

実視連星 ADS 3085 A/B における視線速度の変化

加藤 則行¹、伊藤 洋一¹、佐藤 文衛²

1) 兵庫県立大学 天文学センター (西はりま天文台)

2) 東京工業大学 理学院

Radial Velocity Variations of ADS 3085 A and B

Noriyuki KATO¹, Yohichi ITOH¹, and Bun'ei SATO²

1) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, 407-2, Nishigaichi, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan*

2) *Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551*

E-mail: noriyukik@nhao.jp

(Received 2018 October 31; Accepted 2018 December 7)

概要

前主系列星では主系列星よりも連星をなす恒星が多い、といくつかの観測から示唆されている。一方、主系列星では公転周期が数日と極端に短いホットジュピターと呼ばれるガス惑星がいくつも発見されている (e.g., Mayor & Queloz 1995)。現在の主系列星の多くはかつて連星をなしていたこと、前主系列星と主系列星の連星頻度の差とホットジュピターの存在度は相関することが考えられる。我々は、連星形成と惑星形成には関連性があると考え、Toyota et al. (2009) により、連星をなす恒星 ADS 3085 A と ADS 3085 B は視線速度の標準偏差が十分大きいと分かった。この主星と伴星は、それぞれ未知の伴天体が付随するかもしれない。我々は、2007 年 12 月から 2009 年 12 月まで、ADS 3085 A と B の視線速度をフォローアップした。視線速度の周期解析から、ADS 3085 A と B それぞれの視線速度は、7.7 日周期と 5.2 日周期で変動する可能性がある。ADS 3085 A と B とともに、彩層活動が活発であること、ヒッパルコスの測光データが変光を示すことから、恒星表面の Cool spot が自転とともに移動していると考えられる。ADS 3085 A では、視線速度と彩層活動が強く相関するので、視線速度変動の起源は恒星の活動にある。ADS 3085 B では、視線速度変動と彩層活動の相関を調べることはできなかったが、視線速度変動が恒星活動に起因する可能性は除去しない。

Abstract

Some observations have indicated that the binary frequency of pre-main-sequence stars is higher than that of main-sequence stars. Several hot jupiters which are gas planets with the orbital period of days are discovered in the main-sequence stars (e.g., Mayor & Queloz 1995). Most of the main-sequence stars may be formed as the binary system. The difference of the binary rate between pre-main-sequence stars and main-sequence stars may be consistent with

the frequency of the hot jupiter. We think that a binary formation correlates with a planet formation. Toyota et al. (2009) indicated that the standard deviations of the radial velocity of ADS 3085 A and ADS 3085 B are twice larger than the typical uncertainties of the velocities. The radial-velocity variation with the primary and secondary component may be caused by the orbital motion of the unknown companion object, respectively. We follow-up the radial velocities of ADS 3085 A and B from December 2007 to December 2009. We searched for the period of the radial velocity with the Lomb–Scargle algorithm (Scargle 1982). The radial velocities of ADS 3085 A and B may have the periodic variations with 7.7 d and 5.2 d, respectively. In both A and B, the cool spots on the surface of the star are moving with the stellar rotation because the chromospheric activity is active and the Hipparcos photometric data shows the magnitude variation. Since the radial velocity of ADS 3085 A strongly correlates with the chromospheric activity, the radial-velocity variation is caused by the stellar activity. In ADS 3085 B, although we do not show the correlation between radial-velocity variation and the chromospheric activity, the stellar activity may explain the radial-velocity variation.

Key words: Visual Binary – Spectroscopy – Radial Velocity

1. イントロダクション

連星は、主星と1個から複数個の伴星からなる恒星系である。いくつかの観測は、太陽のような恒星の約半数は連星をなすと報告した (e.g., Duquennoy & Mayor 1991)。前主系列星では、主系列星よりも連星をなす恒星の数は多いと示唆する観測もある (e.g., Ghez et al. 1997)。主系列段階の単独星では、公転周期が数日と極端に短いホットジュピターと呼ばれるガス惑星がいくつも発見されている (e.g., Mayor & Queloz 1995)。主系列段階の単独星の多くはかつて連星をなしていたことや、前主系列星と主系列星の連星頻度の差とホットジュピターの存在度は相関することが考えられる。もし、これらが事実であるならば、連星形成と惑星形成には関連性があると期待できる。

いくつかの観測は、連星で未知の伴天体の検出を試みてきた。Toyota et al. (2009) は、実視連星 13 天体の視線速度を 5 年間モニターし、4 つの恒星の視線速度が大きく変動することを明らかにした。Toyota et al. (2009) の対象天体は、さらに 5 年視線速度を追観測され、新たに 2 つの分光連星と、褐色矮星を保持する候補 1 天体、星周にガス惑星を保持する 1 天体が同定された (Katoh et al. 2018)。その他の対象天体についても、未知の伴天体の存在が期待できる。

