

赤色巨星研究の新展開 — ISO / SWSの初期成果 —

山村 一 誠

日本学術振興会特別研究員

〈東京大学理学系研究科天文学教室 〒113 東京都文京区弥生 2-11-16〉

e-mail: yamamura@astron.s.u-tokyo.ac.jp

—昨年 11 月に打ち上げられた宇宙赤外天文台 ISO は順調に観測を続けており、期待どおりの、あるいは全く予期されなかった新しいデータを研究者のもとに送り続けている。筆者は昨年よりオランダに滞在して、ISO から新しい成果が生まれているエキサイティングな現場に直接参加する機会を得た。本稿では、筆者の専門である赤色巨星の研究に関連する ISO の最新の成果を紹介する。

1. ISO / SWS の現場にて

1995 年 11 月 17 日、世界中の天文学者の期待を背負って、ISO は南米にある ESA (ヨーロッパ宇宙機構) の発射基地より打ち上げられました。ISO については天文月報でもこれまでも何度か取り上げられたことがあるので^{1), 2)}、ご存知の方も多いかと思いますし、また実際に観測を行なわれている方もいらっしゃるかと思います。ISO (Infrared Space Observatory) は ESA を中心としてヨーロッパ各国が協力して開発した天文衛星で、地球大気外での赤外線観測を目的とした衛星としては、IRAS (1983 年)、COBE (1989 年)、日本のプロジェクト IRTS (1995 年 3 月) に続いて 4 番目のものになります。しかし、以前の 3 つの衛星が空の一部あるいは全部をまんべんなく見る掃天観測を主としていたのに対し、ISO はその名の通り「天文台」として観測者のリクエストに応じて特定の天体を詳しく観測し、質の高いデータを取得することを目的として開発されました。ISO で観測される天体は、開発チームの関係者らによる優先プログラムの他、日本やアメリカを含めた一般の研究者から広くプロポーザルを受け付け、審査の上決定される一般公募プログラムがあり、まさしく地上の天文台と

同じようなスタイルで運用されています。

SWS (Short-Wavelength Spectrometer) は、ISO に搭載された 4 つの観測装置の一つで、波長 2.38–45.2 μm という近赤外から遠赤外までの広い範囲を波長分解能 $\lambda / \Delta \lambda = 200 \sim 30000$ で観測する分光器です。当然のことながらこのような広い波長範囲を同時に、かつこのような高い分解能で観測する装置はこれまでにないユニークなもので、大気の影響が無いこととあいまって、極めて貴重なデータを我々研究者に提供してくれています。

筆者は昨年 4 月より今年半ばまでオランダにある SRON-Groningen 研究所に滞在し、当地の研究グループに加わって、SWS で採られた赤色巨星のスペクトルを解析する機会に恵まれました。この研究所は SWS を開発し、現在もその運用の拠点となっているところです。毎週水曜日には関係者によるミーティングが開かれ、データ処理に関する議論や、観測したのホットな結果の紹介が行なわれます。また、毎月のように大小の研究会が開催され、そこでは SWS に限らず ISO による新しい成果が発表されます。これから紹介するようにそれらの新しい結果の中には全く予想外の発見もあり、そういう場合には発表者だけでなく参加者全員が知恵を絞って激しい議論がかわされます。続々と送

られてくる新しいデータとそこから生まれるサイエンス（あるいはデータ処理の裏にあるさまざまな問題点まで）をリアルタイムで見聞できる現場に当事者の一人として参加できたのは、極めてエキサイティングな経験でした。

本稿では、SWSによる観測結果を中心に、ISOが赤色巨星の研究にもたらした新しい発見のいくつかを紹介したいと思います。赤色巨星は、太陽の高々数倍の質量の星の進化末期の姿です。このような星では、星表面の物質が宇宙空間に流れ出していく質量放出現象が起きていて、これが星の運命を決める大きな要素になっていると考えられています。質量放出と星の進化の問題については、昨年9月号の橋本氏の記事³⁾に詳しく解説されていますので、ここではこれからの話題に関係することだけを、簡単に触れておきます。なお、今回紹介する観測結果は、いずれも星表面での酸素原子の存在量が炭素原子よりも多い「普通の」化学組成を持った星についてのものです。

