

# 衛星データに基づいた 地球磁気圏における サブストームに関する実証的研究

宮下幸長

名古屋大学 太陽地球環境研究所

平成21年度 第2回 宇宙科学奨励賞 記念講演

2010年3月9日

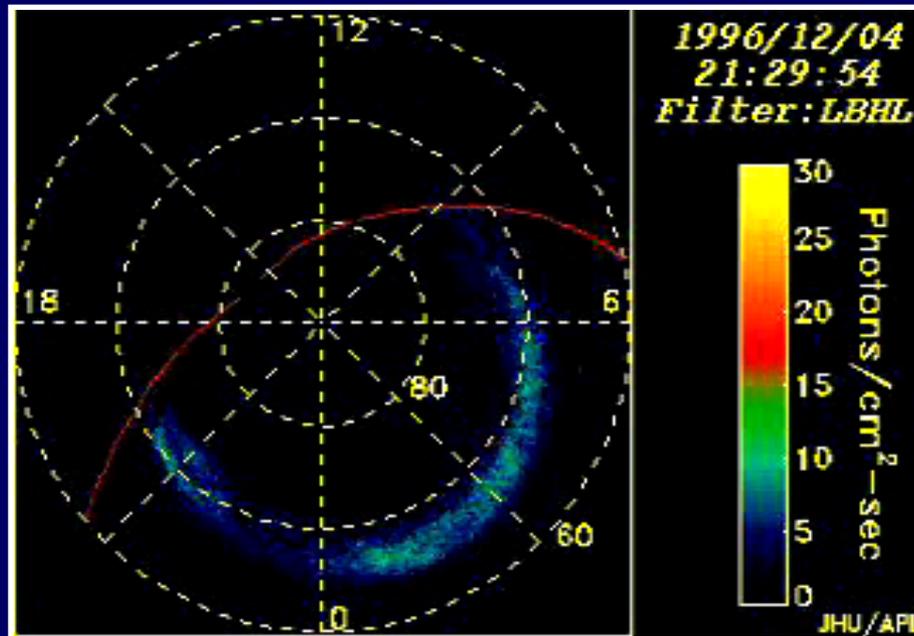
# ■ オーロラ: サブストームの特徴的な現象

- サブストームが起こると、極域の真夜中付近で**激しいオーロラの活動が始まる。**

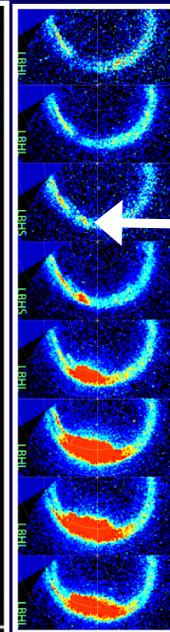


地上から見たオーロラ

(c) JAXA



真夜中

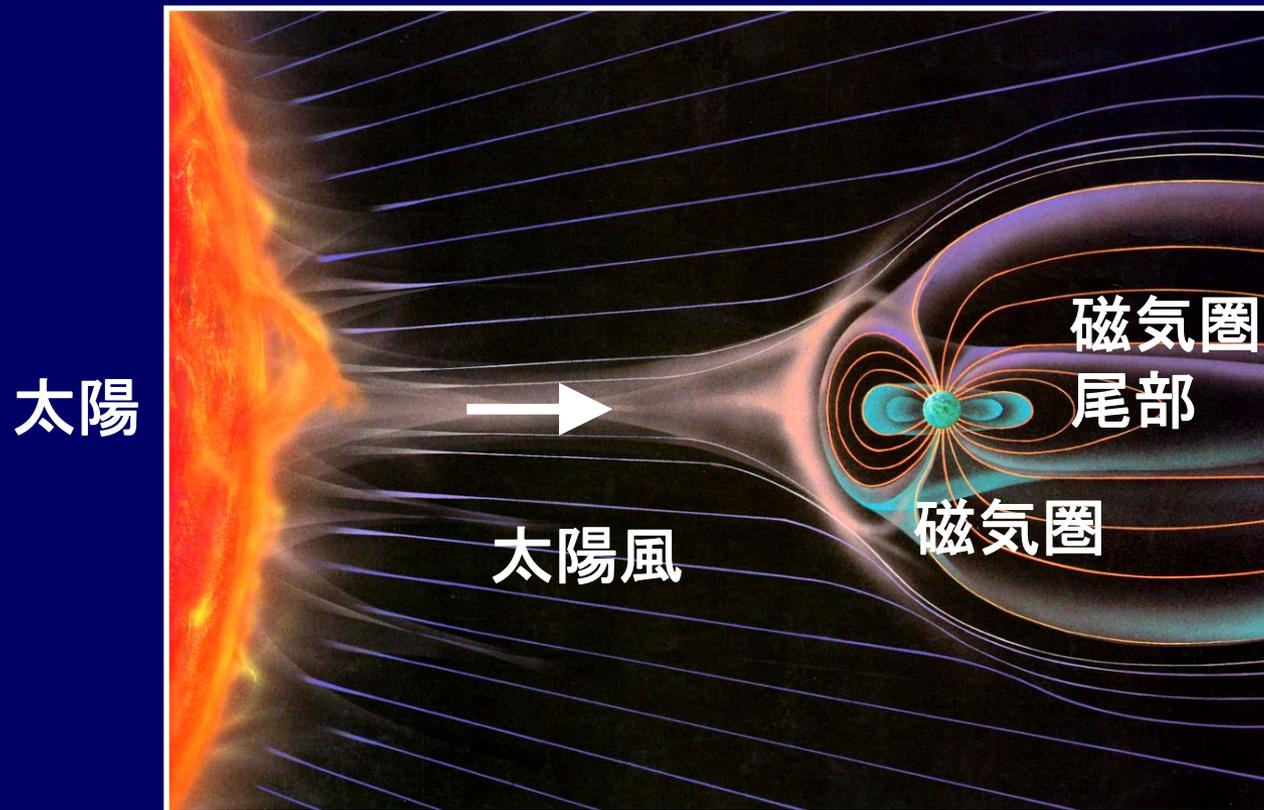


サブストーム開始

衛星により上から見たオーロラ

