

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2012～2015

課題番号：24253003

研究課題名(和文) 南極赤外線望遠鏡による系外惑星天体の大気成分と構造の研究

研究課題名(英文) Study on atmospheric composition and structure of exoplanets with an Antarctica infrared telescope

研究代表者

市川 隆 (Ichikawa, Takashi)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80212992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円

研究成果の概要(和文)：南極氷床地域(国立極地研究所ドームふじ基地)に小型赤外線観測装置を設置して、可視光と赤外線波長で明るい星のトランジット法による観測を行うための天文環境調査を行った。長周期で主星を回る系外惑星の大気の性質を研究及び南極の赤外線波長における極めて優れた観測条件を生かして、赤外線波長での広域探査に基づく銀河進化の研究を行った。またドームふじ基地の雪面上に設置する中口径赤外線望遠鏡建設のための技術的問題点の調査を行った。さらに、これらの研究を発展させるための超軽量南極用2.5m赤外線望遠鏡とトランジット法による地球型系外惑星の大気構造研究のための赤外線カメラの設計を行った。

研究成果の概要(英文)：Small astronomical and site-test instruments were deployed at the Dome Fuji station of National Institute of Polar Research to study the astronomical environment. The Dome Fuji station was found to be the best site for the studies of the exoplanet atmosphere and for wide field surveys of galaxies in the early universe with infrared telescopes and cameras. The technical and engineering problems to construct mid-size infrared telescope on snow in low temperature of -80 Celsius at inland Antarctica and a multi-object infrared spectrograph dedicated to the study of exoplanet atmosphere were studied. Then a 2.5m infrared telescope and a 3-color infrared camera were designed.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：南極 系外惑星 赤外線 地球型惑星 トランジット観測 銀河 広域探査

1. 研究開始当初の背景

近年、Kepler 衛星望遠鏡などのトランジット観測により、多数の系外惑星探査、特に地球型のように長周期天体が発見されている。このような系外惑星の科学は大気の性質を調べる次の段階に入った。惑星大気は赤外線波長に CO₂、CH₄、H₂O などの分子の強い吸収帯を持つ。この波長に合わせてトランジット法を応用することで、惑星大気中の分子の存在や大気の厚みに関する情報も直接得ることができる。しかし極めて高い測光精度を必要とするこのような観測は現在の地上天文台では極めて困難である。

一方、冬の平均気温が-70℃の乾燥した南極は大気からの赤外線雑音が非常に小さく(ハワイ島マウナケア山の約 1/100)、大気の透過率も極めて高いことから分子帯によるトランジット法を応用するサイトとして、地球上で最も優れた場所と言える。また大気透過率が非常に安定している南極内陸は最適な場所である(図 1)。

赤外線でのトランジット観測は一部、ハッブル望遠鏡や Spitzer 衛星望遠鏡で行われて

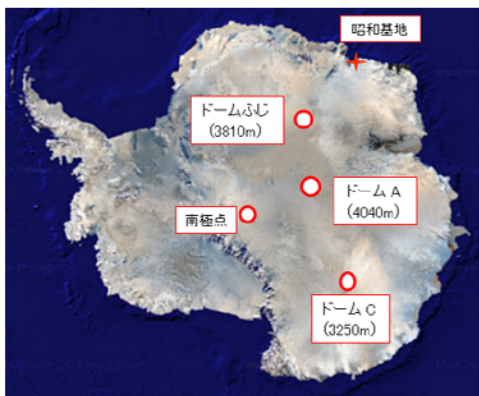


図 1 南極のドーム(氷床高原)

いるが、極めて限定的であり、衛星望遠鏡は高価・短命であること、装置交換ができないことを考えると、南極、特に冬期は定常的な観測が可能な地球上で唯一の場所であると言える。長周期の天体は連続して観測できる場所での観測が不可欠である。世界各国の望遠鏡を連携して連続観測を行う試みもされているが、天候や装置の違いなどにより観測は容易ではない。一方、南極での極夜は連続して 4 ヶ月以上の観測が可能であり、周期が 100 日の系外惑星の観測も効果的に行うことができる。

