

## あけぼの衛星観測に基づく昼側カスプ領域における ELF 帯電磁波による水素・酸素イオン加熱の解析

# 石ヶ谷 侑季 [1]; 熊本 篤志 [2]; 笠原 禎也 [3]; 加藤 雄人 [4]; 松田 昇也 [5]

[1] 東北大・理・地物; [2] 東北大・理・地球物理; [3] 金沢大; [4] 東北大・理・地球物理; [5] 名大 ISEE

### H<sup>+</sup> and O<sup>+</sup> ion heating by electromagnetic ELF waves in the dayside cusp region based on Akebono observation

# Yuki Ishigaya[1]; Atsushi Kumamoto[2]; Yoshiya Kasahara[3]; Yuto Katoh[4]; Shoya Matsuda[5]

[1] Tohoku Univ.; [2] Dept. Geophys, Tohoku Univ.; [3] Kanazawa Univ.; [4] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [5] ISEE, Nagoya Univ.

The Earth's dayside cusp region is one of main origins of ion outflow. Ground, rockets, satellites observations reported ion heating/acceleration like transversely accelerated ions (TAI) and ion conics with simultaneously bipolar electric field and plasma waves which contribute to ion heating/acceleration in region from the ionosphere to the magnetosphere within a geocentric distance of several Re. [Chaston et al. 2004; Waare et al., 2012; Lund et al., 2012]

Broadband Extremely Low Frequency waves (BBELF), which enhance in wide frequency range in ELF bands, is one of such plasma waves observed in the dayside cusp. Kasahara et al. [2001] reported that BBELF was observed with more strong intensity in the dayside cusp than in other latitude and MLT region, and that it was observed in altitudes range from 275 km to 10,500 km in the dayside cusp by the Akebono satellite. They also reported that BBELF consisted of two components, the electrostatic component up to proton gyrofrequency or lower hybrid frequency and the electromagnetic component below oxygen ion gyrofrequency. Moreover, they indicated that there was correlation between energy density of TAI and ion conics heated up to 100eV and electric field spectral density of BBELF below 10 Hz, which is lower than proton and oxygen ion gyrofrequencies, and that heated ions were found only when the electric field spectral density of BBELF is larger than the threshold intensity of 0.1 [(mV/m)<sup>2</sup>].

In the analysis of correlation between TAI and ion conics and electric field of BBELF by Kasahara et al. [2001], ions were not divided by their species. In this study, we divide H<sup>+</sup> and O<sup>+</sup> ions using data from ion mass spectrometer, and investigate the correlation with intensity of BBELF below oxygen ion gyrofrequency. We use datasets of thermal ions below 25 eV and electromagnetic field in a frequency range from 3.18 Hz to 17.8 kHz observed by Akebono Suprathermal Ion Mass spectrometer (SMS) and VLF Multichannel Analyzer (MCA) in the dayside cusp in a sector of 10-14 MLT and in invariant latitude of 65-80 degree. Data selection criteria are as follows: Increase of magnetic field intensity of BBELF below oxygen ion gyrofrequency from the average is more than 2sigma, and the ion counts of 4 channels in perpendicular directions with respect to earth's magnetic field or all channels enhance. As a result of statistical analysis of H<sup>+</sup> and O<sup>+</sup> ions heating in an altitude of 4000-8000km in a period from January to February, 1990, we found that the counts of heated H<sup>+</sup> and a part of O<sup>+</sup> ions showed positive correlation with electric field spectral density. However, the counts of the other part of O<sup>+</sup> ions did not show clear correlation. The threshold intensity of BBELF as reported by Kasahara et al. [2001] was also found in this study. The threshold intensity of BBELF for H<sup>+</sup> ions was 0.1[(mV/m)<sup>2</sup>], as large as reported. However, the threshold intensity of BBELF for O<sup>+</sup> ions was 0.01[(mV/m)<sup>2</sup>], less than that for H<sup>+</sup> ions.

Our results suggest that the correlation between heated ions and BBELF intensity reported by Kasahara et al. [2001] mainly indicated the correlation between heated H<sup>+</sup> ions and BBELF intensity, and that O<sup>+</sup> ions are heated more efficiently by BBELF.

In order to clarify the mechanism of the threshold as shown in this study, we are going to perform further analysis of heating events of each ion in consideration of other parameters such as ion temperature and density, which affect the threshold level. Singh et al. [2007] reported based on particle simulation that the electrostatic wave was generated by the relative drift between light and heavy ions accelerated by the electromagnetic component of BBELF and that it accelerated ions. We can understand that the two-step acceleration suggested by the simulation generates the threshold. We are also going to perform event analysis and comparison with the physical process in the simulation.

