

原始惑星系円盤形成過程のシミュレーションにおける 渦状衝撃波発生の可能性とその定量評価

折戸 英理美 (指導教員: 河村 哲也)

1. はじめに

2つの星が近接し共通の重心の周りを回転している連星系では、降着円盤が発生する。この降着円盤において渦状衝撃波の発生が予測され[1]、後に実際の観測によって存在が確かめられた[2]。連星系と同じように、星形成の過程でも原始惑星系円盤という円盤が生じることが分かっている。ならば、その原始惑星系円盤にも渦状衝撃波が発生する可能性があるのではないだろうか。もしそうであるならば、その渦状衝撃波は惑星系形成過程の上でなんらかの影響を及ぼしていると考えられる。しかし、今までの研究では原始惑星系円盤上での渦状衝撃波に関して調べられていない。

渦状衝撃波の原始惑星系形成過程に与える影響の一つとしてコンドリユールを取り上げる。このコンドリユールという物体は地球に落下する隕石に含まれており、放射性同位体元素の分析から見て原始惑星系円盤が存在していた頃に作られたことがわかっている。このコンドリユールが形成されるにはダストが一度高温で融解された後、急速に冷やされる必要があり、そのような高温の状態が発生する原因として、衝撃波を通過した際にダストがガスとの摩擦によって過熱するという説[3]が提唱されている。

以上のことから本研究では、原始惑星系円盤において渦状衝撃波が発生する可能性を調べ、発生した場合においてその衝撃波の持つパラメータとコンドリユール形成との関連性を検証した。

2. 計算手法

2.1. SPH法

本研究では分子雲ガスの状態を記述するために粒子法の一つであるSPH法を用いた。粒子法とは、格子を用いず物理量を持った個々の粒子の軌跡を追って計算する手法である。分子雲から原始星へ収縮する過程においては計算領域内に空隙が多くできるため、粒子法を用いれば計算不要な領域において計算する必要がなくなり、計算効率が向上する。その中でもSPH法では、個々の粒子を固有の広がり h を持った質点として考え、密度の空間分布を以下のように与える。

$$\rho(x) = \sum_j m_j W(x-x_j, h)$$

上式において、 W はカーネル関数と呼ばれ空間積分に関して以下のように規格化されている。

$$\int W(x, h) dx^3 = 1$$

運動方程式は、以下のようになる。

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - \nabla \Phi$$

ただし、 $\nabla \Phi$ は外力として働く粒子間の重力である。

それぞれの項に関してカーネル関数を用いると基礎方程式は次のようになる。

$$-\frac{1}{\rho} \nabla P = -\sum_j m_j \left(2 \frac{\sqrt{PP_j}}{\rho \rho_j} + \Pi \right) \nabla W(x-x_j, h)$$

$$\nabla \Phi = -\sum_j m_j \int 4\pi r^2 W(x-x_j, h) dr \cdot \frac{\vec{r}}{r^3}$$

ここで、 Π は以下のような人工粘性である。

$$\Pi = -\alpha \frac{a_{ij} \mu_{ij}}{\rho_{ij}} + \beta \frac{\mu_{ij}^2}{\rho_{ij}} \quad \mu_{ij} = \frac{h(v_i - v_j) \cdot (x_i - x_j)}{(x_i - x_j)^2 + 0.01h^2}$$

2.2. リーマン解法を用いたSPH法

SPH法で用いる人工粘性は衝撃波の強さに応じて粘性項の大きさを調節する必要があり、非常に強い衝撃波ではお互いを突き抜けてしまうという欠点がある。そのため、本研究ではSPH法にリーマン解法を適用した。リーマン解法とは、中間値を用いて不連続面から始まる非線形波の厳密解の時間発展を解くものである。このため不連続面である衝撃波を安定に記述することができる。

ここでは、 p の中間値 p^* を以下のように取った。

$$p^* = \frac{P_i \rho_i c_i + P_j \rho_j c_j - \rho_i c_i \rho_j c_j (v_i - v_j)}{\rho_i c_i + \rho_j c_j}$$

ただし、 c_i は粒子番号 i における局所音速である。

この時の運動方程式は以下ようになる。

$$\frac{dv}{dt} = -\sum_j 2 \frac{m_j p^*}{\rho \rho_j} \nabla W(x-x_j, h) - \nabla \Phi$$

