

完成した IRSF マゼラン雲近赤外線 カタログ

加藤 大輔

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: kato@astron.s.u-tokyo.ac.jp



「IRSF マゼラン雲近赤外線カタログ」は約 1,800 万個の天体を含み、現時点で最も高い感度、高い解像度でマゼラン雲の主要部をカバーする近赤外線データです。このカタログによってマゼラン雲の星の形成と進化を探ることが可能になります。この記事では、このカタログの概要と得られた結果を紹介していきます。

1. はじめに

1.1 カタログとは

天文学の観測手法は、大きく二つに分けることができます。一つは、広い視野を同じ条件でカバーする観測、もう一つは、興味深い天体を詳細に調べるための観測です。前者のような観測のことをサーベイ観測と言います。そして、サーベイ観測データを基にして作成される天体リストのことを「カタログ」と呼びます。このうち星のカタログのことを「星表」と呼ぶこともあります。興味深い天体を探したり、たくさんのサンプルを使って統計的な議論を行う際には、一様な条件で同定された多くの天体を含むカタログが必要となります。

私たちは、「IRSF マゼラン雲近赤外線カタログ」を作成し、公開しました。この記事では、このカタログの概要と作成のねらい、そしていくつかの結果を紹介していきたいと思えます。

1.2 マゼラン雲

マゼラン雲は、私たちの天の川銀河から最も近くにある銀河たちで、大マゼラン雲と小マゼラン雲という二つの銀河からなっています。この二つの銀河は、電波観測によって、共通の中性水素原

子ガスで覆われていることがわかっています。特に大マゼラン雲と小マゼラン雲をつなぐようなガスの領域は、「マゼランブリッジ」領域（以下「ブリッジ領域」と呼ばれていて、この二つの銀河の相互作用によって生まれた構造であると考えられています。このブリッジ領域には、ガスだけでなく星も存在することがわかっています。

マゼラン雲は、星の形成と進化を探るうえで理想的な、いくつかの利点をもっています。まず、個々の星を分解できるぐらい近く（16-20 万光年）にあります。またマゼラン雲は、私たちの天の川銀河と比べ、重元素比が小さく、ダスト/ガス比が小さく、輻射場が大きいことがわかっています。さらに、大小マゼラン雲間およびマゼラン雲と私たちの天の川銀河は、過去に何度も相互作用したと考えられています¹⁾。このような特徴をもつマゼラン雲を調べることによって、異なる環境や銀河間相互作用が星の形成や進化に与える影響を探ることができます。

ただし、マゼラン雲が近くにあるということは大きな利点ですが、それは一方で、マゼラン雲が空の広い領域に広がっているということを意味します。マゼラン雲全体に分布する個々の天体を検出するためには、秒角単位の角度分解能で広い領

域をカバーするサーベイ観測が必要です。

1.3 過去の近赤外線サーベイ

近赤外線とは波長が $1\text{--}5\ \mu\text{m}$ と、赤外線の中でも波長が短く、可視光のすぐ隣りにある波長域です。近赤外線による観測は、星の形成と進化の研究をするうえで大きな利点を持っています。主系列星になる前の若い星や主系列星を終えて進化の進んだ星は、近赤外線波長域で最も明るく輝くうえに、星間塵（ダスト）による減光を可視光に比べて受けにくいからです。

初期の近赤外線観測は、単一検出器によって空を一点一点観測する効率の悪いものでした。それが1980年代から、それまでの単素子に代わって、可視光の CCD のように基盤目状に並んだ素子によって二次元の画像を撮ることのできる「二次元アレイ検出器」を用いた観測が行われるようになりました。この二次元アレイ検出器によって、広い視野を高い角度分解能でカバーする広域サーベイを行うことが可能になりました。

