

## M 17 周辺 C II 領域の空間分布とエネルギー収支

松原英雄\*・中川貴雄・芝井 広  
奥田浩之・水谷耕平\*\*・舞原俊憲\*\*  
小林行泰\*\*\*・広本宣久†・西村徹郎††  
F. J. Low††

## Spatial Distribution and Energetics of the CII Region around M17

By

H. MATSUHARA, T. NAKAGAWA, H. SHIBAI,  
H. OKUDA, K. MIZUTANI, T. MAIHARA,  
Y. KOBAYASHI, N. HIROMOTO, T. NISHIMURA,  
F. J. LOW

**Abstract:** Balloon observations of [CII] 158  $\mu\text{m}$  and [OI] 63  $\mu\text{m}$  from the M17 HII region and the molecular cloud complex are presented. Spatial distribution and energetics of the CII region are discussed.

Around the M17 HII region, [OI] 63  $\mu\text{m}$  significantly contributes to the cooling of the CII region. Heating due to photoelectric effect of dust grains illuminated by the intense UV radiation can compensate for the cooling due to [CII] and [OI] lines. The CII

---

\* 名古屋大学理学部

\*\* 京都大学理学部

\*\*\* 東京大学理学部

† 郵政省通信総合研究所

†† アリゾナ大学スチュワード天文台

region extends far beyond the HII region, which indicates the clumpy structure of the CII region.

The existence of low-brightness, diffuse [CII] emission component toward M17 SW molecular cloud has been revealed. Distribution of the [CII] emission is quite similar to that of  $^{12}\text{CO } J = 1 \rightarrow 0$  emission. Possible energy source of the [CII] emission is discussed. Ratio of the [CII] luminosity to the total far-infrared luminosity of this diffuse component has been found to exceed that of the intense [CII] emission component around the HII region.

### 概 要

気球遠赤外分光観測, 特に[C II] 158 $\mu\text{m}$  線, [OI] 63 $\mu\text{m}$  線の観測結果に基づき, M 17 H II領域及び M 17 SW 分子雲に関係した光解離領域(C II領域)の空間分布とエネルギー収支について考察した。

H II領域周辺では, [OI]線放射のガスの冷却に関する寄与が大きい。[C II]線・[OI]線によるガスの冷却量は, ダスト粒子からの光電子放出による加熱でまかなうことができる。重要な結果は, 水素原子密度  $10^4[\text{cm}^{-3}]$ 以上, ガス温度 100 K 以上と考えられる C II領域が, H II領域周辺に広範に広がっていることである。このことは C II領域には紫外光が充分遠方まで到達できるように, 密度ムラがあることを示唆している。

また M 17 SW 分子雲領域に低強度の拡散[C II]線放射の存在が明らかになった。その分布は $^{12}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ 線の強度の分布と似ている。この[C II]線放射のエネルギー源について考察した。また [C II]線放射量の全放射量に対する比が, H II領域周辺のそれよりも大きいことが明らかになった。

### I. 序

最近 H II領域と分子雲領域の間に位置する星間物質の研究が, 観測的・理論的に進められつつある。水素分子を解離して水素原子にするのに必要なエネルギーは, 水素原子を電離して水素イオンにするエネルギー(13.6 eV)よりも低い。従って H II領域と分子雲領域が隣接している場合, H II領域から放出された比較的低エネルギーの紫外光により分子が解離され, 中性水素領域が形成される。このような中性水素領域は「光解離領域」と呼ばれており, 近年特にモデルによって理論的に研究が進められている[1]。興味深いことは, 分子雲領域で存在度の高い一酸化炭素(CO)分子もやはりこの比較的低エネルギーの紫外

光で炭素及び酸素原子に解離され、さらに炭素原子は電離されて(電離エネルギー 11.3 eV)炭素イオンになっていることである。そしてこの炭素イオンの放射する[C II]線( $^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}; \lambda=157.737 \mu\text{m}$ ), および酸素原子の放射する[OI]線( $^3P_1 \rightarrow ^3P_2; \lambda=63.1837 \mu\text{m}$ )は光解離領域のガスの冷却を担っている重要なスペクトル線である。

