

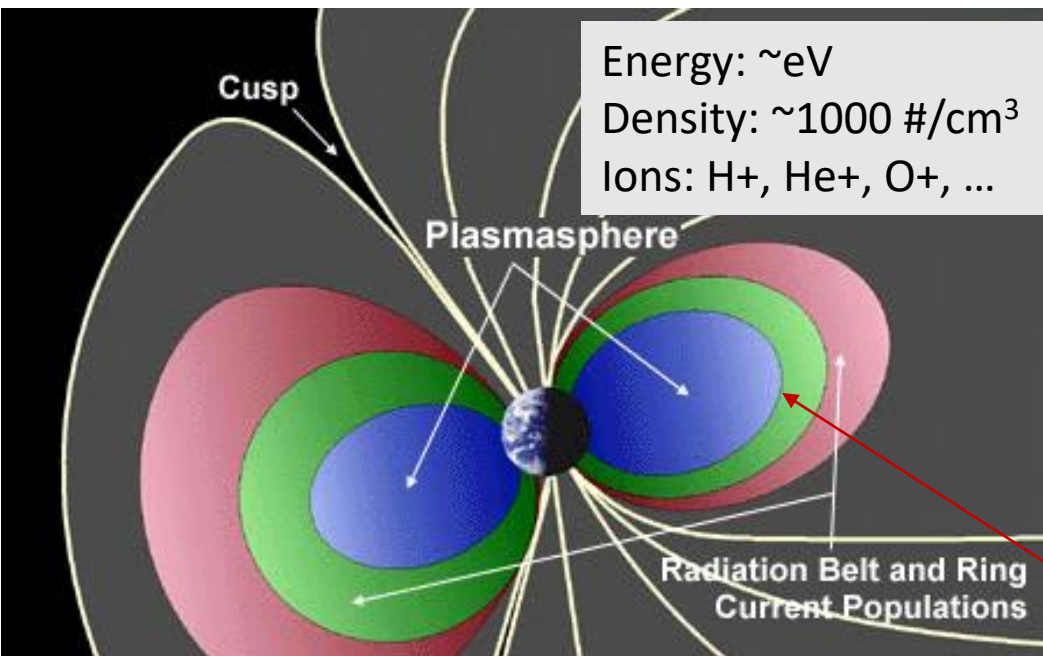
波動解析によるプラズマ 圏密度の解析法について

尾花 由紀

大阪電気通信大学工学部基礎理工学科

What is the Plasmasphere?

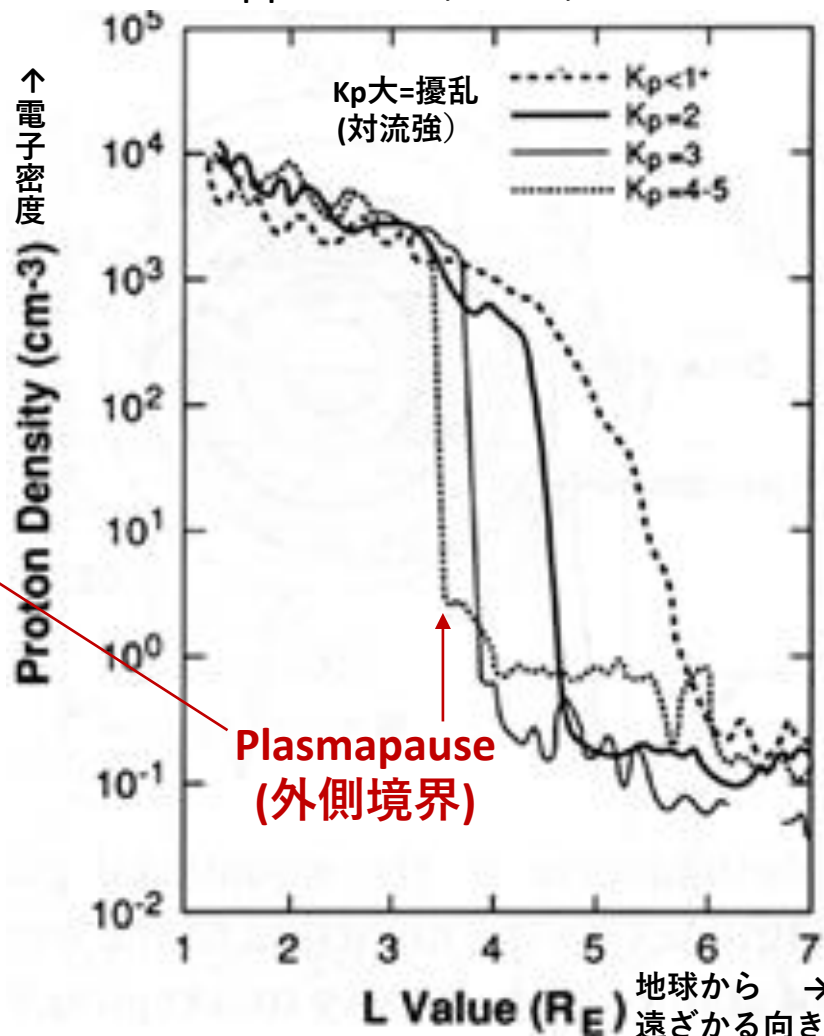
内部磁気圏の中に存在する、冷たく高密度なプラズマで満たされた領域のこと。プラズマの供給源は電離圏(地球大気)。



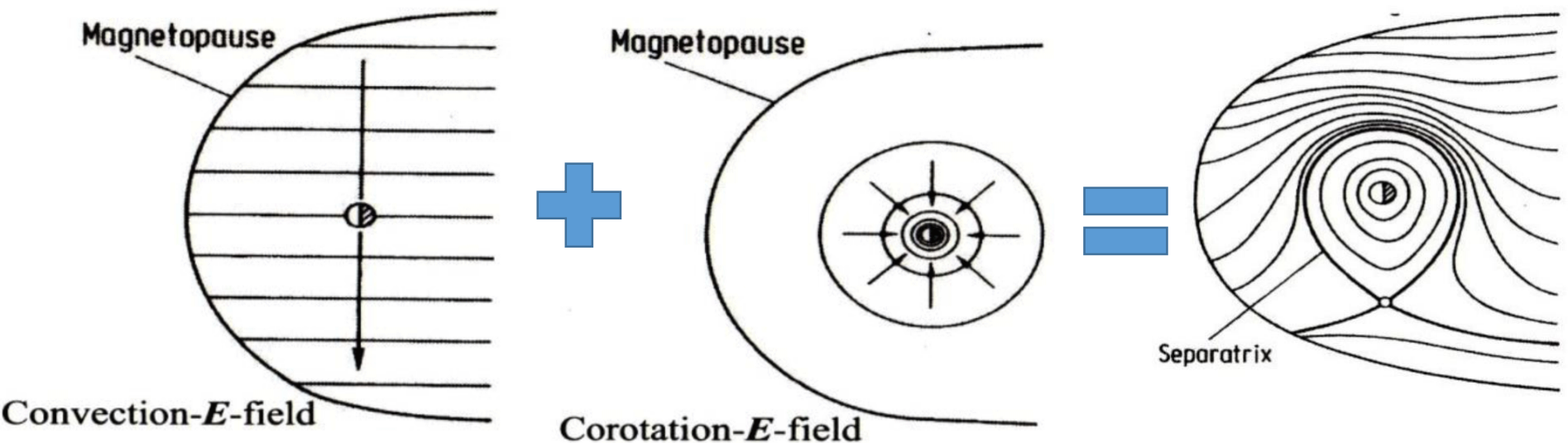
プラズマ圏の大きさや形は磁気圏内の大規模な流れ(対流)によって大きく変動する。

- 対流弱 \rightarrow プラズマ圏拡大 (saturated)
- 対流強 \rightarrow プラズマ圏縮小 (erosion)
- 対流弱 \rightarrow プラズマ圏再拡大(refilling)

Chappell et al., 1970, OGO data



プラズマ圏の形成



磁気圏対流を駆動
する対流電場

プラズマを地球と共回転
させる共回転電場

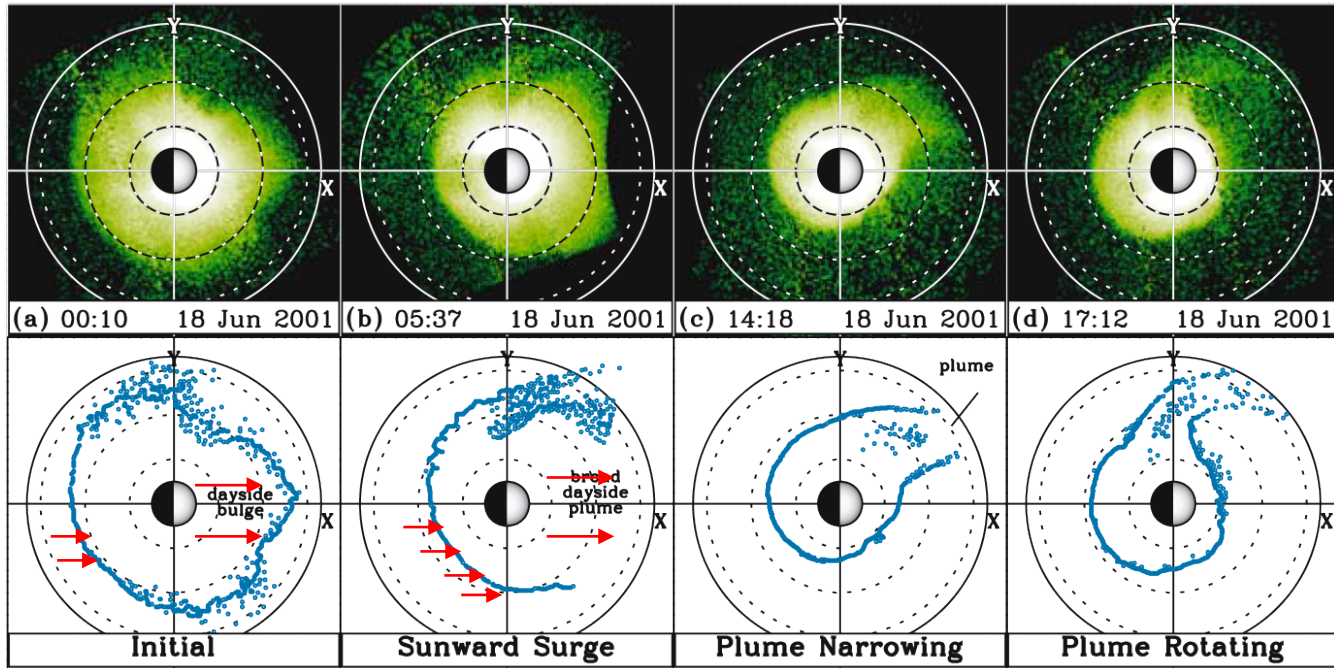
これらが均衡する位置に
プラズマポーズが形成
される [Nishida, 1968]

