

# トランジット法による太陽系外惑星の観測

Observations of Extrasolar Planets by the Transit Method

大石 尊久

OHISHI Takahisa

北海道大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻

惑星物理学研究室

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science,

Hokkaido University

Physical Planetology Laboratory

2007/01/31

## 要旨

1995年に初めての系外惑星が発見されて以来、現在までに200個を超す系外惑星が発見されている。それらの系外惑星発見の多くはドップラー偏移法を用いられたものである。この方法では惑星の公転周期や軌道長半径、離心率といった軌道情報しか正確に知ることができない。そのため、その他の情報を知るには他の観測方法で同じ星を観測する必要がある。

本研究では、恒星前面を惑星が通過する際の等級変化を観測するトランジット法で観測し、惑星の詳細な情報を求めた。また、新しい系外惑星の発見を目指すための準備段階でもある。

観測地として本研究で選択したのは、北海道の北部に位置する名寄市である。そこにある名寄市立木原天文台と共同で本研究は行われた。名寄市は盆地にあり、周囲に大都市がないため、漁船や街明かりによる光害が全くと言っていいほどない。また、大気中のダストが少なく、冬期には氷点下の気候が続くため水蒸気量も少ない。本州に比べて気温が低いいため、熱ノイズが入りやすい冷却 CCD カメラを使用するにも適した環境である。

観測としてまず最初に目指すことは、既にトランジット法での観測履歴のある系外惑星を観測し、既存の観測機器でトランジット現象を検出することが可能であることを証明することである。トランジットする系外惑星の情報はトランジット予報を公開している [www.transitsearch.org](http://www.transitsearch.org) から取得し、観測日の夜に現象開始が重なるものを選択した。初めての観測の結果、トランジット法で発見された系外惑星 TrES-1 のトランジット現象を検出することに成功した。しかし、惑星の詳細な情報を求めるまでには至らなかった。そのため、2回目以降の観測ではより良い状態のデータを得るためにはどうしたらよいかを調べるための観測を行った。その結果、TrES-1 を観測したデータは以前のデータに比べて、予測される曲線に近いグラフを表すようになった。

本論文では、トランジット法で観測した際の観測結果と観測システム構築の履歴を紹介する。

# 目次

第 1 章	序論	3	第 3 章	観測結果・議論	19
1.1	系外惑星について . . . . .	3	3.1	観測対象星 . . . . .	19
1.1.1	系外惑星とは . . . . .	3	3.1.1	TrES-1_b . . . . .	19
1.1.2	系外惑星探索の歴史 . . . . .	3	3.1.2	55Cnc_e . . . . .	20
1.1.3	系外惑星の種類 . . . . .	4	3.2	観測結果 . . . . .	21
1.2	系外惑星の観測方法 . . . . .	4	3.2.1	観測 1 . . . . .	22
1.2.1	ドップラー偏移法 . . . . .	5	3.2.2	観測 2 . . . . .	23
1.2.2	トランジット法 . . . . .	6	3.2.3	観測 3 . . . . .	24
1.2.3	ドップラー偏移法 + トランジット法 . . . . .	8	3.2.4	観測 4 . . . . .	25
1.3	観測目標・野望 . . . . .	9	3.3	考察 . . . . .	26
第 2 章	手法	10	3.3.1	望遠鏡による違い . . . . .	26
2.1	観測場所と観測機材 . . . . .	10	3.3.2	対象星による違い . . . . .	26
2.1.1	観測場所 . . . . .	10	3.3.3	連続撮影の方法 . . . . .	26
2.1.2	観測機材 . . . . .	10	3.3.4	その他 . . . . .	27
2.2	観測方法 . . . . .	15	3.4	データ誤差の検証 . . . . .	28
2.2.1	観測 . . . . .	15	3.5	惑星パラメータの算出 . . . . .	31
2.2.2	測光 . . . . .	17	3.5.1	観測 2 と観測 3 の 結果 . . . . .	31
2.2.3	可視化 . . . . .	17	3.5.2	恒星と惑星の半径 の比 . . . . .	31
			3.5.3	惑星の軌道長半径 . . . . .	32
			第 4 章	まとめ	33
			4.1	まとめ . . . . .	33
			謝辞		34
			参考文献		35

# 第1章 序論

## 1.1 系外惑星について

### 1.1.1 系外惑星とは

系外惑星は太陽系外の惑星のことである．1995年に初めて発見され，2006年7月には発見総数は200個を超えた [10] ．

### 1.1.2 系外惑星探索の歴史

系外惑星の探索は1940年代に始まった．

20世紀初頭，地球から観測される天体の大部分が恒星であることが判ったことによって，他の恒星の周りにも惑星が回っているであろうと思われるようになった．それに加え，観測装置の精度の向上も進み，1940年代には太陽系外の惑星を探す試みが盛んになった．

1940年代から数十年にわたって行われていた観測方法はアストロメトリ法である．これは，恒星が惑星の引力によってふらつく様子を恒星の位置を精密に測定することによって，惑星の存在を発見する方法である．この方法によって，1963年にアメリカのピーター・バンデカンブがバーナード星を発見したと発表した<sup>1</sup>が，10年後にそれを否定する論文が発表された．バーナード星は発見した天文台の観測機材の固有の誤差からくる観測ミスであった．実際，他の天文台ではバーナード星の観測は成功していなかった．

アストロメトリ法は，恒星のふらつきが小さいため観測が困難だと言われており，現在までにアストロメトリ法での発見はされていない．

1980年代からは，現在では系外惑星探索の主流であるドップラー偏移法を用いた観測が行われ始めた．しかし当時の観測装置の精度では，恒星のふらつきが秒速200m以上のものしか検出できない．木星が太陽をふらつかせる速度が秒速13mであることを考えると，その精度は惑星を発見するには不十分である．

その後，1995年まで様々な恒星が観測されてきたが，惑星は全く発見されなかった．1990年代前半は理論研究者たちによって惑星の形成は不可能であるという発表がなされていた．

系外惑星の発見が初めて発表されたのは1995年10月6日のことであった．ミッシェル・マイヨールとディディエ・ケロズがペガスス座51番星に惑星があると発表した．当時の観測装置の精度は秒速10m～15mであった中，発見された惑星は恒星を秒速55mで揺らしていた．すぐに他の天文台でも追試<sup>\*1</sup>が行われ，観測データが正しいことが証明された．

ところが，発見された惑星は公転周期が4.2日で，恒星からわずか0.051 AUを公転し

---

<sup>\*1</sup>微妙な観測では他の観測チームでも観測を行い，同じ結果が出ると発表が信用される．

ていた．そのため，太陽系形成論での説明がつかず，反論<sup>\*2</sup>が相次いだ．しかしこれらの反論では説明が付かず，やはり何らかの天体が回っているという考えに落ち着いた．

惑星が実際に回っていると証明出来たのが，1999年にドップラー偏移法で発見されたHD209458である．翌2000年にHD209458のトランジット法での観測が成功したからである．トランジット法は系外惑星による恒星の食を検出したものであるため，天体が回っているのは明らかとなった．天体のサイズも詳細に判ったため，回っている天体が恒星でなく惑星であることも証明された．

系外惑星の初めての発見から11年経った2006年7月，ついに発見数は200個を超えた．現在のドップラー偏移法による観測精度は数 m/sec 程度であり，土星サイズの惑星を検出可能である．地球が太陽をふらつかせる速度は0.09 m/secであることを考えると現在の精度では第2の地球を発見するのは困難である．

しかし2006年1月，重力レンズ法で地球サイズの系外惑星の発見がされた．背景の星からの光の歪みによって発見する方法であるが故に発見確率の低い観測方法ではあるが，恒星から遠く離れた小さい星でも発見が可能である．

### 1.1.3 系外惑星の種類

#### 1. ホット・ジュピター

現在発見されている系外惑星で最も多く発見されているのが「ホット・ジュピター」と呼ばれる系外惑星である．ホット・ジュピターは恒星の近くを高速で公転する木星級質量の惑星である．惑星表面は恒星からの輻射によって高温になっていると考えられている．ホット・ジュピターは質量が大きく恒星に近いので，恒星を大きくふらつかせる．

#### 2. エクセントリック・ジュピター

彗星のような楕円軌道を持つ木星サイズの巨大ガス惑星．

#### 3. 木星（類似）型惑星

木星サイズで恒星から数 AU 離れた場所を公転する惑星．

#### 4. 地球サイズの惑星

重力レンズ法で，地球質量の5.5倍の惑星が発見されている．

1つの恒星の周りを複数の惑星が回っている系も発見されている．

## 1.2 系外惑星の観測方法

系外惑星の観測方法には以下の方法がある．

- ドップラー偏移法

---

<sup>\*2</sup>黒点が自転しているという説，恒星の脈動しているという説，等

- トランジット法

以下にこれらの観測方法の詳細を示す。

### 1.2.1 ドップラー偏移法

ドップラー偏移法は、惑星の引力によって恒星がふらつくことで恒星が発する光の波長変化を観測する方法である (図 1.1)。恒星と惑星による重心を回る恒星が観察点より遠離る時、恒星からの光の波長は長くなり、近づく時恒星からの光の波長は短くなる。このスペクトル変化を観察することで、以下の惑星パラメータが導出可能である。なお恒星の半径・質量  $R_{star}$  ,  $M_{star}$  は他の観測によって明らかになっているものとする。<sup>\*3</sup>

