

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340048

研究課題名(和文) ジェットを伴うコンパクト天体の高感度可視近赤外同時偏光観測

研究課題名(英文) Simultaneous optical and NIR polarimetry of compact objects accompanied with astrophysical jets

研究代表者

川端 弘治 (kawabata, koji)

広島大学・宇宙科学センター・准教授

研究者番号：60372702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円、(間接経費) 4,140,000円

研究成果の概要(和文)：広島大学宇宙科学センターが運用する口径1.5m「かなた」光学赤外線望遠鏡の次期主力装置である可視赤外線同時カメラHONIRに、可視光(波長0.5 μ m)から近赤外線(2.4 μ m)の広い波長域に亘って $p=0.1-0.2\%$ という高精度の偏光測定を行う機能を実装した。また、かなた望遠鏡とHONIRおよび1露出型可視広視野偏光撮像器HOWPolを用いて、活動銀河核やガンマ線バーストなどのといった宇宙ジェット天体の偏光モニター観測を行い、ジェットにおける発光機構や、その放射の基となる磁場のジオメトリを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have developed a wide-band polarimetric module dedicated for the Hiroshima Optical and Near-InfraRed camera (HONIR) and realized a high-precision polarimetric capability at wavelengths 0.5 -- 2.4 microns. We also performed polarimetric monitoring observations of active galactic nuclei, gamma-ray burst, and other cosmic jet objects with HONIR and HOWPol (Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter) mounted to Kanata 1.5-m telescope of Hiroshima University, and revealed possible mechanism of strong emission from the jet and the geometry of magnetic field within the emitting region of these objects.

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：光学赤外線天文学 偏光 ジェット 活動銀河核 ガンマ線バースト

1. 研究開始当初の背景

宇宙ではある絞られた方向にプラズマ流などが相対論的な速度で噴出する「ジェット」と呼ばれる現象が普遍的に見つかっており、ジェットを生む母天体やその周辺の進化に対して大きな影響を与えていることは疑いが無いものの、どのような機構で放出されるのかについては未だ定説はなく、宇宙物理学の大きな謎として、世界中で様々な観点から研究が進められている。これらジェットはシンクロトロン放射を主体として幅広い波長帯域の電磁波を放射していると考えられ、偏光観測を行うことで、放射領域の磁場の情報が得られると期待されているものの、可視近赤外域での偏光観測は限定的で、多波長での比較に耐える密で高精度の観測が望まれていた。

一方、広島大学宇宙科学センターでは2006年に建設された口径1.5mの「かなた」光学赤外線望遠鏡を用いてジェット天体を初めとした高エネルギー天体の継続的・機動的観測を開始し、X線・ガンマ線衛星と連携したブレーザーの観測で成果を挙げていた。そして、その次期主力装置として2007年頃より開発を進めてきた可視赤外線同時カメラHONIRの撮像機能のファーストライトを迎え、いよいよ、偏光モードの実現が切望される段階にあった。

2. 研究の目的

広島大学1.5mかなた望遠鏡の次期主力装置として開発を進めている可視赤外線同時カメラHONIRに、偏光測定機能を新設して、X線連星および活動銀河核の一種であるブレーザーを時間的に密に多バンド観測する。その結果を、MAXI・X線衛星やフェルミ・ガンマ線衛星のデータと比較することにより、コンパクト天体周辺の質量降着過程と輻射機構、とりわけジェットの磁場構造を観測的に明らかにすることを目的とする。偏光観測機器が常設されている望遠鏡は世界的にも稀少で、且つ可視・近赤外同時観測を行うことができる装置は皆無に近いことから、当該分野における先駆的な観測データを量産し、相対論的ジェットの観測的研究において世界をリードすることを目指す。

3. 研究の方法

可視近赤外2バンド同時観測が可能であるHONIRに、可視～近赤外で共通に用いることができる偏光プリズムと無色半波長板を導入し、偏光撮像観測が可能となるように整備する。特に偏光プリズムはHONIRの光学系内、つまり真空中の75Kの冷却下でも破損せずに安定的に用いられるもので、波長0.5-2.4 μm という広い帯域で有効な結晶を見出して、HONIRの光学系に最適化したものを独自に設計して光学メーカーに製作を依頼するものとする。そして、HONIRを1.5mかなた望遠鏡のカセグレン焦点に常設して、(i)近赤外線

