

# 若い散開星団および運動星団内の惑星 および褐色矮星の探査

松尾太郎・OCメンバー

〈大阪大学 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1〉

e-mail: matsuo@ess.sci.osaka-u.ac.jp



私たち SEEDS Open Cluster (以下, SEEDS OC) グループは, 2009年から2014年までの5年間にわたって年齢120 MyrのPleiades星団に属する21天体と, 年齢400 MyrのUrsa major moving groupと年齢200 MyrのOctans-Near Associationに属する18天体の周りで惑星と褐色矮星の探査を行い, 三つの褐色矮星の撮像に成功した. また, 年齢120 MyrのPleiades星団において50から1,000 AUの領域で惑星の存在頻度は17.6% ( $2\sigma$ ) に制限され, 異なる年齢の結果と無矛盾であることがわかった.

## 1. なぜPleiades散開星団か?

SEEDSプロジェクトは1 Myrから1 Gyrまでの惑星形成・進化の過程を明らかにすることを目的としている. 私たちSEEDS OCグループでは, 特に年齢120 MyrのPleiades散開星団に着目し, 惑星探査を行った. SEEDSプロジェクトにおける惑星質量の伴星探査は, 次の三つの理由からPleiades散開星団に属する恒星周りが最も適している.

1. 年齢100 Myrより古い惑星系では代表的な二つの惑星進化モデル (Hot Start<sup>1)</sup>, Cold Startモデル<sup>2)</sup>) の差が小さいこと.
2. 年齢300 Myrより古い惑星は冷たく暗く, 主星と惑星のコントラストが大きいために惑星質量を検出することが困難であること<sup>2)</sup>.
3. 散開星団に属するメンバーが精度よく決定されており, 系の年齢による不定性が非常に小さいこと.

1番目のHot StartモデルとCold Startモデルは, 惑星形成直後(年齢1 Myrを想定)のエントロピーが大きく異なり, 年齢100 Myrまでの伴星

の明るさは二つのモデルで大きく異なる. 一方, 年齢100 Myrより古い伴星では, 初期のエントロピーの情報が失われ, 二つのモデルで予想される明るさの差が小さくなる. その結果, 年齢100 Myrより若い惑星系で伴星が検出されても, モデルを介して導出される伴星質量に不定性が生じる. したがって, 伴星質量を精度よく決定するために年齢100 Myrより古い惑星系を狙うことが1番目の条件となる.

次に, 2番目の理由について述べる. 惑星は形成直後が最も明るく, 年齢とともに冷えて暗くなる. その結果, 主星と惑星のフラックス比(コントラスト)は大きくなる. 使用した観測装置は, 大気による波面歪みを補正する汎用の補償光学系(AO 188)とコロナグラフ装置(HiCIAO)を組み合わせたもので, コントラストはAO 188の波面補償の精度で決定される. AO 188の性能から導出される装置コントラストに基づけば, 年齢300 Myrより古い系での惑星質量の伴星検出は困難である. 以上より, 年齢300 Myrより若い系を狙うことが2番目の条件となる.

最後に, 散開星団やmoving groupは, 固有運

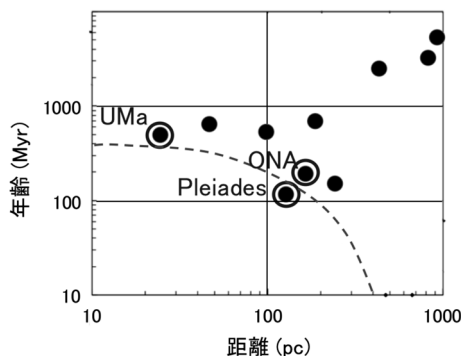


図1 近傍の散開星団と Moving groups の距離と年齢の分布 (黒丸). 二重丸はSEEDS OCで観測されたPleiades散開星団, Ursa major moving group (UMa), Octans-Near Association (ONA) を示す. 鎖線は, SEEDSで惑星質量の伴星が検出できる距離と年齢.

動の測定からメンバーシップが非常によく決定されており, そのメンバーに基づいた年齢もよく決定されている. 一方の field star では, さまざまな指標で年齢の推定が試みられているが, その不定性は散開星団や moving group に比べて非常に大きい. 年齢の不定性は, モデルを介した伴星質量の推定にそのまま不定性として反映される. したがって, 年齢の不定性の小さい散開星団あるいは moving group に属する恒星周りでの惑星探査が3番目の条件である. 以上をまとめると, 年齢100 Myr から300 Myr の散開星団あるいは moving group のメンバーの観測がSEEDSプロジェクトでの惑星質量の伴星検出において最適であることがわかる.

