

Observation and Analysis of Anomalous Terrestrial Diffraction as a Mechanism of Electromagnetic Precursors of Earthquakes

地震の電磁的前兆現象のメカニズムとしての

地表面異常回折の観測と解析

(ChatGPT-4o による自動翻訳後一部修正 ver. 1)

Masafumi Fujii^{1*}

¹Graduate Research Division of Science and Engineering, University of Toyama

Key Points:

- A low-noise high-sensitivity technique is proposed to observe anomalous radio wave signals associated with earthquakes.
- Possible electromagnetic precursors of earthquakes have been detected by observation networks placed near major tectonic lines.
- Large-scale numerical analysis has suggested that anomalous diffraction is the mechanism of the electromagnetic precursors.

要点：

- 地震に関連する異常なラジオ波信号を観測するための低ノイズ・高感度技術を提案します。
- 主要な断層線の近くに配置された観測ネットワークによって、電磁的地震前兆と考えられる現象が検出されました。
- 大規模な数値解析により、地表面異常回折が電磁的前兆現象のメカニズムであることが示唆されています。

*3190 Gofuku Toyama, Japan

Corresponding author: Masafumi Fujii, mfujii@eng.u-toyama.ac.jp

Abstract

Detection of earthquake precursors has long been a controversial issue with regard to its possibility and realizability. Here we present the detection of electromagnetic anomalous signals before large earthquakes using an observation network of very high frequency (VHF) radio wave receivers close to major tectonic lines in Japan. The receivers are equipped with specifically designed narrowband filters to suppress noises and to detect extremely weak signals. We detected different types of electromagnetic anomalies before earthquakes around mountainous and coastal regions, where presence of electric charges is anticipated on the surface located in the middle of the radio wave paths near major tectonic lines in Japan. We use numerical electromagnetic wave analysis to show that when electric charges are present on a ground surface as a consequence of tectonic activity, the surface charges interact strongly with radio waves and eventually cause strong diffraction of the radio waves. The analysis was performed using the three-dimensional finite-difference time-domain (3D-FDTD) method with digital elevation models of the actual geographical landforms on a massively parallel supercomputer. The results confirm the consistent mechanisms of the electromagnetic precursors, which explains the anomalous electromagnetic signals observed by the authors before large earthquakes.

地震の前兆検出は、その可能性や実現性に関して長い間議論の対象となってきました。本研究では、日本の主要な構造線（断層帯）近くに設置された超高周波（VHF）ラジオ波受信機の観測ネットワークを用いて、大地震前に異常な電磁信号を検出した結果を報告します。受信機は、特別に設計された超狭帯域フィルタを搭載しており、ノイズを抑制し、非常に微弱な信号を検出できるようにしています。日本の主要構造線近くに位置する山岳地帯や沿岸地域では、ラジオ波経路上の地表に電荷が存在することが予測され、地震前にさまざまなタイプの電磁異常が検出されました。さらに数値電磁波解析を用いて、地震活動により地表に電荷が生じると、これがラジオ波と強く相互作用し、結果的にラジオ波の強い回折を引き起こすことを示しました。この解析は、実際の地形デジタル標高モデルを使用した三次元有限差分時間領域法（3D-FDTD）を用いて、並列スーパーコンピュータ上で実施されました。この解析結果は、電磁的前兆現象のメカニズムを一貫して裏付けており、筆者らによって観測された大地震前の異常電磁信号を説明しています。

1 Introduction 序論

Electromagnetic signals could be enhanced and received at distant locations some days or weeks before earthquakes. Researchers have tried to observe such electromagnetic anomalies and precursors associated with earthquakes for more than 20 years (Kushida & Kushida, 1998, 2002; Fujiwara et al., 2004; Moriya et al., 2005; Hayakawa et al., 2007; Uyeda et al., 2009; Moriya et al., 2009, 2010; Freund, 2011; Yasuda et al., 2009; Bleier et al., 2013). The observation of such anomalies has been difficult and unstable because they are affected by geographical, atmospheric, ionospheric conditions and disturbed by environmental noise of random nature. Various possible electromagnetic precursors have been so far reported and a number of hypotheses have been proposed: i.e., ionospheric perturbation by Kushida et al. (Kushida & Kushida, 1998, 2002) and Hayakawa et al. (Hayakawa et al., 2007; Yasuda et al., 2009; Bleier et al., 2013), lithosphere-atmosphere-ionosphere (LAI) coupling by Pilipenko et al. (Pilipenko et al., 2001), atmospheric anomalies (Fujiwara et al., 2004), a bulk plasmon model (Kamogawa & Ohtsuki, 1999), and

chemical models (Enomoto & Hashimoto, 1990; Enomoto et al., 1997). All of these models are inclusively possible, not exclusively, but difficult to explain the anomalous radio wave phenomena comprehensively, especially in the very high frequency (VHF) band.

地震の数日前や数週間前に、電磁信号が強められ、通常より遠隔地で受信される可能性が指摘されています。研究者たちは、過去 20 年以上にわたり、地震に関連するこのような電磁気異常や前兆現象を観測しようと試みてきました (Kushida & Kushida 1998, 2002; Fujiwara et al. 2004; Moriya et al. 2005; Hayakawa et al. 2007; Uyeda et al. 2009; Moriya et al. 2009, 2010; Freund 2011; Yasuda et al. 2009; Bleier et al. 2013)。しかし、このような異常現象の観測は、地形、気象、大気、電離層の状態によって影響を受けることによって不安定で非常に困難であり、またランダムな環境ノイズによっても妨げられます。これまでに報告されているさまざまな電磁前兆現象や、それに関連する仮説がいくつか提案されています。例えば、Kushida ら (Kushida & Kushida 1998, 2002) や Hayakawa ら (Hayakawa et al. 2007; Yasuda et al. 2009; Bleier et al. 2013) による電離層の擾乱、Pilipenko ら (Pilipenko et al. 2001) によるリソスフェア-大気-電離層 (LAI) 結合、Fujiwara ら (Fujiwara et al. 2004) による大気異常、Kamogawa & Ohtsuki (1999) によるバルクプラズモンモデル、Enomoto & Hashimoto (1990) および Enomoto ら (1997) による化学モデルなどがあります。これらのモデルは排他的ではなく互いに併存可能ですが、特に VHF 帯における異常なラジオ波現象を総合的に説明するのは困難です。

On the other hand, the mechanism of the anomalous radiowave propagation has been explained reasonably by the theory of the ground surface plasma wave appearing on the surface of the Earth (Fujii, 2013, 2016). It has been experimentally shown that positive electric charge carriers come out from the peroxy bond in oxidized minerals when rocks are subjected to tectonic deviatoric stresses (Freund, 2000, 2002, 2011; Bleier et al., 2013), and that such carriers can even move across the composite boundary of rocks along crustal faults. Although it is still controversial, this fact could explain the possible presence of electrostatic charges on the Earth's surface associated with co-seismic or pre-seismic activities. Another possibility is the change of ground resistivity with earthquakes (Rikitake & Yamazaki, 1978) even at a distance of 1,000km from epicenters, which could be supported by the theory that the size of the precursor deformation zone of earthquakes is estimated by a simple formula as a function of its magnitude (Dobrovolsky et al., 1979). Therefore, electric charges on the ground surface must play a role in seismic activity. In general, if electric charges exist on a surface, then the charges are subjected to the force by the external oscillating electric field. This is equivalent to the well-known surface plasmon in optics induced by light on metal surfaces (Kittel, 1986; Raether, 1977, 1988; Fujii, 2014).

一方で、異常なラジオ波の伝搬メカニズムは、地表に現れる地表面プラズマ波の理論によって合理的に説明されています (Fujii 2013, 2016)。実験的には、岩石が地殻の歪み応力を受けたとき、酸化鉱物のペルオキシ結合から正電荷キャリアが放出されることが示されており (Freund 2000, 2002, 2011; Bleier et al. 2013)、これらのキャリアは、地殻断層に沿って岩石の複合境界を越えて移動することさえ可能です。この事実はまだ議論の余地がありますが、地震活動に関連する地表の静電気が存在する可能性を説明するものでしょう。また、Rikitake & Yamazaki (1978) が指摘したように、震源から 1000km 離れた地点でも地震による地表面抵抗の変化が起こる可能性があります。この変化は、地震の前兆変形領域のサイズを地震規模の関数として推定する単純な公式で説

明できます (Dobrovolsky et al. 1979)。したがって、地表に存在する電荷は地震活動において重要な役割を果たすと考えられます。

In this paper, we present our observation results of anomalous radio wave signals that strongly depend on the polarization and the propagation path of the wave. We then analyze the propagation of the radio waves and show a possible mechanism of the anomalous propagation and diffraction caused by an interaction between the radio wave and the surface electric charges, which can be referred to as the terrestrial surface plasmon. This paper does not deal with the fundamental mechanism of the earthquake itself, but rather focuses on the possible electromagnetic phenomena on the Earth's surface with electric charges associated with earthquakes. The analysis was performed using the three-dimensional finite-difference time-domain (3DFDTD) method (Yee, 1966; Taflove, 1995) with the properties of the mobile electric charge carriers of the Drude dispersion model (Taflove & Hagness, 2005; Fujii, 2013, 2016). The analysis method and the computational code have been verified by comparison with the theoretical solutions of localized surface plasmons on a metal sphere (Fujii, 2014). Several analyses have been carried out with different landforms of irregular shapes in mountainous regions and coasts to show that the electromagnetic interactions occur randomly and depend strongly on the topography of the ground surface. The numerical results agree well with the observed polarized radio wave signals.

一般的に、電荷が地表に存在すると、その電荷は外部の振動する電場によって力を受けます。これは、金属表面に光を照射して生じるよく知られた表面プラズモンに相当します (Kittel 1986; Raether 1977, 1988; Fujii 2014)。本論文では、ラジオ波と地表電荷の相互作用によって引き起こされる異常な伝搬および回折のメカニズムを示し、その波が地球表面の表面プラズモンとして扱える可能性があることを示します。本論文では、地震そのものの基本的なメカニズムには触れず、むしろ地震に関連する地球表面における電磁現象に焦点を当てています。解析は、移動電荷キャリアの Drude 分散モデル (Taflove & Hagness 2005; Fujii 2013, 2016) を使用して、三次元有限差分時間領域法 (3D-FDTD 法) で実施しました。解析手法および計算コードは、金属球体の局所表面プラズモンの理論解と比較して検証されました (Fujii 2014)。山岳地帯や海岸でのさまざまな不規則な地形を使用していくつかの解析が行われ、電磁相互作用がランダムに発生し、地表の地形に強く依存することが確認されました。数値解析の結果は、観測された偏向ラジオ波の信号とよく一致しています。

2 Radio Wave Observation Geometry and Equipment 観測における地形と装置

We observe radio waves from distant broadcast stations as shown in Figure 1 and in Table 1. Since these radio signals are significantly weak, we have developed highly sensitive low-noise measurement systems that employ super-narrow-band filters for significant noise reduction, implemented over a network of distant observation sites (Fujii, 2023a).

私たちは、図 1 および表 1 に示されるように、遠方の放送局からのラジオ波を観測しています。これらのラジオ信号は非常に弱いので、遠隔観測サイトのネットワークにわたり大幅なノイズ低減を実現する超狭帯域フィルタを用いた高感度低ノイズ測定システムを開発しました (Fujii 2023a)。

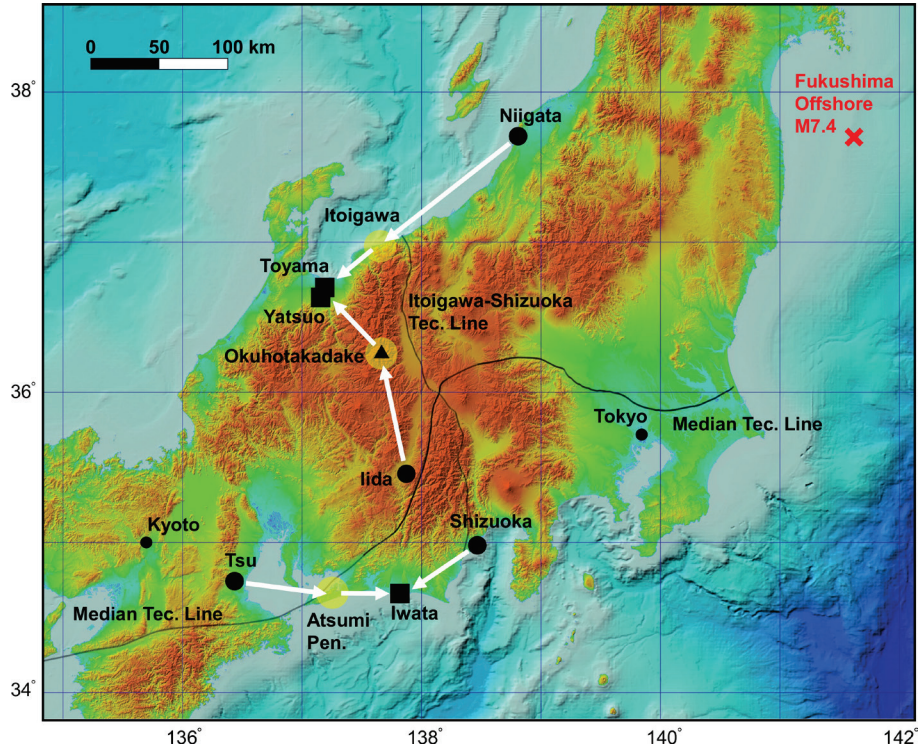


Figure 1. The map of broadcast and observation stations focused in this study as listed in Table 1 and the epicenter of the M7.4 Fukushima offshore earthquake (E141° 37'22", N37° 41'48", depth 57km) on Mar. 16, 2022 at 23:36:32.6 (JST) on the Pacific side of Japan. The symbols of the black circle and the square are for the broadcast and observation stations, respectively. White arrows indicate the radio wave paths, and the yellow circular regions indicate the possible points of causing anomalous diffraction, which are Mt. Okuhotakadake, Atsumi Peninsula, and Itoigawa, analyzed in the following sections. Thin black lines are the Median Tectonic Line and the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line. Tokyo and Kyoto are shown for reference. The earthquakes in the Kamikochi/Okuhotakadake region discussed later and listed in Table 2 occurred in the limited area within approximately 10km distance of the black triangle near the center of the map.