磁気圏活動度の変化に伴うプラズマ圏の拡大・縮小は、対流電場の消長で説明される

現実の磁気圏では、太陽風の入力・磁気圏の応答・電流系の形成・
磁気圏擾乱による電離圏の加熱等、様々な現象が刻々と変化して起こる

Erosion and Plume Formation

[Goldstein 2006]

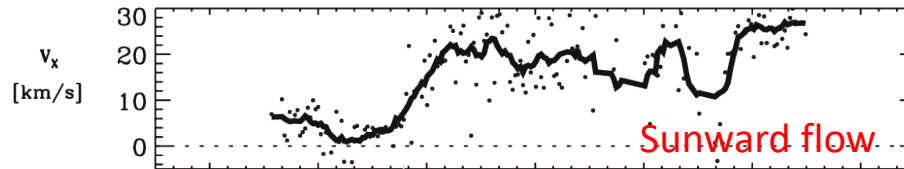


対流が弱まるとPlumeが回転し始める

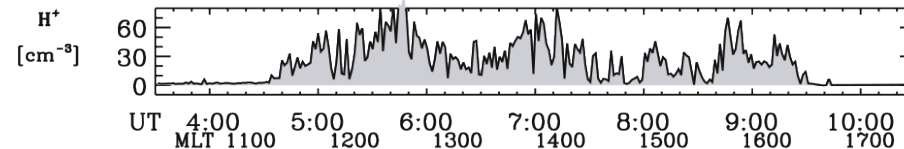
対流の上昇直後

LANL 1994-084 18 Jun 2001

(e) Flow Inside Plume

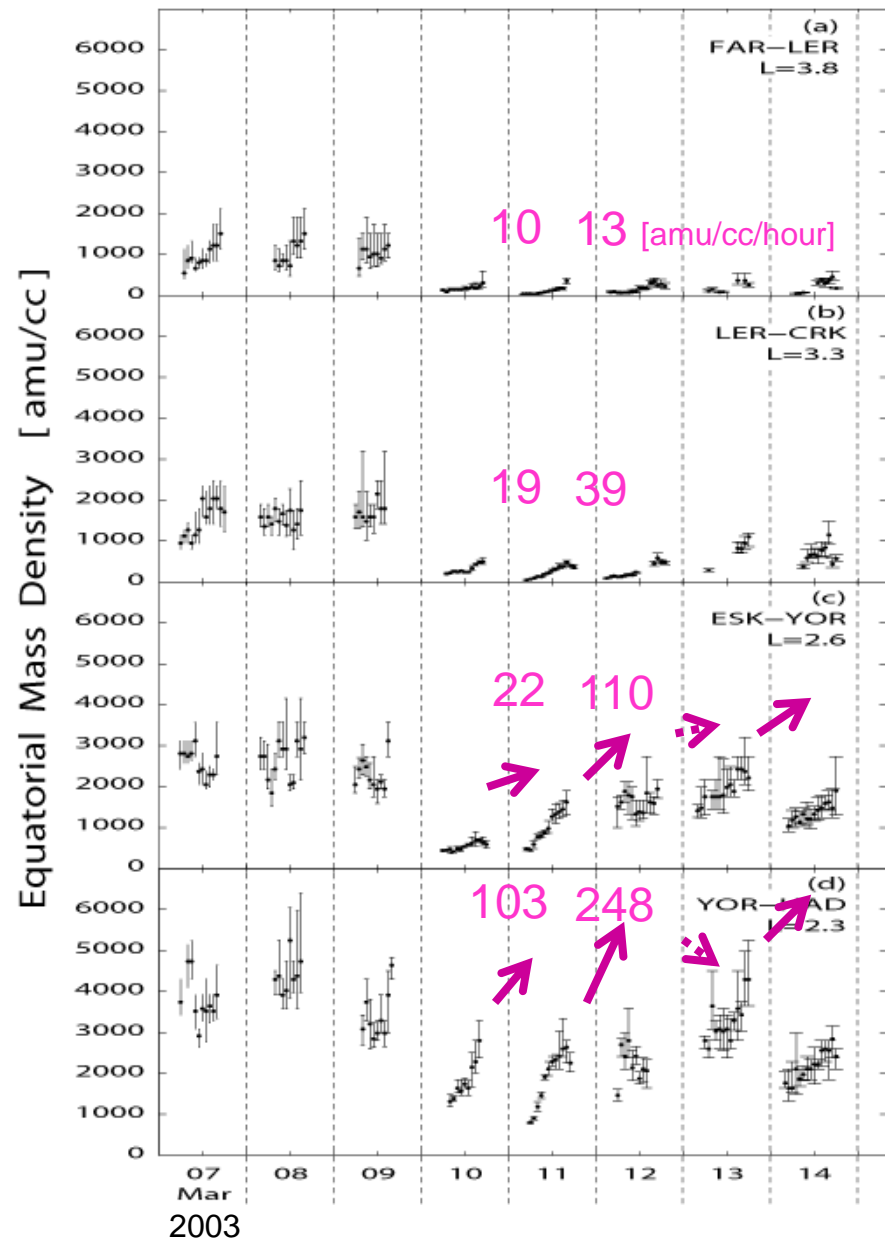
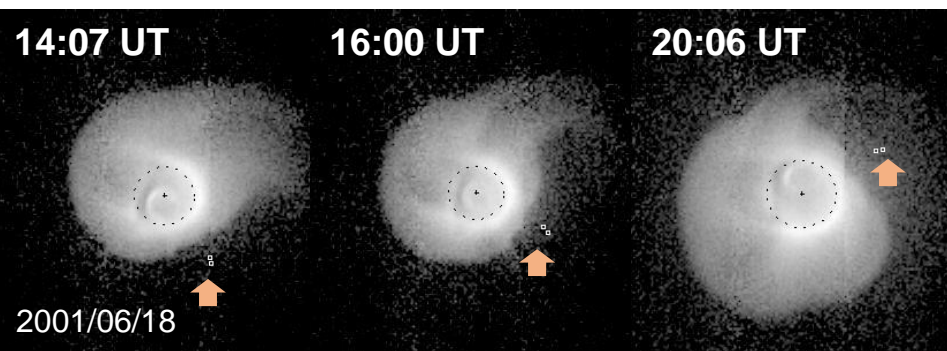
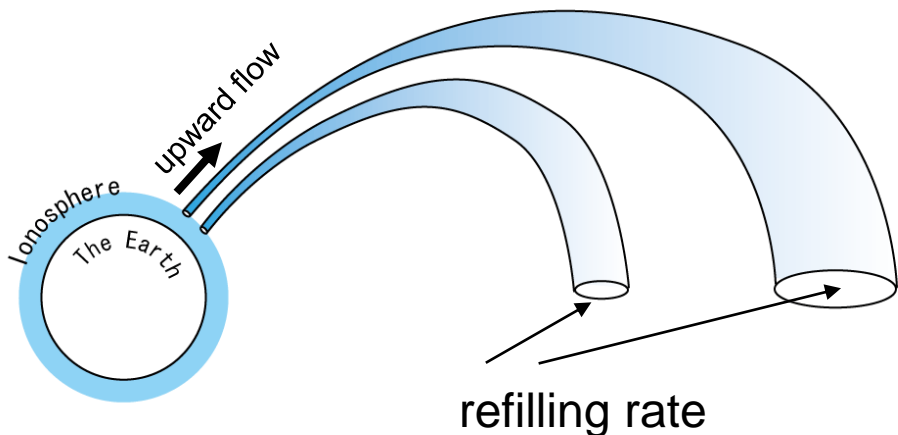


