# 「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」

## 平成24年度年次報告

## 【成果の概要】

平成25年10月

### 科学技術・学術審議会測地学分科会

地震火山部会

# 目 次

### [平成24年度の成果の概要]

1.はじめに	1
<ol> <li>2. 巨大地震による災害の軽減に資する研究成果</li> <li>2.1. 巨大地震の解明</li> <li>2.2. 地震動・津波予測のための手法開発</li> </ol>	3 3 4
<ul> <li>3.平成 24 年度の成果の概要</li> <li>3.1.地震・火山現象予測のための観測研究の推進</li> <li>3.2.地震・火山現象解明のための観測研究の推進</li> </ul>	5 5 8
3 - 3 . 新たな観測技術の開発 3 - 4 . 超巨大地震に関する当面実施するべき観測研究の推進	15 16

4.まとめ	18
4.まとめ	18

用語解説

### 

### [参考資料]

. 項目別の成果 (地震・火山噴火予知研究協議会 計画推進部会)	39
1(1)地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化	41
1(2)(2-1)地震発生予測システム	55
1(2)(2-2)火山噴火予測システム	72
1(3)地震・火山現象に関するデータベースの構築	79
2(1)日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象	84
2(2)(2-1)地震準備過程	116
2(2)(2-2)火山噴火準備過程	144
2(3)(3-1)地震発生先行過程	155
2(3)(3-2)地震破壊過程と強震動	185
2(3)(3-3)火山噴火過程	193
2(4)地震発生・火山噴火素過程	197
3 新たな観測技術の開発	213
5 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進	226
. 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の見直しについて(建議)の概要	253
. 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について(建議)の概要	255
. 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の実施機関	261

[平成24年度の成果の概要]

1.はじめに

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」(以下,「本研究計画」という。)は,平成20年に策定され,平成21年度から5か年計画として実施されてきた。本研究計画は,当初は以下の4項目を柱として推進された。

地震・火山現象予測のための観測研究の推進

II. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

|||. 新たな観測技術の開発

IV. 計画推進のための体制の強化

本研究計画 2 年目の平成 23 年 3 月 11 日にマグニチュード(M)9 の東北地方太平洋沖地震(東日本大震 災)が発生したことを受けて計画の内容を総点検した結果,超巨大地震の発生可能性を十分に考慮して いない等の問題があることが明らかになった。問題点に対応するために平成 24 年度に本研究計画の見 直しを行い,上記の4項目に

∨. 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進

を加えて,5項目を柱として計画を推進することとなった。

上記項目のうち, I. は地殻やマントルで進行している諸過程を把握し,数値シミュレーションへの観 測データの同化に基づく地震発生予測,及び噴火シナリオに基づく火山活動の予測に関する研究を行う ものであり,次のような中項目に分けられている。

- (1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化
- (2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築
- (3) 地震・火山現象に関するデータベースの構築

II.は, I.を実施するために,地殻やマントルで進行している諸過程の正しい理解とそのモデル化の ための観測研究を行うものであり,次のような中項目に分けられている。

- (1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象
- (2) 地震・火山噴火に至る準備過程
- (3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程
- (4) 地震発生·火山噴火素過程

III.は,地震・火山現象に関する現象理解や予測の高度化を進めるために,新たな観測技術の開発や 既存技術の高度化を行うものであり,次のような中項目に分けられている。

- (1) 海底における観測技術の開発と高度化
- (2) 宇宙技術等の利用の高度化
- (3) 観測技術の継続的高度化
- IV.は,計画全体を組織的に推進する体制の整備や,基礎的な観測体制の強化を図るものである。

∨.は,当初の計画では不足していた超巨大地震に関する研究を強化するために,超巨大地震の発生過程の解明や予測のための研究,津波等の超巨大地震に起因する現象に関する研究,また,これら研究を進めるための技術開発を行うものであり,次のような中項目に分けられている。

- (1) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明のための観測研究
- (2) 超巨大地震とそれに起因する現象の予測のための観測研究
- (3) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明と予測のための新技術の開発

本研究計画は,国立大学法人等,独立行政法人,政府機関<sup>1</sup>が策定した211の実施計画(個別課題) からなっている。平成24年度の個別課題の成果は,「平成24年度年次報告 機関別」に取りまとめら れている。これらの個別課題による研究成果を基に,本研究計画の項目別に成果を取りまとめたものが, 本報告書「平成24年度年次報告 成果の概要」である。

本報告書では,難解な学術用語をなるべく避け,平易な文章で学術的成果を記述することを心がけて 作成した。しかし,専門用語を使用しなければ説明が冗長となる場合があるため,必要に応じて本報告 書の後の「用語解説」のページで解説した。

また,参考資料編には[項目別の成果]を添付した。これは上記の中項目別に学術報告として成果を 取りまとめたもの<sup>2</sup>であり,より詳細な成果が報告されているので参考にされたい。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>国立大学法人等(北海道大学,弘前大学,東北大学,秋田大学,東京大学,東京工業大学,名古屋大学,京都大学,鳥 取大学,高知大学,九州大学,鹿児島大学,立命館大学,東海大学),独立行政法人(情報通信研究機構,防災科学技術 研究所,海洋研究開発機構,産業技術総合研究所),政府機関(国土地理院,気象庁,海上保安庁) <sup>2</sup>東京大学地震研究所には,本研究計画で立案された研究を推進する目的で地震・火山噴火予知研究協議会が設置され, 同協議会には中項目ごとに効率的かつ調和的に研究を推進するために,13の計画推進部会が設置されている。参考資料 編の[項目別の成果]は,各部会長が中項目別に平成24年度の学術的成果を取りまとめたものである。

2. 巨大地震による災害の軽減に資する研究成果

2011 年 3 月 11 日に発生したマグニチュード(M)9 の東北地方太平洋沖地震は,日本周辺で発生す する可能性のある巨大 ~ 超巨大地震(以下,巨大地震)の評価を見直す必要があることを示した。 巨大地震の発生可能性をより適切に評価するためには,これまでに発生した巨大地震の震源域,規 模,発生頻度をあらゆるデータを利用して推定するとともに,発生サイクルの全容を解明しなけれ ばならない。また,巨大地震による災害を軽減するために,津波や地震動の予測が極めて重要であ ることを再認識させられた。本研究計画では,巨大地震に関する研究を強化するために計画の内容 を見直した。平成 24 年度は,巨大地震の長期評価に必要な過去の巨大地震の震源像の見直しに関 する研究,巨大地震による津波を地震発生直後に精度よく推定するための手法開発等で成果が得ら れた。

2 - 1 巨大地震の解明

巨大地震の繰り返し間隔は百年程度以上と長いため,その特性を地震計等の計器観測から明らか にするには限界がある。今後の巨大地震の発生を予測するためには,歴史記録や地質データ等も利 用して,過去の巨大地震の震源像を明らかにすることが重要である。

津波堆積物調査から,17世紀に北海道太平洋沖で巨大地震が発生したことが明らかになっており, これまでのデータに基づいて,この巨大地震は十勝沖と根室沖の連動型のプレート境界型地震 (M8.5)と推定されていた。今年度,最新の津波堆積物調査結果を含む北海道太平洋沿岸の11地域 での津波到達範囲・地点をデータとし,それらを全て説明できる断層モデルを新たに推定した。そ の結果,従来の断層モデルで推定された滑りに加えて,海溝軸近傍のプレート境界浅部の幅 30km の断層で,25mにも及ぶ滑りが生じていたとすればデータを説明できることが分かった。この巨大 地震の規模はM8.8 と推定された(図1)。このことは,2011年東北地方太平洋沖地震と同様に,17 世紀の北海道太平洋沖の巨大地震により,海溝近傍浅部のプレート境界が非常に大きく滑った可能 性を示す研究成果である。

東北地方太平洋沖地震については,東北地方太平洋岸の長期的な上下変動が解明されていない。 これは,今後のプレート境界滑りの予測とも関連しているため,考察が進められた。東北日本弧の 太平洋岸では,ここ数十年の短い期間で見てみると急速な沈降が観測されている。その一方で,地 質学的観点に立ち長い期間で見てみると,第四紀後期の海岸線は緩慢な隆起を示している。ここ数 十年の期間にみられる急速な沈降は,プレート境界の固着部分が滑ることで解消されるものと考え られているが,過去100年間に起こった海溝型地震では,地質学的に観測されるひずみ解放を説明 できない。この地質学的観測を説明するためには,プレート境界の深部までにわたっての固着面全 体が滑る巨大ひずみを解放する現象が存在する可能性がある(図2)。2011年東北地方太平洋沖地 震においても,浅部の固着領域のひずみを解放した現象であるが,更に深部の固着域においても余 効滑り等の滑り現象によってひずみを解放する必要があることが分かった。

東北地方太平洋沖地震発生後のプレート境界の固着状況を解明するために,GPS-音響測距結合 方式による海底地殻変動観測を継続した。海底基準点「宮城沖1」では,本震後の2011年3月28 日から2012年12月12日までの西北西方向の累積変動量は41cmとなる。2011年7月10日の余 震(M7.3)から2012年12月7日の三陸沖の地震(M7.3)までの期間でも,西向きに22cmの変動 が観測されている。「釜石沖1」でも時系列のばらつきが大きいものの西北西方向の変動が観測され ている。その他,「宮城沖2」では南向きに17cm,「釜石沖2」では北西方向に6cmの変動が検出さ れており,東北地方太平洋沖地震の震央周辺では複雑な地殻変動を示している。この観測結果は, プレート境界での余効滑りや地震性滑り域での固着の回復では説明が難しく,今後の研究が必要で ある。

2-2 地震動・津波予測のための手法開発

巨大地震の発生を精度よく予測することが難しくても,予想される巨大地震による地震動や津波 を事前に評価できれば,災害軽減のための対策を講じることができる。また,地震発生直後に,短 時間に震源特性等を推定して地震動や津波の特性を予測できれば,防災行動に役立てることができ る。

地震が発生した際にマグニチュード(M)を迅速に推定することは,強震動や津波の予測において 非常に重要な課題である。巨大地震のMの即時推定と津波予測の高度化に向け,日本列島の震度の 広がりから震源域の広がりを判断する方法や,周期数百秒以上の長周期地震動成分の振幅を用いた Mの推定の実用性の検討が進められた。その結果,周期100秒までの様々な周期帯の地震波形の最 大振幅からMを推定できるように手法が改良され,2011年東北地方太平洋沖地震や2010年チリ地 震に適用したところ,地震発生後数分以内で一定の値が得られることが確認された。また,グリッ ドサーチを用いてモーメントテンソル解を自動解析する手法が開発され,気象庁の地震監視業務に 反映された。

津波即時予測高度化のために,GNSS による広域の地震時変位データから即時的に推定された震源 断層モデルを津波波源の初期モデルとして採用し,沖合津波観測データを基に断層モデルと沿岸の 津波予測を逐次更新する手法の開発を進めた。この手法の性能を調べるため,東北地方太平洋沖地 震を対象として,仮想的な観測津波波形を用いた津波予測実験を行った。予測実験では,GNSS 陸上 観測点,ケーブル式海底水圧計,GPS 波浪計の実際に観測されたデータを用いた。東北地方の太平洋 岸に大津波が到達する前までのデータにこの手法を適用して,その後の大津波を精度よく予測する ことができた(図3)。

津波による被害を軽減するためには津波浸水域の即時予測が有効と考えられるが,津波浸水域を 精度よく予測するためには10m以下の細かい格子間隔で津波遡上数値計算を実施する必要があり, 地震が発生してから津波数値計算を行っていては津波到達までには間に合わない。断層モデルの即 時推定と事前計算に基づく津波遡上のデータベースを組み合わせることにより,津波浸水を即時予 測する手法を開発した。巨大地震の発生後,地震波データ等を用いて断層モデルを即時推定し,粗 い格子間隔で津波伝播の計算を行う。これに加えて,あらかじめ計算しておいた津波浸水のデータ ベースを検索することで,短時間で津波の浸水予測が可能となった。この手法を用いて,釧路市で の津波浸水域予測の検証実験を実施した結果,良好に予測できることが明示された(図4)。

海底下で発生する巨大地震の震源断層モデルを短時間で精度よく推定したり,地震動や津波の即 時予測の精度を向上させるためには,海底における観測は極めて有効である。紀伊半島沖の海底ケ ーブル観測データを用いて,地震動や津波の即時予測高度化のための研究を進めるとともに,津波 の早期検知に有効な海底圧力計の開発研究を進めた。また,北海道から房総沖に至る日本海溝周辺 において地震・津波観測網を整備するために,海洋調査を実施し,観測点配置とケーブルルートを 決定した。 3.平成24年度の成果の概要

3 - 1 . 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

地震現象と火山噴火現象の理解を深めるとともに,それらの予測精度の向上を目指し,日本列島 全域に高密度な地震・地殻変動等の観測網,及び全国の主な火山に地震・地殻変動・重力等の火山 活動観測網が整備されてきた。これらの観測網を着実に維持・更新し,得られたデータを活用した 地震活動・地殻変動及び火山活動のモニタリングが進められた。さらに,諸観測網の高密度化及び 多項目化といった整備・強化,新たな観測・解析手法の導入,観測データの準実時間での処理シス テムの開発と運用といったモニタリングシステムの高度化を図る研究が進められた。各種の観測に よって得られた成果は,随時,地震調査委員会や地震予知連絡会・火山噴火予知連絡会などに提供 され,会報にまとめられているほか,各機関などのウェブで公開した。

・日本列島域

巨大地震に対応できるように,地震のモーメントテンソル解を長周期地震波を用いて完全自動で 決定する手法の改良を進めた。また,気象庁等の震源情報を利用して,GEONETによる1秒ごとの地 殻変動データを用いて地震発生後10分以内にモーメントマグニチュード(Mw)を推定することがで きることを確認した。

・地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

東北地方太平洋沖地震の本震破壊域の最北部にあたる岩手沖の海域で海底地震計を用いた余震 観測を実施し,震源決定を行った。東北地方太平洋沖地震の本震・余震時の破壊域と比較すると, 本震・余震時に滑りが大きかった領域で余震活動が低いことが明らかとなった。高密度の首都圏地 震観測網(MeSO-net)で得られたデータを解析することにより,千葉県中部下のフィリピン海プレー ト下面が太平洋プレートと接する場所は,顕著な減衰域であり高 Vp/Vs(P 波速度/S 波速度)領域 であることが分かった。阿蘇火山中岳火口周辺において比抵抗モニタリングを実施した結果,2011 年4月~7月の地下 200~300 m における比抵抗変化は,小噴火に先立つ深部からの火山ガス供給の 増加と小規模噴火発生後のガス供給の減少によるものと推察された

・東海・東南海・南海地域

東北地方太平洋沖地震後の地殻変動は地震発生時の地殻変動と比較して南北での変動量の差が 小さかった。これは,本震の断層運動による地震時の地殻変動よりも,地震後に余効滑りや粘性緩 和を起こしている領域の方が広いことによると考えられる。また,東北地方太平洋沖地震後の地殻 変動により,静岡県北部から長野県にかけて面積ひずみ増加,静岡県南部地域では面積ひずみ減少 がみられた。これは東北地方太平洋沖地震の余効変動や粘性緩和によって説明できる。

(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

地震発生予測システムの構築を目指して,地震発生とその準備過程の物理的理解に基づく地殻活 動予測シミュレーションによる予測を実現するための研究と,地震活動の統計モデル・物理モデル に基づく地震活動予測の高度化のための研究を推進している。これらの目的のために,地殻活動予 測シミュレーションモデルの開発と高度化,観測データをシミュレーションに反映するためのデー 夕同化手法の開発,地震活動予測手法の開発と高度化を行った。

(2-1) 地震発生予測システム

・地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

巨大地震の発生が懸念される南海トラフを対象として,近年の地震波構造探査等によって明らか になった沈み込みプレート境界の形状や物性値の詳細な分布を利用してシミュレーション研究を 実施した。プレート境界浅部の滑り挙動の摩擦パラメータに対する依存性を調べたところ,ある値 を境としてプレート境界浅部の挙動が大きく変化することが分かった。また,南海トラフで発生す る巨大地震と内陸部の地震活動との相互作用をシミュレーションにより調べた。その結果,内陸部 では,南海トラフ巨大地震の発生前に逆断層型地震が,発生後に横ずれ型地震が多くなること,逆 に,内陸部で大地震が発生したことによる応力擾乱(じょうらん)がプレート境界地震の発生に影 響を与える可能性が示された。

巨大地震の発生サイクルを再現するため,大規模計算を効率よく行う手法の改良を行った。また,現実に即したシミュレーションを行うため,観測データを用いてシミュレーションに必要な物 理量を推定する手法や,逐次的なデータ解析により,シミュレーションを現実の変化に追従させる データ同化手法の開発を進め,数値実験を行った。

・地殻活動予測シミュレーションの高度化

巨大地震発生時の大きな滑りを説明するメカニズムとして提案されている,地震時の摩擦発熱に よる間隙流体圧の上昇の影響を考慮したシミュレーションを行った。その結果,この効果が働く領 域の深さや間隙流体拡散係数の大きさが,地震時の滑りや応力降下量,地震発生間隔に影響を与え ることを示した。また,浅部に大規模なアスペリティを設定し,摩擦発熱による間隙流体圧の上昇 の影響を考慮した東北地方太平洋沖地震を対象とした三次元モデルを構築し数値シミュレーショ ンを行ったところ,M7クラスとM9クラスの地震を含む複雑なサイクルが再現できることが分かっ た(図5)。さらに,断層に沿った流体の移動を考慮した理論に基づくシミュレーションで,ゆっく り滑り,及びゆっくり滑りと同期し逆方向に移動する微動源を再現した。

・地震活動評価に基づく地震発生予測

将来の地震活動を統計モデル・物理モデルに基づいて予測する手法を統一的に比較・検証するために,地震活動予測に関する国際研究プロジェクト(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability:CSEP)と連携し,検証に用いるデータベース等の共通基盤の整備,地震発生予測手法の開発及び異なる予測手法間の比較実験を行った。日本周辺の地震活動は,局所的な活動が発生しやすいことから,地震の空間分布予測性能を評価する手法を新たに開発し,評価指標として役立つことを確認した。

(2-2)火山噴火予測システム

噴火の時期や場所についての予測は,十分に観測体制が整備されていればある程度可能な状況で ある。しかし,一旦開始した噴火の規模・様式・推移を予測することは,現在の火山学的知識では まだ不十分である。そこで,実際の噴火を予測することを目指し,過去の噴火履歴を基に将来発生 する可能性のある噴火事象をできる限り網羅し,これまで培ってきた火山学的な知見を総動員しな がら,ある程度の確度を付した噴火事象系統図(イベントツリー),すなわち,噴火シナリオの作 成を進めた。

・噴火シナリオの作成

本年度はより爆発的噴火を起す可能性のある流紋岩 ~ デイサイト火山の例として有珠山を対象 とした。有珠山では,7~8千年前の山体崩壊の後,1663年から噴火活動が発生し合計8回の噴火 が起きている。それぞれの噴火は,古記録や地質調査結果による噴火履歴に関する十分な量のデー タがそろい,かつ,最近の4噴火については地震活動や地殻変動観測を中心とした観測データがあ る。これらのデータから,有珠山の噴火は約30年+/-4年の間隔で発生すること,噴火の規模と頻 度には良い負の相関があること,山頂噴火と山腹噴火で噴火の規模や推移に明瞭な違いがあること が明らかとなったこれらの結果を基に,確度を付した有珠山の噴火シナリオを作成した(図6)。

#### ・噴火シナリオに基づく噴火予測

これまでに霧島山と桜島について噴火シナリオを試作し,これに基づいて推移予測を試みた。しかし,噴火事象の分岐に対する考え方が未成熟であったため,十分な推移予測はできなかった。本年度は,山頂噴火と山腹噴火で地震の発生パターンに違いがある有珠山について,観測データに基づいた噴火事象分岐が可能か検討した(図7)。山頂噴火では地震活動が加速して噴火に至る。一方,山腹噴火では地震活動が一旦ピークを過ぎてから噴火が起きる。これは,ゆっくり上昇したマグマが一旦,地下 3~4km の深度で浮力を失い,地震を伴って横移動し,その後,遅延発泡して,柔らかい地層中を上昇・噴火したと理解できる。このことは,有珠山では,地震活動の様式やマグマ上昇速度をもとに山頂噴火と山腹噴火の分岐の判断ができることを示唆している。

(3) 地震・火山現象に関するデータベースの構築

地殻活動予測シミュレーションモデルの開発のためには,その基礎となるデータが必須である。 地震現象や火山現象に関する予測のために必要な「基礎データベース」を構築するとともに,それ らに関する情報の統合化を図り,地殻活動予測シミュレーションモデルの構築に資するための「統 合データベース」の構築を進めた。

・地震・火山現象の基礎データベース

高感度地震観測網,広帯域地震観測網,強震観測網等による地震波形データベース,全国の地震 カタログ,更には GPS 観測データや潮位観測データのデータベース等の基礎データ群を利用した研 究により,東北地方太平洋沖地震以降の地殻活動の理解が進展した。全国ひずみ・傾斜データの流 通と一元化の作業が進められると同時に,これらのデータを使用して,巨大地震の発生時に即時に 地震の規模を推定する手法の開発も開始した。

・地震・火山現象に関する情報の統合化

諏訪之瀬島火山と桜島火山の火山地質図を完成させるなど,将来噴火の可能性の高い活動的な火山について,火山地質図の整備や,噴火シナリオの作成・高度化等の作業を行った。南海トラフや 西南日本内陸等を初めとする各地を対象とした地殻活動シミュレーションや強震動予測シミュレ ーション等に資するため,既存研究成果の数値化を行い,日本列島の地殻構造データベースのプロ トタイプの構築を進めた。

3-2.地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(1)日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

日本で地震や火山噴火が発生するのは,日本列島がプレート沈み込み帯に位置しているためであ るが,プレートの沈み込みによって地震・火山噴火が生じる機構は完全には解明されていない。日 本列島及びその周辺域で,長期的なプレート運動とそれに伴う応力場を明らかにし,上部マントル における水の供給・輸送過程とマグマの生成・上昇機構を明らかにする必要がある。さらに,これ らの流体と地震・火山噴火発生との関係を解明することが重要である。そのためには,マグマ等の 地殻流体の分布を含む広域の地殻・上部マントル構造を明らかにするとともに,地震活動と火山活 動の相互作用に関する研究を進めた。さらに,地震現象の予測精度向上に不可欠な地震発生サイク ルに関する理解を深めるために,アスペリティやセグメントの破壊様式についての過去の活動履歴 を明らかにすると同時に,長期的な内陸の地殻ひずみの時空間分布を調べた。

・列島及び周辺域のプレート運動,広域応力場

地震波形のインバージョン解析や地震前後の発震機構の変化等から,2011 年東北地方太平洋沖地 震では、プレート境界面上に蓄えられたほとんど全てのひずみが解放されたと考えられる。応力降 下量の見積りなどから絶対応力レベルを推定すると、海溝から震源付近までの領域でせん断応力は 約 10MPa と求まった。プレート境界面上でほぼ全てのひずみを解放するには、摩擦発熱による間隙 流体圧の上昇など、摩擦力を極端に下げる何らかのメカニズムが必要であることが分かった。

・上部マントルとマグマの発生場

火山岩及び地下水・温泉・熱水系の調査・サンプリングに基づき,テクトニックな背景とスラブ 流体の起源の関係性を明らかにした。特に中部地方に産出する火山岩について,流体量の制約と, 数値シミュレーションを合わせて,太平洋プレートとフィリピン海プレートの二重のスラブ沈み込 み帯でのマグマ生成過程の定量的モデル化に成功した。

・広域の地殻構造と地殻流体の分布

濃尾地震断層周辺域について比抵抗構造を求めた結果,断層域直下の中部地殻は高比抵抗域と推定された。跡津川断層周辺域での構造研究は,地震発生域は高地震波速度・高比抵抗であることを示しており,流体が存在することは考えにくい。このことから,濃尾地震の断層が伸びた南南東方向に断層運動の障壁となる流体存在域がなかったことが,濃尾地震が M8 クラスの大地震になった要因であると推察された。

・地震活動と火山活動の相互作用

九州全域において,地下深部の構造の境界面を容易に検出できる変換波を利用した地震波速度構 造解析(レシーバ関数解析)を行ったところ,布田川・日奈久断層に平行な帯状の領域でモホ面が 周囲よりも 5-10km 浅いことが分かった(図 8)。この帯状の領域は,一方の境界が布田川・日奈久断 層であり,別府 島原地溝がこの領域内に存在する。今回の解析結果は,重力から推定されたモホ 面深度の結果と調和的である。この帯状の領域の直下では,マントルの上昇流が存在する可能性が ある。ただし,レシーバ関数解析によるモホ面深度の特徴は,別府 島原地溝帯の東部(別府地域) における地震発生層の厚さや応力・ひずみ分布とは調和的であるが,地溝帯西部とは必ずしも整合 的ではないように見えるため,今後更なる検討と総合モデルの構築が必要である。

#### ・地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

糸魚川 - 静岡構造線活断層系中部の塩尻峠周辺には,北西 - 南東走向の左横ずれ断層が複数並走 する。塩尻峠の南側に位置する岡谷市西山地点においてトレンチ調査を実施した。現在,年代測定 を実施中であり,その結果に基づき活動時期と回数を推定し,本断層と並走又は延長上に位置する 他の活断層で報告されている活動時期との関係について検討する。

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1)地震準備過程

地震発生の準備過程を解明するために,地殻とマントルで応力が特定の領域に集中し地震発生に 至る過程を明らかにする。プレート境界地震に関しては,プレート境界の固着状態の把握やプレー ト境界におけるゆっくり滑りの時空間的推移,プレート境界近傍の地震発生場における応力状態な どを解明する。内陸地震に関しては,広域の応力によって非弾性的な変形が進行して,特定の震源 断層に応力が集中する過程を,新潟-神戸ひずみ集中帯や近年発生した内陸大地震発生域などにお ける詳細な媒質構造不均質性及び応力場,ひずみ速度場などの特性を明らかにして定量的にモデル 化する。また,スラブ内地震については,スラブ内の震源分布や地震波速度構造を詳細に推定し, スラブ内に取り込まれた流体の分布・挙動と地震発生機構の解明を図る。

・アスペリティの実体及び非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生前のプレート間非地震性滑りについて,小繰り返し地震によ る解析を行った結果,本震時の大滑り域を含む領域では,その南北の隣接領域に比べて,プレート 境界のより深部(50-60km 付近)まで小さい滑り速度を示していたことが分かった。南西諸島沖に おいても同様の解析を行い,1911 年の喜界島近海の巨大地震(M8.0)の滑りが大きかった領域では プレート境界の深部まで非地震性滑り速度の小さい領域が存在することが分かった。これらの巨大 地震の発生域では,周囲よりも深くまでプレート境界が固着していた可能性がある。

2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域直上に設置された海底圧力計及び陸上沿岸部の体積ひず み計で,2011 年1月下旬から非地震性の地殻変動が観測された(図9)。これらの地殻変動が沿岸 部の GNSS 観測点では観測されなかったことも考慮し,地震モーメント 3.6×10<sup>19</sup>Nm (Mw7.0)のゆ っくり滑り(100km×35km の矩形断層上での40cm の逆断層滑り)が発生していたことが推定され た。このゆっくり滑りは少なくとも3月9日の最大前震直前まで継続していたように見える。また, 観測記録の変化から,ゆっくり滑りの断層の上端部は,2月下旬から3月9日の地震発生直前にか けて,海溝軸の方向に拡大していた可能性がある。また,このゆっくり滑りの発生域では,2月中 旬頃からM5 程度の地震が頻発した。

GNSS 連続観測により,四国,紀伊半島,東海地方に加えて,日向灘から種子島にかけての領域と 相模トラフ沿いにおいて,短期的なゆっくり滑りの発生を示唆する地殻変動を多数検出した。さら に,それらの断層モデルの推定により,短期的なゆっくり滑りの規模,繰り返し周期,発生する深 さの地域的な特徴を明らかにした。 東北地方太平洋沖において,浅部超低周波地震は岩手沖,宮城沖,福島・茨城沖の三つの領域で クラスター状に発生していたが,2011 年東北地方太平洋沖地震後に岩手沖及び福島・茨城沖の活動 が活発化したのに対し,宮城沖については地震後に活動が検出されていないことが分かった。千島 海溝 日本海溝会合部付近においては,1994 年三陸はるか沖地震の直前・直後に目立った超低周波 地震活動はなかったこと,その後,2003 年十勝沖地震発生までの1996~2002 年の期間には約10.5 か月間隔で超低周波地震が発生していたことが明らかとなった。この期間における超低周波地震活 動の多くは北東方向に移動し,逆方向の移動が卓越した2003 年十勝沖地震後の活動とは対照的で ある。

北海道太平洋岸~沖縄の8地域において,絶対重力の連続測定を行っている。琉球弧の西表島では,約半年ごとに発生する2回のゆっくり滑りに伴って,約4マイクロガルの減少を観測した。これはゆっくり滑りの発生時に高圧間隙水が拡散した可能性を示す。

・ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

濃尾地震震源域の総合集中観測により地震波トモグラフィー解析を行い,濃尾地震震源域及びその北西側の下部地殻はP波,S波とも周囲に比べ低速度であること,その中でも特に,濃尾地震の際に滑り量が大きかった温見断層直下の下部地殻の速度が遅いことなどを明らかにした。人工地震実験データの解析から,反射波群の上面(28-32km)と下面(37-41km)の深さは根尾谷断層帯を境に北東側の方が深いことが明らかになった。これは,根尾谷断層帯が下部地殻にまで及んでいる可能性を示す。比抵抗構造の3次元解析からは,濃尾地震断層帯南部(深さ4km程度までの浅部)に沿った低比抵抗帯の存在,福井-岐阜県境域上部マントルに東西に横たわる低比抵抗域の存在が推定された。後者は,深さ100km以深にまで達しており,その生成には太平洋プレートからの脱水が 関与している可能性がある。

2008 年岩手・宮城内陸地震の詳細な前震・本震・余震分布と震源域周辺の速度構造を推定し,本 震断層面(逆断層)の上盤側は低速度,下盤側は高速度で過去の正断層運動を示唆すること,震源 域の深部には低速度異常域が分布し,その震源域走向方向の広がりは本震震源断層の広がりに対応 することなどを明らかにした。地殻下部の弱い領域(弱体)の広がりが地殻上部における震源域の 広がりを規定していた可能性がある。

2007年能登半島地震の震源域について,断層の深部延長の滑りによるモデル化を行い,余震の発 震機構解に調和的な深部で逆断層的,浅部で横ずれ型の応力場を再現できることが分かった。また, 能登半島地震の震源域では,下部地殻内の低速度・低比抵抗領域から推定される弱体は震源域を越 えて続いていないと推定されるのに対して,跡津川断層帯においては,下部地殻内の低速度・低比 抵抗領域は大規模であり,深部延長だけでなくその両端部を含めて弱体となっており,新潟-神戸 ひずみ集中帯の走向方向の弱体のつながりが,ひずみ集中帯の形成に関係している可能性が明らか になった。島根県東部の定常的な地震活動帯において応力逆解析を行い,地震帯中央部での圧縮応 力がかかる方向が変化し,それが地震帯深部延長における滑りで説明可能であることを示した。日 本海東縁ひずみ集中帯で観測される顕著な短縮変形と長波長の沈降について,表層を持つ上部地殻 (弾性層)と下部地殻・マントル(粘弾性層)を仮定した運動学的なモデルにより再現できること が分かった。また,東北地方太平洋沖地震時に越後平野周辺において観測された,周辺より大きい 東西伸張ひずみについては,この地域の地盤構造モデルに基づく地殻不均質構造を利用して変形の シミュレーションを行い,その地殻変動の特徴を再現できることを示した。 ・スラブ内地震の発生機構

東北地方において,スラブ内地震で観測される太平洋プレート上面での PS 変換波を用いて,海 洋性地殻のP波速度構造を推定した。その結果,P波速度は火山フロント下を境に大きく変化する こと,深さ70-90kmの範囲では岩石学的モデルや室内実験から期待される速度よりも10%程度遅く, 含水鉱物に加えて多量の水が存在する可能性が示された。また,海洋性地殻内で地震活動が活発な 上面地震帯はこの低速度領域と良い対応を示すことから,海洋性地殻内で発生する地震は,含水鉱 物の脱水によって生じた高間隙圧水に起因するというモデルが支持される。

新潟県新発田市付近の深さ約155kmで発生している稍(やや)深発地震について波形解析を行い, これらは太平洋スラブの地殻内に発生する複数のクラスター活動であること,正断層地震のクラス ターは逆断層地震のクラスターより約1km浅部で発生していることなどを明らかにした。近接する クラスター間で応力場が急変していることは,海洋性地殻が高圧下で相転移する際の体積減少に伴い,浅部に引張場,深部に圧縮場を形成すると考えることにより説明可能である。

(2-2)火山噴火準備過程

火山噴火予知研究の目標は,噴火の時期,場所,規模,様式及び推移を予測することである。現 状では,研究が進んでいる幾つかの火山において,観測と経験則により異常の原因が推定できる段 階になっている。これを,現象を支配する物理・化学法則を明らかにし,それに基づいたモデルと 観測結果を合わせて将来の予測ができる段階に引き上げることを目指している。本研究項目では, 噴火に至るまでの現象を理解するため,マグマ上昇・蓄積過程の解明と,地質学的研究による噴火 履歴,及びマグマの発達過程の解明を2本の柱として研究を推進している。

・マグマ上昇・蓄積過程

これまでの研究により,火道が開口系であるか非開口系であるかにより,マグマ上昇・蓄積過程 に対応する地殻変動の様式には多様性があることが示された。非開口系の場合にはマグマの蓄積が そのまま地殻変動に現れる一方,開口系の場合には火山ガスやマグマの放出により地殻変動の変化 量が小さく,明瞭でない場合が多い。

開口系であると考えられている桜島では,長期的なマグマ貫入と蓄積による地殻変動の空間的な パターンが時期により変化していることが明らかになった。桜島の地殻変動を励起する二つの圧力 源は,姶良カルデラ下と桜島の中央火口丘下にある。GNSS 観測から,後者は,2009年10月~2010 年3月の変動では球状圧力源で近似できる一方,2011年11月~2012年3月の変動は開口割れ目で モデル化する方が妥当であることが示された(図10)。また,噴火に前駆する圧力源の体積変化量 とその変化速度が,噴火の規模を判断するための指標となる可能性を示す観測データが得られた。 例えば2012年7月24日の噴煙高度5000m以上,30万トンの火山灰を放出した南岳からの爆発は, その21時間前から捉えられた隆起・膨張を説明する圧力源の体積増加は1×10<sup>5m3</sup>であった。これ は,昭和火口からの爆発に前駆する体積変化量の10<sup>3</sup>~10<sup>4m3</sup>よりも1桁以上大きかった。このこと は,地殻変動観測が噴火規模の予測に役立つ可能性を示している。

#### ・噴火履歴とマグマ発達過程

桜島の噴火活動は 2009 年から活発化し,それと同時に,これまで低調であったマグマの供給率 が桜島の過去 100 年間の活動の平均的なレベルまで回復した。また,それに前駆し,温泉ガスに含 まれる水素,二酸化炭素が急激に増加し,噴出物の中の玄武岩質マグマの成分が増加した。さらに, 火山灰に付着する塩素/硫黄の分子比,及び亜硫酸ガスの放出量は長期的に増加傾向にある。これ らは,高温のマグマが浅部まで上昇し,しかもその量が増加していることを意味しており,噴火活 動が継続したことによる火道の拡大を反映していると考えられる。

幾つかの火山で,噴火史及び噴火推移と物質科学解析によるマグマ系変遷の解明が進んだ。北海 道駒ケ岳のマグマ溜まりは,二つの異なったマグマから成り,固まりかけたマグマ溜まりに新たな 高温マグマが地下から入って来たと考えられる。現在,この高温マグマは,ほぼ噴火により噴出し つくし,マグマ溜まり全体も更に温度が下がり,固結が進んでいると考えられる。このことから, 北海道駒ケ岳では噴火能力が弱まっていると判断できる。那須岳においては,最新のマグマ噴火で ある 1408~1410 年噴火について詳細な噴火履歴を明らかにし,ブルカノ式噴火活動中にマグマの 組成が変化したことなどが明らかとなった。これらの結果は,マグマの成分の分析により,次のマ グマ活動の様式が推定できる可能性を示す。

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

#### (3-1)地震発生先行過程

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,地震に先行する地殻 等における諸過程を地震発生先行過程と位置付けて研究し,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のか評価することが重要である。

#### ・観測データによる先行現象の評価

大地震によるクーロン破壊関数の静的変化( CFF)で,周辺の地震活動の変化がどの程度予想で きるかを厳密に検討するために,大地震の前と後に実際に起こった地震の発震機構を調べて,それ が CFFと調和的であるかを検討した。2011年東北地方太平洋沖地震後に関東地方で発生した地震 について調べた結果,多くは東北沖地震による CFFで説明が可能であるが,動的応力変化,流体 圧変化,余効(よこう)滑りなどの影響を考慮しなければ説明できないものも存在することが分か った。東北地方のプレート境界地震の滑りベクトルを調査し,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滑り方向が回転していた可能性を示す 結果を得た。

・先行現象の発生機構の解明

これまでの伊豆諸島での地電位観測で,地震の発生場所によって地電位変動の極性が決まっていることなどが見つかっている。地殻内の電気伝導度の不均質を仮定して,地電位変動の数値計算を行った結果,ある程度観測事実を説明できる結果を得た。今後は解析から推定された地下の電気伝導度の不均質構造が実際に存在するかどうかを調査していく必要がある。

大きなアスペリティの中に,部分的に弱い小アスペリティがある場合の大地震の準備過程につい て調べた。小アスペリティが小さいときは,ほとんどの大地震が大アスペリティ自体の震源核が大 きく成長するという準備過程を経てから発生する。小アスペリティが大きくなるにつれて,大アスペリティ自体の震源核が成長するより先に小アスペリティで地震が起こり,それが大アスペリティの破壊を励起して全体が壊れてしまうケースが増える (図11)。

#### (3-2)地震破壊過程と強震動

地震や津波の観測データの解析に基づき,大地震の震源破壊過程を詳しく調べることは,大地震 の発生過程と強震動の生成過程の理解を深め,将来の大地震の強震動と津波の発生予測の高度化に つながる。また,断層面上の大滑り域や強震動生成域を知ることは,地震ごとの繰り返し性を考え ると地震発生予測に向けた重要な基礎データとなる。さらに,大地震発生直後に観測データを即時 解析し,震源域の広がりと破壊過程を正確に求めることにより,強震動の面的広がりや沿岸の津波 到達・浸水の予測が可能になる。

#### ・断層面の不均質性と動的破壊過程

2011年東北地方太平洋沖地震の本震から30分後に茨城県沖においてM7.6の余震が発生した。この 地震の断層面上の滑り分布を,強震計の波形とGNSSデータを用いて調べたところ,この断層面の大 きな滑りの領域は震源から南東方向に約20km の浅い領域に位置し,その大きさはほぼ60km×30km であることが分かった。この領域は沈み込むフィリピン海プレートの北東限と沈み込む海山に囲ま れた場所に位置する (図12)。この地震の破壊の伝播がフィリピン海プレートと海山によって止め られたように見え,大地震の発生場所と規模(震源域の広がり)を海底地形やプレート構造などの 地学的要因からと関係する可能性があることが分かった。

・強震動・津波の生成過程

津波の即時予測のための研究では,既存のGPS波浪計や海底圧力計に加え,海溝軸を越えた沖合 に津波観測点を数点増強するだけで,波源域の推定と,北海道~房総半島沖の沿岸津波到達予測の 精度が大きく向上することが示された。現在の沿岸津波観測点は大地震が発生する海溝(トラフ) 側から見て一方向にしかないため,波源の広がりを正しく推定するためには震源を取り囲むような 観測網の増強が有効である。

詳細な震源モデルを推定するためには,近地強震計記録の短周期成分を用いた解析が必要になり, 不均質な地下構造の影響を考慮する必要がある。三次元的に不均質な地殻・マントル構造とプレー ト構造での波動伝播を考慮したモデルに基づき,東北地方太平洋沖地震と1995年兵庫県南部地震の 震源過程の詳細な再解析が行われた。

(3-3)火山噴火過程

噴火規模や様式,噴火推移を支配する要因を理解するためには,火道浅部におけるマグマの挙動 や火山体構造の状態を把握し,それらと噴火規模や様式との関係を明らかにすることが必要である。 このような観点から,本計画では,繰り返し発生する噴火を対象として集中的な地球物理学・物質 化学的観測を行い,噴火機構のモデル化を図る。

・噴火機構の解明とモデル化

諏訪之瀬島の臨時地震観測点等の波形データ解析から,火山爆発に伴い励起される地震(爆発地 震)の発生から約1秒間は,火口底からの火山物質の噴出に先行して火道の収縮現象が起きている ことが示唆された。この収縮量と爆発地震の最大振幅には正の相関がある。この結果は,爆発直前 に火道浅部で起きる収縮現象が噴火規模に影響を及ぼしていることを示している。また,観測を開 始したインドネシアのスラウェシ島北部に位置するロコン(Lokon)山においても,爆発に伴い励 起される地震波は,巨視的には桜島や諏訪之瀬島のブルカノ式噴火に伴って観測される地震波の特 徴と類似していた。これらは,ブルカノ式の爆発は,地震に共通の物理過程が内在することを示し ている。霧島山新燃岳の2011年噴火活動においては,火道深部から供給される火山ガスが強度の高 いマグマのある火道浅部で停留し,この高強度のマグマが破壊することで爆発が発生すると推察さ れた。また,火道深部からの火山ガスの供給は時間経過と共に指数関数的に減少していくことが明 らかになった。これらの成果により,ブルカノ式噴火の発生理解が深まるだけでなく,先行現象と 噴火発生や規模との幾つかの経験的関係が明らかになった。

#### ・噴火の推移と多様性の把握

火山ガス観測による火道内揮発性成分挙動の理解も深まった。浅間山では,2007-2010年の火山 ガス観測から,2009年の微噴火前後で地震を励起しながら地表に放出された火山ガスの割合が変化 し,火山地下の脱ガス機構の変化が起きたことが示唆された。また,火山ガス(二酸化硫黄)放出 率の自動連続測定により,ほぼ2-3 kg/sの放出率で火山ガスが放出されていること,時折短時間に 10kg/s程度の放出率が観測されることが分かった。短時間の高い放出は,地震発生に対応するもの もある一方で,無関係なものもあることが分かった。桜島における約30回の爆発に伴う二酸化硫黄 放出率変動観測からは,必ずしも噴火直前に二酸化硫黄放出率が減少するわけないことが明らかに なった。これらの結果は,地震や噴火活動と相関のある火山ガス活動の変化が起きていることを示 す一方で,多様性があることを示している。

#### (4) 地震発生・火山噴火の素過程

より信頼性の高い地震発生モデルを構築するために必要な,地震発生の各過程を支配する破壊・ 摩擦構成則の素過程を理解するための実験的・理論的研究を行った。時空間的スケールが数桁以上 異なる自然地震へ室内実験の知見を適用することの妥当性を検討するために,摩擦・破壊現象の規 模依存性を明らかにするための実験・観測を行った。

破壊エネルギーを支配する主要因である臨界滑り量(Dc)は,従来の低速滑り実験では1mm程度 以下と見積もられてきたが,最近低速滑りでも数十cmという長いDcが生じ得ることを発見されて いる。厚い粉体層をはさんだ高速滑り実験を行ったところ,10mクラスの長大なDcをもつ摩擦の緩 和を見出した(図13)。この緩和の原因は粒子自体の物性変化ではなく,多体粒子系の構造変化が 原因であることと考えられる。

回転式中-高速摩擦試験機を用いて,中米コスタリカ沖のこれから沈み込む地点で採取された堆 積物について行った摩擦実験の結果,高速滑りでの摩擦係数が低速滑り時の半分以下に低下すると いう著しい速度弱化の性質を示すことが明らかになった。

南アフリカ鉱山で観測した薄い面状のクラスターを示す AE に対して,特に高精度の震源決定を 行ったところ,AE クラスターの厚さは薄いものでは 50cm 程度と,非常に密集した面状分布を示す ことが分かった。面状クラスターを構成する AE の多くは,通常の鉱山地震観測網では検知できな い非常に小さい破壊イベントである。このような AE についても,サイズ分布は地震と同様にべき 乗則に従うことが確認された。

#### ・マグマの分化・発泡・脱ガス過程

地震と空振のデータに含まれる様々な情報を適切に整理し解析する手法を開発し,その手法を用 いて霧島山新燃岳において2011年1月26日から27日に起こった3回の噴火を調べた。その結果, 3回の噴火で火道内過程に違いがあることが分かり,これまでの室内実験の結果と併せることにより,観測データから噴出率の推移予測できる可能性が示された。

3-3.新たな観測技術の開発

(1)海底における観測技術の開発と高度化

東北地方太平洋沖地震の発生で,プレート間の固着状態,特に,海溝付近での状態把握が,プレート境界で発生する巨大地震発生の評価に,極めて重要であることが明らかになった。発生が懸念 される南海トラフ地震を考慮すると,水深の大きい海溝付近での海底観測装置の開発は,喫緊の課 題である。

海中音波を用いて海底に設置した基準点間の距離の伸縮を計測する観測装置では,これまで水深 2000~3000mで基準点間2km程度までしか測定することしかできなかったが,測距に用いる発信音波 の波形,返信音波の強度,記録装置の改良を行い,水深6000mで基準点間3kmまで測定可能な大深度・ 長基線対応型の海底間音響測距装置の開発を行った。実用化を目指して,長期連続試験を実施し, その有効性を検証する。

海底の上下変動を検知する海底圧力計は,地殻変動の観測だけでなく,津波を早期に検知できる 重要な装置であるが,これまで深海での設置は行われていなかった。深海での有効性を検証するた め,水深6900mの海底で試験観測を行った。深海ではセンサーのドリフトが大きくなり,今後,対 策・補正の課題が明らかになった。

水深6000mを超える深海での地震観測を可能にするチタン球を用いた超深海用長期型海底地震計 の開発では,過去の試験的観測での結果を考慮して,耐圧性能を中心に構造を根本的に見直した。 2012年11月~2013年2月に試験観測を行い良好な結果を得た。また,ガラス球を用いた海底地震計 についても,水深6000mを超える超深海底に設置可能なものを開発し,試験観測を行った。

以上のように,海溝付近での大水深での観測を可能にする観測装置の開発が,着実に進められている(図14)。

(2) 宇宙技術等の利用の高度化

リアルタイムGPS 時系列を用いた地震時変位の自動検知及び地震時変位量推定アルゴリズムの 改良を行い,地震発生から60秒以内に「地震発生」を判定できるアルゴリズムを開発した。このア ルゴリズムは大学で開発され,国土地理院において試験運用が進められているリアルタイムGPS解 析システム(プロトタイプ)に実装されている。大学の研究成果が現業部門に利用されることとな った好例の一つである。

SARによる地殻変動観測技術を向上させ,越後平野及びその周辺での,年間約5mmから1cmで進行 する地盤沈降が抽出できるようになった。東北地方太平洋沖地震に伴う東日本火山周辺の地殻変動 の検出に成功した。変動のパターンは火山周辺に楕円状に沈降するパターンが見られ,火山下に存 在する軟らかい媒質に地震に伴う伸長変動が集中したことによると考えられる。 (3) 観測技術の継続的高度化

宇宙線ミューオン透視装置とアルゴリズムの改良を進め,有珠山で山体の厚さ1500mまで密度構造を精度よく求めることができた。また,この開発により,透視限界が2~4倍程度延伸でき,応用範囲が広がった。

桜島火山に精密制御信号システム(アクロス)を設置し,7日間の観測データから,約20 km 離れた桜島の外の観測点でもアクロス信号を検出できることが確認できた。火山周辺における地殻構造の時間変化と火山活動の関係を明らかにすることを試みる。

3-4. 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進

平成 21 年度から始まった「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」では,平成 23 年に発生した東北地方太平洋沖地震のような M9 クラスの超巨大地震の発生予測の観測研究の推進が十分ではなかった。そのため観測研究計画が見直され,平成 24 年度から新たに,超巨大地震の発生機構とそれに起因する現象を解明する観測研究,及び超巨大地震やそれに起因する現象を予測するための観測研究,更にはこれらの解明と予測のための観測研究に必要な新技術の開発を行う研究が実施されることとなった。

(1) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明のための観測研究

東北地方太平洋沖地震前後に発生した地震を用いた上盤プレート内の応力場の変化から,地震時 の大滑り域が地震前に固着していたこと,地震時の滑りにより蓄積されていた応力がほぼ解放され たことが示された。また,約30年間にわたる小繰り返し地震データから,東北地方太平洋沖地震 発生前後のプレート境界の非地震性滑りの時空間発展が推定された。その結果,本震発生時に大き く滑った宮城沖では,本震発生前の平均滑り速度が他の領域に比べて小さいこと,さらに,間欠的 な滑りが頻繁に生じていたことが明らかとなった。一方,その周辺域では,本震発生前の平均滑り 速度が大きく,定常的な滑り,あるいは数年~10年にわたるM6~7クラス地震の余効滑りが見られ た(図15)。本震発生後,本震時の大滑り域では小繰り返し地震がほとんど起きていないことも分 かった。このことは,本震時の大滑り域でほぼ応力が解放されたことを示唆する。一方,本震時の 大滑り域の周辺では,小繰り返し地震の活発な活動が見られ,プレート境界面上で進行する余効滑 りによる影響と考えられる。これまで,幾つかの大地震の余効滑りに対して,滑り速度の対数に比 例してせん断応力が増大する線形関係を示すことが推定されてきたが,東北地方太平洋沖地震の余 効滑りでは,これらが非線形の関係を示し,滑り速度が大きくなるにつれて摩擦滑りの安定性が抑 制されることが示された。

東北地方太平洋沖地震後に生じた誘発地震活動の多くは,本震のプレート境界面上での滑りによるクーロン破壊関数の静的変化( CFF)でおおむね説明できるが,それに反する観測もある。これは間隙流体圧の上昇に伴う断層強度の低下が重要な役割を果たした可能性が考えられる。顕著な誘発地震活動域では明瞭な震源移動が観測されており,流体の拡散が地震発生に影響を与えている可能性がある。また,これらの誘発地震活動域の深部には地震波速度の低速度域が見られる場合が多く,流体の関与を支持する。

(2) 超巨大地震とそれに起因する現象の予測のための観測研究

東北地方太平洋沖地震後のプレート境界での固着状況を明らかにするために,太平洋沖での海底 地殻変動観測を継続した。本震時の震央周辺の宮城沖・釜石沖では複雑な変動を示すが,おおむね 西方向の地殻変動が観測された。一方,福島沖及び銚子沖では,プレート境界での余効滑りを示す プレートの沈み込み方向と逆方向の変動が検出されており,時間とともに滑り速度が減衰する様子 が捉えられた。また,南海トラフから陸域までの連続的な地殻変動プロファイルを得るために,南 海トラフの海溝軸付近に新たな海底局を設置した。

東南海地震震源域における地殻変動のリアルタイムデータを用いたデータ同化研究を推進した。 1996 年以降の西南日本で観測された上下変動データにおおむね整合するシミュレーション結果が 得られた。

(3) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明と予測のための新技術の開発

東北地方太平洋沖地震の発生時に大きな滑りが生じた日本海溝軸近傍において,海底圧力連続観 測を開始した。観測地点の水深は,従来海底圧力観測を行ってきた海域に比べてはるかに深いため (約7000m),耐圧容器・水中ケーブルは耐圧9000m相当のもの,圧力センサーはフルスケール7000m のもので観測システムを作成し,海溝軸付近に設置した。さらに,海底間音響測距装置を開発し, 水深6000mの緩やかな斜面に基線長3kmで2台を対に設置し海底間測距を試みた。

津波堆積物の検出のために,下北半島,仙台平野,北茨城,房総半島の沿岸低地において,ボー リングなどによる地層のコア採取を行い,さらに,仙台湾では海底表層の地層コア採取を実施した。 和歌山県串本町では津波石の分布の正確な把握のため,地上レーザー計測を実施した。 4.まとめ

平成21年度から5か年計画で推進されてきた「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」は, 平成23年3月11日にM9.0の東北地方太平洋沖地震が発生したことを受けて平成24年度に計画の内容 を見直し,超巨大地震やそれに起因する現象の解明や予測の研究を強化した。平成24年度は,計画 の見直しで強化された超巨大地震に関する研究を特に重視して進めた結果,これに関する新たな成 果が出始めた。

巨大~超巨大地震(以下,巨大地震)の発生を予測するためには,過去に,どこでどのような巨 大地震が発生したかを解明し,その繰り返し特性を明らかにしなければならない。そのためには, 地震学に基づく研究だけでは不十分であり,地質学や歴史学の成果を利用する必要がある。新たな 津波堆積物調査に基づき,17世紀に北海道で発生した海溝型の巨大地震の震源モデルが修正され, 東北地方太平洋沖地震と同じように海溝近くでの滑り量が大きいM8.8の規模の地震と推定された ことは,巨大地震の予測のためには重要な成果である。ほかにも,歴史記録を用いた過去の巨大地 震の解明に関する研究や津波堆積物や海底活断層の評価手法に関する研究が進められた。

巨大地震発生後に,その規模や震源域を即時に推定するなどして地震動や津波を精度よく予測す ることは,防災行動のために極めて重要である。地震波や測地データを用いて地震の規模を短時間 で推定する手法や,これと沖合津波計のデータを組み合わせること等により津波を精度よく即時推 定する手法の開発が進められ,数値実験でも良好な成績が得られている。巨大地震の発生予測は, 長期的なものも短期的なものも,かなりの不確かさをもつが,震源特性の推定ができれば,防災・ 減災に利用できる精度で地震動や津波を予測することは可能になってきている。また,これら地震 動や津波の即時予測の精度向上のためには,解析手法開発だけではなく,実時間海底観測のための 技術開発も必要である。このような研究を加速させることにより,地震研究の成果を防災・減災に 役立てることは重要である。

東北地方太平洋沖地震の解明に関する研究では,本震の震源過程の研究だけではなく,長期的な 準備過程の研究にも進展があった。小繰り返し地震や海底地殻変動の観測などから,東北地方太平 洋沖地震の震源域でのプレート境界の固着状況が空間的に一様でなかったことや,本震の大滑り域 の近くでゆっくり滑りが発生していたことなどが明らかになった。これらは,東北地方太平洋沖地 震の発生に至る過程を解明する上で重要なだけでなく,今後の巨大地震の予測の研究のためにも重 要な成果である。

火山噴火予測に関する研究では,現象の理解だけでなく,噴火発生時間,規模,様式,推移の予 測方法の構築が必要である。有珠山では,過去の事例から,山頂噴火と山腹噴火では地震活動パタ ーンに違いが見出され,噴火様式と前駆現象の経験的関係が明らかとなった。また,桜島では,比 較的規模の大きな爆発的噴火に先行した地殻変動源の規模が大きいことが明らかとなった。そのほ か,諏訪之瀬島や霧島山,浅間山などにおいて,地震や地殻変動,火山ガス観測等で捉えられる噴 火現象や火山活動の理解が進むとともに,噴火発生の予測に有用な経験則も幾つか見つかるなど, の研究成果が得られた。ただし,活動に多様性も見出されており,噴火や火山活動の観測事例を増 やすとともに,基礎的な法則の理解が必要である。

地震発生予測に関しては,物理モデルに基づくシミュレーションと各種モニタリングデータを統合したシステムを開発し,これを用いた地殻活動予測を目指している。東北地方太平洋沖地震やゆっくり滑りを対象としたシミュレーションが行われるとともに,データ同化実験が進められた。現

実的なシミュレーションを行うためには,物理モデルの開発と同時に観測データが重要である。東 北地方太平洋沖地震後の日本列島は発生前とは異なる応力状態となったと考えられる。進行してい る地殻活動現象をモニタリングし,地震や火山噴火の発生が予想される地域において,連続かつ高 密度観測の整備が急務である。観測網の拡充によってデータ量は増大し続けており,膨大なデータ を有効に活用していくには新しい発想によるデータの扱いと解析の自動化が不可欠である。

地震や火山噴火の発生を予測するためには,これらが発生する場を理解し,地震発生や火山噴火 に至る物理・化学過程を解明して,適切なモデルを構築する必要がある。日本列島及び周辺域の応 力場については,日本周辺のプレート運動とマグマ発生場や地殻流体の分布も含めた三次元不均質 構造に関する研究が進められてきた。東北地方太平洋沖地震の震源域の応力場や,地震後の応力擾 乱(じょうらん)の影響に関しても研究が進められている。東北地方太平洋沖地震後の広域の地震 活動や余効(よこう)変動は,地震発生機構や日本列島域の変形特性の解明のために重要であるの で,今後も重点的に研究を進める必要がある。地震発生や火山噴火に至る過程を適切にモデル化す るためには,それらの素過程から理解しなければならない。現実的な条件下での岩石の摩擦特性や 破壊現象の規模依存性に関する研究が進んだが,これらを観測事実の解明に利用し,現実的なモデ ル構築に利用するための研究も必要である。

一方,地震や火山噴火の発生の予測は,詳細な物理・化学過程のモデル化を経ずに,経験則に基づいて行うことも可能である。地震活動評価に基づく地震発生予測では提案されている多数のモデルの評価が進められている。噴火シナリオに基づく噴火予測では,有珠山の山頂噴火と山腹噴火の分岐判断に関して成果があった。また,地震先行現象に関しては震源核に関する理論研究等が進められた。

地震発生の予測が難しくても,地震による強震動や津波の予測が可能であれば,地震による災害 の軽減に役立てることができる。そのために,詳細な地震破壊過程の研究が進められ,地震の規模 や津波を即時予測する手法の開発が進められた。即時予測にも利用できる深海底での観測技術の開 発が進められている。これは,巨大地震発生域である海底下のプレート境界の固着状況を把握する ためにも重要な技術である。

平成 24 年度は「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」に従い,本研究計画立案当初か ら実施されている研究については順調に研究が進められ,5か年計画の4年度目としての所期の成 果が得られた。平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震により,計画の見直しが行われ, 巨大地震やそれに起因する現象の解明と予測のための研究が大幅に強化された。その結果,過去の 巨大地震の震源特性の解明が進み,観測データから地震の規模や津波等を即時に推定する手法の開 発が進められた。これらは,巨大地震による災害を軽減するために活用されるべき研究成果である。

## 地震及び火山噴火予知のための観測研究



成果の概要概念図 地震及び火山噴火予知のための観測研究平成24年度成果のまとめ

地震及び火山噴火予知のための観測研究の全体像を描き、その主要な成果を吹き出しで記述した。詳しくは吹き出しに記載 されたページと図を参照。

### 北海道太平洋沖17世紀の巨大地震の断層モデル



図1 (北海道巨大地震)最新の津波堆積物調査から明らかにされた17世紀に発生した北海道太平洋沖巨大地震(Mw8.8)の断層モデル。 黄色の〇印は津波堆積物調査地点を示す。従来の断層モデルに加えて、千島海溝近傍のプレート境界浅部において、幅30km・長さ 300kmの断層が25mにも及ぶ滑りを起こしたことが推定された。

### 長い時間スケールで見た東北地方における プレート境界の滑り域と隆起・沈降の様子



図2 (東北超巨大地震地殻変動サイクル)地震時すべりと余効すべりの空間分布と地質学的スケールから見た巨大地震間における隆起・ 沈降の様子。上図はプレート境界におけるそれぞれの滑り域の分布。地震時に実際に観測された最大上下変動は、牡鹿半島周辺での 1.2mの沈降である。

### 津波即時予測の実験



図3 (GNSS/沖合津波計による津波即時予測)上図)即時津波予測手法の概念図。下図)東北地方太平洋沖地震を対象として,仮想的な 観測津波波形を用いた津波予測実験の結果。(a)ケーブル式海底圧力計と沖合波浪計の海水位の時間変化を示す。黒線は観測データ, 赤線は最初の20分間の観測データ(緑の縦線まで)のみを用いた津波の予測波形を表す。(b)地震時の海面変動分布。赤い☆印は本 震の震央を示す。(c)予測対象点(水深100 m)における海水位の時間変化。黒線は観測データ,赤線は予測津波波形を示す。

予測

観測データ

-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10

地震時の海面変動 [m]

経過時間[分]

### リアルタイム津波浸水予測実現化への試み



図4 (津波浸水域即時予測) 左) 北海道太平洋沖巨大地震(Mw8.8)の断層モデルから計算された釧路地域における津波高。右) リアル タイム津波浸水予測による津波高の予測値。赤色の△印は予測の際に用いた仮想観測点の位置を示す。



