

## Transit 法による太陽系外惑星 wasp-3b の観測

太陽系外惑星の観測方法の一つであるトランジット法は、惑星の恒星面通過による減光を観測する方法であり、近年急速に発展している。ただ、減光は多くの場合微弱であり天候等の理由によってデータの質が大きく左右されるのが現状だ。本研究では、にしはりま天文台の60cm反射望遠鏡でWASP-3bを観測したが、観測条件が厳しかったため、データのばらつきが大きかった。そこでデータのばらつきを減らし、減光を捉えるために解析の工夫を行った。その結果、予報時刻付近に減光を読み取ることができた。また、減光率から求めたWASP-3bの半径は $0.8R_j$ となった。

### はじめに

系外惑星とは太陽系外の恒星を周回する惑星のことである。

系外惑星の中には地球から見て惑星が恒星の前を通過して恒星が減光するように見える恒星面通過（トランジット）という現象を起こすものがあり、この減光をとらえる観測方法をトランジット法という。トランジット法は他の観測方法とは異なる物理パラメータを得られること、比較的観測が容易なことから近年発展している観測方法である。今回私たちが観測した系外惑星WASP-3bは恒星面通過を起こすことがわかっていて、恒星WASP-3を回る周期が1.8468372日と非常に短く、トランジットの時間も短いので1夜での観測が可能である。ただ、減光は恒星の等級を0.01等級下げ程度の非常に微弱なもので、天候の安定しない日本における地上観測は困難なものになっており、私たちが観測した日も天候に恵まれなかったが、解析を工夫することによってデータのばらつきを減らし、トランジット予想時刻付近での微弱な減光をとらえることに成功した。

### 観測条件

観測した星 目的星：WASP-3b（主星WASP-3）

比較星1：TYC2636-92-1, 恒星, 視等級 11.76 等級(<http://aladin.u-strasbg.fr> より)

場所と設備 兵庫県立大学自然・環境科学研究所 天文科学センター西はりま天文台 60cm望遠鏡。CCDカメラ SBIG社のSTL-1001E、フィルターはその付属品を使用  
観測日時 2014年8月21日21:30～22日1:00

天気 晴れだが観測星付近に雲がかかることがあった

### 方法

#### 1 ライトカーブを描く

カウント値は天気による誤差が大きいですが、天気（雲など）による誤差は比較星、WASP-3ともに同じように起こっているため等級差をとることで、その誤差を減らすことができると考えた。

測光によって比較星と目的星の光子数(カウント数)が得られる。ここで、比較星とWASP-3bの主星WASP-3の視等級とカウント数の関係は等級の定義式より

$$V_m - V_n = 2.5 \log \left( \frac{F_n}{F_m} \right)$$

$V_m$ : 比較星の視等級  
 $V_n$ : 目的星(WASP-3)の視等級  
 $F_m$ : 比較星のカウント数  
 $F_n$ : 目的星のカウント数

という式で表される。

星が暗いほど等級は大きくなり、トランジット時は暗くなるので図1のようなグラフになると考えられる。だから等級差 $V_m - V_n$ の値を計算しグラフにすると図2のようなグラフになる。

