

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2011～2015

課題番号：23403011

研究課題名(和文) 地上・衛星同時観測による Pc5 地磁気脈動の励起・伝播特性の解明

研究課題名(英文) Investigation of excitation and propagation mechanism of Pc5 geomagnetic pulsations based on coordinated ground- and space-based observations

研究代表者

長妻 努 (Nagatsuma, Tsutomu)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所宇宙環境インフォマティクス研究室・研究マネージャー

研究者番号：50359014

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,300,000円

研究成果の概要(和文)：極域短波レーダ及び磁力計の地上観測網とNASAの内部磁気圏探査衛星を用いた地上-衛星同時観測により、Pc5地磁気脈動の励起特性に関する研究を行った。その結果、太陽風動圧急増時に太陽風中の速度と磁気圏境界の速度によって形成されるケルビン-ヘルムホルツ不安定性によって励起される圧縮性のPc5地磁気脈動が存在することを明らかにした。また、中規模の地磁気嵐時の回復相においてPc5地磁気脈動強度が増加している様子を捉えた。

研究成果の概要(英文)：We have studied on the generation characteristics of Pc5 geomagnetic pulsations on the basis of coordinated observations among auroral HF radar, ground-based magnetometer network, and NASA's inner magnetospheric explorer. From the results of data analysis using our coordinated observations data, we have found that the existence of global compressional Pc5 geomagnetic pulsations excited by Kelvin-Helmholtz instabilities produced during the sudden increase of the solar wind dynamic pressure. In addition, the enhancement of the Pc5 geomagnetic pulsations during the recovery phase of the geomagnetic storm has been confirmed from our observations.

研究分野：太陽地球系物理学

キーワード：磁気圏・電離圏 地磁気脈動 内部磁気圏 宇宙天気 地上・衛星同時観測 地磁気嵐

1. 研究開始当初の背景

(1) 地磁気脈動は、周期が 0.2 秒から 1000 秒程度の周期的な地磁気の変動である。地磁気脈動は太陽風パラメータの変動、磁気圏界面での不安定性、磁気圏内部のプラズマ分布の変化等が励起源となつて磁気圏内を伝搬し、電離圏や地上磁場の変動をもたらし物理現象であり、地磁気脈動の励起・伝搬特性を理解することは太陽風 - 磁気圏 - 電離圏相互作用及び磁気圏内のプラズマダイナミクスを理解する上で重要である。特に、周波数が 1.7~6.7mHz の地磁気脈動 (Pc5) は、放射線帯粒子の加速機構の有力候補と考えられているため、Pc5 の地磁気脈動の励起・伝搬特性を理解することは放射線帯粒子の加速メカニズムを解明し理解する上でも重要であると同時に、研究代表者の研究グループが取り組んでいる放射線帯粒子変動の予測や地磁気擾乱の予測を行う宇宙天気予報の観点からも重要な課題である。

(2) これまでの研究によって、地上の Pc5 地磁気脈動の波動強度と太陽風速度との間に良い相関関係があることが知られている (例えば、Engbretson et al. [1998])。このことから、Pc5 の励起源として磁気圏フランク領域におけるケルビン - ヘルムホルツ不安定性 (KHI) や粘性の効果による地磁気擾乱が考えられてきた。更に、地上の Pc5 の波動強度変動と静止軌道における放射線帯電子フラックス変動の対応関係が良い (例えば、Rostoker et al. [1998]) ことから、Pc5 に起因する第 3 断熱不変量の破れによる動径拡散・断熱加速が、放射線帯粒子加速の要因の一つという描像が構築されてきた。

(3) その一方で、静止軌道の磁場データと太陽風パラメータの比較解析を行った最近の結果からは、静止軌道における Pc5 の波動強度は、太陽風速度や密度よりも、太陽風の動圧や動圧変動に対して最も高い相関を示すことが明らかになってきた [Kessel, 2008; Takahashi and Ukhorskiy, 2007, 2008]。その結果、静止軌道の Pc5 は、KHI よりも太陽風の動圧変動が主な励起源と考えられるという結論が得られている。

(4) このように、地上観測から得られた Pc5 の特性と静止衛星観測から得られた Pc5 の特性の間には違いが見られるが、その理由はまだ良く分かっていない。これは、従来の研究においては、ほとんどの研究において太陽風との比較解析を地上磁場観測のみ、衛星磁場観測のみとそれぞれ単独で行っていたことに起因する。Pc5 の励起・伝搬特性を理解するためには、両者の特性を矛盾なく (あるいは独立の励起機構として) 説明できる必要がある。