図1に赤色巨星の表面からその周縁にかけての大まかな構造を示します。星の表面の物質は高温のため、通常は気体の状態にあります。何らかの理由（例えば星の脈動）によって星の表面から飛

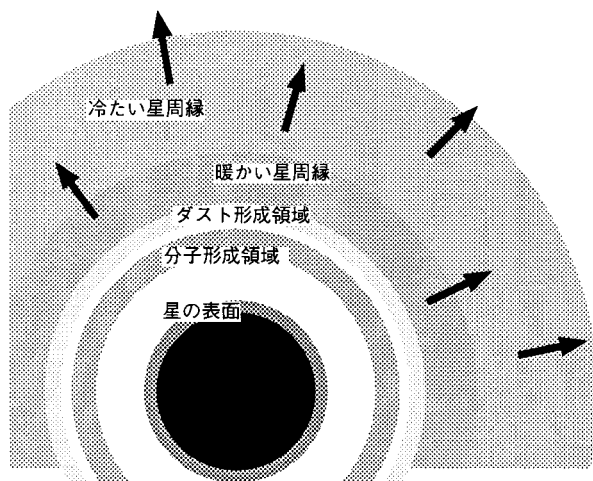


図1. 赤色巨星とその星周縁にかけての概略図。スケールは必ずしも正しくない。脈動している星の表面の上に分子形成領域（3節参照）がある。ダストが形成されると、中心星の輻射圧により加速されて、ガスとともに外側に広がっていく。

び出した物質は、離れるに従って徐々に温度が下がっていきませんが、1500～1000K程度まで冷えるとガスの中から固体微粒子（ダスト）が析出し始めます。一旦ダストが出来ると、これが中心星からの輻射の圧力を効率よく受けて、ガスを引き連れて周囲に広がっていきます。この広がっていくダストとガスの混合体を一般に星周縁と呼びます。星周縁は、ダストからの赤外輻射やさまざまな分子の回転遷移線の電波望遠鏡による観測などによって、その構造や内部の化学的状態などが研究されてきました。一方、星表面の物理化学は、これまで可視～近赤外領域での分光観測を主な拠り所としていました。SWSはその広い波長範囲により、この両者を同時に観測することが可能で、それぞれの成分について、また両者の間の関係について統一的に理解することが可能になります。

2. 星周縁中の結晶質シリケート

20年以上前に、初めて波長 $10\mu\text{m}$ 付近での星の分光観測を試みた人々は、多くの星のこの波長帯のスペクトルに幅の広いでっぱり、あるいは凹みがあるのを発見しました。その後の研究でこれは星周縁中のシリケート、すなわち酸化ケイ素のダストによるものであることが分かりました。シリケートというのは地球上の鉱物の主成分でもあります。ケイ素原子と酸素原子の結合部分が振動する時に $10\mu\text{m}$ や $18\mu\text{m}$ に対応する光を放出あるいは吸収し、それが観測されるようなでっぱりや凹みになります。IRAS衛星に搭載された低分散分光器LRSは、5000個以上の天体の $8\mu\text{m}$ から $23\mu\text{m}$ までのスペクトルを観測し、シリケートのダストが「普通」の化学組成を持つ星の星周縁に普遍的に存在することを明らかにしました。

ところで、これまでの観測で知られていたシリケートのダストのスペクトルは、滑らかで幅の広い形をしており、これらのダストはアモルファス、すなわちケイ素と酸素が乱雑に結びついた不規則

