

暗黒星雲L1251のガスとダストの多波長観測

高木 知里*・土橋 一仁*・秋里 昂*・井上 舞*・大江 佑香*

宇宙地球科学分野

(2008年5月26日受理)

TAKAGI, C., DOBASHI, K., AKISATO, K., INOUNE, M. and OOE, Y.: Multiwavelength observation of gas and dust in the dark cloud of L1251. *Bull. Tokyo Gakugei Univ. Natur. Sci.*, **60**: 57-68. (2008) ISSN 1880-4330

Abstract

L1251 is a dark cloud in the Cepheus region having a cometary shape with a dense “head” at the galactic longitudes $\ell \geq 114^\circ$ showing active star-formation and with a diffuse “tail” at $\ell < 114^\circ$ without any signs of star formation. In this paper, the overall distributions of dust and gas in the cloud were investigated based on the photometric data taken at 7 bands in the optical to the near-infrared wavelengths (B , V , R_c , I_c , J , H , and K_s) and on the spectral data of the $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ and $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ emission lines. Using the photometric data, we derived the extinction maps of A_B , A_V , A_{R_c} , A_{I_c} , A_J , A_H , and A_{K_s} as well as the color excess maps of $E(B-V)$, $E(V-R_c)$, $E(R_c-I_c)$, $E(V-I_c)$, $E(J-H)$, and $E(H-K_s)$ to reveal the global dust distribution in L1251 at various density ranges. We found that the reddening curve representing the dependence of extinction on wavelength is similar to that suggested by Cardelli et al. (1989) for $R_V=6.0$ except for two data points for R_c and I_c . We also investigated the gas distribution of the cloud through the ^{13}CO and C^{18}O data, and derived the total molecular mass of the cloud to be $\sim 1000 M_\odot$.

Key words: radio astronomy, dark cloud, L1251, reddening curve

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 暗黒星雲L1251は彗星状の形をしており、活発な星形成が起きている領域(銀経 $\ell \geq 114^\circ$, 以下Headと呼ぶ)と星形成が起きていない領域($\ell < 114^\circ$, 以下Tailと呼ぶ)に分けられる。本研究では、可視光・近赤外線(7バンド)で測光された星のデータと $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ および $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ の分子輝線データを解析し、これらのデータの相関から暗黒星雲L1251のダストとガスの性質を探った。

星の7バンドの測光データをスターカウント法を用いてそれぞれ解析し、減光量(A_B , A_V , A_{R_c} , A_{I_c} , A_J , A_H , A_{K_s})マップを作成した。また、平均赤化法を用いて色超過($E(B-V)$, $E(V-I_c)$, $E(R_c-I_c)$, $E(V-I_c)$, $E(J-H)$, $E(H-K_s)$)マップを作成した。これにより、L1251のダストの分布を暗黒星雲の外縁部から中心部までの広い密度範囲で描き出すことができた。また、減光量と $^{13}\text{CO} \cdot \text{C}^{18}\text{O}$ 分子輝線の積分強度との相関関係をHeadとTailに分けて調査した。その結果、HeadとTailでは $A_V \sim 2$ 等を境に A_V 対 ^{13}CO の積分強度が折れ曲がった相関を示すことが明らかになった。これより ^{13}CO 分子輝線が光学的に厚くなっていることが示唆された。実際にHead内の5つのコアで、 ^{13}CO 分子輝線の光学的厚さを計算したところ全てのコアで0.5以上であり、 ^{13}CO 分子輝線が光学的に厚くなっていることが確認できた。ま

* 東京学芸大学宇宙地球科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

た、分子ガスの質量は、Headでは500 M_{\odot} 、Tailでは470 M_{\odot} であり、ほぼ同等であることが分かった。一方、可視光～近赤外線のパラメータをもとに、減光量と波長の相関を表す赤化曲線を描き、 R_V の値を求めようと試みた。 R_c, I_c バンド以外ではCardelli et al. (1989) によって示された $R_V = 6.0$ の赤化曲線に近い値を示していることが分かった。しかし R_c, I_c バンドが合わない要因は本研究ではわからなかった。また、HeadとTailで描かれる赤化曲線に顕著な違いはみられなかった。

1. はじめに

暗黒星雲はガスとダストが集まった星間雲であり、その内部のダストが背景の星の光を遮るため、可視光の波長帯では、影のように暗く見える。暗黒星雲内部のガスやダストの濃く集まっているところは、内部にまで光が透過しないため、極めて低温(典型的な温度は約10 K)である。暗黒星雲は星の誕生の場として重要な役割を果たしており、本研究で調査した暗黒星雲L1251でも原始星や若い星が形成されていることが分かっている(Sato et al. 1994, Kun et al. 1993)。本研究では星の測光データと暗黒星雲内部に存在する分子から放射される分子輝線のデータを用いて、星形成の場である暗黒星雲について調べる。

暗黒星雲によって星の光が何等減光されたかを調べる方法の一つにスターカウント法がある。この方法では単位立体角あたりの星の数を調べることで、減光量 A_{λ} (単位は等級)の分布図を描くことができる。また減光量を調べる他の方法として、平均赤化法がある。平均赤化法では、平均的な星の色指数の変化を調べることで、2つのバンド λ, λ' での暗黒星雲による色超過 $E(\lambda-\lambda')$ の分布を求めることができる。一方、分子輝線のデータを解析することにより、暗黒星雲内に存在する分子ガスの量(柱密度など)を調べることができる。一酸化炭素分子(CO)は暗黒星雲内に広く分布している。その同位体である ^{13}CO と C^{18}O の低い回転遷移($J=1-0$ など)による分子輝線は一般に光学的に薄いため、濃密な暗黒星雲内部の観測によく用いられる。

暗黒星雲L1251は彗星状の形をしており、活発な星形成が起きている領域(銀経 $\ell \geq 114^{\circ}$ 、以下Headと呼ぶ)と星形成が起きている領域($\ell < 114^{\circ}$ 、以下Tailと呼ぶ)に分けられる。これまでもL1251の星形成や物質の分布に関する研究が行われており、HeadとTailでダストの性質が異なることが示唆されている(Kandori et al. 2003)。

本研究では、可視光～近赤外線のパラメータ(7つのバンド($B, V, R_c, I_c, J, H, K_s$))における測光データから、各バンドでの減光量・色超過のマップを描き、それらのマップをもとに、CO分子の柱密度との相関をHeadとTailで比較する。また、7つのバンドのデータを用いて、波長と減光量の