2. 研究の目的

地磁気脈動の励起・伝搬特性を知ることは、太陽風 - 磁気圏 - 電離圏相互作用及び磁気圏内のプラズマダイナミクスを知る上で重

要である。放射線帯粒子の加速機構において重要な役割を果たすと考えられている Pc5 地磁気脈動の特性に対して、地上観測では Pc5 波動強度と太陽風速度の間に良い相関関係がある一方で、人工衛星観測では太陽風動圧変動との間に良い相関関係があり、それぞれ異なる励起機構を示唆する結果が得られている。しかしながら、なぜこのような違いが生じるのかについての統一的な説明はまだなされていない。

本研究では、極東シベリア域の地上観測網と内部磁気圏の人工衛星観測を用いて Pc5 の同時観測を行い、太陽風パラメータ等との比較解析を行うことで Pc5 の励起・伝搬特性を解明することを目的としている。

3. 研究の方法

Pc5 地磁気脈動現象の地上 - 衛星同時観測のために主に次の観測装置のデータを用いる。1) 極東シベリア域及び北極海のプラズマ対流を観測している米国アラスカ州キングサーモン (KSR: 北緯 58.68 度、西経 156.65 度) の短波レーダ (同レーダは国際短波レーダ観測網 SuperDARN に加盟)、2) 極東シベリア域の地磁気変動を観測する地磁気観測ネットワーク [パラツンカ (PTK: 北緯 52.94 度、東経 158.25 度)、マガダン (STC: 北緯 59.97 度、東経 150.86 度)、ティキシー (TIK: 北緯 71.58 度、東経 129.00 度)、ペベック (PBK: 北緯 70.09 度、東経 170.93 度)、ケープシュミット (CST: 北緯 68.93 度、西経 179.45 度)]、3) 2012 年 8 月 30 日に打ち上げられた NASA の 2 機の Van Allen Probes 衛星観測。

これらの観測データを用いて、以下のような手順で研究を進めた。

(1) 地上 - 衛星同時観測による Pc5 地磁気脈動現象の研究のために、SuperDARN 短波レーダに特別観測モード (ST-APOG, CT-TRIG) を導入する。SuperDARN の通常観測では、加盟するすべての短波レーダが 1 分間で 16~20 方向にレーダービームを向けて総引観測を行っている。この方式では、1 分間でグローバルな対流電場の観測が可能となる。一方、ST-APOG モードでは、特定の短波レーダの視野内に Van Allen Probes 衛星の共役点がある場合に、全方向の総引周期を 1 分から 2 分に下げる代わりに、特定の 3 方向についてレーダービームを向ける回数を増やすことで、Pc5 地磁気脈動を高時間分解能で観測することが可能となる。

また、グローバルな Pc5 地磁気脈動現象の研究のために CT-TRIG 特別観測モードを導入する。CT-TRIG では、すべての SuperDARN 短波レーダにおいて ST-APOG と同じレーダービーム総引を行なう。そのための条件は、地磁気嵐の指数である Dst 指数が -50nT 以下に下がり、-30nT 以上に回復するまでの間である。地磁気嵐時には Dst 指数が大きく - の値となり、数日程度で回復することから、上記の条件を導入することで、地磁気嵐時の特別観測

が実現可能となる。

(2) 前述した観測モードを King Salmon 短波レーダで運用し、取得されたデータから、Van Allen Probes 衛星との同時観測、及び地磁気嵐時の Pc5 観測事例を抽出し、データ処理及び事例解析を行なう。

4. 研究成果

本研究では、短波レーダ及び磁力計の地上観測網と Van Allen Probes 衛星を用いた地上 - 衛星同時観測により、Pc5 地磁気脈動の特性に関する研究を行い、以下の成果が得られた。

(1) 短波レーダ特別観測モードを用いた Pc5 地磁気脈動解析技術の開発:

地上 - 衛星同時観測による Pc5 地磁気脈動の研究のために導入した短波レーダ特別観測モードのデータ解析手法を開発した。実施した地上 - 衛星同時観測のイベントの内、Pc5 地磁気脈動が顕著に観測されている数例を選んで、短波レーダ及び地磁気データを用いたイベント解析を行なった。磁場変動と電場変動の間に良い対応関係が見られる例から電離層電気伝導度の推定を行い、他の観測等と整合性のある結果が得られた他、3つのビーム方向の複数のレンジにおける電場変動のパターンに緯度方向、経度方向のドリフトが見られ、経度方向の波数の推定を行うことが出来た(図1)。

