

論文の内容の要旨

論文題目

Observational Studies of Infrared Water-Vapor Bands in Late-Type Giants

赤外線観測に基づく晩期型巨星の水蒸気バンドの研究

Mikako Matsuura

松浦 美香子

1 序章

本研究は、晩期型巨星の光球の周りに位置する「大気外層 (extended atmosphere)」と呼ばれる領域の構造を解明することを目的としている。これらの星の赤外線スペクトルに見られる水蒸気バンドの解析を行い、これまで予想されていた大気外層の存在を確立した。さらに水蒸気バンドを詳細に解析することにより、大気外層の温度、密度構造、およびその時間変動を明らかにした。

晩期型巨星 (有効温度 2000–3500 K 程度) は中小質量星の進化の末期段階にあたり、進化段階の順に赤色巨星分枝 (Red Giant Branch; RGB) と漸近巨星分枝 (Asymptotic Giant Branch; AGB) からなる。また、これらの星の多くは脈動型変光星である。晩期型星の周囲約 1000 K あたりの領域では星表面から持ち上げられた物質を材料にダストが生成されている。ダストが中心星からの放射圧を受け、周りのガスを巻き込みながら外向きに流れ出すことで、質量放出が始まると考えられている。特に AGB 星の場合、その放出量は一つの恒星あたり 0.5 から数 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ にも達し、銀河系内の主要なダストやガスの供給源の一つであると考えられている。しかしながら、ダストが星周で生成される条件、また質量放出が星のどの進化段階で開始するかは未だに解明されておらず、そもそも星表面からダスト生成領域の中間層、すなわち大気外層の詳しい状況はつかめていなかった。

大気外層というのは、恒星の表面 (光球) よりもさらに外側の半径が 1 から ~2–5 恒星半径 (後者については不明) の領域のことで、ガスの温度が約 3000–1000 K 前後である。大気外層には分子が多く含まれている。こういった分子は主として近・中間赤外線に振動回転励起スペクトルをもち、大気外層の研究には赤外線の分光観測が有効である。しかしながら、恒星の水蒸気スペクトルは地球大気自身に含まれる水蒸気の影響により地上からの望遠鏡では詳細な研究が困難である。そこで本研究では、近年の赤外線観測衛星により得た晩期型星のデータをもとに水蒸気バンドを解析し、晩期型巨星の大気構造を明らかにすることを目的とする。特に、水分子は大気中の存在比が H_2 , CO に次いで高いと考えられ、なおかつ一本一本の遷移のライン強度が高いため、赤

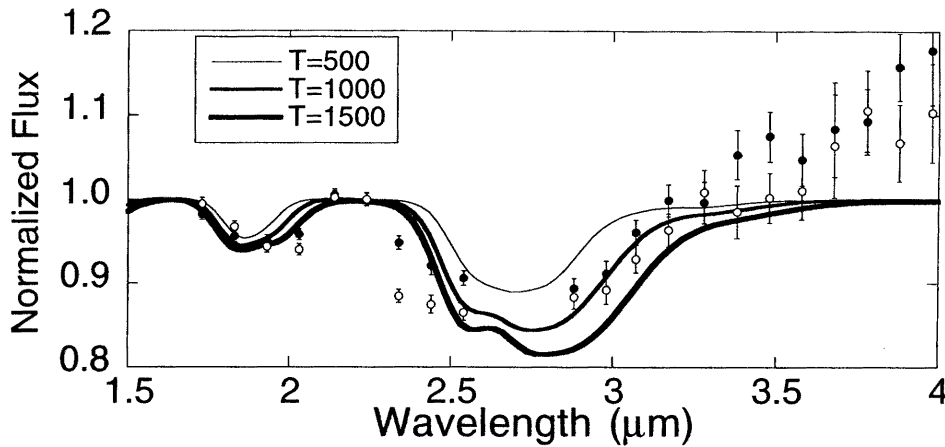


Figure 1: 早期 M 型巨星 (M2) やぎ座 AK に観測された水蒸気スペクトル (白丸と黒丸) と、水蒸気バンドのモデルスペクトル。やぎ座 AK のスペクトルは水蒸気がない同じスペクトル型の星 HR 1667 (白丸) と HR 6306 (黒丸) で割ってある。モデル中の水蒸気の柱密度は $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ で、励起温度は 500, 1000, 1500 K。観測スペクトルは励起温度 1000–1500 K の水蒸気で再現できる。

外線観測衛星を用いた場合には比較的広範囲の恒星から検出され、数多くの星を対象にした大気外層の研究には非常に有用である。また、他の分子に比べて外層の密度が薄い星からも検出されやすい特性がある。

