

# Herbig Be 型星 Z CMa の可視光分光モニター観測

秋本 妃奈子 (兵庫県立大学)

## Abstract

前主系列星の変光を調べることは、若い星の質量獲得のメカニズムの解明に役立つと考えられる。近年アウトバーストを起こしたことで有名な Z CMa は、Herbig Be 型の星と FU Ori 型の星の若い連星であることが知られている。この星は静穏時には V バンドで 11 等級だが、2014 年から 2018 年の間に 4 度の急激な増光を起こし、最大で 8 等級前後まで明るくなった。本研究では 2 度の増光期間を含む 2015 年 10 月から 2018 年 1 月にかけての分光モニター観測の結果を報告する。観測には西はりま天文台の 2m 反射望遠鏡「なゆた」に搭載される、可視光中低分散分光器 MALLS (Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph) を使用した。19 夜において、6280 Å から 6720 Å の波長範囲で波長分解能  $R \sim 10000$  のスペクトルを取得した。また、Keck 望遠鏡の高分散分光器 HIRES で撮られた、2000 年から 2008 年までの 5 夜のデータも使用した。得られたスペクトルには H $\alpha$  や FeII など多数の輝線が確認され、活発な質量降着現象が起きていることが分かった。一方で質量放出現象と密接な関わりがあるといわれている [OI] 輝線は、観測期間中に等価幅が  $-0.68$  Å から  $-4.4$  Å まで変化した。V 等級が明るくなると等価幅は減少したことから、増加した連続光に [OI] の輝線が埋もれたものと考えられる。また [OI] の等価幅から質量放出率が  $10^{-5.8} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  程度と推定できる。増光の起源が連星のどちらに起因するかを探るために、我々は HeI のフィーチャーにも着目した。結果、HeI はブロードな吸収を示し、増光と共に強くなる傾向を持った。HeI は Herbig Be 型星に由来すると考えられているラインであるため、この結果から Herbig Be 型星に増光と関連する現象が起きていると結論付けた。

## 1 Introduction

### 1.1 若い星の質量獲得

星は分子雲内部で生まれ、周囲の物質を取り込むことにより質量を獲得していく。物質は星の周りに形成された降着円盤を介して星の表面へと落下する。多くの若い星は数十万年から 1000 万年ほどの時間をかけて、通常時に  $10^{-7} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  程度の降着率で質量を獲得していくと考えられている。しかしこの降着率だけでは最終的な主系列星の質量に至るには不十分である。この問題の解決の糸口として、星の急激な増光現象である FU Ori 現象が注目されている。FU Ori 現象は降着円盤からの物質降着により発生すると考えられていて、現在十数天体が報告されている。Hartmann & Kenyon (1996) は星の形成率と過去の FU Ori 現象の観測頻度から、この現象はどの星に対しても反復的に起こり、1 天体あたりに 10 回

以上起こる可能性があるとして推測した。このように FU Ori 現象は星の成長に必須であると主張される一方で、観測事例が少なく未だ解明されていない部分が多い。FU Ori 現象を起こしている星について観測研究することは、星形成のメカニズムの本質的な解明に繋がると考えられる。

変光を示す若い星の観測において、しばしばジェットが観測される。ジェットは磁気遠心力噴出メカニズムを介して降着円盤表面から生じることが広く受け入れられており、角運動量を効率的に抽出し物質を星表面へと降着させることを可能とするため、星形成を考える上で重要な役割を果たすと考えられている。

6300 Å の [OI] は禁制輝線でありジェットに由来することが知られ、ジェットによる質量放出率の測定に用いられる。Hartigan et al. (1995) は [OI] 輝線を用いて数多くの T Tau 型星の質量放出率を求め、そ

の結果質量放出率と質量降着率の間に 0.01 の比で相関があると報告した。

## 1.2 Z CMa

Z CMa は Herbig (1960) によって Herbig Ae/Be 型星と分類された星である。不規則な周期で変光を示すことで有名な若い星であり、静穏時は V バンドで 11 等級、アウトバースト時は 9 等級にまで明るくなることが知られている (Covino et al. 1984; Hessman et al. 1991)。また Z CMa は 0.1 arcsec 離れた連星であり、SED において可視域と紫外域で支配的な南東の星 (SE) と、強い赤外源の北西の星 (NW) からなることが示された (Koresko et al. 1991)。Whitney et al. (1993) による H $\alpha$  輝線の強い偏光の発見や van den Ancker et al. (2004) の高分散分光の結果などから、南東の星は FU Ori like な星、北西の星はエンペロープに囲まれた B 型星であると一般的に解釈されている。

