

## VTOSによるベテルギウスおよび近傍星のスペックル観測 II

三浦則明<sup>1</sup>、小野翔太郎<sup>1</sup>、小田島渉<sup>1\*</sup>、桑村進<sup>1</sup>、圓谷文明<sup>2</sup>、坂元誠<sup>3</sup>、馬場直志<sup>4</sup>

1) 北見工業大学、2) 西はりま天文台、3) 子ノ星教育社、4) 室蘭工業大学

## Speckle observations of Betelgeuse and its neighbor stars using Visible Target Observation System II

Noriaki MIURA<sup>1</sup>, Shotaro ONO<sup>1</sup>, Wataru ODAJIMA<sup>1\*</sup>, Susumu KUWAMURA<sup>1</sup>, Fumiaki TSUMURAYA<sup>2</sup>, Makoto SAKAMOTO<sup>3</sup>, and Naoshi BABA<sup>4</sup>

1) *Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507, Japan*

2) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan*

3) *Nenohoshi educational company*

4) *Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido 050-8585, Japan*

*E-mail: miuranr@mail.kitami-it.ac.jp*

(Received 2017 November 30)

### 概要

我々は、2016年10月および2017年10月、西はりま天文台のVTOSを用いてベテルギウスとその近傍星のスペックル観測を行った。データ解析は天体スペックル干渉法を用いて行い、観測天体の空間周波数パワースペクトルを導出した。可視から近赤外にかけて6種類のフィルタを用いた。2016年観測および2017年観測のどちらにおいても、ベテルギウスのパワースペクトルには非等方な成分は観測されなかった。

### Abstract

We conducted speckle observations of Betelgeuse and its neighbor stars using the Visible Target Observation System at the Nishi-Harima Astronomical Observatory in October 2016 and October 2017. We derived spatial-frequency power spectra of observed stars using the stellar speckle interferometry. We used six kinds of filters from visible to near infrared. Anisotropic components in the power spectra of Betelgeuse were observed neither in 2016- nor 2017-observations.

**Key words:** Speckle interferometry – Betelgeuse – spatial frequency power spectrum

---

\* 現在の所属：東洋紡エンジニアリング株式会社

Present Affiliation: Toyobo Engineering Co.

## 1. はじめに

ベテルギウスは赤色超巨星であり、表面の活動が観測できる数少ない星のひとつである。可視光観測において、恒星の表面構造を観察するための有力な手段の一つがスペックル干渉法 (Labeyrie 1970) であり、ベテルギウスの視直径の計測が行われてきた (Bonnueau & Labeyrie 1973, Lynds et al. 1976; Welter & Worden 1980; Balega et al. 1982; Cheng et al. 1986)。従来報告では、視直径の最大値は 69 ミリ秒角 (422nm)、最小値は 30 ミリ秒角 (740nm) である。さらには、535nm での観測で、光球のまわりに大きく広がったエンベロープが観測されている (Roddiier & Roddiier 1985)。

近赤外域においてもベテルギウスの視直径が得られており、2.28-2.31 $\mu$ m における VLTI/AMBER での観測では 42.05 $\pm$ 0.05 ミリ秒角であった (Ohnaka et al. 2011)。この観測からは、外側の大気が光球半径の 1.3 倍くらいまで非対称に広がっていることも示されている。また、VLT+AO による 1.04-2.17 $\mu$ m の波長帯の観測で、光球 (直径 90-100 ミリ秒角) の 6 倍くらいまで広がった plume があるとの報告がある (Kervella et al. 2009)。H-band での干渉計における観測からは、表面に複数のスポット状の明るい領域を持つベテルギウスの像が得られている (Haubois et al. 2009)。

我々は、西はりま天文台の Visible Target Observation System (VTOS) を用いて、ベテルギウスのスペックル観測を 2012 年から継続的に実施している。2012 年 11 月の観測では、緑色フィルタ (515W, Table 1) を用いた際、ベテルギウスのパワースペクトルが二重楕円構造になっていることを見出した (Fig. 1(a))。一方、参照星として観測したベラトリクスにはこのような構造は見られない (Fig. 1(b))。この原因を調査するため、継続的に観測を実施してきている。2014 年と 2015 年の観測を通して、二重楕円の内側の楕円は、フィルタの透過特性によって近赤外に対応する成分である可能性があることに気づいた (三浦 2015)。

そこで我々は、従来用いてきた可視フィルタに加えて、近赤外のフィルタ (Table 1) を導入し、多波長スペックル観測を実施した。ここでは 2016 年 10 月および 2017 年 10 月に実施した観測の結果を報告する。従来と同様に天体スペックル干渉法によるデータ処理を行い、空間周波数パワースペクトル分布を求めた。

