

低温天体(褐色矮星及び赤色巨星)における分子及びダストの雲形成過程の分光学的研究

課題番号: 17540213

平成 17 年度～平成 20 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)(2))
研究成果報告書

平成 22 年 3 月

研究代表者: 辻 隆
東京大学大学院・理学系研究科・名誉教授

Spectroscopic Study on Cloud Formation of Dust and Molecules in Cool Objects (Brown Dwarfs and Red Giant Stars)

Project Number: 17540213

**Report on Scientific Results by Grant-in-Aid for Scientific
Research (C)(2) April 2005 – March 2008**

March 2010

Principal Investigator: Takashi TSUJI

Professor Emeritus
Institute of Astronomy, School of Science
The University of Tokyo

低温天体(褐色矮星及び赤色巨星)における分子及びダストの 雲形成過程の分光学的研究

課題番号: 117540213

研究代表者：辻 隆
東京大学大学院・理学系研究科

目次

はじめに	1
1. 研究組織	3
2. 研究経費	3
3. 研究発表	
3.1 学会誌等	4
3.2 学会発表等	5
4. 研究成果概略	
Summary	6
4.1 赤色巨星・超巨星	7
4.2 褐色矮星	10
5. 参考資料	
5.1 赤色巨星・超巨星	13
5.2 褐色矮星	77

はじめに

本報告書は、平成 17 年度 (2005.4)～平成 20 年度 (2009.3) にわたる科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (2)) 「低温天体 (褐色矮星及び赤色巨星) における分子及びダストの雲形成過程の分光学的研究 (課題番号: 17540213)」による研究成果の報告である。本報告書は、本来ならば本研究の最終年度である昨年度末に提出すべきものであったが、最終結果の検討に時間を要し次年度への繰越しを認めて頂いたため、1 年遅れたことをお詫びする。

褐色矮星から赤色巨星・超巨星にわたる低温天体を支配する最も特徴的な物理過程は、分子・ダストの形成であるが、最近の我々の研究により、これら分子・ダストは大気に均質に分布するのではなく局限された領域に雲の形で存在することが明らかとなった。雲のような非均質構造の存在は、詳しい観測の可能な惑星や太陽でよく知られていたが、見掛け上は非常に異なる赤色巨星・超巨星や褐色矮星においても分子・ダストの雲が存在しこれらの雲が大気の構造を支配していると考えなければならぬと考えられるに至った。このような分子・ダスト雲の形成過程を低温天体の恒星環境において解明することが、これらの天体の外層大気構造を解明する上で重要な問題であることが認識された。

褐色矮星は L 型 (見掛け上ダストの効果が顕著) 及び T 型 (見掛け上ダストの効果は少なく分子スペクトルが顕著) に分類されているが、これはダストが存在する褐色矮星と存在しないそれが存在するのではなく、ダストはその凝固温度で形成されるが、それより若干低い温度で大きく成長して沈殿するため、薄いダスト雲の形で存在することの必然的帰結として自然に説明される。即ち、比較的低温の T 型ではダストの凝固温度がその有効温度より高いため、ダスト雲は光学的に深い領域に形成されるため観測されない。しかし、比較的高温の L 型ではダストの凝固温度がその有効温度より低いため、ダスト雲は光学的に浅い領域に形成され観測的効果をもたらす。この考えを発展させ、我々は先に褐色矮星の統一モデル (Unified Cloudy Model - UCM) を提唱した。これは L 型及び T 型矮星を単一のモデル系列で説明する初めてのモデルであり、これにより L 型から T 型褐色矮星への遷移やスペクトル及び赤外色指数の変化は、すべて自然に説明された。本研究において、我々はこのモデルを発展させ、これに基づきこれまでに蓄積された豊富な観測結果の解析を行った。その結果、褐色矮星のスペクトルや赤外色指数は、従来知られていた星の基礎物理量、即ち、有効温度、表面重力加速度、化学組成、乱流速度のみでは記述できず第 5 のパラメータが必要であること、そのパラメータはダスト雲の特性を表すものであるべきことが明らかとなった。このことは、ダスト雲の特性は有効温度、表面重力加速度、化学組成、乱流速度のみでは決まらず、別の因子に支配されていることを意味する。この因子が何であるかを突き止めることが褐色矮星におけるダスト雲形成機構の解明にとって本質的な問題である。このことは、従来の恒星大気構造論の単なる延長として褐色矮星の大気構造を理解することはできないことを意味する。これらの問題を観測的に究明する試みの一つとして、従来、未開拓であった $2.5 - 5.0\mu\text{m}$ にわたる分光観測を「あかり」により行い、その解析をすすめた。

