

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540258

研究課題名(和文)大質量星形成領域におけるウォルフ・ライエ星の探索

研究課題名(英文) Search for Wolf-Rayet Stars in Massive Star Clusters

研究代表者

高橋 英則 (TAKAHASHI, Hidenori)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：80361567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：核崩壊型超新星の母天体であるWolf-Rayet星(WR)の他、高輝度青色変光星(LBV)、黄色超巨星(YHG)、赤色超巨星(RSG)などを含む銀河系内外の大質量星クラスターの形成・進化過程および年齢、さらにその空間分布や星間物質への寄与などの解明を目的として、広帯域Ksバンドと狭帯域フィルターを用いた近赤外線撮像観測を行っている。これらのフィルターセットから得られる2色図は、輝線星だけでなく、減光の大きな領域での減光量を補正したKs等級とカラー情報を精度良く与えるため、若い天体も含めた大質量星の形成から終末に至るあらゆる進化段階の天体の検出に有効である。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate not only the formation, evolution process, and age of massive star clusters but also distribution and contribution to interstellar medium, we had carried out near-infrared spectroscopic imaging observation. NIR narrow-band filters (ex: 1.875um, 2.07um) which is customized for detection of massive stars and broad-band filter (Ks) are used for the observation. In the massive star clusters, many type of massive stars exist; that is, Wolf-Rayet stars which are seemed to be the progenitors of Ib/c type supernovae, Luminous Blue Variable (LBV), Yellow Hyper Giant (YHG), Red Super Giant (RSG), and so on. The color-color diagram that is derived from these NIR filters gives us color information of reddening object by dust. Therefore the diagram is effective for not only detection of emission stars but also understanding of various stage of evolution from birth to end for massive stars.

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：大質量星 ウォルフ・ライエ星 近赤外線 分光撮像観測 東京大学アタカマ天文台

## 1. 研究開始当初の背景

大質量星は、そのエネルギーの大きさから銀河のエネルギー収支や星間物質に非常に大きな影響力を持つ。また、そこからの質量放出は銀河の化学進化やダストの形成などにも重要な影響を与える。大質量星の進化は理論・観測両面から研究されてきたが、その理解はまだ十分であるとは言えない。

WR星は大質量星の水素の外層が強い恒星風によって吹き飛ばされ、高温の恒星内部が露出したもので、青色巨星とも呼ばれる。WR星は、特に重たい大質量星の一生の最終段階であり、それはやがてIb型或はIc型超新星爆発を起こすと考えられている。大質量星の進化シナリオ (Crowther 2007) では、概ね25太陽質量以上の質量を持つ星が進化段階の途中でWR星の段階を経る。分類として、中心核の燃焼段階によってWN型(CNO cycleによる水素燃焼段階)、WC型(3 $\alpha$ 反応によるHe燃焼段階)、WO型(C燃焼段階)に分けられる。観測的(分光学的)には、ヘリウム、窒素の輝線が強いWN型、炭素輝線が強いWC型、酸素輝線の強いWO型に区分される。幅の広い輝線は恒星風の運動速度が非常に大きいことを意味している。また大質量星故に寿命が短く、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特徴の一つである。

WR星の発見は19世紀後半である。その後、恒星風メカニズム、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。また、銀河系内でのWR星の分布や数を、Pop Iと銀河系の金属量の分布のモデルを用いて考察してみると、銀河系内でおおよそ5,000個は存在するという結果が得られる。しかしながら、現在までの検出個数

はおおよそ500個と、予想の10%に過ぎない。さらにWR星の終焉である超新星爆発の観測例は、ここ1000年でもわずか5個である。さらにそれはIa型であり、Ib型、Ic型に至っては皆無である(WR星の寿命を約10万年とすると、100年で3個は超新星になるはずである)。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領域で誕生・進化するという事実があげられる。

