

等質量連星の等価幅の差分を用いた組成差の導出

加藤 則行¹

¹兵庫県立大学 天文科学センター (西はりま天文台)

Determination of Abundance Difference with Differential Equivalent Width Method in Equal Mass Binaries

Noriyuki KATOH¹

¹Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo,
407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan
noriyukik@nhao.jp

(Received 2019 October 31; Accepted 2019 December 10)

概要

主星と伴星の大気組成の違いが分子雲内の化学組成分布を反映しているならば、実視連星では主星と伴星に組成差があるものも存在して良い。先行する観測は、組成差と連星間距離に弱い相関があると示唆した。等質量の連星であれば主星と伴星の大気パラメータはほぼ同じと見なせるので、組成差は主星と伴星の等価幅の差分として導出できる。そこで本研究は、恒星スペクトルに多数現れる Fe I の吸収線の等価幅を測定し、代表的な難揮発性元素である鉄について主星と伴星の組成差を求めることができるか調査した。惑星を保持する実視連星4天体を兵庫県立大学西はりま天文台の「なゆた望遠鏡」とMALLSで分光観測した。16 Cyg AB、83 Leo AB、HD 80606/80607とXO-2 NSの鉄の等価幅差A-Bについて、それぞれ $-0.0042 \pm 0.0040 \text{ \AA}$ 、 $-0.0040 \pm 0.0099 \text{ \AA}$ 、 $0.0001 \pm 0.0031 \text{ \AA}$ と $0.0156 \pm 0.0067 \text{ \AA}$ と導出した。これらの結果はどれも、先行研究が求めた組成差の結果と調和する。

Abstract

If abundance difference between the primary and secondary star indicates the chemical distribution in the molecular cloud, some visual binaries have abundance differences between the stellar components. The previous work showed the weak correlation between the abundance difference and the binary separation. This work regards the difference between the equivalent widths of the primary star and secondary star as the abundance difference because the atmospheric parameters of the stellar components are almost the same in the equal mass binaries. Therefore, we measured the equivalent widths of the Fe I absorption lines of the stellar components in the visual binaries, and investigated whether the difference of both equivalent widths determines the abundance difference between the primary and secondary stars. For 16 Cyg AB, 83 Leo AB, HD 80606/80607 and XO-2 NS, the difference of both equivalent width (A-B) is $-0.0042 \pm 0.0040 \text{ \AA}$, $-0.0040 \pm 0.0099 \text{ \AA}$, $0.0001 \pm 0.0031 \text{ \AA}$, and $0.0156 \pm 0.0067 \text{ \AA}$, respectively. These results are consistent with ones in the previous works.

Key words: stars: abundances — binaries: visual — techniques: spectroscopic

1. イントロダクション

太陽系外惑星を保持する恒星を対象とした観測は、ガス惑星を持つ恒星が鉄に富む傾向にあると明らかにした (Mayor et al. 2011)。このことは、惑星が恒星へ降着することで恒星大気が金属汚染された、と解釈できる (Israelian et al. 2001)。一方、近年の Solar-twin star の観測は、恒星の大気中に含まれる揮発性元素と難揮発性元素の存在比が恒星の年齢や銀河系中心からの距離と相関を持つと示した (Adibekyan et al. 2014)。このことは、恒星が誕生した際の周囲の化学組成が恒星大気の組成を決める、と解釈できる。

連星 (主星と伴星) が同じ分子雲で同時期に誕生することが注目された。主星と伴星は、誕生した周囲の化学組成が同じなので、大気組成も同じと見なせる。仮に主星と伴星の組成に違いがあれば、組成差は連星誕生後に付加

されたものと考えることができる。Laws&Gonzalez (2001) は、同じ連星内でも惑星を保持しない星の方が鉄に富むと示した。この主星と伴星の組成差は、惑星形成に起因すると解釈できる。すなわち、惑星を保持しない星では微惑星や原始惑星がほとんど降着したため metal rich になった。もしくは、惑星を保持する星では固体物質が惑星側に固定されたため metal poor になった。しかしながら近年の組成解析は、同じ連星に存在する惑星を保持する星と保持しない星の双方が揮発性元素より難揮発性元素に富むと示した (Ramirez et al. 2011)。主星も伴星も難揮発性元素の過剰を示すことは、双方とも固体物質の降着を経験した、もしくは誕生した分子雲の元々の化学組成を反映していると解釈できる。Lichon&Ramirez (2019) の報告では、主星と伴星の組成差は分子雲内の場所による化学組成の違いを示すと解釈された。