一方、赤色巨星・超巨星については、我々はこれまでに赤外線宇宙天文台 (ISO) によるデータの解析から、巨星、超巨星の全てに予想外の水蒸気のスペクトルが観測されることを見出した。水蒸気は従来、低温のミラ型変光星等にしか存在しないと考えられていたが、これらの観測から早期 M 型巨星・超巨星においても光球以外に水蒸気を含む比較的温かい分子雲の存在が明らかとなった。このような新しい“分子形成領域”の形成やその詳しい物理構造を解明することが本研究の重要な目的の一つである。赤色超巨星については、最近の高分解能空間干渉計データと赤外スペクトルデータの首尾一貫した解析を行った結果、その分子形成領域は光球半径の数倍に広がっていることが明らかとなり、これを“分子光球”と呼ぶことにした。さらに晩期 M 型巨星については、このような分子形成領域の存在は、高分解能 FTS データを用いて早い段階に見出していたが、本研究においては、CO 及び OH 分子線の高分解能 FTS スペクトルの定量解析を、K 型から晩期 M 型にわたる赤色巨星の大規模サンプルに拡張した。その結果、従来光球で形成されると考えられていたこれらの分子線は、全てハイブリッド構造を示し、光球のみでなく若干温度の低い領域で形成された成分を含むことが明らかとなった。問題は、この“若干温度の低い領域”が何かである。我々は、今まで得られた様々の結果を総合して、この“若干温度の低い領域”は大気中に浮かぶ分子雲であるとする仮説を提唱した。この分子雲はすでに K 型巨星や早期 M 型巨星に存在するが、晩期 M 型巨星や赤色超巨星では、これらの分子雲が集積して前に提唱した“分子光球”に成長するのではないかと考えられる。

赤色巨星・超巨星はまたその多量な質量放出により、銀河進化に重要な効果をもたらすが、その質

量放出機構が何かという問題は今なお未解決である。本研究により明らかにされた分子雲・分子光球ではダストが形成されると考えられ、これら脱出速度の小さな拡がった外層に形成された分子雲や分子光球を媒介とすることにより、赤色巨星・超巨星の質量放出の問題は一挙に解決への道がひらかれた。また、褐色矮星におけるダスト雲の形成は、現在すでに数百個知られている太陽系外巨大惑星について、今後可能となる物理的研究の基礎として重要である。本研究においては、これら赤色巨星・超巨星から褐色矮星にわたる大気における分子雲・ダスト雲についていくつかの新しい観測的手がかりを見出し、このような天体における雲形成の重要性を喚起した。また、これらの分子雲・ダスト雲の物理特性をある程度明らかにしたことにより、今後のこの分野の研究に具合的な展望を示した。しかし、この問題は未開拓の新しい分野であり、未解決の問題は多く今後の研究の進展が望まれる。

以上の結果については本報告書の「4. 研究成果概要」に簡単にまとめられているが、その一部は既に出版されている（本報告書「3. 研究発表」参照）。これら本科学研究費により行なわれた研究により出版された結果は、「5. 参考資料」として本報告書の最後に添付した。なお、研究成果の一部である UCM データベースは、以下のホーム・ページに公開済みである。

<http://www.ios.a.u-tokyo.ac.jp/~ttsuji/export>

以上の研究は、ようやく定年退官後も申請が認められるようになった科学研究費により行われたが、これに関してご理解、ご支援をいただいた多くの方々に深く感謝する。また、この研究を進めるうえで多くの方々にお世話になった。特に、計算ソフトについては田辺俊彦氏に、また、「あかり」による観測及びデータ解析については山村一誠氏に、たいへんお世話になった。また、天文学教育研究センター長の吉井譲教授をはじめ所員の方々のご配慮により、定年退官後も良好な研究環境のもとで研究をつづけることができたことを深く感謝する。本科研費の実際の運用にあたっては、天文学教育研究センターの事務主任橋口剛氏にたいへんお世話になった。また、大学院理学系研究科の事務部の方々には、定年退官後にいたるまで本科学研究費補助金に関する事務的諸手続でたいへんお世話になった。また、本研究は、国立天文台天文学データ解析計算センターのワークステーション、データ・ベースなどの共同利用により行われた。この機会にこれらでお世話になった多くの方々に厚く感謝する。

辻 隆
研究代表者

2010 年 3 月

1 研究組織

研究代表者：辻 隆（東京大学大学院・理学系研究科・名誉教授）

2 研究経費

平成 17(2005) 年度	900 千円
平成 18(2006) 年度	800 千円
平成 19(2007) 年度	700 千円
平成 20(2008) 年度	800 千円

計	3,200 千円
---	----------

3 研究発表

3.1 学会誌等

*1. Tsuji, T.: "The K giant star Arcturus: the hybrid nature of its infrared spectrum", *Astron. & Astrophys.*, **504**, 543-559, 2009

*2. Tsuji, T.: "Cool luminous stars: the hybrid nature of their infrared spectra", *Astron. & Astrophys.*, **489**, 1271-1289, 2008

*3. Helling, Ch., Ackerman, A., Allard, F., Dehn, M., Hauschild, P., Homeier, D., Lodders, K., Marley, M., Rietmeijer, F., Tsuji, T., & Woitke, P. "A Comparison of Chemistry and Dust Cloud Formation in Ultracool Dwarf Model Atmospheres", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **391**, 1854-1873, 2008

*4. Tsuji, T.: "Isotopic Abundances of Carbon and Oxygen in Oxygen-Rich Giant Stars", *Proc. IAU Symp. No. 239 "Convection in Astrophysics"* eds. F. Kupka, I. W. Roxburgh, & K. L. Chan, Cambridge Univ. Press, pp.307-310, 2007

