

炭素星分光分類から赤外炭素星まで

平井正則

福岡教育大学 〒811-41 福岡県宗像市大字赤間 729

e-mail: hiraim@fueipc.fukuoka-edu.ac.jp

最近の低温度星の赤外や電波波長域の観測成果にはめざましいものがある。そこで、これまでの低温度星の可視光、近赤外分光観測や分光解析の側から低温度星の分光分類から今日までの歩みをかなり自由にとりあげて考えてみた。赤外や電波域での低温度星の観測の進行は速く、さらには ISO (赤外線天文台) や JNLT への期待はきわめて大きい。

低温度星分光学に関する平衡のとれた価値あるまとめが 1993 年¹⁾によって書かれているので、ここでは低温度星の最新の赤外、電波観測の展開を頭において低温度星研究のいくつかを考えた。

炭素星分光分類

無数の星のスペクトルをあるまとまった考えのもとに分類し、その分類を可能にしたパラメーターの物理的な意味を明らかにすることで恒星の物理的性質を研究する分光分類の方法は 1950 年代の恒星の物理観測での主な手法であった。



写真 1983年カナダ・トロントの研究会で肩を組むキーナンとモルガン。後ろにマゼラン雲の炭素星を対物プリズムで観測したパチカンのマッカーシーが見える。

それは多数の恒星の性質を質的に分類することでその代表的な恒星の研究を基礎に多数の恒星の性質を知る方法としてきわめて合理的で重要な方法であった。

天文学には発見の時代と流れをつくる時代とある。天文学の分光学の時代とは流れを作る時代に近く、その点で近年学ぶものが多いと考える。そこで、分光分類学を基礎に進んだ低温度星研究の系譜を簡単にふりかえるために炭素星の分類史を見てゆく。

炭素星の分類はセッキにはじまり、ハーバード分類で R-N 型として分類された。1928 年シェインはこの R-N 分類を一層精密化した。

一方、1941 年にはキーナンとモルガン (写真) は C 分類と呼ばれる炭素星の新しい分類を提案した。彼らの新しい分類とは温度系列をナトリウム D 線の強度で決めるとともに、炭素の元素組成量の指標と考える 5635 Å の C₂分子の帯吸収強度を導入した、いわゆる、炭素星スペクトルの 2 次元分類を行なった。また、1971 年には炭素星のような低温度星の主な放射波長域が赤外にくるのだから可視光よりも、写真赤外域に注目して分類を行ったのはリッチャーである。

1972 年 Yamashita²⁾は C 分類に水素、金属元素、CN、CH、C₂、炭素同位体分子などの吸収強度、を考慮して、C 分類を改良し、きわめて完成度

の高い岡山分類を完成した。

こうした分類がうまく行われると次には分類で代表される恒星の詳しい分光解析によって分類にかかる分光特性から温度、光度などの恒星の重要な物理量を得たり、恒星の元素組成の違いなどを明かにし、恒星の内部構造や恒星の進化の理論と結びつけることになる。ここで、分光解析には恒大気モデルがきわめて有効な役割りを果たす。簡単には恒星大気モデルとは必要な限りの簡単な物理的仮定のもとに分光特性を再現することによって恒星の物理量を決定するものである。

たとえば、1964年 Tsuji³⁾は低温度星の M, S, C 型の違いが C, O, N の元素組成量の違いによるというそれまでの推論を彼の大気モデルを使って具体的に数値的に証明した。もちろん、それ以降も彼は精密な低温度星大気モデルを基礎に近赤外域での高分散スペクトル観測を得て、炭素星の詳しい元素組成の決定を行った。

岡山分類で観測された炭素星はおもに岡山 188 センチ鏡クーデ分光器で分散度 60 Å/mm でいどで得られた可視光スペクトルで 200 星ほどであった。

この分類の後、これらの観測星のうち輝炭素星 60 星余はこの岡山分類の基礎となる分光標準星として、高分散スペクトルの観測の対象となりこ

れらの炭素星の詳しい分光解析を行うことで岡山分類における炭素星の元素組成や物理的な研究が進められた。たとえば、岡山分類のもとに元素特異星は相当の元素の異常なのかそれとも大気構造の異常に伴うものかを決定するなどである。