我々はこうした光解離領域の星間空間における分布、また星間雲のエネルギー収支を明らかにするために、気球高度からの遠赤外分光観測、特に前述した[C II]線・[OI]線の観測を行った。気球高度(約 30 km)では、この波長域での観測を妨害する地球大気による吸収・放射の影響が非常に少なくなる。空間的に広がった放射の空間分布を効率よく得ることのできる周波数スイッチング法は、この大気放射の影響が少ない場合に初めて適用できる。我々は気球高度環境の長所を生かすべく、この波長域で史上初めて周波数スイッチングを観測に用い、信頼性の高いデータを広範な領域にわたって得ることに成功した。ここでは特にその成果の中で H II 領域と分子雲領域が隣接した領域の典型的な例の一つである M 17(オメガ星雲)領域の観測結果について述べる。

M 17 は距離 2.2 kpc [2] の比較的近傍にある古くから知られている H II 領域である。H II 領域の電離を担う O 型星が 5 ~ 6 個知られており [3], その放射エネルギーは電離星周辺を取り囲むダスト粒子に効率よく吸収され、遠赤外波長域で(総放射量  $6 \times 10^6 L_{\odot}$  [4])再放出されている。H II 領域の南西側に巨大な分子雲クランプ( $\sim 15^5 M_{\odot}$ )の連なりが広がっている [5]. すぐ隣接する分子雲クランプはピークで可視等級での減光度(Av)換算で約 200 等に達する厚い分子雲(質量約  $2 \times 10^5 M_{\odot}$ )で、H II 領域の南西方向への膨張を妨げている。M 17 の H II 領域と分子雲領域の境界はほぼエッジオンで見えていると考えられており、境界領域で期待される光解離領域の構造を探る上で都合がよい。

観測データは、周波数スイッチング法で行った[C II]線強度の 2 次元マップと、空間チョッピング法で行った H II 領域近傍の数点での[C II]線・[O I]線のスペクトルとがある。前者の特に H II 領域近傍の[C II]線放射については、既に文献 [6] で発表済みであるのでここでは深く立ち入らない。以下では、特に[C II]線・[OI]線強度の比較、及び特に M 17 SW 分子雲方向に見られた[C II]線低強度拡散放射の観測をもとに、光解離領域(特に炭素電離領域という意味で C II 領域)の分布及びエネルギー収支について議論する。

## II. 観 測

ここで紹介する M 17 領域の観測結果は、すべて 6 月 5 日に行われた米国テキサス州パレスティン気球基地からの気球観測で得られたものである。観測時間はのべ約 2 時間であった。

観測に用いた望遠鏡は、口径 50 cm の経緯台式気球搭載赤外線望遠鏡 [7] であり、精密なオフセットガイドによるポインティング、トラッキングが可能である。またスペクトル線強度を測定する分光器は、光学素子をすべて液体ヘリウムで冷却したファブリ・ペロー型分光器 [8] であり、[C II]線、[OI]線の同時分光が可能である。各々の周波数(波長)分解能は 2100, 1700 である。また観測ビームは、空間的に一様強度の天体に対して直径  $3'.7$  の円である。

観測モードは2種類あり、それぞれ周波数スイッチング法による掃天観測、及び空間チョッピング法によるポインティング観測である。以下に各々について簡単に説明する。

#### 1) 周波数スイッチング法による観測

周波数スイッチングの具体的方法については文献[6]を参照されたい。なお観測は[C II]線のみについて行った。観測は、主に北東—南西に約 $1^\circ.5$ にわたる天空スキャンを中心に行った。スキャンの移動率は約 $1'.3 \text{ sec}^{-1}$ である。またそれぞれのスキャンパスはすべて3~4回繰り返し観測している。以下に示す結果は、データを約 $1'.3$ のビンにおいて積分したものであり、各ビン当り約3~4秒の積分時間になっている。北東—南西スキャンでのデータを用いて、[C II]線強度のマップを作成した。