- 公転周期  $T$   
スペクトル変化の周期から求められる。
- 軌道離心率  $e$   
恒星からのスペクトル変化を観測することで、恒星の地球に対する相対速度を求めることが出来る。その相対速度の時間に対する変化の様子から軌道離心率は求められる。
- 軌道長半径  $a$   
ケプラー第 3 法則

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{star}} \times a^3 \quad (1.1)$$

から

$$a = \left( \frac{4\pi^2}{GM_{star}T^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.2)$$

となり、公転周期  $T$  から求められる。<sup>\*4</sup> ここで  $G$  は万有引力定数である。

- 惑星質量の最小値  $M_{planet-min}$   
恒星の遠ざかる速度、近づく速度から  $M_{planet}/\sin\theta$  の質量が求められる。ここで  $\theta$  は地球から見た視線方向に対する惑星の公転面傾斜角である。視線方向に対して惑星の公転面がどれだけ傾いているのかはドップラー偏移法では判らないため、惑星質量の下限值  $M_{planet-min}$  しか求めることが出来ない。

<sup>\*3</sup>恒星の色や明るさから質量、半径を推測できる。

<sup>\*4</sup>ケプラー第 3 法則を厳密に表すと

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_{star} + M_{planet})} \times a^3$$

となるが、ここでは惑星質量が恒星質量に対して十分に小さなものであると仮定して考える。

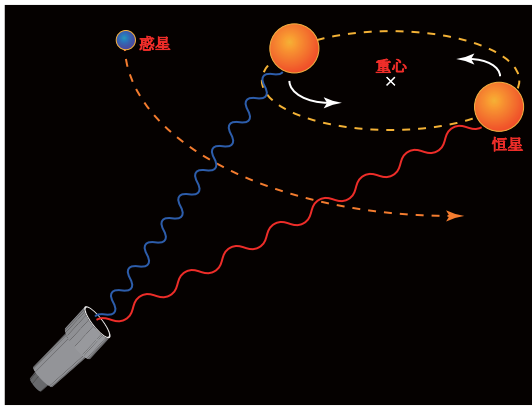


図 1.1: ドップラー偏移法

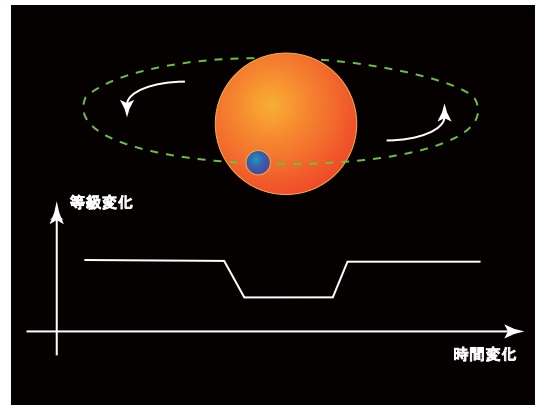


図 1.2: トランジット法

### 1.2.2 トランジット法

トランジット法は、恒星の前面を惑星が通過するとき生じる等級の変化（トランジット現象）を観測する方法である。恒星半径に対する惑星半径の大きさの比が大きいほど等級の変化も大きい。この方法では地球と恒星の間を惑星が通過しなければならず、視線方向と恒星面とのなす角が小さい惑星しか観測できないが、このなす角を求めることで惑星質量を厳密に求められるという利点がある。

また、トランジット法は他の観測方法と比較して口径の小さな望遠鏡でも観測が可能である。

トランジット法で観測することで以下の惑星パラメータがわかる。

- 公転周期  $T$

トランジット現象が起こる周期  $T_{transit}$  が公転周期  $T$  となる。

$$T = T_{transit} \quad (1.3)$$

- 軌道長半径  $a$

ドップラー偏移法と同様に 1.1 式より求められる。

- 惑星半径  $R_{planet}$

トランジット現象前と現象最中の等級の差から恒星半径に対する惑星半径の比が求められる。

観測結果から現象開始前と現象最中（恒星面の前に惑星が完全に重なっている状態）の光度差  $L_{middle}/L_{before}$  が求めれば、惑星半径  $R_{planet}$  は

$$\begin{aligned} \frac{R_{planet}}{R_{star}} &= \sqrt{1 - \frac{L_{middle}}{L_{before}}} \\ &= \sqrt{1 - 10^{\frac{m_{before} - m_{middle}}{2.5}}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

となり、既知の  $R_{star}$  から惑星半径が求められる。

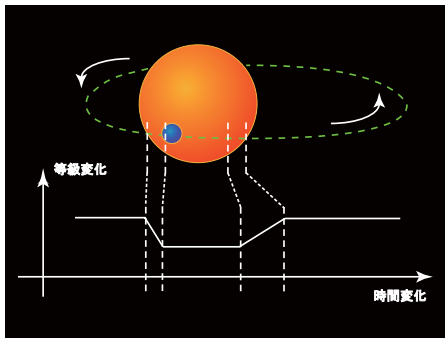


図 1.3: 楕円軌道と等級変化のグラフ．近恒星点に近いほど等級の変化は早い．

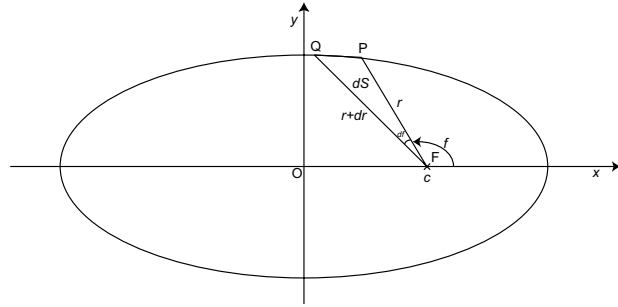


図 1.4: 楕円軌道図

- 軌道離心率  $e$

軌道離心率は恒星面に惑星が入っていく時の速度と，恒星面から出て行く時の速度を求め，惑星が恒星前面を通過するのにかかる時間を考慮することで割り出すことが出来る．恒星前面を惑星が通過するのにかかる時間は，近恒星点で一番早く，遠恒星点で一番遅くなる．公転速度  $v$  と離心率  $e$ ，惑星の位置（近恒星点からの角度  $f$ ）の関係は以下ようになる．

近恒星点から角度  $f$  だけ移動した位置での恒星 - 惑星間距離  $r$  は軌道長半径  $a$ ，離心率  $e$  を用いて

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \quad (1.5)$$

と表すことが出来る．（図 1.4 の線分 PF）

ケプラー第 2 法則より，面積速度が一定であるため，

$$\frac{dS}{dt} = \text{const} \quad (1.6)$$

である． $dS/dt$  を公転周期  $T$  を用いて表すと

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} \cdot T &= (\text{楕円の面積}) \\ \frac{dS}{dt} &= \frac{\pi a^2 \sqrt{1 - e^2}}{T} \end{aligned} \quad (1.7)$$

と表すことが出来る．

図 1.4 の P から Q への移動する際の面積速度を  $r$  と  $f$  で表すと，

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{2} r^2 \frac{df}{dt} \quad (1.8)$$

であり，PQ の距離は  $rdf$  と表せるため，PQ 間を移動する際の公転速度  $v$  は

$$\frac{rdf}{dt} = \frac{2}{r} \cdot \frac{dS}{dt} = v \quad (1.9)$$



となる．

式 (1.9) は式 (1.7) を用いて

$$v = \frac{2\pi a(1 + e \cos f)}{T\sqrt{1 - e^2}} \quad (1.10)$$

となる．

観測結果から惑星が恒星面に入るときの速度と恒星面から出て行くときの速度を求め (図 1.3 の等級が変化する時間と惑星半径から速度が求まる)，惑星の恒星面通過時間を考慮すれば，式 (1.10) から離心率  $e$  と近恒星点からの角度  $f$  を決定することが出来る．

- 軌道傾斜角  $\theta$  (地球からの視線方向に対する傾斜角)

恒星面の前面を惑星が通過する時間は，惑星が恒星面のどこを通ったかで変化する．惑星が恒星面の中心を通過する際にかかる時間を  $t_o$  とする．この  $t_o$  は公転速度から求める．惑星が恒星端の緯度  $\phi$  の位置から進入する場合，惑星が通過する時間  $t_\phi$  は  $t_\phi = t_o \cdot \cos \phi$  となるため，楕円軌道内の恒星前面通過位置での速度と恒星面通過時間，恒星の直径から，恒星面のどの位置を通過していったかが判明する．

- 惑星大気組成

トランジット現象が起こっていない時の恒星のスペクトルと，トランジット現象が起こっている最中の恒星のスペクトルとの差分を取ることで惑星大気の吸収線を検出でき，そこから大気成分を推測することが出来る．

### 1.2.3 ドップラー偏移法 + トランジット法

同じ系外惑星をドップラー偏移法とトランジット法で観測した結果を組み合わせることによって，より多くの惑星情報が明らかになる (表 1.1) ．

	D	T	D+T
公転周期			
軌道長半径			
軌道離心率			
軌道傾斜角	×		
惑星質量		×	
惑星半径	×		
惑星密度	×	×	
惑星大気組成	×		

表 1.1: 観測から明らかになる情報 D: ドップラー偏移法 T: トランジット法

惑星質量は，トランジット法で地球からの視線方向の軌道傾斜角  $\theta$  が決定できるため，ドップラー偏移法での観測によって求まる  $M_{planet} / \sin \theta$  から質量  $M_{planet}$  を決定することが出来る．