以上に基づいて, SEEDS OCグループでは, 年齢100 Myr から300 Myr の年齢の散開星団あるいは moving group に焦点を当てた. 図1は, 年齢100 Myr より古く, 1,000 pc より近傍にある散開星団と moving group を示している. 惑星存在頻度の統計的議論が可能となる30以上のメンバー星を有する散開星団あるいは moving group をプロットしている. 比較として, Hot Startモデルに基づいた, HiCIAOの1時間積分で惑星質量の

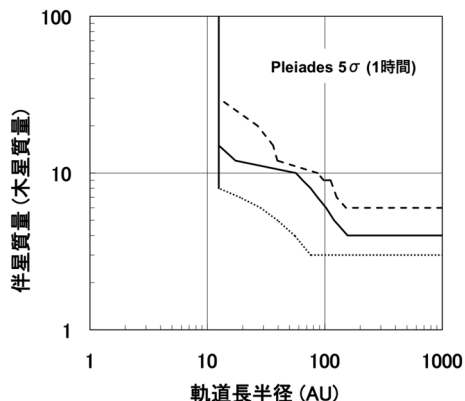


図2 Pleiades星団に属する, A型星 (鎖線), G型星 (実線), M型星 (点線) 周りの伴星の検出限界. 観測可能最内離角はSEEDSプロジェクトの提案書の公称値0.1秒角を採用.

伴星の検出できる距離と年齢の関係を示す. 惑星質量の伴星が検出できるものは, Pleiades星団しかないことがわかる. 図2は, Pleiades星団に属するA型星とG型星周りの伴星の検出限界である. Pleiades星団は125 pcに位置するため, 観測可能最内離角 (Inner Working Angle; IWA) を0.1秒角と想定すれば, 約10 AU近傍の伴星まで迫ることができる. しかし, Pleiades星団のメンバー星の多くは暗いため, 観測候補星の条件に当てはまらない. 後述のように, Pleiades星団に属するメンバー星の観測天体数は21天体にどまり, 残りの天体については低質量の褐色矮星の伴星が検出できる Ursa major moving group<sup>3)</sup> と Octans-Near association<sup>4)</sup> から選定した.

## 2. 観測天体

### 選定方法と観測天体

観測天体の選定は, 次の三つの観点から行われた. まずR等級の明るさである. AO 188の性能が十分に発揮できるR等級の明るさが12等星より明るいことを条件とした. 次に, 観測天体が散開星団あるいは moving group に属するメンバーであることである. Pleiades星団の場合, Belikovらの固有運動測定<sup>4)</sup> によるメンバーシップ確率

が80%以上かつLodieuらの別の固有運動測定<sup>5)</sup>でもノンメンバーでないと分類されていることを条件とした。最後に、SEEDSプロジェクトの目的である単独星周りでの惑星系形成・進化の理解のために、主星が連星系でないことである。先行研究から連星でないと判定されていることを条件とした。この条件を満たす天体はPleiades星団において21天体であった。同様の三つの条件に基づいてUrsa major moving groupおよびOctans-Near Associationでも選定した結果、それぞれ、14天体と4天体となった。この39天体の観測をすばる戦略枠観測の2009から2014年までの計5年間で実施した。伴星候補が存在した場合には、固有運動の追観測を行った。

観測は、Pleiades星団の一天体であるSSHJ K 121を除いて、角度差分撮像(Angular Differential Imaging; ADI)を行った。ADIモードは、視野を日周運動で回転させ、主星の散乱光を検出器に固定させるようにイメージローテータを駆動させることで、主星の散乱光と惑星光を分離する方法である。SEEDSプロジェクトで用意された観測モードの中で、主星近傍の散乱光を最も抑えることができるものである。SSHJ K 121については、ADIにスペクトル差分撮像(Spectral Differential Imaging; SDI)を組み合わせたモードで観測を行った。観測装置HiCIAOは、主星のPSFハローを除去するLyotコロナグラフが搭載されているが、OCでは主星の中心位置の測定(つまり、固有運動の測定精度の向上)を優先したため、コロナグラフを使用しなかった。観測帯域は、Hバンドである。

### 観測データの整約

SEEDS OCグループでは、二段階で観測データを整約している。まず、第一段階では独自に開発した一次処理によって主星近傍を除く領域でノイズをランダム化して検出限界の改善を行う。第二段階において一次処理を行った画像群に対して実施された観測モード(ADIあるいはADI+

