

チリで発生した三つの大地震の直前に起こった電離圏異常の時空間構造

Spatio-temporal Structure of the Ionospheric TEC Anomalies Immediately Before the Three Large Earthquakes in Chile

*日置 幸介¹、賀 黎明¹*Kosuke Heki¹, Liming He¹

1.北海道大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

全球衛星航法システム(GNSS)のLバンドの複数搬送波の位相差から、電離圏全電子数(Total Electron Content, TEC)を求めることができる。Heki [2011]は、日本全国に展開された国土地理院のGNSS網のデータから、2011年東北沖地震($M_w 9.0$)の約40分前に、震源上空の電離圏でTECが増加したことを見出した。TEC異常を定義するための基準曲線(Reference curve)の導出に曖昧性があること、電離圏が本来持っている自然な変化を大きく超えるものでないこと、の二点が繰り返し批判の対象となってきた[Kamogawa & Kakinami, 2013; Utada & Shimizu, 2014; Masci et al., 2015]が、我々はそれに対し同じJGR誌上で反証を述べてきた[Heki & Enomoto, 2013; 2014; 2015]。最新のHeki & Enomoto [2015]では、地震前の折れ曲がりを経験曲線の代わりに赤池情報量基準(AIC)を用いて検出する方法を提案し、TEC変化率の増加率が背景TECと M_w の双方の関数として表されること、先行時間が M_w と明瞭な相関を示すことを示した。さらに平時における正の折れ曲がり検出率から、地震直前の折れ曲がりの原因を宇宙天気を求めることは確率的に非現実的であることを示した。

本研究では、南半球のチリで発生した2010年2月Maule地震($M_w 8.8$)、2014年4月Iquique地震($M_w 8.2$)、2015年9月Illapel地震($M_w 8.3$)、のプレート間大地震を取り上げる。南米、中でもチリとアルゼンチンでは様々な機関が展開した連続GNSS網が広域に展開されており、TEC異常の空間構造を調べる条件は日本より良好である。我々はUNAVCO、IGS、RAMSAC等のデータセンターからダウンロードしたGNSS生データを解析し、これら三つのチリ地震のすべてで、地震直前に明瞭なTEC変化の折れ曲がりが生じたことを見出した(添付図参照)。本研究では地震直前のTEC異常の三次元空間構造を、地表電荷への電離圏の応答[Kuo et al., 2014]と比較する。

先行時間(折れ曲がりの発生)は三つの地震のそれぞれ40分前、25分前、22分前、であり、他地域の例と整合的である。背景VTECは磁気緯度の違い(Iquique地震は赤道異常の直下で発生)と時刻の違い(Maule地震は深夜に発生)を反映し、それぞれ5 TECU以下、約60 TECU、約20 TECUとバラエティに富む。総じてVTECに対するTEC変化率の増大量は M_w に整合的であった。

いずれの地震でも、地震直前の正のTEC異常は震源北側に生じた(北半球と逆)。またその空間的広がりにはMaule地震で500 km程度、Iquique地震とIllapel地震では300 km程度と M_w への依存性が見られた(添付図参照)。またすべての地震で正異常(TEC増加)と同時刻に負異常(TEC減少)が、震源から遠方の地域で始まること確認された。GNSS局のカバレッジが良いIllapel地震について、正負の異常の三次元的な空間構造を調べた結果、正の異常は震源北側高度200 kmあたり、負の異常は高度400 kmを中心に正異常のやや北寄りに現れることがわかった。正負の異常は地磁気の磁力線に沿っており、Kuo et al. [2014]が地表の正電荷への応答として計算した、電離圏電子密度の異常の空間構造と調和的である。

文献

Heki, K. (2011), GRL.

Heki, K. and Y. Enomoto (2013) JGR.

Heki, K. and Y. Enomoto (2014) JGR.

Heki, K. and Y. Enomoto (2015) JGR.