図5 (東北地方太平洋沖地震の地震発生サイクルモデル)地震時の摩擦発熱による間隙流体圧上昇の効果を考慮した東北地方太平洋沖地 震震源域を含む領域の地震サイクルシミュレーション。左図:これまでに発生したプレート境界型地震の滑り分布を基に設定したア スペリティ(薄い水色)の分布。青色は地震時滑りが起こりにくい領域。右上図:M9クラス地震の破壊開始直後の滑り速度とせん断 応力の分布。右下図:震源域全域に破壊が達した時点における滑り速度とせん断応力の分布。アスペリティとその周辺地域の両方で 高速滑りが発生していることが分かる。

#### 有珠山の噴火事象分岐図 山体崩壊(岩屑なだれ) ~.01 軽石噴火 75 地震活動活発化 火砕流(サージ)発生 広域山体膨張 山頂噴火 マグ マ水蒸気 マグマ上昇 数日間の地震活動 Ŭ .31 急な膨張 水蒸気爆発 .99 溶岩(潜在)ドーム形成 **OE** 崩壊なし 軽石噴火 .53 山腹噴火 マグマ水蒸気 数日間の地震活動 .16 +土石流発生 .67 震源移動・強震 水蒸気爆発 噴火なし

図6 (有珠山噴火シナリオ)有珠山の噴火シナリオ(確度を付した噴火事象分岐図)。山頂噴火開始後は、火砕流(あるいは火砕サージ)の発生、溶岩ドーム形成、土石流の発生を伴う。山腹噴火についても同様であるが、溶岩ドームは潜在ドームとなる。



図7 (有珠山(山頂/山腹)噴火発生パターン)有珠山の山頂噴火と山腹噴火の違いを示す解釈図。両噴火には発生場所や規模の違いの ほかに、地震の発生パターンに違いが見られる。山腹噴火では、脱ガスによってマグマが浮力を失い、横移動後に遅延発泡し、山腹 から噴火を起す。その後、地下に潜在ドームが形成される。



図8 (九州モホ面)レシーバ関数解析から求められた九州地域のモホ面の深度分布。九州中部の東北東-西南西方向に延びる領域のモホ 面の深さが、周囲に比べて相対的に浅くなっていることが分かった。別府-島原地溝帯は、そのモホ面が浅くなる領域の中に存在す る。



図9 (東北地方太平洋沖地震前駆的slow slip) 左図:上から順に,震源域直上に設置されていた海底圧力計により捉えられたゆっくり 滑り(TJT1に対するGJT3の相対的な上下変動),金華山で観測された体積ひずみ計の記録,地震発生の時系列。マグニチュード5以 上を●で示す。右図:2011年東北地方太平洋沖地震の滑り分布,最大前震(M7.3)とマグニチュード5以上の前震(☆)の位置,及 びゆっくり滑りの発生領域(矩形(くけい))の概念図。小さい■は海底圧力計(TJT1, GJT3)の位置



図10 (桜島火山のマグマ供給系の概念図と地殻変動) 桜島火山では、マグマ供給系の複雑さを反映し、地殻変動のパターンが時期により 異なる。

### 大アスペリティの中に弱い小アスペリティがある場合の先行過程



図11 (震源核モデル)大アスペリティの中にに弱い小アスペリティがある場合の大地震の先行過程。数値シミュレーションでは地震の先 行過程には、4つのパターンが現れた。4つのパターンが現れる割合を、小アスペリティの半径と大アスペリティの臨界核半径の関 数として表した。臨界核半径とは、先行すべりが発生する領域(震源核)の最大値であり、すべり域がこの領域をはみ出すと地震が 発生する。小アスペリティが大アスペリティの臨界核半径に比べて小さいときは、ほとんどの大地震が大アスペリティ自体の震源核 が大きく成長する過程を経てから発生する。小アスペリティが相対的に大きくなるにつれて、大アスペリティ自体の震源核が成長す るより先に小アスペリティで地震が起こり、それがトリガーとなって大アスペリティ全体が壊れてしまうケースが増える。小アスペ リティ地震が一旦収束したあと、少し遅れて大地震になることや、大アスペリティ内で時々起こる過渡的なゆっくり滑りが合体して 地震にいたる例外的な現象も見られる。 -27-

### 茨城県沖の地震(2011年3月11日)の断層面上における滑りの分布



図12 (茨城県沖地震)2011年茨城県沖の地震(M7.6)震源域の模式図。右上図は、近地強震波形とGNSSデータ解析から求められた断層面 上における滑り分布。大きな滑り域が太平洋プレート/フィリピン海プレート境界(青点線)と太平洋プレートとともに沈み込む海 山(紫点線)に挟まれた位置にあり、これらの構造の境界が滑りを止めた可能性が考えられる。



# 高速滑り実験で見いだされた長大な臨界滑り量

図13 (粉体中の滑りのDc)厚い粉体層での高速滑り試験。回転式高速摩擦試験機(写真)を用いて,厚い粉体層をはさみ,滑り速度をステップ状に変化させたときの摩擦の変化を調べた結果,10mクラスの長大な臨界滑り量Dcをもつ摩擦の緩和を見出した。

### 海底観測技術の進展と課題



図14 (海底観測装置の開発状況)海底観測を可能にする様々な観測装置の開発が進んだ。しかしながら,海溝軸地殻の水深6000m以深での観測装置の開発が課題となっている。

### 小繰り返し地震解析に寄る東北地方太平洋沖地震前後の 非地震性滑りの時空間発展



図15 (東北地方太平洋沖地震の前の非地震性滑り)上図:(a)東北地方太平洋沖地震発生前のプレート境界の非地震性滑りの平均滑り速度分布,(b)A~Cの3領域において平均した滑り速度の深さ変化を示す。(c)本震発生後9か月間の非地震性滑りの滑り量分布を表す。下図:本震発生前後の非地震性滑りの時空間発展の概念図。
# 用語解説

アスペリティ

プレート境界や断層面の固着の強さが特に大きい領域のこと。この領域が地震時に滑ると,滑り量 が周りよりも大きくなり,大振幅の地震波を放出する。アスペリティがどのように連動して滑るかに よって地震の大きさが変化する。いろいろな大きさのアスペリティが混在する場合には,それらの相互 作用(スケール間相互作用)が震源核形成を含む地震サイクルに大きく影響すると考えられている。

アルゴリズム

問題を解いたり,目標を達成したりするための計算手順や処理手順のこと。

#### インバージョン解析(逆解析)

観測データから、それを生じさせる原因となる現象や物質の性質等を推定する解析手法。

#### 宇宙線ミューオン

宇宙線が大気中の原子核と反応して生成される二次宇宙線の一つで,地上に絶え間なく降り注いでいる素粒子。透過する物質の密度差によって宇宙線ミューオンの減衰が異なることを利用して,X線の透視撮影のように地殻内部の密度分布を調べる試みがなされている。

応力

物体内部での力の掛かり具合を示す,物体内部に考えた仮想的な面を通して及ぼされる単位面積当た りの力。震源域の応力が破壊強度より高くなったときに地震が発生すると考えられている。起震応力場 は地震を発生させる応力の方向や状態を示す。また,地震発生による断層面上のせん断応力の低下量を 応力降下量と呼ぶ。

# 応力場

物体内部の応力の向きや大きさの空間的な分布の状態を応力場という。

火道

地下のマグマ溜まりから地表へ至るまでのマグマの上昇経路のこと。火道でのマグマの脱ガスや上昇 の仕方が噴火の様式を左右する。

## 間隙流体

土や岩石中の粒子間のすきま(間隙)に入り込んだ水などの流体。この流体の圧力を間隙流体圧また は間隙圧という。

貫入(マグマ貫入)

マグマの圧力の急増等により,地殻内のマグマが周辺岩体の内部に入り込むこと。

規模依存性

現象の規模によって,物理量などがどのように変わるかを記述する法則。例えば,断層の長さや滑り

量が地震の規模にどのように依存するかを記述する法則。

#### 逆解析

インバージョン解析の項を参照。

#### 強震観測網

被害を及ぼす強い揺れの地震波形を,振り切れることなく記録できる強震計で構成された観測網。これらの観測網のデータ等は,地震ハザード・被害リスク評価などに役立てられている。防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net は全国規模の強震地震観測網であり,それぞれ約 1000,約 700の観測点からなる。

クラスター

地震がある特定の場所に数多く集まっている状態,またはそのような地震の集合体のこと。

玄武岩質マグマ

主成分である二酸化ケイ素 (SiO<sub>2</sub>)の質量が全化学成分の 45~52 %のマグマ。冷え固まると玄武岩質の火成岩となる。

#### 高感度地震観測網

人が感じない極めて微弱な地面の揺れまでを記録するために,雑微動の影響を避けるために設置した 高感度地震計で構成される観測網。この記録は詳細な震源分布の把握や日本列島周辺の地下構造推定な ど広く地震研究に活用されている。例えば,独立行政法人防災科学技術研究所の Hi-net は全国規模の 高感度地震観測網であり,約800の観測点からなる。

#### 広帯域地震観測網

主として周期約100秒から0.1秒までの地面の振動を観測できる周波数帯域の広い広帯域地震計で構成された地震観測網。例えば,独立行政法人防災科学技術研究所のF-net は様々な周期の揺れを正確に記録するために全国約70か所で横穴の奥に広帯域地震計を設置した観測網。日本列島周辺で発生した地震のメカニズム解の推定や地下構造の推定,火山周辺で発生する長周期振動,火山性微動の解析に用いられている。

地震発生サイクル

地震発生後,断層面の強度が回復するとともに,プレート運動などによる広域応力により再びひずみ エネルギーが蓄積され,次の地震が発生するまでの一連の過程。

地震モーメント

地震の大きさを示す指標の一つで,断層運動によって解放されるエネルギーの大きさと関係している。 地震モーメントの大きさは,断層面の剛性率と断層面積と断層面での滑り量の平均値の積で表わされる。

シミュレーション

実際の事象を、その事象を支配している法則に基づいてほぼ同様となるように組み立てた模擬空間で

再現試行すること。コンピュータを用いた数値シミュレーションを指すことが多い。計画では,強震動 や地震発生サイクル等のシミュレーションが行われる。

準備過程

(地震準備過程)

地震発生直後から次の地震発生に至るひずみエネルギーの蓄積と応力集中の過程。

(火山噴火準備過程)

火山噴火は,火口から溶岩や火山ガスが急激に地表に放出される現象である。その過程として,地下 深部で発生したマグマが,マントルや地殻内を上昇し,地殻浅部にマグマ溜まりとして蓄積される。さ らに,内部の圧力が高まる等の理由で,マグマが地表へ移動し溶岩や火山ガスとして噴出する。このよ うに噴火に至るまでの一連のプロセスを意味する。

震源過程

地震は震源域内部で,ある種の破壊が発生することにより起こる。この破壊過程のことを震源過程という。

スラブ

マントル内部に沈み込んだ海洋プレート。このプレート内部で発生する地震をスラブ内地震と呼び, 海溝の近くやプレート境界地震が起こらないような深部で大地震が起こる場合がある。

正断層

断層面に沿って主として上下方向にずれた断層で,上盤(断層面の上側の地塊)側が相対的に下向き にずれた断層のこと。

セグメント

巨大な断層で地震が起こる場合には,断層全体がいっぺんに動くとは限らず,幾つかの区分に分かれた振る舞いをすることがある。このように,断層運動する際にまとまった振る舞いをする区分をセグメントと呼ぶ。

先行現象

地震や火山噴火の発生前に震源域や火山の周辺で発生するさまざまな異常現象。土地の隆起・沈降, 地震活動の変化,電磁気異常,地下水の変化などがある。前兆現象と呼ばれることもある。

せん断応力

物体内部のある面に平行な方向に作用する応力。地震は, せん断応力による断層面のずれによって発 生する。

素過程

地震や火山噴火における複雑な現象を支配する基本的な物理化学過程。例えば、「断層面上の摩擦」、 「地殻流体の振る舞い」、「マグマの発泡」などがある。室内実験・理論・シミュレーションなどによる 研究を通して地震や火山噴火に関する理解を深める上で大切な要素である。 速度弱化

断層面の摩擦強度が,断層の滑り速度の増大とともに小さくなることを速度弱化という。

体積ひずみ

物体の伸び縮みによる体積の変化のこと。変形に伴って物体の体積 V が V だけ増大したとき,その 体積ひずみは V/V で求められる。

弾性・非弾性

外力によって変形した物質が,そのひずみを元に戻そうとする力を生じる性質を弾性といい,そのような性質でないものを非弾性という。非弾性で媒質が変形することを非弾性変形という。非弾性的性質には,粘性や塑性などの性質が含まれる。地殻の上部は主に弾性的性質を持つが,深部になると粘弾性的性質や塑性的性質を持つことが知られている。内陸地震の発生のメカニズムを理解するためには,粘弾性的性質や塑性的性質を持つ層の影響を理解することが重要であると考えられている。

地殻

地球の固体部分を構成する大きな成層構造のうち,一番外側の層。地殻の内側はマントルと呼ばれている。地殻は海洋地殻と大陸地殻に分類され,海洋地殻は約6kmのほぼ均一な厚さであるのに対し,大陸地殻は平均的には30km程度の厚さであるが,場所によっては60-70kmにも及ぶ場所がある。

#### 地殻活動

地震や火山噴火,及びそれを引き起こす地殻変動など,地殻内で発生する現象全般の総称。

#### 地殻流体

地殻の内部に含まれる水やマグマ等の流体。地殻内で水は,岩盤の亀裂や岩石鉱物の粒界などに存在 していると考えられている。

同化(データ同化)

複雑な現象の高精度予測のために,数値シミュレーションの結果として得られる物理量が観測データ をなるべく再現できるように,適切な初期値や境界値,各種パラメータを推定すること。

トモグラフィー

地下の二次元又は三次元構造を求める手法。地震波速度や減衰構造の推定によく用いられる。医学分野におけるX線や超音波で身体の二次元断面を求める手法に類似した原理に基づいている。

トレンチ調査

断層面を横切る方向に細長い溝(トレンチ)を掘り,断面を観察して断層のずれ方や地層の年代を測 定し,断層の動いた年代や周囲の環境を調べる調査。

熱水系

マグマから分離上昇した火山ガスが地下で凝縮したり,地下水と接触したりして生じる熱水の生成過

程,移動経路などを指す。

発震機構(解)

地震の起こり方。地震波の放射パターンなどから求められる震源断層の走向,傾斜角,滑り角を指す 場合が多い。断層に働いていた力の方向を知る手がかりになる。

非地震性滑り

断層やプレート境界における,地震波を放出しないゆっくりとした滑り。その滑り量や滑り速度を指 すこともある。

ひずみ

岩盤(プレート)などが変形する際の,変形の大きさをひずみと言う。単位長さ当たりの変位で定義 される,変形の度合いを表す物理量。

ひずみ集中帯

測地観測や地形から推定される地殻ひずみが大きい領域。新潟 - 神戸ひずみ集中帯など。

比抵抗

単位断面積,単位長さあたりの電気抵抗値。電気伝導度の逆数。

微動源

低周波成分の小さい振幅の地震波を長い時間にわたって放出する震源のこと。

ブルカノ式噴火

やや粘性の高いマグマによる爆発的な噴火。噴煙高度が 10km 近くに達することもある。爆発によって 1m 径のものが数 km も飛ばされることがある。火山弾はパン皮状のものが多く,火口底にあった古い 岩塊も放出される。桜島や浅間山などでしばしば発生する。

プレート

地球表面は,地殻と十分に冷却して固くなっている最上部マントルとを合わせた,厚さ 100 km 程度 の固い岩石の層で覆われている。この固い岩石の層は,いくつかのブロックに分割されている。それぞ れの板状(球殻状)のブロックをプレートという。

プレート境界地震

プレートとプレートがその境界でずれ動いて発生する地震。震源断層がプレートの境界に一致する地 震。

噴火シナリオ

火山ごとに,噴火で想定される現象の発生推移を時系列的に整理したもの。噴火の規模や現象発生パ ターンなどの分岐判断について示した噴火事象系統樹を指しているが,防災対応を目的としたより実効 的なものを指すこともある。 噴火様式

噴火時にマグマが地表に噴出する場合,噴火の様子はマグマの性質や破砕の程度などによって異なり, いくつかのタイプに識別される。その異なる噴火の様子を噴火様式という。

変換波

地震波速度の境界面で P 波から S 波又は S 波から P 波に変換された波。変換波を解析することにより 境界面の位置を推定することができる。

マグマ

岩石物質の高温溶融体。噴火によってマグマが地表に出たものを溶岩という。マグマが地下で結晶化 したり,地殻物質を溶かし込んだりして,多様な組成のマグマができる(分化という)。マグマが上昇 すると,マグマの中に溶解していた揮発性成分が気泡となる。火道での気泡の離脱の仕方により噴火の 激しさが変化する。

マグマ溜まり

火山活動の源であるマグマが蓄積されているところ。火山やカルデラの直下にあると考えられているが,その正確な形状や内部構造は分かっていない。

摩擦パラメータ

断層面上の摩擦をすべり変位やすべり速度などの関数で表わしたモデルで使用される変数のこと。

マントル

地殻の下にある深さ約 2,900 km までの固体層。その上部(上部マントル)は,かんらん岩を主成分とする岩石で構成されている。

#### モホ面

モホロビチッチ不連続面の略。地殻とマントルの境界面である。この境界面を境にして地震波の速度 が大きく変わるために,屈折波や反射波などによって容易に検出できる。

モーメントテンソル解

モーメントテンソルとは,地震の断層に働く力を,力が働く面と力の働く向きに分解して表したもの。 モーメントテンソル解とは,インバージョン解析で求めた地震のモーメントテンソルのこと。

モーメントマグニチュード

地震モーメントの大きさから評価されるマグニチュード。比較的短い周期の地震波から簡便に決定で きるマグニチュードは,大規模な地震でその値が飽和してしまうという問題があった。この問題を解消 するためにモーメントマグニチュード(Mw)が導入された。

ゆっくり滑り

地震波を放射しない,断層面やプレート境界面でのゆっくりとした滑り。ここでは,継続時間が数か 月以上のものを長期的ゆっくり滑り,それ以下のものを短期的ゆっくり滑りと呼ぶ。スロースリップ, スロースリップイベント (SSE) ともいう。

余効滑り

地震の後に震源域あるいはその周囲で発生するゆっくり滑り。その滑り量や滑り速度を指すこともあ る。

#### 横ずれ断層

断層面に沿って主として水平方向にずれた断層。断層を挟んで他方の岩盤を見たときに,右向きにず れていれば右横ずれ断層,左向きにずれていれば左横ずれ断層という。

レシーバ関数解析

地震波が地下構造の不連続面を通過するときに,違う種類の地震波に変換する性質を利用して地下構 造を詳しく調べる手法。

ΑE

Acoustic Emission (アコースティックエミッション)の略。岩石や金属などに応力や熱が加えられると,内部に局所的な応力集中が発生し,微小破壊などが引き起こされる。このときに励起される高周波数の弾性波のことをアコースティックエミッションという。

Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP)

地震活動予測可能性共同実験。米国・欧州・ニュージーランド・日本を中心として実施している国際 プロジェクトで,できるだけ統計学的に厳密な手法で地震発生の予測を行い,その結果を評価し,統計 学的手法による地震発生予測可能性を検証して手法の確立を目指している。

CFF

せん断応力などの変化によって,断層面での滑りが起きやすくなるかどうかをあらわす指標。 CF Fが大きくなった場所では地震が起きやすくなる。

G N S S

全球測位衛星システム(Global Navigation Satellite System)の頭文字をとった略称。位置や時刻 同期を目的とした電波を発射する衛星群及び地上の支援システム,並びに比較的簡単な受信機で電波を 受信して自分の三次元的な地球上の位置を知る目的で使用する利用者群を総称して用いられる。アメリ カ合衆国が構築した GPS は現在最も実用的な GNSS であるが,他にもロシアが運用中の GLONASS や,ヨ ーロッパ連合(EU)が構築中の Galileo などのシステムがあり,これらを統合して利用することで精度 や信頼性の向上が期待される。

G P S

Global Positioning System (汎地球測位システム)の略。地上高約20,000 kmの高度を航行するGPS 衛星からの電波を地上で受信し,三次元的位置と時刻を正確に計測するシステム。地殻変動計測には干 渉測位と呼ばれる電波の位相を用いた相対測位法が用いられる。

# GPS 音響測距結合方式

海底の地殻変動を観測するための手法の一つ。海上の船舶やブイの位置をGPS(GNSS)によって精密に決定し,それらと海底に設置された基準点との距離を,海中音波を用いて測定することにより,間接的に海底の基準点の位置変化を推定する。

SAR

Synthetic Aperture Radar (合成開口レーダー)の略。人工衛星や航空機などに搭載されたレーダーの移動により大型アンテナと同等の高い分解能を実現したレーダーシステム。SAR 干渉解析 (Interferometric SAR, InSAR)は,同じ場所を撮影した時期の異なる2回の画像の差をとる(干渉させる)ことにより地表面の変動を詳細にとらえる手法である。

# [参考資料]

# 項目別の成果

地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について(建議)に示された実施内容について,平成24年度の成果の項目別の成果を学術報告としてとりまとめた。この報告は,地震・火山 噴火予知研究協議会\*に設置された13の計画推進部会の各部会長が執筆したものである。この報 告に基づいて,難解な学術用語をなるべく言い換え,平易な文章で表現して書き直したものが,本 編の「平成24年度の成果の概要」である。本編の「平成24年度の成果の概要」に内容について, さらに詳細を知りたい場合,原著論文を参照したい場合には,この「項目別の成果」をご参照頂き たい。

> 東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 計画推進部会 「地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化」計画推進部会長 渡辺俊樹(名古屋大学大学院環境学研究科) 「地震発生予測システム」計画推進部会長 鷺谷 威(名古屋大学減災連携研究センター) 「火山噴火予測システム」計画推進部会長 鍵山恒臣 (京都大学大学院理学研究科) 「地震・火山現象に関するデータベースの構築」計画推進部会長 大見士朗 (京都大学防災研究所) 「日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象」計画推進部会長 松澤 暢 (東北大学大学院理学研究科) 「地震準備過程」計画推進部会長 飯尾能久(京都大学防災研究所) 「火山噴火準備過程」計画推進部会長 井口正人(京都大学防災研究所) 「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) 「地震破壊過程と強震動」計画推進部会長 古村孝志 (東京大学地震研究所) 「火山噴火過程」計画推進部会長 西村太志 (東北大学大学院理学研究科) 「地震発生・火山噴火の素過程」計画推進部会長 矢部康男 (東北大学大学院理学研究科) 「新たな観測技術の開発」計画推進部会長 田所敬一(名古屋大学大学院環境学研究科) 「超巨大地震」計画推進部会長 谷岡勇市郎(北海道大学大学院理学研究院)

<sup>\*</sup>東京大学地震研究所には、地震及び火山噴火予知のための観測研究計画で立案された研究を推進することを目的に設立された地震・火山噴火予知研究協議会がある。ここでは、地震及び火山噴火予知研究を行っている全国の大学が連携し、研究機関と協力しながら研究を推進している。また、科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会観測研究計画推進委員会は大学、研究機関、行政機関が連

携して計画の推進を図っている。地震・火山噴火予知研究協議会には、地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の実施内容を、項目別に効率的かつ調和的に研究を推進するために、13の計画推進部 会が設置されている。

## 1 (1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

「地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化」計画推進部会長 渡辺俊樹 (名古屋大学大学院環境学研究科)

地震現象と火山噴火現象の理解を深めるとともに、それらの予測精度の向上を目指し、日本列島全域に稠密な地震・地殻変動等の観測網、および全国の主な火山に地震・地殻変動・ 重力等の火山活動観測網が整備されてきた。本計画においても、これらの観測網を着実に維持・更新し、得られたデータを活用した地震活動・地殻変動および火山活動のモニタリング が進められている。さらに、諸観測網の高密度化および多項目化といった整備・強化、新た な観測・解析手法の導入、観測データの準実時間での処理システムの開発と運用といったモ ニタリングシステムの高度化を図る研究が進められている。

各種の観測によって得られた成果は、随時、地震調査委員会や地震予知連絡会・火山噴火 予知連絡会などに提供され、会報にまとめられているほか、各機関や関連のウェブで公開さ れ、利用されている。2011年3月の東北地方太平洋沖地震に関して、今年度も観測点の復旧 や更新の努力が継続しており、加えて観測網やデータ収集システムの災害に対する強靱化、 観測網の拡充にも力が注がれている。それらにより、超巨大地震の余震・誘発地震などの地 震活動や余効変動のモニタリングのみならず、地震や火山活動の活発化が懸念されている日 本列島における地震活動や地殻変動、火山活動のモニタリングが精力的に行われている。

#### ア. 日本列島域

#### (地震観測によるモニタリングシステムの高度化)

日本列島全域に整備された稠密な基盤的地震観測網の維持管理に努めた。東北地方太平洋 沖地震による津波で損壊した Hi-net 観測点を移設した。また、地震計の特性を調査し、不調 な地震計の更新を行った(防災科学技術研究所[課題番号:3001])。震源決定精度の向上の ために、観測点高度を考慮した波線追跡を適用した。また、地震多発時の自動決定精度の向 上を目指し、複数のアルゴリズムを適用して評価を行った。地震活動を定量的に評価するシ ステムの適用、自動 CMT 解析処理、遠地実体波および近地強震波形を用いた震源過程解析を 実施し、解析結果を地震調査委員会および地震予知連絡会等で報告した(気象庁[課題番号: 7002, 7003, 7004, 7005])。

地震データ流通システムについては、高速広域ネットワーク JDXnet 上のデータ相互交換シ ステムの改良および多項目観測化について検討を進めており、チャンネル情報管理システム (CIMS)の運用、SINET4 データセンターへの中継拠点の設置実験を行った。地殻変動連続観測 等データの流通とデータベースの公開を行った(東京大学[課題番号:1401])。

モニタリングシステムについては、震源、マグニチュード、メカニズム解を即時推定する AQUA システム、深部低周波微動や超低周波地震のモニタリングを行う SPA システム、西南日 本で繰り返し発生している短期的スロースリップイベント(SSE)自動検出システムの安定な 運用を継続した(防災科学技術研究所[課題番号:3001])。日本列島規模のデータ流通網で 流通する高感度地震観測連続データから震源やメカニズム解などの震源情報をモニタリング し、地殻活動の現況を概観できるウェブ閲覧システムの構築を進め、運用した。地震の発生・ 位置・メカニズム(モーメントテンソル)解を完全自動で決定する GRiD MT の改良を進め、 震源速報とW-phaseを用いた巨大地震への対応を行った(図1)(東京大学[課題番号:1401])。

地震波干渉法によるモニタリングを東北地方において実施し、東北地方太平洋沖地震後に 東北日本の太平洋岸全域で位相の遅れが見られた(図2)。地表観測点の自己相関は浅部の構 造に敏感であり、深部の構造をモニタリングするためには浅部の影響の補正が必要であるこ とが示唆された(東北大学[課題番号:1201])。

#### (地殻変動観測などによるモニタリングシステムの高度化)

全国の GPS 連続観測網(GEONET)による地殻変動連続観測、水準測量、高度地域基準点測量、 絶対重力観測および地磁気連続観測、潮位連続観測を実施し、解析結果を公開した(国土地 理院[課題番号:6001, 6002, 6003, 6004, 6005]、気象庁[課題番号:7001, 7007]、海上 保安庁[課題番号:8001, 8002])。

電子基準点の次世代 GNSS への対応及び防災能力向上等を図るため、GNSS アンテナへの更 新(1024 点)、GNSS 受信装置への更新(583 点)及び無停電電源装置バッテリーの増強(611 点)等を実施した。GEONET による地殻変動連続観測を実施し、日本列島全域の地殻変動・火 山活動のモニタリングを着実に行った。東北地方太平洋沖地震後の継続的な余効変動を検出 し(図 3)、地震の発生メカニズムの解明等に寄与した。また、四国中部で11月下旬から12 月上旬までプレート間ゆっくり滑り(スロースリップ)現象に伴う非定常的な地殻変動を検 出した。気象庁等の震源情報を利用して、GEONET による1秒毎の地殻変動データを用いて地 震発生後10分以内にモーメントマグニチュードを推定することができることを確認した(国 土地理院[課題番号:6001])。ALOS2の運用開始後速やかに定常解析を再開するための対応 を行った(国土地理院[課題番号:6006])。

#### (火山におけるモニタリング)

全国の活火山について、火山噴火予知連絡会で中長期的に観測体制の充実が必要とされた 47 火山において、地震計、空振計、GPS 等により連続的な監視観測を行っている。

地震計、空振計、傾斜計、GPS等の観測施設を整備、更新した。全国の火山について調査 的な機動観測を実施した(気象庁[課題番号:7006])。南方諸島及び南西諸島の海域火山の 定期巡回監視を実施し、地磁気異常を報告した(海上保安庁[課題番号:8003])。火山にお けるモニタリングを促進するために、大学、研究機関の地震計・傾斜計・空振計等の観測デ ータの共有化・流通を実施した。

GEONET により、硫黄島、霧島山、桜島周辺等において火山活動にともなう非定常的な地殻 変動を検出した(国土地理院[課題番号:6001])。活発な火山活動が続いている桜島(南岳) について、航空機 SAR による観測を平成 24 年 12 月 19 日に実施し、火口の数値標高モデルを 作成した(国土地理院[課題番号:6006])。ASTER による緊急火山観測を依頼した。また、 火山衛星画像データベースに約 21,000 シーンの衛星画像を追加登録した(産総研[課題番 号:5001])。

#### イ. 地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

#### (日本海溝・千島海溝周辺)

東北地方太平洋沖地震の本震破壊域の最北部にあたる岩手沖の海域で長期観測型海底地震計(LTOBS)6台と短期観測型海底地震計(STOBS)22~23台を用いた余震観測を2期に渡って実

施した。気象庁一元化震源リストを基にデータを切り出し、観測点直下の堆積層の影響を取 り除いて震源決定を行った。東北沖地震の本震・余震時の破壊域と比較すると、本震・余震 時に滑りが大きかった領域で余震活動が低いことが明らかとなった(図4)。また、震源域南 端における正確な余震分布を把握することを目的として、茨城沖において海底地震計の設置 間隔を15 km 程度とした密な余震観測を行った。以前の解析と合わせて 617 個の震源分布が 求められた。この領域では本震時から連続して観測網が設置されており、余震活動の時間変 化を抽出し、破壊過程を理解することが可能なデータが蓄積されている(東京大学[課題番 号:1403]、気象庁[課題番号:7008])。

#### (南関東と周辺域・伊豆)

首都圏地震観測網(MeSO-net)で得られた地震の読み取り値を用いて地震波速度トモグラフィ解析を行い、P波速度、S波速度、Vp/Vsの分布を求めた。また、観測波形のスペクトルから求めたコーナー周波数から観測点ごとのt\*を求め、減衰構造のトモグラフィ解析を行った。関東下に沈み込むフィリピン海プレートに起因すると考えられる減衰域が求められ、千葉県中部の下に顕著な減衰域の存在が認められた。この場所はフィリピン海プレート下面が太平洋プレートと接する場所であり、地震波速度トモグラフィ解析で得られた速度構造における高 Vp/Vs 領域と一致し、地震活動が活発な領域である(東京大学[課題番号:1402])。

全磁力観測及び長基線地電位差観測を継続した。全磁力観測は落雷に伴う機器の故障が相 次ぎ、安定した観測が実現しなかった。2012年は全磁力、自然電位ともに顕著な変化が見ら ず、年周変化的な挙動が見られるにとどまった(東京大学[課題番号:1402])。

(火山)

活動的な火山において多項目観測によるモニタリングを継続し強化した。樽前山、有珠山、 北海道駒ケ岳、伊豆大島、富士山、伊豆東部、浅間山、霧島山、硫黄島において、GPS 火山 変動観測装置(REGMOS)による連続観測、伊豆大島において自動光波測距・測角観測装置(APS) 観測を継続実施した(国土地理院[課題番号:6007])。雌阿寒岳、草津白根山、三宅島、伊 豆大島、阿蘇山において全磁力連続観測および繰り返し観測を実施した。草津白根山ではリ アルタイム伝送が完成した。また、36年間のデータを精査して熱源の時間的推移を求めたと ころ、熱源が噴火活動と相関しながら狭い範囲を移動する様子が見られた(気象庁[課題番 号:7009])。火山観測網の維持管理および火山観測データの流通と公開を実施した(防災科 学研究所[課題番号:3002])。

阿蘇火山中岳火口周辺において、比抵抗連続観測システム ACTIVE による比抵抗モニタリン グを実施した。1次元構造解析の結果、2011年4月~7月に見られたレスポンス関数の低周 波帯における変化は地下200~300mにおける比抵抗変化に対応し、モデルとの比較から、小 噴火に先立つ深部からの火山ガス供給の増加と小規模噴火発生後のガス供給の減少と解釈で きる。5月~7月の高周波帯の変化は地表~地下数+mの浅部における比抵抗変化を表し、梅 雨期の豪雨を経て湯だまりが再出現した時期に対応している(図5)(京都大学[課題番号: 1901])。

#### ウ.東海・東南海・南海地域

本地域においては、定常・臨時の地震観測網、地殻変動観測網が特に密に配置されており、

重点的に観測が実施されている。 歪計、傾斜計による地殻変動連続観測(国土地理院[課題 番号:6008])、レーザー式変位計、多成分歪計、体積歪計(気象庁[課題番号:7010,7011])、 地下水等総合観測(産総研[課題番号:5002])、精密制御震源(名古屋大学[課題番号:1701]、 気象庁[課題番号:7011])、海底地震計(東京大学[課題番号:1403])、地磁気、絶対およ び相対重力観測(東京大学[課題番号:1404])海底地形調査(海上保安庁[課題番号:8004]) など多項目の観測を実施している。中でも、多成分ひずみ計で安定したデータが蓄積されて きたことから、潮汐補正の再調査及びパラメータの調整を行い、現業での監視業務へ反映さ せた(気象庁[課題番号:7010])。

前兆的地下水位変化検出システムを引き続き東海地方で運用した。東南海・南海地震予測 のため、愛媛県新居浜市と愛知県西尾市に新たな地下水等総合観測点を各1点整備し、計16 点となった。また、地下水等総合観測網全体のバックアップシステムを強化した。産総研の 歪データと防災科研の傾斜データに加え、新たに産総研の地下水位データ及び気象庁の歪デ ータを統合した解析を開始し、南海~駿河トラフで発生する巨大地震を予測する鍵となる短 期的スロースリップ(SSE)の検出精度をさらに向上させた。四国及び紀伊半島において1946 年南海地震前の聞き取り調査を行い、目撃証言を地殻の上下変動量に換算するなどの定量化 を行った(産総研[課題番号:5002])。

GPS大学連合では 2004 年から東海地域で高密度の GPS 観測網を展開して観測を行ってお り、今年度も引き続き GPS 観測を実施した。また、2004 年以降のデータを統一的に再解析し、 最近の東海地方の地殻変動について以下の知見を得た。2005 年夏の長期スロースリップ収束 前後に、各地の面積歪速度の傾向が大きく変化したことを用い、インバージョンにより沈み 込むフィリピン海プレートの表面のアスペリティを推定した。長期スロースリップ終了から 2011 年東北地方太平洋沖地震発生までの 5 年強の期間の地殻変動を比べ、長期スロースリ ップ終了からの時間経過によってフィリピン海プレートとのカップリングが強まったことが 示唆された。東北地方太平洋沖地震後の地殻変動は地震発生時の地殻変動と比較して南北で の変動量の差が小さかった。これは、地震時の地殻変動の原因となった断層運動より地震後 に余効変動や粘性緩和を起こしている範囲のほうが広いという解釈と調和的である(図 6)。 また、東北地方太平洋沖地震後の地殻変動により、静岡北部から長野県にかけて面積増加、 静岡県南部地域では面積減少がみられた。これは東北地方太平洋沖地震の余効変動や粘性緩 和によって説明でき、フィリピン海プレートと固着している南部ではその影響が小さいため と考えられる(東京大学[課題番号:1404])。

東海地域における電磁気観測を継続した。2012年は全観測点で全磁力の増加が継続したが、 東部ほど増加の傾向が大きい(図7)。東日本から中部日本にかけてのリージョナルな地磁気 永年変化が全磁力変化に反映していると考えられ、精察を行っている。御前崎と豊橋におけ る絶対重力測定を継続して実施した。御前崎における重力増加は長期的な傾向と一致してい る(東京大学[課題番号:1404])。

精密制御震源によるモニタリングについては、(独)日本原子力研究開発機構が岐阜県土岐 市に所有していたアクロス震源が名古屋大学に委譲されたことにより観測の継続が可能とな り、土岐、豊橋(名古屋大学)、森町(気象庁)の3ヶ所の送信点によるモニタリングを継続 した。土岐一鳳来間の走時の時間変動を解析し、2008年以降の定常的な走時の早まりと、東 北地方太平洋沖地震時に発生した走時の遅れを見いだした(図8)(名古屋大学[課題番号: 1701])。森町送信点の近傍の観測点においても、東北地方太平洋沖地震に伴い、伝達関数の 走時の遅れとゆっくりとした回復が見られ、事例分析を継続した(気象庁[課題番号:7011])。 愛知県新城市鳳来に設置した地震計アレイ観測による深部低周波微動のモニタリングを継続 した(名古屋大学[課題番号:1701])。

紀伊半島における陸域地震観測(亀山一御坊測線)を継続した。レシーバ関数解析による 速度不連続面イメージを更新した。この構造を地震波走時トモグラフィーに組み込み、臨時 観測点の読み取り値も追加して、深さ40kmまでの3次元速度構造を求めた(図9)。東部で の臨時観測点の読み取りを行っており、今後この地域の解像度の向上が期待できる。(京都大 学[課題番号:1801])。紀伊半島沖における広帯域海底地震計と長期観測型海底地震計を用 いた海底地震観測は機器を回収し終了した。南海トラフ沿いで発生した超低周波地震が記録 され、発生数と潮汐との関係が指摘できた。また、平成15年からの5カ年にわたり実施した 観測のデータ解析を行い、震源と3次元速度構造を同時決定した。構造は紀伊水道から紀伊 半島沖にかけて3つのセグメントに分類でき、そのうち一つのセグメントは低 Vp/Vs 比をも ち、その深部で低周波イベント活動が活発である(図10)(東京大学[課題番号:1403])。

広域の地殻変動検出手法である InSAR 解析では、高知県南東部から岡山~広島県境付近に 至る四国中央部と高知県南西部~愛媛県西部の ALOS/PALSAR データを用い、電離層の影響の 少ない干渉画像のみを用いてスタッキングを行った。画像には電離層の影響が依然残ってい ると考えられ、さらなる検討が必要である(京都大学[課題番号:1801])。紀伊半島におけ る 1972 年以降の地殻変動について調査し、東海や豊後水道で見られた規模の長期的スロース リップが発生していないことを確認した(図 11)(気象庁[課題番号:7011])。

これまでに行った四国周辺域(四国〜紀伊半島、中国地方)でのメカニズム解析、多重逆 解法によって推定された不均質な応力場の妥当性について、応力状態の差を空間的にマッピ ングする手法を用いて議論した(高知大学[課題番号:2101])。

#### これまでの課題と今後の展望

前計画(第7次火山噴火予知計画)から今計画にかけて、地震・火山観測網の着実な維持・ 更新が図られてきた。今計画では、諸観測網の高密度化および多項目化に重点を置くととも に、観測データの実時間あるいは逐次処理システムの開発と整備が進み、システムの高度化 が進められてきた。

地震・火山現象のモニタリングをさらに高度化し、研究の成果を上げるためには、個別の 研究課題を着実に進展させるばかりでなく、研究機関の連携をさらに進め、各機関で観測網 のデータを交換・共有して最大限に活用することが必要である。この試みは今計画ですでに 一部実現しており、これによってモニタリングの検知能力を高めることが可能となることが 明らかとなっている。また、プレート境界の固着・すべりに関する解析が集中的に進められ たことにより、同一地域における複数の観測データの総合的解析とモデル化への試みが始ま りつつあり、さらに研究者間で積極的に議論を進めていく必要がある。また、新たな観測や データ処理によるモニタリング手法の開発も着実に進展している。これらにより得られた各 種の観測データおよび科学的知見を、地震および火山現象の解明に向けた研究へ提供し役立 てなければならない。また、これらのデータをリアルタイムに情報発信し、防災や減災に役 立てるための技術開発も必要である。

東北地方太平洋沖地震の発生により、地震および地殻変動などの観測点やデータ収集シス テムにも甚大な被害が発生した。観測点の復旧には可能な限り速やかな対応がとられたが、 現在でも影響が残り、観測点の復旧や更新の努力が継続されている。地震や火山噴火発生時 にもモニタリングシステムを維持し、重要なデータを取り逃がさないために、観測点や通信 網、データ収集システムの災害に対する強靱化を図る必要がある。また、迅速な緊急観測の 体制の整備といった観点からの検討も必要である。

東北地方太平洋沖地震の余震や余効変動は現在でも継続している。日本列島では超巨大地 震の発生により地震発生前とは異なる応力状態となったとされ、地震や火山活動の活発化が 懸念されている。進行している地殻活動現象をモニタリングし、今後の活動の推移を予測す ることは重要である。地震や火山噴火の発生が予想される地域において、連続かつ稠密な観 測が急務であり、モニタリングを強化する必要があると考えられる。特に、観測が困難であ るためこれまで観測が十分でなかった海域における観測、中でも、連続データのリアルタイ ム収集が可能な観測網によるモニタリングが必要である。

一方で、観測網の拡充によって観測データ量は増大し続けている。今後、かつてない大量 の観測データを観測・収集・流通・保存・解析することになる。膨大なデータを有効に活用 していくには新しい発想によるデータの扱いと解析の自動化が不可欠であり、今後検討が必 要であろう。また、インフラ化した観測網の今後の維持管理、老朽化への対応など課題は山 積みであり、研究を支える基盤を維持していく努力が不可欠であろう。

#### 成果リスト

(地震予知連絡会・火山噴火予知連絡会会報への報告数は多数に上るため成果リストでは割愛する。)

Akuhara, T., K. Mochizuki, K. Nakahigashi, T. Yamada, M. Shinohara, S. Sakai, T. Kanazawa, K. Uehira, and H. Shimizu, 2013, Segmentation of Vp/Vs ratio and low frequency earthquake distribution around the fault boundary of the Tonankai and Nankai earthquakes, Geophys. Res. Lett., in press.

浅野陽一・岡田知己・中山貴史・伊藤喜宏・堀修一郎・河野俊夫・松澤 暢・海野徳仁・伊東明 彦・小原一成,2012,1990年代の広帯域地震観測記録からみた千島海溝一日本海溝会合部付 近の超低周波地震活動,日本地震学会2012年度秋季大会,C31-08.

藤田明男,2012,GEONETデータによる西南日本の固着分布とスロースリップイベントの連続モニ タリング,静岡大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士論文.

藤田明男・里村幹夫・生田領野・島田誠一・加藤照之,2012,GEONETを用いた西南日本のスロー スリップイベントのモニタリング,日本地球惑星科学連合2012年大会.

- 橋本武志他,2012,道東地域の地磁気永年変化と三成分絶対測量,北海道大学地球物理学研究報告,75,117-132.
- Hirano, T., and K. Hattori, 2012, ULF geomagnetic changes possibly assosiated with the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, Journal of Asian Earth Sciences 41, 442-449.

Hirose, H., H. Kimura, B. Enescu, and S. Aoi, 2012, Recurrent slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake, PNAS, 109, 15157-15161, doi:10.1073/pnas.1202709109.

- Imakiire, T., and T. Kobayasi, 2012, The Crustal Deformation and Fault Model of the 2011 off the Pacific Coast of TohokuEarthquake, Bulletin of the GSI, 59, 21-30.
- 岩切一宏・溜渕功史・川添安之・中村雅基,2012,東北地方太平洋沖地震後の宮城県気仙沼市沖 M6クラスの繰り返し地震,日本地震学会2012年秋季大会,P1-61.
- 泉 紀明・堀内大嗣・西澤あずさ・木戸ゆかり・中田 高・後藤秀昭・渡辺満久・鈴木康弘, 2012,

150mグリッドDEM から作成した日本海溝付近の3D 海底地形,海洋情報部研究報告,48.

鍵山恒臣・吉川 慎・宇津木 充・浅野 剛, 2012, 阿蘇カルデラ北部における表層電気伝導度分 布,月刊地球,34,11,650-658.

- 木村一洋・潟山弘明・藤松 淳・菅沼一成・赤司貴則, 2013, 地殻変動観測原簿のしくみについて, 験震時報, 77, 印刷中.
- Kimura, T., S. Tanaka, and T. Saito, 2012, Ground tilt changes in Japan caused by the 2010 Maule, Chile, earthquake tsunami, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2012JB009657, in press.
- 小林昭夫,2013,GNSS日値による面的監視の通常変動値調査,験震時報,投稿中.
- Kobayashi, T., M. Tobita, M. Koarai, T. Okatani, A. Suzuki, Y. Noguchi, M. Yamanaka, and B. Miyahara, 2012, InSAR-derived crustal deformation and fault models of normal faulting earthquake (Mj7.0) in Fukushima-Hamadori area, Earth Planets Space, 64, 1209-1221.
- 小泉尚嗣, 2013, 地震時および地震後の地下水圧変化, 地学雑誌, 122, 159-169.
- 小泉尚嗣,2013,地下水観測による地震予知研究-地下水位変化から地殻変動を推定することに よる地震予測-,シンセシオロジー,6,1,24-33.
- 小泉尚嗣・佐藤隆司・北川有一・佐藤 努・高橋 誠・松本則夫・板場智史・梅田康弘・武田直人・ 桑原保人・今西和俊・木口 努・山口和雄,2012,愛媛県新居浜市と愛知県西尾市における 東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測点整備,GSJ地質ニュース,1,6,188-190. 国土地理院,2011,地球磁気観測報告(水沢・江刺・鹿野山平成22年 一等磁気点昭和24年-平

成22年),国土地理院技術資料.

- 三浦優司・川元智司, 2012, 験潮場のGPS連続観測点を用いた潮位データ解析手法の検討,国土 地理院時報,123,21-33.
- 宮岡一樹・横田 崇, 2012, 地殻変動検出のためのスタッキング手法の開発―東海地域のひずみ 計データによるプレート境界すべり早期検知への適用―, 地震2, 65, 205-218.
- 中川茂樹・鶴岡 弘・鷹野 澄・酒井慎一,2012, チャネル情報管理システムの開発, 東京大学地 震研究所技術研究報告, 18, 1-8.
- 中原 恒, 2013, 地震波干渉法により減衰構造を求めるための理論的背景, 地震2, 65, 243-249.
- Nakahara, H., 2012, Formulation of the spatial auto-correlation (SPAC) method in dissipative media, Geophys. J. Int., 190, 1777-1783.
- Nakahigashi, K., M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, R. Hino, T. Sato, K. Uehira, Y. Ito, Y. Murai, and T. Kanazawa, 2012, P-wave velocity structure in the southernmost source region of the 2011 Tohoku earthquakes, off the Boso Peninsula deduced by an ocean bottom seismographic survey, Earth Planets Space, 64, 1149-1156.
- 中埜貴元・小荒井 衛・乙井康成・小林知勝, 2012, 2011年3月12日長野県・新潟県県境付近の地 震に伴う災害の特徴,国土地理院時報,123,35-48.
- 野村晋一・里村幹夫・生田領野・島田誠一・加藤照之・原田 靖・鷺谷 威, 2012, 2011年東北地 方太平洋沖地震による東海地域の地殻変動への影響,日本地球惑星科学連合2012年大会.
- 岡村盛司, 2011, 「日本重力基準系2010(案)の提案」, 日本地球惑星科学連合2011年大会, SGD022-01.
- Sofyan Y., 吉川 慎・鍵山恒臣・大倉敬宏, 2012, 阿蘇火山における繰り返し重力測定による熱

水流動のモニタリング,月刊地球,34,11,691-699.

- Satomura, M., R. Ikuta, A. Fujita, Y. Hashimoto, S. Shimada, T. Kato, Y. Harada, S. Nomura, 2012, Micro displacement obtained from very dense GPS netwaork in the Tokai District, central Japan, AGU 2012 Fall meeting.
- 澁谷拓郎・福居大志・平原和朗・中尾節郎, 2012, 紀伊半島下に沈み込むフィリピン海スラブ周 辺の3次元地震波速度構造,日本地球惑星科学連合2012年大会.
- 澁谷拓郎・今井基博・平原和朗・中尾節郎・西村和浩,紀伊半島下に沈み込むフィリピン海スラ ブ周辺の3次元地震波速度構造(2),日本地震学会2012年秋季大会.
- 眞城亮成・高橋浩晃, 2012, ひずみ計を用いた即時Mw推定手法の開発, 日本地球惑星連合2012年 大会予稿集, SSS40-P05.
- 眞城亮成・高橋浩晃, 2012, ひずみ計を用いたMw即時推定手法の開発(その2), 日本地震学会 秋季大会予稿集, C22-13.
- Shinohara, M., Y. Machida, T. Yamada, K. Nakahigashi, T. Shinbo, K. Mochizuki, Y. Murai, R. Hino, Y. Ito, T. Sato, H. Shiobara, K. Uehira, H. Yakiwara, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, K. Hirata, H. Tsushima, and T. Iwasaki, 2012, Precise aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake revealed by ocean bottom seismometer network, Earth Planets Space, 64, 1137-1148.
- 水藤 尚・西村卓也・小林知勝・小沢慎三郎・飛田幹男・今給黎哲郎, 2012, 2011年(平成23年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地震時および地震後の地殻変動と断層モデル, 地震, 65, 2, 95-121.
- 田口陽介・増子徳道・山崎 明・三島稔明,2013,伊豆大島の地磁気全磁力にみられる周期数ヶ 月の変動,地磁気観測所テクニカルレポート,投稿中
- 高橋浩晃・山口照寛・中尾 茂・松島 健・加納靖之・山崎健一・寺石眞弘・伊藤武男・鷺谷 威・ 大久保慎人・浅井康広・原田昌武・本多 亮・加藤照之・三浦 哲・横田 崇・勝間田明男・ 小林昭夫・吉田康宏・木村一洋・太田雄策・田村良明・柴田智郎, 2012, 全国ひずみ傾斜デ ータの流通一元化と公開, 日本地球惑星科学連合2012年大会, STT59-P04.
- Tanaka, S., 2012, Tidal triggering of earthquakes prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw9.1), Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2012GL051179, in press.
- 高橋幸祐・藤井郁子・有田 真, 2013, 全磁力観測から推定される草津白根山の長期的な熱的活動の推移, 2012年度Conductivity Anomaly研究会.
- 寺田暁彦, 2012, 阿蘇火山中岳の火口湖「湯だまり」の火山学的理解, 月刊地球, 34, 12, 712-721.
- Ueno, T., T. Saito, K. Shiomi, B. Enescu, H. Hirose, and K. Obara, 2012, Fractional seismic velocity change related to magma intrusions during earthquake swarms in the eastern Izu peninsula, central Japan, J. Geophys. Res., 117, B12305, doi:10.1029/2012JB009580.
- 上野友岳・齊藤竜彦・汐見勝彦・針生義勝, 2012, Hi-net地震計特性の時間変化, 日本地震学会 2012年度秋季大会, P1-07.
- Urai, M., 2012, Monitoring Active Submarine Volcanoes with ALOS AVNIR-2 Imgae A Case Study of Fukutoku-Okanoba, Japan, CD ROM Proceedings of ISRS 2012 ICSANE, 1-4.
- Utada, H., et al., 2012, Geomagnetic field changes in response to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami, Earth and Planetary Science Letters, 311,

11 - 27.

- 宇津木充・徳本直明・鍵山恒臣・井上寛之・小森省吾・浅野剛・小山崇夫, 2012, Active観測から見た阿蘇中岳火口周辺の浅部比抵抗変化,月刊地球, 34, 12, 738-744.
- 山崎明・福井敬一・山崎伸行・小林徹・石井邦男・簗田高広, 2012, 吾妻火山の大穴火口下で発 生している熱消磁について,日本地球惑星科学連合2012年大会.



図 1. GRiD MT のモニタリング領域と 2012 年の解析結果 (東京大学 [課題番号:1401])。

MYGH03 ACF EW 1. - 20. Hz



図 2. 近地地震のコーダ波の自己相関により検出された 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う 時間変化(MYGH03 観測点,東西動成分)。本震(2011 年 3 月 11 日、図中の赤い横線) 直後 に最大で 15%程度位相が遅れている(東北大学[課題番号:1201])。



図 3. 東北地方太平洋沖地震後(3~7月)の余効変動量。(左):水平成分、(右):電子基準点「山 田」時系列(国土地理院[課題番号:6001])。



図 4. 余震分布と本震・余震による破壊域との比較。色つき丸は再決定された余震、赤三角・赤 四角は海底地震計の位置をそれぞれ示す。赤線は本震による破壊域、黄色四角は余震の破壊域を それぞれ示す。灰色丸は東北地方太平洋沖地震発生前の地震活動を示す(東京大学[課題番号: 1403])。



図 5. 阿蘇火口中岳周辺における 2011 年 4 月~2012 年 4 月までのレスポンス関数の時間変化(京都大学[課題番号:1901])。



図 6. 2011 年東北地方太平洋沖地震時の水平変動(赤)と、それ以降の余効変動(青)、および地 震前と地震後の地殻変動直線成分の勾配の変化量(緑)。地震時の変動は北のほうが大きいが、 それに比べると余効変動や勾配の変化量は南北による差が小さい(東京大学[課題番号:1404])。



図 7. YAT を基準とした 1988 年 4 月から 2012 年 12 月までの全磁力時間変化。上から KKW, KWZ, SHN/FJM, OKY, TAW, FNK, SAG, HRN (東京大学 [課題番号: 1404])。



図 8. 土岐のアクロス震源と Hi-net 鳳来の間の伝達関数の S 波走時の時間変動。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震で約 2.5 ミリ秒の遅れが見られる。また 2008 年以降は定常 的な走時の早まりが見られる(名古屋大学 [課題番号:1701])。



図 9. 潮岬-田尻測線断面での P 波速度の初期モデルからのパータベーション。初期モデルは JMA2001(上野・他,2002)を基準とし、海洋地殻の速度を-5%、海洋マントルとマントルウェ ッジの速度を+5%と与えている。〇はトモグラフィに用いた地震のうち断面の近傍で発生したも のを表す。太線は上から大陸モホ面、海洋地殻上面、海洋モホ面を示す(京都大学[課題番号: 1801])。



図 10. 沈み込む海洋プレート内 (a)と陸側プレート最下部 (b)の Vp/Vs 比の分布 (東京大学 [課題番号:1403])。



図 11. 南海トラフ沿いの長期的スロースリップ発生場所と発生時期。矩形の灰色は水準・潮位を 用いて調査済みの期間・領域を示す(気象庁[課題番号:7011])。

# 1 (2)(2-1) 地震発生予測システム

「地震発生予測システム」計画推進部会長 鷺谷 威 (名古屋大学減災連携研究センター)

本研究計画では、科学的な地震発生予測の実現を目指して、2 つの異なるアプローチを試 みる。一つは地震発生の物理モデルに基づく予測であり、これまで開発を進めてきた地震発 生予測シミュレーションをモニタリングシステムと有機的に結合し、予測システムの構築を 進める。5 ヶ年の研究でシステムの全体設計、プロトタイプシステムの構築、および予測シ ミュレーション手法の高度化を行う。もう一つのアプローチは、統計的手法に基づく地震活 動予測の高度化である。検証に用いるデータベース等の共通基盤を整備し、異なる予測手法 の比較実験を実施する。平成24 年度の研究により得られた成果の概要を以下に述べる。

#### ア. 地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

本研究計画では、観測網から得られるデータの情報を取り込み、地震発生の物理過程を考慮した数値シミュレーションを通じて地震発生予測を行うシステムの構築を目指しており、 それは地震予知研究における最重要課題として位置づけられている。目的達成のため、予測 シミュレーションの改良・高度化とシミュレーションと観測システムを有機的に結合するデ ータ同化システムの開発を2つの柱として研究を実施している。

まず、予測シミュレーションの改良・高度化に関しては、2011年東北地方太平洋沖地震を 発生させるサイクルシミュレーションのモデル領域を広げるとともに、階層型行列を用いた すべり応答関数の作成を並列化により計算を効率化した。日本列島周辺のプレート境界を 1km間隔のメッシュでモデル化すると、セル数を現在の20万個程度から100万個のオーダーに 増やす必要がある。中小規模の地震を扱うにはセルがさらに細分化されるため、計算の高速 化を進める必要がある。また、粘弾性媒質中での地震サイクルシミュレーションには階層型 行列を適用できないことが分かり、計算のさらなる高速化には別の工夫が必要である(名古 屋大学[課題番号:1702],平原・他,2012)。

プレート境界で発生する地震サイクルのシミュレーションにより破壊開始点の破壊エネル ギーを推定し、理論式と整合的な結果を得た。この結果によれば、南海トラフのM8級地震と 東北地方太平洋沖地震の破壊開始点における破壊エネルギーは、それぞれ0.1-1MJ/m<sup>2</sup>、約 10MJ/m<sup>2</sup> と見積もられた(図1,名古屋大学[課題番号:1702],Kato,2012)。

巨大地震の発生が懸念される南海トラフでは、近年の地震波構造探査等によって沈み込み プレート境界の形状や物性値の詳細な分布が明らかにされている。こうした構造モデルを用 いた三次元のシミュレーションでプレート境界浅部のすべり挙動の摩擦パラメータに対する 依存性を調べたところ、ある閾値を境としてプレート境界浅部の挙動が大きく変化すること が分かった(海洋研究開発機構 [課題番号:4001], Hyodo and Hori, 2013)。

南海トラフ巨大地震の50年前から10年後にかけて、西南日本で内陸地震活動が増すと言われている。日本列島の定常的な東西圧縮、南海トラフでの固着と地震発生に伴う粘弾性応答、 さらに内陸地震発生を考慮してクーロン応力変化を計算した結果、南海トラフ巨大地震の発 生前に逆断層型地震が、発生後に横ずれ型地震が多くなることが予測される(図2,名古屋 大学[課題番号:1702], 鹿倉・他,2012)。 逆に、津波地震の可能性がある1605年慶長地震が内陸地震による応力擾乱で生じた可能性 を検証する目的でシミュレーションを行った。その結果、内陸地震の発生がプレート境界地 震に影響を与える可能性のあることが分かったが、プレート境界の浅部のみを破壊するよう な地震は発生しなかった(図3,気象庁[課題番号:7023],弘瀬・前田,2012c)。また、 南海トラフ沿いで短期および長期のスロースリップが繰り返し発生しているが、スロースリ ップ領域の広がりと摩擦パラメータについて検討を行い、長期と短期のスロースリップが共 存するようなシミュレーションに成功した(図4,防災科学技術研究所[課題番号:3004])。

現実に即したシミュレーションを行うためにはデータ同化が必要である。そのため、本研 究では観測データを用いてシミュレーションに必要な物理量を推定する手法や逐次的なデー タ解析により、シミュレーションを現実の変化に追従させるための手法の開発を進めている。

東北地方太平洋沖地震の余効すべりに基づいてプレート境界の摩擦パラメータを推定した ところ、剪断応力の速度依存性が時間的に一定ではなく、摩擦パラメータがすべり速度に依 存するか、断層面の有効法線応力が時間変化するという2つの可能性があることが分かった (名古屋大学 [課題番号:1702], Fukuda et al., 2012)。

地殻変動データに対してアジョイント法を適用し、断層面上の摩擦パラメータを推定する 手法の開発を行っている。従来よりも細かい小断層を用いることで余効すべりの伝播を表現 できるようにして、2003年十勝沖地震から2004年釧路沖地震に至る一連の過程を模した数値 実験を行った。その結果、摩擦パラメータが初期値から真の値に近い値に修正され、釧路沖 地震の発生時期の予測も改善された(名古屋大学[課題番号:1702],加納・他,2013)。

測地データから推定されるプレート境界面のすべり欠損分布はプレート境界の真の固着状態を直接対応していない。固着域ですべり0、非固着域で応力0と単純に仮定し、与えられた固着域分布に対する地表変位の計算を行い、こうして得られた理論地表変位からすべり欠損分布を推定すると、固着域として過大評価となることが分かる。この方法を日本海溝沿いと南海トラフ沿いの2地域に適用し、2011年以前の東北地方では固着域の面積比がおよそ30~60%と推定されるのに対し、南海トラフでは60~100%と、固着の度合いがより高いと推定された(図5,名古屋大学[課題番号:1702], Hirai and Sagiya, 2013)。

さらに、地殻変動データに加えて、地震学的なデータの情報を予測シミュレーションに取 り込むための基礎研究として地震活動データの解析を実施している。関東および東海・東南 海地域で震源および規模を再決定して得られた均質な地震カタログから、2005年から2007年 にかけて関東地方南部における地震活動活発化と銚子沖の静穏化が同時発生していることを 見出した。GPSデータを精査すると、この地震活動変化に伴う水平変動が検出され、長期ス ロースリップが発生したと推測される。地震活動データはスロースリップの指標としても使 える可能性が示された(図6、名古屋大学[課題番号:1702], Katsumata, 2013)。

一方、日本海溝沿いでは繰り返し地震を用いたプレート境界すべりの研究が進められ、東 北地方太平洋沖地震前の3年間をそれ以前の12年間に比べると、本震のすべり域およびその 近傍ですべり速度が大きかったこと、地震後は本震すべり域の周辺で余効すべりが起きてい ることが見出された(図7,名古屋大学[課題番号:1702],Uchida et al., 2013)。また、本 震後に発生したプレート境界型地震活動の空間分布を用いると、本震時の大すべり域の広が りを推定することができた(図8,名古屋大学[課題番号:1702])。

#### イ. 地殻活動予測シミュレーションの高度化

現在開発を進めている地震発生予測システムでは単純化された地震サイクルを仮定してお り、地震発生に影響する様々な要素が考慮されていない。そうした要素を将来地震発生予測 システムに組み込むための基礎的な研究を進めている。

東北地方太平洋沖地震で数十mもの巨大な断層すべりが起きたメカニズムとして、地震時 の摩擦発熱による間隙流体圧上昇(Thermal pressurization,以下TP)の影響が提案されている。 こうした効果は大地震サイクルそのものに影響を与えるため、二次元シミュレーションを行 い、地震時すべりや応力降下量、地震発生間隔がTPの働く領域の深さおよび間隙流体拡散係 数に依存することを示した(図9,東京大学地震研究所[課題番号:1405],Mitsui et al.,2012)。 また、TPを考慮に加えて浅部に大規模なアスペリティを設定することで、日本海溝において M7クラスとM9クラスの地震が再現できることを示した(図10,東京大学地震研究所[課題番 号:1405])。断層内の流体は、スロースリップの発生にも寄与すると考えられている。断 層に沿った流体移動を考慮することで、スロースリップおよびスロースリップと同期し逆方 向に伝播する微動の伝播速度を再現することに成功した(図11,東京大学地震研究所[課題 番号:1405],Yamashita,2013)。

プレート境界の地震と比較して、内陸部における地殻変形や地震発生のシミュレーション は遅れている。温度構造等に基づいて作成した日本列島のレオロジー構造(Cho and Kuwahara, 2012)を用いて有限要素法のモデルを作成し、プレート運動等に基づく境界条件を与えて長 期変形のシミュレーションを行った(図12,産業技術総合研究所[課題番号:5003])。

#### ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測

地震活動の特徴や地震発生の統計モデル・物理モデルに基づいて、将来の地震活動を確率 論的に予測する様々な試みが行われている。しかし、従来の研究では、解析対象とする地震 カタログがまちまちで、公平な手法間の比較が十分に行われてこなかった。そこで、地震活 動予測手法の比較検証を目的とする国際研究プロジェクトCSEP(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability)が進められている。本研究計画では CSEPへの取り組みを計画の 一部と位置づけ、地震発生予測のアルゴリズム開発やモデルの比較を進めている(Tsuruoka et al., 2012)。平成24年度は、CSEPにおける標準的な予測手法の評価方法に加え、局所的な活 動が発生し易い日本の地震活動の特徴を踏まえ、地震の空間分布予測性能に関する新たな評 価手法として「マッチスコア」を開発した。この手法で求められるマッチスコアはL-testで用 いられる対数尤度と相関があり空間分布予測性能の評価指標として有用である(図13、東京 大学地震研究所[課題番号:1406],鶴岡,2012)

前震の発生確率に基づき地震発生確率をリアルタイム予測するシステムを開発し、自動的 に更新している。例として、2012年11月19日の根室沖の地震(M<sub>w</sub>5.2)が、発生1時間前に 発生確率が高いとされていた場所で発生したことが分かる(図14、京都大学防災研究所[課 題番号:1802])。また、地震発生予測の正確さを評価する新たな統合的指標を提案した(Smyth et al., 2012)。

また、地震活動データの解析から、房総半島では、b値がスロースリップの繰り返しに伴う 応力変化に対応していることが分かった(図15, 弘瀬・前田, 2012a)。さらに、M7.0 以上の 地震前後のη値の時間変化の解析から、大地震発生前に、規模別頻度分布がGutenberg-Richter 則から外れる傾向にあることが見出された(気象庁[課題番号:7012], 弘瀬・前田, 2012b)。

# 課題と展望

地震活動に基づく確率予測に関しては、CSEPの取り組みが順調に続けられており、これを 継続することで有用な知見が得られるものと期待される。この取り組みを続けていく上では、 元になる地震カタログの再検討が重要な課題として挙げられる。また、地震活動の背景に潜 む物理そのものに未解明の部分が多く、現象理解の研究も進めていく必要がある。

物理モデルに基づく予測システムの構築に向けては、シミュレーション、モニタリング、 データ同化それぞれの部分で着実に研究は進んでいる。最初にも述べたように、本研究計画 が目指すのは、地震発生予測シミュレーションをモニタリングシステムと有機的に結合した 予測システムの構築である。上でまとめた成果は、依然として予測システムの構成要素に関 するものが多く、予測システムの姿が見えて来ているとは言い難い。

目に見えた成果には至っていないが、予測システムのプロトタイプの研究は進められてい る。そこでの基本的な考え方は、予測システムによる定常的なモニタリングの補助である。 日本列島には陸上のGPS観測網に加え、海域にも連続監視可能な海底圧力計などが設置され つつあり、地殻活動のリアルタイムモニタリングは現実に可能である。しかし、こうした観 測データに何らかの変化が起きた時、その後の推移を予測するには何らかの物理モデルを導 入する必要がある。最新のデータは刻一刻と追加されていくので、それに応じてより確から しい将来予測を提供していくことがデータ監視を担当する機関には求められる。この時、そ の場で計算を開始して毎回推移予測を行うのではなく、予め多数のケースについて計算を実 施しておき、観測されたデータと整合する結果を抽出して予測の一助とすることは十分可能 であり、実用的な価値がある。現時点までのデータに基づいて、将来起こり得る事象の確率 分布が提示できれば、それは科学的な予測と呼ぶに値するものであり、観測網の拡充やモデ ルの改良によって、予測精度は改善されていくものと期待される。平成25年度は現計画の最 終年度であるが、上述したような内容の予測システムのプロトタイプを提示することを予定 している。ただし、ここで提示できるものには実用性は期待できず、今後長い時間をかけて 経験を積み重ねることにより、初めて実用的な価値が生まれる。そのため、関係する組織、 研究者全体に、観測網とデータ同化のシステム全体を長い時間をかけて育て上げていく覚悟 が必要である。気象の数値予報のシステムが数十年にわたる努力で今日の姿に至っているこ とは改めて言うまでもない。関係者はこうした努力を維持していくための戦略的思考が求め られていることを改めて肝に銘じるべきだろう。

#### 参考文献

Cho, I. and Y. Kuwahara, Constraints on the three-dimensional thermal structure of the lower crust in the Japanese Islands, EPS, accepted, 2012.