### 1.3 観測目標・野望

本論文の構成は以下の通りである．

第 2 章 観測場所と観測方法

第 3 章 観測の結果と考察

本研究の目的は、将来的に系外惑星の詳細なパラメータを求めることを目指し、系外惑星の観測手法を確立することである．系外惑星の観測にはトランジット法を用い、既に報告されている系外惑星を観測することで、構築した観測システムを検証することにする．

第一の目標は既知の系外惑星を撮影し、トランジット現象を捉えることである．本研究はゼロからのスタートであるため、まずは以上のことを最優先に考え観測を開始した．

## 第2章 手法

### 2.1 観測場所と観測機材

#### 2.1.1 観測場所

観測場所は北海道の北部に位置する，名寄市（北緯 44 °21 '35 "東経 142 °28 '13 "標高 104m）である（図 2.1）．周囲に大きな都市がないため，光害の心配がなく，年間晴天率もよい．大気が安定している日が多く，長時間露出をする観測に適した場所であると言える．

その名寄市にある，名寄市立木原天文台にて共同で観測を行った．

冬期は気温が氷点下であるため，大気の水蒸気量は低く，CCD カメラを冷却するのに都合がよい．ところが，最低気温が氷点下 30 を下回ることもあるため，機材はそれに耐えうるものにする必要がある．

寒冷地で耐えられるものにする上で重要なのは，グリスの凝固点と，ケーブルの質である．大抵の赤道儀は氷点下 20 程度までしかグリスは耐えることができない．また，赤道儀の操作用ケーブル，電源ケーブル等は材質によっては低温で堅くなり，折れる可能性がある．

夏期は CCD カメラの冷却も本州で観測するときと比べ効率よく行える．ところが北海道は高緯度に位置するため，夜の時間帯が短く，観測が行える時間が短い．



図 2.1: 名寄市

#### 2.1.2 観測機材

##### 望遠鏡

望遠鏡は木原天文台所有の望遠鏡を使用する．

- 25 cm 反射望遠鏡（図 2.2）  
木原天文台内のドームに設置されている望遠鏡．ヨシカワ光器製の鏡筒．焦点距離は 1500mm．f/6．赤道儀は PENTAX MS-5．
- 40 cm シュミットカセグレン望遠鏡（図 2.3）  
木原天文台所有の移動天文台車内設置の望遠鏡．MEADE 社製の鏡筒．焦点距離は



図 2.2: 25 cm 反射望遠鏡

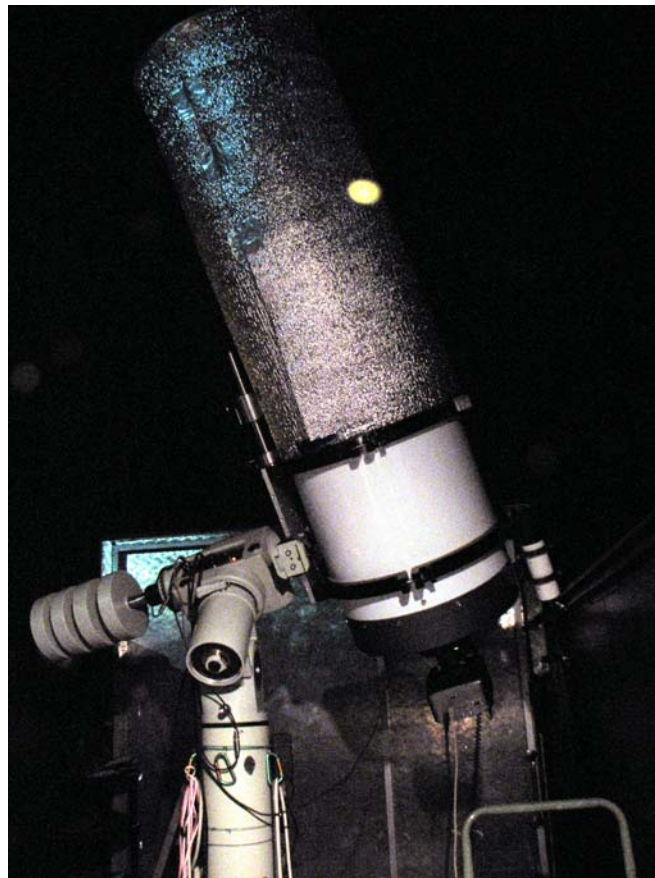


図 2.3: 40 cm シュミットカセグレン望遠鏡

4000mm . f/10 . 赤道儀は TAKAHASHI EM-500 .

## CCD カメラ



図 2.4: STL-1001E

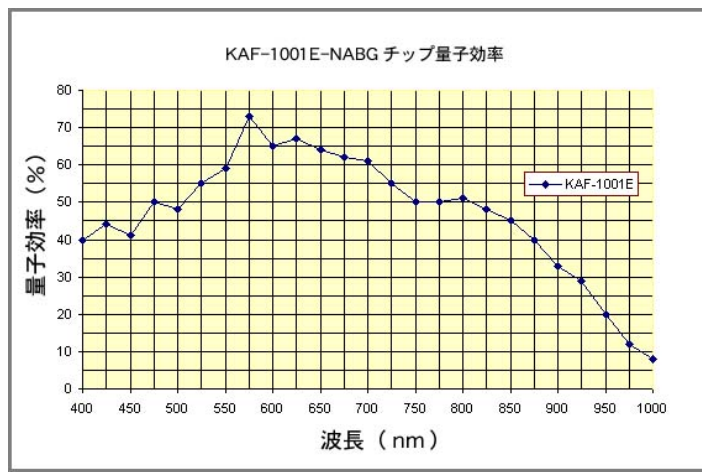


図 2.5: CCD チップの量子効率

<[http://www.kkohki.com/SBIG/new\\_SBIG/st1001eqe.gif](http://www.kkohki.com/SBIG/new_SBIG/st1001eqe.gif)>

使用した CCD<sup>\*1</sup> カメラは SBIG 社の STL-1001E (図 2.4) である . チップサイズは 24.6×24.6mm , 1 ピクセルのサイズは 24×24 μm である . チップの量子効率は赤外から紫外まで幅広い波長域で安定しており , 観測で使用する R バンド (波長 600nm 付近) の量子効率は 65% 前後と高い値を持つ (図 2.5) .

各望遠鏡と組み合わせた時の画角等は表 2.1 にまとめる .

STL-1001E と	25cm 反射	40cm シュミカセ
チップサイズ		24.6mm
1 pixel サイズ		24μm
焦点距離	1500mm	4000mm
口径	250mm	400mm
画角 (FOV)	56 '22.6"	21 '8.5"
対角画角 (FOV Diagonal)	1 °19 '43.7"	29 '53.9"
1 画素視野 (IFOV)	3.29"	1.23"
エアリディスクの直径	8.6μm	14.34μm

表 2.1: STL-1001E と各望遠鏡の組み合わせ

FOV:Field Of View , IFOV:Instantaneous Field of View

<sup>\*1</sup>Charge Coupled Device

## フィルター

フィルターは R バンドのフィルターを使用する．フィルターは CCD カメラのフィルターホイールに取り付ける．ジョンソンフィルターの波長特性を図 2.6 に示す．

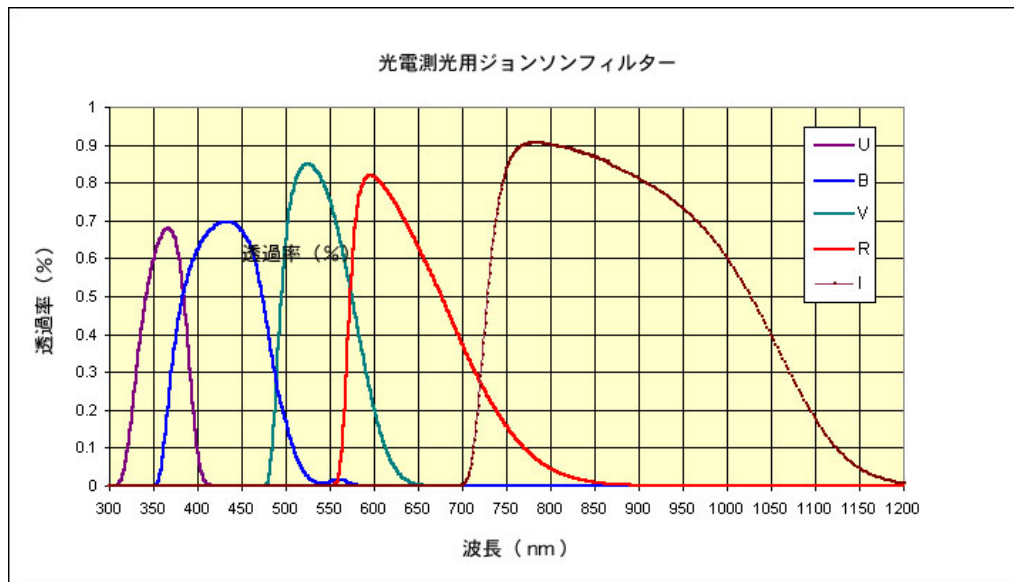


図 2.6: ジョンソンフィルターの特性

<<http://www.kkohki.com/SBIG/ubvri/UBVRIfilters.jpg>>

## パソコン

観測で使用するパソコンは以下の 3 種類である．

- CCD カメラ操作作用  
CCD カメラ (STL-1001E) とは USB で接続する．カメラの操作には CCD カメラに付属の CCDOPS<sup>\*2</sup>，もしくは CCDsoft<sup>\*3</sup> を使用する．
- 赤道儀操作作用  
赤道儀の操作には The Sky<sup>\*4</sup> を使用する．
- データ保存用  
データは CCD カメラ操作ソフトでフォルダを指定して，連番でファイル名を付け保存される．その際に，Windows のフォルダ共有機能で他のパソコンのフォルダを指定してデータを転送する．もしくは CCD カメラ操作作用パソコンのローカルに保存したデータを同期させる．

