

(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：

本課題は地震及び火山噴火の短期・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付ける。研究期間内に電磁気学的手法(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-U L F 帯及びV L F 帯の電磁現象について取り扱う。V L F 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 2 1 年度においては、DC-U L F 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)に設置及び設置準備を行う。また、より高い周波数であるV L F 帯の観測装置の設計及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

ソフトウェアの設計を行う。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働させ、一部観測点ではVLFの観測装置も稼働させる。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ェアを完成させ、稼働させる。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、結果を取りまとめ、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24年度成果の概要：

電磁現象発現メカニズムの解明

昨年度は、不均一に一軸圧縮した火成岩試料の熱起電力変化をもとに、圧縮部で正孔電荷キャリアが発現していることを立証した。今年度は、同様な実験を真空乾燥させたハンレイ岩試料に対して行い(図1)、不均一圧縮に伴う起電力発生モデル化と定量的議論を行った。不均一圧縮実験で得られる起電力が圧縮部と非圧縮部にけるフェルミ準位の差異によるものとし、エネルギー準位のシフトによる正孔電荷キャリア発現と起電力発生モデル(図2)を構築した。岩石実験から得られた起電力(約80mV)とゼーベック係数変化量(約0.1mV/K)を用いて、50MPaの一軸圧縮(約 0.5×10^{-3} の最大剪断応力)によって圧縮部の正孔電荷キャリア濃度が約1500倍になっていると見積もられた。この関係性を東北地方太平洋沖地震で推定された最大剪断応力(Takahashi, 2011, EPS, 63, 741-744.)に当てはめると、東北地方沿岸部では地震の前後で電位を比較すれば同一地点で約5mVの地電位変化のあったことが予想された。

野外における観測的研究

平成24年度は、新島・神津島での地電位差観測が順調に実施された。一方で、紀伊半島でのVLF帯パルス地電流観測はULF帯に感度のあるアンテナに取り替えて観測を行なった。しかし、地震に先行する地電位差の顕著な異常変化は、生データのみをチェックする予察的な解析では確認できなかった。そこで、以前(1997年5月14日から2000年6月25日)に19回観測された神津島での地電位差異常変化を再検討した。異常変化の認定条件を、

- 1) 短基線における電場変化(単位長さ当たりの変化)がほぼ等しい
- 2) 短基線と長基線で同時に変化
- 3) 短基線と長基線の変化の向き(極性)が同じ
- 4) 神津島観測点のバックグラウンド・ノイズレベル(2.0 μ V/m)以上の変化
- 5) 継続時間が40秒以上(10秒サンプリングで3データ以上)

とし、観測点から20km以内で発生したマグニチュード3.0以上の地震(23個と時系列比較したところ、例えば、異常変化から30日以内に起こった地震は11個で、20日以内だと10個となった。また、異常変化の極性がプラスの場合は島の東側で地震が発生し、マイナス極性の場合は西側で発生する傾向があった。この極性対応はゼニス海嶺の伸長方向の東西で分かれていると解釈することもできる(図3)。この時系列対応が偶然でも起こりうるかどうか、各種の統計的な検証(地震または異常変化の発生タイミングをランダムに変えた人工データセットとの比較など)を行い、偶然ではめったに起こることがないとの結論に至った(図4)。この論文は全米科学アカデミー紀要に2012年10月に「今週のハイライト論文(TWIP)」として掲載された。

シミュレーション的研究

昨年度は、神津島付近の地下に電流双極子を仮定し、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2D解析したので、今年度は3Dに拡張することを試みた。計算