Fukuda, J., Y. Aoki, T. Kato, and N. Kato, Evolution of afterslip following the 2011 Tohoku-oki earthquake, 2012 AGU Fall Meeting, T13F-2695, San Francisco, USA, 2012.

平原和朗・大谷真紀子・鹿倉洋介・兵藤守・堀高峰・橋間昭徳,漸化型メモリ変数法を用いた粘弾性媒質における地震発生サイクルシミュレーション,日本地震学会2012年秋季大会, P2-68,函館,2012.

Hirai, T., and T. Sagiya, Biased geodetic inference on asperity distribution on a subducted plate interface: a quantitative study, Earth Planets Space, in press, 2013.

弘瀬冬樹・前田憲二, 房総半島沖で繰り返すスロースリップとb 値の時間変化との関係, 日本地球惑星科学連合2012 年大会, SSS030-P09, 2012a.

弘瀬冬樹・前田憲二,2012,大地震前に現れるG-R 則からの逸脱について~その2~,日本地 震学会2012 年秋季大会, P1-68, 2012b.

弘瀬冬樹・前田憲二,四国中央構造線断層帯の活動と1605 年慶長津波地震との関係,日本地 震学会2012 年秋季大会, P2-72, 2012c.

Hyodo, M. and T. Hori: Re-examination of possible great interplate earthquake scenarios in the Nankai Trough, southwest Japan, based on recent findings and numerical simulations, Tectonophys., accepted, 2013.

加納将行・宮崎真一・伊藤耕介・平原和朗, An adjoint data assimilation method for optimizing frictional parameters on the afterslip area, データ同化ワークショップ, 2013.

Kato, N., Fracture energies at the rupture nucleation points of large interplate earthquakes, Earth Planet. Sci. Lett., 353-354, 190-197, 2012.

Katsumata, K., Detection of a small slow slip event beneath the Kanto district, central Honshu, Japan by modeling a pair of seismic quiescence and activation anomalies and GPS data, Earth Planets and Space, submitted, 2013.

Mitsui, Y., Y. Iio, and Y. Fukahata, A scenario for the generation process of the 2011 Tohoku earthquake based on dynamic rupture simulation: Role of stress concentration and thermal pressurization, Earth Planets Space, 64, 1177-1187, 2012.

鹿倉洋介・深畑幸俊・平原和朗, プレート運動と地震発生に伴う西南日本内陸活断層の長期 的な破壊関数の変化, 日本地球惑星科学連合2012 年大会, SSS38-11, 千葉, 2012.

Smyth, C., M. Yamada, J. Mori, Earthquake forecast enrichment scores, Research in Geophysics, doi:10.408/rg2012.e2, 2012.

Tsuruoka, H., N. Hirata, D. Schorlemmber, F. Euchner, K.Z. Nanjo and T.H. Jordan, CSEP Testing Center and the first results of the earthquake forecast testing experiment in Japan, Earth Planets Space, 64, 8, 661-671, 2012.

鶴岡 弘,評価手法マッチスコアの提案,日本地震学会2012年度秋季大会,函館(日本),2012 年10月16日~19日,2012.

Uchida, N., T. Matsuzawa, Pre- and post-seismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture, Earth Planet. Sci. Lett., under revision, 2013.

Yamashita,T., Generation of slow slip coupled with tremor due to fluid flow along a fault, Geophys. J. Int., doi:10.1093/gji/ggs117, 2013.



(課題番号:1702 図2)

図1 破壊エネルギーとプレート相対運動速度と地震の再来周期の積の関係。有効法線応力の深さ分 布やプレート相対運動速度V<sub>pl</sub>が異なる7ケースについて調べたが、すべてについて1つの関係式で 説明できる。ただし、係数は破壊開始点の深さやプレート境界面の伏角に依存する。

(課題番号:1702 図4)



図2 西南日本内陸活断層における応力変化。(左)0.3x10-7/年の東西圧縮による各断層におけるク ーロン応力変化(μ'=0.3 を仮定)。(右)100 年間の固着を仮定した時の南海トラフ巨大地震時に おける各活断層のクーロン応力変化。(赤:正、青:負)(鹿倉・他,2012)。

(課題番号:7023 図1)



図3 内陸地震の発生によるフィリピン海プレート面上のせん断応力擾乱。内陸地震(6つ)の断層 運動によるフィリピン海プレート面上のせん断応力擾乱を示す(MTL4 は傾斜角を変えた2ケース)。 右下の図は6地震の応力擾乱を重ね合わせたもの。暖色系は地震を促進,寒色系は地震を抑制するこ とを表す。左下の図には擾乱元のそれぞれの活断層の位置を色別の線で示す。

(課題番号:3004 図)



図 4 深さ26kmにおけるすべり速度の時間変化。(a)豊後水道付近(X=200km付近)に長期的SSE領域をおいた場合。(b) 豊後水道付近に長期的SSE領域をおかない場合。

(課題番号:1702 図6)



図5 地震モーメント蓄積速度と測地データに基づく推定値の関係。(a) 東北地方のGPS 変位速度デ ータとインバージョン解析による計算値の比較。(b) 南海トラフ西部付近のGPS 変位速度データとイ ンバージョン解析による計算値の比較。(c) 東北沖のプレート境界について、仮定したアスペリティ における地震モーメント蓄積速度と模擬測地データから推定された地震モーメント蓄積速度の比較 (黒丸)。白丸は計算上得られるすべり欠損分布に基づく地震モーメント蓄積速度。実際のデータに 基づく推定値を水平の破線で、それに基づく真の地震モーメント蓄積速度の範囲を縦の破線で示す。 (d) 南海トラフについての解析結果。

(課題番号:1702 図7)


図6 地震活動変化に基づくスロースリップの検出。(a)GPS の東西成分。2001年6月から2003年6月 までの変化を直線で近似し、その近似直線からのずれを表示した。赤点は近似直線からのずれの開始 時、2008年5月付近の飛びは茨城県沖の地震(M7.0) によるものである。(b)長期的スロースリップイ ベントの断層モデル。四角形が西方に傾き下がる太平洋プレート上面に仮定した断層面を表し、P-P' が深さ30km である。赤矢印が観測値、黒矢印が計算値である。

(課題番号:1702 図8)



図7 繰り返し地震による非地震性すべり分布の推定。(a)1996年3月11日-2008年3月11日、(b)2008 年3月11日-2011年3月11日、(c)2011年3月11日-2011年12月31日。0.3 °× 0.3 °のグリッドごとに図a、 bではすべり速度、図cではすべり量を表示している。白はグリッド内に3個以上の繰り返し地震がな い場所、灰色はすべり量が0を表す。灰色のコンターはIinuma et al.(2012) による10m の地震時すべ りコンター、黒太線はフィリピン海プレートの北東限(Uchida et al, 2009)。星はM7 クラス以上の地 震の震央。

(課題番号:1702 図9)



図8 プレート境界型地震の活動度及び小繰り返し地震活動から推定された大すべり域。青色の実線で囲まれた領域が推定された大すべり域。小繰り返し地震を青色のひし形で、プレート境界型地震 の発生密度をカラースケールで示す。プレート境界型地震の西縁の位置を赤色の実線で、太平洋プレ ート上面の深さを緑色の破線で表している。

(課題番号:1405 図1)



図 9 速度状態依存則に従う断層で、地震時におけるTP・ダイラタンシー、地震間における準静的ガ ウジ変形および圧力溶解など化学変化による空隙変化の影響を組み込んだ、1 自由度準動的地震サイ クルシミュレーン例(Mitsui, 2011)。(左)間隙流体庄変動、(右)累積すべりの時間変動。裁荷 速度3cm/年、剛性率27GPa、透水率10-20m<sup>2</sup>、間隙形成係数1.7-6、すべり依存ダイラテーション係数 0.0005、化学反応による空隙減少の特徴的時間を10年とし地震時すべり幅Wを変えて地震サイクルシ ミュレーションを行なった。

(課題番号:1405 図2)



図10 東北地方太平洋沖地震の3 次元発生サイクルモデル:(左)アスペリティの分布、(右) M9 ク ラス時のすべり速度とせん断応力の分布。

(課題番号:1405 図3)



図11 微動と同期したスロースリップのモデリング解析における滑り速度の時空間発展図。スロース リップと同期し逆方向伝播する微動の伝播速度も再現された。

(課題番号:5003 図2)



図12 不均一レオロジー構造に糸静断層帯深部延長シアゾーンを加えたモデルに東西圧縮と伊豆の 衝突を加えた予備計算結果。カラーバーは相当応力(ミーゼス応力)レートを表す。深さ15km の断 面。左図が力を加えた直後の弾性応答、右図が10 万年後の結果。右図が定常的な応力レートに対応 する。

(課題番号:1406 図1)



図13 マッチスコアと地震観測数で規格化した対数尤度の比較(東京大学地震研究所[課題番号: 1406])。

(課題番号:1802 図1)



# Predictions for 58.5421833316485 minutes

図14 2012年11月19日の根室沖の地震(Mw5.2)の1時間前の地震発生確率分布。黒丸は地震の震央 を示す。

```
(課題番号:7012 図2)
```



図15 b値の時間変化。横棒はb値の推定に用いた期間、縦棒はb値の推定誤差を示す。橙線はスロー スリップの発生時期を示す。100個のイベントをb 値の計算単位とし、10 イベント毎に時間方向にシ フトさせた。

# 1 (2) (2-2)火山噴火予測システム

「火山噴火予測システム」計画推進部会長 鍵山恒臣 (京都大学大学院理学研究科)

火山噴火の予知のなかでも、噴火の時期や場所については、十分に観測体制が整備さ れていればある程度可能になっている。しかし、一旦開始した噴火の規模や様式、推移 を予測することは現在の知見だけでは困難である。近年、防災関係者など行政の間で「噴 火シナリオ」に対する期待が高まっている。その理由は、噴火シナリオが仕事の工程表 に似ており、迫りくる事態が工程表のどの部分に位置しているかを容易に把握すること ができ、将来起こりうるさまざまな事象も俯瞰的に見ることが可能であるためと思われ る。一方、火山専門家にとっても、シナリオを作成することは、これまで培ってきた火 山学的な知見を総動員する作業であり、火山学の一層の発展を促す機会となる。しかし、 現状の噴火シナリオは、対象となる火山において過去に発生したいくつかの典型的な規 模(あるいは直近)の噴火事例を並べたものが多く、それぞれの事象に付随して予想さ れる災害やそれに対する防災対策が記載されているものの、噴火規模や様式ごとに個別 のシナリオが作成されている場合がある。このため、防災担当者は、事前におおよその 防災対策を計画することはできるが、火山活動の異常が発現した段階では、当該活動が どのシナリオに該当するかが分からないままに対応することになる。

建議では、「より高度な火山噴火予知を目指して、噴火規模、様式、推移の予測を行 うには、噴火シナリオ(予想される噴火前駆現象や噴火活動推移を網羅した噴火事象系 統樹)を作成することが有用である。」と述べられている。すなわち、対象火山につい て、過去の噴火の発現頻度や噴火様式をまとめあげ、多様な噴火事象の変化を支配する 機構を科学的に理解することによって、噴火の規模や様式を含む推移予測をある程度を 絞り込むことを目指している。そのため、「地震・火山現象に関するデータベースを活 用するとともに、地質調査・解析によって明らかにされた噴火履歴を参照して、噴火シ ナリオを我が国の主要な活火山について順次作成する」こと、噴火現象の分岐に「過去 の噴火時の観測データの再検証や研究成果を取り入れて噴火シナリオを高度化する」こ とが求められている。さらには「活動的な火山について、観測データと噴火シナリオに 基づき、火山活動の現状を評価し推移予測を試行する」ことが本研究計画のゴールのひ とつであり、この研究での成果をマニュアル化し、火山専門家が他の活火山に適応でき る道筋をつけることが重要である。

平成24年度は、本計画の細目「ア.噴火シナリオの作成」については、気象庁[課題番号:7013]が既存の知見に基づいて、6火山(倶多楽,恵山,秋田焼山,白山,青ヶ島, 鶴見岳・伽藍岳)について噴火シナリオの作成作業を進め,いずれもシナリオの素案が 完成した。東京大学地震研究所[課題番号:1407]は、より高度な噴火シナリオ作成を めざし、有珠火山の噴火シナリオを試作した。細目「イ.噴火シナリオに基づく噴火予 測」については、東京大学地震研究所[課題番号:1408]は、有珠火山の噴火シナリオ 試作にあたり、噴火の分岐を規定する条件について検討を行った。気象庁[課題番号: 7014]は、火山噴火予知連絡会を構成する機関と協力して火山活動の予測と情報の発表 を行っている。また、防災科学技術研究所[課題番号:3006]は、平成23年度に観測点 が整備された草津白根火山について、開発した異常変動を自動で検出し変動源モデルを 自動推定するシステムを適用し,波形がよく似た相似地震を自動分類し、震源及び発震 機構解を高精度に決定する方法を開発した。

# ア.噴火シナリオの作成

有珠山の噴火シナリオの試作にあたっては、第1段階として平成21年度作成の三宅島と 同様に現象の分岐系統樹を作成し、それぞれの分岐点における分岐確率を与えた。分岐 系統樹の作成には、これまでの地質学的な噴火履歴研究、古文書による噴火履歴解読、 過去4回の地球物理観測や岩石学的研究成果を用いた。以下に、検討した際にポイントと なった点を示す。

有珠山の噴火履歴:

有珠山は7~8千年前の山体崩壊の後に、1663年から噴火活動を再開し(表1)、それ以 降、山頂で5回、山腹で3回の噴火をおこなっている。前者はプリニー式噴火に始まり、 後者は水蒸気ないしマグマ水蒸気爆発で開始している。これらの噴火は古文書に記録さ れており、20世紀以降は地球物理学的な観測がなされている。こうした情報を基に、分 岐系統樹作成に必要な、活動の推移を整理した。東京大学地震研究所[課題番号:1426] によれば、以下の特徴が明らかにされている。

- (1) 有珠山における1663年以降の噴火は、統計上、30+/-4年おきに起きている。
- (2)小規模である山腹噴火を除いて、噴火の規模とその頻度には対数座標で良い逆相関 がある。
- (3) 地震の前兆現象は噴火場所に限らず噴火前の数日間であることが多い。
- (4) 噴火場所に限らず、1663年を除いて、噴火はいつも溶岩ドームか潜在ドームを作っ て終わっている。
- (5) 噴火により噴出したマグマの量と火山体浅部に貫入したマグマの量の和は、噴火継 続時間との間に負の相関が見られる。

噴火シナリオの試作:

上記の結果に基づいて分岐系統樹を作成し、それぞれの分岐の確率には、東京大学地 震研究所[課題番号:1408]の検討結果を反映させて図1に示す噴火シナリオを作成し た。山体崩壊が起こる確率は約1%であり、山頂噴火と山腹噴火の確率はそれぞれ30と 50%である。山頂噴火では、約70%の確率で噴火がプリニー式で始まり、山腹噴火では、約70%の確率で噴火が水蒸気爆発で始まる。

#### イ.噴火シナリオに基づく噴火予測

平成24年度は、有珠山の噴火シナリオを用いて、予測を行う際にもっとも重要となる 事象分岐の判断を観測に基づいてどう扱えるかを検討した。

噴火の前兆について:

有珠山の噴火では有感地震の群発が大きな特徴となっている。噴火に先行する地震活動は、約6ヶ月続いた1943-45年噴火を除いて、数日間の継続の後噴火している。また、

1977-82年噴火や2000年噴火の場合、地震活動には最初一旦小さなピークが見られている (図2)。正確な震源決定ができた2000年噴火の場合は、この時期の地震の震源がほぼ山 頂直下の深さ4km程度に集中している。この領域は、地震波および比抵抗構造探査の結果 によると基盤岩(6km/s層、10kΩ-m層)との境界にほぼ相当する。そのため、マグマが 基盤岩を突き抜ける際に地震活動が一旦活発化したと考えられる。

また、噴火前に地殻変動も起きると考えられる。古文書では、洞爺湖の湖水面変化が 1769年、1822年、1910年噴火で認められており、地殻変動による影響と考えられる。水 準測量による観測でも、最近の4回の噴火では、いずれも噴火の前後に有珠山を中心とす る広範な地域の隆起が観測されている。また、最近の4回の噴火の噴出量とマグマが貫 入して生じたと考えられる隆起量とを合わせた体積は、いずれも1億㎡のオーダーと推定 され、良く似た量のマグマが噴火に関与したと考えられる。この噴火に伴う体積の増加 は、これまでの噴火では事前に検知されていないが、地殻変動観測の体制を整備すれば 検知可能であると考えられる。

山頂噴火と山腹噴火の分岐について:

山頂噴火は、1977-82年噴火の観測事例や文政の噴火に関する古文書によれば、地震発 生頻度が加速的に増加して山頂噴火に至った(図2)。一方、山腹噴火は、地震活動のピ ークを過ぎて少し経ってから噴火が始まった。前兆地震の震源決定がなされている2000 年噴火では、3月29日の午後から震源が山頂下から南西側に移動し始め、30日昼に地震活 動のピークを迎え、31日の昼過ぎに山腹から噴火が発生した。このような山腹噴火にお ける地震発生の特徴は、揮発性成分の少ないマグマが地表近くで浮力を失った結果、マ グマが横方向に移動したために起きたと解釈することができる。1943-45年噴火や2000年 噴火では、伊達市において有感地震が観測されているが、1977-82年噴火では観測されて いない。これは山腹噴火の場合に、マグマが火山体浅部で浮力中立点に達して横に広が ったために、震源移動と強い地震を起こした可能性が考えられる。2000年噴火では、3月 29日の昼過ぎにGPS観測で明瞭な伸びが観察され(岡崎ほか,2002)、3月29日から井戸 の水位上昇が認められている(佐藤ほか,2002)。こうした違いは、将来の噴火におい て、分岐の判断に役立つと期待される。

火砕流・山体崩壊について:

有珠山の過去の噴火では、噴火の規模が大きい場合にプリニー式噴火の発生直後に火 砕流が発生している。噴出率が大きいほど噴煙柱崩壊が起こったものと理解される。ま た、この350年間でもっとも噴出量の大きかった1663年の噴火を除き、どの噴火でも最後 に溶岩ドームや潜在ドームが形成されている。噴出したマグマ+貫入したマグマの量(噴 火に関与したマグマの量)と噴出継続時間の関係を検討すると(図3)、噴火に関与し たマグマの量が多い噴火では、噴火継続時間が短くなる傾向がある。この結果は、大き い噴火ほどマグマ噴出率が高かったことを示している。すなわち、マグマの上昇経路が ほぼ同じ太さ(断面積)であれば、噴出率が高いほどマグマの上昇速度が大きかったこ とを意味する。過去350年間で見ると、古い噴火ほど噴出したマグマ量は大きい傾向があ るので、マグマの上昇速度が時代と共に遅くなってきている可能性がある。マグマの上 昇速度は、マグマ中の揮発性成分量に依存していると考えられ、1663年以降噴火したマ グマの組成が流紋岩からデイサイトへと、順次未分化に変化してきており、噴火に関与 したマグマの揮発性成分量が時代とともに乏しくなってきたことがひとつの原因とも考 えられる。さらには、初期のマグマ上昇速度の違いが脱ガスの程度の違いを引き起こし、 上昇速度の小さいマグマ中での脱ガス進行によって、より低い揮発性成分量のマグマが 達成された可能性もある。

1910年噴火や1977-82年噴火においては潜在ドームの成長中、2000年噴火では噴火の直 前に、有珠山の北麓で新たな断層群が形成された。これらの断層系は有珠山の北斜面が マグマによって北側に押し出された結果生じたものである。そのため、最悪の噴火シナ リオとしては、マグマ上昇時か噴火後期の溶岩ドーム形成時に北斜面が崩壊する可能性 も検討すべきである。山体崩壊は7~8千年前に起きているが、今後の噴火では山体崩壊 も分岐のひとつとして考える必要があると思われる。

噴火の開始・分岐について:

この350年間の噴火、特に最近の4回の噴火をレビューすると、噴火の開始や分岐に関 して次のようにまとめることができる。

- (1)噴火の準備段階として、これまでの噴火では、前兆現象として、明瞭に捉えられてはいないが、有珠山を中心とした広域の隆起現象が期待される。また、地震の発生回数も増加してくると期待される。(中期的予測)
- (2) 噴火の数日前から地震活動が活発化する。基盤岩をマグマが抜けた段階で一旦地震 活動は低下するが、その後噴火まで地震回数が増加する。(短期的予測)
- (3)山腹噴火の場合は、マグマの地下浅所での移動(震源移動)に伴い、強い地震が発生し、伊達市など山頂から離れた場所でも有感地震が発生する。その後、地震活動がピークを過ぎた後、噴火が開始する。一方、山頂噴火の場合は、マグマは浮力を保ったままで上昇し、地震活動が加速的に活発化してそのまま噴火に至ると考えられる。 (山頂噴火と山腹噴火の分岐)
- (4) 噴火直前には、マグマの浅所貫入に伴い短基線の伸びが認められるようになる。この際、浮力のあるマグマと浮力を失ったマグマとでは山体の膨張速度に違いが生じると期待される。(短期予測)
- (5) 同様に、井戸の水位はマグマの貫入に伴い急激に上昇する。(短期予測)

# これまでの課題と今後の展望

近年、防災関係者などの間で「噴火シナリオ」に対する期待が高まっている。しかし ながら現状の噴火シナリオは、対象となる火山において過去に発生したいくつかの典型 的な規模の噴火事例を並べたものであり、防災担当者は、火山活動の異常が発現した段 階では、当該活動が結果としてどのシナリオに該当するかを知らされないままに対応を スタートさせることにならざるえを得なかった。予知計画がめざしている噴火シナリオ は、発生しうる事象を網羅した分岐系統樹の形態をとり、ある事象の後に分岐する事象 が複数ある場合、その分岐確率とその分岐の判断を示したものをめざしている。平成21 年度に作成した三宅島のシナリオは、十分な数の噴火履歴データに加えて、異常が発生 しても噴火しない噴火未遂についても大胆な仮定を設けて(およそ20年間隔で異常現象 が起きているという知見に基づき、20年ごとの各時期に噴火が発生しなかった場合は噴 火未遂とした)、分岐確率を計算した。

平成22年、23年度に作成した桜島では、異なる課題が明らかとなった。桜島では、南 岳山頂火口(最近では昭和火口)において年間400回程度の噴火が発生するのに対して、 大正噴火に代表されるような山腹割れ目噴火は歴史時代に数例しか発生していない。こ のように、高頻度小規模噴火が発生している火山において低頻度大規模噴火も対象とし た噴火シナリオを作成するには、克服すべき課題が多い。桜島火山で試作した噴火シナ リオでは、高頻度小規模噴火・マグマ蓄積の活動形態と低頻度大規模噴火の活動形態が あることを明らかにし、30年程度の周期で活動形態の分岐が訪れると考えられた。その 噴火形態の分岐は、火山体浅部へのマグマの上昇率によって生じると提案された。

今回対象とした有珠山は平成21年度に対象とした三宅島と似たアプローチであり、桜 島のような高頻度小規模噴火と低頻度大規模噴火といった活動形態の組み合わせではな い。すなわち、過去の噴火履歴を統計的に処理して分岐確率を計算した。そこでは、三 宅島の場合には顕在化しなかった山頂噴火と山腹噴火の分岐や火砕流・山体崩壊などの 分岐事象を考慮する必要があることが明らかになった。これらの分岐のいくつかは、火 山体構造探査や過去の観測研究の成果を考慮することによって、マグマの噴出速度によ って、噴火の規模や山頂噴火と山腹噴火の分岐が規定され,地震活動にも違いが生じる ことが明らかになった。このマグマの噴出速度は、マグマの異なる上昇速度に依存し、 その原因となるマグマの揮発性成分の量が規定している可能性が指摘された。噴火に関 与したマグマ量は山頂と山腹噴火で違いがない。この350年間で噴出率・マグマ量共に時 代と共に小さくなっていることから、揮発性成分量が減少してマグマの上昇速度が低下 している可能性がある。また、物質科学的研究からは、マグマ供給システムが時代とと もに変化している可能性も指摘されている。こうした情報を噴火シナリオにどう反映さ せればよいか、今後検討していく必要がある。

# 成果リスト

Iguchi, M., Surono, Nishimura, T., Hendrasto, M., Rosadi, U., Ohkura, T., Triastuty, H., Basuki, A,, Loeqman, A., Maryanto, S., Ishihara, K., Yoshimoto, M., Nakada, S., Hokanishi, N. (2012) Methods for Eruption Prediction and Hazards Evaluation at Indonesian Volcanoes. Journal of Disaster Research, 7, 26-36.

中田節也・森田裕一・大久保修平・上嶋 誠・清水洋ほか(2012) 2011 年霧島火山(新燃岳) 噴火に関する総合調査(2). 第49 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 1-6.

井口正人, 2012, 桜島の火山活動予測を考える上で必要なデータベース, 月刊地球, 34, 322-330.



図1. 有珠山の噴火シナリオ(東京大学地震研究所[課題番号:1407])



図2. 有珠山の最近4 噴火で観測された噴火の前兆地震の発生状況(東京大学地震研究所[課題 番号:1408])



図3. 有珠山の1663 年以降の噴火における隆起+噴出量と噴火の継続時間の関係 過去の噴火の隆起量は最近の4噴火の前後で観測された隆起量の平均値(0.14 km<sup>3</sup>)とした。(東 京大学地震研究所[課題番号:1408])

噴火年	前兆現象	前兆地震	様式	期間	噴出量 (km³)	備考
1663		3日間?	山頂: サージ→軽石→サージ	17日	2.5	死者5名
先1769		?	山頂: 軽石→サージ→ドーム	?		?
1769	洞爺湖水減	3日間	山頂: 軽石→火砕流→ドーム	5月	0.11	家屋被害
1822	半年前湖水減	60時間	山頂: 軽石→火砕流→ドーム	114日+	0.28	死者82名
1853		9日間	山頂: 軽石→火砕流→ドーム	1月+	0.35	
1910	湖水の増減	5日間	山腹:水蒸気→潜在ドーム	12月	0.003	泥流死者
1943-45		6ヶ月	山腹: マグマ水蒸気?→サージ→ ドーム	15月	0.001	降灰死者1 名
1977-78		36時間	山頂: 軽石→マグマ水蒸気→ ドーム	3月, Dm4.5 年	0.09	泥流死者
2000		83.5時間	山腹:マグマ水蒸気→ドーム	4月+	0.001	

# 軽石:プリニー式噴火,ドームは潜在ドームを含む。

表1. 有珠山の1663 年以降の噴火のまとめ(東京大学地震研究所[課題番号:1407])

# 1 (3) 地震・火山現象に関するデータベースの構築

地震火山データベース構築計画推進部会長 大見士朗

## 1. はじめに

平成 21 年度から始まった「地震予知・火山噴火予知計画」では、地震現象や火山現象 に関する予測のために必要な基礎データベースを構築するとともに,それらに関する情 報の統合化を図り,「地震・火山現象に関する統合データベース」として体系化するこ とを目指している。

# 2. 平成24年度成果の概観

以下、平成24年度の主な成果について概観する。

#### (ア) 地震・火山現象の基礎データベース

(地震や地殻変動観測に関する基礎データベース)

防災科学技術研究所により構築されている高感度地震観測網,広帯域地震観測網,強 震地震観測網等による地震波形データベース[課題番号:3007],気象庁による全国の地 震カタログ[課題番号:7015],さらには国土地理院によるGPS観測データや潮位観測デー タのデータベース[課題番号:6009,6011]等々は、引き続き、2011年3月の東北地方太平 洋沖地震以後の種々の地殻活動研究に多大な貢献をした基礎データ群となった。これら のうち、課題番号6009については、成果公表のURLが変更されたので、「地震火山噴火 予知研究計画データベース」http://epdb.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp上の登録URLを変更 した。

(地殻変動観測に関する基礎データベース)

北海道大学を中心とするグループによる、全国ひずみ・傾斜データの流通と一元化の作 業は、平成24年度も順調に進められ、平成24年度末現在、合計108観測点,525チャンネ ルのデータを試験流通させるに至っている。また、これらのデータを使用して、巨大地 震の発生時に即時にMwを推定する手法の開発も開始した。また、本課題のURLを「地震 火山噴火予知研究計画データベース」http://epdb.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jpに登載し た [課題番号:1001]。

(火山に関する基礎データベース)

気象庁では活火山データ整備[課題番号:7018]として、全国の活火山の過去の活動についての文献・資料等の再調査や、再編成された観測網等の取りまとめを行っている。

その内容は火山の資料全般から、週間火山概況、火山活動解説資料等の多岐におよび、 火山に関する統合データベースを目指している。今年度は、日本活火山総覧(第4版) の原稿を確定させ、製本を行った。また、国土地理院では、火山基本図や火山土地条件 図整備などが行われており、今年度は岩手山の火山土地条件調査を実施するとともに、 恵山の火山基本図の数値データの作成が行われた。また本課題の成果公表URLが変更さ れたため「地震火山噴火予知研究計画データベース」上のURLを変更した[課題番 号:6010]。

(地球電磁気観測に関する基礎データベース)

気象庁地磁気観測所では、数少ない地球電磁気観測関連のデータベースのひとつである、 地磁気永年変化のデータベースの整備・構築を行っており、柿岡・女満別・鹿屋・父島 の地磁気4成分連続観測データを統一的な形式に整理し、地磁気永年変化データベー スに登録する作業が続けられている[課題番号:7017]。

# (イ)地震・火山現象に関する情報の統合化

防災科学技術研究所は、同機関が長年にわたって蓄積してきた基礎データベースから得 られた研究成果をもとに、地震波速度・減衰・熱・温度・地質等の総合データベースの 構築を試みている。今年度は、日本列島下の三次元地震波速度構造表示ソフトウェアに、減 衰構造や温度構造なども表示できる機能を加えたソフトウェアを開発した.データ入力形式を改 善し、短時間で表示できるソフトウェアを開発した。[課題番号:3008]。

産業技術総合研究所(産総研)においても、これまでに活断層関係をはじめとする複数の基礎データベースが構築されてきたが、それらの中の、地殻応力場データベース, 活断層データベース,活火山データベース,火山衛星画像データベースなどを統合して、 地震や火山活動に関係する地質情報データベースとして統合する試みがなされている。 火山衛星画像データベースに関しては、今年度、あらたに約21,000シーンの追加が行われ、全登録シーン数が165,000シーンとなった[課題番号:5004]。これに加えて産総研 では、将来噴火の可能性の高い活動的な火山を数火山選び、火山地質図の整備や、噴火 シナリオの作成・高度化等の作業を行っている。今年度も、数火山において噴火履歴調 査と火山地質図整備を行った。その中では、諏訪瀬島火山と桜島火山の火山地質図を完 成させ、印刷を行った。なお、九重、蔵王における野外調査研究は継続中である。[課 題番号:5005]。国土地理院では、前計画に引き続き、都市圏における活断層図の整備が 行われており、今年度は横手盆地東縁断層帯、双葉断層および関東平野北西縁断層帯の 3断層帯における活断層図整備が行われた。また本課題の成果公表URLが変更されたた め「地震火山噴火予知研究計画データベース」上のURLを変更した「課題番号:6012]。

名古屋大学は、「日本列島地殻活動総合相関評価システムの研究」と称して、地殻内 部の構造や現象に関する情報を集積し、統一フォーマットでのデータベース化と可視化 を試みている。また、成果をウェブ上で公開した。URLは、以下のとおりであり、これは「地震火山噴火予知研究計画データベース」にも登録されている。

http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/yamaoka/EWSN1703/ [課題番号:1703]。

京都大学防災研究所では、「日本列島の地殻構造データベースのプロトタイプの構築」 として、南海トラフや西南日本内陸等を初めとする各地を対象とした地殻活動シミュレ ーションや強震動予測シミュレーション等に資するため、既存研究成果の数値化を行い、 日本列島地殻構造データベースとして集約することを試みている。[課題番号:1804]。

# 3. これまでの課題と今後の展望

これまでの地震予知研究計画(地震予知のための新たな観測研究計画、以下、前計画 という)においては、種々の機関において基礎データの蓄積およびそのデータベース化 にかかる研究が着実に推進されてきた。しかしながら、個別データベースの構築の実績 が著しいことに比較すると、相互のデータベースを有機的に統合して活用するという作 業の努力が若干欠落していたきらいがあり、これらの情報を体系化して地殻活動予測シ ミュレーションモデルの構築に資するという本部会の最終目標に至ることが困難であ ったという反省があった。この反省に鑑み、平成21年度から始まった「地震予知・火 山噴火予知計画」では、地震現象や火山現象に関する予測のために必要な基礎データベ ースを構築するとともに、それらに関する情報の統合化を図り、「地震・火山現象に関 する統合データベース」として体系化することを目指すことになっている。

本計画のこれまでの4年間の成果をみると、まず、前計画に引き続き、地震観測・地 殻変動観測等の基礎データの蓄積とデータベース化が着実に行われており、これらのデ ータが、東北地方太平洋沖地震後の地殻活動調査研究に多大な貢献をしたことは論を待 たない。

また、本計画により、初めて、大学関係のひずみ計・傾斜計データの流通と一元化が 図られ、平成23年の新燃岳噴火や東北地方太平洋沖地震等に際して、その有用性が確認 されたことは意義が深い。ただし、Hi-net等の大学以外の微小地震基盤観測網の充実に より大学の微小地震観測網が縮小傾向にある状況で、地殻変動観測網の維持を各大学等 がどのように位置づけるか等、今後の長期の安定運用に関しての解決すべき課題が残さ れているものと考える。

さらに、本計画の柱ともいうべき、データの統合化に関しては、新しい概念でもある ことから、各機関でこれの指向するところを模索している動きがみえる。それらの中か ら、基礎データから導かれた研究成果をデータベース化する試みや、機関横断型のポー タルサイト構築等の試みが現れていることは興味ある成果である。

しかしながら、本部会の最終的な目標である地殻活動予測シミュレーションモデルの 構築に資するための体系化されたデータベースの構築に関しては、いまだに模索の状態 が続いているように見える。ひとつの理由として、データベース課題担当者は、必ずし も、シミュレーション課題の現状に精通していないことが挙げられる。さらに、データ ベース構築そのものは、研究の本質を担うものでなく、後方支援を担当するものである ことから、研究として注力する対象となりにくいことも挙げられる。

このような点から、次期計画での本項に関しては、以下のような検討が必要と考えら れる。すなわち、シミュレーションに資するデータベースの構築は、シミュレーション 課題、または、観測データ解析を行う課題そのものの一部として位置付けるべきである。 シミュレーションを実行するには、データベース課題の有無にかかわらず、モデルとな る構造が必要であり、構造モデルは研究に必須の産物として生成される。実際に、強震 動シミュレーションに資するための構造モデル等、詳細なチューニングがなされている 構造モデルも存在するようである。観測データ解析を行う課題により提出された初期構 造ともいうべき成果を基本に、シミュレーション課題担当者により観測波形データ等を より良く説明するための改良が頻繁に加えられることにより、精度の高いモデルが期待 できる。また、これらのデータベースの取りまとめや公開は、もはや研究ではなく、後 方支援以外のなにものでもないことから、研究課題として実行するのではなく、企画部 等のヘッドクォータ的組織がアウトソーシング等の手段によって業務として行うこと が望ましい。これらは、個別の研究機関で小規模におこなうより、企画部等が要望を取 りまとめ、一元管理することで、より一層、効率的な作業が可能になるものと考えられ る。

成果リスト

原田昌武・板寺一洋、神奈川県西部地域における2011 (平成23)年の地殻変動観測結果、 神奈川県温泉地学研究所観測だより、第61 号、53-62、2012.

笠原稔・高橋浩晃・山口照寛, 1m 長および2m長伸縮計の動作特性, 日本測地学会秋季大会, 51-52, 2012.

真城亮成・高橋浩晃,ひずみ計を用いた即時Mw 推定手法の開発,日本地球惑星連合2012 年大会, SSS40-P05, 2012.

眞城亮成・高橋浩晃,ひずみ計を用いたMw 即時推定手法の開発(その2),日本地震 学会秋季大会予稿集,C22-13,2012.

眞城秋成,巨大地震のMw 即時推定に向けたひずみ計の静的・動的応答特性の検討,北 海道大学地球惑星科学専攻修士論文,2013.

高橋浩晃・山口照寛・中尾茂・松島健・加納靖之・山崎健一・寺石眞弘・伊藤武男・鷺谷威・大久保慎人・浅井康広・原田昌武・本多亮・加藤照之・三浦哲・横田崇・勝間田明男・小林昭夫・吉田康宏・木村一洋・太田雄策・田村良明・柴田智郎,全国ひずみ傾斜データの流通一元化と公開,日本地球惑星科学連合2012年大会,STT59-P04,2012. Geshi. N., V. Acocella, and J. Ruch, 2012, From structure- to gravity-controlled subsiding calderas: evidences, thresholds and mechanics. Bulletin of Volcanology, 74, 1553-1567. 小林哲夫・味喜大介・佐々木寿・井口正人・山元孝広・宇都浩三, 2013, 桜島火山地質 図(第2版),火山地質図no.1,産業技術総合研究所地質調査総合センター,印刷中. 嶋野岳人・下司信夫・小林哲夫, 2013,諏訪之瀬島火山地質図,火山地質図no.17,産業 技術総合研究所地質調査総合センター,印刷中.

Kawamura, M., T. Kudo and K. Yamaoka, 2012, Spatiotemporal Relationship between Geodetic and Seismic Quantities: A Possible Clue to Preparatory Processes of M>6 Inland Earthquake in Japan. International Journal of Geophysics, 2012, doi:10.1155/2012/610712

# 2(1)日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

「日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象」計画推進部会長 松澤暢 (東北大学大学院理学研究科)

地震・火山現象に関する予測システムを構築するためには、まず何よりも枠組みを明 確にしなければならない。日本で地震や火山噴火が発生するのは、日本列島がプレート 沈み込み帯に位置しているためであるが、プレート沈み込みによって地震・火山噴火が 生じる機構は完全には解明されていない。その基本的な仕組みを解明し、長期的に見た ときに日本列島はどのような場にあるのかを明らかにすることが、本研究計画の目標で ある。

具体的には、日本列島及びその周辺域で、長期的なプレート運動とそれに伴う応力場 を明らかにし、上部マントルにおける水の供給・輸送過程とマグマの生成・上昇機構を 明らかにして、これらの流体と地震発生との関係を解明することが重要である。このた めには、マグマ等の地殻流体の分布を含む広域の地殻・上部マントル構造を明らかにし、 また、地震活動と火山活動の相互作用に関する研究を推進する必要がある。さらに、地 震現象の予測精度向上に不可欠な地震発生サイクルに関する理解を深めるために、アス ペリティやセグメントの破壊様式についての過去の活動履歴を明らかにすると同時に、 長期的な内陸の地殻歪の時空間分布を解明する必要がある。

このような観点から、本研究計画においては、下記の5項目について観測研究が実施 されている。

ア.列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場

- イ. 上部マントルのマグマの発生場
- ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布
- エ. 地震活動と火山活動の相互作用
- オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

以下では、これらの項目順に従って、平成24年度(2012年度)の成果の概略について 述べる。なお、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)の発生を受け た建議の見直しにより、超巨大地震に関わる新たな項目が立てられ、特に「オ.地震発 生サイクルと長期地殻ひずみ」からいくつかの課題が新たな項目に移動した。ここでは 重複を避けるために、それらの移動した課題については触れないが、今後の展望につい ては、超巨大地震に関する部分も述べることにする。

# ア.列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場

日本列島およびその周辺域のプレート運動を理解するために、VLBI(超長基線電波干 渉計)の国際・国内観測とアジア・太平洋地域でのGNSS連続観測(国土地理院[課題番 号:6013])、およびSLR(衛星レーザー測距)国際共同観測(海上保安庁[課題番号:8005]、 海上保安庁、2011)を実施した。VLBI 観測により得られたデータを解析することで得ら れた日本列島及び周辺地域のプレート運動を図1に示す(国土地理院[課題番号:6013])。 また、SLR 観測により求められた下里の1997~2012年の期間の座標変化を図2に示す(海 上保安庁[課題番号:8005])。

2011年東北地方太平洋沖地震は M9.0 という巨大な地震であり、プレート運動を理解す

るためにも、この地震がどのようにして生じたのかを理解することは重要である。

地震波形のインバージョン解析や地震前後のメカニズム解の変化等から、2011 年東北 地方太平洋沖地震では、プレート境界面上に蓄えられたほとんど全てのひずみが解放さ れたと考えられる(Hasegawa et al., 2011、深畑他, 2012)ため、応力降下量の見積も りなどから絶対応力レベルの推定が可能である。応力降下量の慎重な推定により、海溝 から震源付近まで約10MPaという値が得られた(図3)。プレート境界面上でほぼ全ての ひずみを解放するには摩擦力を極端に下げる何らかのメカニズムが必要であり、摩擦発 熱による間隙流体圧の上昇(thermal pressurization)の可能性も考えられる(Mitsui et al., 2012a, b)。またこの地震開始初期の1 Hz GPS データから、最初の大きなモーメン ト解放が地震発生約20秒後から気象庁震源の約35 km 西で始まったこと(Fukahata et al., 2012)、また、モーメント解放の立場でみればそのピークは海溝寄りではなくむしろ震源 付近であること(Chiba et al., 2012)をそれぞれ明らかにした(東京工業大学[課題 番号:1603])。

この太平洋沖地震を理解するために、超巨大地震を伴う島弧のひずみ蓄積/解放過程 について、東北日本弧と世界の他の沈み込み帯とを比較した(図4)。東北日本弧におい ては、太平洋岸で急速な沈降が観測される一方で、第四紀後期の旧汀線高度は緩慢な隆 起を示す。東北日本では幅広い固着領域の浅部のみが地震時に滑り、割れ残った深部固 着域で余効滑りが起こると考えられる。このような深部固着は、他の超巨大地震発生帯 には存在しない可能性が高い。日本海溝に沈み込んでいるプレートの年齢は極めて古く 従って低温であるから、このように深い固着域が存在するのは熱的な原因によると考え られる(東京工業大学[課題番号:1603]、池田ほか,2012、Ikeda,2012)。

次に、2011年東北地方太平洋沖地震の断層深部延長の余効的すべりと地殻・上部マン トルの粘弾性的回復の両面から地震時の沈降及び地震発生以前の長期的な沈降を回復さ せるモデルについて検討した。地震後約7か月間の余効すべりを推定した結果をもとに 断層面を9枚の短冊状の長方形で近似し、上述の仮説の通り、120kmまで余効滑りが進行 した場合の上下地殻変動の分布とプレート運動方向の上下変動プロファイルを図5に示 す。深さ120kmまで約3.5mの余効滑りを与えることにより、海岸線が地震時の沈降量の 約1mを回復することができると考えられる。また、球対称粘弾性地球モデルを用いて粘 弾性余効と地震時及び余効滑りの量をすべて考慮した場合、断層モデルの与え方によっ ては、約1000年とされる地震サイクルで上下変動量が微弱な隆起を示すという地形学的 な証拠と整合性のある条件が存在することが示された(東京大学地震研究所[課題番号: 1410])。

一方、西日本の広域の応力場の特徴を明らかにするため、香川西部-燧灘-高縄半島に 発生する地震を詳細に調べ、正断層型の地震が高縄半島や燧灘西部に発生していること がこれまでに明らかになっていたが、本年度は燧灘東部の地震のメカニズム解を詳細に 調べた。その結果、横ずれ型が最も多く、正断層型が最も少ないことがわかった。した がって、予察的結果ではあるものの、燧灘東部では正断層型の応力場が卓越している可 能性が低いことが明らかになった(高知大学 [課題番号:2102])。

# イ.上部マントルとマグマの発生場

火山の噴火の源となるマグマはマントルウェッジ内で作られると考えられるが、メル

トを生じるためには H<sub>2</sub>0 が供給される必要があり、その大元は沈み込んだスラブに由来すると考えられる。

東北地方のスラブ内地震に見られる太平洋プレート上部境界でのPS変換波の走時を用 いて地震波速度トモグラフィを行い、海洋性地殻の面的なP波速度分布を調べた結果、 図6に示すように、深さ60-90kmの範囲において、得られたP波速度は、岩石学的モデ ルや室内実験から期待される速度よりも10%程度遅いことが明らかになった。この結果は、 前弧域では海洋性地殻が多量の水(自由水)を保持していることを強く示唆しており、 また、速度構造から期待される水の分布域と地殻内地震分布とは非常に良い対応を示し ている(東北大学[課題番号:1203])。

近地および遠地地震の走時データを用いて、日本列島下における深さ700kmまでの三 次元P波速度構造を詳細に決定した結果、図7に示すように、九州下ではフィリピン海 プレートが深さ430kmまで沈み込んでいること、九州地方下のマントルウエッジには斜 めの低速度域が明瞭に分布し、それは東シナ海下から火山フロント下まで連続的に存在 することなどが明らかになった(東北大学[課題番号:1203])。

沈み込み帯における噴出するマグマ及び地殻物質は、マントルで製造されたマグマの 分化した最終生成物である。その成因を解明するために、海洋性島弧(伊豆小笠原マリ アナ弧)において、無人探査機を用いて調査を行った結果、海底火山、及び火山島の海 底斜面に、初生マグマを見い出し、さらに記載岩石学的及び地球化学的分析・解析によ り、一つの火山に二種の初生マグマが存在することを明らかにした(海洋研究開発機構 [課題番号:4002])。

一方、火山岩及び地下水・温泉・熱水系の調査・サンプリングに基づき、テクトニックセッティングとスラブ流体の起源の関係性を明らかにした。特に中部地方に産出する 火山岩について、流体量の制約と、数値シミュレーションを合わせて、太平洋プレート とフィリピン海プレートの二重のスラブ沈み込み帯でのマグマ生成過程の定量的モデル 化に成功した(Nakamura and Iwamori, 2013)。その結果、中部地方の下では、ソースマ ントルが二重のスラブからもたらされた液相濃集元素に富むこと、かつ主にガーネット 橄欖岩がソリダス近傍の低温で融解するために、アダカイトとよばれる高 Sr/Y 比を有す る岩石を産出することが分かった(図 8)。従来、アダカイトはスラブ溶融を伴う高温沈 み込み帯で産出するという定説があったが、中部日本のような極めて低温の場において、 むしろそのようなマグマが生成されることが分かった。一方、中国地方の白亜紀花崗岩 のジルコン年代及び同位体分析結果に基づき、スラブ溶融を伴う火成活動の機構に制約 を与えつつある。これらの研究結果は、沈み込み帯の物質循環の多様性を、沈み込むス ラブ、ウエッジ対流、テクトニックセッティングに関わる基本パラメータの組合せで再 現できることを意味しており、一般化に成功しつつあると言える(東京工業大学[課題 番号:1603])。

# ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布

上記のようにマントルにスラブから供給された H<sub>2</sub>0 はやがて近くに達し、そこで地震発 生の原因となっていると考えられるため、このような地殻流体の状態と分布を調べるこ とは極めて重要である。このような流体の検知には比抵抗測定が有効であると考えられ る。 濃尾地震断層周辺域について、2012年5月までのデータを用いて3次元インバージョ ンを行って推定された構造を図9に示す。図9bに示ように濃尾地震断層域直下の中部地 殻は、1kΩ-mを超える高比抵抗域と推定された。跡津川断層周辺域での構造研究の考察 から、地震発生域は高地震波速度、高比抵抗であり、流体の存在を示すと考えられる低 地震波速度,低比抵抗層がバリアとなって地震のサイズを決定するのではないかとの議 論がなされたことを考慮すると,濃尾地震断層が走った南南東方向にバリアとなる流体 存在域がなかったことが,濃尾地震がM8クラスの大地震になった一つの要因としてあ げられるのかも知れない。ただし、流体の存否に関して,高比抵抗域は流体が孤立して 存在する領域であるとも解釈できるため,上記の議論のためには地震波速度構造との対 比による検討が必要である(東京大学地震研究所[課題番号:1411])。

一方、図 9c に示すように、福井-岐阜県境付近の上部マントル内に東西に連なる低比 抵抗域が決定された。低比抵抗域は、図 10 の南北断面図に示されるように、100km 以深 の深部から立ち上るかのような形状を示していて、沈み込むスラブからの脱水によるも のである可能性が高く、その流体の存在が、本研究エリアでは福井-岐阜県境を走る新 潟-神戸ひずみ集中帯のひずみ集中に関わっている可能性がある。本ターゲットエリア ではフィリピン海スラブはその撓曲のために 40-60km にその上面が決定されていて、明 らかに低比抵抗域の最深部はその下部に位置している。このため、本地域での深部低比 抵抗帯は、フィリピン海スラブの下に横たわる太平洋スラブからの脱水を示唆する。こ れは図 8 に示した火山岩及び地下水・温泉・熱水系の調査・サンプリングに基づいて推 定された中部地方下流体移動モデルと良く整合してる(東京大学地震研究所[課題番号: 1411])。

これまで秋田県内で得られた MT 法による観測データについて、TM モードと TE モード を併用してインバージョン解析を行い、新たな構造モデルを算出した。それぞれの測線 についての解析結果を図 11 に示す。震源の位置と比抵抗の関係をみると、比抵抗の急変 部で普段の地震活動が生じている傾向が明瞭になった(秋田大学[課題番号:1301])。

蔵王火山および福島盆地西縁断層を含む地域で、これまで28 観測点において広帯域 MT 観測を実施してきたが、今年度はこれらに加えて、このエリアの北東に隣接する長町 利府断層の61 観測点の既存データをコンパイルした。さらに6 観測点の追加観測を行っ た。これらから、データの品質の良い全95 観測点のデータを選び、インピーダンスの全 成分を使った3次元解析を行った。この結果、長町利府断層の深部延長に低比抵抗ブロ ックが解析され、その北西縁の高比抵抗部で東北地方太平洋沖地震以降の誘発地震が多 発している。地殻内流体の移動が誘発地震をトリガーしたと推定される(東京工業大学 [課題番号:1601])。

西南日本弧を横断する測線(鳥取西部・島根東部-広島-愛媛-高知西部)に関する地殻・ マントル上部の比抵抗構造調査として、未測定エリアである広島東部から愛媛今治大三 島に至る山陽から瀬戸内海地域で観測を行った。また、このエリアの電磁気ノイズ環境 の調査状況を考慮して、山陰地方の島弧縦断方向の不均質構造の解明を充実させる調査 研究も加えて実施した。その結果、鳥取県中西部の地震(2002 年、Mj5.3)発生域でも山 陰地方地震活動帯で確認された深部低比抵抗領域が連続して存在する可能性を示すデー タが得られた(鳥取大学[課題番号:2001])。

以上のように比抵抗測定から地殻流体の存在が推定されているが、それ以外に、地震

波の速度、減衰、散乱からも地殻流体の存在が推定されている。

北海道下において地震波減衰構造を求めた結果、複数の地質帯・地質境界との明確な 対応が見られ、大きな低Q領域が日高主衝上断層の西側の深さ0-70kmで見いだされた。 また、1970年 M7.1日高山脈南部地震の震源はこの低Q領域の東端に位置し、1982年 M6.7 浦河沖地震の震源も低Q領域中で最も低い値を持つ領域に位置しているという特徴があ る。さらに、地震波低速度異常域内部での特異な微小地震活動(Kita et al., 2012)も、 この最も低い値を持つ低Q領域に集中している。これらの結果は、内陸大地震や微小地 震活動の発生が、流体や含水鉱物の空間分布と関係する可能性を示唆している(東北大 学[課題番号:1204])。

「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」による稠密機動地震観測の記録を用いて P 波減衰構造を推定した。解析の結果、深さ 10km では越後平野、新潟県中越沖地震の余震 域北西部、及び新潟県中越地震の余震域南部において、地震波速度の低速度域と調和的 な高減衰(低 Q)領域が存在することが分かった。一方、新潟・長野県境から長野県北部に かけての信濃川に沿った活断層帯の北西側では、地震波速度については低速度であるも のの、減衰構造でみると低減衰(高 Q)であることが分かった。より深部においては、全体 的には低減衰(高 Q)領域の中に、局所的に火山に対応する高減衰(低 Q)領域の存在を確認 することができた(防災科学技術研究所[課題番号:3009])。

遠地P波のトランスバース成分解析をHi-net データに適用した結果、火山あるいは火山と断層域近傍の領域は、断層域のみのある地域よりも、統計的に短波長不均質強度がやや大きいことがわかった(Nishimura, 2012)。一方、北部伊豆小笠原弧において、多重前方散乱による見かけの振幅減衰を考慮し、S波減衰の三次元構造を推定した結果、北部伊豆小笠原弧は前弧側で減衰が非常に弱く、火山下は周囲に比べ強い減衰を示すことがわかった。ランダム速度不均質と減衰因子を比較すると、北部伊豆小笠原弧の火山下の媒質は東北日本前弧側と類似し、東北日本の火山下は、不均質性と減衰が特に強い媒質といえることがわかった(東北大学[課題番号:1204])。