このあたりの低温度星研究の詳しい事柄は 1970 年 Fujita⁴⁾の低温度星のまとめに論じられている。

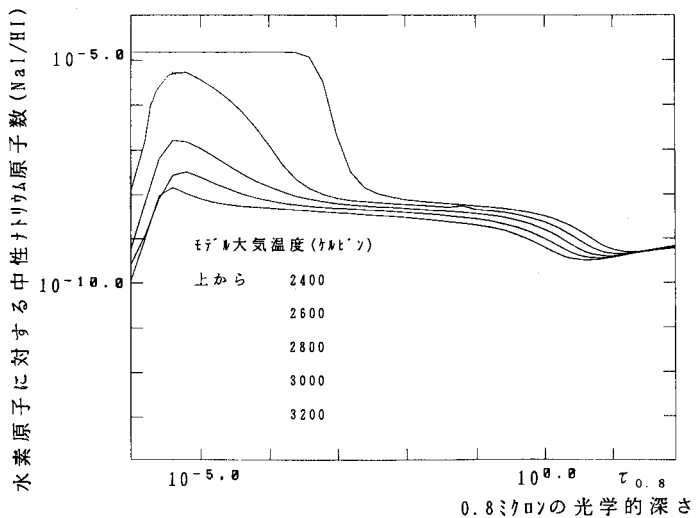
ここで、炭素星分類の温度系列についての検証を紹介してみる。

ナトリウム D 線が温度に敏感なことは次のように示すことができる。

ナトリウム D 線は中性ナトリウム原子の基底準位をふくむ遷移による共鳴線である。したがって、この吸収線は出発する準位にある原子の個数に比例して強くなるので、中性ナトリウム原子の数が多いほど強い。中性ナトリウム原子の 1 回電離のエネルギーは 5.14 eV (電子ボルト) と低く、つまり、ナトリウム原子は簡単に電離する。このため、宇宙では金属元素は C, N, O について金属元素が多いこととともに、この電離しやすいナトリウムは低温大気の子供供給源の候補となるほどである。図 1 は辻の炭素星大気モデルを参考に計算したものである。

したがって、図 1 からわかるように低温の大気

図 1 炭素星大気での中性ナトリウムの分布
炭素星大気での 2400K から 3200K の 5 種のモデル大気温度での深さによる中性ナトリウム原子の相対個数分布を示す。スペクトルはこの数を積分するのだから低温な大気ほどナトリウム D 線が強いことがわかる。



ほどナトリウム D 線は強いはずである。ところが、くわしいことは省略するが炭素星の測光観測や分光観測の結果から得られた有効温度と C 分類の温度系列は必ずしも相関しないらしいことがわかった。正確にはナトリウム D 線強度は温度と必ずしも関係しないのである。たとえば、極端に強いナトリウム D 線をもつカシオペア WZ 星は中くらいの強度のりょうけん座 Y 星と比べると有効温度がナトリウム D 線の強度の違いほど高くないのである。

C 分類の温度系列は有効温度と相関しないことはきわめて重大な問題であった。そこでいろいろな議論はあるがナトリウム D 線の強度は星を取りまく塵をふくむ殻による吸収の結果が影響しているとする意見もあった。

他にも、C 分類について、C 分類早期の C 0 とか C 2 くらい、ヘンリードレイパー星表で早期 R 型星は星が一樣に分布せず、ひとつのグループになっているとか、C 5 前後の星の有効温度はほとんど変わらないといった議論が行われた。

そこで分類の物理的な意味を検討するにはもつと暗い星まで観測したり、観測波長域を広げて近赤外での分光観測を行うこと、分類の基本となるスペクトル線の重合構造を明らかにするため高分散スペクトル観測や解析の数を増やすことであった。しかし、その考えは評価されず、むしろ、観測量は減っていった。

また、恒星大気モデルの精密化によって元素の測定精度があるていど上がって見ると、たとえば、低温度星の C, N, O 元素の違いがかなりみかけのスペクトルを変えることがある。

たとえば、次の節で我々の FeH 分子観測の結果からわずかな組成の違いが大気の透明度や吸収線の強さ、吸収線の存在する波長域の組み合わせによって、かなりスペクトルの様相を変えることが示せる。また、逆に低温度星が M, S, C 型に区別できても同じミラ型という変光星に属している。これは C, N, O 組成の違いで大気構造が違っ

