

マゼラン銀河の暗黒星雲探査
Survey for Dark Clouds in the Magellanic Clouds

(日本天文学会推薦)

代表研究者 東京学芸大学 土橋一仁 Tokyo Gakugei University Kazuhito DOBASHI

協同研究者 フランス中央科学研究所 ジャンフィリップ ベルナルド Centre d'Etude Spatiale des
Rayonnements

Jean-Philippe Bernard

We have performed a survey for dark clouds in the Large and Small Magellanic Clouds (LMC and SMC) utilizing the two star catalogs in the near infrared wavelengths, namely, the 2 Micron All Sky Survey Point Source Catalog (2MASS PSC) and the SIRIUS Point Source Catalog (SIRIUS PSC). In order to probe into dark clouds deeply embedded in the star distribution in the LMC and SMC, we developed a new technique named “X percentile method” to measure the color excess by dark clouds, which is robust against contamination by the unreddened foreground stars. As a result, a number of dark clouds were revealed for the first time in the near infrared extinction. Comparing the extinction maps with other datasets tracing the molecular gas and atomic gas, we quantified the gas-to-dust ratio $A_V/N[H]$ in these galaxies to find a significant variation of the ratio over them, while its average values are much lower than that in the Milky Way.

研究目的

本研究の目的は、我々が独自に開発した暗黒星雲の新しい研究方法である「百分順位法」(英文表記は X percentile method) を用いて、南天に輝くマゼラン銀河内部での暗黒星雲の分布を世界で初めて明らかにすることである。世界周航で有名なマゼランが航海中に観測したことにちなんで名付けられたマゼラン銀河には、大マゼラン銀河(距離約16万光年)と小マゼラン銀河(約20万光年)がある。これらの銀河は、私たちの銀河系に最も近い系外銀河として多くの研究者を魅了してきた。

暗黒星雲は、太陽のような恒星や地球のような惑星が誕生する星形成の場である。その内部の多量のダスト(星間塵)が背景の星の光を吸収散乱するため、暗黒星雲は天空では星の少ない暗い領域として認識される。光学写真を見ると、私たちの銀河系と同様に、マゼラン銀河の中にも暗黒星雲が多数存在することが分かる。本研究では、近年公開された近赤外線(2 μ m帯)の星のデータベースを解析することにより、大小両マゼラン銀河における暗黒星雲の分布(すなわちダストの分布)を高い精度で描き出す。本研究によってもたらされた定量的なダスト分布を解析することにより、

太古の宇宙環境を解明するための鍵を握るマゼラン銀河に関する理解が、飛躍的に深まることが期待される。

本研究では、以下の3点に重点を置いて研究を進めた。

- ①まず、暗黒星雲の新しい計測法である百分順位法の開発を行い、その完成度を高める。
- ②次に、近赤外線の色データのデータベースを利用して大マゼラン銀河及び小マゼラン銀河での暗黒星雲の検出・定量を試みる。
- ③さらに、大小マゼラン銀河の暗黒星雲データを他のデータと比較することにより、ガスに対するダストの割合や、暗黒星雲中での星形成活動の様子を調べ、我々の銀河系のそれと比較する。

研究経過

①百分順位法の原理と開発

百分順位法は、本研究の成否を分ける極めて重要な新しい研究手法である。そのため、我々は本研究を本格的に開始する以前から、計画を前倒しして百分順位法の開発に取り組んできた。

従来、暗黒星雲の有用な計測方法の一つに、暗黒星雲に含まれる星間ダストによる背景の星の色の変化を測定するものがある。平均赤化法と呼ばれる方法である。一般に、暗黒星雲の背景の星からやってくる光のうち、波長の短いものは暗黒星雲中のダストにより強く吸収・散乱され、波長の長いものはあまり吸収を受けない。その結果、暗黒星雲の背景にある星のスペクトルは全体的に長波長側が卓越して見える。すなわち、可視光帯での色に例えると「赤く見える」のである。夕日が赤く見えるのと、同じ原理である。

星の光が本来の色よりどのくらい赤くなっているかという量を色超過(あるいは赤化量)という。色超過は暗黒星雲に含まれるダストの量(柱密度)に比例する減光量(A_V)と密接に関係しているので、色超過を測定することで暗黒星雲中のダスト分布を知ることができるのである。

暗黒星雲による色超過を具体的に計測するためには、星野写真(CCDのイメージ)にメッシュを切り、各メッシュの中に入る多数の星の「平均的な色」をそのメッシュの色とし、暗黒星雲の無い領域(参照領域)のメッシュの色と暗黒星雲の有る領域のメッシュの色の差を求め、という方法をとる。各メッシュの「平均的な色」としては、従来、平均値や中央値が用いられている。太陽系近傍の暗黒星雲の場合、この方法で暗黒星雲による色超過(すなわちダスト量)の分布を精度よく定量することができる。しかし、大マゼラン銀河内の暗黒星雲のように、暗黒星雲が星の分布の中に深く埋もれている場合、単純な平均値や中央値では暗黒星雲による色超過を計測することはできない。暗黒星雲の手前にある星は赤化を受けないからである。

この問題を解決するために、我々はメッシュ内の星を青い順に並び替え、 $X_0\%$ 番目の星の色(100%が一番赤い星の色)や、 $X_0-X_1\%$ 番目($X_0 < X_1$)の星の色の平均値を、そのメッシュの「平均的な色」とする方法を考案した。 X_0 や X_1 が大きい場合、このような星の色を使用すると暗黒星雲の手前にある赤くなっていない星の影響をかなり低減することができる。