Table 1. Filter specifications

Label	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)
515W	515.5	21.0
507N	506.3	7.5
517N	518.9	8.0
600W	600.0	25.0
875L	875.0	long pass
925W	925.0	25.0

## 2. データ処理

スペックル干渉法では、準単色でかつ短時間露光で天体像 (スペックル像という)

$$i(x, y) = o(x, y) * p(x, y) \quad (1)$$

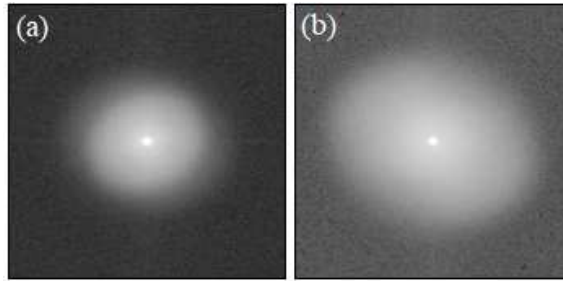


Fig. 1. Power spectra of Betelgeuse and Bellatrix, observed with the 515W filter in November, 2012.

を多数枚取得する (Labeyrie 1970)。ここで、 $o(x, y)$ ,  $p(x, y)$  は物体および点広がり関数 (PSF)、\*はコンボリューションである。これらのスペックル像の空間周波数パワースペクトルの集合平均

$$\langle |I(u, v)|^2 \rangle = |O(u, v)|^2 \langle |P(u, v)|^2 \rangle \quad (2)$$

を計算する。ここで、大文字の関数は小文字の関数のフーリエ変換を表している。スペックル伝達関数  $\langle |P|^2 \rangle$  は、大気ゆらぎのランダムな成分が正值で平均化されるため、回折限界までのなだらかな分布を持つ。このため、 $|O|^2$  に特徴的な構造がある場合には、 $\langle |I|^2 \rangle$  上にもそれが反映され、物体の特徴を観察できる。

### 3. 2016 年観測結果

Table 2 は 2016 年 10 月 30 日の観測天体リストである。各々の天体について 500 枚の平均パワースペクトルを求めた。Fig. 2 はベテルギウス (上段)、HIP30343 (中段)、アルデバラン (下段) について 515W (左)、875L (中央)、925N (右) フィルタを用いた場合のパワースペクトルである。同条件での観測である Fig. 2(a) と 1(a) を比較すると形状は異なるものの、同じように二重構造になっている。Fig. 2(b) と (c) は近赤外でのパワースペクトルであり、外見上 (a) の内側の成分に似ていることが確認できる。同様の傾向が、M 型星の HIP30343 (d-f) と K 型星のアルデバラン (g-i) においても確認できる。パワースペクトルの二重構造は HIP30343 (d)、K 型星のアルデバラン (g) でも見られる。ただし、アルデバランの場合は外側の成分に対する中央の成分が、他の二つに比べて暗くなっている。これは、緑波長帯での輝度に対する近赤外帯での輝度が、K 型星では M 型星に比較して小さいためと解釈できる。

これらのことから、515W フィルタを用いたパワースペクトルの二重構造は緑色波長帯に対応する成分 (外側) と近赤外に対応する成分 (内側) を同時に観測しているため生じたと結論付けた。しかしながら、今回観測された近赤外の成分は円形に近いのに対して、Fig. 1(a) では楕円形になっている。これは近赤外のベテルギウス像の形状に何らかの非等方性があったことを示している。この現象は 2012 年以來観測されておらず、原因も不明のままである。今後、近赤外域での観測を継続して、この現象を再び捉えることが重要と考えている。

### 4. 2017 年観測結果

Table 3 は 2017 年 10 月 26 日の観測天体リストである。観測当日、ハードウェアのトラブルにより望遠鏡のフォーカスを数値で指定することができず、ボタンを手動で操作して像を見ながら感覚的に合わせざるを得なかった。このため、すべてのデータを少しデフォーカス状態で取得したと考えておくべきであろう。リストにあるように、途中でフォーカス位置を調整し (d-1→d-2)、ベテルギウスとアルデバランはそれぞれ 2 度観測した。

