

サブストームの正式理論

田中高史¹

¹九州大学名誉教授

Formal theory of the substorm

Takashi Tanaka¹

¹*Emeritus Professor, Kyushu-u*

It has been believed that the substorms is a manifestation of extraordinary plasma processes in the magnetosphere such as instability, anomalous resistivity and reconnection. In this paper, we show that this belief is a misleading concept and that substorm must be understood as the development and transition of the convection system. Major observed signatures of the substorm have all become reproducible by the recent magnetosphere-ionosphere (M-I) coupling simulation. In the ionosphere, these reproductions include enlargement of the oval and quiet arc during the growth phase, the onset that strat from the equatorial edge of the oval together with Pi2 and positive bay, and the westward traveling surge (WTS). Also in the magnetosphere, the plasma sheet thinning, the dipolarization, the D-deflection, earthward propagating dipolarization are reproduced successively. In order to understand the substorm as the change in convection system, we first study from these numerical solutions the energy conversion driving the convection and the generation mechanism of field-aligned current (FAC) namely the formation process of the dynamo. Based on these results, we investigate how the structure of the convection would change from the quiet state to the growth phase and further to the expansion phase. Then we clarify how the various substorm signatures in the magnetosphere and the ionosphere are related with the corresponding developments in the convection system.

サブストームは、不安定、異常抵抗、リコネクションなど、磁気圏プラズマ中の異常過程の現れであると信じられてきたが、この論文では、これは誤りであり、サブストームは対流の発展と変動として理解されることを示す。磁気圏はその全体が見えないのが、サブストーム研究の最大の困難である。特に電流のトレースは最重要であるにも関わらず、実際には出来ない。磁気圏全体の構造は推定であり、カートゥーンで描かれている（ダンジェー対流、CW、ポストローム電流、部分環電流など）。ダンジェー対流のカートゥーンに、電離圏で観測されるサブストーム変動を重ねれば、（中尾部）リコネクションが見えているのがサブストームである、というような安直な結論に至るのは当然である。同じような（部分から全体を説明する）発想に立つサブストームモデルに、電流切断モデルがある。これはオンセットの開始の位置が赤道側のアークであるという点から、MHDの破れは（内部磁気圏の）局所的な不安定として発生し、中尾部リコネクションはその余波によると考える。これらのモデルでは、電離圏は付けたし（受動体）であり、そこで描かれる磁気圏-電離圏電流系では、たいていの場合、力のバランスとエネルギー保存が、厳密には考えられていない。このようなモデルは、部分を見て（不要部分は適当にカットした）全体を連想する、というプロセスで成り立っている。

観測されるサブストームの変動は、最近のシミュレーションで全て再現されている。電離圏では、成長相でのオーロラオーバルの拡大と quiet arc、Pi2 と positive bay、それらと共にオーロラオーバルの赤道側から開始するオンセット、西方伝搬するサージ（WTS）が再現されている。磁気圏では、プラズマシート thinning、双極子化、D-deflection、地球向きに伝搬する dipolarization front が再現されている。これらの数値解からサブストームを理解するため、まず対流を駆動するエネルギー変換と FAC の生成機構、すなわちダイナモを調べるのが重要である。その結果から、サブストームの成長相と拡大相で、対流構造がどのように変化するかを知ることが出来る。これから、電離圏と磁気圏における各種サブストーム変動が、対流の構造変動とどう連動しているかが、解明される。

ダンジェー対流で連想されているような、開磁場の磁気張力が磁気圏内部に及んで対流が励起されるというイメージは誤りである。磁気張力は極弱く、侵入したプラズマのエネルギーが圧倒的である。プラズマのエネルギーで励起される対流は、多くの要素の等価な結合系である。磁気圏-電離圏結合系では、散逸領域は電離圏であり、オーロラや地磁気変動はこの散逸の現れである。これらの散逸エネルギーの大元は太陽風の運動エネルギーに違いない。太陽風の運動エネルギーはまずシースプラズマの内部エネルギーに変換され、それが磁気圏内部でいくつかの段階を経て、電磁エネルギーに変換され、FAC として電離圏に供給される。全ての FAC は、磁化電流から生成される。当たり前のことであるが、対流とエネルギー変換においては、力のバランスとエネルギー保存が成り立つことが必須である。これらの力学法則に従って、磁気圏-電離圏対流を（シミュレーションで）再現すれば、サブストームはその変動と急変現象（状態遷移）として自然に発生する。サブストームには何かキーとなる重要な素過程が隠されているという発想では、研究の方向は出だしから誤ってしまう。