



光学炭素星の星周 C₂ スワンバンド吸収線

泉 浦 秀 行

〈国立天文台 岡山天体物理観測所 〒719-0232 岡山県浅口郡鴨方町本庄 3037-5〉

e-mail: izumiura@oao.nao.ac.jp

活発な質量放出を起こしている赤色巨星の一種である炭素星の可視域スペクトル中に、これまで知られていなかった線幅の狭い C₂ 分子スワンバンド吸収線群が HIDES によって明瞭に検出されました。視線速度や励起温度の解析から星の大気中ではなく、星から少し離れた星周領域にある C₂ ガスによって形成された吸収線群であることが判明しました。その後の系統的な観測と解析により、この C₂ 吸収線群は主に中心星の温度が 2800 K より低く、大気中の炭素の数が酸素のその 1.1 倍以上ある星に見出されることが明らかになりました。光学域の原子吸収線の解析に基づき赤色巨星の質量放出現象の探究が始まってから 40 有余年、質量放出流に伴う分子バンド吸収線群の存在がようやく光学域で広く認められることとなったのです。この発見により質量放出流の流出速度が極めて正確に測定できるようになるとともに、これまで未探査だった炭素星のまわり、星の半径の十倍から百倍 ($10^{14} \sim 10^{15}$ cm) の領域を可視域から観測的に探る一つの可能性が開けました。今後さらに、これら天体における炭素同位体比の独立な決定、ミラ型変光星への展開、さらに光学観測に基づく星周化学研究などへの発展が期待されます。

1. はじめに

一般に恒星は生まれた時の姿をそのまま保持することはなく、大なり小なり自分自身の身を削りながらその一生を生きて行くと考えられています。中・小質量（現在はおよそ 0.8 ~ 8 太陽質量と言われています）を持った星の場合には、赤色巨星段階を経たのち漸近巨星枝（Asymptotic Giant Branch, 以後「AGB」）段階へと進むと、その表面から宇宙空間へと物質が流れ出る「質量放出」流が活発に ($\geq 10^{-8}$ 太陽質量/年) 起こることが知られています。その結果中・小質量星は、主系列星になった時にはチャンドラセカールの限界質量（~ 1.4 太陽質量）より重かった場合にも、最後には白色矮星になるだろうと考えられています。一方、初めの質量と白色矮星になった時の質量の差が星周空間に還元されるわけですが、星の表面には内部の核反応で生成された新たな物質が汲み上げら

れているため、質量放出は星間物質の循環だけでなく化学組成にも影響を与えることになります。つまり質量放出は恒星と星間物質をつなぐ一つの大切な架け橋なのです。このように重要な質量放出現象なのですが、その物理的な仕組みについては、これまでの様々な研究にも関わらず依然としてよく分からないところが多く残っています。その理解のためには、多方面からの観測事実を一つ一つ積み上げて行くことが必要不可欠と考えられます。

さて、このような質量放出の直接の結果として、星のまわりには表面から遥かな星周空間に至るまで、連続的に広がった物質の層が形成されます（circumstellar envelope, 以後「CSE」）。可視、赤外、ミリ波の観測技術の発展とともにそれら CSE を詳しく調べることで、質量放出現象、特に過去 1 万年程度の時間にわたる質量放出率とその変遷に関し、近年様々なことが分かってきました（図 1）。まず光学域の原子の吸収線を使って、広く M 型星

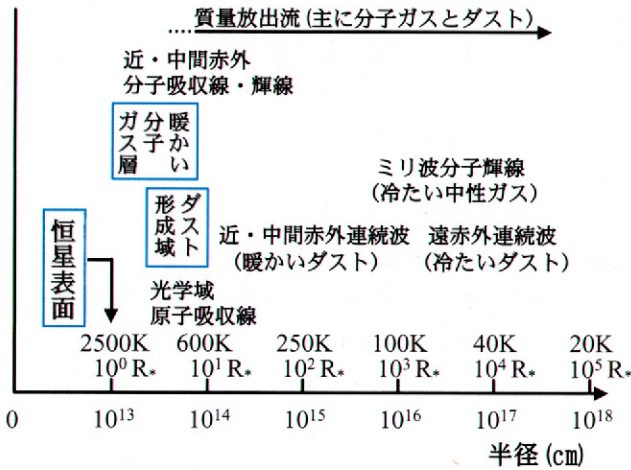


図1：星周層 (Circumstellar Envelope, CSE) のこれまでの探査の模式図。図中の数値は概略値であることに注意されたい。

について質量放出率が調べられました (炭素星*ではうまく調べられませんでした)。続いてミリ波分子輝線、特にCO輝線の観測が進展すると、星の半径のおおよそ千倍から一万倍の $10^{16} \sim 10^{17}$ cm の領域が良く探査され、M型星でも炭素星でも過去数千年の平均の質量放出率がたいへん良い精度で求まるようになりました。その少し後に赤外線天文衛星 IRAS の活躍により赤色巨星まわりで作られる固体微粒子の層 (ダストシェル) の情報が飛躍的に増大し、星の半径の十倍から千倍の $10^{14} \sim 10^{16}$ cm の領域がよく探査されました。それらの研究により AGB 段階の質量放出は 100 年から 10,000 年の間のいろいろな時間尺度でその勢いが時間的に変化し、その大きさは最大二桁にも及ぶことが明らかになってきました^{1), 2)}。さらに近赤外高分

*ここで出て来た炭素星は、表面大気に含まれる炭素原子の数が酸素原子の数を超えていて、可視スペクトルで CH, CN, C₂ といった炭素を含む分子のバンド吸収線が卓越して見える星です。恒星進化の理論とマゼラン雲の観測から、普通の中小質量星が漸近巨星枝 (AGB) という段階に達した時に、内部の核融合反応で作られた炭素が表面に汲み出され M 型星が姿を変えたものと理解されています (ここでは AGB 段階の炭素星だけを考えます)。

解能分光観測や気球、赤外線スペース天文台 (Infrared Space Observatory) による近・中間赤外線分光により、星の表面から半径の数倍～十倍の場所に準静的な暖かい分子層の存在が指摘されるようになり^{3), 4)}、質量放出現象の理解に向け貴重な一歩が踏み出されました。

