

郭九苓, 王继业, 刘振兴. 不考虑磁层顶磁重联的全球三维 MHD 模型. 地球物理学报, 2005, 48(1): 7~12

Guo J L, Wang J Y, Liu Z X. No magnetic reconnection at the magnetopause: A new 3-D MHD simulation model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(1): 7~12

不考虑磁层顶磁重联的全球三维 MHD 模型

郭九苓^{1,2}, 王继业³, 刘振兴²

1 北京大学现代教育技术中心, 北京 100871

2 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080

3 中央民族大学物理与电子工程系, 北京 100081

摘 要 本文介绍了一个新的磁层全球三维 MHD 模型, 该模型可通过把 IMF 和地球磁场分开处理的方法“关闭”磁层顶的磁重联, 从而可直观地显示不同 IMF 条件下磁层顶的 IMF 与地磁场的反平行区域, 即磁重联最可能发生的地方. 结果表明, IMF B_x 分量对磁层顶磁重联有重要影响. 由于可关闭磁重联, 该模型还可有效地研究有无磁重联时, 太阳风对磁层位形 (如晨-昏不对称性)、粒子输运等重要问题的影响, 有助于揭示磁层物理现象的基本特性.

关键词 磁层 MHD 模拟 磁重联 行星际磁场

文章编号 0001-5733(2005)01-0007-06 中图分类号 P353 收稿日期 2004-04-13, 2004-09-15 收修定稿

No magnetic reconnection at the magnetopause: A new 3-D MHD simulation model

GUO Jiu-Ling^{1,2}, WANG Ji-Ye³, LIU Zhen-Xing²

1 Modern Education Technology Center, Peking University, Beijing 100871, China

2 Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

3 Department of Physics and Electronics Engineering, Central University of Nationalities, Beijing 100081, China

Abstract We have developed a new 3-D MHD magnetosphere simulation model. One of the main features of this model is that it can “close” the magnetic reconnection by a method of dealing with IMF and the dipole magnetic field separately. B_y introducing the anti-parallel theory, this method can show the possible reconnection sites on the magnetopause distinctly like the gas dynamic model. The results show that the IMF B_x component also has important influence on magnetic reconnection on the magnetopause like the other two components. We suggest that this model may be helpful to the study of solar-territorial interaction from a different point of shutting down the magnetic reconnection, and may reveal some important physical processes of the magnetosphere.

Key words Magnetosphere, MHD simulation, Magnetic reconnection, IMF.

1 引 言

一个可靠的三维磁层模型对于分析和理解空间探测数据, 认识磁层物理现象和过程的变化规律, 以

及对“空间天气”进行预测等都有非常重要的意义. 尽管有一定局限性, 磁流体力学方程 (MHD, Magnetohydrodynamics) 仍是惟一可用于全球磁层模拟, 并对较大尺度磁层物理过程有较好再现的方法^[1~4].

基金项目 国家自然科学基金项目 (40390150) 资助.

作者简介 郭九苓, 男, 1970 年生, 1997 年北京大学物理系硕士毕业, 在职博士研究生, 主要从事地球磁层三维 MHD 模拟方面的工作.

E-mail: cswy@sohu.com

MHD 全球模拟开始于 20 世纪 80 年代. 随着空间探测和计算机技术的进步, 已建立的几个有代表性的模型^[1,5-9], 其全球磁层模拟工作已取得许多重要成果: 对磁层的主要结构和磁层的主要物理过程(弓激波、磁层顶、极尖区、等离子片、磁重联和亚暴等)进行了定性的模拟, 而根据实际的太阳风参数进行的某些计算结果, 定量上也与空间和地面的探测数据比较有较好的一致性^[5,8,10-16].

目前 MHD 全球模拟还有很多局限和不足之处, 主要存在以下问题:

(1) 从结果上来看, 主要是对某些磁层大尺度结构和物理过程的模拟, 如弓激波、等离子片、磁尾位形、极盖区对流、磁层亚暴等, 而且模拟结果和实际探测数据之间及模拟结果之间存在显著偏差或矛盾, 对一些重要的磁层结构和物理过程(如磁层顶边界层、环电流、磁暴等)不能进行正确模拟^[1,5].

(2) 在模型适应性方面, 基本以静态模型为主, 主要适用于稳态或准稳态磁层以及一些相对稳定太阳风条件下的典型事件模拟.

