

ISO(赤外線宇宙天文台) 赤外分光データによる 低温度星外層大気模型の検証と再構築

課題番号: 11640227

平成 11 年度～平成 14 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 15 年 5 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

Modeling of the Outer Atmosphere of Cool Stars Based on the ISO Spectroscopy : From Red Supergiants to Cool Dwarfs

Project Number: 11640227

**Report on Scientific Results by Grant-in-Aid for Scientific
Research (C)(2) April 1999 – March 2003**

May 2003

Principal Investigator: Takashi TSUJI
Professor Emeritus
Institute of Astronomy, School of Science
The University of Tokyo

ISO(赤外線宇宙天文台) 赤外分光データによる低温度星外層 大気模型の検証と再構築: 赤色超巨星から低温矮星へ

課題番号: 11640227

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
定年退官後の科学研究費について	3
1. 研究組織	4
2. 研究経費	4
3. 研究発表	
3.1 学会誌等	5
3.2 学会発表等	7
4. 研究成果概略	
Summary	9
4.1 赤色巨星・超巨星	10
4.2 M型矮星・褐色矮星	12
4.3 今後の問題	15
5. 参考資料	
5.1 赤色巨星・超巨星	17
5.2 M型矮星・褐色矮星	57

はじめに

本報告書は、平成 11 年度 (1999.4)～平成 14 年度 (2003.3) にわたる科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (2)) 「ISO (赤外線宇宙天文台) 赤外分光データによる低温度星外層大気模型の検証と再構築 (課題番号: 11640227)」による研究成果の報告である。赤外線宇宙天文台 (ISO)¹ は、大部分地上から観測が不可能な赤外線領域を高感度で観測できる世界で最初の汎用冷却型軌道望遠鏡であり、我が国の宇宙科学研究所 (ISAS) の協力のもとに、ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) が十数年の準備のもとに 1995 年 11 月に成功裡に打ち上げ、1998 年 4 月まで観測を継続して多大の成果を納めたプロジェクトである。我々は、この計画の早い段階から参加し、我が国に割り当てられた重点プログラムの一部を担当し、これと一般公募プログラムを併せて、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) にわたる系統的な赤外線領域における分光観測を計画した。主として短波長分光器 (ISO SWS) により、 $2.5\text{--}45\mu\text{m}$ にわたるスペクトルの系統的観測がほぼ予定どおり行われ、これら恒星の赤外線スペクトルの全貌が初めて明らかにされた。本研究は、これらの観測結果に加えて、2000 年に公開された ISO データアーカイブからのデータを大々的に併せて用いて、赤色超巨星から低温矮星にいたる低温度星外層大気模型の検証と再構築を目的として行なわれた。

ISO の初期段階で、従来のモデルでは全く予想されていなかった水蒸気のスペクトルを早期 M 型巨星, 超巨星に見出し、これらの星の外層には比較的温かい分子形成領域が存在することを示した。早期 M 型超巨星に水が存在することは、40 年近く前に気球搭載望遠鏡 Stratoscope II により発見されていたが、これは当時としては余りに予想外の発見であったため正しく理解されず、今日まで無視されてきたが、ようやく ISO による我々の再発見により、その先駆的意義が再認識された。本研究においては、K 型巨星 Aldebaran (α Tau; K5III) を含む M0III 以降の全ての M 型巨星に水が普遍的に存在することを見出し、その励起温度は 1000K 以上と比較的高いことを明らかにした。また早期 M 型超巨星 μ Cep (M2Ia) や晩期 M 型巨星では水は輝線としても観測され、その解析から水蒸気スペクトルは光学的に厚く拡がった “分子光球” とでも呼ぶべき外層分子雲によるものであることを結論した。従来から知られている光球, 高温の彩層, 及び低温の膨張ダスト・分子流のほかに、従来の恒星外層大気の理論では全く考慮されていなかった分子光球の存在が明らかとなった。このことは、我々の現在の低温度星外層大気模型に根本的な変革を迫るものである。今後の恒星外層大気模型の再構築にあたっては、このような分子光球の起源やその物理構造の解明が不可欠である。

M 型矮星については、 $2.2\text{--}12\mu\text{m}$ にわたるスペクトルの系統的観測を、ISOPHTS 及び ISOCAM-CVF により行なった。ISO では感度が不足のため観測できなかった褐色矮星は、近く打ち上げが予定されている ASTRO-F (ISAS) 及び SIRTf (NASA) などの赤外線観測衛星によりようやく観測されようとしている。これらのスペクトルの解析の基礎を確立する目的で、本研究ではこれら小質量星の大気構造の基礎的研究を進めた。褐色矮星は、見掛け上非常に異なる特性を示す L 型及び T 型の 2 タイプに分類されているが、簡単な熱力学的考察に基づきこれらを統一的に説明するモデルを提案した。このモデルでは、ダストは褐色矮星の有効温度の如何にかかわらず常にその凝固温度 ($T_{\text{cond}} \approx 2000\text{K}$) と成長・分離・沈殿をはじめる限界温度 ($T_{\text{cr}} \approx 1800\text{K}$) の間の範囲でのみ存在し、この範囲外ではダストは大きくなり過ぎ、分離・沈殿してしまう。即ち、ダストは有効温度の如何にかかわらず温度が $T_{\text{cr}} \lesssim T \lesssim T_{\text{cond}}$ の範囲に薄い雲の形で存在する。従って、このダスト雲は、有効温度の比較的高い L 型矮星では観測可能な大気中 ($\tau < 1$) に位置するが、有効温度の低い T 型矮星では大気の奥深く観測不可能な領域 ($\tau > 1$) に移行する。このような単一のモデルにより M 型, L 型から T 型矮星にいたる赤外色指数, SED, 及びスペクトルなどを始めて統一的に説明できることを示した。このことは、また、我々のダスト雲形成モデルの観測的検証と考えることができ、今後発見されるであろう太陽系外巨大惑星などをふくめて、平衡大気におけるダスト雲形成に応用できるであろう。このような L 型及び T 型褐色矮星の統一モデル Unified Cloudy Model (UCM) を確立したことは、本研究の主要な成果の一つである。

¹ ISO is an ESA project with instruments funded by ESA member states (especially the PI countries: France, Germany, the Netherlands, and the United Kingdom) and with the participation of ISAS and NASA.