で明るい低質量X線連星、および(ii)ガンマ線で明るく活動の活発なブレーザーの可視近赤外同時偏光モニターを行うと共に、(iii)突発的な活動性が報告された同種の天体のフォローアップ観測を行う。これにより得られたかつて例の無いほどの時間的に密な可視・近赤外偏光データ・セットを基に、同時期に得られたX線・ガンマ線データを合わせ、比較・解析することで、ジェットの輻射起源およびコンパクト天体周辺の質量降着過程について検証する。

<p>設計したYLF製ウォラストンプリズムの図面</p>	<p>製作・装着したウォラストンプリズム</p>
	<p>かなた望遠鏡に装着したHONIRの全容</p>

4. 研究成果

4.1 可視・近赤外同時偏光観測向け偏光素子の開発とHONIR偏光モードの立ち上げ

本科研費を充てて、可視・近赤外同時偏光測定を可能とするウォラストンプリズムを設計し、光学メーカーに依頼して製作した。実用化されている複屈折性結晶はいくつかあるが、屈折率や複屈折性の大きさ、有効波長域、結晶の熱膨張率(の軸毎の違い)はまちまちである。HONIRは、Kバンド(2.2 μm)までカバーするため内部を75K程度に冷却して用いており、あらゆる光学素子は真空・冷却に耐えるものでなくてはならない。また、HONIR自身の設計仕様上、用いるウォラストンプリズムは、1つで波長0.5 μm から2.4 μm までカバーするものでなくてはならない。文献を調査してみたものの、このようなウォラストンプリズムの実用例は見つからなかったため、複屈折結晶の基礎データを収集して、最適と考えられる結晶を選定し、ウォラストンプリズムの設計を行った(上図参照)。結晶はLiYF₄(YLF)で、可視・近赤外線域でほぼ完全に透明で、熱膨張率の軸による違いが小さく冷却に耐えることや、複屈折性が大きく、且つ常光・異常光分離角の色依存性が少ないという特徴がある。課題は、HONIRのウォラストンプリズムとして必要な34mm×34mmという大きさの結晶材が流通しておら

ず、光学素子として用いるだけのクオリティを持つものが本当に手に入るかどうかであったが、光学メーカーの度重なる努力により、最終的に気泡や脈理のないきれいな結晶を手に入れることができ、透過率においても所期性能を上回る、期待以上に良いウォラストンプリズムを作成することができた。このウォラストンプリズムは2012年11月末に納品された。加えて、当初は本予算で購入する予定であった大型スーパーアクロマティック半波長板について、別財源での購入の目途が立ったことから、同種の波長板製作で実績のある別の光学メーカーに依頼して製作した。この波長板は2013年2月に納品された。以上で、HONIRでの偏光観測に必要な主たる光学素子が揃ったことになる。それぞれの光学素子は、必要なホルダーや素子回転/切り替え機構も設計・開発し、それらを介してHONIR本体に装着された。偏光観測に必要な焦点マスクも開発した。

その後、実験室における冷却光学試験を行った後、2014年1月にHONIR本体をかなた望遠鏡に取り付けて、HONIRの偏光モードの試験観測を開始した。カセグレン焦点ということもあり、器械偏光は可視域で $\sim 0.1\%$ 以下、近赤外域でも $\sim 0.2\%$ 以下と小さく安定していることが確認された。懸念されたYLF製ウォラストンプリズムの可視域での偏光能率であるがBバンドで43%、Rバンドで67%程度と十分な能率を持っていることも判ったが、青い波長域における偏光撮像観測では、波長依存性が大きいことによる有効波長の天体ごとのずれによる誤差を考慮する必要がある場合があることも判った。複数回の試験観測により、光量が十分な場合には、 $\Delta p = 0.1 - 0.2\%$ かそれより良い精度で安定的に偏光測定ができることが確認されたことで、高精度で可視・近赤外同時偏光観測が可能で、世界的にもまれなシステムの開発に成功した、と考えている。

