

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25707009

研究課題名(和文) シリカで探る地球型惑星の巨大衝突の痕跡

研究課題名(英文) Search for Traces of Giant Impacts of Rocky Planets with Silica Feature

研究代表者

酒向 重行 (Sako, Shigeyuki)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90533563

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：地球型惑星は複数回の巨大衝突により質量を獲得すると考えられている。本研究では、高温高圧下でのみ生成されるシリカを巨大衝突のトレーサーと考え、若い系外惑星から放射されるシリカフィーチャ(波長 $10\mu\text{m}$)の形状と時間変化を観測することで巨大衝突の姿を探る。観測には視野合成機能により高い精度で $10\mu\text{m}$ 帯スペクトルを観測できる中間赤外線装置MIMIZUKUを用いる。本研究ではMIMIZUKUのセンサー部、光学系メカ部、視野合成部を開発するとともに、それらを真空冷却光学系内に組み込んでの統合試験を実施して装置を完成させた。また、MIMIZUKUをすばる望遠鏡に搭載しての分光監視観測の詳細な準備を行った。

研究成果の概要(英文)：A rocky planet acquires mass through multiple giant impact events. We consider silica, which is produced only under a high temperature and high pressure condition, as a tracer of the giant impacts and investigate the impact events by observing a shape and time variation of silica feature in 10 microns radiated from young exo-planets with the mid-infrared instrument MIMIZUKU. MIMIZUKU can obtain spectra in the 10-micron band with high accuracy by a field stacker unit. In this study, we have developed sensor units, opto-mechanical units, and the field stacker unit of MIMIZUKU and successfully completed integrated tests after assembling them into a vacuum dewar and an optical system. We also have planned spectroscopic monitoring observations with MIMIZUKU on the Subaru telescope.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：系外惑星 中間赤外線 観測装置 監視観測

1. 研究開始当初の背景

系外惑星研究は、高分散分光器 HARPS (Rupprecht+2004) とケプラー衛星 (Borucki+2011) の登場により、地球型惑星をターゲットとする新たな時代へと入った。特に HARPS チームが 2009 年に発表した「太陽型星の約 50% は 0.25AU 以内にスーパーアース (= 数倍の地球質量) を持つ」という中間報告は系外惑星研究の世界観を変えた (Mayor+2009)。この結果は、地球型惑星が銀河系に普遍的に存在することを示したと同時に、地球質量の数倍もあるスーパーアースを星の近くでいかに形成するかという新しい疑問を投げかけることになった。

惑星コアが地球の数倍以上の質量に達すると周囲のガスを暴走的に捕獲してガス惑星に成長する。岩石 (+ 氷) が主体のスーパーアースを作るにはガスの暴走的捕獲を避ける必要がある。Ida+2011 は理論的考察により、ガス円盤との相互作用で起きる型惑星移動現象により地球質量以下の岩石惑星がガス円盤の内縁へ移動・密集し、ガス円盤が消失した後に互いが衝突合体してスーパーアースが作られたと主張している。Ida+2011 の主張と HARPS チームの観測結果が正しければ、惑星系円盤の約半分において、ガス円盤が消失する進化段階に、0.1AU より内側で、岩石惑星どうしの巨大衝突が頻繁に発生すると考えられる。本研究ではシリカ (SiO_2) という鉱物に着目し、その中間赤外線フィーチャを観測することでスーパーアースの形成につながる岩石惑星の巨大衝突の痕跡を探ることを目的とする。

