

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340042

研究課題名（和文）

次世代赤外線高分散分光器の開発と高赤方偏移ガンマ線バーストによる宇宙再電離の研究  
研究課題名（英文）Development of Next-generation Infrared High-resolution Spectrograph  
for Studying the Cosmic Re-ionization Era with High Redshift Gamma-ray Bursts

研究代表者：

小林 尚人（KOBAYASHI NAOTO）

東京大学・理学系研究科・准教授

研究者番号：50280566

研究成果の概要（和文）：

宇宙再電離期の銀河間物質の吸収線分光観測を可能とする、高感度な次世代近赤外高分散分光器 WINERED を開発した。様々な望遠鏡への持ち運びを可能とするコンパクトな光学系でありながら波長分解能  $R=\lambda/\Delta\lambda=30,000$  の高分散を実現し、また目的に必要な波長域（0.9-1.4 $\mu\text{m}$ ）に特化し非冷却光学系を用いることで従来の分光器の2倍近くのスループットを実現した。本装置の製作および室内実験を終え、京都産業大学神山天文台 1.3m 望遠鏡に設置し、天文学観測を開始した。また、ガンマ線バーストのフォローアップ観測の体制を実験的に構築した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a next-generation near-infrared high-resolution spectrograph “WINERED”, which enables high-sensitive absorption spectroscopy of intergalactic medium in the re-ionization era. WINERED achieves a high-resolution of  $R=30,000$  despite its compact design and a high throughput that doubles that for conventional high-resolution spectrographs by narrowing the wavelength coverage (0.9-1.4 $\mu\text{m}$ ) and by using non-cryogenic optics. After completing the assembly and laboratory experiments, we started astronomical observations with the 1.3m telescope of Koyama Astronomical Observatory at Kyoto Sangyo University. We also experimentally constructed an observational scheme for the follow-up of gamma-ray bursts.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2009年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：天体物理学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：高分散分光、赤外線、近赤外線、イメージンググレーティング、ガンマ線バースト、キューサー吸収線系、銀河間物質、宇宙再電離

## 1. 研究開始当初の背景

（1）約 140 億年前の宇宙誕生後の初代天体の形成に始まり約 5 億年近く続いたと考えられる「宇宙の再電離期」の理解は、宇宙論や銀河形成研究の最重要テーマの 1 つであり、

天文学のフロンティアでもある。

（2）この時代を調べるには、高光度になる高赤方偏移のガンマ線バーストの分光観測が最も有効と期待されるが、そのためには詳細な物理情報を持つ主要な紫外吸収線が赤

方偏移によってシフトしていく「近赤外線」波長域での高感度な高分散分光が必要となる。

(3) この 20 年の赤外線天文学技術の発展を受け、そのような高感度な高分散分光のニーズはますます高まっている。可視光に匹敵するレベルの高分散赤外線天文観測が可能になれば、天文学の全領域、引いては物理・化学・生物等多様な分野への波及効果が期待される。

## 2. 研究の目的

“次世代の”高感度な近赤外高分散分光器を実現することにより、高赤方偏移ガンマ線バーストの系統的な吸収線高分散分光観測を可能とし、最終的には最後のフロンティアであるビッグバン後の宇宙再電離期の物理状態の解明を目指す。

(1) 本研究では

①まず、このような観測を実現できる近赤外高分散分光器を実現・実証し

②実際に中小口径の望遠鏡にとりつけて、ガンマ線バーストのフォローアップ観測の体制を構築する

ことまでを目的とする。

(2) 最終的には、本研究の次のステップとして、大口径の望遠鏡に WINERED をとりつけ、統計的な個数の高赤方偏移ガンマ線バーストの観測から、宇宙再電離期の電離状態・元素組成、その一様性や等方性といった物理・化学状態を明らかにする。また、それをファーストステップとして、他の様々な天文観測への応用の道を拓く。

## 3. 研究の方法

(1) 目標とするサイエンス(高赤方偏移の銀河間物質の吸収線分光)に必要な波長域(0.9-1.4 $\mu\text{m}$ )に特化した高感度な高分散分光器を、非冷却でコンパクト兼可搬性のある安価な光学系で実現する。具体的には以下の4つの項目が挙げられる：

