

準静的圧縮実験による砂の塑性ガス状態方程式モデルと 衝突現象への応用

鈴木宏二郎（東大新領域）

Key Words: Granular Flow, Irreversible Compression, Plastic Gas Model, Computational Fluid Dynamics

1. はじめに

衝突プローブは、運動エネルギーを利用して天体表面に貫入するため、ドリルのような機構を必要とせず、小型、シンプル、軽量、低コストの表面サンプリングや地下探査（ペネトレータ）などへの利用が期待される。天体表面の物質や状態、不均一性など様々な不確定性がある中で確実に機能する衝突プローブを開発するためには、バリステックレンジ等による衝突実験に加え、数値シミュレーションを援用することが重要である。特に後者では衝突条件のパラメータ設定が自由に行えるため、その技術を確立する必要がある。

衝突プローブまわ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。これは、構成粒子1個1個の運動解析によって粉体流れを直接シミュレーションするものである。しかし、これはN体問題であり、プローブ開発などの実用に供するには計算負荷が過大である。さらに、再現性の高いシミュレーションとするためには、あらかじめ粒子間の相互作用モデルをチューニングしておく必要があり、それは容易ではない。流体モデルは、衝突によって表面物質が押しつぶされてマクロな密度が上がることを圧縮性流体現象とのアナロジーで表現する。この時、衝撃波捕捉法などの数値流体力学として既に開発されている計算技術が利用できる。しかし、衝突時の粉体の挙動は、圧縮で密度が上昇する時点で圧縮性流体として表現できるものの、圧縮力がなくなった際に元の密度に戻らない非可逆性を示す点で、本質的に異なっている。そのため、通常の圧縮性流体とは別の新たな流体モデルとその流体力学を構築する必要がある。

ここでは、適用をペネトレータやサンプリングゴアラーに限定し、速度は100m/sで、それによって生ずる動圧は100MPaのオーダーであるとする。従って、高速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する。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]。CNE流体モデルは図1に示す密度と圧力の関係（状態方程式）として表現される。状態方程式は非可逆的圧縮曲線と可逆な弾性的除荷/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、

密度と圧力が上昇する。状態 C_1 で圧縮が止まると弾性的除荷/再圧縮線上を状態 B_1 まで移動し、圧力が0となる。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_1 まで戻った後、非可逆的圧縮曲線上を状態 C_2 まで密度と圧力が上昇する。圧縮力が失われると状態は弾性的除荷/再圧縮線上を状態 $B_2(p=0)$ まで移動し、というような過程を繰り返す。図に示すように弾性的除荷/再圧縮線の傾き（音速の二乗）は非可逆的圧縮曲線よりはるかに大きいため、初期状態Oから $B_1 \rightarrow B_2$ と弾性的除荷によるわずかな密度減少を除き、ほぼ単調な密度上昇が表現される。

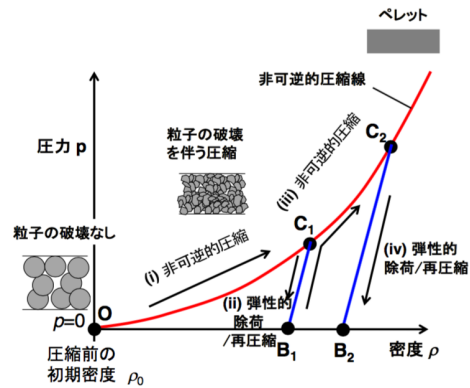


図1 CNEFモデルの状態方程式

2. 準静的圧縮実験の概要

実際の砂が圧縮と除荷に対して図1に示すような挙動を示すかを確認するため粉体からペレットを作成するために用いられている油圧プレスを用いた準静的圧縮実験を行った[4,5]。粉体サンプルは直径15mmの円筒状のサンプル容器（ダイ）に入れ圧縮される。研磨用のガラスビーズ（不二ガラスビーズ、粒度40=直径0.355~0.5mm）を用いた実験では図1と同様な挙動を計測することができた[4,5]。

ここでは、この性質が一般的なものかを調べるため粒度の異なるガラスビーズや珪砂（竹折礦業所珪砂4）、その混合などについても計測を行った。図2に粒度80のガラスビーズ（不二ガラスビーズ、粒度80=直径0.18~0.25mm）を用いた結果を示す。サンプル容器の中で均一な圧縮状態を得るため、圧縮後に容器を開け全体を攪拌する操作を繰り返す必要がある。繰り返しにより均一に圧縮が行われ、密度が一定の値に収束するようになる。図には比較のため粒度40のガラスビーズにおける非可逆的圧縮線も示されているが、定性的には同様な傾向を示し、かつ、その

