

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011 年度

課題番号：21540465

研究課題名（和文） 大振幅アルフベン波による宇宙プラズマ加熱プロセスの観測的検証

研究課題名（英文） Experimental study of the plasma acceleration/heating by large-amplitude Alfvén waves in the space

研究代表者

松岡 彩子（MATSUOKA AYAKO）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：80270437

研究成果の概要（和文）：磁気圏探査衛星 Geotail の電場・磁場およびプラズマ粒子データを用い、プラズマシート内で観測される大振幅の非圧縮電磁流体波動である、アルフベン波の解析を行った。その結果、プラズマの分布関数等との比較研究により、大きなエネルギーを運んでいるアルフベン波はイオンビームのサイクロトロン不安定によって立てられており、イオンビームの減衰と共にアルフベン波も減衰することがわかった。リコネクションによって生じたイオンビームのエネルギーが、アルフベン波のエネルギーとなり、それがプラズマシートの加熱に寄与していることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：Alfvén waves were found to propagate toward the earth in the nightside magnetosphere. They are considered to be associated with the auroral activity at the ionospheric altitudes. We have investigated the electric and magnetic field variations measured by Geotail in the mid-tail region, 10-30 Re. We found large-amplitude electric field fluctuations and the corresponding magnetic field fluctuations having the components in the direction perpendicular to the ambient magnetic field. These fluctuations were identified as Alfvén waves from the ratio between the amplitudes of electric and magnetic field. These large-amplitude Alfvén waves often propagate in the direction coincides with the plasma flow, and earthward at the same time. We will further select events in which the fluctuations are identified as waves definitely. We will report the statistical result about the correspondence with the plasma properties and estimation of the energy flux carried by the Alfvén waves.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：地球惑星磁気圏

1. 研究開始当初の背景

地球の磁場の勢力範囲である地球磁気圏も、プラズマで満たされているが、分布や特性は一様ではない。磁気圏尾部においては、密度が小さく温度が低い（数百 eV）ローブ領域と、密度・温度共に大きい（ $\sim 10\text{keV}$ ）プラズマシートとに大別される。

プラズマシートがどのようなプロセスで加熱されているのかは、磁気圏物理学における大きな課題である。Terasawa, et al., (1997) は、プラズマシートの温度や密度が、太陽風の運動エネルギーや密度、惑星間空間磁場に依存していることを明らかにした。このことは、太陽風の状況に依存した加熱過程が、プラズマのプラズマシートへの進入時あるいは進入後に起こっていることを示唆している。有力なプラズマの加熱プロセスの一つとして、磁気圏尾部におけるリコネクションが挙げられる。リコネクションによる磁場のエネルギー開放が、ローブ領域からプラズマシートに進入するプラズマを直接加熱している、という解釈が考えられる。リコネクションの頻度は、磁気圏尾部における電場が大きいほど増え、更に磁気圏尾部の電場は太陽風の状況に依存するため、Terasawa, et al., (1997) の結果と定性的に一致する。確かにリコネクションはプラズマシートの加熱に寄与していると考えられるものの、リコネクションの起こる領域が極めて限定的であることを考えると、それだけでプラズマシート全体の加熱を説明できるとは考えられない。プラズマシートの加熱プロセスには、更にステップを加えて、広い範囲で加熱を起こす機構を考える必要がある。

その他、プラズマシート加熱を説明する可能性のある他のプロセスとして、プラズマシート境界層で観測される、高周波数の静電孤立波が考えられる [e.g., Kojima et al., 1997]。しかし、これらの静電孤立波で陽子の加熱を説明することは難しく、プラズマシート加熱を完全に理解することは出来ない。

2. 研究の目的

本研究で解明を目指すのは、大振幅アルフベン波によるプラズマシートの加熱プロセスである。申請者らはこれまで、Geotail 衛星のデータを用い、プラズマシート内で観測される大振幅のアルフベン波の観測を行ってきた。その結果、地球磁気圏尾部において、多くの大振幅アルフベン波イベントが発見された。更に、プラズマの分布関数等との比較研究により、大きなエネルギーを運んでい

るアルフベン波はイオンビームのサイクロトロン不安定によって立てられており、イオンビームの減衰と共にアルフベン波も減衰するらしいことがわかった。リコネクションによって生じたイオンビームのエネルギーが、アルフベン波のエネルギーとなり、それがプラズマシートの加熱に寄与していることが示唆される。

