

# 論文内容の要旨

## *Development of a New SPH Scheme for Shear Flows and Its Astrophysical Application*

### シアー流解析のための新しいSPH法の開発とその天体物理学への応用

今枝 佑輔

#### 1 はじめに

新しい観測技術、新しい観測装置の立ち上がりなどによって、星形成領域における我々の知見は、近年、飛躍的に増大してきた。なかでも、若い星の多くが誕生時にガス円盤を伴っていることがわかったことは、大きな発見である。このガス円盤は原始惑星系円盤とよばれている。まさにこの原始惑星系円盤の中で、惑星形成や連星系形成が進行するものと考えられる。観測的に、恒星は単独星として生まれるよりも、連星もしくは多重星として生まれることのほうが多いことがわかってきた。太陽系外に新たに発見された惑星から、この宇宙には多種多様な形態の惑星系が存在していることもわかってきた。現在、連星系や惑星系がどのように形成されるのか、その形成過程を調べる研究が、非常に活発に行われている。

例えば、形成途中にある惑星や連星系は、周囲に残っている原始惑星系円盤と激しく潮汐相互作用を行う。この潮汐相互作用は、惑星・連星系さらには原始惑星系円盤の、その後の進化を決定するのに非常に重要な役割を担っている。例えば惑星の軌道離心率が進化と共に増加するのか、それとも時間と共に減少し円軌道を描くようになるのかといった問題は大変興味深い問題である。また、惑星は形成されたそばから軌道長半径が減少し、短時間で中心星まで落下してしまうといった描像が線形計算の結果から得られている。一方、我々の太陽系は、現在確かに存在している。このことは、どこかの段階で何らかの非線形的効果が重要になることを示唆している。現在、惑星・連星系と原始惑星系円盤の相互作用を理論的に詳細に解析することが求められている。

しかし、惑星・連星系と原始惑星系円盤の潮汐相互作用は非常に非線形的な現象であり、解析的に取り扱える部分は限定される。従って、数値実験による研究が持つ意

味は非常に大きい。一方、潮汐相互作用による進化の時間尺度は、動的時間尺度（つまりケプラー回転周期）に比べて非常に長い。進化を知るには、運動の長時間積分を行わなければならない。従って長時間の現象の時間進化を正しく追えるような数値計算法を開発していくことも惑星系・連星系の形成過程を研究していく上で、必要不可欠な重要なことである。

## 2 シアー流の解析において SPH 法が抱える問題点

我々は数値実験のひとつの手法として SPH 法を考える。しかしながら、従来の必要になる。SPH 法はシアー流を含む系の長時間積分に対して、非常に大きな問題点を抱えている。1 動的時間を超えて時間積分を行うと、 $\frac{\Delta\rho}{\rho} \gtrsim 1$  の密度誤差を生じてしまい、流体の正しい時間進化を追うことができない。我々はこの問題点が生じるメカニズムについて詳しく解析した。シアーは常に流体を一方的に引き伸ばす一方、SPH における粒子の広がり（カーネル）は、シアーによる引き伸ばしを考慮していない。従って、粒子と粒子が近づきすぎた場合には、密度が高くなったものと間違えてしまう（図 1 右）。従って、その適用限界は、シアーによるカーネルの引き伸ばしが球形のカーネルで近似できなくなる時点、すなわち 1 ダイナミカル時間程度であると説明できる。この結果は、従来の SPH 法で問題が生じる時間尺度を正しく説明している。（図 1 左）。

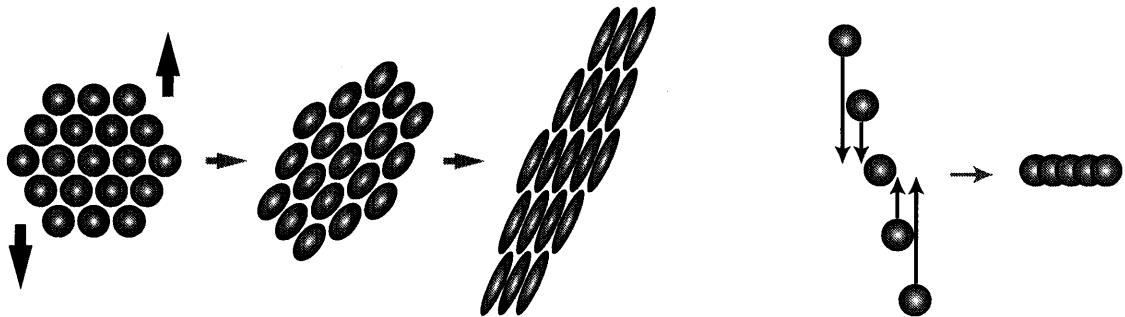


図 1: 左図：シアーによる流体素片の変形。右図：シアーによる SPH 粒子の運動

## 3 シアー流を高精度に記述する SPH 法の改良

シアー流の長時間積分が可能な SPH 法を開発するために、SPH 法の再定式化を正しく行った。その結果、密度の定義と流体の連続の式が同時に正しく満たされるためには、流体の速度場も同時に

