

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

科学研究費助成事業 研究成果報告書



平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400227

研究課題名(和文) 紫外線/赤外線でのEta Carinae観測:変化する恒星風の包括的検証

研究課題名(英文) Investigation of changing stellar wind of Eta Carinae in NIR and UV

研究代表者

石橋 和紀 (Ishibashi, Kazunori)

名古屋大学・理学研究科・講師

研究者番号：50547536

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 1,400,000 円

研究成果の概要(和文): 超大質量星Eta Carは、1990年代初期には毎年千分の1の太陽質量を恒星風として放出することで知られていた。その質量ロスの度合いは異常で、その物理メカニズムは理解されていない。そのEta Carだが、近年恒星風目まぐるしい変化(光度変化、恒星風の物理的变化)を見せている。本研究では、Hubble宇宙望遠鏡(STIS)を用いた紫外線分光観測や南アフリカ天文台のIRSF1.4m赤外線望遠鏡での測光観測の結果から、それらの現象がここ10年間程度期間の間に起こったEta Car起因の恒星風質量ロスの半減が理由であることを解明した。

研究成果の概要(英文): Super-massive star Eta Carinae was well-known for its tremendous mass loss rate -- 1/1000th of the solar mass per year -- and its physical mechanism is not understood at all. Then, in early 2000s, it is noted that Eta Car is undergoing rapid changes in its brightness and apparent changes in its massive stellar wind. In this research program, with the use of Hubble Space Telescope (STIS) and IRSF telescope at SAAO, the cause is identified to be a significant reduction in Eta Car's massive stellar wind, roughly by 50% of the reduction merely in 10 years or so.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：紫外線天文学 赤外線天文学 恒星 大質量星 変光星 国際共同研究 IRSF HST

1. 研究開始当初の背景

宇宙創生初期の” First Star” には、多くの大質量星が存在したという説がある。諸説あるが、特に大質量星が進化の過程でもたらされる急速な重元素生成と、爆発的現象を経てのそれらの星間空間への放出が、今日に見られる宇宙元素組成を説明する上で重要な鍵と見られている。しかし、それらに強く寄与する超大質量星 - 100 太陽質量程度の星々 - が、どのように生成した重元素を爆発的に星間物質として放出するかは全く理解されていない。100 ~ 200 太陽質量を越えるあたりの超大質量星は、恒星大気中でその輝度と重力が釣り合いを起こし（Eddington luminosity）、些細な外因が恒星大気的不安定性を引き起こし爆発的質量放出へと継がり兼ねない。だが、その外因自体が理解されていないのである。宇宙論を語る上で、これら超大質量星の理解は不可欠である。その研究を観測的に可能にする天体の重点的調査が求められた。

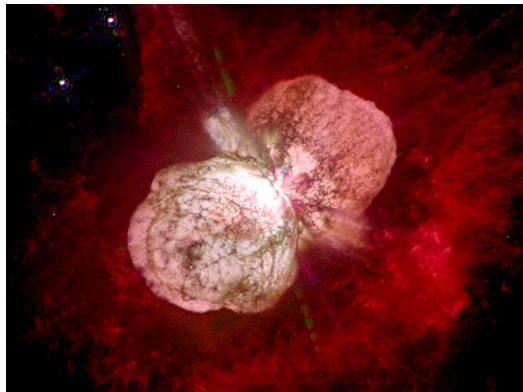


図 1：超大質量星 Eta Carinae

2. 研究の目的

銀河系最大級の大質量星 Eta Car [図 1] が、連星周期と思われる 5.5 年毎に著しい変化を見せている原因は、その伴星の潮汐効果による主星の自転速度の段階的スピンアップが起因と予想した。主星の上層大気が増速回転により膨れあがり不安定性が増し、その影響が星より吹き出す熱い「風」にでていると提唱し、その変化が起こると

予測された 2014 年 7 月頃前後にて紫外線分光と赤外線測光を行い、事象自体が実際に周期予想どおりに再現されるか否かの検証、及び、恒星風自体がいかに変化しているかの度合いを解明し、恒星自体とその恒星風の物理量変化過程を調査する。

3. 研究の方法

主要研究方法は、以下の 4 項目である。

（1）HST 紫外線分光観測

HST/Space Telescope Imaging Spectrograph (STIS) にて、高空間分解能を用いた Echelle 紫外線分光観測及び可視光域での grating 分光観測を実施する。主に、0.2 秒角幅のスリットにて中心星の観測を行い、水素輝線強度及び紫外線スペクトルの時間変動を調査し、数年単位で主星がどのように変化するかを解析する。申請時には、2014 年及び 2015 年に紫外線及び可視光帯域での観測時間が保証され、それらを過去 20 年に得られたデータと比較する。