さて、それら質量放出星の CSE の観測的研究状況を観測波長域と解析に使われた対象についてまとめてみると表1のようになります。これを見るとすぐ気がつくように、M型星、C型 (炭素星) からの質量放出流はほとんど分子ガスであるにもかかわらず、可視 (光学) 域の分子線のところがすっかり抜け落ちています。私たちは以前から、この可視域の分子吸収線の空白はなぜ埋まらないのだろうか、果たして埋めることはできないものなのか、光学域から質量放出現象に関わる研究を何か進めることはできないのだろうかと常々考えていました。岡山天体物理観測所の高分散エシエル分光器 HIDES (本号の記事を参照されたい) が稼動したこともあり、いよいよその考えを試してみる時がやってきました。新たな知見を求めて私達は、質量放出星のひとつである炭素星の光学域スペクトルをかつて無い高い波長分解能で調べ始めました。本稿では HIDES による炭素星の可視高分解能スペクトル探査の初期成果である、星周領域を起源とする C₂ 分子

表1：質量放出流の観測的研究の発展状況

	可視 (A/M/D)	赤外 (A/M/D)	電波 (A/M/D)
M 型星	○/×/○	×/○/○	○/○/○
C 型星	×/×/○	×/○/○	○/○/○

(A/M/D) : (原子/分子/ダスト)

○ : 広く進められている

× : 全く (ほとんど) 進められていない



の Swan (0,0) バンド吸収線群^{**}の発見、その後の系統的探査、そしてスペクトルの定量解析という一連の研究についてご紹介いたします。

2. 星周層起源の C₂ スワンバンド吸収線群の発見

私たちはまず、質量放出流ばかりでなく星自身の特質も詳しく調べることができるよう、光学域で中心星が直接見えている炭素星（以後「光学炭素星」）の高分解能スペクトルを取得し、原子・分子の吸収線の輪郭や視線速度を長期間にわたり丁寧に調べて行くことを考えました。それにより大気の動きを調べて行けば、スペクトル中に隠れているかもしれない星周層（CSE）起源の微かな信号も見えてくるかもしれません。観測を始めるにあたり私たちはまず 5000 Å 付近を調べることにしました。それは、その何年前かに国内で開かれた研究会の場で、4800–5000 Å 付近は比較的分子の吸収線の数少なく、定量的な解析に使える原子の吸収線が見つかる可能性がある、という話を聞いていたからです。また、それより短い波長域は炭素星が急激に暗くなるため、HIDES では観測不可能という現実的な問題もありました。そしてもう一つ、5100 Å より長い波長域には、かなり観測波長域に抜けがありますが、スペクトルアトラスが数多くの炭素星について出版されていました⁵⁾。そのスペク

トルから判断する限り、長い方の波長域を繰り返して観測する必要はなさそうでした。これらの結果として C₂ スワン (0,0) バンドのバンドヘッドの波長域 (< 5164 Å) が、観測波長域のほぼ真中に入ってくることになりました。私たちは最初から C₂ スワンバンドそのものを狙っていたのではなく、そのあたりの波長域全体のスペクトル線を狙っていたのです。スペクトル分解能についてはそれまでの経験から、5 万程度では何か新しいものを簡単に見つけるのは難しいと予測しました。5 万で見込みが無ければ一挙に 10 万にするしかありません。HIDES にはそれができます。しかし 10 万を達成するには入り口スリット幅を 100 μm (0.39") に設定する必要があり、どんなにシーイングが良くても望遠鏡で集めた光のほとんど (~ 80%) を捨てることになり、なかなか後ろめたい気分のする観測となりました。

私たちは年末年始で共同利用観測がお休みになる 1999 年 12 月 27 日からの 8 日間、年明け早々から始まる共同利用観測の慣らし運転も兼ね、正月返上で HIDES による光学炭素星の高分解能スペクトル観測に突入しました。いったい何が出てくるのか、期待と不安が入り混じった中、明るい光学炭素星を順次観測して行きました。観測は初日から好天に恵まれ 12 月ながら最良シーイング 0.7" を記録しました。自炊しながらの年末年始観測は無事に終了し、私たちはまず手始めに 1 月 3 日の夜に撮ったばかりのりょうけん座 Y 星という星のスペクトルを調べ始めました。夜空には、新しい観測装置を作ったらず見てみるという天体が、どの研究分野にも必ずあります。りょうけん座 Y 星もそのうちの一つでした。一次処理が終わり見やすい形にプロットされたりょうけん座 Y 星のスペクトル (図 2) を見た私たちはすぐに疑問を抱きました。「不思議だなあ、C₂ のバンドヘッドの辺りなのに 3 本ずつのパターンを持った線幅の狭い吸収線がいっぱい見えている。これ何だろうなあ。バンドヘッドなら吸収線が密に詰まってお互いに重なり合い、吸収が飽和して平坦で滑

^{**} 「Swan (0,0) バンド」という呼び名について
 スワン：C₂ 分子の電子状態 d³ Π_g と a³ Π_u の間の遷移についた名前。a³ Π_u がエネルギーの低い側。
 (0,0)：各電子状態での振動状態の量子数。左側がエネルギー的に上の d³ Π_g 側、右側が下の a³ Π_u 側を記述。(0,0) はどちらも振動基底状態であることを意味する。
 バンド：回転状態の遷移が関係すると光学域では狭い波長域に多数の吸収線が密に集まって現れるのをバンドと呼ぶ。
 C₂ スワン (0,0) バンド吸収線は、つまり、a³ Π_u という電子状態の振動基底状態にある分子がいろいろな回転準位に配位して、それらが d³ Π_g という電子状態の振動基底状態へ回転遷移の選択律を満たしながら光子を吸収して遷移する時に生じる吸収線群である。