また状態方程式には、ポリトロップの関係式を用いた。

$$\frac{P}{\rho^\gamma} = const$$

2.3. 衝撃波

衝撃波とは、物理量が不連続的に変化する場合に、この不連続な面が流体中を波として伝わる現象である。衝撃波が発生する領域において、衝撃波前面の領域を1、後面の領域を2とすると、それぞれの領域での衝撃波に対する相対速度 v と音速 c の間に以下の関係式が成り立つ。

$$v_1 > c_1, \quad v_1 > v_2, \quad \rho_1 > \rho_2$$

また、衝撃波伝播速度 $\phi'(x)$ は以下のように求められる。

$$\phi'(x) = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

3. モデル

モデルとして以下の分子雲コアのパラメータを用いた。

半径: 1000 AU ($AU = 1.5 \times 10^{11} m$)

密度: 10^4 個/cm³

質量: $5M_\odot$ ($M_\odot = 2.0 \times 10^{30} kg$)

このような値を持ち、密度の分布が一様であり、尚且つ z 軸方向に回転する球をモデルとする。

4. 結果

モデルの分子雲コアに温度 T と回転角速度 ω を与え、粒子と衝撃波の分布を調べた。この時粒子数 3000 で計算した。

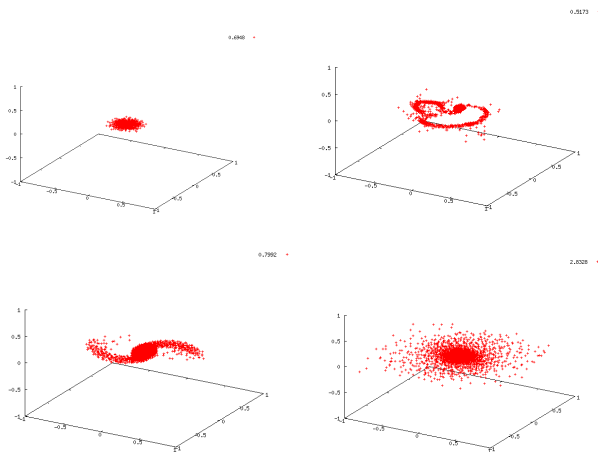


図 1: $T:10[K]$ $\omega:3.5[10^{-13} km/s]$ (左上) $T:2[K]$ $\omega:6.0[10^{-13} km/s]$ (右上)
 $T:10[K]$ $\omega:6.9[10^{-13} km/s]$ (左下) $T:20[K]$ $\omega:8.5[10^{-13} km/s]$ (右下)

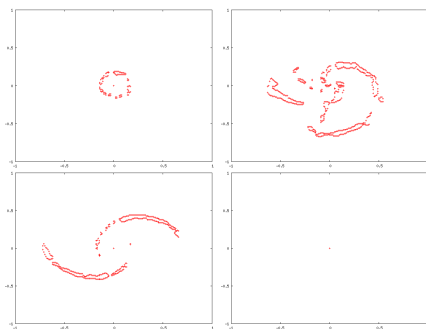


図 2: 各パラメータでの衝撃波の分布

図 1 に粒子の分布の俯瞰図, 図 2 に衝撃波の位置を示す。温度と回転角速度によって, 原始惑星系円盤の形状が変化した。左上の条件の場合では, 分子雲コアは収縮し, 1 つの原始星となり衝撃波はその周囲に表れ, どちらもその後の形状に変化はなかった。右上の場合では, 原始惑星系円盤は生じず輪の形になり, 外形に沿った形の衝撃波が現れた, 左下の場合, 原始惑星系円盤が渦状になり, 渦状衝撃波が発生することが分かった。右下の場合, 原始惑星系円盤が生じたが, 衝撃波は発生しなかった。

次に, 渦状衝撃波が確認できたパラメータ (温度 $10[K]$ 角速度 $6.9[10^{-13} km/s]$) を用いた場合の衝撃波の伝播速度と衝撃波前面の密度を調べ, コンドリュール形成条件との比較を行った。この時, 粒子数 5000 で計算した。

