

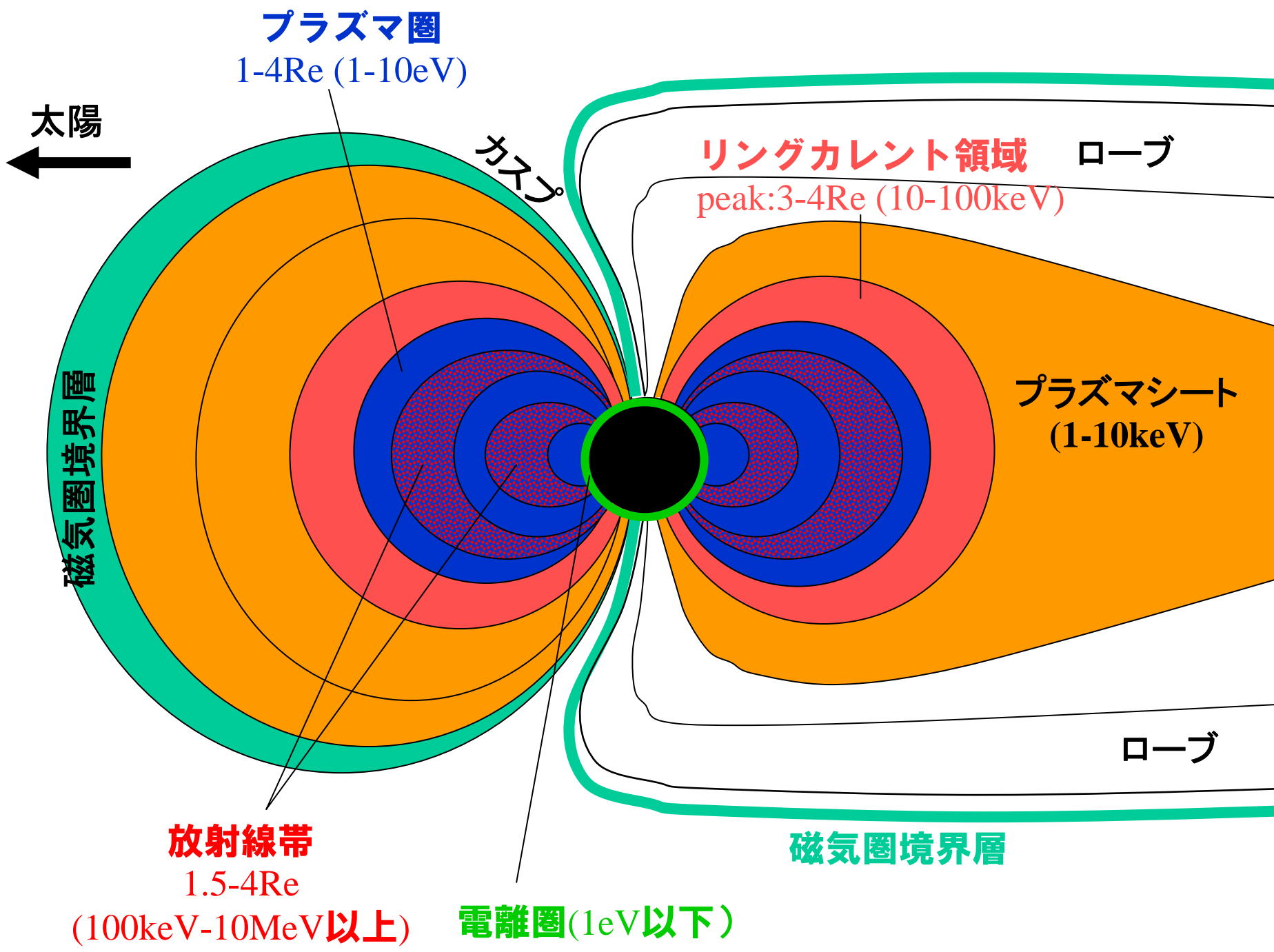
磁気圏構造とオーロラ

塩川和夫

(名古屋大学太陽地球環境研究所)

Contents

- 磁気圏のプラズマ領域
- 磁気圏プラズマダイナミクス
- 磁気圏プラズマ変動による沿磁力線電流・
オーロラの駆動
- サブストームとその発生機構の議論



プラズマ圏

1-4 R_e (1-10eV)

太陽
←

カusp

リングカレント領域

ローブ

peak:3-4 R_e (10-100keV)

層
磁気圏境界

プラズマシート
(1-10keV)

放射線帯

1.5-4 R_e

(100keV-10MeV以上)

電離圏(1eV以下)

磁気圏境界層

ローブ

磁気圏プラズマダイナミクス

MHD近似による運動方程式

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

n : プラズマ密度

m : 粒子質量 (近似的にイオンの質量)

v : 流体速度ベクトル

P_{th} : プラズマ圧 $P_{th} = nk_B T$

j : 電流密度ベクトル $j = ne(v_i - v_e)$

B : 磁場ベクトル

MHD近似による運動方程式

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

粒子加速 = プラズマ圧の勾配力 + 電流にかかるローレンツ力

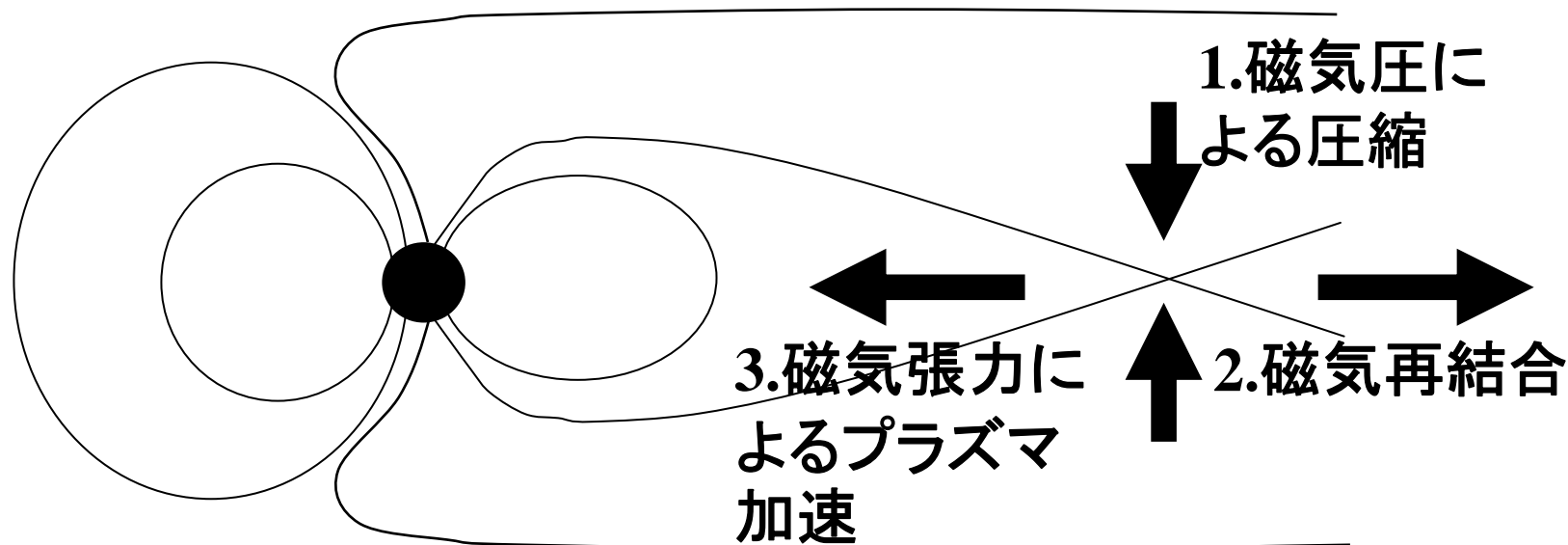
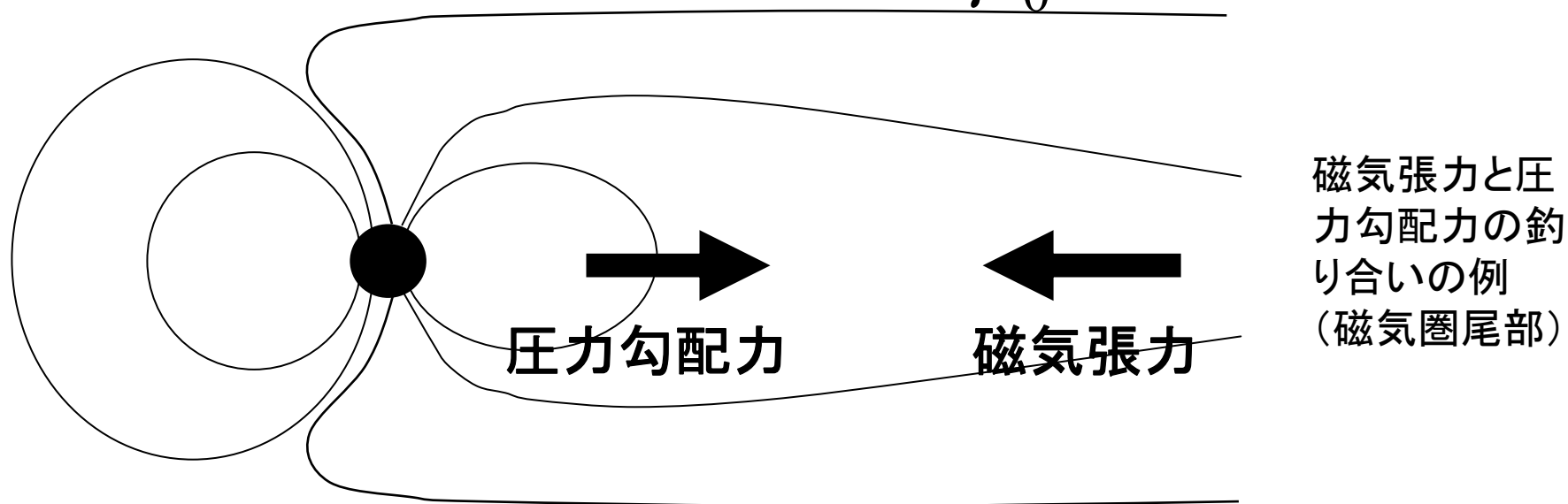
$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$ を使うと

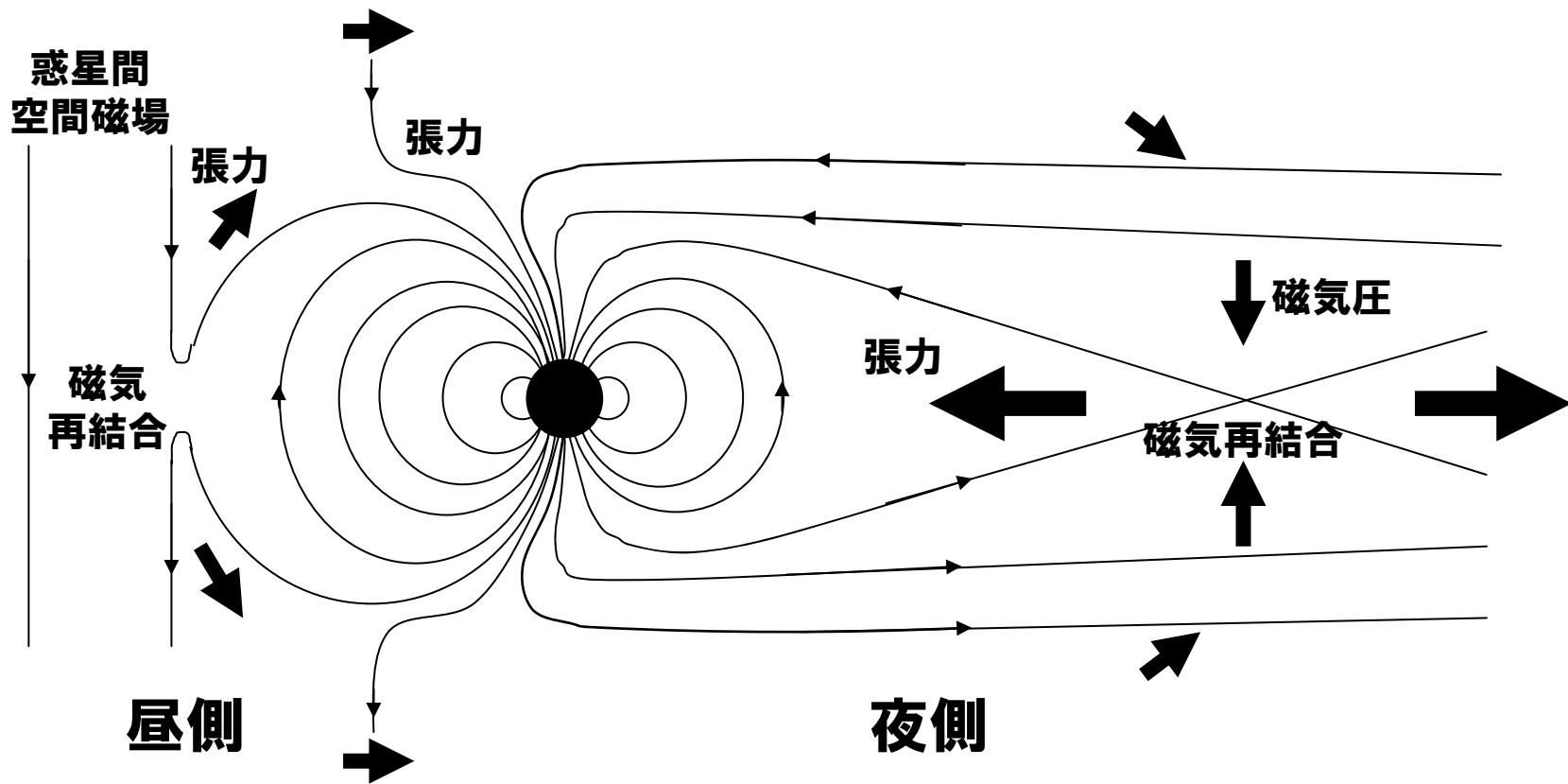
$$nm \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} (P_{th} + P_B) + \frac{1}{\mu_0} (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} \quad (2)$$

