

地震前兆時における地表面プラズマ波による山岳異常回折の観測結果の検証

藤井 雅文 *

*富山大学 大学院理工学研究部 工学領域

1 はじめに

地震は突発的に発生し、従来の方法ではその事前予測は困難であるとされてきた。しかし、地震の発生前に地殻の状態変化により電磁氣的現象が生じ、これを捉えることにより短期地震予測が可能であることが近年明らかになってきた [1, 2, 3, 5, 6]。これは地震活動前後の地殻応力変動により地殻内部から電荷が放出されるためであることが示唆されている。こうして地上に出現した電荷は付近を伝搬する電波と相互作用し、地表面プラズモンが誘起され地表面に沿って伝搬し、さらに地表面付近を伝搬する電波が異常な回折を受ける電磁波異常回折現象として観測されることが推察されている。これまで筆者は理論、数値シミュレーション、および実験観測によりこのことを検証してきた。このような電磁氣的な地震前兆現象の検出により、地震発生を数日から数時間前に推定可能となり、その事態に備え被害を低減することが可能となりつつある。これまでは地震が突然発生し、不意を突かれる不安と災害が大きかったが、数時間前の予測が可能になれば心理的あるいは社会的安全の確保や減災の効果は極めて高いと考えられる。

2 研究手法及び数値解析

筆者は図 1 に示す日本の複数の地点（富山、静岡等）において、その他の地域から伝搬する電波を常時観測している。これらの信号は非常に微弱であり、超高周波（VHF）帯の電波ノイズを低減するために急峻な周波数選択性をもつ超狭帯域阻止フィルタを開発し、これを用いて都市部においても低ノイズ

かつ高感度な電波観測が可能な装置を製作し、複数の観測拠点をネットワークで結び、各地の観測データをリアルタイムで解析できるシステムを構築している。

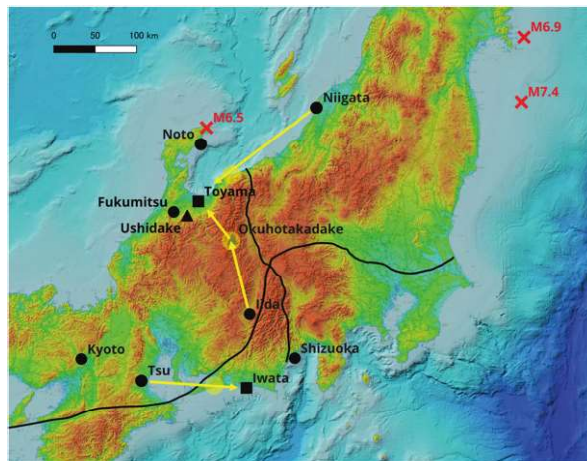
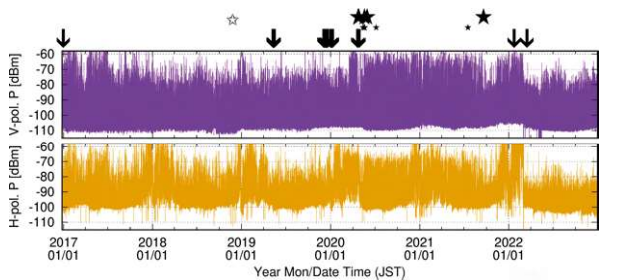
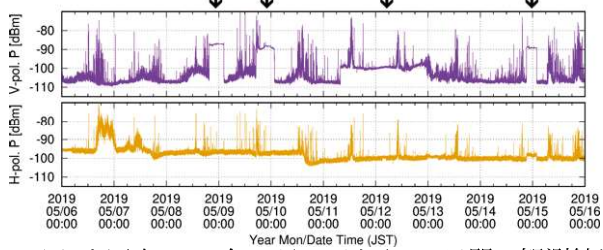


図 1: 電波経路と観測地点および能登半島地震（2023年5月5日 M6.5）と太平洋側で発生した地震（宮城沖 2021年3月20日 M6.9、福島沖 2022年3月16日 M7.4）の震源。黄色矢印は主な電波経路、黄色の円形領域は異常回折が生じると推察される地点、黒曲線は中央構造線および糸魚川-静岡構造線を示す。

