

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」

平成 21 年度年次報告

【成果の概要】

平成 22 年 9 月

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



# 目次

[ 平成21年度の成果の概要 ]	1
1. はじめに	2
2. 平成21年度の代表的な成果	4
2-1. 釜石沖地震の階層的アスペリティモデル	4
2-2. 伊豆東部の地震活動と火山活動の相互作用	4
2-3. 三宅島の噴火シナリオの作成	5
3. 平成21年度の成果の概要	6
3-1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進	6
3-2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進	9
3-3. 新たな観測技術の開発	16
4. まとめ	18
用語解説	29
[ 参考資料 ]	39
1. 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）	
2. 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	
3. 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	



**[ 平成21年度の成果の概要 ]**

## 1. はじめに

科学技術・学術審議会において建議された「地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）の推進について」及び「第7次火山噴火予知計画の推進について」のもと、平成16年度から地震と火山の二つの計画が進められた。両計画が平成20年度をもって終了することを受け、それに先立つ平成19年1月に科学技術・学術審議会測地学分科会から、「地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）の実施状況等のレビューについて」及び「第7次火山噴火予知計画の実施状況等のレビューについて」が報告された。この報告を踏まえて、同年6月に「地震及び火山噴火予知研究計画に関する外部評価報告書」が取りまとめられ、両計画に基づく研究について一層の連携を図ることとされた。この評価を受け、同年8月の科学技術・学術審議会測地学分科会地震部会/火山部会合同会議において、二つの計画を統合する方向で検討することが決定され、次期計画検討委員会を設置した。ここで次期計画の建議案の策定を始め、意見公募を経て、平成20年7月には「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」（以下、「地震火山噴火予知観測研究計画」という。）が科学技術・学術審議会において建議された。

地震火山噴火予知観測研究計画では、計画を推進するために、科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会の下に、計画実施機関の委員で構成する観測研究計画推進委員会を平成21年5月に設置し、年度ごとに観測研究成果報告の取りまとめを行うこととした。

本報告は、地震火山噴火予知観測研究計画の平成21年度の成果の概要を取りまとめたものである。

なお、計画の実施機関は以下の通りである。

- ・ 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

### 「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」における観測研究計画

地震予知に関する研究計画は昭和40年から、火山噴火予知に関する研究計画は昭和49年から、それぞれの予知計画として推進されてきた。しかし、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、これまでの研究の進展により、地震と火山とが密接に関連する地殻及びマントルの諸過程を統一的に理解する研究の道が開かれてきた。

平成21年度から始まった地震火山噴火予知観測研究計画では、地震及び火山噴火の「予測システムの開発」をより明確に志向した研究に重点を置くこととし、以下の4項目を柱として推進する。

- (1) 地震・火山現象予測のための観測研究の推進
- (2) 地震・火山現象解明のための観測研究の推進
- (3) 新たな観測技術の開発
- (4) 計画推進のための体制の強化

上記項目のうち「(1) 地震・火山現象予測のための観測研究の推進」は、地殻やマントルで進行している諸過程を把握し、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

また、「(2) 地震・火山現象解明のための観測研究の推進」は、「(1) 地震・火山現象予測のための観測研究」を行うために、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

また、「(3) 新たな観測技術の開発」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

「(4) 計画推進のための体制の強化」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。計画の目標達成に向けて、定期的な進捗状況の把握、実施計画及び研究成果の取りまとめ、研究の評価を実施することを目的として、平成 21 年度から科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会に観測研究計画推進委員会が設置された。観測研究計画推進委員会では、国立大学法人等、独立行政法人、政府機関の組織がそれぞれの機能に応じた役割分担と密接な協力連携を行い、本報告書も同委員会により編集されている。

## 本報告書について

地震火山噴火予知観測研究計画は、国立大学法人等、独立行政法人、政府機関の 193 題の実施計画（個別課題）により推進されている。平成 21 年度の個別課題の成果は、「平成 21 年度年次報告機関別」に取りまとめられている。この各機関の個別課題の成果をもとに、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 21 年度年次報告 成果の概要」である。

本報告書では、学術的成果を、難解な学術用語をなるべく避け、平易な文章で表現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概要説明する上で冗長となることがあり、その場合には用語解説の頁で用語を解説した。

また、参考資料編に[項目別の成果]を添付した。これは研究者が計画の項目別に学術報告として成果を取りまとめたもの\*である。成果が詳細に報告されているので参考にされたい。

\*東京大学地震研究所には、地震火山噴火予知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、地震火山噴火予知観測研究計画に書かれた項目に区分し、項目毎に効率的かつ調和的に研究を推進するために、12 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、この計画推進部会長が項目別に平成 21 年度の学術的成果を取りまとめたものである。

## 2. 平成21年度の代表的な成果

### 2-1. 釜石沖地震の階層的アスペリティモデル

岩手県釜石沖のプレート境界で発生する地震活動について、深さ 50 km 程度にあるアスペリティが、5 年半程度の間隔で繰り返し破壊することによりマグニチュード 5 程度の地震が発生してきたことがわかっている。その観測事実に基づき発生時期の確率的な予測が行われており、2001 年 11 月及び 2008 年 1 月の地震については、マグニチュード、位置、時期の事前予測に成功した。このことは、「プレート境界上に、アスペリティと呼ばれる固着強度の大きな領域が分布しており、この領域では普段はプレートどうしが固着しているが、そのまわりはゆっくり滑っている。このアスペリティが壊れたときに地震が発生する。」とするアスペリティモデルを支持するものである。

最近、詳細な解析により、このマグニチュード 5 相当のアスペリティの内部や端でいくつかのグループをなす小地震の活動が見つかるとともに、非地震性滑りがアスペリティ内部へ向かって徐々にしみ込んでいくことなどが明らかになった（図 1）。このことは、単純なアスペリティモデルでは説明ができず、アスペリティ内部の固着強度は一様でなく、比較的弱い領域が地震発生サイクルの間に繰り返し滑っていることを示唆する。つまり、1 つの大きなアスペリティの中にいくつかの小さなアスペリティがある階層的な構造であることを示している。そこで、このような階層的アスペリティモデルを導入して釜石沖地震発生の数値シミュレーションを行った結果、マグニチュード 5 相当のアスペリティ内部での小地震の発生や、それに続くゆっくりした余効滑りなどの現象を再現できた。

以上のように、大きなアスペリティの内部に不均質構造が存在して複雑な振る舞いをしていても、大きなアスペリティの破壊は予測可能な場合があり、そのような現象がなぜ生ずるのかが明らかになってきた。プレート境界地震の発生予測に貢献する成果と言える。

### 2-2. 伊豆東部の地震活動と火山活動の相互作用

静岡県伊東市周辺では、1970 年代後半から頻繁に群発地震が発生してきた。1989 年 7 月には、約 10 日間継続した群発地震活動が低下した直後に海底噴火が起これ、この群発地震が火山活動と密接に関連していることが明らかになった。1998 年までは毎年 1~2 回の群発地震があり活動度が高い状態が続いていたが、それ以降活動度は低下していた。2009 年 12 月に約 4 年ぶりに群発地震が発生し、震源域周辺で負傷者と建物の被害があり、この地域の地震活動予測の必要性が指摘された。この地域は、1990 年以降、各研究機関が地震、GPS、ひずみ、傾斜、地下水、全磁力等の多項目の観測を実施しており、日本国内で最も観測網が整備された地域のひとつとなっている。

繰り返し発生してきた群発地震を系統的に解析すると、個々の地震活動の初期には深部から浅部に線状に震源が上昇し、一定の深さに達するとほぼ鉛直の円盤状に中心部から周辺部へ震源が広がる（図 2）。また、これに同期して群発地震発生域での体積膨張を示す地殻変動も観測される。これらから、深部に蓄積したマグマが周辺の岩体に比べて低密度であるため浮力により上昇し、等密度となる深度（浮力中立深度）に達すると、そこに滞留して広がるという典型的なマグマ貫入現象で説明できることがわかった。さらに、ほとんど全ての群発地震活動の震源は、鉛直に近い同一面上に分布し、1 回前の群発地震の震源に隣接した場所で新たな群発地震が発生する。これは新たなマグマ貫入過程がそれ以前の貫入による応力場に強く影響を受けていることを示している。

上記のようなモデルに基づき、地震活動に先行するマグマ貫入による地殻変動を捉えれば、群発地震活動の発生や群発地震活動の活動度が予測できる。地震調査研究推進本部地震調査委員会では「伊豆東部の地震活動の予測手法」をまとめ、気象庁は群発地震活動の予測情報の発表を検討している。これは群発地震活動域周辺における観測網の整備と、予測手法の科学的根拠となった研究成果に負うところが大きい。さらに、活動の推移によっては火山噴火につながる可能性も考慮し、噴火警報・噴火警戒レベル等、火山関係の情報と整合を取った運用を検討している。

このように、伊豆東部では地震活動と火山活動の相互作用についての理解が進み、群発地震活動の予測の実用化が視野に入ってきた。しかしながら、1989年の海底噴火と噴火に至らなかった他の活動の違いは何か、2009年12月の群発地震活動ではマグマはこれまでとは異なった面に貫入したが、これがどのような意味を持ち、今後の活動にどのような影響を与えるのかなど未解明な点も多い。今後も地震学と火山学とが連携し、群発地震とマグマ貫入現象の研究を推進することが重要である。

### 2-3. 三宅島の噴火シナリオの作成

これまでの火山噴火予知研究の成果により、観測網の整備された火山では噴火場所、噴火時期はある程度予測可能であることが実際の火山噴火の際に示されてきた。一方、噴火規模、様式、推移の予測は現時点では実現できていない。これを実現するためには、地学的な時間スケールで個々の火山の性質を知り、その火山が現在どのような状況にあり、今後どのような活動をするのかを知る必要がある。このため、個々の火山の噴火履歴を調査し、過去の噴火様式を整理してどのような噴火の推移をしたかを噴火事象系統樹図にまとめ、個々の事象の発生確率を見積もることが重要である。

三宅島の過去の噴火の履歴及び観測結果から全ての噴火事象を抽出し、発生頻度を付した噴火事象系統樹を作成した(図3)。特に、最近300年間の噴火の前兆地震活動の発生時期、噴火の継続期間及び噴火後の地震の継続期間の記録からは、ひとつの噴火事象から次の事象が発生するまでの時間や各現象の継続時間の範囲を知ることができる。図3の系統樹の枝に示した数値は、過去の噴火から算出される発生確率である。地球物理観測の成果が20世紀中頃からしか存在しないことや、2000年噴火のカルデラ形成は約2500年ぶりに発生したまれな事例であったことなどから、系統樹の右側にある現象ほど発生頻度が少なく精度が低い。このため、今後は物理・化学モデルに基づいた情報も取り入れ、発生確率を評価することが必要である。

### 3. 平成 21 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、それらの予測精度を向上させるために、日本列島全域には稠密な地震・地殻変動等の観測網が、全国の火山周辺には地震・地殻変動・重力・全磁力等の火山活動観測網が着実に整備・強化されつつある。また、地震活動・火山活動の高い地域では、観測データのリアルタイム処理システムの開発や整備などのモニタリングシステムの高度化を行い、地震予知や火山噴火予知のためのデータベースの構築や、地殻活動予測シミュレーションへのデータ提供の検討を開始した。現在最も巨大地震発生の切迫度の高い東海・東南海・南海地域では、プレート間滑りに関連するスロースリップの検出が重要課題であるが、その検出の高度化に関する研究を進めている。

##### ・日本列島域

即時的震源情報の提供とそれによる地殻活動・火山現象モニタリングの手法の開発・高度化を行い、少数の広帯域地震計記録から超低周波地震等を検出する解析法や継続期間が数日程度のスロースリップの自動検出システムを開発した。

