

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247017

研究課題名(和文)二視野同時観測による中間赤外線時間軸天文学の開拓

研究課題名(英文)Pioneering study of mid infrared time domain astronomy by newly developed simultaneous observing system

研究代表者

宮田 隆志 (Miyata, Takashi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：90323500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,200,000円

研究成果の概要(和文)：中間赤外線は星周空間にある円盤やシェル構造を知る上で最も重要な波長の一つである。近年、衛星望遠鏡によってこれら波長でも放射が時間的に変動する例が見つかってきた。これらは星周環境を知る上で重要であるが、以後観測は進んでいない。これは地上からの観測では大気変動が大きく、高精度のモニタリングができなかったためである。  
この状況を打開するため我々は中間赤外線用2視野同時観測システムを開発した。このシステムは望遠鏡の2つの視野を合成するものであり、天体と参照星を同時観測することでモニタ制度を格段に向上できるものである。本システムは既知の中間赤外線天体の99%(9 $\mu$ m)、60%(18 $\mu$ m)で利用できる。

研究成果の概要(英文)：Mid infrared is one of the most important wavelengths to study circumstellar disks and shells. Recent satellite telescopes have revealed that the mid-infrared radiations from those objects sometimes show strong time variation. It is very informative and interesting result, but the follow-up observations from the ground are quite difficult because of strong time variation of atmosphere in mid-infrared wavelengths.  
To overcome this situation a new "2-field simultaneous observing system" has been developed for mid-infrared observations. It is an optical device to combine two discrete fields in the telescope FoV into a single field and feed it into the astronomical camera. This device enables us to observe a science target and a reference star simultaneously, and improve the photometric accuracy dramatically.  
This system can be used for 99% and 60% of known mid-infrared objects at 9 and 18 micron, respectively.

研究分野：天文学

キーワード：赤外線天文学

## 1. 研究開始当初の背景

中間赤外線は 50-300K の温度領域をよくトレースし、また固体微粒子のスペクトル構造が多数存在することから、惑星円盤などの星周環境を探る上で重要な観測波長である。近年の衛星望遠鏡等の観測により、このような星周環境で時間変動を伴う現象が多数見つかり、原始惑星系円盤進化が従来想定よりも動的な現象である可能性が取りざたされている。しかしこのような時間変動現象を中間赤外線観測で系統的に観測することは容易ではない。衛星望遠鏡は観測精度が高く、微小な変動をとらえるのに優れたツールであるが、観測機会が限られており、また寿命も 3-5 年程度しかないため、観測できる変動は限られてしまう。実際、本研究の開始当初である平成 25 年時点では中間赤外線を観測できる衛星望遠鏡はない。(この状況は平成 29 年現在も同様)。これを補う意味で地上望遠鏡による観測は重要である。地上望遠鏡は観測機会・寿命の点で非常に優れており、長期にわたる観測や天体数を多くした系統的な研究を行うことが可能である。しかしながら従来の地上望遠鏡を用いた観測手法では大気変動の影響が大きく、時間変動現象をとらえることが非常に難しかった。

## 2. 研究の目的

本研究では上のような状況を鑑み、地上中間赤外線観測装置に光学システムを追加することで観測精度を格段に改善することを目指した。可視や近赤外線といった波長に比べ中間赤外線では時間変動を捉えにくいのは、中間赤外線波長では相対的に星数が減り、視野内に星が入らないため、視野内相対測光の手法が使えないからである。これを解消するには視野を広げるしかないが、背景光との関係もあり、また検出器が限られているので、そのまま視野を大きくすることは現実的ではない。そこで我々は離れた 2 視野を 1 つのカメラで観測できる光学システム (2 視野同時観測システム) を構築、中間赤外線カメラに乗せ、視野内相対測光を実現することを目指した。これは中間赤外線波長に時間軸天文学を開拓することに対応しており、惑星系円盤のみならず、超新星や変光星、太陽系内天体など多くの天体の観測においてブレイクスルーをもたらす開発である。

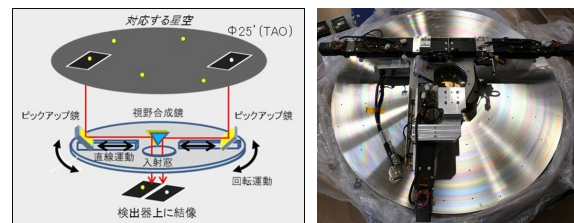
## 3. 研究の方法

上記目的を達成するため、本研究では 2 視野合成観測システムの構築を行った。またシステムの光学試験を実施し、目標性能である測光精度 1% がほぼ達成されることを確認した。加えて、測光精度を乱す原因である大気透過率の空間的差異についても実際のデータを

