

衝突流を通して俯瞰する誘発的星形成： 銀河スケールから分子雲コアまでを追う

徳田 一起¹・榎谷 玲依²・町田 正博³・
藤本 裕輔⁴・前田 郁弥⁵・植田 準子⁶・
金子 紘之⁷

〈^{1,3}九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744〉

〈^{1,6,7}自然科学研究機構 国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈²慶應義塾大学 理工学部 物理学科 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1〉

〈⁴会津大学 コンピュータ理工学科 コンピュータサイエンス部門 〒965-8580 福島県会津若松市一箕町鶴賀〉

〈⁵東京大学 大学院理学系研究科 附属天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈⁷上越教育大学 学校教育研究科 〒943-8512 新潟県上越市山屋敷町 1〉

e-mail: ¹ tokuda.kazuki.369@m.kyushu-u.ac.jp, ² enokiya@keio.jp, ³ machida.masahiro.018@m.kyushu-u.ac.jp,

⁴ fujimoto@u-aizu.ac.jp, ⁵ fmaeda@ioa.s.u-tokyo.ac.jp, ⁶ junko.ueda@nao.ac.jp, ⁷ hkaneko@juen.ac.jp

分子雲同士の衝突は大質量星やその星団の形成を誘発する有力な物理過程である。分子雲衝突に限らず様々なスケールにおいても、星間ガス衝突流の理解は星形成全般を理解するうえで重要と言える。近年の観測技術や理論計算の進展に伴い、分子雲単体だけでなく、その周囲も含む星間ガス集合体の衝突流、渦状腕などでの大局的な銀河ガス流、さらには銀河同士の相互作用など、幅広い空間スケールでの衝突流の研究が可能となってきた。例えば、銀河系内の様々な星形成領域におけるガス雲衝突系の観測研究により、相対速度や柱密度などの衝突パラメータと、最終的な生成物である星団の規模との相関関係が明らかにされつつある。また、ガス圧縮によって実現された強磁場環境が、その後形成される大質量星の性質の決定に重要な役割を果たすことも数値計算によって指摘されつつある。銀河スケールの研究においては、近傍銀河観測や銀河円盤流体計算によって、渦状腕や棒状構造などの様々な銀河環境下での巨大分子雲の衝突速度や頻度などが定量的に示されてきた。また、相互作用銀河では10 kpcほどの巨大な分子ガスフィラメントが、そして衝突最中の銀河円盤のオーバーラップ領域では高速の分子雲衝突やそれに付随した大質量星団が見つかってきた。このSKYLIGHT記事では、これまで国内を中心に行われてきた様々なスケールでの誘発的星形成研究を、衝突流という一つのキーワードを軸にして観測及び理論の両側面から俯瞰する。

1. 序論と研究会の総括

星形成研究は長らく球対称ガス雲のような“孤立系”分子雲コアを出発点として研究が進められてきた[1]。これは、理論的もしくは数値的に取り扱いやすいこと、なおかつ望遠鏡の視野が狭く

分子雲の一部のみに観測が制限されていた[2]ことが背景に挙げられる。これらはアウトフローやジェット及び原始惑星系円盤など、現在観測的に明らかになっている原始星に伴う現象／構造の発生を記述し、1 M_⊙程度の星形成の大枠を説明する[3]という観点からも一定の成功を収めたと言

える。しかしながら、星間空間、とりわけ星形成の母体となる分子雲の一般的な環境を考えると、その内部は超音速乱流状態であり、外部は超新星爆発や銀河渦状腕の横断、最も大規模なものでは銀河間衝突など、様々なスケールのガス流入及び衝撃波に常に晒されている、動的な“相互作用系”と捉える方が自然であろう。

近年のALMA等をはじめとする大規模干渉計の開発によって駆動されたミリ波/サブミリ波受信機技術の大幅な進歩により地上電波望遠鏡の感度/視野が改善されたこと、及び宇宙望遠鏡による星間塵熱放射の網羅的観測によって、分子雲全容(数10–100 pc)から分子雲コア(0.1 pc以下)の高い空間ダイナミックレンジで星形成現場の詳細な地図が得られた。その結果、分子雲は基本的にアスペクト比の大きい構造(フィラメント状構造)を有しており、ある程度の柱密度($A_V \geq 8$ mag)を有する領域において小質量星原始星やその形成の直接母体となる分子雲コアが形成されていることが明らかになってきた[4–6]。これら一連の研究は分子雲スケールから $1 M_\odot$ 程度の原始星形成についての我々の理解を大きく前進させたが、依然としてより大きな質量の星、すなわち大質量星の形成に関しては避けては通れない課題が残されたままであった。それは、「いかにしてガス集積の途中で小質量星を作らずに、初期条件となる、大きさ ~ 0.1 pc、質量 $\sim 100 M_\odot$ [7]の分子雲コアを作るか?」という点である。

このガス集積のメカニズムとして超音速のガス雲衝突が有力視されるようになり、日本国内の研究者を中心に2編のPASJ特集号に関連する成果がまとめられた(the PASJ special issue: Star Formation Triggered by Cloud–Cloud Collision, Volume 70, and 73)。銀河系内及びマゼラン雲等を中心に進められてきた観測的研究については、2章及び、過去の月報記事[8, 9]も参照されたい。これらの観測的知見の蓄積には、前述の星間ガスを観測する技術の向上と、それらと同等のダイナ

ミックレンジで数値計算が可能になったことによって理論的な裏づけがより強固になったことが大きな原動力となっている。ALMA等の観測機器の発展による恩恵は銀河系内やマゼラン雲研究だけでなく、より遠くの様々な銀河の研究にもたらされた。現在では渦巻銀河M51や棒渦巻銀河M83を含む数多くの近傍銀河に対して高分解能(約40–100 pc)かつ広視野での分子ガス観測が行われ[10–12]、巨大分子雲の分布やそれらの質量やサイズ、重力束縛度(ピリアル比)などの性質が明らかにされてきた。そして渦状腕や棒状構造などが生み出す様々な銀河環境下において、巨大分子雲の分布や性質がどのように異なるのかを統計的に議論できるようになってきた。これは、観測者である我々が銀河系円盤内に存在するために銀河構造との関係を議論しづらい銀河系内の分子雲研究とは相補的である。加えて、理論的な研究も発展してきた。巨大分子雲を同定できる分解能での銀河円盤流体力学シミュレーションが可能となり、前述の系外銀河の巨大分子雲観測との直接比較が可能となった。さらにシミュレーションでは巨大分子雲の時間発展を追うことができるため、分子雲衝突の衝突速度や頻度の調査が可能であり、観測的研究と相補的な役割を担っている。

