

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400226

研究課題名(和文) 近赤外ファブリ・ペロー分光器の開発と大質量星のスペクトル同定観測

研究課題名(英文) Development of Near-Infrared Fabry-Perot Spectrometer and Spectroscopic Observation of Massive Stars

研究代表者

高橋 英則 (TAKAHASHI, Hidenori)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任助教

研究者番号：80361567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、星団や銀河形成においてその膨大な放出エネルギーや終末期の超新星爆発の結果として周辺環境へ多大な影響を及ぼす大質量星に関して、主に近赤外分光観測からその形成と進化について解明することを目的としている。本課題の結果として、miniTAO近赤外線観測装置を用いた観測データから、大質量星クラスターの構成要素の分類や特有のタイプの大質量星の質量放出に関する新しい知見が得られた。また、平行して新たな分光器の基礎開発も行い、期待されていながらこれまで実運用例がほとんどない冷却波長走査型面分光装置開発に向けた技術要素(低温における光学素子の駆動手法)を確立した。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of our research is reveal the formation and the evolution of massive stars which have great influences to the environment in term of enormous energy and supernovae as its final stage, using near-infrared spectroscopic observation. As the results of observational data by near-infrared spectroscopy with miniTAO, we derived new views; the classification of elements of cluster members and the information of mass-loss from some type of massive star (late-N type Wolf-Rayet star). Furthermore basic development of new instrument for spectroscopy was carried out in this research. The technical elements, that are driving mechanism of optical elements in low temperature, could be established towards development for wavelength scanning field spectroscopy unit which was scarcely unprecedented despite expectation.

研究分野：天文学

キーワード：大質量星 クラスター 近赤外線 分光撮像観測 分光器 ファブリ・ペロー

1. 研究開始当初の背景

大質量星(Wolf-Rayet (WR)、Luminous Blue Variable (LBV)、Yellow Hyper Giant (YHG)、Red Super Giant (RSG)など)は銀河のエネルギーの多くを担い、また質量放出によって、周辺の星間物質の形成や変成、さらに次世代の星形成などに大きな影響を与えるという点で非常に重要な研究対象である。

WR 星に関して言えば、その発見は 19 世紀後半で、その後、恒星風メカニズムや質量放出の研究などが星の進化モデルとともに考えられてきた。一方観測研究は 1970 年代に Conti 等による輝線スペクトルによる分類が行われ、その後個々の天体についての詳細研究はなされてきたが、大局的な観測や系統的な調査が多くされているとは言えない。さらに、種族 I(Pop I)の星と銀河系の金属量の分布のモデルを用いて WR 星の分布や数を考察してみると、銀河系内で最大 6,000 個程度は存在するという結果が得られるが、現在までの検出個数はおよそ 600 個強で、予想の 10%に過ぎない。この理由として考えられるのは、大質量星は減光が非常に大きな環境で誕生・進化するという事実があげられる。これまでの観測は主に可視光での観測であり、種族分類およびサブクラス分類は、炭素或いは窒素の輝線の有無と電離状態の異なる輝線の強度比で行われている。しかし、ダストや星間ガスの豊富な星形成領域や 銀河中心方向では減光量が大きく、この判別方法は最適とは言えない。つまり、ダストや分子雲に埋もれた WR 星が数多くあり、それらが観測されていない可能性が考えられる。また大質量星故にその寿命が短いため、WR 星として観測される時間が短く、観測サンプルが少ないことも理由の一つであろう。このように大質量星はその進化過程において未詳の部分が多い。

そこで、この状況のブレイクスルーになるのが赤外線による観測である。最近では Homeier 等 (2003) や Shara 等 (2009, 2012) によって、銀河面を中心に赤外サーベイが行われており、それによって、多くの WR 星が検出されている。

2. 研究の目的

本研究では、大質量星探索サーベイ観測で埋もれた大質量星の候補天体を発見、その分光同定観測を行い、個々の種族を決定した上で理論と実際の個数分布の違いを観測的に明らかにすること、さらに大質量星クラスターの構成要素の環境依存性を明らかにすることを第一の目的とする。さらにこれまで行ってきた探索サーベイを継続するとともに、これら候補天体の即時スペクトル同定観測のための近赤外面分光装置として波長走査型ファブリ・ペロー分光器を製作する。これにより大質量星のスペクトル分類、つまりタイプおよびサブクラス分類が可能になる。これらのデータを基に、星間ガスやダストな

