

# 低温度星の分子光球 — ISO でみる新しい恒星像

辻 隆

〈東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター 〒181-0015 三鷹市大沢 2-21-1〉  
e-mail: tsuji@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

赤色巨星・超巨星の外層は、熱い ( $T_{\text{ex}} \approx 10^4 \text{ K}$ ) 彩層及び冷たい ( $T_{\text{ex}} \approx 10^2 \text{ K}$ ) 膨張分子・ダスト流 (恒星風) より成ると考えられていた。しかし、赤外線スペース天文台 (ISO) により、早期 M 型超巨星  $\mu \text{ Cep}$  (M2Ia) で水が吸収のみならず輝線として観測され、分子線でみると光学的に厚い“分子光球”とでも呼ぶべき比較的温かい ( $T_{\text{ex}} \approx 10^3 \text{ K}$ ) 膨大な分子ガス領域の存在が確実となった。一般に、ISO 及びそれ以外の観測も含めて、赤色巨星・超巨星の赤外スペクトルは従来の光球モデルでは説明できず、分子光球の寄与が本質的であることが分かる。しかし、分子光球の形成機構や物理的モデルは全く判っていない。早期 M 型巨星・超巨星にも分子光球が存在することは、これが大規模な脈動などで誘発された二次的現象ではなく、恒星のより根源的特性であることを示している。彩層や恒星風の成因を含めて恒星光球の全体像を明らかにするには、分子光球の解明が不可欠である。

## 1. はじめに

本格的な赤外線天文学が始まったのは 1960 年代であるが、赤外線領域では地球大気による吸収の影響が大きい。そのため、赤外線天文学の揺籃期に、すでに口径 0.9 メートルの望遠鏡を気球に搭載して赤外スペクトルを大気圏外から観測する先駆的試みが行なわれ、数個の赤色巨星・超巨星の観測に成功している。この Stratoscope II とよばれる気球搭載望遠鏡は 1963 年 3 月に打ち上げられ、その結果は Woolf, Schwarzschild, Rose の連名で *Astrophys. J.* 誌に投稿され、レター誌もないこの時代に投稿後わずか 2 ヶ月で出版されている<sup>1)</sup>。おそらくこの重要性を認めた当時の同誌編集長 Chandrasekhar の英断によるものであろう。事実、この論文にはベテルギウス ( $\alpha \text{ Ori}$ ) をはじめとする早期の M 型巨星・超巨星にもすでに水が存在すると言う驚くべき発見が報告されていた。しかし、この発見は当時の恒星大気の一般的理解の枠を遙かに越えるものであり、その後何らの追観測も行なわれないままに、永らくほとんど無視された。い

まから思えば、この発見が正しく理解されていれば、その後の恒星大気の研究は、実際とは異なる発展をしていたであろう。

実際の歴史は逆の方向に進んだ。即ち、その数年後、Stratoscope II が水に同定した 0.9, 1.1, 1.4, 1.9  $\mu\text{m}$  (マイクロン) の吸収帯は、実は水ではなく CN の電子遷移 (0.9, 1.1, 1.4, 1.9  $\mu\text{m}$  に吸収帯を持つ) によるものであるとの説が Wing と Spinrad により提起された<sup>2)</sup>。事実、1970 年当時までの赤外線観測により水はミラ型変光星などの最低温の星にのみ観測され、一方、CN は光学領域にも太陽から赤色超巨星まで広く観測されていた。そのため、この新説はもっともらしく、水を発見した Stratoscope II グループはもとより、筆者を含む関連研究者からも何の反論もなく、広く受け入れられた。その結果、Stratoscope II による水の同定は誤りとされ、ますます無視されることになった。

一方、Stratoscope II で水が発見されたという知らせは、当時電子計算機の発展によりようやく可能となった恒星の非灰色大気モデルの計算に大きな影響をあたえた。特に、水は赤外線領域全体にわ

たり強いスペクトル線を示すので熱の収支に重要な役割を果たすが、計算の結果その効果が顕著となるのは巨星・超巨星では有効温度が 3000 K 以下の星に限られることが示された<sup>3)</sup>。これはスペクトル型ではほぼ M7 型よりも晩期に対応する<sup>4)</sup>。この結果からは、ミラ型星などにのみ水が観測されることはよく理解できたが、早期 M 型巨星・超巨星にすでに水が存在すると言う Stratoscope II の結果は理解し難い。おそらく Wing-Spinrad 説が正しいのだろう、というのが 1980 年頃までに達した結論である。しかし、この一見もっともらしい結論の盲点は、ここで言う大気モデルとは正確には光球のモデルに過ぎず、恒星大気にはなお未知の問題が含まれていることに思い至らなかったことである。

その後、赤外線天文衛星 IRAS や宇宙背景光探査機 COBE をはじめ、様々の試みが行なわれた。しかし、星の赤外スペクトルに関しては、僅かにジェット機に望遠鏡を搭載した NASA の Kuiper 飛行天文台 (KAO) などによる観測があるが、Stratoscope II を越えるような観測は行なわれていない。Stratoscope II から 30 年以上経った 1995 年 11 月に、ようやくわが国の宇宙科学研究所の協力のもとにヨーロッパ宇宙機構 (ESA) が打ち上げた本格的な赤外線スペース天文台 (ISO) により、星を含むあらゆる天体の赤外スペクトルの全貌が明らかにされた。まさに ISO は Stratoscope II 以後 30 年の空白を一挙に取り返した画期的なミッションであり、その意義と主要な成果については奥田先生がすでに本誌でレビューされている<sup>5)</sup>。