銀河は、個々の固有運動の結果、近接し銀河間衝突や合体が生じることがある。強い重力相互作用は銀河の形状を変えるだけでなく、銀河の性質にも強い影響を及ぼす。1970年代後半から1980年代にかけて、さまざまな波長での観測により得られた「銀河衝突がしばしば孤立銀河の数百倍にも達する爆発的な星形成を励起する」という知見はその最たるものである[13, 14]。逆に、非常に活発に星形成活動を行っており、宇宙の星形成史にも大きな寄与をしている超高輝度赤外線銀河(ULIRG: $L_{\text{IR}} > 10^{12} L_\odot$)のほとんどが合体銀河であるということもわかってきた。これらの事実から、こうした銀河間衝突現象は、銀河形成と物質

循環にも重要な寄与を及ぼすといえる。ここで、星形成の母体である分子ガスが銀河間衝突現象を通じてどのような物理的・化学的影響を受けるのか、という本質的な問いが残されており、観測・理論研究が精力的に進められている。

これら日本国内の研究の隆盛を受けて、筆者らのうち数名を含むメンバーが中心となってオンライン研究会「様々なスケールの衝突流による誘発的星形成大質量星から超大質量星団まで」を2021年7月7-9日の3日間にわたって開催した。招待講演13件、一般講演23件、のべ登録者数100名程度（常時参加者60-70名）であり、学部生を含む若手からシニアまで幅広い年齢層の方にご参加いただいた。Slackを用いた非同期コミュニケーションやzoomのブレイクアウトルーム機能等を用いた議論も活発に行われ、オンライン研究会ならではの盛り上がりを見せた。このSKYLIGHT記事では、研究会中の話題も踏まえて、これまで主に独立して進められてきた、銀河系内でのガス衝突における誘発的星形成研究（2章）、系外銀河観測などによる銀河スケールの星間ガス流や銀河間相互作用（3章）の研究を“衝突流”という一つのキーワードを軸に概観し、今後の研究の展望（4章）について述べる。

2. ガス雲衝突と誘発的星形成

2.1 ガス雲衝突候補天体探査と理論的研究の進展

最初に星間ガス雲の衝突の可能性を観測的に指摘した研究[15]以降、50年以上にわたり、一部の散発的な研究を除いて系統だった星間ガス雲衝突の探査はなされていなかった。この状況を一変させる鍵となったのが、Westerlund 2という半径1 pc、総質量 $\sim 10^4 M_{\odot}$ の星団方向に対して行った名古屋大学NANTEN2望遠鏡によるCO分子雲観測であった[16]。同望遠鏡の広域サーベイ能力を活かして、星団方向に対して相対速度差 $\geq 10 \text{ km s}^{-1}$ の異なる速度を持った2つの巨大分子雲が見出されたが、これらは互いに重力では束縛

されておらず、星風による膨張運動でも解釈できない。互いに独立した分子雲同士の衝突が星団形成を誘発したと考え、観測された特徴をすべて矛盾なく説明できたのである。

その後NGC 3603などの異なる星団においても、分子雲同士の衝突が星団形成を誘発した可能性が指摘されたが[17]、本質的に不均一な密度構造を持ち、様々な環境/進化段階にある分子雲を統一的に扱うことは依然として困難であった。次なる転換をもたらした観測的研究は、SpitzerバブルRCW 120に関するものである。ちなみにSpitzerバブルとは、赤外線 $8 \mu\text{m}$ で観測されるリング状の構造を持つ天体で、銀河面上に数百個以上存在する。鳥居和史らは2つの異なる速度を持った分子雲が存在することを見出したことに加えて、大きさの異なる分子雲を正面衝突させた2次元流体計算（羽部-太田モデル[18]）にその形態学的特徴が酷似していることに着目した。20年以上前の計算が再び脚光を浴びることになったのである。上記の羽部-太田モデルを観測と綿密に比較することを念頭に、高平謙らは3次元で再計算し[19]、擬似観測を行った[20-22]ことによって、衝突ガス系で見られる主な特徴を、1. 視線方向衝突に見られる相補的空間分布（図1c）、2. 視線と直角方向の衝突に見られるU字型構造（図1b）、3. 位置速度図上に見られるブリッジ構造やV字構造（図1d, 1e）などに整理した。

これら兆候がすべて揃うことがガス雲衝突を示すための必要十分条件ではなく、実際は光学観測から判別できる減光分布と分子雲の位置相関[24, 25]、原始星/分子雲コアの分布[26]、分子雲の温度[27]、フィラメント状分子雲の線質量[28]など天体に応じてほかの観測的特徴と組み合わせつつ総合的に判断する必要があることに注意したい。ただし、流体力学現象は基本的にスケールフリーであるという性質を生かし、M 20などの10 pc程度の比較的コンパクトな大質量星形成領域[21]や銀河スケールの水素原子ガス流[29]に至

