

## サブストーム開始メカニズムに関する議論

[ 講演: 塩川和夫 (名古屋大学 太陽地球環境研究所) ]



電気通信大学 鈴木臣

### 1 はじめに

オーロラの地球規模の変動は、1957–1958年の国際地球観測年 IGY (International Geophysical Year) における全天カメラによる地上観測ネットワークによってはじめて明らかとなった。サブストームは、そのオーロラの発達過程を地球磁気圏の変化と関連づけて説明するために導入された概念である。サブストームの研究は、地上における光学観測、磁場観測とともに、現在では人工衛星による磁気圏での直接観測も行われている。長い歴史を持つ研究ではあるが、サブストームのメカニズム、特に何がサブストームの引き金となり、どこで起こるのかという根本的な問題には、未だはっきりとした答えを得ることができていない。2007年、“サブストームの引き金”の正体を明らかにすることを目的に THEMIS 衛星が NASA によって打ち上げられた。地上の全天カメラのネットワークと連携することで、近い将来サブストーム研究が飛躍的に発展することが期待される。

本稿では、サブストームの観測的な特徴について述べた後、提唱されているサブストーム開始メカニズムの説明とその観測例を紹介し、現在のサブストームに関する議論を整理する。

### 2 サブストームの諸相

IGY 期間に極域に展開された地上全天カメラ網の画像から、地磁気極を中心とした環状のオーロラの発光領域 (オーロラオーバル) の存在が示された [Feldstein, 1963]。オーロラオーバルは、昼側 (太陽側) で圧縮し夜側に引き延ばされた楕円形であり、昼側、夜側の位置はそれぞれ磁気緯度 75 度, 65 度程度となる。また、オーバルの昼側はカスプへとつながっている。

さらに、全天カメラ網の画像からオーロラが数分から数時間のスケールで変動する様子が捉えられ、グローバルなサブストームの概念が Akasofu [1964] によって示された。観測された変動 (オーロラサブストーム) は主に爆発相、回復相に分けられる。サブストームの諸相は Akasofu [1974] の図 2.3.3 を参照されたい。静穏時 (A.  $T = 0$ ) から、真夜中付近のオーロラアーク (discrete aurora) で突如増光 (ブレイクアップ) が始まる (B.  $T = 0 \sim 5$  min)。増光したアークは極方向へ発展し、真夜中付近で“オーロラバルジ”が見られ (C.  $T = 5 \sim 10$  min)、やがて広がっていく (D.  $T = 10 \sim 30$  min)。バルジが最も極に近づくと、バルジの収縮が始まる (E.  $T = 30$  min–1 hr)。その後、午前側でパッチ状のオーロラ (pulsating aurora) が見られ、擾乱は回復していく (F.  $T = 1 \sim 2$  hr)。

図 1 に、アラスカの Kotzebue で観測されたオーロラサブストーム時の全天画像を示す。東西方向に伸びるオーロラアークが徐々に南にシ

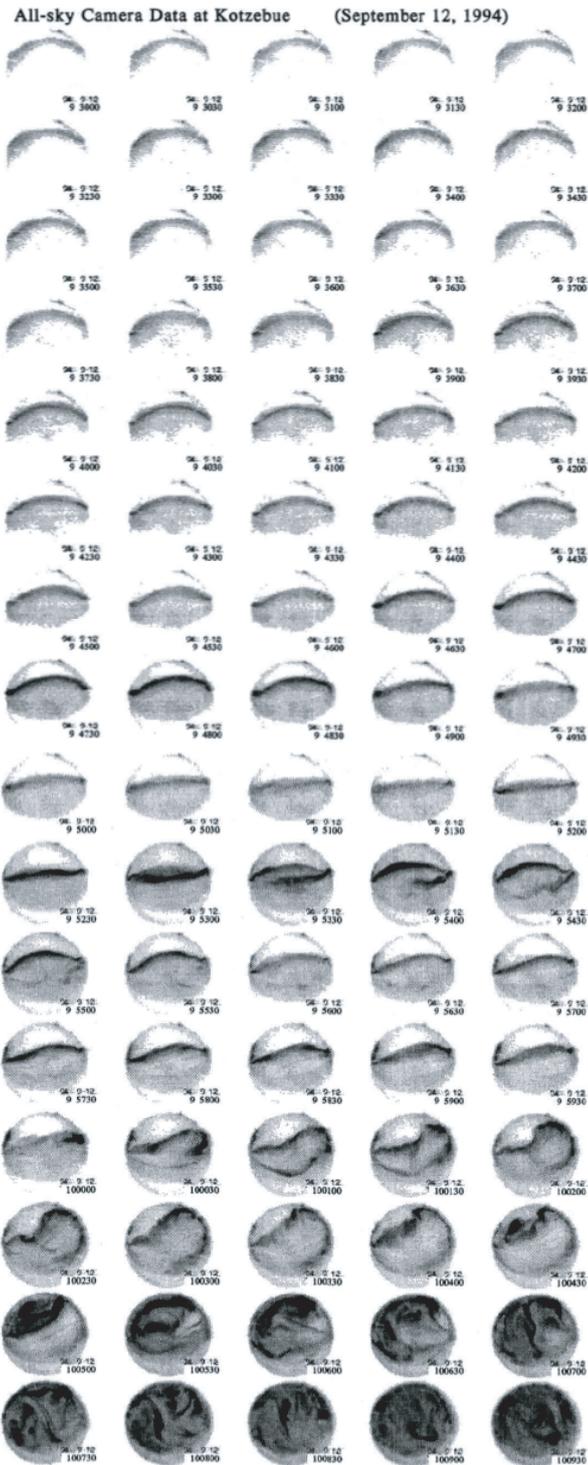


図 1: Kotzebue で観測されたオーロラサブストーム時の全天画像 (1994 年 9 月 12 日 0930–1010 UT) [Shiokawa et al., 1996] . 画像の上方向が北に、左方向が東に対応する .

