

# 分子雲質量関数の時間進化と星形成過程

小林 将人<sup>1,2</sup>

〈<sup>1</sup>大阪大学大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉

〈<sup>2</sup>名古屋大学大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: <sup>1</sup>miskobayashi@astro-osaka.jp, <sup>2</sup>masato.kobayashi@nagoya-u.jp



分子雲は星の母天体であり、小スケールの星形成から大スケールの銀河進化・宇宙大規模構造をつなぐ重要な天体である。これまで筆者らは、分子雲の進化を統御する分子雲形成・質量成長・消失・衝突・再生過程を整合的に含む、分子雲質量関数の半解析的時間発展方程式の定式化に取り組んできた。本研究から、質量関数の低質量側べき分布が分子雲形成と消失の時間スケール比で決まる可能性、分子雲衝突過程が銀河円盤の星形成の半分弱を担う可能性を示した。また観測から示唆される分子雲の長寿命・短寿命という二分的性質は、分子雲の異なる進化過程に対応することを指摘した。今後さらに進展が見込まれる近傍銀河の分子雲探査や天の川銀河内での大質量星形成現場の多波長観測から、銀河の星形成率の空間分布・時間進化を理解する道筋が見えてきた。

## 1. はじめに：銀河進化と分子雲

銀河は星と星間ガスと暗黒物質の集合体であり、膨張宇宙における基本的な構成要素である。特に銀河内での星形成過程を理解することは、太陽系の起源や惑星形成の条件、銀河全体のサイズ・質量・金属量・構造・星形成活動の時間進化や環境依存性、ひいては宇宙大規模構造の進化や再電離といった広範な研究分野につながる中心的な課題である。星形成にかかわる天体は多岐にわたるが、筆者らは分子雲という天体に着目している。分子雲とは、主に水素分子ガスからなるガスの塊（雲）であり、典型的には絶対温度10程度・水素分子ガス数密度1立方センチメートルあたり300個以上という状態にある。なかでも本稿で取り扱う巨大分子雲は、1万太陽質量以上（サイズにして数パーセクから数十パーセク）の立派な分子雲である<sup>1)</sup>。

星形成の基本的な流れは、銀河円盤内のかなりの体積を占めている暖かい中性水素原子ガスを集

めて分子雲を形成し、分子雲内部の高密度領域である分子雲コアが自己重力収縮して星形成に至る、というものである。しかしこれは一方通行過程ではなく、形成された星からのフィードバック（放射や恒星風など）により、母天体分子雲の破壊や次世代分子雲の形成などが次々と発生するため、複合的で循環した過程となっている。したがって分子雲は銀河の構成要素かつ個別の星形成過程の初期条件・境界条件となっており、われわれの住む天の川銀河での星形成過程から遠方銀河の進化までを接続する架け橋として重要な天体である。それゆえに関係する物理素過程も豊富で、その典型的な空間スケールに何桁も幅があるため、非常に興味深い（かつ勉強になる）研究対象である（図1を参照）。

管見ながら分子雲研究の究極的目標を挙げさせていただくと、銀河のガス総質量のうち分子雲に転換できる割合・分子雲のうち分子雲コアに転換できる割合・分子雲コアのうち星に転換できる割合を明らかにすること、そしてそれらを統御する

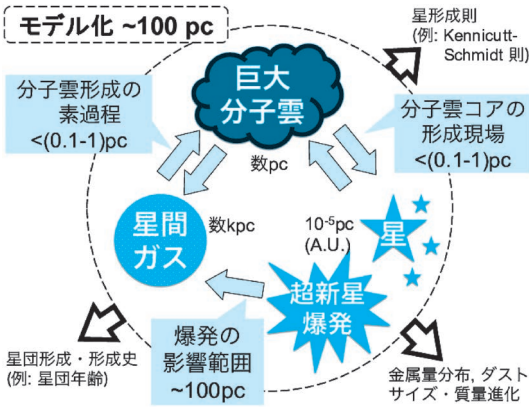


図1 銀河内部の星形成過程（物質循環）の概念図。単位の“pc”はパーセク。星間ガスから熱不安定性を介して分子雲が形成される過程は1 pc弱であるのに対して、分子雲の中から分子雲コアが形成される過程は0.1 pc程度、超新星爆発の影響が及ぶ範囲は100 pc程度になっている。また星間ガスは銀河円盤全体（数十kpc）に分布する一方で、個別の分子雲のサイズは数pc、星（の降着円盤）は天文単位（A.U.）で計測される小スケールの構造である。したがって星形成過程と銀河進化を接続させることは、マルチスケールな現象の包括を意味する。後述の筆者らの研究はこうした過程・天体の時間進化を100 pc程度のスケールで整合的に粗視化するモデルの構築である。

機構の解明、に尽きる。ここで重要な物理量は質量—特に天体の質量頻度分布を表す関数（“質量関数”）—である。そこで筆者らの立場は、星形成の多様な素過程を整合的に包摂した分子雲進化の描像を提供し、分子雲質量関数の時間発展モデルを構築すること、およびそのモデルに基づいて、天の川銀河から遠方銀河に至るまでの観測結果を整合的に説明しよう、というものである。天の川銀河や近傍銀河の分子雲と星形成に関する研究は理論・観測両面でここ10年ほど急進し、先の問いに答えつつある。そこで本稿ではまずこれら先行研究について簡単に概観し、次に筆者らの分子

雲進化の描像をご紹介する。さらに筆者らの分子雲進化の半解析的方程式の研究成果を紹介し<sup>2), 3)</sup>、最後にまとめと今後の課題・将来展望を述べる。

## 2. 直近の先行研究

星の一生は主系列星となった段階での質量で決定されるので、一世代の星集団が主系列到達時に有する質量関数（初期質量関数と呼ばれる）の起源を解明することは本質的に重要である。その足がかりとして、星の前段階である分子雲コアの観測が近年進展している。例えばHerschel望遠鏡によるGould Belt Surveyにより、近傍の星形成領域は分子ガスがフィラメント状の構造をなしており、分子雲コアの大半がフィラメント構造内に形成されていると明らかにされた。また観測された分子雲コア質量関数が、星の初期質量関数と類似のべき分布であったため、分子雲コアから星への変換効率率は30パーセント程度と推定されている<sup>4), 5)</sup>。このような分子雲コア質量関数を作る理論やその観測的検証も行われ始めており<sup>6), 7)</sup>、フィラメント描像が大質量分子雲や異なる銀河環境でも成立しているかが今後問われる。