図 1. 本研究で注目した放送局と観測局の地点、および 2022 年 3 月 16 日 23 時 36 分 32 秒 (日本標準時) に太平洋側の福島沖 (東経 141°37'22"、北緯 37°41'48"、深さ 57km) で発生した M7.4 の震源位置。黒丸は放送局、四角は観測局を示す。白い矢印はラジオ波の経路を示し、黄色の円は本論文で解析された異常回折が生じる可能性のある地点 (奥穂高岳、渥美半島、糸魚川) を表す。薄い黒線は中央構造線と糸魚川-静岡構造線を示す。参考として東京と京都も表示している。後述する上高地/奥穂高岳地域で発生した地震は、地図中央の黒三角の近く、約 10km の範囲で発生。

2.1 Noise Reduction by Super-Narrow-band Notch Filter and Observation System

超狭帯域ノッチフィルタによるノイズ低減と観測システム

The radio wave observation system is composed of standard Yagi antennas of 3 to 6 elements in horizontal and/or vertical polarization depending on the allowable facility as summarized in Table 1, and digital radio receivers AOR AR5001D and/or AR2300, which are controlled by PCs. The radio wave is measured every 10s at the Toyama and Yatsuo stations, and every 20s at the Iwata station. For stable detection of earthquake precursors, effective noise reduction in the measurement system is essential. Super-narrow-band notch (band-rejection) filters (Fujii, 2021) are inserted between the antenna and the receiver to reduce unwanted intense radio waves from nearby broadcast stations by more than 20dB from a typical -50dBm signal level down to -70dBm , etc., allowing clear uninterrupted observation even in urban areas as described in the following. Note that dBm is a unit of electric power in dB relative to 1mW reference power.

ラジオ波観測システムは標準的な八木アンテナを使用しており、表 1 に示されるように、水平または垂直偏波に応じて 3～6 要素が設置されています。デジタルラジオ受信機（AOR AR5001D および AR2300 モデル）を使用して PC に接続し、信号を記録しています。ラジオ波は、富山および八尾の観測局で 10 秒ごとに、磐田の観測局では 20 秒ごとに測定されています。地震の前兆を確実に検出するためには、測定システムにおける効果的なノイズ低減が重要です。スーパーナローバンドノッチフィルタ（Fujii 2021）は、アンテナと受信機の上に挿入され、近隣の強力なラジオ局からの不要な信号を 20dB 以上（典型的な -50 dBm 信号レベルから -70 dBm まで）減衰させ、都市環境でもクリーンな観測を可能にしています。

Table 1. List of the radio broadcast and observation sites focused in this paper. The polarization and the number of elements of the Yagi antennas at the observation sites are shown in parentheses with the form of (Polarization, Number of elements). Polarization notations H and V are for horizontal and vertical linear polarizations, respectively. Height is that of antenna comprised of altitude above sea level and approximate height of antenna facility. 80.9MHz is an unused frequency in Japan and is monitored for comparison as discussed in the text.

表 1. 本論文で焦点を当てたラジオ放送局と観測局の一覧。観測局における八木アンテナの偏波および要素数が括弧内で（偏波、要素数）の形式で示されている。偏波の記号 H および V は、それぞれ水平および垂直の線偏波を表す。高さは、海拔高度とアンテナ施設の高さの概算値を含む。80.9MHz は日本で使用されていない周波数であり、本文で議論される比較のために監視されている。

Observation sites:						
Site Name		(Pol., Elem.)	Longitude	Latitude	Height (m)	
For Toyama/Yatsuo:						
Toyama City, Toyama Pref.		(H,5) (V,6)	E137° 11'13"	N36° 41'38"	30	
Yatsuo, Toyama City, Toyama Pref.		(H,3)	E137° 07'51"	N36° 37'10"	30	
For Iwata:						
Iwata City, Shizuoka Pref.		(H,5)	E137° 49'20"	N34° 39'20"	4	
Broadcast sites:						
Freq.(MHz)	Power	Site Name	Pol.	Longitude	Latitude	Height (m)
For Toyama/Yatsuo:						
80.9	0 W	(no broadcast)	—	—	—	—
82.3	1 kW	Niigata	H	E138° 48'30"	N37° 42'24"	600
88.3	100W	Iida	H	E137° 52'21"	N35° 27'33"	771
For Iwata:						
78.9	3 kW	Tsu	H	E136° 26'01"	N34° 43'57"	320
79.2	1 kW	Shizuoka	H	E138° 27'56"	N34° 58'27"	300
80.9	0 W	(no broadcast)	—	—	—	—

The frequency characteristics of the super-narrow-band notch filter used for the Toyama observation station are shown in Figure 2 (a). The filter attenuates the radio wave signals from nearby stations by -25dB each, and the rejection bandwidth is as narrow as approximately 1MHz . Since the target signal from the Niigata broadcast station at 82.3MHz is very close to the unwanted signal at 82.7MHz , the target signal is also attenuated by approximately -11dB ; this may unwillingly degrade the necessary radio wave power. However, the third-order intermodulation caused in the amplifying circuit of most receivers would have worse effects, which has been reduced by the filters by more than -30dB . This results in the reduction of the noise floor under -90dBm to -100dBm as shown in Figure 2 (b).

富山観測局では、図 2(a)に示される周波数特性を持つノッチフィルタが使用され、 77.7MHz 、 81.5MHz 、 82.7MHz 、 90.2MHz の信号を -25dB で減衰させ、拒絶帯域幅はわずか 1MHz です。ターゲット信号である 82.3MHz は、近隣の不要な信号に近いために -11dB 減衰されますが、三次相互変調効果は -30dB 以上減少し、ノイズフロアは図 2(b)に示されるように -90dBm から -100dBm まで低下します。

Note that 80.9MHz is a frequency that is not used for broadcasting in Japan; it is monitored in this study to see if broadband noise is observed simultaneously with anomalous signals at different frequencies (Yoshida et al., 2006). The effect of the filter is clearly seen when the filter was removed occasionally for maintenance on March 9, 2022, from 12:00 to 17:00, and the noise floor increased by 30dB to 40dB depending on the frequency due to the nonlinear intermodulation effect. The reduction of the third-order intermodulation noise is therefore considered critical and has a higher priority than the slight loss of necessary signals; otherwise, the precursors are weak and hidden behind the noise. Note also that different filters and receiver are used for each observation system, even at the same site, depending on the directions of the target broadcast stations. The 88.3MHz wave from Iida is observed with a different system than the 82.3MHz wave from Niigata, and therefore it is not shown in Figure 2, whereas the noise reduction capability is in the same level.

なお、 80.9MHz は日本では放送に使用されていない周波数であり、本研究では、他の周波数で異常信号と同時に広帯域ノイズが観測されるかどうかを確認するために監視されています (Yoshida et al., 2006)。2022 年 3 月 9 日の 12:00 から 17:00 にかけて、メンテナンスのためにフィルタが一時的に取り外された際、非線形相互変調効果により、周波数に応じてノイズフロアが 30dB から 40dB 上昇しました。したがって、三次相互変調ノイズの低減は極めて重要であり、わずかな必要信号の損失よりも優先されます。そうでなければ、前兆信号が弱くなり、ノイズの背後に隠れてしまいます。また、異なるフィルタと受信機が、同じ観測地点であっても、ターゲットとなる放送局の方向に応じて使用されていることにも注意が必要です。飯田からの 88.3MHz 波は、新潟からの 82.3MHz 波とは異なるシステムで観測されており、そのため図 2 には示されていませんが、ノイズ低減の能力は同じレベルです。

The super-narrow-band notch filter consists of a series capacitor of several picofarads and a high quality-factor (low-loss) inductance of approximately 1nH . The inductance is formed by a short-circuited low-loss 12D-FB coaxial cable of 60cm to 70cm length, determined according to the frequency to be rejected, and has a quality-factor of 25 to 30 at the VHF band. The circuit is shown in Figure 2 (c) for one unit structure; for its use in actual observation, a necessary number of the unit structures are cascaded as shown in Figure 2 (d). It should be noted that commercially available

inductors are mostly not applicable due to their much higher losses and lower quality factors.

スーパーナローバンドノッチフィルタは、数ピコファラッドの直列コンデンサと、約 1nH の高品質（低損失）インダクタンスで構成されています。インダクタンスは、除去すべき周波数に応じて決定される長さ 60cm から 70cm の短絡された低損失 12D-FB 同軸ケーブルによって形成され、VHF 帯では 25 から 30 の品質係数を持っています。この回路は、図 2(c)に示されているように、1 ユニット構造として描かれています。実際の観測では、必要な数のユニット構造を図 2(d)に示されているように直列に接続して使用します。市販のインダクタは、損失がはるかに大きく、品質係数が低いため、ほとんど適用できないことに留意すべきです。

The notch filters are used in all observation systems to attenuate unwanted radio wave signals and reduce the noise floor; thus, it is not necessary to go to an unpopulated district in search of an electromagnetically quiet environment for observation. In addition, the coaxial cables connecting the antennas and receivers are loaded with numerous ferrite cores to reduce the common-mode noise. The target broadcast stations were chosen in such a way that their radio signals were significantly weak but close to the limit of detection. The system was first operated for a certain period of time to search for radio waves that carry anomalies under critical propagation conditions.

ノッチフィルタは、すべての観測システムにおいて、不要なラジオ波信号を減衰させ、ノイズフロアを低減するために使用されています。そのため、観測のために電磁的に静かな環境を求めて人のいない地域に行く必要はありません。さらに、アンテナと受信機を接続する同軸ケーブルには、共通モードノイズを低減するために多数のフェライトコアが装着されています。ターゲットとなる放送局は、電波が極めて弱く、かつ検出限界に近いものが選ばれました。システムは、まず一定期間、異常を伴うラジオ波を探すために、厳しい伝搬条件下で運用されました。

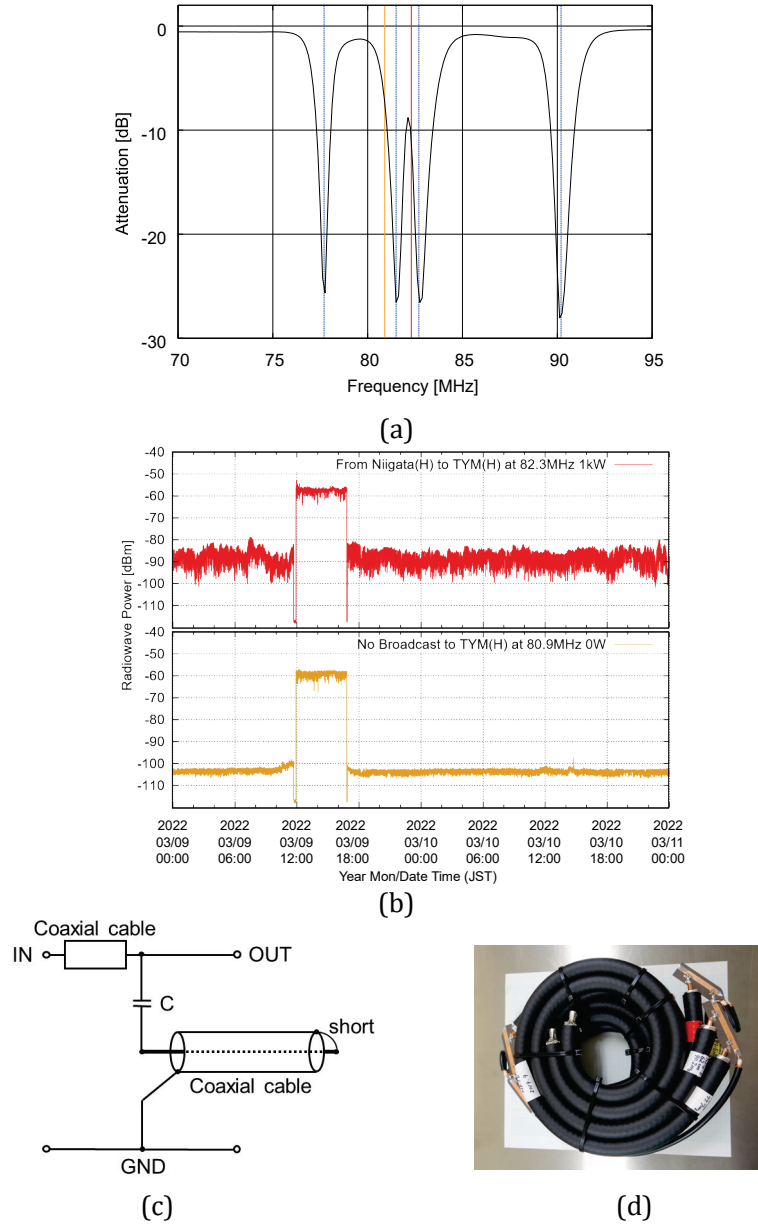


Figure 2. An example of the super-narrow-band notch filter implemented in one of the observation systems in Toyama. (a) Frequency characteristics of the whole filter. Blue dotted lines show the frequencies to be rejected i.e., 77.7MHz, 81.5MHz, 82.7MHz, and 90.2MHz for the Toyama station (TYM), and the orange and red solid lines show the target frequencies to be observed at 80.9MHz and 82.3MHz, respectively. (88.3MHz wave from Iida is observed by another system and is therefore not shown here.) (b) Noise reduction effect of the filter; the filter was removed for occasional maintenance on March 9th from 12:00 to 17:00, i.e., for the period of the high-level state of the step, otherwise the filter was inserted. The height of the step is, therefore, the level of the achieved noise reduction. "H" refers to the antenna polarization as horizontal. (c) Unit circuit of the notch filter. (d) The appearance of the whole filter. A total of 8 units are cascaded to reject 4 frequencies. The coaxial cables are rolled to fit in a 25cm-wide, 30cm-long, and 10cm-high box.

