

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13573

研究課題名(和文) 電離圏短波レーダーによるPc 1帯電離圏MHD波動観測のための手法開発と実証

研究課題名(英文) Development of the new technique for ionospheric high frequency radars enabling measurement with a sub-second time resolution of Pc 1-band hydromagnetic waves in the Earth's ionosphere

研究代表者

堀 智昭 (Hori, Tomoaki)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任准教授

研究者番号：30467344

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：SuperDARNと呼ばれる、短波帯の電波を用いた大型電離圏観測レーダー向けに、0.1秒オーダーの時間分解能で電離圏プラズマの移動速度を計測する新しい計測・データ処理手法を開発し、その手法を用いることで、地球周辺の宇宙空間から電離圏に侵入して電離圏内を伝搬する磁気流体波の時空間特性を観測的に明らかにすることを目指して、本研究は実施された。結果として、特定の条件下であれば0.1~0.5秒の時間分解能でプラズマ速度を導出可能な手法を開発することができた。しかしながら、実際の自然の磁気流体波の波形を観測的に同定するには至らなかった。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at development of a new measurement and raw data processing technique for SuperDARN (the network of the ionospheric radars using high frequency radio waves) to deduce the horizontal velocity of ionospheric plasma with a time resolution of the sub-second order. Utilizing the new technique, we tried to measure perturbation in ionospheric plasma velocity caused by the hydromagnetic waves coming from the near-Earth space to the ionosphere and further propagating horizontally in the ionosphere, leading to better understanding of those waves based on an actual observation. As a result, we have successfully developed a technique to observe time variations of the ionospheric plasma velocity with a time resolution of ~0.5s, and possibly with that of ~0.1s, under some good observation conditions. In spite of the efforts to capture the incoming hydromagnetic waves, however, we did not succeed in observing an actual sample of the expected waves so far.

研究分野：磁気圏物理学、電離圏物理学、太陽地球系物理学

キーワード：電離圏短波レーダー Pc 1地磁気脈動 高時間分解能観測技術

1. 研究開始当初の背景

電磁イオンサイクロロン波(EMIC 波)は、主として比較的地球に近い磁気圏領域(内部磁気圏)の赤道面付近で励起され、磁力線に沿って地球近傍まで伝搬してくることが知られている[Fraser et al., SSR, 1985]。それが地球電離圏のプラズマと相互作用することでMHD 波動にモード変換されたものが、電離圏 F 領域に捕捉され水平方向に伝搬するいわゆるダクト伝搬を起こすことが理論的に予測されている[Fujita and Tamao, JGR, 1988]。

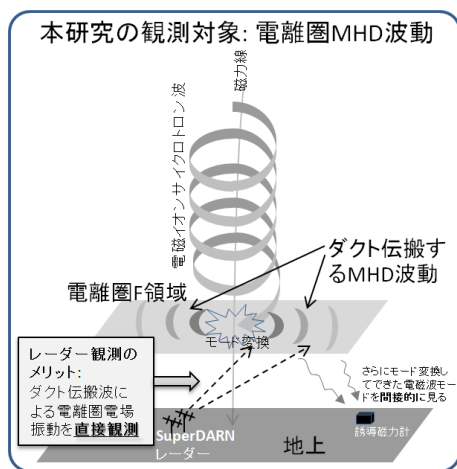


図1: 電離圏 MHD 波動の概要

このダクト伝搬する電離圏 MHD 波動は一部が電磁波モードとなり、地上にある誘導磁力計で 0.2-5 Hz 程度の周波数を持つ Pc 1 地磁気脈動として観測することができる。しかしながら地上 Pc 1 地磁気脈動の観測では伝搬のおおよその方向はわかるものの、大元のモード変換後の電離圏 MHD 波動の詳細な特性についての情報を得ることは難しい。そのため現状では主に数値実験を用いた EMIC 波→MHD 波動へのモード変換やその伝搬特性の研究が先行しており、それを、地磁気観測より空間分解能が良い観測によって検証することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究の具体的な目的は、2006 年より運用中の SuperDARN 北海道-陸別第一短波レーダーと 2014 年度に新たに新設された第二レーダーを用いて、以下のような技術を開発・実証し、

