

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2006-2008  
 課題番号：18740279  
 研究課題名 (和文) 直接検出法に基づく太陽系外惑星系の多様性についての観測的解明  
 研究課題名 (英文) Observational Study of various extrasolar planets  
 研究代表者 大朝由美子 (OASA YUMIKO)  
 神戸大学・大学院理学研究科・COE 上級研究員  
 研究者番号：10397820

## 研究成果の概要：

系外惑星系の普遍性や多様性、第二の地球は存在するかという疑問に答える事を目指し、1) 系外惑星の直接検出、惑星質量天体の観測的解明を目的として、すばる望遠鏡などの大型望遠鏡を用いた、若い前主系列星や太陽近傍の恒星の周囲に存在する原始惑星や原始惑星系円盤の探査観測、及び恒星の伴星でなく単独で存在する惑星質量天体や褐色矮星など超低質量天体の詳細観測 2) 地球型生命を持つ系外地球型惑星検出計画にむけた数値計算法による基礎研究を進めた。

## 交付額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2006年度 | 1,300,000 | 0       | 1,300,000 |
| 2007年度 | 1,000,000 | 0       | 1,000,000 |
| 2008年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,300,000 | 300,000 | 3,600,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：惑星形成・進化、系外惑星

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の観測から、太陽以外の恒星を公転する系外惑星の存在が明確になり、150を超える系外惑星の多くは、その質量・軌道半径等の特徴が太陽系と異なる事が指摘されている。しかし、これらは全て

間接的に観測されており、その姿を直接捉えた確かな観測例はない。一方、惑星質量を持つが、恒星を周回せず単独で存在する天体(単独惑星質量天体)が最近発見されている。この天体は、従来の分類では、太陽質量の約8%以下の褐色矮星

にも惑星にも該当せず、その形成論は確立されていない。単独惑星質量天体を含めた系外惑星系の多様な姿は、一様でない形成過程を反映すると考えられ、汎惑星形成についての理論的研究が進められると同時に、系外惑星系の詳細な観測がますます重要視されるようになっていく。

- (2) 一連の系外惑星観測の最終目標として、太陽系外に地球型生命を持つ惑星を探索する計画が、欧米 (Darwin/TPF)、日本 (JTPF) で検討され始めている。地球のような環境を持つ惑星系があれば、そこに生命が存在する可能性は高い。そこでこれらの計画は、まず居住可能な軌道にある系外地球型惑星を直接に撮像し、次に生命兆候の有無を惑星大気分光から探るといった手法を検討している。その概念設計には、生命有無による惑星大気スペクトルの変化の様子を予測する必要があるが、詳細研究はほぼ皆無である。

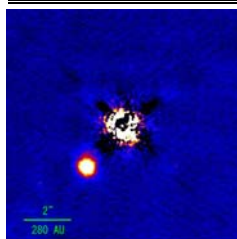
## 2. 研究の目的

系外惑星系の普遍性や、どのように、なぜ、多様な姿を示すのか、さらに第二の地球は存在するかという疑問に答える事を目的とし、1) 系外惑星の直接検出、惑星質量天体の観測的解明 2) 地球型生命を持つ惑星検出計画にむけた基礎研究を進め、系外惑星の形成と進化過程について観測的に解明することを目指す。