①波長域をもっとも重要な範囲

(0.9-1.4 $\mu\text{m}$  : z, Y, Jバンド) に絞り、反射防止コーティングなどをカスタマイズすることにより、通常分光器の倍近いスループット(約30%)を目指す。

②世界各地の天文台の望遠鏡にとりつける可搬性を高めるために、通常はすべてを冷却しないといけない赤外線装置の常識に反して”非冷却型”の光学系を組む。波長範囲をしばったことによりそれが可能となるが、この短波長域であってもなお残る熱背景放射の影響を排するために、検出器の直前のカメラ光学系のみは(どのみち冷却が必要な)検出器とともに冷却する。また、さらに熱背景放射を軽減するために、新しい1.7 $\mu\text{m}$ カットオフ(それより長波長に全く感度がない)

検出器を用い、また独自開発した冷却サーマルカットフィルターをカメラ光学系に挿入する。

③大型の赤外線検出器(2024x2024画素)、透過光学系と透過型のクロスディスペルザー(VPH)を組み合わせることで、コンパクトな分光器を実現する。

④将来的には、現在開発中の「近赤外線イメージングレーティング」をインストールすることで、波長分解能を約3倍のR=100,000まであげる。

(2) この新型の近高分散分光器を、十分な観測時間が確保できる中小口径望遠鏡に長期に亘ってとりつけ、この未開拓な波長域(z, Y, Jバンド)の様々な天体の観測をすすめる、分光カタログを作成すると同時に、ガンマ線バーストのフォローアップ体制を構築する。

## 4. 研究成果

(1) WINERED の基本的なモードの開発、製作を終了し、京都産業大学神山天文台荒木1.3m望遠鏡のナスミス焦点に設置した(図1)

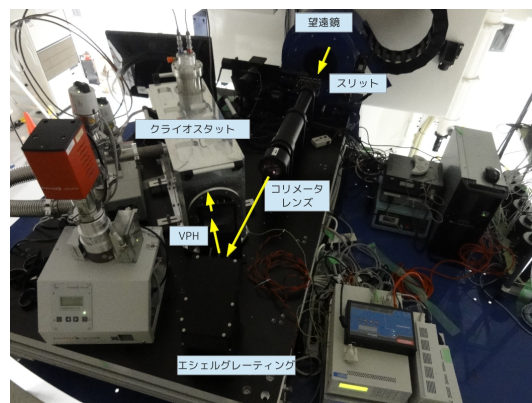


図1. 京産大 1.3m 望遠鏡のナスミス焦点に設置された WINERED。

(2) 試験観測ならびに本格的な天体観測を開始した。その結果、多数の星のスペクトルを取得し(図2、図3)：

①波長範囲や波長分解能などの基本光学性能が設計通りに達成できていることを確認した。

②星の観測から目標とするスループットならびに感度が達成できていることを確認した。波長分解が高い(R=30,000)にもかかわらず、J=8mag程度の天体の高いS/N比の観測が口径1.3m望遠鏡でも十分できているが、これは通常は口径2-4mクラスの望遠鏡でしか達せない感度である。