本研究では、地震に関連する可能性のある異常な電波伝搬の発現機構を明らかにするため、デジタル国土地形データを用いて有限差分時間領域法（FDTD法）による大規模数値シミュレーションを超並列スーパーコンピュータ上でを行い、山地、河川、海岸などの地形が地表面プラズマ波の伝搬に及ぼす影響を解析した。使用した計算機は Cray CS400 Type B、



(a) 2017年1月1日から2022年12月31日の観測結果



(b) 上図中2019年5月6日から10日間の観測結果拡大図

図2: (a) 2017年から2022年末、(b) 代表的な区間の10日間の、ともに飯田から富山までの88.3MHzの電磁波異常観測結果。矢印は矩形パルス状の異常信号観測時点、星印はマグニチュード5程度（気象庁）以上の主な地震発生時刻。2020年4月と5月に群発地震が発生し、これらの地震発生以降は異常信号はほぼ観測されていない。(a)(b)ともに上段は垂直、下段は水平偏波の観測結果。

64ノード、2304CPUコア、必要メモリ容量は解析領域に応じて約3~5TB、1回の解析に要した時間は約5~20時間であった。

2.1 山岳地域（上高地・奥穂高）における電磁波現象

図1中央部の上高地または奥穂高岳付近では2020年4月から5月にかけてM5を超える地震が相次いで発生した。その約1年前から、図2に矢印で示すような様々な周期と高さの矩形パルス状の特異な信号を多数観測していた[7]。これらの信号は水平偏波にはほとんど現れず垂直偏波のみに観測され、人工的なノイズとしては説明困難であり自然由来の現象と推察される。

同地域において、長野県飯田市から送信された電波が日本アルプスの標高の高い山岳地帯で回折し、

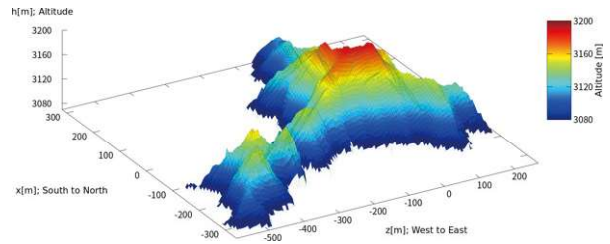


図3: 奥穂高岳山頂（標高3189.5m）の3次元解析モデル。水平面内座標原点は山頂位置。デジタル標高モデルは国土地理院による。

その電波が富山市へ到達している可能性が考えられる。この伝搬経路は明らかに見通し外伝搬であるが、山岳地形の頂上付近に電荷が出現した場合のような電波の散乱や回折が生じるかは不明で興味深い問題であった。そこで、図3に示す国土地理院発行の3次元デジタル標高モデル（Digital Elevation Model, DEM, グリッドサイズ5m）からFDTD解析モデル（グリッドサイズ0.2m）を生成し、この地表面に電荷がある場合とない場合の電波伝搬の様子を3次元FDTD法により解析した。解析手法の詳細は文献[3, 4]に記載している。ここでは偏波依存性を調べるため、入射波の偏波は実際の放送波と同じ水平偏波とし、電波の周波数は70MHzとした。

そのFDTD解析結果を図4に示す[8]。これらの比較により、地表面に電荷がある場合では電荷と電波の相互作用が生じ、電荷のない場合に比べて電波が強く散乱または回折している様子が明らかになった。この結果は上記の観測結果の偏波依存性をうまく説明することができ、地震前兆時の電磁波異常の物理機構を示唆していると考えられる。

2.2 太平洋沿岸（遠州灘・渥美半島）における電磁波現象

次に海岸部における電磁波の異常伝搬現象について検証する。図5に示すように、2022年3月16日に発生した福島沖地震（M7.4）の前日に、200km以上離れた2地点で極めて明瞭な前兆現象と推察される信号を検出した[7]。この事象では静岡県磐田観測点での信号が強く富山観測点での信号が弱かったため太平洋側での地震が予測され、実際にその通り、最大電波強度を観測した約5時間後に地震が発生した。