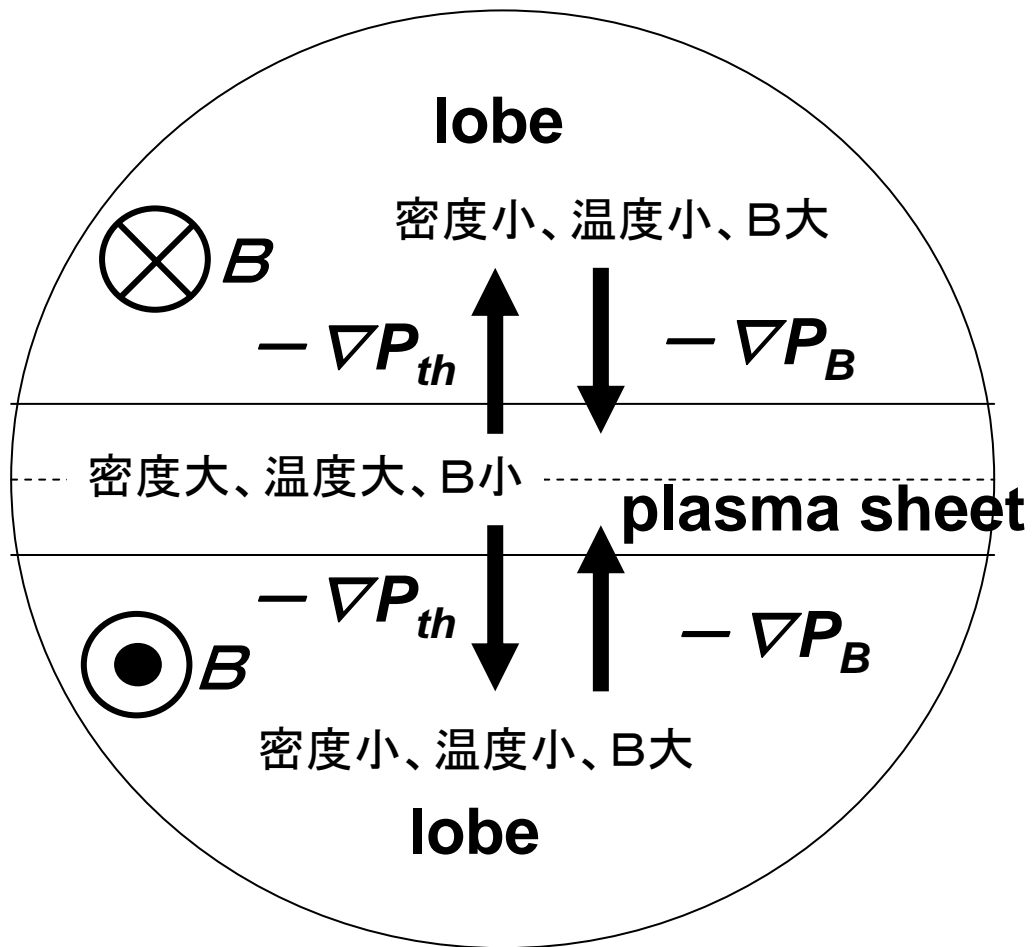
粒子加速 = プラズマ圧の勾配力 + 磁気圧の勾配力 + 磁気張力

磁気圧力、プラズマ圧力、tension force (磁気張力) の力のバランスが崩れたところで、流体粒子の加速が起こる。

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







(1)の式 $nm \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} P_{th} + \vec{j} \times \vec{B}$ に右から $\times B$ を作用させると

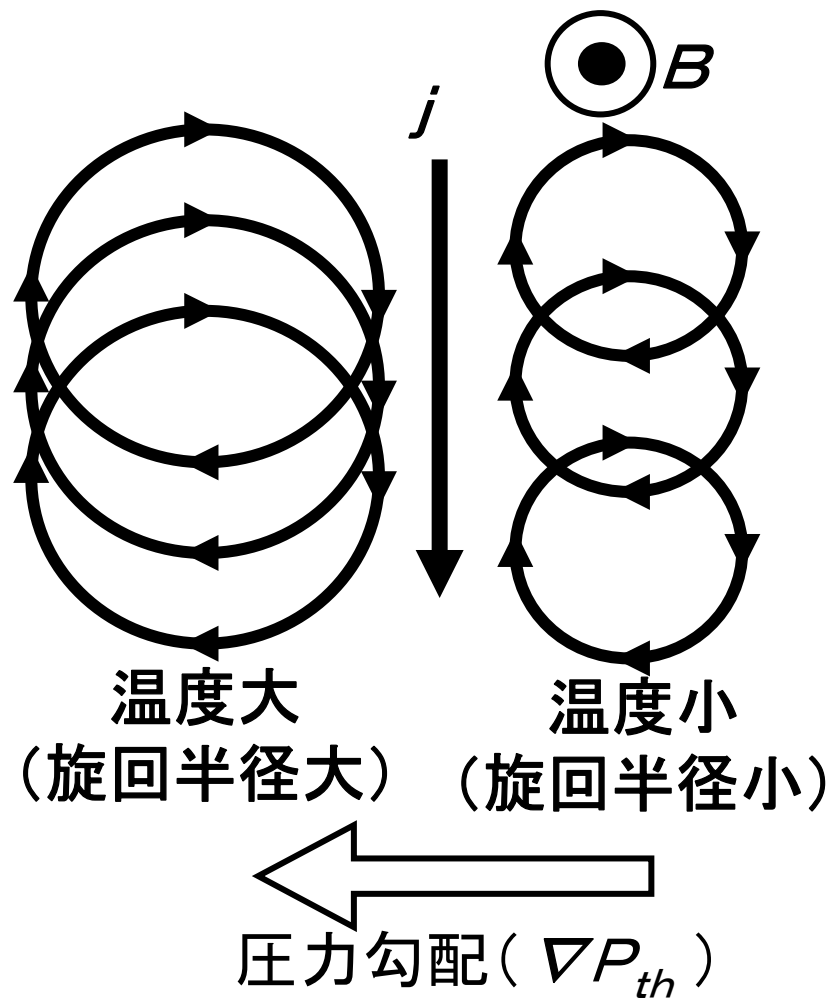
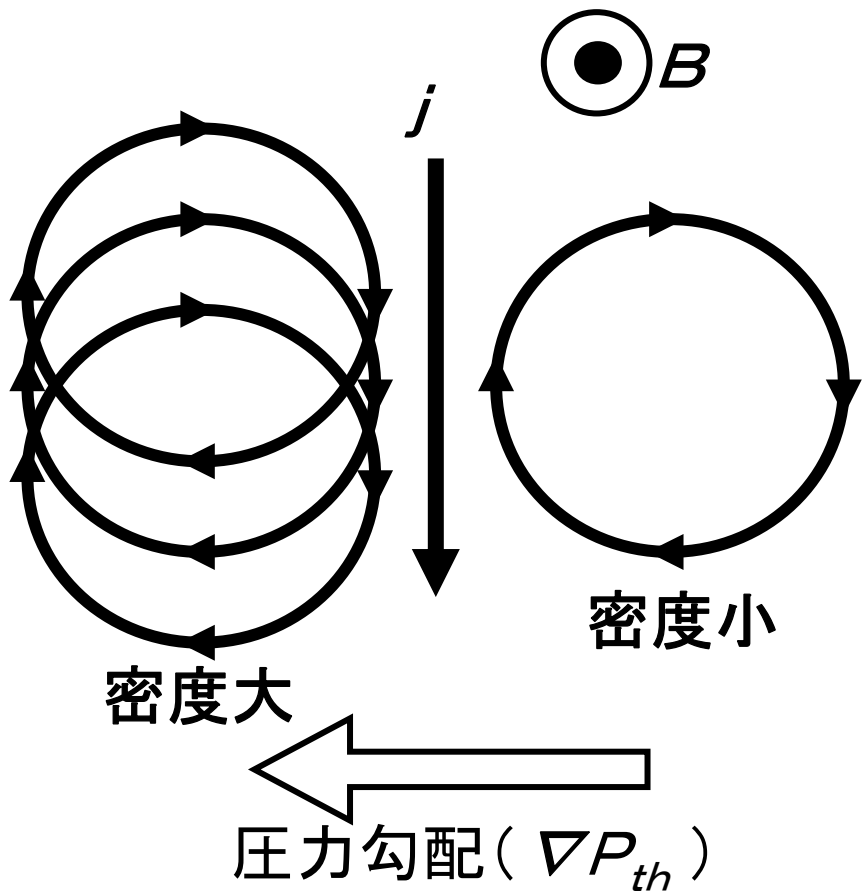
$$\vec{j}_{\perp} = \frac{\vec{B} \times \nabla P_{th}}{B^2} + \frac{nm}{B^2} \left(\vec{B} \times \frac{d\vec{v}}{dt} \right) \quad (3)$$