私たちの研究グループは太陽系の地球を含む全惑星といくつかの衛星、月の可視・赤外線同時低分散分光を行い、広帯域の測光観測を行えば太陽系天体は「土」「氷」「ガス」の 3 つに分類できることを示した。この研究をさらに可視光から紫外線での観測に拡張して分類精度を上げる研究を行ってきた。トランジット天体を可視と赤外線と同時に測光することにより、Kepler 天文衛星などで発見された長周期惑星の性質を明らかにする

ことができる。そこで、私たちは極地研の協力を得て、平成 22 年度にドームふじ基地に可視光でのトランジット観測を目的とした小型望遠鏡とともに天文の気象条件を調査する各種装置を設置した。さらに 40cm 赤外線望遠鏡と赤外線カメラを用いた昼間での金星観測実験を行った。天文観測ステージ、イニング観測のための DIMM 装置、40cm 望遠鏡の恒常的設営のために、平成 23 年度中の昭和基地に運搬した。本研究ではそれら装置を平成 24 年度からドームふじ基地に設営し、本格的観測を開始する。

2. 研究の目的

本研究ではこれまでの私たちの研究成果を継続して、実際に赤外線と可視光同時観測による系外惑星のトランジット観測を行い、長周期系外惑星の大気の性質を調べることを目的とする。この計画は国立極地研究所(極地研)の南極地域観測第 8 期計画(平成 22~27 年度)に採択され、24 年度前半の越冬試験観測、24 年度後半のドームふじ基地移設が決定した。装置の運搬と設営には極地研の全面的な協力が得られるので、本研究によって、研究者を研究期間中、毎年ドームふじ基地に派遣し、夏期に望遠鏡と観測装置の保守・整備を行う。日本からは極夜にリモート観測によって長周期トランジット天体の観測を行う。ネットワークが細いので(128kbps)、現地でデータ解析を行い、結果のみを日本に送る。生データは本申請の経費を用いて、派遣する研究協力者が回収する。

3. 研究の方法

平成 24 年度は極地研の昭和基地に 40cm 赤外線望遠鏡と赤外線カメラを設営して、越冬観測を行い、平成 24 年度後半のドームふじ基地設置に向けて準備を行う。越冬隊員として昭和基地に滞在している東北大・大学院生が、日本からは連携研究者が飛行機を用いてケープタウン経由でドームふじ基地に遠征する。同年度に 40cm 望遠鏡と赤外線カメラを設置し、自動発電装置からの電力供給で観測装置を日本からのリモート制御することにより、トランジット天体の観測を行う。観測時間の空き間を使って、近傍銀河の星系ハローの構造の研究、高光度赤外線天体内のダストに埋もれた II 型超新星探査も並行して行う。平成 25 年度以降はドームふじ基地に研究協力者と大学院生を派遣してデータの回収を行う。データはすべて日本に持ち帰り、解析し、成果として発表する。最終年度は研究の総括を行い、将来の中口径赤外線望遠鏡設置の検討を行う。

4. 研究成果

国立極地研究所昭和基地において赤外線望遠鏡の駆動試験と観測ステージの組み上げ試験を行った後、平成 24 年度に第 53 次南極越冬隊員と第 54 次南極地域観測隊の研究

協力者と連携研究員が、赤外線観測装置、天文環境調査観測装置、高さ 9m の観測台ステージをドームふじ基地に輸送し、設営した(図 2)。ドームふじ基地においてはオーストラリアの研究協力者との共同で、自動発電装置の整備、赤外線望遠鏡と観測装置のリモート観測実験を行った。またドームふじ基地滞

