

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400477

研究課題名(和文) 極域におけるVLF帯送信電波を用いた下部電離層擾乱に関する研究

研究課題名(英文) Monitoring lower ionospheric perturbations using VLF/LF transmitter signals in polar regions

研究代表者

芳原 容英 (Hobara, Yasuhide)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：10303009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：南極においてVLF/LF帯送信電波の磁界振幅データの解析から世界の様々な経度における下部電離層状態の調査を実施した。具体的には、電磁干渉の極めて少ない南極西オングル島における短期の磁界観測データから、7つの送信電波局の同定に成功した。また、南極特有の気象条件に配慮した水平磁界観測装置、観測ソフトを開発し、南極昭和基地に同システムを設置した。昭和基地では、電磁干渉が大変大きかったが、2年間に渡る観測期間中に、2つの送信局の同定、日変化の導出に成功した。今後も、観測期間中に発生した雷活動や宇宙天気に関するパラメータ、高エネルギー天体现象等の下部電離層に与える影響を調査し、学術研究成果の発表を行う。

研究成果の概要(英文)：We investigated the lower ionospheric properties based on the magnetic amplitude from the world wide VLF/LF transmitters in Antarctica. Seven transmitter stations were identified from short-term observations on West Ongul Island, which has little electromagnetic interference. During this project, we developed the VLF/LF observation system consisting of orthogonal cross loop, pre- and main amplifiers, A/D signal processing unit, recording unit and observation software. The developed observation system was installed in Syowa base, Antarctica after test observations in Japan. In Syowa base, we successfully identified the two stations and derived the diurnal pattern of the magnetic amplitude during continuous observation over two years despite strong electromagnetic interference. In the future, we will continue analyzing our precious long-term data and study the lower ionospheric response from parameters related to global lightning activity, space weather.

研究分野：プラズマ理工学，大気電気学，地震電磁気学

キーワード：VLF帯送信電波 下部電離層擾乱 昭和基地 極域 粒子降下 雷活動 ガンマ線フレア 波動・粒子相互作用

1. 研究開始当初の背景

電離層の最下部 (D/E 層) は太陽活動だけでなく磁気圏からの粒子の降下、下部からの直接加熱 (雷放電関連現象など) や天文学的事象からの影響に対しても極めて敏感である。また、この下部電離層の擾乱の観測には VLF/LF 帯送信局電波の受信がほぼ唯一の観測手段となっている。電気通信大のグループでは過去 15 年以上にわたり国内複数点 (現在 7 観測点) にて VLF/LF 帯送信局電波の受信ネットワークにより国内外の VLF/LF 帯送信電波局の振幅および位相の連続観測を行っており、雷放電や地殻変動、太陽フレアや天文学的現象に伴う下部電離層擾乱に関して多数の新たな知見を見出してきた。しかしながら、中緯度に位置する日本国内での受信においては、国内周辺の電離層擾乱の同定には大変優れているものの、世界中の電離層擾乱の同時監視には困難が伴う。何故なら、世界各地からの VLF/LF 帯送信電波局から国内受信点への伝搬パスは一般的に東西、南北方向の組み合わせであるため、パスごとの伝搬方向 (西向きか東向き) や同パス上の昼夜の伝搬特性の差異が著しいためである。そこで、本研究では南極昭和基地における VLF/LF 帯送信局電波観測を提案する。南極での観測の最も大きな利点は、世界の様々な地域からの VLF/LF 帯送信局電波は、ほぼすべて南北方向の伝搬特性をもつため、世界の様々な経度、即ちさまざまな現地時間における電離層擾乱の同時観測が可能なことである。

2. 研究の目的

本研究では南極昭和基地における世界 VLF 送信電波受信のため、南極特有の気象条件や電磁環境、観測データサイズ、電力等の制約に十分配慮した電磁界観測システム、観測ソフトを開発し、国内にて実証実験を行ったのち、南極にて観測を行う。本観測により全世界の下部電離層擾乱の時空間特性を導出し、粒子降下や磁気圏電磁波動、世界雷活動の電離圏や磁気圏への結合過程、さらに、高エネルギー天体現象等に関連する電離層擾乱の事例及び統計的研究を行いこれらの物理機構の解明や、宇宙天気予報への貢献を目指す。

