

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249060

研究課題名(和文)海陸複合電磁気観測網による地殻変動準備過程および地下流動の検知・監視技術の開発

研究課題名(英文) Development of Detection and Monitoring Technique for Crustal Movement
Preparation Process and Underground Flow by Sea-Land Integrated Electromagnetic
Observation Network

研究代表者

服部 克巳(Hattori, Katsumi)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：60244513

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では(1)電磁気現象を正確に検知する複合観測システムの構築と海底電磁場観測の実施，(2)信号弁別や時系列データ処理などの信号処理法や統計的評価法の開発，(3)電磁気探査等による地下構造の把握，(4)室内実験やモデルによる地震電磁場信号の物理機構解明，(5)電磁気学的，力学的，地震学的データとの関連性評価の5項目を連携させて遂行し，地震準備過程で発生するULF電磁場異常変動や電離圏電子数異常変動などの地震との統計的有意性と地震前兆性を確認した。つまり地震前兆現象の存在を明らかにし，それらを利用した短期地震予測技術の開発が可能であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this research, the followings have been coordinated and executed; 1) Construction of the integrated electromagnetic observation network in Boso area and ocean bottom electromagnetic measurements off Boso, 2) Development of signal processing methods such as signal discrimination, time series analysis, and statistical evaluation, 3) MT exploration of the Boso Peninsula to understanding the underground structure, 4) Elucidation of the physical mechanism of seismo-electromagnetic signals by rock experiments, sand box experiments, and computer simulations, 5) Investigation on correlation among mechanical, seismological, electromagnetic phenomena.

We found the statistical significance between sizable earthquake and ULF magnetic or Ionospheric anomalous changes and assessed them as precursors of the earthquake. That is, we found out the existence of precursory phenomena in earthquake preparation process and it is possible to develop the short-term earthquake forecast technology using them.

研究分野：地球物理学、信号処理

キーワード：電磁場複合観測 MT観測 地震準備過程 雑音除去・信号検知 統計的有意性 モルチャンエラーダイ
アグラム解析 室内実験

1. 研究開始当初の背景

2004年中越地震, 2008年四川地震, 2011年東北地方太平洋沖地震など被害地震が毎年発生している。地震の短期予測はその重要性にもかかわらず達成されていない。2007年から始まった緊急地震速報は, ある程度離れた場所で生じた大地震には効力があるが, 直下型地震では, P波とS波の到達時間差がなく無力である。阪神大震災以降, 短期・直前予測は困難と言われているが, 近年, 地震や火山活動などの地殻活動に関連する様々な電磁気学的な現象が報告されており, 従来の弾性学的なパラメータに加えて, 地殻活動を予測するパラメータとして有効である可能性が極めて高い。近年では米国地球物理連合等の学会にて地震電磁気セッションが設けられ, 地殻活動に伴う電磁気現象は, 未解明の物理現象として, また, その予測手法としての重要性が認識されている。千葉大では2001年より南関東を中心に, 地震前兆現象の検出を試み, それを利用した監視と短期予測手法の検討をULF帯(ここでは周波数10Hz以下)の電磁気観測を主体として実施している。南房総と西伊豆では観測点距離5kmのアレーを構成し, 詳細な観測を行っている。また名工大では20年前よりELF帯の電磁気現象の観測学的研究を実施している。ULF帯電磁場現象のモデルに関しては, electrokinetic効果による電磁放射, microfracturingによる電磁放射, 比抵抗構造の変化, ピエゾ効果等の可能性が考えられるが, 物理機構の解明に直接結びつく波形データはこれまで検出できなかった。しかし, 2000~2010年のデータを詳細に解析したところ, 2002年10月および2007年8月の房総slowslipイベント(SSE)に関連して, 電磁場異常変動が深夜に観測された。極性や到来方向を調査すると, 02年と07年の2つのSSEとも地下に線電流源を仮定すると, 観測された波形の特徴が説明でき, electrokinetic仮説を強く支持する結果である。また, ULF帯の磁場強度変動と地震発生との相関を統計解析したところ, 磁場鉛直成分の活動度と地域の地震活動との間に統計的有意な相関があり, その相関の強さは地震活動の規模に依存する傾向があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は, 震源域に近い海域と陸域でシームレスの複合電磁場観測を展開し, 精度良い基礎データを蓄積し, 電磁気現象の物理機構解明への足がかりをつかむ。つまり, その時空間分布や再現性・普遍性などの情報を蓄積することにより, 地震準備過程や地下流体の動きに関連する電磁気現象の理解を深めることである。加えて室内実験や計算機実験等を行い, 観測された電磁場異常変動と地殻変動との関係を観測学的/実証論的に検証し, その発生機構を解明し, 地殻変動準備過程や地下流動を監視する技術を開発する。