<sup>\*2</sup>SBIG 社の CCD カメラを操作するソフト

<sup>\*3</sup>Software Bisque, Inc. 製のソフト

<sup>\*4</sup>Software Bisque, Inc. 製のソフト

上記の 3 機能は 1 台のパソコンにまとめることは可能だが、負荷を分散させることで少しでもエラーの発生を押さえることを重要視した。また望遠鏡の周りで振動を起こさないようにするため、パソコンの操作は VNC<sup>\*5</sup> を使用して遠隔操作で行った。

---

<sup>\*5</sup>Virtual Network Computing

## 2.2 観測方法

### 2.2.1 観測

以下は望遠鏡，及び冷却 CCD カメラの使用方法，接続方法等である．

各機器の接続 望遠鏡と冷却 CCD カメラの接続は望遠鏡用のアダプターを使用して接続する．その際の注意点として，以下のことが挙げられる．

1. 取り付け角度

撮影した画像が赤緯・赤経と一致する方向となるように設置する．これを行わないと，後で画像から星を見つけるのに苦労することになる．

2. アダプターの隙間

アダプターの隙間から光が中に漏れることがある．それによって撮影した映像のバックグラウンドが明るくなる．接続部分の周りに黒い布を巻くことで改善できる．(図 2.7)



図 2.7: 望遠鏡と CCD カメラ．接続アダプターの周りに黒い布を巻くことで光の漏れを防ぐ．

赤道儀はパソコンから赤道儀操作ソフト The Sky を使用して操作する．CCD カメラの操作は SBIG 社製のソフト CCDOPS もしくは CCDSoft を使用した．

各機器の接続は，25 cm 反射望遠鏡を使用する際には図 2.8 のように，40 cm シュミットカセグレン式望遠鏡を使用する際には図 2.9 のように行う．パソコン同士は LAN で接続し，赤道儀の操作と CCD カメラの操作は VNC で遠隔操作する．撮像した映像は Windows



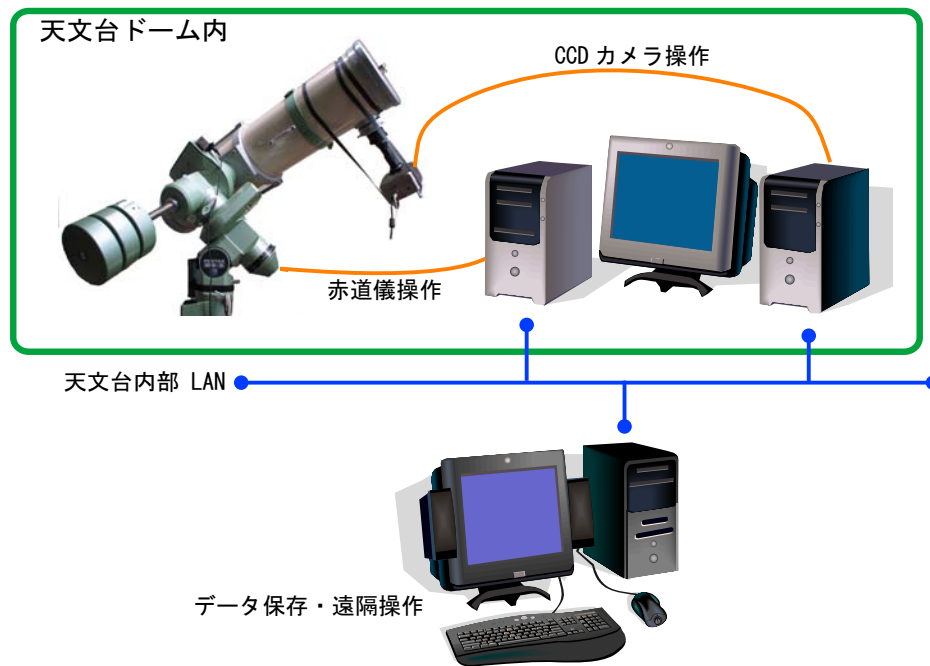


図 2.8: 天文台ドーム内の望遠鏡 (口径 25cm 反射式) を使用した時の機器の接続 .  
 CCD カメラと赤道儀の操作は 2 台のパソコンに分けて行う .



図 2.9: 移動天文台車内の望遠鏡 (口径 40cm シュミットカセグレン式) を使用した時の機器の接続 .

移動天文車内のパソコンのスペックが高いため、1 台のパソコンで CCD カメラと赤道儀の操作を行う .

のフォルダ共有機能で CCD カメラを操作するパソコンから直接ドーム外のパソコンに転送する。

撮像 撮像前にフォーカスモードでピント合わせと位置合わせをする。明るい星を使用してピントを合わせ、The Sky 上の位置と同期させる。次に対象星を The Sky を使用して導入する。細かい位置合わせは The Sky の微動機能で行う。細かいピントの調整は対象星を使用して行う。露出スピード、連続撮影枚数等は CCD カメラの操作ソフトで指定する。

### 2.2.2 測光

測光ソフトで一般的に主に使用されているのは IRAF である。が、IRAF は Linux 環境でのみしか動作しないため、本研究中では Windows で動作する Mira<sup>\*6</sup> を使用した。

測光は星が写っている各ピクセルの光子数のカウントを取り、積分してその星の総カウント数を求める。同一画像内の等級が既知の星との総カウント数の差から相対等級を求めることで、対象星の等級を調べる。

### 2.2.3 可視化

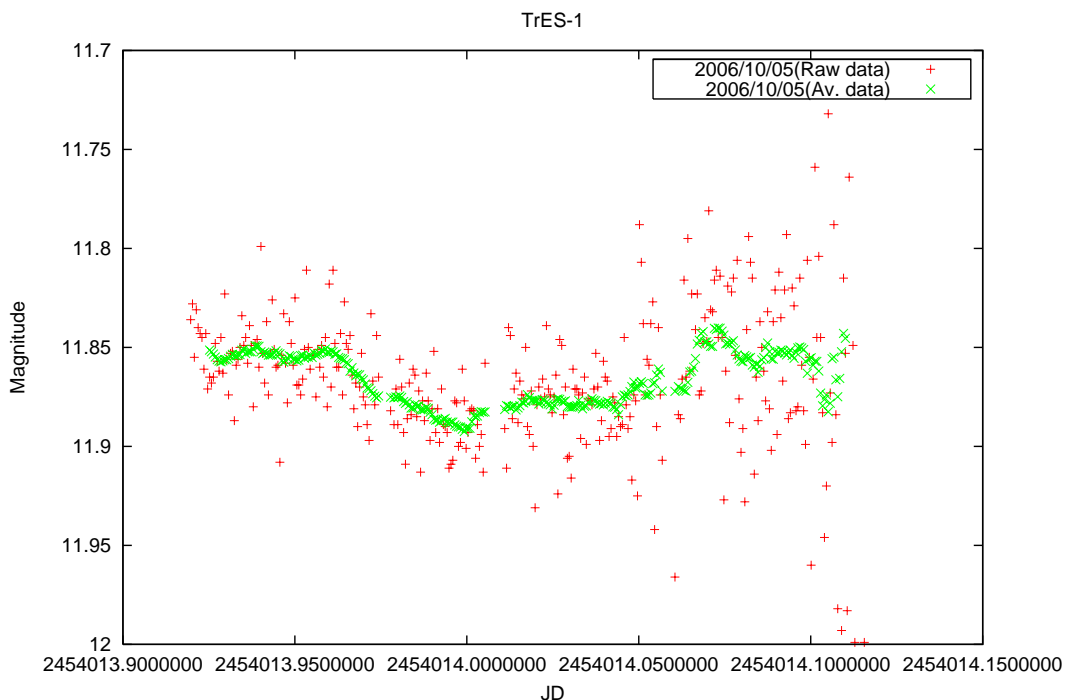


図 2.10: データを平均させる前と後の違い

測光したデータは Perl で並べ替えを行った後、Fortran でデータの時間平均処理を行い、

<sup>\*6</sup>Copyright ©Axiom Research, Inc.

Gnuplot でグラフ化を行った．平均化には前後 21 データを用いた．これによってデータの分散は抑えられ，等級変化が確認しやすくなる．

# 第3章 観測結果・議論

## 3.1 観測対象星

### 3.1.1 TrES-1\_b

TrES-1\_b は 2004 年に TrES (Trans-Atlantic Exoplanet Survey) というグループによって口径 10cm の小口径望遠鏡を用いた観測で発見された系外惑星である [9] .