さらにそれを実際の電離圏 MHD 波動観測に応用することである。

① この2基のレーダーから出力される大量の生データを処理して最高時間分解能を含む任意の積分時間での自己相関関数(ACF)を算出、または ACF を経由せずに Doppler 速度を導出するソフトウェアを新規に開発する。両者を比較して最適な手段を見極める。

② 上記ソフトウェアを第一レーダーおよび第二レーダーのデータに適用して誤差やシグナル-ノイズ比を評価し、EMIC 波起源の電離圏 MHD 波動の電場振動を有意レベルで計測できることを実証する。

③ 観測される電場振動の空間分布から電離圏 MHD 波動の偏波特性や伝搬中の減衰特性を調べ、理論・数値計算モデルの検証を行う。ただし、十分な統計精度を得るために通常 3 秒程度の積分時間が必要な SuperDARN レーダー観測において、単一のパルスシーケンス(約 0.1 秒)毎に Doppler 速度を導出する必要があり、この点が大きな挑戦要素となっている。単純にこの時間分解能が原理的に可能であることは過去に示されている[Greenwald et al., GRL, 2008]が、実際の Pc 1 帯の波動観測に応用した例はこれまで無い。そのため、実際の観測を行い計測誤差やシグナル-ノイズ比について詳細に解析し、どの程度の強度の MHD 波動であれば観測として有意な Doppler 速度値が得られるかを慎重に見極める必要がある。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、下記の手法及び手段で研究を進めることとなった。

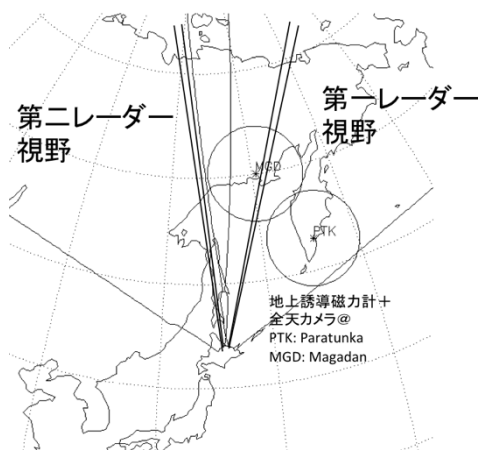
(1) レーダー出力の生データから任意の積分時間で Doppler 速度等を導出するソフトウェアの開発

現行の Doppler 速度等の fitting データ (fitacf データ) では、既に各パルスシーケンスから導出した ACF を 3 秒積分した上で

fitting 処理を行うため、この積分時間を任意に指定して Doppler 速度を導出するためのソフトウェアを新規に開発する。このためには、レーダーが出力する生データ (iqdat データ) を読み込んで処理する必要がある。

(2) 北海道-陸別第一および第二レーダーデータの Doppler 速度導出と誤差・SN 比評価
上記で開発したプログラムを使って、実際に北海道-陸別第一および第二レーダーの iqdat データを処理して Doppler 速度を各パルスシーケンス毎 (約 0.1 秒分解能) に導出する。また導出の際のノイズの影響や有意な Doppler 速度を得るための誤差等を評価する。

(3) レーダーから導出した電離圏電場振動と地磁気データ及び光学観測との比較事例
研究による電離圏 MHD 波動レーダー観測の実



証

図 2: 北海道第一・第二レーダーの視野と地上磁力計・カメラとの位置関係

レーダーから導出した Pc 1 周波数帯の電場振動を、第一レーダーの視野下のロシア・パラツンカ (図 2 の PTK) およびマガダン誘導磁力計 (MGD) で計測された地磁気脈動と比較解析することで、実際にレーダーによって Pc 1 地磁気脈動の元になっている電離圏 MHD 波動の電場振動をとらえていることを実証する。

(4) 電離圏 MHD 波動の理論モデルの検証
観測結果を Fujita and Tamao [JGR, 1988] や Woodroffe et al. [JGR, 2012] などによる MHD 数値計算モデルの結果と比較することで、

