

VTOS によるベテルギウスおよび近傍星のスペックル観測

三浦 則明¹、八木 聖人^{1*}、桑村 進¹、圓谷 文明²、坂元 誠³、馬場 直志⁴

1) 北見工業大学、2) 兵庫県立大学西はりま天文台、3) 子ノ星教育社、4) 北海道大学工学研究院

Speckle observations of Betelgeuse and its neighbor stars using Visual Target Observation System

Noriaki MIURA¹, Masato YAGI^{1*}, Susumu KUWAMURA¹, Fumiaki TSUMURAYA², Makoto SAKAMOTO³, and Naoshi BABA⁴

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

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

3) *Nenohoshi educational company*

4) *Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060-8628, Japan*

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

(Received 2015 November 30)

概要

我々は、2015年1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。M型星とK型星のパワースペクトル分布には、B型星とは異なる共通の特徴が見られた。

Abstract

We conducted speckle observations of Betelgeuse and its neighbor stars using the Visible Target Observation System at the Nishi-Harima Astronomical Observatory in January, 2015. We derived spatial-frequency power spectra of observed stars using the stellar speckle interferometry. A common feature is demonstrated in the power spectra of M- and K-type stars, being different from that of a B-type star.

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

* 現在の所属：株式会社ユーエスイー

Present Affiliation: USE 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。可視光観測では、スペックル干渉法 (Bonnueau & Labeyrie 1973, Lynds et al. 1976; Welter & Worden 1980; Balega et al. 1982; Cheng et al. 1986) や、アパーチャマスキング法 (Buscher et al. 1990; Wilson et al. 1992; Tuthill et al. 1997) によって、ベテルギウスの視直径の計測が行われてきた。報告されたものの中で、最大値は 69 ミリ秒角 (422nm)、最小値は 30 ミリ秒角 (740nm) である。他にも 535nm での Rotation Shearing 干渉法を用いた観測で、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 (Roddier & Roddier 1985)。しかしながら、近年可視光でのベテルギウスの観測についてはほとんど行われていない。

我々は、西はりま天文台の Visual 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 (515.5±10.5 nm:515W) 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 (Figure 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 (Figure 1(b))。この時点では、TiO 分子が光球のまわりで大きく広がっているのが原因ではないかと推測していた。

2014 年には上記波長帯を、TiO 輝線を含まない波長帯 (506.3±3.8 nm:507N) と含む波長帯 (518.9±3.8:517N) に対応するフィルタを新たに導入し、観測を実施した。しかしながら、それぞれのパワースペクトルには大きな差異は見られず、原因を特定するには至らなかった。2015 年 1 月の観測では、さらに詳細に調査するため、上記 3 種のフィルタを同時に用いると共に、比較のためベテルギウス近傍の M 型、K 型星を観測対象に加えた。観測した天体については、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。

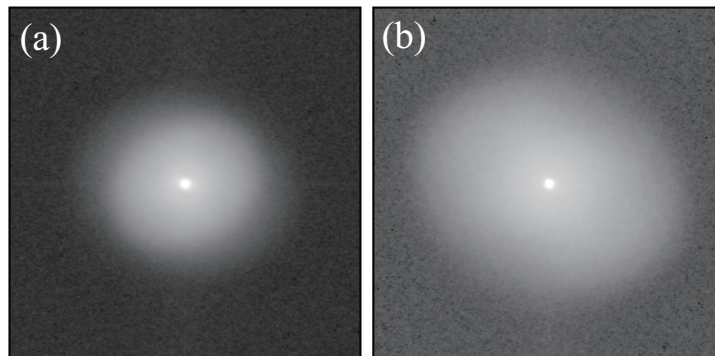


Fig. 1. Power spectra of Betelgeuse and Bellatrix, observed with the 515W filter in November, 2012

2. データ処理

準単色でかつ短時間露光で観測された天体像は

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

と表わすことができる (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。PSF は、通常大気ゆらぎの影響で、多数の斑点 (スペックル) のランダムな集合となっており、このため観測像もスペックル状となる (スペックル像と呼ぶ)。天体スペックル干渉法では、多

数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。 $\langle |P|^2 \rangle$ をスペックル伝達関数という。この項は、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. 観測および結果

