

# Near-infrared extinction law in the $\rho$ Ophiuchi, Chamaeleon, and Coalsack dark clouds へびつかい座, カメレオン座, およびコールサック分子雲の 近赤外減光則

直井隆浩

## 1 研究目的

星間空間は、一般にダストと呼ばれるオングストロームからミクロンサイズの固体微粒子に満ちている。ダストは、そこを通過する光（電磁波）を吸収・散乱する。これを減光と呼ぶ。減光はダストのサイズ、形状、構造、組成、そして密度分布に依存し、また光の波長によっても異なる。ダスト密度の比較的高い ( $10^3\text{--}6$  個/cm<sup>3</sup>) 領域は分子雲 (1-10pc) と呼ばれ、星・惑星が形成される母体となり得るため、減光を詳しく調べることで、その光に減光をもたらしたダストの物性を知ることが出来、星・惑星系の形成およびその後の進化を探る上で極めて重要な情報を得ることになる。

観測的減光研究は、光の波長にしてその効果の最も顕著に認められる紫外から可視域において主に行われてきた。この波長域の性質上、比較的希薄な星間空間を対象とした研究が多く、減光には視線方向に対してバリエーションを持つことが知られている。このバリエーションは、 $R_V$  ( $\equiv A_V/E_{B-V}$ ) で表されるひとつのパラメータによって近似的に分類することが出来る。

一方、紫外可視と比較して波長の長い赤外領域は主に、比較的ダスト密度の濃い分子雲の観測に適している。近赤外域の減光については、観測が不十分なため、明確な減光則は示されていない。一般に、視線方向に対して明らかなバリエーションは認められず、おおよそ  $A_\lambda \propto \lambda^{-\alpha}$  ( $\alpha \sim 1.6\text{--}1.8$ ) の関係が知られているのみである。近年、観測データの充実と共に、近赤外の減光則が纏められ、分子雲毎の相違も示されつつある。しかしながら、信頼置ける明確な成果は未だ示されておらず、減光をもたらすダストにまで及ぶ定量的議論に至っては皆無に等しい。近赤外は、紫外や可視と比較して波長が長いため、比較的大きなサイズのダストに敏感であり、星形成をもたらすような比較的ダスト密度の濃い領域を観測するのに適している。このため、近赤外の減光を知ることが、星・惑星系形成過程の解明へ向けた極めて重要な研究材料のひとつといえる。本研究では、比較的近傍の分子雲として知られるへびつかい座、カメレオン座、およびコールサック分子雲を、南アフリカサザランド観測所の SIRIUS/IRSF を用いて  $JHK_s$  バンド測光観測をおこない、精密に減光を求め、これを議論した。また、モデルを用いた結果と比較することで、ダストについて定量的な議論も行った。なお、紙面の都合上参考文献をはじめ、観測手法、データ解析の詳細については省略する。

## 2 観測領域

本研究では、へびつかい座、カメレオン座、およびコールサック分子雲の  $JHK_s$  バンド測光観測をおこなった。へびつかい座分子雲は太陽系からの距離がおおよそ 125pc、銀河面から比較的離れた ( $(l, b) = (345, 17)$ )、比較的巨大な構造を持つ、中から低質量形の星形成領域として知られている。中心部のコアは  $A_V > 100$  等を超えるとされており、極めてダスト密度が高く、YSOs (Young Stellar Objects; 比較的若い天体) も数多く報告されている。コアから北東方向に二本の伸張した特徴的なフィラメント構造を持つ。古くから知られた分子雲であるため、観測も多い。本研究ではダスト密度の最も濃い領域を L1688、それよりやや東部の比較的ダスト密度の濃い領域を L1689、更に北東方向に伸びたフィラメント構造部を L1712 と区別し、観測を行った。

カメレオン座分子雲は、太陽系からの距離が 150-180pc、やはり銀河面から比較的離れた ( $(l, b) = (300, -16)$ )、中から低質量型の星形成領域である。一般にカメレオン I, II, および III と分類され、この順にダスト密度は低くなると考えられており、カメレオン III に至っては比較的希薄なフィラメント構造を主体としている。本研究では、やはりへびつかい座と同