例えば、図1の左側のイラストにあるように、観測者から見た大マゼラン銀河の厚さを100とし、観測者側の端から距離 Z の所に厚さ T の暗黒星雲があるものとする。また、暗黒星雲内には色超過

E_0 に相当するダストがあるものとする。さらに、大マゼラン銀河の中の星の本来の色の分布を図1の右側の(a)のように標準偏差 σ の正規分布であるとし、銀河内全体に色超過 E_{bg} に相当する希薄なダストが広がっているものとする。この場合、参照領域で観測される星の色の分布は(b)のように最大 E_{bg} だけ赤い方 (図の右側) へ広がり、暗黒星雲方向で観測されるそれは(c)のように二山に分かれる。山の一つは暗黒星雲の背景にある星の色分布であり、もう一つの山は前景にある (赤くなっていない) 星の色分布である。暗黒星雲方向の星の色分布が二山になっているので、星の色の単純な平均値や中央値を使っても暗黒星雲による色超過 E_0 を正確に推定することはできない。しかし、図1を見ると、例えば 90% 番目に赤い星など X_0 の大きな星は二つの山の影響をあまり受けていないように思われる。そこで我々は、図中の様々なパラメータ (σ , E_{bg} , Z , T , X_0 , X_1) に対して、実際に観測される色超過が真の色超過 E_0 とどのように関係するか、モンテ・カルロシミュレーションで追跡した。その結果、 Z と T と σ の3つのパラメータが同時にゼロでない限り観測される色超過は暗黒星雲の真の色超過 E_0 を過小評価するが、 X_0 と X_1 を大きくとると、3つのパラメータがゼロでなくてもその誤差を小さく抑えられることが分かった。

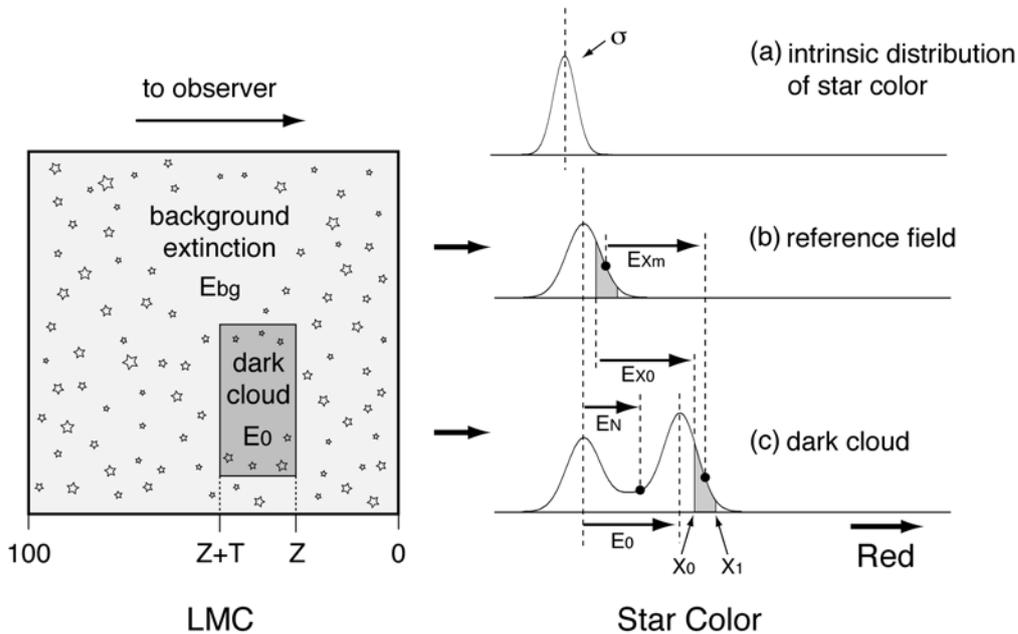


Fig.1 Schematic illustration of the model used to estimate the color excess caused by a dark cloud in the LMC. (Left) We set uniform background extinction and locate a dark cloud within the LMC. The position and thickness of the cloud are taken to be $Z\%$ and $T\%$ of the total thickness of the LMC along the line of sight to the observer. E_{bg} and E_0 are the total color excess caused by the background and the cloud, respectively. (Right) In panel (a), we generate a number of stars which have an intrinsic color distribution that follows a Gaussian distribution with a standard deviation σ , and we distribute the stars randomly in the LMC including the inner region of the cloud. The color distributions shown in panels (b) and (c) are the reddened distributions observed toward the reference field (i.e., a cloud-free region) and the dark cloud, respectively. E_{X0} and E_{Xm} are the color excesses measured. E_N is the color excess measured by the classical methods using either the simple mean or median color of the stars.

$E_0=0.2$ 等級とし、 Z を 0、30、70%とした場合に観測される色超過を X_0 の関数として計算した例を図2に示す（他のパラメータは図に示した通りである）。図の白丸は $X_0\%$ の星を利用した場合に得られる色超過（ E_{X_0} とする）であり、黒丸は $X_0-X_1\%$ の星の色の平均値を利用した場合に得られる色超過（ E_{X_m} とする）である。 X_0 を大きくするほど E_{X_0} や E_{X_m} は真の値 E_0 に近づき、 $X_0 > 50\%$ では単純な平均値や中央値を用いた場合に得られる色超過（図中の黒と灰色の矢印）よりもはるかに過小評価は小さい。暗黒星雲が大マゼラン銀河の背面に近い $Z=70\%$ の場合ですら、 $X_0=90\%$ では真の色超過の 70%程度を検出できることが分かった。