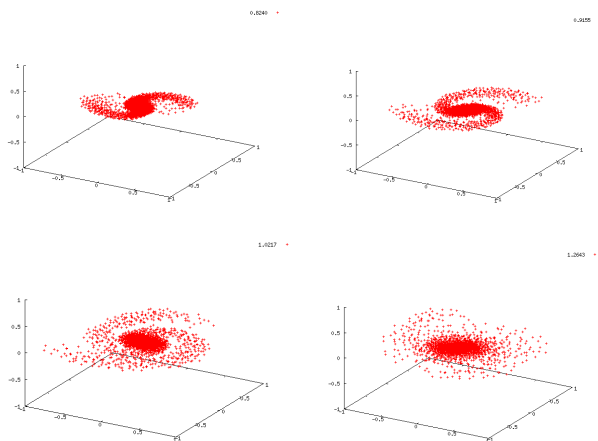


図 3: 65100 年後 (左上) 72300 年後 (右上) 87000 年後 (左下) 100000 年後 (右下)

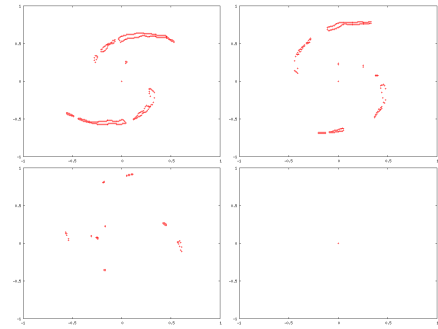


図 4: 各時間での衝撃波の分布

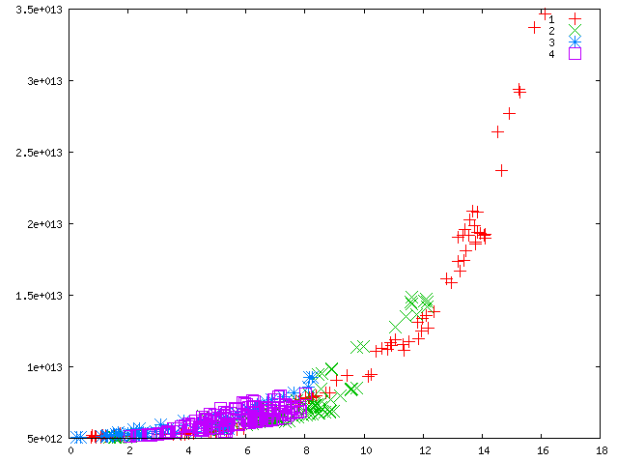


図 5: 衝撃波伝播速度 $[km/s]$ (横軸) と衝撃波前面での密度 $[個/cm^3]$ (縦軸)

図 3 に粒子の分布の俯瞰図, 図 4 に衝撃波の位置, 図 5 に衝撃波伝播速度と衝撃波前面の密度の値を示す。コンドリュール発生条件は密度 $10^{13} \sim 10^{14} [個/cm^3]$ において, 速度 $12 \sim 20 [km/s]$ である。上 2 つの場合には渦状衝撃波が発生し, 衝撃波伝播速度, 密度ともにコンドリュール形成条件を満たすことが分かった。また, 下 2 つの場合には中心星の周囲に衝撃波が発生し衝撃波伝播速度, 密度ともに低く, 条件を満たさなかった。また, 形状の時間変化としては渦は 4 万年ほどの期間で巻き込まれ原始惑星系円盤になった。

5. 考察とまとめ

温度と回転角速度という条件を満たせば, 原始惑星系円盤にも渦状衝撃波が発生する可能性があることが分かった。そして, 渦状衝撃波が発生した時点でコンドリュール形成条件を満たした。これらのことから, コンドリュール形成には渦状衝撃波が関わっていたことと, コンドリュールが存在する太陽系のような惑星系は非常に限られた範囲の初期の温度と角速度を持っていたことがいえる。そのため, 初期の太陽系の持つ正確な物質量を特定することができ, 今後の詳しい太陽系形成過程のシミュレーションを行う手助けになると考えられる。また, 渦は, 惑星形成後の粗密波によっても生じる可能性がある。そのため, 今後の課題としては粒子数を増加させて精度を上げることと, 惑星形成が成されるまでの長期間の数値解析を行うことなどが挙げられる。

参考文献

- [1] K.Sawada, et al. : "Spiral shocks and accretion in discs", Mon. Not. R. Astron. Soc., vol.229, pp.517-527, 1987
- [2] Steeghs, D, et al. : "Spiral structure in the accretion disc of the binary IP Pegasi", Royal Astronomical Society, Monthly Notices, vol. 290, no.2, pp.28-32, 1997.
- [3] 三浦均, 中本泰史: 「衝撃波加熱コンドリュール形成モデル」, 日本惑星科学会誌, vol.11, No.3, pp.150-157, 2002.