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、さらに詳しい研究成果は、今後以下のホーム・ページで逐次公開の予定である。

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

以上の研究を進めるうえでは多くの方々にお世話になった。まず、ISO による観測にわが国の参加が実現できたのは、その重要性にはやくから着目され長い間にわたり献身的な努力をされた宇宙科学研究所（当時）の奥田治之教授のおかげである。また、実際に ISO による研究計画を進めるにあたっては、観測からデータ処理にいたる様々の局面で、多くの方々、特に、青木 和光、川良 公明、尾中 敬、大仲 圭一、佐藤 康則、田辺 俊彦及び山村 一誠の諸氏にお世話になった。また、データ解析ソフトの立ち上げやネット・ワーク導入には、浜部 勝、半田 利弘、田辺 彦、及び山村 一誠の諸氏にたいへんお世話になった。また、国立天文台の中島 紀氏とは特に褐色矮星について共同研究を行なった。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歴代事務主任、横山 弘光、谷内田 浩、及び新井 烈の諸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、本研究では、国立天文台天文学データ解析計算センターのデータ・ベースその他の施設を使用し、また褐色矮星の観測は同「すばる」望遠鏡の共同利用観測により行われた。この機会にこれらでお世話になったおおくの方々に深く感謝する。

なお、定年退官後の科学研究費については重大な問題が含まれており、これについては項を改めて述べる。

辻 隆
研究代表者

2003 年 5 月

定年退官後の科学研究費について

平成 14 年度で本科学研究費補助金による研究の終了に伴い、平成 15 年度からの科学研究費補助金に応募しようとしたところ、科学研究費補助金を代表者として申請できるのは「研究機関に常勤の研究者として所属する者」に限るとの規定により名誉教授は申請することができないといわれ、非常に驚くとともに困惑している次第であります。科学研究費補助金応募要項を読み直してみますと、たしかにそのように書かれてあります。何かの間違いではないかと、日本学術振興会に問い合わせしてみますと、これは間違いではなく日本学術振興会の確固たる方針であるとのことでありました。(もっとも、名誉教授も代表者として申請できる種目もあるとのことでありましたが、これは大規模プロジェクトの企画調査を行うことに限定され、個別的な研究費とは別の問題であります)。

このように常勤的職の有無や年齢により、科学研究費を申請の段階で差別することは極めて不当であり、学問研究の自由の侵害以外のなにものでもありません。常勤的職の有る場合、例えば大学教官の場合、教官校費により研究費の一部は保証されていますが、それでは研究費として不十分であり、現実には科学研究費補助金がわが国の学問研究で重要な役割を果たしています。名誉教授の場合には、教官校費のような定常的な研究費はもとより他からも研究費を得る見込みはないのが一般的であり、科学研究費からの補助がなければ研究費は全く無いことになります。名誉教授を任命しておきながら、研究費を申請する可能性すら閉ざしているというのはどういうことなのでしょうか？これは、名誉教授は研究をするなど言うに等しいことであり、全く理解に苦しむところであります。わが国の憲法は、その第 23 条で“学問の自由はこれを保証する”と明確に規定しています。“学問の自由”とはなにを意味するのでしょうか？これは、少なくとも学問を行なう意志があり、その能力がある者は、何らの差別を受けること無く学問を行なう自由が含まれることは明らかでありましょう。何故、定年退官後にはこの自由が認められないのでしょうか？公募型研究費である科学研究費補助金について、常勤的職の有無や年齢による差別をすることは、わが国憲法に反することは明白であります。

現在の厳しい経済情勢のもとでも、科学研究費補助金も例外ではありません、多様化する研究活動にとって決して十分ではないことは事実であります。このような情勢のもとで、例えば、若手研究者への重点配分を行うことは結構であります。だからといって定年退官後の研究者に科学研究費の補助を受ける可能性を閉すなどということは、全く筋違いであります。科学研究費補助金は本来競争原理に基づく公募型研究費であり、不当な差別により公募の範囲を予め狭くするということは、最初から公正な競争を排除していることであり、科学研究費補助金そのものの本来の主旨に反すると言わなければなりません。ここで、名誉教授にたいして何らかの優遇処置をすることを求めているのではなく、ただ応募の機会と審査を差別なく公正に行うことを要求しているだけであります。また、すべての研究者は、いずれは定年を迎えることを考えれば、定年退官後の差別を撤廃することは、若手研究者を含む現職の研究者にとっても何ら反対すべきことではないでありましょう。

もう一つの問題は、定年退官後の科学研究費補助金が認められた場合、その事務的諸手続をどのように行なうかであると思われます。現在、たび重なる人員削減により厳しい状況にある事務局にさらに負担がかかることは明らかであります。これについてはさしあたり支給される科学研究費補助金の一部を事務経費として使っていただくことで解決できるのではないのでしょうか？しかしながら、定年退官後も研究者がその経験と蓄積を生かして研究を継続することは有意義なことであり、今後の高齢化社会にあってできれば制度的にもこのことをある程保障する方策を確立すべきであることをこの機会に要望するものであります。

以上を要約すると、定年退官後は科学研究費申請の代表者として認めないことは、わが国憲法の精神に反し、また公募型競争原理により研究促進をはかるべき科学研究費補助金の本来の趣旨と全く矛盾するものであります。関係各位及び日本学術振興会におかれましては、このように不当な差別と矛盾に満ちた現在の科学研究費補助金を再検討し、早急に改善を諮られるよう要望するものであります。

辻 隆
東京大学・名誉教授

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 11(1999) 年度	1,000 千円
平成 12(2000) 年度	800 千円
平成 13(2001) 年度	800 千円
平成 14(2002) 年度	900 千円

計	3,500 千円
---	----------

3 研究発表

3.1 学会誌等

- *1. Tsuji, T.: Water Observed in Red Giant and Supergiant Stars – Manifestation of a Novel Picture of the Stellar Atmosphere or else Evidence against the Classical Model Stellar Photosphere, in Proc. “Exploiting the ISO Data Archive – Infrared Astronomy in the Internet Age” ed. C. Gry et al., (ESA SP-511, Noordwijk), in press, 2003
- *2. Tsuji, T.: Unified Cloudy Models of M, L, and T Dwarfs – Physical Basis of the Spectral Classification in the Substellar Regime, *Proc. IAU Symposium 211 “Brown Dwarfs”* ed. E. L. Martín, ASP Conf. Ser., in press, 2003
- *3. Tsuji, T. & Nakajima, T.: Transition from L to T Dwarfs on the Color-Magnitude Diagram, *Astrophys. J. Letters*, **585**, L119–L122, 2003
- *4. Tsuji, T.: Dust in the Photospheric Environment: Unified Cloudy Models of M, L, and T Dwarfs, *Astrophys. J.*, **575**, 264–290, 2002
- *5. Tsuji, T.: Water in K and M Giant Stars Unveiled by ISO, *Astron. & Astrophys.*, **376**, L1-L4, 2001
- *6. Tsuji, T.: Unified Model Photospheres for Ultracool Dwarfs of the Type L and T, *Proc. “Ultracool dwarfs: New spectral types L and T”* ed. H. R. A. Jones & I. Steele, Springer, pp.9-25, 2001
- *7. Tsuji, T.: Warm Molecular Sphere around Red Supergiant Stars– A Missing Link between the Photosphere and Masering Water Clouds in the Circumstellar Envelope, *Proc. IAU Symposium 205 “Galaxies and their constituents at the highest angular resolutions”* ed. R. T. Schilizzi, S. Vogel, F. Paresce & M. Elvis, ASP Conf. Ser. pp.316-317, 2001
- 8. Nakajima, T., Tsuji, T., and Yanagisawa, K.: H and K-band Methane Features in an L Dwarf, 2MASS 0920+35, *Astrophys. J. Letters*, **561**, L119–L122, 2001
- *9. Tsuji, T.: Water on the Early M Supergiant Stars α Orionis and μ Cephei, *Astrophys. J.*, **538**, 801–807, 2000
- *10. Tsuji, T. : Water in Emission in the *Infrared Space Observatory* Spectrum of the Early M Supergiant Star μ Cephei, *Astrophys. J. Letters*, **540**, L99–L102, 2000