3. 研究の方法

本研究では上記の目的のために, (1)電磁気現象を正確に検知する複合観測システムとデータベースの構築, (2)信号弁別や時系列データ処理などの信号処理法や統計的評価法の開発, (3)電磁気探査/電気探査による地下構造の把握, (4)室内実験やモデルによる地震電磁場信号の物理機構解明, (5)電磁気学的, 力学的, 地震学的データとの関連性評価の5項目を連携させて遂行した。具体的には房総地域にてULF/ELF電磁場, 海底電磁場, 大気電場等の複合観測点網を構築し, 異常変動の有意性や普遍性・再現性を吟味し, その検知や診断用のデータ解析手法を確立し, 観測学的/実証学的に地震電磁気現象の物理機構解明を目指した。国際ワークショップや連絡会議を開催し, 研究者間の情報共有や相互理解, 解析結果の評価をしながら研究を進めた。

4. 研究成果

本研究では前節の研究の方法で示した5項目を連携させて遂行し, 電磁気現象を正確に把握し, 地震準備過程や地下流動を監視する手法を開発した。結果として, 査読論文73編, 査読なし論文53編, 著書5編, 招待講演39件(うち33件国際会議), 学会発表418件(うち192件国際会議)の研究成果の発表があり, 活発な研究活動を行ったといえる。なお, 投稿準備中の論文も数多くあり, 今後も増加予定である。以下に項目毎に成果をまとめる。

(1)電磁気現象を正確に検知する複合観測システムとデータベースの構築: 房総半島の観測点の増強を行った。具体的には房総清澄観測点, 房総旭観測点へのELF電磁場観測装置の新設, 旭観測点への地中ラドン濃度観測装置の配備, 一部の既存ULF電磁場観測装置の更新を行い, 既存観測点の複合化を行うとともに海底観測を実施した。

ELF観測では新型のELF帯観測装置を開発した。この装置は1台のPCと東西, 南北, 鉛直のアンテナおよびアナログ回路からなり, 223Hzの磁界を観測できるほか, 商用電源をパルスとして観測できる。観測PCは, 商用電源パルスを適応フィルタによって適切に成形し, キャンセリング信号としてD/A変換ボードを通して出力する。このキャンセリング信号によって, アンテナから届く信号に重畳した商用電源雑音が回路上で打ち消され, 精度の高い観測が可能となった。回路を小型化, 樹脂箱にアンテナを収めることで, 設置時の空間的, 時間的コストを削減した。新型を鴨川市の清澄観測点, 旭市の旭観測点に設置した。

(2)信号弁別や時系列データ処理などの信号処理法や統計的評価法の開発:

ULF電磁場観測データ: 気象庁柿岡観測点について, 鹿屋観測点をリファレンスとする2001~2010年の統計解析を実施し, 統計的有意性・前兆性を評価し, 最適なパラメータを調査する方法を提案した。また, 従来の手法では単一の観測点または相関の高い観測点間

のデータを解析していたが、地磁気変換関数を用いた任意の観測点間に拡張した方法を提案した。地震活動とULF磁場変動との相関や統計地震学で用いられる Molchan's Error Diagram(MED)解析を行ったところ、統計的有意性、前兆性が得られ、ULF磁場異常は短期地震予測の指標になることがわかった。

ELF 電磁場観測データ: 信号に含まれる背景雑音の推定分離について、外積展開による分離する方法を検討した。通常、背景雑音は誤差関数として絶対値誤差を用いたテンソル積展開(TPE-AE)により推定できるが、雑音の統計的性質に影響される。このため、修正トリム平均(MTM)に基づく外積展開手法を提案し、シミュレーションにより良好な特性であることを確認した。