もとにした解析を行った。また、この 2 視野同時観測システムが実際に活用されるためには、望遠鏡視野内に複数の天体が入る必要がある。これがどの程度の天域で実現できるかを中間赤外全天カタログを用いて定量評価した。

## 4. 研究成果

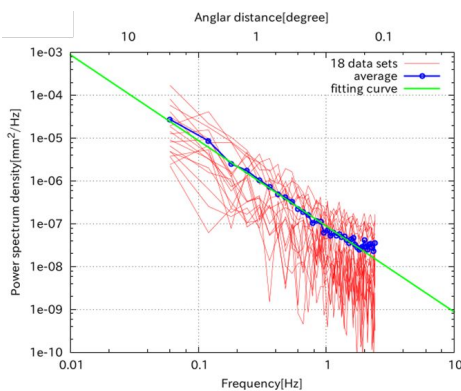
2 視野構成観測システムの概念図と写真を図に示す。



装置は回転ステージと 3 つのリニアステージからなっている。リニアステージ上の 2 つの平面鏡が視野をピックアップし、視野合成鏡に送りそれを検出器で結像する仕組みである。

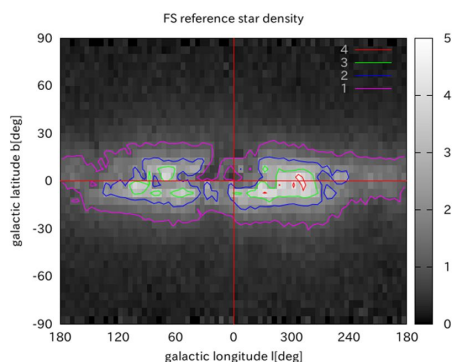
この 2 視野同時観測システムを用いて観測を行う場合に問題になるのは 2 つの視野間での瞳のずれである。赤外線望遠鏡では光学系の瞳は副鏡に置かれており、一般にその効率は視野によらず一定であるが、本システムを用いるとピックアップ鏡の設置ずれによって瞳がずれ、効率が変化する可能性がある。特に鏡の傾きの影響が大きく、光学計算によると 0.04 度の傾きで相対測光誤差が 2% 程度発生することになる。我々は調整及びソフトウェアの制御によってこの傾きを最も大きい場合で 0.25 度以下にすることに成功した。これは測光精度 1.2% に対応する。目標としていた測光精度 1% にわずかに届かないが、現状での測光精度 (おおよそ 10%) を大きく改善するものであり、おおむね満足できるものである。

上のような瞳ずれ起因の測光誤差の他に、2 視野同時観測システムでは大気吸収率の違いにも注意を払う必要がある。2 視野は天球の違う場所を見るため、その間の大気も厳密には違うパスを通ることになる。もし大気透過率に空間的差異があるとすると、2 視野間で透過率が異なり、これが最終的な測光誤差に影響する可能性がある。中間赤外線の大気吸収で最も効くのは水蒸気であるが、大気中の水蒸気の三次元分布は複雑であり、このような評価はなされていなかった。我々は東京大学アタカマ 1 m 望遠鏡の波長 30  $\mu\text{m}$  の撮像データを用いてこの評価を実施した。30  $\mu\text{m}$  帯は大気吸収が非常に強いので、微量の水蒸気量の変動もとらえることが可能である。解析の一例を次の図に示す。



この図は横軸が天球上の距離、縦軸がそこのパワーを示している。空間距離が大きくなるほどパワーが大きくなり、2視野間での水蒸気量の差異も大きくなっている。パワーはおおむね  $1/f$  に従っていることが分かる。大気モデルを用いてこれを解釈したところ、望遠鏡視野である 25 分角の範囲では水蒸気量は 1%程度しか変わらず、大気透過率の差異に直すと 0.1%程度の違いしか生まないことが明らかとなった。

また、本システムを用いて相対測光を行う場合、視野内に参照天体となる別の天体が 1つ以上あることが必須となる。これがどの程度の天域で達成されているかは、実際の観測計画を立案するうえでは不可欠な情報となる。我々はこれを、AKARI 衛星で得られた  $9\mu\text{m}/18\mu\text{m}$  の全天点源カタログをもとに見積もった。具体的には全天カタログに載っている天体のカラーから参照星を抽出し、その分布を中間赤外線天体の分布と比較した。結果、既知の中間赤外線天体を観測する場合、 $9\mu\text{m}$  で 99%、 $18\mu\text{m}$  で 60%の確率で参照天体を見つけることが可能であると示された。



