

ICI-3搭載LEP-ESAによる電離圏カスプ領域 低エネルギー電子の観測

東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻
宇宙惑星科学大講座 齋藤義文研究室
竹島順平

研究背景と目的

カスプ領域は太陽風の電子が磁力線に沿って直接、電離圏まで降り注ぐ特殊な領域である。昼間側において降下電子を観測するとenergy-time dispersionと呼ばれるエネルギー分散構造を示す電子降下現象が確認されることがある。energy-time dispersionは速い電子が遅い電子に比べて先に観測されることでE-t(Energy-time)図で時間分散を示す。人工衛星やロケットによる観測ではよく下に凸のようなenergy-time dispersionが観測され(図1)、生成要因として過去の研究よりInertial Alfvén Waves(IAWs)による沿磁力線加速が有力視されている。

ICI-3観測ロケットはノルウェーの観測ロケットで搭載された低エネルギー電子観測機(LEP-ESA)によりオーロラ電子の高時間分解能観測に成功した。取得されたデータから従来とは異なる上に凸形energy-time dispersionが多数観測された(図2)。本研究では上に凸形のenergy-time dispersionがどのような加速高度分布であれば観測されるのか、また、IAWsで生成可能であるかどうかを位相速度分布を計算することで調べた。

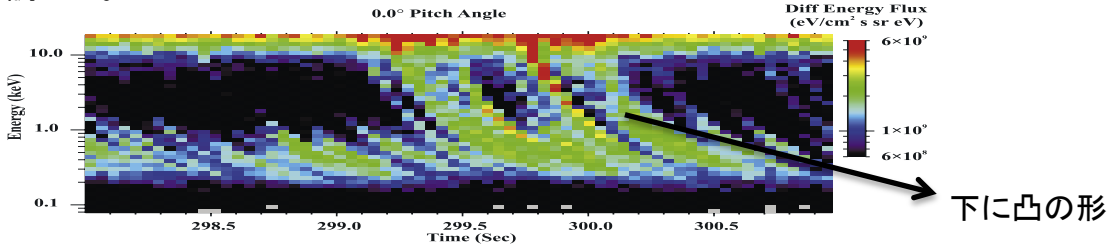


図1:過去に観測ロケットにより観測されたenergy-time dispersionの例(Chen et al.,2005)

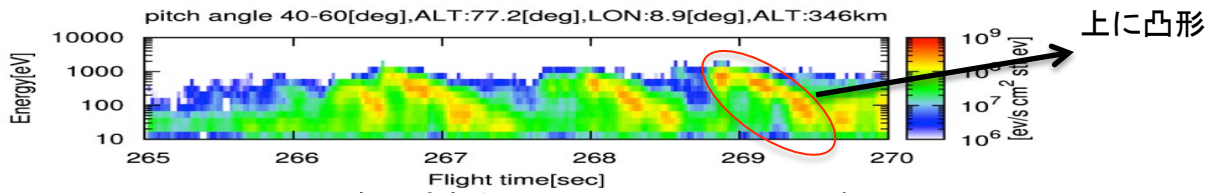


図2:ICI-3で観測されたenergy-time dispersionの例

IAWsモデルによる加速メカニズム

◆分散関係と電場

$$\omega^2 = \frac{k_{\parallel}^2 v_A^2}{1 + k_{\perp}^2 \lambda_e^2} \quad \frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} = \frac{k_{\parallel} k_{\perp} \lambda_e^2}{1 + \lambda_e^2 k_{\perp}^2} \quad \lambda_e = \frac{c}{\omega_{pe}} \quad k_{\perp} = \frac{2\pi}{\lambda_{\perp}}$$

$k_{\perp}^2 \lambda_e^2 \ll 1$ の時 $\omega^2 = k_{\parallel}^2 v_A^2 \Rightarrow E_{\parallel} = 0$ (理想MHDのアルフベン波)

$k_{\perp}^2 \lambda_e^2 \geq 1$ の時 $\Rightarrow E_{\parallel} = \frac{k_{\parallel} k_{\perp} \lambda_e^2}{1 + \lambda_e^2 k_{\perp}^2} E_{\perp}$ 沿磁力線方向の電場を持つ

◆加速過程

$$\Delta V = V_{\parallel} - V_e$$

$$V_{final} = V_e + 2\Delta V = 2V_{\parallel} - V_e$$

$$V_{\parallel} = \frac{V_a}{\sqrt{1 + \lambda_e^2 k_{\perp}^2}} \quad V_a = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho}}$$

- 1.沿磁力線方向の電場を持ったIAWsが伝播
- 2.ポテンシャル構造内で電子は沿磁力線方向の位相速度と同じ速度になると反射(反射されるまでに得る速度は $\Delta V = V_{\parallel} - V_e$)
- 3.反射された電子はポテンシャル構造から抜けるまでにさらに ΔV 加速される
- 4.最終的に電子の速度は沿磁力線方向のIAWsの位相速度の最大二倍

