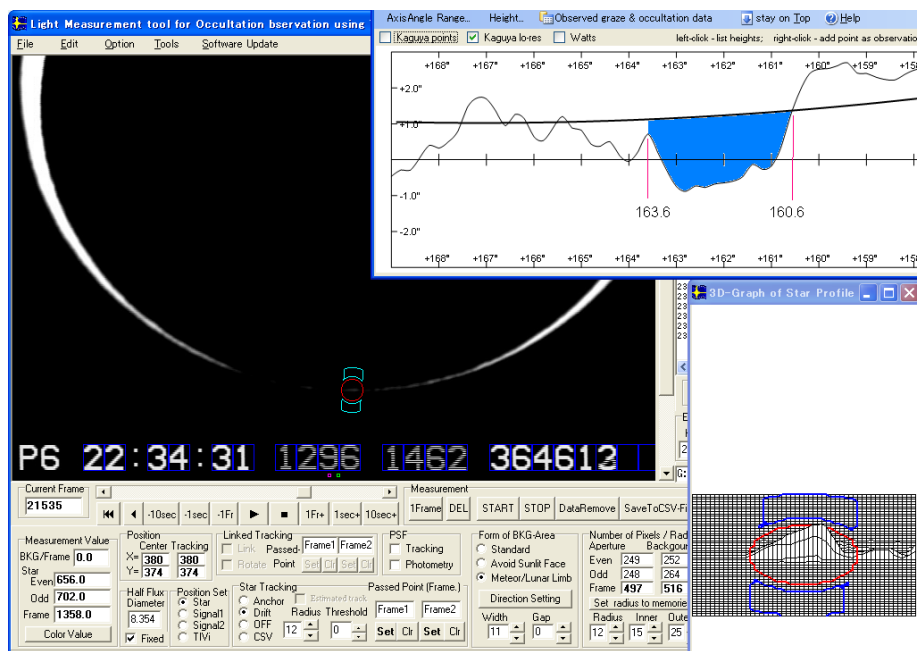
一宮校の観測 : +0.184 +/- 0.036 秒角  
+ 135 +/- 27km

外村氏の観測 : +0.174 秒角  
+ 127km

長野高専の観測 : +0.111 +/- 0.093 秒角  
+ 81km +/- 68km

# 求められた太陽の半径

696134 +/- 22 km



現在までの解析の途中経過の値です。  
今後の解析で改訂される可能性があります。

## 成果 :

- ・太陽最外縁部の周縁減光のようすをビデオから得ることができた。
- ・モデルにフィットさせる方法で太陽半径を得ることができるのではないかと、この見通しを持つことができた。



## 課題 :

- ・得られた太陽半径の値のばらつきの原因は何か。



- ・キャプチャの問題・・・ほぼ特定
- ・周縁減光を精度良く解析することにより、検証できる可能性

ご静聴ありがとうございました