

## 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、その素性を明らかにするために、大気電場、異常伝播の到来方向、異常の発生範囲を調べる観測を増強するとともに、統計処理にもとづいてノイズの判別をおこなう手法の改善を試みている(北海道大学[課題番号:1005])。

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異常について、客観的基準で異常判定を行い、地震との対応を統計的にあらゆる角度から検討し、これが地震に短期的に先行する現象であることは、まず疑いようがないことが示された(図1)(Orihara et al., 2012, 東海大学[課題番号:2501])。

2011年東北太平洋沖地震に伴う地震時の電離圏異常(Coseismic ionospheric disturbances略してCIDs)についてGPSTECと地震波データを用いて調べた。速度約3km/sで伝播する高速CIDは西から南西方向だけにみられ、速度約1.2km/sで伝播する低速CIDは、津波ソースから同心円状に広がっている(図2)。伝播速度や振動数を考えると、高速CIDはRayleigh波によるものであり、低速CIDは音波や重力波に伴うものであると考えられる(北海道大学[課題番号:1005])。

2009年12月から2010年1月にかけて伊豆東部で発生した群発地震の際のようにマグマ貫入に伴う火山性の群発地震の場合は、岩石の持つ磁気の強さが岩石の温度や応力に応じて増減するため地磁気に変化する。しかし、地殻由来の磁気変化をその他の要因による変化と区別するには、様々な補正が必要である。伊豆半島東部で地震研と連携しておこなっている地磁気全磁力観測のデータについて、内部固有磁場を月別に評価しなおして静穏レベルを推定しDI補正を行ったところ、年周変動らしきものははっきり認識できるようになった。年周変動には、地殻活動の活発だった2011年と静穏だった2012年で違いがみられた(気象庁[課題番号:7020])。

## (地球化学)

跡津川断層観測点に平成22年に設置された地下水溶存ガス測定システムで課題となった観測装置の不安定性は平成23年に解決することができたので、平成24年度はこの安定性をさらに向上させることに努めた。その結果、精度のよい連続観測を1年以上継続させることに成功し、本5カ年計画終了後の開始をめざしている多点観測のために必要な安定性を実現できた。この過程で、特に、地殻起源のガスであるヘリウム4の安定観測を実現することもできた。一方、本計画の主体である希ガス同位体連続観測装置は、現在もなお試作段階にあるが、平成25年度の早い時期に観測を開始できる見込みである。<http://growdas.com>で観測データを準リアルタイムに表示するとともに、観測装置の概要やデータの変動の解釈なども公開している（東京大学理学系研究科 [課題番号：1502]）。

大気中ラドン濃度は、比較的広域な地殻の歪み変化を感度よく反映する可能性がある。兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震に先行する大気中ラドン濃度変化が捉えられたことを受け、放射線管理施設の排気モニターの全国ネットワークを構築している。昨年度の5施設に続き、今年度は8施設のデータとりだしを行った。昨年度までの公募課題で開発した気象要素の除去を含む解析を進めている。昨年度、東北地方太平洋沖地震に先行する変動を福島県立医科大学通気式電離箱観測でみいだしたが、今年度は、牡鹿半島にある宮城県原子力センターモニタリングステーション(女川、小積、飯小浜地区)でアルファガードを使用して観測されている大気中ラドン濃度データ(図3)を校正して、福島県立医科大学と整合する結果をえた。さらに、時期的に地震や余効滑りに伴うとおもわれる大気中ラドン濃度変動が、多くのM>6の地震や2000年有珠山噴火で、周囲の複数観測点でみられることがわかった(図4)。これは、大気中ラドン濃度が広域の地殻歪みに感度をもつという仮説を支持する。このような観点から、兵庫県南部地震で観測されたさまざまな先行現象間の比較をおこない、今年度は3本の論文にまとめた(東北大学[課題番号:1223])。

## (地震間の応力相互作用)

巨大地震による静的クーロン応力変化( $\Delta$ CFF)で、周辺の地震活動の変化がどの程度予想(あるいは説明)できるかをより厳密に検討するために、一般に行われている、受け手側のメカニズムを仮定する方法ではなく、原因地震の前と後に実際におこった地震のメカニズムを知らべて、それが $\Delta$ CFFと調和的であるかを検討した。特に、関東地方のように、さまざまなメカニズムの地震がある領域ではこの観点は重要である。活動変化は、概ね東北沖地震による $\Delta$ CFFで説明が可能であるが、 $\Delta$ CFFが負となるメカニズムの地震が多く起った場合もある(図5)。特に、従来地震活動が低調であった茨城県北部から福島県南部の浅部において活発化した正断層型の地震など、過去のメカニズム解を用いる本手法では、大地震前に地震活動が不活発であった領域など予測が困難な領域もある。本手法による予測精度向上には過去地震のメカニズム解の充実(不均質な応力場の理解)が重要である(東京大学地震研究所 [課題番号：1419])。

同一面上での地震間応力作用を検討できる高精度のフィールドデータとして、南アフリカ鉾山の既存断層上で活発に起っている微小破壊(AE)の面状クラスタ(立命館大学[課題番号：2402])のなかで、比較的大粒(Mw0)の地震が10分間隔で2個隣接しておこった例について、相対震源決定を行い、震源分布を詳細に調べた。1つ目のMw0地震発生前の震源分布と

2つのMw0の余震域から推定された破壊域・破壊開始点の位置関係から、1つめのMw0は、既存弱面のブランチにぶつかって停止し、2つ目のMw0はこのブランチの部分から破壊が始まったことが示唆された。ブランチがバリアとして作用し、1つ目のMw0の発生でブランチに集中した応力によって、2つ目のMw0が誘発されたと考えられる。1つめのMw0後には、2つめのMw0の破壊開始点周辺にAEが集中する様子もみられたが、これらのAEレートや積算モーメントが2つ目のM0の開始に向かって加速する傾向は見られなかった。一方、1つめのMw0の17日前には、その破壊開始点付近でやや大粒のMw-1.0の地震が発生しており、地震波の解析からその破壊域を推定すると、1つめのMw0の破壊開始点もこのMw-1.0の破壊端に位置していることがわかった。なお、1つめのMw0以前から、Mw0の破壊開始点付近で多くのAEが発生していたが、比較的大粒のM-1.0が起こったということ以外に、微小AEの破壊開始点への集中や活動度の活発化がおこった様子はみられなかった（東京大学地震研究所 [課題番号：1421]）。

