

R03「恒星変光現象への高精度測光の適用」

大島 修(岡山県立水島工業高校)

1. はじめに

国内でも系外惑星のトランジットを測光的に検出する観測例が増えてきた。筆者の関わった HD17156b の観測では、0.1% (= 1 ミリ等級) 測光の系統誤差が問題になり、原因を調べ補正することができた。このような高精度測光の手法は、従来の変光星・食連星の測光観測にも積極的に取り入れることによって、より高精度で信頼性の高い解析が可能になると思われる。ここではそれらの具体的なノウハウや系統的誤差の実例と対応策を述べる。

2. 食連星の高精度な光度曲線の実例

系外惑星の測光観測で鍛えられた手法を適用して観測を行った GR Tau と AM Leo の光度曲線を示す。

どちらも、筆者が口径 20cm という小口径望遠鏡に、安価な SBIG 社製 ST-9 XE CCD カメラを取り付けて、倉敷市内の自宅から観測したもので、特に好条件の観測地ではない。むしろ観測環境としては、水島工業地帯の西の外れに位置していて、決して透明度も良くない場所である。冬季の関東平野のように、透明度の良い晴天が持続するというものもない。

それでも、小望遠鏡によるこの程度の測光精度の光度曲線は、国内ではほとんど観測例がないと思われる。

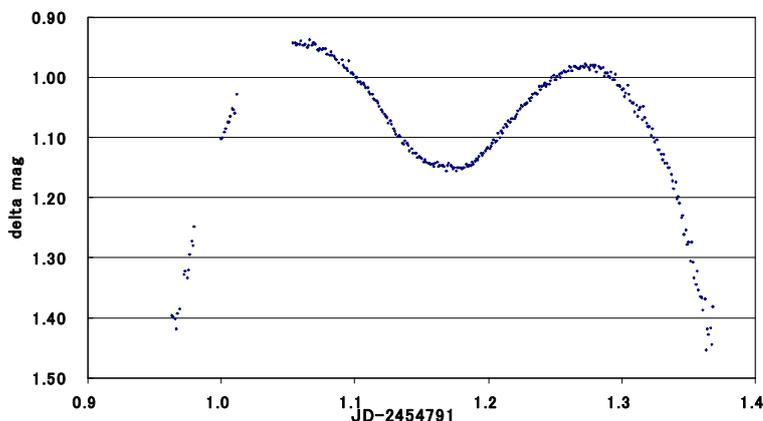
3. 従来の変光星・食連星の観測と系外惑星 Transit 観測の違い

右の表は、従来の変光星・食連星の観測と系外惑星 Transit 観測の違いを大まかにまとめたものである。

10 等星程度まで明るい変光星では、測光精度は、(1)光子統計(2)ピクセル内の感度ムラの影響(3)比較星の明るさ(4)フラットフィールドの質など精度が決まる。

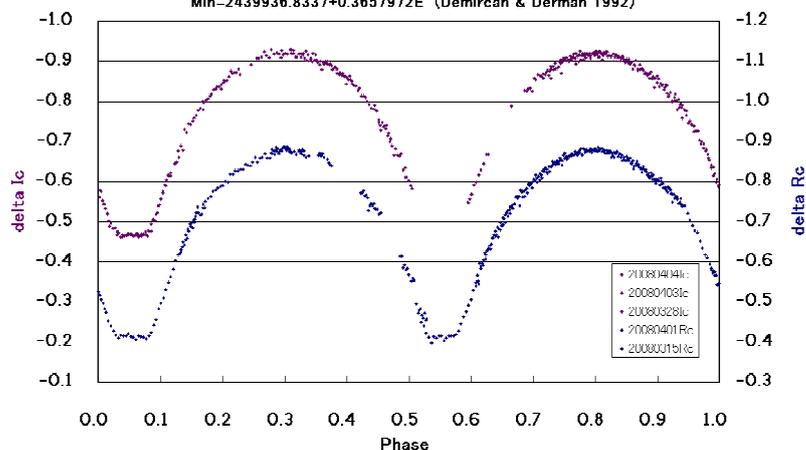
(1)と(2)については、デフォーカスにより多数ピクセルを用いて測光することで一度に解決する。

GR Tau 20081121@OTO 20cm ST-9XE R-band



AM Leo @OTO 20cm ST-9XE

Min=2439936.8337+0.3657972E (Demircan & Derman 1992)



| | 従来の方法 | Transitの手法 |
|-----------|-------------------|----------------------------------|
| 焦点 (FWHM) | できるだけ合わせる(1~2pix) | 大きくぼかす(12pix以上) |
| 露出 | 数10秒のサチらない範囲 | 1分から2分間 10 ⁶ cnt以上 |
| 比較星 | 視野内にある星を使う | を求めてなるべく |
| フラットフィールド | ドームやスカイ | 薄明で100枚 |

