

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月28日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340130

研究課題名（和文） 南極における長周期系外惑星のトランジット検出

研究課題名（英文） Detection of transit of exo-planet with long orbital period from Antarctica

## 研究代表者

高遠 徳尚（TAKATO NARUHISA）

国立天文台・ハワイ観測所・准教授

研究者番号：50261152

研究成果の概要（和文）：長周期の系外惑星系トランジット天体を検出するために、2色同時測光カメラを製作し、南極ドームふじに設置した。しかし、極夜でのリモートからの調整期間中に無人電源モジュールが、故障し残念ながら科学観測を行うことができなかった。第54次南極地域観測隊に依頼し修理を行い、現在復帰作業を行っている。また小型の水蒸気量モニターを用いて、ドームふじの天文サイトとしての評価も同時に行った。その結果ドームふじは条件の悪い夏季でも可降水量が約0.5mmであることがわかり、地上でもっとも赤外線観測に適した観測地であることがわかった。

研究成果の概要（英文）：A transit survey camera for long-period extra-solar planet, which has two identical camera but different color filters, was successfully installed at Dome Fuji in Antarctica plateau. Long-period extra-solar planet is expected to have low surface temperature, and Dome Fuji is best location for detecting long-period phenomenon because of the long continuous night. Unfortunately, the power module was broken during remote adjustment work in Antarctic winter and we were unable to obtain scientific data. The power module were repaired by 54th Antarctica expedition team and currently doing recovering work from remote. In addition to the transit survey, we did some site evaluation at Dome Fuji for a possible astronomical observatory site in near future. The precipitable water-vapor (PWV) at Dome Fuji was very low ( $\sim 0.5$  mm) even in summer, which is 1/2-1/3 of the best season value of Mauna Kea. We can expect PWV become  $\sim 0.1$  mm in Antarctic winter and thus Dome Fuji is one of the best site know on the earth for infrared astronomy.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	10,500,000	3,150,000	13,650,000

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：系外惑星系、南極、トランジット惑星、惑星形成・進化

### 1. 研究開始当初の背景

系外惑星系は数 100 天体発見されていたが、トランジットが観測されている長周期 (> 50 日) は見つかっておらず、いわゆるホットジュピター以外で物理状態の詳細を観測できる天体は見つかっていなかった。

### 2. 研究の目的

- (1) 表面温度がより低温であることが期待される長周期の系外惑星系のうち、トランジットを起こす天体を発見する。
- (2) 南極ドームふじを天体観測サイトとして評価する。特に可降水量を測定し、他の中緯度帯サイトと比較する。

### 3. 研究の方法

- (1) トランジット検出のために 2 色同時測光 CCD カメラを製作し、南極ドームふじに設置する。トランジット現象は観測波長にほとんど依存しないため、2 波長で同時に測光することで他の現象と区別できる確率が上がる。
- (2) 南極ドームふじは緯度が高いため、連続した夜が長時間続く。そのため周期が 1 日を超える現象をとらえるのに適している。また天体の高度変化が少ないため、測光精度も安定して高い。
- (3) ドームふじは冬季無人のため、電力は豪ニューサウスウェールズ大が開発した無人運転電源モジュール PLATO-F を設置した。
- (4) 装置は全自動で運用できるようにプログラムされているが、PLATO-F 内に設置されているイリジウム通信によって状況をモニターできる。
- (5) 可降水量の測定には、近赤外線での太陽光の水蒸気による吸収スペクトルから求める装置を開発した。

### 4. 研究成果

(1) 2 色同時測光カメラ (TwinCam) の開発  
焦点距離 400 mm、F/2.8 のカメラレンズ (キヤノン) と冷却 CCD カメラ (Alta U4000, 2k x 2k pixel, 表面照射、インターライン方式) を組み合わせたカメラを 2 式用意し、オーロラ輝線を避けた赤、青の 2 フィルターを装着した。レンズは -70°C の恒温槽にてオートコリメータを使って星像の確認を行った。また CCD カメラは冷却試験の結果 -30°C 以下では誤動作を起こすことが判明したので、ヒーターにて -20°C 程度を維持するようにした。レンズ自体も温度変化によるフォーカス位置の移動を避けるために、ヒーターによって一定温度になるようにコントロールしている。