Kamogawa, M. and Y. Kakinami (2013) JGR.

Kuo, C.L. et al. (2014) JGR

Masci, F. et al. (2015) JGR.

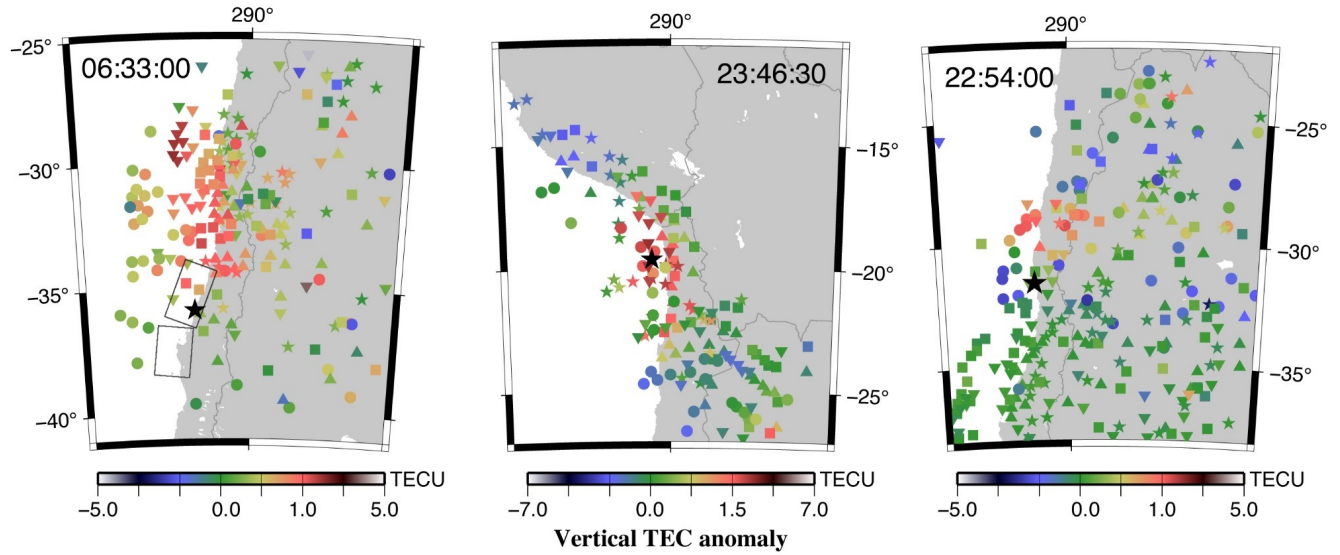
Utada, H., and H. Shimizu (2014) JGR.

図の説明: 2010年Maule, 2014年Iquique, 2015年Illapel地震の直前に起こった鉛直TECの異常を、視線が高度

200 kmの薄い層を貫く点を地上に投影した点に色で表したものを。異なる記号は異なる衛星で得られたデータを示す。

キーワード：GNSS-TEC、前兆、チリ地震

Keywords: GNSS-TEC, precursor, Chilean earthquake



地震に先行する電離圏総電子数変動の統計解析

Statistical Analysis and assessment of Ionospheric TEC anomaly prior to large earthquake

*服部 克巳¹、Han Peng¹、廣岡 伸治¹

*Katsumi Hattori¹, Peng Han¹, Shinji Hirooka¹

1. 千葉大学大学院理学研究科

1. Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Chiba University

近年、地震活動に先行する様々な電磁気現象が報告されており、地震の短期予測の可能性が指摘されている。それらの中でも電離圏総電子数(Total Electron Content; TEC)の変動は有望な手法の1つである。先行研究では、中磁気緯度地域の日本において、地震の前に正のTEC異常が有意に出現することが明らかとなっている。地震に関連するTEC異常の検出のためには、地磁気嵐に起因するTEC変動を除去する必要がある。地磁気嵐起因の異常を除去するために、従来の手法では統計的に定めた地磁気擾乱期間を解析除外期間としていた。しかしより正確な期間を取り除くためには、地磁気嵐期間ではなくそれに基づく電離圏擾乱期間を除去する必要がある。そこで本研究では、日本地域における地磁気嵐に起因する電離圏擾乱の性質を調査し、1998-2013年にわたるTEC変動と地震の関係を統計的に調査した。