新型 ELF 帯電磁波観測装置について、それらに実装した商用電源雑音キャンセラの挙動の検証を行い、50Hzの高調波の雑音レベルが40dB低減されること、その他の周波数について新たに雑音が重畳することを確認した。異常検出手法においては、環境電磁波強度の波形の複雑さが季節によって変化するため、波形のケプストラムをHMMでモデル化する際に、季節ごとの最適状態数の検討を行った。どの季節においても状態数の増加がモデル適合度の向上につながらないことを確認した。ELF帯環境電磁波の解析に用いる、準L1ノルム最小化に基づくNMFアルゴリズム(QL1-NMF)に関し、新たなコスト関数を導入することで改良を行った。これまでのものと同等の信頼性と計算時間のもとで、安定性を大きく改善することに成功した。画像化されたELF帯環境電磁波からHMMを用いて地殻の異常検出を行う手法の検討を行った。

ULF/ELF データ解析: 中部大学のULF/ELF帯電磁波観測データを解析した。2014年11月22日に長野県北部で発生したM6.8の地震前後の中津川観測点で観測されたデータや2016年4月に発生した熊本地震に関してULF/ELF帯電磁波観測システムで観測された電磁波の方位測定解析を集中的に行った。

電離圏電子数変動解析: 先行研究によって日本付近ではM6以上の地震の1-5日前に電離圏電子数(TEC)が有意に増加することがわかっている。先行研究では地磁気嵐に起因するTEC異常を統計的に定めた地磁気擾乱期間に基づいて解析から除外していたが、精度をあげるためには、地磁気嵐に起因する電離圏擾乱期間を除外し、地震とTEC異常の関連を統計的に調査する必要がある。そこで、1998~2013年に発生した294個の地磁気嵐を強度と発生地方時で分類し、分類クラス毎に地磁気嵐に起因する電離圏擾乱の平均的な変動を求めた。具体的には地磁気嵐発生の日前~5日後のデータを抽出し、ブートストラップ法を用いてTECの平均値を算出し、閾値を超える期間を地磁気による擾乱期間として除去した。次に上記データを除去したデータを用いて地震に先行するTEC異常の統

計解析を行った。本研究では、1998年5月~2013年12月に発生した、M 6.0, D 40 km の87個の地震を解析対象とした。その結果、地震発生の日前~5日前に有意な正のTEC異常が発生することがわかった。さらに地震に対するTEC異常の前兆性を調査するMED解析を行ったところ、先行研究で用いた地磁気擾乱期間を除去するよりも、本研究で定めた電離圏擾乱期間を除去したほうがより前兆性が高まることがわかった。

また、国分寺で観測された1958~2017年の60年間にわたるイオノゾンデデータを用いて地震に先行する電離圏異常の統計解析を実施した。具体的には国分寺を中心に半径1000km以内で発生したM6以上、深さ40km以下の地震との相関とMED解析を実施した。その結果、地震に6-10日間先行するNmF2の有意な正の異常とその前兆性がわかった。

さらに、開発した3次元トモグラフィーを用いて2011年東北地震前の電離圏電子数変動の時空間構造の特徴を調査した。その結果、震央上空付近の高度200-300km付近の電子密度が過去15日の中央値より約60%減少し、その周囲と上空では200%ほど増加していることがわかった。1998-2010年のM6の地震と2011年東北地震の計53件のうち、10時間以上電離圏異常が継続する地震は8件あり、そのうちの7件で類似した構造が見つかった。また、地震前の電子数変動について日本付近では水平東向きの電場が付加されれば説明可能であることがわかった。また、地磁気嵐による電離圏嵐時の3次元電離圏解析をしたところ、地震に先行する電離圏異常の時空間分布とは特徴が異なることがわかった。