このような進展を受けて、さらにその初期条件となっている巨大分子雲の質量関数の時間進化や環境依存性を説明する理論の構築が喫緊の課題となっている。実際にここ10年ほどで、理論側では磁気流体シミュレーションの3次元化など、観測側では電波帯域での干渉計と巨大単一鏡の合同解析などが実行されてきた。後節で詳説のとおり、筆者らの計算ではこうした先行研究の最新成果を仮定として用いるため、なかでも重要な3例を本章でご紹介したい。ただし本研究で念頭にあるのは、現在の宇宙（過去10億年以内）で渦状腕構造<sup>\*1</sup>をもつような円盤銀河（例えば天の川銀河やM51, M83といった近傍の渦巻き銀河）である。

\*1 銀河円盤中の物質密度は一様ではなく、方位角方向にも動径方向にも非一様性がある。渦状腕は星や星間ガスが渦状腕領域と比べて数倍高密度に存在している領域である。太陽系はオリオン腕に居住している。

## 2.1 観測：分子雲の人口統計

国勢調査によって国の統計がつまびらかになることと同様に、階層的構造をなしている宇宙の理解には宇宙の地図作成が王道初手と言える。可視光帯域での銀河分布の大規模調査<sup>8)</sup>はその顕著な例であるが、本稿で扱う分子雲も電波観測により探査されている。等核分子である水素分子は、基本的に四重極以上の弱い放射でのみ光る<sup>\*2</sup>ので、分子雲探査のより現実的な手段は2番目に存在量の多い一酸化炭素分子の回転遷移放射の観測である。星間空間からの一酸化炭素分子輝線の検出は1970年と比較的最近のことであり<sup>9)</sup>、ここから天の川銀河円盤全体にわたる大規模探査が急速に進展してきた<sup>10),11)</sup>。異なる準位間遷移の輝線および複数の同位体の輝線が観測され、星間ガスの物理状態の診断が行われている<sup>12)</sup>。また各観測から生成され乱立した状況にある多数の分子雲カタログ<sup>13)</sup>も、今後統合されることが期待されている。

ただしわれわれ自身が天の川銀河内部に居住しているため、分子雲までの距離測定や前景の分離が煩勞である。逆に近傍銀河探査の場合、個別の分子雲の内部構造について詳細な議論は困難だが、例えば円盤面がわれわれに正対する方向を向いている銀河 (face-on 銀河) であれば距離の不定性は抑制でき、銀河内の分布や銀河スケールの構造との対応が議論可能である (すなわち分子雲の人口統計)。例えば M51 銀河について重要な結果は CARMA 干渉計と野辺山 45 m 望遠鏡により 2000 年代後半から出ており<sup>14)</sup>、大質量分子雲は渦状腕に沿って分布する傾向が示された。この傾向は 2010 年代になって IRAM 望遠鏡 PdBI 干渉計と 30 m 望遠鏡により定量化され、分子雲質量関

数のべき分布が渦状腕領域では緩やかで渦状腕間領域では急峻であると明らかになった<sup>15)</sup>。

## 2.2 理論：分子雲形成の遅滞と超音速流による多数回圧縮

星間空間には加熱過程 (光電加熱や宇宙線加熱) と冷却過程 (Ly $\alpha$  や OI・CII) が存在しているため、星間ガスは多相構造をなしていることが古くから知られている<sup>16-18)</sup>。暖かい中性水素原子ガスを集めて分子雲を形成する際には、超新星爆発や大質量星周囲の電離領域起源の衝撃波および銀河渦状腕衝撃波などによって、原子ガスを急激に圧縮し冷却機構を効率良く機能させること (熱不安定性) が必要と考えられている<sup>19),20)</sup>。熱不安定性の典型的な成長スケールは、冷却が音速で伝わるスケールと熱伝導で均されるスケールのおおむね相乗平均であり、暖かい中性水素原子ガスでは 1 パーセク弱に相当する<sup>21)</sup>。

こうして等圧収縮で効率良く分子雲が形成される、という描像がこれまで考えられていた。しかしここ 10 年ほどで熱不安定性を追う磁気流体計算が開始された結果、衝撃波後面圧縮層では磁気圧による圧縮の阻害が顕著で、分子雲相当の高密度ガスの形成は著しく遅滞することが示された<sup>22)-24)</sup>。ただし磁場と衝撃波伝搬の方向のなす角が 15 度以内であれば、分子雲相当の高密度分子ガス形成に至る確率が高いと示唆されている<sup>25)</sup>。すなわち統計的には多数回 (10-30 回) 圧縮の後に分子雲が形成されると考えられ<sup>\*3</sup>、星間ガス中の衝撃波到来頻度 (典型的には 100 万年に 1 回<sup>26)</sup>) と合わせると、分子雲形成の典型的な時間スケールは 1,000 万年程度とわかる<sup>\*4</sup>。

\*2 他方で水素原子ガスは微細構造線 (21 センチメートル線) の放射があり、実際に観測されている。

\*3 衝撃波の到来方向が等方的と仮定すると、1 回あたり 15 度の成功率のイベントで 4 $\pi$  立体角をすべて埋めるには 10-30 回が期待値であるという意味。実際には星間空間は (そして分子雲自身も) 乱流状態で磁場の方向もランダムと思うと、1,000 万年経過の間に分子ガスが徐々に形成される、と考えるほうが現実的である。

\*4 実は遅滞と言うものの頻度の高さゆえに速い過程であるので、これに比して銀河円盤の静々とした自己重力的収縮による分子雲形成過程は非効率と考えられる。例えば中性水素原子ガスが、暖かい相より冷えて濃集し絶対温度 100 度・数密度 10 個にすでに至っていたとすると、その自由落下時間は 5,000 万年程度、しかもその波長は 50 パーセク程度と長大である。

### 2.3 観測と理論：分子雲衝突誘起の大質量星形成

天の川銀河内の観測から、分子雲同士が衝突している領域のうち1パーセク弱という狭い領域で複数個の大質量星（O型星）形成が誘発されていること<sup>27)–30)</sup>、またこれは100万年弱という短時間に同時多発的に発生したこと<sup>31)</sup>、が強く示唆されている。衝突候補領域は天の川銀河内部だけでも30カ所以上に上り、また銀河同士の相互作用（中性水素原子ガスの衝突）でも星形成することが観測的に議論されている<sup>32)</sup>。