主星と伴星の大気組成の違いは、連星が誕生した分子雲

内部での場所による化学組成の違いを反映していると仮定する。連星間距離（主星と伴星の平均距離）が長い実視連星では、主星と伴星が分子雲内で誕生した場所が異なるので、主星と伴星に組成差があるものも存在して良い。主星と伴星の組成差を求めるに当たり、本研究では等質量の連星に着目する。本来、恒星大気のエ元素存在量は、元素の対応する吸収線の等価幅に、有効温度や表面重力などの大気パラメータを加味して決定する。しかしながら等質量の連星では、同じ光度階級であれば、主星と伴星の大気パラメータはほぼ同じと見なせる。したがって、等質量の連星では、主星と伴星の組成差を等価幅の差分として直接導出できる。本研究は、恒星スペクトルに多数現れる Fe I の吸収線の等価幅を測定し、代表的な難揮発性元素である鉄について主星と伴星の組成差を求めることができるか調査する。第2章では観測と解析について述べ、第3章でその結果に触れる。第4章では本研究の目的が達せられたか議論し、第5章にてまとめる。

2. 観測と解析

2.1. なゆた望遠鏡とMALLSを使用した分光観測

本研究の手法で主星と伴星の組成差を導出できるか調べるため、惑星を保持する実視連星に対して、主星と伴星の Fe I の等価幅を測定する。惑星の存在が既知である実視連星では、主星と伴星の組成差が精度良く求められているものもある。観測装置は、兵庫県立大学西はりま天文台の「なゆた望遠鏡」と可視光中低分散分光器MALLS(Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph)を使用した。観測対象は、以下4つの条件を課し、4天体に絞り込んだ (Table 1)。

- 1 : 主星と伴星のスペクトル型がほぼ同じ
- 2 : 赤緯が -16° 以上で西はりま天文台から観測できる
- 3 : 主星と伴星の離角が9秒角以上でMALLSのスリットビューワー上で星像が分離できる
- 4 : 惑星を持つため組成差が求められている

観測は、2019年1月7日から9日にかけて実施した。MALLSの設定は、スリット幅 $0.8''$ 、グレーティング 1800 l/mm とし、観測波長が $5700\text{--}6100 \text{ \AA}$ になるように調整した。積分時間は、熱ノイズを考慮し、積分1回あたり最大で600秒とした。積分時間が600秒以上必要となる暗い天体に対しては、600秒積分のスペクトルデータを足し合わせた。 $V=9 \text{ mag}$ のG型星に対して、合成で1200秒積分することで、 $S/N \sim 200$ のスペクトルデータが得られる。

2.2. 等価幅の測定

生データを overscan したデータに対して、天体画像処理ソフトウェア IRAF を用いて一次処理（ダーク引き、フラット補正、散乱光の除去、一次元化、波長校正、規格化）を行った。等価幅を測定する Fe I の吸収線は、周囲に強い吸収線が存在せず、他の吸収線からのブレンドをあまり受けていない、波長 $5730\text{--}6080 \text{ \AA}$ にある13本とした (Table 2)。等価幅は、IRAF の `splot` コマンドを使用して、吸収線を Voigt 関数でフィッティングすることで測定した。

測定した等価幅を用いて、主星と伴星の Fe I の組成差を次の1-3の順番で求めた。

- 1 : 等価幅を正しく測定できていない観測点を除去する。各吸収線で等価幅差の絶対値を導出する。等価幅差の絶対値の平均値を $1\sigma_1$

とする。等価幅差の絶対値が $2\sigma_1$ 以上の観測点を除外する。残った吸収線で再度、等価幅差の絶対値の平均値を導出する (σ_2)。等価幅差の絶対値が $3\sigma_2$ 以上の観測点を除外する。

- 2 : 最終的に残った吸収線で主星と伴星の等価幅の差分を求める。この差分の平均値を組成差と見なす。
- 3 : 組成差と各吸収線の等価幅の差分とのばらつきを求める。このばらつきの平均値を組成差の不定性と見なす。

