

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：34412

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740333

研究課題名(和文)新しい地上観測ネットワークによる1/4波長モード定在アルフヴェン波の観測

研究課題名(英文)A Study of quarter-wave mode standing Alfvén waves using data from a new magnetometer array in New Zealand

研究代表者

尾花 由紀 (Obana, Yuki)

大阪電気通信大学・工学部・講師

研究者番号：50398096

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新しい地磁気観測網をニュージーランド地域に展開し、そのデータから、1/4波長モード波の周波数、共鳴領域の幅、減衰率を明らかにした。これは世界で初めての成果である。また1/4波長モード波から1/2波長モード波への遷移を連続的に捉えることに成功した。モード遷移は昼夜境界線が観測点の上空を通過するタイミングで始まっていた。

また、磁気圏モデルを使って1/4波長モードを再現したところ、周波数、共鳴領域の幅、減衰率など、いずれも観測結果と良く一致する結果が得られた。さらに、プラズマ圏界面で生じる空洞共鳴の強弱で1/4波長モード波の励起がコントロールされていることを暗示する結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：In order to examine the resonance structure of quarter-wave mode standing Alfvén waves, we constructed a new magnetometer array in New Zealand and data from this array were analyzed. Four events are discussed which show extraordinarily low eigenfrequencies, wide resonance widths, and strong damping when the ionosphere above New Zealand was in darkness while the conjugate northern hemisphere ionosphere was sunlit. The wide resonance width and the strong damping of the quarter-wave mode arise from strong energy dissipation in the dark side ionosphere. One event exhibited field line resonance structure continuously through a transition from very low frequency to the normal daytime values. The frequency change began when the dawn terminator passed over New Zealand and finished one hour later. These experimental results were compared with the ULF wave fields obtained from a 2.5-dimensional simulation model.

研究分野：磁気圏物理学

キーワード：磁気圏-電離圏結合 プラズマ圏 空洞共鳴 磁力線共鳴 ULF波 国際情報交換

1. 研究開始当初の背景

ULF 周波数帯($f \sim 1\text{-}1000\text{mHz}$)のプラズマ波動は、地球磁気圏のあらゆる場所で頻りに観測され、しばしば磁気圏システムの固有モードであるアルフヴェン定在波としての様相を呈している。そのため、ULF 波動の解析研究は磁気圏システムの様々な背景物理量を調べる上で効果的な手法の一つとなっている。たとえば、ULF 周波数帯の地磁気脈動(しばしば磁力線共鳴振動的な性質など)が開発されると[1,2]、得られた共鳴周波数について波動方程式を解き、磁気圏プラズマ質量密度が推定されるようになった。この手法は本研究開始時点ですでに実用的なプラズマ圏モニタリングの方法として確立していた[3,4]。

しかし、我々の先行研究[5,6]により、gradient 法で 1/4 波長モード波が検出されることが示されると、上記の磁気圏探査に新たな課題が持ち上がってきた。1/4 波長モード波とは、磁力線の両端の電離層環境が極端に非対称なときに励起される磁力線共鳴振動の 1 モードである。境界条件の非対称を反映して波形は大きくゆがみ、磁力線上に波長の 1/4 だけが乗った形となる。約 30 年前に存在が予言され[7]ながらほとんど観測例がなかったが、gradient 法で磁力線共鳴振動を詳細に解析したところ、静穏時の朝方で約 20% の確率で検出された[5]。1/4 波長モード波は通常の 1/2 波長モード波に比べ周波数は約半分となる。そのため、モードを間違えて波動方程式を解くと推測されるプラズマ密度が大幅に過大評価されてしまう。また、磁力線状の波形が歪んでいることから、地磁気データから赤道面における拡散係数を見積もる[8]上でも、影響は大きいことが指摘されていた。

このような学術的背景をふまえ、本研究では 1/4 波長モード波の詳細観測を行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、新しい地上観測ネットワークを構築し、1/4 波長モード定在アルフヴェン波の詳細観測を行うことである。まずニュージーランドに地磁気観測点を一カ所新設して新しい地磁気多点観測網を構築し、得られた地磁気データを用いて、磁力線共鳴振動の 1/4 波長モード波を詳細かつ長期間にわたって観測する。これにより、1/4 波長モード波の発生頻度、3 次元的な構造、共鳴特性を明らかにする。さらに、最新の磁気圏モデルを使って数値計算を行い、1/4 波長モード波の励起メカニズムを解明する。これらの研究成果により、1/4 波長モード波の検出精度の向上が見込まれ、1/4 波長モード波の混在による磁気圏プラズマ密度の過大評価を防ぎ、重イオン濃集領域の特定精度を向上する等の波及効果が見込まれる。研究費申請時点で 1/4 波長モード波の観測研究は非常に少なく、統計的な調査は全く行われていない状況にあった。本研究の成果が 1/4 波長モード波