衝突圧縮層では音速・乱流速度・磁場の効果の合算で実効的に音速が高まり大質量星形成に有利な環境であるから、観測される大質量星の大規模な形成は極めて合理的である。実際に分子雲衝突を模したシミュレーション研究が実行され<sup>33)–35)</sup>、特に近年の磁場入りの詳細な計算結果<sup>36), 37)</sup>からは圧縮層内でもフィラメント状構造が形成されて大質量星形成に至るという描像が示唆されている。こうした衝突誘起の星形成過程が銀河円盤全体の星形成にとって重要か否か議論が必要となっている。

### 3. 銀河スケールでの分子雲進化の描像：膨張シェルネットワーク

本題である方程式の定式化に入る前に、前節までに述べた先行研究らを包括的に説明するモデルがいかなる描像たりえるか、本章で議論しておく。図2に示すのは筆者らの描像を表した模式図である（これはInutsuka et al.<sup>38)</sup>の図2の改変であるので、原図はそちらを参照されたい）。銀河円盤中には至る所に超新星残骸や大質量星起源の電離領域が存在し、彼らが膨張するに従って超音

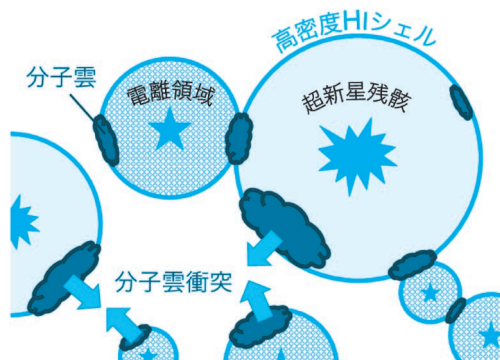


図2 銀河スケールの分子雲進化の描像。星印が大質量星（O型星）、爆発印が超新星爆発、またそれぞれを囲む円は膨張する電離領域や超新星残骸、円表面は圧縮された高密度な中性水素ガス（Hi）シェルに対応している。シェル表面の限られた領域にのみ分子雲（雲印で表現）が形成・存在しており、近々衝突する運命のものにはその動きを矢印で示してある。

速衝撃波が星間ガス中を伝播している（膨張シェルのネットワーク）。すでに多数回の衝撃波圧縮を経験した領域—すなわちすでに雲散霧消してしまっただけには描画されていない過去の複数の膨張シェルによって繰り返し圧縮された領域—に分子雲が形成されている様子を描いている<sup>\*5)</sup>。

本描像で期待されるポイントは、分子雲形成に超音速流による多数回の圧縮を要請するので、膨張シェルの $4\pi$ 立体角全てが常に分子雲で覆い尽くされているわけではないことである<sup>39)</sup>。さらに、衝突する分子雲の相対速度はその質量によらずシェルの膨張速度程度（すなわちシェル内部の温度で決まる音速程度）であることも期待でき<sup>\*6)</sup>、実際に天の川銀河内の観測される分子雲同士の速度分散（毎秒10 km弱<sup>40), 41)</sup>）と整合的である。また余談ではあるが、膨張シェルの中心か

\*5) ただし、例えば超新星残骸がX線等の高エネルギー放射で明るく輝き観測される時間スケールは爆発からおおむね1万年なので、ある時刻のスナップショットとして銀河面の至る所がX線で図2に示すように観測されるとは期待できない（し、実際にそうはなっていない）。しかしHiの観測からシェル構造が多く見つければ、このような統計的な描像がより支持されると考えられる。

\*6) 簡単な磁化していない流体の衝撃波ジャンプ条件を考えれば、衝撃波後面の流体の速度は衝撃波伝播速度に対して数十パーセント程度であるから、既存の分子雲が明後日の方向から到来した膨張シェルにより突き飛ばされて獲得できる速度も毎秒数km程度であることは自然である。

らの距離に応じて付随する天体の年齢が減少関数になることも期待され、実際に天の川銀河内の電離領域の観測からそのような傾向が示唆されている<sup>42)</sup>。今後の観測から、これらのポイントが太陽系近傍だけでなく銀河中心や銀河外縁部でも成立しているか否かを吟味する必要がある。

#### 4. 分子雲質量関数の時間発展：形成・質量成長・消失・衝突・再生

筆者らは図2に示した描像に基づき、半解析的な分子雲質量関数の時間発展方程式を定式化した。これは分子雲の微分密度<sup>\*7)</sup>の時間進化を表す方程式となっている。

本定式化で評価される主な過程は四つある。一つ目は分子雲の質量成長である。この過程も多数回圧縮に駆動されると考えて、標準モデルでは質量成長の典型的な時間スケールに形成過程のそれ( $T_{\text{形成}}$ )と同じ1,000万年を与える。二つ目は大質量星を形成しそのフィードバックによって分子雲が自分自身を破壊・消失させる過程である。標準モデルではこの典型的な時間スケール( $T_{\text{消失}}$ )に1次元球対称輻射流体計算から示唆されている400万年<sup>38), 43)</sup>を採用する。三つ目は衝突過程であり、原始惑星系円盤のダスト成長など同様に2体遭遇での衝突合体を解く<sup>44), \*8)</sup>。ただし標準モデルでは衝突の際の誘発的星形成は無視する。四つ目は再生過程であり、筆者らのモデルでは消失過程により破壊された分子ガスの全量のうち最小質量分子雲(筆者らの計算では1万太陽質量)に生まれ変わる確率(再生率<sup>\*9)</sup>)を与えて評価する。

初期条件としては、最小質量分子雲しか存在し

ない系を用意する。これは熱不安定性を介した分子雲形成が、必ず小スケール(小質量スケール)から起こるからである。この条件設定下では質量関数は小質量側から大質量側へ成長する。

このように定式化した時間発展方程式は、分子雲形成時間スケール( $T_{\text{形成}}$ )・消失時間スケール( $T_{\text{消失}}$ )・再生率の三つがフリーパラメーターであり、時間積分することで分子雲質量関数の時間発展が与えられる。ちなみに1980年前後に、衝突合体による分子雲の質量成長過程を計算する半解析的方程式(合体成長方程式)研究やN体シミュレーション研究が精力的に行われた<sup>46)-49)</sup>。本研究は、その当時まだ理解が深まっていなかった多数回圧縮による分子雲形成・質量成長を考慮し、衝突合体の相対的重要性や再生率を定量的に評価するものである。以下4小節に細分化して、結果の重要点を紹介する。