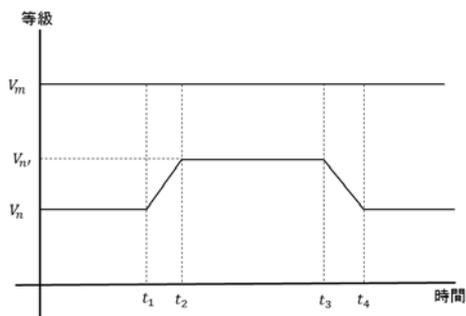


図1 比較星の視等級と WASP-3b の視等級

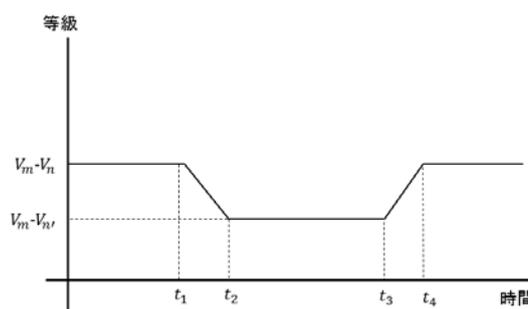


図2 比較星と WASP-3b の等級差

## 2 減光率を求める

以下では定常時、トランジット時それぞれのカウント数、等級はずっと一定であると仮定している。実際は望遠鏡の露光時間の違いや天気などで一定ではない

まず、減光率は星の明るさの変化した割合のことなので、カウント数の変化した割合と考えられるから、(2)式

$$i = 1 - \frac{\overline{F_{n'}}}{\overline{F_n}}$$

$i$ : 減光率  
 $\overline{F_n}$ : 定常時(0 -  $t_1$ )の wasp-3b のカウント数の平均  
 $\overline{F_{n'}}$ : トランジット時(  $t_1 - t_2$  )の wasp-3b のカウント数の平均

ここで星の等級とカウント数の関係(1)式より

$$\overline{V_{n'}} - \overline{V_n} = 2.5 \log \left( \frac{\overline{F_n}}{\overline{F_{n'}}} \right)$$

$\overline{V_n}$ : 定常時の wasp-3b の視等級の平均  
 $\overline{V_{n'}}$ : トランジット時の wasp-3b の視等級の平均

変形して

$$i = 1 - \left\{ 10^{\frac{(\overline{V_m - V_n}) - (\overline{V_m - V_{n'}})}{-2.5}} \right\}$$

$(\overline{V_m - V_n})$ : 定常時の等級差の平均  
 $(\overline{V_m - V_{n'}})$ : トランジット時の等級差の平均

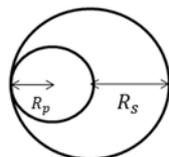
また、減光率を%にするにはこれに100をかける

## 3 半径を求める

主星、惑星ともに円とみなすと、減光率は主星と惑星の見かけの面積比と考えられるから

$$\left( \frac{R_p}{R_s} \right)^2 = i$$

$R_s$ : 主星の半径  
 $R_p$ : 惑星の半径



主星の半径は太陽基準、惑星の半径は木星基準になっているから変形して

$$R_p = \frac{R_s * R_{\odot} * \sqrt{i}}{R_j}$$

$R_p$ : 惑星の半径(木星半径)  
 $R_s$ : 主星の半径(太陽半径)  
 $R_{\odot}$ : 太陽の半径(km)  
 $R_j$ : 木星の半径(km)  
 $i$ : 減光率

となりほかの観測方法などで $R_s$ の値が得られれば、惑星の半径を求めることができる。

また、ETD - Exoplanet Transit Database ( <http://var2.astro.cz/ETD/> ) というサイトでトランジットの予報時刻や他の人のトランジットの観測結果を知ることができる。WASP-3b の in の予報時刻は 22:06 Out の予報時刻は 24:23 だった。

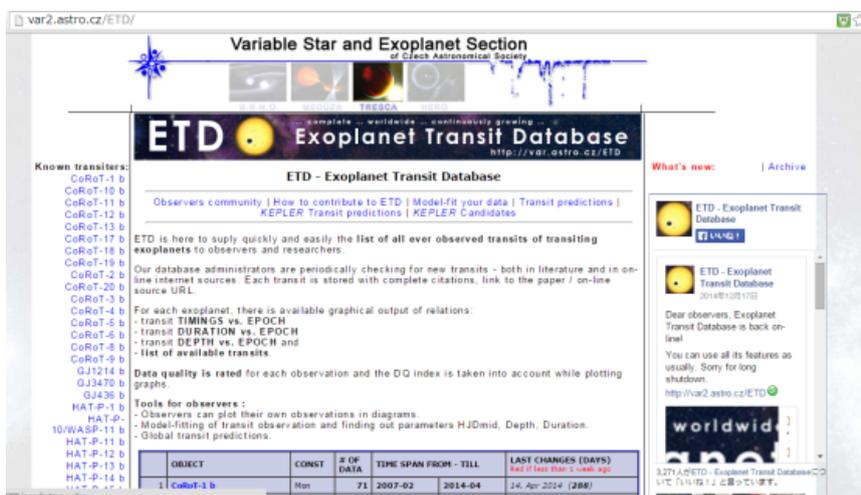


図3 ETDのサイト ( <http://var2.astro.cz/ETD/> )