#### （スケール間相互作用）

昨年度、ほとんどの主要活断層帯では、最大規模の地震の発生頻度は近年の微小地震活動度からグーテンベルグ・リヒター(GR)則を用いて計算される頻度より大きく、固有地震モデルが支持されることを報告したが、今年度は、南海地震の想定震源域において発生した中規模(M>5.0)以上の地震について調べた。推定されている平均再来間隔で規格化したM-Tダイアグラムからは、前駆的地震活動(1944年東南海地震の余震である可能性もある)や余震を除くとinterseismic期間には2つしか発生しておらず、GR則など全く関係がないとっていい低調さである。この2つのうち、波形データのある1982年5月11日の地震の発震機構解を気象庁初動を用いてHASH(Hardebeck and Shearer, 2002)により推定すると、震源の不確定性を考慮しても南海トラフの一部が滑ったものではありえない。波形データの無い1923年12月5日の地震がプレート間地震であった可能性は否定できないものの、南海地震震源域のようなカップリングが強いプレート間大地震の震源域の(ある程度以上のサイズの)一部分だけが破壊することはほとんどない可能性が示唆される（東京大学地震研究所 [課題番号：1419]）。

#### （応力）

宮城県沖に設置されていた海底地震計を用いて2011年東北地方太平洋沖地震の本震近傍の震源分布を推定した(図6)。本震前は、本震震源よりも海溝軸側のプレート境界沿いにおいて発生している。本震後は、本震の地震時すべりが大きな領域においては、ほとんどプレート境界型地震は発生していない。一方、上盤・下盤側のプレート内において本震発生前にはほとんどみられなかった地震活動が発生しており、M7級の地震も含まれていることが分かった。（東北大学 [課題番号：1210]）。

南ア金鉱山において観察された平面状分布を示すAE(微小破壊、 $-5 < M < -2$ 程度)クラスタのうち、2011年7月から11月にかけて、クラスタと採掘前線の距離が10m程度まで近づいたクラスタ上でおこるAEの応力降下量に時間変化が見られるかを検討する解析に着手した。このクラスタ周囲では、背景応力の顕著な時間変化があると予測されるので、応力と応力パラメタの関係の検証が可能である。現在、震源距離の近いイベント間でのスペクトル比法によって応力降下量が求まることが確認できている（[東京大学地震研究所 [課題番号：1420]）。

## (測地)

2011年東北地方太平洋沖地震前のプレート境界の情報を調べるため、プレート境界地震のすべりベクトルを調査した。防災科学技術研究所のF-netによるメカニズム解を用い、 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$  のウインドウごとに平均のすべり方向を求めた(図7)。その方向には特に海溝近くでプレート運動モデルから期待される方向からのずれが見られた。図の1-5の領域について方向の時間変化を調べると、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の後、プレート運動モデルから期待される方向へ変化していることが分かった。これは、東北地方太平洋沖地震前にプレート境界での局所的な固着によりその周囲のプレート境界でのすべり方向が回転していた可能性を示す(東北大学 [課題番号: 1210])。

H23年度に引き続き、プレート境界自動モニタリングに向けたGPSデータの自動解析システム開発を進めた。具体的にはGEONET観測点1,200点超及び大学等が運用している臨時観測点131点を日々自動解析し、それらの結果に基づいて時系列の自動作成、可視化を行えるシステムを構築した。特に大学等が運用している臨時観測点に関してはWEBサーバ上で時系列データを画像ファイルとして確認できるシステムを構築した。GEONETを含めた全時系列データはWEB経由で取得が可能であり、プレート境界の自動モニタリングの入力データとしてそのまま使える環境を整備した(東北大学 [課題番号: 1210])。

震源極近傍に設置した歪み計で、地震に先行する準静的歪み変化の観測例を増やすため、5つの南アフリカ大深度鉱山で11台の石井式歪計の埋設を終え観測を継続している(立命館大学 [課題番号: 2401])。

## (地殻構造)

雑微動の自己相関関数(ACF)や相互相関関数(CCF)を使用して地震波速度構造の時間変化の定量的な推定を行う際に必要となるデータ処理手法についての考察を、2007年能登半島沖地震震源近傍のデータを用いて行った。2007年能登半島沖地震の震源域における本震発生に伴う地震波速度構造変化については、すでに Ohmi et al. (2008)に報告があるが、この報告は定性的な解析にとどまっている。この地震による地下構造変化を定量的に見積もるために、データの処理手法、とくに、雑微動データの前処理手法の詳細な検討を行った。雑微動データの前処理として、one-bit化、スペクトルホワイトニング、ゼロ・フィルがあるが、試行の結果、スペクトルホワイトニングは本来抽出されるべき、波形の時間変化に相当する部分をマスクする影響が無視できないことがわかった。そこで、Wegler et al. (2009)等のゼロ・フィル手法にスペクトル中のラインスペクトルを軽減する手法を組み合わせたものを使用して解析を行った。また、観測点間基線のグリーン関数は、これまでCCFを用いて評価してきたが、今回は、CCFよりも安定した結果が得られると言われている、Deconvolution法により求めた。震央から20km-40km程度のまでの観測点のACFは、最大1.5%程度の速度低下を示し、それは深さとともに小さくなる傾向を示す。これに対し、震源直上観測点では、浅部で3.5%程度、深部ではさらに大きな値を示す。観測点間の基線については、震源域をサンプルする基線には最大1.8%程度の速度低下が見られた。これらの結果を考察すると以下ようになる。震源域から離れた観測点については、ACFによる速度低下は浅部の方が大きいことから、これらは強震動によりもたらされた可能性が高い。これに対し、震源断層直上では、深部の速度低下がより大きいことが示唆される結果となり、流

