

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：18K13587

研究課題名（和文）Validation of New Measurement Tools of Star Formation Rate in radio wavelength

研究課題名（英文）Validation of New Measurement Tools of Star Formation Rate in radio wavelength

研究代表者

三浦 理絵（Miura, Rie）

国立天文台・アルマプロジェクト・特別客員研究員

研究者番号：30770698

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、星形成率を正確に決定するために、ALMA望遠鏡を用いて100GHz帯連続波データを解析する方法の有用性を検証した。M33銀河内に存在する87個の巨大分子雲に対し、16個の連続波源を特定し、それらから星形成率を推定した。また、すばる望遠鏡による近赤外画像を用いて、機械学習アルゴリズムを利用することで、より客観的にM33銀河内南北渦状腕の星の測光カタログを作成した。その結果、100GHz帯連続波から見積もった星形成率を、測光カタログから得られた大質量星候補の結果と空間的かつ定量的に比較すると、ほぼ同等の正確さを持つことが初めて観測的に示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来の星形成率測定方法における欠点を克服し、最先端電波望遠鏡ALMAを用いた新しい星形成率測定方法の有用性を実証した。これにより、銀河進化を理解する上で重要な要素である星形成率をより正確により複雑なプロセスを経ることなく測定することができるようになる。本研究で検証された手法は、減光などの理由で他の波長のデータでは困難である領域でも使える手法であり、遠方宇宙にも容易にスケールアップすることができる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the usefulness of analyzing 100 GHz band continuum data using the ALMA telescope for accurately determining the star formation rate. We identified 16 continuum sources from 87 giant molecular clouds in the M33 galaxy and estimated the star formation rate based on those sources. Additionally, we created a more objective photometric catalog of stars in the northern and southern spiral arm of the M33 galaxy using a machine learning algorithm by applying it on the near-infrared images from the Subaru Telescope. As a result, we observed for the first time that the star formation rate estimated from the 100 GHz band continuum was almost equally accurate when compared spatially and quantitatively to those obtained from the photometric catalog of massive young star objects.

研究分野：電波天文学

キーワード：大質量星形成 星形成率 近傍銀河 サブミリ波

1. 研究開始当初の背景

様々な銀河の星形成率を測定することは、銀河の進化および宇宙の進化を理解する上で非常に重要である。一般的な星形成率の測定方法は、大質量星からの紫外線放射、そしてその周りの電離領域からの再結合線や自由自由放射から求める方法である。紫外線や可視光は、若い星の種族を直接トレースすることができるが、通常ダストによって減光を受けるため、真の放射量を求めるには減光分を補正する必要がある。補正には、赤外線データと組み合わせて用いる方法が最も一般的である。しかし、赤外線データは紫外線・可視光のデータよりも空間分解能が低いため、両者が必ずしも同じ領域からの放射であるとは限らない。また、赤外線放射量のみを用いる場合もあるが、赤外線連続波には若い星の種族のみならず、すでに進化した星からからの放射も含まれるため、星形成率を過大評価している可能性がある。最後に、電波連続波を用いる方法がある。電波域では、自由自由放射と超新星爆発によって加速された電子によるシンクロトロン放射が主に含まれ、短波長側ではダスト放射も寄与してくるため、これらを切り分ける必要がある。一方、新たな星形成領域のトレーサーとして注目したのが、100GHz 帯連続波およびミリ波サブミリ波水素再結合線である。100GHz 帯はシンクロトロン放射とダスト放射からの寄与が最も小さく、自由自由放射が卓越する周波数帯である。これらのトレーサーは、上にあげた他波長における放射に比べて放射強度が弱いという弱点があったため、これまで積極的に用いられることはなかった。しかしながら、感度および、空間分解能の高い電波データが取得できる ALMA 電波望遠鏡時代の到来で容易に検出が可能となった。さらに、観測帯域広い ALMA では、1回の観測で同時に複数の輝線・連続波を観測することができるため、同時に取得されたデータはすべて同程度の高い空間分解能である上に、他の望遠鏡のデータを獲得する必要がないという利点もある。近年、より簡単でより正確な、新しい星形成率の測定手段の開拓の必要性はより高まっている。

2. 研究の目的

様々な輝線や連続波(炭素電離輝線や酸素電離輝線、センチ波など)を用いた星形成率の測定手段の有効性が検証されているが、これまで、星団一個単位でミリ波と近赤外データを直接比較し、測定手段の有効性を検証した研究はこれまでになかった。そこで本研究では、ALMA を用いたミリ波サブミリ波帯域での 100GHz 帯連続波の観測データを用いて、星形成率の測定を行い、可視光や赤外線データを使う従来の方法から求めたそれと定量的に比較することで、新しい星形成トレーサーとしての有用性を評価することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) データの取得