図2. (a) 富山観測局で使用されたスーパーナローバンドノッチフィルタの周波数特性。青い点線は抑制すべき周波数（77.7MHz、81.5MHz、82.7MHz、90.2MHz）を示し、オレンジおよび赤の実

線は観測対象周波数である 80.9MHz および 82.3MHz を示す。(b) フィルタによるノイズ低減効果。フィルタは 2022 年 3 月 9 日 12:00~17:00 のメンテナンス時に取り外され、その間にノイズフロアが 30dB から 40dB 増加した。(c) ノッチフィルタの単一ユニットの回路図。(d) ノッチフィルタ全体の外観。4 つの周波数を抑制するために 8 つのユニットが直列に配置されている。アンテナと受信機を接続する同軸ケーブルには、共通モードノイズを低減するために多くのフェライトコアが装着されている。

3 Observed Anomalous Radio Signals before Earthquakes and Numerical Analysis 観測された地震前の電磁異常信号と数値解析

In this paper, we show first some of the anomalous signals that we observed by the above-mentioned system. In order to clarify the physical mechanism of the anomalous radio wave propagation that is possibly related to earthquakes, we have performed large-scale electromagnetic analyses using the FDTD method on a massively parallel supercomputer with digital elevation models of the landforms. We have analyzed the effect of landforms such as mountains, valleys, and coasts, with and without electric charge carriers on the propagation of electromagnetic waves in air and on surfaces (Fujii, 2013, 2016, 2023b, 2024c). The computational resources used for the analyses were 64 nodes, 2304 CPU cores, 3 to 5TB of memory, and the wall time of 5 to 20 hours per job on a Cray CS400 supercomputer.

本論文では、まず前述のシステムによって観測されたいくつかの異常信号を示します。地震に関連している可能性がある異常なラジオ波伝搬の物理的メカニズムを明らかにするために、地形のデジタル標高モデルを使用して、大規模な電磁解析を FDTD 法を用いて大規模並列スーパーコンピュータ上で実施しました。山岳、谷、海岸などの地形が、電荷キャリアの有無にかかわらず、空気中および地表での電磁波伝搬に及ぼす影響を解析しました (Fujii, 2013, 2016, 2023b, 2024c)。これらの解析に使用された計算リソースは、64 ノード、2304 CPU コア、3~5TB のメモリ、および 1 ジョブあたり 5~20 時間の実行時間であり、Cray CS400 スーパーコンピュータで実施されました。

3.1 Mountainous Region of Japan Alps 日本アルプス山岳地域

In the region of Japan Alps, we had a series of earthquakes larger than $M5$ in April - May, 2020, as listed in Table 2, near the Okuhotakadake peak ($E137^{\circ} 38'53''$, $N36^{\circ} 17'20''$, height 3189.5m), referred also to as Kamikochi region shown near the center of Figure 1. Since approximately a year before the earthquakes, we observed a series of anomalous signals; in the normal state, the signal level was below -100dBm , but suddenly it increased by about 20dB and lasted for several hours or even longer and returned to the previous signal level; they look like rectangular pulses with different periods and heights, as shown by the arrows in Figure 3. A single rectangular pulse signal was observed on December 30, 2016, as shown in Figure 3 (a), which may be due to the possibility that the preparation phase of the earthquakes continues intermittently, as earthquakes occur periodically in this particular region, including the group of small events in 2018; the origin of this single anomaly has not yet been identified.

日本アルプス地域では、2020 年 4 月から 5 月にかけて、表 2 に示されるように奥穂高岳の山頂付近（東経 137 度 38 分 53 秒、北緯 36 度 17 分 20 秒、高さ 3189.5m）、通称神高地地域で $M5$ 以上の一連の地震が発生しました（図 1 の中央付

近に示されています)。これらの地震の約 1 年前から、異常な信号が連続して観測されてきました。通常の状態では、信号レベルは -100dBm 以下でしたが、突然約 20dB 増加し、数時間あるいはそれ以上継続した後、元の信号レベルに戻りました。それらは、図 3 に示される矢印のように、異なる期間と高さを持つ矩形パルスのように見えます。2016 年 12 月 30 日に単一の矩形パルス信号が観測されました (図 3(a)参照)。これは、この特定の地域では地震が周期的に発生しており、2018 年の小規模な地震群を含め、地震の準備段階が断続的に続いている可能性があるためかもしれません、この単一の異常の原因はまだ特定されていません。

Similar phenomena of such pulse anomalies have also been observed regarding the pre-seismic radio wave propagation, and its statistical analysis was presented for earthquakes in a mountainous area in Hokkaido, Japan (Moriya et al., 2010). In the case of our observations, an association with earthquakes can also be inferred. In Figure 3(a), the times of the earthquakes are indicated by the stars. Interestingly, these anomalous signals appear mostly in the vertical polarization (upper plots) and not in the horizontal polarization (lower plots), while the polarization of the broadcast radio wave is horizontal, which is difficult to explain by artificial noise and can be presumed to be a natural phenomenon. More detailed anomalous signals for this case are shown in Supporting Information (Fujii, 2024c) Section 3.1 Figures 27 to 29.

このようなパルス異常の類似現象は、地震前のラジオ波伝搬に関しても観測されており、北海道の山岳地域での地震について、その統計解析が発表されています (Moriya et al., 2010)。私たちの観測の場合でも、地震との関連が推測されます。図 3(a)では、地震の発生時刻が星印で示されています。興味深いことに、これらの異常信号は主に垂直偏波 (上段プロット) で現れ、水平偏波 (下段プロット) ではほとんど現れません。一方、放送されるラジオ波の偏波は水平偏波であり、この現象を人工的なノイズで説明するのは困難で、自然現象であると考えられます。このケースに関するより詳細な異常信号は、補足情報 (Fujii, 2024c) 第 3.1 節の図 27 から 29 に示されています。

From these facts, it is presumed that the radio wave from Iida is diffracted by the high peaks of the Japan Alps and then reaches the observation station in Toyama. This propagation path is obviously out of sight due to the high mountains in this region. However, it is an interesting problem how radio waves propagate when electric charges appear on the surface of the mountain peaks, which has been studied by the numerical analysis in the following.

これらの事実から、飯田からのラジオ波は日本アルプスの高峰によって回折し、その後富山の観測局に到達したと推測されます。この伝搬経路は、この地域の高い山々のために明らかに視界外にあります。しかし、山頂の表面に電荷が現れた場合にラジオ波がどのように伝搬するかは興味深い問題であり、これについては以下で数値解析によって研究されています。

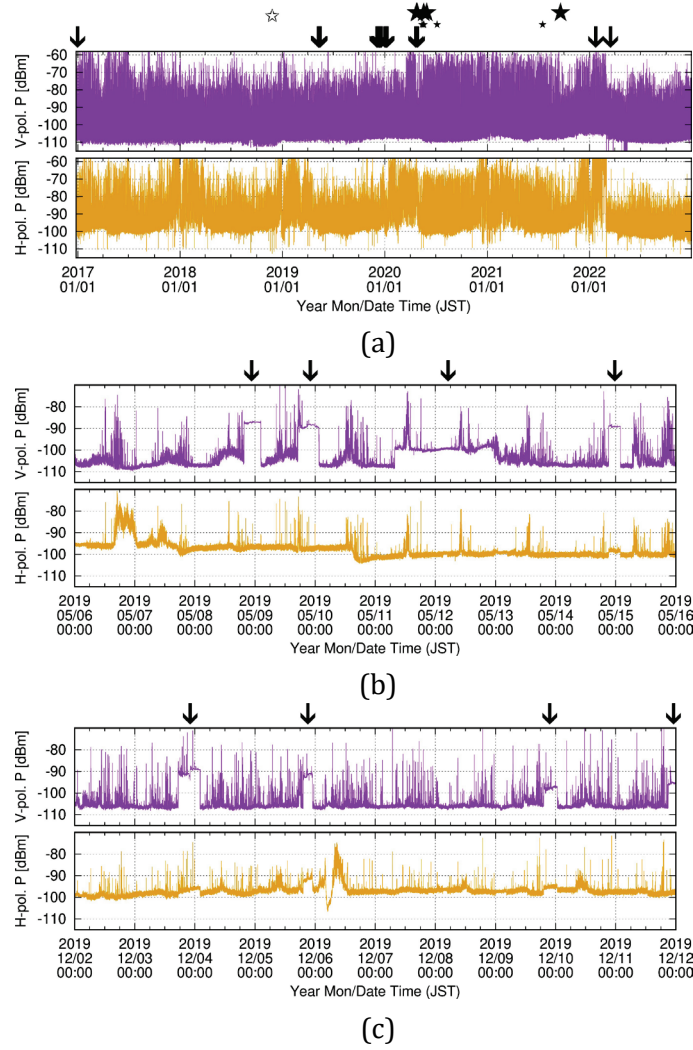


Figure 3. (a) Observed radio wave power in dBm for the wave propagation from Iida to Toyama at 88.3MHz since 2017 till 2022 obtained by the authors; time data for the whole observation period are plotted to show their long-term perspective. For more detailed signals, see (b) and (c), and their descriptions below. Arrows indicate the time of occurrence of the anomalous rectangular-shaped pulse signals. Large black stars indicate the time of the major earthquakes in Kamikochi district ranging from $M5$ to $M5.5$ (JMA); some of which occurred in a particular short period are listed in Table. 2. Small black stars show those of smaller earthquakes of $M4.3$ to $M4.8$ in the same district. A medium white star shows a group of 49 small earthquakes of $M1.9$ to $M3.1$ in the same district during the short period from November 23 to November 30, 2018. After these major events, anomalous rectangular-shaped signals are rarely seen, except for short ones lasting less than a few minutes. (b) Example of the observed signals expanded for 10 days from May 6 to May 16, 2019. (c) Another example of the period of 10 days from Dec. 2 to Dec. 12, 2019. The anomalous rectangular-shaped pulses with sudden increase in their power levels are pointed by the arrows in (b) and (c). For each sub-figure, the upper plot is the vertical polarization data and the lower plot is the horizontal polarization data. The anomalous rectangular signals are mostly observed for the vertical polarization. The data for the horizontal polarization exhibit some spike noises and those possibly caused by sporadic E layers in ionosphere, and some very weak rectangular anomalies are seen at the same time as those for the vertical polarization.

図3. (a) 2017 年から 2022 年までに飯田から富山へ伝播する 88.3MHz のラジオ波において観測された電力 (dBm)。データは長期的な観測期間を表示するためにプロットされている。詳細な信号については、(b) および (c) を参照。矢印は異常な矩形パルス信号が観測された時点を示している。大きな黒星は神高地地域における $M5 \sim M5.5$ の主要地震の時刻を示す。小さな黒星は同地域で発生した $M4.3 \sim M4.8$ の小規模な地震の時

刻を示す。白星は 2018 年 11 月 23 日から 11 月 30 日の間に同地域で発生した M1.9～M3.1 の小規模地震群 (49 回) を示す。これらの主要イベント後、矩形パルス信号は数分以下の短期間を除いてほとんど見られなくなった。(b) 2019 年 5 月 6 日～5 月 16 日の 10 日間に観測された信号の詳細。(c) 2019 年 12 月 2 日～12 月 12 日の 10 日間に観測された信号の詳細。異常な矩形パルスは垂直偏波データ (上段プロット) で主に観測され、水平偏波データ (下段プロット) では少数のスパイクノイズが見られる。

Table 2. List of the major earthquakes in the Kamikochi/Okuhotakadake district discussed in this section. They occurred in a limited area of approximately 10km distance near the center of Figure 1 (black triangle), and within a time period of about a month. Magnitude M is of JMA. The maximum seismic intensity of Japan scale (Max SI) is also shown.

表 2. 本節で議論された神高地／奥穂高岳地区で発生した主要な地震の一覧。これらは図 1 の中央に示された黒三角の近く、およそ 10km 以内の範囲で発生した地震である。震度は日本の震度階級に基づく最大震度を示す。

No.	Epicenter (Longi. Lati.)	M	Date	Time (JST)	depth	Max SI
1	Nagano middle part E137° 39'42" N 36° 13'30"	5.5	April 23, 2020	13:44:22.1	3 km	4
2	Nagano middle part E137° 39'00" N 36° 14'06"	5.0	April 23, 2020	13:57:55.1	5 km	3
3	Nagano middle part E137° 38'12" N 36° 15'06"	5.0	April 26, 2020	02:22:49.4	6 km	3
4	Gifu Hida District E137° 37'42" N 36° 17'00"	5.4	May 19, 2020	13:12:58.1	7 km	4
5	Nagano middle part E137° 38'24" N 36° 15'42"	5.3	May 29, 2020	19:05:14.9	4 km	4

3.1.1 Numerical Analysis Conditions 数値解析条件

As shown in Figure 4, the size of the analysis region is chosen to be 860m from west to east, 710m from south to north including the peak point at the origin of the analysis region, and an altitude higher than 3070m up to 3240m i.e., 170m in height. The peak of the mountain has an altitude of 3189.5m, and the gap between the peak and the upper boundary of the analysis region is approximately 50m. The original digital elevation model (DEM) grid has a resolution of about 5m, and finer grids of 0.2m resolution were obtained by spline interpolation for the FDTD analysis. The boundaries of the analysis region were all set to be the perfectly matched layer (PML) absorbing boundary of 50 layers and the reflection from the boundary was minimized. For the whole mountain model, the relative dielectric permittivity was set to $\epsilon_{\infty} = 6$ and the electric conductivity $\sigma = 1.0 \times 10^{-3}$ S/m. The parameters of the Drude dispersion are plasma frequency $f_p' = 408$ MHz and damping frequency $\Gamma = 2\pi \times 10^7$ rad/s for the electrically charged ground (Fujii, 2016). The incident wave has horizontal polarization of the E_z component, same as the real radio broadcast, and the frequency is set to be 70MHz i.e. the wavelength is 4.3m in air. The incident wave is entered in the x-direction from south to north so that it hits the peak of the mountain.

