Investigating the metallicity dependence of the mass-loss rate relation of red supergiants 2026/05/12 佐藤太河

Antoniadis et al. 2025：https://arxiv.org/abs/2503.05876

[アブスト] 赤色超巨星(RSGs)の質量放出は星の運命を左右するが、その駆動メカニズムや金属量依存性は未解明。本研究では異なる金属量Zを持つ銀河のRSGsを大規模に調査した結果、質量放出率$\dot{M}$はZによらず一定であることが示された。

[オリジナリティ]過去最大級のRSGsサンプルを同一手法を用いてその$\dot{M}$を横断的に比較調査。

[ゴール] RSGsの$\dot{M}$を一律に導出し、RSG windsの金属量依存性を決定すること。

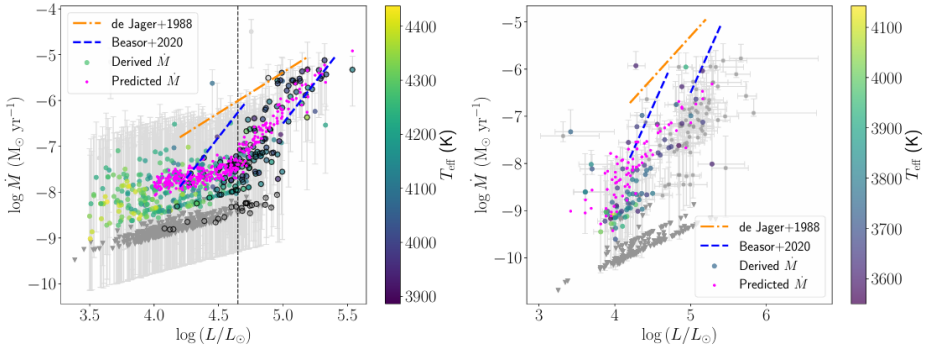
[方法]①大マゼラン雲(LMC)、小マゼラン雲(SMC)、天の川銀河(MW)、NGC 6822のRSGsのサンプルを各先行研究から入手・補正(Tab. 1)。
②各RSGsサンプルのスペクトルエネルギー分布(SED)をモデル化するために放射輸送コードDUSTYを使用(球対称なdust shellを仮定)。
③質量放出率を$\dot{M} = \frac{16\pi}{3}\frac{a}{Q_V}R_{in}\tau_V\rho_d v_\infty r_{gd}$ (2)を用いて算出。($\frac{a}{Q_V}$:塵粒子の半径とVバンドでの減光率の比, R_{in}:shellの内半径, τ_V:Vバンドでの光学的厚さ, ρ_d:バルク密度,v_∞:terminal outflow velocity, r_{gd}:ガス対塵比)⇒②から求まる値(τ_V)や推定値(R_{in}, v_∞, r_{gd})を代入。

Tab. 1

Survey	Filters	SMC	NGC 6822	MW
GALEX	FUV, NUV	✓	-	-
SkyMapper	*u, v, g, r, i, z*	✓	-	✓
Massey (2002)	*U, B, V, R*	✓	-	-
LGGS	*U, B, V, R, I*	-	✓	-
NSC DR2	*u, g, r, i, z, Y*	✓	-	-
Gaia DR3	G_{BP}, G, G_{RP}	✓	✓	✓
Pan-STARRS	*g, r, i, z, y*	-	✓	-
OGLE-III	*V, I*	✓	-	-
DENIS	I, J, K_s	✓	-	-
VMC or VHS	Y, J, K_s	✓	✓	-
2MASS	J, H, K_s	✓	-	✓
IRSF	J, H, K_s	✓	✓	-
UKIRT	*J, H, K*	-	✓	-
HAWK-I	*J, K*	-	✓	-
AKARI	N3, N4, S7, S11, L15, L24	✓	-	-
AllWISE	[3.4], [4.6], [12], [22]	✓	✓	✓
Spitzer	[3.6], [4.5], [5.8], [8.0], [24]	✓	✓	✓
JWST	F115W, F200W, F356W, F444W, F770W, F1000W, F1500W, F2100W	-	✓	-

[結果]

Fig. 5



・Fig. 5:質量放出率 vs Luminosity (左SMC, 右MW, カラーバーは有効温度T_{eff}, マゼンタの点は光度LとT_{eff}の関数としての$\dot{M}$の予測値, 灰色の三角は$\tau_V < 0.002$の上限値, ○はスペクトル分類されたRSGs)
⇒SMCでは$\log(L/L_\odot)$=4.65付近に転換点(kink)があり、$\dot{M}$とT_{eff}に負の相関がある。