3. 研究の方法

(1) 磁気圏尾部において、アルフベン波によって運ばれる電磁的エネルギーの総量を導き出す。

アルフベン波の伝播領域の、背景磁場に垂直な方向のスケールや、太陽風の状況に依存したエネルギー分布を出すことによって、プラズマシートを加熱する可能性のあるエネルギーの総量を導き出す。

波が伝播している領域の、磁場に垂直方向のスケールを導き出す。アルフベン波は、磁力線方向にポインティングベクトルを持ち、エネルギーを伝播する。人工衛星による1点観測では、波が伝播している領域の、磁場に垂直方向のスケールを導き出すことは容易ではない。しかし、Geotail 衛星データに加えて、Cluster、Temis 衛星群のデータを用い、同時観測点数を増やすことが出来れば、垂直方向のスケールを出すことが出来る。

また、1点観測により波が伝播している垂直方向スケールを導出する別の方法として、アルフベン波の垂直方向のスケールが波長に比べて小さい時には、電場と磁場の振幅比の、アルフベン速度からのずれから、このスケールを出すことが可能である (Wygant et al., 2002)。ただし、このずれは、電子の慣性が無視できない場合や、プラズマに重イオンが含まれる場合にも生じる。従って同時に、イオンの組成や電子の温度を正確に求め、スケールの見積もり時に考慮に入れる必要がある。

次に、アルフベン波が運ぶエネルギー分布と、エネルギーの総量を導き出す。粒子構造の領域の頻度分布にエネルギーの期待値を乗ずることにより、磁気圏の構造に対して、アルフベン波がどのようなエネルギー分布を持つのか、統計的に求めることが出来る。粒子構造の領域の頻度分布は、太陽風の状況（速度、密度、惑星間空間磁場等）に依存して変化するので、アルフベン波が運ぶエネルギーの、太陽風の状況に対する依存も明らかになる。

(2)大振幅アルフベン波が、磁場の弱い領域に伝播して、以下の効果によりエネルギーを失う(=プラズマを加熱する)ことを、波動のスペクトルを解析することによって検証する。

一様な媒体など、単純な状況では、アルフベン波がプラズマを加熱することは不可能であるので、アルフベン波がプラズマを加熱するために必要な要件の検討と、観測的な実証を行う必要がある。アルフベン波が反地球方向へ伝播すると、媒体の背景磁場が次第に減少する。アルフベン波が、安定して伝播する状態から外れて、プラズマを加熱する機構の候補として、次の2つのプロセスを考えた。

①背景磁場が弱くなると、陽子のサイクロトロン周波数が下がる。サイクロトロン周波数以上の周波数帯域の波動は、磁気流体的ふるまいをしなくなり、陽子を加熱することが出来る。

②背景磁場が弱くなり、かつ、アルフベン波によって運ばれるエネルギーが保存される場合には、背景磁場強度に対する磁場の振幅の比が大きくなり、非線形効果が大きくなり、陽子を加熱することが出来る

両者においては、アルフベン波がプラズマに熱を与える周波数が異なるため、伝播下流における磁場・電場スペクトルが異なることが予想される。即ち、①においては、その場のイオンサイクロトロン周波数以上の周波数成分が加熱に寄与するのに対して、②は加熱に寄与する波動に、周波数依存を持たない。

4. 研究成果

本研究により、次のことが明らかになった。

(1) 大振幅アルフベン波の大部分のイベントは、①イオンビーム または ② dipolarization に伴って起こる(図1)。このことは、アルフベン波がサイクロトロン不安定あるいは磁気圏の形状変化に伴って起こることが示唆している。

(2) 大きな Poynting flux ($> 0.04 \text{ W/m}^2$) のイベントは、常にイオンビームに伴ってあらわれる(図2)。大きな Poynting flux を伴うイベントの頻度は地球に近づくにつれて減るため、波のエネルギーは太陽向きのイオンビームの減衰の後短時間で消散すると考えられる。