シリカは地球上では表面に露出する岩石の約 60% を占める一般的な鉱物である。しかし、シリカは高温高压下で形成されるため、星間空間における観測例は極めて少ない (Si の大部分はシリケートの形をとる)。地球上に見られるシリカの多くは原始地球のマグマオーシャンおよびその後のマグマ活動で形成されたと考えられている。近年、Spitzer 赤外線宇宙望遠鏡や AKARI 赤外線衛星により、若い星 (YSO) のダスト円盤や主系列星のデブリ円盤からシリカのフィーチャ (波長 $10 \mu\text{m}$) が検出された (e.g., Lisse+2009, 2012 図 1; Fujiwara+2012)。このシリカの起源については未だ結論が出ていないが、候補の 1 つに岩石惑星どうしの巨大衝突に起因するという説がある。衝突により高温高压となった地表付近でシリカが生成され、衝撃により惑星間空間へ放出された一部を観測しているというものである。我々はこの「シリカの惑星衝突起源説」と、最近の系外惑星研究が示した「0.25AU 以内のスーパーアースの偏在性」の間に重要な関連性があると考えている。

2. 研究の目的

地球型惑星は複数回の巨大衝突 (ジャイアントインパクト) により質量を獲得すると考え

られている。本研究では、これまで理論研究が中心だった巨大衝突の議論に対し、直接的な観測により新たな知見と制限を与えることを目的とする。高温高压下でのみ生成されるシリカを巨大衝突のトレーサと考え、若い系外惑星系から放射されるシリカフィーチャ (波長 $10 \mu\text{m}$) の形状と時間変化を観測することで巨大衝突の姿を探る。観測には我々が開発中の中間赤外線装置 MIMIZUKU を用いる。本研究では、中間赤外線装置 MIMIZUKU を完成させた後に、MIMIZUKU をすばる望遠鏡に搭載して YSO の星周円盤からの $10 \mu\text{m}$ 帯シリカフィーチャの高精度な監視観測を実施する。そして観測されるシリカフィーチャが「岩石惑星の巨大衝突」に起因することを示した後、「岩石惑星の表層の鉱物種」や「巨大衝突の規模や頻度」といったこれまでの系外惑星研究では観測されていない情報を得ることを目標にする。そして、近年発見が相次いでいるスーパーアースとの関連性について議論を進める。

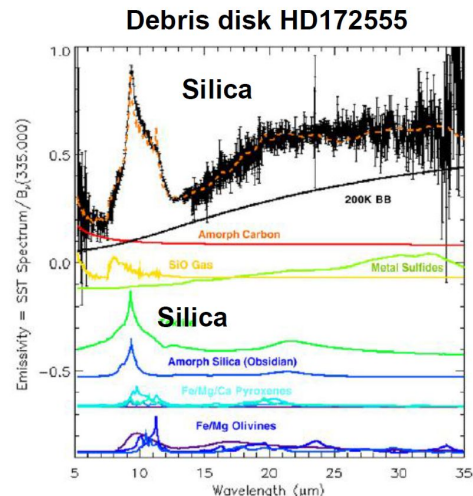


図 1. Spitzer 赤外線宇宙望遠鏡によりデブリ円盤 HD172555 から検出されたシリカフィーチャ (Lisse+2009)。

3. 研究の方法

本研究は中間赤外線装置 MIMIZUKU の開発と、それをすばる望遠鏡に取り付けて実施するシリカフィーチャの分光監視観測による観測的研究から構成される。

地上中間赤外線観測は大口径を活かした高解像度が利点であるが、地球大気の影響を多大に受けるため、監視観測に必要なとされる相対測光精度が典型的に数 10% と低いことが欠点であった。また、シリカフィーチャの位置する波長 $10 \mu\text{m}$ は地球大気のアオゾンバンドと重なるため、天体のスペクトルからシリカフィーチャを抽出することは難しい。そのため、既存の中間赤外線装置を用いては本研究の目標の達成は困難である。しかし、本研究では大気の影響を高精度に除去できる MIMIZUKU を開発して用いることで、この