どの分布や物理状態と併せて考えることで、様々な周辺環境の中で、大質量星の誕生や進化モデルの検証、ひいては新しい進化シナリオを構築することが本研究の最終目標である。また、系統的に大質量星のスペクトルを取得し、その分類を行うことで、今後の研究のデータベースを構築することも重要な目的の一つである。

3. 研究の方法

そこで本研究では、大質量星に関する問題に関して、2つのアプローチからその解決に迫る。

3-1. 観測的研究

観測データとして、大質量星検出に最適化された近赤外線狭帯域フィルターを搭載した観測装置(近赤外線カメラ ANIR (Motohara et al. 2008, Konishi et al. 2015) @ miniTAO-1m 望遠鏡; Minezaki et al. 2010)での結果を用いる。この装置は、WC 型 WR 星に特徴的な近赤外線 CIV 輝線(2.076 μm)や WN 型 WR 星や LBV に特徴的な HeII 輝線(1.864 & 1.876 μm)に最適化された狭帯域フィルターと Ks バンドフィルターを組み合わせた、大質量星探索に適したフィルターシステムを持つ。特に HeII 輝線の検出が期待される 1.87 μm 帯は、サイトの標高の高さ故観測が可能であり、地上からでは唯一の観測サイトとなっている。

表1: ANIRフィルターバンドと観測される輝線。

フィルター	輝線	近赤外波長[μm]
N187	HeII 6 \rightarrow 5	1.864
	HeII 8 \rightarrow 6	1.876
	H Pa α	1.875
N207	CIV 3d \rightarrow 3p	2.078
Ks	---	1.990~2.312

具体的にはこのフィルターシステムを用いた撮像観測を行い、領域内の天体(恒星)について各バンドでの測光を行う。輝線天体の狭帯域フィルターバンドでの測光値は、通常の恒星と比較して超過する。2つの狭帯域フィルターを用いた2色図内では、恒星は種類に応じて特徴ある位置にプロットされる(図1。ここで測光値は広帯域バンドとの比を取ることで規格化されている)。また減光量の波長依存性を考慮すると、2色図で個々の天体(付近)の減光量も推定できる。撮像データを利用することで、より詳細な減光量の空間分布が得られることになる。

3-2. 面分光装置の開発

上記観測でピックアップされた天体のタイプを確定させるには、各々の天体について分光観測を行う必要がある。我々のフィルターシステムでの撮像観測では空間情報としてピックアップされるため、これを効率的に分光するためには、面分光が有効な手段となる。

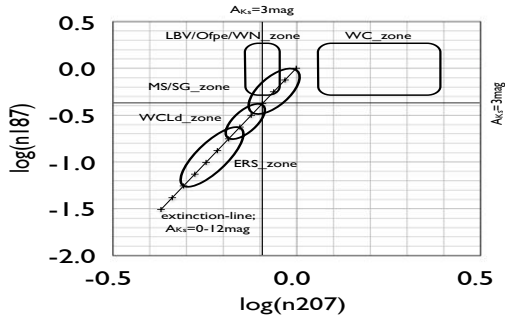


図1：ANIRフィルターシステムを用いた2色図。星のタイプによってプロットされるゾーンが異なる。

そこで空間的に効率的なスペクトル同定観測を行い、次のサイエンスへと展開することを目的として、赤外線観測に特化した波長走査型のファブリ・ペロー分光器を開発する。ファブリ・ペロー分光器とは、向かい合った高反射率の平行平面基板(エタロン)の間の干渉により、特定の波長のみを透過させる超狭帯域フィルターである。光束を面として利用できるため、アレイ検出器と組み合わせた面分光を行うことができる。さらにエタロンの間隔を変化させることで、透過する波長を任意に変えることができる。

