GPU を利用した CIP 法による磁気リコネクション解析 Magnetic reconnection analysis by using CIP method utilized GPU

○林大和¹,本橋征幸¹,長峰康雄²,相澤正満² *Yamato Hayashi¹, Masayuki Motohashi¹, Yasuo Nagamine², Masamitsu Aizawa²

We have analyzed a 2-dimensional Petschek type magnetic reconnection. The resistive one-fluid MHD equations are adopted as the basic equations, and calculated by using the CIP-MOCCT and GPGPU methods. We confirm that reconnection processes are well explained by our simulations.

1. はじめに

今回私たちは、磁気リコネクション過程のシミュレ ーションを行った.基礎となる抵抗性 MHD 方程式に CIP-MOCCT 法[1]を用いることにより安定した数値解 析を行う.また GPU を用いてアルゴリズムの並列化 を実行,つまり GPGPU を導入することで、より高速 なシミュレーションを目指し、またどのような条件下 において GPGPU が有効であるかを検討、比較するこ とで、GPGPU の有効性を確かめることも目指す.

2. 磁気リコネクション

磁気リコネクションとは、太陽面や地球磁気圏境界 面、磁気圏尾でプラズマの混合と分離、輸送、加速を 担うプラズマ過程である.今回は磁気リコネクション に Petschek モデルを採用した.このモデルは再結合領 域を局所的にすることにより、再結合にかかる時間が

$$t_{\text{Petschek}} \cong \frac{8\ln(R_m)}{\pi} t_A$$
 (1)

となり、磁気レイノルズ数 R_m 依存性が弱いものにした. ただし、 t_A は Alfvén 時間である.そのため、再結合時間も短くなり、実際の現象に近い結果を得ることができる.

3. 抵抗性 MHD 方程式

基礎となる規格化された CGS-Gauss 単位系の抵抗性 MHD 方程式を以下に示す.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\boldsymbol{\nu} \cdot \boldsymbol{\nabla})\rho = -\rho(\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\nu})$$
(2)

$$\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{v} = -\frac{1}{\rho}\boldsymbol{\nabla}p + \frac{1}{4\pi\rho}(\boldsymbol{j} \times \boldsymbol{B})$$
(3)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + (\boldsymbol{\nu} \cdot \boldsymbol{\nabla})p = -\gamma p(\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\nu}) + (\gamma - 1)\frac{\eta}{4\pi}|\boldsymbol{j}|^2 \qquad (4)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = -\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{E} \tag{5}$$

Equation(2)-(4):Calculate the stress term by the MOC method Equation(2)-(4):Calculate the non-advection term Prepare Equation(6) by MOC method Equation(2)-(4) Calculate the advection term(CIP) Equation(5):Calculate the electric field Updata

Fig.1 Computational algorithm

$$E = \eta j - \upsilon \times B \tag{6}$$
$$i = \nabla \times B \tag{7}$$

である.ここで ρ は密度,pは圧力,vは速度であり,Bは磁場,Eは電場,jは電流密度である.また, γ は比熱 比, η は電気抵抗率である.

今回のアルゴリズムでは、まず(1),(2),(3)式におい て非移流項を計算し、その結果から移流項を CIP 法[2] で計算する.次に(4)式を MOCCT 法[3]と用いて導き出 す.Fig.1 に計算全体の流れを示す.

4. 初期条件

今回初期値は以下のように与えた[4].

$$B_y = B_0 \tanh\left(2\frac{x}{L_0}\right) \tag{8}$$

$$B_x = v_x = v_y = 0 \tag{9}$$

$$p = p_0 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) - \frac{B_y^2}{8\pi}$$
 (10)

$$\rho = \gamma p \tag{11}$$

ここで $\rho_0 = 1, p_0 = 1/\gamma, B_0 = \sqrt{8\pi/(\beta\gamma)}$ とした. ま た β はベータ値 (圧力と磁気圧の比)で, L_0 は電流シ ートの厚さ, γ は比熱比であり,それぞれ $\beta = 0.1, L_0 =$ 1, $\gamma = 5/3$ とした.

であり

1:日大理工・院(前)・量子 2:日大理工・教員・量科研

また抵抗率は,

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 \left[2(r/r_\eta)^3 - 3(r/r_\eta)^2 + 1 \right] & (r \le r_\eta) \\ 0 & (r > r_\eta) \end{cases}$$
(12)

ただし $r = \sqrt{x^2 + y^2}, r_{\eta} = L_0, \eta_0 = 0.1C_{S0}L_0$ である. C_{S0} は音速 $C_{S0} = \sqrt{\gamma p_0/\rho_0}$ である.

5. 計算結果

シミュレーション結果を Fig.2 に示す. カラーマップ されているのがlogpであり, 横軸はx, 縦軸はyである. 白の矢印は速度ベクトルであり, 黒の矢印が磁場ベク トルである. 計算する空間格子は $\Delta x = \Delta y = 0.125L_0$, 範囲は-50.125 $L_0 \le x, y \le 50.125L_0$ で格子数は 803×803である. また $t_0 = L_0/C_{50}$ (今回は $t_0 = 1$)とする と, 計算時間ステップは $\Delta t = t_0/1024$ で, $t = 20t_0$ まで 計算した. Fig.2 では $-5L_0 \le x \le 5L_0$, $-20L_0 \le y \le$ 20 L_0 の領域を表示している. (a)は初期状態である. (b) では磁力線のつなぎ変わりが起こり, (c)以降ではリコ ネクションジェットが発生していることがわかる.

Intel Core i7-4770K CPU(3.50GHz)による $t = 20t_0$ までの計算時間は約 28.3 時間であった. GPU による計算時間やその他詳細については、当日発表する.

CIP-MOCCT 法を使うことにより,抵抗性 MHD 方 程式から磁気リコネクションの解析を行うことができ た.しかし,圧力の計算に不安定を起していた.

今後の課題として, 圧力に関する計算の安定化を図 るためにも, CCUP 法と呼ばれるポアソン方程式を導 入した数値計算法, また物理量のアンダーシュートを 抑えるために有理関数 CIP 法の導入も視野に入れてい きたい.

参考文献

[1] T. Kudoh and K. Shibata ; "Magnetically Driven Jets from Accretion Disks. II. Nonsteady Solutions and Comparison with Steady Solutions", The Astrophysical Journal, Vol.476: pp632-648, 1997

[2] T. Aoki and T. Yabe ; "A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation", Computer Physics Communications Vol.66, pp219-232, 1991.

[3] John. F. Hawley and James. M. Stone ; "MOCCT: A numerical technique for astrophysical MHD", Computer Physics Communications, Vol.89 pp127-148 1995

[4] H. Kigure, K. Takahashi, K. Shibata, T. Yokoyama and S. Nozawa ; "Generation of Alfvén Waves by Magnetic Reconnection" Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.62, pp993-1004, 2010.



6. まとめと今後の課題