## 3. 研究の方法

ステラーコロナグラフ (CIAO) というユニークな装置を使った原始系外惑星の直接検出

明るい星のごく近傍にある系外惑星の検出には、高空間分解能とダイナミックレンジを有する観測が必要である。直接法の一つ、



スペックルや月の掩蔽

観測は、ほぼ回折限界の分解能を得られるが、中心星に比べて約 2 桁暗い天体しか検出できない。一方、CIAO は中心星に目隠しをするコロナグラフに加えて、大気の擾乱を補正する補償光学機能を備え、すばる望遠鏡と組み合わせると、角分解能、S/N 共にハッブル宇宙望遠鏡以上の性能を持つ。さらに、惑星は誕生直後 (約 100-1000 万年) に近赤外で比較的明るく、中心星との明るさの比が数桁程度であると予測されている。例えば、近傍の前主系列星から 100 天文単位離れた位置において、既存の観測手法では中心星より 2 桁暗い低質量星までしか検出できないが、CIAO によって 5 桁暗い原始木星型惑星が検出できる。左図 (左下。中央はマスクで隠した主星) は CIAO で発見した前主系列星周りの原始褐色矮星である。伴星としての原始褐色矮星の観測は技術的に困難なため、3 例のみである。画像で褐色矮星が明るく見える事からもわかるように、CIAO を用いると、同様の前主系列星周りの原始惑星が十分観測可能と予想される。この手法から、不可能であった系外惑星の直接検出が可能になり、これまで間接法に限られていた系外惑星の観測的研究をより拡張する事ができる。

### 単独惑星質量天体の観測的解明

惑星にも褐色矮星にも分類できない単独惑星質量天



体 (右図で微小天体と記載) は、申請者が世界で最初に発見した新しいタイプの天体である。その正体や形成過程は惑星系形成を探る上で重要であるが、理解されていない。申請者はこれまで詳細かつ高感度の探査観測を

進めており、従来にない多数の若い(約 100 万年)単独惑星質量天体候補を検出している。本研究では、**惑星質量天体についての赤外分光・多波長観測から、有効温度、さらにより精確な質量や年齢**を求め、物理的性質を明らかにすると同時に、同領域の原始褐色矮星(上図)などと比較を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) **太陽系外惑星及び原始惑星・原始惑星系円盤の探査観測**

すばる望遠鏡とコロナグラフ装置を用いて、若い前主系列星の周囲に存在する原始惑星や原始惑星系円盤の探査観測を行った。

##### (1-1) 太陽近傍の恒星に付随する系外惑星の直接撮像探査

太陽近傍の恒星 eps Eri と Vega の周りの惑星の有無を探るため、直接検出法による世界で最も高感度の探査観測を実施した。結果、これらの恒星から数-数十天文単位には、木星質量の5倍以上の惑星は存在しないことが明らかになった。

##### (1-2) 連星系に付随する原始惑星系円盤の発見

連星に付随する原始惑星系円盤の検出は数例しかない。若い連星 UY Aur を直接法で観測し、明るさが不均一な原始惑星系円盤を発見した。特に最も明るい部分は塊状であり、この塊が収縮することで将来惑星が誕生する可能性があることがわかった。

##### (1-3) 前主系列星に付随する原始惑星の直接撮像探査

おうし座分子雲に付随する前主系列星 72 天体について撮像を行い、非常に暗い伴星候補 55 天体を新しく検出した。天体の光度から質

量を推定すると、惑星である可能性がある。これら伴星候補 26 天体について分光観測・固有運動測定を行った結果、原始惑星ではなく低質量星か背景星であることが明らかになった。

##### (1-4) 前主系列星に付随する原始惑星系円盤の発見

近傍の前主系列性の周りに付随する原始惑星系円盤の直接撮像に3例成功した。一つは双極流と円盤及び伴星候補を持つ天体、一つは、円盤をもつ非常に若い天体、もう一つは、天体の質量が太陽の約0.1倍であり、これまで直接撮像された円盤を持つ天体の中で最も軽い天体である。

##### (1-5) 若い星に付随する原始惑星の直接撮像探査

3つの惑星候補天体を伴うと報告されている若い星 HR8799 についてコロナグラフ撮像観測を行い、非常に暗い伴星候補を検出し、少なくとも一つの惑星候補天体について固有運動型研究の報告と矛盾しないことを示した。この結果は HR8799 が惑星を持つ可能性を支持する重要なものである。