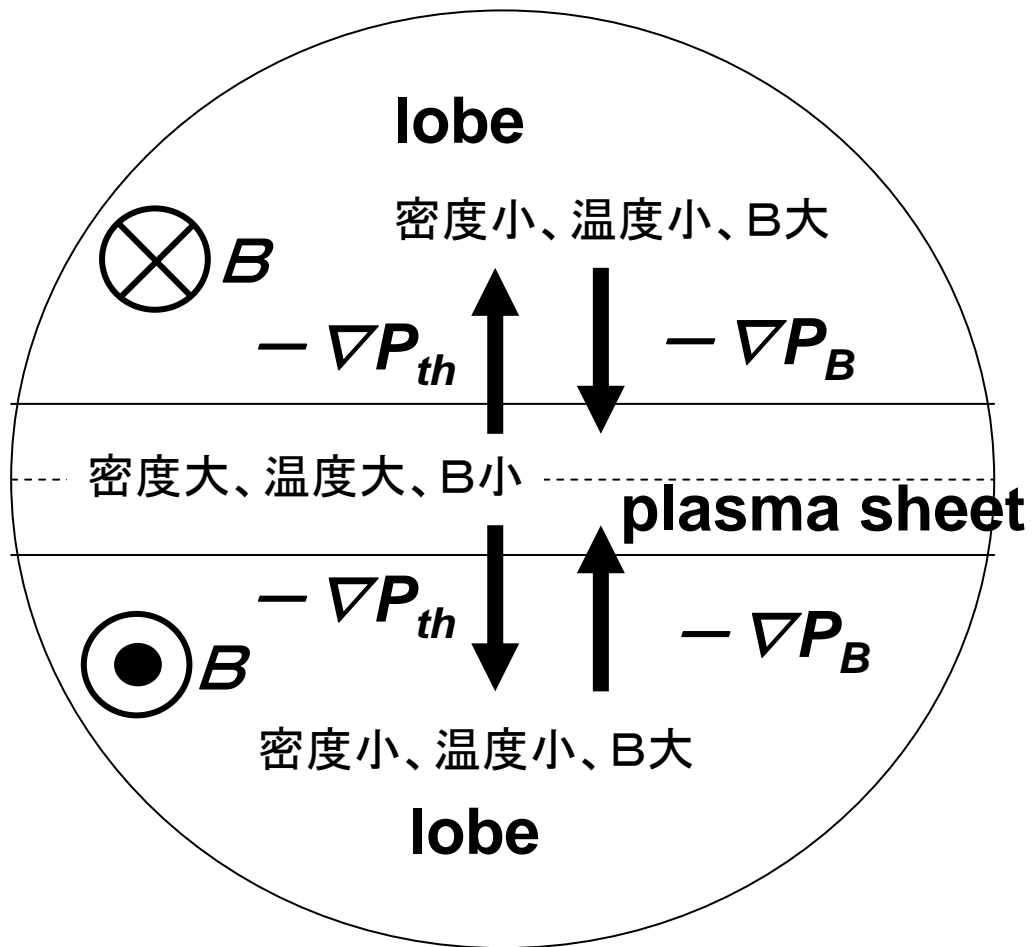
磁場に垂直な電流 = プラズマ圧の勾配による電流 + 慣性電流

圧力勾配に伴う電流の説明

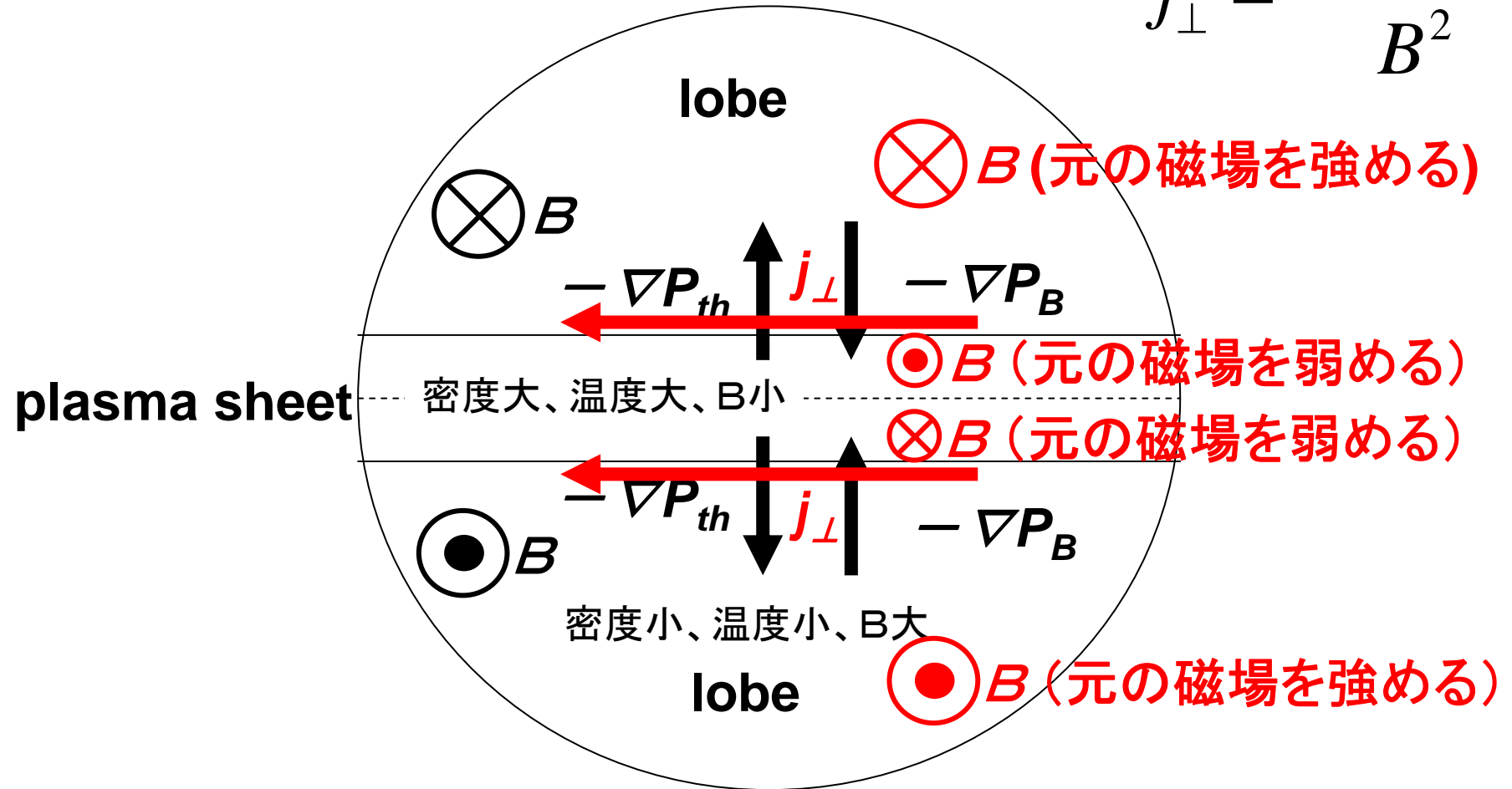
$$P_{th} = nkT$$

$$\vec{j}_{\perp} = \frac{\vec{B} \times \nabla P_{th}}{B^2}$$



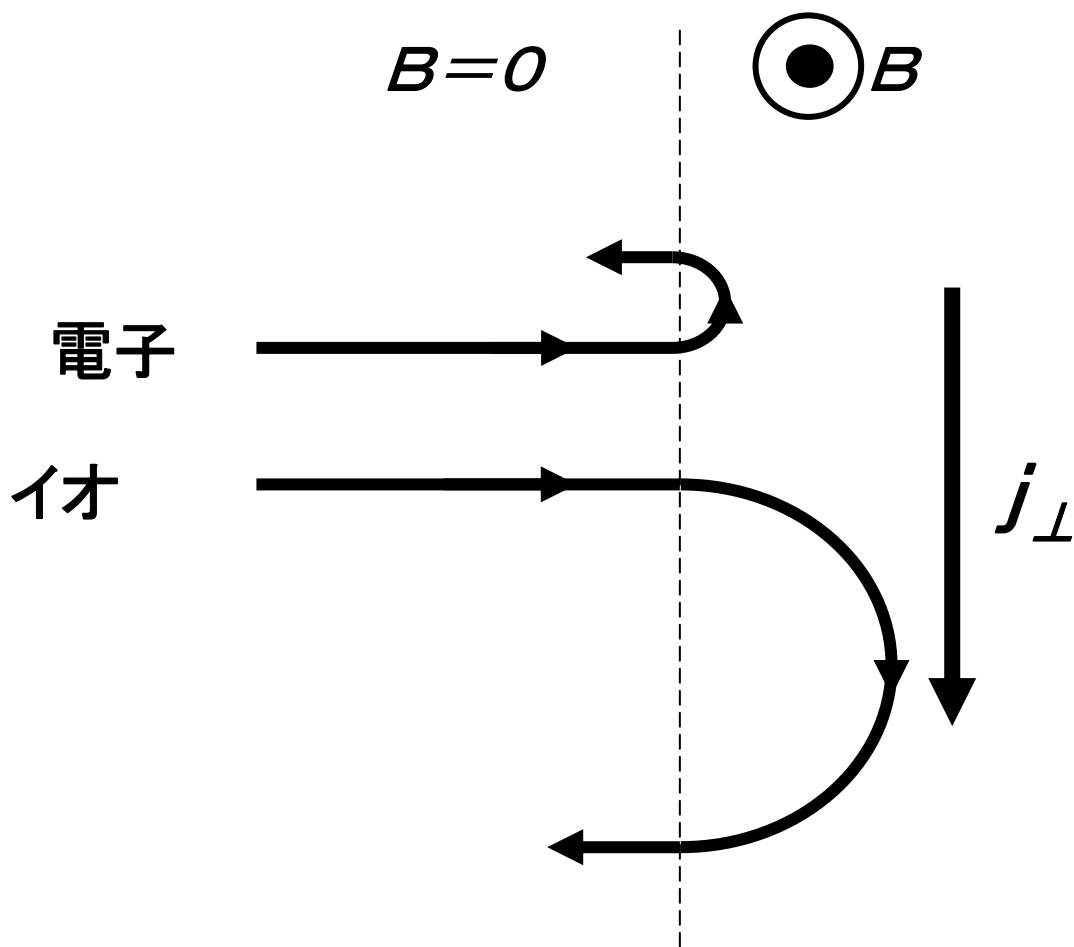


$$\vec{j}_{\perp} = \frac{\vec{B} \times \nabla P_{th}}{B^2}$$



慣性電流の説明

$$\vec{j}_{\perp} = \frac{nm}{B^2} \left(\vec{B} \times \frac{d\vec{v}}{dt} \right)$$



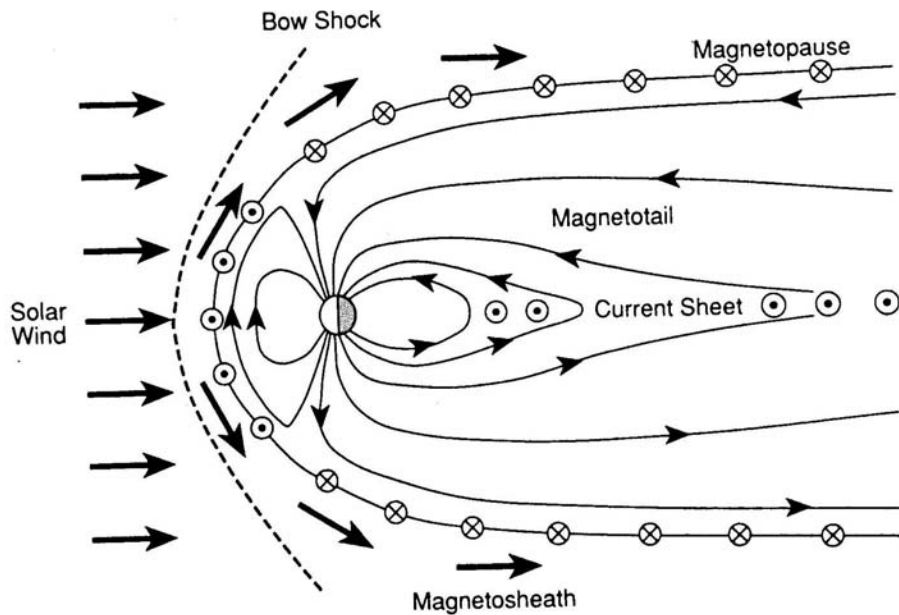
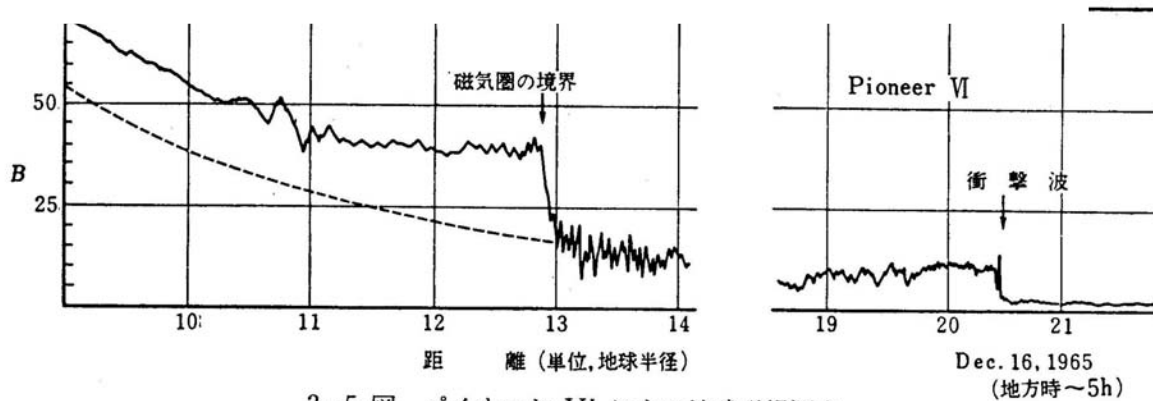


FIG. 9.1. Cross section of the simplest model of the magnetosphere in the noon-midnight meridian. In this so-called closed model, the geomagnetic field is perfectly confined by the sheet currents flowing on the magnetopause. A second current sheet flows across the midplane of the magnetotail and connects with the magnetopause currents at the flanks of the tail. The solar-wind flow (thick arrows) is deflected at the bow shock and flows around the magnetosphere, forming the magnetosheath.

Introduction to Space Physics より



3-5 図 パイオニア VI による地球磁場測定

Ness et al., JGR, p.3305, 1966.

磁気圏プラズマ変動による 沿磁力線電流・オーロラの駆動

電流の連続の式 $\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{j}_{\parallel} + \vec{j}_{\perp}) = 0$

従って $\vec{\nabla}_{\perp} \cdot \vec{j}_{\perp} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_{\parallel} = -B \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\vec{j}_{\parallel}}{B} \right)$

これに $\vec{j}_{\perp} = \frac{\vec{B} \times \nabla P_{th}}{B^2} + \frac{nm}{B^2} \left(\vec{B} \times \frac{d\vec{v}}{dt} \right)$ を代入すると

沿磁力線電流の式が出てくる。

$$j_{\parallel} = B \cdot \int \left(\frac{2}{B^2} \vec{j}_{\perp} \cdot \vec{\nabla} B + nm \frac{\vec{B}}{B^3} \frac{d(\vec{\nabla} \times \vec{v})}{dt} - \frac{\vec{j}_{in} \cdot \vec{\nabla}(nm)}{nmB} \right) dl_{\parallel}$$

(4)

$$j_{\parallel} = B \cdot \int \left(\frac{2}{B^2} \vec{j}_{\perp} \cdot \vec{\nabla} B + nm \frac{\vec{B}}{B^3} \frac{d(\vec{\nabla} \times \vec{v})}{dt} - \frac{\vec{j}_{in} \cdot \vec{\nabla}(nm)}{nmB} \right) dl_{\parallel}$$

(4)

第1項: j_{\perp} 方向の磁場勾配

第2項: flowのshear(渦)の時間変化

第3項: 慣性電流方向の密度勾配

が沿磁力線電流を駆動する=オーロラを光らせる

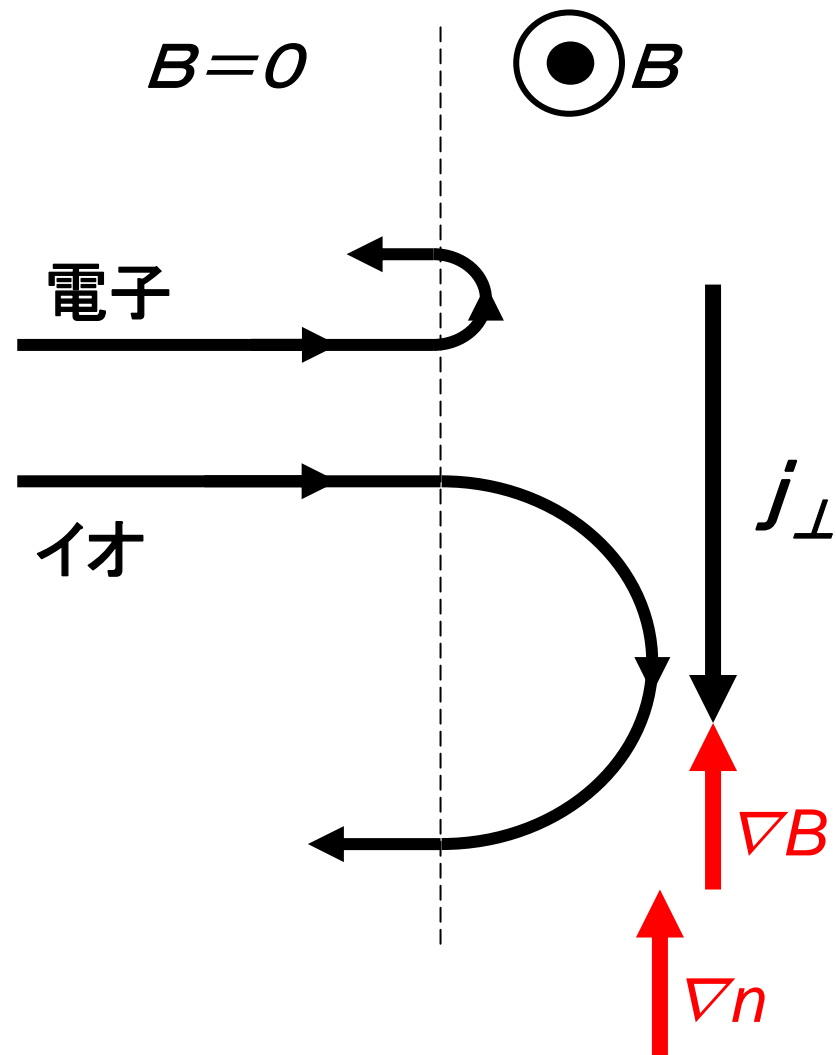
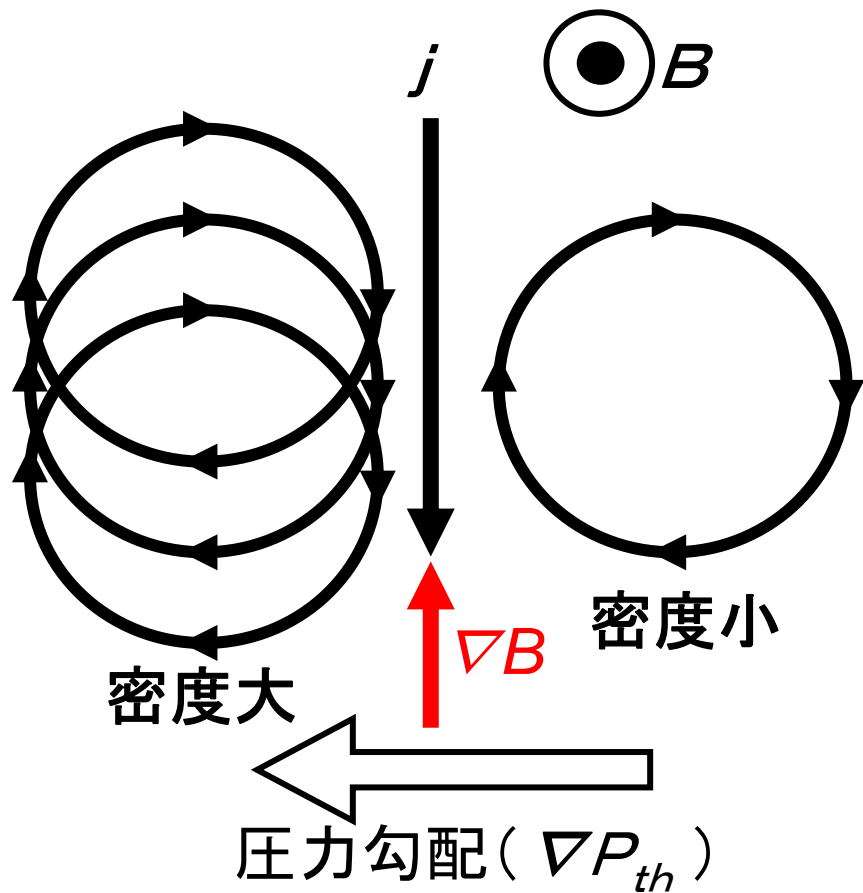
$$\vec{j}_{\perp} = \frac{\vec{B} \times \nabla P_{th}}{B^2} + \frac{nm}{B^2} \left(\vec{B} \times \frac{d\vec{v}}{dt} \right) \quad \vec{j}_{in} = \frac{nm}{B^2} \left(\vec{B} \times \frac{d\vec{v}}{dt} \right)$$

Hasegawa, A., and T. Sato, Generation of field aligned current during substorm, in Dynamics of the Magnetosphere, edited by S.-I. Akasofu, pp. 529-542, D. Reidel, Norwell, Mass., 1979.