サブミリ波電波データ: ALMA を用いて、近傍渦巻銀河 M33 の 87 個の巨大分子雲に対して 100GHz 帯連続波データを取得した。これらのデータから求めた電離光子率から、それを星の種族合成モデル(Starburst99)を用いて星形成率に変換した。

近赤外線撮像データ: すばる望遠鏡 MOIRCS を用いて、M33 渦状腕内にある星形成領域に対して、近赤外撮像データを取得し、星(団)のカタログを作成した。MOIRCS の分解能なら M33 の一つの星団が分解できる(1 パーセク程度)。さらに、複数の観測バンドの測光データを使った二色図上で、ダストによる赤外線超過が見られる天体を選別することで若い大質量星を同定した。

(2) との比較 同定された若い星(団)の規模(空間分布、数密度)と電波データにより推定された星団の規模(空間分布、星形成率)を比較し、電波データが真に若い星団をトレースしているのか比較検証した。



図 1 すばる SupremeCam の可視光画像と MOIRCS による観測領域(白枠で覆われた領域)。南北渦状腕上にそれぞれ領域を選んだ。上下のパネルは JHK 3 色合成図と巨大分子雲(GMC: 白い等高線)との位置関係を示す。

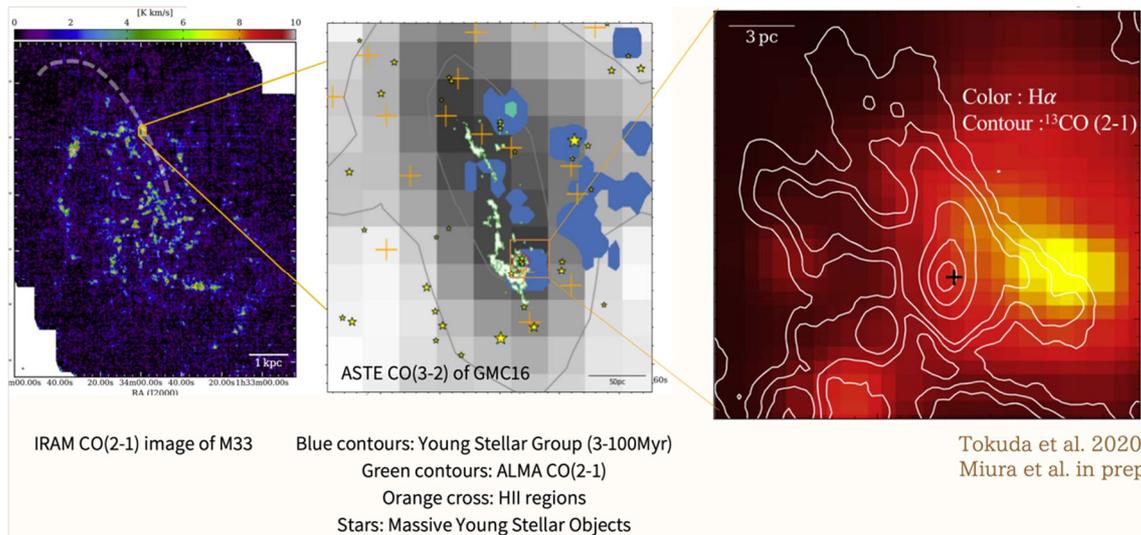


図 2 (左)M33 の CO(2-1)分子ガス分布図(Tokuda et al. 2020 より改編) 点線は渦巻腕を示す。(中)M33 北部渦状腕に位置する分子雲 GMC-16 における ASTE CO(3-2)分子ガス分布図(グレースケール; Miura et al. 2012)と ALMA CO(2-1)分子ガスの分布(緑の等高線; Tokuda et al. 2020). 星型のシンボルが本研究で同定した MYSO の分布. 青い等高線は比較的若い星団(<30Myr)の分布, クロスは $24\ \mu\text{m}$ 源の場所を示す. (右) 中図の MYSO の密度が高い領域を拡大したもの. カラスケールは H α , 等高線は $^{13}\text{CO}(2-1)$ 分子ガス分布 (Tokuda et al. 2020)

4. 研究成果

(1-) 近傍渦巻銀河 M33 内の 100GHz 連続波ソースカタログ

ALMA Band3 の連続波データを解析し, 近傍銀河 M33 内の 87 巨大分子雲のうち, 16 個の領域で連続波源を同定した. これらの連続波データから星形成率を求めたものと, H α データから見積もったそれと比較すると相関関係にあることが分かった. また, H α ソースカタログと位置の相関を調べると, ALMA の高分解能のデータで見ると数 pc 程度のオフセットが見られ, $24\ \mu\text{m}$ ソースのほうにより近い位置にあることが分かった.

