

ガラスビーズを用いた粉体の準静的圧縮試験と 衝突シミュレーションへの応用

鈴木宏二郎（東大新領域）

Key Words: Granular Flow, Glass Beads, Hydraulic Press, Plastic Gas Model, Impact, Computational Fluid Dynamics

1. はじめに

衝突プローブは、はやぶさ2インパクトが証明したように、天体表面や内部の探査に有効なため、レゴリスのサンプラーやペネトレータなど今後の発展が期待される。開発には、模型発射装置等を用いた衝突実験が必要不可欠であるが、これらは大掛かりな装置を必要とする。また、ターゲット内部での貫入過程を観測することや、重力や大気の影響を調べるための実験セットアップなども容易ではない。衝突プローブ周りの砂の流れを数値シミュレーションでできる手法を確立し、実験のアシストや設計に導入していくことは重要である。

衝突プローブ周りの砂の挙動をシミュレーションする方法は、粒子モデルと流体モデルの2種に大別される。前者の代表としてDEMが挙げられる。粉体流れを構成する粒子1個1個の運動を解析する点で、直接シミュレーションであり、粒子間の相互作用について適切なモデルが定義できれば、高い精度が期待される。しかし、衝突プローブの大きさは粒子の大きさよりはるかに大きいため、その計算は巨大なN体問題となり、計算速度やメモリサイズの点で実用的ツールとしての利用は難しい。一方、流体モデルでは、衝撃波捕捉など、数値流体力学として既に開発されている様々な計算技術を適用できる点で有望である。しかし、衝突時の砂の挙動は、押すとつぶれて高密度になる点で圧縮性流体に似ているものの、本質的に異なる点もある。砂地を踏めば足跡が残る事実からわかるように、砂は圧縮に対して非可逆的な性質を持つ。このことは、空気のように膨張が起こらないことを意味する。また、砂塊は真空中に曝されても、空気のように膨張拡散せず、元の形を保持することの理由でもある。このような性質を圧縮性流体力学のフレームワークで表現するためには、新たなモデルの構築が必要である。

これまで筆者は「圧縮性かつ非膨張(CNE: Compressible and Non-Expanding)流体」モデルを開発してきた[1-3]。衝突プローブでは、衝突速度は高々300m/s程度であると考え、衝突に伴う砂の温度上昇や融解、気化などの相変化は無視できる。また、圧縮に対する砂の抗力は等方的であると仮定すると、それは流体における圧力として近似的に表現できる。すなわち、CNE流体の状態方程式は圧力と密度の関係として表現できる。図1にCNEFモデルの状態方

式を示す。状態方程式は非可逆的圧縮曲線と弾性的(可逆的)除荷/再圧縮線の2種類で構成される。CNE流体は初期状態から圧縮されると非可逆的圧縮曲線上を移動し、密度と圧力ともに上昇する。状態Cで圧縮が止まると弾性的除荷/再圧縮線上を $p=0$ (図の状態B)まで移動する。再度圧縮が起こると同じ弾性的除荷/再圧縮線上を状態Cまで戻った後、非可逆的圧縮曲線上をC'まで密度と圧力が上昇する。再度、圧縮力が消えると状態は弾性的除荷/再圧縮線上を $p=0$ (図の状態B')まで移動し、これを繰り返す。弾性的除荷/再圧縮線の傾き(すなわち音速の自乗)を非可逆的圧縮曲線に比べてはるかに大きいとすれば、弾性的除荷による密度減少は非可逆的圧縮による密度上昇に比べて小さく、結果として初期状態からB、B'へと単調な密度上昇が表現できる。ここでは、簡単のため弾性的除荷/再圧縮線は直線(音速一定)とした。

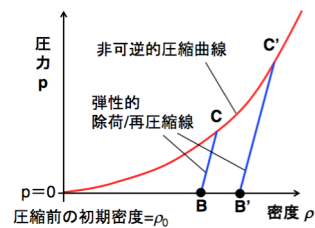


図1 CNEFモデルの状態方程式

CNE流体モデルは、圧縮と除荷で異なるプロセスを経るという点を除いて圧縮性流体と同様であるため、流れ場の数値解析には有限体積法、ゴドノフ法、リーマンソルバーの組み合わせを用いることができる。ただし、CNE流体のリーマンソルバーは、膨張波の代わりにクラック形成または真空との接触波が形成されることや、非可逆的圧縮曲線上にジャンプする衝撃波と弾性的除荷/再圧縮線へジャンプする衝撃波の2種類があることを考慮したものとなる[1]。クレータ形成のテスト問題では、圧縮による高密度領域がクレータ底面の直下に形成、保持されて、衝撃波の伝播とともに深部へ侵攻、拡散しないなど、合理的と思われる計算結果が得られている[3]。しかし、これはモデルであり、実際の粉体がそのような状態方程式を持つかどうかについては、実験による確認が必要である。ここでは、ガラスビーズについて油圧プレスを用いた準静的圧縮試験を実施し、その挙動がCNE流体モデルの状態方程式で表現できるかについて検証を行った結果を報告し、今後の展望

を述べる。

2. 準静的圧縮実験の概要

図2に準静的圧縮実験の装置概要を示す。圧縮には油圧プレス（ラボネクト MP-100）を用いた。直径15mmの円筒状の型（ダイ）にサンプルを入れて圧縮する。圧力は油圧プレス機のアナログメータと円筒容器直径から、密度はサンプルの質量とその時の円筒の高さから算出した。サンプルとしては不二ガラスビーズ（粒度40=直径0.355~0.5mm）を用いた。材質はソーダ石灰ガラスで、固体としての密度は2500kg³、音速は5500m/s、破壊強度は50MPaである。