これら 2 視野同時観測システムの開発評価に加え、搭載する中間赤外線カメラの整備改修も行い、実際に観測可能なシステムとして完成させることができた。研究最終年度にはすばる望遠鏡での試験観測の審査にも合格した。残念ながら研究期間内に観測的な成果は得られなかったものの、システム開発やそ

の評価を含め総合的な試験は実施でき、中間赤外線における時間軸天文学の実現にむけた準備を終えることに成功した。

また、これらに加えて、既存赤外線装置での観測によって時間変動天体の赤外線観測研究を進めた。ひとつは木星イオの中間赤外線モニタリング観測である。イオは太陽系で最も活動的な星の一つであり、表面では火山噴火活動が起きている。我々はイオの中間赤外線モニタリング観測を実施し、大規模な火山活動を捉えることに成功している。別の例としては大質量星のモニタリング観測も行い、電波波長で見られるメーザー源の変動との比較なども進めてきている。これらは非常に先駆的な成果であり、赤外線時間軸天文学の有用性を示す重要な成果であった。

## 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)

1. 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., Kataza, 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., and Yoshii, Y., Development status of the mid-infrared two-field camera and spectrograph MIMIZUKU for the TAO 6.5-m Telescope, SPIE, 9908, 99083W (2016) 10.1117/12.2231565 査読無し
2. Nakamura, T., Miyata, T., Sako, S., Kamizuka, T., Asano, K., Uchiyama, M., and Okada, K., A method for reducing atmospheric noise without chopping for ground-based mid-infrared observations, SPIE, 9908, 99082U (2016) 10.1117/12.2231996 査読無し
3. Okada, K., Sako, S., Miyata, T., Kamizuka, T., Ohsawa, R., Uchiyama, M.S., Mori, K., Yamaguchi, J., Asano, K., and Uchiyama, M., Array controller system with cryogenic pre-amplifiers for MIMIZUKU, SPIE, 9915, 991527 (2016) 10.1117/12.2232532 査読無し