### データ処理とその結果

撮影枚数 440 枚

CCD の露出時間 1 枚目 30 秒 2 枚目~3 枚目 60 秒

4 枚目~24 枚目 10 秒 25 枚目~440 枚目 20 秒

測光回数 1 枚につきひとり 1 回を 4 人で行った

データ処理に使用したソフト すばる画像処理ソフト Makali'i ver2.0c

データ一次処理 ダーク処理 CCD の熱によって生じるノイズを除くためシャッターを閉じた状態で撮影した画像 10 枚を加算平均しダーク画像を作成した。そして天体画像からダーク画像を差し引いた。

データ一次処理 フラット処理 CCD のピクセルごとの感度ムラを補正するため、光を当てた状態で撮影した画像をから同様にフラット画像を作成し、天体画像をフラット画像で割った。

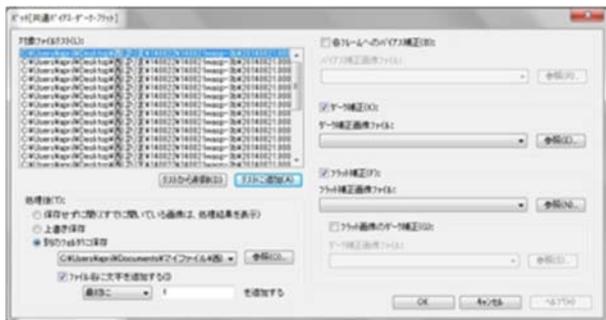


図4 Makali ' i でのダーク、フラット処理の画面

## 結果

前述の方法で等級差を求め、そのグラフを作成したところ下のような結果が得られた。

図5 比較星と WASP-3b の等級差のグラフ縦軸は等級、横軸は画像番号

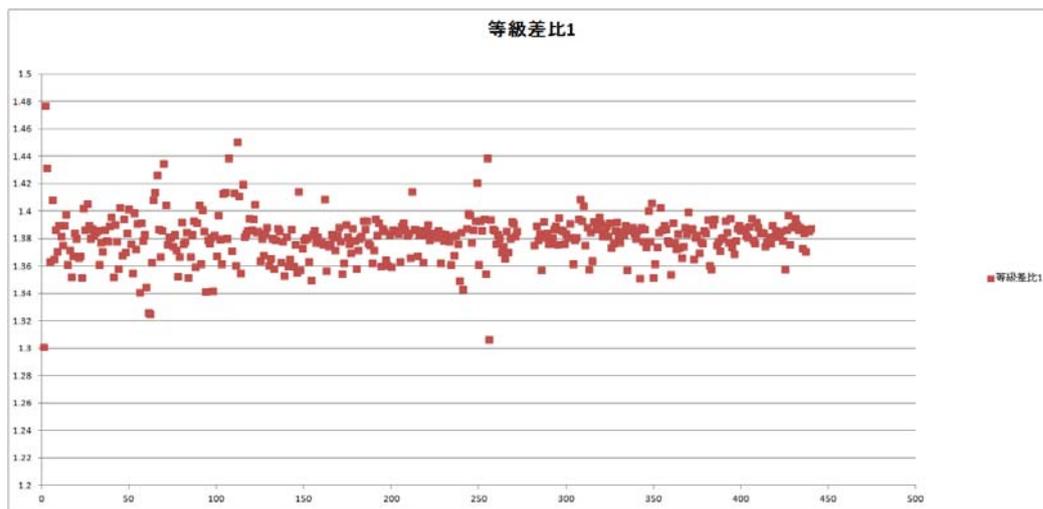


図5からトランジットの開始と終了を見極めることが困難だったので以下のような解析の工夫をした。

## 解析の工夫

**比較星を増やす**：比較星をもう1つ取り、比較星2とした。それぞれの比較星と WASP-3 について等級の定義式より等級差を算出し2つの加算平均を取った。比較星2は視等級が不明であるが等級差を用いるのであれば変光星でないことがわかれば使用してもよいと考えた。比較星2は視等級が未知であるが図8より変光星でない比較星1と等級が同様の動きをしているから、比較星2も変光星でないとみなしてよいと判断した。このアンサンブル測光により、比較星のどちらかだけに雲がかかっていたときの誤差を軽減できる。また比較星を2つ取ることでカウント数が多くなることから後述する光子がゆらぎによる誤差を軽減できる。