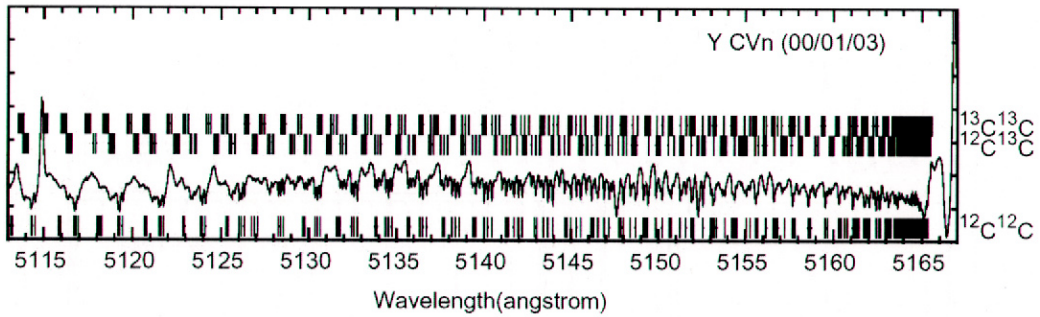


図2：りょうけん座Y星のC₂スワン(0,0)バンドヘッド付近のスペクトル。横軸：波長(Å)，縦軸：相対強度(任意スケール)。図中の短い縦線は、C₂とその同位体置換種の吸収線の現れる位置を示している。図9も参照されたい。

らかなスペクトルが見えてもいいのになあ...」。この疑問がCSE C₂発見の第一歩でした。さっそく人づてに計算機ファイルになっているCNとC₂のスペクトル線の波長テーブルを手に入れ、りょうけん座Y星のスペクトル中にそれら吸収線の現れる位置を一緒に表示しました。すると、たくさん並んでいるりょうけん座Y星中の吸収線の半分くらいが、その波長テーブルの並びに一致しました。「あっ、これC₂の吸収線だったんだ！でも何で飽和もブレンドもしていないの?」。C₂線群の実験室系の波長と観測された波長とを比較し、その差異がC₂ガスの運動によるドップラー偏移と解釈し、個々の線の視線速度を求めました。するとC₂吸収線群は全体として一つの視線速度を示していました。また、得られたC₂ガスの視線速度は、以前に私たちが野辺山45m鏡で測定したこの星のCSE中のCOガスで言う私たちへ向かって近づいてくる側の視線速度とはほぼ一致することが分かりました。この時私たちは、今見ている吸収線群が質量放出流中のC₂ガスに由来するものであることを知りました。また、この瞬間に筆者はHIDESが分解能10万を達成できるように作っておいて良かったと、改めて思いました。しかしそのままでは同定できない吸収線もたくさん残りました。それらを見るとやはり3本ずつの組をなしているように見えます。そういえばこの星は¹³Cの多い星だったのです。同位体置換

種(isotopomer)かもしれません。さっそくHerzberg先生の分厚いSPECTRA OF DIATOMIC MOLECULES⁶⁾をあちこちひっくり返して、同位体による波長シフトの量を見積りました。電子遷移に関するシフトはなく、(0,0)バンドなので振動に関するシフトもありません。結局、回転に関するシフトだけで、あまり自信がないながら、1Åくらい長波長側にずれるという勘定になりました。実際に観察されたシフトの量とほぼ一致します。同位体置換種の吸収線にはほぼ間違いありません。これで未同定の吸収線はほとんど無くなりました。後で分かったことですが、実はそのような頼りない計算をしなくても、同位体置換種の輝線スペクトルの詳細な波長テーブルを載せた論文が既にありました⁷⁾。

余談ですが、ここで話は一旦1994年に立ち戻ります。その頃一時的にオランダのフロニンゲン大学に滞在していた筆者は、そこで開かれている恒星物理関係のゼミで、とある日Eric Bakkerという大学院生が自分の研究結果を話すのを聞いていました。そのゼミには、惑星状星雲研究の大家Pottasch博士や新進気鋭の若手研究者Waters博士などもいました。その時Ericは、ウィリアム・ハーシェル望遠鏡(口径4.2m)で稼動したばかりの高分散分光器UES(Utrecht Echelle Spectrograph)で取ったpost-AGB星(質量放出が止まりAGB段階を過ぎ

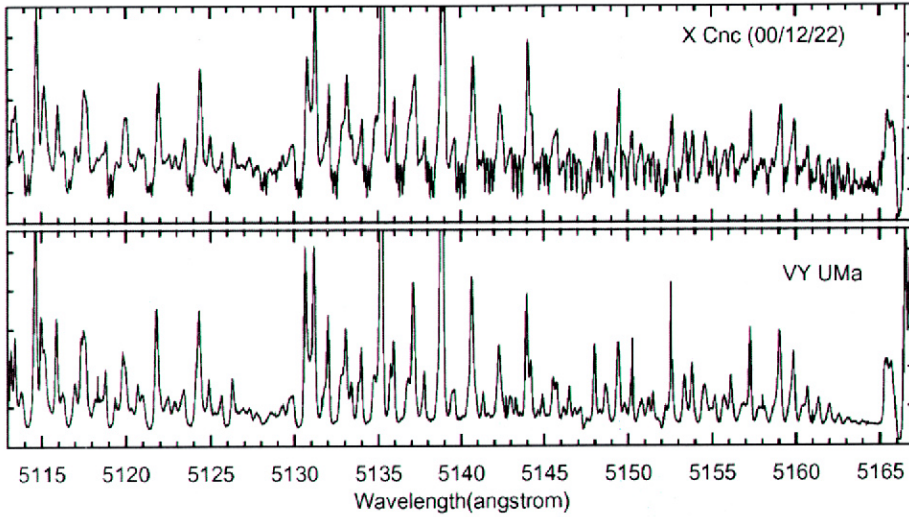


図3：CSE C₂吸収線の検出された星とされなかった星のスペクトル。横軸：波長(Å)，縦軸：相対強度(任意スケール)。
 上段：検出例(かに座X星)，下段：非検出例(おおぐま座VY星)。

た直後の天体)の可視域スペクトルの解析結果を話していました。そこに彼らはCNやC₂分子のバンド吸収線を新たに見出し、それらの定量解析を進めていたのです。その解析にはvan Dishoeck博士というたいへん優秀な研究者が手を貸していました。彼女の理論的な解釈が組み込まれ、洗練された研究に仕上がっていたEricの話に感銘を受けた私は、いつか自分もこういう面白い分光研究をしてみたいものだと思っていました。その時から6年、そんなことはすっかり忘れていた筆者ですが、私たちの見つけたCSE C₂吸収線のスペクトルを目の前にして、いつのまにかその日の思いが満たされていたことに気がつきました。