ているのに変光のメカニズムには影響しないのである。

近赤外波長域での FeH 分子観測

1977 年ウイング等は 1 ミクロン波長域の低温度星スペクトルの観測を行ないある M 型主系列星に波長 0.99 ミクロン近くに強い幅のある未同定吸収線を発見した。のちにこれは FeH 分子の振動一回転スペクトルで、分散度が低いため多数の振動一回転線が重合して幅のある吸収線に見えることがわかった。FeH 分子の実験室データの不足もあってウイング等はまず太陽黒点での FeH 線観測も行った。恒星での鉄の元素組成の測定はきわめて重要であり、ふつう、それには中性鉄原子線スペクトルを測定する。しかし、低温で分子しか見えない大気では鉄量の測定には FeH 分子の観測が重要となる。1978 年 Clegg⁹⁾等は新しい実験室のデータをもとにミラ型変光星で S 型のはくちょう座 R 星に強い FeH 吸収線を発見した。我々も新しい実験データを独立に入取して、まず、太陽黒点での FeH 線の確認を行い、さらに M 型主系列星、M, S, C 型星で FeH 分子の観測を行った。

観測は岡山天体物理観測所の 188 センチ鏡とクーデ分光器に CCD 素子を装着して行った。その結果 M 型主系列星や S 型星のふたご座 G 星に FeH 吸収線を同定した。

図 2 から分かるように 1 番上と 3 番目の星には確かに上部に書き入れた FeH 分子帯に一致する所に吸収線が確認できる。そこで確かに存在すると考えられる 3 番目の主系列座 R 星について実験室データをもとに再現してみると図 3 になる。

図 3 は 9900 Å の FeH 分子帯ヘッド部分の拡大図みたいなもので細かい遷移に関するデータは図下部に示す。実線が観測、点線(青)は数値計算の結果で良く一致していて、確かに FeH 分子が S 型星大気に存在することを示している。ではなぜ S 型星や M 型主系列星に見えて M 型巨星や炭素

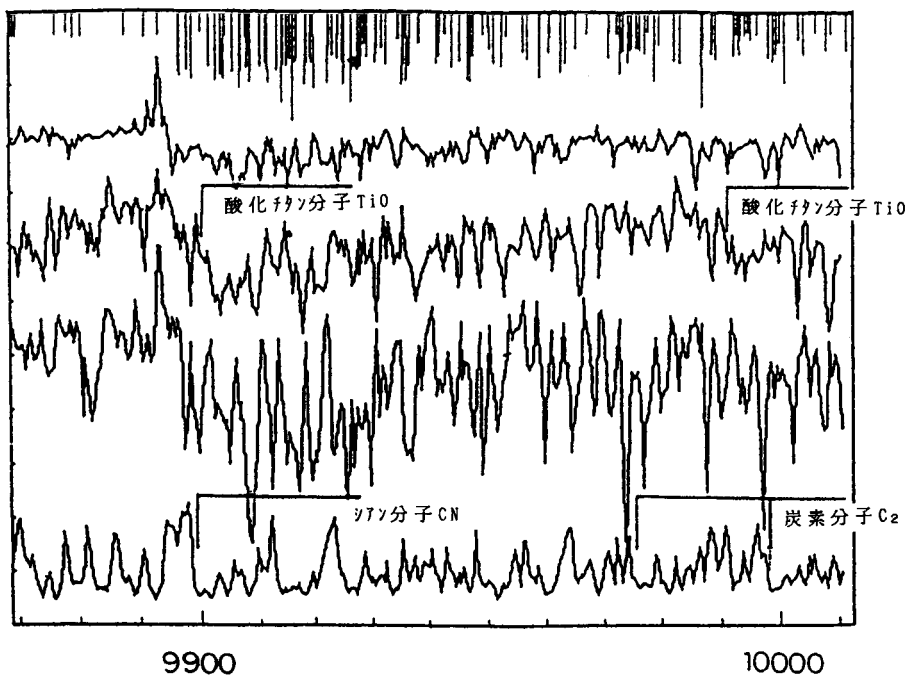


図2 FeH(0, 0) 振動回転吸収線同定

上から BD+36°2147 (M 型主系列星), かに座 RS 星 (M 型巨星), ふたご座 R 星 (S 型星), りょうけん座 Y 星 (炭素星) の 9870A~10006A のスペクトルである。上部に実験室で観測された FeH 分子振動回転線の波長位置と強度を線の長さで示す。また, かに座 RS 星スペクトルの上部には赤波長 (右) に続く M 型星特有の TiO 分子帯をりょうけん座 Y 星スペクトルの上には CN, C₂ 分子吸収帯の位置を示している。