3. 結果

主星と伴星の Fe I の等価幅を Figure 1, 2 に示す。また、導出した組成差を Table 3 にまとめた。

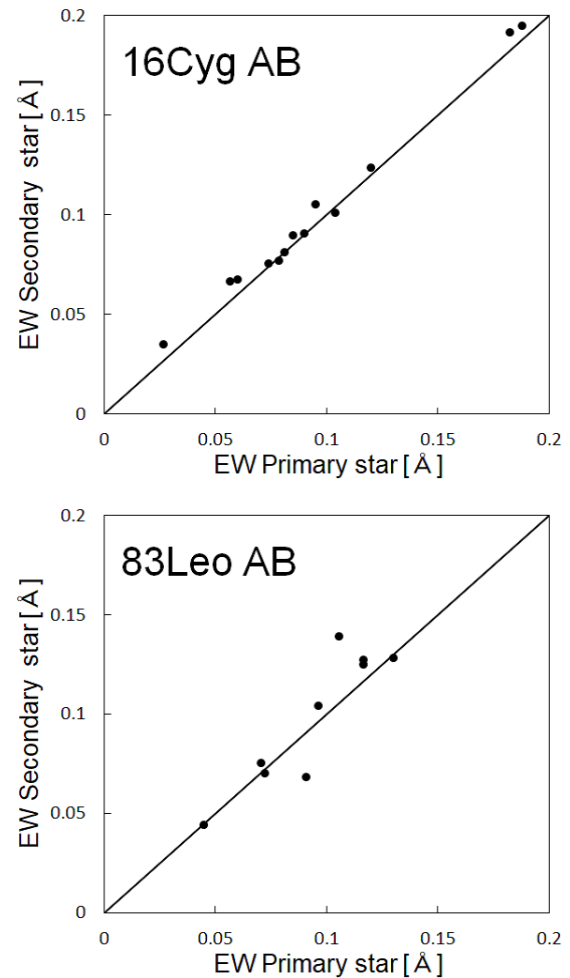


Fig. 1. Equivalent widths of the primary and secondary stars in 16 Cyg AB and 83 Leo AB. The horizontal axis represents the equivalent widths of the primary star. The vertical axis represents the equivalent widths of the secondary star. The filled circles show the observed equivalent widths. The solid line represents that the two quantities are equal.

Table 1. Targets.

Object	V [mag]	Sp. types	π [mas]	Mass [M_{\odot}]	Planets	References*
16 Cyg A	5.99	G1.5 Vb	46.98	1.02		(a)(b)
16 Cyg B	6.25	G3 V	47.12	1.03	b	(a)(b)(c)
83 Leo A	6.49	K0 IV	54.80	0.93		(b)(d)(e)
83 Leo B	7.58	K2 V	54.88	0.83	b	(b)(d)(e)(f)
HD 80606	9.06	G5 V	15.33	0.98	b	(b)(d)(g)(h)
HD 80607	9.17	G5 V	15.22	0.98		(b)(d)(g)
XO-2 N	11.20	G9 V		0.81	b	(i)(j)
XO-2 S	11.25	G9 V	6.68	0.81	b,c	(b)(i)(k)

* (a) Takeda et al. (2005a), (b) Gaia Collaboration et al. (2016), (c) Mazeh et al. (1996), (d) Bobylev et al. (2006), (e) Luck (2017), (f) Marcy et al. (2004), (g) Gonzalez et al. (2010), (h) Naef et al. (2001), (i) Benavides et al. (2010), (j) Hansen & Barman (2007), (k) Desidera et al. (2014).

Table 2. Observed Fe I lines.*

λ [Å]	χ [eV]	log gf
5731.7619	4.256222	-1.1090
5762.9922	4.208883	-0.0921
5816.3732	4.548505	-0.6850
5848.1267	4.607593	-1.0560
5883.8166	3.959723	-1.3552
5905.6713	4.652030	-0.7251
5934.6546	3.928606	-1.1767
5952.7180	3.984106	-1.4294
6003.0112	3.881603	-1.1088
6008.5559	3.883508	-0.9872
6056.0047	4.733140	-0.4602
6065.4822	2.608502	-1.4868
6078.4911	4.795465	-0.3206

*Reference is van Hoof (2018).

