

2 (3) (3-1) 地震発生先行過程

「地震発生先行過程」計画推進部会長 中谷正生
(東京大学地震研究所)

地震発生の予測の時間精度を高め、短期予測を可能にするためには、地震発生の直前に発生する非可逆的な物理・化学過程(直前過程)を理解して、予測シミュレーションモデルにそれらの知見を反映させ、直前過程に伴う現象を的確に捕捉して活動の推移を予測する必要がある。これまでの研究によって、地震に先行して発生する現象は多種多様であり、地震発生準備過程から直前過程にまたがって発生する現象の理解を進める必要性が認識されてきた。このために、1) 地震に先行する地殻等の諸過程を地震発生先行過程と位置付けて研究し、2) そのメカニズムを明らかにして、特定の先行過程が地震準備過程や直前過程のどの段階にあるかを評価し、3) 数値モデルを作成し、4) モデルを予測シミュレーションシステムに組み込む必要がある。地震発生予測システムの研究で行う3)と4)の研究に資するために、地震発生先行過程に関する研究では、上記のうち1)と2)を実施することとされている。

ア. 観測データによる先行現象の評価 (電磁気)

地震発生に短期的に先行してVHF帯の電波が見通し外に伝播する異常(地震エコー)について、異常判定の機械化のための簡単な統計処理による実験をはじめた(北海道大学[課題番号:1005])。

東北地方太平洋沖地震をはじめM8.5級以上の巨大地震に数十分先行する大きな正のTEC変動(図1)が指摘された(Heki, 2013, 北海道大学[課題番号:1005])が、一方で同じデータを、地震後の津波によるTEC減少(Kakinami et al., 2011, 北海道大学[課題番号:1005])によるベースラインのみかけ上の変化によって、地震前の時期に偶然発生していた磁気嵐が強調されてみえたに過ぎないとする解釈もあり、国際誌において論争を展開している(Kamogawa et al., 2013; Heki et al., 2013, 北海道大学[課題番号:1005])。

2000年三宅島噴火より以前の時期に、半径20km以内の地震(M>3)と非常によく相関した、VAN法におけるSES状の、短期的先行異常がみられた(Orihara et al., 2012, 東海大学[課題番号:2501]) 神津島の観測点については、2010年の観測再開後、地震もなければ異常もない状態が続いていた。東北地方太平洋沖地震に誘発された地震(M>3)が2011年の3月11-13日に約20個、また、2013年8月にも2個のM>3地震があったが、いずれにも先行異常はなかった。また、2013年4月に三宅島近海で群発地震が発生したが、これにも先行異常はなかった。後者については、2000年三宅島噴火に前後する群発地震のさいにも先行異常がなかったのと調和的である(東海大学[課題番号:2501])。

2009年12月に発生した火山性の伊豆半島東方沖地震の後の、火山性の地震活動がなかった期間である、2010年1月から2012年12月までの伊豆半島東部の全磁力変動について、外部磁場変動、年周変化、線形トレンド、潮汐を補正したうえ(図2)で、短

期的な変動について定性的に解釈した。この期間の地殻活動としては、2011年7月と9月の群発地震活動、2011年3月の東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動がある。地殻変動、地震活動との比較から、ピエゾ磁気変化は有意に反映されず、むしろ地下の熱活動の経過を反映したものとみるのが合理的とおもわれる（笹岡ら、2014、気象庁 [課題番号：7020]）。

（地球化学的現象）

地下水中のラドン濃度が地震や地殻変動に応答する現象については、先行現象研究の初期から多くの報告がある。中伊豆に設置された観測井では、1978年の伊豆大島近海地震に先行するラドン濃度の明瞭な変化が記録されたことは有名であるが、その後も不断の観測をつづけていた(図3)。約30年にわたって、非常に安定したデータが続いていたが、2011年の東北地方太平洋沖地震に先行して、明瞭なラドン濃度の変化が観測された(東京大学理学系研究科 [課題番号：1502])。

兵庫県南部地震に先行する現象として注目された大気中ラドン濃度について、本計画では、全国の放射線管理施設のモニタリングネットワークを築いている。過去に遡ってのデータ解析も進展している。東北地方太平洋沖地震に先行する異常(補正後で 3σ 超)は、宮城、福島、札幌でえられていたが、今年度、栃木県の獨協医科大学のデータでもこれが確認された(図4)。また、和歌山県立医科大学のデータからは、1999年8月21日(M5.4)、2011年7月5日(M5.5)の地震が、 3σ 超異常のピーク前後に発生していた(東北大学 [課題番号：1213])。

（測地）

GPSデータの解析については、プレート境界自動モニタリングに向けたシステム開発を継続し、具体的には最終精密暦だけではなく、速報暦、超速報暦を用いて直近1日前の日座標が得られるシステムを構築した。さらに国土地理院(30点)および東北大学(8点)による1HzリアルタイムGNSSデータストリーミングを用いて、1秒毎の座標値を随時得るシステムの構築を行った。さらにこのようにして得られたデータをもとにプレート境界での滑り分布を推定するシステムの開発を進めた(東北大学 [課題番号：1210])。

また、東南海地震震源域の直上付近に設置された海底圧力計について、浅部ゆっくり地震の検知可能性を検討した。その結果、浅部ゆっくり地震に伴う地殻変動は、その近傍の限られた観測点のみに局所的なものとなり、同一ノード内であってもセンスの異なることが示された。このことは、ノード内でスタックしたデータからの差分が有効であり、実際のデータのノイズレベルと比較した結果、検出できる可能性があることを示した。さらに、海溝やプレートの形状によっても大きな影響を受けるため、定量的な検討をする際には、構造探査などから得られた詳細な解析結果を取り入れる必要がある(東北大学 [課題番号：1210])。

（地震活動）

2011年東北地方太平洋沖地震前後の繰り返し地震の規模について見ると、この地震の余効滑りが大きい領域で、繰り返し地震のマグニチュードが大きくなっている

傾向(図5)が明らかになった。また、これらの規模が大きくなった繰り返し地震は、東北地方太平洋沖地震以降に多数発生しているものが多く、非地震性滑りの加速(余効滑り)が繰り返し地震の規模の増加に寄与していると考えられる。規模変化の詳細を調べるために、東北地方太平洋沖地震後マグニチュードが最大1増加した岩手県釜石沖の繰り返し地震について調べると、その滑り域が地震前に比べ広がっていることが分かった(図6)。この結果は、これまでの繰り返し地震の滑り域の周囲に条件付き安定滑り領域が存在していることを示唆している。このような、ローディングレートに依存する滑り特性の変化は、今後地震の時期だけでなく規模の予測にとって重要である(東北大学[課題番号:1210])。

微小破壊観測を実施している南アフリカ金鉱山において、採掘前線の前方20mの地点で、薄い平面上分布を呈する微小破壊のクラスター(図7)が現れ、初期には5m程度の広がりしかなかった活動域が、その後3ヶ月の間に差し渡し20mまで拡大した。この間、 b 値は2.5から1.5へ漸減していき、また、AEイベントの応力降下量が初期には概ね数MPaだったが、後半には10MPa程度のものが現れはじめた。この例では、期間中、採掘前線が10mほど前進したので、岩石実験等でしられている、応力上昇による微小破壊の活動変化がフィールドスケールで確認された例とみることができる(東京大学地震研究所[課題番号:1420])。

臨界現象の観点から、地震活動の時系列を分析し大地震の発生前の臨界状態を検知しようとする手法のひとつとして、地震の発生順序を時系列の横軸(ナチュラルタイム)にとり、マグニチュードの系列を分析し、そこから κ_1 とよばれる統計量の時系列をえる方法を研究している。従来は κ_1 が閾値に近づくことで臨界状態を検知するというやり方であったが、今年度 κ_1 の変動度に着目した検討を行った。日本周辺の地震カタログを用いて検討した結果、 κ_1 の変動度が極小値をとる時期が大きな地震の発生に先行する傾向がみられ、なかでも最も顕著な極小は、2011年東北地方太平洋沖地震の前であった(Sarlis et al., 2013, 東京大学地震研究所[課題番号:1448])。

イ. 先行現象の発生機構の解明

(震源核)