##### 4.1 衝突効果とべき分布：単一べき分布から示唆される時間スケール

図3は衝突過程の有無で時間進化の違いを比較した結果である。ここでは簡単のために、最小質量分子雲の数が一定になるように再生率は調整してある。この処理は、本研究では宇宙論的時間スケールを追わないため(2節参照)、銀河の星形成率が準定常的でその母天体である分子雲の質量関数も準定常的だと仮定したことに対応する。

図3から、 $10^{5.5}$ 太陽質量を下回る質量範囲では衝突過程にほぼ影響されずに単一のべき分布が出現し、それよりも大質量範囲では衝突合体による成長が顕著になることがわかる。実際に時間発展方程式の衝突項を落として準定常仮定を採用すると、質量関数は分子雲形成と消失の時間スケール

\*7) ここでの微分は質量空間微分。

\*8) 三つの特殊な衝突率の表式に限って、衝突のみの系での定常解析解が奇跡的に知られている<sup>45)</sup>。衝突計算は、離散化した質量瓶で衝突処理をする際の質量分配や桁落ち手当など、数値計算手法の勉強課題としてもとても面白い。

\*9) 筆者らは査読論文中でこれを“蘇生率(resurrecting factor)”と命名した。英語のresurrectionは復活(特にイエス・キリストの復活)を意味することがある単語で、分子雲がその最期の後に新たな分子雲として再生するという概念を端的に表現している。しかし今になって内省すると、例えば“再充填率(replenishing factor)”など数値処理に焦点を当てた表現のほうが、人々の感情に差し障らない穏やかな命名であったかもしれない。

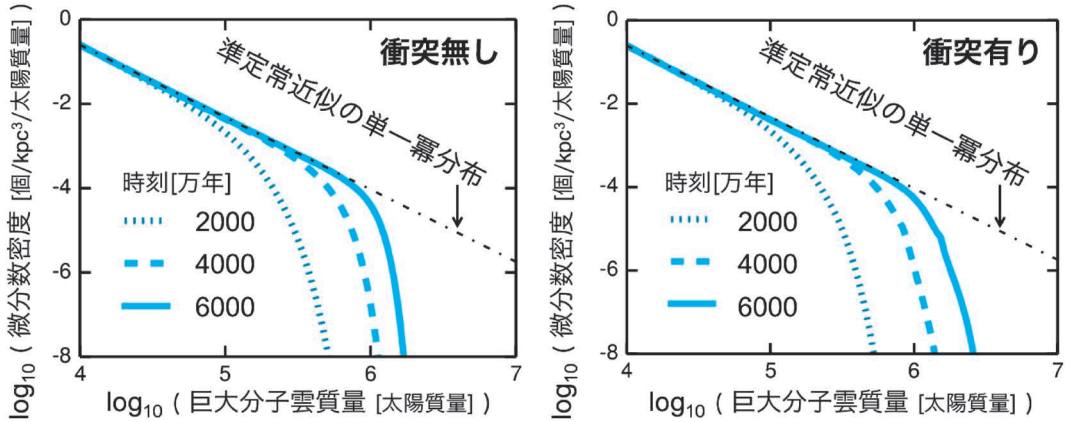


図3 左パネル: 衝突過程を無視した場合の分子雲質量関数の時間進化. 青の点線・鎖線・実線がそれぞれ2,000・4,000・6,000万年経過後に対応. 黒の一点鎖線は準定常近似下で期待される単一べき分布を示していて, 分子雲質量関数の低密度側はこれによく従う. 右パネル: 衝突過程も含めた場合の分子雲質量関数の時間進化. 大質量分子雲が衝突合体過程により形成されるが, 低質量側の単一べき分布は維持される.

比 ( $T_{\text{形成}}/T_{\text{消失}}$ ) で決まる単一べき分布 (微分密度が質量  $m$  のべき関数として, そのべきが  $-1 - (T_{\text{形成}}/T_{\text{消失}})$ ) となることがわかる. 銀河の中でも星形成率の高い領域は, 分子雲形成を促す超音速流現象 (大質量星起源の電離領域の膨張や超新星残骸の膨張) の発生確率も高いので, 形成時間スケールが短くなる傾向 (つまりべき分布が緩やかなべきになる) が期待される. 実際に銀河 M51 内の星形成率分布から概算される分子雲形成時間スケールの多様性が, 観測されている分子雲質量関数の多様性 (2.1節参照) とよく一致することがわかった. すなわち大規模な電波観測を推進し銀河の領域ごとに質量関数を得ることで, 銀河各所での分子雲形成時間スケールを見積もることができ, 例えば“分子雲形成はやはり速い過程ではなかった”といったことが (間接的に) 主張可能になる<sup>\*10</sup>. 観測で小質量側の完全性を担

保できるかなど課題はあるが, このような質量関数測定は今後 ALMA 望遠鏡での近傍銀河探索から期待される重要成果の一つと言える<sup>\*11</sup>.

衝突効果が大質量側にのみ顕著に現れるのは, 分子雲質量関数の成長に現れる実効的な質量成長率が, 衝突起源の場合は大質量分子雲ほど大きいことを反映している. 平易に換言すると, 大質量分子雲は自分より小質量の分子雲すべてから衝突されて徐々に質量が増えるため, もともと数が少ない大質量分子雲の形成 (すなわち分子雲質量関数の大質量エンドの成長) として直接的に現れるが, 小質量分子雲はもともと数が多いため, 大質量分子雲に衝突して間引かれても分子雲質量関数の形に顕著に現れるほど数が減らない, という意味である. ちなみに本結果は衝突誘起の大質量星形成は考慮していないにもかかわらず, 銀河 M51 で観測される分子雲質量関数をよく再現し

\*10 厳密には時間スケール比であるから, 原理的には個別の時間スケールは決定できない. 本節の説明はあくまで, 消失は星の進化で決まる過程であり形成に比べて銀河環境の依存性が弱い, という仮定に基づいている. 今後さらに精査したい.

