

トランジット法による系外惑星探索

浦川聖太郎¹

(要旨) 系外惑星という新たなフロンティアが発見されて10年以上が経った。太陽のような主系列星を公転する系外惑星の数は200個を越え、今後は系外惑星の姿をより詳細に探る段階にきている。系外惑星系の様子を知るとは、我々の太陽系がどのように形成されたか理解を深めることにも繋がるであろう。系外惑星の発見方法のひとつにトランジット法がある。トランジット法とは系外惑星がその主星の恒星面を通過した時に起こる、主星のわずかな減光を検出することで系外惑星を発見する方法である。トランジット法により系外惑星が検出されると、系外惑星の半径と正確な質量を求めることができるようになる。本稿では、トランジット法による系外惑星の検出手法と現在のトランジット観測グループの状況を紹介する。さらに我々が行っている、すばる望遠鏡と木曾観測所シュミット望遠鏡を用いたトランジットサーベイの結果を報告する。

1. トランジット法

これまで発見された系外惑星の多くはドップラーシフト法による発見である。系外惑星系の天体の運動を考えたとき、主星と惑星はお互いの共通重心を中心に公転している。惑星の質量が十分に大きく、さらに主星の近くを公転している場合は、惑星の重力の影響により主星の公転運動が大きくなる。主星の公転運動の視線速度方向の変化を検出することで付随する天体の質量を求め、系外惑星を発見する方法がドップラーシフト法である。ドップラーシフト法により、多くの系外惑星を発見することに成功したが、主星の視線速度方向の速度変化しか測定できないため、正確な惑星の質量を求めることは困難であった。また、惑星の半径も求めることができなかった。ドップラーシフト法と並び、代表的な系外惑星の発見方法にトランジット法がある。トランジット法とは系外惑星がその主星を掩蔽するときにかかる、主星のわずかな減光を検出することで系外惑星を発見する方法である (図1)。主星の

周辺減光の影響を考慮しなかった場合、系外惑星による主星の減光率 ΔF は

$$\Delta F = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2, \quad (1)$$

で表される。ここで R_p 、 R_* はそれぞれ惑星と主星の半径である。例えば、太陽系を外から見た場合、太陽のおよそ10分の1の半径である木星が太陽を掩蔽した場合、減光率はおよそ1%となる。ここで注意しなければならないのは、1%程度の減光現象を検出した場合でも、即座に系外惑星の発見とならない点である。晩期M型星の恒星や褐色矮星の半径は、木星のような巨大ガス惑星と同程度である。そのため、減光率だけでは掩蔽を起こした天体が、どのような天体であるか決定することができない。最終的な確認のためには、ドップラーシフト法による追観測で質量を決定する必要がある。木星の13倍質量以下の天体を惑星、13倍以上80倍までの天体を褐色矮星、80倍以上の天体を恒星と分類分けすることが多い。

2. トランジット法で系外惑星を検出するためには

1. 日本スペースガード協会美星スペースガードセンター

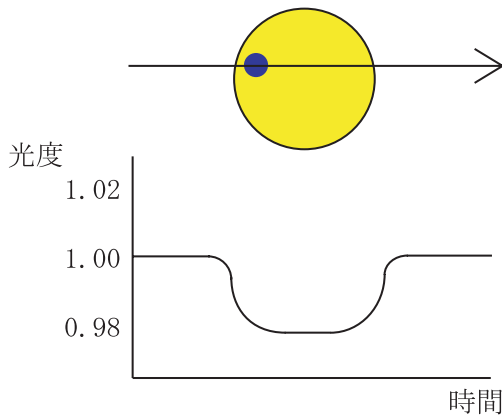


図1：トランジット法の概略図。系外惑星が主星の前面を通過した時の、主星の光度変化を測定する。縦軸は相対的な光度。

2007年1月までにトランジット法により発見された系外惑星の総数は13個に上る(<http://exoplanet.eu/>に掲載されているもの)。特に2006年秋には6個もの新たな系外惑星がトランジット法により発見されており、本稿が出版される段階ではさらに発見数が増加している可能性もある。しかしながら、ドップラーシフト法による発見と比較すると、まだまだ発見数が少ないのが現状である。トランジット法での系外惑星発見数が少ない理由として、次のことがあげられる。