4. Uchiyama, M.S., Miyata, T., Kamizuka, T., Sako, S., Ohsawa, R., Okada, K., Mori, K., Yamaguchi, J., Asano, K., and Uchiyama, M., Development of an optical device (Field Stacker) for achieving accurate photometry in ground-based mid-infrared observations, SPIE, 9912, 99125N (2016) 10.1117/12.2231283 査読無し
5. Mori, K., Miyata, T., Honda, M., Kamizuka, T., Takahashi, H., Sako, S., Ohsawa, R., Okada, K., Uchiyama, M. S., Kataza, H., Ohsaki, H., Hiroe, T., and Packham, C., Development of superconducting voice coil motor of a cold chopper for MICH1, SPIE, 9912, 991218 (2016) 10.1117/12.2231889 査読無し
6. 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., and Onaka, T., High-resolution 25 $\mu$ m Imaging of the Disks around Herbig Ae/Be Stars, ApJ, 804, 143 (2015) 10.1088/0004-637X/804/2/143 査読あり
7. Morokuma, T., Tominaga, N., Tanaka, M., Mori, K., Matsumoto, E., Kikuchi, Y., Shibata, T., Sako, S., Aoki, T., Doi, M., Kobayashi, N., Maehara, H., Matsunaga, N., Mito, H., Miyata, T., Nakada, Y., Soyano, T., Tarusawa, K., Miyazaki, S., Nakata, F., Okada, N., Sarugaku, Y., Richmond, M. W., Akitaya, H., Aldering, G., Arimatsu, K., Contreras, C., Horiuchi, T., Hsiao, E.-Y., Itoh, R., Iwata, I., Kawabata, K.-S., Kawai, N., Kitagawa, Y., Kokubo, M., Kuroda, D., Mazzali, P., Misawa, T., Moritani, Y., Morrell, N., Okamoto, R., Pavlyuk, N., Phillips, M. M., Pian, E., Sahu, D., Saito, Y., Sano, K., Stritzinger, M. D., Tachibana, Y., Taddia, F., Takaki, K., Tateuchi, K., Tomita, A., Tsvetkov, D., Ui, T., Ukita, N., Urata, Y., Walker, E. S., and Yoshii, T., Kiso Supernova Survey (KISS): Survey strategy, PASJ, 66, 114 (2014) 10.1093/pasj/psu105 査読あり
8. Tanaka, M., Morokuma, T., Itoh, R., Akitaya, H., Tominaga, N., Saito, Y., Stawarz, L., Tanaka, Y. T., Gandhi, P., Ali, G., Aoki, T., Contreras, C., Doi, M., Essam, A., Hamed, G., Hsiao, E. Y., Iwata, I., Kawabata, K. S., Kawai, N., Kikuchi, Y., Kobayashi, N., Kuroda, D., Maehara, H., Matsumoto, E., Mazzali, P. A., Minezaki, T., Mito, H., Miyata, T., Miyazaki, S., Mori, K., Moritani, Y., Morokuma-Matsui, K., Morrell, N., Nagao, T., Nakada, Y., Nakata, F., Noma, C., Ohsuga, K., Okada, N., Phillips, M.-M., Pian, E., Richmond, M.W., Sahu, D., Sako, S., Sarugaku, Y., Shibata, T., Soyano, T., Stritzinger, M. D., Tachibana, Y., Taddia, F., Takaki, K., Takey, A., Tarusawa, K., Ui, T., Ukita, N., Urata, Y., Walker, E. S., and Yoshii, T., Discovery of Dramatic Optical Variability in SDSS J1100+4421: A Peculiar Radio-loud Narrow-line Seyfert 1 Galaxy?, ApJ, 793, L26 (2014) 10.1088/2041-8205/793/2/L26 査読あり
9. 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., and Onaka, T., Development of high-throughput silicon lens and grism with moth-eye anti-reflection structure, SPIE, 9151, 91515G (2014) 10.1117/12.2054917 査読無し
10. 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, H., Okada, N., and Mitsui, K., Restraint deformation and corrosion protection of gold deposited aluminum mirrors for cold optics of mid-infrared instruments, SPIE, 9151, 915143 (2014) 10.1117/12.2055756 査読無し
11. 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., and Onaka, T., Development of high-throughput silicon lens and grism with moth-eye anti-reflection structure, SPIE, 9151, 91515G (2014) 10.1117/12.2056184 査読無し
12. Yoneda, M., Miyata, T., Tsang, C.C.C., Sako, S., Kamizuka, T., Nakamura, T., Asano, T., Uchiyama, M., Okada, K., Hayashi, Y., Yoshii, Y., Kagitani, M., Sakanoi, T., Kasaba, Y., and Okano, S., Mid-infrared observations of Io's

volcanism from the ground in 2011 and 2012, Icarus, 236, 153 (2014)  
10.1016/j.icarus.2014.01.019 査読あり

〔学会発表〕(計 9 件)

1. 山口淳平、中間赤外線観測装置 MIMIZUKU 用  $5\ \mu\text{m}$ -cutoff HAWAII-1RG 検出器の駆動試験、日本天文学会、2017年3月16-18日、九州大学(福岡県福岡市)
2. 内山允史、中間赤外線装置 MIMIZUKU の開発状況と試験観測計画、日本天文学会、2017年3月16-18日、九州大学(福岡県福岡市)
3. 宮田隆志、TAO 中間赤外線観測による dustiest evolved stars の観測計画、日本天文学会、2016年3月14-17日、首都大学東京(東京都八王子市)
4. 上塚貴史、TAO 中間赤外線観測によるミラ型変光星のダスト形成モニタリング観測、日本天文学会、2016年3月14-17日、首都大学東京(東京都八王子市)
5. 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14-17日、首都大学東京(東京都八王子市)
6. 上塚貴史、中間赤外線二視野同時撮像分光装置 MIMIZUKU の開発進捗と運用計画、日本天文学会、2015年9月9-11日、甲南大学(兵庫県神戸市)
7. 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18-21日、大阪大学(大阪府大阪市)
8. 内山瑞穂、メタノールレーザーの強度変動を伴う天体 MonR2-IRS3 の近赤外線モニター観測、日本天文学会、2014年9月11-13日、山形大学(山形県山形市)
9. 本原顕太郎、TAO6.5m 望遠鏡用第一期観測装置 SWIMS MIMIZUKU の開発進捗、日本天文学会 2013年9月10日-12日、東北大学(宮城県仙台市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮田 隆志 (MIYATA, Takashi)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号：90323500

### (2) 研究協力者

上塚 貴史 (KAMIZUKA, Takafumi)  
東京大学・大学院理学系研究科・研究員  
研究者番号：20613509