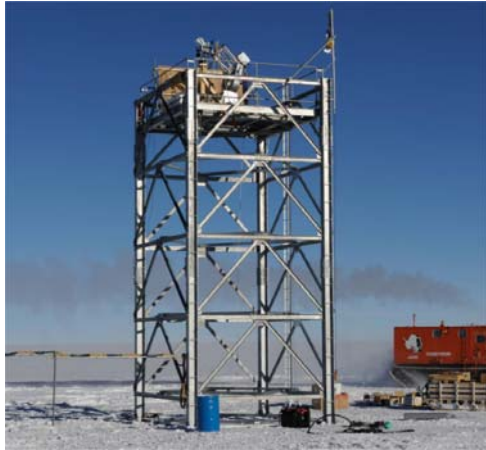


図 2 ドームふじ基地に設営した天文観測ステージ

在中に平成 22 年度に設置した天文気象観測装置のデータを回収した。極地研の研究者や大学の研究者の協力を得て、橇による運搬時の振動調査、観測ステージの雪面上での基礎地盤の形成、ステージの不等沈下の実験を行った。

国内においてはドームふじ基地に移設予定の 25cm 可視光望遠鏡の整備を行った。特に、 -80°C での低温運用が可能な改良を行い、また、リモート観測に必要な制御装置及びソフトウェアの開発を行った。また、これまで開発を進めてきた 3 色同時赤外線カメラの光学システムの組み上げとセンサーの読み出し回路の開発を行った。超軽量 2 m 級赤外線望遠鏡と観測装置の技術的検討、特に望遠鏡構造と望遠鏡を支持するステージの基本設計と強度計算を行った。その過程で、望遠鏡

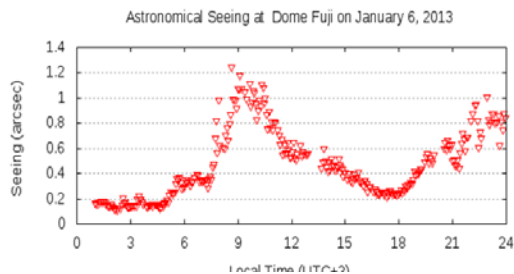


図 3. ドームふじ基地でのシーイング観測

架台とステージの材質に低温脆性の問題が明らかになったので、様々な金属材料の低温脆性の評価と、実際に用いる部材の低温脆性の測定装置を開発した

系外惑星のトランジット観測を目的とした 3 色赤外線カメラ、25cm 望遠鏡、広視野

CCD カメラの開発を行った。3 色赤外線カメラはクライオスタット、光学システムの製作を完了し、組み上げ試験を行った。真空試験、冷却試験の結果、仕様通りの性能を得た。また 3 つのセンサーを同時に駆動制御するための制御システムの開発を行った。25cm 望遠鏡の各部品を -80°C において冷却駆動試験を行いながら、望遠鏡システムの組み上げを行った。

平成 24 年度に取得した南極における天文学的観測条件に関するデータ解析を行い、シーイングが $0.2''$ であることを解明した(図 3)。これは地球上で最も良い値である。大気擾乱の測定と地表付近の気温勾配の解析から接地境界層の厚みが 15m 程度であることを解明した。ドームふじ基地に設置した高さ 9m の観測ステージの経年傾斜を測定した所、年間 0.2 度の傾きが発生した。これは十分に小さい値であり、2.5m 赤外線望遠鏡を雪面上に設置する際に問題となる経年不等沈下の影響が小さいことがわかった。

ステージに用いた鋼材の低温脆性を調べるため、同じ鋼材サンプルについて -80°C から 60°C までの温度範囲でシャルピー試験を行った結果、 -20°C 以下で大きな低温脆性があることが判明した。望遠鏡ステージの建設に関して、安全率を高める方法が必要である

