

宇宙鉱物学最前線

—死にかけ星のダストを追え！—

宮田 隆 志

〈東京大学理学系研究科天文学教育研究センター木曾観測所 〒397-0101 長野県木曾郡三岳村 10762-30〉

e-mail: miyata@kiso.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

従来までの観測によって、宇宙空間には実にさまざまな種類・組成のダストが存在することがわかってきている。このような多種多様なダストがいつ・どのようにしてできるのか。この問題はダスト形成のみならず、惑星系形成や恒星の進化史の研究とも相まって、今日、非常に興味深い研究テーマとなってきた。本稿では、この宇宙鉱物学のうち、地上大口径望遠鏡による観測で大きな発展が見られる、死にかけ星の周りのダストの観測的研究について紹介する。

1. 死にかけ星の周りのダスト

固体微粒子、いわゆるダストは宇宙のあらゆる場所に存在しており、星間物理/化学過程において重要な役割を演じている。また、宇宙にある重元素はそのほとんどがダストの中に取り込まれており、宇宙の物質循環を考える上でもダストを無視することはできない。このように、ダストは宇宙の重要な構成要素の一つであるが、その形成や進化、破壊などのプロセスには不明な点が多く、われわれがダストの一生を理解できているとは言いがたい状況である。

これまでの観測研究によって、進化した星から放出されるガスがダスト形成の現場の一つであることが知られている。なかでも、小・中質量星の進化の末期にあたる AGB (Asymptotic Giant Branch) 星は、大量のガスを星間空間にまき散らしており、ダストを宇宙に供給する天体の中でも、重要なものの一つである。実際、隕石中のダストの中からは、金属の同位体比が太陽系とは大きく異なる物が見つかっており、AGB 星の周りで大量のダストが生まれていることを直接裏づける証拠となっている。

AGB 星の周りのダストは赤外線で見るとたいへん明るいので、1960 年代後半から精力的に観測研究がなされてきた。近年では、赤外線天文衛星 ISO がダストにつつまれた AGB 星やさらに進化が進んだ惑星状星雲などを数多く観測し、高精度かつ広波長範囲の赤外線スペクトルを取得している。このような研究の結果、AGB 星の周りではシリケート・アルミナなどの酸化物や、グラファイト・シリコンカーバイド、芳香属炭化水素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons; PAHs あるいはそれに類するもの) といった炭素系のダスト、あるいは金属鉄など、実にさまざまな種類のダストが形成されていることが明らかになってきた。このようなダストはいつ・どんな環境で形成されたのか、またできるダストの組成や構造を決める要因は何なのか? といった疑問は、天文学のみならず鉱物学の観点からも非常に興味深い問題であり、また惑星の形成進化などとの関係も注目され始めている研究テーマである (本特集、本田、他も参照のこと)。このような研究分野は近年、「宇宙鉱物学 (astro-mineralogy)」と呼ばれ、理論・室内実験・観測など多岐にわたって精力的な研究が行われている。

本稿では、この「宇宙鉱物学」研究のうち、地上望遠鏡による中間赤外観測によって新展開を迎えつつある晩期型星の星周ダストの高解像度観測について述べたいと思う。

2. 高解像度がもたらすもの

ダストは赤外線域に多数の放射吸収バンドフィーチャーを示すため、その組成や構造を探る上では、赤外域分光観測がたいへん有用である。特に、ダストの中でも最も普遍的に存在すると考えられているシリケートや、星間空間で強い放射を示す芳香属炭化水素系のダストは8~60ミクロンの中間赤外域に特徴的なフィーチャーを示すので、この波長域での観測はダストの研究には欠かすことができない。このような波長域では、望遠鏡による回折がその空間分解能を決めてしまうため、従来の観測は空間的な解像度の悪い、ラージビームによる観測しか不可能であった。