##### (2) **惑星質量天体、褐色矮星の物理的性質解明**

申請者らの先行研究から見つかった、恒星の伴星でなく単独で存在する惑星質量天体や褐色矮星など超低質量天体を対象に、大型望遠鏡による赤外分光・多波長観測を行った。

##### (2-1) 超低質量天体の近赤外分光観測

超低質量天体は非常に暗いため、詳細な観測は数例しかない。超低質量天体の物理的性質を調べる目的ですばる望遠鏡を用いて、NGC1333 の超低質量天体候補の近赤外分光観

測を行った。結果、複数の天体に低温度の指標となる水の吸収特徴がみられ、約2000-3000Kの温度で、質量が木星の十数倍である若い褐色矮星及び惑星質量天体であることがわかった。また、また、幾つかの天体には、H $\alpha$ 輝線や水素分子輝線などの検出にも成功した。これらは、星周円盤質などからの量降着現象を起こす、非常に進化段階の若い天体であると考えられる。

### (2-2) 超低質量天体の多波長測光観測

NASA/IRTF望遠鏡を用いて超低質量天体の3 $\mu$ m測光観測を行うと同時に、スピッツァー宇宙望遠鏡を用いた4-10 $\mu$ mの測光観測データ解析を行った。先行研究と合わせた多波長観測による放射エネルギー分布等から、原始惑星系円盤の付随する超低質量天体の存在が示唆された。

### (2-3) 大質量星による紫外線影響下での若い前主系列星・超低質量天体の形成

すばる望遠鏡及び英国赤外線望遠鏡を用いて星形成領域S106の近赤外1-3 $\mu$ m測光観測を行った。これら多波長データから新しく若い天体を複数同定し、天体の質量分布や年齢分布などを調べた結果、大質量星の紫外線の影響で超低質量天体が多く形成されるという傾向は見られなかったが、未同定の若い天体集団が新しく見つかった。つまり、大質量星周囲に若い超低質量天体が集団的に形成されること、そしてこれらが誘発的に形成されている可能性があることがわかった。

### (3) 過去から現在の地球の大気組成と放射スペクトルモデル計算

将来の地球型惑星探査のためには、生命有無による惑星スペクトル変化を予測する必要がある。現時点で我々が、生命が存在する

と知る惑星は地球のみである。そこで、まず生命を持つ地球のスペクトルを知るために、大気大循環モデルを用いて様々な気候条件下の大気・雲の放射による地球の赤外全球放射スペクトルを作成するモデル計算方法を構築した。さらに大気化学平衡及び放射対流平衡計算コードの開発を行い、年齢の異なる地球の大気モデルを作成し、地球の大気化学進化に伴う赤外観測スペクトルを導出した。これは将来の地球型探査計画の基礎研究となる。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 21 件)  
査読有り

1. Oasa, Y., Tamura, M., Sunada, K., Sugitani, K., “Luminosity and Mass Functions at the Very Low-Mass Side in NGC 1333”. The Astronomical Journal, Vol. 136, pp. 1372-1387, 2008,

2. Oasa, Y., Tamura, M., Nakajima, Y., Itoh, Y., Maihara, T., Iwamuro, F., Motohara, K., Hayashi, S., Hayashi, M., Kaifu, N., “Very Low Luminosity Young Cluster and the Luminosity and Mass Functions in S 106”. The Astronomical Journal, Vol. 131, pp. 1068-1088, 2006

3. Oasa, Y., Kikuchi, N., “The Search for Extrasolar Earth-like Planets: Spectral Signature of Atmospheric Evolution” Viva Origino, Vol. 34, pp.130-132, 2006

査読なし

4. Oasa, Y. “Photometric and Spectroscopic Studies of Very Low Mass YSOs and Young Brown Dwarfs in S106”, Proc. of International Astronomical Union Symposium edited by the IAU, vol 237, pp. 457, 2007

(他 17 件)

[学会発表] (計 45 件)

