

塑性ガスモデル数値流体力学による ペネトレータ貫入シミュレーション

鈴木宏二郎（東大新領域）

Computational Fluid Dynamics for Penetration into Regolith using Plastic Gas Model

Kojiro Suzuki (GSFS, Univ. of Tokyo)

Key Words: Granular Flow, Impact, Regolith, Plastic Gas Model, Computational Fluid Dynamics

Abstract

For analysis of the penetration dynamics into regolith, the computational fluid dynamics using the "Compressible and Non-Expanding Fluid (CNEF)" model was proposed. The CNEF model is classified into the plastic gas model. The cohesion of the grains is described as the irreversible compression, assuming a higher speed of sound at unloading than compression, which enables the fluid to have higher density after unloading than the initial uncompressed one. The Euler equations for CNEF are numerically solved with the finite volume method, the Godunov scheme, and the exact Riemann solver. The result of the two-dimensional impact problem clarified that the highly compressed region is formed just under the impact point, while in the conventional compressible gas dynamics model, the high-density region is formed behind the shock wave propagating in the regolith. The present CNEF code was applied to the two-dimensional oblique impact problem and the axi-symmetric flow around a flat-tipped cylinder penetrating into the regolith, and qualitatively reasonable results were obtained.

1. はじめに

天体表面での衝突によるクレータ形成ダイナミクスの解明や、はやぶさ2のインパクト、レゴリスのサンプラー、天体内部に貫入して地下を探索するペネトレータの開発などでは、レゴリスの挙動をシミュレーションする数値解析手法の開発が重要である。ミクロなモデルとしては、レゴリスを構成する1個1個の粒子間に働く力をモデル化し、その時間発展を解く粒子法があり、DEM¹⁾はその代表である。その一方で、流体モデルは、計算負荷が軽く、数値流体力学として開発されてきた様々な計算手法の適用が期待できるため、系全体のマクロな挙動に注目する際に有用なツールになるものと期待される。そのような目的では、複雑な破壊モデルを組み合わせた構成方程式よりは、モデルパラメータの少ない簡単なガスモデルの方が便利であろう。

これまで筆者は「圧縮性かつ非膨張流体(CNEF: Compressible and Non-Expanding Fluid)」モデルを開発してきた^{2,3,4)}。ここでは、膨張しないというモデルの特性がどのような結果をもたらすかについて、2次元衝突テスト問題の結果により示す。さらに、剛体平板への斜め衝突や、軸対称のペネトレータ貫入問題の解析結果を紹介する。

2. CNEFモデルの概要

CNEFモデルでは、簡単のため温度の影響を無視し、レゴリス中に発生する応力を密度の関数で表される圧力として、例えば、式(1)のように与える。

$$p = p_0 + \rho_0 c_0^2 (\rho / \rho_0 - 1) + a_4 (\rho / \rho_0 - 1)^4 \quad (1)$$

ここで、 ρ_0 は圧縮前の初期密度、 c_0 はその時の音速となっている。係数 a_4 は正の定数であり、密度 ρ とともに圧力 p の上昇率 $\partial p / \partial \rho$ および音速 $c = (\partial p / \partial \rho)^{0.5}$ が増えることになる。すなわち、 a_4 の非線形項は、圧縮とともにレゴリスが硬くなっていく硬化を表現している。式(1)は、非可逆的圧縮過程を表す曲線であり、一般に単調増加の関数となる。

図1にCNEFモデルの状態方程式を示す。0→1は非可逆的圧縮であり、密度、圧力ともに初期状態から式(1)の曲線上を増加する。状態1で一旦圧縮が終わり、圧縮がなくなると可逆的除荷過程1→2に乗って、圧力が下がっていく。このとき、圧力の減少は密度減少に対して線形を仮定して、その傾きは式(2)に示すように音速 c_s （簡単のため、ここでは定数とする）の自乗である。

$$p = c_s^2 (\rho - \rho_B) \quad (2)$$

c_s は $c_s \gg c$ に設定しているので、圧力がゼロとなっても（この時の密度が ρ_B ）、密度の低下は小さく、初期の無負荷時より高い密度が保持される。再度圧縮があると状態は2→3→4と変化する。最終的にはレゴリス内の空隙がゼロとなり、固体の圧縮曲線S-S（ここでは傾きは1→2→3と同じと仮定している）に乗ることになる。単位質量あたりの内部エネルギー e は、圧力のした仕事として下式で定義される。

$$e \equiv \int_{\rho_0}^{\rho} -pd \left(\frac{1}{\rho} \right) = \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{p}{\rho^2} d\rho \quad (3)$$

CNEFモデルに対する流れのシミュレーションは、通

常の圧縮性流体と同様に有限体積法とゴドノフ法、リーマン解法を用いて行うことができる^{2,3,4)}。

圧縮後の膨張で元の状態に戻らないという意味においてCNEFモデルは塑性ガスモデルの一種といえる。ポーラス物体の非可逆圧縮を扱うモデルとしては ε -alphaモデル⁵⁾があるが、そこで導入されているvolumetric strain ε とdistension α は圧力、密度と相関があるので、モデル全体としてもCNEFとの対応関係があるものと思われる。これについては今後明らかにしていきたい。