そして1990年代に、二つの大規模近赤外線サーベイ、2MASS（トゥーマス）・DENIS（デニス）が行われ、全天/南半天が近赤外線でカバーされました^{2),3)}。従来の、マゼラン雲の主要部をカバーする最も深い近赤外サーベイはこの2MASS・DENISでした。しかし、全天/南半天という広大な領域をカバーするために各視野での観測時間（＝感度）が短く抑えられた結果、これらのサーベイによって検出できたマゼラン雲の天体は、近赤外線で非常に明るい天体に限られていました。

1.4 私たちのサーベイの狙い

私たちは、マゼラン雲に存在するもっとさまざまな天体を検出するために、彼らよりも6-10倍感度が高く、2倍以上角度分解能の良い近赤外線サーベイを行いました。これがIRSFマゼラン雲近赤外線サーベイです。

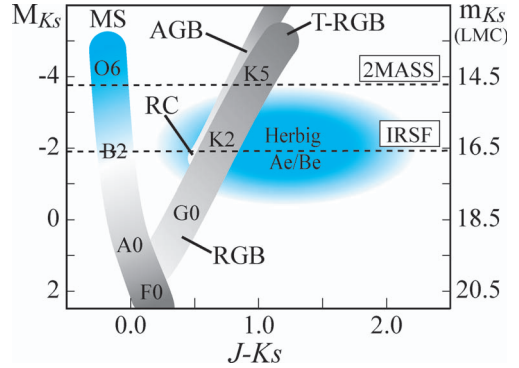


図1 色等級図の模式図。横軸が $J\text{-}K_s$ の色 [等級]、縦軸左側が K_s の絶対等級、右側が大マゼラン雲にあるときの見かけの等級。

では、私たちのサーベイでどんな天体を検出できるのでしょうか？ それを示すために、図1を使って説明します。図1は色等級図と呼ばれる、横軸に J バンドと K_s バンドの明るさの差、つまり色、縦軸に K_s バンドの明るさをとった図です。「バンド」というのは波長帯のことで、 J バンドは波長 $1.25\ \mu\text{m}$ 、 K_s バンドは波長 $2.14\ \mu\text{m}$ の近赤外線を中心とする波長帯です。観測では、その波長帯の近赤外線のみを透過するフィルターを用います。したがって、図の下にあるほど近赤外線で暗い天体、図の右にあるほど波長の短い J に比べて波長の長い K_s で明るい、つまり近赤外線で「赤い」天体であると言えます。また、図1には、さまざまな天体の図上での位置を示しています。図の左上から下へ伸びているのが主系列 (MS)、左下から右上へ伸びているのが赤色巨星枝 (RGB)、巨星枝の途中から巨星枝と重なるように右上へ伸びているのが漸近的巨星枝 (AGB) で、AGBの付け根あたりにレッドクランプ (RC)^{*1} があります。そして、図中に青い楕円で示してあるのがハービグ Ae/Be 型星と呼ばれる星の分布です (Herbig Ae/Be)。ハービグ Ae/Be 型星というのは、中質量 (太陽質量の約2-10倍) の前主系列

*1 色等級図の赤色巨星枝近くのできる塊のこと。巨星から AGB 星へ進化する途中の太陽程度の質量の星からなる。

星，つまり主系列星になる前の若い星です。

図1には、私たちのサーベイと2MASSサーベイの検出限界が点線で描いてあり、この線より上にある天体を検出できることを示しています。私たちのサーベイによって検出できる天体は、B2型よりも早期型の主系列星、K2型よりも晩期型の巨星、ほぼすべてのAGB星、レッドクランプ星、太陽の3倍以上の質量をもつ前主系列星（ハービッグ Ae/Be 型星）です。つまり、私たちのサーベイによって、マゼラン雲全体にわたって存在する主系列に達する前の若い星と主系列を離れた古い星の両方を初めて検出することができます。これらの天体の性質を調べ、マゼラン雲の星の形成と進化の様子を探るのが私たちのサーベイの狙いです。