*印は本報告書「5. 参考資料」に収録

11. Tsuji, T.: Dust Formation in Stellar Photospheres: The Case of Carbon Stars from Dwarf to AGB, *Proc. IAU Symposium 177 "The Carbon Star Phenomenon"* ed. R. F. Wing, Kluwer, pp.313–324, 2000
12. Tsuji, T.: Dust in Very Cool Dwarfs, *Proc. "Very Low-Mass Stars and Brown Dwarfs"* ed. R. Rebolo & M. R. Zapatero-Osorio, Cambridge Univ. Press, pp.156-168, 2000
13. Nakajima, T., Tsuji, T., and Maihara, T., Iwamuro, F., Motohara, K., Taguchi, T., Hata, R., Tamura, M., Yamashita, T.: Near-Infrared Spectroscopy of the Cool Brown Dwarf, SDSS 1624+00, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **52**, 87–92, 2000
14. Ohnaka, K., Tsuji, T., and Aoki, W.: Elemental Abundances of Carbon, Nitrogen, and Oxygen in Carbon Stars, *Astron. & Astrophys.*, **353**, 528–542, 2000
- *15. Tsuji, T., Ohnaka, K., and Aoki, W.: Warm dust in the Cool Brown Dwarf Gliese 229B and Spectroscopic Diagnosis of Dusty Photospheres, 1999, *Astrophys. J. Letters*, **520**, L119–L122
- *16. Tsuji, T., Aoki, W., and Ohnaka, K.: Water in Stars: Expected and Unexpected, 1999, in *Proc. "The universe as seen by ISO"* ed. P. Cox & M. F. Kessler, (ESA SP-427, Noordwijk), pp. 229–232
17. Ohnaka, K., and Tsuji, T.: Quantitative Analysis of Carbon Isotopic Ratios in Carbon Stars. III. 26 J-Type Carbon Stars Including 5 Silicate Carbon Stars, *Astron. & Astrophys.*, **345**, 233–243, 1999
18. Aoki, W., Tsuji, T., and Ohnaka, K.: Infrared Spectra of Carbon Stars Observed by the ISO SWS II. HCN and C₂H₂, *Astron. & Astrophys.*, **350**, 945–954, 1999

3.2 学会発表等

1. 辻 隆, 中島 紀: 「褐色矮星の大気構造とその観測特性 XI. 色一等級図上での L 型から T 型矮星への遷移」, N76a, 日本天文学会 2003 年春季年会, 東北大学, 2003/03/24-26
2. 中島 紀, 辻 隆, 柳沢 顕史: 「すばるで求めた L 型及び T 型矮星のスペクトルと有効温度」, N77a, 日本天文学会 2003 年春季年会, 東北大学, 2003/03/24-26
3. 辻 隆: 「ISO による赤色巨星のスペクトル II. 晩期 M 型巨星における光球・分子光球構造」, N57a, 日本天文学会 2002 秋季年会, 宮崎, 2002/10/7-9
4. Tsuji, T. “Warm Molecular Sphere of Red Giant and Supergiant stars – Confirmation and Extension with the ISO Data Archive” at “Exploiting the ISO Data Archive – Infrared Astronomy in the Internet Age”, Següenza/Spain, June 24-27, 2002
5. T. Tsuji: “Unified Cloudy Models of M, L, and T Dwarfs – Physical Basis of the Spectral Classification in the Substellar Regime” at IAU Symposium 211 on “Brown Dwarfs”, Kona/Hawaii, May 20-24, 2002
6. 辻 隆: 「褐色矮星の大気構造とその観測特性 X. スペクトル分類の物理的基礎」, N02a, 日本天文学会 2002 年春季年会, 茨城大学, 2002/03/28-30
7. 辻 隆: 「低温度星の大気」, MIRA 研究会 2002; 超高分解能光赤外天文学の幕開け, 国立天文台, 2002/2/7-8
8. 辻 隆, 中島 紀, 田辺 俊彦, 山村 一誠: 「褐色矮星の近・中間赤外線分光・測光観測」, ASTRO-F (IRIS) ミッションプログラム研究会, 名古屋大学, 2001/10/30-31
9. 辻 隆: 「ISO による赤色巨星のスペクトル: K 型巨星 Aldebaran にも存在した高温水蒸気」, N48a, 日本天文学会 2001 秋季年会, 名古屋大学, 2001/10/4-6
10. 中島 紀, 辻 隆, 柳沢 顕史: 「L 型矮星における H 及び K バンドでのメタンの検出」, N38a, 日本天文学会 2001 秋季年会, 名古屋大学, 2001/10/4-6
11. 辻 隆, 「褐色矮星の大気構造とその観測特性 IX. L 型及び T 型矮星の統一モデル」, N43a, 日本天文学会 2001 年春季年会, 千葉大学, 2001/03/26-28
12. 辻 隆, 「早期 M 型超巨星における水蒸気」, ISO による赤外線分光観測ー その成果と将来への展望, 宇宙科学研究所, 2000/12/6
13. 辻 隆 「早期 M 型超巨星における水蒸気存在 II. A Final Word Based on the Spectrum from the ISO Archives」, N02a, 日本天文学会 2000 秋季年会, 群馬, 2000/10/4-8
14. T. Tsuji: “Outer Atmosphere of Red Supergiant Stars: Observations of Molecular Sphere or MOLsphere”, IAU Symposium 205 on “Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolution”, Univ. Manchester, August 15-18, 2000
15. T. Tsuji: “Unified Model Photospheres for the Ultracool Dwarfs of the Types L and T”, IAU 24th GA Workshop on “Ultracool Dwarfs: Surveys, Properties and Spectral Classification”, Univ. Manchester, August 12, 2000
16. T. Tsuji: “Grain Formation in the Stellar environment: Low vs. High Luminous Stars” IAU Joint Discussion 1 on “Atomic and Molecular Data for Astrophysics: New Developments, Case Studies and Future Needs”, Univ. Manchester, August 9-11, 2000,

17. 辻 隆 「早期 M 型超巨星における水蒸気存在： 歴史的教訓」, N02a, 日本天文学会 2000 年春季年会, 東京大学, 2000/04/3-5
18. 辻 隆, 大仲 圭一, 青木 和光 「褐色矮星の大気構造とその観測特性 VIII. 温かいダストと冷たい分子ガスの複合モデル」, N73a, 日本天文学会 1999 秋季年会, 九州大学, 1999/10/7-9
19. T. Tsuji, W. Aoki, K. Ohnaka: “Water Vapor in the Spectra of Oxygen-Rich Giant Stars”, 2nd Austrian ISO workshop on “Atmospheres of M, S, and C Giants”, Vienna, May 27-29, 1999

4 研究成果概要

ISO(赤外線宇宙天文台) 赤外分光データによる低温度星外層 大気模型の検証と再構築: 赤色超巨星から低温矮星へ

辻 隆 (東京大学大学院・理学系研究科)

Modeling of the Outer Atmosphere of Cool Stars based on the ISO Spectroscopy : From Red Supergiants to Cool Dwarfs

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: From the analysis of ISO SWS spectra, supplemented with those from the ISO data archive, we show that water exists throughout red (super)giants including K giant α Tau (Aldebaran), early M supergiants α Ori (Betelgeuse) & μ Cep, and all the M giants of M0III - M9III. Water was discovered in α Ori & μ Cep nearly 40 years ago with the pioneering balloon-borne telescope named Stratoscope II, but this important discovery was so unexpected at that time (and even today) that it has been misinterpreted and overlooked for a long time. We rediscovered this phenomenon neglected during the 40 years and extended it to a larger sample of cool luminous stars. The excitation temperatures of the water bands are rather high ($T_{\text{ex}} \approx 1500$ K) and water appears in emission in μ Cep as well as in late M giants. This finding is difficult to understand by the presently known models and/or theories on stellar atmospheres, and we propose instead the presence of a warm molecular sphere (MOLsphere) as the 4-th component of the stellar atmosphere consisting of the photosphere, chromosphere, and expanding cool wind. How to understand the origin of the MOLsphere and its physical structure should be a major challenge to the theory of stellar atmosphere.