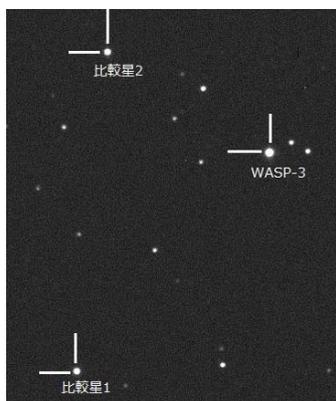


図6 Makali'i 上での観測星

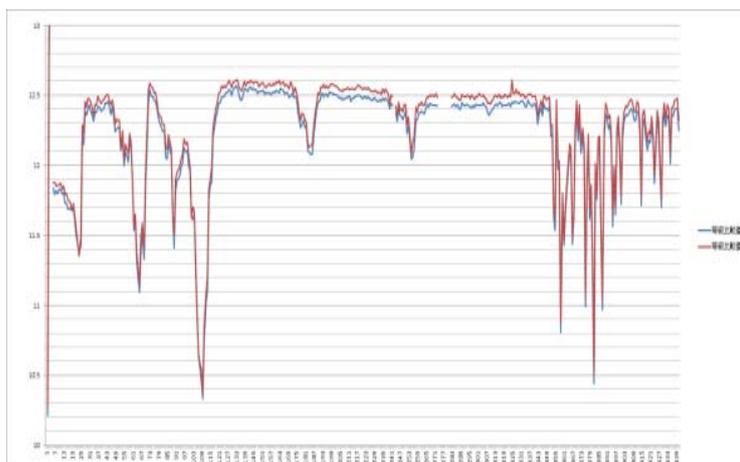


図7 比較星の等級の比較縦軸は等級、横軸は画像番号

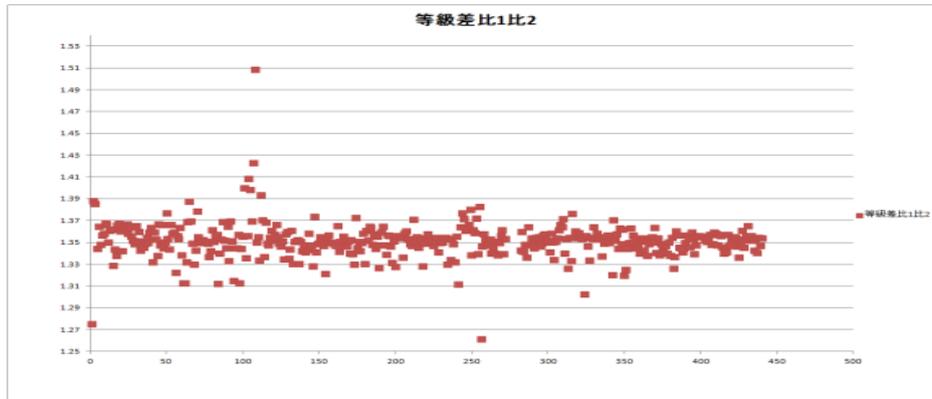
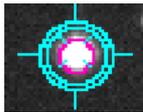


図 8 比較星を 2 つ使った等級差 (縦軸は等級、横軸は画像番号)

**入力ミスの確認**: 打ち込みに間違いがないかを、ログや再測光の結果と合わせて確認し、誤りのあるものは修正をした。

**MaxIm DL による測光**: Makali'i による測光は手動による測光なので自動測光ソフト MaxIm DL でも測光を行い、それぞれで得られた等級差の平均をとることにした。特に今回の観測は天候が悪く、sky の状況が悪かったため、また高精度の測光が必要だったためアパーチャ径や sky 径の違いによる誤差が無視できないと考えた。以後等級差はこの値を用いる。 各ソフトの特徴は以下の通りである。

