

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

〈東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: naoi@eps.s.u-tokyo.ac.jp

近赤外線による減光研究は、分子雲をはじめとする比較的ダスト密度の高い領域の観測に優れている。近赤外波長域における減光の波長依存性（減光則）は、観測領域に対する差異が認められないと考えられていた。我々は、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の近赤外測光観測を行い、減光を統計的に精密に求めた。その結果、分子雲内における変化と分子雲同士の差異を示し、近赤外減光がダスト成長を示す手段となりうることを示した。

1. 星間減光の観測

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^{3-6} 個/cm³) 領域は分子雲と呼ばれ、星・惑星が形成される母体となりうる。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でき、星・惑星系の形成およびその後の進化を探るうえで極めて重要な情報を得ることになる。

星間減光の観測的研究は、用いられる光の波長によって大きく分類される。紫外から可視による研究は、減光の効果が最も顕著に認められるため、活発に行われてきた¹⁾。この波長域の減光は、視線方向つまり観測対象ごとに異なった振舞いを示すことが知られており、その減光則から示唆されるダストについての研究が報告されている²⁾。これに対し、近赤外の減光則はどの方向を観測し

ても差はないと考えられてきた³⁾。近年、近赤外減光則の分子雲による違いも議論されるようになってきたが、後述するような観測に伴う統計誤差の問題をはらんでおり、異論のもたらされる余地がある⁴⁾。近赤外は、紫外や可視と比較して波長が長いので、比較的大きなサイズのダストが寄与した減光に反応し、星形成をもたらすような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は、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一つといえる。本研究では分子雲の減光を精密に求め、ダスト成長に関する定量的議論を行った。

2. 近傍分子雲の観測

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 *JHKs* バンド近赤外測光観測を行った。観測面積はそれぞれ 1.56, 2.77, および 0.16 平方度、限界等級 ($S/N=10$) は $J \sim 19.0$, $H \sim 18.3$, および $Ks \sim 17.0$ 等であり、総じて 23 万個以上の点源を同定した。この数字は本研究が、類似した近赤外測光観測と比較しても、

より広い・深い観測であることを示している。以下に観測領域の主な特徴を述べる。

- **へびつかい座分子雲**：太陽からの距離がおおよそ 125 pc、銀河面から比較的離れた $[(l, b) = (345^\circ, 17^\circ)]$ 、中低質量星形成領域として知られている⁵⁾。中心部のコアは A_V （可視光での減光量）にして 100 等を超えるとされており、極めてダスト密度が高く、主系列に達しない生まればかりの星（YSOs: Young Stellar Objects）が多く観測されている。本研究ではダスト密度の最も濃い領域である L1688、それよりやや東部の比較的ダスト密度の濃い領域の L1689、さらに北東方向に伸びたフィラメント構造部の L1712 に対して観測を行った。
- **カメレオン座分子雲**：太陽からの距離が 150–180 pc、やはり銀河面から比較的離れた $[(l, b) = (300^\circ, -16^\circ)]$ 、中低質量星形成領域である⁶⁾。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、I, II, および III 領域のそれぞれ最も密度の高い領域を選んで観測を行った。
- **コールサック分子雲**：太陽からの距離が 180 pc、銀河面上に位置した $[(l, b) = (302^\circ, 0^\circ)]$ 、比較的希薄な分子雲である⁷⁾。星形成の兆候は認められていない。本研究ではグロービュール 2 (CSG) と呼ばれる、比較的密度の濃い領域を選択して観測を行った。

3. 赤化ベクトルとその向き

E_{J-H}/E_{H-Ks} の決定

星（点源）は測光され、 $J-H$ vs. $H-Ks$ 二色図上へ配置される。減光を受ける前の星は、その等級から経験的に、 $0 \leq J-H \leq 1, 0 \leq H-Ks \leq 0.4$ へ配置されることが知られている⁸⁾。減光を受けた星は減光を受けていない星と比較して $J-H$ vs. $H-Ks$ 二色図上を右上方向へ移動して配置される。この