2. IRSF マゼラン雲サーベイ

2.1 IRSF

私たちは、このような大規模サーベイをおこなうのに不可欠な、専用の施設を作りました。これが IRSF*2 (InfraRed Survey Facility: 赤外掃天施設) です。IRSFは南アフリカ天文台サザーランド観測所にあります。IRSFを建設するにあたり、名古屋大学を中心とする日本側のグループと南アフリカ天文台の間で協定が結ばれ、日本側が望遠鏡とカメラを、南ア側がドームと後方支援を担当することが決められました。南半球からしか観測できないマゼラン雲をサーベイするにあたりいくつかのサイトがリストアップされたのですが、南アフリカ天文台を選んだ決め手は、その万全のサポート体制にあります。IRSFは2000年より現在まで順調に動いていますが、南アフリカ天文台のサポートがなければ、これほど長期間にわたる安定運用はとてできなかったでしょう。

IRSFは、IRSF 1.4 m 望遠鏡と近赤外三色同時カメラSIRIUSからなっており、いずれも自分たち

で開発した装置です。IRSF 1.4 m 望遠鏡は経緯儀式望遠鏡で、名古屋大学と望遠鏡会社の(株)西村製作所で共同開発しました。望遠鏡のポインティング精度、つまり星を視野の中心に入れようとしたときのずれの平均は全天で約3秒角、トラッキング精度、つまり星を視野の中心に入れ続けたまま30秒間追尾したときのずれは0.3秒角/30秒間で、いずれもサーベイ観測に十分な精度を達成しています。

SIRIUSは、名古屋大学と国立天文台が共同開発された近赤外線カメラです^{4), 5)}。3台の1,024×1,024素子の近赤外線アレイ型検出器(HAWAII)を搭載したことによって、三つの近赤外線バンド、Jバンド(中心波長1.25μm)、Hバンド(1.63μm)、Ksバンド(2.14μm)を同時に撮像することができます。SIRIUSカメラをIRSF望遠鏡に搭載したときの1ピクセルは0.45秒角に相当し、視野は7.7分角四方です。

なお、天文月報2005年3,4月号に掲載された「IRSF/SIRIUS特集」において、このプロジェクトの経緯や装置開発の裏話、主な成果などが紹介されています。興味のある方はぜひそちらもご覧いただきたいと思います。

2.2 観測

観測は、2001年11月より2006年3月の間にかけて行われました。サーベイ領域は、大マゼラン雲約40平方度、小マゼラン雲約11平方度、ブリッジ領域約4平方度の計約55平方度に及び、これはIRSF/SIRIUSの4,455視野に相当します。図2はマゼラン雲の画像上にサーベイ領域を示したもので、青い実線で囲まれているのが私たちのサーベイ領域です。参考のために、二つの赤外線衛星、スピッツァーとあかりによるマゼラン雲サーベイ領域を青い点線で示してあります。両衛星は私たちよりも波長の長い中間赤外線～遠赤外線マゼラン雲をカバーします。図2を見ると、

*2 「アイアールエスエフ」と読みますが、滑りが悪いせいか日本の人にも海外の人にもなかなか覚えていただけません。名づけ人のT.N氏にはいつも文句を言っています。

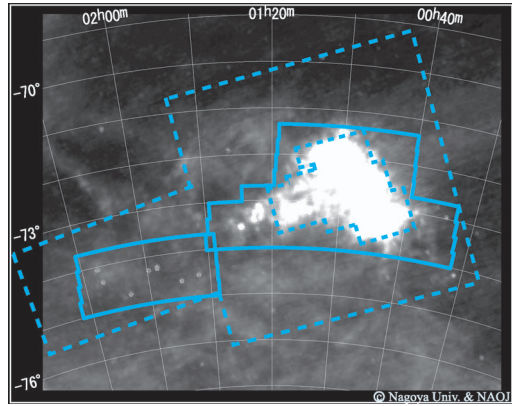
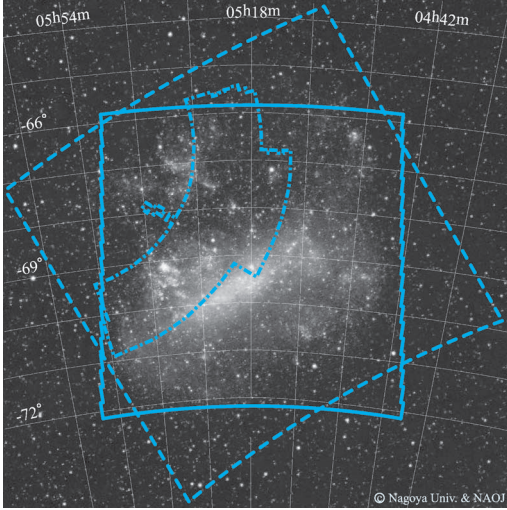