*5. Tsuji, T., "Infrared Spectra and Visibilities as Probes of the Outer Atmospheres of Red Supergiant Stars", *ApJ*, **645**, 1448-1463, 2006

*6. Tsuji, T., "Dust in the Photospheric Environment III. A Fundamental Element in the Characterization of Ultracool Dwarfs", *ApJ*, **621**, 1033-1048, 2005

7. Sadakane, K., Hirata, R., and Tsuji, T., "Forty Years of Spectroscopic Stellar Astrophysics in Japan", *PASJ*, **57**, 1-12, 2005

8. Itoh, Y., Hayashi, M., Tamura, M., Tsuji, T., Oasa, Y., Fukagawa, M., Hayashi, S., Naio, T., Ishii, M., Mayama, S., Morino, J., Yamashita, T., Pyo, T-S., Nishikawa, T., Usuda, T., Murakawa, K., Suto, H., Oya, S., Takato, N., Ando, H., Miyama, S. M., Kobayashi, N., and Kaifu, N., "A Young Brown Dwarf Companion to DH Tauri", *ApJ*, **620**, 984-993, 2005

9. Nakajima, T., Morino, J. -I., Tsuji, T., Suto, H., Ishii, M., Tamura, M., Fukagawa, M., Murakawa, K., Miyama, S., Takami, H., Takato, N., Oya, S., Hayashi, S., Kudo, T., Itoh, Y., Oasa, Y., and Oppenheimer, B. R., "A Coronagraphic Search for Brown Dwarfs and Planets around Nearby Stars", *Astron. Nachr.*, **326**, 952-957, 2005

*10. Tsuji, T., "Interpretation of the Spectra Originating from the Photospheres Contaminated with Dust - Experience in L and T Dwarfs", *Proc. 13-th Cambridge Workshop on "Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun"* ed. F. Favata et al., ESA SP-560, 1001-1004, 2005

11. Leggett, S. K., Allard, F., Burgasser, A. J., Jones, H. R. A., Marley, M. S. and Tsuji, T., “Spectral Classification Beyond M”, Proc. 13-th Cambridge Workshop on “Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun” ed. F. Favata et al., ESA SP-560, 143–154, 2005
12. Nakajima, T., Kashikawa, N., Mizumoto, Y., Miyazaki, S., Takata, T., Tsuji, T., Ota, K., and Yasuda, N., “Hyper Digital Sky Survey: Brown Dwarfs and Subdwarfs”, Proc. 13-th Cambridge Workshop on “Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun” ed. F. Favata et al., ESA SP-560, 837–840, 2005

3.2 学会発表等

1. 辻 隆: 「恒星大気に雲は存在するか? K 型巨星 ARCTURUS の場合」, 日本天文学会 2009 秋季年会, 山口大学, N01a
2. 辻 隆, 山村 一誠, 田辺 俊彦, 中島 紀: 「「あかり」による褐色矮星の近赤外線分光観測 II. 基礎物理量の決定及び非平衡モデルの観測的検証」, 日本天文学会 2009 春季年会, 大阪府立大学, N08a
3. 辻 隆: 「高分解能 FTS スペクトルの定量解析 III: 赤外線スペクトルの複合構造」, 日本天文学会 2008 秋季年会, 岡山理科大学, N11a
4. 辻 隆: 「高分解能 FTS スペクトルの定量解析 II: RGB 及び AGB 星における炭素及び酸素組成」, 日本天文学会 2007 秋季年会, 岐阜大学, N08a
5. 辻 隆: 「高分解能 FTS スペクトルの定量解析: RGB 及び AGB 星における炭素及び酸素同位体組成比」, 日本天文学会 2006 秋季年会, 九州国際大学, N27a
6. Tsuji, T.: “Isotopic Abundances of Carbon and Oxygen in Oxygen-Rich Giants as Probes of Mixing in RGB and AGB stars”, 2006/08/21–25, IAU Symp. No. 239, “Convection in Astrophysics”, Prague, Czech Republic
7. 辻 隆: 「空間干渉計データ及び赤外スペクトルによる赤色超巨星 MOLSPHERE (分子光球) の最終確認と経験的モデル」, 日本天文学会 2006 年春季年会, 和歌山大学, N21a
8. 辻 隆: 「高分解能 FTS スペクトルによる MOLSPHERE (分子光球) の構造と動力特性: M 型超巨星 ベテルギウス (α Ori)」, 日本天文学会 2005 秋季年会, 北海道大学, N17a

*印は本報告書「5. 参考資料」に収録

低温天体(褐色矮星及び赤色巨星)における分子及びダストの雲形成過程の分光学的研究

辻 隆 (東京大学大学院・理学系研究科)

Spectroscopic Study on Cloud Formation of Dust and Molecules in Cool Objects (Brown Dwarfs and Red Giant Stars)

Takashi TSUJI

Institute of Astronomy, The University of Tokyo

Summary

The major outcomes of this research project can be summarized as follows:

1. Red Giants and Supergiants: We confirmed the presence of molecular condensation (or referred to as MOLsphere for simplicity) in the outer envelope of red supergiant star μ Cep and determined its physical structure by a consistent analysis of the infrared spectrum and recent visibility data. In a large sample of M giant stars, we found that their infrared spectra are a hybrid of at least two components originating in the photosphere and extra molecular condensation (MOLsphere). Only the weak lines, mostly of high excitation, are relatively free from the effect of the MOLsphere and can be used to extract photospheric abundances. The strong lines and the intermediate-strength lines, which dominate the observed infrared spectra, are affected badly by contamination from the MOLsphere. In the interpretation and analysis of the infrared spectra of M giant stars, it is essential to consider their hybrid nature. Also, molecular condensation referred to as the MOLsphere in M giant stars may exist in the K giant star Arcturus as well. The MOLsphere, however, is not necessarily a separate “sphere” but may be an aggregation of molecular clouds formed within the outer atmosphere. The formation of molecular clouds (referred to as MOLsphere in our modeling) in the outer atmosphere appears to be a basic property of all the red giant stars from early K to late M types (and red supergiants).

2. Brown Dwarfs : We extended our unified cloudy model (UCM), which we has proposed before, and applied it to analyze a large sample of observed data. We found that the spectra and colors of brown dwarfs cannot be interpreted in terms of the four basic physical parameters (the effective temperature T_{eff} , surface gravity $\log g$, chemical composition, and micro-turbulent velocity ξ_{micro}), which have been sufficient for stellar cases. In fact, even for the objects of the same T_{eff} , spectra and colors of brown dwarfs show large differences, which cannot be explained by the differences of other parameters such as $\log g$, ξ_{micro} , and chemical composition. For this reason, we should have a 5-th parameter to specify the observed characteristics of brown dwarfs and it should be related to the physical property of dust cloud. For the 5-th parameter, we choose the critical temperature T_{cr} which is a measure of the thickness of the dust cloud. With the 5-th parameter T_{cr} in addition to the 4 classical parameters, the observed characteristics of brown dwarfs can first be understood consistently. At present, the 5-th parameter T_{cr} is an empirical parameter to be inferred from observed data, and it remains to be specified by the theory of cloud formation.

4.1 赤色巨星・超巨星

4.1.1 高分解能 FTS スペクトルによる MOLSPHERE（分子光球）の動力学特性

我々は、1980 年代に高分解能 FTS による CO スペクトルの解析から、晩期 M 型巨星の光球外に温度が 1000-2000K の準静的分子領域が存在することを示唆したが [1], その後, Stratoscope や ISO などの大気圏外からの観測により, 早期 M 型巨星・超巨星の赤外スペクトルにはこれらの星の光球には存在しないはずの水分子が見出された [2]. その結果, 晩期 M 型巨星のみならず早期 M 型巨星・超巨星を含めて赤色巨星・超巨星には, 光球, 彩層, 膨張ガス-ダスト雲以外に, 大気の第 4 の構成要素として” 温かい分子雲” の存在がより明確となった. このような光球外の分子領域 — 分子光球または Molsphere と呼ぶことにする — の存在は, ようやく認められつつあるが, 次の問題はその構造, 特に動力学特性を解明することである. このためには高分解能スペクトルの解析が不可欠であるが, 今回は様々の観測が最も多く行われている M 型超巨星 Betelgeuse (α Ori; M2Iab) について, 視線速度, 特に分子光球の寄与が異なる低励起と高励起のスペクトル線の時間変動の解析を行った. これらの結果から, 動力的には分子光球は光球の運動に連動しているが, 数 Km/sec の相対運動が見られ, 時間的に不規則な流出及び流入を示すことが明らかとなった. このような視線速度の時間変動の解析からは, 例えば衝撃波による加熱・圧縮により, 外層に温かい高密度領域が形成されるとするモデルは, 支持されないことが結論される.

4.1.2 空間干渉計データ及び赤外スペクトルによる赤色超巨星 MOLSPHERE（分子光球）の最終確認

赤色超巨星についての最近の観測的進歩として, 中間赤外域における高分解能分光観測や, 近赤外から中間赤外域にわたる多波長での空間干渉計による Visibility の測定などがあげられる. 特に, 狭帯域フィルターにより, 分子帯強度の異なる領域の Visibility の測定が行われ [3], 外層の分子領域 — 我々が主に赤外スペクトルの解析から提唱し分子光球または Molsphere と呼んだもの — の空間構造の直接的検討が可能となった. しかし, これらのデータの解釈についてはかなりの混乱が見られ, これら新しい観測結果は必ずしも有効に生かされていない. 特に, これら空間干渉計データは, スペクトルデータを正しく考慮しないで解釈されているため, 矛盾した結果が示されている. 一般に, Visibility の解釈にはかなりの自由度があり, Visibility のみによるモデルの一意性は必ずしも保証されないことが示される. 一方, 多波長にわたる赤外スペクトルにもかなりの空間情報が含まれており, これらを統一的に解析することが重要である. 事実, このように空間干渉計データと赤外スペクトルを統一的に解析することにより, 分子光球の実在は明白となり, 整合性ある分子光球の経験的モデルの構築が可能となった. 実際に, 赤色超巨星 α Orionis 及び μ Cephei についてこのような解析を行い, それらの分子光球の物理量を決定した [4]. いずれにしても, スペクトルからその存在が予想されていた分子光球の存在が, 空間干渉計の結果を併せ用いることにより, ようやく直接的にかつ最終的に確認されたことの意義は大きい. 次の問題は, このような分子光球の起源や安定性を明らかにすることである. この問題は, 依然として未解決のままに残されているが, おそらく分子光球は恒星彩層と密接に関連した現象であり, 同じ現象の高温及び低温の位相が彩層及び分子光球として発現しているものと考えられる. 彩層についても, その起源は太陽についてすら必ずしも明確ではないが, 彩層や分子光球の形成機構が解明されれば, 永い間未解決であった赤色巨星・超巨星の質量放出機構も分子光球を媒介とすることにより統一的に理解することが可能であろう.