問題を克服する(図 2)。MIMIZUKU は視野結合ユニットにより観測天体と同時に参照天体を撮像/分光観測できるため、数%の相対測光精度を達成できる装置である。この機能を持った観測装置は MIMIZUKU 以外に存在せず、本研究の科学的目標を達成できる唯一の観測装置と言える。まず、MIMIZUKU を開発拠点である東京大学天文学教育研究センター(東京都三鷹市)で完成させる。その後、国立天文台ハワイ観測所へ輸送し、性能試験を経たのちに、すばる望遠鏡に搭載して YSO やデブリ円盤からのシリカフィーチャの分光監視観測を開始する。シリカフィーチャの形状を複数回にわたり高精度に測定することで、岩石惑星の成長をもたらす巨大衝突や惑星の表層の状態に関する情報を得る。Spitzer、AKARI がシリカを検出した天体に加え、地上大型望遠鏡や IRAS、ISO 衛星のデータが存在する YSO やデブリ円盤の中から、シリカの兆候が見られる天体を初期の観測ターゲットとする。シリカフィーチャの形状や高精度に測定することで、結晶度や含有物を特定し、シリカが形成された時および現在の状況を明らかにする。また、天体によるシリカフィーチャの有無や形状の違いから、シリカが原始惑星どうしの巨大衝突に起因することを検証する。

4. 研究成果

最初に研究の柱の1つである中間赤外線装置 MIMIZUKU の開発に関してまとめる。本研究の開始時に MIMIZUKU の光学素子と真空冷却系は大部分が完成していたが、赤外線センサの読み出し系、光学系メカ部、視野結合ユニットは開発の初期段階(設計と製造期)にあった。MIMIZUKU は最終的に3台の赤外線センサ(2-5 μm 帯 HgCdTe 近赤外線センサ、7-24 μm 帯 Si:As 中間赤外線センサ、25-38 μm 帯 Si:Sb 長中間赤外線センサ)を搭載する計画であるが、本研究の完遂に必要な、近赤外線センサと中間赤外線センサの2システムの立ち上げを優先した。地上から赤外線観測を実施する場合、天体からの微弱な信号に、地球大気と望遠鏡からの強い背景光が加わる。そのため、センサが背景光により飽和する前に画像データを高速に読み出す必要がある。また、観測効率を向上させるために、連続的(動的)なデータの読み出しが要請される。そこで我々は、赤外線センサを高速かつ低ノイズで読み出すことが可能な、専用の読み出しシステムの開発を行った。近赤外線センサと中間赤外線センサは仕様が大きく異なるが、本研究で開発する読み出しシステムは両センサの読み出しが可能である。また、高速なアナログ信号を真空低温下で 2m 以上伝送するために、20K 環境で動作する FET バッファ回路の開発も行った(Okada+2016, 論文)。H25 から H26 年度に回路の性能試験と改修からなる開発サイクルを数度実施した後、H27 年度に中間赤外線センサを、H28 年度に近赤



図 2 中間赤外線観測装置 MIMIZUKU の全景

外線センサの駆動に成功した。極低温(20K 以下)にセンサを設置して実施した評価試験の結果、当初の設計性能を実現していることを確認した。並行して、フィルタホイールやビーム切り替え装置からなる光学系メカ部の開発も行った(図 3)。これらのユニットを極低温(20K 以下)に冷却した試験ベンチに設置し、再現性、速度、安定性などの駆動性能の評価と性能向上のための改修を繰り返し実施した。また、複数のユニットからなるメカ部を統合的に制御するためのソフトウェアも開発した。結果、H27 年度には、MIMIZUKU の真空冷却デュア内での駆動試験に成功した。MIMIZUKU が高い相対測光精度を達成する鍵をにぎる視野結合ユニット(常温部)の評価試験も進めた。レーザー変位計を用いて視野結合ユニットの回転併進駆動時の安定性を測定し、機械的なエラーが測光精度のエラーに及ぼす量を推定した。結果、目標としている相対測光精度 1%を実現することを数値シミュレーションにより確認した(Uchiyama+2016, 論文)。視野結合ユニットと MIMIZUKU 本体の統合試験は H27 年から H28 年にかけて実施し、光学的にも問題ないことが確認された。MIMIZUKU の全ユニットを統合した試験は H28 年度に実施され設計通りの性能が確認されたとともに、それらが統合ソフトウェアによって連携して効率よく動作す