図2 (左) 青い実線が IRSF 大マゼラン雲サーベイ領域. 青い点線はスピッツァー, 青い一点鎖線はあかりのサーベイ領域. (右) 青い実線が IRSF 小マゼラン雲/ブリッジ領域サーベイ領域. 二つの青い点線はいずれもスピッツァーのサーベイ領域 (内側が実行済み, 外側が実行中の領域).

IRSF と両衛星のサーベイ領域の多くの部分が重複していることがわかります. 今後, 幅広い波長域のデータの組み合わせによって, マゼラン雲にあるさまざまな天体を探ることが可能になります.

1 視野当たりの総露出時間は 300 秒で, 既存の 2MASS・DENIS 両サーベイの 30 倍以上の長さです. また, 大気の揺らぎによって決まる点源の広がり, すなわち空間分解能の平均値は, *J* バンドで 1.3 秒角, *H* バンドで 1.2 秒角, *K_s* バンドで 1.1 秒角で, 2MASS の 2.5~2.8 秒角に比べて 2 倍以上良いことを確認しました.

3. カタログの概要

以上のサーベイによって, 総量約 2 テラバイトからなる観測データを手に入れました. このデータを使ってカタログを作成していきます. まず, 観測データの元画像に対してさまざまな画像処理を行い, 観測装置の特性や, 観測装置・地球大気

からの放射の影響を取り除いた約 60 ギガバイトほどの「画像処理済み」画像を作成します. 次に, これらの画像上に写っている天体の位置と明るさを測定します. これを三つのバンドそれぞれについて行い, 同じ位置にある天体を統合します. 最終的にマゼラン雲全体で約 1,800 万個の天体を含むカタログを作成しました.

カタログは日本天文学会の欧文研究報告 (PASJ) の web サイト^{*3}において公開されており, 日本天文学会員なら誰でも取得することができます. カタログは, 各天体の位置, 各バンドでの明るさとその誤差のほかに, 天体の広がり具合やひずみを示すパラメーターなどを含んでいます. また, 視野ごとに共通の情報 (観測日など) をまとめた付属カタログも公開しています. 付属カタログとの組み合わせによって, 各天体の観測時刻や観測時の気象条件などを調べることができます.

また私たちは, カタログの精度と感度を測定し

*3 <http://pasj.asj.or.jp/v59/n3/590315/>

ました。まずカタログの測光精度と位置精度を測定するために、(1) 隣り合った視野の両方で検出されている天体の比較、(2) 両方で検出されている天体の比較、の二つの比較を行いました。その結果、私たちのカタログが測光精度 0.03–0.04 等、位置精度 0.1 秒角を達成していることを確認しました。このうち、測光精度 0.03–0.04 等という値は、3–4% の精度で星の明るさが求まっていることに相当します。これらの値は、私たちのカタログに含まれる天体が、十分良い精度でその明るさと位置を求められていることを示しています。