1. 系外惑星がトランジット（惑星による主星の掩蔽現象を以下の文章でトランジットと表記する）を起こす軌道を公転していなければならない。

トランジットを検出するためには、観測者から見て惑星が主星を掩蔽する軌道を公転していなければならない。この条件は、惑星の軌道長半径が大きければ大きいほど厳しくなる。例えば、太陽と同程度の半径の恒星の周りを、木星のような惑星が軌道長半径0.04AUで公転している場合を考える。この時、トランジットが起こる惑星の軌道傾斜角（視線と公転面のなす角）は、およそ7度以下であれば良い。一方、軌道長半径1AUで公転している場合、軌道傾斜角はほぼ0度でなければならない。これまで発見された系外惑星のうち、トランジット法での検出に適した、軌道長半径が0.04AU以下のものは1割程度しか存在しない。

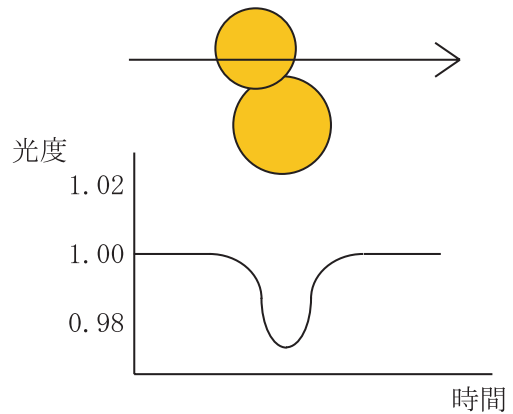


図2：grazing elclipse の例。食連星をなすひとつの恒星がもう一方の恒星をかすめるように掩蔽した場合も数%程度の減光が検出される。縦軸は相対的な光度。

2. 観測期間中にトランジットを検出しなければならない。

限られた観測時間と、安定した天候の下で、タイミングよくトランジットを検出できる確率は低い。トランジットは観測を行っていない昼間にも起こりうる。加えて、トランジットを検出した場合でも、減光現象が1回しか検出されなかった場合は、有意な系外惑星候補とはいええない。減光の原因が、主星の周りを公転する天体によるものと確認し、正確な公転周期を確定するには、周期的なトランジットを検出する必要がある。しかし、2回目、3回目のトランジットが、天候に恵まれた夜間の観測中に起こるとは限らない。また、伴星のような他の恒星が付随していないことを確認するためには、主星の光度曲線の全位相をできるだけ明らかにしなければならない。このためには長期にわたる観測が必要となる。

3. 観測した恒星が惑星を伴っていないなければならない。

当然のことながら観測した恒星が惑星を伴っていないなければならない。これまでの研究で、金属量の豊富な星が惑星を伴いやすいことがわかっている。そのため、ドップラーシフト法で系外惑星探索をする場合、金属量が豊富な恒星を観測対象とすることが多い。金属量が豊富な恒星に惑星が伴っている確率はおよそ5～10%程度である。しかし、トランジット法による観測では、

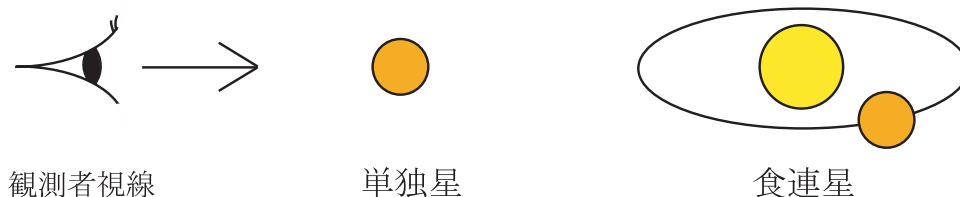


図3：blend starの例。観測者の視線方向上に単独星と食連星が重なっている。数%程度の減光現象が起きる場合がある。

選択条件を設定せずできるだけ多くの星を探索する方法を用いる。探索した星が必ずしも、金属量が豊富なわけではない。また、巨星やドップラーシフト法で追観測が難しいO、B、A型といった早期型星、近接連星、高速自転星も探索した星の中に含まれている。さらに、トランジットと思われるわずかな減光を検出した場合にも、減光の原因が系外惑星による掩蔽現象とは限らない。前述した、晩期M型星や褐色矮星による掩蔽の可能性に加え、grazing eclipseやblend starの可能性も考えられる。grazing eclipseとは、連星系をなすひとつの恒星がもう一方の恒星の縁をかすめるように掩蔽する現象である(図2)。blend starとは連星系とその背景星(あるいは前方星)が視線方向上に重なっている天体であり、この場合にも、数%程度のわずかな減光が検出されることがある。

