

機械学習による星形成フィラメントの幅の普遍性の解明

Revealing the universality of the widths of the star-forming filaments using machine learning

(日本天文学会推薦)

代表研究者	九州共立大学	島尻 芳人	Kyushu Kyoritsu University	Yoshito SHIMAJIRI
協同研究者	名古屋大学	立原 研悟	Nagoya University	Kengo TACHIHARA
	鹿児島大学	高桑 繁久	Kagoshima University	Shigehisa TAKAKUWA
	九州大学	Arzoumanian Doris	Kyushu University	Doris ARZOUMANIAN

This project aimed to develop a machine-learning approach for reconstructing Herschel-like H_2 column-density maps from molecular-line data, with the ultimate goal of providing a common observational basis for testing the universality of filament widths in star-forming regions. Previous studies showed that filament widths measured from different molecular tracers can differ significantly, indicating that tracer-dependent observational biases must be removed before comparing filament widths across environments. In this project, we improved the prediction of high-column-density filamentary structures by incorporating dense-gas tracers, including HCO^+ , H^{13}CO^+ , and HCN , in addition to CO isotopologue data. Applying an Extra Trees Regressor to the B211/B213 filament in Taurus, we confirmed that the inclusion of dense-gas information substantially improves the reconstruction of the filamentary H_2 column-density structure compared with models using only CO isotopologues. This result is being prepared for publication as Shimajiri et al. 2026. As a related outcome, we also demonstrated that dust temperature can be predicted from molecular-line data using machine learning; this work was published as Dougome, Shimajiri et al. 2026 in The Astrophysical Journal. Together, these results demonstrate the potential of machine learning to infer physical quantities that are difficult to obtain directly from conventional observations.

研究目的

星形成過程において、分子雲中に形成されるフィラメント構造は、星の母体となる高密度コアの形成と密接に関係している。ハーシェル赤外線宇宙望遠鏡による観測から、近傍星形成領域のフィラメントは典型的に約 0.1 pc の幅をもつことが示されてきた。一方で、分子輝線観測から得られるフィラメント幅は、用いる分子トレーサーによって異なる値を示す場合があり、フィラメント幅の普遍性については現在も議論が続いている。

本研究の目的は、分子輝線データから水素分子柱密度分布を予測する機械学習モデルを構築し、トレーサー依存の観測バイアスを低減することで、星形成フィラメント幅の普遍性を検証するための共通基

盤を確立することである。特に、これまでの CO (一酸化炭素)同位体分子のみを用いたモデルでは、高密度フィラメント領域の水素柱密度の再現性に課題があった。そこで本研究では、 HCO^+ 、 H^{13}CO^+ 、 HCN などの高密度ガスを捉える分子輝線データを学習に加えることで、高柱密度領域の再構成精度を向上させることを目指した。

さらに、本研究の派生成果として、分子輝線データからダスト温度を予測する機械学習モデルの検証も行った。水素柱密度およびダスト温度は、通常、多波長連続波観測に基づいて導出される物理量であるが、機械学習により分子輝線データからこれらを推定できれば、観測装置や観測手法の制約を補い、星形成領域の物理状態をより広範囲に調べる新しい

解析手法となる。

研究経過

本研究では、まず過去の研究で構築した、CO 同位体分子輝線データから水素分子柱密度分布を予測する機械学習モデルの課題を整理した。従来モデルでは、分子雲全体の水素柱密度分布や総質量については良好な再現性が得られていた一方で、フィラメントのような高密度領域では予測精度が十分ではなかった。この原因として、CO 同位体分子は比較的低密度から中密度のガスを主に反映し、高密度フィラメント内部の情報が不足していることが考えられた。そこで、本助成期間中に、おうし座分子雲中の代表的なフィラメントである B211/B213 領域を対象として、野辺山 45m 電波望遠鏡による分子輝線データを整備した。具体的には、 ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 C^{18}O に加え、 HCO^+ 、 H^{13}CO^+ 、 HCN などの高密度ガストレーサーを含む多分子輝線データを用い、ハーシェル観測から得られた水素柱密度分布を教師データとして機械学習モデルを構築した。機械学習手法としては、回帰問題に適した *Extra Trees Regressor* を用い、CO 同位体分子のみを用いたモデルと、高密度ガストレーサーを加えたモデルを比較した。

モデルの評価においては、予測された水素柱密度マップの視覚的な一致だけでなく、フィラメントに直交する動径方向プロファイルを作成し、ハーシェル観測に基づく水素柱密度分布との比較を行った。また、各分子輝線および線強度比が予測にどの程度寄与しているかを特徴量重要度として確認し、CO 同位体分子のみでは再現が難しい高柱密度領域に対して、高密度ガストレーサーが補完的な情報を与えていることを検証した。これにより、単なる画像再構成ではなく、フィラメント幅測定に利用可能な物理量分布を再構成できているかという観点から、モデルの有効性を評価した。