2 年以上にわたって行なわれた ISO の観測では、低温度星の観測も大きな比重を占めた。予想外の結果の一つは、早期 M 型巨星・超巨星に水が同定されたことである<sup>6)</sup>。しかし、Stratoscope II の場合と同様にこれらの水の同定も容易に受け入れられたわけではなく、特に何処にこのような水が存在するのかが問題であった。ようやく最近公開された ISO アーカイバルデータを用いて、30 年以上にわたる水の物語は、早期 M 型巨星・超巨星にも水が

存在し、それが光球ではなく外層大気に存在することを疑う余地のない論拠により示すことでその第 1 章 (本稿 2 ~ 4 節) を終る。水の物語の第 2 章以下はまだ空白のままに残されているが、二酸化炭素 (5 節)、一酸化炭素 (6 節) など他の分子の結果や最近の諸観測を併せて、新しい恒星の姿が予見される (7 節)。

## 2. 水の物語 1 : ISO による観測

ISO により星の赤外スペクトルの本格的観測が始めて可能になると言うので、日本の専有観測時間の一部 (約 1/9) と一般公募時間を併せて、低温度星の主要なスペクトル型 (M, S, C) 及び光度階級 (超巨星, 巨星, 矮星) にわたる系統的な観測を計画した。主として短波長分光器 (ISOSWS) により、波長領域は 2.5-45  $\mu\text{m}$ , 分解能は 300-2000 で、観測はほぼ順調に行なわれた。解析はまだ完了したわけではないが、M 型巨星・超巨星については水が早期から晩期型にわたり普遍的に存在することが明らかとなった。

まず、早期 M 型巨星  $\beta$  Peg (M2III) の 2.7  $\mu\text{m}$  領域に  $\text{H}_2\text{O}$   $\nu_1, \nu_3$  バンドが見い出され<sup>6)</sup>、さらに h +  $\chi$  Persei 星団の数個の早期 M 型超巨星にも同じバンドが同定された<sup>7)</sup>。しかし、この領域には CO, OH などのバンドが混在しているため、 $\text{H}_2\text{O}$  バンドの存在は自明とは言い難い。一例として図 1a に M2 型超巨星 KK Per の 2.7  $\mu\text{m}$  領域のスペクトル (黒線) と光球モデルによる予測スペクトル (青線) を示す。ここで見られる強いスペクトル線は主として OH によるものであるが、これだけでは観測を説明できないことは明らかである。この 2 者の比を取ってみると、図 1b に示すように残余の強い吸収線が現れる (黒線)。これと、図 1b に示す水分子による吸収スペクトル (青線) は良く対応していることが判る。即ち、KK Per の観測されたスペクトルには光球モデルでは説明できない水のスペクトルが含まれている。この  $\text{H}_2\text{O}$  バンドはかなり広がっており、その励起温度は 2000 K にも達す

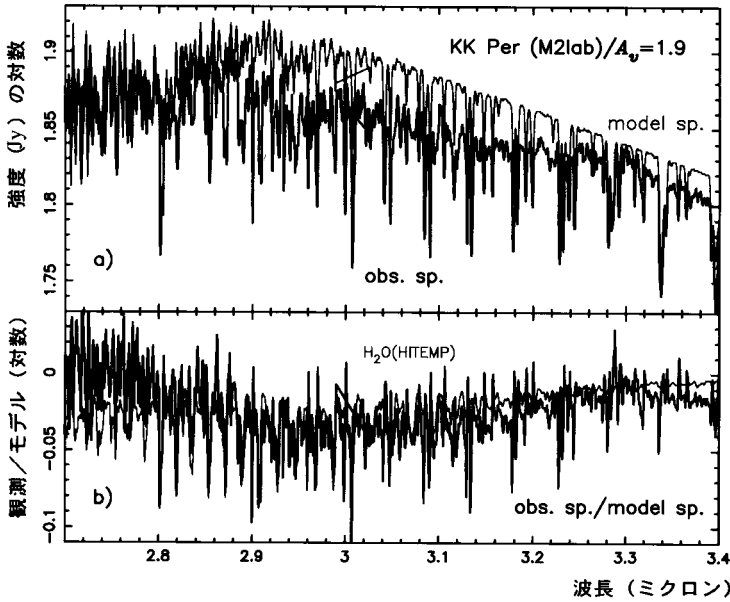


図1 : a) ISO による  $h + \gamma$  Persei 星団の超巨星 KK Per (M2lab) のスペクトル (黒線) 及び光球モデル (後述のベテルギウスのモデルと同じ) による予測スペクトル (青線). 尚, 観測スペクトル強度 (正確には輻射流量) の単位はジャンスキー ( $1\text{Jy} = 10^{-26}\text{W m}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ). b) 観測値と予測値の比 (黒線) 及び分光データ (HITEMP) による水のスペクトル (青線).

るように見える。

次に  $6\ \mu\text{m}$  領域のスペクトルを図2に示す. この領域には  $\text{H}_2\text{O}$   $\nu_2$  バンドがあるが, 他の分子の吸収は弱く, 水の検出はより容易である. 実際, 最も早期の  $\alpha$  Cet (M1.5III) に水が存在することはこのバンドを同定したことによりようやく確信できた. 図2から, 水は早期から晩期にいたる M 型巨星で観測されることが確認される. 早期 M 型巨星・超巨星の光球には水蒸気は無いと考えられるので, これらで観測された水蒸気は通常の光球以外に起源を持つことは確かである. このような水のスペクトルは何処で形成されるのだろうか? 一つの可能性として外層に“温かい分子の雲”が存在すると言うモデルが考えられる<sup>6)</sup>.

