

リュウグウの状態方程式モデル作成と炭素質小惑星上の衝突過程への応用

黒澤耕介¹, 玄田英典², 兵頭龍樹³, 富岡尚敬⁴, 木村勇氣⁵, 菊入瑞葉⁶, 中村智樹⁶

¹千葉工業大学, ²東京工業大学, ³JAXA, ⁴JAMSTEC, ⁵北海道大学, ⁶東北大学

はじめに: はやぶさ 2 は 2020 年 12 月に 5.4g にのぼる炭素質小惑星リュウグウの試料を地球にもたらした。2021 年夏頃から網羅的な初期分析が開始された。惑星科学の衝突研究の文脈では(1)リュウグウは CI コンドライト隕石と呼ばれる隕石群とほぼ同じ物質であるが, 地球上での汚染を免れている, (2)試料がたくさんとれたおかげで物性データを取得することができた, (3)大部分の粒子は >1 GPa, $>100^\circ\text{C}$ の衝撃を経験した痕跡がない, (4)少数の粒子に衝撃に関係するとみられる変成が見いだされた, という発見があった。(1)の結果より, リュウグウ粒子は太陽系の新しい基準物質として物質科学分野で認められた。(2)の結果はリュウグウのような炭素質小惑星の衝突モデル作成のために数値計算サブチームが要求して取得された。(3), (4)の結果は太陽系の基準物質が経験してきた衝突の歴史を反映するものである。

状態方程式の必要性: 数値衝突計算はリュウグウ及びその母天体の衝突史を復元するための有効な手法の一つである。しかし, これを実行するためには状態方程式(Equations of state, EOS)モデルが不可欠である。質量, 運動量, エネルギーの保存則に炭素質小惑星を表現できる EOS モデルを連立することで, 炭素質小惑星が経験してきた天体衝突の影響を評価することが可能になる。

Ryugu EOS: はやぶさ 2 が予想外に大量かつそれなりの大きさの粒子をもたらしたおかげで, リュウグウ粒子の熱弾性情報が取得された。とはいえ, データは限られるため, 少ないパラメータで幅広い P-V-E(圧力, 体積, 内部エネルギー)関係を簡易的に表現する Tillotson EOS 形式を選択した。リュウグウ試料初期分析では衝撃圧縮時の「硬さ/柔らかさ」(=圧縮率)に対応するデータを取得することができなかったことから, 圧縮率の上限/下限を与えた 2 種類の EOS モデルを作成した。比

較のために Shock Hugoniot データが得られている物質の中では最もリュウグウ粒子に近い Murchison 隕石についての EOS モデルも作成した。幅白い圧縮率を持つ複数モデルで計算すると結果はばらつくのだが, 真の値はその間には入っているだろう, という狙いである。

リュウグウ母天体の破滅的破壊: 得られた EOS モデルを用いておよそ 8 億年前に起こったとされているリュウグウ母天体の破滅的破壊を模擬する数値衝突計算を実施した。その結果, 衝突天体サイズは直径 12 km 程度であろうことがわかった。この結果をもとに iSALE shock physics code を用いて 2 次元の高解像度計算を実施し, 衝撃圧力/温度分布を求め, >1 GPa, $>100^\circ\text{C}$ となる領域の広さを求めた。その結果, リュウグウのもとになった岩体は衝突点から少なくとも 20 km 以上離れた場所に存在していた可能性が高いことがわかった。また, 母天体の至るところが引張強度を超える応力に晒されることがわかった。このことはリュウグウ粒子の多くにひび割れが観られる分析事実と調和的である。

リュウグウ試料採集時の衝撃圧力: はやぶさ 2 は 2 回のタッチダウンを行い, 2 地点から試料を採集した。特に 2 回目の採集地点(TD2)は SCI による人工クレータからの放出物が堆積している領域であった。深部の宇宙風化を免れた物質を含んでいる可能性が高い一方で, そのような物質は SCI 衝突の影響を受けている。そこで構築したリュウグウ EOS を用いて SCI 衝突の再現計算を実施した。衝突時にリュウグウ表面物質が経験した最大衝撃圧力の累積質量分布を求め, SCI 衝突による掘削総質量との比をとると, SCI 衝突でそのような衝撃圧力を経験した物質を採集した確率と近似できるであろう。その結果, 衝撃変成が顕著に起こる >1 GPa を経験するような物質はリュウグウ粒子の 1 万粒に 1 つ程度しか見つからないことがわかった。SCI 衝突による変成

ではないということはいけないものの、そのような可能性は低いことがわかった。

リュウグウ粒子中の熱変成: リュウグウ粒子の詳細な分析によって、数は少ないものの高温での変成を起こした組織が発見されてきた。これらはリュウグウ上、あるいは母天体上での比較的小規模な高速度天体衝突の証拠かもしれない。どの程度の衝突速度であればそのような加熱を引き起こすことができるか検討した。熱変成は衝撃波背面の高圧高温条件でなく、減圧後の残留温度によって引き起こされる。真空中への断熱膨張を仮定しリュウグウ EOS による衝撃波背面圧力と残留温度の関係を算出し、多項式で表現した。この結果を用いることでリュウグウ上の任意の衝突条件で残留温度の分布を求めることが可能になった。

結言: リュウグウ粒子の Shock Hugoniot データが得られていないため、不完全であるが、リュウグウ粒子の熱弾性情報を反映した炭素質小惑星用の EOS モデルを作成した。この EOS は Nakamura et al. (2022), *Science* の Dataset として公開されている。iSALE などと組み合わせることで炭素質小惑星の衝突過程を計算できるようになっている。

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。