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と考えている。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、いくつかのWR星が検出されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまで銀河系内で見つからないIb/c型超新星爆発の前段階と考えられているWolf-Rayet星(WR星)を探索・発見し、その詳細研究を行うことが第一の目的である。さらに検出された星の分光観測を行い、大質量星のタイプおよびサブクラス分類、また個々の物理状態を詳細に研究する。また、大質量星だけでなく、クラスター内の構成要素やダスト減光を丹念に調べることで、多様な周辺環境の中で、大質量星クラスターの形成・進化がどのように進んでいくのかを探るのが本研究の最終目標である。

## 3. 研究の方法

### (1) 近赤外を用いた観測

これまでの観測は主に可視光での観測であり、その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。炭素が卓越しているWC型では、CIII(5696Å)とCIV(5805Å)輝線、WN型ではNIII(4634, 4641Å), NIV(6383, 7116Å), NV(4604, 4620Å)が判断基準となっている。いずれも可視光領域にある輝線での分類分けであり、減光のない、或は小さい領域では、これら可視光による検出・分類が可能であった。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であるとは言えない。さらには、検出そのものがされない可能性が高い。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。

そこで観測には、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を用いている。昨今大口径望遠鏡が盛んに使われているが、(1)広視野が得られること、(2)大質量星は比較的明るい、(3)広い領域をサーベイするための多くの観測時間の確保、などの理由から中小口径望遠鏡でも観測も有効な手段であり、国内外の望遠鏡を用いた観測を中心に行っている。

### (2) フィルターシステムの構築

これまでにShara等も同様の赤外線観測を行っているが、大質量星の輝線プロファイル

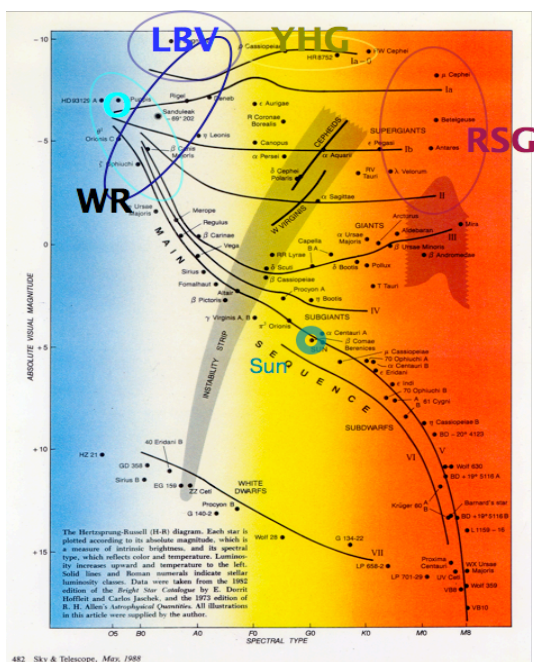


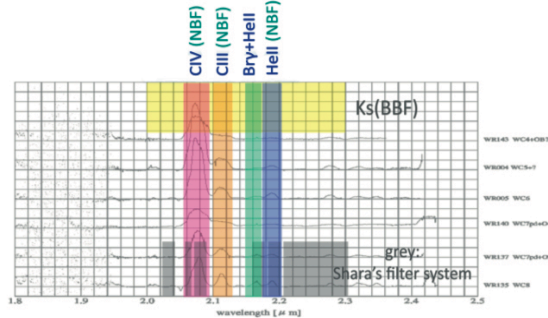
図1: HRダイアグラム中の大質量星の分布

を考えると、観測フィルターの波長設定が必ずしも最適であるとは言えない。そこで我々は本研究において、さらに効率的な大質量星探索のフィルターシステムの構築を行った。具体的には、広帯域 Ks バンドと複数枚の狭帯域 (N187=1.87  $\mu\text{m}$ , N207=2.07  $\mu\text{m}$ , N218=2.18  $\mu\text{m}$ ) である。それぞれのフィルターでは、Pa  $\alpha$ 、HeII、CIVなどの大質量星からの輝線の検出に効率的な仕様となっている (表1)。

