

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 5月14日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22840033

研究課題名（和文） FM-CW レーダー電離圏観測システムを用いた電磁波動の伝搬特性解明

研究課題名（英文） Study of electromagnetic wave by FM-CW radar system

研究代表者

池田 昭大（IKEDA AKIHIRO）

九州大学・宙空環境研究センター・講師非常勤研究員

研究者番号：90582833

研究成果の概要（和文）： Pc5 周期帯(150-600 秒)地上磁場変動と同期した電離圏電場変動を FM-CW 電離圏電場観測システムにより捉える事に成功した。低緯度電離圏電場と赤道域地上磁場変動の位相差から、電離圏が LR 回路(コイルと抵抗を含む回路)のような役割を果たし、電離圏電場(電流)が地上磁場 Pc5 を励起している事が明らかになった。さらに、磁気圏内である静止軌道で観測された Pc4 周期帯(45-150 秒)磁場変動の地方時毎の発生頻度を調べると、磁気圏と太陽風のプラズマの速度差で励起される Kelvin-Helmholtz 不安定性及び、磁気圏境界の前面(太陽側)に存在する衝撃波付近で発生する波動が磁気圏内の Pc4 周期帯磁場変動を励起していると考えられる。

研究成果の概要（英文）： By using an FM-CW radar system, we succeeded in detecting Pc5 range (150-600 sec.) ionospheric electric field variation which corresponded with ground magnetic oscillation. From the comparison of low-latitude ionospheric electric field and ground magnetic field variation at an equatorial station, we concluded that the ionosphere performs as a LR circuit when Pc5 range ionospheric electric field penetrates into the lower-latitude ionosphere, and the ionospheric electric field generates ground magnetic field oscillation. We also analyzed magnetic field data obtained at the geosynchronous orbit and examined local time dependence of occurrence of Pc4 range (45-150 sec.) magnetic oscillations. It seems that the Kelvin-Helmholtz instability and the upstream waves generate Pc4 range oscillations inside the magnetosphere.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,060,000	318,000	1,378,000
2011年度	1,030,000	309,000	1,339,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,090,000	627,000	2,717,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：超高層物理学

キーワード：電離圏，短波レーダー，地磁気脈動，電磁波動，電場，磁気圏

1. 研究開始当初の背景

磁気圏内の電磁気現象解明のため，地上磁

場観測のみによる研究が長年行われてきた。しかし、磁場観測のみでは電場情報の欠如から、電磁波動の伝搬方向等の議論ができない。近年では衛星による磁気圏内の磁場・電場観測が進んできたが、電離圏高度は衛星観測が難しく、電離圏等の地球近傍では電場変動が解明されていない。電離圏は国際宇宙ステーションが飛翔する等、人間活動にとって重要な領域となりつつあり、電離圏電場観測を含めた研究が急務である。

申請者は Pi2(周期 40~150 秒の電磁波動)の電離圏電場変動を FM-CW レーダーによって捉える事に成功し [Ikeda et al., 2010], さらに地上磁場変動との比較から、世界で初めて電離圏で観測される Pi2 が定在波構造を持っている事を示した。電磁波動の構造解明に成功した事は、電離圏での電磁波動を議論できるようになったと言え、非常に大きな進歩である。

2. 研究の目的

磁気圏内で発生する電磁波動は Pc5 周期帯 (150-600 秒)の電場変動が磁気圏内の粒子加速に重要な役割を果たしており [Elkington et al., 2003], 宇宙災害の観点から近年注目されている。地上磁場観測では、低緯度域の Pc5 は磁気圏からの磁気圧縮波の伝搬に因るものとされている [Villante et al., 2001]。しかし、地上磁場のみによる解析では、理解が進まず、Pc5 の伝搬特性を解明する事はできない。また、Pc5 が地上磁場を変動させる励起機構も、電離圏電場観測を含めた議論を行わなければ、明らかにならない。このように、電離圏電場の観測・解析を行う事が地球近傍の電磁波環境を研究する上で重要な役割を果たす。