このように非常に困難が多いトランジット法による系外惑星検出であるが、そこから得られる知見は、ドップラーシフト法単独による発見に比べて非常に興味深いところがある。光度曲線から、系外惑星の半径や軌道傾斜角が明らかになるので、正確な質量が求まり、密度や内部構造を推定することが可能になる。代表的な例は、HD149026bの発見である[1]。この天体はドップラーシフト法で発見された後、トランジットが検出された。正確な惑星の質量と半径が求まったことから、密度の推定を行うことが可能となり、地球の70倍もの質量を持った固体コアの存在が明らかになった。これほど大きな固体コアを持つ惑星は、従来の木星型惑星の形成メカニズムで説明するのが難しい。トランジット法による系外惑星の検出は、この例のよう

に我々の常識を覆すような発見がなされる可能性をまだまだ含んでいる。

3. 観測戦略

ここで、トランジット法により系外惑星を発見するための観測戦略に視点を移す。トランジット法の低い検出確率に打ち勝ち、系外惑星を検出するためには、できるだけ多くの恒星を長期間観測することが必要である。そのための観測方法に次のようなものがある。

3.1 ワイドトランジットサーベイ

小口径の望遠鏡(あるいは普通のカメラレンズ)にCCDを取り付けた観測システムで、およそ5度平方度以上の超広視野を実現し、12等級程度までの明るい恒星を探索する観測である。非常に広い視野であるので、多くの恒星を観測することが可能になる。これまでトランジット法で発見された惑星のうち、TrEs-1[2]、TrEs-2[3]、WASP-1b、WASP-2b[4]、XO-1b[5]、HAT-P-1b[6]の6天体が、この種の観測で検出された。さらにCOROTやKeplerミッションといった宇宙望遠鏡も計画され(COROTは2006年12月27日に打ち上げに成功)、高い測光精度を利用して、地球サイズの系外惑星の発見が期待されている。

3.2 ディープトランジットサーベイ

大型望遠鏡と焦点面にCCDを数多く並べた検出器(モザイクCCD)を用いることで、限界等級を深くし、多くの恒星を探索する観測である。代表的な

例にOGLE (THE OPTICAL GRAVITATIONAL-LENSING EXPERIMENT) がある。元来、OGLEは重力レンズ現象の検出を目指したプロジェクトである。重力レンズ現象も発生確率が低い現象のため、多くの恒星を観測しなければならない。そのため、広視野のモザイクCCDカメラを用いて大規模なサーベイ観測を行っている。OGLEはこれまでの観測で5つの系外惑星を発見している[7]。また、同様な観測を行っているMOAプロジェクトでも、トランジットを起こす系外惑星候補天体を検出している[8](MOAでは他に重力レンズ現象を利用して惑星質量天体を発見している[9])。最近ではハッブル宇宙望遠鏡を用いた観測により、SWEEPS-04, SWEEPS-11[10]の2天体が発見されている。我々のグループが行ったすばる望遠鏡や木曾シュミット望遠鏡を用いた観測も、暗い恒星を広視野検出器で数多く探索しようとするものである。

3.3 ドップラーシフト法で発見された天体の追観測

ドップラーシフト法で系外惑星がすでに発見されている天体に対して、トランジットの検出を試みる観測である。この観測では、対象天体にすでに系外惑星が存在していることが分かっているので、トランジット検出の確率は高くなる。発見された天体が軌道長半径の短い灼熱惑星の場合、およそ10%の惑星がトランジットを起こすと期待される。ドップラーシフト法の観測は分光観測であるため、発見された系外惑星の主星の光度は十分に明るい。したがって、トランジット検出を目指した観測は口径10cm程度の望遠鏡と市販のCCDカメラで十分可能である。このため、多くのアマチュア天文家もトランジット検出に挑戦している。トランジット観測国際ネットワーク (<http://www.transitsearch.org/index.htm>) や、日本でもトランジットネットワーク (<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/ida/transit.htm>) が組織され、プロ・アマが協力して、観測技術の向上や、より良い測光精度を目指した観測、解析方法などについて議論が行われている。さらに、N2Kconsortiumと協力したトランジ