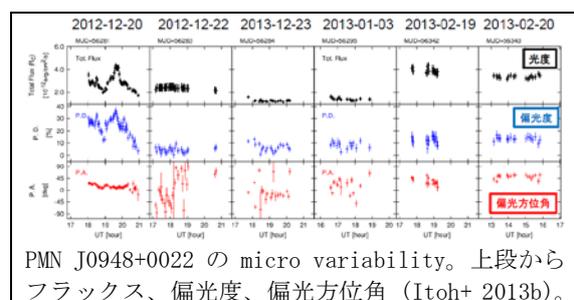
4.2 ジェット天体等の偏光モニターによる観測的研究

HONIRによる偏光モードの立ち上げが行われる間、かなた望遠鏡と既存の可視偏光撮像装置であるHOWPolを用い、X線・ガンマ線衛星とも連携して、ブレーザーやガンマ線バースト (GRB) などのジェット天体の偏光モニター観測を行った。またジェット天体のエンジンであるコンパクト天体 (ブラックホール・中性子星) に関連の深い超新星のモニター観測も行った。以下にその成果の一部を開示する。

CTA 102は $z \sim 1$ の遠方にあるFSRQに分類されるブレーザーで、2012年9月19日に可視域で光度のフレアを示した後、21日にはGeVガンマ線でもフレアを示したことから、かなた望遠鏡で重点的な偏光モニター観測を行った (Itoh et al. 2013a)。また、OISTERと

呼ばれる中小口径望遠鏡群の大学間連携ネットワークに呼びかけて多バンドの測光観測も行われた。その結果、最初のフレアから10日の間に、偏光度が数時間のうちに10%以上変動するmicro variabilityが2例見つかったが、そのうち一方は光度やカラーも同期して変化したものの、もう一方は光度やカラーに明瞭な変化は見られなかった。フレア中の偏光成分を取り出すと、偏光度が $p=50\%$ と極めて高く、非常に狭い領域 ($< 10^{15} \text{cm}$) において磁場がよく揃っていてシンクロトロン放射を示したことや、その磁場の方向が2006年のフレア時に電波 (VLBI) で観測されたジェットと揃っていることが示唆された。

次に、PMN J0948+0022は、radio loudな狭輝線セイファート1型銀河であり、2012年12月18日に近赤外域でフレアが発見された後、12月31日にはGeVガンマ線でフレアが観測された。我々は近赤外域でのフレアの報告を受けて重点的な偏光モニターを行った結果、観測初日の12月20日に、2時間のうちに偏光度が光度と同期して30%も変化する事例を見出した (Itoh et al. 2013b)。これだけ短期間のうちに大きな変動を検出した例は世界的にも初とあって良いだろう。この変動のタイムスケールから、 $\sim 10^{14} \text{cm}$ という非常に狭い領域で磁場がよく揃っていることが示唆される。このような早い変動性は一部のブレーザーと共通しているものの、PMN J0948+0022における変動性はブレーザーに比べて複雑ではなく、寄与しているジェット成分の個数がブレーザーよりも少ないことが示唆された。



PMN J0948+0022のmicro variability. 上段からフラックス、偏光度、偏光方位角 (Itoh+ 2013b)。

また、HONIRの偏光撮像モードを用いて、近傍銀河M82に現れたIa型超新星SN 2014Jの偏光観測も行った。HONIRの特徴である可視-近赤外線幅広い波長域に亘って偏光観測を行うことで、Bバンド ($0.44 \mu\text{m}$) で5%近い偏光度を持つものの、波長と共に偏光度が急激に減衰し、Ksバンド ($2.2 \mu\text{m}$) では $\sim 0.1\%$ となること、偏光度のピークが紫外域にあることはM82内に存在して偏光を及ぼす固体微粒子のサイズが小さいことなどを見出した。このHONIRによる成果は投稿準備中である (Kawabata et al., in press)。