プラズマシートがアルフベン波で加熱されている可能性があるが、定量的な評価のためにはアルフベン波が伝搬している領域の大きさを正確に見積もる必要がある。

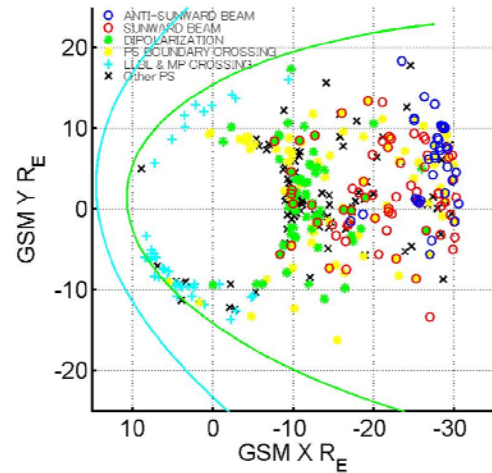


図1 大振幅アルフベン波イベントの空間分布図

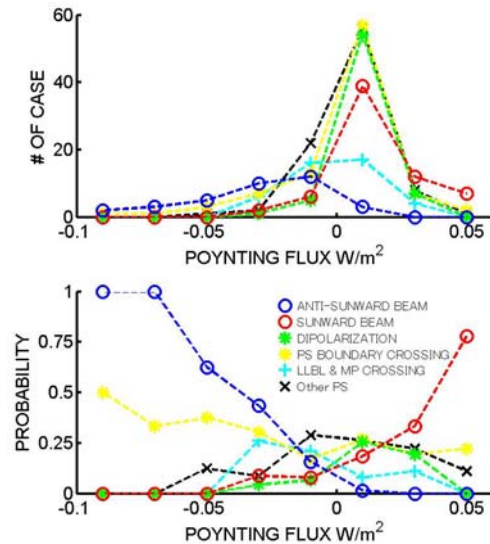


図2 大振幅アルフベン波のポインティングフラックスの分布

(3)アルフベン波は $-5R_E > X > -15R_E$ の近尾部領域においてしばしば dipolarization に伴ってあらわれるが、Poynting flux は比較的小さく 0.04 W/m^2 である(図3)。

以上の結果により、大きなエネルギーを運んでいるアルフベン波はイオンビームのサイクロトロン不安定によって立てられており、イオンビームの減衰と共にアルフベン波も減衰するらしいことがわかった。リコネクションによって生じたイオンビームのエネルギーが、アルフベン波のエネルギーとなり、それがプラズマシートの加熱に寄与していることが示唆された。

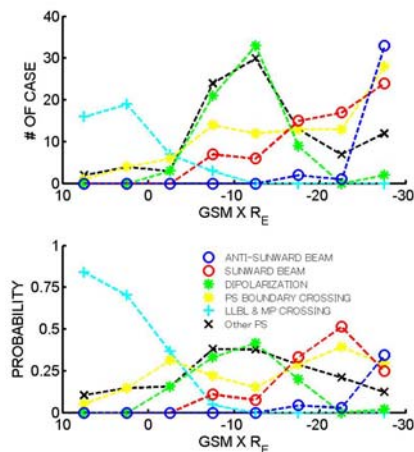


図3 大振幅アルフベン波イベントの GSM X 位置の分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Matsuoka A., M. Shinohara, Y. Tanaka, A. Fujimoto, and K. Iguchi、Development of fluxgate magnetometers and applications to the space science missions、Science Instruments for Sounding Rocket and Satellite、査読有、印刷中

[学会発表] (計4件)

- ① Ayako Matsuoka、Examination of Magnetic Field Measurement in the Inner Magnetosphere by ERG、Inner Magnetosphere Coupling 2 Workshop、2012年3月21-22日、UCLA, Los Angeles, California (アメリカ)
- ② 松岡彩子、高田拓、星野真弘、Estimation of the Electromagnetic Energy Carried by the Alfvén waves Traveling in the Plasma Sheet、38th COSPAR Scientific Assembly、2010年7月24日、Bremen Exhibition & Conference Center (ドイツ)
- ③ 松岡彩子、高田拓、星野真弘、磁気圏尾部において電磁的エネルギーを伝播するアルフベン波の空間スケールの推定、第126回地球電磁気・地球惑星圏学会、2009年

9月29日、金沢大学 角間キャンパス (石川県)

- ④ 松岡彩子、高田拓、星野真弘、Estimation of the Electromagnetic Energy Carried by the Alfvén waves Traveling in the Plasma Sheet、American Geophysical Union 2009 Fall Meeting、2009年9月12日、サンフランシスコ モスコーンコンベンションセンター (アメリカ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松岡 彩子 (MATSUOKA AYAKO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：80270437

(2) 研究分担者

高田 拓 (TAKADA TAKU)

高知工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号：80455469

(3) 連携研究者

星野 真弘 (HOSHINO MASAHIRO)

東京大学・理学部・教授

研究者番号：90241257