\*11 ALMA 望遠鏡は空間分解能が高いが視野が狭いため, 銀河円盤面全体を掃くには長時間要する. 観測を短時間化するために, 一酸化炭素の高回転準位遷移を狙う観測提案もされていて, Cycle 5 から採用され始めた. また近傍ながらサイズの小さい銀河を狙うことで銀河円盤を掃く観測が実行され, 成果が出つつある<sup>50)</sup>.

ている。天の川銀河と比して水素分子ガスが多いことも知られているので、銀河M51では衝突起源の星からのフィードバックが何某かの理由で非効率である可能性や、あるいはより高空間分解な将来観測で大質量分子雲が複数の中質量分子雲に分解される可能性を示唆しているかもしれない。

#### 4.2 分子雲再生率：べき-再生率関係の解析解

もともと再生率はフリーパラメーターであるが、準定常仮定を課した段階で束縛条件が付加されたことになり実はフリーパラメーターではなくなっている。実際に準定常下では、再生率が質量関数のべきと1対1対応の関係にあることを解析的に証明できた。解析的に求まったべき-再生率関係を図4に示す。この右肩あがり傾向は、べきが緩やかな領域（例えば渦状腕領域）では表面積の大きな大質量分子雲が存在するため、破壊された星間ガスのうちこのような大質量分子雲に捕獲されずに生き残り小質量分子雲として生まれ変わる確率は低い、ということの意味している。

このべき-再生率関係を満たさない場合は、例えば分子雲の数が現実よりも大幅に超過して衝突過程だけで決定されるべき分布となって観測が再現できないか、逆に大幅に枯渇して観測される大質量分子雲を形成できない、といった状況に陥る。大規模な電波観測での質量関数べき分布測定は、時間スケール比だけでなく再生率も（間接的に）評価することにつながるのである。

#### 4.3 分子雲寿命：“積算年齢”と“消失寿命”

観測からは、分子雲の長寿命性（1億年以上）と短寿命性（数百万年程度）という二分的性質が頻繁に指摘されている。筆者らの計算に基づくこれらは矛盾しているわけではなく、あくまで分子雲進化過程の異なる側面に対応しているだけだと理解できるので、その理由を簡単に紹介する。

筆者らの定式化では形成および質量成長の典型

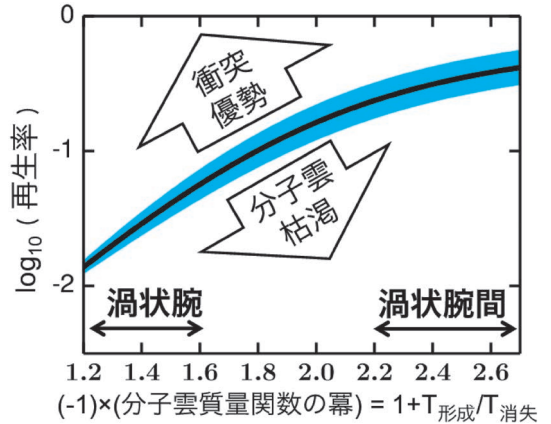


図4 分子雲質量関数のべきと再生率の関係。黒実線が定常状態を維持する関係、その周囲の青影領域は、1億年経過後も分子雲質量関数の形を変えずに維持可能な範囲。観測される渦状腕領域・渦状腕間領域の典型的なべきの範囲を横軸に両矢印で示してある。このべき-再生率関係から大幅逸脱した系での分子雲質量関数は、衝突のみで決まる衝突優勢領域か、分子雲の数が減少し続ける分子雲枯渇領域に入ってしまう、観測と非整合的になる。

的時間スケール ( $T_{形成}$ ) は質量依存しない<sup>\*12</sup>ため、分子雲はその最小質量から指数関数的に質量増加する。ただし第2項で与えられる典型的時間スケールで消失過程も常々経験しているため、大質量分子雲は消失しきらずに運良く質量成長を継続できた残滓なのである。現実には小質量星形成だけが継続し、母天体を全て破壊しきるような大質量星は運良く形成されなかった、という状況に相当している。質量成長の典型的時間スケールに標準モデルの1,000万年を採用すると、最小質量分子雲として生を受けてから大質量分子雲 ( $>10^6$  太陽質量) に至るまでは1億年程度要する。すなわち大質量分子雲の積算年齢は、1億年かそれ以上なのである。長寿命説の主張する1億年以上という数字はこの“積算年齢”に対応している。

\*12 すべての分子雲が観測で示唆される典型的な柱密度（おおむね  $10^{22}$  個  $\text{cm}^{-2}$ ）を保持していて、表面積が質量と線形に比例していると仮定したことに相当する。

他方で消失過程により数がネイピア数分の一に減少する典型的な時間スケールは、(母天体を破壊しきほどの大質量星が形成されるために別個1,000万年必要だとすると<sup>\*13)</sup> 1,000万年+400万年=1,400万年程度であると見積もられる<sup>\*14)</sup>。すなわち消失過程で絶滅してしまう分子雲の典型的な寿命は、1,400万年程度であるとわかる。短寿命説の主張する数百万年から3,000万年程度までという数字は、この“消失寿命”に対応している。

実際に各主張が拠り所としている論理や観測結果は、「質量降着や渦状腕間領域の通過には時間がかかる」・「重力崩壊して星形成を活発にしていると見受けられる巨大分子雲は極めて少ない」(長寿命説<sup>14), 54)</sup> や「渦状腕から渦状腕までの分子雲の数密度の減少が寿命の上限値を決める」(短寿命説<sup>55)</sup>) といったものになっている。

ここで興味深いのは、積算年齢の長い大質量分子雲はこれまでの来歴として(大質量星はほとんど形成できなかったが)星形成を継続していた可能性があることだ。このような大質量分子雲に星団が付随している場合、その星団の年齢は1億年程度になりえるし、かつ一番最近の星形成活動の星が多く観測される可能性があり、観測で示唆される星団の加速的星形成活動<sup>56)</sup> という奇妙な性質は事実であるかもしれない<sup>\*15)</sup>。

#### 4.4 星形成の担い手：衝突誘起の星形成は銀河の星形成に重要か？

ここまでの計算では簡単のために衝突過程は全体過程として取り扱った。しかし4.2節で前述のとおり、衝突誘起と考えられる大質量星形成現場が観測から頻繁に提示されるようになっている。