4. 考察

16 Cyg AB は、主星と伴星ともに大気パラメータ（有効温度、表面重力、微小乱流速度、金属量）が太陽とよく似た値を持つ Solar-twin star である。16 Cyg B は、巨大ガス惑星を1個保持することが明らかになった (Mazeh et al. 1996)。したがって 16 Cyg AB は、恒星の大気組成と惑星の存在との関係を探る良いサンプルとして、主星と伴星の組成差がよく調べられた (e.g. Laws&Gonzalez 2001)。主星と伴星それぞれの大気パラメータを個別に導出し、後から金属量の差分を計算する標準解析法は、16 Cyg B の方が metal rich であると示した (Takeda et al. 2005a)。一

Table 3. Equivalent width difference of primary star (A) – secondary star (B).

Binary	A-B [Å]	Uncertainty [Å]	a^* [AU]
16 Cyg AB	-0.0042	0.0040	860
83 Leo AB	-0.0040	0.0099	515
HD 80606/80607	0.0001	0.0031	1200
XO-2 NS	0.0156	0.0067	4600

* a is a binary separation.

方、Fe I と Fe II の吸収線の等価幅を利用して、主星と伴星の大気パラメータの差分を直接計算する差分解析法は、16 Cyg AB 双方の金属量が 0.01dex のレベルで同等であると結論付けた (Takeda 2005b)。Fe I 線の等価幅の差分をそのまま組成差と見なした本研究の結果は、A-B=-0.0042±0.0040 Å であり、不定性を考慮すると 16 Cyg AB 双方で鉄の存在量に差はほとんど無いと示した。本研究の手法は、差分解析法の結果を再現した。

83 Leo AB は、質量比（伴星質量／主星質量）が0.89の連星である。83 Leo B が保持する惑星 83 Leo Bb はガス惑星である (Marcy et al. 2004)。83 Leo Bc の存在も示唆されていたが、誤検出であると結論付けられた (Kane et al. 2016)。83 Leo AB の金属量は、主星と伴星それぞれ [Fe/H]=0.40±0.06 dex と [Fe/H]=0.36±0.12 dex と測定誤差の範囲では同等の値が導出された (Heiter & Luck 2003)。本研究の結果は A-B=-0.0040±0.0099 Å であり、83 Leo AB 双方の等価幅に測定誤差の範囲で違いは無かった。83 Leo AB の V等級は主星と伴星それぞれ $V_A=6.49$ mag と $V_B=7.58$ mag であるが、16 Cyg AB ($V_A=5.99$ mag、 $V_B=6.25$ mag) と比べ、等価幅差の測定誤差は2倍以上も大きい (参照 Table 3)。これは主星と伴星のスペクトル型の違いが、他の観測天体に比べて大きいためと考えられる。Figure 3 に、観測した 83 Leo AB の 5848.123 Å と 6065.482 Å の Fe I 吸収線を示す。強いラインでは、83 Leo B の吸収線は 83 Leo A の吸収線よりも深い。6065.482 Å