フトしていき、その後、増光と極方向への発展の様子が 4 回ほど見られる (0946:30, 0952:00, 1000:00, 1004:30 UT) . 最後の増光 (1004:30 UT) の後は、全天画像の視野内全体で活発なオーロラ活動 (global expansion) が見られる . このように、所謂サブストームの開始である global expansion の前には、グローバルに発達しない増光 (pseudo breakup) がしばしば観測される . pseudo breakup は一つのサブストームイベント中に、ローカルタイムの違う局所な場所で何度も繰り返し起こることが知られている .

### 3 サブストームに伴う磁場変化

図 2 は、図 1 に示したオーロラサブストーム時の (上図) 磁気天頂におけるオーロラ発光強度、(中図) 全天画像の南北断面でのオーロラ発光強度 (下図) Kotzebue と中低緯度帯における磁場の H 成分 (北向き成分) の時間変動である . 南北断面の強度変化を見ると、1004 UT あたりから始まる global expansion の前に、東西のアーキが明るくなって極方向に動く (poleward expansion) ことを何度か繰り返しているのが分かる . これら増光の一つ一つが pseudo breakup であり、グローバルに発達しないだけで特徴としては全体のサブストームとよく似ており、両者の物理メカニズムは同じであると考えられている .

サブストームは地球規模の磁場変動によっても特徴づけられる . 図 2 の磁場データを見ると、サブストームの直下 (KOT: Kotzebue) ではサブストームに伴って、磁場成分が南 (磁場の H 成分が負) に振れていることが分かる . 一方、中低緯度では振幅としては小さいが、一斉に磁場の北向き成分が増加している . これらの変動は、それぞれ negative bay, positive bay と呼ばれ、サブストーム時のグローバルな地磁気変動パターンの典型的な特徴として知られている . さらによく見ると、Kotzebue では、一個一個の pseudo breakup に対応して、磁場 H 成分に小さいながらも negative bay が見られることにも注意した

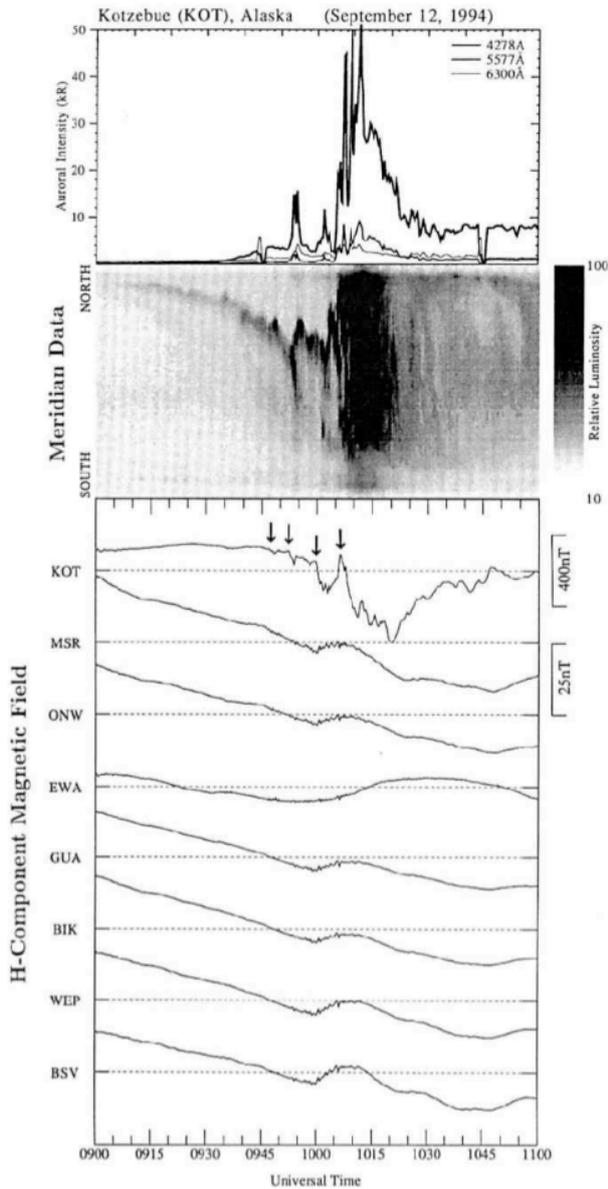


図 2: 図 1 に示したオーロラサブストーム時におけるオーロラ発光強度と磁場の時間変動 (0900–1100 UT) [Shiokawa et al., 1996] (上から順に) 磁気天頂におけるオーロラ発光強度, 全天画像の南北断面, Kotzebue および中低緯度の各点 (図 3 を参照のこと) の磁場データ (H 成分) .

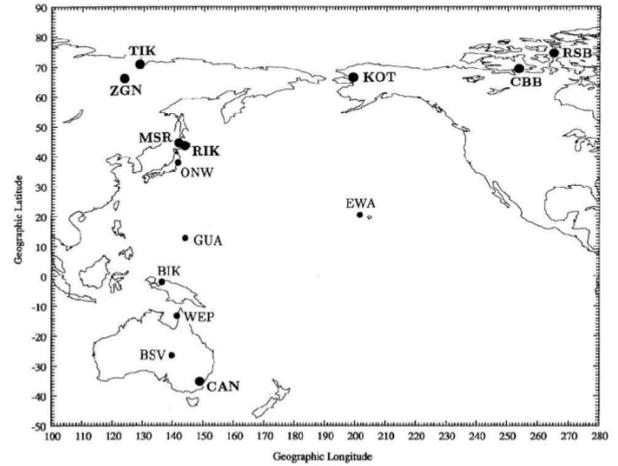


図 3: 図 2 に示した磁場データの観測位置 [Shiokawa et al., 1996] .