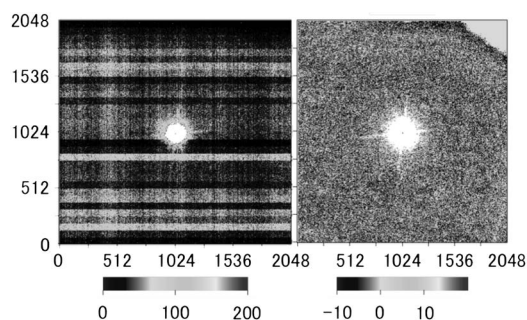


図3 Pleiades星団に属するHD 23863の14秒積分で取得された画像(左)と一次処理を行った画像(右)。グレースケールの値は画素値(ADU)を表す。

SDI)に最適化された二次処理を行い、主星近傍の主星の散乱光を低減することで検出限界を改善する。ADIやADI+SDIに最適化された二次処理はほかで詳細に取り扱われるので、ここでは独自に開発した一次処理について紹介する。図3の左には、SEEDS OCで観測されたHD 23863の生画像を示す。生画像の画素値のpeak-to-valleyは、約100 ADU程度である。この画像に含まれる要素は、次の10個のものである。a. 中心のHD 23863の主星光, b. 主星の放射状ハロー, c. 副鏡支持によるスパイダーパターン, d. 検出器の読み出し回路のバイアスによる32本の横縞, e. 縦縞, f. 画像周囲4ピクセル分の不感帯, g. 画像右上にある低感度帯, h. ホットスポット, i. ダークスポット, j. フォトンノイズおよび検出器ノイズによるランダムノイズ, である。理想的な観測画像を作るには、aからiまでのノイズおよびオフセットをマスクあるいは取り除いて、jのランダムノイズで支配される状態にすることである。この一次処理では、詳細は省略するが、検出器の横縞と縦縞、ホットピクセルとデッドピクセル、宇宙線を取り除き、ホットピクセルの周囲に形成されるウォームピクセルとダークパターン、感度変動については補正する。これによって、図3の右に示すように、一次処理後の画像では、その中心領域では主星とそのハローによって、その周囲の領域

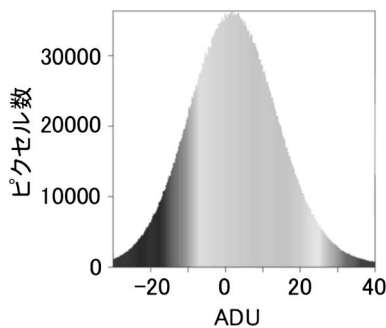


図4 一次処理後の画像から主星とパッドピクセルを除いた領域における画素値のヒストグラム。

ではランダムノイズによって支配される。図4は、主星のハローの影響を受けない周囲の領域における画素値のヒストグラムである。図4に示すように、そのヒストグラムはガウス分布であり、その周囲領域はランダムノイズで支配されている。また、その画素値の root mean square (rms) は17 ADUである。このように、一次処理後の画像は、生画像のノイズおよびオフセットに対して数分の1に低減されている。

### 3. 観測結果

#### 検出限界

2009年から2014年までの5年間でOCグループにおいて実施された計39天体の観測画像に対して同じ一次および二次処理を行い、バイアスの無い検出限界を導出した。図5は、Pleiades散開星団と、Ursa major moving groupおよびOctans-Near Associationのメンバー星の観測に対するHバンドでの $5\sigma$ の検出限界である。主星から0.1あるいは0.2秒角までは主星光によって飽和しており、伴星検出はできない。1.5秒角以遠では、主星のハローが十分に低減されており、平均で20.3等級の伴星検出が可能である。一方、1.5秒角以内はADIの引き残りによる主星光によって検出限界が悪化している。導出された検出限界について、Hot startモデルを用いて質量と軌道長半径に焼き直したものを図6に示す。Pleiades散開

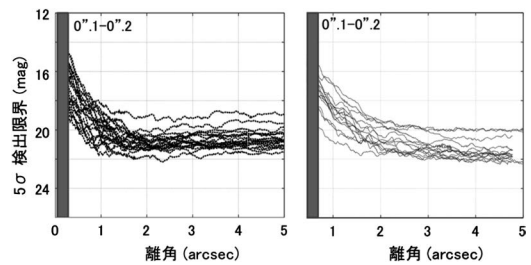


図5 Pleiades散開星団(左)とUrsa major moving groupおよびOctans-Near Association(右)のHバンドでの $5\sigma$ の検出限界。右図は解析された14天体を載せている。主星から0.1あるいは0.2秒角以内では、主星光によって飽和するために伴星の検出は困難である。

