

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340037

研究課題名(和文) イマージンググレーティング分光器を用いた星間分子のラインサーベイ観測

研究課題名(英文) Line survey observation of interstellar molecules by immersion grating spectrograph

研究代表者

平原 靖大 (Hirahara, Yasuhiro)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：30252224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円

研究成果の概要(和文)：中間赤外線(N band:波長 8～13 μm) を観測域とする冷却エシエル分光観測装置GIGMICS (Germanium Immersion Grating Mid-Infrared Cryogenic Spectrograph)をすばる望遠鏡などの国外の光学赤外望遠鏡に搭載し、星間分子の振動回転スペクトルを分解能(R 40000)で観測するために必要な、GIGMICS本体および周辺装置に関する以下の開発を行った：(1)可動架台(2)光軸調整用可搬型外部光学系(3)4つの分光スリットミラー(4)波長校正用低圧ガスセル(5)エシエルフォーマット解析用ソフト(6)スペクトル解析用放射伝達コード。

研究成果の概要(英文)：We developed a Germanium Immersion Grating Mid-Infrared Cryogenic Spectrograph (GIGMICS), which operates at N-band (8-13 μm in wavelength ) with maximum resolving power  $R$  ( / ) 40,000. In order to conduct the line survey observation by GIGMICS equipped with optical/infrared telescopes in abroad, further design and development were made for the followings: (1) adjustable stage, (2) external optical system for optical alignment, (3)4 additional spectral slit mirrors, (4)low-pressure gas cell for wavelength calibration, (5)software for the analysis of echelle format, and (6)radiative transfer code for spectral analysis. By the observed spectral data for Venus by the first light observation of GIGMICS in 2011 equipped with the Kanata 1.5-m telescope, we clarified the isotopic fractionation of  $^{13}\text{C}$  in  $\text{CO}_2$  in the Venusian atmosphere. We also clarified the velocity structure of the ambient cloud of the Planetary nebula NGC7027 by the emission line of [SIV] observed by GIGMICS.

研究分野：星間化学

キーワード：宇宙化学 星間分子 イマージンググレーティング 中間赤外線 振動回転スペクトル 短寿命分子

## 1. 研究開始当初の背景

希薄な宇宙空間に見出される星間分子に関する研究は宇宙における物質循環や進化を知る上で重要である。観測によってこれまでに発見された星間分子は 140 種を超え、その多くは星間化学反応の中間体であり、短寿命なラジカルやイオンであることが明らかにされた。これらは従来主としてセンチ波、ミリ波領域の回転スペクトルによって観測されてきたが、この方法では研究の対象が双極子モーメントをもつ化学種に限られる。双極子モーメントをもたない分子種は、赤外領域の振動スペクトルによって観測が可能である。とりわけ、中間赤外線領域(N-band, 波長 8~13  $\mu\text{m}$ )は有機物の多様な官能基の振動に伴う遷移が現れるため指紋領域と呼ばれ、分光分析に際して、炭素骨格の構造決定に用いられる有用なバンドである。また、各種珪酸塩における Si-O 骨格振動モードもこの領域に現れ、鉱物もしくは非結晶の固体珪酸塩の構造に関する豊富な情報をもたらす。しかしながら、これまでの赤外線領域での分光観測では、30 種程度の分子が検出されているにすぎず、その多くは電波領域の回転スペクトルで先に確認されている。赤外観測のみで検出されたものは 10 種類以下である。このように過去の研究例が少ない最大の理由は、星間分子の高分散分光観測に用いることの出来る赤外線高分散分光器が国内外においてきわめて少ないことにある。

## 2. 研究の目的

赤外線領域の振動遷移によって星間分子の探査観測を行う場合には、スペクトルの回転構造を分離して観測することがスペクトル線の帰属、分子種の同定、励起温度や柱密度などのパラメータの導出上、本質的に重要である。スペクトル線の回転構造は、分子の慣性モーメントと分子骨格構造を反映し、幅広い波長範囲(典型的に 0.1~1  $\mu\text{m}$ )に展開するため、これらを一挙に観測し、その回転構造の特徴をみることで、分子種の特定や遷移の帰属が可能である。一方、星間空間からの分子スペクトルは分子ガスの速度分散( $v$ )の視線方向成分により固有の広がりを持つので、観測に用いる分光器の波長分解能  $R = \lambda / \Delta\lambda$  は  $c / v$  ( $c$ :光速)の 2 倍以上が要求される。従来の電波観測から、典型的な  $c / v$  は晩期型周辺大気に対して 10,000~