震源核形成過程の研究に使われる摩擦法則にはいくつかのバージョンがあるが、震源核形成時におこるゆっくりした滑りによる弱化に関して、実験室で計測された摩擦データをよく説明できるバージョンのもの(slip law)を使うと、非常に小さな震源核がパルス的にゆっくり伝播するという形のプロセスとなることが数値計算と理論から示されていた(Ampuero and Rubin, 2008)。しかし、最近提案された、低速での滑り弱化と、地震間の強度回復の両方を説明できる摩擦則(Nagata et al., 2012, 東京大学地震研究所[課題番号:1427])を用いて同様の数値計算を行うと、従来のもうひとつの代表的なバージョンであるaging lawで予想される大きな震源核よりは小さいが、slip lawのように極端に小さくなるわけではない(図8)ことが示された(Kame et al., 2013, 東京大学地震研究所[課題番号:1421])。

また、本年度は、断層の載荷速度が震源核の大きさに及ぼす影響についても、数値実験と理論的考察を行い、摩擦法則とそれに支配される震源核成長のスタイルに

よっては、震源核の大きさが断層の載荷速度に系統的な依存性をもちうることを示した(Noda et al., 2013, 東京大学地震研究所 [課題番号: 1421])。これは、プレート間大地震のほとんどには本震に向かって加速する前震活動が伴うのに、プレート内地震においてはそのようなケースがほとんどないという、最近の発見(Bouchon et al., 2013)の物理メカニズムである可能性がある。

(電磁気学的現象)

2003年十勝沖地震の震源域の比抵抗構造を深部まで決定するために、2003-2004年に行われたMT探査データを3次元インバージョンし、日高衝上断層直下のプレート上面付近の地震頻発域から地表浅部に達する柱状の低比抵抗域(図9)があることを示した。日高山脈の地殻に分布する低速度域の東端に位置しており、千島弧と東日本弧の衝突域に破碎域が生じ深部から流体が供給される通路となっている可能性が指摘できる(Ichihara et al., 2013, 北海道大学 [課題番号: 1005])。また、近畿地方北部の丹波山地における特異な地震活動については、本計画での詳細な地殻構造探査により、フィリピン海プレートからの流体供給と関連しているとの見方が強まっているが、本年度は、MT法探査が同地域南部まで行われ、比抵抗構造(図10)の点からもこの見方が支持される結果となった(京都大学防災研究所[課題番号: 1811])。

一方、地電位観測を行っている神津島では、地震に先行すると考えられる信号に南北成分に特化したものが多かった(Orihara et al., 2012, 東海大学 [課題番号: 2501])が、有限要素法でおこなったシミュレーション(図11)によって、電流ソースの方向にかかわらず、地表付近にある金属製人工物の影響でこれが説明できることがわかった(東海大学 [課題番号: 2501])。これは、同島でおこなった、人工電流注入実験の結果にみられる同様の傾向(Orihara et al., 2009, 東海大学 [課題番号: 2501])とも調和的である。

電磁気観測でみられる量のなかには、観測点での地殻の変形に誘起されるものがあることは理論的にも期待される。東北地方太平洋沖地震における津波の到達にもなって、潮位や地殻歪みとよく相関するDC-ULF帯の地電位変動(茂木ら, 2011, 北海道大学 [課題番号: 1005])が北海道の複数の観測点で捉えられ、津波の到来方向と直交する方向に地電流が流れたことが示唆された。また、新島・神津島の地電位観測データの解析から、東北地方太平洋沖地震の地震波到達から約1日弱の期間には流動電位等によるとおもわれる特異な電場が地表付近に形成されていたことが推察され、これは東北地方太平洋沖地震の地震波到達から数時間の間に集中したおこった誘発地震による地殻状態の変化による可能性が指摘できる(東海大学 [課題番号: 2501])。また、紀伊半島でのVLF帯パルス信号の観測においても、人工ノイズのさけられるULF帯に感度のあるセンサを導入して、地震波到達時にその場で誘起されたと判断できる特異な電磁気信号を捕捉できた(東海大学 [課題番号: 2501])。

(地球化学的現象)

地下水ラドンが地震や地殻変動に応答する現象の発生機構の予察的モデルを発展させた。中伊豆に設置された観測井では、1978年に伊豆大島近海地震に先行するラ

ドン濃度の減少が、2011年に東北地方太平洋沖地震に先行するラドン濃度の増加が観測された。一つの帯水層においてラドン濃度の異常減少と異常増加が観測されたことを利用して、地下水ラドン濃度の変動機構をKuoのモデル (Tsunomori and Kuo, 2010) を発展させて定式化した (Tsunomori and Tanaka, 2014)。このモデルは、観測可能量で置き換えられるパラメータのみで構成されており、今後の観測結果によってその妥当性や修正点を議論していけることが特徴である (東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502])。

(地殻状態)

近畿地方北部では、本計画により、下部地殻にあるS波反射面の存在範囲を3次元的に解明し、丹波山地の活発な微小地震活動域と対応することが示されていたが、今年度は、稠密データを活かした新たな解析法をとり入れ、反射強度分布 (図12) が求められた。また、FMTOMO (Rawlinson et al., 2006) 法を用いた高解像度の3次元トモグラフィ (図13) が完成し微小地震発生域の下部に沿った低速度層が認められた。0.1度以下の高解像度トモグラフィが1年分 (地震数4714) のデータで求められたことになり、地下深部状態のモニタリングにおける大きな進歩でもある。さらに、従来は得られなかった地下浅部の速度異常も得られており、活断層や表層地質データとの統合的利用への道が開かれた。また、被圧ボアホール間隙圧データから遠方で発生した地震による透水性変化を求める方法については、過去のさまざまな地震に遡って解析を行った (京都大学防災研究所 [課題番号: 1811])。

(絶対応力)

震源断層に加わる絶対応力レベルは、いまだに結論の得られていない、地学の基礎問題のひとつであるが、地震発生メカニズムおよび、その準備過程に付随する先行現象の現れ方を左右する重要な情報である。最も直接的な解法として、震源断層の主要エネルギー放出部や破壊開始点付近での絶対応力を実測することが考えられるが、大深度ボアホールでの応力計測は難しい。南アフリカ金鉱山の地下3.3kmで発生したM2の地震については、近在のトンネルから100m以下の掘削で震源断層を貫通することができ、その際のボアホールブレイクアウトやコアディスクキングから、震源付近の絶対応力が拘束され (Yabe et al., 2013, 立命館大学 [課題番号: 2401])、その値は標準的な初期応力に採掘空洞の影響を重ね合せた弾性モデリングとも調和的 (図14) であり (小笠原ら, 2014, 立命館大学 [課題番号: 2401])、さらに、調和的であった中になおみられた有意な差は、歪みの連続観測に基いて震源付近の非弾性変形を評価すれば説明可能であった (桂, 2011; 小笠原ら, 2014; Ogawawara et al., 2014, 立命館大学 [課題番号: 2401])。また、地下空間の作業環境で迅速におこなえるオーバーコアリング法による絶対応力測定を3つの金鉱山の深さ1.0-3.4kmの延べ6カ所で行い、最大主応力は76-146MPaであった。これらの測定値で構成した応力モデリングによって、それらのサイト周辺でおこったM>2.9の7つの地震の発生時の応力を求めると、法線応力が25-65 MPa, 剪断応力が45-86 MPa, 最大主応力が100-177 MPaであった (Hofmann et al., 2013, 立命館大学 [課題番号: 2401])。

これまでの課題と今後の展望

地震に先行して発生する現象は多種多様であり、地震発生準備過程から直前過程にまたがって発生する地殻の諸現象を観測によって見だし、そのメカニズムを明らかにして特定の先行過程が地震準備過程や直前過程のどの段階にあるかを評価することを目指して研究を進めた。以下、地震発生過程に関する現時点での理解を軸としてこの5年間の成果を概観する。

地震サイクルにおける応力変化の大きさについては観測からよく知られているが、断層に作用する応力の絶対値レベルが知れた例はほとんどない。しかし、応力絶対値がサイクル中の変化量に比してどの程度であるかによって、地震サイクルにおいて期待される地殻の諸活動の変化は大きく異ると考えられるので、絶対応力の値は先行活動の研究にとって重要な基礎情報である。本計画で、東北地方のプレート境界と、南アフリカ大深度鉱山について、震源断層付近の絶対応力値が推定された。一方、地下深部での応力蓄積の消長を知るひとつの方法として、ピエゾ磁気効果が古くから検討されている。伊豆半島東部で丁寧に計測されている最近の全磁力変化を慎重に検討したところ、地下の熱変化の効果を上回るものはみえていなさそうである。一方、道東地域での地磁気観測結果は、プレート沈み込みから期待されるピエゾ効果と調和的であるが、確信をもつにはもう少し観測データの時間的蓄積が必要である。