私たちはこのCSE C₂の発見に気がついた時点で文献調査を一通り済ませ、現在質量放出中の赤色巨星における観測例としては全く初めてのものだと考えました。しかしその後すぐにBakkerらの1997年の論文⁸⁾で、1ダース以上あるpost-AGB星に混ざってあのIRC+10216(波長5μmで全天で一番明るい天体で、激しく質量放出中の炭素星)が調べられ、CSEのCNとC₂の吸収線が少数ながら検出されているのに気がつきました。残念ながら私た

ちの見出したCSE C₂線は、現在質量放出中の赤色巨星としては完全に最初の検出例ではなかったのです。正確に言うと二番目でした。しかし、私たちのように見まがいのような無いほぼ完全なCSE C₂スワン(0,0)バンド吸収線群は、それまで誰も知らないものでした。高い分解能と感度で広い波長域を同時に捉えることのできるエシエル分光器HIDESの威力が十分に発揮された結果でした。

3. CSE C₂の特徴

CSE C₂の発見を受け私たちは、主に2001年の共同利用観測により、炭素星のCSE C₂サーベイを進めました。まずLambertたち⁹⁾により、大気中の化学組成が詳細に調べられた33個の光学炭素星について、岡山から観測可能なものをすべて観測しました。さらに他の興味深い炭素星も加え合計44個の炭素星についてスペクトルを得ました。得られたスペクトルを一つ一つ問題を解決しながら定量的に解析していく膨大で骨の折れる作業は、一緒に研究を進めた大学院生の目を見張る頑張りにより見事に乗り越えられました。その結果からCSE C₂について以下のことが順次明らかになってきました。

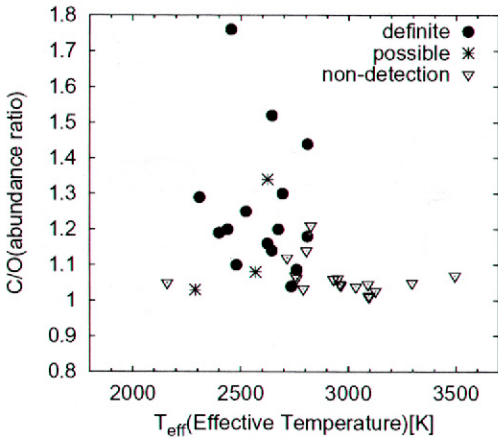


図4：CSE C₂ 吸収線の検出，非検出と中心星の性質との関係。横軸：中心星の有効温度，縦軸：中心星の酸素に対する炭素の存在数の比。●は明確な検出例，*は検出が疑われる例，▽は非検出の例。

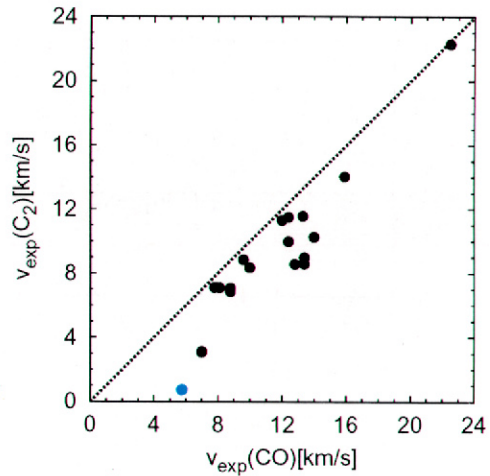


図5：CSE C₂ ガス(縦軸)とCSE CO ガス(横軸)の流出速度の比較。流出速度の一番小さい点がポンプ座U星。

3.1. CSE C₂ の検出される天体

私たちが観測した44天体の中で確実にCSE C₂の検出できたものは17天体でした(図3に検出, 非検出の例)。さらに見込みのありそうな天体が6つありました。観測を始めた頃には, CSE C₂の見える天体と見えない天体の違いが必ずしもよく分からなかったのですが, これだけの数を調べると違いがはっきり見えて来ました。CSE C₂の見える方と強い関係があったのは星の温度(有効温度)と大気中の炭素の豊富さ(C/O:炭素原子の酸素原子に対する数の比)でした(図4)。CSE C₂は有効温度が2800 Kより低く, C/Oが1.1よりも大きい星に選択的に見られることが分かったのです。炭素の豊富さと関係することについては, (C/O-1)がCO分子生成後にC₂になれる炭素量の上限值を与えるので自然に理解されます。有効温度との関係については, 解離平衡状態における炭素の存在形態が温度の低下とともにCNやC₂からHCNやC₂H₂へと移って行くため, 必ずしも一直線には理解されません。とにかく有効温度が2800 Kの付近で恒星大気かCSEのどちらかで, 何かが大きく変

わることが推測されます。CSE C₂の起源を探る上で重要な情報です。一方, ミリ波のCOガス輝線(以後「CO輝線」)から求めた質量放出率には余り強い関係は見られませんでした。これは, 炭素星の場合大雑把に言って, 質量放出率は酸素放出率に比例する一方, C₂放出率は(炭素-酸素)放出率に比例すると考えられることと, (C-O)/OがOと良い相関がないことから定性的に理解されました。

3.2. CSE C₂ ガスの視線速度

次に私たちはC₂吸収線の示す視線速度を測定しました。通常の観測方法では一般的に, 一本一本の線の測定精度はせいぜい分解能の10分の1(私たちの場合では300 m s⁻¹)程度止まりです。しかし, 分子の場合には同じガスが一度にたくさんの吸収線を引き起こすので, それらの平均を取れば格段に精度が上げられます。実際にCSE C₂の吸収線60本ほどを測定した場合には, 20 m s⁻¹くらいまで精度が出ることが分かってきました。赤色巨星において何かの視線速度がこんなに正確に決まったことはこれまで一つもありません。今後の高精度な視線速度モニタの際の基準としての利用が見込まれま