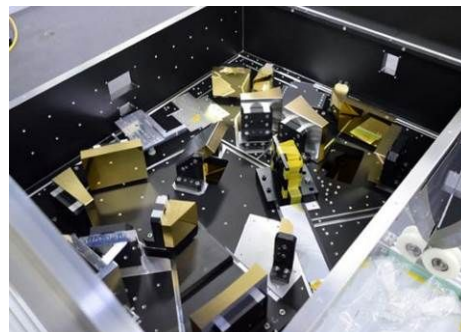


図 3 MIMIZUKU の光学系。20K に冷却される

ることを確認した。以上の MIMIZUKU の開発に関して H26 年と H28 年にカナダモントリオールとイギリスエジンバラでそれぞれ行われた天文観測装置の国際研究会 SPIE にて発表した (Kamizuka+2016, 論文, Kamizuka+2014, 論文)。また、日本天文学会や天文観測装置の研究会においても複数回の発表を行った。

もう一つの柱である MIMIZUKU を用いた YSO のシリカフィーチャの監視観測についてまとめる。MIMIZUKU による高精度観測は視野結合ユニットによる、ターゲット天体と参照天体の同時観測により実現される。したがって性質が良く (特異なフィーチャのない) 明るい参照天体がターゲット天体の近傍に位置することが重要となる。本研究の観測計画を立案するために、既存の赤外線全天カタログデータ (AKARI 衛星, IRAS 衛星, WISE 衛星) を用いて、良好で明るい参照星が見つかる確率を計算した。結果、波長 10 μm 帯では、ターゲットになりうる YSO が位置する領域 (= 銀河面) では、72% 以上の確率で参照天体が存在することがわかった (図 4)。次に、過去に中間赤外線にて取得した大気熱放射の時系列画像データをもちいて、その時間変化のスペクトルを評価した。結果、視野が 25 分角離れた視野間においても、その相対測光により精度 1% を達成することが計算から確認された (Uchiyama+2016, 論文)。以上により YSO のシリカフィーチャを監視観測する準備が整った。しかし、並行して進めていた国立天文台ハワイ観測所への MIMIZUKU の輸送とすばる望遠鏡のマシントイムの確保は、望遠鏡の運用上の複雑な情勢が影響し、交渉を円滑に進めることが困難であった。複数回の協議の末、現在、2017 年夏にハワイ観測所へ輸送、2018 年度にすばる望遠鏡に搭載した観測としたスケジュールで最終調整がなされている。従って、本研究期間に MIMIZUKU を用いた観測を実施することはできなかった。一方、交渉が停滞した期間を利用し、観測装置のより詳細な評価試験とソフトウェア開発を実施することができた。科学観測の準備としては、東工大の惑星形成の計算モデルの構