地磁気嵐に起因する電離圏擾乱期間を統計解析するために、まず1998~2013年に発生した294個の地磁気嵐をその大きさ(較差)と発生したローカルタイムで分類をした。この分類クラスごとに地磁気嵐に起因する電離圏擾乱の平均的な変動を調査するために、GIM-TEC*時系列データを用いて地磁気嵐発生日の2日前から5日後のデータを抽出した。ブートストラップ法(復元抽出回数10000回)を用いて同時刻のTEC*値の平均値を算出し、地磁気擾乱に起因する電離圏擾乱の性質を調査した。正の異常に注目すると、地磁気嵐の大きさが大きいほど正のTEC異常が大きくなることや、地磁気嵐の発生時間と電離圏擾乱の発達の関連性がわかった。各クラスについて地磁気嵐起因の電離圏擾乱期間を除去した後、地震と正の電離圏異常の相関を調査したところ、従来の1998-2010年までの結果はほぼ一致することがわかった。また解析期間を2013年までとする、2011年東北地方太平洋沖地震の余震の影響が強く現れることもわかった。そこで、孤立地震についてのみ抽出し、同様な相関解析を実施すると、M6以上の地震の1-5日前に正のTECが有意に出現することがわかった。詳細は講演で報告する。

キーワード：統計解析、電離圏総電子数異常

Keywords: Statistical Analysis, Ionospheric TEC anomaly

衛星高度で検知された地震先行電離圏擾乱の発生領域推定

Ionospheric disturbance in D region possibly related to pre-earthquake activities observed by the DEMETER

*新田 英智¹、鴨川 仁¹、東郷 翔帆¹、ジャン・ジャック ベトリエール²、児玉 哲哉³、長尾 年恭⁴

*Hidetoshi Nitta¹, Masashi Kamogawa¹, Shoho Togo¹, Jean-Jacques Berthelier², Tetsuya Kodama³, Toshiyasu Nagao⁴

1.東京学芸大学教育学部物理学科、2.フランス ラトモス、3.宙航空研究開発機構宇宙利用ミッション本部地球観測研究センター、4.東海大学地震予知研究センター

1.Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 2.LATMOS, France, 3.Earth Observation Research Center, Space Applications Mission Directorate, Japan Space Exploration Agency, 4.Earthquake Prediction Research Center, Tokai University

地震に関連する電磁気現象として大気圏および電離圏擾乱は1980年代後半ごろから指摘されてきた。これらの擾乱は、比較的大きなマグニチュードの地震前でも変動が微少であるので、先行現象の存否を示すには大量なイベント収集による統計的な評価が求められる。その意味で、2004年6月にフランスCNESによって地震電磁気衛星DEMETERが打ち上げられ、地震に先行する夜間VLF帯電磁波強度減少現象がM4.8以上の地震、震央距離が500 km以内、地震発生前4時間前に見いだされた。彼らの解析では、VLF帯電磁波強度スペクトルデータ（連続2秒サンプリング・サーベイデータ）を2000個以上の地震に対して地震発生時刻と震央地点を基準に時間的空間的に分類して、平均をとることによって得られている。また彼らは、減少する周波数が1.7kHz周辺であり、地上と電離圏下部で構成される導波管モードのカットオフ周波数とほぼ一致することから、地震の前にD層下部が降下し、カットオフ周波数が変化することによって、この現象が引き起こされているのではないかと考察している。