また、これまで整備が遅れてきた火山観測網の整備を進めた。複数の機関が協力して、全国の 47 火山にボアホール型高感度地震計、GPS、傾斜計、広帯域地震計、空振計、火口監視カメラ等の整備を進めた。これにより、火山監視の強化と火山噴火予知研究の推進が大いに期待できる。

##### ・地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

宮城県沖では、自動処理により抽出した繰り返し小地震の発生状況及びプレート間の非地震性滑り状況のモニタリングを行った。最近 4 年間では、福島県、茨城県のはるか沖合で 2008 年以降非地震性滑りの加速が顕著であること、この滑りの大部分は 2008 年 5 月の茨城県沖の地震（マグニチュード 7.0）後に発生していること、2009 年末頃においても同領域の滑り速度は以前よりも速い状況が続いていることなどを明らかにした。

##### ・東海・東南海・南海地域

新たな地殻変動検出手法として、干渉 SAR 時系列解析手法を近畿地方に適用した。陸域観測技術衛星「だいち」による SAR 干渉画像と GPS データを統合処理し長波長ノイズを除去することで、広範囲で微小な地殻変動を検出するのに有効であることがわかった（図 4）。この手法を用いることにより、アスペリティ周辺で発生するスロースリップや低周波微動等に伴う微小地殻変動を精度よくモニタリングできる。

##### (2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

##### (2-1) 地震発生予測システム

地震発生とその準備過程の物理学的理解に基づいて構築された地殻活動予測シミュレーションモデルと、モニタリングシステムから得られる観測データを統合した地震発生予測システムを開発し、それに基づいて「地震がいつ、どこで、どの程度の規模で発生するか」の定量的な予測を目指している。現実的なシミュレーションモデルの開発には、観測データを取り込み、現実の現象を再現するデータ同化が必要がある。このため、データ同化の手法の開発を行った。また、従来のシミュレーションモデルでは考慮されていなかった物理過程を取り込んだ高度なシミュレーションの手法を開発した。さらに、地震活動を確率論を用いて予測する手法の検証を進めた。

#### ・地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

プレート境界における応力や滑りの時間変化を計算するための地殻活動予測シミュレーションは、これまでは現実の観測データを定性的にしか再現できず、定量的評価ができなかった。そこで、観測データから得た情報を初期条件としたシミュレーションを行うことや、シミュレーションに観測データを直接取り込むデータ同化手法の開発を行った。図5にその例を示す。最初に、西南日本のGPSデータを解析して東南海・南海地震の震源域を含むユーラシアプレートとフィリピン海プレートの境界面における滑り遅れ（固着の程度）の分布を推定した。次に、この滑り遅れ分布から求めた応力分布を初期条件として、破壊伝播のシミュレーションを行った。その結果、東南海地震・南海地震の発生を再現することに成功した。

また、データ同化手法の開発については、GPSにより観測された余効滑りデータを利用して、地殻活動予測シミュレーションモデルに必要な摩擦パラメータを推定する手法を開発した。これを平成15年（2003年）十勝沖地震の余効滑りのデータに適用し、現実のプレート境界面上での摩擦パラメータを推定することに成功した。

#### ・地殻活動予測シミュレーションの高度化

より現実的なシミュレーションモデルの構築を目指して、従来考慮されていなかった摩擦発熱や間隙流体圧の時間変化などの物理過程を考慮したシミュレーション研究を行った。地震発生時の摩擦発熱を考慮すると、考慮しない場合に比べて地震の繰り返し発生間隔が長くなることを明らかにした。また、摩擦発熱、間隙流体の移動等と断層滑りの相互作用についての理論的研究から、地震時の高速な断層滑りとスロースリップが統一的に理解できることを明らかにした。

#### ・地震活動評価に基づく地震発生予測

これまで、地震活動を確率論的に予測するための統計モデルが開発されてきたが、予測能力の比較・検証は十分に行なってこなかった。そこで、モデルを統一的に評価・検証するために、国際研究プロジェクトCSEPと連携して地震活動予測検証実験を開始した。

### （2-2）火山噴火予測システム

ある程度観測体制が整備された火山では噴火の前兆を観測から捉えることができるが、一旦始まった噴火の規模や様式、推移の予測は、その火山の直近の噴火例を重視しがちで、大きくはずれる例もあった。これらの予測を成功させるには、過去の噴火履歴や火山観測例に基づいて、将来起こりうる噴火の先行現象や噴火の推移をすべて網羅した噴火事象系統樹を作成しておくことが重要である。また、これを用いて噴火活動の時系列を推定する噴火シナリオを実際に活動している火山

に適用し、噴火シナリオの有効性や不備などを評価することが必要である。噴火シナリオの作成と噴火シナリオに基づく噴火予測を5か年かけて試行する予定で、平成21年度は三宅島火山（東京都）の噴火シナリオを作成した。

- ・噴火シナリオの作成

三宅島の過去の噴火の履歴と観測データから全ての噴火事象を抽出し、発生確率を付した噴火事象系統樹を作成した。これと、過去の噴火事例との対比により、ひとつの噴火事象から次の事象が発生するまでの時間や各現象の継続時間の範囲を知ることができる（2. 平成21年度の代表的な成果を参照）。

今後、三宅島で試作した噴火シナリオの高度化と、桜島等の噴火活動中の他の火山での新たな噴火シナリオの試作も行う。

- ・噴火シナリオに基づく噴火予測

作成した噴火シナリオを現実の噴火活動に適用して噴火予測を行い、その有効性を検証するとともに、改善点を見つけ出すことが噴火予測の高度化に不可欠である。三宅島の火山活動が低調であったため、試作した三宅島の噴火シナリオを効果的に検証することはできなかった。次年度以降、現在活動中の桜島火山等の噴火シナリオを試作し、これを実際の噴火予測に試用することにより、噴火シナリオに基づく噴火予測の有効性を検証する。

### （3）地震・火山現象に関するデータベースの構築

地震や火山噴火現象を解明し、それらを予測するシミュレーションモデルを開発するためには、その基盤となるデータが利用しやすい形式で長期に保存されていることが必須である。地震や火山現象解明のために必要な観測データをまとめた「基礎データベース」を構築するとともに、予測シミュレーションモデルの開発のために、基礎データにこれまでの研究成果を付加した「統合データベース」も構築する必要がある。ひずみ計や傾斜計の基礎データベースの整備と、統合データベースのフォーマットを統一化し、利便性を図った。

- ・地震・火山現象の基礎データベース

ひずみ計や傾斜計は、変動の周期が数日程度の地殻変動においてはGPSよりも高感度であり、地震発生に至るプレスリップやスロースリップの検出において大きな役割を果たすものと思われる。基盤的観測網として整備され、データの流通が進んでいる地震計データやGPSデータに比べると、ひずみ計や傾斜計データの流通やデータベース化は格段に遅れていた。ひずみ計と傾斜計に加え、重力計、水位計、気圧計などデータも含め、全国の50観測点データを一元的に管理し、試験的に流通させた。また、地震計データでは、高感度地震観測網、広帯域地震観測網、強震観測網の波形データをひとつにまとめ、日本周辺の地震について総合地震波形データベースを構築した。

- ・地震・火山現象に関する情報の統合化

地殻の弾性層の厚さ、重力異常、地震発生域深度の上限・下限、GPSによって得られるひずみ速度、地震活動度、活断層、地温勾配、地磁気データ等の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画像による表示方法を取り入れ、異種の物理量間の相関について系統的な調査を開始した。また、これまでに構築されている各機関のデータベースへのポータルサイトを構築し、従来は困難であった機関の壁を越えたデータベースの相互参照を可能にした。現状では個別データベースの羅列にとどまっているが、これを改善して統合データベースへと発展させる必要がある。

### 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、プレートが日本列島下に沈み込んでいることが大きく関与しているが、プレートの沈み込みによって地震や火山噴火が生じる機構は完全には解明されていない。地震や火山噴火発生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は重要である。そのため、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・上昇機構に関する理解を深め、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。また、水やマグマ等の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、プレートの沈み込みによって発生するという共通の地学的背景を持つ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ひずみの時空間分布を解明する必要がある。

##### ・列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場

地震と火山噴火は広域的な応力場に影響を受けるため、日本及びその周辺の応力場を精度よく推定することは重要である。VLBI、SLR、GPS等の宇宙技術を用いた測地観測の進歩により、日本列島を含む広域の地殻変動、広域の応力場が明らかになった。データの蓄積により、毎年その精度が向上してきている。

##### ・上部マントルとマグマの発生場

日本列島の成因を知るには、島弧の発達過程の解明が重要である。伊豆弧に沿った地震波を用いた地下構造の大規模探査と、火山噴出物の分析から伊豆弧の発達過程を明らかにした。また、プレートの沈み込みで起こる脱水過程の深度を推定したところ、これまでの仮説よりも深い領域まで続いている可能性があることがわかった。

##### ・広域の地殻構造と地殻流体の分布

温度検層データを用いて関東地方の地殻熱流量の分布を推定したところ、北緯36度付近を境に北では高く、南では低いことがわかった。これを用いて温度分布を計算したところ、フィリピン海プレートの形状や地震活動度との相関が良いことがわかった。

跡津川断層（岐阜県）域において広帯域MT観測とネットワークMT観測のデータを同時に用いて比抵抗構造の推定を行った。その結果、表層から上部マントルに至る広い深度の範囲で比抵抗構造

が推定できた。新潟－神戸ひずみ集中帯中軸部の3つの主要な断層（牛首断層、跡津川断層、高山・大原断層帯）深部の下部地殻に、上下に伸びた局在化した低比抵抗域が存在することがわかった（図6）。さらに、地震波速度構造と比較すると、これらの低比抵抗域は低速度域に概ね一致する。以上の結果より、3つの主要断層下には、透水性の高いせん断帯が局所的に発達しており、せん断帯内には流体が存在することが明らかとなった。この流体を含んだせん断帯の変形が進行することで、上部地殻内の断層面に応力が効率的に集中することが予想される。

下部地殻より深い上部マントル内は、北側（牛首断層－跡津川断層下）でやや高比抵抗、南側（高山・大原断層帯下）で低比抵抗となる強いコントラストが認められた。上部マントルの地震波速度構造によると、フィリピン海プレートの上盤側の深さ100 kmから200 kmにかけて低速度体が検出されており、上記の上部マントル内の比抵抗領域は地震波速度構造から得られるイメージと調和的である。すなわち、地殻だけでなく上部マントル内にも低比抵抗、かつ低速度の異常域が存在する可能性が高く、沈み込むプレートから放出された水、もしくはマグマの上昇経路を捉えていると考えられる。

#### ・地震活動と火山活動の相互作用

伊豆東部の群発地震活動の予測について、火山噴火予知研究の成果が、地震調査委員会の「伊豆東部の地震活動の予測手法」のまとめに際し、その科学的根拠を与えた（2. 平成21年度の代表的な成果の項を参照）。

また、南海トラフ巨大地震発生による富士山噴火連動性に関する研究に着手し、地震と火山の連動現象についての包括的な情報の整理（連動事例のデータベース化、連動をもたらすメカニズムの整理）を行った。また、地震波の通過により圧力が増したマグマ溜まりが、火口につながる火道内の気相と液相からなるマグマにどのような影響を及ぼすか評価した。

#### ・地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

航空写真測量やLiDARによる地形計測の高度化により、新たな活断層の認定や、平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震（マグニチュード7.2）を引き起こしたと考えられる活断層を見出した。さらに、この技術により、いくつかの地域で地震断層に沿った詳細な滑り量の分布を明らかにし、従来の静的な活断層分布だけでなく、地震時の滑り分布等の情報を取り入れた断層モデルの構築を目指した研究に着手した。