これらの問題に対して、電離圏電場と地上磁場の比較を併せた解析からは、Pc5 の地上磁場変動が(1)電磁波動の電場変化が電離圏電流を励起して地上磁場を変動させているか、または(2)Pc5 電磁波動の磁場変化が直接地上磁場変動に現れているか議論する事ができる。そこで、本研究では Pc5 地上磁場変動の励起機構を明らかにする事を第一の目的とし、さらに地上と電離圏のみならず、磁気圏内を飛翔する衛星の磁場データを解析し、Pc5 等の周期的地磁気現象が何によって励起されているかの解明を第二の目的とする。

3. 研究の方法

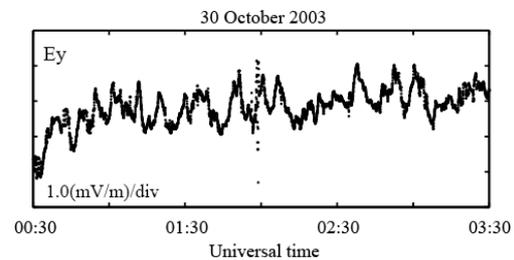
FM-CW レーダーにより得られた電離圏電場データと地上磁場データの比較解析を行い、低緯度での電離圏電場と地上磁場変動の位相差を調べ、Pc5 の地上磁場変動の励起機構を特定する。電磁波動の電場が励起した電離圏電流が地上磁場を変動させている場合、電

離圏電場と地上磁場変動は位相差を持たずに変動する。一方、Pc5 電磁波動の磁場変化が地上磁場に反映されているのであれば、このような特徴は現れない。この場合は位相差から定在波か進行波か特定でき、電磁エネルギーの運搬方向も地上観測のみから分かり、Pc5 の波動構造理解が深まる。

さらに Pc5 等の周期的現象が磁気圏内でのように励起されているかを解明するため、JAXA(航空宇宙研究開発機構)の人工衛星「きく 8 号」が磁気圏内である静止軌道(高度約 36,000km)で観測した磁場データを解析する。

4. 研究成果

Pc5 周期帯(150-600 秒)地上磁場変動と同期した電離圏電場変動を FM-CW 電離圏電場観測システムにより捉える事に成功した。

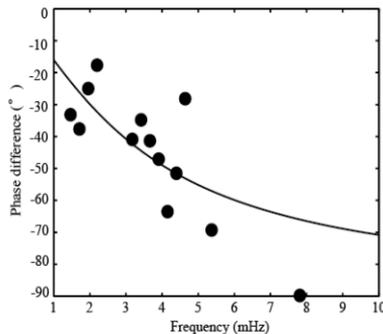


FM-CW レーダーによって観測された Pc5

Pc5 周期帯の地上磁場変動と電離圏電場変動の相関、位相等、比較解析を行った。低緯度で観測される Pc5 周期帯電離圏電場変動を地上磁場変動と比較すると、電離圏電場変動は昼側赤道付近の地上磁場変動と最も高い相関を示す事が分かった。赤道域では電離圏の電気伝導度が高く、地上磁場変動に電離圏電場(電流)の影響が強く反映されるため、Pc5 周期帯の地上磁場変動は電離圏電場(電流)によって励起されているものと結論付けられた。さらに、低緯度電離圏電場と赤道域地上磁場変動には、現象の周期によって位相差が変化する傾向が確認された。現象の周期が短くなるほど、位相差が小さくなり、電離圏が LR 回路(コイルと抵抗を含む回路)のような役割を果たしている事が発見された。この特徴は赤道域の電離圏電気伝導度が高い為に現れると考えられ、地上磁場 Pc5 の励起源が電離圏電場(電流)である事を強く示唆している。これまでの多くの研究の対象領域は、地上及び磁気圏であったが、本研究ではその間をつなぐ領域である電離圏を含めた特性を明らかにでき、地上磁場 Pc5 を励起する要因を特定できた。

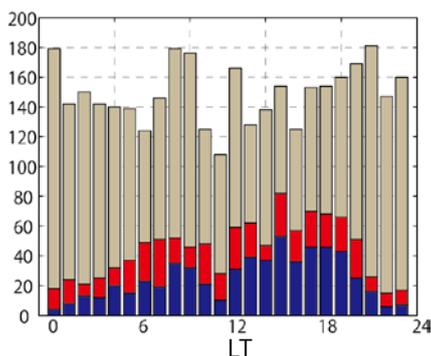
さらに、Pc5 等の周期的現象がどうやって磁気圏内に励起されているのかを明らかにするため、JAXA(航空宇宙研究開発機構)の