$10\ \mu\text{m}$  よりも長波長領域では水蒸気の純回転遷移が観測されるはずであるが, 30g Her (M6III) や SW Vir (M7III) などの晩期 M 型巨星ではダストの熱輻射も強く, ようやく  $30\text{--}45\ \mu\text{m}$  領域で純回転線が輝線として観測された. 晩期 M 型巨星では光球の水蒸気が吸収または輝線で見えている可能性もあるが, これらの輝線は多分光球外の寄与によるものであろう. 例えば, 数 100 K の外層水蒸気成分による輝線が光球の吸収線に重なっていると解釈することができる.

晩期 M 型巨星・超巨星に水が存在することは, すでに Stratoscope II の時代から認められおり,

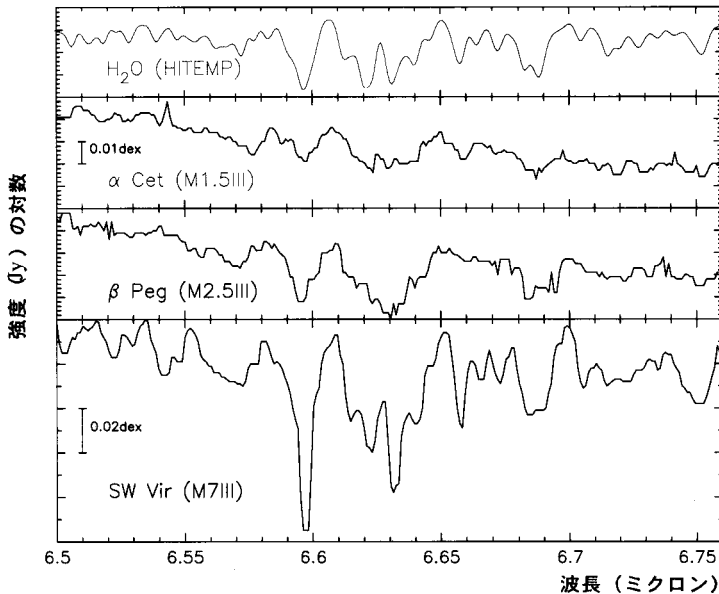


図2 : ISO による M 型巨星の  $6\ \mu\text{m}$  領域のスペクトル. 上段に示す  $\text{H}_2\text{O}$  の分光データ (HITEMP) による吸収スペクトルと較べて明らかなように,  $\alpha$  Cet,  $\beta$  Peg などの早期 M 型巨星にも水が見出されたが, これらは光球起源としては説明できない. 晩期 M 型巨星 SW Vir では水はさらに強いが, この少なくとも一部は光球起源として説明できる.

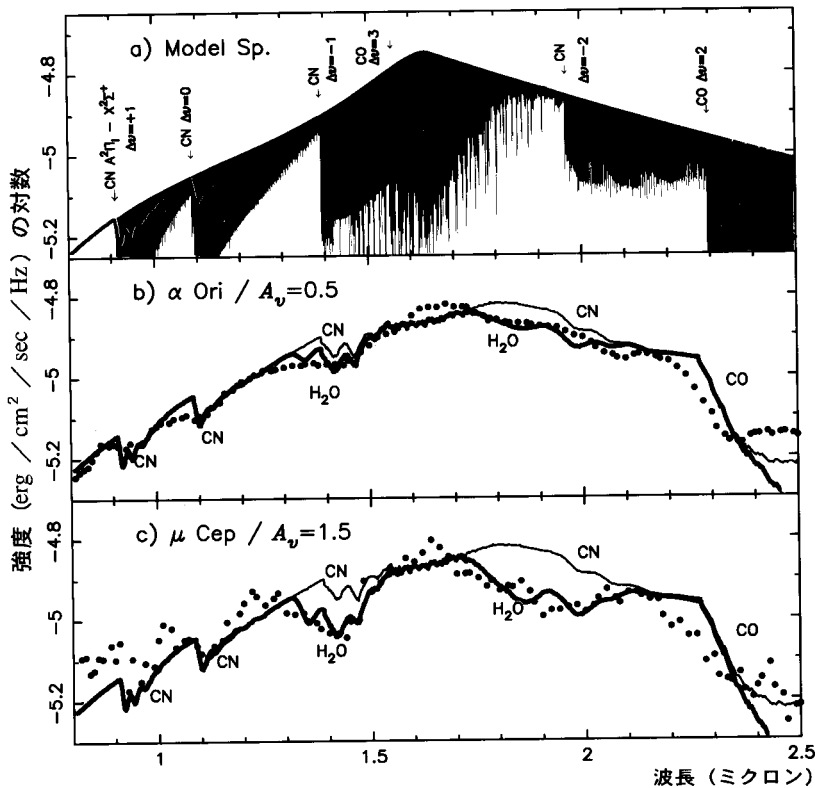


図3 : a) 早期 M 型超巨星の光球モデルから予想されたスペクトル。多数の分子吸収線の効果を高分解能で示すと青線のようになるが、Stratoscope II の低い分解能での予測スペクトルは黒線のようになる。b) Stratoscope II で観測された  $\alpha$  Ori のスペクトル (黒点) は、光球モデルから予想されたスペクトル (黒線) では説明できず、 $T_{\text{ex}} \approx 1500$  K 及び  $N_{\text{col}} \approx 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$  の水による吸収を仮定すると良く説明される (青線)。c) 同じく  $\mu$  Cep のスペクトル。但し、ここでは  $T_{\text{ex}} = 1500$  K 及び  $N_{\text{col}} \approx 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$  の水による吸収を仮定している (青線)。