2. Cool Dwarf Stars and Substellar Objects: We observed some spectra of M dwarfs by ISO, but we must wait for the next infrared missions such as Astro-F (ISAS) and SIRTf (NASA) to observe the spectra of brown dwarfs. To provide the physical basis of interpreting the infrared spectra of cool dwarfs including M-type and brown dwarfs, we developed model photospheres of cool dwarfs, in which formation of dust cloud plays a crucial role. Based on a simple thermodynamical argument, we proposed unified cloudy model (UCM) in which dust can be sustained in the temperature range between the condensation temperature ($T_{\text{cond}} \approx 2000$ K) and the critical temperature ($T_{\text{cr}} \approx 1800$ K), independently of T_{eff} . Then, the dust cloud appears in the optically thin region in L dwarfs whose T_{eff} are relatively high but will sink below the observable photosphere in the cooler T dwarfs. The observed CM diagram, SED, and spectra are well reproduced with our UCMs consistently throughout L to T dwarfs. This fact in turn can be regarded as an observational confirmation of our model of the cloud formation. We hope that our UCM will be of some clue for modeling the atmospheres of extrasolar giant planets.

4.1 赤色巨星・超巨星

本研究プロジェクトが開始される以前に、すでに ISO 重点プログラム及び公募プログラムによる観測に基ずく幾つかの結果が得られている (Tsuji et al. 1997, 1998) が、本研究ではこれらに加えて ISO データアーカイブを大々的に利用し、さらには 40 年近く前に観測されながら今日まで不当に無視されてきた先駆的な気球搭載望遠鏡 Stratoscope II によるデータ (Woolf et al. 1964) を再評価し、これらを総合して赤外線スペクトルの意味を明らかにする。

4.1.1 ISOSWS による M 型巨星・超巨星のスペクトル [Tsuji et al. 1999]

赤外線宇宙天文台 ISO により観測した M0 - M7 の M 型巨星・超巨星の 2.5 - 45 μm にわたるスペクトルの解析を行った。その結果、この領域には H_2O の 3 つの基準振動と純回転遷移の全てが同定された。

2.7 μm 領域 (H_2O ν_1 and ν_3 bands): β Peg (M2.5III), KP Per (M2Iab) などの早期の M 型巨星・超巨星のこの領域は CO 及び OH が強いが、光球モデルでは説明できない吸収が明らかに存在する。高分解能スペクトルにより、この過剰吸収は励起温度が 2000K に達する水蒸気によることが確かめられた。

6.3 μm 領域 (H_2O ν_2 band): 早期の M 型巨星のこの領域では他の分子吸収は弱く特に最も早期の α Cet (M1.5III) における水の存在は H_2O ν_2 band が観測されたことにより、確実となった。S Per (M4-7Ia) では H_2O ν_2 band は弱い輝線となっている。

10-30 μm 領域 (純回転遷移): この領域では 2000K 程度の水蒸気の純回転遷移は強度が最大を示すはずであり、このような水蒸気が外層にあれば輝線となるこちが予想された。しかし観測結果は輝線ではなくむしろ吸収が観測された。晩期 M 型巨星では光球の水蒸気が見えている可能性もあるが、 β Peg (M2.5III) などの早期 M 型巨星でも吸収が観測された。このことは 2000K の高温水蒸気は光球ではないとしてもそのごく近くに存在することを意味する。

30-45 μm 領域 (純回転遷移): この領域で水蒸気の純回転遷移は晩期 M 型巨星及び S Per で輝線として観測された (早期 M 型巨星では残念ながらノイズのみ)。この輝線もかなりの高温を示し、短波長領域で観測された吸収に寄与したのと同じ水蒸気によるものと考えられる。これらの結果から、晩期 M 型巨星及び S Per に存在する水蒸気が光球外に起源を持つことが確認された。

4.1.2 Stratoscope II による赤色超巨星のスペクトル [Tsuji 2000a]

すでに 40 年近く前に、Stratoscope II とよばれる気球搭載望遠鏡により、早期 M 型超巨星における水蒸気の 0.9, 1.1, 1.4, 1.9 μm の吸収は、発見されていた (Woolf et al. 1964; Danielson et al. 1965)。しかし、この発見は当時の恒星スペクトルの一般的理解の枠を越えるものであり、そのためこれらの吸収は水ではなく CN Red System (0.9, 1.1, 1.4, 1.9 μm に吸収帯を持つ) によるものであるとされた (Wing & Spinrad 1970)。事実、水はミラ型変光星など最低温の星に観測されるのみで、一方、CN は太陽から超巨星まで広く観測されており、この CN 同定は広く受け入れられてきた。その結果、Stratoscope II による水の同定は誤りとされ、超巨星外層大気理解に何ら貢献することなく、永い間見過ごされてきた。最近 ISO により $h + \chi$ Persei 星団の早期 M 型超巨星には水が同定されたが、一般星野の早期 M 型超巨星については Stratoscope II による水の同定は果たして誤りであろうか？

Stratoscope II による α Ori (M2Iab) 及び μ Cep (M2Ia) のスペクトルの再解析を行った結果、0.9, 1.1 μm の吸収は光球の CN によるとしてもよいが、1.4, 1.9 μm の吸収は光球の CN では全く説明できないことが明らかとなった。Stratoscope II の観測で強い 1.4, 1.9 μm の吸収は、 $T_{\text{ex}} \approx 1500\text{K}$ 及び $N_{\text{col}} \approx 1 - 3 \times 10^{20}/\text{cm}^2$ の水によるスペクトルと良く一致するが、光球モデルでは全く説明できず、その起源は光球外に求めなければならない。いずれにしても、40 年前の Stratoscope II による α Ori 及び μ Cep のスペクトルは、最新の技術的には遥かに高度な観測に比べても何ら遜色ないのみならず、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のである。なお、最近、地上での 10 μm 領域での観測で、 α Ori に水蒸気の純回転線が同定された (Jennings & Sada 1998)。

このように、光球外に水が多量に存在することは、若い星団のみならず一般星野の早期 M 型超巨星、さらには M 型巨星に共通する一般的現象であり、さらに太陽外層にも多量の CO が発見されている (Solanski et al. 1994). これらのことから太陽から赤色巨星・超巨星を含む低温度星外層構造は、高温の彩層 ($T \approx 10000\text{K}$) のみでなくむしろ温かい分子形成領域 ($T \approx 1000 - 2000\text{K}$) を主要な成分とする非均質構造であることが示唆される。

4.1.3 早期 M 型超巨星における水蒸気の輝線スペクトル [Tsuji 2000b]