様子を模式的に図 1 に示す。この星の移動する方向を一般に赤化ベクトルと呼ぶ。星の移動する距離は、受けた減光の量に比例する。本研究では、この赤化ベクトルに注目し、近赤外の減光を表すパラメーターに E_{J-H}/E_{H-Ks} を利用した。これは、

$$\begin{aligned} \frac{E_{J-H}}{E_{H-Ks}} &= \frac{A_J - A_H}{A_H - A_{Ks}} \\ &= \frac{(J - J_0) - (H - H_0)}{(H - H_0) - (Ks - Ks_0)} \\ &= \frac{(J - H) - (J_0 - H_0)}{(H - Ks) - (H_0 - Ks_0)} \end{aligned}$$

と変形できる。 A_λ は減光を等級で示した量である。 J, H , および Ks は観測による測光値を表し、 J_0, H_0 , および Ks_0 は減光を受ける前の等級を表す。つまりパラメーター E_{J-H}/E_{H-Ks} は、赤化ベクトルの傾きを表している。

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。

- **観測装置（光学システム）の相違**：バンドパスフィルターの透過率と有効波長が装置（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

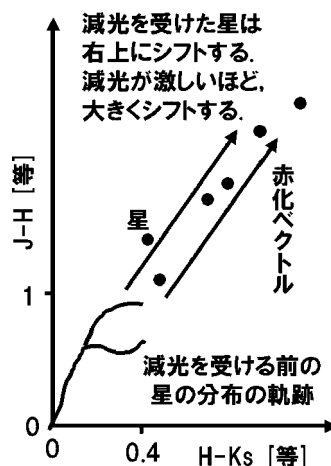


図 1 $J-H$ vs. $H-Ks$ 模式二色図。

に利用される変換式を用いることなく、高精度の結果を導くことができる。

- **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 (輻射エネルギー分布) の変形の影響を受け、赤化ベクトルが曲がる現象。従来ではほとん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:** YSO をはじめとした減光に由来しない色超過を示す星の影響は、分子雲の減光を精密に求める妨げとなる。本研究では、YSOs は相対的に数が少ないことから、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たどることで、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必要となる。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できる。しかし本研究は分子雲の背景星を観測しているため、この手法は利用できない。本研究では、ターゲットの近傍でかつ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、本来のカラーをもつ星の分布とみなした。

紙面の都合上、以下には例としてカメレオン I 領域 (Cha I) の観測結果と E_{J-H}/E_{H-Ks} を決定する手法⁹⁾を示す。他の観測領域においてもその手法は等しい。

図2には、カメレオン I (Cha I) のターゲット領域 (測光エラー 0.1 等以下の条件で、22,899 個の点源を同定) および本来のカラーを示す参照領域の測光結果を配置した $J-H$ vs. $H-Ks$ 二色図を示す。

星の移動した方向を精密に求めるには、減光のみを表す E_{J-H} vs. E_{H-Ks} 二色図を求めると良い。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移動したと考えられるから、参照領域のある点の分布密度とターゲット領域のある点の分布密度との積の和を求めることで、 E_{J-H} vs. E_{H-Ks} 等高線二色図を導くことができる。この工

