

( 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) 計画期間中(平成21年度~25年度)の成果の概要:

平成21年度には、これまでの東海大学を中心とした研究で、地電位差の異常が観測され、統計的にも有意性が示唆された伊豆諸島の神津島、新島に地電位差観測点を再構築した。新島では、平成21年7月に営繕工事を行ない、IP接続によるテレメータシステムを導入した。神津島では、平成22年2月に営繕工事を行ない、同じくIP接続によるテレメータを開始した。

また過去に神津島で観測されたデータについてより詳細な解析を実施し、地震に先行した地電位差異常は、地磁気誘導成分や、市街地からの人工ノイズと明らかに異なった性質を持っていた事が判明した。これらは神津島の電氣的構造に大きな異方性が存在している事を示唆しており、その確認のために予察的なVLF-MT探査を実施した。

電磁現象発現メカニズムについては、従来は流動電位が唯一と“いい”もってもらい“メカニズムであったが、本課題では、破壊を必要としないメカニズムである正孔電荷仮説に関する室内加圧実験を開始した。

平成22年度には、神津島および新島で地電位差の観測を継続した。また当初計画どおり、神津島においてVLF-MT法を用いて詳細な浅部電気伝導度探査を実施した。また地質調査も並行して実施し、電気伝導度構造と地質分布に関する考察を実施した。さらに電磁現象発現メカニズム解明に資する室内実験も当初計画どおり順調に推移した。地震を起こす断層運動が地殻岩石の破壊現象であるとする概念を採用すれば、地震に先行する諸電磁気現象は地殻岩石の破壊に先行する何かしらのメカニズムによって駆動されなければならない。また一方で、地殻岩石の応力やひずみは決して一定様ではなく、特に断層周辺では、断層運動の直前から徐々に変化しているはずであると期待されている。これらの事柄を考慮すれば、地震に先行する諸電磁気現象のメカニズムは地殻岩石の応力やひずみの不均一な変化と大きく関わっていることが容易に想像できる。そこで、実験室内において岩石試料を不均一に加圧し(未破壊)それに伴う電気信号の検出を試み、実際に起電力が発生している事を確認した。

平成23年度には、「電磁現象発現メカニズムの解明」では、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、「正孔発現」の立証をホットプローブ法により試みた。その結果、予想どおり不均一圧縮によって正孔の濃度が増加していること、つまり正孔が発現していることが立証された。

「野外における観測的研究」では、神津島近傍の地震活動は極めて低調であり、以前先行的地電位差変化が観測された観測点から20km以内でのマグニチュード3を超える地震は、東北地方太平洋沖地震による誘発地震以外発生しておらず、異常変化も観測されていない。

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。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事が判明した。

「電磁波伝搬シミュレーション研究」では、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、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）に違いが生じることが確認できた。

平成 24 年度には、「電磁現象発現メカニズムの解明」研究では、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、圧縮部での正孔電荷キャリア発現を立証したが、24 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も行ない、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お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。

「野外における観測的研究」では、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変化を統計的に詳しく再検討した。この結果、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 20 日以内だと 10 個の地震が発生していた。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り、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)」としても掲載された（Orihara et al., PNAS, Vol. 109, no. 47, 19125-19128, 2012）。

「シミュレーション的研究」では、平成 23 年度に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、平成 24 年度は 3D に拡張することを試みた。計算領域は 10km x 10km x 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。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変化の大きさを説明するには、震源近傍に 1A x 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、とりあえず本研究計画の 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、島および地殻の抵抗率を 300  $\Omega$ m とし、VAN 法で期待されている良導体のパス（conductive pass）として島の一部およびその下部（地表から地下 10km まで続く電氣的パス）の電気伝導度を 3 通り仮定し計算したが、どの場合においても観測値（約 2km の距離で数十 mV）には達しない事も明らかとなった。

VAN グループで提唱されている conductive pass のエッジ効果についても上記の解析と同じ島地形・電流双極子に対して検証した。解析の結果、conductive pass を配置した場合、観測値（約 2km の距離で数十 mV）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。