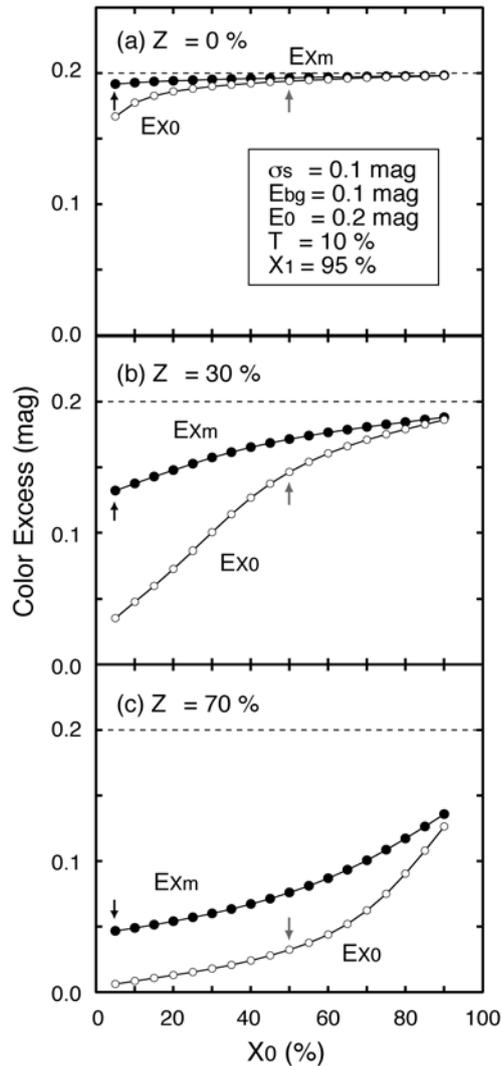


Fig.2 E_{X_0} vs. X_0 (open circles) and E_{X_m} vs. X_0 (filled circles) diagrams calculated for $Z=0, 30$, and 70% are shown in panels (a), (b), and (c), respectively. In the calculations, common parameters listed in the box in panel (a) are used. The distribution function of the star colors $\phi(c)$ is taken to be Gaussian with a standard deviation of $\sigma = 0.1$ mag. Broken lines indicate the true color excess by the cloud ($E_0 = 0.2$ mag). Black and gray arrows indicate the color excesses measured using the classical method based on the simple mean and median star colors, respectively.

さらに、図2に見られる X_0 に対する E_{X_0} と E_{X_m} のグラフの形は、特に T と Z に強く依存することが分かった。例えば、 $T+Z$ が 50%以下（観測者から見て暗黒星雲が星の分布の中心より手前にあ

る場合)には E_{X_0} や E_{X_m} の曲線は上に凸になり、 $T+Z$ が 50%を超える場合 (暗黒星雲が星の分布の裏面側にある場合)には下に凸になる。すなわち、実際のデータを用いて図2のようなグラフを作成しモデルフィットすれば、星の分布中における暗黒星雲の位置を推定できる可能性もあることが分かった。

②大マゼラン銀河での暗黒星雲探査

2 Micron All Sky Survey Point Source Catalog (以後、2MASS PSC) は、北天はアリゾナ州ホプキン山に、南天はチリ CTIO 観測所に設置された合計2台の 1.3m 望遠鏡を使った全天探査により取得された約4億8千万個の星のカタログであり、それぞれの星について Jバンド (1.25 ミクロン)、Hバンド (1.65 ミクロン)、及び K_s バンド (2.17 ミクロン) の近赤外線測光データ (等級) と天球座標が記載されている。

この 2MASS PSC に、本研究で開発した百分順位法を適用して暗黒星雲探査を行った。様々な X_0 について得られた色超過マップのうち、 $X_0=80\%$ について得られた E_{X_m} の分布を図3に示す (図は色超過 $E(J-H)$ をダストのより一般的な指標である減光量 A_v へ変換したものである)。

