

平成21年5月20日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18340055

研究課題名（和文） 光ファイバーを用いた高効率高分散分光による太陽系外惑星探査

研究課題名（英文） Extra-solar planet search by high-performance high-dispersion spectroscopy using an optical fiber fed system

研究代表者

吉田 道利 (YOSHIDA MICHITOSHI)

国立天文台・岡山天体物理観測所・准教授

研究者番号：90270446

研究成果の概要： 岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡に装着された可視光高分散エッセル分光器用に、望遠鏡カセグレン焦点から光を導く光ファイバー天体導入システムの開発を行った。また、ファイバー集光システムに付随する問題点とその解決策を明らかにした。さらに、巨星周りの惑星探査計画を進め、散開星団に世界ではじめて系外惑星を発見するなど、巨星周りに惑星を新たに8個発見することに成功し、恒星質量・年齢と惑星質量・軌道半径の間に相関関係が存在する兆候を見出した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	9,900,000	0	9,900,000
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	1,230,000	15,230,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：惑星探査、光学赤外線天文学、宇宙物理学、惑星起源・進化

## 1. 研究開始当初の背景

「惑星はどんな恒星の周りにいかにして形成されるのか？」は現代天体物理学における重要な問題であるが、いまだ統一的な理解には至っていない。1995年に精密視線速度測定によって初めて太陽系外の恒星に惑星がある確実な証拠が見つかって以来、研究開始当初には、すでに150個近い惑星が発見されていた。しかしながら、それまでの精力的なサーベイは、主に太陽のような小さい質量の長命の星（小質量星）が対象であり、もっと質量

の大きな寿命のより短い星（中質量星）は主たるターゲットとなっていなかった。したがって、冒頭に上げた疑問に答えるにははなはだ偏ったサンプルの観測結果しかなかった。

そこで我々は、中質量星が生涯の末期に膨れあがって低温になった時期のもの（G型巨星）に絞って研究することにした。2001年から始めたこの観測研究プロジェクト（当初は約60個をターゲットとして始め、現在ではターゲットを約300個に増やしてモニター観測している）は開始当時世界に類のない計画で

あり、注目をあびた。研究開始当初には我々に並ぶライバルグループは存在しなかった。実際に、本プロジェクトはわが国で最初の系外惑星 (HD104985b) の発見に加え、いくつかの有望な候補の検出に漕ぎつけており、世界的に高く評価されていた。しかし、より詳しい知見を得るためには、恒星のパラメータ (表面組成や大きさなど) の違いと惑星の有無並び特性の関係を論ずるに十分な程度にサンプルの数を増やすことが必須な状況にあった。

## 2. 研究の目的

(1) 比較的重い(太陽質量の 1.5~5 倍程度) 中質量星が進化して膨らんだ G 型巨星の視線速度の精密モニター観測を遂行することで周りに惑星を持つ星を発見し、併せて組成解析等の分光学的手法で明らかにされる母星の性質との相関を調べることで、中質量星周りの惑星形成を明らかにする。

(2) 岡山天体物理観測所 188 センチ望遠鏡の HIDES に光ファイバーを用いた天体導入機構 (「HIDES 光ファイバーシステム」と呼ぶ) を開発・装着し、HIDES の感度を約 1 等級アップさせる。これにより、モニター観測効率の大幅な向上を達成し、またこれまでより 1 等級程度暗い G 型巨星までを観測対象とすることで、モニター観測するターゲット数を現状の 3 倍 (約 1000 個) とする。

## 3. 研究の方法

(1) 岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡のクーデ高分散エシエル分光器 HIDES に、カセグレン焦点から光ファイバーを用いて天体の光を導入するシステム (HIDES 光ファイバーシステム) を開発する。

このシステムの開発により、

- F 比が明るく、クーデ焦点に導くための余分な鏡 (第 3 鏡、第 4 鏡) を使用しないため効率が良いカセグレン焦点で天体を導入
- ファイバー入射部を精密駆動することで高速かつ高精度なガイドを実現
- 安定したクーデ焦点入射機構により、スリットによる光量損失を抑える