大気電気パラメータデータ解析: 日本付近ではM6以上の地震の1-5日前に電離圏電子数が有意に増加すると報告され、この現象は震源近くにおける付加的な水平東向きの電場あるいは上向き電流で説明でき、これらの発生機構として、地圏-大気圏-電離圏結合が提案されている。この中には地震準備段階における地殻中の応力変化によって地中のラドンガスが大気中へ散逸し、空気分子や原子を電離し、地表付近の大気伝導度や大気電場を変調し、これが付加的な水平電場や鉛直電流の原因となるという仮説がある。この仮説を観測学的に検証するために大気電場、大気イオン濃度、大気ラドン濃度、地表付近の地中ラドン濃度、気象要素の総合観測を旭観測点で開始した。地中ラドン濃度変動量と地震との関連を調査するためには、気温や気圧等による地中ラドン濃度の変化を除去する必要がある。そこで、地中ラドン濃度や気象要素についてマルチチャンネル特異スペクトル解析法(MSSA)による調査を行った。その結果、気温の日変化や大気潮汐などが原因と考えられる変動成分の存在が判明し、これらを分離・除去することで、地下からのラドン flux を推定することに成功した。今後は flux 変動と観測点近傍の地震活動の関係を調査し、電

離圈異常の原因となるかどうかを検討する。

(3)電磁気探査等による地下構造の把握：

陸域観測：2014年11月から2015年3月にかけて房総半島北部を、2015年11月から2016年1月にかけて房総半島南部を対象としてMT探査を実施した。観測点は緯度経度5秒毎に41箇所設けた。全観測点においてPhoenix Geophysics社のMTU-5, 5A, netを用い、サンプリング周波数15, 150, 2400 Hzのデータを観測し、約0.003–3000sのMTインピーダンスを推定する。41箇所の観測点の内12箇所ではテラテクニカ社のU-43も使い、サンプリング周波数1 Hzのデータを観測し、約20–15000sのMTインピーダンスを推定した。雑音の少ない深夜のデータのみを用いて、代表的な断面について、深度2 km位までの2次元比抵抗構造を求めた結果、この地域の浅部に広く分布する上総層群が非常に低い比抵抗値を示すことがわかった。

陸域データ解析：上記のほとんどの点で、観測点近傍の直流電車や人工的な電磁雑音によるnear field効果が見られた。その影響を軽減するために、遠方にある観測点の磁場記録を用いてlocalな雑音の影響を軽減するリモートリファレンス処理を行った。さらに、スパイク状の雑音等を軽減できるBIRRP法によるデータ処理も試みた。リモートリファレンス処理やBIRRP法では除けない雑音があり、以下の2手法を試みた。

(i)**独立成分分析(ICA)：**ICAは、混在する雑音を分離する手法であるが、雑音がシグナルと比べて大きいような場合はシグナルと認識するのが難しいことがある。そこで、遠方の雑音の入っていない磁場記録(水平磁場成分は遠方でもほぼ同じ変動を示す)を参照することでシグナル成分を認識することにした。BIRRP法による結果と比較して、ICAによる雑音除去の効果が認められるところもあることが分かった。さらに、雑音除去を試みて改善された測定結果(見掛比抵抗とインピーダンス位相)を用いて、比抵抗構造の3次元モデリングを試みた。本研究ではModEMを用いた。対象地域は海に囲まれており、また多くの対象域が表層を低比抵抗の上総層群に覆われているので、それらの影響を調べたところ、深部構造に対する感度が低下することが分かった。3次元インバージョンを試みた結果を、房総半島を東西方向断面でみると中央部が周囲に比べて相対的に低比抵抗であり、その幅は南に行くほど広がるが鴨川—鋸南測線以南では急に狭くなる。また、表層数km以浅には1–10Ωm程度の低比抵抗域が見られるが、その厚さには変化があり一宮—君津測線で厚くなっていて、特に西側で厚くなる傾向がみられる。SSEはこのあたりで発生している。現段階ではこのような結果が得られたが、まだデータの雑音除去が十分でないことや3次元インバージョンも計算条件に対する構造の変化を検討していない状況にあるので、今後さらに研究を進める

必要があることがわかった。

(ii)**特異スペクトル解析：**取得したMTデータは、厚い堆積層や直流列車等による人工雑音影響が大きい。現在MT解析で最もよく利用されているロバストなインピーダンス推定手法はBIRRP法であるが、この方法では対象観測点以外に参照観測点のデータを用いて、統計を利用して周波数領域でMT応答関数を計算している。しかし、BIRRP法では地下の比抵抗構造をうまく推定できなかった。そこで、MSSAを用いて、時間領域において人工雑音を除去し、信号/雑音比を改善した後に周波数領域においてBIRRPによる比抵抗構造を推定する手法を試みたところ、現実的な比抵抗構造を安定に推定することができた。房総半島のように人工雑音の多いMTデータは、MSSAにより時間領域において信号を改善した後、従来のMTインピーダンス推定を行うことが有効であることがわかった。