Table 1 は 2015 年 1 月 25 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。Figure 2 はベテルギウス (a)515W, (b)507N, (c)517N フィルタを用いた場合、およびペラトリクス (d)515W, (e)507N, (f)517N の場合のパワースペクトルである。それぞれ表中の番号 7-12 に対応している。Figure 2(a) は Figure 1(a) と同じフィルタで観測されたものであり、同じ様な特徴を持つことが分かる。すなわち、中心部の明るく比較的コンパクトな成分と、それより広がった暗い楕円形の成分からなる。これに対して、フィルタ 507N と 517N を合わせると 515W の透過幅をほぼカバーするため、Figure 2(b) か (c)、または両方に (a) と同様なパターンが現れてもよいはずであるが、全く見えていない。当初は TiO 輝線を含むフィルタ 517N の観測像に何らかの変化が現れると推定していたが、この結果からは否定されたと考えている。

Table 1. Observing log

Object	RA, Dec (J2000)	Magnitude	Spectrum type	Observation time (JST)	Zenith angle(deg)	Filter	No.
HIP22667	04 ^h 52 ^m 31.96 +14° 15' 02.3	4.71	M3Sv	22:51	36.389	515W	1
HIP21421 (Aldebaran)	04 ^h 35 ^m 55.30 +16° 30' 30.4	0.87	K5III	22:56	39.089	515W	2
HIP25945	05 ^h 32 ^m 12.75 +18° 35' 39.3	4.32	M2Ib	23:02	38.356	515W	3
HIP29655	06 ^h 14 ^m 52.59 +22° 30' 24.3	3.31	M3III	23:07	19.207	515W	4
HIP30343	06 ^h 22 ^m 57.69 +22° 30' 47.2	2.87	M3IIIver	23:16	19.361	515W	5
HIP32533	06 ^h 47 ^m 19.83 +08° 00' 36	4.77	K4III	23:24	29.450	515W	6
HIP27989 (Betelgeuse)	05 ^h 55 ^m 10.34 +07° 24' 25.6	0.45	M2Ib	23:29 23:33 23:35	37.187 37.808 38.123	515W 507N 517N	7 8 9
HIP25336 (Bellatrix)	05 ^h 25 ^m 07.86 +06° 20' 58.7	1.64	B2III	23:40 23:43 23:46	44.762 45.292 45.823	515W 507N 517N	10 11 12

