

石鉄隕石メソシデライトの形成シナリオ解明に向けたベスタ様小惑星への巨大衝突の数値計算

○杉浦圭祐¹, 羽場麻希子², 玄田英典¹

¹東京工業大学 地球生命研究所

²東京工業大学 地球惑星科学系

メソシデライトは石鉄隕石の一種で、ケイ酸塩と鉄-ニッケル合金を同量程度含んでいる。メソシデライトのケイ酸塩部分は玄武岩または斑レイ岩質のクラストを含んでおり、分化した小惑星の地殻由来であると考えられている (e.g., Mittlefehldt et al. 1979)。またメソシデライトの鉄-ニッケル合金の親鉄性元素組成はコンドライト的かつ一様であるため、分化した小惑星のコア由来であると考えられている (e.g., Hassanzadeh et al. 1990)。一方でマンツルの主成分であるカンラン石はメソシデライトにはほとんど含まれていない (e.g., Prinz et al. 1980)。メソシデライトの金属部分の縁に集中的にリン酸塩鉱物が存在しているため、混合時には金属成分は溶融していた可能性が高い (e.g., Haba et al. 2019)。さらに、メソシデライト金属の冷却速度及びシリケート成分の Ar-Ar 年代から、メソシデライトは形成後に数 100 km サイズの小惑星のある程度深くに埋め込まれてゆっくりと冷却したことが予想されている (e.g., Haack et al. 1996)。以上からメソシデライトは、分化小惑星の溶融状態にあるコアが巨大衝突で掘削され、直後に数 100 km サイズの小惑星の表面付近の地殻と混合することで形成したと考えられる。

メソシデライトを形成した石鉄混合時 (45.25 億年前) にコアが溶融状態にあったことから、メソシデライトの金属部分の母天体は直径 500 km 程度の小惑星だと考えられている (e.g., Haba et al. 2019)。さらにメソシデライトのケイ酸塩部分の酸素-クロム同位体組成が HED 隕石と完全に一致すること (e.g., Greenwood et al. 2006) と、HED 隕石の赤外分光スペクトルが小惑星ベスタと似ていること (e.g., McCord et al. 1970) から、メソシデライトのケイ酸塩部分の母天体はベスタである可能性が高い。メソシデライトの金属部分とケイ酸塩部分と同じ母天体起源である必要はなく、異なる分化した母天体のコアから供給されても良いが (e.g., Wasson et al. 1985)、メソシデライト形成時の約 45 億年前の小惑星帯の相対速度 ~ 5 km/s は 500 km サイズの小惑星の脱出速度 ~ 300 m/s よりも十分に速いため、衝突破壊及び集積によって金属コアを別母天体から供給することは難しいと思われる。

巨大衝突による母天体のコアの掘削・集積過程は Scott et al. (2001) が低解像度シミュレーションで大雑把に調べているものの、集積後の物質の分布を詳しく調べることで金属コアと地殻を主成分とする隕石の形成が可能かどうか調べた研究は存在しない。そこで本研究では Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いた数値シミュレーションでベスタ様小惑星への巨大衝突を再現し、衝突後の小惑星の物質分布を詳しく調べる。ターゲット天体の半径はベスタ同様の 270 km とし、内部構造はベスタのマグマオーシャンモデル (Mandler&Elkins-Tanton 2013) に基づいてコア半径 110 km, マンツル厚さ 120 km, 地殻厚さ 40km とした。インパクト質量はターゲット天体の 0.1 倍とし、衝突角度を 10° から 50° 、衝突速度を 2 km/s から 5 km/s の間で変化させて様々な衝突計算を実行した。

その結果、衝突後の天体質量が元の質量の 0.5 倍になる程度の破壊的な衝突で金属コアを掘削し、表面地殻と混合できることがわかった。より非破壊的な衝突ではコアが掘削できず、より破壊的な衝突では地殻が優先的に失われるので天体上で地殻とコアの混合を実現することがより難しくなることもわかった。図 1 は衝突角度 30° 、衝突速度 3.25 km/s の計算のスナップショットを表しているが、衝突によって変形したコアの一部が放出され (b, c)、その後薄くなった地殻の上に堆積していることが分かる (c, d)。図 2 は衝突で形成された天体の表面から 20 km にある物質の割合の分布を表している。平均的には表面の 50%程度でマンツルが露出してしまっているものの、

経度 60° , 緯度 60° のように 85%程度が地殻を占めているが少量のコア物質も堆積している部分も形成された. メソシデライトはこのようなサイトで形成可能である.