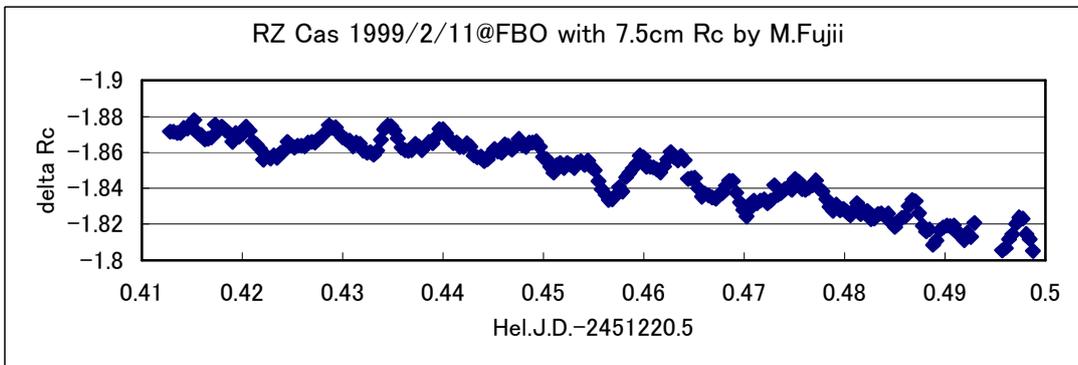
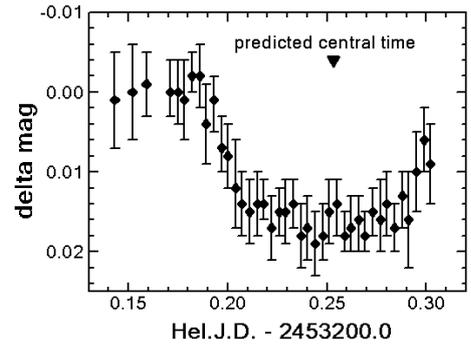
4. 多数ピクセルを用いた測光法

CCD 1 ピクセルのフルウェル容量は、 $10^4 \sim 10^5$ AUD 程度であるので、多数のピクセルで星の光を受ければ、光子数をさらに 2 桁以上以上稼ぐことができる。同時に 1 ピクセル内に存在する感度ムラの影響を事実上無視できるようになる。

- (1) デフォーカス法 (藤井・大島 1997、COROT、Kepler など)
- (2) PSF 増大法 (HAT)
- (3) 「分光器で測光」法 (HST)

(1) デフォーカス法

1997 年の RZ Cas の非動径振動検出の測光観測のテスト時に藤井貢さんから、もう 1 つよい測光精度が出ないという相談があった。そこで「ピントをはずして露出を稼いでみたらよいのでは。サチらなくなるのでより明るい比較星も使えようになるし」と助言。その結果、口径 7.5cm の望遠鏡+ST-7CCD でミリ等級の精度を達成できた。その手法を、2004 年以降の Transit の観測へ適用することを提唱した (大島、2004 年の連星/変光星研究会で発表)。右図は 2004 年当時唯一の transit 惑星 HD209458b を 10cm 望遠鏡でデフォーカス法で観測したもの。下図は、RZ Cas の測光例である。



