

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13971

研究課題名(和文) 地表面を伝搬する電磁プラズマ波の新理論と観測による短期地震予測への挑戦

研究課題名(英文) Challenge to the short-term prediction of earthquakes by the observation and new theory of electromagnetic plasma waves propagating on the surface of the earth

研究代表者

藤井 雅文 (Fujii, Masafumi)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・准教授

研究者番号：60361945

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：電磁気学的アプローチによる地震の短期予測の可能性を探るため、地震の発生前に電磁波が見通し外の遠方まで伝搬する異常現象を理論的に解析した。地震時や地震前兆時には地殻への圧力が変動することにより電荷が発生し地表面に出現する。この地表面の電荷は上空の電磁波と相互作用し表面プラズマ波として電磁波と強く結合し、さらに電磁波の回折や散乱を生じさせ、結果として電磁波は遠方へ到達することを示した。この現象を実際の山岳地形を考慮した数値解析により確認した。さらに同理論に基づく観測手法を考案し電磁波の観測を開始した。

研究成果の概要(英文)：To explore the possibility of short-term prediction of earthquakes by means of an electromagnetic approach, we have analyzed theoretically the anomalous propagation of electromagnetic waves to out-of-sight distant places before earthquakes. On or before earthquakes, electrical charges are generated by the stress change on the earth's crust, and appear on the surface of the earth. The surface charges then interact with electromagnetic waves in air, couple strongly with the waves as a surface plasma wave, and further, diffract and scatter the electromagnetic waves, resulting in an electromagnetic wave reaching to a far place. We verified this phenomenon numerically by considering the actual mountainous landform. We have also started observation of electromagnetic waves with the method based on the new theory.

研究分野：電気電子工学、電磁波工学、地球物理学

キーワード：電磁波 地震 表面プラズマ波

1. 研究開始当初の背景

我が国は東日本大震災によって甚大な被害を受け、今なお首都直下、東海、東南海で大地震が予想されている。従来の地震学では地質調査などから、数十年単位の長期的な地震の発生予測がなされている。しかし、近い将来に起こりうる地震に対し、より短期的な予測を行うことは、我が国の喫緊の課題というべき重要な研究テーマである。

一方、これまでの地震の直前には、様々な電磁気現象が生じることが確認されている。驚くべきことに、このような現象を継続的に観測することにより、地震の発生する場所、時間、規模を予測した事例が報告されている[1]。これらの事例を客観的に評価すれば、地震の短期予測は必ずしも不可能ではないと考えられる。

しかし、これらの電磁気的な現象に基づく予測法が十分な信頼性を獲得していない裏には、地震に伴う電磁気現象のメカニズムが理論的に解明されていないという問題があった。このため、観測には試行錯誤が必要で、観測手法の妥当性が常に問題とされてきた。また、たとえ有効な観測手法であっても、理論的な裏付けがなくては説得力に欠け、合理的に発展させることができないという問題があった。

2. 研究の目的

電磁気学的アプローチによる地震の短期予測の可能性について、そのメカニズムが解明されておらず、地震と電磁気現象との関連を理論的に説明できないという問題があった。このような状況において、申請者らは地震直前に生じる電磁波の異常伝搬の原理を初めて理論的に解明し、数値解析により検証した。

本研究では、この新しい理論に基づく科学的アプローチにより、詳細な観測を実施し、地震がいつ、どこで、どれくらいの規模で起こるのかを地震発生の数週間前に捉え、より安全な社会を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

国土地理データを用い、実際の山地、河川、海洋の地形を考慮して数値解析を行うことにより、電波の見通し外領域への伝搬現象を明らかにした。数値解析には、申請者らが開発してきた有限差分時間領域 (FDTD) 法を適用する。この数値解析法はマクスウェル方程式を、時間を追って解く手法であり、様々な電磁波現象に柔軟に適用できる優れた解析法である。特に、地表に出現する荷電粒子によるプラズマ波の現象を柔軟かつ正確にモデル化できる。これにより、従来不明であった見通し外伝搬の現象の新理論を検証することができた。