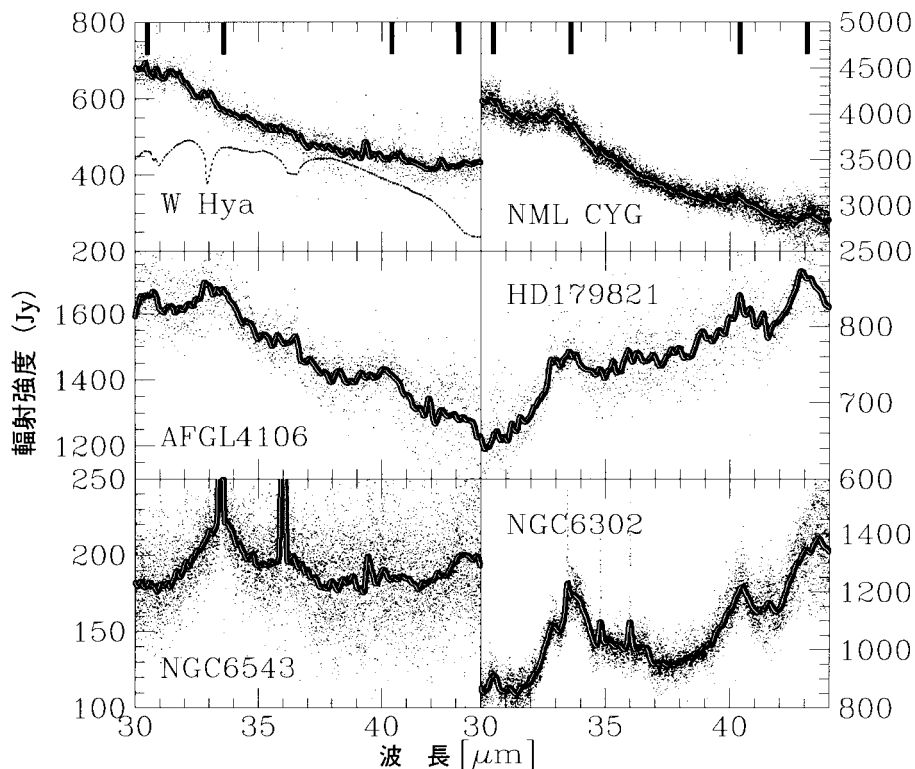


図2. 結晶質シリケートが見つかった天体のSWSスペクトル⁴⁾. (上段) 赤色(超)巨星, (中段) post-AGB 星, (下段) 惑星状星雲.

な構造を持つと考えられてきました. ところが, シリケートの特徴を示す天体 (その多くは赤色巨星です) を SWS で観測していた人々は, これらの天体のスペクトルの, 特に $20\mu\text{m}$ よりも長い波長のところに複雑な構造があることに気がきました⁴⁾. このようなスペクトルは赤色巨星だけでなく, 赤色巨星期を終えた直後の天体 (post-AGB 星) や, 惑星状星雲にまで見られることが分かりました. 図2はそのうちの代表的な天体6つの $30\sim 45\mu\text{m}$ のスペクトルを並べたものです. これらのうち, 上の2つは質量放出の激しい赤色(超)巨星, 真ん中の2つは post-AGB 星, そして下の2つは惑星状星雲です. いずれのスペクトルでもこぼこして, たくさんのスペクトル成分が見えています.

それではこの輻射成分の正体は一体何なのでしょう? これらの天体は皆 $10\mu\text{m}$ や $18\mu\text{m}$ 付近の

シリケートの特徴的なスペクトル成分が著しい天体です. また, 惑星状星雲のスペクトルには $33.5, 35, 36\mu\text{m}$ 付近に電離した原子の輝線が見られますが, この未知の成分はそれと比べてずっと幅が広く, 原子や分子などによるものはないことは明らかです. これらのことから, シリケートのダスト, ただしこれまで知られていたアモルファスでなく, 砂粒のような結晶化した粒子が候補として考えられました. そこで, 実験室で測定された各種の鉱物の赤外スペクトル⁵⁾と SWS で観測された天体のスペクトルを比べてみると, 星周縁のスペクトルに見られる輻射成分の波長と一致する成分を持つものが見つかりました. ただし, ある特定の鉱物によってスペクトル成分の総てが説明できるわけではなく, 星周縁中ではいくつかの異なった結晶体が混ざりあっていると考えられます. 結晶質のシリケ