関係を表す赤化曲線をHeadとTailで描くことにより、ダストの性質の違いを探る。

2. 観測天体とデータの整約

2. 1 観測天体

暗黒星雲L1251はケフェウス座の方向(銀河座標で $\ell \sim 114^{\circ}, b \sim 15^{\circ}$)に位置し、Kun et al. (1993) によって、地球から約 300 ± 50 pcの距離にあると見積もられている。光学写真のデータベースであるDigitized Sky Survey (DSS) に収録されているL1251付近の画像を図1に示す。L1251は視直径約 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ の大きさをもつ。北西の方向に 2° にわたって伸びた彗星状の形をしており、活発な星形成が起きているHead($\ell \geq 114^{\circ}$)と星形成が起きているTail($\ell < 114^{\circ}$)の2つの領域に分けられる(Sato et al. 1994)。Kun et al. (1993) によってYoung Stellar Objects (YSOs: 主系列星になる前の若い星)の候補天体の位置が調べられており、それからHeadでは星形成が活発に起こり、Tailでは星がまだ生まれていないことが分かっている。また、Kandori et al. (2003) の研究によって、Headではダストの成長が示唆されている。

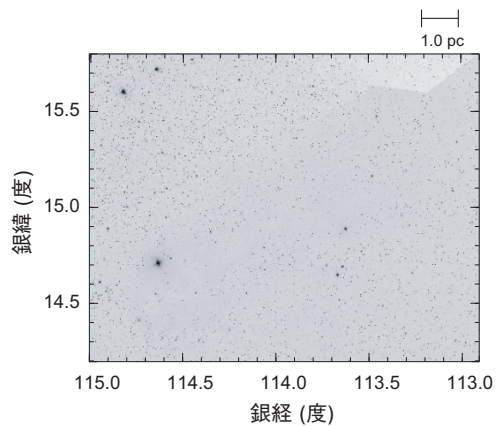


図1 L1251の光学写真 (Digitized Sky Surveyより)

2. 2 使用したデータ

解析に使用したデータは7バンドの星の測光データと2つの分子輝線のデータである。星の測光データとは各バンドで測光された星の座標や等級、測光エラーなどである。 B, V, R_c, I_c バンドの星の測光データは、Kandori et

al. (2003) によって東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡の 2kCCD カメラを用いて得られたものを使用した。データの一次整約は Kandori et al. (2003) によってすでに行われ、標準システムに変換されている。

J, H, K_s バンドの星の測光データは、Two Micron All Sky Survey (2 MASS) の Point Source (点源) カタログから引用した。

また、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ と $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 分子輝線のデータは、Sato et al. (1994) によって名古屋大学 4 m 電波望遠鏡で得られたデータを使用した。ベースラインフィッティングなどの一次整約は Sato et al. (1994) によってすでに行われている。

それ以降のデータ解析は本学の Macintosh システム上で IDL 言語を用いて行った。

3. 解析および結果

3. 1 減光量マップの作成

減光量とは暗黒星雲の背景にある星の光が暗黒星雲によって何等減光されたかを示す量である。本研究では、可視光の B, V, R_c, I_c バンドと近赤外線 J, H, K_s バンドの計 7 バンドの星の測光データを解析し、各バンド毎にそれぞれスターカウント法を用いて減光量マップを作成した。可視光の少なくとも 1 つのバンドで検出された星の分布を図 2(a) に示す。この図には約 16000 個の星がプロットされている。スターカウント法による減光量マップの作成には、これらの星のうち、各バンドでの測光エラーが 0.2 等未満の星のみを使用した。近赤外線各バンドについては、2 MASS のカタログで測光精度と検出精度が保証されているもの (rd_flag が 1, 2, 3, 4 のいずれかであり、かつ ph_qual が A, B, C, D のいずれか) で、かつ、太陽系天体に同定されていない (mp_flg が 0) 星を使用した。

まず、銀河座標に沿って観測点 (以下 grid という) を 2' 毎に設定した。各 grid を中心とする直径 10' の円 (角分解能) 内に位置し、かつ、ある等級 $m_{0\lambda}$ より明るい星の個数を数えた。10' という角分解能は、最も減光の強い領域でも B バンドで最低 4 個の星が入るように設定したものである。また、ある等級 $m_{0\lambda}$ とは λ バンドでの星の検出限界等級のことである。 $m_{0\lambda}$ の値は光度関数を実測して決定した。ここで、 $m_{0B}=20.0$ 等、 $m_{0V}=18.5$ 、 $m_{0R}=17.9$ 、 $m_{0I}=17.0$ 、 $m_{0J}=16.0$ 、 $m_{0H}=15.5$ 、 $m_{0K}=15.0$ とした。10' の角分解能内に位置する星の数は、減光のない所で数百個、減光の大きいところで数個である。星の数を角分解能の立体角で割ることで星数密度 (単位立体角あたりの星の数) マップを作成する。例として、作成した V バンドの星数密度マップを図 2(b) に示す。

次に、Wolf 図を作成する (Wolf 1923)。Wolf 図とは横軸に見かけの等級、縦軸にある等級よりも明るい星の数密度 (累積星数密度) の対数をプロットしたものである。Wolf 図と星数密度マップを用いることで、減光量マップを作成することができる。減光量算出の原理はどのバンドでも同じであるが、Wolf 図は可視光と近赤外線のバンドで異なる特徴をもつ。それに伴い減光量 A_λ の算出方法も少し異なる。

全ての星が同じ絶対等級をもち、宇宙空間に一様に分布していると仮定すると、図 3(a) の模式図のように、Wolf 図は直線で描かれる。実線は減光のない領域 (以下 “参照領域” と呼ぶ) での Wolf 図であり、破線は減光のある領域 (以下 “減光領域” と呼ぶ) の Wolf 図を表している。減光領域では暗黒星雲によって、その背景にある星の光が減光されているため、地球と暗黒星雲との距離に対応する見かけの等級 m で Wolf 図が図 3(a) の破線のように平行移動する。この平行移動量 A_λ が暗黒星雲による減光量である。破線で示した m 等付近での平行移動量 A_λ は、図から明らかのように、実線で示した A_{20} (検

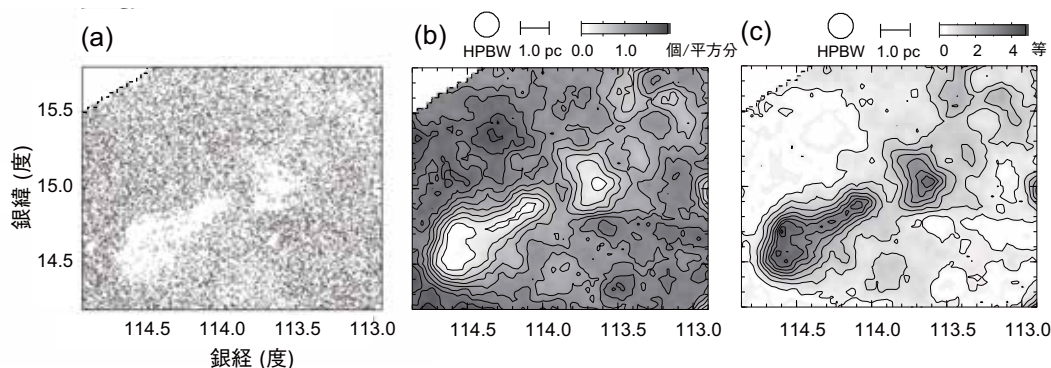


図 2 減光量マップの作成過程の例。(a) B, V, R_c, I_c バンドで検出された星の位置、約 16000 個をプロットしたものである。(b) V バンドの星数密度マップ。コントラストは 0.2 個/平方分から 0.2 個/平方分である。grid は 2', 角分解能は 10'。(c) V バンドの減光量マップ。図 5(b) を参照。grid が 2', 角分解能は 10'。

