

# 教育現場で観る太陽系外惑星 —小中口径望遠鏡でできる系外惑星観測と その愛教大60cm望遠鏡による実践—

政田 洋平\* 中野 友美\*\*

\*理科教育講座（地学分野）

\*\*伊賀市立緑が丘中学校教諭

## Transiting Exoplanet Observations for Science Education

Youhei MASADA\* and Tomomi NAKANO\*\*

\*Department of Science Education, Aichi University of Education, Kariya 448-8542, Japan

\*\*Midorigaoka Junior-High School, Midorigaoka, Iga, 518-0836 Mie, Japan

### 1. 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総称である。「この広大な宇宙に地球のような生命が育まれている惑星は存在するか？」古代ギリシアの哲学論争以来のこの問いに答えることが、系外惑星探査の一つのマイルストーンである。

系外惑星の存在が初めて確認されたのは1995年のことである。スイスのミシェル・マイヨールのチームがドップラー偏移法（後述）を用いて、ペガスス座51番星の周りを約4日の周期で公転する木星の半分程度の質量の惑星（ホットジュピターと呼ばれる）を発見した（文献 [1]）。

この発見以前は、系外惑星を直接観測しようとする試みが多かった。しかし、惑星は自ら光を発していない上、地球からの距離も遠い（太陽から最も近い恒星でも距離が4.4光年ある）ため、地上で観測すると非常に暗い。さらに主星の光も惑星の直接撮像の妨げとなるため、従来の撮像法では系外惑星を発見することは困難であった。

マイヨールらの発見を後押ししたのは、近年急速に発展した“間接的な”系外惑星の探査手法である。惑星が主星である恒星の前面を通過する際の「減光率」や、惑星の公転に起因した「主星のふらつき」等を測定する方法が見出され、間接的に惑星の存在を検出できるようになったのである。

この発見を契機に様々なタイプの系外惑星が発見されるようになり、2017年9月現在までに発見された系外惑星の総数は、特定済みのものが3500個以上、候補も含めると5000個以上にものぼる。

このように、太陽系外惑星観測が天文学の舞台に

立ったのは1995年のことであり、天文学の他分野（例えば、太陽や銀河の研究分野）と比べるとその歴史は非常に浅い。これは裏を返せば系外惑星の分野は現在急激に発展している分野であるとも言えることができ、現に驚くべき新発見が毎年のように続いている。例えば、今年の2月にNASAは「赤色矮星 TRAPPIST-1 の周りに7つの地球型の系外惑星を同時に発見し、さらにその中には生命が居住可能な惑星が3つ含まれている可能性が高い」と発表した。そのニュースは日本でも各種報道で大々的に報じられた。その新発見の多さと内容の身近さ・わかり易さも相まって、系外惑星分野への関心・注目は、一般市民の中でも日に日に高まっているのが現状である。

太陽系外惑星の探査は天文学の最先端トピックであるが故に、我々に身近な小型・中型の望遠鏡では実現不可能だと思われがちであるが、実はそうでは無い。比較的近傍にある恒星を周回する惑星の「トランジット観測」は、本研究での実践が示すように、ノウハウさえあれば市販の小型望遠鏡や大学・高校の屋上に設置されている中型の望遠鏡でも実現可能である。系外惑星探査のこのアクセシビリティの高さは、天文・理科教育にとって大きなアドバンテージになる。

系外惑星探査は「宇宙に我々以外の生命は存在するか？」という人類の永遠の問いと密接に関係しているため、理科教材としての問題設定が容易である。加えて、我々が行う系外惑星の「トランジット観測」は、後述するようにその原理が極めて単純であり、小中高生でも現象の定性的な理解が得やすい。よって、系外惑星観測の教育現場への導入には、高い教育効果が期待できる。

我々の研究の目的は、教育現場と理科教材への導入

を目指し、身近な小中口径望遠鏡を使った系外惑星観測のノウハウを確立することである。そのための第一歩として、本論文では本学60 cm望遠鏡を使って、初めて系外惑星観測を試みた。2節では、系外惑星観測の教育現場への導入を想定し観測手法と観測装置、使用したソフトウェアとデータの解析手法を丁寧にまとめる。3節で観測データとその解析結果を示し、より小さな口径の望遠鏡での系外惑星観測の可能性を4節で議論する。

## 2. 観測方法

### 2.1. 各手法の特徴とトランジット法

#### の天文教育の観点からの利点

以下では、太陽系外惑星の代表的な観測手法について簡潔にまとめ、各手法の利点と欠点、本研究でトランジット法を採用する理由を述べる。

#### (1). ドップラー偏移法（視線速度法）：

中心星が発する光の波長は、惑星の重力による中心星のふらつきに起因して変化する。ドップラー偏移法は、この光の波長のふらつきを観測することで惑星の存在を抽出する方法である。太陽系と同様に、中心星は惑星からの重力を受けて両者の共通重心の周りを（惑星と同じ周期で）公転している。その様子を地球から観測すると、中心星がその公転運動に起因した周期で地球に近づいたり地球から遠ざかったりするため、光のドップラー効果により、中心星の色が僅かに青方偏移したり赤方偏移したりする。この僅かな光の色の变化を捉えることにより、惑星の存在を発見する。