2000 年に公開された ISO データアーカイブに含まれていた α Ori では、 $\text{H}_2\text{O } \nu_2$ バンドは吸収として観測され、水の存在が確定した。同じく、ISO データアーカイブに含まれる早期 M 型超巨星 μ Cep (M2Ia) の SWS スペクトルでは、 $6.3 \mu\text{m}$ の基準振動が輝線として観測され、さらに強いダスト放射にも関わらず $40 \mu\text{m}$ 帯には水蒸気の純回転遷移による輝線が観測された。このことから、水蒸気スペクトルは広がった外層分子雲によるものであることが確認された。40 年前の Stratoscope II によるスペクトルから水蒸気雲の励起温度 $T_{\text{ex}} \approx 1500\text{K}$ 及び柱密度 $N_{\text{col}} \approx 3 \times 10^{20}/\text{cm}^2$ はすでに判っているので、簡単な作業モデルとして、この分子雲を球状と仮定し、光球スペクトルを境界条件として、この球状分子雲での輻射輸達を解くことにより、観測された輝線スペクトルは、光球半径の 2 倍以上 ($\approx 1300R_{\odot}$) に広がった水蒸気により定量的によく説明される。このようなスペクトルに、さらに外層のダストによる熱輻射を加えたることにより、ISO の全波長領域にわたる観測をほぼ説明することができることが示される。

このことから、比較的温かい分子形成領域が早期 M 型超巨星を取り巻いていることは観測的には疑う余地なく明確となった。この膨大な分子形成領域は、輝線強度比から光学的に極めて厚いと考えられ、分子光球または MOLsphere と呼ぶのが適当であろう。しかし、この MOLsphere モデルは見かけは極めて単純であるが、その意味する物理的内容はそれほど簡単ではなく、多量の水が如何にして外層で形成されるかを始めとして、未解決の困難な問題を含んでいる。いずれにしても、このような分子形成領域の存在は従来の恒星外層大気理論では全く考慮されておらず、従来から知られている高温 ($T_{\text{ex}} \approx 10^4\text{K}$) の彩層及び低温 ($T_{\text{ex}} \approx 10^2\text{K}$) の膨張ダスト・分子流のほかに、このような温かく ($T_{\text{ex}} \approx 10^3\text{K}$) 光学的に厚い分子形成領域を考慮してようやくまとめた恒星外層大気モデルの構築が可能であろう。

4.1.4 赤色巨星スペクトルの大規模サンプル [Tsuji 2001a,2003a]

ISO データアーカイブから約 10 個の K 型及び M 型巨星の高分解能データ ($R \approx 1600$) を選び、 $6 \mu\text{m}$ 領域のスペクトルを解析した。この領域における分子吸収としては H_2O の ν_2 基準振動が主であり、他の分子吸収は弱いため H_2O の同定には最も適した領域である。特に予想外のことは、K 型巨星 Aldebaran (α Tau; K5III) に水の吸収が見出されたことである。また、高分解能データのある M0III 以降の全ての M 型巨星には H_2O の ν_2 基準振動が吸収で見出され、その励起温度は 1500K またはそれ以上、水分子の柱密度は $(0.2 - 2.0) \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ の範囲にあるが、スペクトル型とは必ずしも相関しない。

この結果をさらに多数のサンプルに拡張する目的で、ISO データアーカイブに含まれる SWS 低分解能サンプル ($R \approx 200$) のサーベイを行なった。その結果、サンプル数は数倍になり、このような低分解能でも 6 ミクロン領域の $\text{H}_2\text{O } \nu_2$ 基準振動による吸収バンドの強度を測定することは可能であることを示した。もともと水分子の柱密度は、K5III - M5III では光球モデルの予測値よりも著しく大きく、光球起源では説明できないことがこれら多数のサンプルで確認された。逆に晩期 M 型巨星では水分子の柱密度は光球モデルの予測値よりも小さく、M8III までを含めても $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 程度が上限であり、また晩期 M 型巨星でもほとんど水の吸収を示さないものもある。これらのことは、6 ミクロン領域ですでに輝線成分が、光球起源の吸収成分を相殺している可能性を示唆する。

これらの結果は光球起源の水分子では説明できず、早期 M 型超巨星 μ Cep (M2Ia) で明瞭に示された分子光球とも呼ぶべき温かい分子形成領域が、晩期 K 型巨星から始まりすべての赤色巨星に普遍的に存在することを改めて示唆するものである。古くから多量の質量放出を行う低温の赤色超巨星やミラ型

変光星などの周辺に高励起の水分子が存在することは水メーザーにより知られていたが、このような高励起の水分子は K 型巨星に始まり赤色巨星の大気 (但し光球ではない!) に普遍的に存在することが明らかとなった。水メーザー現象もこのような赤色巨星段階ですでにその種は大気に組み込まれていたと考えることができるであろう。

4.1.5 古典的光球模型の限界と新しい恒星大気模型

以上で見たように、 H_2O の輝線スペクトルも示す赤色超巨星や晩期 M 型巨星を含めた低温高光度星における水の存在を統一的に理解するには、外層における新しい分子形成領域 — 分子光球 — の存在が不可欠である。しかしながら、このような輝線スペクトルは確認されていない K 型巨星及び早期 M 型巨星では、このような分子光球は必ずしも自明ではなく、単に従来の光球モデルが不完全であるに過ぎないと言う可能性も否定できない。最近、地上での $10\mu\text{m}$ 領域での高分解能分光により K 型巨星 Arcturus(K1.5IIIp) にも H_2O の純回転線が観測されたが、この結果は現在の光球モデルに比べて星の表面温度が数 100 度低くなっているためであると解釈されている (Ryde et al. 2002)。しかしながら、このように表面温度が数 100 度低くなる原因は特定されていない。例えば、古典的 1 次元 (1D) 光球モデルでは予測されなかった低温領域の存在が、3 次元 (3D) 流体力学モデルにより予測されるというような可能性も否定できない。このようなモデルは、現在までのところ対流が盛んな金属量の少ない準矮星などで実際に試みられ、化学元素組成の定量解析にも影響するとされている (e.g. Nissen et al. 2002)。

観測的には、最近、遂に Adaptive Optics (AO) と分光を結合した Spectrocalipermetry の手法により、赤色超巨星や晩期 Mira 型巨星におけるこのような分子光球の存在が直接示された (Takami et al. 2003) ことは、極めて重要な進歩である。この新しい方法により、CO や H_2O の吸収係数の大きなスペクトル領域では、星の半径が連続吸収のみの領域でのそれに比べて 2 倍以上であることが示され、これは古典的元光球 1D モデルでは全く説明できないことは明らかである。今や、少なくとも赤色超巨星や晩期 Mira 型巨星における分子光球の存在は、分子線自身による直接撮像により完璧に実証された。このような Spectrocalipermetry の手法で、K 型巨星及び早期 M 型巨星がどのように見えるかは極めて興味あるところである。このような観測により、分子光球をふくむ新しい恒星大気モデルの適用範囲が明確にされるとともに、古典的光球モデルの限界も明らかにされてゆくであろう。

4.2 M 型矮星・褐色矮星

ISO では、M 型矮星についても、スペクトルの系統的観測を試みたが、感度が不足のため褐色矮星は観測できなかった。これは、近く打ち上げが予定されている ASTRO-F (ISAS) 及び SIRTf (NASA) などの赤外線観測衛星を待たなければならない。これらのスペクトルの解析の基礎を確立する目的で、本研究では M 型矮星から褐色矮星までを含む小質量天体の大気構造の基礎的研究を進めた。