ADS 3085 A と ADS 3085 B は、G0 IV と G5 IV の恒星が平均距離 ~ 1450 AU で公転する連星である。Toyota et al. (2009) は、ADS 3085 A と B について、視線速度の標準偏差は 40 m/s よりも小さく、視線速度に周期的な変動は見られないと報告した。他方、主星と伴星それぞれの視線速度の標準偏差は、視線速度の測定精度と比べ、2 倍と大きい。したがって、ADS 3085 A と B の視線速度には、未知の伴天体の運動に起因する視線速度の変動が存在しても不思議ではない。我々は、ADS 3085 A と B の視線速度をフォローアップする。2 章では、ADS 3085 A と B の観測と解析について記載する。3 章にて結果を報告し、最後 4 章で ADS 3085 A と B の視線速度変動の起源について議論する。

2. 観測と解析

2-1. 高分散分光観測

視線速度を測定するため、高分散分光観測を実施した。対象天体は、実視連星 ADS 3085 A と ADS 3085 B である (Table 1)。観測では、岡山天体物理観測所の 188cm 望遠鏡と高分散分光器 HIDES (High Dispersion Echelle Spectrograph: Izumiura (1999)) を使用した。HIDES は、2K × 4K の CCD チップを 3 枚搭載し、RED cross-disperser を使用することで 3750-7500Å の波長域を観測できる。波長分解能は、スリット幅を 200 μm (0".76) として、 $R (\lambda/\Delta\lambda) \sim 60,000$ である。ADS 3085 A と B の積分時間はともに 1800 秒であり、典型的なシグナル・ノイズ比 (S/N) は 200 となる。ADS 3085 A の観測は、2007 年 12 月から 2009 年 12 月までの間に 1-2ヶ月に 1 回の頻度で計 13 回行った。ADS 3085 B の観測は、2008 年 10 月に 1 回行った。

視線速度の測定は、ヨードセル (I₂ セル: Kambe et al. 2002) を用いた。ヨードセルはヨウ素ガスを封入したガラスセルで、天体からの光はヨードセルを透過後に分光される。したがって観測したスペクトルは、恒星スペクトルにヨウ素スペクトルが重なったものとなる。また、光量モニターを使用し、3 秒おきに HIDES のスリットに入る天体からの光量を測定した。この光量の重みから積分時間の中央時刻を算出した。地球の運動が作り出す見かけの視線速度は、TEMPO プログラム¹ を用いて、積分時間の中央時刻で導出した。

Table 1. Targets.

Object	V [mag]	Sp. types	Separation [arcsec]	π [mas]	$V \sin i$ [km s ⁻¹]	Mass [M_{\odot}]
ADS 3085 A	6.33	G0 IV		45.28	4.3	1.01
ADS 3085 B	6.96	G5 IV	65.5	45.24	3.9	0.87

References: de Medeiros & Mayor (1999), Nordstrom et al. (2004). The value of π in *Gaia* DR2 (*Gaia* Collaboration 2016a, 2016b).

2-2. 視線速度の測定

スペクトルデータは IRAF のソフトウェアパッケージを用いて処理され、我々は 3800-6000Å の波長域のデータを使用した。

視線速度を計算するために、恒星スペクトルに重ね合わせたヨウ素の吸収線を波長の基準として使用した。我々は、5000-6000Å の波長域で視線速度を計算した。この波長域では、スペクトルに多くの深く鋭いヨウ素の吸収線と、何百もの恒星大気の吸収線が存在する。視線速度の計算には、Butler et al. (1996) に基づいた HIDES データの解析コード (Sato et al. 2002) を使用した。このコードは、スペクトルを 5Å ごとのセグメントに分割し、各セグメントにてスペクトルを次のようにモデル化する。

$$I(\lambda) = k[A(\lambda)S(\lambda + \Delta\lambda)] * IP, \quad (1)$$

$A(\lambda)$ はヨウ素のテンプレートスペクトル、 $S(\lambda)$ は本来のピュアな恒星スペクトル、 $\Delta\lambda = \lambda v/c$ をそれぞれ表す。 λ は波長、 v は恒星の視線速度、 c は光速、*はコンボリューション、IP は装置に起因する吸収線

