令和６年度～令和１０年度観測研究計画

課題番号：CBA_01

（1）実施機関名：

千葉大学

（2）研究課題（または観測項目）名：

（和文）電磁気学的な各種先行現象の総合的研究

（英文）Comprehensive study of pre-earthquake electromagnetic phenomena

（3）関連の深い建議の項目：

２ 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地震発生確率の時間更新予測

イ. 観測データに基づく経験的な予測と検証

（4）その他関連する建議の項目：

５ 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

(2) 首都直下地震

６ 観測基盤と研究推進体制の整備

(1) 観測研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) 国際共同研究・国際協力

（5）令和５年度までの関連する研究成果（または観測実績）の概要：

本課題は令和5年度まで実施された千葉大学の課題CBA_01を継続・発展させるものである。令和5年度までの課題では、(i)地震に伴う電磁気現象を正確に捕捉する観測パラメータの調査と観測・データ蓄積[観測]、(ii)データ解析法（予測精度の高度化（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，電磁気学的，力学的，地震学的データとの関連性評価[データ解析]、(iii)室内実験やモデルによる地震電磁気信号発生の物理機構解明[理論]，に資する研究を遂行した。

[1] 観測：令和2年度以降COVID-19感染症拡大の影響を受けながらも、その感染状況を考慮しつつ、下記の項目について、保守点検、移設、新規設置等の観測を実施した。

・ULF帯、VLF帯、VHF帯電磁場観測を維持、短期予測に資するデータ収集

・地圏－大気圏－電離圏結合の観測学的研究のための観測装置の開発

・地中ラドン観測装置の開発と定常観測の開始（大気電場との同時観測）

R1年度：地震に先行するTEC異常の発生原因の１つと考えられている電場異常について観測学的に調査するラドン観測装置のプロトタイプを房総・旭観測点で運用中であったが、実機が運用可能となり、地中および地表付近のRn濃度や大気電場観測点を茨城・美浦に新たに1か所整備した（令和元年9-10月の房総半島台風および東日本台風の影響、およびCOVID-19の影響で作業は大幅に遅延）。

R2年度：COVID-19感染症拡大の影響で昨年度末に完成予定だった茨城・美浦観測点は2020年9月より、ULF帯電磁場観測、地中・大気ラドン濃度、大気電場、大気イオン濃度観測、気象観測を開始。昨年度末に予定していた四国・九州の観測点保守作業（ロガー交換等）は2020年11月に実施。北海道えりも観測点の3成分磁力計観測2020年11月再開。

R3年度：四国・九州の観測点は感染症の防止措置が解除された11月に実施。ラドン観測装置に土中水分量・土中温度が観測できるセンサを追加する改良を開発メーカーと行った。比較的強度の強い降雨時にRn fluxが増加する原因が雨水あるいは地下水からの影響かどうかを推定するための改良で、旭観測点において試験観測を開始。VLF帯パルス電磁波観測では、東海大学観測点においてセンサ位置の変更を実施（従来の観測場所が新学部開設のため使用できなくなったため、別の校舎の屋上に移設）。

それに伴い、ノイズフィルターの特性の現場試験を行い変更。5観測点における観測は概ね順調に行われた。
R4年度：房総slowslipの発生領域にある大原で臨時観測を実施したが、地下水面が高くかつ電磁環境雑音が大きいことから設置を断念。美浦観測点に設置した地中ラドン観測器について、2022年9月24日の豪雨によって故障し、腐食した回路部等の修理を実施。VLF帯パルス電磁波観測においては、5観測点における観測は概ね順調に行われた。
R5年度：北海道えりも観測点のULF磁力計装置の移設を9月に実施し、保守を11月に実施。旭観測点に設置した地中ラドン観測器について、60cmと100cmの2つの異なる深さでの観測を開始した。また機器不良が発生し修理とWin11への対応作業も実施。VLF帯パルス電磁波観測においては、5観測点における観測は概ね順調に行われた。容量性平板アンテナによるLF帯干渉計システムの開発について予察的な調査を開始。2024房総slowslipに関するULF電磁場臨時観測を実施。
[2] データ解析：概ね順調に計画通り実施。Slowslip検知用の観測点がCOVID-19問題や観測候補地の地下水や電磁環境から設置できなかった。
A．ULF磁場データの地震前兆性に関する統計解析
R2年度：Hattori et al., 2013（Survey in Geophysics）では2000年から2010年に房総半島（清澄）と伊豆（清越）で観測された磁場データについて調査し、観測点付近で発生したある程度の大きさ以上の地震とULF磁場異常の出現には有意相関があることを示した。今年度はHattori et al., 2013と同じデータセットでこれらのデータの地震前兆性についてMolchan’s Error Diagram解析に基づき詳細に調査した結果をEntropy（Han et al., 2020）で報告。確率利得と確率差を導入し、予測パフォーマンスを定量化し、2か所のULF 磁場観測点の最適な予測パラメータを調査。その結果は、磁場異常に基づく地震予測がランダムな推測よりも大幅に優れていることを示しており、房総半島と伊豆で観測された磁場データに潜在的に有用な前兆情報が含まれていることを示した。また、先行情報には、明確な震源距離とターゲット地震イベントのサイズ（Es：観測点が受信する地震エネルギー）に依存することを示した。伊豆の清越観測点および房総の清澄観測点での最適なRおよびEsパラメータは、それぞれ約100kmと約180km、Esは8であることがわかった。これらの結果は、地震電磁気現象を理解するのに役立ち、ULF電磁アプローチに基づく運用予測モデルを改善することができる。この研究で提案された方法論は、予測方針を評価し、短期的な地震予測のために他の種類の測定を最適化するのにも役立つ可能性がある。
R3年度：昨年度に引き続き、統計的有意性、ROC的前兆性の評価を行った。これらの結果は、地震電磁気現象を理解するのに役立ち、ULF電磁アプローチに基づく予測モデルを改善することができる。この研究で提案された方法論は、予測方針を評価し、短期的な地震予測のために他の種類の測定を最適化するのにも役立つ可能性がある（Han et al., Entropy 2020）。また他の統計的有意性、ROC的前兆性が確認されたパラメータと合わせて、binary予測の精度向上や数理確率モデルの検討も開始した。また、観測電磁場のノイズ除去法について時間領域で信号を特異スペクトル分解し、太陽起源のグローバル変動（MTのソース信号）とそれ以外の信号に分離するMSSA（Multi-channel Singular Spectrum Analyses）法に着手した。
R4年度：昨年度に引き続き、統計的有意性、ROC的前兆性の評価を行った。これらの結果は、地震電磁気現象を理解するのに役立ち、ULF電磁アプローチに基づく予測モデルを改善することができる。この研究で提案された方法論は、予測方針を評価し、短期的な地震予測のために他の種類の測定を最適化するのにも役立つと考えている（Han et al., Entropy 2020）。また他の統計的有意性、ROC的前兆性が確認されたパラメータと合わせて、ETASモデルへの前兆現象の取込みを開始した。まずはULF磁場変動についてROC結果に基づいて、時系列余震予測および本震予測の数理確率モデルの検討をしている。
R5年度：昨年度に引き続き、統計的有意性、ROC的前兆性の評価を行った。これらの結果は、地震電磁気現象を理解するのに役立ち、ULF電磁アプローチに基づく予測モデルを改善することができる。この研究で提案された方法論は、予測方針を評価し、短期的な地震予測のために他の種類の測定を最適化するのにも役立つと考えている（Han et al., Entropy 2020）。また他の統計的有意性、ROC的前兆性が確認されたパラメータと合わせて、ETASモデルへの前兆現象の取込みについて引続き調査を行っている。論文や学会での報告はしていないが、柿岡観測点のULF磁場変動について、これまでに報告した論文に基づいたROC調査を行い、予測すべき地震を選定し、そのための最適パラメータを決定した。それを用いた地震予測を現在研究室内で実施している。
B．地中ラドン濃度解析