図1の下部に三重県津市から静岡県磐田市への電

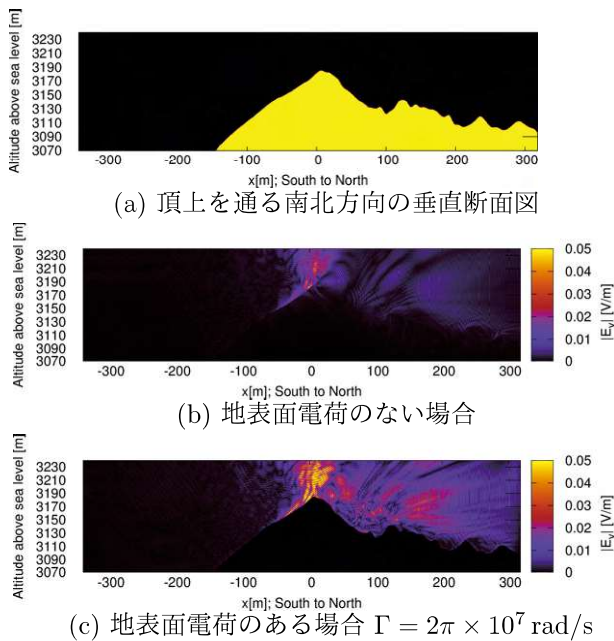


図 4: 奥穂高岳頂上における垂直成分 $|E_y|$ の FDTD 解析結果 (ピークを含む南から北への鉛直面上)。入射波は水平偏波 E_z 。 Γ は Drude 分散の減衰周波数 [5]。

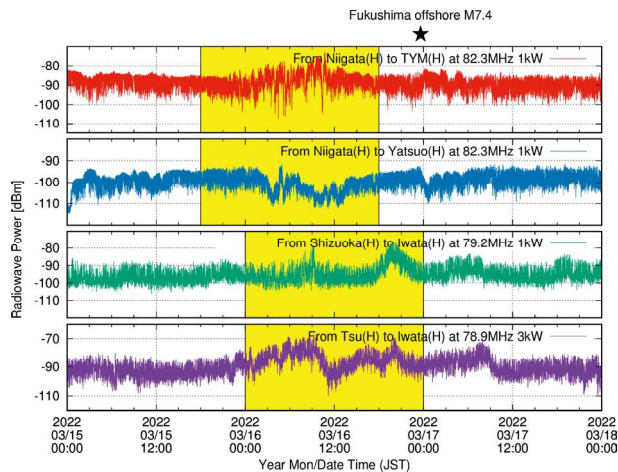


図 5: 2022 年 3 月福島県沖地震 ($M7.4$) 前後に富山、八尾、磐田で観測された前兆信号比較。星印は地震発生時刻。上から新潟から富山市中心部、新潟から富山市八尾 (市中心部より約 20km 南)、静岡市から磐田市、三重県津市から磐田市への電波伝搬観測結果。

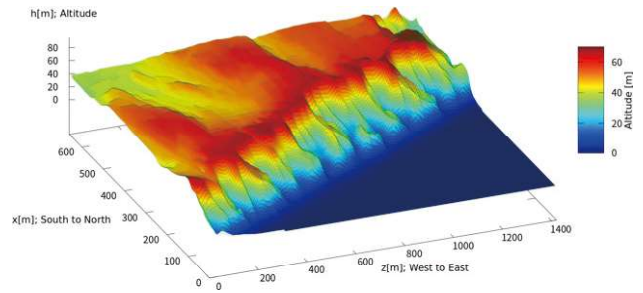


図 6: 渥美半島太平洋岸の 3 次元 FDTD 解析形状。標高 h は y 方向。

波が伝搬する際の地形の概要を示す。同伝搬経路上には渥美半島太平洋岸など、海岸の高低差のある崖など電波を回折する可能性のある地形が存在する。その海岸線の数十メートルの崖を含む数値解析モデルを図 6 に示す。同図の地形を解析した結果、地表面に電荷が出現した状況では、偏波依存する電磁波の異常回折が生じる可能性が判明した。その解析結果を図 7 に示す [8]。同地域の複雑な地形により付近を伝搬する電磁波が無数の細いビームを形成しランダムな方向へ散乱や回折および放射する様子が明らかになった。この結果からは地震の前兆現象として電波伝搬異常が生じる物理的機構を説明することが可能である。特に、太平洋岸に長距離にわたり高低差のある崖が存在し、その複雑な地形によって水平偏波が垂直偏波に比べて強く散乱および回折されることが推察される。