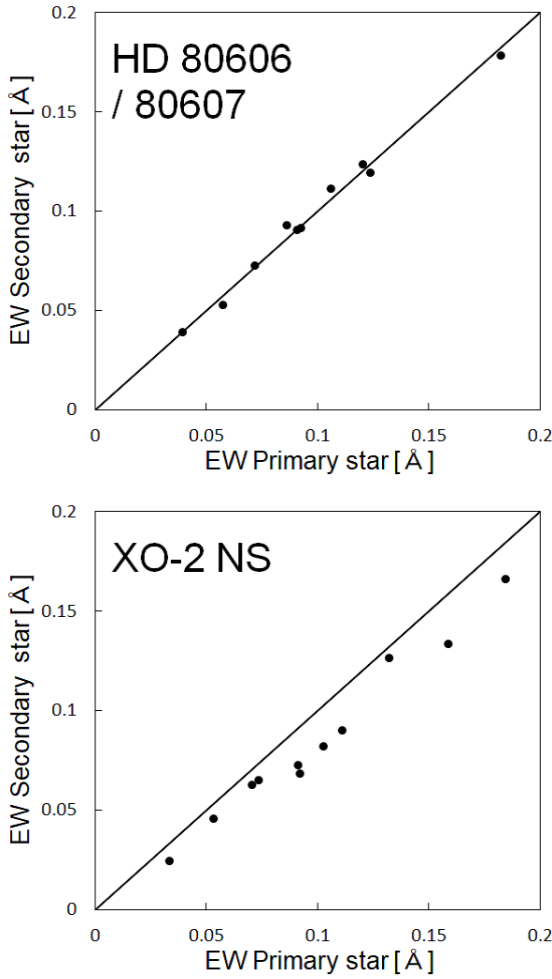


Fig. 2. Equivalent widths of the primary and secondary stars in HD 80606/80607 and XO-2 NS.

の Fe I 吸収線について、Takeda et al. (2002) の計算コードからモデルのラインプロファイルを作成した (Figure 4)。主星と伴星の有効温度はそれぞれ 5551 K と 4945 K、表面重力はそれぞれ $\log g=4.43 \text{ cm s}^{-2}$ と $\log g=4.49 \text{ cm s}^{-2}$ である (McDonald et al. 2017)。伴星のモデルプロファイルは、有効温度を主星の有効温度へ近づけるように昇温すると、吸収線が浅くなる。強い吸収線では、83 Leo B が 83 Leo A よりも低温であるため、伴星の吸収線の方が主星のものよりも深くなる。したがって、強いラインでは弱いラインよりも等価幅差が大きく測定されるため、等価幅差の測定誤差が大きくなる。

HD 80606 では、軌道離心率が 0.9 以上と非常につぶれた楕円軌道を持つトランジット惑星が公転している (Naef et al. 2001)。また、HD 80607 と連星間距離 $a=1200 \text{ AU}$ の連星をなす (Eggenberger et al. 2003)。最近の組成解析は、HD 80606/80607 の重元素の存在量に大きな違いが無いことを示した (Mack et al. 2016, Liu et al. 2018)。本研究の結果は $A-B=0.0001 \pm 0.0031 \text{ \AA}$ となり、主星と伴星で少なくとも鉄の存在量に差は無いと示した。

XO-2 NS は、主星と伴星が等質量かつ、どちらも惑星を保持する連星である。主星の XO-2 N は、ホットジュピターを 1 個保持する (Hansen & Barman 2007)。伴星の

XO-2 S は、巨大ガス惑星を 2 個保持する (Desidera et al. 2014)。先行研究が導出した XO-2 NS の鉄の組成差は $N-S=0.055 \pm 0.013 \text{ dex}$ となった (Biazzo et al. 2015)。本研究の結果も $N-S=0.0156 \pm 0.0067 \text{ \AA}$ と、XO-2 N の方が鉄の存在量が多いと示した。

本研究で求めた組成差を連星間距離ごとにまとめたものを、先行研究で示された組成差と合わせて、図で示す (Figure 5)。等質量の主星と伴星で Fe I 線の等価幅の差分を取り、その差分を組成差と見なす本研究の手法は、実視連星内で組成差を求めた先行研究と大きく食い違わない結果を示した。