信号のベースラインの決定は、銀緯 $-1^\circ$ 以下の天域に属する信号を、天体からの[C II]線強度に関して零レベルと見なすことで行った。ベースラインの信頼性はデータの各ビンでの統計的誤差(強度換算で $\sigma \sim 6 \times 10^{-5} [\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}]$ )よりも充分小さい。

周波数スイッチングの効率は、後述する空間チョッピングで行った観測と比較して、55%であった。[C II]線の放射強度の絶対値較正は、M 17の観測の後に行った火星の空間チョッピングによる観測に基づいている。火星の放射流束密度・及び我々の視野の値の不定性を考慮すると、周波数スイッチング法で得た[C II]線の強度の絶対値の不定性は、25%と見積られる。しかし、これは強度の相対的な分布の信頼性には関係しない。相対的分布の誤差は、前述した $\sigma$ で決まっている。

#### 2) 空間チョッピング法による観測

空間チョッピング法によるポインティング観測を行った領域はM 17 H II領域周辺の6点に限られる(図2)。空間チョッピングの振幅は $15'.6$ と充分に大きいので、M 17のように放射領域が広大な天体でも自己チョッピングの補正量は小さく、信頼性の高いデータを得ることができる。なお観測時の[C II]と、[OI]線チャンネルのシステムNEPは各々、 $1 \times 10^{-14} [\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}]$ 、 $1 \times 10^{-13} [\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}]$ と見積られる。強度の絶対値の不定性は[C II]線、[OI]線各々20%、30%と考えられる。但し強度の相対値の不定性は各々3%、10%である。

### III. 観測結果と議論

#### 1) H II領域周辺

ここでは高質量のO型星の集落に電離されたH II領域周辺について結果を示し議論する。周波数スイッチング法による[C II]線の観測結果を図1に示す([6]も参照)。これはVLAで観測されたH II領域の分布[3]、及び水素分子の近赤外輝線[9]の分布との比較である。黒丸で示したところにあるOB型星の集落から放射される強い紫外光が、このH II領域の電離を保っている。比較的低エネルギーの紫外光はH II領域の外にもれだし、中性領域に属する水素分子を解離したり、励起したりする。水素分子輝線はこの紫外光によって励起されたフルオレッセンス光であると解釈されている[10]。北東側でH II領域、水素分子輝線、[C II]線の分布がOB型星集落からみて平行に並んで分布していることは興味深い。またH II領域の見えている方向で[C II]線放射は'谷'になっている。これは[C II]線放射の主要な部分はH II領域からではなく、その周辺の中性領域であることを意

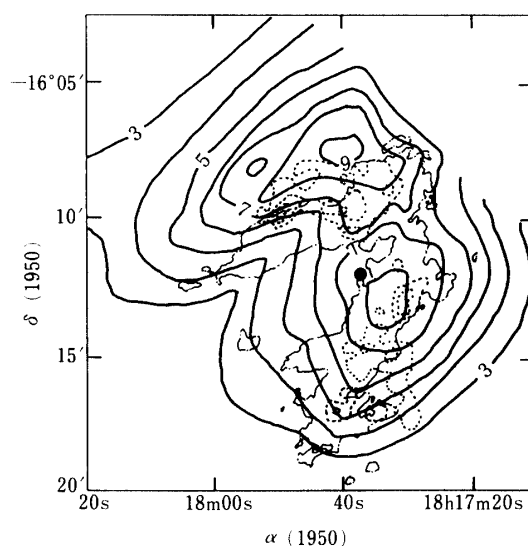


図1 M17領域における[C II] ( $\lambda=158\ \mu\text{m}$ )線放射の分布(実線)とH II領域の位置との比較. 一点鎖線がVLAによる電波連続波観測によるH II領域の電離波面の位置を表している[3]. [C II]線強度の等高線の間隔は $2.4 \times 10^{-4} [\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \text{cm}^{-3} \text{sr}^{-1}]$ . 点線は水素分子輝線( $V=1 \rightarrow 0\ S(1)$ )の分布を示す[9]. 黒丸はH II領域の主要な電離星集落の位置を示す.

