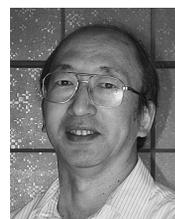


アマチュア・公共天文台による トランジット観測



大島 修

〈岡山県立水島工業高等学校 〒710-0807 岡山県倉敷市西阿知町 1230〉

e-mail: ohshima@po.harenet.ne.jp

系外惑星のトランジット観測は、対象も明るいものが多いためにアマチュアのもつ機材で観測可能であり、その機動性を生かし最先端分野にアマチュアが協力できる天文学でも数少ない分野である。ここでは、小口径望遠鏡と小型冷却CCDカメラに適した測光方法の確立とネットワーク参加者による観測例、そして、公共天文台の望遠鏡での1ミリ等級以下の測光精度の実現例などについて述べる。

1. 小口径広視野「ピンぼけ」観測法の確立

本特集の冒頭（渡部・井田・大川記事）に書かれたようないきさつで、2004年前後から、N2Kプロジェクトが見いだした候補星のトランジットを検出する国内プロジェクトが始まったのであったが、その実現のためにまず重要なのが、観測方法の確立と普及であった。このようにすれば微小な変光現象である系外惑星のトランジットをアマチュアでも検出できる、という具体的な観測方法を提示することが大切である。今の時点では、観測法としてよくまとまったものが日本トランジット観測ネットワークのWebページ*1に掲載しているので関心のある方は覗いてみてほしい。ここでは、活動初期の手探り状態の様子に触れる。

1.1 明るい星を精度良く測光する方法

アマチュアのもつ機材に合った観測方法を具体的に解説した記事を、アマチュアがよく読む天文雑誌の特集で書いて欲しいという依頼が井田・渡部両氏から寄せられた。そこで、それまでの測

光観測の経験を踏まえた記事を書いた¹⁾。

しかし、その記事を書き始める私自身は、トランジット観測そのものを行った経験はなかった。当時、トランジットによる減光が確認されていた系外惑星はHD209458bが唯一の存在であったが、国内で最初にこの星のトランジット検出に挑戦した国立天文台の渡部・福島両氏による口径50 cm望遠鏡で得られた光度曲線は、トランジットは検出したと言うものの、プロットされた観測点のばらつきは大きく、口径50 cmをもってしてもトランジット観測は難しそうだという印象をプロジェクトに参集したアマチュアに与えていた。しかし、その原因は、この星が7等級と明るく、近くに暗い星しか比較星として得られないためにS/N比が上がらないのだと私は考えた。目的星の光量は十分あるのだから、むしろより小さな望遠鏡を用いて広い視野を確保することで明るい比較星が使い、さらにピントを外すなどの工夫でもっと良い測光精度を達成できると考えていた。それを解説記事に書こうと思った。

そう考えた根拠は、以下のような経験による。

*1 <http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/transit/pukiwiki/>

その7年前に私たちのグループは、食連星系 RZ Cas の光度曲線にときどき変形が現れるという 50 年来の謎を、我々が新しく検出した周期 22 分の非動径振動による振幅 0.02 等の変光が食に重なるためとして説明した²⁾。それをきっかけにして、その後世界的に連星系の δ Sct 型振動の研究分野が一気に広がっていったという得がたい経験をしたが、その中で口径 7.5 cm という小口径望遠鏡でこの星を CCD 測光した藤井 貢さんによる小口径広視野「ピンぼけ」観測法の成功例があったからであった。

1.2 小口径広視野ピンぼけ観測法

この RZ Cas 星は 6 等級と明るく、そのためにアマチュアのもつ平均的な口径である 20 cm 程度の望遠鏡と小さな CCD の組み合わせでは、同一視野内に明るい比較星が確保できないためになかなか測光精度が上がらなかった。実際に解析に用いた観測データのほとんどは、望遠鏡を振って明るい比較星を選ぶことができるフォトマル測光器で取得したものであった（当時はまだアマチュアの中に冷却 CCD カメラがあまり普及していなかったという事情のほかに、 δ Sct 型振動は短波長ほど振幅が大きく、フォトマルとの相性が良いという理由もあった）。その中であって、明るい比較星を視野内に確保するために短焦点の望遠鏡（＝小口径の望遠鏡）で観測してみようというのが藤井さんであった。その相談を受けた際に、より測光精度を上げるためには検出光子数を増すことでショットノイズを減らすことができるが、その際、星の光を受ける CCD のピクセルが少数の場合は蓄えられる光電子の数に限度がある。そこでわざとピントを外して、より多数のピクセルにたっぷり露出して光子数を稼ぐようにすればより精度が上がることが期待できると提案した。それを受けて実際に観測した藤井さんは、数ミリ等級