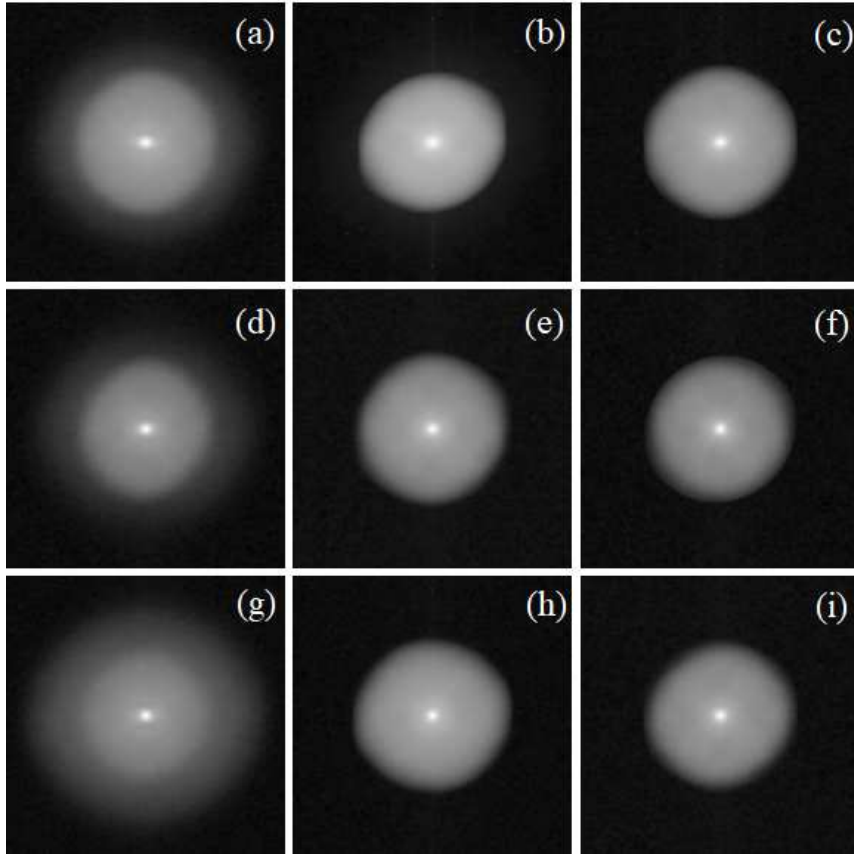


Fig. 2. Results of 2016-observation. (a)-(c): Power spectra of Betelgeuse observed with the 515W, 875L and 925W filters, respectively. (d)-(f): HIP30343 and (g)-(i): Aldebaran, whose configurations are same as (a)-(c). These figures correspond to observation numbers in Table 2 as (a)10, (b)14, (c)15, (d)4, (e)2, (f)3, (g)19, (h)17, and (i)18.

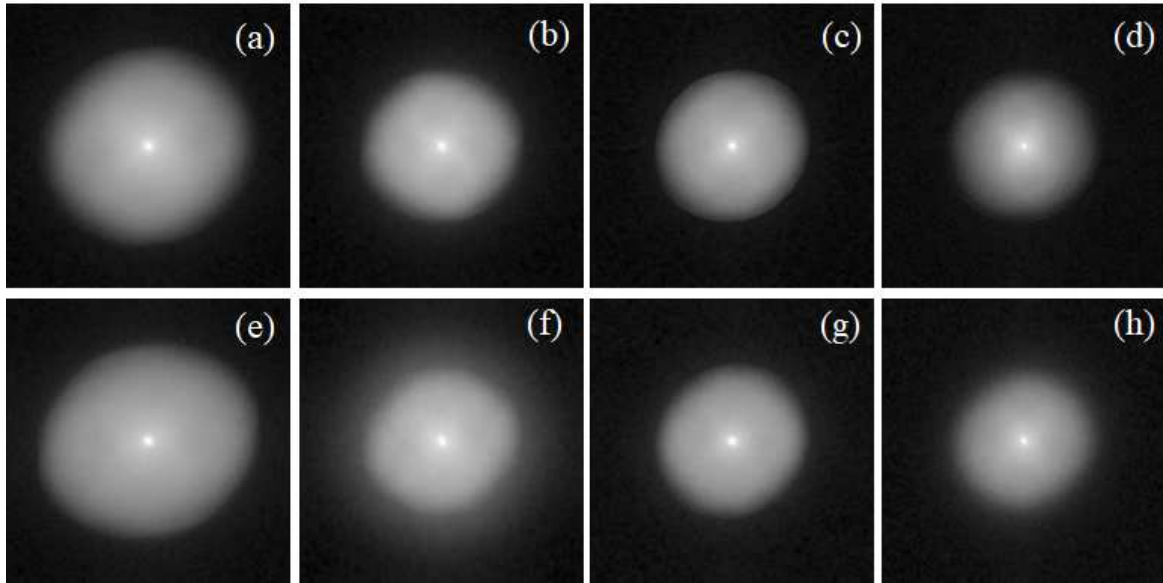


Fig. 3. Results of 2017-observation. Power spectra of Betelgeuse observed with (a) 600W, (b)875L and (c)925W filters at the focus position of d-2, and with (d)925W filter at the focus position of d-1. (e)-(h): power spectra of Aldebaran with the same configuration as (a)-(d). These figures correspond to observation numbers in Table3 as (a)16, (b)17, (c)19, (d)9, (e)13, (f)14, (g)15, and (h)12.

