

衝撃圧力分布から推定する衝突放出物速度分布と過渡クレータ径

黒澤耕介¹, 高田智史²

¹千葉工業大学 惑星探査研究センター, ²東京大学 地震研究所

はじめに:大気水圏を持たないが, 固体表面を持つ太陽系の惑星/衛星表面を支配する地形は衝突クレータである. 衝突クレータのサイズ頻度分布はその天体の衝突史を推定し, 熱進化や表層進化を推定するための手がかりの一つである. このような研究を行うためには観測される衝突クレータがどのような規模(天体サイズ, 衝突速度)の衝突によって作られたか?を推定する手段をもつことが不可欠である.

スケーリング則: 数値衝突実験による「終段階等価性」の発見をきっかけとして, 点源近似条件のもとでの次元解析によって衝突の帰結を整理する試みが行われ, いわゆる π スケーリング則が構築された. 多様な条件で室内衝突・数値衝突実験の結果をもとに必要な定数 K_1 や速度指数 μ , 密度指数 ν が求められている. 特に速度指数 μ は衝突条件や標的物性によって結果がどのように変化するか?を決定する重要なパラメータである. 現象が衝突天体が持ち込んだ運動量で整理されるのであれば $\mu = 1/3$, 運動エネルギーで整理されるのであれば $\mu = 2/3$ となる. 近年の室内/数値衝突実験結果

は速度指数 μ そのものが複雑なパラメータ依存性をもっていることを示唆している. 「スケーリング則を確立する」という試みはますます複雑な道となりつつある. 室内/数値衝突実験を相補的に行ってデータを蓄積することが望ましいが, どちらも時間的・費用的に高価であり, 調査できるパラメータ領域は限られてくる.

このような現状はスケーリング定数の物理的意味が明確でない次元解析の限界であるといえよう. そこで我々は既存のスケーリング則と相補的な方法として衝撃波伝播とそれに続く掘削流形成の物理から演算的に衝突の帰結を予測する解析モデルを提案する.

解析モデル概要: 掘削流は衝撃圧縮とそれに続く断熱膨張によって得られる残留速度によって駆動されるとする指針は 80 年代に示されている. この指針に従えば, 衝撃圧力分布(最大粒子速度分布)が既知であれば, 掘削流の運動エネルギーを計算できる. それに加えて掘削流線形状が既知であれば, それぞれの流管中のエネルギー収支(運動エネルギー, 重力ポテンシャルエネルギー, 強度エネルギー)

を解くことにより、衝突掘削による放出速度分布、クレータ径の時間進化、そして過渡クレータ径を計算することができる。今回は衝撃圧分布、残留速度、掘削流線形状を計算するためにそれぞれ Croft のガンマモデル、Tillotson EOS, Maxwell の Z モデルを利用した。これらを用いることで衝突の帰結を解析的に計算することができる。

計算結果と考察: 提案モデルは衝突実験で観察される速度分布やクレータ径の時間進化の”べき乗関係”を再現できることを確認した。特に放出速度-累積体積関係がべき乗則が成立する速度領域で、掘削流線形状指数 $Z = 3.5$ とした場合には既存のスケーリング則と絶対値で一致した。次元解析ではべき乗則からずれていく低速と高速の閾値は決まらない。提案モデルでは低速閾値は掘削流管中の運動エネルギーが重力ポテンシャルエネルギーと同程度まで小さくなる速度、高速閾値は等圧核内の残留速度として物理的に決まり、高速閾値の大きさは衝突速度の 1-10%程度となる。提案モデルによる計算値を π スケーリング則で頻繁に用いられる π_0 vs π_2 関係図上にプロットしたところ、計算結果の大部分が既存のスケーリング則の代表的な 2 本の線 (Dry sand と Wet sand) の間に位置することがわかり、

物質によるスケーリング定数の違いは、形状指数 Z の違いとして整理できることがわかった。また衝突速度を幅広く変化させた計算 (2-50 km/s) を実施すると、等しい π_2 に対して速度が速いほど π_0 がファクター 2 ほど大きくなった。これは π_2 が重力支配域のクレータ形成を整理するよい指標ではないことを示唆し、衝突天体が持ち込む運動エネルギーが等しくても速度が速いほど掘削効率がよいことを示唆する。残留速度は根源的には不可逆加熱に伴うエントロピー増加によってもたらされるため、単純に運動エネルギーで規格化できないようである。

今後の衝突実験への示唆: 提案モデルは物理的な意味が明確な形状指数 Z , 減衰指数 n , 残留速度決定指数 m を入力パラメータに持つ。速度指数 μ とは異なり、これらの入力パラメータが標的物性によってどのように変化するかは予測を立てやすい。表計算ソフトなどで簡単に衝突の帰結 (放出物速度分布、クレータ径の時間進化、過渡クレータ径) を計算可能なので、室内/数値衝突実験に実施していく指針を立てるときに役立つと期待される。

※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。