その結果、CO 同位体分子のみを用いた場合には、フィラメント中心部の高柱密度構造の再現に限界が見られたのに対し、高密度ガストレーサーを加えたモデルでは、ハーシェル水素柱密度マップに近いフィラメント構造を再構成できることが確認された。特に、 HCO^+ 、 H^{13}CO^+ 、 HCN を加えることで、高密度領域の情報が機械学習モデルに取り込まれ、フィラメント中心部の柱密度分布の予測精度が改善した。この成果は、Shimajiri et al. 2026 として国際査読誌

への投稿・出版に向けて取りまとめている。

また、本研究の進展に伴い、分子輝線データから水素柱密度だけでなく、ダスト温度も予測できる可能性が明らかになった。そこで、Orion A 分子雲を対象に、CO 同位体分子輝線データからダスト温度分布を予測する機械学習モデルを構築し、学習領域の広さや学習サンプルの温度範囲が予測精度に与える影響を検証した。この成果は Dougome, Shimajiri et al. 2026 として *The Astrophysical Journal* に出版され、プレスリリースも行った。

考察

本研究により、分子輝線データから水素柱密度分布を再構成する機械学習モデルにおいて、高密度ガストレーサーを学習データに加えることが、高密度フィラメント構造の再現に有効であることが示された。これは、フィラメント幅の測定において、単一の分子輝線強度分布を直接用いるのではなく、複数の分子輝線情報を統合して水素柱密度分布を再構成するという新しい解析方針の有効性を示すものである。

本研究の重要な点は、観測装置で直接取得することが難しい、あるいは観測条件により制約を受ける物理量を、既存の分子輝線データと機械学習を組み合わせることで推定できる可能性を示したことである。特に、大質量星形成領域は一般に遠方に存在するため、ハーシェル観測だけでは 0.1 pc スケールのフィラメント幅を直接分解することが難しい。また、地上連続波観測では広がった構造の再現に課題がある。そのため、分子輝線データからハーシェル類似の水素柱密度分布を再構成する手法は、低質量星形成領域と大質量星形成領域を共通の基準で比較するための有力な手段となる。

また、本研究は、機械学習を単に観測データの補間や画像変換に用いるのではなく、観測手法ごとの制約を補い、異なる観測量を共通の物理量へ変換する解析基盤として利用する点に意義がある。星形成領域の研究では、対象天体の距離、観測装置の空間分解能、分子輝線ごとの化学的性質の違いが、領域間比較の大きな障壁となってきた。本研究で得られた成果は、これらの違いを完全に排除くものではないが、複数の分子輝線情報を統合することで、従来よりも一貫した基準でフィラメント構造を比較できる可能性を示した点で重要である。

一方で、本研究で実証したモデルは、現時点では B211/B213 フィラメントにおける概念実証の段階である。分子輝線の強度や存在量は、分子雲ごとの化学状態、励起条件、星形成活動の違いに影響される。そのため、今後は異なる分子雲に対して同様の手法を適用し、分子雲間での転用可能性を検証する必要がある。また、当初計画に含めていた分子流の影響除去については、フィラメント幅測定の高精度化に向けた重要な次段階の課題として残されている。

以上のように、本研究はフィラメント幅の普遍性そのものに最終的な結論を与える段階には至っていないが、その検証に不可欠な水素柱密度再構成手法を大きく前進させた。さらに、Dougome, Shimajiri et al. 2026 により、ダスト温度も分子輝線データから予測可能であることを示したことで、機械学習を用いて観測データから複数の物理量を推定するという研究展開の可能性を示すことができた。本助成により、星形成フィラメント研究と機械学習を接続する研究基盤が強化され、今後の大質量星形成領域への応用およびフィラメント幅の普遍性検証に向けた重要な足がかりが得られた。

研究の発表

口頭発表

1. 島尻芳人「機械学習による星形成フィラメント研究の展開」45m 鏡サイエンス研究会 2024, 国立天文台, 2024 年 12 月 2 日, 招待講演.
2. 島尻芳人「機械学習を用いた分子輝線データからの星形成フィラメント構造の再構成」宇宙電波懇談会シンポジウム 2025, 国立天文台, 2025 年 1 月 8–10 日, 招待講演.
3. 島尻芳人「分子輝線データと機械学習による水素柱密度分布の再構成」野辺山研究会 2025, 国立天文台, 2025 年 8 月 30 日, 招待講演.

誌上発表

1. Dougome, T., Shimajiri, Y., Saigo, K., Takahashi, S., Kido, M., Ishibashi, S., & Takakuwa, S. “Predicting Dust Temperature from Molecular Line Data Using Machine Learning,” *The Astrophysical Journal*, 998, 29, 2026.

本研究成果は、「機械学習により分子輝線データからダスト温度を予測する研究成果」(鹿児島大学ほか)に関するプレスリリースを行なった, 2026 年 2 月 10 日.