海域観測とデータ解析：海底電磁場観測については、京都大学が所有している海底電磁場観測装置(OBEM)を房総半島沖の海底(水深1000m~2000m)への設置・回収作業を行った。房総半島沖合のプレート境界断層ではSSE域が確認されており、数年間隔で活動している。海底電磁場観測によりSSE域の電気伝導度構造が解明されると期待される。2015年7月に3台のOBEMを調査船から海底に設置した。磁場3成分と水平電場2成分を10Hzまたは1分サンプリングで観測した。観測は2016年3月までの約7ヶ月半実施し、ハイサンプリング電磁場データを取得できた。データを予察的に解析したところ、房総半島の沖合のプレート境界層(SSE域)では見かけ比抵抗が低下する傾向があり、SSE域と地下流体の関係性を示唆している可能性がある。

(4)室内実験やモデルによる地震電磁場信号の物理機構解明：

圧力誘起電荷：圧力誘起電荷の物理的値を実験的に検証するために、ハンレイ岩等の岩石破壊実験を温度変化させて実施した。本研究の目的は、地殻内の応力変化による地表面分極の可能性とそれを利用した計算機シミュレーションの実現のためである。結果として、流動電位による正電荷の移動とそれによる通常の大気電場である100-150 V/mと同程度の誘起が期待され、上空に影響を与えると期待されることがわかった。今後は地殻電磁場発生モデルの構築と電離圏電子密度変化のシミュレーションを実施し、地震前のTEC異常現象の物理を解明する必要がある。

マイクロ波：岩石破壊に伴うマイクロ波発生を発見し、その発生機構の研究を行ってきた。本研究では、岩石破壊と地震前のマイクロ波発生物理現象を調査した。本格的に解析するにあたり、センサ間の感度補正が必要となる。そのために複数の周波数を使ったりリモートセンシングにおいて、各周波数のアンテナビームの地上足跡径を補正する手法を開発した。実衛星データに本手法を適用した

ところ、6.9 GHz と 10.7GHz の 2 周波数における足跡径差は、海岸線の幅の差が見えないくらいに小さくできた。今後はこの手法を用いて国内定観測など地震に関連する衛星リモートセンシングマイクロ波解析を実施するとともに、衛星解析結果の妥当性を示すために地上での岩石破壊時のマイクロ波/赤外線放射観測実験も行う必要がある。

地殻内電磁波伝搬シミュレーション: 本課題では媒質の導電率のため数 Hz 程度の低周波を扱うのに対し、不均質性からセルサイズは波長に比べ極めて小さく、従来の FDTD 法は安定条件により計算ステップ数が増加してしまう問題がある。この問題を解決するため、無条件安定解法である Weighted Laguerre Polynomial FDTD(WLP-FDTD)法に注目し、従来の FDTD 法より飛躍的に計算量が少ない地殻内電磁波伝搬シミュレーション法を開発した。WLP-FDTD 法と従来の FDTD 法を用いて、地殻内に波源があるときの地表面での 2 次元シミュレーション波形を行った。波源の深さは 20 km、観測点は波源の直上の地表面、セルサイズは 1km×1km、地殻の導電率は 0.01 S/m とした。その結果、従来の FDTD 法と WLP-FDTD 法の結果は一致しており、WLP-FDTD 法の精度に問題がないが、計算に要した計算時間は、従来の FDTD 法では安定条件のために、計算の反復回数が多くなってしまい、1000 秒以上の時間がかかる一方、WLP-FDTD 法では $t > 0$ の任意の時刻の応答が得られるため、精度を上げるための関数の次数を増すための 201 回の反復のみとなり、0.4 秒で計算が終わることがわかった(Intel Core-i7 2700K(3.5GHz)を使用)。