平成 25 年度は「野外における観測的研究」では、2013 年 4 月 17 日に三宅島近海で群発地震（最大 M6.2）が発生し、新島・神津島でも最大震度が 4 に達した。そこで地震日から 1ヶ月以上遡って地電位差データを精査したが、地震に先行する地電位差の顕著な異常変化（VAN グループがギリシャで検出している SES と同様の変化）を確認することはできなかった。しかし、このことは過去の経験とも調和的ということもできる。換言すれば 2000 年の三宅島噴火に前後する群発地震の際にも神津島では地電位差異異常信号が検出されていない。また、新島では 2000 年三宅島噴火に関連すると思われる地電位差異異常信号が検出されたが、この地震に先行した地電位差異異常は観測されなかった。

また本計画が開始され、神津島に地電位差観測点が再構築されてから、これまでの観測で先行的地電位差変化が観測できた周辺 20km 以内で発生したマグニチュード 3 以上の地震は、東北地方太平洋沖地震に誘発された地震活動以外では 2013 年 8 月 6 日神津島東方で発生した M3.1 および 2013 年 8

月 14 日に発生した神津島直下の M3.1 の地震の 2 個だけであった ( 図 1 )。これは 2000 年の三宅島噴火に伴う激しい地震活動により、テクトニクス ( 応力場 ) が大きく変化してしまった可能性を示唆している。地電位差記録を精査したが、これらの地震に先行した変動は観測されなかった。

平成 23 年東北地方太平洋沖地震が発生した後、新島・神津島の周辺で地震活動が一時的に活発化した。よって、それら震源域の物理的・化学的・電磁気的特性が一時的に変化したことが期待できる。そこで、新島・神津島の地電位差観測データをスペクトル解析し、その特性にどのような変化があるか調査した。気象庁の女満別観測点と父島観測点における地磁気スペクトルから合成した両島における疑似地磁気スペクトル ( 周期 512 秒 ) を仮定し、これにインピーダンステンソルを掛けることにより導出されるものを、地電位差スペクトルとした。この地電位差スペクトルは地磁気スペクトルの各成分の線形和となる。2011 年 1 月 1 日から 2 月 28 日の期間、実際の観測データから求められる地電位差スペクトルの時系列データを地磁気スペクトル各成分の時系列データで重回帰させることにより、各成分の線形結合係数を求めた ( 図 2 a および b )。求めた係数と 3 月 1 日以降の地磁気データを用いて両島における地電位差スペクトル ( Cal ) を計算し、観測データから得られる地電位差スペクトル ( Obs ) と比較したところ、地震波到達後から 12 日の午前中にかけて比較的大きな差異 ( Obs-Cal ) のあることが確認された。この差異の原因として、磁気嵐イベントによる回帰からのズレ成分が含まれていることも無視できないが、通常地磁気誘導以外の要因も考えられる。最初の地震波が到達してから数時間は、両島において有感地震が発生していることから、流動電位などによる特異な電場が地表付近に形成されたことが主な要因であると考えられる。その後は無感地震しか発生していないため、流動電位の発生よりも、地下水・間隙水の存在状態変化が推測される。

紀伊半島において行なってきた VLF 帯パルス信号の観測は、ULF 帯に感度のあるセンサーに取り替えて引き続き履行された。その結果、地震波の到達時に特異な電磁気信号を検出することに成功した。その波形は地上に設置した加速度の波形とは異なることからセンサーの揺れによるものとは考えにくく、観測点のその場で誘起されたものであると推測された。