本研究では、光学素子の波長走査に必要な駆動素子の開発をメインに行った。赤外線観測装置では装置そのものからの熱放射や検出器のノイズを低減させるために装置全体を冷却する必要がある。そのため低温で安定かつ精度よく光学素子を変位させるため、駆動素子が分光器として重要な役割を果たす。駆動素子としては様々なものがあるが、今回は電磁力を利用したボイスコイルモータ、印加電圧によって伸縮するピエゾ素子を選定し、その性能評価を行った。

4. 研究成果

4-1. 大質量星クラスターの観測

4-1-1. 2色図

前述したように我々の2色図では様々なタイプの天体(星)の分類が可能である。図2に銀河系中心部の大質量星クラスター(Archesクラスター、Quintupletクラスター、SgrA*クラスター)の2色図を示す。この領域ではほぼすべての既知の大質量星が想定されるゾーンに検出されている。また減光の大きな或いは非常に赤い天体が多数見つかっている。もしこれらの天体がYSOである場合、寿命の短い大質量星からまさにこれから大質量星になるであろう天体が同じクラスターに共存することになる。これは大質量星がクラスター中

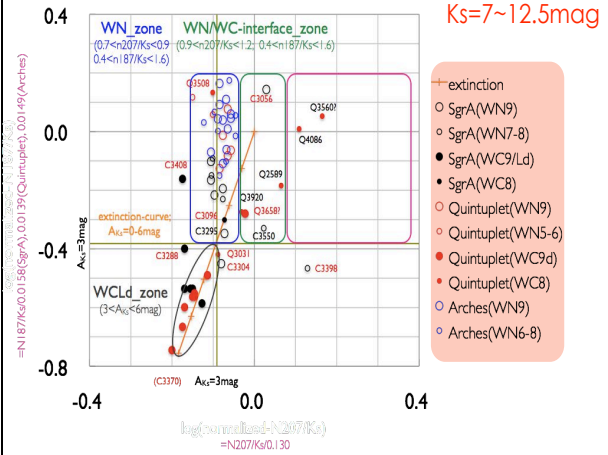


図2：銀河中心3領域の2色図におけるWRの分布。

でどのように誕生し進化していくのかのシナリオの理解の鍵となるヒントとなる(Tanaka et al. 2017)。

4-1-2. 187 excess図

さらに最近の解析では、Ks等級 vs N187 excess 図についての相関についての議論を進めている(Osawa et al. 2017)。WN型WR星の場合Ksが明るくなると、N187が強くなるというシーケンスが見られる。これは、WR星のKsの明るさはfree-free emissionの強さに比例しており、N187はHe II輝線が強くなるということを示している。これらは恒星風の強さに直接関係しており、質量放出率で説明が可能である。また同じシーケンスでもN187-excessが0のときのKs値はオーダーに渡って分布するが、恒星風の寄与を除くと、ほぼ一定の値を示すことを明らかにした。WNEとWNLでそのシーケンスが異なるのは、終末期における星の半径が異なっていることを示唆する。また観測は金属量の異なる複数の星形成領域について行われていることから(MW (Milky Way)とMC (Magellanic Cloud))、これらを比較することでWRになる星の質量についての環境依存性の情報を得ることができると考えられる。

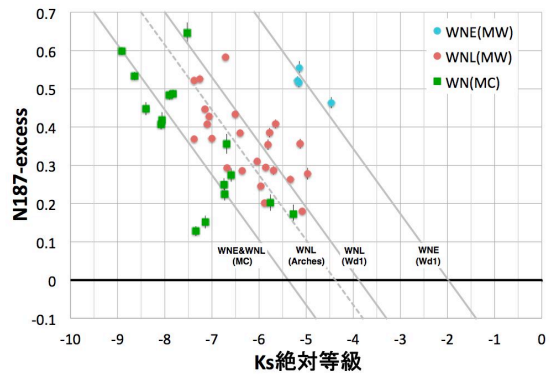


図3：WNのKs絶対等級 vs n187-excess図。WNEとWNLの違いは星の半径の違い、MWとMCの違いは金属量の違いを示唆する。

4-1-3. その他の観測領域

系内大質量星形成クラスターの一つである Westerlund1 では、これまでのカタログにはない WR 星候補天体の可能性もあり、我々の手法が大質量星検出のツールとして有効であることを示唆している (Okumura et al. 2017)。さらに LMC や SMC は金属量が天の川銀河環境とは大きく異なっており (低金属量)、大質量星についてはクラスターの形成・進化にも違いがあることが考えられる。観測した複数の領域はクラスターの構成メンバーや進化段階に多様性があり、これらを系統的に調べることで形成環境の違いとその後の大質量星クラスターの進化へ議論が展開できると考えている (Takahashi et al. 2017)。