#### (2). トランジット法：

トランジット法は、惑星が中心星の前を通過（トランジット）する際の減光現象を観測する手法である。図1に示すように、惑星が中心星の前を通過する際、地球から観測する中心星の明るさは惑星に遮られた分だけ小さくなる。このような惑星のトランジット時の光度変化を捉え、解析することで、惑星の存在とともに惑星の半径や惑星のタイプなど様々な情報を得ることができる。トランジット法と得られる惑星パラメータについては3.4節でさらに詳しく解説する。

#### (3). パルサー・タイミング法：

パルサー・タイミング法では、中性子星を周回する惑星の存在を捉えることができる。中性子星の中にはミリ秒から秒単位の周期でパルス状電波を発する種族があり、パルサーと呼ばれる。パルサーが発するパルスの周期は、通常は極めて規則正しい。しかし、パルサーの周りを惑星が周回している場合は、惑星から受ける重力の影響でパルス周期が徐々に変化する。この

周期の変化を捉えることで、パルサーの周囲に存在する惑星を発見する手法が「パルサー・タイミング法」である。

#### (4). 重力マイクロレンズ法：

重力マイクロレンズ法は、重力レンズ効果を使って惑星を検出する方法である。ここで重力レンズ効果とは、光の経路が天体の重力によって曲げられ、あたかも天体がレンズの役割を果たしているように見える効果のことである。光の曲がり具合はレンズ天体の質量が大きいほど強い。近傍の恒星同士でも重力レンズ現象が見られるが、地球から見て二つの恒星が視線方向に重なった時にその効果は顕著になり、光源星からの光が増光する。重力マイクロレンズ現象の際の光度変化は時間に対し本来左右対称であるが、レンズ天体となる恒星の周囲に惑星が存在していると、非対称になる。この非対称性から惑星の存在を検出できる。

ドップラー偏移法の場合、中心星に近く公転周期が短い惑星や質量の大きな惑星の方が視線速度の変動が大きくなり検出しやすい。反対に、中心星が暗い場合や若くて高温な場合、自転が速い場合は検出しにくい。高分散分光を行うためには大量の光子が必要であり、中心星が暗いと分光観測が出来ない。そのため、大口径望遠鏡でも9等が限界である。観測には最低でも分光器が必要なため、身近な小中口径望遠鏡でドップラー偏移観測を実施するのは簡単とは言えない。

パルサー・タイミング法は、パルサーのパルス周期の時間変化を捉えることがポイントで、技術的な難しさは無い。しかし、中心星が安定したパルス周期の中性子星でなければ検出できない点が問題であり、そのような星系に惑星が存在する確率も高くは無い。そもそもパルサーの観測は電波の波長帯で行う必要があるため、一般の可視光望遠鏡では実現不可能である。

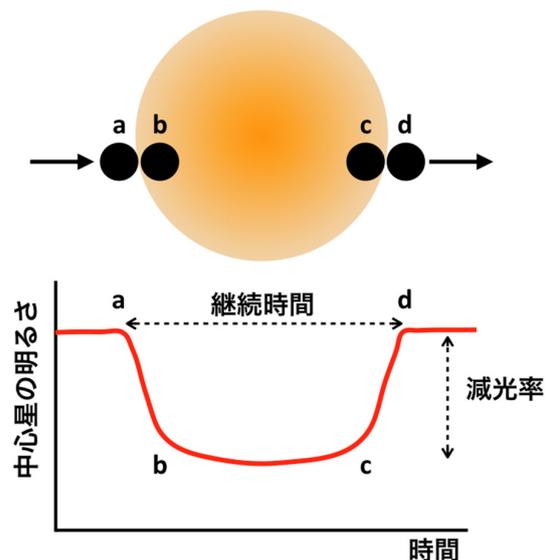


図1. トランジット法の模式的説明

重力マイクロレンズ法は、中心星から遠く公転周期が長い惑星を検出しやすい。また、中心星が暗く遠方であっても検出できるという利点がある。しかし、そもそも重力マイクロレンズ現象が発生する確率が極めて低いことが難点である。教育現場への導入という観点からは、その原理自体が小中高生や一般市民の理解の範疇を超えている。

トランジット法の最大の利点は、比較的シンプルな光学系でも惑星を検出できる点である。トランジット法の場合、惑星半径が大きいほど減光率が大きくなり検出しやすい。また、軌道周期が短いほど、惑星がトランジットする確率（頻度）は高くなる。しかし、トランジット現象を起こすためには、観測者の視線方向が惑星軌道面とほぼ一致している必要があり、惑星が存在していたとしても検出できない場合がある。これは系外惑星の新発見を目指す場合には一つの欠点になる。

一方、本研究の目的は、新しい系外惑星の探査・発見ではなく、系外惑星の観測・探査を教育現場に還元することである。この場合、すでに系外惑星の存在が確立している星系を主な観測対象とするため、上記の欠点はほとんど問題にならない。よって、単純な光学系を持つ小中口径望遠鏡で系外惑星の観測を行うためには、トランジット法が最も適していると考えられる。よって、本研究では、トランジット法による系外惑星観測を愛知教育大学60 cm望遠鏡を使って実践する。