という 3 つの効果によって、HIDES に入射される光量をこれまでの 2 倍以上にアップして、系外惑星探査計画の効率を画的に向上させることができる。

HIDES 光ファイバーシステムは、次の二つ

の機構からなる (図 1 参照)。

### ① カセグレン焦点精密天体導入機構

天体光導入ファイバー、校正用光源ファイバー、超精密ピエゾ XY ステージ、ガイド用 CCD カメラシステム、リニアステージなどで構成された精密天体導入機構を 188cm 望遠鏡カセグレン焦点に装着する。

### ② クーデ焦点ファイバー機構

校正光源導入光学系とクーデ焦点部光学系の二つの部分から構成されるファイバー機構を 188cm 望遠鏡クーデ焦点に装着する。校正光源光学系は、相対感度補正用のフラットランプと波長校正用の輝線ランプを校正光源用ファイバーに導入する機構である。クーデ焦点部光学系は、天体光導入ファイバーから来た天体光を HIDES スリットに導入するレンズ系と、天体光導入ファイバーの位置を測定するための逆照射光を照射する光学系からなる。

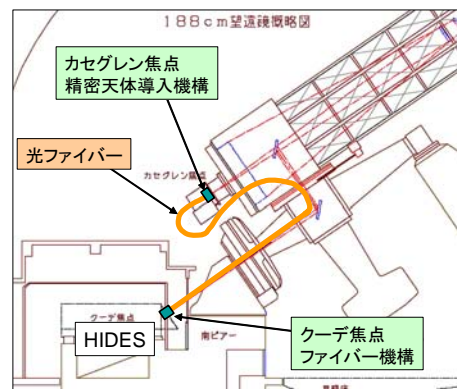


図 1. 本研究課題期間中に開発するシステム概要

(2) HIDES を用いて、300 個の G 型巨星につき、超精密視線速度測定モニターを行い、巨星周りの惑星探査を実施する。同じターゲットにつき精密化学組成解析も行って、恒星の性質と惑星の有無や特徴との関係を調べる。

(3) 上記 (2) で得られた実際の観測データを用いて、より高精度な視線速度精密測定ソフトウェアの開発を行う。

## 4. 研究成果

(1) HIDES 光ファイバーシステムを構成する、「カセグレン焦点精密天体導入機構」と、「クーデ焦点ファイバー機構」について、前者の開発に成功し、試験観測を行うことができた。試験観測の結果、当初予定の性能が達成されていることを確認した。後者については製作・試験までは完了することができな

ったが、詳細設計まで完了することができた。これらにより、当初の研究開発目標の80%は終了することができ、観測システムの基礎的部分は完成させた。

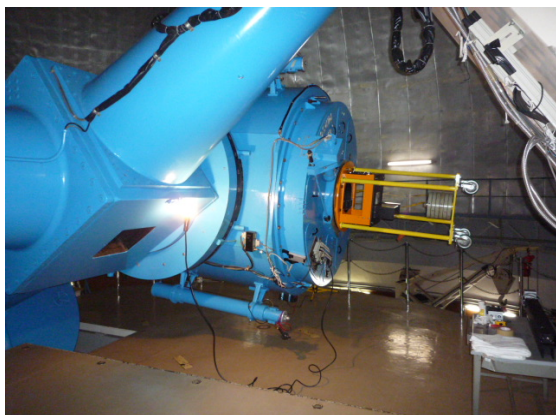


図2. 188cm望遠鏡カセグレン焦点に取り付けられた、カセグレン焦点精密天体導入機構

(2) 上記(1)の開発に伴う基礎実験設備の整備と、それをを用いた実験により、ファイバー集光システムに付随する問題点とその解決策を明らかにした。



図3. 完成した基礎実験設備。

(3) 従来の観測システムによるG型巨星周りの惑星探査計画を進め、研究期間中に以下のような研究成果を挙げた。

#### ① 散開星団での系外惑星の発見

Sato, B. et al., “A Planetary Companion to the Hyades Giant  $\epsilon$  Tauri”, ApJ, 661, 527 (2007)

おうし座ヒアデス星団に属するG型巨星  $\epsilon$  Tauの周りに木星の8倍の質量を持つ惑星が存在することを発見した。惑星の軌道周期は約595日、中心星からの距離は約2天文単位であった。散開星団は、それを構成する恒星の質量と年齢が精度良く決定されているため、恒