HST/STIS データ処理プログラムの稼動に、IDL という市販ソフトが用いられる。しかし、プログラム自体が 1990 年代後半に開発された為、そのプログラムを最新版の IDL ソフト上で稼動させることが難しかった。今回の研究の一環として、そのプログラム自体のアップデートも同時に行う。

（2）南ア天文台での赤外線モニター観測

5.5 年周期で起こる近星点通過が 2014.5 年に起こることが予想されており、それに合わせて南アフリカ天文台の IRSF1.4m 望遠機施設へ直接訪問し、観測手法を確立し、現地に研究担当者不在の場合でも依頼観測にてデータ入手を目指せるような体制作りを実施する。ちなみに、南アフリカからでは、Eta Car は 8 月中旬から 9 月中旬の期間は夜間の観測が困難である。その期間中の観

測を可能にする為に、NDフィルターを使い日中での観測手法の確立も目指した。これは、近赤外から中間赤外線に掛けて異様に明るい Eta Car であるからこそ可能な試みである。

基本は、JHKsのバンド帯にて時間変動を2週間に一度程度の頻度にて観測し、0.01～0.03等程度の測定精度でのモニタリングを目指した。

(3) P Cygni Profile 解析

恒星風起源の輝線・吸収線の強度・構造変化を解析し、恒星風の物理量がどのように変化しているかを推測する。その際に、恒星風計算モデルとして一般的な CMFGEN等のモデル計算を用いての解析を行う予定であったが、高温かつ高輝度の伴星がもたらす影響や、二つの大質量星から放たれる恒星風の衝突の影響等が無視できず、紫外線スペクトルの変動のみの解析にて恒星風の状態を解明することとした(後述の査読論文 [5] 参照)。

(4) 赤外線観測データ解析

2014.5年前後の近赤外線観測データを解析し、(a)2003.5年、2009.0年同様の光度変化が発現するかを確認し、(b)近星点通過時の赤外線での color-color diagram に見られるような見かけの色の変化(図2)の起因を検証する(査読論文 [5] 参照)。

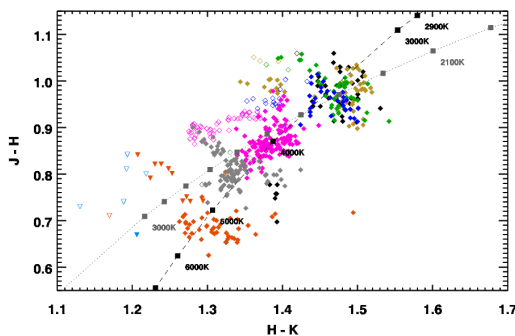


図2：H-Ks vs. J-H Diagram (近赤外線での見かけの色の変化度)

4. 研究成果

上記4研究項目についての成果を以下に示す。

(1) 紫外線分光観測

HST/STIS観測は計画通りに実施された。その観測日時と観測帯域についての詳細は以下の表1に記す。HST/STIS観測の成果は幾つかの査読論文として発表され(査読論文 [2],[3],[4])、その成果は高く評価された故に、2018年に再度HST/STIS観測時間を獲得することに繋がった。それらの新規データについては、現在解析作業が継続的に進行中である。

HST データを用い、紫外線帯域スペクトルの時間変動を調査した結果は、査読論文 [1] に纏められている。結果の概略を述べると、紫外線スペクトルの変化の度合いが示すのは、その理由が主に強度の増加ではなく、その紫外線帯の光子を吸収する視線方向のガスの減少が主な理由であると推測できる(図3)。ほんの10年前に見られなかった恒星大気からの連続スペクトルの存在が垣間見られるようになったことは、そ

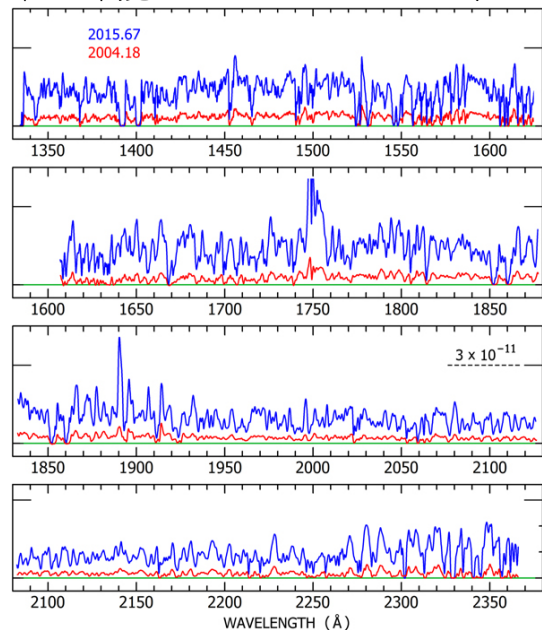


図3：紫外線帯域でのスペクトル強度変化

観測 ID	観測日時	観測帯域
1337701	Sep 14,2013	可視光
1337702	Oct 26,2013	紫外線
1337703	Jul 13, 2014	可視光
1337704	Jul 30, 2014	可視光
1337705	Aug 15,2014	可視光
1337706	Aug 31, 2014	可視光
1337707	Sep 17, 2014	可視光
1378901	Nov 9,2014	可視光
1378903	Sep 2,2015	紫外線
1378902	Sep 15,2015	可視光
1506701	Feb 21, 2018	可視光
1506703	Feb 26,2018	可視光
1506702	Apr 21, 2018	紫外線