レンズ前面には霜を防ぐために TiO 膜による透明ヒーター付窓を設置したが、これに起因する非点収差が非常に大きくなること

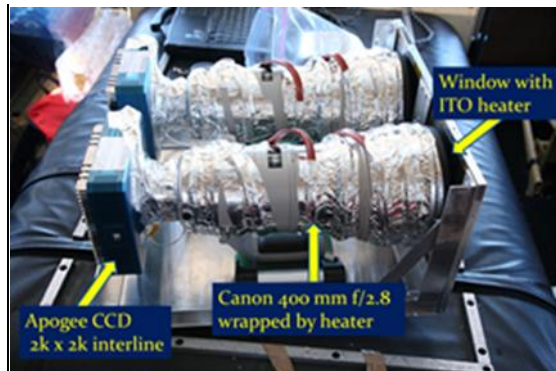


図 1. TwinCam カメラ部



図 2. TwinCam 制御系

判明したため、54 次隊での改修時に取り外した。図 1 に TwinCam のカメラ部を示す。

カメラ部を搭載して天体に指向・追尾するための架台は、市販赤道義 EM400 (タカハシ) をベースに、南緯 77° に対応できるようにアダプターを製作し、ベアリング部通常のグリスの代わりに -80°C でも使用可能な物に変更した。駆動部も大型モーターに変更し絶対値エンコーダーを追加しリモートでの観測を容易にした。望遠鏡のコントローラー類の多くが -70°C での環境試験の結果、-30°C 程度で電源投入時に破壊されることが分かったので、保温箱に入れて機器からの発熱とヒーターによって -20°C 程度以上になるようにコントロールしている。図 2 にコントローラー内部、図 3 にドームふじに設置した TwinCam を示す。

### (2) 南極ドームふじへの輸送・設置

TwinCam および関連装置の輸送・設置は、第 52 次南極地域観測隊に夏隊隊員として参加して行った。ドームふじは南極・昭和基地から内陸に約 1000 km 入ったところがあり、標高 3810m で南極で 2 番目に高い「ド

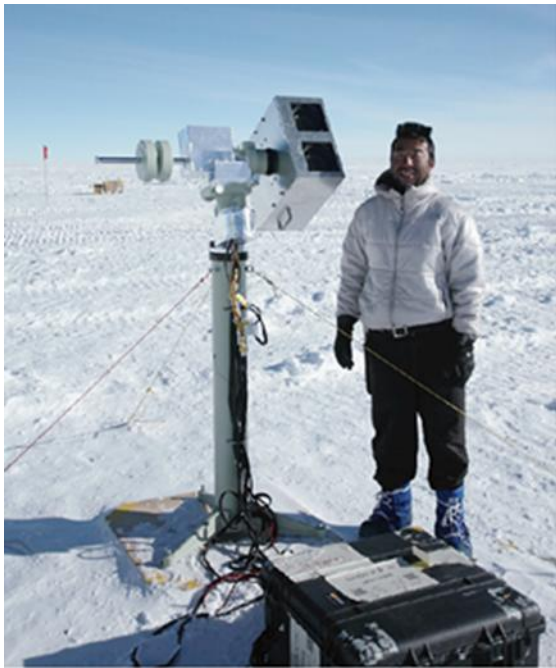


図3. 南極ドームふじに設置された TwinCam

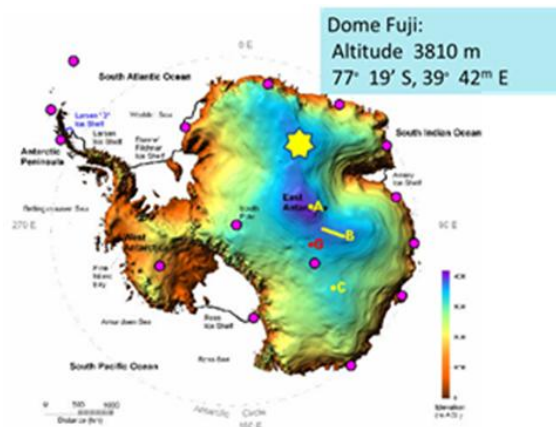


図4. ドームふじの位置 (星印)