また外層にも水メーザーなどからよく知られていた。一方、早期 M 型巨星・超巨星に水が存在することは Stratoscope II で一旦発見されながら、当時としては (そして現在でも) 余りに予想外であったため無視されてしまった経緯はすでに述べた。最近では ISO 以外にも、例えば宇宙研が ISO に数カ月先だって打ち上げたスペース赤外線望遠鏡 (IRTS) により、早期 M 型星を含む多くの星で  $1.9 \mu\text{m}$  に吸収帯が見出され水に同定された<sup>8)</sup>。また、 $\alpha$  Ori や  $\alpha$  Sco などの早期 M 型超巨星には、地上からの高分解能分光観測によって  $12 \mu\text{m}$  領域に水の純回転線が同定されている<sup>9)</sup>。

### 3. 水の物語 2 : Stratoscope II

早期 M 型巨星・超巨星に水が存在するかどうかは、Stratoscope II による先駆的な観測により 30 年前にすでに論じられたが (第 1 節)、結論は不透明のまま残されている。 $\alpha$  Ori (M2lab) は、マイケルソン恒星干渉計で最初に視直径が測定された星であるが、最近の測定値とヒッパルコスによる距離から、その光球半径は  $637R_{\odot}$ 、光度は  $6 \times 10^4 L_{\odot}$ 、従って有効温度はほぼ 3600 K と考えられる。これらの基本的物理量が判ればその光球モデルは容易に計算される。それから予想されるスペクトルを図 3a に示す。ここで見られる分子帯スペクトルは CO, CN, OH などの 2 原子分子によるもので、 $\text{H}_2\text{O}$  のスペクトルは確

かに見られない。観測と同じ分解能に成ましたこの光球スペクトル (黒線) と、35 年前に観測された  $\alpha$  Ori (M2lab)<sup>1)</sup> 及び  $\mu$  Cep (M2la)<sup>10)</sup> のスペクトル (黒点) を比較すると図 3b 及び 3c のようになる。これから、 $0.9, 1.1 \mu\text{m}$  の吸収は光球の CN による可能性もあるが、 $1.4, 1.9 \mu\text{m}$  の吸収は光球の CN では全く説明できないことは明らかである。ここで、試しに光球予測スペクトル (黒線) に水分子による吸収を仮定してその効果を加えてみると図 3b 及び 3c の青線のようになる。これと  $\alpha$  Ori 及び  $\mu$  Cep で強い  $1.4, 1.9 \mu\text{m}$  の吸収はよく一致する。即ち、Stratoscope II の観測は光球モデルでは説

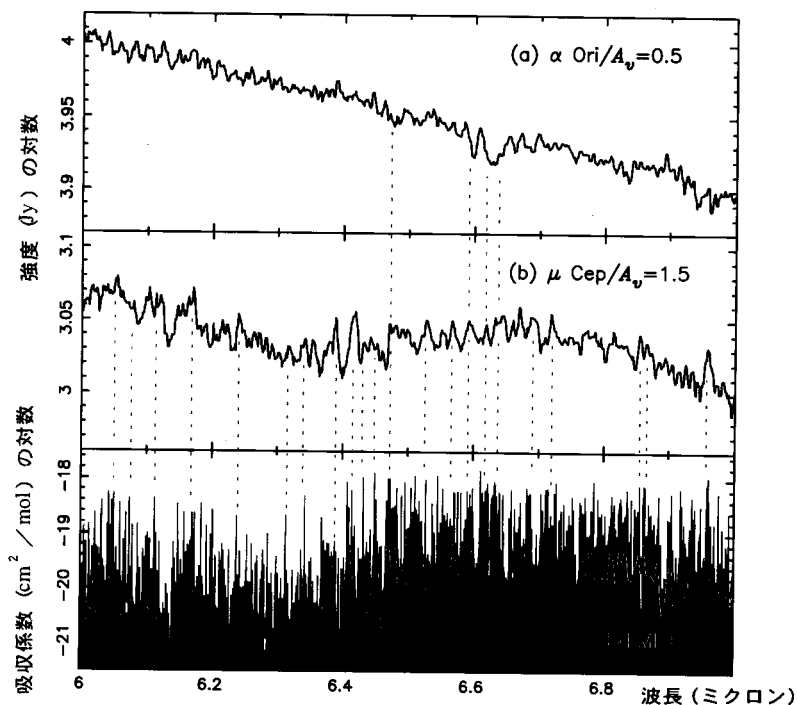


図4：ISOによる6 $\mu$ m領域のスペクトル。a)  $\alpha$  OriではH<sub>2</sub>O  $\nu_2$ バンドは弱い吸収として観測される。b)  $\mu$  CepではH<sub>2</sub>O  $\nu_2$ バンドは反転して輝線スペクトルとなっている。c) 水の吸収断面積 ( $T_{\text{ex}} \approx 1500$  K) を高分解能(青線)及び観測と同じ分解能(黒線)で示す。

明できず、水の効果を加えることでようやく説明できた<sup>1)</sup>。しかし、ここでこの水の正体は判っておらず、ただその起源は通常の光球以外に求めなければならぬことは確かである。

いずれにしても、35年前の Stratoscope II による  $\alpha$  Ori 及び  $\mu$  Cep のスペクトルは、最新の技術的には遥かに高度な ISO などの観測に比べても何ら遜色のないのみならず、むしろ最も明瞭に早期 M 型超巨星における光球外起源の水の存在を示していた。Wing-Spinrad<sup>2)</sup> による解釈は誤っていたが、これも試行錯誤の一環と考えればあながち非難されることではない。問題はこのような誤りがもっと早く訂正されなかったことである。

#### 4. 水の物語 3 : ISO アーカイブ

早期 M 型巨星・超巨星に水が存在すること自体はもはや疑いない。しかし、水が何処にどのような形態で存在するのかは、これまでの結果では明らかではない。例えば、外層に水蒸気の雲が存在するのか、または巨大な黒点が存在するのか、或いは、大規模な対流による非均質構造によるのか? 特に、大規模対流モデルは1975年に Schwarzschild<sup>12)</sup> が提唱したモデルで、温度差が1000 Kにも達する巨大な熱い対流塊と冷たい対流塊が表面に数えるほどだけ存在するというものである。これは、その後ベテルギウスなどの様々の観測結果