15,000、星形成領域に対して 15,000~150,000 であることが知られている。これまで、星間分子の赤外スペクトル探査に適した中間赤外線領域での高分散分光器は希少で、国内には存在しなかった。

申請者は、中間赤外線領域における星間分子の観測研究を進展させ、新しい星間分子の検出と、星間化学反応プロセスの解明を目指すために、ゲルマニウムイマージョングレーティングを用いた冷却エシェル分光器(GIGMICS: Germanium Immersion Grating Mid-Infrared Cryogenic Spectrograph)を開発した。今後、GIGMIC を国立天文台すばる望遠鏡をはじめとする大口径の赤外望遠鏡に設置することにより、中間赤外線領域(N-band, 波長 8~13  $\mu\text{m}$ )全域に対する星間分子のスペクトル線サーベイを行うことを計画してきた。

## 3. 研究の方法

我々は、2010 年 12 月末から 2011 年 4 月末までの期間、広島大学宇宙科学センター附属・東広島天文台 1.5m 望遠鏡(かなた望遠鏡)の赤外ナスマス焦点台に設置のうえ、ファーストライト観測を行った。東広島天文台ドーム施設の仕様上の制約により、運搬後の GIGMICS の内部光学系の調整などを行うことは不可能であった。高い波長分散能力を有する GIGMICS の内部光学系は、イマージョングレーティングによって分散した後の焦点位置に固定した開口径 1mm のオリフィスに、光入射窓と分光スリットを経由した中間赤外単色光が通るように精密調整する必要がある。望遠鏡との光軸合わせを短時間で行うための小型の調整専用光学系の開発、幅広い波長範囲にわたる波長更正法の確立、および、装置全体の位置を微調整可能な可動ステージの設計と製作が必須である。また、様々な望遠鏡への搭載を行う上で、天体の明るさとスペクトルの分解に必要な波長分解能を選択可能にするような分光スリットの装着が有効である。本研究においては、これらの開発とその性能評価を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 可動架台の製作

30K 冷却下で動作させる GIGMICS の光学系全体は、直径約 1m, 高さ約 1.4m, 重さ約 1ton のクライオスタットに格納される。実際の観測を行うためには、望遠鏡焦点はこのクライオスタット内部のコールドストップに合わせる必要があるが、その調整作業は迅速かつ短時間に行う必要があること、また、他の既設の観測装置の観測時間には退避させる可

性能があることから、可搬式の GIGMICS 専用架台の詳細な設計と製作を行った。完成した架台の 3D 図面を図 1 に示す。合計 5 つの自由度(光軸方向の焦点位置の移動は望遠鏡副鏡パラメータにより調整する)に対して、可動範囲  $\pm 5\text{mm}$ 、が確保されていて、調整後の位置のロック機構、およびメモリー機構を有している。また、望遠鏡ドーム内での運搬・組み立てを容易とするために、構造材には汎用のアルミフレームを用いた。