ーム」地形である。晴天率が高く風が弱い場所である (図4)。昭和基地沖合までは砕氷艦しらせで輸送し (途中、豪フリーマントルにて無人電源モジュール PLATO-F を積み込んだ)、そこから南極大陸沿岸の S16 と呼ばれる地点まではヘリコプター (図5)、S16 からドームふじまでは雪上車 (図6) によって輸送した。S16 からドームふじまでは18日かかった。

TwinCam を含むすべての天文装置を設置した状態を図7に示す。電力は右手遠くに見える PLATO-F エンジンモジュール内に設置されたエンジン及び左手手前に見える太陽電池パネルによって発電・供給されている。太陽が沈む冬季はエンジンのみによる発電となる。エンジンモジュール内の様子を図8に示す。エンジンは1台ずつ交代で運転する。



図5. しらせ-S16間のヘリコプター輸送



図6. S16-ドームふじ間の雪上車による輸送

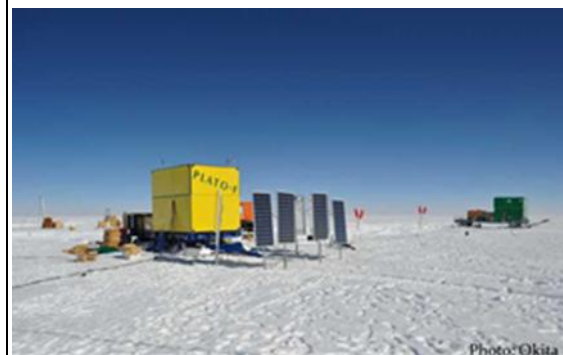


図7. ドームふじ天体観測所全景

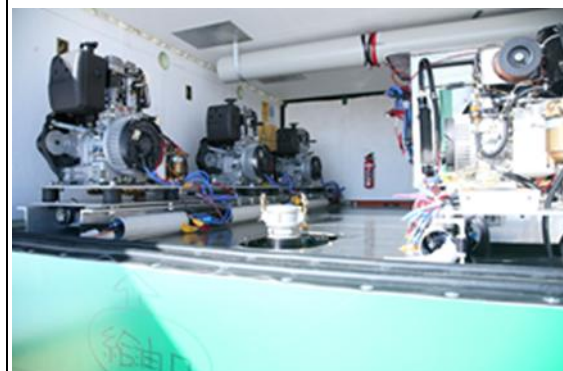


図8. エンジンモジュールの内部



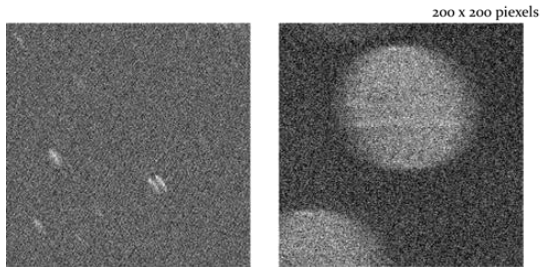


図 9. TwinCam の調整中に得られた画像 (一部)

太陽および月を用いて現地での調整を一通り完了した段階で帰国し、その後の調整はリモートで行った。調整作業中に得られて星の像を図 9 に示す。

ところが装置の調整が完了していない状態、電源モジュール PLATO-F が停止してしまった (バッテリーもすぐに消費された)。電源が供給されないと通信も停止するため、それ以上の作業が不可能となり、TwinCam を用いた科学観測の遂行することができなくなってしまった。

PLATO-F が停止した原因は、PLATO-F 内の DC-DC コンバーターが故障し、瞬間的に過電流が流れてブレーカーがトリップしたと考えられる。次にドームふじにアクセスできるのは、第 54 次観測隊であったので、隊に依頼して修理を行った。それを受けて現在リモートで TwinCam の復旧を試みている。

### (3) 南極地域の可降水量の測定

南極の赤外線観測環境調査の一環として、大気中の水蒸気量 (可降水量) の測定を、南極大陸沿岸からドームふじへの往復の途上に行った。

用いた装置は、太陽光の近赤外線スペクトルに見られる地球大気中の水蒸気による吸収の透過幅を測定するもので、我々が新たに開発したものである (図 10、11)。この装置は小型軽量なため携帯性に優れており、可降水量の絶対値が容易に 10% 以下で得られる。