導波管内で、カットオフ周波数が減衰させられたのならば、それは衛星ではホイスラー波の強度の減少として観測されるはずである。しかし、衛星で観測される電磁波強度データは様々なノイズを含んでいるため、その現象をそのまま直接見ることは難しい。本研究では、ホイスラー波の強度が、他の電磁波よりも強度が大きいという特徴に注目し、VLF帯電磁波強度スペクトルの時系列データからホイスラーの強度のみを抽出して、地震の前のホイスラー波の強度に関して統計的な研究を行った。その結果、地震の前にD層下部が降下していると推測できる結果を得た。

キーワード：地震、電離圏、DEMETER衛星

Keywords: Earthquake, Ionosphere, DEMETER

発震機構と夜間揺らぎ法に基づく地震－下部電離層擾乱の関連性に関する統計研究
Statistical study on the Relationship between Major Earthquakes and Lower Ionospheric
Perturbations based on the Focal Mechanism and Nighttime Fluctuation Method

河野 友紀¹、龍田 健心¹、*芳原 容英¹

Tomoki Kawano¹, Kenshin Tatsuta¹, *Yasuhide Hobara¹

1.電気通信大学 大学院情報理工学研究科

1.Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

地震の発生に先行して下部電離層が擾乱されることが報告されており、これを地震先行電離層擾乱と言う。この物理現象を監視する手法としてVLF/LF帯送信電波観測や、それに伴う夜間揺らぎ法を用いた電界強度変化異常の統計的解析が挙げられるが、擾乱の発生機構を始めとする地圏－大気圏－電離圏結合機構の詳細は未解明である。従ってこれらの現象解明のために地震に関連する物理パラメータと擾乱の発生に関する調査を行うことは必要不可欠である。本研究では2007年から2012年の6年間に日本周辺にて発生した地震をCMT解析による発震機構データ及び震源データに基づき分類し、それぞれにおいて地震先行電離層擾乱の発生状況を調査した。その結果、6年の長期に渡る解析においても過去の報告と同様に逆断層地震で高い擾乱発生率が示される傾向にあることが確認された。さらに、短期地震予測に用いる下部電離層擾乱パラメータに関し、Molchan's error diagramを使用し、下部電離層異常判定のための閾値を調査した。その結果、VLF/LF帯送信電波の夜間平均振幅値は、標準偏差にして2~3σ下回った際に予測精度が最も高くなるという結果が示された。このことは地圏から大気圏に渡る結合機構解明のみならず下部電離層擾乱を用いた将来の短期地震予測精度向上にも有用であると考えられる。

キーワード：地震、電離層擾乱、発震機構、VLF/LF送信局、地震予測、Molchan's error diagram

Keywords: Earthquake, Ionospheric perturbation, Focal mechanism, VLF/LF transmitter, Earthquake prediction, Molchan's error diagram

簡単な客観手法で作成した予測マップによる VHF電波伝播異常と地震発生の相関

Correlation between earthquake occurrence and the VHF propagation anomaly indicated by objectively produced prediction maps

*森田 笙¹、中谷 正生²、茂木 透¹

*Shou Morita¹, Masao Nakatani², Toru Mogi¹

1.北海道大学大学院理学院自然史科学専攻地震学火山学講座、2.東京大学地震研究所

1.Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University,

2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

観測点周辺において発生する地震の発生前に、普段であれば電波が届かない遠くの放送局からのVHF帯 FM 放送波の散乱波が観測されることがあると報告されている (Moriya et al., 2010)。北海道大学では道内に12か所の観測点を設置しこの見通し外伝播と呼ばれる現象を観測している。本研究では、えりも観測点での見通し外 FM放送局の受信強度のデータ約10年分から客観的手法で地震発生予測マップを作成し成績を評価した。6分間隔で取得されている観測データが2サンプル連続で閾値を上回ればその時刻を異常とみなし(Morita and Mogi, 2015, IUGG)、異常の後一定の期間Lの間警報をONにすることで、時空間を「警報ON」、「警報OFF」、「データ欠測などによる判定不能」の3つに分けた予測マップを作成した。