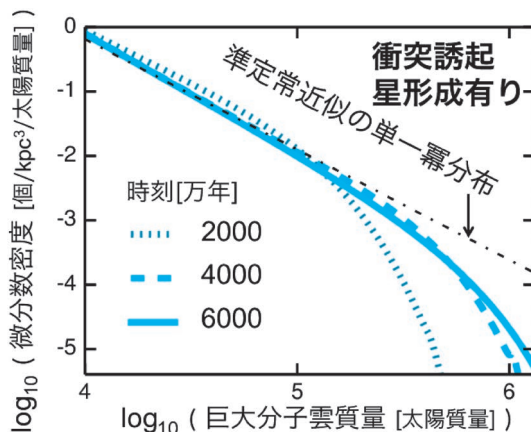


図5 図3と同様、ただし衝突誘起の星形成およびそのフィードバックを考慮した場合の分子雲質量関数の時間進化。大質量分子雲は度重なる衝突で生まれる大質量星によって破壊されやすくなるが、小質量分子雲の単一べき分布はほぼ不変。

そこで本節では、衝突による誘発的大質量星形成を定式化し、この過程が銀河全体の星形成にどの程度寄与するか議論する。

筆者らはこれまでの方程式系を踏襲しつつ、分子雲を2種族に分けることにした。一つは従来(ノーマル種族)の時間発展方程式に従う種族(ノーマル種族)、もう一つは衝突を経験した際に誘発的大質量星形成を100万年という短期間で起こし、母天体を500万年以内に破壊する種族(衝突種族)である。一度衝突種族に分類された分子雲は、衝突起源大質量星からのフィードバックに常に曝されると過程し、ノーマル種族へは二度と帰属できないこととした。計算初期にはすべてノーマル種族であるが、時間発展に従い衝突種族も生まれる。

<sup>\*13)</sup> この数字は、分子雲内部で大質量星の素となるフィラメント状構造を形成する際にも多数回の衝撃波圧縮が必要で、これも(分子雲質量成長過程と同じ機構なので)1,000万年程度の時間スケールが必要である、という仮定からくる。

<sup>\*14)</sup> 本稿では詳細は割愛させていただくが、筆者らの定式化では星形成効率(母天体分子雲の質量のうち星に至る質量の割合)が1パーセントという仮定を暗に含む。したがって典型的な星間ガス消費時間は1,400万年/1パーセント=14億年であり、これは観測で知られるKennicutt-Schmidt則で期待される10億年程度のガス消費時間と整合的な定式化である。

<sup>\*15)</sup> ただしここでは分子雲の力学的な状態を問うていない。そのような大質量星形成に至らず小質量星のみ形成し続ける機構の理論確立も、今後の研究課題である。



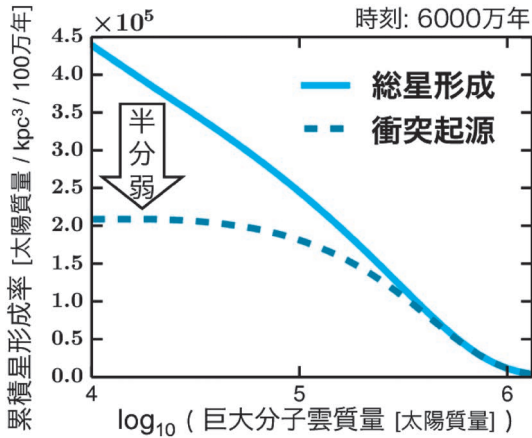


図6 ある質量よりも重たい分子雲から形成されている星の累積質量（累積星形成率）。横軸の最小目盛り（最小質量）での縦軸の値が、系全体での星形成率に対応。全過程を考慮した総星形成率に対して、衝突起源の内訳が数十パーセントである。

図5は新しい定式化に従った分子雲質量関数の時間発展（ただし時間パラメーターや再生率は標準モデルと同値に設定して銀河の平均的な状況を想定）である。これまで大質量側に伸びていた関数が、衝突誘起の大質量星からのフィードバックにより数が減じて、天の川銀河で観測される質量関数により近づいた。ここでポイントなのは、それでもなお低質量側の単一べき分布はおおむね保持されており、先ほどまでの準定常近似の時間スケール比とべきの関係は有効な議論だということである。

図6はある質量より大質量な分子雲から形成されている星の総和を勘定した、累積の星形成率である。定義により、最小質量（1万太陽質量）目盛りでの縦軸値が系の全星形成率に対応している。天の川銀河サイズの円盤（10キロパーセク×10キロパーセク×100パーセク）を仮定すると

図6の縦軸はちょうど数太陽質量/年に対応しており、天の川銀河や近傍渦巻き銀河の典型的な星形成率と整合的である。図6には系全体の累積星形成率に加えて、内訳として衝突起源の累積星形成率も図示した。この結果から、衝突起源の星形成は主に10<sup>5</sup>太陽質量以上の大質量分子雲に起源があるとわかる。詳細な説明は割愛させていただくが、この起源の端的な理由は大質量で表面積が大きい分子雲は衝突を数多く経験できかつ星形成に使用可能なガスが潤沢だからである。

さらに図6からは、衝突起源の星形成が銀河円盤全体の星形成の数十パーセント程度を担うことがわかる。解釈にあたり注意が必要なのは、この数字は上限値であろうという点である。筆者らの計算では星形成効率が1パーセントという仮定（脚注14参照）を、衝突している分子雲ペアのうち大質量分子雲に適用している。したがって質量比が大きいペア（例えば10<sup>6</sup>太陽質量と10<sup>4</sup>太陽質量）の衝突では、小質量分子雲のガスの大半が星へ転換されている。また衝突率の見積もりでは、外縁部が接触するだけでも衝突合体および衝突に誘発された星形成が開始されるとしている。こうした（それぞれは僅かながらも）過大評価要素が複数組み合わせるため、算出した衝突起源の星形成率は上限値と考えられる<sup>\*16</sup>。したがって衝突起源の星形成は観測できる程度に必ず存在するが、銀河円盤の主たる星形成過程ではないだろうというのが現状の見解である。

ただしこの結果を追検証するためにも、衝突候補天体を電波と光赤外で詳細に観測することが今後さらに重要になる。そこで最後に、筆者らの計算結果を元に、今後観測で同定されうる衝突候補天体の数を衝突分子雲の質量ペアの関数として見積もることにした。本算出ではなるべく楽観的な