1. Takagi, Y., Itoh, Y., Oasa, Y., “Age determination of T Tauri stars by high-resolution nearinfrared Spectroscopy”, International Astronomical Union Symposium No.258 “The Age of Stars”, 2008
2. Oasa, Y., “A multi-wavelength study of very low-mass objects”, The 5th Japan-Taiwan ALMA Science Workshop, 2008 12.5~6. 台湾
3. Oasa, Y., “Photometric and Spectroscopic Studies of Young Brown Dwarfs and Planetary Mass Objects”, The ESO workshop “Observing Planetary Systems”, 2007.1.23~29. ドイツ
4. Hioki, T., Itoh, Y., Oasa, Y., Fukagawa, M., Subaru Disk/PLANET Survey Team, “Near-Infrared Coronagraphic Observations of the T Tauri Binary System UY Aur”, The 3rd Japan-Taiwan ALMA Science Workshop, 2007.4.13~14. 台湾
5. Oasa, Y., “Photometric and Spectroscopic Studies of Young Brown Dwarfs and Planetary Mass Objects in S106”, The 3rd Japan-Taiwan ALMA Science Workshop, 2007.4.13~14. 台湾
6. Hioki, T., Itoh, Y., Oasa, Y., Fukagawa, M., Subaru Disk/PLANET Survey Team, “Near-Infrared Coronagraphic Observations of the T Tauri Binary System UY Aur”, The Spirit of Bernard Lyot “The Direct Detection of Planets and Circumstellar Disks in the 21st Century”, 2007.7.4~8. アメリカ
7. Fukagawa, M., Itoh, Y., Oasa, Y., Kudo, T., Fujiwara, H., Tamura, M., Hayashi, M., Hayashi, S., “Near-Infrared Images of the Disk around HD 142527”, The Spirit of Bernard Lyot “The Direct Detection of Planets and Circumstellar Disks in the 21st Century”, 2007.7.4~8. アメリカ
8. 大朝 由美子、田中 宗親、伊藤 洋一、 「NGC1333 に存在する超低質量天体」、日本天文学会秋季年会、2007.9.26~28 岐阜
9. Oasa, Y., ” Photometric and

Spectroscopic Studies of Very Low Mass YSOs and Young Brown Dwarfs in S106”, International Astronomical Union Symposium No.237, 2006.8.14~18 プラハ

10. Niwa, T., Itoh, Y., Tachihara, K., Oasa, Y., Sunada, K., Sugitani, K., “Radio observation of molecular clouds around the W5-East triggered star-forming region”, International Astronomical Union Symposium No.237, 2006.8.14~18 プラハ

11. Funayama, H., Itoh, Y., Oasa, Y., Toyota, E., Mukai, T., “Metallicity of Pleiades Dwarf”, Precision Spectroscopy in Astrophysics, the ESO/Lisbon/Aveiro Conference, 2006.9.11~15. ポルトガル

12. Toyota, E., Itoh, Y., Ishiguma, S., Murata, D., Oasa, Y., Sato, B., Mukai, T., “Radial Velocity Search for Extrasolar Planets in Binary Systems”, Precision Spectroscopy in Astrophysics, the ESO/Lisbon/Aveiro Conference, 2006.9.11~15. ポルトガル

13. 大朝 由美子、伊藤 洋一、向井 正、田村 元秀、「NGC1333 における超低質量天体形成」、日本天文学会秋季年会、2006.9.19~21 九州国際大学

14. 大朝 由美子、菊地 信弘、「進化に伴う系外地球型惑星の放射スペクトルと光度変化」、日本惑星学会秋季年会、2006.10.18~20 神戸

(他 31 件)

[その他]

総説、解説記事、など

1. 「14ばん目の月」 誠文堂新光社発行月刊天文ガイド 2001年8月号から毎月連載 (現在も連載中)

2. Lykawka, S. P., Oasa, Y., 「太陽系に新惑星を予測」 誠文堂新光社発行月刊天文ガイド 2008年5月号 (vol 531), pp.18-21

3. プラネタリウム番組「はるかなる第二の地球」製作協力、出演、監修 2006年9月から2007年3月まで上映

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大朝 由美子 (OASA YUMIKO)

神戸大学・大学院理学研究科・COE 上級研究員

研究者番号：10397820

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者