の測光精度を実現し、振幅が小さくなる Rc バンドでも見事な δ Sct 振動を示す光度曲線を得たのだった。

このあたりの事情は、まさに系外惑星の場合と共通しているので、全く同じ方法でうまくいくはずという確信があった。なお、ピントを外す理由は、CCD のダイナミックレンジを見かけ上上げてより多くの光子数を稼ぐ効果以外に、ピクセル内に存在する感度ムラの影響を減らす効果も大きく精度向上に貢献している^{*2}。

1.3 まず隗より始めよ

このような解説記事を書いているうちに、いくら執筆者がこのとおりの方法で観測すれば高精度が実現できるという確信があっても、実際にトランジットを観測したことがなければなかなか信用してもらえないのではないかと、ここは実際に観測を行い実例をもって示したほうが良いと考えようになった。そして脱稿後に、その実証観測のチャンスを待った。

そのために、わざわざ、わずか数万円の 10 cm f/4 という短焦点の屈折望遠鏡の鏡筒を購入した。この望遠鏡は、光学系が 2 枚玉で f/4 という光学設計の常識を無視したものであり、はじめからシャープな星像は全く期待していなかったが、広視野小口径ピンぼけ観測法には最適なものとして探し出した機種であった。なお、メーカーの名誉のために書くと、光学系以外はケラレのない太いドロチューブやしっかりした合焦機構など、良心的な作りであった。

そして幸いに梅雨明け直後の、すばらしい透明度でかつ安定した絶好の測光夜に恵まれ、夜明けまでの 4 時間の観測を行った。その結果を図 1 に示す。狙ったとおり小口径による観測であっても、狭い視野で暗い比較星を使った 50 cm 望遠鏡の測光精度を上回っており、提唱した観測法が

^{*2} ピクセル内感度ムラ ここでは省略するが、次のサイトにそのあたりについて詳しく書いた。 <http://otobs.org/hiki/?focused>

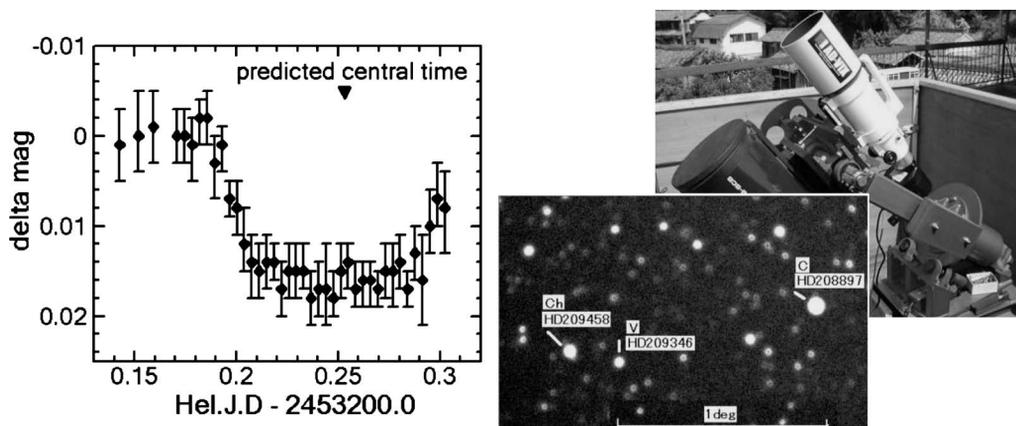


図1 口径10 cmの望遠鏡(右上写真の白い方の鏡筒)で初めて検出したトランジットの光度曲線。2004年7月14日(UT)右下の画像は実際のデフォーカス観測フレームで、Vが目的星、Cが比較星を示す。CCDカメラ: ST-9XE, 冷却: -10°C , 測光バンド: Rc, 露出29秒。データ点は10フレームの平均値。