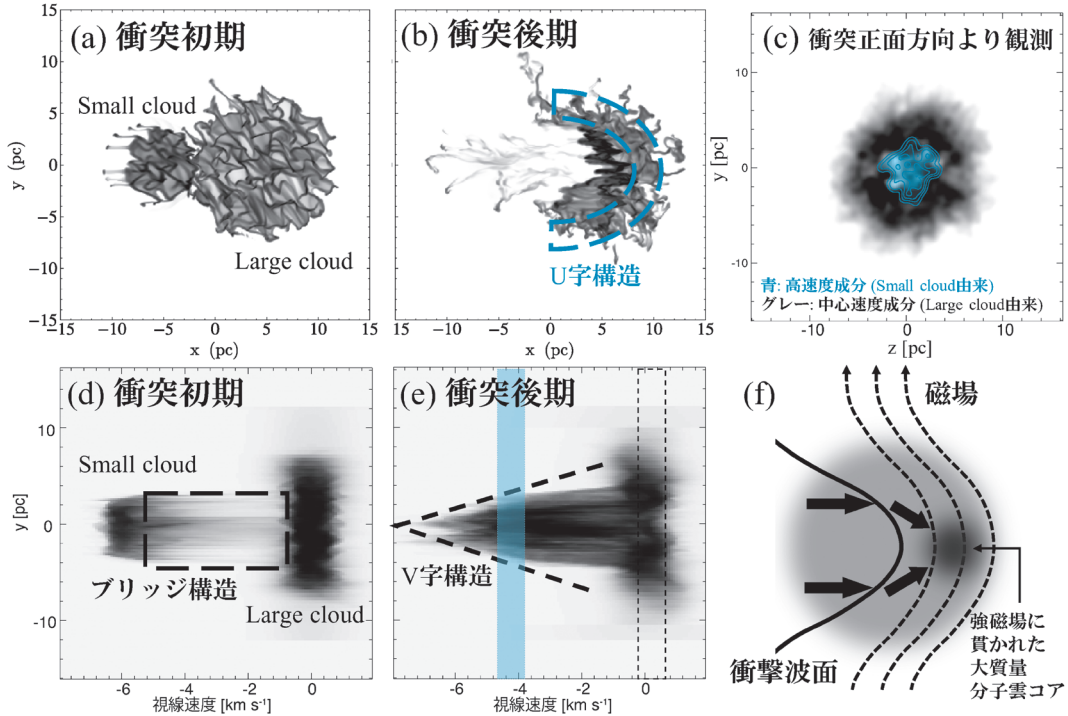


図1 分子雲衝突の数値シミュレーション (a,b) [19] を分子雲の観測でよく用いられる CO 分子輝線を想定して衝突方向正面より観測した場合に予想される、small cloud と large cloud 由来の二つの異なる速度成分の空間分布 (c) と位置-速度空間上に見られる痕跡を示した図 (d,e) [21, 22]. パネル (e) の青と黒点線で囲まれた部分はパネル (c) の速度積分範囲を示す. (f) 衝突により圧縮を受け高密度領域が生成される様子を模式的に表した図 ([23] を参考にし作成).

るまで、図1で示された同定手法はさまざまな系に適用できたため、2017年以降にガス雲衝突天体の報告例を倍増させる大きな原動力となった。

ガス雲衝突天体候補の増加は新たな理論研究の展開を駆動している。井上剛志ら [23, 30] は分子雲衝突における衝突圧縮層を模した磁気流体計算を実施し、ガス塊と衝撃波の相互作用によって形成される斜め衝撃波が、その凸点にガスを集めることで大質量フィラメント構造を形成することを示した。さらに圧縮磁場によって実効的なジーンズ質量が増したことにより、強磁場に貫かれた重力不安定な大質量コアが形成される。このフィラメント状分子雲は近年、太陽系近傍の分子雲 (1章) やマゼラン雲で普遍的に見出されており [28, 31]、ガス雲衝突の物理過程は大質量星の誕生だ

けでなく、分子雲の形成/進化自体にも関わっている可能性が浮かび上がった。また強磁場環境下の分子雲コアは形成される大質量星そのものの性質を説明するうえでも重要視されつつあり (2.3節)、ガス雲衝突は天体の構造形成史を大小様々なスケールで統一的に理解する鍵になる可能性がある。

2.2 形成される星団のガス雲衝突パラメータ依存性

観測的特徴づけが進んだ天体が増加したことにより、ガス雲衝突と星形成の関係を統計的に探る研究も進んでいる。榎谷玲依ら [32] はそれまでに観測された銀河系内すべてのガス雲衝突天体候補における、分子雲の最大柱密度、衝突相対速度、及びその衝突によって形成が誘発されたと思

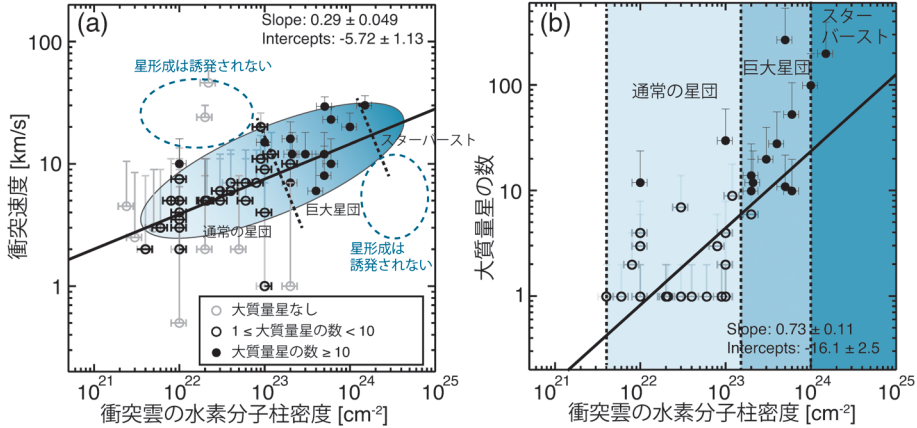


図2 分子雲衝突とそれによって形成される星団の性質を示した図. 柱密度が大きく、衝突速度が大きい衝突ほど星団に含まれる大質量星の数が増える. また、フィッティング直線から外れた物理パラメータを持つ衝突では、衝突後に大質量星が形成されない ([32] の Fig. 9 を改変).

われる大質量星の個数をまとめた (図2). これは異なる距離にある天体, 異なるトレーサーや望遠鏡を使用することによって生じる観測的なバイアスを完全に排除できたものではないが, オーダーの範囲で両グラフとも正の相関があることが見て取れる.

柱密度が高く衝突速度が大きいほど星形成の規模が大きくなることは特筆すべき点であり, 数 $10\text{--}100 \text{ km s}^{-1}$ の衝突流を取り入れた計算でも巨大星団前駆体となりうるような $10^4 M_{\odot}$ 以上に及ぶ大質量ガスクランプの形成が示されていることも整合的である [33].