2.3 日本海沿岸 (新潟・富山・糸魚川付近) における電磁波現象

次に、図 1 の上部に位置する能登半島で 2023 年 5 月 5 日に比較的大きな地震 ($M6.5$) が発生し、その直前に図 8 のように富山観測点において明瞭な前兆現象と推察される信号を検出した。ただし、この時には静岡観測点では同様の信号を観測しなかった。このような日本海側と太平洋側における観測信号の違いが地震発生地点に関する推測を可能とし、その通り最大電波強度が観測された約 3 時間後に能登半島地震 ($M6.5$) が発生した。

富山観測地点では、新潟からの電波を観測しており、その電波経路はちょうど見通し内伝搬と見通し外伝搬の境界のような状況であり、中間地点の糸魚川付近において電波の回折に影響があればその効果

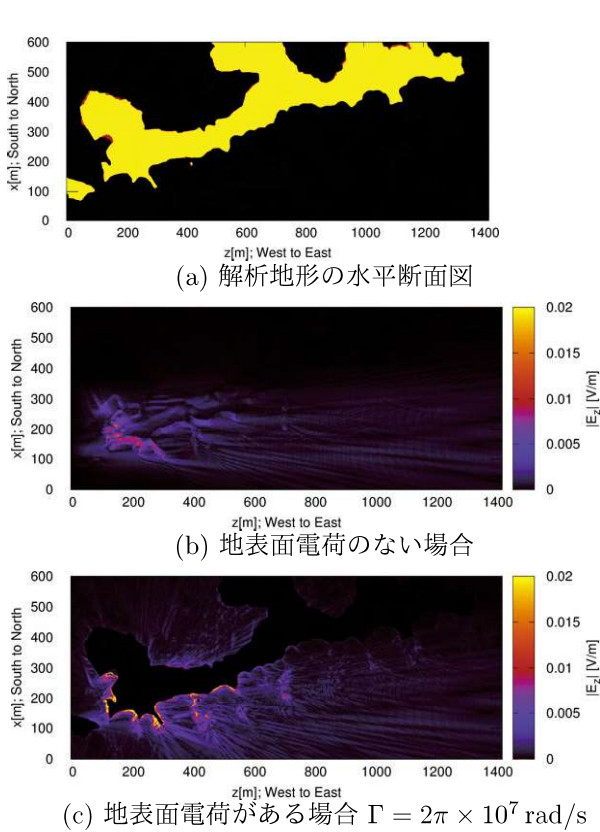


図 7: 渥美半島海岸部の FDTD 解析結果の電界強度分布を海拔 56 m の水平断面で表示した結果。入射波は西から東へ伝搬する水平偏波 (E_x) であり、電界の水平成分 (E_z) をプロットしている。 Γ は Drude 分散の減衰周波数である。

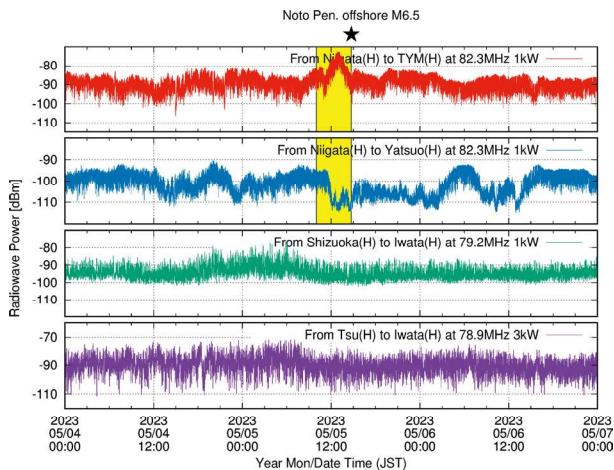


図 8: 2023 年 5 月 5 日能登半島地震 ($M6.5$) 前後に富山、八尾、磐田で観測された前兆信号比較。星印は地震発生時刻。観測した電波は図 5 の表示と同様。