## 2.2. 観測装置とソフトウェア

本研究で使用した観測装置と機材をまとめる。

### (1) 60cm反射望遠鏡

2014年に愛知教育大学の自然科学棟屋上に設置された経緯台式反射望遠鏡で主鏡有効径は600 mm、ナスミス焦点は6000 mm（主鏡口径比F/10）である。

### (2) CCDカメラ

市販のSBIG社製ST-8XME (NABG)を使用した。チップサイズは13.8×9.2 mmで、1ピクセルのサイズは9×9 μmである。チップの量子効果はRバンド(λ=600 nm付近)で65%程度である。メーカー仕様を以下の表にまとめる。

CCDの使用に際し、①冷却能力が外気温から確かに

表1. CCDカメラのメーカー仕様

チップサイズ	13.8 × 9.2 mm (1534 × 1020 pixel)
1ピクセルサイズ	9 μm
冷却能力 (空冷時)	外気温から最大-35°C
視野角 (FOV)	1.8540/pixel · 1000 mm
読み出しノイズ	15e- RMS
AD変換係数	2.3e- /ADU
露出可能時間	0.12 ~ 3600秒 (0.01秒刻み)

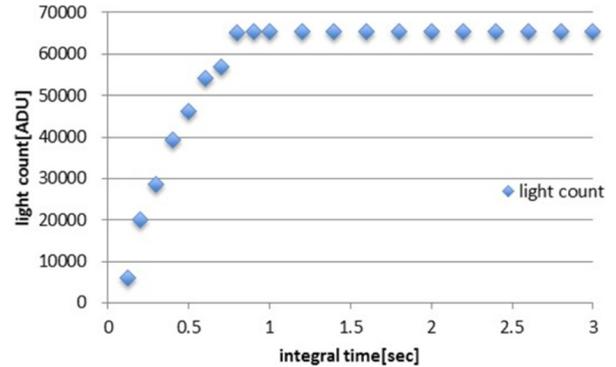


図2. 実験結果：CCDカメラのライトカウントと積分時間の関係（約64000ADUで飽和）

最大-35°Cであること、②冷却温度 (=T) とダークカウント ( $C_d$ ) の間に指数関数的関係 [ $C_d \propto \exp(-T)$ ] が成り立っていること、③ダークカウントが積分時間に比例して増加すること（線形関係が成立）、④ダークカウントのばらつきが1-2%の範囲に収まっていること、⑤ライトカウントと積分時間の間には64000ADUまでは線形性が保たれているが、それ以上になると飽和すること、などを事前の実験で確認している。ライトカウントの線形性の実験結果を図2に示す。観測天体の明るさを事前に調べ、ライトカウントの線形性が保たれる範囲で、測光時間を決定する必要がある。

### (3) 解析ソフトウェア：CCDOps

CCDカメラの操作用ソフトウェアとして、付属のCCDOpsを使用した。これは一般的なWindowsパソコンで動作するソフトウェアであり、主に以下のような機能を有する：

#### ①撮像

天体の画像を撮る機能。「自動撮像」モードに設定すれば、連続で複数枚の画像の取得が可能である。系外惑星の観測には少なくとも数時間の連続撮像が必要であり、自動撮像モードの利用が不可欠である。

#### ②カメラ設定

CCDカメラの冷却温度や解像度等のパラメータを決める。撮像バンドの決定もここで行う。

#### ③ダークフレーム処理

取得画像からダークフレーム（ダークノイズを含んだ画像）を減算する。撮像時にダーク減算モードを選べば、自動でダークフレーム処理をした画像を取得する。

#### ④フラットフィールド処理

取得した画像をフラットフレームで割る。

以上の機能は市販CCDカメラの付属ソフトウェアに通常備わっているものであり、本研究に特有のものではない。系外惑星の観測では、基本的にはCCDカメラの特殊な操作は必要ないと考えて良い。

(4) 解析ソフトウェア：すばる画像処理ソフトマカリ  
観測で得られたFITS画像を解析できるソフトウェアである。無償で配布されており、国立天文台のホームページからダウンロードできる。一般的なWindowsパソコンで動作する。主な機能としては①測光、②測位・重心検出があり、FITS画像データから天体の明るさや位置を対話的に調べることができる。マカリを使った解析方法については、次節以降で解説する。

### 2.3. 観測・データ解析の手順

以下で観測手順を詳しく説明する。この手順に従うことでスムーズに目的星の光度の決定（光度曲線の作成）まで行うことが可能である。

#### 手順 (1) 目的星の決定

観測する目的星を決定する。既知の系外惑星の観測が目的の場合、トランジット予報（文献 [2]）を利用するのが便利である。トランジット予報では、観測日当日にトランジットを起こす星の位置や視等級の情報、トランジットの開始・終了時刻、トランジット時の減光率等を調べることが出来る。精度よく観測を行うためには、条件の良いものを選ぶ必要がある。その選定基準を以下にまとめる。

##### ①季節

当然その時期に見える星であることが前提である。また、トランジット現象を正確に捉えるには、その開始前後の等級も必要である。そのため、現象が起こる予定の時刻の前後も観測可能な星を選ぶ。