表1: 大質量星に見られる可視光/近赤外輝線。

輝線	可視光 波長[nm]	近赤外 波長[ $\mu\text{m}$ ]
He I	587.6 $^3\text{D}\rightarrow^3\text{P}$	1.083 $^3\text{P}\rightarrow^3\text{S}$
	706.5 $^3\text{S}\rightarrow^3\text{P}$	2.058 $^1\text{P}\rightarrow^1\text{S}$
HeII	468.6 $4\rightarrow3$	1.012 $5\rightarrow4$
	541.2 $7\rightarrow4$	1.163 $7\rightarrow5$
	656.0 $6\rightarrow4$ (+H $\alpha$ )	1.281 $10\rightarrow6$ (+Pa $\beta$ )
		<b>1.864</b> $6\rightarrow5$ (+Pa $\alpha$ )
		<b>1.876</b> $8\rightarrow6$ (+Pa $\alpha$ )
2.166 $14\rightarrow8$ (+Br $\gamma$ )		
<b>2.189</b> $10\rightarrow7$		
H	486.1 H $\beta$	1.285 Pa $\beta$
	656.3 H $\alpha$	<b>1.875</b> Pa $\alpha$
		<b>2.167</b> Br $\gamma$
<hr/>		
NIII	464.0	
NIV	711.6	
<hr/>		
CIII	569.6 $3d\rightarrow3p$	1.198 $4p\rightarrow4s$
		2.108 $5p\rightarrow5s$
CIV	466.0 $6\rightarrow5$	1.191 $8\rightarrow7$
		1.736 $9\rightarrow8$
		<b>2.078</b> $3d\rightarrow3p$

図2: 本研究のフィルターシステム (CIV,



HeII, Ks). 背景は WC 型 WR 星の近赤外線スペクトル。

### (3) 観測サイトと観測装置

観測サイトとしては、南米チリ、アタカマ高地にあるチャントール山にある mini-TAO 望遠鏡と群馬県立ぐんま天文台である。両者を用いることで、北天南天の多くの天域をカバーすることができる。特に mini-TAO は標高が 5640m にあり、大気吸収が低減されることで地上観測としては他に類を見な



い感度で観測を行うことが可能になる。mini-TAO に搭載されている近赤外線カメラ ANIR (Motohara et al. 2008) には、水素の再結合線である Pa  $\alpha$  の波長に合わせた狭帯域 N187 フィルターと N207 フィルターが内挿されている。ANIR は現在地上から Pa  $\alpha$  が観測できる唯一の装置である。他には、ぐんま天文台 (GAO) 150cm 望遠鏡搭載の近赤外線カメラ (GIRCS; Takahashi et al. 2009) には、2.07  $\mu\text{m}$  および 2.18  $\mu\text{m}$  の炭素輝線を効率的に検出するフィルター (N07, N218) が内装されており、北天のサーベイ観測を行うことができる。いずれも共同利用観測装置ではないため、比較的フレキシブルな観測運用を行うことが可能である。

### (4) 天体の検出と分類

前述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。輝線天体は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 excess する。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る。2つの狭帯域フィルターを用いた 2 色図 (カラーカラーダイアグラム) 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。また減光量の波長依存性を考慮すると、減光量の excess から 2 色図で個々の天体 (付近) の減光量が推定できる。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。