「シミュレーション的研究」では、以前に神津島で電流注入実験を行なったところ ( Orihara et al., Proc. Jpn. Acad., 2009 )、電流双極子の方向を  $90^\circ$  変えても、島内各地で検出される地電位差 ( 地表電流 ) は直近の道路の方向を向く傾向があるという結果を得た。平成 22 年度に追試験を行ない、やはり同様な傾向が得られた。このことから、地表付近には比抵抗の極端なコントラストや異方性のあることが示唆される。そこで疑われるのが舗装道路や住宅地などの人工物である。これらには金属製の部材が使われており、地電流の良導体となっていると推測される。地震に関係すると考えられる地電位差異常信号の一部が南北成分に特化していたのも ( Orihara et al., PNAS, 2012 )、このような人工良導体の影響があった可能性がある。そこで、人工物が地電位差 ( 地表電流 ) にどれほど影響し得るのか、有限要素法解析で 2D シミュレーションした。神津島と近海は  $100\text{m} \times 100\text{m}$  メッシュ、その周辺は大きめのメッシュに切り、それら計算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 ( 図 3a )、海の比誘電率  $\epsilon$  を 80、比抵抗  $\rho$  を  $0.3 \text{ m}$  とし、人工物の比誘電率を 8、比抵抗を  $10 \text{ m}$  とした。それに対し、陸 ( 地表 ) の比誘電率を 10 とし、その比抵抗を  $100\text{-}3000 \text{ m}$  の間で様々に変化させた。実際に電流注入を行なった 3ヶ所に、 $1\text{A} \times 100\text{m}$  の電流双極子を南北方向または東西方向に設置し、地表に誘導される電位と電流の分布を計算した ( 図 3b-e および図 3f-i )。どの計算結果にも共通することは、注入電流の方向にかかわらず、電流の多くは電流注入用電極間を最短距離で流れ、その他は最寄りの舗装道路を通り周辺へ、さらに僅かな残りが地表を流れるという特徴であった。注入電流の方向にかかわらず、地表 ( 舗装道路のない天上山を除く ) を流れる電流の方向は大きくは変わらず、電流注入実験の結果と概ね一致した。地表電流が道路や住宅地へ流れ込もうとするもしくは漏れ出ようとする傾向は、陸の比抵抗が大きいほど顕著になり、結果として電流注入点から離れた場所での電位分布は電流注入の方向を変えても変化しなくなる。以上より、電流注入による地表面電流および震源由来で地表に達した SES は、地表の電気伝導度の違いなどによって、大きく影響を受けてしまう可能性があると言えよう。

( 8 )平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物( 論文・報告書等 ) :  
織原義明, 川上哲太郎, 鴨川 仁, 長尾年恭, 静岡県内漁業協同組合の津波対策および海の異常現象  
に関する証言 - 2011 年東北地方太平洋沖地震に関するアンケート調査より -, 東海大学海洋  
研究所研究報告, 第 35 号, 2014. (印刷中)

( 9 )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 )