一方で、衝突するガスの柱密度に対して衝突速度が大きすぎると星形成が誘発されないケースも存在する. このような天体は銀河系においても銀河ディスク領域と比べて乱流が卓越していると思われる銀河中心付近 [32] や銀河のバー領域 (3.1節) 等で見出されている. 衝突ガスの柱密度が衝突継続時間 (t_{col}) に対応していると考えられると, t_{col} が短い場合には星形成に至らないことを指摘した数値シミュレーションの結果とも矛盾がない [19]. 現在, 衝突速度や t_{col} をパラメータとしたより大規模な数値計算も進行中であり, 衝突速度が大きいほど大質量星形成に至るような線質

量の大きいフィラメントを形成することや [34], 衝突雲の柱密度が 10^{23} cm^{-2} を超えるところで大質量星の形成が顕著に増えることなど, 図2で示されたような観測的経験則の物理的理解が急速に進みだしている.

2.3 ガス雲衝突がもたらす分子雲コア及び大質量原始星形成への影響

現在知られている大質量星及び大質量原始星の性質が, ガス雲衝突とどのように関連しているかを考える. ここでは大質量星のほとんどは互いにほぼ同じ質量を持った近接連星であること [35, 36], 大質量星の原始星は小質量星よりも運動量の大きい分子アウトフローが付随している [37] ことに着眼する. 原田直人ら [38] は大質量星原始連星の進化を長時間計算で追った結果, 磁場が弱い環境では連星間距離が増加した一方で, 強磁場環境下では近接連星を維持していたことを示した. 町田正博ら [39] の計算では $100 M_{\odot}$ を超える分子雲コアを初期条件とした場合, 数 $100 \mu\text{G}$ 以上の強磁場環境下 (重力収縮に対する安定性を示す磁束と質量の比 (mass-to-flux ratio) に換算すると2-3程度) でのみ分子アウトフローが生成されたのに対し, それより弱い磁場強度の場合は, アウトフローの発生が原始星形成よりも遅延

する、もしくは全く発生しないことが示された。上記を総合すると“大質量星を形成するには強磁場環境に晒された大質量コア”が必要条件であり、ガス雲衝突は磁場の増幅 ([23], 図1fも参照) を実現するための有望なメカニズムである。しかしながらアウトフローを発生しないような未知の大質量原始星が存在する可能性が完全に棄却できないことや、分子雲コアのスケールで衝突流が存在していたことを観測的に示す手法が確立されていないということを考えるとアイデアの段階に過ぎないため、今後分子雲コアから原始星形成までの既存の進化モデルとの連続性を明らかにしていく必要がある。

3. 銀河スケールでの衝突流

3.1 渦状腕や棒状構造などの銀河内環境における衝突流

この章ではまず、銀河円盤内で起こる分子雲衝突の頻度や衝突速度などの分布に関するこれまでの研究を紹介する。ちなみに近傍銀河の分子ガス研究においては、その限られた分解能のために、2章で紹介した系内での研究に比べて比較的質量の大きい巨大分子雲 (典型値が 10^5 – $10^6 M_{\odot}$ 程度) を対象にしている点に注意して頂きたい。銀河円盤内で起こる分子雲衝突については、銀河シミュレーションなどを用いた理論研究が先行してきた。Elizabeth J. Tasker ら [40] は渦状腕や棒状構造などの非軸対称構造のない、銀河系程度の質量の銀河円盤星間ガスシミュレーションを行い、分子雲衝突のタイムスケール (一つの分子雲が生まれてからほかの分子雲と衝突するまでの典型的な時間) を定量的に調査している。それによると、銀河半径 $3 \text{ kpc} < R < 8 \text{ kpc}$ の広い範囲において、衝突のタイムスケールが銀河一回転のタイムスケールのおよそ $1/5$ となることが示されている。例えば、回転速度が約 220 km s^{-1} の銀河半径 $R = 5 \text{ kpc}$ 付近では、衝突タイムスケールが 30 Myr ほどとなる。分子雲衝突はこのような短いタイムス

ケールで分子雲内部に乱流を注入できる効率的な機構であり、銀河スケールでの星形成を支配する物理過程であると著者らは論じている。

渦状腕や棒状構造などの銀河構造が加わるとさらに衝突頻度は高くなる。Clare L. Dobbs ら [41] は渦状腕構造を考慮したモデルと考慮しないモデル、二つの銀河円盤シミュレーションを行っている。そして渦状腕がない場合の分子雲衝突時間は 28 Myr (銀河回転時間に対する比は $1/5$) であったのに対し、渦状腕がある場合は、そこでの星間ガスの密集によって分子雲衝突時間が 10 Myr (銀河回転時間に対する比は $1/15$) と短くなることを示した。星間ガスの密集が起こるという意味で棒状構造の末端 (Bar-end) も似たような環境である。藤本裕輔ら [42] は棒渦巻銀河シミュレーションを行い、Bar-endでの分子雲衝突時間は 10 Myr 以下となることを示している。

衝突頻度と同様に、衝突速度についても銀河領域ごとの特徴が示されている。藤本ら [43] は棒渦巻銀河 NGC 1300 を模した星間ガスシミュレーションを行い、分子雲衝突の際の相対速度を求めている。図3は縦軸に衝突相対速度、横軸に衝突直前の重い方の分子雲の質量を記した散布図である。各データ点は各々の分子雲衝突イベントである。黒い線はこの分子雲質量と衝突分子雲の間の距離から求めた自由落下速度を記している。この結果をみると、渦状腕部 (Arm) や棒状構造末端部 (Bar-end) では衝突速度は分子雲質量から算出される自由落下速度とよく一致していることがわかる。これは近接する分子雲同士の重力相互作用がこれらの領域における分子雲衝突の主要因であること、そしてさらに言えば、kpcスケールの銀河ガス流の影響よりも局所的な分子雲分布が衝突速度を決める要素であることを意味している。一方棒状構造部 (Bar) では、 20 km s^{-1} 以上の衝突速度を持ち、かつ自由落下速度から大きく外れたものが見られ、中には 30 km s^{-1} に達するものも存在する。棒状構造部は星間ガス流が円運