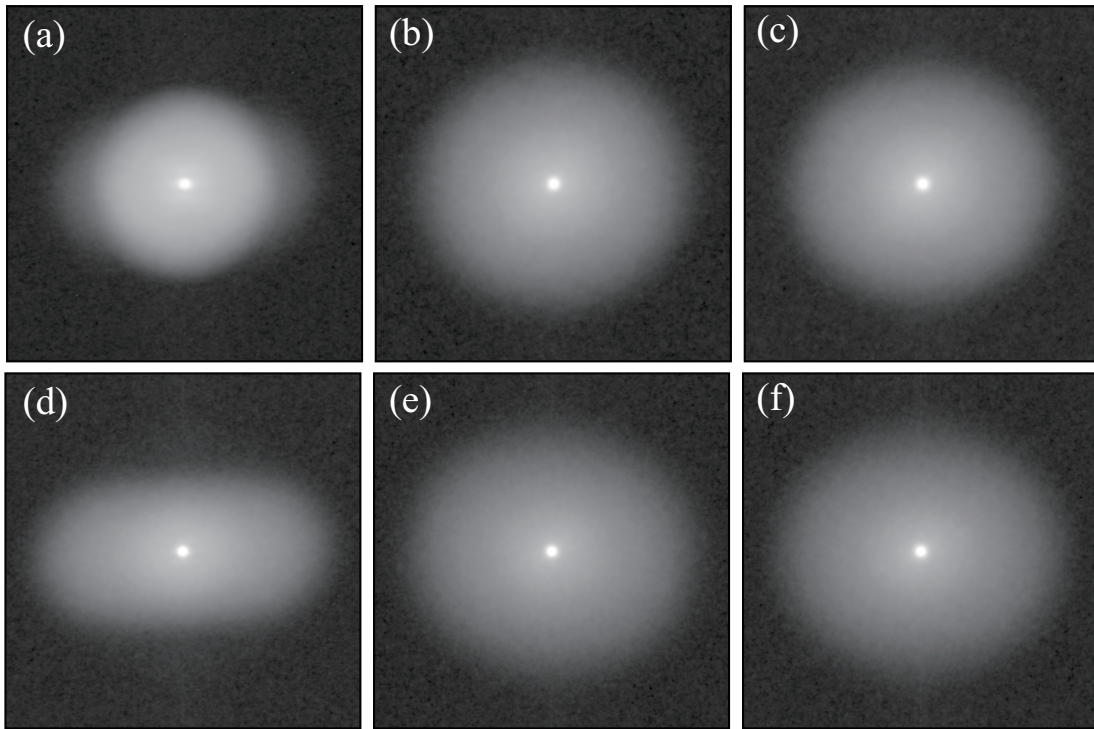


Fig. 2. Power spectra of Betelgeuse with the filters of (a) 515W, (b) 507N, (c) 517N and of Bellatrix with (d)515W, (e)507N, (f)517N, observed in January, 2015. They correspond to No.9-14 in Table 1, respectively.

また、ベラトリクス 515W の結果 Figure 2(d) は、対応する Figure 1(b) と同じような楕円パターンを示している。この楕円パターンは、大気分散によって観測像中の個々のスペクルが天頂方向に引き伸ばされてしまうため、スペクル伝達関数とその方向に縮まることによって生じる。大気分散の効果は、天頂角が大きいほど、観測波長が短いほど、またフィルタの透過幅が広いほど顕著に現れるため、Figure 2(d) のスペクトルが最も扁平になっている。なお、Figure 1 と Figure 2 では天頂方向が異なっている。

フィルタ 515W を用いて観測された幾つかの K 型星と M 型星の観測データについて同様の処理を適用した結果が Fig. 3(a)-(f) であり、それぞれ Table 1 中の番号 1-6 に対応している。すべての画像において、Figure 2(a) のベテルギウスのパワースペクトル中の明るいコンパクトな成分と似たパターンが現れている。特に、Fig. 3(b) アルデバランの結果には、広がった暗い楕円形の成分も見えている。なお、図からはわかりにくい Fig. 3(e)(f) にも広がった成分が現れている。これらの結果から、フィルタ 515W を用いた場合にパワースペクトルの中心部に明るいコンパクトな成分が現れるという現象そのものは、ベテルギウスに特有のものではなく、K 型星と M 型星に共通して現れるものであったと考えるべきであろう。また外側に広がった成分が見えているものは K 型星であるか、M 型星でかつ比較的明るい天体である。M 型星で暗い星の場合、強度そのものが小さい上、緑波長帯の放射強度が K 型よりさらに弱いので、緑波長帯の信号を検出できなかったと考えている。

4. 考察

フィルタ 515W は、VTOS がすばる望遠鏡の試験観測装置であった時期に、ICCD カメラの使用を想定して製作されたものであったので、確認のためにメーカーに依頼してフィルタの透過率を改めて計測した。この結