星の質量や年齢が惑星形成に与える影響について調べるために適している。しかしながら、これまで世界でいくつか行われてきた探査では散開星団中の恒星には惑星が発見されていなかった。今回の我々の発見は散開星団中の恒星を周る惑星として、世界初である。今回の発見により、太陽の約3倍の質量の恒星で、約6億歳という若さで巨大惑星が存在することが明確に示された。このように、年齢、質量が精度よく決定された恒星で惑星が見つかったのも初めてである。

#### ② 巨星周りの褐色矮星の発見

Liu, Y. J. et al., “A Substellar Companion to the Intermediate-Mass Giant HD107383”, ApJ, 672, 553 (2008)

中国国家天文台の研究グループとの共同観測により、巨星 11Comaの周りに木星の約19倍の質量をもつ褐色矮星を発見した。これは、巨星のまわりで見つかった3例目の褐色矮星である。我々は、2005年から中国国家天文台の研究者と協力して系外惑星探査の規模を拡大し、岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡と中国興隆観測所の口径2.16m反射望遠鏡を用いて新たに約100個の惑星探索を開始している。今回の発見は、日中共同惑星探索の最初の成果である。

現在までに約300個の系外惑星が発見されているが、その一方で、恒星と惑星の中間の質量を持つ褐色矮星の発見確率は系外惑星と比べて10分の1程度以下と極めて低く、このような状況は”褐色矮星砂漠”と呼ばれている。褐色矮星砂漠の存在は、ガス雲の重力収縮によって誕生する恒星と、原始惑星系円盤の中で誕生する惑星との形成過程の違いを反映していると考えられ、惑星形成のメカニズムを探る重要な手掛かりとなると考えられている。今回の発見は、太陽より重い恒星における惑星や褐色矮星の形成過程を明らかにする上で、貴重なサンプルである。

#### ③ 巨星周りに惑星を新たに7個発見

Sato, B. et al., “Planetary Companions around Three Intermediate-Mass G and K Giants: 18 Del,  $\xi$  Aql, and HD 81688”, PASJ, 60, 539 (2008)

Sato, B. et al., “Planetary Companions to Evolved Intermediate-Mass Stars: 14 Andromedae, 81 Ceti, 6 Lyncis, and HD 167042”, PASJ, 60, 1317 (2008)

本研究で推進している系外惑星探査計画により、G型巨星の周りを回る系外惑星を新

たに7個発見した。巨星の周りの惑星は世界中の惑星探索グループによってこれまでに約20個発見されているが、本研究グループはその約半数の10個を発見しており、巨星の周りの惑星発見数では現在のところ世界一である。

この多数の発見によって巨星の周りの惑星系の特徴が明らかになり、それは太陽型星の周りの惑星系とは少し異なることが明らかになった。太陽型星の周りでは、中心星のすぐそばを公転周期数日で回る「ホット・ジュピター」から、木星のように周期10年以上というような遠く離れた軌道を回る惑星まで様々な特徴を示す惑星が発見されている。一方、我々が巨星の周りで発見した惑星は全て、中心の巨星から約0.7天文単位（太陽系の金星軌道に相当）以上離れた軌道を周回している。中心の巨星は進化によって太陽の約10倍の大きさに膨らんでいるが、これは軌道半径に直すとせいぜい約0.05天文単位なので、これより外側には惑星が存在していてもいいはずである。つまり、中心の巨星から約0.05~0.7天文単位の領域は惑星の欠乏領域となっていると言える。

この原因として考えられる説は二つある。一つは、太陽より重い恒星の近くには元々惑星が形成されにくいというものである。太陽より重い恒星は非常に光度が大きく高温なため、周囲の固体物質が欠乏し惑星ができにくくなる可能性がある。もう一つの説は、元々あった惑星が中心星に飲み込まれてしまったというものである。現在の巨星の半径は太陽の約10倍、軌道半径にして約0.05天文単位であるが、恒星の進化理論によると過去には今の3倍程度（~0.15天文単位）まで大きく膨らんでいた時期があったと考えられる。この膨張した中心星の表面から惑星が強い引力を受けて中心星へと引っ張られ、当時の中心星の半径の約3倍（約0.5天文単位）以内の軌道にある惑星は中心星に落ち込んでしまった可能性がある。これらの説のどちらが正しいかは現時点ではまだ不明であるが、更なる観測の積み重ねによって明らかになると期待される。

## 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25件）

- ① Yoshida, M., 他8名, “Strange filamentary structures (“fireballs”) around a merger galaxy in the Coma

cluster of galaxies”, *ApJ*, 査読有, 688, 918 (2008).

