

サブストーム統一モデルの構築に向けて

町田 忍 [1]; 福井 健人 [2]; 宮下 幸長 [3]; 家田 章正 [4]
[1] 名大・ISEE; [2] 名大 ISEE; [3] KASI; [4] 名大宇宙地球研

Toward a unified model of substorm

Shinobu Machida[1]; Kento Fukui[2]; Yukinaga Miyashita[3]; Akimasa Ieda[4]
[1] ISEE, Nagoya Univ.; [2] ISEE, Nagoya Univ.; [3] KASI; [4] ISEE, Nagoya Univ.

Numerous models of substorms have been proposed so far, and they are roughly divided into two categories, i.e., the outside-in category that is represented by the near-Earth neutral line (NENL) model and the inside-out category represented by the current disruption model or the ballooning instability model. Controversies have been raised for many years over the validity of those models. However, in recent years we have obtained important clues to solve this long-standing issue by analyzing THEMIS probe data for substorms and pseudo-substorms separately. [Fukui et al., 2017]

The key is the plasma pressure in the equatorial region, and it was about 1.3 times higher in substorms, than the pseudo-substorm in the region between $X \sim -7$ and -8 Re. However, no difference was found beyond $X \sim -10$ Re. Therefore, the spatial gradient of the plasma pressure in the region of $X \sim -7.5$ Re must be a necessary condition for the occurrence of substorm. Abrupt earthward flows originated from the catapult current sheet relaxation and subsequent magnetic reconnection at the NENL just prior to the onset is a common signature for both substorm and pseudo-substorm, which seems to be essentially a result of the tearing instability in the magnetotail. [Uchino and Machida, 2015] The subsequent earthward flows must initiate some instability, quite likely the ballooning instability around the flow braking region.

Substorms do not occur only with the magnetic reconnection. If there is enough plasma pressure gradient, the system can develop into a substorm. Otherwise, it will end up with a pseudo-substorm. We emphasize that both NENL model and the ballooning instability model are partially correct but incomplete, and the true model of substorm can be constructed by synthesizing multiple models of substorm including at least these two models.

これまでに数多くのサブストームモデルが提案されているが、それらの大部分のものは、NENL (Near-Earth Neutral Line) モデルで代表される Outside-In モデルと、電流遮断モデルまたはバルーニング不安定モデルで代表される Inside-Out モデルに分類される。そして、それらのモデルの妥当性を巡って長年論争が繰り返されてきた。しかし、近年、THEMIS 衛星で取得されたデータをサブストームと疑似サブストームについて別々に解析することで、この難問を解決するための重要な手掛かりが得られた。 [Fukui et al., 2017]

その鍵となるのは、赤道領域のプラズマ圧の空間勾配である。 $X \sim -7$ Re と -8 Re の間のサブストーム時のその値は、疑似サブストーム時に比べて約 1.3 倍大きい。しかし、 $X \sim -10$ Re 以遠では殆ど差がみられない。したがって、 $X \sim -7.5$ Re の領域のプラズマ圧の空間勾配の大きいことが、サブストームが発生するための必要条件であることが推定される。サブストーム開始直前のカタパルト電流シートの緩和およびその後の磁気リコネクションを原因とする地球向きのプラズマ流は、本質的に磁気圏尾部におけるティアリング不安定の結果であると考えられる。 [Uchino and Machida, 2015] その流れの発生は、サブストームと疑似サブストームに共通した特徴であるが、サブストームにおいては、それが何らかの不安定性、恐らく、バルーニング不安定を引き起こすものと推定される。

ここで重要なことは、サブストームは、磁気リコネクションのみでは発生しないという事実である。サブストームは、十分なプラズマ圧力勾配がある場合にのみ発生し、それ以外の場合は、単に疑似サブストームに止まってしまう。NENL モデルとバルーニング不安定モデルはそれぞれ部分的に正しいが完全でない。真のサブストームモデルは、少なくとも、この2つを含む複数のサブストームモデルを統一的に組み合わせることによってはじめて構築できる。