(2) HAT プロジェクトで採用した PSF 増大法による測光精度の向上

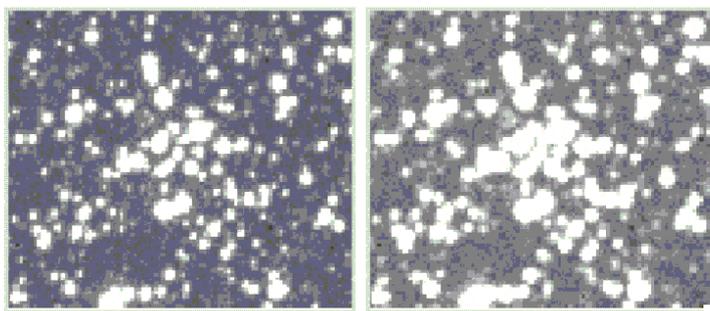
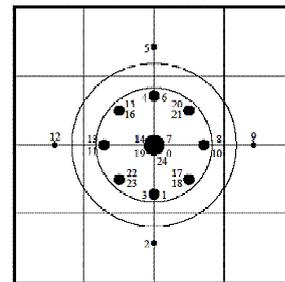
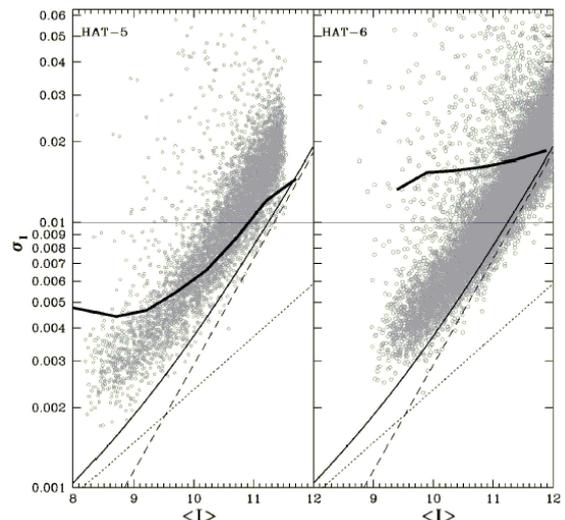


Fig. 3.— A $25' \times 25'$ region (approx 1/300th of a frame) showing the open cluster M34 tak by HAT-6 with tracking mode (left, 1.2 pix FWHM) and PSF broadening mode (right, 2.0 pix FWHM). Blurring is to the eye only slight, but makes a significant difference in photomet



HAT (Hungarian-made Automated Telescope) は 1 眼レフ用 200mm f/1.8 レンズ (口径 11cm) で系外惑星を 9 個発見しているサーベイプロジェクトであるが、このプロジェクトでは、測光精度を上げるために、左上図のように露出中に望遠鏡を 24 回振り、PSF を増大している (右上図の写真)。

右図の灰色の点は、PSF 増大法による実測値で、太線はシャープにピントを合わせた場合の測光精度。縦軸は標準偏

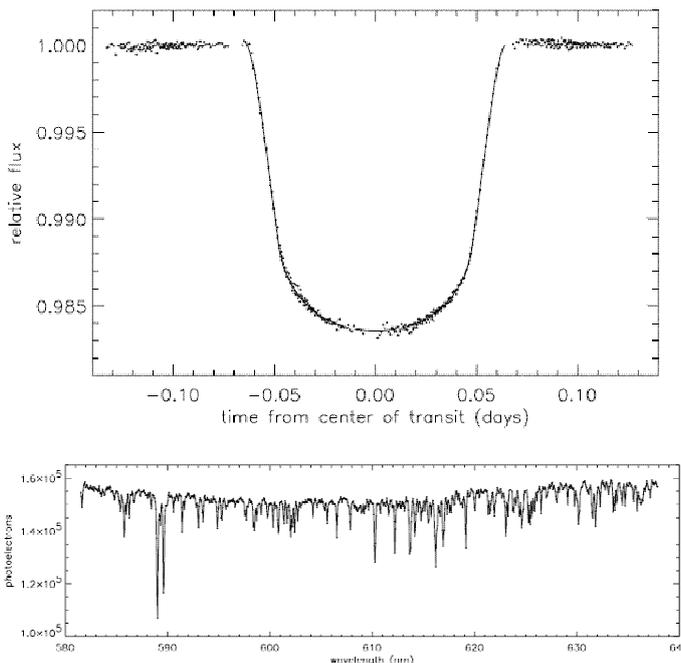


差で、横軸は I 等級。PSF 増大により、極限等級付近の暗い星の測光精度は悪化するが、明るい星では逆に測光精度が向上していることがわかる。Bakos et al.(2004) PASP, 116, p.266

(3) 分光器による高精度測光 with HST

右図は、有名なトランジット系外惑星 HD209458 b の HST での高精度な光度曲線 (4 回分の重ね合わせ) である。Brown et.al.(2001, ApJ.552,699)

注意！単に「HST だから高精度測光ができた」のではない。S/N比 10000 を目指すために、光子数を 10^8 個以上を稼ぎたい。しかし、そんな大光量に対応できる測光装置は HST にはない。そこで Brown らは分光器によるスペクトルから測光を行う方法を考案。スリット幅は 2 秒角に開け、星の光をすべて分光器に入れる。スペクトル 1024×64 ピクセル = 57nm 分を足し算し、絶対測光を行った。