##### ②方角・高度

本学付近は南部から西部にかけて工業地帯が広がっている。そのため、南から西の空では光害の影響が大きい。また、高度が低いと大気吸収の影響が大きくなる。観測星は、なるべく観測中に北から東の空の高度30度以上で見られるものを選ぶ。

##### ③視等級

暗い星はトランジットを検出するのに必要な光量を稼げない。露出時間を長くすると光量は増えるが、長くしすぎると露光中に星が移動したり十分な枚数を撮像できない可能性がある。そのため、観測星の視等級は14等より小さいものを選ぶ。

##### ④公転周期

観測の精度を上げるためにも、出来れば一晩でトランジット現象の開始から終了までを捉えたい。そのため、公転周期が数日程度の比較的短いものを選んだ方が良い。

##### ⑤減光率

トランジットの際の減光率は典型的には1%程度だが、当然ノイズが存在する（手順3で詳述）。減光率が大きな天体の方が光量の変化が分かりやすいため、観測精度は良くなる。よって、減光率が1%以上になるもの

のを選ぶ。

#### 手順 (2) 比較星の候補の決定

目的星の光量を正確に求めるために、比較星も同時に観測する必要がある。目的星の決定後、SIMBAD（文献 [3]）などを利用して目的星の周辺の星から比較星の候補を選んでおく必要がある。比較星には以下のような星が適している。

##### ①変光していない星

比較星が変光しては意味がない。変光星カタログやGCVS（変光星総合カタログ）等から、選んだ星が変光星かどうかを確認する。

##### ②目的星と似た色の星

比較星は、その色が目的星と似ているものを選ぶ。色が比較星と目的星で異なると、大気減光に差が出てしまうためである。補正できないわけではないが、補正量が少ない方が精度が高くなる。

##### ③目的星よりも明るい星

比較星は目的星と同程度かそれ以上に明るい星を選ぶ。比較星が暗いほど測光精度が悪くなるためである。同一視野内に目的星よりも明るい星を入れるためには、望遠鏡の焦点を短くして視野を広げると良い。視野内に目的星よりも明るい星が無い場合は、視野内の複数の星を測光し、その光量を足し合わせて仮想的な比較星とする（アンサンブル測光）。この時、比較星間の色の違いは平均化する。大気差等の誤差を少なくするため、足し合わせる星は、目的星を囲むような配置に選ぶ。

#### 手順 (3) 露出時間・焦点距離の調整

トランジット観測で1%の減光を捉えるには、少なくとも0.1%程度の観測精度が必要である。一方、光子はランダムにCCDに入ってくるため、必然的に統計揺らぎによるノイズが含まれる。S/N比（信号対雑音比）は、検出光子数の平方根で表され、S/N比が大きいほど、ノイズは相対的に小さくなる。要求精度0.1%（S/N比=1000）を達成するには、100万ADU程度の光量が必要であり、検出光子数をできるだけ稼ぐ必要がある。光量を増やす方法には、主に以下の2つがある：

##### ①露出時間を長くする

露出時間と光量には比例関係があり、露出時間を長くすれば単純に光量は大きくなる。しかし、露出時間を長くしすぎると、今度はピクセルが飽和して正確に測光できなくなったり、露出中に星が移動して星像がぶれる可能性が出てくる。よって、単純に露出時間を伸ばすだけでは、正確な観測ができなくなってしまう。

##### ②ピントをずらし星像を広げる

①を補う方法として、焦点距離を短くしてピントをずらす方法がある。ピントをずらすことで星像を拡大でき、光をより多くのピクセルに分散させて観測でき

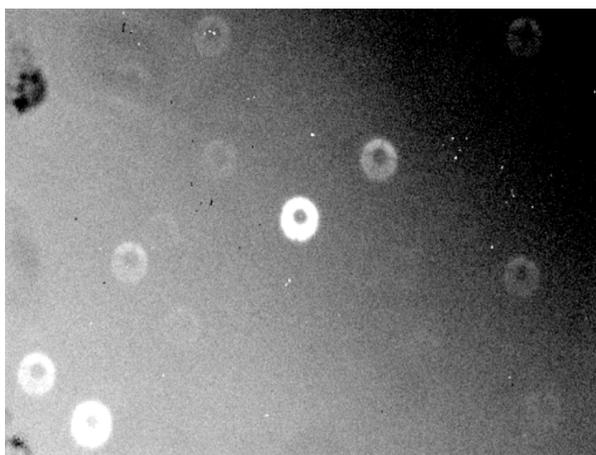


図3. ピントをずらした時のドーナツ状星像

る。よって、焦点を合わせた場合には飽和してしまうような光量を、飽和させずに測光することが可能になる。図3に示すように、反射望遠鏡ではピントを外すと副鏡の影が出てドーナツ状の星像になるが、測光上も重心検出上も問題は無い。ただし、焦点距離を短くすると視野が狭くなる。観測には、1枚のフレームに目的星と比較星が収まっている必要がある。比較星は手順(2)に挙げた条件を満たしている必要があり、視野が狭くなると、その分だけ視野内に入る星が少なくなり比較星として用いる星が無くなる場合もある。総光量100万ADU以上を達成するには、両方のバランスを上手く調整する必要がある。