(1-) 近傍渦巻銀河 M33 南北渦状腕周辺の若い大質量星のカタログ

近傍銀河 M33 内の南北渦巻銀河付近の領域にたいして, すばる望遠鏡の MOIRCS で JHK 赤外線撮像データを取得した. 本来 ALMA で取得した領域と同じ領域を観測予定であったが, 観測時間の制約と装置トラブルにより, 最終的に北部渦状腕 $4' \times 3' .5$ 領域, 南部渦状腕の $7' \times 4'$ 領域のみが有効なデータとなった(図 1). 想定上に星の密度が高く, 開口測光は困難なため, PSF 測光を行なった上で, JHK 赤外線源のカタログを作成した. なお, PSF 作成の際には, アクティブラーニングの手法を使ったことで, PSF 候補天体を選択する手間の効率化に成功した(Appendix 図). PSF 測光後は, 2 色図を作成し, より赤い天体を若い大質量星候補天体(MYSO)を同定した. その際, NGC604 における星の JHK 測光データおよび MYSO カタログ(Farina et al. 2012), 星の密度分布を学習させた機械学習モデル(サポートベクトルマシーン: AUC スコア 98%)を本研究で生成した測光データにも適用することでより客観的に MYSO を同定することにも成功した.

(2) 100GHz データと近赤外データの定量的比較

100GHz 連続波の分布と MYSO の星の分布(密度)を比較すると, とても良い相関があることが分かった. 例えば, M33 北部渦状腕にある大質量星形成がさかんな巨大分子雲 GMC-16(進化段階 C; Miura et al. 2012)を例に取る(図 2 左). GMC-16 の南側の領域では, 分子ガスが多く, H α でみられるような水素電離領域も付随している(図 2 右). MYSO の空間分布も同様の傾向が見られた. 図 3 は GMC-16 南部を拡大したもので, 数 pc 程度のコンパクトな分子雲があることがわかる. 5 つの MYSO はその周り, H α のピーク付近に分布している(図 2 右). 100GHz 連続波から見積もった電離光子率から初期質量関数(IMF)を -2.35 と仮定して星の数を求めると 5 個程度になった. つまり, 100GHz 連続波から見積もった星形成率は, 近赤外線データで星(団)ひとつひとつを数えたものと同様であると言える.

本研究の結果によって, ミリ波帯に 100GHz 帯の連続波が, 可視赤外線データに変わる新たな星形成率測定方法として有効であることを初めて観測的に確かめられた. 言い換えれば, ALMA 望遠鏡による輝線観測によって同時に取得される連続波があれば, 可視赤外線データがなくとも, 高分解能かつ減光補正の不要な星形成トレーサーとして使えるといえ, 新しい星形成率の測定手法の妥当性を裏付ける結果となった.

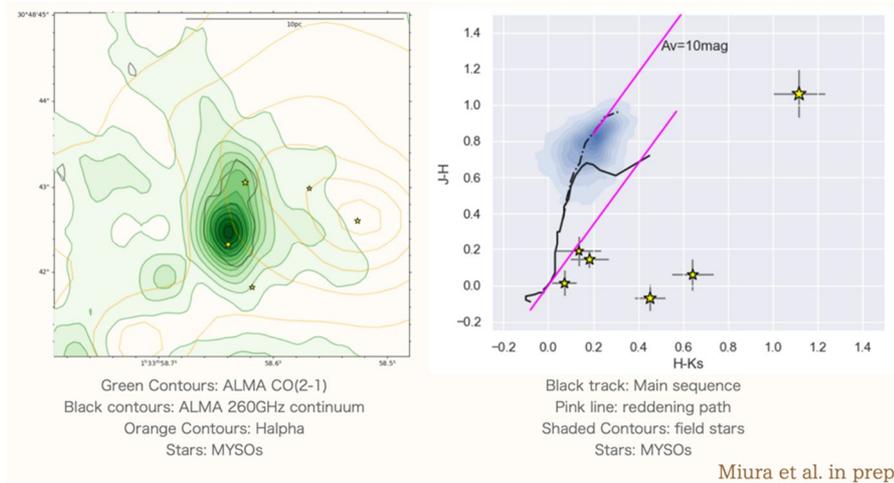
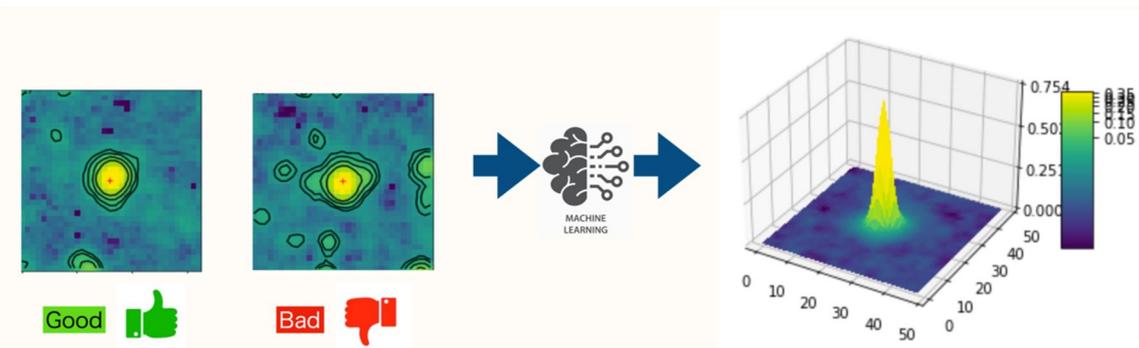