人口衛星「きく8号」が静止軌道(高度約36,000km)で観測した磁場変動データを解析した。人工衛星の磁場観測データは周期的現象がトロイダルモード(磁力線の方位角方向の動き)であるか、ポロイダルモード(磁力線が圧縮する動き)であるか区別する事ができ、発生要因が異なると考えられる2つのモードをそれぞれ分けて議論する事ができる。また、静止軌道では Pc5 より周波数の高い Pc4(周期 45-150 秒)がよく観測される為、Pc4 を研究の対象とした。



低緯度電離圏電場と赤道域地上磁場変動の位相差(観測値)。曲線は LR 回路における位相差(理論値)。

結果、トロイダルモードは夕方時間帯でよく発生し、ポロイダルモードは昼側でよく発生する事が明らかになった。この事から、トロイダルモードは磁気圏と太陽風のプラズマの速度差で励起される Kelvin-Helmholtz 不安定性 [Hughes, 1994] が発生要因、ポロイダルモードは磁気圏境界の前面(太陽側)に存在する衝撃波付近で発生する波動 [Yumoto et al., 1986 等] が励起源と考えられる。



地方時毎の Pc4 発生回数。赤色はポロイダルモード、青色はトロイダルモード、他は Pc4 が特定されなかった。

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 7 件)

- ① Y. Yamazaki, K. Yumoto, D. McNamara, T. Hirooka, T. Uozumi, K. Kitamura, S. Abe, and A. Ikeda, Ionospheric current system during sudden stratospheric warming events, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 2011, doi:10.1029/2011JA017453
- ② Takla, E. M, K. Yumoto, J. Y. Liu, Y. Kakinami, T. Uozumi, S. Abe and A. Ikeda, Anomalous Geomagnetic Variations Possibly Linked with the Taiwan Earthquake (Mw = 6.4) on 19 December 2009, 査読有, 2011, *International Journal of Geophysics Volume* 2011, doi:10.1155/2011/848467
- ③ Uozumi, T., K. Yumoto, T. Tokunaga, S. I. Solovyev, B. M. Shevtsov, R. Marshall, K. Liou, S. Ohtani, S. Abe, A. Ikeda, K. Kitamura, A. Yoshikawa, H. Kawano, and M. Itonaga, AKR modulation and Global Pi 2 oscillation, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 2011, doi:10.1029/2010JA016042
- ④ Pilipenko, V., E. Fedorov, K. Yumoto, A. Ikeda, and T. R. Sun, An analytical model for Doppler frequency variations of ionospheric HF sounding caused by SSC, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 2010, doi:10.1029/2010JA015403
- ⑤ Shinohara M., A. Ikeda, K. Nozaki, A. Yoshikawa, V. V. Bychkov, and B. M. Shevtsov, and K. Yumoto, DP2 TYPE ELECTRIC FIELD FLUCTUATIONS OBSERVED BY FM-CW HF RADAR NETWORK, SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS AND PHYSICS OF EARTHQUAKES PRECURSORS, SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS AND PHYSICS OF EARTHQUAKES PRECURSORS, V INTERNATIONAL CONFERENCE, COLLECTION OF THE REPORTS, 査読無, 2010, 222-225
- ⑥ Ikeda A., K. Yumoto, M. Shinohara, K. Nozaki, A. Yoshikawa, V. V. Bychkov, and B. M. Shevtsov, IONOSPHERIC ELECTRIC AND GROUND MAGNETIC PC5 VARIATIONS AT LOW-LATITUDE STATIONS,

SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS AND PHYSICS OF EARTHQUAKES PRECURSORS, V INTERNATIONAL CONFERENCE, COLLECTION OF THE REPORTS, 査読無, 2010, 118-121