## 4. 研究成果

### (1) フィルターシステムの有効性確認

まず、比較的減光が大きく ( $A_{Ks} \sim 3$  等)、可視では詳細な分類が困難な銀河中心方向の星形成領域 (Quintuplet, Sagittarius A\*: 図3) の観測を行った。この領域は大質量星形成が盛んであり、WR 星の存在も期待されている場所である。星の同定やタイプはある程度わかっているが、詳細なサブクラスは厳密には確定しておらず不定性が大きい。これらの天体について、前述と同様に CIV, Ks バンドでの撮像を行い、各々の比をとったものが図4である。ここで、CIV: 2.07  $\mu\text{m}$  と Ks: 2.15  $\mu\text{m}$  (バンドの中心波長) の波長による減光量の違いを考慮し、補正を行っている ( $A_{\lambda} \propto \lambda^{-\alpha}$  ( $\alpha=1.80$ )). 尚、クラスター内の減光量は同じとした。Quintuplet では、WR 星と同定されている 17 天体をすべて解析した。この結果、そのうち 1 天

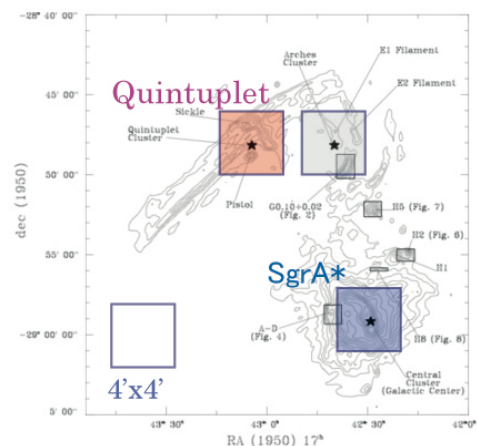


図3: 銀河中心方向の観測領域。

体のCIV/Ks比が有意に0.13 (<WC8以外の天体の平均値) より大きな値を示し、WC8より早期型のWR星である可能性を示唆する。一方、SgrA\*ではWR星と同定されている42天体のうち、今回のデータでは検出できなかった天体もあり、また、空間分解できない天体もあったが、解析を行った20天体のうち1天体が<WC8型WR星であると同定された。これらの結果は、これまでのおおまかな分類と大きくは矛盾しない。

大質量星クラスター内のWR星の比率 (WR星/O型星およびWC型/WN型) は、クラスターの年齢とも密接に関係するが、銀河中心領域の場合、この結果は妥当な値である。つまり、この手法が早期型のWR星のピックアップに有効な手段であるということが出来る。他にも早期型のWR星探索・検出の手法はあるが、本研究の手法は効率的、且つ信頼性の高いツールであると結論できた。

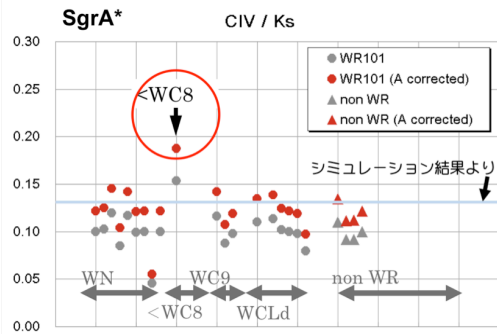


図4: SgrA\*領域で観測された天体のCIV/Ks比。

(2) 銀河中心方向クラスターの観測

図5に銀河中心方向の3つのクラスターの2色図を示す。横軸はN207/Ks比、縦軸はN187/Ksである。各軸とも、輝線のないフラットなスペクトルから得られる比で規格化してある。この図において、右側にはN207が超過する(輝線)天体が、また上側にはN187が超過する(輝線)天体がプロットされることになる。また、左下方向に向うに従って、減光量が増加する、或は赤い天体であることを示している。