領域は 10km × 10km × 10km とし、その領域に対して十分に広い無限境界要素を周囲に設定した。島周辺は 500m メッシュ、遠方は 500-1000m メッシュの要素を切った(図 5a)。海の厚さを 500m とし、その上層には大気を設定した(上空 500m まで計算領域に含む)。VAN グループによるギリシャでの地電位差計測の経験と理論によれば、M5 級の地震に対する地電位差異常変化の大きさを説明するには、震源に 1A × 1km の電流双極子を仮定すればよいことが示されている(Sarlis, et al., Geophys. Res. Lett., 26, 3245-3248, 1999)。よって、本解析でもこの大きさの電流双極子を震源域に仮定した。神津島周辺の地殻電気抵抗率構造に関する情報がないため、とりあえず VLF-MT 計測で得られた神津島地表付近の抵抗率(Orihara et al., Proc. Japan Acad. Ser. B., 86, 914-919, 2010)をもとに、島及び地殻の抵抗率を 300 Ω/m とし、VAN 法で期待されている良導体のパス(conductive pass)として島の一部及びその下部(地表から地下 10km まで続く電氣的パス)の電気伝導度を 3 通り仮定した。Conductive pass を配置した場合、島の地表における最大の電位差は 2-3km の距離で約 16 μV となった(図 5b)。Conductive pass を周辺岩盤と同じにした場合は 3-4km の距離で約 19 μV の電位差(図 5c)、逆に不導体とした場合は 1-2km の距離で約 21 μV の電位差となった(図 5d)。Conductive pass の抵抗率によって地表での電位分布が大きく変化することが確認できた。特に、良導体とした場合には、他の場合に比べ電位の高低が東西で逆転している。しかし、どの場合においても観測値(約 2km の距離で数十 mV, Orihara et al., PNAS, 2012)には達しない。

次に、VAN グループで提唱されている conductive pass のエッジ効果(Sarlis, et al., Geophys. Res. Lett., 26, 3245-3248, 1999)を上記の解析と同じ島地形・電流双極子に対して検証した(図 6a)。今回の conductive pass は上端部が尖っており、地表には達していない(図 6b)。解析の結果、conductive pass を配置した場合、島の地表における最大の電位差は 2-3km の距離で約 3mV となり(図 6c)、逆に不導体とした場合、2-3km の距離で約 12mV となった(図 6d)。いずれの場合も観測値(約 2km の距離で数十 mV, Orihara et al., PNAS, Vol. 109, no. 47, 19125-19128, 2012)に近づいたことから、神津島においてもエッジ効果を期待しなければならないだろう。実際にこのような地下構造が存在するかどうかを調査していく必要がある。

- (8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Orihara, Y., M. Kamogawa, T. Nagao, and S. Uyeda, Preseismic anomalous telluric current signals observed in Kozu-shima Island, Japan, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109, 19125-19128, doi:10.1073/pnas.1215669109, 2012.
Takeuchi, A. and T. Nagao, Activation of hole charge carriers and generation of electromotive force in gabbro blocks subjected to non-uniform loading, Journal of Geophysical Research (2013 年 1 月 29 日受理)。

- (9) 平成 25 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及び紀伊半島での ULF 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。後者の観測においては、パルス信号を定量的に弁別出来るセンサーシステムの開発も引き続き行なう。

本年度行なった統計的検定を新しく得られる異常信号に対して行ない、電磁気学的な現象が有意な先行現象と判断できるか試みる。

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、地表における電場及び電磁波を有限要素法や FDTD 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

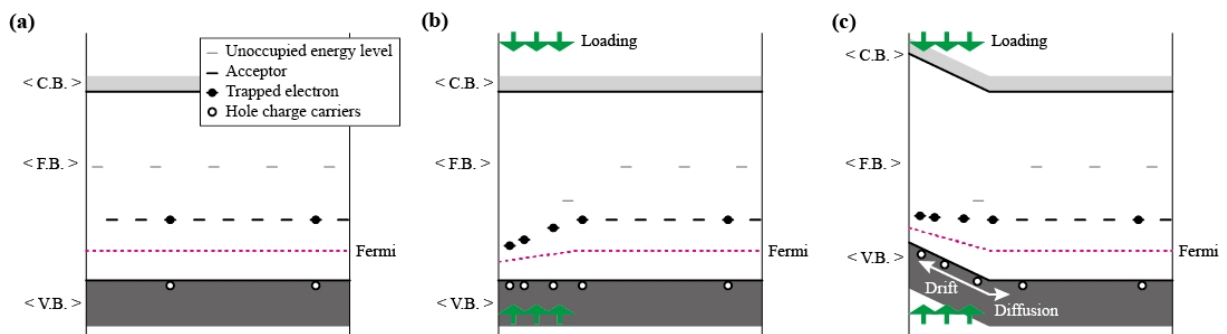


図2 バンドモデルによる正孔電荷キャリア発現と起電力発生の様子。

a) 通常状態におけるハンレイ岩のエネルギーバンド構造。アクセプター準位が存在し、若干のP型である (b) 圧縮部のアクセプター準位が下にシフトし、正孔電荷キャリア濃度が増加する。結果として、フェルミ準位も下にシフトする (c) 正孔電荷キャリアが非圧縮部に拡散し、不均一な正負電荷の分布による電場が形成される。このことにより、圧縮部のバンド構造全体が傾斜する。結果として、フェルミ準位が上にシフトする。最終的に、圧縮部と非圧縮部とでフェルミ準位に差ができる。