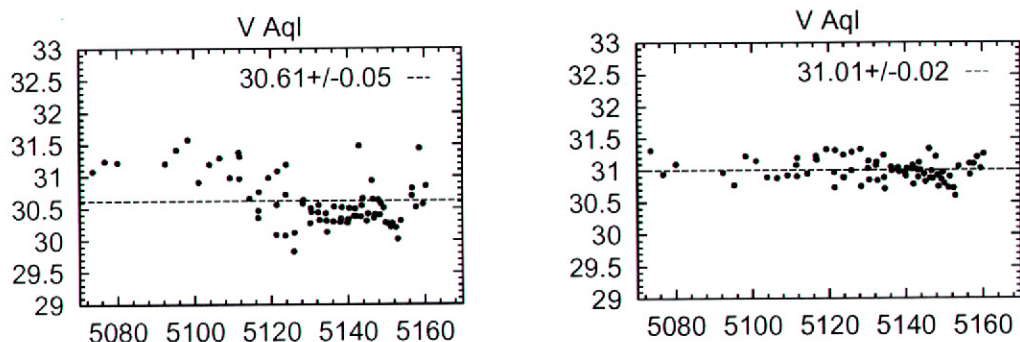


図6 a (左) b (右) : 波長テーブルの違いによる CSE C₂ 吸収線の視線速度の違い (わし座 V 星). 横軸は吸収線の波長(Å), 縦軸は吸収線の視線速度 (km/s). a : 参考文献 10) を用いた場合. b : 参考文献 7) を用いた場合.

す。さらに、その高い決定精度のおかげで、星の変光変動にともない CSE C₂ の視線速度がどのように変化するか調べることができました。その結果、CSE C₂ の視線速度は大きくても 0.5 km s⁻¹ 以下で安定していることが明らかになりました。この安定性は、CSE C₂ が中心星の脈動の影響のほとんど及ばない場所にあり、そこで吸収を起こしているためと考えられます。ここで特筆すべき事は、CSE C₂ 吸収線とミリ波 CO 輝線のそれぞれから求められた CSE ガスの流出速度の関係です。CSE C₂ ガスの流出速度は CSE C₂ の視線速度と CO 輝線による重心系の視線速度との差としました。比較の結果、一般的に CSE C₂ の流出速度は CO の流出速度より僅かに (1-4 km s⁻¹) 小さい傾向にあることが分かりました (図 5)。これについては当初、何らかの系統的な誤差を疑ったのですが、結局データは正しい値を与えていると判断されました。そして、CO 輝線から流出速度を求める方法に問題がある可能性に至りました。つまり CO の場合には輝線で見ているため、流出速度の測定のため線幅を測る際にガスの乱流速度幅が含まれてしまう可能性があるのです (他の可能性として、物質の流出速度が小さくなるにつれ、CO と C₂ で見ている場所の違いが大きくなり、速度勾配が観測されているという場合も考えられます)。逆に言うと、私たちは乱流速度

幅を観測的に初めて測定している可能性があるのです。特にポンプ座 U 星という星の場合、CO の流出速度は 6 km s⁻¹ で C₂ のそれは 1 km s⁻¹ となり、顕著に違っています。もし私たちの仮説が正しければ、これはポンプ座 U 星で見えている CO ガスが、実際には極めて小さい流出速度とかなり大きい乱流速度幅を持つことを示しています。流出速度の小さいガスは星のすぐ近くของガスと考えることもでき、それが大きな乱流速度幅を持っているとすれば、質量放出現象の理解を進める上で今後の重要な研究対象と考えられます (速度勾配を見ているという場合にも同様に重要です)。

ところで、視線速度の詳細な解析を進めているうちに私たちは、一つ不思議な結果に出くわしました。CSE C₂ の個々の吸収線の示す視線速度に妙なパターンが現れてきたのです。それは 500 m s⁻¹ 程度の系統的な変動を示しています (図 6 a)。すわ、励起ポテンシャルに依存する視線速度の系統的な推移か？ つまり、何らかの速度勾配を検出したのでしょうか？ しかし文献を漁ると、新しい、精度の高い C₂ スワンバンドの波長測定の報告がありました。それを利用するとそのパターンは消え、CSE C₂ の吸収線群は全体として一つの視線速度を示すようになりました (図 6 b)。初めに使っていた波長テーブル¹⁰⁾のほんの僅かな測定誤差に起因す

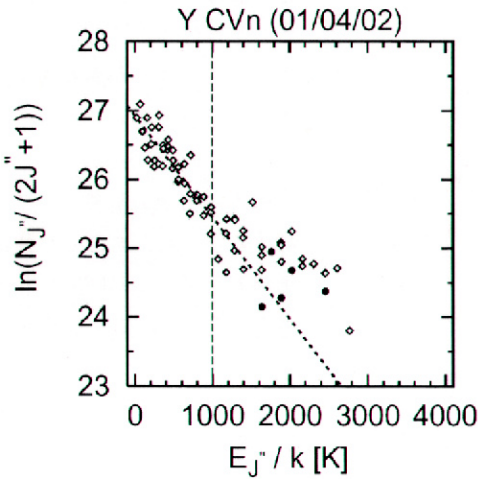


図7：ローテーションダイアグラム（りょうけん座Y星）。横軸は吸収線に関わっている下側の回転準位の励起エネルギーを温度(K)で表した値。縦軸は吸収線に関わっている下側の回転準位にあるC₂分子の測定された柱密度(cm⁻²)を統計的重みで割り自然対数を取った値。全体の傾きの逆数が励起温度に対応する。

るものだったのです。多数の吸収線を同時に扱えるために、質量放出星の観測では今まで問題にもならなかったような微量が気になるようになってきました。

3.3. CSE C₂ ガスの回転励起温度と柱密度

次に私たちは、CSE C₂ 吸収線の吸収強度を一本ごとに測って、ローテーションダイアグラム（図7）を作成し、エネルギー的に下の電子状態 a³Π₀ の v=0 の状態における回転準位の励起温度を求めました。その結果、得られた回転励起温度は400 K から800 K の間に分布しました。この値は私たちの見出したC₂ 吸収線群がCSE 起源であるという解釈を強く支持します。次に私たちは a³Π₀ の v=0 の状態にあるCSE C₂ 分子の合計の柱密度を求め、さらにこの回転励起温度をすべての分配関数に対して使うという少々荒っぽい仮定を置いて、CSE C₂ 分子の総合計の柱密度を求めました。ちなみに、この回転励起温度と柱密度の導出は、文字で書くとなんとなく終