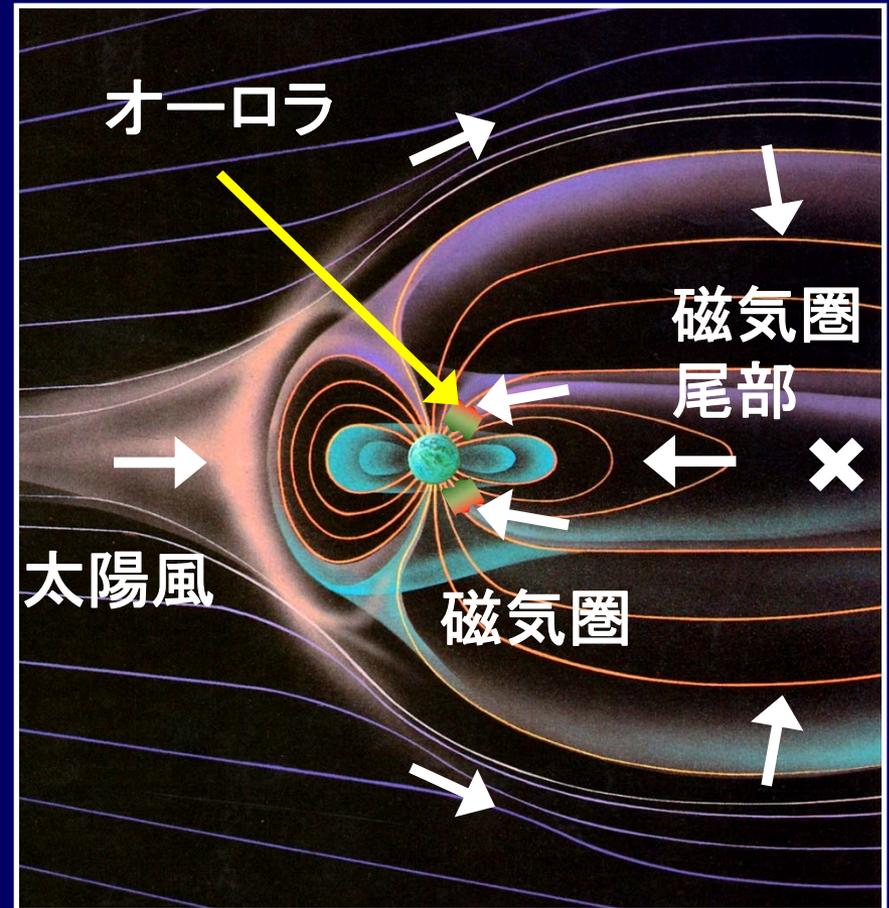
## ■ オーロラ・サブストームの源

- ・ 太陽から地球(惑星)周辺の宇宙空間(磁気圏・電離圏)へガス・エネルギーが運ばれる。
- ・ 太陽活動の影響により、電磁場・プラズマの激しい変動が発生する。サブストーム(激しいオーロラ)は、そのうちの一つ。



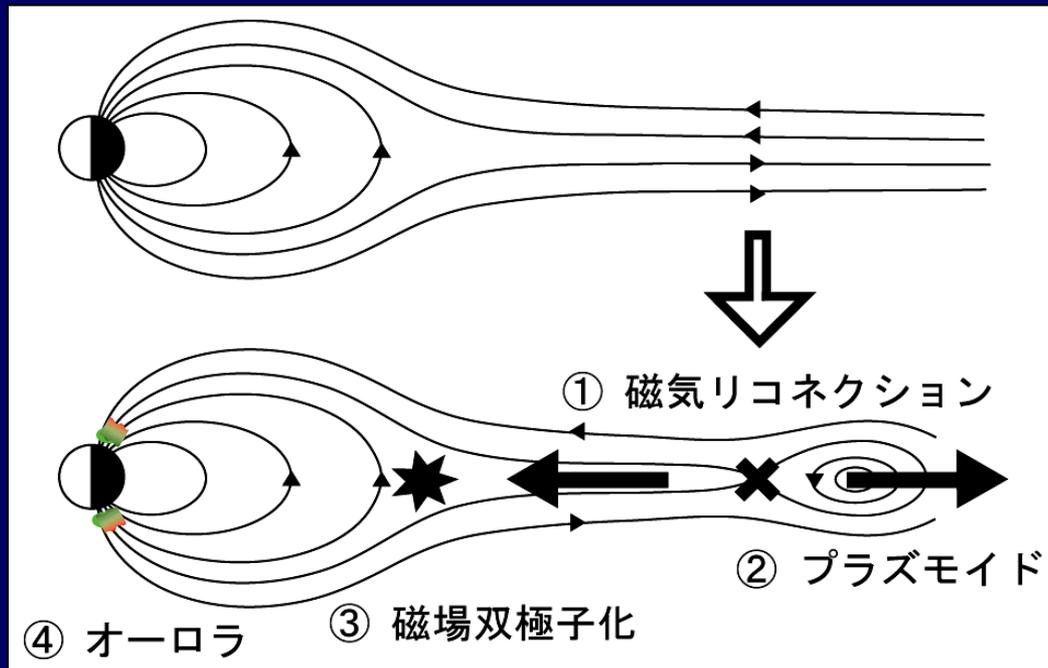
# ■ サブストーム発生過程

- ・ 太陽風と磁気圏の相互作用により、太陽風のエネルギーが磁気圏尾部に蓄積される。  
→ 過剰になると、**何らかの過程**により、エネルギーが爆発的に解放される。  
～ サブストームの発生
- 磁気圏・電離圏・地上で様々な電磁場・プラズマの変動が発生する。  
(磁力線形状の変化、オーロラ、地磁気変動など)