R1年度：千葉県旭市で観測している地中ラドン濃度と、地殻変動との関係を調査した。浅い地中ラドン濃度は気象要素の影響を受けるため、地殻変動との関係を調査するためには気象の影響を除去する必要がある。マルチチャンネル特異スペクトル解析を地中ラドン濃度、気温、気圧の3チャンネルに適用し、気象要素の影響を除去し、地中ラドンフラックスを推定している。推定したラドンフラックス変動と観測点近傍の地震活動との関係について、累積地震モーメントとEs指数を用いて調査した結果、旭観測点直下で地震が発生した数日前に地中ラドンフラックスの3σを超える異常を示した。これらの地震は太平洋プレート上盤付近にて逆断層で発生しているという特徴があった。これらのことから、地震準備過程における応力集中によって地表付近の上向きへの地下ガスの流量が増加すると考えられる。地中ラドンフラックスの変動モデルと観測点の応力変化との関係について調査を行った。本研究では、国土地理院のF3解を用いて面積ひずみを求め、地中ラドンフラックスの変動との関連について調査した。その結果、地中ラドンフラックスは、弾性圧縮に対して増加し、弾性膨張に対して減少する傾向がみられた。地中ラドンフラックスの変動は、地殻の応力変化に感度をもつことが示唆され、前兆すべりの大きな巨大地震やスロースリップ地震に対して有効な指標となる可能性があることがわかった。今後は、地殻変動との関連をさらに詳細に調査するとともに、ラドン観測点を2か所増強し、同様な傾向がみられるかどうかを検証する。
R2年度：昨年度に引き続き、α線を計測する地中ラドン濃度観測データの解析を実施した。令和2年9月より美浦観測点が新設された。マルチチャンネル特異スペクトル解析を用いて気圧および温度による変動を除去し、ラドンフラックスを求める手法を提案したが、2時間の降雨量が20mmを超える場合に有意なラドンフラックスの増加があることがわかった。これは、降雨による荷重増加と雨水の浸透による地中ラドンフラックス増加が原因であると考えられ、適切に除去する方法の開発が必要であることがわかった。
R3年度：昨年度に引き続き、α線を計測する地中ラドン濃度観測データの解析を実施した。令和2年度マルチチャンネル特異スペクトル解析を用いて気圧および温度による変動を除去し、ラドンフラックスを求める手法を提案したが、2時間の降雨量が20mmを超える場合に有意なラドンフラックスの増加があることがわかった（小島ら J. Atmos. Electr. 2020）。これが降雨による雨水の浸透による地中ラドンフラックス増加が原因であることを観測的に確認し、そのモデルを検討した（根本ら J.Atmos. Electr. 2021）。降雨効果を観測するために土中水分を測定できるように装置の改良を実施し、試験観測を開始した。
R4-5年度：昨年度に引き続き、α線を計測する地中ラドン濃度観測データの解析を継続中である。R5年度は旭観測点において深さ60cmと100cmに地中ラドン計測装置を設置し、降雨や気象の影響、計算した地中ラドンフラックスの妥当性を検証している。
C．電離圏電子数変動の解析
（1）中国地震電磁気衛星（CSES-1）データ解析　中国・台湾等との共同研究
R2年度：2018年2月2日に打ち上げられた中国の地震電磁気衛星（CSES-1）のIn-situ電離圏電子数変動と2018年7-8月にインドネシア・ロンボク島付近で発生したM6クラスの4つの地震との関係を調査した。CSES-1の初期データのチェックを含めて解析を行った。今回は震源が浅い4つの連続する地震（2018年7月28日M6.4、2018年8月5日、9日、19日M6.8、5.9、6.9）に関連する地震前電離層効果の特性を調査した。具体的には、CSES-1に搭載されたラングミュアプローブ（LAP）によって検出された電離層電子密度（Ne）の移動中央値を調査した。その結果、4つの地震のちょうど1、5、2、5日前の7月27日の軌道＃2660-0、7月31日の軌道＃2721-0と＃2728-1、8月7日の軌道＃2827-0と＃2735-1、8月14日の軌道＃2934-0で顕著な電子密度の増加を示した。また、電子数異常を検知した場所は、震源から2000km 以内の北－北東部であった。これらの軌道と時空間的に近接する軌道データおよび国際電離圏モデル2016（IRI-2016）の予測値とを比較検討したところ、CSES-1のデータは4つの地震に先行する電離圏電子数異常を検知した可能性が高いことを示した。これらの結果をより説得力のあるものにするために、ヨーロッパの軌道決定センター（CODE）が発表している全球電離圏マップ（GIMのグリッド全電子数（TEC）データ（CODE-GIMTEC））を調査したところ、時空間分布の両方で同様の異常を示した。また、CODE-GIMTECを用いて、2007年から2017年にインドネシアで発生した35個のM≧ 5.8、深さ≦50kmの地震に対してSuperposed Epoch Analysis（SEA）法を実施したところ、この地域の震源地から2000km 以内で、地震の1～7日前に電離圏電子数変動の有意な正の異常があったことを示した。CSESによって検出された正のプラズマ摂動は、地震前の地震電離層効果として強く示唆された（Song et al., J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2020）。
R3年度：中国の地震電磁気衛星（CSES-1）のIn-situ電離圏電子数変動と(1)2020年10月30日のトル