3. 研究の方法

本研究の方法として、以下の 4 つのステップを踏んでいる。まず、南極昭和基地に設置する (1) VLF/LF 帯送信局電波受信システム (ハードウェア、およびソフトウェア) を開発する。次に、(2) 受信システムの国内実証試験を実施し、周波数特性、感度など、観測システムの各種調整を行う。その後、(3) 昭和基地に VLF/LF 帯電界受信機器を設置し、連続観測を開始する。観測開始後は、定期的に稼働状況を監視し、観測データは越

冬隊員の帰国時に持ち帰られる。その後、(4) 取得データの解析を実施する。

4. 研究成果

(1) VLF/LF 帯送信局電波受信システムの開発

① ハードウェア開発

本研究では、複数の VLF/LF 帯送信電波局からの電波の振幅と位相の高精度同時連続観測を行えるようなシステムを構築した。現地の接地状況の悪さを予想して、電界観測は行わず、磁界観測のみとした。観測システムは、磁界ループアンテナ (クロスド・ループアンテナ)、磁界用増幅器 (メインおよびプリアンプ) 及びデータ収録装置から構成された。昭和基地に設置した観測システムの仕様として、磁界ループアンテナ、増幅器等が屋外に設置されるため、南極における、外気温 (最低気温 -40°C) や風速 (50 m/s) 程度に耐えられる構造のものを開発した。図 1 に、本研究において開発された、VLF/LF 帯送信電波連続受信システムの概要を示す。

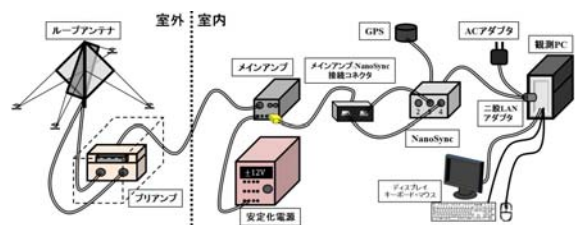


図 1 : 観測システムの概要

② ソフトウェア開発

電通大により国内で運用中の各 VLF/LF 帯送信電波観測点における観測ソフトウェアでは、最大 6 送信局からの電波を同時観測することが可能であり、各送信局からの電波の電界強度 (振幅) と位相変化を連続記録している。サンプリング間隔は最小で 20 ms (50 Hz) である。本研究においても、国内にて実績のある同ソフトウェアを導入し、追加機能として、シノプティックな波形観測機能を開発した。また、本ソフトウェアは周波数スペクトルの表示機能も備えている (振幅、位相の連続観測との同時観測は不可)。

(2) 受信システムの国内実証試験

昭和基地への観測機材設置の前に、越冬隊員による現地での設置のための訓練、システム動作の確認および調整のため、H26 年 9 月電通大菅平宇宙電波観測所にて、国内実証試験を実施した。観測所の敷地内に、磁界ループアンテナを展開、1 昼夜連続観測を実施した結果、国内外の VLF/LF 帯送信電波が正常に受信され、かつデータも正常に記録されていることが確認された。図 2 に菅平での実証試験の様子を示す。



図2：菅平宇宙電波観測所での実証試験

(3) 昭和基地におけるVLF/LF帯電界受信機器設置

H27年1月に、昭和基地に配属された隊員の方々の協力により観測システムの設置が完了した。図3に、昭和基地敷地内に設置された磁界観測用クロスドループアンテナを示す。また、プリアンプはアンテナ直下設置されたRV-BOXに収納された。図4に、昭和基地の情報処理棟内に設置された、メインアンプ（左下）、およびA/D変換システム（左上）を示す。なお、情報処理棟と、アンテナ設置場所の間の距離は、100 m程度である。