5. デフォーカスの効果

(1) S/N 比の改善

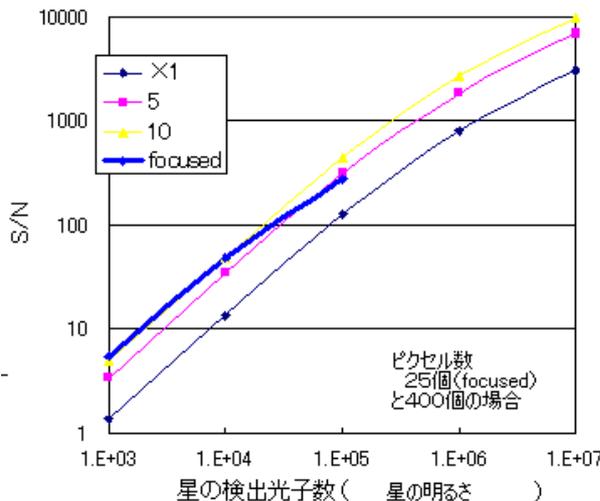
明るい星の場合、測光精度を上げるためには、露出時間を延ばし、光子数を稼げばよい。しかし、ピントを合わせて撮像した場合、少数のピクセルに光が集中するために、すぐサチり、それ以上 S/N 比を向上させることはできない (右図、"focused" の曲線)。

星像をボカした場合、同じ露出時間だと S/N 比は低下する (同図、"×1" の曲線)。しかし、サチらない範囲で、露出を伸ばすと S/N 比は次第に改善される。

$$S/N = \frac{N_{star}}{\sqrt{N_{star} + n_{pix}(N_{sky} + N_{dark} + N_{read}^2)}}$$

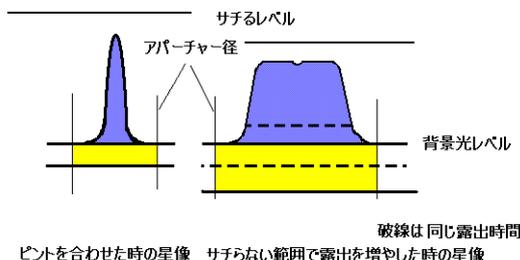
N_{sky} は分母のルートの中に入っているが N_{star} は分子にもかかっている効果である。

デフォーカスとS/N比 Back=1000



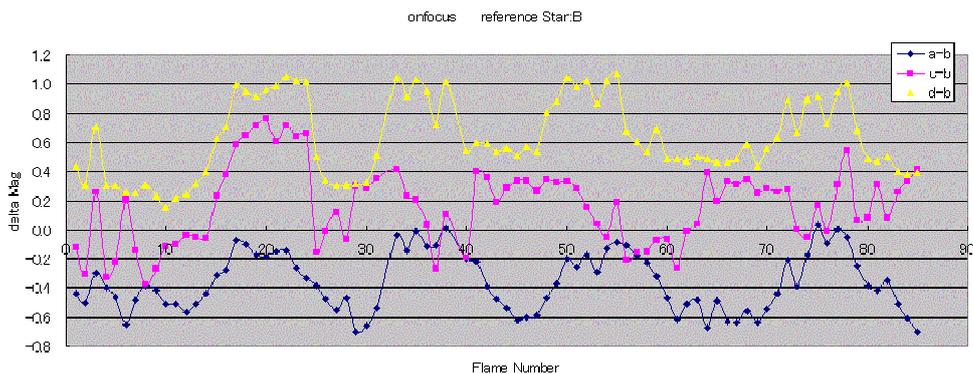
(2) アンダーサンプリングとピクセル内感度ムラの解消

小望遠鏡では、ピントをシャープに合わせた場合、星像サイズは 1 ピクセル以内になり完全なアンダーサンプリングとなることが多い。その上、表面照射型 CCD のピクセル表面には、電極など複雑な構造物が載っているため場所により表面の光の透過度が異なり、同じ 1 ピクセルの中でも感度は均一にならない。その結果、このピクセル内感度ムラが測光結果に非常に大きく影響する。

