

# 弾性体ゴドノフ SPH 法を用いた衝突計算

○杉浦圭祐、犬塚修一郎

名古屋大学大学院 理論宇宙物理学研究室

固体惑星や月などの衛星は小天体同士の衝突の結果形成されたと考えられている。従って惑星・衛星の起源を詳しく理解するにあたって、小天体同士の衝突の結果を詳細に理解することは極めて重要である。しかしながら小天体の典型的なサイズは km 以上であるため、室内実験で衝突を再現しその結果を観測することは不可能である。そのため数値計算の手法を用いて小天体衝突の詳細を調べることも必要となる。

近年 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法と呼ばれる流体力学の数値計算手法を弾性体力学に応用することで、天体衝突の数値計算が行われている (e. g. Benz and Asphaug 1999)。SPH 法は粒子を用いたラグランジュ的な手法であり、天体衝突などの大変形問題に非常に適した手法である。一方で広く使われている標準 SPH 法にはいくつか問題点があることが指摘されており、一般の乱雑な粒子配置では空間 1 次精度以下である、強い衝撃波で流体粒子の突き抜けが起きてしまう人工粘性を利用している、引き伸ばされた固体を表す負の圧力の領域で tensile instability と呼ばれる数値不安定性が存在する、などの問題点が存在する。

標準 SPH 法の問題点を解決するための手法として、ゴドノフ SPH 法と呼ばれる別の SPH 法が提案されている (Inutsuka 2002)。このゴドノフ SPH 法では空間 2 次精度の定式化がなされており、またリーマンソルバーと呼ばれる物理的な粘性を導入する手法を利用し人工粘性の利用を回避している。しかしながらゴドノフ SPH 法の tensile instability に対する安定性は調べられておらず、さらにゴドノフ SPH 法を弾性体力学に応用した研究は存在しない。

そこで本研究では、まず弾性体力学の基礎方程式をゴドノフ SPH 法の定式化に沿って離散化し、空間 2 次精度の弾性体ゴドノフ SPH 法を開発した。この弾性体ゴドノフ SPH 法が本当に空間 2 次精度を達成しているか確かめるため、音波の計算を用いた収束性テストを行ったところ、確かに空間 2 次精度であることが確かめられた。また Tillotson の状態方程式 (Tillotson 1962) など比較的複雑でリーマンソルバーの解析解を求めることが難しい場合にも、理想気体の状態方程式など解析解がわかっているリーマンソルバーに近似することで解を求める方法を考案した。この近似したリーマンソルバーを用いた衝撃波管問題の計算結果と標準 SPH 法を用いた結果はよく一致し、問題なく計算で

することが示された。さらに開発した弾性体ゴドノフ SPH 法の線形安定性解析を行い、tensile instability への安定性を評価した。その結果、ゴドノフ SPH 法の運動方程式に用いられている  $V_{ij}^2$  の補間方法を、圧力の符号と空間の次元に応じて適切に選ばば安定に計算できることがわかった (Sugiura and Inutsuka 2015 JCP in press (arXiv:1505.05230))。この線形安定性解析の結果を確かめるため金属板の振動計算を行ったところ、圧力の符号に応じて補間方法を選んだ場合には震動の様子が計算できたが(図 1)、そうでない場合には非物理的なひび割れにより計算することができなかった(図 2)。

さらに、本研究で開発した弾性体ゴドノフ SPH 法に、塑性変形の効果と粉々になった岩石間に働く摩擦の効果(Jutzi 2015)とひび割れの効果(Benz and Asphaug 1995)を取り入れ、岩石の挙動を計算できるようにした。図 3 は玄武岩の球を玄武岩の壁にぶつけた様子を計算した結果である。以上で、弾性体ゴドノフ SPH 法を用いた岩石の衝突計算が可能となった。

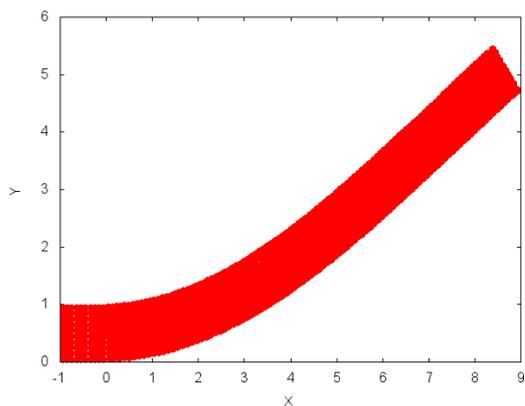


図 1: 補間方法を適切に選んだ場合の、金属板の振動計算の結果。

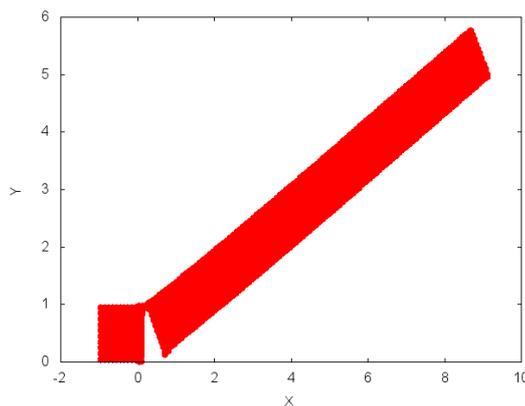


図 2: 補間方法を適切に選ばなかった場合の、金属板の振動計算の結果。

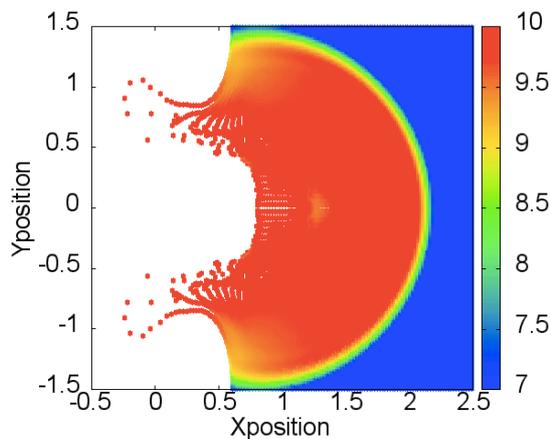


図 3: 玄武岩の球を玄武岩の壁にぶつけた計算の結果。色は単位質量あたりの内部エネルギー(対数)[erg/g]を表す。