ット観測も行われている。N2Kconsortiumとは、すばる望遠鏡、ケック望遠鏡、マゼラン望遠鏡が協力して、新たに2000個の星に対してドップラーシフト法で系外惑星探索を行うプロジェクトである。このプロジェクトで系外惑星と思われる視線速度変化を検出した場合、その天体情報がトランジットネットワークの一部のメンバーに知らされ、即座に観測を行う体制にある。前述した、HD 149026bも、この戦略でトランジットを検出した。日本のトランジットネットワークに参加しているグループも観測に挑戦したが、残念ながら悪天候によりトランジット検出にはいたらなかった。

4. すばるSuprime-Camトランジットサーベイ

4.1 Suprime-Cam

ここで我々が行った、すばる望遠鏡Suprime-Camを用いたトランジット法による系外惑星探索の結果を報告する[11]。すばる望遠鏡の検出器のひとつにSuprime-Camがある。Suprime-Camは、すばる望遠鏡の主焦点に備え付けられた4K×2KピクセルのCCD10枚から構成されたモザイクカメラであり、34'×27'という広視野を実現している。すばる望遠鏡の高い集光力で暗い天体まで観測が可能であり、さらにSuprime-Camの広い視野を利用すれば、トランジット法による系外惑星探索に適した観測が行えると期待できる。本観測では、すばる望遠鏡でトランジット法による系外惑星探索に必要な測光精度と撮像恒星数を達成できるか評価を行うことを第一の目的に設定した。加えて系外惑星候補天体の検出を目指した。

4.2 観測

観測は2002年9月28、29日と10月1、2日に行った。9月28、29日の観測時間はそれぞれ6時間、10月1、2日の観測時間は1時間半であり、全体で15時間の観測を行った。式(1)が示すように、トランジット法で系外惑

表1: 晩期主系列星を仮定したときのトランジット候補天体の軌道要素. Object-1は, G0V/K5VとM0V/M5Vの可能性があり, それぞれの場合における結果を示した. ここで軌道傾斜角 i は主星の極からの角度で表している. 軌道要素の値の不確定性は, 主星の半径(スペクトル型)の不確定性による.

Object	SpT	A_V	ΔF	t_r	t_f	P	a	i	Dist	Radi
		[mag]	[%]	[min]	[min]	[day]	[Au]	[$^\circ$]	[kpc]	[R_{up}]
Object-1	G0V/K5V	3.1	3.9 ± 0.8	79-92	0-34	0.3-1.8	0.01-0.02	67-84	1.0-3.0	1.4-2.2
	M0V/M5V	1.1	4.4 ± 0.8	91-111	0	2.1-6.9	0.02-0.03	86-89	0.3-1.2	0.6-1.3
Object-2	K5V/M0V	1.1	4.9 ± 0.5	101-106	23-34	1.5-2.5	0.02-0.03	84-86	1.3-2.3	1.3-1.6
Object-3-A	K0V/M2V	1.4	3.2 ± 0.4	106-111	0-39	1.7-5.6	0.03-0.05	83-88	1.2-3.0	0.9-1.5

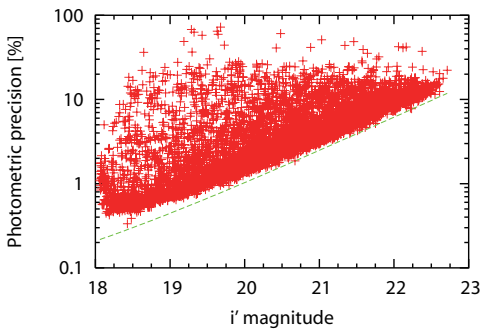


図4: 9月28日の観測における天体の等級と測光精度の関係. 破線はポアソンノイズと典型的なスカイノイズを与えたときの理論的な測光精度の上限.