次に私たちは、 10σ 限界等級、90% 検出限界と呼ばれる数値を求めました。これらはいずれもサーベイの感度を示す指標で、前者は 10% の精度で明るさを求められる限界の明るさ、後者は 90% の確率で検出することのできる限界の明るさを意味しています。測定の結果、 10σ 限界等級は $J=18.8$ 等、 $H=17.8$ 等、 $K_s=16.6$ 等、90% 検出限界は $J=18.5$ 等、 $H=18.2$ 等、 $K_s=17.4$ 等という値を得ました。いずれの値も、私たちのサーベイが目標どおりの感度を達成していることを示しています。

4. カタログ天体の性質

ここからは、カタログの天体を使って、光度関数、二色図、色等級図と呼ばれる図を、大小マゼラン雲とブリッジ領域それぞれについて示していきます。このうち光度関数は、カタログの全天体を使って作成していますが、二色図・色等級図は、カタログ天体の中でも質の良いもの、具体的には、(1) 10% の精度で明るさがわかっている、(2) 天体の形状に異常（広がり・ひずみ）がなく、(3) すぐ近くに他の天体がない、という三つの条件をすべてのバンドで満たしている天体のみを用いて作成しています。

4.1 光度関数

図 3 は横軸に天体の明るさ、縦軸にその明るさをもつ天体の数をとった光度関数と呼ばれる図

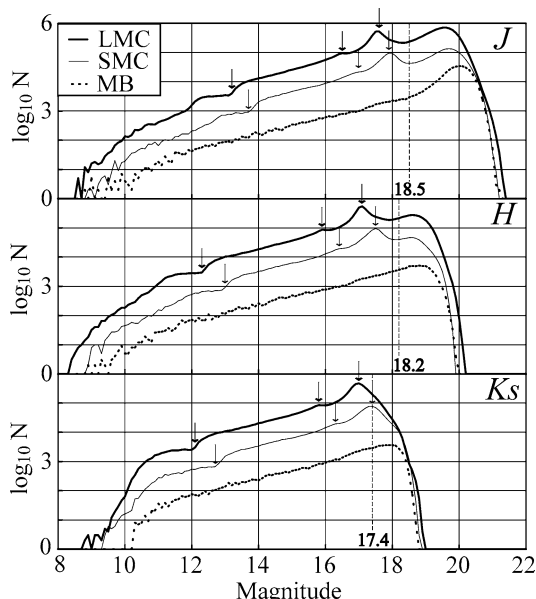


図 3 J バンド (上), H バンド (中), K_s バンド (下) の光度関数 (0.1 等刻み). 大マゼラン雲, 小マゼラン雲, ブリッジ領域の光度関数がそれぞれ, 太い実線, 細い実線, 点線で示してある. また縦の点線は 90% 検出限界の明るさを示している.

で、上から順に J, H, K_s バンドの光度関数を示しています。大マゼラン雲、小マゼラン雲、ブリッジ領域の光度関数がそれぞれ、太い実線、細い実線、点線で示してあります。どの光度関数も右肩上がりになっていて、暗い天体ほどたくさんあることを示しています。しかし、大マゼラン雲、小マゼラン雲の光度関数を見ると、12–14 等あたりと 17–18 等あたりに不連続な構造、15.5–17 等あたりと 17–18 等あたりにこぶのような構造があるのがわかります (図中矢印)。これら三つの構造はそれぞれ、巨星枝の先端 (Tip of RGB), AGB バンプ (AGB bump), レッドクランプ (red clump) と呼ばれるものです。巨星、レッドクランプ星、AGB 星はいずれも、主系列星を終えた星が進化した古い星です。これらの星は主系列星に比べて表面温度が低いため、近赤外線でも輝きます。私たちのサーベイで検出される天体の大部分は、これらの進化