TrES-1\_b は、太陽系から 500 光年離れたこと座の恒星 (GSC2652-1324<sup>\*1</sup>) を約 3.03 日で公転している。トランジット現象の開始から終了までの時間がおよそ 3 時間であるため、一晩で現象の開始から終了までの観測が可能であり、0.03 日 (約 45 分) ずつしか 1 サイクルでずれていかないため観測可能な日程が一時期に集まる。また、等級は約 12 等級であり、肉眼での観測は不可能であるが、冷却 CCD カメラを用いれば観測可能である。

TrES-1 の位置情報、他の天文台での観測によるデータは以下の通りである。

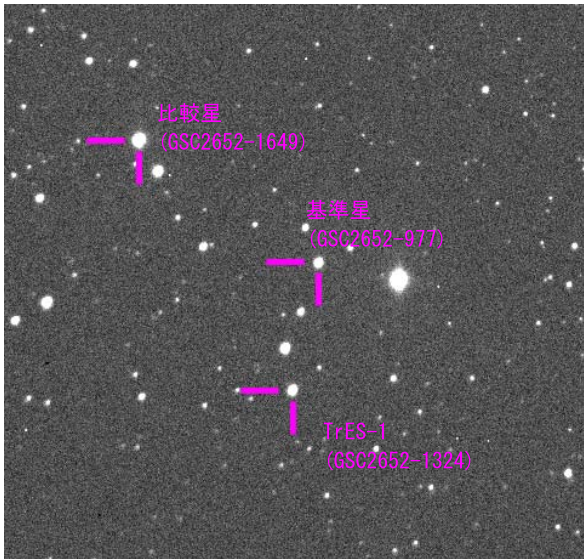


図 3.1: TrES-1 とその周辺

赤緯	19h04m09.8s
赤経	36 °37 '57 "
公転周期	3.030065 日
離心率	0.0
恒星質量	0.88 $M_{Sun}$
惑星質量	0.7537 $M_{Jup}$
恒星半径	0.85 $R_{Sun}$
惑星半径	1.02 ~ 1.10 $R_{Jup}$

表 3.1: TrES-1\_b の惑星パラメータ (参照文献 [12])

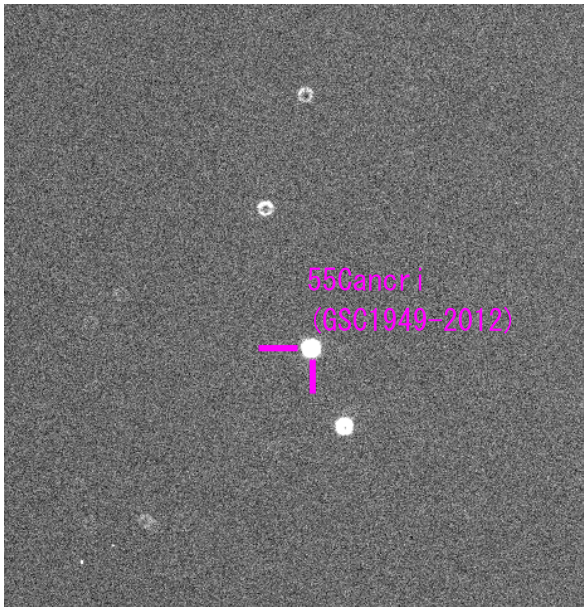
<sup>\*1</sup>Guide Star Catalog

### 3.1.2 55Cancr\_i\_e

55Cancr\_i (GSC1949-2012) はかに座の星である。地球から距離はおよそ 41 光年であり、1996 年に 1 つの惑星があるとして発表されたが、その後他にも惑星が存在することが明らかになり、現在までに 4 つの惑星が発見されている。太陽系とよく似たシステムである系外惑星系として注目されている。

55Cancr\_i\_e は恒星 55Cancr\_i の周りを公転する惑星として 4 番目に発見された。他の惑星に比べ、恒星にとっても近い位置を公転している。

55Cancr\_i の位置情報、他の天文台での観測によるデータは以下の通りである。



赤緯	08h52m35.8s
赤経	28 °19 '51 '
公転周期	2.808 日
離心率	0.1740
恒星質量	0.95 $M_{Sun}$
惑星最小質量	0.0443 $M_{Jup}$
恒星半径	0.95 $R_{Sun}$
惑星半径	0.35 $R_{Jup}$

表 3.2: 55Cancr\_i\_e の惑星パラメータ (参照文献 [12])

図 3.2: 55Cancr\_i

## 3.2 観測結果

本研究では、4回のトランジット観測を行った(表 3.3)。

	観測 1	観測 2	観測 3	観測 4
観測日	2005/08/31	2006/06/30	2006/10/05	2006/03/09
観測対象星	TrES-1.b	TrES-1.b	TrES-1.b	55Cancer
望遠鏡	25cm 反射	40cm シュミカセ	40cm シュミカセ	25cm 反射
CCD カメラ	STL-1001E	STL-1001E	STL-1001E	STL-1001E
フィルター	IR	R	R	IR
露出時間	20 秒/枚	30 秒/枚	30 秒/枚	30 秒/枚
連続撮影枚数	≤ 500 枚	≤ 100 枚	≤ 100 枚	≤ 200 枚
全撮影枚数	537 枚	365 枚	314 枚	269 枚
撮影間隔	-	-	10 秒	-
備考				口径 10cm の絞り

表 3.3: 使用した機材, 露出時間, 撮影枚数

以下に各観測の詳細を記す。

### 3.2.1 観測 1

天候は晴れであったが、薄雲があったため、雲の影響を受けにくい赤外領域で観測を行った。CCD カメラの操作には CCDOPS を使用した。機器の接続は図 2.8 のように行った。連続撮影枚数を 500 枚に設定し、観測対象星が視野から外れた場合、赤道儀操作ソフトを介して手動で位置を補正。

結果を図 3.3 に示す。ユリウス日 2453614.0000000 付近における等級の急激な増加からトランジット現象の開始が検出された。しかし、等級は予測されるような安定した直線を描かず、現象の終了を特定できなかった。

観測後半のデータの分散は前半約 200 枚のデータに比べ大きい。これは CCD カメラでの連続撮影による影響であると考えられる。CCD チップは冷却することでノイズを減らす必要があるが、連続撮影によって、CCD チップが十分に冷却されず熱がたまり、ノイズが大きくなってしまったと考えられる。

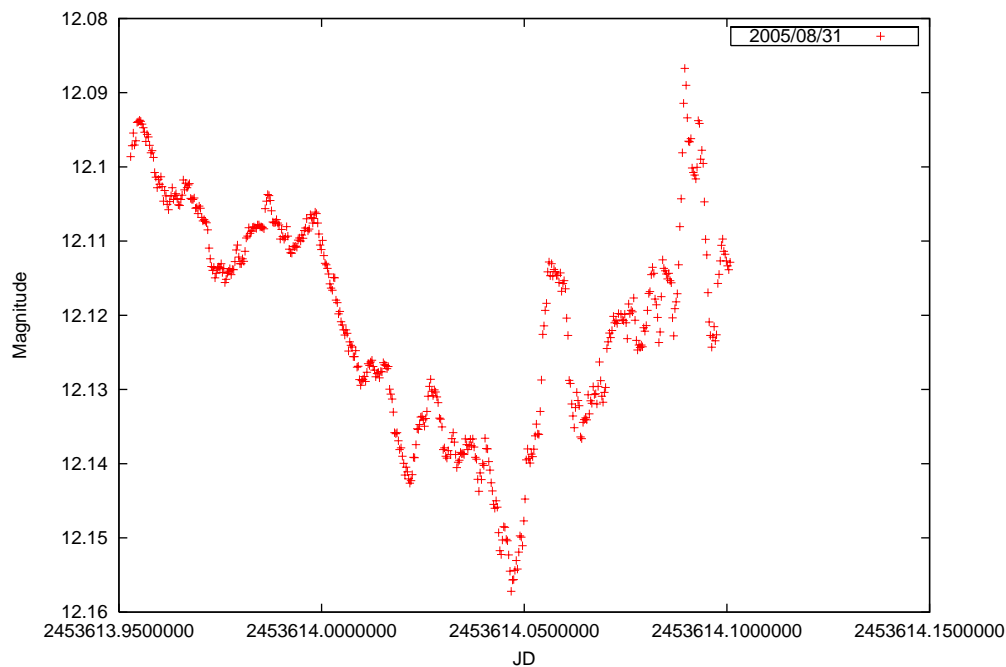


図 3.3: TrES-1 の等級変化 (2005/08/31)

### 3.2.2 観測 2

本観測では口径 40cm の望遠鏡を用いた．口径が大きくなったことで，ピクセルあたりのカウント値は稼げるようになったが，1 つの星あたりのカウント値は多い方が精度が上がるため，露出時間は観測 1 に比べ 10 秒長く取った．且つ，25 cm 反射望遠鏡に比べ焦点距離が長いので，視野は狭く，1 つの星を多くのピクセルで写すことができるので，測光精度は向上する．

本観測では観測 1 で連続撮影枚数が 200 枚以下の場合にはデータの分散が少なかったことを踏まえ，連続撮影枚数を 100 枚とした．

観測の結果を図 3.4 に示す．ユリウス日 2453917.0000000 付近及び 2453917.0800000 付近でそれぞれ等級の急激な増加及び現象が確認された．図 3.3 と比較して，トランジットの現象を正確に判断することができる．ただし，本観測でも現象終了点付近でデータの分散が大きい．これは望遠鏡の補正板<sup>\*2</sup>が結露していたためと思われる．