様に I, II, および III 領域のそれぞれ最も密度の高い領域を別々に選んで観測を行った。

コールサック分子雲は、太陽系からの距離が 180pc, 銀河面上に位置した  $(l, b) = (302, 0)$ , 比較的希薄な分子雲である。星形成は今のところ観測されていない。本研究ではグロービュール 2 と呼ばれる、最も密度の濃い領域を選択して観測を行った。

### 3 $E_{J-H}/E_{H-K_s}$ 値の決定

本研究では、近赤外の減光をあらわすパラメータに  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  を利用した。 $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  は、 $J-H$  vs.  $H-K_s$  二色図上において、赤化ベクトルの向く方向を示している。二色図から赤化ベクトルの傾きを精密に求めるためにはいくつかの問題点を改良しなければならない。

- 光学システム（観測装置）の相違：フィルターの透過率と有効波長がシステムによって異なるため、減光における色の変化が異なる現象。本研究では、SIRIUS/IRSF 単一システムによる観測のため、システム間の変換に利用される単純な変換式を用いることなく、高精度の結果を導くことが出来た。
- フィルター効果：フィルターの有効波長に幅があるため、減光による SED の変形の影響を受け、赤化ベクトルが曲がる現象。従来では殆ど省みられていなかったが、本研究では考慮に入れた。
- 減光以外の影響：YSOs（Young Stellar Objects：比較的若い星）のディスクからのエミッションの影響により、赤化ベクトルの向きが低く見積もられる影響。本研究では、YSOs は相対的に数が少ないことをから、次の「本来のカラーの仮定」を用いて作成された図の尾根を辿ることで、その影響を回避した。
- 本来のカラーの仮定：減光を求めるためには、減光を受ける前の情報が求められる。星までの距離がわかる場合、限界等級も考慮することで、おおよそのスペクトルタイプを知ることが出来る。しかし分子雲の場合、背景星を見ていることになるため、この手法は利用出来ない。本研究では、ターゲットの近傍で殆ど減光を受けていないと考えられる領域を参照領域と呼び、本来のカラーを持つ星の分布とみなした。

以下には例として、カメレオン I 領域の観測結果と  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値の決定法を示す。他の全ての領域においても、決定法は同様である。

図 1 上左および中央には、本来のカラーを示す参照領域とカメレオン I 領域の測光結果（測光エラー 0.1 等以下の条件で、22899 個のポイントソースを同定）をプロットした  $J-H$  vs.  $H-K_s$  二色図を示す。ポイントソースの分布は、

$$\rho(x, y) = \frac{1}{Nh} \sum_{l=1}^N K\left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{X}_l}{h}\right) \quad (1)$$

の密度分布として示すことが出来る。ここで  $N$  は観測領域のポイントソースの数、 $h$  はスムージングパラメータ、 $\mathbf{x}$  および  $\mathbf{X}$  は、それぞれ、分布図上のポイントソースおよびグリッドの位置を示す。 $K$  はカーネルと呼ばれ、本研究では、

$$K(\mathbf{u}) = \begin{cases} \frac{4}{\pi}(1 - |\mathbf{u}|^2)^3 & \text{if } |\mathbf{u}| \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

の triweight を用いた。 $\mathbf{u}$  はノルムを表す。ここで  $h$  に 0.1 を用いたが、これは本研究で用いた測光エラーに等しい。このカーネル法を用いることにより、図 1 の上左および中央の  $J-H$  vs.  $H-K_s$  二色図は下左および中央図のコンターとして表すことが出来る。コンターを採用することでポイントソースの分布が明瞭になるだけでなく、測光エラーも考慮することが出来る。なお、本研究で示されるコンターは全てログスケールである。

参照領域の星の分布が、減光によりターゲット領域の分布へシフトしたと仮定する。シフトした方向を厳密に求めるには、ポイントソースの減光のみを表すイクセス図を求めると良い。イクセスの密度分布  $(\rho(E_{H-K_s}, E_{J-H}))$  は、 $E_{H-K_s}$  および  $E_{J-H}$  からなり、ターゲットと参照領域の結果に依存する。 $\rho_{k_1, k_2, \text{off}}(H-K_s, J-H)$  を参照領域のポイントソースの分布、 $\rho_{k_3, k_4, \text{on}}(H-K_s, J-H)$  をターゲット領域のポイントソースの分布とすると、イクセスの密度分布は、

$$\rho_{i, j}(E_{H-K_s}, E_{J-H}) = \sum_{k_1} \sum_{k_2} \rho_{k_1, k_2, \text{off}}(H-K_s, J-H) \rho_{k_3, k_4, \text{on}}(H-K_s, J-H) \quad (3)$$

