

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 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21244012

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トランジット探査

研究課題名（英文） Transit Observations of Exoplanets with Antarctic Infrared Telescope

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

研究成果の概要（和文）：

南極において初めて、赤外線波長でのトランジット(食変光)法を応用し、長周期で主星を回る系外惑星を探査するために40cm望遠鏡と赤外線カメラを開発した。国立極地研究所において試験観測の後、ドームふじ基地に設置した。また高さ9mのステージをドームふじ基地に設置し、天体観測環境の測定を行い、世界で最もシーイングが良い場所であることを確認した。これらの成果は日本天文学会と欧文論文で発表された。

研究成果の概要（英文）：

In order to perform transit observations of exo-planets at Antarctica, we developed 40cm infrared telescope and camera. The instruments were deployed at Dome Fuji station of National Institute of Polar Research. In addition, the stage of 9m height was constructed, on which astronomical conditions were observed. We obtained the smallest seeing size ever taken at good astronomical sites. The results were published in main journals and were presented at the Astronomical Society of Japan.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2010 年度	16,700,000	5,010,000	21,710,000
2011 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012 年度	0	0	0
2013 年度	0	0	0
総計	33,500,000	10,050,000	43,550,000

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：系外惑星、トランジット、赤外線、南極

1. 研究開始当初の背景

トランジット法による系外惑星探査、特に地球型のように長周期天体の探査は長期間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。

実際、22日より長周期のトランジット天体はまだ発見されていない。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。

惑星大気は赤外線帯に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、惑星大気の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。このような赤外線での観測は現在の地上天文台では極めて困難である。一方、極寒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期待されている。また、トランジット観測には高い測光精度が必要なため、大気透過率が非常に安定している南極は最適な場所である。赤外線でのトランジット観測は一部、Spitzer 衛星望遠鏡で行われているが、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。

南極点には 1990 年代に 60cm 望遠鏡が設置されたが、天候が悪いなどの理由により観測は終了した。一方、内陸の高気圧帯にある氷床地帯は大気が安定しており、標高も高いことから大気の透過率が極めて高く天文観測に最も適した場所である。極地研は氷床コアの掘削プロジェクトなどのために「ドームふじ」基地を建設した。その周辺はモデル大気計算によると、南極での赤外線天文観測に最も適した場所であると期待されている。日本は地球上で最も観測条件の良い場所に基地を持っていると言える。標高が高く(3810m)、快晴日が多い(85%以上)、水蒸気量が少ない(0.2mmPV 以下)ことから私たちは赤外線天文学のサイトとして注目し、テラヘルツ天文学を開拓するグループと共同して、極地研の協力の下、南極に赤外線・テラヘルツ天文台を建設する準備を進めている。近年、南極ドームにおける天文観測の重要性が認識される中、40cm 望遠鏡による南極における赤外線天文学の開拓は日本における南極天文台建設のための先駆けになるものと期待される。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は、国立極地研究所(極地研)の南極地域観測第Ⅷ期計画(平成 22~27 年度)に参加し、40cm 南極赤外線望遠鏡と 3 色同時赤外線カメラ[2.3 μ m(Kdark バンド)、3.4 μ m(CH₄)、3.7 μ m(L)]を極地研の南極ドームふじ基地に設置し、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、トランジット法による長周期系外惑星を探索することである。

望遠鏡を平成 22 年夏期に設置し、太陽や明るい惑星の観測を基に、極寒環境下における望遠鏡の性能と大気の透過率やシーイン

グなどを評価する。並行して極夜に長時間連続観測を可能にする自動発電モジュールを開発し、平成 23 年にドームふじ基地に設置する。3 色カメラによって、南極における初めての赤外線による長周期トランジット天体の探索を行い、系外惑星大気中の H₂O、CH₄ の分子を検出し、大気の厚みに関する研究を行う。加えて南極のサイト調査を行い、2m クラス赤外線望遠鏡によるドームふじ基地での赤外線天文学の展望を開く。

3. 研究の方法

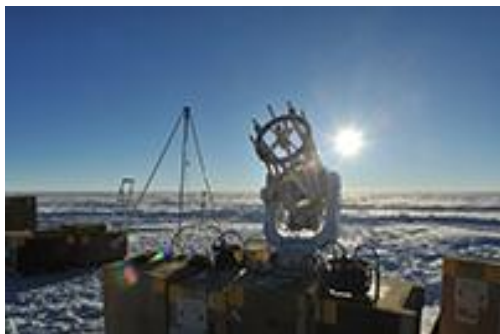
南極観測船、新「しらせ」による南極観測は平成 21 年度の第 51 次観測から再開し、今までに掘削した氷床コアを回収する目的でドームふじ基地に行く。そこで、その機会に市販の小型赤外線分光器による大気透過率と安定性の測定を行う。また大気の擾乱を測定するための超音波風速計を搭載した高度 30m タワーの設置し、複数の風速計によって高さ方向の大気の屈折率の変化を求め接地境界層の厚みを測定し、40cm 望遠鏡と赤外線カメラを設置する観測台の高さを決定する。