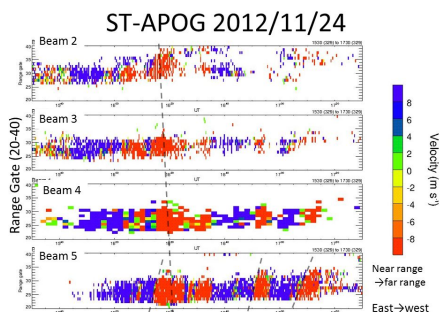


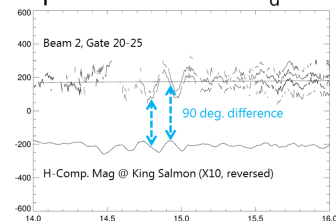
図1 (上)King Salmon 短波レーダのドップラー速度の図。1つのビーム内で赤と青の縞が変動する様子が長周期地磁気脈動に対応している。同一ビーム内でも、遠方ほど位相が遅れること、及びビーム No. が大きくなると位相が遅れる特性が見えており、波数約4の長周期地磁気脈動が西向きに伝播していたと考えると解釈できることが明らかになった。

(2) 人工衛星 - 地上同時観測による太陽風動圧急増時の汎地球的 Pc5 地磁気脈動励起現象の解析:

同時観測例の中から、太陽風動圧が急増後の汎地球的な Pc5 地磁気脈動が励起した例を解析した。太陽風動圧急増後の汎地球的な Pc5 地磁気脈動は、正午付近を除き、In-Phase で振動していることが地磁気観測から明ら

かになった。一方、地上磁場と HF レーダによる電波観測との比較から、地上磁場と電離圏電場の間には 90 度の位相のずれがあり、地上の変動(少なくとも極域)が、電離圏の Hall 電流の変動によるものではないことが示された。また、VAP 衛星との比較により、このグローバルな Pc5 地磁気脈動が K-H 不安定性によって励起された圧縮性の波動に起因することが示唆された(図2)。

Comparison between V_d and B_H



Magnetic field variations on the ground does not produced by ionospheric electric field (current) variations.

ST-APOG
2013/01/06

Pc5 variations are almost **in phase** along the meridian plane.

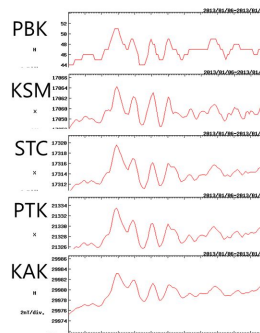
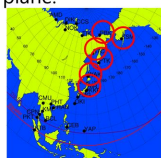


図2 (上)King Salmon 短波レーダビーム No.2 レンジ 20-25 の視線方向電離圏速度変動と同地点の地磁気水平成分変動。位相が 90 度ずれている。(下)日本近傍の地磁気観測ネットワークから得られた Pc5 地磁気脈動変動。同位相で変動している。

(3) 短波レーダ特別観測モードを用いた地磁気嵐時の Pc5 地磁気脈動現象の解析:

SuperDARN では、地磁気嵐発生時に動作する CT-TRIG 特別観測モードを運用している。このモードは、ST-APOG 特別観測モードと同様、3つのキャンピングビームを用いて3方向の高時間分解能観測を実施するところは同じだが、衛星の共役点のレーダーのみならず、全レーダーで観測を実施するところに特徴がある。

2015年に発生した3つの地磁気嵐イベントを用いて、地磁気嵐時の Pc5 変動の解析を行なった。その結果、地磁気嵐の回復相において、Pc5 帯の地磁気脈動が増加している様子を捉えることができた。反面、大きな地磁気嵐時には電離圏の吸収が増加し、ドップラー速度計測に用いることができるエコー数が減少し、地磁気嵐時の Pc5 地磁気脈動観測には中・小規模の地磁気嵐が適していることを見出した。