	Makali'i	MaxIm DL
使用方法	手動	自動
アパーチャ径	毎回自動	固定
アパーチャ画像		

この 2 つのソフトによる測光結果は以下のようになった。

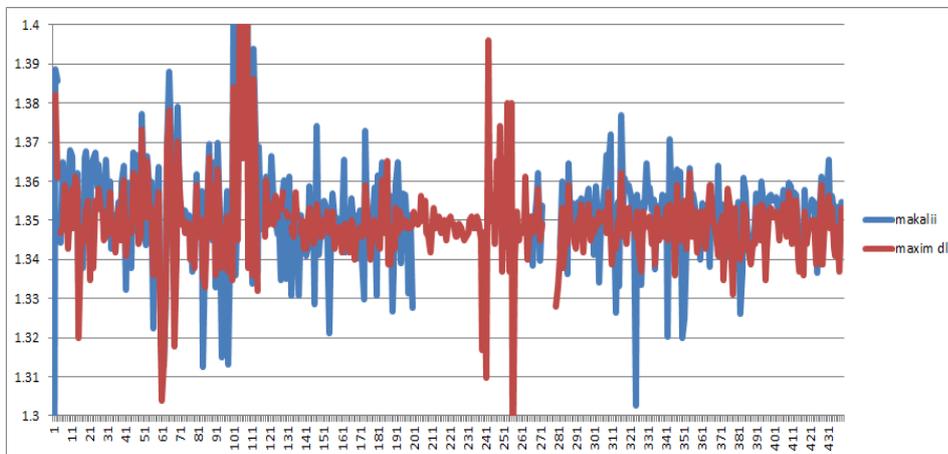


図 9 Makali'i, MaxIm DL それぞれで測光して出した等級差のグラフ縦軸は等級横軸は画像番号

2つの測光ソフトの測光結果には、やはり少し差がある。この2つの平均値をとって、精度を向上させる。

**移動平均**：値の広がりの大きさ、外れ値による変化を軽減するため、前後の値との加算平均をとって移動平均（3）のグラフにした。

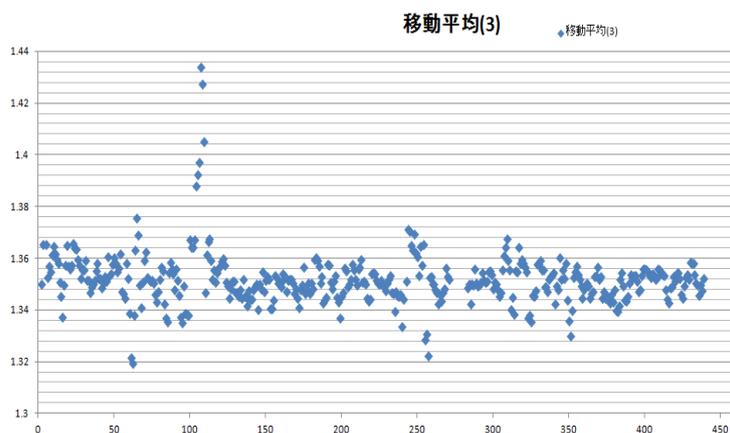


図 10 移動平均のグラフ縦軸は等級横軸は画像番号

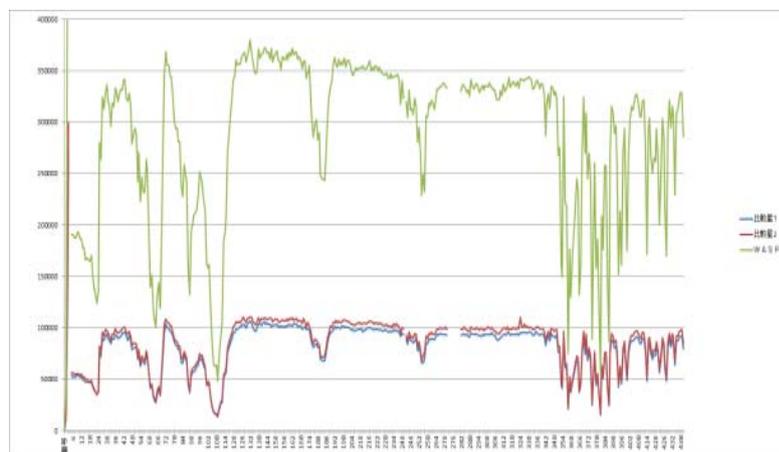


図 11 WASP-3(緑)比較星 1(青)比較星 2(赤)のカウント値

**外れ値の処理**：1、4、105、115、117、122、126、129、132、137 は画像の悪さから Maxim DL が認識できなかった。そのため、外れ値とし、またカウント値が 30000 代まで減少し、誤差が大きく等級差の分布をみても明らかな外れ値であると判断した 104～110、同じくカウント値が 30000 代の 22、23、63～68、ログに曇りまたは薄曇りの表記がありカウント値の小さい 115～121 を除いた。