警報ONの期間の割合を警報分率 r 、地震のうち警報ONの期間に発生したものの割合を s として、予測マップのゲイン G を s/r で算出し、さらに p 値も求めた。 r, s ともに「判定不能」の期間は除外して算出した。多くのマップで $G > 1$ が得られ、最も p 値が低かったのは、 $L = 4$ 日として作成した予測マップを $M_w > 5$ の地震と比較した場合で、 $G = 2.1$ 、 $p = 0.036$ であった。まだ有意性を確信できるレベルではないが、今後異常の抽出基準を整備することにより、VHFの見通し外伝播には地震の前兆が含まれることを証明できる可能性があると考えられる。

キーワード：地震発生予測マップ、客観的手法

Keywords: Earthquake prediction map, objective algorithm

地震発生の直前に現れる直流電場の観測

Observation of DC Electric Field Radiated prior to Large Earthquakes

*筒井 稔¹*Minoru Tsutsui¹

1.京都産業大学 名誉教授

1.Professor Emeritus of Kyoto Sangyo Univ.

最近の電離層電子密度の観測研究で、電子密度が地震発生前から増加傾向を示すと言う事が確実となってきた (Heki, GRL, 2011 他) が、そのメカニズムとして、地震前に直流 (DC) 電場が発生する事が候補の一つとして挙げられている。一方、地震発生に伴う電磁波励起現象を解明するために筆者が行った実験 (地震を模擬した岩石への衝撃印加の室内実験) において、衝撃が加わる直前にDC電場が現れる事を示した。これらの状況から、地震が発生する直前にはDC電場が発生する可能性があるとの仮説に基づき、それを解明するための観測研究を開始した。

地震に関連して発生するだろうと思われる電磁界観測のためには、人工電磁波雑音 (特に電車による電磁界の影響) の少ない、静穏な環境が必要であったので、電車軌道から十分 (9.3 km) 離れた京都北部の山中でこの観測を開始した。

空間電場の検出センサーとして、直線状ダイポールアンテナを使用した。大地(GND)に対する両ダイポールアンテナ素子の電気的平衡状態の対策を講じなければ空間における大気電気等の影響による対地電場の変動が常に検出されてしまい、目的とするDC電場を精度よく測定する事はできない。そのため、本研究ではダイポールアンテナの給電方法に注意を払った。即ち、DC電場のみを検出・観測する事とアンテナ素子の電気的平衡を確保するために、給電部分では、抵抗とコンデンサーを並列接続した回路を2セット用意し、それらを直列に接続して給電回路とした。その給電回路の midpoint (接続点) を接地し、回路の両端に夫々の線状ダイポールアンテナ素子を接続した。この給電回路の両端とアンテナ線との間の2つの接続点間に現れる電位差を差動増幅器 (プリアンプ) で検出する事で、大地に対して変動する空間全体の電場成分はコモンモードとして除去する事ができる。一方、空間を伝搬してきた様々な電磁波による交流雑音成分は給電回路のコンデンサーによりGNDに短絡させる事により、DC電場成分のみを測定できるようにした。このように製作した全長5 mの2本のダイポールアンテナを、地上高4 mの位置で、東西と南北の2方向に設置して、水平面内でのDC電場の偏波状況を確認する事を目指した。プリアンプで700倍に増幅された出力電圧は4チャンネルの同時サンプリングのAD変換器で、1秒毎にサンプリングを行い、デジタル化した4096点のデータ (約68分間) を1つのファイルとして、パーソナルコンピュータに自動的に保存できるようにした。これにより、68分間のDC電場の変動を見る事ができる。この装置を用いて2016年2月5日から観測を開始した。

