

極超長波 (ELF Waves) 地球放射波の電離層突き抜け特性と衛星による観測について

中部大 畑 雅恭、馬場 清秀、藤井 隆、太田 健次、名工大 内匠 逸

Ionosphere Penetrating Characteristics of Earth Radiated ELF Waves and Satellite Observation

Masayasu Hata, Kiyohide Baba, Takasi Fujii, Kenji Ohta and Takumi Ichi
Chubu University and Nagoya Institute of Technology, Aichi 487-8501
E-Mail: hata@cs.chubu.ac.jp

Abstract: Anomalous radiation of environmental electromagnetic waves is reported as portent of earthquakes. We have been measuring electromagnetic signals in ELF frequency range all over Japan in order to predict earthquakes. Because the observed data is very huge, it is difficult to discriminate anomalous signals manually. In this paper, we propose the method to detect anomalous signals by focusing on errors between LPC models and observed signals. On the other hand, it is effective to investigate the generation mechanisms of precursory emissions employing the simultaneous observations both onboard satellite and on the ground. At the satellite altitude (>400km), it is necessary to estimate the possibility that the ELF radio waves emitted from the epicenter can be propagated into the upper ionosphere with enough field strength to be observable. This paper presents some preliminary numerical calculations for field structure of ELF (223Hz) radio waves between the earth and the ionosphere and in the upper ionosphere up to 1,000km.

Key words; Precursor, Environmental Electromagnetic Radiation, ELF, LPC model, Satellite observation, Ionosphere Penetration

1. はじめに

ELF帯 223Hz(自由空間波長 1330km)の地表観測により、多くの強い地震について前兆的な電磁放射現象が検出された。本文では、2005年3月20日発生の福岡西方沖地震M7.0の本震・余震と電磁放射との対応について解析結果を示す1)*。

また一方、ロシア、アメリカ、フランスで衛星による地震電磁波の観測や地震による電離層異常の研究が進展している2)。衛星による同時観測ができれば、前兆電磁波放射の詳細が把握され、モデル解明が進展すると期待される。

衛星高度はその寿命から、通常 500km以上 700-800kmとなり、D,E,F電離層高度(約 60, 250-350km)より上空となる。このため、地震準備地域から放射される ELF 帯放射波が電離層を透過して衛星高度から観測できるかが課題となる。

ELF帯等の極超低周波数の電離層透過特性については、詳細な報告が見られない。先の検討3)-4)では、電離層プラズマのほか、地球磁力線からなる磁気圏が深く伸びており、そのジャイロ周波数が高く異方性媒質であるため一部の電力が透過し観測が可能なが示された。

本文では、電離層内の電磁波の状態などさらに検討し、500km以上の高度において磁界エネルギーが夜間約 10%、昼間で 4%透過することが示された。

*一部の観測点では、地殻透過表皮厚の大きい 17Hz も用い 2 周波観測を行っている。

2. 地表観測による地震前兆電磁波放射

2. 1 ELF 帯磁界観測の概要

現在、全国約 40 箇所の地点に観測装置を配置し、ELF帯 223Hzの電磁波(磁界成分)の観測を行っている。観測周波数の選定は非常に重要であり、検知感度と特性が決定される。地殻活動による大気中の電磁放射と地殻を透過する成分の捕捉のほか、他の要因による雑音の影響を最も受けにくい周波数帯を選ぶ必要がある。他の要因とは、太陽からの照射エネルギーの変動による大気環境雑音、人工雑音、雷電波、受信機雑音の影響などである。これらを考慮して ELF 帯で観測することとした。

各観測点では、東西・南北・垂直の 3 軸方向のループコイルアンテナを配置し、狭帯域バンドパス増幅した後、50Hz でサンプリングを行う。得られた磁束密度強度の 6 秒及び 150 秒間の平均値(単位 pt/\sqrt{Hz})を記録している。

2. 2 線形予測分析と異常検知

異常のない日の観測データは、熱帯の多くの雷放電からなり、太陽照射による電離層高度の変化から到来振幅が日変化するガウス性雑音となる。そのため、異常のない日の平均的な線形予測モデルを算出し、同様に異常のない別の日のデータを推定すれば、共に同じ性質の信号源から出た信号となるため、相互の予測誤差は小さい。一方、観測データに何らかの別の性質の信号源の異常信号が加わった場合、情報量が増し、平常時の平均的モデルでは予測できない成分が残り、大きな予測誤差が発生する。この予