(3) 在模型的物理合理性方面, 理想 MHD 方程在磁层顶和等离子片等区域会存在误差, 而采用非理想 MHD 方程时引入的电导率、扩散系数等存在较大的人为因素^[11,13], 特别是对磁层各种物理过程至关重要的磁重联效应在 MHD 模拟中主要由数值扩散产生. 模型中也没有包含共转电场和漂移电流等重要的物理因素.

(4) 在计算方法和数据结构方面, 虽然普遍采用非均匀格点或可变格点技术, 但相对于复杂而广阔的磁层区域, 仍然不能获得理想的时空分辨率.

总之, 由于 MHD 方程固有的局限性、空间环境的复杂性及模型和计算能力方面的限制, 全球磁层三维 MHD 模型还需要不断发展和完善.

磁重联无疑是影响整个磁层结构和变化过程的最基本、最重要的物理现象, 在空间探测和磁层模拟中都是非常重要的课题. 通常认为行星际磁场 (IMF, Interplanetary Magnetic Field) 具有南向分量时磁层顶磁重联发生在日下点附近, IMF 有北向分量时磁层顶磁重联发生在极区附近, 这两种情况有完全不同的太阳风-磁层耦合特性与磁尾位形及磁尾动力学过程^[17]. 磁重联和“黏性”相互作用是太阳风-磁层耦合的两种主要机制. 在 IMF 南向时, 磁层顶磁重联是驱动磁层物理过程的主要机制; 但在 IMF 北向时一些重要的磁层物理过程和磁层结构是否由或单独由磁重联引起, 如低纬边界层 (LLBL, Low

Latitude Boundary Layer) 形成机制及粒子加热、加速现象等, 是存在争议或未完全解决的问题^[18-20].

根据模拟和观测结果^[21-24], 不同行星际磁场时, 磁层顶重联位置在日下点和极区不同位置的变化符合“反平行理论”^[25]. 用气体动力论的方法可描绘出 IMF 和地磁场不同夹角时的“反平行”区域^[26,27], 但此种方法在磁层顶存在较大误差^[4], 并且由于采用经验地磁场模型, 因此不能完全反映磁层顶的真实情形. 通常的 MHD 模型, 由于数值耗散导致磁重联的存在, 无法像气体动力论模型一样直观地显示磁层顶反平行区域, 当然也很难把磁重联对磁层的影响同其他物理机制(如扩散)区别开来.

根据上述问题, 本文建立了一个 IMF 与地磁场可分开处理的全球三维 MHD 模型, 这样磁层顶磁重联是否发生在数学上是可控制的, 不受数值耗散的影响, 即与模型的差分格式和数据结构无关.

2 基本模型

2.1 模型的物理构思

本文的主要设想是把地磁场和 IMF 分开处理. 其合理性是因为不考虑磁层顶磁重联时, 两种不同起源的磁场在空间上是完全分开的(以磁层顶为分界线), 分界线附近等离子体所受磁力可认为是 IMF 和地磁场的磁力叠加而成, 数学处理方式将在下面叙述. 这种方法和预期结果应该与 IMF 为零时类似^[28], 但会比人为令 IMF 为零更有意义. 其主要优越性是:

(1) 可用于研究磁层顶重联区域位置及其对 IMF 条件的依赖. 模型可以直观显示磁层顶 IMF 与地磁场反平行区域(即磁重联最可能发生的位置), 特别是在 IMF 有北向分量时不同 x 、 y 分量影响下磁重联在极区不同位置的变化.

(2) 可得到理想的基态磁层, 从而研究磁层最基本的特性. 虽然 IMF 北向时磁层会处于比较“安静”的状态, 但实际也处于 IMF 与地磁场重联过程的驱动之下, 因而并不是真正理想基态.

(3) 可比较有无磁层顶磁重联时, 磁层不同的结构和动力学过程. 从而为以相反的角度研究一些磁层现象是否与磁重联相关及相关程度等, 提供了一种有效的手段.

本文重点研究弓激波、磁鞘区、磁层顶附近、磁尾以及相应区域的准稳态物理过程. 为简单起见, 本模型没有包括电离层模型, 即初始地磁场采用真空

偶极场.

采用理想的 MHD 方程. 由于所研究区域等离子体及磁场参数变化剧烈, 为保证足够的时空分辨率, MHD 方程动力学项采用中心差分, 扩散项采用迎风格式.