## （2）地震・火山噴火に至る準備過程

### （2－1）地震準備過程

地震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観測研究を実施する必要がある。プレート境界で発生する地震については、プレート間の固着が強く大きな破壊をおこすと考えられているアスペリティ領域の実体を解明し、アスペリティが大きく関与する非地震性滑りの関連を明らかにする必要がある。また、内陸地震については広域の応力によって非弾性的な変形が進行してひずみ集中帯を形成し、その中で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不可欠である。さらに、スラブ内地震の

発生機構を解明するためには、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とともに、スラブ内に取り込まれた流体の地下深部における分布と挙動の解明が重要である。

#### ・アスペリティの実体

沈み込むプレート境界におけるアスペリティの実体は、断層面の形状、断層の反射係数から推定できる間隙流体圧等プレート境界の物理特性、あるいは上盤側の物質など、これまで様々な仮説が提出されている。過去にプレート境界型巨大地震の発生が知られていない東北日本―千島弧の島弧会合部のプレート境界上盤側は、地震波が低速度の物質で占められているのに対して、隣接する2003年十勝沖地震や1968年十勝沖地震の震源域の上盤側は高速度の岩石であり、水を含まないかんらん岩で構成されたマントルと解釈される。また、宮城県沖地震の震源域においては、プレート境界上盤側に水を含む領域が存在し、その直下でのプレート境界における地震性滑りを抑制している可能性が示された。このように、プレート境界上盤側を構成する物質の差異が、プレート境界における固着強度に影響を与えている可能性を示した。

#### ・非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

深部低周波微動は、浅部側と深部側に2列の活動域があり、その二つの領域は異なる性質をもっていることがわかった(図7)。浅部側は短期的スロースリップの際などに数か月毎に活動するのに対して、深部側はより定常的に活動している。この深部低周波微動の2列分布は短期的スロースリップの発生領域を規定し、その下端部は安定滑り域との境界、上端部の一部は長期的スロースリップ域との境界を反映するものと考えられる。

宮城県沖の海溝陸側斜面で海底地震計及び圧力計を用いた広帯域地殻変動観測を行い、プレート境界地震に先行する地殻変動と考えられる水深変化を検出した。

#### ・ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

2008年岩手・宮城内陸地震の研究において、長期的な余効変動をGPS観測により検出した。この余効変動のデータから地殻の弾性層の厚さと粘性率を推定した。さらに、震源域直下及び火山(栗駒山・焼石岳鳴子・鬼首)周辺に地殻流体の存在を示唆する低速度域が存在することを見出した。また跡津川断層域では、地震発生域の下限より深いところで非弾性的な変形によって広域な応力が解消されているのと同様に、断層の両端においても非弾性的な変形が進行し、将来の地震発生域だけに応力の蓄積が進行していることをGPS観測データの解析により明らかにした。

#### ・スラブ内地震の発生機構

太平洋スラブ内の二重地震面では、地震の発震機構は上面側が圧縮型で下面側は伸張型であることが知られている。そこで、発震機構を上面側から下面側へ詳細に調べることによって、圧縮型から伸張型へと変わる応力の中立面の位置の推定を行った。その結果、東北日本ではプレート表面より約23 km、北海道では11 kmを境に応力場が変わっていることがわかった(図8)。過去に発生したスラブ内大地震の破壊域の広がりの中立面を超えて広がることなく、破壊域はスラブ内の応力場により規定されていることがわかった。

## (2-2) 火山噴火準備過程

火山噴火予知のためには、マグマ供給系を含む地下の構造を知り、マグマ上昇・蓄積過程の理解とマグマ溜まりにあるマグマの発達過程を解明し、火山噴火現象をモデル化する必要がある。また、モデル化を助けるために過去の噴火履歴を研究し、噴出物の変化の時間経過からマグマの発達過程を知ることは重要である。マグマ上昇過程やその蓄積過程については、これまでいくつかの火山で研究が進められてきた。しかしながら、マグマ蓄積過程と噴火規模、様式、推移との関連については、極めて重要な課題であるにもかかわらず未解明である。これを明らかにするため、火山活動が活発になりつつある桜島火山（鹿児島県）で観測研究を行った。また、いくつかの火山で噴火履歴とマグマ組成の時間変化について研究を進めた。

### ・マグマ上昇・蓄積過程

桜島火山では、2006年6月に昭和火口における噴火活動が再開し、2009年には548回の爆発的噴火や320万トンの火山灰が放出されるなど、近年活発化の傾向にある。ここで地殻変動、地震、電磁気、火山ガスなどの多項目観測と火山体の地下構造の探査を実施した。桜島直下に蓄積されているマグマ量と、地下深部から供給された量は、2009年10月からともに顕著に増加していることがわかった。これ以降、火山灰の特徴より深部から供給された新たなマグマ物質の放出が始まったこと、マグマに先行して火山ガスが昭和火口直下のマグマ溜まりに上昇してきたこと、高温の火山ガスが地下水を周辺部に後退させたことなどがわかった（図9）。このように桜島では、火山体直下へのマグマ蓄積と、それに付随する現象の推移が明確に捉えられ、マグマ蓄積・上昇過程の詳細が明らかになりつつある。今後は、他の火山のマグマ蓄積・上昇過程と比較することにより、一層理解が進むと期待できる。

### ・噴火履歴とマグマ発達過程

個々の火山の過去の噴出物を分析し、その火山のマグマの発達過程を研究することは、これから発生する火山噴火の様式を長期的に予測する上で重要である。地質学・物質科学的検討から、桜島火山では15世紀から新しいマグマ供給系による噴火が始まったこと、1914年の噴火からは新たに玄武岩質マグマが加わったことを明らかにした。また、764年と1471年噴火の間の西暦1000年頃に溶岩流出があったことを見出した。

さらに、伊豆大島（東京都）の江戸時代の噴火履歴をまとめ、歴史時代の代表的噴出物について岩石学的特徴を調査した。蔵王火山（宮城・山形県）、十勝岳、雌阿寒岳、屈斜路火山（以上、北海道）、岩木山（青森県）について噴火履歴の精密化と物質科学的検討を行った。これらの調査から、これまで知られていなかった噴火活動もわかり、長期的な噴火予測に有用なデータを得た。

## (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を取りこみ、直前過程に伴う現象を的確に捉え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れ

ば、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がある。このために、地震に先行する異常な地殻活動の諸現象を地震発生先行過程と位置付けて研究し、観測データから先行現象を評価するとともに、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

南アフリカの大深度鉱山では、大規模な採掘により短期間で大きな応力変化がおり、多数の地震が誘発される。そのような採掘部の近くに地震計やひずみ計を埋設して、至近距離で地震を観察している。過去の記録を精査した結果、2台のひずみ計から25 m以内で発生したマグニチュード0.3の地震の6.5時間前から、顕著な非地震性の変化を見出した。現在は、広帯域地震計、加速度計、AEセンサーなどとともに、8~9台のひずみ計からなる総合観測網を、既存の断層の周囲に3次元配置で展開する準備を始めた。

また、地震発生に先行して、地殻の弾性・非弾性構造が変化する可能性が指摘されている。これを観測データから検証するため、平成21年度は、雑微動を利用して大地震前後にその変化を検出することを試みた。

さらに、地震の発生に先行してVHF帯の電波が異常に長距離まで伝播することが国内外で観測されている。これを観測データから検証するため、平成21年度から観測点を増設し、その現象を複数の観測点で捉えることに成功した。

#### ・先行現象の発生機構の解明

地震に先行する地下水中のラドン濃度は増加するだけでなく、減少する例もしばしば観測されている。これは、ラドン濃度変化が帯水層中での亀裂の生成により引き起こされるという、従来から考えられていたメカニズムだけでは説明がつかないことを意味する。帯水層中の状態の変化など様々な要因をモデルに組み込むことで、ラドン濃度の減少を定量的に説明することに成功した。先行現象では観測される異常の大きさが単純な物理的モデルからの推定されるものに比べて大き過ぎることがしばしば問題とされるが、その点について定量的考察を行いながら研究を進めた。

### (3-2) 地震破壊過程と強震動

大地震発生に伴い生じる強震動や津波をより高精度に予測して災害軽減に役立てるためには、地震断層面の不均質性による複雑な地震破壊過程を理解し、地下構造モデルを高度化する必要がある。実際に発生した地震の地震破壊過程研究と強震動観測は、強震動予測の基盤となるものである。しかし、既存の震源断層モデルや地下構造モデルでは、強震動等の実際の観測記録を十分説明できないなど不十分な点が多い。このため、観測データ解析と数値計算の協調により両者を高度化し、震源解析及び震源物理に基づく破壊過程の研究を推進した。また、大地震発生による津波を高精度に推定する手法を開発し、津波波形を用いて震源過程を推定した。

#### ・2009年の駿河湾の地震

2009年8月11日に発生した駿河湾の地震（マグニチュード6.5）について、地震波形、GPSによる地殻変動記録、津波波形等を用いた逆解析により、震源破壊過程と津波発生メカニズムを調べた。

その結果、この地震は沈み込むフィリピン海プレート内で発生し、南東傾斜と北東傾斜の二つの断層面を持つことが明らかになった。またリアルタイムで収集される強震記録を用いた、震源過程解析の自動化に向けた検討も進められた。

#### ・地下構造モデルと強震動

地震波の伝播に強い影響を与える不均質な地下構造の影響を取り入れるために、地下深くまで求められた地下構造モデルと別途高精度に求められた表層モデルを組み合わせることで、実際に観測された強震動波形を再現する手法の開発を行った。この手法を実際の大地震に適用して強震動波形を計算したところ、これまでの手法では再現出来なかった観測記録の特徴が再現でき、強震動波形推定の高精度化が検証できた（図 10）。

#### ・強震動・津波の生成過程

沿岸での津波予測のために、地震発生後、逐次更新される観測記録をリアルタイム解析する手法の開発を行った。沖合に設置された海底ケーブル津波記録計を用いて地震の破壊過程を解析し、地震波形記録からだけでは不十分であった 2004 年紀伊半島沖地震の発震機構や地震断層の広がり精度よく推定できた。また、複雑な海底構造の影響を受けて伝播する津波と、不均質地下構造を伝播する地震波を高い精度で評価するために、地球シミュレータに適した数値シミュレーションのためのプログラム開発を行った。

### （3-3）火山噴火過程

火山噴火予測のために、噴火機構の解明とそのモデル化及び噴火の推移と多様性を把握する研究を進め、それらの成果をあわせることにより、実用的な噴火シナリオを作成する手法を見つけることが重要である。平成 21 年度は、繰り返し噴火する火山を対象として多項目の地球物理学・物質科学的観測を行い、火道における発泡・脱ガス過程などのマグマの挙動を調べ、観測データをもとに噴火現象のモデル化を試みた。また、火山体浅部の熱水系や火道周辺構造と噴火の規模や様式との関係を調べた。さらに、多様な噴火形態やその推移の規則性や頻度を理解するために、三宅島における過去の噴火履歴を明らかにした。

#### ・噴火機構の解明とモデル化

諏訪之瀬島（鹿児島県）で頻繁に繰り返される小規模な爆発的な噴火過程を明らかにするため、火口から 1 km 以内に複数の傾斜計を設置し、他の観測項目と比較しながら爆発的噴火に伴う傾斜変動を調べた。爆発的噴火に伴う山体の膨張は爆発の約 1 分前から起こり、火口から離れるに従って振幅は小さくなり、1 km 以遠で観測できなくなる。この特徴は、火道が常に開口している火山の爆発的噴火の特徴であると言える。

