

# 星・惑星形成研究のためのParticle Rezoning SPH法の開発

釣部通 (大阪大学)

利用カテゴリ XT4B

本研究では、星や惑星の形成過程を星間雲の流体力学的な進化に基づいて物理的に理解することを目指して研究を行っている[1,2]。特に、重力収縮にともなうガス雲の分裂過程と原始星と円盤の成長過程について詳細な計算を行うことによって詳しく調べることで、最終的には星と星周円盤および連星や惑星の形成のメカニズムの解明を目指すものである。天体物理で多く用いられているSPH法(粒子法的流体力学)には(1)差動回転円盤のような構造では、密度の見積もりに問題があること、(2)高密度の断熱コアが形成された後は、数値流体力学計算の安定性条件の存在のため、時間刻を細かくしなくてはならず、系全体の進化正しく計算することは計算コストが高いことが分かっている。ここでは、(1)をParticle Rezoning(PRM)法で解決し、(2)の制約に縛られない新しい手法としてBoltzmann SPH(BSPH)法を構築し、その手法を適用することで天体形成の初期段階から完了時までを追跡し、その物理過程を明らかにすることを目指す。以下には、新たに得られた知見について報告する。

## (1) PRM法における単調性を保持した手法の開発[3]

星や星周円盤の形成過程を正しく理解するため計算では角運動量輸送を正確に解く必要がある。円盤内における数値シアー粘性が大きすぎると、円盤上の揺らぎは成長する前に中心へ落下してしまうなど、分裂が起こる条件に影響を与える可能性がある。また、連星の周りの流れの場合には、主星、伴星のどちらに降り積もるかに影響を与える可能性がある。しかし、強い衝撃波を安定に捕獲し、その上で十分に小さなシアー粘性を正しく記述するということは数値計算上は相反する要求であり改善が望まれる。流体素片が冷たいシアー流により極度に変形すると、近傍の粒子配置から算出されるSPH法の密度は大きなエラーを持つようになる。このような原始惑星系円盤のような冷たいシアー流の計算において密度エラーを抑えるためにこれまでにPRM法を開発してきた。そこでは、流体素片の変形を補填するために、SPH粒子内の質量の一部を互いのSPH粒子間で交換し合うことにより、粒子配置を補正することで、密度のエラーを大幅に抑えることができる(mass exchange step)。その過程で、交換する質量にともなって運動量とエネルギーもSPH粒子間で交換されることになる。これらの交換の定式化は、2粒子の重心、運動量、およびエネルギーが丸め誤差の範囲内で完全に保存するように行うことができる。しかしながら、単純な質量交換だけの場合には、大きすぎる数値拡散が入るため実用的ではなく、不必要な交換を抑制するための工夫(diffusion subtraction step)を行う必要がある。これまでこのdiffusion subtraction stepにおいて速度分布などが不連続面の前後において少しオーバーシュートしてしまうという問題があった。今年度は、このPRM法におけるdiffusion subtraction stepにおいて、物理量の単調性を保ちつつ高精度に計算する手法を開発した。

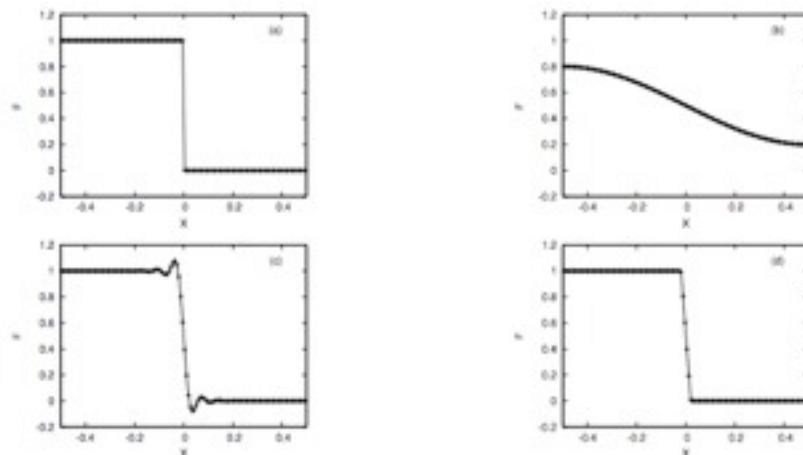


図1 階段関数状の物理量に対するPRM法のテスト計算例

新たな手法の効果を示すテスト計算結果を図1に示した。これは1次元の階段関数で表される物理量Fの分布をPRM法を用いて10000ステップ更新した結果である。(a)が初期状態、(b)がmass exchange stepのみの場合、(c)がmass exchange step + subtraction stepの場合、(d)がmass exchange step + 単調化制限付きのsubtraction stepによる結果である。(a)に比べ、(b)は大きく数値拡散し、(c)は不連続面の前後で若干振動しているのに対して、(d)ではほとんど数値拡散のなく、かつ不連続面を振動することなく再現していることがわかる。この改良によって、冷たく非常に強い衝撃波に対して内部エネルギーが負になってしまうという問題も同時に解決した。