申請者らはこれまでに2次元解析により地表面プラズマ波の伝搬を確認した。また、

大規模な3次元解析を行うため、超並列大型計算機の使用環境を整え、並列プログラムの正常動作を確認した。この数値解析と観測結果を合わせれば、広範囲の異常現象をより正確に理解し、監視できると考えられる。

これまでの観測で本州北部における地震前兆の異常伝搬現象を観測している。異常信号を受信した数日後に実際にM5程度以上の地震を確認している。

また、申請者らの理論によれば、大気中の電磁波の異常は、これまでよりも高い周波数で観測可能であると考えられる。このために広帯域アンテナでも試験的に観測を開始している。

従来の観測では狭帯域のシステムを使用していたため、同時に複数の周波数を観測するにはその数だけのアンテナと受信機を設置する必要があった。本研究では、この広帯域受信システムにPCによるデータ収集システムを追加し、多様な電磁波源について観測を行った。

4. 研究成果

本研究では地表面電荷と電磁波、特にラジオ放送波との相互作用を大規模な数値解析により解明することを試みた。同様な物理現象に金属表面の自由電子による光散乱がある。金属に光が照射されると表面の電子は光の電場から受けるクーロン力によって振動しようとする。このとき、自由電子密度が十分大きいと高い振動数の外部電場の動きに追従することができ、このような状況では光は金属内部深くまでは浸透できず反射される。しかし、自由電子密度が小さいと電子は外部電場の動きに追従できず、その物質はもはや金属ではなく誘電体と同様になり光は物質の中に侵入する。すなわち、表面電荷密度の大小により物質は外部からの光あるいは電磁波に対して金属のようにふるまうか誘電体のようにふるまうかが決まることとなる。

同じことを地表面に出現する電荷に対して示すことができる。すなわち、地震の前兆として地表面に電荷が多く存在していれば近傍の電磁波と結合して強く散乱したり回折させたりする。その反対に地表面に特に多くの電荷が存在していなければ地表面に到達した電磁波はそれほど大きな作用をおよぼさず、一部は地中に浸透し、一部は反射する比較的穏やかなふるまいをする。

このような電磁波と地表面電荷の相互作用を大規模数値解析によって、特に山岳地帯における実際の複雑な地形を考慮することにより精密に解析する。このような解析によって得られる知見に基づき電磁波の観測を実施すれば、観測結果の時間変動によって地殻の応力変化などの地震に関連する活動を捕えることが可能になると考えられる。このような電磁波の異常現象を明らかにすることが本研究の目的である。この数値解析に関

連する論文はすでに米国地球物理学連合 (AGU) の学術誌に掲載され[2]、同学会ホームページにおいて注目の論文として取り上げられた[3]。

地球上の岩石はプレートと呼ばれる数10kmの厚さの岩盤を構成しており、これがマントルの流動によってゆっくりと移動する際に特定の箇所に大きな応力が作用する。地中深くの火成岩は高温で溶融した状態で水分子を取り込み、上方に移動し冷えて固まる。この際に水素や酸素原子が岩石中の特定の部位に入り込み、ペルオキシ結合を形成することが示されている。このような水素や酸素を取り込んだ火成岩に応力が作用すると特定のペルオキシ結合が破断され、それに伴ってちょうど半導体の電子と正孔のような電荷が発生する。

特に火成岩に応力が作用するとP型半導体に類似した状態となり正孔が生成され岩石中を移動して地表に出現する。また、深部の高温の岩石は熱によって励起された伝導電子を生じ、これらが地中の主に活断層等に沿って伝搬し地表面に到達する。地表面の異なる場所に到達した正孔と電子は再結合するまでは地表を移動しその部分が静電気を帯びたような状態になる。このような地中の岩石における電子と正孔の生成が理論と実験によって示されている[4]。