为使本模型以后可扩展为一个有良好适应性的动态磁层模型, 坐标系采用 GSE(地心太阳黄道系, Geocentric Solar Ecliptic coordinate). 由于要研究 IMF x 分量的作用, 对 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ 的问题采用 Brackbill and Barnes 的方法处理^[29].

2.2 基本方程

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

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u + p \mathbf{I}) - \mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla [(\rho + p) \mathbf{u}] - \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (4)$$

$$\mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B} / \mu_0, \quad (5)$$

其中 ρ , \mathbf{u} , \mathbf{B} , p , \mathbf{j} , μ_0 分别为粒子密度、速度、磁感应强度、热压力、电流和真空磁导率, \mathbf{I} 为单位矩阵, $\rho u = \frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{p}{\gamma - 1}$, 为单位体积等离子体能量, γ 为绝热系数.

数学上假定地磁场与 IMF 分别遵守独立的(3)和(5)式, 而没有交叉项. 在“关闭”磁重联的情况下, 对于磁层顶以内和以外的区域只有一种磁场, 因此这种处理不会带来问题. 对于磁层顶附近的格点, 磁作用力是两种磁场的磁压力和磁张力的简单叠加, 两种磁场不产生直接的相互作用, 因此也就“关闭”了磁重联. 由于计算时采用有限大小的空间格点并存在一定的数值耗散, 这种处理方法在磁层顶附近会存在一定误差(格点越小则误差越小). 根据前面的构思, “关闭”磁重联是为了更好揭示在无磁层顶重联状态下磁层结构的基本特性而设计的理想状态, 对磁层实际物理过程的模拟总是在只有一个统一磁场情况下进行的, 所以这种误差不会影响磁层模拟的可靠性.

2.3 数据结构

为了得到一个高效并且高精确性的模拟模型, 本文开发了一种“可伸缩格点”的数据结构模型.

由于计算区域非常大并且不同区域物理量变化程度有很大不同, 有比较平缓的区域如太阳风区和

远磁尾, 也有梯度很大或变化剧烈的区域如弓激波、磁层顶、极区等, 因此在全球三维 MHD 模型中普遍采用非均匀格点. 非均匀格点可分为两类: 固定格点^[9,10]和可变大小格点(但格点形状不变, 仍为正方形)^[6], 本文的模型计算单元采用可变大小格点, 不同的是格点形状可为长方形, 因此是更为灵活和高效的一种数据结构.

2.4 计算边界与边界条件

内边界在距地球中心 $3.5 R_E$ (R_E 为地球半径) 处, 外边界和格点最小尺度只受计算机内存和计算时间的限制, 在初步的模拟计算中我们采用了日向 $44 R_E$, 尾向 $70 R_E$, 其他边界距日地连线 $56 R_E$ 的计算区域.

日下点磁层顶附近最小格点尺寸为 $0.25 R_E$, 其他区域格点尺寸 $0.5 \sim 4 R_E$, 这是比较粗略的格点划分和空间区域选择, 但对于验证模型的可靠性和研究我们感兴趣的磁层顶 IMF 与地磁场夹角问题已经足够了.

日向为太阳风条件, 尾向和其他边界采用自由边界条件. 地球附近的内边界采用固定边界.

2.5 初始条件

初始时刻地磁场为偶极场, 其中粒子初始密度 $n = 1 \text{ cm}^{-3}$, 温度 $T = 10^4 \text{ K}$.

太阳风速 450 km/s , 等离子体密度 7 cm^{-3} , 温度 $1.2 \times 10^5 \text{ K}$. IMF 大小为 5 nT , 指向尾向和昏向, 在 GSE 坐标系中的分量由 Parker 理论确定^[30]. 地磁轴在 GSE 坐标系中的指向由地球在公转轨道上的位置和世界时来确定, 这种方式不用人为确定或规定 IMF 相对地磁轴的方向, 是一种更接近实际并可连续运行的模型. 本文仍令磁偶极轴与 GSE 坐标系 z 轴重合, 并研究了磁层达到准稳态时的结果.

3 结果与分析

图 1 分别为沿日地连线到磁层顶的密度和温度曲线. 弓激波密度和温度跃变均与典型太阳风条件下观测和模拟结果一致^[31,32]. 粒子密度变化曲线可以看出等离子体“减压层”(PDL, Plasma Depletion Layer)的存在^[2].