プレート間滑り速度の変化にみられる先行現象については、本震の準静的初期破壊、すなわち現行犯逮捕である震源核と、震源核の段階に進むための必要条件である、広域な固着の剥れの両者をわけて考える必要があるだろうことが、摩擦滑りシミュレーションなどから認識されるようになってきた。後者は、現象としてはスロースリップではあるが、地震性の固着域の外側でおこり、震源域への载荷を進める役割だと考えられていた従来のスロースリップの認識とは違い、震源域の内部でおこるものである。現象の規模が大きかった東北地方太平洋沖地震に関しては、地震前数年から震源域の一部で固着のゆるみに対応するであろうスロースリップイベントがあったことが様々な観測データから示唆されている。この現象は、将来の震源域の一部が破壊するものだから物理前兆の一種ではあるが、理論研究から、固着剥れイベントは地震サイクル中に何回もおこるものであって、仮にこれを用いて警報をだせば、多くの空振りが期待されることが示唆された。しかし、大地震発生の必要条件である可能性は高く、また、測地や繰り返し地震によるスロースリップの監視は自動リアルタイム解析ができるレベルに近づいており、今後、この情報の活用法を検討すべきであろう。また、破壊域の浅部、深部での従来型のスロースリップについても検知能力を向上させる成果がでており、また、数値シミュレーション等から地震サイクル全体のなかで期待される活動様式の変化も提案された。

一方で現行犯逮捕的な震源核については、東北地方太平洋沖地震でも顕著なものは観測されなかった。破壊エネルギーの小さな小アスペリティでおこった地震が、大きなアスペリティの破壊をトリガするカスケードアップ現象によって、大きな地震がそれにあつたサイズの準静的震源核の段階をスキップして発生する可能性は、現行犯逮捕的な地震予知の可能性に対する主要な原理的批判である。計算機能力の向上によって、破壊エネルギーが階層的に分布する場での地震発生サイクルの動的計算ができるようになり、大きな震源核がスキップされるかどうかの条件が定量的に検討できるようになったことは非常に重要な進歩である。それによれば、階層間のスケールの差が、下位アスペリテ

の独立な破壊を許す程度に大きければ、大きな核がスキップされないケースは十分に期待できる。自然地震では、大きな震源核が測地的に直接観測された例はないが、南アフリカ金鉱山での震源断層至近距離における歪み観測において、ついにそのような例がみつかった。

地震破壊の物理モデルが、スケール間相互作用を扱える段階に達したいま、さまざまな地震発生場での不均質構造の階層性を解明することには大きな意義がある。東北地方太平洋沖地震および釜石沖繰り返し地震では、地震サイズに比べて高い分解能をもつ観測を実現して、階層的アスペリティモデルが観測をよく説明できることが示された。一方、南海トラフの M8 級破壊域の一部だけが有意に破壊した地震はほとんどないこと、多くの内陸断層についても、小地震の数は、グーテンベルグリヒター則から期待されるよりずっと少ないことが示された。このような情報を向上させ、不均質断層の破壊計算と結びつけて、大地震発生の可予測性の程度を定量的に調べることで、次世代の地震予測研究の大きな方向性と考えられる。

前震・静穏化等の地震活動度の時空間変化も、先行現象として長く研究されている項目であるが、小繰り返し地震が、断層面上での巨視的なクリープに伴ってパッシブに起こるローカルな脆性破壊であるということを除いては、地震の発生数の物理的解釈は確立していない。地殻内に多数ある小さな断層の、その場の応力上昇への反応であるとするモデルが現在広く受け入れられている唯一の定量的な物理モデルであり、東北地方太平洋沖地震による広汎な応力変化を用いてその検証がおこなわれた。この考えで説明できる地震活動の変化は多いが、矛盾しているようにみえる例も少なくない。また、このモデルに用いる摩擦パラメータが実験室値と 2 桁ほど異なることが以前から知られており、より正確とおもわれる摩擦法則を用いて検討されたが、不首尾であった。定量的な物理的理解を介して地震活動の変化を先行現象として解釈することについては、これといった目処が立っていないというべきだろう。一方、経験的な活動度変化の検出については、いくつかの新たな方法が試みられ、大地震に先行する傾向のあるようにみえる結果もでてきているが、十分な統計的検証で確立する段階には至っていない。

地震活動の変化には、地下の流体移動によるケースがあることは確実である。北近畿地方の特異な地震活動に関しては、活動の存在そのものが、流体分布によっていることが提案されており、これまでに例をみない稠密かつ広域な構造探査と、微小な地震までのメカニズム決定による応力分布推定が行われ、沈み込むプレートからの流体上昇、下部地殻での流体分布、上部地殻での地震分布に対して包括的で具体的な描像が得られた。時間変化や大地震サイクルとの関係を議論する段階には至っていないが、高い時空間分解能をもつ像が得られていることはその前提条件としてまず必要である。また、全国をカバーする JUNECS データから、M2 程度までを含むメカニズム解のカタログが作成されたことも同じ意味で重要な進歩である。微小地震は沢山おこっているというが、そこから応力分布や変化等の情報に変換しようとする、実は、データ(微小地震のメカニズム解)の時空間密度は全く不足している。

地殻の破碎状態や、流体の状態は、高い時間分解能で監視できる可能性の高いものである。前者については、地震波干渉法を用いて、地震破壊による地下深部での速度低下が検出され、後者においては、密閉ボアホール水圧の測定という新たな手法が、非常に広帯域高感度の間隙水圧の計測になっていることが示された。また、ラドン等の地下水

溶存成分の変化も地震の先行現象として古くから研究されている。本計画では、中伊豆における長期連続観測で、東北地方太平洋沖地震に先行する大きな変化を検出した。有意な変化は、1978年の伊豆大島近海地震に先行したもの以来である。この観測井のデータを参考に、ラドン濃度を帯水層岩石の歪みと定量的に結びつけるモデルを開発した。また、地下水の観測点には「つぼ」があるといわれるが、日本全国の温泉水データを収集分析し、流体が地震発生域から活断層に沿って上昇する水系をスクリーニングした。さらに、分析精度と安定性を飛躍的に向上させた多種溶存成分の自動観測装置を開発し、跡津川断層に掘削された観測井において、600日の連続運転を成功させた。これらは、地球化学的な先行現象の研究スタイルを一新するインパクトをもつものである。さらに、1995年兵庫県南部地震において新たな先行現象として注目された大気中のラドン濃度について、全国の放射線管理施設のデータを収集し、気象由来等の変動の補正法を開発して解析することを開始した。東北地方太平洋沖に先行する変動を、宮城、栃木、福島、札幌で確認でき、また、他の地学イベントでも、共時的なものを含めていくつかの対応する変動がみついている。メカニズム解明のための作業仮説として、地表近くの広域歪みを反映するのではないかという提案がなされている。

電磁気的な先行現象に関しては、いくつかの大きな懸案に関して重要な進歩があった。まず、神津島での地電位観測で1997-2000年に検出されたVAN法のSES状の先行異常と、地震との対応については、異常の有無 x 地震の有無の4象限全てに関して統計的には疑いのないよい相関であることが検証された。また、地下での電磁シグナルソースの影響が地表まで伝播できるかという問題に対しても、FEMによる不均質な比抵抗抵抗でのモデリングや現場での電流注入実験を通して理解が大きく進展した。また、VHF電波の見通し外伝播現象については、最近の衛星観測データ等でみられる電離圏の異常を説明するために提案されたエアロゾル説を作業仮説として、大気電場観測を近接した複数点で行うことにより、VHF伝播異常の発生と共時的な電場異常、また、その空間的移動が観測される(上空の散乱体の移動を示唆する)場合があることを見いだした。

海外で地震に数日先行して起こった例が多数報告されているTECの負の変動について、国内のM6.5以上の内陸地震との相関を知らべてみたが、それほどよくはなかった。この異常のメカニズムについては赤道異常との関連での説明が提唱されており、日本ではでにくいというのは妥当かもしれない。一方で、M8をゆうに超える巨大地震に関してだけ、数十分の先行時間をもつTECの正の異常があることを新たに見いだした。これは、先行時間からして現行犯逮捕的なものである可能性が高く、確立されれば非常に実用価値の高いものであるが、データのベースラインが地震後の津波によって起こった異常にひきずられることによって、偶然地震前におこっていた磁気嵐が強調されてみえたのではないかと批判があり、目下論争中である。