4-2. 分光器の開発

前述したように探索サーベイで発見された星のタイプ、サブクラスを同定するには分光観測が必要である。多種の輝線を複数天体 (広い領域に渡って) 同時に分光するためには面分光が最適である。そのための分光器としてファブリ・ペロー分光器が有効である。本研究では、干渉のための光学素子を変位させる駆動素子の実験と分光器本体の概念設計を進めた。

4-2-1. 駆動アクチュエータ

駆動素子に用いるリニアモータに対する要求は駆動幅、安定性、駆動時間、および発熱であり、設計において考慮すべき項目はさらに加速度と体積の2つである。今研究ではリニアモータとして外磁型および内磁型の2種類のボイスコイルモータ (VCM) 及びリニア電磁ソレノイド (LES) を考え、加速度及び体積に対してリニアモータ設計の最適化を行った。この結果、内磁型 VMC が最も小型で大きな加速度を出せると判明した。これを基にリニアモータの試作を行った。

発熱の軽減を目的として、リニアモータには 39K を転移温度として持つ超伝導体 MgB₂ 線材の coils を用いた。本研究の目的としてはこれより高い温度での制御でもよいが、中間赤外線での使用も視野に入れ、より低温での動作が可能な駆動素子の開発を目指す。

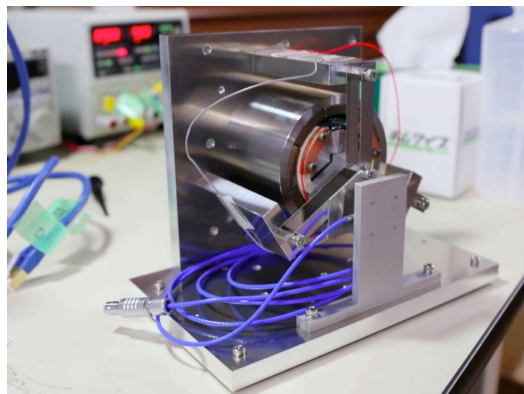


図4：超伝導アクチュエータ試作機。

MgB₂ を用いた小型 coils の製作は、工学的にもあまり例がなく、性能や発熱については実験による評価が必要となる。そこで試作機として市販 MgB₂ 線を用いた VCM を製作し、超伝導アクチュエータの評価を行った。評価にあたっては機械系として板ばねを導入した。試作機の試験では、MgB₂ のもつ磁性の影響をばね定数の増加としてモデルに組み込めることが判明した。また、発熱についてはヒステリシス損失による発熱が多くを占めることが分かった (Mori et al., 2016)。

上記の結果を受け、超伝導線 coils に加えて銅線を使用した比較用 coils を製作し、超伝導線アクチュエータと銅線アクチュエータの両者の性能を比較した。ここでは設計の改善により、磁性の影響を小さくすることに成功し、超伝導線および銅線アクチュエータのどちらでも要求を達成できることが分かった。また、超伝導線アクチュエータからの発熱は銅線アクチュエータの 10% に抑えられる。銅線アクチュエータの場合は、高純度銅線などの使用により抵抗を減らすことで、ジュール熱の発熱全体に占める割合を約 10% まで減らすことが可能である。この場合はヒステリシス損失等の主要な発熱源を軽減することが重要となる。