#### 手順(4) 撮像

CCDOps [2-2節参照]には自動撮像機能があり、露出時間と撮像枚数を指定すれば自動で連続撮像できる。このような機能は他のCCD・撮像ソフトウェアでも標準的に備わっている。設定の際、予測されるトランジット時間を十分カバーできるように撮像枚数を指定する。また、CCDに発生する熱を除去するため、1回の撮像ごとにインターバルを設ける必要がある。経験的に、その時間は露出時間の1/2程度は必要である。

一般的にCCDは赤から赤外の領域の波長の観測が得意である。よって、単に系外惑星を捉えることが目的の場合、フィルターはRバンドを使用すれば良い。フィルターを取り付けた方が色収差を考慮した測定が出来るが、総光量が足りなくなるのであればフィルターは付けなくても構わない。撮像の際、「ダーク減算」を指定することで、ダーク減算処理が自動で行われ、処理後の画像が得られる。撮像の開始前か後にフラットフレームを撮る。その際、フィルターや露出時間、CCDカメラの冷却温度は星の撮像時と同様の値に設定にする。

#### 手順(5) データの1次処理

画像の1次処理とは、通常はダークフレーム減算とフラットフィールド処理を指す。今回のようにCCDの機能として自動でダーク減算が行える場合は、フラットフィールド処理だけを行えば良い。CCDOpsの機能にフラットフィールド処理がある。観測星の撮像時に一緒に撮ったフラットフレームを利用して、画像データの全てに処理を施す。

#### 手順(6) 測光アパーチャとSKY幅の決定

測光アパーチャとは、測光する円形のマスキングの開口のことである。図4に測光アパーチャを示す。半径はピクセル単位で表すことが多い。アパーチャ内に星の全ての光を入れないと正確な測定値が得られない。星像は見かけよりも広がっているため、アパーチャは大きめに取る必要がある。

すばる画像処理ソフト「マカリ」を使用し、アパーチャを決定する。マカリには自動でアパーチャのサイズを決めてくれるモードもあるが、その場合フレーム毎にアパーチャのサイズが異なってしまい、それが原因で測定誤差が生じる可能性がある。それを避けるために、観測星の適切なアパーチャを手動で調べ、固定したアパーチャで測光した方が良い。その方法の一例を以下に示す。

- ①マカリの「光度測定の設定」の「測定方法」タブで、「半自動」「重心を探す」にチェックを入れる。
- ②「半径設定」で「SKY内径」をかなり大きめに設定する。
- ③「恒星/天体径」を3 pixel程度にして目的の星を測光し、その結果をファイルに出力する。
- ④「恒星/天体径」を1 pixelずつ増やしていき、SKY内径に満ちるまで測光・出力を繰り返す。
- ⑤出力したファイルを1つにまとめ、例えばExcel等(プロッター)で読み込む。
- ⑥横軸にアパーチャ [pixel単位]、縦軸に総カウント数を取り、グラフ化する。
- ⑦グラフで、径が変化してもカウント数の変化が少なくなったところを見極め、アパーチャ半径として定める。

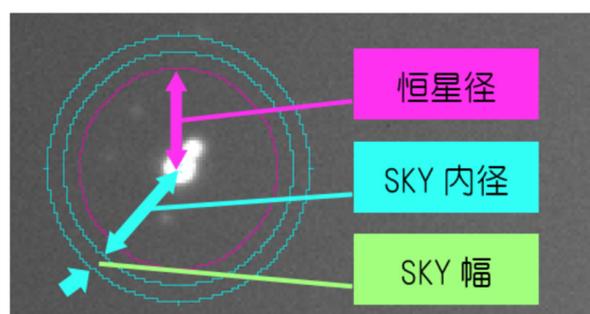


図4. 測光アパーチャ

近接した星がアパーチャ内に入り、明確に分離できない場合は、1つのアパーチャの中にそれらの星も全て入れてしまう方が良い。アパーチャ半径を決めたら、同様にSKY幅も決める。SKY幅は総カウント数には余り影響しないが、周りの明るい星がSKYの同心円に入ってこない限り、SKY幅が広い方が測定精度は高くなる。測光アパーチャとSKY幅は目的星と比較星の両方で決める。

### 手順 (7) 測光

測光にはマカリを使用する。決定したアパーチャ半径とSKY幅を適用して、撮像した全フレーム分の目的星と比較星を測光する。測光した結果は目的星と比較星のそれぞれでテキストファイルにまとめておく。

### 手順 (8) 光度曲線の作成

測光した結果をまとめたテキストファイルをExcelで読み込み、次式から目的星と比較星の等級差 $dm$ を求める：

$$dm = -2.5 \log_{10} (N_v/N_c)^N \quad (1)$$

ここで $N_v$ と $N_c$ は目的星と比較星のカウント数である。全フレームで等級差 $dm$ を求めグラフ化する。その際、横軸に時刻に相当する量を取ることで光度曲線が得られる。