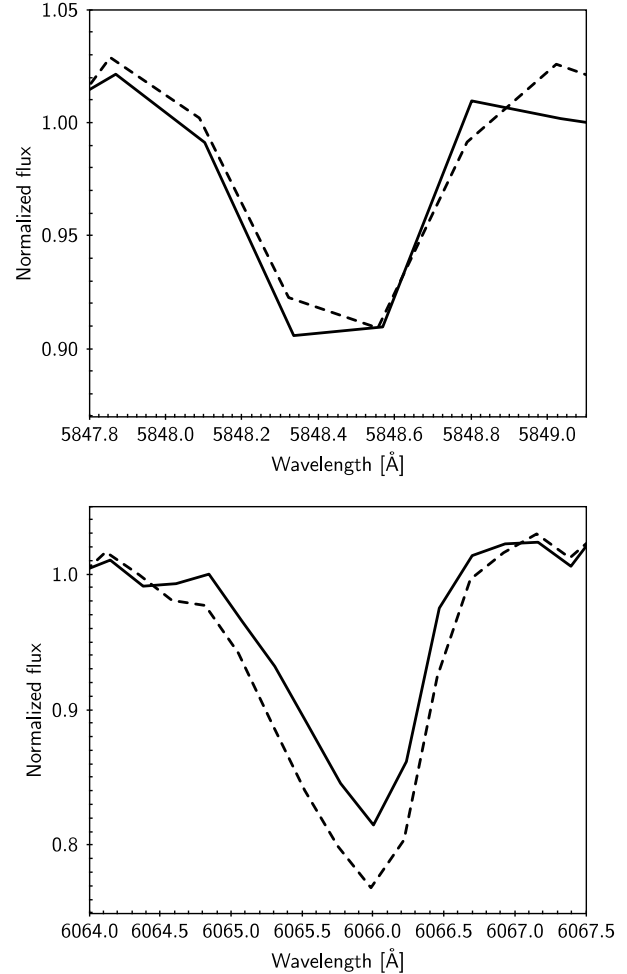


Fig. 3. Fe I lines in 5848.123 Å (upper) and 6065.482 Å (bottom) of 83 Leo A and B. The horizontal axis represents the wavelength. The vertical axis represents the normalized flux. The solid and dash lines show the primary and secondary line-profiles. For the strong line, the secondary line is deeper than the primary one.

5. まとめ

主星と伴星の大気組成の違いは連星が誕生した分子雲内部での場所による化学組成の違いを反映していると仮定するならば、実視連星では主星と伴星に組成差があるものも存在して良い。事実、連星内の組成差と連星間距離には弱い相関があると示唆された。主星と伴星の組成差

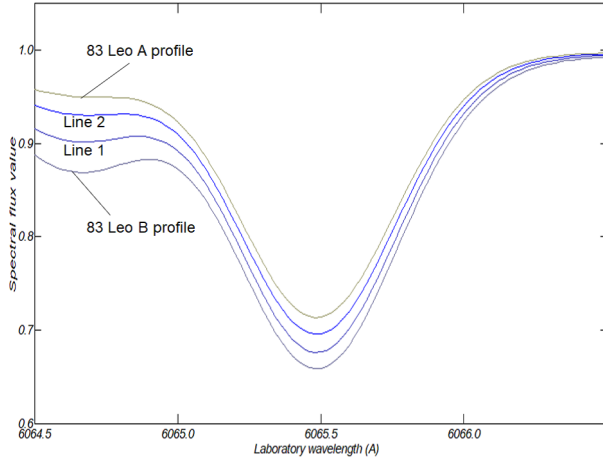


Fig. 4. Fe I model lines of 83 Leo A and B. The horizontal axis represents the wavelength. The vertical axis represents the normalized flux. Line 1 and Line 2 show the profiles of secondary model with the effective temperature to be 5145 K and 5345 K.

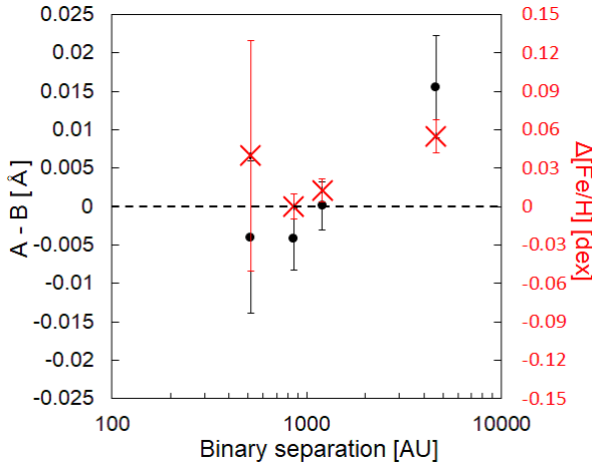


Fig. 5. Equivalent width difference and binary separation. The horizontal axis represents the binary separation. The first vertical-axis represents the equivalent width difference of binary component. The second vertical-axis represents the metallicity difference of binary component. The filled circles show the equivalent width differences obtained by this study. The red crosses show the metallicity differences indicated by the previous studies.