これらのモデルの検証を行う。

4. 研究成果

(1) 高時間分解能で SuperDARN レーダーの Doppler 速度を導出する手法開発

従来の約 3 秒積分で各ビームの ACF を算出する方法と比較して、より高い時間分解能で Doppler 速度を導出する手法の開発を行った。当初の見通しにもあった、積分時間を短くして ACF を求める方法と、別案として、ACF を計算せず単一のパルスシーケンス毎に Doppler 速度を導出する方法の 2 つについて具体的な検討を行った。結果として、前者の方法は複数のレンジからレーダー電波のエコーが返る場合に問題となる cross-range interference (CRI) に対して根本的な対策がなく、さらに本研究で求められるレベルにまで積分時間を短くすると、CRI が全く無視できなくなることがわかった。そのため ACF 積分時間を短くする手法を諦め、パルスシーケンスから直接 Doppler 速度を導出する手法を模索した。

その際に参考にしたのが、SuperDARN の流星痕起源エコーを解析するための raw time series (TMS) analysis 手法 [Yukimatu et al., 2002] である。ただし、この手法は近距離エコーのみに使われていたが、それを拡張して数百~1500km 程度のレンジの観測に適用できるようにした。

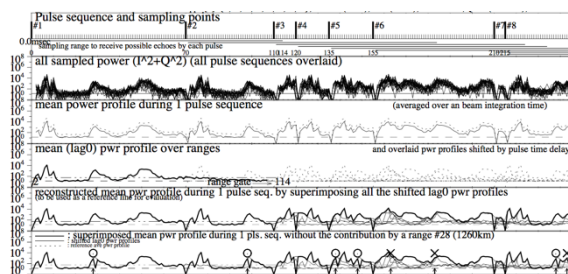


図 3: raw time series analysis 手法の 1 例

TMS 手法を北海道第一レーダーの中距離エコー (レンジ番号#25) に適用した例を図 3 に示す。一番上のパネルが 8 つのパルスで構成されるパルスシーケンスを表しており、2 つ目

のパネルが約3秒間に受信された複数のエコー信号の強度を表している。1つ目のパルス(#1)の2つ目のパルス(#2)の間に受信されるのは確実にパルス#1のエコー信号なので、その受信信号パターンを全パルス分の後に複製してその包絡線を取ることで、CRIの参考信号強度としている(5つ目のパネル)。ある瞬間の受信信号強度が参考強度を超えていたら(1番下のパネルの”○”印)、それを有効な信号と考え、それらを使ってDoppler速度を導出した。この手法により、CRIがゼロではなくても、受信信号がCRIより強い(受信信号 > CRI レベル+20 dB)か、またはCRIがノイズレベルより十分小さい(CRI レベル < ノイズレベル+6 dB)場合で、有効な信号のサンプルが複数得られれば、単一のパルスシーケンスからでもDoppler速度を導出できることがわかった。

(2) 導出されたDoppler速度の評価

上記のようにして同定したそれぞれの有効信号について、信号の位相を求め、その時間変化からDoppler速度を導出した。図4はその1例で、異なる色の点が異なるパルスからの受信信号の位相を表している。レンジ番号28-30において、これらの点の傾きから位相変化を出すと ~ 7 Hzであり、Doppler速度に直すと約97 m/sとなる。また、この例では37.0-38.0秒の1秒間に8回分のDoppler速度が位相変化から求められた(観測のサンプル

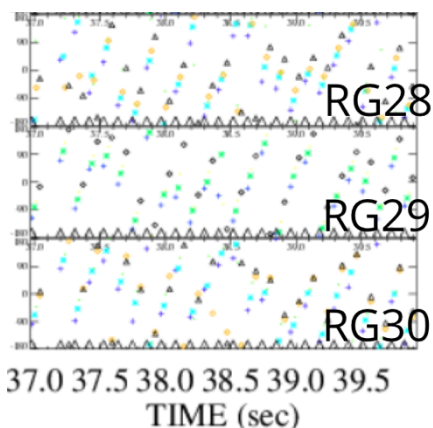


図4: レンジ番号28-30の受信信号の位相変化

リング周波数 ~ 8 Hz)ので、原理的には ~ 4 Hz未満であればDoppler速度の振動を抽出可能である。またこの例では、プロット点の傾きを求める際の誤差は $\pm \sim 1$ Hz程度と見積もられるので、Doppler速度に換算すると14 m/s程度の精度でDoppler速度を決めることができている。つまり、14 m/s以上の振幅かつ4 Hz未満のDoppler速度振動であれば、波動として検出可能ということになる。