(f) Density of Plume



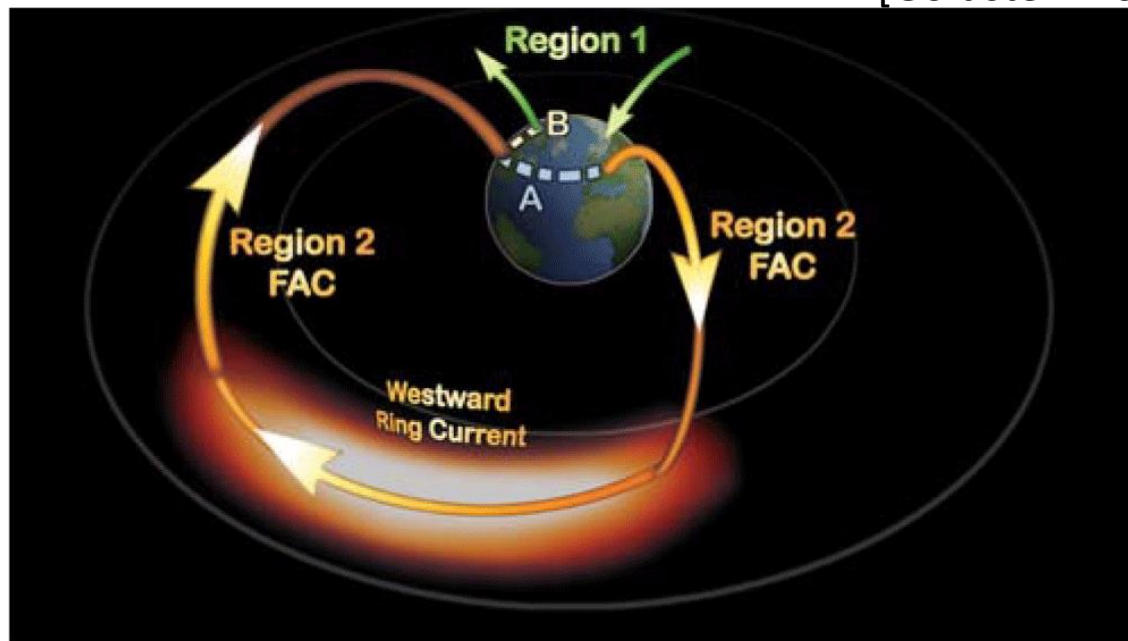
Refilling

- 対流が弱まると、再び共回転領域が拡大し、電離圏からプラズマが再充填される。
- 再充填に要す時間はL値が大きいほど長い。
- 当然、その途中には部分的に充填された状態が生じる



Ring Current and SAPS

[Goldstein 2006]



磁気圏対流の発達



Partial Ring Currentの発達

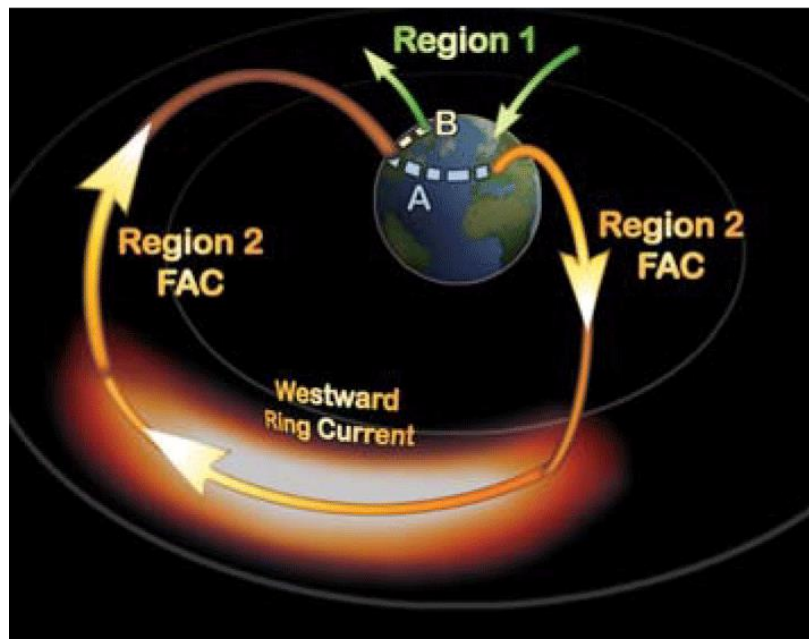


Region 2 current systemの形成

Path A

- 東向き電場を形成し、対流電場を遮蔽する
- 応答時間は30分～1h
- これより遅い電場変化は内部磁気圏まで侵入できない
- 逆に、急激に対流電場が消滅すると、電流系だけ残るので過遮蔽が起こる

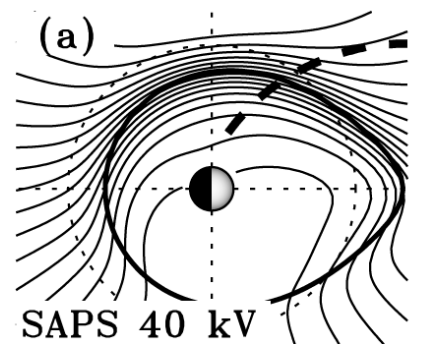
Ring Current and SAPS



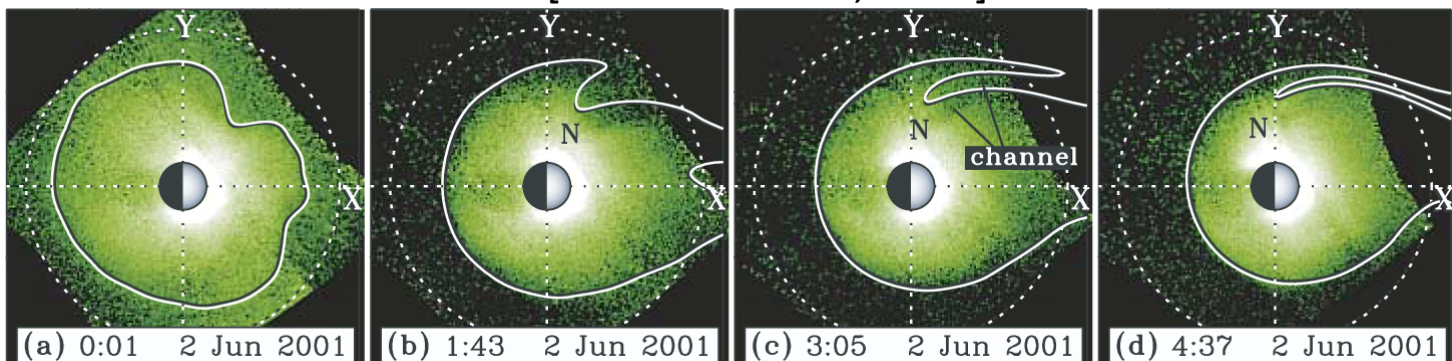
[Goldstein 2006]

Path B

- R2 currentがpoleward flowを経てR1 currentとつながる
- SAPSの形成
- 極向き電場 = 磁気圏赤道面ではradial方向外向きの電場
- これが西向きの流れを作り、細いplume構造の形成に寄与する



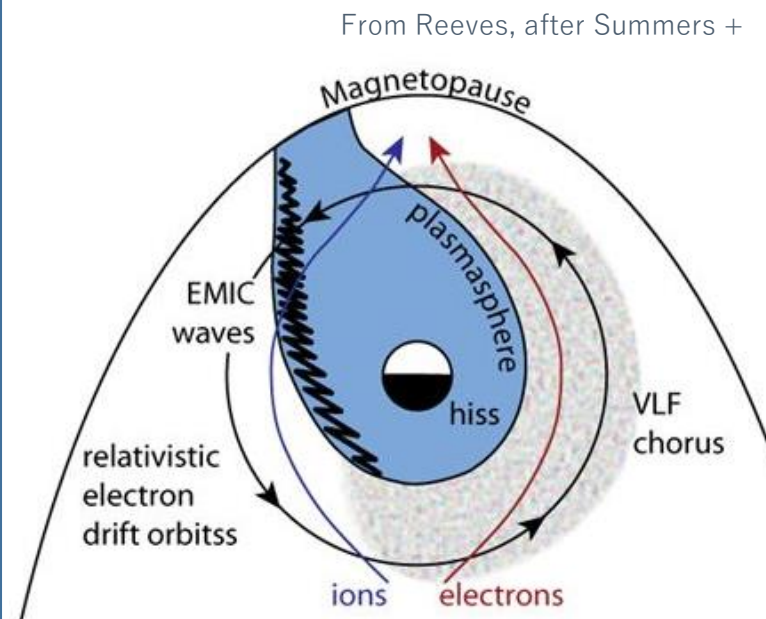
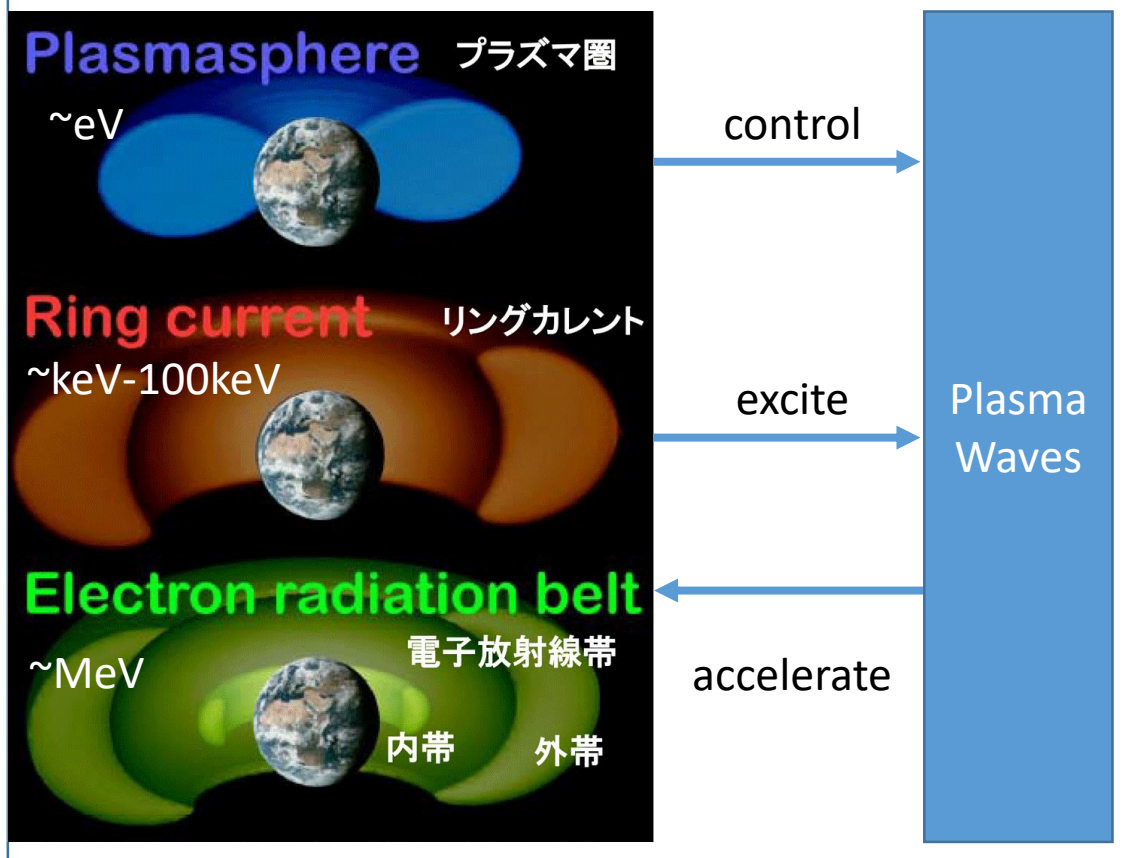
[Goldstein et al., 2003]