すでに日本の極寒地での性能評価を終了した-80°C仕様の 40cm 赤外線望遠鏡をリモートで観測する制御装置を開発する。設計を終了した 3 色同時赤外線カメラを本研究で製作する。平成 22 年からの南極地域観測第Ⅷ期計画で予定されている第 52 次観測隊に参加し、ドームふじ基地に望遠鏡を設置する。平成 22 年度は越冬の予定がないので、太陽を用いて、狭帯域フィルターを搭載した 3 色赤外線カメラの性能評価を行う。並行して、望遠鏡と観測装置の自動運転を可能にする自動発電モジュールを開発し、平成 23 年度にドームふじ基地に設置する。平成 23、24 年度の極夜に発電モジュールを用いてリモート観測による無人運転を行い、すでにドップラー効果で見られている長周期系外惑星系のトランジット観測を行い、惑星の大気中に、CH₄ や H₂O などの分子を検出し、大気の厚みに関する研究を行う。上記の南極におけるサイト調査と天文学の研究と並行して、近い将来に建設を計画している 2 m 級赤外線望遠鏡と CO₂ 観測装置の基礎開発、建設に関わる課題の検討を行う

4. 研究成果

その観測を行うために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とそのコントローラを開発した。南極での運用の場合、比較的遅いネットワーク回線での運用が予想される。特に越冬隊を必要としないリモートでの無人観測を行う必要がある。しかしドームふじ

基地は衛星電話回線による通信のみが可



能である。そこで継続して観測を進めるために細いネットワーク回線でのリモート観測技術を開発した。平成21年11月出発の第51次観測隊でドームふじ基地における短期間の天文環境の調査を行うため、隊員に大気の水蒸気量を測定する $1.7\mu\text{m}$ まで測定可能な小型赤外線分光



器を託してドームふじ基地周辺における夏期の大気水蒸気量とその安定性についての測定を行った。南極での電力は日本から運搬する燃料でまかなわれたため、その量は制限される。従って燃費を抑えるためには、できる限り低温での運用が望ましい。しかし制御システムなどの電気・電子機器は -10°C 以下になると運用が困難になるものが多い。そこで自己発熱を利用しながら最小限の燃費で運用する温蔵システムを開発し、南極で用いる電気・電子機器などを低エネルギーで保温する実験を行った。

平成22年11月出発の第52次観測隊が行うサイト調査のための装置の開発と40cm赤外線望遠鏡と赤外線カメラの整備及び観測準備を行った。また高度16mまでの温度分布を測定する装置の開発を行った。オーストラリアニューサウスウェールズ大学(UNSW)との共同研究によって自動発電モジュールの開発を行った。そのために大学院生が2ヶ月間UNSWに滞在して開発に参加した。その結果、発電モジュールとともに大

気の擾乱や天文用気象データを収集する各種測定装置を開発した。第52次南極地域観測隊に大学院生が同行者として参加し、南極内陸にある国立極地研のドームふじ基地において初めて、天文環境調査を行った。その過程で自動発電モジュールの設営、データ通信設備の設置、気象タワーの設置、40cm赤外線望遠鏡と赤外線カメラによる天文環境のための観測データを得た。また、SNODAR、超音波風速計、DIMMらを同時に使って、大気の乱流の観測を行った。その結果、シーイングに関する情報を得た。さらにドームふじ基地に設置した自動観測装置を用いて、1月中旬から3月末までの気象データと大気の乱流データを取得した。

研究代表者は南極地域観測第53次隊に参加し、南極での耐久テストと日本からのリモート観測実験を行うために、昭和基地に40cm望遠鏡と赤外線カメラを設営した。同時に54次隊でドームふじ基地に設営する予定の、本研究で製作した高さ8mのステージと望遠鏡を格納する観測室を極地研のコンテナヤードに仮設置し、組み立て手順の確認、観測室制御システムの開発を行ったのち、昭和基地に運んだ。これらの成果により、平成24年度に昭和基地での系外惑星のトランジット観測とドームふじ基地への移設の準備を整えた。これらの成果は日本天文学会と欧文論文で発表された。

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16件)

(1) Tanaka, I., Ichikawa, T. et al. 2011, PASJ, 63, 415-435 "Discovery of an Excess of H Emitters around 4C 23.56 at $z = 2.48$ " (査読有)

(2) Kajisawa M., Ichikawa T., et al. 2011, PASJ, 63, 403-414 "MOIRCS Deep Survey. X. Evolution of Quiescent Galaxies as a Function of Stellar Mass at $0.5 < z < 2.5$ " (査読有)

(3) Kajisawa, M., Ichikawa, T. et al. 2011, PASJ, 63, 379-401 "MOIRCS Deep Survey. IX. Deep Near-Infrared Imaging Data and Source Catalog" (査読有)

(4) Ebizuka, N., Ichikawa, T. et al. 2011, PASJ, 63, 605-612 "Cryogenic VPH Grisms for MOIRCS" (査読有)