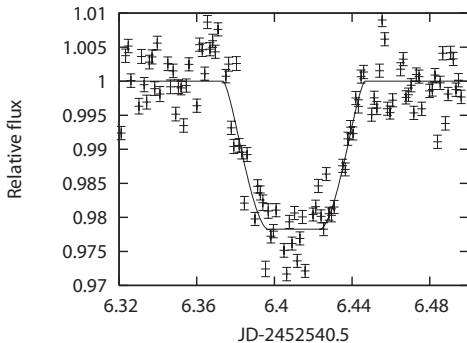
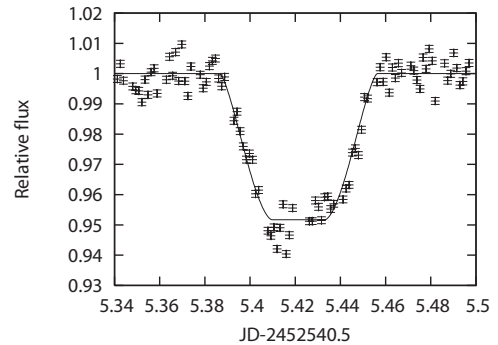
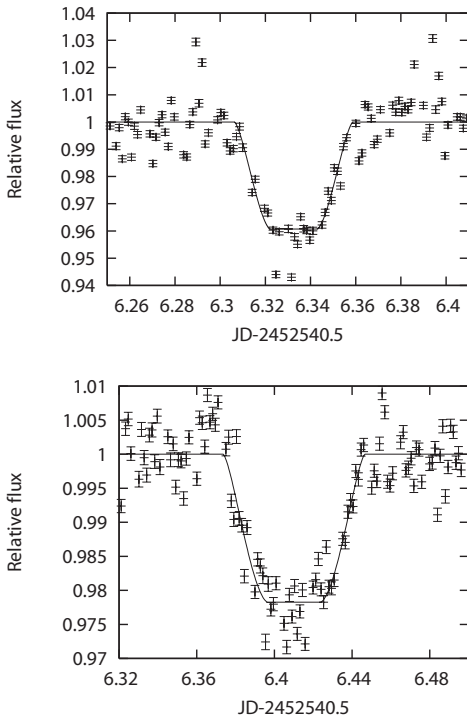


図5: 検出した光度曲線の例 (左図: Object-1, 右図: Object-2, 左下図: Object-3-A). フィッティングに用いた光度曲線モデルは [13] を用いた. Object-1, Object-3-A のスペクトル型はそれぞれ K0V, Object-2 は K5V を仮定している. Object-3-A は近接した 2 重星である. 詳細な解析の結果, 主星が 3.2% の減光を起こしていることが分かった.

方法). 星の光度はエアマスなどの大気状態の変化のために常に変動している. そのため光度曲線を得るためには, 目的の星の光度を測ると同時に, 同じ画像内に写っている比較星の光度を測り, 目的の星の明るさから比較星の明るさを引くことで大気変動を補正する必要がある. このとき, 比較星の精度が良くないと目的の星に対して十分な測光精度を得ることはできない. 例えば, 目的星と比較星がともに1%の測定誤差で測定できたとすると, 補正された目的星の精度は誤差伝播よりおよそ1.4%になる. 本観測では, Superime-Camという広視野検出器を使用したために, 比較星に適した明るい天体がCCD1チップあたり200個以上撮像されていた. これらの比較星の明るさを足し合わせ, 比較星の精度を向上させることで高い測光精度を実現した. 補正後の測光精度と観測等級の関係を図4に示す. 20等級より明るい天体で, 系外惑星検出に必要な数%の測光精度が達成されている. ここで測光精度は, 観測期間中の恒星の明るさの平均に対する標準偏差で定義した. また, 画像中に検出された恒星数はおおよそ10万個であった. このうち1.0%以内の精度を達成した星がおおよそ7700個, 3.0%以内の精度を達成した星が27000個であった. FGK型の主系列星のうち690個にひとつが灼熱惑星を伴っていると言われている[12]. このうち約1割強の恒星がトランジットを起こすとすれば, トランジットが検出できる恒星はおおよそ5000個にひとつとなる. 達成された測光精度と撮像恒星数は, トランジットを起こす恒星の存在割合を上回るものである.