一方、浅間山（長野・群馬県）で発生している長周期振動（VLP）の原因を明らかにする目的で、広帯域地震計を火口近傍に多数設置し、観測された地震波形の解析を行った。その結果、火道上部を占める高い空隙率の物質中に二つの割れ目があり、ガスの通過によってそれらが膨張・収縮するというモデルで VLP の発生をうまく説明できることがわかった。これらの割れ目より上部は、高エネルギー宇宙線ミュオンの観測から推定した低密度域と一致する。さらに、可搬型の紫外線カメラによる火山ガス観測では、VLP の規模と二酸化硫黄放出量には正の相関があることが明らかになっ

た（図 11）。

これらの 2 火山の観測結果からは、火口近傍に傾斜計や広帯域地震計を適切に配置すれば小規模の噴火の先行現象が捉えられることが示された。観測の高度化によって、噴火規模や爆発性の程度も予測できる可能性がある。

#### ・噴火の推移と多様性の把握

有珠山（北海道）周辺の既存のボーリングデータを調べることによって 1943～1945 年噴火の際のマグマの上昇と噴火様式の推移の関係を明らかにした。マグマが地下の帯水層（50～120 m 深）に達すると水蒸気爆発が起こり、その後、より浅部の不透水層（水を通しにくい層）に達するとマグマ水蒸気爆発が発生することがわかった。この結果、噴火の推移を予測するには火山の地下浅部の構造を知ることが重要であることが明らかになった。

また、噴火予測に必要な、噴火事象毎の発生確率の検討を行うため、噴火履歴が比較的良好にわかっている三宅島火山の噴火様式の発生頻度、前兆地震の継続期間などを調べ、噴火シナリオ作成のための資料を提供した。

### （４）地震発生・火山噴火素過程

地震及び火山噴火に関与する機構は多方面にわたり、互いに複雑に作用しあっている。その中から、いくつかの重要な過程を取り出し、その本質を知ることは、地震火山現象を理解する上で重要である。ここでは、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、従来よりも広い条件範囲にわたって物理的・化学的素過程を明らかにした。また、地下深部の岩石の物性及び環境を観測により推定できるようにするため、可観測量との関係を様々な条件の下で定量的に求めた。さらに、室内実験で得られた知見を実際の自然現象に適用できるようにするため規模依存性を明らかにした。火山噴火のモデル化のために、マグマの分化・発泡・脱ガス過程を明らかにするとともに、それらを取り込んだマグマ上昇の数値モデルを作成することを目指した。

#### ・岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

岩石の破壊や滑り特性は変形速度、温度、水の影響を強く受けることは知られているが、充分広い条件範囲にわたっては調べられていない。平成 21 年度は、摂氏 1000 度までの温度で数 cm/s 程度の中速度における滑り特性、塩化ナトリウムを含む水の滑り強度に対する影響などを明らかにした。また、内陸地震の発生は、断層深部延長の下部地殻での超塑性流動による上部地殻への応力集中が原動力となっていると考えられているが、これまで下部地殻の岩石が塑性流動するメカニズムはよくわかっていなかった。極細粒緻密な人工岩石を用いて大変形実験を行い、400%の伸び変形をした試料では伸び方向と直交した方向に粒子が再配列していることがわかり、塑性流動のメカニズム解明の手がかりを得た（図 12）。

#### ・地殻・上部マントルの物性の環境依存性

観測から求められる地震波の速度や減衰定数から、岩石の種類、温度や流体の存在を推定するために、室内実験を行った。沈み込んだスラブ上盤側と境界付近の主要構成鉱物は、蛇紋岩の一種のアンチゴライトであると考えられている。地震学的観測からアンチゴライトの存在を確認するため

に、地震波速度の異方性を岩石組織と対応づけた。また、アナログ物質を用いた測定により、地震波の減衰定数に対する、流体（メルト）や温度の影響を調べた。

#### ・摩擦・破壊現象の規模依存性

室内実験により岩石の詳細な摩擦・破壊構成則が明らかになってきているが、10 cm 程度の岩石試料を用いて得られた結果が、自然地震に適用できるかはよくわかっていない。南アフリカ大深度金鉱山の地下 3.3 km において発生したマグニチュード 1.9 の地震を詳細に調べ、長さ 100 m に及ぶ断層面の傾きが、室内実験で見いだされた破壊則で説明できることを明らかにした。

#### ・マグマの分化・発泡・脱ガス過程

火山噴火過程の多様性を支配する要因を明らかにし、噴火の推移を正確に予測することを目指し、マグマ溜まりと火道を持つ系を想定した実験を行った。その結果、微動の特徴的周波数の低下から噴出の短期予測ができる可能性があること、噴出量と噴出様式は圧力変動から確率予想できる可能性があることなどがわかった。

### 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

東海・東南海・南海地震、三陸沖、十勝沖など日本周辺の大地震の多くは、海域でのプレートの沈み込みによって発生するため、海底においても陸上と同程度の地震及び地殻変動等の観測データが取得できることが理想である。これを実現するため開発研究を推進した。

海底地殻変動は、変動を測るべき地点に海底局（観測点）を設置し、GPSで位置のわかっている観測船やブイからの音波の往復時間を計測して求められる。この計測方法による誤差を軽減するため、観測船の音波発生源を船底に固定する方法の開発、海底局と観測船の配置を工夫した水中音速分布推定方法の高度化を行った。これにより、海底地殻変動の測定精度が向上し、プレート間結合度の地域による違いを求められるようになってきた（図13）。また、海底での上下変動を計測する海底圧力計を開発するとともに、海洋変動予測モデルによる海底圧力変動を考慮に入れた解析手法を開発し、海底での上下変動も計測できる見通しが立った。

東南海地震に備えて、熊野灘に設置する地震・津波観測監視システム（DONET）の開発を進め、三重県尾鷲沖にケーブル式海底地震計のための基幹ケーブルを敷設した。また、製造コスト、敷設コストを下げ、しかも高い信頼性を持つ次世代のケーブル式海底地震計による観測システムを開発し、評価試験でその性能を確認した。広帯域海底地震計の開発では、地震計センサーとデータ収録部を分離して設置することにより、約10 秒より長周期では陸上地震観測点に匹敵する品質の地震記録を取得できた。

#### (2) 宇宙技術等の利用の高度化

GPSや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、その解析技術の高度化を一層図ることにより、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になる。

GPSによる観測では、大気荷重による地盤変形効果を補正し、観測点における大気鉛直分布の季節変化を考慮する解析手法を開発した。これにより地殻変動の上下成分の精度が向上した。また、火山研究において極めて重要な、高い時間分解能で地殻変動を推定する手法の開発をした。

通常の干渉SARの解析では、その性質上数メートルを超える変動をとらえることは困難で、大地震により狭い領域で大きな地殻変動があったとき、変動量を正確に推定することは困難であった。地震前後のSAR強度画像から変動を計測する手法で、2008年岩手・宮城内陸地震及び四川地震の震源付近における大変形の空間分布を推定することに成功し、その有用性を示した。

また、人工衛星や航空機による火山噴火活動のモニタリング手法では、衛星画像解析から2009年浅間山噴火の噴煙や、2009年サリチェフ火山（千島列島）の噴煙が観測された。航空機による赤外線観測データの解析手法を開発し、桜島の南岳及び昭和火口付近において、二酸化硫黄ガスの分布を推定した。

### **（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高度化も必要である。

地下状態をモニタリングする手法として、ミュオンによる観測、人工震動源の一種であるアクロスを用いた観測を行った。火口近傍を高エネルギー宇宙線で透視するミュオンによる観測は、火山活動の進行に伴う火道の変化を捉えることが期待でき、火山噴火予測に重要な道具になる可能性がある。従来型と比べて消費電力を1/1000以下にした観測機器を開発し、商用電力の利用が困難な火山近傍でも計測できる機器を作製し、桜島浅部における火道の可視化に成功した。また、東海地域の3か所で稼働しているアクロスからの信号の解析を継続して進めた。火山等のモニタリングのため、低周波数の信号を効率的に送信できるアクロスの改良を行った。

火山噴火の際に、安全に火口近傍での観測を実施するため、産業用小型無人ヘリコプターを用いた地磁気観測、地震観測を試みた。また、火山周辺で稠密な観測を実現するため、携帯電話網を利用した観測データの伝送方式の試験を行った。機動型のGPS火山変動リモート観測装置の開発では、発電効率を向上させ、GPS以外のデータを含めた複合的なデータ通信システムを開発した。火山観測に有用な小型の絶対重力計を開発では、長周期加速度計を組み込むことにより高精度化が図れることがわかった。

大深度観測井での地震観測を実現するため、レーザー計測方式の広帯域地震計の実用化を目指した開発を行った。既存の地表設置型の広帯域地震計と比較したところ、ほぼ同等の性能を有することがわかり、大深度広帯域地震観測の可能性が検証できた。また、大深度観測では避けられない高温環境でも使用できる加速度計を開発し、摂氏200度にて自然地震の加速度記録が正常に得られることを検証した。

#### 4. まとめ

本計画から本格的に指向している地殻活動予測システムの開発について、大きな一歩を踏み出した。シミュレーションに観測データを直接取り込むデータ同化手法の開発が行われ、東南海地震・南海地震の発生が再現されたほか、2003年十勝沖地震の余効滑りの観測からプレート境界面の摩擦特性が推定された。また、地震予知研究と火山噴火予知研究を連携させたことによる成果も得られつつある。例えば伊豆東部の地震活動と火山活動の相互作用が明らかとなり、マグマ貫入に伴う地震の地震活動の予測が実用化されようとしている。