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 20 件)

1. Yamanaka, M., Maeda, K., Kawabata, M., Kawabata, K. S. (計 18 名中 8 番目), Early-phase Photometry and Spectroscopy of Transitional Type Ia SN 2010ht: Direct Constraint on the Rise Time, *Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 2014, 782, 35 (計 6 ページ)
2. Maeda, K., Nozawa, T., Sahu, D. K., Kawabata, K. S., et al. (計 18 名中 10 番目), Properties of Newly Formed Dust Grains in the Luminous Type Iin Supernova 2010jl, *Astrophysical Journal*, 査読有, 2013, 776, 5 (計 16 ページ)
3. Itoh, R., Tanaka, Y. T., Fukazawa, Y., Kawabata, K. S., et al. (計 15 名中 4 番目), Minute-scale Rapid Variability of the Optical Polarization in the Narrow-line Seyfert 1 Galaxy PMN J0948+0022, *Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 2013, 775, 26 (計 6 ページ)
4. Takaki, K., Kawabata, K. S., Yamanaka, M., et al. (計 18 名中 2 番目), A Luminous and Fast-expanding Type Ib Supernova SN 2012au, *Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 2013, 772, 17 (計 6 ページ)
5. Itoh, R., Fukazawa, Y., Tanaka, Y. T., Kawabata, K. S., et al. (計 37 名中 17 番目), Dense Optical and Near-infrared Monitoring of CTA 102 during High State in 2012 with OISTER: Detection of Intra-night "Orphan Polarized Flux Flare", *Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 2013a, 768, 24 (計 5 ページ)
6. Takahashi, J., Itoh, Y., Akitaya, H., Kawabata, K. S., et al. (計 7 名中 5 番目), Phase Variation of Earthshine Polarization Spectra, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 2013, 65, 38 (計 9 ページ)
7. Sasaki, K., Uemura, M., Sasada, M., Kawabata, K. S., et al. (計 12 名中 4 番目), Photopolarimetric Monitoring of the Blazar BL Lac in the Optical and Near-infrared Bands: Decay of the Long-Lived Component, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 2013, 65, 35 (計 8 ページ)
8. Yamazaki, S., Fukazawa, Y., Sasada, M., Kawabata, K. S., et al. (計 10 名中 8 番目), X-Ray and Optical Monitoring of a Gamma-Ray-Emitting Radio Galaxy, NGC 1275, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 2013, 65, 30 (計 8 ページ)
9. Gandhi, P., Yamanaka, M., Tanaka, M., Kawabata, K. S., et al. (計 11 名中 5 番目), SN 2009js at the Crossroads between Normal and Subluminous Type IIP Supernovae: Optical and Mid-infrared Evolution, *Astrophysical Journal*, 査読有, 2013, 767, 166 (計 15 ページ)
10. Rani, B., Krichbaum, T. P., Fuhrmann, L., Kawabata, K. S., et al. (計 37 名中 17 番目), Radio to gamma-ray variability study of blazar S5 0716+714, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, 2013, 552, A11 (計 24 ページ)
11. Itoh, R., Fukazawa, Y., Chiang, J., Kawabata, K. S., et al. (計 28 名中 20 番目), A Study of the Long-Term Spectral Variations of 3C 66A Observed with the Fermi and Kanata Telescopes, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 2013, 65, 18 (計 9 ページ)
12. Sakimoto, K., Akitaya, H., Yamashita, T., Kawabata, K. S., et al. (計 18 名中 4 番目), An optical and near-infrared multipurpose instrument HONIR, *SPIE Proceedings*, 査読無, 2012, 8446, 73 (計 12 ページ)
13. Hayashida, M., Madejski, G. M., Nalewajko, K., Kawabata, K. S., et al. (計 93 名中 26 番目), The Structure and Emission Model of the Relativistic Jet in the Quasar 3C 279 Inferred from Radio to High-energy gamma-Ray Observations in 2008-2010, *Astrophysical Journal*, 査読有, 2012, 754, 114 (計 22 ページ)
14. Bufano, F., Pian, E., Sollerman, J., Kawabata, K. S., et al. (計 53 名中 37 番目), The Highly Energetic Expansion of SN 2010bh Associated with GRB 100316D, *Astrophysical Journal*, 査読有, 2012, 753, 67 (計 13 ページ)
15. Sasada, M., Uemura, M., Fukazawa, Y., Kawabata, K. S., et al. (計 14 名中 4 番目), Multi-Wavelength Photometric and Polarimetric Observations of the Outburst of 3C 454.3 in 2009 December, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 2012, 64, 58 (計 8 ページ)
16. Uehara, T., Toma, K., Kawabata, K. S., Chiyonobu, S., et al. (計 22 名中 3 番目), GRB 091208B: First Detection of the Optical Polarization in Early Forward Shock Emission of a Gamma-Ray Burst Afterglow, *Astrophysical*