内部磁気圏エネルギー階層間結合におけるプラズマ圏の役割

- プラズマ圏は低エネルギーだが物量的には支配的な役割を担う
- プラズマ波動環境を定義する上で重要な役割を果たす

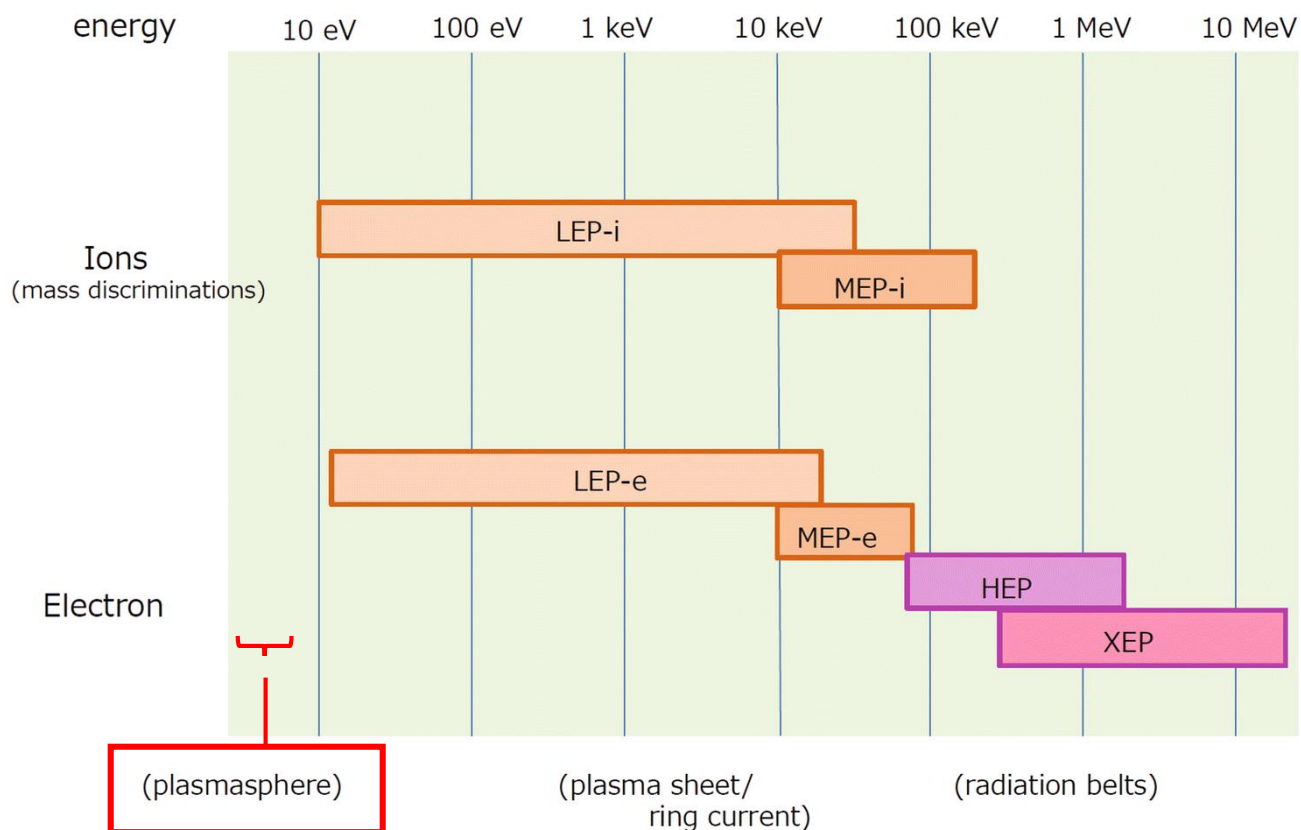
内部磁気圏プラズマのエネルギー階層間結合



プラズマ圏の観測

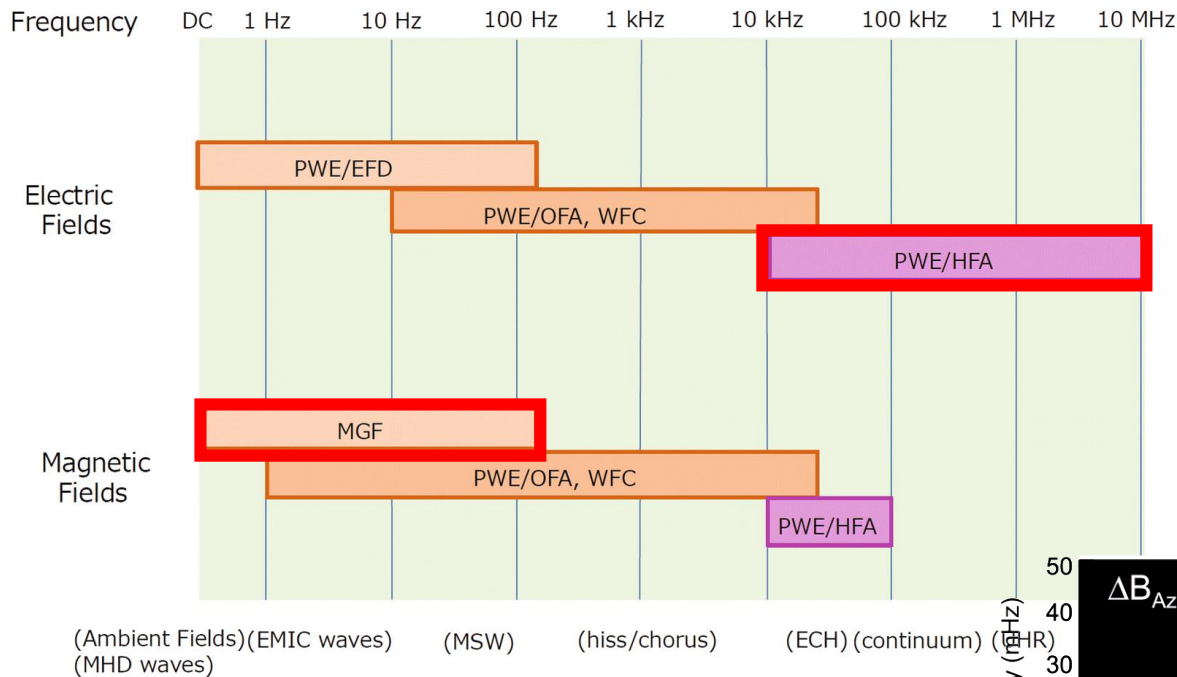
- 人工衛星で直接粒子計測を行うのは難しい
- 例) あらせの粒子計測エネルギー範囲 (図)
 - プラズマ圏は範囲外
 - 衛星帯電によって粒子の計測器への入射が阻害されるため

a Energy Coverages: LEP-i, MEP-i, LEP-e, MEP-e, HEP, XEP



プラズマ波動によるプラズマ圏密度の測定

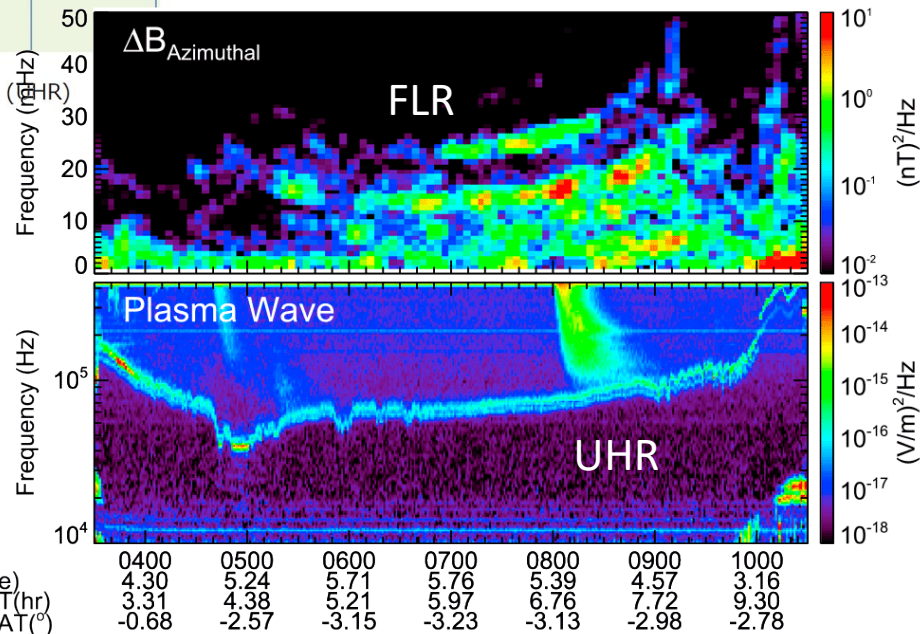
b Frequency Coverages: PWE, MGF Miyoshi + 2018



- Upper Hybrid Resonance (UHR) in VLF range ... electron density
- Field Line Resonance (FLR) in ULF range ... mass density