の解釈に広く引用されるモデルである。しかし、なぜか Schwarzschild<sup>12)</sup> 自身は自らが  $\alpha$  Ori などに発見した水<sup>1)</sup> との関係については、ひとことも触れていない。

早期 M 型巨星・超巨星における水の起源の問題は、最終的には最近公開された ISO アーカイバルデータによって解決された。Kessler 氏が率いる ISO チームの努力により、ISO で観測された全データがほぼ完璧な形でデータベース化され公開された。この中には殆んど手つかずの  $\alpha$  Ori 及び  $\mu$  Cep のスペクトルが含まれていた。これらの6 $\mu$ m領域のスペクトルを見ると、 $\alpha$  Ori (図4a) では図2と同様に H<sub>2</sub>O  $\nu_2$  バンドは吸収として観測され、水の存在が確定した。しかし、 $\mu$  Cep (図4b) では、反転して輝線スペクトルとなっている。水の吸収断面積(図4c)と較べるとよく対応しているが、強度比か



らこの輝線は光学的に厚い領域で形成されていることが分る。8  $\mu\text{m}$  よりも長波長域ではダストの熱輻射が顕著であるが、それにも拘らず 40  $\mu\text{m}$  領域には水の純回転遷移が輝線として観測される (図 5 = 表紙)<sup>13)</sup>。なお、20 年以上前に NASA の飛行天文台はこの  $\mu\text{Cep}$  の 5-8  $\mu\text{m}$  領域を観測し、未知のスペクトル模様を見出している<sup>14)</sup>。筆者は当時これが水の基準振動による輝線スペクトルである可能性を指摘し、 $\mu\text{Cep}$  の外層にはダスト以外に水が存在するモデルを提唱した<sup>15)</sup>。しかし、分解能の低いこの観測からは、この提案は肯定も否定もされず殆んど無視されたが、ようやく ISO によって確認された。

このように、水の輝線スペクトルが赤外領域で観測されたことは、水が光球の外に広がった領域に存在することを示している。簡単な作業モデルとして、 $\mu\text{Cep}$  を取り巻く球対称の水蒸気雲を仮定し、光球スペクトルを境界条件として輻射輸達方程式を解いて得られるスペクトルに、さらに外層のダストによる熱輻射を加えたスペクトルで ISO の観測をほぼ説明することができる (図 5 = 表紙)。これから分子雲は光球半径の約 2 倍以上に広がっていることが示される。6  $\mu\text{m}$  及び 40  $\mu\text{m}$  領域を拡大してみると、この作業モデルは観測の細部もかなりよく再現していることが分かる。

このように、我々が当初から仮定していた外層における“温かい分子雲”<sup>6)</sup>の存在が、ようやく早期 M 型超巨星で確認された。この分子雲は水のスペクトル線にたいしては光学的に十分厚いので分子光球とでも呼ぶのが適当であろう。 $\mu\text{Cep}$  ほど明確ではないが、水は早期 M 型を含む赤色巨星・超巨星の外層に普遍的に存在すると考えられ、外層における分子光球の存在はこれらの星の基本的な性質と考えることができる。

## 5. 二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)

ISO の初期結果のなかで、早期 M 型巨星に水が同定されたことと並んで予想外であったことは、晩期

M 型巨星に二酸化炭素が見出されたことである<sup>6)</sup>。CO<sub>2</sub> は 4.2  $\mu\text{m}$  及び 15  $\mu\text{m}$  領域に赤外活性の基準振動を持つことが知られている。晩期 M 型巨星 SW Vir では、4.2  $\mu\text{m}$  に CO<sub>2</sub> のかなり強い吸収帯が観測された (図 6)。CO<sub>2</sub> は光球には殆んど存在しないので、観測された CO<sub>2</sub> は光球外に起源を持つと考えられる。15  $\mu\text{m}$  領域では CO<sub>2</sub> による輝線が 3 本観測されたが、このことは CO<sub>2</sub> が光球外に広がった領域に起源を持つことを示している (図 7)。しかし、中央の輝線に較べて両端の輝線は高い励起準位からのものであるが、輝線強度はそれほど違わない。このことは、CO<sub>2</sub> は熱平衡にはないことを示すものであろう。さらに、より低温のミラ型変光星には二酸化硫素 (SO<sub>2</sub>) が観測されている<sup>16)</sup>。CO<sub>2</sub> や SO<sub>2</sub> がこのように多量に存在すること自身が、既に熱化学平衡では説明できず、これらの生成機構や励起機構は未解決である。これらは、より普遍的に存在する水の生成と関連していると思われ、これらの分子の存在を統一的に考える必要があるだろう。

## 6. 一酸化炭素 (CO)

ISO により M 型巨星・超巨星には温かい分子光球が存在することが確立されたが、このような可能性が ISO 以前には全く考えられなかったわけではない。実際、大気圏外からの恒星赤外線観測の 30 年に及ぶ空白期にも、地上からの赤外線観測は様々の方法で行なわれ、特にフーリエ変換分光 (FTS) による高分解能分光観測は低温度星の研究に大きな役割を果たした。図 8 には異なる時期に観測した M 型巨星 SW Vir の CO 倍振動の FTS による高分解能スペクトルの一部を示す。ここで、実線は観測値、斜線は光球スペクトルの予測値を示す。図 8 で、高励起の線 (R 79, R 80, R 81) はほぼ光球スペクトルで説明できるが、低励起の線 (R 19, R 20, R 21) は光球スペクトルのみでは説明できず、時間的に変動している別の成分が存在することが示唆される。光球の CO 分子の励起温