体の注入等、強震動以外の原因による深部の速度低下がもたらされた可能性がある。また、観測点間グリーン関数による速度変化は、考察している基線の平均的な速度変化であると考えられることから、震源域をサンプルする基線のCCFで見られる速度変化がACFのそれより小さいことは、大きな速度低下を起こした領域が、震源域近傍に極在していることを示唆している。また、ACFの時間変化からは、この震源域近傍の速度低下は、本震発生直後にもたらされたことが推測される（京都大学防災研究所 [課題番号：1810]）。

## イ. 先行現象の発生機構の解明

(電磁気学的現象)

一方、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年に行われたえりも地域の45地点での長周期までのMT探査データについて3次元インバージョンを行い、予察的な結果をえたが、構造が複雑が示唆され、例えばグリット設定の方向によって解が変わるので、信頼性のある解を求めるためにさらに吟味が必要がある（北海道大学 [課題番号：1005]）。

プレート運動による地殻中での応力変化に伴う応力磁気効果仮説の検証のためにおこなっている道東地域の地磁気三成分絶対測量は、新たな観測を追加するとともに、観測値の時間変化についてオリエンテーション効果によるみかけ変化の影響が無視できないことをあきらかにした。これを補正すると、真の時間変化は若干大きくなる（北海道大学 [課題番号：1005]）。

微小破壊を含まない電磁気先行現象のメカニズムとして、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昨年度に立証した。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ない、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なった。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8)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。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)にあてはめると、最大剪断応力の変化が大きい東北地方沿岸部と応力変化の無視できる地方とでは約5mVの電位差が発生したことになる（東海大学 [課題番号：2501]）。

不均質な電気伝導度構造化での電磁気異常を定量評価するために、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解析しているが、今年度は2Dから3Dへの拡張を起こなった(図9a)。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 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., 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., 2010)をもとに、島および地殻の抵抗率を300Ωmとし、VAN法で期待されている良導体のパス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

仮定した。良導体パスを配置した場合、島の地表における最大の電位差は2-3kmの距離で約 $16\mu\text{V}$ となった(図9b)。パスを周辺岩盤と同じにした場合は3-4kmの距離で約 $19\mu\text{V}$ の電位差(図9c)、逆に不導体とした場合は1-2kmの距離で約 $21\mu\text{V}$ の電位差となった(図9d)。パス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. 2012)には程遠い。そこで、さらに、VANグループで提唱されている良導体パスのエッジ効果(Sarlis, et al., 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10a)。上端部が尖っており、地表には達していないパスを仮定した(図10b)。解析の結果、良導体パスを配置した場合、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10c)、逆に不導体とした場合、2-3kmの距離で約12mVとなった(図10d)。いずれの場合も観測値(約2kmの距離で数十mV、Orihara et al., 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(東海大学[課題番号:2501])。

#### (地球化学的現象)

本計画で開発した地下水溶存ガス測定システムは、次期計画で多点観測に入ることをめざしているが、観測すべき地下水系の論理的根拠を与えるために、全国の地下水系の化学組成データの収集と解析を継続しており、地下水化学データベースをほぼ完成させた。さらに平成24年度は中部地方にある活断層とそれらの地下水系の化学組成との関係を検討し、断層と地下水化学組成の関係をいくつかのグループに分類できることを突き止めた。これらの分類法により、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することができた(東京大学理学系研究科[課題番号:1502])。

#### (地震のスケール間相互作用)

地震を相転移的な臨界現象とみる立場の研究は、Bakらの自己組織化臨界現象の研究をはじめとして数多い。これらは地震発生マグニチュードの頻度分布や余震の発生数時系列などが臨界現象の特徴であるべきの変化を示すことおよび大地震などのイベントが相転移に対比できることから予想されている。自己組織化臨界現象とみなせる地震や砂山崩しなどでは、発生マグニチュードの時間発展はごく僅かな例外を除き、磁性体の相関長などのようにべき的な変化ではなく単調増加でもない。ゆえに、大地震の発生時を臨界現象の立場から予測することは難しいと考えられている。しかしながら、Varotsosらによればナチュラルタイムの概念を地震発生時系列に適応させることによって、大地震のような最大イベント発生前の臨界状態を知ることができるとされている。だが、Varotsosらの計算方法は、重み付き時間と閾値を満たす地震のマグニチュードのみをもとにして計算している。実際の地震は余震などからわかるように空間的な相関をもち距離に大きく依存していると考えられる。そこで本年度は、Varotsosらの理論体系を再構築し、自己組織化臨界現象の例として地震を対象にして解析した。さらに重み付き時間・マグニチュード・距離に依存する新たな関係式を定式化した。この式を用いてプレート境界などのサブダクションによる地震とは大きく関係していないと考えられる、日本の内陸性の地震への適用を試みた(東京大学地震研究所[課題番号:1448])。

臨界現象的な立場からは、大地震前に応力場が均質化し、破壊が停止しにくい場が形成されるという仮説が考えられる。昨年度までの研究で、複雑で非連続な変形を扱える離散要素シミュレーションによって応力場の均質化は捉えられていたものの、均質化が生じて必ずしも大規模な断層運動につながらない場合も見られた。そのため、均質化に加えてどのような条件が大規模な断層運動に必要なかを検討することとした。大規模な断層運動が起きるということは、それまでの連続的な変形ができなくなり、変形様式の分岐が起きているのだろうとの観点から、数値実験での断層運動が生じる直前に特化した解析を行った結果、断層運動が開始する領域付近での変位が、周りのほぼ一様な変位よりも小さくなり、さらに局所的な領域で変位の向きがローディングとは無関係にばらつく現象が生じるといった分岐現象を確認することができた（東京大学地震研究所 [課題番号：1421]）。