の励起メカニズムを解明するために大きく寄与するものと期待されると考えて、本研究を申請した。

3. 研究の方法

(1) 地磁気観測網の整備

ニュージーランド地域には、申請者が国内外の研究者と協力しながら 2010 年度より配備を進めている地磁気観測点があった。本研究で新たにニュージーランド北部に地磁気観測点を開設し、2012 年 4 月よりデータの取得を開始した。これにより、磁力線共鳴振動の空間構造の調査に最適な配置を持つ観測網が構築された。

(2) 1/4 波長モード波の候補イベントの選定

緯度がわずかに異なる観測点ペアでは入射信号はほぼ共通しつつも共鳴周波数がわずかに異なる。そのためペア間で振幅比をとるとペアの中間点における共鳴周波数を中心に双極子型の変化が現れ、容易に共鳴周波数を同定できる。これが gradient 法の原理である。上記で構築した地磁気観測網の、隣り合う観測点同士でペアを作り、この手法を適用して共鳴周波数を精密に同定した。1/4 波長モード波は電離層電気伝導度が極端な非対称を持つときに励起され、異常に低い周波数を持つ特性があるので、明け方付近で異常な低周波数が検出されたとき、これを候補イベントとした。

(3) 1/4 波長モード波の発生頻度の研究

上記で選定したイベントリストを用いて、1/4 波長モード波の発生頻度について統計的に調査を行った。

(4) 1/4 波長モード波の空間構造・共鳴特性の研究

1/4 波長モード波は夜側の電離圏でエネルギー散逸が激しく、強い減衰を示すと予想されている[7]。本研究では、新しい地磁気観測網のデータを用いて、これまで調べられたことのなかった 1/4 波長モード波の共鳴特性(共鳴幅や減衰率など)を明らかにした。緯度がわずかに異なる観測点間の振幅比や位相差は単に共鳴周波数を与えるだけでなく、共鳴領域の幅や共鳴の Q 値に関する情報を含んでいる[9,10]。よって、これを利用して共鳴領域の半値幅や減衰率を求めた。ただし減衰率の算出には媒質の空間変化の情報が必要で、緯度方向に 3 点以上の観測点が必要である。そのために本研究で新たにニュージーランド北部に地磁気観測点を開設し、これを利用した。

(5) 磁気圏モデルによるシミュレーション

現実的な電離圏境界条件を取り入れた最新の磁気圏モデルで 1/4 波長モード波を再現し、統計解析の結果と比較した。磁気圏内のプラズマ密度分布条件等を様々に変化させ

て数値実験を行い、1/4 波長モード波の励起メカニズムについて考察を行った。

4. 研究成果

(1) 地磁気観測網の整備

ニュージーランド北島の Te Wharau (TEW)に地磁気観測点を開設し、2012年4月よりデータの取得を開始した。取得されたデータは CRUX data archive (<http://www1.osakac.ac.jp/crux/>) や名古屋大学太陽地球環境研究所(STEL)磁力計データのウェブページ (<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/magne/index.html>)を通じて公開している。また宇宙物理環境データ解析ソフトウェア Space Physics Environment Data Analysis Software (SPEDAS)にも提供している。これにより、地磁気観測データの解析未経験者にもデータの所在地やデータファイルのフォーマットを熟知せずともダウンロードや表示・解析できる体制が整えられている。

(2) 1/4 波長モード波の発生頻度の研究

1/4 波長モード波の発生頻度について統計的に調査を行ったところ、磁気圏擾乱指数や地磁気脈動の振幅の増大に対応して発生頻度が上昇することが明らかになった。中でも地磁気脈動の振幅との相関が最も高いとの結果が得られた。