4.1.3 酸素過多の赤色巨星の炭素及び酸素同位体組成比

赤外検出器に著しい進歩が達成された今日においても, 高分解能フーリエ変換分光 (FTS) は, 広い波長領域にわたる高い精度の赤外スペクトルを与える点で今なお極めて有用である. 今回は, KPNO FTS により観測した高分解能 FTS スペクトルにもとずき, $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$, 及び $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ の第一倍振動帯の解析から, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 及び $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ の決定を 23 個の M 型巨星に拡張した [5]. まず, AGB 段階に

あると考えられる晩期 M 型星では、 $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ はほぼ 500 以下で 100 に達するものもあるが、早期 M 型巨星では、 $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ は 100 近くから原始太陽系の値 (≈ 2700) に近いものまで大きなバラツキを示す。得られた $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ の観測値と質量の相関を調べるため、Hipparcos による光度と進化トラックから質量の推定を行った。その結果、 $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ は小質量星で大きな変動を示すが、これは first dredge-up でほぼ説明できる。しかし、中質量星にも 100 に近い $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ 比を示すものがあり、これは first dredge-up のモデルで説明することは困難である。一方、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ は K5 – M8 にわたり極めて小さく、5 – 10 の範囲に留まることが確かめられた。このような結果は、first dredge-up による混合では説明できないことは古くから知られており、最近では ad-hoc な仮定にもとづく混合モデル (e.g. cool bottom mixing) で説明しようとする試みもある。しかし、このような ad-hoc な混合モデルは小質量星にしか適用できず、我々の結果はこれによっても説明することはできないことが明らかとなった。進化の進んだ星における元素混合及びその基礎となる対流の理解は、なお極めて不十分であることが分る。

4.1.4 酸素過多の赤色巨星の炭素及び酸素組成

恒星の炭素及び酸素組成については、最近、太陽光球についても、従来広く採用されていた値より 50% 程度少ないとする結果が提唱され、問題となっている。さらに問題の多い赤色巨星 (酸素過多) について、我々は高分解能 FTS スペクトルによる CO 及び OH 分子の解析から炭素及び酸素組成の検討を試みた [6]。今までに既に CO については解析を行い、低励起の強い吸収線は異常な振舞をすることを明らかにしたが、これは光球以外に分子光球の寄与によるとして一応解決された。しかし、OH については、必ずしも低励起ではない比較的強い吸収線が、同様に異常な振舞をすることが見出された。また、CO についても第一及び第二倍振動による炭素組成が一致しないことが分っていたが、これも比較的強い第一倍振動の吸収線が異常な振舞をしていたためと考えられる。これらのことから飽和効果を示すような赤色巨星の比較的強い分子吸収線には、従来のマクロ乱流モデルによる古典的なスペクトル解析の方法を適用することは困難であることが結論される。これらのことから、すくなくとも赤色巨星の元素組成の決定は、今のところ飽和効果をほとんど示さないような比較的弱い分子吸収線により行わなければならない。炭素組成については、前に CO 第二倍振動から求めた結果がほぼ妥当であり、酸素組成については OH 基準振動及び第一倍振動の弱い線から求めた結果はほぼ一致する。

4.1.5 赤色巨星における赤外分子スペクトルの複合構造

赤色巨星 (RGB 及び AGB 星) で観測される CO, OH などの吸収線は、その強度により異なる振舞を示す 3 つのグループ、即ち、I ($\log W/\nu < -4.75$), II ($-4.75 < \log W/\nu < -4.4$), 及び III ($\log W/\nu > -4.4$) に分類されるが、これらの内、ミクロ乱流モデルによる古典的なスペクトル線形成理論により解析できるのは、グループ I のみである。グループ III は低励起の強い CO の吸収線のみからなり、光球外の分子領域 MOLsphere の寄与を含むと考えられている。しかし、グループ II の起源は未解決のままに残されていた。グループ II は 2eV に達する高励起の線までを含んでいるので、当初、グループ III のように MOLsphere の寄与ではないと考えていた。しかし、グループ II の吸収線の振舞はグループ III のそれとよく似ていることが明らかとなり、グループ II のスペクトル線は光球外の MOLsphere と関連した広い温度領域にわたる複合的大気構造により形成されたものであることが結論されるに至った [6]。このことから、赤外線スペクトルで支配的な大部分の分子吸収線は光球と上記 MOLsphere に関連する光球外成分との複合物であり、このことを無視して光球モデルで赤外線スペクトルを解析しても、正しい結果を得ることは不可能であった理由がようやく明らかとなった。このように、化学組成解析においては光球以外の成分を含まないグループ I の吸収線のみを用いなければならない理由が明らかとなるなど、赤色巨星スペクトルの解析の困難の本質的原因が解明された。さらに、このようなハイブリッド構造の効果を分離できない中・低分散の赤外分子スペクトルから化学組成などを求めることは原理的に不可能であることが結論される。

