

令和元年6月10日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05014

研究課題名(和文) 分子雲衝突による大質量星形成の研究

研究課題名(英文) Study of massive star formation by cloud cloud collision

研究代表者

羽部 朝男 (Habe, Asao)

北海道大学・理学研究院・名誉教授

研究者番号：90180926

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：分子雲衝突の3次元高精度数値シミュレーションを行い、大質量星形成につながる大質量高密度コア形成の条件を調べた。分子雲の自己重力、放射冷却、分子雲の乱流や sink particle model を用いて衝突早期に形成された大質量星によるUV光電離を考慮した。分子雲の乱流や質量、衝突速度とコア形成の関係を明らかにした。高密度コアの質量関数は衝突速度に依存し、衝突速度が大きいと大質量コア形成が抑制されること、観測が示唆する衝突速度では大質量星形成が可能な高密度コアが形成されることを示した。衝突早期に形成された大質量星のUV光は低密度ガスを電離するために星形成に影響しないことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで未解明だった大質量星形成について、分子雲衝突による可能性を理論的に示したことで、銀河における星形成の研究に大きく寄与している。現在分子雲衝突による星形成は観測的に盛んに研究されているが、分子雲衝突に特有な構造が我々の数値シミュレーションによって示され、それを応用した観測的研究が進んでいる。また、我々は大質量星形成に結びつく大質量高密度コア形成の分子雲の衝突速度依存性を示し、それを考慮した星形成について議論したが、その関係は宇宙論的銀河シミュレーショングループからも注目されている。また、有名なオリオン星雲の起源について、我々の研究は寄与しその成果は新聞でも報道された。

研究成果の概要(英文)：We simulate cloud cloud collisions by using three dimensional numerical hydrodynamic code, ENZO, that is an AMR code, including turbulent motion in clouds, self-gravity of gas, radiative cooling process and UV feed back effects by newly formed massive stars by using the sink particle model. We assume non-identical clouds with various cloud mass and collision speeds of clouds. We found that massive dense cores are form in the shocked layer formed by cloud cloud collisions, mass function of dense cores is a power law form similar to the observation. The mass function depends on cloud mass and collision speed. We found that massive dense cores that are possible to form massive stars are formed in the observed collision speed range. UV feed back by massive stars formed in early stage of cloud-cloud collision is mainly effective to ionize low gas density regions and is hard to change massive dense core formation condition by cloud cloud collision.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：大質量星 星形成 分子雲 星間物質 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

大質量星は、重元素の放出、強力な紫外光や星風、超新星爆発などによって周囲の星間ガスに大きな影響を与え、その後の銀河の進化や星形成に大きく影響する。そのため、大質量星の形成は銀河進化にとって極めて重要であるが、形成条件は未解明な点が多い。

大質量星形成のためには、星形成コア中での質量降着率が小質量星の場合と比べて二桁以上大きい必要がある (McKee & Tan 2003[4], Hosokawa & Omukai 2009[2])。こうした星形成コアがどのように形成されるのかは未解明であり、超新星や分子雲衝突による衝撃波によって分子雲が圧縮されて形成される可能性があるが、理論的な研究も少なく、観測対象の少なさから観測的研究も進んでいなかった。

Tan (2000)[5] は、分子雲衝突で銀河系での大質量星形成を説明できる可能性を議論し、そのために必要な分子雲衝突の頻度や、分子雲衝突による大質量星形成効率を示した。分子雲衝突頻度については、銀河スケールの分子雲形成進化のシミュレーションによって、Tan(2000)[5] が期待した頻度が実現可能なことが示されている (Tasker and Tan 2009, Fujimoto et al. 2014)。一方、名古屋大学の福井グループや、学芸大学の土橋グループなどが大質量星形成領域での分子雲衝突の観測的証拠を示している (図 1)。観測と大質量星形成との関係を明確にするには、観測と比較しうる数値シミュレーションが必要であるが、そのようなシミュレーションはなされていなかった。