の主星の恒星風による質量放出度の減少を暗示している。

ちなみに、HST/STISデータ処理ソフトの更新もつつがなく完了し、米国ミネソタ大学と名古屋大学にて稼働することを確認した。

（２）IRSFでの赤外線モニター観測

観測手法の確立の為、2014年7月にIRSFを訪問し観測手順を確認し、依頼観測の為に指南書を作成した。これにより、以後はIRSF観測者への依頼観測という形で赤外線輝度計測を継続する体制を構築することが可能となる。観測機器の使用状況や観測者の熟練度、そして、天候などにも左右されるが、概ね月に1～2度程度の低頻度での依頼観測は可能となった（図4の赤外線光度変化曲線参照。未発表データを含まず）。現在では、鹿児島大学の永山准教授や南アフリカ天文台の方々と共に、更に高頻度

（一日1回の頻度での観測）の依頼もしくは遠隔操作での観測の体制の構築に向けて動き出している。

日中観測については、IRSF管理者でもある永山准教授によりすでに実証済みであり、高いバックグラウンドノイズの環境下（大気が赤外線にて明るいことが起因）でも、0.03等級程度の精度での測光は可能と判断している。日中観測については、依頼も遠隔操作での観測も高いリスクを伴う故に現状は視野には入っていない。

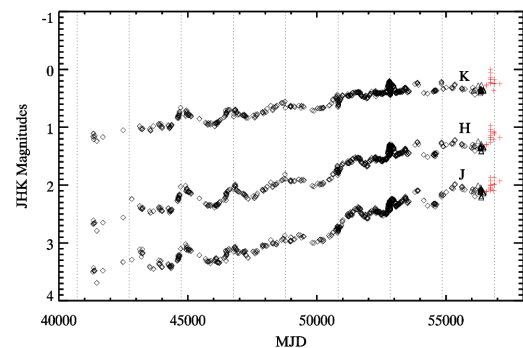


図4：JHKバンド赤外線光度曲線

（３）輝線・吸収線解析

紫外線帯域にて観測されるFe II及びAl II、Al IIIの吸収線構造は、2002.5年時点では視線方向に-400 km/sから-500 km/sで動く恒星風による強い吸収帯が存在したが、2013.8年には、その吸収線の幅が狭まり、吸収の度合いが減少したことが伺える（図5）。詳細は査読論文 [1] に記載したが、最も可能性の高い起因としては、ionizing radiationが主星の恒星風に浸透しやすくなったことでの元素の電離度の変化が疑われている。それを可能にするのは、恒星風自体の密度が、ここ10年程度で5割程度減少したことによると説明するのが最も自然である。

（４）赤外線観測データ解析

本研究の一環として観測されたデータ点を、

図2のオレンジ及び水色の点として示す。
 まず、重要な点としては、2003.5年、2009.0年同様の赤外線帯域での見かけの色の変化が2014.5年の近星点通過の際にも発現したことが確認された。5. 5年毎に恒星自体の見かけの色が「青」く変化しているのも見て取れる。