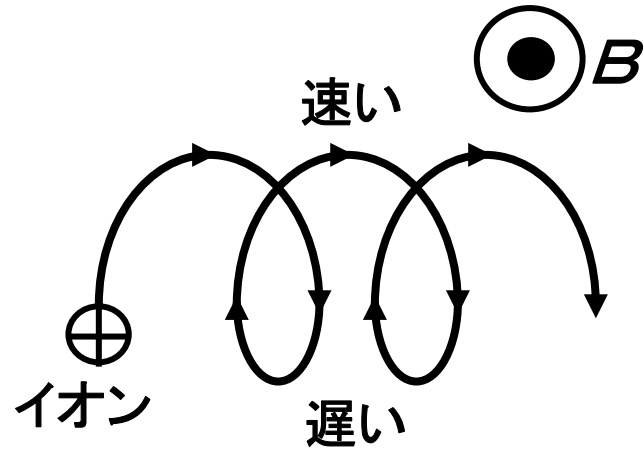
Haerendel, G., Field-aligned currents in the Earth's magnetosphere, in Physics of Magnetic Flux Ropes, Geophys. Monogr. Ser., vol. 58, edited by C. T. Russell, E. R. Priest, and L. C. Lee, pp. 539-553, AGU, Washington, D. C., 1990.

第1項: j_{\perp} 方向の磁場勾配

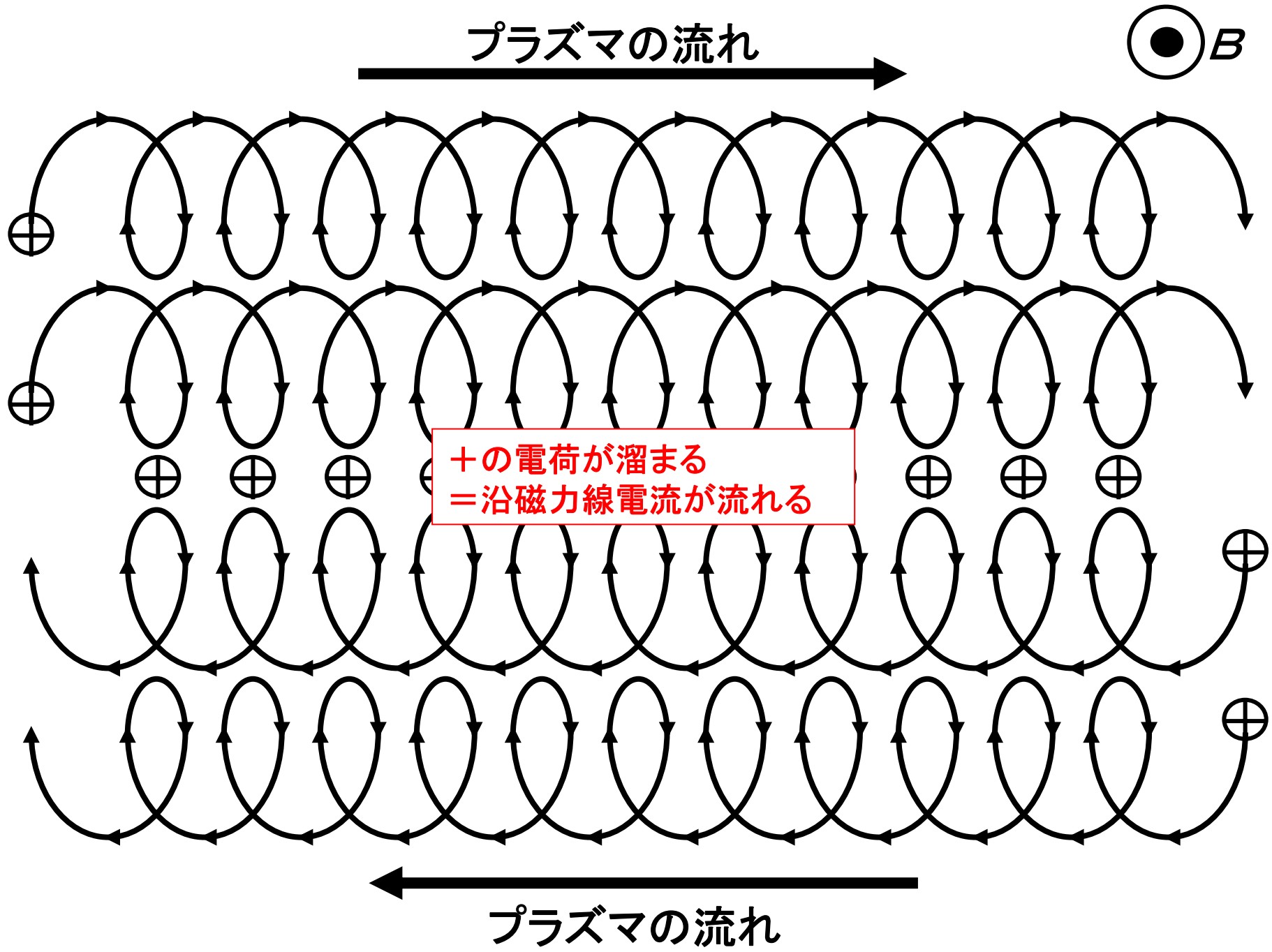
第3項: 慣性電流方向の密度勾配



flowのshear(渦)による沿磁力線電流の駆動



flowのshear(渦)による沿磁力線電流の駆動



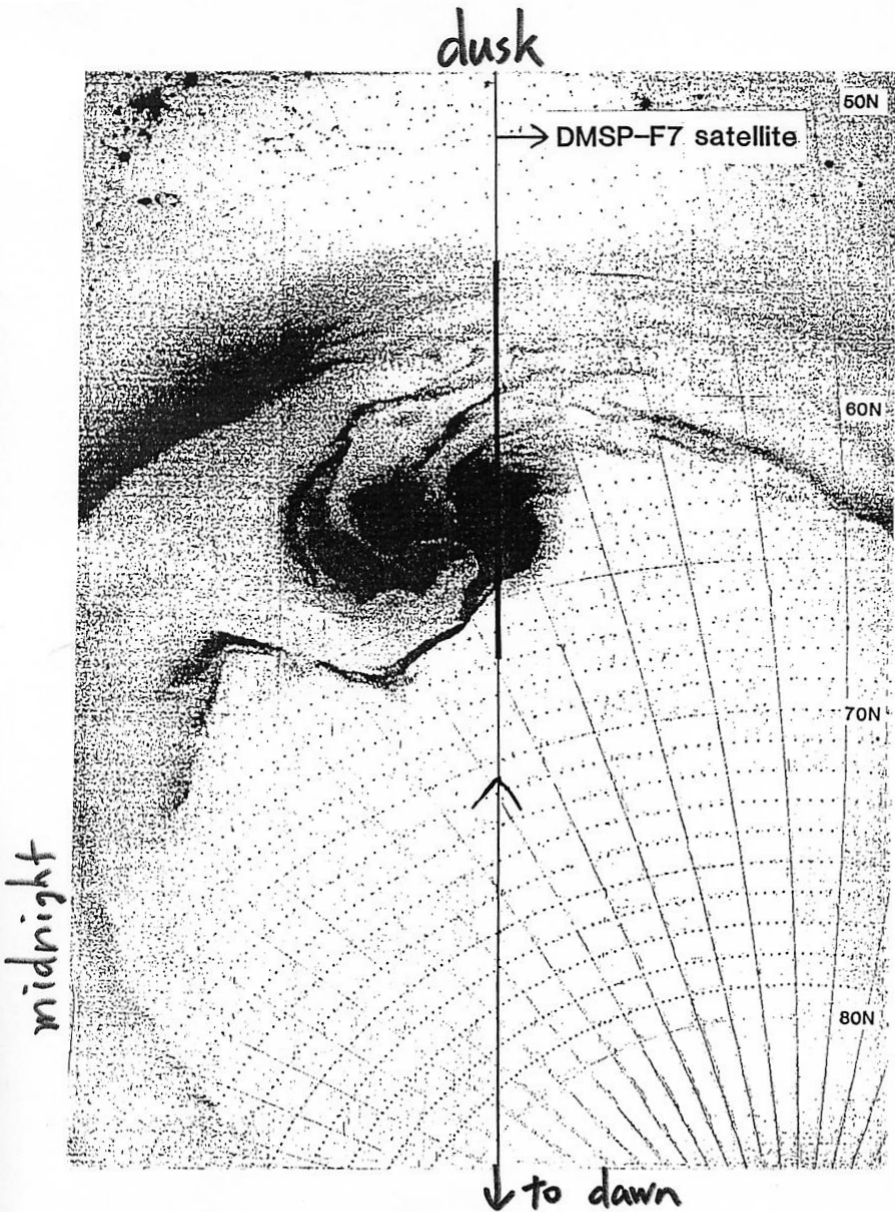


Figure 4.5a. Typical example of nightside discrete arcs observed by the DMSP-F7 satellite.

オーロラとそれを光らせる 電子降り込み

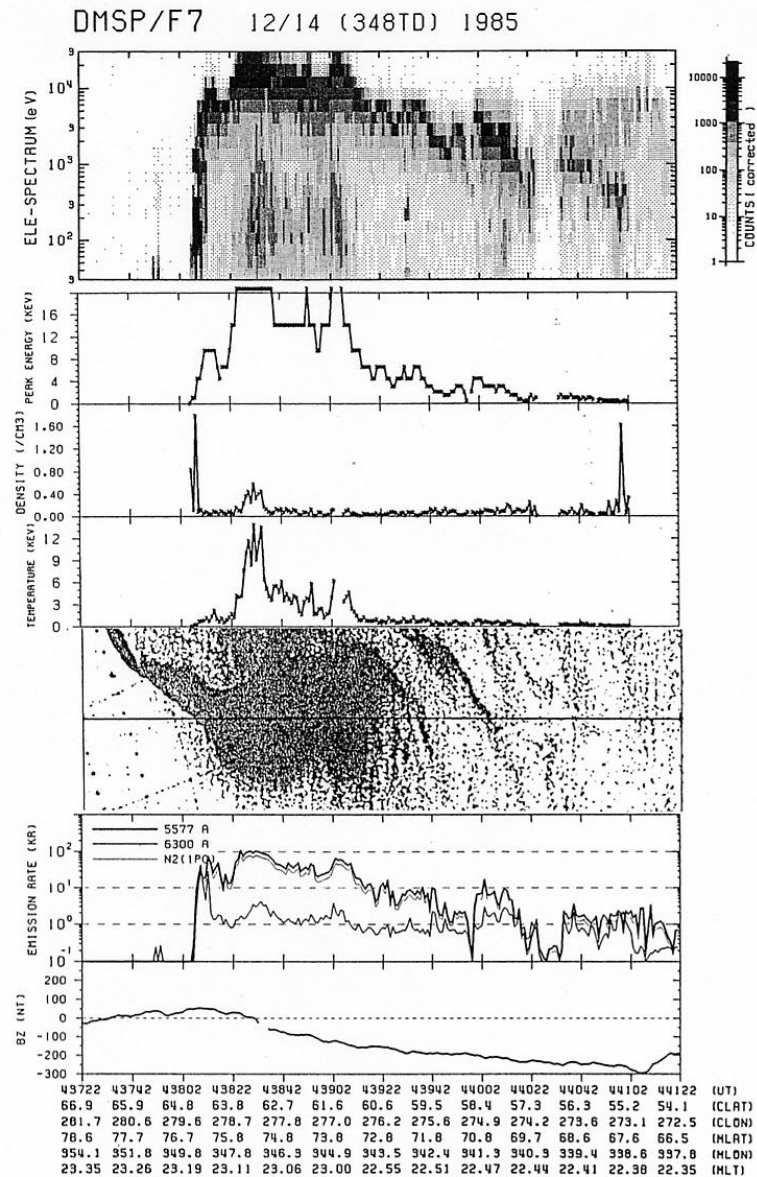


Figure 4.5b. Energy-time spectrum of precipitating electrons, $V_{||}$, n , E_0 , auroral picture, and calculated auroral emission intensities on the same pass as that in Figure 4.5a. The format is the same as that in Figure 4.4b except for the bottom panel, in which the horizontal magnetic field perturbations perpendicular to the satellite trajectory is given.