大地震発生との関連の必然性に関して、多くの先行現象は、断層での先行的微小破壊を過程すればそれほど不思議ではなくなる。バルク岩石での微小破壊を念頭においたダイランシーディフュージョン仮説がその後の観測で否定されて以降、微小破壊に頼る説明は疑問視されがちであったが、南アフリカでのM-4以下までの微小破壊観測によって、地質断層上に極端に集中し、断層面上微小破壊とでも呼ぶべきものが発見された。この活動は非常に高いb値をもち、自然地震の観測で検知できないことは不思議ではない。さらに、そのような活動のクラスターが拡大する現象も発見された。

以上のように、地震発生の力学に関する現代的な理解に沿って、本計画での先行現象研究をレビューしてみると、メカニズムの理解に対して当初計画を大きく超えた進歩があった。しかし、メカニズムに関することは、結局は仮説であり、とくに、地下深くでおこる現象であり、直接の観測も実物での実験もできない地震を対象にする以上、仮説が完全に検証されることは期待できない。さらに、不均質場での破壊の停止メカニズムまで含めて考えると、相当の空振りや見逃しが伴うのは、先行現象にとって本質的であるのかもしれない。地震の予測を目標として考えるならば、むしろ、現象と大地震発生の相関を統計的によく検討して、予測能力を定量的に把握した上で、それなりの活用法を考えるという視点をもつ必要があるだろう。一方で、大地震が低頻度の現象であることから、データの蓄積に時間がかかるのが、経験的な地震予測法の研究の宿命であったが、観測に関して行われたいくつかの革新的なアプローチは、有効なデータ蓄積を加速させる効果があるだろう。

成果リスト

- 青木 将・飯尾能久・片尾 浩・三浦 勉・米田 格・澤田麻沙代, 2013, 近畿地方北部における地殻内S波反射構造の推定(2), 日本地震学会2013年度秋季大会, B21-05.
- Ariyoshi, K., R. Nakata, T. Matsuzawa, R. Hino, T. Horii, A. Hasegawa, Y. Kaneda, The detectability of shallow slow earthquakes by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET) in Tonankai district, Japan, *Mar. Geophys. Res.*, in press, doi:10.1007/s11001-013-9192-6.
- 有吉 慶介・中田 令子・堀 高峰・金田 義行・松澤 暢・日野 亮太・長谷川 昭, 2013, 浅部ゆっくり地震に伴う地殻変動の検出可能性, 日本地球惑星科学連合2013年大会.
- Ariyoshi, K., R. Nakata, T. Matsuzawa, R. Hino, T. Horii, A. Hasegawa, Y. Kaneda, 2013, The detectability of shallow slow earthquakes by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET) in Tonankai district, Japan, AGU 2013 Fall meeting, San Francisco, Moscone Center, December, 2013.
- Durrheim, R. J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A. M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, M. Naoi, T. Kgarume, O Murakami and The Satreps Research Group, 2013, Observational Studies In South African Mines To Mitigate Seismic Risks: A Mid-project Progress Report, Proceedings of SAGA 13th Biennial Conference, accepted.
- 畠中弘哉・安岡由美・武藤 潤・長濱裕幸・鈴木俊幸・本間 好・坂下 守・小林由布香・向 高弘, 2013, 地震前後の大気中ラドン濃度の異常変動と地殻歪との呼応について, 第14回「環境放射能」研究会プロシーディング, 高エネルギー研究所, 筑波, 三浦, 木下(編集), 印刷中.
- 林 孝積・安岡由美・長濱裕幸・武藤 潤・石川徹夫・鈴木俊幸・本間 好・大森康孝・向 高弘, 2013, 簡易モデルによる屋外ラドン濃度の季節変動の推定, 第63回日本薬学会近畿支部大会(10月12日), 京田辺.
- 林 孝積・小林由布香・安岡由美・長濱裕幸・武藤 潤・大森康孝・鈴木俊幸・本間 好・山本文彦・高橋克彦・向 高弘, 2013, 東北地方太平洋沖地震に先行する大気中ラドン濃度異

常変動, 第15回「環境放射能」研究会, つくば市 (3月7日) .

- Heki, K. and Y. Enomoto, 2013, Preseismic ionospheric electron enhancements revisited, *J. Geophys. Res.*, 118, 6618–6626, DOI: 10.1002/jgra.50578.
- Hofmann, G., L. Scheepers, and H. Ogasawara, 2013, Loading conditions of geological faults in deep level tabular mines, *Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress*, Sendai, 558–580.
- Ichihara, H, T. Mogi, K. Tanimoto, Y. Yamaya, T. Hashimoto, M. Uyeshima and Y. Ogawa, 2013, 3-D electrical resistivity models in the Erimo area, southern central Hokkaido, Extended Abstract, 5th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics, Sapporo, Japan, May 7–9.
- Ishibe, T., H. Tsuruoka, K. Satake, and M. Nakatani, 2014, A Focal Mechanism Solution Catalog of Earthquakes ($M \geq 2.0$) in and around the Japanese Islands for 1985–1998, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 104, doi: 10.1785/0120130278 (in press).
- Janik, M., T. Ishikawa, Y. Omori, and N. Kavasi, 2014, Radon and thoron intercomparison experiments for integrated monitors at NIRS, Japan, *Review of Scientific Instruments* 85, 022001; doi: 10.1063/1.4865159.
- Kakinami, Y., M. Kamogawa, S. Watanabe, M. Odaka, T. Mogi, J. Y. Liu, Y. Y Sun and T. Yamada, 2013, Ionospheric ripples excited by superimposed wave fronts associated with Rayleigh waves in the thermosphere, *J. Geophys. Res.*, DOI 10.1002/gra50099.
- Kame, N., S. Fujita, M. Nakatani, and T. Kusakabe, 2013a, Effects of a newly incorporated stress-weakening term in a revised RSF on earthquake nucleation, *Proceedings of 13th International Conference on Fracture*, S20, 004, 1–9.
- Kame, N., S. Fujita, M. Nakatani, and T. Kusakabe, 2013b, Earthquake nucleation on faults with a revised rate- and state-dependent friction law, *Pure Appl. Geophys.*, DOI 10.1007/s00024-013-0744-0, 9 pages.
- Kamogawa, M. and Y. Kakinami, 2013, Is an ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-oki earthquake a precursor?, *J. Geophys. Res.*, 118, 1–4, doi:10.1002/jgra.50118.
- 片尾 浩, 2013, 稠密地震観測による近畿地方北部の地震活動と地殻構造, 京都大学防災研究所年報, 56, B, 167–172.
- 木下千裕・加納靖之・伊藤久男, 2013, 東北地方太平洋沖地震の前後で観測された間隙水圧とその潮汐・大気圧応答の時間変化, 日本地球惑星科学連合2013年大会, SSS29-P10.
- 木下千裕・加納靖之・伊藤久男, 2013, 間隙水圧観測から検出された東北地震に伴う透水性変化, 日本地震学会2013年度秋季大会, D31-04.
- 小林由布香・畠中弘哉・安岡由美・長濱裕幸・武藤 潤・鈴木俊幸・本間 好・山本文彦・高橋克彦・向 高弘, 2013, 宮城・福島・栃木における大気中ラドン濃度変動について: 東北地方太平洋沖地震の先行現象, 第50回 アイソトープ・放射線 研究発表会 (7月15日), 東京
- Mori, Y., S. Murata, H. Yoshimura, A. Maeda, Y. Sawada, K. Shimura, T. Yamaguchi, Y. Tajika, T. Ishikawa, and Y. Yasuoka, 2013, Determination of radon concentration in air using a liquid scintillation counter and an activated charcoal detector, *J. Hot Spring Sci.*, 62(4), 306–317.