味すると共に,比較的低エネルギーの紫外線が,水素分子輝線同様[C II]線の励起にも主要な役割を果たしていることを示している. SW側は[C II]線ピークとH II領域が重なって見えるが,これは単に幾何学的効果であるというよりも,SW側の分子雲が比較的厚く高密度であるために中性領域側の紫外光の吸収の度が激しく,従って[C II]線の強い領域がH II領域のごく近傍に限られるために我々のビームの大きさではほとんどH II領域と重なってしまうのであろう.

次に空間チョッピング法による観測結果を図2に示す.これは観測された[OI]線の強度の[C II]線のそれに対する比の分布を示す.ポジション③以外は[OI]線が検出され,強度比の平均は約4であり,H II領域周辺ではガスの冷却において[OI]線の方が寄与が大きいことがわかる.[OI]線のポジション⑥での値が他よりも小さいことや,ポジション③での上限値から考えて,[OI]線放射領域は[C II]線のそれほどは大きくないと思われる.

[C II]線を放射する領域が,主にH II領域をとりまく中性領域(C II領域)であることは既に述べた.[OI]線も同じ領域から放射されているとすれば,[C II]線,[OI]線の強度比からC II領域の物理状態の情報が得られる.[C II]線,[OI]線が共に光学的に薄いものとして強度比( $[\text{OI}]/[\text{C II}]$ ) $\sim 4$ より,温度が100 K $\sim$ 1000 Kの範囲で水素原子密度 $n_H \sim 10^4 [\text{cm}^{-3}]$ が得られる.強度比は密度に敏感であり,密度が高いほど強度比は大きくなる.しかし[OI]線は,推測される酸素原子の柱密度の値から考えて光学的に厚い( $\tau \sim 2-4$ )と思われる.従って[OI]線も光学的に薄いとして推定した $n_H$ は,実際の値の下限であると思われる.但し[C II]線さえも,場所によっては(特にSW側)光学的に厚い可能性がある.

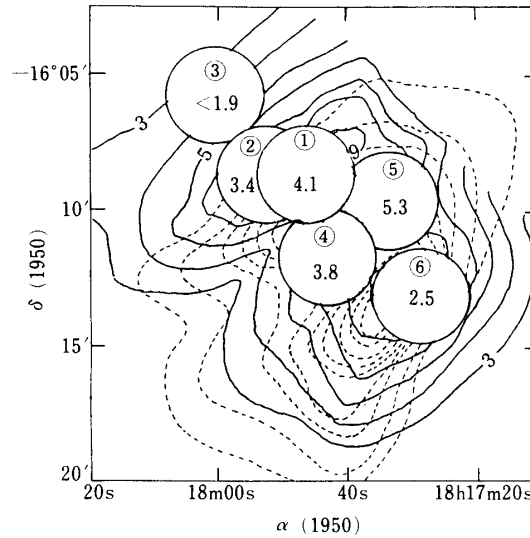


図2 空間チョッピング法での観測点を，[C II]線放射の分布図上に重ねた。円は観測ビームの大きさを示し，円内の数字はその点における [OI] 線 ( $\lambda=63 \mu\text{m}$ ) の [C II] 線 ( $\lambda=158 \mu\text{m}$ ) に対する強度比である。