¹ <http://pulsar.princeton.edu/tempo>

の歪みをそれぞれ意味する。Sato et al. (2002) の方法にしたがい、ヨウ素スペクトルを用いて観測されたスペクトル $I(\lambda)$ から $S(\lambda)$ を再構成した。 $I(\lambda)$ から IP をデコンボリューションし、ヨウ素のテンプレートスペクトルを除去することで恒星スペクトルだけを抽出する。いくつかの $I(\lambda)$ から恒星スペクトルを抽出し、その平均スペクトルを $S(\lambda)$ とみなした。IP は、式 (1) でモデルスペクトルを観測スペクトルに適合させることによって決定した。視線速度は、式 (1) のモデルスペクトルと観測スペクトルの残差が最小となる $\Delta\lambda$ から決定した。各セグメントの視線速度の重みは、ランダム誤差と系統誤差の逆 2 乗で得られる。ランダム誤差は、光子ショットノイズから推定した。系統誤差は、次の方法で求めた。各セグメントで幅は 5\AA のまま波長中心を 0.3\AA だけ前後にシフトさせ、視線速度を計算した。前後にシフトさせて求めた視線速度と初期の視線速度の差を導出した。この差の平均を各セグメントの系統誤差とみなした。各セグメントの視線速度の重みを用いて、 ~ 200 個のセグメントから視線速度の加重平均を計算した。この平均速度を恒星の視線速度とみなす。視線速度の測定精度は、平均速度と個々のセグメントで求めた視線速度との標準偏差である。

我々は、Toyota et al. (2009) での ADS 3085 A と ADS 3085 B それぞれのデータも併せて視線速度を計算した。ADS 3085 A について、平均の測定精度が 8.6 m s^{-1} で、2003 年 9 月から 2009 年 12 月までに 32 個の視線速度データを取得した。ADS 3085 B について、平均の測定精度が 10.6 m s^{-1} で、2003 年 12 月から 2008 年 10 月までに 13 個の視線速度データを取得した。

3. 結果

ADS 3085 A と ADS 3085 B の視線速度を Fig.1 と Table 2、Table 3 に示す。我々は、Lomb–Scargle アルゴリズム (Scargle 1982) を使用して、視線速度データに対して離散フーリエ変換による周期解析を行った。NASA Exoplanet Archive’s Services² が提供する EXOFAST の計算コード (Eastman et al. 2013) を使用し、ADS 3085 A と B の periodogram を導出した (Fig.2)。周期解析で求めた周期は、最小値を 1 日、最大値を天体の観測期間とした。Zechmeister & Kurster (2009) の解析式にしたがい、periodogram 上でピークを持つ周期について、False Alarm Probability (FAP) を計算した。FAP は、次のように求めることができる。

$$FAP = 1 - [1 - \exp(-z)]^M \quad (N \geq 50), \quad (2)$$

$$FAP = 1 - [1 - (1 - \frac{2z}{N-1})^{\frac{N-3}{2}}]^M \quad (N < 50), \quad (3)$$

z は周期のパワー、 $M = \Delta f / \delta f$ 、 N は視線速度のデータ数をそれぞれ表す。 Δf は periodogram の計算範囲を、 δf はピークの幅をそれぞれ示す。Table 4 は ADS 3085 A と B それぞれの N 、最も強いピークを持つ周期、その周期のパワー、 M 、および FAP を掲示する。

3-1. ADS 3085 A

ADS 3085 A は、その視線速度に変動を示す。視線速度の標準偏差 σ は、 15.6 m s^{-1} である。periodogram は、周期 7.7 日に最も強いピークを示す。また、periodogram には、導出した FAP を図示する (Fig.2 参照)。Fig.3 に、ADS 3085 A の視線速度の変動について、7.7 日を 1 周期とする位相で表した。ADS 3085 A の視線速度は、一定の周期で変動する可能性がある。この視線速度変動の起源については、4 章にて議論する。