- 森 康則・志村恭子・川村陽一・出口晃・美和千尋・石川徹夫・安岡由美, 2103, 放射能泉の利用における被ばく線量評価のためのラドン分析検討および実態調査, 日本健康開発財団研究年報, 34, 11-20.
- Moriya, T., T. Mogi, H. Yamashita, I. Yamamoto and M. Sato, 2013, Quantitative characteristics of anomalous VHF transmissions as an earthquake precursor in the Hidaka mountain range, Hokkaido, Japan Earthquake Prediction Studies: Seismo Electromagnetics, edited by M. Hayakawa, TERRAPUB, 101-112.
- Mogi, T., Y. Kakinami and T. Moriya, 2013, Atmospheric and ionospheric phenomena appeared in the VHF-band radio-wave anomalous transmission beyond the line of sight, AGU fall meeting, December 2013.
- Nakamura, S., K. Hayashi, Y. Yasuoka, H. Nagahama, J. Muto, Y. Omori, T. Ishikawa, T. Suzuki, Y. Homma, H. Ihara, and T. Mukai, 2013, Sinusoidal model for the annual variation of atmospheric radon concentration in Japan. 2nd G-ever International Symposium and the 1st IUGS & SCJ International Workshop on Natural Hazards, Hazard and Risk Management in Asia-Pacific Region: Earthquake, Tsunami, Volcanic Eruption and Landslide in Subduction Zones. Oct. 19-20, 2013, Sendai, Japan, Abstract Volume, 164-167.
- Nakatani, M., Microfractures on natural faults stressed by mining (invited), 2013, The International Summer School on Earthquake Science "Diversity of Earthquakes" organized by the Earthquake Research Institute of the University of Tokyo and the Southern California Earthquake Center, 25 September 2013, Hakone, Japan.
- 中谷正生, 2013, 見逃しも空振りもありつつ. . . . 階層的アスペリティにおける大地震の準備過程(invited), 気象庁地震火山部談話会, 東京.
- 中谷正生, 2013, 地震発生物理と前兆現象, 日本地震学会モノグラフ2「ブループリント」50周年一地震研究の歩みと今後, 2012年秋季大会特別シンポジウム実行委員会篇, 30-39.
- Noda, H., M. Nakatani and T. Hori, 2013, Large nucleation before large earthquakes is sometimes skipped due to cascade-up - Implications from a rate and state simulation of faults with hierarchical asperities, J. Geophys. Res., 118, doi: 10.1002/jgrb.50211.
- Noda, H., M. Nakatani and T. Hori, 2013, A slower fault may produce a smaller preseismic moment rate: Non-1/τf acceleration of moment rate during nucleation and dependency on the background slip rate, Geophys. Res. Lett., 40, 4850-4854, doi: 10.1002/grl.50962.
- Noda, H., M. Nakatani, and T. Hori, 2013, Ripening of a seismogenic patch and the increased triggerability by a small rupture (invited), AGU Fall Meeting, S52A-05, San Francisco CA, USA.
- 野田博之・中谷正生・堀 高峰, 2013, 階層アスペリティモデルにおける地震の始まり方の多様性(invited), SSS29-12, 地球惑星科学連合2013年大会, 幕張メッセ, 千葉.
- 野田博之・中谷正生・堀 高峰, 2013, 震源核の加速が 1/τf より遅いと, 長期的滑り速度の遅い断層ほど地震直前のモーメント解放速度が小さくなる可能性, 日本地震学会秋季大会, A22-04, 神奈川県民ホール, 横浜.
- Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, P. Piper, T. Clements, and K. Sakaguchi, 2013, In-situ

- stress measurements to constrain stress and strength near seismic faults in deep level South African gold mines, Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, Sendai, 614-623.
- Ogasawara, H., G. Hofmann, H. Kato, M. Nakatanil, H. Moriya, M. Naoi, Y. Yabe, R. Durrheim, A. Cichowicz, T. Kgarume, A. Milev, O. Murakami, T. Satoh, and H. Kawakata, 2013, In-situ monitoring and modelling of the rock mass response to mining: Japanese-South African collaborative research, Proc. 8th Int. Symp. Rockburst and Induced Seismicity in Mines, Russia, 51-60.
- 小笠原宏・加藤春實・Gerhard Hofmann・矢部康男・坂口清敏, 2014, 南アフリカ金鉱山大深度における震源近傍での現位置多点応力測定の可能性, 月刊地球, No. 366, in press.
- 織原義明, 川上哲太郎, 鴨川 仁, 長尾年恭, 2014, 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 (印刷中).
- Sarlis, N. V., E. S. Skordas, P. A. Varotsos, T. Nagao, M. Kamogawa, H. Tanaka, and S. Uyeda, 2013, Minimum of the order parameter fluctuations of seismicity before major earthquakes in Japan, Proc. Nat. Acad. Sci., 110 (34), 13734-13738.
- 笹岡雅宏・大和田毅・有田真・山崎明・田口陽介・小河勉, 2014, 伊豆半島東部における地殻の上下変動と関連する地磁気全磁力変動, 地磁気観測所テクニカルレポート, 第11巻, (投稿中).
- Seki, A., I. Tohbo, Y. Omori, J. Muto, and H. Nagahama, 2013, Seismic luminous phenomena and VHF electromagnetic emission originated from radon emanation. 2nd G-ever International Symposium and the 1st IUGS & SCJ International Workshop on Natural Hazards, Hazard and Risk Management in Asia-Pacific Region: Earthquake, Tsunami, Volcanic Eruption and Landslide in Subduction Zones. Oct. 19-20, 2013, Sendai, Japan, Abstract Volume, 156-159.
- Seki, A., I. Tohbo, Y. Omori, J. Muto, and H. Nagahama, 2013, Luminous phenomena and electromagnetic emission VHF wave emission originated earthquake-related radon emanation. AGU Fall Meeting 2013, Dec. 9-13, NH31B-1611.
- 関 明日香・大森康孝・武藤 潤・長濱裕幸, 2013, 大気中ラドンに由来する空気ルミネッセンスと電磁波放射, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), 第134回総会・講演会 (11月2-5日), 高知.
- Tajika, Y., Y. Yasuoka, H. Nagahama, T. Suzuki, Y. Homma, T. Ishikawa, S. Tokonami, T. Mukai, M. Janik, A. Sorimachi, and M. Hosoda, 2013, Radon concentration of outdoor air: Measured by an ionization chamber for radioisotope monitoring system at radioisotope institute, J. Radioanal Nucl. Chem., 295, 1709-1714.
- Tanaka, R., S. Araki, Y. Yasuoka, T. Mukai, S. Ohnuma, T. Ishikawa, N. Fukuhori, and T. Sanada, 2013, A , Radioisotopes, 62(7), 423-438.
- F. Tsunomori, and H. Tanaka, 2014, Anomalous Changes in Groundwater Radon Concentration Monitored at Nakaizu Well in 2011, Radiation Measurements, 60, 35-41.
- Uchida, N., 2013, Slow slip and repeating earthquakes in the northeastern Japan subduction zone , The summer school on Earthquake Science, Hakone, Laforet Gora, September, 2013.
- Uchida, N., K. Shimamura, T. Matsuzawa, T. Okada, Postseismic response of repeating

earthquakes around the 2011 Tohoku-oki earthquake: Moment increases due to the fast loading rate, *J. Geophys. Res.*, under review.

海谷絵未・片尾浩・澁谷拓郎・飯尾能久・三浦勉, 2013, 近畿地方北部における地震波速度構造と地震活動, 日本地球惑星科学連合2013年大会, S-SS26-P12.

海谷絵未・片尾浩・澁谷拓郎・飯尾能久・三浦勉, 2013, 近畿地方北部における地震活動と地震波速度構造, 日本地震学会2013年度秋季大会, P1-32.

Yabe, Y., M. Nakatani, M. Naoi, T. Iida, T. Satoh, R. Durrheim, G. Hofmann, D. Roberts, H. Yilmaz, G. Morema, and H. Ogasawara, 2013, Estimation of the stress state around the fault source of a Mw 2.2 earthquake in a deep gold mine in South Africa based on borehole breakout and core discing, *Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress*, Sendai, 604-613.

山本淳平・長田幸仁・太田雄策・平原 聡・出町知嗣・中山貴史・立花憲司・佐藤俊也・木戸元之・藤本博己・日野亮太・三浦 哲・内田雅之, 衛星通信を活用したリアルタイム GPS解析 - 地上通信障害時に地殻変動を実時間で把握するために-, 測地学会誌, 印刷中.

安岡由美・長濱裕幸, 2013, 大気中ラドン濃度の変動について: 地震先行現象を捕えることができるのか? 放射線教育フォーラムニュースレター, 55, 8-9.