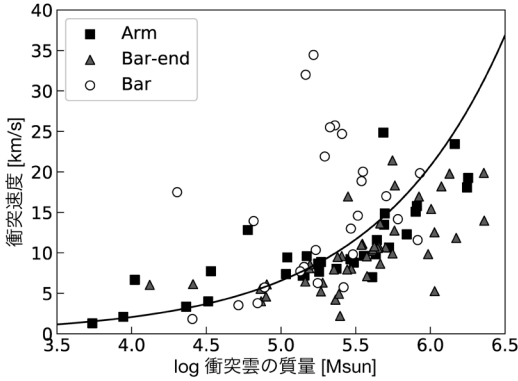


図3 銀河シミュレーションによる、銀河円盤内で起こる分子雲衝突の衝突速度と分子雲質量の相関図。各点は分子雲衝突を示し、各シンボルで衝突が起こる銀河領域を示している。黒い線は衝突する分子雲の質量と分子雲間の距離から求めた自由落下速度である ([43] の Fig. 9 を改変)。

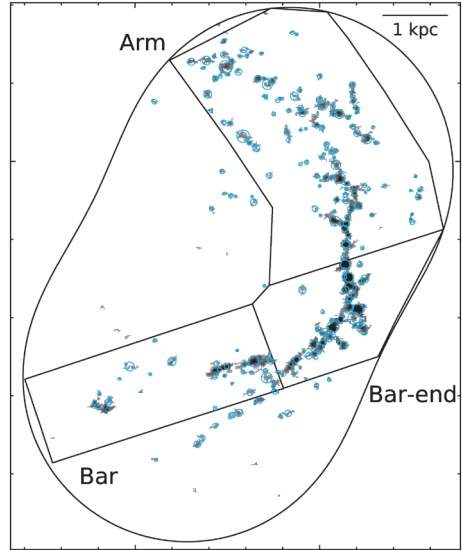


図4 NGC1300における分子雲の分布図。NGC 1300の西側のArm, Bar-end, Barを対象に、ALMA望遠鏡でCO (1-0)を観測した。灰色の分布が検出されたCO (1-0)であり、青色の丸が同定された分子雲である。丸の大きさは実際の分子雲の半径を示す。

動から大きく外れる領域であることから、この領域では局所的な分子雲分布よりもkpcスケールの銀河ガス流が衝突速度に大きく影響を与えていると考えられる。

理論的な研究が進んでいる一方で、観測的に銀河円盤内の分子雲衝突を調べる研究はまだ始まったばかりである。前田郁弥ら [44] による先駆的な研究では、近傍の棒渦巻銀河NGC 1300 (距離20 Mpc) とNGC 5383 (同32 Mpc) に対する分子ガス輝線 (CO ($J=1-0$)) の観測データが使われた。これらは野辺山45 m望遠鏡によるビームサイズ (分解能) が1-2 kpcの観測であった。ビーム内の分子雲同士の速度分散が大きいほど、衝突速度は大きいと考えられ、またその場合観測される速度分散は大きくなる。この傾向は銀河シミュレーションを使った模擬観測からも確かめられている。実際、観測においても、Armに比べてBarの輝線の速度幅が系統的に大きいこと、すなわち衝突速度がBarの方が大きい可能性が示唆された [44]。また、棒渦巻銀河NGC 4303 (距離17 Mpc) の野辺山45 m鏡による観測では、CO (1-0) 輝線の速度幅がArm, Bar-end, Barの順で

大きくなっていく傾向が示されている [45]。しかしながら、このようなkpcの分解能で見た輝線の速度幅は分子雲間の速度分散だけではなく、ビーム内の分子雲の分布や速度場にも依存する。そのためこの研究だけで、衝突速度が領域間で異なると結論することはできず、より高分解能な分子ガス観測が必要不可欠であった。

そこで、前田ら [33] はALMA望遠鏡を用いて約40 pcの分解能で観測されたNGC 1300のCO (1-0) のデータをもとに分子雲衝突速度を調べた。この研究では、同定された分子雲の視線速度の情報と銀河全体の速度場の情報をもとに銀河円盤内での分子雲の運動を予測することで、現在衝突している分子雲のペア及び今後10 Myr以内に衝突する分子雲のペアを抽出している。図5は推定された衝突速度と衝突する分子雲ペアの重い方の分子雲の質量を記した散布図で、図3と同様の図である。この結果をみると、Armの衝突速度

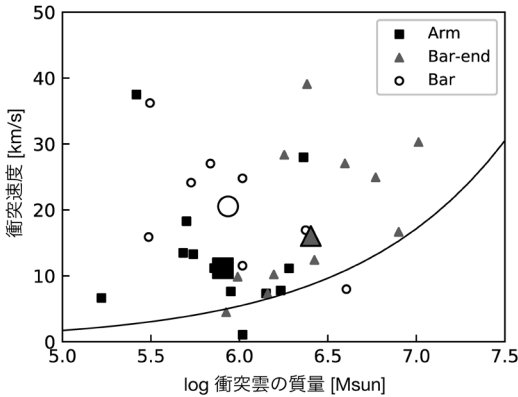


図5 分子雲観測から推定された、棒渦巻銀河NGC 1300内で起こる分子雲衝突の衝突速度と分子雲質量の相関図. 各点は分子雲衝突を示し、各シンボルで衝突が起こる銀河領域を示している. 大きいシンボルが各領域の中央値を示している. 黒い線は衝突する分子雲の質量と分子雲間の距離から求めた自由落下速度である ([33] の Fig. 7 を改変).

に比べてBarとBar-endにおいて衝突速度が高い傾向にあることがわかる. 特に、BarやBar-endでは 20 km s^{-1} 以上の衝突速度を持つようなペアの割合が高い. また、図3とは異なりおおむねすべてのペアが自由落下速度から外れていることから、銀河円盤全体で銀河ガス流が衝突速度に大きな影響を与えている可能性が示唆される.