2 早期 M 型巨星における水蒸気の検出

宇宙赤外線望遠鏡 (IRTS) は 1995 年に打ち上げられ、全天の約 7% を無バイアスサーベイ観測した。IRTS による地球大気の影響を受けていない星のスペクトルを、その一部のデータを解析した。ここでは IRTS に搭載された 4 つの観測装置のうち、近赤外線分光器 (NIRS) の $1.4\text{--}4.0 \mu\text{m}$ 低分散 ($\Delta\lambda=0.1 \mu\text{m}$) 分光データを用いた。解析は NIRS の観測した星の中から選んだ約 100 個の天体のスペクトルを対象とした。このうち B 型から M 型の早期 (M6 よりも早期) なスペクトルを持つ天体は 67 個が含まれる。M6 よりも早期型の星は従来、静水圧平衡のモデルで光球までを考慮すればスペクトルが充分説明できるとされ、また静水圧平衡のモデルによれば水蒸気は観測されないと考えられていた。ところが、6 つの天体については 1.9 と $2.7 \mu\text{m}$ に水蒸気バンドが観測された。水蒸気が検出された星のなかで最も早期型の星は M2 である。この水分子は光球ではなく、大気外層に存在しており、励起温度は $1000\text{--}1500 \text{ K}$ 、柱密度は星によるが $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ から $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ であった (Fig. 1)。早期 M 型星から、大気外層の水蒸気を明確に検出したのは Tsuji ら (1997) について二例目である。この研究は比較的スペクトル型が若い段階からすでにある程度の割合の星で大気外層が存在していることをしめした。また、約 100 個の天体のうち水蒸気の吸収を持つ天体は中間赤外線に過剰な部分があり、ダストを持つものと考えられる。つまり、外層の形成とダストの形成には関連がある可能性が示された。

3 晩期型星の赤外線と一酸化硅素レーザーでの特性の比較

SiO レーザーは、晩期型星の場合大気外層中で励起されていると考えられているが、SiO レーザーの励起機構については未だに議論が残されている。IRTS の観測により、水蒸気の吸収の深さが多

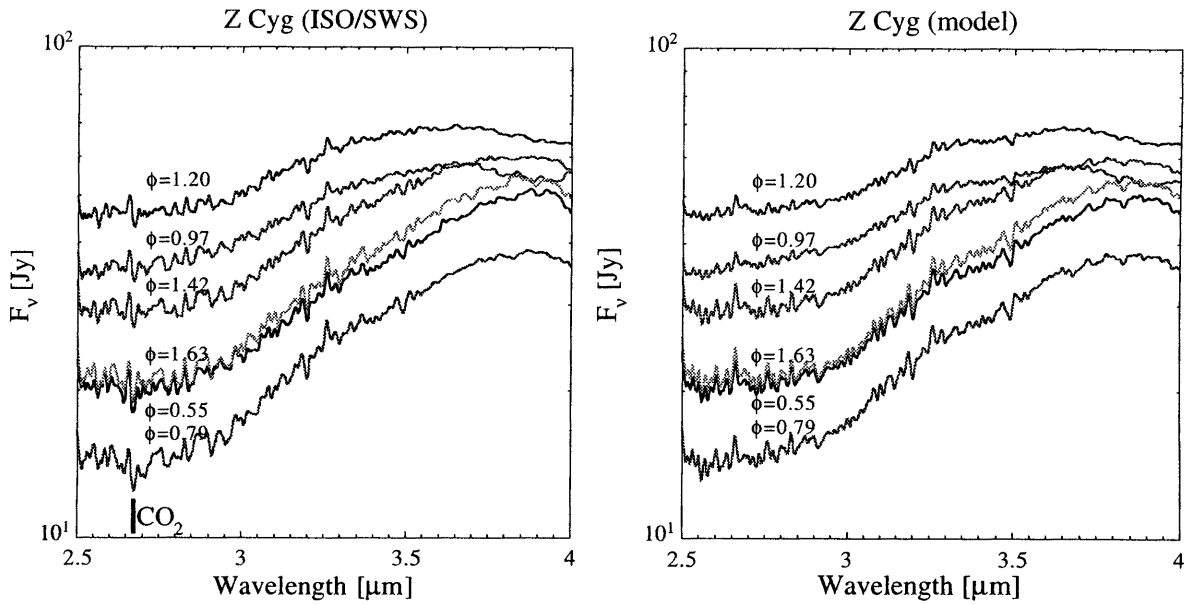


Figure 2: はくちょう座 Z の観測スペクトル (左) とそれに対応するモデルスペクトル (右)。はくちょう座 Z は 6 回観測され、それぞれのフェイズ (ϕ) は図中にしめした。モデルには水蒸気分子のみが含まれている。観測スペクトルはほぼ水蒸気分子のみを考えれば再現できることを示している。

数の星によって観測され、大気外層の発達の度合がわかるようになった。そこで、水蒸気の吸収の深さを基にした大気外層の発達の度合と SiO メーザーの検出率を比較した。

IRTS で水蒸気が検出された星について、SiO メーザーの検出を国立天文台野辺山観測所 45m 電波望遠鏡にて試みた。観測天体 59 個中、27 個の天体についてメーザーが検出された。検出された天体の大部分はミラ型変光星であるとともに、水蒸気の吸収が特に深く、大気外層が発達した星であった。いくつかの天体について定量的考察を行うと、SiO メーザーが検出された天体というのは水蒸気の柱密度が $3 \times 10^{19} - 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 以上ある。近赤外線の水蒸気スペクトルに貢献している層の厚みをおよそ一恒星半径 ($3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) と仮定すると、SiO メーザーが検出される領域の密度は $10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ で以上であることが示された。密度の差異が直接的な要因であるか、あるいは密度以外の理由、例えば脈動の強さによりショックが起きるか起きないか等が SiO メーザーの励起には直接関係して、密度の差異は間接的な現象なのかの解明は今後の課題である。