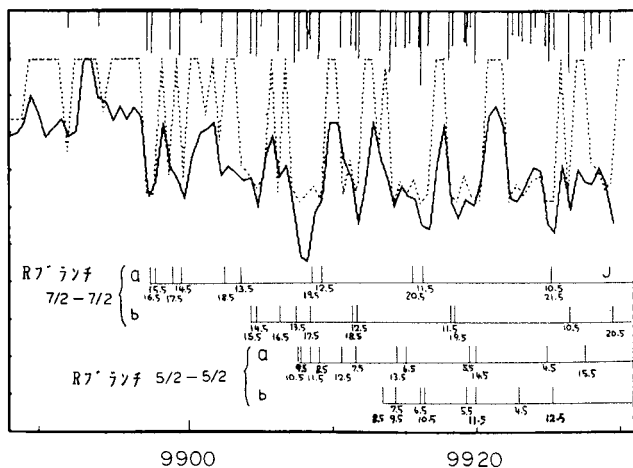


図3 FeH(0, 0) 分子吸収帯のふたご座 R 星の観測スペクトルと合成スペクトルの比較

星に見つからないのであろうか。その理由のうち炭素星や M 型星に見つからないのは図 3 に分かるように強い CN, C₂ や TiO 帯のためにこの細くて弱い FeH 線はかき消えて見えないことが分かる。さらには辻の解離平衡理論をもとに FeH と

関連する分子の分圧を計算したのが図 4 である。図 4 は巨星大気を想定したときの FeH 分子圧の C/O 比 (M, S, C 型) に対する変化である。主系列星では圧力が高いため当然 FeH は多くなる。一方, 巨星では FeH 分圧は C/O 比に対してほと

んど一定であるが、M型ではTiOがC型ではCN, C₂がFeHを上まわり、C/O比が1近くのS型星ではCN, C₂やTiOが少ないために見えることになる。この性質はどのような種類の分子の吸収帯が問題の種類分子の近くにくるかによって大きく見え方が異なる。とくに水素を相手とする金属元素の2原子分子CaH, AlH, MgHでは単に解離エネルギーばかりでなく、どの波長域にあるかによって見え方が異なるが、実際には存在していることが結論された。(Hirai等1992⁸)

続々と発見される赤外炭素星

1987年口径60センチの赤外望遠鏡を載せた赤外天文衛星IRASの出現は低温度星観測天文学に飛躍的な進歩をもたらした。また、この赤外天体掃天によって得られた赤外線源に電波望遠鏡が向けられ、分子分光により、赤外線源の詳しい速度場や空間構造が明らかになりつつある。このすべては現在進行中であるので可視光分光にかかる興味ある天体についてのみ取り上げてみる。

図5は1994年Waters等⁷によってIRASの60マイクロで観測された輝炭素星うみへび座U星の周りに発見される塵殻である。この星は輝炭素星として可視光スペクトルは詳しく研究されている星である。彼らの解析によるとこの殻の年齢

は12,000年、質量放出は $5 \times 10^{-6} M_{\odot}$ /年でこの星は中質量のAGB(漸近的巨星枝)上にある星で何回かの熱パルスによる大量の質量放出の結果という。

さらに、図6はBergman等⁸による輝炭素星のたて座S星のミリ波観測結果を説明できる星を取りまく殻のモデルで、彼らは非一様な密度をもつ球殻モデルが観測結果に最も良く一致することを見いだした。この星も炭素星の可視光観測では知られた天体である。1993年Yamamura等⁹による野辺山の45メートル電波望遠鏡を使い、CO輝線(J=1-0線でミリ波)で観測した。