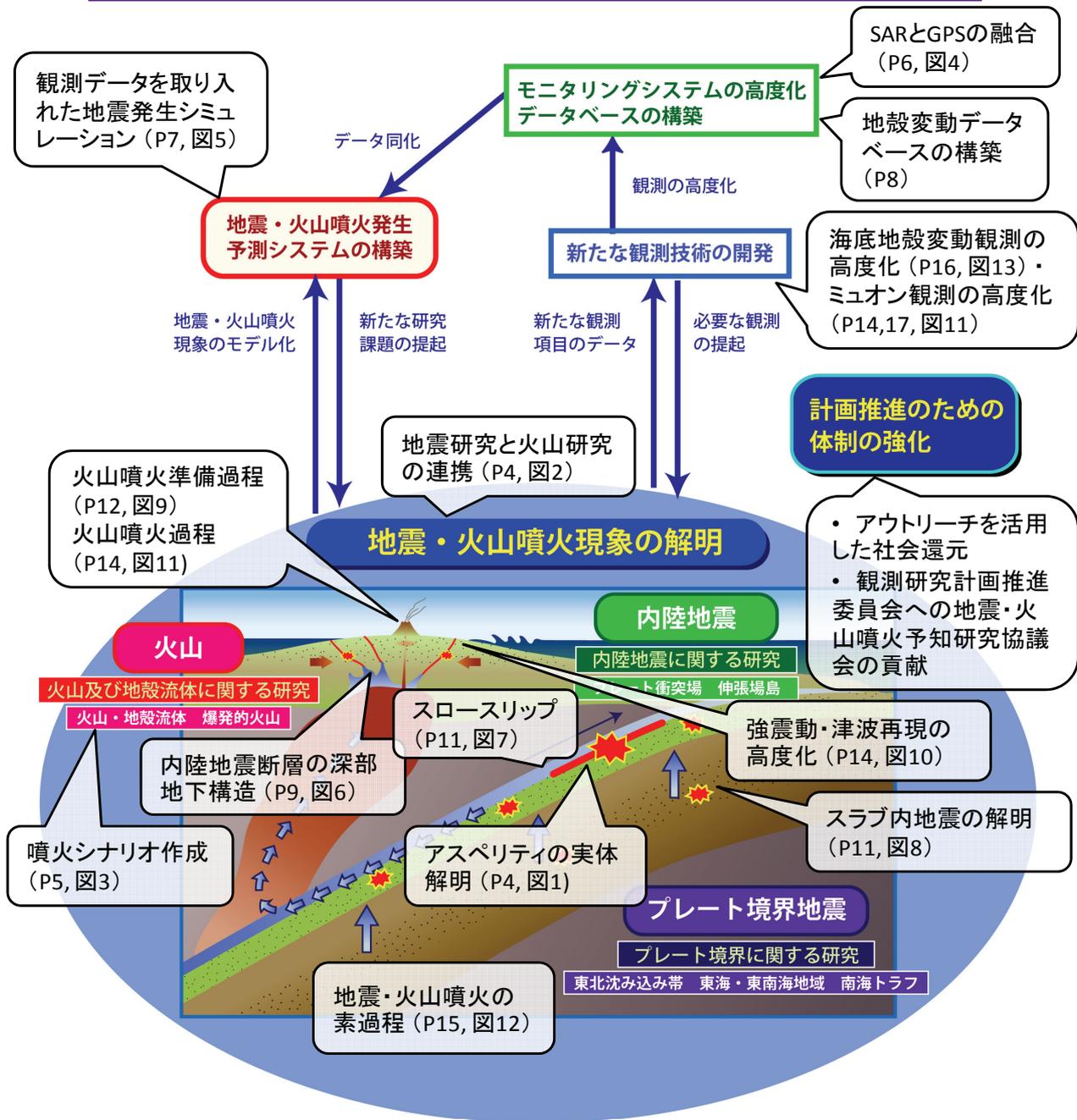
地殻活動や火山噴火予測システムを構築する上で不可欠な、地下で進行している諸過程を理解するための研究が進められた。地震断層において破壊時に強い地震波を出すアスペリティについては、プレート間の固着の強さが上盤の物性の違いを反映していることを示す観測事実が蓄積された。また、大きなアスペリティ内部に小さなアスペリティが階層的に存在するモデルが導入され、アスペリティ内部における複雑な小地震の起こり方に関する理解が深まった。内陸地震発生域では、地球電磁気学的研究により、跡津川断層域において表層から上部マントルに至るまでの水の分布や連結状態が推定された。強震動・津波予測の高精度化のために、より現実的な構造モデルや複雑な震源断層モデルを考慮し、スーパーコンピュータを利用して強震動や津波を再現する試みが進められた。

三宅島火山について過去の噴火履歴が詳細に調べられ、それに基づき火山噴火シナリオが作成された。また、桜島火山におけるマグマ供給量の増加や火口直下での蓄積量の増加等、噴火に至るまでの詳細過程が明らかになりつつある。さらに、火口近傍の観測により噴火に先行する現象が捉えられ、噴火様式・規模の予測の手がかりが得られた。

新たな観測技術の開発により、海底地殻変動観測において測定精度の向上を実現し、陸上の地殻変動データと統合してプレート運動を高精度で計測できる見通しが立った。また、高エネルギー宇宙線ミュオンを利用した観測技術が高度化された。

平成 21 年度は「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」に従い順調に研究が進められ、5 か年計画の初年度としての所期の成果が得られた（右図：成果の概要図）。

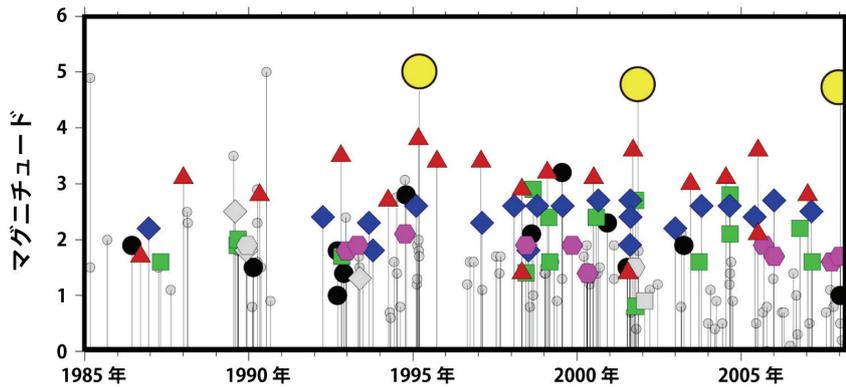
## 地震及び火山噴火予知のための観測研究の成果（平成21年度）



成果の概要図 地震及び火山噴火予知のための観測研究の平成21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頁と図番号を参照。

## 釜石沖の地震の規模別発生時系列図



## 釜石沖の地震の階層的アスペリティの模式図

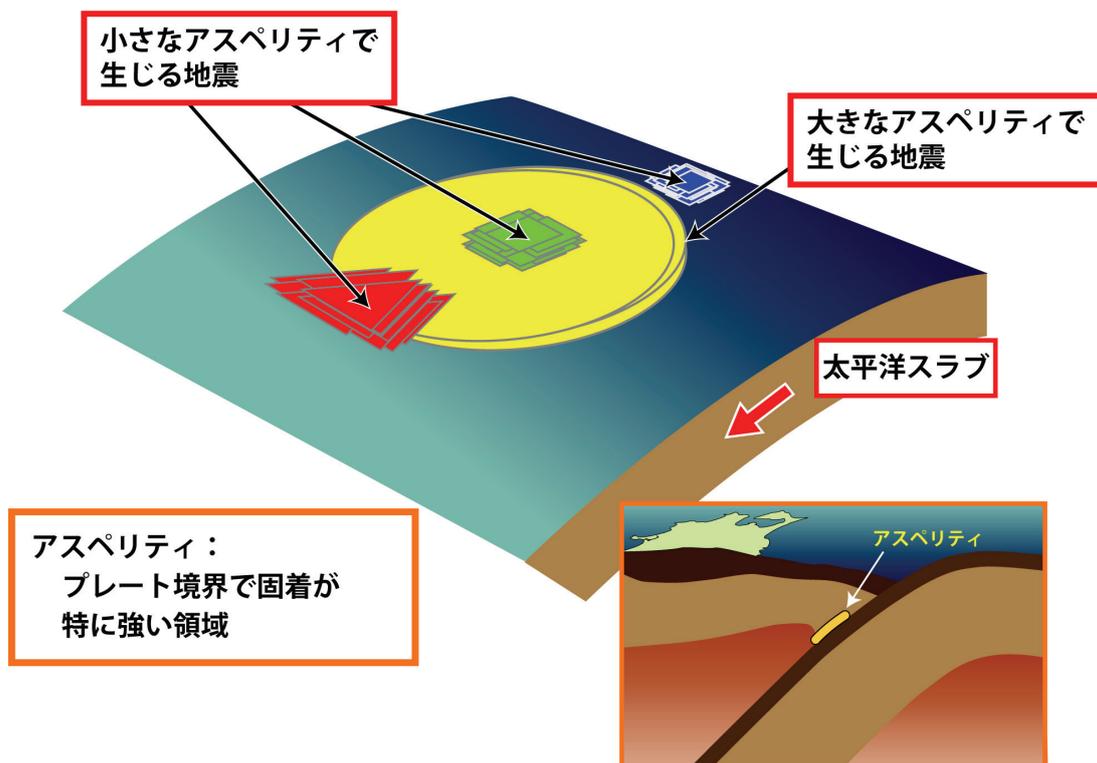
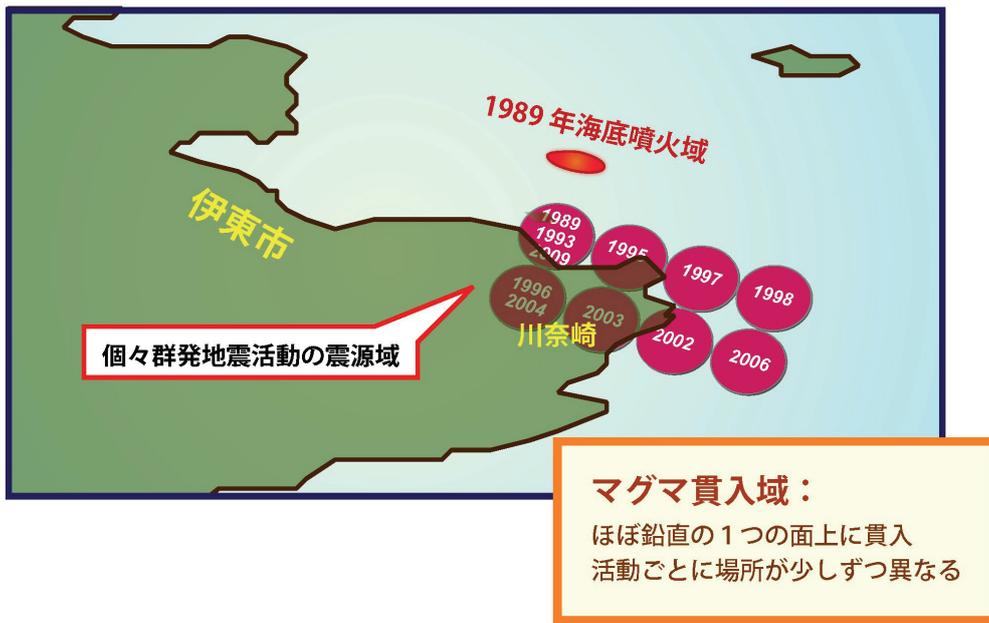


図1. アスペリティ階層モデルの概念図

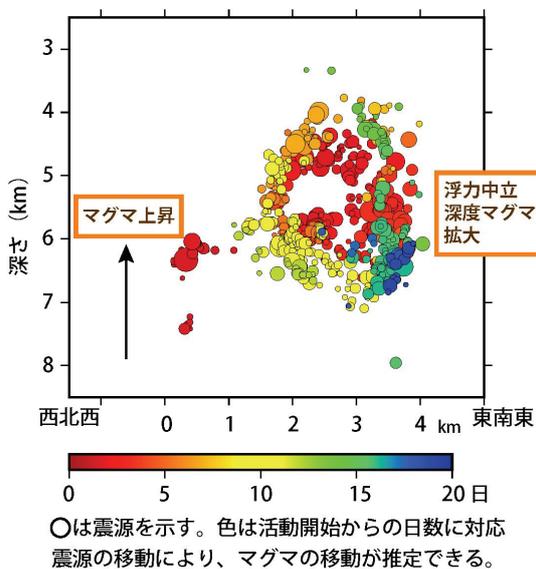
釜石沖のプレート境界で発生する地震の中には、同じ場所ではほぼ一定の間隔で繰り返す地震（●）があり、これはひとつの大きなアスペリティであると考えられている。この震源域の中にさらに小規模な地震（▲、■、■）が、それぞれほぼ同じ場所で短期間に繰り返して発生する階層的な構造を持つことがわかってきた。上図はそれぞれの地震の規模別発生時系列、下図はそれぞれの地震の発生域の模式図。▲と■の地震は大きなアスペリティの縁で発生し、大きなアスペリティが引き起こす地震発生サイクルの中で定常的に発生しているが、■の地震はアスペリティの中央部にあり、サイクルの後半に集中して発生している。これは非地震性滑りがアスペリティ内部に時間の経過とともにしみ込んで行き、最終的に全体を破壊して黄丸の大きな地震が発生することを示していると思われる。アスペリティが引き起こすプレート境界地震の予測には、このようなアスペリティの特性を知ることが重要である。