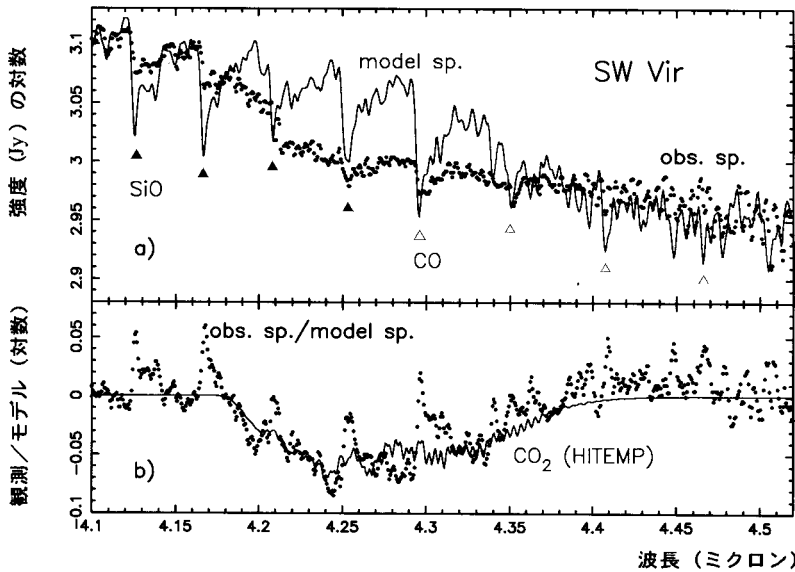


図6 : a) M型巨星 SW Vir の  $4 \mu\text{m}$  領域のスペクトル (黒線) は、光球モデル ( $M = 2 M_{\odot}$ ,  $R = 250 R_{\odot}$ ,  $L = 5792 L_{\odot}$ ,  $T_{\text{eff}} = 3200 \text{ K}$ ) による予測スペクトル (青線) では説明出来ない部分がある. b) 観測値と予測値の比 (黒線) で示される残余の部分は、 $\text{CO}_2 \nu_3$  基準振動のスペクトルでよく説明できる. この吸収帯の幅及び強さを説明する  $\text{CO}_2$  ガスの励起温度は  $500 \text{ K}$ 、柱密度は  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  程度と推定される.

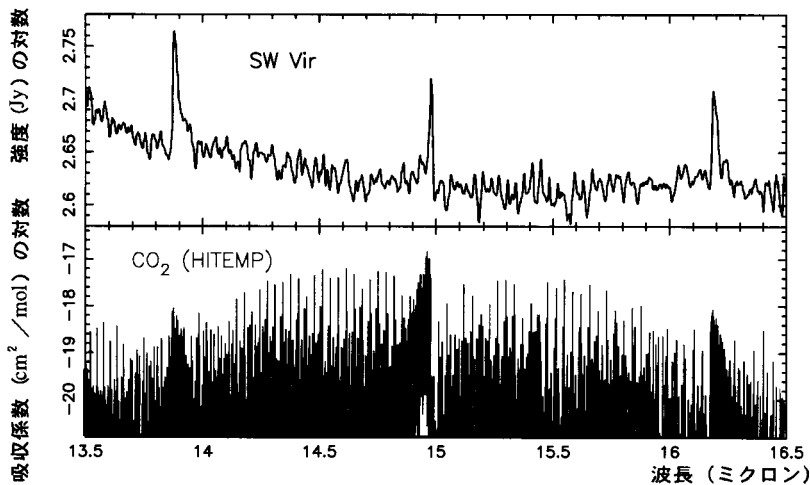


図7 : M型巨星 SW Vir の  $15 \mu\text{m}$  領域のスペクトル (上図). 及び  $\text{CO}_2 \nu_2$  基準振動の分光データ ( $T_{\text{ex}} \approx 500 \text{ K}$ ) (下図).

度は  $3000 \text{ K}$  以上であるが、この成分の励起温度は  $2000 \text{ K}$  程度、柱密度は  $10^{20} \text{ cm}^{-2}$  程度で、図8から光球に対してせいぜい数  $\text{km/sec}$  程度の相対運動を示すに過ぎないことが分かる. このような新しい  $\text{CO}$  成分の存在は、多くの M 型巨星<sup>17)</sup>をはじめ、早期 M 型超巨星でも示されている<sup>18)</sup>. このように光球スペクトルに殆んど隠された  $\text{CO}$  スペクトルのみから、分子光球の存在を主張するのは若干説得力に欠ける. しかし、分子光球は光球にたいして大きな相対運動をしていないことは、FTS などによる高分解能分光観測のみから分ることであり、ISO の観測にたいして十分相補的な役割を果している.

このような新しい  $\text{CO}$  成分の存在は、最近太陽でより明瞭に示された. 即ち、高分解能赤外分光器のスリットを太陽光球面において  $\text{CO}$  のスペクトルを撮ると吸収線として観測されたが、スリットを光球の縁からさらに外側に置くと  $\text{CO}$  は輝線として観測された<sup>19)</sup>. 太陽光球に  $\text{CO}$  が存在することは古くから知られていたが、この観測は太陽外