長野県西部地域において、10kHz サンプリングの地震観測データの特長を生かして、 詳細なP波速度(Vp)、S波速度(Vs)、Vp/Vs構造を推定した結果を図12に示す。断層 に直交する2つの断面における推定値が示されている。特徴的な領域について見てみる と、Region A では地震活動が活発で、Vpが小、Vs は大、Vp/Vs は非常に小さくなって おり、一方、Region C では地震活動がほとんど無く、Vp がやや大、Vs は普通、Vp/Vs は やや大となっている。地震活動は、地震波速度が遅いところでは少なく速いところで多 い傾向があるが、Vp/Vs の方がより相関が良く、Vp/Vs の小さなところに震源が集中し ているように見える(京都大学防災研究所[課題番号:1806])。

このことを定量的に検討するために、図 13 に、各グリッドの Vp/Vs 値と地震数の関係 を示した。図 13b に Vp/Vs 値とその値をとるグリッドの数との関係を示したが、Vp/Vs が 1.75 以上の値をとるグリッド数は全体の半分近くある。一方、図 13a の Vp/Vs 値毎の地 震数の関係を見ると、Vp/Vs が 1.75 以上の値をとるグリッドでは地震はほとんど発生し ていないことがよく分かる。さらに個々の Vp/Vs の値のグリッドに発生する平均的地震 個数をプロットした図 13c ではその傾向はさらに顕著で、Vp/Vs が 1.65 以下のグリッド は数少ないものの、そこに地震が集中して発生する傾向があることがわかる。このよう に、長野県西部地域においては、地震活動と Vp/Vs 比の関係が非常に良いことが分かっ た(京都大学防災研究所[課題番号:1806])。

長野県西部地域では、竹田・他(1999)によりクラックのない岩石本体の速度が求めら れており、ここで推定された速度はいずれも岩石本体の速度より小さいため、クラック とその中の流体の有無で解釈可能である。Vp/Vs の大きな領域では、薄いクラックを満 たした水の効果により、非地震・非弾性変形が進行して、地震が起こりにくいものと推 定される。このような非弾性変形が発生していれば、その周囲で応力集中を起こし、応 力場が回転することが期待される。このことを、標準的な応力逆解析手法により検討し た結果、やはり Vp/Vs の大きなグリッドの周囲で応力場が回転しているように見えるも のの、残念ながら今のところ、その違いは 95%の信頼区間を越えて有意ではないことがわ かった。今後、さらにデータを蓄積して、この関係が有意となるかどうかの検証を行う ことが重要である(京都大学防災研究所 [課題番号:1806])。

2010 年11 月下旬から今年度の6 月下旬にかけて展開した和歌山地域を横断する長さ 約 90km の南北測線上の稠密地震計アレイデータの解析を行った。和歌山地域の地震活動 は深さ 10km 以浅に位置し、地震発生層の下限が活動域の中心部では縁辺部に比べて浅く なる、上に凸状の形状を示すことが明らかになった。地震発生域の深部延長部には、顕 著な低速度体が存在し、下部地殻全体が低速度を示す。この低速度体の分布と活発な非 火山性地震の分布との間には、明瞭な空間的な対応関係が見られる。2009 年度に地震発 生域の南部で取得された比抵抗構造(Uyeshima et al., 2010)を参考にすると、この低 速度体は地殻内の流体である可能性が高い(東京大学地震研究所[課題番号:1412])。

2011 年 7 月から 2012 年 3 月にかけて展開された、和歌山地域南部を東西方向に横断 する稠密地震計アレイのデータを用いて地震波トモグラフィー解析をおこなった結果、 やはり南北測線同様に、地震発生域直下に低速度体がイメージングされ、地殻流体の存 在を示唆する。東部において地震発生層の下限が浅くなるが、それに応じて低速度層の 上端も浅くなっており、地震発生域の深部延長部に存在する地殻流体が、非火山性地震 の発生と密接な関連があると考えられる(東京大学地震研究所 [課題番号:1412])。

紀伊半島下のフィリピン海プレート内で発生したスラブ内地震の地震波動を、Hi-net で得られた地震記録波形の解析と数値シミュレーションによって調査した。3次元媒質中 での波動場計算よる理論記象と観測記録の結果、観測記録中のチャネル波の振幅を説明 するためには、海洋性地殻が低速度層であるだけでなく、地震波動場を効率的にトラッ プし、振幅を保持する何らかのメカニズムが必要であることが分かった(防災科学技術 研究所[課題番号:3009])。

地震波干渉法を用いて、東北日本弧のウェッジマントル内部の反射・散乱構造のイメ ージングを行った結果、図 14 に示すように、反射的なウェッジマントルおよび透明な沈 み込むスラブのイメージングに成功した。ウェッジマントル内部でも前弧側よりも火山 フロント直下・背弧側で顕著な反射・散乱体の存在を示唆する結果が得られた。ウェッ ジマントル内部の反射・散乱体は地震波トモグラフィーで得られた P 波低速度体の周辺 に分布する(東北大学 [課題番号: 1204]、I to et al., 2012)。

ひずみ集中帯周辺域の地下構造を調査するため、佐渡島から猪苗代湖周辺に展開した 直線アレイの観測データを用いたレシーバ関数解析を行った。その結果、佐渡島の深さ 25km付近、越後山脈の下35km付近にモホ面と思われる変換面の存在を確認した。また、 越後山脈周辺の下部地殻は地震波速度が南北方向により速く伝わる異方性構造を示すこ とが分かった(防災科学技術研究所[課題番号:3009])。

西南日本のP波方位異方性構造を推定した結果、図15に示すように、九州地方下の背 弧マントルウエッジの異方性は海溝軸に直交するのに対し、前弧マントルウエッジの異 方性は海溝軸に平行であるという、東北日本弧の同様の性質を示すことが明らかになっ た(東北大学[課題番号:1204])。

## エ。地震活動と火山活動の相互作用

九州中南部地域下におけるマグマの生成に関するモデルを構築するためは、フィリピン海プレートからの脱水やマントルウェッジ内の流体の挙動を解明する必要がある。

霧島山周辺で新燃岳モニタリング用に行われている臨時観測点とHi-netの定常観測点 を含めて、宮崎市から阿久根市まで九州南部を横断する稠密リニアアレイを構築し、暫 定的なレシーバ関数イメージを得た(図 16)。西北西に傾き下がるフィリピン海スラブ内 の海洋モホ面を深さ 120 km まで確認することができる。ただし、深さ 70 km くらいから レシーバ関数イメージから読み取れる海洋モホ面と黒丸で示される深発地震面との間に 開きが生じるが、これは水平成層構造を用いたイメージングによるバイアスであり、今 後補正する必要がある。大陸モホ面は、測線の中~西部では深さ 30~35 km にみられる が、東部のウェッジ域では不明瞭である。これは、ウェッジ部がスラブ起源流体の影響 で低速度化し、モホ面が高速度層上面ではなくなっているためと考えられる。宮崎市付 近の深さ 40 km のプレート境界面は安定すべり域である可能性が高い(京都大学防災研 究所[課題番号:1805])。

九州地域でのNetwork-MT法観測によるデータをもとにした広域比抵抗構造の2次元解 析結果を図17に示す。3次元比抵抗構造解析により、得られたモデルの妥当性に関して 検討を加えた結果、火山フロントの主要火山の地下には、背弧側深部から沈み込むプレ ートの上面に沿うように浅部までに至る低比抵抗異常域が不連続に存在していることが 明らかになった。一方、沈み込むプレートを含め火山フロントより前弧域は、概ね高比 抵抗であるが、逆に、非火山地域では、前弧域のプレート上面から浅部にわたり、火山 地域と比較して低比抵抗値を示しているがわかった(京都大学防災研究所[課題番号: 1805])。

別府-島原地溝帯を中心として、九州地域のひずみ速度分布、応力分布、地震発生層の 厚さ分布を従来よりも高い精度で明らかにし、平均的間隙水圧分布を推定した。別府地 域に大きなひずみが集中しており、そこでは微小地震活動が高いことが明らかになった。 この地域は地震発生層の厚さが他の地域と比べて薄く、このためにひずみ速度が大きく なることが示された。この結果は応力比の空間変化からも支持され、ひずみ集中メカニ ズムに関して重要な知見が得られた。さらに、間隙水圧は別府-島原地溝帯西部で比較的 低く、断層地域では高い結果が得られるなど、地震発生特性との関連が示唆された(九 州大学 [課題番号:2201])。

一方、地殻構造に関しては、平成23年度に実施された制御震源地震探査のP波初動デ ータを用いて、トモグラフィー解析により高精度の地震波速度構造断面が得られた(図 18)。速度構造には顕著な水平方向の速度不均質が見られ、臼杵-八代構造線を境にして、 南側の付加帯が存在する領域よりも北側の火山岩類や火砕流堆積物が見られる領域で、 低速度領域が厚くなる特徴を示す。特に、別府-万年山断層帯の下部は深部まで低速度領 域が延びている(九州大学 [課題番号:2201])。

また、レシーバ関数解析の結果では、図 19 に示すように、布田川・日奈久断層に平行 な帯状の領域でモホ面が周囲よりも浅部に存在することがわかった。この帯状の領域は、 一方の境界が布田川・日奈久断層であり、別府-島原地溝がこの領域内に存在する。この 領域の内側では外側に比べてモホ面の深度が 5-10km 浅い。多田 (1993)は、島原半島を南 北に横切る測線上で観測された重力値をもとに、島原半島を中心とする幅 50km の領域で モホ面が最大で 10km 上昇していると推定しており、今回の解析結果はそのフォワードモ デリングと調和的である。この帯状の領域の直下では、マントルの上昇流が存在する可 能性がある。ただし、レシーバ関数解析によるモホ面深度の特徴は、別府-島原地溝帯の 東部 (別府地域)における地震発生層の厚さや応力・ひずみ分布とは調和的であるが、 地溝帯西部とは必ずしも整合的ではないように見えるため、今後更なる検討と総合モデ ルの構築が必要である (九州大学 [課題番号:2201])。

上記のような広域の構造に加えて、火山周辺の詳細な構造探査と、火山活動の推移と 地震等の地殻活動の関係を調べる研究も実施された。

富士山直下の比抵抗構造を調べるために設置された広帯域 MT 探査と AMT 探査の観測点 の分布を図 20 に示す。今年度は、太平洋沖地震の直後の 2011 年 3 月 15 日に富士山直下 で発生した M6.4 の地震の震源域を通る北西 - 南東方向の測線(図 20 の白点線)に沿っ た断面での比抵抗構造を二次元解析(図 21 左)と三次元解析(図 21 右)から推定した。 得られた構造では、両者とも 2011 年 3 月 15 日の地震とその余震の震源域が低比抵抗と なる結果が得られているが、この結果の有意性については、今後、更に検討する必要が ある(東京大学地震研究所 [課題番号:1413])。

東海地震と連動した富士山の噴火可能性評価のため、富士山地下周辺の静的な応力変 化に加え、粘弾性を考慮した準静的応力変化の検討を行なった。粘弾性による影響は、 震源域では 100 年で約 77%程度に緩和されるのに対し、富士山下マグマだまりの境界付 近では 7%程度の増加があることがわかった。また、火道内における気液二相マグマの上 昇過程の数値的・解析的研究を実施した。特に非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移過 程を再現する時間発展モデルを開発し、地球物理学的観測データとの比較が可能な、火 道内圧力変動プロセスなどの数値シミュレーションを引き続き実施した(防災科学技術 研究所[課題番号:3010])。

伊豆大島において、ハイブリッド重力測定(絶対重力観測点を基準として相対重力測 定から絶対重力値を推定)を2012年10月に実施した。2009年6月に実施した同様の測 定の結果と比較して得られた重力変化を図22に示す。特徴として、(a)中央火口近傍の 重力増加(+10~+30μgal)、及び(b)カルデラ内北東部の重力減少(-10~-40μgal)を 確認した。特徴(a)については、火口近傍の1km程度の狭い範囲では、5~6cmの沈降が 生じていることが、国土地理院の水準測量(2008年10月~2012年10月)で明らかにな っている。そのため重力にもフリーエア効果だけで20μgal程度の増加が期待され、観 測された10~30μgal程度の増加と概ね整合している。特徴(b)については、島全体の北 東上がり(南西下がり)の傾動が引き続き生じていることが、水準測量で明らかになっ ており、これにより、北東部の重力減少の一部(10μgal程度)は説明可能であるが、そ れでもなお説明しきれない重力減少(20μgal程度)が残る。地下水起源の擾乱が、この 重力減少に含まれている可能性もある。図22の重力変化と、国土地理院の水準測量結果 および GNSS の F3 解をデータとして、変動のソースモデルを計算した。変動源としては、 島の中央付近のやや深部(5km 程度)の膨張源と、極浅部(1km 程度)の収縮源とを想定 し、それぞれを Mogi Source として扱った。その結果、2008/2009 年から 2012 年までの 3~4年間に、浅部では 90 万 m<sup>3</sup>の収縮、深部では 800 万 m<sup>3</sup>の膨張が生じていることが わかった。深部へのマグマ蓄積量は、重力変動が小さいため、確定することができなか った(東京大学地震研究所[課題番号:1413])。

2007 年~2011 年の期間における ALOS/PALSAR データ及び解析ソフトウェア StaMPS を 用いた PS-InSAR 時系列解析を桜島火山に適用した結果を図 23 に示す。これまでノイズ が少ないと思われる InSAR 解析結果にスタッキングを行うことで桜島北部における地盤 の隆起が面的に検出されていたが、これとほぼ同様な結果がより客観的な解析方法で検 出された(京都大学防災研究所 [課題番号:1805])。

霧島(新燃岳)山の北西約 18km の伊佐観測点においては、2011 年 1 月 26 日からの噴火 活動の推移に対した歪変動が捉えられたが、その後の解析で各噴火前に、噴火時の約 1/100 程度(1.0×10<sup>-9</sup>)で、数時間先行する山体膨張を示す先駆的変動が確認されている。 また、図 24 に示すように、2008 年 8 月の小規模な噴火の際にも、噴火時のスッテップ状 の変化と、噴火の 6 約日前から山体膨張を示すひずみ変化が記録されていることが確認 された(京都大学防災研究所 [課題番号: 1805])。

# オ.地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

超巨大地震に関わる課題は別項目に移動したため、ここでは主として内陸の活断層に 関わる研究を行った。

越後平野東縁の笹神丘陵を横断する約8km区間で高分解能反射法地震探査を行い、共 通反射点重合処理法により解析を行った。その結果、測線東部では基盤の花崗岩類を覆 う堆積層が約30度の西傾斜で分布しており、月岡断層はこの反射面群と平行に位置し、 層面すべりによって形成されていることがわかった。測線西部の1.5km以浅ではやや緩 傾斜になるが、堆積層は同様に西傾斜を示す。一方、測線中央部から西部の深さ約2.5km 付近の領域では、やや凸型を示す反射面が卓越する。阿賀野川沿いの深部反射のイメー ジと合わせて検討すると、月岡断層は、越後山地西縁の東傾斜の逆断層である主要断層 とともにウエッジスラストを形成していると推定される。従って、東傾斜の逆断層が震 源断層として重要であり、二次的な断層である月岡断層よりも変位量が大きいものと推 定される(東京大学地震研究所[課題番号:1414])。

強震動予測の精度を高める要請の高い都市域周辺において活断層地形を新たに発見し たことから、活断層の地質学的認定及び、累積変位量を明らかにするため、群馬県太田 市龍舞において5本の群列ボーリング調査を行った(図25)。群馬県東部農業事務所が収 集したボーリングコアも含めた地形地質断面図を図25下に示す。である。断層下盤側に あたる既設 no.5においてYP(浅間板鼻黄色軽石)とみられるテフラが確認でき、この YP は過去のトレンチ調査で断層上盤側で認められ、今回のボーリング調査のNo.1とNo.5 でも認められている。既設 no.5と断層上盤側のYP の層位は、ともに砂~シルト層中の 水中堆積であり、ほぼ同じ環境下に堆積している。一方、断層を挟む高低差は2~3m あり、これは両地点間にYP 以降に断層変位があったことを強く示唆する。また、下部で 認められた礫層は、下盤側では深さ5m(下盤側の水田の高さを0とする)ぐらいで一定 しているのに対して、断層上盤側では、深さ0mであり、5m以上の変位が認められる。 このことから、礫層は YPよりも多く断層変位を受けている可能性が高い。今後、さらに テフラ分析やコアの詳細な記載などを実施し、詳細な検討をすすめる予定である(名古 屋大学 [課題番号:1704])。

糸魚川-静岡構造線活断層系中部の塩尻峠周辺には、北西-南東走向の左横ずれ断層 が複数並走する(図26左)。最近の活動性が不確かな断層について、牛伏寺断層や岡谷 断層などで報告されている活動時期との関係を検討するために、塩尻峠の南側に位置す る岡谷市西山地点においてトレンチ調査を実施した(図26)。2条の断層の東側の活断層 トレースに沿っては、下流側(東側)隆起のバルジ状の高まりが形成されており、その 西側斜面の傾斜変換点付近を断層が通過するものと推定し、掘削をおこなった。トレン チに露出した地層には、壁面にはほぼ垂直に近い高角な活断層が数条認められた(図26 右)。断層は腐植質土壌をくさび状に落ち込ませるように変形させ、それより上位の表土 に覆われる。現在、年代測定を実施中であり、その結果にもとづき活動時期と回数を推 定し、本断層と並走または延長上に位置する他の活断層で報告されている活動時期との 関係について検討する予定である(名古屋大学[課題番号:1704])。

# これまでの課題と今後の展望

2011 年東北地方太平洋沖地震は、100 年という地球物理学的知見では把握しきれない 巨大な地震が発生しうることを如実に示した。本来、「長期・広域」の研究は、このよう な地震の解明も大きな目標であったはずであり、十分な解明がなされないうちに巨大な 災害が生じてしまったことは極めて残念であるが、津波堆積物の解析により、過去の巨 大な地震の概要が、2010 年にはかなり明らかになっていたことを忘れてはならない。こ れまで「長期・広域」の研究対象の時間的スケールとして、地震の数サイクルを考え、 数百年程度のイメージしていたが、超巨大地震の再来間隔が数百年~千年程度と考えら れるため、今後は数千年以上の活動履歴を調べる必要がある。これは地質学・地形学的 調査に頼らざるを得ない。一方、研究対象の空間スケールとしては、プレートの相対運 動を理解するために千 km~数千 km 程度を考えていたが、今後は地球規模を対象とし、他 の沈み込み帯での超巨大地震の観測データと比較することが極めて重要となる。そのよ うな「長期・広域」から「超長期・グローバル」への転換が今後必要である。

今回、M9の地震を「想定外」としてしまったのは、(1) 東北のような古いプレートが 沈み込むところで M9の地震が起こるはずがない、(2) 海溝近くで巨大な歪エネルギー を蓄えられるはずがない、という二つの思い込みが主たる原因であった。またアスペリ ティ・モデルを単純化しすぎたことも問題であった。今後は、単純なモデルでかなりの 部分が説明できても、必ず説明できない部分が残るのが地球物理学の世界であることを 忘れないようにし、また、「大きな地震が起こりにくい」、ということが理論的に確かめ られても「大きな地震が起こりえない」ということを証明したことにはならないことを 忘れないように注意することが必要である。

上記のような誤った思い込みが生じた理由の一つが、海域のデータの不足にあったこ とは否めない。日本のような島弧に発生する地震の全体像を正しく把握するためには、 今後、海域の観測を充実させる必要がある。

一方、陸域についても、地震発生のサイクルは活断層の研究から推定されているにす

ぎず、同じ場所で繰り返し大地震が発生する理由については、いくつかの仮説はあるも のの、その検証は不十分である。今後は、観測のみならず実験やシミュレーションの研 究とも連携して、内陸の歪エネルギー蓄積・応力集中過程と強度低下過程を解明し、か つ定性的説明にとどまらず、定量的モデルを構築していくことが必要である。特に地殻 流体との関係の解明が地震発生メカニズムの理解にも火山噴火のメカニズムの理解にも 極めて重要である。

以下、各項目の課題と展望について述べる。

「ア.列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場」については、海外との共同観測 研究により、日本周辺のプレート運動は次第に明らかになってきている。また、東北地 方太平洋沖地震の前に海岸が沈降し、また地震時にも沈降した理由について、説明はつ けられている。しかし、この沈降がいつ、どのようにして解消されるのかは、まだ不明 のままである。今後、プレート運動による島弧の変形について、三次元不均質や非弾性 効果を入れたシミュレーションによって理解する必要があり、そのためには、海域も含 めた広域の構造探査と、今回の地震の地殻応答の観測が極めて重要となっている。

「イ.上部マントルのマグマの発生場」については、スラブ内の岩石の脱水の状況や、 マントルウェッジ内の流体の分布が、明らかになってきているのは大きな進歩である。 特に、マントルウェッジは、火山の下とそれ以外で異なっていることが、地震波速度分 布のみならず比抵抗分布からも見えつつある。今後、シミュレーションについても、二 次元解析にとどまらず、三次元解析を進め、火山の下でのみマグマが上昇してくる理由 について解明する必要がある。

「ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布」については、地殻流体や三次元不均質と地 震発生との関係が次第に明らかになってきている。大地震は基本的に高速度・高比抵抗 の場所で起こり、普段の地震活動は、高速度・高比抵抗領域の中ではあるが、低速度・ 低比抵抗領域の境界付近で発生しているように見える。これは、低速度・低比抵抗領域 で非弾性変形が進み、そこに隣接している高速度・高比抵抗領域に応力が集中している と考えれば理解できる。さらに、今回、長野県西部の低 Vp/Vs 域に普段の地震活動が集 中していることが明らかになった。この低 Vp/Vs 域は石英の濃集域である可能性が高い と考えられるが、その場合、このような領域が地殻深部にあれば、周囲よりも低速度と なっていることに注意が必要である。また、流体の地震発生に及ぼす役割として、これ まで間隙圧の上昇の効果が強調されてきたが、流体が非弾性変形を促進し、周囲に応力 集中をもたらす効果についても、十分な検討が必要である。今後、上記のような観点か ら地殻内の地震発生について、より定量的なモデルを構築していく必要がある。

「エ.地震活動と火山活動の相互作用」については、フィリピン海プレート北端と九 州を中心として、様々な観測研究が行われてきた。2011年東北地方太平洋沖地震のあと、 各地の火山で地震活動が活発化した。地震直後の一時的な活発化は、地震波によって地 下のシールが破れ、深部高圧流体が浅部に移動したためと考えれば理解できるが、この ような超巨大地震が地下のマグマそのものに及ぼす影響は、時間をおいて現れる可能性 があり、たとえばスマトラの例を見ても、貞観地震の例を見ても、今後、数十年は要注 意である。逆に、これらの観測から、地震発生や火山噴火のメカニズムの理解が進む可 能性があり、地震活動と火山活動の相互作用に関する研究は今後も重要である。

「オ.地震発生サイクルと長期地殻ひずみ」については、超巨大地震に関わる部分は

別項目となったが、一回り小さな地震で周期的な活動が見られるものや、活断層で繰り 返し発生する地震について、まだ十分に理解が深まったとは言えず、今後、そのような 地震の理解が超巨大地震の理解にも繋がると期待される。その際に重要なことは、完全 な固有地震モデルに執着しすぎないことである。実際の地震活動は、GR 式に代表される ような、特徴的規模を持たない地震と、小繰り返し地震に代表されるような、決まった 規模を示す地震の両極端の間にあると考えられる。すべての地震が完全にランダムに発 生しているというのは間違っているが、一方、すべての地震が完全に規則的に起こって いると考えるのも間違いである。どこまで決定論的に予測が立てられるのか、今後、実 験や物質科学、シミュレーション等の専門家と一緒に研究を進めていく必要がある。 成果リスト

- Chiba, K., Iio, Y. and Fukahata, Y., 2012. Detailed stress fields in the focal region of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake -Implication for the distribution of moment release-, Earth Planets Space, 64, 1157-1165.
- Duputel, Z., Rivera, L., Fukahata, Y. and Kanamori, H., 2012. Error estimations for seismic source inversions, Geophys. J. Int., 190, 1243-1256.
- Fujita, E., T. Kozono, H. Ueda, Y. Kohno, S. Yoshioka, N. Toda, A. Kikuchi, Y. Ida, 2013, Stress field change around the Mount Fuji volcano magma system caused by the Tohoku megathrust earthquake, Japan, Bull. Volcanol, 75, 1-14.
- 深畑幸俊, 2012. 世紀の難問「地震予知」に挑む, 地震学の今を問う, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 76-80.
- 深畑幸俊, 2012. 世紀の難問「経度問題」とのアナロジーから地震予知の将来について考える, 京大防災研年報, 55B, 149-153.
- 深畑幸俊・八木勇治・三井雄太,2012.2011年東北地方太平洋沖地震による絶対歪みの解放:遠 地実体波インバージョン解析と動的摩擦弱化,地質学雑誌,118,(7),396-409.
- Fukahata, Y., Yagi, Y. and Miyazaki, S., 2012. Constraints on early stage rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake from 1 Hz GPS data, Earth Planets Space, 64, 1093-1099.
- Goldfinger, C., Y. Ikeda, R.S. Yeats, and J. Ren, 2013, Superquakes and supercycles, Seism. Res. Lett. 84, 24-32, doi: 10.1785/0220110135.
- 後藤秀昭,2012,数値標高モデルから作成した日本列島の地形アナグリフー解説と地図ー,広島 大学大学院文学研究科論集特輯号,72.
- 後藤秀昭・杉戸信彦, 2012, 数値標高モデルのステレオ画像を用いた活断層地形判読, E-journal GE0, 7, 197-213.
- Hata, M., N. Oshiman, R. Yoshimura, Y. Tanaka, and M. Uyeshima, 2012, Fluid upwelling beneath arc volcanoes above the subducting Philippine Sea Plate: Evidence from regional electrical resistivity structure, J. Geophys. Res., 117, B07203, doi:10.1029/2011JB009109.
- 畑真紀, 2013, Modeling of Large-Scale Electrical Resistivity Structure for Clarifying Arc Magmatism beneath Kyushu, Japan, 京都大学大学院理学研究科博士論文.
- Huang, Z., D. Zhao, 2013, Relocating the 2011 Tohoku-oki earthquakes (M 6.0-9.0). Tectonophysics 586, 1-11.
- Ikeda, Y., 2012, Long-term strain buildup in the northeast Japan arc-trench system and its implications for the gigantic subduction earthquake of March 11, 2011, In: Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan, 238-253. http://nisee.berkeley.edu/elibrary/Text/201204246.
- 池田安隆, 2012, 東北地方太平洋沖地震を地質学的時間スケールでみると何が見えるか? milsil, 5 (No. 5), 14-19, 国立科学博物館.
- 池田安隆,2012,下北半島沖の大陸棚外縁断層:地下に横たわる巨大な断層を原発安全審査はど

うあつかったのか,科学,82,644-650.

- 池田安隆・岡田真介・田力正好,2012,東北日本島弧-海溝系における長期的歪み蓄積過程と超 巨大歪解放イベント,地質学雑誌,118,294-312.
- Ito, Y., K. Shiomi, J. Nakajima, and R. Hino, 2012, Autocorrelation analysis of ambient noise in northeastern Japan subduction zone, Tectonophysics, 572-573, 38-46.
- 岩森光,2012,固体地球の構造:地殻-マントル-コア,宇宙と地球の科学事典,朝倉書店, 230-231.
- 岩森光, 2012, 地殻熱流量と地球の熱源, 宇宙と地球の科学事典, 朝倉書店, 246, 2012.
- Iwamori, H., and T. Nakakuki, 2013, Fluid processes in subduction zones and water transport to the deep mantle, In: Physics and Chemistry of the Deep Earth (ed. S. Karato), in press.
- Iwamori, H., and H. Nakamura, 2012, East-west mantle geochemical hemispheres constrained from Independent Component Analysis of basalt isotopic compositions, Geochem. J. 46, e39-e46, 2012.
- 岩森光・中村仁美,2012,沈み込み帯での地殻流体の発生と移動のダイナミクス,地学雑誌,121, 118-127.
- 海上保安庁,2012,人工衛星レーザー測距観測(2010年),海洋情報部観測報告衛星測地編,25.
- 加藤愛太郎, 2013, 稠密地震波観測に基づく地震発生と地殻流体, 地球化学, 46, 191-203.
- 加藤照之,2012,沈降か隆起か一過去100年と過去10万年の矛盾する挙動一,milsil,Vol.5,No.5, 10-13.
- Kawabata, R., S. Kurihara, K. Kokado, Y. Fukuzaki, J. Kuroda, M. Ishihara, Y. Mukai and T. Nishikawa, 2012, Tsukuba 32-m VLBI Station, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report, NASA/TP-2012-217505, 111-114.
- Kaya, T., T. Kasaya, S.B. Tank, Y. Ogawa, M.K. Tuncer, N. Oshiman, Y. Honkura, M. Matsushima, 2013, Electrical Characterization of the North Anatolian Fault Zone in the Marmara Sea, Turkey by Ocean Bottom Electromagnetic Method, Geophy. J. Int., in press.
- Kita, S., A. Hasegawa, J. Nakajima, T. Okada, T. Matsuzawa and K. Katsumata, 2012, High-resolution seismic velocity structure beneath the Hokkaido corner, northern Japan: Arc-arc collision and origins of the 1970 M 6.7 Hidaka and 1982 M 7.1 Urakawa-oki earthquakes, Journal of Geophysical Research, 117, B12301, doi:10.1029/2012JB009356.
- Kokado, K., S. Kurihara, R. Kawabata, K. Nozawa, 2012, Tsukuba VLBI Correlator, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report, NASA/TP-2012-217505, 165-168.
- Kokado, K., S. Kurihara, R. Kawabata, K. Nozawa, 2012, Tsukuba VLBI Analysis Center, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report, NASA/TP-2012-217505, 264-267.
- Kurihara, S., and D. MacMillan, 2012, The Tohoku Earthquake: One Year After, IVS Newsletter, Issue 32, 6.
- Liu, X., D. Zhao, S. Li, 2013, Seismic imaging of the Southwest Japan arc from the Nankai trough to the Japan Sea. Phys. Earth Planet. Inter. 216, 59-73.
- Mitsui, Y., Y. Iio, and Y. Fukahata, 2012. A scenario for the generation process of the

2011 Tohoku earthquake based on dynamic rupture simulation: role of stress concentration and thermal fluid, Earth Planets Space, 64, 1177-1187, 2012.

- Mitsui, Y., N. Kato, Y. Fukahata, and K. Hirahara, 2012. Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, Earth Planet. Sci. Let., 325-326, 21-26.
- 中村仁美・岩森光, 2012, 沈み込み帯の物質循環とスラブ流体, 宇宙と地球の科学事典, 朝倉書 店, 228-229.
- Nakamura, H., and H. Iwamori, 2013, Generation of adakites in a cold subduction zone due to double subducting plates, Contrib. Mineral. Petrol., 165, 1107-1134, doi:10.1007/s00410-013-0850-0.
- Nakamura, Y., J. Muto, H. Nagahama, I. Shimizu, T. Miura, and I. Arakawa, 2012, Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces, Geophys. Res. Lett., 39, L21303, doi:10.1029/2012GL053228.
- Nichols, A. R. L., R. J. Wysoczanski, K. Tani, Y. Tamura, J. A. Baker, Y. Tatsumi, 2012, Melt inclusions reveal geochemical cross-arc variations and diversity within magma chambers feeding the Higashi-Izu Monogenetic Volcano Field, Izu Peninsula, Japan, Geochem. Geophys. Geosyst., 13, doi:10.1029/2012GC004222.
- Nishimura, T., 2012, Heterogeneity of the Japanese islands as inferred from transverse component analyses of teleseismic P-waves observed at a seismic station network, Hi-net Earth Planets Space, 64, e25-e28.
- Noda, A., C. Hashimoto, Y. Fukahata, and M. Matsu'ura, 2013. Interseismic GPS strain data inversion to estimate slip-deficit rates at plate interfaces: Application to the Kanto region, central Japan, Geophys. J. Int., doi:10.1093/gji/ggs129.
- Noguchi, N., A. Abduriyim, I. Shimizu, N. Kamegata, S. Odake, and H. Kagi, 2013, Imaging of internal stress around a mineral inclusion in a sapphire crystal: Application of micro-Raman and photoluminescence spectroscopy, Journal of Raman Spectroscopy, 44, 147-154, doi:10.1002/jrs.4161. Published online at http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jrs.4161/full.
- 大見士朗・和田博夫・濱田勇樹, 2012, 飛騨山脈焼岳火山周辺における東北地方太平洋沖地震後の群発地震活動, 地震2, 65, 85-94.
- Okada, S., and Y. Ikeda, 2012, Quantifying crustal extension and shortening in the back-arc region of Northeast Japan, J. Geophys. Res., 117, B01404, doi: 10.1029/2011JB008355.
- Ozawa, T., and E. Fujita, 2013, Local deformations around volcanoes associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, J. Geophys. Res. Solid Earth, 118, 390-405, doi:10.1029/2011JB009129.
- Patro, P. K., M. Uyeshima and W. Siripunvaraporn, 2013, Three-dimensional inversion of magnetotelluric phase tensor data, Geophys. J. Int., 192, 58-66.
- Saiga, A., Kato, A, E. Kurashimo, T. Iidaka, M. Okubo, N. Tsumura, T. Iwasaki, S. Sakai and N. Hirata, 2013, Anisotropic structures of oceanic slab and mantle wedge in a deep low-frequency tremor zone beneath the Kii peninsula, SW Japan, J. Geophys. Res., in press.

澤田源一郎, 2013, 秋田県地域の最適2 次元MT 比抵抗モデルの確立および比抵抗構造と地震活動の関係, 秋田大学大学院工学資源学研究科地球資源学専攻博士前期課程修了論文.

Shimizu, I., 2012, Steady-state grain size in dynamic recrystallization of minerals, In: "Recrystallization", edited by Krzysztof Sztwiertnia, InTech, ISBN 978-953-51-0122-2,

- pp. 371-386. Published online at http://www.intechopen.com/articles/show/title/ steady-state-grain-size-in-dynamic-recrystallization-of-minerals.
- 塩崎一郎, 2012, 電気の流れやすさから山陰地方の地震発生場を探る(Web コンテンツ), サイエンスアカデミー, 鳥取大学.
- 鈴木啓・宮原伐折羅, 2012, アジア太平洋地域におけるGPS解析戦略の構築, 国土地理院時報, 123, 1-8.
- 高岡宏之・津村紀子・高橋福助・野崎謙二・加藤愛太郎・飯高隆・岩崎貴哉・酒井慎一・平田直・ 生田領野・國友孝洋・吉田康弘・勝俣・山岡耕春・渡辺俊樹・山崎文人・大久保慎人・鈴木 貞臣, 2012, 東海地域下の三次元地震波減衰構造一微小地震スペクトルを用いた推定一,地 震, in press.
- 谷口薫・杉戸信彦・廣内大助・澤祥・渡辺満久・鈴木康弘,2012,糸魚川-静岡構造線活断層系 中部,茅野断層(茅野市坂室)の変動地形の再検討,活断層研究,37,17-28.
- 宇宙測地課, 2012, VLBI2010~国際VLBIの動向~, 全測連, 44, 19-21.
- Ueki, K., and H. Iwamori, Thermodynamic model for partial melting of peridotite by system energy minimization, Geochem. Geophys. Geosyst., doi:10.1029/2012GC004143, 2013.
- Wang, J., D. Zhao, 2012, P wave anisotropic tomography of the Nankai subduction zone in Southwest Japan. Geochem. Geophys. Geosyst. 13, Q05017, doi:10.1029/2012GC004081.
- Wang, Z., W. Huang, D. Zhao, S. Pei, 2012, Mapping the Tohoku forearc: Implications for the mechanism of the 2011 East Japan earthquake (Mw 9.0). Tectonophysics 524, 147-154.
- Wei, W., J. Xu, D. Zhao, Y. Shi, 2012, East Asia mantle tomography: New insight into plate subduction and intraplate volcanism. J. Asian Earth Sci. 60, 88-103.
- Zhao, D., 2012, Tomography and dynamics of Western-Pacific subduction zones. Monogr. Environ. Earth Planets 1, 1-70.
- Zhao, D., Y. Yamamoto, T. Yanada, 2013, Global mantle heterogeneity and its influence on teleseismic regional tomography. Gondwana Res. 23, 595-616.



図 1. VLBI 観測によって得られた日本列島および周辺域のプレート運動(国土地理院[課題番号: 6013])。



図 2.SLR 観測により求められた下里の座標変化(1997~2012年)(海上保安庁[課題番号:8005])。


図 3. 東北地方太平洋沖地震における応力降下量の見積もり。計算手法上の制約から二つ の見積もりを並記した。(a)はインバージョン解析の結果得られた滑り分布を一様な半無 限弾性体の仮定の下で応力変化に直した。(b)は得られた滑り分布をインバージョン解析 の際に用いた弾性率変化に基づいてモーメント解放量に変換し、それを元に応力降下量 を求めた。深部では(b)が正しく、震源から浅部では(a)と(b)の間でやや(b)に近いと考 えられる(東京工業大学[課題番号:1603]、深畑他,2012)。



図 4. 超巨大地震が発生する沈み込み帯の 2 つのタイプ(池田ほか,2012)。(A) チリ型。 (B) 東北日本型。上図は、地震時(黒実線)、余効変動(灰色の実線)と地震間(黒破 線)における隆起・沈降パターンを、下図はプレート境界の形状と滑り分布の概略を示 す。A, B 両図とも弾性変形のみを示している事に注意;地震サイクルの過程で生じる緩 慢な造山運動(=非弾性変形)は、この図に表現されていない(東京工業大学[課題番 号:1603])。



図 5. 短冊状の余効滑り量分布(単位:m)の場合の地表で推定される上下変動。挿入図は断層面 の中央部を横切るプレート運動に平行する測線に沿った上下変動プロファイルを示す。海岸線の ところでほぼ1mの隆起が得られる(東京大学地震研究所[課題番号:1410])。



図 6. PS 変換波の走時から推定された海洋性地殻の P 波速度分布図。赤菱形は各深さで の平均速度、黒バーは各深さでの標準偏差を表す。緑のシンボルは Ito et al. (2005) で 推定された地殻の P 波速度、黒の実線は初動 P 波から推定された深さ平均の P 波速度、 岩石学的モデル(Hacker et al., 2003)および室内実験(Fujimoto et al., 2010)で得ら れた P 波速度をそれぞれ青線と橙破線で示してある。頻度分布は、各深さにおける地殻 内の地震数である(東北大学[課題番号:1203])。



図 7. 挿入図に示す測線における P 波速度構造の鉛直断面図。フィリピン海プレートの上 部境界面を破線で示してある(東北大学[課題番号:1203])。



図 8. 火山岩及び地下水・温泉・熱水系の調査・サンプリングに基づいて推定された中部 地方下の温度構造と流体移動モデル。(a)中部地方下の温度プロファイル(緑線)と固 相線(赤線)と様々な鉱物の安定領域(灰色線)。点線は Iwamori (2000)の数値シミュレ ーションによる温度プロファイルを示す。(b)中部地方下の温度構造の東西断面。流体の 移動を矢印で示す(東京工業大学[課題番号:1603]、Nakamura and Iwamori, 2013)。



図 9. 三次元インバージョンによって推定された、濃尾地震断層周辺域の比抵抗構造の平 面図。(a) 深さ1.0-1.5km。(b) 深さ9-10km。(c) 深さ96-110km。丸印ははNTT根尾 交換所(岐阜県本巣市根尾)の位置を示す。暖色系ほど電気が流れやすい低比抵抗域で あることを表す(東京大学地震研究所[課題番号:1411])。



図 10. 濃尾地震断層周辺域の比抵抗構造の、東西方向座標(-14~-10km)、(-2~2km)、(10-14km)の範囲の南北断面図。座標原点はNTT根尾交換所(岐阜県本巣市根尾)の 位置(図9の丸印)に対応する。暖色系ほど電気が流れやすい低比抵抗域であることを 表す(東京大学地震研究所[課題番号:1411])。



図 11. 秋田県中南部における各側線ごとの 2 次元比抵抗構造 (TM+TE モード)。黒逆三 角印と白丸印は解析に用いた測点の位置と東北地方太平洋沖地震以前の震源分布を示す。 (秋田大学 [課題番号:1301])。



図 12. 長野県西部地域における地震波速度構造。1.5km のグリッドにおける Vp,Vs の速 度偏差と Vp/Vs 比の結果を示す。断層に直交する2つの断面における推定値が示されて いる。F の近くの実線が Yoshida and Koketsu(1990)による本震の推定断層面を表す(京 都大学防災研究所[課題番号:1806])。



図 13. グリッド毎の Vp/Vs 値と地震数の関係。(a) 各グリッドの Vp/Vs 値とそのグリッド 内で発生した地震の総数の関係。(b) 各グリッドの Vp/Vs 値の頻度分布。(c) Vp/Vs 値とそ の値を取る1 グリッドあたりの平均地震数の関係(京都大学防災研究所[課題番号: 1806])。



図 14. Normalized stacked amplitude のマイグレーション結果と P 波速度分布 (Nakajima et al., 2009)。黒および灰色の点は振幅の絶対値がそれぞれ 0.005,、0.001 以上のグリッドポイントを表す。細い灰色線は大陸モホ面と太平洋スラブの上部境界面を示す(東 北大学 [課題番号:1204]、Ito et al., 2012)。



図 15. (a) 深さ 25km, (b) 50km, (c) 80 km における P 波方位異方性分布。バーの方向 が異方性の向きを、長さが異方性の強さをあらわす。赤丸は微小地震、青三角は第四紀 火山を示す(東北大学 [課題番号:1204])。



図 16. 宮崎-阿久根測線でのレシーバ関数イメージ。赤線は高速度層の上面を表す(CM: 大陸モホ面、OM:海洋モホ面)。白抜きの丸は低周波地震、黒丸は通常の地震、赤三角は 霧島火山を示す(京都大学防災研究所[課題番号:1805])。



図 17. 広域比抵抗三次元モデルの鉛直断面(京都大学防災研究所 [課題番号:1805])。



1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0 8.5 [km/s]

図 18. 九州内陸部を南北に縦断する探査測線下の P 波速度構造。震源と観測点を結ぶ波 線が通過した領域のみ速度の値を色で表示した。星印は発破点の位置を示す。臼杵一八 代構造線は発破点 S4 付近を通る。また、別府-万年山断層帯は発破点 S2 付近に対応す る(九州大学 [課題番号: 2201])。



図 19. レシーバ関数解析から推定される九州地域のモホ面の深度分布。図中の破線で挟 まれた領域のモホ面深度が相対的に浅くなっており、別府一島原地溝帯はその中に存在 する(九州大学[課題番号:2201])。



図 20. 富士山周辺で実施した MT 観測の観測点配置。☆印:2011-2012 年に設置した広 帯域 MT 観測点。〇、□印:2002-2003 年に設置された広帯域 MT 観測点。△印:2009 年 度に設置した AMT 観測点。2011 年 3 月 15 日に発生した地震の震源及び余震の分布(東 京大学地震研究所による)を黒点で示す。白破線は図\*に示す比抵抗断面の位置に相当 (東京大学地震研究所[課題番号:1413])。



図 21. 2011 年 3 月 15 日に発生した M6.4の地震の余震域を横切る比抵抗断面(二次元 解析と三次元解析の比較)。図\*の破線の断面での地下比抵抗構造を示す。左図:三次元 解析による結果。右図:三次元解析による結果。黒点は気象庁一元化カタログによる震 源分布を示す(東京大学地震研究所[課題番号:1413])。



図 22. 伊豆大島におけるハイブリッド重力観測。2012 年 10 月の重力測定値と 2009 年 6 月の測定値との差を示す。中央火口近傍の重力増加とカルデラ内北東部の重力減少が見られる(東京大学地震研究所 [課題番号:1413])。

# Mean LOS velocity calculated by StaMPS



Target: Sakurajima volcano Data: ALOS/PALSAR Off-nadir angle: 34.3 deg.

図 23. 2007 年~2011 年の桜島火山の ALOS/PALSAR データの PS-InSAR 解析結果 (京都 大学防災研究所 [課題番号: 1805])。



図 24. 伊佐の 2008 年 8 月の伸縮計記録。霧島の 2008 年の小規模噴火に際して変動が 認められる(京都大学防災研究所 [課題番号:1805])。



図 25. 太田断層のボーリング調査。左上:太田断層の位置。右上:太田市龍舞における ボーリング調査地点の詳細図。下:太田市龍舞の地形地質断面図(名古屋大学[課題番 号:1704])。



図 26. 岡谷市、トレンチ掘削調査地点周辺の段丘面区分と活断層の分布(谷口ほか(2011) を加筆・修正)、およびトレンチ北側壁面の一部(名古屋大学[課題番号:1704])。

#### 2 (2) (2-1) 地震準備過程

「地震準備過程」計画推進部会長 飯尾能久 (京都大学防災研究所)

地震発生の準備過程を解明するために,地殻とマントルで応力が特定の領域に集中し 地震発生に至る過程を明らかにするための観測研究を実施してきた。プレート境界地震 に関しては,「超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進」部会が立ち上がり, 一部の課題がそちらへ移動したが,プレート境界の滑りと固着の状態の把握やプレート 境界におけるゆっくり滑りの時空間的推移の解明,プレート境界近傍の地震発生場にお ける応力状態の解明などが進んだ。

内陸地震に関しては、広域の応力によって非弾性的な変形が進行して、特定の震源断 層に応力が集中する過程を定量的にモデル化することが必要不可欠である。新潟-神戸 ひずみ集中帯及び近年発生した内陸大地震発生域などにおける、上部地殻、下部地殻及 び上部マントルまでの地震波速度・減衰・電気比抵抗構造、散乱体・流体分布、媒質の 異方性、微小地震の詳細な震源分布、発震機構解等の解明、およびひずみ速度が小さい 地域におけるこれら解析との比較、内陸の地震発生モデルの一般化、断層の両端部の非 弾性変形と断層への応力集中過程の関係の解明、および震源断層の強度回復過程の解明 等において、重要な成果が得られた。

スラブ内地震の発生機構を解明するため,スラブ内の震源分布や地震波速度構造を詳 細に明らかにすることにより,スラブ内に取り込まれた流体の分布と挙動の解明を図る ことが重要である。海溝付近から島弧下までの海洋プレート内の不均質構造や震源分 布・発震機構解を詳細に調べることにより,スラブ内の強度分布並びに流体の供給・輸 送過程を明らかにし,スラブ内地震の発生に至る過程を解明する研究が進展した。

# ア.アスペリティの実体

アスペリティの実態に関して,東北地方太平洋沖および日向灘から南西諸島沖におい て,以下に述べるように重要な知見が得られた。

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域のアスペリティの特性について、小繰り返し地 震の積算滑りから、本震前の非地震性滑りの空間変化の特徴の抽出が行われた(東北大 学[課題番号:1205])。その結果、海溝近傍に大滑り域が存在し陸に近い場所でも地震 時滑りが大きかった領域Bでは、プレート境界の深い場所(50-60km付近)まで滑りレー トが小さいのに対し、その南北に隣接する領域(領域A,C)では、深さ35km付近から深 さとともに滑りレートが大きくなる傾向が報告された(図1)。沈み込むプレートが陸の プレートのマントルに接する場所においては、基本的には、深さとともに滑りレートが 大きくなるが、滑りの大きかった領域Bでは深くまで小さい滑りレートが推定されてお り、これは、この領域のプレート境界の特性の違いを反映している可能性があることも 報告された。

日向灘から南西諸島沖においても、小繰り返し地震活動からプレート間固着についての 知見が得られた(九州大学[課題番号:2202])。日向灘においては南部から北部に向か うにつれて非地震性滑りレートが減少し、過去に発生した M7 級のプレート境界地震の地 震滑り領域との対応関係が認められること,東北地方とは反対に,日向灘北部では深く なるほど滑りレートは小さくなるが,日向灘南部の大隅半島沖では小繰り返し地震発生 領域の浅部・深部で滑りレートが大きい傾向が報告された(図2)。

大隅半島以南のトカラ列島東方沖~奄美大島沖では,1993年4月~2012年9月のデー タについて,個々の相似地震群の活動期間を考慮に入れて非地震性滑りレートの分布が 推定された(図3)(鹿児島大学[課題番号:2301])。奄美大島の北方海域で発生した2009 年10月30日M6.8の地震の震源域近傍での準静的滑り速度が2007年ころから早くなる 傾向にあること,地震資料を見直すことで再決定された1911年に喜界島近海で発生した 巨大地震の震源付近は地震活動が非常に低調であり,その周辺で非地震性滑りレートが 小さいことが報告された。また,津波の現地調査および津波シミュレーションの結果か ら,この巨大地震に伴う津波は,波源域が喜界島の北~北北東にあり,低角逆断層運動 により発生したものと推定された(図3)。

# イ.非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

# (スロースリップの時空間変化)

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生前の 2011 年1月下旬から,直上に設置された海 底水圧計および陸上沿岸部の体積歪計で非地震性の地殻変動が観測され,以下のような 解析結果が報告された(図4)(東北大学[課題番号:1206])。地殻変動が観測された期 間の前半の1月下旬から2月上旬には,周辺の地震活動度に顕著な変化は見られなかっ たが,2月中旬頃よりマグニチュード5程度の地震が海底圧力観測網内で発生した。こ れらの地殻変動が沿岸部の GPS 観測点では観測されなかったことを考慮し,観測された 地殻変動記録からスロースリップイベントの断層を推定した結果,100km × 35km の矩 形断層上の 40cm の逆断層滑り(地震モーメント:3.6x10<sup>19</sup>Nm:M7.0)で観測記録が説明 された。地震モーメントは2008 年に観測されたスロースリップイベントの2倍であった。 2011 年のスロースリップイベントは少なくとも3月9日の最大前震直前まで継続して いた可能性があり,観測記録のトレンドの変化から,スロースリップイベントの断層の 上端部は,2月下旬から3月9日の発生直前にかけて,海溝軸の方向に拡大していた可 能性が指摘された。

四国と房総沖においてもスロースリップイベントに関して,重要な知見が得られた(防 災科学技術研究所[課題番号:3301])。2011年12月~2012年1月の豊後水道~四国中 部における短期的スロースリップイベント(SSE)と深部低周波微動・超低周波地震活動 の発生域は、フィリピン海プレート走向方向の長さが150~200 km程度に及び、従来の エピソードと比べて大規模なものであった。短期的SSEの詳細な滑り過程を微動及び超 低周波地震の活動と比較し、愛媛県西部及び中部では滑りの増加に伴って微動や超低周 波地震の活発化が見られた一方で、2つの領域の間では微動活動が活発化するが、短期的 SSEの滑りがほとんど発生せず、超低周波地震も発生していなかった。このギャップ領域 では、微動活動が潮汐とよく対応することや通常の地震波によってトリガーされやすい ことが知られている。これらのことから、短期的SSEを含めたスロー地震の発生様式を 支配する滑り特性が、プレートの走向方向に不均質性を有していることが示唆された。 房総半島沖ではスロースリップイベントが2011年10月~11月にかけて4年2か月ぶり に再来した。過去約30年間に房総半島沖で発生してきたスロースリップイベント(以下、 房総 SSE)の再来間隔は平均 68 か月であり,2011 年の房総 SSE は 50 か月と最短だった が、1990 年房総 SSE は 91 か月と最長だった。この間には 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0)及び 1987 年千葉県東方沖地震(M6.7)がそれぞれ発生しており、これらの地震によ る応力変化(ΔCFS)を評価したところ、前者は約 0.1 MPaの増加、後者は約 0.2 MPaの減 少と推定された。これは房総 SSE の応力降下量と比較して大きな部分を占めるものであ り、外的な応力変化によって SSE の発生間隔が影響を受けた可能性が指摘された。

GNSS 連続観測によっても、短期的なスロースリップイベントが多数検出され、下記の ような特徴が報告された(国土地理院[課題番号:6014])。四国、紀伊半島、東海地方 に加えて、日向灘から種子島にかけての領域と相模トラフ沿いにおいても短期的スロー スリップの発生を示唆する地殻変動を検出するとともに、断層モデルが推定された(図 5)。四国中西部では、Mw6.0前後のイベントが数か月ごとに繰り返し発生し、四国東部、 紀伊半島、東海地方においては、Mw6.0以下の小規模なイベントが数か月~半年ごとに繰 り返し発生していることが分かった(図6)。相模トラフでは、主に房総半島南東沖で繰 り返し間隔が長く Mw6.5程度のやや大規模なイベントと Mw6.0以下の小規模なイベント が繰り返し発生していること、日向灘から種子島にかけては、Mw6.0前後のイベントが半 年~1年ごとに発生していること、短期的スロースリップの発生する深さは、四国から 東海地方にかけては深部低周波微動の発生する 30~40km 程度であり、それより浅い場所 では検出されなかったが、相模トラフ及び日向灘から種子島にかけての領域では浅部の 深さ 10~20km でも発生するという地域的な特徴があることが報告された。

#### (浅部超低周波地震の解明)

東北地方太平洋沖において超低周波地震が発生していることが,防災科研 F-net の広 帯域地震計記録を用いた解析により見出され,以下のような特徴が報告された(防災科 学技術研究所[課題番号:3301])。超低周波地震のクラスターは,岩手沖,宮城沖,福 島・茨城沖の3つの領域で見られ,それぞれクラスター的な活動分布をしていることが 分かった。2011年東北地方太平洋沖地震後に岩手沖及び福島・茨城沖の活動が活発化し たのに対し,宮城沖については地震後に活動が検出されていないが,これは,大地震の 滑りによる応力集中や解放,あるいは余効滑りの影響を反映していると考えられる。

2003年十勝沖地震発生以前の期間における千島海溝一日本海溝会合部付近の超低周波 地震活動に関して、1994年三陸はるか沖地震の直前直後に目立った超低周波地震活動は 無かったこと、その後、2003年十勝沖地震発生までの1996~2002年の期間には約10.5 か月間隔で超低周波地震が発生していたことが明らかとなった。この期間における超低 周波地震活動の多くは北東方向のマイグレーションを示し、逆方向のマイグレーション が卓越した2003年十勝沖地震後の活動とは対照的である。このようなマイグレーション 方向の違いは、超低周波地震発生域に対するその周辺域からの応力集中状態の違いに起 因している可能性が指摘された。

#### (東北地方太平洋沖地震の震源域における応力の時空間変化の推定)

東北地方太平洋沖地震を受けて、各種緊急調査により甚大な地震・津波災害を引き起こした断層活動の場所が絞り込まれたが、それを受け、統合国際深海掘削計画(IODP) により、今回の地震断層を特定してそこでの摩擦熱を計測することにより、どのような メカニズムで地震が発生したかに迫るために, H24 年 4-5 月及び7 月に地球深部探査 船「ちきゅう」による調査掘削が実施された(海洋研究開発機構[課題番号:4003])。 この調査掘削では,掘削同時検層や試料採取により,断層深度を絞り込み,その断層周 辺に密に温度計を設置することに成功し,長期温度計測が実施され,検層データから, 地震発生時に海溝付近で大きな応力開放が起こったことが明らかにされた(Lin et al., 2013)。

応力集中に対応した応力場の空間変化を検出するために、2011年東北地方太平洋沖地 震発生前の応力場と本震の断層滑りとの関係が注意深く調査され、以下の結果が得られ た(産業技術総合研究所[課題番号:5007])。プレート境界面で発生している逆断層型 の地震は解析から除外して推定された東北地方太平洋沖地震発生前の応力場は、震源域 北部域と南部域で異なる結果が得られた。北部域の応力場は横ずれ場で特徴付けられ、 最大主圧縮軸はほぼ水平で大滑り域の方向に向くが、南部域の応力場は正断層場で特徴 づけられ、最大主圧縮軸がプレート境界面にほぼ直交していた。北部の応力場は海溝軸 付近に大きな滑り欠損があった場合に予想される応力場と調和的である。一方、南部域 は北部域に比べてプレート境界に掛かっているせん断応力が小さいと推定され、本震に よる断層滑りが小さかったこととも矛盾しない。東北地方太平洋沖地震の発生後、震源 域南部の上盤側では正断層型の地震が多発しているが、もともと正断層場だった南部域 の上盤側で本震の断層滑りによる伸張の応力変化が生じたため、正断層型の地震が起き やすいと解釈された。

# (ゆっくり<br /> 地震の発生と<br /> 流体との<br /> 関連)

サブダクション・ゾーン陸側の長期的な重力変動をとらえるために,沖縄~北海道太 平洋岸の8地域(北海道道東部,えりも,北海道南部,三陸,東海,日向,琉球)で, 絶対重力測定が行われている(東京大学地震研究所[課題番号:1406])。琉球弧の西表 島で約半年ごとに発生するスロースリップに関して,2回のスロースリップイベントに ともなって約4マイクロガルの減少が観測され,スロースリップ時に高圧間隙水の拡散 がおきている可能性が示唆された(図7)。

深部低周波微動発生域を含む紀伊半島南部下の地震波速度構造やプレート境界面の形 状を把握するために、稠密自然地震観測及び制御震源地殻構造探査が実施され、測線下 におけるフィリピン海プレートの形状やプレート境界域の地震波速度構造に関する知見 が得られた(東京大学地震研究所[課題番号:1415])。地震波トモグラフィー解析では、 深部低周波微動は高速度領域を避けるように分布し、微動発生域では Vp/Vs 値が大きく なることが推定され、深部低周波微動発生過程における流体の関与が示唆された。

# ウ. ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

#### (ひずみ集中帯の成因)

屈斜路カルデラ周辺のGPS連続観測により、カルデラを中心とする収縮場が得られ たが、広域的なデータ解析から得られた結果と調和的であり、地域スケール・カルデラ スケール双方で収縮が卓越する場となっていることが確認された(図8)(北海道大学[課 題番号:1103])。機動観測点を含めたより詳細な速度場から、カルデラ内部のより詳細 な状況が明らかにされ、屈斜路湖南東岸以外の地域では伸長ひずみ場となっていること が報告された。これまで明らかにされてきた広域なひずみ場では,伸長ひずみは検出さ れておらず,カルデラ内部にひずみ場の不均質が存在していることが示唆された。

岩手・宮城内陸地震震源域における合同余震観測グループによる稠密臨時地震観測点 のデータを利用し、2008年岩手宮城内陸地震の前震・本震・余震分布と周辺の詳細な速 度構造が推定され、以下の結果が報告された(Okada et al., 2012)(東北大学[課題番 号:1207])。1)本震震源周辺では余震は西に傾斜した分布と東に傾斜した分布が交差 したような分布となるが、主な断層面は西に傾斜したものである。2)直前の前震は本 震の震源付近に位置し、1999年頃からの先駆的活動域は西に傾斜した余震の並びの浅部 に対応する。3)本震震源周辺では、西に傾斜した余震の並びに対し、上盤側は低速度、 下盤側は高速度となり、2003年宮城県北部地震などのインバージョンテクトニクスによ ると考える地震の特徴と一致する。地震時に大きくすべった領域は高速度域に対応する。 4)震源域の深部には地震波速度低速度域が分布する。この低速度域の震源域の走向方 向の広がりは震源域の広がりに対応することから、地殻下部での弱い領域の広がりが、 地殻上部での震源域の広がりを規定していた可能性が指摘された(図9)。

日本海東縁ひずみ集中帯では、顕著な短縮変形と同時に長期的かつ長波長の沈降が生 じており、堆積盆形成に寄与しているが、この地殻変形の運動学的なモデルについて検 討が行われた(名古屋大学[課題番号:1705])。厚さ 8km の弾性的な上部地殻の上に厚 さ 10km の堆積層(軟らかい弾性層)が、下に粘弾性的な下部地殻(粘性率 1021Pa・s) とマントル(粘性率 3×1019Pa・s)を仮定して、上部地殻全体と堆積層の下半分を切る 傾斜 30 度の逆断層を仮定し、断層変位後の完全緩和解を求めた結果が図 10 に示された。 この完全緩和解は、断層が一定速度でずれている場合の定常解とみなすことが可能であ るが、断層付近で短縮変位の 3 割程度に相当する沈降域が生じること、および水平短縮 のブロック運動が再現された。これは短縮変形による余剰質量をアイソスタティックに 支えるために生じる沈降であり、ひずみ集中帯の変形過程を支配するメカニズムの一つ と考えられた。

越後平野周辺における東北地方太平洋沖地震時のひずみ分布の不均質が有限要素法に より再現された(国土地理院[課題番号:6015])。東北地方太平洋沖地震を含む1年間 のGNSS観測から越後平野周辺では地震時の東西伸張ひずみが周辺より大きいことが観測 されたが、このひずみ分布の不均質を説明するため、有限要素法によるJ-SHIS 地盤構造 モデル(防災科学技術研究所)に準拠した地殻不均質構造と東北地方太平洋沖地震の震 源断層モデルを用いた地殻変動の数値シミュレーションが行なわれた。その結果、地震 時の東西伸張ひずみ分布において越後平野が周辺部より2倍程度大きくなり、観測デー タの特徴が再現された。