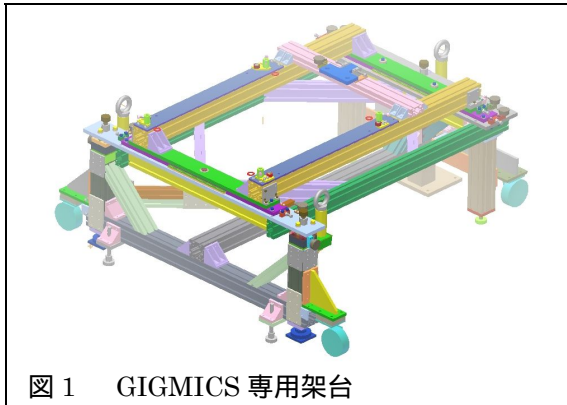


図 1 GIGMICS 専用架台

### (2)GIGMICS 外部光学系の開発

量子カスケードレーザー(QC レーザー)、高速 CCD カメラ、落射照明用 NG:YAG レーザー光源や各種レンズ、ミラーホルダーを購入し、これらを組み合わせた GIGMICS 専用の光軸調整用外部光学系を新規に設計、開発した。QC レーザーはペルチェ冷却のみで波長  $10.3\ \mu\text{m}$  での狭帯域(0.005nm)かつ安定な発振が可能であり、そのパワーも必要充分(10mW)であった。すばる望遠鏡の場合、赤外ナスマス焦点における F/13.9 収束光を GIGMICS 内部の冷却視野絞り(4.5mm $\phi$ , T $\sim$ 30K)に結像させるべく、GIGMICS は望遠鏡にきわめて近接して( $\sim$ 20cm)設置する。そこで本研究において、望遠鏡と装置の間隙に挿入して用いる着脱可能な外部光学系を開発した(図 2)。この光学系は以下の機能を持つ：(1) 可視レーザー光を用いた光軸の確認 (2) GIGMICS 内部の落射照明 (3) スリットビューアおよび瞳ビューア (4) 波長校正用ガスセルの搭載 (5)GIGMICS 内部光学系の調整用の QC レーザーの搭載。ビデオカメラビューアによりリアルタイムモニタが可能になったことにより、高地にある望遠鏡における光軸調整作業の効率化と安全化が達成可能となった。

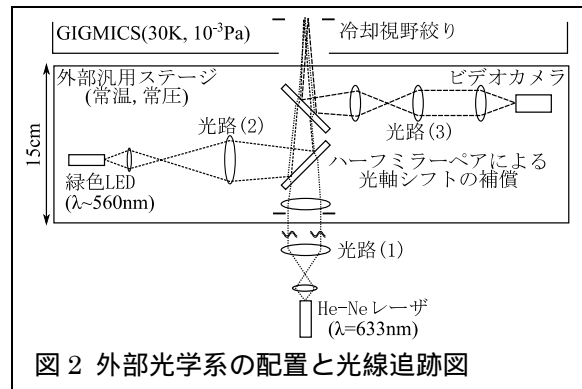


図 2 外部光学系の配置と光線追跡図

### (3)GIGMICS 内部前置光学系の改良

本研究において、国立天文台すばる望遠鏡、およびその他の様々な望遠鏡に GIGMICS を搭載可能にすべく、GIGMICS の前置光学系の改造を行った。構成するミラー、レンズなどは確実な冷却のためにすべて自作のアルミニウム削り出しのホルダに固定する必要があり、物理的干渉が起きない配置と固定法を検討の上、調整用スペーサによって  $5\ \mu\text{m}$  の位置精度で調整を行った。光学設計ソフトを用いて Subaru/GIGMICS 光学系のシミュレーションを行い、分光用スリット部分の再設計と製作・評価を行った。GIGMICS のスリットはリボルバに格納され、モーター駆動によって適切なスリットを選択できる。既存の 2 種類のスリットに加えて、名古屋大学装置開発室のワイヤー放電加工機により、波長分解能  $R = \lambda/\Delta\lambda$  および分光視野角  $\theta$  を  $(R, \theta)=(5,800, 2''.8)$ 、 $(11,600, 1''.4)$ 、 $(23,200, 0''.7)$  および  $(46,300, 0''.35)$  の計 4 種類を新たに製作した(図 3)。これにより、星雲の空間的な拡がり、および速度構造に最適な波長分解能と視野角を選択可能で、スペクトル線サーベイや微細構造のマッピングが可能となった。