によって求められる。ただし、 $k_3 = i + k_1 - i_0, k_4 = j + k_2 - j_0$  である。 $i$  と  $j$  はイクセス密度分布の  $x$  と  $y$  のグリッドを示し、 $k_1, k_2$  も同様である。 $i_0$  および  $j_0$  はゼロ点までのグリッドのオフセットを示している。カメレオン I の場合、図 1 の下左

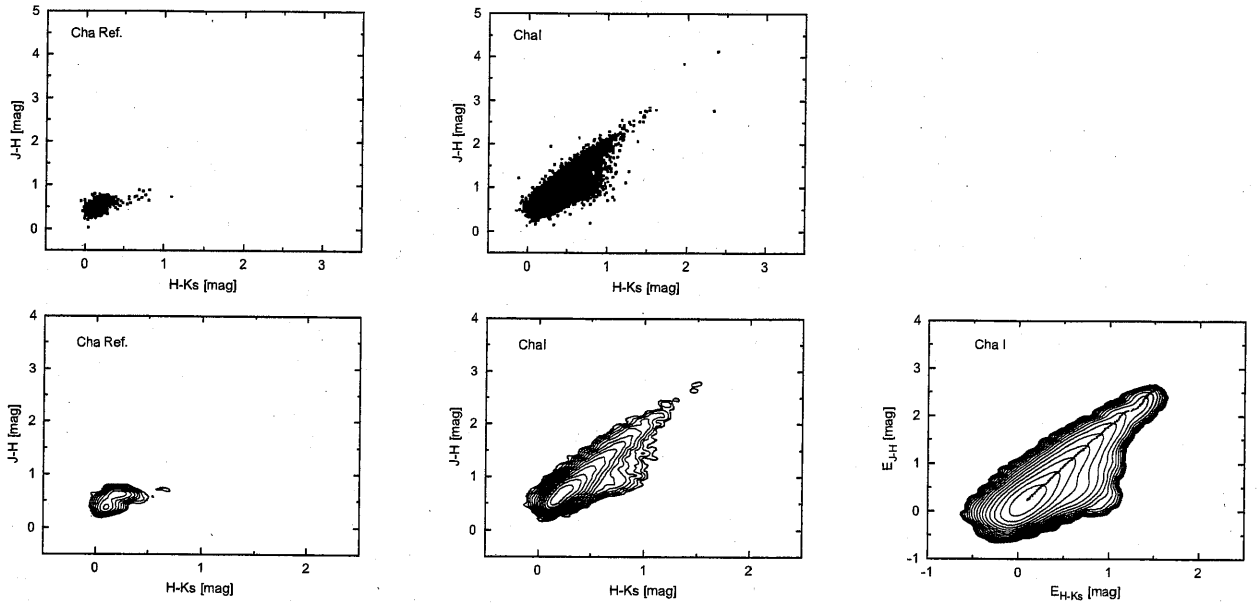


図 1: カメレオン参照領域とカメレオン I 領域の観測結果の  $J-H$  vs.  $H-Ks$  二色図 (上左および中央), そのコンター (下左および中央), およびイクセス密度分布 (下右)