領域間における分子雲衝突の性質の違いは領域間の星形成活動の違いを説明し得ることも強調したい. NGC 1300のBarではArmやBar-endに比べて大質量星形成が活発ではないことが知られている [46]. 2章で述べたように、分子雲衝突によって星形成が誘発されるためには、速度と柱密度に条件があることが判明しつつある. このことと図5を見ると、軽い分子雲が 10 km s^{-1} 程度で衝突しているArmや重い分子雲が 20 km s^{-1} 程度で衝突しているBar-endはおそらく星形成が誘発される条件にある一方で、軽い分子雲が 20 km s^{-1} 程度で高速衝突しているBarではその条件から逸脱しているため星形成が誘発されていない可能性があるといえる. しかしながら、図5の結果は多

くの仮定やモデルを介して推定されたものである. 今後は、より高分解能観測によって近傍の円盤銀河においても、2章で述べた同定方法が適用され、直接的に衝突速度が求められることにより、より詳しく銀河ガス流と分子雲衝突、および星形成活動の関係が明らかになっていくだろう.

3.2 銀河間相互作用

最後に、さらに大きなスケールでの衝突現象に目を向けてみよう. 星や星間物質の集合体である銀河は、別の銀河と衝突することがある. 銀河が近づき始めると、互いの重力で銀河の形態は歪み始める. 特に、円盤銀河同士が十分に近づくとその潮汐相互作用が恒星および星間ガスに強く働き、銀河間をつなぐようにアームやブリッジ構造が形成されることが多い. 銀河が衝突すると、形態の歪みのほかに、銀河の内部で星の形成活動が活性化することが知られている. 恒星や星間物質の循環を通して銀河が“進化”していくことから、銀河衝突は銀河研究の大きなトピックの一つであり、理論・観測の両面から精力的に研究が続けられている (銀河スケールでの銀河衝突と星形成活動の関係は過去の月報記事 [47, 48] も参照されたい).

数値シミュレーションによる銀河間相互作用の研究を見てみると、銀河の形態的構造変化の理解、または、星形成を含む物理・化学的性質の理解を目的としたものに大きく分けられる. 前者の例としては、 $m=2$ のモード (2本の渦状腕) が強く励起されることや、時間の経過とともに楕円銀河で見られる恒星分布になっていくことを示した研究が挙げられる. 後者からは、銀河の衝突が進行するにつれて、星間ガスが角運動量輸送に伴って銀河中心へ集中していくことが示されている. このような中心集中がガスの高密度化をもたらし、これによって効率的で爆発的な星形成が生じる. 一方、これらのシミュレーションはkpc程度の空間分解能であり、大局的な理解にとどまっていた. この10年ほどでより低温の星間ガスの振る舞いまで計算することができるようになり、

空間分解能が向上し数10–100 pcほどの巨大分子雲スケールでの星間ガスの挙動も明らかになってきた。(直接の衝突を伴わない) 銀河の近接遭遇後では、より大きくて重く重力的に束縛されていない分子雲を形成することが示されており、これは似た状況下にあるM 51の観測結果とも一致する [49]. この結果は巨大分子雲の性質にのみ着目したものであるが、星形成プロセスを含めたシミュレーションからも興味深い結果が報告されている。銀河円盤の衝突によって強い衝撃波が生じることで分子ガス円盤が圧縮され、10 kpcほどの巨大で高密度な分子ガスフィラメントを形成する様子が見られたのである [50, 51]. このフィラメントはその後、ちぎれながら数10–100 pc程度の分子雲となり、これらが効率的な星形成を誘発し、 10^5 – $10^8 M_{\odot}$ ほどの質量をもつ巨大星団を形成する。

近年のALMA望遠鏡による分子ガス観測からは、衝突が進んだ相互作用銀河で星形成領域が付随した大規模なフィラメント状構造が見出されつつある [52, 53]. 同様に、銀河に付随する分子ガス円盤が接触しはじめた衝突初期段階の相互作用銀河(NGC 4567/4568)でも、分子ガス円盤同士が衝突して作られたと思われるkpcスケールのフィラメント状の構造が発見された [54]. このことは、銀河衝突に伴い、分子雲及び星団形成が普遍的に誘発されている可能性を示している。ただし、銀河同士の衝突速度は数 10 km s^{-1} から数 100 km s^{-1} と衝突の仕方により大きく異なる。そのため、こうしたフィラメント状構造の形成が一般的な現象であり、銀河の星形成に大きな寄与をもたらすものであるかどうか、今後のさらなる検証が必要である。

また、2つの円盤銀河(NGC 4038/9)が衝突している「アンテナ銀河」において、銀河間相互作用によって星形成が誘発される可能性が古くから議論されてきた。それぞれの銀河に付随する分子ガス円盤が衝突し重なり合っている領域「オー

バーラップ領域」では、 10^5 – $10^6 M_{\odot}$ の若い大質量星団の存在が知られている。さらに、衝突の衝撃によって集積されてきたと考えられる分子ガスも大量に存在し、 10^6 – $10^7 M_{\odot}$ の分子ガスからなる分子雲複合体が形成されている [55]. そのため、銀河間相互作用と星形成の関係を解明するうえで最適な研究対象である。さらに、南天に位置することから、ALMA望遠鏡で繰り返し観測されており、遂には10 pcスケールの分子雲の分布が描かれるようになった。そこで、銀河系内での星間雲衝突の研究によって蓄積されてきた知識や手法(2章)を応用して、オーバーラップ領域に分布する分子ガス雲の構造や運動の理解に取り組んだ [56, 57]. その結果、分子雲複合体は互いに相補的な空間分布を持つ異なる視線速度のガス雲で構成されており、それらの間を速度空間上で接続するブリッジ構造も見られた。また、最も若い大質量星団候補の周辺に分布する分子ガスを詳細に調べたところ、 50 – 100 km s^{-1} 以上という高速の分子雲衝突が起きていることが示唆された。速度差および分子ガスの(柱)密度が大きく衝突の際に生じる圧力も高いと予想され、星団を形成する環境が整っていたのではないかと考えられる。これらのことより、先の星団候補が分子雲衝突によって形成された可能性が高まった。さらに、アンテナ銀河では銀河中心付近でも分子雲衝突現象が示唆されている [58]. メタノール分子輝線を用いてNGC 4038の銀河中心付近を観測したところ、100 pcスケールの銀河核円盤とそれにつながる腕のような構造との接点で、メタノール分子量が増加していた。腕に沿って流入してきたガスが銀河核円盤に付随するガスと衝突を起こしているという描像が可能性のひとつとして挙げられている。このように観測とシミュレーションの両方によって、巨大分子雲スケールでの星の形成活動の理解が進みつつあるところであり、その中では分子雲衝突が一つの鍵となっているといえよう。