4 ミラ型変光星の水蒸気バンドの時間変動

最後の章では代表的な脈動型変光星であるミラ型変光星について、水蒸気バンドの時間変動を調べた。観測データは赤外線宇宙天文台 ISO に搭載された短波長分光器 SWS による。変光の一周期以上にわたり、複数回観測がなされた 4 つの星 (わし座 R、カシオペア座 R、ケフェウス座 T、はくちょう座 Z) について、近赤外線領域 ($2.5 - 3.95 \mu\text{m}$) スペクトルのモデル解析を行った。その結果、これらの星の $2.5 - 3.95 \mu\text{m}$ のスペクトルは、ほとんど水蒸気で支配されていることがわかった (Fig. 2)。特に $\sim 3.5 - 3.95 \mu\text{m}$ の、励起エネルギーが高いラインが支配する領域は、時間変動にともなって、水蒸気のバンドが吸収から放射と変化をしていた。4 つの星全てが可視光の変光曲線が極小の時は吸収、極大の時は放射を示す。これらの波長領域は励起温度が 2000 K の水蒸気が

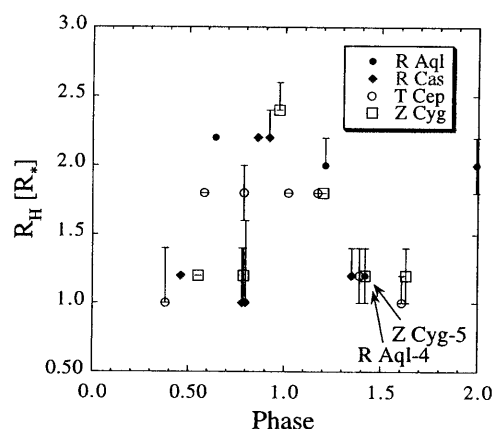


Figure 3: 4つの星についての、励起温度 2000 K の層の半径の時間変動。

観測されていると考えられるが、この水蒸気の層が、中心星に対して極大でより広がっていると解釈される。観測スペクトルに対してモデル解析を行ったところ、2000 K の層の半径の中心星の半径 R_* に対する大きさは、極小では水蒸気の層の半径は約 $1.0 R_*$ であるのに対し、極大では約 $2.0 R_*$ にまで達する (Fig. 3)。

ミラ型変光星の中心星の半径も変動すると考えられているが、脈動型変光星を対象とした動的な大気モデルによると、約 20 % の範囲 (極大で半径が小さくなる) でしか変動しておらず、また、干渉計を用いた観測では変動幅は検出限界 (7%) 以下である。すなわち、観測された水蒸気層の半径の時間変動は水蒸気層の方が動いていることに起因し、層の半径の変動幅は、極小に対して極大の方が約 1.5–2.0 倍大きい。

この水蒸気層の半径の変動は、光学的に厚い水蒸気層の半径が時間変動していることによる。ミラ型変光星の脈動により局所的に密度が高い領域が生じ、その高密度領域が動径方向に移動している。極小では高密度領域が中心星付近に位置し、極大にかけて外へと拡散していく。このように、このミラ型変光星の大気外層で、赤外線観測をもとに物質の動径方向の水蒸気層の運動が間接的に示されることができた。

ミラ型変光星の水蒸気バンドは $2.5\text{--}4.0 \mu\text{m}$ の波長領域ほぼ全域で、光学的厚みが 1 を越えている。つまり、赤外線の領域のスペクトルは、大気外層にある水蒸気分子が支配しており、光球は直接見えていない。ミラ型変光星は L バンド (3.5 から $3.8 \mu\text{m}$ 付近) でも等級幅 $0.5\text{--}1.0$ 等程度の変光をしていることが知られている。今回の研究から、 L バンドの変化は光学的に厚い水蒸気層の半径の動径方向の運動に支配され、光度はその層の半径の二乗に比例する。赤外線における変光の要因が観測を基に示されたのはこの研究が初めてである。

一連の赤外線水蒸気バンドの研究により、大気外層は、早期 M 型星から生成し始め、ミラ型変光星では普遍的に存在することが観測的に確かめられた。特に脈動による密度波の移動が初めて定量的に測定された。この結果は、大気構造を考える上で必要な動的恒星大気モデルの今後の確立に無視できない影響を与える。一方、SiO メーザーの励起のために必要な密度を、レーザーとは独立な観測から与え、励起機構に具体的な制限を課す一方、ミラ型変光星とそのほかの星では大気外層の性質が異なることを示した。以上の結果を基にした今後の研究により、大気外層の構造とダストの形成の関係を通じて、質量放出機構の理解が進むものと思われる。