および中央のコンターから下右のイクセス密度分布図を得る. 図の右下部分のコンターの膨らみは YSOs の影響によるものである. 赤化ベクトルに相当する直線は, 分布の最大値を示す位置を中心として円環を描き, 中心からの距離 0.05, 0.07, 0.09, 0.11, ... と尾根を沿うようにプロットした点からの距離の最小二乗法により求めた. 図に示されたプロットがその点であり, この手法を用いることで, YSOs による影響を避けられる. こうして求められた  $E_{J-H}/E_{H-Ks}$  値を,  $E_{J-H}$  の選択範囲毎に, 図 2 へ示す (エラーバーの重なりを避けるため, 一部は若干右へシフトさせている). 示された  $E_{J-H}/E_{H-Ks}$  値は, on および off それぞれの観測領域の測光エラーを 0.10, 0.09, 0.08, ..., 0.03 等未満とす 8 種類のデータに分類し, そのコンビネーションにより導かれた中間値 (median) であり, エラーは,  $(\text{maximum} - \text{minimum})/2$  としている. 横軸の  $E_{J-H, \text{max}}$  は  $E_{J-H}/E_{H-Ks}$  値を求める際に利用した尾根のプロットの上限を示しており, 値が大きいくほど減光の激しい領域の影響を受けていることになる.

## 4 結果と考察

図 2 から, (1) 全ての分子雲において,  $E_{J-H, \text{max}}$  値が大きくなる, つまり減光が激しくなるにつれて  $E_{J-H}/E_{H-Ks}$  値は減少しやがてフラットになる, (2) ベびつかい座およびカメレオン座分子雲の  $E_{J-H}/E_{H-Ks}$  値は,  $E_{J-H, \text{max}}$  が十分大きいところではほぼ等しい値 ( $1.67 \pm 0.03$ ) を示しているのに対し, コールサック分子雲のそれは比較的高い値を維持している—ということがわかる. これは, 近赤外の減光が視線方向および減光の程度の両方においてバリエーションを持つことを示している.

この結果が示すところの分子雲のダスト物性を知るために, Mie 理論を用いたモデル計算を行った. ダスト形状は球, 組成にはいわゆる「アストロノミカルシリケート」およびグラファイトを仮定し, ダストの分布は MRN モデルのパワーロウ ( $n(a) \propto a^{-3.5}$ ) に則していると想定した. ダストの最小サイズを  $0.005 \mu\text{m}$  と固定し, 最大サイズをパラメータとした. 減光は減光断面積と柱密度の積に比例するが, モデルによって求められた減光断面積から導いた  $E_{J-H}/E_{H-Ks}$  値を図 3 に示す. 縦軸は  $E_{J-H}/E_{H-Ks}$  値を, 横軸はダストの最大サイズ ( $a_{\text{max}} [\mu\text{m}]$ ) を示している. C はグラファイト, Si はシリケート, Mix はシリケート: グラファイト = 53 : 47 に混合した場合の結果を示している. グラファイトはシリケートに比べて  $a_{\text{max}}$  に対する変化に乏しいが, 混合させた場合に対して比較的支配的である. これは, ダストサイズが比較的小さい場合はグラファイトダストの吸収が効果的なため, ダストサイズが大きくなるとシリケートの散乱の効果が影響を与え始めるためである. 一般的な星間空間のダストサイズは  $0.1$  から  $0.2 \mu\text{m}$  と考えられており, 分子雲のダストはそれより大きいと容易に想像出来る. ダストの最大サイズがダスト成長を表していると仮定すると, モデルからはダストが成長すると ( $a_{\text{max}}$  が大きくなる) と  $E_{J-H}/E_{H-Ks}$  は減少し, やがて一定になることが分かる.  $a_{\text{max}} = 0.1 \mu\text{m}$  から先は近赤外のサイ