地表に出現した電荷が自然界において興味深い現象を引き起こすことについて様々な推察と実際に観察された現象が報告されている。それらの詳細は他の文献にゆずり、ここではその1つであるラジオ放送波との相互作用を検証する。ラジオ放送波はAMラジオの長波帯からFMラジオの超短波(VHF)帯が良く知られている。長波帯の電波は周波数が約30kHzから300kHzであり、上空に存在する電離層によって反射されやすく地表面との間で反射を繰り返して遠方まで伝搬する性質がある。一方、超短波帯は周波数が約30MHzから300MHzであり比較的周波数が高く、上空の電離層を透過してしまい通常100km程度より遠方へは届きにくい性質がある。

地震前兆時に地表に電荷が出現するとそれらの電荷は付近を伝搬する電波の電場から力を受け振動する。これは、例えて言えば湖面の上に風が吹くとき水面が波立つのと同じような現象として理解できる。地表面の電荷が波立つ現象は、表面電荷のプラズマ振動である。光学領域では金属表面に光を照射したときに自由電子が振動する表面プラズモンとしてよく知られている。電波の領域でも物質表面に電荷が存在するところに電波が伝搬すると同様の表面プラズマ波が励振される。

実際、地震や地殻活動による表面電荷がこのような地表面のプラズマ波、あるいは地表面プラズモンを生じさせるような表面電荷密度に達することは可能である。このことは

上述の理論および実験から推察されており、超短波帯の電波との相互作用を観測すればこれによって地殻に作用する応力の変化を検出することが可能となる。すなわち、遠方のFMラジオ放送波を常時観測しておき、地殻への応力変動があれば受信されるラジオ放送波の強度が変化することにより検知できる。このような現象を実際の地形を考慮して解析し、正確に電波の伝搬特性を理解することが重要となっている。超短波の波長は数mであるが、地形の変化や電波の伝搬距離は数100kmにおよぶ。したがって、少なくとも地形の起伏と電波の散乱を解析するためには1km四方程度の地形をモデル化する必要がある。このため数値解析は大規模問題となり大型計算機を使用することが必要となる。

今回の数値解析には有限差分時間領域法(FDTD法)を用いた。本手法は電磁波のマクスウェル方程式を差分近似して逐次時間を追って計算するものであり、解析領域を分割することにより効果的な並列計算が可能であり、したがって大規模数値解析に適している。また、プラズマ振動は周波数に依存する性質を持ち、この周波数特性を微分方程式の形で正確に有限差分法に取り込むことが可能となっている。筆者は本手法をナノメートルサイズの金属粒子に生じる局在表面プラズモンの解析に適用しその妥当性は確認済みである[5]。

解析対象には図1に示すように富山県と長野県にまたがる北アルプス山岳地帯のうち立山連峰の剣岳を選んだ。同峰は標高2999mであり約2500m以上は森林限界を超え樹木はなく、花崗岩が切り立ち露出している構造である。このため山体のモデル化には典型的な岩石の電気定数として一様に比誘電率6、導電率 10^{-3} [S/m]を適用した。解析は図1に示す直線AB(5km)に沿った2次元解析と正方形C(600m×600m)の範囲における3次元解析を行った。このために必要な計算機資源は超並列計算機GB8000による3次元解析について最大64ノード、1024プロセス、記憶容量3.8TB、計算時間は1解析当たり約6時間であった。

デジタル標高モデルは国土地理院による5m水平分解能標高地図をもとに双3次スプライン補間法を用いFDTD解析に必要な空間分解能0.2mの解析モデル(図2)を生成した。このモデルの山頂に向けて周波数70MHzの電波を西から東(z軸の正方向)へ伝搬させている。

