

土星系中型質量衛星における多様性の起源： SPH 流体コードを用いた巨大衝突のシミュレーション

○藤田 航¹、玄田 英典¹、関根 康人²、杉田 精司²

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

土星の中型質量衛星とは、Titan（半径約 2500km）より一回り小さい、半径約 100-1500km の衛星群を指す。特に Titan より内側のものに注目すると、それらは密度や活動度などの点で多様性に富んでいることが知られている。例えば、Tethys は岩石質量分率が約 6% と非常に低く純粋な氷に近い天体であるが、その両隣の Enceladus と Dione はそれぞれ約 57%、約 50% であり、太陽系元素存在度から予想される岩石質量分率（約 30%）より顕著に高く、これら衛星には活発な表面活動が現在もしくは過去に起きていたこともカッシーニ探査機の観測から明らかになっている。一方、Mimas と Rhea はそれぞれ約 26%、約 33% となっており、軌道や衛星サイズに無関係に密度にばらつきが見られる。これらの衛星は規則衛星であり、土星形成時に出来る原始土星系円盤内での氷微惑星の衝突・合体で形成したと考えられるが、元々同じような組成をもつ氷微惑星の集積によりこのような多様性が生じる理由は、従来の最小質量円盤モデルでは説明することが出来ず長年の謎であった。

近年、Sekine & Genda (2011) は、原始太陽系星雲からの物質のインフローを考慮した原始ガス惑星円盤モデル (gas-starved モデル) (Canup & Ward, 2006) に立脚し、衛星系形成の最終段階において起こりうる氷衛星同士の衝突によって、この多様性を説明しようと試みた。gas-starved モデルによると、原始土星系円盤では衛星は Titan 程度の大きさまでは成長できるが、それ以上大きくなると円盤ガスのガス抵抗により土星に落下してしまう。Sekine & Genda (2011) は、落下途中の Titan サイズの氷衛星が、内側軌道を公転する形成途中の衛星 (Titan の 1/20 の質量) と巨大衝突すると考えた。そして、SPH 流体コードを用いた数パターンの衛星同士の巨大衝突シミュレーションを行い、月一地球系形成時の巨大衝突における過去の研究で提唱されていた、衝突衛星同士の合体衝突 (merging impact)、衝突後合体せずに 2 つの衛星が残る衝突 (hit-and-run impact) の他に、ある衝突条件下において "clump" と呼ばれる中型質量衛星と同程度の質量を持つ粒子の塊が複数形成される衝突 (clump-forming impact) が起きることを発見した。全 20 ランの数値計算の結果、これらの clump は岩石質量分率が 0-92% と幅広く分布しており、Sekine & Genda (2011) はこのような巨大衝突が中型質量衛星の形成につながった可能性があるとの仮説を提唱した。しかしながら、彼らの計算は限られた衝突条件でしか行われておらず、上記のような仮説が確率的にどのくらい妥当であるかを系統的に調べられてはいない。

そこで本研究では、巨大衝突によって土星の中型質量衛星における密度のばらつきを説明するため、衝突速度・衝突角度といった衝突パラメータを変化させ、clump が形成されるような衝突がどのくらい起こりうるかを系統的に調べた。SPH 流体コードを用い、衝突速度 v を $1 < v/v_{\text{esc}} < 3$ (v_{esc} は Titan の脱出速度)、衝突角度 θ を $0^\circ < \theta < 90^\circ$ (0° が垂直衝突) の間で変化させた衝突シミュレーションを約 80 ラン行った結果、clump-forming impact が起きるパラメータ領域はほぼ $30^\circ < \theta < 60^\circ$ の間にあり、 $v/v_{\text{esc}} < 1.3$ では clump は形成されず、merging もしくは hit-and-run impact

になることがわかった (図1)。さらに、本研究によって得られた各衝突が起きるパラメータ領域と、衛星同士が衝突する際の衝突角度の確率分布から、巨大衝突の際に約40%の確率で clump-forming impact が起こりうるということ、また衝突後にインパクターがターゲットに全て取り込まれないような clump-forming impact や hit-and-run impact は約70%の確率で起こることが明らかになった。これは、Titan サイズの巨大衛星の落下の際、内側の形成途中の衛星は必ずしも衝突で失われてしまうわけではなく、高い確率で巨大衝突を生き残ることを示唆している。形成された全 clump の質量と岩石質量分率と実際の土星系中型衛星のそれらを比較したところ、Enceladus、Dione、Tethys といった、太陽系元素存在度から予想される岩石質量分率から顕著に外れた衛星の観測結果も説明する多様性を持つ中型衛星が形成するという結果が得られた (図2)。これらの系統的な妥当性の検証の結果、巨大衝突による土星系中型衛星の形成は十分に起こりうるという結論を得た。

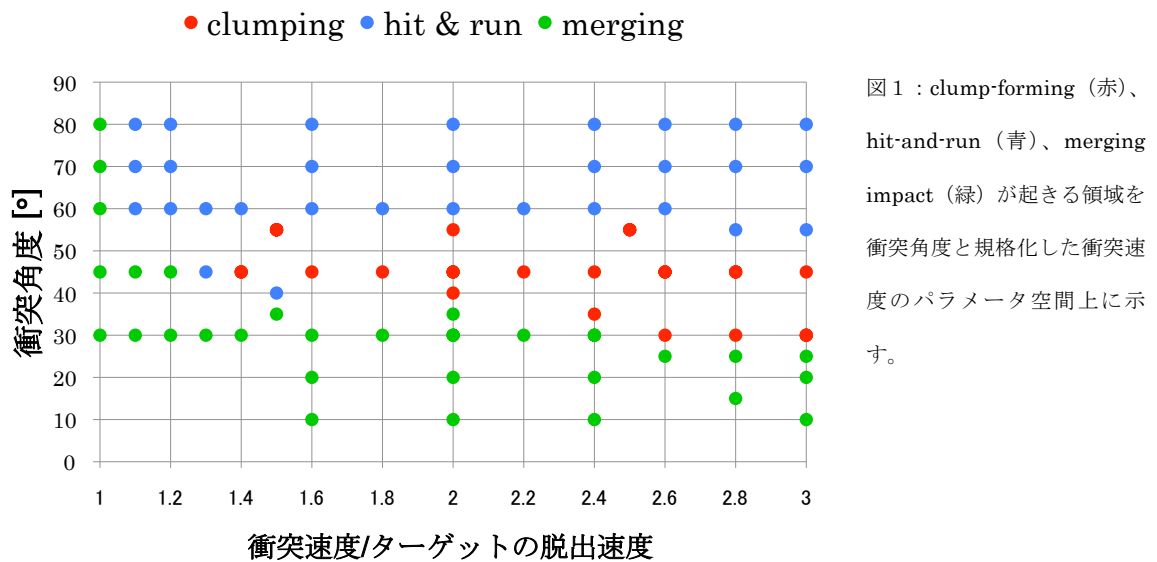


図1 : clump-forming (赤)、hit-and-run (青)、merging impact (緑) が起きる領域を衝突角度と規格化した衝突速度のパラメータ空間上に示す。

図2 : 本研究と Sekine & Genda (2011) で形成された全 clump の岩石質量分率と衛星質量の関係。青と緑は、それぞれ Sekine & Genda (2011) と本研究の結果を示す。赤は実際の中型質量衛星を表す。