Aurora movie provided by Trond Trondsen (U. Calgary)
flow shearの描像を示すオーロラアーク

粒子運動における第1断熱不変量保存より

$$\mu = \frac{1}{2} m v_{\perp}^2 / B = \text{一定}$$

エネルギー保存から、

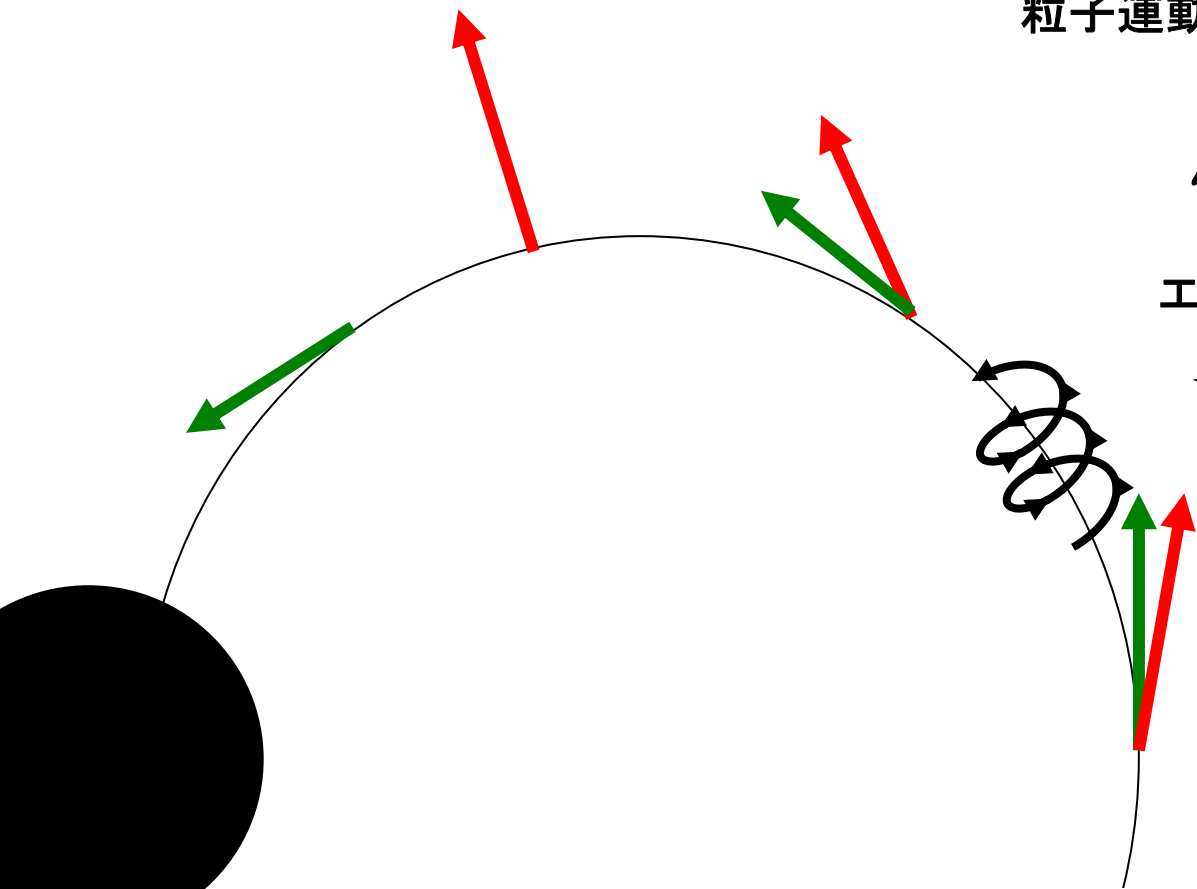
$$W = \frac{1}{2} m (v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2) = \text{一定}$$

→磁力線に沿ってBが増える

→ v_{\perp} が増える

→ v_{\parallel} が減る

→ $v_{\parallel} = 0$ のところではね返される



磁気圏でのピッチ角(磁力線となす角)が小さいもの

(数度以下): 電離圏まで到達

(電離圏まで到達できる最大ピッチ角をロスコーンと呼ぶ)

磁気圏でのピッチ角(磁力線となす角)が大きいもの

(数度以上): ミラ一点ではね返される。

→ 磁力線方向に実質的な電気抵抗が存在する

磁気圏の電子が運べる沿磁力線電流の量

Knight (PSS, p.741, 1973); Lyons (JGR, p.17, 1980)

$$j_{\parallel} = en_M \left(\frac{\kappa T_M}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \left(\frac{B_I}{B_M} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{B_M}{B_I} \right) \exp \left\{ - \frac{eV_{\parallel}}{\kappa T_M \left(\frac{B_I}{B_M} - 1 \right)} \right\} \right]$$

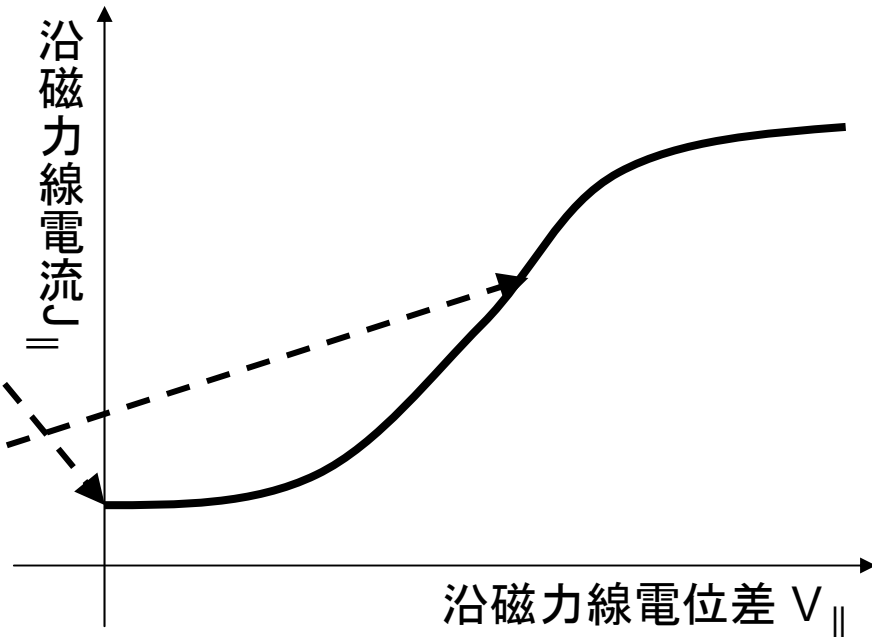
V_{\parallel} : 沿磁力線電位差

$V_{\parallel} = 0$ の時

$$j_{\parallel} = en_M \left(\frac{\kappa T_M}{2\pi m_e} \right)^{1/2}$$

$1 \ll eV_{\parallel} / \kappa T_M \ll B_I / B_M$ の時

$$j_{\parallel} = KV_{\parallel}$$



オーロラ上空を横切った 人工衛星による降り込み イオン・電子データ

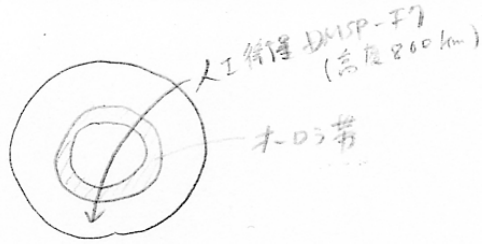
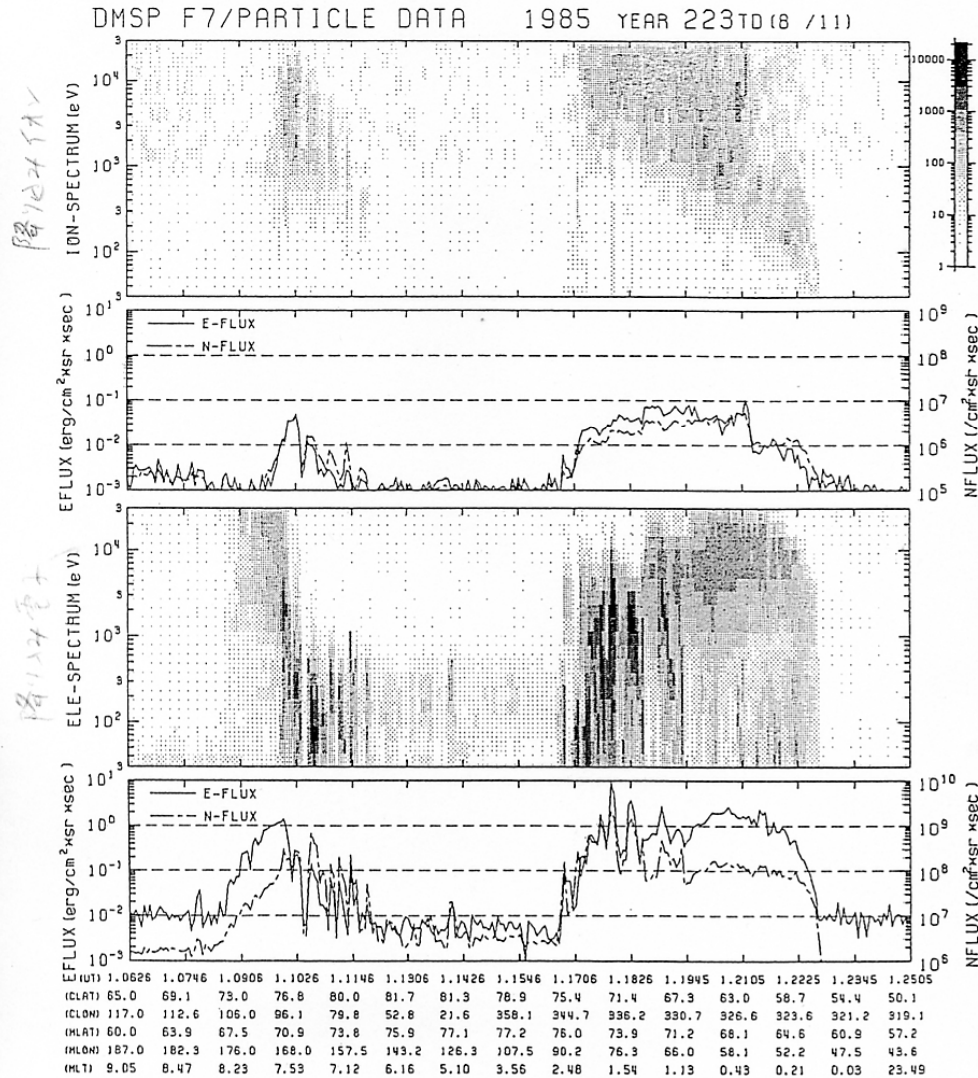
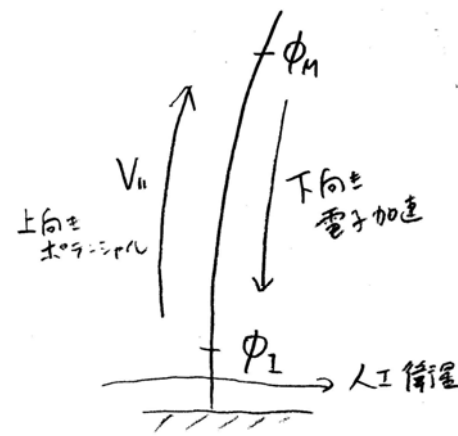


Fig. 3a

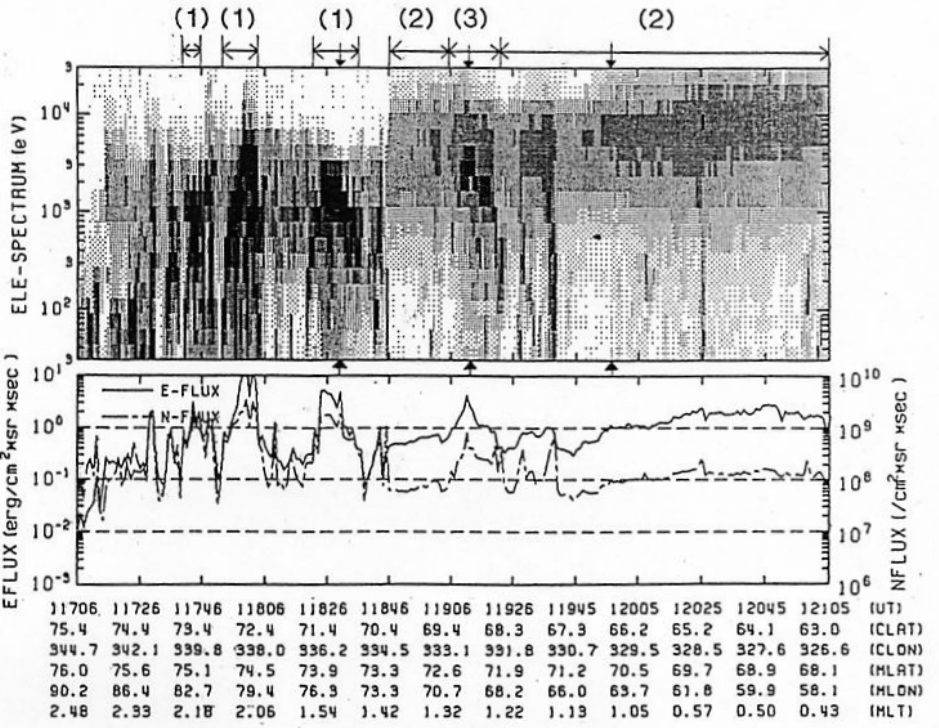
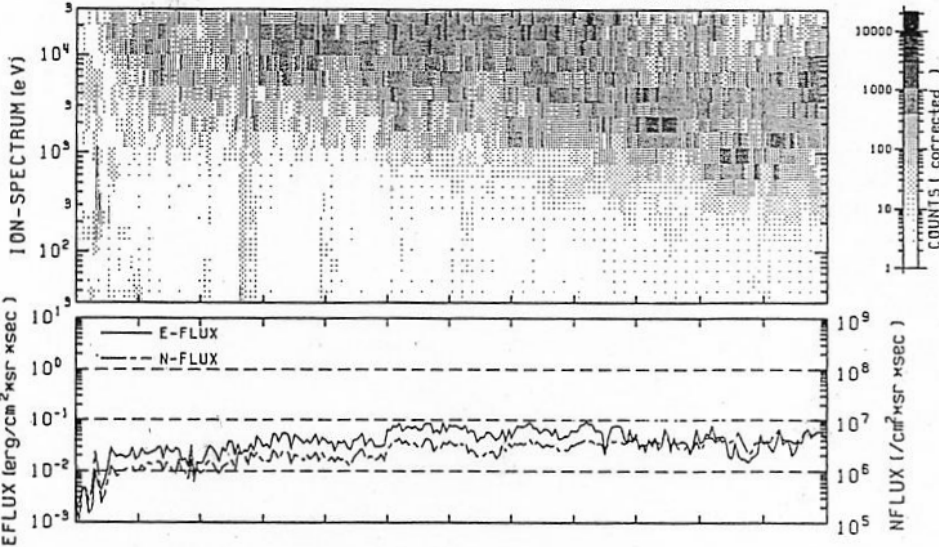
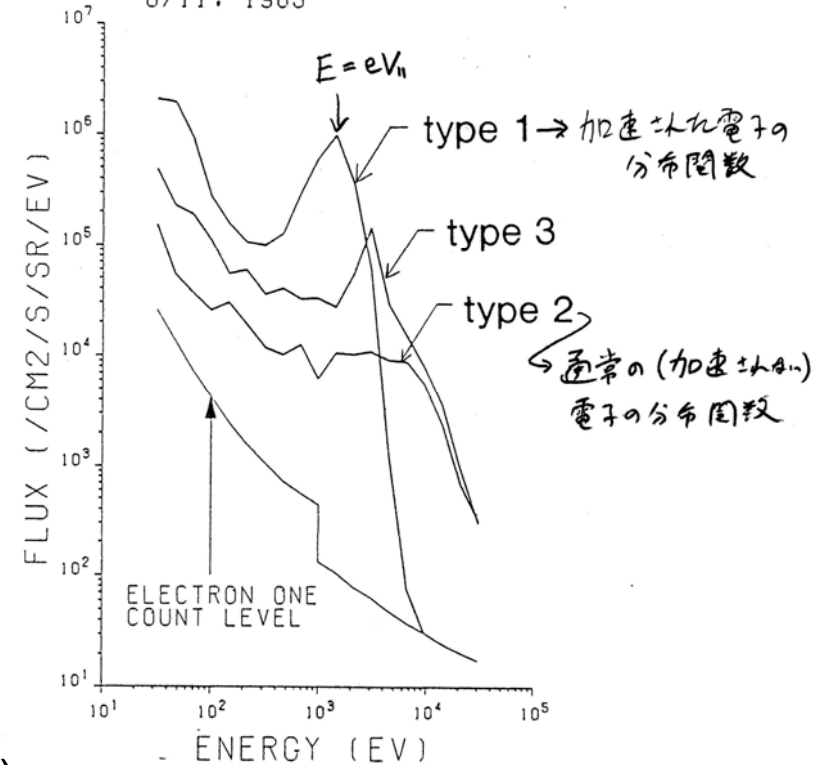