出限界等級 $m_{0\lambda}$ 付近) と等しい。よって、Wolf図の傾き b_λ と限界等級 m_0 での参照領域の累積星数密度 $\log N_{0\lambda}$ および減光領域の累積星数密度 $\log N_\lambda$ を以下の式 1 に代入することにより、 A_λ を算出できる。

$$A_\lambda = \frac{1}{b_\lambda} (\log N_{0\lambda} - \log N_\lambda) \quad \text{式 1}$$

Jバンドで実測したWolf図を図3(b)に示す。現実には星の絶対等級は一定ではなく、また、暗黒星雲も視線方向に広がりをもつため、実際の破線は図のようになだらかに変化する。

近赤外線でのWolf図が直線でよく近似されるのに対し、可視光でのWolf図は4次程度の関数で表される曲線になることが多い。図4(a)はその模式図である。図4(b)はVバンドで実測したWolf図である。図4(a), (b)の実線と破線は、それぞれ参照領域と減光領域のWolf図である。近赤外線の場合と同様に、図4(a)に矢印で示す平行移動量を測定することで A_λ を求めることができる。

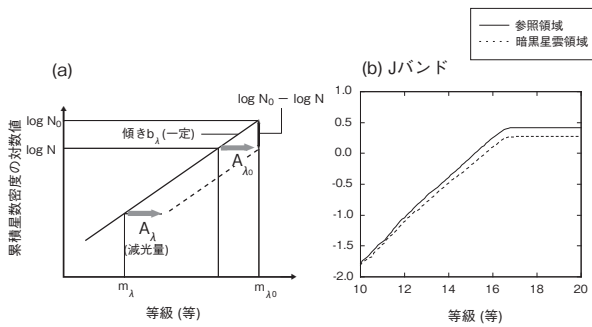


図3 近赤外でのWolf図の例。(a) 近赤外でのWolf図の模式図。(b) Jバンドで実測したWolf図。

本研究では、参照領域のWolf図について、 m_λ を $\log N_\lambda$ の4次関数として表す。

$$m(4, \lambda) = \sum_{n=0}^4 C_{n\lambda} (\log N)^n \quad \text{式 2}$$

この m_λ と限界等級 $m_{0\lambda}$ との差が、Wolf図の平行移動量、つまり減光量となる。

$$A_\lambda = m_{0\lambda} - m_\lambda \quad \text{式 3}$$

以上のようにして、Wolf図を描き、星数密度マップから減光マップを作成した。例としてVバンドの減光マップを図2(c)に示す。

図5に、このようにして求めたL1251の7バンドでの減光マップ ($A_B, A_V, A_{Rc}, A_{Ic}, A_J, A_H, A_{Ks}$) をまとめる。マップのgridは全て2'であり、角分解能は全て10'である。

ダストの量は減光量に比例するため、減光量が多いほどダストの量も多いと考えられる。また、波長が短

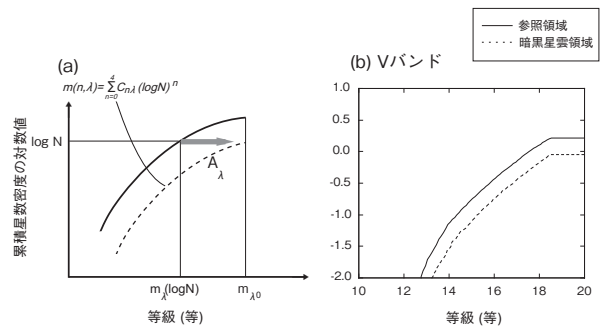


図4 可視光でのWolf図の例。(a) 可視光でのWolf図の模式図。(b) Vバンドで実測したWolf図

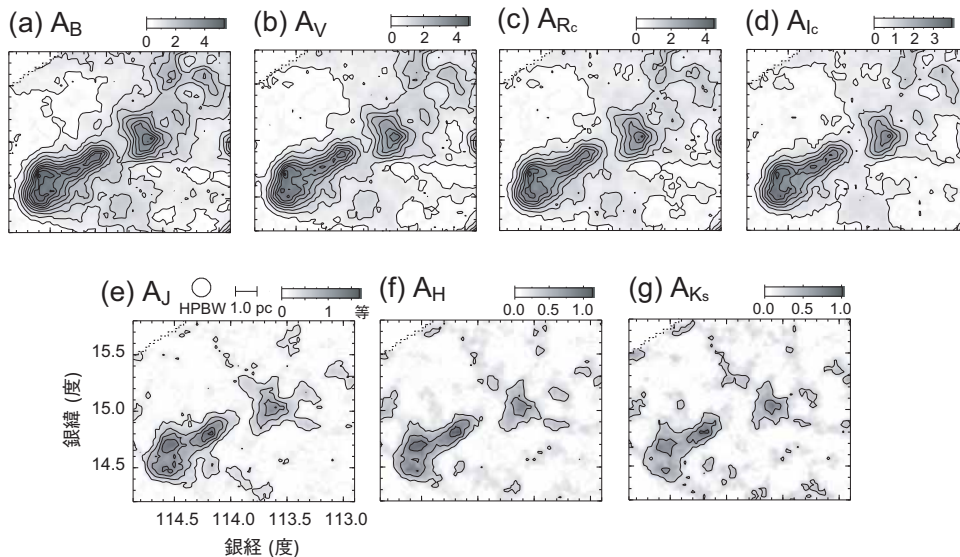


図5 各バンドの減光マップ。(a) A_B , (b) A_V , (c) A_{Rc} , (d) A_{Ic} , (e) A_J , (f) A_H , (g) A_{Ks} マップである。マップは全てgridが2', 角分解能は10'。コントアは(a)~(d)では0.5等から0.5等毎。(e)~(g)では0.3等から0.3等毎である。各パネルの左上の領域はデータが無い部分である。

い光ほどダストにより吸収・散乱されやすく、波長が長い光ほど吸収・散乱されにくくなる。そのため、7バンドのうち短波長側のBバンドなどではダストの比較的薄い領域がよくトレースされ(図5(a)), 一方、長波長側の K_s バンドなどではダストの濃密な領域(図5(g))が詳細に描き出されている。可視光～近赤外線の高波長で減光量マップを作成することにより、ダストの分布を暗黒星雲の外縁部から中心部までの広い密度範囲で描き出すことができる。減光量マップのノイズレベルは星の数によって決まるため、減光が大きく、星の数の少ない領域ほどノイズレベルも高くなる。減光量の最も大きな領域では、可視光のバンドでのノイズレベルは約0.14等、近赤外線のバンドでは約0.2等であった。どのマップでも、減光量の大きい領域ではマップの典型的なノイズレベルよりも減光量の値が有意に大きくなっている。また、減光量はどのバンドでもTailに比べHeadの方が大きくなっており、ダスト量がHeadで多くなっていることが確認できる。