濃尾地震震源域の総合集中観測により、下記に述べるように、震源域周辺の不均質構造に関する様々な知見が得られた(東京大学地震研究所[課題番号:1417])。地震波トモグラフィ解析により、濃尾地震震源域およびその北西側の下部地殻はP波、S波とも周囲に比べ低速度であること、その中でも特に、濃尾地震の際に滑り量が大きかった温見断層直下の下部地殻の速度が遅いことが確認された。また、濃尾地震の震源よりも南東側の下部地殻の速度は平均程度であり、震源域付近を境に下部地殻の速度が大きく変化することが示された。稠密アレー観測の地震波トモグラフィー解析から、活断層密集域の地震発生層下部には、低速度層が存在することが明らかとなった。さらに、2009年10

月に研究地域で行われた発破のアレイ地震観測点での記録から反射波群の空間的広がり の特定が試みられ、対応する反射群の上面と下面の深さは、28-32 km及び37-41kmと根尾 谷断層を境に北東側の方が深い深度を示すことが示された(図11)。これらのことから根 尾谷断層が下部地殻まで及んでいる可能性が示唆された。地殻内で発生する地震のS波ス プリッティング解析において、波線長で正規化した時間差をGPS解析から得られた差ひず み速度と比較すると、Hiramatsu et al. (2010)で報告されているひずみ集中帯におけ る差ひずみ速度との比例関係と整合的な結果が得られ、差ひずみ速度に対応する速度で 上部地殻に応力が蓄積しているという解釈がなされた。3次元的解析による比抵抗構造の 推定結果によると、深さ4km程度までの地下浅部に、濃尾地震断層南部に沿って低比抵抗 帯のあること、中部地殻は全体的に高比抵抗であること、福井一岐阜県境域上部マント ルに東西に横たわる低比抵抗域が存在することが分かった。この低比抵抗域は、深さ 100km以深にまで達しており、その生成には太平洋プレートからの脱水が関与している可 能性が示唆された。

前計画で実施した跡津川断層域における総合集中観測については、地震波形3成分デー タを用いて、コーダQ(Q<sub>c</sub>)の解析を継続して行い、低周波数帯である1.5 Hz帯や2.0 Hz 帯では、北東一南西方向に跡津川断層帯と重なるように低コーダQ域(高コーダQ<sup>-1</sup>域)が 広がり、跡津川断層帯から離れるにつれ、高コーダQ(低コーダQ<sup>-1</sup>)になることが示され た(東京大学地震研究所[課題番号:1417])。Nakajima et al. (2010)による地震波ト モグラフィのS波速度構造と比較すると、上部地殻下部から下部地殻でのS波速度と正の 相関が見られ、低周波数帯におけるコーダQ値は地殻の脆性-延性遷移領域を反映したパ ラメータであるというこれまでと調和的な結果が得られた。

2007年能登半島地震の余震のメカニズム解から推定された応力の深さ変化(Kato et al., 2011, Yoshimura et al., 2008)について、断層の深部延長の滑りによる解釈が行われ、深部で逆断層的、浅部で横ずれ型の応力場が再現された(東京大学地震研究所[課題番号:1417])。また、能登半島地震の震源域では、下部地殻内の低速度・低比抵抗異常域から推定されるWeak Zoneは震源域を超えて続いていないと推定されるのに対して、跡津川断層においては、下部地殻内の低速度・低比抵抗異常域は大規模なものであり(Nakajima et al., 2007; Yoshimura et al., 2009)、深部延長だけでなくその両端部を含めてWeak Zone(変形集中帯)となっていることから、新潟-神戸歪集中帯の走向方向のWeak Zoneのつながりが、ひずみ集中帯(Sagiya et al., 2000)の形成に関係している可能性が指摘された。

# (内陸地震発生の準備過程)

福岡県西方沖地震の余震のメカニズム解から,新たに開発された手法(Matsumoto et al., 2012)により推定された断層端及び破壊開始点での非弾性変形を他地域と比較するために,同じ横ずれ型地震で近年発生した最大規模の内陸地震である1995年兵庫県南部地震の震源域を対象とした解析が行われた(九州大学[課題番号:2203])。Hardebeck and Michael (2006)の応力テンソルインバージョンを適用した結果,1)  $\sigma$ 1軸はほぼ東西で安定,2)応力比が小さく(0.1-0.3), $\sigma$ 2, $\sigma$ 3が近接,3)北東方向は横ずれ場,南西方向は逆断層場という結果が得られた(図12)。Matsumoto et al. (2012)による手法を用いて広域応力場と非弾性変形源を推定した結果,広域応力は横ずれ応力場である

が、応力比が小さく(0.1-0.3)、σ2、σ3が近接していることが推定された。これら は断層南西部では地震の滑りによって鉛直応力<水平最小圧縮力となった可能性が指摘 された。また、淡路島側の断層端や明石海峡周辺で大きな非弾性変形がみられ、断層端 の応力集中や震源付近の応力場の乱れに対応すると解釈された。このように、断層端お よび破壊開始点では大きな非弾性変形が見られ、福岡県西方沖地震震源域で得られた特 徴と同様な結果であることから、これらが地震発生及び停止に関連している可能性が示 唆された。

山陰地方の地震帯中部,島根県東部から鳥取県西部地域における満点システムを用い た稠密地震観測から,断層への応力蓄積過程に関する知見が得られた(京都大学防災研 究所[課題番号:1808])。2009年11月から2011年10月までのデータを用いて決定したメ カニズム解のP軸の方位分布において,Kawanishi et al. (2009)に報告されているように, 南部ではほぼ東西であるのに対して,北へ行くほど北西-南東方向へ回転している空間変 化が見られた(図13)。定常的な地震活動の見られる島根県東部において応力逆解析が行 われ,地震帯中央部のR2,R3付近で最大主圧縮応力軸が回転しており,深部延長の滑りで 説明可能であることが報告された。トモグラフィーによる山陰地方の地震帯中部での速 度構造の推定も行われ,微小地震活動は顕著な低速度及び高速度域を避けるように分布 していること,黒線で示された2000年鳥取県西部地震の余震域,及び2000年10月に誘発 された地震活動及び1978年の三瓶山の地震の余震分布の両端に低速度異常域があるよう に見えることが示された(図14)。低速度異常域では周囲より弾性定数が小さいと考えら れるため,その周辺に局所的な応力集中を起こした可能性が示唆された。

# (断層の強度回復過程)

野島断層近傍の地表岩盤に設置されたアクロス震源の連続運転を2012年10月~2013年 1月に実施した。過去7回の連続運転(2000年1月~2001年4月,2003年3月~6月,2005年8 月~9月,2007年11月~2008年5月,2009年9月~2010年1月,2010年11月~2011年1月,2011 年11月~2012年2月)データと合わせた解析により,アクロス震源と800 m孔底地震計の 間の伝達関数からP 波およびS 波の走時と振幅の経年変化を推定するともに,1999年6月 及び9月に試験的に実施した実験データについても再解析を行い,共通の周波数帯の応答 を取り出して比較することにより,1999年~2012年にわたる経年変化が推定された(京 都大学防災研究所[課題番号:1807])。その結果,走時は各期間で±1ms程度のばらつ きを持つものの,1999年~2012年にかけて約2 ms(0.4%)程度速くなる傾向が確認され た(図15)。同じ伝達関数を用いて,後続波部分における走時変化についても推定する ことにより,鉛直成分については変化がなく,水平成分については変化がないかもしく は0.1%程度速くなっていることが推定された。後続波(散乱波)部分は直達波経路より も広い領域の速度変化を反映すると考えられるので,野島断層の破砕帯近傍ではその周 辺領域よりも速度の速まり(強度回復)が大きい可能性が示唆された。

# エ. スラブ内地震の発生機構

スラブ内地震の発生機構に関していくつかの重要な知見が得られた。

東北地方のスラブ内地震にみられる太平洋プレート上部境界でのPS変換波(Matsuzawa et al., 1986)の走時を用いて,海洋性地殻の面的なP波速度構造が推定された(東北大

学[課題番号:1208])。その結果,P波速度は前弧側で6.5-7.5 km/s,背弧側で7.5-8.5 km/sであり,火山フロント下を境に速度が大きく変化することが明らかにされた。深さ 70-90kmの範囲では,観測されたP波速度は岩石学的モデルや室内実験から期待される速 度よりも10%程度遅く,含水鉱物に加えて多量の水が存在していることが強く示唆された。 また,海洋性地殻内で地震活動が活発な上面地震帯(Kita et al., 2006)はこの低速度 域とよい対応を示すことから(図16),地殻内地震は含水鉱物の脱水によって生じた高 間隙圧水によって生じているというモデルが支持された。

北海道下において稠密地震観測網のデータも用いて地震波減衰構造が推定された(東 北大学[課題番号:1208])。太平洋スラブ内は全体的には,これまでの研究と同様に 低減衰(高Q)となっているが,地震波低速度領域としてイメージングされている海洋性 地殻領域は高減衰(低Q)を示すことが明らかになった(図17)。これらの知見も海洋性 地殻での地震発生には流体が関わることを支持する結果である。

新潟県新発田市の下の深さ約155kmで発生している稍深発地震のクラスターについて, 波形解析からその特徴を調べ,下記の知見が得られた(東北大学[課題番号:1208])。 地震クラスターは,太平洋スラブの地殻内に位置していること,正断層,逆断層地震が 発生していること(図18),波形の相似性から9つの地震クラスターに分類できることが 明らかになった。また,相互相関データを用いた震源決定の結果,正断層地震は逆断層 地震よりも1km程度浅部で発生していることがわかった(図18b)。この結果は,同じク ラスターの中で応力場が急変していることを示しており,海洋性地殻がエクロジャイト 化する際の体積減少に伴って,浅部の引張場,深部の圧縮場が形成されているとすると, 観測事実を説明することができると考えられた(図18c)。

# これまでの課題と今後の展望

アスペリティの実体に関して、東北地方太平洋沖の大滑り域において浅部から深部ま で非地震性滑りレートが小さいことが確認された。南西諸島沖では、1911年の喜界島近 海の巨大地震の震源や断層モデルが推定されるとともに、奄美大島の北方海域で発生し た2009年10月30日 M6.8の地震は、1911年の巨大地震の断層深部で発生したことが示 された。海溝軸近くに決定された1911年の巨大地震の震源付近では非地震性滑りレート が小さく、地震発生域の深部では M6.8のプレート境界地震が発生したことから、南西諸 島沖においても東北地方太平洋沖と同様に、巨大地震の発生域では、プレート境界の固 着域が広い可能性が示唆された。一方、日向灘においては、北部の大地震の発生する地 域においては、震源域付近で非地震性滑りレートが小さいことが報告されたが、海溝近 くの浅い領域では非地震性滑りレートが大きく、東北地方太平洋沖や喜界島近海とは異 なっているように見える。日向灘北部では、過去に南海トラフの巨大地震の震源域が及 んだ可能性が指摘されているが、小繰り返し地震が発生しない領域では滑りレートの推 定が出来ないため、他の手法を用いた推定が非常に重要である。

非地震性滑りの時空間変化に関して,2011 年東北地方太平洋沖地震の発生前の2011 年1月下旬から,直上に設置された海底水圧計および陸上沿岸部の体積歪計でスロース リップイベントが観測され,それは少なくとも3月9日の最大前震直前まで継続してい た可能性があること,観測記録のトレンドの変化から,その滑り域が,2月下旬から3 月9日の発生直前にかけて,海溝軸の方向に拡大していた可能性が指摘された。これら の知見は,超巨大地震の発生と直接関係している可能性のある極めて重要な知見であり, 他の観測結果による検証が重要である。

東北地方太平洋沖においては浅部超低周波地震が発生していることが防災科研 F-net の広帯域地震計記録を用いた解析により見出され,2011年東北地方太平洋沖地震後に岩 手沖及び福島・茨城沖の活動が活発化したのに対し,宮城沖については地震後に活動が 検出されていないことが報告された。2003年十勝沖地震に関連して超低周波地震活動の マイグレーション方向の違いも推定されたが,これらの知見をさらに蓄積して,地震発 生との関係を解明することが重要である。

九州から房総沖においても、深部低周波微動や超低周波地震活動とともに、スロース リップイベントに関して興味深い知見が多数得られた。GNSS 連続観測によっても、短期 的なスロースリップイベントが多数検出され、四国、紀伊半島、東海地方に加えて、日 向灘から種子島にかけての領域と相模トラフ沿いにおいても短期的スロースリップの断 層モデルが推定され、それぞれの活動の時空間的な特徴や時間変化が明らかになりつつ ある。これらの知見をさらに蓄積するとともに、断層モデルの推定精度を向上し、地震 発生との関係を解明することが重要である。琉球弧の西表島ではスロースリップに伴っ て重力変化が観測され、スロースリップ時に高圧間隙水の拡散がおきている可能性が示 唆された。スロースリップの発生過程を推定するだけでなく、地震発生を考える上でも 重要な知見であり、今後の発展を期待したい。

ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程に関しても、物理モデルの構築へ向け て突破口となると期待される重要な知見がいくつか得られた。断層直下の下部地殻の不 均質構造に関しては、岩手・宮城内陸地震や濃尾地震の震源域で、低速度異常や下部地 殻の不連続構造が推定された。能登半島地震の震源域や山陰地方の地震帯に属する島根 県東部において、メカニズム解の逆解析から推定された応力場が深部滑りにより解釈可 能であることが示された。山陰地方の地震帯では、地震発生域の断層の両端に低速度異 常が推定され、断層両端の変形による応力集中の可能性が示唆された。さらに、新潟-神 戸歪集中帯に属する跡津川断層周辺で推定された不均質構造と、能登半島地震の震源域 で推定されたものとの比較から、不均質構造の水平方向におけるつながりがひずみ集中 帯の形成に関係している可能性が示唆された。

スラブ内地震の発生機構に関して、今年度においても、東北地方および日高地方にお いて、脱水脆性仮説を支持する重要な知見が多数得られた。スラブ内の詳細な応力場の 推定にも成功しつつあり、スラブ内地震の発生に至る過程の解明へ向けて、今後の進展 が大いに期待される。

成果リスト

秋田藤夫・岡崎紀俊・高橋浩晃,2012, 屈斜路カルデラの地下温度構造,日本温泉科学会2012 年秋季大会講演予稿集.

後藤和彦,2013,1911年に喜界島近海で発生した巨大地震の震源位置の再評価,地震2,65,231-242. Hiramatsu, Y., K. Iwatsuki, S. Ueyama, T. Iidaka, and the Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, 2010, Spatial variation in shear wave splitting of the upper crust in the zone of inland high strain rate, central Japan, Earth Planets Space, 62,675-684.

- Hiramatsu, Y., A. Sawada, Y. Yamauchi, S. Ueyama, K. Nishigami, E. Kurashimo, and the Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, Spatial variation in coda Q and stressing rate around the Atotsugawa fault zone in a high strain rate zone, central Japan, Earth Planets Space, in press.
- Hirose, H., Hisanori Kimura, Bogdan Enescu, and Shin Aoi (2012) Recurrent slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 109(38) 15157-15161, doi:10.1073/pnas.1202709109.
- 生田領野・山岡耕春・渡辺俊樹・國友孝洋・西上欽也, ACROSS による淡路島野島断層近傍にお ける 11 年間の地震波速度モニタリング,日本地球惑星科学連合 2012 年大会,2012 年 5 月 20日(ポスター).
- 生田領野・山岡耕春・渡辺俊樹・國友孝洋・西上欽也, ACROSS による淡路島野島断層近傍の長期 地震波モニタリング,日本地震学会 2012 年度秋季大会,2012 年 10 月 17 日(ロ頭).
- 今西和俊·桑原保人,2012,2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域における正しい応力場の推定 一応力インバージョンにおけるデータセットの抽出基準の重要性一,地球惑星科学連合 2012 年大会,SCG68-2.
- 今西和俊·桑原保人,2012,2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域における正しい応力場の推定 一応力インバージョンにおけるデータセットの抽出基準の重要性一,地球惑星科学連合 2012 年大会,SCG68-2.
- Ito, Y. R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, J. Ashi, 2013, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Tectonophysics, in press.
- 伊藤喜宏・日野亮太・木戸元之・藤本博己・長田幸仁・稲津大祐・三浦哲・太田雄策・内田直希・ 辻健・芦寿一郎・三品 正明, 2012, 2011年東北地方太平洋沖地震発生前のスロースリップ イベント, 日本地球惑星科学連合2012年大会, SCG63-01.
- 伊藤喜宏・芝崎文一郎・柄谷和輝・日野亮太・中島淳一,2012,有限要素法に基づく2011年東北 地方太平洋沖地震による地殻内変形,日本地球惑星科学連合2012年大会,SSS39-06.
- Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, M. Mishina, S. Miura, K. Suzuki, T. Tsuji, J. Ashi, 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, AGU 2012 Fall meeting, T21F-01.
- Kato, A. et al., 2011, Anomalous depth dependency of the stress field in the 2007 Noto Hanto, Japan, earthquake: Potential involvement of a deep fluid reservoir, Geophys. Res. Lett., 38, L06306, doi:10.1029/2010GL046413.
- Kawanishi, R., Y. Iio, Y. Yukutake, T. Shibutani, and H. Katao, 2009, Local stress concentration in the seismic belt along the Japan Sea coast inferred from precise focal mechanisms: Implications for the stress accumulation process on intraplate earthquake faults, J. Geophys. Res., 114, B01309, doi:10.1029/2008JB005765.
- Kita, S., T. Okada, J. Nakajima, T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2006, Existence of a seismic belt in the upper plane of the double seismic zone extending in the along-arc direction at depths of 70–100 km beneath NE Japan, Geophys. Res. Lett., 33, L24310,

doi:10.1029/2006GL028239.

- Kita, S., A. Hasegawa, J. Nakajima, T. Okada, 2012, T. Matsuzawa and K. Katsumata, High-resolution seismic velocity structure beneath the Hokkaido corner, northern Japan: Arc-arc collision and origins of the 1970 M 6.7 Hidaka and 1982 M 7.1 Urakawa-oki earthquakes, Journal of Geophysical Research, doi:10.1029/2012JB009356, Vol. 117, B12301.
- 国土地理院, 2012, 東北地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 87, 127-141.
- 国土地理院,2012,関東甲信地方の地殻変動,地震予知連絡会会報,87,200-205.
- 国土地理院, 2012, 中国・四国地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 87, 438-447.
- 国土地理院,2012,東北地方の地殻変動,地震予知連絡会会報,88,131-139.
- 国土地理院・東京大学地震研究所,2012,御前崎における絶対重力変化,196回地震予知連絡会.
- 国土地理院・東京大学地震研究所,2012、御前崎における絶対重力変化,197回地震予知連絡会.
- 国土地理院・東京大学地震研究所,2013,御前崎における絶対重力変化,198回地震予知連絡会.
- Lin Weiren, et al., 2013, Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, Science, 339, 687-690, (DOI: 10.1126/science.1229379).
- Matsumoto, S., 2012, Modeling heterogeneous deviatoric stress field around the hypocentral area of the 2005 Fukuoka earthquake (M7.0) by spatially distributed moment tensors, Journal of Geophysical Research, VOL. 117, B03303, doi:10.1029/2011JB008687, 2012.03.
- Matsuzawa, T., N. Umino, A. Hasegawa and A. Takagi , 1986, Upper mantle velocity structure estimated from PS-converted wave beneath the northeastern Japan arc, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 86, 767-787.
- Nakajima, J., and A. Hasegawa, 2007, Deep crustal structure along the Niigata-Kobe Tectonic Zone, Japan: its origin and segmentation, Earth Planets and Space, 59, e5-e8.
- Nakajima, J., A Kato, T. Iwasaki, S. Ohmi, T. Okada, T. Takeda, and The Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, 2010, Deep crustal structure around the Atotsugawa fault system, central Japan: A weak zone below the seismogenic zone and its role in earthquake generation, Earth Planets and Space, 62, 555-566.
- Nakajima, J., N. Uchida, T. Shiina, A. Hasegawa, B.R. Hacker, and S.H. Kirby, 2013, Intermediate-depth earthquakes facilitated by eclogitization-related stresses, Geology, in press.
- 西村卓也,2012,測地観測データに基づく東北日本の最近120年間の地殻変動,地質学雑誌,118, 279-293, doi:10.5575/geosco.2012.0027.
- 岡田知己・米川真紀・吉田圭佑・高木涼太・松澤暢・2011年東北地方太平洋沖地震合同余震観測 グループ,2012,東北地方西部地域の地殻構造と地震活動,日本地震学会2012年大会, B12-04.
- Okada T., Umino, T., Hasegawa A., and Group for the aftershock observations of the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, 2012, Hypocenter distribution and heterogeneous seismic velocity structure in and around the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, NE Japan—Possible seismological evidence for a fluid driven compressional inversion earthquake, Earth Planets Space, 64,

doi:10.5047/eps.2012.03.005.

- 大久保修平・張新林・田中愛幸・今西祐一・植木貞人・大島弘光・前川徳光,2012,2011年東北 地方太平洋沖地震で生じた地上重力の余効変動, 日本測地学会第118回講演会要旨集, 43-44.
- 大久保修平,2012, ナノで見た日本列島の重力変化-東北地方太平洋沖地震の影響, 地震ジャー ナル,54,24-25.
- 大園真子・高橋浩晃・一柳昌義・山口照寛・眞城亮成・篠原大地・湊宏司,2012, 屈斜路カ ルデラ周辺における稠密GPS観測,日本測地学会2012年秋季大会.
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Munekane, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire, 2012, Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, J. Geophys. Res., 117, B07404, doi:10.1029/2011JB009120.

Ozawa, S., H. Yarai, T. Imakiire, and M. Tobita, Spatial and temporal evolution of the long-term slow slip in the Bungo Channel, Japan, Earth Planets Space, in press.

- Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada, 2000, Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan, PAGEOPH, 157, 2303-2322.
- 鷺谷威・歪み集中帯 GPS 観測グループ,2012,GPS 稠密観測から推測される日本海東縁歪み集中 帯の変形様式,日本地震学会2012 年秋季大会.
- 水藤 尚・西村卓也・小林知勝・小沢慎三郎・飛田幹男・今給黎哲郎,2012,2011年(平成23年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地震時および地震後の地殻変動と断層モデル,地震2,65, 95-121, doi:10.4294/zisin.65.95.
- 鈴木秀市・伊藤喜宏・木戸元之・太田雄策・長田幸仁・日野亮太・藤本博己,2012, 音響トラン スポンダを用いた音響測距による海底ベンチマークの位置決定精度について,日本地学会第 118回講演会, P-1.
- Suzuki, S., Y. Ito, M. Kido, Y. Ohta, Y. Osada, R. Hino, H. Fujimoto, 2012, Accuracy of acoustic positioning of seafloor benchmarks by a generic acoustic transducer pair, AGU 2012 Fall meeting, T13F-2696.
- 高岡宏之・津村紀子・高橋福助・野崎謙二・加藤愛太郎・飯高隆・岩崎貴哉・酒井慎一・平田直・ 生田領野・國友孝洋・吉田康弘・勝俣啓・山岡耕春・渡辺俊樹・山崎文人・大久保慎人・鈴 木貞臣, 2012. 東海地域下の三次元地震波減衰構造一微小地震スペクトルを用いた推定一, 地震 第2輯, 第65巻2号, 175-187.
- 田中愛幸・岡村盛司・宮崎隆幸・名和一成・今西祐一・大久保修平・中村衛,長期的スロースリ ップの発生時に観測された絶対重力変化,日本測地学会第118回講演会要旨集, 31-32.
- 田中愛幸・今西祐一・大久保修平・名和一成・田村良明・宮地竹史・池田博・岡村盛司・宮崎隆 幸・中村衛,2012年5月の琉球弧の長期的スロースリップとその前後に観測された重力変化, 日本地震学会2012年秋季講演会予稿集,200.
- 内田直希・松澤 暢,2011東北地方太平洋沖地震震源域の地震活動特性~釜石沖地震との比較を 基にして、日本地球惑星科学連合2012年大会,千葉,幕張メッセ,2012年5月.
- 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.

van Keken, P. E., S. Kita, and J. Nakajima, 2012, Thermal structure and intermediate-depth

seismicity in the Tohoku-Hokkaido subduction zones, Solid Earth, 3, 355-364, doi:10.5194/se-3-355-2012.

- Yamashita Y, H. Shimizu, and K. Goto, 2012, Small repeating earthquake activity, interplate quasi-static slip, and interplate coupling in the Hyuga-nada, southwestern Japan subduction zone, Geophys. Res. Lett., 39, L08304, doi:10.1029/2012GL051476.
- 山下裕亮, 2013, Heterogeneity of interplate coupling in the Hyuga-nada region revealed by the analysis of interplate earthquakes, 九州大学博士論文.
- 山下裕亮・清水 洋,2012,小繰り返し地震を用いた日向灘におけるプレート間固着状態の推定, 西部 地区自然災害資料センターニュース,47,14-19.
- Yoshimura, R., et al., 2008, Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto Earthquake (Mj6.9), central Japan, Earth Planets Space, 60, 117–122.
- Yoshimura, R., et al., 2009, Magnetotelluric Transect Across the Niigata-Kobe Tectonic Zone, Central Japan: A Clear Correlation Between Strain Accumulation and Resistivity Structure Geophys. Res. Lett., 36, L20311, doi:10.1029/2009GL040016.



図1. 小繰り返し地震解析による東北地方太平洋沖地震発生前のプレート間非地震性滑り(東北 大学[課題番号:1205])。(a) 2011年東北地方太平洋沖地震震源域周辺の地震前の非地震的滑 りの速度分布。1996年から2008年について、0.3°×0.3°のグリッドごとに、その中の繰り返し 地震の滑りレートの平均を示す。A-Cは(b)で深さごとの滑りレートを推定した領域。灰色コンタ ーはIinuma et al. (2012)により推定された2011年東北地方太平洋沖地震の10mの地震時滑りを 示す。(b) 1997年から2011年東北地方太平洋沖地震直前までの非地震性滑りレートの深さ分布。 (a)のグリッドについて、プレート境界の深さをZhao et al. (1997)のプレートモデルにより求 めた。次に、深さ5kmごとに、その深さから5kmの深さ範囲に対応するグリッドについて、滑りレ ートの平均(四角、菱形、丸)および標準偏差(エラーバー)を求めた。大滑り域の北部(A)、 大滑り域が含まれる場所(B)、大滑り域の南部(C) ((a)参照)について示す。



図2. 小繰り返し地震解析から推定された非地震性滑りレートの空間変化(九州大学[課題番号: 2202]) (Yamashita et al., 2012 GRL)。大きな赤星はM6.5 以上,小さい赤星は1997 年以降に 発生したM5 以上のプレート境界地震の震央,青,赤,グレーのコンターは1996 年10 月,12 月, 1968 年日向灘地震の地震滑り分布。



図3. 小繰り返し地震解析から推定された非地震性滑りレートの空間変化と地震資料から推定された1911年の巨大地震(M8.0)の震央(大きな星印),及び津波シミュレーションから推定された断層(矩形)(鹿児島大学[課題番号:2301])。太線の矩形は相対的に大きな滑りがあったと考えられる領域。小さな星印は2009年10月30日に発生したM6.8のプレート境界地震の震央。



図4. 東北地方太平洋沖地震の大滑り域で地震前に発生した2011 年のスロースリップを示す観測 記録(東北大学[課題番号:1206])。(a)宮城沖に設置された海底水圧計記録。 隣接する2 つの海底圧力計の差の時系列。A:スロースリップ前期,B:スロースリップ中期,C:スロースリ ップ後期。(b)金華山の体積ひずみ計記録と同一地点の気圧記録。(c)M-T ダイアグラム。黒丸: 2月16日以降のM5を超える地震。(d)宮城沖沿岸観測点のGPS時系列記録。GEO-NET の950154 を基準点とした海溝軸にほぼ直交する方位(N100度E)の基線長変化。



図5. GNSS観測から推定された短期的スロースリップの断層モデル(国土地理院[課題番号: 6014])。

対象とする期間は、1996年6月19日(相模トラフのみ1994年7月24日)~2012年10月7日。赤丸は 気象庁一元化震源による低周波地震。



図6. GNSS観測から推定された短期的スロースリップの断層モデルの時空間分布図(国土地理院 [課題番号:6014])。赤及び黄色の長方形がそれぞれカテゴリーA及びBのスロースリップを表 す。長方形の横幅が滑り量,縦の長さが緯度もしくは経度の範囲,中央の縦線が発生時期を表す。



図7. 琉球弧スロースリップと重力変化の対応(東京大学地震研究所[課題番号:1406])。 上 段:与那国島~波照間島のGPS斜距離変化。下段:西表島における絶対重力変化。グレーのハッ チは、スロースリップの生じた時期。



図8.GPS観測の結果明らかになった屈斜路カルデラの速度場(北海道大学[課題番号:1103])。



図 9. 岩手・宮城内陸地震震源域周辺の S 波速度偏差分布(東北大学[課題番号:1207])。(a) 深さ 24km における平面図。白☆は本震を,小〇は余震,赤▲は第四紀火山の位置。(b)図(a)中 A-A'に沿う鉛直断面図。深さ 35km 付近の線はモホ面。



図10. ひずみ集中帯の運動学的モデルによる変形速度分布(名古屋大学[課題番号:1705])。 (上)水平変動分布。実線は断層変位に伴う瞬間的な変化。破線は完全緩和解で,一定速度の断 層滑りに対する定常解に相当する。(下)上下変動の分布。


図11. (a) 2009年に実施された構造探査の観測点および発破点分布。地質図は20万分の1日本シ ームレス地質図(地質調査所)。 赤線は断層を示す。(b)反射波走時から求められた各投影測線 での地震波速度構造。青点線は広瀬ほか(2007)によって推定されたこの地域でのフィリピン海プ レート上面深度。赤点は気象庁一元化震源(2002年6月10日~2012年8月7日)を示す。根尾谷断 層付近を境として北東側の反射面深度が深い傾向がわかる(東京大学地震研究所[課題番号: 1417])。



図12. 兵庫県南部地震の余震のメカニズム解からHardebeck and Michael (2006)の応力テンソル インバージョンにより推定された応力場(九州大学[課題番号:2203])。各ビーチボールが応 カテンソルの結果とboot strap testの結果を示している。青,緑,赤はそれぞれσ1,2,3 の95%信頼範囲。



図13. 島根県東部および鳥取県西部におけるメカニズム解のP軸の方位分布と応力逆解析の解析 領域(京都大学防災研究所[課題番号:1808])。P軸は2009年11月から2011年10月までのデー タを用いて決定。



図14. 島根県東部および鳥取県西部における深さ4kmにおけるS波速度偏差(京都大学防災研究所 [課題番号:1808])。水平断面から深さ0.5km以内の微小地震の震源がプロットされている。



図15.1999年6月~2013年1月にかけてアクロス連続運転により測定された,野島断層近傍における直達波(P波及びS波)の走時(上)及び振幅(下)の時間変化(京都大学防災研究所[課題番号:1807])。いずれも,2008年3月~5月を基準とした走時の遅れと振幅の比を示す。赤,緑,青はそれぞれ,P波,断層に直交するS波,及び断層に平行なS波。



図16.PS変換波により推定された沈み込む海洋性地殻内のP波速度(東北大学[課題番号:1208])。 (上) PS変換波により推定された海洋性地殻内のP波速度分布。海洋性地殻内で発生している地 震(白丸)を重ねて示す。(下)上図の測線A-A'に沿うP波速度構造の鉛直断面図。



図17. 北海道下の地震波減衰構造と地震活動(東北大学[課題番号:1208])。推定されたQp構造の(a)深さ20kmの水平断面および(b)鉛直断面。(a)の白色細線は地質境界を示す。(b)上端の黒太線,緑矩形および灰色矩形は,それぞれ陸域,日高変成帯および神居古潭変成帯の位置を示す。黒点線および黒丸は,スラブ表面の位置(Kita et al., 2010)と地震活動を示す。





図18. 新発田の下のスラブ内地震クラスター(東北大学[課題番号:1208])。(a) 地震クラス ター直上の観測点で観測された地震波形例。赤が逆断層地震,青が正断層地震(以下同じ)。(b) 再決定された震源分布。シンボルは波形の相似性で分類した9つのグループに対応。(c) 解釈図。 エクロジャイト化により,反応フロントの浅部に引張場,深部に圧縮場が形成される。

# 2 (2) (2-2) 火山噴火準備過程

「火山噴火準備過程」計画推進部会長 井口正人 (京都大学防災研究所)

火山噴火予知研究の目標は、噴火の時期、場所、規模、様式及び推移を予測すること であるが、活動的で数多くの噴火履歴があり、多項目観測や各種調査が実施されている 幾つかの火山であっても、観測と経験則により異常の原因が推定できる段階にとどまっ ている。これを、「現象を支配する物理法則を明らかにし、観測結果を当てはめて、将 来の予測ができる段階」に引き上げるために、火山噴火準備過程研究計画では、「ア. マグマ上昇・蓄積過程」と「イ.噴火履歴とマグマの発達過程」の解明を2つの柱とし ている。前者では、マグマ供給系を含む地下の構造や状態とそれらの時間変化を把握す ることに重点を置き、後者では様々な時間スケールでの火山活動過程を解明するための 地質学的調査・研究を行う。両者をあわせて考察することにより噴火現象をモデル化し、 噴火シナリオの作成に役立てることを目指している。

## 研究成果のまとめ

# ア. マグマ上昇・蓄積過程

# (1)マグマ上昇・蓄積過程の多様性の把握

これまでの研究により、マグマ上昇・蓄積過程に対応する地盤変動の様式には多様性 があることが明確に認識され、次のように大別される。①地震活動や地殻変動以外の噴 火の兆候を示す現象が観測されていない静穏期にある火山で、山体の膨張と収縮を繰り 返す活動(例:伊豆大島)。②山体直下へのマグマの貫入と噴火によるマグマの放出が 同時に起こり、マグマ蓄積はその収支バランスの上に現れる活動(例:現在の桜島)、 ③山体膨張の開始がそのまま主噴火に直結する活動(例:2011年霧島山新燃岳噴火)。

今年度の研究では、同じ火山でも地盤変動の様式が時間とともに変化することが分か った。例えば、伊豆大島では、1990年代からカルデラ内と周辺海域の地震活動に連動す る膨張とそれに続く収縮が、1~2年周期で繰り返され、膨張が収縮よりも優勢であるの で、長期的には膨張のトレンドにあるとされてきた。ところが、2010年以降、膨張量が 収縮量とバランスした結果、長期的な膨張のトレンドも停止した状態にあり、マグマの 蓄積量が増加していないことがわかった(気象庁[課題番号:7019]、国土地理院[課題 番号:6016])。また、最近の1~2年周期で繰り返される膨張・収縮は体積ひずみ計でも 観測されるが、1986年噴火以前の体積ひずみ計の記録に遡ったところ、最近繰り返され る膨張・収縮の振幅の2倍の大きさで、噴火の3年ほど前から膨張・収縮が繰り返されて いたことが判明した(図1:気象庁[課題番号:7019])。伊豆大島は次の噴火に向けて の準備過程にあると考えられるが、噴火に近づいていることの判断基準として重要な情 報が得られたことになる。また、岩手山では1998年のマグマ貫入と思われる火山体の膨 張イベントに先行して、岩手山山腹・山麓地域が収縮する地盤変動が検出された(東北 大学[課題番号:1209])。その前の変動についてはわからないが、マグマ貫入に先行す るプロセスとして注目できる。

伊豆大島と同様に長期的なマグマ貫入と蓄積が進行している桜島においては、地盤変

動の空間的なパターンが変化していることが分かった。桜島の地盤変動を励起する圧力 源は姶良カルデラ下と桜島の中央火口丘下にあるが、桜島下にある圧力源は、2009年10 月~2010年3月の変動では球状圧力源で近似できたが、2011年11月~2012年3月の変動は 開口割れ目でモデル化する方が妥当であることが示された(図2)。2012年7月24日には 南岳で噴煙高度5000m以上、30万トンの火山灰が放出される爆発が発生した。これに前駆 して21時間前から隆起・膨張が捉えられた。圧力源における体積増加量は1×10<sup>5</sup>m<sup>3</sup>であり、 昭和火口爆発に前駆する地盤変動の体積変化量の10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>よりも1桁以上大きい。この ことは、前駆する地盤変動を励起する圧力源の体積変化量とその速度がその後に発生す る噴火の規模を判断するための指標となることを意味する(京都大学防災研究所[課題 番号:1809])。

#### (2) 地下構造と火山活動

桜島においては様々な火山体構造調査が行われた(京都大学防災研究所[課題番号: 1809])。広帯域MT観測から得られる3次元比抵抗構造では北岳の下3~5kmの深さに顕著な 低比抵抗部分が認められ(図3)、地盤変動観測により求められた圧力源の位置と一致し ており、北岳の下のマグマ溜りを見ている可能性が高い。毎年繰り返してきた反射法地 震探査では反射面の不明瞭化が、また、4年ぶりに実施した空中磁気測量では火口周辺へ の噴出物の堆積に伴う磁化の獲得を除去した場合の磁化強度の減少が検出された。それ ぞれ、マグマの北岳下への貫入の繰り返しおよび昭和火口下での蓄熱の結果と解釈され る。

一方、深部構造については、大陸内火山を対象とした高精度地震波トモグラフィーに より得られた深部構造と火山の位置関係からマグマ上昇機構が検討された(東北大学[課 題番号:1209])

# イ. 噴火履歴とマグマの発達過程

クリチェフスコイ火山、北海道駒ケ岳、那須岳、蔵王山、伊豆大島、桜島において噴 火史および噴火推移と物質科学解析によるマグマ系変遷の解明が進んだ。珪長質マグマ の上位にまで苦鉄質マグマが貫入したマグマ系をもつ北海道駒ケ岳においては、苦鉄質 マグマがほぼ消費され、主要なマグマとなった珪長質マグマの温度低下が進行している ことが明らかとなった(北海道大学[課題番号:1004])。また、桜島の先歴史時代の降 下火砕物について、物質科学的解析を行った結果、約21000年前から約11000年前まで の長い休止期間中にマグマ混合の一方の端成分マグマである珪長質マグマの性質が大き く変化したことが明らかになった(図4)(北海道大学[課題番号:1004])。さらに、那 須岳においては最新のマグマ噴火である1408~1410年噴火について詳細な噴火履歴が明 らかになるとともに、ブルカノ式噴火活動中にマグマの組成が変化したことなど、詳細 なマグマ系変遷の推移が明らかとなった(公募研究[課題番号:2914])。これらの結果 は、次のマグマ活動の様式の推定の可能性を示すとともに、長期の休止期を経た場合の 予測の難しさを意味する。

## 地球物理学的データと物質科学的データのリンクと時間変化の同期

桜島において地盤変動観測から見積もられるマグマ供給率の推移は噴出物分析による

物質科学的データとも整合的である。マグマ供給率が大きい貫入期に、火山灰付着成分の水溶性成分のC1/Sモル比、火口からのS0<sub>2</sub>放出率、温泉ガス中のC0<sub>2</sub>濃度は増加し(京都大学防災研究所[課題番号:1809])、噴出物の火山ガラス中のSi0<sub>2</sub>量が減少する(北海道大学[課題番号:1004])。

桜島の噴火活動は2009年から激化し、それと同時にマグマの供給率が桜島の100年間の 活動の平均的なレベルまで増加した。それに前駆して観測されたた温泉ガス中のH<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> の急激な増加は、その後は減少傾向が続き(京都大学防災研究所[課題番号:1809])、 噴出物の分析により認められる玄武岩質マグマの関与は、その程度を2010年以降弱めて いる(北海道大学[課題番号:1004])。一方、火山灰付着成分水溶性成分のC1/Sモル比 およびSO<sub>2</sub>放出量は長期的に増加傾向にある。これは、高温のマグマが浅部まで上昇し、 しかもその量が増加していることを意味するので、噴火活動が継続したことによる火道 の拡大を反映している。

#### これまでの課題と今後の展望

これまでの観測と研究により、マグマの蓄積はほぼ検知できているといってよい。多 くの火山でマグマ蓄積あるいは貫入イベントは繰り返し発生しており、現状の予知研究 の課題は、現在発生しているマグマ貫入イベントが火山噴火発生に結びつくものなのか どうか、火山噴火に結びつくイベントだとすれば、いつ噴火発生の直前過程に移行し、 そして噴火するかである。伊豆大島では1-2年周期の膨張と収縮が繰り返され、長期的 に膨張のトレンドにあり、マグマの蓄積が進行していると考えられる。2009年以降、昭 和火口の小規模爆発が頻発し、長期的な噴火活動期にある桜島においてもマグマの蓄積 過程の推移と主噴火に至っていない状況からみると同様である。そこで、考えなければ ならないのが 2011 年に発生した霧島新燃岳噴火である。GPS 観測により、1 年前から山 体の膨張が検知されたが、地盤変動率がほぼ一定の割合で膨張が進行し、直前の地震活 動の顕著な活発化もなかったので事前発生予測に至っていない。長期的なマグマの蓄積 を検知していても、実戦で利用可能な技術としてはいまだに直前の地震活動の活発化に 依存しているのが、実情である。2011年の霧島新燃岳噴火では、噴火直前の地震活動が 見られなかったように、地震活動の活発化は噴火直前に常に期待できるわけではなく、 その規模や発生様式、地震の種類は多様であり、しかも直前過程である地震活動期間が 短く、その活発化を捉えた段階では、避難完了のための予知はすでに手遅れである場合 もありうる。マグマ蓄積とその多様性は認識できる段階であり、個々のマグマ蓄積の特 性がどのような現象に対応し、噴火に至るまでの準備過程の中でどの段階にあるのかを 判断できる研究が必要である.

観測坑道におけるひずみ計は、桜島の昭和火口の爆発に先行する圧力源の膨張を捉え、 1つの膨張イベントは確実に噴火活動に結びつくが、膨張開始から噴火発生までに時間を 要する場合は、途中のプロセスは単純ではない。図5に発生までに29時間を要した噴火 に先行する傾斜とひずみ変化を示すが、膨張と停滞、一時的な収縮を繰り返し、直前で は膨張率が加速して爆発に至った。時間と規模のスケールは数十年以上の時間間隔で発 生する噴火とは大きく異なるが、数年以上の間隔で発生する火山噴火に至る準備過程の 縮図がここにある可能性もあり、小規模であっても発生頻度の高い現象から原理.原則 を導き出し、スケーリング則を確立させていくことにより低頻度大規模現象の予測に結び付けていく努力が必要である.

成果リスト

- Alanis, P., H. Miyamachi, H. Yakiwara, K. Goto, R. Kobayashi, T. Tameguri, and M. Iguchi, 2012, Seismic velocity structure of the crust beneath the Aira caldera in southern Kyushu by tomography of travel times of local earthquake data, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 57, 227-234.
- Ban, M., Hirotani, S., Ishizuka, O. and Iwata, N., 2012, Petrologic study of explosive pyroclastic eruption stage in Shirataka volcano, NE Japan: Synchronized eruption of multiple magma chambers. In: Al-Juboury A.I. (ed.) Petrology - New Perspectives and Applications: In Tech - Open Access Publisher, 57-72.
- Haseagwa, T., Nakagawa, M., Kishimoto, H., 2012, The eruption history and silicic magma systems of caldera-forming eruptions in eastern Hokkaido, Japan. Jour. Mineral. Petrol. Sci., 107, 39-43.
- 井口正人,2012,桜島における火山灰放出量予測に関する研究,京都大学防災研究所年報,55B, 169-175.
- 井口正人,2012,桜島火山の噴火活動-2011年7月~2012年6月-,桜島火山における多項目観測 に基づく火山噴火準備過程解明のための研究,平成23年度分報告書,1-6.
- 井口正人・平林順一,2012,桜島・黒神における温泉ガス濃度(2011年・2012年),桜島火山にお ける多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究,平成23年度分報告書,87-90.
- 井口正人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鉄朗・市川信夫,2012,桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測(2010年~2011年),桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程 解明のための研究,平成23年度分報告書,47-53.
- Iguchi, M., 2013, Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observations, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 1-18.
- Iguchi, M., T. Tameguri, Y. Ohta, S. Ueki, and S. Nakao, 2013, Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011 Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 115-135.
- 神田径・小川康雄・高倉伸一・小山崇夫・橋本武志・小森省吾・園田忠臣・佐藤泉・井上直人・ 宇津木充・Nurnaning Aisyah・Aditya Sebastian Andreas, 2012, AMT法による桜島火山の 浅部比抵抗構造調査2011, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のた めの研究, 平成23年度分報告書, 71-78.
- Kanda, W., et al., 2013, Shallow resistivity structure of Sakurajima volcano revealed by audio-frequency magnetotellurics, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 251-267.
- 国土地理院,2012,伊豆大島の地殻変動,第113回噴火予知連絡会資料.
- 国土地理院,2012,伊豆大島の地殻変動,第114回噴火予知連絡会資料.
- 国土地理院,2012,桜島の地殻変動,第113回噴火予知連絡会資料.
- 国土地理院,2012,桜島の地殻変動,第114回噴火予知連絡会資料.
- 小林哲夫,2012,水蒸気マグマ噴火のデータベース作成上の問題点.月刊地球,第34号,

299 - 304.

小林哲夫, 2012, 南九州における最近の火山活動. 鹿児島県地学会誌, No. 100, 55-64.

- Kuritani, T., Kimura, J.-I., Ohtani, E., Miyamoto, H. and Furuyama, K., 2013, Transition zone origin of potassic basalts from Wudalianchi volcano, northeast China. Lithos 156-159: 1-12.
- Kuritani, T., Yoshida, T., Kimura, J.-I., Hirahara, Y., and Takahashi, T., 2013, Water content of primitive low-K tholeiitic basalt magma from Iwate Volcano, NE Japan Arc: implications for differentiation mechanism of frontal-arc basalt magmas. Mineralogy and Petrology, in press.
- 松本亜希子・中川光弘・宮坂瑞穂・井口正人,2012,岩石学的特徴からみる,桜島火山の活動と その評価-2006年6月~2012年4月の昭和火口の活動について-,桜島火山における多項目観測 に基づく火山噴火準備過程解明のための研究,平成23年度分報告書,109-118.
- Matsumoto, A., M. Nakagawa, M. Miyasaka and M. Iguchi, 2013, Temporal variations of the petrological features of the juvenile materials since 2006 from Showa crater, Sakurajima volcano, Kyushu, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 191-212.
- Miura, K., Ban, M., Ohba, T., Fujinawa, A., 2012, Sequence of the 1895 eruption of the Zao volcano, Tohoku Japan. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 247-248, 139-157.
- Miyamachi, H. et al., 2013, Shallow velocity structure beneath the Aira caldera and Sakurajima volcano as inferred from refraction analysis of the seismic experiment in 2008, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 227-237.
- 森 俊哉,2012,昭和火口と南岳火口の火山ガスHC1/S02比の推移(2),桜島火山における多項目 観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究,平成23年度分報告書,91-99.
- 野上健治・井口正人・味喜大介・為栗健・山本圭吾・園田忠臣・佐藤泉,2012,桜島昭和火口に おける噴火活動と地球化学的観測研究-火山灰水溶性成分及びガス放出量による噴火活動評 価2009~2012-,桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成23年度分報告書,105-107.
- 大場司・林信太郎・伴雅雄・近藤梓・葛巻貴大・鈴木真悟・古木久美子,2012, 最近4500年間の 鳥海火山の噴火活動一湿原堆積物に保存された火山灰層の解析一.火山,57,65-76.
- 大久保修平・田中愛幸・山本圭吾・井口正人・今西祐一・渡邉篤志・坂守,2012,桜島火山にお ける絶対重力観測(3),桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のため の研究」平成23年度分報告書,65-70.
- Okubo, S. et al., 2013, Absolute gravity variation at Sakurajima volcano from April 2009 through January 2011 and its relevance to the eruptive activity of Showa crater, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 153-162.
- 奥野 充・鳥井真之・西園幸久・稲倉寛仁・小林哲夫, 2012, 九州の活火山データベースで何を 目指すか? 月刊地球, 第34号, 273-276.
- 奥野 充・鳥井真之・成尾英仁・小林哲夫, 2012, 種子島・屋久島のテフロクロノロジーの最近の進展. 鹿児島県地学会誌, No. 100, 79-86.
- Okuno, M., Nakamura, T., Geshi, N., Kimura, K., Kokubu, Y., and Kobayashi, T., 2013, AMS radiocarbon dating of wood trunks in the pumiceous deposits of the Kikai-Akahoya eruption in Yakushima Island, SW Japan. Nucl. Instr. Meth. Phys., B, 294, 602-605.

Okuno, M., Torii, M., Naruo, H., Saito-Kokubu, Y., Kobayashi, T., 2012, AMS radiocarbon dates and major element composition of glass shards for Late Pleistocene tephras on Tanegashima Island, Southern Japan. Radiocarbon, 42 (2), 825-832.

寺田暁彦, 2012, 阿蘇火山中岳の火口湖「湯だまり」の火山学的理解. 月刊地球, 34, 12, 712-721.

- 嶋野岳人・井口正人・味喜大介,2012,桜島で連続採取した火山灰の分光測色による活動評価指標の検討,桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究,平成23年度分報告書,101-104.
- Takahashi, R. and Nakagawa, M., 2013, Formation of a compositionally reverse zoned magma chamber; Petrology of the AD 1640 and 1694 eruptions of Hokkaido-Komagatake Volcano, Japan. Jour. Petrol., 54, (in press)
- 為栗 健・井口正人・園田忠臣・市川信夫,2012,桜島火山における火山性地震の震源分布(2011 -2012年),桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究,平 成23年度分報告書,7-11.
- Terada, A., T. Hashimoto and T.Kagiyama, 2012, A water flow model of the active crater lake at Aso volcano, Japan: fluctuations of magmatic gas and groundwater fluxes from the underlying hydrothermal system, Bulletin of Volcanology, April 2012, Volume 74, Issue 3, pp 641-655.
- Terada, A. and Y. Sudo, 2012, Thermal activity within the western-slope geothermal zone of Aso volcano, Japan: Development of a new thermal area, Geothermics, Volume 42, April 2012, Pages 56-64.
- Tian, Y. and D. Zhao, 2012, P-wave tomography of the Western United States: Insight into the Yellowstone hotspot and the Juan de Fuca slab, Phys. Earth Planet. Inter., 200, 72-84.

津久井雅志,2013,青ヶ島噴火史料集. 114p.

筒井智樹・他,2012,桜島火山における反復地震探査(2011年観測),「桜島火山における多項目 観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成23年度分報告書,25-38.

- Tsutsui, T. et al., 2013, Structure of northeastern Sakurajima, south Kyushu, Japan, revealed by seismic reflection survey, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 239-250.
- 上木賢太・寺田暁彦, 2012, 草津白根火山の巡検案内書.火山, 57, 235-251 山脇 輝夫, 野上 健治, 青山 裕, 草津白根山南部の地震活動, 地球惑星科学連合大会予稿 集, SCG64-P15
- 植木貞人・太田雄策・出町知嗣・井口正人・園田忠臣・市川信夫,2012, 桜島火山山腹における GPS連続観測用電源の降灰対策, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解 明のための研究, 平成23年度分報告書,55-58.
- Umeda, K. and Ban, M., 2012, Quaternary Volcanism Along the Volcanic Front in Northeast Japan. In: Stoppa, F. (ed.) Updates in Volcanology - A Comprehensive Approach to Volcanological Problems: InTech - Open Access Publisher, 53-70.
- 宇津木充・井上寛之・神田 径・橋本武志・井上直人・小森省吾・井口正人・味喜大介,2012, 桜島火山におけるくり返し空中磁気観測(2007-2011年),桜島火山における多項目観測に基 づく火山噴火準備過程解明のための研究,平成23年度分報告書,79-86.

八木原寛・平野舟一郎・宮町宏樹・高山鐵朗・市川信夫・為栗健・井口正人, 2012, 鹿児島湾奥

部海域における繰り返し海底地震観測,および陸上地震観測網による桜島火山周辺の広域地 震活動,桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究,平成23 年度分報告書,13-23.

- 山本圭吾・他,2012,水準測量による桜島火山の地盤上下変動(2010年11月~2011年11月),京都 大学防災研究所年報,55B,155-161.
- 山本圭吾・他,2012,水準測量による桜島火山の地盤上下変動(2010年11月~2011年11月),桜 島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究,平成23年度分報告 書,39-45.
- 山本圭吾・他,2012,桜島および鹿児島湾周辺における精密重力測定(2011年10月),桜島火山 における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究,平成23年度分報告書, 59-64.
- Yamamoto, K. et al., 2013, Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996 - 2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 58, 137-151.
- 山下貴範・奥野 充・小林哲夫, 2012, 霧島火山, 牛のすね火山灰-野外調査と室内分析結果の データベース化-. 月刊地球, 第34号, 287-292.
- Wei, W., J. Xu, D. Zhao, and Y. Shi, 2012, East Asia mantle tomography: New insight into plate subduction and intraplate volcanism, J. Asian Earth Sci., 60, 88-103.
- Zhao, D., 2012, Tomography and dynamics of Western-Pacific subduction zones, Monogr. Environ. Earth Planets, 1, 1-70.
- Zhao, D., T. Yanada, A. Hasegawa, N. Umino, and W. Wei, 2012, Imaging the subducting slabs and mantle upwelling under the Japan Islands, Geophys. J. Int., 190, 816-828.



図1.1999年~2012年4月における体積ひずみ計データとGNSS(GSI)による面積ひずみの比較(気象庁[課題番号:7019])

(左)伊豆大島における気象庁の体積ひずみ計(津倍付)と国土地理院(GSI)のGNSS、および その他の観測点の配置を示す。

(右) 1999 年から 2012 年にかけての体積ひずみ計(気圧および温度補正)および GNSS による面 積ひずみの時系列。青色が体積ひずみ計のデータを表す。経年的なトレンドを除去するためハイ パスフィルタ(カットオフ3年、ゼロ位相)で処理し、遠地地震波による広域ひずみへの校正係 数と、地表を仮定した面積ひずみへの変換係数を乗じてある。黒色が GNSS によって求められた、 左図の緑色の三角形の面積ひずみを表す。体積ひずみ計と同じハイパスフィルタで処理した。顕 著に見られる周期1~2年程度の変動パターンについて、両者は良く一致している。ボアホール ひずみ計はドリフトの評価が困難なことから長期的なデータの解析には不向きと考えられるが、 少なくとも2~3年の周期帯までは解析に有用であることが明らかになった。



図2. 桜島の膨張期における水平変動の空間分布様式の変化(京都大学防災研究所[課題番号: 1809])

上図: 2009年11月から2010年4月までの水平変位ベクトル

下図: 2010年11月から2011年11月までの水平変位ベクトル



図3. 広帯域 MT 観測による桜島の3次元比抵抗構造(京都大学防災研究所[課題番号:1809]) 2010年2~6月に6点で行った広帯域 MT 連続観測データを使用して、3次元比抵抗構造を決定し た。期間全体のデータをスタックし精度の高いインピーダンス及び地磁気変換関数を求め、それ らを3次元比抵抗インバージョンコード(Siripunvaraporn and Egbert, 2009)を用いて逆解析し た。モデルでは空気を108 ohm-mのブロックで近似し、地形を階段状に表現した。海水および 海底地形もモデルに組み込み、陸地の初期比抵抗値を1000 ohm-mとしてインバージョンを実行 した。インピーダンスに10%、地磁気変換関数に5%のエラーバーを与えインバージョンを行っ た結果、RMS 残差が1.49まで下がった。得られた特徴的な構造は、北岳付近地下3~5kmの低比 抵抗体である。桜島島外の構造については,今後検討を要する。



図4. 桜島火山の約2.3万年~3500年前までの軽石中の鉱物組成変化(北海道大学[課題番号: 1004])

P15 と P14 の間(2.1~1.1 万年前)にマグマ組成が大きく変化している。P17~15 は石英とかんらん石斑晶も含む。



図 5.2009 年 4 月 9 日の桜島昭和火口爆発に先行する傾斜とひずみ変化(京都大学防災研究所[課題番号:1809])

上段:有村観測坑道。下段:ハルタ山観測坑道。WT-R:傾斜計火口方向成分、EX-R:ひずみ計火口方向成分、EX-T:ひずみ計火口と直交方向成分。

## 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 テ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) (0rihara 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が変化する。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をはっきり認識でき 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)を較正して、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(ΔCFF)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ΔCFF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ΔCFFで説明が可能であるが、ΔCFF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 鉱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 トが二つ目の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 とい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 タのない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°×0.3°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のようになる。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の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の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 一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のモデル(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 all., 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 まで続く電気的パス)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 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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+mV,0rihara 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+mV、0rihara 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 ざしているでが、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的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 ても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 ルには陥いらず、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>>1のGR則に従う等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(CCBO)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高くな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気的・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波反射面がみつかってお 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σ2,σ3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 りに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、事例数の嫁ぎやすい前震・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鉱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 がな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 みつかっている(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でき 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

地震発生の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 がおこり「やすい」物理的状態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載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」はいまだみつかってい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スズム解と応力場, 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<sup>~</sup>次世代型稠密地震観測<sup>~</sup>, 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. Nakatan i, 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・渡邉篤志・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MO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, Calf., 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 定の提案一巨 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 荘子, Miroslaw 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.