電気抵抗に伴う
磁力線方向の加速
電場が存在

$$J_{\parallel} = KV_{\parallel}$$



DMSP F7 ELECTRON
8/11, 1985





Aurora movie provided by Trond Trondsen (U. Calgary)
Kinetic Alfvén waveの描像を示すflickering aurora

Inertia Alfvén Wave による電子の加速の観測とシミュレーションの比較 Watt et al. (GRL, 2005GL024779, 2006)

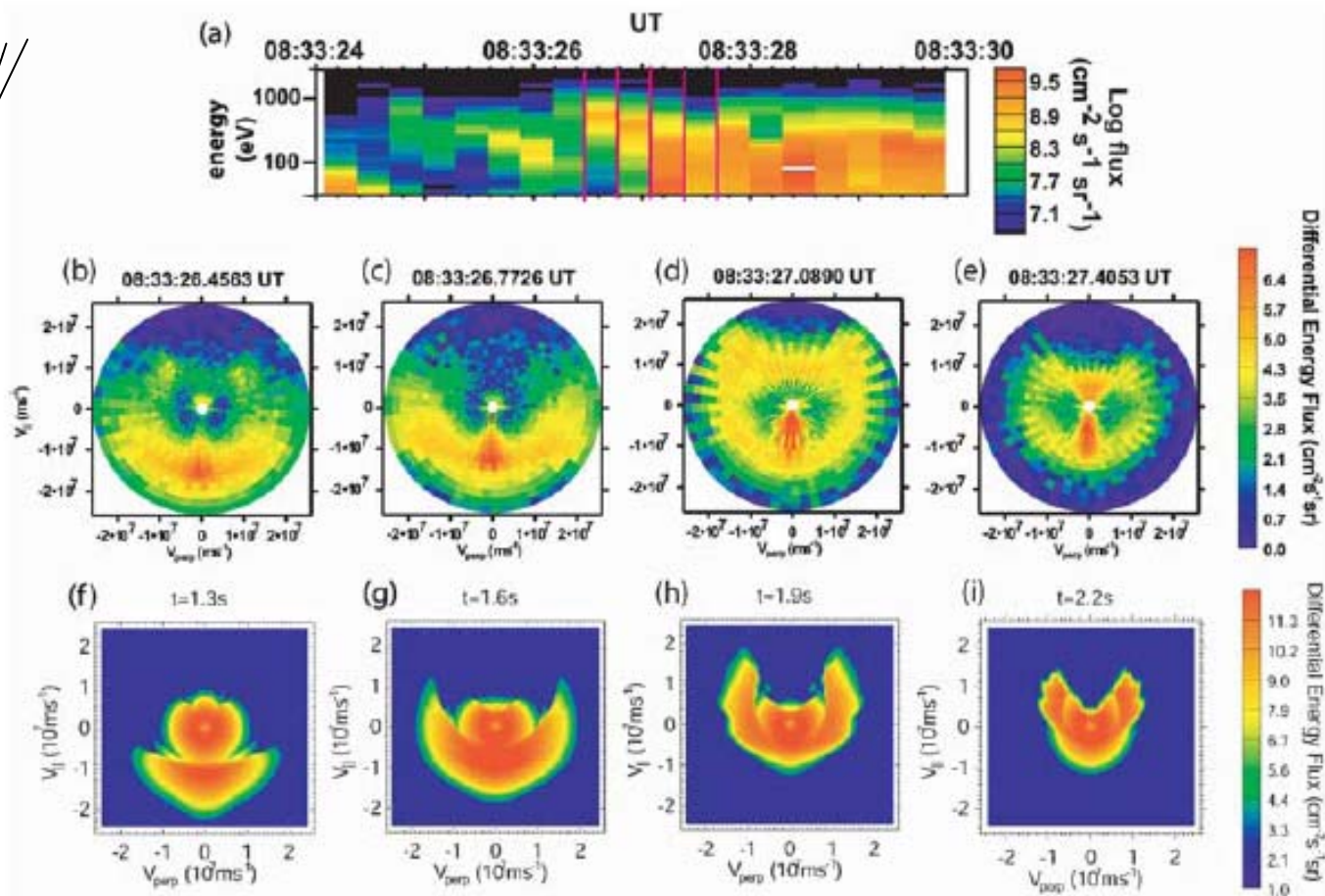


Figure 2. Comparison between FAST observations of an electron acceleration event during orbit 3568 and the results from the simulation code. (a) Differential electron energy flux of the downgoing electrons; (b, c, d, e) full two-dimensional plots of FAST differential electron energy flux as a function of v_{\parallel} and v_{\perp} for time intervals indicated with red vertical lines in Figure 2a; (f, g, h, i) two-dimensional plots of differential energy flux as a function of v_{\parallel} and v_{\perp} at $z = 0.5 R_E$ for time intervals of 0.3 s duration taken from the simulation. In the simulation, the field-aligned burst of low-energy electrons occurs at $t = 1.9\text{s}$.

サブストームとその 発生機構の議論

オーロラの代表的なグローバル変動 — オーロラサブストーム

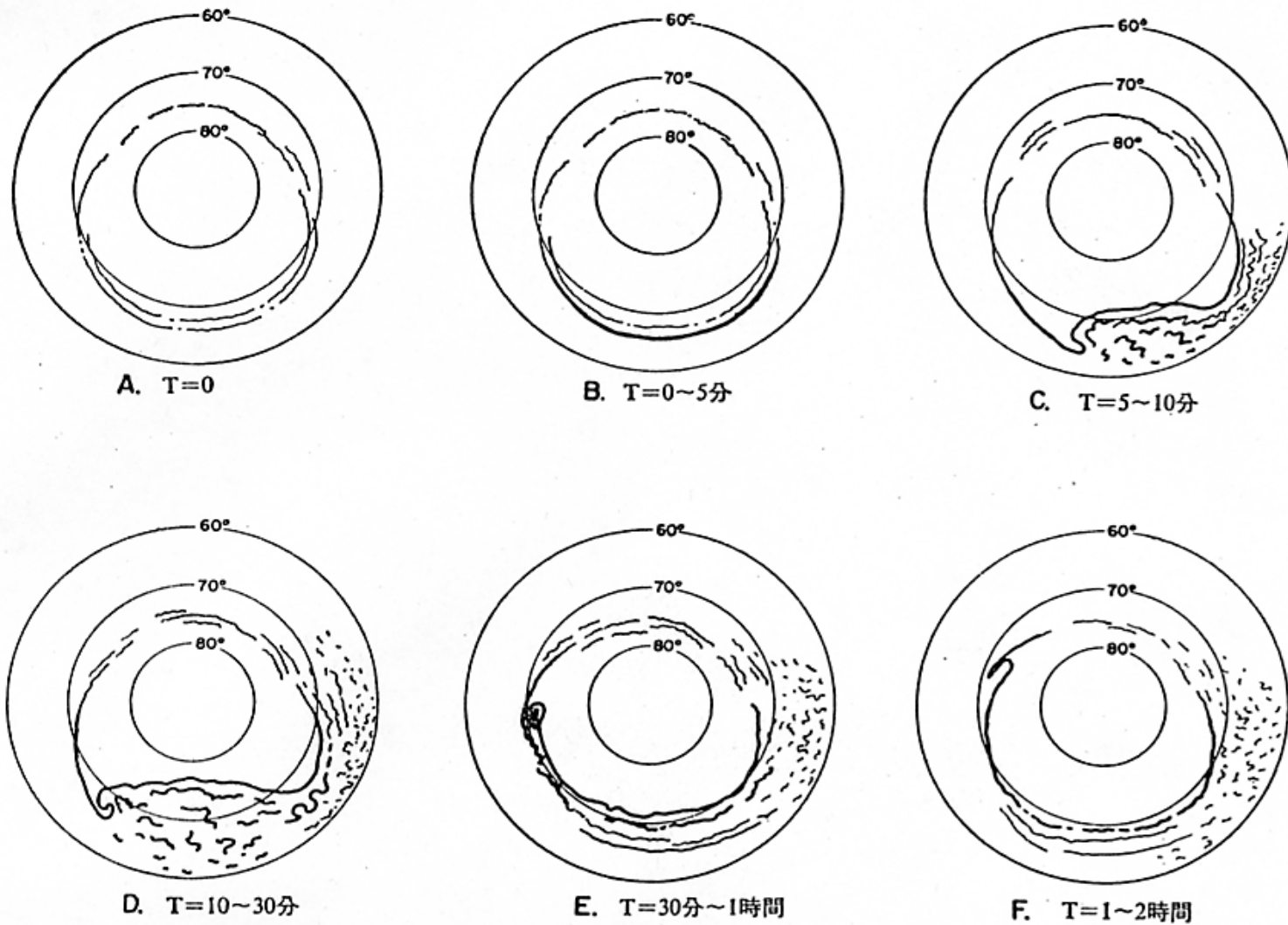


図 2.45 オーロラサブストームの発達過程 (Akasofu, 1968)