図 4 に示されているように、解析領域のサイズは、西から東に 860m、南から北に 710m で、解析領域の原点に山頂を含み、標高は 3070m から 3240m の範囲、すなわち高さ 170m に設定されています。山頂の標高は 3189.5m で、山頂と解析領域の上限との間には約 50m の差があります。元のデジタル標高モデル (DEM) のグリッド解像度は約 5m であり、FDTD 解析のためにスプライン補間によって 0.2m の細かいグリッドが得られました。解析領域の境界はすべて、完全一致層 (PML) 吸収境界として設定され、境界からの反射は最小限に抑えられました。山全体のモデルでは、比誘電率は $\epsilon_{\infty} = 6$ 、電気伝導率は $\sigma = 1.0 \times 10^{-3}$ S/m に設定されました。Drude 分散のパラメータは、プラズマ周波数 $f_p' = 408$ MHz、減衰周波数 $\Gamma = 2\pi \times 10^7$ rad/s で、電荷を帯びた地表に適用されます (Fujii, 2016)。入射波は実際のラジオ放送と同じく E_z 成分の水平偏波を持ち、周波数は 70MHz、つまり空気中での波長は 4.3m に設定されています。入射波は南から北に向かって x 方向に進み、山頂に到達するようにしています。

3.1.2 Numerical Results 数値解析結果

The analysis results are shown in Figure 5. To distinguish the behavior of radio waves for the cases with and without the surface charges, it is easily recognizable to plot only the vertical component E_y . The vertical cross-section of the landform on which the radio wave field will be plotted is shown in Figure 5(a). In these plots, the incident wave is not included; only the scattered or diffracted wave in the vertical polarization is observed. In the case where no earthquake is expected and there is no surface electric charge, the radio wave is diffracted at the peak as a normal phenomenon and the wave partially penetrates the ground as shown in Figure 5(b). In contrast, for the case where crusts are stressed and electric surface charges appear on the peak, the radio wave is strongly scattered and diffracted in random directions as shown in Figure 5(c); this is considered to be the anomalous mountain diffraction caused by the peak covered with surface electric charges.

解析結果は図 5 に示されています。地表に電荷がある場合とない場合のラジオ波の挙動を区別するため、垂直成分 E_y のみをプロットすることがわかりやすい方法です。ラジオ波の場がプロットされる地形の垂直断面は図 5(a) に示されています。これらのプロットでは、入射波は含まれておらず、垂直偏波での散乱波または回折波のみが観測されています。地震が予測されず、地表に電荷がない場合、ラジオ波は通常の現象として山頂で回折し、一部の波が地面に浸透する様子が図 5(b) に示されています。これに対し、地殻が応力を受けて山頂に電荷が発生した場合、ラジオ波は強く散乱され、図 5(c) に示されるようにランダムな方向に回折します。こ

れは、地表電荷で覆われた山頂によって引き起こされる異常な山回折であると考えられます。

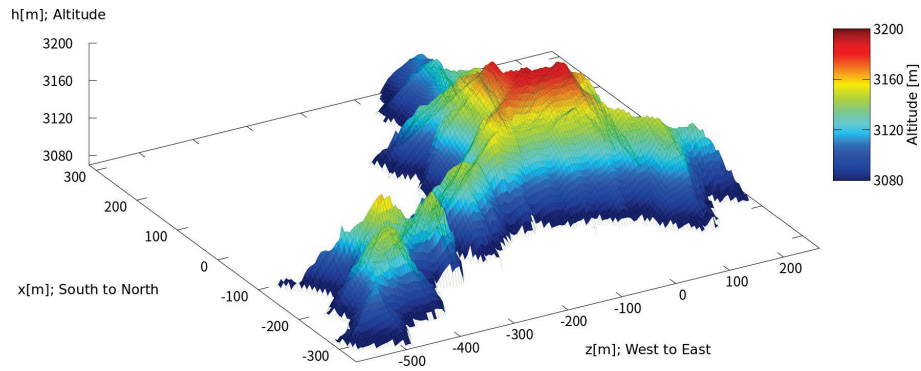


Figure 4. 3D model of the Okuhotakadake peak of 3189.5m altitude. The origin of the horizontal axes is collocated with the peak. Altitude h is taken in the y -direction. The digital elevation model (DEM) is publicized by the Geographical Survey Institute, Japan.

図4. 奥穂高岳（標高 3189.5m）の三次元モデル。水平軸の原点は山頂に配置されている。標高 h は y 軸方向に取られている。デジタル標高モデルは国土地理院による。

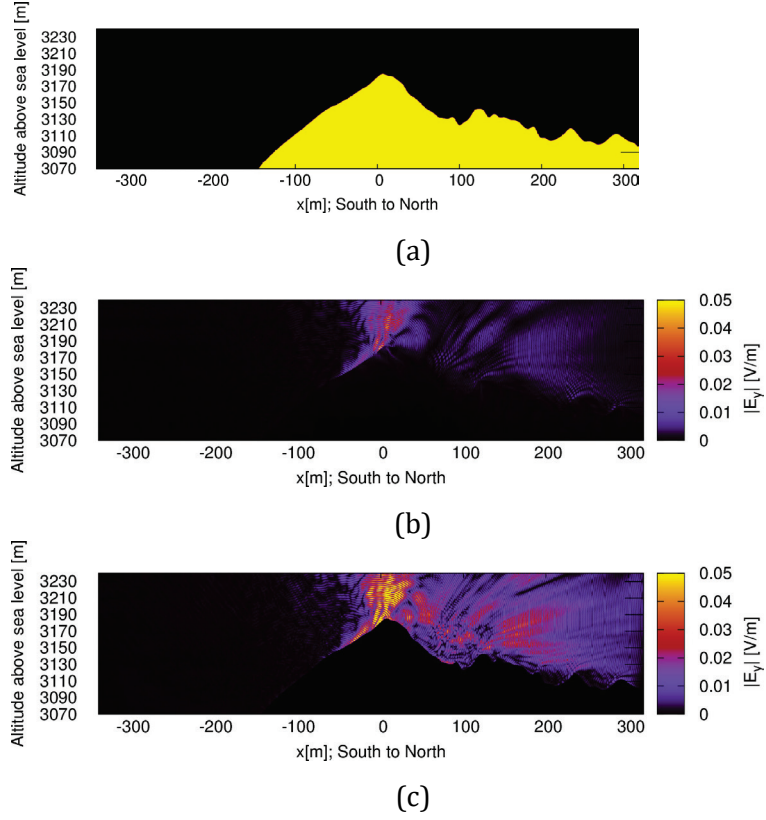


Figure 5. FDTD analysis results of the vertical component $|E_y|$ for the Okuhotakadake peak on the vertical plane from the south to the north that includes the peak point. The incident wave is of horizontal E_z polarization. Altitude h is taken in the y -direction. (a) Vertical landform on the plane of the field plot, (b) without surface charge, and (c) with surface charge.

図 5. 奥徳高岳の垂直成分 $|E_y|$ の FDTD 解析結果。南から北に向かう垂直断面で、入射波の水平偏波 E_z を除いた散乱波または回折波が表示されている。(a) フィールドプロットの平面における地形断面。(b) 表面電荷がない場合の回折波。(c) 表面電荷がある場合の強く散乱・回折された波。

In Figure 6, similar effects are clearly observed in the horizontal plane at 3120m. These results clearly show that the radio wave strongly interacts with the surface electric charges; the strong field along the surface is considered to be the surface plasma wave or the surface plasmon and they are induced around the peak and propagate downward along the surface. They are partly scattered by surface roughness and re-radiate the radio waves, which are diffracted again by the next lower peaks. Interestingly, the radio wave is scattered toward various random directions in a beamlike form as clearly seen in Figure 6(c) compared to (b). This randomness in the scattering and diffraction would cause the randomness in the ability to detect the anomalous signals at particular observation locations, i.e., anomalies are detectable in some locations, but not in others, literally randomly, as the electric charges on the ground surface vary according to the stress to the crusts. The beam-like diffraction is a general phenomenon that is commonly seen in most of our analyses; this could be a possible mechanism for an anti-symmetric behavior of the observation results in Toyama and in Yatsuo, as discussed in the next section.

図 6 では、3120m の水平面でも同様の効果が明確に観察されています。これらの結果は、ラジオ波が地表の電荷と強く相互作用することを明確に示しています。地表に沿った強い電場は、地表プラズマ波または表面プラズモンであると考えられ、それらは山頂周辺で誘起され、地表に沿って下方に伝搬します。それらは部分的に地表の粗さによって散乱され、ラジオ波を再放射し、次に低い山頂で再び回折します。興味深いことに、図 6(c) と (b) を比較すると、ラジオ波がビーム状の形でランダムな方向に散乱されているのが明確に見られます。この散乱と回折のランダム性は、特定の観測地点で異常信号を検出できるかどうかのランダム性を引き起こし、すなわち、ある地点では異常が検出され、他の地点では検出されないという現象が、地殻への応力に応じて地表の電荷が変化するために生じることを意味します。このビーム状回折は、ほとんどの解析で一般的に見られる現象であり、次の節で議論されるように、富山と八尾での観測結果における反対称的な挙動の可能なメカニズムであると考えられます。

It is of particular importance to evaluate the quantitative agreement between the observation and the numerical analysis. We assume the typical environmental conditions for a broadcast radio wave with its source power $P_0=1\text{kW}$, and it is observed at a distance of $r=100\text{km}$. Then, the intensity (magnitude of the pointing vector or the power flow per unit area) of the radio wave is estimated over a tentative sphere surface of radius r as $p = P_0/4\pi r^2 \approx 8 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$. In the numerical analysis, the electric field strength of the incident wave is set to approximately 1V/m , and that of the diffracted radio wave is typically 1% to 5% of the incident wave that is found in Figures 5 and 6. If we assume that it is 1%, then the intensity of the diffracted wave will be $p = 8 \times 10^{-9} \times 0.01^2 = 8 \times 10^{-13} \text{ W/m}^2 = 8 \times 10^{-10} \text{ mW/m}^2$ (milli-watts per square meter). We also assume that the effective antenna cross section for the Yagi antenna is of the order of $a = 1\text{m}^2$, then, the received power for the Yagi antenna is estimated to be $P = ap = 8 \times 10^{-10} \text{ mW}$, which is $10\log P = -90\text{dBm}$; this value is the receivable power when the anomalous diffraction occurs, and is consistent with the received power for the observed anomalous signals, typically -90dBm to -100dBm as found in all the observation results such as Figure 3, and Figure 7 in the later section.

観測結果と数値解析の定量的な一致を評価することは特に重要です。放送用ラジオ波の典型的な環境条件として、送信出力 $P_0 = 1\text{kW}$ 、観測距離 $r = 100\text{km}$ を仮定します。このとき、ラジオ波の強度（ポインティングベクトルの大きさ、または単位面積あたりの電力の流れ）は、半径 r の仮想球面上で $p = P_0 / 4\pi r^2 \approx 8 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$ と見積もられます。数値解析では、入射波の電場強度を約 1V/m に設定しており、回折したラジオ波の強度は通常、入射波の 1% から 5% 程度です（図 5 および図 6 参照）。これを 1% と仮定すると、回折波の強度は $p = 8 \times 10^{-9} \times 0.01^2 = 8 \times 10^{-13} \text{ W/m}^2 = 8 \times 10^{-10} \text{ mW/m}^2$ （平方メートルあたりミリワット）となります。また、八木アンテナの有効アンテナ断面積をおよそ $a = 1\text{m}^2$ と仮定すると、八木アンテナで受信される電力は $P = ap = 8 \times 10^{-10} \text{ mW}$ と見積もられます。これは $10\log P = -90\text{dBm}$ となり、異常回折が発生したときに受信可能な電力であり、図 3

や後述の図 7 に示されている観測結果で得られた -90dBm から -100dBm の異常信号の受信電力と一致しています。

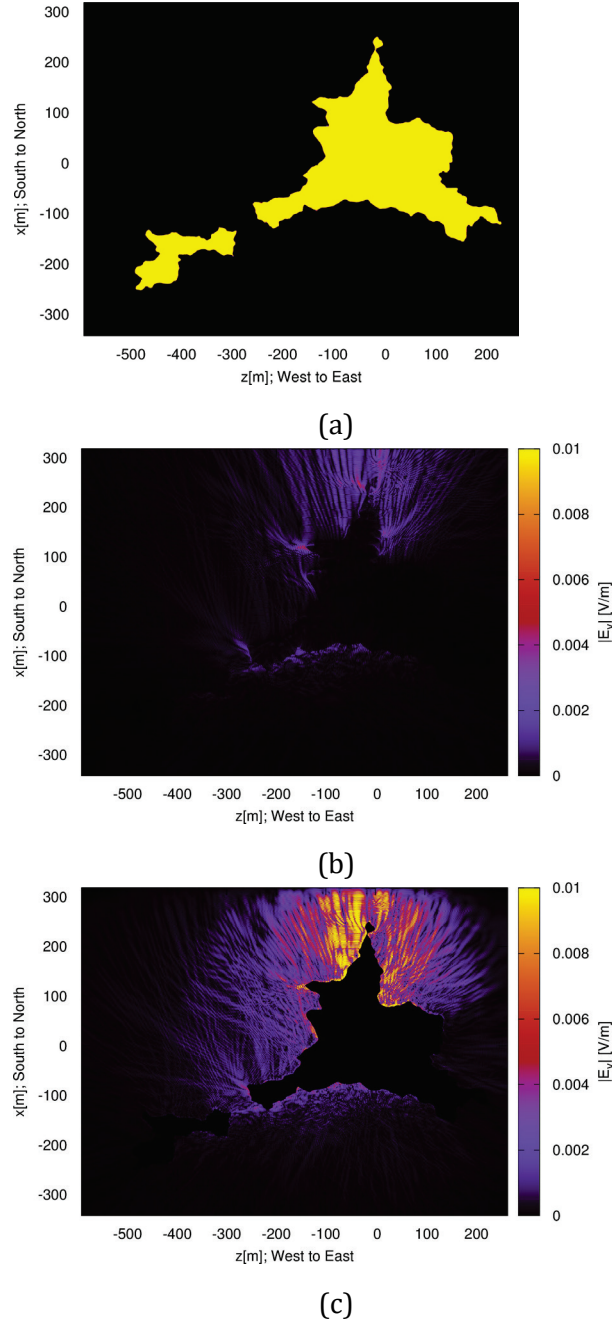


Figure 6. FDTD analysis results of vertical component $|E_y|$ for the Okuhotakadake peak on the horizontal plane at an altitude of 3120m, which is 69.5m down from the peak. The incident wave is of horizontal E_z polarization incoming from the south. (a) Configuration of the landform on the plane of the field plot, (b) without surface charge, and (c) with surface charge.