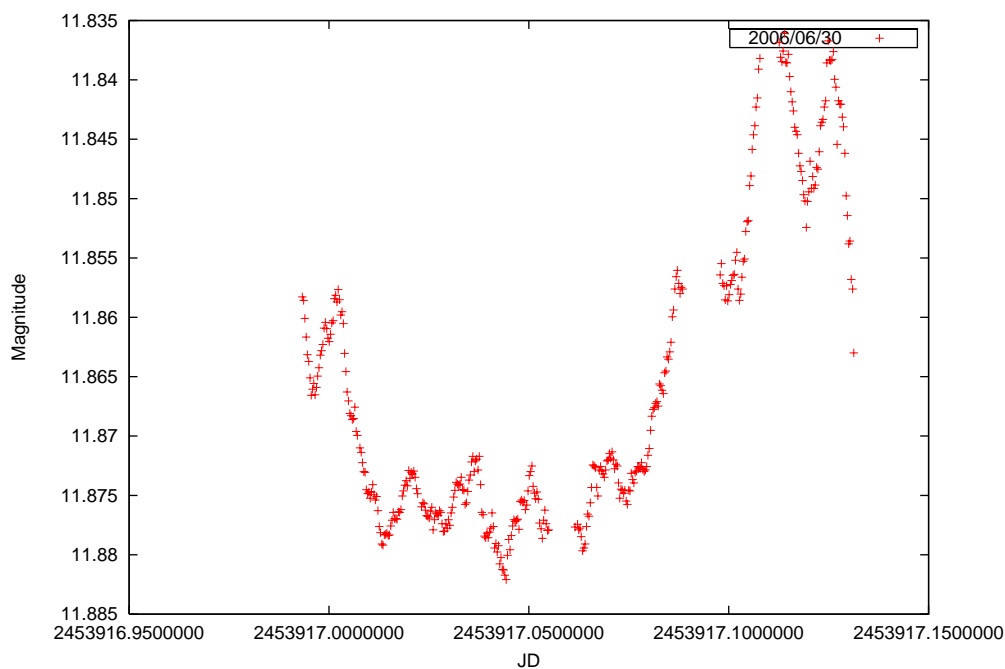


図 3.4: TrES-1 の等級変化 (2006/06/30)

<sup>\*2</sup>シュミットカセグレン式望遠鏡の前面に付いているガラスの板．反射鏡に入射する光の補正を行っている．



### 3.2.3 観測 3

本観測では、各撮影の間に約 10 秒のインターバルを置いた．それによって長時間露出をした後でも CCD チップを十分に冷却できるであろうと考えた．そのために、CCD 操作を行うソフトを上記の内容が行いやすい CCDSoft に変更した．

観測結果を図 3.5 に示す．本観測も観測 2 と同様に観測終了前のデータの分散が見られた．原因は観測 2 と同じく補正板の結露である．天頂付近の星の観測であったため、フードがあまり役に立っていなかったようである．

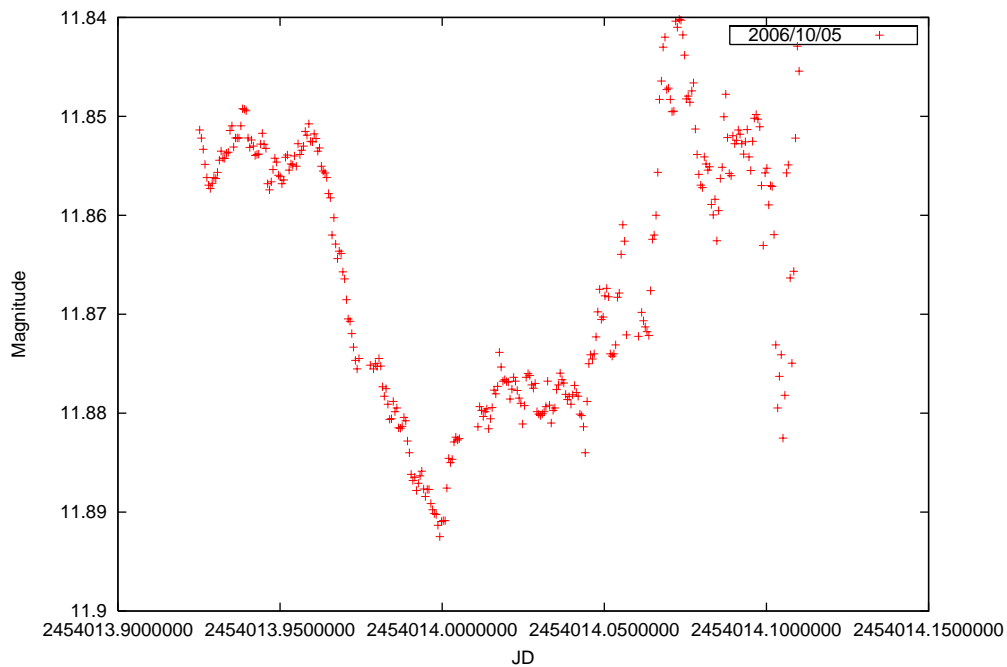


図 3.5: TrES-1 の等級変化 (2006/10/05)

### 3.2.4 観測 4

55Cncr1 は TrES-1 に比べ等級が明るく、口径 25 cm ではカウント値が検出器の上限値を超えるため、口径絞り用の蓋を制作し、口径を 10 cm に絞って観測を行った。

図 3.6 にその結果を示す。時間の経過につれて、等級が増加していることが見て取れる。55Cncr1e は軌道離心率が大きく、遠星点方向が地球側に向いているため、惑星が恒星面を通過するのに約 2 日かかる。そのためこの観測では、トランジット開始時の減光の様子がとらえられたと考えられる。

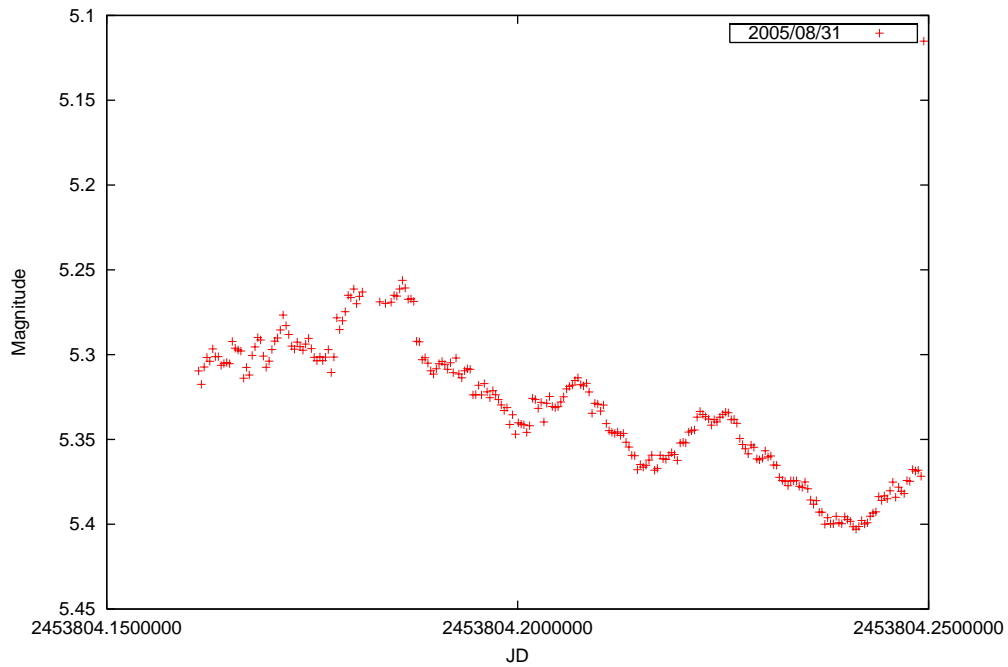


図 3.6: 55Cncr1 の等級変化 (2006/03/09)

### 3.3 考察

#### 3.3.1 望遠鏡による違い

本研究では 2 種類の望遠鏡を使用した (2.1.2 節) . 2 種類の望遠鏡の違いは焦点距離と構造である .

異なる望遠鏡を使用することで発生する大きな変化が、焦点距離の違いによる視野の違いである . 焦点距離が違くと視野が変わるため、同じ星を観測した場合でも 1 つの星が何ピクセルに写るのが変化 . カウント値を精度良く得るには出来るだけ多いピクセルで光子を受ける方が望ましいが、そうすることによって視野が狭くなってしまいう問題がある . 今回のように対象星が決まっている観測では視野が狭くても問題ない . しかし系外惑星の探索をする際には、出来るだけ多くの星を測光したいので、視野は出来る限り広くした方が良い .

また、焦点距離は温度変化による屈折率の変化によってわずかに変化するため、25cm 反射望遠鏡よりも焦点距離の長い 40cm シュミットカセグレン望遠鏡では温度変化でピントが大きすぎてしまう .

シュミットカセグレン望遠鏡は鏡筒の口に補正板というガラス板が付いているため、鏡筒内部の温度と外気温とが馴染みづらい . 本研究で使用している鏡筒は、ファンを取り付けることによって温度差を早く解消するように工夫されているが、数時間で大きく外気温が変化する場合には鏡筒内部の温度が外気温の温度に追従できない . そのため、望遠鏡に露が付くやすいと考えられる . 対して反射望遠鏡は、鏡筒内がそのまま外気と接しているため、温度が急激に変化しても露が付きにくい . また、反射鏡が鏡筒の奥にあるため露が届きにくい .

結局、シュミットカセグレン望遠鏡には結露しにくくする工夫が必要である . また、観測時の気候や観測対象を考慮して使い分けることもすべきである .

#### 3.3.2 対象星による違い

本論文では 2 つの対象星を観測している . TrES-1 は 12 等級、55Canceri は 5 等級と等級が大きく異なる . 光子の揺らぎによる測光精度の低下を抑えるため、露出時間は出来るだけ長くしたいが、口径 25 cm の望遠鏡では 55Canceri は露出オーバーとなってしまう . そのため、観測時に口径を 10 cm に絞る対策を取った .