$$\mathbf{v} \equiv \frac{\sum_j m_j \dot{\mathbf{x}}_j W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x})}{\sum_k m_k W(\mathbf{x}_k - \mathbf{x})},$$

のように定義される必要がある。この速度場の定義式は、位置  $\mathbf{x}_i$  で流体の速度  $\mathbf{v}_i$  を定義する。しかしこの流体の速度は、一般に粒子自体の速度  $\dot{\mathbf{x}}_i$  とは異なる。その差は非常に小さく、空間精度に対応するところのカーネルの大きさ  $h$  の 2 乗の誤差である。しかしながら、シアーによる流体素片の変形は時間的に一方的に変化するので、長時間積分を行う際にはこの小さな誤差が無視できない。我々は、粒子の速度と流体の速度を区別して取り扱うことで、長時間の時間積分に対しても、正しくシアー運動を追うことができるような新しい SPH 法を開発した。

## 4 改良 SPH 法を用いた Circumbinary Disk の長時間進化の解析

我々は、改良 SPH 法を Circumbinary Disk の運動に対して適用し、その長時間積分を追った。一般に、連星系の軌道離心率がある程度大きな値を持っている場合には、解析的な取り扱いが難しい。このような計算は、空間メッシュを用いた数値計算でも取り扱いが難しい。そこで我々は、他の手法では取り扱うことが困難である、連星系の軌道が楕円であるような場合について、連星系と Circumbinary Disk の相互作用を調べた。

観測的には多く連星系が大きな離心率をもった軌道を描いている。一方、理論的にも初期に円軌道を描いている連星系はガス円盤との相互作用の結果、軌道離心率を獲得することがわかっている。いったん離心率を獲得した後の進化の議論は、本来軌道が楕円であるような研究によって行われなければならない。従って、今回我々が行った計算は、まさに一般的な連星系を想定していることにあたる。

我々は数値実験の結果、離心率がある場合には Circumbinary Disk に  $m = 1$  の密度波が励起されることをあきらかにした。この波は連星系から非常に遠い位置で励起される。この結果は、これまで多くの研究者によって研究が進められてきた線形解析の結果と一見矛盾する。しかし、この結果は解析的に説明できる。我々が見ていた結果は、これまでその物理的重要性が軽視されてきた  $l = 0$  のモードに属する結果、すなわち  $(m = 1, l = 0)$  のモードであり、天体力学における 3 体問題での永年共鳴に起源を持つ波の励起である。

我々は、この数値実験の結果と、GG Tauri の観測結果を比較した。その結果、両者は良い一致を示すことが示された。UY Aurigae との比較では、良い一致は見られなかった。しかしながら、その観測の不定性を考慮すると、観測結果から得られた連星系の軌道要素に関する結果は不確定である。逆に我々の結果から、UY Aurigae の連星系は軌道離心率が大きいと予言することができる。このことは、今後の詳細な観測によって確かめることができる。

## 5 今後の課題

今回我々が改良したSPH法の手法は、原始惑星系円盤の現象を解き明かすのに役立つだけでなく、シアアを含んでいるような他の天体物理学的現象（例えば銀河円盤の運動の解析など）を研究する際にも適用が可能である。数値計算上の今後の課題としては、例えば計算のダイナミックレンジを稼ぐ手法として導入される、variable smoothing length を使った計算手法を我々の計算スキームの中で確立させることなどが挙げられる。Variable smoothing length による計算は、多くのSPH法で使われているにもかかわらず、その正しい理論的導出はいまだに行われていない。

一方、我々が考えているようなガス円盤の物理と、粒子系の物理との間には密接な関係があり、今回我々が示した ( $m = 1, l = 0$ ) の結果と同様な結果が粒子系の物理でも得られている。両者の類似点及び相違点、そしてそれらを決めている物理過程を明らかにすることも今後、非常に重要な研究になるものと考えられる。