静穏時と増光時の連星それぞれの SED の変化から、連星のうち増光の起源は Herbig Be 型星であるとの見方が有力である (Hinkley et al. 2013) が、ジェットの起源については議論が続いている。

近年の明るさの動向について、2011 年の終わり頃から 3 年近く静穏期が続いていたが、2014 年末から 2017 年末までの間に 4 度の急激な増光を起こし、最大で V バンドで 8 等級前後まで明るくなった。本研究では 2 度の増光期間を含む 2015 年 10 月から 2018 年 1 月にかけての分光モニター観測の結果を報告し、ジェットによる質量放出率とその時の質量降着率について議論する。

## 2 Observations

本研究の観測は 2015 年 10 月から 2018 年 1 月にかけて、西はりま天文台の 2m 反射望遠鏡「なゆた」で行った。使用した装置は可視光中低分散分光器 MALLS (Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph) である。観測波長は 6280 Å から 6720 Å で、波長分解能 R $\sim$ 10000、600 秒から 3600 秒の露出時間で 19 夜のデータが得られた。図 1 に観測し

たときの日にと光度を示す。

画像処理には National Optical Astronomy Observatory (NOAO) の画像解析ソフト IRAF (Imaging Reduction and Analysis Facility) を用いた。

また、解析には Keck 望遠鏡の高分散分光器 HIRES で撮られた、2000 年から 2008 年までの 5 夜のデータも使用した。表 1 にデータの詳細を記す。HIRES のデータの画像処理は IRAF の他、MAKEE (Mauna Kea Echelle Extraction) というパイプラインを通して行った。

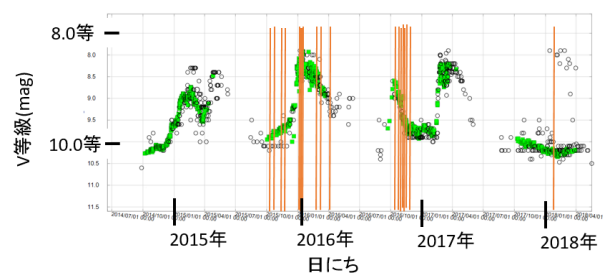


図 1: Z CMa の光度曲線。緑点は V 等級、白丸が眼視観測による等級、オレンジ線が本研究の観測でデータが得られた日を表す。光度曲線は AAVSO (American Association of Variable Star Observers) で公開されているデータを使用した。

表 1: アーカイブより取得した HIRES のデータ

観測日	観測者	露出 (s)	V 等級 (mag)
2008.12.3	Dahm	60	8.7
2008.12.4	Dahm	60	8.7
2008.12.17	Hireseng	60	8.5
2010.11.14	Herbig	200	8.5
2011.12.18	Reiqrurth	180	10.1

## 3 Results and Discussion

### 3.1 Z CMa のスペクトル

図 2 に MALLS で得られたスペクトルの一例を示す。P Cygni プロファイルを示す強い H $\alpha$  輝線の他、複数の FeII 輝線などが見られた。

また、得られたスペクトルのうち 6300 Å の [OI]