図6. 奥穂高岳の頂点付近での垂直成分 $|E_y|$ の FDTD 解析結果。3189.5m の標高を持つ奥穂高岳の頂点の南から北に向かう垂直面上で解析された電磁波の散乱波または回折波を示しています。(a) 電磁波のプロットが行われる平面の地形断面、(b) 表面電荷がない場合の通常の回折波、(c) 表面電荷が存在する場合の強く散乱されランダムな方向に回折する波。

3.2 Pacific Coast of Central Japan 中部日本の太平洋岸

Next, we consider the anomalous radio wave propagation in the coastal regions. As shown in Figure 7, one day before the Fukushima earthquake of $M7.4$ on March 16, 2022, we detected significantly clear radio wave signals of possible earthquake precursors at two locations over 200km apart (Fujii, 2023a). For this event, the anomalous signal at the Iwata observation station from the Tsu broadcast station (fourth slot from above) was much larger than those at the Toyama (first slot) and Yatsuo (second slot) stations, leading to the implication of earthquakes occurring near the Pacific side rather than the Japan Sea (north) side. Eventually, about 15 hours after the maximum of the anomalous signal, the Fukushima offshore earthquake occurred. The epicenter for this event is shown in Figure 1. The anomalous signal from the Shizuoka broadcast station to the Iwata observation station (third slot in Figure 7) also exhibits moderate variation, which could be due to the influence of the nearby Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line. More examples of the anomalous signals are found in Supporting Information (Fujii, 2024c) Sections 4.2.3 and 4.2.5.

次に、沿岸地域での異常なラジオ波伝搬について考えます。図 7 に示されているように、2022 年 3 月 16 日に発生した福島沖 $M7.4$ の地震の 1 日前に、200km 以上離れた 2 か所で明確な地震前兆と考えられるラジオ波信号が検出されました (Fujii, 2023a)。このイベントでは、津放送局から磐田観測局（上から 4 番目のスロット）への異常信号が、富山観測局（最上部のスロット）や八尾観測局（2 番目のスロット）よりもはるかに大きく、地震が日本海側（北側）よりも太平洋側で発生することを示唆していました。最終的に、この異常信号のピークから約 15 時間後に福島沖地震が発生しました。この地震の震源地は図 1 に示されています。磐田観測局に対して静岡放送局から送られた異常信号（図 7 の 3 番目のスロット）も中程度の変動を示しており、これは近くの糸魚川-静岡構造線の影響による可能性があります。異常信号のさらなる例は、補足情報 (Fujii, 2024c) の第 4.2.3 節および第 4.2.5 節に記載されています。

It is very interesting to note that the variation of the anomalous signals for Toyama (first slot) and Yatsuo (second slot) shows an anti-symmetric behavior; when the signal increases in Toyama, the signal decreases in Yatsuo, and vice versa. Such phenomena in a small district of only 10km distance is difficult to explain by meteorological or ionospheric phenomena such as radio ducting and sporadic E layers, but can be explained by anomalous diffraction due to surface electric charges as discussed in the previous section; more details are found in (Fujii, 2024c) Section 4.2.4.

非常に興味深いことに、富山（最上部のスロット）と八尾（2 番目のスロット）での異常信号の変動は反対称的な挙動を示しています。すなわち、富山で信号が増加すると、八尾では信号が減少し、その逆もまた同様です。わずか 10km の小さな区域でこのような現象が発生するのは、ラジオダクトやスポラディック E 層といった気象現象や電離層現象で説明するのは難しく、前節で議論されたように、地表の電荷による異常回折で説明できます。詳細は (Fujii, 2024c) の第 4.2.4 節に記載されています。

Note also that, in Figure 7, the observed signals show some smaller fluctuations even after the main shock (e.g. March 17, 2022, at 00:00 in the second slot, and same day at 8:00 in the fourth slot, also smaller fluctuations in other plots). These post-cursor signals are often seen in other cases as well, which can be attributed to the crustal activity in the associated nearby regions, and to the other smaller earthquakes. More examples are found in (Fujii, 2024c) Section 4.2.7. Although there are some uncertainties that are difficult to fully describe, the significance in this case is that the major anomalies occurred almost simultaneously. Long-term observation data are found again in (Fujii, 2024c) Section 4.2.6 and in Supporting Data Set-1 and 2 (Fujii, 2024a, 2024b) on the corresponding pages in chronological order. It is also noteworthy that during the period of the Fukushima $M7.4$ earthquake in Figure 7, 80.9MHz signals did not show any particular variations either in

Toyama, Yatsuo or in Iwata observation station, suggesting that no broadband noise was observed; for the observation data, see (Fujii, 2024c) Section 4.2.3 Figures 6 to 9, and related part.

また、図 7 では、主震後にも小さな変動が観測されていることに注目してください（例：2022 年 3 月 17 日 0 時に 2 番目のスロット、同日 8 時に 4 番目のスロット、その他のプロットでも小さな変動が見られます）。これらのポストカーサー信号（後続信号）は他のケースでもよく見られ、関連する近隣地域の地殻活動や、他の小さな地震によるものと考えられます。さらなる例については（Fujii, 2024c）第 4.2.7 節に記載されています。完全には説明しきれない不確実性がありますが、このケースで重要なのは、主要な異常がほぼ同時に発生したことです。長期的な観測データは（Fujii, 2024c）の第 4.2.6 節および補足データセット 1 および 2（Fujii, 2024a, 2024b）の対応するページに時系列順で再掲載されています。また、図 7 に示されている福島 M7.4 地震の期間中、富山、八尾、磐田の観測局では 80.9MHz の信号に特別な変動は見られず、広帯域ノイズは観測されなかったことも注目に値します。観測データについては（Fujii, 2024c）の第 4.2.3 節、図 6 から図 9 および関連部分を参照してください。

3.2.1 Numerical Analysis Conditions 数値解析条件

In the lower part of Figure 1, the landform near the radio wave path from Tsu to Iwata is shown by white arrows. Along this radio wave path, there are some landforms that can cause radio wave diffraction, such as high cliffs along the Pacific coast of Atsumi peninsula. The numerical model of the coast including the cliff of several ten meters in height is shown in Figure 8. The size of the analysis region is 1420m from west to east, 600m from south to north, including a part of the Pacific Ocean. The total height of the analysis region is 100m; the height above sea level is 96m, added with the tentative 2m-deep sea water and 2m-thick sea bottom, which have little effect on the analysis results.

図 1 の下部では、津から磐田へのラジオ波の経路付近の地形が白い矢印で示されています。このラジオ波の経路に沿って、渥美半島の太平洋沿岸にある高い崖など、ラジオ波の回折を引き起こす可能性のある地形が存在します。数十メートルの高さの崖を含む沿岸の数値モデルは図 8 に示されています。解析領域のサイズは、西から東へ 1420m、南から北へ 600m で、太平洋の一部を含んでいます。解析領域の総高さは 100m で、海拔 96m に加えて暫定的に深さ 2m の海水と厚さ 2m の海底が設定されており、これらは解析結果にほとんど影響を与えません。

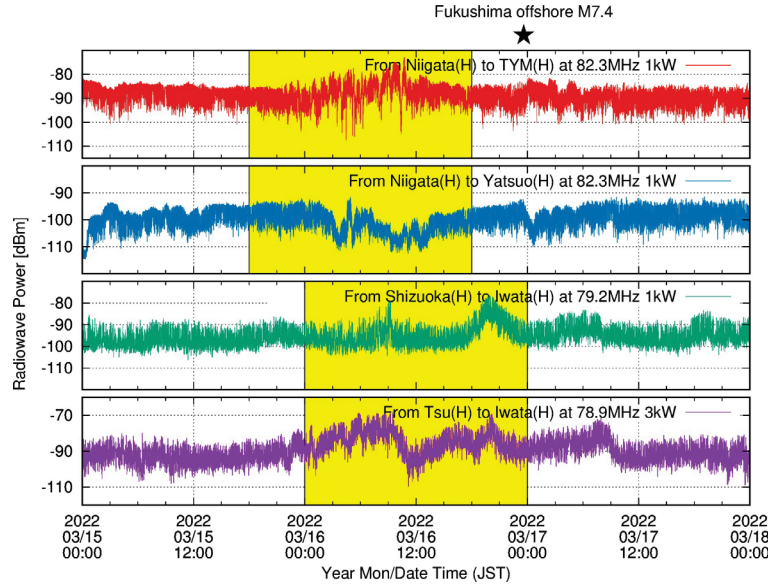


Figure 7. Comparison of the anomalous signals observed in Toyama, Yatsuo and Iwata around the Fukushima offshore *M7.4* earthquake on March 16, 2022. Star symbol shows the time of the earthquake.

図 7. 2022 年 3 月 16 日に発生した福島沖 *M7.4* 地震の約 1 日前に観測された異常なラジオ波信号の比較。富山、八尾、磐田の観測地点における異常信号の強度が示されています。観測された異常信号の強度は、福島沖地震発生約 15 時間前にピークに達しました。白い矢印は、観測されたラジオ波経路と海岸線上の地形の関係を示しています。

The relative dielectric permittivity was set to $\epsilon_{\infty} = 6$ and the electrical conductivity $\sigma = 1.0 \times 10^{-3}$ S/m for the ground, and $\epsilon_{\infty} = 80$, $\sigma = 4.0$ S/m for the seawater. The parameters of the Drude dispersion are $f_p' = 408$ MHz and $\Gamma = 2\pi \times 10^7$ rad/s for the electrically charged ground as in the previous analysis. The seawater was treated as a normal lossy conductive medium. The grid size of the DEM is approximately 5m, and it was refined by the spline interpolation to obtain the FDTD grid of 0.2m resolution. The analysis region is surrounded by 50 layers of perfectly matched layer (PML) absorbing boundaries and was analyzed with the 70 MHz incident radio wave from the west.

地表の相対誘電率は $\epsilon_{\infty} = 6$ 、電気伝導率は $\sigma = 1.0 \times 10^{-3}$ S/m に設定され、海水については $\epsilon_{\infty} = 80$ 、 $\sigma = 4.0$ S/m に設定されました。Drude 分散のパラメータは、前の解析と同様に、電荷を帯びた地表に対して $f_p' = 408$ MHz、 $\Gamma = 2\pi \times 10^7$ rad/s に設定されました。海水は通常の損失性導電媒質として扱われました。DEM（デジタル標高モデル）のグリッドサイズは約 5m であり、スプライン補間によって FDTD グリッドを 0.2m の解像度に細かくしました。解析領域は、50 層の完全一致層（PML）吸収境界に囲まれており、西からの 70MHz の入射ラジオ波で解析が行われました。

3.2.2 Numerical Results 数値解析結果

In the analysis results, for the case where electric charges are present on the surface, it was found that polarization-dependent anomalous diffraction of radio waves can occur (Fujii, 2023b), which is shown in Figure 9; due to the complicated landform, the scattered and diffracted radio waves form many narrow beams and radiate in random directions, which is clearly seen in (c) compared to the result in (b). In particular, due to the high cliff that runs for long distance along the Pacific coast, it is presumed that horizontally polarized waves are scattered and diffracted, which are all

superimposed, and the enhanced wave reaches the observation site. These results suggest the physical mechanism of the anomalous radio wave signals caused by the interaction between the surface charges and radio waves.

解析結果では、地表に電荷が存在する場合、偏波依存の異常なラジオ波の回折が発生することがわかりました (Fuji, 2023b)。これは図 9 に示されているように、複雑な地形のため、散乱および回折されたラジオ波が多数の細いビームを形成し、ランダムな方向に放射されます。これは、(b)の結果と比較した(c)で明確に見られます。特に、太平洋沿岸に沿って続く高い崖により、水平偏波の波が散乱および回折し、それらがすべて重なり合って強化された波が観測地点に到達すると推定されます。これらの結果は、地表電荷とラジオ波の相互作用によって引き起こされる異常なラジオ波信号の物理的メカニズムを示唆しています。

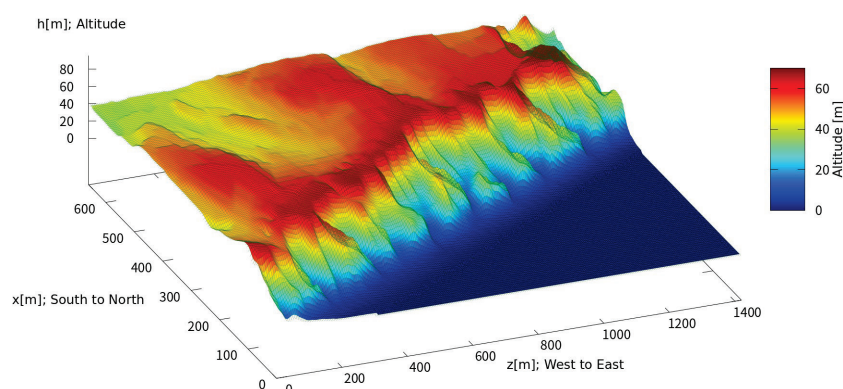


Figure 8. The 3D analysis configuration of a south coastline of Atsumi Peninsula indicated in Figure 1.