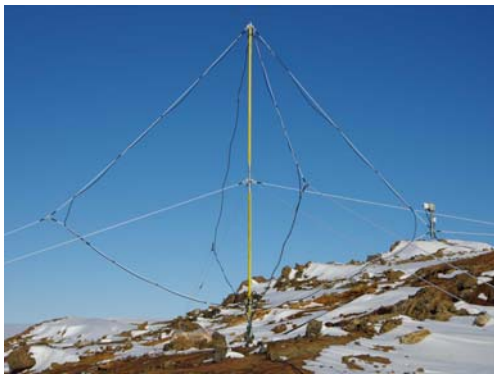


図3：昭和基地に設置されたVLF受信用クロスドループアンテナ

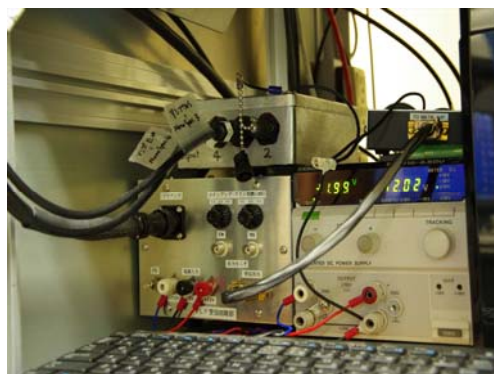


図4：情報処理棟内のメインアンプ、AD変換ユニット

(4) 取得データの解析

① 西オングル島におけるデータ解析

極地研究所では、昭和基地よりも電磁干渉の少ない西オングル島にて、広帯域VLF帯磁場観測（周波数スペクトル）を実施している。西オングル島では、電力事情とデータ転送の制約から、本研究にて必要な連続観測は実施できないが、本研究による昭和基地へのVLF帯送信電波受信システム設置前に、西オングル島にて、短期間にわたり磁場波形のシノプティック観測データ（間欠データ）を取得し、データ解析を実施した。本データ解析の目的は、より電磁干渉が少なく、かつ昭和基地に距離が近い環境にて、VLF/LF帯送信局からの電波を受信し、昭和基地でも受信可能な送信局の同定を行うことである。本解析では2008年、および2014年に取得されたデータを用いた。図5に、取得された周波数スペクトルの一例を示す。全体的に、極めて電磁干渉が低く、周波数20 kHz前後に多くのピークがあるが、これらは主に世界中のVLF送信局からの電波である。

図6に2008年6月18日に観測された21.68 kHzの磁界振幅（1成分のみ解析可能）の日変化を示す。この周波数を使用する送信局（NPM）があるアメリカ・ハワイの日の出は15時50分、日没は5時15分であった。この時刻は図中に示したTerminator Timeと良い一致を示しており、この時刻を境として昼と夜の特徴的な振幅変化が見られる。よって、21.68 kHzのスペクトルはNPM（アメリカ合衆国ハワイ）送信電波であると同定した。25 kHz以下の周波数帯について同様に解析を実施した結果、表1に示す送信局を同定した。

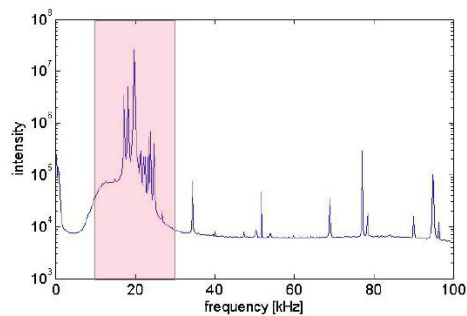


図5：西オングル島にて取得された、VLF/LF帯磁場の周波数スペクトル

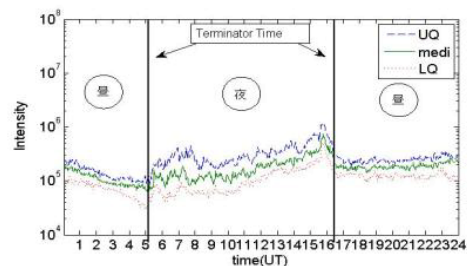


図6：2008年6月18日と前後18日間の日変

化の中央値と四分位数 (21.68 kHz)

送信局	周波数 [kHz]	送信局	周波数 [kHz]
VTX3	18.2	DHO38	23.4
NWC	19.8	NAA	24.0
NPM	21.4		

表 1 : 2008年のデータから同定されたVLF送信局

さらに、2014年には直交する水平磁場2成分より、電磁波の到来方位および観測周波数から送信局を同定した。2008年および2014年のデータ解析から同定された7つの送信局の位置を世界地図に示す(図7)。図7より、南極においては世界3大雷領域を含む様々な経度方向からの伝搬パスからの送信電波が観測可能であることが示された。

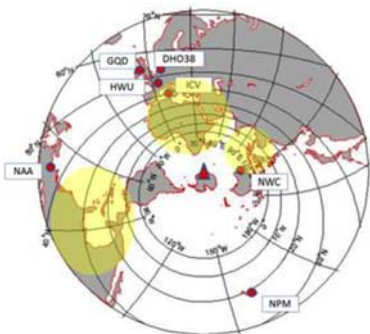


図 7 : 南極 (西オングル島) にて受信された送信局の位置

② 昭和基地におけるデータの解析

本研究において開発された観測システム (H27年1月に昭和基地敷地内に設置) による、設置直後の周波数スペクトルの例を図8に示す(2つのパネルのうち上段が周波数スペクトルである)。西オングル島における周波数スペクトルと比較して、送信電波からのスペクトルが多く見られず2つの水平磁界の両成分とも電磁干渉が大変大きいことがわかる。