図3に結果のまとめを示す。注意すべきは、同じ圧縮荷重でもかく拌と再圧縮を繰り返すことにより状態が変わっていくことである。これは容器内で局所的な凝集が起こり荷重を支えてしまうことが原因と思われ、容器内の均一な圧縮を確保するために十分な繰り返し数を実施し、再現性が得られるまで収束させることが重要であることがわかった。

図3はガラスビーズ圧縮にCNE流体モデルが適用できることを示している。ただし、50MPa以下の低圧縮では、粒子の破壊だけでなく、粒子の再配列による荷重保持も起こっていると考えられ、今後、この領域での詳細なデータ取得が必要である。また、除荷において、わずかな密度低下でp=0に到達することが実験的に確認できたが、その傾きは密度とともに上昇するため、弾性的除荷/再圧縮線における音速の密度依存性をCNEモデルに追加する必要がある。

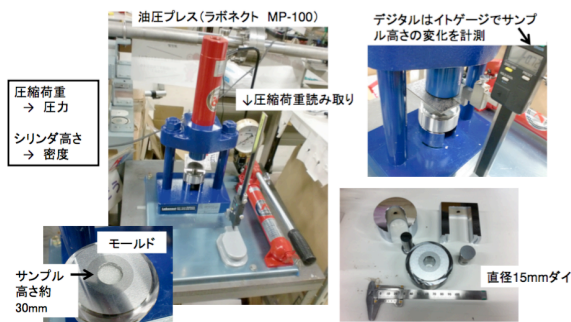


図2 準静的圧縮実験の装置概要

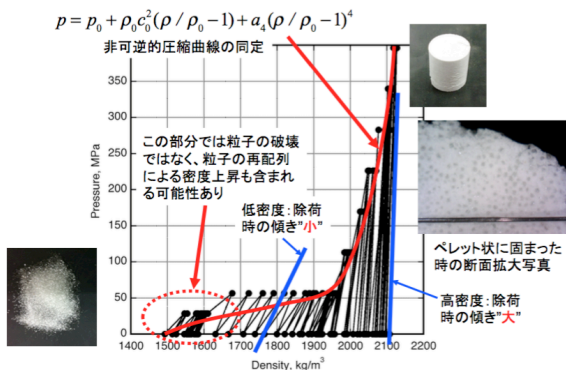


図3 準静的圧縮実験結果のまとめ

3. まとめと今後の展望

1) 準静的圧縮実験により、粒子が破壊されていく様子が観察され、非可逆的圧縮が確認できた。圧縮後の状態は様な微粒子粉体ではなく、大きな粒子がガラス粉末のベッドの中に距離を置いて配列される構造をしていることがわかった。

2) 実際の粉体においても、非可逆的圧縮曲線と弾性的除荷/再圧縮線で構成されるCNE流体モデルの状態方程式で表現出来ることが実験的に示された。

3) 弾性的除荷/再圧縮過程での音速は密度の単調増加関数である。これについては、CNE流体モデルの改良とCFDソルバーの拡張が必要である。

4) 低圧縮では、粒子の圧縮破壊と再配列による圧力の吸収の混合により複雑な非可逆的圧縮曲線となることが予想された。今後、この領域におけるより詳細な計測を行い、その特性の把握を行っていく。

5) 得られた状態方程式を用いて、平頭円柱型ペネレータの貫入数値シミュレーションを実施した（図4）。ガラスビーズへの衝突実験を行い、それと比較して、モデルとソルバーを改良していく。それにより「静的試験→状態方程式の同定→動的現象のシミュレーション」の方法が確立する。

6) 準静的圧縮実験において、圧縮荷重を与えてから容器高さ、すなわち密度が一定となるまでに有限の時間がかかる現象が見られた。これは、圧縮に対する密度の応答には時間遅れがある可能性があることを示唆している。すなわち、密度変化の非平衡性を考慮するなどのモデル改良が必要となるかもしれない。今後の重要課題の一つである。

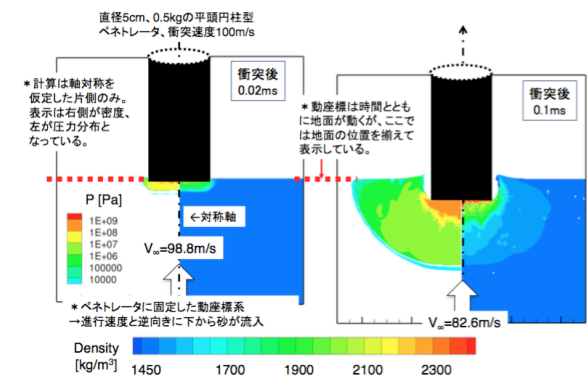


図4 円柱型ペネレータの数値解析例

謝辞: 本研究は、科学研究費補助金（基盤研究(B) No. 19H02339）の支援を受けて行われた。

参考文献: [1] K. Suzuki, AIAA Paper 2016-4107, 2016. [2] K. Suzuki, Aerospace Technology Japan 16, 210-217 (2018). [3] K. Suzuki, 32ISTS, 2019-k-24, 2019, also Aerospace Technology Japan (in press).