Fig. 3はベテルギウス (a)600W, (b)875L, (c)925W フィルタを用いた場合のパワースペクトルである。各々の天体について 500 枚の平均パワースペクトルを求めた。どの場合も円形に近く、非等方性は見られない。なお、フォーカス位置は d-2 である。一方、アルデバランの場合は、(g)925W フィルタの場合は円形に近いが、(e)600W および (f)875L の場合は少し楕円形になっている。この原因は現在調査中である。

フォーカス位置が d-1 の場合の 925W フィルタの結果が Fig.3(d) と (h) である。それぞれ対応する d-2 位置での結果 (c),(g) と比較すると、パワースペクトルの広がりが小さくなっている。これは、d-2 より d-1 の方がよりデフォーカスの状態にあり、個々のスペックル像がデフォーカスによって少しボケて広がり、その結果パワースペクトルの広がりが全体的に均等に小さくなったためだと解釈できる。このように望遠鏡のデフォーカスによる影響が等方的に現れるのは、なゆた望遠鏡の光学系では非等方的な収差成分 (非点収差など) があまり大きくないためであろう。この意味で、なゆた望遠鏡は非常によい光学系を持っているといえる。

また、Fig. 3(c),(g) を 2016 年の結果である Fig.2(c),(i) と比較するとほぼ同程度の広がりとなっており、d-2 のフォーカス位置はほぼオンフォーカス位置にあると考えてよい。

以上の結果より、Fig. 1(a) においてパワースペクトル内側の近赤外に対応する成分が楕円形をしているのは、フォーカス設定の甘さによって生じた人為的なものではないことが確認できた。すなわち、2012 年の観測においてベテルギウスそのものが近赤外域で非等方的な形状をしていた可能性がより高まったといえる。

## 5. 考察

2016 年と 2017 年の観測を通して、どのフィルタを用いた場合でも、ベテルギウスの形状に 2012 年のような特徴は観測されなかった。しかしながら、今回の観測を通して 2012 年の結果が真の現象である可能性が高まったと考えられるので、今後も定期的な観測を実施して同様の現象を捉えることが必要であろう。

2017年の観測では、唯一アルデバランの結果(600W,875L)においてパワースペクトルが少し楕円形となっていた。これは、大気分散によるものではない。なぜなら、今回の観測では天頂方向が画像の上下方向に一致するようにVTOSを固定して観測したので、もし大気分散による影響が現れるとしたら上下に縮まった形状となるはずであるのに対して、Fig. 3(e)の楕円は斜めになっているからである。このことは同条件で観測したベテルギウスの結果にはこの現象が見られないことから確認できる。ただし、アルデバランの視直径は約20ミリ秒角であり、ベテルギウスよりもかなり小さい。この値はなゆた望遠鏡の600nmでの分解能75ミリ秒角に比較して1/3以下であり、アルデバランに多少変化があってもパワースペクトルには反応が現れないはずである。このため、この現象が真の現象なのか慎重に検討することが必要であろう。

## 《参考文献》

- Balega, Y., Blazit, A., Bonneau, D., Koechlin, L., Foy, R., and Labeyrie, A. 1982, *A & A*, 115, 253
- Bonneau, D., and Labeyrie, A., 1973, *ApJ*, 181, L1
- Cheng, A. Y. S., Hege, E. K., Hubbard E. N., Goldberg. L., Strittmatter, P. A., and Cocke, W. J. 1986, *ApJ*, 309, 737
- Haubois, X., Perrin, G., Lacour, S., Verhoelst, T., Meimon, S., Mugnier, L., Thiebaut, E., Berger, J. P., Ridgway, S. T., Monnier, J. D., Millan-Gabet, R., and Traub, W., 2009, *A & A*, 505, 923.
- Labeyrie, A., 1970, *A & A*, 6, 85
- Lynds, C. R., Worden, S. P., and Harvey, J. W., 1976, *ApJ*, 207, 174
- Kervella, P., Verhoelst, T., Ridgway, S. T., Perrin, G., Lacour, S., Cami, J., and Haubois, X. 2009, *A & A*, 504, 115
- 三浦則明, 八木聖人, 桑村進, 圓谷文朗, 坂元誠, 馬場直志, 2015, 兵庫県立大学天文科学センター紀要, 3, 21
- Ohnaka, K., Weigelt, G., Millour, F., Hofmann, K. -H., Driebe, T., Schertl, D., Chelli, A., Massi, F., Petrov, R., and Stee, Ph., 2011, *A & A*, 529, A163.
- Roddier, F., Roddier, C. 1985, *ApJ*, 295, L21
- Welter, G. L., and Worden, S. P., 1980, *ApJ*, 242, 673