(4) 1/4 波長モード波の空間構造・共鳴特性の研究

ニュージーランド地磁気観測網で得られたデータを解析し、1/4 波長モード波の周波数、共鳴領域の幅、減衰率を観測から明らか

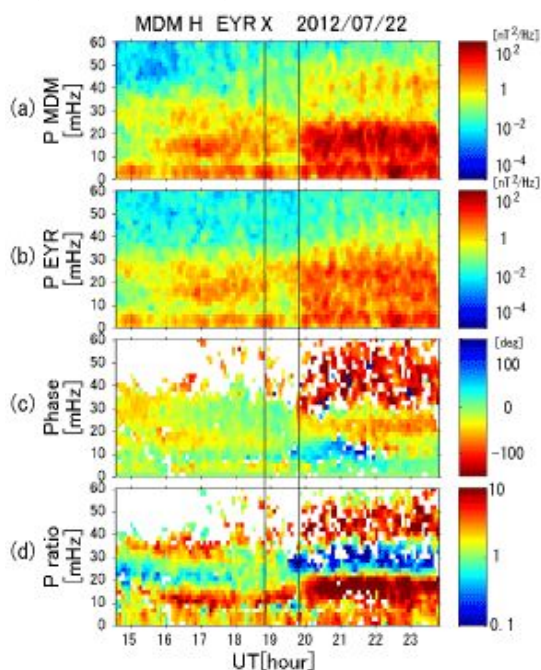


図1 2012年7月22日に観測された1/4波長モード波から1/2モード波への連続的な遷移を示すイベント。

にした。周波数は1/2波長モード波のそれに比べて1.3-1.8倍低く、共鳴領域の幅は1/2波長モード波のそれに比べて2倍広いことが明らかになった。また、1/4波長モード波は1/2波長モード波に比べ強い減衰を示す傾向にあることが分かった。

また、1/4波長モード波が、電離圏環境の非対称が解消されるに連れて、1/2波長モード波に遷移する様子を連続的に捉えることに成功した(図1)。その様子を電離層高度の昼夜境界線の移動と比較したところ、モード遷移は昼夜境界線が観測点の上空を通過するタイミングで始まり、電離圏電気伝導度の南北半球間の比が約5になるころ終了していた。

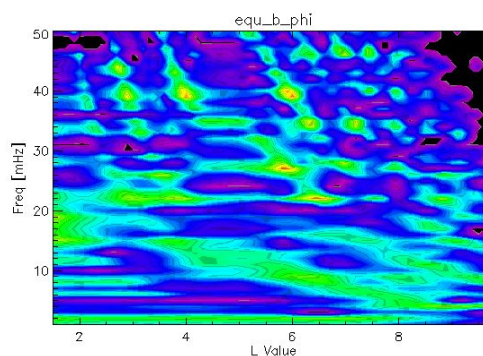


図2 数値計算で再現された1/4波長モード波。

さらに、これらの観測結果を数値計算結果と比較した。現実的な電離圏伝導度を組み込んだ磁気圏モデルを使って計算したところ、1/2波長モードの計算では磁力線共鳴振動の特性が良く再現できたのに対し、1/4波長モードの計算では当初磁力線共鳴振動の特性が再現されなかった。プラズマ圏内部で空洞共鳴が起っており、その強いエネルギーによって弱い1/4波長モード波の共鳴構造が覆い隠されているように見えた。そこでプラズマ圏界面付近のアルヴェン速度プロファイルを調整してプラズマ圏空洞共鳴の効果を抑制して再計算したところ、1/4波長モードの磁力線共鳴が再現された(図2)。

こうして得られた1/4波長モード、1/2波長モードの周波数、共鳴領域の幅、減衰率は観測で得られた結果と良く一致した。またこの結果は空洞共鳴によって振幅の大きなファストモードプラズマ波動が発生するとき、1/4波長モード波が隠されてしまうことを暗示しており、1/4波長モード波の発生条件を特定する上で重要な示唆を与えるものである。

<引用文献>

[1] Baransky, L.N. et al. (1985), Planet. Space Sci., 33(12), 1369-1374.

[2] Waters, C.L. et al. (1991), Geophys.

Res. Lett., 18(12), 2293-2296.

[3] Chi, P.J. et al. (2000), Geophys. Res. Lett., 27(5), 633-636.

[4] Dent, Z. C. et al. (2006), J. Geophys. Res., 111, A03205, doi:10.1029/2005JA011046.

[5] Obana, Y. et al. (2008), J. Geophys. Res., 113, A08203, doi:10.1029/2007JA012917.

[6] Obana, Y. et al. (2011), workshop における講演(「研究業績」欄「(2) 招待講演・研究招聘等」, 1.)