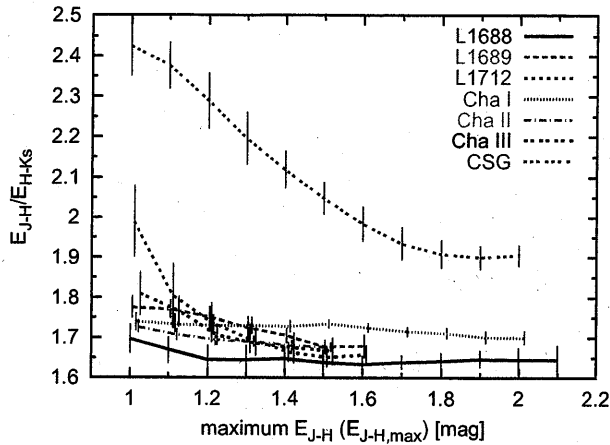


図 2: 求められた  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値

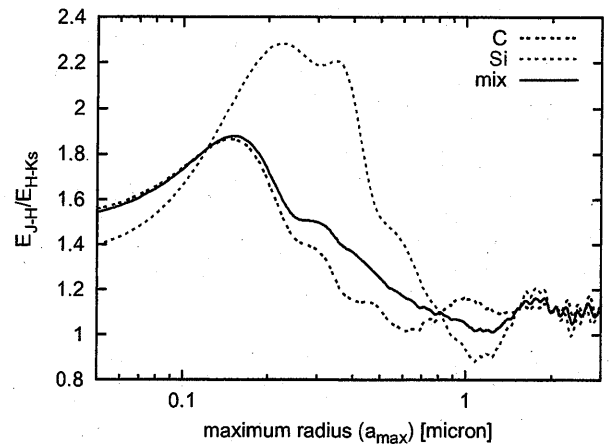


図 3: Mie 理論モデルから導かれた  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値

ズ限界であり、振動を示しているのは散乱光の共鳴によるものと考えられる。

モデルおよび観測結果の比較から  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値は、分子雲コアへ向かう（減光が激しくなる）につれてダストが成長（ $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値が減少）し、ある地点で成長が停止しているという分子雲の構造を示していることが明らかになった。へびつかい座とカメレオン座分子雲のダストが同程度まで成長しており、近赤外の観測限界ではなと考えられる。それは、図 2 からは  $E_{J-H,max} \sim 1.5$  辺りから  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値の降下は鈍るが、これは  $A_V$  に換算してもせいぜい 20 等程度であり、この程度の減光でダストが  $1\mu\text{m}$  以上にまで成長していると考えるのは、紫外および可視の減光研究と矛盾するためである。コールサック分子雲の  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値が他の二つの分子雲に比べて高いのは、ダストの成長が進んでいないためである。また、コールサック分子雲の  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値は、モデルの結果よりも高い値を示しているが、この種の相違を示すためには、組成差を持ち出さなければならない。コールサック分子雲の比較的大きな  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値は、他の二つの分身と比較して、組成の相違を示唆しているのではないかと考えられる。

最後に本研究で用いられた SIRIUS システムによるフィルター効果を見積もった。本システムの場合（図は紙面の都合省略するが）減光が激しくなるにつれて  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値は増加する（ $J-H$  vs.  $H-K_s$  二色図上において赤化ベクトルが上に曲がる）傾向にあることがわかった。これは観測により導かれた図 2 の傾向と逆フェイズである。よって観測結果は、フィルター効果の影響を受けた  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値の変動を示しているわけではないことがわかった。

## 5 纏めと結論

SIRIUS/IRSF1.4m を用いて、へびつかい座、カメレオン座、およびコールサック分子雲の近赤外測光観測を行った。単一システムによる観測のため、システム変換やフィルター効果といった誤差を生じる要因を極力排した上で、分子雲ごとの減光を比較することが出来た。また、過去の同種の研究と比較して、広く、深く観測出来た。これらのデータから、コンターマップによる確率分布と参照領域の利用により、分子雲ごとの  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値を減光に応じて決定した。また、Mie 理論を用いた減光断面積のモデルから、 $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値とダスト成長の相関を求めた。その結果、近赤外の減光則（ $E_{J-H}/E_{H-K_s}$ ）には分子雲ごとにバリエーションがあり、減光の程度に応じて変化することがわかった。

へびつかい座、カメレオン座、およびコールサック分子雲の近赤外減光則（ $E_{J-H}/E_{H-K_s}$ ）とモデル結果から、

1. 分子雲のダスト構造を示した：分子雲コア中心部へ向かうにつれてダストが成長し、ある地点で成長が収まる。
2. 分子雲のダスト成長の相違を示した：へびつかい座およびカメレオン座分子雲は同様のサイズまでダストが成長している。コールサック分子雲のダストは、へびつかい座およびカメレオン座分子雲に比べて成長していない。
3. 分子雲のダスト組成の相違を示唆した：コールサック分子雲の比較的高い  $E_{J-H}/E_{H-K_s}$  値はダスト成長だけでは説明出来ず、組成の相違を示唆していると考えられる。