地震が動的に階層成長することで、大きな震源核を経ずに大地震がおこるという仮説に関して、昨年度は、破壊成長抵抗の分布に階層的な不均質を与えた連続体中のRSF断層のモデル(野田他, 2012; Noda et al., 2012)において、同一のアスペリティによる地震の繰り返しでも大地震が大きな準静的震源核形成を経ておこる回と、小地震の動的破壊によって核形成が代用される(cascade upによる大地震)回の両方がおこることを見いだした。今年度は、低い破壊成長抵抗を設定した領域である小地震のパッチ(小パッチ)の大きさをかえた複数のモデルを、それぞれ大地震が20回おこるまで走らせ、挙動の違いを調べた。小パッチの大きさは、高い破壊成長抵抗を設定した領域である大地震のパッチ(以下大パッチ)の臨界核サイズの0.6倍から1.5倍の範囲を試した。小パッチが大きい場合は、小さい地震はおこらず、小パッチ内部にできる小さな核からはじまる小地震は必ずcascade upして大パッチ全体を破壊する大地震となる。一方、小パッチが小さい場合は、小パッチ地震からcascade upして大地震に発展することはできず、大地震の発生は大パッチの高い破壊成長抵抗にみあった大きな臨界サイズまで大パッチ内で準静的震源核が大きく成長するという準備過程を経てからのみおこる。この変化は漸進的で、小パッチサイズが大きくなるにしたがって、cascade upでおこるものの割合が増え、大きな準静的核が先行するものが減る(図11)。また、この遷移的な範囲の条件下でのシミュレーションは、計算した範囲ではリミットサイクルには陥らず、次の回がどちらのタイプであるかを予測することはできない。一方で、どちらのタイプの大地震であっても、繰り返し間隔は相当に一定で、しかも、小パッチのない場合と大して変らなかった。このことは、cascade upがおきるためには、大パッチがいまにも自分自身で大きな核形成を起こしそうなほど熟れた状態になっている必要があることを示唆する。そのような観点から個々のケースを詳しく観察すると、小パッチがcascade upする場合は、cascade upせずに小地震でおわるケースにくらべて小パッチの核形成(地震発生までの時間 $t_f$ に反比例する加速で特徴づけられる)が始まる段階での大パッチ全体での平均滑り速度が高いことがわかった(図12)。ただし明確な閾値があるわけではない。さらに、小パッチの単独地震から、あまり間をおかずに大核が先行する大地震がおこるケースが多くみられたが、そのような場合には、小パッチ地震の余効滑りが異常に大きく、そのことが大核の開始を促している様子がみてとれた。これらの現象は、東北地震の数年前から、M9破壊域内の広い範囲でおこっていた様々な変化とも整合的である。これらの知見から、本震破壊の準静的な始まり部分ともいえる十分条件的だがスキップされやすい直前の加速する震源核とは別のコンセプトとして、広域な固着の剥れというものを必要条件的ではあるが大地震の

発生の切迫に対してある程度確定的な情報をもつ準備過程として検討すべきであるとおもわれる（中谷, 2012, 東京大学地震研究所 [課題番号: 1421]）。

南ア金鉱山に展開したAE観測網で捉えられた、鋭く面状に集中する微小破壊の10-100m規模のクラスタは、自然地震や採掘前線周辺の雲状のAE集団とはちがって、非常に微小な破壊の頻度が極端に卓越した $b \gg 1$ のGR則に従う等々のことが示されている（立命館大学 [課題番号: 2402]）。これらが巨視的断層面でおこる微小破壊だとすれば、プレート境界の小繰り返し地震がそうであるように、巨視的断層面の状態に関してより直接的な情報をもつことが考えられる。昨年度は、加速度計でも捉えられる比較的大きいAEのメカニズム解推定が可能である事を確かめたが、本年度は、AEセンサの初動記録のみを用いて、平面状クラスタ上で起こる多くのイベントの初動極性を一つの震源球上に投影し、断層上の滑りを示すメカニズム解が求まるかを確認した（図13）。平面状分布を示すAEクラスタのうち、最もカバレッジのよいZebra断層に対応するAEクラスタで発生したMw-4から-3.4のAE50個を用いた結果では、同断層上で起こる正断層滑りと調和的なメカニズム解に対応する押引分布が得られ、これらのAEはZebra断層の微小な一部の正断層滑りである可能性が強いと考えられる。また、他の平面クラスタでも、それに矛盾する結果はでなかった。（[東京大学地震研究所 [課題番号: 1420]）。

#### （地震活動）

昨年度、浅部ゆっくり地震の特徴について数値シミュレーションによるモデル化を行ったが、今年度は、数値シミュレーション結果を東北地方太平洋沖地震に適用し、予想される観測現象を調べた。その特徴として、東北地方太平洋沖地震の発生後には、固着の強い福島沖付近で静穏化し、縁辺部の岩手沖や茨城沖などで活発化することを指摘した。また、小繰り返し地震の揺らぎの特徴を調べ、slowness-lawであれば、巨大地震の余効すべりによって、釜石沖地震のような固有地震が、一時的に数日程度の発生間隔で頻発する現象を説明することができた（東北大学 [課題番号: 1210]）。

#### （応力）

鉱山の地震発生ポテンシャル評価のために、日本で実用化されている口径76mmの円錐孔底オーバーコアリング(CCB0)法による応力測定を、口径60mmでもできるように小型化し、現地の条件(低品質なドリリング、限られた現場作業時間)で応力測定することに昨年成功したが、今年度はMponeng鉱山の地下約3.4kmおよびTau Tona鉱山の地下約3.0kmにおいても測定に成功した。前者は、同鉱山で初めての応力測定結果であり、また、南アで最も深い地点の応力解放法による測定結果でもあった。測定現場付近の採掘は進んでおらず、標準的な応力モデルを地表下3.4kmに外挿した結果と調和的な結果と思われる。後者は、2月前に発生したM1.5の被害地震の震源の数十m以内での応力測定で、得られた最大主応力は、相対的に約400m深いMponengよりも有意に大きいものであった。この地震は、鉱山の標準応力モデルと採掘レイアウトから応力が低いと予測される領域に発生したため、この応力実測結果は、地震リスク評価をどのように行うべきかを考える上で非常に貴重である。（立命館大学 [課題番号: 2401]）。