- ⑦ Ikeda A., A. Yoshikawa, M. G. Cardinal, K. Yumoto, M. Shinohara, K. Nozaki, B. M. Shevtsov, V. V. Bychkov, Q. M. Sugon, and D. McNamara, Ionospheric observation using FM-CW radar array, *Advances in Geosciences*, 査読あり, 2010, Vol.21, 379-391

[学会発表] (計 27 件)

- ① Ikeda A., K. Yumoto, K. Koga, T. Obara, D. Baishev, B. M. Shevtsov, T. Uozumi, S. Abe, A. Shishime, Ground-satellite observation of Pc4 pulsations by MAGDAS and ETS-VIII geosynchronous orbit satellite (ポスター), 2011 AGU Fall Meeting, 平成 23 年 12 月 9 日, San Francisco, USA
- ② Pilipenko V. A., E. N. Fedorov, K. Yumoto, and A. Ikeda, Analytical Model for HF Doppler Ionospheric Response to MHD waves (ポスター), IUGG 2011, 平成 23 年 7 月 4 日, Melbourne, Australia
- ③ Ikeda A., Y. Fujita, K. Yumoto, Y. Yamazaki, S. Abe, T. Uozumi, and MAGDAS Group, Lunar Tide Effects in the Equatorial Electrojet Observed by MAGDAS/CPMN (ポスター), IUGG 2011, 平成 23 年 7 月 4 日, Melbourne, Australia
- ④ Ikeda A., K. Yumoto, Y. Kakinami, M. Shinohara, K. Nozaki, T. Nagatsuma, A. Yoshikawa, B. M. Shevtsov, V. V. Bychkov, Q. M. Sugon, Jr, D. McNamara, Long period Ionospheric Electric and Magnetic Field Variations Observed by FM-CW Radar and MAGDAS (ポスター), IUGG 2011, 平成 23 年 7 月 4 日, Melbourne, Australia
- ⑤ 長谷川純一, 湯元清文, 池田昭大, 八坂哲夫, 鶴田佳宏, 横田和毅, QSAT-EOS 搭載の地球磁場観測用磁力計に関する残留磁気測定実験 (ポスター), 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 平成 23 年 5 月 26 日, 千葉県千葉市
- ⑥ 岡田里衣子, 湯元清文, 山崎洋介, 阿部修司, 池田昭大, 魚住禎司, MAGDAS/CPMN グループ, MAGDAS データから求めた Sq 等価電流系の可視化 (ポスター), 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 平成 23 年 5 月 26 日, 千葉県千葉市
- ⑦ 藤田悠, 湯元清文, 山崎洋介, 池田昭大, 阿部修司, 魚住禎司, MAGDAS/CPMN グループ, MAGDAS/CPMN で観測した赤道ジェット電流中の月潮汐効果 (ポスター), 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 平成 23 年 5 月 26 日, 千葉県千葉市
- ⑧ 魚住禎司, 湯元清文, 古賀清一, 小原隆博, B. M. シェフトソフ, S. I. ソロブエフ, 池田昭大, 阿部修司, 吉川顕正, 河野英昭, 地上-静止軌道で同時観測されたサブストーム・カレントウエッジに伴う Pi 2 地磁気脈動 (ポスター), 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 平成 23 年 5 月 26 日, 千葉県千葉市
- ⑨ 新堀淳樹, 辻裕司, 菊池崇, 荒木徹, 池田昭大, 魚住禎司, S. I. Solovyev, B. M. Shevtsov, R. E. S. Otadov, 歌田久司, 長妻努, 湯元清文, 高緯度から磁気赤道域における磁気急始(SC) の磁場振幅の季節依存性について (口頭), 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 平成 23 年 5 月 26 日, 千葉県千葉市
- ⑩ 池田昭大, 湯元清文, 柿並義宏, 篠原学, 野崎憲朗, 長妻努, 吉川顕正, B. M. Shevtsov, V. V. Bychkov, Q. M. Sugon, Jr., D. McNamara, FM-CW レーダーと MAGDAS によって観測された長周期の磁場・電場変動 (ポスター), 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 平成 23 年 5 月 26 日, 千葉県千葉市
- ⑪ K Yumoto, Y Yamazaki, A Rabiou, A Mahrous, A Meloni, P Baki, N Makundi, T Afullo, L A McKinnell, K Badi, H Mweene, A Macamo, S Abe, A Ikeda, A Fujimoto, T Tokunaga, Y Fujita, K Matsuyama, Ionospheric Current System over the African Region and East Asian Region as Observed by MAGDAS Stations (口頭, 招待講演), 2010 AGU Fall Meeting, 平成 22 年 12 月 16 日, San Francisco, USA
- ⑫ G Maeda, K Yumoto, Y Kakinami, T Tokunaga, A Fujimoto, A Ikeda, Y Yamazaki, S Abe, M Sakai, N Eto, M