## 伊豆東部の群発地震発生域



### 震源分布の鉛直断面図

マグマが上昇・移動する場所で、  
岩盤が破壊された地震が発生する。



### マグマ上昇から海底噴火までの模式図

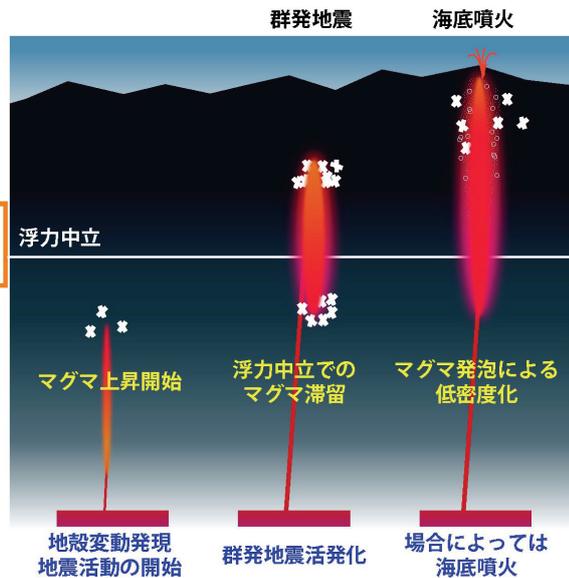


図2. 伊豆東部の群発地震活動

伊豆東部ではこれまで群発地震が繰り返し発生してきたが、ひとつひとつの群発地震活動の震源域は全体としてほぼ鉛直の同一面上に並び、ひとつ前の群発活動の震源域に隣り合う場所で活動する機会が多いことがわかった(上図)。また、個々の群発地震活動について震源の移動を見ると、活動初期(●)は深部から浅部に線状に上昇し、深さ5 km付近で停滞し、そこから時間の経過(●→●→●)とともに外側に広がってゆく(下左図)。これは、マグマが地下深部から上昇し、浮力中立深度で滞留して蓄積されることで説明できる(下右図)。さらにマグマの蓄積が増えて浅部に押し出されると1989年7月のように海底噴火に結びつくことも考えられる。このような火山噴火準備過程研究の成果が「伊豆東部の地震活動の予測手法」を取りまとめる際の科学的根拠を与えた。

# 三宅島火山の噴火事象系統樹

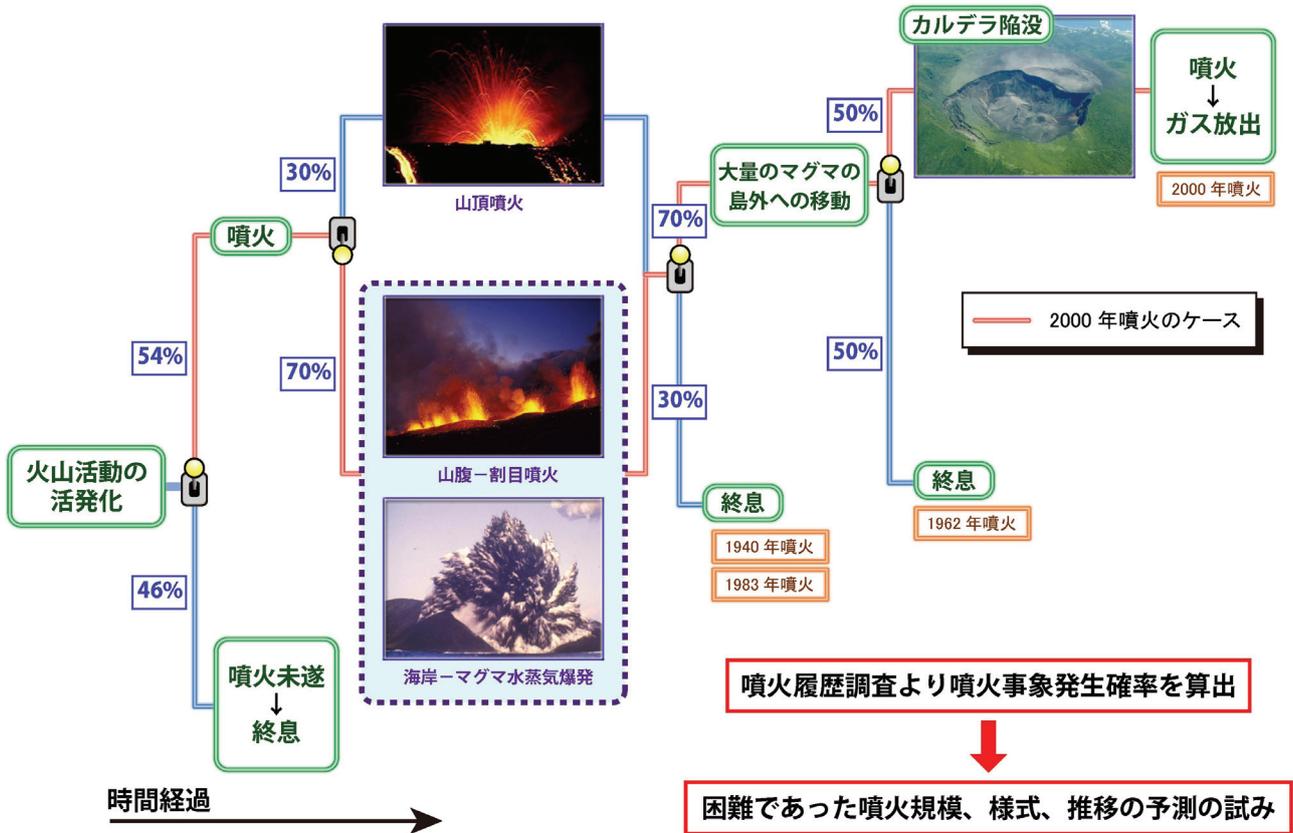


図 3. 三宅島火山の噴火事象系統樹

三宅島火山の噴火の際に想定されるあらゆる事象について、時間経過に伴う活動の推移を分岐させて表した噴火事象の系統樹に 2000 年噴火のケースを赤線で書き加えた。数値は噴火履歴研究の成果を利用し、それぞれの事象ごとにその発生頻度を示す。このような噴火事象系統樹を利用し、噴火で想定される事象を時系列で整理したものを噴火シナリオと呼ぶ。噴火シナリオを用いた噴火予測により、これまで困難であった噴火規模、様式、推移の予測を試みる。

## 地殻変動モニタリングの高度化

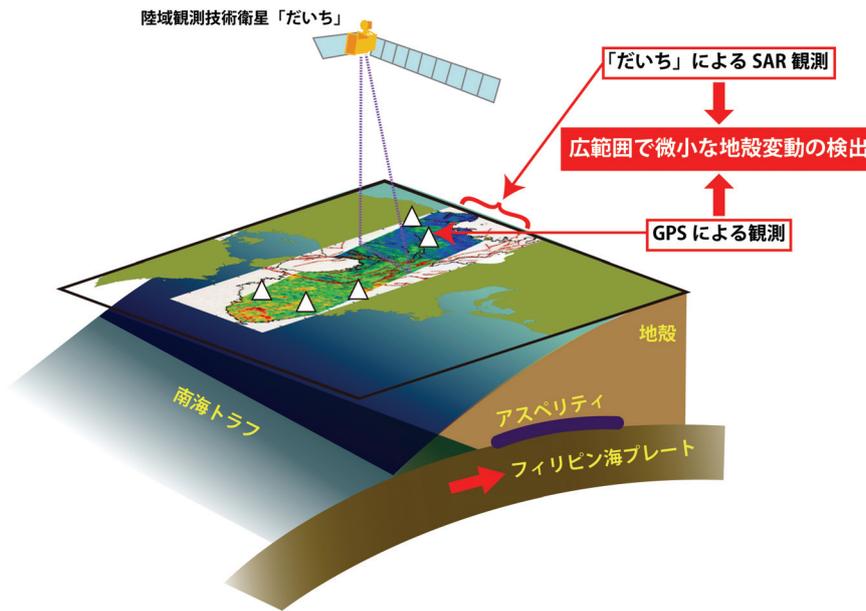


図4. 地殻変動モニタリングの高度化

干渉 SAR と GPS のデータを統合解析することにより、広範囲で微小な地殻変動の検出を可能にする手法を開発し、近畿地方での地殻変動検出に適用してその有効性を検証した。広域で微小な地殻変動の検出が可能になったことで、プレート境界での地震発生予測に必要なアスペリティの場所の推定、スロースリップの発生やプレート境界の固着状態のモニタリングの高度化が期待できる。

## 地殻変動データを取り込んだプレート境界地震発生シミュレーション

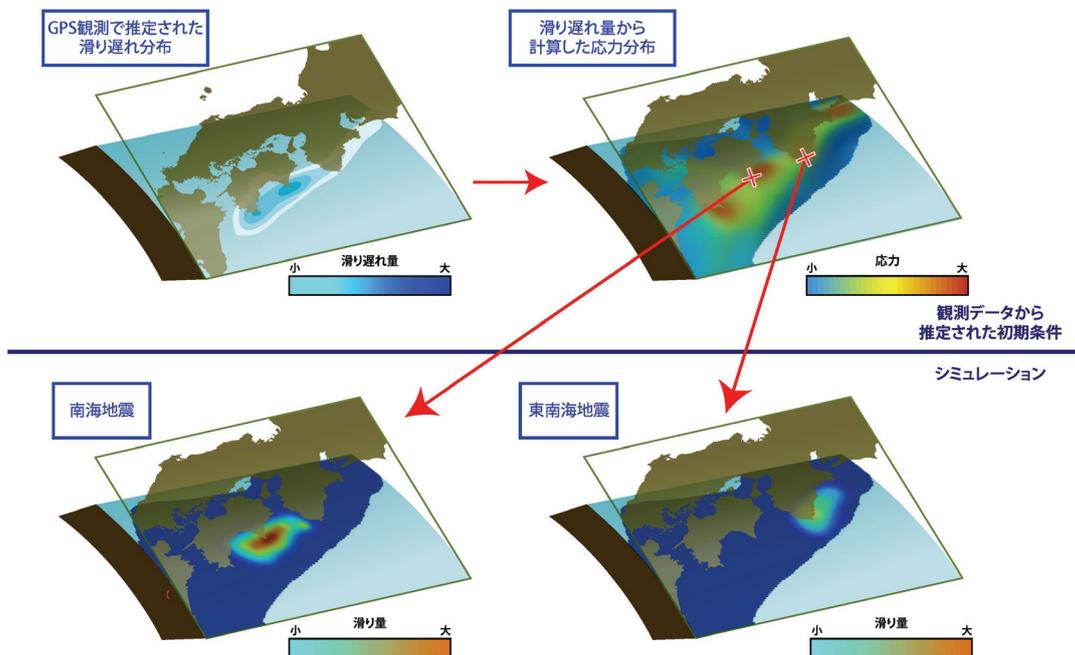


図5. 地殻活動予測シミュレーション

観測データを取り入れてプレート境界地震の発生を再現した例。GPS の観測データより推定した南海・東南海地震想定震源域における滑り遅れ分布（左上）を用いて、応力分布（右上）を推定した。これを初期値とし、プレート境界の一部で破壊が始まったと仮定した場合の、南海地震想定域での最終的な滑り分布（左下）と東南海地震想定震源域での滑り分布（右下）を計算した。このようなシミュレーションにより南海地震、東南海地震が再現できた。