- ② Omiya, M., Izumiura, H., Sato, B., Yoshida, M., 他9名, “A Korea-Japan planet search program: Current status and discovery of a brown dwarf candidate”, *Proceedings of IAU Symposium*, 査読無, 249, 53 (2008)

- ③ Sato, B., Izumiura, H., Takeda, Y., Yoshida, M., 他10名, “Planetary Companions around Three Intermediate Mass G and K Giants: 18 Del, xi Aql, and HD 81688”, *PASJ*, 査読有, 60, 539 (2008).

- ④ Izumiura, H., Yoshida, M., 他14名 “Evidence for a companion to BM Gem, a silicate carbon star”, *ApJ*, 査読有, 682, 499 (2008).

- ⑤ Sato, B., Izumiura, H., Takeda, Y., Yoshida, M., 他8名, “Planetary Companions to Evolved Intermediate-Mass Stars: 14 Andromedae, 81 Ceti, 6 Lyncis, and HD 167042”, *PASJ*, 査読有, 60, 1317 (2008).

- ⑥ Kambe, E., Sato, B., Izumiura, H., 他13名, “Development of Iodine Cells for Subaru HDS and Okayama HIDES. III. An Improvement on the Radial-Velocity Measurement Technique”, *PASJ*, 査読有, 60, 45 (2008).

- ⑦ Chen, Y. Q., Izumiura, H., 他5名, “Abundance Pattern of Metal-Rich Stars from 14 Old and 24 Young Stars”, *AJ*, 査読有, 135, 618 (2008).

- ⑧ Liu, Y. J., Sato, B., Izumiura, H., Takeda, Y., Yoshida, M., 他15名, “A Substellar Companion to the Intermediate-Mass Giant HD107383”, *ApJ*, 査読有, 672, 553 (2008).

- ⑨ Bakos, G. A., Sato, B., 他(25名中9番目), “HAT-P-1b: A Large-Radius, Low-Density Exoplanet Transiting One Member of a Stellar Binary”, *ApJ*, 査読有, 656, 552 (2007).

- ⑩ Takeda, Y., “Fundamental Parameters and Elemental Abundances of 160 F-G-K Stars Based on OAO Spectrum Database”, *PASJ*, 査読有, 59, 335 (2007).

- ⑪ Sato, B., Izumiura, H., Yoshida, M., 他11名, “A Planetary Companion to the Hyades Giant  $\epsilon$  Tauri”, *ApJ*, 査読有, 661, 527 (2007).

- ⑫ Takeda, Y., Kawanomoto, S., and Ohishi, N., “High-Resolution and High-S/N Spectrum Atlas of Vega”, *PASJ*, 査読有, 59, 245 (2007).

- ⑬ Takeda, Y., 他4名, “Behavior of Li

abundances in solar-analog stars. Evidence for line-width dependence”, A&Ap, 査読有, 468, 663 (2007).

- ⑭ Takeda, Y., 他 5 名, ” Abundances of Volatile Elements in Post-AGB Candidates”, PASJ, 査読有, 59, 1127 (2007).
- ⑮ Takeda, Y., 他 6 名 “On the Spectroscopic Determination of Atmospheric Parameters and O/Fe Abundances of RR Lyrae Stars”, PASJ, 査読有, 58, 389 (2006).