分光器スリットへの太陽光の導入には光ファイバーを用いているが、スリットへの照射パターンを一定にするために、太陽光を一旦積分球で拡散して、光ファイバーへ十分に拡散された光が入射するようにすることが、安定に測定するために重要である。また積分球への入射口には十分な長さのバッフルを設置して、雪面や空からの散乱光の影響を防いでいる。

測定された太陽スペクトルの例を図 12 に示す。測定波長内に水蒸気による吸収バンドが 3 か所あり、それぞれから独立に可降水量が求まる。3 つの測定値は本来同一になるべきものなので、この値のばらつきから測定精



## PWV measurements

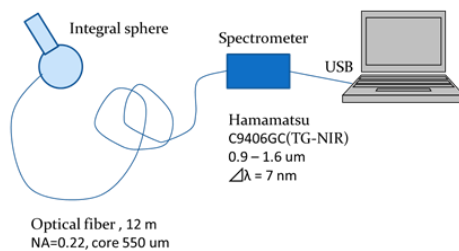


図 10. 可降水量測定装置の構成



図 11. 可降水量測定風景

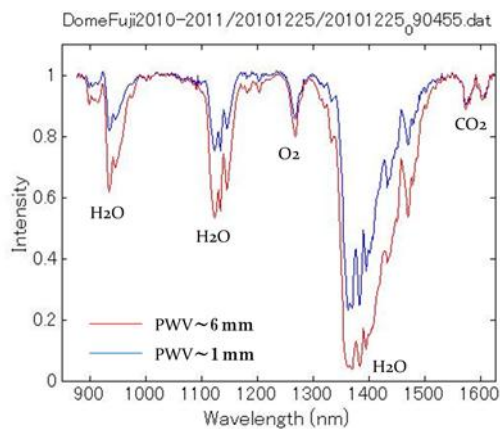


図 12. 太陽吸収スペクトルの実測例

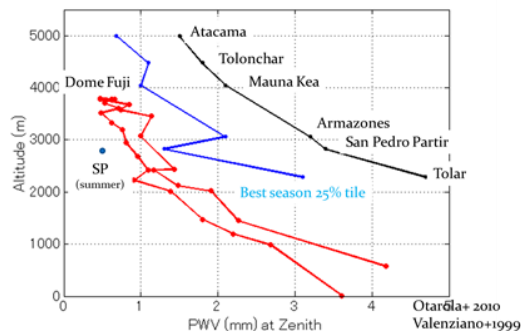


図 13. 可降水量と標高との関係

Site	Altitude (m)	winter	summer
DomeA	4090	0.14	0.5-0.6
DomeFuji	3810		~0.6
DomeC	3250	0.24	~0.6
SouthPole	2850	0.25-0.32	0.47
Atacama	5050	0.6-1.0	2.0
MaunaKea	4050	1.8	2.4

Yang+2010, Takato+, Valenzino+1999, Giovanelli+2001, Otarola+2010

表 1. ドームふじと他のサイトの可降水量の比較

度を推定することができる。

図 1 2 に南極大陸沿岸からドームふじにかけてさまざまな標高で測定した可降水量を赤線で示す。黒線は中緯度地帯にあるすぐれた天文観測サイトの可降水量を比較のために示した。青線は、黒線にあるサイトでのベスト 25%の可降水量を表している。

この図から南極ドームふじは中緯度帯のサイトに比べて可降水量が非常に少ないことがわかる。南極のデータはドームふじへ向かった時と帰る時の両方のデータを示してあり、帰りのデータの方が行きより平均的に可降水量が少なくなっている。これは行きよりも帰りの方が気温が低下したためと考えられる。そのため気温が低下する冬季のドームふじでは、さらに低い可降水量になることが予想される。

表 1 に南極点、ドーム A、マウナケア、アタカマとの数値を比較した。ドームふじの夏季（可降水量が多い時期）は、マウナケアの最も良い季節と比べてもその約 1/3、最も乾燥しているといわれるアタカマのベストと同程度となっており、冬季にさらに良くなることを考えると、地球上で最も可降水量が少ない地域を言え、赤外線観測にもっとも適した地域であることが分かった。

ドームふじより標高の高いドーム A との比較では、夏季は同程度の可降水量であることが分かった。ドームふじの冬季のデータは未取得であるが、南極内陸の水蒸気量は標高だけでなく沿岸からの距離などにも依存しているため、実測することが望まれる。

## 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 4 件)

- ① Okita, H., Ichikawa, T., Ashley, M. B. C., Takato, N., “Excellent daytime seeing at Dome Fuji on the Antarctic plateau,” A&A, 査読有, 554, L5-8, 2013.

