

CIP 法による 3 次元 MHD 星間分子雲シミュレーション

Three Dimensional MHD Simulation of Molecular Cloud with CIP Method

講演番号 IP5 東京工業大学 理工学研究科 機械物理工学専攻 尾形陽一

Yoichi Ogata

Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Japan

1 : 結論

電磁流体方程式を解く方法としてこれまで数々の手法が提唱されてきたが、近年誘導方程式を解く際に Maxwell 方程式の $\text{div}\mathbf{B}=0$ を満たす方法として MOCCT 法¹⁾²⁾が提案され、(Hawley,Stone) 2,3D ZEUS コードとして降着円盤上での磁気不安定性 (Balbus-Hawley Instability) 等の計算が行なわれた。

この手法と流体方程式を高精度に解く事ができる CIP 法³⁾を組み合わせた CIP-MOCCT 法が国立天文台の Kudoh らによって開発され宇宙ジェット等に適用されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。本論では CCUP 法⁷⁾に拡張した CCUP-MOCCT 法を用いて磁気流体の計算を行なう。

2 . 計算例

計算例として回転分子雲の計算を行った。

天文分野における MHD 計算では、磁力線は流体に凍りついていてよい場合が多い。例えば星間物質の電気伝導率は $\sigma \approx 10^7 T^{3/2}$ であり、分子雲コアでの典型スケールの磁気拡散時間は非常に長い ($\approx 10^{19}$ yr) ものとなる。よって本計算で用いる基礎方程式は、次の磁気流体方程式を扱う。

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{r} = -\mathbf{r} \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\mathbf{r}} \nabla p + \frac{1}{\mathbf{r}} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\mathbf{r} \left[\frac{\partial U}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) U \right] = -p \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (3)$$

$$p = (\mathbf{g} - 1) \mathbf{r} U \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0 \quad (5)$$

U は内部エネルギー、圧力は理想気体である。

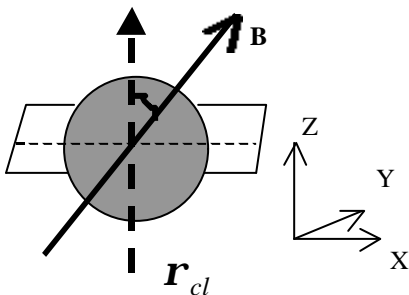


Fig.1 3D simulation model

星が形成される時には、周りより密度の濃い部分が回転しながら自己重力で収縮するが、磁場の影響により内部の角運

動量が外部に輸送される。初期の磁場と角運動量の角度を変えると角運動量輸送率、角運動量の方向が変わってくる。本論では $=0^\circ, 45^\circ$ について計算を格子数 60^3 の不等間隔格子を用いて行った。

また、 $\mathbf{B}(t=0) = (B_x, 0, B_z)$ 、 $\dot{\mathbf{U}}(t=0) = (0, 0, \mathbf{w})$ である。

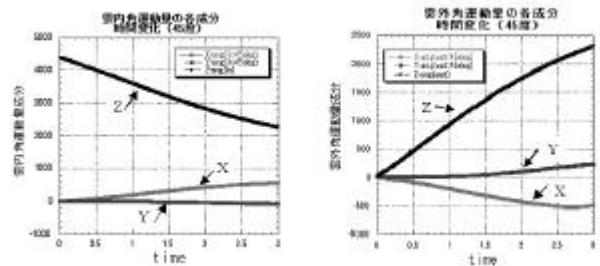


Fig.2 雲内・雲外角運動量時間変化 (0 度)

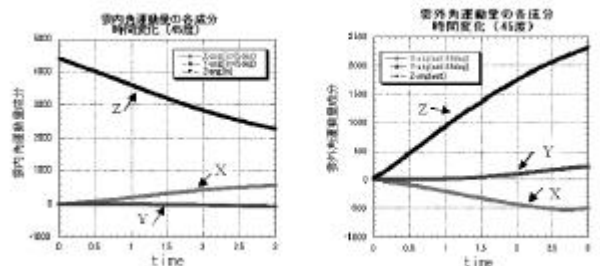


Fig.3 雲内・雲外角運動量時間変化 (45 度)

図 2,3 はそれぞれ $0^\circ, 45^\circ$ の時の雲内部・外部の各角運動量成分の時間発展を示したグラフである。初期に角運動量は Z 軸に沿っていると仮定しているので、X, Y 成分は $t=0$ で 0 であるが、 0° (平行) の時は X, Y 成分は発生せず、雲内部の Z 成分のみ減衰し、同じ量だけ雲外部に輸送されている事が分かる。それに対し、 45° の時は X 成分が雲内部と外部で符号は逆で同じ量だけそれぞれ発生し、Y 成分はほぼ 0 のままである事が分かる。この事は、角運動量が初期の磁場の方向に角運動量ベクトルが向き始めている事を示している。Magnetic Braking により上記の様な現象が起きる事は予想されているが、本件で実際に示す事が出来た。今回は基本的な解析であるが、今後様々な条件下で角運動量の際差運動等といった解析を行っていきたい。

References

- (1) T. Yabe, T. Aoki, *Comput. Phys. Commun.* **66** (1991), 219.
- (2) T. Kudoh and K. Shibata, *CFD Journal*, **8**, (1999), 56
- (3) C.R. Evans, J.F. Hawley, *ApJ*, **332** (1988), 659
- (4) J.M. Stone, M.L. Norman, *ApJ. Supp. Series*, **80** (1992), 791