コの地震（M7.0）、(2)2020年1月28日のジャマイカ地震（M7.7）について調査したところ、(1)のトルコの地震については磁気嵐と重なり、CSES1 In-situ電離圏電子関連データには地震に先行する明確な変動は確認できなかった。一方、(2)のジャマイカの地震に関して地震に先行する変動が確認され、GIM-CODEを用いた統計解析を実施した。
R4年度：中国の地震電磁気衛星（CSES-1）のIn-situ電離圏電子数変動と2023年2月6日にトルコで発生したM7.8クラス地震との関係の調査を開始した。この地震に関してヨーロッパの軌道決定センター（CODE）が発表している全球電離圏マップ（GIMのグリッド全電子数（TEC）データ（CODEGIMTEC）を用いた統計解析も実施した。
R5年度：中国の地震電磁気衛星（CSES-1）のIn-situ電離圏電子数変動と地震との関係の調査を行った。解析には全球電離圏マップ（GIMのグリッド全電子数（TEC）データ）を用いた統計解析も実施している。今年度のトピックスは地震前の電離圏異常（PEIA）と太陽起源（磁気嵐／宇宙天気）による電離圏異常の空間的解析である。具体的には、地震前の電離圏異常と太陽活動に起因する電離圏宇宙気象を調査するために中国の地震電磁気衛星（CSES-1）のIn-situ電離圏電子数変動と全球電離層マップの全電子量を調査した。GIMのTECとCSESの電子密度（温度）の異常な増加（あるいは減少）が、震源域において地震の1-5日目に出現することがわかった。一方、宇宙天気に関する異常は、地磁気嵐の期間中にグローバルに発生する。またM7.0の地震に伴うPEIAの電場は、東方向で0.21／0.06mV/mであり、2018年8月1-3日の午前0時以降／午後0時以降の下向き電場は0.11／0.10mV/mであった。2018年8月26-28日の磁気嵐期間中の電場は、02:00の深夜以降に西向き／下向き0.17／0.45mV/m、14:00LTには0.26／0.26mV/m東向き／上向きであった。CSES電子密度データの空間解析は、PEIAをグローバルな影響から識別し、震源を特定できる可能性があること、電離層におけるPEIAと嵐に関連した電場を導出するのに有効であることがわかった（Liu et al., Geoscience Lett. 2023）。
（2）Coseisimic/Preseismic（直前）電離圏電子数変動
R2年度：GNSSネットワークで観測できる地震に伴う電離圏TEC変動の解説論文を発行した。地震の隆起／沈下は音波を励起し、周期が4～5 分の成分が電離圏F層に伝播し、TEC振動を引き起こす。そして地震の約10分後に、速度（～1km/s）で磁気赤道に向かって伝播する突然のTEC振動として出現する。非常に大きな地震の後には、何時間も続く共鳴大気振動が続くことがよくある。レイリー表面波も音波を発生させ、震源地から数千キロメートル離れた場所でTEC振動を引き起こす。大地震の直前に発生するTECの変化は、地震の10-80分前に始まり、破壊しそうな断層の上に正の電子密度異常を作る。18の地震Mw7.3-9.2の比較は、それらの主要な時間、TEC率の変化、および累積的な異常におけるMwとの正の相関を示した。電子密度異常の3次元構造は、電離圏を介した、おそらく表面電荷による電場の浸透によって引き起こされたＥｘＢドリフトによって形成されることを紹介した（WileyAGUbook）。また、インドネシアの2010年Merapi火山噴火や2020年8月4日のレバノンの大爆発に関連する電離圏電子密度の擾乱についても解析した（Cahyadi, et al., J. Volc. Geothe. Res.2020; Kunduet al., Nature Scientific Rep. 2021）。2011年東北地方太平洋沖地震の直前・直後の電離圏トモグラフィーもJGR（Musfiry and Heki, 2020）で報告した。
R3年度：地震時電離圏擾乱に含まれる音波成分（AW）と内部重力波成分（IGW）の振幅を、2011年東北沖地震、2010年マウレ地震、2003年十勝沖地震、1994年北海道東方沖地震に加え、津波地震として知られる2010年メンタワイ地震の計5個の地震についてGNSS観測網のデータを解析して求めた。その結果 (1)大きな地震ほど大きなIGW/AW比を示すこと、(2)津波地震はそれらのトレンドから大きくずれた大きなIGW/AW比を示すことが明らかになった。これは断層運動が長い時間かけて起こるほど、地殻上下変動もゆっくり進行し、その結果長い周期の大気波動をより効率的に励起することを示唆することがわかった（Heki&Takasaka2021EGU、日置、高坂JpGU2021）。また、GNSSデータを利用したTECデータから浅間山、新燃岳、桜島、口永良部島の2004～2015年の5回の爆発的な火山噴火に対する電離圏応答を比較したところ、電離層のF領域の音波速度で外側に伝播する周期が約80秒のN字型の擾乱を示すころがわかった。 これらのTEC擾乱の振幅は、バックグラウンドのVTEC値の数%であることもわかり。火山爆発の強度の新しい指標となることを示した（Cahyadi et al., EPS2021）。
R4年度：東北地方太平洋沖地震に関して、日本の地磁気共役点であるオーストラリア北部のGNSSによって観測された電離圏総電子数を解析したところ、日本で地震直前に観測されたものと同様なTECの正異常があった。異常の開始時間は地震の 41.5分前であり、日本で観測された時間に非常に近く、日本とほぼ同じ磁気経度で発生していた。これは、電離層内の電場が大地震の直前に電子を再分布さ

せたというモデルを支持している（He et al., Frontier in ES 2022）。地震電離圏擾乱の観測によって、Mw8～9の4つの巨大地震では、マグニチュードが 1 増加すると内部重力波が 10倍強くなることを示した。典型的な津波地震である2010年のインドネシア・メンタワイ地震では、この経験的関係よりも強い内部重力波が励起された一方、励起された音響波の振幅は正常であった。このことはゆっくりとした断層の破壊が長周期の大気波動を効率的に励起することを示した（Heki et al., GRL 2022）。トンガの火山噴火に伴う日本やインドネシア上空のTEC異常変動について電離圏擾乱の伝播速度は大気ラム波と同じ速さであり、対流圏からの上方へのエネルギー漏洩が起源であることを示唆した（Heki, EPS 2023; Muafiry et al., Atmosphere 2022）。また電離圏擾乱は少なくとも4回日本上空を通過したことを確認した。

R5年度：巨大地震に伴う電離層擾乱は、電離圏総電子数の変化として地上の全地球航法衛星システム（GNSS）受信機で観測することができる。震源からの音響重力波による地震後10分程度の共震擾乱に加え、超巨大地震の直前における変化も報告されている。2008年中国四川地震（Mw7.9）では、本震の37分前に擾乱が始まり、バックグラウンド値の5%に達した。Mw7.3以上の過去20ケースの結果は、先行時間は断層の長さで決まり、バックグラウンドに対する異常の強さは断層面積で決定するという単純な関係を示している。2008年四川地震の直前の異常値は、これらの傾向によく適合しているが、先行時間がやや長く、強度が強いことを示す（Heki et al., Adv. Space Res. 2024）。

2023年2月6日のトルコ東アナトリア断層の地震Mw7.8（EQ1）が発生した。これは陸上で記録された横ずれ地震の中で最大級のもので、約9時間後にEQ1の北側でMw7.7の地震（EQ2）が発生した。音響波（AW）による地震発生時の電離圏電子数変動（CIP）を調査したところ。観測されたCIP 周期はEQ1の方がEQ2よりも幾分長かった。また、EQ1ではCIPの振幅に方位角依存性が見られた。地磁気や視線幾何学などの既知の要因では説明できないCIP振幅の方位依存性を示した。EQ1によるCIPは、断層に沿った一連の震源を想定することにより、よく再現されることが数値実験により明らかになった。振幅と周期の方位依存性は複数の震源からのAWの干渉によるものであった。また，横ずれ地震のCIP 振幅は，dip-slip地震よりも小さい傾向があることもわかった（Bagiya et al., GRL 2023）。

昨年度に引続き、2022年のトンガの火山噴火に伴う電離圏擾乱について解析し、今年度はニュージーランドや台湾上空のTEC異常変動についても調査した（Muafiry et al., JGR 2023, Liu et al., GRL2023）。気象衛星ひまわり8号の画像は、噴火によって誘導された上層対流圏の擾乱が高度8.2kmで水平速度約315m/sのラム波モードで世界中に伝播していることを示している。ニュージーランドではラム波によって励起された津波前方電離圏擾乱と、その後の太平洋を伝播する津波との関連を示唆している。第二の擾乱は噴火の約2時間後に始まった。これはラム波の通過によって励起された内部重力波（IGW）であると考えられる（Muafiry et al., JGR 2023, Liu et al., GRL 2023）。対流圏のラム波による擾乱（TAD）が11:30UTに台湾に到達すると、98基の地上気圧計が11:50UT頃に気圧の上昇とピークを記録し、28基の検潮儀が14:30UT頃から17:30UT頃に海面変動の上昇と最大を記録し、イオノゾンデが14:30UT頃に電離層が最高高度に達することを観測している。台湾の10台の磁力計で測定された地球磁場の水平成分の変化は、11:00-12:00UTの対流圏ラム波面到達時には、ほぼすべてトンガ火山の方向を指し、22:00-23:00UTには火山から遠ざかり、高度約130kmの487m/sのTAD（または熱圏ラム波面）も活性化していることを示唆している。世界の69個のINTERMAGNET磁力計の磁場変化の水平成分は、トンガ火山噴火によって引き起こされる対流圏と熱圏のラム波が非常に強力で、地球上に強烈なダイナモ電流と電場を誘発することを示唆することがわかった（Liu et al., GRL 2023）。

連続的なプリニアン噴火では、しばしば約3.7mHzと約4.4mHzの大気モードが励起され、全地球航法衛星システム（GNSS）受信機によって電離層全電子量（TEC）の高調波振動として観測される。このようなTEC振動は、2022年トンガ・ハアパイ海底火山（HTHH）が噴火した直後に始まった。ここでは、火山から約4000km以内の観測点におけるGNSSデータを解析し、このような大気モードの時間的・空間的分布を調べたところ、噴火直後から3.7mHz程度の強いTEC振動が観測され、火山からの音速とともに外側に伝播した。その後、TEC振動は再び強くなり、HTHHから約1400kmの距離で振幅のピークを示した。このような遠距離磁場振動は、HTHHから約3000km離れたニュージーランドやソロモン諸島の上空でも発生した。これらの振幅は、0S29固体地球モードの振幅と相関があり、大気モードの維持に、その下の鉛直表面振動が一役買っている可能性を示唆している。遠距離TEC振動の開始は、現地の日の出と同期しており、電離層電子密度の日周変動によって制御されている可能性があることもわかった（Heki, GJI 2024）。