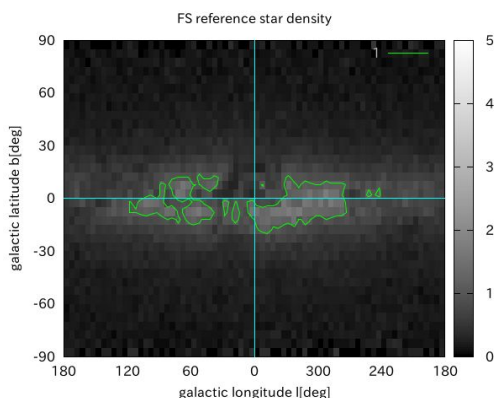


図 4. 全天の分光参照星の密度マップ。

築を進めている玄田氏とジャイアントインパクト現象に関して検討を進め、ジャイアントインパクトの痕跡が円盤回転をしても長期に一定位置にとどまる (位相が回転しない) ことを利用した新しい観測提案を生むことにつながった。今後、2017 年 9 月よりハワイ観測所にて MIMIZUKU の最終調整を行った後に、2018 年にすばる望遠鏡にて YSO のシリカフィーチャの監視観測を実施する計画である。MIMIZUKU は 2018 年に南米チリの標高 5,640m サイトに完成する東京大学アタカマ天文台 (TAO) 6.5m 望遠鏡の第 1 期観測装置になることが決定されている。我々は TAO 望遠鏡を用いて 2019 年ころから 10 年以上の長期に渡って、YSO のシリカフィーチャの監視観測を実施する予定である。MIMIZUKU による YSO の長期監視観測計画についてドイツで開かれた星惑星形成の国際研究会にて発表をおこなった (Sako+2013, 発表)。

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 9 件)

Kamizuka, T.; Miyata, T.; Sako, S.; Ohsawa, R.; Okada, K.; Uchiyama, M. S.; Mori, K.; Yamaguchi, J.; Asano, K.; Uchiyama, M.; Sakon, I.; Onaka, T.; Katata, H.; Hasegawa, S.; Usui, F.; Takato, N.; Aoki, T.; Doi, M.; Kato, N. M.; Kitagawa, Y.; Kobayakawa, Y.; Kohno, K.; Konishi, M.; Minezaki, T.; Morokuma, T.; Motohara, K.; Ohashi, H.; Soyano, T.; Takahashi, H.; Tamura, Y.; Tanabe, T.; Tanaka, M.; Tarusawa, K.; Terao, Y.; Yoshii, Y., Development status of the mid-infrared two-field camera and spectrograph MIMIZUKU for the TAO 6.5-m Telescope, Proceedings of the SPIE, 査読有、9908、10、2016

DOI: 10.1117/12.2231565

Nakamura, T.; Miyata, T.; Sako, S.; Kamizuka, T.; Asano, K.; Uchiyama, M.; Okada, K., A method for reducing atmospheric noise without chopping for ground-based mid-infrared observations, Proceedings of the SPIE, 査読有、9908、9、2016

DOI: 10.1117/12.2231996

Okada, K.; Sako, S.; Miyata, T.; Kamizuka, T.; Ohsawa, R.; Uchiyama, M. S.; Mori, K.; Yamaguchi, J.; Asano, K.; Uchiyama, M., Array controller system with cryogenic pre-amplifiers for MIMIZUKU, Proceedings of the SPIE, 査読有、9915、10、2016

DOI: 10.1117/12.2232532

Uchiyama, M. S.; Miyata, T.; Kamizuka, T.; Sako, S.; Ohsawa, R.; Okada, K.; Mori,

K.; Yamaguchi, J.; Asano, K.; Uchiyama, M., Development of an optical device (Field Stacker) for achieving accurate photometry in ground-based mid-infrared observations, Proceedings of the SPIE、査読有、9912、11、2016

DOI: 10.1117/12.2231283

Sakon, I.; Sako, S.; Onaka, T.; Nozawa, T.; Kimura, Y.; Fujiyoshi, T.; Shimonishi, T.; Usui, F.; Takahashi, H.; Ohsawa, R.; Arai, A.; Uemura, M.; Nagayama, T.; Koo, B.; Kozasa, T., Concurrent Formation of Carbon and Silicate Dust in Nova V1280 Sco, The Astrophysical Journal、査読有、817、23、2016

DOI: 10.3847/0004-637X/817/2/145

Honda, M.; Maaskant, K.; Okamoto, Y. K.; Kataza, H.; Yamashita, T.; Miyata, T.; Sako, S.; Fujiyoshi, T.; Sakon, I.; Fujiwara, H.; Kamizuka, T.; Mulders, G. D.; Lopez-Rodriguez, E.; Packham, C.; Onaka, T., High-resolution 25 μm Imaging of the Disks around Herbig Ae/Be Stars, The Astrophysical Journal、査読有、804、8、2015