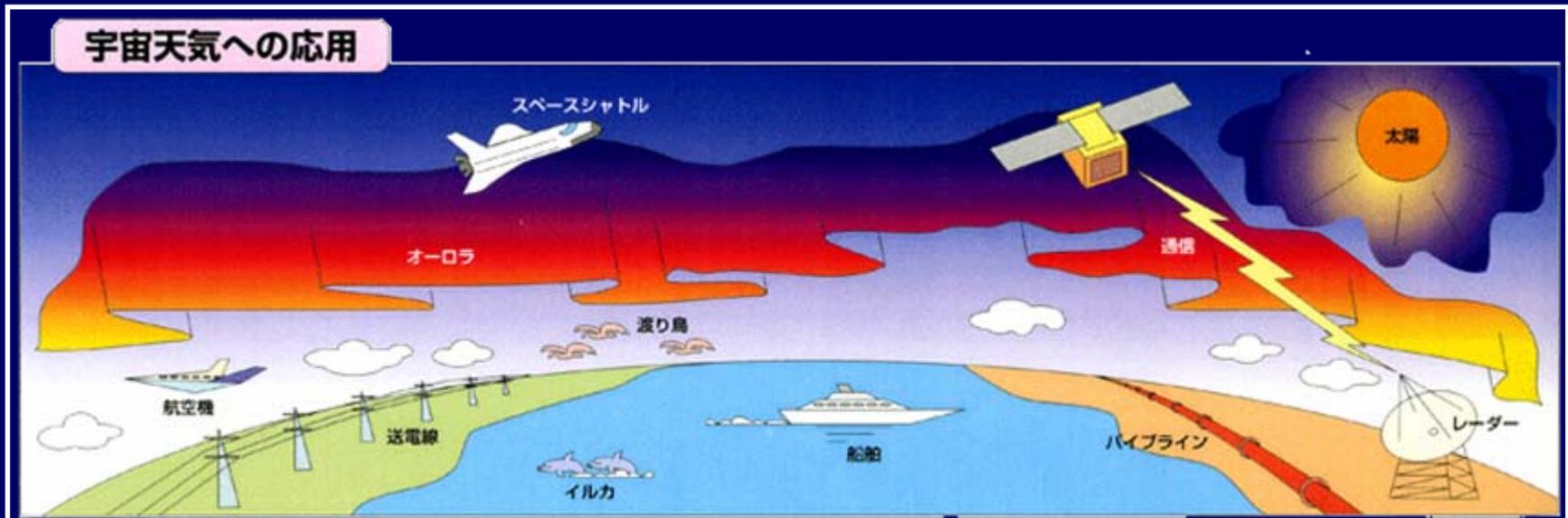
# ■ サブストームの発生機構のモデル

- 最有力のモデル: Near-Earth Neutral Line Model  
磁気圏尾部での**磁気リコネクション**  
(反平行の磁力線のつなぎ替え)により、  
エネルギー解放、サブストームを駆動。
- しかし、サブストーム発生機構は、数十年間来、  
大論争が続いている。



# ■ 宇宙天気研究：サブストーム研究の重要性

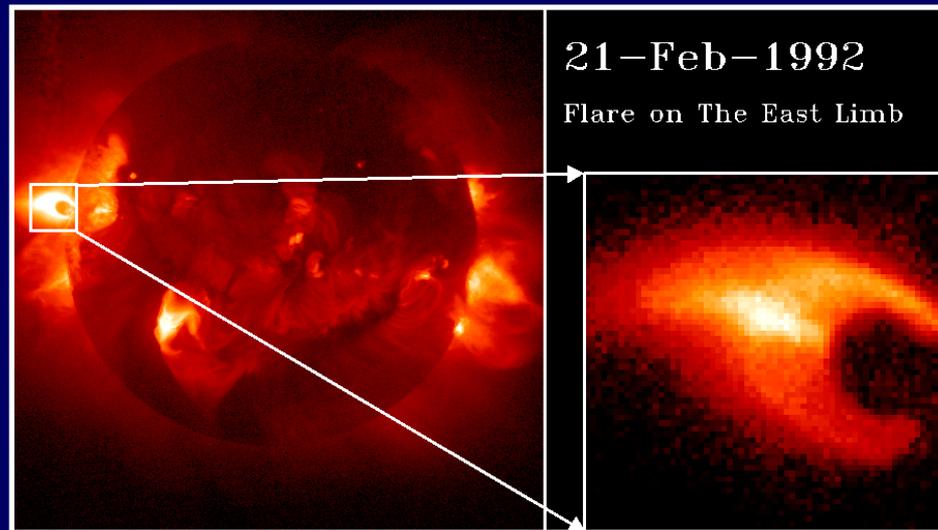
- ・ 現代社会では、宇宙空間の利用が不可欠になった。
- ・ 宇宙空間で激しい変動が発生
  - 宇宙空間に滞在する人工衛星や人、  
通信、送電システムの損傷・停止
- ・ 人類活動への打撃を最小限にとどめたい
  - 「宇宙天気」研究と「**宇宙天気予報**」が重要



# ■ サブストーム現象の普遍性

- ・ サブストームに伴って起こる磁気リコネクション、粒子加速、プラズマ現象は、惑星、太陽、他の天体でも起こる。  
→ サブストームは、宇宙空間で起きる爆発現象の典型例
- ・ 宇宙の同様の現象の解明、  
普遍的な宇宙プラズマ現象の理解にもつながる。

「ようこう」衛星が  
観測した  
太陽フレア



(c) JAXA

➡ 宇宙天気と宇宙プラズマ物理の観点から、  
サブストームの解明は重要である。

# ■ 本研究の目的・解析

- ・ サブストーム(オーロラ等)を駆動する物理過程は何か？
- ・ サブストーム開始に伴う磁気圏尾部の変化  
(いっどこで何が起こるか)の  
全貌を明らかにする。



- ・ 3787例のサブストーム(オーロラ)  
(PolarまたはIMAGE衛星の観測)