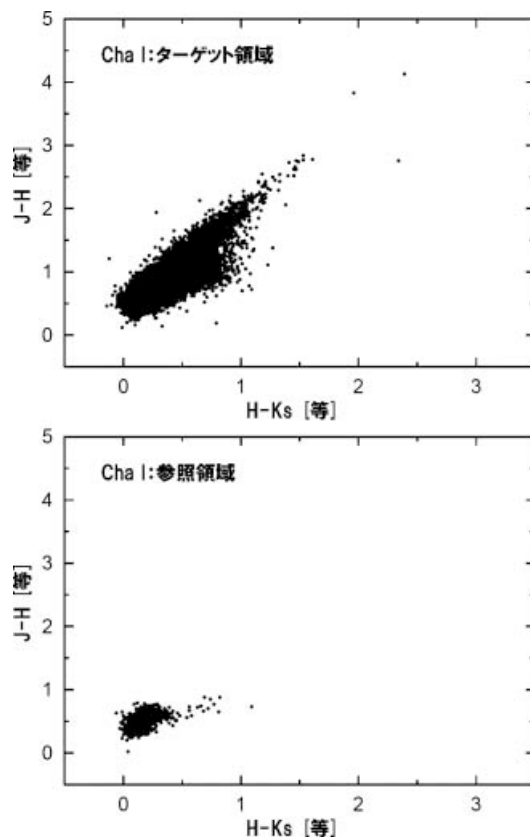


図2 カメレオン I (Cha I) のターゲット領域および参照領域の $J-H$ vs. $H-Ks$ 図。

程により、図3を得る。図中等高線右下部分の膨らみは 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、等高線の尾根を沿うように配置した点からの最小二乗法により求めた。図中に示された点曲線がその点であり、この手法を用いることで、YSOs による影響を避けられる。三つの分子雲のすべての領域における、赤化ベクトルの傾きである E_{J-H}/E_{H-Ks} を、図4に示す (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)。横軸の $E_{J-H, \max}$ 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において、 E_{J-H} における上限値を示しており、値が大きいほど減光の激しい領域を考慮していることになる。

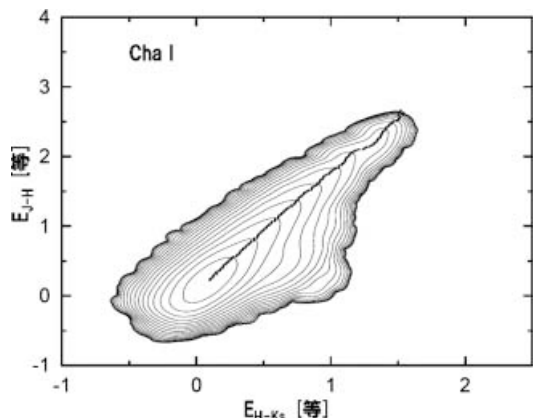


図3 カメレオンI領域の E_{J-H} vs. E_{H-Ks} 等高線図.

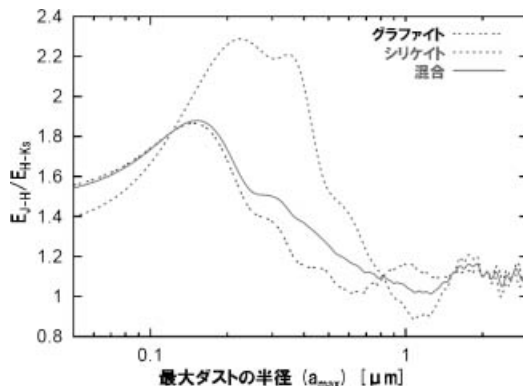


図5 Mie理論モデルから導かれたダストの最大サイズによる E_{J-H}/E_{H-Ks} の変化図.

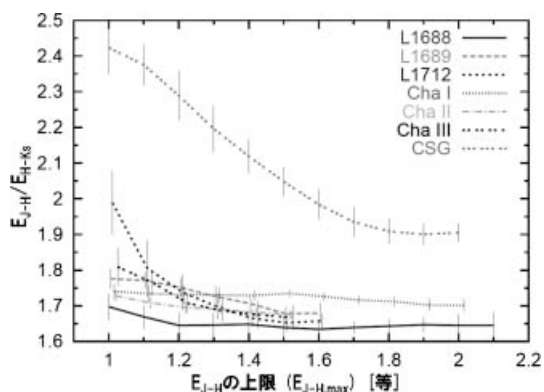


図4 減光の程度による、三つの分子雲の E_{J-H}/E_{H-Ks} の変化図.

4. 近赤外減光と分子雲ダストの成長

図4から

- すべての分子雲において、 $E_{J-H, \max}$ 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} は減少する。
- 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} は、 $E_{J-H, \max}$ が十分大きいところではほぼ等しい値 (1.67 ± 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、分子雲が固有の近赤外減光則を持つこと、また減光に程度によって