## 3. 実際の観測とその結果

### 3.1. 目的星 HAT-P-20b と比較星

HAT-P-20bは2010年に発見された系外惑星である。地球からふたご座の方向に約228光年の距離にある恒星(2MASS J07273995 +2420118)の周りを2.88日の周期で公転している。トランジットの開始から終了までが約2時間であり、トランジットの前後1~2時間を含めても一晩で観測することが出来る。また、主星はK型の太陽型の恒星であり、視等級は11.34等級であった。

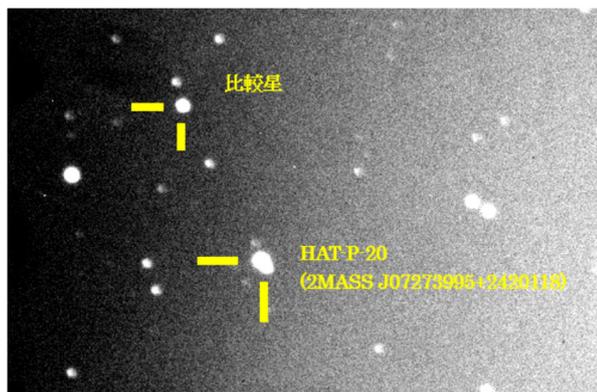


図5. HAT-P-20b (目的星) と比較星

HAT-P-20bの位置情報、他の天文台で得られた観測データを表2にまとめる。比較星として図4に示した星を選んだ(SIMBADで変光星ではないことを確認済み)。比較星の光量は目的星(HAT-P-20)の1/3程度であったが、フレーム内にある星の中では比較的明るい。

表2. HAT-P-20bのデータ

赤緯	07h27m39.95s
赤経	+24°20'11.49"
公転周期	2.875317日
離心率	0.015
恒星質量	0.756 $M_{\text{sun}}$
惑星質量	7.246 $M_{\text{jup}}$
恒星半径	0.694 $R_{\text{sun}}$
惑星半径	0.867 $R_{\text{jup}}$

### 3.2. アパーチャ半径・SKY幅の設定

目的星の周囲には小さな星が3つほど隣接していた。これらの星の光が入らないように目的星のアパーチャ半径を決めるのは難しいため、隣接した3つの星もアパーチャの中に入れた。系外惑星の観測に必要なのは絶対的な明るさではなく等級差の変化なので、アパーチャ半径内に目的星以外の星を入れても問題は無い。比較星にも近接した星があったため、アパーチャ内に入れた。

その結果、目的星のアパーチャ半径を30ピクセル、SKY幅を5ピクセルとした。この時の目的星の総光量は約716,000であった。また、比較星のアパーチャ半径を25ピクセル、SKY幅を5ピクセルとした。この時の目的星の総光量は約200,000であった。

### 3.3. 観測結果

本研究では2回のトランジット観測を行った。観測の概要は表3にまとめる。

気候条件の良かった2016年12月16日の観測結果を図6に示す。撮像した全170枚のフレームの5点ずつの平均をとり、分散をエラーバーで示している。目的星や比較星の測光アパーチャ内に宇宙線が強く映り込んだデータは測光誤差の原因になるため、グラフ作成の

表3. 観測条件、機材、露出時間や撮像枚数

観測日	2016/12/16	2017/01/24
天候	快晴	晴れ
気温	7°C	2°C
目的星	HAT-P-20b	HAT-P-20b
望遠鏡	60 cm 反射望遠鏡	60 cm 反射望遠鏡
CCDカメラ	ST-8XME (NABG)	ST-8XME (NABG)
冷却温度	-15°C	-15°C
フィルター	R	R
露出時間	60秒/枚	60秒/枚
撮像間隔	30秒	0秒
焦点距離	-2.0	-2.0
撮像時間	4時間(21:30~1:30)	3時間(18:50~21:50)
撮像枚数	170枚	170枚