一方で、星の周りのダストは、星からの距離が変わるとその物理条件が大きく違っていることが予想される。例えば、星から離れた場所では、星からの放射が弱くダストは低温になっているはずである。また、質量放出星の周りを考えると、ダストは内側で形成され徐々に外側に流されていくので、ダスト密度は中心からの距離に従って下がることになる。さらに、星の進化に伴ってガスの放出率が変化すると、その影響がガスの流れに乗って徐々に外側に伝わることになり、密度はさざ波のような構造を示すことになる。従来の解像度の悪い観測では、このようなさまざまな環境のダストがいわばゴチャマゼになって観測されてしまっていた。このため、観測されたスペクトル中のフィーチャーを出すダストがいったいどこに存在し、どのような環境で生成されたか解釈するのが難しく、これがダスト生成を探る上で大きな障害となっていた。

すばる望遠鏡をはじめとした8~10 mクラスの大口徑望遠鏡は、このようなダスト形成領域を

詳しく調べる上で、非常に有用なツールである。例えばすばる望遠鏡の場合、その解像度は10ミクロンで0.3秒角、20ミクロンでも0.6秒角であり、1キロパーセク離れた天体で300~600天文単位のものが分解できる。これは現在質量放出を起こしているAGB星を分解するには若干不足だが、AGB期の質量放出が終わって間もない天体(post-AGB星)のダスト分布を調べるのには十分な解像力である。なかでも、すばる望遠鏡に取り付けられた中間赤外分光器COMICSは、同種の装置と比べても優れた解像度を有する装置であり、このような高解像度分光観測を行うには、世界最高の装置の一つである。

3. くっきり見えてきた星周ダスト

3.1 二つのダストの奇妙な同居 (Red Rectangle)

われわれのグループでは、すばる望遠鏡の高解像度を活かしダスト生成の現場を調べるため、比較的近くにあるpost-AGB星の中間赤外分光観測を精力的に行ってきた。われわれがまず最初に挑戦した観測ターゲットは、近傍(710パーセ

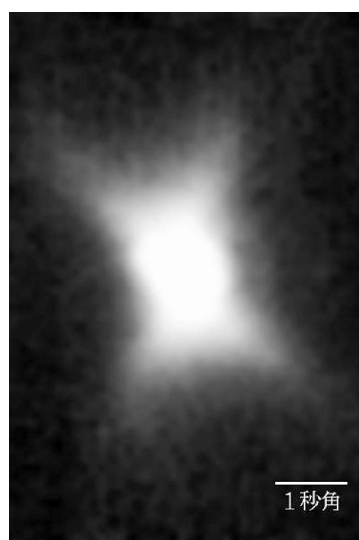


図 1 Red Rectangle の8.7ミクロン画像、明るさのスケールは対数で表示してある。図中の直線が1秒角に相当する。

ク)にある HD44179 と呼ばれる星の分光撮像観測であった。

HD44179 は post-AGB 期にある天体で、南北に伸びた長方形のネビュラを伴う(なのでこの天体は赤い四角、すなわち **Red Rectangle** と呼ばれている)。また、このネビュラの中心付近には星を取り巻く密度の濃いダストディスクが存在することが知られている^{2),3)}。この天体はかねてより芳香属炭化水素の強い放射が観測されており、芳香属ダストの主要な形成現場ではないかと考えられてきた¹⁾。驚いたことに、ISO による分光観測では、この芳香属ダストに加えて結晶化したシリケートの放射も同時に存在することが明らかにされた⁴⁾。一般に、星周空間でのダスト形成は、酸素に比べて炭素が多いか少ないかで、形成されるダストが大きく異なることが知られている。なので、炭素が酸素よりも多い場合にできる炭素系ダストである芳香属炭化水素と、酸素が多い場合にできる(結晶化)シリケートが同時に見えることは、

たいへん奇妙で、興味深い現象と言える。しかしながら、これまで、直接これらのダストの空間的な分布を測定した観測はなく、ネビュラのダスト分布について詳しい状況はわかっていなかった。