わってしまうのですが、実際には吸収線一本ごとの強度を測ったり、その振動子強度（吸収の起こしやすさ）を本¹¹⁾とにらめっこしながら計算して求めたりと、今回の研究の中では最も時間のかかる根気のいる作業でした。私たちはその長いトンネルをなんとかくぐり抜け、吸収にあずかるCSE C₂ 分子の合計の柱密度が(2-9)×10¹⁴ cm⁻² の範囲に分布するという結果をどうにか得ることができました。

さてC₂ 分子は等核二原子分子のため永久電気双極子モーメントを持ちません。そのため電波領域の純粋な回転遷移や赤外線領域の振動回転遷移が許容線として存在しません。従って温度の低いCSE 中では、おもに電子遷移によって高い回転準位に励起され、衝突により低い回転準位へと移動すると考えられています。そのため大まかな傾向として実際の熱運動学的温度に比べて回転励起温度は高めに出る傾向にあり、その傾向はエネルギー準位の高いレベルでより顕著になることが観測とモデルの両方から確かめられています¹²⁾。従って、ここで求めた回転励起温度は実際のガスの熱運動から決まる温度の上限と言えます。また、C₂ スワンバンドに関係している電子状態の低い側(a³Π₀)は基底状態から700 K ほどの励起エネルギーを持ち、基底状態とは双極子遷移でないインターコンビネーションバンドと呼ばれる遷移で結ばれています。そのためa³Π₀の励起状態について正確に知ることは実はたいへん複雑な問題です。正確な励起状態の計算は将来の研究課題であり、私たちはここではそれらを考慮に入れず、どのエネルギー準位への配位も回転励起温度と同じ励起温度に相当していると単純化して分配関数を計算しました。そのため、ここで求めた総合計の柱密度の見積もりは実際よりもかなり低くなっている可能性があります。

3.4. CSE C₂ ガスの存在量とその起源

求めた回転励起温度を使い私たちは、CSE C₂ 吸収線を引き起こしているC₂ ガスの在る場所を推定しました。その際、ガスの温度が中心星からの

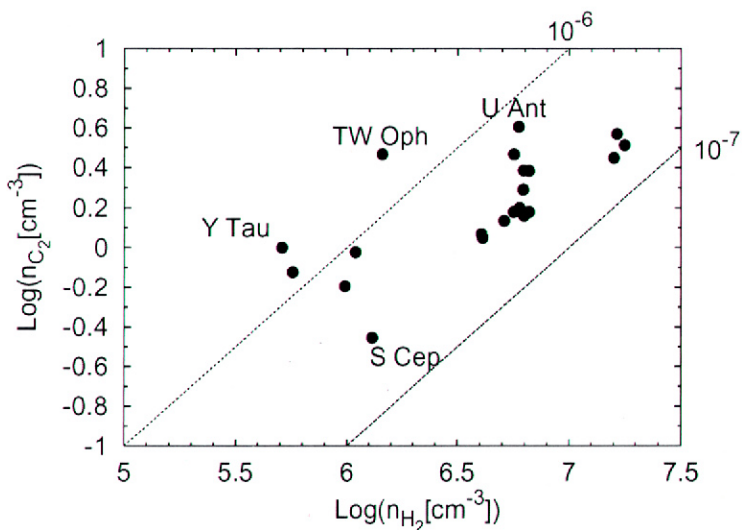


図8：CSE C₂ガス層の位置における水素分子密度(横軸)とCSE C₂密度(縦軸)の比較。前者はCOガスから求めた質量放出率から導出。

距離に従い、距離のべき乗の関数として下がっていくと仮定しています。そのべきの値については、質量放出流の流体力学的な数値シミュレーションから推測された値を用い、ここでは-0.7前後を採用しました¹³⁾。その結果CSE C₂ガスは、おおむね星の半径の10倍くらいから外側のところに位置するという結果が得られました。私たちの求めた回転励起温度がガスの熱運動から決まる温度の上限値だと考えると、ここで求めた位置は下限値だと考えることができます。従って吸収を起こしているC₂ガスはやはり確実にCSEの領域にあることになります。その正確な位置については、近い将来の高空間分解能(～0.1"程度)観測を通じて明らかにして行けるだろうと考えています。

さらに私たちは、CSE C₂ガスの位置、全柱密度、流出速度を総合して、水素分子とC₂分子の存在数を比較しました。それによると質量放出流中でC₂分子は水素分子の約100万分の1前後の存在量(個数比)を示していることとなります(図8)。これまでに置いた仮定による不定性を考慮すると、

この値はさらに二桁程度は(つまり1万分の1くらいまで)大きくなる可能性があります。そのような値は果してして納得できるのでしょうか。

最近のモデル計算^{14), 15)}と比較すると、私たちの得た値は固体微粒子形成や質量放出流を考えに入れない静水圧平衡の大気外層モデルにおけるC₂存在量とはほぼ一致しています。一方、それらを考慮に入れた流体力学的な数値シミュレーションの予測と比べると10桁近く高い値になっています。ところで私たちの発見したCSE C₂ガスは視線速度、その安定性、回転励起温度などから、星から十分に

離れた場所にあることはほぼ確実です。従って静水圧平衡のモデルでは扱えない、星から離れた場所に位置していると言えます。また、中間赤外線輝線フィーチャーからCSE C₂を示している星で固体微粒子形成が起こっていることも確実です。これらのことから私たちは、CSE C₂の解釈には質量放出流を考慮した流体力学的なシミュレーションとの比較が妥当と判断しました。

さて、流体力学的なモデルの場合、C₂そのものの存在量は極めて低いと予測されているので、ここで検出されたCSE C₂は、何かの方法によって作り出すことができなければつじつまが合いません。実はそのような質量放出流中では、様々なモデル計算によりC₂H₂がCOに次いで豊富に存在すると考えられています。C₂H₂は星間空間の2000 Åより短い波長の紫外線により、比較的短い時間でC₂H₂ → C₂H → C₂と解離していくと考えられています。CSE中でC₂を作り出す方法が用意されていたのです。これなら私たちの得たC₂ガスの存在量も十分説明できます。1970年代のアメリカ国立光学天文