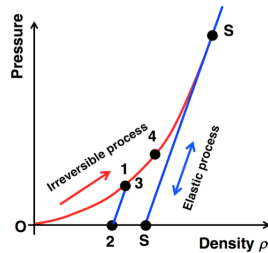


図1 CNEFモデルによる非可逆的圧縮の表現

3. CNEFモデルによる流れの数値解析結果

CNEFモデルと通常の圧縮性流体の特性を比較するため、2次元クレータ形成問題の数値解析例を示す。幅2m、深さ1mの砂箱に円形砂塊が300m/sで垂直に衝突する。モデルパラメータは、それぞれ $\rho_0=1600\text{kg/m}^3$ 、 $c_0=150\text{m/s}$ 、 $a_4=2\times 10^9\text{Pa}$ 、 $c_s=3000\text{m/s}$ に設定した。図2に式(1)で表される通常の圧縮性流体モデルをSPH法で解いた密度分布と、CNEFモデルの比較を示す。前者では、高密度領域は衝撃波背後に形成され、衝撃波の伝播とともに内部に進行する。CNEFモデルでは高密度域は衝突変直下の表層に形成される。結果として、CNEFモデルでは、クレータサイズの砂箱の大きさに対する感度が鈍くなる⁴⁾。

次に剛体平板に円形（2次元解析なので円柱）物体が45度、500m/sで斜め衝突する問題を解く。図3に示した結果（速度ベクトルの大きさの等高線）では、衝突後に物体は潰れるが、先頭部分は平板とほぼ平行な向きに衝突速度と同程度の速度を保つことが示唆されている。

次に円柱形状ペネレータの垂直貫入解析結果を示す。ペネレータに固定した座標系を用いているので、その減速とともに上流からの流入速度が減速する。図4の結果は定性的に妥当なものと思われる。

4. まとめ

レゴリスへの貫入や衝突問題をマクロな流体として扱うCNEFモデルを紹介して、数値解析結果例を示した。今後は、モデルの改良と、3次元化を含め、計算コードの開発を進める一方、 ε -alphaモデルなど既存モデルとの関係を明らかにしていく。

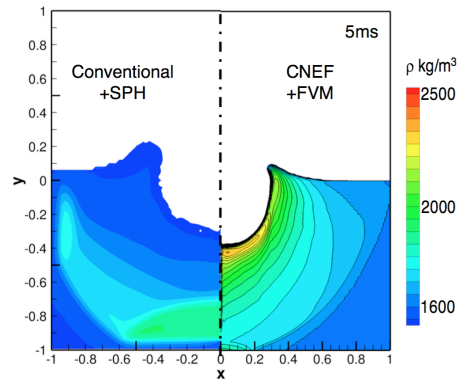


図2 2次元クレータ形成問題（左：SPH、右：CNEF）

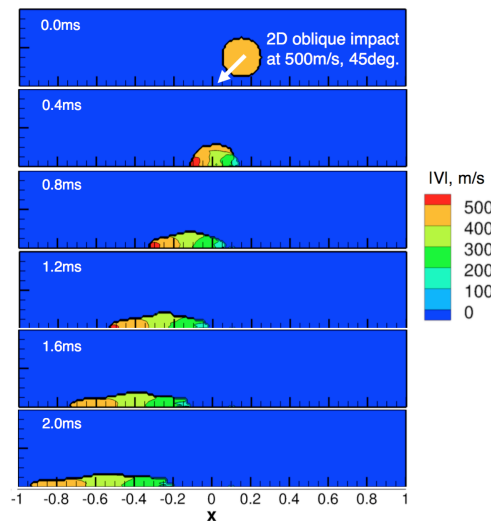


図3 2次元斜め衝突の結果（速度の等高線）

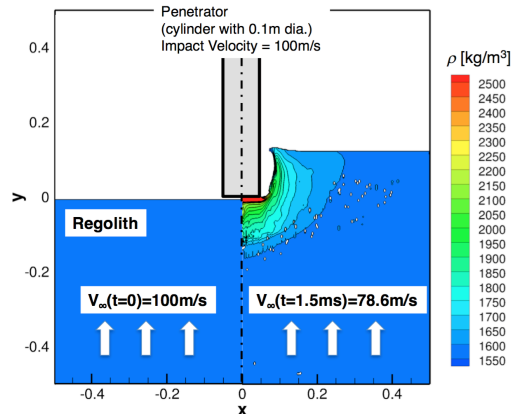


図4 円柱ペネレータの軸対称流れ解析

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。また、 ε -alphaモデルと斜め衝突問題については黒澤耕介氏(千葉工業大学)より教示頂いた。ここに感謝の意を表する。
参考文献：1) Wada, K. et al., *Icarus*, **180**, 528-545, 2006. 2) Suzuki, K., AIAA Paper 2016-4107, 2016. 3) Suzuki, K., *Aerospace Technology Japan*, **16**, 210-217, 2018. 4) Suzuki, K., 32ISTS, Fukui, 2019-k-24, 2019. 5) Wünnemann, K. et al., *Icarus*, **180**, 514-527, 2006.