4.2.1 温かいダストー冷たい分子ガスの複合モデル [Tsuji et al. 1999]

1995 年に発見された冷たい褐色矮星 Gliese 229B (Nakajima et al. 1995) は、メタン、水などのスペクトルが支配的であり、ダストはすでに十分成長したためガスから分離・沈殿したと考えられてきた。しかし、これらのモデルで観測結果を十分説明することは困難で、例えば HST の観測により明らかにされた可視光輻射の大幅な減少の原因は長らく不明であった。この解決として大気下層部にはガスと詳細平衡にある温かいダストが存在し、上層部ではダストはガスから分離・沈殿し分子ガスが支配的であるような複合モデルを考える。これにより Gliese 229B などのメタン矮星は：

1) 大気下層部に存在する温かいダスト層は、可視光では光学的に厚く内部からの高温輻射を有効に遮るとともにダスト温度の黒体輻射で輝く。観測される可視光輻射はこれでほぼ説明される。さらにアルカリ金属などの非揮発性元素はガス状態にあり、中性原子の共鳴線 (e.g., KI, NaI doublets) も可視光輻射の減光に寄与する。

2) 上記の温かいダスト層は赤外領域では光学的に薄く、赤外スペクトルには寄与しない。大気上層部ではメタン、水などの非揮発性分子が多量の存在し、赤外スペクトルを支配する。これらの分子ガスは下層部に存在する温かいダスト層で温められるためそれらの吸収帯は弱くなるが、その結果観測との一致は良くなる。

3) ダストの寄与が有効となる場所で吸収係数は大幅に増大するため大気は対流不安定となる。それよりも深くでダストが蒸発すると対流は消滅するが、その後再び深い対流層が発達する。このような表面对流層－輻射層－内部対流層のような二重対流層は惑星で知られているが、褐色矮星にも存在すること可能性があり、褐色矮星大気における気象学的現象を引き起こす可能性を示唆する。

4.2.2 L 型及び T 型矮星の統一モデル - Unified Cloudy Model [Tsuji 2001b, 2002]

最近、多数の褐色矮星が発見され、これらは L 型及び T 型の 2 タイプに分類されている。この説明として、L 型には微小なダストがガスと一様に混合した状態にあるモデル B が、T 型にはダストはガスから分離・沈殿したモデル C が考えられた。しかし、これらのモデルに種々の難点があることを示し、上でのべた複合モデルを拡張・発展させ、L 型 及び T 型矮星の統一モデル - Unified Cloudy Model (UCM) を提案した。褐色矮星のようにほぼ 静水圧平衡にある大気にダストが定常的に存在できるのは、これらのダストが微小であるため十分成長しないでガスと詳細平衡にある場合に限るが、これが可能な温度範囲はダストの凝固温度 (T_{cond}) とダストが成長をはじめる限界温度 (T_{cr}) の間である。この範囲外ではダストは大きくなり過ぎ、分離・沈殿してしまう。ダストはこのように $T_{\text{cr}} \lesssim T \lesssim T_{\text{cond}}$ の温度領域に限定される。即ち、ダストは層状の雲を形成する。

このダスト雲は、有効温度如何にかかわらず常に $T_{\text{cond}} \approx 2000 \text{ K}$ の付近にできるので、有効温度が比較的高い L 型矮星では観測可能領域 ($\tau < 1$) にあるが、有効温度が比較的低い T 型矮星では観測不可能な領域 ($\tau > 1$) に入ってしまう。このような単一のモデルにより L 型から T 型矮星にいたる赤外色指数及びスペクトルの変化を始めて統一的に説明することができる。このことはまた新しい統一モデル UCM の観測的検証と考えることができる。従来のモデル B は $T_{\text{cr}} = T_0$ (T_0 : 表面温度)、即ちダストの分離は大気の表面まで起きないとした場合に、又モデル C は $T_{\text{cr}} = T_{\text{cond}}$ 、即ちダストは形成と同時に分離・沈殿するとした場合に対応し、いずれも現実には起こり得ず、近似としても粗雑に過ぎる。また、一般に平衡大気では、ダストは低温の大気表面領域ではなく $T_{\text{cond}} (\approx 2000 \text{ K})$ 近傍の高温領域でのみ有効に存在し得る。このことは、褐色矮星のみでなく、巨大惑星や降着円盤等の平衡大気におけるダスト形成に一般的に適用されるであろう。

4.2.3 UCM の応用：スペクトル分類 [Tsuji 2003b]

最近提唱されている L-T 矮星統一分類 (Geballe et al. 2002) は、Harvard 分類に集約される従来の恒星スペクトル分類の伝統に則りすぐれて経験的であるが、これらのスペクトル分類が物理的に何を意味するかは必ずしも明確ではない。この L-T 統一分類で主な分類の指標として採用されている水のバンドは、L 型矮星の領域ではあまり大きな強度変化を示さないが、T 型矮星の領域では水及びメタンのバンドは晩期に行くに従い急激に増大する。L 型矮星では低温に行くに従い水の組成は増加するが、我々の UCMs ではダスト雲は大気の光学的に薄い領域に存在しそのダスト量も低温に行くに従い増加するので、水の組成増大はダスト雲による減光の効果と相殺して、結果として水のバンド強度はあまり変化しない。T 型矮星の領域ではダスト雲は大気の奥深くに入ってしまうため、分子組成従って分類の指標であるバンド強度は、ガス分子における温度効果のみにより急激に増大する。このことから、L 型矮星では水が分類の指標として適当かどうか問題となるが、L-T 統一分類は温度系列としてほぼ理解される。

従来の恒星スペクトル分類は電離・解離平衡によりイオン、原子、分子量の温度変化としてよく理解されたが、L-T スペクトル分類は単純にダスト量が低温になるにつれて増大するとしたのでは全く説明できない。我々の UCM が示すように、ダストが光球大気内で薄い雲を形成し、その存在領域がスペクトル型により変化することが重要である。即ち、褐色矮星のスペクトル分類は、光球大気内におけ

る有限の厚さの雲の形成を示したことにより、褐色矮星から巨大惑星などを含む小質量天体の大気構造の研究に重要な基礎を与えたと言える。

4.2.4 UCM の応用：色一等級図 [Tsuji & Nakajima 2003]

ここ 2, 3 年の間に多数の褐色矮星について視差が測定され、色一等級図が正確にもとめられるようになった。その結果、褐色矮星の色一等級図は極めて特異なものであることが明らかとなった。即ち、L 型から T 型矮星への遷移にあたっては、 $J-K$ などの赤外色指数は急激に青くなり、同時に M_J などは暗くなるよりはむしろ明るくなる (J -brightening) が示された。このような結果を説明する試みとして、簡単な熱力学的考察によるダスト雲を採り入れた我々の光球モデル (Unified Cloudy Model -UCM) の応用を検討した。このモデルでは、ダスト雲は褐色矮星の有効温度の如何にかかわらず常にその凝固温度 ($T_{\text{cond}} \approx 2000\text{K}$) と成長・分離・沈殿をはじめる限界温度 ($T_{\text{cr}} \approx 1800\text{K}$) の間の範囲でのみ存在し、従ってダスト雲は、有効温度の比較的高い L 型矮星では観測可能な大気中に位置するが、有効温度の低い T 型矮星では大気の奥深くに移行する。そのため、L 型から T 型褐色矮星への遷移にともなうダストによる減光は減少し、 M_J などはほとんど減少せず、色指数もガス分子の吸収係数を反映して青くなることが可能である。