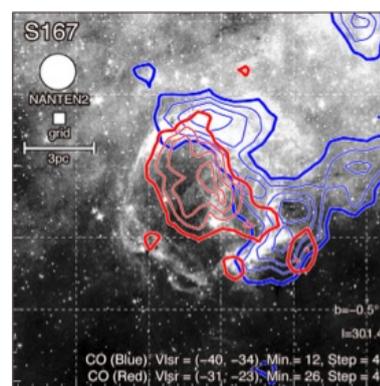


図 1: Spitzer bubble の CO 分子ガス (Fukui+ 2014)。赤と青 (コピーでは薄い色と濃い色) の等高線は速度 10 km/s 異なる CO ガス。グレイスケールは $8\mu\text{m}$ 強度。 $8\mu\text{m}$ リングは 2 速度分子ガス成分が重なるところで強く、その反対側で弱い。大質量星である OB 型星は二分子ガス成分が重なる領域にある。

2. 研究の目的

大質量星は重元素供給や UV 光による星間空間への影響により銀河進化に多大な影響を及ぼすが、その形成条件は未解明な点が多い。私たちは、銀河スケールの数値シミュレーションでかなりの頻度の分子雲衝突が予想されること、観測的にも分子雲衝突による大質量星形成の証拠が最近示されていることから、現実的な分子雲衝突の 3 次元数値シミュレーションを系統的に進め、分子雲衝突による高密度コア形成と分子雲の乱流や衝突速度との関係、大質量星形成が可能な高密度コアの形成条件はどのようなものか、などを系統的に調べる。また、大質量の高密度コアから大質量星が形成された場合に、大質量星から強力な UV 光が放射されて次の高密度コア形成を抑制する可能性があり、その効果も調べる。それによって、これまで未解明であった分子雲衝突による大質量星形成条件や衝突する分子雲の全質量に対してどれくらいの質量の大質量星形成が可能なのかという形成効率の理解に寄与することが、この研究の目的である。

3. 研究の方法

数値シミュレーションに用いる ENZO code は、空間3次元で最適化格子生成を行いつつながら分子雲衝突の流体計算を行うことができる。用いた格子数は、 126^3 個の様な格子とガス密度の高密度領域では、ガス密度に応じて各格子のサイズを1/2づつ減少させ、分子雲の10pcのスケールから分子雲衝突によって形成される分子雲コアを十分分解できる0.003pc以下のスケールまで、密度では 1 H atm/cm^3 以下から 10^5 H atm/cm^3 以上までの変化の計算を可能にする。さらに、ENZO code には、分子雲内の自己重力、ガス分子原子からの放射冷却、新しく誕生した大質量星からの UV 光の放射輸送、乱流運動を考慮できるように開発を行った。

ENZO code を用いた我々の研究 Takahira, Tasker and Habe (2014) では、質量が $10^3 M_\odot$ 程度の内部乱流をもつ分子雲の衝突を研究し、衝突速度が、1) 3 - 5 km/s の場合、大質量星形成が可能な高い質量降着率をもつ高密度コアが形成可能であること、2) 衝突速度が大きい 10 km/s の場合、高密度コアが形成されずに分子雲はむしろ破壊されることを示した。以上の結果は大変興味深いものであるが、Takahira, Tasker and Habe (2014) で調べた分子雲は観測されている分子雲と比較すると質量が小さなものであり、以下の二点について研究を発展させる必要がある。

名古屋大学の福井グループの分子雲衝突観測の典型的な質量である $10^4 M_\odot$ 、衝突速度 20km/s を基本的な場合として、それに対して様々な分子雲の質量や乱流状態、衝突速度の分子雲衝突と、形成される高密度コアの関係を明らかにする。この結果から、分子雲衝突と大質量星形成が可能な高密度コアの形成条件を明らかにする。分子雲の形状は単純な球状とする。これは、分子雲衝突の物理過程を分かりやすくするためである。

4. 研究成果

典型的な衝突分子雲の質量 ($\sim 10^4 M_\odot$)、相対速度 ($\sim 20 \text{ km/s}$) をもとに、さまざまな質量と速度の分子雲衝突を計算する。形成される高密度コアの質量、サイズ、密度、内部運動状態、高密度コアの質量関数、Position-Velocity Diagram, や PDF を調べる。その結果から分子雲衝突と大質量星形成との関係を系統的に調べる。乱流は Larson's law に従って初期状態でビリアル平衡となるように導入する。また、衝突する分子雲は Larson の経験則に従い、質量の異なる分子雲を仮定する。また、これらの計算と平行して、大質量星からの UV 放射輸送を考慮した計算を進めた。これは、分子雲衝突の観測がなされている Spitzer bubble との比較では分子雲衝突で形成された大質量星からの紫外光による電離過程の影響を評価する必要があるからである。また、分子雲衝突による星形成効率を議論する上で、衝突過程の早期に形成された大質量星からの紫外光による電離過程の影響を議論すべきであるからである。