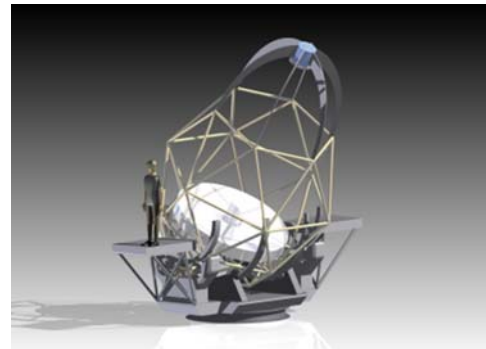
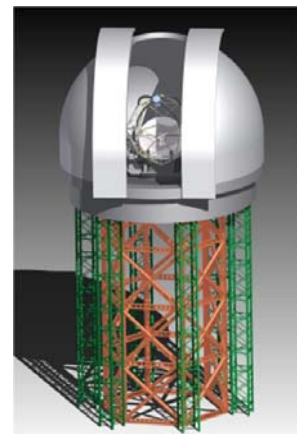


図 4. 南極赤外線望遠鏡と観測室

ことがわかった。2.5m 赤外線望遠鏡の駆動と支持に用いる R ガイドの低温脆性を調査するため、相当品の R ガイドの低温下での性能を評価した。その結果、低温下では素材の熱膨張の違いに



より、市販品はそのままでは使えないこと、特に、軸受けとボールの隙間を低温下で最適な値にする必要があることが判明した。

南極における系外惑星のトランジット観測のための観測手法の検討を行った。その検討を元に、必要となる 3 色赤外線カメラの低分散多天体機能の仕様について評価した。

3色同時赤外線カメラ制御用コントローラの製作と性能評価、広帯域と狭帯域フィルターを搭載できる3色同時赤外線カメラの光学系と冷却系の総合試験を行った。その結果、設計通りの性能を得た。検出器の読み出しを行うコントローラの開発を行った。市販のボードを用いた安価な3色同時観測のための読み出し回路を開発して、赤外線センサーの読み出しシステムが完成した。

超軽量2m級赤外線望遠鏡と観測装置の技術的検討と雪面の上に大型の望遠鏡を設置するために、ドームふじ基地の雪面の硬度と安定性について調査した。望遠鏡周辺に蓄積するスノードリフトや着雪に関する検討を連携研究者と行った。望遠鏡とステージの建設のための技術的検討を行った。直径10mの半円形の発泡スチロールを用いて、超軽量の望遠鏡ドームを検討した(図4)。

赤外線トランジット観測を行うに当たり、その候補となる天体の探査が必要である。そこで広視野をもつ口径25cmニュートン望遠鏡を開発し、望遠鏡のリモート制御システムの開発を行った。平成26年度までに完成した3色同時赤外線カメラセンサー用コントローラ(TACS)の動作実験と既設の2048×2048HgCaTeと256×256InSb近赤外線センサーの性能評価を行った。従来の読み出し方法に比較して、オーバーヘッドタイムを3分の1にすることに成功した。HgCdTe検出器については当初の期待される性能を達成していることを確認した。一方、既設のInSb検出器については経年劣化と思われる性能の低下が確認され、InSb検出器の新規導入が必要であることがわかった。

超軽量2m級赤外線望遠鏡と観測装置の技術的検討を行い、平成26年度までに得られた性能評価を基に、3Dプリンタを用いた模型を製作し、望遠鏡製作の課題についての技術的評価を行った。南極における長期間の極夜を利用した系外惑星のトランジット観測を想定して、口径3cmの小型赤外線カメラの開発し、国立天文台岡山天体物理観測所に設置した。

平成24年度以降予定されていた国立極地研究所による南極観測計画ではドームふじ基地への遠征計画がすべて中止となったため、すでにリモート観測で得られていた観測データの回収ができなかったが、本計画遂行に必要なドームふじ基地での運用を想定した観測装置等の開発研究は滞りなく進んだ。これまでに回収した観測データの解析を終了し、成果発表を行った。また将来の大型望遠鏡建設のための基礎開発と実験を完了した。

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12件)

①Morishita, T., and Ichikawa, T. 2016,

ApJ, 816, 87, "THE FATE OF A RED NUGGET: IN SITU STAR FORMATION OF SATELLITES AROUND A MASSIVE COMPACT GALAXY"

