

# 気象衛星ひまわり8号を 活用した時間領域天文学



谷口



宇野



西山

谷口大輔<sup>1</sup>・宇野慎介<sup>2</sup>・西山学<sup>3,4</sup>

〈<sup>1</sup> 国立天文台 日本学術振興会特別研究員 (PD) 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈<sup>2</sup> 東京大学 天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈<sup>3</sup> 国立天文台 RISE 月惑星探査プロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈<sup>4</sup> 東京大学 地球惑星科学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: <sup>1</sup>d.taniguchi.astro@gmail.com, <sup>2</sup>uno@ioa.s.u-tokyo.ac.jp, <sup>3</sup>gaku.nishiyama@grad.nao.ac.jp

宇宙を観る新たな眼として、我々は「気象衛星を用いた天体観測」という手法を提案している。この観測手法は時間領域天文学の分野で利点があり、「可視光から中間赤外線にまでわたる時間分解した測光観測」と「一年中（太陽による）中断のない高頻度測光観測」を実現できる。一方で、気象衛星は地球観測に最適化された人工衛星であるため、天文学研究のためのデータ解析手法を確立する必要がある点や、観測可能な天体が限られる点などに困難がある。本原稿では、日本の静止気象衛星ひまわり8号に着目し、オリオン座の赤色超巨星ベテルギウスの大減光と、月面の熱放射を観測した事例研究を紹介する。前者の研究では、大減光の原因として、表面温度低下と星周ダスト減光の増加が寄与していたであろうことが明らかになった。また後者の研究では、月表面の細かな凹凸や岩石量分布が推定でき、ひまわり8号が惑星科学にも有用な観測機器であることが示された。

## 1. はじめに

観測天文学者は、世界各地（あるいは大気圏外）に設置された各種天体望遠鏡を用いた天体観測により、宇宙の研究を進めている。すばる望遠鏡やALMA望遠鏡に代表される地上大型望遠鏡、木曾105cmシュミット望遠鏡など各地に点在する中小口径望遠鏡、あるいは近年打ち上げられたジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡など、異なるパラメーター（観測波長や口径、観測頻度など）を持つ望遠鏡たちを適材適所で使い分けているのである。では、既存の天体望遠鏡のみでパラメーター空間を網羅できているのだろうか？我々は、

これまでカバーできていなかった「可視光から中間赤外線にまでわたる時間分解した測光観測」と「一年中（太陽による）中断のない高頻度測光観測」を可能とすべく、「気象衛星を用いた天体観測」という新たな観測手段を提唱している。

## 2. 気象衛星を用いた「天体観測」

### 2.1 気象衛星画像に写り込む天体

気象衛星は文字通り地球上の気象観測を目的とする衛星だが、その観測機器を宇宙空間へ向ければ地球以外の天体を観測することもできる。事実、気象衛星の観測画像には図1のように月や惑星、恒星が写り込むことがあり、その画像は放射

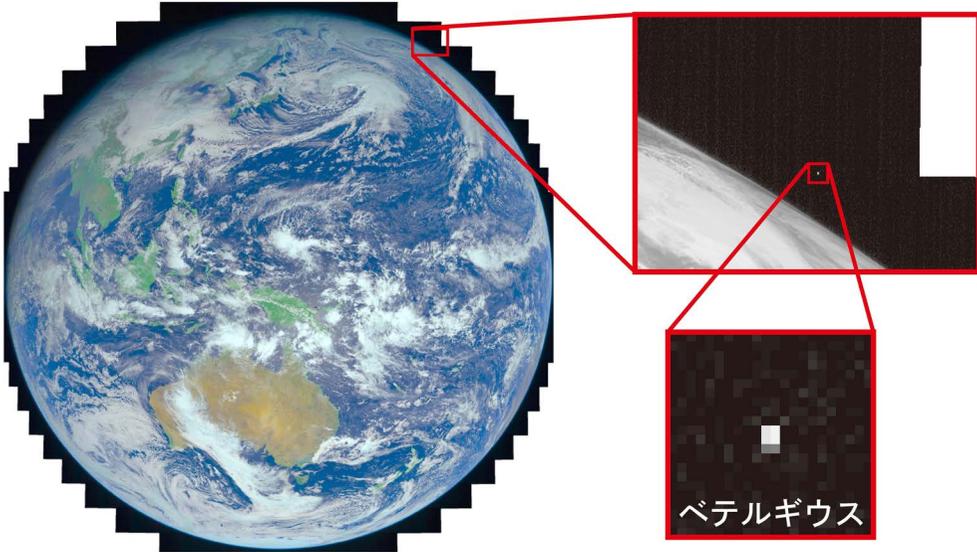


図1 静止気象衛星ひまわり8号の地球観測画像に写り込んだベテルギウスの姿。

計の較正や衛星姿勢の制御など、気象衛星の運用のために利用されてきた [1]。これに対し我々は、気象衛星（特に日本の静止気象衛星ひまわり8号）が撮影した天体画像を積極的に取り出して、宇宙望遠鏡のように天文学や地球惑星科学の観測研究に利用できないだろうか考えた。