うまくいくという事例となった。まだ校正段階であった記事に、この光度曲線の図を急遽挿入してもらい、説得力を増すことができた。

また、この結果を日本のアマチュアによる初トランジット検出観測として米国に知らせた井田教授からは、「大島さんの結果を Debra Fischer 博士に見せたところ、『日本のアマチュアによる、ドップラーで見つかった新ホットジュピターのトランジットによる追試に期待している』と言っていました」という知らせがメーリングリストに届いた。自分では単に観測法の実証実験のつもりで行った観測であったが、それを超えて日本のアマチュアの測光観測がトランジットを検出できるレベルであることを示したことになったことは予想外で、またN2Kプロジェクトの一角に参加しているという実感と、同時に期待に対するプレッシャーも感じた。

2. アマチュアの努力と協力

2.1 さらに精度を上げるための工夫あれこれ

そのほかに、測光精度を上げるために工夫したことを列挙すると、次のようになる。フラットフィールドの精度は測光精度に直接影響するので $S/N \sim 1,000$ (精度で0.1%) は欲しいため、人工照明ではなく薄明の天頂付近を10,000カウント以上で100フレーム取得しノーマライズ・メジアンで処理する。それでも0.1%の精度を実現することは難しく、後はCCDピクセル上を目的星と比較星が全観測時間を通して移動しないようにガイドを行うこと(本特集, 福井記事参照)。どうしても同一視野内に明るい比較星が確保できない場合は、多数の暗い比較星のフラックスの総和に対する測光=アンサンブル測光^{*3}を実行すること。観測の試行錯誤を繰り返す中で、これらの工夫を行い、毎年開かれてきた観測研究会で観測方法の工夫の共有化を図る中で、徐々にネットワーク参

*3 複数の比較星のフラックスを合わせて明るい一つの比較星と見なし、測光する方法。目的星と比較星(複数)の色の違いに起因する2次大気減光は、一括して食外のレベルを使い補正する。「AIP4Win Ver.2」という書籍³⁾付属の画像処理ソフトでは、最大23個までの複数の比較星を測定でき、そのフラックスの総和との等級差を連続数百枚の画像から測光する機能があり、実施が容易になった。

加者の観測精度は向上していった。しかし、あと一步のところまでN2Kプロジェクトで発見された候補天体のトランジット検出の試みは、国内の悪天候に阻まれなかなか成功せず、情報リリース直後に天候に恵まれた欧米で検出されるなど、国内関係者は何度も悔しい思いを味わった。

2.2 分光測光同時協同観測の実現

ホットジュピターの起源を巡る問題については、元の形成場所から中心星近くまで移動するためのメカニズムがいくつか提唱されており、その一つに古在メカニズム^{*4}と呼ばれるものがある。

それは、軌道の大きな離心率と大きな傾斜角をもつことが特徴である。HD17156bは、N2Kプロジェクトの一環としてすばる望遠鏡で発見された^{4) 5)}が、この系は大きな離心率をもつために古在メカニズムによる移動を受けた可能性もあり、主星の自転軸に対する惑星の横切り角を調べるために岡山188 cm望遠鏡の高分散分光器HIDESを用いた視線速度観測が予定された。軌道傾斜角の量は、惑星がトランジットを起こす場合にはロシター・マクローリン効果と呼ばれる見かけの視線速度変化から見積もることができることを東大の須藤研究室が中心になって見いだしている。この分光観測に合わせて、そのトランジット中心時刻をできるだけ正確に決定するために同時協同観測キャンペーンが成田憲保さん(現 国立天文台)により提唱され、ネットワークに属する全国の観測者が参加した。その成果は天文学会でも報告され⁷⁾注目を浴びた。また、今のところ唯一のネットワークからの貢献がある論文⁸⁾も出版された。このキャンペーンにより得られた光度曲線と参加者の分布を図2に示す。