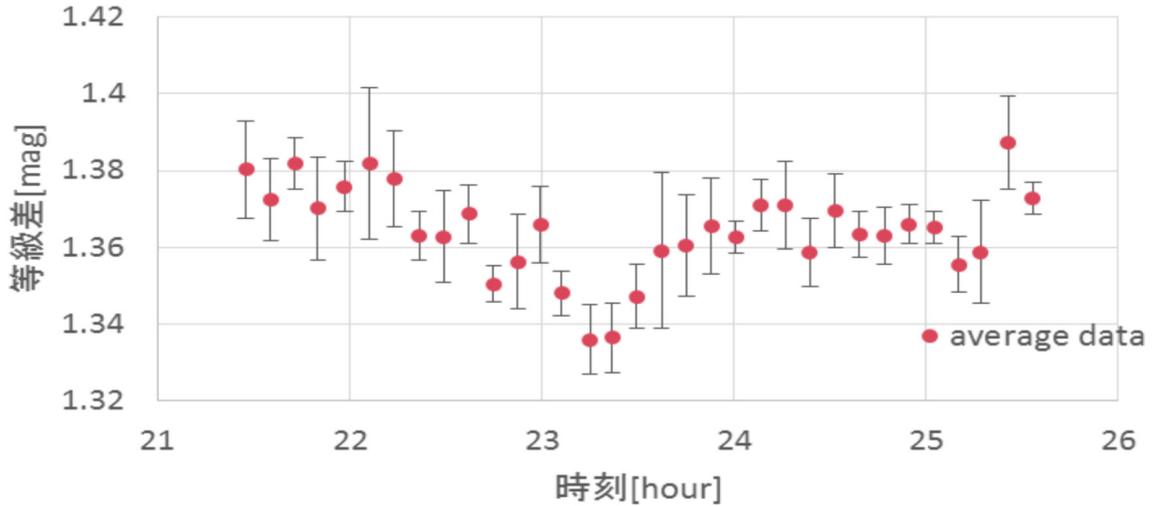


図6. 目的星と比較星の等級差の時間進化. 赤丸が5点平均のデータ. エラーバーは分散.

際には除外した。

図6の横軸は観測時刻、縦軸が目的星と比較星の等級差である。比較星は変光星ではないので、図の縦軸は実質的には目的星の等級変化に相当している。図の22:10頃から等級差の急激な減少が始まり、ピークでは3%ほどの減光を示す。その後24:00頃に今度は等級差が急激に増加し、減少前の状態に戻る。今回の観測で得た等級差の減少開始時刻と終了時刻は、トランジット予報のトランジット開始・終了時刻とほぼ一致していた。2017年1月24日に行った2回目の観測でも、気候条件は1回目ほど良くはなかったが、ほぼ同様の結果が得られた。次節以降では1回目の観測データを使って、観測誤差やトランジット観測の成否、観測結果が示唆する惑星のパラメータなどを評価する。

### 3.4. データ誤差と観測結果の信頼性

データ誤差をS/N比を用いて評価する。S/N比は以下のように定義され、その逆数がデータ内に含まれる誤差、つまりデータの精度 ( $\sigma$ ) である：

$$S/N \text{ 比} \equiv N^{1/2} \quad (2)$$

$$\therefore \sigma \equiv 1/N^{1/2} \quad (3)$$

この時のNはスカイを差し引いた後の測光星のカウント値である。任意に選択したフレームの目的星と比較星のカウント値はそれぞれ  $N_v = 733427$ ,  $N_c = 203947$  であった。それぞれのS/N比は

$$\begin{aligned} S/N \text{ 比 (目的星)} &= N_v^{1/2} = 856.4034 \\ S/N \text{ 比 (比較星)} &= N_c^{1/2} = 451.6045 \end{aligned} \quad (4)$$

であった。この時、目的星と比較星の誤差は

$$\begin{aligned} \sigma_v &= 1/N_v^{1/2} = 0.001168 \\ \sigma_c &= 1/N_c^{1/2} = 0.002214 \end{aligned} \quad (5)$$

である。よって、等級差が持つ誤差は

$$\sigma_{\text{tot}} = (\sigma_v^2 + \sigma_c^2)^{1/2} = 0.0025 \quad (6)$$

となり、追求できる観測精度は約0.25%である。

次に結果の信頼性（観測結果がトランジットによる等級変化を検出できる誤差に収まっているか）を評価する。トランジット開始前の等級差の平均値は1.3777等級であり、トランジット中の等級差の平均値は1.342等級であった。よって、トランジットによる等級差の変化量は0.0352等級であることがわかる。また、トランジット中の等級差の分散は0.00572等級であった。従って、トランジットによる等級差の変化量に対する現象中の分散が占める割合は16.2%となった。以上から、この観測結果はトランジットによる等級変化を検出できる誤差に収まっており、本研究で系外惑星のトランジット現象を検出できたと言える。

### 3.5. 惑星パラメータの評価：

#### 観測した惑星の半径と種族

トランジット観測で得た光度曲線からは主に2つの物理量が分かる。「減光率」と惑星通過の「継続時間」である。これらに主星等の情報を加えることで、惑星に関する様々な知見が得られる。ここでは、減光率から「恒星に対する惑星の半径比」を評価する。トランジット前の恒星の見かけの等級を  $m_s$ 、トランジット中の恒星の見かけの等級を  $m_t$  とすると、明るさと等級の関係から、恒星半径  $R_s$  と惑星半径  $R_p$  の比に関する以下の式が得られる

$$R_p/R_s = [1 - 10^{-(m_s - m_t)/2.5}]^{1/2} \quad (7)$$

今回我々が求めたのは天体の等級そのものではなく、トランジット天体（目的星）と比較星の「等級差」である。実は式(7)は等級差を使った形にも書き換えることができる。比較星の等級を  $m_c$ 、トランジット開始前とトランジット中の目的星と比較星の等級差をそれぞれ  $dm_s$ ,  $dm_t$  とすると、

$$\begin{aligned} dm_s &= m_c - m_s \\ dm_t &= m_c - m_t \end{aligned} \quad (8)$$