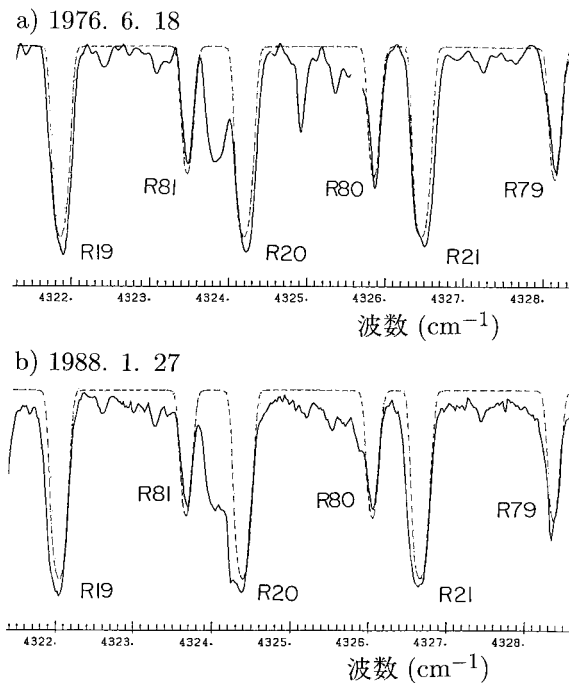


図8：M型巨星 SW Vir (M7III) のCO (2-0) バンドのキットピーク天文台 FTS による高分解能スペクトル (実線) と光球モデルによる予測スペクトル (斜線). 2つの異なる時期における観測を示す.

層の彩層が存在する領域にもCOが存在することを示し、CO-mosphereと名づけられた。このことは、太陽、そしておそらく他の晩期型星についても“光球+熱い彩層+超高温コロナ”という従来の外層モデルは不十分であり、温かい分子領域が存在することを示している。

## 7. 新しい恒星像

以上により赤色巨星・超巨星の外層には分子光球とも呼ぶべき膨大な分子形成領域が存在することが確立された。従来、彩層の存在は紫外領域における輝線スペクトルにより、また、恒星風の存在は短波長側にドプラー変位した低励起のスペクトル線により比較的容易に知ることができた。しかし、分子光球からのスペクトル線はほとんどドプラー変位を示さず、またその温度も光球に比較的近い

め、光球の強いスペクトル線から区別して認識することは非常に困難であった。ISOにより光球には存在しないはずの $H_2O$  (早期M型星) や $CO_2$  (晩期M型星) が、しかも輝線でも観測されてようやく分子光球の存在は確定した。これらは丁度地球大気にも存在する $H_2O$ ,  $CO_2$ などに妨げられて今まで観測がほとんど不可能であったため、分子光球の確認には赤外線スペース天文台ISOを待たなければならなかったのである。

最近、分子光球の存在はISO以外の観測からも示唆されている。例えば、VLAを用いて電波により $\alpha$  Oriのマッピング観測が行なわれ、熱い彩層が存在すると考えられていた中心星半径の数倍程度に及ぶ領域には、同時に温かいガスが存在することが明らかにされた<sup>20)</sup>。この観測はこの温かいガスが電波の連続スペクトルにたいして光学的に厚いことを示しており、まさに光でみる従来の光球の数倍の大きさの巨大な“電波光球”が存在することになる。また、同じくVLAを用いてセンチ波により数個のミラ型変光星を観測した結果、中心星の半径の2倍程度のセンチ波で光学的に厚い“電波光球”の存在が明らかにされた<sup>21)</sup>。これら“電波光球”はおそらくISOにより見出された分子光球を電波で見たものであろう。

このような分子光球は外層における様々の現象を理解する上で要となる重要性を持っている。例えば、これらの星は多かれ少なかれ質量放出を行なっているが、その機構はよく判っていない。従来、質量放出を説明する機構として、ダストにたいする輻射圧が考えられているが、ダスト形成が可能な低温領域まで如何にしてダストの材料となるガスを運ぶかが問題であった。ミラ型変光星では脈動に伴う進行波でこれは可能と言われているが、それ以外の星でも分子光球が存在すればこの問題は一挙に解決する。分子光球はまさにこのような質量放出の材料を提供する貯蔵庫としての役割を果たしていると考えられる。また、多くの晩期M型星は水メーザー源でもあり、その周辺にはVLBI





などにより半径が天文単位（地球軌道半径）のオーダーの多数のメーザー・スポットが観測されている<sup>22)</sup>。これらの巨大な水玉の起源は謎であったが、分子光球が存在すればその外部で容易に形成されるであろう。さらに、ISOなどでつぎつぎと星周辺に発見される分子やダストの形成には分子光球が格好の化学反応の場を提供するだろう。

しかし、これで外層の様々の問題が解決したわけでは決してなく、問題が若干整理されたに過ぎない。何故ならば、分子光球が如何にして形成されるかの問題は全く未解決だからである。例えば、 $\mu$  Cep の分子光球の質量は  $10^{-4} M_{\odot}$  以上と推定されるが、如何にしてこれだけの物質を外層の持ち上げ、かつ安定に保持するのだろうか？ また、前節で述べた太陽の CO-mosphere<sup>19)</sup> がどのようにして形成され、またこれが従来から知られている彩層とどのような関連をもつのかも未解決である。さらに、M 型巨星・超巨星ほど顕著ではなく、また太陽ほど詳しい観測のできない一般の恒星についても同様の問題が存在するであろう。

一般的には、恒星は他の天体にくらべると比較的良く判っていると考えられ、特にその光球構造は比較的容易にモデル化することができる。例えば、大部分の恒星についての光球モデルや予測光球スペクトルは Kurucz による 23 枚の CD-ROM にまとめられ、化学分析を始めとするスペクトルの定量解析に広く使われている。しかし、通常これらは恒星大気モデル (stellar model atmosphere) と称されているが、実際は光球モデル (model photosphere) に過ぎないことに注意すべきである。恒星大気と恒星光球とを混同することは混乱のもとであり、この両者は厳密に区別すべきである。現在の恒星光球モデルは分子光球や彩層を含む恒星大気全体にたいして境界条件としての意味を持つが、観測可能な恒星外層全体を恒星大気と呼ぶとすれば（そしてこれが正しい呼び方であるが）、恒星大気的首尾一貫したモデルは少なくとも低温度星についてはまだ存在しない。事実、本稿で図 1～8 に示した赤外