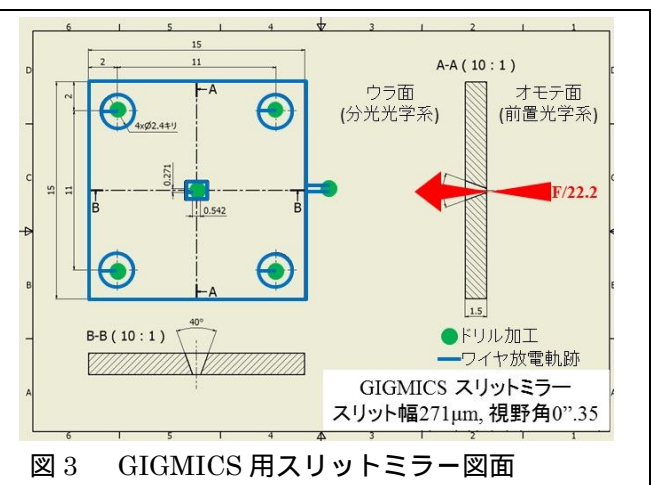


図 3 GIGMICS 用スリットミラー図面

#### (4) 波長校正用低圧ガスセルの製作

グレーティング型分光器である GIGMICS は原理上波長校正が必須であり、従来は O-ring シールタイプのガスセルを自作のうえ、分光器の性能評価に用いてきた。赤外線領域での振動回転遷移の圧力拡がりの影響を抑えるためには、相応の真空度を保つ必要があるが、これまで製作したガスセルではほぼ 1 日で圧力上昇が見られ、真空ポンプなどを用いて逐次圧力調整を行う必要があった。観測波長域において多数の吸収線を持つ NH<sub>3</sub> ガスセルが有効であるが、実際の観測サイトにおいて、真空排気システムなどを用いてガスセルを逐次セットアップすることは事実上不可能である。そこで、GIGMICS の観測波長：N-band 全域を網羅するスペクトル標準として、温度調節可能な CH<sub>4</sub> + NH<sub>3</sub> 低圧(~10mTorr)封入混合ガスセルの設計と製作および継続耐用試験を行った。試行錯誤の結果、最終的に良好な性能を満たしたガスセルの図面を図 3 に示す。ガスセル本体はパイレックスガラス製で、窓材は ZnSe を採用し、2 種類の異なる真空シール接着材を併用することで良好な真空保持性能を得た。透過率の高い BaF<sub>2</sub> はパイレックスガラスとの熱伝導率の違いが大きく、接着後 1 週間で破壊する現象が見られた。製作したガスセルは約半年間、封入時の圧力 10mTorr を保持し、GIGMICS の波長校正に運用する。

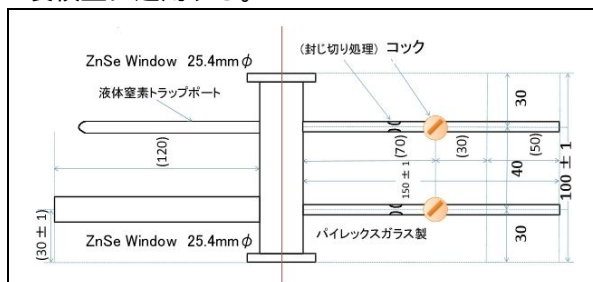


図 4 波長校正用ガスセル

#### (5) 金星大気中層における CO<sub>2</sub> の炭素同位体異常の発見

2011 年春に東広島天文台のかなた望遠鏡(主鏡口径 1.5m)のナスミス焦点台に GIGMICS を設置のうえ行ったファーストライト観測の詳細なデータ解析を行った。観測生データはクロスディスペルザーにより折り返された画像データ(エシェルフォーマット)であり、スペクトルデータの抽出のための解析プログラムの開発を行った。図 5 に得られたスペクトルチャー

