

非可逆的圧縮性ガスモデルによるレゴリス衝突シミュレーション

鈴木宏二郎 (東大新領域)

Simulation of Impact on Regolith using Gas Dynamics Model with Irreversible Compressibility

Kojiro Suzuki (GSFS, Univ. of Tokyo)

Key Words: Granular Flow, Impact, Regolith, Irreversible Compression, Computational Fluid Dynamics

Abstract

To simulate the dynamics of the regolith at the impact of a high-speed object onto the surface of a planet, an asteroid or a comet nucleus in the framework of the continuum fluid dynamics, the "Compressible and Non-Expanding Fluid (CNEF)" model was proposed. The cohesion of the grains is considered 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 shows that the CNEF model forms the high-density zone near the surface at the bottom of the crater. In the problem of the penetration of a spherical projectile into a plane of the granular fluid, the CNEF analysis reproduces the shock-wave-like structure in front of the projectile and the void in the wake region as observed in the experiment using the ballistic range. A trial calculation was made to demonstrate the potential of the CNEF model for the simulation of the planetary system formation.

1. はじめに

群として起こる固体粒子の衝突現象の理解は、ダスト円盤からの惑星系形成シナリオやクレータ形成ダイナミクスなどの惑星科学上のみならず、はやぶさ2に搭載されているインパクトや、天体表面のレゴリスに貫入して地下を探索するペネトレータの開発など、宇宙工学上においても重要である。レゴリスのような粉体のダイナミクスを解析する手法としては、粉体を構成する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る。例えば、DEM¹⁾は、クレータ形成などを合理的に再現できることが知られている。しかし、扱う系が粒子サイズよりはるかに大きい場合、計算負荷が過大となり、実用に適さない。一方、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。しかし、破壊モデルを組み合わせた構成方程式は複雑なものとなり、必要なパラメータの全てを決めることは容易ではない。そのため、レゴリスでの衝突に見られる非可逆的圧縮を表現することができる、コンパクトな流体モデルの開発が望まれる。

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、バリスティックレンジを用いた衝突実験との比較を示す。さらに、中心天体周りを回転するダスト円盤に擾乱を与え、その後の進化に関するテスト計算の結果も紹介する。

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。

$$p = c_0^2(\rho - \rho_0) + a_2(\rho - \rho_0)^2 \quad (1)$$

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_2 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_2 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、ここでは2次関数で与えているが、単調増加の関数であれば特に制限はない。

図1に式(1)によるCNEFモデルの状態方程式を示す。圧縮過程#1では、密度、圧力ともに初期状態から非可逆的圧縮線上を増加する。点 C_1 で一旦圧縮が終わり、除荷過程#1に入ると可逆的除荷過程 C_1B_1 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(図の点 B_1)、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。圧縮と除荷を繰り返すことで、除荷時($p=0$)の密度は、 $B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3$ と非

可逆的に上昇している。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。

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

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}。

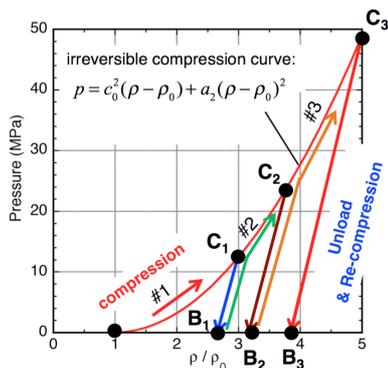


図1 CNEFモデルの状態方程式と非可逆的圧縮

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。図2に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、その伝播とともに内部に進行する。衝撃波の拡大とともに背後の密度は低下する。一方、CNEFモデルでは高密度域はクレータ表面付近に残り、その密度が時間の経過によって低下していくことはない。

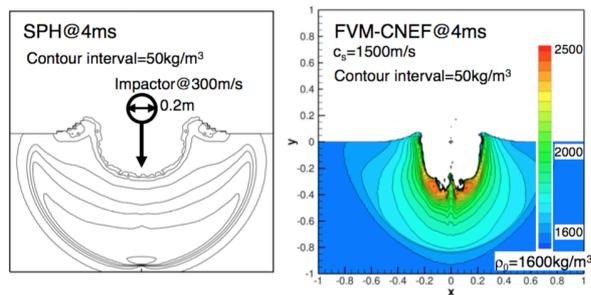


図2 2次元クレータ形成問題(左:SPH,右:CNEF)

直径0.4mmのガラスビーズのカーテンと飛翔体の衝突実験^{5,6}をCNEFモデルで再現した結果を図3に示す。飛翔体前方の衝撃層の構造と背面の空虚構造がCNEFモデルで表現できていることがわかる。

太陽系やそれを構成する天体は、ダスト円盤の粒子が衝突合体して形成されたと言われているが、そ

のような状況は、非可逆的圧縮現象としてCNEFモデルで表現できることが期待される。その可能性を検討するためのトライアルとして2次元の回転運動するCNEF流れの様子を数値解析した。均一密度の同心円運動するディスクにランダムな密度と速度ゆらぎを加え、その後の時間発展を見た例を図4に示す。衝突による非可逆的圧縮により、有限個の高密度領域に分離成長していく様子が見てとれる。

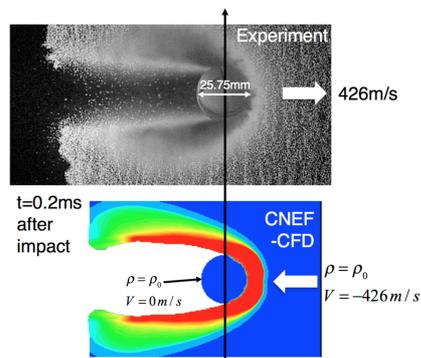


図3 粒子カーテンと飛翔体衝突問題の解析結果

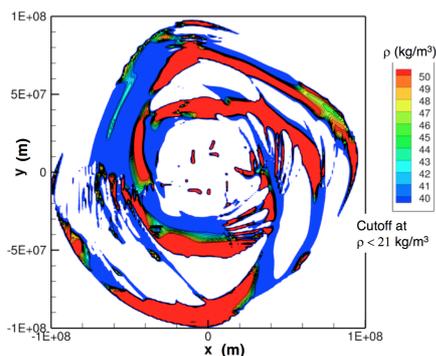


図4 ダスト円盤進化問題へのCNEFモデルの適用

4. まとめ

圧縮するが膨張しない流体(CNEF)モデルを構築し、非可逆的圧縮現象をマクロな流体現象として記述した。クレータ形成、粉体層への飛翔体の貫入、ダスト円盤からの天体形成問題に適用した結果を示した。CNEFモデルは粒子モデルより計算負荷が軽く、構成方程式や破壊モデルを考慮する必要もないため、ポータブルな連続体モデルとして役立つことが期待される。

謝辞: 本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B) No. 16H04585)の支援を受けて行われた。

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., ISSW31, Nagoya, 2017. 5) Masaki, C. et al., *JFCMV*, **6**, 136-151, 2018. 6) Suzuki, K., RGD31, Glasgow, 2018.