オーロラサブストームの例

Kotzebue, Alaska

September 14, 1994

94- 9-12
9:19:43

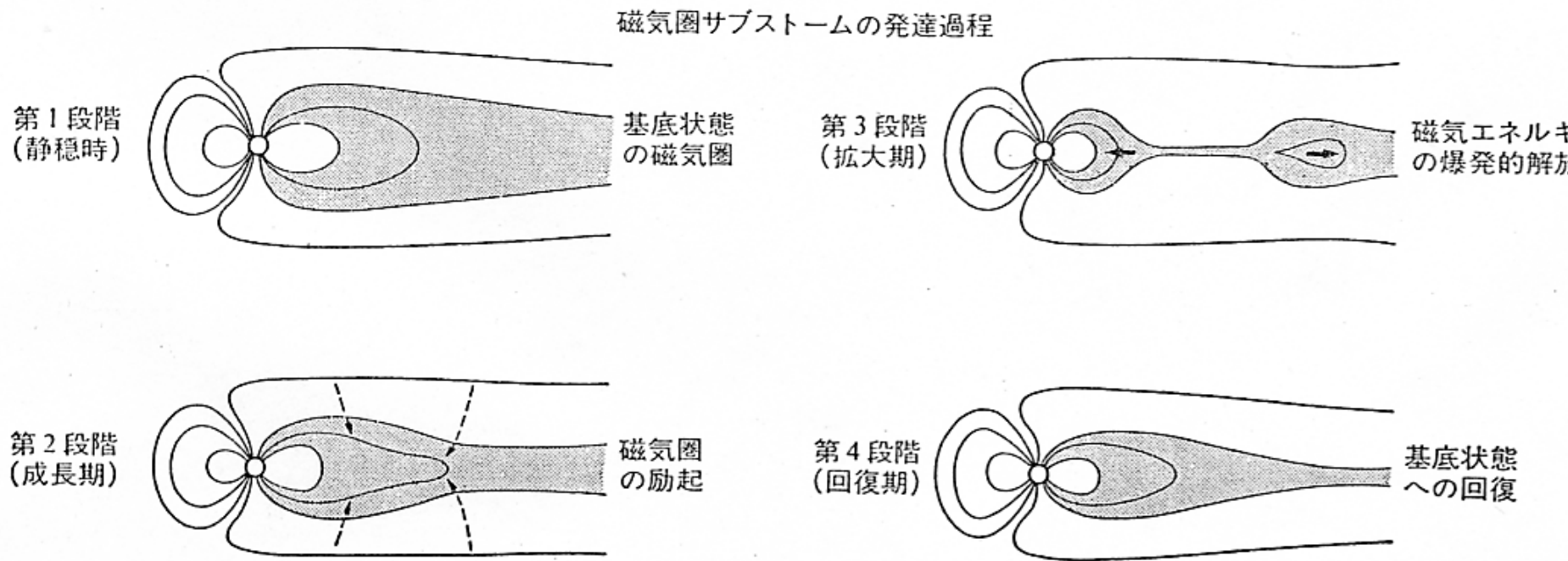
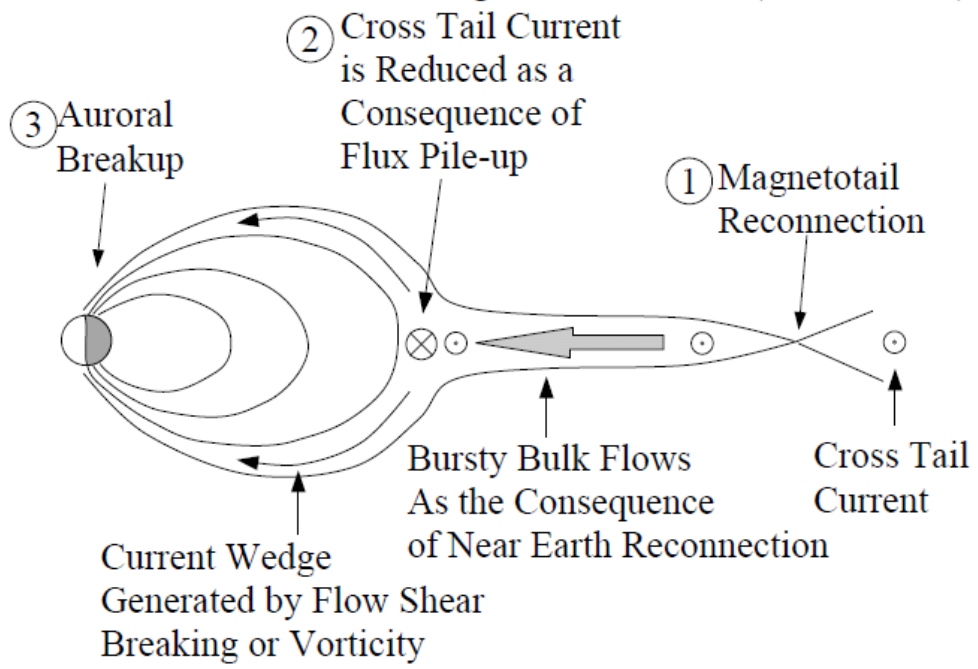
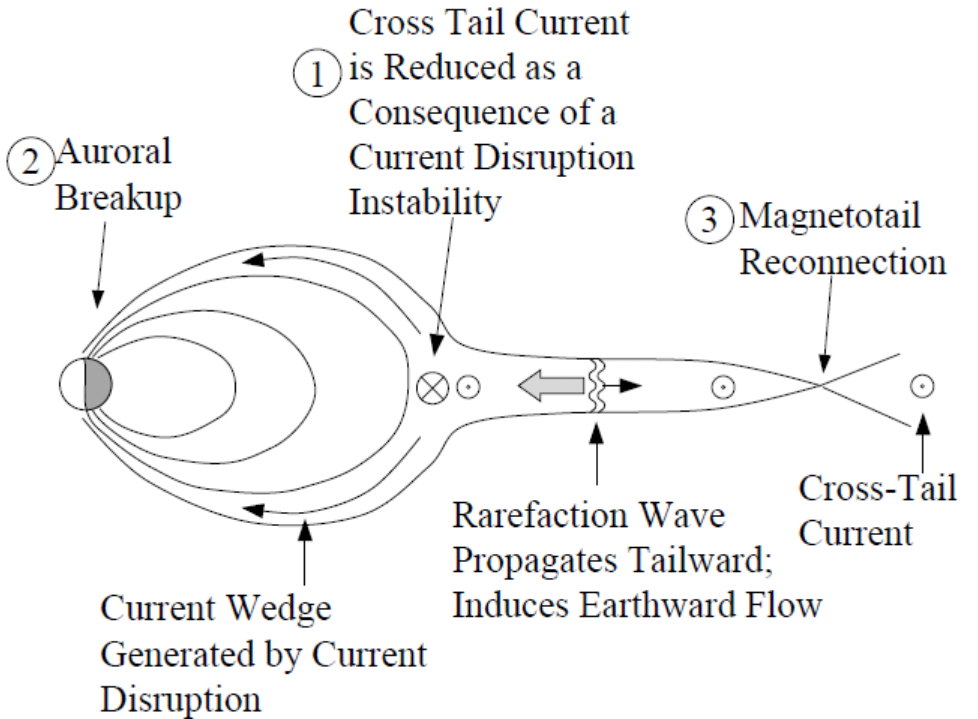