4. まとめと今後の展望

本記事で概観したように、様々なスケール及び場所で相互作用する系が存在し、ガス雲衝突が大質量星形成をはじめとする天体／構造形成を誘発している過程が明瞭になりつつある。銀河間空間及び、星間空間は非常にダイナミックな現場であり、さまざまな層にあるガスおよび天体が相互作用しつつその形態を変化させていくことは想像に難くなかった。ただし、衝突銀河のように可視光画像などに基づいて2体以上の系の衝突が比較的判別が容易なものを除き、重力がまだ優勢でない星間ガス雲のような不均一構造が卓越するシステム同士の相互作用を示すのは困難であった。観測技術及び理論計算の発展に加えて、それらに動機づけられた速度1次元+空間2次元観測データの博物学的な解析手法の発展が重要な役割を果たしたことは強調しておきたい。これらは大質量星形成の誘発に関する研究だけでなく、フィラメント状分子雲 [23] や巨大分子雲がどのように形成／進化してきたかなどを解き明かすうえでも重要な指針を与えつつある [59]。

今後、星間雲衝突という文脈で考えられる研究の展望として、主に以下の3点を挙げたい。

(1) 大スケールと小スケールの大質量星研究を結びつける研究。個別の大質量星（及びその連星系）形成の現場は母体となる分子雲コアや形成される星周エンベロープ構造が0.1 pcから数100 au以下の空間スケールであり、巨大分子雲スケールの衝突流現象を取り扱った研究との空間的なギャップを完全に埋めることはできていない。巨大スケールの星間雲衝突現象を見いだしてきたHiやCO等のトレーサーが原始星形成の直接母体となるような非常に密度の高い場所を観測するには不向きなことで、分子雲コア以下のスケールでは分子輝線／連続波の観測領域が限られてしまうことが観測的な困難であった。最近、ALMA

等のラージプログラム [60] も含めた研究により、大規模な衝突流を経験したと思われる銀河面上の比較的遠方に存在する大規模星団形成領域の広域高解像度観測が急速に進みつつある。これらの領域で見出される分子雲コア／原始星円盤の性質、周囲のガスの降着流の特徴、及び質量関数などの統計量を導出し、太陽系近傍などの結果と比較研究することが求められる。

(2) 星間物質の化学組成に関する研究。おうし座領域において、比較的化学進化が若い段階で顕著な放射が見られるCCS輝線が強く検出される分子雲コア付近でほかよりも顕著に星形成が進んでいる領域が見出された [61]。この領域ではフィラメント状分子雲が相互作用する兆候が得られており、分子雲コアスケールを超えた現象が密度の不連続な変化をもたらし、定常過程を考えた場合の化学組成と異なる状態を実現したと考えられる。現在、原始星形成現場の化学的多様性を議論／モデル化する際、周囲の星間輻射場や宇宙線量の違いなどが活発にパラメータ化されているが、加えてガス雲同士の相互作用という観点も取り入れられつつあり [62]、星惑星系の化学的多様性の理解に起源に向けて新しい枠組みをもたらす可能性がある。

(3) 現在の銀河系では見られない、球状星団および爆発的星形成現象の理解。総質量が $10^5 M_{\odot}$ を超える球状星団は、銀河形成初期や宇宙進化の中で星形成活動が活発な時期には数多く形成されたと考えられ、宇宙・銀河進化を理解するうえでその形成メカニズムの解明は非常に重要である。局所銀河群においてはマゼラン雲30 Dor及びその周辺、さかかく座銀河NGC 604などが代表的であり、当面はこれらの天体の知見をベースにより遠方天体の考察が進む（3.2節も参照）と期待される。アンテナ銀河やNGC 253, M83はい

わゆるスターバースト銀河であるため、局所銀河群ではほとんど調査することが不可能な 10^5 - $10^6 M_{\odot}$ の星団形成にも迫ることができる。例えば現存する装置の感度を保ったまま1桁以上解像度を上げることができれば、これらの天体でも分子雲フィラメント程度であれば判別可能になるため、ALMA望遠鏡の大型アップデートやそのほかの将来計画でより詳細を探ることが可能になる。

ここで述べた研究は、これまでは主に独立にすすめられてきた。星形成の最初期（分子雲形成期）から最後（原始星形成からその後）、かつ様々な規模の星形成領域において衝突流というキーワードが関連しうることが明らかになりつつある今、個別の分野間同士を連携させて新しい研究テーマを創造することは自然な流れとも言える。日本は産業においても“すり合わせ”の技術／文化を発展させてきた歴史を持つ独自性を生かし、今後上記であげた観点以外にも様々な研究が展開され、天体形成史の中でも重要な役割を果たし続けることを期待して締めくくりたい。

謝 辞

この原稿を作成するにあたって、2021年度 of 天文月報編集委員の岩崎一成氏には大変お世話になった。また、福井康雄氏、井上剛志氏、羽部朝男氏、大西利和氏、原田ななせ氏、千葉柁司氏、山田麟氏には研究会開催において多大なご尽力いただき、原稿執筆においても有益なアドバイスをいただいた。加えて、鳥居和史氏、河野樹人氏、柘植紀節氏には本稿作成において理論計算データ等を提供頂いた。オンライン研究会「様々なスケールの衝突流による誘発的星形成大質量星から超大質量星団まで」にご参加いただいたすべての方に改めて感謝を申し上げたい。