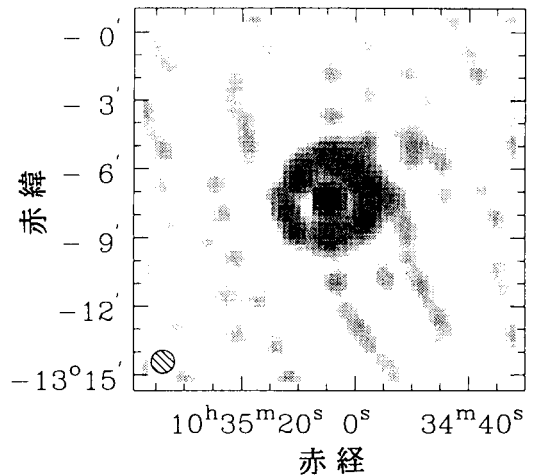


図5 うみへび座U星の60マイクロン輝度分布

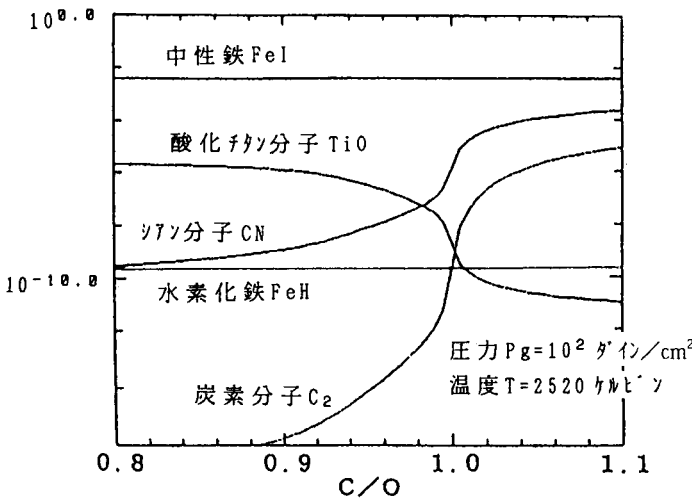


図4 巨星の場合のM, S, C型星大気でのFeHとTiO, CN, C₂分子の分子圧。

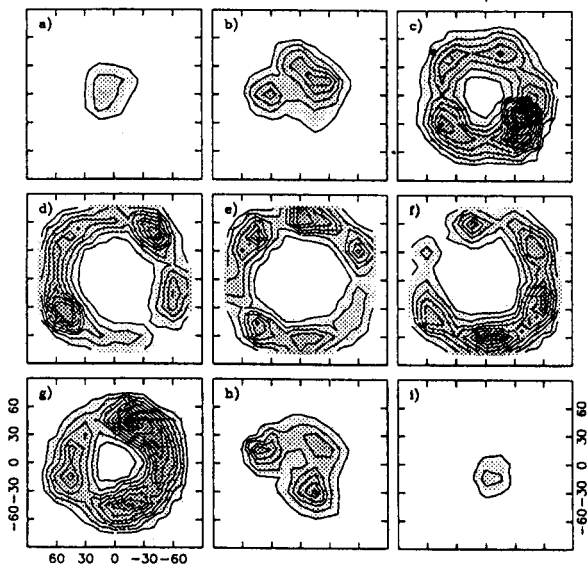


図6 たて座S星の観測CO輝線を説明するモデル

この星を取りまくCO分子殻の観測結果からこの星を取りまく殻は大きさが約0.5光年厚さ0.02光年の薄い殻であることが結論された。さらにこの殻は1万年前に $1.3 \times 10^{-4} M_{\odot}$ /年という極端に大きな質量放出をした時できたものであるという。このような事件はAGB星の進化の様子が尋常な核反応なりによって進行するのではなくかなり

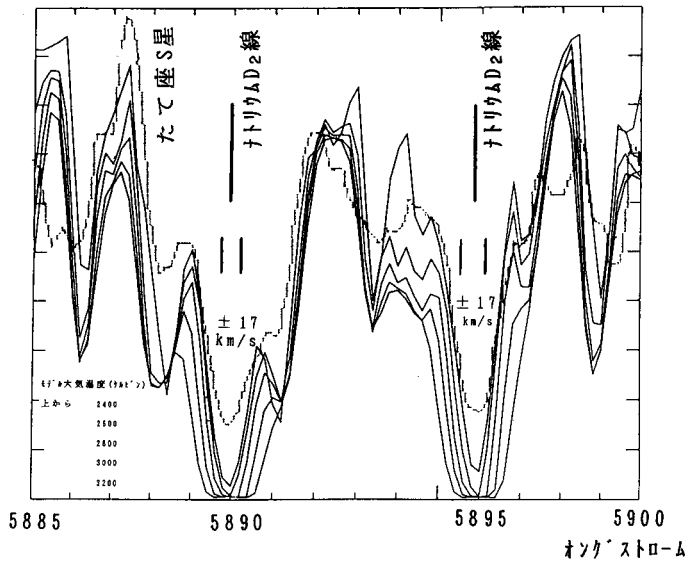
極端な質量放出を伴う進化の過程を経て行く点できわめて興味ある結果といえる。このように輝炭素星で分離殻をもつと思われる炭素星はオルフソン等によると他にははくちょう座TT星とポンプ座U星の2星であるという。