と表すことができる。両者の差は  $(m_s - m_t)$  に等しいので、式 (7) は以下のように書き換えられる：

$$R_p/R_s = [1 - 10^{-(dm_t - dm_s)/2.5}]^{1/2} \quad (9)$$

トランジット天体の等級を求めなくても、その比較星に対する相対的な減光から惑星半径の情報が得られるというのは興味深い点である。

導出した式を用いて、今回の観測結果から惑星半径を評価する。1回目の観測データ（2016年12月16日に取得）より、トランジット開始前の目的星と比較星の等級差の時間平均は  $dm_s = 1.377$  等級、トランジット中（惑星と恒星が完全に重なり合っている状態）の等級差の平均は  $dm_t = 1.342$  等級であった。式 (9) にこれらの値を代入すると、

$$R_p/R_s = [1 - 10^{-(dm_t - dm_s)/2.5}]^{1/2} = 0.1788 \quad (10)$$

となる。系外惑星 HAT-P-20b の先行研究からは、半径比  $R_p/R_s = 0.106 - 0.184$  という値が得られており、今回の我々の観測結果と整合的である。この一致も、今回我々が系外惑星のトランジット観測に成功したことを示す一つの証拠であると言える。

中心星である HAT-P20 はスペクトル型が K7 型でその半径が 0.69 太陽半径であることもわかっており、この値を式 (10) に代入すると今回観測した惑星の半径がおおよそ  $R_p = 1.3R_J$ （木星半径の 1.3 倍）程度であることもわかる。中心星に非常に近い軌道を周回していることから、太陽系には存在しない、いわゆるホット・ジュピターと呼ばれる種族であろう。以上の評価は、1回目の観測データに基づき行っているが、2回目の観測データでも同様の評価が得られていることも追記しておく。

#### 4. まとめと議論：

本研究では、天文学の最先端トピックである「系外惑星探査」の教育現場と理科教材への導入を目指し、本学 60 cm 反射望遠鏡を使って、初めて系外惑星観測を試みた。本論文では、身近な小中口径望遠鏡を使った系外惑星観測のノウハウを確立することを目的に、トランジット観測の原理、観測手法や観測機材、データ解析手法なども丁寧にまとめた（2節参照）。

本研究で実施した観測の結果、本学 60 cm 望遠鏡を使って初めて太陽系外惑星を捉えることに成功した。光度曲線の定性的な振る舞い（約 3% の減光）だけではなく、取得データの定量的な評価からも、本研究で「確かに系外惑星を捉えた」ことが支持される（3.4 節と 3.5 節を参照）。本研究で系外惑星観測が本学 60 cm 望遠鏡で実現可能であることを明確に示したことで、当然研究的な側面からの今後の発展も期待できる。

最期に、より小さな口径の望遠鏡を使った系外惑星

観測の可能性を議論する。本研究では、市販の CCD カメラ（値段は 20–30 万円程度）と、無料で配布されているデータ解析ソフトウェア（マカリ）を使って観測を行っており、これらは一般にも利用可能な装置・機材である。一方、望遠鏡としては 60 cm の口径を使用しており、当然一般に普及しているサイズよりは大きい。しかし、例えば 15 cm から 30 cm の比較的小さな口径の望遠鏡でも対象天体を選ぶことでトランジット観測は可能である。

実現のポイントは、測光の総光量を 100 万 ADU 程度まで増やすことである。この基準となる値（=100 万 ADU）の由来は、太陽系を例にとるとわかりやすい。太陽系で考えると、系内最大の惑星である木星の表面積は太陽のおおよそ 1/100 倍なので、木星の太陽面通過を観測できたとすると、本来の明るさから 1% 程度減光すると考えられる。従って、系外惑星が太陽系内と似たスケールであると想定すると、トランジット時には最大で  $O(1)\%$  程度の減光が期待される。この  $O(1)\%$  の減光を議論するために必要な観測精度は、少なくとも 0.1% である。この値は S/N 比 = 1000 に相当し（2.3 節参照）、S/N 比はカウント数  $N$  の平方根に比例するので、要求される総光量として  $N = 100$  万 ADU が求まる。

総光量 100 万 ADU を達成するためには、明るい天体のトランジット観測を行えば良い。遠い天体でも露出時間を長くすることで総光量を増やすことはできるが、2.3 節の手順 (3) でまとめた問題が発生する。10 cm から 30 cm の口径の望遠鏡であれば、おおよそ 8–9 等級くらいまでの星のトランジット観測は可能であろう。実際、10 cm クラスの小中高の屋上に設置できる望遠鏡でトランジット観測を成功させた例は複数あるようである（文献 [4, 5]）。

今後は本学 60 cm 望遠鏡を系外惑星の研究に用いるのと同時に、系外惑星観測をよりアクセシビリティの高いものにし、効率的に教育現場・理科教材に導入していくスキームを検討していきたい。

#### 引用文献：

- [1] Mayor & Queloz 1995, Nature, 378, 355
- [2] Exoplanet Transit Database (<http://var2.astro.cz/ETD/>)
- [3] SIMBAD (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>)
- [4] 小型望遠鏡による系外惑星のトランジット観測, 石隈, 伊藤, 向井 (2006) [<http://doi.org/10.14909/jsps.2006f.0.133.0>]
- [5] 高校生でも参加可能な系外惑星のトランジット観測, 大島修 (<http://paofits.nao.ac.jp/naoWS07/oosima.pdf>)

(2017年9月25日受理)