図 8． 図 1 に示す渥美半島南海岸線の三次元解析配置。

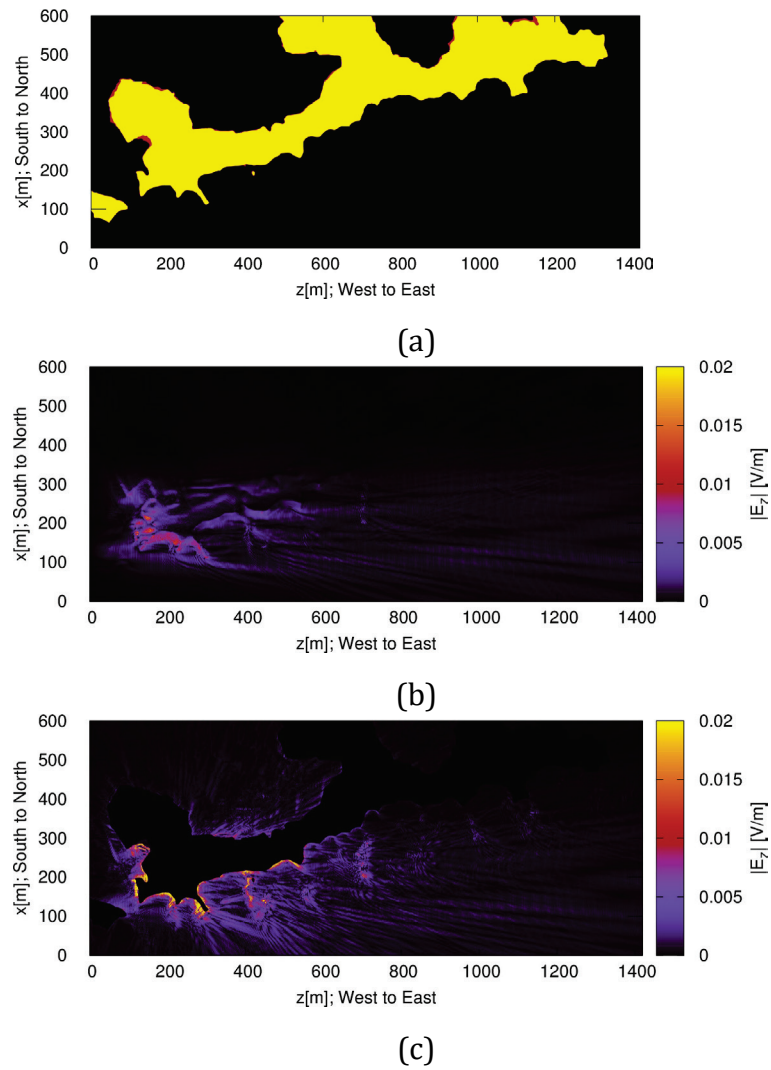


Figure 9. FDTD analysis results of the coastline of Atsumi Peninsula on the horizontal plane at an altitude of 56m above sea level. The incident wave is of horizontal E_x polarization radiated from the west, and horizontal E_z component is plotted. (a) Horizontal landform on the plane of the field plot, (b) Without surface charge, and (c) With surface charge.

図9. 渥美半島の海岸線における FDTD 解析結果。海拔 56m の水平面上での解析。入射波は西から放射された水平偏波 E_x で、水平偏波 E_z 成分がプロットされている。(a) フィールドプロットの水平面における地形。(b) 表面電荷がない場合。(c) 表面電荷がある場合。

3.3 Japan Sea North Coast of Central Japan 中部日本の日本海海岸

We also consider the radio wave propagation in the coastal region on the Japan-Sea side near the Itoigawa district in Figure 1, where anomalous signals are often observed. As shown in Figure 7, radio wave observation data for Toyama (first slot) and those for Yatsuo (second slot) have typical characteristics of anti-symmetric behavior and simultaneous fluctuation. For more examples, see Supporting Information (Fujii, 2024c) Section 4.2.3. These anomalies are difficult to explain by meteorological and ionospheric phenomena, whereas they can be explained by the anomalous diffraction at electrically charged ground surfaces.

また、図 1 に示されているように、糸魚川地区付近の日本海側沿岸地域におけるラジオ波の伝搬についても考察します。この地域では、異常な信号が頻繁に観測されています。図 7 に示されているように、富山（最上部のスロット）および八尾（2 番目のスロット）のラジオ波観測データは、典型的な反対称的な挙動と同時変動の特徴を示しています。さらなる例については、補足情報（Fujii, 2024c）の第 4.2.3 節を参照してください。これらの異常は、気象現象や電離層現象では説明が難しいですが、電荷を帯びた地表での異常な回折によって説明することができます。

The radio wave path for this district is from Niigata to Toyama, which is approximately 180km apart along a coastline and beyond the line of sight due to the curvature of the ocean surface. However, there is a landform of a steep mountain in the very vicinity of the Japan Sea, which is in the Itoigawa district that can cause diffraction of the radio wave by the cliff-like landform. Moreover, the radio wave path crosses the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, along which the stress-induced electric charges may have a relatively high mobility and appear on the nearby ground.

この地域でのラジオ波の経路は新潟から富山までで、海岸線に沿って約 180km 離れており、海面の曲率のために視界外にあります。しかし、日本海に非常に近い糸魚川地区には険しい山の地形があり、この崖のような地形がラジオ波の回折を引き起こす可能性があります。さらに、ラジオ波の経路は糸魚川-静岡構造線を横切っており、この構造線に沿って応力によって誘発された電荷が比較的高い移動性を持ち、近隣の地表に現れる可能性があります。

3.3.1 Numerical Analysis Conditions 数値解析条件

The mountainous landform has been extracted from the Itoigawa district as shown in Figure 10, and the propagation and diffraction of the radio wave have been analyzed for this region. The size of the analysis region was 650m from west to east, 300m from south to north. The height above sea level is 190m, and below the sea level is tentatively set as 2m-deep sea water and 2m-thick sea bottom, which has only little effect on the analysis, so that the total height is 194m.

図 10 に示されているように、糸魚川地区から山岳地形が抽出され、この地域におけるラジオ波の伝搬と回折が解析されました。解析領域の大きさは、西から東へ 650m、南から北へ 300m です。海拔高度は 190m であり、海面下は暫定的に深さ 2m の海水と厚さ 2m の海底として設定されており、解析に与える影響はほとんどなく、合計の高さは 194m となっています。

The material parameters are the same as in the previous section, $\epsilon_\infty = 6$, $\sigma = 1.0 \times 10^3$ S/m for the ground, and $\epsilon_\infty = 80$, $\sigma = 4.0$ S/m for the seawater. The parameters of the Drude dispersion are $f_p' = 408$ MHz, and $\Gamma = 2\pi \times 10^6$ rad/s for the electrically charged ground. Seawater is always assumed to be a normal non-Drude lossy conductive medium. These are typical analysis conditions used for other cases of anomalous radio wave diffraction by landforms (Fujii, 2013, 2016, 2023b).

材料パラメータは前の節と同じであり、地表に対しては $\epsilon_\infty = 6$ 、 $\sigma = 1.0 \times 10^3$ S/m、海水に対しては $\epsilon_\infty = 80$ 、 $\sigma = 4.0$ S/m です。Drude 分散のパラメータは、電荷を帯びた

地表に対して $f_p' = 408 \text{ MHz}$ 、 $\Gamma = 2\pi \times 10^6 \text{ rad/s}$ です。海水は常に通常の非 Drude 型の損失性導電媒質として仮定されています。これらは、地形による異常なラジオ波の回折を解析する他のケースで使用する典型的な解析条件です (Fujii, 2013, 2016, 2023b)。

The incident wave is chosen to be 70 MHz with the horizontally polarized E_x -component radiated from east to west, from the rectangular source region from $x = 30 \text{ m}$ to 270 m , and from $y = 112.4 \text{ m}$ to 180.3 m , which simulates the actual radio wave path from the broadcast station in Niigata City.

入射波は 70 MHz で、東から西に放射される水平偏波 E_x 成分が選ばれました。これは、 $x = 30 \text{ m}$ から 270 m 、 $y = 112.4 \text{ m}$ から 180.3 m の長方形の送信領域から放射されており、新潟市の放送局からの実際のラジオ波経路をシミュレートしています。

3.3.2 Numerical Results 数値解析結果

This analysis region has a large steep mountainous landform, and the steep and rugged slopes are close to the sea, a part of which is shown on the horizontal cross section of the landform in Figure 11(a). Under normal conditions, the radio wave is blocked by the mountainous landform and only a very weak signal reaches the observation point. This is shown in Figure 11(b) and its expansion (c). However, when electric charges are present, the radio wave is diffracted along the slope and propagates around to reach the other side behind the mountain, which appears imperceptibly in Figure 11(d) because the diffracted wave has the same polarization as the incident wave and is dominated by much stronger incident field; the diffracted wave is clearer in the expanded plot in (e). This phenomenon of diffraction allows the horizontally polarized wave to reach the observation site in Toyama.

この解析領域には急峻な山岳地形があり、険しい斜面が海に近接しています。その一部は図 11(a)の地形の水平断面に示されています。通常の条件では、ラジオ波は山岳地形によって遮られ、ごく弱い信号のみが観測地点に届きます。これは図 11(b)およびその拡大図(c)に示されています。しかし、電荷が存在する場合、ラジオ波は斜面に沿って回折し、山の背後に回り込んで到達しますが、図 11(d)では、回折波が入射波と同じ偏波を持ち、はるかに強い入射波に支配されているため、その様子はほとんど目立ちません。回折波は拡大図(e)でより明確に示されています。この回折現象により、水平偏波の波が富山の観測地点に到達することが可能となります。

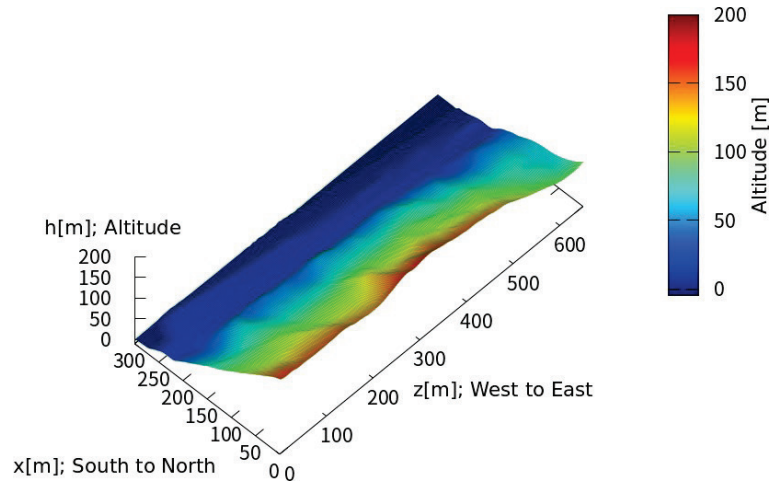


Figure 10. 3D analysis configuration of a coastline along the northern west sea (Japan Sea) side of Japan near Itoigawa City. Altitude h is in the y -direction. the original digital elevation model of approximately 5m resolution publicized by the Geographical Survey Institute, Japan.

図 10. 日本の西北海岸（日本海側）にある糸魚川市付近の海岸線の三次元解析配置。標高 h は y 方向に取られている。国土地理院が公表した約 5m 解像度のデジタル標高モデルを使用。

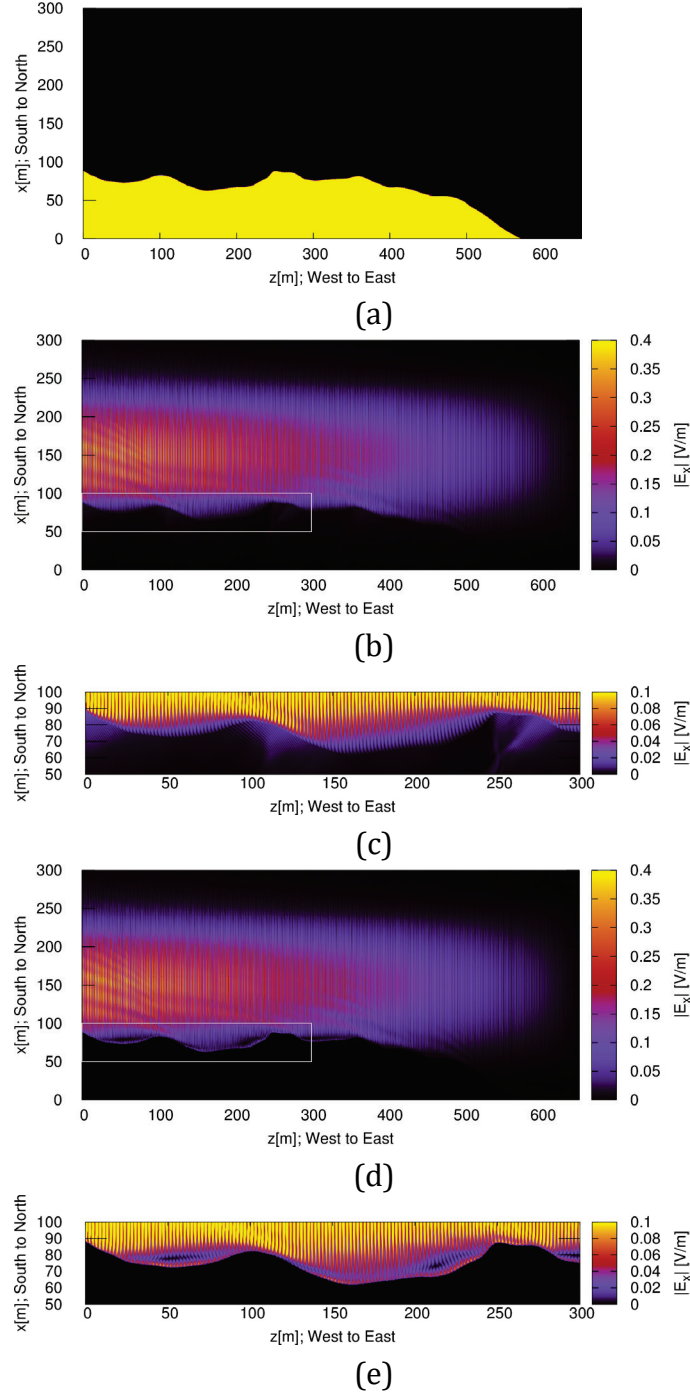


Figure 11. FDTD analysis results of the coastline along the Japan-Sea side of Japan on the horizontal plane at an altitude of 112.4m above sea level. The incident wave is of horizontal E_x polarization radiated from the east, and the same horizontal E_x -component is plotted. (a) Configuration of the landform on the horizontal plane at an altitude of 112.4m. (b) Without surface charge, the white rectangular part of the wave propagation is expanded in (c). (c) Without surface charge, the white rectangular part of (b) expanded. (d) With surface charge, the white rectangular part of the wave propagation is expanded in (e). (e) With surface charge, the white rectangular part of (d) expanded.