Nose + 2015

Van Allen Probe A 2012/11/15



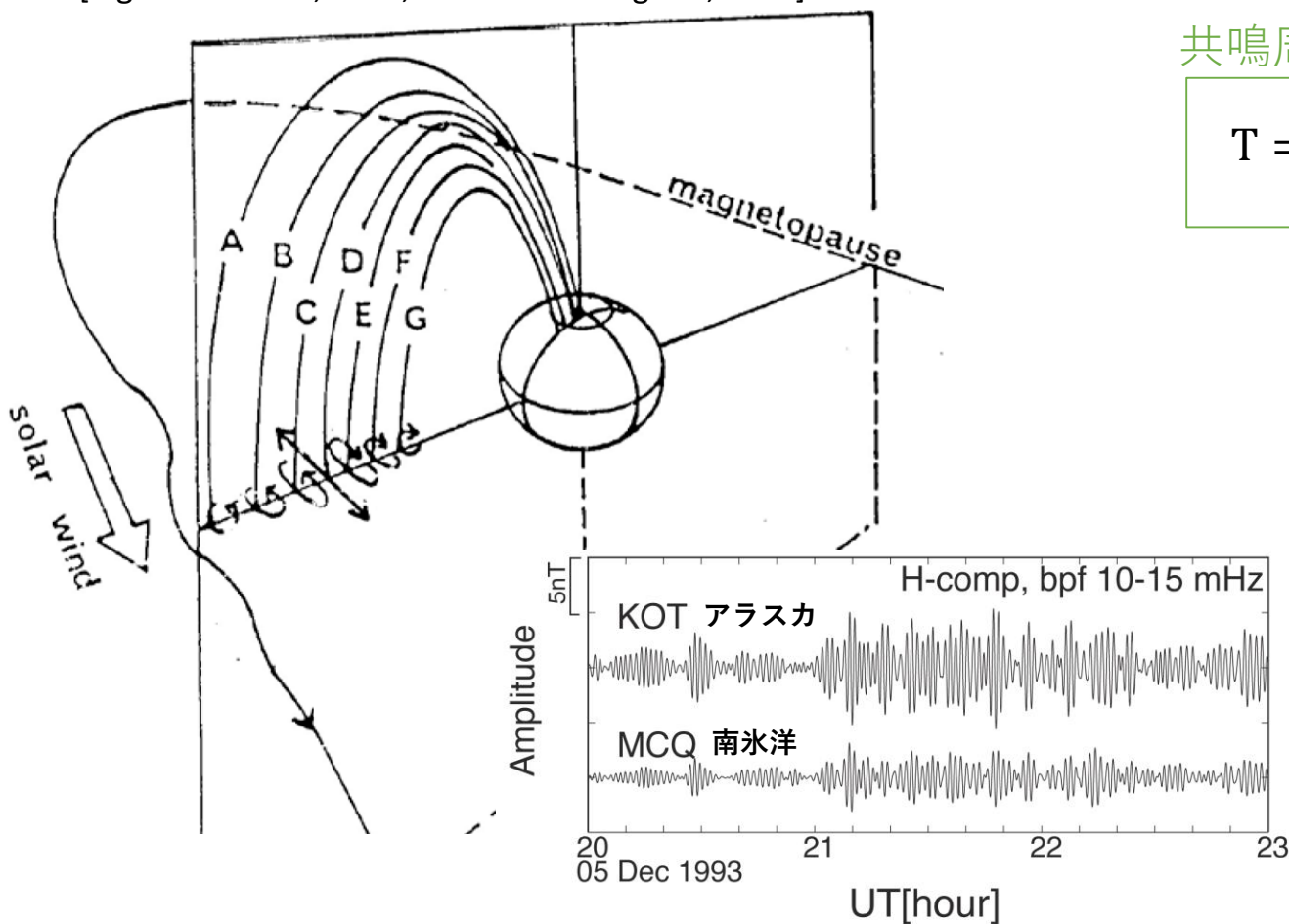
ULF波動を用いた
プラズマ質量密度の算出

ULF周波数帯 (T = 1-1000sec) の地磁気脈動

磁気圏内の磁気流体(MHD)波動に由来
昼側磁気圏に広く分布。ほぼ毎日見られる。

磁力線共鳴振動(Field Line Resonance)モデル

[e.g. Southwood, 1974; Chen and Hasegawa, 1974]



共鳴周期

$$T = 2 \int \frac{1}{v_A} ds = 2 \int \frac{\sqrt{\mu_0 \rho}}{B_0} ds$$

B_0 : モデルから与える

ρ : 磁力線沿いの分布を
モデルで与える

$$\rho = \rho_{eq} \left(\frac{r}{r_{eq}} \right)^{-m}$$

観測データからTを得ることで、
 ρ_{eq} が算出される

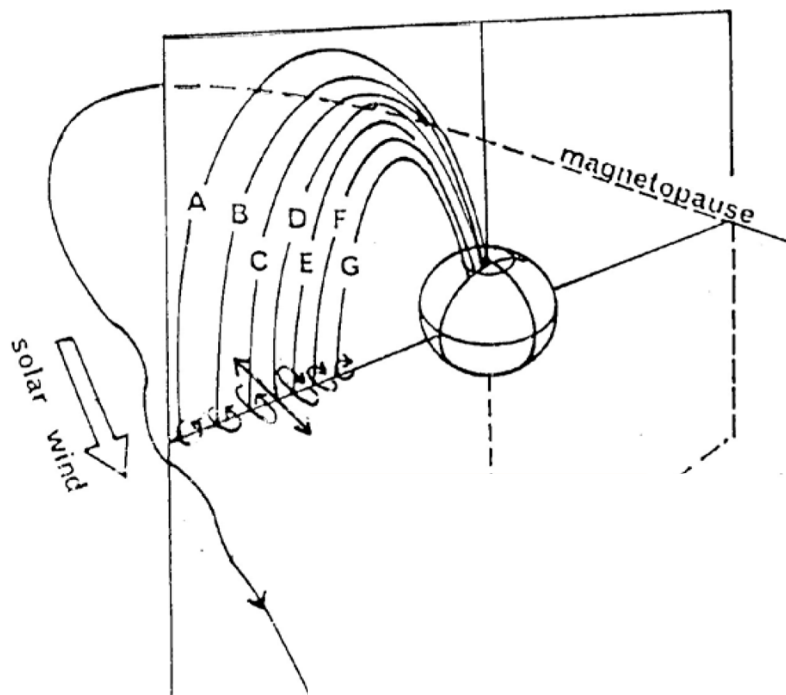
解析の概要

1. 観測データから磁力線共鳴振動周波数を同定する
 - 地磁気データの利用...2観測点間で振幅・位相を比較
 - 衛星観測磁場データの利用...azimuthal成分の卓越周波数から同定
2. 磁場モデルを選定
3. 磁力線沿いの密度プロファイルモデルを選定する
 - べき乗モデル...べき係数をどう選ぶか
 - その他の経験モデルを利用
4. MHD波動方程式を解く