逆の極限として[C II]線が光学的に充分厚いとしてガスの温度の下限が得られ， $T > 100 \text{ K}$ と推定される。

観測された領域から，M 17 H II 周辺領域からの[C II]線総放射量を見積ると約  $5000 L_{\odot}$  である。[OI]線は OB 型星から距離  $6'$  に集中して放射されているとして総放射量を見積ると  $\sim 8000 L_{\odot}$  となる。従って[C II]領域から少なくとも  $1.3 \times 10^4 L_{\odot}$  (M 17 の遠赤外域の全放射量の約 0.2%) のエネルギーが常に失われていることになる。これは C II 領域をわずか  $\sim 300$  年の間に冷やしきってしまう膨大な冷却率である。この冷却率に見合うだけの加熱機構は，光解離領域モデルによれば，紫外光に照射された星間塵からの光電子放出による加熱である [I]。この場合星間塵に吸収された紫外光のエネルギーの 0.1~1% をガスの加熱エネルギーに変換できるので，観測された冷却率を説明することができる。

ここで注目したいのは，OB 型星集落から距離  $6'$  ( $\approx 4 \text{ pc}$ ) 以内からの[C II]線放射量は全体の 40% にすぎず，残りはさらに外側からの寄与であることである。OB 型星からはかった C II 領域の特徴的な広がりスケールは約  $6 \text{ pc}$ ，H II 領域の境界から約  $4 \text{ pc}$  もある。C II 領域の密度が  $> 10^4 [\text{cm}^{-3}]$  と考えられることは既に述べた。もしこの密度でガスが一様に H II 領域の周囲に存在していたとすると，距離  $4 \text{ pc}$  は  $> 10^{23} [\text{cm}^{-2}]$  のガスの柱密度に対応し，可視光での光学的厚み ( $A_V$ ) で 50 等以上に達することになり，ガスの加熱の源である紫外光は全く C II 領域に入り込めないことになる！ 従って C II 領域は一様ではなく，紫外光がその隙間を通じて充分遠方まで到達できる程度に密度ムラがある [II] と考えられる。

## 2) M 17 SW 分子雲領域

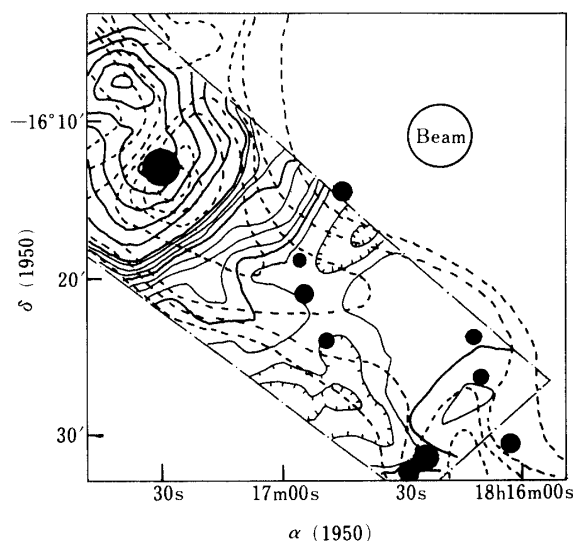


図3 M17 SW 分子雲 [5] 領域における [C II] 線放射の分布(実線). 等高線の間隔は, 太い実線に関しては図1と同様, また特に強度 $\leq 7.2 \times 10^{-4}$  [ $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ] では  $6 \times 10^{-5}$  ( $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ) 毎に細い実線で表示した. 一点鎖線が観測した領域を示している. また太い点線は  $^{12}\text{CO } J=1 \rightarrow 0$  線の強度分布である [5]. また IRAS 点源 [12] の中で,  $f(60) > f(25)$  を満たすものを観測領域内について●印で示した. ●印の大きさが強度の対数に比例している.