² <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

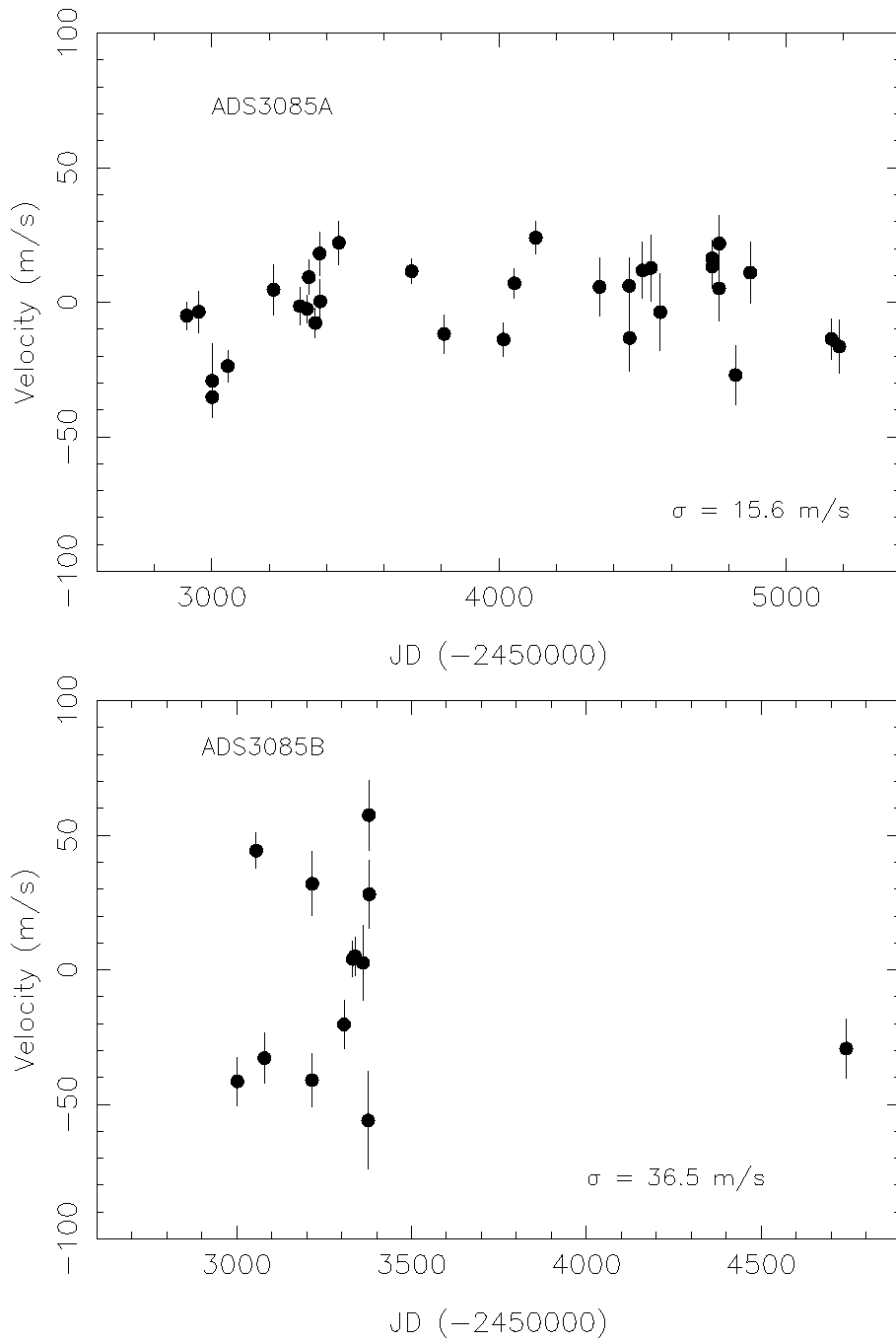


Fig. 1. Radial velocities of ADS 3085 A and B. The horizontal axis represents the Julian date. The vertical axis represents the radial velocity. The filled circles show the observed velocities. σ is the standard deviation of the radial velocity.

Table 2. Radial velocities of ADS 3085 A.

JD	Radial Velocity [m s ⁻¹]	Uncertainty [m s ⁻¹]
2452913.25941	-4.5	5.1
2452955.20848	-3.0	7.6
2453001.94946	-28.7	13.8
2453002.06918	-34.8	7.2
2453055.91063	-23.2	5.8
2453215.26268	5.2	9.4
2453307.10631	-1.0	6.8
2453332.09943	-2.0	5.1
2453338.12788	9.8	6.3
2453360.99705	-7.2	5.5
2453375.14875	18.6	8.0
2453378.14727	0.8	8.1
2453442.95358	22.6	8.1
2453696.11851	12.0	4.7
2453808.98218	-11.3	7.1
2454016.34439	-13.3	6.2
2454054.21955	7.6	5.6
2454128.11879	24.5	6.1
2454350.31779	6.2	10.8
2454453.00510	6.6	10.6
2454455.20950	-12.8	12.2
2454500.01993	12.3	10.4
2454528.96110	13.2	12.1
2454561.92566	-3.2	14.4
2454742.34544	16.8	6.7
2454743.21278	13.8	7.8
2454766.32934	5.7	11.9
2454767.19054	22.3	10.3
2454824.12389	-26.6	11.1
2454874.99291	11.5	11.3
2455158.20937	-13.2	7.4
2455185.19765	-15.9	9.9

Table 3. Radial velocities of ADS 3085 B.