気象衛星が行う観測には主に二つの特徴がある。まず一つ目は、地球を観測する頻度の高さである。ひまわり8号に代表される静止気象衛星では、地球の自転と同じ角速度で地球周囲を公転することで、地上に対する相対位置を固定しつつ、地球の半面という広範囲を数分から数十分程度という高頻度で繰り返し撮影して大気中の雲や水蒸気を追跡する。一般に観測頻度が高い（＝観測周期が短い）ほど、台風のような短時間で変化する大気現象の予測精度が向上する。もう一つの特徴は、同時観測可能な波長帯域の広さである。可視光から近赤外線にかけての観測は太陽光の反射を見ており、望遠鏡の回折限界を考えると短波長ゆえの高い解像度で雲の形を捉えられる利点があるが、地球の夜面を撮影できないという弱点もある。対して、より波長の長い中間赤外線の観測で

は地球の熱放射が見えるために表面温度を測定でき、昼夜を問わず、上空の雲と地上との温度差によって雲を識別できる利点がある。また、6-7  $\mu\text{m}$  帯は水蒸気による吸収を強く受けるため、水蒸気分布の観測に利用される。このような気象衛星の持つ高い観測頻度と多数の観測バンドが、現代の高精度な気象予報を支えている。

では、気象衛星は天体観測においてどのように役立つだろうか？ ひまわり8号は地球をスキャンする際、見えている地球の縁から少し外へ伸びて宇宙空間もスキャンする（図1）。もし天体がタイミングよくその位置に写り込めば、天体の可視光から赤外線までの多色測光画像が一举に得られる。これはすなわち天体のスペクトルエネルギー分布（spectral energy distribution; SED）の情報を測れることを意味する。特に水蒸気バンドに関しては、地上からは大気水蒸気の影響を受けて観測困難であるから、もともと地球大気の水蒸気を観測対象にしている気象衛星がこのバンドで天体大気の水蒸気を撮影することは理に適っている。

気象衛星がスキャンを繰り返すうちに同じ天体が定期的に写り込むので、天体の光度変化を辿る

こともできる。時には天体が太陽に近い方向に位置し、地上からは夜間に観測できない場合でも、大気圏外にある気象衛星では観測できていることもある。加えて気象衛星は5-10年単位で長期的にかつ観測が途切れないように運用されるため、天体の時間分解した多色測光データが同じく5-10年単位で蓄積されるのである\*1。

## 2.2 ひまわり8号とAHIの性能

2015年7月に運用が開始されたひまわり8号は世界的に見ても最新世代の静止気象衛星であるが、注目すべきは搭載された可視赤外放射計(Advanced Himawari Imager; AHI) [2]の観測性能である。ここでは観測バンド数・観測頻度・空間分解能の三要素から、ひまわり8号のAHIと一世代前のひまわり7号(MTSAT-2)の放射計とを比較したい。ひまわり7号では可視1バンド、赤外4バンドの合計5バンドで、30分ごとのスキャン、最高1 km (5.76秒角)の空間分解能であった。そして新型のひまわり8号では可視3バンド、赤外13バンドの合計16バンド(図2上)で、10分ごとのスキャン、最高0.5 km (2.88秒角)の空間分解能というように、いずれの要素においても倍以上に性能向上を果たしている。

放射計の進歩のおかげで、気象観測の観点では、例えば可視光3色カラー画像による火山の噴煙と黄砂の監視や、中間赤外線バンドによる雲の高度とオゾン量の推定などのような観測用途が広がり、かつ高い時空間分解能でより詳細に大気現象を追跡できるようになった [2]。同時に天体観測に対してもメリットがあり、可視光から近・中間赤外線の広い波長帯域にわたって16色ものスペクトル情報が得られるうえ、各天体が写り込む頻度は単純計

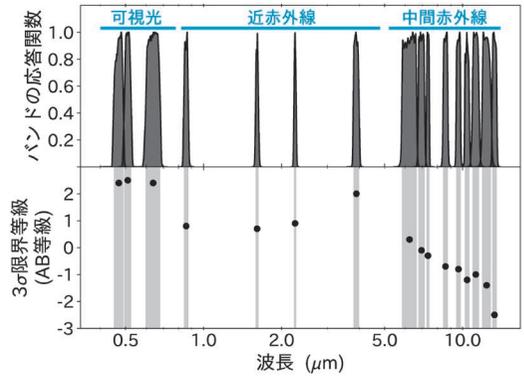


図2 ひまわり8号AHIの各観測バンドの応答関数(上)、および本研究の測光手法において画像1枚からシグナルノイズ比3以上で検出できる恒星の限界等級(下)。短波長から長波長に向かってバンド1, 2, ..., 16の順に並んでいる。

算で3倍になった(例えばベテルギウスは平均して1.72日に1回の頻度)。また空間分解能が倍増したことで、月のクレーターや惑星表面などの構造をより明瞭に観測できるようになった。

我々は以上で述べたひまわり8号AHIの性能、特に多数の観測バンドと高い観測頻度に着目して、天体の写り込み画像を使った観測的研究を行った。特に恒星天文学の分野では、ひまわり8号の観測データを解析して恒星の光度曲線、すなわち光度の時間変化を取得した。我々の知る限りでは、本研究は気象衛星データを本格的な天文学研究に利用した世界初の試みである。すなわち、ひまわり8号の観測データは天文学にとって手付かずのまま眠っていた全く新しいデータセットだったのだ\*2,\*3。