COMICS を使った 10 ミクロン帯分光観測は、この星雲中のダスト分布をクリアに描きだすことに成功した⁵⁾。図 2 はネビュラの場所ごとのスペクトルを示したものである。ネビュラの中心付近では非常に強い連続波放射に加えて小さなコブ状の放射フィーチャーが見られる。それに対して、外側は波長幅の狭い放射が多数存在し、大きく様子が異なっていることがわかる。他の天体の観測結果や実験室スペクトルとの比較の結果、内側のコブ状の放射は結晶化シリケートからの放射であり、ネビュラ領域の放射は芳香属ダストからの放射であることがわかった。すなわち、シリケートは中心の星周ディスクに存在し、芳香属ダストは軸対称な質量放出ガスに付随するものであることが明らかになったわけである。このことは、ディ

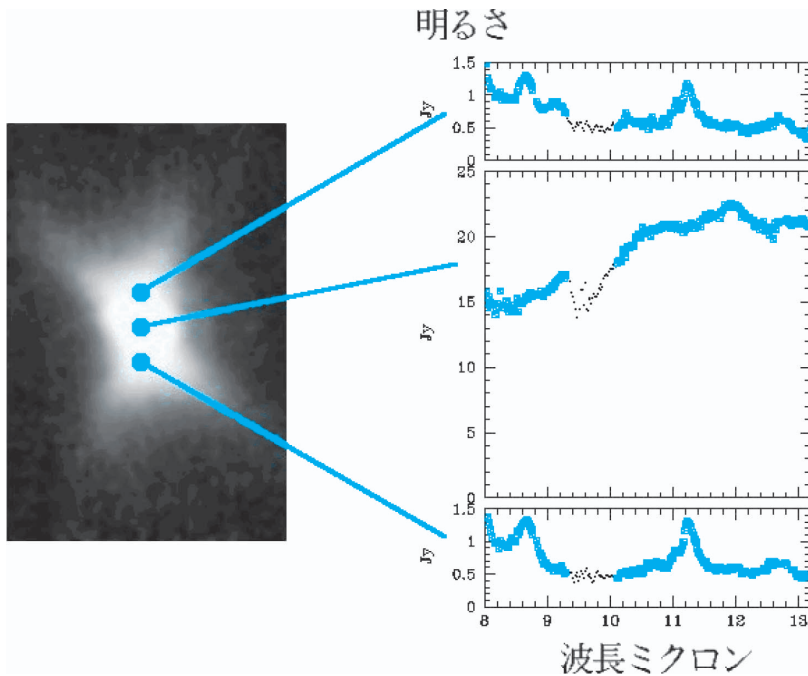


図 2 Red Rectangle ネビュラ各位置でのスペクトル。上から、中心から北 0.7 秒角、中心、中心から南 0.7 秒角の位置のスペクトルを示した。南北に見られる鋭い放射が芳香属ダストからの放射。

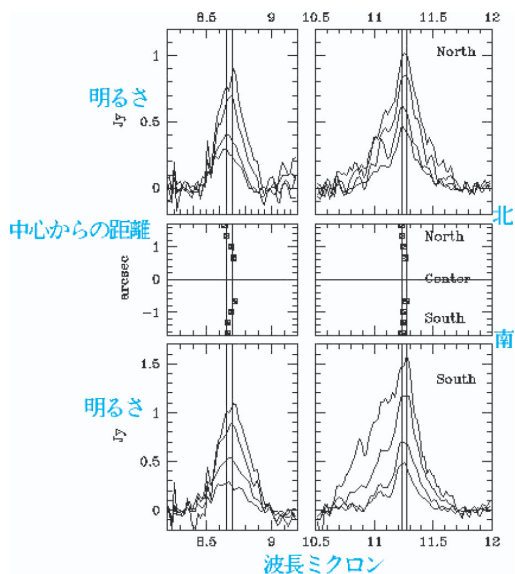


図3 ネビュラ領域で検出された放射波長のシフトの様子。

スクの進化形成と生成されるダストの種類が変わるといふ現象が同じ時期に起きたことを示唆するものであり、物質形成のみならず星の進化史を考える上でも面白い結果だと言える。