(3) 京都産業大学神山天文台に観測チームを組み、非常に明るいガンマ線バーストが出現した時の観測体制を構築した。

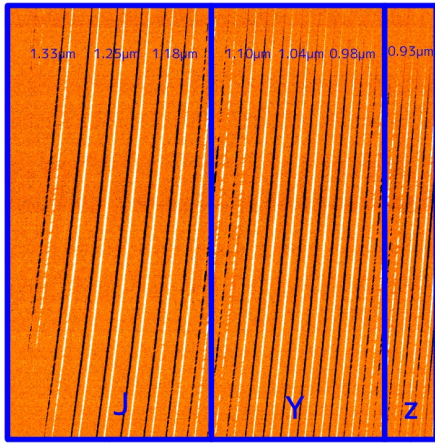


図 2. WINERED で取得した A 型星のスペクトル。大型赤外線検出器により、0.9-1.4 μm の広い範囲のスペクトルが一挙に取得できている。

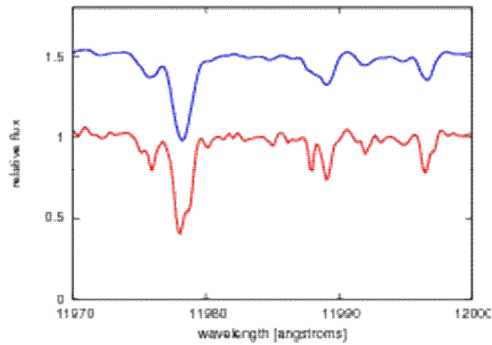


図 3. WINERED で取得した M 型星のスペクトルの一部 (赤線)。S/N は十分に高く、見えているフィーチャーはすべてリアルなものである。青線は、比較のために波長分解能を倍にならせたもの。高い波長分解能により、細かいラインが明確に分離されて精密な物理量の導出が可能となるとともに、微弱なラインが多数新たに検出されることがわかる。

(4) 本装置は、本格的な高感度・大フォーマット検出器での近赤外高分散分光を初めて実現するものであり、今後の国内外の次世代近赤外線高分散分光器の走りとなるものである。今後は、さらにイマージョングレーティングを用いた高分散化とともに、よりグレードの高い装置開発が続けられていくことになる。本装置の波長域 (z, Y, J バンド) は、可視と赤外の”ニッチ”波長域であり、まだ世界的にもほとんど高分散データが取得されていない。本装置による系統的な観測から、世界初となるこの波長域での多数の天体分光カタログや天文学成果が出ることを期待される。

## 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 Paul J. Kuzmenko, Steve L. Little, Yuji Ikeda, and Naoto Kobayashi, Progress in the fabrication of a prototype ZnSe immersion grating for the WINERED spectrograph, Proc. SPIE 7739, 77393U (2010), DOI:10.1117/12.857804 査読無

② Hirokazu Kataza, Takehiko Wada, Yuji Ikeda, Naofumi Fujishiro, Naoto Kobayashi, and Itsuki Sakon, Optical architecture of mid-infrared instruments (MIRACLE/MIRMES/MIRHES) on board SPICA, Proc. SPIE 7731, 77314A (2010), DOI:10.1117/12.856660 査読無

③ Yuji Ikeda, Naoto Kobayashi, Paul J. Kuzmenko, Steve L. Little, Chikako Yasui, Sohei Kondo, Hiroyuki Mito, Kenshi Nakanishi, and Yuki Sarugaku, Fabrication and current optical performance of a large diamond-machined ZnSe immersion grating, Proc. SPIE 7739, 77394G (2010), DOI:10.1117/12.856631 査読無

④ Yuji Ikeda, Naoto Kobayashi, Sohei Kondo, Chikako Yasui, Paul J. Kuzmenko, Hitoshi Tokoro, and Hiroshi Terada, Zinc sulfide and zinc selenide immersion gratings for astronomical high-resolution spectroscopy: evaluation of internal attenuation of bulk materials in the short near-infrared region, Opt. Eng. 48, 084001 (2009), DOI:10.1117/1.3206734 査読有

⑤ Yuji Ikeda, Naoto Kobayashi, Paul J. Kuzmenko, Steve L. Little, Chikako Yasui, Sohei Kondo, Atsushi Minami, and Kentaro Motohara, Diamond-machined ZnSe immersion grating for NIR high-resolution spectroscopy, Proc. SPIE 7018, 70184R (2008), DOI:10.1117/12.788113 査読無

⑥ Paul J. Kuzmenko, Steve L. Little, Yuji Ikeda, and Naoto Kobayashi, Fabrication and testing of diamond-machined gratings in ZnSe, GaP, and bismuth germanate for the near-infrared and visible, Proc. SPIE 7018, 70184Q (2008), DOI:10.1117/12.787699 査読無

⑦ Naoto Kobayashi, Yuji Ikeda, Hideyo Kawakita, Keigo Enya, Takao Nakagawa, Hirokazu Kataza, Hideo Matsuhara, Yasuhiro Hirahara, and Hitoshi Tokoro, Mid-infrared high-resolution spectrograph for SPICA, Proc. SPIE 7010, 701032 (2008), DOI:10.1117/12.799423 査読無