## 2.3 ひまわり8号データによる恒星の測光

我々が実施した恒星測光の手法とその検証結果

\*1 ただし、気象衛星は気象観測という実用上の任務のため、おもしろいと好きな天体を観測することは残念ながら現状わかない。それでも、本節で述べたように画像の端に偶然天体が写り込むだけで十分にユニークな観測データになる。

\*2 AHIとはほぼ同じ放射計を搭載した気象衛星にNASAのGOES-16とGOES-17, GOES-18, 韓国気象庁のGEO-KOMPSAT-2Aがあるが、本原稿執筆時点において宇宙空間領域の画像が一般公開されているのはひまわり8号のみである。

\*3 ひまわり8号は2022年12月に同型機のひまわり9号と交代してバックアップ運用に入っている。2022年6月現在、観測運用中のひまわり9号が取得したデータについても我々はひまわり8号同様に解析を進めている。

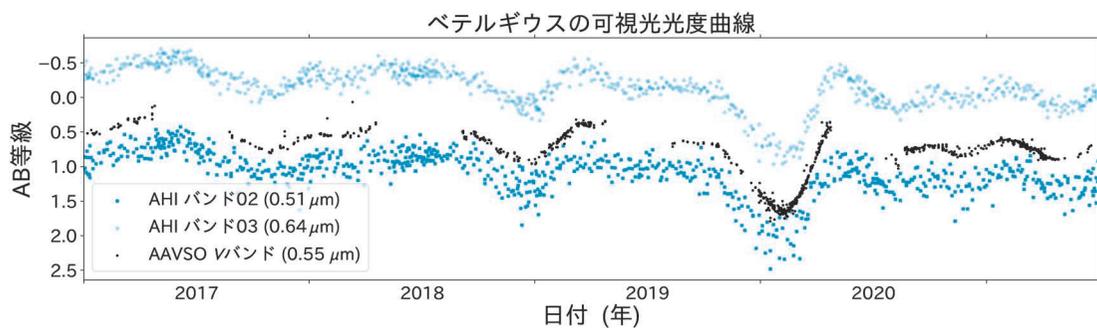


図3 ベテルギウスの可視光光度曲線。ひまわり8号のバンド2と3を用いた測光値（濃淡青）を，アメリカ変光星観測者協会（AAVSO）のデータベースに記録されているVバンドのもの（黒）と比較している。

[3] について報告する。

ひまわり8号AHIは，地球面を南北方向に23個の帯（スワス）に分け，10分ごとに地球面を北のスワスから順に東西方向にスキャン観測する。その際に地球の縁から最大で約1度以内の範囲の宇宙空間が撮像される（図1）。本研究の測光対象として，AHIのスキャンに写り込むことがある赤緯±8.8度以内の領域（静止軌道がある高度3.6万kmから見たときの地球の半径に相当）に含まれ，かつ可視バンドで容易に検出可能なほど明るい，ベテルギウス，リゲルなど計5個の恒星を選定した。なお，各バンドの画像1枚から検出可能な恒星の限界等級は図2下パネルの通りである。

ひまわり8号AHIの観測画像は，一次処理で座標変換・放射量較正がなされた「ひまわり標準データ」として気象庁から一般公開されている。恒星の像を抽出するため，まず恒星が写り込んだ可能性がある観測時刻を絞り込み，その後画像内の恒星が写り込んでいと推定した位置周辺のうち最も明るいピクセルを選ぶことで，恒星が写った位置を特定した。

次に各画像から星像（おおよそ $2 \times 2 \text{ pix}^2$ の広がりを持つ）を切り出して開口測光を行ったが，これが一筋縄ではいかなかった。恒星の位置が地球の縁に近いと，地球の強い放射が背景光として漏れ込んでしまう。背景光の空間分布は座標に対して線形ではなく，単純な開口測光だと測光値に

小さくないバイアスが乗ってしまう。そこで我々は複数の測光方法を試した結果，本研究では地球の縁から一定角度以上恒星が離れた画像に絞ったうえで，星像周囲の輝度を多項式曲面でフィッティングし背景光成分として差し引く方法を採用し，測光時のバイアスを軽減させた。

このようにして，5個の恒星に対して運用開始2015年7月以降の測光値の時系列データ，つまり光度曲線が得られた。ベテルギウスに対して画像内の推定位置と実際の観測位置とのずれを調べたところ，2016年以前は一部のバンドで位置ずれが大きいことが確認され，星像が検出困難な中間赤外バンドで測光すべき星の位置を見誤ってしまうおそれが生じていることがわかった。また更に，測光の安定性を評価するため，非変光星であるリゲルを用いて測光値の時間変動を調べた。すると，2017年以降は測光値が一定であったのに対し，2016年前半以前では複数のバンドで測光値が2017年以降より大きく，かつ時間変化していることがわかった。以上の調査結果を踏まえ，2016年以前のデータは光度曲線の解析に使用しないことにした。こうした挙動が見られた原因は不明のままだが，一つの可能性として2016年に気象庁が実施したノイズ処理や位置合わせ処理の更新が関係していたのかもしれない。