図 1. 地電位差異常変化と地震との先行時間対応度。(A) ランダムな地震と実際に観測された地電差異常変化との対応度。(B)実際に観測された地震とランダムに発生させた地電位差異常変化との対応(n)は地震が神津島の東側と西側のどちらで発生したかのを考慮した場合、(y)は考慮しなかった場合。赤いラインは実際の対応度。青い点は対応度の平均値。黒いバーはそれぞれのパーセンタイル。(東海大学[課題番号:2501])



図 2. 地震波および GPSTEC の走時ダイアグラム。(a) 地震波および(b) 10 分のハイパスフ ィルターをかけた津波ソース(北緯 48 度、東経 138 度)と同じ緯度での GPSTEC の走時ダ イアグム。(c)、(d)は、震央から西南西方向(北緯 35 度、東経 136 度)での GPSTEC 走時 でそれぞれ PRN15 および PRN26 衛星による観測。黒の斜め線は速度を示し、垂直な破線 は地震の発生時間を示す。(北海道大学 [課題番号:1005])



図 3. 牡鹿半島のアルファガード測定結果。2005 年から 2011 年までの大気中累積ラドン濃 濃度(散逸率)。毎年、前年の 12 月から翌年 3 月まで累積変化を示す。福島県立医科大学で 通気式電離箱により測定された大気中ラドン濃度の解析結果と整合している。(東北大学 [課題番号:1223])


図 4. 札幌医科大学における排気モニターの変動。有珠山噴火(1:2000年3月31日)、 +勝沖地震(2:Mw = 8.0, 2003年9月26日)、浦河沖地震(4:Mj = 6.2, 2011年11月 24日)。(東北大学[課題番号:1223])



図5. (a) 千葉県北部領域において過去地震のメカニズム解(第1節面)に対して計算された ΔCFFが正となった分布とメカニズム解の例。(b) ΔCFFが負となったメカニズム解分布とメカ ニズム解の例。(c) 千葉県北西部(左図)、北東部(右図)において計算されたΔCFFのヒストグ ラム。灰色が第1節面に対する結果、白色が第2節面に対する結果を表す。(東京大学地震 研究所[課題番号:1419])



図6. 地震活動と地震学的構造の比較。(a) Ito et al. (2005)の人工地震探査測線。黒と 灰色のコンターは2011年(Lay et al., 2011)と1978年(Yamanaka and Kikuchi, 2004)に 発生した地震の地震時すべり域を示す。(b)震源分布と2次元P波速度構造(Ito et al., 2005)の比較。2011年東北地方太平洋沖地震以前・以後の地震を灰色・黒丸で示す。また、 F-netによって推定されている大地震の発震機構解を示す。(東北大学[課題番号:1210])



図7. (a) プレート境界地震の 0.3°×0.3°のウインドウごとの平均のすべり方向。F-net によるバリアンスリダクション0.8 以上、使用観測点3点のものを使用した。色は北から時 計回りの方向を示す。(b)(a)の領域1-5でのすべり方向の時間変化。ウインドウは50個の 地震を用い25個ずつずらした。東北地方太平洋沖地震前後の地震は混じらないようにウイン ドウを設置した。(東北大学[課題番号:1210])



図 8. バンドモデルによる正孔電荷キャリア発現と起電力発生の様子。 a)通常状態におけるハンレイ岩のエネルギーバンド構造。アクセプター準位が存在し、若干の P 型である。 b) 圧縮部のアクセプター準位が下にシフトし、正孔電荷キャリア濃度が増加する。結果として、フェルミ準位も下にシフトする。 c)正孔電荷キャリアが非圧縮部に拡散し、不均一な 正負電荷の分布による電場が形成される。このことにより、圧縮部のバンド構造全体が傾斜 する。結果として、フェルミ準位が上にシフトする。最終的に、圧縮部と非圧縮部とでフ ェルミ準位に差ができる。(東海大学[課題番号:2501])



図9. 地下10kmに仮定した電流双極子(1A x 1km)が神津島の地表に形成する電位分布の有限要素法による3Dシミュレーション。(a)高度0kmにおける地形分布と電流双極子の位置関係。青色:海(厚さ500m)、赤色:一般地殻(地下10kmまで)、紫色:良導体パス(地下10km まで続く電気的パス)。(b)良導体パスを電気的に良導体とした場合。(c)良導体パスを周辺の一般地殻と同じにした場合。(d)良導体パスを電気的に不導体とした場合。(東海大学[課題番号:2501])



図10. エッジ効果の検証。地下10km に仮定した電流双極子(1A x 1km)が神津島の地表に 形成する電位分布の有限要素法による3Dシミュレーション。(a)高度 0km における地形 分布と電流双極子の位置関係。青色:海(厚さ500m)、赤色:一般地殻(地下10kmまで)。(b) 水色:空(厚さ500m)、青色:海(厚さ500m)、赤色:一般地殻、紫色: 良導体パス。(c)良導 体パスを電気的に良導体とした場合。(d) 良導体パスを電気的に不導体とした場合。(東 海大学[課題番号:2501])



図11. タフで大きなアスペリティ(大パッチ)の中にある部分的に脆い部分(小パッチ)の 大きさが大地震の準備過程にあたえる影響。小パッチが小さい場合は、ほとんどの地震が 大パッチ自体の震源核が大きく成長することで発生する(大核、Large Nucleation)が、小 パッチが大きくなるにつれて、大パッチ自体の震源核が成長するより先に小パッチで地震 がおこり、そのまま大パッチ全体を壊してしまう(Cascade-up)でおこるケースが増える。 Delayed cascade-upは,小パッチ地震が一旦収束したあとすぐに、小パッチと大パッチの境 界から動的破壊がおこり大地震になる中間的なケースで、大きな準静的震源核の先行がスキ ップされるという点で本質的にCascade-upの一種である。なお、大パッチ内でときどきおこ る過渡的なゆっくり滑りの前線が合体して地震にいたる Coalescenceのケースもあるが、大 パッチの臨界サイズを極端に大きく設定しないかぎりは例外的な現象である。(東京大学地 震研究所[課題番号:1421])



図12. 地震パターンと大パッチ平均滑り速度の加速。ひとつのシミュレーションでおこった 地震について、その発生パターン別に、地震発生までの大パッチ全体での平均滑り速度の変 遷を地震発生までの時間t\_fに対してみたもの。核形成がはじまると1/t\_f で加速していく が、小パッチ内での核形成と大パッチ内での核形成は、このプロットで振幅が違うトレンド (理論線)にのる。地震発生のパターン別にしめした。うすいグレーの線は、そのパターン以 外のもの。(a)cascade-upしない小地震の場合。(b)cascade-upでおこる大地震の場合。 1/t\_fでの震源核成長は、(a)の場合と同じく小パッチ内での核形成であるが、震源核成長が 始まる前のレベル(たとえば、t\_f=2 週間あたり)が(a)の場合より明らかに高い傾向がある。 このレベルは、(c)大核が先行する大地震の場合と同程度である。なお、このシミュレーショ ンでの大地震の繰り返し間隔は16-19年程度である。(東京大学地震研究所[課題番号: 1421])



図13. 南アフリカ鉱山でみいだされた平面状AEクラスタを構成する複数のイベントの初動 極性を一つの震源球上にプロットした結果。節線は、クラスタを近似する平面内において正断 層が卓越した滑りが起った場合に期待されるものを引いてある。(東京大学地震研究所[課 題番号:1420])



図14. 丹波山地から近江盆地に至る東西断面の構造模式図。(京都大学防災研究所[課題番号:1811])



図 15. 2011 年東北地方太平洋沖地震にともなう神岡での(上)間隙水圧変化と(下)ひずみ変 化。ひずみは水平 3 成分のひずみ変化から面上の面ひずみ変化を計算したもの。上の図の 赤線は、非排水条件での間隙弾性的応答のみを仮定して、面ひずみ変化から期待される間 隙水圧変化。(京都大学防災研究所[課題番号:1811])

2(3)(3-2)地震破壊過程と強震動

「**地震破壊過程と強震動**」計画推進部会長 古村孝志 (東京大学大学院情報学環/地震研究所)

地震津波観測データの解析に基づき、大地震の震源破壊過程を詳しく調べることは、 大地震の発生過程と強震動の生成過程の理解を深め、将来の大地震の強震動と津波の発 生予測の高度化につながる。また、断層面上の大滑り域や強震動生成域の関係や、地震 毎の繰り返し性から、これらの領域の周辺の応力状態や断層の強度に関する特徴を知り、 地震発生予測に向けた重要な基礎データを得ることができる。さらに、大地震発生直後 に観測データを即時解析し、震源域の広がりと破壊過程を正確に求めることにより、強 震動の面的広がりを把握し、そして沿岸の津波到達・浸水予測が可能になる。

大地震による強震動と津波の発生を予測し、地震津波災害軽減を目的として、昨年度 (平成23年度)に引き続き2011年東北地方太平洋沖地震の強震動、GPS、津波観測データ の詳細な解析による、地震前後の地震活動の推移、本震の動的破壊特性、強震動および 長周期地震動の生成に関する総合的な研究が進められた。また、M9地震の震源過程の即 時解析と、沿岸津波高・浸水域の即時推定に向けた開発研究が進められた。

東北地方太平洋沖地震の動的破壊過程の解析では、M9地震の複雑な破壊成長過程を、 4つの階層を持つパッチモデルを用いて説明する試みが行われた。まず、東北地方沖の 地震活動からパッチモデルを作成し、断層面上の摩擦パラメータ(Dc)をパッチサイズ から設定して、これに3月9日の前震に伴う応力集中を断層面上に与て動的断層破壊シミ ュレーションを行い、本震時の断層破壊運動を再現できることが示された(東大理[課題 番号:1503]、Ide and Aochi, 2012)。過去に東北地方沖で発生したM7級の地震活動を 詳しく調べるたところ、1)1968年十勝沖地震発生後の一ヶ月間のM7級の余震の移動方 向、2)1978年・1981年・2011年の宮城県沖地震の震源移動方向、3)1938年福島県東 方沖の地震発生後の5ヶ月の余震活動の移動方向、のいずれもが東北地方太平洋沖地震 の大きな滑り域に向かっていたという解釈が示された。また、これらの地震の余震活動 についても、東北地方沖のM7~8級の過去地震の大きな滑りが(アスペリティ)の場所 に向かって移動した傾向も確認できた(東北大[課題番号:1211]、内田・松澤,2012)。 こうした大地震の震源移動とその余震の震源移動の特徴は、大地震の発生前後にアスペ リティ内部への滑りの浸食が起こっている可能性を意味している。大地震の発生予測可 能性を探るために、こうした新たな視点から過去地震の詳細な破壊過程と余震活動の再 解析が急務である。

東北地方太平洋沖地震の震源域近傍での海底圧力計データの解析から、3月9日・10日 の前震の後、余効滑りが本震の震源方向に向かう進行過程が見えてきた(図1;東北大 [課題番号:1211]、内田・松澤,2012)。また、強震波形とGPSデータを用いた震源過 程解析から、本震から30分後に発生した茨城県沖の地震の断層滑りが、太平洋プレート とフィリピン海プレート境界と、震源域の東側にある海山に挟まれた場所に限定されて いることが示され、プレート境界と海山が断層滑りを止めた可能性が議論された(図2; 京大防災研[課題番号:1812])。大地震の発生場所と規模(震源域の広がり)を海底 地形やプレート構造などの地理学的要因から規定できる可能性がある。

東北地方太平洋沖地震では、厚い堆積層(3000m以上)に覆われた大阪平野において、

周期6.5秒前後の長周期地震動が強く増幅され、湾岸の埋め立て地にある55階建ての大阪 府咲島庁舎が最大137cm(片振幅)の大きさで長く揺れたことが問題となった。いっぽう、 此花地点での長周期地震動の増幅率は、2004年紀伊半島南東沖地震(M7.4)や2000年鳥 取県西部地震(M7.3)と同様に周期3秒と6秒で30~40倍程度であり、特異なものではな く、SH波の多重反射モデルから予測される理論増幅率と良く一致した(東大地震研[課 題番号:1424])。全国の強震観測データと大阪平野の高密度強震観測データの解析に より、咲島での大きく長い揺れが2つの波群から構成されることが示され、2つ目の波 群は濃尾平野で二次的に発生した表面波であることが確認された(京大防災研[課題番 号:1812,1813]、Sato, Asano, and Iwata, 2012)。全国強震観測により、平野における 長周期地震動の増幅に加え、複雑な伝播経路による増幅と増長メカニズムが明らかにな ったと言えよう。強震観測データの蓄積と地下構造(堆積層)の理解により、将来の大 地震の長周期地震動を事前に高い確度で推定できることも確認された。

M9クラスの巨大地震の規模(M)の即時推定と津波予測の高度化に向け、日本列島の震 度の広がりから震源域の広がりを判断する方法や、周期数百秒以上の長周期地震動成分 の震幅を用いてたMの推定の実用性の検討が進められた。津波警報の迅速な発令に向けて、 2~3分以内のMの即時推定を目標に、P波部分を用いて即座にMwを推定する手法や、 W-phaseを解析して震源とMをグリッドサーチにより推定する手法が開発され、東北地方 太平洋沖地震により検証が行われた(図3;気象庁[課題番号:7024])。

津波の即時解析に向けた研究では、既存の沖合GPS波浪計や海底ケーブル津波計に加え、 海溝軸を越えた沖合に津波観測点を数点増強するだけで、地震発生後20分程度での観測 データから波源域の推定と、北海道~房総半島沖の沿岸津波到達予測の精度が大きく向 上することが示され、東北地方太平洋沖地震の津波シミュレーションをもとに有効性の 検討が行われた(図4;気象庁[課題番号:7021])。現在の沿岸津波観測点は大地震が 発生する海溝(トラフ)側から見て一方向にしか無ないため、波源の広がりを正しく推 定するためには震源を取り囲むような観測網の増強が有効である。津波は波長が数十~ 数百キロメートルと長いため、比較的観測点間隔が粗くても津波予測への改善効果は大 きい。

津波浸水は沿岸の津波波形が分かれば十分に予測が可能であり、波源の場所や断層パ ラメータは必ずしも必用ではない。こうした視点から、津波の即時浸水予測の新たな手 順が検討された。まず、地震発生直後に津波シミュレーションにより沿岸の津波波形を 求め、予め数多く行ないデータベース化された津波浸水シミュレーションの中から、沿 岸の津波波形が対応するものを選び出し、その先に起きる津波浸水を予測する。その有 効性は、根釧平野での津波浸水シミュレーションにより示された(北大[課題番号:1006])。

大地震の地震動や津波の発生過程の理解と、強震動・津波の事前予測に力を発揮する シミュレーション技術についても大きな進展があった。2008年より本格運用が開始され た「京」コンピュータにおいて、最大規模の82,944CPUを用いた地震波伝播の差分法シミ ュレーションが行われ、2.09PFLOPSの演算性能が得られた。これは、地球シミュレータ を用いた従来のシミュレーションの40倍の性能に相当する。京コンピュータを用いて東 北地方太平洋沖地震の強震動、水中音波、地殻変動の同時シミュレーションが行われ、 釜石沖海底ケーブル津波計データやK-NET強震観測データとシミュレーション結果の比 較から、複雑な断層運動に伴う強震動と津波の生成過程の評価が進められた(図5;東 大地震研 [課題番号:1424]、Maeda et al., 2013)。

地震波計算技術の進展により、不均質な地殻・マントル構造とプレート構造を考慮し て求めた3次元グリーン関数により、東北地方太平洋沖地震、1995年兵庫県南部地震の 詳細な再解析が行われ、また2003年と1952年十勝沖地震の再解析が進められた(東大地 震研[課題番号:1422]、小林・纐纈・三宅・金森、2013)。震源モデルの詳細化には、 近地強震計記録の短周期成分を用いた解析が必要になり、3次元的に不均質な地下構造 を適切に評価したグリーン関数を用いた震源解析が今後進展するものと思われる。

# これまでの課題と今後の展望

地震破壊過程と強震動の高精度即時震源解析と推定に向け、近年の高密度強震観測網 と GPS 地殻変動観測網、沖合ケーブル津波計など、大地震の強震動と津波をリアルタイ ムで観測・データ流通システムが整備された。こうした高密度・高精度観測データの解 析のために、高速シミュレーション技術を用いた即時震源解析や津波波源域の推定に加 え、さらに時間経過とともに入電する新たなデータを用いたデータ同化と逐次予測修正 による津波予測の高度化のための研究が大きく前進した。

リアルタイム予測では、予測の時間短縮が最優先課題である。時間のかかる観測デー タからの震源と波源の推定(逆解析)を待たずに、観測データから直接的に未来の地震・ 津波波動場の時間発展を予測するような、あらたな予測の考え方が生まれつつある。こ れは、日本の高密度・高精度観測とデータ同化・高速シミュレーション技術により可能 になるものである。また、P波初動部の特性から経験的に地震の震源距離やMを推定す る方法など、たとえ震源物理に基づく理論的背景が弱くても、現行の緊急地震速報のよ うに十分に実用的なものもある。即時予測システムの社会実装に向け、こうした経験的 手法についても評価し、理論的背景の裏付けによる高度化の手助けとなる研究が必用で あろう。

成果リスト

- 青木重樹,吉田康宏,勝間田明男,干場充之,2012,強震動の継続時間から見た平成15 年(2003年)十勝沖地震とその最大余震の破壊伝播特性,地震2,65,163-174.
- Chen, K., B.L.N. Kennett and T. Furumura, High frequency waves guided by the subducted plates underneath Taiwan and their association with seismic intensity anomalies, J. Geophys. Res., in press, 2012.
- 郭 雨佳・纐纈一起,2012,三次元グリーン関数を用いた1995 年兵庫県南部地震の震 源過程の再解析,日本地震学会講演予稿集2012 年秋季大会,P3-59.
- Gusman, A. R., Y. Tanioka, S. Sakai, and H. Tsushima, 2012, Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data, Earth and Planetary Science Letters, 341-344, 234-242, doi:10.1016/j.epsl.2012.06.006.
- 林 豊,対馬弘晃,平田賢治,木村一洋,前田憲二,2012,沖合津波観測値からの逆伝 播で推定した津波波源域,気象庁技術報告第133号「平成23年(2011年)東北地方

太平洋沖地震調查報告」, 第 I 編 112-114.

- Hayashi, Y., S. Koshimura, and F. Imamura, 2012, Comparison of decay features of the 2006 and 2007 Kuril Island earthquake tsunamis. Geophys. J. Int., 190, 347-357, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05166.x.
- Ide, S., and H. Aochi, 2012, Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Tectonophysics, in press.
- Iinuma, T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura, 2012, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, J. Geophys. Res., 117, B07409, doi:10.1029/2012JB009186.
- Iwakiri, K. and M. Hoshiba, 2012, High-Frequency (>10Hz) Content of the Initial Fifty Seconds of Waveforms from the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 102, 2232-2238.
- Katsumata, A., H. Ueno, S. Aoki, Y. Yoshida and S. Barrientos, 2013, Rapid magnitude determination from peak amplitudes at local stations, Earth Planet Space, submitted.
- 小林広明・纐纈一起・三宅弘恵・金森博雄, 2012, 1952 年と 2003 年十勝沖地震の震源過 程(2),日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS28-P13.
- 久保久彦・浅野公之・岩田知孝, 2012, 2011 年 3 月 11 日 15 時 15 分の茨城県沖地震 (Mw7.9)の震源過程,日本地震学会 2012 年度秋季大会予稿集, A21-08.
- Kubo, H., K. Asano, T. Iwata, and Y. Kakehi, 2012, Rupture Processes of the 2011 Tohoku Earthquake and the 2011 Ibaraki-Oki Earthquake, AGU Fall meeting, S33A-2509.
- Maeda, T., T. Furumura, S. Noguchi, S. Takemura, S. Sakai, M. Shinohara, K. Iwai and S. J. Lee, Seismic and tsunami wave propagation of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake as inferred from the tsunami-coupled finite difference simulation, Bull. Seism. Soc. Am., in press, 2013.
- Okada T., Umino, T., Hasegawa A., and Group for the aftershock observations of the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, 2012, Hypocenter distribution and heterogeneous seismic velocity structure in and around the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, NE Japan—Possible seismological evidence for a fluid driven compressional inversion earthquake, Earth Planets Space, 64, doi: 10.5047/eps.2012.03.005.
- Oishi, Y., M.D.Piggott, T. Maeda, S.C. Kramer, G.S. Collins, H. Tsushima and T. Furumura, Three-dimensional tsunami propagation simulations using an unstructured mesh finite element, J. Geophys. Res., in press, 2013.
- Padhy, S., S. Takemura, T. Takemoto, T. Maeda and T. Furumura, Spatial and temporal variations in coda attenuation associated with the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku, Japan (Mw 9) Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., in press, 2012.

Poiata, N., H. Miyake, K. Koketsu, and K. Hikima, 2012a, Strong-motion and

teleseismic waveform inversions for the source process of the 2003 Bam, Iran, earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 102, 1477-1496.

- Poiata, N., K. Koketsu, A. Vuan, and H. Miyake, 2012b, Low-frequency and broad-band source models for the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake, Geophys. J. Int., 191, 224-242.
- Romano, F., A. Piatanesi, S. Lorito, N. D' Agostino, K. Hirata, S. Atzoril, Y. Yamazaki & M. Cocco, 2012, Clues from joint inversion of tsunami and geodetic data of the 2011 Tohoku-oki earthquake, Sci. Rep. 2, 385; DOI:10.1038/srep00385.
- Sato, K., K. Asano, and T. Iwata, 2012, Long-period Ground Motion Characteristics of the Osaka Sedimentary Basin during the 2011 Great Tohoku Earthquake, Proc. 15th World Conf. Earthq. Eng., Lisbon, Portugal, paper no. 4494.
- Shinohara, M., Y. Machida, T. Yamada, K. Nakahigashi, T. Shinbo, K. Mochizuki, Y. Murai, R. Hino, Y. Ito, T. Sato, H. Shiobara, K. Uehira, H. Yakiwara, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, K. Hirata, H. Tsushima, and Takaya Iwasaki, 2013, Precise aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake revealed by ocean bottom seismometer network, Earth Planets Space, in press.
- Suzuki, W., S. Aoi, H. Sekiguchi, and T. Kunugi, 2012, Source rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake derived from the strong-motion records, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1650.
- Takemoto, T., T. Furumura, T. Saito, T. Maeda, and S. Noguchi, Spatial- and Frequency-Dependent Properties of Site Amplification Factors in Japan Derived by the Coda Normalization Method, Bull. Seism. Soc. Am., 102, 4, 1462-1476, 2012.
- Takemura, S. and T. Furumura, Scattering of high-frequency P wavefield derived by dense Hi-net array observations in Japan and computer simulations for seismic wave propagations, Geophys. J. Int., in press, 2013.
- 対馬弘晃,平田賢治,林 豊,前田憲二,尾崎友亮,2012,沖合津波観測点配置の違い が逆解析に基づく近地津波予測の精度に与える影響,土木工学論文集 B2(海岸工 学),68(2),I\_211-I\_215.
- 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.
- Yabe, S., and S. Ide, 2012, Repeating deep tremors on the plate interface beneath Kyushu, southwest Japan, Earth Planet Space, in press.
- Yokota, Y., Y. Kawazoe, S. Yun, S. Oki, Y. Aoki, and K. Koketsu, 2012, Joint inversion of teleseismic and InSAR datasets for the rupture process of the 2010 Yushu, China, earthquake, Earth Planets Space, 64, 1047-1051.

横田裕輔・纐纈一起, 2012, 三次元グリーン関数を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震

の震源過程解析,日本地球惑星科学連合 2012 年大会,SSS39-15.



図1 (a) 東北地方沖で発生した M7 以上の主要地震の滑り域をコンターで表示。1968 年および 1978-2011 年にかけて、滑り域が移動する傾向(矢印で表示)がみられる。(b) 本震の震央から余震活動の重心の位置の方向をベクトルで表示。余震の重心の位置は、本震後1年間に起きた余震を地震モーメントで重みをつて求めた(東北大[課題番号:1211]、内田・松澤、2012)。



図 2 2013 年 3 月 11 日の茨城県沖の地震の震源過程。近地強震波形と GPS データ解析から求められた断層滑り分布。大きな滑り域が太平洋プレート/フィリピン海プレーと境界(青点線)と太平洋プレートとともに沈み込む海山(紫点線)に挟まれた位置にあり、これらの物性境界

が滑りを止めた可能性が考えられる(京大防災研[課題番号:1812]、久保・浅野・岩田、2012)。



図3 様々な周期帯の地震波形の最大振幅に基づくマグニチュード。平成23年(2011年)東北 地方太平洋沖地震の例を示す。横軸は、地震発生からの時間であり、地震発生後2分20秒以内 に、マグニチュード約9という地震の規模の推定が可能である。



図4 2011年東北地方太平洋沖地震を例題とする沖合い津波観測による沿岸津波予測の数値実験。実在の沖合津波観測点と海溝海側に仮想的に追加した海底水圧計三点(0T1,2,3)で地震後20分までに得られる津波波形を用いて沿岸津波を予測し、観測された津波と比較する(気象庁 [課題番号:7021])。



図5 京コンピュータによる東北地方太平洋地震の地震津波同時シミュレーション。(a)大規 模並列計算による演算性能の比較(京コンピュータと地球シミュレータ(ES2))、(b)東北地 方太平洋沖地震の地震動と地殻変動、津波の同時シミュレーション(地震から17分後)(東大 地震研[課題番号:1424]、Maeda et al., 2013)。

「火山噴火過程」計画推進部会長 西村太志 (東北大学大学院理学研究科)

噴火規模や様式、噴火推移を支配する要因を理解するためには、火道浅部におけるマ グマの挙動や火山体構造の状態を把握し、それらと噴火規模や様式との関係を明らかに することが必要である。本火山噴火過程研究計画では、「ア.噴火機構の解明とモデル化」 と「イ.噴火の推移と多様性の把握」の研究を2つの柱とし、両者をあわせて考察するこ とにより噴火シナリオの作成に資することを目的とする。このような観点から、本計画 では、発泡・脱ガス過程などの火道内マグマの挙動を調べるために、繰り返し発生する 噴火を対象として集中的な地球物理学・物質化学的観測を行い、多量のデータをもとに 噴火機構のモデル化を図る。また、火山体浅部の熱水系や火道周辺構造との相互作用を 調べる。さらに、多様な噴火形態やその推移を支配する要因を理解するために、過去の 履歴を地質学的情報に基づき記載し、その特徴を明らかにする。

# ア.噴火機構の解明とモデル化

諏訪之瀬島の臨時地震観測点等の波形データ解析から、爆発地震の初動から約1秒間 は、火口底からの火山物質の噴出に先行し、火道の収縮現象が起きていることが示唆さ れた.この収縮量と爆発地震の最大振幅には正の相関がある。2010年秋に実施した火口 近傍の地震計アレイ観測データを昨年度に引き続き解析した結果は、31 個の爆発地震の 震源は火口底から収縮減と同じ深さ 80-550m に推定されている。これらの結果は、爆発 直前に火道浅部で起きる収縮現象が、噴火規模に影響を及ぼしていることを示している。 今年度は新たに、スラウェシ島の北部に位置するロコン(Lokon)山において広帯域地 震計と傾斜計を用いた機動観測を 2012 年 9 月より開始した. これまでに記録された S/N 比のよい3つの爆発地震の1Hz以下の帯域の波形は相似であり、巨視的にはその発生過 程が類似であることが示唆された。この波形は,押しの P 波、引き波、Rayleigh 波から なる. 桜島や諏訪之瀬島のブルカノ式噴火に伴って観測される地震波の特徴と類似して おり, 共通の物理過程が内在することが明らかとなった. (東北大学理学研究科 [課題番 号:1213])霧島新燃岳の2011年噴火活動で観測された、火口近傍での噴火に先行する傾 斜変動とその時間変化,先行する傾斜変動継続時間の系統的な変化等から、火道深部から供 給される火山ガスの火道浅部での停留が,火道内部の最も強度強いマグマ組織でおき、それ が破局的に破壊することで爆発が発生すると推察された.また、火道深部からの火山ガスの 供給は時間経過と共に指数関数的に減少していくと考えられることも明らかになった。(東 京大学地震研究所 [課題番号:1425]]。これらの成果により、ブルカノ式噴火の発生理 解が深まるだけでなく、先行現象と噴火発生や規模とのいくつかの経験的関係が明らか になった。

火山ガス観測による火道内揮発性成分挙動の理解も深まっている。2007-2010年の火山ガ ス観測から、2009年の微噴火前後で、地震を励起しながら地表に放出された火山ガスの割合 が変化し、火山地下の脱ガス機構の変化が起きたことが示唆された。(東京大学地震研究所 [課題番号:1425]]。火山活動の理解には連続測定が必要である。浅間山では、火山ガ ス(二酸化硫黄)放出率の自動連続測定が平成23年7月から行われているが、スキャニン グ装置のモータ故障による3週間の欠測のほかは、これまでほぼ順調に稼働させることに成 功した。その結果、ほぼ2-3 kg/sの放出率で火山ガスが放出されるていること、時おり短時 間に10kg/s程度の放出率が観測されることがわかった。短時間の高い放出は、地震発生に対 応するものもある一方で、無関係なものもあることがわかった(産業技術総合研究所[課 題番号:5009])。平成23年度末に桜島に設置した火山ガス連続自動測定装置は、観測開始当 初の火山灰による故障の問題を解決し、平成23年3月末より現在まで約11か月順調に運用す ることに成功した.約30個の爆発に伴う放出率変動を調べた結果、爆発の前に放出率の変化 パターンは必ずしも噴火直前に減少するパターンだけでないことが明らかになった.(東京 大学理学研究科[課題番号:1504])。これらの結果は、地震や噴火活動と相関のある火山 ガス活動の変化が起きていることを示す一方で、多様性があることを示している。これ は噴火に先行する山体膨張の特徴でもある。

そのほか、火山噴火機構の理解のために、浅間山,阿蘇山における Multi-GAS 連続観測、 浅間山山頂部での稠密 MT/AMT 観測による浅部比抵抗探査、薩摩硫黄島硫黄岳における muon radiography 再解析と火道内マグマ対流過程のモデル化、伊豆大島山頂カルデラ内の 自然電位の連続観測体制の強化と3次元数値計算、薩摩硫黄島火山における自然電位測定, AMT 法による電磁探査、口永良部島火山で GPS と自然電位の連続測定、個別要素法による 3次元応力場下でのマグマ移動シミュレーショ等が実施された(産業技術総合研究所[課題 番号:5009],防災科学技術研究所[課題番号:3014],東京大学地震研究所[課題番号: 1425])。

# イ.噴火の推移と多様性の把握

有珠2000年新山域を対象に、デイサイト質マグマによるドーム形成噴火の発生場の理解の ため、平成24年度は試錐探査を開始した。試錐地点は、2000年新山北麓で、昨年度までに実 施した地震探査およびMT探査から推定された貫入マグマを示唆する背斜状を呈する構造の 北翼にあたる。これまでに深度100m程度まで掘削が進み、表層部から火山噴出物、凝灰岩、 サージ堆積物、外輪山溶岩が順に認められている。今後、詳細なコアの火山地質学・岩石学 的解析を行い、有珠火山噴出物と対比する。また、水環境の指標となる逸水の調査も進んだ。 深さ100mまでに、互層状態で透水性の異なる層が現れており、洞爺湖水面や外輪山溶岩内で ある掘削地の場所をもとに噴火発生場である地下水の状況把握が進んだ(北海道大学理学研 究科 [課題番号:1007])。有珠山についての噴火シナリオ(噴火事象分岐図)試作に当た って必要な,有珠山の過去の噴火データを調べた.火山爆発指数(VEI)3以上の噴火の規模 と発生頻度に対数座標で負の関係が認められることがわかった.さらに、有珠山で発生する 山体崩壊,山頂噴火,山腹噴火,噴火未遂の発生頻度、噴火発生頻度(ほぼ平均30年)と噴 火の前兆地震の発生期間(ほぼ数日)は、噴火継続期間と噴出量とにはおおまかに負の相関 が認められるものの、山腹噴火のデータはこれらからは外れて噴出量が小さく、噴出量の多 い噴火ほど噴出率が高かったことがわかった.(東京大学地震研究所 [課題番号:1426])。

# これまでの課題と今後の展望

平成21年度より進めてきた観測研究により、ブルカノ式噴火の発生直前に、山体膨張 や微動停止、火山ガス停止が発現する事例が数多くあることが明らかとなった。これま で諏訪之瀬島やスメル山では噴火規模と先行する山体膨張に相関が認められた。本年度 実施した新燃岳では、同様の相関を調べるには観測された噴火規模の範囲が十分でなか ったため相関は調べられないものの、発生時期に特徴的なパターンが認められ、その物 理的な解釈も行うことができた。また、スメル山の繰り返し噴火では、規模の大きいほ ど、噴火活動が低調である時間が長い傾向が認められた。これらの成果は、ブルカノ式 噴火と呼ばれる噴火様式では、噴火の発現に何らかの特徴があることを強く示唆してい る。異なる火山で必ずしも同一の特徴が認められていないが、火山活動に応じてその物 理過程や発現の仕方は時間的に変化していると考えられる。ただ、観測対象火山が限ら れまだ解析事例が少ないため、今後も地震・地殻変動などの地球物理学的観測および火 山ガス観測などを継続・拡張して実施することにより、幅広いデータに基づく噴火予知 に関連する経験則を得ることが必要であろう。

多様な噴火様式を理解するには、地下浅部のマグマ・熱水活動の理解が欠かせない。 有珠山北西麓の新山での試錘探査は、直接的な構造探査であり、地球物理学的探査デー タとの比較を通して、山麓噴火の発生場浅部の特徴と過去の噴火事例との対照ができる。 来年度の成果を期待したい。噴火シナリオは、火山周辺自治体や住民にとって、また、 火山学者にとっても火山活動全体を俯瞰的に理解する上で非常に役立つ。火山活動の系 統的な理解は、防災対策や避難行動を考える上で重要であり、今後も、同様のシナリオ を作成していくことが重要であることは言うまでもないが、噴火事例が十分記録されて いないものへのアプローチを考えていく必要があろう。

成果リスト

- Aiuppa A., Shinohara H., Tamburello G., Giudice G., Liuzzo M., Moretti R., 2011, Hydrogen in the gas plume of an open-vent volcano, Mount Etna, Italy. J. Geophys. Res., 116 doi: 10.1029/2011JB008461.
- Aoki, Y., M. Takeo, T. Ohminato, Y. Nagaoka, and K. Nishida, Structural controls on magma pathways beneath Asama Volcano, Japan, Geological Society London Special Publications, 380, 2012.
- Garcia-Aristizabal, A., Selva J., Fujita E., 2013, Integration of stochastic models for long-term eruption forecasting into a Bayesian event tree scheme: a basis method to estimate the probability of volcanic unrest, Bull. Volcanol, 75, 689.
- 平井雄一・西村太志・井口正人・為栗 健・及川 純・八木原 寛・中道治久・青山 裕,2012, 諏訪之瀬島の爆発地震の初動付近に見られる収縮フェイズの解析, P07, 日本火山学会秋季 大会, 御代田町. Ichihara, M., M. Takeo, A. Yokoo, J. Oikawa, and T. Ohminato, Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion, Geophys. Res. Lett., 39, L04304, doi: 10.1029/2011GL050542, 2012.
- Kazahaya R., Mori, T. and Yamamoto K., Separate quantification of volcanic gas fluxes from Showa and Minamidake craters at Sakurajima volcano, Japan. J. Volcanol. Soc. Of Japan, 58 (in press)
- 森俊哉・森田雅明・武尾 実・ト部 卓・及川 純(2012)浅間火山における二酸化硫黄放出率の 自動観測, A1-10, 日本火山学会秋季大会,御代田町.

- Nagaoka, Y., K. Nishida, Y. Aoki, M. Takeo, and T. Ohminato, Seismic imaging of magma chamber beneath an active volcano, Earth Planet. Sci. Lett., 333-334, 1-8, doi: 10.1016/j.epsl.2012.034, 2012, 2012.
- Nakamichi, H., Aoyama, H., Nishimura, T., Yakiwara, H., Ohta, Y., Yokoo, A., Iguchi, M., 2012, Source process of explosive eruptions inferred from analysis of seismic array data recorded very close to the active crater of Suwanosejima volcano, Japan, AGU 2012 fall meeting, San Francisco, USA.
- Nakamichi, H., Yamanaka, Y., Terakawa, T., Horikawa, S., Okuda, T., Yamazaki, F., 2013, Continuous long-term array analysis of seismic records observed during the 2011 Shinmoedake eruption activity of Kirishima volcano, southwest Japan, Earth Planets and Space, in revision.
- Nishimura, T., Iguchi, M., Hendrasto, M., 2012, Activity of vulcanian eruptions at Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes observed by seismic and geodetic measurements, AGU 2012 fall meeting, San Francisco, USA.

### 2(4)地震発生·火山噴火素過程

「地震発生・火山噴火素過程」研究推進部会長 矢部康男 (東北大学大学院理学研究科)

「地震発生・火山噴火素過程」研究推進部会委員 寅丸敦志 (九州大学大学院理学研究院)

より信頼性の高い地震発生モデルを構築するために必要な、地震発生の各過程を支配する破壊・ 摩擦構成則の素過程を理解するための実験的・理論的研究を行った。観測可能量から地震発生場の環 境を精度よく推定するために、岩石物性の環境依存性を明らかにすることを目指した実験・計測をお こなった。時空間的スケールが数桁以上異なる自然地震へ室内実験の知見を適用することの妥当性を 検討するために、摩擦・破壊現象の規模依存性を明らかにするための実験・観測を行った。

火山噴火過程や噴火準備過程、さらには噴火シナリオ、噴火推移予測システム構築を意識して、 素過程に関係づけた観測量解釈の高度化、噴火現象における素過程の役割と評価、複雑現象における 素過程の整理とメカニズムの解明、素過程データ抽出のための技術開発、素過程に注目した噴火様式 推移の支配要因の特定、に関する研究を行った。

### ア. 岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

(岩石-水相互作用)

地殻流体としてより現実的な組成である1モル NaCl 溶液を用いて、100MPaの圧力のもと、300℃ および 400℃における石英と珪灰石の溶解度測定を行い、同溶液の有効誘電率を見積もった。1モル NaCl 溶液の有効誘電率は純水に比べて、400℃で20%程度、300℃で36%程度高い。これは、低温ほ ど、塩水と純水の誘電率が乖離するという予想と一致する(東北大学[課題番号:1214])。

鉱物表面の薄膜水の分子状態を検討するために、顕微ラマン分光、赤外吸収スペクトルの計測を 行い、自由水と薄膜水の分子状態の比較を行った。その結果、石英基板上の薄膜水は、自由水に比べ て ice-like な分子振動モードが発達し、構造化された"かたい"水となっていることが明らかとな った。これは、石英表面の Si と水分子が Si-OH シラノール基とこれに規制される水素結合による構 造化が生じているためと推定される(東北大学[課題番号:1214])。

下部地殻領域での岩石の変形特性に及ぼす水の効果を明らかにするために、最大 0.5wt%の水を導入させながら、固体圧試験機を用いて、温度 900℃、封圧 1 GPa のもとで剪断変形実験を行い、無水の人工アノーサイト多結晶体の流動特性を調べた。多結晶体の平均粒径は 3 ミクロンで、5 vo1%のシリカリッチなメルトを含む。剪断ひずみ速度約 10<sup>-4</sup>/s でドライ (無水試料そのまま)及び 0.1-0.3wt%の水を加えた実験では、差応力が 1000MPa まで達する。一方、0.5wt%の水を加えたときのみ、顕著な弱化が見られた。 回収試料の微細組織観察から、添加した水が少ないほど破砕流動が卓越することが明らかになった。0.5wt%の水を添加した試料では塑性変形が卓越しており、歪の局所化も認められた。赤外分光法面分析から、0.1wt%の水を添加し、剪断歪が局所化している領域では最大 550ppmH<sub>2</sub>0 であった。一方、0.5wt%の水を添加し、剪断歪が局所化している領域では最大 550ppmH<sub>2</sub>0 であった。このように、微小試料内においても、含水量の不均質性によって、脆性変形から塑性流動までの変形機構の遷移が認められた。従って、天然の断層帯においても、水の非平衡な拡散に伴い、変形挙動が変化することが推察できる(東北大学 [課題番号:1214])。

超微小硬度計により, c 軸に垂直な面に圧痕を形成した石英を, 亜臨界水に浸して溶解実験を行っ

た。圧痕は明瞭に大きくなっており、かなりの速度で溶解するが、非変形部ではほとんど溶解しない ことを確認した。このことは、き裂などの欠陥のある岩石の熱水への溶解が、従来の予想よりも早く 進むことを示唆する(静岡大学[課題番号:2915]).

### (多体粒子系の摩擦)

破壊エネルギーを支配する主要因である臨界すべり量(Dc)は、従来の低速すべり実験ではmm以下と見積もられてきたが、Chambon et al. (2006)は、すべりのほとんどが厚み数粒子以下の狭い層に局在している状況下でも背景に厚い粉体層があれば、低速すべり(10um/s)でも数十 cm という長い Dc が生じ得ることを発見した。これは、地震発生場で一般的に期待される環境で、動的破壊に移行する前の震源核が非常に大きくなり得ることを示唆する結果である。前年度までに、東京大学地震研究所[課題番号:1427]では粒子自体の物性変化を極力排した実験と理論の両面で、高速すべりにおいては多体粒子相互作用に支配される新たな摩擦メカニズムがあることを証明したが、今年度はこの系に厚い粉体層をはさんだ実験を行い、10m クラスの長大な Dc をもつ摩擦の緩和を見出した。すべり速度を階段状に増加した場合と減少させた場合で対称な応答を示したことから、この緩和の原因は粒子自体の物性変化ではなく、多体粒子系の構造変化が原因であることが示唆される。また、摩擦強度の変化に対応した粉体層の厚み変化も観察された(東京大学地震研究所[課題番号:1427])。

### (断層破砕帯の成因)

San Andreas 断層などの大規模横ずれ断層帯のダメージゾーンに、顕著な剪断組織は持たないが、 著しく粉砕した岩石 (Pulverized rocks) が幅広く分布することが知られている。この岩石は、断層 に沿って非対称に分布していることなどから、破壊伝播に伴う動的な応力場によって形成された可能 性が指摘されているが、その正確な形成機構は明らかではない。Pulverized rocksの形成機構を明ら かにするために、San Andreas 断層および有馬高槻構造線の地質調査を行い、両断層沿いに分布する Pulverized rocks の試料採取を行った。得られた試料の微細組織観察から、粒径分布測定を行ったと ころ、Pulverized rocks は通常の断層ガウジやカタクラサイトに比べ、高いフラクタル次元と大きな カットオフ粒径を持つことが明らかになった。このことは、摩耗によって細粒物質が形成され、徐々 に断層破砕帯が出来るという従来の理論では説明できないことから、新たな断層形成機構の存在を示 唆する (東北大学 [課題番号: 1215])。

(高速摩擦)

粉砕法によって作成した,非晶質含有量 0-40wt%の範囲で制御したドレライトガウジを用いて,広 い速度範囲での系統的な摩擦実験を行った。まず,広島大学の二軸装置を用いて,室温及び 120℃の 温度下において,2-20um/s の低速で速度ステップ実験をおこなった。定常摩擦の速度依存性はいずれ もわずかに速度弱化であったが, 20mm 程度の累積変位の間にみられた摩擦のすべり変位依存性には 非晶質の含有量による違いがあった。すなわち,室温の実験では,非晶質分が少ない時にはすべり弱 化,多い時にはすべり硬化が生じた。一方,120℃の実験では,非晶質分の量にかかわらず摩擦係数 は一定のままであった。これは,室温では実験中に非晶質分に水の吸着が進むためではないかと考え ている。ついで,産業技術総合研究所の回転式試験機を用いて,室温下において,20um/s-1.3m/sの 広い速度範囲で実験をおこなった。非晶質分の量に依らず,4cm/s以上では非常に顕著な速度弱化を 示した。一方,低速レンジでは,非晶質分が多い試料の方が大きな摩擦強度を示すが,高速レンジで は逆であった。この傾向も,二軸実験の場合と同じく,非晶質に対する水の吸着と温度(この場合は 摩擦発熱)による逸失という解釈が可能である(東京大学地震研究所 [課題番号:1427])。

(摩擦の微視的過程)

摩擦面は、わずかな真実接触部でのみ応力を支えており、摩擦すべりは最終的にはそのような部 分での物質の非弾性変形によって賄われる。そのような変形を理解するために、超微小硬度計を用い た圧痕形成実験を行っている。今年度は、圧痕の形成に要するエネルギーの結晶方位異方性について 検討した。石英単結晶試料の方位を変え、5種類の圧子を用いて試した。それぞれの圧子について、 全ての結晶方位のデータは同一直線上にのり、結晶方位依存性は認められなかった。また、直線の傾 きは圧子の種類にかかわらずほぼ同じであった(東京大学地震研究所[課題番号:1427])。

岩石の準静的なすべりの摩擦特性は速度・状態依存摩擦則という巨視的経験則によって記述され、 地震発生の研究で多く用いられている。経験則に含まれるパラメタや状態変数の物理的な意味を明ら かにするため、真実接触部の微視的クリープ変形過程に基づいて、巨視的経験則の理論的導出を行い、 その微視的表現を得た。これにより、摩擦現象のスケーリングを支配する臨界すべり量の微視的表現 が初めて得られたことは特筆される(東京大学地震研究所 [課題番号:1427])。

摩擦に伴う岩石鉱物の非晶質化のうち,石英岩の非晶質化は,その後の含水したゲルの生成によりすべり・速度弱化を引き起こすことから,摩擦特性にも直接影響を及ぼす。そこで,Pin-on-disk型の摩擦試験機を用いて,摩擦すべり後の石英トラックのラマン分光分析を行った。摩擦に伴い,Si04 四面体6員環からなる石英構造中に,3-4員環という歪んだネットワーク構造が形成されていることが明らかになった。非晶質化は,高速すべりを必要としないことから,真実接触点での高応力下で,Si04中距離構造がより歪んだ平面3および4員環となり,歪んだSi-0結合部から選択的に水和反応が進むことで,摩擦表面に非晶質シリカの水和物が生成したことを示唆する。非晶質シリカ水和物は,強度の低い粘性物質として振舞うことで,速度弱化を引き起こしたと考えられる(東北大学[課題番号:1215])。

### イ.地殻・上部マントルの物性の環境依存性

(蛇紋岩の物性・変形過程)

沈み込み帯での地震発生過程において重要な役割を果たすと考えられている蛇紋岩の分布を地震 波速度構造にもとづいてマッピングするためには、蛇紋岩の弾性的性質の理解が不可欠である。しか し、アンチゴライトのような弾性的異方性の強い鉱物を含む媒質では、従来の Voigt 平均や Reuss 平 均による多結晶体の弾性定数の見積もりは不確定性が大きい。アンチゴライトのみからなり、結晶方 位がランダムである等方的な蛇紋岩を考えた場合、Voigt 平均と Reuss 平均の間には P 波速度, S 波 速度ともに 1 km/s ほどの差が生じる。これは、アンチゴライトの粒子形状が考慮されていないためで ある。そこで、昨年度に開発した、粒子形状を考慮した計算方法を応用して、等方的な蛇紋岩の弾性 波速度(常温、常圧)を求めた。 P 波速度は 6.70km/s、S 波速度は 3.78km/s と見積もられ、これから 得られる Vp/Vs は 1.77 であり、実測値の 1.8 とほぼ一致する。この結果を地震波速度トモグラフィの 解釈に応用すると、紀伊半島下のウェッジマントルなどで得られている 1.8 を超える Vp/Vs は、蛇紋 岩化だけでは説明できず、流体の存在を意味していると考えられる(東京大学地震研究所[課題番号: 1428])。

このような流体が、実際にどのような場所にどのような状態で存在しているかを明らかにするため、オマーンオフィオライト延性剪断帯の微細構造解析を行った。オマーンオフィオライト北部フィズ岩体に露出する延性剪断帯は、海洋地殻とその下部のマントル物質を横切る大剪断帯である。この

剪断帯の,特に地殻−マントル境界において角閃石が見出された。角閃石は,母岩であるハンレイ岩 に水が作用して形成されるので,海洋地殻−マントルを横切る延性剪断帯はマントルからの水みちと しての機能をもつ可能性が十分に考えられる(東京大学地震研究所 [課題番号:1428])。

(流動則の高精度推定)

天然の条件に比べて高温・高ひずみ速度(高応力)条件下で実験的に得られる鉱物の流動則を外 挿して地球内部の流動変形に適用するためには、流動則のパラメタ、特に、活性化エネルギーを高い 精度で求める必要がある。そこで、高温・大気圧下でのフォルステライト多結晶体の一軸圧縮クリー プ試験により,流動応力に対する温度の影響を調べた。また,インピーダンス法により,クリープ試 験中に電気伝導度測定も行った。一般に、クリープは最も遅いイオン種の拡散過程により律速され、 逆に電気伝導度は最も速いイオン種の拡散過程に律速されていると考えられているので、クリープ速 度と電気伝導度の温度依存性(活性化エネルギー)を高精度で求めることにより、拡散メカニズムの 詳細が理解できると期待される。これより,地球内部の流動変形における律速過程を推定し,実験室 で得られる流動則(活性化エネルギー)を地球内部に適用することができる。試料は,体積比 90%の フォルステライト(Mg\_Si0,)と 10%のエンスタタイト(MgSi0,)から成る多結晶焼結体である。圧縮 クリープ試験には,管状炉が付設されたインストロン型の変形試験機を用いた。実験中の粒径変化を 抑えるため,試料に負荷する前に,実験を行う最高温度で粒径を飽和させた。試験中の応力は10-20MPa で一定に保ち,温度は1360℃から1200℃までゆっくり変化させた。これにより,1℃刻みで応力-ひ ずみ速度の関係が得られた。ピストンと試料の接触部である上部および下部の SiC をそれぞれ電極と して印加した2Vの交流電圧と応答電流の関係から試料のインピーダンスを測定した。インピーダン ス測定は、1360℃から 1200℃まで 10℃毎に行った。全温度領域の粘性率・温度のアレニウスプロッ トにおいて、両者の関係は、非常に小さなばらつきでひとつの直線にのることが分かった。このこと は、実験の温度領域で律速する拡散機構が変わらなかったことを示す.また、このプロットから活性 化エネルギーを 722±1kJ/mol という高い精度で推定することができた。これは、本実験手法によっ て、地球内部の低温領域に安定して外挿できる流動則を得られることを示している。インピーダンス 測定からは,温度の低下に伴い,電気伝導度が系統的に小さくなることが示された(東京大学地震研 究所[課題番号:1428])。

(地震波の減衰)

3次元速度構造から地球内部の温度分布や流体分布を定量的に推定するためには、岩石の非弾性 特性の解明が不可欠である。有機多結晶体を岩石のアナログ物質として用い、試料のヤング率Eと減 衰 Q を様々な周波数(10-0.1mHz)で精密に測定できる強制振動型の変形実験装置を開発した。これ までの実験から、減衰スペクトルQ(f)の温度T,粒径 d、メルト分率 φ に対する依存性には相似則が 存在し、マックスウエル周波数 fM(T, d、 φ)を用いてQ(f, T, d、 φ)=Q(f/fM)と表せることが分か った。同様の相似則がオリビン多結晶体のデータについても成り立ち、Q(f/fM)がアナログ物質と同 ーの曲線上に載ることから、多結晶体の非弾性の持つ普遍性を明らかにすることができた。しかし、 マントルのマックスウエル周波数で地震波の周波数を規格化すると、実験の規格化周波数が 5×10<sup>4</sup> であるのに対して、地震波のそれは2桁以上高周波の 10<sup>6</sup>-10<sup>9</sup>であり、実験データが地震波帯域をカ バーしていないことも分かった。そこで実験法を改良して、より高周波、低温領域でアナログ試料の 非弾性データを取得し、f/fM=10<sup>7</sup>までの高規格化周波数領域で非弾性データを取得した。これまでに 得られた予備的実験データは、高規格化周波数帯域では、マックスウエル周波数を用いた単純な相似 則が成り立たないことを示唆している(東京大学地震研究所[課題番号:1428])。

#### (地殻の物性)

地殻・マントルの正確な物性測定に必要な高緻密・極細粒多結晶体の合成法の開発を引き続き行 った。今年度は、下部地殻主要鉱物である斜長石の多結晶体の合成を目標にした。ナノサイズの粒径 を有する SiO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の微粒粉を出発物質として、粉の混合、仮焼き、真空焼結を経て、ポア 率1%、粒径1ミクロンの多結晶体合成に成功した。最大で、直径5mm、高さ10mmの円柱形の試料 体を作ることも可能である。従来、斜長石の合成試料は、ガラスを出発材料に用いて作られてきたが、 ガラス相が最後まで残ってしまうこと、また、そのガラス相に入る水を完全に脱水できない問題があ った。ガラスおよび水は、試料の変形および電気的特性に大きな影響を与えるので、これまでは、下 部地殻の物性を正確に測定することは困難であった.一方、今回合成した試料は、全く水を含まない 完全結晶体であるため、下部地殻物性を知る上での基準試料となることが期待される。

### ゥ. 摩擦・破壊現象の規模依存性

(断層摩擦のスケーリング)

破壊・変形の規準として、応力の単位で表現される摩擦強度以外に、J/m<sup>2</sup>の単位であらわされる破壊エネルギーがあり、これが地震発生に先行する準静的震源核の大きさを規定することが理論的にしられている。Kato(2012)は、2次元での地震サイクルシミュレーションと破壊力学的考察から、繰り返し時間の長い地震ほど破壊開始点での破壊エネルギーが高いはずだと指摘した。静的応力降下量が地震のサイズに依存しないという経験則から、繰り返し間隔と地震のサイズは同一視できる。このアイデアの拡張として、アスペリティの破壊エネルギーがアスペリティの半径(R)に依存しないと仮定して3次元の地震サイクルシミュレーションを行ったところ、大きな地震ほど応力降下量が小さくなるという結果を得た。逆に、破壊エネルギーがRに比例すれば、応力降下量が一定となることを、簡単な破壊力学的考察で示すことができる。そしてこのときには、震源核の半径が本震破壊の半径と比例することが期待される(東京大学地震研究所[課題番号:1427])。

摩擦強度の回復は、さまざまな時定数をもつ物理化学過程により生じる。Kato and Yoshida (2011) は、東北地方太平洋沖地震の数値シミュレーションを行い、M7 級地震を引き起こすアスペリティでは 巨大地震の直後から固着が開始し、周囲で起こる余効すべりにより次の M7 級地震が早められると予 想した。仮定した速度及び状態依存摩擦則では非常に速く強度が回復するためである.しかし、最近 の GPS データの解析によると、M7 級地震のアスペリティでは、東北地方太平洋沖地震発生から1 年経 っても固着が見られないようである。そこで、室内実験で示されている強度回復の物理化学過程に固 有のカットオフタイムを数値シミュレーションに導入し、固着の開始がどのように遅れるかを調べた。 実験では、カットオフタイムは 10 桁程度変わりうる。数値計算の結果、カットオフタイムを長くと れば固着の開始は遅れるが、同時に最大すべり速度も遅くなった。地震性の高速すべりを起こせるよ うな場合では、固着の開始を1ヶ月程度しか遅らせることはできなかった。天然の断層では強度回復 に二種類以上の異なる素過程が関与している可能性がある。そこで、異なるカットオフタイムを有す る摩擦則を定式化し、更に検討を進めた。その結果、最大すべり速度は短い方のカットオフタイムで 規定され、全体的な固着の遅れは長い方のカットオフタイムの影響を強く受けることが明らかになっ た。これにより、固着の開始を大幅に遅らせつつ、地震性すべりも再現することができた(東京大学 地震研究所 [課題番号:1427])。 防災科学技術研究所の大型振動台を用いた二軸すべり摩擦実験を行った。断層のサイズは 0.5m× 1.5m で、断層に印加した法線応力は 1.3MPa である。0.1-10mm/s のすべり速度域では、これまでの小 サンプルを用いた実験結果と遜色のない摩擦係数が得られた。また、すべりが試料端まで達しない stick slip event を多数観測する事ができた。このデータの解析により、これまで十分に解明されて いなかった断層破壊の停止機構に関して、新たな知見が得られると期待される(防災科学技術研究所 [課題番号: 3015])。

### (断層面形状の階層性)

断層面は生来的に不均質であり、それが地震の多様性を生む。断層面上の距離 x とその点上の測度(例えば凹凸の振幅 h) との間に h=  $\beta$  xH の関係にあればフラクタルであり、フラクタル次元 D は D=E+1-H である (E はユークリッド次元, H はハースト指数)。1mm から 100km オーダーの断層の観察 によれば、全ての断層帯が断層セグメントとジョグの階層的入れ子構造になっていて、①D は 2 より わずかに大きく、②H は 1 よりわずかに小さく、③  $\beta$  は約 0.04 である。①と②の事実は地震学的な 推定と調和する。③は本震とサブイベントの長さ比を説明する。地震発生層の厚さより長い横ずれ地 震断層の地表平均変位 U は長さ L の 1 乗ではなく、約 0.46 乗に比例して増加する。これはジョグに よるピン止めのためである。Hillers and Wesnousky (2008)による数値実験はこれを再現している。 Dieterich and Smith (2009)による数値実験は、H=1 で  $\beta$  が約 0.04 のとき、U $\propto$ L<sup>0.46</sup>を再現するよう だ。すなわち、断層面の不均質性の実態は、階層的に自己相似な断層帯のジオメトリーそのものと考 えてよい (東北大学 [課題番号:1215])。

(室内実験で観測される AE のスケーリング則)

ウェスタリー花崗岩試料を用いて三軸圧縮破壊試験(封圧:10MPa)を実施した。試料表面に7台 の広帯域トランスデューサ(感度帯域:100-2000kHz)を貼付し,高分解能(14 bit)・多チャンネ ルでAEを観測した。約6時間の実験中,1分以内の欠測が数回あったのを除いて,AE波形を20MS/s で連続集録することに成功した。ピーク強度(296 MPa)に達した以降,約24MPaの応力低下を確認 したところで高速除荷し,試料を回収した。回収後の試料に対してX線CTスキャンをおこない,明 瞭な一枚の成長途上の断層を試料内に確認した。集録された連続波形から微小破壊に伴うAEイベン トを抽出し,震源決定をおこなった。AE 震源は,断層に対応する位置に分布しており,その中に2つ のクラスタが見つかった。トランスデューサの感度校正をおこなった後,これらのクラスタに含まれ る AE 波形のスペクトル解析を行った。その結果,AE の地震モーメントはMw-8 から-7 程度に相当し, コーナー周波数の-3 乗に比例することが明らかになった。さらに,このスケーリング則は自然地震の スケーリング則の延長上に位置しており,AE から自然地震に至るまで,震源サイズにして8桁程度に わたり,応力降下量が破壊規模に依存しない自己相似な関係にあることが示された(立命館大学[課 題番号:2402])。

(掘削試料の解析)

回転式中-高速摩擦試験機を用いて、付加体物質(付加体泥質岩、南海掘削試料)の摩擦実験をお こなった。統合国際深海掘削計画(IODP) Exp. 334 において、中米海溝コスタリカ沖の沈み込みイン プットサイト(Site U1381A)にて採取されたココスプレート上の生物起源堆積物について行った摩 擦実験の結果、数十 mm/s より高速のすべり速度条件で摩擦係数が 0.2 以下に低下するという著しい 速度弱化の性質を示すことが明らかになった(京都大学[課題番号:1814])。 南海トラフ付加体浅部(海底下約1000-1500 m)から採取された砂岩,凝灰岩シルト質泥岩および 粘土質泥岩の4試料について,原位置に近い条件(室温,封圧36-58MPa,間隙水圧28-43MPa)のも と,軸方向の変位速度を0.1,1,10um/sでステップ状に変化させて三軸摩擦実験を行ったところ, 摩擦強度と粘土鉱物含有量に負の相関が認められた。摩擦係数は,粘土鉱物含有量が約5wt%の砂岩 試料で0.8より大きく,約15wt%の凝灰岩試料では約0.7,約30wt%のシルト質泥岩試料において は約0.53,さらに約40wt%の粘土質泥岩試料では約0.25であった。また,すべり依存挙動にも粘土 鉱物含有量との相関が認められた。砂岩試料,凝灰岩試料,シルト質泥岩試料,粘土質泥岩試料は順 に,わずかにすべり硬化,ほぼ定常すべり,わずかにすべり軟化,明瞭なすべり軟化の挙動を示した。 いずれの試料も速度強化の挙動を示したが,摩擦強度の変位速度依存性にも粘土鉱物含有量との相関 が認められ,粘土鉱物含有量が多くなると,変位速度依存性に対する流動の影響が大きくなった(東 京大学地震研究所[課題番号:1427])。

中央構造線のボーリングコアに含まれる断層岩を調べ,過去の応力状態を見積もった。脆性-塑性 遷移領域直上で被った差応力は100MPa 未満,脆性-塑性遷移領域直下で被った差応力は200MPa 程度 であることが明らかになった(産業技術総合研究所[課題番号:5010])。

(南アフリカ金鉱山での地震観測)

クック・フォー(旧名イズルウィニ)鉱山における AE 観測では、2012 年4月から12月の期間中, のべ140日にわたり、合計605.6万個のトリガー波形を収録した。このうち、2012年5月17日まで のデータに関して、自動処理による震源決定をおこない、1,044,416個の信頼性の高い震源が求めら れた。昨年度に解析した分を含めると、合計10ヶ月間,1,509,568個のイベントからなる信頼性の高 い震源カタログが作成できている.昨年度に報告した、採掘前線から離れて存在する薄い面状のAE クラスタのうち、既知の地質断層との対応がわかっていなかった2つのクラスタについても、それら と対応する弱面が坑道で確認できた。これらの薄い面状のクラスタを示すAEに対して相対震源決定 をおこなったところ、AE クラスタの厚さは薄いものでは50cm程度と、非常に密集した面状分布を示 すことがわかった。いくつかのクラスタでは、面のオフセットやブランチなど、より細かな構造をAE 分布から確認する事ができた。面状クラスタを構成するAEの99.8%はMw-2以下であり、通常の鉱山 地震観測網(検知限界Mw-1程度)では検知できない非常に小さいイベントである.面状クラスタを 構成するAEのサイズ分布はべき乗則に従うことが確認された.サイズ分布のb値はクラスタ毎に異 なっているが(1.34から2.19)、いずれにおいて、採掘前線直近に分布するAEのb値(1.3程度) に比べて高い値を示した(立命館大学[課題番号:2402])。

# エ.マグマの分化・発泡・脱ガス過程

(素過程に関係づけた観測量解釈の高度化)

開口型火道を持つ山体変形のシミュレーション行った。本年度は、小気泡の上昇、スラグ流で の気泡の上昇、気泡の拡散成長の効果を比較検討した。その結果、ストロンボリ火山で観測される、 噴火直前の加速的膨張は、その時間スケールの点から、小気泡の上昇が最もふさわしいことがわかっ た。火山性微動の仕組みの研究では、深部低周波微動に対して、固液二相系における流体亀裂振動の 問題を定式化し、sine-Gordon 方程式に帰着することがわかった(東北大学理学系研究科[課題番号: 1216])。

近年,噴火に伴う振動現象が,地震計だけではなく空振計でも記録されるようになってきた。地 盤の振動と空気振動の両方を適切に解析することで,噴火の最中の火道内部や,火口付近で起こって いる物理過程についてより進んだ理解が得られる可能性が出てきている。霧島新燃岳 2011 年噴火に ついて、地震と空振のデータに含まれる様々な情報を適切に整理し解析する手法を開発し、その手法 を1月26日から27日に起こった3回の準プリニー式噴火の観測データに応用した。その結果、3つ の準プリニー式噴火において火道内過程に違いがあることがわかってきた。1回目と3回目の噴火で は、地震動と空振の間の相関は悪い。この噴火では、噴出率増大の前に地震活動が活発になり、火道 浅部での増圧・急減圧が観測されている。一方、2回目の噴火では、地震動と空振の間の相関はよく、 地震活動の活発化や急減圧は観測されていない(図1)。地震動と空振の相関がよいことは、どちら も火口近傍での似たような励起源により振動が励起されていること意味し、相関が悪いことは、があら 1目と3回目の噴火では噴出率増大前の急減圧によって遅延破砕が起こっていた可能性が示唆され る。この結果は、観測データ間及び観測データと現象の間にある関係性を物理的理解に基づいて見る ことによって、観測データから噴出率の推移予測が行える可能性を示している(東京大学地震研究所 [課題番号:1429])。

(噴火現象における素過程の役割と評価)

マグマのレオロジーは、その非ニュートン性のために、さまざまな非線形現象を引き起こす。そのひとつは、粘性領域と脆性領域の変形速度による遷移である。一般的なレオロジー試験では、破壊 面や運動状態の空間分布を時間の関数として知ることはできない。そのため、脆性破壊のように極め て局在する、こうした非線形性の強い現象の理解には、力学応答と同時にその現象をその場で観察す ることが重要になる。本年度、シンクロトロン放射光X線を用いて、高速変形する流紋岩マグマの脆 性破壊現象を、その場観察することに成功した。円筒形の試料に対して、中心軸を中心として上面を 回転させる実験では、破断面が核形成し、円錐状の面に発達して行く様子が観察された。詳しい解析 は今後なされるが、マグマの破壊現象の動力学的側面の理解が一気に進む可能性が持てる研究成果だ (東北大学理学系研究科[課題番号:1216])。

昨年までに行った、間欠泉の噴出量と噴出様式の支配要因の特定とモデル化をさらに発展させ、 新しい爆発指数を提案した。従来の爆発指数 VEI は、その爆発性に関わらず、噴出量でほぼ一意的に 決められていた。本研究で提案した爆発指数 EI (Explosivity Index) は,総噴出量のうち火砕物の 占める割合で, EI=火砕物量/総噴出量, と定義される。モデルにおいて重要なカギは, 噴出直前の過 飽和度不均一で、噴火のトリガー条件を満たす過飽和度の平均値と標準偏差はお互いに補償し合う関 係で様々な組み合わせを取りうる。標準偏差が大きいほど噴火は、噴出量は少なく EI も小さい。す なわち、ある決まった大きさのマグマだまりが繰り返し噴火する場合には、噴出量と爆発性が正の相 関を持つ。これは、従来の VEI 指数が爆発指数として適切に機能する条件を示したことになる。しか し、噴火に関わるマグマだまりのサイズは、噴火毎火山毎に異なっている。その場合には、本研究で 提案する EI の方がより明白な物理的意味づけを持つ爆発性の指標となる。さらに、本研究で明らか になった重要な点は、EIの値は、噴火による噴出量や爆発性だけでなく、マグマだまりの中に残った 残留マグマの量についても意味を与えることである。 結果によると, EI が小さくなるほど残留マグマ の量も増える。例えば、姶良カルデラ噴火などカルデラ噴火はEI=1であり、噴火後マグマだまりが 空っぽになることを意味する。これは陥没によるカルデラ形成と調和的である。富士山宝永の噴火も EI=1 なので、マグマだまりの中にはほとんど残っていないが、富士山貞観の噴火は EI=0 であり、ほ とんどのマグマがマグマだまりに残っていると予想される。 また, 桜島の文明・安永・大正の噴火 (典 型的安山岩噴火)ではEI=0.5 程度であり,噴出した量と同じぐらいの量のマグマをマグマだまりに

残していたと予想される。さらに、桜島の昭和の噴火では EI はおおよそ0 なので、噴出量よりも一 桁多い量のマグマがマグマだまりに残っていると予想される。桜島火山についてのこれら噴出量・噴 出様式と残存マグマの量の関係は、地殻変動のデータと整合的である。噴出マグマの物質的不均一性 と噴出量・噴火様式のデータを蓄積し、このモデルが天然でどの程度成り立っているか評価すること が今後の課題である(九州大学大学院理学研究院[課題番号: 2206])。

### (素過程データ抽出のための技術開発)

噴火直前のメルトに溶け込んでいる揮発性成分を知ることは、噴火のポテンシャルを知る上で 決定的に重要である。さらに、その濃度の頻度分布、すなわち過飽和度の不均一性を知ることは、前 項で述べた噴火様式や噴出量、EI さらには残留マグマの量の理解になくてはならない情報量である。 そのひとつの指標は、噴出物に含まれる斑晶中のメルト包有物(ガラス包有物)中の揮発性成分濃度 である。その測定方法として、これまで発展させてきた顕微 FTIR 反射分光法は、比較的玄武岩質の カンラン石斑晶をターゲットとしてきた。本年度は、この方法をさらにケイ長質マグマにまで拡張す るために、長石、石英、輝石の斑晶に含まれるメルト包有物に対しても手法を整備した。この手法を 用いて、富士火山宝永噴火の初期白色軽石に含まれる斜方輝石のメルト包有物を測定し、4から4.5wt% の含水量を得た。今後、この手法を多くの火山噴出の噴出物に応用することによって、噴火ポテンシ ャルのデータベースが充実することが期待される(東京大学地震研究所[課題番号:1430])。

# 今後の展望

(地震発生の素過程)

幅広いすべり速度帯域で、ガウジの非晶質化や水和といった化学反応やガウジ粒子同士の力学的 な相互作用が断層の巨視的摩擦特性に著しい影響を与えることが確かめられた。また、圧痕形成試験 やPin-on-diskの摩擦実験では、断層摩擦のもっとも基本的な過程である真実接触点の力学的・化学 的過程に関する新たな描像が得られつつある。このようなガウジの振る舞いや真実接触点の振る舞い は、従来の摩擦構成則では十分に考慮されていない。そのため、これらをより詳細に調べて定量化す ることが重要である。一方、天然の断層帯に分布する破砕物の粒径分布が、摩耗によってできたガウ ジとは異なっていることから、破砕帯は、従来考えられていたように摩耗によって徐々に発達するの ではないことが示唆された。ガウジの水和や力学的相互作用が断層の巨視的摩擦に及ぼす影響は、そ の粒径分布にも依存するので、天然の断層帯に含まれる破砕物の生成過程を明らかにし、その粒径分 布を考慮した摩擦実験を行うことが望まれる。

地殻流体としてより現実的な組成である1モル NaCl 溶液の誘電率を、下部地殻に相当する環境下 で測定することに成功した。また、欠陥のある結晶では、亜臨界水への石英の溶融が、従来知られて いたよりも速く進むことが明らかとなった。このような、岩石-水相互作用に関する新たなデータや 知見の積み重ねにより、内陸地震の発生モデルとして提唱されている断層バルブ仮説を検証できると 期待される。

アンチゴライトのような弾性的異方性の強い鉱物を含む媒質の巨視的な弾性波速度を計算する手 法を開発した。このような媒質の Vp/Vs は最大でも 1.77 であることから,紀伊半島下のマントルウ ェッジに推定されている Vp/Vs=1.8の異常域には,自由水が存在することが示唆された。一方,オマ ーンオフィオライト延性剪断帯の微細構造からは,このような剪断帯がマントルからの水みちとして 機能している可能性が示された。これらの知見は、マントル内の水輸送過程の解明に重要であり、よ り多くの地域で事例を積み重ねることで、その標準的な描像の確立に貢献するであろう。

体積比 90%のフォルステライト(Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)と 10%のエンスタタイト(MgSiO<sub>3</sub>)から成る多結晶焼結 体を用いた高温・常圧下の変形試験により、これまでよりも高い精度で活性化エネルギーを推定する ことに成功した。高温・高圧下においても同様の手法で岩石の活性化エネルギーを測定できれば、室 内実験で得られた岩石の変形則のパラメタを、これまでよりも高い信頼度で天然の環境に適用するこ とが可能になる。

広帯域センサーにより観測した,三軸圧縮下で発生する AE のスペクトル解析から,Mw-8~-7 の AE の応力降下量も自然地震のそれと同程度であることが示された。このことは,震源サイズにして8 桁にわたり,応力降下量一定のスケーリング則が成り立つことを意味する。南アフリカ金鉱山での高 感度地震観測では,G-R則が,Mw-2以下の極微小地震まで成り立つことが示された。このことも,非 常に広いマグニチュード範囲で地震のスケーリング則が成り立っていることを示唆する。破壊力学的 考察からは,破壊エネルギーが震源サイズに比例する場合には応力降下量が一定となることが示され る。そして,この場合,本震破壊域の大きさが震源核の大きさに比例することが,数値計算により示 された。これらの成果は,震源核を検出して地震を予知するという,予知研究の基本的なスタンスの 妥当性を支持する.ただし,この数値計算に用いた摩擦則では,すでに述べたガウジ層の化学過程や 力学的相互作用は考慮されていない。新たに見つかったガウジの振る舞いを定式化して,それが震源 核形成過程に与える影響を評価する必要がある.