图 2 为地磁场 B (nT) 在 $x-z$ 平面投影的矢量场线示意图. 场线密度越大, 则场强越强, 地磁场近地处与远地处场强相差很大, 故这里场线密度与场强并不是线性关系. 从图中可清楚看到极尖区、磁尾近地中性线及相当于等离子体幔的平行磁力线结构.

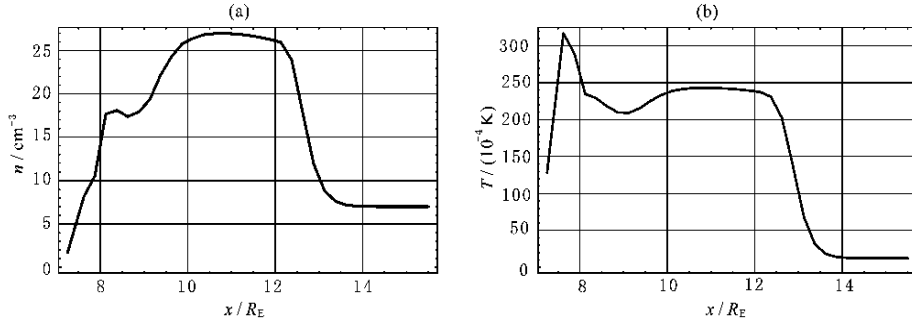


图 1 沿日下点的粒子密度(a)和温度(b)变化曲线

Fig. 1 Density (a) and temperature (b) profiles along the Sun-Earth line

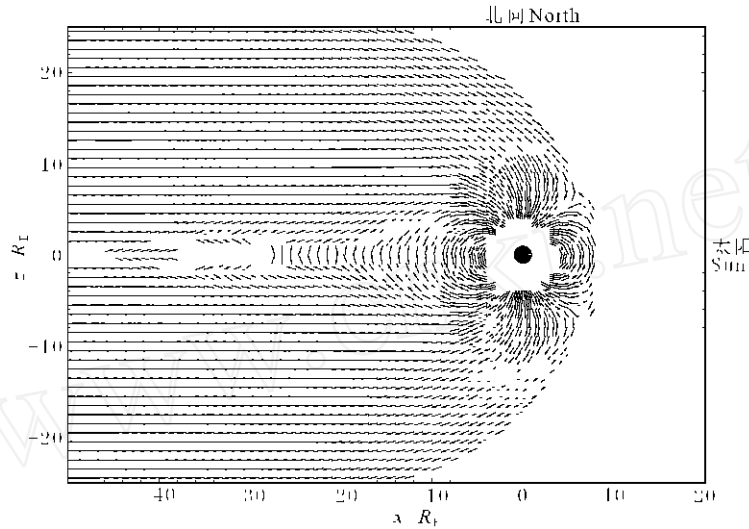


图 2 x - z 平面(昼夜子午面)地磁场位形

Fig. 2 Geomagnetic field vectors in the noon-midnight meridian plane

图 3 为 $x - y$ 平面(晨-昏面或赤道面)行星际磁场 B_s (nT) 投影的矢量场线示意图。 B_s 的 y 、 x 分量大致相等, z 分量为零, 因此弓激波在昏侧为准垂直激波, 在晨侧为准平行激波。从图中可看到两者明显差别和磁力线通过弓激波的转向过程。

图 4 为 $x - z$ 平面(昼夜子午面)粒子密度图。从图中可清楚看到弓激波、磁鞘区、极尖区等磁层结构。由于粒子密度与色标变化采用线性关系, 磁尾等离子片在图中并不明显。粗实线为经验模型磁层顶的位置^[33], 可以看到经验模型磁层顶位置与模拟结果符合得很好。

图 5 给出了磁层顶 MF 与地磁场平行/反平行区域的示意图。图 5a 的结果与气体动力论所描绘的磁层顶图像类似^[26, 27], 但晨-昏侧具有一定的不对称性, 这是 MF x 分量造成的(对比图 5b 只有 B_{sy} 分量的结果)。