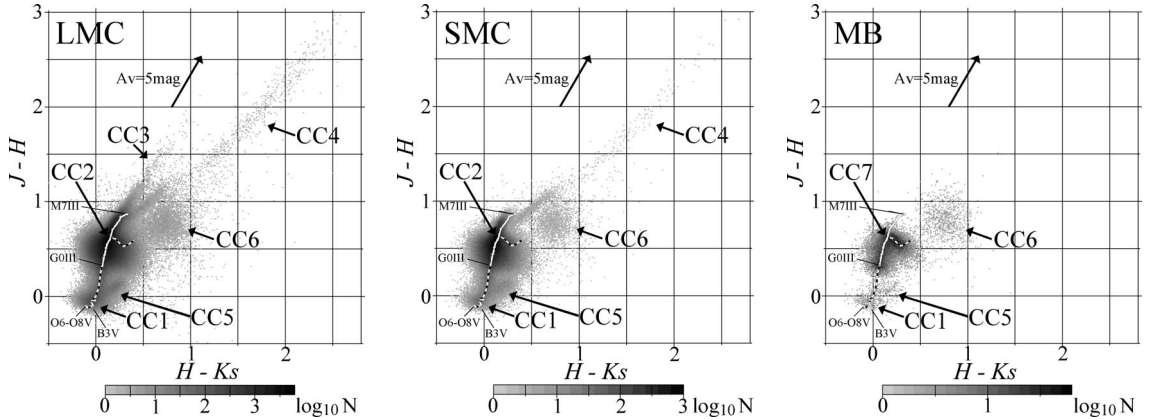


図4 大マゼラン雲 (左), 小マゼラン雲 (中), ブリッジ領域 (右) の二色図.

の進んだ星です.

一方これらの構造は、ブリッジの光度関数には見られません. これは、ブリッジにはこれらの古い星が存在しないことを示しています.

4.2 二色図

図4は、横軸に $H-Ks$ の色、縦軸に $J-H$ の色をとった二色図と呼ばれる図です. カタログ天体の分布が白黒等高図で描いてあり、色が黒いほど天体の数が多いことを示しています. また、図上にある白い点線と実線は、私たちの銀河系内の主系列星と巨星のこの図上での位置を示しています. 大マゼラン雲の二色図を見ると、全部で六つの構造が見えます (CC1-CC6). CC1とCC2はそれぞれ、主系列星と巨星の線に沿って分布しています. CC3とCC4はCC2の端から右上へ伸びていて、特にCC4は最も右上、つまり最も赤いほうへ長く伸びています. CC5はCC1に隣接してそこから右上へ伸びています. CC6は $(H-Ks, J-H) \sim (0.7, 0.7)$ あたりにやや広がって固まっています. これらの構造は順に、CC1: 主系列星, CC2: 巨星, CC3: 強い減光を受けた巨星, CC4: AGB星, CC5: 古典的 Be 型星+前主系列星, CC6: 前主系列星+マゼラン雲の背景にある銀河、からなっていると考えられます.

小マゼラン雲の二色図を見ると、大マゼラン雲

にある六つの構造のうち、CC3を除く五つの構造が見えます. これは、強い減光を受けた巨星が小マゼラン雲にはあまりないものの、その他の天体は小マゼラン雲の方向にも存在することを示しています.

一方ブリッジ領域の二色図は、大小マゼラン雲のものとは大きく異なっており、全部で四つの構造が見えます. うち三つ (CC1, CC5, CC6) は大小マゼラン雲の二色図にも見える構造ですが、もう一つはCC7というブリッジ領域にしか見えない成分が見えています. CC7は主系列星の線に沿って折れ曲がって分布していることから、私たちの銀河系内にある晩期型主系列星からなっていると考えられます. ブリッジ領域には巨星 (CC2) や AGB 星 (CC4) が存在しないために、銀河系内の星が目立って見えてしまうのです.