- ・ 統計解析

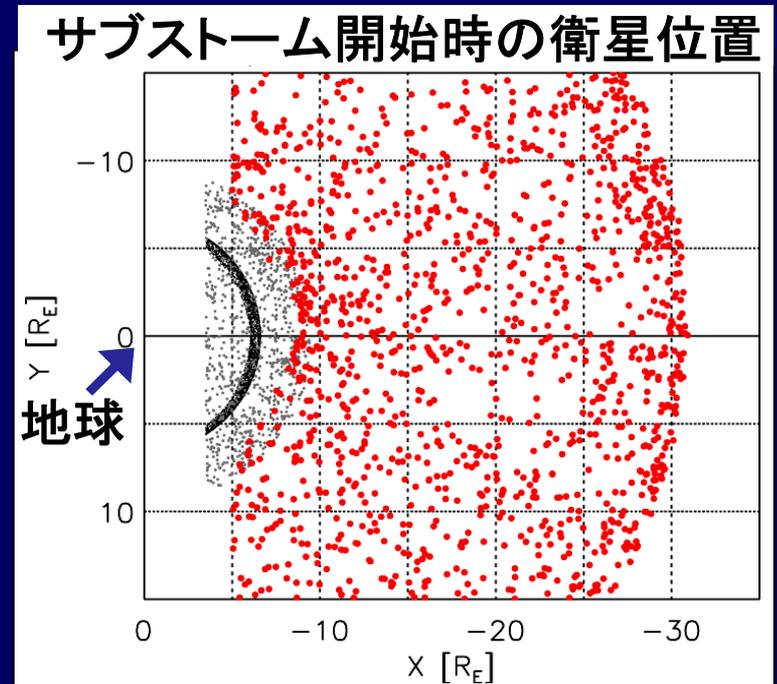
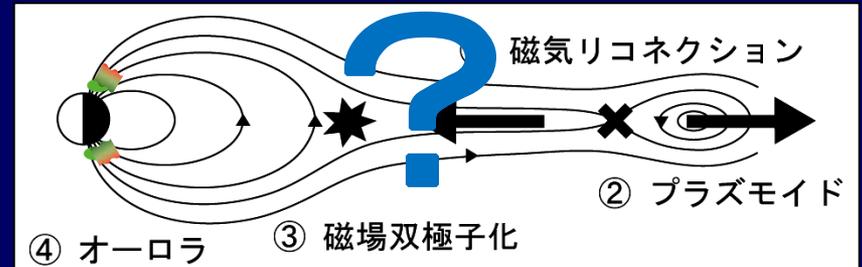
(Superposed Epoch Analysis)

Geotail衛星(イオン・電磁場)

GOES、Polar衛星(磁場)

～ 約10年のデータ

Miyashita et al. [2009]

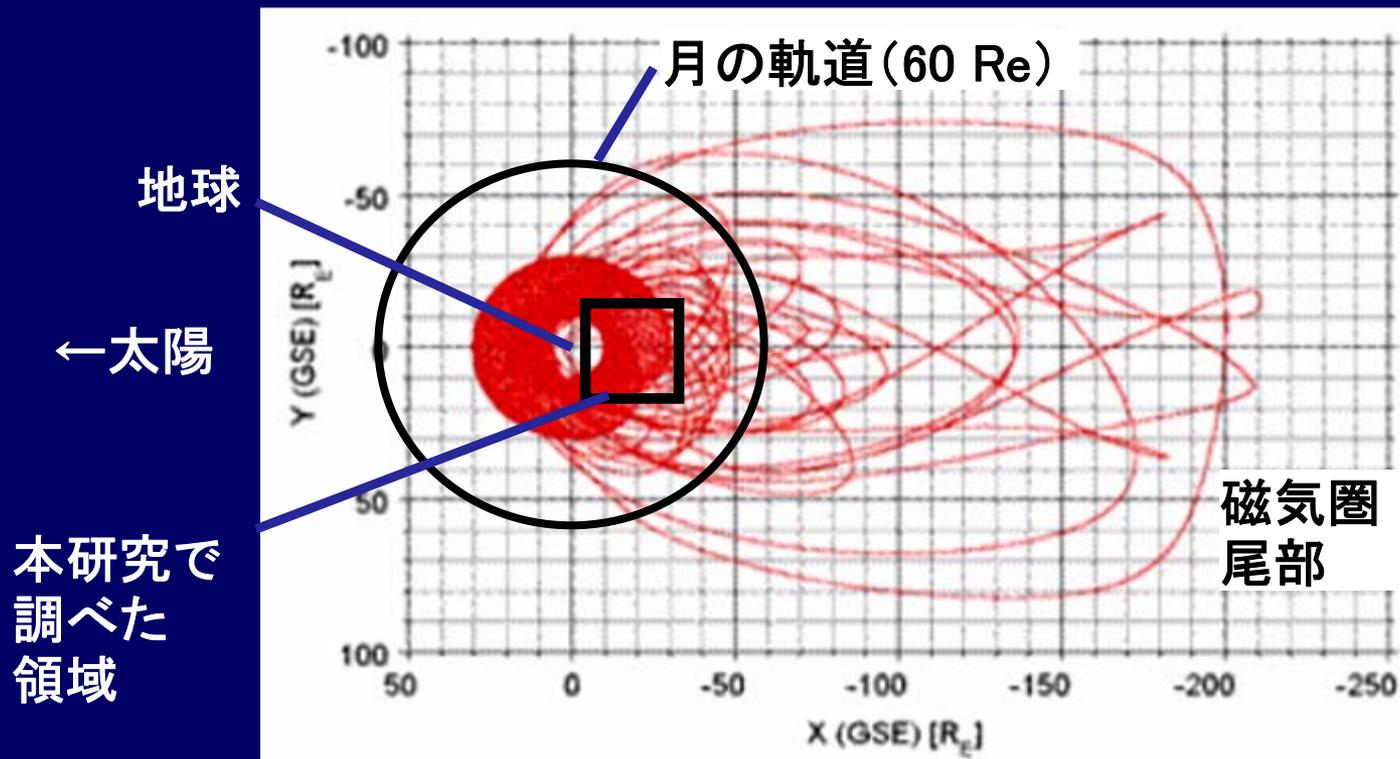


# ■ Geotail衛星

- ・ 初の本格的な磁気圏尾部観測衛星
- ・ 日本(ISAS)がアメリカと協力して1992年7月24日に打ち上げ  
(18年にもわたって現在も観測を続けている)
- ・ 粒子、磁場、電場、波動を「その場」で観測  
(太陽地球系物理学の特長でもある。)