3. 2 色超過マップの作成

色超過マップは平均赤化法を用いて作成した。星の光は波長が短いほどダストによって吸収・散乱されやすくなるため、ダストを通して見た星の光は赤化する。これを星間赤化という。そのため、同じ星を観測した場合でもバンドによって星の明るさは異なる。ある波長 λ と λ' よりも長波長の λ' で観測した星の等級 $m(\lambda)$ および $m(\lambda')$ の差 $m(\lambda) - m(\lambda')$ のことを色指数という。減光領域の色指数 $m(\lambda) - m(\lambda')$ の値は参照領域の色指数 $m_0(\lambda) - m_0(\lambda')$ に比べて大きくなる。この参照領域の色指数と減光領域の色指数の差が色超過である。色超過は以下の式4のように表される。

$$E(\lambda - \lambda') = \{m(\lambda) - m(\lambda')\} - \{m_0(\lambda) - m_0(\lambda')\} \quad \text{式4}$$

まず測光された星のうち各バンドでの測光エラーの大きい星を除外した。除外の方法は可視光のバンドと近赤外線のバンドで異なる。可視光のバンドでは測光エラーが0.15等以上の星を除外した。近赤外線のバンドでは、測光精度と検出精度が保証されているもの(2 MASSカタログでrd_flagが1, 2, 3のいずれかであり、かつph_qualがA, B, Cのいずれか)で、かつ、太陽系天体に同定されていない(mp_flgが0の)星を使用した。減光量マップの作成に使用した条件よりも厳しい条件で星を選定した。

また、測光された星のうちYSOsを同定して除外した。YSOsに付随する星周円盤は内部の星の光を赤化す

る。暗黒星雲による赤化量を測定するためにはこれを除外する必要がある。YSOsの除外方法も可視光のバンドと近赤外線のバンドで異なる。可視光のバンドでは、各YSOs候補天体の座標から3"以内に位置する星を、解析に使用した約16000個の星の中から探し出し、除外した。除外したのは、IRAS 22398 + 7448のみである。近赤外線のバンドでは、星の色 $H-K_s$ と $J-H$ の関係式5, 6, 7を全て満たす星を除外した。

$$H-K_s > 0.95 \quad \text{式5}$$

$$J-H < \frac{1.2}{0.45}(H-K_s - 0.95) + 1.0 \quad \text{式6}$$

$$J-H < \frac{1.8}{1.1}(H-K_s - 1.4) + 2.2 \quad \text{式7}$$

(この除外方法については秋里2007を参照)

減光量マップと同様にgridを2'に設定し、各gridから直径10'の角分解能内に位置する星の平均色指数を計測した。減光量マップと同じgridと角分解能を用いたのは、減光量マップと色超過マップを直接比較するためである。

参照領域での星の平均的な色指数を測定し、単位立体角あたりの星の平均色指数マップから参照領域での色指数を差し引き、色超過マップを作成した。図6に作成した一連の色超過 $E(B-V)$, $E(V-R_c)$, $E(R_c-I_c)$, $E(V-I_c)$, $E(J-H)$, $E(H-K_s)$ のマップを示す。

色超過マップでは、スターカウント法による減光量マップと比べ、マップのシグナル・ノイズ比(S/N)が高く、より細かい構造が描き出されている。特に近赤外線では、その違いが顕著である。また、減光量マップと色超過マップでは、図からも明らかであるように、ピーク的位置(座標)が有意に異なっている。

3. 3 減光量・色超過 対 ^{13}CO および C^{18}O 分子輝線の積分強度

本研究で使用した分子輝線のデータは、Sato et al. (1994)によって観測・整約された ^{13}CO ・ C^{18}O 分子輝線の積分強度マップである。図7に2つの積分強度マップを示す。これらのマップのgridと角分解能は共に2', および2.7'である。相関をとるために、それぞれの積分強度マップにガウシアンスムージングをかけ、角分解能を減光量マップと同じ10'に揃えた。一般に、分子輝線の積分強度と分子の柱密度にはよい相関があり、積分強度が大きくなるほど柱密度も大きくなる。積分強度マップから、分子ガスの質量分布を推定することができる。

減光量 A_V と ^{13}CO 分子輝線の積分強度の関係をL1251全体とHeadおよびTailと比較し、ダストとガスの相関を

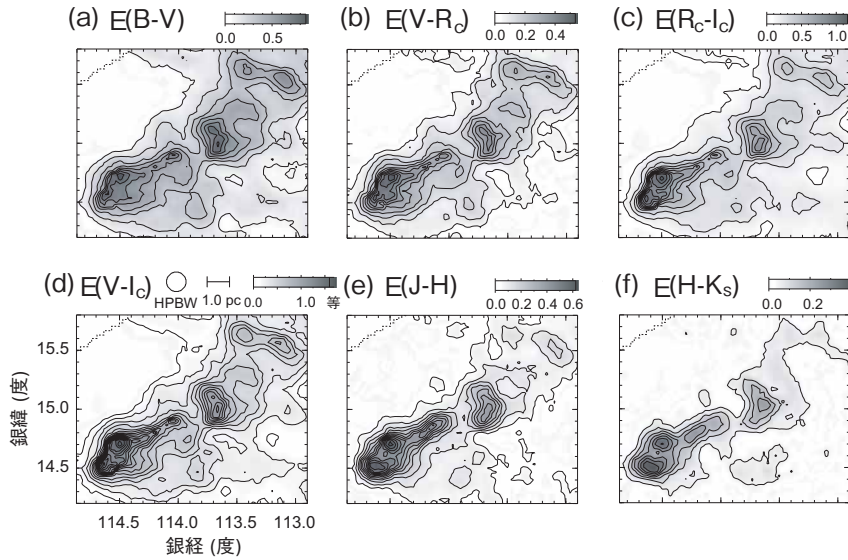


図6 色超過マップ。(a) $E(B-V)$, (b) $E(V-R_c)$, (c) $E(R_c-I_c)$, (d) $E(V-I_c)$, (e) $E(J-H)$, (f) $E(H-K_s)$ マップ。マップは全て grid が 2', 角分解能は 10'。コントアは (a), (c), (d) では 0.1 等から 0.1 毎。 (b), (e), (f) では 0.05 等から 0.05 等毎である。各パネルの左上の領域はデータが無い部分である。