4.3 色等級図

図5は図1で示した色等級図を、実際のカatalogデータから作ったものです. 二色図と同様に、カタログ天体の分布が白黒等高図で示してあり、白の点線と実線は、銀河系内の主系列星と巨星をマゼラン雲の距離に置いたときのこの図上での位置を示しています. 大マゼラン雲と小マゼラン雲の色等級図では、二色図同様、六つの構造が見えます (CM1-CM6). これらは順に、CM1: 主系列

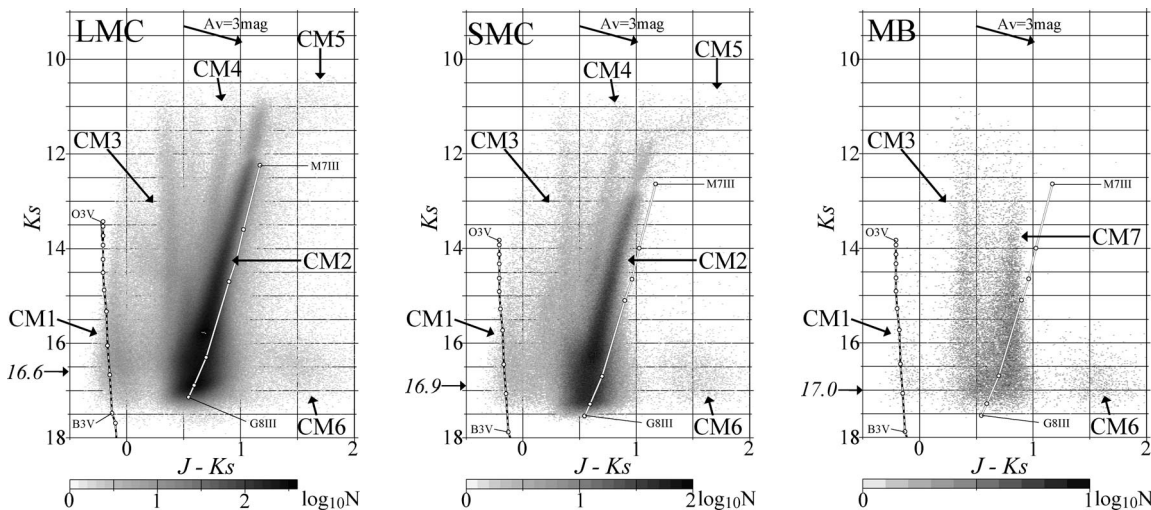


図5 大マゼラン雲 (左), 小マゼラン雲 (中), ブリッジ領域 (右) の色等級図.

星, CM2: 巨星, CM3: 銀河系内の晩期型主系列星, CM4: ヴァーティカル・レッドクランプ*4, CM5: AGB 星, CM6: 背景の銀河+前主系列星からなっていると考えられます。ブリッジ領域の色等級図は他の二つとは異なり, 四つの構造が見えます。うち三つ (CM1, CM3, CM6) は大小マゼラン雲と同じものですが, もう一つ CM7 という構造が見えています。CM7 は CM3 と同じく銀河系内の晩期型主系列星ですが, CM3 よりもさらに晩期型の主系列星です。この図でもやはり, 大小マゼラン雲では見えている巨星 (CM2) や AGB 星 (CM5) が見えない結果, かわりに銀河系内の構造 (CM7) が目立っています。

5. 今 後

先に示した結果から, 私たちのカタログが OB 型星, 巨星, AGB 星, レッドクランプ星, 前主系列星など, さまざまな天体を含んでいることがわかりました。これらの天体を用いて, マゼラン雲のさまざまな研究が可能となります。

私たちのサーベイで検出できる前主系列星の寿

命は, 100 万年ほどしかありません。これまでのマゼラン雲の星形成の研究では, 寿命が 1,000 万年のオーダーである OB 型星が主に用いられていましたが, 私たちの研究ではそれよりも 1 桁細かいタイムスケールで星形成を探ることができます。実際, 私たちのサーベイデータを用いて OB 型星や前主系列星の候補を選び出し, マゼラン雲の星形成の様子を探る研究がいくつか行われています⁶⁾⁻⁸⁾。また, 私たちのカタログを基に, レッドクランプを距離の指標に用いた大マゼラン雲の奥行き構造を調べる研究もすでに行われています⁹⁾。