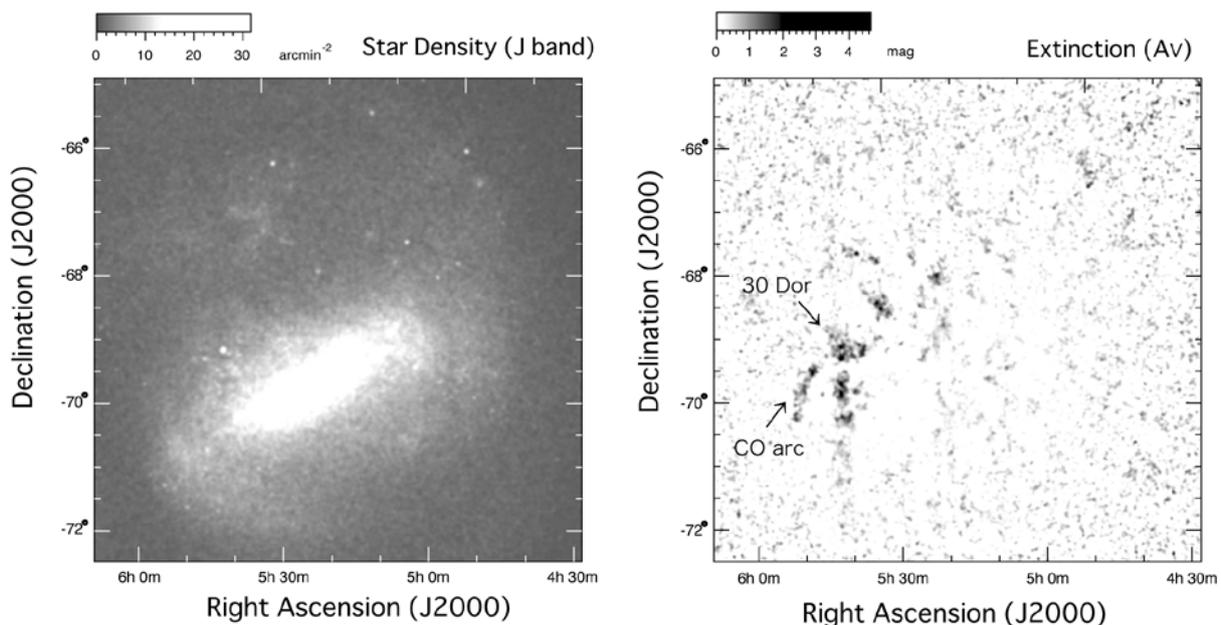


Fig.3 (Left) Star density map of the LMC. The distribution of stars brighter than 16 mag in J band is shown in units of arcmin^{-2} . (Right) Extinction map of A_v measured in the range $80\% < X_0 < 95\%$ from the color excesses $E(J-H)$ and $E(H-K_s)$.

図には、活発な星形成領域として有名な 30Dor 領域や一酸化炭素 (CO) の分子輝線の観測で近年明らかとなった「CO アーク」の他、これまでその存在が知られていなかった多数の暗黒星雲が浮かび上がっている。この探査で検出された暗黒星雲の質量をダスト量から推定したところ、一番大きなもので太陽の 100 万倍、一番小さいもので数千倍の質量をもっていることが分かった。

また、 X_0 を大きくとるほど星の分布に埋もれた暗黒星雲が浮かび上がり、百分順位法が期待通りに機能することが分かった。30Dor 領域周辺について、 $X_0=20, 50, 80\%$ とした場合に得られるダ

ストの分布図を図4に示す。

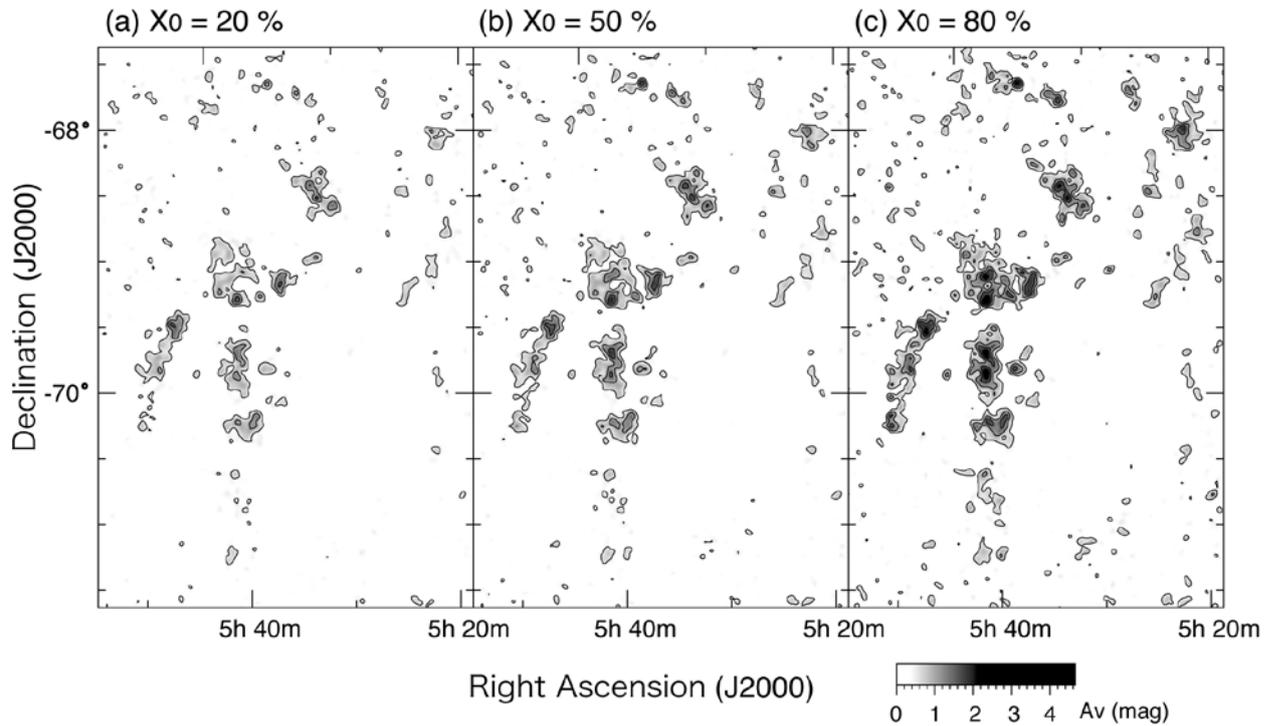


Fig.4 Sample of the extinction maps derived from E_{X_m} at different X_0 values: for a fixed value of $X_1 = 95\%$, the maps in panels (a), (b), and (c) are calculated for $X_0 = 20, 50,$ and 80% respectively. In all panels, the lowest contour and the contour interval are set to $A_v = 0.5$ mag.