JD	Radial Velocity [m s ⁻¹]	Uncertainty [m s ⁻¹]
2453002.09078	-26.4	9.0
2453055.93223	59.3	6.6
2453078.92501	-17.7	9.2
2453215.29875	-26.0	9.9
2453216.29181	47.1	11.9
2453307.12252	-5.2	9.0
2453332.16779	19.1	6.7
2453338.15065	20.2	7.1
2453361.02599	17.7	13.9
2453376.14722	-40.9	18.2
2453378.17059	72.5	12.9
2453379.15031	43.2	12.6
2454743.23695	-14.2	11.0

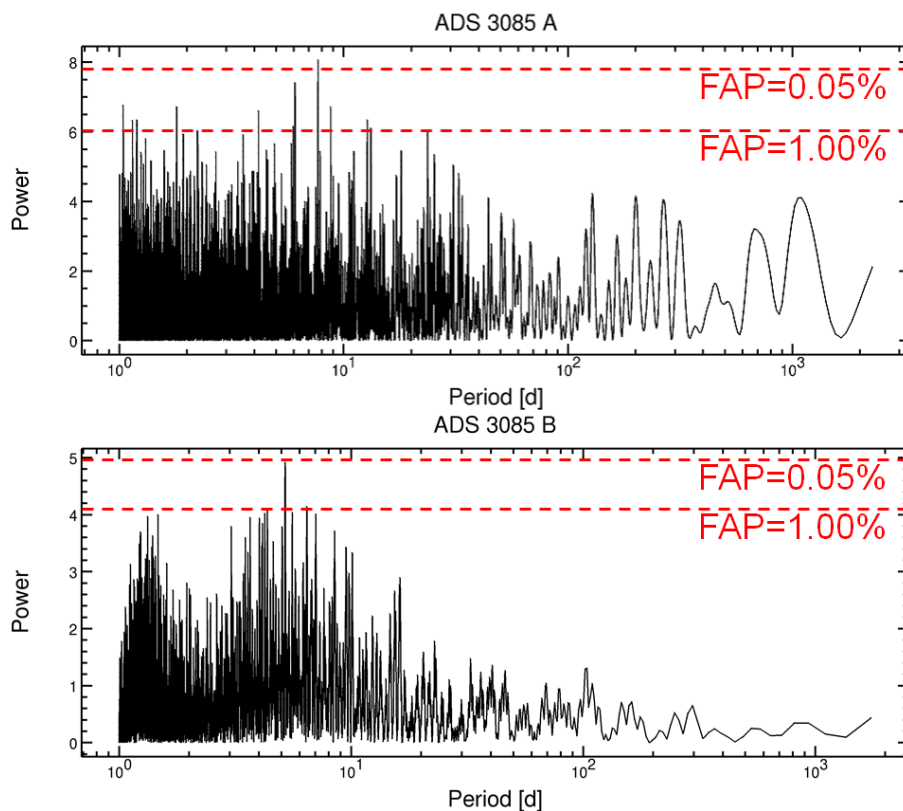


Fig. 2. Periodograms of ADS 3085 A (top) and B (bottom). The horizontal axis represents the logarithm of the period. The vertical axis represents the power. The period at the strongest peak is regarded as the period of the radial-velocity variations. The red dash lines represents the FAP of 0.05% and 1.00%.

Table 4. Periodogram analysis.

Object	N	Period [d]	Power	M	FAP [%]
ADS 3085 A	32	7.7	8.053380	13.105554	0.03
ADS 3085 B	13	5.2	4.915625	3.491278	0.07

3-2. ADS 3085 B

ADS 3085 B は、その視線速度に変動を示す。 σ は、 36.5m s^{-1} である。periodogram は、周期 5.2 日に最も強いピークを示す。また、periodogram には、導出した FAP を図示する (Fig.2 参照)。Fig.4 に、ADS 3085 B の視線速度の変動について、5.2 日を 1 周期とする位相で表した。ADS 3085 B の視線速度は、一定の周期で変動する可能性がある。この視線速度変動の起源については、4 章にて議論する。

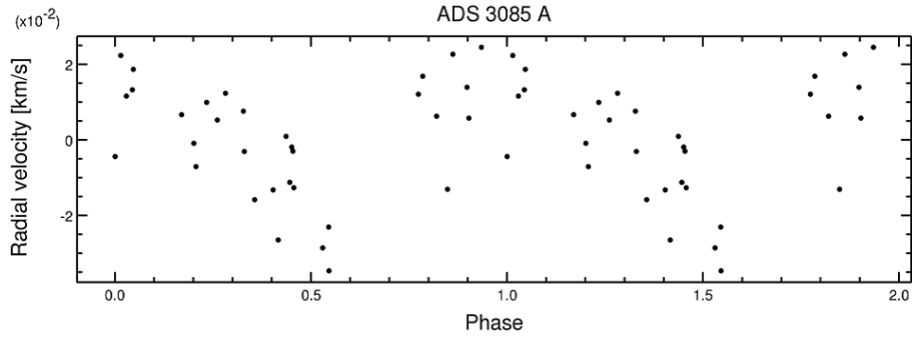


Fig. 3. Phased variation of radial velocity of ADS 3085 A. The horizontal axis represents the phase with the period of 7.7 d. The vertical axis represents the radial velocity.