M17 SW 分子雲 [5] の H II 領域にもっとも近いクランプの方向においても [C II] 線放射が観測された. この様子を図3に示す. データは図1に示したもののから隣合うビンにおけるデータを重み平均することで平滑化している. また低強度成分の分布を強調するために, 図1の3の等高線以下の間隔をさらに4分割して細い実線で表示している. 重要な結果は, H II 領域から M17 SW 分子雲方向に進むに連れて [C II] 線強度は一旦急激に落ちているが, 更にすすむと再び若干増加していることである. これは M17 H II 領域に関する成分以外の C II 領域の存在を意味している. さらにこの [C II] 線強度の分布は,  $^{12}\text{CO}$  線強度(点線)の分布と大局的には似ている. このことは観測された [C II] 線はこの M17 SW 分子雲に関係する成分であることを示している.

前述したように H II 領域の電離星からの紫外光は, この領域に厚く存在するダスト粒子に吸収・散乱され, 仮に分子雲にかなり密度ムラがあるとしても, これほど遠方の分子雲中に C II 領域を形成することは難しい. 従って H II 領域の電離星とは別に, C II 領域を形成するエネルギー源がなければならないことになる. このエネルギー源の候補を以下に考える. 図3に IRAS 点源 [12] で,  $f(60)$  (波長  $60 \mu\text{m}$  での強度)  $> f(25)$  を満たす点源もプロットした. 観測領域の南西の端にかなり明るい点源が二つ存在する. これらの点源の遠赤外線放射量, 近赤外のスペクトルからこれらは分子雲の中に埋もれた ( $A_V \sim 6$  等) B0V 型星であると考えられる [13]. これらの点線の全放射量  $4 \times 10^4 L_\odot$  となる. 一方これらの点源

周辺の C II 領域の [C II] 線放射量は大きざっぱに  $>200 L_{\odot}$  (観測領域がおそらく全放射領域を覆っていないという意味で下限) であるから、エネルギー源がこれらの IRAS 点源のみであるとすれば、全放射量の 0.5% 以上が [C II] 線としてガスから放射されていることになる。これは前節で述べた H II 領域周辺での比 ( $\sim 0.1\%$ ) より大きい。この領域には他にも IRAS 点源がいくつか見えているが、その遠赤外線強度からこれらが M 17 SW 分子雲に関係しているとしても各々の全放射量は  $\sim 10^3 L_{\odot}$  と考えられ、この領域の遠赤外線放射量が大きく増えることにならない。また適当な初期質量関数・及び星生成率を仮定し、分子雲クラumpの質量  $10^5 M_{\odot}$  から、誕生するであろう B 型星は約 100 個と予想できる [11]。それら全てが既に誕生しているとするればそれらの全放射量は  $\sim 10^5 L_{\odot}$  となる。この場合でも [C II] 線総放射量の全放射量に対する比は 0.2% 以上となる。以上から、M 17 SW 分子雲においては、[C II] 線放射の効率が H II 領域周辺のそれに比べて大きい、と結論できる。

このことは次のように解釈することができる。M 17 H II 領域周辺のように紫外光の非常に強い (太陽近傍の  $10^4 \sim 10^5$  倍) 環境では [C II] 線は C II 領域の主要な冷却源ではない。我々の観測でも示されたように、[OI] 線が相対的に主要な冷却源になっている。これはダストからの光電子放出による加熱が十分に効果的で、ガスの温度も [OI] 線を充分励起できる程度に高いからである。一方分子雲領域では、紫外光の強度はおそらく約 2 桁 H II 領域周辺のそれよりも小さいので、ガスの加熱の効率は比較的低い。そのため [OI] 線の励起の効率は悪いが、励起温度の比較的低い [C II] 線はまだ充分効率よく励起され、重要な冷却剤になりうる。この傾向は詳細な光解離領域モデル [1] の計算で確かめられている。

なお、エネルギー源の候補として、前述のような分子雲に埋もれた B 型星だけでなく、近傍の裸の早期型星が分子雲を外から照射しているとも可能である。そのような裸の早期型星の寄与による星間空間の紫外光強度が、我々の太陽近傍でのそれよりも強いことは、M 17 領域が我々の銀河の渦状腕に位置し活発な星生成の場であることから自然に予想されることである。