(c) JAXA



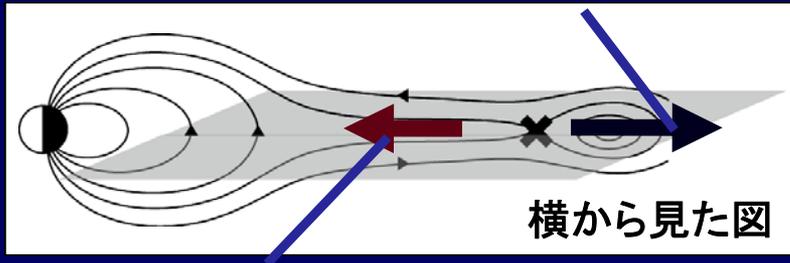
Geotail衛星  
の軌道  
(上から  
見た図)

Re: 地球半径

# ■ プラズマの流れ

反地球方向  
高速プラズマ流:  
サブストーム開始直後に  
 $X < -20 R_e$ で顕著になる。

上から  
見た図

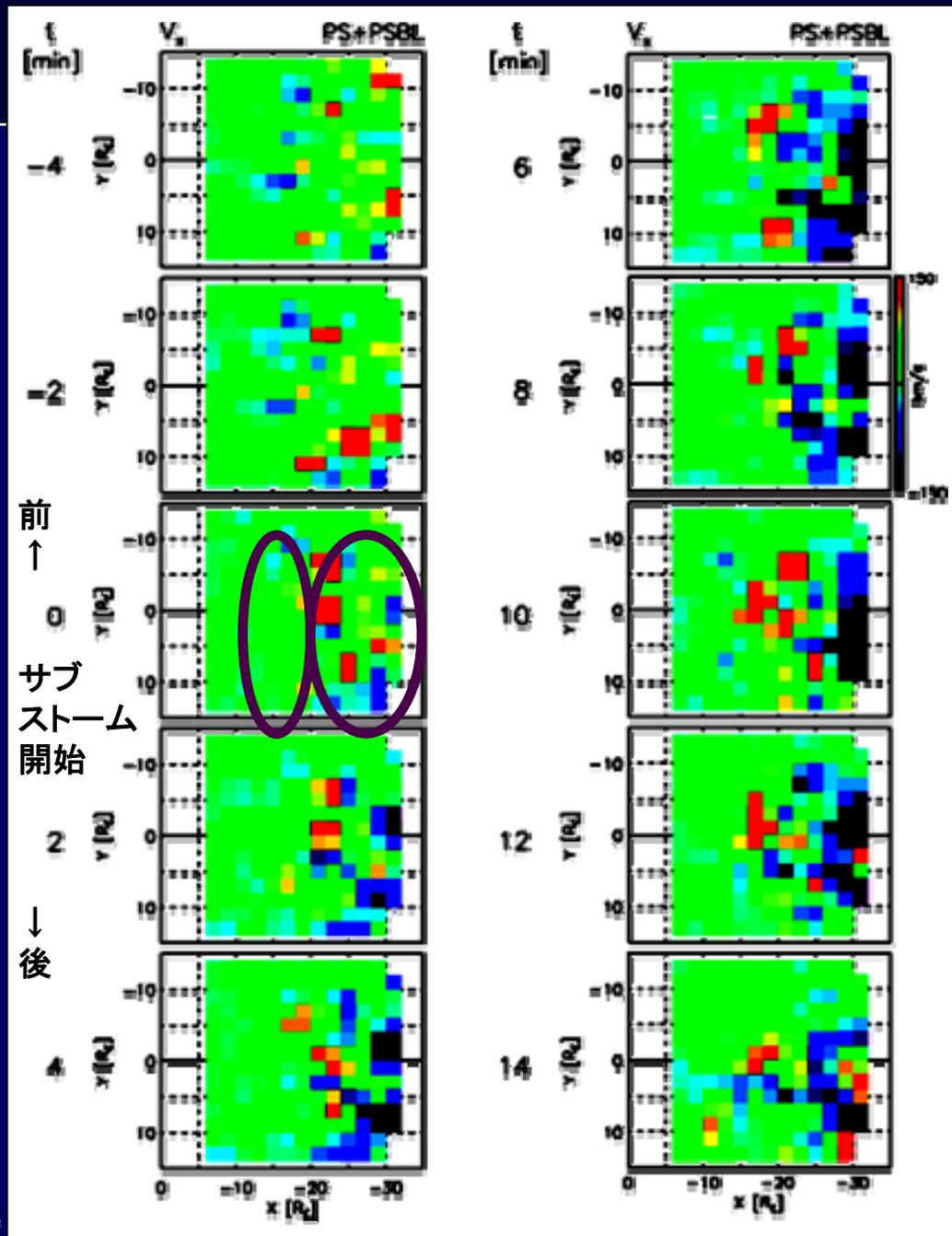


横から見た図

地球方向  
高速プラズマ流:  
 $-15 > X > -20 R_e$ では、  
サブストーム開始前後に  
それほど顕著に  
見られない。

$|Y| < 15 R_e$

← 太陽



$-5 > X > -32 R_e$

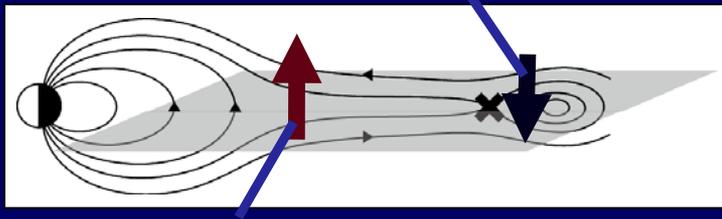
Miyashita et al. [2009]

# ■ 磁場南北成分の変化

$\Delta B_z < 0$  (南向き変化):

$X < -20 R_e$  でサブストーム  
開始時に顕著になる。

(プラズモイドの形成)



$\Delta B_z > 0$  (北向き変化):