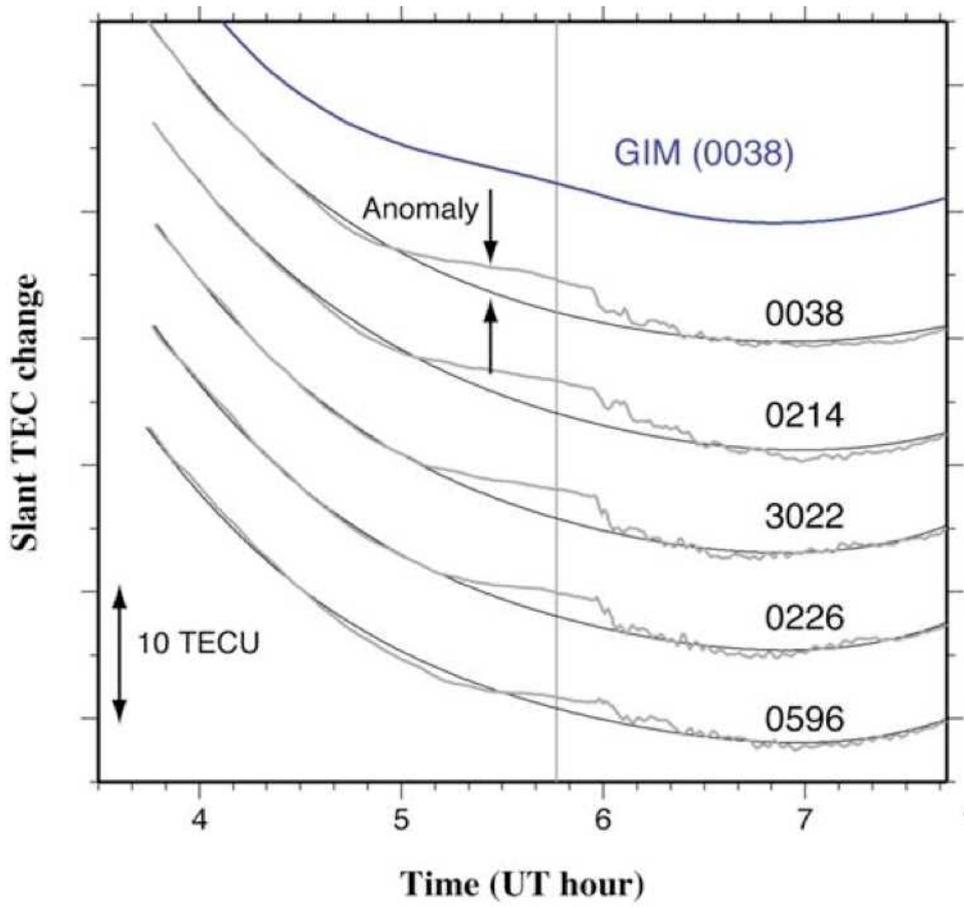


図1. 東北地方太平洋沖地震前後のGPS-TEC変化（北海道大学 [課題番号：1005]）

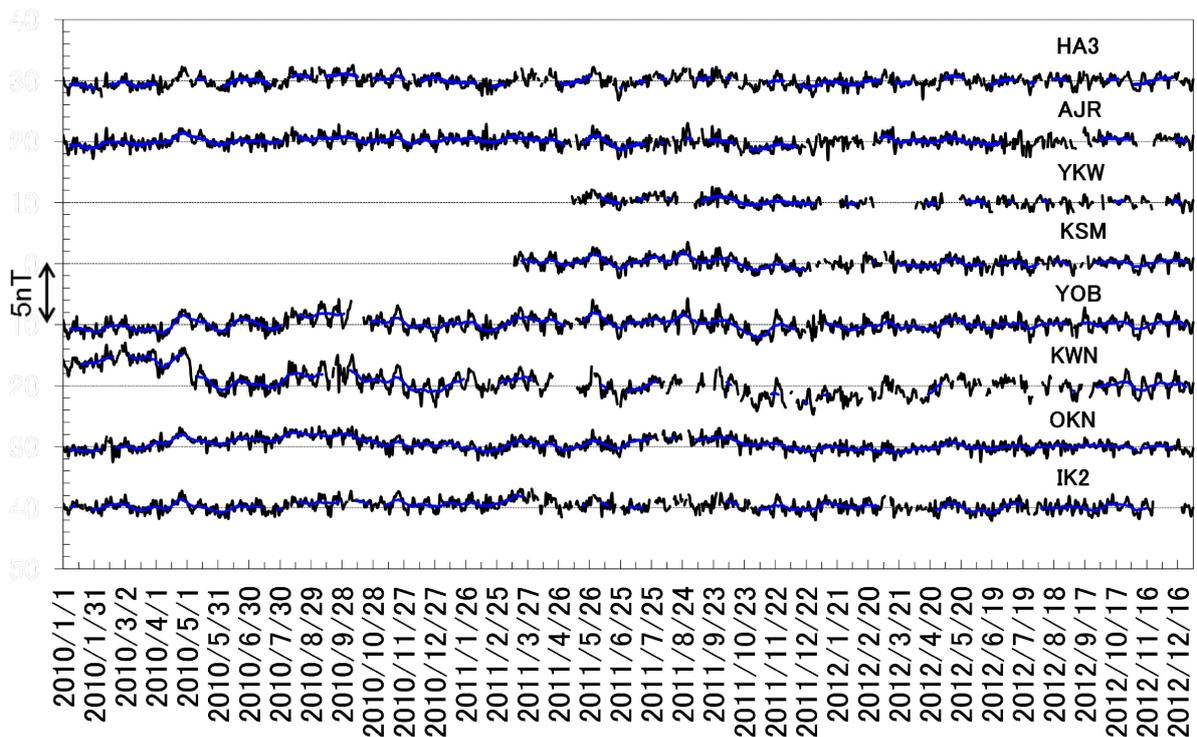
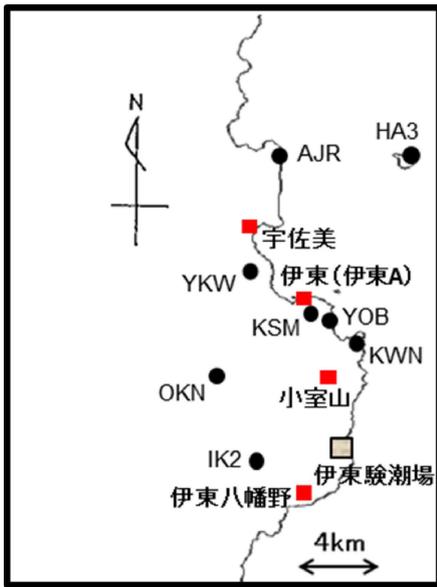


図2. 伊豆半島東部における地磁気観測（気象庁 [課題番号：7020]）

1 段目：全磁力連続観測点(黒丸)の配置。赤四角は、GPS連続観測電子基準点。

2 段目：地磁気観測所観測点(KSM)と地震研観測点(HA3, AJR, YKW, YOB, KWN, OKN, IK2)の地磁気全磁力の日々変動比較(2010.01.01-2012.12.31)。各観測点について、外部磁場変動成分を除去したのち、年周変化とトレンドを差し引いてプロット(黒線)。青線は潮汐周期を無視するための15日間移動平均を示す。KWNについては5月4日に人工擾乱によるギャップあり。