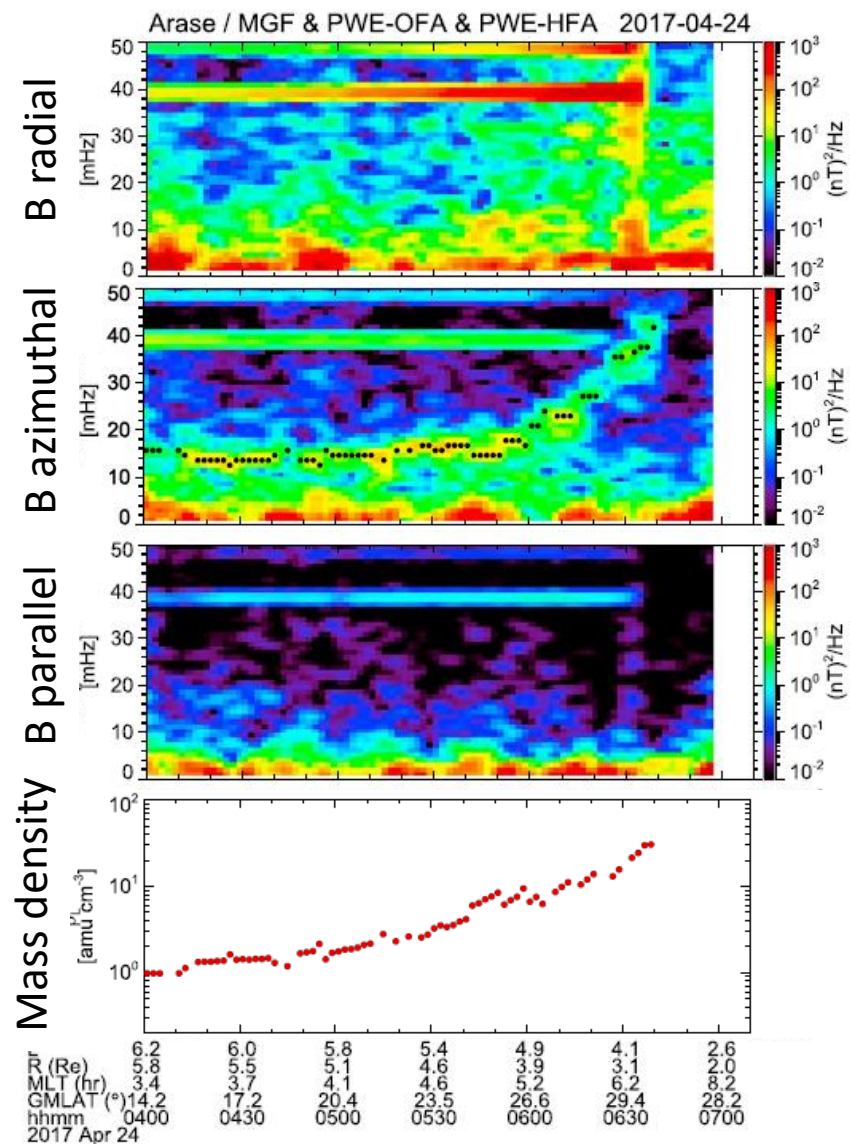
1. 磁力線共鳴周波数の同定

衛星観測磁場データを利用

局所的な磁場の向きに合わせて座標変換を行い、azimuthal成分の卓越周波数から同定する

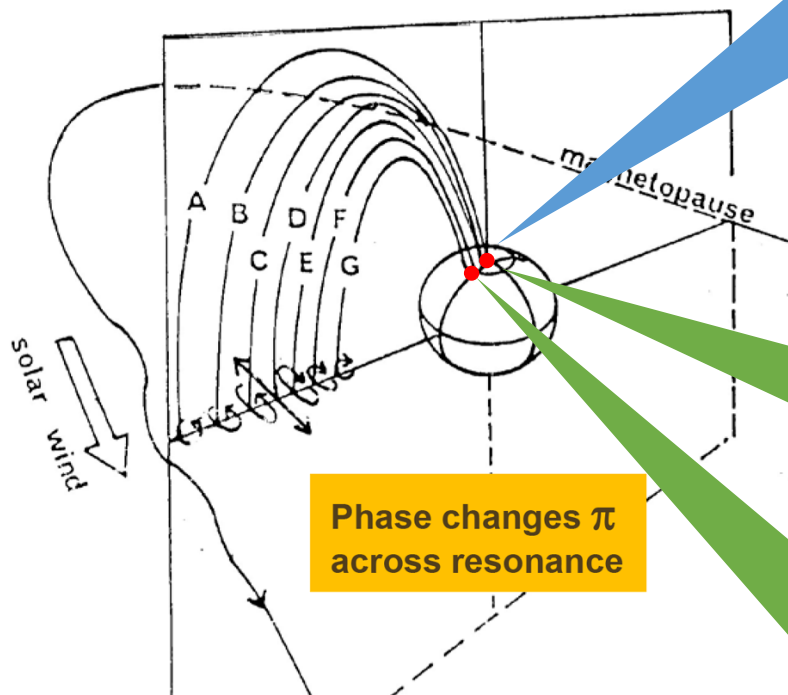


[e.g. Southwood, 1974; Chen and Hasegawa, 1974]



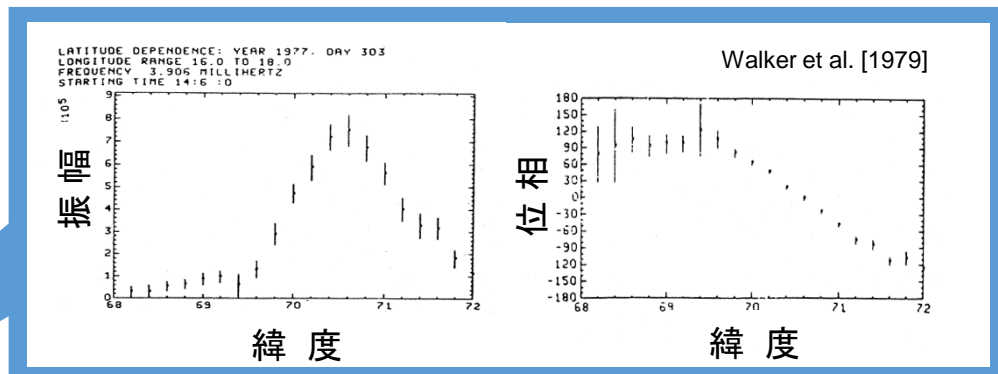
1. 磁力線共鳴周波数の同定

地上観測磁場データを利用



[e.g. Southwood, 1974; Chen and Hasegawa, 1974]

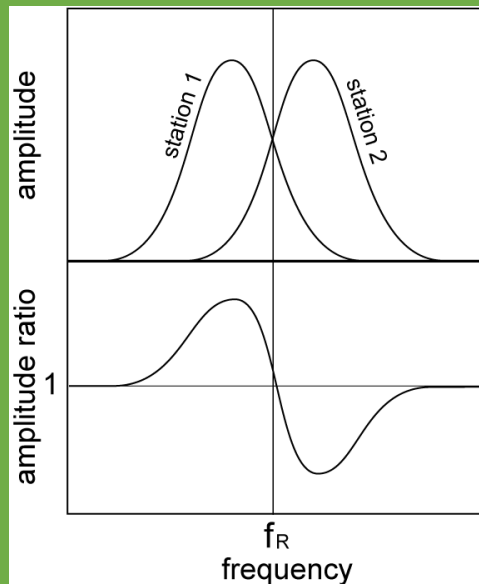
共鳴振動の振幅・位相の緯度方向分布



緯度方向に離れた2観測点間で振幅・位相を比較する

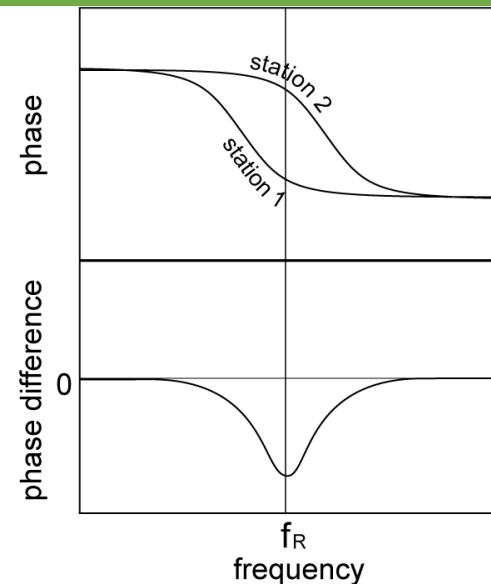
H成分比法

[Baransky et al., 1985]



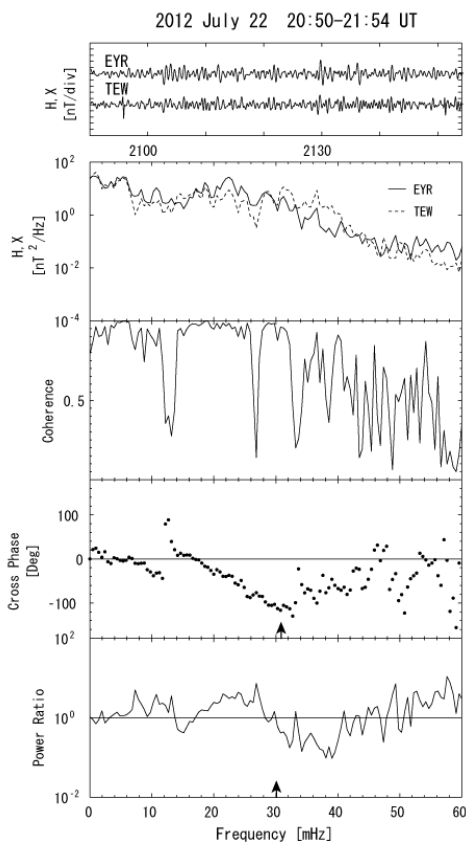
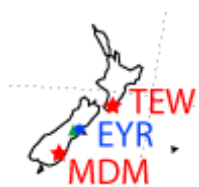
位相差法

[Waters et al., 1991]

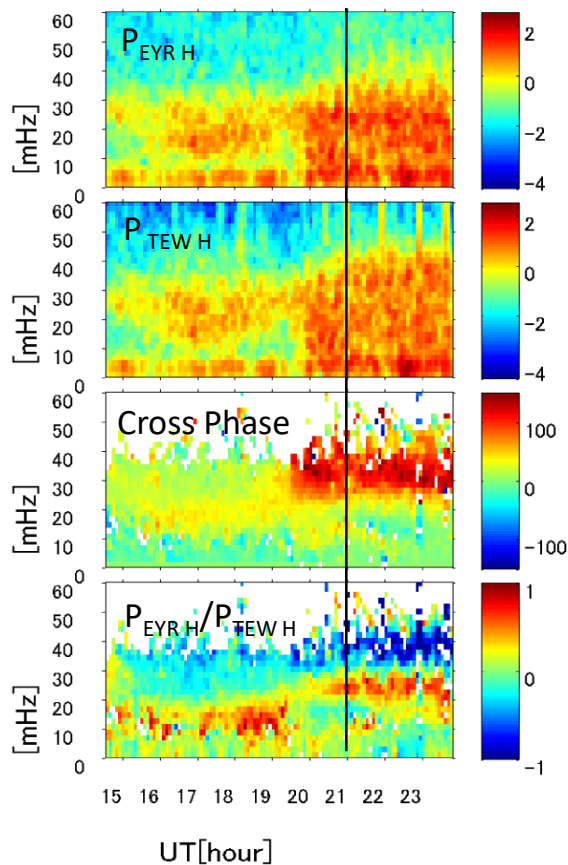


1. 磁力線共鳴周波数の同定

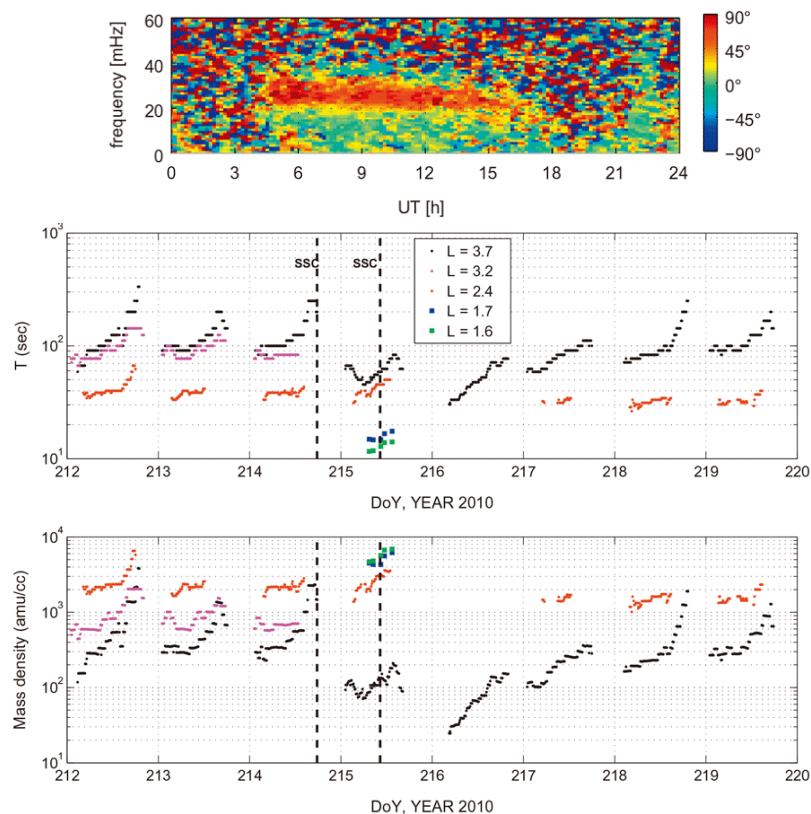
地上観測磁場データを利用



[Obana et al, 2015]