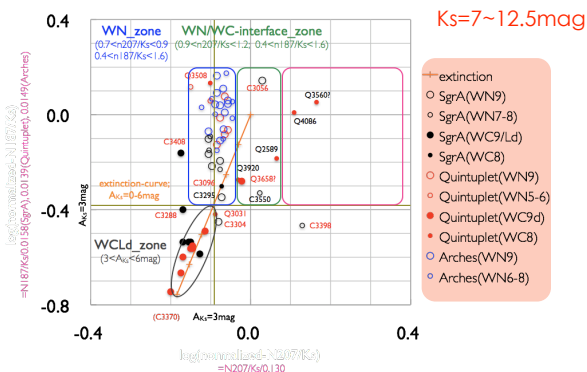


図5: 銀河中心3領域の2色図におけるWRの分布。

銀河中心方向クラスターは既知のWR星が多数存在するが、今回の観測領域に含まれるWR星のほとんどが検出されている。2色図上での位置は、WC型が右サイドのWCゾーンに、WN型がWNゾーンに分布している。さらにダストを纏ったWCLd型は左下ゾーンにプロットされる。この結果は、このフィルターセットによる2色図が星のタイプ別分類に非常に効率であることを示している。

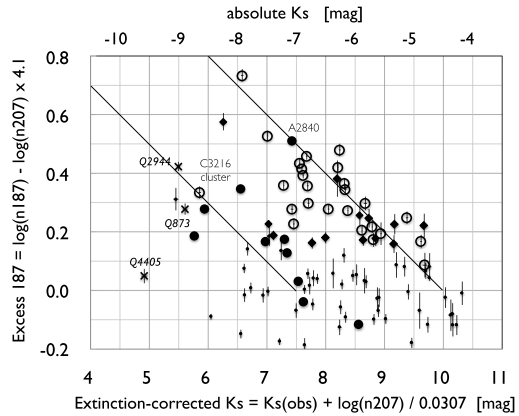


図6: 銀河中心3領域のKs vs N187超過。

さらに、同じく3領域のWN型WR星、WN9/Ofpe型星について、減光を補正したKsとN187超過量をプロットしたものを図6に示す。白丸がWN型WR星、黒丸がWN9/Ofpe型星、黒点がO型星、+印がLBV星を示している。これを見ると、O型星はKsの明るさによらず超過量は一定値となる、つまりN187フィルターには特徴的な輝線は存在しないことを表している。これに対し輝線天体はKs等級と超過量に逆相関し、さらに2種類のシーケンスに分かれることもわかる。晩期型WN星やOfpe型星は左側のシーケンスに乗り、それより早期型のWN型WR星は同じKs等級でも大きな超過量を示すシーケンス上にプロットされる。これはN187フィルターに含まれるHeII輝線がKs等級に比例して強くなることを意味している。これは明るさと恒星風強度が関係しているのかもしれない。

(3) 銀河系外の大規模星形成領域の観測

天の川銀河とは物理状態が異なる環境での星形成および活動を調べるために、銀河系外の大規模星形成領域の観測を行った。対象は、金属量が異なる大マゼラン銀河(LMC)、その中でも特に大質量星が多く存在し、星形成活動が盛んな30Doradus周辺を選んだ。この領域の中でもR136と呼ばれるクラスターは、150太陽質量を超える超巨大質量の星が存在することがわかっており(Crowther et al. 2010)、銀河系内のクラスターとは星形成や進化過程にかなりの違いがあると考えられる。これが金属量の違いに因るものなのか、他の原因があるのかはわかっていない。また、R136領域から、N158, N159, N160領域へと星形成活動が連続的に変化しており、進化の様子を連続的に調べることが可能である。

これら領域では過去に、Breysacher et al. (1999) によってWR星がカタログ化されているが、今回のサーベイ観測ではそれらのWC型WR星がピックアップされたことに加え、それ以外にも新たにWC型WR星の可能性のある天体を複数検出した。これらの天体は、CIV/Ks比が早期型WC型WR星に特徴的な値をとる以外にも、WR星の絶対等級(Crowther et al. 2006)も妥当な値になることから候補天体の可能性がある。やや暗めの天体については、局所的な減光を受けている可能性がある。また、この領域はAKARI/FIS-FTSによって遠赤外[OIII]輝線が広く観測されており、clumpyなクラウドの存在も示唆されている(Kawada et al. 2011)。その電離源として埋もれた大質量星、つまり今回検出されたような減光を受けたWR星もその役割を担っているかもしれない。