実際に、最近改定された太陽の炭素・酸素組成による非灰色光球モデルの新しいグリッドを構築し、これから計算される SED にもとずき進化モデルによる ($T_{\text{eff}}, M_{\text{bol}}$) を ($J-K, M_J$) に変換することにより、観測される色一等級図を定量的に再現できることを示した (尚, " J -brightening" に見えるのは、異なる質量、年齢の褐色矮星が混在しているための見かけ上の効果である)。このことは、褐色矮星の進化モデル + 光球モデルが、ようやく色一等級図による古典的方法により検証されたことを意味するが、特に、最も不確定性の大きかった光球モデルとして採用した UCM、ひいてはその基礎にあるダスト雲形成モデルの妥当性の観測的検証と考えることができる。

4.2.5 UCM の応用：「すばる」による観測結果の解析 [Nakajima et al. 2001]

国立天文台の中島紀氏と共同で、「すばる」による観測を行ない、解析結果により UCMs の観測的検証を進めつつある。従来、メタンのバンドは、T 型矮星にのみ存在すると考えられていたが、「すばる」の IRCS により観測した L 型矮星 2MASS 0920 + 35 (L6.5V) にはメタン 1.6 及び $2.2\mu\text{m}$ バンドが存在することが見出された。このような晩期 L 型矮星ではダスト雲は大気の比較的深い領域に形成され、従ってダスト雲の上部にはメタンなどの揮発性分子が形成される余地があり、本観測はこのような L - T 型褐色矮星の UCMs の妥当性を示す観測的根拠の一つと考えることができる。

4.2.6 UCM と他のモデルの比較

最近、惑星大気の手法を用いて、褐色矮星におけるダスト雲の形成を採り入れるモデルが試みられている (e.g. Marley et al. 2002; Cooper et al. 2003; Helling 2003; Woitke & Helling 2003)。これらのモデルでは、対流によりガスが高温領域から低温領域に運ばれる際にダストの核生成、成長が行なわれ、ガスが低温領域から高温領域に運ばれるとダストは蒸発する。このような過程が繰り返される限りダストは定常的に存在し、対流のタイム・スケールによりダストのサイズなども決定されるとするものである。これは、一見たいへん魅力的にみえる。特に、低温矮星は wholly convective であると言われており、対流がどこにでも容易におきると思われているようである。しかし、これは非灰色大気モデルを正しく理解すれば分かるように正しくない。低温矮星と言えどもダスト形成の起きるような表面では、温度勾配は対流不安定を引き起こすほど大きくはなく、すくなくとも褐色矮星の領域 ($T_{\text{eff}} \gtrsim 1000\text{K}$) ではようやく対流が起きるのは $T \approx 2000\text{K}$ 程度の深さである。このことは、我々の UCMs のみならず、他の人々 (e.g. Burrows et al. 1997) のモデルを見れば直ちに確かめられることである。一方、ダスト形成は 1000 - 2000K の領域で行なわれるので、対流とダスト形成は上のモデルで仮定されているように都合よく相互作用することはない。事実、このようなモデルで L 型から T 型

矮星にわたる観測を統一的に説明できるものはない。例えば, Marley et al.(2002) のモデルでは, 色一等級図を説明できず, ダストの雲が分裂してその隙間から高温輻射が洩れ出すなどという ad hoc な仮定を導入している (Burgasser et al. 2002). Helling(2003) 他のモデルでは, 観測との比較すら行なわれていない。また, これら以外で, ただ単純にダストが一様に生成するとしたのみで雲の形成を考慮していないモデル (e.g. Chabrier et al. 2000) では, 色一等級図を始め観測を説明することは全くできない。

我々の UCMs では, このような対流の有無に関係なく, 詳細平衡にあるダストとガスが, 生成・消滅を繰り返すことにより, ダストは定常的に存在する。このような熱力学的考察のみからは, ダストのサイズなどは決定されないが, このような詳細平衡にある微小なダストの吸収係数は, サイズによらないので実用上問題はない。このようなダストの存在範囲, 即ちダスト雲の厚さは, 赤外色指数に敏感に反映されるので, 観測から決定される。即ち, 我々の UCM は半経験的モデルである。恒星大気モデルでは, 場合によってはこのような半経験的方法がなお必要であり, かつ有効である。例えば, 対流を扱う混合距離理論においても, 混合距離は今なお半経験的に決定されており, 対流を考慮したモデルはすでに半経験的モデルである。本文で見たように, このような我々の UCMs の単一のグリッドにより, L 型から T 型矮星にわたるスペクトル, SED, 色指数, 色一等級図などの観測は統一的に説明された。現在のところ, 我々の UCMs は, このように観測を統一的に説明できる唯一のモデルである。

4.3 今後の問題

以上見たように, 赤色巨星・超巨星から褐色矮星にわたる低温度天体を支配する最も重要な物理過程は, 分子・ダストの形成であるが, 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, 低温度天体の恒星環境に於いても同様の現象が存在し, 見掛け上は非常に異なる赤色巨星・超巨星と褐色矮星においても, 様々の形で分子やダストの雲が存在することが明らかになった。これら分子・ダストの存在形態や形成過程は従来地球大気に邪魔されてほとんど観測できなかったが, 本研究では, スペースからの赤外線観測により切り開かれる新しい可能性にいち早く着目し, その観測結果を最大限に利用して, 恒星環境下における分子・ダスト形成過程を解明し, 外層大気構造モデルの検証と再構築を目指した。さらに, 最近開発された Spectrocalipermetry (Takami et al. 2003) の手法により, 高い空間分解能とスペクトル分解能を結合した新しい観測が実現され, これにより恒星大気の研究はさらに新しい局面を迎えるであろう。

このような観測上の進歩にたいして, これらの理論面での理解はあまり進んでいないのが現状である。赤色巨星・超巨星における分子雲は, 彩層などが存在し質量放出が行なわれる外層領域に, 新しい物理的実体を導入するもので, いまなお未解決のこれら外層領域の物理構造の解明に本質的な意味をもつものであろう。従来, 光球のみのモデルに過ぎないものが恒星大気モデルと称されることが多いが, これは学術用語の混乱のみでなく, 概念上の混乱をも示すものである。本来, 恒星大気とは光球, 彩層, 分子光球, 恒星風の全てを包含するものであり, このような本来の意味での恒星大気の全体像を示すものが“恒星大気モデル”であるべきである。しかし, 恒星大気全体を支配しているのは光球であり, 彩層, 分子光球, 恒星風などに物質とエネルギーを供給する光球の重要性は決して軽いわけではなく, むしろこのような恒星大気全体の基幹構造としての光球すらまだ良く理解されていないことが問題である。また, 褐色矮星におけるダスト雲は, 光球内部に形成され, その意味で本研究では古典的光球モデルをダストを含めて拡張する問題として扱った。しかし, 雲のような非均質構造は, 様々の気象学的現象を引き起こす可能性があり, 今後は気象学の方法が, これらの大気の研究にも必要となるであろう。すでに一部の褐色矮星には, 原因不明の時間変動も観測されており, 近く可能となるであろう太陽系外巨大惑星の観測も考慮に入れて, 褐色矮星から惑星を含む天体の光球大気構造を従来の古典的光球モデルの枠を超えて進める必要がある。