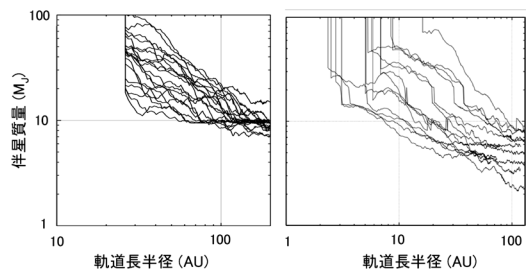


図6 軌道長半径と伴星質量で検出限界を評価したもの。

星団については100 AU以遠で惑星質量の伴星の検出が可能である一方、moving groupは年老いているため、20-30木星質量の褐色矮星の検出に制限される。

図5に示すように、Pleiades散開星団のメンバー星観測の小さい離角での検出限界は、Ursa major moving groupやOctans-Near Associationのそれらに比べて改善されている。これは、Pleiades散開星団の1時間の観測で50度以上の大きな視野回転が起きるために、通常の観測に比べてADIモードが働いて、主星の散乱光がよく低減されていることを示している。

#### 褐色矮星の撮像

SEEDS OCで実施された観測は、SEEDSプロジェクト前身のCIAOで取得されたV1171 Tauの追観測を除いて、新規観測である。38天体の新規観測のうち、新たに19天体の周りで27個の伴



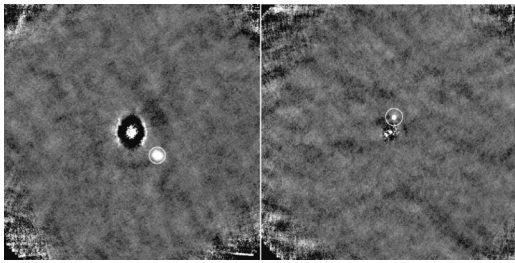


図7 HD 23514 (左) と HII 1348 (右) の ADI モードで観測された H バンド画像.

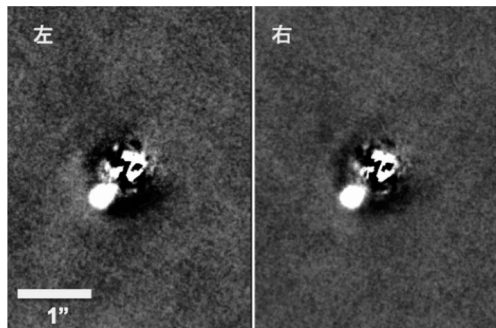


図8 SSHJ K121 の ADI と SDI を組み合わせた観測モードでの 2 バンド画像. 左は 1.486-1.628  $\mu\text{m}$ , 右は 1.643-1.788  $\mu\text{m}$  の波長帯域.

表1 SEEDS OC で観測された褐色矮星.

	投影された軌道 長半径 (AU)	推定質量 (木星質量)
HD 23514	360	58
HII 1348	132	48
SSHJ K121	60	60

星候補を発見した. 新規に発見された 27 天体について複数回にわたる固有運動の測定結果, Pleiades 散開星団に属する HD 23514, HII 1348, SSHJ K121 の 3 天体の周りで主星と同じ固有運動を行う褐色矮星が発見された. ただし, HD 23514 と HII 1348 については, 別の研究グループ<sup>7), 8)</sup> によって先行して報告されたため, 残念ながら OC グループからの褐色矮星の新規検出の報告とならなかった. 図7は, SEEDS OC で観測された HD 23514 と HII 1348 の H バンド画像, 図8は SSHJ K 121 の SDI モードで取得された 2 バンド画像で

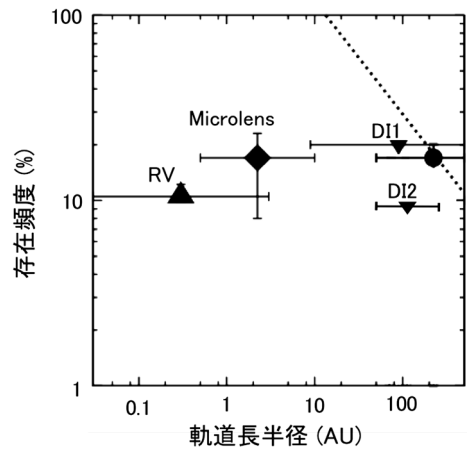


図9 軌道長半径に関する惑星の存在頻度. 本研究は●で示す. ▲は視線速度法観測<sup>10)</sup>, ◆はマイクロレンズ法観測<sup>11)</sup>, ▼は直接撮像法観測 (DI1 は Nielsen と Close<sup>12)</sup>, DI2 は Lafreniere ら<sup>13)</sup> の観測). 点線は, 軌道長半径に関する頻度分布が  $\alpha^{-0.61}$  のときの頻度分布の上限値を示す.