また, 今回の記事では公開したカタログについて紹介しましたが, サーベイ画像についてもできるだけ早く公開することを目指して準備しています。その際, ただ単に画像を公開するだけでなく, 任意の場所とサイズを指定したら画像が出てくるようなユーザーインターフェイスを用意したいと考えています。画像にはカタログにはない多くの情報が含まれています。特に, カタログは「点源」のみを扱っているため, 広がった天体の情報を含

*4 赤色巨星枝のやや左側にできる縦に伸びた構造のこと。レッドクランプと同様に巨星から AGB 星へ進化する途中の星からなる。

んでいません。画像の公開によって、広がった天体の輝度分布などを調べる事が可能になります。多くの方が、マゼラン雲を「見て」調べることができるよう、責任をもって画像を公開したいと思います。

6. おわりに

私たち（名古屋大学-西村製作所）が開発した IRSF 1.4 m 望遠鏡には、多くの兄弟望遠鏡がいます。天文研究に使用されているだけでも、鹿児島 1 m, 石垣島 1 m (国立天文台), ニュージーランド 1.8 m (名古屋大学) などが挙げられます。また、広島 1.5 m (広島大) でも私たちの開発した望遠鏡制御技術が活かされています。

自分たちのために開発した望遠鏡の製作技術が他の研究でも広く活用されているというのは、たいへん嬉しいことです。また現在、望遠鏡を作るためのさまざまな新技術が進展しつつありますが、もし自分たちの開発が、後から見て、望遠鏡を「作る」ことへのとっかかりになったのだとしたら、これほど嬉しいことはありません。

なお、この記事の内容は PASJ に掲載されたカタログ論文と加藤の博士論文を基にしています^{10), 11)}。

謝 辞

この研究を遂行するにあたり、IRSF/SIRIUS チームの皆様、南アフリカ天文台の皆様、そのほか数多くの皆様に多岐にわたってご支援をいただきました。皆様とともにこの研究を進められたこと、そしてこのように結果を報告できることを心より嬉しく思います。本当にありがとうございました。

また、私はこの研究によって博士号を取得しました。指導教官の佐藤修二先生、ならびにお世話になった多くの皆様に心より御礼申し上げます。

この研究は、1998-2001 年の特定領域研究 (旧重点領域研究)「マゼラン星雲大研究」の補助を受けて行われています。

参考文献

- 1) van den Berge S., 2000, *The Galaxies of the Local Group* (Cambridge: Cambridge Univ. Press)
- 2) Skrutskie M. F., et al., 2006, *AJ* 131, 1163
- 3) Epchtein N., et al., 1999, *A&A* 349, 236
- 4) Nagashima C., et al., 1999, in *Star Formation 1999*, ed. T. Nakamoto (Nobeyama: NRO), 397
- 5) Nagayama T., et al., 2003, *Proc. SPIE* 4841, 459
- 6) Nakajima Y., et al., 2005, *AJ* 129, 776
- 7) Hatano H., et al., 2006, *AJ* 132, 2653
- 8) Nishiyama S., et al., 2007, *ApJ* 658, 358
- 9) Koerwer J. F., 2008, submitted
- 10) Kato D., et al., 2007, *PASJ* 59, 615
- 11) 加藤大輔, 2007, 名古屋大学大学院理学研究科博士論文

The IRSF Magellanic Clouds Point Source Catalog

Daisuke KATO

Department of Astronomy, Graduate School of Science, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: We present a near-infrared (*JHKs*) photometric catalog including about 18 million point sources distributed over 40 square degrees of the LMC, 11 square degrees of the SMC, and 4 square degrees of the Magellanic Bridge. The 10 sigma limiting magnitudes are 18.8, 17.8, and 16.6 at *J*, *H*, and *Ks*, respectively, about 2 mag deeper than those for 2MASS. The photometric and astrometric accuracies for bright sources are 0.03-0.04 mag and 0.1 arcsecond, respectively. Catalog data are available at <http://pasj.asj.or.jp/v59/n3/590315/>.