（3）津波による電子数変動の解析　台湾との共同研究

R2年度：大地震の地震波と津波は、震源地と津波発生地域の地表近くで移動性大気擾乱（TAD）を誘発する。これらのTADは、音速で大気から電離層に垂直に伝播し、移動性電離層擾乱（TID）を形成し、同時に電離圏内で内部重力波を誘導する（Liu et al., GPS solution, 2019）。2011年東北地方太平洋沖地震の際に震源地と津波源地域から離れた電離層電子密度プロファイルを調べ、レイリー波と津波の下でより顕著なTIDが誘発されることを発見した。地震波の水平速度は約2-3km/s、津波の水平速度は2-300m/sで大きく異なるため、津波によるTEC擾乱と地震によるTEC擾乱は明確に区別できる。
R3年度：項目(5)で開発した線形正則化電離圏トモグラフィーを用いて上述の2011年東北地方太平洋沖地震に発震後の3次元構造を調査したところ、地震動の関しては水平方向に速度約2.3-3.3km/s、津波に関しては水平方向に速度200-230m/sで電離層中を伝搬する波動を検知できた。これは、昨年度の解析結果と調和的であった。また、地震動に関しては垂直方向に450-600kmの波長があり、津波に関しては垂直方向に約200-250kmの波長があることも初めてわかった。特に津波に関しては、推定される背景の中性大気が北方向に49.3m/sで移動することが初めて観測的に推定することができた。これらの数値は大気重力波の条件（分散式）を満足する合理的な値となっており、津波による電離層の擾乱が大気重力波で発生したことを強く示唆するものである。今後の津波による大気重力波発生の理解に大きく貢献する結果を世界で初めて導出した（宋2022千葉大学大学院融合理工学府博士学位論文））。
R4年度：津波によっても発生する移動性大気擾乱（TAD）に関して、トンガの火山噴火に対する応答を解析している。トンガ火山の激しい噴火により、2022年1月15日04:05UTに地表面近くにて顕著なTADが発生した。台湾に設置されたフラックスゲート磁力計、気圧計、潮位計およびイオノゾンデデータを使用して、台湾におけるこのTAD応答を調査した。地表付近の大気圧は11:30UTに上昇し始め、11:50UTにピークに達し、海面変動は12:00UTに始まり、14:00UT以降に顕著になった。電離層は12:00UTに突如上昇し、14:30UTに最高高度に達し、東向きの電場が出現したことを示唆した。磁場変化を調査したところ14:00-15:00UTの間に、TADによって生成された東向きのダイナモ電場と調和的な変化が検知された。津波によるTAD変動の解析にも有効な情報が得られたといえる。
R5年度：ニュージーランドや台湾上空のTEC異常変動について調査した。気象衛星ひまわり8号の画像は、噴火によって誘導された上層対流圏の擾乱が高度8.2kmで水平速度約315m/sのラム波モードで世界中に伝播していることを示している。ニュージーランドではラム波によって励起された津波前方電離圏擾乱と、その後の太平洋を伝播する津波との関連を示唆している。第二の擾乱は、噴火の約2時間後に始まった。これはラム波の通過によって励起された内部重力波（IGW）であると考えられる（Muafiry et al., JGR 2023, Liu et al., GRL 2023）。対流圏のラム波による擾乱（TAD）が11:30UTに台湾に到達すると、98基の地上気圧計が11:50UT頃に気圧の上昇とピークを記録し、28基の検潮儀が14:30UT頃から17:30UT頃に海面変動の上昇と最大を記録し、イオノゾンデが14:30UT頃に電離層が最高高度に達することを観測している。台湾の10台の磁力計で測定された地球磁場の水平成分の変化は、11:00-12:00UTの対流圏ラム波面到達時には、ほぼすべてトンガ火山の方向を指し、22:00-23:00UTには火山から遠ざかり、高度約130kmの487m/sのTAD（または熱圏ラム波面）も活性化していることを示唆している。世界の69個のINTERMAGNET磁力計の磁場変化の水平成分は、トンガ火山噴火によって引き起こされる対流圏と熱圏のラム波が非常に強力で、地球上に強烈なダイナモ電流と電場を誘発することを示唆することがわかった（Liu et al., GRL 2023）。
（4）イオノゾンデ統計解析
R1年度：近年、地震に先行する電離圏電子数異常の報告が多くされている。例えば、Kon et al., 2011では、日本上空における電離圏総電子数(TEC) は浅いM>6の地震1-5日前に正の有意相関があることを示した。しかし、GNSSデータは1990年代以降しか存在しない。そこで、1958年以降の長期にわたるデータの存在する地上の電離圏観測機器であるイオノゾンデに注目し、電離圏の最大電子密度（NmF2）とその高度（hmF2）について地震との相関解析を行った。NmF2とhmF2について前15日間の中央値と四分位範囲（IQR）を用いて、観測値が中央値+1.5IQR、または中央値-1.5IQRを超える場合、異常と定義した。また、電離圏擾乱は地磁気擾乱によっても発生するため、地磁気擾乱に起因する電離圏異常の特徴を調査し、そのデータを除去した。イオノゾンデから半径1000kmおよび半径350km以内で発生したM≧6, 深さ≦40kmの地震を解析対象としSuperposed Epoch Analysis（SEA）を実施した。SEAの結果から、NmF2は半径1000km以内では地震前6-10日間、半径350km以内では地震前1-10日間の正の有意な異常を示した。hmF2については有意な異常はなかった。さらに、Molchan’s Error Diagram（MED）解析を適用し、NmF2の前兆性の評価を行った。MED解析を最も有意な異常を示した5日カウントで6-10日前、1日カウントでの7日前に適用した。その結果、

