

磁気リコネクションに係る無次元量の検討 Study of Dimensionless Quantities Related to Magnetic Reconnection

○平田麟太郎¹, 長谷部寛², 浅井朋彦³

*Rintaro Hirata¹, Hiroshi Hasebe², Tomohiko Asai³

Abstract: In anticipation of future lunar base construction, a thorough and quantitative evaluation of the effects of magnetic reconnection within the Earth's magnetotail is imperative. While foundational analyses of reconnection have been performed with an object situated in the reconnection region, their findings are predominantly presented in normalized, dimensionless quantities. An evaluation of these results in practical, dimensional terms, therefore, necessitates a systematic assessment of the influence of the key dimensionless parameters. The present study investigates this challenge by systematically varying the dimensionless parameter β and evaluating the similarity of the dynamical outcomes under these different conditions.

1. 研究背景

近年、多分野で宇宙開発が進められている。建設分野では、特に、月面基地建設を大きな目標の一つとしている。その一方で、宇宙天気が社会インフラに及ぼす影響についても発信がなされている。平田らは、急激なエネルギー変換を伴う現象である地球磁気圏尾部の磁気リコネクションに着目し、figure 1 に示すようなリコネクション点近傍に物体を配置した場合のリコネクション解析を行った^[1]。しかし、この結果は無次元量で評価されており、有次元量での評価の際には、無次元パラメータの影響を評価する必要がある。そのため、本研究では、磁気流体方程式を用いた磁気リコネクション解析において、無次元数を変化させ、その影響を調べた。

2. 磁気流体方程式の無次元化

本研究では、オープンソース磁気流体コードである OpenMHD^[2] を使用している。このコードでは、以下のような保存系の磁気流体方程式を採用している。

OpenMHD の磁気流体方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \cdots(1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + p_T \mathbf{I} - \mathbf{B} \mathbf{B}) = 0 \quad \cdots(2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot ((\varepsilon + p_T) \mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) \mathbf{B} + \eta \mathbf{j} \times \mathbf{B}) = 0 \quad \cdots(3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{v}) + \nabla \times (\eta \mathbf{j}) + \nabla \psi = 0 \quad \cdots(4)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + c_h^2 \nabla \cdot \mathbf{B} = - \left(\frac{c_h^2}{c_p^2} \right) \psi \quad \cdots(5)$$

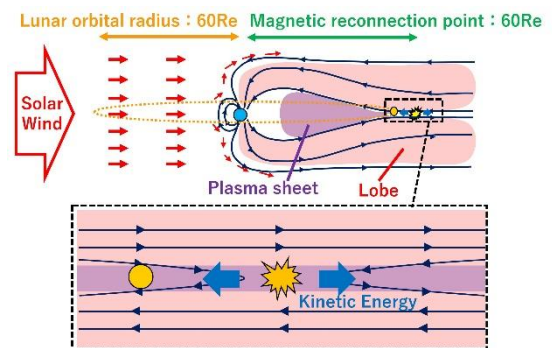


Figure 1. Magnetic reconnection at magnetotail

(1)は連続の式, (2)は運動量方程式, (3)はエネルギー方程式, (4)は磁場の誘導方程式, (5)は磁場の湧き出しがないという条件である $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ を満たすための方程式である。 $p_T = p + B^2/2$ は総圧, \mathbf{I} は単位テンソル, $\varepsilon = p/(\Gamma - 1) + \rho \mathbf{v}^2/2 + B^2/2$ はエネルギー密度, $\Gamma = 5/3$ は断熱定数である。 ρ は密度, p は圧力, \mathbf{v} は速度, \mathbf{B} は磁場, η は電気抵抗, \mathbf{j} は電流密度, ψ は仮想ポテンシャルを表す。上記方程式に対して、各物理量の特微量を用いて方程式を無次元化すると、プラズマ圧力と磁気圧力の比を表すプラズマベータ $\beta = 2p_0/B_0^2$ と慣性項と拡散項の比を表す磁気レイノルズ数 $R_m = v_0 x_0/\eta$ が無次元数として現れる。

一般的に、地球磁気圏尾部の β は低 β であることが知られ、その値は $\beta = 0.0035$ ほどと言われている^[3]。しかしながら、 10^{-3} オーダーの β を条件とした解析は解析の不安定性や多大な計算時間を要するという問題が存在する。そのため本研究では段階的に β を低下させる検討を行い、異なる β の磁気リコネクション解析に相似性があるかを検討した。

1 : 日大理工・院 (前)・土木 2 : 日大理工・教員・土木 3 : 日大理工・教員・物理

3. 数値解析と解析結果

本検討での検討概要を figure 2 に示す, $\beta = 0.2, 0.1, 0.05$ の各ケースにおいて, 磁気リコネクションにより放出されたアウトフローの圧力分布が最大値を取る瞬間を $x = -50.0, y = 0.0$ の点で比較した. 比較項目は速度, 磁場, 密度, 圧力の可視化図と $x = -50.0$ の y 方向断面の各物理量の分布形状である. また, リコネクション点付近の局所レイノルズ数は $R_{m1} = 60$, リコネクション点以外の背景の磁気レイノルズ数は $R_{m0} = 1000$ と設定した^[4]. 初期磁場は $B(y) = \tanh(y)$, 初期密度は $\rho(y) = 1 + \cosh^{-2}(y)/\beta$, 初期圧力は $p(y) = 0.5(\beta + \cosh^{-2}(y))$ とした.