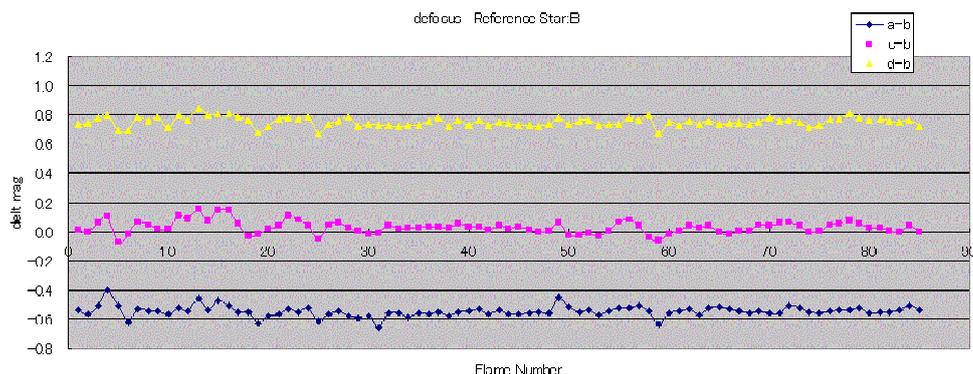


破線は同じ露出時間
ピントを合わせた時の星像 サチらない範囲で露出を増やした時の星像

右の2枚の図は、SBIG ST-9XE カメラのピクセル内感度ムラの様子を調べたものである。焦点距離 100mm のレンズに、色収差の軽減のためにVフィルターをかけ、望遠鏡の恒星時追尾のレートをわざとずらし、星像がゆっくりとピクセルをスキャンするモードになっている。視野中心付近にある"a"から"d"の4個の星について、b星を比較星として、等級差を調べたもので、横軸はフレーム番号で時間変化を表してある。



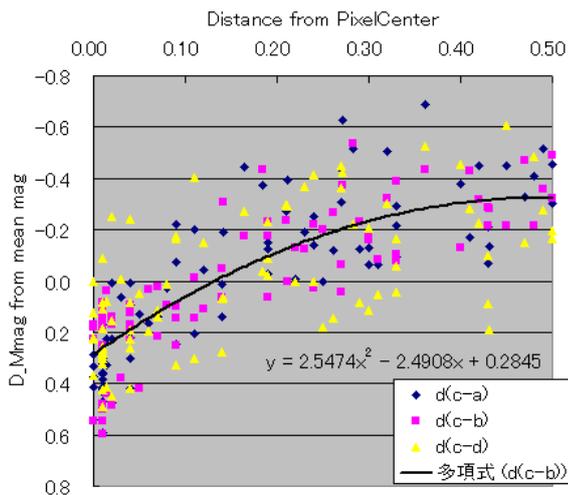
上の方の図は、ピントを合わせた状態での撮像で、星像サイズ (FWHM) が1ピクセルの数分の1程度、スキャンにより星がピクセルからピクセルへと移動する毎に、最大0.8等級程度の感度変化があることがわかる。



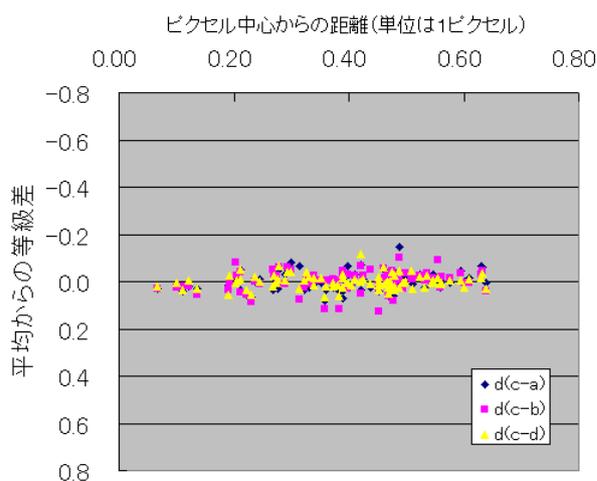
下の方の図は、FWHMが数ピクセルになるようにピントをずらして撮像したもので、ピクセル間の移動に伴う感度変化はほとんど見られなくなっていることがわかる。

これらのデータから、星像重心のピクセル中心からの距離と明るさの関係を調べたのが、次の図である。ピントを合わせた場合は、感度がピクセル中心からの関数になっていることがはっきりとわかる。ピントをはずすと、星像重心位置との相関は見られなくなる。

ピクセル内の星像の位置と感度の関係
ピントを合わせた場合



ピクセル内の星像位置と感度の関係
(ピントを外した場合)



以上、デフォーカスが測光精度の向上に大きく効果があることを説明した。ミリ等級の精度を目指す場合、10の6乗ADUを稼ぎたい。そのためには、1ピクセルあたり10の4乗ADUを上限と考えれば、100ピクセル程度までデフォーカスするのがよいという結論になる。つまり、少なくともFWHMで12ピクセル程度までぼかす必要がある。