参考文献

- [1] Burgasser, A. J., et al. 2002, *ApJL*, 571, L151
- [2] Burrows, A., et al. 1997, *ApJ*, 491, 856
- [3] Chabrier, G., Baraffe, I., Allard, F., & Hauschildt, P. 2000, *ApJ*, 542, 464
- [4] Cooper, C., Sudarsky, D., Milson, J. A., Lunine, J. I., & Burrows, A. 2003, *ApJ*, 586, 1320
- [5] Dahn, C. C., et al. 2002, *AJ*, 124, 1170
- [6] Danielson, R. E., Woolf, N. J., & Gaustad, J. E. 1965, *ApJ*, 141, 116
- [7] Geballe, T. R., et al. 2002, *ApJ*, 564, 466
- [8] Helling, C. 2003, *Rev. Mod. Astron.*, in press (ZIB-Report 02-47)
- [9] Jennings, D. E., Sada, P. V. 1998, *Science*, 279, 844
- [10] Marley, M. S., Seager, S., Saumon, D., Lodders, K., Ackerman, A. S., Freedman, R., & Fan, X. 2002, *ApJ*, 568, 335
- [11] Nakajima, T., Oppenheimer, B. R., Kulkarni, S. R., Golimowski, D. A., Matthews, K., & Durrance, S. T. 1995, *Nature*, 378, 463
- [12] Nakajima, T., Tsuji, T., & Yanagisawa, K. 2001, *ApJL*, 561, L119
- [13] Nissen, P. E., Primas, F., Asplund, M., & Lambert, D. L. 2002, *A&A*, 390, 235
- [14] Ryde, N., Lambert, D., Richter, M. J., & Lacy, H. 2002, *ApJ*, 580, 447
- [15] Solanski, S. K., Livingston, W., & Ayres, T. 1994, *Science*, 263, 64
- [16] Takami, H. et al., 2003, in preparation
- [17] Tsuji, T. 2000a, *ApJ*, 538, 801
- [18] Tsuji, T. 2000b, *ApJL*, 540, L99
- [19] Tsuji, T. 2001a, *A&A*, 376, L1
- [20] Tsuji, T. 2001b, in *Ultracool Dwarfs: New Spectral Types L and T*, ed. H. R. A. Jones & I. A. Steele (Berlin: Springer-Verlag), 9
- [21] Tsuji, T. 2002, *ApJ*, 575, 264
- [22] Tsuji, T. 2003a, ESA SP-511, in press (astro-ph/0209495)
- [23] Tsuji, T. 2003b, in *Brown Dwarfs* ed. E. L. Martín, in press (astro-ph/0208255)
- [24] Tsuji, T., & Nakajima, T. 2003, *ApJL*, 585, L151
- [25] Tsuji, T., Ohnaka, K., Aoki, W., & Yamamura, I. 1997, *A&A*, 320, L1
- [26] Tsuji, T., Ohnaka, K., Aoki, W., & Yamamura, I. 1998, *Ap&SS*, 255, 293
- [27] Tsuji, T., Aoki, W., & Ohnaka, K. 1999, ESA SP-427, 229
- [28] Wing, R. F., & Spinrad, H. 1970, *ApJ*, 159, 973
- [29] Woitke, P., & Helling, C. 2003, *A&A*, 399, 297
- [30] Woolf, N. J., Schwarzschild, M., & Rose, W. K. 1964, *ApJ*, 140, 833

5 参考資料†

5.1 赤色巨星・超巨星

1. Tsuji, T.: Water Observed in Red Giant and Supergiant Stars --
Manifestation of a Novel Picture of the Stellar Atmosphere or else
Evidence against the Classical Model Stellar Photosphere, in Proc.
‘‘Exploiting the ISO Data Archive -- Infrared Astronomy in the
Internet Age’’ ed. C Gry et al., (ESA SP-511, Noordwijk), in press,
2003 19
2. Tsuji, T.: Water in K and M Giant Stars Unveiled by ISO,
Astron. & Astrophys., 376, L1 - L4, 2001 23
3. Tsuji, T.: Warm Molecular Sphere around Red Supergiant Stars - A
Missing Link between the Photosphere and Masering Water Clouds in
the Circumstellar Envelope, Proc. IAU Symposium 205 ‘‘Galaxies and
their constituents at the highest angular resolutions’’ ed. R. T.
Schilizzi, S. Vogel, F. Paresce & M. Elvis, ASP Conf. Ser.
pp.316 - 317, 2001 27
4. Tsuji, T.: Water in Emission in the Infrared Space Observatory
Spectrum of the Early M Supergiant Star μ Cephei,
Astrophys. J. Letters, 540, L99 - L102, 2000 29
5. Tsuji, T.: Water on the Early M Supergiant Stars α Orionis and
 μ Cephei, Astrophys. J., 538, 801 - 807, 2000 33
6. Tsuji, T., Aoki, W., Ohnaka, K.: Water Vapor in the Spectra of
Oxygen-Rich Giant Stars, Abstract of the 2nd Austrian ISO workshop
on ‘‘Atmospheres of M, S, and C Giants’’ ed. J. Hron & S. Hofner,
Univ. Vienna, pp.45 - 46, 1999 40
7. Tsuji, T., Aoki, W., and Ohnaka, K.: Water in Stars: Expected and
Unexpected, in Proc. ‘‘The universe as seen by ISO’’ ed. P. Cox &
M. F. Kessler, (ESA SP-427, Noordwijk), pp.229 - 232, 1999 42
8. 辻 隆: 「低温度星の分子光球 - ISO でみる新しい恒星像」, 天文月報,
vol. 94, pp.204 - 213, 2001 46

† 電子版では省略

5.2 M型矮星・褐色矮星

1. Tsuji, T. & Nakajima, T.: Transition from L to T Dwarfs on the Color-Magnitude Diagram, *Astrophys. J. Letters*, 585, L151 - L154, 2003
..... 59
2. Tsuji, T.: Unified Cloudy Models of M, L, and T Dwarfs -- Physical Basis of the Spectral Classification in the Substellar Regime, *Proc. IAU Symposium 211 'Brown Dwarfs'* ed. E. L. Martin, ASP Conf. Ser., in press, 2003 63
3. Tsuji, T.: Dust in the Photospheric Environment: Unified Cloudy Models of M, L, and T Dwarfs, *Astrophys. J.*, 575, 264 - 290, 2002
..... 67
4. Tsuji, T.: Unified Model Photospheres for Ultracool Dwarfs of the Type L and T, *Proc. 'Ultra cool dwarfs: New spectral types L and T'* ed. H. R. A. Jones & I. Steele, Springer, pp.9 - 25, 2001
..... 94
5. Tsuji, T., Ohnaka, K., Aoki, W.: Warm Dust in the Cool Brown Dwarf Gliese 229B and Spectroscopic Diagnosis of Dusty Photosphere, *Astrophys. J. Letters*, 520, L119 - L122, 1999 111