**誤差の検討**：観測には様々な誤差が発生する。本来測光誤差は比較星が目的星より明るいほど小さくなるが、今回は比較星が目的星より暗かったため、誤差が大きいと考えられる。誤差は、Maxim DL に算出させた Error の値を次の式に代入して求めた。この誤差は画像 1 枚ごとに求められ光子のゆらぎによるものとみなしてよい。

$$\sqrt{m^2 + (1/n) * \sum_{i=1}^n ki^2}$$

m は目的星の測光誤差、n は比較星の個数今回は n=2 k1, k2... は比較星の測光誤差

(目的星と比較星の測光誤差は s/n 比から算出可能) \* 単位はない割合を表している

s/n 比とは光子がゆらぎを持つことによって発生する誤差でおよそ  $\sqrt{\text{カウント値}}$  となることが知られている。目的星、比較星の測光誤差はこれの逆数である。つまりカウント数が多いほど誤差は小さくなり、曇りなどでカウントが小さいところは誤差が大きくなる。その他、大気による誤差も発生する。一秒程度のゆらぎであれば 20～30 秒の露光時間で減ら

すことができるが、悪天候のため、考慮する必要があると考えた。

以上の結果、下のグラフが得られた。

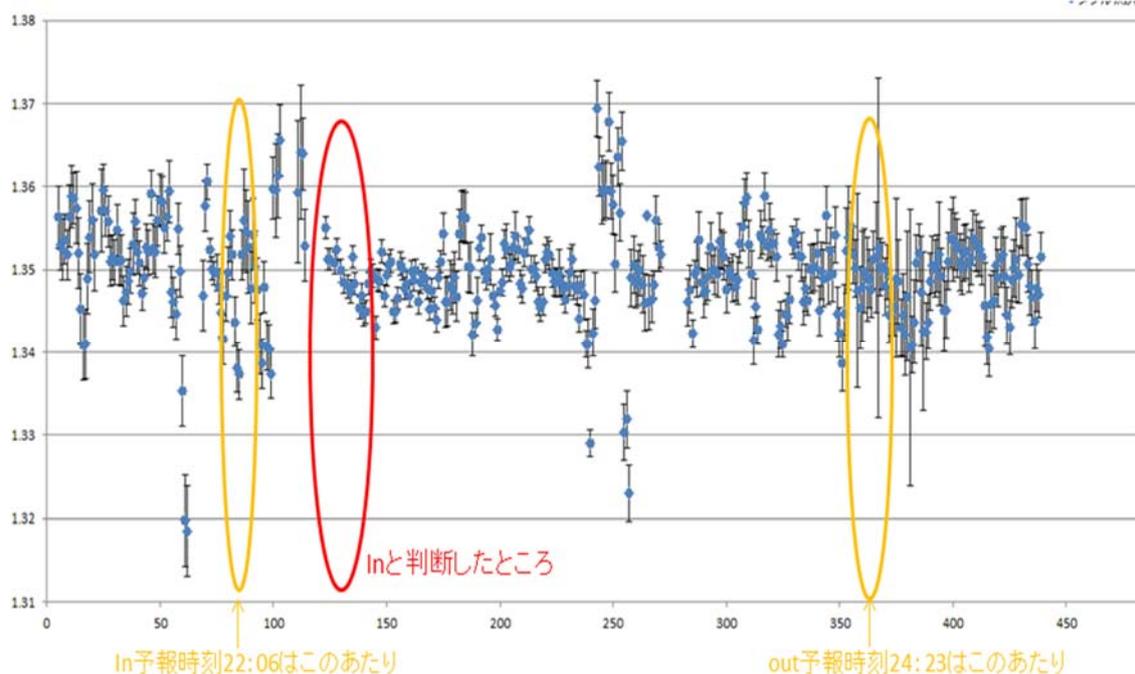


図 12 アンサンブル測光移動平均(3)同士を加算平均したグラフ、縦軸は等級横軸は画像番号。誤差棒は参考程度

In の時刻は 120~140 枚目 (22:23~22:31) ごろと判断した。また、Out は読み取ることができなかった。よって以後 In の減光率について検討する。