6. ミリ等級の系統的誤差の問題

(1) HD17156b の場合

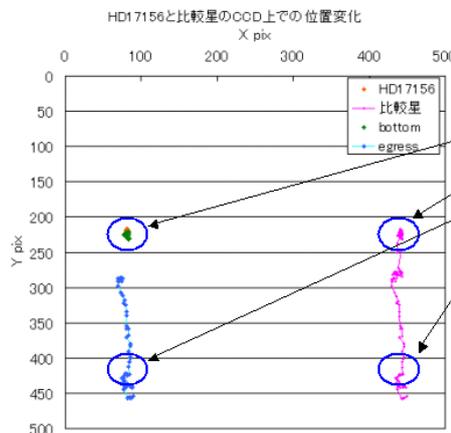
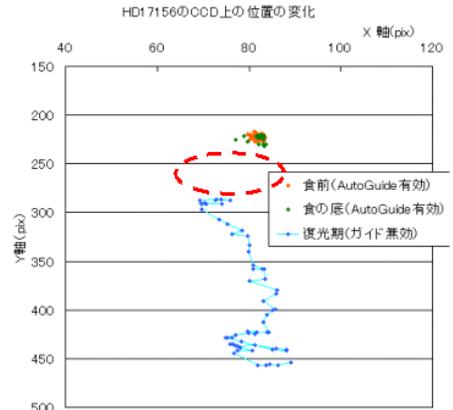
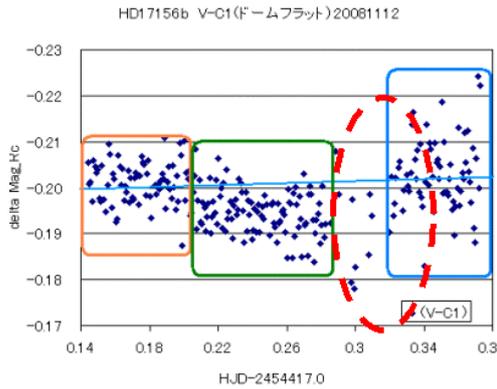
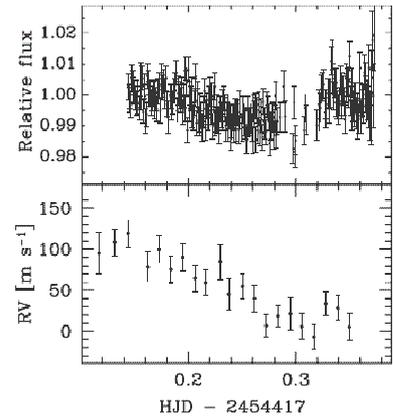
右図の上パネルは、系外惑星のマクローリン・ロスター効果を扱った論文 (Narita et al. 2008) に載せた筆者の観測による光度曲線であるが、減光量9ミリ等級程度であることがわかる。しかし、この光度曲線から計算した惑星サイズは、欧米の観測と比較して2割ほど大きく出た。そこで、測光データを見直した結果、ガイドエラーとフラット補正に起因する2ミリ等級(0.2%)の系統的誤差が含まれていることが判明した。フラットフィールド処理をやり直し、系統的誤差を1ミリ等級まで押さえることができた。

下図は、目的星の CCD 上の位置変化(右パネル)と光度曲線の関係を示したもので、悪天候でオートガイダーが星を見失う(赤破線の楕円部)までは、CCD 上での位置はほとんど一定であった(橙色および緑部)が、天候回復後の復光フェイズ時にガイドエラーにより大きく CCD 上を下方へ移動している(青線部)ことがわかる。食外のレベルも後半が右上がりになっていることがわかる。

これだけ CCD 上の位置が変化すると、フラットフィールドに傾きがあれば、たちまち 0.2% 程度の系統的誤差が容易に生じることになる。そこで、使用したマスターフラットフレームの目的星と比較星の位置における明るさの比を調べた(右図の添字1が観測前半の位置、添字2は食の後半の位置)。予想通り 0.2% の系統的誤差が見つかった。

問題のフラットフィールドは、ドームフラットを使ったものであったため、より均一性の良い薄明フラット(50日ほど後の観測ではあったが)を使い、処理をし直した。その結果、食外のレベルは食の前後で同一レベルになり、食の減光量も7ミリ等級となり、惑星サイズも他の観測とほぼ同じ値となった。