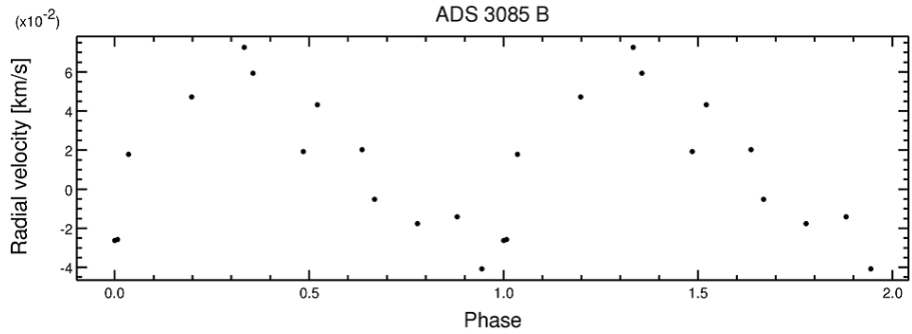


Fig. 4. Phased variation of radial velocity of ADS 3085 B. The horizontal axis represents the phase with the period of 5.2 d. The vertical axis represents the radial velocity.

4. 議論

もし、ADS 3085 A と ADS 3085 B の視線速度変動が未知の第 3 体の公転運動に起因するならば、ADS 3085 A の第 3 体は最小質量 ($m_{\text{third}} \sin i$; i は軌道傾斜角) が 0.4 木星質量、軌道長半径が 0.08AU となる。ADS

3085 B の第 3 体は、最小質量が 1.4 木星質量、軌道長半径が 0.06AU となる。しかしながら、ADS 3085 A と B は Ursa Major Moving Group に属する年齢が 300 Myr と若い恒星である (Soderblom & Mayor 1993)。若い星では、恒星の表面活動が活発なため、巨大な Cool spot が存在する。したがって、自転にともない Cool spot が恒星面上を移動することにより、見かけの視線速度変動が起きる。我々は、ADS 3085 A と B の視線速度変動が恒星の活動に起因するか議論する。

4-1. 恒星の自転にともなう変光

恒星表面での磁場活動は、Cool spot を生成する。磁場の活動度は彩層活動と相関する。CaII の輝線強度は、彩層の活動度を示す。我々は、ADS 3085 A と ADS 3085 B それぞれのスペクトルにおける Ca H 輝線の強度を測定した。強度は S_H インデックスで表され、次のように定める (Sato et al. 2013)。

$$S_H = \frac{F_H}{F_B + F_R}, \quad (4)$$

F_H は、H 輝線を中心とした 0.66\AA 幅の総フラックスである。 F_B と F_R は、それぞれ H 輝線から $\pm 1.2\text{\AA}$ 離れた波長を中心とした 1.1\AA 幅の総フラックスを表す。ADS 3085 A と B の S_H は、それぞれ 0.60 と 0.82 である。我々の観測から、彩層活動が比較的穏やかな恒星 β Vir では、 $S_H=0.27$ である。ADS 3085 A と B ともに、Ca 輝線の強度が強く、彩層活動が活発であると考えられる。したがって、磁場の活動度も高く、巨大な Cool spot が存在する可能性がある。

Cool spot が自転にともない移動するならば、恒星の変光周期が自転周期と一致する。ADS 3085 A と B について、ヒッパルコス の測光データを用いた周期解析は、それぞれ 8.8 日と 8.2 日で変光することを示唆する (Fig.5)。ADS 3085 A と B の自転速度 ($v \sin i$) は 4.3km s^{-1} と 3.9km s^{-1} (Table 1 参照)、半径は 1.01 太陽半径と 0.89 太陽半径 (*Gaia* DR2(Gaia Collaboration 2016a, 2016b) より参照) である。したがって自転周期の最大値は、主星と伴星それぞれ 11.9 日と 11.5 日となる。ADS 3085 A と B ともに、変光周期と自転周期が一致する可能性はある。