電波伝播シミュレーション高速化: 大規模問題を高速に計算するための GPU NVIDIA Tesla K20 を 64 台搭載した GPU クラスタによる FDTD 法の高速度に関する検討を行った。これまでに開発してきた GPU クラスタ向けの FDTD 並列プログラムを GPU 64 台を搭載した比較的大規模な GPU クラスタで評価した結果、単精度で 6.2 Tflops、倍精度で 3.7 Tflops が得られ、ルーブリック理論によりメモリアクセスを考慮した理論性能と比較すると 75 %程度の演算性能が得られていることを明らかにした。また、実際の大規模問題への応用例として、地中レーダにおける鉄筋探査シミュレーションや仙台市の数値地形モデルを用いた雷放電電磁界解析においては、これまで 170 時間を要していた地中レーダシミュレーションが 30 分程度で、14 時間を要していた雷放電電磁界解析が 1 分程度で計算できることを示した。

ULF 電磁場発生の解明: ULF 電磁場変動の有力な発生機構の 1 つが electrokinetic 効果である。これを検証するために自然電位トモグラフィーの開発、数値シミュレーションおよび水槽実験を実施した。まず、地下水動態から自然電位を推定する順問題において、electrokinetic 効果を表す式を解くために、圧

力水頭から電荷分布を求めるプログラムを作成した。地下水流動シミュレーション AC-UNSAF2D と上記プログラム、そしてクーロンの法則による電位計算プログラムを用いて、水槽実験モデルで数値シミュレーションを行い、その結果は自然電位の実観測データと調和的であった。次に、自然電位から電荷分布を求めるために、線形正則化法を用いた逆解析プログラムを作成した。また、求めた電荷分布から圧力水頭を計算するプログラムも作成し、小型水槽実験で観測された自然電位データから電荷分布および圧力水頭、流速を算出した。その結果、実際の自然電位変動は electrokinetic 効果で説明でき、自然電位トモグラフィーによる地下水動態の推定が定性的に有効であることを示した。

(5)電磁気学的、力学的、地震学的データとの関連性評価: 地震の発生頻度とマグニチュードの関係は Gutenberg-Richter 則によって表される。b 値は大地震と小さい地震の相対的発生率を表し、大地震発生の数年前あるいは数十年前から b 値が低下するという報告が多くある。本研究では、以下の b 値解析を実施した。

中長期: 電磁波データとの時空間的な比較検討を目的として、GIS による地震活動をはじめとした地球観測データの可視化に着手。日本周辺の地震観測データ及び GEONET データによる地殻変動の状況も GIS で可視化した。2016 年 4 月の熊本地震に関して周辺地域の b 値変動、GNSS データによる地殻変動の状況を GIS 上に表現し時空間的な解析を行った。断層帯の近傍の地震を使用して断層帯ごとの b 値の時間変動を調査し、GIS 上で可視化した。内陸の活断層だけでなく南海トラフや相模トラフなどの日本周辺のプレート境界領域の地震活動に対して、高解像度で b 値を計算し GIS 上に表現して可視化し、web 上で試験公開した(<http://strain.isc.chubu.ac.jp>)。

短期: b 値を用いた短期的な地震前兆検出の可能性を検証した。MAXC 法を用いて解析期間の M_c を決定し、b 値の時間変化を解析するため、地震カタログを window 200 で切り出し、1 日でシフトし、最尤法で b 値を推定した。さらに、赤池情報量基準に基づく ΔAIC を用いて変動の有意性を評価した。その結果、2003 年と 2008 年の M8.0 および M7.1 の十勝沖地震の発生に関して、大地震が発生する約 3 か月前から b 値の継続的な低下が見られ、地震が発生する直前(4-5 日前)にも b 値の小さな低下があり、かつ b 値変動の有意性が認められたが、M6 クラスの地震では顕著な b 値変化はなかった。中国四川地震について同様な解析をしたところ、同様な結果が得られ、M8 クラスの地震に対して b 値を用いる地震予測の有効性を示す結果が得られた。

(6)その他: 2014 年 6 月、2017 年 7 月に全体の連絡会議を開催した。2015~2017 年の国内外の学会においてセッションを主催した。また、2014 年 8 月、2015~2017 年の 5 月に地震準備過程に関する国際ワークショップ