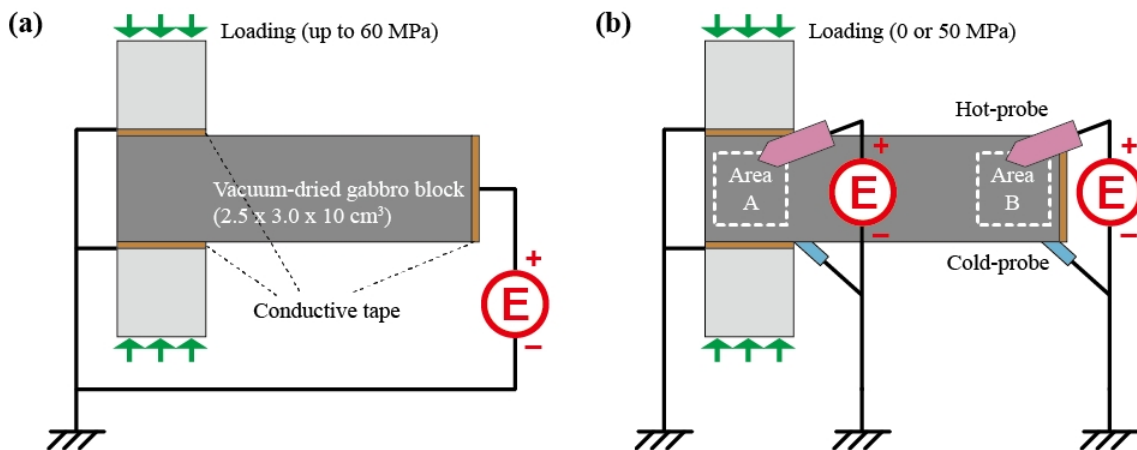


図1 室内岩石実験のセットアップ。

a) 不均一圧縮に伴う起電力計測実験。真空乾燥させたハンレイ岩試料の一端のみを一軸圧縮し、その際に発生する起電力を計測する (b) ホットプローブ法による熱起電力計測実験。同一試料を同様に圧縮し、その際に変化する熱起電力を計測する。Area A と B は、同時には計測していない。