[7] Allan, W. and F. B. Knox (1979a), Planet. Space Sci., 27, 79-85.

[8] Ozeke, L. G. et al. (2009), J. Geophys. Res., 114, A01214, doi:10.1029/2008JA013041.

[9] Pilipenko, V. A., and E. N. Fedorov (1994), in Geophys. Monogr. Ser., vol. 81, pp. 283-292.

[10] Waters, C. L. et al. (1994), J. Geophys. Res., 99, A9, doi:10.1029/94JA00252.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

[1] Obana, Y., C. L. Waters, M. D. Sciffer, F. W. Menk, R. L. Lysak, K. Shiokawa, A. W. Hurst, T. Petersen, Resonance Structure and Mode Transition of Quarter-Wave ULF Pulsations Around the Dawn Terminator, J. Geophys. Res. - Space Physics., 査読有, 2015, doi:10.1002/2015JA021096.

[2] Hori, T., Y. Miyashita, Y. Miyoshi, K. Seki, T. Segawa, Y.-M. Tanaka, K. Keika, M. Shoji, I. Shinohara, K. Shiokawa, Y. Otsuka, S. Abe, A. Yoshikawa, K. Yumoto, Y. Obana, N. Nishitani, A. S. Yukimatu, T. Nagatsuma, M. Kunitake, K. Hosokawa, Y. Ogawa, K. T. Murata, M. Nose, H. Kawano, and T. Sakanoi, CDF data archive and integrated data analysis platform for ERG-related ground data developed by ERG Science Center (ERG-SC), J. Space Sci. Info. Jpn., 査読有, vol. 4, JAXA-RR-14-009 (ISSN 1349-1113), 75-89, 2015.

[3] 尾花由紀 and 井田恭平, 'ニュージールランド地磁気観測網データを用いたプラズマ

圏質量密度季節変動の研究 A study of annual variation in plasmaspheric mass density using data from the New Zealand magnetometer array', 大阪電気通信大学研究論集(自然科学編), 査読有, 第48号, 39-48, 2013. <http://ced.osakac.ac.jp/ced/index.php?> 研究論集(自然科学編)

〔学会発表〕(計20件)

[1] Yuki Obana, Colin L. Waters, Murray D. Sciffer, Gareth Sciffer, Frederick W. Menk, Robert L. Lysak, 'Characteristics of quarter wave standing Alfvén waves observed by the New Zealand magnetometer array (Oral)', Chapman Conference on Low-Frequency Waves in Space Plasmas, 03 Sep 2014, Jeju Isl, Korea.

[2] Yuki Obana, Nozomu Nishitani, Tomoaki Hori, Mariko Teramoto, Masahito Nose, Akimasa Yoshikawa, 'A Study of Ionospheric Pc 4 Plasma Oscillation Observed by the Hokkaido HF Radar and its Comparison with Geomagnetic Pulsation on the Ground (Poster)', Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting, Sapporo, 29 Jul 2014, Sapporo, Royton Sapporo, Japan.

[3] Y. Obana, C. L. Waters, M. D. Sciffer, G. Sciffer, F. W. Menk, and R. L. Lysak, 'Mode Transfer from Quarter-Wave to Half-Wave Modes of Standing Alfvén Waves Around the Dawn Terminator (Poster)', Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting, Sapporo, 29 Jul 2014, Royton Sapporo, Sapporo, Japan.

[4] G. D. Sciffer, C. L. Waters, M. D. Sciffer, Y. Obana, 'Modelling ULF Quarter-wave modes', the 13th Australian Space Science Conference (ASSC), 1 Oct 2013, Sydney, Australia.

[5] Y. Obana, F. W. Menk, C. L. Waters, M. D. Sciffer, A. Yoshikawa, F. Honary, M. B. Moldwin, I. R. Mann, D. Boteler, V. Angelopoulos, and C. T. Russell, 'Characteristics of Quarter-Wave ULF Pulsations around the dawn terminator (Oral)' Asia Oceania Geoscience Society (AOGS) 10th Annual Meeting, 28 June 2013, Brisbane, Australia.

〔その他〕

ホームページ等

CRUX data archive (<http://www1.osakac.ac.jp/crux/>)

STEL 磁力計データのウェブページ
(<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/magne/index.html>)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾花 由紀 (OBANA, Yuki)

大阪電気通信大学・工学部基礎理工学科・
講師

研究者番号：50398096