イトはこれまで彗星などで見つかっていましたが、赤色巨星の星周縁に見つかったのは初めてのことです。

図2を良く見ると、スペクトル中の結晶質シリケートの成分の強度にある傾向があることに気がつきます。例えば、W HyaとNML Cygという2つの星は現在も質量放出を続けている現役の赤色(超)巨星ですが、明らかにNML Cygの方が結晶質シリケートの輻射成分は顕著です。これは質量放出の激しさが違うことによるものだと考えられています。実際、NML Cygの質量放出はW Hyaと比べて2桁くらい激しいものであることが、電波観測などのこれまでの研究から分かっています。他の天体の例と合わせて調べてみると、結晶質シリケートのダスト全体の量に対する割合は質量放出率の増加とともに急速に増大しているように見えます。一方Post-AGB星や惑星状星雲では、結晶質シリケートのスペクトル成分は、より明瞭に見えています。これらの天体は、赤色巨星より後の進化段階にあるもので、post-AGB星は赤色巨星の核燃焼が終わり、質量放出が止まってから数千年以内の天体、惑星状星雲は更にその後数万年以内の時間を経たものです。これらの天体で結晶質シリケートの輻射成分が著しい理由は2つ考えられます。一つは、質量放出が止まって星からの新しい物質の供給が無くなるために、星周縁内側の暖かいダスト(アモルファス)からの連続的な輻射成分が弱まり、相対的に結晶質シリケートの成分が露になってくること、もう一つは、放出されてから長い時間を経て星周縁中で結晶が徐々に成長し、星周縁ダスト中に含まれる結晶質の量が相対的に増えることです。

結晶質シリケートが赤色巨星の星周縁中で生成されるということから、星間空間や、ひいては太陽系周縁のダストの起源について、あるいは銀河系内の物質の存在形態について、今後新たな考察が必要になって来ることでしょう。また、これまで赤色巨星周縁でのダスト形成は、物質が冷却されるスピードが急過ぎて、ゆっくり結晶が成長する時間がないであろうと考えられていましたが、結晶

質が存在するという事実が明らかになった今、逆にこの領域でのダストの形成過程や、ダスト形成領域の物理的・化学的状況について改めて考え直す必要が出て来ました。なお、結晶質シリケートは赤色巨星だけでなく、生まれた直後の若い星の周りのディスクにも見つかっており⁶⁾、こちらは惑星系形成の問題と直接に結びついて来ます。若い星と赤色巨星の場合で、ダストの性質がどう違っているのかもたいへん興味深いところです。今後のさらに詳しいデータの解析や、新たな実験室での鉱物スペクトルの測定によって、スペクトルに見られる各成分が同定され、上記の問題が解決されてゆくことでしょう。

3. 星周縁中の水の検出

H₂O、すなわち水分子は宇宙において最も基本的な分子の一つであり、多くの低温度星の星周縁に存在していることが、電波望遠鏡による観測によって知られています。水分子は一見単純な構造をしていますが、量子力学的には非常に複雑なエネルギー構造をしており、各エネルギー準位間の遷移が吸収線あるいは輝線としてどのように観測されるのかということは、理論的に予測する他ありませんでした⁷⁾。水分子の遷移線は赤外領域にも数多く存在し、星周縁中でのエネルギーの流れや、電波で観測されるメーザーの励起に重要な役割を果たしていると考えられます。ところが、地球大気中に豊富に含まれる水蒸気が邪魔をして、地上から水分子の赤外ラインの観測を行なうことはほとんど不可能です。大気の影響のないISOによる観測は、星周縁に関わらずさまざまな天体における水分子の状態について研究するための絶好のチャンスです。

図3に示すのは、前にも登場したW Hyaにおいて初めて検出された水の遠赤外線ラインです⁸⁾。もともとこの論文の著者たちのねらいは、この図に示したのとは別の何本かの水のラインを高分解能で観測し、星周縁の物理状態を探ろうというも