#### （地殻状態）

地殻流体の挙動が地震発生やその先行過程に果す役割は、理論的に考えて大きいはずであり、様々な手段で地殻の電氣的・力学的構造をモニターすることで、地震に先行する現象が見付かる可能性がある。下部地殻に流体の可能性が高いS波反射面がみつかり、また微小地震活動が異様に高い丹波山地周辺域において行っている、超稠密な地震観測で得られた多数の地震記録を用いて種々の解析を進め、北摂・丹波地域と琵琶湖西岸両地域は多くの対照的な特徴を示すことがはっきりした(図14)。発震機構/応力場は、琵琶湖西岸地域は一貫して東西圧縮の逆断層的な応力場であるが、花折断層より西方の丹波地域では東西圧縮ながら $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ が区別しにくい応力場であることが示された(青木裕晃, 2012)。下部地殻に存在するS波反射面は北摂・丹波地域では顕著であるが、琵琶湖西岸地域には分布していないことがわかった(青木将, 2013)。レシーバファンクション解析では、丹波地域と琵琶湖西岸ではモホ面の形状に違いがあり、その下のフィリピン海プレートが急激に西下がり傾斜している様子が捉えられた(佐々木, 2011)。電気比抵抗観測によると、花折断層を境に西側の丹波山地では地殻浅部まで低比抵抗であるのに対し、琵琶湖側は比較的高比抵抗であることが示されている(吉村ほか, 2005)。微小地震活動は丹波側で定常的に活発であるのに対し、近江盆地ではほとんど微小地震は発生しない。地震発生層の深さは花折断層付近を境に東西で段差がある。これらの特徴の違いは地殻内の流体分布の違いによる可能性が高く、さらに地殻下のフィリピン海プレートの形状が地殻内流体の発生や地殻の力学的状態に大きな影響を与えていると考えられる(京都大学防災研究所 [課題番号: 1811])。

間隙水圧・地下水位データから地殻の状態を解釈するために、近畿地方での既存の間隙水圧・地下水位観測のデータを解析した。神岡鉱山・近畿の地殻変動・地下水観測の間隙弾性論による先行現象抽出手法の開発を継続し、特に遠方で発生した地震による観測点近傍の透水性変化について検討した。図15は神岡鉱山で継続している密閉ボアホールを用いた間隙水圧測定での検討例である(京都大学防災研究所 [課題番号: 1811])。

## これまでの課題と今後の展望

本計画における先行現象の研究は、断層滑りの時空間発展モデルの中に位置付けるための物理的理解を重視してきた。一方で、ここ数年になって、世界のあちこちの研究グループから、統計的に有意な(否定しがたい)先行現象の査読論文が発表された。余震という時空間クラスタリングの影響をのりこえて、地震先行現象の統計的有意性を示すのは、かなり念のいった作業が必要なのだが、事例数の稼ぎやすい前震・電離層異常といったもので、やっと、それができるようになったのである。ひとつでも、そういう先行現象があるのなら、大地震がおこりやすい特別な物理状態という意味での準備過程が実在することになるから、そのような状態を診断することによって大地震の発生を予測しようとする、伝統的なアプローチの正当性はあきらかとなる。本計画の外側でおこっている、このような重要な変化を含めて、現状の分析と今後の展望を考える。

本項目の研究によって、先行現象発生機構の解明に関して、観測量が何を反映するかについての解明は大きく進んだ。全国の温泉データから、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ことは、モニタリング点の選定への画期的なアプローチであり、データの解釈においても非常に重要な貢献である。また、電離圏異常につ

いては、地上での電場測定など複数の項目を併わせた観測がおこなわれている。地電位異常については、強い不均質構造の効果をシミュレーションして観測値と比較することが行われるようになった。系統的なデータの収集がはじめて行われるようになった大気中ラドン濃度では、東北地方太平洋沖地震前の変化が、福島と仙台で整合的であったことがわかり、地震以外の地殻活動との対応もみられることから、広域の微小な地殻歪みの高感度なモニタになっているとの仮説が提出された。また、干渉法による速度構造の変化検出に関しても、先行現象ではなく地震発生に伴う変化ではあるが、強震動による浅部の変化とは別に、深部の震源断層近傍での速度低下が示唆された。微小地震活動に関して応力場や地域の構造との関連で平常時の活動の特徴の把握が進展している。こうした観測エンドでの現象の明確化は、種々提案されてきた先行現象生成のメカニズムを検証するための必要条件であり、一層推進すべきだろう。

他方、観測には当然感度上の制約があることは十分認識されなくてはならない。先行現象を説明するのによく微小破壊が仮定され、それが微小地震観測で検出されないとの批判をうけるが、他項目(立命館大学[課題番号:2402])で cm スケールの微小破壊が天然の断層面上で活発におこっていることが鉾山地下の至近距離観測で見いだされた。それは b 値の高い活動で、一般的な微小地震からの外挿で期待されるものではない。また、たまたま近くに連続地震波形があった場合に、大地震の破壊開始点に密集してごく微小な直前の前震が非常に多数みつかった例(Bouchon et al., 2011, Doi and Kawakata, 2012)も同様な教訓である。地下でなにがおこっているかについては間接的で非常に不完全な情報しかないのだから、あきらかな矛盾をはらんでいない限りは、観測されていないプロセスを含む憶測的なメカニズムも排除しないで研究するべきである。

先行現象という概念は、大きな地震が普段よりおこりやすいような物理状態があることを暗黙の前提としている。しかし、地震の大きさは本震の破壊が(偶然)どこで停止するかで決めるのだから本震破壊の開始前には決っておらず、従って大きな地震が起りやすいという状態などあるはずがないという考えも根強い。しかし、小地震の多くは大断層の部分破壊ではないことが、本項目で示した日本の活断層や沈み込み帯に加えて、活断層近傍に活動が密集するカリフォルニアのケースでも示されており(Powers and Jordan, 2010)、断層個々の破壊について、GR 則を根拠に、特徴スケールのない臨界状態だから破壊サイズに predictability が無いという議論は成り立たない。