い . また , これらのオーロラ増光に対応して , Pi 2 地磁気脈動と呼ばれる数分周期の磁場振動も観測される (Shiokawa et al. [1996] の Fig. 8) . Pi 2 地磁気脈動は , サブストームオンセットの時間的指標として広く用いられている [Saito et al., 1976] .

### 3.1 カレントウェッジ

サブストームに伴って , 磁場 H 成分に見られた変動 (negative bay , positive bay) は , サブストームカレントウェッジ (substorm current wedge) という概念で説明できる . オーロラが明るくなることに伴って図 4 (上図) のような電流系が発生すると考えられる . Kotzebue は閉曲線で示される電流系の朝側から夕側方向 (西向き) の電流の真下であり , この西向き電流によって作られる南向きの磁場のために negative bay となる . また , 一方で中低緯度帯においては , Kotzebue 上空の西向き電流からは距離があるため , この局所的な西向き電流の効果は磁場変動には現れず , 大きな電流系全体が作る北向き (紙面垂直上向き) の電流によって positive bay となると考えられる . 現在 , このようなサブストーム時の電流

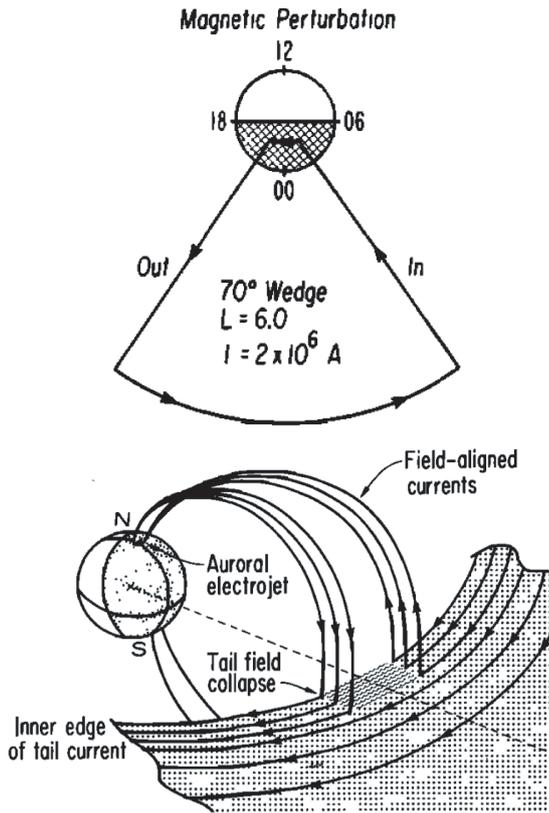


図 4: (右図) サブストーム時の電流系モデルの概念図。図中の地球の夜側(斜線部)において、朝側から入り、夕側から出て行く電流系を示す。(左図) サブストームのカレントウェッジの概念図。尾部電流の一部が寸断されると磁力線方向に沿った電流が発生する [Clauer and McPherron, 1974]。

系は地上磁場観測だけでなく、人工衛星によっても観測されており、確立された概念となっている。

図 4 の下図は、この電流系を立体的に見たものである。地球磁気圏の尾部には、西向き電流 (tail current) が存在する。磁力線方向には電流が流れやすいため、西向き尾部電流の一部が何らかの理由で寸断されると、尾部電流の一部が磁力線に沿った電流となり、図のように地球に迂回する電流系となる。サブストーム開始時に、ちょうど地球に向かって電流のくさび (wedge) が打ち込まれるような電流系が形成されると考えられ、

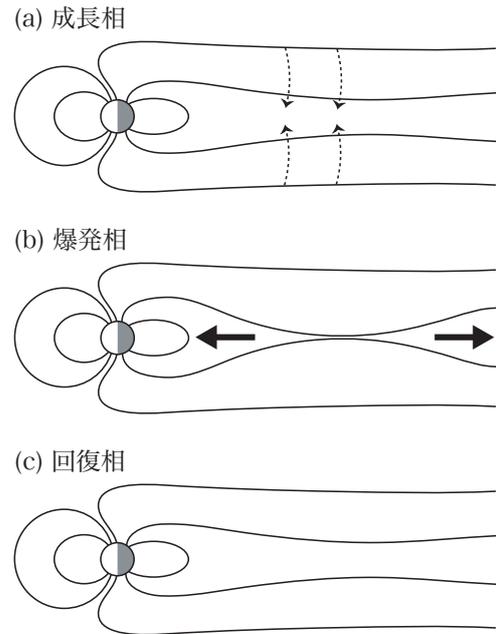


図 5: 磁気圏サブストームの発達過程。

その形状からサブストームのカレントウェッジと呼ばれる。

### 3.2 磁気圏の発達過程

これまでは、地上観測をベースとしてオーロラサブストームを見てきたが、磁気圏ではどのようなことが起きているのであろうか。図 5 に、一般的に考えられている磁気圏サブストームの発達過程を模式的に示す。

惑星間空間磁場 (IMF) が南向きになると磁気圏が励起され、次第に磁気圏にエネルギーが溜まっていく (成長相 growth phase)。このとき、プラズマシートは薄くなっていき、オーロラオーバルは低緯度方向に拡大していく。その後、爆発相 (expansion phase) を迎え、磁気圏が双極子の形状に戻る働き (dipolarization) によって地球向き的高速フローと反地球方向のプラズモイドが発生する (図 5b 中の矢印)。この地球方向へのプラズマ流が地球大気に達するとオーロラが激しく光る。爆発相が終わると、プラズマシートは再び

厚くなり、磁気圏は元の形状に回復していく（回復相 recovery phase）．Pi 2 地磁気脈動は、地球方向に流れてくるプラズマで地球磁場が震えることによって発生すると考えられる（これは、地球磁場が高速プラズマというハンマーで叩かれ、その振動が磁気圏の内部に伝わっていく様子に似ている）．