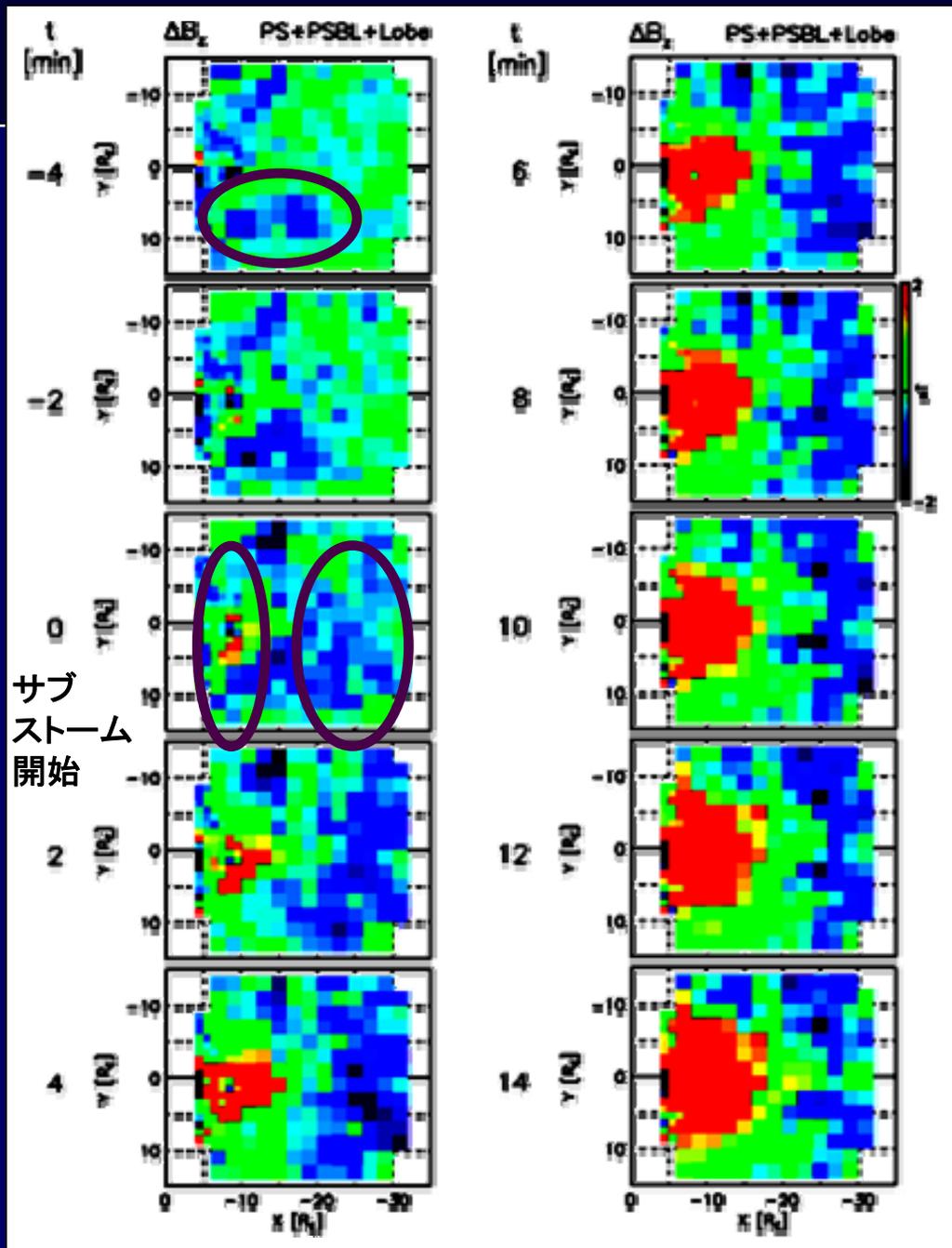
プラズモイドの形成と同時に  
 $X \sim -8 R_e$  で発達。

(磁場双極子化)

その後、四方に拡大。

$-5 > X > -20 R_e$  では、  
サブストーム開始前に  
磁力線がかなり  
引き伸ばされている。

$|Y| < 15 R_e$



← 太陽

$-3 > X > -32 R_e$

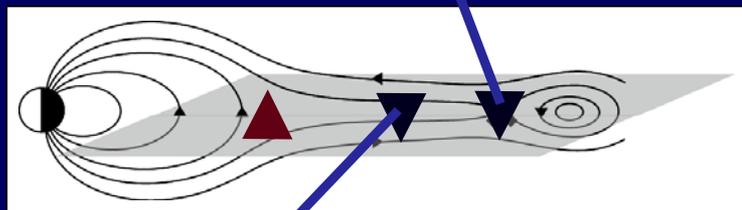
Miyashita et al. [2009]

# ■ 全圧力の変化

全圧力:

エネルギー密度の指標

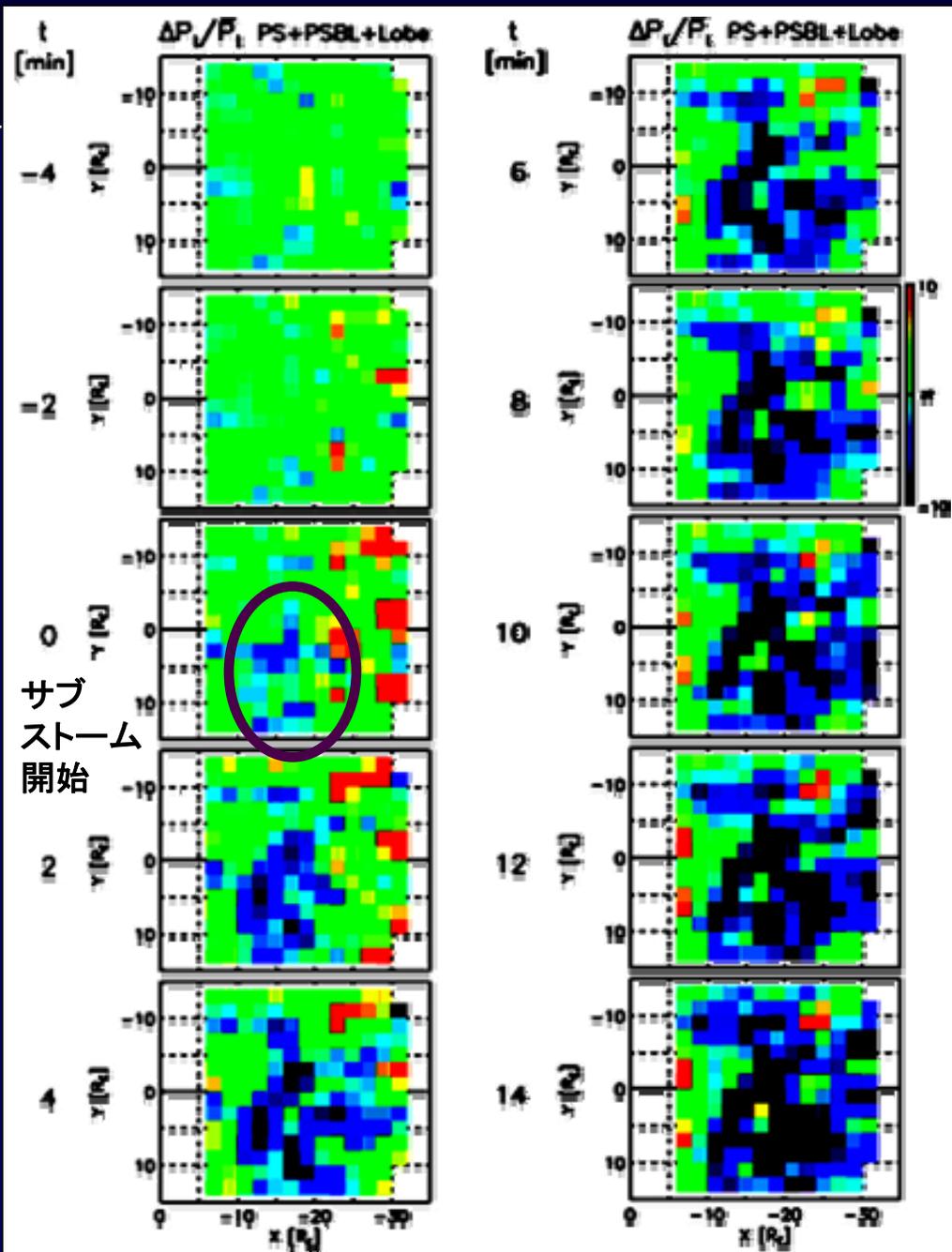
サブストーム開始2分前に  
 $X \sim -18 \text{ Re}$ で減少し始める。  
 その後、周囲も減少する。



減少量は、  
 $-10 > X > -18 \text{ Re}$ で大きい。  
 (最初に減少する領域と  
 磁場双極子化領域の間)

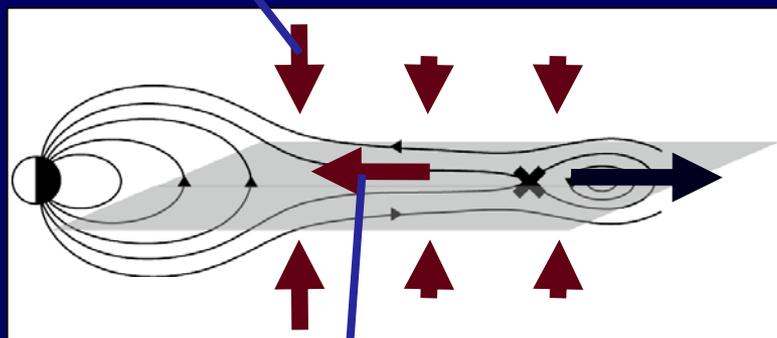
$X \sim -8 \text{ Re}$ では、  
 磁場双極子化に  
 伴い、増加する。

$|Y| < 15 \text{ Re}$



# ■ エネルギーの流れ

ローブから、プラズマシートに  
電磁気的なエネルギーが  
入ってくる。



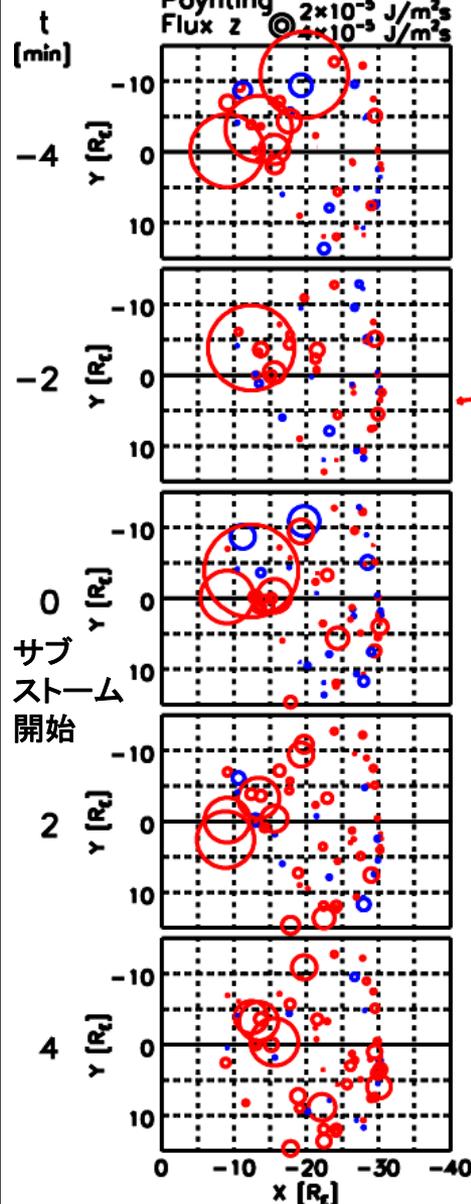
プラズマシートでは、  
サブストーム開始2分前から、  
磁気リコネクション領域から  
地球方向と反地球方向の  
熱流が現れる。  
(電磁気的なエネルギーが  
変換される。)