中米海溝コスタリカ沖の沈み込みインプットサイトにて採取されたココスプレート上の生物起源 堆積物や南海トラフ付加体浅部(海底下約 1000-1500 m)から採取された砂岩,凝灰岩シルト質泥岩 および粘土質泥岩を用いた摩擦実験では,堆積物の種類ごとに摩擦特性が大きく異なることが示され た.このことは,プレート境界のすべり特性の地域性を考える上で重要な示唆を与える.

# (火山噴火の素過程)

昨年度の報告書において、「モデルを介して基礎的理解と観測量の橋渡しを行うこと」を課題とし て挙げた。本年度は、ある程度それを意識した研究が行えたような印象を受ける。今後、この方向性 をより一層推し進め、予知研究における素過程的視点の意義と必要性を整理・確認したい。

#### 成果リスト

- Abe, J., N. Hitrano, and N. Tsuchiya (2012), Infrared spectroscopic study of water in moseporous silica under supercritical conditions, Journal of Material Science, 47, 7971-7977.
- Fukuda, J., T. Okudaira, T. Satsukawa, and K. Michibayashi (2012), Solution-precipitation of K-feldspar in deformed granitoids and its relationship to the distribution of water, Tectonophysics, 532-535
- 福山英一・溝口一生・山下 太・東郷徹宏・川方裕則・吉光奈奈・嶋本利彦・御子柴 正・佐藤 誠・ 箕輪親宏 (2012), 大型振動台を用いた大型2軸摩擦実験,日本地震学会講演予稿集, D31-01.
- 福山英一・山下 太・溝口一生・東郷徹宏(2012),透過波振幅を通して見たすべり弱化過程,日本地 球惑星科学連合 2012 年大会予稿集, SSS29-05.
- Fukuyama, E., K. Mizoguchi, F. Yamashita, T. Togo, H. Kawakata, N. Yoshimitsu, T. Shimamoto, T. Mikoshiba, M. Sato, and C. Minowa (2012), Large-scale biaxial friction experiments with an assistance of the NIED shaking table, EOS(AGU Fall Meeting).

- 針金由美子・道林克禎(2012), 走査型蛍光 X 線分析顕微鏡を用いた層状はんれい岩の組織解析:予 察,静岡大学地球科学研究報告, no. 39, 7-27.
- Hatano, T. and O. Kuwano (2013), Origin of the velocity-strengthening nature of granular friction, Pure Appl. Geophys., 170, 3.
- 平賀岳彦・渡部泰史・宮崎智詞(2012),粒間流体の実体,地球化学,46,231-242.
- 星出隆志・寅丸敦志(2012),新燃岳 2011 年噴火噴出物から推定されるマグマの発泡・脱ガスプロセス,日本地球惑星科学連合 2012 年大会.
- Ichihara, M., Lyons, J., Oikawa, J., and Takeo, M. (2012) Acoustic waves in the atmosphere and ground generated by volcanic activity, in: Kamakura, T., and Sugimoto, N. eds, Nonlinear Acoustics, Satte-ofthe-Art and Perspectives, 327-330, Am. Inst. Phys., Melville, US. (ISNA 19).
- Ichihara, M. (2012) A tree diagram for responses of bubbly magma on rapid decompression based on bubble dynamics: an implication to the onset of explosive eruptions, Soft matter physics & solid earth science: unifying concepts, (2012-6-5, ERI).
- Ichihara, M., M. Takeo, and A. Yokoo (2012) Monitoring volcanic activities using correlation patterns between infrasound and ground motion, EGU2012-6856, 2012 (2012-4-22-27, Vienna).
- 入山 宙・寅丸敦志(2012),新燃岳 2011 年噴火の噴出物に関する基礎記載から見た初期変遷,日本 地球惑星科学連合 2012 年大会.
- Ishibashi, T., N. Watanabe, N. Hirano, A. Okamoto, and N. Tsuchiya (2012), GeoFlow: A novel model simulator for prediction of the 3-D channeling flow in a rock fracture network, Water Resour. Res., 48, W07601, doi:10.1029/2011WR011226.
- 金川久一・東 修平・高橋美紀・上原真一・井上厚行(2012),南海トラフ付加体浅部の半遠洋性・タ ービダイト起源泥質堆積物の力学的・水理学的特性,日本地球惑星科学連合2012年大会, SSS38-27.
- Kawakata, H., T. Okuno, I. Doi, N. Yoshimitsu, N. Takahashi, and M. Takahashi (2013), Three dimensional structure of a fault generated during a triaxial compressive test with a granite sample, Proceedings of The 13th Japan Symposium on Rock Mechanics and The 6th Japan Korea Joint Symposium, 979-982.
- 川方裕則・吉光奈奈・福山英一・溝口一生・山下 太・東郷徹宏・嶋本利彦・佐藤 誠・土井一生(2012), 大型試料のせん断すべり時における透過弾性波の特徴,日本地震学会 2012 年度秋季大会, D31-02, 2012 年 10 月,北海道.
- Kawamura, H., T. Hatano, N. Kato, B. Soumya, and B. Chakrabarty (2012), Statistical physics of fracture, friction and Earthquake, Rev. Mod. Phys., 84, 839.
- 吉瀬 毅・寅丸敦志(2012), 噴火強度が変化する原因; 新燃岳 2011 年噴火の噴出物の密度の時間変 化に注目した岩石学的研究, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会.
- Kitajima, H. and D. Saffer (2012), Elevated pore pressure and anomalously low stress in regions of low frequency earthquakes along the Nankai Trough subduction megathrust, Geophys. Res. Lett., 39, doi:10.1029/2012GL053793.

- Kitajima, H., F. Chester, and G. Biscontin (2012), Mechanical and hydraulic properties of subducted sediments, Nankai Trough accretionary prism: Effect of stress path, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 13, doi:10.1029/2012GC004124.
- Kuwano, O., R. Ando, and T. Hatano (2013), Crossover from negative to positive shear rate dependence in granular friction, Geophys. Res. Lett., doi:10.1002/grl.50311 (in press).
- Lin, W., M. Conin, J.C. Moore, F.M. Chester, Y. Nakamura, J. J. Mori, L. Anderson, E.E. Brodsky, N. Eguchi, B. Cook, T. Jeppson, M. Wolfson-Schwehr, Y. Sanada, S. Saito, Y. Kido, T. Hirose, J.H. Behrmann, M. Ikari, K. Ujiie, C. Rowe, J. Kirkpatrick, S. Bose, C. Regalla, F. Remitti, V. Toy, P. Fulton, T. Mishima, T. Yang, T. Sun, T. Ishikawa, J. Sample, K. Takai, J. Kameda, S. Toczko, L. Maeda, S. Kodaira, R. Hino, D. Saffer (2013), Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, Science 339, 687-690, doi:10.1126/science.1229379.
- Lyons, J.J., M. Ichihara, A. Kurokawa, and J.M. Lees (2013) Switching between seismic and seismo-acoustic harmonic tremor simulated in the laboratory: Insights into the role of open degassing channels and magma viscosity, J. Geophys. Res., doi:10.1002/jgrb.50067.
- Lyons, J.J., G.P. Waite, M. Ichihara, and J. M. Lees (2012) Tilt prior to explosions and the effect of topography on ultra-long-period seismic records at Fuego volcano, Guatemala, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2012GL051184.
- 増田幸治(2013),岩石強度の時間依存性に対する水の影響,第13回岩の力学国内シンポジウム講演 論文集,525-529.
- Matsumoto, K. and M. Nakamura (2012), Syn-eruptive desulfidation of pyrrhotite in the pumice of the Saku-rajima 1914?15 eruption: Implication for potential magma ascent rate meter, J. Miner. Petrol. Sci., 107, 206-211.

道林克禎(2012), かんらん石ファブリック:上部マントルを探る手がかり, 岩石鉱物科学, 41, 267-274.

- Michibayashi, K. and H. Imoto (2012), Grain growth kinetics and the effect of crystallographic anisotropy on normal grain growth of quartz, Physics and Chemistry of Minerals, 39, 213-218.
- Michibayashi, K., Y. Kusafuka, T. Satsukawa, and S. Nasir (2012), Seismic properties of peridotite xenoliths as a clue to imaging the lithospheric mantle beneath NE Tasmania, Australia, Tectonophysics, 522-523, 218-223.
- 道林克禎・大原達也(2012),海洋地殻-マントル境界に発達した延性剪断帯と加水による軟化作用, 地球, no. 34, 136-141.
- Miwa, T. and A. Toramaru (2013), Conduit process in vulcanian eruptions at Sakurajima volcano, Japan: Inference from comparison of volcanic ash with pressure wave and seismic data, Bull. Volcano., 75, 685, DOI:10.1007/s00445-012-0685-y.
- 溝口一生・東郷徹宏・山下 太・福山英一・御子柴 正(2012),自然地震の断層すべりを模した既存 断層面上の限られた領域でおこる不安定すべりに関する大型二軸摩擦実験,日本地震学会講演 予稿集, P3−35.
- 武藤 潤・中村 悠・長濱裕幸・清水以知子・三浦 崇・荒川一郎(2012), ピンオンディスク摩擦試験 による石英非晶質化, 2012 日本地球惑星科学連合大会,幕張メッセ国際会議場.
- 武藤 潤・大園真子(2012)東日本太平洋沖地震後の余効変動解析に向けた東北日本弧レオロジー断 面,地質学雑誌 特集号(東北地方太平洋沖地震 –統合的理解に向けて-), 118, 323-333.
- 中谷 剣・武藤 潤・西川 治・長濱裕幸(2012), Pulverized Rock の微細構造:サンアンドレアス断 層と有馬高槻構造線, 2012 日本地球惑星科学連合大会,幕張メッセ国際会議場.
- 中谷 剣・武藤 潤・西川 治・長濱裕幸・大槻憲四郎 (2012), Pulverized rock の微細構造と粒径分 布:サンアンドレアス断層と有馬高槻構造線,日本地質学会大阪大会,大阪府立大学.
- Nakatani, T., J. Muto, O. Nishikawa, H. Nagahama, and K. Otsuki (2012), Microstructures and grain size distribution of pulverized fault rocks: Examples from San Andreas Fault and Arima-Takatsuki Tectonic Line, Tohoku University GCOE program Final symposium, Sendai, Japan.
- Nakamura, Y., J. Muto, H. Nagahama, I. Shimizu, T. Miura, and I. Arakawa (2012), Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces Geophys. Res. Lett., 39, L21303.
- 直井 誠・中谷正生・J. Philipp・堀内茂木・大槻憲四郎・T. Kgarume・G. Morema・S. Khambule・
   T. Masakale・宮川幸治・渡邉篤志・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 MO 級地震に関連
   する AE 活動,日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集,SSS028-07,2012 年 5 月,千葉.
- Naoi, M., M. Nakatan i, 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・J. Philipp・堀内茂木・大槻憲四郎・T. Kgarume・G. Morema・S. Khambule・
  T. Masakale・宮川幸治・渡邉篤志・森谷祐一・村上 理・矢部康男・川方裕則・吉光奈奈・T. Ward・R. Durrheim・小笠原宏 (2012),南アフリカ金鉱山における微小破壊 (-3.7≦Mw≦1.3)の規模別頻度分布と採掘発破前後の b 値の安定性,日本地震学会 2012 年度秋季大会,P1-50, 2012 年 10 月,北海道.
- Ohara, Y., M. Reagan, K. Fujikura, H. Watanabe, K. Michibayashi, T. Ishii, R. J. Stern, I. Pujana, F. Martinez, G. Girard, J. Ribeiro, M. Brounce, N. Komori, and M. Kino (2012), A serpentine-hosted ecosystem in the Southern Mariana Forearc, Proceeding of the National Academy of Science, 109, 2831-2835.
- Ohzono, M., Y. Ohta, T. Iinuma, S. Miura, and J. Muto (2012), Geodetic evidence of viscoelastic relaxation after the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake. Earth Planets Space, 64 759-764.
- 大槻憲四郎(2012),断層帯の階層的フラクタル幾可の普遍則:地震の多様を支配する鍵,日本地質 学会大阪大会,大阪府立大学.
- Okumura, S., M. Nakamura, T. Nakano, K. Uesugi, and A. Tsuchiyama (2012), Experimental constraints on permeable gas transport in crystalline silicic magmas, Contrib. Mineral. Petrol., 164, 493-504.

- 奥村 聡・中村美千彦・上杉健太朗(2012), 放射光 X 線を用いた流動するマグマのその場観察:火山 噴火の多様性の原因解明へ向けて,放射光, 25, 222-228.
- Okumura, S., M. Nakamura, K. Uesugi, T. Nakano, T. Fujioka (2013), Coupled effect of magma degassing and rheology on silicic volcanism, Earth Planet. Sci. Lett., 362, 163-170.
- Saishu, H., A. Okamoto, and N. Tsuchiya (2012), Mineralogical variation of silica induced by Al and Na in hydrothermal solutions, American Mineralogist, 97, 2060-2063.
- Saito, T., K. Ujiie, A. Tsutsumi, J. Kameda, and B. Shibazaki (2013), Geological and frictional aspects of very-low-frequency earthquakes in an accretionary prism, Geophys. Res. Lett., doi: 10.1002/grl.50175.
- Shigematsu, N., K. Fujimoto, N. Tanaka, N. Furuya, H. Mori, and S. Wallis (2012), Internal structure of the Median Tectonic Line fault zone, SW Japan, revealed by borehole analysis, Tectonophysics, 532-535, 103-118.
- Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, M. Kinoshita, K. Nakahigashi,M. Shinohara, and Y. Fukao (2012), Tsunamigenic potential of the shallow subduction plateboundary inferred from slow seismic slip, Nature Geoscience, doi:10.1038/NGE01466.
- 鈴木由希・安田 敦・外西奈津美・金子隆之・中田節也・藤井敏嗣(2012),霧島山新燃岳 2011 年噴 火における深部マグマ供給と浅部マグマ再移動-斑晶メルト包有物と相平衡実験からの制約-, 火山学会秋季大会,68,御代田.
- 鈴木由希・安田 敦・外西奈津美・金子隆之・中田節也・藤井敏嗣・平林順一(2012),霧島山新燃岳 2011 年噴火の岩石学 3-低温端成分マグマの相平衡実験-,JGUM2012,SVC50-08.
- 高橋美紀・東 修平・上原真一・井上厚行・金川久一(2012),南海トラフ付加体中の半遠洋性および タービダイト性泥岩の水理特性・強度・摩擦特性の違いについて,日本地球惑星科学連合 2012 年大会,SSS29-P12.
- Takahashi, M., S. Azuma, S. Uehara, K. Kanagawa, and A. Inoue (2013), Contrasting hydrological and mechanical properties of clayey and silty muds cored from the shallow Nankai Trough accretionary prism, Tectonophysics, doi:doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.008, in press.
- 高橋美紀・東 修平・上原真一・金川久一・井上厚行(2012),南海トラフ付加体浅部泥質堆積物の摩 擦特性,日本地質学会第119年学術大会,大阪府立大学,T5-0-4.
- Tanikawa, W., H. Mukoyoshi, O. Tadai, T. Hirose, A. Tsutsumi, and W. Lin (2012), Velocity dependence of shear-induced permeability associated with frictional behavior in fault zones of the Nankai subduction zone, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2011JB008956.
- Toramaru, A. and M. Kazuki (2013), Mass and style of eruptions in experimental geysers, J. Volcano. Geotherm. Res., 257, 227–239.
- 寅丸敦志(2012),マグマだまりにおける過飽和度揺らぎによって支配される噴出量・噴火様式・噴 火様式推移のモデル,日本地球惑星科学連合 2012 年大会.
- 和田純一・金川久一・中谷正生・望月裕峰・廣瀬丈洋・安東淳一・古川 登・井上厚行 (2012), 粉砕 によるドレライトの非晶質化とその摩擦特性に対する影響,日本地球惑星科学連合 2012 年大 会,SSS29-P21.

- 和田純一・野田博之・岡崎啓史・安東淳一・金川久一・井上厚行・廣瀬丈洋・片山郁夫(2012),ド レライトガウジの非晶質化と摩擦特性に対する影響,日本地質学会第119年学術大会,大阪府 立大学,R12-P-2.
- Yamashita, F., E. Fukuyama, K. Mizoguchi, and T. Togo (2012), Influences of wear material, fault roughness and loading rate on stick-slip behavior revealed by large-scale biaxial friction experiments, EOS(AGU Fall Meeting), S21B-2500.
- 山下 太・福山英一・溝口一生・東郷徹宏・御子柴 正(2012), 大型二軸摩擦実験中に発生したスティックスリップイベントの特徴,日本地震学会講演予稿集,P3-34.
- 吉光奈奈・川方裕則・高橋直樹(2012),広帯域連続集録から得られた AE のコーナー周波数と地震モ ーメントの関係(2),日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集,SSS028-06,2012 年 5 月,千 葉.
- Yoshimitsu, N., H. Kawakata, A. Yamamoto, H. Ogasawara, and Y. Iio (2012), Temporal changes in attenuation of S waves through a fault zone in a South African gold mine, Geophys. J. Inter., 191, 3, 1317-1324.
- Yoshimura, S and M. Nakamura, 2013. Flux of volcanic CO2 emission estimated from melt inclusions and fluid transport modelling, Earth Planet. Sci. Lett., 361, 497-503.



2011/01/26-27

図1. 青矢印は3回の準プリニー式噴火の噴煙高度の高い期間を示す。1回目と3回目については、 噴煙高度の成長前に爆発に伴う地震活動が見ら、噴火中も地震と空振の相関がよくない。一方、2回

目の準プリニー式噴火については、直前の爆発活動は見られず、一定のエネルギー比で地震と空振を 発生しながら発達している。

#### 3 新たな観測技術の開発

「新たな観測技術の開発」計画推進部会長 田所敬一 (名古屋大学大学院環境学研究科)

「新たな観測技術の開発」研究では、地震・火山予知研究の推進のために、これまでと らえることが困難、または不可能であった地震及び火山噴火現象を見るための「道具」を 開発することを目指している。観測・実験技術の開発研究は、地震や火山噴火の現象解明 の研究や予測のための研究と共同で実施されることが多く、この部会と関連の深いもので あっても、他の研究計画の中で実施されている技術開発は別に報告されている。ここでは、 他部会で報告されない研究課題の成果を中心にまとめる。

### (1) 海底における観測技術の開発と高度化

日本列島は海に囲まれており、プレートの沈み込みに伴う巨大地震は海域で発生する。 また、プレートの沈み込みに伴い、伊豆諸島をはじめ多くの島嶼部にも活動的な火山が存 在する。そのため、既に高密度・高精度な観測が行われている陸域の観測網に近い品質(観 測精度と時空間分解能)で、海域においてもデータを取得する必要がある。つまり、陸域 と同様に地殻変動の低周波数から地震動の高周波数までの広い周波数帯域で、高ダイナミ ックレンジの観測を高密度かつ高い時間分解能で実施する必要がある。特に、巨大地震発 生の予測を目指した研究を行うためには、日本周辺のプレート境界における地震活動及び その固着状態を準リアルタイムで知ることが重要であり、そのためには、海域における地 震活動及び地殻変動の実時間観測が不可欠である。上記のような研究上の需要があるにも かかわらず、海域の観測に必要な測器は、陸上の測器のように商業ベースでは開発されて いない。地震及び火山噴火予知研究の推進のためには、海域での観測機器の開発から始め る必要がある。

#### ア. 海底地殻変動観測技術

海底に設置した機器間での音響測距によって距離の伸縮を捉える観測方式(いわゆる海底-海底間測距方式)の開発について、従来は水深 2000~3000mの海底で 2km 程度までの 距離を測定することは可能であったところ、日本海溝等での観測を可能にするため、水深 6000mの海底で 3000mの距離が測定できる大深度・長基線対応型の海底間音響測距装置の

開発と動作試験を行った(東北大学 [課題番号:1222])。耐圧容器は 9000m 用を用いる こととした。測距信号は長距離で波形歪の少ないステップスイープに改め、ミラー応答の 増幅率のバグを修正するとともに、返信を自動認識しなくても波形を収録する方式とした。 動作試験は、2013 年 2 月 11 日~21 日にかけての「かいれい」による航海(KR13-04)で 実施した。2台の音響測距装置を水深 6000m の海域に基線長 3000m で設置した。自由落 下によって海底に設置された装置を海洋研究開発機構の遠隔操作無人探査機「かいこう」 で位置を調整し、目標地点に設置した。動作試験の後には、音響測距装置をアンカから切 り離し、回収を行った。今回は短期間での動作試験であったが、2013 年 5 月からは半年~ 1年の連続観測を実施する予定である。

海底圧力計については、東北地方太平洋沖地震で大きなすべりがあった海溝軸付近 (JFAST 掘削孔近傍)の水深 6900m の海底で試験観測を行った(東北大学「課題番号:

1222〕)。試験観測の結果、大深度用にセンサーのフルスケールを大きくするとドリフト も大きくなることが判明し、この対策・補正が今後の課題である。

GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測システムの高度化について、海中音速構造 の不均質性を把握するため、複数のブイに水温水圧計を係留する実験を行った(名古屋大 学[課題番号:1706])。2012年11月9日に駿河湾北西部にて2台のブイに各5つの水温計 を水深50m、100m、200m、300m、400mに取り付け、数時間にわたって各層の水温の連続測 定を行った。図1はその結果である。2台のブイ直下における水温の時系列を比較すると、 同じような水温の変化パターンが、約30分~1時間の時間遅れを伴って検出されており、 小規模な水塊の移動に伴うと思われる水温の変化を捉えることに成功した。

機動的な海底地殻変動観測の実現のための開発として、海底絶対圧センサーによる機動 的な海底地震・圧力同時観測の技術開発と、海底での傾斜観測を機動的観測として実現す るための先端的技術開発を引き続き実施した(東大地震研[課題番号:1431])。前者に ついては、近年開発したOBS 専用高機能レコーダーと連携して動作可能な高精度圧力計レ コーダーを完成させると共に、広帯域海底地震計(BBOBS)と圧力計を併せもったシステ ム(BBOBS+AGP)を紀伊水道沖・東北沖・ニュージーランド北東沿岸に展開し実用的観測 に供した。後者については、レーザー光源の小型傾斜計を地震研究所内で共同開発しつつ あり、オフラインの機動観測に適合する改良を継続し検討している。それに加え、課題番 号1432 にある次世代型広帯域海底地震計(BBOBS-NX)の広帯域地震センサーのマスポジ ション出力から傾斜変動を検出するシステム(BBOBST-NX)について、昨年に引き続き海域

での実地試験を行った。2012年11月に海洋開発研究機構の無人潜水艇「かいこう7000II」

を利用して設置、2013年2月に回収した(図2)。今回の観測期間は約77日と短かったが、 海底面直下での傾斜変動観測の可能性を評価するのに足りると思われるデータが得られた。

## イ. 海底地震観測技術

次世代の機動的海底地震観測に向けた観測技術の高度化のため、(a) 水深6000m 以深の 超深海域での海底観測技術開発、(b)海底強震観測の高度化、(c)海底広帯域地震観測の 高度化を実施した(東大地震研 [課題番号:1432])。(a)については、過去の試験的観測 での結果を考慮して根本的に構造を変え、耐圧性能を安定的に確保しやすい新方式の超深 海用海底地震計(NUDOBS)のプロトタイプ(図3)を開発し、2012年11月に試験観測を開始 し、2013年2月に無事回収した。地震観測の機能も問題なかった。また、昨年度から開発を 行っているガラス球1個を用いた超深海型海底地震計(UOBS)については、現在広く用い られている海底地震計と機構および外寸・重量の互換性を維持した上でシステム各部およ び全体構成の検討を行い、水深6000mを超える超深海底に設置可能な実器の製作を行った。 5月に6500mを超える海底に、つづいて8月に7500mを超える日本海溝域に自由落下で設置し、 自己浮上により回収し、データ取得に成功した。(b)については、前年度に陸上で試験観測 を実施した水晶発振式加速度計3式を用いて、3成分一体型加速度計への成型を行った。さ らにこれを海中重力システムに組み込むことで、自律航行型潜水艇を用いた海中での観測 データを取得し、3成分型の評価を行った。 (c)については、既設のBBOBS-NXのセンサー部 を海底から引き抜くのに要する力を2例実測した。また、無人潜水艇を用いないで運用する 方式を開発する基礎データを得ることを目的とした試験観測(11月に設置、2013年2月に回 収)を実施し、無事データを得ると共にこの際にも引き抜き力を測定した (Shiobara et al., 2012)

## ウ. 海底実時間システム

相模湾初島沖観測ステーション、海底地震観測総合システム、豊橋沖ケーブル先端に接続した海底観測ステーションの運用を継続し、平成24年12月7日に発生した三陸沖を震源とするM7.3の地震による微小津波を釧路・十勝沖の海底地震観測総合システムの水圧式津波計で観測することができた。波高に換算すると1cm以下の微小津波であるが、高精度の観測

が実施できた(海洋研究開発機構 [課題番号:4005])。DONETについては、そのデータ

を用いた緊急地震速報や津波警報の高度化に資する即時解析研究や、プレート境界浅部での低周波微動やゆっくり滑りをはじめとする南海トラフ地震発生帯研究を実施した。また、 DONET2について、事前調査航海として、和歌山県西方沖の音響測深機による海底地形調査、 曳航体による海底ケーブル敷設予定ルートのルートサーベイ、及び観測機器設置予定点に おいてピストンコアによる採泥調査を実施した。これらの調査結果から、海底ケーブル敷 設ルートと観測点構築位置の決定を行った。なお、陸上局設置予定地では海底ケーブルの 陸揚げに関する工事を実施している(海洋研究開発機構[課題番号:4005])。

次世代ケーブル式海底観測システムによる海底地震観測については、粟島南東海域にお いてこれを継続して実施した(東大地震研 [課題番号:1433])。設置から2年半が経過 するが、その間大きなトラブルもなく、順調に稼働している。また、ケーブル陸揚げ地点 において、ダイバーによる海岸から水深20mまでの浅海部ケーブル敷設状況の調査を行い、 ケーブルは設置時から移動していないことがわかった。第3世代ケーブル式海底観測システ ムの開発として、高精度水圧計またはPower over Ethernet (PoE)による外部拡張ポート を観測ノードに実装するための内部ユニットの検討・設計を行った(図4)。地震計は、粟 島システムと同一機種を採用し、精密水圧計を筐体部に収容することとした。エレクトロ ニクス部は、GigaBit Ethernet、WDM、IEE1588 などの最新技術を導入した(図4)。現在、 PoE外部ポートのための水中脱着コネクタの実装方法を検討中である。

#### (2) 宇宙測地技術等の利用の高度化

GPS や衛星搭載合成開口レーダー(SAR)等の人工衛星を利用した観測技術は、地震及び 火山活動の観測手段として重要な役割を果たしてきており、その解析技術の一層の高度化 を図ることにより、様々な地震や火山活動をより高い精度で把握することが可能となる。 その他の衛星や航空機を利用したリモートセンシング技術の高度化を含めて、以下のよう な研究を進めた。

#### ア. 宇宙測地技術

リアルタイムGPS 時系列を用いた地震時変位の自動検知及び地震時変位量推定アルゴリ ズム(RAPiD: Real-time Automatic detection method for Permanent Displacement, Ohta et al., 2012) について、隣り合う観測点でのイベント検知情報を共有することで地震時 変位の誤検知を低減するアルゴリズム(隣接観測点連携アルゴリズム)を2011 年東北地方 太平洋沖地震時のデータに適用し、その性能評価を行った(小林ほか,2012 ; 東北大学[課 題番号:1218])。いまだ改善の余地はあるが、隣接観測点連携アルゴリズムを2011年東 北地方太平洋沖地震に適用することによって、RTK-GPS のみで地震発生から60 秒に「地震 発生」と判定できることが示された。隣接観測点連携アルゴリズムは、国土地理院におい て試験運用が進められているリアルタイムGPS 解析システム(プロトタイプ)に実装され ている。このように、大学発の研究成果が現業部門に実装されていることは、本研究計画 の特筆すべき成果として評価できる。また、リアルタイムGPS 時系列を用いて地殻/地盤変 動監視を行う場合、ユーザ側で時系列を表示する必要がある。そこでwebサーバ上の可視化 ツールの開発を開始した(図5;東北大学[課題番号:1218])。現段階では任意の観測点 の過去1分から1時間の間の時系列データをGUI によって描画可能である。現在は静止画の みであるが、将来的にはリアルタイムで時系列が描画されるシステムを構築する予定であ る。

GEONETによる地殻変動監視において、小スケールの大気擾乱による測位誤差のため地殻 変動を速やかに把握できない場合があり、このような大気擾乱の影響を評価するための手 法を構築した(国土地理院[課題番号:6017])。高分解能数値気象モデルを用いて大気 擾乱による測位誤差を推定し、次に、大気擾乱による影響が地域的に認められる全国30地 区を対象とし、GEONET解析結果に対し、この手法で得られる測位誤差の推定値の再現性を 特徴的な気象条件ごとに分類して調査を行った。その結果、地区ごとに特定の気象条件に おいて再現性が高いことが分かった。この手法により、地殻変動監視において大気擾乱の 影響を判断することが可能である。ただし、地区によっては、ある特定の気象条件下にお いて推定される測位誤差の再現性が十分ではなく、このような場合において測位誤差の再 現性が高くなるように更に細かく条件を特定することが必要である。また、小スケールの 大気擾乱により大気遅延分布に異方性が生じている場合には測位誤差がより悪化する場合 があり、大気遅延分布の方位依存性を考慮した測位誤差軽減手法の検討が有効であると考 えられる。

SARによる地殻変動監視技術については、ピクセルオフセット解析と時系列解析を組み合わせることで崑崙山脈での氷河の移動にともなう大変形(最大年間500m)の検出に成功した(東大地震研[課題番号:1434])。このことにより、この方法は、地震や火山現象にともなう大変形の検出にも応用可能であることが示された。また、永続散乱体干渉手法を 越後平野およびその周辺の地盤変動計測に適用したところ、阿賀野川河口周辺や三条市周辺などで年間約5mmから1cmの速度で進行する沈降性の地盤変動の抽出に成功した。よって、 永続散乱体干渉手法は非イベント時の火山体変動等の微小な地殻変動の検出にも適用可能であると期待される(国土地理院[課題番号:6018])。東北地方太平洋沖地震に伴う東日本火山周辺の局所的な地殻変動の検出にSAR干渉解析を適用したところ、伸長軸に直交方向に長軸をもつ楕円形の干渉縞パターンが検出された。このような地殻変動は、火山下に低ヤング率の媒質を置いたモデリング結果と合致しており、東北地方太平洋沖地震によって、火山下に存在するやわらかい媒質に地震に伴う伸長変動が集中したことが示唆される(0zawa and Fujita, 2013;防災科学技術研究所[課題番号:3017])。

## イ.リモートセンシング

火山体等のアクセス困難な場所での諸観測に有効な無人ヘリ(図6)を用いた観測技術に ついては、空中磁気測量や地震計モジュールおよびGPSモジュールの遠隔設置・回収試験、 火山ガスの回収試験を実施した(東大地震研[課題番号:1435])。使用した無人ヘリは、 ペイロードが約10kgまでとの制限はあるものの、waypoint上を位置精度約20cmで自律飛行 でき、5kmの範囲内を昼夜問わず飛行可能で、さらに、飛行中にデータ伝送可能も可能であ るとのメリットが多い。新燃岳で実施した空中磁気測量によると、磁化強度分布から新燃 岳の北西にマグマの通り道の熱消磁による弱磁化領域が検出され、また、半年間の全磁力 変化から火口内の冷却により磁化を獲得した様子が観測された。地震計モジュールおよび GPSモジュールの遠隔設置・回収、および火山ガスの回収試験は桜島にて実施された。

衛星赤外画像を利用した火山研究については、現在の衛星の問題点と新衛星の活用について議論がなされた(東大地震研[課題番号:1436])。MODISやMTSATといった現在の衛星では、空間分解能が1km程度と低いため、活動の活発さや噴火の有無は把握ができるが、詳細な活動状況については把握が困難である。そこで、2015年に打ち上げられるGCOM-C衛星を用いることで、噴火の拡大、噴出物の拡大推移、火砕流の発生状況の様子がより詳細

に把握できるものと期待される。また、時間軸を同じくして守備範囲の異なる複数の衛星 で取得された画像の解析結果を並べた parallel time line chart を利用することにより、 活動パターンの類型化を行い、そのパターンから噴火推移の予測が可能であることが示さ れた。

初期値としてレーダーによる噴煙エコー解析結果を導入し、さらに改修した局地版移流 拡散モデルによる予測を行うことで、降灰予測や最大粒径予測の高度化に成功した(気象 庁[課題番号:7022])。

#### (3) 観測技術の継続的高度化

地震及び火山観測においては、地下の状態を把握する新たな観測技術を開発して、研究 の推進に役立てることと同時に、従来の観測手法の継続的な高度化も必要である。特に、 これまで電源や通信事情が悪くて観測ができなかった、山間地・離島・火口近傍等の場所 でデータを効率よく取得する技術の開発も必要である。このような課題に対して、以下の ような研究を進めた。

### ア.地下状態モニタリング技術

宇宙線を利用した地下状態監視技術について、今年度はミューオン透視装置を4層型から 7層型カロリメータ方式に改良した(東大地震研[課題番号:1438])。併せて、宇宙線ミ ューオンスペクトルの高エネルギー成分だけを用いる自動解析アルゴリズムも開発した。 観測日数および誤差を低減するために、透過装置の面積を大きくするのではなく層数を増 やすことで、コストは大幅に削減できる。この7層式検出器を用いて、2012年10月から2か 月間にわたり有珠山の観測を行ったところ、厚さ1500mまでの山体において密度構造を精 度良く求めることができた(図7)。すなわち、有珠新山の隆起、およびその地域での断層 形成につながる貫入マグマをイメージングできた。また、透視限界が従来の2層式では400m 程度、4層式でも800m だったものが、今回改良した新型検出器(7層式+新解析アルゴリズ ム)で1500mまで延伸できたことから、活動的火山への応用が広がった。

精密制御信号システム(アクロス)については、桜島に設置した震源の稼動を開始した (名古屋大学[課題番号:1707])。連続運転は2012年6月から開始し、90%以上の稼働率 で連続して運転を続けている。懸念された火山灰の震源装置への影響や、軟らかい地盤の 伝達関数への影響は今のところ問題となっていない。桜島島内の地震観測点および島外の Hi-net観測点等の地震記録を解析し、7日間のスタッキングで約20 km 離れた島外の観測点 でもアクロス信号を検出できることを確認した(図8)。散乱を捉えていると思われる紡錘 形の伝達関数波形が観測されており、今後の桜島火山における地殻内不均質やその時間変 化の検出が期待される。

## イ. 地震活動や噴火活動の活発な地域における観測技術

小型絶対重力計については、プロトタイプの性能評価を継続するととともに、実用機の 製作および試験を実施した(東大地震研[課題番号:1439])。プロトタイプの性能評価 は、国立天文台江刺地球潮汐観測施設(岩手県奥州市)において実施した。その結果、5µgal 程度以内の系統誤差で測定可能なことが示された。また、東北地方太平洋沖地震時に重力 が低下し、その後に回復するような観測値が得られた(図9)。この重力変動の原因は不明 であるが、計測誤差を越える変化があったことは確かである。製作が遅れていた小型絶対 重力計が完成した。干渉計入射部分のユニット化と光ファイバーコネクタ接続、および落 下装置の小型化により市販の絶対重力計の約半分の高さの装置となった。試験観測の結果、 図10のように理論潮汐と整合的なデータが得られ、観測精度は従来の試作絶対重力計と同 等と推測された。

GPS 火山変動リモート観測装置(REGMOS) については、地磁気全磁力データの安定取得の ために、プリアンプの保温やセンサー設置方法を改善し、地磁気全磁力データの安定取得 のための改善を行うとともに、これを富士山の GPS 火山変動リモート観測装置に導入した (国土地理院[課題番号:6019])。

## ウ. 大深度ボアホール計測技術

大深度ボアホールの高温環境下で使用できるレーザー干渉式広帯域地震計の開発・試験 を継続した(東大地震研[課題番号:1440])。高温用真空容器におさめて高温試験を行っ たところ、STS-1と同等のノイズレベルかつより広い帯域が得られ、また、290℃まで使用 可能であることが確認できた。また、地震計の振り子部分を250℃程度までの高温環境に 耐える材料で作製し、約10cm立方のサイズにおさめるさらに小型化をはかった(図11)。 この小型実証機については、広帯域地震計として動作することを確認した。

# 参考文献

- Shiobara, H., T. Kanazawa and T. Isse, New Step for Broadband Seismic Observation on the Sea Floor: BBOBS-NX, IEEE-JOE, doi: 10.1109/JOE.2012.2222792, 2012.
- Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono, N. Umino, Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki Earthquake (Mw 9.0), J. Geophys. Res., doi:10.1029/2011JB008750, 2012.
- 小林竜也,太田雄策,三浦哲,日野亮太,藤本博己,出町知嗣,立花憲司,隣接観測点の 情報を用いたRTK-GPS による地震時永久変位自動検知アルゴリズムの改良,測地学会 誌,58(2),77-87,2012.
- Ozawa, T., and E. Fujita, 2013, Local deformations around volcanoes associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2011JB009129.



#### TIME on 2012/11/09

図 1. 2つの海上局ブイに取り付けた水温計で測定した水深の異なる海中水温の時間変化 (名古屋大学 [課題番号:1706])緑線と青線はぞれぞれ2台のブイを示す.



図 2. 試験観測を実施した BBOBST-NX の海底での様子(東大地震研[課題番号:1431])。 2012 年 11 月に「かいこう 7000II」で展開・設置、2013 年 2 月に回収した。この観測で は課題番号 1432 での BBOBS-NX の機能高度化に関する基礎的試験も兼ねていた。そのため、 オレンジ色のチタン球耐圧容器であり記録部を、センサー部の上方へ設置するために、そ の中央部に台座(塩ビパイプ製)を置いてから記録部を載せている。



図3. 新方式の超深海用海底地震計(NUDOBS)のプロトタイプ(東大地震研[課題番号: 1432])。



図4. 第3世代ケーブル式海底観測システムにおける内部エレクトロニクスの配置設計図 (東大地震研[課題番号:1433])。



図5. リアルタイムGPS データ可視化の例。web ブラウザ上で確認ができる(東北大学[課 題番号:1218])。



図6. 無人ヘリの機体と基地局(東大地震研 [課題番号:1435])。



図7. 有珠山における宇宙線を利用した密度構造推定結果(東大地震研[課題番号:1438])。



図8. 桜島火山周辺で観測されたアクロスの伝達関数波形(名古屋大学[課題番号:1707])。



図9. プロトタイプの性能試験で得られた東北地方太平洋沖地震前後の重力変化(東大地 震研[課題番号:1439])。



図10. 小型絶対重力計で測定された地球潮汐(青色)。赤線と茶色はそれぞれ理論潮汐お よび地面振動を示す(東大地震研[課題番号:1439])。



図11. レーザー干渉式広帯域地震計の小型実証機(東大地震研[課題番号:1440])。

## 5. 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進

超巨大地震計画推進部会長 谷岡勇市郎

平成21年度から始まった「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」では、平成23年に 発生した東北地方太平洋沖地震のようなM9クラスの超巨大地震の発生予測の観測研究の推進 が十分ではなかった.そのため観測研究計画が見直され、平成24年度から新たに、超巨大地震 の発生機構とそれに起因する現象を解明する観測研究、及び超巨大地震やそれに起因する現象を 予測するための観測研究、さらにはこれらの解明と予測のための観測研究に必要な新技術の開発 を行う研究が実施されることとなった.本報告では平成24年度の成果を概観する.

#### (1) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明のための観測研究

# ア. 超巨大地震の発生サイクルの解明

発生間隔の長い超巨大地震の発生サイクルを理解するためには、まず、地形変動的、古地震学 的、地質学的手法から得られたデータを地球物理学的に解析する必要がある.

北海道太平洋沿岸の釧路市周辺における津波堆積物調査を実施した.釧路市鶴野の湿地(海岸 線から1.5~2km付近)に少なくとも2層の津波砂層(TS1およびTS2)が存在することが分かった. TS1は樽前b火山灰(T西暦1667年)の下位数cmに,TS2は白頭山苫小牧火山灰(約1000年前)の 上位数cm~10cmの位置に存在する. TS1およびTS2はいずれも海岸から2120m地点(標高5.9m) まで識別できた.昨年度までに調査した浦幌,キナシベツ,音別,厚岸,根室では,いずれも同 時期に2層の津波堆積物が存在する. 釧路市鶴野で記載したTS1およびTS2も, この2層にそれぞ れ対比され、広範囲の巨大津波が発生していたと思われる(北海道大学[課題番号:1002]). こ れまで,北海道太平洋沖で発生した地震による17世紀の巨大津波を説明する断層モデルは十勝沖 と根室沖の連動型のプレート境界型地震(Mw8.5)と考えられてきた.今年度,最新の津波堆積物 調査結果を含む北海道太平洋沿岸の11地域での津波到達範囲・地点をデータとし、それらを全て 説明できる断層モデルを推定した.その結果, 今までの断層モデルに加えて, 海溝近傍のプレー ト境界浅部の幅30kmの断層で、25mにも及ぶ滑りが生じていたことが明らかになった(図1). 17世紀の巨大地震の地震モーメントは1.7×10<sup>22</sup>Nm (Mw8.8)と推定された.このことは、2011年 東北地方太平洋沖地震と同様に,17世紀の巨大地震により北海道太平洋沖の海溝近傍浅部におい てプレート境界が非常に大きくすべったことを示す重要な研究成果である(北海道大学I課題番 号:1002]).

津波堆積物の変質・保存過程を明らかにするため、青森県三沢海岸に分布する2011年東北地方 太平洋沖地震による津波堆積物について、津波発生後1年の時点での層相、層厚、堆積物分布、 被覆層の有無を調べた.その結果、津波発生から1年経過した時点で、津波堆積物の分布域は、 実際の堆積域・津波浸水域より狭くなっており、「古津波堆積物」の分布域を津波の浸水域と考 えると、津波の規模を過小評価する可能性があることが分かった(図2)(北海道大学[課題番号: 1002]). 日本海溝沿いでは津波堆積物の検出のため沿岸低地において,ボーリングやジオスライサーに よる地層のコア採取を行うとともに,仙台湾では海底表層の地層のコア採取を実施した.また, 房総半島南部沿岸において,地殻変動の解析を目的とした航空レーザー計測による地形データを 取得した.南海トラフ沿いでは,津波堆積物と地殻変動の検出を目的としたボーリング及びジオ スライサー調査を静岡県沿岸から和歌山県沿岸にかけて実施した.さらに,和歌山県串本町では 地上レーザー計測を用いて津波石の分布を正確に把握した(産業技術研究所[課題番号:5006]).

南海トラフ沿いの超巨大地震の発生履歴を明らかにするために,名古屋大学が所蔵する高木家 文書(西高木家)のうち「御用日記」で安政東南海・南海地震に関する日記の修復を行った.現 在翻刻中であるが,蓬左文庫にある高木家文書(東高木家)よりも安政東海・南海地震について の記載が多いことがわかった.また,徳川林政史研究所の調査を行いデータベース化した.高知 県神社明細帳によると,宇佐地域の神社の多くが宝永地震の津波で流されているが,安政地震に 関する記載は全く出て来ないなど,高知県では安政地震の津波被害の記載が全体的に少ないこと がわかった.一方,和歌山県では安政でも宝永でも同程度の被害が生じていたことが示された(名 古屋大学[課題番号:1709]).

## イ. 超巨大地震の発生とその前後の過程の解明

ここでは、2011年東北地方太平洋沖地震に先行した地震活動や地殻変動の特徴を調査し、超 巨大地震発生の準備過程を理解するとともに、地震発生後の海域での観測等による地震時大滑り の実体の解明や地震後の地震活動や地殻変動とそれに伴う応力の再配分に関する観測研究を実 施した.

東北地方太平洋沖地震の余震の震源位置を正確に決定することは、本震の震源断層の位置、形 状を正確に捉えるために必要である.また、余震活動の時空間変化を調べることで、本震の破壊 様式や今後の余震活動の推移を推定するための重要な情報となる.そのために、海域の震源域直 上に自己浮上式海底地震計を多数設置し、余震分布を高精度に決定した.その結果、深さ方向の 誤差が3km以下、水平方向の誤差が5km以内の1210個の余震の震源を決定することができた

(図3).海底地震計観測網で決められた余震分布に基づくと,海溝から日本列島に向かって, 震源の深さは全体的に深くなる.しかしながら,プレート境界以外にも,陸側プレート内に活発 な活動が見られる.深さ約25kmよりも深いプレート境界付近で発生している余震は,海洋プレ ートの沈み込みを示す逆断層型の発震機構解を呈する地震が多いが,陸側プレート内の地震は, 正断層型または横ずれ型の発震機構解を持つ地震が卓越する.また,本震時に大きな滑りが推定 されている本震の初期破壊開始点付近では,余震活動が低調である.海溝軸付近においても,地 震活動は低調であるが,巨大津波の発生域であると推定されている宮城県はるか沖の海溝軸付近 には,海洋プレート内で余震が発生している.また,海溝より海側では,正断層型の地震が多数 発生していることが,海底観測より明らかとなった.陸側プレート内の余震活動が,本震発生以 前に比べ,活発になったことと比べ,陸側斜面下の海洋プレート内の活動度は,それほど変化し ていないように見える.沈み込む海洋プレートは,深さ25km付近で沈み込み角が大きくなるが, 余震域の端がこの折れ曲がり点とほぼ一致している.折れ曲がり点より深いプレート境界では, 余震が多く発生していることもわかる.プレート境界付近の余震発生域の南限は,本震時の滑り 域と概ね一致しており,本震の破壊がこの付近で停止したことが考えられる(東京大学地震研究 所[課題番号:1443]).

CMT解を用いて東北地方太平洋沖地震前後の上盤プレート内の応力場を推定した(図4).地 震前は、σ<sub>1</sub>軸の方位が地震時の大滑り域に集中するような分布を示し、一方、地震後は、σ<sub>3</sub>軸 の方位が地震時の大滑り域に向かう特徴を示した.このことは、地震時の大滑り域が地震前に固 着していたこと、地震時の滑りにより蓄積されていた応力がほぼ解放されたことを示唆する.こ れは、地震前の応力が地震時に解放された静的応力変化よりも小さい(<5~25MPa)ことを意 味し、高い間隙流体圧等がその要因として考えられる(東北大学[課題番号:1219]).

また,東北地方太平洋沖地震の発生直前のプレート境界面上の固着状況を明らかにするために, 海上保安庁水路部による海底地殻変動観測データを解析した.周辺に発生したM7前後の地震と その余効変動の影響を考慮すると,宮城沖1・2の観測点付近において,本震発生の数年前以降に おいては,ほぼ100%の滑り欠損レートが推定された.ただし,海溝付近における滑り欠損レー トについては,より海溝付近の海底地殻変動観測データを解析する必要があるため,今後の検討 が欠かせない.さらに,地震時滑りが起きた領域の下端付近におけるプレート境界断層の強度を 推定した.F-netによる余震のメカニズム解のP軸は,宮城県沖の地震滑り域の下端付近において, 上盤側では鉛直方向を向くのに対して,下盤側ではプレート境界に平行な分布を示す.また,よ り深部においては,P軸はプレート境界断層の滑りに調和的な方向となる.このようなP軸の空 間分布を説明するためには,余効滑りが起こった領域において,断層の強度が10MPa程度以上必 要であることが示された.また,本震の動的破壊過程に関して,thermal pressurizationが重要な役 割を果たしている可能性も指摘した(京都大学防災研究所[課題番号:1815]).

約30年間にわたる小繰り返し地震データを用いて,東北地方太平洋沖地震発生前後の小繰り返 し地震の活動度の変化と,プレート境界の非地震性滑りの時空間分布を推定した.太平洋プレー ト上面の小繰り返し地震グループの活動に注目してみると,地震時に大きく滑った領域では,小 繰り返し地震が地震後にほとんど起きていないことが明らかとなった(図5a).この結果は,繰 り返し地震と判定するコヒーレンスの基準を下げても変わらず(図5b),媒質や震源過程の変化 で波形の相似性が悪化したため,繰り返し地震と判定できなくなったわけではないことが確かめ られた.このような小繰り返し地震の活動停止の原因の1つとして,東北地方太平洋沖地震の滑 り域での応力解放が考えられる.一方,地震時の大滑り域の周辺では,活発な小繰り返し地震の 活動が見られ,プレート境界面上で進行する余効滑りによる影響と考えられる(東北大学[課題番 号:1219]).

さらに非地震性滑りに着目して、プレート境界を東北地方太平洋沖地震時の大滑り域(図6で 赤線)、その隣接領域あるいは最大余震の隣接領域(図6で青色)、さらに地震時滑り域から見 て遠方(図6で緑色)、に分けてみると、それぞれ特徴的な滑りのパターンが見られた.地震前 には、地震時大滑り域では、比較的頻繁にエピソディックな滑りが見られた.一方、その周囲で は、比較的滑りレートが大きく、定常的な滑り、あるいは数年~10年にわたる大地震の余効滑り が見られた.また、いくつかの領域では2008年ころから滑りの加速が見られた(図6中破線楕円) (東北大学[課題研究:1220]).

東北地方太平洋沖地震の最大前震である2011年3月9日に発生した三陸沖の地震(Mw7.2)の地 震時滑りとそれに引き続く余効滑り分布を,陸域GPSデータおよび海底水圧計データにもとづい て推定した.その結果,地震時滑り域の浅部延長の南東部で余効滑りが発生していたことが明ら かになった.地震時の最大滑り量は1.7m,地震後余効滑りの最大滑り量は約0.4mであり,余効滑 りによって解放されたモーメントはおよそMw 6.8と推定された.前震の地震時とその余効滑り の分布は相補的であり,更にその後に発生した東北地方太平洋沖地震で周辺と比較して滑り量が 少ない領域に前震およびその余効変動の滑り分布は位置する(図7)(東北大学[課題研究:1220]).

2011年の最大前震や1989年や1992年の三陸沖地震の余効変動を比較するために,滑り速度・状態依存摩擦構成則に基づく対数関数を余効変動時系列に当てはめ,余効変動の時定数を抽出した. 1989年,1992年の地震では東北大学宮古観測点の石英伸縮計のデータを,2011年の地震では金華山観測点の体積ひずみ計のデータをそれぞれ用いた.その結果,いずれの場合でも抽出された時定数は数時間程度(1~5時間)と極めて短いことが分かった(図8).こうした短い時定数は定性的には滑り速度・状態依存摩擦構成則における摩擦パラメータ(a-b)\*のが小さいことで説明が可能であり,プレート境界面の摩擦特性を反映している可能性を示唆する(東北大学[課題研究: 1220]).

2003年十勝沖地震発生後や2011年東北地方太平洋沖地震前後の地球化学データ(大気中ラドン 濃度等)の変動を抽出するために,福島県立医科大学(福島市)で使用された解析法を用いて, 札幌医科大学(札幌市)の通気式電離箱のデータを解析した.その結果,大気中ラドン濃度に関 係する通気式電離箱での測定指示値は,2003年十勝沖地震発生直後の地殻変位と呼応して上昇し た.その後,通常の年変動に転じたが,2010年末にはラドン濃度は急激に増加し,東北地方太平 洋沖地震の本震後に低下した(東北大学[課題研究:1220]).

大地震に至る発生プロセスを理解するために,過去約10年間に日本列島内で発生したマグニチ ュード約5.0以上の本震に対して,その地震の発生前後の連続波形記録を収集した.収集した連 続波形記録を用いて,2007年3月25日に発生した能登半島地震(M6.9)の発生直前に見られた前 震活動について調べた.気象庁カタログによると,本震発生の約12分前に1個の前震活動(M2.2) が報告されている.この地震波形をテンプレートイベントに用いて,連続波形データに対して波 形相関処理を施した.その結果,本震発生直前の12分間に4個のイベントが検出された.これら の震源を再決定したところ,本震の初期破壊開始点の極近傍(数百m以内)で発生していた事が 明らかとなった(東京大学地震研究所[課題番号:1442].