図 1 1. 日本海側の海岸線における FDTD 解析結果。海拔 112.4m の水平面上で解析された結果。入射波は東から放射された水平偏波 E_x 成分で、同じ水平偏波 E_x 成分がプロットされている。(a) 標高 112.4m の水平面における地形の構成。(b) 表面電荷がない場合

の波の伝搬を示した白い矩形部分が(c)で拡大されている。(c) 表面電荷がない場合の(b)の白い矩形部分の拡大。(d) 表面電荷がある場合の波の伝搬を示した白い矩形部分が(e)で拡大されている。(e) 表面電荷がある場合の(d)の白い矩形部分の拡大。

4 Discussions 考察

We have observed some anomalous radio wave signals before medium and large earthquakes as shown in the previous sections of this paper and in the Supporting Information (Fujii, 2024c). For all the radio waves that show such anomalous signals, we have noticed some common properties regarding the path of the wave: (i) the distance of the radio wave path is slightly beyond the line of sight, and it is not too far and not too close, (ii) there is a possible diffraction point in the middle of the path, for which, if diffraction occurs, the radio wave can reach the observation site, (iii) there is also a major tectonic line nearby, and the radio wave crosses it over or propagates near it. Conversely, if the above conditions are not satisfied, anomalous signals will not appear or will appear only weakly. Therefore, it is reasonable to consider that the anomalous signals were observed as a variation from the normal state of mountain diffraction, which has been well-studied in the past (Barsis & Kirby, 1961).

本論文の前の節および補足情報 (Fujii, 2024c) に示されているように、中規模および大規模な地震の前にいくつかの異常なラジオ波信号を観測しました。これらの異常信号を示すすべてのラジオ波について、いくつかの共通する特性が観察されました。(i) ラジオ波の経路は視界のわずかに外側にあり、遠すぎず近すぎない、(ii) 経路の中間に回折が発生する可能性のある地点があり、回折が発生すればラジオ波が観測地点に到達できる、(iii) 近くに主要な断層線があり、ラジオ波がそれを横切るか、またはその近くを伝搬している。逆に、これらの条件が満たされない場合、異常信号は現れないか、非常に弱く現れるだけです。したがって、これらの異常信号は、過去に十分に研究されてきた通常の山回折の状態からの変化として観測されたと考えるのが妥当です (Barsis & Kirby, 1961)。

The above properties are seen in Figure 1 and understood by the coordinates in Table 1; the approximate distances between the broadcast and observation stations are 150km from Iida to Toyama, 130km from Tsu to Iwata, and 180km from Niigata to Toyama, all apparently beyond the line of sight of the radio wave due to the curvature of the Earth and/or the mountains in between. The distance from Shizuoka to Iwata is 68km, which is relatively shorter than the other distances, but still beyond the line of sight due to the mountains, and the radio wave could be influenced by the nearby Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line. The electromagnetic field analyses have confirmed that when the electric charges appear on the ground surface, they interact with radio waves propagating near the ground, and that the interaction causes anomalous diffraction of the radio wave, as suggested also numerically and theoretically (Fujii, 2013, 2016), which supports the above common properties (i) to (iii). The behavior of the interaction varies depending on the landform, e.g., whether it is of mountain or coast.

上記の特性は図 1 に見られ、表 1 の座標から理解されます。放送局と観測局の間のおおよその距離は、飯田から富山まで 150km、津から磐田まで 130km、新潟から富山まで 180km であり、いずれも地球の曲率やその間の山々のためにラジオ波の視界外にあります。静岡から磐田までは 68km で、他の距離よりは短いです、山々のために依然として視界外にあります、ラジオ波は近くの糸魚川-静岡構造線の影響を受ける可能性があります。電磁界解析によって、地表に電荷が発生すると、それが地表付近を伝搬するラジオ波と相互作用し、その相互作用がラジオ波の異常な回折を引き起こすことが確認されています。これは、数値的および理論的にも示唆されている通りです (Fujii, 2013, 2016)。この相互作用の挙動は、山岳か海岸かといった地形によって異なります。

In mountains, as the surface charges are induced and repel each other, moving toward the peak and accumulating there, the interaction with radio waves continues for a certain period of time depending on the amount of charges generated by the crustal activity. Anomalous signals thus form a rectangular-shaped pulses with a high potential state for the corresponding lifetime of the charges. This agrees with the similar pulse signals observed in the mountainous region in Hokkaido, Japan (Moriya et al., 2010). If the peak of

the mountain has at least an area comparable to the wavelength of the radio wave, i.e. only a few meters, then it would act as an antenna and re-radiate waves of vertical polarization, i.e., basically perpendicular to the ground surface near the peak. This scenario is supported by our numerical results.

山岳地帯では、地表電荷が誘導されて互いに反発し、山頂に向かって移動してそこに蓄積されるため、地殻活動によって生成される電荷の量に応じて、ラジオ波との相互作用が一定期間続きます。このため、異常信号は高い電位状態を持つ矩形パルスとして形成され、電荷の寿命に対応します。これは、北海道の山岳地域で観測された類似のパルス信号と一致します (Moriya et al., 2010)。山頂がラジオ波の波長に匹敵する面積、つまりわずか数メートルでもあれば、それがアンテナとして機能し、山頂付近の地表に対してほぼ垂直な、垂直偏波の波を再放射することになります。このシナリオは、私たちの数値解析結果によって支持されています。

In contrast, along coasts, surface charges may flow away through the conductive part of the ground or through the seawater, rather than accumulating in one place like the case for a mountain peak. Then the lifetime of such surface charges would be shorter than that on the mountain peaks, and the electric charges would appear and disappear as quickly as they are generated by crustal activity. Thus, the anomalous signals may have a different time variation of the fluctuation compared to that of the rectangular pulses. As briefly mentioned in Sections 3.2 and 3.3, the typical landform of cliffs can cause the anomalous diffraction of the horizontally polarized wave, which is enhanced by the tens of kilometers of coastal landform and then reaches the observation site.

これに対して、沿岸部では、地表の電荷は山頂のように一箇所に蓄積されるのではなく、地面の導電性部分や海水を通じて流れ去る可能性があります。この場合、地表電荷の寿命は山頂でのそれよりも短くなり、電荷は地殻活動によって生成されると同時に、すぐに現れて消えてしまいます。したがって、異常信号の時間変動は、矩形パルスのものとは異なる可能性があります。第 3.2 節および第 3.3 節で簡単に述べたように、崖の典型的な地形は水平偏波の異常な回折を引き起こし、これは数十キロメートルにわたる沿岸地形によって増幅され、その後観測地点に到達します。

The time period of the possible precursors is years before the earthquakes for our case of the mountainous region of the Japan Alps, while it is only a few days for the case of the coasts of the Atsumi Peninsula and Itoigawa district. This difference is considered to be the difference in the phase of the earthquake; in the preparation phase, which could be a long continuous process before the final failure of the crust, stress is applied to the crusts and elastic potential energy accumulates there; after such a period, immediately before the failure, there could be a foreshock stage, which also varies from a few tens of minutes to a few days, and we can observe a short-term precursor (Dobrovolsky et al., 1989). This scenario varies due to the difference in the crustal properties of the epicentral regions and the rate of stress accumulation on the crust. This will influence the temporal synchrony between the precursors and the occurrence of earthquakes, which can vary greatly depending on the crustal structure and the geology and geography where the precursors are observed. Therefore, the knowledge of the electrical or electromagnetic behavior of the particular site, obtained through long-term observations, would elucidate the typical causality between precursors and earthquakes.

日本アルプス山岳地域の場合、前兆現象が発生する期間は地震の数年前にわたるのに対し、渥美半島や糸魚川地区の沿岸の場合はわずか数日前です。この違いは、地震のフェーズの違いによるものと考えられます。地殻が最終的に破壊される前の準備段階は長期間にわたる連続的なプロセスであり、その間に地殻に応力が加わり、弾性ポテンシャルエネルギーが蓄積されます。この期間の後、破壊直前には前震段階があり、それは数十分から数日まで変動し、短期的な前兆が観測されることがあります

(Dobrovolsky et al., 1989)。このシナリオは、震源地域の地殻特性や応力蓄積速度の違いによって異なり、前兆現象と地震発生の時間的な同期性にも影響を与えます。この同期性は、前兆が観測される場所の地殻構造や地質、地理によって大きく異なる可能性があります。したがって、特定の地点における電氣的または電磁的な挙動に関する

知識は、長期的な観測を通じて得られたものであり、前兆現象と地震の因果関係を明らかにするために役立つでしょう。

5 Conclusions 結論

Various possible electrical precursors have been detected by electromagnetic wave observation in the central part of Japan. Such anomalous phenomena are generally subtle and vague. However, with our network observation systems and sophisticated noise reduction filters, stable detection of the anomalous signals has been realized. In this paper, the mechanism of the electromagnetic precursors has been proposed and verified by theoretical and numerical analyses of the electromagnetic wave propagation near the surface of the Earth.

日本の中央部では、電磁波観測によってさまざまな可能性のある電氣的な前兆現象が検出されています。このような異常現象は一般的に微妙で不明瞭です。しかし、私たちのネットワーク観測システムと高度なノイズ低減フィルタを用いることで、異常信号の安定した検出が実現しました。本論文では、地球表面近くでの電磁波伝搬に関する理論的および数値的解析によって、電磁前兆のメカニズムを提案し、検証しました。

We have considered the following particular ground surfaces where we observed possible electromagnetic precursors of earthquakes: (a) a peak of Mt. Okuhotakadake, close to an epicenter in Kamikochi district, (b) a coastline of the Atsumi Peninsula with random cliffs near the Median Tectonic Line, and (c) a coastline of Itoigawa with steep mountain slopes near the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line. From the extensive analysis of these landforms, it has been highly possible that the dominant mechanism of the electromagnetic precursors is the anomalous diffraction by charged ground surfaces; these landforms block the line-of-sight paths of the radio wave propagation, whereas the diffraction of the radio wave by the electric charges on the ground causes significant scattering and re-radiation of the radio wave, which can be detected as precursors at observation sites.

私たちは、以下の特定の地表において、地震の可能性のある電磁前兆現象を観測しました：(a) 神高地地区の震源に近い奥穂高岳の山頂、(b) 中央構造線近くにある渥美半島のランダムな崖がある海岸線、(c) 糸魚川-静岡構造線近くの急峻な山岳斜面を持つ糸魚川の海岸線。これらの地形に対する広範な解析から、電磁前兆現象の主要なメカニズムは、帯電した地表による異常な回折である可能性が非常に高いことが示されました。これらの地形は、ラジオ波の伝搬経路の視界を遮りますが、地表の電荷によるラジオ波の回折が、ラジオ波を大幅に散乱し、再放射させ、これが観測地点で前兆として検出されるのです。

We have demonstrated the stable low-noise observation method, physical mechanism, and numerical analysis of the electromagnetic precursors of earthquakes, which had been extremely controversial and difficult to clarify for a long time. Now, a highly feasible method for monitoring the underground crustal activity and detecting potential earthquake precursors are suggested in terms of where to locate the observation stations and which broadcast stations to choose; i.e., choose the transmitting and observing stations so that the radio wave path is only slightly beyond the line of sight and that the radio wave path crosses a major tectonic line or an expected epicentral zone. Conversely, without fulfilling these conditions, the detection of earthquake precursors would be difficult. We propose the above guidelines to continue monitoring the underground crustal activity, and eventually clarify the correlation property between electromagnetic anomalies and earthquakes.

私たちは、長い間非常に議論的となり、解明が難しかった地震の電磁前兆現象に関する安定した低ノイズ観測方法、物理的メカニズム、および数値解析を実証しました。現在、地下の地殻活動を監視し、地震前兆の可能性を検出するための非常に実現可能な方法が提案されています。それは、観測局をどこに配置し、どの放送局を選ぶかという点で、ラジオ波の経路が視界のすぐ外にあり、ラジオ波の経路が主要な断層線や予想される震源域を横切るように選択するというものです。逆

に、これらの条件を満たさなければ、地震前兆の検出は困難になります。私たちは、地下の地殻活動を引き続き監視し、最終的に電磁異常と地震の相関関係を明らかにするために、上記のガイドラインを提案します。

6 Open Research 研究データ開示

Data of earthquakes from the searching service by the Japan Meteorological Agency (JMA) available at <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html> (JMA-EQ, n.d.). Precipitation and temperature data from JMA at <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/> (JMA-Weather, n.d.). Ionograms from the National Institute of Communication Technologies (NICT), Japan at <https://wdc.nict.go.jp> (NICT, n.d.). Geomagnetic field data from JMA Kakioka Magnetic Observatory, 2013, Kakioka geomagnetic field 1-minute digital data in IAGA-2002 format [dataset], Kakioka Magnetic Observatory Digital Data Service, doi:10.48682/186bd.3f000, available at <http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/metadata> (JMA-GM, n.d.). 気象庁 (JMA) の検索サービスから取得できる地震データは、<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html> にあります (JMA-EQ、年不詳)。気象庁の降水量および気温データは、<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/> から取得できます (JMA-Weather、年不詳)。日本の国立情報通信技術研究所 (NICT) からのイオノグラムは、<https://wdc.nict.go.jp> で入手可能です (NICT、年不詳)。気象庁・柿岡地磁気観測所からの地磁気データは、2013 年、IAGA-2002 形式の 1 分ごとのデジタルデータ [データセット] で提供されており、柿岡地磁気観測所デジタルデータサービスから doi:10.48682/186bd.3f000 で入手可能です。<http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/metadata> で確認できます (JMA-GM、年不詳)。

Supporting Information, including detailed radio wave observation data, is originally available in an institutional repository site at <http://www3.u-toyama.ac.jp/densou01/SupportInfo20240819.pdf>, and also in the multiple resource repository site ZENODO for the findable, accessible, interoperable and reusable (FAIR) capability (Fujii, 2024c).