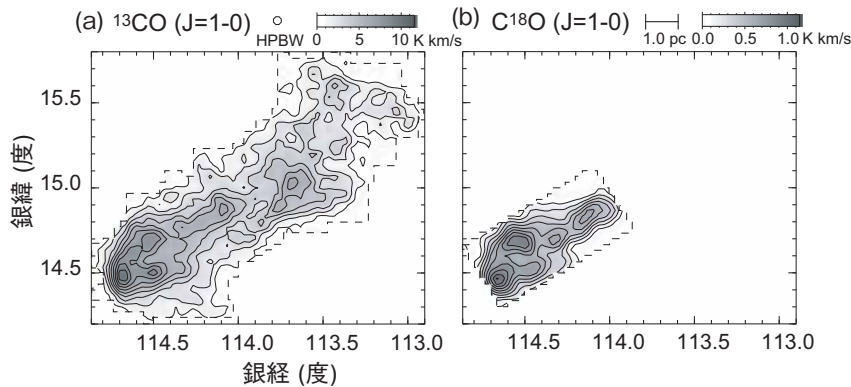


図7 (a) ^{13}CO と (b) C^{18}O 分子輝線の積分強度マップ。共に grid が 2', 角分解能は 2.7'。(a) のコントアは 1.0 K km s^{-1} から 1.0 K km s^{-1} 毎。(b) のコントアは 0.1 K km s^{-1} から 0.1 K km s^{-1} 毎である。各パネルの破線の外の領域はデータが無い部分である。データは Sato et al. (1994) による。

調査した。相関をとった 3 つの領域 (All, Head, Tail とした) を図 8 に示す。得られた相関図を図 9 にまとめる。また、図 8 の領域 Head 2 の範囲で、 C^{18}O 分子輝線との相関も調べた (図 9(d))。

図 9(a), (b), (c) にみられるように、Head と Tail の両方で、相関は A_V が小さいところでは比例関係にあるが、 $A_V \sim 2$ 等付近で折れ曲がっている。一方、図 9(d) に示す Head 2 での A_V と C^{18}O 分子輝線の相関では、この折れ曲がりは見られない。一般に、 C^{18}O 分子は ^{13}CO 分子より存在量が少ない (約 5 分の 1) ため、 C^{18}O 分子輝線は ^{13}CO 分子輝線よりも光学的に薄い。 $A_V \sim 2$ 等付近での A_V 対 ^{13}CO の相関関係の変化は、 ^{13}CO 分子輝線が光学的に厚くなっているために引き起こされている可能性がある。一方、波長の短い V バンドの減光量も高密度領域ではすぐに飽和してしまうため、図 9 の横軸の A_V は 2 等以

上の範囲では誤差が大きい可能性がある。そこで、 A_V の代わりに、より光学的に薄い近赤外線の減光量や色超過と、 $\text{C}^{18}\text{O} \cdot ^{13}\text{CO}$ 分子輝線との相関関係を調べた。その結果、やはり図 9 と同様の折れ曲がりがあることを確認することができた。以上より、減光の大きい領域 ($A_V \geq 2$) では、減光の小さい領域 ($A_V < 2$) よりも ^{13}CO 分子輝線がさらに光学的に厚くなっていることが示唆される。

3. 4 分子分光データの解析

3. 3 章で ^{13}CO 分子輝線が光学的に厚くなっている可能性を指摘した。ここでは、その光学的厚さを実際に推定する。比較のため C^{18}O 分子輝線の光学的厚さも計算する。

Sato et al. (1994) によって測定された ^{13}CO および C^{18}O 分子輝線のデータ (表 1) を用いて、それらの光学的厚

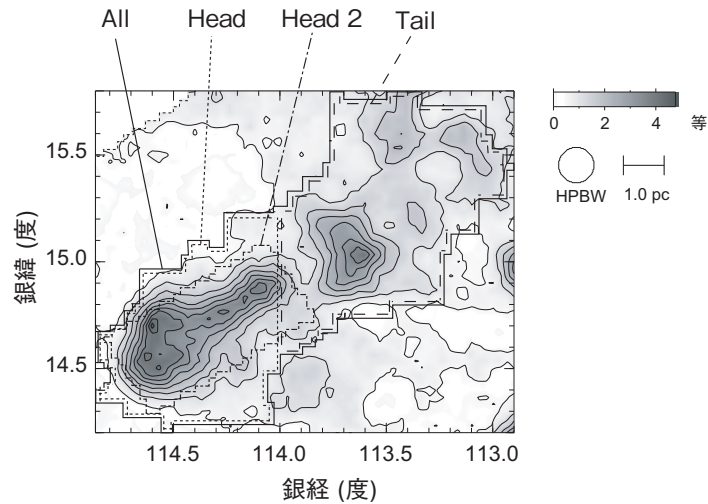


図 8 Vバンドでの減光量マップ。All, Head, Head2, Tail に相当する領域を示した。

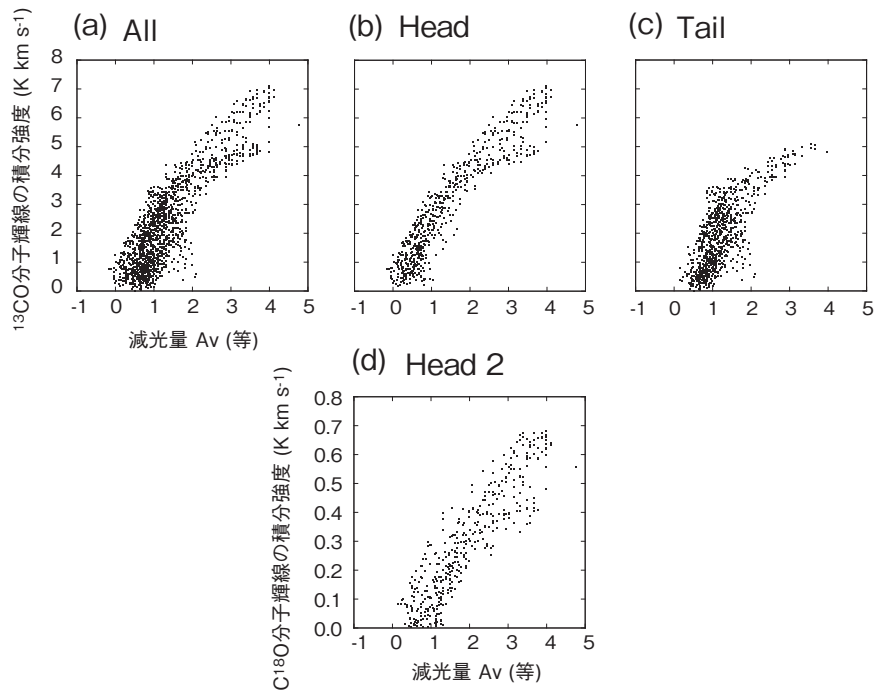


図 9 A_V と ^{13}CO および C^{18}O 分子輝線の積分強度の相関図。(a), (b), (c) はそれぞれ図 8 に示した All, Head, Tail の領域での A_V と ^{13}CO の相関図。(d) は Head 2 の領域での A_V と C^{18}O 分子輝線の積分強度の相関図。

さ $\tau[X]$ (X は ^{13}CO または C^{18}O) を次の式 8 から計算した。

$$\tau[X] = -\ln \left\{ 1 - \frac{T_R^*}{J(T_{ex}) - J(T_{bg})} \right\} \quad \text{式 8}$$