陸域の連続GPSデータを解析することで、東北地方太平洋沖地震の余効滑り領域における摩擦 特性を推定した.GPSデータに時間依存インバージョン法を適用することによって、プレート境 界面上における地震後約7ヶ月間の積算余効滑り及び滑り速度の時空間変化を1日毎に推定した. 地震直後の余効滑り速度は最大で100 m/yrを超えており、これは東北地方太平洋沖地震により、 余効滑り領域に極めて大きな応力変化があったことを意味する.これに引き続いて,10 m/yrを 超える滑り速度が地震後約15日間続いた.摩擦パラメータ(a-b)\*σが時間的に一定な速度強化の 定常摩擦に従って余効滑りが進行する場合,剪断応力変化と滑り速度の対数は比例関係を示す. これまで,いくつかの大地震の余効滑りに対して,剪断応力変化と滑り速度の対数が線形関係を 示すことが確認されてきたが,東北地方太平洋沖地震の余効滑りでは,これらが非線形の関係を 示した(図9).この結果は,(a-b)\*σが滑り速度に依存して変化することを示す.即ち,(a-b)\*σ を滑り速度の関数として推定すると,滑り速度が大きくなるにつれて(a-b)\*σが小さくなり(図 9b),摩擦滑りの安定性が抑制されることが分かった.推定された滑り速度に依存する(a-b)\*σ を用いて,速度強化の定常摩擦に従う1自由度モデルを用いた余効滑りのシミュレーションを行 ったところ,インバージョンで推定された余効滑りの時間変化と,剪断応力変化と滑り速度の関 係が良く再現された(図9c-f).数値シミュレーション研究により,速度強化領域における正の (a-b)\*σの値が小さくなるほど,動的破壊が速度弱化領域から速度強化領域に伝播しやすくなり, その結果,破壊が速度強化領域を乗り越えて別の速度弱化領域に伝播する可能性が高まることが 分かっている.従って,速度強化領域における(a-b)\*σの滑り速度依存性は,地震時滑り域の空 間的な大きさを決める一つの要因と考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:1441]).

陸域のGPSデータに対して海域の地殻変動観測データを加えることで、東北地方太平洋沖地震 の余効滑り分布を推定した.解析対象とした期間は、2011年4月23日から12月10日までの約8ヶ月 である.各観測点における変位時系列データに対し、プレート運動による変位を差し引いてオホ ーツクプレート固定の変位場とし、さらに期間中に発生した規模の大きな地震及び粘性緩和によ る変位を除去する操作を行い、プレート境界面上の滑りの時空間発展を求めた.推定された余効 滑りの分布から、茨城・福島両県沖並びに岩手県沖のプレート境界のごく浅部(20km以浅)に おいて大きな余効滑りが生じていること、また、1978年宮城県沖地震のアスペリティ群(2005 年の宮城県沖の地震及び2011年東北地方太平洋沖地震本震によって破壊されたと考えられる領 域)の付近では、余効滑りがほとんど起きていないことが分かった(東北大学[課題研究:1220]).

超巨大地震の地震発生サイクルシュミレーション研究にも進展が見られた.これまで,東北地 方太平洋沖地震の破壊領域のみを考慮して,地震発生サイクシミュレーションを行ってきた.し かしながら,釜石沖より北部の東北沖には1968年十勝沖地震(M8.3)の震源域が存在し,この北部 地域を含む連動破壊の可能性を考える必要性がある.そこで,まず,釜石沖以北の1968十勝沖地 震震源域についても,南部の領域と同様に滑り速度・状態依存摩擦構成則に従う階層アスペリテ ィモデルを仮定して,地震発生サイクルの再現を行なった.その後,釜石沖の条件付き安定滑り 摩擦特性(特徴的滑り量L)を変えながら,北部(十勝沖地震の震源域)と南部(東北地方太平 洋沖地震の震源域)を併せた領域についてのサイクル計算を行なった.その結果,Lが小さい場 合には2つの領域がほぼ同時に滑る連動破壊が生じ,一方,Lが大きい場合には破壊に時間差が 生じることが分かった.シミュレーションは予備的なもので1896年明治三陸津波地震がモデル化 されていないという問題は残るものの,釜石沖の摩擦特性の解明が北部域と南部域の連動・非連 動破壊の鍵を握ると考えられる(東北大学[課題番号:1219]). 東北地方太平洋沖地震後の余効変動に伴う東北日本弧・内陸部におけるひずみ場の時空間変化 を詳細に捉えた.その結果,大局的には余効滑りに伴って東西伸長が卓越するひずみ場が得られ たが,面積ひずみで見ると収縮を示す領域が奥羽脊梁山脈に沿って連続的に分布し,周囲と比較 して特徴的な結果となった.これは,この領域における東西伸長が小さく,その結果南北収縮が 相対的に卓越するために面積ひずみで見ると収縮域に対応するものである.単純な余効滑りモデ ルで検証を行ったところ,この特徴的な収縮域は余効滑りだけでは説明ができないことが分かっ た(東北大学[課題番号:1219]).

東北地方太平洋沖地震前のひずみ集中および本震に伴う応力擾乱によって生じた, 脊梁山地ひ ずみ集中帯および前弧域ひずみ集中帯のひずみ異常のパターンを, 有限要素法によって再現し, 地殻及び上部マントルのレオロジー構造を推定した. 地震発生前にはひずみ集中, 地震時には小 さな東西伸長が観測された脊梁山地ひずみ集中帯の振る舞いは, 周辺に比べてより浅部にまで低 粘性を仮定したモデルにより再現できた. 地震前と地震時のいずれにおいても周辺に比べて大き な変形が観測された前弧域ひずみ集中帯の振る舞いは, 表層にある厚い堆積層の効果で説明可能 であり, 地殻及び上部マントルに低粘性を仮定する必要は必ずしもないことが明らかとなった. しかし, 地震後の前弧域ひずみ集中帯の変形は, 地殻・上部マントルに低粘性を仮定するか否か により大きく異なることも明確になった. そのため, この地域の変形を, 今後10年程度にわたり 詳細に観測することが, 前弧域ひずみ集中帯の成因を解明するために重要であると考えられる (東北大学[課題番号: 1219]).

## ウ. 超巨大地震に誘発された内陸地震や火山活動等の解明

2011 年東北地方太平洋沖地震発生後、東北地方内陸域では秋田県北部の森吉山周辺、福島県・ 山形県境付近、茨城県北部・福島県南東部等の数か所で活発な誘発地震活動が発生し、現在に至 るまで活動的な地域も存在する.また、長野県北部のように1年以上経過したのちに活発化した 地震活動も見られる.これらの誘発地震活動は、東北地方太平洋沖地震本震の断層運動によるク ーロン破壊関数の静的な変化(ΔCFF)で概ね説明できるが、それに反する場合には間隙流体圧 の上昇に伴う断層強度の低下が重要な役割を果たしたと考えられる(図10).とくに、顕著な誘 発地震活動の領域では明瞭な震源移動が観測されており、流体の拡散が地震発生に影響を与えて いる可能性がある.また、これらの誘発地震活動域の深部には地震波速度の低速度域が見られる 場合が多く、この低速度域は流体の分布域であると考えられる.たとえば、茨城県北部・福島県 南東部では、東北地方太平洋沖地震の本震発生の1ヶ月後にM7.0の福島県浜通りの地震が発生 しており、その大滑り域は高速度体・高比抵抗体に対応し、その深部には流体の存在を示唆する 低速度域が広がっているとともに、大滑り域の周囲は低速度・低比抵抗で特徴づけられ、M7.0 の発生前から誘発地震活動が開始していることから、このような構造の違いが地震発生に大きな 影響を及ぼしたことが考えられる.また、阿武隈山地を含む前弧域では、東北地方太平洋沖地震 発生以前からσ,軸がプレート収束方向を向いていない傾向にあり、その原因としては重力によ りつくられる応力が、この地域で支配的である可能性があげられる.そのことが、非常に活発な 正断層型地震活動を誘発した原因かもしれないことが示唆された(東京大学地震研究所[課題番 号:1444]).

日本列島の震源断層の位置形状についてのカタログを作成するために,主に日本海沿岸北部に おけるMCSデータを収集し,東北日本内陸域の震源断層モデルを作成した(東京大学地震研究 所[課題番号:1445]).

## (2) 超巨大地震とそれに起因する現象予測のための観測研究

### ア. 超巨大地震の震源域における地殻活動のモニタリング

プレート境界での固着・滑りの状況を把握するために、GPS-音響測距結合方式による海底地 殻変動観測を継続した.日本海溝沿いの海底基準点では、東北地方太平洋沖地震発生後の海底変 動を捉えた.図11に水平方向の累積変動量を示す.「宮城沖1」では、西北西方向の地殻変動が 観測されており、本震後の累積変動量は41cm となる.2011年7月10日の余震(M7.3)から2012 年12月7日の三陸沖の地震(M7.3)までの期間でも、西向きに22cmの地殻変動が観測されている. また、「釜石沖1」でも時系列のばらつきが大きいものの西北西方向の地殻変動が観測されてい る.その他、「宮城沖2」では南向きに17cm、「釜石沖2」では北西方向に6cmの地殻変動が検出 されており、東北地方太平洋沖地震の震央周辺では複雑な地殻変動を示している.一方、「福島 沖」及び「銚子沖」では、本震後、プレートの沈み込み方向と逆方向の東南東方向に余効変動が 検出されており、時間とともに減衰している様子がうかがえる.累計変動量は、「福島沖」で65cm、 「銚子沖」で36cmである.上下方向では、「銚子沖」海底基準点を除き、沈降傾向が見られて いる(海上保安庁[課題番号:8006]).

また,南海トラフの海溝軸付近における海底地殻変動モニタリングのために投入予定の海底局 の機器整備を行った.設置を予定している海域は,水深が3,500m程度とこれまでの海域(水深 2,000m程度)よりも深いため,深海型と呼ばれる海底局を設置することとした.さらに,熊野 灘KME 観測点の南東方向約50km(トラフ軸から約30km)の地点に,名古屋大学/東北大学の 両仕様を兼ね備えたハイブリッド型海底局を新設した.この点は,トラフ軸から陸域までの連続 的な地殻変動プロファイルを得るために重要な観測点になる(名古屋大学[課題研究:1709]).

東北地方北部日本海溝沿いの地震活動モニタリングのために,エンベロープ波形をテンプレートとして用いる震源決定法の開発を行った.まず,連続波形のエンベロープとテンプレートのエンベロープとの相関を計算し,相関係数の時系列を求めた.次いで,複数のテンプレートに対応する時系列の中から最も相関の高いテンプレートを選び出すことで,震源が未知の地震に対応するテンプレートを抽出した.この方法を,内陸で発生した2004年新潟県中越地震の本震直後の連続波形に適用し,地震の抽出とマグニチュードの決定が可能であることを確認した.sP波については,宮城県沖で発生した地震を対象に基本的な性質を調べ,振幅の自動的な測定を行った.その結果得られた振幅分布はメカニズム解を反映していることが判明し,振幅情報をメカニズム解決定に用いることが有効と判断できた (弘前大学[課題番号:1219]).

南海トラフより海側には、トラフ軸にほぼ平行に走向する銭洲海嶺が存在する. 銭洲海嶺を含 めた海域は、島弧地殻を持つフィリピン海プレートが衝突する地域であり、通常の海洋性地殻の 沈み込み形態とは異なる. 銭洲南側で確認されている新たな沈み込みだけではなく、上盤側に発 達する断層分布や下盤側の地殻構造は、東南海地震発生域、南海地震発生域とも異なる分布を示 す. これまで、プレート境界には銭洲海嶺と同様な走向を持つ地形的な高まりが前弧域下に確認 されている. これらの高まりは内部にP波速度6km/sを持つ島弧地殻に近い構造列を形成している ことが明らかになりつつある. 上盤側では褶曲構造が一部取り込まれた様子も見つかり、紀伊半 島沖で見られる付加体構造と大きく異なる特徴を示す. 下盤側では、トラフ軸に近いところに複 数の断層が発達し、プレート内が強い変形を被り、プレート内部に構造線が発達する(海洋研究 開発機構[課題番号:4006]).

# イ. 超巨大地震の長期評価手法

超巨大地震のグローバル長期評価手法の確立のためには、地震カタログの整備とその性能を評価することが欠かせない.このために、グローバルな地震カタログである GCMT, ISC, ISC-GEMカタログを用いて、データベースを構築した.これらのデータベースを時間、領域、マグニチュード等で簡単に検索・解析ができるソフトウエアを整備するとともに、カタログの性能評価を実施した(東京大学地震研究所[課題番号:1446]).

地震統計を基礎とする地震発生予測モデルの一つである Relative Intensity (RI) モデルを用い て、東北地方太平洋沖地震を含む 2011 年の地震発生予測結果とそれ以前の予測結果の比較を行 った. 地震カタログとしては、学習および評価に GCMT カタログを使用した. 地震の予測は、 マグニチュード6以上とした. 2009 年および 2010 年の予測結果は、すべてのテストをパスした が、2011 年の予測結果は、パスした評価テストとパスできなかった評価テストがあった(東京 大学地震研究所[課題番号: 1446]).

東南海地震震源域におけるリアルタイムデータを用いたデータ同化研究を推進した. 実データ として,GEONET ならびにDONET の観測データを(準)リアルタイムにデータベース化して いくとともに,データ同化手法として粒子フィルターのプログラムを整備し,それを適用するた めの地震発生サイクルシミュレーション結果を蓄積する必要がある.そこでGEONET ならびに DONET の観測データを蓄積するデータベースを構築するとともに,定期的かつ自動的にデータ を取り込むシステムを構築した.また,粒子フィルターのプログラムを作成し,GEONET デー タと地震発生サイクルシミュレーション結果の比較を行った.その結果,1996年以降の西南日 本の上下変化に概ね整合するシミュレーション結果が得られるとともに,豊後水道 SSE のよう にシミュレーションに含まれていない現象が,データとシミュレーションのずれとして現れるこ とが確認できた(図12)(海洋研究開発機構[課題番号:4007]).

# ウ. 超巨大地震から発生する津波の予測

東北地方太平洋沖地震により発生した津波による被害は甚大であったことから,超巨大地震に 伴う津波の精度良い予測手法の開発は急務である.

北海道太平洋沿岸は、津波堆積物調査結果より、最近のM8クラスの巨大地震による津波より もはるかに大きな津波が太平洋沿岸を襲っていたことも明らかになっている.このような大津波 による被害を最小限に抑えるためには、リアルタイム津波浸水予測の開発が急務である.津波浸 水域を精度よく予想するためには、10m以下の細かい格子間隔で津波遡上数値計算を実施する必 要があり、地震が発生してから津波数値計算を実施していては時間がかかるため、太平洋沿岸の 津波を事前に予測することができない.そこで、あらかじめ津波遡上数値計算を実施しておき、 それをデータベース化することで、リアルタイムで津波浸水域を予測する手法を開発した.巨大 地震の発生後、推定された震源とマグニチュードから地震のスケーリング則を用いて断層モデル を決定する.その断層モデルを用いて線形長波近似式を用いた津波数値計算を実施する.北海道 太平洋沿岸に対する上記津波数値計算は、通常のパソコンでも1-3 分程度で完了するため、十分 に津波予測に利用することができる.この結果を利用してデータベースから最適の津波浸水予測 結果を抽出することでリアルタイム津波浸水予測を実現する.上記手法を用いて、釧路市での津 波浸水域をどの程度予測可能であるか実験した.結果は良好に予測できることが分かった(図13). この手法は、リアルタイム津波浸水予測が可能であることを示す画期的な成果である(北海道大 学1課題番号1006]).

震源断層即時推定時の初期情報(発震機構解)をRTK-GPSデータのみで得ることを目的とし, RAPiDアルゴリズムで得られた変位データを,GPSによる永久変位から地震メカニズムおよび規 模を即時推定する手法(fastCMT)に入力する(以下,RAPiD/fastCMT)ことを試みた.対象とし た地震は、東北地方太平洋沖地震後に発生した茨城県沖地震(Mw7.8)および、東北地方太平洋沖 地震そのものである.fastCMTは任意のグリッドにおける最適なCMT解を推定するアルゴリズム である.茨城県沖地震(Mw7.8)による地震時変動データに適用した場合、地震後166秒後の段階 (RAPiDアルゴリズムで変位量推定が完了した段階)でMw=8.0という地震規模と低角逆断層型の 発震機構解を推定することができた.一方、東北地方太平洋沖地震時のデータにRAPiD/fastCMT アルゴリズムを適用した場合、地震発生後275秒でCMT解は推定可能であるが、地震規模が Mw=9.5と実際より大幅に過大評価されてしまった.しかし、両地震とも、発震機構解の節面の 方向についての推定結果はおおむね良好で,有限断層推定の初期情報として利用可能であること が示された(東北大学[課題番号:1221]).

さらに、RAPiDにより得られる広域の地震時変位データから推定された震源モデルを、津波波 源の初期モデルとして採用し、沖合津波観測データを用いてこれを逐次的に改善する手法の開発 を進めた.具体的には、時間経過とともに沖合観測点で得られる観測津波波形と、初期モデルか ら期待される計算津波波形との差を最も小さくするように、波形逆解析を用いて初期モデルを修 正し、新たなモデルをもとに津波波形を計算して沿岸の津波予測を逐次更新する、というもので ある.このうち、津波解析に関連する部分はtFISHアルゴリズムを活用した.統合解析アルゴリ ズム(tFISH/RAPiD)の性能を調べるため、東北地方太平洋沖地震を対象として、仮想的な観測 津波波形を用いた津波予測実験を行った.その結果,tFISH/RAPiDを適用することで,沖合津波 計と陸上GPSデータの情報の双方を有効に活用した津波即時予測が可能になることが示された (図14) (東北大学[課題番号:1221]).

正確な地震・津波情報を迅速に提供するため、北海道から房総沖に至る日本海溝周辺において 地震・津波観測網を整備することが欠かせない。海洋調査を実施し、観測点配置とケーブルルー トを決定した.さらに地下構造調査を実施し、ケーブルルートに沿った浅部地下構造を求めた(防 災科学技術研究所[課題番号:3012]).

## (3) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明と予測のための新技術の開発

### ア. 超巨大地震のための海底地殻変動観測技術

東北地方太平洋沖地震の発生時に大きな滑りを伴った日本海溝軸近くの海域において,海底圧 力連続観測を開始した.観測地点の水深は,従来海底圧力観測を行ってきた海域に比べてはるか に深いため(約7,000m),耐圧容器・水中ケーブルは耐圧9,000m相当のもの,圧力センサーは フルスケール7,000mのもので観測システムを作成し,海溝軸付近に設置した.5~10月の期間 に得られた水圧変化の時系列を図15に示す.短期間の間に100hPaという大きな圧力減少が観測 されたが,これは圧力センサーの過渡的な特性である可能性が高い.今後,複数のセンサーによ る同時観測や,センサーの加圧テストなどから,超深海型のセンサー特性の把握を進める必要が ある.海底間音響測距装置に関しては,ガラス球を9000m耐圧に変更,受信感度と返信信号の 感度向上,GPS音響と同じ方法である一定期間のデータを収録する方法に変更等の改良を行っ た.開発した装置は、2013年2月の航海で水深6000mの緩やかな斜面に基線長3kmになるよう に2台を対で設置した.航海終了時に2台とも回収し,今後測距結果を確認し,問題点があれば 出力・感度調整などに反映させる予定である(東北大学[課題番号:1222]).

#### イ. 海底地形・堆積物調査技術

津波堆積物の検出のために、下北半島、仙台平野、北茨城、房総半島(九十九里浜及び夷隅川 河口)の沿岸低地において、ボーリングやジオスライサーによる地層のコア採取を行い、さらに、 仙台湾で海底表層の地層のコア採取を実施した.また、地殻変動の解析を目的とした航空レーザ ー計測による地形データ取得を房総半島南部沿岸で実施した.和歌山県串本町では津波石の分布 の正確な把握のため、地上レーザー計測を実施した(産業技術研究所[課題番号:5006]).

海底活断層の分布や構造を明らかにするために、日本海溝周辺(福島沖・茨城沖の大陸棚から 陸棚海溝斜面にかけて)のMCS および海底地形データを収集し、これらのデータに基づいて、 海底活断層の分布や構造について予察的な検討を行った(東京大学地震研究所[課題番号:1447]).

## これまでの課題と今後の展望

東北地方太平洋沖地震を受けて、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」が見直され、 「超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究」が加わった.その内容は次の3項目を推進する こととされ,(1)超巨大地震の発生機構とそれに起因する現象を解明する観測研究,(2)超 巨大地震やそれに起因する現象を予測するための観測研究,(3)これらの解明と予測のための 観測研究に必要な新技術の開発を行う研究,である.

超巨大地震の発生機構とそれに起因する現象を解明するためには、まず「その発生サイクルの 解明」が必要となり、低頻度の超巨大地震のサイクルを理解するためには地質学的研究が重要と なる.しかし、津波堆積物調査結果から実際の津波浸水域を得るにはまだまだ解決すべき問題が 多く存在することが明らかになった.さらに各地点でのイベント対比にも大きな問題が残る.こ れらを解決するための新技術の開発に期待がかかる.

また、「超巨大地震の発生とその前後の過程の解明」を進める必要がある.東北地方太平洋沖 地震前後の地震活動や地殻変動のデータの解析が進み、プレート境界での応力蓄積・解放の過程 に関する理解が進んできた.同時に、今までの理解が不十分であったことも明らかになってきた. 例えば、東北地方太平洋沖地震の滑り量分布からは、海溝付近と深部に滑り域があることが確認 され、東北地方太平洋沖地震後の相似地震の分布やプレート境界で発生した余震分布は滑り量分 布と相補的であり、本震の滑りによって応力がほぼ解放されたことが明らかになった.一方、海 溝付近の超低周波地震の活動や2011年03月09日の最大前震とその後のゆっくり滑りの存在や、滑 り域内に分布する相似地震の活動は、東北地方太平洋沖地震の滑り域および周辺におけるプレー ト境界面上の滑りの複雑性、且つ、多様性を示唆する.東北地方太平洋沖地震の様な超巨大地震 の発生サイクルの理解およびモデル構築の為には、東北地方太平洋沖地震の酸な超巨大地震 の発生サイクルの理解およびモデル構築の為には、東北地方太平洋沖地震のであったことが明ら かになり、長期的な変動場を高精度に捉え、東北地方太平洋沖地震前のひずみ速度分布との比較 や地震波速度構造などとの比較、さらにそれらを説明するためのレオロジー構造の構築によって 東北地方太平洋沖地震前後の挙動を理解することも重要である.

次に,超巨大地震に誘発された内陸地震や火山活動等の解明が課題となり,東北地方太平洋沖 地震により実際に誘発された多くの内陸地震についての解析が進んできた.誘発のメカニズムに はやはり流体の関与が示唆されており,流体関与のモデル化が今後の課題であろう.

超巨大地震やそれに起因する現象を予測するための研究としては、まず「超巨大地震の震源域 における地殻活動のモニタリング」に関する研究が重要となる.そのためには海底地殻変動の観 測が当然重要となる.東北地方太平洋沖地震では海溝近傍で大きな滑りが発生したことを考慮す ると、今後さらに深海域での高精度な海底地殻変動データの取得を目指した技術開発が必要とな る.また、「超巨大地震の長期評価手法の開発」も重要課題あり、地震発生サイクルシュミレー ションを組み込んだ長期評価を実現するためには、GEONET や DONET の観測データを同化す る研究を推進する必要がある.さらに、「超巨大地震から発生する津波の予測」は将来の超巨大 津波発生時の被害を軽減するためにも、緊急の研究課題である.リアルタイム津波浸水予測技術 の開発等、様々な手法の開発や観測網の設置が進んできているが、さらなる進歩がおおいに期待 される. 最後に新技術の開発では、すでに述べたように、「海底地殻変動観測手法のさらなる開発」と 「実際の津波とその波源を理解するための津波堆積調査手法の高度化」が期待される.

## 成果リスト

- Aitaro Kato, Toshihiro Igarashi, Kazushige Obara, Shinichi Sakai, Tetsuya Takeda, Atsushi Saiga, Takashi Iidaka, Takaya Iwasaki, Naoshi Hirata, Kazuhiko Goto, Hiroki Miyamachi, Takeshi Matsushima, Atsuki Kubo, Hiroshi Katao, Yoshiko Yamanaka, Toshiko Terakawa, Haruhisa Nakamichi, Takashi Okuda, Shinichiro Horikawa, Noriko Tsumura, Norihito Umino, Tomomi Okada, Masahiro Kosuga, Hiroaki Takahashi and Takuji Yamada, Imaging the source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. Res. Lett., 40, doi:10.1002/grl.50104, 2013
- Azuma, R., Y. Murai, K. Katsumata, Y. Nishimura, T. Yamada, K. Mochizuki and M. Shinohara, Was the 1952 Tokachi-oki earthquake (Mw=8.1) a typical underthrust earthquake?: Plate interface reflectivity measurement by an air gun - ocean bottom seismometer experiment in the Kuril Trench, Geochemistry Geophysics Geosystems, 13, Q08015, 10.1029/2012GC004135, 2012.
- Chiba, K., Y. Iio, and Y. Fukahata, Detailed stress fields in the focal region of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake ?Implication for the distribution of moment release?, Earth Planets Space, 64, 1157-1165, 2012.
- 藤原治・佐藤善輝・小野映介・海津正倫,2013,陸上掘削試料による津波堆積物の解析 浜名湖 東岸六間川低地にみられる3400 年前の津波堆積物を例にして,地学雑誌,122,印刷中
- 福田秀樹, 2013, 稠密GPS データによる山形盆地断層帯周辺および東北地方中央部における2011 年東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動場,山形大学修士論文.
- Gusman, R. A., M. Fukuoka, Y. Tanioka, S. Sakai, Effect of the largest foreshock (Mw 7.3) on triggering the 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0), Geophys. Res. Lett., doi: 10.1002/grl.50153, in press
- Gusman, A. R., Y. Tanioka, S. Sakai, and H. Tsushima, Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data, Earth Planet. Sci. Lett., 341?344, 234?242, doi:10.1016/j.epsl.2012.06.006, 2012.
- Hasegawa, A, K. Yoshida, Y. Asano, T. Okada, T. Iinuma, Y. Ito, 2012, Change in stress field after the 2011great Tohoku-oki earthquake, Earth Planet. Sci. Lett., 355-356, 231-243.
- Iinuma, T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada , Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, J. Geophys. Res., 117, B07409, doi:10.1029/2012JB009186, 2012.
- 飯尾能久・松澤暢,東北地方太平洋沖地震の発生過程一なぜM9が発生したのか?一,地質学雑誌, 118,5,248-277,2012.
- Inazu, D., R. Hino and H. Fujimoto, A global barotoropic model driven by synoptic atmospheric

disturbances for detecting seafloor vertical displacements from in situ ocean bottom pressure measurements, Mar. Geophys. Res., 33, 127-148, 2012.

- Ioki, K, Source process of great earthquakes along the Kurile trench estimated from tsunami waveforms and tsunami deposit data, PhD dissertation, Graduate School of Science Hokkaido University, 2013.
- Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, J. Ashi, 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Tectonophys., in press.
- Johnson, K. M., J. Fukuda, and P. Segall, 2012, Challenging the rate-state asperity model: Afterslip following the 2011 M9 Tohoku-oki, Japan, earthquake, Geophys. Res. Lett., 39, L20302, doi:10.1029/2012GL052901.
- 海上保安庁,2012,東北地方太平洋沖地震前までの海底地殻変動観測結果(再解析),地震予知 連絡会報,88,143-149.
- 海上保安庁, 2012, 東北地方太平洋沖地震後海底地殼変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 88, 150-154.
- 海上保安庁, 2012, 東北地方太平洋沖地震後の海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 89, 印刷中.
- Kakinami, Y., M. Kamogawa, Y. Tanioka, S. Watanabe, A.R. Gusman, J.-Y. Liu, Y. Watanabe, and T. Mogi, Tsunamigenic ionospheric hole, Geophys. Res. Lett., 39, doi: 10.1029/2011GL050159, 2012
- 金沢敏彦, 2012, 日本海溝海底地震津波観測網について -観測網の概要とその背景-, 地震本 部ニュース, 2, 6-7.
- 金沢敏彦,2012,日本海溝海底地震津波観測網について2 ー観測網のシステム概要と期待される効果-,地震本部ニュース,3,6-7.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa and N. Hirata 2012, Propagation of Slow Slip Leading Up to the 2011Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, Science, 335, 705-708, doi:10.1126/science.1215141.
- Kato,A. and T. Igarashi, 2012,Regional extent of the large coseismic slip zone of the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake delineated by on-fault aftershocks, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 39, L15301, doi:10.1029/2012GL052220.
- Mitsui, Y. and Y. Iio, How did the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake start and grow? The role of a conditionally stable area, Earth Planets Space, 63, 755-759, 2011.
- Mitsui, Y., Y. Iio, and Y. Fukahata, A scenario for the generation process of the 2011 Tohoku earthquake based on dynamic rupture simulation: role of stress concentration and thermal fluid, Earth Planets Space, 64, 1177-1187, 2012.
- Nakahigashi, K., M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, R. Hino, T. Sato, K. Uehira, Y. Ito, Y. Murai, and T. Kanazawa, P-wave velocity structure in the southernmost source region of the 2011 Tohoku earthquakes, off the Boso Peninsula deduced by an ocean bottom seismographic survey, Earth Planets

Space, 64, 1149-1156, 2012.

- 中村有吾,西村裕一,伊尾木圭衣,プルナスラスティアプトラ,アディティアグスマン「北海道 における2011 年東北地方太平洋沖地震津波の現地調査」北海道地区自然災害科学資料センタ 一報告, 26, 3-45, 2013.
- Nakamura, Y., Nishimura, Y., Putra, P.S., Local variation of inundation, sedimentary characteristics, and mineral assemblages of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Misawa coast, Aomori, Japan, Sedimentary Geology. 282, 216-227, 2012.
- Nanjo, K. Z., H. Tsuruoka, S. Yokoi, Y. Ogata, G. Falcone, N. Hirata, Y. Ishigaki, T. H. Jordan, K. Kasahara, K. Obara, D. Schorlemmer, K. Shiomi, and J. Zhuang, Predictability study on the aftershock sequence following the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku, Japan, earthquake: First results, Geophys. J. Int., 191, 2, 653-658, 2012.
- Nanjo, K. Z., S. Sakai, A. Kato, H. Tsuruoka, and N. Hirata, Time-dependent earthquake probability calculations for southern Kanto after the 2011 M9.0 Tohoku earthquake, Geophys. J. Int., in press.
- Obana, K., G. Fujie, T. Takahashi, Y. Yamamoto, Y. Nakamura, S. Kodaira, N. Takahashi, Y. Kaneda, and M. Shinohara, Normal-faulting earthquakes beneath the outer slope of the Japan Trench after the 2011 Tohoku earthquake: Implications for the stress regime in the incoming Pacific plate, Geophys. Res. Lett., 39, L00G25, doi:10.1029/2011GL050399, 2012.
- Ohta, Y., R. Hino, D. Inazu, M. Ohzono, Y. Ito, M. Mishina, T. Iinuma, J. Nakajima, Y. Osada, K. Suzuki, H. Fujimoto, K. Tachibana, T. Demachi, and S. Miura, Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, Japan, Geophys. Res. Lett, 39, L16304, doi:10.1029/2012GL052430, 2012.
- Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono and N. Umino, Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), J. Geophys. Res., 117, B02311, doi:10.1029/2011JB008750, 2012.
- Ohzono, M., Y. Yabe, T. Iinuma, Y. Ohta, and S. Miura, 2012, Strain anomalies induced by the 2011 Tohoku Earthquake (Mw 9.0) as observed by a dense GPS network in northeastern Japan, Earth, Planets and Space, 64(12), 1231-1238, doi:10.5047/eps.2012.05.015.
- 大久保修平,2012,ナノで見た日本列島の重力変化-東北地方太平洋沖地震の影響,地震ジャー ナル,54,24-25
- Sawai, Y., Y. Namegaya, Y. Okamura, K. Satake and M. Shishikura, 2012, Challenges of anticipating the2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology, Geophys. Res. Lett., 39, L21309, doi:10.1029/2012GL053692.
- Sawai, Y., M. Shishikura, Y. Namegaya, Y. Fujii, Y. Miyashita, K. Kagohara, O. Fujiwara and K. Tanigawa, 2012, Diatom assemblages in tsunami deposits on a paddy field and paved roads from Ibaraki and Chiba prefectures, Japan, generated with the 2011 Tohoku tsunami, Diatom, 28, 1-8.

- Shinohara, M., Y. Machida, T. Yamada, K. Nakahigashi, T. Shinbo, K. Mochizuki, Y. Murai, R. Hino, Y. Ito, T. Sato, H. Shiobara, K. Uehira, H. Yakiwara, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, K. Hirata, H. Tsushima, and T. Iwasaki, Precise aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake revealed by ocean bottom seismometer network, Earth Planets Space, 64, 1137-1148, 2012.
- 宍倉正展・藤原 治・澤井祐紀・行谷佑一・谷川晃一朗,2012,2011 年東北地方太平洋沖地震 による津波堆積物の仙台・石巻平野における分布限界、活断層・古地震研究報告,12,45-61.
- Suzuki, K., R. Hino, Y. Ito, Y. Yamamoto, S. Suzuki, H. Fujimoto, M. Shinohara, M. Abe, Y. Kawaharada, Y. Hasegawa, and Y. Kaneda, Seismicity near the hypocenter of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake deduced by using ocean bottom seismographic data, Earth Planets Space, 64, 1125-1135, 2012.
- 谷岡勇市郎, Aditya R. Gusman, 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波解析結果から再検討する巨大津波の発生様式, 地震2, 64, 265-270, 2012
- Terakawa, T., C. Hashimoto, and M. Matsu' ura, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, Earth and Planetary Science Letters, 19.1016/j.epsl.2013.01.017, 2013 (in press).
- Tsushima, H., R. Hino, Y. Tanioka, F. Imamura, and H. Fujimoto, Tsunami waveform inversion incorporating permanent seafloor deformation and its application to tsunami forecasting, J. Geophys. Res., 117, B03311, doi:10.1029/2011JB008877, 2012.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Okada, T. Iinuma, Y. Ito, and Y. Asano, Stress before and after the 2011 Great Tohoku-oki earthquake, and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan, Geophys. Res. Lett., 39, DOI: 10.1029/2011GL049729, 2012.



図1 全ての津波堆積物調査地点を説明できる北海道太平洋沖17世紀の巨大地震の断層モデル (既存の断層モデル(赤と青)に海溝近傍の断層モデル(滑り量25m)を追加)と1952年十勝沖 地震の滑り量分布や1973年根室半島沖地震の滑り量分布との比較.(北海道大学[課題番号:1002])



図2 青森県三沢海岸における2011年東北地方太平洋沖地震津波堆積物の1年間の変化(模式図). 1年で津波堆積物が確認できる限界の位置も変化しているのが分かる.(北海道大学[課題番号: 1002])



図3 海底地震計で再決定した東北地方太平洋沖地震の余震分布.決定精度のよい余震だけを表示してあるので,空間的には部分的であることに注意.黄色のコンター線は,本震時の滑り量分布を表す. (東京大学地震研究所[課題番号:1443])



図4 東北地方太平洋沖地震による上盤側の起震応力場の変化 (Hasegawa et al., 2012). (a) 地震前の起震応力場.赤は最大主応力軸,青は最小主応力軸を示す.桃色はBorehole breakout による最大水平圧縮軸方向を示す.(b) 地震後の起震応力場.(c) 滑りによる静的応力変化. プレート境界より10km上方を示す.赤実線コンターは滑り量,緑破線コンターは差応力 (MPa) を示す. Slip modelはLay et al. (2011)を使用した. (東北大学[課題研究: 1219])


図5 (a) M2.5以上の繰り返し地震グループの分布 (Uchida and Matsuzawa, 2013). 解析期間は1984 年から2011年. 黄色い丸は2011年東北地方太平洋沖地震前のみ活動があるグループ,赤い丸は 2011年東北地方太平洋沖地震前後に活動があるグループ. 星は本震と主な余震, コンターは Iinuma et al. (2012)による本震時の滑り量分布. (b) M4以上の地震についてコヒーレンスの閾値を 通常の0.8から0.6に下げた場合の波形の相似な地震の分布. 赤い丸は, 2011年東北地方太平洋沖 地震の発震機構解と比べて,最小回転角が50°以内のもの,自色の丸は50°以上,灰色の丸は発震 機構解が不明のもの (F-netのCMT解を解析に用いた). 水色の線は, Igarashi et al. (2001)による 低角逆断層型地震の西縁. プレート境界型の波形相似な地震は,大滑り域内にほとんど起きてい ないことがわかる. (東北大学[課題研究: 1219])



図6 プレート境界の各領域での非地震性滑りの時間発展. (a-c) 東北地方太平洋沖地震前の滑り の推移. (d-f) 東北地方太平洋沖地震後の滑りの推移. (g)使用した各領域の分布を示す. 滑りの 時間発展は,東北地方太平洋沖地震の滑り域との関係で,大滑り域内 (a, d), その隣接域あるい は最大余震の隣接域 (b, e), さらに離れた場所 (c, f) に分けた. (東北大学[課題研究: 1220])



図7 海陸測地データによって推定された2011年3月9日三陸沖地震(前震)の地震時滑りおよび 余効滑り分布. 2011年東北地方太平洋沖地震までの余震 (Suzuki et al., 2012)を前震からの経過 時間で色付けしたものを丸印で示す. 青色コンターは海陸測地データから推定された2011年東北 地方太平洋沖地震の滑り分布 (Iinuma et al., 2012). (東北大学[課題研究: 1220])



図8 1989年, 1992年, 2011年の三陸沖地震による宮古観測点(1989, 1992年地震),金華山観測点 (2011年地震)における余効変動時系列.滑り速度・状態依存摩擦構成則にもとづく対数関数を 当てはめた場合の時定数とその誤差,および地震発生後51時間の段階における地震時ステッ プと余効変動による変動量比. (東北大学[課題研究:1220])



図9 (a) 上図の地点1,2,3における余効滑り速度と余効滑りによる剪断応力変化の関係.(b) 図
 (a)に示された滑り速度と剪断応力変化の関係から推定した(a-b)\*のの滑り速度依存性.(c) 滑り速度に依存する(a-b)\*のを用いた余効滑りのシミュレーションから計算された滑り速度と剪断応力変化の関係.(d, e, f) 図3(a)の地点1,2,3における余効滑りの時間変化(青丸)と滑り速度に依存する(a-b)\*のを用いたシミュレーション(赤線)の比較.(東京大学地震研究所[課題番号:1441])



図10 左)本震によるクーロン破壊関数の変化( $\Delta$ CFF).本震滑り(Hashimoto et al., 2012)による静的応力変化から、広域応力場(Terakawa & Matsu'ura, 2010)の最大剪断面に働くトラクションの方向を考慮して計算した(深さ10km,  $\mu'=0.4$ ). 黄色い丸は上盤プレート(0-20km)で発生した地震(NIEDモーメントテンソルカタログ, 2011.3.11-2012.3.31)を示す.  $\Delta$ CFFが負にも関わらず、本震後に地震活動が活発化した領域(A-E)がある.

右) 3Dモール円上にプロットした余震のメカニズム解. 各対象地域(図2aのA-E)の平均的な広 域応力場のパターン(灰色の震源球)を表現するモール円上に,地震のメカニズム解(NIED, JMA, HASH, 2011.3.11-2012.3.31)を下半球投影の震源球でプロットした. 震源球のカラースケールは, 応力場から期待される理論的な滑り方向と実際の滑り方向のミスフィット角を示す. ミスフィッ ト角が小さいことから,内陸では本震前後で大きな応力場のパターンの変化はなく,発生した余 震の多くは間隙流体圧の上昇による断層強度の低下で発生したと考えることができる(例外は領 域B). (東京大学地震研究所[課題番号:1445])



- 図11 東北地方太平洋沖地震発生後の水平方向の累積変動量
- (a) 地震後の各海底基準点の観測期間と累積変動量(ユーラシアプレート安定域固定)
- (b) 地震後の各海底基準点の移動ベクトル (海上保安庁[課題番号:8006])



図12 実データとシミュレーション結果の比較.GEONETによる1996年以降の西南日本での上下 変動と、固着域の範囲を様々に変えた地震発生サイクルのシミュレーション結果を比較した. その結果、紀伊半島先端などでデータに見られる時間変化と整合する結果とそうでない結果 が明瞭に区別できるとともに、豊後水道SSEのようにシミュレーションに含まれない現象が、 データとのずれとして認識できる.(海洋研究開発機構[課題番号:4007])



図13 北海道太平洋沖17世紀巨大地震の断層モデルから計算された釧路市での津波高(左)とリ アルタイム津波浸水域予測手法により抽出された津波高(右)の比較. (北海道大学[課題番 号1006])



- 図14 2011年東北地方太平洋沖地震を仮定した数値実験における,同地震発生後20分までに得られる沖合津波波形を用いてtFISH/RAPiDで津波予測した結果.
  - (a) 沖合津波観測点における観測波形(黒線)と計算波形(赤線)の比較.(b) 沖合津波波形 の逆解析で求めた初期水位分布.(c) 本州の太平洋沿岸に沿った水深100 m地点における観測 津波波形(黒線)と予測津波波形(赤線)の比較.(a)と(c)の緑線は,予測計算を実施した時 刻を示す(地震発生後20分).(東北大学[課題番号:1221])



図15. 開発した超深海型圧力計と設置風景(左),圧力の計測結果(右)(東北大学[課題番号: 1222])

## 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画 の見直しについて(建議)の概要

.経緯

- ・ 地震予知研究は昭和 40 年,火山噴火予知研究は昭和 49 年を始まりとして,当時の文部省測地学審議会(現在の科学技術・学術審議会)が策定した研究計画に沿って,全国の大学や関係機関が協力・連携して推進。現行計画は平成 21 年度から5か年計画で実施
- 測地学分科会は,平成23年東北地方太平洋沖地震の発生について,事前にその 発生の可能性を追究できなかったことを真摯に反省し,計画の見直しの方向性を 検討
- ・ 見直し計画について意見公募や学協会の意見,さらに,海外研究者からの評価
  や次期計画に向けた外部評価委員会の意見・提言などを踏まえ,「地震及び火山
  噴火予知のための観測研究計画の見直し(建議)」を取りまとめ

.本計画の基本方針と実施内容

- 1.現状の基本的認識
- 現状の地震予知は,発生履歴の判明している地震については,シミュレーション技術を用いてその発生の特徴を再現することが可能なレベルに達しているものの,<u>発生履歴の判明していない地震の規模や発生間隔の推定及び地震の短期予知は困難</u>
- ・ プレート境界の地震について、広範囲で一度に滑るような超巨大地震をはじめ、 様々な規模の地震発生を予測するモデルの構築はいまだ研究途上
- ・ 観測網が充実している陸域から遠く離れた<u>海溝軸付近のプレート境界の固着状態の推定の困難さ</u>,<u>地形学,古地震学,地質学の情報を取り入れる努力の不足</u>, プレート境界滑りモデルの不完全さなどが,超巨大地震の発生可能性を追究できなかった主な要因
- 現在進行中である余効的な地殻変動や誘発された地震活動などの現象の把握を
  優先し,アスペリティモデルの再検討に加え,ほかの多様なモデルの検討による
  超巨大地震発生の可能性についての徹底的な解明が早急に必要
- モデルの検証作業と外部評価も加えた計画全体の再構築に向けた検討は継続して実施

2.本計画の基本方針

- ・ 現行計画の「地震・火山現象予測のための観測研究」,「地震・火山現象解明 のための観測研究」,「新たな観測技術の開発」,「計画推進のための体制強 化」の<u>4項目を柱として推進する考え方は有効</u>
- ・ ただし,超巨大地震に関する観測研究は不十分であったことから,本見直し計 画では,現行計画の残り2年間において,現行計画の地震破壊過程の項目などに

<u>係る個別課題のうち3課題については中止し、予測シミュレーションなどに係る</u> <u>課題については大幅な計画の縮小</u>を実施

・「5.超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進」の項目を新しく計画

<u>3.計画の実施内容</u>

- ・ 既存計画の項目については,引き続き推進
- 超巨大地震の項目については、これまで十分な観測研究事例がなかったことから、まず「現象の解明のための観測研究」に重点を置くこととし、次の3項目を 柱として実施
  - (1) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明のための観測研究
  - 平成 23 年東北地方太平洋沖地震や南海トラフ沿いなどの地震に関する地球物 理学的,変動地形学的,古地震学的,地質学的手法を用いた,幅広い規模にわたる地震の発生サイクルや,サイクルの階層性についての研究の推進
  - ・ 歴史地震や地質学的なデータなどを重視した過去の地震発生履歴の研究
  - ・ 超巨大地震に先行する各種現象や準備過程として進行する現象,地震時滑り, 余効滑りに関する調査研究
  - ・ 平成 23 年東北地方太平洋沖地震の本震や余効変動によって生じた日本列島の
    応力場の変化に伴った内陸地震や火山活動等の活発化に対する観測研究
  - (2) 超巨大地震とそれに起因する現象の予測のための観測研究
  - ・ 陸域と海域の観測による超巨大地震の震源域における地殻活動のモニタリン グの高度化
  - 低頻度現象である超巨大地震の発生予測に向け,統計地震学的モデルと震源 物理学的モデルに基づく数値実験的手法を統合した新しい手法の開発と巨大地 震発生の超過確率評価の研究
  - ・ 海底地震津波観測網の整備に伴う津波予測の高度化や,即時的な津波予測シ ステムの研究開発
  - ・ 古地震学的なデータに基づいた事象発生シナリオと分岐確率評価の研究
  - (3) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明と予測のための新技術の開発
  - ・ 超巨大地震のための深海型の海底地殻変動観測技術開発
  - ・ 高分解能の反射法地震探査や掘削調査等を用いた,深海底での地震活動履歴 解明のための技術開発

地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について(建議)の概要

- 科学技術・学術審議会 -

## 地震・火山噴火予知研究に関するこれまでの成果と今後の展望

<u>1 経 緯</u>

- ・ 地震予知研究は昭和 40 年,火山噴火予知研究は昭和 49 年を始まりとして,当時の文部省測地学審議会(現在の科学技術・学術審議会)が建議する計画に沿って,大学や関係機関が協力・連携して,現在も総合的に推進
- ・ 現行の二つの5か年計画(地震・火山)が平成20年度で終了になることから, 平成19年に実施状況等レビュー及び外部評価を実施
- 2 現状への基本的認識
- ・ 我が国は世界有数の地震・火山国であり,これらの災害から国民の生命・財産 を守り,安全で安心な社会を実現することは,国の基本的な責務
- 日本列島周辺では、海洋プレートの沈み込みにより、巨大地震が発生し、また、
  マグマが生成されるなど、地震と火山現象で共通の地球科学的な背景が存在
- 3 地震予知研究の成果
- ・ 地震発生に至るモデル「アスペリティモデル」の有効性の検証が進展
- ・ プレート境界地震について,東海から西南日本にかけてのフィリピン海プレート深部境界で,短期的ゆっくり滑りと低周波微動の同時発生を発見
- 内陸地震の発生準備過程について,地殻・マントルの不均質な粘弾性・塑性変
  形により広域応力が特定の断層域へ集中していく機構の理解が進展
- 日本列島域の地殻活動予測シミュレーションモデルの原型が完成し,地震発生
  に至る過去の巨大地震発生サイクルの特徴が再現
- 4 火山噴火予知研究の成果
- ・「2004 年浅間山噴火」では,多項目観測により火山体へのマグマ貫入など,噴 火の前駆的な変動把握に成功
- マグマ供給系・熱水系がモデル化された火山では,観測データから噴火に先立つ流体移動の把握が可能
- ・ 活動的火山について,活動度把握に基づく火山活動レベル(現在の噴火警戒レ ベルに移行)の導入

5 今後の展望

(地震予知・火山噴火予知の統合的研究)

- ・ 地震発生と火山噴火は、海洋プレートが日本列島下に沈み込む際に生じる地
  殻・上部マントルの構造不均質と力学的・化学的不安定が原因
- ・ これら地震と火山噴火現象に共通な場を理解する統合的研究が必要

(地震予知研究)

- ・ 地震予知研究の目標は、地震現象を理解し、モデル化に基づく予測シミュレーションとモニタリングを総合化した「総合予測システム」を構築。「地震がいつ、どこで、どの程度の規模で発生するか」の定量的な予測
- ・ 現在の目標到達度は、プレート境界の大地震の場所と規模の予測については、 一定の見通しが得られた段階。時期の予測に関しては、一般に長期予測の段階
- ・ プレート境界地震については,予測シミュレーションモデルに観測データを取り込む(データ同化)研究が重要
- 内陸地震については、予測シミュレーションモデル開発のための物理モデルの 構築が必要
- 海洋プレート(スラブ)内地震については、物理モデルの構築のために、プレートの沈み込みに伴って発生する諸過程の統一的な理解が必要

(火山噴火予知研究)

- ・ 火山噴火予知研究の目標は,観測データと噴火の物理化学モデルに基づき,噴 火の時期,場所,規模,様式及び推移の予測
- ・ 現在の目標達成度は,適切な観測体制が取られた火山では,噴火時期をある程 度予測できる段階。噴火の推移を予測することは現在も困難
- 今後も火山監視観測網の強化及び火山噴火の可能性の高い地域におけるモニタ リングの重点的な強化が必要
- ・ 火山活動の現状を評価し,予測される噴火の前兆現象や活動推移を網羅した噴 火シナリオの作成が必要
- ・ 基礎研究の推進によって得られるモデルや噴火シナリオにモニタリング結果を 統合し,火山活動の定量的評価を行う予測システムの構築が必要

(計画推進のための体制)

- ・ 計画全体を組織的に推進する体制や評価する体制の一層の整備が必要
- ・ 地震・火山現象を理解し,発生を予測するためには,長期にわたる継続的な観 測と研究が不可欠。それを実現する観測網の整備,若手研究者の養成・確保が必 要
- 大学の観測網については,基盤的観測網との調和を図りつつ,大学が担うべき 観測研究への一層の重点化が必要

.本計画策定の方針と実施内容

1 計画推進の基本的考え方

- ・ 地震及び火山噴火は、同じ地球科学的背景を持った自然現象であり、測地学的・地震学的手法による共同での観測研究はそれぞれの現象理解に有効
- ・ 世界に類を見ない稠密(ちゅうみつ)な地震・地殻変動の観測網などの研究資 <u>源を地震現象と火山現象の観測研究に有効活用</u>することにより,<u>効率的で効果的</u> <u>な研究</u>を実施

- 両予知研究の戦略や達成度の違いなど、それぞれの特徴を踏まえ、到達度の評価が可能な具体的目標を設定し、その目標に向けて段階的に計画を推進
- ・ これらの状況を踏まえ,現計画の成果を引き継ぎ,地震予知研究及び火山噴火 予知研究を着実に推進するため,二つの計画を発展的に統合し,平成 21 年度か ら5年間を見据えた計画と位置付ける
- ・本計画では,<u>「予測システムの開発」をより明瞭に志向した研究に重点</u>を置く こととし,<u>以下の4項目を柱として推進</u>
- (1)モニタリングシステムを更に発展させ、そのデータを用いて地震・火山現象の 推移予測を行うための予測システムを開発する「地震・火山現象予測のための 観測研究」
- (2) 予測システムの基礎となる「地震・火山現象解明のための観測研究」
- (3) 地震・火山噴火予知に資する「新たな観測技術の開発」
- (4)計画を一層効果的に推進できる体制の整備及び観測研究プロジェクトを立案・ 推進するための広く開かれた仕組みの整理を図り,また,成果を社会に効果的 に提供するなどの「計画推進のための体制の強化」

2 本計画の基本方針と実施内容

今回策定する計画は,前記の基本的考え方に基づき,以下の基本方針に沿って実施

(1) 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

地殻やマントルで進行している諸過程の把握により,予測シミュレーションモ デルへのデータ同化に基づく地殻活動の予測,及び噴火シナリオに基づく火山活 動の予測

《地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化》

- 日本列島全域に整備された観測網により,地震活動・地殻変動及び火山活動を
  的確にモニターし,予測に有用な情報を収集
- 大地震の発生や火山噴火の可能性の高い地域では、モニタリング観測項目の多 項目化、観測点の高密度化や観測データの実時間処理システムを一層整備

《地震・火山現象に関する予測システムの構築》

(地震発生予測システム)

- モニタリングによる観測データを予測シミュレーションモデルに取り込む手法
  を開発し,データ同化実験により予測を試行
- ・時空間的に高分解能な地震活動評価を行う手法を確立するため,地震活動予測
  手法の開発とそれの妥当性を評価・検証する枠組みを構築

(火山噴火予測システム)

- ・ 地質調査・解析による噴火履歴の解明等に基づき,噴火シナリオを作成
- モニタリングによる観測データから火山活動の評価を行い,噴火シナリオに基づく火山活動の推移予測を試行

《地震・火山現象に関するデータベースの構築》

- 日本列島及びその周辺域の地震・火山現象の基礎データベースを構築するとと
  もに,データの流通を図り,さらに,情報を統合化して,地殻活動予測シミュレーションに活用
- (2) 地震・火山現象解明のための観測研究の推進
  - 地殻やマントルで進行している諸過程の正しい理解とそのモデル化のため,基 礎的な観測研究を推進

《日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象》

- 日本列島及びその周辺域における長期的なプレート運動とそれに伴う応力場を 解明し,上部マントルにおける水の供給・輸送過程とマグマの生成・上昇機構を 解明
- マグマ等の地殻流体の分布を含む広域の地殻・上部マントル構造を解明
- ・ 地震現象と火山現象の共通原因であるプレート運動の影響を正確に評価するため,地震活動と火山活動の相互作用に関する研究を推進
- ・ 地震発生サイクルの理解のため、アスペリティやセグメントの破壊様式についての過去の活動履歴を解明。同時に、長期的な内陸の地殻ひずみの時空間分布を 解明

《地震・火山噴火に至る準備過程》

(地震準備過程)

- プレート境界地震に関し、アスペリティ分布の推定精度を向上させ、アスペリ ティ域に固有な地殻やマントルの性質の研究を推進し、アスペリティモデルを高 度化
- プレート境界面上で進行する非地震性滑りの時空間変化を高精度に把握し,ア スペリティ間の相互作用について理解を促進
- 内陸地震に関し、ひずみ集中帯の形成・発達と地震発生に至る過程に関する定 量的なモデルを構築
- スラブ内の震源分布や地震波速度構造を詳細に明らかにし、流体の地下深部に おける分布と挙動を解明

(火山噴火準備過程)

- ・ マグマの上昇・蓄積過程を解明するため,多項目の観測や探査を実施し,火山 体構造とマグマ供給系及び火山体浅部における火山流体の状態と変動を把握
- ・ 地質調査や岩石学的研究により、高精度の噴火履歴を復元し、噴火の推移及び
  マグマ供給系の変遷を把握

《地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程》

(地震発生先行過程)

 ・ 地震に先行する地殻やマントルの諸過程を地震発生先行過程と位置付け、その 発生機構を明らかにし、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

(地震破壊過程と強震動)

・ 大地震の断層面の不均質性と動的破壊特性及び強震動・津波の生成過程を理解
 するため,震源解析及び震源物理に基づく破壊過程の研究を一層推進

(火山噴火過程)

 火道浅部における噴火過程の詳細を高時空間分解能で解明し,爆発的噴火のモ デル化を行うとともに,噴火推移の多様性を支配する要因を理解

《地震発生·火山噴火素過程》

- ・ 地殻・上部マントル構成物質の変形・破壊について,実験・理論的手法により
  物理的・化学的素過程を解明
- 火山噴火のモデル化のため、マグマの分化・発泡・脱ガス過程を解明し、マグ マ上昇の数値モデルを構築

(3) 新たな観測技術の開発

新たな観測技術の開発や既存技術の高度化により,地震・火山現象に関する理 解を飛躍的に促進

《海底における観測技術の開発と高度化》

・ 地震及び火山噴火予知に有用な観測データを安定的に取得するため,海底における地殻変動観測技術及び地震観測技術の高度化と海底における各種観測データ
 を実時間で利用できるシステムを技術開発

《宇宙技術等の利用の高度化》

- ・ GPS や衛星搭載合成開口レーダー(SAR)等の宇宙測地技術を利用した解析技術を高度化
- ・ 地震や火山活動をより高精度で面的に把握するリモートセンシング手法を実現

《観測技術の継続的高度化》

- ・ 地下状態をモニタリングする技術,センサー技術や観測ネットワーク技術など, データを量・質的に増大させる技術開発を推進
- ・ 地震活動の高い地域や噴火活動域近傍など,電源・通信事情などの不十分な場所で効率的データ取得のためのセンサー技術やネットワーク技術を高度化
- 気象変化による擾乱(じょうらん)や人工的なノイズを避け,高品質のデータ
  を取得するため,大深度ボアホールにおける計測技術を開発

(4) 計画推進のための体制の強化

《計画を推進する体制の整備》

 本計画遂行を担う各大学や関係機関が、それぞれの機能に応じた役割分担と密 接な協力・連携の下に、計画全体を組織的に推進する体制の確立及び評価体制の 充実

- 本計画の実施内容が,地震本部が策定する新しい総合的かつ基本的な施策に反
  映されることを期待
- ・ 火山監視観測網の整備と火山観測研究の充実を図るために,火山噴火予知連絡 会の機能を強化

《基礎的な観測研究体制の強化》

- ・ 長期にわたる継続的かつ基礎的な観測研究を推進するため,個々の法人の枠を 超え全国の国公私立大学の研究者が連携し,拠点を形成して観測研究を実施
- ・ 工学・人文社会科学等の他の研究分野との共同研究を促進

《計画を実施するための予算的措置》

- ・ 国,各大学及び関係機関においては,地震予知研究及び火山噴火予知研究が本 計画に沿って着実に推進されるよう,予算・人材面での適切な措置が不可欠
- 本計画は長期間を見通しつつ,段階的に予知の実現を目指すため,特に萌芽
  (ほうが)的な研究や基礎基盤的な研究等に対しての予算的配慮を期待

《人材の確保,特に若手研究者の養成》

- ・ 地震・火山噴火の予知の実現という最終目標を達成するためには、長期的な観 測研究が必要。これらを担う人材の養成と確保が不可欠
- 研究者のキャリアパスの確保と若手研究者支援の方策を検討し,大学院生等の 確保に努力

《国際共同研究・国際協力の推進》

- ・ 地震や火山噴火に関する事例を効率的に集積するため,多様な地震・火山活動 の比較研究及び緊急時の国際共同調査研究による研究成果・知識の交換が必要
- ・ 国際共同研究の推進,研究者の交流等による研究成果の普及・発信,緊急調査 体制の整備,観測データの継続的な交換と技術支援等

《研究成果の社会への還元》

- ・ 研究成果の普及は,防災意識の向上のためにも重要であり,地震火山に関する 普及活動を組織的に推進
- ・ 地震,火山噴火による被害軽減に資するため,情報や報道発表内容の質的向上 を図り,的確かつ迅速な提供に努力

## 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画 実施機関

総務省	独立行政法人情報通信研究機構
文部科学省	国立大学法人等
	北海道大学大学院理学研究院
	弘前大学理工学部
	東北大学大学院理学研究科
	秋田大学大学院工学資源学研究科
	東京大学大学院理学系研究科
	東京大学地震研究所(共同利用・共同研究拠点)
	東京工業大学大学院理工学研究科
	東京工業大学火山流体研究センター
	名古屋大学大学院環境学研究科
	京都大学大学院理学研究科
	京都大学防災研究所(共同利用・共同研究拠点)
	鳥取大学大学院工学研究科
	高知大学理学部
	九州大学大学院理学研究院
	鹿児島大学大学院理工学研究科
	立命館大学総合理工学研究機構
	東海大学海洋研究所
	独立行政法人防災科学技術研究所
	独立行政法人海洋研究開発機構
経済産業省	独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター
国土交通省	国土地理院
	気象庁
	海上保安庁

科学技術・学術審議会測地学分科会 地震火山部会 〒100-8959 東京都千代田区霞が関3-2-2 文部科学省研究開発局地震・防災研究課

電話:03-6734-4137 FAX:03-6734-4139 http://www.mext.go.jp/b\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/index.htm