众所周知, MF 南北向分量 B_{sz} 对磁层结构和

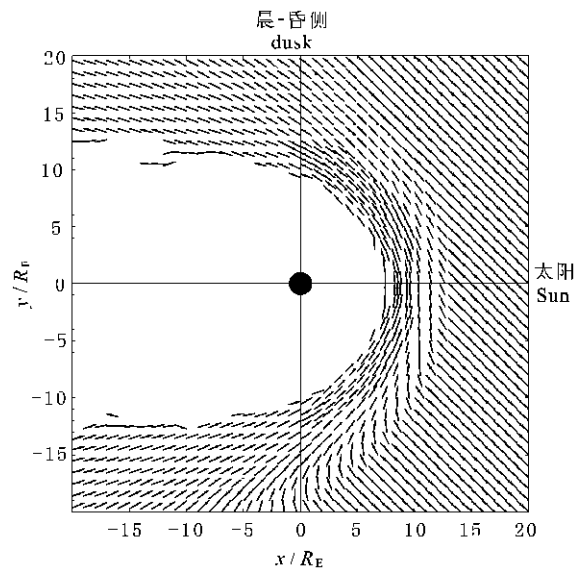


图 3 x - y 平面(赤道截面) MF 位形

Fig. 3 MF vectors in the equatorial plane

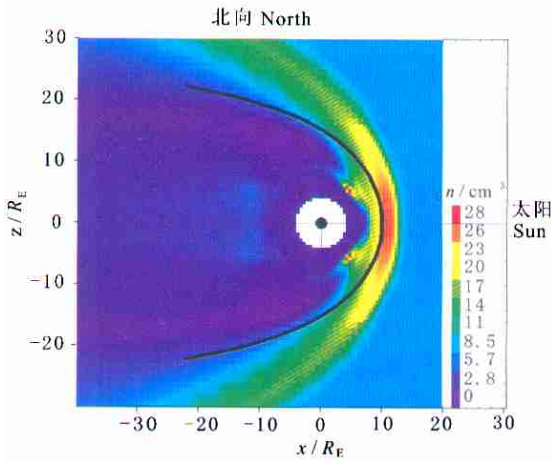


图4 x - z 平面(昼夜子午面)粒子密度分布

Fig. 4 Plasma density of the noon-midnight meridian cross section

物理过程有决定性影响,晨昏向分量 B_{sy} 的作用也已进行了较多研究^[1,21,34,35]. 根据 Parker 理论^[30], B_{sx} 分量是固有的,本文的模拟结果表明 IMF B_{sx} 分量除了可产生磁层晨昏侧弓激波的不对称外(图3),还可造成磁层顶磁重联区域的晨昏不对称,因此也会对磁层结构及物理过程产生重要影响.

4 总结与讨论

本文建立了一个新的磁层全球三维 MHD 模拟模型. 在典型的太阳风条件下,初步计算表明该模型对于磁层大尺度结构特征,如弓激波、磁层顶、极尖区位置,磁尾磁场位形和等离子片等都能进行良好

