平成23年度年次報告

課題番号：2501

（１）実施機関名：

東海大学

（２）研究課題（または観測項目）名：

電磁気学的広帯域先行現象の観測的検証とその発現メカニズムに関する研究

（３）最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

（3） 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

（3-1） 地震発生先行過程

ア. 観測データによる先行現象の評価

（４）その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

（3） 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

（3-1） 地震発生先行過程

イ. 先行現象の発生機構の解明

（５）本課題の５か年の到達目標：

本課題は地震および火山噴火の短期・直前予測実現のために避けて通れない先行現象の実在性に関する基礎研究と位置づける。研究期間内に電磁気学的な手法（地電流、地磁気観測）を用いた再現性のある先行現象の存在証明と、新たな電磁現象発現メカニズム仮説の実験的検証を目指すものである。

地震予知研究の究極の目的の一つが短期・直前予測の実現である事は明白であり、特に時間精度の向上には、先行現象を活用する以外方法は無い。先行現象を直前予測に役立たせるためにも、その物理的意義を解明するためにも、まず有効な先行現象を抽出し、統計的な検定を経る事がプロセスとして必要であろう。本課題では、ＤＣ－ＵＬＦ帯およびＶＬＦ帯の電磁現象について取り扱う。ＶＬＦ帯の先行現象は、先行現象の発生場所が震央（震源）である可能性も高く、先行現象と発生した地震との対応付けが比較的容易である可能性が高いと考えている。

一方で電磁現象発現メカニズムについては、従来から研究が進んでいる流動電位仮説ではなく、正孔電荷キャリア仮説の実験的検証を行う。正孔電荷キャリア仮説は、電磁現象の発現に際し、岩石・鉱物の変形や加熱だけで対応でき、微小破壊を必要としない。一般に電磁気学的先行現象が認知されない理由が電磁現象発現時の力学的対応現象の欠如であろう。特に微小破壊を仮定するメカニズムは、「微小破壊は微小地震そのもの」という事実に反論できないが、本メカニズムはこの問題を解決する可能性がある.

（６）本課題の５か年計画の概要：

平成２１年度においては、ＤＣ－ＵＬＦ帯の電磁気観測点を、これまで先行現象が観測された可能性の高い伊豆諸島（神津島、新島等）に設置および設置準備を行なう。またより高い周波数であるＶＬＦ帯の観測装置の設計および作成を実施するとともに、地殻内部での電磁波伝搬に関するシミュレー

ションソフトウエアの設計を行なう．電磁現象発現メカニズムの解明に関しては、正孔電荷仮説を検証するための基礎的な室内岩石実験を開始する。

平成２２年度においては、伊豆諸島の観測点を本格稼動させ、一部観測点ではＶＬＦの観測装置も稼動させる。また観測点周辺の電磁気学的な浅部構造探査を実施する。さらに電磁現象発現メカニズムの解明のための正孔電荷仮説に関連する実験を集中的に実施する。

平成２３年度においては、観測を継続するとともに、電磁波の地殻内部伝播に関するソフトウエアを完成させ、稼動させる。電磁現象発現メカニズムの解明のための室内実験の取りまとめを行なう。

平成２４年度においては、各種観測を継続するとともに、観測結果の統計的検定作業を開始する。また広帯域電磁波の地殻内部伝播に関する解析結果を取りまとめる。

平成２５年度においては、各種観測を継続し、結果をとりまとめ、統計的な検定を実施し、電磁気学的な現象が有意な先行現象と判断できるかについて、一定の結論を出す。

（７）平成 23 年度成果の概要：

電磁現象発現メカニズムの解明

昨年度に行なった室内岩石実験結果から、不均一に圧縮した火成岩試料の圧縮部において正孔電荷キャリアが発現し、非圧縮部へ拡散するモデルを提唱した。そこで今年度は、「正孔発現」の立証を試みた。図 1a に実験方法の概要を示す。昨年と同様に、自然乾燥させたブロック状のハンレイ岩試料の一端のみを破壊しない程度に一軸圧縮した。温度の異なる端子を試料のエリア 1 に接触させ、端子間に発生する熱起電力を計測した。電荷キャリアの種類が正孔の場合には熱起電力は負の値をとり、正孔濃度が大きいほど熱起電力の絶対値は小さくなることが、理論的にも既知となっている。図 1b に実験結果の一例を示す。まだ圧縮していない場合には熱起電力は負の値をとり（青線）、圧縮した場合にはその絶対値が減少している（赤線）ことが分かる。このことから、このハンレイ岩試料は不均一圧縮によって正孔の濃度が増加していること、つまり正孔の発現していることが立証された。エリア 2 と 3 についても同様の実験を行ったが、圧縮前後で熱起電力の顕著な変化は確認されなかった。以上のことから、圧縮部において正孔が発現しているが、それら正孔の拡散は圧縮部の近傍周辺程度までであることが判明した。恐らく、非圧縮端まで到達している正孔はごくわずかなのであろう。図 1c に示すように、これら正孔の分布と過酸化架橋に捕捉された電子の分布の偏り（分極）が、不均一圧縮に伴う起電力の原因となっていると考えられる。圧縮の度合いが増すに従い、発現する正孔の数が増え、分極が大きくなることにより、起電力の増加に繋がっているのであろう。実際の地殻内においても、断層運動前および運動中の周辺地殻応力／歪みの変化に伴い、正孔の発現と拡散が起こり、分極が変化することにより、周辺に異常電場を形成すると期待される。