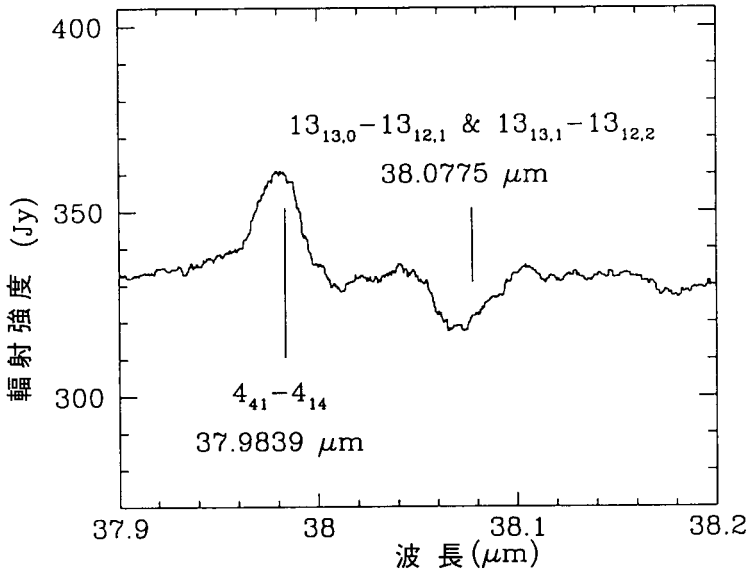


図3. 水 (H_2O) 分子の遠赤外線⁸⁾

のでした。図3に示した波長域は、ダストからの輻射の強度を見積もるための「ラインは受からないであろう」部分として観測されたそうです。ところが、結果のスペクトルには予想に反して(!?)見事に2本の水のラインが、しかも一本は輝線として、もう一本は吸収線として受かりました。この結果は、これまでの水分子ラインの性質に対する我々の理解がいかに不十分なものであったかを認識させてくれます。

図3に見られる輝線と吸収線の違いは、それぞれのラインに関係するエネルギー準位の大きさに起因するものです。左側の輝線はエネルギーが低い準位間の遷移で、星周縁外側の温度の低い部分でも十分励起されていると考えられます。一方、右側の吸収線（実際には2本のラインが混ざりあっている）はエネルギーが高い準位間の遷移で、中心星に近い高温・高密度の領域のみで励起されているのでしょう。前者の場合は広がった星周縁が暗い宇宙を背景として光って見えるのに対し、後者では励起されている領域のすぐ裏側に星あるいは高温のダストからの輻射があるために吸収として

見えるわけです。

このように励起エネルギーの異なるラインを観測することで、星周縁中のいろいろな部分の情報をそれぞれ選択的に取り出し、星周縁の構造を調べることができます。W Hyaの他にも、いくつかの明るい赤色巨星について同様の観測が行なわれており、ISOの長波長側を担当するもう一つの分光器LWSの観測と合わせて、星周縁の物理状態や水分子の分布、さらに水分子を原料とした化学変化についてより統一的理解が進むことでしょう。

4. 第三の領域 — 分子形成層

上にあげた2つの事柄はISO/SWSによって得られた主に星周縁に関する新しい知見ですが、もちろんSWSの威力はそればかりではありません。星の表面やそのすぐ外側の物理状態についても新しい認識が得られつつあります。その一つの例が分子形成領域の発見です⁹⁾。図4に示したのはペガス座ベータ星 (β Peg) という星の波長 $3\mu\text{m}$ 付近のスペクトルです。一番上のグラフ(a)はSWSによる観測の結果で、CO, OH等非常に多くの分子のラインが吸収として見えています。真中のスペクトル(b)はモデル計算によって得られた、観測を最も良く再現するスペクトルです。一番下のグラフの実線は、aからbを引いた残差で、もしモデルが完全に観測を再現しているのであれば、一直線になるべきです。ところが、実際の結果は見ての通り直線から外れていて、ノイズ等の影響を別にしても、モデルに考慮されていない別の要素が残っていることが伺えます。この残差のスペクトルの $2.7\mu\text{m}$ 付近のカーブに特に注目して、これに適切な条件を与えて計算した水分子のスペクトル