- Journal Letters, 査読有, 2012, 752, L6 (計5ページ)
17. Ackermann, M., Ajello, M., Ballet, J., Kawabata, K. S., et al. (計219名中200番目), Multi-wavelength Observations of Blazar A0 0235+164 in the 2008-2009 Flaring State, Astrophysical Journal, 査読有, 2012, 751, 159 (計20ページ)
 18. Matsumura, M., Kameura, Y., Kawabata, K. S., Akitaya, H., Isogai, M., Seki, M., Correlation between Interstellar Polarization and Dust Temperature: Is the Alignment of Grains by Radiative Torques Ubiquitous?, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2011, 63, L43-L47
 19. Ikejiri, Y., Uemura, M., Sasada, M., Kawabata, K. S., et al. (計13名中10番目), Photopolarimetric Monitoring of Blazars in the Optical and Near-Infrared Bands with the Kanata Telescope. I. Correlations between Flux, Color, and Polarization, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2011, 63, 639-675
 20. Sasada, M., Uemura, M., Fukazawa, Y., Kawabata, K. S., et al. (計12名中4番目), Prominent Polarized Flares of the Blazars A0 0235+164 and PKS 1510-089, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 2012, 63, 489-497

[学会発表] (計 件)

1. 川端弘治, 高木勝利, 伊藤亮介ほか (18名中1番目), 3つのGRBの早期可視残光における偏光のアップーリミット, 日本天文学会 2014年春季年会, 2014/3/19-2014/3/22, 国際基督教大学
2. 川端弘治, 吉田道利, 植村誠ほか (9名中1番目), 可視偏光サーベイ計画SGMAP: 広視野3バンド同時偏光撮像光学系の設計, 日本天文学会 2014年春季年会, 2014/3/19-2014/3/22, 国際基督教大学
3. 川端弘治, 高木勝俊, 小松智之ほか (15名中1番目), 可視1露出型偏光撮像器HOWPo1の開発: (7)器械偏光の特性, 日本天文学会 2013年春季年会, 2013/3/20-2013/3/23, 埼玉大学
4. 川端弘治, 高木勝利, 小松智之ほか (28名中1番目), 可視1露出型偏光撮像器HOWPo1とGRB初期残光の偏光観測, 日本天文学会 2012年秋季年会, 2012/9/19-2012/9/21, 大分大学
5. 川端弘治, 上原岳士, 當真賢二ほか (12名中1番目), GRB 091208B初期残光の光度曲線と可視偏光の考察, 日本天文

学会 2011年秋季年会, 2011/9/19-2011/9/22, 鹿児島大学

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/honir/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

川端 弘治 (KAWABATA KOJI)

広島大悪・宇宙科学センター・准教授
研究者番号: 60372702

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

山下 卓也 (YAMASHITA TAKUYA)

国立天文台・TMT推進室・教授
研究者番号: 00211631

深沢 泰司 (FUKAZAWA YASUSHI)

広島大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 60272457

吉田 道利 (YOSHIDA MICHITOSHI)

広島大学・宇宙科学センター・教授
研究者番号: 90270446

植村 誠 (UEMURA MAKOTO)

広島大学・宇宙科学センター・准教授
研究者番号: 50403514