4-2. 視線速度変動の起源

ADS 3085 A と ADS 3085 B は表面に Cool spot を持ち、自転に伴う Cool spot の移動による光度変化があると考えられる。Cool spot の恒星面上での移動は、その星の視線速度に見かけの変動を与える。ADS 3085 A の変光周期 8.8 日は、視線速度が持つ変動周期 7.7 日に近い。ADS 3085 A では、2007 年 12 月から 2009 年 12 月まで彩層活動度 S_H を 10 回測定した。 S_H と視線速度の観測値との相関を調べた (Fig.6)。相関係数は 0.87、Significance は 99.6% であり、強い相関を示した。したがって、ADS 3085 A の視線速度の変動は、恒星の活動に起因する。

ADS 3085 B の変光周期 8.2 日は、視線速度が持つ変動周期 5.2 日と一致しない。また、 S_H の測定は、2008 年 10 月の 1 回のみである。しかしながら、彩層の活動度が Cool spot の存在を示し、Cool spot の移動が原因と考えられる変光の存在が示唆される。したがって、ADS 3085 B の視線速度変動の起源から恒星の活動を除去しない。

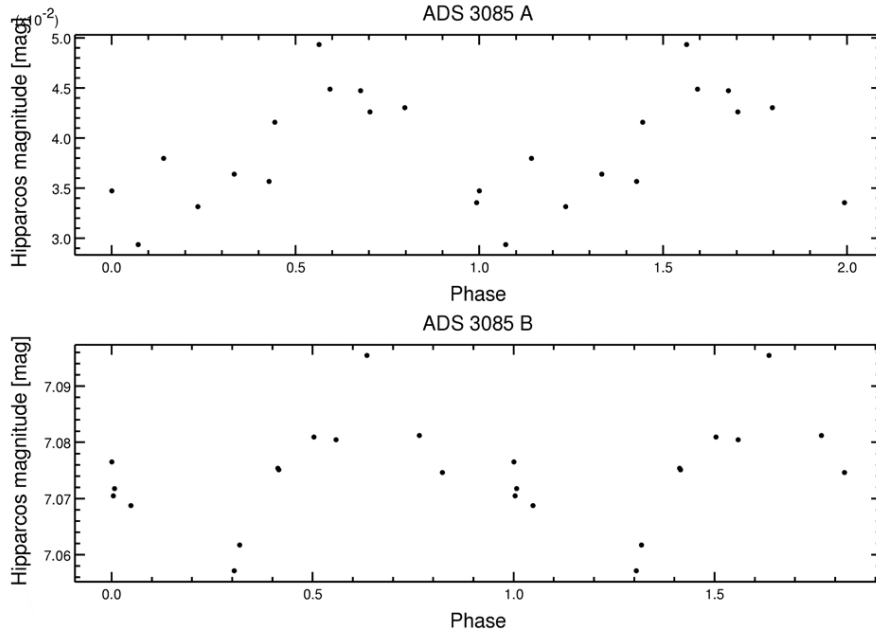


Fig. 5. Phased variations of Hipparcos magnitude of ADS 3085 A and B. The horizontal axes represent the phase with the period of 8.8 d (top) and 8.2 d (bottom). The vertical axes represent the Hipparcos magnitude with the real value (top) and the offset value (-6.4 mag : bottom).

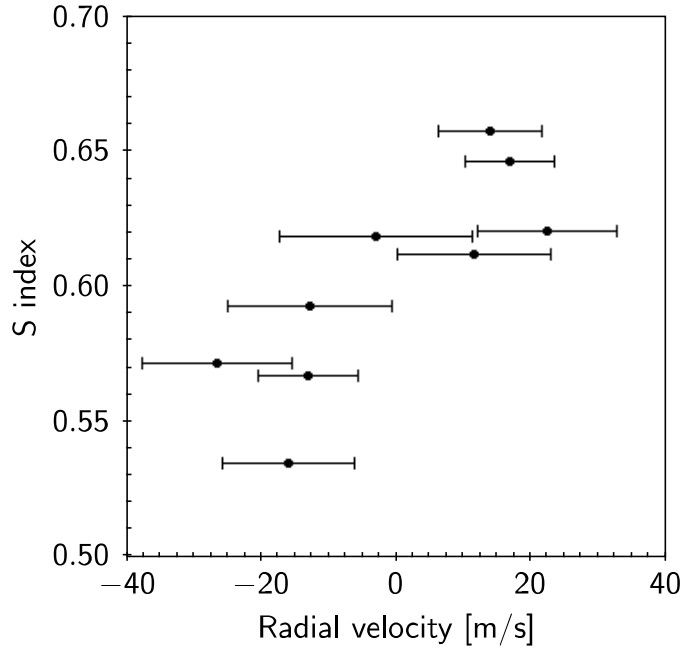


Fig. 6. Correlation between S_H and radial velocity for ADS 3085 A. The horizontal axis represents the radial velocity. The vertical axis represents the S_H . The two quantities are correlated.