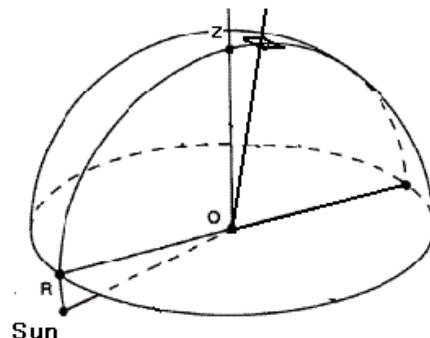
なお、薄明フラット取得に際しては、Chromey & Hasselbacher (1996)によれば、天頂より少し反太陽方向の領域が最も均一になっているようだ。空の明るさは、50000 カウント程度以下になってから、10000 カウントまで、100 フレーム連続撮像した。撮像中は星が写りこむのを防ぐために望遠鏡を東西南北に振り続けた。



測定したフレームは、(MstドームFlat/Mst薄明flat×定数)で得たものを使用
Mstフレームは100枚のノーマライズドメイン処理結果

| | X | Y | 径 | PixNo. | 総カウント |
|-------|-----|-----|----|--------|---------|
| V1 | 77 | 219 | 30 | 2917 | 805240 |
| C1 | 421 | 216 | 30 | 2917 | 800249 |
| V2 | 92 | 419 | 30 | 2917 | 801647 |
| C2 | 422 | 409 | 30 | 2917 | 798154 |
| V1/C1 | | | | | 1.00624 |
| V2/C2 | | | | | 1.00438 |

このドームflatは薄明flatに比べて、画面下の方で目的星を0.2%ほど明るくする影響を与えている



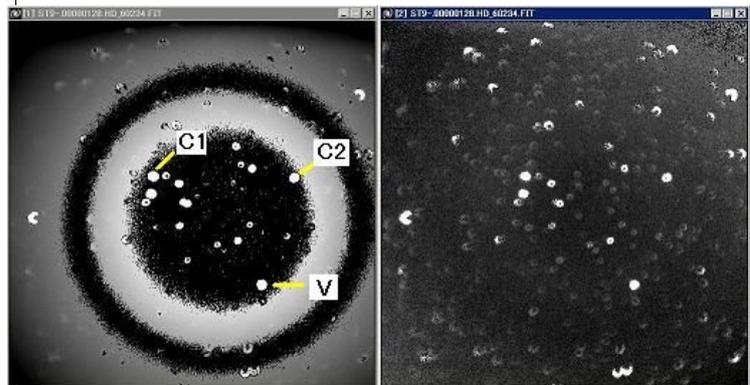
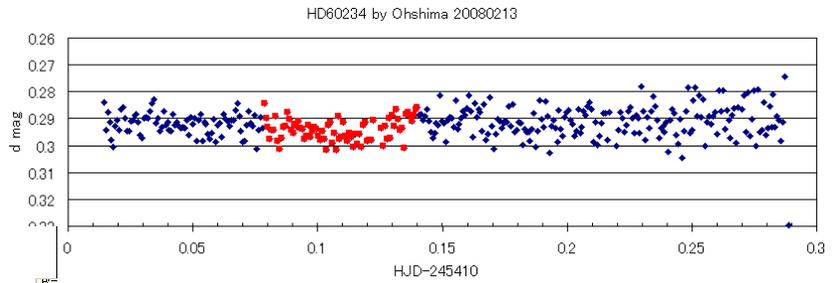
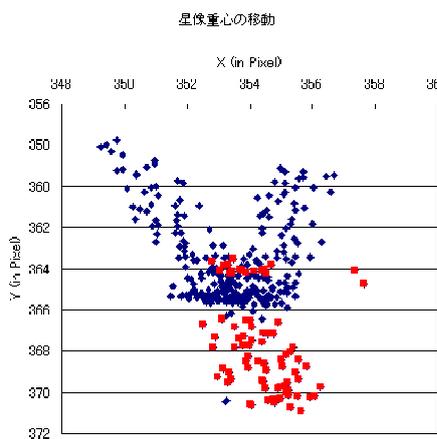
薄明フラットの撮像天域

天頂と太陽を通る大円上で、天頂よりも反太陽側(OTOでは天頂より5度反太陽方向にしている)

(2) HD60234 の場合

この星は、N2K プロジェクトのトランジット惑星候補星であり、T 大学の T さんよりトランジットを起こしているかも知れないという観測報告があった。ただ、その日時は、惑星が主星の向こう側に隠れるフェイズに当るため、トランジットを起こしているとは考えにくかったが、理論的には同一惑星軌道の 180 度の離れた位置に 2 つの惑星が安定に存在できるため、もう一方の惑星が存在すればトランジットはあるという井田茂さんの示唆があり、念のために 1 周期後にフォローアップ観測を行うことになった。