\*16 ただし筆者らの仮定している分子雲柱密度が最新の観測値と比して数倍高いことや、本研究で無視している重力による衝突断面積の実効的拡大（gravitational focusing effect）が10<sup>6</sup>太陽質量以上の分子雲で効きうること、また分子雲内部でフィラメント構造同士の衝突による星形成の高効率化の可能性など勘案すると、筆者らの計算結果は必ずしも上限値とは限らない。こうした補正効果の詳細な議論は、筆者らの論文Kobayashi et al.<sup>2),3)</sup>を参照されたい。

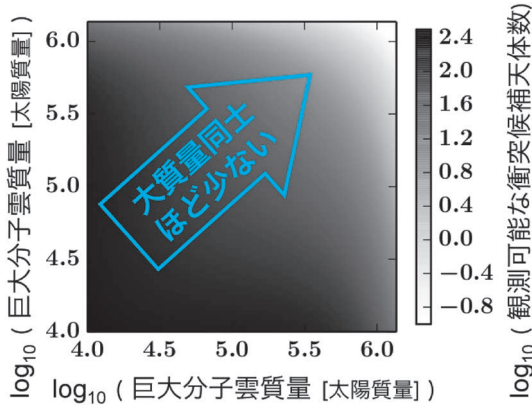


図7 衝突ペアの質量の関数として、観測可能な衝突候補天体数を10底対数で色づけした。数の少ない大質量分子雲同士の衝突は極めて限られる。

態度を取ることにして、天の川銀河程度の大きさの銀河円盤中が見通せる観測を実施し、しかも衝突した痕跡が一酸化炭素分子輝線の積分強度図上に衝突後100万年は継続して残留するという設定を課した。図7がその結果である。存在数の多い小質量分子雲同士の衝突イベントが圧倒的多数であることは直感的にも理解しやすく、実際に現段階で観測されている衝突候補天体の大半が1万太陽質量（ないしそれ以下）であることと整合的である。今後観測を継続していけば、1万太陽質量同士の衝突であれば天の川銀河内だけでも300イベントほど同定できる可能性がある。他方で大質量同士の衝突イベント数は少なく、 $10^{5.5}$ 太陽質量同士の衝突に至っては10イベント程度に限られそうである。したがって今後の観測戦略としては、100イベント程度の同定が期待できる質量比のついた衝突候補（例えば $10^4$ 太陽質量と $10^5$ 太陽質量）を見つけ詳細に調査し、衝突誘起星形成効率の分子雲質量や柱密度依存性を評価するのが良いと考えられる。

## 5. まとめ・将来展望

本稿では、分子雲の形成・質量成長・消失・衝突（合体と誘発的星形成）・再生過程を取り入れた巨大分子雲質量関数の半解析的時間発展方程式の定式化、およびその時間積分から得られた結果を紹介した。主要結果は以下4点である；1) 分子雲質量関数の低質量側べき分布は分子雲形成過程と消失過程の時間スケール比で決定されており、観測のべき分布測定は銀河領域ごとの分子雲形成時間スケールの評価につながるうる、2) 準定常近似下では、べき分布測定は分子雲の再生率評価にも対応している、3) 分子雲の長寿命説は分子雲の積分年齢を、短寿命説は分子雲の消失寿命を観測・議論していると考えられる、4) 分子雲衝突誘起の星形成は銀河円盤の星形成の数十パーセント程度まで担いうるが、さらに観測を推進し質量比のついたペアを同定・星形成効率の測定を実行することが重要となる。

本研究では、星形成の素過程と銀河内部の分子雲質量関数の多様性を関係づけるスタートラインに到達したばかりで、改善点が数多ある。例えばここまでで紹介した結果は環境固定（すなわちパラメーター自体は時間進化しない）であったので、分子雲集団の渦状腕から渦状腕間領域への遷移といった時間進化を厳密に再現するには、環境変化をパラメーターに反映させる必要がある。また時間スケールパラメーターは種々の形成過程や消失過程のアンサンブル平均であるため、ここで取り扱った過程以外にも、銀河渦状腕衝撃波による分子雲形成の促進や近傍の超新星爆発による分子雲消失効果も考慮が必要になる。さらに本計算では、背景場の星間ガスは枯渇しないことを暗に仮定しているが、実際には星間ガスが減ったことによる分子雲形成の抑制や近傍からの星間ガスの流入など考えられる。あるいは本方程式系をより低質量側まで展開した際に、分子雲中の分子雲コアの数勘定をいかに整合的に組み込むかも要検討であ

る<sup>\*17</sup>。ALMA望遠鏡の稼働により、(天の川銀河の)銀河中心の詳細な観測が実行されており<sup>57)</sup>、分子雲数密度の多い銀河中心での衝突効果の重要性も評価する必要がある。

次世代観測機器 (SKA, ngVLA, PFS など) により分子ガス-星形成関係の研究は、銀河種族・赤方偏移・金属量など多様なパラメータ空間へさらに進展し、統計的な議論が今以上に充実する。したがって本研究も現状の近傍渦巻き銀河研究に安寧せずに、分子ガス量が少ない楕円銀河や低金属環境の高赤方偏移銀河への発展が必須である<sup>\*18</sup>し、Kennicutt-Schmidt則の銀河環境依存性検証やダスト進化モデルとの融合も期待される。

### 謝 辞

本稿の内容は、筆者が2018年3月まで大学院生として在籍した名古屋大学大学院理学研究科にて行い、2本の査読論文<sup>2),3)</sup> および博士論文にまとめた研究<sup>61)</sup>の概要である。この研究成果は、ひとえに日本学術振興会特別研究員制度による支援によって実現したものであり、筆者は当該事業に深謝しております。本研究を通して保守的な筆者を前向きに教育して下さった犬塚修一郎先生、優柔不断な筆者にベストな研究環境・研究指針を選択し恒常的に与えて下さった杉山直先生に拝謝いたします。共著者として多角的かつ仔細にわたり議論くださった福井康雄先生、小林浩先生、長谷川賢二先生、また本研究の今後の発展方向性を議論して下さった井上剛志先生にも感謝しております。また名古屋大学の宇宙系研究室(計6研究室)に所属されていた皆様、および筆者がセミナー行脚してお世話になった国内外の研究機関の諸先生方から、日夜助言をいただいたことにたいへん感謝しております。最後に、本稿の