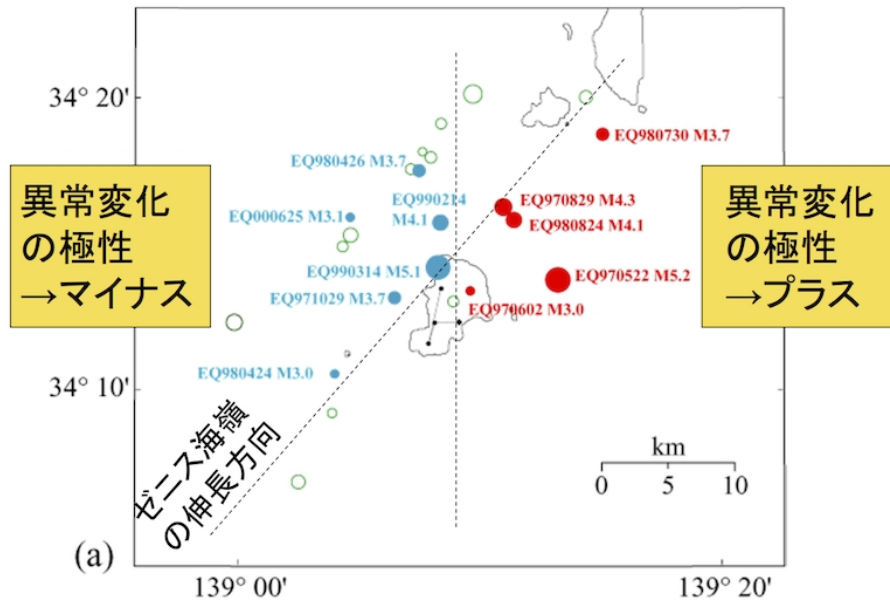


図3 神津島で検出された地電位差異異常変化の極性と地震の発生場所との地理的關係図。

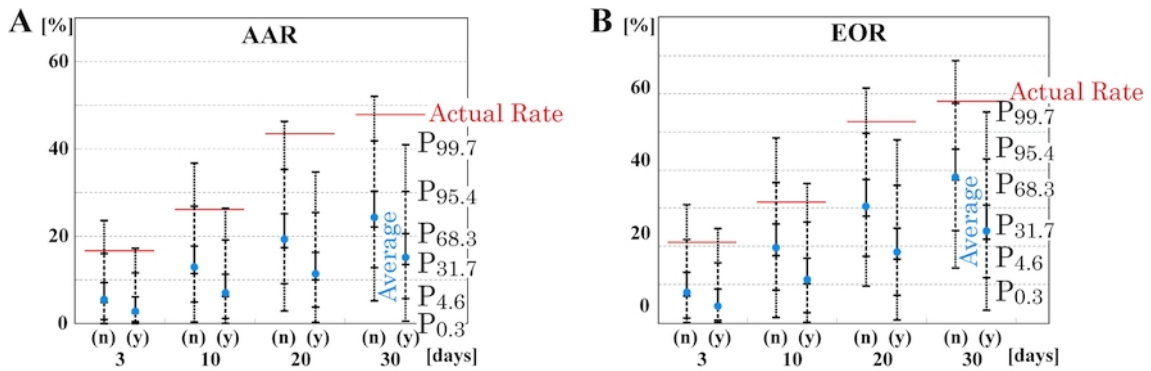


図4 地電位差異異常変化と地震との先行時間対応度。

(A) ランダムな地震と実際に観測された地電位差異異常変化との対応度 (B) 実際に観測された地震とランダムに発生させた地電位差異異常変化との対応 (n) は地震が神津島の東側と西側のどちらで発生したかを考慮した場合、(y) は考慮しなかった場合。赤いラインは実際の対応度。青い点是对応度の平均値。黒いバーはそれぞれのパーセンタイル。

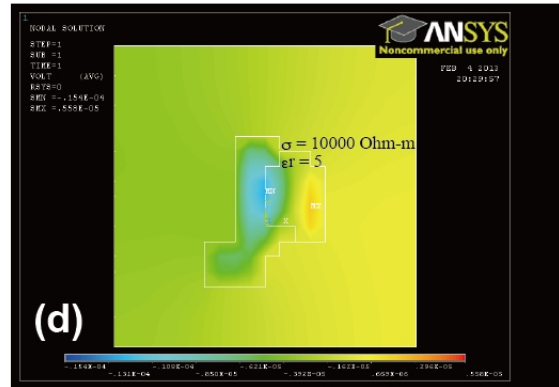
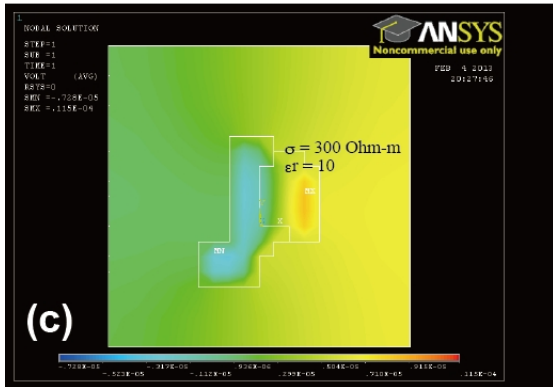
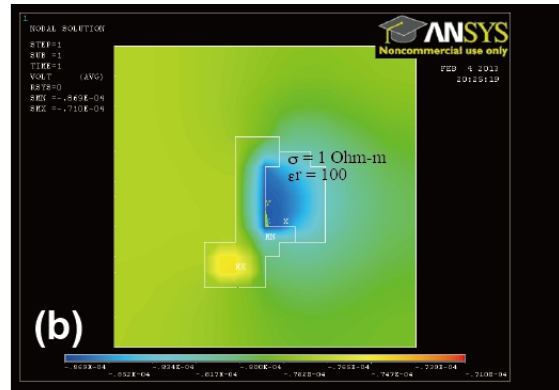
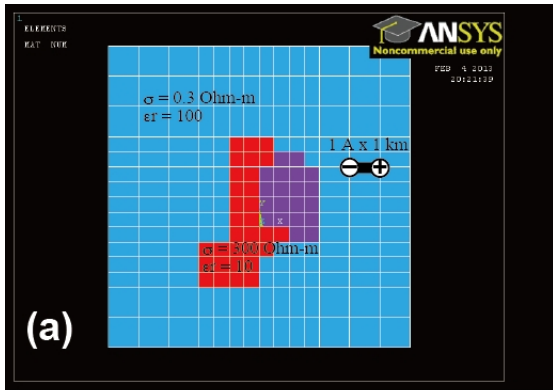