③小マゼラン銀河での暗黒星雲探査

2MASS PSC を利用した大マゼラン銀河での暗黒星雲探査を一通り終えた後、我々は小マゼラン銀河での探査に着手した。タイミングよく、従来の 2MASS PSC よりも 6 倍感度の高い新しい 2MASS PSC である「6x2MASS」と、それと同等の感度をもつ名古屋大学の SIRIUS 望遠鏡による星のカタログ (Kato et al.2007 ; 以下、SIRIUS カタログという) がほぼ同時にオンライン上で公開された。両カタログは大小マゼラン銀河の周辺だけをカバーしており、全天を網羅している訳ではない。両カタログをダウンロードして比較した結果、6x2MASS の方が天空の広い範囲をカバーしているが、大小マゼラン銀河の主要な部分は SIRIUS カタログにもほぼ完全に記載されており、かつ SIRIUS カタログの方が若干感度が高いことが分かった。そこで、小マゼラン銀河の暗黒星雲探査には SIRIUS カタログを使用することにした。

大マゼラン銀河の場合と同様に百分順位法を適用したところ、多数の暗黒星雲が浮かび上がった。図5に検出された暗黒星雲の分布を示す。これらの暗黒星雲の幾つかについては以前からその存在が知られていたが (Hodge 1974 ; 可視光帯の光学写真の観測による)、ダスト量を測定できる定量的なデータはこれまで存在しなかった。特に図5で Region 1 とラベルした領域は小マゼラン銀河中で星形成が盛んに置けている領域であり、同領域でのダスト分布を明らかにしたことは今後の研究を推進する上で画期的であるといえる。

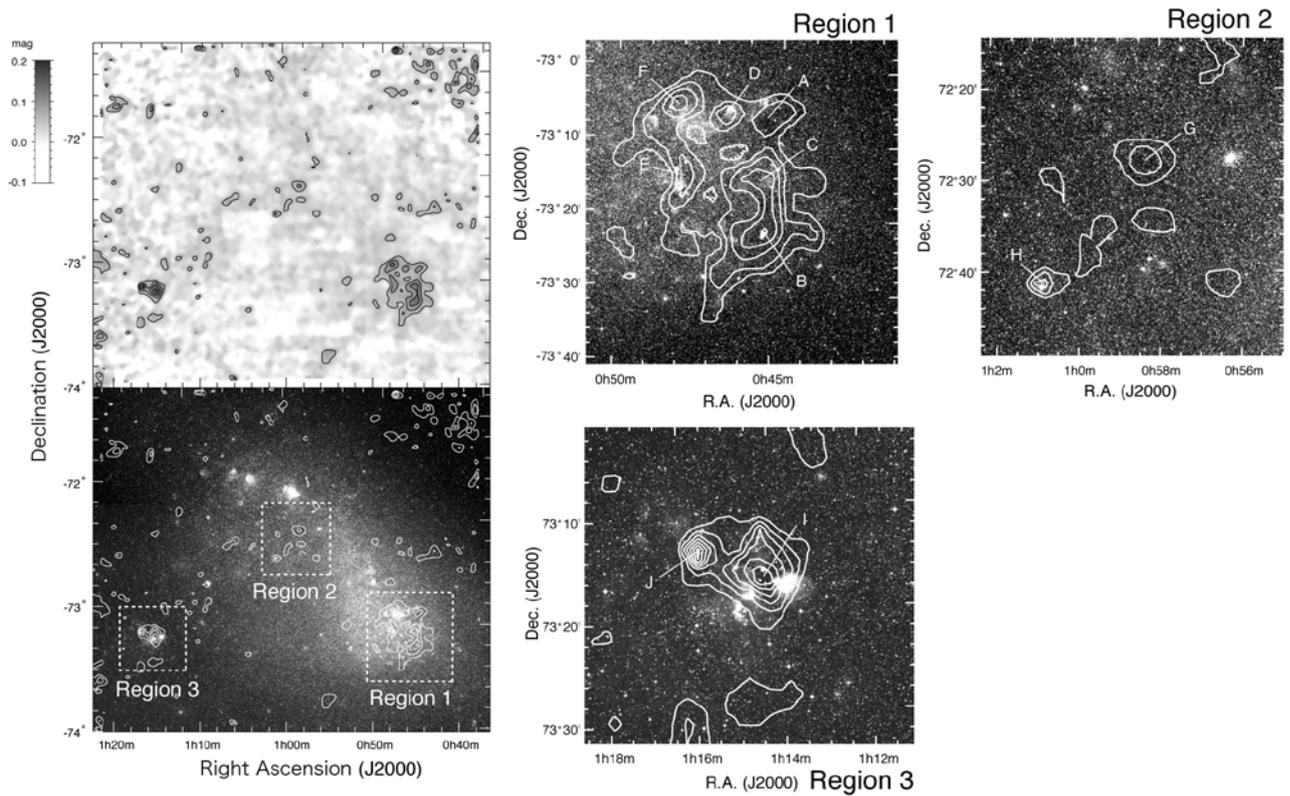


Fig.5 (Top-Left) Color excess map of $E(J-H)$ measured in the range $80\% < X_0 < 95\%$ of the SMC. (Bottom-Left) Same as the top-left panel, but superposed on the optical image. (Right) Color excess maps of $E(J-H)$ around the Region 1-3 indicated in the bottom-left panel on a finer scale. In all panels, contours start from $E(J-H) = 0.05$ mag with a step of 0.03 mag.