・Fig. 6:NGC 6822の質量放出率 vs Luminosity(カラーバーはτ_V, 黒枠のデータはスペクトル分類されたRSGs, オレンジ色の円はJWSTの中間赤外線観測装置MIRIの測光データがあるソース)
⇒JWST MIRIのデータがあるソースのほとんどは $\log(L/L_\odot) < 4$ であり、これらはRSGsではなく、よりlower-mass starである可能性が高い。MIRIによる観測データがないソースについては、SEDが$8\,\mu m$までしか制約されておらず、この波長を超えると塵の放射が顕著になるため、不確実性が大 。灰色の点は、MIRIの観測データがなく、かつは $\log(L/L_\odot) < 4$であるソース。

Fig. 6

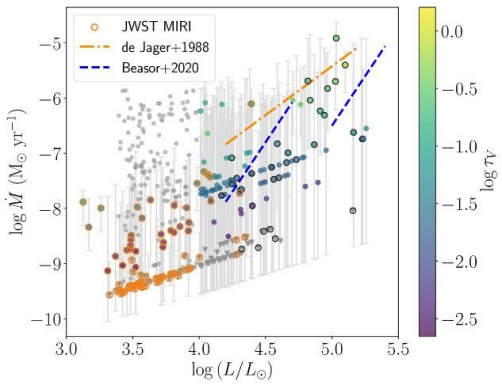
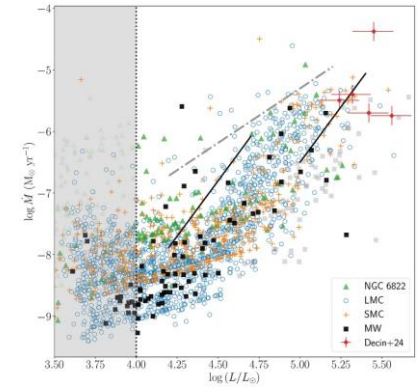


Fig. 7



[ディスカッション]

・Fig. 7:調査したすべての銀河における質量放出率の比較(赤点はgas diagnosticsから得られた$\dot{M}$の予測値, 実線は初期質量$10\,M_\odot$および$20\,M_\odot$におけるBeasor et al. 2020のモデル, 一点鎖線はde Jager et al. 1988のモデル, 半透明のシンボルは不確実性の大きいデータ, 網掛けの領域は$\log(L/L_\odot) < 4$のRSGsでない可能性大)
⇒Decin et al. 2024の結果と一致。de Jager et al. 1988のモデルよりも平均して低い$\dot{M}$だが不確実性の範囲内であり、 $\log(L/L_\odot) \geq 4.5$ではより急な傾き。同様な仮定に従ったBeasor et al. 2020の結果とも一致。

・転換点(kink)について
⇒SMCではLMCより0.2 dex高い、要因の一つは同じ初期質量であっても、Zが低い星ほどLが高くなる性質。
⇒MWでは明確なkinkが見られない、これはRSGsのサンプル数が少なく、不確実性が高いことが原因！？
⇒原因となり得るパラメータの一つはr_{gd}。低光度のRSGではr_{gd}が系統的に高くなっている可能性(van Loon +2025)があるが、全光度範囲においてr_{gd}を一定値であると仮定してしまっている。ただし、他のパラメータもr_{gd}にに影響を与える可能性があるため、Lとの相関は明確でない。 Lに対するr_{gd}追加観測が行われない限り、kinkに対するr_{gd}の関連性を特定することは困難。

[ディスカッション]

・kinkの原因は漸近巨星分枝(AGB)星の混入！？２つの方法で検証。

①スペクトル分類によって確認済みのRSGの質量放出率の関係を調査。

Fig. 8:スペクトル分類がなされたSMCのRSGsの質量放出率

Fig. 9 :スペクトル分類がなされたSMCのRSGsのNEOWISEのW1バンドの中央値絶対偏差(MAD)図

⇒両方の図、特にFig. 9において$\log(L/L_\odot)$=4.65にkinkがある。

⇒スペクトル分類された「確実なRSGs」のサンプルにおいてkinkが存在することは、AGB星の混入がkinkの原因ではないことを示唆。

②RSGsと同じ色を持つ巨星によるコンタミネーションを調査。

Fig. 10:MWにおけるK型またはM型の星の総数に対するRSGsの割合

⇒ $\log(L/L_\odot) = 4$において、約70%がRSGsで構成されており、この割合はLの増加とともに上昇($3.8 \leq \log(L/L_\odot) < 4$では、20～40%程度まで低下)。

⇒低金属量環境では、同じ初期質量であってもより高いLに対応する(RSGsが70%を占める点がLMC・SMCでは$\log(L/L_\odot) \approx 4.3, 4.4$に)。