その後、N2Kプロジェクト自体もいくつかの成果を上げ、さらにほかのトランジット法によるサーベイプロジェクトにより多数のホットジュ

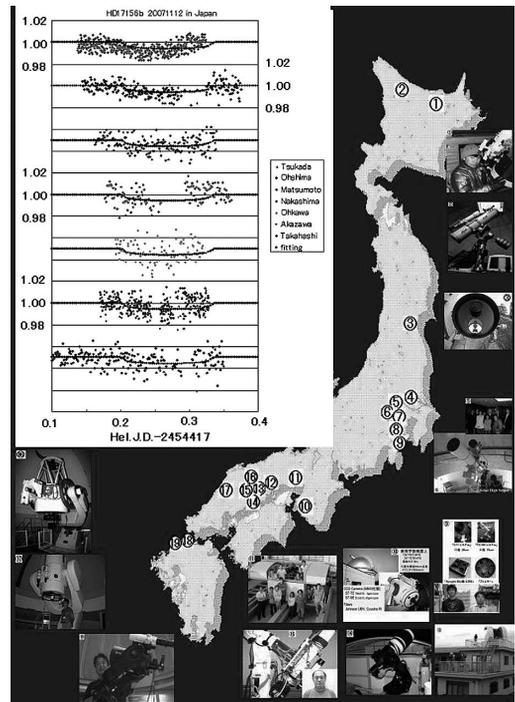


図2 HD17156bの共同観測で得られた光度曲線と参加した観測者の国内分布。

ピターを発見し始めたこと、すばる望遠鏡の観測時間確保も難しくなってきたことなどにより、N2Kの取り組みを収束させる方向が井田 茂教授より示された。それを受けて、ネットワークでの取り組みはトランジット惑星のトランジットタイミング変化を調べる観測(TTV観測)に重心が移っている。同一の系に惑星が複数個存在すると、その重力相互作用により、トランジットを起こすタイミングがずれるという現象が期待され、その現象から未発見の惑星の存在が予言される。

3. 公共天文台での取り組み

3.1 公共天文台とトランジット観測

複数の公共天文台の職員もネットワークに参加しており、施設単独で、あるいは近隣のアマチュ

*4 古在由秀元国立天文台長が1962年の論文⁶⁾で、太陽-木星-小惑星系において、木星との共鳴により小惑星の軌道(離心率・軌道傾斜角)が大きく変化する機構を調べた。

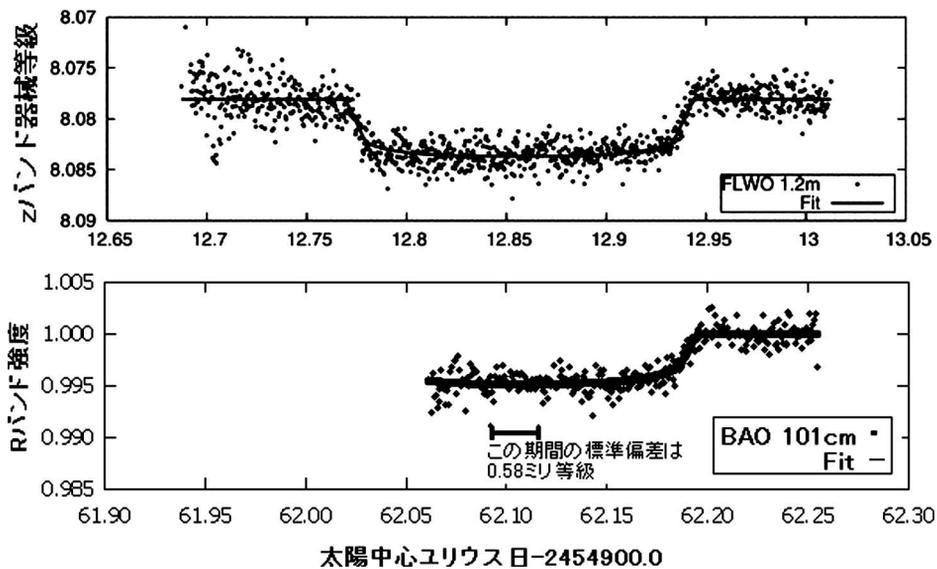


図3 美星天文台101 cm望遠鏡によるHAT-P-2bのトランジット（下）。トランジットによる減光量はわずか5ミリ等級。潜入時の欠測は一般観望時間帯のため。上は比較のためのFLWO1.2 m望遠鏡による観測¹¹⁾。