4.3 トランジット候補天体

系外惑星によるトランジットの可能性のある光度曲線を3天体に対して検出した. その一例を図5に示す. さらに多色測光の結果より, これらの天体はG～M型の恒星であることも分かった. スペクトル型の決定だけではその恒星が巨星であるか, 太陽のような主系列星であるか分からない. そこで, 天体までの距離を推定することで天体のタイプの類推を行った. 我々が

検出した3天体の明るさは, 星間赤化の影響を補正すると, おおよそ16～18等級である. また巨星の絶対等級は-2～0等級といわれている. 従って, -2～0等級の巨星が16～18等級まで暗くなっているということは, その天体が非常に遠くに存在していることになる. 計算の結果, 巨星と仮定した場合, これらの天体までの距離は17kpc以上であると分かった. これは, 太陽系から銀河系の外縁部までの距離をこえる値である. 一方, G～M型主系列星の絶対等級は5～8等級であり, そこから推定される距離は0.3～3.0kpcである. したがって, 遠方に存在する巨星の可能性を否定できないものの, 主系列星の可能性がより高いと思われる. これより, 主星の半径はG～M型の主系列星程度であると類推できる. トランジットの減光率と主星のおおまかな半径が分かったので, 減光を起こした天体の半径を式(1)から求めることができる. また, 系外惑星候補が円軌道で公転していると仮定した場合は, 次の式より軌道要素を推定することも可能である[14].

$$P = \frac{M_* G \pi (t_T^2 - t_P^2)^{\frac{3}{2}}}{R_*^3 32 (\Delta F)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

$$a = \left(\frac{P^2 G M_*}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

$$\cos i = \frac{R_*}{a} \left\{ \frac{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - [\sin^2(t_F \pi / P) / \sin^2(t_T \pi / P)](1 + \sqrt{\Delta F})^2}{1 - [\sin^2(t_F \pi / P) / \sin^2(t_T \pi / P)]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで, P , a , i はそれぞれ公転周期, 軌道長半径, 軌道傾斜角, M_* は主星の質量, G は重力定数, t_T は減光の継続時間, t_P は最大減光 (フラットボトム) の継続時間である. 結果を表1に示す. この結果は, 数々の仮定に基づいたものであり, 追観測を行わなければ確かなことは言えない. しかし, 系外惑星による掩蔽の可能性を含んだ天体であることを示している. また, 当初の目的であった, すばる望遠鏡Suprime-Camを用いてトランジット法による系外惑星探索が原理的に可能であることを示した.

5. 木曽トランジットサーベイ

5.1 木曽トランジットサーベイ

すばるSuprime-Camを用いた観測で系外惑星検出に必要な測光精度と十分な数の星を探索できることを確認した。しかし、減光が観測期間中に一度しか起こらなかったために、正確な公転周期を測光観測から導きだすことができなかった。長期観測を行えば、有意な系外惑星候補天体を検出することは可能であるが、すばる望遠鏡を長期間占有することは現実的に非常に難しい。さらに、18～20等級という明るさは、ドップラーシフト法の分光観測を行うには十分な明るさでない。これらの問題点を解決するために、我々は東京