図 3: (左) 緑, 黒, オレンジの等高線はそれぞれ CO(2-1)ガス分布, 連続波, および H α の分布をあらわす(Tokuda et al. 2022; this work). 星形のシンボルは MYSO の位置を表す. (右)左図にある MYSO を JHK 2 色図にプロットしたもの. 青の等高線はフィールドスター, 黒い実線は, 減光なしの場合の星の進化トラック(Tokunaga 2000). マゼンタの実線は, 減光 A_v 10 等級あった場合の赤化曲線. 分子ガスのピークと距離が近い MYSO ほど二色図上で右下(より赤い)にあることが分かった.

Appendix. アクティブラーニング手法による PSF 候補天体の選択

PSF(Point Spread Function)測光のための PSF の作成には, 撮像当時の点源の形状を最もよく表す PSF 候補体を選び出して, PSF を作る必要があるが, 本研究で得られた領域のようにとても混み合った領域では簡単に選び出すのは難しくなる. そこで, 本研究では, 機械学習のアクティブラーニング手法を用いて, その作業の効率化を実現した. 初めに全ての点源の画像を切り出した上で, いくつかの画像をランダムに選び出し, 良いか悪いかのラベルをつける. このお手本を機械学習分類器に学習させ, ラベルをつけていない画像にも適用させる. 分類器は良いか悪いかの判断がつかないものがあつたときだけ, 人間がラベルを教えることでさらに学習して, 分類作業を続けるという具合である.



Appendix 図 機械学習による PSF 候補天体の画像の分類プロセス. 左側 2 枚は点源画像で, たとえば人間が最初に PSF 候補として採用かどうかを教えることを行うと, 良いものだけを抽出する. 選ばれた画像だけで PSF を作ると右端のような尤もらしい PSF ができる.

<参考文献>

Farina et al. 2012, AJ, 143, 43
 Miura et al. 2012, ApJ, 761, 37
 Tokuda et al. 2020, ApJ, 896, 36

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Muraoka Kazuyuki, Kondo Hiroshi, Tokuda Kazuki, Nishimura Atsushi, Miura Rie E., Onodera Sachiko, Kuno Nario, Zahorecz Sarolta, Tsuge Kisetsu, Sano Hidetoshi, Fujita Shinji, Onishi Toshikazu, Saigo Kazuya, Tachihara Kengo, Fukui Yasuo, Kawamura Akiko	4. 巻 903
2. 論文標題 ALMA Observations of Giant Molecular Clouds in M33. II. Triggered High-mass Star Formation by Multiple Gas Colliding Events at the NGC 604 Complex	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 94 ~ 94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb822	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kondo Hiroshi, Tokuda Kazuki, Muraoka Kazuyuki, Nishimura Atsushi, Fujita Shinji, Tosaki Tomoka, Zahorecz Sarolta, Miura Rie E., Kobayashi Masato I. N., Onodera Sachiko, Torii Kazufumi, Kuno Nario, Sano Hidetoshi, Onishi Toshikazu, Saigo Kazuya, Fukui Yasuo, Kawamura Akiko, Tsuge Kisetsu, Tachihara Kengo	4. 巻 912
2. 論文標題 ALMA Observations of Giant Molecular Clouds in M33. III. Spatially Resolved Features of the Star formation Inactive Million-solar-mass Cloud	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 66 ~ 66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abeb65	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tokuda Kazuki, Muraoka Kazuyuki, Kondo Hiroshi, Nishimura Atsushi, Tosaki Tomoka, Zahorecz Sarolta, Onodera Sachiko, Miura Rie E., Torii Kazufumi, Kuno Nario, Fujita Shinji, Sano Hidetoshi, Onishi Toshikazu, Saigo Kazuya, Fukui Yasuo, Kawamura Akiko, Tachihara Kengo	4. 巻 896
2. 論文標題 ALMA Observations of Giant Molecular Clouds in M33. I. Resolving Star Formation Activities in the Giant Molecular Filaments Possibly Formed by a Spiral Shock	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 36 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8ad3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Rie E. Miura
2. 発表標題 Embedded Massive Young Stellar Objects in the Giant Molecular Clouds of M33
3. 学会等名 SUBARU TELESCOPE 20TH ANNIVERSARY (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------