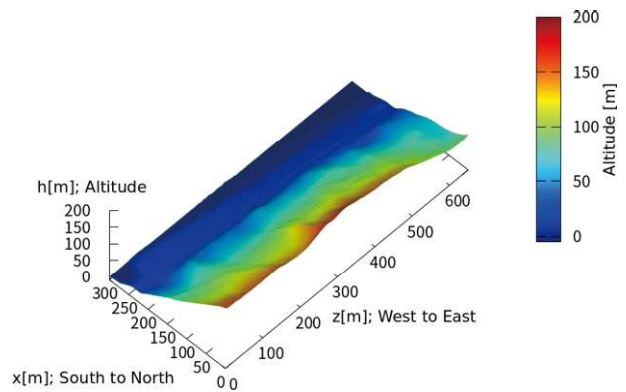


図 9: 糸魚川市付近の西海岸北部（日本海側）の海岸線の 3 次元 FDTD 解析形状。標高 h は y 方向。

が顕著に現れることが推察される。そして、糸魚川には糸魚川-静岡構造線が存在し電波がその構造線を横切る配置となっている。図 9 に糸魚川付近の地形を抽出した結果を示す。この地形における電波伝搬を解析した。解析領域の大きさは、西から東へ 650 m、南から北へ 300 m である。海面からの高さは 190 m であるが、仮に海水 2 m、海底 2 m を追加し、合計 194 m とした。材料パラメータは上記の例と同様であり、地上は $\epsilon_\infty = 6$, $\sigma = 1.0 \times 10^{-3} \text{ S/m}$ 、海水は $\epsilon_\infty = 80$, $\sigma = 4.0 \text{ S/m}$ としている。Drude 分散のパラメータ $f'_p = 408 \text{ MHz}$ とし、帯電した地面の $\Gamma = 2\pi \times 10^6 \text{ rad/s}$, $2\pi \times 10^7 \text{ rad/s}$, $2\pi \times 10^8 \text{ rad/s}$ の 3 つのケースをテストした。海水は常に通常の非 Drude 型、損失性導電媒体と仮定した。

糸魚川付近の地形の解析結果を図 10 に示す。入射波は、実際の新潟市の放送局からの電波を模擬した東から西へ伝搬する周波数 70 MHz の水平偏波（偏波成分は E_x ）とし、 $x = 30 \text{ m}$ から 370 m、 $y = 112.4 \text{ m}$ から 180.3 m の矩形領域から励起した。

この地域は特に急峻な山地が多く複雑な斜面が海に面している。通常、電波は山岳地形に遮られ観測点には直接届かない。しかし、地表面に電荷が存在すると、図 10(d)(e) に示すように、電波は斜面に沿って伝搬し一部は強く回折され富山観測点に到達する。なお、この解析領域の地形には急峻な変化が複数存在し、図では明瞭でないが、入射波の先頭部が解析領域の特定の位置に達したときに数値的な不安定性を引き起こすことがあった。この問題は Γ 値に依存しなかったが今後の研究課題である。

2.4 結果および考察

以上の観測結果と解析結果の比較により、地震に伴う電磁波異常伝搬現象を電波と電荷の相互作用によって説明できることを示した。現段階では、精密な電波観測によって比較的大規模な地震を数時間前に予測できることが示されている。また、複数の地点における電波観測結果を比較することにより、震源位置を太平洋側か日本海側かの程度で判別可能である。さらに、観測拠点を増設することにより地震の発生地点をより正確に予測することが今後の重要課題である。今後、これらの研究成果と理論に基づき電磁波観測を実施し、数百 km の範囲の地殻活動のモニタリングおよび地震の短期予測の精度を向上させることが重要である。このような予測は、これまで国内外において非常に困難とされてきたが、本研究における物理機構の解明と観測手法の改良、および大規模数値シミュレーションによる検証によって科学的な裏付けが与えられた。その社会的および学術的価値は小さくないと考えられる。