等級の違う星を同じ観測機器で観測するには適度に口径を絞る必要がある .

#### 3.3.3 連続撮影の方法

本研究は等級の時間変化を追う観測であるため、一定時間ごとのデータが必要になる . そのため、連続撮影する必要がある . 初めての観測では 500 枚を連続して撮影した . その結果、連続撮影枚数が 200 枚を越えた辺りから測光データがばらついてしまった . 使用している CCD カメラのチップサイズが大きいため、チップ中央部と端部に温度差が発生してしまい、受光部の温度が上がってしまったためでないかと推測する .

200 枚位までは正常に測光できたため、次の観測からは連続撮影枚数を減らし、各連続

撮影の間に数分のチップ冷却時間を持たせた。その結果、観測後半の CCD カメラが要因の等級のばらつきはなくなった。また、CCD カメラの操作ソフトを変更し、1 枚撮影するごとにインターバルを置くことも出来るようになり、より効率良く冷却出来るようになった。

### 3.3.4 その他

#### 撮影時のピントについて

測光するには撮影時にピントをずらし、受光ピクセル数を増やすと良いと言われているが、本研究で使用している機材では画角が小さいため、ピントを合わせても 1 つの星に対するピクセル数は十分に大きい。そのため、ピントは出来るだけ合わせて撮影を行った。このことによって、星が隣の星と重なることを避けることが出来る。

#### Virtual Network Computing (VNC) を使用した遠隔操作について

Windows XP Professional がインストールされたパソコンを使用しているため、リモートデスクトップを使用すれば遠隔操作することが出来る。しかし、遠隔操作されているパソコンで作業が行えない欠点がある。そのためリモートデスクトップを使用せず、VNC を使用することにした。ところが、VNC 使用中はパソコンの処理速度が落ちてしまうため、リモートで作業する時以外は接続を切るようにしている。

### 3.4 データ誤差の検証

入射光によって CCD に生じる光電流の揺らぎによるノイズが必ず含まれる．測光精度を向上させるために，露出時間を長くすることで光電流を大きくすることが有効である．本研究で行った観測では，測光精度を上げるため露出時間を長くした．本節では現状の結果が測光誤差の範囲内か，そして等級変化を検出できる誤差に収まっているかを検証する．

#### 計算式

S/N 比<sup>\*3</sup> は，暗い場所で冷却 CCD カメラを使用した場合，以下のように考えることが出来る．<sup>\*4</sup>

$$S/N = \frac{N_*}{\sqrt{N_*}} \quad (3.1)$$

ここで， $N_*$  は測光星のカウント数である．

S/N 比に対して精度  $A$  は

$$A = \frac{\sqrt{N_*}}{N_*} \quad (3.2)$$

と表せる．

撮影の精度は CCD カメラの S/N 比の他にも気象条件やシーイングの変化の影響もあるが，この観測では撮影の露出時間を大きく取り，前後 21 画像の平均を取っていることで，シーイングやシンチレーションの変化といった影響を無視できる．また，測光する対象星と等級基準星が同じ画像内で，且つ近くに位置しているため，各星の位置での気象条件は同じであると考えて良い．

ただし，CCD カメラの温度変化に関しては CCD カメラ操作ソフトの方で一定に保つようになっているが，使用している CCD カメラのチップサイズが大きいため，チップの端と中央部での温度が異なる可能性がある．そのため長時間の連続撮影を行うと温度変化によってノイズが増加する可能性がある．しかし現状の観測方法では 1 枚撮影するごとに冷却時間を設けるようにしているため，無視できると考えられる．

#### 検証

2006/06/30 と 2006/10/05 の観測におけるトランジット現象の最中の精度について検証する．

<sup>\*3</sup>信号対雑音比．信号内に存在する雑音の量．CCD カメラでの S/N はフォトン (光子) の揺らぎによるものが大きい．

<sup>\*4</sup>S/N 比は正確には，

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

となる． $n_{pixel}$  は測光星のピクセル数， $N_{sky}$  と  $N_{dark}$  はフラットとダークの 1 ピクセルあたりのカウント数， $N_{read}$  は読み出しノイズである．

$N_*$  以外は  $N_*$  に対して極小さいため，無視して考えることが出来る．

図 3.4, 3.5 より, 現象中の等級の平均値は 11.878 等級である. 平均値からの等級の変動幅の平均は

0.002716 等級 (2006/06/30)

0.003890 等級 (2006/10/05)

である.

平均光度を  $L_0$ , 光度変化の幅を  $\Delta L$  とすると, 等級の変化幅  $\Delta m$  は以下のように表される.

$$\Delta m = \log \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \quad (3.3)$$

従って, 観測 1, 2 の時の光度変化幅は

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 0.0025 \quad (3.4)$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 0.0036 \quad (3.5)$$

となる. よって観測結果の精度は, 約 0.25 % (2006/06/30), 0.36 % (2006/10/05) の精度である.

対して, 観測画像の S/N 比から求まる精度について考える. ここでは測光星のカウント値は, 各ピクセルから背景のカウント数の平均値を引いたカウント数の合計とする. 任意に選択した画像の測光対象星の拡大写真と各ピクセルのカウント値は図 3.7 と表 3.4 である. この時, 測光星のカウント値の合計は 69250 であり, 追求できる観測の精度は

$$\begin{aligned} A &= \frac{\sqrt{N_*}}{N_*} = \frac{\sqrt{69250}}{69250} \\ &= 0.0038 \end{aligned} \quad (3.6)$$

約 0.4 % となる.

以上のことから, 誤差の平均は精度が良く出ていることが言える. ただし, 明らかに大きく外れてしまっているデータもあるため, 今後の課題としてそういった問題の解決を目指す必要があるだろう.

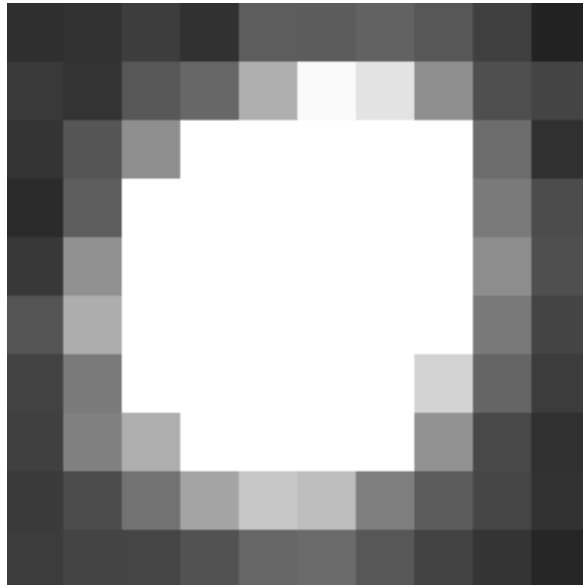


図 3.7: 星の拡大画像

16.875	4.875	-24.125	5.875	-13.125	-4.125	5.875	-15.125	-49.125	-35.125
-20.125	-14.125	8.875	-16.125	75.875	72.875	85.875	61.875	12.875	-47.125
0.875	-12.125	61.875	95.875	242.875	397.875	349.875	177.875	43.875	22.875
-10.125	57.875	176.875	442.875	1271.875	2227.875	1457.875	497.875	104.875	-18.125
-28.125	74.875	408.875	1388.875	4168.875	7024.875	3954.875	779.875	133.875	39.875
-1.125	178.875	677.875	2028.875	4905.875	7632.875	4250.875	808.875	173.875	46.875
56.875	238.875	631.875	1585.875	3215.875	4271.875	2336.875	634.875	131.875	22.875
18.875	133.875	436.875	978.875	1495.875	1638.875	953.875	317.875	90.875	7.875
15.875	147.875	241.875	483.875	656.875	594.875	439.875	183.875	30.875	-18.125
3.875	39.875	118.875	221.875	292.875	271.875	142.875	72.875	25.875	-14.125
7.875	23.875	25.875	51.875	93.875	102.875	62.875	18.875	-10.125	-38.125
-19.125	11.875	-25.125	15.875	26.875	47.875	-0.125	0.875	-30.125	-59.125

表 3.4: 各ピクセルのカウント数．背景の平均カウント数を引いた数値．

### 3.5 惑星パラメータの算出

#### 3.5.1 観測 2 と観測 3 の結果

観測 2 , 観測 3 は同じ対象星及び同じ観測機器とほぼ同条件で観測を行ったため, 結果を重ねることが出来た. トランジット予報<sup>\*5</sup>を参照し, 開始時間をゼロとして観測 2 及び 3 の等級変化を示した (図 3.8) .

観測 2 及び 3 の結果は, トランジット開始時の等級変化においてよく一致していると言える. 赤線は既知の情報から計算した等級変化曲線である. 観測した等級変化はほぼ計算した曲線に一致している.