DOI: 10.1051/0004-6361/201321937

- ② Seta, M., Nakai, N., Ishii, S., Nagai, M., Miyamoto, Y., Ichikawa, T., Takato, N., Motoyama, H., “Dome Fuji in Antarctica as a Site for Infrared and Terahertz Astronomy,” IAU symp. 査読無, 288, 22-38, 2013.

DOI: 10.1017/S1743921312016961

- ③ Okita, H., Takato, N., Ichikawa, T., Bonner, C., Ashley, M. C. B., Storey, J., “Dome Fuji Seeing - the Summer Results and the Future Winter-over Observations,” IAU symp., 査読無, 288, 25-28, 2013.

DOI: 10.1017/S1743921312016626

- ④ Miyata, T., et al. (including Takato, N.), “Evaluations of new atmospheric windows at thirty micron wavelengths for astronomy,” SPIE, 査読無, 8444, 6B, 2012.

DOI: 10.1117/12.925258

[学会発表] (計 10 件)

- ① Takato, N., “Deployment of Astronomical Instruments at Dome Fuji,” XXXII SCAR, July 2012, Hilton Portland (Portland, USA).

- ② 古澤純一、他 (含む 高遠徳尚)、「ペルー・ボリビア山岳地域におけるサブミリ波 VLBI 観測適地のサーベイ」、日本天文学会 2012 年秋季年会、大分大学 (大分県)

- ③ 高遠徳尚、沖田博文、市川 隆、他、「南極大陸での可降水量調査」、日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学 (鹿児島県)

- ④ 高遠徳尚、沖田博文、市川 隆、他、「南極ドームふじ基地 TwinCam による系外惑星探査」、日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学 (鹿児島県)

- ⑤ 市川 隆、他 (含む 高遠徳尚)、「南極天文台の進捗状況」、日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学 (鹿児島県)

- ⑥ 沖田博文、他 (含む 市川 隆、高遠徳尚)、「南極ドームふじ基地での赤外線天文観測」、日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学 (鹿児島県)

- ⑦ 市川 隆、他 (含む 高遠徳尚)、「南極ドームふじ基地に設置した自動発電システム PLATO-F」、日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学 (鹿児島県)

- ⑧ 沖田博文、他 (含む 市川 隆、高遠徳尚)、「南極ドームふじ基地での天文観測条件調査」、日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学 (鹿児島県)

- ⑨ Takato, N., “Site testing and the first winter-over instruments at Dome Fuji, SCAR AAA sympo., June 2011, Taronga Zoo (Sydney, Australia).

- ⑩ Ichikawa, T., "Current Status at Dome Fuji, SCAR AAA sympo., June 2011, Taronga Zoo (Sydney, Australia).

[図書] (計1件)

- ① 高遠徳尚、(国立天文台編)、丸善出版、平成24年理科年表、2012 (pp174-176).

[その他]

ホームページ等

<http://mcball.phys.unsw.edu.au/~plato-f/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高遠 徳尚 (TAKATO NARUHISA)  
国立天文台・ハワイ観測所・准教授  
研究者番号：50261152

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

市川 隆 (ICHIKAWA TAKASHI)  
東北大学・理学系研究科・教授  
研究者番号：80212992

本山 秀明 (MOTOYAMA HIDEAKI)  
国立極地研究所・教授  
研究者番号：20210099

### (4) 研究協力者

岡田 則夫 (OKADA NORIO)  
国立天文台・先端技術センター・主任研究技師

Ashley, Mihael, C. B.  
University of New South Wales, AU,  
Professor

Storey, John  
University of New South Wales, AU,  
Professor