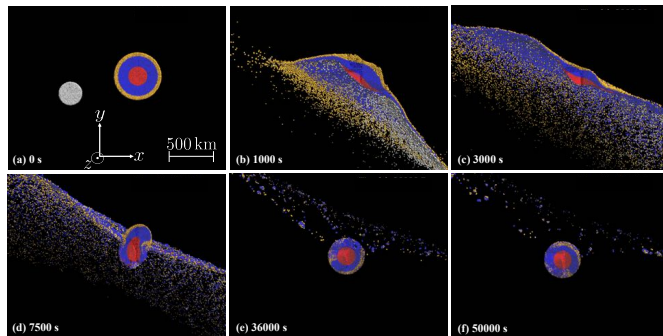


図 1: 衝突角度 30° , 衝突速度 3.25 km/s の衝突計算のスナップショット

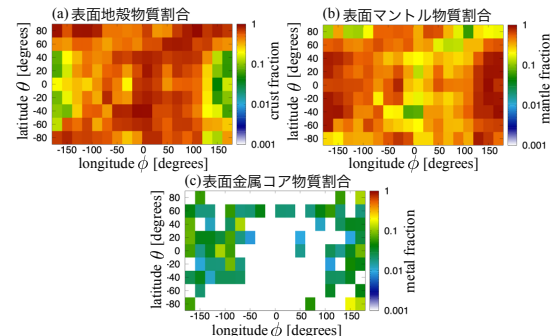


図 2: 図 1 の衝突で形成された天体の表面から 20 km にある物質の, (a)地殻, (b)マントル, (c)コアの割合. 横軸は経度, 縦軸は緯度, 色は割合を表す. 図 1 の x 方向が経度 0° , z 方向が緯度 90° に対応する.

上記のモデルではメソシデライト母天体の表面の半分程度でマントル物質が露出してしまうため, マントル物質を多量に含む物質も表面に大量に形成されてしまう. 一方でメソシデライトと同じ母天体起源の隕石でマントル物質を多量に含むものはほとんど見つからない (e.g., Prinz et al. 1980). また, もしメソシデライトの母天体がベスタであった場合, Dawn 探査機によるその場観測ではベスタの表面にはマントル物質がほとんど検出されなかったため (Ammannito et al. 2013), この観測事実を説明することにも不利となる. この矛盾の原因として, メソシデライトの母天体の内部構造が本研究で採用しているモデルとは大きく異なることが可能性として考えられる. 後期の火山活動によって地殻が 80 km 程度にまで厚くなる可能性が指摘されている (Yamaguchi et al. 2011). また金属コアの組成によっては 140 km もの大きさのコアが形成される可能性もある (Ermakov et al. 2014). ターゲット天体の内部構造を半径 140 km の金属コアと厚さ 80 km の地殻に変更して衝突計算を行ったところ, 衝突後の天体質量が元の 0.7 倍になる程度の比較的非破壊的な衝突で金属コアを表面に輸送することができ, 表面の 75% 程度の部分で地殻を残すことができた (図 3). このような内部構造を持った母天体は, 巨大衝突によってメソシデライトを形成しつつ上記の矛盾を解決するために有利かもしれない.

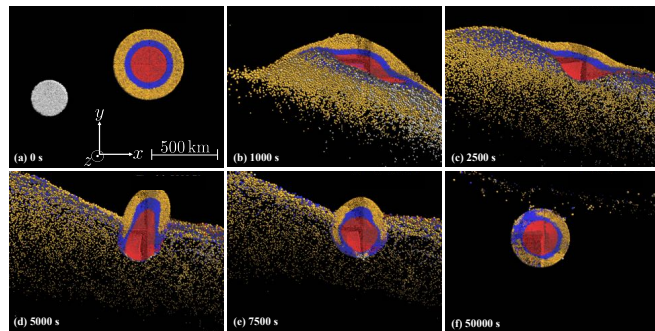


図 3: 金属コア半径を 140 km , 地殻厚さを 80 km にした天体に, 衝突角度 40° , 衝突速度 4 km/s でインパクタを衝突させた計算のスナップショット.