どちらとも前兆性を示す結果を得た。
R2年度：本報告のULF磁場データの地震前兆性に関する統計解析を情報通信機構の国分寺イオノゾンデ観測データ（1958年1月1日-2019年9月30日）に実施した。NmF2異常が有意に発生する地震の条件（震源の深さ、マグニチュード、震央距離）について統計解析（SEA）を行った。また、NmF2異常が地震に対し最も前兆的となる条件をMED解析を用いて調査した。その結果、NmF2異常は地震との間に有意相関があり、かつ震央距離依存性、震源の深さ依存性、マグニチュード依存性があることがわかった。また、NmF2異常はより震央距離が近い地震ほど、より震源の深さが浅い地震ほど、 よりマグニチュードが大きい地震ほど前兆的となることがわかった。特に、震源の深さ20km以浅、震央距離200km以内、マグニチュード6.4以上の地震を対象とした場合、NmF2異常の10日後に対象の地震の約46%で予測に成功するという結果が得られた。これらの結果は電離圏電子数の異常変動には地震前兆の情報が含まれていることを示唆している。引き続き詳細な調査を実施中である（三石他、令和3年1月8日本大気電気学会研究発表会online）。
R3年度：情報通信機構（NICT）の国分寺イオノゾンデ観測データの解析を実施するとともに、GPSデータと同様に日々NICTにて公開されるデータを用いてリアルタイム解析が実施できるようにした。NmF2異常が有意に発生する地震の条件（震源の深さ、マグニチュード、震央距離）について、海域で発生する地震と陸域で発生する地震に関する統計解析（SEA）を実施した。対象とした地震は1958年1月1日~2019年9月30日に発生した、国分寺観測点から震央距離350km以内、マグニチュードM≧6.0、震源の深さD≦40kmの地震である。対象の地震の震央分布と地震発生日数は海域71日、陸域19日であった（全解析日数は22553日）。海域地震に関しては地震に6-15日先行して、陸域地震に関しては地震に1-20日先行してNmF2異常が有意に発生することがわかった。対象の地震発生日数が大きく違うため単純には比較できないが、震央が陸上に位置する地震の検知率は9/19で約47%、海上に位置する地震の検知率は19/71で約27%となり、海域地震より陸域地震の方がよりNmF2異常の発生率が高いと考えられることがわかった。また、従来得られていた有意相関や前兆的変動は、地震カタログをシャッフルすると消失することを確認した。
R4-5年度：情報通信機構（NICT）の国分寺イオノゾンデ観測データの解析を実施するとともに、GPSデータと同様に日々NICTにて公開されるデータを用いてリアルタイム解析を継続して実施している。
（5）電離圏トモグラフィーによる電離圏電子密度変動の可視化と変動予測
R1年度：地震に先行する電離圏電子数の発生物理メカニズムは未解明である。物理機構を推定するために、電離圏電子分布の3次元構造を理解することは重要である。Hirooka et al., 2012では、擾乱電離圏に適用可能な、ニューラルネットを用いた非線形電離圏トモグラフィーを開発し、GEONETデータに適用してきた。しかし、この手法は夜間にTECデータのSN比が低下すると電子密度分布の推定が不安定となる欠点があった。地震先行電離圏異常は昼夜問わず継続的に発生している。したがって、電離圏電子分布の継続的な再構成が可能な電離圏トモグラフィーの開発に着手した。本研究では、Phillips-Tikhonov正則化法とカルマンフィルタを適用した2種類の異なる手法で行う。
R2年度：Philipps-Tihkonov正則化法およびカルマンフィルタを用いた電離圏トモグラフィーの開発中である。
R3年度：電離圏電子密度の3次元分布について、従来のカルマンフィルタの計算要件を軽減するために、再帰的な更新プロセスを必要としない、時間に依存しない簡略化されたカルマンフィルタ（SKF）を採用したトモグラフィー手法を開発した。この手法は初期値依存性があり、電離圏電子分布が静穏な場合は、実際に近い電子密度分布を再構成することがわかったが、擾乱時には再構成精度にやや問題があることがわかった（Song et al., J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics2021）。
　次に従来の線形正則化法を改良した手法を考案した。従来の方法では、対象とする空間ボクセルに対して東西南北上下の6方向への変動に着目して拘束条件をかけているが、この方法では擾乱時には適切な結果が得られていない。本研究では、この拘束条件を上下の2方向に限ることにより、変動の大きい擾乱時の電離圏電子密度分布も再現可能な手法を開発した。この手法の再構成精度の評価を、国際標準電離圏モデル（IRI）による静穏時の電離圏電子密度や、これに人工的な局所電子密度擾乱を付加した場合において行い、その有効性を担保した（Song et al., JGR SP 2021）。次に、実際のデータを用いて、日本付近の典型的な電離圏電子密度擾乱である大規模・中規模伝搬性電離圏擾乱や、近年わかってきた台風や地震動・津波によって励起された電離圏擾乱を再構成し、これらの電子密度擾乱の3次元構造を解析・考察した。その結果、大規模・中規模伝搬性電離圏擾乱は電離圏不安定、地震動は音波、台風や津波は大気重力波によって電離圏擾乱が励起されていることを示した（宋2022千葉大学大学院融合理工学府博士学位論文）。従来の手法では不可能であった電離圏密度擾乱の3次元構造につ

いて、観測に基づいて現実的な空間分布を再構成したことは意義深く、今後、地震や津波に関連する影響の理解や把握に大きく貢献すると期待される。具体的には、津波発生領域の海面変動の検知による新しい津波緊急地震速報の開発や、地震前兆的電離圏変動の理解や物理機構の解明・評価である。
R4年度：電離圏変動の理解には電離圏電子密度の3次元分布の把握が必要で、昨年度線形正則化法を改良した手法を開発した。本方法では拘束条件を上下の2方向に限ることにより、変動の大きい擾乱時の電離圏電子密度分布も再現可能にしたことが特徴である（Song et al., JGR SP 2021）。近年わかってきた台風によって励起された電離圏擾乱について開発したトモグラフィーを用いて再構成したところ、擾乱は大気重力波によって励起され、台風の強さだけでなく、中性風の重要性（中性風速度が10-20m/sで弱い条件であること）も初めて観測学的に示した（Song et al., JGR SP2022）。2011年東北地方太平洋沖地震に関しても開発した手法を適用したところ、地震動や津波による電離圏変動の高度方向の構造から、前者は音波、後者は大気重力波によって励起されていることが世界で初めて明らかとなった。また、地震前兆的振る舞いについては、震央上空250kmを中心に電子密度が減少する領域が、3月8-9日に20時間以上存在し、その周囲では電子密度は増加していることがわかった。この結果は、非線形トモグラフィーによるLiu et al., Wiley 2018の結果（doi:10.1002/9781119156949.ch17）と同様であるが, 夜間でも安定に再構成でき、連続的に可視化できたことが重要である。
R5年度：電離圏変動の理解には電離圏電子密度の3次元分布の把握が必要であるが、電離圏擾乱時にこの3次元密度分布を適切に連続的に再構成することが可能なトモグラフィー手法の開発と準リアルタイム解析手法を開発中である。時空間分解能の向上と精度と計算時間を考慮した調査を行っている。
D．大気圏熱赤外異常解析　気象衛星ひまわりデータの解析　イタリアとの共同解析
本研究成果をまとめたN. Genzano, C. Filizzola, K. Hattori, N. Pergola, and V. Tramutoli, Statistical correlation analysis between thermal infrared anomalies 1 observed from MTSATs and large earthquakes occurred in Japan (2005 - 2015), J Geophys. Res. SE, 126, e2020JB020108, 2021, doi:10.1029/2020JB020108 がJGR2021-2022のtop cited articleに選出された。2023年12月現在top10%論文となっている。
R2年度：近年、さまざまな種類の非地震学的パラメータの異常な変動と地震の発生との間の時空間関係が報告されることがよくある。ここでは大気パラメータの異常変動と地震発生との間の時空間関係を統計的に調査した。具体的には衛星熱異常（SSTA）で、イタリアのTramutoliのグループの手法について調査・解析を実施した。彼らの手法はロバスト衛星技術（RST）データ分析手法と言われている。この手法を日本の気象衛星MT-SAT1R、MT-SAT2（ひまわり6-7号）データに応用した。SSTA解析に使用したデータは、2005年6月から2015年12月までの11年間の夜間衛星画像（波長10.8μm、00:30LT）である。解析の概要は（1）SSTA検知には、RSTアプローチとRETIRAインデックスを用いる（Tramutoli et al., 2005）、（2）SSTAとM_{JMA}≧6の日本の地震との相関分析は、空間、時間、マグニチュードに関する適切な制約を適用して実行した。解析結果のハイライトは（a）11年間の観測期間中にわずか29のSSTAが発生、（b）18のSSTA（つまり、62%）は、地震との見かけの時空関係で発生、（c）そのうち13個は地震の前に発生したことである。また、Molchan’s Error Diagram解析結果は、「RSTベースの衛星熱異常」と地震発生の間の偶然では説明できない相関関係があることがわかった。特に、M_{JMA}≧6.5の地震の場合、ランダムな推測に対して最大4.3の確率利得があることがわかった（Genzano et al., JGR SE 2021）。
R3-5年度：昨年度himawari6-7号を衛星熱赤外温度異常と地震との統計的有意相関とROC解析を用いた前兆性の評価を実施し、地震発生の間の偶然では説明できない相関関係があり、M_{JMA}≧6.5の地震の場合、ランダムな推測に対して最大4.3の確率利得があることを報告した（Genzano et al., JGR SE 2021）。Himawari8-9号については、バンドや時間分解能も上昇したことから、2018年新燃岳の溶岩噴出を例にその性能の調査と雲判別の精緻化・高度化を実施した。雲判別手法や地表面温度変化の特性について、精緻化・高度化した結果、夜間だけでなく太陽光のある日中も含めた10分間サンプリングの輝度温度データを用いて、最初の火山噴火の数時間前に高い特異点異常を検出できることを示した。ひまわり8号の輝度温度データが火山溶岩活動の監視や溶岩流出の迅速な検知に有効であることが示唆された。
E．中国の孔内歪計データの解析（中国・吉林大学との共同研究）、および地震統計解析（中国南方科技大等との共同研究）
R1年度：大地震発生の前にb値が減少することが数多く報告されている。しかし、Mcの決め方やb値の推定誤差など、b値変動について定量的に評価することは困難であったため、これらの点を改善する