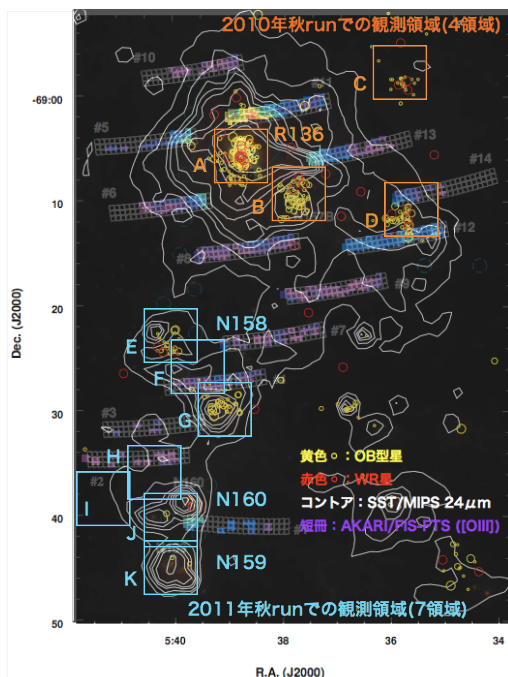


図7：LMC/30Dor観測領域。

- ・ R136 領域：超巨大質量星を含むクラスター
- ・ N158：SN起因のsuperbubbleのX線観測あり。既に進化した大質量星が複数存在。
- ・ N160：HII領域blobが点在。若い大質量星が存在。
- ・ N159：COが強く大質量星が少ない。最も若い領域。

このサーベイ観測ではWC型WR星のピックアップだけでなく、(1) 超新星の前段階であると考えられているWR星の分布を調べることで大質量星の進化シナリオからその星を含むクラスターや星形成領域の年齢の推測、(2) 独特のフィルターシステムを使った星間減光量の直接の推定、さらに、(3) 40~75太陽質量のような大質量星を含むクラスターごとの初期質量関数 (Initial Mass Function) への制限、などの議論が可能になる。

また、2色図からは観測領域の減光量の推定、Mira型星やYSOの検出も可能であり、大質量星の空間・個数分布に加えて、進化段階の異なる複数の大質量星形成領域の形成・進化を系統的に議論することが可能なデータセットとなっている。

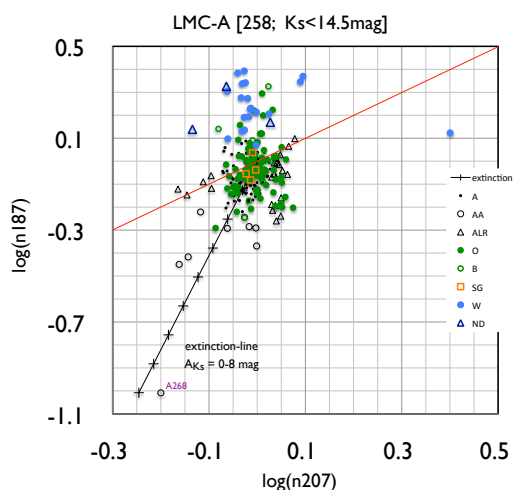


図8：LMC/30Dor/R136付近の2色図。

#### (4) 他領域の観測

クラスターの形成・進化を系統的に研究するために、さらに多くの観測サンプルを集める必要がある。銀河系内サンプルとして、Westerlund領域、さらに低金属量環境での星形成を調べるために小マゼラン銀河 (SMC) の観測もmini-TAO/ANIRで行った。これらについては詳細解析が進められている。

現在、銀河中心方向クラスター、Westerlundクラスター、LMC/30Dorについてそれぞれ結果をまとめ、学術論文として執筆中であり、平成26年内の投稿を予定している。