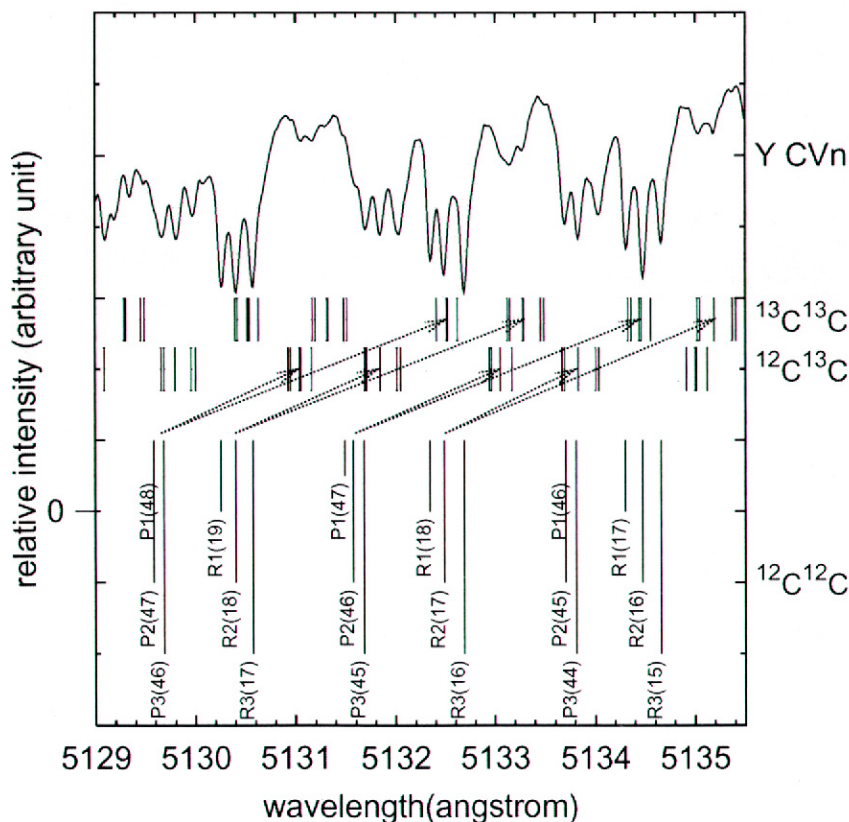


図9：CSE C₂の同位体置換種のスペクトル(りょうけん座Y星)。¹²C¹²Cの線と同じ遷移に対応する¹²C¹³Cと¹³C¹³Cの線を矢印で結んである。¹²C¹²Cの線に添えられた記号は各遷移の吸収を起こす側の準位を記述している⁶⁾。星周域では温度が低いため、見えている吸収線のほとんどは励起エネルギーの低い準位から起こる「R」の記号の付いた線で、高い準位からの「P」の記号の付いた線はほとんど見えていない。

台のキットピーク4 m鏡とフーリエ分光器を使った炭素星の研究により、炭素星の有効温度が低くなるにつれて、3 μm帯吸収バンドに主に寄与している分子がHCNからC₂H₂へと変化していくことが報告されています¹⁶⁾。CSE C₂がC₂H₂の光解離で作られていると考え、私たちが得た有効温度2800 Kの境界線の存在(3.1参照)は、星の温度がそれ以下になると質量放出流中のC₂H₂の存在量が何かの理由で急速に上昇していくことを指し示していると考えられます。CSE中の状態変化を明らかにするための重要な知見ではないかと私たちは考えています。

4. CSE C₂の今後の展開

これまでの定量解析の結果や流体力学的シミュレーションとの比較などから、私たちはCSE C₂がおそらくは星の半径の数十倍のところではC₂H₂が光解離されて出来てきたと考えるようになってきました。多くの数値シミュレーションによれば、物質が加速され始めると考えられている星の半径の数倍のところでは、C₂H₂がCOを除き炭素を含む分子の中では最も存在量が多いと考えられています。酸素過多なM型星の場合には、恒星表面近くの層を探查する手段として、水分子が近年クローズアップされてきました^{3), 4)}。炭素星の場合にはC₂H₂がそれに相当するのではないかと私たちは考え始めま



した。今後、近・中間赤外線の高分解能スペクトルが大量に得られるようになるにつれて、炭素星からの質量放出の物理的状態が C_2H_2 などの分子を使ってより一層詳しく明らかにできるようになると期待されます。それまでに C_2H_2 のスペクトル解析に必要な様々なデータの整備を進めておくことが大切でしょう。

星の進化段階を明らかにする上で、元素組成における同位体比が重要な役割を果たします。特に炭素、酸素、窒素などの同位体比は重要です。炭素星の炭素同位体比については、日本の研究者により岡山で撮られたスペクトルを巧妙な方法で解析することで精力的に調べられてきました¹⁷⁾。また、近赤外線観測の進展により分子の振動回転遷移線の解析からも精力的な研究が進められています⁹⁾。しかし、その値については研究者の間で必ずしも意見の一致を見ていません。CSE C_2 の今後の研究により、独立な数値を与えられる可能性が出てきました。CSE C_2 吸収線では $^{12}C^{12}C$ 、 $^{12}C^{13}C$ 、 $^{13}C^{13}C$ の吸収線が一本一本独立に見えています(図9)。十分なS/Nを達成すれば、どの同位体種についても飽和度の弱いものから強いものまで数多くの吸収線を解析に利用することができます。星間紫外線のある環境では、 C_2 は比較的短い時間で中性の炭素原子へ解離すると期待されます。従って、CSE C_2 が実際に C_2H_2 の光解離による生成物であれば、CSE C_2 の分布には内側と外側のどちらにも明確な境界が存在し、CSE C_2 は中心星のまわりに星の半径の数十倍のところから球殻状に分布していることが予想されます。これらの幾何学的な情報を実際の観測により裏付けながら解析を進めれば、これまでとは独立な方法による精度の高い炭素同位体比の決定が期待できます。炭素星の場合、星の半径の50倍が約 10^{15} cmに相当し、距離200 pcの星ならば光解離でできた C_2 の分布は半径約0.34"のリング状に見えるはずで、5000 Å付近で0.3"程度の空間分解能の狭帯域撮像観測が実現できれば、点源に比べ有意に広がった輝線領