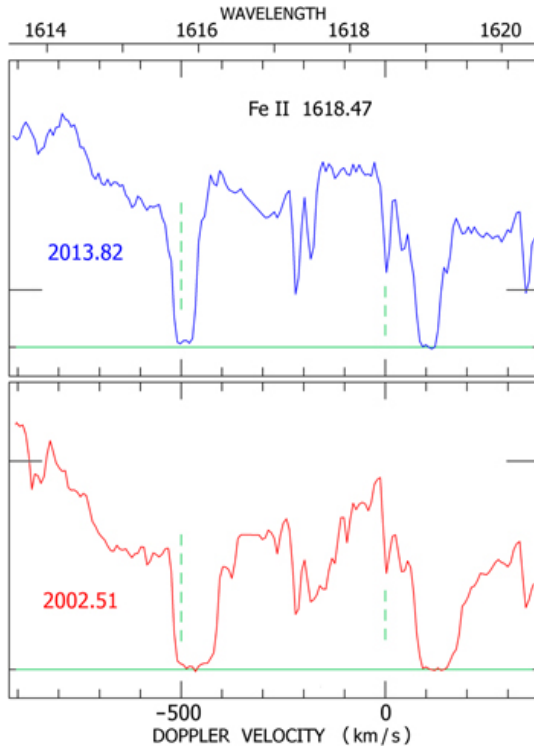


図5：紫外線帯域での吸収線強度の減少（査読論文[1]より抜粋）

その周期的変化の原因については、現在でも調査中であるが、近星点通過中に起こる色の変化（図6 赤線参照）は、おそらくJHKバンド帯にて観測される水素輝線

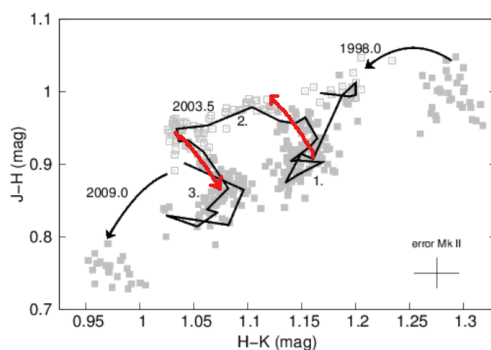


図6：近星点通過時の見かけの色変化（査読論文[5]より抜粋）

（Paschen & Bracket Series）とHelium輝線の強度変化によるものである。これは、伴星が主星の厚い恒星風の中へ突入することにより起こる恒星風のガス電離度の変化（プラズマ温度でいうと1万度から2万度程度の電離度への変化）で説明できそうであるとまでは計算できているが、詳細についてはまだ解析中である。

5. 主な発表論文等

【査読付き論文】

[1] Eta Carinae's Declining Outflow Seen in the UV, 2002 - 2015 Davidson, K., Ishibashi, K., Martin, J.C., & Humphreys, R.M. 2018, ApJ, 858, 109

[2] Concerning the Orbit of η Car Davidson, K., Ishibashi, K., & Martin, J.C. 2017, Research Notes of the American Astronomical Society, 1, 6

[3] Eta Carinae's 2014.6 Spectroscopic Event: The Extraordinary He II and N II Features, Davidson, K., Mehner, A., Humphreys, R.M., Martin, J.C., & Ishibashi, K. 2015, ApJL, 801, L15

[4] Eta Carinae's 2014.6 spectroscopic event: Clues to the long-term recovery from its Great Eruption, Mehner, A., Davidson, K., Humphreys, R.M., Walter, F.M., Baade, D., de Wit, W.J. Martin, J. & Ishibashi, K., et al. 2015, A&A, 578, A122

[5] Near-infrared evidence for a sudden temperature increase in Eta Carinae, Mehner, A., Ishibashi, K., White-lock, P., et al. 2014, A&A, 564, A14

【査読無し論文】

[1] Near IR observations of η Car: Reaching its critical rotation?

Ishibashi, K., Mehner, A., & Nagayama, T.
2016, Journal of Physics Conference Series, 728, 072007

[2] eta Carinae -- Caught in Transition to the Photometric Minimum, Humphreys, R. M., Martin, J. C., Mehner, A., Ishibashi, K., & Davidson, K. 2014, The Astronomer's Telegram, 6368

〔雑誌論文〕（計0件）

〔学会発表〕（計4件）

[1] Eta Carinae: 変光する大質量連星（招待講演） Ishibashi, K.、「連星系・変光星・低温度星研究会 2017」、Sept. 15 - 17, 2017, 北海道名寄市

[2] Oh IRSF, You are my only hope! The case for near-IR monitoring of Eta Carinae(口頭), Ishibashi, K. “IRSF Past and Future” meeting, March 2-4, 2016, South Africa

[3] The Increased He II Emission and the Continuing Evolution of the Wind During Eta Carinae's 2014.6 Spectroscopic Event (ポスター発表)

Martin, J. C., Davidson, K., Mehner, A., Humphreys, R. M., & Ishibashi, K.
2015, American Astronomical Society Meeting Abstracts #225, 225, 344.14

[4] Near IR observations of eta Car: Reaching its critical rotation? (ポスター発表)

Ishibashi, K., Mehner, A., & Nagayama, T.
“11th Pacific Rim Conference on

Stellar Astro-physics”, December 14-17, 2015, Hong Kong.

〔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〕

プロジェクトウェブサイト

<http://etacar.umn.edu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石橋 和紀 (ISHIBASHI Kazunori)

名古屋大学大学院・理学研究科・講師

研究者番号: 50547536

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

DAVIDSON, Kris / HUMPHREYS, Roberta
University of Minnesota (Twin Cities)
Minnesota Institute for Astrophysics
Professor Emeritus

MEHNER, Andrea

European Southern Observatory
Instrument Scientist

永山 貴宏 (NAGAYAMA Takahiro)

鹿児島大学理工学研究科物理宇宙専攻
准教授