ために、(1)GR則に従う最小のMであるMcの時間変化を考慮したb値解析、(2)地震活動の参照期間と対象期間のb値の差異を赤池情報量基準を用いて客観的に評価するパラメータP値を導入したb値解析、を併用する手法を開発した。ここでP値について簡単に説明する。モデルの差の有意性は$\Delta AIC = AIC_1 - AIC_2$を用いて評価でき、$\Delta AIC \geqq 2$となれば、モデル1とモデル2は有意に違うとされる。本研究では、地震参考期の地震をブートストラップ法でリサンプルし、地震参照期の代表b値を1000個求める。対象期間のb値、参照期期の代表b値とのΔAIC値をそれぞれに算出し、ΔAICが2以上になる個数をカウントし、その割合をP値（$P_{\Delta AIC} \geqq 2$）と定義した。つまり、Pが大きいほど、参照期間と対象期間のb値の違いが大きい判断する。

開発した手法を2003年十勝沖地震M8.0と2011年東北沖地震M9.0の海溝型巨大地震と2008年中国四川地震M8.0と2016年熊本地震M7.3の内陸巨大地震に適用し、事例解析を行った。その結果、海溝型地震について、両者とも地震の数か月～数年前からb値の継続的な低下が見られ、本震の1～3か月前にP値が著しく上昇することがわかった。内陸型地震については、四川地震では、b値の長期的な低下がみられ、震源域におけるP値が地震の3か月前から大きな上昇し、熊本地震では、b値減少は解析期間中に数回あり、P値の上昇とb値減少が同時に発生した回数は2回で、そのうち1つは本震の3か月前から、もう1つは阿蘇山の火山活動による火山性地震による擾乱であることがわかった。すなわち、参照期間との差異を表すP値の増加が地震活動の変化の客観的な変化を示し、海溝型地震、内陸地震とも数か月前からb値の減少とP値の増加を示すことがわかった。

R2年度：中国・四川省－雲南省の龍門山断層帯の南西端にある6つのYRY-4孔内ひずみ計からのデータを分析して、構造ひずみの変化と2013年8月のLushan地震との関係を調査した。適応カルマンフィルタを用いて気圧、潮汐、水位の変化によるひずみ応答を除去して、非構造的擾乱を優先的に分離する状態空間モデルを開発した。既知の変動を除去した歪変動と近似ネゲントロピー（ApNe）とb値が導入され、局所的な地震活動と比較された。Lushan地震に最寄りの観測点とさらに2つの観測点では、地震の6～4か月前にほぼ同時に短期間のApNe異常を記録した。またその領域のb値も同時に低いことを示した。孔内歪計からうまく気圧、潮汐、水位の変化に対応する応答を除去できれば、地震前兆的な変動を検出できる可能性があることを示した（Yu et al., IEEE access 2021）。

同上の中国・四川省－雲南省の龍門山断層帯の孔内歪計網の2011-2014年のデータを用いて、大地震に先行する認識可能な歪データの異常変動があるかどうかを調査した。本研究では6か所の孔内歪計データを調査した。各サイトが受信する地震エネルギーEsを用いて、地震イベントを選択した。各歪計データの相関度を調査するために、マルチチャンネル特異スペクトル解析（MSSA）を用いて、周期成分、地震に関連する成分、ノイズ成分等に分解し、各歪計データの相関度を決定した。ネットワーク結合度数を相関度の高い観測点の組み合わせ数と定義し、全観測期間中の歪データのネットワーク結合度数の変化を調査し、上位20%を異常と定義し、地震との相関を調査した。その結果、ボアホール歪ネットワークの結合度異常と局所的な地震活動（Es>105）が相関していることを示した。特に、Es>107の13個の地震のうち11個でネットワーク結合度異常が増加していた。また、歪計ネットワーク結合度の強化が規模の大きい地震の前30日以内に出現する傾向が高いこともわかった。MSSAを用いた歪計ネットワークの結合度解析は、地震発生プロセスの理解に役立つ可能性がある（Yu et al., Entropy 2020）。歪異常のモニタリングと局地的な大地震との相関関係が確認されたので、ROCを用いて、歪データに地震前兆情報が含まれるかどうかを評価した。ここでは2010年から2017年の孔内歪計データを使用した。歪計ネットワークは歪計データの地震に関連する異常検知に関する先行研究のEntropy 2020やIEEEAccess 2021よりも少し広範囲になる。先行研究同様に歪データのネットワーク異常を調査し、異常を検知した観測点の数N_{ano}と地震に対する警告時間の長さT_{alm}を用いたROC曲線によって評価した。その結果、最適な予測は14日以内に$N_{ano} \geqq 7$とし、T_{alm}=1日の場合であることがわかった。また、規模が大きい地震ほど、予測結果がよいことがわかった。ROC調査により、歪データに大地震に関連する先行情報が含まれていることを示した（Yu et al., Remote Sensing 2021）。

R3年度：2008年四川地震（M8.0）の主破砕帯に沿った地域のb値の時間変化について調査した結果を論文にまとめた（Xie et al., Entropy 2022）。それとともに国内の地震（2011東北地震や2018熊本地震）への応用を開始した。ブーストラップ法と赤池情報量規準（AIC）を組み合わせて，時間変化におけるb値の変化の有意水準を示すパラメータP（$\Delta AIC \geqq 2$）値を導入していることが特徴である。その結果主破壊帯のb値は長期的に減少傾向を示していることがわかった。次に初期断裂が始まる小さな領域に注目すると、2008年四川地震の約3ヶ月前に初期破壊領域でb値が大きく変化しており、かつP値も上昇しており、b値が大地震の前兆現象を監視・検知する潜在的な能力を有することがわかった。