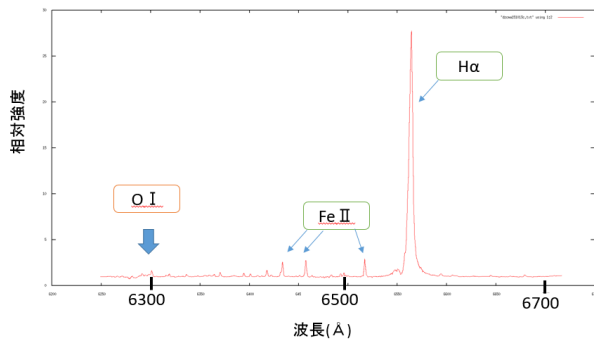


図 2: Z CMa のスペクトルの一例。

と 6678 Å の HeI について拡大し時系列に並べたものを図 3 と図 4 に示す。[OI] の観測において 6300 Å のピークの外 6291 Å 付近にもピークが見られた。van den Ancker et al. (2004) によると 6291 Å のピークは 2000 年までの観測では見られなかったもので、2002 年の観測において見られるようになった。このピークについて、前述の著者はジェットのコリメーションが変わったことに由来している可能性を述べている。6678 Å の HeI は Herbig Be 型星由来の元素であり、同じ波長域において FU Ori 型星では別の元素 (FeI) が観測されることが知られている (Hessman et al. 1991)。観測において、HeI は弱い輝線とブロードな吸収の P Cygni プロファイルを示した。

### 3.2 [OI] の等価幅

[OI] の等価幅は IRAF の `splot` タスクを用いて直接積分により測定した。測定した幅は 6287 Å から 6303 Å であり、ピークを 2 つともを含む。ジェットに関する先行研究では [OI] は 40km/s を境に低速成分と高速成分に分けられ、ジェットに直接的に関係している高速成分について議論がなされる (Nisini et al. 2018)。しかし今回はピークが 2 つあるなどの理由で測定方法が複雑になるのを避け、両者の区別はしていない。得られた等価幅の測定結果を図 4 に記す。

また図 5 には、[OI] の光度が変わらず連続光成分のみが増加した場合に予測される等価幅の推移のモ

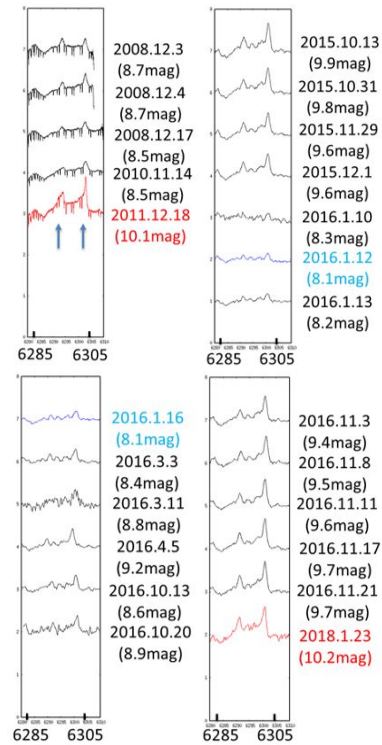


図 3: [OI] のスペクトル。横軸: 6280 Å-6310 Å、縦軸: 相対強度。矢印はピークを指す。

デル線も示す。

図 5 に示したように、測定値は等級が明るくなると小さくなったが、その推移の仕方はモデル値におおよそ合致していた。これは [OI] 輝線が強度は一定で連続光に「埋もれた」ことを意味する。

### 3.3 質量放出率と質量降着率

質量放出率は [OI] の光度から見積もることができる。求め方にはいくつかの式が提唱されているが、本研究では Hartigan et al. (1995) の次式を採用した。

$$\log_{10} \dot{M}_w = -4.30 + \log_{10} \frac{L_{6300}}{L_{\odot}} \quad (1)$$

ここで、 $\dot{M}_w$  は質量放出率、 $L_{6300}$  は [OI] の光度、 $L_{\odot}$  は太陽光度を表す。まず、観測で得た [OI] の等価幅と Z CMa の地球からの距離 1.24 milliarcsec (ヒッパルコスデータ) から [OI] の光度を算出した。続けて、求めた [OI] 光度から質量放出率を算出した。次