考察

①星の分布の中での暗黒星雲の位置の推定

(2) の①で述べたように、図2のようなプロットを作成しモデルフィットを行えば、星の分布の中での分子雲の位置を推定できる可能性がある。我々は、大小マゼラン銀河で検出された幾つかの暗黒星雲に対して図2に相当するプロットを作成し、図1のモデルパラメータの推定を試みた。大マゼラン銀河の結果を図6に、小マゼラン銀河の結果を図7に示す。

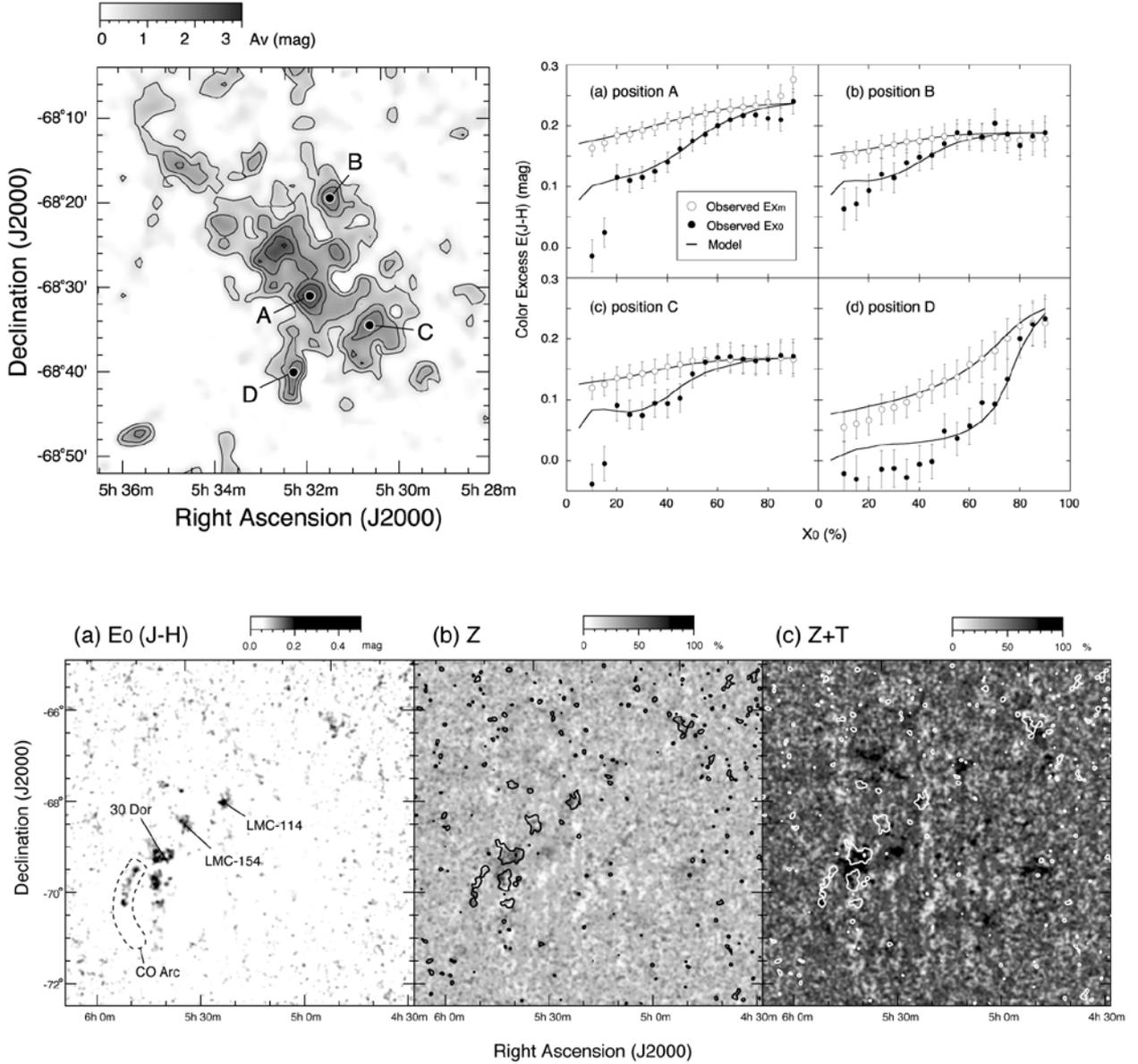


Fig.6 (*Top-Left*) Extinction map around the cloud LMC-154 in the LMC. The lowest contour and the contour interval are $A_v = 0.5$ mag. Labels “A”-“D” mark the positions where the data shown in the top-right panels are sampled. (*Top-right*) Sample of E_{X_0} (filled circles) and E_{X_m} (open circles) measured as a function of X_0 around the cloud LMC-154 (X_1 is fixed to 95%). Data shown in panels (a)-(d) are sampled by averaging some pixels around the positions labeled “A”-“D” in the top-left panel. Solid lines denote the best-fitting model values with parameters $[E_0, T, Z] = [0.24 \text{ mag}, 40\%, 10\%]$, $[0.19 \text{ mag}, 15\%, 15\%]$, $[0.17 \text{ mag}, 5\%, 25\%]$, and $[0.28 \text{ mag}, 10\%, 65\%]$ for the data shown in the panels from (a) to (d) in this order. (*Bottom*) Distribution of model parameters that best fit the observed color excess $E(J-H)$: (a) color excess due to dark clouds E_0 , (b) position of the near side of the clouds Z , and (c) position of the far side of the clouds ($Z+T$). For comparison, locations of the clouds are indicated in the panels (b) and (c) by black and white contours at $E_0 = 0.09$ mag, respectively.