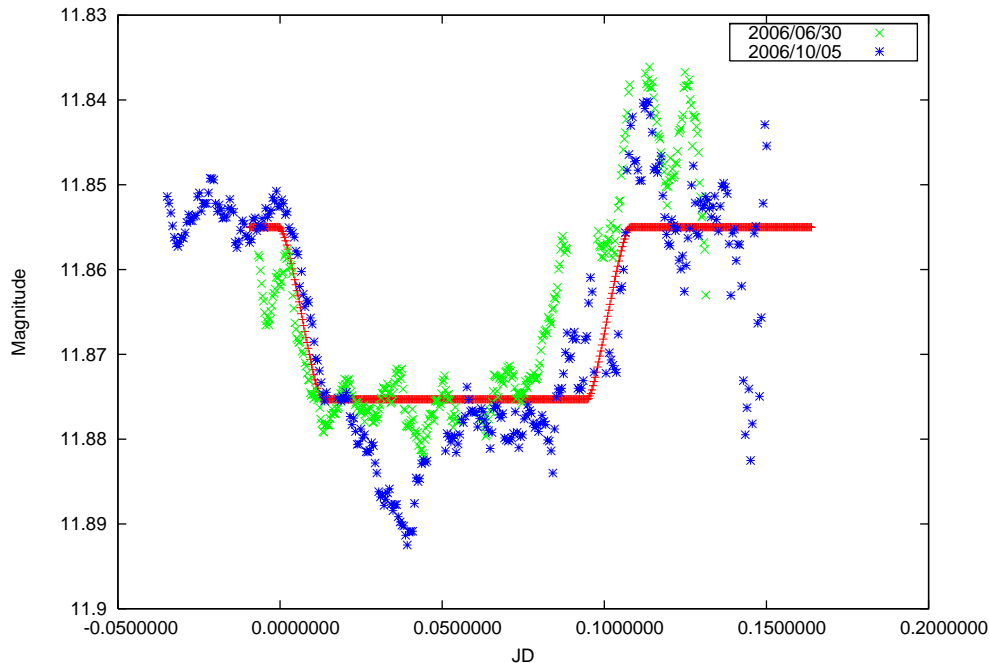


図 3.8: 合成した結果. 赤線は既知の惑星データから計算した等級変化

次節では図 3.8 から求まる情報によって惑星パラメータの算出を行う.

#### 3.5.2 恒星と惑星の半径の比

2006/06/30, 2006/10/05 の結果 (図 3.8) から恒星に対する惑星の半径を算出する.

初期等級を開始時間前の等級を平均したものとすると, 観測データから 11.858 等級であると求まる.

また, 現象中 (惑星と恒星が完全に重なり合っている状態) の等級を平均したものは 11.878 等級である.

以上の情報から恒星と惑星の半径の比を求める. (1.4) 式より

<sup>\*5</sup><http://www.transitsearch.org>



$$\begin{aligned}\frac{R_{planet}}{R_{star}} &= \sqrt{1 - 10^{\frac{m_{before} - m_{middle}}{2.5}}} \\ &= 0.1351\end{aligned}$$

表 3.1 のデータから求めた数値は 0.123 ~ 0.133 であるから、ほぼ合っていると思われる。

### 3.5.3 惑星の軌道長半径

表 3.1 のデータにより、惑星の公転周期は 3.030065 日である。2005/08/31, 2006/06/30, 2006/10/05 の観測データから明らかとなった現象開始時間は以下の時間である。

- 2005/08/31 2453613.9984375 (JD)
- 2006/06/30 2453917.0023072 (JD)
- 2006/10/05 2454013.9605308 (JD)

上記の開始時間から本観測から求められる周期は 3.0299916 日<sup>\*6</sup>と求められる。

本研究から求めた公転周期から軌道長半径を求めると、(1.1) 式より

$$\begin{aligned}a &= 5.875 \times 10^9 \text{ m} \\ &= 0.039 \text{ AU}\end{aligned}\tag{3.7}$$

である。ここでは恒星の温度や光度から求められた  $M_{star} = 0.88 \times M_{sun}$  を用いた。 $M_{sun}$  は  $1.9891 \times 10^{30} \text{ kg}$  であり、万有引力定数は  $G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$  とした。

---

<sup>\*6</sup>2005/08/31 と 2006/06/30, 2006/06/30 と 2006/10/05 の各期間から求められる公転周期の平均とした。

## 第4章 まとめ

### 4.1 まとめ

本観測では系外惑星の検出，及び等級変化曲線の作成手法が確立された．また，現状の観測機器でトランジット現象の検出が可能であり，観測データを元に導出した惑星パラメータは他機関の公表データとほぼ一致することを示した．ただし，観測をすることで明らかになった問題点もあった．以下のそれらを述べる．

#### 観測に関して

本観測で，惑星パラメータのうち，惑星半径及び軌道長半径の導出を行った．より多くの惑星情報を導出するためには観測精度を向上させる必要がある．改善すべき内容として観測中のピントのずれ，そして観測中の結露が挙げられる．

ピントのずれは観測期間中の気温変化に伴う鏡筒の温度変化によるものである．鏡筒の保温を行い，温度変化を抑える工夫をする必要があるだろう．

観測中の補正板の結露は望遠鏡のフードを工夫する必要がある．現在は 40 cm シュミットカセグレン望遠鏡の専用フードが完成していないため，簡易フードを作成して観測をしている．そのために発生してしまった問題点であると思われるが，天頂方向の観測を行う際にはフードの有無にかかわらず結露は起こってしまう．そのための改良を行う必要はあるだろう．具体的には，まず補正板に風を送ることで露が降りるのを防ぐ方法を考えている．気流の乱れが少々発生してしまうかもしれないが，観測には影響が出ないと予想している．

#### 系外惑星の発見に向けて

現状の解析方法では解析に時間がかかる．大量なデータを処理するには画像内の星を自動で測光し，自動で分析することが出来るプログラムの開発を行う必要があるだろう．

現在使用している MIRA は，グラフの表示機能はないため，解析の自動化を行いづらい．今後大量のデータを解析する際に備え，IRAF を使用して自動的に測光できるようにすべきであろう．

また現状では，トランジット現象の有無はグラフ化して目で判断している．現象の各ポイント（現象開始，惑星が恒星に完全に重なった状態，現象終了等）を自動で判断できるようなプログラムを作成すべきであろう．それを実現することによって，惑星のパラメータの算出がスムーズに行われるようになり，系外惑星の発見もスムーズに行えるようになるであろう．

# 謝辞

本論文を作成するにあたり，指導教官である渡部重十教授には大変お世話になりました．的確なご指導，ご助言をいただいたことによって本研究は順調に進めることが出来ました．また，名寄市立木原天文台の佐野康男さんには観測の技術をご教授いただきました．観測がメインである本研究では天文台のご協力が必須でした．

そして私の所属する惑星物理学研究室の皆さまにも大変お世話になりました．倉本圭助教授にはセミナー等で本研究に対して様々な指摘をいただきました．山田学さん，光田千紘さん，小松研吾さん，そして地球流体力学研究室の高橋芳幸さんには本論文の添削をしていただきました．

皆さまに心から感謝いたします．

また，本研究では北海道大学理学部・地球惑星科学専攻と名寄市立木原天文台の間的高速ネットワーク回線を活用させていただきました．この回線を引くにあたり協力していただきました以下の協力機関の方々には大変感謝いたします．

- (株) ネクステック
- HOTnet 北海道総合通信網株式会社
- (有) ラフィネプランニング
- 北海道地域ネットワーク協議会 NORTH
- 北海道大学 情報基盤センター 情報ネットワーク研究部門 先端ネットワーク分野
- 名寄市立木原天文台
- 北海道大学 大学院理学研究科 地球惑星科学専攻 & epnetfan

## 参考文献

- [1] Alexander J. Willman , Known Planetary Systems  
<[http://www.princeton.edu/~willman/planetary\\_systems/](http://www.princeton.edu/~willman/planetary_systems/)>
- [2] 井田 茂 『異形の惑星 系外惑星形成理論から』 NHK ブックス , 2003 , 262pp.
- [3] 大島 修 『系外惑星の transit の検出 -ミリ等級代の高精度 CCD 測光-』  
<<http://scox.kamokou.jp/~ohshima/photometry/HighPrecePhotometry.pdf>>
- [4] 岡野 邦彦 『冷却 CCD カメラによる 天体撮影テクニック』 誠文堂新光社 , 2002 ,  
175pp.
- [5] California and Carnegie Planet Search  
<<http://exoplanets.org/>>
- [6] 木下 宙 『天体の軌道の力学』 東京大学出版会 , 1998 , 259pp.
- [7] 文部科学省 国立天文台 編 『理科年表』 丸善株式会社 , 942pp.
- [8] 米山 忠興 『教養のための天文学講義』 丸善株式会社 , 1998 , 220pp.
- [9] Roi Alonso, et al. "TrES-1: THE TRANSITING PLANET OF A BRIGHT K0 V STAR", The Astrophysical Journal, 613:L153-L156, 2004 October 1
- [10] AstroArts 天文ニュース 2006/07/28  
『「量」から「質」の時代へ - 系外惑星 , 200 個到達』  
<[http://www.astroarts.co.jp/news/2006/07/28exoplanets\\_200th/index-j.shtml](http://www.astroarts.co.jp/news/2006/07/28exoplanets_200th/index-j.shtml)>
- [11] SBIG 社製品日本輸入総代理店 国際光器 (株) マゼラン  
『Santa Barbara Instruments Group 天体撮影専用世界一冷却 CCD カメラ』  
<<http://www.kkohki.com/SBIG.html>>
- [12] transitsearch.org  
<<http://www.transitsearch.org/>>
- [13] 名古屋大学・太陽地球環境研究所 MOA 実験グループ  
『重力マイクロレンズによる地球質量の 5.5 倍の低温の惑星の発見』  
<<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/div3/moa/o390/>>
- [14] 名寄市立木原天文台  
<<http://www.nayoro-star.jp/>>

[15] University of California Observatories  
<<http://www.uclick.org/>>