結果・考察

◆時間変化と空間変化の判別

加速電場が時間的に発生した場合、ピッチ角の小さい電子はピッチ角の大きい電子に比べ、時間的に早く観測されるはずである。また、空間変化である場合、全てのピッチ角が同時に観測されるはずである。本研究ではピッチ角と観測時間の関係から時間変化と空間変化の判別を行った。

ピッチ角と観測時間の関係式

$$\Delta t = \sqrt{\frac{m}{2E}} \int_{x_0}^x \frac{1}{\sqrt{1 - B(s) \sin^2(\alpha_{large}) / B_0}} - \frac{1}{\sqrt{1 - B(s) \sin^2(\alpha_{small}) / B_0}} ds$$

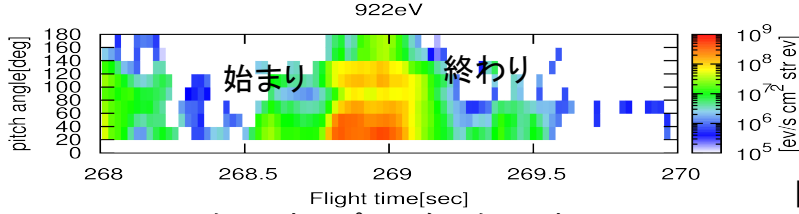


図4: dispersion観測時のピッチ角と観測時間の図

energy-time dispersionの観測の始まりは時間変化、終わりが空間変化と判別

→ 加速電場は時間的に発生

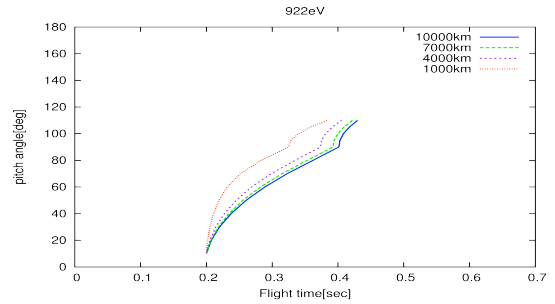


図3: ピッチ角と観測時間の関係を計算した図

◆形状について

TOF分析により加速高度分布を計算した結果

- ・高エネルギーほどより高高度で加速
- ・高いエネルギーの電子が7000kmと高い高度で加速



高いエネルギーの電子が高高度から加速することで、高エネルギー側で観測時間の差が長くなり、上に凸形のenergy-time dispersionが観測されたと考えることができる。

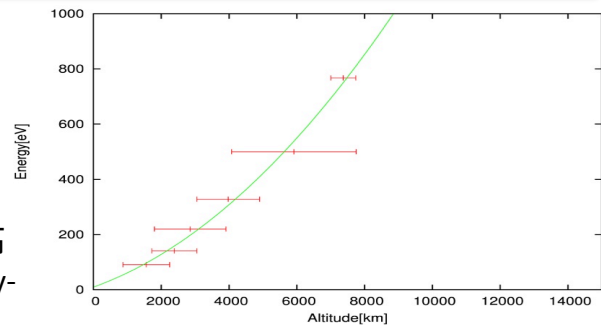


図5: TOF分析から計算した加速高度分布

◆IAWsによる上に凸形のenergy-time dispersionの生成の可能性

- ・IAWsモデルで得られたエネルギーを沿磁力線方向のIAWs位相速度の二倍と仮定
- ・図5の加速高度分布からエネルギーを位相速度に換算することで高度に対する位相速度分布を計算



沿磁力線方向のIAWsの位相速度分布の結果

沿磁力線方向のIAWsの位相速度が高度7000kmまで増加し、高度7000kmで8000km/sに達すれば可能

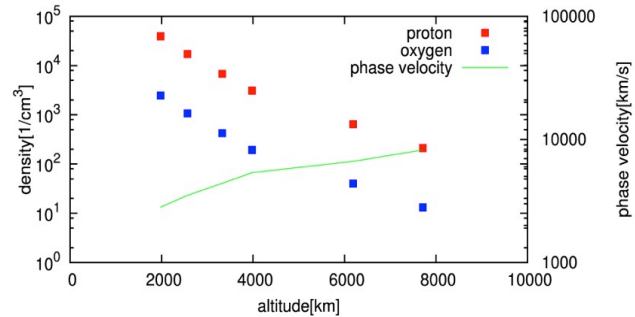


図6: 沿磁力線方向のIAWsの位相速度分布とプラズマ密度分布

プラズマ密度分布

位相速度分布よりプラズマ密度分布を計算した結果、図6のような沿磁力線方向の位相速度分布になるには高度7000kmまで長くプラズマ密度が減少し続けなければならないことがわかった。

まとめ

ICI-3では従来とは異なる上に凸形のenergy-time dispersionが観測され、形状及び、IAWsによる生成の可能性を調べた。
 TOF分析より、上に凸形のenergy-time dispersionが観測される加速高度分布を示した。
 また、IAWsと仮定した場合の沿磁力線方向のIAWsの位相速度分布を計算し、IAWsで生成可能であることを示した。