さらに興味深いことに、芳香属ダスト放射の放射ピーク波長は、星からの距離が離れるに従って徐々に短波長側にシフトしていることが明らかになった(図3)。この波長シフトの原因はまだはっ

きりしないが、われわれはダスト中に含まれる炭素の同位体比が変化しているためではないかと考えている⁵⁾。もしこの解釈が正しいとすれば、ダストの観測から放出されたガス中の成分=星の大気成分の進化を百年スケールで追えるようになるかもしれない。今後、この仮説を検証するような追観測が望まれている。

3.2 謎の21ミクロン放射ダスト (IRAS07134+1005)

Red Rectangle は post-AGB 星以外の天体でもよく観測される、いわばメジャーなダストの形成が行われている天体であり、その意味で重要な天体である。しかし、post-AGB 星の一部では、他の種類の天体では見られないような特殊なダストが見られるものもある。このようなダストは星間空間でのダストの存在形態を考える上では重要とは言えないが、星周空間でのダストの形成や進化を考える上では鍵となる物質である。その代表が21ミクロンにある強い放射構造、俗にいう21ミクロン放射である。

21ミクロン放射は赤外線天文衛星 IRAS によって発見された放射フィーチャーであり、炭素系の post-AGB 星にのみ見られる。この放射源であるダストとしてはさまざまな物質が提案されてきているが、強度や放射プロファイルを完全に説

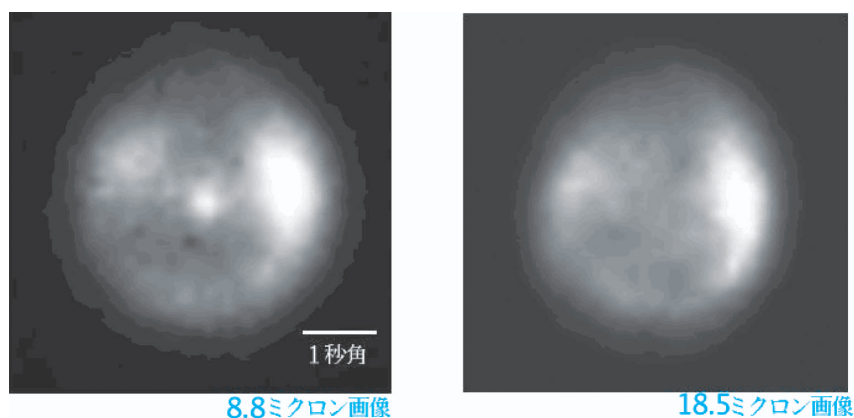
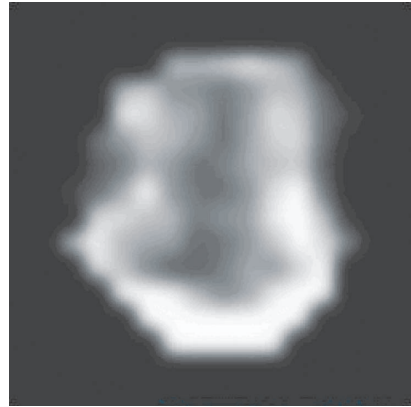


図4 IRAS07134+1005 の中間赤外画像。左が8.8ミクロン、右が18.5ミクロン。図中の直線が1秒角に相当する。

明できるものは見つかっていない。von Hendenら⁶⁾は2000年に、ナノサイズの炭化チタンがこの21ミクロン放射の放射プロファイルに似た放射を示すことを発表し注目を集めた。というのは、炭化チタンは隕石中のプレソーラーグレインとして発見されており、AGB星周りでの存在が予想された物質であったからである。しかしながら、チタンは宇宙の中では希少な物質であり、放射強度を説明するほどの炭化チタンができるにはかなり高密度の環境が必要となる。これを実現するには、例えば、非常に限られた方向に向かって強い質量放出現象が起きなければならない。本当にこのような構造が21ミクロン放射を示す天体に見られるのか、観測的な検証が強く望まれてきた。