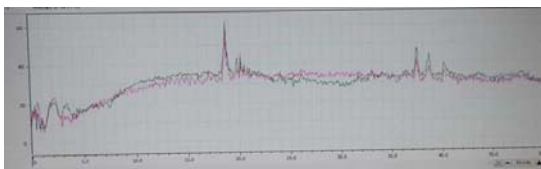


図 8 : 昭和基地に設置された、VLF/LF帯受信システムにより観測された、水平磁界の周波数スペクトル (設置直後)

その後観測を継続しつつ、電磁干渉原因の解明および軽減措置を試みたが、抜本的な電磁干渉軽減には至らず現在に至っている。具体的には、屋外のアンテナ、プリアンプ等への結線状態の確認も行っ

たが異常は見つからなかったため、観測システム(筐体含め)、電源に接地を施したが、状況は改善しなかった。原因として、現地での接地端子(海中アース)は現実には接地されていなかったことが判明するとともに、現在海中アース自体はないため、良好な接地は困難であるということも分かった。

上記に述べられたように、背景に強い電磁干渉が存在しているにもかかわらず、の2つの送信局からの電波の受信に成功した。

図9および図10に、昭和基地でのVLF/LF帯送信電波観測により同定された、NWC(オーストラリア)局、HWU(フランス)の振幅の日変化を示す。それぞれの図について、上段は生データ、下段は2分平均値を示す。いずれの送信局に関しても、振幅に関して明確な日変化パターンが見られ、地方時の夜間に振幅が大きく、かつ変動が激しく、昼間に減少することが分かる。特に、HWUと昭和基地間の伝搬路については、世界で最も強力な雷の発生領域の一つである、アフリカ上空を横断する。

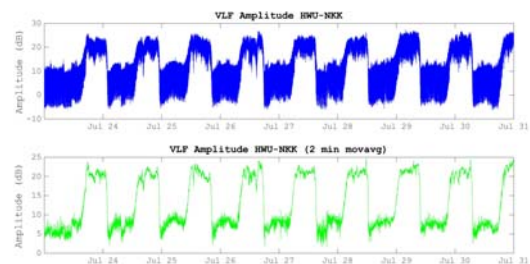


図 9 : 昭和基地にて受信されたNWC送信局からの磁界振幅の日変化例 (上段: 生サンプリングデータ、下段: 2分平均値)

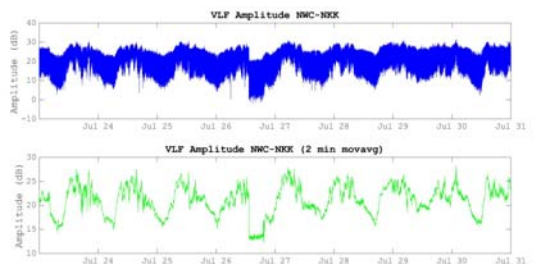


図 10 : 昭和基地にて受信されたHWU送信局からの磁界振幅の日変化例 (上段: 生サンプリングデータ、下段: 2分平均値)

今後、2年間の取得データのより詳細な解析を実施していく予定であるが、特にHWU局からの電離層擾乱データについては、アフリカ大陸の雷活動の影響との対応を調査する。また、それぞれ経度の異なるHWU、NWC局の振幅データについて、観測期間中に発生した、太陽フレア、磁

気嵐等の宇宙天気に関するパラメータの影響や、高エネルギー天体现象等の下部電離層に与える影響を調査し、引き続き学術研究成果として、査読つき学術論文や国内外の学会等にて発表を行っていく予定である。また、南極昭和基地における、接地環境の改善等についても、今後の観測再開に向けて議論を進めていく予定である。

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 8 件)