4-2-2. 分光器の設計

上記駆動素子を用いた分光器の設計を行った。変位を伴う機械的構造としては、単純板ばねを用いたもの、摺り割りが入ったもの、フレックスピボットを用いたもの、ヒンジを用いたものなどが考えられる。いずれも低温 (~80K) で必要な変位量 (~10μm) が求められる。駆動素子を 3 対称に配置し、独立に駆動させることで光学素子 (エタロン) の平行度を維持したまま、波長走査を行うことができる。ひいてはあらゆる波長で波長分解能などの分光性能を保って、広い波長範囲をカバーすることが可能になる。具体的な試作モデルを図 5、6 に示す。

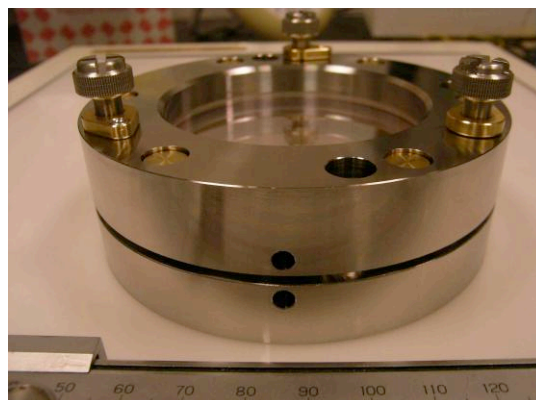


図5：ファブリ・ペロー分光器プロトタイプモデル。3つの押しバネが内蔵されており、精密ネジの押し引きでエタロンの平行度を制御する。



図6：ヒンジを用いた面制御システムの例。駆動素子としてピエゾを用いている。

4-3. 今後の展開

本研究の目的のためには更なる観測データが必要である。現在東京大学アタカマ天文台6.5m望遠鏡(TAO; Yoshii et al. 2016)の建設が進められている。その第1期装置として、近赤外線2色同時多天体分光器SWIMS(Motohara et al. 2016)の開発も進んでいるが、その装置の多天体分光機能を利用した観測を計画している。試験観測となる国立天文台ハワイ観測所・すばる望遠鏡搭載時では北天の、TAOでの運用時には南天を中心とした大質量星形成領域を観測する。これによりサンプル数の増大が見込まれ、統計的・系統的な議論が可能になることが期待される。

装置としては、本研究課題の成果を基に引き続き開発を進める。すばる望遠鏡の近赤外線分光撮像装置IRSCの前置光学系として赤外線観測用波長走査型フィルター(チューナブルフィルター)を開発し、その実用可能性を示す。さらにそれを足がかりとして、すばる望遠鏡が次期装置として推進している広視野近赤外線撮像装置(ULTIMATEプロジェクト)用のチューナブルフィルターへと開発を進めていく予定である。これらを用いたサイエンスとして、大規模星形成領域の物理状態を銀外系内の星団レベルから近傍・遠方銀河までの広い空間ダイナミックレンジで、近赤外線波長全域に渡って連続的に高空間分解能の観測を行うことを考えている。それを基に星形成活動の物理過程を調査、大質量星や銀河の進化の解明に繋げていく。

参考文献

Homeier, N.L., et al., A&A, 397, 585, 2003
 Konishi, M., et al., PASJ, 67, 4, 2015
 Minezaki, T., et al., Proc. of SPIE, 7733, 773356, 2010
 Mori, K., et al., Proc. of SPIE, 9912, 991218, 2016
 Motohara, K., et al., Proc. of SPIE, 7014, 70142T, 2008
 Motohara, K., et al., Proc. of SPIE, 9908, 99083U, 2016
 Okumura, S., et al., 2017, in prep.
 Osawa, K., et al., 2017, in prep.
 Shara, M.M., et al., ApJ, 128, 402, 2009
 Shara, M.M., et al., ApJ, 143, 149, 2013
 Takahashi, H., et al., 2017, in prep.
 Tanaka, M., et al., 2017, in prep.
 Yoshii, Y., et al., Proc. of SPIE, 9906, 99060R, 2016

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3件)