を4回主催し、研究者間の情報共有や相互理解、解析結果の評価をしながら研究を進めた。

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73件) 査読有のみ

- (1) K. Hattori and P. Han, Statistical Analysis and Assessment of Ultralow Frequency Magnetic Signals in Japan As Potential Earthquake Precursors, Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, edited by Ouzounov et al., 229-240, Wiley, 2018. 印刷中
- (2) J-Y. Liu, K. Hattori, and Y-I Chen, Application of Total Electron Content Derived from the Global Navigation Satellite System for Detecting Earthquake Precursors, Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, edited by Ouzounov et al., 305-317, Wiley, 2018. 印刷中
- (3) D. Ouzounov, S. Pulinet, J-Y (Tiger) Liu, K. Hattori, and P. Han, Multiparameter Assessment of Pre Earthquake Atmospheric Signals, Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, edited by Ouzounov et al., 339-359, Wiley, 2018. 印刷中
- (4) Han, P., Hattori, K., 他4名, Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan's error diagram, Geophysical Journal International, vol.208, Issue 1, pp.482-490, 2017.1. (doi: 10.1093/gji/ggw404)
- (5) P. Han, K. Hattori, 他8名, Statistical analysis of ULF seismo-magnetic phenomena at Kakioka, Japan, during 2001-2010, J Geophys. Res., SPA, 119, 4998-5011, 2014.6. (doi:10.1002/2014JA019789)

[学会発表](計418件)

- (1) J. Omura, P. Han, C. Yoshino, K. Hattori, 他3名, Observation of Atmospheric Parameters for Earthquake Forecast at Kanto, Japan: Characteristics of Variation and Signal Discrimination, 2017 AGU Fall Meeting, New Orleans Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, USA, 2017/12/12, Poster
- (2) K. Hattori, 他3名, Characteristics of Ionospheric Electron Distribution for large Earthquakes around Japan, IAG-IASPEI2017, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, 2017/8/2, Oral (Invited)
- (3) C. Yoshino, K. Hattori, P. Han, T. Mogi, T. Goto, I. Takumi, H. Yasukawa, M. Mouri, T. Takano, C. Yamanaka, M. Kamogawa, Y. Ando, H. Sakai, J. Izutsu, J. Sonoda, J-Y. Liu, D. Ouzounov, Va Tramatoli, N. Genzano, Q. Huang, H. Yamaguchi, R. Tashiro, M. Shimo, and T. Konishi, Multi-sensor monitoring network for earthquake precursors and preparation process near subduction zone at Boso, Japan, 2017, 4th International Workshop on Earthquake Preparation Process 2017, 2017/5/26-5/27, Chiba University, Chiba, Japan, Poster

[図書](計5件)

- (1) D. Ouzounov, S. Pulinet, K. Hattori, P. Taylor (Editors), Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, AGU Geophysical Monograph 234, pp.360, Wiley, 2018. (ISBN: 9781119156932) 印刷中

[その他]

ホームページ等

<http://www-es.s.chiba-u.ac.jp/geoph/ulf/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

服部 克巳 (HATTORI Katsumi)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：60244513

(2)研究分担者

内匠 逸 (TAKUMI Ichi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30188130

安川 博 (YASUKAWA Hiroshi)

愛知県立大学・情報科学部・名誉教授

研究者番号：00305517

井筒 潤 (IZUTSU Jun)

中部大学・工学部・准教授

研究者番号：90362433

鴨川 仁 (KAMOGAWA Masashi)

東京学芸大学・教育学部・准教授

研究者番号：00329111

茂木 透 (MOGI Toru)

北海道大学・大学院工学研究院・特任教授

研究者番号：80182161

後藤 忠徳 (GOTO Tadanori)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90303685

酒井 英男 (SAKAI Hideo)

富山大学・大学院理工学研究部・教授

研究者番号：30134993

山中 千博 (YAMANAKA Chihiro)

大阪大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：10230509

高野 忠 (TAKANO Tadashi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：80179465

安藤 芳晃 (ANDO Yoshiaki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30323877

(3)連携研究者

園田 潤 (SONODA Jun)

仙台高等専門学校・知能エレクトロニクス工学科・教授

研究者番号：30290696

前田 崇 (MAEDA Takashi)

宇宙航空研究開発機構・宇宙利用ミッション本部・研究員

研究者番号：90509829

丹保 俊哉 (TANBO Toshiya)

立山カルデラ砂防博物館・学芸課・学芸員

研究者番号：10574311

佐藤 利典 (SATO Toshinori)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：70222015

宮内 崇裕 (MIYAUCHI Takahiro)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：00212241