試験観測において、電場の日変化の状況を調べた結果、以下の事が判った。即ち、夜明け後の時間が経つと、太陽の大地への照射による地表付近の大気電気の揺らぎの影響と思われる電場の複雑な変動が現れ、その変動振幅は昼の12時から14時頃に掛けて最大となるが、時間と共にその揺らぎが減少していき、夕方の18時を過ぎるころからは静穏になり、深夜においては極めて静穏なDC電場の状態となり、それが夜明け過ぎまで続いていた。故に夕方から夜明けまでの間において、この観測を行えば、地震関連の電場が発生した場合でも極めて精度良くその変化等をモニタできる事が判った。

観測を初めて4日目の2月9日の08:28:30.9 JSTに本観測点から西方18.5 kmの深さ12 kmでM2.1の地震が発生した事が気象庁から発表された。本観測点近傍でM2以上の地震が発生したのは久々であった。そこで、DC電場の観測データをチェックしたところ、深夜から継続して静穏で安定していた空間電場は、地震発生の35分前から急激に長周期 (約25分) の大きな変動が見られた。そこには2分程度の周期を持つ変動をも重畳している上に、更に周期の短い (周期8秒程度) の比較的振幅の大きい交流雑音も重畳した複雑な波形となっていた。その短周期の変動成分を解析した結果、楕円偏波をしている事が判ったので、この電界成分は地中から放出されたものと考えられる。そしてこれらの大きな変動が終わった8分後に地震が発生した (気象庁発表) とされている。このように周期約25分の大きなDC電場の変動の形は、岩石への衝撃印加の室内実験において、衝撃が加わる直前に発生したDC電場の変化と相似的な形状をしていた。

地震発生として発表された時刻前後においては、電場波形には特徴的な変化が見られず、その後の電磁波観測点までの地震波伝搬時間（約6秒）後に検出されるだろう地震波も検出されておらず、磁界パルスも検出されていない事が疑問として残っている。

このような電場が地震前に発生するかどうかを確実なものにするためには、今後この種のデータを定量的に集める事が重要である。それにより、地震との関連性を明確化させる事ができる。そうすれば次はこの電場発生のメカニズムを議論する事ができる。

キーワード：地震関連直流電場、電場の地上観測

Keywords: DC Electric Field related to Earthquakes, Observation of Electric Field

DEMETER衛星VLF帯電場波形データを用いた地震に先行するVLF帯電波強度減少現象の研究
Study of pre-seismic ionospheric anomalies in the D region using the DEMETER burst data

*東郷 翔帆¹、新田 英智¹、鴨川 仁¹、ジャンジャック ベトリエール²、児玉 哲哉³、長尾 年恭⁴
*Shoho Togo¹, Hidetoshi Nitta¹, Masashi Kamogawa¹, Jean-Jacques Berthelier², Tetsuya Kodama³,
Toshiyasu Nagao⁴

1.東京学芸大学教育学部物理学科、2.フランス ラトモス、3.宇宙航空研究開発機構宇宙利用ミッション本部
地球観測研究センター、4.東京大学地震研究所
1.Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 2.LATMOS, France, 3.Earth Observation Research
Center, Space Applications Mission Directorate, Japan Space Exploration Agency, 4.Earthquake
Research Institute, The University of Tokyo