右図は、その予報時刻前後の筆者の測光観測である。何と赤色点で示した部分が**数ミリ等級の減光**を起こしているように見える。もしリアルな現象なら、一大事である。



事は慎重を要するために、観測データを詳細に検討した。CCD 上の位置を調べたものが上図左パネルで、赤点が高度曲線状での「減光」部の時期にあたる。どうも特定の部位になると「減光」現象が生じているようである。上図中パネルは、フラット補正前の画像で諧調を強調して表示しているので望遠鏡の視野の周辺減光がよくわかる。目的の HD60234 は「V」で、比較星は「C1」「C2」で示してある。上図右パネルは、フラット補正後の諧調を強調した画像であるが、フラット補正後も何やら同心円状のムラが生じていることがわかる。

この観測では、同程度の明るさの比較星を同一視野内に確保するために 20cm f/10 の光学系を f/3.3 へ縮小するフォーカルレデューサーを用いていた。極端な視野縮小を行った結果、著しい周辺減光が生じ、薄明フラットを撮ってフラット補正を行っても、補正量が大き過ぎ、精度良く補正するのは困難であることは容易に想像できる。

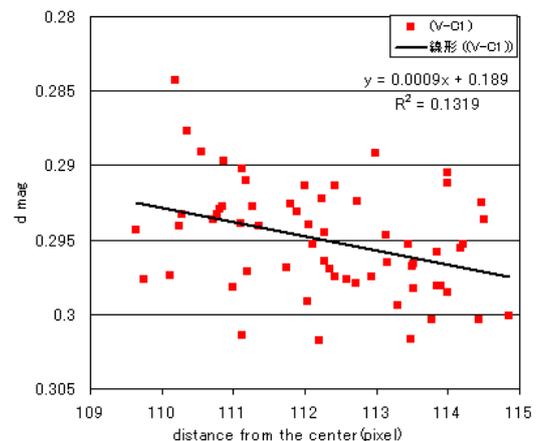
そこで、この観測データで、周辺減光中心からの距離と測光値の関係を調べてみたのが右図である。相関がありそうである。フラット補正を行っても補正しきれないで残った系統的誤差が生じているらしいことがわかる。

こうして、この星は、少なくとも筆者の観測からは、問題の時刻に減光量数ミリ等級以上のトランジットを起こしているという結論を導くことはできなかった。ここでも、フラットフィールドとガイドエラーによる系統的な誤差を生じていたことになる。

<教訓>

- ・ 補正しきれないほどの大きな周辺減光の生じる光学系は使わない！
- ・ ガイドはやはり正確に！

星像の位置と減光の関係
($0.08 < \text{HJD}-245410 < 0.14$)



7、まとめ

恒星変光現象の観測にも系外惑星の高精度測光の技法は生かして使うべきである。
小口径望遠鏡と安価な冷却 CCD カメラでも十分良い精度の測光観測を実現できる。
比較的明るい星をミリ等級の測光精度で観測するために、以下のことに配慮すべきである。

- ・ デフォーカスしてたっぷり露出する
その目安は、FWHM=12ピクセル以上、 10^6 ADU 以上のカウント数に
- ・ 比較星は、目的の星と同等かそれより明るいものを使う
そのためには視野の広い装置で（ラージフォーマット CCD または焦点距離の短い光学系）
- ・ しかし、補正しきれないほどの大きな周辺減光の生じる光学系は使わない
- ・ ガイドは正確に行い、同じ領域のピクセルで測光できるようにする
- ・ フラットフィールドは、薄明フラットで 100 枚程度を取得する

参考文献

Bakos, Noyes, Kovács, Stanek, Sasselov, and Domsa 2004 PASP, 116, p.266
HAT プロジェクトの測光技術

Brown, Charbonneau, Gilliland, Noyes and Burrows 2001, ApJ.552, p.699
HST での分光器を使った HD209458b のトランジット測光観測

Chromey & Hasselbacher 1996, PASP 108, p.944
薄明フラット用の天域は天頂よりも反太陽方向にあることを調べた

Narita, sato, Ohshima and Winn 2008 PASJ, 60, L1
HD17156 b のロシター効果の検出

大島 修 2004 連星/変光星研究会集録
ミリ等級精度の系外惑星トランジットの測光観測

Toyozumi and Ashkiey 2005, Pub. Astron. Soc. Australia, 22, p.257
ピクセル内感度ムラについて詳しく調べてある