解析の結果得られたAHIのバンド2（ $0.51 \mu\text{m}$ ）と3（ $0.64 \mu\text{m}$ ）のベテルギウスの可視光光度曲

線を図3に示す。比較のために波長の近いVバンド(0.55 μm)地上測光データを重ねると、両者の時間変化は非常によく似ていることがわかった。本光度曲線の特筆すべき点として、一年のうちベテルギウスと太陽とが近い位置関係にあって地上観測が途切れている6月前後においても、衛星観測のひまわり8号でなら絶え間なく測光できている点が挙げられる。すなわち、気象衛星の観測データを活用して、冒頭で述べた「可視光から中間赤外線にまでわたる時間分解した測光観測」と「一年中(太陽による)中断のない高頻度測光観測」を達成する、天文学研究に使用可能な多色・高頻度での恒星測光が実現できたのである。

### 3. ベテルギウス「大減光」の観測

気象衛星で観測するターゲットとして絶好の天体現象が2019年末から2020年初頭にかけて発生した。オリオン座の赤色超巨星ベテルギウスの「大減光」である。本章では、気象衛星観測が天文研究に有用であることを示す事例研究として、ひまわり8号の多色光度曲線を用いてベテルギウスの大減光の原因に迫った研究[3]を紹介する。

#### 3.1 序論：ベテルギウスの光度変化と大減光

ベテルギウスは、最も近くにある赤色超巨星のうちの一つであることから、赤色超巨星の大気構造を研究するうえでの主要なターゲットとして、古くから測光・分光・撮像・干渉計観測などが(時間分解されて)行われてきた[4]。とりわけ、可視光光度に関しては、AAVSOなどに属するアマチュア天文学者らによって1世紀以上に渡ってモニタリングされており(図4)、平常時のベテルギウスはVバンドで0.3-0.7等級付近を~400日と~2,000日周期で変光していることが明らかになっている\*4。また、近年の興味深い試みとし

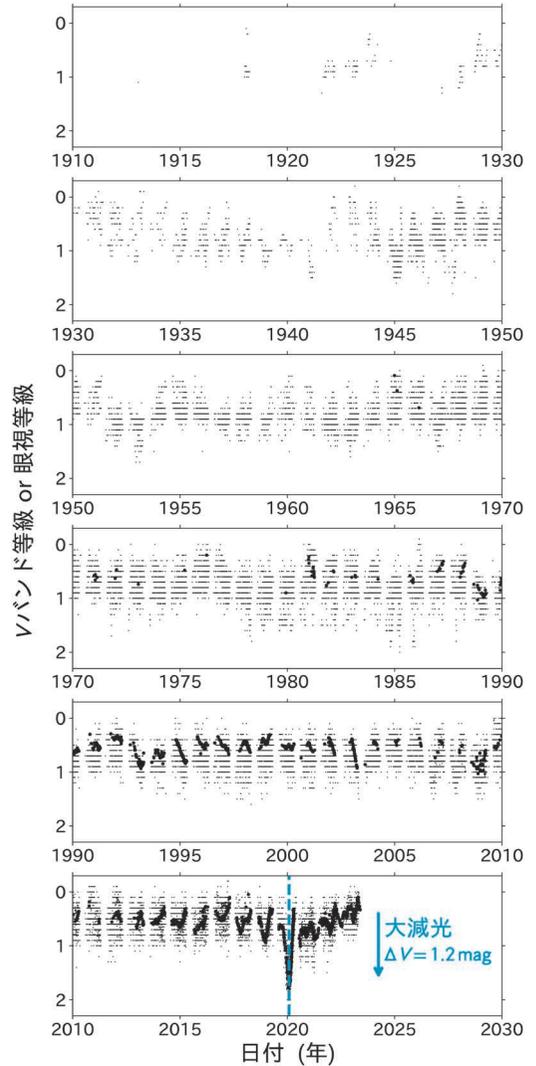


図4 1世紀にわたるベテルギウスの可視光光度曲線(AAVSOデータベースより)。黒丸がVバンド測光、黒点が眼視測光のデータを示す。

て、23年間にわたるUBVRI多色測光観測[5]や、夏に太陽がベテルギウスの近くに位置する中での日中観測[6]などが実施されている。

この通常の変光の振幅に反し、ベテルギウスは

\*4 ~400日の変光周期をfundamental mode、~2000日の周期をAGB星などで見られるlong secondary period(LSP)だと解釈するのが一般的である。また、そのほかに~30年(ベテルギウスの自転周期と大きな誤差の範囲内で一致することが指摘されている)と~200日(first overtone modeと解釈されている)の変光周期の検出も報告されている[7]ものの、均質かつより長期間にわたる測光観測での検証が望まれている。