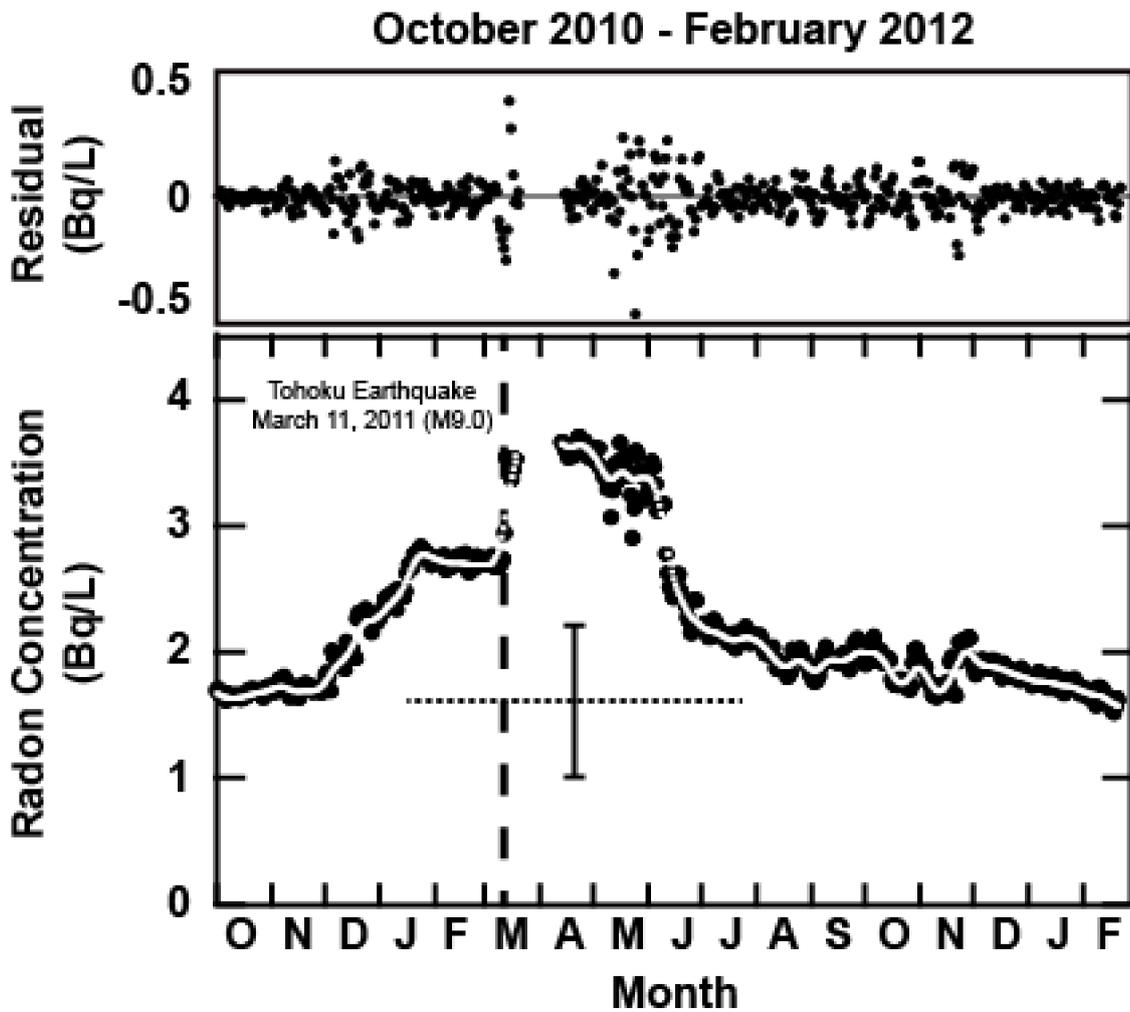
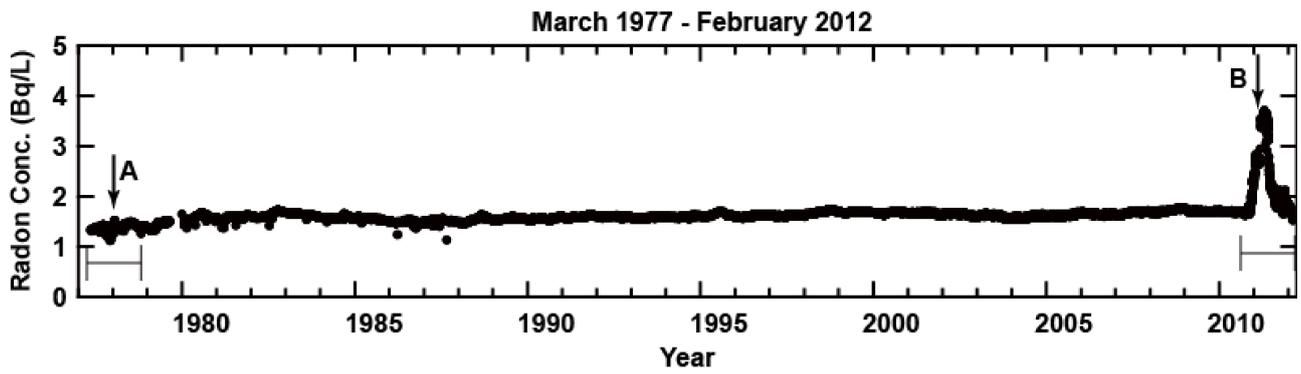


図3. 中伊豆観測井のラドン濃度連続観測（東京大学理学系研究科 [課題番号：1502]）

1 段目：長期観測データ。A:伊豆大島近海地震。B:東北地方太平洋沖地震。

2 段目：東北地方太平洋沖地震前後の拡大図。

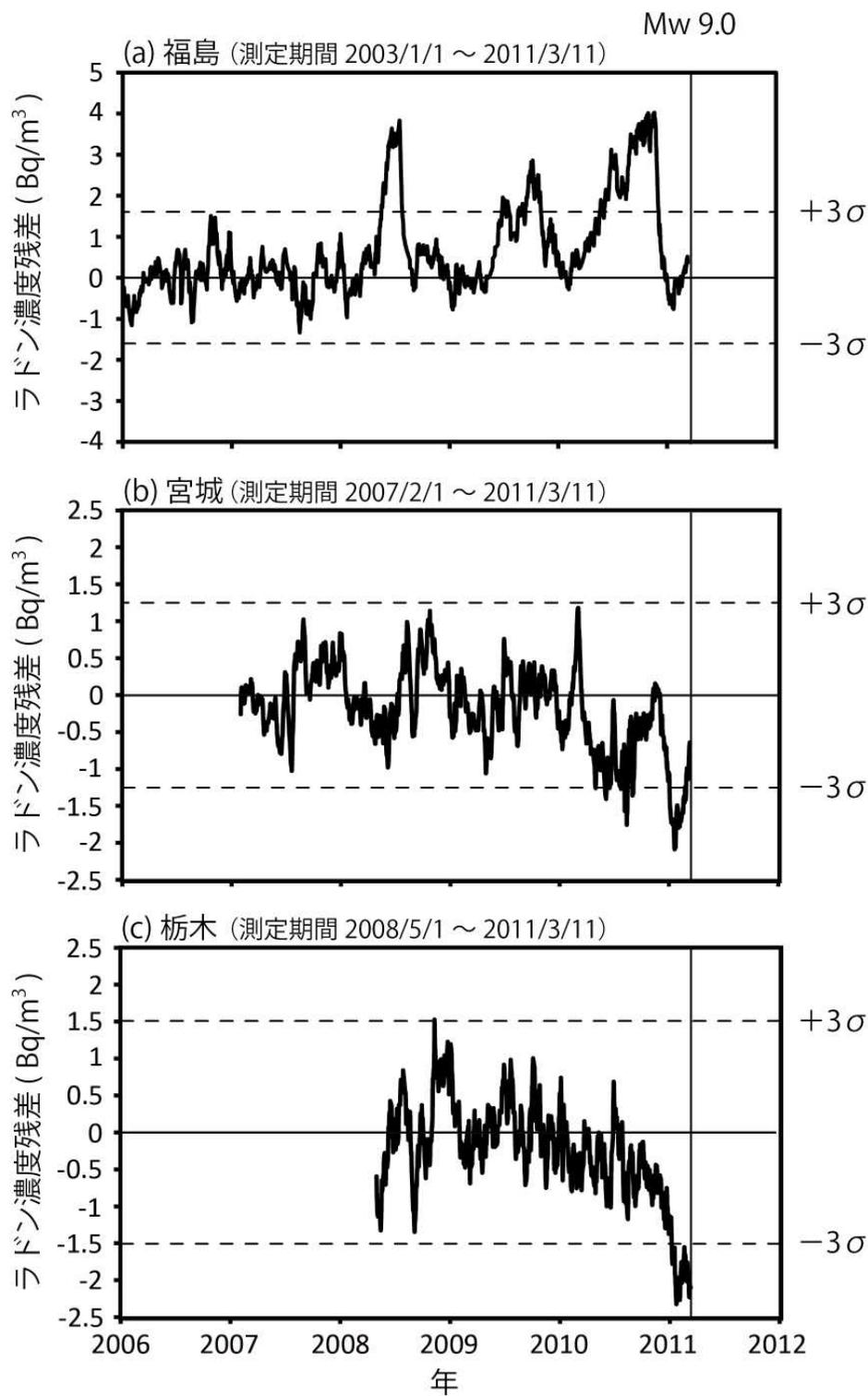


図4. 東北地方太平洋沖地震前の大気中ラドン濃度残差変動比較(東北大学 [課題番号: 1213])