(3) 電離圏MHD波動観測への応用

電離圏MHD波動を実際に検出できるかどうかを調べるために、2011年10月5日15:09 UT前後で、ロシア・マガダン(MGD)でPc1帯の地磁気脈動があったことを同定し、その時の比較的近いところから得られた北海道第一レーダーのBeam03の受信エコー(全体像は図5を参照)について、(2)の手法を適用した。実は上記のレンジ番号28-30の位相変化の図が、このイベントに対応する。しかし残念ながら、約8 Hzのサンプリング頻度でDoppler速度を同定できたにも関わらず、速度は90-100 m/sの間でほぼ一定であった。速度の精度が14 m/s程度であるので、精度的にも有意な速度変動は見えない、という結論となった。

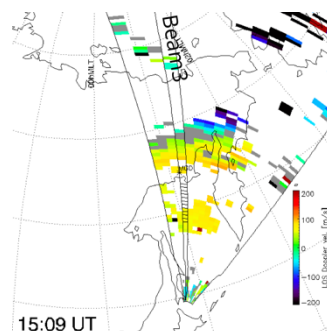


図5: 2011年10月5日15:09 UTの北海道第一レーダーによるDoppler速度観測

そこでサーベイする対象を2011年8月以降のSuperDARN北海道-陸別第一短波レーダーの全IQデータに拡大して、調査を行った。イベント同定・抽出を計算機処理で行うべく

ソフトウェアの開発を行ったが、完成には至らず、計算機で大まかにイベントをサーチした上で、人力での詳細同定を実施した。結果として、Doppler 速度に何かしらの振動が乗っているイベントを新たに 10 例ほど見出すことに成功した。しかしながら、そのうち 7 例については、レーダーから得られた受信波形の信号-ノイズ比が悪く、有意な振動として同定できなかった。残りの 3 例については振動は同定できたものの、地上磁力計の同時観測からは同周波数の振動が同定できず、電離圏 MHD 波動の観測としての確証が得られなかった。

<引用文献>

- ① Fraser, B. J. (1985). Observations of ion cyclotron waves near synchronous orbit and on the ground. *Space Science Reviews*, 42(3-4). <https://doi.org/10.1007/BF00214993>
- ② Fujita, S., & Tamao, T. (1988). Duct propagation of hydromagnetic waves in the upper ionosphere, 1, Electromagnetic field disturbances in high latitudes associated with localized incidence of a shear Alfvén wave. *Journal of Geophysical Research*, 93(A12), 14665. <https://doi.org/10.1029/JA093iA12p14665>
- ③ Greenwald, R. A., Oksavik, K., Barnes, R., Ruohoniemi, J. M., Baker, J., & Talaat, E. R. (2008). First radar measurements of ionospheric electric fields at sub-second temporal resolution. *Geophysical Research Letters*, 35(3), L03111. <https://doi.org/10.1029/2007GL032164>
- ④ Woodroffe, J. R., & Lysak, R. L. (2012). Ultra-low frequency wave coupling in the ionospheric Alfvén resonator: Characteristics and implications for the interpretation of ground magnetic fields. *Journal of Geophysical Research*, 117(A3), A03223. <https://doi.org/10.1029/2011JA017057>
- ⑤ Yukimatu, A. S., & Tsutsumi, M. (2002). A new SuperDARN meteor wind measurement: Raw time series analysis method and its application to mesopause region dynamics. *Geophysical Research Letters*, 29(20),

42-1-42-4.

<https://doi.org/10.1029/2002GL015210>

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)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Hori, T., A. S. Yukimatu, and N. Nishitani, Development of a detection method for Pc1-range ionospheric MHD waves using SuperDARN, 第 7 回極域科学シンポジウム, 極地研究所、東京都立川市, 2016 年
- ② 堀 智昭, SuperDARN-ERG 共同観測の現状, 極域-中緯度 SuperDARN 研究集会, 情報通信研究機構, 東京都小金井市, 2017 年
- ③ 堀 智昭, Evolution of ionospheric convection and ULFs during the 27 March 2017 storm: ERG-SuperDARN campaign, 極域-中緯度 SuperDARN 研究集会, 情報通信研究機構, 東京都小金井市, 2017 年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀 智昭 (HORI, Tomoaki)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任准教授

研究者番号: 30467344

(2) 連携研究者

西谷 望 (NISHITANI, Nozomu)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号: 10218159