Figure 3 に圧力分布が最大値の時の速度と密度の可視化図を示す. 可視化図から, リコネクションにより放出されたアウトフローの形状や大きさは, 速度, 密度ともにほぼ同じものであることが分かる. 速度の可視化図からは, リコネクション点から噴出している速度分布がおおよそ等しいことが読み取れる. 対して, 密度の可視化図からは β が 1/2 倍減少するごとに, リコネクションによって発生したプラズモイド内の密度が上昇していることが分かる. Figure 4 には, 同時刻の $x = -50.0$ の y 方向断面の速度, 密度の分布を示す.

(a)Velocity より, 各ケースの速度分布はともに類似していて, その絶対値も大幅には異なることが分かる. (b)Density からは, 密度分布の形状は類似しているが, その絶対値は大きく異なり, β を1/2倍変化させると, 密度はおおよそ2倍変化している. これは, リコネクションにより発生した, プラズモイドが形成する磁場の壁によって, 密度が流れ方向に押されながら移動するため壁付近に圧力と密度が集中して極端に高い値を示すと考えている. 文献[3]に示すような物体を配置したリコネクション解析の面から考えると, $\beta \approx 10^{-3}$ オーダーではそのベータ値の低さから困難であると予想されるが, 本検討から, ある程度解析の安定する β を選定し, その結果から $\beta \approx 10^{-3}$ の結果を見積もることが可能であると考えている.

4. まとめと今後の課題

本検討では, 磁気流体方程式の無次元数であるプラズマベータに着目し, β を1/2倍ずつ低下させる検討を行った. その結果, リコネクションにより発生するアウトフローの速度, 圧力, 磁場は形状と分布の絶対値に類似性があることが, 密度は形状に類似性があるが, 絶対値の値は大きく異なることが確認された. 磁気レイノルズ数 R_m に関しても同様の検討を行うことが今後の課題である.

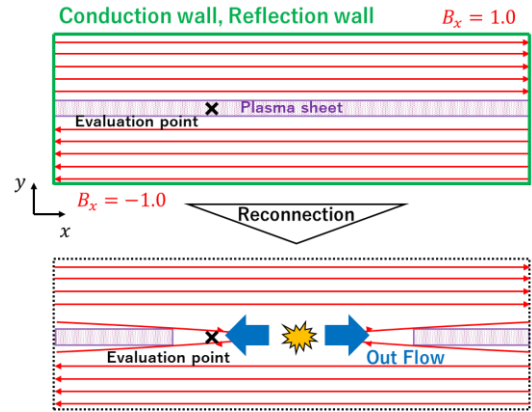


Figure 2. Reconnection simulation image

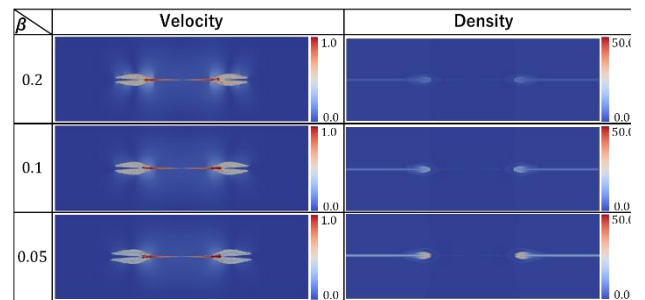


Figure 3. Velocity and density distribution

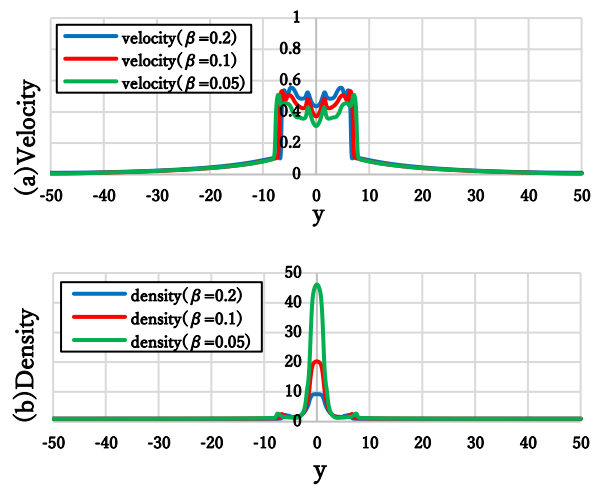


Figure 4. Distribution pattern of physical quantity

参考文献

[1]平田ら:「太陽風がもたらす磁気リコネクションの三次元解析」, 土木学会第80回年次学術講演会公演概要 差 12AM-F0-15, 2025
 [2]国立天文台科学研究部:「OpenMHD コード」, <https://sci.nao.ac.jp/MEMBER/zenitani/openmhd-j.html> (2025/9/25 閲覧)
 [3]小原隆博:「3-1 磁気圏の形成とプラズマ領域の発生」, 特集宇宙天気予報特集, Vol.48, No.3, pp.55-67, 2002
 [4]S.Zenitani.et.al, Physics of Plasmas, Vol.18, No. 022015, pp.1-9, 2011