大地震の物理的な準備過程から派生すると考えられていた前震という現象が、時間的に不変な GR の下で余震(ETAS)によるクラスタリングを認めるだけで、統計的なみかけの効果として生じうる(Helmstetter et al., 2003)という論文は、事前にそれと気づくことは難しいにしても、「大きな地震が起りやすい特別な物理状態」というものはあるだろうという期待に疑問をなげかけた。しかし、ごく最近になって、良質のデータと注意深い解析によって ETAS 等の確率的トリガリング作用では説明のつかない前震活動の存在を統計的に支持する結果が出版されている(Lippiello et al., 2012; Bouchon et al., 2013)。また、事例数の多い電離層データ等にも、統計的有意性を示すことのできる先行現象がみついている(Nemec et al., 2008; Le et al., 2011)。また、前震の続発性や、相対的静穏化で、普段よりは大地震がおこる確率が有意に高いという状態を事前に診断することも報告されている(Ogata, 2001; Ogata and Katsura, 2012)。

統計的事実として、ある現象がおこった場合、それがおこらない場合より、その後の大

地震発生確率が有意に高いという意味での先行現象がひとつでも存在すれば、大地震が「やすい」物理的状态というものが存在することになる。ETAS等によって、平常時からおこるクラスタリング等と定量的に比較できるようになって、やっとそういうことが示せるようになったというのが現在の段階だろう。一方で、統計的に有意な相関が示された現象であっても、空振りや見逃しは多数生じる。それは観測しているのが地震発生にいたる過程そのものではなく派生現象であるからという理由もあるだろうが、階層モデルによって示されたように、地震発生の過程そのものの性質であるとも考えられる。例えば、固着域の一部が先行的にゆっくり滑り始める、大地震の準静的な開始ともいえるような(大きな)震源核は、空振りはしにくいだろうが、簡単にスキップできるプロセスであり、見逃しがおこりやすい。逆に、階層モデルでも中・短期的な必要条件であることが示唆され、東北地方太平洋沖地震前の測地観測からも示唆されている、広域な固着剥れの進行の担い手であるゆっくり滑りイベントは、大地震につながらずに終息することも多い空振りの多い先行現象であろう。(なお、天然の断層の静的な破壊エネルギーが、室内実験で得られるような小さなものであれば、そもそも、震源核は必ず非常に小さいものになるが、大地震の固着域端部への载荷による応力集中のみつもりから、大きな静的破壊エネルギーをもつことが他項目(Kato, 2012; 名古屋大学[課題番号:1702])で示された。)

こうしてみると、先行現象の再現性・普遍性が高くないからといって「気のせい」や「にせもの」であるということにはならない。相関の有意性が高ければ、見逃し率・空振り率が高くても「ほんもの」である。経験則として確率予報に反映させることは可能であるし、また、逆に、どのような現象が、どのような先行期間、見逃し率、空振り率で大地震の発生と関連しているのかということは、地震発生の物理過程に対する有力な拘束条件である。様々な現象と地震発生の経験的相関を定量的に評価することの重要性をあらためて強調したい。「銀の弾丸」はいまだみつからないではないかという批判があるが、ここで論じているのは見逃し・空振りあたりまえということを踏まえた上での先行現象の追求である。先行現象によって、現状どの程度の予測能力が得られるのかを定量的に示すことは、社会的な側面からも有益だろう。上述したように、先行現象の統計的有意性を示す論文は、最近急増しているが、本計画からのものは、ひとつ(Orihara et al., 2012, 東海大学[課題番号:2501])だけである。

#### 成果リスト

青木裕晃・片尾 浩・飯尾能久・三浦 勉・中尾愛子・米田 格・澤田麻沙代・中尾節郎, 2012, 稠密地震観測による近畿地方北部におけるメカニズム解と応力場, 日本地球惑星科学連合大会, SSS31-P3.

青木裕晃・片尾 浩・飯尾能久・三浦 勉・中尾愛子・米田 格・澤田麻沙代・中尾節郎, 2012, 稠密地震観測による近畿地方北部におけるメカニズム解と応力場, 京都大学防災研究所年報, 55, B, 121-140.

青木将, 2013, 近畿地方北部における地殻内S波反射構造の推定, 京都大学理学研究科修士論文  
有吉慶介・堀 高峰・中田令子・金田義行・松澤 暢・日野亮太・長谷川 昭, 海溝型巨大地震の発生過程と浅部ゆっり地震の活動変化との関係, 2012, 日本地震学会秋季大会, A31-09.