( 10 )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/

( 11 )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

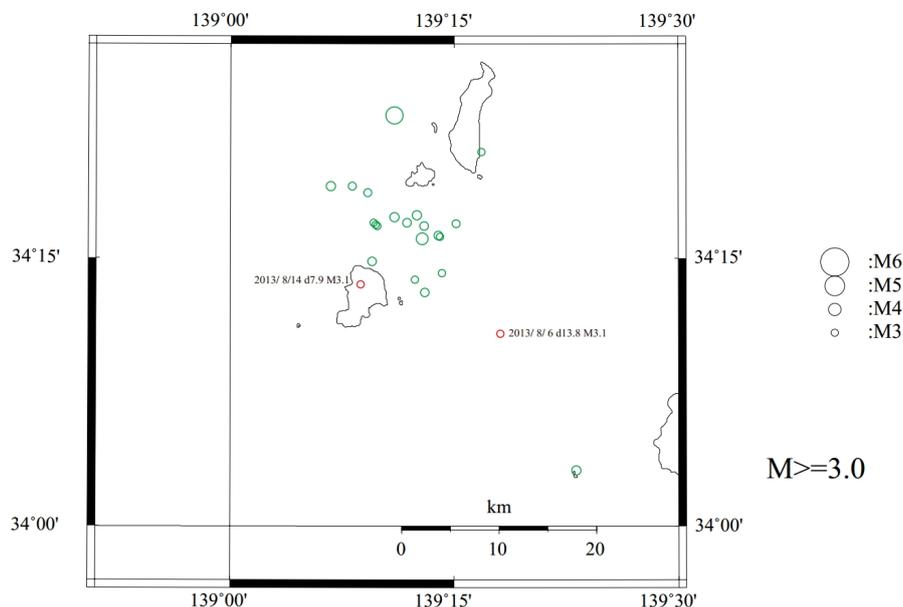


図 1

観測期間中に神津島近傍で発生した M 3 以上の地震。緑の円で示した地震はすべて 2011 年 3 月 11 日の東北  
地方太平洋沖地震に誘発された地震活動。1 つを除き 3 月 11 日から 13 日までに発生した。

