

サブストーム発生メカニズムの解明

田中高史¹
¹九州大学

Generation mechanism of the substorm

T. Tanaka¹
¹Kyushu University

As the observational appearance, the substorm consists of four consecutive periods, the growth phase, the onset, the expansion phase, and the recovery phase [McPherron, 1970, 1979]. According to the development of these phases, various auroral forms occur sequentially in the ionosphere together with the corresponding auroral current system [Elphinstone et al., 1993; Kamide et al., 1996]. It is extensively studied how auroras and associated geomagnetic perturbations occur in the ionosphere. The problem is their origins in the magnetosphere. The key mechanism is the magnetosphere-ionosphere (M-I) coupling process realized by the exchange of the field-aligned current (FAC) between the ionosphere and the magnetosphere. Especially, the origin of arc type auroras must coexist with the source mechanism of the upward FAC. In this paper, we try to discuss the substorm mechanism recognizing that the generation process of the FAC has a crucial importance. We consider two main points to understand the generation of the FAC. The first point is to understand the FAC as the mechanism which transmits the motion from the magnetosphere to the ionosphere [Iijima, 2000; Birn and Hesse, 2013; Tanaka, 2015]. In other words, if there is a FAC, we must identify the motion (shear) that should be transmitted. The second point is to understand the FAC as the energy supplier that compensates the ionospheric dissipation to maintain the convection. For this purpose, we must search for the dynamo that energize the FAC [Tanaka, 2007; Kikuchi, 2014; Tanaka et al., 2016]. These points are clarified from a global simulation code which gives numerical solutions having an extremely high resolution. The substorm solution obtained from this simulation code reproduces the precise sequence of the substorm onset in the ionosphere. It can reproduce sequentially the quiet arc during the growth phase, initial brightening at the onset, and the westward traveling surge (WTS) during the expansion phase. It even reproduces the onset that starts from the equatorward side of the oval, two step development of the onset, and the WTS that starts two minutes after the initial brightening. Then, we investigated the counter structures in the magnetosphere that correspond to each aurora in the ionosphere. The structure in the magnetosphere promoting the initial brightening is the near-earth dynamo in the inner magnetospheric region away from the equatorial plane. The near-earth dynamo is driven by the field-aligned pressure increase due to the parallel flow associated with the squeezing, combined with equatorward field-perpendicular flow induced by the near-earth neutral line (NENL). The dipolarization front is launched from the NENL associated with the convection transient from the growth phase to the expansion phase, but neither the launch nor the arrival of the dipolarization front coincides with the initial brightening. The arrival of flow to the equatorial plane of the inner magnetosphere occurs two minutes after the onset, when the WTS starts to develop toward the west. Looking at the present result that the onset is induced by the near-earth dynamo and the details of onset sequence is understood from it, we cannot avoid to conclude that the current wedge (CW) is a misleading concept.

Key words

Substorm onset, Field-aligned current, Near-earth dynamo, Dipolarization front

サブストームは磁気圏変動の中で、最古にして最大の未解決問題です。サブストームでは、成長相の quiet arc、オンセットの initial brightening、拡大相の WTS というように、明確なオーロラシーケンスがあります。オーロラには arc と diffuse がありますが、arc は上向き沿磁力線電流 (FAC) に対応し、これこそがサブストームダイナミクスを反映する重要なオーロラなのです。このことは良く研究された事実ですが、問題はそれらのオーロラに対応する磁気圏変動は何かという点でしょう。FAC の起源はダイナモであり、従ってオーロラシーケンスに対して、ダイナモの生成機構、それを駆動する対流構造が明らかにされなければなりません。対流は、あらゆる磁気圏変動のフリーエネルギーの元であると考えられます。

FAC は磁気圏—電離圏結合系のダイナミクスで主要な役割を果たします。FAC は磁気圏の運動を電離圏に伝え、電離圏の散逸に対して、対流を維持するためのエネルギーを供給します。このことは飯島先生以来、わが国で研究され続けた重要なテーマですが、最近このような FAC の役割は、サブストームであっても変わらないことが分

かってきました。従って、サブストームのオーロラシーケンスを生成する FAC について、それがどのような運動を伝え、ダイナモがいかにして励起されるかを調べれば、サブストームは解明できます。オンセット FAC の起源を CW などとってしまうと、サブストーム研究は停滞してしまいます。