地震に先行する電離圏擾乱の研究のためにフランスCNESよりDEMETERが2004年より打ち上げられ2010年まで運用された。数々の先行現象の報告があるなかで、夜間VLF帯電波強度減少現象(Němec et al., GRL, 2008)は事例数が多く統計的に有意な地震先行的変動である。これらの研究は地震発生4時間前に1.7kHz周辺の強度が減るということを示しているが、軌道データ上の時系列波形データからどのような信号が減っているかについては詳細に述べていない。本研究では、地震発生前の震央付近上空において電磁波強度が減少している軌道データのうち波形データに着目して減少の発生原因をさぐる。まず統計的減少を示した条件に合致する軌道の電場強度データの抽出を行った。それらの軌道の電場データの重ね合わせを行うと、震央付近で電場強度が減少していることを確認できた。そのような変化を示すものが統計的なデータに特に寄与したものであると考えられるので、それと相関が特に良い軌道の電場データにおいて解析を行った。DEMETER衛星によって観測されたVLF帯電場データは、プラズマポーズ付近で生じたELFヒス電波や地球で軍事用に使われている人工的な電波や雷起源の電磁波であるホイスラー波など様々な電波を観測し記録した。その中でもホイスラー波は雷起源であるがゆえに強度も高く、しかも震央付近上空の電離圏下部を通過して伝搬してくるので、重要な情報を与えてくれるのではないかと考える。したがって、本講演では地震前のホイスラー波を独自のアルゴリズムで抽出し、詳細に解析した内容を報告する。

キーワード：地震、下部電離圏擾乱、DEMETER衛星

Keywords: Earthquake, Subionospheric disturbance, DEMETER

東海大学方式VLF帯パルス電磁波観測装置の開発と観測

First observational results of electromagnetic wave detection system in VLF range, Tokai University

*長尾 年恭¹、鴨川 仁²、井筒 潤³、馬場 久紀⁴

*Toshiyasu Nagao¹, Masashi Kamogawa², Jun Izutsu³, Hisatoshi Baba⁴

1.東海大学海洋研究所、2.東京学芸大学、3.中部大学、4.東海大学海洋学部

1.Institute of Oceanic Research and development, Tokai University, 2.Tokyo Gakugei University,

3.Chubu University, 4.School of Marine Science and Technology, Tokai University

これまでも各種の電磁気学的な地震先行現象が報告されているが特に興味深い伝承として地震の前に何らかの雑音が入るとい話が残っている。1945年の三河地震では、その頃は第二次世界大戦中であり、空襲警報を聞くためにラジオの電源は常に入った状態であり、「余震の前にはラジオに雑音が入るので前もってわかった」との伝聞が残っている。その後、先駆的な研究が京都大学の尾池らによって行われた。また1995年の兵庫県南部地震の前にはそれまで観測された事が無いほどのVLF帯パルスが観測されたとの報告もある。元東海地震判定会会長の浅田敏らは東海大学開発技術研究所在職中の1990年代、VLF帯パルス電磁波観測装置を作成し非常に興味深い成果を公表した(Asada et al, 2001, EPS)。このような経緯もあり、東海大学海洋研究所地震予知研究センターでは、いわゆる国の地震予知研究計画にVLF帯でのパルス電磁波の観測を現在のテクノロジーで再挑戦したいというプロポーザルを提出し、2014年度から開始された、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」でその計画が採択され、2018年度までの5ヶ年計画の中で正式に実施する事が承認された。

センサーは浅田らが用いたコイルセンサーを忠実に再現した。これは、当時誰も地震に先行する電磁波の性質がわからなかった段階で、最も有望な成果が出ている事から、まずは同じ周波数特性を持つコイルセンサーで研究を再開すべきと考えたためである。今回、A/Dコンバータとしていくつかの候補が上がったが、最終的に特殊電子回路(株)の12ビット、6チャンネル、最大100MHzサンプリングが可能なものを採用した。

現在、雷を用いて計測器の性能チェックを行っている。当初、先行研究に習い、方位探査により波源を求める事を考えていたが、100MHzで観測を実施すると地震学と同様な波動の到達時間差を用いた波源決定がより有効である事が判明した。現在、東海大、東京学芸大、金沢大の3地点で観測を継続している。今後は波形の相互相関処理等を用いて波源を決定するソフトウェアの開発や、非常に短時間のパルス状のノイズを除去するデジタルフィルタ等の開発を行っていく予定である。なお本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受け実施されています。

キーワード：地震先行現象、VLF帯

Keywords: precursory phenomena, VLF range