条件が厳しくデータにばらつきがあるので、比較的值誤差が小さい 5~46 をトランジット前、138~170 をトランジット中のより信用できるデータとして、それぞれ加算平均を取り、上の方法で DEPTH を計算し、0.41% という結果を得た。また、この結果と既知の WASP-3 の半径を以下の式に代入することで、WASP-3b の半径を  $0.81 R_j$  と算出した。今回の観測では誤差が非常に大きく、簡単に有効数字を決定することはできないが、最終的に得られた図 12 にプロットしたデータの標準偏差が約 0.006 だったことを参考に 2 ケタとした。

#### E T D のサイトのフィッティングの結果

参考までに E T D のサイトで I N についてライトカーブのフィッティングを行った。データは解析の工夫をした後のものを使用し、誤差は M A X I M D L のエラーの値をそのまま入力した。結果、減光がどの程度になるか (既知の W A S P 3 の減光率) を初期条件として入力した場合に私たちが考えたところと同じところを I N と認識した。

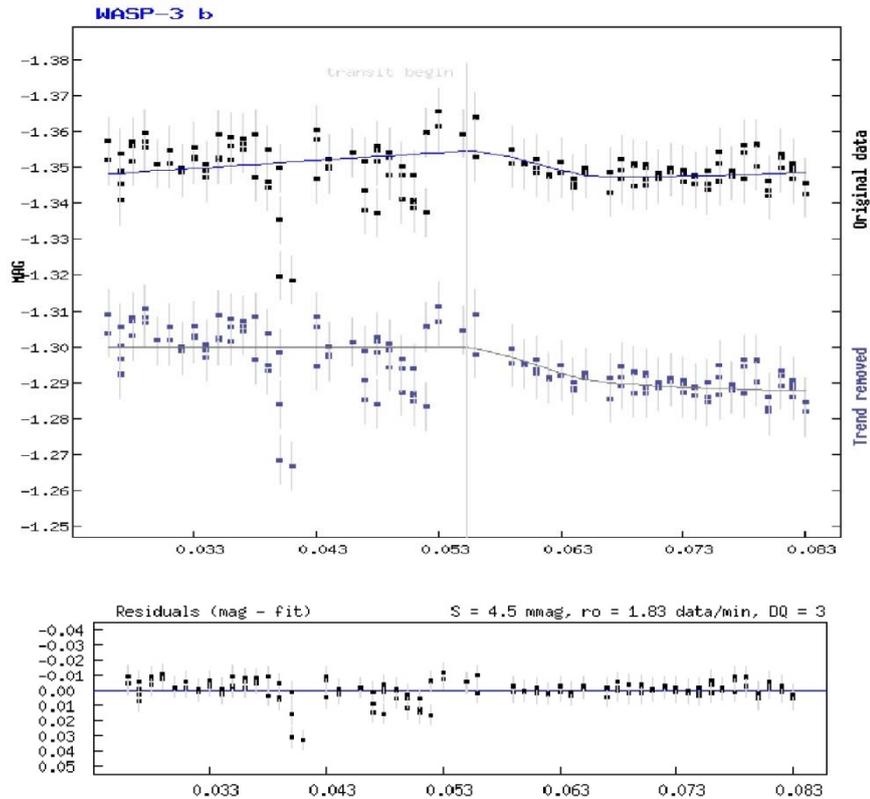


図 13 ETD のサイトのフィッティングの結果

### まとめと考察

まず、図 12 を見ると IN の予想時刻付近に減光があったことは確実に言えるであろう。IN の時刻は 120~140 枚目(22:23~22:31)ごろと判断し、予報時刻は 22:06 であるから予報時刻より遅くなった。これは in であると考えた 120 枚目より前の、予報時刻にあたる 80 枚目付近のカウント値が小さく誤差が大きいためこの周辺から減光を読み取ることができなかったからであると考えられる。ログでもこの付近では薄曇りとなっている。予報時刻より 17 分ずれていることになるがこれは ETD の他の人の観測と比べるとずれが大きい。しかし図 12 から予報時刻に近くかつ 0.01 等級に近い減光(実際は 0.004 等級程度だが)が見られるのはこの辺りだけであり ETD のフィッティングでもこの周辺を in と読み取ったので in はこの辺りであるという判断は妥当なものと思われる。また、Out について、読み取れなかった原因として、予想時刻は 24:23 であり、これは 358~360 枚目にあたるが、その付近の誤差が大きかったことが上げられる。この誤差を大気のゆらぎによるものと判断したが、その理由は図 11 よりカウント値が急激に変化しており、その変化の仕方が曇りでカウント値が小さくなった時のゆるやかに下がっていく様子とは違ったからだ。また、既知の DEPTH、半径がそれぞれ 1,181%、 $1.346 \pm 0.063R_j$  なので、どちらも既知のものより

小さくなった。これも、inの誤差が大きかったことが原因だろう。

誤差の原因としてはこれまでに述べた

- 1、天候、大気のゆらぎ
- 2、比較星が目的星よりも暗かったこと（測光誤差が大きくなる）

の他にも

- 3、望遠鏡の視野が狭く、比較星の数が限られていたこと
- 4、観測技術不足

などが挙げられる。

特に4の観測技術不足に関しては改善の余地があった。

例えばピントをずらしてより広い面積(ピクセル)でCCDに光子を受けるとすれば全体としてカウント値を稼ぐことができ、誤差を減らせたはずである。また、今回観測した画像の中にはCCDのダイナミックレンジを超えている可能性のある画像もあった。CCDの直線性が保たれる範囲で測光を行わないと誤差が大きくなる。