[学会発表] (計 3 1 件)

- ① 大宮正士、「G 型巨星における惑星系の日韓共同探査 V」, 日本天文学会、大阪府立大学、2009 年 3 月 26 日
- ② 神戸栄治、「HIDES ファイバー・フィード化計画」、2008 年連星、変光星、低温度星研究会、鹿児島大学、2008 年 11 月 30 日
- ③ 吉田道利、「岡山天体物理観測所の現状とその将来」、日本天文学会、岡山理科大学、2008 年 9 月 12 日
- ④ 佐藤文衛、「G 型巨星における惑星探索プロジェクト」、日本天文学会、岡山理科大学、2008 年 9 月 12 日
- ⑤ 大宮正士、「日中韓土の国際協力による G 型巨星の惑星系探査網」、日本天文学会、岡山理科大学、2008 年 9 月 12 日
- ⑥ 神戸栄治、「HIDES ファイバー・フィード化計画」、2008 年度岡山 (光赤外) ユーザーズミーティング、国立天文台三鷹、2008 年 8 月 19 日
- ⑦ 泉浦秀行、「岡山「HIDES」モザイク CCD カメラの開発」、日本天文学会、国立オリンピック記念青少年総合センター、2008 年 3 月 24 日
- ⑧ 泉浦秀行、「トルコ RTT1.5m 望遠鏡による系外惑星探索とヨードセル装置の開発」、日本天文学会、国立オリンピック記念青少年総合センター、2008 年 3 月 24 日
- ⑨ 竹田洋一、「G 型巨星の恒星パラメータと表面化学組成について」、日本天文学会、国立オリンピック記念青少年総合センター、2008 年 3 月 24 日
- ⑩ 佐藤文衛、「太陽型星 HD17156 におけるエキセントリック・ホットジュピターの発見」、日本天文学会、岐阜大学、2007 年 9 月 28 日
- ⑪ 佐藤文衛、「太陽型星 HD17156 におけるエキセントリック・ホットジュピターの発見」、日本天文学会、岐阜大学、2007 年 9 月 28 日
- ⑫ 神戸栄治、「ヨードセル観測法における短期間視線速度測定精度改良の試み」、日本天文学会、岐阜大学、2007 年 9 月 27 日
- ⑬ 村多大輔、「G 型巨星の組成解析」、日本天

文学会、東海大学、2007 年 3 月 30 日

- ⑭ 竹田洋一、「ヒアデス星団の金属量について」、日本天文学会、東海大学、2007 年 3 月 30 日
- ⑮ 佐藤文衛、「岡山プラネットサーチプロジェクト「G 型巨星の惑星探し」：2005 年の観測成果報告」、日本天文学会、九州国際大学、2006 年 9 月 21 日

[図書] (計 1 件)

- ① 家正則、岩室史英、舞原俊憲、水本好彦、吉田道利 (編)、「宇宙の観測 I ー 光・赤外天文学 シリーズ現代の天文学 15」、304 ページ、2007 年、日本評論社

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 道利 (YOSHIDA MICHITOSHI)  
国立天文台・岡山天体物理観測所・准教授  
研究者番号：9 0 2 7 0 4 4 6

### (2) 研究分担者

(平成 18 年度～平成 20 年度)  
泉浦 秀行 (IZUMIURA HIDEYUKI)  
国立天文台・岡山天体物理観測所・助教  
研究者番号：0 0 2 1 1 7 3 0  
(平成 18 年度～平成 19 年度)  
清水 康広 (SHIMIZU YASUHIRO)  
国立天文台・岡山天体物理観測所・主任研究技師  
研究者番号：6 0 1 4 3 5 1 7  
沖田 喜一 (OKITA KIIICHI)  
国立天文台・岡山天体物理観測所・主任研究技師  
研究者番号：6 0 2 0 4 0 9 6  
竹田 洋一 (TAKEDA YOICHI)  
国立天文台・光赤外研究部・准教授  
研究者番号：5 0 3 7 3 1 8 9  
佐藤 文衛 (SATOU BUNEI)  
東京工業大学・グローバルエッジ研究院・特任助教  
研究者番号：4 0 3 9 7 8 2 3

### (3) 連携研究者

(平成 20 年度)  
清水 康広 (SHIMIZU YASUHIRO)  
国立天文台・岡山天体物理観測所・主任研究技師  
研究者番号：6 0 1 4 3 5 1 7  
沖田 喜一 (OKITA KIIICHI)  
国立天文台・岡山天体物理観測所・主任研究技師  
研究者番号：6 0 2 0 4 0 9 6

竹田 洋一 (TAKEDA YOICHI)  
国立天文台・光赤外研究部・准教授  
研究者番号：50373189  
佐藤 文衛 (SATOU BUNEI)  
東京工業大学・グローバルエッジ研究院・  
特任助教  
研究者番号：40397823