傾きが大きいことから圧縮されにくい性質を持っていることがわかる。成分は同じであるので、その差異は粒子の直径によるものと思われる。砂の圧縮に対するマクロな応答は、粒子の物質、形状、大きさなどミクロな性質が寄与していることがわかる。

計測した弾性的除荷/再圧縮線の傾きから求めた音速の密度依存性を図3に示す。密度が上昇するに従い弾性的な音速は上昇し、物質として持っている音速に近づくことがわかる。さらに、弾性的な音速も粒度80の方が粒度40より大きく、マクロな弾性体としてより硬い性質を持っていることを示している。

以上からCNE流体モデルは砂などの粉体の圧縮モデルとしてある程度汎用性を持つことがわかった。

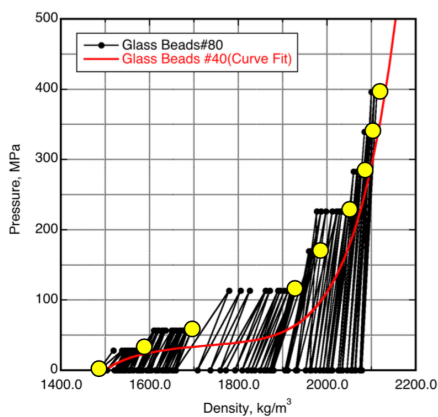


図2 粒度80ガラスビーズの準静的圧縮実験結果

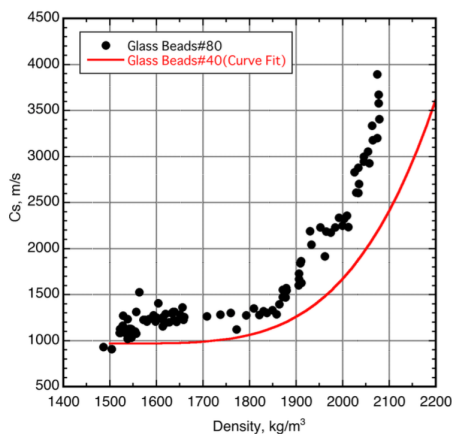


図3 粒度80ガラスビーズの弾性的音速(c_s)

同じ粉体でも、その環境により、異なる圧縮特性を示すことが予想される。粒度40のガラスビーズに質量で約20%の水を混入し、ぬれた砂として準静的圧縮実験を行った。プレスすることで水分は抜けていくため、密度の計算では乾燥したガラスビーズの質量のみを用いている。図4に濡れたガラスビーズにおける準静的圧縮実験の結果を示す。乾いたガラスビーズと比べて傾きが小さく、圧縮されやすくなっており、圧縮に際して水が潤滑剤の役割をしていることが考えられる。これについては、今後、顕微鏡観測

による圧縮後の粒子状態の比較などを行っていく予定である。

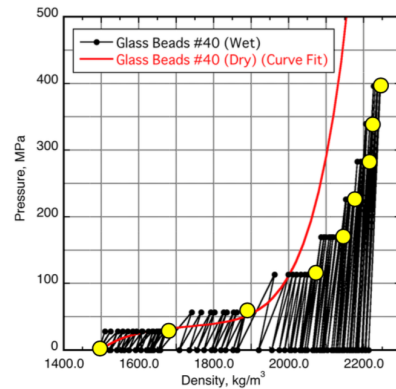


図4 濡れたガラスビーズの準静的圧縮実験結果

3. CNE流体の流体シミュレーション

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、非可逆的圧縮と可逆的弾性変化の2種類の過程が存在するため、その解の様子は異なったものとなる。図5にガラスビーズ#40で得られた状態方程式を用い、左右のCNE流体が衝突する1次元問題の数値解の波動線図($x-t$ 空間での密度等高線)を示す。衝撃波の前方に弾性的過程が作る先行波が形成されており、一般的な圧縮性流体とは異なる解となっている。現在、ここで開発されたソルバーを円筒型ペネトレータやサンプリングコアラー問題に拡張し、CNE流体モデルの適用性を評価している。

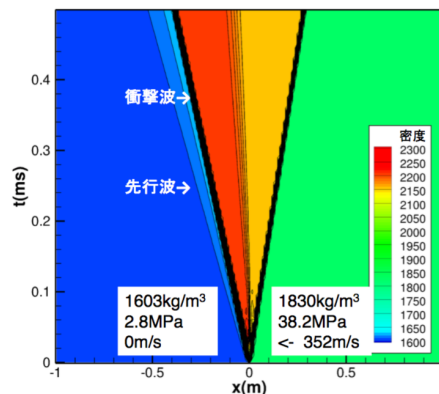


図5 CNE流体衝突問題の波動線図

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, Aerospace Technology Japan 19, 726-734 (2021). [4] 鈴木, 衝突研究会, 2021, 3月. [5] K. Suzuki, iCRAFT2020_5003.