サブストームの特徴は以上の概念でいたい説明できる．しかしながら、いつ、どこで、どのような状態になったらサブストームが始まるのかという疑問は残されたままである．これらの疑問は、今なお続くサブストーム開始メカニズムの議論に発展していった．次節では、現在提唱されている開始メカニズムを紹介していく．

## 4 サブストーム開始メカニズム

### 4.1 磁気圏尾部の力学

サブストーム開始メカニズムの議論の前に、磁気圏尾部における力のつりあいについて触れておく．MHD ( MagnetoHydroDynamics ) の運動方程式を考える．

$$nm \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}(P_{th} + P_B) + \frac{1}{\mu_0}(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} \quad (1)$$

ここで、 $n$ 、 $m$  はプラズマの数密度と質量（近似的にはプロトン質量）、 $\vec{v}$  はプラズマの速度ベクトル、 $P_{th}$ 、 $P_B$  はそれぞれプラズマ圧と磁気圧、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $\vec{B}$  は磁場ベクトルである．式(1)の右辺に関して、第一項は圧力勾配力であり、第二項は磁気張力を意味する．実際の磁気圏では地球に近い方がプラズマ密度が高く、磁場も強い．ため、圧力勾配力は（地球に対して）外向きとなる\*．対して磁気張力は、磁場の形状を考えると分かるように、常に地球方向を向く．地球磁気圏尾部では、これら二つの力がつりあうことで、その形状を保っている．

\*さらに地球に近いところ（プラズマが侵入できない限界のところ）では勾配は逆向きになるが、今考えているようなサブストーム開始を議論する領域では、圧力勾配力は常に外向きと考えてよい．

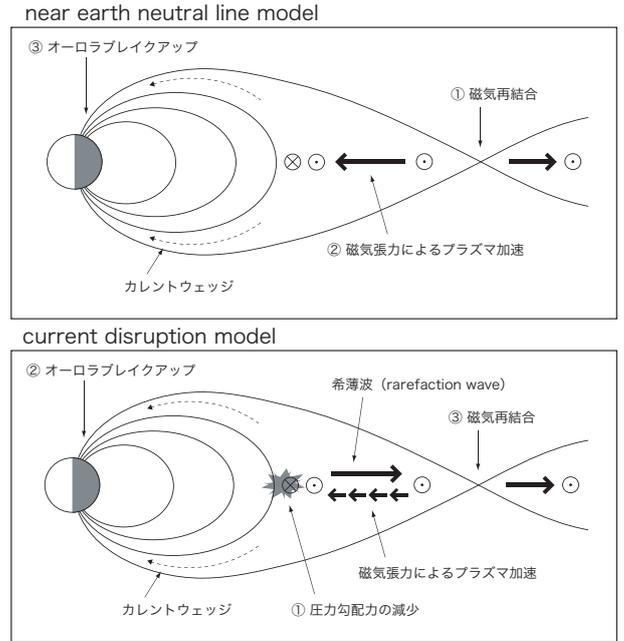


図 6: 二つの代表的なサブストーム開始メカニズムのモデル．

サブストーム時には、このつりあいが破れてプラズマが地球方向に加速される（磁場の dipolarization が起こる）．そのようなつりあいの破れが起こる条件は、つりあっている状態から 1．磁気張力が急に増える（outside-in）、あるいは 2．圧力勾配力が急に減る（inside-out）という二つの状況が考えられる．

### 4.2 outside-in と inside-out

まずは、磁気張力が増える場合を考える．これには、磁気圏尾部での磁気リコネクションを考えればよい．反平行の磁力線があると、磁力線の繋ぎ替え（リコネクション）が起こる．成長相において磁気圏尾部の南北には反地球方向と地球方向の磁力線が貯まっていく．臨界点に達すると爆発的に磁気リコネクションが発生し、引き延ばされていた磁場が即座に dipolarization を起こす．この瞬間、磁力線には強い張力が働くため、プラズマは地球向きに加速される（図 6 の上図）．この

ように、もともと背景にあった圧力勾配に対して急に張力が強くなり、力のつりあいが破れることでサブストームが始まると考えるのが near earth neutral line (NENL) モデルであり、物事が外から内に向かって進む outside-in の考えかたである。

この考え方に対して、もう一方のモデルでは、圧力勾配力が急に減ることでサブストームがトリガされると考える。図6の下図にその概念を示す。何らかの理由(不安定)によって、地球に近いところで尾部電流が寸断(current disruption)されると地球外向きの圧力勾配力が減少する(理由は後述する)。ここで、圧力勾配力が減少した局所的な領域を考える。はじめ圧力勾配力と磁気張力はつりあっているので、圧力勾配力が急に減少すると、磁気張力によって空間内のプラズマは地球向きに動かされて空っぽの状態になる。すると、その外側領域でも、圧力勾配力が減少するために磁気張力によってプラズマが地球方向に運ばれる。同様なことがその外側でも起こり、どんどんと外側に向かっていく希薄波(rarefaction wave)となる。ここで注意したいのが、波としては外向きに伝搬していくが、実際に動くプラズマは磁気張力によって地球向きに加速されるため、地球方向のプラズマ流となることである。また、プラズマシートは薄く引き延ばされている(上下から押さえつけられた状態)ため、このモデルでも最終的には、ある場所でプラズマが抜ける(地球方向に加速される)ことでリコネクションが誘発されると考えられる。このように、尾部電流が寸断されることでサブストームがトリガされ、希薄波が内から外に向かって進んでいく(inside-out)というのが、current disruption モデル(図6下図)である。

現在では、どちらのモデルでも地球向き的高速フローと磁気リコネクションが起こることは了解されている。そこで、どちらが実際に起こっているのかを見極める鍵となるのは、現象の起きるタイミングである。地球方向へのプラズマのフローが磁気リコネクションの場所と地球近傍との間を進むには数分を要する。数分という時間差は、現