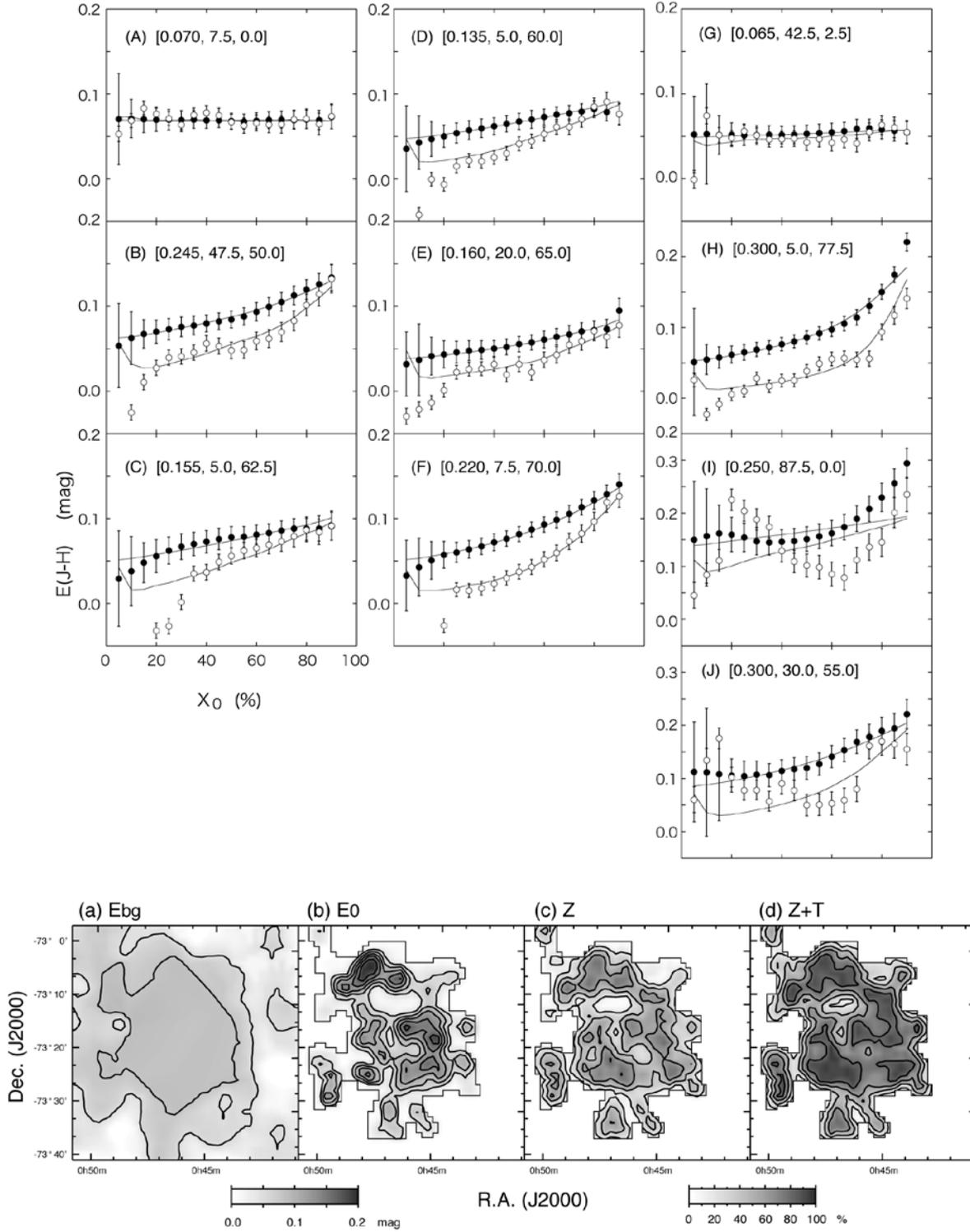


Fig.7 (*Top*) Same as the top panels in Fig.6, but for clouds A to J in the SMC in Fig.5. Filled and open circles are E_{X_0} and E_{X_m} , respectively. The best fitting parameters $[E_0, T, Z]$ are given in the parentheses in units of [mag, %, %], respectively. (*Bottom*) Panel (a) shows the background color excess E_{bg} in Region 1 in Fig.5 inferred from the $E(J-H)$ maps measured at various X_0 . The other panels (b), (c), and (d) show the distributions of the model parameters (see Fig.1). Contours are drawn at every 0.03 mag starting from $E(J-H) = 0.05$ mag in panels (a) and (b), and at every 20% starting from $Z = 20\%$ in panel (c), and at every 10% starting from $T = 10\%$ in panel (d).

大マゼラン銀河については、まず、LMC-154 と名付けた暗黒星雲の中の4つのピーク A-D (図6の左上のパネル) についてモデルフィットを行った。星の色分布としては、図1の(a)のような正規分布ではなく、実際に観測される星の色分布 (J-H の色で、巨星と矮星の2山の分布になる) を用いた。その結果、観測データは図1の単純なモデルできれいなフィットでき、ピーク D 以外は大マゼラン銀河の星の分布のごく表面 (我々から見て手前) にあることが示唆された (図6の右上のパネル)。さらに、大マゼラン銀河全体で同様のフィットを試みた。データにベストフィットを与えるモデルパラメータ E_0 (暗黒星雲の真の色超過)、 Z (暗黒星雲の前面の位置)、 $Z+T$ (暗黒星雲の裏面の位置) の分布を図6の下のパネルに示す。パラメータの分布から分かるように、暗黒星雲 LMC-154 は全体的に星の分布の手前にあるが、別の暗黒星雲 LMC-114 は星の分布の裏面にある。さらに 30Dor は星の分布に対して分厚く (T が大きい)、CO アークは北端 (図の上側) から南端 (下側) にかけて星の分布の表面から裏面に移ることが分かった。CO アークの南端は、可視光では長年その存在が知られておらず、その名の通り 100GHz 帯の CO 分子輝線による観測で数年前に発見された天体である (Mizuno et al.2001; Fukui et al.)。図6を見ると、同天体が可視光で発見されなかった理由は、ここに属する暗黒星雲が星の分布の裏面に位置しているからだということが分かる。