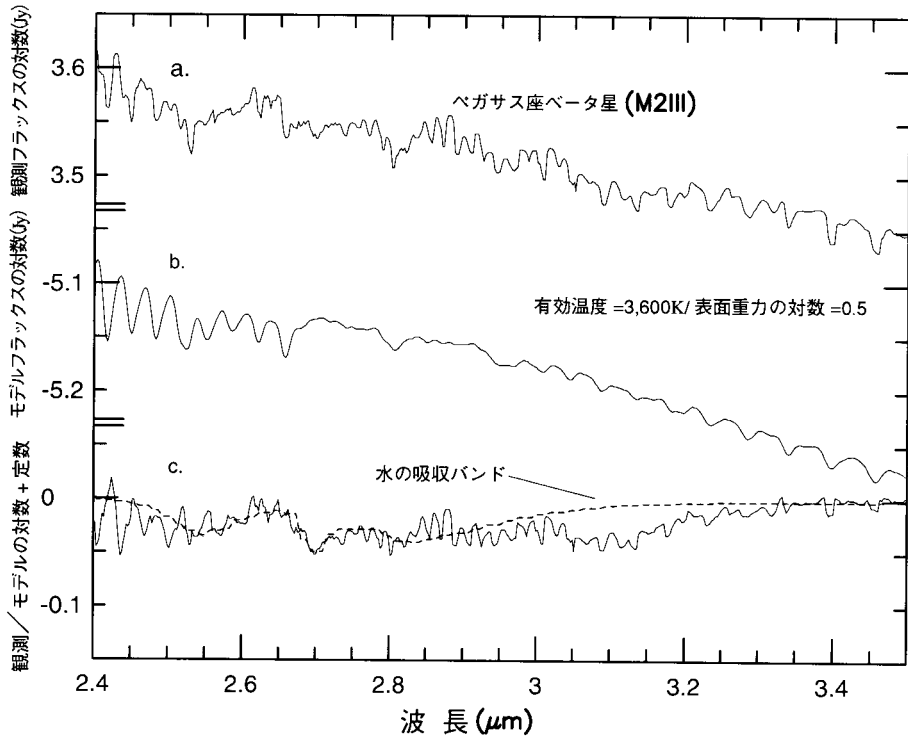


図4. β Peg の $3\mu\text{m}$ 付近のスペクトル⁹⁾. (a) SWS による観測結果. (b) モデル計算. (c) 実線: 観測-モデル, 点線: 分子形成層を仮定した水分子のモデル計算によるスペクトル.

(点線)を重ねてやると、ピッタリと一致することが分かります。

これは、赤色巨星の大気構造を考える上で非常に重要な発見です。この β Peg という星のスペクトルタイプは M2 とされています。スペクトルタイプは、非常に大雑把に言ってしまうと星表面の温度を表しています。この星の有効温度は3千数百度であると考えられており、この温度はもちろん太陽などと比べるとずっと低いものですが、赤色巨星としては比較的高温で、これくらい高温の星の大気中には水分子は存在し得ないというのが、観測的にも、理論的にもこれまでの定説となっていました。図4に示されたモデル計算によれば、 β Peg で見つかった水分子は励起温度が 1250 K で、星の半径の2倍程度外側にあるとすると観測をうまく説明できることが分かりました。一方、この星はダストの輻射成分はそれほど強くなく、

星周縁はあまり発達していないと考えられます。さらに、このような 1000 K 程度の励起温度を持つ分子からのスペクトル成分が、一酸化炭素 (CO)・二酸化炭素 (CO_2) などの他の分子でも、また β Peg 以外の星においても存在することが示されました。

以上の結果は、星の表面より更に外側に分子を含んだ暖かいガスの層があり、その中で新しい分子が作られているのであると解釈されます。このような分子形成層は、これまでにも地上から行われた高分解能分光観測の結果から、その存在が指摘されてきました¹⁰⁾。それによれば、この中間領域は星表面の脈動や、星周縁の外側へ広がっていく運動とは独立しており、また温度も両者の中間にあるとされています。ISO/SWS の観測結果はこの分子形成層の存在を確認するとともに、水分子や二酸化炭素分子のように地上からは絶対に観測