執筆機会を与えて下さった岡部信広先生、編集担当委員として添削くださった富田賢吾先生に御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) Williams, J.P., et al., 2000, in *Protostars and Planets IV*, ed. V. Mannings, A. P. Boss, & S. S. Russell (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 97
- 2) Kobayashi, M.I.N., et al., 2017, *ApJ*, 836, 175
- 3) Kobayashi, M.I.N., et al., 2018, *PASJ*, 70, 59
- 4) André, P., et al., 2010, *A&A*, 518, L102
- 5) Könyves, V., et al., 2010, *A&A*, 518, L106
- 6) Inutsuka, S., 2001, *ApJ*, 559, L149
- 7) Roy, A., et al., 2015, *A&A*, 584, A111
- 8) de Lapparent, V., et al., 1986, *ApJ*, 302, L1
- 9) Wilson, R.W., et al., 1970, *ApJ*, 161, L43
- 10) Dame, T.M., et al., 1987, *ApJ*, 322, 706
- 11) Fukui, Y., et al., 1999, *PASJ*, 51, 745
- 12) Rigby, A., et al., 2016, *MNRAS*, 456, 2885
- 13) Rice, T.S., et al., 2016, *ApJ*, 822, 52
- 14) Koda, J., et al., 2009, *ApJ*, 700, L132
- 15) Colombo, D., et al., 2014, *ApJ*, 784, 3
- 16) Field, G.B., et al., 1969, *ApJ*, 155, L149
- 17) Wolfire, M.G., et al., 1995, *ApJ*, 443, 152
- 18) Wolfire, M.G., et al., 2003, *ApJ*, 587, 278
- 19) Koyama, H., & Inutsuka, S., 2000, *ApJ*, 532, 980
- 20) Koyama, H., & Inutsuka, S., 2002, *ApJ*, 564, L97
- 21) Field, G.B., 1965, *ApJ*, 142, 531
- 22) Inoue, T., & Inutsuka, S., 2008, *ApJ*, 687, 303
- 23) Körtgen, B., & Banerjee, R., 2015, *MNRAS*, 451, 3340
- 24) Valdivia, V., et al., 2016, *A&A*, 587, A76
- 25) Inoue, T., & Inutsuka, S., 2009, *ApJ*, 704, 161
- 26) McKee, C.F., & Ostriker, J.P., 1977, *ApJ*, 218, 148
- 27) Furukawa, N., et al., 2009, *ApJ*, 696, L115
- 28) Ohama, A., et al., 2010, *ApJ*, 709, 975
- 29) Fukui, Y., et al., 2014, *ApJ*, 780, 36
- 30) Fukui, Y., et al., 2016, *ApJ*, 820, 26
- 31) Kudryavtseva, N., et al., 2012, *ApJ*, 750, L44
- 32) Fukui, Y., et al., 2017, *PASJ*, 69, L5
- 33) Gilden, D.L., 1984, *ApJ*, 279, 335
- 34) Nagasawa, M., & Miyama, S.M., 1987, *PThPh*, 78, 1250
- 35) Habe, A., & Ohta, K., 1992, *PASJ*, 44, 203
- 36) Wu, B., et al., 2017, *ApJ*, 841, 88
- 37) Inoue, T., et al., 2018, *PASJ*, 70, 53
- 38) Inutsuka, S., et al., 2015, *A&A*, 580, A49
- 39) Kendrew, S., et al., 2016, *ApJ*, 825, 142
- 40) Stark, A. A., & Brand, J., 1989, *ApJ*, 339, 763

<sup>\*17</sup> 暗黒物質ハローのcloud-in-cloud問題と類似しているが、分子雲の集団は自己重力系とは限らないことに注意が必要。

<sup>\*18</sup> 実は楕円銀河における分子雲質量関数測定という興味深い先行研究がすでに存在する<sup>58)</sup>。ALMA望遠鏡による高赤方偏移銀河の分子雲質量関数測定も日本発で行われた<sup>59)</sup>。さらに低金属環境での分子雲形成を模擬したシミュレーション研究も始まりつつある<sup>60)</sup>。

- 41) Stark, A. A., & Lee, Y., 2005, ApJ, 619, L159
- 42) Palmeirim, P., et al., 2017, A&A, 605, A35
- 43) Hosokawa, T., & Inutsuka, S., 2006, ApJ, 646, 240
- 44) Smoluchowski, M. V., 1916, Zeitschrift fur Physik, 17, 557
- 45) Trubnikov, B. A., 1971, Soviet Physics Doklady, 16, 124 earth and planets.
- 46) Kwan, J., 1979, ApJ, 229, 567
- 47) Cowie, L. L., 1980, ApJ, 236, 868
- 48) Levinson, F. H., & Roberts Jr., W. W., 1981, ApJ, 245, 465
- 49) Tomisaka, K., 1984, PASJ, 36, 457
- 50) Faesi, C.M., et al., 2018, ApJ, 857, 19
- 51) Tachihara, K., et al., 2000, ApJ, 528, 817
- 52) Harvey, P. M., et al., 2013, ApJ, 764, 133
- 53) Schneider, N., et al., 2016, A&A, 587, A74
- 54) Barnes, P. J., et al., 2011, ApJS, 196, 12
- 55) Meidt, S. E., et al., 2015, ApJ, 806, 72
- 56) Palla, F., & Stahler, S. W., 2000, ApJ, 540, 255
- 57) Tsuboi, M., et al., 2015, PASJ, 67, 90
- 58) Utomo, D., et al., 2015, ApJ, 803, 16
- 59) Tosaki, T., et al., 2017, PASJ, 69, 18
- 60) Inoue, T., & Omukai, K., 2015, ApJ, 805, 73
- 61) 小林将人, 2018, 博士論文 (名古屋大学)

## Evolution of Giant Molecular Cloud Mass Functions and Star Formation across a Galactic Disk

Masato I. N. KOBAYASHI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Department of Earth and Space Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka 560-0042, Japan*

<sup>2</sup> *Graduate School of Science, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya, 464-8602, Japan*

Abstract: Evolution of giant molecular clouds is central to understanding star formation and galaxy evolution. Parameter surveys to describe cloud statistical properties in various galactic environments require some models that consistently include various processes involved in cloud evolution. We formulate a series of time evolution equations for giant molecular cloud mass functions and suggest that ongoing and future large millimeter/sub-millimeter surveys may reveal single power-law slopes in the low-mass regime of mass functions, which are characterized by the cloud formation and dispersal timescales. Our results also indicate that collision may amount to about 40 percent of the total star formation in the Milky Way and nearby galaxies.