- ⑧ Hiroshi Terada, Ikeda Yuji, Naoto Kobayashi, Chikako Yasui, Tae-Soo Pyo, Tomonori Usuda, Masahiko Hayashi, and Hideyo Kawakita, High resolution spectrograph unit (HRU) for the SUBARU/IRCS, Proc. SPIE 7014, 701434 (2008), DOI:10.1117/12.788561 査読無
- ⑨ Chikako Yasui, Sohei Kondo, Yuji Ikeda, Atsushi Minami, Kentaro Motohara, and Naoto Kobayashi, Warm infrared echelle spectrograph (WINERED): testing of optical components and performance evaluation of the optical system Proc. SPIE 7014, 701433 (2008), DOI:10.1117/12.788371 査読無
- ⑩ Yuji Ikeda, Naoto Kobayashi, Hiroshi Terada, Akinori Shibayama, Akira Ozawa, Chikako Yasui, Sohei Kondo, Tae-Soo Pyo, and Hideyo Kawakita, High-efficiency silicon immersion grating by electron-beam lithography Proc. SPIE 7014, 701469 (2008), DOI:10.1117/12.788126 査読無
- ⑪ Chikako Yasui, Naoto Kobayashi, Alan T. Tokunaga, Hiroshi Terada, and Masao Saito, Star Formation in the Extreme Outer Galaxy: Digel Cloud 2 Clusters, 2008 ApJ 75 443 DOI:10.1086/524356 査読有
- ⑫ Naoto Kobayashi, Chikako Yasui, Alan T. Tokunaga, and Masao Saito, Star Formation in the Most Distant Molecular Cloud in the Extreme Outer Galaxy: A Laboratory of Star Formation in an Early Epoch of the Galaxy's Formation, 2008 ApJ 683 178 DOI:10.1086/588421 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① 近藤 莊平、池田 優二、福江 慧、中西 賢之、川西 崇史(京都産業大学)、三戸 洋之(東京大学)、安井 千香子(国立天文台)、河北秀世、三好 蕃、原 哲也、米原 厚憲、中道 晶香、吉川 智裕、藤代 尚文、磯貝 瑞希、新井 彰(京都産業大学)、小林 尚人(東京大学)、近赤外高分散分光器「WINERED」: 京都産業大学 1.3m 荒木望遠鏡でのファーストライトに向けた開発状況 2012/3/19~22 日本天文学会 2012 年春季年会 京都 V213a
- ② 中西 賢之、池田 優二、近藤 莊平、福江 慧、川西 崇史(京都産業大学)、小林 尚人、三戸 洋之(東京大学)、安井 千香子(国立天文台) 近赤外高分散分光器「WINERED」: クライオスタット及び機械系の開発 2012/3/19~22 日本天文学会 2012 年春季年会 京都 V211b
- ③ 福江 慧(東京大学/京都産業大学)、池田 優二、近藤 莊平、中西 賢之、川西 崇史、新崎 貴