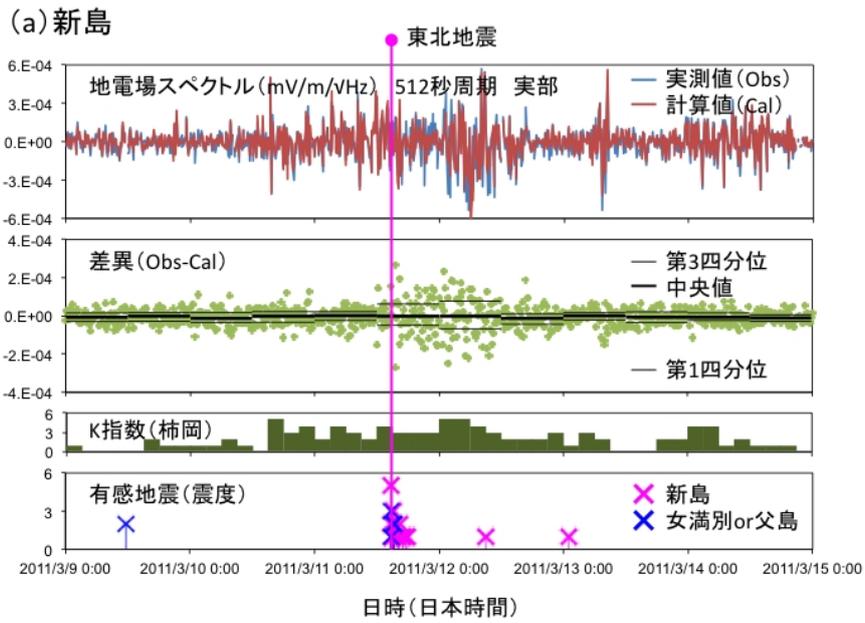


図 2 a  
新島における東北地方太平洋沖地震前後の地電位差スペクトル。

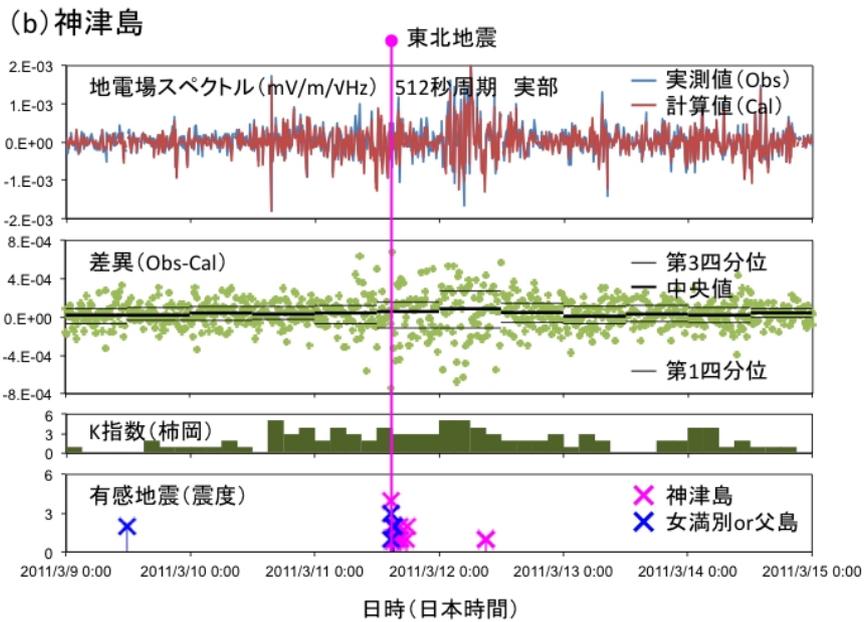


図 2 b  
神津島における東北地方太平洋沖地震前後の地電位差スペクトル。

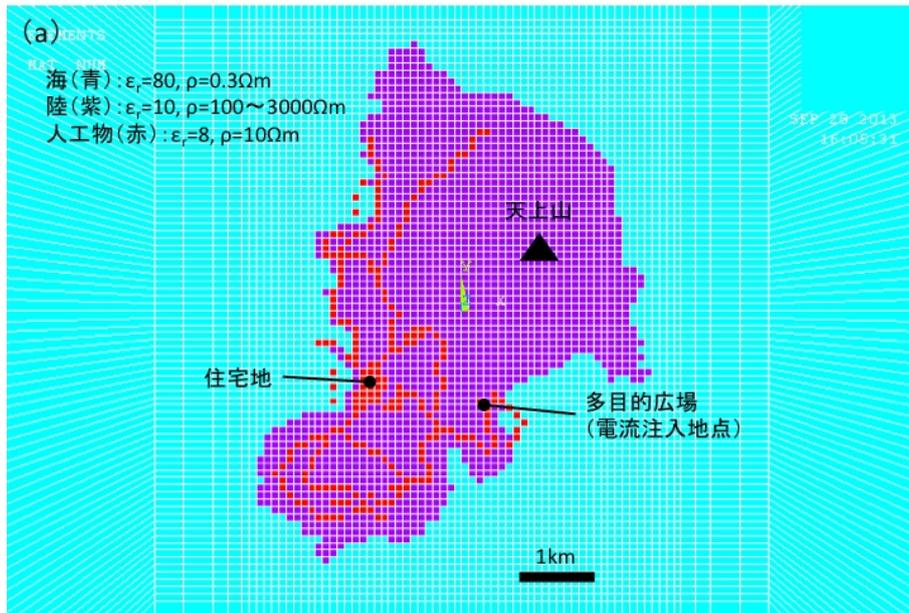


図 3 a  
解析に用いた有限要素法のメッシュ。多目的広場から電流を送信した。