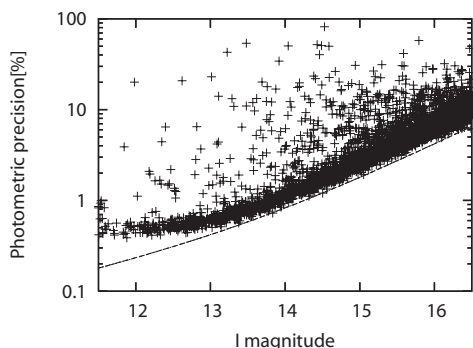


図6：5月16日における観測した天体の等級と測光精度の関係。破線はポアソンノイズと典型的なスカイノイズを与えたときの理論的な測光精度の上限。

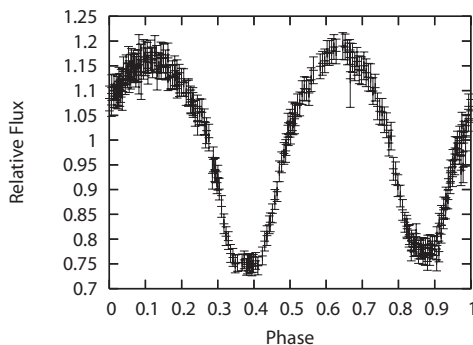


図7：検出した変光星の例。光度は13.1等級、変光周期は0.3159日。W UMa型食変光連星であると考えられる。

大学木曽観測所105cmシュミット望遠鏡を用いたトランジットサーベイを立案した。木曽シュミット望遠鏡には2K×2KピクセルからなるCCDカメラが備え付けられ、その視野は51'×51'という広さである。また、105cmという大きさは、ドップラーシフト法で追観測が可能である15等級程度より明るい天体を適度な積分時間でサーベイするのに適している。さらに、すばる望遠鏡に比べて長期の観測を行うことも可能である。ただし、ハワイに比べて空の状態は良くないと思われる。そこで、木曽観測所においてトランジット法による系外惑星検出に必要な測光精度が達成可能であるか試験観測を実施した。

観測は2005年5月16～20日に行った。観測戦略はすばる望遠鏡Suprime-Camの時と同様であり、長波長域に感度のあるフィルター（ここでは1バンドフィルター）を用い、視野内にできるだけ多くの恒星を撮像する観測を行った。解析方法も同様にアパーチャー測光を採用した。試験観測の結果を図6に示す。視野内に撮像された恒星の数はおよそ9000個であり、そのうち1.0%以下の測光精度を達成した星がおよそ350個、3.0%以内の精度を達成した星が1300個であった。撮像恒星数は少ないものの、測光精度の上では木曽観測所で系外惑星検出が可能であることを示している。また3.0%以内の精度を達成した恒星は15等級より明るく、ドップラーシフト法による追観測に適したものである。加えて、周期が明らかな変光星を2天体検出することに成功した。その1例を図7に示す。公転周期の短さと光度変化の様子からW UMa型食変光連星であると考えられる。

試験観測に引き続き、2005年と2006年の秋に周期的なトランジット検出を目指し長期観測を実施した。2005年は22日間、2006年は12日間の観測期間を得ることができた。2005年の観測では天候不良のため有意義なデータを取得することができなかったが2006年の観測では8日間の良い天候に恵まれ、現在データ解析中である。

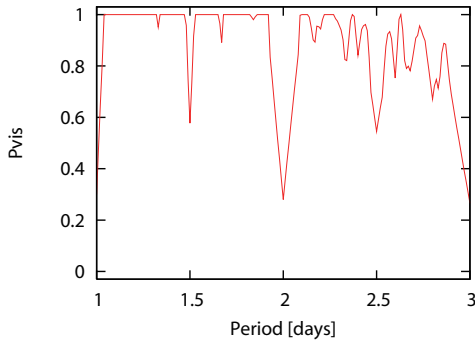


図8：1夜あたり9時間の観測を3週間にわたり行ったときの、複数回数以上のトランジットを検出できる割合。横軸は想定している系外惑星の公転周期。ここでは公転周期が1～3日の超灼熱惑星を想定している。

5.2 予測される系外惑星発見数

ここで、長期観測を行った場合の木曾観測所で予想される系外惑星の検出数（検出確率）を求める。系外惑星の予想検出数は次式で示すことができる。

$$N_p = NF\overline{P_{vis}}, \quad (5)$$

N は系外惑星検出に必要な精度が達成できた星の数、 F はドップラーシフト法で追観測が可能なFGK型の単独主系列星がトランジットを起こす軌道に系外惑星を伴っている確率、 $\overline{P_{vis}}$ は複数回以上のトランジットを検出できる割合の平均を示す。 $\overline{P_{vis}}$ について説明する。例えば公転周期が1日の系外惑星が存在していたとする。この系外惑星のトランジットを検出することができれば、地球の自転周期と系外惑星の公転周期が同期しているので、翌日の同じ時間に再びトランジットを検出することができ、2日間の観測で複数回のトランジットの検出に成功する。系外惑星の公転周期と地球の自転周期が同期しない場合は、長期の観測を行うことで複数回のトランジットを検出することが可能になる。図8に一晚あたり9時間の観測を3週間にわたり行った場合の $\overline{P_{vis}}$ を示す。図中で、公転周期が地球の自転周期と同期する惑星の検出確率が低くなっている。これは、一度トランジットの検出に成功するとその後、2回、3回とトランジットを検出することが可能であるが、最初のトランジットが昼間に起こった場合、次のトラ