参考文献

- [1] Larson, R. B., 1969, MNRAS, 145, 271
- [2] Myers, P. C., & Benson, P. J., 1983, ApJ, 266, 309
- [3] Shu, F. H., et al., 1987, ARA&A, 25, 23
- [4] Onishi, T., et al., 1998, ApJ, 502, 296
- [5] Könyves, V., et al., 2015, A&A, 584, A91
- [6] André, P., et al., 2014, in Protostars and Planets VI, ed. H. Beutheret (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 27
- [7] Krumholz, M. R., et al., 2009, Science, 323, 754
- [8] 鳥居和史, 大浜晶生, 福井康雄, 2012, 天文月報, 105, 481
- [9] 福井康雄, 2020, 天文月報, 113, 269
- [10] Koda, J., et al., 2009, ApJ, 700, L132
- [11] Hirota, A., et al., 2018, PASJ, 70, 73
- [12] Leroy, A. K., et al., 2021, ApJS, 257, 43
- [13] Larson, R. B., & Tinsley, B. M., 1978, ApJ, 219, 46
- [14] Keel, W. C., et al., 1985, AJ, 90, 708
- [15] Oort, J. H., 1946, MNRAS, 106, 159
- [16] Furukawa, N., et al., 2009, ApJ, 696, L115
- [17] Fukui, Y., et al., 2014, ApJ, 780, 36
- [18] Habe, A., & Ohta, K., 1992, PASJ, 44, 203
- [19] Takahira, K., et al., 2014, ApJ, 792, 63
- [20] Haworth, T. J., et al., 2015, MNRAS, 454, 1634
- [21] Torii, K., et al., 2015, ApJ, 806, 7
- [22] Fukui, Y., et al., 2018, ApJ, 859, 166
- [23] Inoue, T., & Fukui, Y., 2013, ApJ, 774, L31
- [24] Torii, K., et al., 2011, ApJ, 738, 46
- [25] Enokiya, R., et al., 2021a, PASJ, 73, S256
- [26] Yamada, R. I., et al., 2022, MNRAS, 515, 1012
- [27] Ohama, A., et al., 2010, ApJ, 709, 975
- [28] Tokuda, K., et al., 2019, ApJ, 886, 15
- [29] Fukui, Y., et al., 2017, PASJ, 69, L5
- [30] Inoue, T., et al., 2018, PASJ, 70, S53
- [31] Fukui, Y., et al., 2019, ApJ, 886, 14
- [32] Enokiya, R., et al., 2021b, PASJ, 73, S75
- [33] Maeda, F., et al., 2021, MNRAS, 502, 2238
- [34] Abe, D., et al., 2021, ApJ, 916, 83
- [35] Duchêne, G., & Kraus, A., 2013, ARA&A, 51, 269
- [36] Moe, M., & Di Stefano, R., 2017, ApJS, 230, 15
- [37] Beuther, H., et al., 2002, A&A, 383, 892
- [38] Harada, N., et al., 2021, MNRAS, 508, 3730
- [39] Machida, M. N., & Hosokawa, T., 2020, MNRAS, 499, 4490
- [40] Tasker, E. J., & Tan, J. C., 2009, ApJ, 700, 358
- [41] Dobbs, C. L., et al., 2015, MNRAS, 446, 3608
- [42] Fujimoto, Y., et al., 2014, MNRAS, 445, L65
- [43] Fujimoto, Y., et al., 2020, MNRAS, 494, 2131
- [44] Maeda, F., et al., 2018, PASJ, 70, 37
- [45] Yajima, Y., et al., 2019, PASJ, 71, S13
- [46] 前田郁弥, 2022, 天文月報, 115, 384
- [47] 三浦飛未来, 2021, 天文月報, 114, 709
- [48] 道山知成, 2022, 天文月報, 115, 6

- [49] Pettitt, A. R., et al., 2018, MNRAS, 480, 3356
- [50] Saitoh, T. R., et al., 2009, PASJ, 61, 481
- [51] Teyssier, R., et al., 2010, ApJ, 720, L149
- [52] Whitmore, B. C., et al., 2014, ApJ, 795, 156
- [53] Saito, T., et al., 2015, ApJ, 803, 60
- [54] Kaneko, H., et al., 2018, ApJ, 860, L14
- [55] Wilson, C. D., et al., 2000, ApJ, 542, 120
- [56] Tsuge, K., et al., 2021a, PASJ, 73, S35
- [57] Tsuge, K., et al., 2021b, PASJ, 73, 417
- [58] Ueda, J., et al., 2017, PASJ, 69, 6
- [59] Kondo, H., et al., 2021, ApJ, 912, 66
- [60] Motte, F., et al., 2022, A&A, 662, A8
- [61] Seo, Y. M., et al., 2019, ApJ, 871, 134
- [62] Bisbas, T. G., et al., 2017, ApJ, 850, 23

An Overview of Triggered Star Formation by Colliding Flow: Perusing a Galactic Scale Down to Cloud Cores

Kazuki TOKUDA¹, Rei ENOKIYA²,
Masahiro N. MACHIDA³, Yusuke FUJIMOTO⁴,
Fumiya MAEDA⁵, Junko UEDA⁶,
Hiroyuki KANEKO⁷

^{1, 3} *Department of Earth and Planetary Sciences,
Faculty of Science, Kyushu University, Nishi-ku,
Fukuoka 819-0395, Japan*

^{1, 6, 7} *National Astronomical Observatory of Japan,
National Institutes of Natural Sciences, 2-21-1
Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

² *Department of Physics, Faculty of Science and
Technology, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-
ku, Yokohama-shi, Kanagawa 223-8522, Japan*

⁴ *Division of Computer Science, Department of
Computer Science and Engineering, University of
Aizu, Tsuruga Ikki-machi, Aizu-Wakamatsu,
Fukushima 965-8580, Japan*

⁵ *Institute of Astronomy, Graduate School of
Science, The University of Tokyo, 2-21-1 Osawa,
Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

⁷ *Graduate School of Education, Joetsu University
of Education, 1 Yamayashiki, Joetsu, Niigata 943-
8512, Japan*

Abstract: Cloud–cloud collisions are an important process that triggers high-mass star formation. Recent advances in observational techniques and theoretical calculations have enabled us to study colliding flows over a wide range of spatial scales, from individual molecular clouds to global galactic gas flows in spiral arms and interacting galaxies. This article reviews the studies conducted in Japan about triggered star formation on various scales from both observational and theoretical perspectives in terms of colliding flows.