ア観測者と一緒にトランジット観測に取り組んでいるかなどの事情は個々の施設によって異なるが、所属する施設の望遠鏡を活用して観測を行っている⁹⁾。公共天文台がトランジット観測を行う観測上のメリットは、口径60 cmから1 m程度の望遠鏡が使える点で、アマチュア所有の望遠鏡ではできない暗い天体であっても十分観測対象にできることである。一方、決定的なデメリットは、公共施設の使命上、一般公開が第一の目的であるため、一般観望時間帯や何らかの形で利用者に望遠鏡を提供している時間帯にはトランジット観測を行うことはまず不可能という制約があることであろう（実際にトランジットの時間帯と一般観望の時間帯は重なることもしばしばである）。

しかし、利用者や一般市民（納税者）にとって、系外惑星というテーマは、第2の地球探しや宇宙における生命探しといった興味を引く内容に直結しているし、観測の内容も理解しやすく、施設が自らトランジット観測を行い、その成果を展示するということが一般市民にも好評であるのでやりがいのあるテーマである。

3.2 口径を生かした測光精度の向上

第一節で述べたのとは逆に、トランジット惑星の中でも良い比較星が近くにある同一視野内に確保しやすい場合は、多少暗い対象であっても使える望遠鏡の口径が大きいことは、測光精度を上げるためには基本的に有利に働く。地上観測では、大口径は、光量の点だけでなく、シーイングの影響を口径で空間平均化している点も測光精度向上にとって効果は大きい。ここでは美星天文台の101 cm望遠鏡を用いた国内で初めて1ミリ等級以下の測光精度を実現した観測例¹⁰⁾を紹介する。

図3は、HAT-P-2bという惑星のトランジットの光度曲線である。図3の上が世界的にトランジット観測では質と量共に最も優れた測光の実績のあるFLWO1.2 m望遠鏡での観測¹¹⁾で、下が美星天文台で行った観測である。全体の減光量はわずか5ミリ等級という現象であり、二つのグラフのスケールは共通にしてある。慎重に観測を行い、好条件に恵まれた場合の美星天文台での観測の精度がわかる。限られた時間帯ではあるが、特

に好条件に恵まれた40分間の測光精度は、標準偏差で0.58ミリ等級を達成している。この観測では特に入念なガイドを行い、フラット誤差の影響を少なくしている。トランジット前半のデータについては、先に述べた一般観望時間帯にかかっていたために取得できなかったことは残念であるが、この観測精度はスーパーアースサイズの惑星検出など、今後の系外惑星の観測にとって大きな可能性を示すものと言える。

参考文献

- 1) 大島 修, 2004, 月刊星ナビ9月号
- 2) Ohshima O., et al., 2001, AJ 122, 418
- 3) Berry R., Burnell J., 2005, "The Handbook of Astronomical Image Processing" 2nd Ed., Willmann-Bell
- 4) 佐藤文衛, ほか, 2007年秋季年会 P55a
- 5) Fischer D., et al., 2007, ApJ 669, 1336
- 6) Kozai Y., 1962, AJ 67, 591
- 7) 井田 茂, ほか, 2008年春季年会 P04a
- 8) Narita N., Sato B., Ohshima O., Winn J., 2008, PASJ 60, 1
- 9) 矢田猛士, ほか, 2007, 島根県立三瓶自然館研究報告 (5), 55-57
- 10) 大島 修, ほか, 2010年春季年会 P42b
- 11) Bakos et al., 2007, ApJ 670, 826

Transit Observations of Exoplanets by Amateur Astronomers and at Public Observatories in Japan

Osamu OHSHIMA

Mizushima Technical High School, 1230 Nishi-achi, Kurashiki, Okayama 710-0807, Japan

Abstract: Transit observations of exoplanets by amateur astronomers and at public observatories in Japan are described. Especially a development of precision photometry with a small cooled CCD camera attached to a small telescope, and an example of sub millimagnitude photometry with 1-meter telescope of Bisei Astronomical Observatory are reported.