<引用文献>

- Engebretson, M., K. H. Glassmeier, M. Stelmacher, W. J. Hughes, and H. Luhr (1998), The dependence of high-latitude Pc5 wave power on solar wind velocity and on the phase of solar wind streams, *J. Geophys. Res.*, 103(A11), 26,271-26,283.
- Rostoker, G., S. Skone, and D. N. Baker (1998), On the origin of relativistic electrons in the magnetosphere associated with some geomagnetic storms, *Geophys. Res. Lett.*, 25(19), 3701-3704.
- Kessel, R. L. (2008), Solar wind excitation of Pc5 fluctuations in the magnetosphere and on the ground, *J. Geophys. Res.*, 113, A04202, doi:10.1029/2007JA012255.
- Takahashi K., and A. Y. Ukhorskiy (2007), Solar wind control of Pc5 pulsation power at geosynchronous orbit, *J. Geophys. Res.*, 112, A11205, doi:10.1029/2007JA012483.
- Takahashi K., and A. Y. Ukhorskiy (2008), Timing analysis of the relationship between solar wind parameters and geosynchronous Pc5 amplitude, *J. Geophys. Res.*, 113, A12204, doi:10.1029/2008JA013327.

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13件)

- 長妻 努, CP-TRIGモードによるPc5観測, 極域・中緯度短波レーダー研究会, 2015年9月14日, 名古屋大学(愛知県名古屋市).
- T. Nagatsuma, Pc5 Observations at King Salmon HF radar during CP-TRIG mode period, Super DARN Workshop 2015, 2015/06/02, University of Leicester, Leicester, UK.
- 長妻 努, 坂口歌織, 久保田康文, 国武学, 太陽風動圧急増に伴って励起されたPc5-6波動の観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2014年11月3日, キッセイ文化ホール(長野県松本市).
- T. Nagatsuma, K. Sakaguchi, M. Kunitake, Pc5 Observations by ST-APOG Mode of King Salmon HF Radar, Asia-Oceania Geoscience Society 2014, 2014/07/30, Royton Sapporo, Sapporo, Hokkaido, Japan.
- T. Nagatsuma, K. Sakaguchi, M. Kunitake, Coordinated Observations of Pc5 Geomagnetic Pulsations by King Salmon HF Radar, SuperDARN Workshop 2014, 2014/05/29, UNIS, Longyearbyen, Svalbard
- 長妻 努, 坂口歌織, 国武学, King Salmon 短波レーダーを用いたPc5の観測, STE現象報告会, 2014年3月17日, 九州大学西新プラザ(福岡県福岡市).
- 長妻 努, King Salmon HF レーダーの現状,

中緯度短波レーダー研究会, 2014年1月27日, 名古屋大学太陽地球環境研究所(愛知県名古屋市).

T. Nagatsuma, K. Sakaguchi, Y. Kubota, S. Saito, Y. Miyoshi, K. Seki, Operational Relativistic Electron Flux Forecast at GEO Satellite, The 2nd Asia-Oceania Space Weather Alliance Workshop, 2013/11/05, Dianchi Garden Hotel, Kunming, China.

長妻 努, 坂口歌織, 国武学, Pc5 Observations by King Salmon HF Radar, 第134回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2013年11月2-4日, 高知大学朝倉キャンパス(高知県高知市).

T. Nagatsuma, K. Sakaguchi, M. Kunitake, Pc5 Observations using ST-APOG mode of King Salmon HF radar, SuperDARN 2013 Workshop, 2013/05/30, Moose Jaw, Saskatchewan, Canada.

長妻 努, 坂口歌織, 国武学, Pc5 Observations using ST-APOG mode of King Salmon HF radar, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月22日, 幕張メッセ(千葉県千葉市).

長妻 努, King Salmon レーダーを用いたST-APOGモードによるPc5の観測, 2013年3月4日, 第5回電磁圏物理学シンポジウム, 九州大学西新プラザ(福岡県福岡市).

長妻 努, ST-APOGモードによるPc5の観測-初期結果-, SuperDARNによる極域超高層大気研究集会, 2013年2月15日, 東京都立川市・国立極地研究所(東京都立川市).

6. 研究組織

(1)研究代表者

長妻 努(NAGATSUMA, Tsutomu)
国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所・宇宙環境インフォマティクス研究室・研究マネージャー
研究者番号: 50359014

(2)連携研究者

国武学(KUNITAKE, Manabu)
国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所・宇宙環境インフォマティクス研究室・主任研究員
研究者番号: 30359012

坂口歌織(SAKAGUCHI, Kaori)
国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所・宇宙環境インフォマティクス研究室・研究員
研究者番号: 60598994