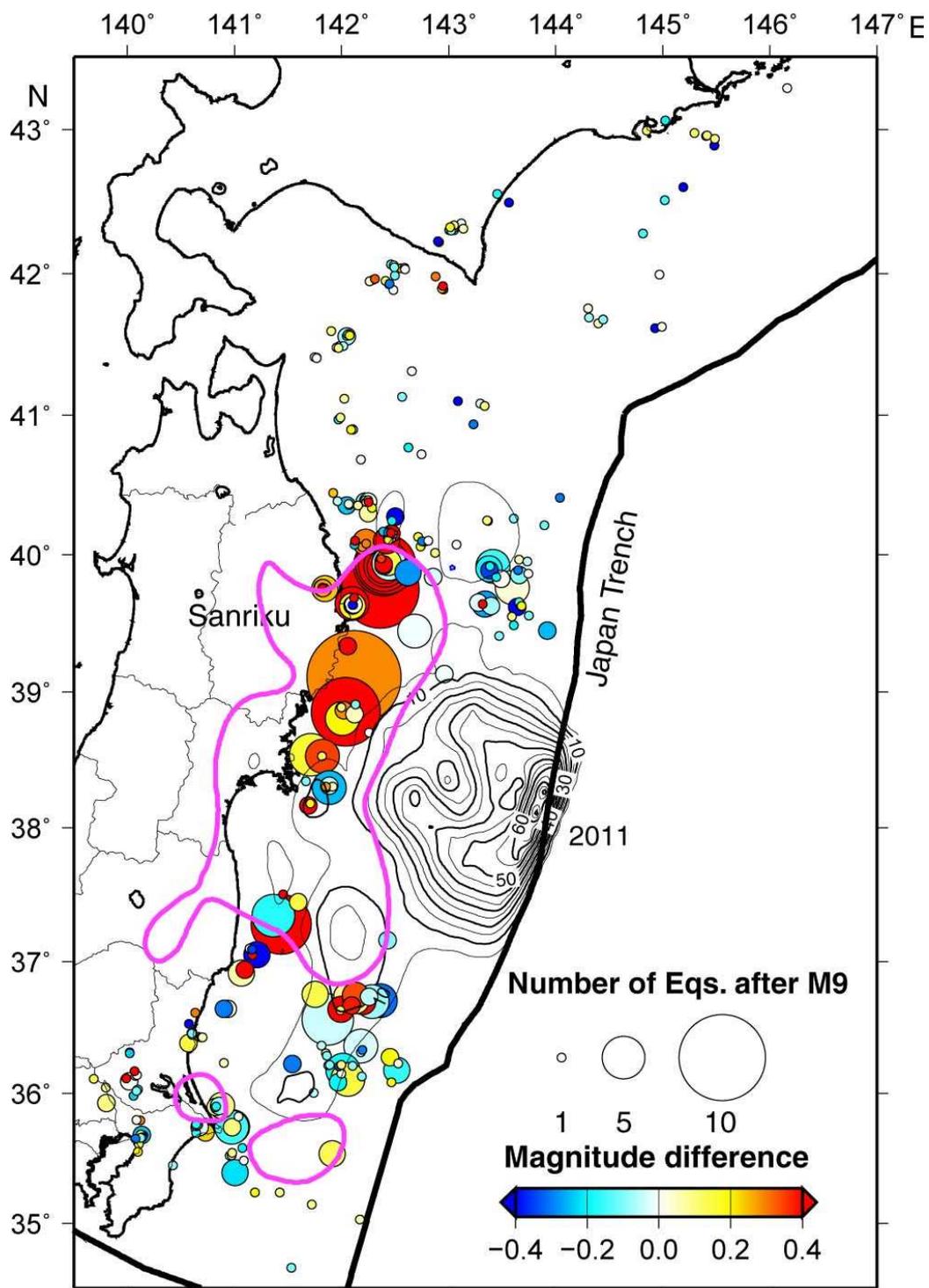


図5. 各繰り返し地震グループにおける，東北地方太平洋沖地震前後の平均マグニチュードの差（後-前）．丸のサイズは各グループの東北地方太平洋沖地震後の地震数．1984年から2011年12月31日までのデータを用いた．黒コンターは，Iinuma et al., 2012による2011年東北地方太平洋沖地震の地震時滑り，ピンクコンターはOzawa et al., 2012による地震後7ヶ月での1mの余効滑りを示す．（東北大学 [課題番号：1210]）

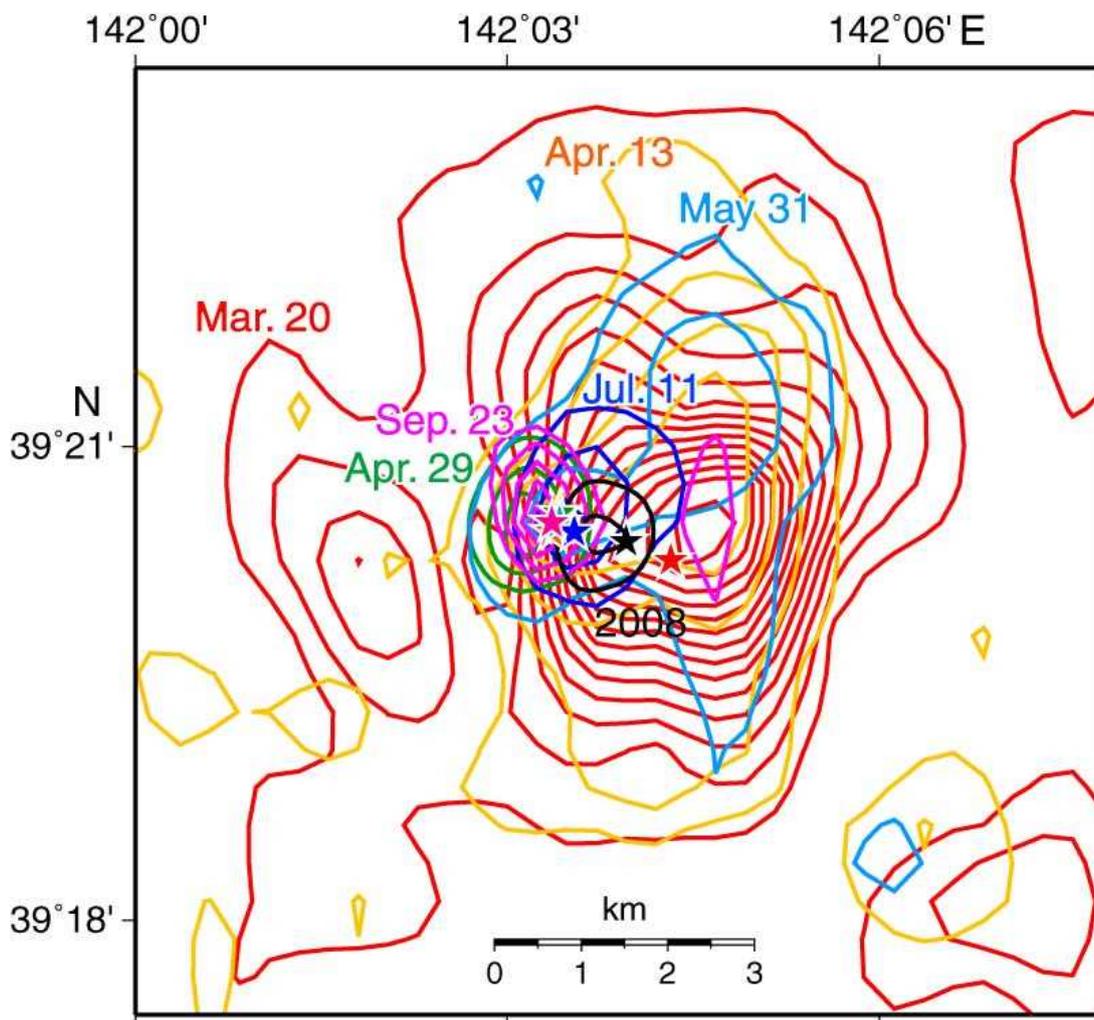


図6. 釜石沖繰り返し地震の滑り量分布（2008年1月11日，赤：2011年3月20日，橙色：2011年4月13日，緑：2011年4月29日，水色：2011年5月31日，青：2011年7月11日，ピンク：2011年9月23日）．コンター間隔は5cm．星はそれぞれの地震の震央．剛性率50GPa を滑り量の計算の際用いた．（東北大学 [課題番号：1210]）