ただし,

$$J(T) = \frac{T_0}{e^{\frac{T_0}{T}} - 1} \quad \text{式 9}$$

$$T_0 = \frac{h\nu}{k} \quad \text{式 10}$$

である。ここで, T_R^* はアンテナ温度, T_{ex} は励起温度,

T_{bg} は宇宙背景放射の温度 (2.7 K), k はボルツマン定数, h はプランク定数, ν は各輝線の静止周波数である。 T_0 は分子輝線によって決まる定数である。各分子輝線の T_0 の値を表 2 にまとめる。

本研究では, Sato et al. (1994) によって検出された Head に位置する ^{13}CO の 5 つの分子ガスの濃密な領域 (以下, それぞれコア A~E と呼ぶ) での τ を計算した。励起温度 (T_{ex}) は分子雲の典型的な温度である 10 K を仮定し, 5 つのコアでの T_R^* は表 1 にまとめた値を使用した (Sato et al. 1994 による)。

コアの座標と計算したそれぞれのコアでの ^{13}CO およ

びC¹⁸O分子輝線のτを表3にまとめる。コアの位置は図10(a)~10(e)に四角印で示す。¹³CO分子輝線のτは全てのコアで0.5以上であり、¹³CO分子輝線が光学的に厚くなっていることを確認できた。コアEではτ[¹³CO]=1.55とL1251内のコアのうち最も大きい値を示しており、光学的に薄いC¹⁸O分子も同様に大きい値τ[C¹⁸O]=0.18を示している。

次にN[¹³CO]およびN[C¹⁸O]を算出した。局所熱力学平衡を仮定した場合、これらの分子の柱密度N[X] (Xは¹³COまたはC¹⁸O)は、τ[X]≪1の場合は以下の式11から、τ[X]~1の場合は式12から求められる(例えばBernard et al. 1999)。

$$N[X] = \frac{C_0}{1 - e^{-(T_0/T_{ex})}} \frac{e^{\frac{J_{lev} T_0}{2T_{ex}}}}{J_{lev} + 1} \beta^{-1} \int T_R^*(V_{LSR}) dV_{LSR} \quad \text{式11}$$

$$\cong \frac{C_0}{1 - e^{-(T_0/T_{ex})}} \frac{e^{\frac{J_{lev} T_0}{2T_{ex}}}}{J_{lev} + 1} \tau_0 \Delta V \quad \text{式12}$$

ここで、

$$J_{lev} = 0 \quad \text{式13}$$

$$\beta = \frac{1 - e^{-\bar{\tau}}}{\bar{\tau}} \quad \text{式14}$$

$$C_0 = \frac{3k}{8\mu^2 B \pi^3} \quad \text{式15}$$

である。C₀は分子輝線によって異なる値をもつ定数、J_{lev}は低い方の回転量子数、βは脱出確率、∫T_R^{*}(V_{LSR})dV_{LSR}は分子輝線の積分強度である。式12中のτ₀は分子輝線のピーク速度(V=V_{LSR})での光学的厚さであり、ΔVは分子輝線の半値幅である。式14のτ̄は光学的厚さの速

表1 L1251の¹³COおよびC¹⁸O分子輝線のガウシアンパラメータ

コア	座標		¹³ CO (J=1-0)			C ¹⁸ O (J=1-0)		
	l (°)	b (°)	T _R [*] (K)	V _{LSR} (km s ⁻¹)	ΔV (km s ⁻¹)	T _R [*] (K)	V _{LSR} (km s ⁻¹)	ΔV (km s ⁻¹)
A	114.10	14.87	2.9	-3.8	1.9	0.72	-3.9	1.3
B	114.29	14.72	3.0	-4.1	1.4	0.96	-4.0	1.0
C	114.49	14.72	3.5	-4.6	1.8	0.84	-4.5	1.7
D	114.49	14.52	3.7	-3.8	2.0	0.48	-3.8	2.0
E	114.67	14.52	5.3	-3.9	1.7	1.1	-3.9	1.4

※ Sato et al. (1994), Table 1より。コアA~Dの位置は図11に示す。

表2 物理量算出に使用したパラメータ

分子	遷移	静止周波数ν (GHz)	双極子モーメントμ (Debye)	T ₀ (K)	C ₀ (cm ² K ⁻¹ km ³ s)	回転定数B (GHz)
¹³ CO	J=1-0	110.20136	0.1098	5.29	2.51×10 ¹⁴	54.891
C ¹⁸ O	J=1-0	109.78218	0.1098	5.27	2.52×10 ¹⁴	55.101

※ Yang (1990), Table 2~3より

表3 L1251のコアの物理量

コア	¹³ CO (J=1-0)		C ¹⁸ O (J=1-0)	
	光学的厚さ	¹³ COの柱密度 (10 ¹⁵ cm ⁻²)	光学的厚さ	C ¹⁸ Oの柱密度 (10 ¹⁴ cm ⁻²)
A	0.56	6.6	0.11	9.1
B	0.59	5.1	0.15	9.5
C	0.74	8.1	0.13	14.0
D	0.80	9.8	0.07	9.1
E	1.55	16.2	0.18	15.4

※励起温度 T_{ex} =10 Kを仮定した。
コアA~Dの座標は表1にまとめ、位置は図11に示す。

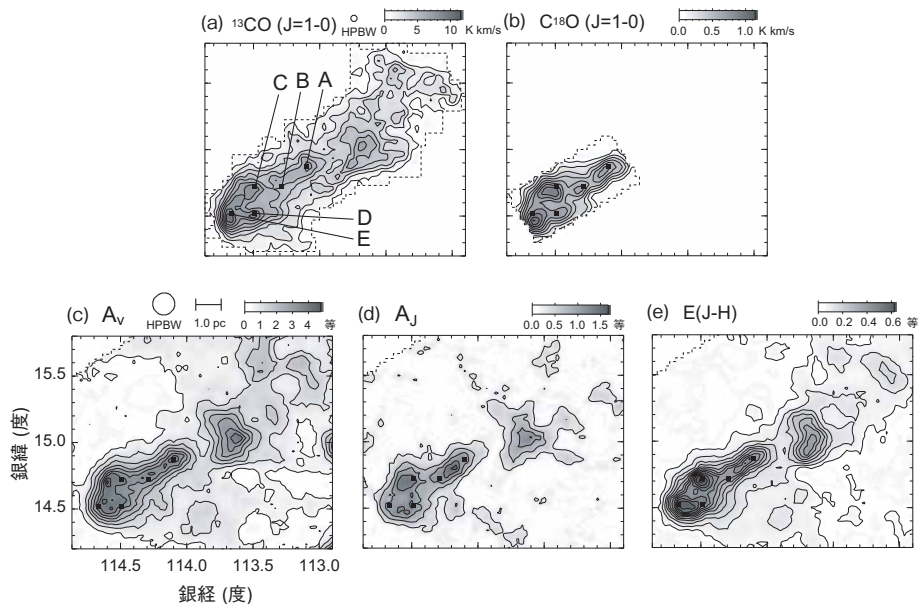


図10 L1251の分子雲コア($^{13}\text{CO}(J=1-0)$ で検出)を示した図。(a)~(e)のマップ全てに四角でA~Eのコアの位置を示した。コンタとグレースケールは、(a) 図7(a)と同じ ^{13}CO 分子輝線の積分強度マップ, (b) 図7(b)と同じ C^{18}O の積分強度図, (c) 図5(b)と同じ A_V マップ, (d) 図5(e)と同じ A_J マップ, (e) 図6(e)と同じ $E(J-H)$ マップである。