図 1.21 磁気圏サブストームの発達過程

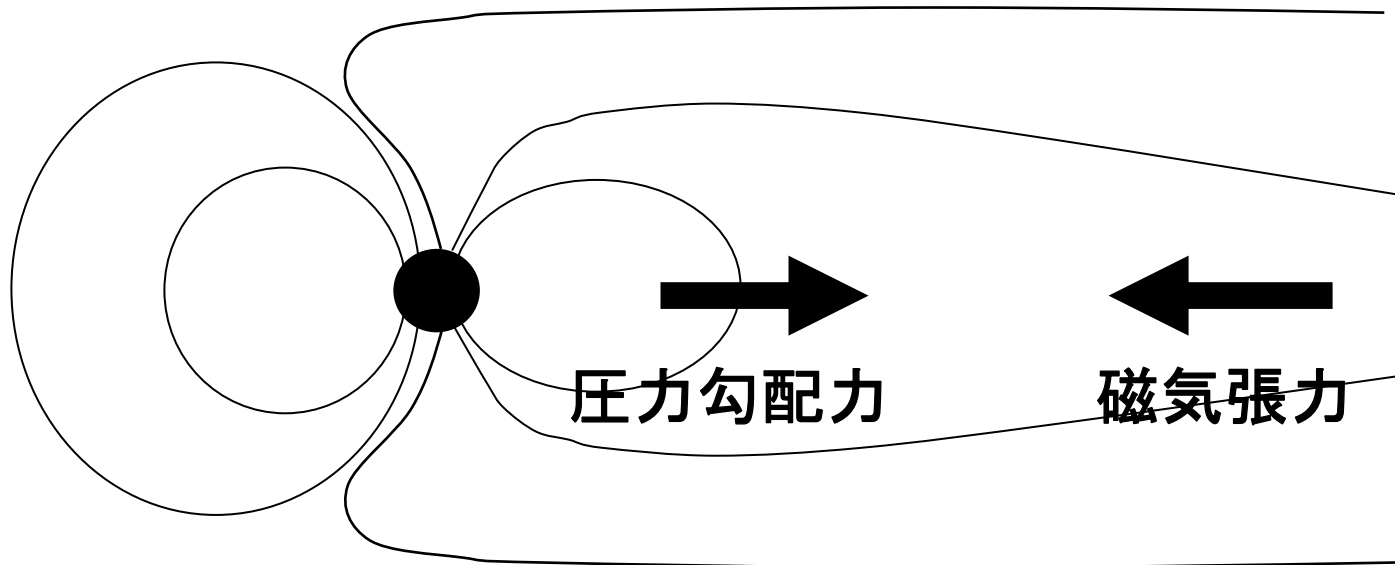
2つの異なるサブストームモデル



NENL model



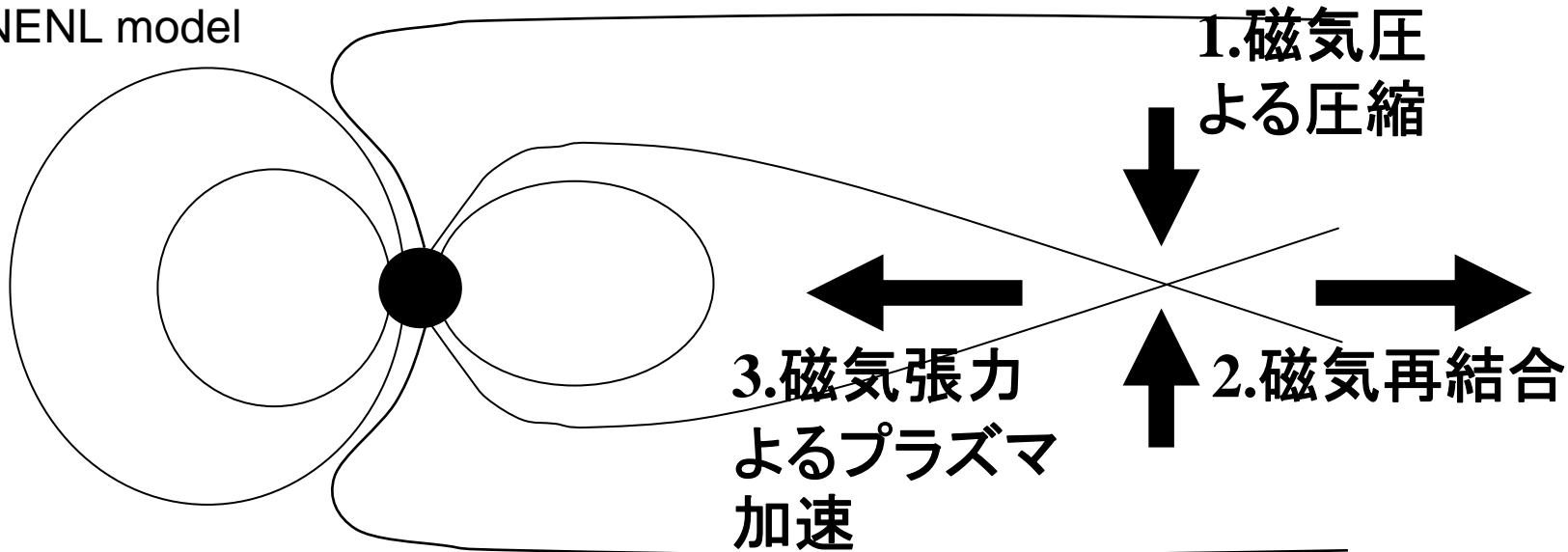
current disruption model



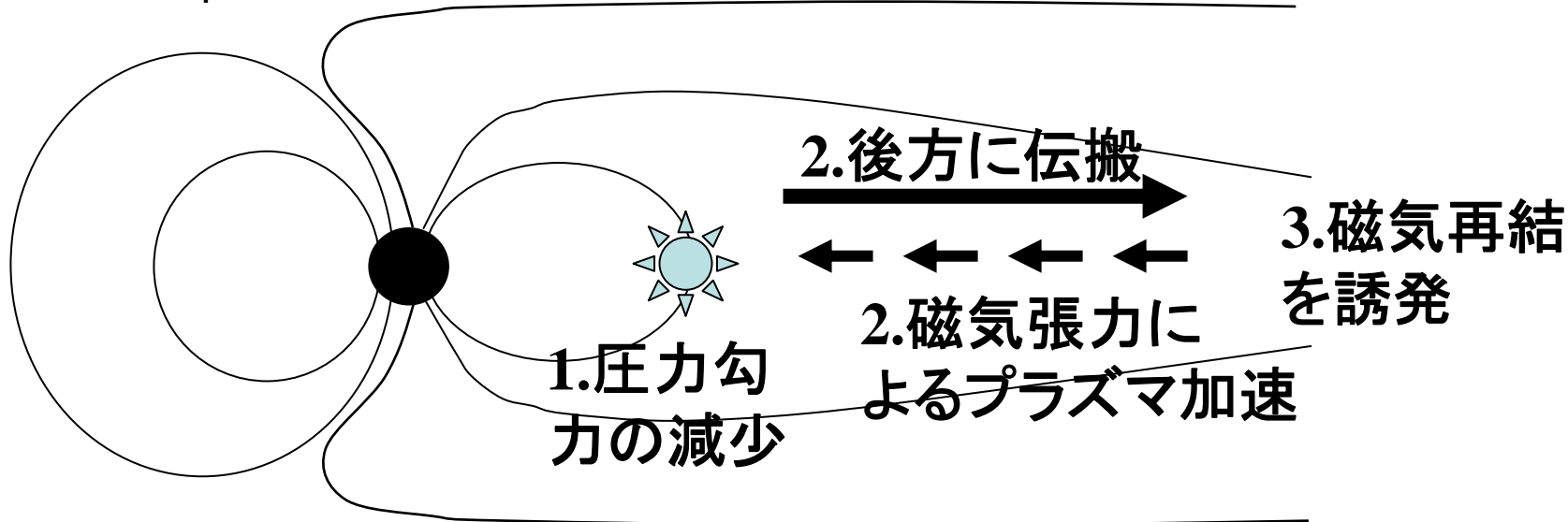
压力勾配力

磁気張力

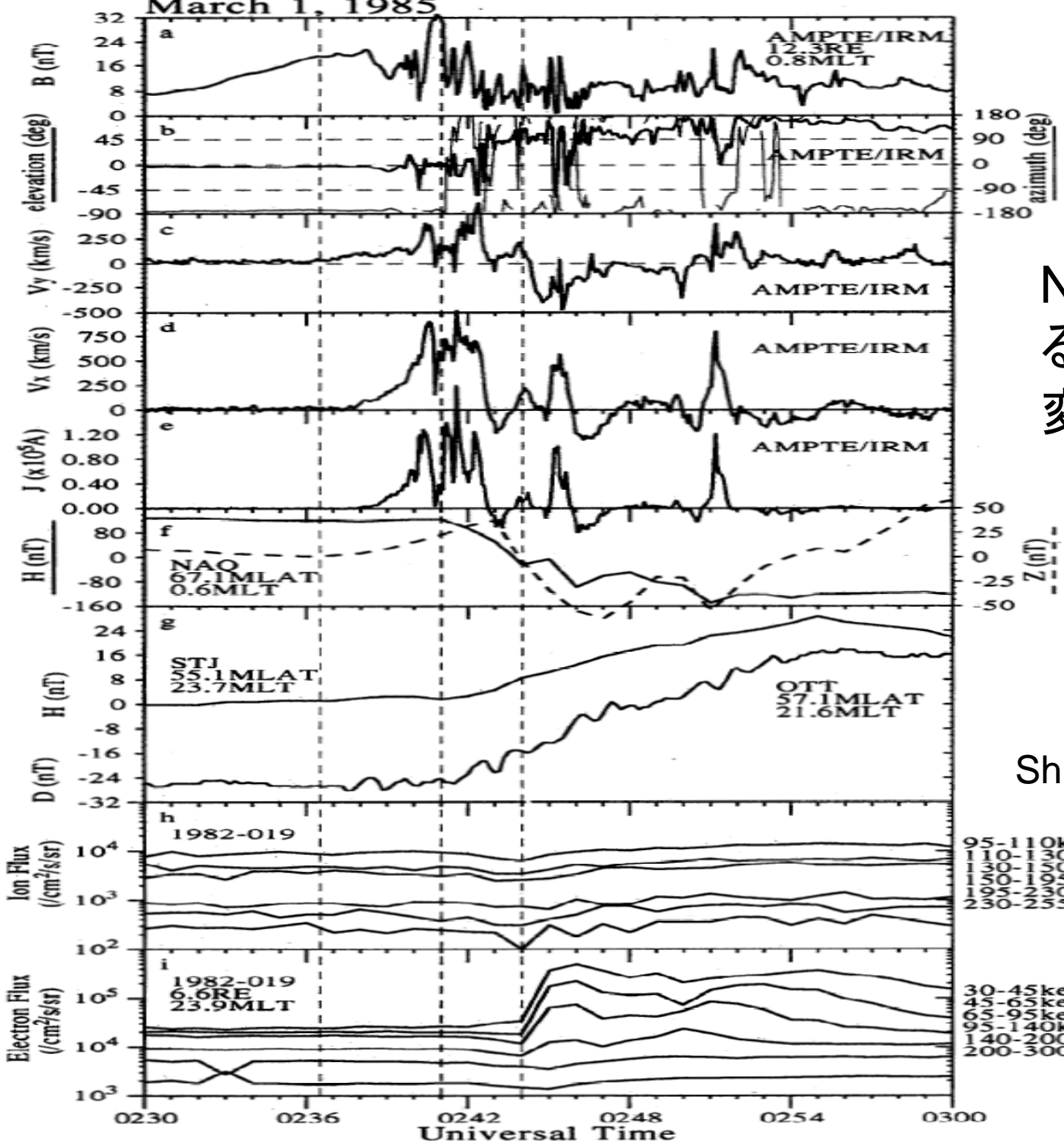
NENL model



current disruption model



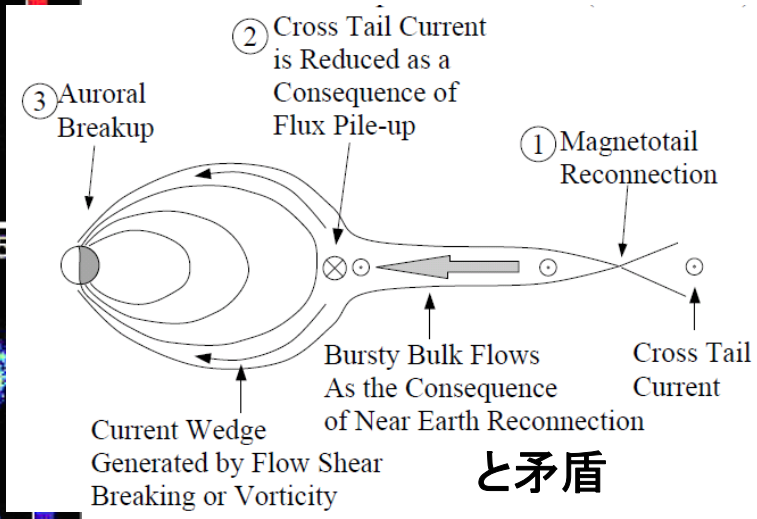
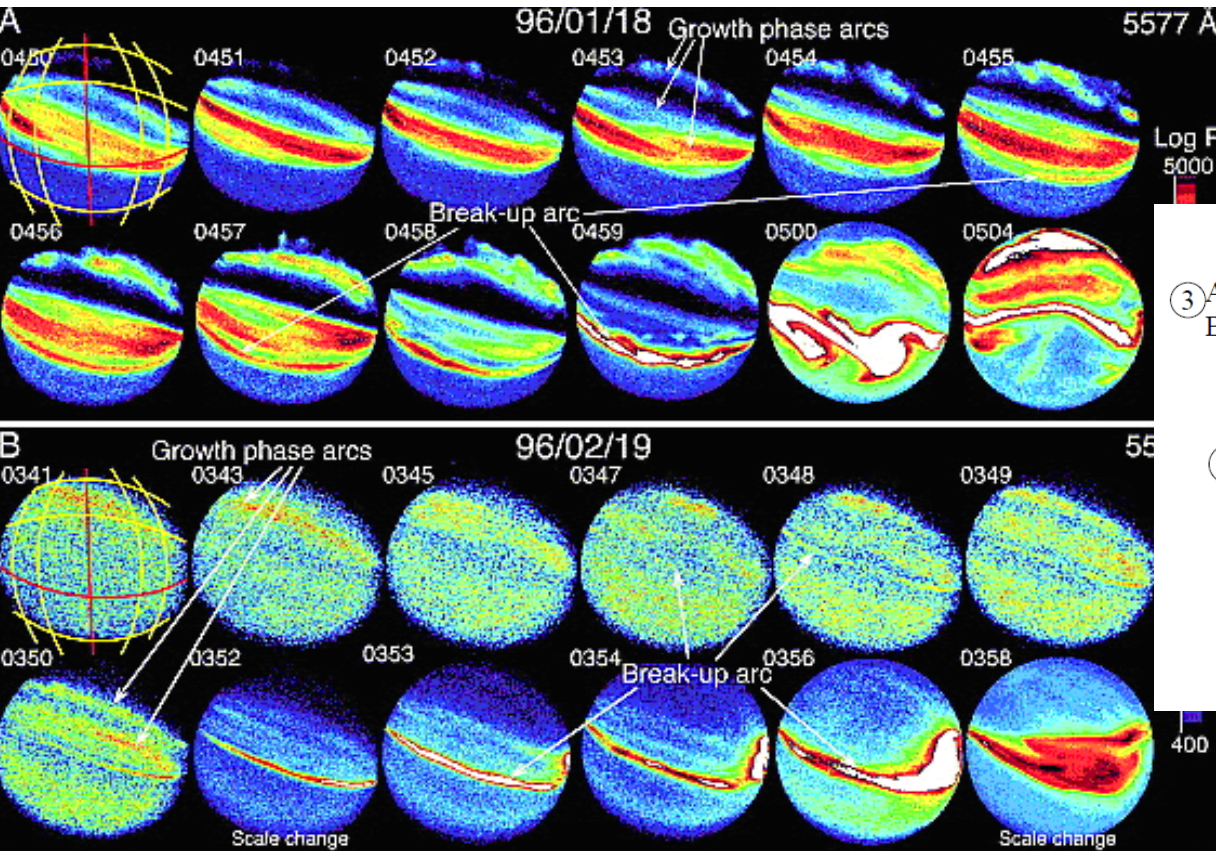
March 1, 1985



NENL描像を示唆するtailの変動と地上変動の時間差

Shiokawa et al. (JGR, 1998)

オーロラは低緯度側からbreakupを開始→NENLではなく地球に近いところでサブストームが開始？



Lyons et al. (JGR, 2002)

AMPTe CCE Magnetic Field Experiment
Orbit 1138 Aug. 28, 1986 Day 240

current disruptionを
示唆する激しい磁場
変動

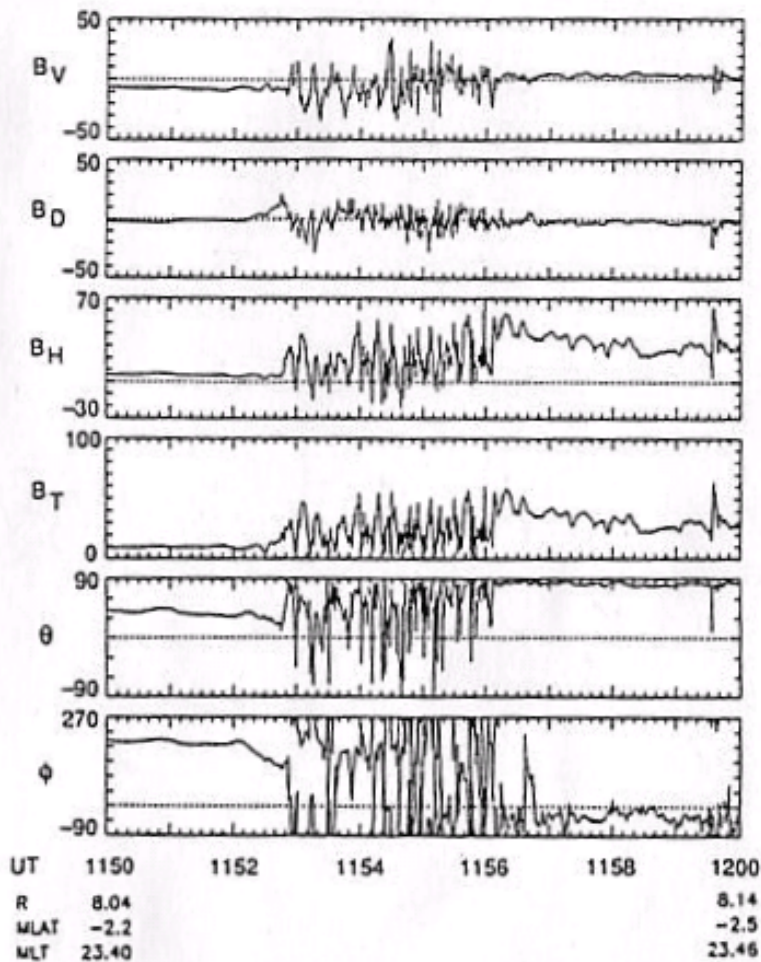
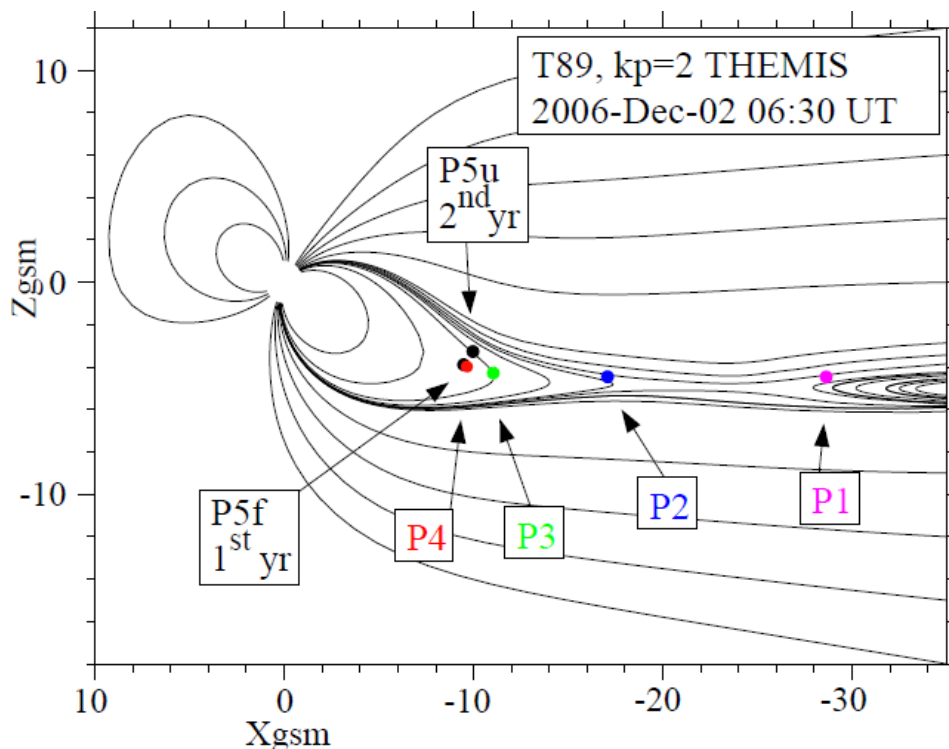
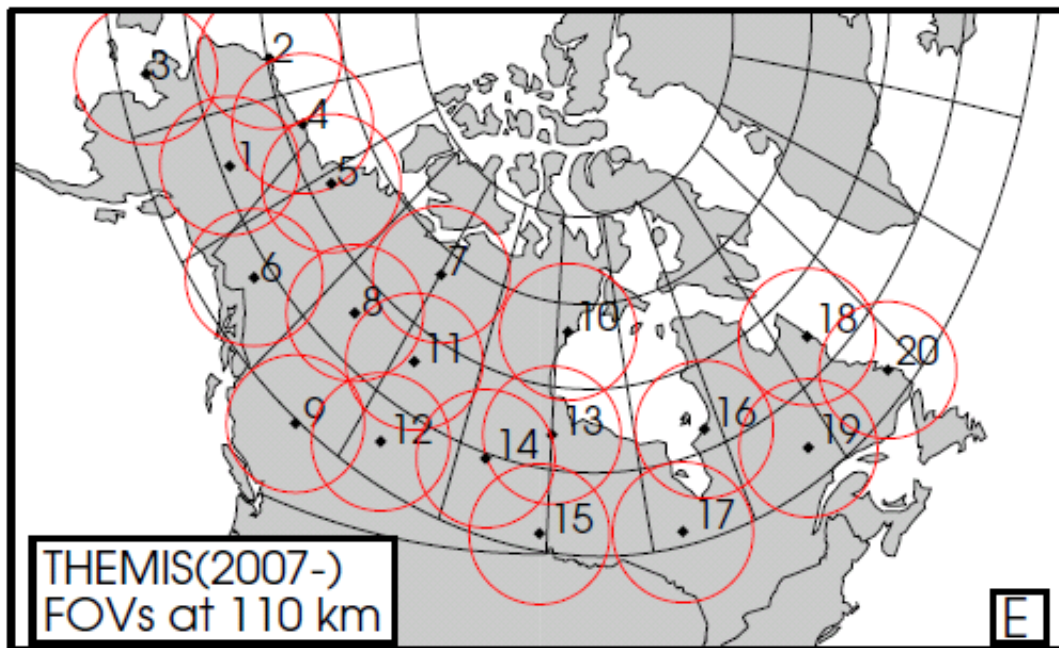


Fig. 7. CCE magnetic field measurements at high time resolution on August 28, 1986. The magnetic field was reduced to about one seventh the dipolar value prior to substorm onset. At the time of onset, large-amplitude magnetic field variations were observed.

Takahashi et al. (JGR, 1987)



2つのサブストーム
モデルに決着をつける
THEMIS衛星群



THEMIS衛星群と
地上観測ネットワーク