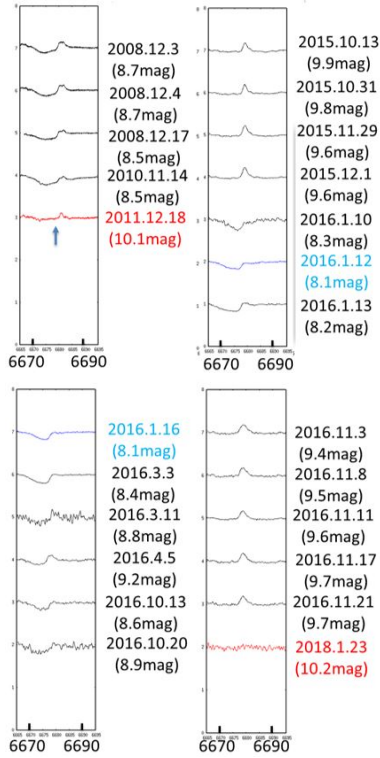


図 4: HeI のスペクトル。横軸: 6665 Å-6695 Å、縦軸: 相対強度。矢印は HeI の吸収フィーチャーの位置を指す。

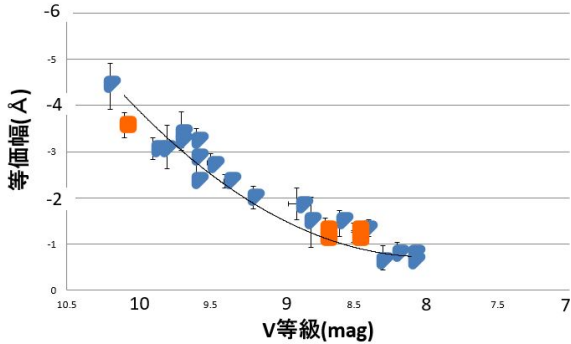


図 5: [OI] 等価幅の測定値とモデル値。青点は MALLS、オレンジ点は Keck の測定点、黒線はモデル点の推移を表す。

に、質量降着率を求める。静穏時を V バンドで 10.5 等級とし、等級の差から光度がどの程度増えたかを調べる。Koresko et al. (1991) は Z CMa について南東の星と北西の星に分けてスペクトルエネルギー分布

(SED) を作成し、それぞれの光度を  $700 L_{\odot}$  と  $2100 L_{\odot}$  と求めた。このとき、Z CMa までの距離は 1150 pc を用いて求めている。本研究において Koresko et al. (1991) の作成した SED の概形が等級が変化しても変わらないものと仮定し、距離と等級を焼き直すことで今回の観測における光度の変化量を決定した。決定した光度の変化量から、質量降着率を求める。光度の変化量と質量降着率の関係式は、Gullbring et al. (1998) の次式を採用した。

$$L_{acc} \simeq \frac{GM_s \dot{M}_{acc}}{R_s} \left(1 - \frac{R_s}{R_{in}}\right) \quad (2)$$

ここで、 $L_{acc}$  は降着光度、 $G$  は重力定数、 $M_s$  は星の質量、 $\dot{M}_{acc}$  は質量降着率、 $R_s$  は星の半径、 $R_{in}$  は降着円盤のインナー半径を表す。出典先の論文において、 $\left(1 - \frac{R_s}{R_{in}}\right)$  は典型的に 0.8 とおいてよいとしているので、本研究でもそれを採用する。 $M_s$  は  $3M_{\odot}$ 、 $R_s$  は  $7R_{\odot}$  を使用した (van den Ancker et al. 2004)。