図2に、分子雲衝突の数値シミュレーション結果の一例を示す。この図では色の濃淡でガスの密度を表している。小さく高密度な分子雲が左から大きく密度の低い分子雲へ衝突している。左の図は、衝突直前、真ん中は小さな分子雲がほとんど大きな分子雲に吸い込まれている。アーク状の高密度領域が形成されているのがわかる。このアーク状構造は名古屋大学のグループが発見した Spitzer bubble の特徴とよく対応している。右は衝突の後期の構造を示している。

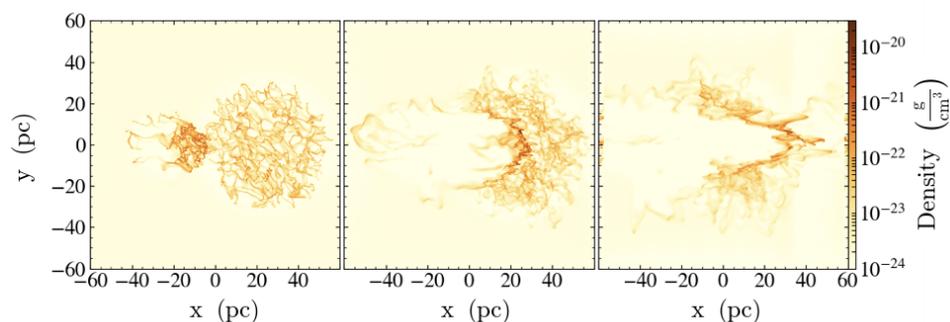


図 2: 衝突分子雲のシミュレーション結果の例。半径 10pc の分子雲と 28pc の分子雲 10 km/s での衝突速度した場合。右から左へ時間が経過を示している。

図 3 左に、分子雲衝突で形成された高密度コアの質量分布を示す。ここで高密度コアはガス密度が 10^{-19}g/cm^3 という分子雲の中では非常に高密度な領域を選んでいる。この図では、衝突する分子雲の衝突速度を系統的変えた時、高密度コアの質量分布が衝突速度によってどのように変化するかを示している。ここで、縦軸の N_{core} は高密度コアの質量が M 以上の数であることを注意しよう。この図によって、衝突速度が 10km/s 以下では、高密度コアは観測されている分子ガスコアの分布とよく似た分布を示すことを示した。また、衝突速度が 10km/s を超えると高密度コアの数が少なくなることがわかる。図 3 左で仮定した衝突速度を超える分子雲衝突では、質量の大きな高密度コアの形成は期待できないこともわかった。形成された高密度コアの質量は $10 M_{\odot}$ をはるかに超えるので大質量星形成が期待できる。そこで、どれくらいの質量の星の形成が期待されるのか、また、太陽の 10 倍を超える星が形成されると、強力な UV 光が放射されて周りのガスが電離されると考えられ星形成が抑制されると期待されるので、その効果を調べるために sink particle model を用いて形成される星の質量を UV 光の影響を調べた

図 3 右に分子雲衝突の最中に新しく形成された星を sink particle model を用いて調べた結果得られた星の質量関数を示す。この図には、形成された大質量星からの UV 光が分子雲を電離する効果を取り入れた計算結果も示してある。図 3 右ではこれら二つの間には大きな差は生まれていない。つまり、分子雲衝突の最中に新しく形成された星のうち、大質量星から放射された UV 光は分子雲を電離し spitzer bubble のような電離領域を形成するが、電離はガス密度の低いところで起きやすく (例えば cavity)、高密度の領域はあまり電離されないため、星形成にはあまり影響しないという結果になったと理解できる。

以上の成果は、次に示すように国際的にも著名な学術雑誌で印刷公表している。また、日本天文学会欧文誌の分子雲 衝突特集号にも共著論文を掲載している。以上の研究によって、大質量星形成のためには質量が成長するまで高密度コアを安定化する必要が明確になり、高密コア内部の乱流や乱流磁場の重要性を指摘した。