- ① Mori, K., Miyata, T., Honda, M., Takahashi, H.(#5), and 9 co-authors, "Development of superconducting voice coil motor of a cold chopper for MICHI", Proc. of SPIE, vol.9912, 2016, 991218-991225, DOI:10.1117/12.2231889, 査読無
- ② Sakon, I., Takahashi, H.(#9), and other 13 co-authors, "Concurrent Formation of Carbon and Silicate Dust in Nove V1280 Sco", ApJ, 817, vol.2, 2016, DOI:10.3847/0004-637X/817/2/145, 査読有
- ③ Takahashi, H., Konishi, M., Motohara, K., Kato, M.N., Tateuchi, K., Kitagawa, Y., and Todo, S., "Development of multi-object spectroscopy unit for simultaneous-color wide-field infrared multi-object spectrograph", SPIE Conference Series, 9147, 2014, DOI:10.1117/12.2055409, 査読無

[学会発表] (計10件)

- ①毛利 清、高橋 英則(#4)、他12名、「次世代中間赤外線装置における低温チョッピング実現に向けた超伝導リニアモータの開発」、日本天文学会、2017年3月15-18日、九州大学(福岡県・福岡市)
- ②毛利 清、高橋 英則(#4)、他12名、「TMT/MICHI冷却チョッピングに用いる超伝導ボイスコイルモータの性能評価」、日本天文学会、2016年9月14-16日、愛媛大学(愛媛県・松山市)
- ③Mori, K., Miyata, T., Honda, M., Takahashi, H.(#5), and 9 co-authors, 「Development of superconducting voice coil motor of a cold chopper for MICHI」, SPIE, 2016年6月29日, Edinburgh (Scotland)
- ④TAKAHASHI, Hidenori, 「Research of Massive Star Cluster by NIR Narrow-band Imaging Observations」、SWIMS Science Workshop, 2015年9月17日、東京大学(東京都・三鷹市)
- ⑤高橋 英則、田中 培生、奥村 真一郎、「近赤外狭帯域フィルター撮像観測で探る大質量星クラスターの性質」、新世紀における銀河宇宙観測の方向研究会、2015年3月31日、KKR熱海(静岡県・熱海市)
- ⑥TAKAHASHI, Hidenori, 「Research of Massive Star Cluster by NIR Narrow-band Imaging Observations」、日本・チリ二国間交流事業ワークショップ、2014年11月19日、Santiago (Chile)

⑦高橋 英則、「大質量星クラスター LMC/30Dor の近赤外狭帯域フィルター撮像観測」、大質量星形成研究会、2014年9月18-19日、茨城大学（茨城県・水戸市）

⑧高橋 英則、田中 培生、奥村 真一郎、「大質量星クラスターLMC/30Dor の近赤外狭帯域フィルター撮像観測」、日本天文学会、2014年9月11-13日、山形大学（山形県、山形市）

⑨ TAKAHASHI, Hidenori、「Investigation of Property of Massive Star Clusters by mini-TAO, TAO and SPICA」、SPICA Science Conference 2013、2013年6月18-21日、Univ. of Tokyo (Bunkyo-ku, Tokyo)

⑩高橋 英則、「miniTAO1m で見えてきた大質量星クラスターの特性とTAO6.5mへの期待」、組織的若手派遣事業研究会、2013年4月22日、東京大学・宇宙線研究所（東京都・柏市）

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）
○取得状況（計0件）

〔その他〕

(1) ホームページ等

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/>
<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kibans/anir/>
http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/tanaka_lab/astrophysics.html

(2) アウトリーチ活動等

①大澤 健太郎、高橋 英則、田中 培生、奥村 真一郎

「重い星の終末期の姿」

国立天文台三鷹キャンパス・特別公開

平成28年10月22日

②田中 培生

「大質量星の一生と星の時間」

東京大学・オープンキャンパス

平成25年8月8日

③高橋 英則

「ぐんま天文台でもできる新しい星の見つけ方」

県立ぐんま天文台・夏祭り講演会

平成25年7月27日

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 英則 (TAKAHASHI, Hidenori)

東京大学・大学院理学系研究科・特任助教

研究者番号：80361567

(3)連携研究者

田中 培生 (TANAKA, Masuo)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：70188340

奥村 真一郎 (OKUMURA, Shin-ichiro)

日本スペースガード協会・研究員

研究者番号：40344270

橋本 修 (HASHIMOTO, Osamu)

県立ぐんま天文台・観測普及研究員

研究者番号：20221492