以上により得られた結果を、図 6 に記す。

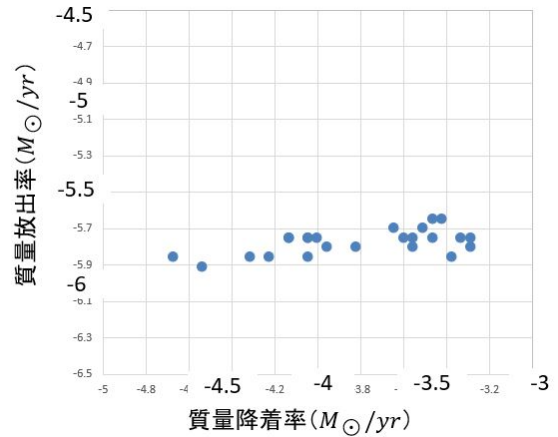


図 6: Z CMa の質量放出率と質量降着率。縦軸横軸共に  $\log(M_{\odot} \text{yr}^{-1})$  の値。

図 6 より、質量降着率が変化したにも関わらず、質量放出率がおおよそ一定であったことが分かった。

### 3.4 増光した星の特定

先のセクションで述べたように、6678 Å のヘリウムは Herbig Be 型星由来の元素である。van den Ancker

et al. (2004) は、過去に Herbig Be 型星が増光した時の分光観測から、等級が明るくなると HeI の吸収が強くなったと報告した。

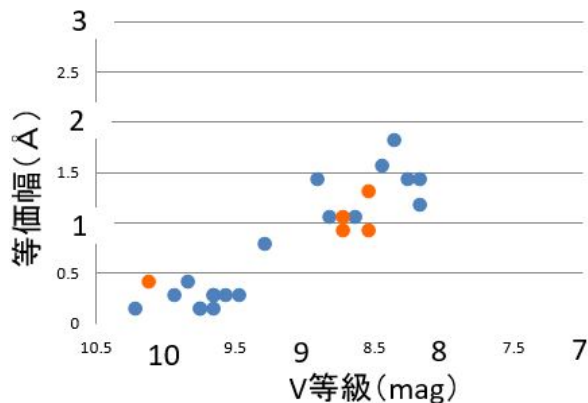


図 7: HeI 吸収フィーチャーの吸収成分の等価幅と V 等級。青点は MALLS、オレンジ点は Keck の測定点を表す。

本研究において HeI の吸収は、V 等級が明るくなると強くなるのが分かる (図 7)。よって今回の観測期間中において、Herbig Be 型星が増光と関連する現象が起きたと判断できる。

## 4 Conclusion

本研究の観測より、質量降着率がおおよそ  $10^{-4.6}M_{\odot}$  から  $10^{-3.2}M_{\odot}$  で推移したのに対し、質量放出率は  $10^{-5.8}M_{\odot}$  でほぼ一定であったことが分かった。また、連星のうち増光は Herbig Be 型星が関連していると考えられる。本研究の観測だけではジェットの起源を区別することは出来ない。よって、ジェットの起源が FU Ori 型星か Herbig Be 型星かの 2 つの場合のシナリオを考える必要がある。もしもジェットの起源が FU Ori 型星であった場合、FU Ori 型星は安定した質量降着率と放出率を保っていることを意味する。一般的な Herbig Be 型星がジェットを持つ割合は、全体の 25 % から 43 % であったという報告もあり (Evans et al. 1994)、Z CMa の Herbig Be 型星がジェットを持たない可能性は充分にある。もしもジェットの起源が Herbig Be 型星であった場合、降着率と放出率是对応していな

い、あるいは相関はあるが放出率の変化量のスケールが、観測で検出出来ない程小さかった等が考えられる。先行研究において、DR Tau 等大きな降着率を持ちながら禁制線は弱くしか光らない天体の報告例もある (Hartigan et al. 1995)。

## Reference

Covino, E., Terranegra, L., Vittone, A. A., & Russo, G. 1984, *AJ*, 89, 1868  
D'Alessio, P., Cantö, J., Calvet, N., & Lizano, S. 1998, *APJ*, 500, 411  
Evans, N. J., II, Balkum, S., Levreault, R. M., Hartmann, L., & Kenyon, S. 1994, *APJ*, 424, 793  
Hartigan, P., Edwards, S., & Ghandour, L. 1995, *APJ*, 452, 736  
Hartmann, L., Calvet, N., Gullbring, E., & D'Alessio, P. 1998, *APJ*, 495, 385  
Hartmann, L., & Kenyon, S. J. 1996, *ARAA*, 34, 207  
Herbig, G. H. 1960, *APJS*, 4, 337  
Hessman, F. V., Eisloffel, J., Mundt, R., et al. 1991, *APJ*, 370, 384  
Koresko, C. D., Beckwith, S. V. W., Ghez, A. M., Matthews, K., & Neugebauer, G. 1991, *AJ*, 102, 2073  
Nisini, B., Antonucci, S., Alcalá, J. M., et al. 2018, *AAP*, 609, A87  
van den Ancker, M. E., Blondel, P. F. C., Tjin A Djie, H. R. E., et al. 2004, *MNRAS*, 349, 1516  
Whitney, T. M., Jiang, J. S., Searson, P. C., & Chien, C. L. 1993, *Science*, 261, 1316