トを示す。

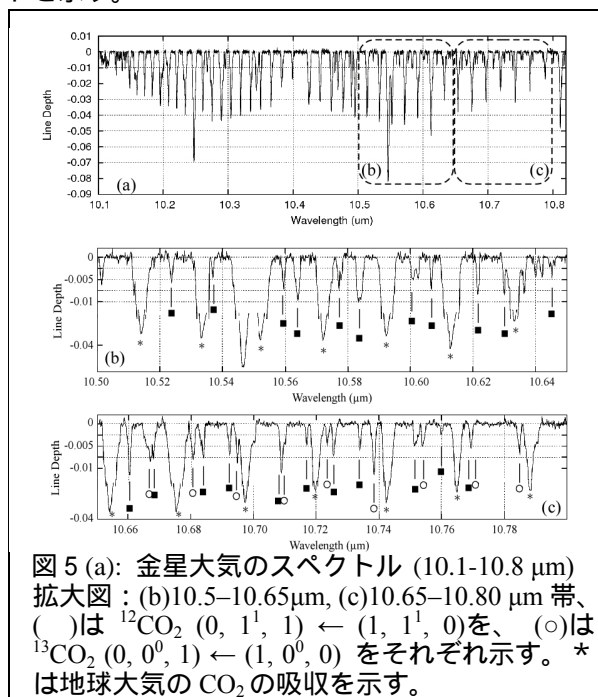


図 5 (a): 金星大気のスเปクトル (10.1-10.8  $\mu\text{m}$ ) 拡大図: (b)10.5-10.65 $\mu\text{m}$ , (c)10.65-10.80  $\mu\text{m}$  帯、( )は  $^{12}\text{CO}_2$  (0, 1<sup>1</sup>, 1)  $\leftarrow$  (1, 1<sup>1</sup>, 0)を、(o)は  $^{13}\text{CO}_2$  (0, 0<sup>0</sup>, 1)  $\leftarrow$  (1, 0<sup>0</sup>, 0) をそれぞれ示す。\* は地球大気 CO<sub>2</sub> の吸収を示す。

これらの金星に対するスペクトルの帰属を行ったところ、金星大気中層からの  $^{12}\text{CO}_2$  および  $^{13}\text{CO}_2$  の振動回転遷移線を多数検出した。また、金星大気分子および雲粒子による光吸収を考慮した放射伝達コードを開発し、それによって計算したモデルスペクトルと観測データとの最小二乗フィットを行い、 $^{12}\text{CO}_2$  /  $^{13}\text{CO}_2$  同位体比を求めた。その結果、雲頂高度付近における  $^{12}\text{CO}_2$  /  $^{13}\text{CO}_2$  比は  $165 \pm 30$  と決定された。これは金星下層大気と同位体比と比較しても高い値であり、金星大気における CO<sub>2</sub> の光解離を起源とする同位体分別の過程の存在を示すことに成功した。

#### (6) 惑星状星雲 NGC7027 おける [S IV] 禁制線の高分解能分光観測

GIGMICS のファーストライト観測において観測した、非常に若い惑星状星雲 NGC7027 のスペクトルの詳細な解析を行った。その結果、硫黄の 3 階電離イオン S<sup>3+</sup>の Laporte 禁制遷移輝線: [S IV] (<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub> <sup>2</sup>P<sub>1/2</sub>)、静止波長 10.5105  $\mu\text{m}$  の高分散スペクトルの取得に成功した(図 6)。[S IV]の中心波長は 10.510005(23)  $\mu\text{m}$ (括弧内は 1 )、その半値全幅は 0.0008  $\mu\text{m}$  と求められた。この輝線幅から導かれる、[S IV]プラズマの視線方向の速度  $V_{\text{lsr}}$  は 22 km/sec に相当する。これは NGC7027 の星周ガス外縁部の、CO の純回転遷移の観測で得られた値:20 km/sec と調和的である。過去の観測では[S IV]のスペクトルは分解されておらず、その輝線形状に関する知見は本研究が初である。

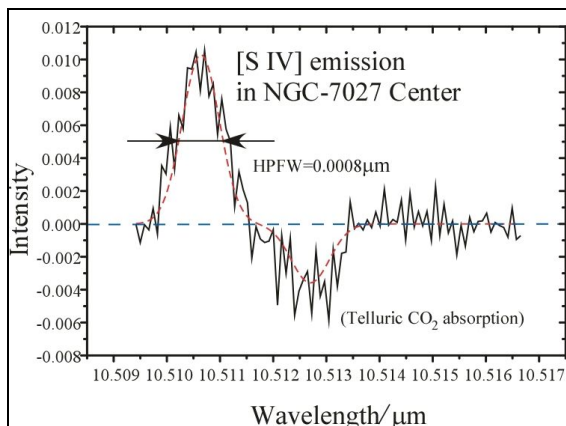


図 6 NGC-7027 における S[IV] の発光線。地球大気の  $^{12}\text{CO}_2$  ( $0, 0^0, 1$ )  $\leftarrow$  ( $1, 0^0, 0$ ) P(12) 振動回転遷移の吸収が  $10.5125 \mu\text{m}$  に現れる。