R4年度：新たに国内のGNSSデータを用いて（4観測点の対角線の交点における疑似歪を算出）、歪計測の疑似ネットワークを構成し、そのネットワークの関連度の調査研究に着手した。具体的には2011年東北地震や2018年熊本地震を対象とし、国土地理院のF3解を用いている。b値変動やその参照区間との有意な差を示すP値などの地震活動との比較（Xie et al., Entropy 2022）も同時に行っている。
R5年度：前年度に引続き、b値解析を実施している。2024年能登地震や関東地域のb値解析やP値解析対象地域を増加した。また、新たに国内のGNSSデータを用いて（4観測点の対角線の交点における疑似歪を算出）、歪計測の疑似ネットワークを構成し、そのネットワークの関連度の調査研究を2011年東北地震、2018年熊本地震を対象に実施している。
F．VLF帯およびLF帯電磁放射の解析R5年度：本研究では雷放電の同定が重要である。そこで、近年世界的に展開されている超低周波（VLF）電磁波受信機で測定された空電から雷放電の位置を特定するためのネットワークであるBlitzortung.orgについて、日本における雷放電の検出効率と位置精度を評価した。その結果、関東など受信局が密集している地域では十分な能力があったが、受信局が少ない地域では十分に検知できていないことがわかった。関東圏の対地雷に対するBlitzortungの最新の検出効率は約90％であり、平均位置精度はおおよそ 5.6kmであることがわかった。VLFは長距離伝播するのでBlitzortungの結果には注意する必要がある（Kamogawa et al., Atmosphere 2023）。
　LF帯の地震前電磁放射については多くの報告があるが、その多くは狭帯域パルスの強度に関するものであり、発生源の位置に関する議論は少ない。そこで、我々は、LF帯広帯域干渉計の開発を進めている。これまでに、干渉計素子の開発が終了し、素子による連続観測を行っている。波形解析の予備的な結果、対地雷によるLF/VLF波形信号を正常に記録することがわかった。また，上記の対地雷起源の波形とは異なるLF帯信号も検出した。この信号は雲内放電である可能性もあるが，地震に関連している信号である可能性も棄却できないことがわかった（太田らJ. Atmos. Electr. 2023）。
G．国際ワークショップ等の企画
COVID19感染症の影響で国際ワークショップ等は予定通りに開催することができなかった。International Workshop on Earthquake Preparation Process（IWEP）はR2-R4年の3年間開催することができず、R5年に4年ぶりの開催となった。以下に開催状況を示す。
令和元年度:
a. JPGUにおける国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processes（幕張メッセ、2019年5月30日、講演数：口頭12件、ポスター8件）
b. 6th Int’l Workshop on Earthquake Preparation Process（2019年5月31日-6月1日、千葉大学、講演数：口頭31件、ポスター16件、参加者約70名（海外からの参加30名））
令和2年度：
a. JpGUにおける国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processes（幕張メッセ、2020年7月16日、Online開催、講演数：口頭5件、ポスター17件）
令和3年度：
a. JpGUにおける国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processes（2021年6月6日、Online開催、講演数：口頭15件、ポスター7件）
令和4年度：
a. JpGUにおける国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processes（2022年5月22日にhybrid開催、講演数：口頭12件、ポスター8件）
令和5年度：
a. JPGU における国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processes（幕張メッセ、2023年5月22日、講演数：口頭15件、ポスター12件）
b. 7th Int’l Workshop on Earthquake Preparation Process（千葉大学、2023年5月24日- 25日、講演数：口頭31、ポスター16件、参加者約70名（海外からの参加35名））

（6）本課題の５か年の到達目標：

　2023年度までの課題において、地球磁場変動や電離圏電子数変動などの地球物理観測データの統計解析により地震との有意相関性や地震前兆性を示す現象の存在が明らかとなってきた。しかし、単独の現象の解析では、現実的な予測の点からは合格点には至っていない。そこで本計画では、2023年度までの課題に加えて、機械学習(AI)やデータ同化などの技術を用いて、地球観測ビッグデータの波形解析・特徴量分析を実施し、地震準備過程を精度よく把握・理解するとともに、地震前兆に関する情報

をタイムリーに必要な品質で精度よく抽出し、マルチパラメータを入力とするデータ駆動型の地震発生確率数理モデルの構築に資する研究を実施する。具体的には点過程を仮定したEpidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) を手本とする発生確率予測モデルにさまざまな地震前兆現象を組込んだ新しい地震予測手法の確立を目指す。有望な予測パラメータ調査も引き続き実施し、特に電離圏電子数変動の准リアルタイム解析・可視化システムの開発とラドン散逸量（地中フラックス）のネットワーク観測とリアルタイム解析技術の開発を実施する。また自前の観測データ以外に、前述のモデルに組み込む既存の他機関データ（GNSS-TEC等）の活用や、中国、台湾、米国、イタリア、ロシア、インド等の研究者とも協力し、国際的に短期地震予測研究を推進する。さらに、電磁気学的な先行現象発現メカニズムについて、室内実験等でいくつかの仮説について観測量を定性的・定量的に説明できるかについて検証を試みる。

（7）本課題の５か年計画の概要：

研究内容は、2019-2023年度に実施した課題のCBA_01の(1)地震に伴う電磁気現象を正確に捕捉する複合観測とデータ蓄積、(2)データ解析法の確立（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)室内実験やモデルによる地震電磁気信号発生の物理機構解明、(4)電磁気学的、力学的、地震学的データとの関連性評価に資する研究に加えて、下記を遂行する。ア)地震前兆現象を用いた時変地震予測確率数理モデルの構築と応用、イ)AI・機械学習による地震前兆情報抽出とその発生機構の検討、ウ)国際ワークショップの観点を増強し、複数の地球物理学的前兆情報を組込んだ包括的な地震予測確率数理モデルの構築を目指す。具体的には、下記のとおりである。

[1]. 観測（現行の(1)の継続）：全期間

・ULF帯、VLF帯、VHF帯電磁場観測を維持、短期予測に資するデータ収集（期間全体）。

・地圏―大気圏―電離圏結合の観測学的研究のための観測装置の開発

地震に先行するTEC異常の発生原因の１つと考えられている電場異常について観測学的に検証可能な装置を開発する。地中および地表付近のRn濃度やLF帯大気電場等を測定する。着手（初年度）、テスト観測（2-3年度）、定常観測（3-5年度）の予定。

短期的な先行現象として統計的有意性を示した地磁気3成分観測およびVLF帯パルス電磁波の観測、さらに北海道大学、千葉大学、群馬大学を中心に行われてきたVHF帯放送波の散乱観測を継続する(ただし機材の更新は困難)。また、電離圏電子数変動（GNSS-TECデータ、イオノゾンデデータ）など、衛星熱赤外異常の解析を継続して実施する。いずれの観測項目でも、観測網を良好に維持し、事例を積み重ねる。本グループでは地震に先行する電離圏電子数変動や気象衛星ひまわりで観測された熱赤外温度異常について、統計的な有意相関とReceivers Operating Characteristics (ROC)的解析による前兆性を報告しているが、因果関係は未解明である。これらの原因の１つとして地震前の地中からの放射性ラドンガスの異常放出による地圏-大気圏-電離圏結合が提案されている。一方、地震活動に伴うラドン変動は1995年神戸地震の際に神戸薬科大学のYasuokaらが大気ラドン濃度の上昇を、および産総研のIgarashiらが地下水ラドン濃度の上昇を報告している。また、活断層直上でラドン濃度が増加することも報告されている。

そこで、特に[3]と連携し、地中ラドンflux計測のネットワーク観測システムを開発し、ラドンの地表への散逸量変動などの地表変動や地殻応力（歪）との関係の調査等に資するデータを蓄積する(南東北・能登・台湾等が候補地)。地中ラドンfluxは大気ラドン濃度よりも大気による拡散の影響や遠方由来の影響が小さく、その場の感度が高い。地下水ラドン濃度の観測は観測井が必要となり一般にコストがかかる。大気ラドン濃度の変動は別グループで研究されているが、大気ラドン濃度の変動と地震との関係を証明するためには、地中からのラドン放出異常とそれに続く大気ラドン濃度変動の観測学的な実証も必要で、彼らとの連携も期待できる。我々は、地中ラドン濃度、大気ラドン濃度、気象要素の予察的試験観測を行い、マルチチャンネル特異スペクトル解析によって気象由来の変動を弁別することで、地中から大気へのラドンfluxの推定およびflux変動と地殻変動との関係を調査してきた。その結果、ラドンfluxとGNSSによる地表歪との相関を示唆する結果を得た。そこで、地震活動が活発な地域において自動ネットワーク観測を実現すべくシステムの開発を実施する。気象等によるラドン変動の要因をマルチチャンネル特異スペクトル解析で弁別し、ラドンfluxが推定でき、複数観測点のデータをルーチン的に管理できるシステムを開発する。設置場所は地震活動と冬季の気候を考慮し、北関

東・南東北あるいは積雪の少ない地域にて3点観測を実施し、システムの検証を行うとともに、地震や地殻変動によるラドン異常を観測学的に研究する。また、電離圏電子数変動ではその変動の自動解析と電離圏トモグラフィーによる3次元構造推定の準リアルタイム化も検討する。