- 有吉慶介・松澤 暢・日野亮太・長谷川 昭・金田義行, 摩擦特性に依存する小繰り返し地震の揺らぎ, 2012, 日本地球惑星科学連合大会, SCG74-P01 .
- Durrheim, R. J. and H. Ogasawara, 2012, Can mine tremors be predicted? Observational studies of earthquake nucleation, triggering and rupture in South African mines, Proc. 2nd Southern Hemisphere Int. Rock Mech. Symp., SAIMM, pp. 327-343.
- 橋本武志・茂木透・西村三治・有田真・清水淳平・井智史・源泰拓・長町信吾, 2012, 道東地域における地磁気三成分絶対測量, 北海道大学地球物理学研究報告, **75**, 117-132.
- 畠中弘哉, 安岡由美, 長濱裕幸, 坂下守, 向高弘, 2012, 排気モニターによる大気中ラドン濃度測定 その3: 札幌医科大学における変動, 日本放射線安全管理学会, 大阪府吹田市, 2012/12/6.
- Hofmann, G., H. Ogasawara, T. Katsura, and D. Roberts, 2012, An attempt to constrain the stress and strength of a dyke that accommodated a ML2.1 seismic event, Proc. 2nd Southern Hemisphere Int. Rock Mech. Symp., SAIMM, pp. 436-450.
- 堀 高峰・阪口 秀, 2012a, 大きな破壊への準備過程: 数値実験にもとづく考察, 日本地球惑星科学連合大会, SSS29-P05.
- 堀 高峰・阪口 秀, 2012b, 大きな破壊に向けた準備過程並びに変形から破壊への移行過程, 日本地震学会秋季大会, P2-74.
- 飯尾能久, 2012, 0.1万点(満点)計画~次世代型稠密地震観測~, 日本地震学会秋期大会, A31-05.
- Ishibe, T., K. Shimazaki, K. Satake, and H. Tsuruoka, 2012, Change in seismicity rate after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, AOGS-AGU(WPGM) Joint assembly, August 13-17, 2012, Resorts World Convention Centre, Singapore.
- Ishibe, T., S. Sakai, K Shimazaki, K Satake, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012, Correlation between changes in seismicity rate and the Coulomb stress changes imparted by the 2011 Tohoku-oki Earthquake in Tokyo Metropolitan area, International Symposium on Emerging issues after the 2011 Tohoku Earthquake, University of Tsukuba, Ibaraki.
- Ishibe, T., S. Sakai, K Shimazaki, K Satake, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012, Statistical analysis of seismicity rate change in the Tokyo Metropolitan area due to the 2011 Tohoku Earthquake, AGU fall meeting, December 3-7, 2012, San Francisco, California, USA.
- 石辺岳男・酒井慎一・島崎邦彦・佐竹健治・鶴岡 弘・中川茂樹・平田 直, 2012, 2011年東北地方太平洋沖地震による関東地方における地震活動度変化, 日本地震学会秋季大会, 2012年10月16-19日, 函館市民会館・函館市民体育館, 北海道函館市.
- 石辺岳男・酒井慎一・島崎邦彦・佐竹健治・鶴岡弘, 2012, 2011年東北地方太平洋沖地震後の南関東における地震活動と歴史地震の震源域への影響, 第29回歴史地震研究会, 2012年9月14-16日, 横浜開港資料館, 神奈川県横浜市中区.
- Kakinami, Y., M. Kamogawa, S. Watanabe, M. Odaka, 3 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, 2012a, Effects of a revised rate- and state-dependent friction law on aftershock triggering model, Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2012.11.028, in press.

- Kame, N., S. Fujita, M. Nakatani, and T. Kusakabe, 2012b, Earthquake cycle simulation with a revised rate- and state-dependent friction law, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2012.11.029, in press.
- 片尾浩・三浦勉・飯尾能久, 2012, 琵琶湖西岸/花折断層南端付近で見られる深部反射波, 日本地震学会秋期大会, P1-37.
- 木下千裕・加納靖之, 2012, 東北地方太平洋沖地震の前後で観測された間隙圧とその大気圧の時間変化, 日本地震学会秋季大会, P2-41.
- Morita, M., F. Tsunomori, R. Matsuyama, and T. Mori, 2013, Survey of Rn222 Concentration in Groundwater in Miura Peninsula, *Radioisotopes*, **62**(2), 91-95.
- 長濱裕幸, 2012, 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw= 9.0)前の大気中ラドン濃度変動, 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 招待講演, 2012/10/20札幌市.
- 中村沙紀・安岡由美・長濱裕幸・鈴木俊幸・本間好・坂下守・向高弘, 2012, 排気モニターによる大気中ラドン濃度測定その2: 3地点(札幌・福島・岡崎)における平年変動の解析, 日本放射線安全管理学会, 大阪府吹田市, 2012/12/6.
- 中谷正生, 2012, 地震発生物理と前兆現象, 日本地震学会2012年秋季大会特別シンポジウム「ブループリント」50周年-地震研究の歩みと今後, S-06.
- Naoi, M., M. Nakatani, J. Philipp, S. Horiuchi, K. Otsuki, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, K. Miyakawa, A. Watanabe, H. Moriya, O. Murakami, Y. Yabe, H. Kawakatai, N. Yoshimitsu, T. Ward and H. Ogasawara, 2012, Magnitude-frequency distributions of AEs associated with the mining front and pre-existing faults-cases from SATREPS array operating in a South African gold mine, 36, ECGS Workshop 2012, October 3-5, 2012, Alvisse Parc Hotel, Luxembourg.
- 直井誠・中谷正生・Joachim Philipp・堀内茂木・大槻憲四郎・Thabang Kgarume・Gilbert Morema・Sifiso Khambule・Thabang Masakale・宮川幸治・渡邊篤志・森谷祐一・村上理・矢部康男・川方裕則・吉光奈奈・小笠原宏, 2012, 南アフリカ金鉱山地下1km深における多点AE観測と2つのM0級地震に関連するAE活動, 日本地球惑星科学連合大会, SSS28-07, 2012年5月24日, 幕張メッセ, 千葉
- 野田博之・中谷正生・堀高峰, 2012, 速度・状態依存摩擦則で支配される断層における階層アスペリティの地震サイクルシミュレーション, 日本地震学会秋季大会, A31-07, 函館, Oct. 16-19, 2012.
- Noda, H., M. Nakatani, and T. Hori, 2012, Earthquake sequence simulation of a multi-scale asperity model following rate and state friction - occurrence of large earthquakes by cascade up vs. own nucleation, AGU Fall meeting, San Francisco, Calif., 3-7 Dec.
- 小笠原宏, 2012, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験, 地震及び火山噴火研究の将来構想シンポジウム, 2012年7月5日, 東京大学鉄門記念講堂, 東京.
- 小笠原宏, 加藤春實, 2012, 地震発生場においてより多くの応力測定を実現するための南アフリカ金鉱山での取り組み, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, A32-03, 2012年10月19日, 函館市民会館.
- Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, and P. de Bruin, 2012, Trial of the BX conical ended borehole overcoring stress measurement technique, Proc. 2nd Southern Hemisphere Int. Rock Mech. Symp., SAIMM, pp. 169-179.

- Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, and P. de Bruin, 2012, Trial of the BX conical ended borehole overcoring stress measurement technique, *J. SAIMM*, **102**(8), 479-753.
- 小笠原宏, 加藤春實, G. Hofmann, P. de Bruin, 坂口清敏, 2013, 大深度・高応力の南アフリカ金鉱山の諸条件に最適な形で円錐孔底ひずみ法応力測定を行う試み, 第13回岩の力学シンポジウム論文集, pp.465-470.
- Ohmi, S., 2012, Seismic Wave Velocity Decrease near the Fault Zone of the 2007 Noto Peninsula Earthquake, Japan, Detected by Using Ambient Noise, Abstract S42A-01 presented at 2012 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 3-7 Dec.
- Orihara, Y., M. Kamogawa, T. Nagao, and S. Uyeda, 2012, 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.
- Suzuki, K., R. Hino, Y. Ito, Y. Yamamoto, S. Suzuki, H. Fujimoto, M. Shinohara, M. Abe, Y. Kawaharada, Y. Hasegawa, and Y. Kaneda, 2012, Seismicity near the hypocenter of the 2011 of the Pacific coast of Tohoku earthquake deduced by using ocean bottom seismographic data, *Earth Planets Space*, **64**, 1125-1135.
- Takeuchi, A. and T. Nagao, 2013, Activation of hole charge carriers and generation of electromotive force in gabbro blocks subjected to non-uniform loading, *J. Geophys. Res.*, **118** (3), 915-925, doi:10.1002/jgrb50111.
- Tajika, Y., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Suzuki, T., Homma, Y., Ishikawa, T., Tokonami, S., Mukai, T., Janik, M., Sorimachi, A., Hosoda, M., 2012, Radon concentration of outdoor air: Measured by an ionization chamber for radioisotope monitoring system at radioisotope institute. *J. Radioanal Nucl. Chem.* **295**, 1709-1714.
- 多鹿優佳里, 安岡由美, 長濱裕幸, 鈴木俊幸, 本間 好, 石川徹夫, 床次眞司, 反町篤行, 細田正洋, Miroslaw Janik, 向高弘, 2012, 排気モニターによる大気中ラドン濃度測定 その1: RI施設の影響, 日本放射線安全管理学会, 大阪府吹田市, 2012/12/6.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, W. L. Ellsworth, K. Imanishi, K. Shimamura, and A. Hasegawa, 2012, Source parameters of microearthquakes on an interplate asperity off Kamaishi, NE Japan over two earthquake cycles, *Geophys. J. Int.*, **189**, 999-1014.
- Uchida, N., A. Hasegawa, and T. Matsuzawa, 2012, Strong near-trench locking and its temporal change in the rupture area of the 2011 Tohoku-oki earthquake estimated from cumulative slip and slip vectors of interplate earthquakes, AGU Fall meeting, San Francisco, Moscone Center, December, 2012.
- 内田直希・長谷川昭・松澤暢, 2012, 2011年東北地方太平洋沖地震前の海溝近傍の固着状況-プレート境界地震のすべり方向からの推定-, 日本地震学会2012年度秋季大会, 函館, 函館市民会館, 2012年10月.
- Yasuoka, Y., Ishikawa, T. Omori, Y. Kawada, Y. Nagahama, H., Tokonami, S., Shinogi, M., 2012a, *Handbook of Radon: Properties, Applications and Health*, Editors: Zachary Li and Christopher Feng, *Anomalous Atmospheric Radon Variation before an Earthquake: A Case Study of the 1995 Kobe Earthquake, Japan*, Nova Science Publishers, NY, USA.

- Yasuoka, Y., Kawada, Y., Omori, Y., Nagahama, H., Ishikawa, T., Tokonami, S., Hosoda, M., Hashimoto, T., Shinogi, M., 2012b, Anomalous change in atmospheric radon concentration sourced from broad crustal deformation: A case study of the 1995 Kobe earthquake. *Applied Geochemistry*, **27**, 825-830.
- 安岡由美, 長濱裕幸, 鈴木俊幸, 本間 好, 2012, 排気モニターによる広域大気中ラドン濃度測定 の提案—巨 大地震前後の地殻変動解析に挑戦してみませんか—*Isotope News*, **693**, 17-19
- 安岡由美, 長濱裕幸, 鈴木俊幸, 本間 好, 向 高弘, 2012, 「ラドン濃度変動と地震—地震先行現象の痕跡 を排気モニターに求めて—」*FBNews*, **428**, 1-5. (ホームページ公開).
- 安岡由美, 石川徹夫, 長濱裕幸, 川田祐介, 大森康孝, 床次眞司, 志野木正樹, 2012, 地震とラドン濃度異常, 地震予知研究の最前線—地震予知工学・耐震工学・地震学の融和をめざして, 早川正士(監修), 日本専門図書出版.
- Yasuoka, Y., Tsuge, M., Miyamoto, S., Nagahama, H., Suzuki, T., Homma, Y., Kubota, K., Mukai, T., 2012, Atmospheric Radon Variation Before and After the 2011 Tohoku Earthquake (Mw = 9.0), NARE 2012 SYMPOSIUM on the NATURAL RADIATION EXPOSURES and LOW DOSE RADIATION EPIDEMIOLOGICAL STUDIES, Hirosaki, 2012/3/2.
- 安岡由美, 長濱裕幸, 鈴木俊幸, 本間好, 久保田和人, 片岡賢英, 2012, 2011 年東北地方太平洋沖 地震前 (Mw= 9.0) の大気中ラドン濃度の顕著な変動, 日本地球惑星科学連合大会, 千葉市 2012/5/24.
- 安岡由美, 長濱裕幸, 鈴木俊幸, 本間 好, 石川徹夫, 床次眞司, 向 高弘, 柘植麻里奈, 宮本 莊子, Mirosław Janik, 反町篤行, 細田正洋, 2012, 排気モニター(通気式電離箱)による空 気中ラドン濃度測定について日本保健物理学会第45回研究発表会 名古屋市, 2012/6/17.
- 安岡由美, 長濱裕幸, 鈴木俊幸, 本間 好, 向 高弘, 2012, 大気中ラドン濃度変動:2011年東北 地方太平洋沖地震と1995年兵庫県南部地震の先行現象, 第2回地震予知研究シンポジウム, 大阪市, 2012/9/29.