

SPH 法の拡張とその応用

Extension of Smoothed Particle Hydrodynamics and its applications

○釣部 通, 大阪大, 〒560-0043 豊中市待兼山町 1-1, E-mail: tsuribe@vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp

Toru Tsuribe, Osaka University, 1-1, Machikaneyama-cho, Toyonaka 560-0043

Recent attempts to extend SPH, the particle rezoning method (PRM) and Boltzmann particle hydrodynamics (BSPH) are further developed. BSPH is combined with Riemann solver to have stronger stability than the original GSPH with longer timestep. Further attempt to decrease numerical shear viscosity in higher-order Godunov BSPH is described. Result of test calculation shows that new scheme has the lowest numerical viscosity in SPHs with keeping shock capturing ability so far. As astrophysical applications, 2D accretion flow onto the proto-binary stars and 3D collapse and fragmentation of rotating dense molecular cloud cores are presented.

1. Introduction

SPH 法は粒子を用いることで流体を記述する流体の数値計算法の一つである。この方法は宇宙流体力学をはじめ、様々な分野で用いられている。近年、著者らはこの SPH 法に関する幾つかの拡張を行った。一つは Particle Rezoning Method⁽¹⁾ で、もう一つは、Boltzmann SPH⁽²⁾(BSPH) である。今回は、上記 2 つの SPH 法の拡張に対して最近更に行った改善として BSPH 法に高度な衝撃波捕獲性能を加え、数値的なシア粘性を減らす試みについて報告し、新しい方法を宇宙物理学的計算に適用した例も紹介する。

2. PRM 法とその進展

標準 SPH 法では球対称カーネルの重ね合わせにより、離散的な粒子から密度などの物理量を計算する。シア流が存在し、しかもそれが冷たい場合、無視できない密度誤差が生じる。これは常に変形する流体素片を球のカーネルで記述出来ないためである。PRM 法では、SPH 法の内部に分子群を考え、分子それぞれが流体素片の変形とともに SPH 粒子を乗り換えて行くことを許す。その結果、SPH 粒子の特定の 2 粒子が極端に近づくことが回避され、密度誤差が減る。更に、各物理量の平均値にはほとんど影響を与えることなく、分散部分だけを選択的に消去する方法を新たに開発したので、それも用いて一様密度の Taylor-Green 流を粒子を用いて記述するテスト計算を行った。

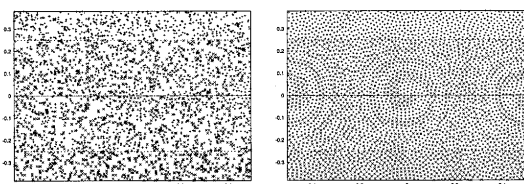


Fig. 1 SPH particle position for Taylor-Green flow with uniform density.

計算した結果を図 1 に示す。左図が PRM 法を用いない方法による SPH 密度の計算結果で右図は PRM 法を組み合わせた場合の結果である。このように PRM 法は、変形の大きな速度場に対して密度の誤差を少なくするのに効果的で、一様なシア以外の問題でも、粒子を用いて流体を記述する際に広く有用である可能性があることが分かる。

3. BSPH 法とその進展: Godunov BSPH 法の構築

BSPH 法はクランの安定性条件に縛られない計算法である。BSPH 法従来の SPH 法において h のとり方を、 $\sqrt{h^2 + c_s^2 \Delta t^2}$ と少し広げるだけでクラン条件から解放されることを示している。しかしながら、拡張された人工粘性項を用いて BSPH

法でそのままシア流を計算すると、過剰な数値粘性が入ってしまうことが分かった。そこで、BSPH 法を少なくとも時間幅が小さい極限では、数値粘性が十分に小さくなるように BSPH 法を Godunov 法と組み合わせた Godunov BSPH 法を構築した。標準 SPH 法にリーマン問題の解を適用した Godunov SPH (GSPH)⁽³⁾ を BSPH に拡張し (GBSPH)、さらに幾つかの改善を行った。SPH 粒子の運動方程式は、

$$\frac{\Delta v_i}{\Delta t} = - \sum_j \frac{m_j}{\rho} (c_{si}^{*2} + c_{sj}^{*2}) \nabla W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, \sqrt{h^2 + c_s^2 \Delta t^2}) \quad (1)$$

で、時間刻みが小さい極限で、自然に Godunov SPH に帰着する。テスト計算例として、等温衝撃波管を CFL 数 2 で計算した結果安定に計算ができることが確認された。更に、BSPH にリーマン問題を実装する際の新たな改善について考察した。粒子的な Godunov 法での新たな流束制限方法を考案するとともに、依存領域の大きさを、粒子の相対速度に応じて適切にとるという改良を行い、数値シア粘性をこれまでより低減することができた。これは、降着円盤の計算を行う上で有用である。

4. 適用例

新たに得られた上記の計算法を用いて得られた宇宙流体力学的な計算も行った。一つとして、連星への降着流を計算した。村田、猪坂、松田⁽⁴⁾ にならい、重力のソフトニング長の異なる計算を行い比較した。 $\epsilon = 0.2$ の場合、primary まわりの disk の質量と secondary まわりの disk の質量の比は、 $M_{1d} : M_{2d} = 7.6 : 3.5$ となり、 M_{2d}/q を考えても primary disk M_{1d} が大きい。一方、 $\epsilon = 0.05$ の場合、 $M_{1d} : M_{2d} = 5.3 : 6.2$ となり、secondary 周りの円盤の質量がより大きくなった。以上、村田、猪坂、松田⁽⁴⁾ の計算結果を支持するものが得られた。

また、回転する分子雲コアの重力収縮と分裂に関する 3 次元の計算結果についても報告している。

参考文献

- (1) 釣部, 今枝, 犬塚, "低温低粘性シア流の粒子法による流体計算法," 日本流体力学会年会 2007, 1 (2007), pp. 89.
- (2) 釣部, 今枝, 犬塚, "Boltzmann Smoothed Particle Hydrodynamics," 日本流体力学会年会 2008, 1 (2008), pp. 385.
- (3) Inutsuka, S., "Reformulation of Smoothed Particle Hydrodynamics with Riemann Solver", *J. Comput. Phys.* **179**, 238 (2002)
- (4) 村田, 猪坂, 松田, "周連星円盤からの降着流: 主星と伴星のどちらに落ちるか?," 日本流体力学会年会 2008, 1 (2008), pp. 386.