域としてCSE C_2 の領域が描き出せる可能性があります。すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡でなら十分に分解可能です。そして C_2 の前段階の生成物である C_2H も、 C_2 より僅かに小さいリングとして見えてくることでしょう。

以上のことは、ミラ型変光星の炭素星についても同様に適用可能と考えられます。ミラ型星は強い脈動の影響で大気構造が複雑なため、光学域のスペクトルを見ると極めて複雑な様相を示します。そのため、これまで定量的な元素組成解析はM型、C型に関わらずまったくと言っていいほど進んでいません。そのためミラ型変光星の本質的な特質については、いまだに良く分かっていないものも多くあります。私たちのサンプルには、少数ですがミラ型変光星が含まれており、CSE C_2 の検出に成功した天体もあります。このことはミラ型炭素星についても十分なS/Nを達成すれば、少なくとも炭素同位体比を決定できる可能性を示しています。ミラ型変光星は光度変化が激しく、極小期には大望遠鏡でも観測が困難なものが多いのですが、逆に極大期であれば中型望遠鏡でも観測可能なものかなり存在します。CSE C_2 の形成領域は中心星の脈動の影響がほとんどない領域なので、CSE C_2 を使えば中心星の変光の位相によらず炭素同位体比の導出が可能と期待されます。それら天体の極大期を捕えて観測して行けば、岡山HIDESでもまとまった数のサンプルを得ることが可能でしょう。それによりかなりの数のミラ型炭素星について、炭素同位体比を明らかにして行けると私たちは期待しています。

6. おわりに

過去40年の間、質量放出星におけるCSE起源の分子吸収線は、IRC+10216で最近同定された僅かな数の C_2 とCNの線に限られていました。私たちの研究によりCSE起源の C_2 分子吸収線群が一定の条件を満たす炭素星で広く見つかったことで、他の分子でも同様の吸収線群の見つかる可能性が出てきました。また、分子種を適正に選べばM型

星にも何か見つかるかもしれません。今後はC₂ スワン (0, 0) バンド以外の波長域をこれまで同様の高分解能で探査していくことを考えています。CSE における物質は基本的に低温であるため、検出される可能性のある分子線は、吸収を起こす側のエネルギー準位がそれなりに低いことが必要でしょう。その意味で、高分解能が容易に達成できる光学域から近赤外域の波長域に限るならば、CN 分子の Red System (0, 0) バンド (1.1 μm 帯) などが興味深いところです。私たちは近いうちに HIDES に近赤外線検出器を搭載し、1.1 μm 帯を観測してみたいと考えています。

謝辞

ここで紹介した CSE C₂ 吸収線の最初の発見は泉浦絵美さんの卒業研究 (2000, 東京学芸大学) の過程でなされました。CSE C₂ 吸収線のサーベイと詳細な定量解析は木全理恵さんの修士論文¹⁸⁾としてまとめられた内容をもとにしています。観測を進めるにあたっては HIDES 製作グループの皆さん、特に国立天文台岡山天体物理観測所の増田盛治さんと柳澤顕史さんにいろいろな面でご協力頂きました。国立天文台の青木和光さんには計算機可読の C₂ と CN の波長テーブルに関しご協力頂きました。岡山大学の川口建太郎さんには分子スペクトルに関しご指導いただきました。皆様に感謝いたします。最後になりましたが、この原稿の執筆を強く勧めてくださった天文月報編集部の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Olofsson H., Bregman P., Eriksson K., Gustafsson B., 1996, A&A 311, 587
- 2) Izumiura H., Hashimoto O., Kawara K., Yamamura I., Waters L.B.F.M., 1996, A&A 315, L221
- 3) Hinkle K. H., 1978, ApJ 220, 210
- 4) Tsuji T., 2001, A&A 376, L1
- 5) Barnbaum C., 1994, ApJS 90, 317
- 6) Herzberg G., 1950, Molecular spectra and molecular structure. Vol.1: Spectra of diatomic molecules 2 nd ed. (New York: Van Nostrand Reinhold)
- 7) Amiot C., 1983, ApJS 52, 329
- 8) Bakker E. J., van Dishoeck E. F., Waters L.B.F.M., Schoenmaker T., 1997, A&A 323, 469
- 9) Lambert D. L., Gustafsson B., Eriksson K., Hinkle K. H., 1986, ApJS 62, 373
- 10) Phillips J. G., Davis S. P., 1968, The Swan system of the C₂ molecule. The spectrum of the HgH molecule, Berkeley Analyses of Molecular Spectra (Berkeley: University of California Press)
- 11) Kovacs I., 1969, Rotational Structure in the Spectra of Diatomic Molecules (New York: American Elsevier)
- 12) van Dishoeck E.F., Black J.H., 1982, ApJ 258, 533
- 13) Schoier F.L., Olofsson H., 2001, A&A 368, 969
- 14) Helling C., Winters J.M., 2001, A&A 370, 555
- 15) Jorgensen, U.G., 1990, A&A 232, 420
- 16) Ridgway S.T., Carbon D.F., Hall D.N.B., 1978, ApJ 225, 138
- 17) Fujita Y., Tsuji T., 1977, PASJ 29, 711
- 18) 木全理恵 2002, 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻修士論文

Circumstellar C₂ Swan band in optical carbon stars

Hideyuki IZUMIURA

Okayama Astrophysical Observatory, NAOJ,
Kamogata, Okayama 719-0232

Abstract: C₂ Swan band absorption lines of narrow velocity widths have clearly been detected for the first time in a number of optical carbon stars using HIDES. It is found that the narrow C₂ absorption lines are seen in stars having effective temperature lower than 2800 K and C/O greater than 1.1. Radial velocity and rotational excitation temperature of the absorbing gas locate the gas layer in the circumstellar region. Our discovery demonstrates a common existence of circumstellar molecular absorption lines in cool mass-losing stars in the optical wavelength region. With our discovery it has become possible to determine the precise outflow velocity of the circumstellar gas. Circumstellar C₂ may be a new probe of the region with radii of 10¹⁴–10¹⁵ cm from the central star. It would be possible to derive carbon isotopic ratios in these stars, and similar analyses would be applicable to Mira-type carbon stars. In future circumstellar chemistry could be developed in the optical region.