- 之(京都産業大学)、小林 尚人、三戸 洋之(東京大学)、安井 千香子(国立天文台) 近赤外高分散分光器「WINERED」: 京都産業大学荒木望遠鏡での光学系の調整 2012/3/19~22 日本天文学会 2012 年春季年会 京都 V212b
- ④ 濱野 哲史、小林 尚人(東京大学)、近藤 莊平(京都産業大学)、美濃 和 陽典、大屋 進(国立天文台)、すばる望遠鏡 A0 チーム、LGSA0188 で拓かれる重力レンズクエーサー吸収線系の近赤外高分散分光観測 2012/3/19~22 日本天文学会 2012 年春季年会 京都 X16a
- ⑤ 濱野 哲史、小林 尚人(東京大学)、近藤 莊平(京都産業大学)、重力レンズクエーサー APM08279+5255 のレンズ銀河の同定とその性質 2011/9/19~22 日本天文学会 2011 年秋季年会 鹿児島 R47a
- ⑥ 濱野 哲史、小林 尚人(東京大学)、近藤 莊平(京都産業大学)、大越 克也(東京理科大学)、辻本 拓司(国立天文台)、重力レンズクエーサーで探る  $z \sim 1$  DLA 銀河の kinematics 2011/3/16~19 日本天文学会 2011 年春季年会 つくば R06a
- ⑦ 濱野 哲史、小林 尚人(東京大学)、近藤 莊平(京都産業大学)、大越 克也(東京理科大学)、辻本 拓司(国立天文台)、重力レンズ QSO 吸収線系で探る高赤方偏移におけるガス雲の構造 2010/9/22~24 日本天文学会 2010 年秋季年会 金沢 X07a
- ⑧ 小林 尚人(東京大学)、TMT30m 望遠鏡用近赤外高分散分光器 2010/3/24~27 日本天文学会 2010 年春季年会 広島 B07a
- ⑨ 小林 尚人(東京大学)、TMT30m 望遠鏡用観測装置の提案: 近赤外高分散分光器 2009/9/14~16 日本天文学会 2009 年秋季年会 山口 V22a
- ⑩ 池田 優二(フォトコーディング)、小林 尚人(東京大学)、塩谷 圭吾、松原 英雄、中川 貴雄 (ISAS/JAXA)、Paul Kuzmenko、Steve Little (LLNL)、河北 秀世(京都産業大学)、所 仁志(ナノオプトニクス研究所)、平原 靖大(名古屋大学)、SPICA 搭載中間赤外高分散分光器検討とイマージョンングレーティングの開発 2009/3/24~27 日本天文学会 2009 年春季年会 大阪 W22c
- ⑪ 池田 優二(フォトコーディング)、小林 尚人、安井 千香子、近藤 莊平、本原 顕太郎(東大)、南 篤志 (JAL)、Paul J. Kuzmenko、Steve L. Little (LLNL)、塩谷 圭吾、松原 英雄、中川 貴雄 (ISAS/JAXA)、所 仁志(ナノオプトニクス研究所)、平原 靖大(名古屋大)、近中間赤外用イマージョン回折格子の開発 IV --- ZnSe 製大型プリズムイマージョン回折格子の製作 2008/9/11~13 日本天文学会 2008 年秋季年会 岡山 V31a
- ⑫ 小林 尚人、近藤 莊平、安井 千香子(東京大学)、池田 優二(フォトコーディング)、

ほか近中間赤外線高分散分光チーム，次世代近赤外高分散分光器「WINERED」計画とそのサイエンス 2008/9/11～13 日本天文学会 2008 年秋季年会 岡山 V14a

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 尚人 (KOBAYASHI NAOTO)  
東京大学・理学系研究科・准教授  
研究者番号：50280566

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

本原 顕太郎 (MOTOHARA KENTARO)  
東京大学・理学系研究科・准教授  
研究者番号：90343102

青木 和光 (AOKI WAKO)  
国立天文台・助教  
研究者番号：20321581

野口 邦男 (NOGUCHI KUNIO)  
国立天文台・教授  
研究者番号：10111824

美濃和 陽典 (MINOWA YOSUKE)  
国立天文台・研究員  
研究者番号：60450194

辻本 拓司 (TSUJIMOTO TAKUJI)  
国立天文台・助教  
研究者番号：10270456

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

河北 英世 (KAWAKITA HIDEYO)  
京都産業大学・理学部・教授  
研究者番号：70356129

大越 克也 (OKOSHI KATSUYA)  
東京理科大学・基礎工学部・講師  
研究者番号：50453832

長島 雅弘 (NAGASHIMA MASAHIRO)  
長崎大学・教育学部・准教授  
研究者番号：20342628

以下、主要な研究協力者

池田 優二 (IKEDA YUJI)  
京都産業大学・理学部・准教授  
研究者番号：40550611

近藤 壮平 (KONDO SOHEI)  
京都産業大学・神山天文台  
・特定研究員 (PD)  
研究者番号：30583413

安井 千香子 (YASUI CHIKAKO)  
国立天文台・研究員  
研究者番号：00583626