詳細なラジオ波観測データを含む補足情報は、富山大学の研究室リポジトリサイト (<http://www3.u-toyama.ac.jp/densou01/SupportInfo20240819.pdf>) および、検索可能、アクセス可能、相互運用可能、再利用可能 (FAIR) な機能を提供する複数のリソースリポジトリサイト ZENODO にて公開されています (Fujii, 2024c)。

Long-term radio wave data and various environmental data integrated into time-synchronized comparison diagrams are originally available in an institutional repository site at <http://www3.u-toyama.ac.jp/densou01/SupportDataSet120240819.pdf> and <http://www3.u-toyama.ac.jp/densou01/SupportDataSet220240819.pdf>, and also in the multiple resource repository site ZENODO (Fujii, 2024a, 2024b).

長期的なラジオ波データや、時系列で同期された比較図に統合されたさまざまな環境データは、富山大学の研究室リポジトリサイト (<http://www3.u-toyama.ac.jp/densou01/SupportDataSet120240819.pdf> および <http://www3.u-toyama.ac.jp/densou01/SupportDataSet220240819.pdf>) および、複数のリソースリポジトリサイト ZENODO で公開されています (Fujii, 2024a, 2024b)。

Figures were made with Gnuplot version 5.2.8 available under Copyright by T. Williams, and C. Kelley at <http://www.gnuplot.info> (Williams & Kelley, n.d.).

図は、T. Williams および C. Kelley による著作権のもとで提供されている Gnuplot バージョン 5.2.8 を使用して作成されました。<http://www.gnuplot.info> で入手可能です (Williams & Kelley, 年不詳)。

The map was created using the open-source software QGIS version 3.22.5, available at <https://www.qgis.org>, and map tiles from the Geographical Survey Institute (GSI), Japan.

地図は、<https://www.qgis.org> で入手可能なオープンソースソフトウェア QGIS バージョン 3.22.5 を使用して作成され、国土地理院 (GSI) の地図タイルを使用しています。

Acknowledgments 謝辞

This work is partly supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) KAKENHI Grant Number 21K04059 and 24K07488.

本研究は、部分的に日本学術振興会（JSPS）の科学研究費助成事業（KAKENHI）21K04059 および 24K07488 の助成を受けて実施されました。

References 参考文献

- Barsis, A., & Kirby, R. (1961, Sep.-Oct.). VHF and UHF signal characteristics observed on a long knife-edge diffraction path. *J. Res. of the National Bureau of Standards - D. Radio Propagation*, 65D(5), 437-448.
- Bleier, T., Dunson, C., Roth, S., Heraud, J., Lira, A., Freund, F., ... Papadopoulos, G. (2013). Earthquake prediction studies: Seismo electromagnetics. In (p. 1-15). Terrapub. (Edited by M. Hayakawa)
- Dobrovolsky, I., Gershenzon, N., & Gokhberg, M. (1989). Theory of electrokinetic effects occurring at the final stage in the preparation of a tectonic earthquake. *Phys. Earth Planetary Interiors*, 57, 144-156.
- Dobrovolsky, I., Zubkov, S., & Miachkin, V. (1979). Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure Appl. Geophys.*, 117, 1025-1044.
- Enomoto, Y., & Hashimoto, H. (1990, Aug.). Emission of charged particles from indentation fracture of rocks. *Nature*, 346, 641-643.
- Enomoto, Y., Tsutsumi, A., Fujinawa, Y., Kasahara, M., & Hashimoto, H. (1997, Dec.). Candidate precursors: Pulse-like geo-electric signals possibly related to recent seismic activity in Japan. *Geophys. J. Int.*, 131(3), 485-494.
- Freund, F. (2000). Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks. *J. Geophysical Res., Solid Earth*, 105(B5), 11001-11019.
- Freund, F. (2002). Charge generation and propagation in igneous rocks. *J. of Geodynamics*, 33, 543-570.
- Freund, F. (2011). Pre-earthquake signals: underlying physical processes. *J. of Asian Earth Sciences*, 41, 383-400.
- Fujii, M. (2013, Mar.). Theory of ground surface plasma wave associated with pre-earthquake electrical charges. *Radio Science*, 48, 122-130.
- Fujii, M. (2014, Mar.). Fundamental correction of Mie's scattering theory for the analysis of plasmonic resonance of a metal nanosphere. *Phys. Rev. A*, 89(3), 033805.
- Fujii, M. (2016, Aug.). A new mode of radio wave diffraction via the terrestrial surface plasmon on mountain range. *Radio Science*, 51, 1396-1412.
- Fujii, M. (2021). *Notch filter*, Japan patent 6846789 [Japan Patent 6846789].
- Fujii, M. (2023a, Aug.). Detection of electromagnetic precursors of earthquakes mediated by the terrestrial ground surface plasma wave. In *URSI GASS 2023* (p. ID.145). Sapporo, Japan. (DOI: 10.46620/URSIGASS.2023.0145.XHCR4809)
- Fujii, M. (2023b, Aug.). Numerical analysis of polarized anomalous electromagnetic diffraction via the ground surface plasma wave associated with earthquakes. In *URSI GASS 2023* (p. ID.464). Sapporo, Japan. (DOI: 10.23919/URSIGASS57860.2023.10265549)
- Fujii, M. (2024a). Supporting data set - 1. (<https://doi.org/10.5281/zenodo.12659372>)
- Fujii, M. (2024b). Supporting data set - 2. (<https://doi.org/10.5281/zenodo.12659372>)
- Fujii, M. (2024c). Supporting information. (<https://doi.org/10.5281/zenodo.12659372>)
- Fujiwara, H., Kamogawa, M., Ikeda, M., Liu, J. Y., Sakata, H., Chen, Y. I., ... Ohtsuki, Y. H. (2004). Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L17110.
- Hayakawa, M., Surkov, V. V., Fukumoto, Y., & Yonaiguchi, N. (2007). Characteristics of VHF over-horizon signals possibly related to impending earthquakes and a mechanism of seismo-atmospheric perturbations. *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.*, 69, 1057-1062.

- JMA-EQ. (n.d.). *Japan meteorological agency seismic intensity database search* [Dataset]. Japan Meteorological Agency. Retrieved from <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html>
- JMA-GM. (n.d.). *Geomagnetic digital data service* [Dataset]. Japan Meteorological Agency Kakioka Magnetic Observatory. Retrieved from <http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/metadata>
- JMA-Weather. (n.d.). *Japan meteorological agency previous weather data search* [Dataset]. Japan Meteorological Agency. Retrieved from <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>
- Kamogawa, M., & Ohtsuki, Y. (1999). Plasmon model for origin of earthquake related electromagnetic wave noises. *Proc. Japan Acad.*, 75(B), 186-189.
- Kittel, C. (1986). *Introduction to solid state physics* (6th ed.). New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Kushida, Y., & Kushida, R. (1998). On a possibility of earthquake forecast by radio observation in the VHF band. *Riken Rev.*, 19, 1-13.
- Kushida, Y., & Kushida, R. (2002). Possibility of earthquake forecast by radio observations in the VHF band. *J. Atmos. Electricity*, 22(3), 239-255.
- Moriya, T., Mogi, T., & Takada, M. (2010). Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes. *Geophysical J. Int.*, 180, 858-870.
- Moriya, T., Mogi, T., Takada, M., & Kasahara, M. (2005, Mar.). Observational research for VHF (FM radio broadcasting waves) scattering waves as a precursor of earthquake occurrence. *Geophysical Bulletin of Hokkaido University*(68), 161-178. (in Japanese)
- Moriya, T., Mogi, T., Takada, M., & Yamamoto, I. (2009, Mar.). Observational research for VHF scattering waves prior to earthquakes (II). *Geophysical Bulletin of Hokkaido University*(72), 269-285. (in Japanese)
- NICT. (n.d.). *Ionospheric sounding data in Japan, ionogram* [Dataset]. National Institute of Communication Technologies. Retrieved from https://wdc.nict.go.jp/cgi-bin/ionog/sum_control.cgi
- Pilipenko, V., Shalimov, S., Uyeda, S., & Tanaka, H. (2001). Possible mechanism of the over-horizon reception of FM radio waves during earthquake preparation period. *Proc. Japan Academy*, 77, Ser. B, 125-130.
- Raether, H. (1977). Surface plasma oscillations and their applications. In (Vol. 9, p. 145-261). New York: Academic Press.
- Raether, H. (1988). *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings*. Berlin: Springer-Verlag. (p.5)
- Rikitake, T., & Yamazaki, Y. (1978). Precursory and coseismic changes in ground resistivity. In *Earthquake precursors, proceedings of the US-Japan seminar on theoretical and experimental investigations of earthquake precursors* (p. 161173). Tokyo.
- Taflove, A. (1995). *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method*. Artech House Publishers.
- Taflove, A., & Hagness, S. C. (2005). Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method. In (3rd ed., p. 361-383). Artech House.
- Uyeda, S., Nagao, T., & Kamogawa, M. (2009). Short-term earthquake prediction: current status of seismo-electromagnetics. *Tectonophysics*, 470, 205-213.
- Williams, T., & Kelley, C. (n.d.). *Gnuplot homepage* [Software]. Retrieved from <http://www.gnuplot.info>

- Yasuda, Y., Ida, Y., Goto, T., & Hayakawa, M. (2009, Apr.). Interferometric direction finding of over-horizon VHF transmitter signals and natural VHF radio emissions possibly associated with earthquakes. *Radio Science*, 44(2). (doi:10.1029/2008RS003884)
- Yee, K. S. (1966, May). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Prop.*, 14(5), 302-307.
- Yoshida, T., M.Nishi, & Mochizuki, K. (2006). Observations of seismic electromagnetic phenomena in VHF band by dual frequency method. *Elec. Eng. Jap.*, 155(4), 36-44.

References from the Supporting Information 補足資料における参考文献

- . Y. Kushida and R. Kushida, "On a possibility of earthquake forecast by radio observation in the VHF band", *Riken Rev.*, vol. 19, pp. 1–13, 1998.
- . Y. Kushida and R. Kushida, "Possibility of earthquake forecast by radio observations in the VHF band", *J. Atmos. Electricity*, vol. 22, no. 3, pp. 239–255, 2002.
- . Y. Kushida, *Earthquake Forecast*, PHP Shinsho, Tokyo, 2012, in Japanese.
- . T. Yoshida, M. Nishi, and K. Mochizuki, "Observations of seismic electromagnetic phenomena in VHF band by dual frequency method", *Elec. Eng. Jap.*, vol. 155, no. 4, pp. 36–44, 2006.
- . F. Freund, "Charge generation and propagation in igneous rocks", *J. of Geodynamics*, vol. 33, pp. 543–570, 2002.
- . T. Rikitake and Y. Yamazaki, "Precursory and coseismic changes in ground resistivity", in *Earthquake Precursors, Proceedings of the US-Japan Seminar on Theoretical and Experimental Investigations of Earthquake Precursors*, Tokyo, 1978, pp. 161–173.
- . M. Fujii, "Fundamental correction of Mie's scattering theory for the analysis of plasmonic resonance of a metal nanosphere", *Phys. Rev. A*, vol. 89, no. 3, pp. 033805, Mar. 2014.
- . M. Fujii, "A new mode of radio wave diffraction via the terrestrial surface plasmon on mountain range", *Radio Science*, vol. 51, pp. 1396–1412, Aug. 2016.
- . K. Hosokawa, J. Sakai, S. Saito, T. Tsugawa, M. Nishioka, and M. Ishii, "A monitoring network for anomalous propagation of aeronautical VHF radio waves due to sporadic E in Japan", *Earth Planets Space*, vol. 72, pp. 88, July 2020, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01216-z>.
- . A. Taflov and S. C. Hagness, *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*, chapter 9, pp. 361–383, Artech House, 3rd edition, 2005.
- . M. Fujii, "Theory of ground surface plasma wave associated with pre-earthquake electrical charges", *Radio Science*, vol. 48, pp. 122–130, Mar. 2013.
- . M. Kamogawa and Y. Ohtsuki, "Plasmon model for origin of earthquake related electromagnetic wave noises", *Proc. Japan Acad.*, vol. 75(B), pp. 186–189, 1999.
- . F. Freund, "Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks", *J. Geophysical Res., Solid Earth*, vol. 105, no. B5, pp. 11001–11019, 2000.
- . J. Scoville, J. Sornette, and F. Freund, "Paradox of peroxy defects and positive holes in rocks Part II: Outflow of electric currents from stressed rocks", *J. of Asian Earth Sciences*, vol. 114-2, pp. 338–351, Dec. 2015.
- . F. Freund, *Triboluminescence - Theory, Synthesis, and Applications*, pp. 17–37, Springer, 2016.
- . A. Agrawal, S. H. Cho, O. Zandi, S. Ghosh, R. W. Johns, and D. J. Milliron, "Localized surface plasmon resonance in semiconductor nanocrystals", *Chem. Rev.*, vol. 118, pp. 3121–3207, 2018.
- . C. Kittel, *Introduction to solid state physics*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 6th edition, 1986.
- . H. Raether, *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings*, Springer-Verlag, Berlin, 1988, p.5.