DOI: 10.3847/0004-637X/816/2/87 (査読有)

②Kubo, M., Yamada, T., Ichikawa, T., Kajisawa, M., Matsuda, Y., Tanaka, I., and Umehata, H. 2016, MNRAS, 455, 3333-3344 "An extremely dense group of massive galaxies at the centre of the protocluster at $z = 3.09$ in the SSA22 field"

DOI:10.1093/mnras/stv2392 (査読有)

③Burton, Michael G., Yang, Ji, Ichikawa, Takashi, 2015, PKAS, .30, 611B "Astronomy from the High Antarctic Plateau"

DOI: 10.5303/PKAS.2015.30.2.611 (査読有)

④Akhlaghi, M., and Ichikawa, T. 2015, ApJS, 220, 1. "NOISE-BASED DETECTION AND SEGMENTATION OF NEBULOUS OBJECTS"

DOI:10.1088/0067-0049/220/1/1 (査読有)

⑤Morishita, T., Ichikawa, T., Noguchi, M., Akiyama, M., Patel, S.G., Kajisawa, M., Obata, T. 2015, ApJ, 805, 34 "FROM DIVERSITY TO DICHOTOMY, AND QUENCHING: MILKY-WAY-LIKE AND MASSIVE-GALAXY PROGENITORS AT $0.5 < z < 3.0$ "

DOI:10.1088/0004-637X/805/1/34 (査読有)

⑥Kajisawa, M, Morishita T., Taniguchi, Y, Kobayashi, M. A. R., Ichikawa, T., and Fukui, Y. 2015 ApJ, 801 134. "Dust Heating By Low-Mass Stars in Massive Galaxies At $z < 1$ "

DOI:10.1088/0004-637X/801/2/134(査読有)

⑦Kubo, M., Yamada, T., Ichikawa, T., Kajisawa, M., Matsuda, Y., Tanaka, I. 2015, ApJ 799 38. "NIR Spectroscopic Observation of Massive Galaxies in the Protocluster at $z = 3.09$ "

DOI:10.1088/0004-637X/799/1/38 (査読有)

⑧Morishita, T., Ichikawa, T. and Kajisawa, M. 2014, ApJ, 785, 18, "THE EVOLUTION OF GALAXY SIZE AND MORPHOLOGY AT $z \sim 0.5-3.0$ IN THE GOODS-N REGION WITH HUBBLE SPACE TELESCOPE/WFC3 DATA"

DOI:10.1088/0004-637X/785/1/18 (査読有)

⑨Kubo, M., Ichikawa, T. et al. 2013, ApJ, 778, 170 (14p) (18人中5番目) "THE FORMATION OF THE MASSIVE GALAXIES IN THE SSA22 $z = 3.1$ PROTOCLUSTER"

DOI:10.1088/0004-637X/778/2/170 (査読有)

⑩Okita, H., Ichikawa, T., Ashley, M. C. B., Takato, N., Motoyama, H. 2013, A&A, 554, L5-8, "Excellent daytime seeing at Dome Fuji on the Antarctic plateau"

DOI:10.1051/0004-6361/201321937 (査読有)

⑪Uchimoto, Yuka K., Ichikawa, Takashi, et al. 2012, ApJ., 750, 116 (15人中5番目) "Assembly of Massive Galaxies in a High- z Protocluster"

DOI:10.1088/0004-637X/750/2/116 (査読有)

⑫Ichikawa, T. Kajisawa, M., Akhlaghi, M.