測誤差の大小に着目して放射異常の検知を行う。

2. 3 線形予測誤差の評価

時刻 n の観測値を、それより過去 p 個のサンプル値それぞれに予測係数を掛け線形和した値を時刻 n の予測値とする。観測値と予測値の差が予測誤差であり、その2乗和が最小になるよう予測係数が決定される。予測次数は情報量基準が最小となるよう決定され、平常時に対し10次と決定した。また各予測係数は異常の見られない25日間について平均し、それを平常時予測モデルとした1)。

大きな予測誤差を生ずる要因として、目標とするは強いインパルス状の信号であり、地殻活動による電磁放射は雷放電より弱いレベルの信号が長時間連続する。この両者の特徴差を利用して、雷による強いインパルス状の信号を抑制するため誤差の2乗値に3時間の移動平均処理を施し評価を行った。

2. 4 処理対象とした観測データ

福岡西方沖地震(2005年3月20日10時53分, M7.0,震央位置 $33^{\circ} 44.3'N$, $130^{\circ} 10.5'E$, 震源の深さ9km)の発生前後約2ヶ月間(2005年3月4日~5月2日)の長崎県千々石町で観測されたデータの処理を行った。この観測点は、現在稼動中観測点の中で、震源に最も近接しており、観測点から震央の位置はFig.1に示すように、ほぼ北方120kmである。

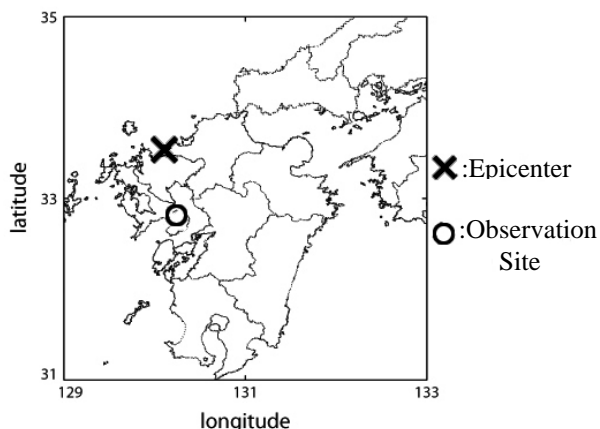


Fig.1 Locations of Epicenter and Observation Site

使用したデータは、南北軸方向磁界強度の150秒間の平均値データ(単位は pt/\sqrt{Hz})である。例として、異常が見られない2005年3月14日の観測データ(150秒平均)をFig.2に、異常信号が観測された2005年3月17日の観測データをFig.3に示す。Fig.3から、0時頃より12時頃まで磁界強度が普段より強かったことが知見できる。なお、線形予測に先立って、各データの平均値が0となるように処理した。

また、前述3月20日の本震以外に期間中に発生した福岡西方沖を震源とするマグニチュード5.0以上の規模の余震は以下の通りである。発生日時、規模、震央位置、震源の深さの順に表記した。

- 2005.3.22 15:55 M5.4, $33^{\circ} 43.5'N$, $130^{\circ} 10.6'E$, 11km
- 2005.4.10 20:34 M5.0, $33^{\circ} 40.1'N$, $130^{\circ} 16.9'E$, 5km
- 2005.4.20 06:11 M5.8, $33^{\circ} 40.6'N$, $130^{\circ} 17.2'E$, 14km
- 2005.4.20 09:09 M5.1, $33^{\circ} 40.7'N$, $130^{\circ} 17.0'E$, 13km
- 2005.5.02 01:23 M5.0, $33^{\circ} 40.2'N$, $130^{\circ} 19.2'E$, 11km