5. 結論

Toyota et al. (2009) のフォローアップとして、2007年12月から2009年12月まで ADS 3085 A と ADS 3085 B の視線速度をモニターした。視線速度の計算は、Toyota et al. の観測点も併せて行った。ADS 3085 A では、2003年9月から2009年12月までに32個の視線速度を測定し、平均の測定精度は 8.6 m s^{-1} である。ADS 3085 B では、2003年12月から2008年10月までに13個の視線速度を測定し、平均の測定精度は 10.6 m s^{-1} である。

ADS 3085 A と B それぞれについて、視線速度が7.7日周期と5.2日周期で変動する可能性がある。ADS 3085 A と B の彩層活動は、 S_H が0.60と0.82と高い値を示し、活発であることが伺える。彩層の高い活動性は、恒星表面に Cool spot の存在を示唆する。ヒッパルコス測光データより、ADS 3085 A と B とともに自転に伴う Cool spot の移動が原因と考えられる変光が確認できる。ADS 3085 A について、視線速度と S_H が強く相関するので、視線速度変動の起源は恒星の活動にある。ADS 3085 B について、視線速度変動と彩層活動の相関を調べることはできなかったが、視線速度変動が恒星活動に起因する可能性は除去しない。

ADS 3085 A の結果から、彩層活動が活発で変光を示す恒星の視線速度変動は、自転に伴う Cool spot の移動に起因すると示唆される。ADS 3085 B の視線速度変動について、恒星の活動との相関を確定するためには、視線速度と彩層の活動度をフォローアップする必要がある。

この研究は、国立天文台 (NAOJ) が運営していた岡山天体物理観測所 (OAO) で観測されたデータに基づいています。私たちは、OAO のスタッフの皆様と、協力いただいた方々のご支援に感謝致します。この論文では、Exoplanet Exploration Program の下、米国航空宇宙局 (NASA) と契約したカリフォルニア工科大学によって運営されている NASA Exoplanet Archive が提供する periodogram の計算コードと EXOFAST (Eastman et al. 2013) を使用しています。この研究では、インタラクティブなグラフィカルビューと表形式データのエディタである TOPCAT (Taylor 2005) を使用しました。この研究では、フランスのストラスブールの CDS によって運営されている SIMBAD データベースと VizieR Service を利用しています。この研究では、欧州宇宙機関 (ESA) の *Gaia* ミッション (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>) のデータを利用しています。*Gaia* のデータは、データ処理および分析コンソーシアム (DPAC、<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>) によって処理されています。

<< 参考文献 >>

- Butler, R. P., Marcy, G. W., Williams, E., McCarthy, C., Dosanjuh, P., & Vogt, S. S. 1996, *PASP*, 108, 500
- de Medeiros, J. R., & Mayor, M. 1999, *A & AS*, 139, 433
- Duquenooy, A., & Mayor, M. 1991, *A & A*, 248, 485
- Eastman, J., Gaudi, S., & Agol, E. 2013, *PASP*, 125, 83
- Gaia Collaboration 2016a, *A & A*, 595, A1
- Gaia Collaboration 2016b, *A & A*, 595, A2
- Ghez, A. M., McCarthy, D. W., Patience, J. L., & Beck, T. L. 1997, *ApJ*, 481, 378
- Izumiura, H. 1999, in *Proc. 4th East Asian Meeting on Astronomy*, ed. P. S. Chen (Kunming:Yunnan Observatory), 77
- Kambe, E., et al. 2002, *PASJ*, 54, 865
- Katoh, N., Itoh, Y., & Sato, B. 2018, *PASJ*, 70, 60
- Mayor, M. & Queloz, D. 1995, *Nature*, 378, 355
- Nordstrom, B., et al. 2004 *A & A*, 418, 989
- Sato, B., Kambe, E., Takeda, Y., Izumiura, H., Masuda, S., & Ando, H. 2002, *PASJ*, 54, 873
- Sato, B., et al. 2013, *PASJ*, 65, 85
- Scargle, J. D. 1982, *ApJ*, 263, 835
- Soderblom, D. R., & Mayor, M. 1993, *AJ*, 105, 226
- Taylor, M. B. 2005, *ASPC*, 347, 29
- Toyota, E., et al. 2009, *PASJ*, 61, 19
- Zechmeister, M., & Kurster, M. 2009, *A & A*, 496, 577