ある. 表1に三つの褐色矮星の投影された軌道長半径と Hot Start モデルで推定された質量を示す.

### 統計的解釈

導出された検出限界に基づいて, 惑星の存在分布の上限値を導出する. この章の詳細は, 山本らの研究<sup>9)</sup> を参照していただきたい. 図6で示したように, Ursa major moving group および Octans-Near Association の観測では褐色矮星質量の伴星しか検出されないの, Pleiades 星団の観測結果に基づいて惑星の頻度分布を議論する. 視線速度法観測で求められた 3 AU 以内にある惑星の質量と軌道長半径に対する頻度分布<sup>10)</sup> を 10 AU 以遠の遠方の惑星分布まで拡張する. 質量分布および軌道長半径分布は

$$\frac{dN}{dM} \propto M^{-1.31}, \quad \frac{dN}{da} \propto a^{-0.61}$$

である. これらに基づけば, 年齢 120 Myr の Pleiades の観測から 50-1,000 AU における 6-12 木星質量の惑星の存在頻度の上限値は 17.6% ( $2\sigma$ ) に制限され, さまざまな年齢での存在頻度分布と同

じであることがわかった。特筆すべきは、ある一つの年齢に着目して導出した結果としては初めてということである。図9は、惑星頻度に関する先行研究と比較した結果である。本稿（図9の●）は、ほかの研究と無矛盾であることがわかる。

#### 4. まとめ

SEEDS OCは、SEEDSプロジェクトの1 Myrから1 Gyrまでの惑星系の形成・進化の理解という目標において、年齢100 Myrから400 Myrの年齢の恒星周りで惑星から褐色矮星質量の伴星を集中的に探査し、3個の褐色惑星を発見した。また、Pleiades星団の観測から惑星質量の伴星の存在頻度を導出し、ほかの年齢の観測結果と無矛盾であることを示した。

#### 謝辞

本研究は、SEEDS Open Clusterグループの若いメンバー（山本広大、小西美穂子、須藤淳、Matthias Samland）が中心になって進めたものです。また、芝井広氏、伊藤洋一氏、深川美里氏より客観的立場から数多くの有益な助言をいただきました。そして、HiCIAOのメンバーから、観測および解析において手厚いサポートしていただきました。これらの人たちが居なければ、SEEDS OCグループは成り立ちませんでした。最後に、観測の実績もない当時大学院生の松尾の提案を受入れ、OCグループを任せていただいた田村元秀氏に心より感謝を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Baraffe I., et al., 2003, A&A 402, 471
- 2) Marlay M. S., et al., 2007, ApJ 655, 541
- 3) King J. R., et al., 2003, AJ 125, 1980
- 4) Zuckerman B., et al., 2013, ApJ 778, 5
- 5) Belikov A. N., et al., 1998, A&A 332, 575
- 6) Lodieu N., et al., 2007, MNRAS 380, 712
- 7) Geibler K., et al., 2012, ApJ 746, 44
- 8) Rodriguez D. R., et al., 2012, ApJ 748, 30
- 9) Yamamoto K., et al., 2013, PASJ 65, 90
- 10) Cumming A., et al., 2008, PASP 120, 531
- 11) Cassan A., et al., 2012, Nature 481, 167
- 12) Nielsen E. L., Close L. N., 2010, ApJ 717, 878
- 13) Lafrenier D., et al., 2007, ApJ 670, 1367

#### Planet and Brown Dwarf Searches in the Young Open Cluster and Moving Group

Taro MATSUO

Osaka University, 1-1 Machikaneyama-cho,  
Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

Abstract: The SEEDS Open Cluster group searched for planet and brown dwarfs around young stellar objects with an age of 100 to 400 Myrs and then found new three brown dwarfs around the Pleiades members. Since there was no planet detection in the Pleiades observations, the frequency of a planet with 6-12 Jovian masses and a semi-major axis of 50-1,000 AU is restricted to be less than 17.9% ( $2\sigma$ ) around one star.