- Shinohara, Title of Team: MAGDAS Project Team, Current Status of MAGDAS Deployment in Africa (ポスター), 2010 AGU Fall Meeting, 平成 22 年 12 月 16 日, San Francisco, USA
- ⑬ A Shinbori, Y Tsuji, T Kikuchi, T Araki, A Ikeda, T Uozumi, S I Solovyev, B Shevtsov, R S Otadoy, H Utada, T Nagatsuma, H Hayashi, T Tsuda, K Yumoto, Title of Team: IUGONET project team, Seasonal dependence of magnetic field variations from subauroral latitude to the magnetic equator during geomagnetic sudden commencements (ポスター), 2010 AGU Fall Meeting, 平成 22 年 12 月 16 日, San Francisco, USA
- ⑭ Ikeda, A., K Yumoto, T Uozumi, S Abe, M Shinohara, K Nozaki, A Yoshikawa, V Bychkov, B Shevtsov, Q Sugon, and D McNamara, Night-side DP-2 type fluctuations observed by the FM-CW Radar and MAGDAS stations (ポスター), 2010 AGU Fall Meeting, 平成 22 年 12 月 13 日, San Francisco, USA
- ⑮ 新堀 淳樹, 辻 裕司, 菊池 崇, 荒木 徹, 池田 昭大, 魚住 禎司, Otadoy Roland E. S., 歌田 久司, Shevtsov Boris M., Solovyev Stepan I., 長妻 努, 湯元 清文, サブオーロラ帯から磁気赤道域における磁気急始 (SC) の磁場振幅の季節依存性について (口頭), 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 127 回総会, 平成 22 年 11 月 3 日, 沖縄県那覇市
- ⑯ 坂井 美菜, 魚住 禎司, 徳永 旭将, 河野 英昭, 吉川 顕正, 池田 昭大, 阿部 修司, 湯元 清文, MAGDAS/CPMN グループ, New Pi 2 Index Based on MAGDAS/CPMN Network Data (ポスター), 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 127 回総会, 平成 22 年 11 月 2 日, 沖縄県那覇市
- ⑰ 藤田 悠, 湯元 清文, 魚住 禎司, 阿部 修司, 池田 昭大, MAGDAS/CPMN グループ, MAGDAS 磁気赤道上観測点で観測される Counter Electrojet の発生特性について (ポスター), 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 127 回総会, 平成 22 年 11 月 2 日, 沖縄県那覇市
- ⑱ 衛藤 菜穂, 湯元 清文, 古賀 清一, 小原 隆博, 池田 昭大, 阿部 修司, 魚住 禎司, MAGDAS/CPMN グループ, Characteristics of Magnetic Field Variations Observed by ETS-VIII during Magnetospheric Substorms (ポスター), 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 127 回総会, 平成 22 年 11 月 2 日, 沖縄県那覇市
- ⑲ 池田 昭大, 湯元 清文, 魚住 禎司, 阿部 修司, 篠原 学, 野崎 憲朗, 吉川 顕正, Characteristics of the night-side DP-2 type fluctuations observed by MAGDAS/CPMN (ポスター), 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 127 回総会, 平成 22 年 11 月 2 日, 沖縄県那覇市
- ⑳ Cardinal Maria Gracita, 湯元 清文, 魚住 禎司, 阿部 修司, 池田 昭大, 坂野井 健, 塩川 和夫, Marshall Richard, McNamara Daniel, and Yatini Clara, Pc3-4 geomagnetic pulsations observed at equatorial MAGDAS/CPMN stations (口頭), 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 127 回総会, 平成 22 年 10 月 31 日, 沖縄県那覇市
- ㉑ Shinohara M., A. Ikeda, K. Nozaki, A. Yoshikawa, V. V. Bychkov, and B. M. Shevtsov, and K. Yumoto, DP2 TYPE ELECTRIC FIELD FLUCTUATIONS OBSERVED BY FM-CW HF RADAR NETWORK (口頭), IONOSPHERIC ELECTRIC AND GROUND MAGNETIC PC5 VARIATIONS AT LOW-LATITUDE STATIONS, SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS AND PHYSICS OF EARTHQUAKES PRECURSORS V INTERNATIONAL CONFERENCE, 平成 22 年 8 月 5 日, Kamchatka region, Russia
- ㉒ Ikeda A., K. Yumoto, M. Shinohara, K. Nozaki, A. Yoshikawa, V. V. Bychkov, and B. M. Shevtsov, IONOSPHERIC ELECTRIC AND GROUND MAGNETIC PC5 VARIATIONS AT LOW-LATITUDE STATIONS (口頭), IONOSPHERIC ELECTRIC AND GROUND MAGNETIC PC5 VARIATIONS AT LOW-LATITUDE STATIONS, SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS AND PHYSICS OF EARTHQUAKES PRECURSORS V INTERNATIONAL CONFERENCE, 平成 22 年 8 月 5 日, Kamchatka region, Russia