野外における観測的研究

平成 23 年度は新島・神津島観測点において順調に観測を実施した。なお、本予知研究計画における観測が開始して以降（平成 22 年 2 月）神津島から 20 ｋｍ以内ではマグニチュード ３を超える地震は下記の東北地方太平洋沖地震による誘発地震以外発生していない（図 2a）。なお重要な観測事実として、Orihara et al., 2009 (Proc. Japan Acad. Ser.B, 85, 476-484) で報告したような異常電位差変化も観測されていない。これはローカルなノイズを除去する長さ 40 － 100 ｍの短基線観測網とリジョナルなノイズを除去する NTT 電話回線を用いた長さ 1km を超える長基線観測とが効果的に機能している事を意味するものである。

平成 23 年東北地方太平洋沖地震（東北地震）が発生した際、新島・神津島観測点において、地震波の到達に伴う特異なシグナルを検出した。図 2b に新島と神津島の観測データの一部を示す。どの観測点にも地震波到達に伴い約 5-20 秒周期の減衰振動が発生している。同様な波形が奥多摩地域で別途観測している地磁気データにも確認できることから、これらは単なるセンサーの振動によるものではなく、流動電位などにより発生した新たな物理現象である可能性がある。これらシグナルを詳細に解析することにより、地殻中を伝搬する電磁波のモデルを構築することに繋げられる可能性がある。

東北地方太平洋沖地震により新島・神津島附近で誘発されたと考えられる地震（図 2a）に先行する

地電位差の顕著な異常変化は、予察的な解析では確認されなかった。そこで、パワースペクトルの時系列データと地震活動などの時系列データとの比較検討を行った。検討例として、図 3 に神津島の Ch. 6 の時系列データのプロットを示す。東北地方太平洋沖地震以降はパワースペクトルの強度が増し、変化に富むようになった。その変化は、ap 指数や Dst 指数といった地球規模での地磁気変化とは相関がないが、附近で起こった有感地震とは相関があるようにも見える。もし、この相関が真ならば、東北地方太平洋沖地震の地震動により観測点近傍の電気的構造が変化し、附近の震源域における起電力が地表にまで伝わり易くなったことが期待できる。

電磁波伝搬シミュレーション

神津島付近地下 10km の震源域に 500Cm の電気双極子を仮定し、地殻内における電気伝導性パスの有無による地表電場の違いを、有限要素法により解析した。一例として、図 4a に震源域の近くにパスがある場合の 2D 解析のモデルを、図 4b にその結果を、図 4c に地表における絶対電位を示す。この例では、パスの有無で地表における絶対電位に大きな差ができ、電極がパスをまたぐような配置をする場合には観測値（電極間における絶対電位の差）に違いの生じることが確認できた。

VLF 帯パルスの地殻内部伝搬の可能性を調べるため、京都産業大学を中心に 2 次元モデルにより FDTD 法による予察的な解析を実施した。モデルとして観測点と震央の距離を 130km とし、震源側の地表は 70km が深さ 1km の海と仮定した。震源の深さは 40km とした。そこに半値幅 40 μ秒のガウスパルスを印加した時の電磁波伝搬を検証した。図 5 は地中媒質の導電率を１０$^{-4}$ と１０$^{-6}$ [S/m]（電気抵抗率にすると 10000 Ω m と 1000000 Ω m）で 1km メッシュの市松模様（チェッカーボード模様）とした場合である。本計算結果は、上記の条件でも VLF 帯のパルスが 80km 以上地中伝搬する事を示すものである。しかしながら、今回ここで採用した導電率は、dry の花崗岩としても極めて小さく、今後さらに議論を進める必要がある。

（８）平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Uyeda, S., T. Nagao and M. Kamogawa, Earthquake prediction and precursor, In: Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, 168-178, 2011.

Nagao, T., S. Uyeda and M. Kamogawa, What we can do in seismo-electromagnetism and electromagnetic precursors, In: The Earth's Magnetic Interior, 91-100, 2011.