小マゼラン銀河についても、図5に示した暗黒星雲 A-J について同様のモデルフィットを行った。結果を図7の上段のパネルに示す。ほとんどの暗黒星雲は図1のモデルで十分にフィットすることができたが、暗黒星雲 I だけは上手くフィットできなかった。同暗黒星雲の CO 分子輝線の分子分光データ (a) と比較したところ、この暗黒星雲には2つの速度成分があることが分かった (Mizuno 2001)。すなわち、視線方向上に2つの独立した暗黒星雲が存在し、そのために図1のような1つの暗黒星雲を想定したモデルではフィットできないのである。

小マゼラン銀河の研究では、さらにモデルフィットの方法を改良して、 E_0 、 Z 、 $Z+T$ に加え E_{bg} (バックグラウンドの色超過) も推定できるようにし、図5の Region1 とラベルした領域全体についてモデルフィットを行った。その結果得られたパラメータの分布を図7の下段に示す。この分布図によると、特に暗黒星雲 B と C は星の分布の裏面側にあることがわかった。

以上のように、百分順位法はマゼラン銀河の場合のように星の分布の中に深く埋もれた暗黒星雲を検出・定量する手段として有用であることが分かった。マゼラン銀河に限らず、我々の銀河系の中心方向に位置するに暗黒星雲の検出や、我々の銀河系とともに局所銀河群を構成するアンドロメダ銀河などでの暗黒星雲探査にも活用できるものと考えられる。

②ガス・ダスト比の推定

星間物質の特徴を表す重要な指標の一つに、ガス・ダスト比がある。これらは、ガスの量に対するダストの量の割合を表すものである。ダストの量は減光量 A_v (単位は等級、mag) で、ガスの量は水素原子ガスの柱密度 $N[H]$ (単位は atom cm^{-2}) で表す。銀河系内の平均的なガス・ダスト比は、 $A_v/N[H]=5.3\times 10^{-22} \text{ mag atom}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ であることが知られている (Bohlin et al. 1978)。ダストはケイ素や炭素などの重元素を主成分とし、恒星の形成が進んだ銀河ほどその値は大きいと考えられている。進化が進んでいない大マゼラン銀河のそれは、我々の銀河系の値の半分から約3分の1程度

しかない。さらに、小マゼラン銀河のそれは、その半分程度しかない（例えば、Gordon et al. 2003）。従来、このようなガス・ダスト比の測定は、恒星の分光観測に頼ってきたが、このような測定方法では明るい恒星のある視線方向だけの情報しか得られない。本研究で得られる2次元の減光量マップを、分子ガス（H₂）をトレースするCO分子輝線のデータや、原子ガス（H）が放射する21cm線のデータと比較すれば、ガス・ダスト比の2次元分布を捉えることができる。

我々は、本研究により得られたダストによる減光量の分布図をFukui et al. (2008)のCO分子輝線のデータやKim et al. (2003)の21cm線のデータと比較解析を行った。その結果、大マゼラン銀河でのガス・ダスト比については、星形成活動が盛んな30 Dor領域周辺でAv/N[H]比が高くなっている（Av/N[H]=3~4×10⁻²²）ことが明らかとなった。また、全体の平均値は従来の恒星を使った測定値と同程度の値（Av/N[H]=2×10⁻²²）が得られた。この結果は、本研究とは独立して行われた遠赤外線ダスト放射を利用した研究結果（Bernard et al. 2008）と一致するものであり、30 Dor領域での星形成活動が周囲の星間物質の組成に影響を与えていることを強く示唆するものである。また、小マゼラン銀河については、図5のRegion1について同様の比較解析を行った。得られた結果は多少複雑であるが、過去に恒星の分光観測を利用して推定されたガス・ダスト比よりも、実際のそれは2倍程度大きな値（1.5×10⁻²²）を取るということが分かった。

以上の研究経過や考察で述べた内容は、すでに2編の学術論文として発表済みである（Dobashi et al. 2008, 2009）。また、本研究で得られたデータを一部利用した大マゼラン銀河でのダストの性質や星形成活動に関する統計的な国際共同研究も行った。その結果をまとめた論文を、現在米国の専門誌に投稿中である（Paradis et al. 2010）。さらに、本研究で開発した百分順位法を用いて、我々は銀河系内の完全な暗黒星雲探査も遂行した。得られた結果は2010年3月末に日本天文学会発行の学術雑誌に投稿する予定である（Dobashi 2010, in preparation）。

引用文献

- Bernard, J.-Ph. et al. 2008, *Astronomical Journal*, vol.136, p.919
Bohlin, R. C. et al. 1978, *Astrophysical Journal*, vol.224, p.132
Dobashi, K. et al. 2008, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 484, p.205
Dobashi, K. et al. 2009, *Astronomical Journal*, vol.137, p.5099
Fukui, Y. et al. 2008, *Astrophysical Journal*, vol.178, p.56
Gordon, K. D., et al. 2003, *Astrophysical Journal*, vol.594, p.279
Kato, D. et al. 2007, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 59, 615
Kim, S. et al. 2003, *Astrophysical Journal Supplement*, vol.148, p.473
Mizuno, N. et al. 2001, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol.53, L45
Mizuno, N. et al. 2001, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol.53, 971
Paradis, D. et al. 2010, *Astronomical Journal*, submitted

研究発表

口頭発表

- ・ 2MASS 6x/SIRIUS を利用した大小マゼラン銀河の暗黒星雲探査
土橋一仁ほか、2008年9月12日、日本天文学会秋季年会

誌上発表

- ・ Dobashi et al. 2008, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 484, p.205
- ・ Dobashi et al. 2009, *Astronomical Journal*, vol.137, p.5099
- ・ Paradis, D. et al. 2010, *Astronomical Journal*, submitted