### 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 12 件)

(1) N. Ebizuka, M. Sekine, K. Ishikawa, H. Kondo, M. Hori, M. Sasaki, A. Bianco, F. M. Zerbi, Y. Hirahara & W. Aoki, "Novel diffraction gratings fabricated by means of plasma nanotechnologies", Proceedings of SPIE, 8450, 84502Y.1-7, 2012.

(2) Y. Hirahara, K. Aoki, K. Ohta, S. Shibata, T. Hirao, Y. Tatamitani, N. Ebizuka, K. S. Kawabata, M. Yoshida, M. Uemura, T. Oosugi, K. Kawaguchi, R. Fujimori, H. Ohiwa & H. Nagahiro, "First light observation of GIGMICS (germanium immersion grating mid-infrared cryogenic spectrograph) by Kanata 1.5-m Telescope at Higashi-Hiroshima Observatory", Proceedings of SPIE, 8446, 84463Y.1-13, 2012

(3) Y. Sarugaku, Y. Ikeda, N. Kobayashi, T. Sukegawa, S. Sugiyama, K. Enya, H. Kataza, H. Matsuhara, T. Nakagawa, H. Kawakita, S. Kondo, Y. Hirahara & C. Yasui, "Development of CdZnTe immersion grating for spaceborne application", Proceedings of SPIE, 8442, 844257.1-11, 2012

(4) 平原靖大, ゲルマニウムイマージョングレーティングを用いた中間赤外線エシエル分光観測装置の開発, 日本赤外線学会誌 23(1), 38-47, 2013

(5) K. Kawaguchi, R. Fujimori, J. Tang, and T. Ishiwata, "FTIR Spectroscopy of  $\text{NO}_3$ : Perturbation Analysis of the  $\nu_3+\nu_4$  State", The Journal of Physical Chemistry A, 117(50) 13732-13742, 2013

(6) P. Sebald, R. Oswald, P. Botschwina and K. Kawaguchi, "Rovibrational states of  $\text{ClHCl}^-$  isotopologues up to high J: a joint theoretical and spectroscopic investigation", Physical Chemistry Chemical Physics, 15, 6737-6748, 2013

(7) N. Ebizuka, S. Morita, Y. Yamagata, M. Sasaki, A. Bianco, A. Tanabe, N. Hashimoto,

Y. Hirahara, W. Aoki, "Birefringence Bragg Binary (3B) grating, quasi-Bragg grating and immersion gratings", Proceedings of SPIE, 9151, 91515C.1-9, 2014

(8) T. Iino, Y. Hirahara, T. Hidemori, T. Tsukagoshi, T. Nakajima, S. Nakamoto, C. Kato, "Observational constraint on Pluto's atmospheric CO with ASTE", Publ. Astron. Soc. Japan, 68(1), 1-5, 2016

(9) K. Kawaguchi, R. Fujimori, J. Tang, T. Ishiwata, "On the vibrational assignment in the ground electronic state of  $\text{NO}_3^-$ ", Journal of Molecular Spectroscopy, 314, 73-78, 2015

(10) W. Chen, K. Kawaguchi, P. F. Bernath and J. Tang, "Simultaneous analysis of the Ballik-Ramsay and Phillips systems of  $\text{C}_2$  and observation of forbidden transitions between singlet and triplet states", The Journal of Chemical Physics, 142(6), 64317, 2015

(11) W. Chen, K. Kawaguchi, P. F. Bernath, J. Tang, "Study of infrared emission spectroscopy for the  $\text{B}_1\Delta_g - \text{A}_1\Pi_u$  and  $\text{B}'_1\Sigma_g^+ - \text{A}_1\Pi_u$  systems of  $\text{C}_2$ ", The Journal of Chemical Physics, 144, 64301, 2016