度平均であり, 式15の μ は永久双極子モーメント, B は回転定数である。 $T_{\text{ex}}, V_{\text{LSR}}, \Delta V$ のパラメータを表1に, 計算に使用したパラメータ (Yang 1990) を表2にまとめる。

式8を用いて導出した τ と式12を用いて, 各コアでの $N[^{13}\text{CO}]$ と $N[\text{C}^{18}\text{O}]$ を計算した。これらの値を表3にまとめる。

次に ^{13}CO 分子輝線のデータを用いて, 分子ガスの質量を導出する。分子ガスの質量の大部分を占めるのは水素分子とヘリウム原子であるが, 分子雲のような低温($\sim 10\text{K}$)の領域では励起される遷移はない。そのため, 励起温度が低く存在量の多い ^{13}CO 分子の低い回転遷移によるスペクトルを観測し, ^{13}CO 分子と H_2 分子の存在比を仮定して, 分子ガスの質量を見積もる。

Dickman (1978) によると $N[\text{H}_2]$ と $N[^{13}\text{CO}]$ には式16のような関係がある。

$$N[\text{H}_2] = 5.0 \times 10^5 N[^{13}\text{CO}] \quad \text{式16}$$

$T_{\text{ex}} = 10\text{K}$, $\tau[^{13}\text{CO}] = 0.1$ を仮定し, 式11から $N[^{13}\text{CO}]$ を計算し, 式16を用いて $N[\text{H}_2]$ に変換した。さらに, 20%のヘリウムの存在量を仮定して, 平均分子量を $2.4m_{\text{H}}$ (m_{H} は陽子質量)とし, $N[\text{H}_2]$ から分子ガスの質量を計算した。

分子ガスの質量は図8に示した4つの領域のうち, All, Head, Tailの3つの領域について導出した。それぞれの質量を表4にまとめる。分子ガスの質量は, Headでは $500 M_{\odot}$, Tailでは $470 M_{\odot}$ であり, ほぼ同等であることが分かった。

3.5 赤化曲線の測定

赤化曲線は A_V で規格化した A_i (つまり A_i/A_V)を波長の逆数($1/\lambda[\mu\text{m}^{-1}]$)についてプロットし, 減光量と波長の相関を示したものである。赤化曲線は R_V の値によってその形が決まることCardelli et al. (1989)の経験的な研究で分かっている。 R_V とは以下の式17より B バンドと V バンドで決まる値である。

表4 L1251の物理量

領域	総質量 (M_{\odot})	広がり (平方度)
All	970	1.58
Head	500	0.66
Tail	470	0.92

※距離を300 pc, 励起温度 $T_{\text{ex}} = 10\text{K}$, 光学的厚さ $\tau = 0.1$ で測定した。領域は図9に示した。

$$R_V = \frac{A_V}{E(B-V)} \quad \text{式17}$$

星間空間における平均的な R_V は ~ 3 であることが知られているが、ダストの濃い領域では $R_V \sim 5$ 程度の大きな値をとることもある(例えば小暮智一 1994)。

L1251での R_V の値はKandori et al. (2003) によって調査され、Headでは $R_V = 4 \sim 6$ 、Tailでは $R_V \sim 3.2$ を示し、TailからHeadにかけて R_V が大きくなることが分かっている。しかしKandori et al. (2003) の方法ではオフセットの問題がある。

本研究では可視光～近赤外線の7つのバンドのデータから、L1251での赤化曲線を実際に描き、3つの領域(All, Head, Tail, 図8を参照)での R_V を確認しようと試みた。 A_i/A_V は A_V と A_i の相関を以下の式18でフィットして求め

ることにより、オフセットの問題を解決した(図11(a), (b), (c))。

$$A_i = \alpha A_V + \beta \quad \text{式18}$$

真の α は A_i/A_V であり、 β はオフセットである。表5に求めた A_i/A_V とCardelli et al. (1989) による $R_V = 3.1, 6.0, 8.0$ の場合の A_i/A_V をまとめる。フィットのエラーは A_i/A_V に対して十分小さい値となった。

以上のようにして A_i/A_V から求めた赤化曲線を、領域別に図12に実線で示す。図中には、 $R_V = 3.1, 6.0, 8.0$ の場合の赤化曲線を、それぞれ破線、点線、一点破線で重ねてプロットした。

実測した赤化曲線は R_c, I_c バンド以外では $R_V = 6.0$ の場合の赤化曲線に近い値を示している。しかし R_c, I_c バン

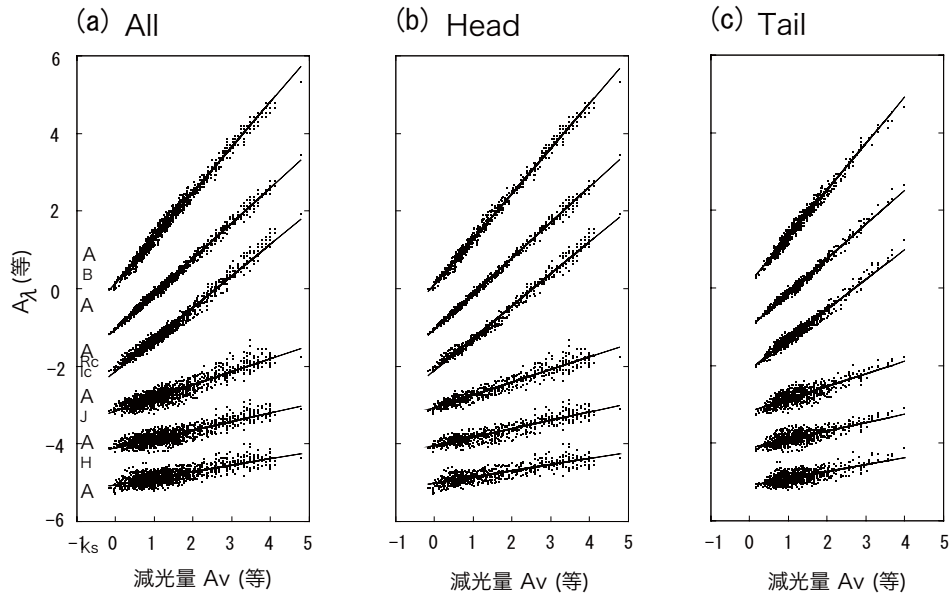


図11 減光量 A_V と A_λ の相関図。(a), (b), (c) はそれぞれ図8に示したAll, Head, Tailの領域での A_V と A_λ の相関図である。プロット点は上から $A_B, A_V, A_{Rc}, A_{Ic}, A_J, A_H, A_{Ks}$ の原点は0.0, -1.0, -2.0, -3.0, -4.0, -5.0 だけずらしてある。また、(a)～(c)の相関図にプロットした直線は A_V と A_λ の比を求めるためにフィットした直線である。この直線の傾きを A_V と A_λ の比として表5にまとめた。