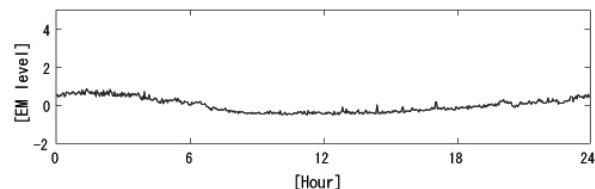


Fig.2 Observed data on 14 March 2005

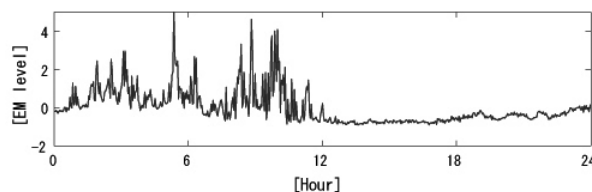


Fig.3 Observed data on 17 March 2005

2. 5 処理結果

観測信号に対し、線形予測処理を行った結果をFig.4~7に示す。横軸は日付を表し、一つの図で20日間の結果を表す。縦軸は線形予測誤差の2乗値に3時間の移動平均処理を施した値である。また図中の縦線は、先に示したマグニチュード5.0以上の地震の発生時刻を示している。

Fig.4~7を見ると、例としてFig.3に例示したような長時間連続する異常信号が受信された時点で高いレベルが出力されており、平常時と異なる異常を検知したことを示す。

地殻活動との関連性については、目立って大きな地震がない時期には、誤差の移動平均値のグラフは小さな値を示しており、異常信号は検出されていない。一方、M5.0以上の規模の大きな地震の4日~数時間前の間に大きな誤差が確認でき、ここで異常信号が検知されている。評価期間中に関しては、M5.0以上の規模の地震全ての前に大きな線形予測誤差が発生している。地殻活動の前兆放射と見られる。

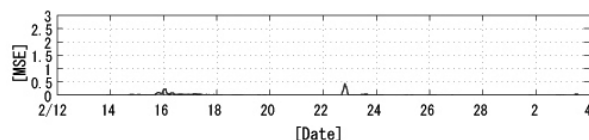


Fig.4 Mean square error from 12 February to 3 March 2005

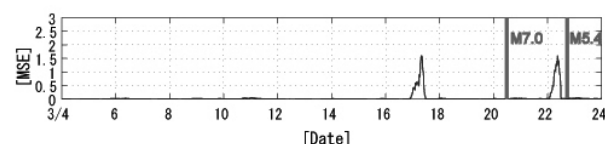


Fig.5 Mean square error from 4 March to 23 March 2005

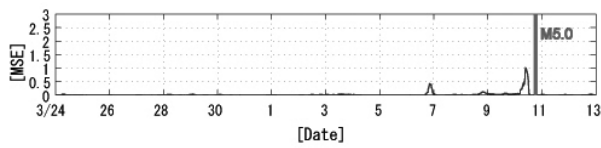


Fig6 Mean square error from 24 March to 12 April 2005

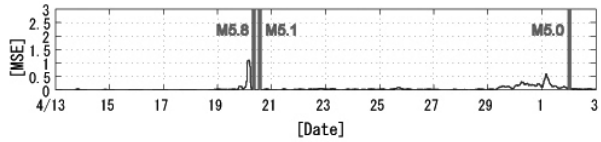


Fig7 Mean square error from 13 April to 2 May 2005

3. 電離層上部への ELF 透過特性

3. 1 評価上の条件

中緯度における昼夜間の電子密度と、電子の中性大気分子との衝突周波数を文献 5)により Fig.8 に示す。地球磁力線による電子のジャイロ周波数は約 1.2MHz とみなされ、電離層は磁力線により異方性として解析する。電離層に対して下面からの入射角(0,30,60)、方位角(0,90,180,270)の幾何を Fig.9 に示す。

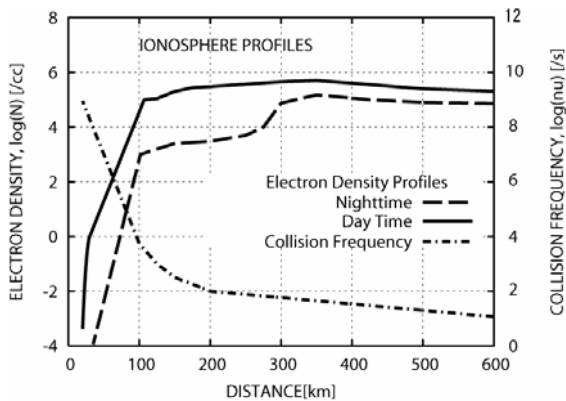


Fig.8 Electron number density profiles and effective electron collision frequency profile.