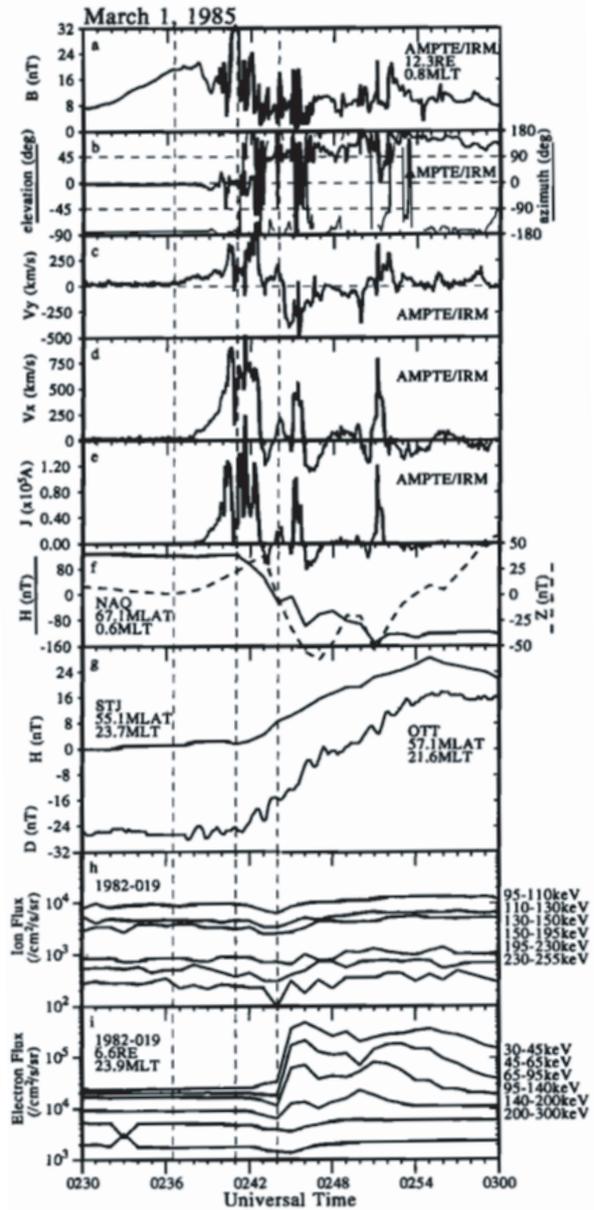


図 7: 磁気圏尾部における高速イオン流と地上観測による西向きエレクトロジェット, カレントウェッジ, 降下粒子のオンセットの比較 [Shiokawa et al., 1998]. 縦方向の三本の破線は、左から順に、Pi 2 地磁気脈動のオンセット, 西向きエレクトロジェットとカレントウェッジのオンセット, 静止軌道衛星の観測による降下粒子のオンセットのタイミングを表す。

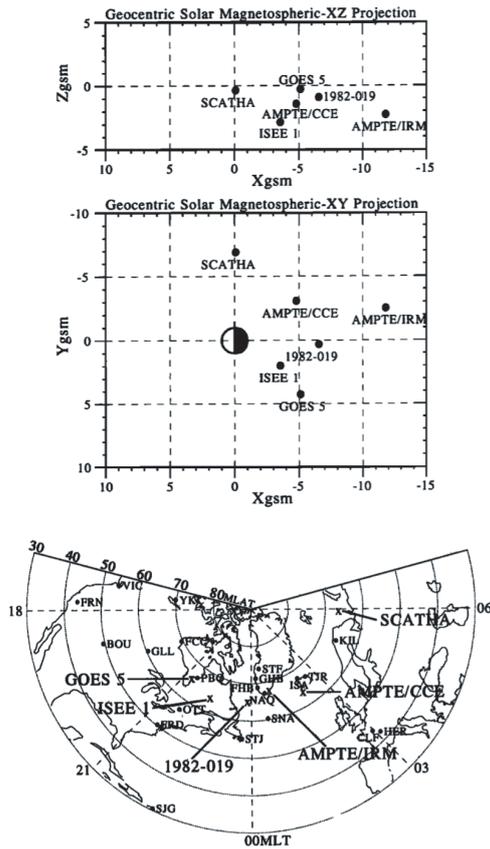


図 8: (上から順に) GSM-XZ 平面と GSM-XY 平面における衛星の場所と, MLAT-MLT 座標上の衛星のフットプリントと地上観測ステーションの位置 [Shiokawa et al., 1998] .

在の人工衛星や地上観測では計測が十分可能であるため, 磁気リコネクション, プラズマ流, オーロラブレイクアップのそれぞれのタイミングを考えることで, モデルの確からしさを議論することができる .

## 5 それぞれのモデルを示唆する観測

サブストーム開始メカニズムについては, 上述した outside-in と inside-out という二つのモデルが提唱されており, それぞれのモデルを支持する観測結果も得られている . 本節では, それらの観測例のいくつかを紹介する .

