

天体衝突による炭素質小惑星内部の大規模損傷

黒澤耕介^{1,2}, 松本侑士^{3,4}, 松本徹⁵,

¹ 神戸大学 大学院人間発達環境学研究科, ² 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ³ 神戸大学 大学院理学研究科, ⁴ 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト(CfCA), ⁵ 京都大学 白眉センター

はじめに: 炭素質小惑星リュウグウから持ち帰られた岩石には天体衝突による強い変成はほとんどみられなかったものの、内部では至るところにヒビ割れが確認された。検出可能な衝撃変成を残すには~5 GPa 以上の衝撃圧力がかかる必要があるが、リュウグウの石を割るだけなら~10 MPa 程度の曲げ応力で十分である。そこで我々はリュウグウ母天体の内部が天体衝突によって大規模損傷を起こしていたとすれば、どの程度の大きさの衝突天体によるものかを検討することにした。ここで

「大規模損傷」は直径 100 km のリュウグウ母天体の中心(つまり衝突点から 50 km の距離)まで~10 MPa の最大圧力がかかった場合に起こるとし、そのような条件を探ることにした。

ここで問題となるのは空隙を含む媒体中では衝撃圧力の減衰率が大幅に大きくなることが知られていることである。今回は無限小空隙の圧密を扱える ε - α porosity compaction model が実装されている iSALE shock physics code を用いて数値衝突計算を実施した。

計算設定と解析: 今回は 2 次元円筒座標系を採用し、地面に対する垂直衝突のみを計算した。衝突速度は小惑星帯の平均衝突速度に近い 5 km s⁻¹で固定した。空間解像度は 20 cells per projectile radius (CPPR)とした。この値は最大衝撃圧力分布を調べるために最小限必要とされる推奨値である。衝突天体、標的天体に ANEOS serpentine を適用した。標的天体のみ初期空隙率を 0-50% の範囲で変化させた。衝突直下点での発生圧力は初期空隙率に応じて変化し、今回の条件では 25-45 GPa である。空隙初期温度は Vesta 軌道での放射平衡温度である 220 K で固定した。今回は標的の曲率、物質強度の効果を無視し、球が半無限平面に衝突する状況を完全流体として計算した。計算格子には Lagrangian 追跡粒子を挿入し、計算

中に経験した最大圧力を記録した。

炭素質小惑星物質に対応する ε - α model の入力パラメータは制約されていない。 ε - α model は体積歪 ε の値に応じて指数関数的圧密領域からべき乗関数的圧密領域に遷移するモデルであるが、今回は極端な例として指数関数的圧密のみ、べき乗関数的圧密のみの 2 種類を計算し、パラメータへの依存度を調べることにした。

衝突点から見下ろして 15±3 度の位置にある追跡粒子を抜き出して最大圧力を書き出し、10 MPa に対応する衝突点からの距離を求めた。

計算結果: 今回の計算はサイズに依存する物質モデルが含まれないので計算結果は格子の大きさに依存しない。以下では衝突天体の半径で規格化した距離について議論する。追跡粒子を配置する角度によって結果が大きくは変わらないことを確認したため、本稿では 45 度の位置に配置した追跡粒子の結果のみを述べる。

空隙を挿入すると、最大圧力の減衰率が上昇し、衝突点から遠方では距離の-2.6 乗で減衰することがわかった。また初期空隙率を 10-50% の範囲で変化させても、指数関数的圧密、べき乗関数的圧密の違いによても最終的な結果はあまり変化せず、衝突天体直径の~10 倍の距離まで~10 MPa の圧力がかかることがわかった。

一方で数%の空隙を挿入した場合でも空隙なしの場合から結果が大きく変化することから、モデルの入力パラメータの精査が必要であることが示唆された。

議論とまとめ: 上記の結果から直径 100 km の天体の内部に大規模損傷を与えるには直径 5 km 程度の衝突天体が 5 km s⁻¹で衝突する必要があることがわかった。この大きさの天体では破滅的破壊(Catastrophic disruption)

を起こすには至らない。今回は垂直衝突のみを考えているが、斜め衝突の場合にはより大きな天体が必要になる。

続いてこのような天体衝突が起きた場合にどの程度の大きさの衝突孔が形成されるかを検討した。重力支配領域で空隙を様々に変化させて π -group scaling 則のパラメータを網羅的に調べた研究を参考にして見積もったところ、最終孔直径は~70 km と見積もられた。直径 100 km の天体を想定しているため、実際には孔が開くというようなものではなく、天体の 3 軸比が変化するような大規模な変形が起きることになるだろう。

最後にこのような衝突事件がリュウグウ母天体上で起きる頻度を検討した。Vesta の衝突孔年代学モデルをもとに、衝突流束は Vesta と同様と仮定して表面積比の効果を補正した。直径 70 km の衝突孔をつくるような衝突事件の回数は、40 億年前まで遡らないと統計的には 1 を超えないことがわかった。リュウグウの岩石に多くみられるヒビは天体重爆撃の時代か、あるいは数億年前と推定されている母天体の破滅的破壊のときである可能性が高い。

謝辞: iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏、pySALEPlot の開発者である Tom Davison 氏に感謝致します。

※図や参考文献についてはスライドの PDF ファイルをご参照下さい。