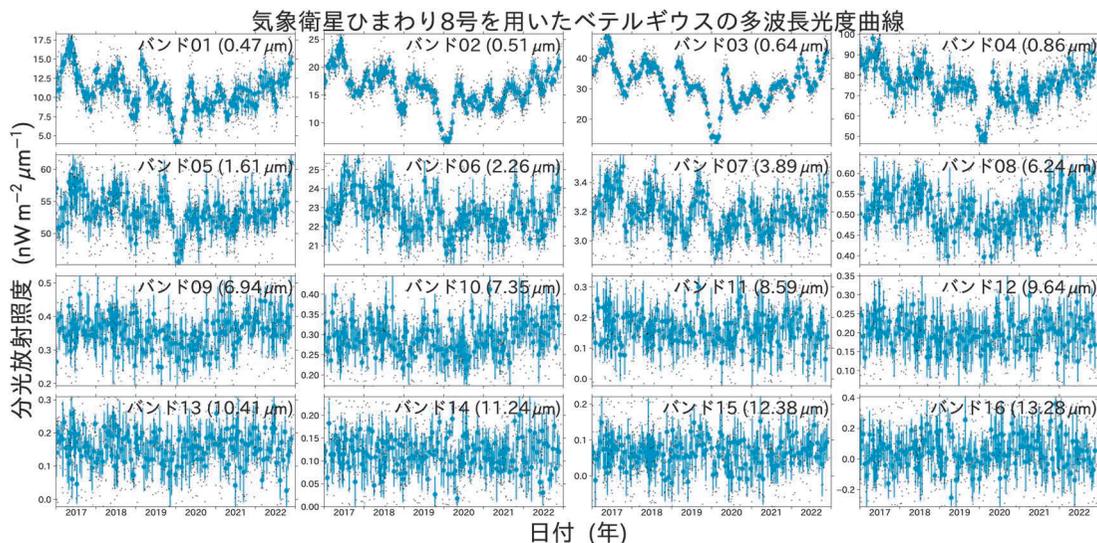


図5 ひまわり8号によるベテルギウスの光度曲線. 各パネルが各波長帯（バンド1-16；0.45-13.5 μm）の光度曲線を示す. 黒点が各観測画像を測光して得られた分光放射照度，青点が5-12個のデータ点をビンニングした後のものを示す.

2019年10月頃から可視光で急激に減光を開始し、2020年2月には観測史上最も暗いVバンドで1.6等級にまで達したものの、その後2020年4月頃には平常時の明るさまで増光した（図4下パネルの縦点線）。このベテルギウスの～1.2等級に及ぶ可視光光度の急激な減光と増光のことを、ベテルギウスの「大減光」と呼ぶ。

大減光の原因に関して、まず考えられた説が有効温度低下説である。ベテルギウスなどの赤色超巨星は、有効温度が低下すると可視光スペクトルに現れるTiO分子吸収線バンドの強度が強くなる。このため、TiO吸収強度は有効温度の指標として使えることがよく知られている。そこで、いくつかの研究グループが大減光中と平常時それぞれでベテルギウスの可視光低・高分散観測スペクトルを一次元モデル大気を用いた理論スペクトルと比較し、有効温度の時間変化を調べた。その結果、大減光中はベテルギウスの有効温度が50-150Kほど平常時より低くなっていたことが明らかになった [8-10]。しかし、この低下量では～1.2等級の減光の約半分がそれ以下しか説明できない

ため、有効温度低下以外の何かしらの原因による減光も必要となる。

そのような追加の原因として、新たに生成された星周ダストによる減光（ダスト雲による遮蔽）説 [11] とベテルギウス表面の温度ムラ増加（巨大な低温領域の出現）説 [12] が提案された。しかし、既存の理論モデルの不定性を考慮に入れると、可視光の観測データ（測光、分光、撮像、偏光）からはこれらの説が区別できていなかった。そこで本研究では、気象衛星ひまわり8号の中間赤外線測光データを活用することで、大減光中に星周ダスト量が増加していたかどうかを明らかにすることを目的とした。

### 3.2 ひまわり8号による光度曲線の解析

図5にひまわり8号の観測データを解析して得た、2017年から2022年までのベテルギウスの16バンド（0.45-13.5 μm）光度曲線を示す。各観測時刻のデータは必ずしも16バンドすべてが揃っているとは限らないことから、5-12個の時刻の測光値をビンニングすることで、穴のない16バンド光度曲線、すなわちSEDの時間変化のデータ

セットを得た。

本研究では各観測SEDを2ステップで理論モデルと比較した。まずバンド1-10 ( $\leq 8\mu\text{m}$ )のSEDを、光球のモデルスペクトルBT-NextGenにCardelliの減光則で減光の効果を取り入れたモデルスペクトルでフィッティングした。このステップにより、3つのパラメーター、有効温度 $T_{\text{eff}}$ 、半径 $R$ 、減光 $A(V)$ を決定した。このステップは先行研究が可視光スペクトルや可視光SEDを解析した方法と同様なものである。なお、「減光 $A(V)$ 」は星周ダスト減光を念頭に置いているものの、温度ムラ増加などの他の効果による減光の可能性を排除しない点に注意されたい。