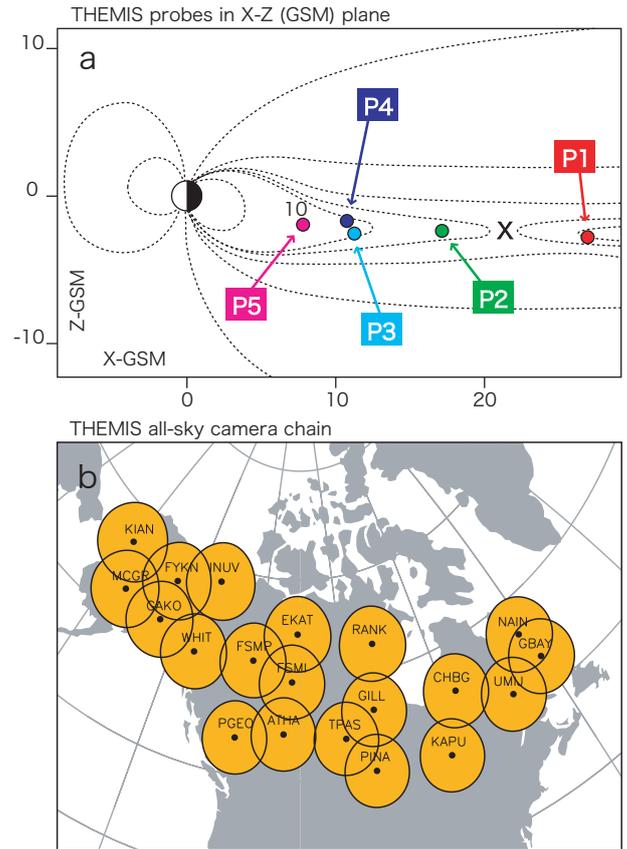


図 9: (a) X-Z (GSM) 平面に投影した THEMIS 衛星 5 機 (P1, P2, P3, P4, P5) のおおよその配置 . (b) カナダ全域に展開されている THEMIS カメラの配置 . 各円はカメラの視野を表す .

### 5.1 outside-in

図 7 は, 複数の衛星と地上での地磁気データ (図 8 参照) を用いて, 高速プラズマ流, 磁場変動, 粒子の降込みのオンセットのタイミングを観測的に議論したものである [Shiokawa et al., 1998] . 0230–0300 UT の 30 分の間に観測されたそれぞれのオンセットのタイミングが破線で示してある . AMPTE 衛星で観測されたイオンフローの  $y$  成分  $V_y$  (図 7c) のオンセットは, 地上の HER (図 8 参照) で観測された Pi 2 地磁気脈動が観測された時間 (0236 UT) とほぼ同じタイミング (図 7 の一番左の破線で示す) であり, これが最初のサ

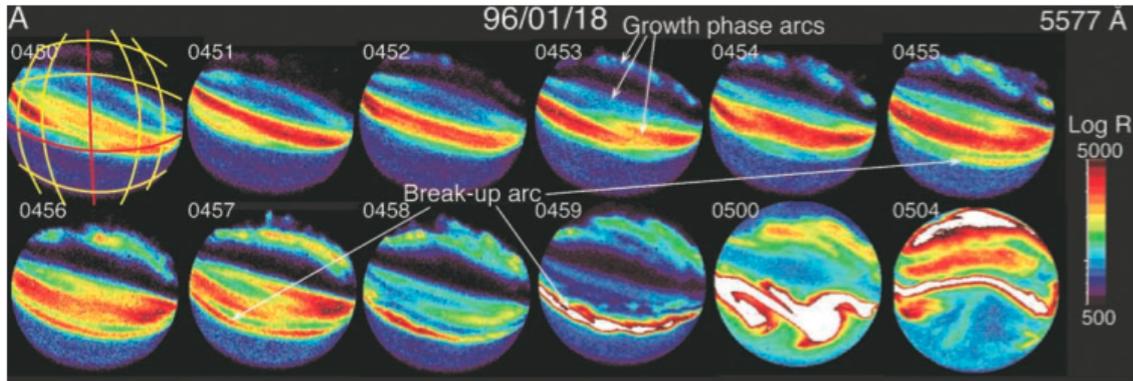


図 10: 全天カメラ (波長 557.7 nm) で観測されたオーロラブレイクアップの例 [Lyons et al., 2002] . ブレイクアップは低緯度側で始まるが, 高緯度のオーロラには変化が見られない .

ブストームの兆候である . 続いて, 高緯度 NAQ で negative bay (図 7f), 中緯度 STJ で positive bay (図 7g) のオンセットが 0241 UT (二本目の破線) のタイミングで観測され, この時に図 4 に示したようなサブストーム電流系が形成されたと考えられる . 最後に 6 Re の場所で粒子のインジェクション (図 7i) のオンセットが 0244 UT (三本目の破線) に観測されている . 従って, この観測結果からは, 1 . 地球向き高速流 2 . 電流系の形成 3 . 静止軌道での粒子インジェクション という outside-in の順序でサブストームが起こることを示唆している .

このように, サブストーム開始の兆候をタイミングで議論する場合には, グローバルな範囲をカバーする観測が非常に大切である . というのも, 前述した pseudo breakup 等の特徴はローカルタイムや緯度によって違うため, たとえ時間差があったとしても, その現象が時間変化したものなのか, それとも空間変化したものなのかを正しく評価しなければならないからである .

現在, この評価を包括的に行う THEMIS 計画が始まっている . この計画では, カナダ全域に展開された全天カメラネットワーク (図 9b) によるオーロラ観測と, 5 機の衛星群 (図 9a) による磁気圏内の粒子, 電磁場の観測を併せることで, サブストーム開始がどこで起こるのかを観測的に

明らかにすることを目的としている .

最近になり THEMIS のデータからも 磁気リコネクションが最初にサブストームをトリガする outside-in モデルを支持する観測結果が報告されている . 詳細は Angelopoulos et al. [2008] を参照されたい .

## 5.2 inside-out

前項の outside-in モデルに比べると inside-out モデルは少々複雑となる . そもそも inside-out モデルが提唱されるきっかけとなったのは, オーロラの最初の増光 (initial brightening) の位置が outside-in では説明できないことであった . 図 10 にその一例を示す . オーロラのブレイクアップは, 0455, 0457, 0459 UT の全天画像中の低緯度側 (画像の下側) のアークに見られる . outside-in の考え方は, 距離 20~30 Re 付近の磁気リコネクションがサブストームのトリガとなるため, 磁気圏のジオメトリを考えると, オーロラオーバルの高緯度側で最初の兆候 (initial brightening) が起こることが期待される . しかし, 実際のオーロラを見ると低緯度側から増光が始まっており, 高緯度側のアークに変化は見られない [e.g., Samson et al., 1992; Lyons et al., 2002; Mende et al., 2003; Yago et al., 2005] . このことは, より地球に近い

ところ (~10 Re) の現象 (尾部電流の寸断) がトリガとなっていることを示唆している。

尾部電流の寸断に伴って希薄波が反地球方向に伝搬する (プラズマは地球方向へ動く) というのが, inside-out であるが, 電流の寸断と圧力勾配力の減少 (さらには希薄波の発生) をどのように関連付けばよいだろうか. 図 11 の模式図を参考に尾部電流の寸断に伴う希薄波発生について考えていく.