## 活断層域の地下構造

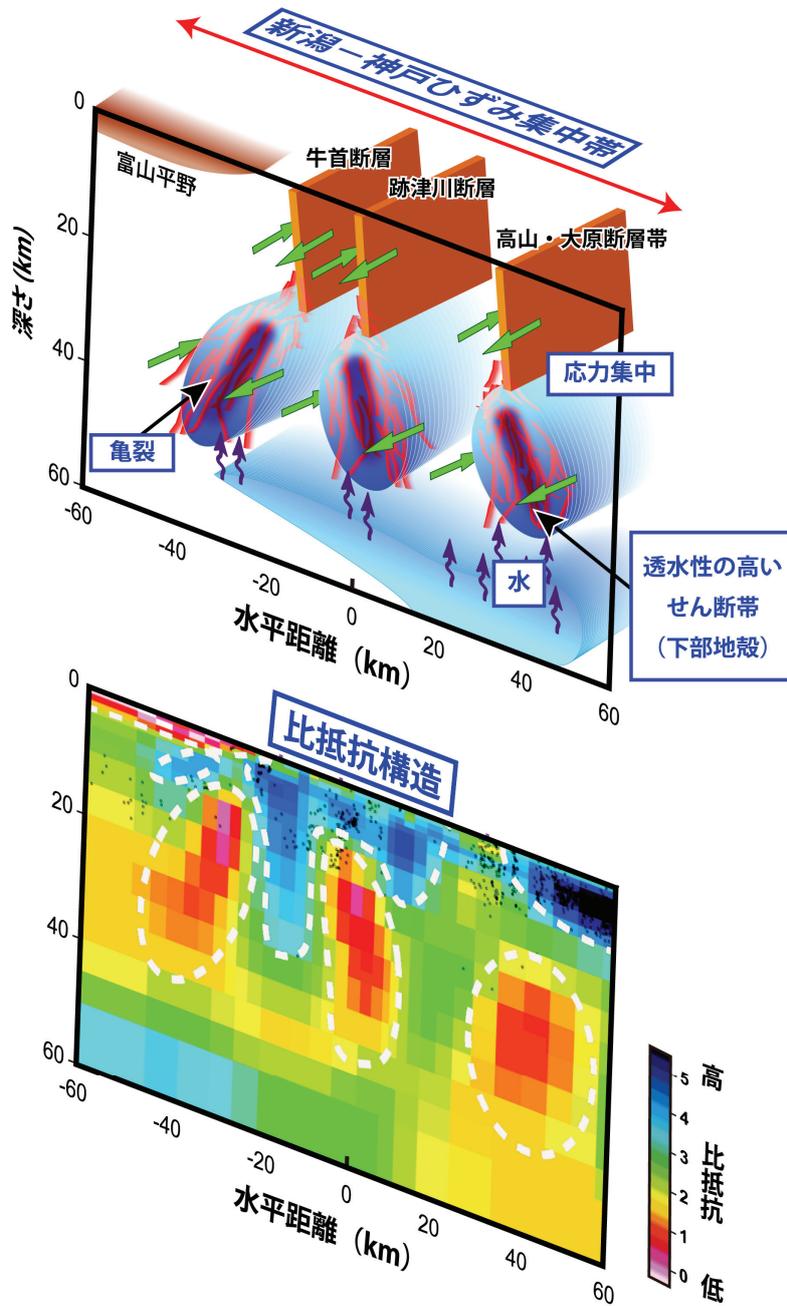


図6. 「新潟-神戸ひずみ集中帯」に位置する跡津川断層域（岐阜県）における比抵抗構造とその解釈

跡津川断層域における地下構造の模式図（上図）。3つの断層の地下には透水性の高いせん断帯が存在し、ひずみはその上部の断層域に集中するため、内陸地震が発生すると考えられている。上図のモデルの科学的な根拠となったMT観測によって推定された跡津川断層域の地下比抵抗構造（下図）では、断層深部で比抵抗の小さな領域があることがわかった。これは地下水が多いか透水性が高いことを示している。

## プレート境界滑り特性モデル

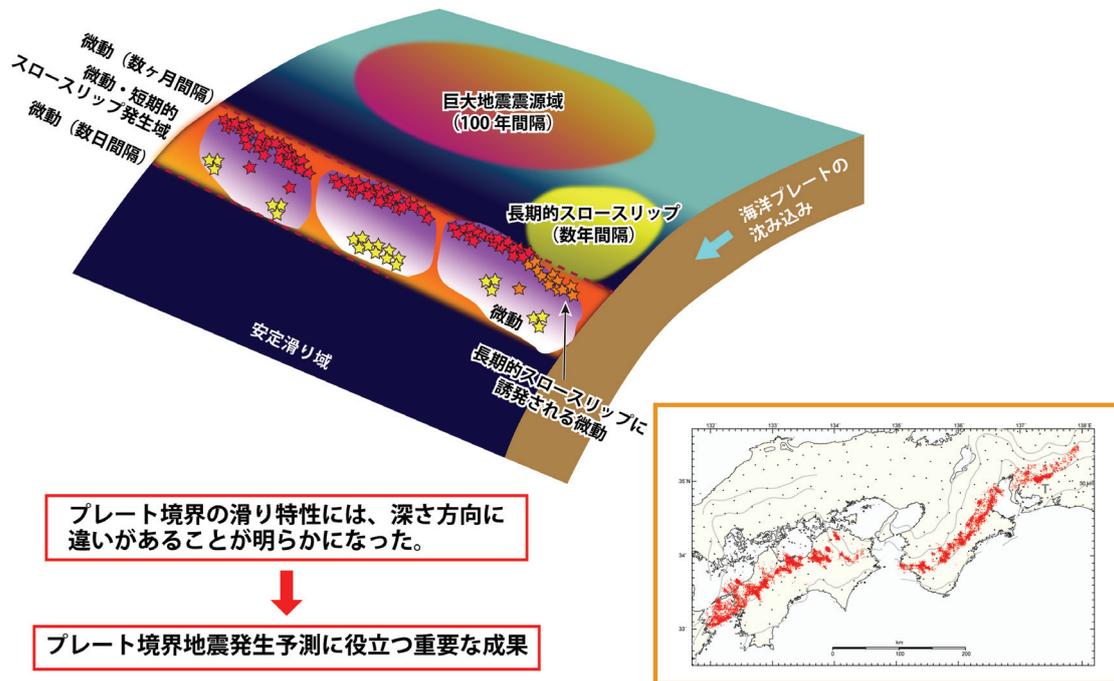


図7. プレート境界での滑り特性の空間分布

プレートの沈み込みに伴い発生する巨大地震、長期的スロースリップ、深部低周波微動の発生場所の違いを示した模式図。深部低周波微動のうち浅部で発生するもの(★)は短期的スロースリップの際に発生し、長期的スロースリップ域と接している場所では、それによって誘発される微動活動(☆)がみられる。一方、深部で発生するもの(★)は、ほぼ定常的に発生している。これはプレートの固着状態が深さとともに変化していることを示唆している。このように、プレート境界の滑り特性には深さ方向に違いがあることが明らかになり、プレート境界地震の発生予測のために重要な知見が得られた。

## 沈み込むプレート内の地震

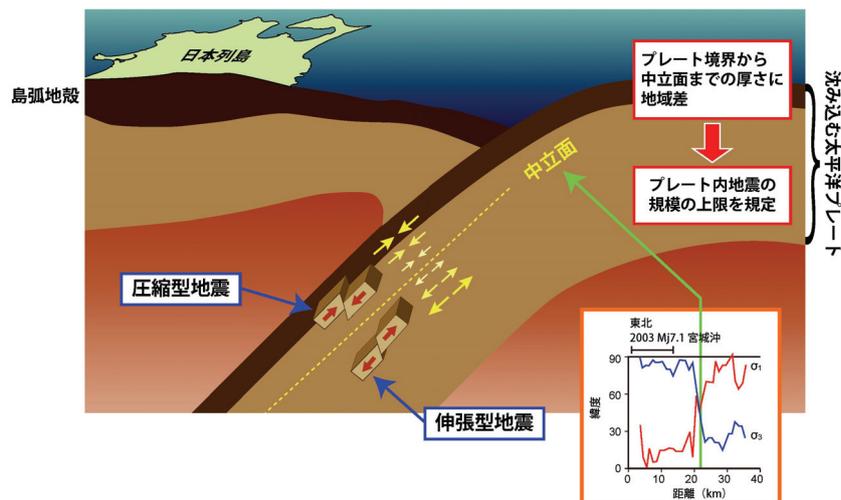


図8. スラブ内の応力中立面

沈み込む太平洋プレート境界付近では圧縮型地震が、それより深いところでは伸張型地震が起こる。この二つの発生様式の異なる地震を用いてプレート内の応力場が求められた(右下図)。地震の発生様式から応力場の変化する中立面が推定でき、プレート境界から中立面までの厚さは場所により異なることがわかった。中立面までの厚さがそれぞれの地域の地震の規模の上限や余震の拡がりを決める可能性が高い。

## 桜島火山の噴火準備過程

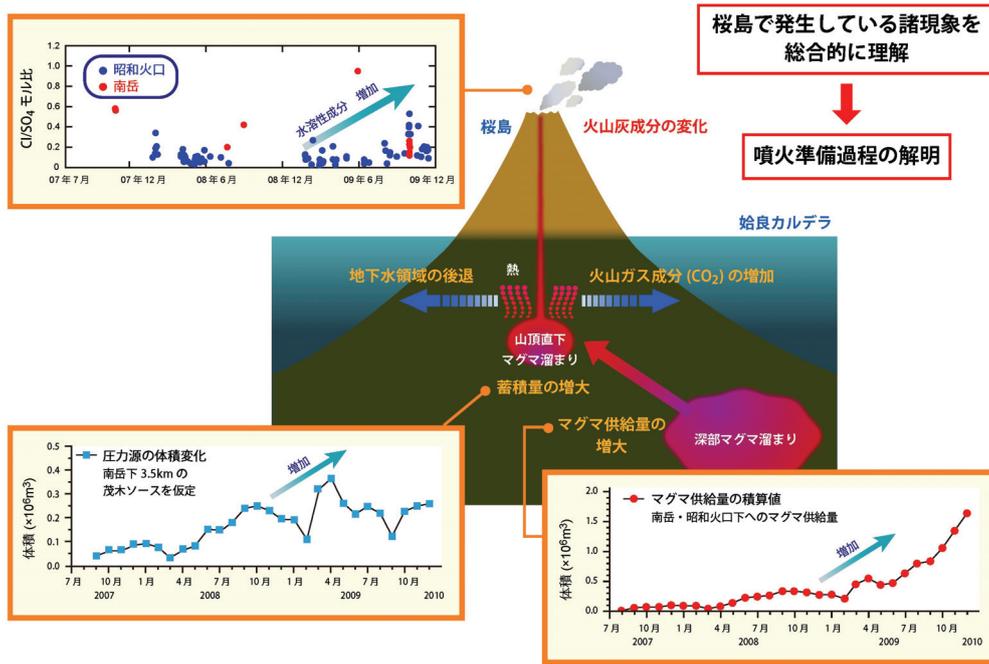


図9. 桜島火山の噴火準備過程

桜島火山では、様々な観測から今後噴火活動が一層活発になることを示す観測データが蓄積されている。例えば、地殻変動観測より山頂直下のマグマ溜まりでのマグマ蓄積量の増加がわかり、それと火山灰噴出量の計測値を加えた量からマグマ供給量の増加が推定できた。また、火口から噴出する火山ガスの成分から、桜島火山直下の地下水がマグマ溜まりの放熱により火道から後退していることが推定できた。このような諸現象を理解することにより、火山噴火に至るまでの物理・化学過程の解明を目指している。