## (2) PRM法の原始惑星系円盤+惑星相互作用問題への適用

上記の改良を行った計算手法を原始惑星系円盤と惑星の相互作用の問題へと適用した。質量1の主星、主星からの距離0.5に質量0.0001の惑星、および面密度一定のガスからなる原始惑星系円盤の時間発展を計算して、惑星が原始惑星系円盤上に励起する渦状波がとらえられるかどうかをテストした。音速をケプラー速度の5%とし、48969粒子を用いた計算結果を図2に示す。左は標準SPH法に数値シアア粘性を減らすためのBalsara補正を適用し粘性パラメータ $a=0.15$ としたものである。冷たいシアア流による密度エラーが大きいため惑星が励起する渦状の密度波はほとんど確認できない。(ただし、粘性パラメータを大きくしたり粒子数を増やしたりすることで、計算結果は改善することが確認できている。)一方、右に人工粘性を用いていないSPH法にPRM法を組み合わせた方法による計算結果を示す。主星の左上にある惑星から渦状の密度波が励起され伝搬していることがはっきりとわかる。惑星の影響によるもの以外の密度ノイズがきわめて小さいためである。また、この方法では数値粘性に起因する中心星への質量降着量も標準SPH法よりも小さいことが確認できている。今後、この手法を現実的な天体形成の問題に適用することを進めていくことが今後の課題である。

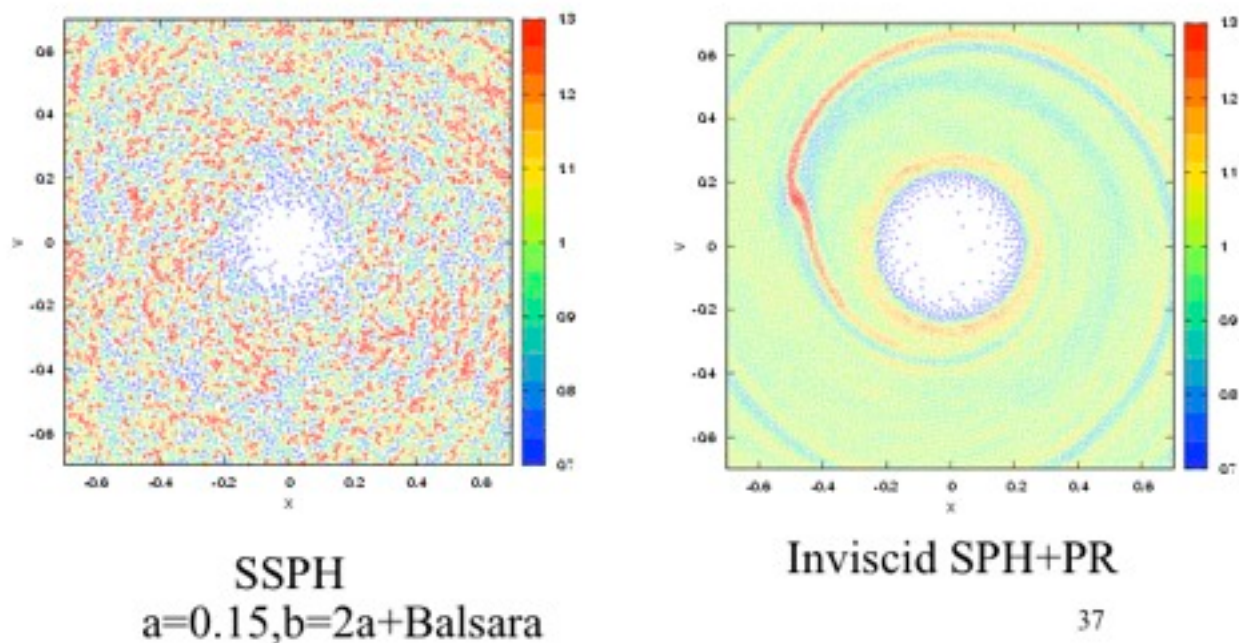


図2 原始惑星系円盤と惑星の相互作用問題へのPRM法の適用例

## 参考文献

- [1] Bessho, S. & Tsuribe, T. 2012, PASJ in press (arXiv:1203.6484)
- [2] Kimura, S. & Tsuribe, T. 2012, PASJ in press (arXiv:1205:3013)
- [3] Tsuribe, T, Imaeda, Y., & Inutsuka, S. 2012, submitted