#### (5) 参考文献

- Breysacher, J., et al., A&AS, 137, 117, 1999  
 Crowther, P.A., et al., MNRAS, 372, 1407, 2006  
 Crowther, P.A., et al., ARAA, 45, 177, 2007  
 Crowther, P.A., et al., MNRAS, 408, 731, 2010  
 Homeier, N.L., et al., A&A, 397, 585, 2003  
 Kawada, M., et al., PASJ, 63, 903, 2011  
 Motohara, K., et al., Proc. of SPIE, 7014, 70142T, 2008  
 Shara, M.M., et al., ApJ, 128, 402, 2009  
 Shara, M.M., et al., ApJ, 143, 149, 2013  
 Takahashi, H., et al., Proc. of GAO-ITB JWS, 50, 2009

#### 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0件)

〔学会発表〕(計9件)

① 高橋 英則、田中 培生、奥村 真一郎、他 TAO グループ、「近赤外狭帯域フィルターによる銀河中心大質量星クラスターの撮像観測：輝線天体の検出」、日本天文学会、2013年3月23日、埼玉大学

② 田中 培生、高橋 英則、奥村 真一郎、他 TAO グループ、「近赤外狭帯域フィルターに

よる銀河中心大質量星クラスターの撮像観測：減光分布と極めて赤い天体の検出」、日本天文学会、2013年3月23日、埼玉大学

③高橋 英則、田中 培生、奥村 真一郎、他 TAO グループ、「近赤外分光撮像観測による Wolf-Rayet 星探索：LMC/30Dor 領域」、日本天文学会、2012年3月20日、龍谷大学

④田中 培生、高橋 英則、奥村 真一郎、他 TAO グループ、「近赤外分光撮像観測による Wolf-Rayet 星探索：減光量の評価」、日本天文学会、2012年3月20日、龍谷大学

⑤奥村 真一郎、田中 培生、高橋 英則、他 TAO グループ、「近赤外分光撮像観測による Wolf-Rayet 星探索：Pa $\alpha$  フィルターによる観測」、日本天文学会、2012年3月20日、龍谷大学

⑥高橋 英則、田中 培生、奥村 真一郎、他 TAO グループ、「近赤外による Wolf-Rayet 星探索：LMC 30Doradus クラスター」、日本天文学会、2011年9月20日、鹿児島大学

⑦田中 培生、高橋 英則、奥村 真一郎、他 TAO グループ、「近赤外による Wolf-Rayet 星探索：銀河中心領域クラスター」、日本天文学会、2011年9月20日、鹿児島大学

⑧高橋 英則、川端 拓信、奥村 真一郎、柳澤 顕史、館内 謙、田中 培生、「大質量星形成領域における Wolf-Rayet 星の探索と星団・物理環境の解明」、日本天文学会、2011年3月17日、筑波大学

⑨高橋 英則、田中 培生、川端 拓信、「系内大質量星形成領域の埋もれた Wolf-Rayet 星の探索」、日本天文学会、2010年9月22日、金沢大学

〔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〕

(1) ホームページ等

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kibans/anir/>  
[http://www.astron.pref.gunma.jp/instruments/device\\_ir.html](http://www.astron.pref.gunma.jp/instruments/device_ir.html)

(2) アウトリーチ活動等

①高橋 英則  
「赤外線を使った新しい星の見つけ方」  
国立天文台三鷹キャンパス・特別公開  
平成25年10月18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」  
県立群馬天文台・夏祭り講演会  
平成25年7月27日

④高橋 英則  
「世界最高峰の天文台から観る宇宙」  
江東区自悠大学・生涯学習講座  
平成24年11~12月、全6回

⑤高橋 英則  
「メタボな星の一生～星の健康診断」  
江東区自悠大学・生涯学習講座  
平成23年12月、全4回

⑥田中 培生  
「ダイエット中の星々～大質量星からのガス放出と地球・生命の誕生」  
日本天文学会・公開講演会  
平成23年9月18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・特任研究員  
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  
(平成23年度より連携研究者)