以上に述べたようにデータ自体の質はよくなかったが誤差約40.1%の精度で系外惑星WASP-3-bの半径を算出することができた。(誤差は、論文値と算出した値の差を、論文値で割って100をかけて求めた)

今回の研究では厳しい観測条件下で系外惑星のトランジットをとらえることができた。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、御指導頂きました研究員の森鼻 久美子先生他、兵庫県立大学自然・環境科学研究所天文学センター 西はりま天文台の皆様、また総じてご指導していただきました本校教諭杉木勝彦先生に心より御礼申し上げます。

## 参考文献等

Constraints on a second planet in the WASP-3 system

『理科年表(平成26年度)』

兵庫県立西はりま天文台 <http://www.nhao.jp/> アクセス日 2014年12月18日

ETD - Exoplanet Transit Database

<http://var2.astro.cz/ETD/> アクセス日 2014年8月21日

すばる画像解析ソフト - Makali'i - 配布サイト

<https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja> アクセス日 2014年8月20日

MaxIm dl

<http://www.cyanogen.com/help/maximdl/MaxIm-DL.htm> アクセス日 2014年11月11日

トランジット法による系外惑星 TrES-3 の観測

<http://user.keio.ac.jp/~earth/ssh/jpn/pdf/h1986.pdf> アクセス日 2014 年 11 月 1 日

トランジット系外惑星に対する高精度測光観測の実現

[http://www.asj.or.jp/geppou/archive\\_open/2012\\_105\\_01/105\\_22.pdf](http://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2012_105_01/105_22.pdf) アクセス日 2014 年 12 月 18 日

系外惑星を観測しよう～トランジット法観測入門～、

系外惑星の transit の検出-ミリ等級代の高精度 CCD 測光-

<http://otobs.org/photometry/HighPrecePhotometry.pdf> アクセス日 2014 年 11 月 22 日

<http://aladin.u-strasbg.fr> アクセス日 2014 年 8 月 20 日

Minor Planet

[http://www.toybox.gr.jp/mp366/lightcurve/ana\\_guide.html](http://www.toybox.gr.jp/mp366/lightcurve/ana_guide.html) アクセス日 2014 年 12 月 19 日

[http://otobs.org/hiki/?ccd photometry](http://otobs.org/hiki/?ccd%20photometry) アクセス日 2014 年 11 月 22 日