続いて、バンド12-14 ( $\sim 10\mu\text{m}$ )のSEDを、DUSTY V2コードを用いて計算した珪酸塩ダストのモデルスペクトルでフィッティングした。この際、星周ダストの $10\mu\text{m}$ での光学的厚み $\tau_{10}$ のみを自由パラメーターとした。この $\tau_{10}$ の変動を用いて、大減光中に星周ダスト量増加の兆候が見られるか検証した。

### 3.3 ベテルギウス大減光の原因

図6に本研究で得られたベテルギウスの物理量の時間変化を示す。まずパネルbcdを見ると、大減光に半径 $R$ の変化は効いておらず、有効温度 $T_{\text{eff}}$ の $\sim 140\text{K}$ の低下と減光 $A(V)$ の $\sim 0.6$ 等級の増加が寄与していたことがわかった。これは可視・近赤外線のスペクトルや測光、干渉計データを解析したいくつかの先行研究 [8, 10, 11] と定性的には同様な結果である。肝心の星周ダストの $10\mu\text{m}$ での光学的厚み $\tau_{10}$ に関しては、大減光中に増加していたことが明らかになった(図6のパネルe)。これは大減光中に新たに星周ダストの塊が形成され、その塊による遮蔽が大減光に寄与した可能性を示唆する。

本研究やその他の観測研究の結果を踏まえ、現在では大減光の前後でベテルギウスに何が起きていたか明らかになりつつある [4, 13]。まず大減光の数ヶ月-1年程度前に、対流などの何らかの

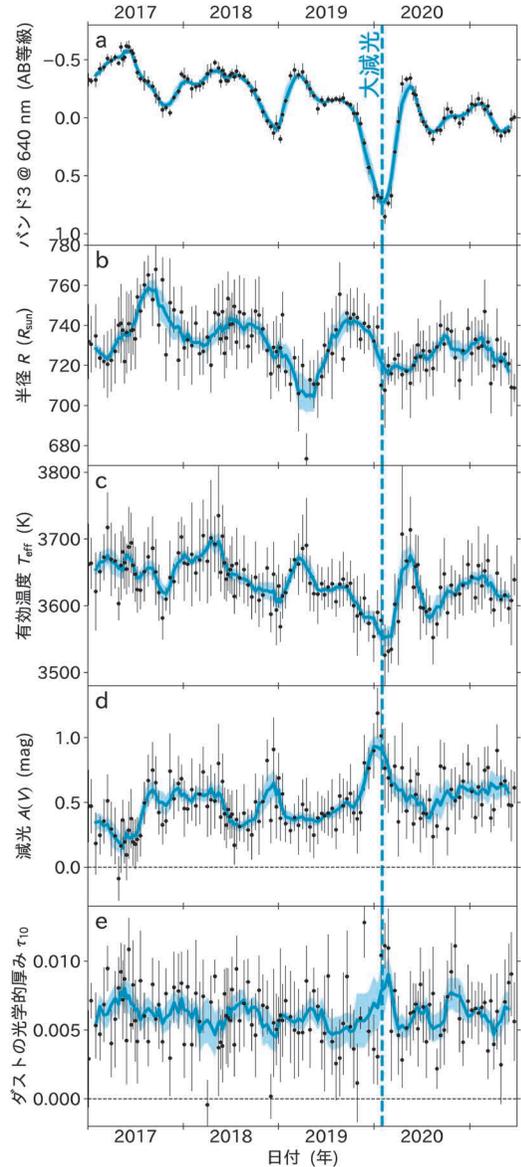


図6 ひまわり8号の光度曲線を解析して得られたベテルギウスの物理量の時間変化。青線は5個ずつのデータ点の移動平均を示す。

原因によってベテルギウスの光球からガスの塊が噴出した(紫外線による彩層観測 [14] や、可視光高分散分光による光球下部での衝撃波の検出 [9])。続いて、このガス雲が光球から遠ざかるかあるいはベテルギウスの表面温度の低下などの原因によってガス雲の温度が低下し、ダスト雲が形

成された（本研究の中間赤外線観測や、可視光偏光観測 [15, 16]）。その後のガス・ダスト雲の行方は不明なもの、～400日の変光周期が消え、～200日の変光周期が卓越するという「後遺症」がベテルギウスの光球に残された [13]。

この一連の大減光の過程を理論モデルで理解しようとする試みも始まりつつある [17, 18]。また、ベテルギウスの現在と今後の姿はプロ・アマチュア両天文学者により多岐にわたる観測手段で観測され続けている他、今年12月には小惑星 Leona によるベテルギウス食を利用した表面マッピングという一大イベントも控えている。今後のベテルギウスの動向に注視していきたい。

#### 4. 月面の熱放射観測

気象衛星の観測データは太陽系天体の研究にも応用できる。本章ではひまわり8号の中間赤外線画像を用いた月の研究 [19] を紹介する。

中間赤外線で観測される岩石天体の熱放射スペクトルからは、表面温度だけでなく、凹凸や岩石量といった表面の物理的性質を推定でき、月惑星探査での着陸地点選定等の様々な場面で有用である。岩石天体に対して中間赤外線のある波長の輝度から求めた温度（輝度温度）は、観測波長によって異なる値を示すことがある。これは画像の有限のサイズを持つピクセル内に様々な温度成分が含まれるため、大気のない天体表面の地質を反映している。例えば、太陽光が斜めに入射する月の朝・夕面（半月の影領域との境界付近）には、表面の細かな凹凸によって、高温の日向と低温の日陰というように異なる温度を持つ領域が混在する（図7） [20, 21]。また日没を過ぎた月の夜面（新月や三日月で暗い部分）では、表面に存在する岩石は周囲の砂（レゴリス）に比べて冷めにくいいため、高温の岩石と低温の砂という2つの温度成分が出現する（図8） [22]。これらの温度の混合が岩石量に応じて特徴的な熱放射スペクトルを生み、赤外多色撮像を通して検出されるのである。