4.1.6 恒星大気に雲は存在するか? K 型巨星 ARCTURUS の場合

従来の恒星大気構造論では、恒星大気は常に雲一つない快晴であると考えてきた。惑星や褐色矮星の大気では雲が重要な存在であることが知られているが、恒星には大気の恒常的な構成要素の一つとしての雲は存在しないのだろうか? 空間干渉計などによる画像解析によりこの問題が答へられるのはなお先のこととすれば、現在可能な分光学的方法によってこの問題にどこまで迫ることができるだろうか? 現在、最も分光データの完備している K 型巨星 Arcturus (α Boo; K1. 5IIIp) について、まず、Hinkle et al. (1995) による赤外スペクトルアトラス [7] の解析により、この問題を検討した。Arcturus スペクトルについては、すでに多くの解析が行われ、例えば、CO 分子の第 1・第 2 倍振動などは古典的な光球モデルで解析されてきたが、詳細な解析からこれらもある強度 ($\log W/\nu \approx -4.75$) でその性質が急激に変化し、従来の方法では解析できなくなることが明らかとなった。さらに、 $5\mu\text{m}$ 領域に観測される CO 基準振動は異常な振舞を示し、これらのスペクトルは光球大気モデルはもとより、 $\text{Ca}^+ \text{H}$, K 輝線などから知られる熱い彩層モデルや、さらにはいわゆる二層モデルなどでも全く説明できないことが明らかとなった。このような分光解析のみで雲の存在を断定的に結論することはもとより不可能であるが、スペクトル線の強度、視線速度、輪郭などの解析と併せて、簡単なモデル解析によって、この K 型巨星大気に分子雲が定常的に生成していると考えられる様々の論拠を示すことができる [8]。我々は、赤外スペクトルが同様の特異性を示すより低温度の M 型巨星、超巨星については、分光及び干渉計データを総合して、MOLsphere または分子光球と名づけた恒星外層の新しい構成要素が存在すると考えてきたが、これらは独立した新しい構成要素というよりは、外層大気中に生成した分子雲の集合体であると考えるのが妥当である。即ち、恒星大気における分子雲の生成は、少なくとも K 型よりも低温の巨星、超巨星における普遍的現象であると考えることができる。

4.1.7 赤色超巨星 MOLSPHERE (分子光球) と質量放出機構

進化の進んだ星における核反応生成物は、これらの星からの質量放出により宇宙空間に還元され、星間物質の化学進化の原動力となる。宇宙初期以来、このような過程を繰り返すことにより現在の宇宙を満たす多様な物質進化が達成された。しかし、進化の進んだ星における質量放出の機構は、いまだによく理解されていない。このような質量放出機構の解明には、進化の進んだ星の外層構造の理解が前提となる。おそらく外層大気における分子雲やそれらが集積した分子光球の形成機構が解明されれば、永い間未解決であった赤色巨星・超巨星の質量放出機構もこれらを媒介とすることにより統一的に理解することが可能であろう。例えば、赤色超巨星の分子光球の半径は、上記干渉計により確認されたように、中心星のその数倍であり、このような場所では脱出速度は十分小さく、分子光球よりの質量放出は極めて容易である。例えば、 μ Cephei の分子光球の質量は $10^{-4}M_{\odot}$ 程度と推定されるので、観測される $10^{-7}M_{\odot}/\text{yr}$ 程度の質量放出には十分な“reservoir”として機能する。

4.2 褐色矮星

4.2.1 ダスト天体大気的基本的特質

我々の提唱した Unified Cloudy Model (UCM) [9] では、ダストの効果は一様で有限の厚さのダスト雲で考慮されているが、このダスト雲の下限はダストの凝固温度 T_{cond} で決まり、上限はダストが十分大きく成長して沈澱する限界温度 T_{cr} で決まる。ここで凝固温度は熱力学的に決定されるので、限界温度が決まればダスト雲の厚さが決まるが、これを理論的に決定することは今のところ困難である。しかし、限界温度はダスト雲の厚さ、従って赤外色指数に直接反映されるので、観測される赤外色指数から推定可能である。最初は簡単のため限界温度は全てのモデルで一定と仮定したが、最近の視差測定による絶対光度から決めた有効温度が同じであっても、赤外色指数は大きく変動していることが明らかとなった。このことは有効温度が同じであっても、ダスト雲の厚さ、即ち、限界温度は、有効温度とは独立に変動することを意味する。この変動の原因は不明であり、限界温度の理論的決定は益々困難となったが、我々の UCM では限界温度を有効温度とは独立に変動する新しいパラメータと考えることにより、観測結果を合理的に理解することが可能である。即ち、従来、恒星大気を特徴づける基礎的パラメータとして有効温度、重力加速度、化学組成、微小乱流速度の 4 つが必要と考えられていたが、ダストが形成される恒星大気ではこれだけでは不十分で、さらに第 5 のパラメータとしてダスト雲の厚さに対応する限界温度 T_{cr} を導入することが不可欠であることを意味する [10]。