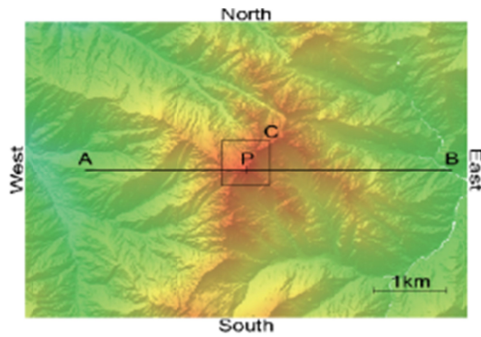


図 1 剣岳付近の地図

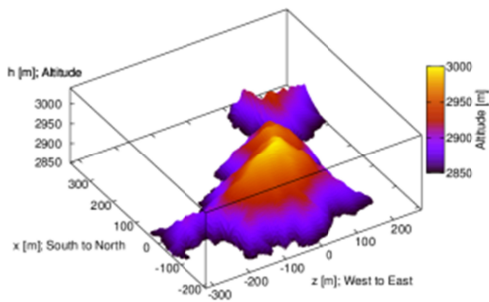
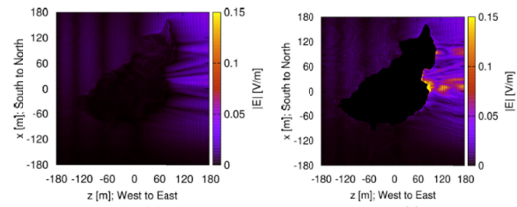


図 2 剣岳山頂の数値解析モデル

今回の解析の主な結果である山頂付近の電波と地表面プラズマ波との相互作用を、図3に西から観察した様子を示している。地表面に電荷が存在しない場合、すなわち図3(b)では電波は山頂で弱く回折していることが分かる。ここでは電波は山頂の岩石中に侵入してから外部へ出ていく様子が見られる。これに対して図3(a)に示す地表に電荷が存在する場合、すなわち地殻の応力が変動していると考えられる状況では、電波は山頂の表面プラズマ波と強く相互作用し、山頂に引き付けられるように反対側まで地表面に沿って伝搬し、さらに地表の凹凸によって散乱される様子が判明した。このような状況では通常電波が到達しない地域に向けて電波が再放射され、高感度の受信機で受信できることが推測できる。

以上のように、電波と地表面電荷の相互作用を大規模な数値解析によって解明することが可能となった。このような結果に基づき様々な地点から出射されるラジオ放送波の受信強度を常時観測することにより、これまで不明であった地殻活動と電波伝搬の関係を推察することが可能になり、ひいては地震につながる地殻の応力変動を検出できる可能性が高まることが期待される。



(1)表面電荷なし (2)表面電荷あり
図 3 解析結果

引用文献

[1] Moriya et.al, "Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes", *Geophys. J. Int.*, v.180, p.858, 2010.

[2] 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.

[3] L. Crane, "Earthquakes could funnel radio waves to dark zones in mountains", *American Geophysical Union Eos*, 97, doi: 10.1029/2016E0059987, Sep. 2016.

[4] F. Freund, "Charge generation and propagation in igneous rocks", *J. of Geodynamics*, v.33, p.543-570, 2002. 2014.

[5] 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.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1件)

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. (Selected as Eos Research Spotlight: Crane, L. (2016), Earthquakes could funnel radio waves to dark zones in mountains, *Eos*, 97, doi:10.1029/2016E0059987, published on 29 September 2016.) 査読有

〔産業財産権〕

出願状況（計 1件）

名称：ノッチフィルタ
発明者：藤井 雅文
権利者：国立大学法人富山大学
種類：特許
番号：特願 2016-222252
出願年月日：2016年11月15日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤井 雅文 (FUJII, Masafumi)
富山大学・大学院理工学研究部・准教授
研究者番号：60361945

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

安藤 彰男 (ANDO, Akio)
富山大学・大学院理工学研究部・教授
研究者番号：00545668

田原 稔 (TAHARA, Minoru)

富山大学・大学院理工学研究部・助手
研究者番号：40242482

(4)研究協力者

()