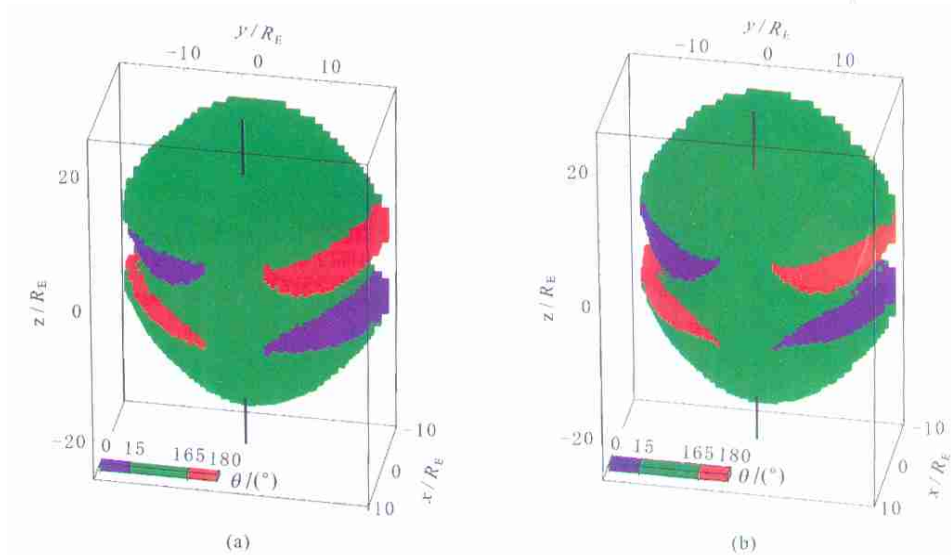


图5 磁层顶 IMF(B_s)与地磁场(B)夹角 示意图

红色区域表示“反平行”区域($>165^\circ$),蓝色区域表示平行区域($<15^\circ$). (a) $B_{sx} = -3.7\text{nT}$, $B_{sy} = 3.3\text{nT}$, $B_{sz} = 0$; (b) $B_{sx} = 0$, $B_{sy} = 5\text{nT}$, $B_{sz} = 0$, 观察点在 CSE 坐标系 $(25 R_E, 5 R_E, 15 R_E)$ 处.

Fig. 5 Parallel/anti-parallel sites of the geomagnetic field lines and the IMF on the magnetopause

的模拟和再现,定量上也与典型太阳风条件下观测及理论结果符合. 因此该模型是有效和可用的. 特别是该模型可将行星际磁场与地磁场分开处理,可用类似气体动力论的方式直观显示磁层顶可能的重联区域,这对磁层顶磁重联研究具有一定意义. 不考虑磁重联还可以从一个相反的角度探讨磁重联对于磁层结构和太阳风粒子与能量输运过程的影响,比如近磁尾晨昏侧边界层粒子注入机制^[19,20], IMF 长时间北向时磁尾是否闭合^[11,36],以及磁层晨-昏侧不对称的物理机制^[37], IMF x 分量对磁层结构的影响等. 这方面的问题我们将在以后的工作中讨论.

参考文献 (References)

[1] Gombosi T I, DeZeeuw D L, Goth C P T, et al. Magnetospheric Configuration for Parker-Spiral IMF Conditions: Results of a 3D AMR MHD Simulation. *Adv. Space Sci.*, 2000, **26**(1): 139 ~ 149.

[2] Siscoe G L, Crooker N U, Erickson G M, et al. MHD properties of magnetosheath flow. *Planet. Space Sci.*, 2002, **50**: 461 ~ 471

[3] Ridley A J, DeZeeuw D L, Gombosi T I. Using steady state MHD results to predict the global state of the magnetosphere-ionosphere system. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A12): 30067 ~ 30076

[4] Fuselier S A, Waite Jr J H, Avanzo L A, et al. Characteristics of magnetosheath plasma in the vicinity of the high-altitude cusp.