(12) W. Chen, K. Kawaguchi, P. F. Bernath, J. Tang, "Publisher's Note: "Study of infrared emission spectroscopy for the  $\text{B}_1\Delta_g - \text{A}_1\Pi_u$  and  $\text{B}'_1\Sigma_g^+ - \text{A}_1\Pi_u$  systems of  $\text{C}_2$ " [J. Chem. Phys. 144, 064301 (2016)]", The Journal of Chemical Physics, 144 99901, 2016

[学会発表](計 22 件)

(1) 平原靖大, 青木慶伸, 太田香菜子, 柴田将, 平尾強司, 豊谷仁男, 海老塚昇, 吉田道利, 川端弘治, 植村誠, 大杉節, 川口建太郎, 藤森隆彰, 大岩宏紀, 永廣久幸, "中間赤外線高分散分光観測装置 GIGMICS のファーストライト観測", 分子分光研究会 2012 年 5 月 18 日, 上智大学 四谷キャンパス

(2) 青木慶伸, 柴田将, 太田香菜子, 平原靖大 "GIGMICS を用いた NGC7027 における [S IV] 禁制線の観測", 分子分光研究会 2012 年 5 月 18 日, 上智大学 四谷キャンパス

(3) 柴田将, 青木慶伸, 太田香菜子, 平原靖大 "GIGMICS による金星大気中の  $\text{CO}_2$  の振動回転スペクトルの観測", 分子分光研究会 2012 年 5 月 18 日, 上智大学

(4) 海老塚昇, 堀勝, 平原靖大, 佐藤修二, 小館香椎子, 市川隆, 川端弘治, 大森整, 青木和光, 家正則, Andrea Bianco, Fillippo Maria Zerbi, "高分散分光用の回折格子" 分子分光研究会 2012 年 5 月 18 日 上智大学

(5) Sarugaku, Y., Ikeda, Y., Kobayashi, N., Sukegawa, T., Sugiyama, S., Enya, K., Kataza, H., Matsuhara, H., Nakagawa, T., Kawakita, H., Kondo, S., Hirahara, Y., and Yasui, C., "Development of CdZnTe immersion grating for spaceborne application", on Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, 2012 年 6 月 1 日, アムステルダム

(6) Y. Hirahara, K. Aoki, K. Ohta, S. Shibata, T. Hirao, Y. Tatamitani, N. Ebizuka, K. S.

Kawabata, M. Yoshida, M. Uemura, T. Oosugi, K. Kawaguchi, R. Fujimori, H. Ohiwa & H. Nagahiro, "First light observation of GIGMICS (germanium immersion grating mid-infrared cryogenic spectrograph) by Kanata 1.5-m Telescope at Higashi-Hiroshima Observatory", SPIE conference on Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, 2012年6月1日、オランダ、アムステルダム

(7) Ebizuka, N., Sekine, M., Ishikawa, K., Kondo, H., Hori, M., Sasaki, M., Bianco, A., Maria Zerbi, F., Hirahara, Y. & Aoki, W., "Novel diffraction gratings fabricated by means of plasma nanotechnologies", SPIE conference on Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, 2012年6月1日、オランダ、アムステルダム

(8) Y. Hirahara, K. Aoki, K. Ohta, S. Shibata, T. Hirao, Y. Tatamitani, N. Ebizuka, K. Kawabata, M. Yoshida, M. Uemura, T. Oosugi, K. Kawaguchi, R. Fujimori, H. Ohiwa and H. Nagahiro, "First light observation of GIGMICS (germanium immersion grating mid-infrared cryogenic spectrograph) by Kanata 1.5-m Telescope at Higashi-Hiroshima Observatory",