図5 地下10kmに仮定した電流双極子(1A × 1km)が神津島の地表に形成する電位分布の有限要素法による3Dシミュレーション。

(a) 高度0kmにおける地形分布と電流双極子の位置関係。青色：海(厚さ500m)、赤色：一般地殻(地下10kmまで)、紫色：Conductive pass(地下10kmまで続く電気的パス) (b) Conductive passを電氣的に良導体とした場合 (c) Conductive passを周辺の一般地殻と同じにした場合 (d) Conductive passを電氣的に不導体とした場合。

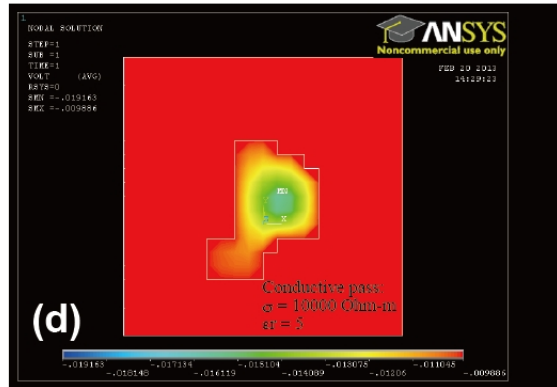
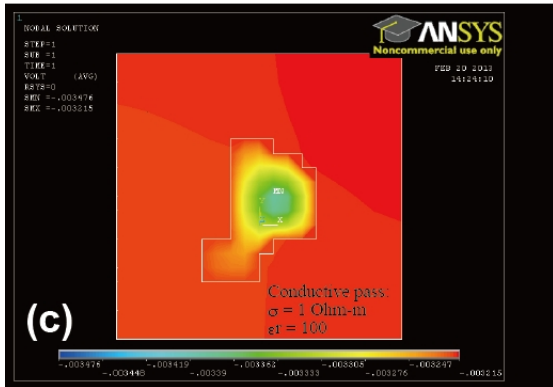
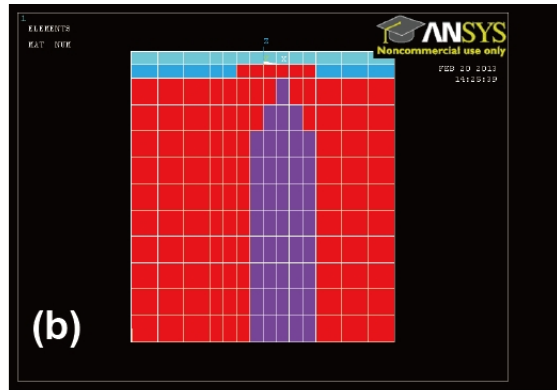
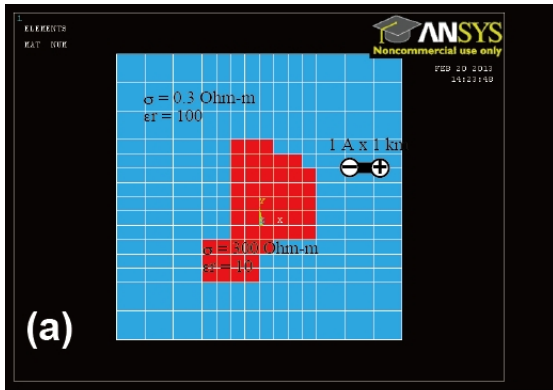


図6 地下10kmに仮定した電流双極子(1A x 1km)が神津島の地表に形成する電位分布の有限要素法による3Dシミュレーション。

(a) 高度0kmにおける地形分布と電流双極子の位置関係。青色：海(厚さ500m)，赤色：一般地殻(地下10kmまで)(b) 水色：空(厚さ500m)，青色：海(厚さ500m)，赤色：一般地殻，紫色：conductive pass (c) Conductive passを電氣的に良導体とした場合 (d) Conductive passを電氣的に不導体とした場合。