もそれが変化しうることを示している。

ダスト成長が分子雲の近赤外減光に与える影響を定量的に議論するため、固体微粒子の光学的性質に関する理論 (Mie 理論¹⁰) を利用した計算を行った。分子雲ダストにはグラファイト、シリケート、およびその混合した状態¹¹) を仮定し、ダストは $n(a) \propto a^{-3.5}$ のべき乗則分布 (MRN 分布¹²) 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 (a_{\max}) をパラメーターとすれば、ダスト成長を追っていると考えることができる。 a_{\max} の変化による E_{J-H}/E_{H-Ks} の変動を図5に示す。グラファイトはシリケートに比べて a_{\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で、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¹²)、分子雲のダストはそれより大きいと容易に想像できる。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_{\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わかる。 $a_{\max} \sim 1 \mu\text{m}$ から先は近赤外がサイズに反応する限界であり、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。

計算結果から、 E_{J-H}/E_{H-Ks} は、ダストがおよそ $0.1 \mu\text{m}$ から $1 \mu\text{m}$ まで成長するとき、2.2 から 1.0 へ減少する傾向を示すパラメーターとなりうるということがわかる。一方、観測により求められた E_{J-H}/E_{H-Ks} は、減光が激しくなるにつれて、2 から 1.7 (へびつかい座およびカメレオン座)、2.4 から 1.9 (コールサック) へと減少する傾向を示している。このことから、本研究の観測結果は、分子雲のダスト成長を捕らえていると考えられる。つまり三つの分子雲の E_{J-H}/E_{H-Ks} の変動は、分子雲コアへ向かうにつれてダストが成長している様子を示唆している。

5. 今後の課題

本研究の結果は、近赤外の減光が観測領域によって異なり、ダスト成長を示す有効な手段の一つであることを示唆している。しかしながら; (1) 観測と計算による E_{J-H}/E_{H-Ks} の絶対値が完全に一致しているわけではないこと、(2) 図3における尾根のプロット点は決してスムーズに推移しておらず、赤化ベクトルの傾きを接線として求めた場合、三つの分子雲の七つの領域に何らかの傾向を認めることは難しい、といった問題点もある。また定量的議論に用いた計算も極めてシンプルである。しかし今後の近赤外サーベイの進展により、現在よりも質量共にはるかに膨大なデータが期待される。近赤外の星間減光研究は明らかに新しい時代へ変遷していると言える。

謝辞

本研究は筆者の博士研究の紹介であり、IRSF/SIRIUS グループおよび SAAO 関係者の皆様のご助言・ご助力に寄るところが多大にありました。最後になりましたがこの場を借りまして、お礼申し上げます。

参考文献

- 1) Fitzpatrick E. L., 1999, PASP 111, 63
- 2) Draine B. T., 2003, ARA&A 41, 241
- 3) Martine P. G., and Whittet D. C. B., 1990, ApJ 357, 113
- 4) Gómez M., Kenyon S. J., 2001, AJ 121, 974
- 5) Barsony M., Kenyon S. J., Lada E. A., Teuben P. J., 1997, ApJS 112, 109
- 6) Hayakawa T., Cambrésy L., Onishi T., Mizuno A., Fukui Y., 2001, PASJ 53, 1109
- 7) Franco G. A. P., 1989, A&A 215, 119
- 8) Bessell M. S., Brett J. M., 1988, PASP 100, 1134
- 9) Kenyon S. J., Lada E. A., Barsony M., 1998, AJ 115, 252
- 10) Bohren C. F., Huffman D. R., 1983, Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Wiley, New York
- 11) Li A., Draine B. T., 2001, ApJ 554, 778
- 12) Mathis J. S., Rumpl W., Nordsieck K. H., 1977, ApJ 217, 425

Near-infrared Extinction Law in the rho Ophiuchi, Chamaeleon, and Coalsack Dark Clouds

Takahiro NAOI

Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Near-infrared observation has been used for studies of dense clouds, as it is more robust against dust extinction than ultraviolet to optical ones. Dust extinction provides us with information on characteristic of dust in dense clouds. While ultraviolet to optical extinction law has been well studied so far, near-infrared extinction law still remains an important issue to be solved. We carried out near-infrared observations of nearby dark clouds in the rho Ophiuchi, Chamaeleon, and Coalsack. We obtained an accurate extinction law for each cloud and propose that the near-infrared extinction can be a probe for grain growth of dust in dark clouds.