を求めるに当たり、等質量の連星であれば主星と伴星の大気パラメータはほぼ同じと見なせるので、組成差は主星と伴星の等価幅の差分として導出できる。そこで本研究は、恒星スペクトルに多数現れる Fe I の吸収線の等価幅を測定し、代表的な難揮発性元素である鉄について主星と伴星の組成差を求めることができるか調査した。惑星を保持するため主星と伴星の組成差が精度良く求められた実視連星4天体に対して、兵庫県立大学西はりま天文台の「なゆた望遠鏡」と可視光中低分散分光器MALLSで分光観測した。

16 Cyg AB の組成差は $A-B=-0.0042\pm 0.0040 \text{ \AA}$ であり、不定性を考慮すると主星と伴星で鉄の存在量に差はほとんど無い。この結果は、先行研究による差分解法

を用いた結果を再現する。83 Leo AB での鉄の存在量差は $A-B=-0.0040\pm 0.0099 \text{ \AA}$ であり、主星と伴星の等価幅に違いは無かった。これは、先行研究の結果と調和する。HD 80606 と HD 80607 からなる連星では、重元素の存在量に大きな違いが無い、と先行研究で明らかとなった。本研究では $A-B=0.0001\pm 0.0031 \text{ \AA}$ となり、主星と伴星で少なくとも鉄の存在量に差は無い。XO-2 NS の鉄の組成差は $N-S=0.055\pm 0.013 \text{ dex}$ と求められていたが、本研究も $N-S=0.0156\pm 0.0067 \text{ \AA}$ と XO-2 N の方が metal rich の結果を示す。

等質量の主星と伴星で Fe I 線の等価幅の差分を取り、その差分を組成差と見なす本研究の手法は、実視連星内で組成差を求めた先行研究と大きく食い違わない結果を示す。今後は、連星間距離が長い連星ほど主星と伴星の組成差が大きいものが存在するとの指摘について、本研究の手法でその真偽を明らかにしたい。

References

- Adibekyan, V. Zh., et al. 2014, *A&A*, 564, 15
 Benavides, R., et al. 2010, *JDSO*, 6, 30
 Biazzo, K., et al. 2015, *A&A*, 583, 135
 Bobylev, V. V., Goncharov, G. A., & Bajkova, A. T. 2006, *ARep*, 50, 733
 Eggenberger, A., Udry, S., & Mayor, M. 2003, *ASPC*, 294, 43
 Desidera, S., et al. 2014, *A&A*, 567, 6
 Gaia Collaboration, et al. 2016, *A&A*, 595, 1
 Gonzalez, G., Carlson, M. K., & Tobin, R. W. 2010, *MNRAS*, 403, 1368
 Hansen, B. & Barman, T. 2007, *ApJ*, 671, 861
 Heiter, U., & Luck, R. U. 2003, *AJ*, 126, 2015
 Israelian, G., Santos, N. C., Mayor, M., & Rebolo, R. 2001, *Nature*, 411, 163
 Kane, S. R., et al. 2016, *ApJ*, 820, 5
 Lichon, S., & Ramirez, I. 2019, *AAS*, 233, 259.26
 Laws, C., & Gonzalez, G. 2001, *ApJ*, 553, 405
 Liu, F., et al. 2018, *A&A*, 614, 138
 Luck, R. E. 2017, *AJ*, 153, 21
 McDonald, I., Zijlstra, A. A., & Watson, R. A. 2017, *MNRAS*, 471, 770
 Mack, C. E. III, Keivan, G. S., Simon, C. S., Leslie, H., & Joshua, A. P. 2016, *ApJ*, 818, 54
 Marcy, G., et al. 2004, *ApJ*, 619, 570
 Mayor, M., et al. 2011, *aXiv1109.2497*
 Mazeh, T., Krymolowski, Y., & Rosenfeld, G. 1996, *ApJL*, 477, 103
 Naef, D., et al. 2001, *A&A*, 375, 27
 Ramirez, I., Melendez, J., Cornejo, D., Roederer, I. U., & Fish, J. R. 2011, *ApJ*, 740, 76
 Takeda, Y., Ohkubo, M., & Sadakane, K. 2002, *PASJ*, 54, 451
 Takeda, Y., Ohkubo, M., Sato, Bun'ei, S., Kambe, E., & Sadakane, K. 2005a, *PASJ*, 57, 27
 Takeda, Y. 2005b, *PASJ*, 57, 83
 van Hoof, P. A. M. 2018, *Galaxies*, 6, 63