地球の昼側カスプ領域は電離圏のイオンを磁気圏に供給するイオンアウトフローの発生源のひとつとして重要な役割を担っていると考えられている。地上やロケット、衛星観測により電離圏高度から磁気圏の数 Re まで、磁場の垂直方向に加熱されるイオン (TAI) やイオンコンニクスなどのイオン加熱、加速現象と同時に、電場の存在や波動の増大が観測されており、幅広い高度で電場や波動などによりイオン加熱、加速が起き、電離圏イオンが磁気圏に流出していると考えられている。[Chaston et al. 2004; Waare et al., 2012; Lund et al., 2012]

イオン加熱域で観測される波動現象の 1 つとして、BroadBand Extremely Low Frequency (BBELF) と呼ばれる広帯域 ELF 波動の強度増大が報告されている。あけぼの衛星の観測により、BBELF は他の緯度、MLT 領域と比較し、昼側カスプ領域で 275km から 10500km までの幅広い高度帯で、とくに強い強度で観測されていた。また、H<sup>+</sup> のサイクロトロン周波数または低域混成周波数付近まで広帯域に現れる静電成分と O<sup>+</sup> のサイクロトロン周波数以下に現れる電磁波成分が観測されており、静電波と電磁波の両者が混在していることも示されている。さらに、高度 3000km 以上で 100eV 以上の十分に加熱された TAI やイオンコンニクスと H<sup>+</sup> のサイクロトロン周波数を下回る 10Hz 以下の電場スペクトル強度

との相関も報告されており、この周波数帯の波動が  $H^+$  を主成分とするイオンの加熱に寄与している可能性が示唆された。加えて、電場スペクトル強度がおよそ  $0.1[(mV/m)^2]$  の閾値を超える場合において効率的にイオンが加熱されることも報告された。[Kasahara et al., 2001]

本研究では、Kasahara et al. [2001] でイオン種を区別しない解析の結果得られた TAI やイオンコンニクスと 10Hz 以下の電場スペクトル強度との相関について、 $O^+$  のサイクロトロン周波数以下に現れる電磁波によるイオン種ごとの加熱に着目するため、あけぼの衛星に搭載された VLF 観測装置のサブシステム Multichannel Analyzer (MCA) で観測された 3.18Hz から 17.8kHz の波動の電磁波成分のデータと Suprathermal Ion Mass spectrum (SMS) で観測された 25eV 以下の熱的イオンのデータを用いて、10-14MLT、磁気緯度 65-80 度の昼側カusp領域において磁場強度が前後 1 時間の平均値より 2 シグマ以上増大し、かつイオンのカウント数が磁力線垂直方向の 4 チャンネルまたはすべてのチャンネルの合計で増大したイベントを統計的に解析した。1990 年 1、2 月の高度 4000-8000km のデータで統計解析を行った結果、 $H^+$  および  $O^+$  の一部でイオンのカウント数と電場スペクトル密度に正の相関がみられた。しかしながら  $O^+$  では、イオンのカウント数と電場スペクトル密度に明確な相関がみられないイベントが見られた。また、 $H^+$  は Kasahara et al. [2001] と同様に電場スペクトル強度が  $0.1[(mV/m)^2]$  の閾値を超える場合に効率的にイオンが加熱されていたが、波動と相関を示す  $O^+$  は  $H^+$  と異なって電場スペクトル強度が  $0.01[(mV/m)^2]$  の閾値を超える場合に効率的にイオンが加熱されていた。これらの解析結果から、Kasahara et al. [2001] で示された相関が、主成分を占める  $H^+$  の加熱の特性を反映したものだったこと、少数成分ながら  $O^+$  が  $H^+$  より低い  $0.01[(mV/m)^2]$  の閾値以上でより効率的に加熱されている可能性が示唆された。

粒子シミュレーションによって、電磁波の磁力線に垂直な電場成分によって  $H^+$  と  $O^+$  の間に速度の異なるドリフトが生じ、それらの速度差によって生じた静電波がイオンをさらに加速することが示唆されている。[Singh et al., 2007]

このような電磁波と静電波の二段階の加速により、閾値が生じている可能性が考えられ、今後、イベントごとにシミュレーションの条件と比較し、波動の成長やイオン加熱の物理プロセスを検討していきたい。また、解析イベント数を増やすとともに、波動の成長や加熱の効率など閾値に影響を与えられと考えられるイオン温度や密度などその他のパラメータを変化させるような条件で分類した統計解析を行い、イオン種ごとに加熱の閾値や相関の有無が生じるメカニズムを議論していきたい。