参考文献

- [1] Y. Kushida and R. Kushida, "On a possibility of earthquake forecast by radio observation in the VHF band", *Riken Rev.*, v.19, p.1-13, 1998.
- [2] F. Freund, "Charge generation and propagation in igneous rocks", *J. of Geodynamics*, v.33, p.543-570, 2002.
- [3] M. Fujii, "Theory of ground surface plasma wave associated with pre-earthquake electrical charges", *Radio Science*, v.48, pp.122-130, Mar. 2013.
- [4] 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, 033805, Mar. 2014.
- [5] M. Fujii, "A new mode of radio wave diffraction via the terrestrial surface plasmon on mountain range", *Radio Science*, v.51, pp.1396-1412, doi:10.1002/2016RS006068, Sep. 2016.
- [6] L. Crane, "Earthquakes could funnel radio waves to dark zones in mountains", *American Geophysical Union Eos*, 97, doi:10.1029/2016EO059987, Sep. 2016.
- [7] M. Fujii, "Detection of Electromagnetic Precursors of Earthquakes Mediated by the Terrestrial Ground Surface Plasma Wave", *URSI GASS 2023*, Aug. 19-26, Sapporo, Japan, abstract ID.145, 2023.
- [8] M. Fujii, "Numerical Analysis of Polarized Anomalous Electromagnetic Diffraction via the Ground Surface Plasma Wave Associated with Earthquakes", *URSI GASS 2023*, Aug. 19-26, Sapporo, Japan, abstract ID.464, 2023.

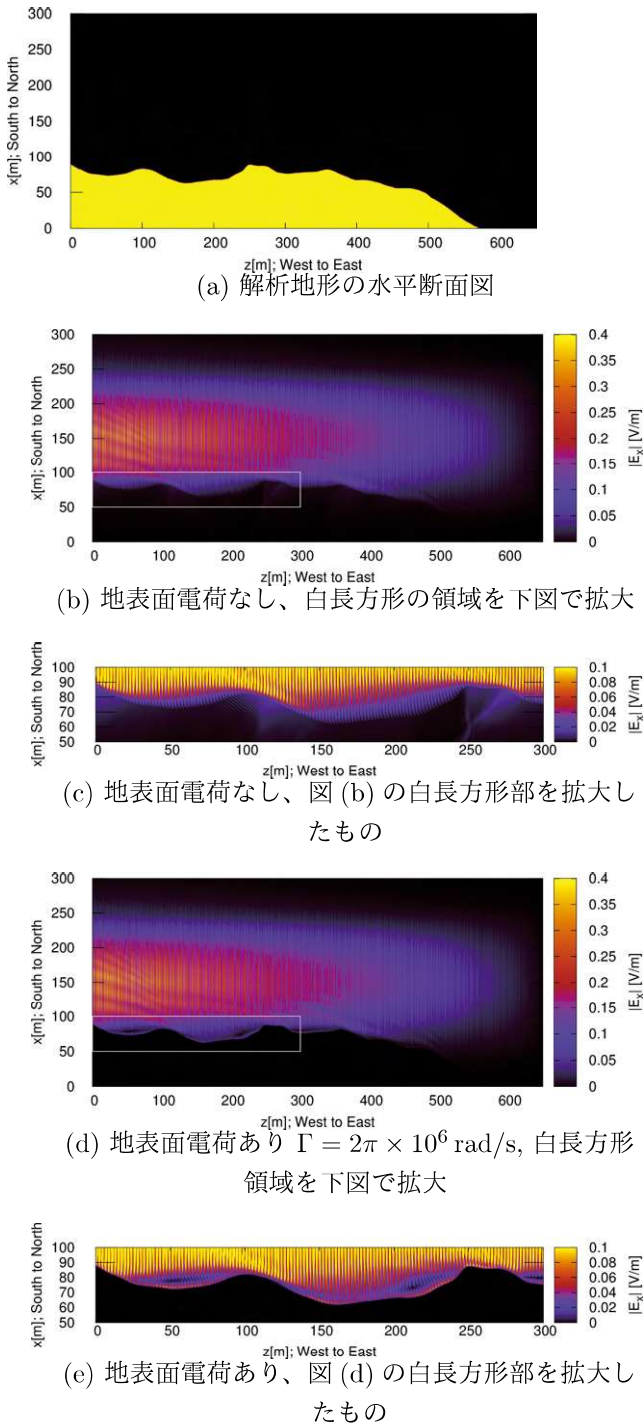


図 10: 日本海側 (糸魚川付近) の FDTD 解析結果の電界強度分布を海拔 112.4m の水平断面上でプロットした結果。電磁波は東から入射した水平偏波 (E_x) であり、同じ水平偏波成分 (E_x) をプロットした。