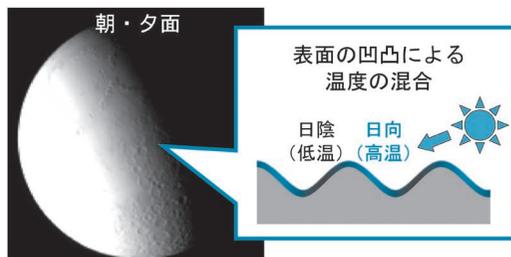


図7 月表面の細かな凹凸の影響でピクセル内に異なる温度が混在している様子。太陽光が斜めに入射する朝・夕面で顕著になる。月画像はひまわり8号のバンド15 (12.38 μm) で撮影されたもの。



図8 月の夜面で岩石量に依存してピクセル内に異なる温度が混在している様子。月画像はひまわり8号のバンド14 (11.24 μm) で撮影されたもの（輝度値は対数スケール）。若いクレーターは岩石量が多く、夜面で周囲よりも温度が高くなるために、中間赤外線画像で明るいスポットとして見えている。

このように、中間赤外線の観測は月惑星表層の情報を得るうえで重要である一方、地上からの観測では大気の影響が無視できない。また、月周回探査機での中間赤外線観測はまだ少なく、宇宙空間での撮像には未開拓の波長帯域が残っている。そうした状況の中、9つもの中間赤外バンドを持つひまわり8号AHIは、月面を最高23 kmの解像度で2021年末までだけでも900回以上写し込んでいた。このような大気の影響を受けない中間赤外線多色画像は月の観測研究においても貴重なデータとなりうるものであった。しかし、ひまわり8号データを用いた惑星科学は前例がなく、実際に有用なのかどうかを確かめる必要があった。

そこで本研究ではまず、ひまわり8号AHIのバンド11の観測画像を、ほぼ同一の波長帯域を持つNASAの月周回探査機ルナー・リコネサンス・オービター（LRO）搭載の放射計と比較した。その結果、2つの機器が測った月の赤道上や若いクレーターの輝度温度がよく一致することを確認した。しかも夜面においてはLROの放射計では検出されない低い輝度温度までAHIは測定できており、従来の月探査機器以上の感度を持つていることが示された。

続いて月面の表面温度分布のシミュレーションを行い、AHIの中間赤外データと比較した。月面全体にわたって表面の細かな凹凸がアポロ計画で測定された着陸地点と同程度だと仮定した場合、シミュレーションした熱放射スペクトルはAHIの観測結果をよく再現した。また、夜面の若いクレーターは周囲よりも温度が高く、月の赤道と比べて表面に占める岩石の割合が10倍以上大きいと推定され、LROによる観測結果とよく一致した。この結果は、若いクレーターにおいては微小隕石の衝突によって岩石が砂へと破碎される風化作用のまだ途上にあり、岩石が多く残存していることを示唆している。

以上のように、ひまわり8号の中間赤外線多色観測が月の地質を調べる手段として有用であることが確かめられた。ひまわり8号には月だけでなく、水星・金星・火星・木星といった太陽系天体も同様に写り込んでおり、今後の探査機器を較正する際にも利用できる。現在進行中の、そして将来ミッションとして計画中の惑星探査機には同様の波長帯を撮像する赤外線カメラを搭載しているものもあり、目的の惑星への航行中に他惑星をフライバイする機会が多々ある。つまり、ひまわり8号が撮像した惑星のデータは、いまだに充実していない中間赤外スペクトルデータを補完し、将来にわたって惑星探査の助けとなるものである。

## 5. 将来の展望

我々は天文学・惑星科学研究における新たな観測手段として、気象衛星の活用を進めてきた。現在も引き続きひまわり8号・9号のアーカイブデータに眠っている天体画像の洗い出しを進めている。これらの画像は、今回のベテルギウスや月の研究と同様に、今後も多色・高頻度撮像という特色を活かした近・中間赤外線での時間変動研究に活用できると考えている。