Cross phase spectra for SUW-BEL (L = 2.4), Aug 1, 2010



[Lichtenberger et al, 2013]

磁力線共鳴振動 (Field Line Resonances: FLRs) が安定して検出されるのは昼側磁気圏に限られる

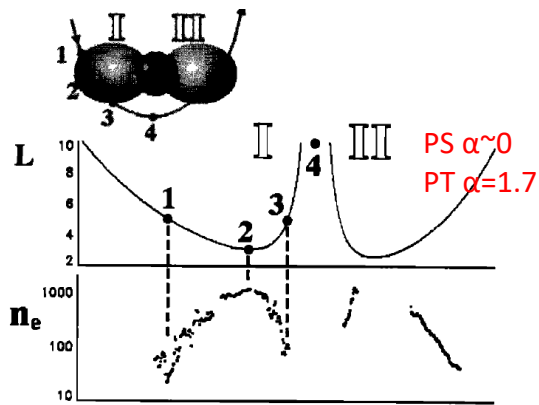
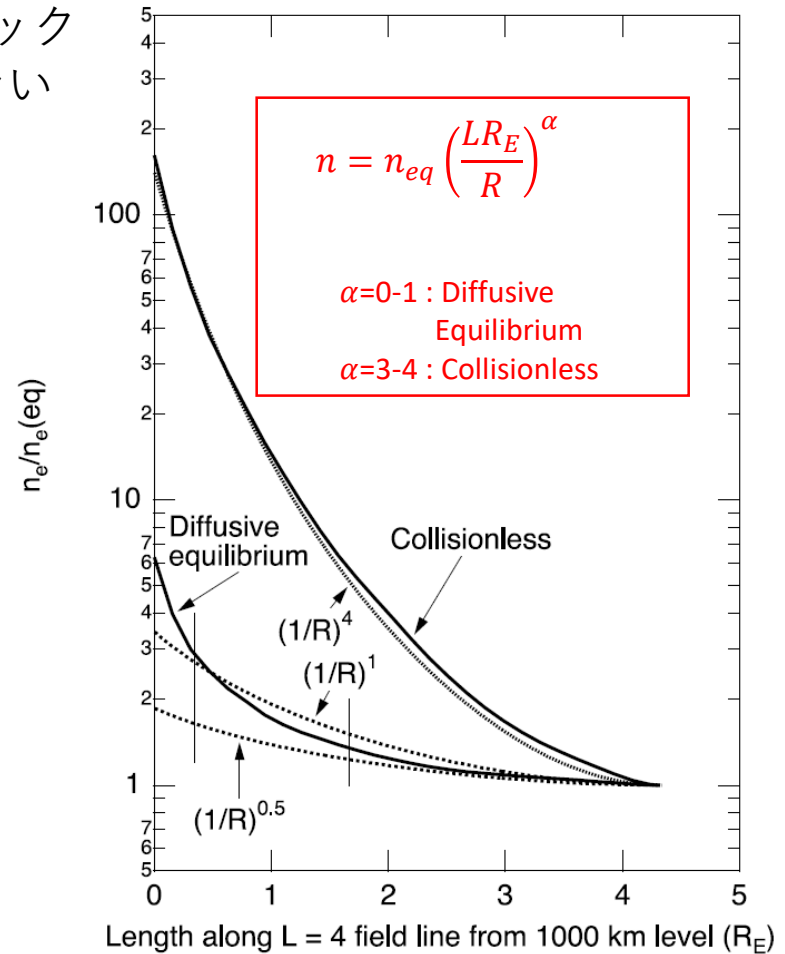
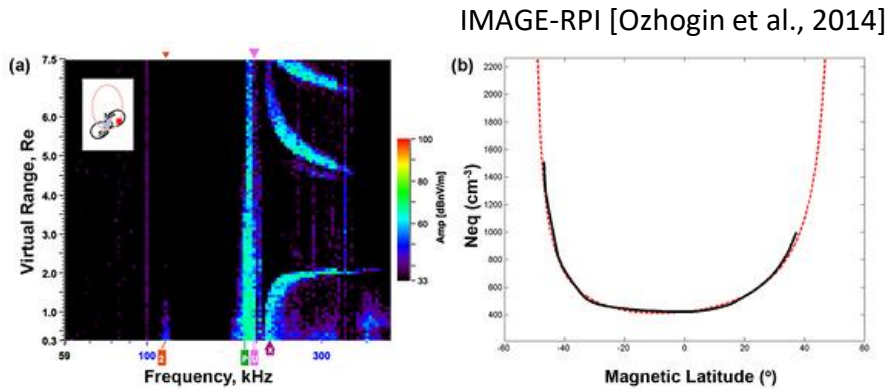
2. 磁場モデルを選定

- IGRF
- Tsyganenko 1989, 2005

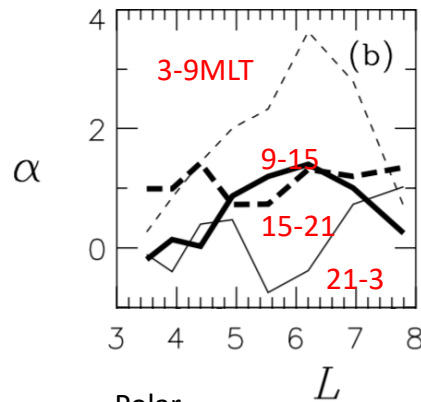
等、状況に応じて選ぶ

3. 磁力線沿いの密度プロファイルモデルを選定

- ULF波動を用いた質量密度推定法の最大のネック
- 磁力線沿いの密度分布に関するデータは少ない



Polar [Goldstein et al., 2001]



Polar [Denton et al., 2002]

Takahashi et al., 2004 (The theoretical curves are taken from Angerami and Carpenter [1966])

プラズマ圏の場合、 $\alpha \sim 0.5$ を選ぶことが多い

4. MHD波動方程式を解く

- Singer et al., 1981

$$\frac{\partial^2}{\partial s^2} \left(\frac{\xi_\alpha}{h_\alpha} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left\{ \ln(h_\alpha^2 B_0) \right\} \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\xi_\alpha}{h_\alpha} \right) + \frac{\mu_0 \rho \omega^2}{B_0^2} \left(\frac{\xi_\alpha}{h_\alpha} \right) = 0$$

ξ_α Plasma (or field) displacement in the α direction

α Normal unit vector between the field lines

h_α Normal separation between the two adjacent field lines

∂s Increment of length along the magnetic field direction

Runge-Kutta法等を用いて数値的に解く。
両端の電離圏で変位が0となる ω を探す。

4. MHD波動方程式を解く

- 近似式を使う方法もある
- Vellante and Förster, 2006

$$T \cong \frac{L^4}{\pi C} \left[4Z_i \int_{-Z_i}^{Z_i} (1-z^2)^6 \cos^2\left(\frac{\pi z}{2 Z_i}\right) \rho(z) dz \right]^{1/2}$$