磁気圏尾部では図 11a のように, 南から北へ向く双極子型の磁場と, 朝側から夕側に向かう方向 (紙面に垂直上方向) の尾部電流が存在する. サブストーム成長相になると, 磁場は寝ていく (図 11b). 今, この状態で電流の寸断がおきたと考える. 尾部電流は寸断は東向き (紙面垂直下向き) の電流の発生と等価である (図 11c). ここで再び, 式 (1) の力のつりあいを考える. 式 (1) を別の形で書くと

$$nm \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} P_{th} + \vec{j} \times \vec{B} \quad (2)$$

となる. ここで,  $\vec{j}$  は電流ベクトルである. 式 (2) において力のつりあいは, プラズマ圧の勾配力 (右辺第一項) とローレンツ力 (右辺第二項) のつりあいと言える. 従って, 東向きの電流によって作られる磁場は, 電流寸断の外側の領域では磁場を弱める方向に, 電流寸断の内側では磁場を強める方向に働く (図 11d). このとき圧力勾配力は変化しないので, 力のつりあいが破れ, プラズマはローレンツ力により電流の寸断された領域の内側へ動かされる (図 11e). その結果, 内側のプラズマは地球方向へ加速され, 希薄波は反地球方向へ次々に伝搬していく (図 11f). 以上が, 電流の寸断による希薄波発生の概念である.

尾部電流を寸断させるプロセスには諸説あるが, 何らかの不安定が地球近傍でおこるものと考えられている. サブストームの成長相においては, 尾部の電流シートの厚みは非常に薄くなる. この薄くなったところに強い電流が流れることで不安定となり, 電流の寸断が発生する (ion Weibel instability, Lui et al. [1993]). 実際にサブストー

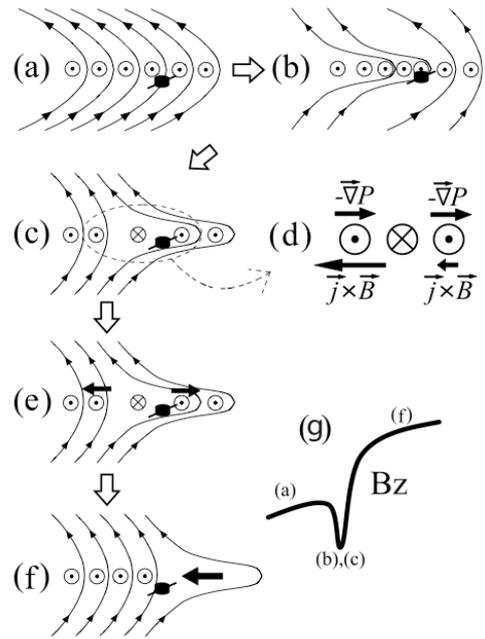


図 11: 尾部電流の寸断による希薄波の発生メカニズムの概念図 [Shiokawa et al., 2005]. X-Z 平面で夕側から見る方向 (紙面垂直上向きが y 方向).

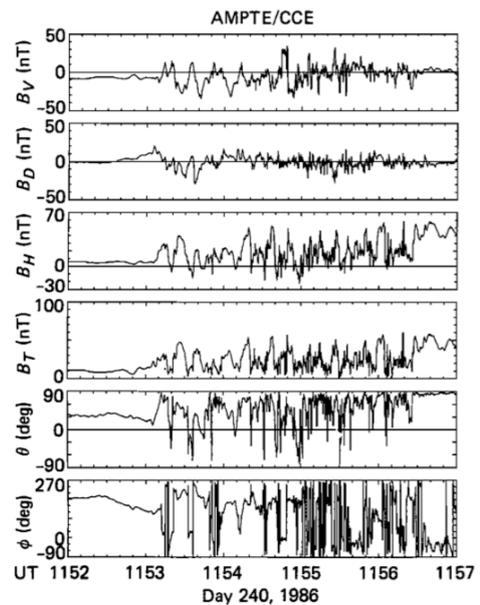


図 12: サブストームのオンセット時に AMPTE/CCE によって観測された急峻な磁場変動 [Takahashi et al., 1987].

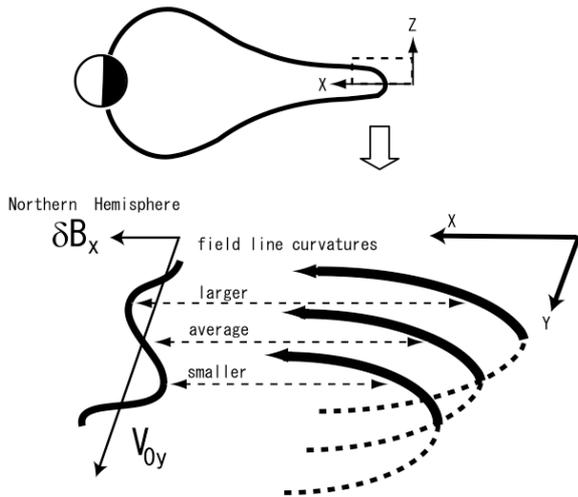


図 13: Geotail 衛星の磁場観測から示唆されたバルーニング不安定概念図 [Saito et al., 2008] .

ムのオンセット時には衛星磁場データなどに、急激な変動が観測される (図 12) .