すばる望遠鏡+COMICSによる観測は、この問題にもクリアな結果を与えている⁷⁾。図4は21ミクロン天体の中でも最も有名な天体、IRAS 07134+1005の中間赤外画像である。点状の部分を中心として、半径1.2秒角の円弧状の構造が見えている。この円弧は実スケールにして約3,000天文単位に相当しており、1500年ほど前に放出された質量が広がったものだと考えられる。このときの質量放出率を見積もると、 10^{-4} 太陽質量/年にも達することから、これはAGB期最末期の強い質量放出現象を見ているのだと思われる。

この天体での21ミクロン放射の空間的な分布を調べるため、われわれは21ミクロン放射を含むバンドパスフィルターを使った撮像観測を行い、それを前後の波長の画像と比較してみた⁷⁾。図5は、得られた21ミクロン放射と、その他のダストとの強度の比を示したものである。温度などの構造を加味して考えると、図で明るくなっている部分は普通より21ミクロン放射ダストが多い部分、暗いところは少ない部分に相当する。これを見ると明らかなように、21ミクロン放射ダストはシェル状に分布しており、AGB最末期に効率的に生成されたことがわかる。一方、21ミクロンダストが決まった方向ではなく円環状に分布する



フィーチャー・連続波強度比マップ

図5 IRAS07134+1005で測定された、21ミクロン放射と連続波の比のマップ。円環状に見えるのは、ある時期に21ミクロン放射ダストが効率的に生成されたことを示す。

ことから、炭化チタンのような希少元素からなる物質では放射源を説明できないことが示される。したがってわれわれの観測からは21ミクロン放射は炭化チタンダストではなく、AGB期最末期にたくさん形成された他のダストから放射されているのではないかと考えられる。

4. 地上観測が果たす役割

ダストはガスなどと比べると複雑であり、その組成や構造を知る上では理論・実験と観測をしっかり比較し結びつけることが必要である。一般に、実験室は宇宙空間に比べると高精度のスペクトルが取れるので、これと比較しうるような高精度の天体スペクトルを取ることが強く望まれてきている。このような高精度スペクトル観測はスピッツァー宇宙望遠鏡(旧SIRTF)やAstro-F、さらには将来のSPICAといった衛星望遠鏡が得意とするところであり、あと数年先にさらに多くの成果が出るであろう。その一方で、観測精度を上げるだけでは、ダスト生成領域の環境とできるダストの組成などを直接結びつけることはできず、ダストの形成過程や形成する環境に制限をつけることが難しい。このような役割は、空間的な解像

度に優れた地上望遠鏡が担っていくべきものである。今まさにスタートしたばかりの宇宙鉱物学という学問分野において、地上大口径望遠鏡を用いた観測が持つ意味は非常に大きいと言える。

参考文献

- 1) Cohen M., et al., 1975, ApJ 196, 179
- 2) Men'shchikov A. B., et al., 2002, A&A 397, 867
- 3) Jura M., et al., 1995, ApJ 453, 721
- 4) Waters L. B. F. M., et al., 1998, Nature 391, 868
- 5) Miyata T., et al., 2004, A&A 415, 179
- 6) von Helden G., et al., 2000, Science 288, 313
- 7) Miyata T., et al., 2003, Proc. "Mass losing pulsating stars and their circumstellar matter"

Frontier of Astromineralogy –The hunt for dust grains around evolved stars–

Takashi MIYATA

*Kiso Observatory, Institute of Astronomy,
University of Tokyo, Tarusawa, Mitake, Kiso,
Nagano 397-0101*

Abstract: Previous observations have revealed that a large variety of dust grains exist in the Universe. How, Where and When the various kinds of dust grains are formed? This is an important and interesting issue not only of understanding the dust formation but also of studying the planetary system formation and stellar evolution. In this paper we will report recent results of ground based observations with large telescopes of dust grains around evolved stars.