UCM は現在のところ一種の半経験的モデルであり、ダスト雲の形成過程を追跡したより物理的モデルに発展させる必要がある。これには例えば対流が何らかの働きをしていることが考えられる。しかし、一般に褐色矮星大気では対流層はダスト形成層よりも深い所にあり、そのため対流とダスト雲形成とが都合よく直接相互作用することは難しく、いまのところこのような対流によるダスト雲形成モデルは成功していない。また、上に見たように、有効温度、重力加速度、化学組成などが同じと思われる天体でもダスト雲は異なる特質を示し、どのような因子がダスト雲の特質を決定しているのかがそもそも未解決である。我々の UCM では、このような現在未解決のダスト雲の形成過程にはひとまず触れず、ダスト雲の大きさを表すパラメータを導入することにより、ダスト雲の形成過程によらない半経験的モデルで観測データの解析を進めることを目的としている。次の段階として UCM の物理的基礎を明らかにするには、大気に及ぼす様々の擾乱を考慮して気象学的手法を導入することが必要であろう。

4.2.2 L-T スペクトル分類の再検討

M 型よりも晩期の矮星にたいするスペクトル分類は、主としてメタン、水、金属酸化物などの分子帯強度による L-T 分類が広く使われ、我々も当初は「L-T スペクトル系列は有効温度の系列である」と考えていたが、これは誤っていたことが明らかとなった。この原因は、これらの天体で形成されるダストの効果は、温度等の効果と区別されず、しかもより卓越していたためである。これら天体でダストが重要であることは早くから認識されていたが、その効果はなお過小評価されていたのみならず、正しく扱われていなかったことが明らかとなった。上に述べたように、このような新しい第 5 の自由度、限界温度 T_{cr} を導入して観測されたスペクトルを UCM により解析した結果、L-T 型矮星の現在のスペクトル型は有効温度の系列に対応しておらず、むしろダスト雲の厚さ、即ち限界温度の変動に対応していることが明らかとなった。多くの紆余曲折を経て 20 世紀初頭に完成した恒星スペクトル分類は、最初全く経験的に行われ後に温度の系列であることが示された。この恒星スペクトル分類を手本として行われた褐色矮星の L-T 分類は、期待されたような温度の系列ではなく、このため様々の混乱がもたらされた。これは、ダストに汚染された天体のスペクトル解釈の一般的困難の表れであろう。褐色矮星のスペクトル分類は根本的に再検討の必要があることが結論される。

4.2.3 褐色矮星のダスト雲モデルの検討及び拡張

褐色矮星の大気ではダストの雲が形成されることは一般に認められているが、このダスト雲の形成機構についての共通認識には達していない。この問題を検討するワークショップが 2006 年 10 月に

Leiden で行われた [11]. 実際には出席はしなかったが、現在提唱されている種々のモデルを同一のパラメーターで構築して比較検討する企画に参加を要請され、我々の Unified Cloudy Model (UCM) についての結果を提出した。L 及び T 型矮星では、有効温度、重力加速度、金属量などが同じであっても、スペクトルや色指数が著しく異なることが観測では明らかとなったが、このことはダスト雲の特性が天体ごとに大きく違っていることを意味する。ここでの大きな困難は、このようなダスト雲の特性がどのような因子により決定されているのかが明らかではないことである。この問題を解決することが雲形成機構の解明の鍵であるが、気象学的現象が関与している可能性もある。我々は、UCM によりダスト雲の厚さを経験的に推定して広いパラメーター領域で整合性あるモデルを構築し、それにより大規模な観測データの解析を進めることが有益であると考えている。そのため、UCM を広いパラメーター領域に拡張した。

4.2.4 M, L 及び T 型矮星の Unified Cloudy Model データベース

褐色矮星の各種観測データの解析その他への応用を考慮して、UCM グリッドを

$$700 \leq T_{\text{eff}} \leq 4000 \text{ K}$$

$$3.0 \leq \log g \leq 5.5$$

$$T_{\text{cr}} = 1600\text{K}, 1700\text{K}, 1800\text{K}, 1900\text{K}, T_{\text{cond}}$$

の範囲について、詳細な数値データ及びそれにもとづくスペクトル、SED、赤外色指数の予測値等をデータベースとしてホームページ (www.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~ttsuji/export/ucm) に公開した。

4.2.5 「あかり」(ASTRO-F) による L 及び T 型矮星の近赤外分光観測

「あかり」(ASTRO-F) により L 及び T 型矮星の $2.5\text{--}5\mu\text{m}$ 領域の分光観測を行うことを提案し、ミッションプログラムとして採択された。この領域は SPITZER など他の赤外線天文衛星では観測できず、現在のところ「あかり」によってのみ観測可能である。観測を予定した 20 星のうち、11 天体について観測が実行され、そのうち 7 天体において、波長分解能おおよそ 100 の良質なスペクトルを得ることが出来た。