(5) Konishi, M., Ichikawa, T. et al. 2011, PASJ, 63, 363-377 "MOIRCS Deep Survey. VII: NIR Morphologies of Star-forming Galaxies at Redshift $z \sim 1$ " (査読有)

(6) Okita, H., Ichikawa T. et al. SPIE, 2010, 7733, 56-65 "Antarctic Infra-Red Telescope with a 40cm primary mirror (AIRT40): development and improvement" (査読有) 10.1117/12.856576
(7) Ichikawa, T. Highlights of Astronomy, 2010, Volume 15, 632-633 "Future plans for astronomy at Dome Fuji" (査読無) 10.1017/S1743921310010835
(8) Tamura, Y., Ichikawa T. et al. 2010, ApJ, 724, 1270-1282 "Submillimeter Array Identification of the Millimeter - Selected Galaxy SSA22-AzTEC1: A Protoquasar in a Protocluster?" (査読有) 10.1088/0004-637X/724/2/1270
(9) Kajisawa, M., Ichikawa, T. et al. 2010, ApJ, 723, 129-145, "MOIRCS Deep Survey. VIII. Evolution of Star Formation Activity as a Function of Stellar Mass in Galaxies Since $z \sim 3$ " (査読有) 10.1088/0004-637X/723/1/129
(10) Yoshikawa, T., Ichikawa, T. et al. 2010, ApJ, 718, 112-132 "MOIRCS Deep Survey. VI. Near-infrared Spectroscopy of K-Selected Star-forming Galaxies at $z \sim 2$ " (査読有) 10.1088/0004-637X/718/1/11
(11) Ichikawa, T., et al. 2010, ApJ, 709, 741-748 "MOIRCS Deep Survey V: A Universal Relation for Stellar Mass and Surface Brightness of Galaxies" (査読有) 10.1088/0004-637X/709/2/741
(12) Ichikawa, T. Proceedings of the "SPICA Joint European Japanese Workshop", 6-8 July 2009, Oxford, United Kingdom (Edited by A. M. Heras, B. M. Swinyard, K. G. Isaak, & J. R. Goicoechea) "SCIENTIFIC GOALS OF SPICA FOR GALAXY FORMATION AND EVOLUTION IN EARLY UNIVERSE" (査読無) 10.1051/spica/200904007
(13) Lundoock, R. G., Ichikawa, T., et al. 2009, A&A, 507, 1469-1658 "Tohoku-Hiroshima-Nagoya planetary spectra library: A method for characterizing planets in the visible to near infrared" (査読有) 10.1051/0004-6361/200912581
(14) Kajisawa, M., Ichikawa, T., et al. 2009, ApJ, 702, 1393-1412 "MOIRCS Deep Survey. IV: Evolution of Galaxy Stellar Mass Function back to $z \sim 3$ " (査読有) 10.1088/0004-637X/702/2/1393
(15) Yamada, T., Kajisawa, M., Akiyama, M., Ichikawa, T. et al. 2009, ApJ, 699, 1354-1364 "MOIRCS Deep Survey III: Active Galactic Nuclei in Massive Galaxies at $z = 2-4$ " (査読有)

10.1088/0004-637X/699/2/1354

(16) Abazajian, K. N. Ichikawa, T. et al. 2009, ApJS, 182, 543-558 "THE SEVENTH DATA RELEASE OF THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY" (査読有)

10.1088/0067-0049/182/2/543

[学会発表] (計 10 件)

(1) 市川隆、高遠徳尚、本山秀明 他 「南極天文台の進捗状況」日本天文学会、2011年9月22日、鹿児島大学

(2) 市川隆、John Storey, Michael Ashley, Jon Lawrence, Daniel Luong-Van, 高遠徳尚 他 「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9月22日、鹿児島大学

(3) 高遠徳尚、市川隆 他 「南極大陸での可降水量調査」日本天文学会、2011年9月22日、鹿児島大学

(4) 小山拓也、市川隆、沖田博文 「南極昭和基地での第53次越冬隊による天文観測計画」日本天文学会、2011年9月22日、鹿児島大学

(5) 沖田博文、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9月22日、鹿児島大学

(6) 沖田博文、市川隆、高遠徳尚 他 「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9月22日、鹿児島大学

(7) 市川隆 他, 「銀河の表面質量密度の進化」日本天文学会、2011年3月16日、筑波大学

(8) Ichikawa, T., 2010, SCAR XXXI Open Science Conference, Aug., 3 (Buenos Aires, Argentina)

"Near-Infrared Survey at Dome Fuji "

(9) 市川隆 他, 「南極赤外線望遠鏡による観測計画」日本天文学会、2010年3月27日、広島大学

(10) 植田準子、市川隆 他 「MOIRCS Deep Survey による $z=0.81$ の $H\alpha$ 輝線銀河の検出」日本天文学会、2009年9月15日、山口大学

[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

笠羽 康正 (YASUMASA KASABA)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：10 295529

(3) 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：80 271857

(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

田口 真 (MAKOTO TAGUCHI)
立教大学・理学部・教授
研究者番号：70236404