$z = \cos(\theta)$: specifies the position along the field line

θ : the geomagnetic colatitude

z_i : the point where the field line meets the ionosphere

$$C \sim 1.7 \times 10^4$$

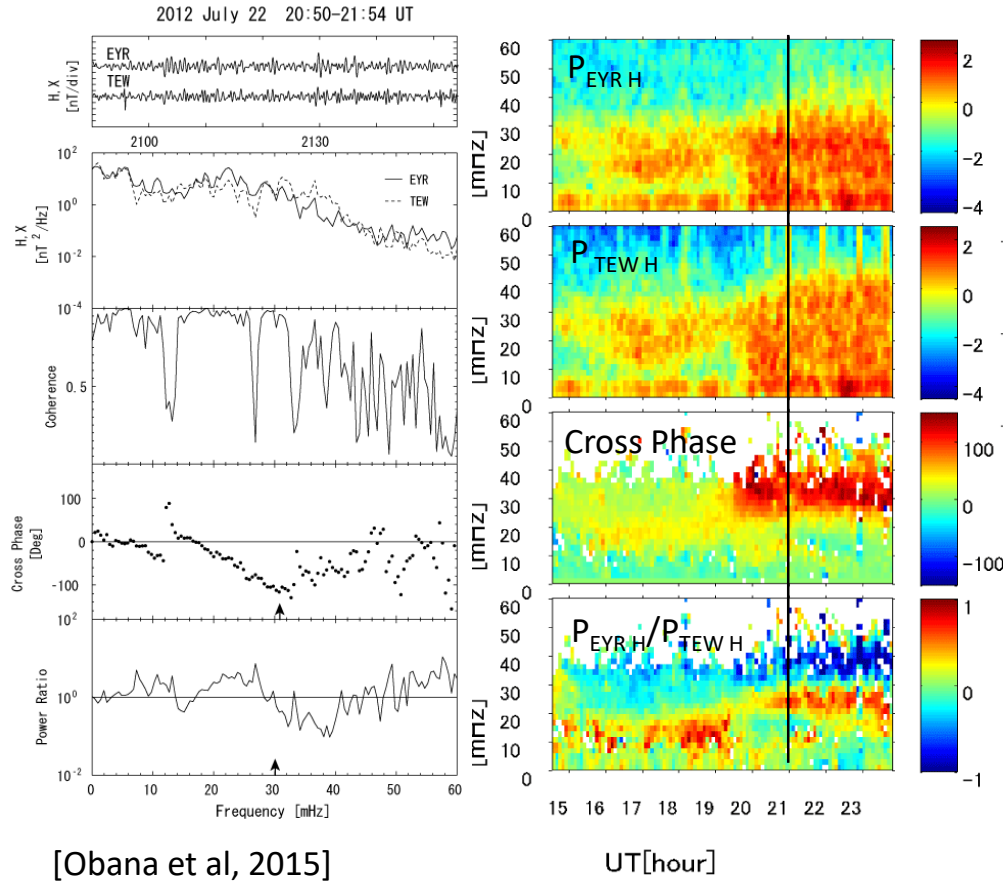
まとめ

1. 観測データから磁力線共鳴振動周波数を同定する
 - 地磁気データの利用...2観測点間で振幅・位相を比較
 - 衛星観測磁場データの利用...azimuthal成分の卓越周波数から同定
2. 磁場モデルを選定
3. 磁力線沿いの密度プロファイルモデルを選定する
 - べき乗モデル...べき係数 $m \sim 0.5$
4. MHD波動方程式を解く
 - Singer et al., 198
 - Vellante and Forster 2008
 - ほか

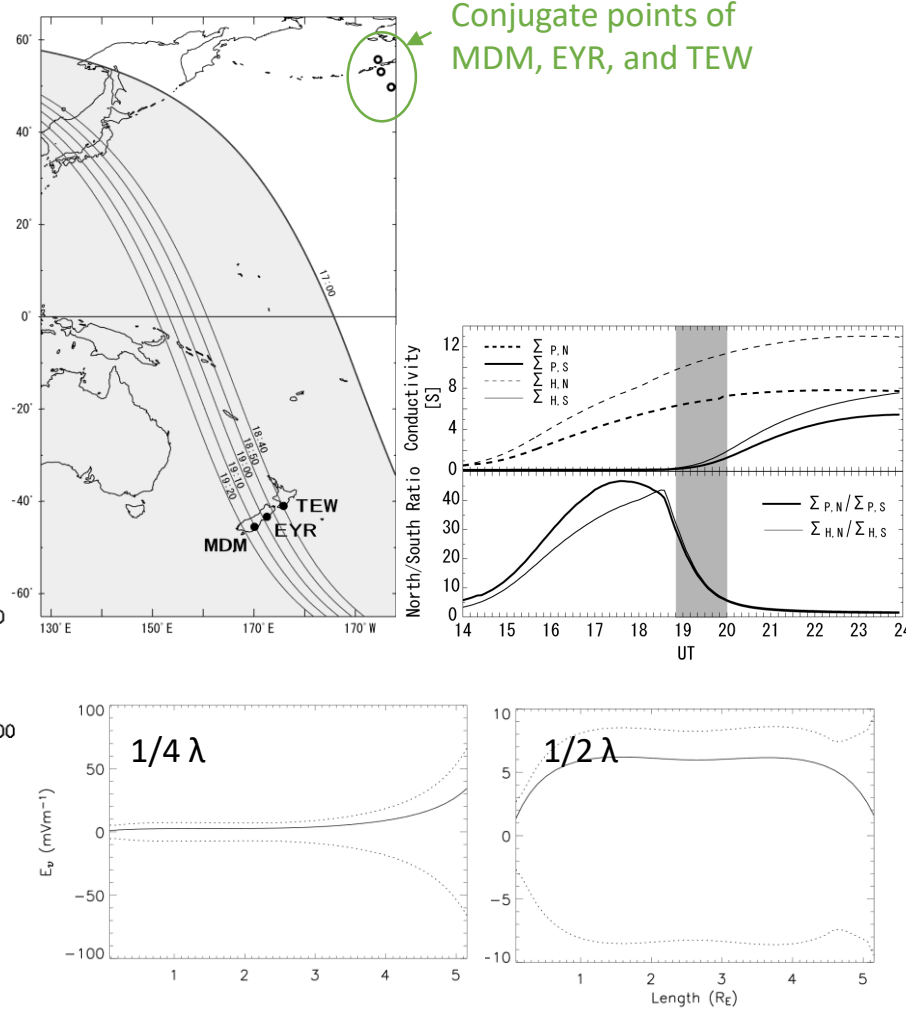
測定の原理と限界について

解析例

昼夜境界線付近では、1/4波長モード波(Quarter Wave)が励起され、質量密度の過大評価の恐れがある

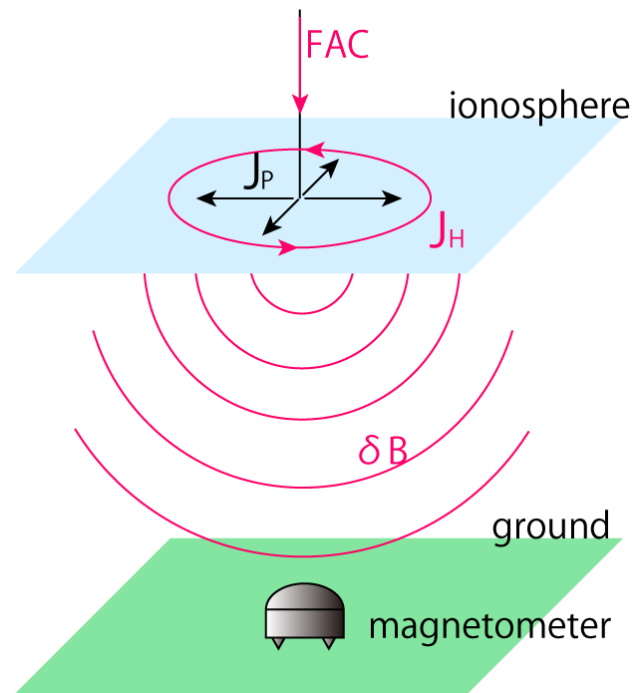


[Obana et al, 2015]

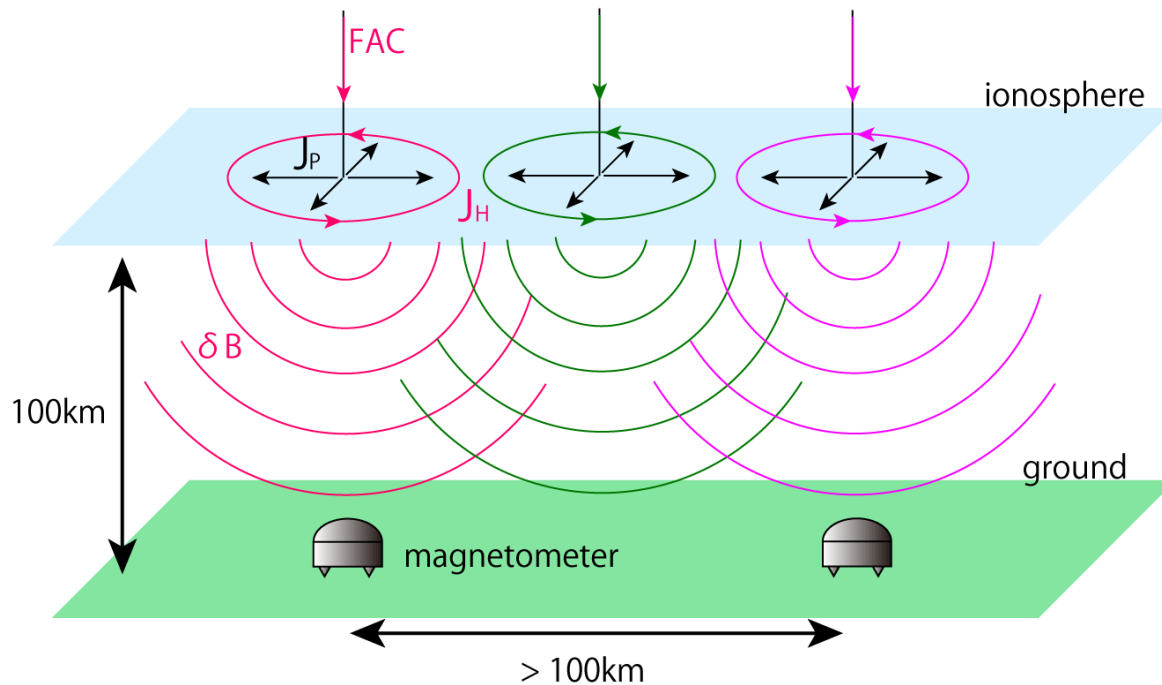


[Obana et al, 2008]

大気圏遮蔽効果による空間分解能の限界



大気圏遮蔽効果による空間分解能の限界



地上	磁気圏赤道面
200km	1.0 Re at L=6.6 0.4 Re at L=4.0 0.2 Re at L=2.5

ULF地磁気脈動を使ったプラズマ圏観測

- 測定できるのは、質量密度
- 昼側にほぼ限定される
- 日の出・日の入り境界線付近も避けるべき
1/4波長モードの混在による密度の過大評価の可能性
- 空間分解能は以下の点に制限を受ける
- 大気圏遮蔽効果により～**100km**以下の小規模構造は見えない

地上	磁気圏赤道面
200km	1.0 Re at L=6.6 0.4 Re at L=4.0 0.2 Re at L=2.5