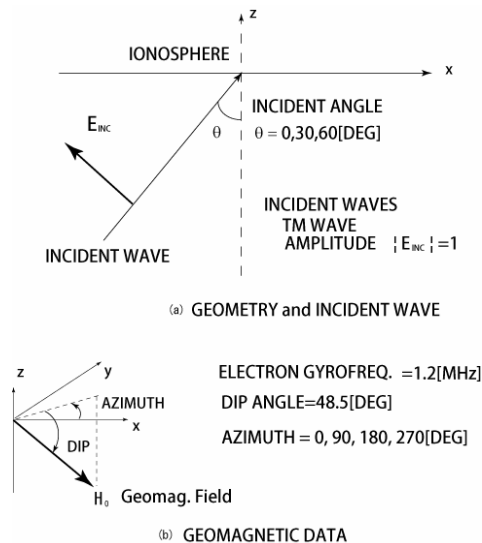


Fig.9 Geomagnetic data and geometry.

なお、地球磁力線の傾斜角は中緯度で 48.5 度としている。電磁界計算は下面より TM 波が x 軸方向に伝播するとしてフルウェーブ法により計算した。なお、磁界振幅は自由空間インピーダンスで規格化し、入射電界と磁界振幅ともに 1 に規格化して示す。

3. 2 電離層中における透過エネルギー

Fig.10 は夜間の高度に対する磁界振幅(上)と電界振幅(下)の変化を示す。100km あたりに E 層、300km 近くに F 層があり、電子密度が増加するため伝播特性が大きく変化する。等価的に波長が 1330km から数 10km、数 km に急激に短縮され、伝搬速度も電離層内で大きく低下することがわかる。

また、入射境界で反射が起きるため、透過するエネルギーは Fig.11 のポインティングベクトルに示される様に低下する。Fig.11(a) は夜間、(b)は昼間の値を示す。なお、Fig.10 を参照すると、電界の振幅とエネルギーは急激に減少するが、磁界のエネルギーの減少は小さく、規格化振幅は増加する様に見える。なお、高度 1,000km まで計算したが、500km から 1,000km の範囲での特性の変化は小さい。

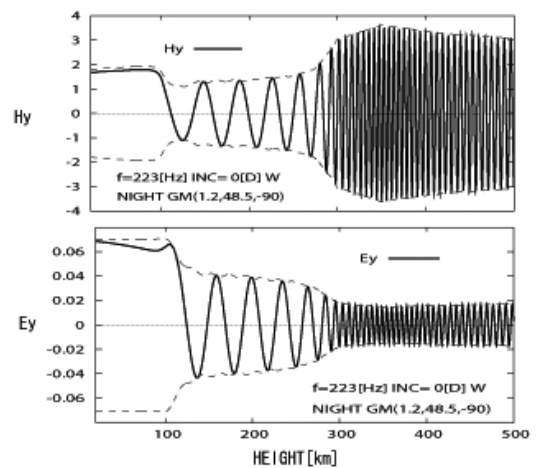
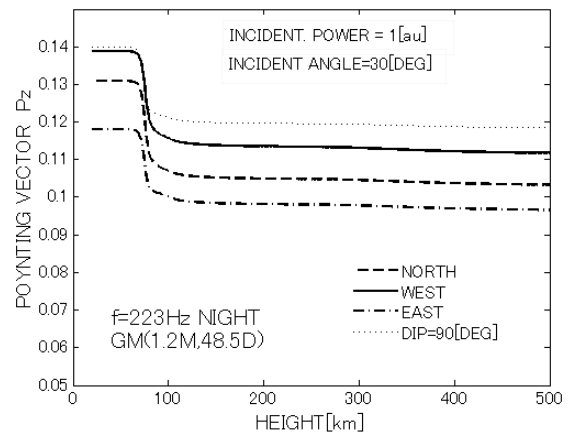
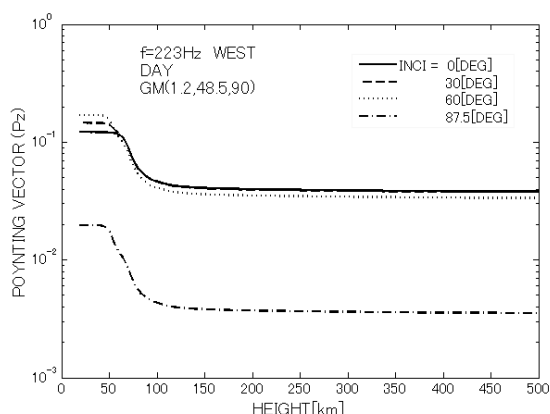