Takeuchi, A., O. Aydan, K. Sayanagi and T. Nagao, Generation of electromotive force in igneous rocks subjected to non-uniform loading, Earthquake Science, 24, 593-600, 2011.

Orihara, Y., M. Kamogawa, T. Nagao and S. Uyeda, Variations of geoelectric potential differences associated with an anomalous volumetric strain change in the region of expected Tokai Earthquake, Japan, Natural Hazards and the Earth System Sciences, 12, 121-127, 2012.

（９）平成 24 年度実施計画の概要：

新島・神津島観測点での地電位差観測および紀伊半島での VLF 帯パルス地電流観測を継続し、先行的変動の事例収集に努める。

未探査であった神津島天上山周辺の浅部電気伝導度構造探査を実施する。

室内岩石実験において、複数種の岩石試料に対して 23 年度と同様の実験を行い、熱起電力の変化、つまり正孔発現の普遍性を調査する。

様々な地殻電気伝導度構造と震源域でのソースを仮定し、地表における電場および電磁波を FDTD や有限要素法により解析し、これまでに得られた観測結果と比較検討する。

（10）実施機関の参加者氏名または部署等名：

東海大学　長尾年恭、佐柳敬造、川畑広紀、竹内昭洋、アイダン・オメル、馬場久紀

他機関との共同研究の有無：有

東京学芸大学（鴨川　仁）、千葉大学（服部克己）、京都産業大学（筒井　稔）、中部大学（井筒潤）、富山大学（楠本成寿）

（11）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東海大学海洋研究所地震予知研究センター
電話：054-334-0411（代表）
e-mail：webmaster@sems-tokaiuniv.jp
URL：http://www.sems-tokaiuniv.jp/EPRCJ/

（12）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：長尾年恭
所属：東海大学海洋研究所地震予知研究センター