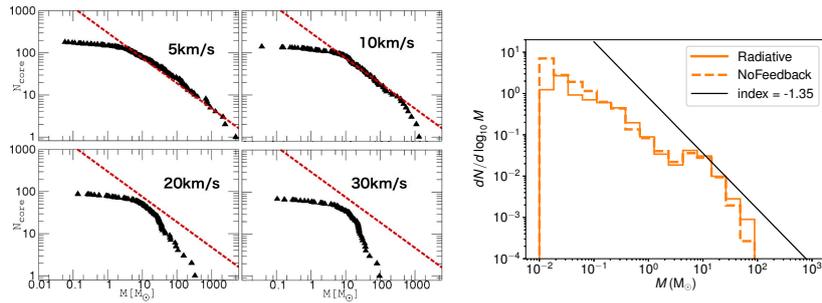


図 3: (左) 高密度コアの累積質量関数と衝突速度と関係の例と、(右) 10 km/s で衝突した分子雲で sink particle model を使って求めた「新しく形成された星の質量関数」。左図には、比較のためにオリオン分子雲で観測されている高密度コアの質量関数の傾きを示した。衝突速度が 10 km/s を超えると質量の大きなコアが形成されにくくなることがわかる。右図には NoFeedback は新しく形成された星からの UV 光を考慮しなかったモデル、Radiation は新しく形成された星のうち大質量星からの UV 光の影響を考慮したモデルの結果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 13 件)

以下おもな論文

1. Takahira, K., Shima, K., Habe, A., and Tasker, E. J. 2018, "Formation of massive, dense cores by cloud-cloud collisions", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, S58. 査読あり
2. Shima, K., Tasker, E. J., Federrath, C., and Habe, A. 2018, "The effect of photoionizing feedback on star formation in isolated and colliding clouds", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, S54. 査読あり
3. Fukui, Y., Torii, K., Hattori, Y., Nishimura, A., Ohama, A., Shimajiri, Y., Shima, K., Habe, A. et al. 2018, "A New Look at the Molecular Gas in M42 and M43: Possible Evidence for Cloud-Cloud Collision that Triggered Formation of the OB Stars in the Orion Nebula Cluster", *ApJ*, 859, 166. 査読あり
4. Shima, K., Tasker, E. J., Habe, A. 2017, *MNRAS*, 467, 512. 査読あり
5. Haworth, T. J., Shima, K., Tasker, E. J., Fukui, Y., Torii, K., Dale, J. E., Takahira, K., and Habe, A. 2015, "Isolating signatures of major cloud-cloud collisions - II. The lifetimes of broad bridge features", *MNRAS*, 454, 1634. 査読あり

〔学会発表〕 (計 15 件)

主な国際会議発表

1. 発表者名: [Asao Habe](#)
発表標題: Simulation Study of Cloud-cloud Collisions
学会等名: the workshop Shells, Clouds and Star Clusters in Prague (招待講演) (国際学会)
発表年 2018 年
2. 発表者名: Kazuhiro Shima (Hokkaido University), [Elizabeth J. Tasker](#) (ISAS/JAXA), [Christoph Federrath](#) (ANU), [Asao Habe](#) (Hokkaido University)
発表標題: The effect of photoionising feedback on star formation in isolated and colliding

turbulent clouds

学会等名: ALMA NA-Taiwan Joint Workshop, Magnetic Fields or Turbulence: Which is the critical factor for the formation of stars and planetary disks?(国際学会)

発表年 2018 年

3. 発表者名:Asao HABE

発表標題:Role of Cloud Cloud Collisions in High Mass Star Formation

学会等名:Life-cycle of gas in galaxies: A Local Perspective(国際学会)

発表年月日:2015 年 08 月 31 日 2015 年 09 月 04 日

発表場所:Dwingeloo, the Netherlands

4. 発表者名:Asao HABE

発表標題:Cloud Cloud Collision and Massive Star Formation

学会等名:Star Formation 2015: From Clouds to Cores(招待講演)(国際学会)

発表年月日:2015 年 06 月 29 日 2015 年 07 月 01 日

発表場所:国立天文台, (東京都, 三鷹市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ:

オリオン大星雲: 分子雲衝突による巨大星形成を立証 (名古屋大学、国立天文台、京都大学との共同研究)

<https://astro3.sci.hokudai.ac.jp/~habe/wp/index.php/page-75/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: Tasker Elizabeth

所属研究機関名: 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名: 宇宙科学研究所

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 40620373

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 名古屋大学、福井 康雄

ローマ字氏名: Fukui Yasuo

研究協力者氏名: 国立天文台、鳥居 和史

ローマ字氏名: Torii Kazufumi

研究協力者氏名: コロンビア大学、Greg Bryan

研究協力者氏名: オーストリア国立大学、Christoph Federrath

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。