

The realization of substorm processes by the eigenmode decomposition method in global MHD simulations

Aoi Nakamizo[1]; Akimasa Yoshikawa[1]
[1] Earth and Planetary Sci., Kyushu Univ.

The magnetospheric substorm is the fundamental but unsolved problem in the solar-terrestrial physics. Our goal is to understand the mechanics and energetics of substorm processes completely in the context of the Magnetosphere-Ionosphere coupling system. In this study, we propose new concepts that will be applied in global MHD simulations, toward the complete understanding of the substorm processes. The details are as follows:

In linear theory, any MHD processes are described as the superposition of the MHD eigenmodes (Intermediate, fast, and slow mode) that are independent each other and its related physics, such as the force balance and energy balance, is clear. However, in the actual magnetosphere, due to the complexity and inhomogeneity of the background magnetic field and plasma, it is extremely difficult to understand the physical processes of phenomena occurring there. Then numerical simulations are very useful for understanding the complex actual phenomena. Formally, the source of FACs on magnetospheric side is identified as the center of rotational convection and the inhomogeneity of the background field and the requirements explicitly imposed by the M-I coupling are only the equality of electric potential and the current closure (continuity of FACs and divergence of ionosphere current) between magnetosphere and ionosphere. Then, it seems that we understand the M-I coupling if we can deduce the one-to-one correspondence of magnetosphere rotational field and ionosphere convection connected via FACs. Here the problem is that the above formalism only states the quasi-steady state but say nothing about the physics of non-steady processes. The following are at least necessary for the consideration of substorm processes.

(1) The excitation of FACs on the magnetosphere side: The magnetospheric convection is basically composed of rotational motion (incompressible, quasi-steady, potential electric field, Intermediate mode) and divergent motion (compressible, non-steady, inductive electric field, fast or slow mode) and FACs are always connected to magnetospheric perpendicular currents. The excitation of FACs is inextricably linked with the growth and decay of perpendicular currents. Therefore, the stress and energy balance associated with divergent field and how they are related to that of rotational field should be clarified.

(2) The description of the magnetosphere-ionosphere coupling process: It is necessary to describe the interaction of intermediate mode and weakly-ionized plasmas consistently in order to clear up the relationship between the inflow/outflow of electromagnetic energy and stresses transferred by FACs and the joule dissipation and momentum change of weakly-ionized plasmas in the ionosphere.

Existing magnetosphere MHD simulations do not provide with the viewpoints of the decomposition of magnetospheric convection into divergent and rotational part and the interaction process through intermediate mode in magnetosphere-ionosphere coupling system. In this paper, we propose an idea for realization of the rotational field and divergent field in a MHD simulation and talk about the details of the method.

我々は、サブストーム発現機構の、磁気圏電離圏 (MI) 結合系における自己無撞着な理解を目指している。数値シミュレーションでサブストーム再現に成功すれば、それはサブストーム研究の大きな前進となりうるが、MI 結合系 3 次元 MHD シミュレーションモデルは数多く開発されているものの、厳密なサブストーム再現は未だ実現していない。沿磁力線電流 (FAC) によって結合した MI 対流場の急変現象ともいべきサブストームを再現し、その発現機構を解明するには、少なくとも、磁気圏エネルギー解放の境界条件を与える MI 結合部を自己無撞着に記述するとともに、対流変化と FAC 励起の間にある物理過程を明確にする必要がある。具体的には、以下である。

複雑な自然現象を捉えるのに、数値シミュレーションは有用な手段だが、磁気圏 MHD シミュレーションでこれまでに得られた理解は十分なものだろうか？形式的には、磁気圏側 FAC のソースは回転性の運動中心および場の不均一領域から特定され、MI 結合が課す基本条件は M-I 間におけるポテンシャル一致および電流クロージャー (FAC と電離圏発散電流の連続性) のみである。よって、FAC をつうじた磁気圏回転場と電離圏対流の一対一対応が描ければ、一見、M-I 結合系は理解できたかに見える。しかしこの形式論は、準定常状態は保証するが非定常過程の物理を含んでいない。非定常過程の考察には少なくとも以下の二点が必要である。

(2) 磁気圏側 FAC 励起について： 磁気圏対流は、回転場 (非圧縮運動、準定常状態、Intermediate mode、FAC) と発散場 (圧縮運動、非定常過程、fast/slow mode、垂直電流) から構成され、FAC は常に垂直電流からもたらされる、即ち、非定常過程では磁気圏側 FAC 励起は垂直電流の盛衰/圧力構造の発展と同義である。よって、磁気圏側 FAC 励起の物理過程を捉えるには、発散場・回転場の発展過程・相互関係を明確にする必要がある。

(1) MI 結合について： MI 結合過程の進展は、MI 間の対流の差異によって生じる電離圏起源 Intermediate mode (FAC) 発生によって保障される (電離圏フィードバック)。よって、FAC を通じて流出入する電磁エネルギー・応力の保存性を満たす自己無撞着な MI 結合の記述が必要である。

現在の磁気圏 MHD シミュレーションは、上記 (1)(2) を備えていない。つまり、磁気圏対流については回転場・発散場といった分離の観点を備えておらず、M-I 結合については準定常状態でのみ正当性が保障される静的 MI 結合アルゴリズムを採用しており、非定常過程における電離圏フィードバック効果が正當に評価されていない。準定常状態の観察には破綻はないが、シミュレーションが本領を発揮する非定常過程において、磁気圏ジェネレータ側での FAC 励起に対し物理過程に立脚した説明が不十分なものであり、磁気圏電離圏結合に伴う各種物理量の保存が保証されていない。以上から我々は、substorm 理解の第一歩は、磁気圏 MHD シミュレーションにおける回転場と発散場の分離、発散場・回転場の帰結としての FAC 系生成の記述、及び Intermediate mode と弱電離気体の陽なる相互作用による MI 結合であると提案する。本発表では、MHD シミュレーションにおける回転場・発散場分離（モード分離）のアイデアと手法の詳細を紹介し、それが実現した場合に期待されることについて議論する。