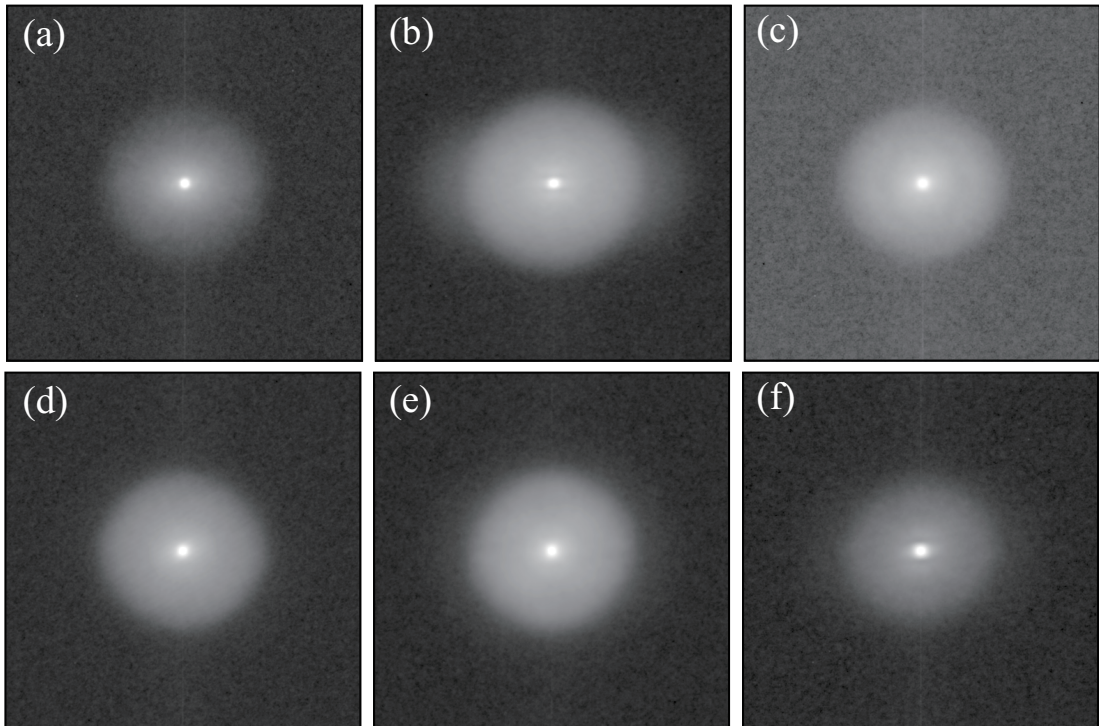


Fig. 3. Power spectra of (a) HIP22667, (b) HIP21421 (Aldebaran) (c) HIP25945, (d) HIP29655, (e) HIP30343, (f) HIP32533, with the 515W filter.

??

果、515nm 付近の他に、900nm 以遠の近赤外光も透過していることが明らかになった。計測した透過特性と、観測に用いた EMCCD の分光感度と合わせて計算したところ、900-1000nm で最大 20% の感度を持つことが分かった。

もし、フィルタが二つの波長帯を透過している場合には、観測像は各々の波長帯のスペックル像の重ね合わせとなる。これのパワースペクトルを求める際、波長帯間の cross term は平均化によって消失する。この結果、得られる平均パワースペクトルは、各波長帯単独で計算したパワースペクトルの単純な重ね合わせになる。

つまり、Figure 2(a) や Fig. 3 に現れていた中心部のコンパクトな成分は近赤外、その外側の成分が緑波長帯によるものと考えられる。コンパクトな成分の拡がりちょうど近赤外での回折限界 (950nm で 120 ミリ秒角) に対応する。近赤外で比較的強い放射強度を持つ M 型星や K 型星にはこのパターンが現れ、B 型星では現れなかったと解釈するとつじつまがあう。さらに、フィルタ 507N や 517N にパターンが現れなかったことの説明もつく。

しかしながら、2015 年の結果 (Figure 2, 3) では中心部のコンパクトな成分は円形に近いのに対して、2012 年の結果 (Figure 1(a)) では楕円形をしている。これを単純に解釈すると、2012 年には、ベテルギウスはある方向に、近赤外での回折限界を超えて広がっていたことを意味する。1.04-2.17 μm 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 があるとの報告もある (Kervella et al. 2009)。このため、2012 年の結果が真の現象である可能性は高いと考えているが、これを確定するためには、同様の現象を再度捉えることが必要であると考えている。

今回の観測で VTOS を用いて近赤外でのスペックル観測が可能であることが分かったので、これを積極的に利用していくことを計画している。近赤外のフィルタを用意し上記解釈を確認すると共に、近赤外を含めた多波長観測を実施することで 2012 年の現象の原因を探る。また、そのような現象が起こるとき他の物理量との関連を探ること、例えば測光観測と併用する等も必要であろう。

《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
- Buscher, D. F., Haniff, C. A., Baldwin, J. E., and Warner, P. J. 1990, *MNRAS*, 245, 7
- Cheng, A. Y. S., Hege, E. K., Hubbard E. N., Goldberg. L., Strittmatter, P. A., and Cocke, W. J. 1986, *ApJ*, 309, 737
- Kervella, P., Verhoelst, T., Ridgway, S. T., Perrin, G., Lacour, S., Cami, J., Haubois, X. 2009, *A & A*, 504, 115
- Labeyrie, A., 1970, *A & A*, 6, 85
- Lynds, C. R., Worden, S. P., and Harvey, J. W., 1976, *ApJ*, 207, 174
- Roddier, F., Roddier, C. 1985, *ApJ*, 295, L21
- Tuthill P. G., Haniff, C. A., Baldwin, J. E. 1997, *MNRAS*, 285, 529
- Welter, G. L., and Worden, S. P., 1980, *ApJ*, 242, 673
- Wilson, R. W., Baldwin, J. E., Buscher, D. F., and Warner, P. J. 1992, *MNRAS*, 257, 369