表5 A_V に対する A_λ の比 (A_V/A_λ)

A_λ	本研究			Cardelli et al. (1989)	
	All	Head	Tail	$R_V=3.1$	$R_V=6.0$
A_B	1.17	1.17	1.20	1.31	1.16
A_V	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
A_{Rc}	0.91	0.92	0.88	0.81	0.86
A_{Ic}	0.82	0.83	0.77	0.59	0.68
A_J	0.34	0.33	0.32	0.28	0.34
A_H	0.22	0.22	0.22	0.18	0.22
A_{Ks}	0.17	0.16	0.18	0.12	0.14

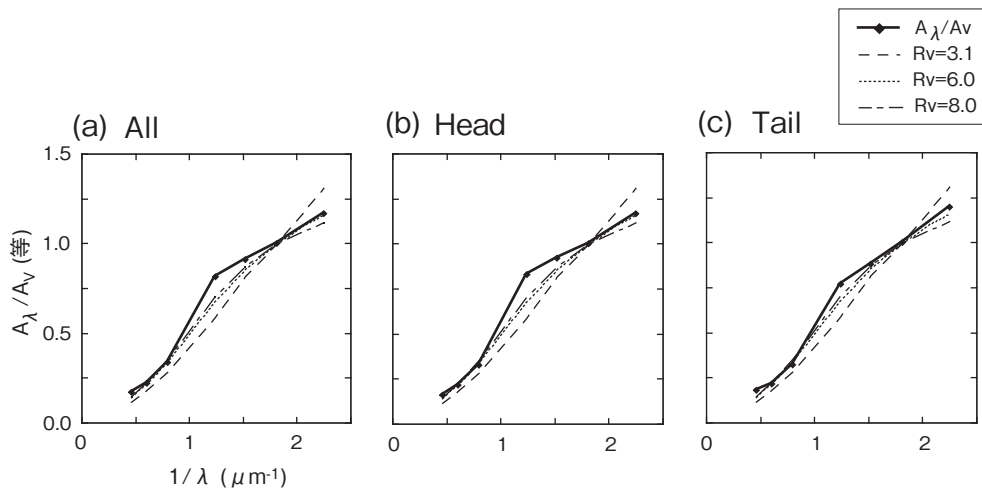


図12 赤化曲線 ($1/\lambda$ と A_λ/A_V の相関図)。 (a), (b), (c) はそれぞれ図 8 に示した All, Head, Tail の領域で描かれる赤化曲線である。プロット点は図 11 の直線の傾きから求めた A_λ/A_V の値であり, 表 5 にその値をまとめた。点線は Cardelli et al. (1989) の $R_V = 3.1, 6.0, 8.0$ の場合の赤化則を示す。 $R_V = 3.1, 6.0, 8.0$ の場合の A_λ/A_V 値を表 5 にまとめた。

ドが合わない要因は本研究ではわからなかった。また, Head と Tail の赤化曲線に顕著なちがいはみられなかった (図 12(b), (c))。

4. 結論

L1251 の 7 バンドの星の測光データを用いて, 減光量マップと色超過マップを作成した。減光量および色超過と, $^{13}\text{CO} \cdot \text{C}^{18}\text{O}$ 分子輝線の積分強度の相関をとり, ダストによる減光量とガスの量の相関を調べた。また, 可視光～近赤外線のデータを基に赤化曲線を描き, ダストの性質を調査した。これらの結果を以下にまとめる。

- (1) 暗黒星雲 L1251 の減光量マップ ($A_B, A_V, A_{Rc}, A_{Ic}, A_J, A_H, A_{Ks}$) と色超過マップ ($E(B-V), E(V-R_c), E(R_c-I_c), E(V-I_c), E(J-H), E(H-K_s)$) を作成することで, ダストの分布を暗黒星雲の外縁部から中心部までの広い密度範囲で描き出すことができた。
- (2) A_V と $^{13}\text{CO} \cdot \text{C}^{18}\text{O}$ 分子輝線の積分強度の相関をとったところ $A_V \sim 2$ 等で相関が変化していることが分かった。これより ^{13}CO 分子輝線が光学的に厚くなっていることが示唆される。実際に Head 内の 5 つのコアで, ^{13}CO 分子輝線の $\tau[^{13}\text{CO}]$ を計算した。 $\tau[^{13}\text{CO}]$ は全てのコアで 0.5 以上であり, ^{13}CO 分子輝線が光学的に厚くなっていることが確認できた。
- (3) $T_{\text{ex}} = 10 \text{ K}$, $\tau[^{13}\text{CO}] = 0.1$ を仮定し, 分子雲の領域別の質量を算出したところ, 分子ガスの質量は, Head では $500 M_\odot$, Tail では $470 M_\odot$ であり, ほぼ同等であることが分かった。
- (4) 可視光～近赤外線のデータをもとに赤化曲線を描き, R_V の値を求めようと試みた。 R_c, I_c バンド以外では $R_V = 6.0$ の赤化曲線に近い値を示していること

が分かった。しかし R_c, I_c バンドが合わない要因は本研究ではわからなかった。また, Head と Tail で描かれる赤化曲線に顕著なちがいはみられなかった。

謝 辞

この研究は, 筆頭著者である高木の卒業研究 (平成 19 年度) として行いました。 2 MASS のデータの準備の一部には, 西浦慎悟先生がご協力くださいました。また, 同先生には本論文の原稿の推敲にも適切な助言を頂きました。本研究を進めるにあたり科学研究費補助金 (課題番号 18026003) 及び伊藤科学財団 (H19) の資金的援助を受けました。ここに感謝致します。

引用文献

- 秋里昂, 2008, 2MASS を利用したケフェウス座領域の広域近赤外線減光量マップの作成, 卒業論文 (東京学芸大学)
- Bernard, J. P., Dobashi, K., Momose, M. 1999, *Astron. & Astrop.*, 350, 197
- Cardelli, J. A., Geoffrey, C. Clayton, John, S. Mathis 1989, *Astron. J.*, 345, 245
- Dickman, R. L. 1978, *Astron. J.*, 37, 407
- 神鳥亮, 2000, 多色観測に基づく暗黒星雲の減光の研究, 修士論文 (東京学芸大学)
- Kandori, R., Dobashi, K., Uehara, H., Sato, F., & Yanagihara, K. 2003, *Astron. J.*, 126, 1888
- 小暮智一, 1994, 宇宙物理学講座第 3 巻「星間物理学」, ごとう書房
- Kun, M., & Prusti, T. 1993, *Astron. & Astrop.*, 272, 235
- Sato, F., Mizuno, A., Nagahama, T., Onishi, T., Yonckura, Y., & Fukui, Y. 1994, *Astron. J.*, 435, 279

Yang J., A STUDY OF MOLECULAR CLOUDS AND STAR-
FORMATION IN THE CEPHEUS-CASSIOPEIA REGION, 1990,
博士論文 (名古屋大学)