このように現状では、分子雲領域に関係した C II 領域のエネルギー源は明確になっていない。この領域での近赤外カメラ等による無バイアスの高質量星の探索が重要である。また、ここで述べたような分子雲と C II 領域の共存関係が一般的であるのかどうか、広域な分子雲領域についての [C II] 線、[OI] 線の系統的な掃天観測が望まれる。

#### IV. ま と め

M 17 H II 領域及び M 17 SW 分子雲に関係した光解離領域 (C II 領域) の空間分布とエネルギー収支について、気球遠赤外分光観測の結果に基づき考察した。観測データは 2 種類あり、1 つは空間チョッピング法によって得られた [C II] 線及び [OI] 線のスペクトルで、もう 1 つはこの波長域では史上初めての試みである周波数スイッチング法による掃天観測による [C II] 線の二次元強度分布である。

H II 領域周辺の観測について重要な結果をまとめる：まず、ガスの冷却には [OI] 線の寄与が大きく、[C II] 線、[OI] 線の放射量をあわせると遠赤外線全放射量の約 0.2% (以上)



に達する。この冷却に見合うガスの加熱は、星間塵からの紫外光吸収に伴う光電子放出による加熱でまかなうことができる。次に C II 領域はかなり高密度 ( $>10^4[\text{cm}^{-3}]$ ) かつ比較的温かい ( $>100\text{ K}$ ) と考えられ、しかも H II 領域の外側 5～6 pc まで広がっている。このように広範な領域への紫外光の輸送は、C II 領域がクランプ状でなければ困難であると考えられる。

また M 17 SW 分子雲領域の観測の重要な結果をまとめると：明るい M 17 H II 領域とは関係しない、しかし分子雲とは関係する [C II] 線拡散放射の二次元分布を得た。その有望なエネルギー源は B 0 型星と考えられる IRAS 点源である。また [C II] 線放射量の全放射量に対する比は H II 領域周辺のそれより大きい。これは C II 領域を照射する紫外光強度の違いで説明することができる。

最後にこの観測でわかったように、C II 領域は空間的に広範な広がりを持つ今後系統的に観測されるべき重要な研究対象である。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] A. G. G. M. Tielens and D. Hollenbach : Ap. J. **291**(1985), 722.  
E. F. van Dishoeck and J. H. Black : Ap. J. **334** (1988), 771.
- [ 2 ] R. Chini, H. Elsässer, and Th. Neckel : A. Ap. **91**(1980), 186.
- [ 3 ] M. Felli, E. Churchwell, and M. Massi : A. Ap. **136**(1984), 53.
- [ 4 ] D. A. Harper et al. : Ap. J. **205**(1976), 136.
- [ 5 ] B. G. Elmegreen and C. J. Lada : A. J. **81**(1976), 1089.  
B. G. Elmegreen, C. J. Lada, and D. F. Dickinson : Ap. J. **230**(1979), 415.  
H. A. Thronson and C. J. Lada : Ap. J. **269**(1983), 175.
- [ 6 ] H. Matsuhara et al. : Ap. J. (Letters) **339**(1989), L62.
- [ 7 ] H. Okuda et al. : Proc. of 14th ISSTS (1984), p. 1217.  
H. Shibai et al. : (1989), in preparation.
- [ 8 ] H. Okuda et al. : Proc. of SPIE **627**(1986), 20.  
T. Nakagawa et al. : (1989), in preparation.
- [ 9 ] I. Gatley and N. Kaifu : in IAU Symp. **120**, Astrochemistry (Dordrecht : Reidel), p. 153.
- [10] M. Tanaka et al. : Ap. J. **336**(1989), 207.
- [11] J. Stutzki et al. : Ap. J. **332**(1988), 379.
- [12] IRAS Point Source Catalog. 1985, Joint IRAS Science Working Group (Washington : GPO)
- [13] D. M. Elmegreen et al. : Ap. J. **335**(1988), 803.