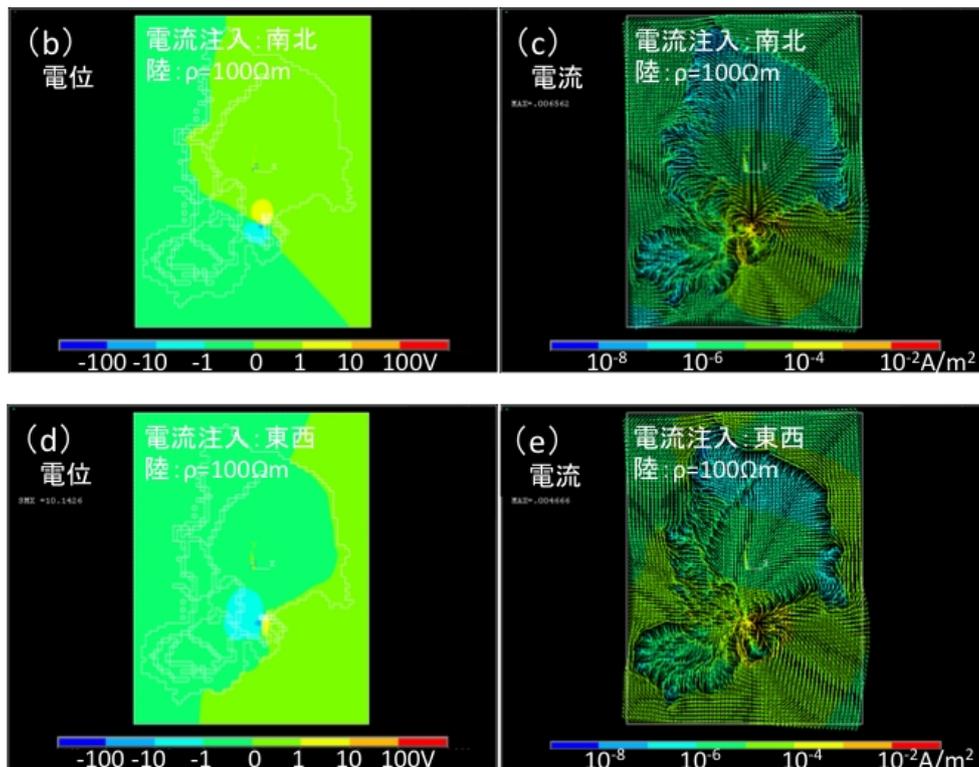


図 3 b - e  
地表の比抵抗が 100 Ωm の場合。南北方向のダイポールからの送信 (b および c)、東西方向のダイポールからの送信 (d および e) 結果。

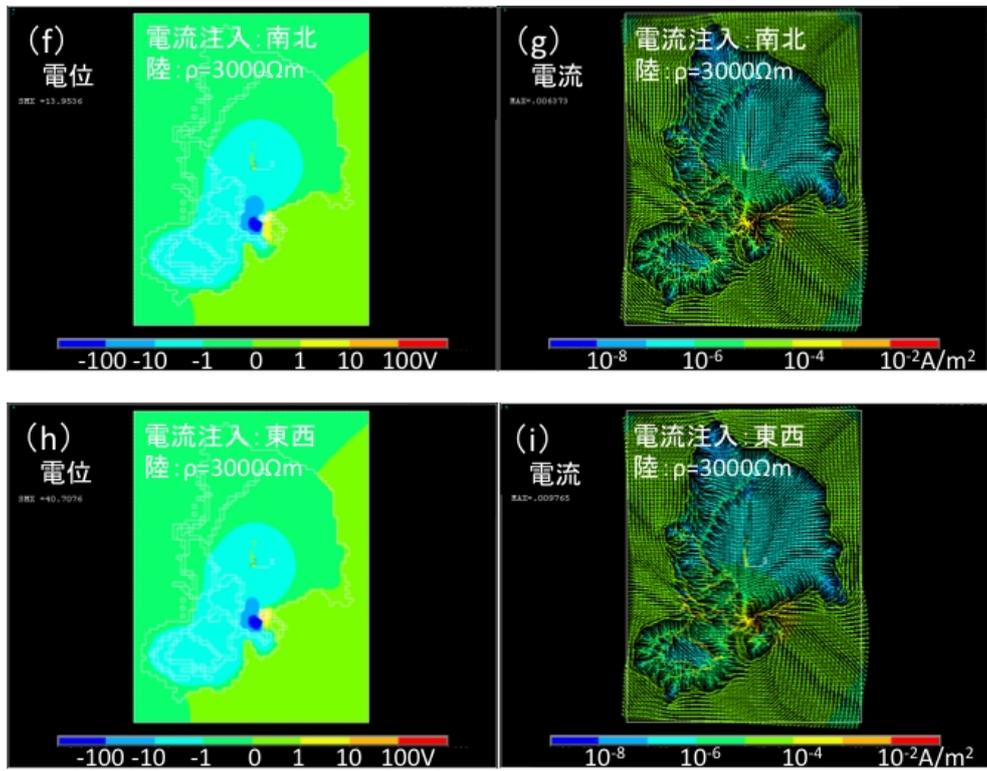


図3 f - i

地表の比抵抗が  $3000 \Omega\text{m}$  の場合。南北方向のダイポールからの送信 ( f および g )、東西方向のダイポールからの送信 ( h および i ) 結果。