⇒AGB星の混入が「人工的なkink」を作り出すほど大きな影響は与えないことを示唆。

・金属量依存性について

Fig. 11: $\log(L/L_\odot) > 4.5$のRSGsにおける質量放出率の分布

⇒分布は明確な差がなく一致している。

Fig. 12:各銀河における質量放出率の中央値vs金属量の関係

⇒質量放出率の中央値は誤差の範囲で一致。

Fig. 13: $\log(L/L_\odot) > 4$のRSGsにおけるダスト生成率$\dot{M}_d$の分布

⇒ $\dot{M}_d$は金属量の増加とともに高くなる傾向。

⇒質量放出率$\dot{M}$と金属量Zの間に相関は見られない。

⇒ただし、金属量が高いほど$\dot{M}_d$は高くなる。

⇒ダストの放射圧によるstellar-windが質量放出のメインではなく、金属量に左右されない乱流圧(turbulent pressure)がメイン!?

[コメント]

消去法的な推論なので今後は質量放出メカニズムを直接的に調べる必要があるかもしれない。

赤外線での観測精度が高まればこの論文で扱った以外の銀河でもデータを得たい。

Fig. 8

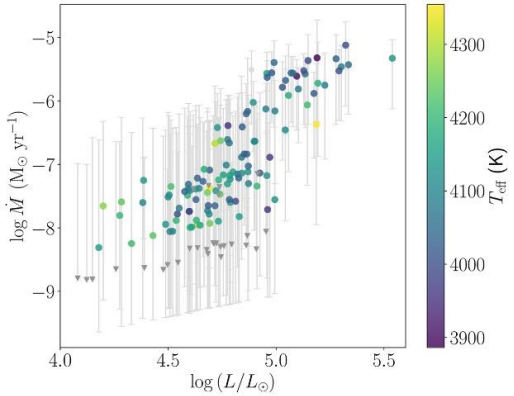


Fig. 9

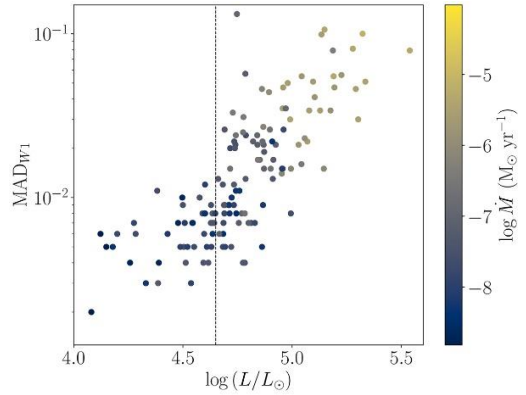


Fig. 10

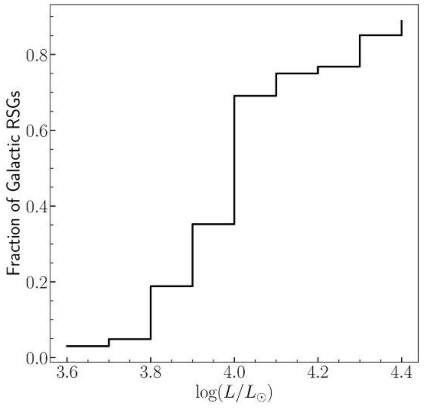


Fig. 11

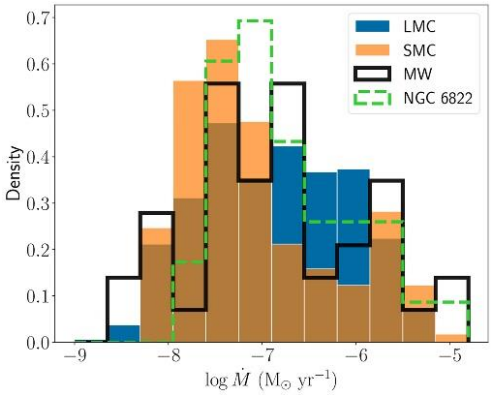


Fig. 12

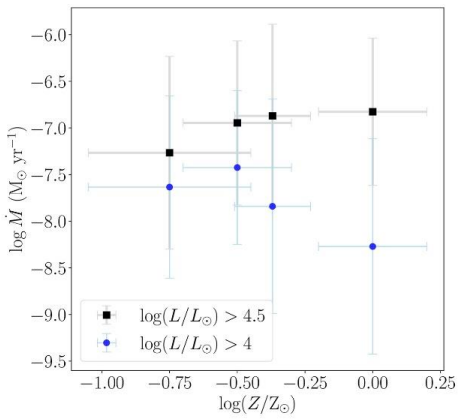


Fig. 13