赤外星周殻とナトリウムD線プロフィール

前節でナトリウムD線の強度が温度相関を示さないのは厚い星周殻での吸収に影響されているからかも知れないという意見を紹介した。

図7はたて座S星の観測されたナトリウムD線と炭素星大気モデルでの計算されたナトリウムD線プロフィールであり、星の大気のコラム数密度は 10^{26} ていどに対して電波の分子数密度 10^{16} ていどだから、残念ながらこの波長分解能とコラム数密度ではこの星についてナトリウムD線による吸収を観測することは難しい。縦線は電波で観測されているCO殻の膨張速度17 km/sを参考のために図に書き込んだものでほとんど線幅内にはいってしまう。

図7 炭素星たて座S星のナトリウムD線の観測といろいろな温度の炭素星の比較実線のプロフィールは辻の炭素星大気モデルを参考に有効温度が3200Kから2400Kまでの5種について計算したものである。青い点線はたて座S星の観測ナトリウムD線である。



ちなみにナトリウム D 線の分光器スリット幅にあたる大きさは 0.37 秒角、電波の CO 殻は 60 秒角だから、このていどの距離にある炭素星で感度さえ高ければ何らかのナトリウム D 線による殻の証明も観測可能かもしれない。

我々が得ている 20 星ほどの輝炭素星の複雑なナトリウム D 線プロフィールは現在赤外、電波で観測される殻ばかりでなく、これらの低温度星に付随しているかも知れない双極流や傾いた円盤の構造に関係している可能性がある。星周殻がナトリウム D 線の強度にどのくらい影響しているかの結論はまだ難しいが輝天体のナトリウム D 線プロフィールには多くの情報が書き込まれていることは間違いないであろう。

再び、観測的な M → S → C 進化の問題

詳しく論じる紙数はないが赤外観測で得られた多くの星周殻の放射は最初、中心星の可視光放射エネルギーに比べれば単なる赤外のフラックスの膨らみに見えた。しかし、可視光での放射エネルギーに匹敵するエネルギーが赤外で放射されるような赤外線星が続々と発見され、中心星の M, S, C 型星の進化に関わるような観測結果が生まれつつある。赤外放射と可視光放射のエネルギーの大きさは現在、星毎に連続的に変化しており、中心星の可視光放射をこえる赤外放射する星周塵の天体の存在も確認され、赤外放射殻に埋もれた天体の数も増えそうな勢いである。中心星が見えないなら中心星が M, S, C 型かを特定できない。こうして、赤外放射のエネルギーの大きい天体こそ中心星である低温度星進化に重大な証拠を与えるのかも知れない。たとえば、中心星は炭素星で殻が M 型と見られる天体の発見など、観測される星周殻の生成と進化の結論にはもうしばらく時間が必要であろう。

可視光で得られた M, S, C 型星の進化の問題も含めて、今後の ISO や JNLT による赤外の観測は低温度星進化の重要な事実を提供し続けるであ

ろう。

参 考 文 献

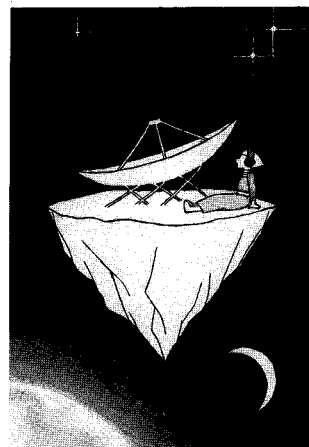
- 1) 辻 隆, 1993, 天文月報 86, 81
- 2) Ymashita, Y., 1992, Ann. Tokyo Astron. Obs., 13, 169
- 3) Tsuji, T., 1994, Ann. Tokyo Astron. Obs., 9, 1
- 4) Fujita, Y., 1970, "Interpretation of Spectra and Atmospheric Structure in Cool Stars", Univ. Tokyo Press
- 5) Clegg, R. E. S. et al., 1978, ApJ. 226, 931
- 6) Hirai M. and Chinami K., 1992, Proc. Japan Aced., 68, Ser. B, 4
- 7) Waters, L. B. F. M. et al., 1994, Astron. Astrophys. 281, L1
- 8) Bergman et al., 1993, Astron. Astrophys. 268, 685
- 9) Yamamura, I. et al., 1993, PASJ, 45, 573

From Carbon Star Classification to Infrared Carbon Stars

Msanori HIRAI

Recent infrared and radio observation of cool stars are very important for studying these stars. Several topics and simple review of cool stars related to the advance of stellar classification and spectroscopic study.

According to recent observation of infrared and radio observation we can expect rapid progress in studing cool stars in observation of the ISO and JNLT.



どこかでだれかが呼んでいるかも……
小北純子 (和歌山県)