Workshop on Interstellar Matter 2012, 2012年10月18日、北海道大学

(9) 青木慶伸、柴田将、太田香菜子、平原靖大、平尾強司、豊谷仁男、海老塚昇、吉田道利、川端弘治、植村誠、大杉節、藤森隆彰、大岩宏紀、永廣久幸、川口建太郎, "GIGMICS を用いた惑星状星雲 NGC7027 における[S IV]禁制発光遷移の高分散分光観測", 日本天文学会2012年秋季年会, 2012年9月21日, 大分大学

(10) 平原靖大, "ゲルマニウムイマージョングレーティングを用いた中間赤外線高分散冷却分光観測装置 GIGMICS のファーストライト観測", 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2012年10月22日、札幌コンベンションセンター

(11) 柴田将, 平原靖大, "GIGMICS による金星大気の高分散分光観測", 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2012年10月22日、札幌コンベンションセンター

(12) 柴田将、青木慶伸、平原靖大、笠井康子、佐川英夫、佐藤隆雄, "GIGMICS による金星大気の中間赤外線高分散分光観測", 日本天文学会 2013 年春季年会 2013 年 3 月 20 日, 埼玉大学

(13) 海老塚昇, 平原靖大, "次世代天文学観測装置用の新しい高分散回折格子", 平成 25 年度日本分光学会年次講演会, 2013 年 11 月 19 日, 大阪大学

(14) 平原靖大, "中間赤外線高分散分光観測装置 GIGMICS の開発", 可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 2013 年 12 月 17 日, 京都大学

(15) 海老塚昇, 平原靖大、佐々木実、田辺綾乃、橋本信幸、森田晋也、山形豊、Andrea Bianco、

Filippo Maria Zerbi、青木和光, "次世代観測装置用の新しい回折格子の開発状況", 可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 2013 年 12 月 17 日, 京都大学

(16) 平原靖大、柴田将, "金星中層大気における CO<sub>2</sub> の炭素同位体異常の観測", 第 14 回分子分光研究会, 2014 年 05 月 16 日、東京大学駒場キャンパス

(17) Yasuhiro HIRAHARA, Sho Shibata, "Mid Infrared Observation of Carbon Isotope Anomaly of CO<sub>2</sub> in the Venusian Mesosphere", 11th Annual Meeting of Asia Oceania Geoscience Society, 2014 年 07 月 31 日, 札幌

(18) Takahiro IINO, Akira MIZUNO, Takehiro HIDEMORI, Takashi TSUKAGOSHI, Yasuhiro HIRAHARA, "Searches of Sulfur-bearing Species in Neptunes's Stratosphere Using Sub-mm Waveband", 11th Annual Meeting of Asia Oceania Geoscience Society, 2014 年 07 月 30 日, 札幌

(19) Yasuhiro HIRAHARA, "Development of GIGMICS (Germanium Immersion Grating Mid-Infrared Cryogenic Spectrograph)", 平成 27 年度日本分光学会年次講演会(招待講演), 2015 年 06 月 01 日, 東京工業大学 大岡山キャンパス

(20) 仲本悟, 中山勇麻, 平原靖大, 飯野孝浩, "タイタン大気におけるアセトニトリル(CH<sub>3</sub>CN)の回転励起状態", 日本惑星科学会 2015 年度秋季講演会, 2015 年 10 月 14 日, 東京工業大学

(21) 仲本悟, 中山勇麻, 平原靖大, 飯野孝浩, "ALMA アーカイブデータ解析による Titan 大気中の CH<sub>3</sub>CN の鉛直分布", 日本地球惑星科学連合大会, 2016 年 05 月 22 日, 幕張メッセ

(22) 飯野孝浩, 平原靖大, 仲本悟, 中山勇麻, 高橋透, "アルマ干渉計を用いた海王星成層圏 HCN(J = 4-3)観測", 日本地球惑星科学連合大会, 2016 年 05 月 22 日, 幕張メッセ

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平原 靖大(Hirahara, Yasuhiro)  
名古屋大学・環境学研究科・准教授  
研究者番号: 3 0 2 5 2 2 2 4

### (2) 研究分担者

川口 建太郎(Kawaguchi, Kentarou)  
岡山大学・自然科学研究科・教授  
研究者番号: 4 0 1 5 8 3 6 1

### (3) 連携研究者 なし