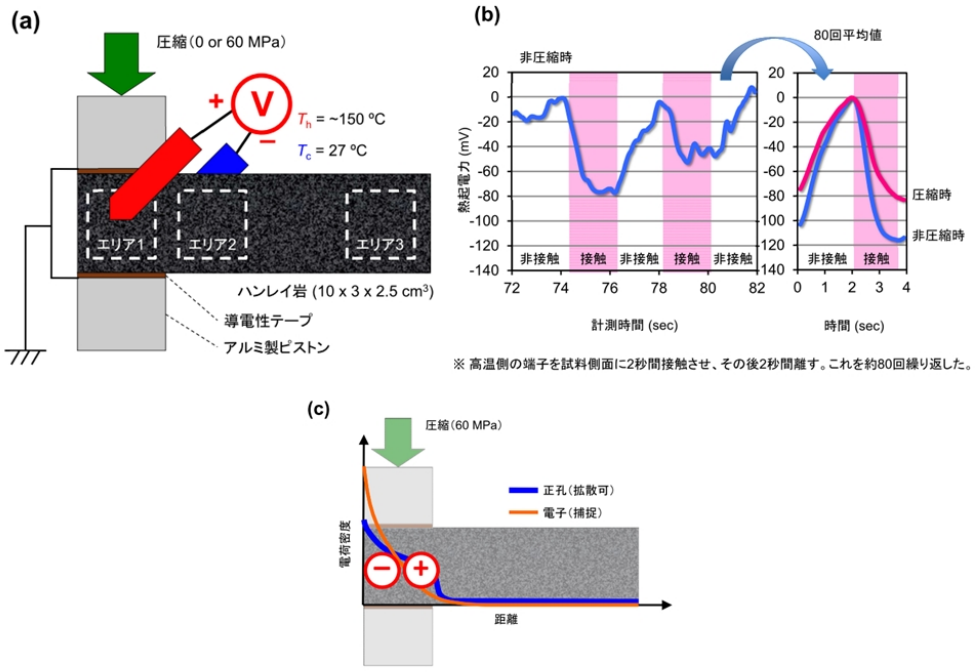

図１
室内岩石実験のセットアップと結果の例

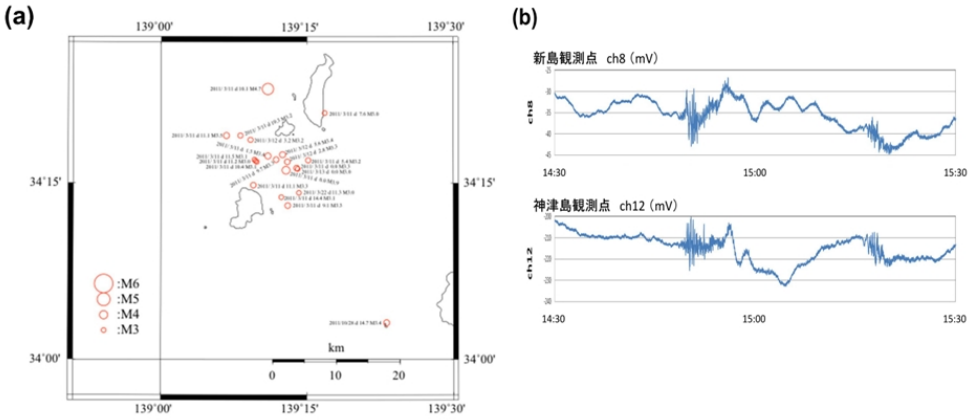

図２
東北地震発生後の新島・神津島観測点附近での地震活動と東北地震の際に観測された地電位差シグナル

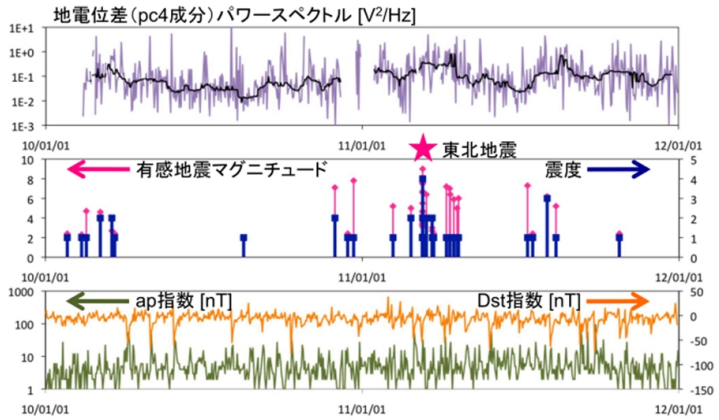

図３
神津島観測点の多目的広場観測点における地電位差のパワースペクトルと地震活動度などのパラメータの時系列プロット

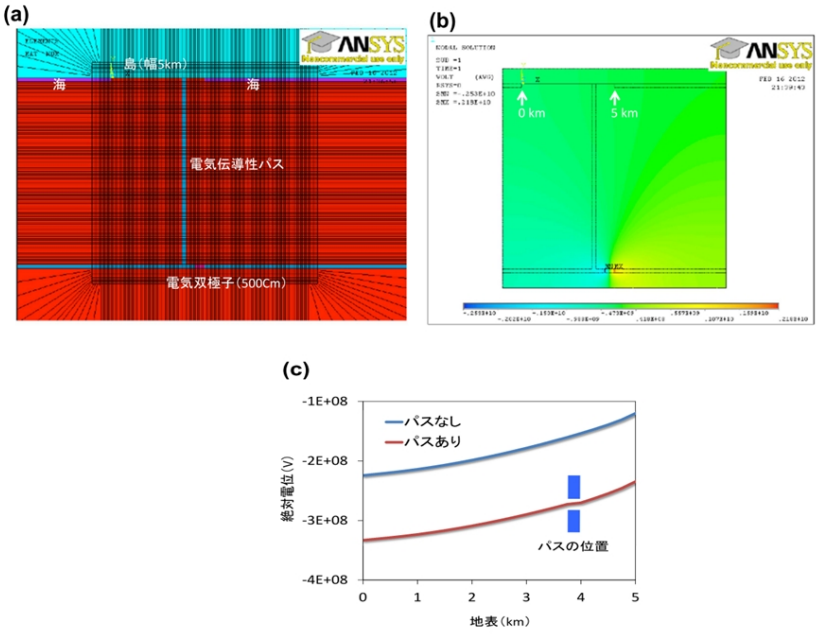

図４
地下 10km に仮定した電流双極子が地殻内に形成する電場の有限要素法によるシミュレーション

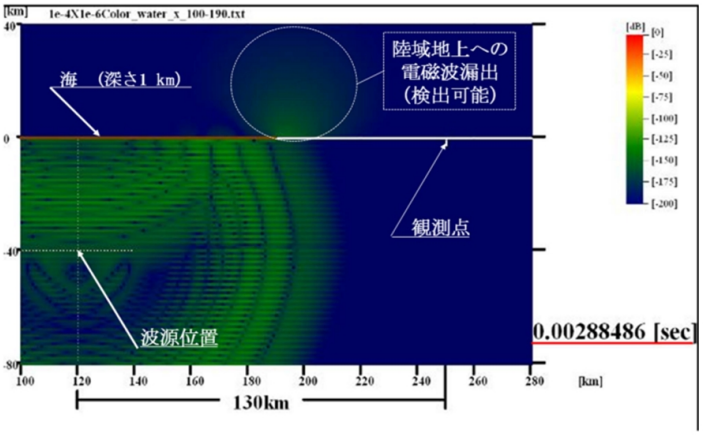

図５
FDTD 法による VLF 帯パルスの地中伝搬シミュレーション（２次元モデル）