1. H.Santosa and Y. Hobara, One day prediction of nighttime VLF amplitudes using nonlinear autoregression and neural network modeling, Radio Science, 査読有, Vol. 52, pp.132-145, DOI: 10.1002/2016RS006022, 2017
2. S. Pal and Y. Hobara, Mid-latitude atmosphere and ionosphere connection as revealed by Very Low Frequency signals, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 査読有, Vol. 138-139, pp.227-232, DOI:10.1016/j.jastp.2015.12.008, 2016
3. K. Tatsuta, Y. Hobara, S. Pal, and M. Balikhin, Sub-ionospheric VLF signal anomaly due to geomagnetic storms:a statistical study, Ann. Geophys., 査読有, 33, pp.1457-1467, DOI:10.5194/angeo-33-1457-2015, 2015
4. I. Popova, A. Rozhnoi, M. Solovieva, B. Levin, M. Hayakawa, Y.Hobara, P. F.Biagi, K. Schwingenschuh, Neural network approach to the prediction of seismic events based on low-frequency signal monitoring of the Kuril-Kamchatka and Japanese regions, Ann. Geophys., 査読有, Vol.56, No.3, DOI:10.4401/ag-6224, 2013
5. T. Endo, Y. Kasahara, Y.Hobara, T. Sue, and M. Hayakawa, A note on the correlation of seismo-ionospheric perturbations with ground motions as deduced from F-net seismic observations, J. Atmos. Electr., 査読有, Vol.33, pp. 69-76, DOI: /10.1541/jae.33.69, 2013
6. T. Nakamura, V. Korepanov, Y. Kasahara, Y.Hobara, and M. Hayakawa, An evidence on the lithosphere-ionosphere coupling in terms of atmospheric gravity waves on the basis of a combined analysis of surface pressure, ionospheric perturbations and ground-based ULF variations, J. Atmos.

Electr., 査読有, Vol.33, pp. 53-68, DOI: 10.1541/jae.33.53, 2013

7. Y.Hobara, R. Nakamura, M. Suzuki, M. Hayakawa, and M. Parrot, Ionospheric perturbations observed by the low altitude satellite DEMETER and possible relation with seismicity, J. Atmos. Electr., 査読有, Vol.33, pp. 21-29, DOI: /10.1541/jae.33.21, 2013
8. M. Hayakawa, Y.Hobara, A. Rozhnoi, M. Solovieva, K. Ohta, J. Izutsu, T. Nakamura, and Y. Kasahara, The Ionospheric Precursor to the 2011 March 11 Earthquake Based upon Observations Obtained from the Japan-Pacific Subionospheric VLF/LF Network, Telecomm. Radio.Eng., 査読有, vol.24, No.3, pp.393-408, DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i18.60 ,2013

[学会発表] (計 5 件)

1. T. Basak and Y. Hobara, Modeling of lower ionosphere and using the wave propagation theory, the computation of diurnal variations of multi-transmitter VLF signals at Antarctic station, 日本大気電気学会, 2016年1月9日, 電気通信大学 (東京都・調布市)
2. T. Basak and Y. Hobara, " Determination of Spatio-Temporal Characteristics of D-region Electron Density during Annular Solar Eclipse from VLF Network Observations", American Geophysical Union, 2015年12月12日, San Francisco (USA)
3. K. Tatsuta and Y.Hobara, "A Statistical Study of Sub-ionospheric VLF Signal Anomaly Due to Geomagnetic Storms ", URSI-JRSM 2015, 2015年9月4日, 東京工業大学 (東京都・目黒区)
4. Y. Hobara, "Study on Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere (LAIC) Coupling by using Satellite-, Ground-Based Measurements and Numerical Modeling", Dynamical Processes in Space Plasmas 6th Isradynamics meeting, 2014年3月20日, Ein Boqek (Israel)
5. 荒船健人、芳原容英、岡田雅樹、山岸久雄, 南極昭和基地におけるVLF帯送信電波を用いた電離層擾乱の観測可能性に関する調査, 日本大気電気学会, 2014年1月10日, 東京学芸大学 (東京

都・小金井市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

http://www.muse.ee.uec.ac.jp/new_hp/professor.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芳原 容英 (HOUBARA, Yasuhide)
電気通信大学・大学院情報理工学研究
科・教授
研究者番号： 10303009

(2) 研究分担者

土屋 史紀 (TSUCHIYA, Fuminori)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号： 10302077

山岸 久雄 (YAMAGISHI, Hisao)
国立極地研究所・研究教育系・教授
研究者番号： 20132714

岡田 雅樹 (OKADA, Masaki)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号： 40270425

湊原 哲也 (MINATOHARA, Tetsuya)
津山工業高等専門学校・総合理工学科
・講師
研究者番号： 70521772

(3) 連携研究者

田中 康之 (TANAKA, Yasuyuki)
広島大学・宇宙科学センター・特任助教
研究者番号： 90633941