しかし、本研究のような観測装置の目的外の転用には往々にして技術的な困難が伴う。気象衛星ひまわり8号の天体観測への転用では、観測装置のダイナミックレンジが地球観測に最適化してあって、天体には滅多に適さない点が特に課題として挙げられる<sup>\*5</sup>。今回の恒星の観測ではベテルギウスやリゲルのような一等星を観測対象としたため、天文学の解析に耐えうるシグナルノイズ比を達成することができたが、より暗い恒星を対象とする場合には画像の積算処理（すなわち時間方向の粗視化）などの工夫によって感度を上げる必要性が生じる。また対照的に、月の観測においては、昼面は地球以上に高温であることから中間赤外バンドにおいて飽和してしまうため、現状の観測対象が朝・夕・夜面に限られている。もし月の昼面が観測可能になれば、水蒸気バンドを手掛かりにして、今後の有人月探査にも関わる月面の水分分布調査が実現可能になる可能性があると考えている。以上のような課題のもとで静止気象衛星を用いた天体観測を更に進めるためには、観測装置自体の設計に加えて画像の解析手法、すなわちハード面とソフト面の両方で発展の余地があるだろう。また他にも、静止気象衛星以外の地球観測衛星や宇宙探査機を用いた天体観測も一考に値するだろう（例えば土星探査機カッシーニを用いた恒星ミラの観測 [23] などの先例がある）。

\*5 観測領域が地球方向（赤緯±8.8度以内）に限られている点は言うまでもない。

現役のひまわり9号は2029年まで観測運用を続ける予定であり、その後継機として次世代の静止気象衛星「ひまわり10号」が計画されている。ひまわり7号から8号で性能の飛躍があったように、今後の気象衛星も世代を重ねるにつれて観測バンド数・観測頻度・空間分解能といった観測性能が向上していくことが期待できる。あるいは分光計のような新機軸の観測機器が導入されることで新たな局面を迎えるかもしれない。いずれにせよ、将来、より先進的な観測機器を搭載した人工衛星や探査機が登場し、また計画段階から天文学者が天体観測への転用可能性について提案することで、宇宙からの天体観測の可能性がより一層広がることを願ってやまない。

## 謝 辞

本原稿の執筆機会をくださり、また多岐にわたるコメントを頂いた、天文月報編集委員の津村耕司氏並びに江草芙実氏に篤く御礼申し上げます。本原稿は [3, 19] の内容をもとに執筆しました。気象学と気象衛星データに関する深い知識によって恒星測光をリードしてくださった山崎和哉氏に心より感謝申し上げます。本研究はコニカミノルタ科学技術振興財団ならびに孫正義育英財団などのご支援を受けて実施しました。

## 参 考 文 献

- [1] Kalluri, S., et al., 2018, *Remote Sens.*, 10, 177
- [2] Bessho, K., et al., 2016, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 94, 151
- [3] Taniguchi, D., et al., 2022, *Nat. Astron.*, 6, 930
- [4] Wheeler, J. C., & Chatzopoulos, E., 2023, *Astron. Geophys.*, 64, 3.11
- [5] Ogane, Y., et al., 2022, *Open Euro. J. Variable Stars*, 233, 1
- [6] Nickel, O., & Calderwood, T., 2021, *J. Am. Assoc. Variable Star Observ.*, 49, 269
- [7] Joyce, M., et al., 2020, *ApJ*, 902, 63
- [8] Levesque, E. M., & Massey, P., 2020, *ApJ*, 891, L37
- [9] Kravchenko, K., et al., 2021, *A&A*, 650, L17
- [10] Alexeeva, S., et al., 2021, *Nat. Commun.*, 12, 4719

- [11] Montargès, M., et al., 2021, *Nature*, 594, 365
- [12] Harper, G. M., et al., 2020, *ApJ*, 905, 34
- [13] Dupree, A. K., et al., 2022, *ApJ*, 936, 18
- [14] Dupree, A. K., et al., 2020, *ApJ*, 899, 68
- [15] Cotton, D. V., et al., 2020, *Res. Notes Am. Astron. Soc.*, 4, 39
- [16] Safonov, B., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2005.05215
- [17] MacLeod, M., et al., 2023, arXiv e-prints, arXiv:2305.09732
- [18] Saio, H., et al., 2023, arXiv e-prints, arXiv:2306.00287
- [19] Nishiyama, G., et al., 2022, *Earth, Planets. Space*, 74, 105
- [20] Bandfield, J. L., et al., 2015, *Icarus*, 248, 357
- [21] Davidsson, B. J. R., et al., 2015, *Icarus*, 252, 1
- [22] Bandfield, J. L., et al., 2011, *J. Geophys. Res. (Planets)*, 116, E00H02
- [23] Stewart, P. N., et al., 2016, *MNRAS*, 457, 1410

## Time-Domain Astronomy Making Use of the Himawari-8 Meteorological Satellite

Daisuke TANIGUCHI<sup>1</sup>, Shinsuke UNO<sup>2</sup> and Gaku NISHIYAMA<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>*JSPS research fellow (PD) at National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

<sup>2</sup>*Institute of Astronomy, The University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

<sup>3</sup>*RISE project, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

<sup>4</sup>*Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: We propose a brand-new concept of using meteorological satellites as “space telescopes”. This concept offers benefits in the field of time-domain astronomy and planetary science, allowing for time-resolved photometry in the optical and near- and mid-infrared wavelengths, as well as continuous high-frequency photometry uninterrupted by the Sun. This manuscript presents case studies conducted with the Japanese geostationary meteorological satellite Himawari-8, focusing on the observation of the Great Dimming of the red supergiant star Betelgeuse, as well as the investigation of thermal radiation from the lunar surface.