- ②③ Ikeda, A., K. Yumoto, M. Shinohara, K. Nozaki, T. Nagatsuma, A. Yoshikawa, T. Shimbaru, A. Fujimoto, B.M. Shevtsov, V. V. Bychkov, Q. M. Sugon, Jr., and D. McNamara, A comparison of low-latitude Pc 5 pulsations observed by FM-CW ionospheric radar and MAGDAS/CPMN magnetometers (口頭, 招待講演), 2010 International Space Plasma Symposium, 平成 22 年 6 月 30 日, Tainan, Taiwan
- ②④ Ikeda, A., K. Yumoto, M. Shinohara, K. Nozaki, T. Nagatsuma, A. Yoshikawa, T. Shimbaru, A. Fujimoto, B.M. Shevtsov, V. V. Bychkov, Q. M. Sugon, Jr., and D. McNamara, SC and Pc 5 associated Ionospheric Electric and Ground Magnetic Field Variations at Low-latitude MAGDAS Station (口頭, 招待講演), 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 平成 22 年 6 月 25 日, Taipei, Taiwan
- ②⑤ Ikeda, A., K. Imamura, K. Yumoto, M. Shinohara, Q. M. Sugon, Jr., and D. McNamara, Characteristics of the night-side DP-2 type fluctuations, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting (ポスター), 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 平成 22 年 6 月 24 日, Taipei, Taiwan
- ②⑥ 新堀 淳樹, 西村 幸敏, 辻 裕司, 菊池 崇, 荒木 徹, 池田 昭大, 魚住 禎司, Roland Emerito S. Otadoy, 歌田久司, Jose Ishitsuka, Nalin Babulal Trivedi, Severino L. G. Dutra, Nelson Jorge Schuch, 長妻 努, 亙 慎一, 湯元 清文, ブラジル磁気異常帯における磁気急始(SC)時の初期インパルスの異常な出現特性について (口頭, 招待講演), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 平成 22 年 5 月 24 日, 千葉県千葉市
- ②⑦ 池田 昭大, 湯元 清文, 篠原 学, 野崎憲朗, 吉川 顕正, 新原 俊樹, 藤本 晶子, B. M. Shevtsov, V. V. Bychkov, Q. M. Sugon, Jr., D. McNamara, 低緯度・赤道 MAGDAS 観測点での Pc5 周期帯電場・磁場変動 (口頭), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 平成 22 年 5 月 24 日, 千葉県千葉市

[その他]

ホームページ等

<http://news.sci.kyushu-u.ac.jp/jokrozfl>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 昭大 (IKEDA AKIHIRO)

九州大学・宙空環境研究センター・講師非常勤研究員

研究者番号 : 90582833