できない分子のスペクトルから、これらの分子がこの中間領域において新しく生成されているということを示唆しています。

この分子形成領域の存在は、我々に新たな問題を提起します。そもそも、このような中間的な領域がどのようにして星の大気層や星周縁と独立に、安定して存在できるのかは全くの謎です。一方でこの領域が星表面と星周縁を結びつけ、質量放出の仲介をしていることは容易に想像出来ることで、その具体的な役割を明らかにすることは質量放出のメカニズムを理解する上で重要な課題となるでしょう。さらに、このような分子形成層が星表面から星周縁にかけての分子生成の化学反応にどのように寄与しているのかは星間化学の面からも非常に興味深いことです。今後の詳細な研究により、これらの謎が解き明かされていくことを期待したいと思います。

5. これからの展望

筆者が大学院に入ったころ「君はラッキーだね。ISOで博士論文が書けるよ」などと言われたことを思い出します。しかし、さまざまなトラブルのために計画は再々延期され、ようやく打ち上げられた時には、すでに筆者は大学院を修了していました。それから約1年半、実際の観測が始まってから1年以上が経ちました。装置を冷却する液体ヘリウムの量で決まる寿命は約2年間と言われていたから、もう半分以上過ぎたこととなります。いくつかの小さなトラブルがあったものの、現在も4つの装置総てが動作し、毎日新しいデータを我々に送り続けてくれています。博士論文には間に合わなかったものの、この世界に生き残り、ISOのデータ解析に専念できる充実した研究生活を送っていただけるのは、やはりラッキーであるというほかにないでしょう。ISOが全観測期間中に取得するデータは膨大なものになり、研究者達は今後数年間はこのデータの山と格闘することになるでしょう。これまでに発表された結果はその中のほんの一部に

過ぎず、本稿で紹介したのはそのまたさわりの部分だけです。筆者自身の知っている範囲でも、本稿に書きたかったにも関わらずまだ論文として発表されていないためにあきらめざるを得なかった興味深い結果がいくつもあります。今後も続々と発表されるだろうISOの成果について、ぜひ注目して下さるようお願いします。

ISOの開発・運用に携わっているすべての方々に深い感謝の念を捧げます。Rens Waters博士、辻隆教授には図の原版を提供していただいた他、議論を通じてさまざまなお話を伺いました。SRON-Groningen研究所とde Jong教授には筆者の滞在中さまざまな面でお世話になったことにお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田辺俊彦 1993, 天文月報 86, 54
- 2) 菅井肇, 田辺俊彦, 奥田治之 1996, 天文月報 89, 355
- 3) 橋本修 1996, 天文月報 89, 382
- 4) Waters, L.B.F.M. et al. 1996, A&A 315, L361
- 5) Koike, C. et al. 1993, MNRAS 264, 654
- 6) Waelkens, C. et al. 1996, A&A 315, L245
- 7) Deguchi, S. & N-Q-Rieu 1990, ApJ 360, L27
- 8) Neufeld, D. A. et al. 1996, A&A 315, L237
- 9) Tsuji, T. et al. 1997, A&A 印刷中
- 10) Tsuji, T. et al. 1988, A&A 197, 185

Recent Progress in the Research of Red-Giant Stars — First Results of ISO/SWS — Issei YAMAMURA

Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

*Department of Astronomy, University of Tokyo
2-11-16 Yayoi, Bunkyo, 113 Tokyo, JAPAN
e-mail: yamamura@astron.s.u-tokyo.ac.jp*

Recent progresses in the research of red-giant stars based on the Infrared Space Observatory (ISO) are reviewed. The ISO was launched in November 1995. It has been working perfectly so far and provides a plenty of exciting data to the astronomers. Three such topics obtained by the Short-Wavelength Spectrometer are reported; discovery of crystalline silicate in the circumstellar envelope, detection of water vapor lines in the far-infrared region, and presence of warm molecular forming region above the photosphere.