DOI: 10.1088/0004-637X/804/2/143

Kamizuka, T.; Miyata, T.; Sako, S.; Imada, H.; Ohsawa, R.; Asano, K.; Uchiyama, M.; Okada, K.; Uchiyama, M.; Wada, T.; Nakagawa, T.; Nakamura, T.; Sakon, I.; Onaka, T., Development of high-throughput silicon lens and grism with moth-eye anti-reflection structure, Proceedings of the SPIE、査読有、9151、8、2014

DOI: 10.1117/12.2055756

Uchiyama, M.; Miyata, T.; Sako, S.; Kamizuka, T.; Nakamura, T.; Asano, K.; Okada, K.; Onaka, T.; Sakon, I.; Kataza, H.; Sarugaku, Y.; Kirino, O.; Nakagawa, Hi.; Okada, N.; Mitsui, K., Restraint deformation and corrosion protection of gold deposited aluminum mirrors for cold optics of mid-infrared instruments, Proceedings of the SPIE、査読有、9151、9、2014

DOI: 10.1117/12.2054917

Kamizuka, T.; Miyata, T.; Sako, S.; Ohsawa, R.; Asano, K.; Uchiyama, M.; Okada, K.; Uchiyama, M.; Nakamura, T.; Sakon, I.; Onaka, T.; Kataza, H.; Aoki, T.; Doi, M.; Kato, N. M.; Kawara, K.; Kitagawa, Y.; Kohno, K.; Konishi, M.; Koshida, S.; Minezaki, T.; Morokuma, T.; Motohara, K.; Soyano, T.; Takahashi, H.; Tamura, Y.; Tanabe, T.; Tanaka, M.; Tarusawa, K.; Tateuchi, K.; Todo, S.; Yoshii, Y., Revised specifications and current development status of MIMIZUKU: the mid-infrared instrument for the TAO 6.5-m telescope, Proceedings of the SPIE、査読有、9147、

11、2014

DOI: 10.1117/12.2056184

〔学会発表〕(計 7 件)

内山允史、中間赤外線観測装置 MIMIZUKU の開発状況と試験観測計画、日本天文学会、2017年3月18日、九州大学(福岡県福岡市)

山口淳平、中間赤外線観測装置 MIMIZUKU 用 5 μm -cutoff HAWAII-1RG 検出器の駆動試験、日本天文学会、2017年3月18日、九州大学(福岡県福岡市)

上塚貴史、東京大学アタカマ天文台中間赤外線観測装置 MIMIZUKU、日本天文学会、2016年3月15日、首都大学東京大学(東京都八王子市)

内山允史、中間赤外線高精度モニタリングに向けた二視野同時観測手法の開発、日本天文学会、2016年3月15日、首都大学東京大学(東京都八王子市)

上塚貴史、TAO 6.5m 望遠鏡用第一期中間赤外線観測装置 MIMIZUKU の開発進捗、日本天文学会、2015年3月20日、大阪大学(大阪府豊中市)

内山允史、中間赤外線高精度モニタリングに向けた TAO/MIMIZUKU 搭載 Field Stacker 機構の開発、日本天文学会、2015年3月20日、大阪大学(大阪府豊中市)

酒向重行、Mid-infrared Monitoring Observations of Circumstellar Disks with TAO/MIMIZUKU, Protostars and Planets VI、2013年7月15日、ハイデルベルク(ドイツ)

〔その他〕

中間赤外線装置 MIMIZUKU のウェブページ
<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/mimizuku/pub/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒向 重行 (SAKO, Shigeyuki)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：90533563

(4) 研究協力者

上塚 貴史 (KAMIZUKA, Takafumi)

内山 允史 (UCHIYAMA, Masahito)

山口 淳平 (YAMAGUCHI, Jumpei)