2012, MNRAS, 422, 1014 “A universal stellar-mass and size relation of galaxies in GOODS-N region”
DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.20674.x (査読有)

[学会発表] (計 15 件)

①市川隆, 森下貴弘「衛星銀河の星生成と大質量コンパクト銀河との合体進化」日本天文学会春季年会 2016 年 3 月 16 日 (首都大学東京、東京都・八王子市)

②小幡朋和、市川隆「off-axial 光学系の近軸理論を応用した南極 2.5m 望遠鏡用三色赤外線カメラの光学設計」日本天文学会春季年会 2015 年 3 月 19 日 (大阪大学、大阪府・豊中市)

③Ichikawa, T. “Astronomy at Dome Fuji in Antarctica” 12th Asian-Pacific Regional IAU Meeting 2014 年 8 月 20 日 (Daejeon, Korea)

④金高義, 亀田貴雄, 市川隆「南極ドームふじにおける極低温下での圧雪地盤造成実験」雪氷学会、2013 年 9 月 20 日 (北見工業大学、北海道・北見市)

⑤市川隆 他「南極 2.5m 赤外線望遠鏡計画」日本天文学会秋季年会、2013 年 9 月 11 日 (東北大学、宮城県・仙台市)

⑥香川博之, 市川隆 他「南極天文観測のための物資輸送櫃の振動測定」日本天文学会秋季年会、2013 年 9 月 11 日 (東北大学、宮城県・仙台市)

⑦金高義, 市川隆 他「9m-天文観測架台の圧雪地盤基礎造成と不同変位観測」日本天文学会秋季年会、2013 年 9 月 11 日 (東北大学、宮城県・仙台市)

⑧沖田博文, 市川隆他「南極大陸内陸高原・ドームふじ基地で観測された極めて薄い接地境界層:高さ 16 m」日本天文学会秋季年会、2013 年 9 月 11 日 (東北大学、宮城県・仙台市)

⑨沖田博文, 市川隆 他「南極大陸内陸高原・ドームふじ基地で観測された地球上最良の自由大気シーイング: 0.2 秒角」日本天文学会秋季年会、2013 年 9 月 11 日 (東北大学、宮城県・仙台市)

⑩森下貴弘、市川隆他「Bias Corrected Size-Stellar Mass Relations of Massive GALAXIES at $z=1-3$ 」日本天文学会春季年会 2013 年 3 月 21 日 (埼玉大学、埼玉県・さいたま市)

⑪Akhlagi, M. and Ichikawa, T. “Test of Significant Size Evolution in Quiescent Galaxies: A Novel Approach” American Astronomy Society 2013 年 1 月 7 日 (UCLA, USA)

⑫沖田博文、市川隆他「-80 度で運用可能な完全自立シーイング測定装置の開発」日本天文学会秋季年会 2012 年 9 月 20 日 (大分大学、大分県・大分市)

⑬Okita, H., Takato, N., Ichikawa, T. et al. “Dome Fuji Seeing -the Summer Results

and the Future Winter-over Observations” Astrophysics from Antarctica, IAU symp. 288, 2012 年 8 月 20 日 (Beijing, China)

⑭Storey, J., Ichikawa, T. et al. “The SCAR Astronomy & Astrophysics from Antarctica Scientific Research Programme” Astrophysics from Antarctica, IAU symp. 288, 2012 年 8 月 20 日 (Beijing, China)

⑮Seta M., Ichikawa, T. et al. “Dome Fuji in Antarctica as a Site for Infrared and Terahertz Astronomy” Astrophysics from Antarctica, IAU Symp. 288, 2012 年 8 月 20 日 (Beijing, China)

[その他]

ホームページ等

<http://www.astr.tohoku.ac.jp/~ichikawa/antarctic/antarctic.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市川 隆 (TAKASHI ICHIKAWA)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 80212992

(2) 研究分担者

坂野井 健 (TAKESHI SAKANIO)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 80271857

(3) 研究分担者

板 由房 (YOSHIFUSA ITA)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 80271857

(4) 連携研究者

高遠 徳尚 (NARUHISA TAKATO)

国立天文台・ハワイ観測所・准教授

研究者番号: 50261152

(5) 連携研究者

本山 秀明 (HIDEAKI MOTOYAMA)

国立極地研究所・研究教育系・教授

研究者番号: 20210099

(6) 連携研究者

宮岡 宏 (HIROSHI MIYAOKA)

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号: 10150046