Speckle Observation of Betelgeuse II

Table 2. Observing log (2016)

Object	RA, Dec (J2000)	Mag.	Spectral type	Obs. time (UT)	ZA (deg)	Filter	Focus pos.	No.
HIP30343	06 <sup>h</sup> 22 <sup>m</sup> 57.69 +22° 30 ' 47.2	2.87	M3IIIver	16:50	28.58	600W	on	1
				16:54	27.62	875L	on	2
				16:59	26.65	925W	on	3
				17:03	25.58	515W	on	4
				17:06	25.31	507N	on	5
				17:11	24.36	517N	on	6
HIP25336 (Bellatrix)	05 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup> 07.86 +06° 20 ' 58.7	1.64	B2III	17:18	29.35	515W	on	7
				17:24	29.04	507N	on	8
				17:29	28.83	517N	on	9
HIP27989 (Betelgeuse)	05 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup> 10.34 +07° 24 ' 25.6	0.45	M2Ib	17:37	29.08	515W	on	10
				17:42	28.72	507N	on	11
				17:46	28.46	517N	on	12
				17:50	28.22	600W	on	13
				17:54	28.02	875L	on	14
				17:58	27.84	925W	on	15
HIP21421 (Aldebaran)	04 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup> 55.30 +16° 30 ' 30.4	0.87	K5III	18:06	23.46	600W	on	16
				18:10	24.03	875L	on	17
				18:16	24.92	925W	on	18
				18:21	25.70	515W	on	19
				18:24	26.17	507N	on	20
				18:27	26.66	517N	on	21
HIP25945	05 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup> 12.75 +18° 35 ' 46.0	4.32	M2Ib	18:38	18.66	515W	on	22
				18:44	19.35	507N	on	23
				18:49	19.98	517N	on	24
				18:54	20.65	600W	on	25
				18:58	21.21	875L	on	26
				19:02	21.79	925W	on	27

Observing date: October 30, 2016. The label "on" denotes the observation on focus.

Table 3. Observing log (2017)

Object	RA, Dec (J2000)	Mag.	Spectral type	Obs. time (UT)	ZA (deg)	Filter	Focus pos.	No.
HIP22667	04 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup> 31.96 +14° 15 ' 02.3	4.71	M3Sv	17:54	19.64	600W	d-1	1
				17:58	18.96	875L	d-1	2
				18:02	18.31	925W	d-1	3
HIP30343	06 <sup>h</sup> 22 <sup>m</sup> 57.69 +22° 30 ' 47.2	2.87	M3IIIver	18:09	22.03	600W	d-1	4
				18:13	22.38	875L	d-1	5
				18:16	22.65	925W	d-1	6
HIP27989 (Betelgeuse)	05 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup> 10.34 +07° 24 ' 25.6	0.45	M2Ib	18:24	27.54	600W	d-1	7
				18:27	27.48	875L	d-1	8
				18:31	27.43	925W	d-1	9
HIP21421 (Aldebaran)	04 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup> 55.30 +16° 30 ' 30.4	0.87	K5III	18:49	27.52	600W	d-1	10
				18:53	28.20	875L	d-1	11
				18:57	28.88	925W	d-1	12
HIP21421 (Aldebaran)	04 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup> 55.30 +16° 30 ' 30.4	0.87	K5III	19:03	29.93	600W	d-2	13
				19:06	30.46	875L	d-2	14
				19:10	31.18	925W	d-2	15
HIP27989 (Betelgeuse)	05 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup> 10.34 +07° 24 ' 25.6	0.45	M2Ib	19:16	28.91	600W	d-2	16
				19:29	29.99	875L	d-2	17
				19:33	30.38	925W	d-2	18

Observing date: October 26, 2017. The labels "d-1" and "d-2" denote observations at defocus positions. "d-2" position is closer to the on-focus position than "d-1".