- Planet. Space Sci.*, 2002, **50**: 559 ~ 566
- [5] Raeder J, McPherron R L, Frank L A, et al. Global simulation of the Geospace Environment Modeling substorm challenge event. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A1): 381 ~ 395
- [6] Powell K G, Roe P L, Linde T J, et al. A solution-adaptive upwind scheme for ideal magnetohydrodynamics. *J. Comput. Phys.*, 1999, **154**: 284 ~ 309
- [7] Tanaka T. Finite volume TVD scheme on an unstructured grid system for three-dimensional MHD simulation of inhomogeneous systems including strong background potential field. *J. Comput. Phys.*, 1994, **111**: 381 ~ 389
- [8] Watanabe K, Sato T. Global Simulation of the Solar Wind-Magnetosphere Interaction: The Importance of Its Numerical Validity. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(A1): 75 ~ 88
- [9] Fedder J A, Lyon J G. The Solar Wind-Magnetosphere-Ionosphere Current-Voltage Relationship. *Geophys. Res. Lett.*, 1987, **14**(8): 880 ~ 883
- [10] Usadi A, Kageyama A, Watanabe K, et al. A global simulation of the magnetosphere with a long tail: Southward and northward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(A5): 7503 ~ 7517
- [11] Raeder J. Modeling the magnetosphere for northward interplanetary magnetic field: Effects of electrical resistivity. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A8): 17357 ~ 17367
- [12] Song P, DeZeeuw D L, Gombosi T I, et al. Global MHD Simulations for southward IMF: a pair of wings in the flanks. *Adv. Space Res.*, 2001, **28**(12): 1763 ~ 1771
- [13] Ogino T, Walker R J, Ashour-Abdalla M. A global magnetohydrodynamic simulation of the response of the magnetosheath and magnetosphere when the interplanetary magnetic field is northward. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1992, **20**(6): 817 ~ 828
- [14] Tanaka T. Application of an MHD simulation to the study of substorms. *Adv. Space Res.*, 2001, **28**(12): 1693 ~ 1699
- [15] White W W, Siscoe G L, Erickson G M, et al. The magnetospheric sash and the cross-tail S. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(10): 1605 ~ 1608
- [16] Slinker S P, Fedder J A, Emery B A, et al. Comparison of global MHD simulation with AMIE simulations for the events of May 19-20, 1996. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A12): 28379 ~ 28395
- [17] Kivelson M G, Russell C T. Introduction to Space Physics. Cambridge University Press, 1995
- [18] Fedorov A, Budnil E, Sauvaud J-A. Interconnection of high-latitude and low-latitude boundary layers when IMF B_y is dominant. *Adv. Space Res.*, 2002, **30**(12): 2771 ~ 2779
- [19] Fujimoto M, Terasawa T, Mukai T, et al. Plasma entry from the flanks of the near-Earth magnetotail: Geotail observations. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A3): 4391 ~ 4408
- [20] Phan T, Larson D, McFadden J, et al. Low-latitude dusk flank magnetosheath, magnetopause, and boundary layer for low magnetic shear: Wind observations. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A9): 19883 ~ 19895
- [21] Reader J, Vaisberg O, Smirnov V, et al. Reconnection driven lobe convection: Interball tail probe observations and global simulations. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2000, **62**: 833 ~ 849
- [22] Mobarry C M, Fedder J A, Lyon J G. Equatorial plasma convection from global simulations of the Earth's magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A4): 7859 ~ 7874
- [23] Gosling J T, Thomsen M F, Bame S J, et al. Observations of reconnection of interplanetary and lobe magnetic field lines at the high-latitude magnetopause. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A8): 10097 ~ 14106
- [24] Gosling J T, Thomsen M F, Le G, et al. Observations of magnetic reconnection at the lobe magnetopause. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A11): 24765 ~ 24773
- [25] Crooker N U. Dayside merging and cusp geometry. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**: 951 ~ 959
- [26] Russell C T. The structure of the magnetopause. *Planet. Space Sci.*, 2003, **51**: 731 ~ 744
- [27] Stahara S S. Adventures in the magnetosheath: Two decades of modeling and planetary applications of the Spreiter magnetosheath model. *Planet. Space Sci.*, 2002, **50**: 421 ~ 442
- [28] Kageyama A, Watanabe K, Sato T. Global simulation of the magnetosphere with a long tail: No interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(A4): 3929 ~ 3943
- [29] Brackbill J U, Barnes D C. The effect of nonzero $\nabla \cdot \mathbf{B}$ on the numerical solutions of the magnetohydrodynamic equations. *J. Comput. Phys.*, 1980, **35**: 426 ~ 430
- [30] Parker E N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. *Astrophys. J.*, 1958, **128**: 664 ~ 676
- [31] Song P, Russell C T, Thomsen M F. Slow Mode Transition in the Frontside Magnetosheath. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(A6): 8295 ~ 8305
- [32] Samsonov A A, Hubert D. Temporal variations in the magnetosheath: Comparison between MHD calculations and observations for one event on September 17, 1978. *Planet. Space Sci.*, 2002, **50**: 619 ~ 625
- [33] Shue J-H, Russell C T, Song P. Shape of the low-latitude magnetopause: Comparison of models. *Adv. Space Res.*, 2000, **25**(7/8): 1471 ~ 1484
- [34] Siscoe G L, Erickson G M, Sonnerup B U Ö, et al. Magnetospheric sash dependence on IMF direction. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(10): 1921 ~ 1924
- [35] Kaymaz Z, Siscoe G L, Luhmann J G, et al. Interplanetary Magnetic Field Control of Magnetotail magnetic Geometry: IMP 8 Observations. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(A6): 11113 ~ 11126
- [36] Ogino T, Walker R J, Ashour-Abdalla M. A global magnetohydrodynamic simulation of the response of the magnetosphere to a northward turning of the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(A6): 11027 ~ 11042
- [37] N meček Z, Hayosh M, Šafář ěk J, et al. The Dawn-Dusk Asymmetry of the Magnetosheath: Interball-1 Observations. *Adv. Space Res.*, 2003, **31**(5): 1333 ~ 1340