もう少し大きなスケールを持つ不安定も考えられている . バルーニング不安定 (kinetic ballooning instability, Cheng and Lui [1988]) の概念は, サブストームのオンセットに伴って磁気圏尾部の等圧面に地球規模の波がたつと, 分極電場が発生し,  $E \times B$  ドリフトによりこの波 (不安定) が成長していくというものである [e.g., Cheng and Lui, 1988; Saito et al., 2008] . この不安定の成長は電離圏でいうところのプラズマバブルやパークンス不安定に近い概念である . 図 13 に, サブストームのオンセット時の Geotail 衛星による磁場観測から考えられるバルーニング不安定の三次元的な概念図を示す . バルーニング不安定の周期は 1 分程度だと考えられているので, 同程度の周期を持つ  $\text{Pi} 2$  地磁気脈動との関連も示唆される .

さらに, オーロラの initial brightening にも空間的な波構造が観測されている . これは, バルーニング不安定の電離圏への投影とも考えられるが, バルーニング不安定の存在を決定づける証拠であるという結果には未だ至っていない .

この他にも, IMF の northward turning に伴っ

て地球向きのプラズマ対流と朝・夕方向のドリフトにアンバランスが生じることで地球近傍の圧力が減少しサブストームがトリガされるという考えも提唱されている . 詳細は Lyons et al. [1995] を参照されたい .

## 6 おわりに

本稿では, サブストームの基本的な概念と現在提唱されている開始メカニズムを紹介した . これまで見てきたように, サブストームに関連する個々の現象の理解はかなり進んできたと言える . 一方, サブストーム開始メカニズムに関しては, 両モデルそれぞれを示唆する観測結果が報告されており, 今なお統一的な見解を得るには至っていない .

しかしながら現在, この議論に終止符を打つべく様々な衛星・地上観測計画が進められている . 特に THEMIS 計画によって今後多くの観測データが得られるため, サブストームの理解は飛躍的に進むであろう . outside-in と inside-out どちらのモデルが正しいのか, あるいは, その両方が起こり, どちらがどのような条件で支配的になるのかといった疑問に答えるためには, 多くの観測事実を積み上げることが必要であり, これによってはじめてサブストームの全体像が見えてくる .

最後に, その他のサブストームに関連する未解明な問題を挙げておく .

- 通常サブストームは数時間続くのに対して, 地球方向のプラズマフローの継続時間はせいぜい 10 分程度である . 何がサブストームの電流系を駆動し続けるのであろうか .
- 地球方向のプラズマフローの空間スケールはどれくらいで, どのような形状なのか .
- サブストームに対して電離圏対流はどのように応答し, どのような時間・空間スケールを持つのか .

## 参考文献

- Akasofu, S.-I., The development of the auroral substorm, *Planet. Space Sci.*, **12**, 273–282, 1964.
- Akasofu, S.-I., A study of auroral displays photographed from the DMSP-2 satellite and from the Alaska meridian chain of stations, *Space Sci. Rev.*, **16**, 617–725, 1974.
- Angelopoulos, V., et al., Tail reconnection triggering substorm onset, *Science*, **321**, doi:10.1126/science.1160495, 2008.
- Cheng, C. Z. and A. T. Y. Lui, Kinetic ballooning instability for substorm onset and current disruption observed by AMPTE/CCE, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 4091–4094, 1998.
- Clauer, C. R. and R. L. McPherron, Mapping the local time-universal time development of magnetospheric substorms using mid-latitude magnetic observations, *J. Geophys. Res.*, **79**, 2811–2820, 1974.
- Feldstein, Y. I., The morphology of auroras and magnetic disturbances at high latitudes, *Geomagn. Aeron.*, **3**, 183–192, 1963.
- Lyons, L. R., A new theory for magnetospheric substorms, *J. Geophys. Res.*, **100**, 19,069–19,081, 1995.
- Lyons, L. R., I. O. Voronkov, E. F. Donovan, and E. Zesta, Relation of substorm breakup arc to other growth-phase auroral arcs, *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2002JA009317, 2002.
- Lui, A. T. Y., P. H. Yoon, and C.-L. Chang, Quasi-linear analysis of ion Weibel instability in the earth's neutral sheet, *J. Geophys. Res.*, **98**, 153–163, 1993.
- Mende, S. B., C. W. Carlson, H. U. Frey, and T. J. Immel, IMAGE FUV and in situ FAST particle observations of substorm aurorae, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JA009413, 2003.
- Saito, T., K. Yumoto, and Y. Koyama, Magnetic pulsation Pi 2 as a sensitive indicator of magnetospheric substorm, *Planet. Space Sci.*, **24**, 1025–1029, 1976.
- Saito, M. H., Y. Miyashita, M. Fujimoto, I. Shinohara, Y. Saito, K. Liou, and T. Mukai, Ballooning mode waves prior to substorm-associated dipolarizations: Geotail observations, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, doi:10.1029/2008GL033269, 2008.
- Samson, J. C., L. R. Lyons, P. T. Newell, F. Creutzberg, and B. Xu, Proton aurora and substorm intensifications, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 2167–2170, 1992.
- Shiokawa, K., et al., Auroral observations using automatic optical instruments: Relations with multiple Pi 2 magnetic pulsations, *J. Geomag. Geoelectr.*, **48**, 1407–1410, 1996.
- Shiokawa, K., et al., High-speed ion flow, substorm current wedge, and multiple Pi 2 pulsations, *J. Geophys. Res.*, **103**, 4491–4507, 1998.
- Shiokawa, K., Y. Miyashita, I. Shinohara, and A. Matsuoka, Decrease in  $B_z$  prior to the dipolarization in the near-Earth plasma sheet, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2005JA011144, 2005.
- Takahashi, K., L. J. Zanetti, R. E. Lopez, R. W. McEntire, T. A. Potemra, and K. Yumoto, Disruption of the magnetotail current sheet observed by AMPTE/CCE, *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 1019–1022, 1987.
- Yago, K., K. Shiokawa, K. Hayashi, and K. Yumoto, Auroral particles associated with a substorm brightening arc, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi:10.1029/2004GL021894, 2005.