[2]．地震前兆現象を用いた時変地震予測確率数理モデルの開発と応用（現行の(2)(4)の発展版）：
・VHF帯観測データについては、予測マップを作成し、統計的な評価を実施する。またリアルタイム解析システムを開発（1-5年度を予定）。
・GNSS-TEC解析では、数日前の日変化パターンについては、準リアルタイム解析システムを開発（1-3年度）。
・イオノゾンデデータの解析による電離圏電子密度変動の準リアルタイム解析システムの開発（1-3年度）。
・電離圏トモグラフィーによる電離圏電子密度変動の連続可視化と変動予測システム構築（1-4年度）。準リアルタイムシステム構築（5年度）
・新規観測パラメータの統計的有意性や前兆性評価の検証（随時）
・電磁気学的，力学的，地震学的データとの関連性評価（随時）
・各種パラメータの組み合わせによる予測成功確率の変動の調査（随時）。
・海外で報告されている衛星観測データ地震前兆現象の検証に着手する（衛星熱赤外データ（TIR：ひまわりやLEOデータなど）、In-situプラズマ計測データ/電磁場データSWARM衛星、中国張衡1号など：初年度～）。統計的有意性や前兆性評価の検証（2年度～）
・slowslipに関する電磁気データの検討開始（1-5年度）
・b値や歪データ等と電磁気データの比較検討（1-5年度）
・個別の地震前兆現象を用いた時変地震予測確率数理モデルの開発・評価（1-5年度）
・複数の地震前兆現象を用いた時変地震予測確率数理モデルの開発・評価（3-5年度）
・時空間地震予測確率数理モデルの検討（3-5年目）

機械学習 (AI) やデータ同化等のビッグデータ解析技術を駆使した新しいデータ解析手法の開発と高精度観測データの充実により、地震準備過程で発生する弱い変化の前兆情報の検出精度を大幅に向上させ、複数の地球物理学的前兆情報を組込んだ包括的な地震予測確率数理モデルを構築する。上記に示したデータ解析（統計的有意性やROC解析等）や新しいでデータ解析手法の開発については、従来通り継続して実施する(令和6年度から令和10年度)。地震発生予測に関して、現在世界で最も優れた確率数理モデルはETASモデルである。ETASモデルは点過程モデルで、地震カタログを分析して、地震の背景レートと地震の自己励起による発生予測情報から地震（余震）発生確率の時間変化を予測する。本計画では、ETASの点過程モデルの条件付き強度の加法性を利用して、地上または衛星観測された前兆異常による予測情報を外部励起部分として追加した包括的な地震予測モデルを構築する。各種前兆現象のカーネル関数は前兆現象の特徴に応じて個別に開発する。前兆現象として、地上観測データ（ULF電磁場、ELF/VLF/LF電磁場、GNSS電離圏電子数変動、イオノゾンデ電離数電子変動、地震活動度、GNSS地表変位、ラドン濃度等）、衛星観測データ（衛星熱赤外変動（HimawariやMODIS等）、衛星電磁場、衛星高度電子数変動等）を調査する。前兆パラメータは固定せず、研究の進展に応じて、追加や削除が可能なopenシステムとするが、地震活動との統計的ROC的解析による前兆性が追加の条件である。まずは、統計的有意性や前兆性が担保されているULF磁場変動、GNSS電離圏電子数変動、衛星熱赤外変動について高精度時変モデルを開発し（令和6年度から3年間程度）、時空間へ拡張する（令和9年度から2年間程度）。また、短期予測精度の向上はROC解析にてAUC(Area Under Curve)が左上方向を通過する曲線に改善されることでもある。従来は個別パラメータについて調査してきたが、複数パラメータを用いたAUCの改善も試みる。

[3]．AI・機械学習による地震前兆情報抽出とその発生機構の検討（現行の(2)(3)(4)の発展版）：
[2]で同定された地震前兆変動について、AI・機械学習で自動検知できるシステムを必要に応じて構築し、リアルタイム監視に向けた調査を行う。また、室内実験や計算機実験等を行い、先行現象の発現・伝搬メカニズムの理解を進める。
・AI・機械学習による地震前兆情報抽出手法の検討とアルゴリズム構築（1-3年目)
・AI・機械学習による地震前兆情報抽出アルゴリズムの評価（4年目)
・AI・機械学習による地震前兆情報抽出アルゴリズムの実装（5年目)

・AI・機械学習による地震前兆情報抽出アルゴリズムの高度化（3-5年目)
・地震前兆情報の発生機構の検討（1-5年目)
・地殻電磁場発生モデルの構築と電離層電子密度変化のシミュレーションを実施し、地震前・地震動や津波によるのTEC異常現象の物理の解明を行う（1-5年度）。
・水槽実験や岩石破壊実験、計算機実験等でelectrokinetic（地下流体の流動による電流励起）による電磁現象の発生について検討する（1-5年度）。

新規に実施する主な事項は、数理モデルに組込む、地震活動との統計的有意性およびROC的解析による前兆性が担保されたパラメータは、地震準備過程で生じる特異な変動を検知している可能性が高い。前兆現象の波形、周波数、振幅、発生時間・場所等の特徴を詳細にかつ定量的に分析・評価し、深層学習やAI技術を用いた異常検知の実時間処理を検討する。これらのデータは前兆現象の発生機構（地震準備過程）の解明に資する。2002年10月および2007年8月の房総slowslipイベント時には、深夜に矩形電磁場変動が観測された。その波形の振幅や極性から地下に線電流源を仮定すると現象を説明でき、electrokinetic（地下流体の流動による電流励起）による電磁現象の発生を示唆している。岩石に圧力を印加すると、岩石中の流体の移動（electrokinetic効果）によって電流が励起され、類似した波形が記録される。同様な波形は地震前兆発生時にも観測されており、実際の観測データと室内岩石実験の結果と比較し、electrokineticモデルの妥当性（(1)地下応力変化により震源域から観測点近傍にて地下流動が発生、(2)それによる電磁場の発生、(3)観測点への伝搬、(4)多点観測された矩形波信号の振幅や継続時間等の特徴）をシミュレーション等で検討する。必要に応じて水槽に土層を敷詰め水流を流す、水槽実験による検証も行う。また、電磁場変動とGNSS地表変位や歪、b値やラドンの地表への散逸量変動などの地表変動や地殻応力（歪）との関係も調査する。また、電離圏電子数変動ではその変動監視の自動化および準リアルタイム可視化を実施する。電離圏電子数層トモグラフィーによる3次元構造推定解析（発生メカニズム）も進める。

[4]. 国際ワークショップおよび成果報告会の開催：
初年度、3年度、最終年度に国際ワークショップを開催する。また、年1回（例えば12月頃）に学会等のセッションも利用しつつ、成果報告会を実施する。

（8）実施機関の参加者氏名または部署等名：

服部 克巳（千葉大学大学院理学研究院）,佐藤 利典（千葉大学大学院理学研究院）,津村 紀子（千葉大学大学院理学研究院）,小槻 峻司（千葉大学国際高等研究基幹/環境リモートセンシング研究センター）
他機関との共同研究の有無：有
庄 建倉（統計数理研究所）,中谷 正生（東京大学地震研究所）,上嶋 誠（東京大学地震研究所）,小河 勉（東京大学地震研究所）,梅野 健（京都大学大学院情報学研究科）,鴨川 仁（静岡県立大学グローバル地域センター）,本島 邦行（群馬大学大学院理工学府）,井筒 潤（中部大学理工学部）,長尾 年恭（東海大学海洋研究所 名誉教授）,日置 幸介（北海道大学大学院理学研究院 名誉教授）

（9）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：千葉大学大学院理学研究院
電話：０４３－２９０－２８０１
e-mail：khattori@faculty.chiba-u.jp
URL：

（10）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：服部 克巳
所属：千葉大学大学院理学研究院