スペクトルは、一つとして光球モデルで説明できるものはない！

図 5 (=表紙) などで、簡単な作業モデルを仮定して観測データを定量的にも再現できることを示したが、このような作業モデルを物理法則に従って構築することは今後の問題として残されている。このことは、われわれはまだ恒星大気を殆んど理解していないことを意味する。実際、恒星大気全体に直接エネルギーと物質を供給し、恒星大気全体を支配するのは光球であり、特に対流や乱流が重要な役割を果たしていると考えられる。このような恒星大気の有機的な構成要素としての光球の役割はまだ解明されてはいない。光球から分子光球・彩層・恒星風を含む恒星大気構造を理解することは、恒星と星間物質の相互作用を明らかにする基礎であり、恒星進化と銀河進化の接点に位置する重要な問題である。分子光球の存在がようやく明らかにされ、恒星外層大気の実体的構造が明らかにされたことにより、恒星大気構造の総括的理解に一步近づいたと言えよう。しかし、新しい恒星像の確立に至る前途はなお多難であろう。

## 8. おわりに

20 世紀初頭、Saha の電離論などの成功に始まり、恒星スペクトルの解釈の基礎として発展した恒星大気構造論はようやく光球構造をどうにか扱うことができた。主として可視光領域のスペクトルを扱う限り、これでおおきな破綻をきたすことはなかった。即ち、恒星大気と光球は同一視され、特に区別する必要はなかった。35 年前の Stratoscope II によるベテルギウスなどでの水の発見は、これがまさに誤りであることを示していた。しかし、この重要な発見は、それにふさわしいインパクトをその後の恒星大気の研究に与えることなく 35 年が経過した。そして、ようやく ISO が明らかにしたことは、赤外スペクトルは光球のみの寄与では全く理解できず、我々の恒星大気理解は極めて不完全なものであったことである。このことは、おそらく太陽



を含む晩期型星全般についてあてはまると考えられるが、少なくとも赤色巨星・超巨星の気には赤外分子スペクトル線にたいして光学的に厚い膨大な温かい分子形成領域—分子光球—が存在する。この分子光球は電波領域では連続スペクトルにたいしても光学的に厚くなり、最近見出された“電波光球”にはほぼ対応するものであろう。光球以外に、分子光球（電波光球）、彩層、膨張分子・ダスト流などを含む巨大で複雑な構造をもつ恒星大気の全体像の解明は、21世紀の重要課題として残されている。

最後に、ISO計画の重要性にはやくから着目され、わが国の参加を実現するためあらゆる努力を惜しまれなかった奥田治之先生に深く感謝する。また、この機会に、ISOによる観測やデータ解析の様々な局面でお世話になった青木和光、濱部 勝、川良公明、大仲圭一、佐藤康則、田辺俊彦、山村一誠の諸氏及び内外のISOグループの方々に感謝する。

### 参 考 文 献

- 1) Woolf N. J., Schwarzschild M., Rose W. K., 1964, ApJ 140, 833
- 2) Wing R. F., Spinrad H., 1970, ApJ 159, 973
- 3) Tsuji T., 1978, A&A 62, 29
- 4) Ridgway S. T., Joyce R.R., White N.M., Wing R.F., 1980, ApJ 235, 126
- 5) 奥田治之, 1999, 天文月報 92, 8
- 6) Tsuji T., Ohnaka K., Aoki W., Yamamura I., 1997, A&A 320, L1
- 7) Tsuji T., Ohnaka K., Aoki W., Yamamura I., 1997/8, Ap&SS 255, 293
- 8) Matsuura M., Yamamura I., Murakami H., Freund M. M., Tanaka M., 1999, A&A 348, 579
- 9) Jennings D. E., Sada P. V., 1998, Sci 279, 844
- 10) Danielson R. E., Woolf N. J., Gaustad J. E., 1965, ApJ 141, 116
- 11) Tsuji T., 2000, ApJ 538, 801
- 12) Schwarzschild M., 1975, ApJ 195, 137
- 13) Tsuji T., 2000, ApJ 540, L99
- 14) Russell W. W., Soifer B.T., Forrest W. J., 1975, ApJ 198, L41
- 15) Tsuji T., 1978, A&A 68, L23
- 16) Yamamura I., de Jong T., Onaka T., Cami J., Waters, L.B.F.M., 1999, A&A 341, L9
- 17) Tsuji T., 1988, A&A 197, 185
- 18) Tsuji T., 1987, IAU Symp.122, 377
- 19) Solanski S. K., Livingston W., Ayres, T., 1994, Sci 263, 64
- 20) Lim J., Carilli C. L., White S. M., et al., 1998, Nat 392, 575
- 21) Reid M. J., Menten K. M., 1997, ApJ 476, 327
- 22) Imai H., Sasao T., Kameya O., et al., 1997, A&A, 317, L67

### Molecular Sphere around Cool Stars - A View Unveiled by ISO

Takashi TSUJI

*Institute of Astronomy, The University of Tokyo,  
Mitaka, Tokyo, 118-0015 Japan*

Abstract: ISO revealed that water is found not only by absorption but also by emission in the early M supergiant star  $\mu$  Cep. More generally, water is found through early to late M (super) giants. These results reveal the presence of huge warm molecular spheres (MOLsphere) around red (super) giant stars. Although stellar photosphere could be modeled rather easily, infrared spectra observed by ISO could not be accounted for at all by the model photospheres. What ISO unveiled is that we are far from unified understanding of the stellar atmosphere, which consists not only of the photosphere but also of the MOLsphere, chromosphere, and expanding gas-dust envelope.