ンジットも昼間に起こるため長期間観測を行ってもトランジットを検出できないことを示している（この不利を解消するためには異なる経度にいる共同観測者と連携を行うか、極地で1日中夜の時期に観測する必要がある）。図8における $\overline{P_{vis}}$ の平均は0.74である。これらの結果よりかなり楽天的に見積もれば、系外惑星の検出数はおよそ0.2となる。つまり2割の確率で系外惑星を検出できることになる。ただし、実際は3週間連続で晴れることはなく、また、公転周期が1日程度の系外惑星がこれまで発見された系外惑星と同じ割合で存在しているか詳しく分かっていない。さらに、観測した星が全て追観測に適した恒星であるとは考えにくい。そのため、実際の検出数は予測より少なくなると考えられる。

6. まとめと今後

すばる望遠鏡、木曾シュミット望遠鏡でトランジット法による系外惑星探索を行い、すばる望遠鏡での観測では3つのトランジット現象候補天体を検出した。追観測の必要はあるものの、これらのトランジット現象候補は系外惑星サイズの天体によるものの可能性がある。また、木曾シュミット望遠鏡を用いたトランジットサーベイでは撮像恒星数が少ないものの、系外惑星検出に必要な精度を達成していることを示した。2008年度から木曾観測所では $2^\circ \times 1.5^\circ$ の視野をもったモザイクCCDが導入予定である。この新広視野CCDを用いれば、系外惑星検出に必要な数の恒星を撮像できると期待される。また、トランジットサーベイで得られるデータは系外惑星研究だけでなく様々な分野に応用可能である。すばるSuprime-Camによる観測では新たに12個の変光星を発見している。これらの変光星は変光周期が全位相にわたり明らかになっているものであり、全位相が明らかになっていない変光星も含めると変光星の検出数は数十個以上に上る。同様に、木曾シュミット望遠鏡を用いた試験観測の結果から、新たな変光星を2天体検出している。このように、

系外惑星だけでなく様々な分野に取得データの利用が期待できる。

622,1118

[14] Seager, S., & Mallén-Ornelas, G. 2003, ApJ, 224,953

謝 辞

本稿の4章は、共同研究者である山田亨氏（国立天文台）、須藤靖氏（東京大学）、Edwin L. Turner氏（プリンストン大学）、伊藤洋一氏（神戸大学）、向井正氏（神戸大学）、田村元秀氏（国立天文台）、Yiping Wang氏（紫金山天文台）との研究結果をまとめたものであり、観測、研究の遂行にあたり非常にお世話になりました。ここに謹んで感謝いたします。5章の木曾観測所における観測は、共同研究者である神戸大学の石隈慎一郎氏をはじめ、山田亨氏、神戸大学の多くの大学院生、東京大学木曾観測所のスタッフの皆様の協力で行いました。この場を借りてお礼申し上げます。また、神戸大学の竹内拓氏には本稿に対して的確なコメントを頂き感謝いたします。

参考文献

- [1] Sato, B., et al. 2005, ApJ, 633, 465
- [2] Alonso, R., et al. 2004, ApJ, 613, L153
- [3] O'Donovan, F.T., et al. 2006, ApJ, 651, L61
- [4] Collier, C.C., et al. 2006, MNRAS submitted
- [5] McCullough, P.R., Stys, J.E., Valenti, J.A., Fleming, S.W., Janes, K.A., & Heasley, J.N. 2005, PASP, 117, 783
- [6] Bakos, G.A., et al. 2006, ApJ Letters accepted
- [7] Udalski, A., et al. 2002, Acta Astron., 52, 1
- [8] Abe, F., et al. 2005, MNRAS, 364, 325
- [9] Beaulieu, J.-P., et al. 2006, Nature, 439, 437
- [10] Sahu, K.C., et al. 2006, Nature, 443, 534
- [11] Urakawa, S., et al. 2006, PASJ, 58, 869
- [12] Gould, A., Dorsher, S., Gaudi, B.S., & Udalski, A. 2006, Acta Astron., 56, 1
- [13] Ohta, Y., Taruya, A., & Suto, Y. 2005, ApJ,