最近、対流とダイナモをシミュレーションで再現し、サブストームを自然に発生させることに成功しました。ここで、シミュレーションの解像度、特に電離圏での解像度が重要です。今まではこのようなシミュレーションは存在していなかったため、サブストームはもっぱら MHD の破れといったような理解が行われていました。高分解能シミュレーションでは、サブストームオーロラシーケンスを観測とそっくり再現します。

成長相の対流は、カスプマントルダイナモによって駆動されます。ダイナモの駆動は slow mode expansion の運動によって、カスプに蓄えられた熱エネルギーが、電磁エネルギーに変換されることによります。この期間の対流はローブプラズマシート境界で Y 方向に曲がり、プラズマシートに侵入しません。この対流が形成するシアを伝達するのが、quiet arc です。この対流はまだポテンシャル電場であり、ポテンシャル電場による磁気圏—電離圏結合が成立しています。

対流のプラズマシートへの侵入に伴ってオンセットが発生します。プラズマシートは電離圏の狭い領域に投影されるだけで、プラズマシートの運動では、ポテンシャル電場による磁気圏—電離圏結合は成り立ちません。NENL で解放された磁気張力によって運動が駆動され、非定常的な対流が発生します。この過程は力バランスの変更であり、典型的な状態遷移です。このことが、オンセットが不連続現象である根本原因です。非定常性は必然的に、braking や NENL の retreat を伴います。成長相から拡大相に至る対流の遷移は、dipolarization front に見えます。対流が内部磁気圏まで侵入することに対応する変動として、injection、injection に伴う near-earth ダイナモの生成、injection に伴う渦の電離圏への伝達が発生します。これらが upward FAC と initial brightening の発生構造です。プラズマシートはごく一部しか電離圏に投影されないため、オーロラからプラズマシートを推定しようとするのは、間違いです。このような間違いを認識せず、研究を推定で進めたところが、サブストーム研究の迷走でしょう。

WTS は拡大相の開始を特徴づける、不思議なオーロラです。この時は、電離圏電気伝導度によって、電離圏に 2 次的なダイナモが形成されます。1 次的ダイナモはあくまでも磁気圏対流で駆動されますが、FAC に接続する電離圏電流が電離圏で電荷分離を発生し、ダイナモとなります。高分解能のシミュレーションは、このような過程を通じて、WTS を観測とそっくり再現します。

最後にまだ問題が残ります。それは反平行リコネクションです。カスプの高圧を発生する太陽風—磁気圏相互作用、NENL を発生するプラズマシート変動では、一般に反平行リコネクションが考えられています。最近では前者に対しては、ヌルでのリコネクションであることが分かってきました。しかしながら後者では、依然として反平行リコネクションです。3 次元では、磁場が広範囲で反平行の形状になるのは、とても実現しにくい条件です。これに対して、ただ一点の条件であるヌルは、容易に形成されます。従って 3 次元ではヌルリコネクションが実現されます。しかし NENL に至るヌルリコネクションは複雑で、まだ全貌が見えません。といっても解明は時間の問題でしょう。

研究対象は、IMF が 2 種類ある時のヌル構造です。マグネトポーズ上で、南 IMF に対応する昼側ヌル、北向き IMF 下のヌルが移動したことによる夜側ヌル、それらを結ぶ X ラインが形成されます。夜側ヌルは高次のヌルであり、プラズマシート磁場を巻き込んで、coreBy を発生させます。CoreBy から繋がる磁場上に別のヌルが発生し、近尾部に NENL を形成するようです。2 種類の IMF に対するヌル構造はテータオーロラにも応用できます。テータオーロラ場合では、今までは考えもつかなかったような、美しいヌル構造が判明しています。きっとサブストームでも、美しいヌル構造があるでしょう。

このような結果では、サブストームはごく単純な MHD 現象となります。何か新しい物理過程が含まれているわけではありません。しかしながらその本質は複合性にあります。複合系の現象は無数の自由度を有し、原理は単純であっても、不連続性の発現を含め、見掛けは複雑です。観測は複合性の結果であり、結果が先に分かり、機構は後から分かる科学です。自然界ではこちらが一般であり、地球科学は見掛けは似ているようですが、原理を追求する物理学とは異なる科学です。