$|Y| < 15 R_E$

← 太陽

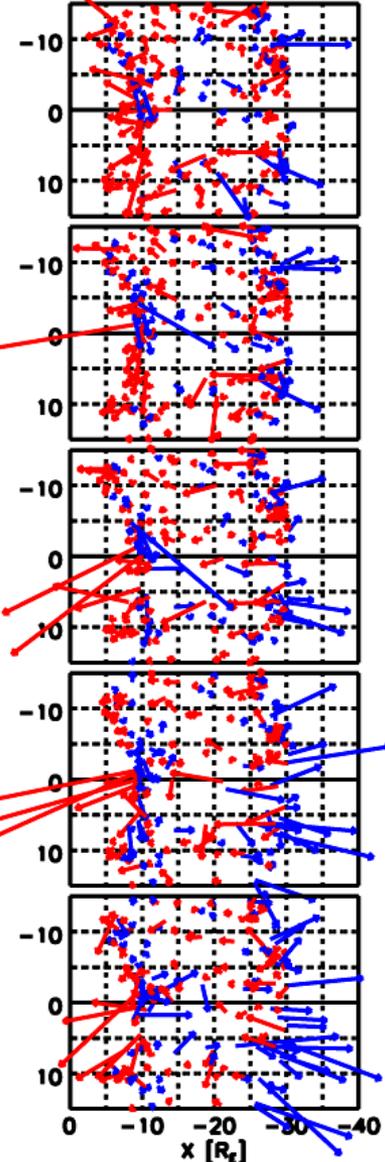
ローブ中の  
電磁エネルギー流

Lobe ○ Toward PS  
○ Toward Lobe  
 Poynting Flux  $2 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2\text{s}$   
 Flux  $2 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2\text{s}$



プラズマシート中の  
熱流

PS → Earthward  
→ Tailward  
 Thermal Flux  $5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2\text{s}$

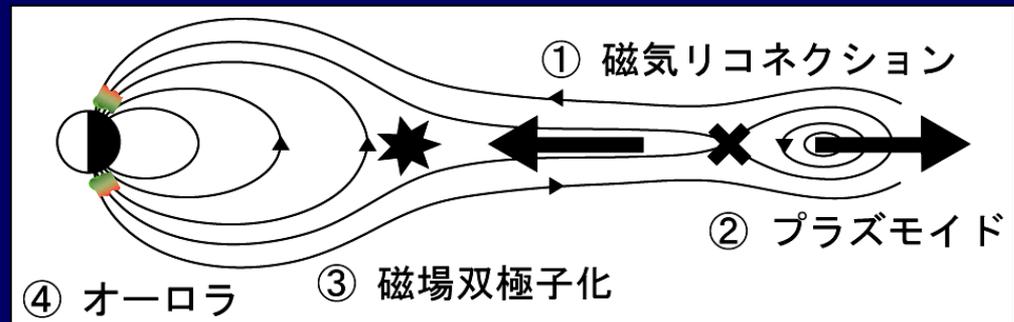


$-5 > X > -32 R_E$

Miyashita et al. [2003]

## ■ 本研究で明らかになったこと

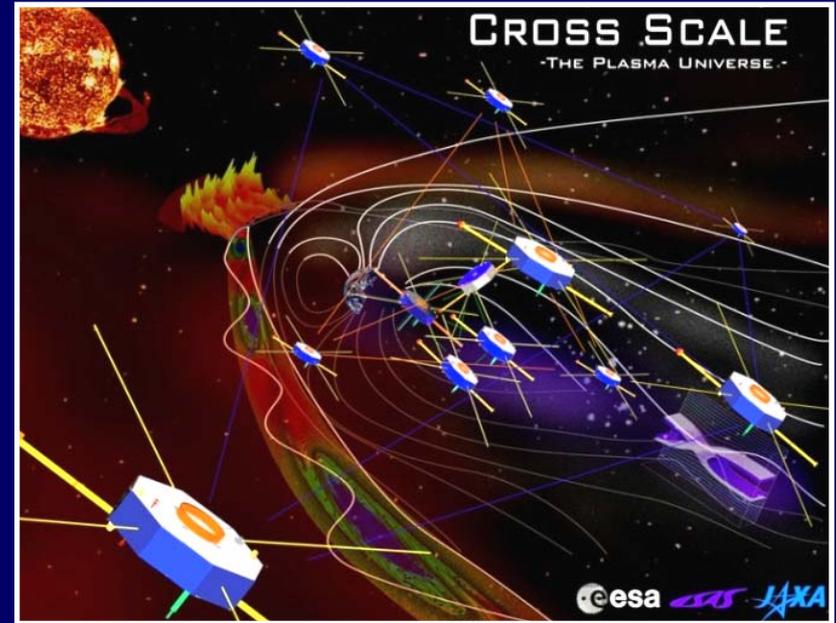
- 統計解析により、サブストーム開始時の磁気圏尾部の構造の時間空間変化とエネルギーの流れを明らかにした。
- 磁気リコネクション**: サブストーム開始2分前、 $X \sim -18 \text{ Re}$   
(薄い電流層の尾部側の端付近)
- 磁気リコネクション領域の反地球側: **プラズモイド**
- 磁気リコネクション領域の地球側: **磁場双極子化**  
サブストーム開始2分前、 $X \sim -8 \text{ Re}$   
→ その後、四方に広がる。
- 磁気リコネクションにより、磁気圏尾部のエネルギー解放。**  
**大規模な構造変化のきっかけになっている。**
- ただし、二過程の間の領域で、エネルギー解放が顕著。



# ■ 今後の研究

## ● 地球磁気圏

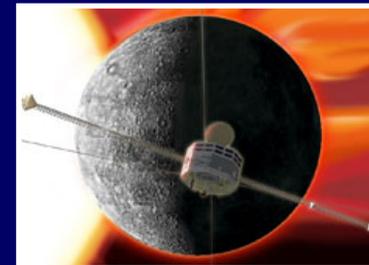
- サブストームの完全解明へ
- 日本の衛星計画
  - 内部磁気圏 (ERG)
  - 磁気圏尾部  
(SCOPE/Cross-Scale)



(c) JAXA

## ● 惑星磁気圏 (水星・木星・土星など)

- サブストームと似た現象が起こる。ただし、異なる環境下。  
→ 地球との共通点、相違点 → 普遍性・特殊性
- 日本の探査計画
  - 水星 (BepiColombo)
  - 木星 (計画中)



(c) 京大RISH

## ■ 謝辞

- JAXA宇宙科学研究本部と国内外の「Geotail」衛星チーム、  
海外の衛星チーム、地上観測チームの方々
  - 人工衛星・観測機器の開発や運用を支えて頂いている  
メーカーの方々
  - 国内外の共同研究者の方々、データを提供して下さったの方々
  - 指導していただいた先生方
  - 宇宙科学奨励賞を授与して下さった  
財団法人宇宙科学振興会の皆様
- に心から感謝いたします。