4.2.6 「あかり」近赤外スペクトルによる褐色矮星の基礎物理量の決定及び非平衡モデルの観測的検証

「あかり」により良質のデータの得られた 6 天体について基礎物理量を決定した。褐色矮星大気におけるダスト雲形成は、通常の恒星大気を規定する 4 個の基礎物理量、即ち、有効温度 T_{eff} 、重力加速度 g 、金属量、微小乱流速度のみならず、それ以外の未知の因子 (気象学現象?) に依存するので、第 5 のパラメーターとして雲の形成領域を規定する限界温度 T_{cr} を導入した unified cloudy model (UCM) により解析を行った。金属量、微小乱流速度は太陽値を仮定し、スペクトルの形状を説明できる T_{eff} 、 T_{cr} 、 $\log g$ を決定した。視差を用いて求めた絶対光度と上記基礎物理量から半径を決めた。結果は、内部構造モデルの予言のように木星半径のほぼ 30% 以内に収まる。また、安定な CO 分子は、化学反応のタイムスケールが対流による混合のそれより永いため非平衡にあるとされているが、「あかり」により $\text{CO } 4.6\mu\text{m}$ バンドが観測され、このようなモデルの定量的解析が始めて可能となった。低温 T 型矮星では内部の高温領域で生成した CO が表面に混合して、CO が非平衡となるモデルでほぼ観測が説明できたが、早期 T 型矮星ではすでに平衡でかなりの CO が存在するので、このようなモデルで CO が異常に強くなることは説明できないことが明らかとなった。また、T 型矮星には予想外に強い $\text{CO}_2 \ 4.2\mu\text{m}$ バンドが観測されたが、これは非平衡モデルでも、UCM のような平衡モデルでも説明できないことが明らかとなった [12]。

参考文献

- [1] Tsuji, T. 1988, A&A, **197**, 185
- [2] Tsuji, T. 2000, ApJL, **540**, L99; Tsuji, T. 2001, A&A, **376**, L1
- [3] Perrin, G., et al. 2005, A&A, **436**, 317
- [4] Tsuji, T. 2006, ApJ., **645**, 1448
- [5] Tsuji, T. 2007, Proc. IAU Symp. No. 239 "Convection in Astrophysics " ed. F. Kupka, I. W. Roxburgh, & K. L. Chan, Cambridge Univ. Press, p.307
- [6] Tsuji, T. 2008, A&A, **489**, 1271
- [7] Hinkle, H. K., Wallance, L., Livingston, W. 1995, Infrared Atlas of the Arcturus Spectrum 0.5-5.3 micron, Asron. Soc. Pacific, pp.372
- [8] Tsuji, T. 2009, A&A, **436**, 317
- [9] Tsuji, T. 2002, ApJ, **575**, 264
- [10] Tsuji, T. 2005, ApJ, **621**, 1033
- [11] Helling, Ch., et al. 2008, Mon. Not. R. Astron. Soc., **391**, 1854-1873
- [12] Yamamura, I., Tsuji, T., Tanabe, T., & Nakajima, T. 2009, ApJ, submitted

5 参考資料[†]

5.1 赤色巨星・超巨星

1. Tsuji, T.: "The K giant star Arcturus: the hybrid nature of its infrared spectrum", *Astron. & Astrophys.*, 504, 543-559, 2009
..... 15
2. Tsuji, T.: "Cool luminous stars: the hybrid nature of their infrared spectra", *Astron. & Astrophys.*, 489, 1271-1289, 2008
..... 32
3. Tsuji, T.: "Isotopic Abundances of Carbon and Oxygen in Oxygen-Rich Giant Stars", *Proc. IAU Symp. No. 239 "Convection in Astrophysics"* ed. F. Kupka, I. W. Roxburgh, & K. L. Chan, Cambridge Univ. Press, pp.307-310, 2007..... 56
4. Tsuji, T., "Infrared Spectra and Visibilities as Probes of the Outer Atmospheres of Red Supergiant Stars", *Astrophys. J.*, 645, 1448-1463, 2006 60

[†] 電子版では省略

5.2 褐色矮星

1. Helling, Ch., Ackerman, A., Allard, F., Dehn, M., Hauschild, P.,
Homeier, D., Lodders, K., Marley, M., Rietmeijer, F., Tsuji, T.,
& Woitke, P. "A Comparison of Chemistry and Dust Cloud Formation
in Ultracool Dwarf Model Atmospheres", Mon. Not. R. Astron. Soc.,
391, 1854-1873, 2008 79
2. Tsuji, T., 'Dust in the Photospheric Environment III. A Fundamental
Element in the Characterization of Ultracool Dwarfs'', Astrophys. J.,
621, 1033--1048, 2005 99
3. Tsuji, T., 'Interpretation of the Spectra Originating from the
Photospheres Contaminated with Dust - Experience in L and T Dwarfs'',
Proc. 13-th Cambridge Workshop on 'Cool Stars, Stellar Systems,
and the Sun' ed. F. Favata et al., ESA SP-560, 1001--1004, 2005
..... 115