Fig.10 Typical instantaneous wave field components for nighttime ionosphere. $\theta = 0^\circ$, AZIMUTH=-90°.



(a) Upward Poynting vector in nighttime conditions



(b) Upward Poynting vectors in daytime conditions
Fig.11 Poynting vectors in vertical directions.

衛星高度 500–700km での ELF 帯 223Hz の磁界の透過エネルギーは、入射角にもよるが、夜間において 10 数%から 10%弱であり、昼間では 4%程度となる。

地表での地震前兆電磁放射観測に必要な磁束強度は震央との観測距離にもよるが、最低 1pT/root Hz が必要とされるので、上の評価によれば衛星搭載受信機の感度は夜間 0.3 pT/root Hz、昼間で 0.2 pT/root Hz が必要になる。しかし、地表での冬季の熱雷雑音 0.3 pT/root Hz、夏季では 1.5 pT/root Hz と 5 倍以上となる。このため、衛星上での熱雷雑音ほかの環境雑音がどのようなものであるか評価すること、および低高度衛星のセンサーアンテナなど観測機器設計には考慮が求められることが明らかとなった。

4. 結び

福岡西方沖地震 M7.0 の地表観測において、線形予測分析により、放射異常の検出が可能となった。また、電磁放射異常と本震、余震との対応が明瞭に示された。今後、多くの事例について、複雑性を持つ地震現象の解明が求められる。

衛星による地震電磁波の観測が可能となれば、さらに多くの知見が増すと考えられる。本研究により、地表から放射される極超長波の電離層透過特性が示され、電離層上空の衛星による観測の可能性が明らかになった。なお、具体的な観測機器の設計には、衛星高度における環境雑音等の評価が求められる。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学技術研究費補助金基盤研究(A)17206042 の補助による。また、一部は中部大学平成 17 年度特別研究 17 II SO1A の支援により実施された。

参考文献

1) Murata. M., Funase.A., Takumi. Ich., Yasukawa. H., and Hata.M.; Detection of Anomaly in Environmental

Electromagnetic Wave by Using LPC Errors, *The 28th Symposium on Information Theory and Its Applications*, Japanese, Pt II ,pp.825-828 (SITA-2005)

2) Parrot. M.; Seismo-Electromagnetic Waves Detected by Low-Altitude Satellites, *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, Ed. By Hayakawa M. and Fujinawa Y., Tokyo, TERRAPUB, pp.361-372 (1994)

3) Hata. M., Baba. K., Takumi. I.; On Comparative Study of Satellite and Surface Observation of Terrestrial EM Radiation at ELF Band, *Space Utilization Research* 19, pp.243-246 (2003)

4) Hata. M., Baba. K., Ohta.K., Fujii. T., Takumi. I., Yasukawa.H.; Prediction Research of Earthquake and Volcanic Eruption by Comparative Study of Satellite and Surface Observations of Terrestrial Electromagnetic Radiation, *Space Utilization Research* 21, pp.184-187 (2005)

5) Kelly. K. C.; *The earth's ionosphere*, Academic Press, (1989)

6) Budden. K. G.; *The propagation of radio waves*, Cambridge U. P. (1985)

7) Pitterway. M. L. V.; The Numerical Calculation of Wave Fields, Reflection Coefficients and Polarizations for Long Radio Waves in the Lower Ionosphere I, *Phil. Tran. R. Soc. Lond.* A257, pp.219-241 (1965)

8) Baba. K., Hayakawa. M.; Finite Element Method Calculation of VLF Propagation Characteristics in the Earth-Ionosphere Waveguide, *Trans. Inst. Elect. Inform. Comm. Engrs.*, Japan, J76-B-II, pp.236-244 (1993)