## 地下構造モデルの高度化による強震動波形の高精度化

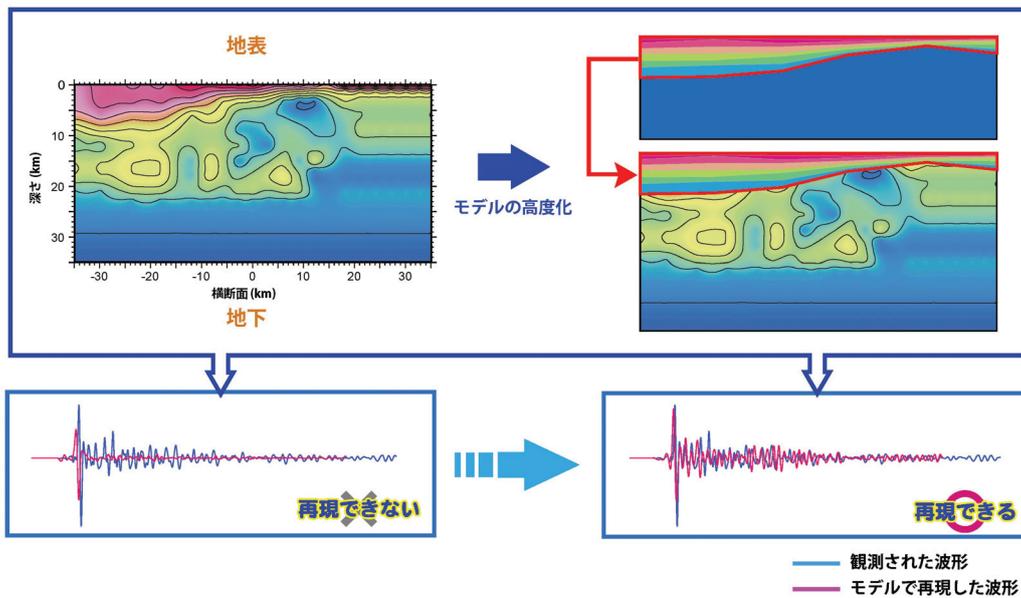


図10. 3次元地下構造モデルの高度化による強震動波形の高精度化

地下深くまで求められた複雑な地下構造モデルを使用して、地震動を数値計算で再現したが、実際の観測と合わなかった（左下図）。これに、別途高精度に求められた表層地盤の構造を組み合わせたことで、地震動波形が精度よく再現できるようになった（右下図）。これにより、強震動予測の高精度化が期待できる。

## 浅間山火口直下の構造と超長周期イベント

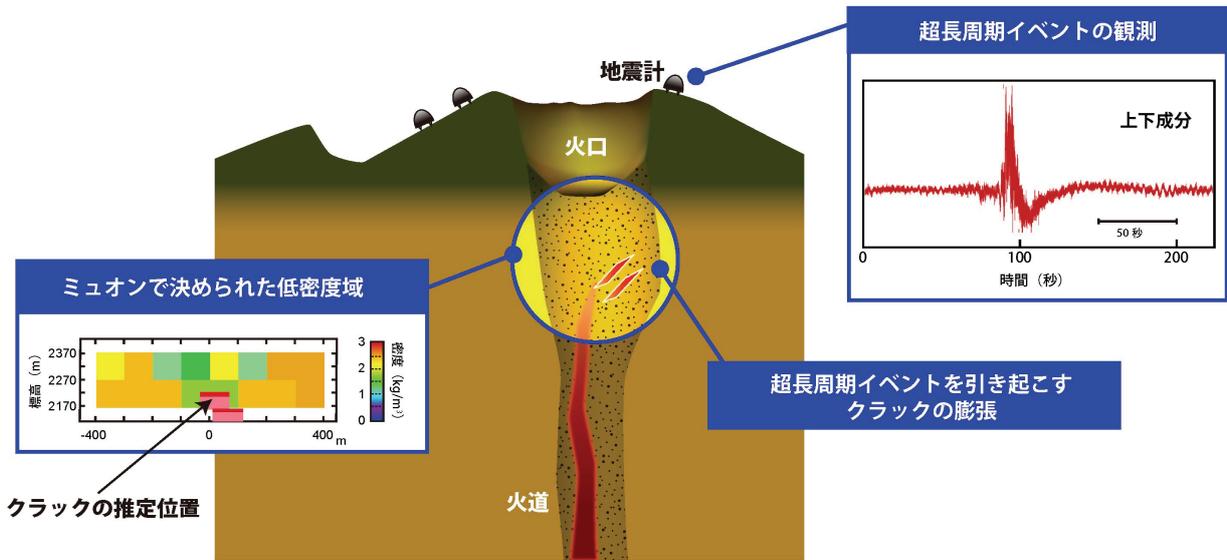


図 11. 浅間山火口直下の構造と超長周期振動

浅間山では火口近くの地震計で超長周期の振動が観測され、それが火口直下の二つの割れ目（クラック）の振動により発生していることがわかった。また、この振動源と思われる領域は、高エネルギー宇宙線ミュオンの解析によれば、密度が小さく、多数のクラックが存在し、地盤が破砕されていると推定される。ここで示した火口浅部の構造の特徴が、噴火の様式に大きく影響を与えている可能性が高く、噴火様式の予測のために重要な知見を得た。

## 岩石の塑性変形実験

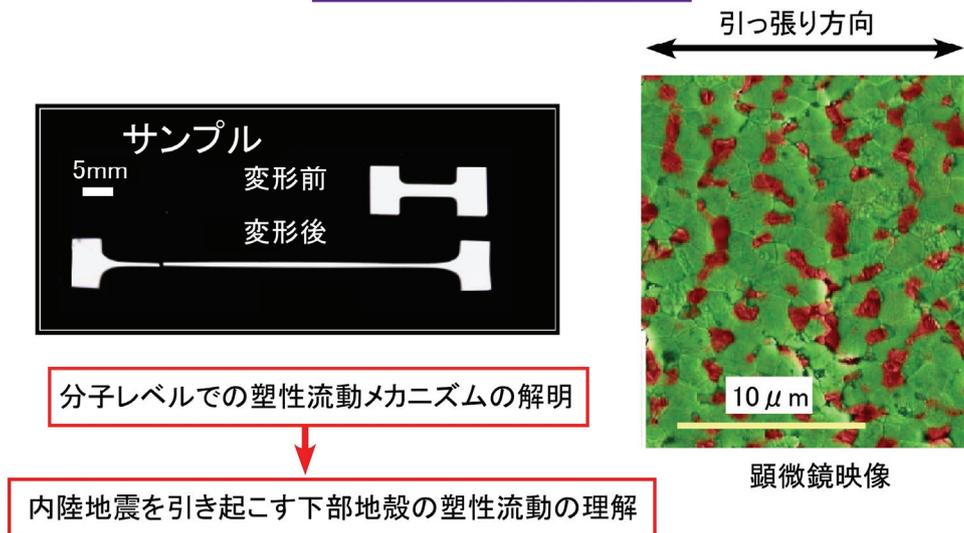


図 12. 岩石の塑性流動のメカニズム

左図：摂氏 1450 度の条件下、約 10 時間かけて引っ張った人工岩石試料。上：元の試料、下：引っ張り後の試料。元の資料から 400%の伸び変形をした。右図：400%伸張後の微細構造。矢印は引っ張り方向。緑色と赤色は異なる結晶粒子。伸び方向と直交した方向に粒子が再配列している様子が見られる。内陸地震発生の原因の一つである震源域直下での塑性流動のメカニズムを知る手がかりが得られた。



## 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。

### アナログ物質

研究対象とする物質に性質や構造がよく似ている物質のことをいう。研究対象の物質を用いた実験が困難であるとき、性質や構造がよく似ている物質であるアナログ物質を用いて実験を行う。

### 異方性

一般には方向によって物性が異なることをいうが、ここでは地震波速度の異方性のこと。振動方向や伝播方向によって地震波の伝播速度が異なること。

### 応力

物体内部での力のかかり具合を示す、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。三次元の物質中の任意の応力状態は互いに直交する三つの軸に平行な圧縮と引っ張りで表すことができるが、この三つの軸を応力の主軸と呼ぶ。

### 温度検層

観測井などで深さ方向に温度を測定し、鉛直方向での温度の変化（温度勾配）を測定すること。この温度勾配により、地表付近での地下からの地殻熱流量が推定できる。

### 活断層

地質時代でいう第四紀後期（数十万年前～現在）に繰り返し地震を発生させ、地表近傍まで食い違いを生じさせてきた断層。今後も同様の地震を発生させると考えられる。

### 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。

### 間隙流体圧

土や岩石中の空隙を占めている流体の圧力。

### 観測井

観測機器を孔底に設置した井戸や地下水、地下水温等の観測を行っている井戸。このうち、特に深いもの（通常深さ 1000 m 以上）を大深度観測井という。

## 貫入（マグマの貫入）

地殻内でマグマ圧力の急増等によりマグマが周辺岩体を破砕して経路を作り移動すること。

## 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

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。

## 強震観測網

被害を起こすような強い揺れの地震波形を、振り切れることなく確実に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 は全国規模の強震観測網であり、約 1000 の観測点からなる。

## 空振

噴火に伴って火山ガス等が火口から大気中に放出されるために発生する空気振動のこと。桜島や浅間山などで発生するブルカノ式噴火では、空振によって火口から 10km 以上も離れた家屋の窓ガラスが破壊されることがある。

## ケーブル式海底地震計

海底での地震観測を行う一方式。複数の地震計を海底ケーブルでつなぎ、地震計からのデータは海底ケーブルにより陸上局まで伝送され、リアルタイムのデータ取得ができる。

## 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、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

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。

## 広帯域地震計

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地震計。周期数秒より長い地面の揺れに対しては他の地震計に比べて感度が高い。

## 雑微動

地面は、海の波浪や風に揺れる木々や人工構造物、鉄道や道路を走る自動車などが振動源となり地震時でなくとも常に小さく揺れている。その振動は高感度の地震計で捉えることができ、それらを総称して雑微動（または常時微動）と呼ぶ。特に周期が数秒程度のものを脈動、周期1秒以下のものを微動と区別することもある。

## 地震調査研究推進本部地震調査委員会

地震調査研究推進本部は行政施策に直結すべき地震に関する調査研究の責任体制を明らかにし、これを政府として一元的に推進するため、地震防災対策特別措置法に基づき政府の特別の機関として1995年7月に総理府（現在の所管は文部科学省）に設置された。地震調査委員会は、地震調査研究推進本部の下に設置され、関係行政機関（気象庁、国土地理院など）や大学等の調査結果を収集、整理、分析し、これに基づき地震活動に関して総合的な評価を行う。

## 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。

## 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。

## 水蒸気爆発

水が加熱されて起こる爆発的な噴火のこと。水蒸気と粉々になった岩石が火口から激しく放出される。水蒸気爆発では噴出物にマグマは含まれないが、引き続いてマグマを含む噴火に移行することがある。

## 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。

## スロースリップ

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スロースリップ、それ以下のものを短期的スロースリップと呼ぶ。ゆっくり滑りとも言う。

## セグメント

活断層は常にその全長にわたって破壊されるわけではなく、いくつかの区間に分かれて活動するが、それぞれの区間をセグメントという。

## 絶対重力／絶対重力計

絶対重力とは、基準となる点からの重力差（相対重力）と対をなす概念。観測点における重力加速度そのものを指す。現在の絶対重力計は、真空中でプリズムなどの反射鏡からなる物体を、投げ上げもしくは自由落下により運動させて、加速度を計測する。測定精度・確度とも1マイクロガル（地上重力値の10億分の1）程度である。

## 全磁力

地球磁場の大きさ。磁場の観測量として、その長期的安定性が最も高い。磁気を帯びた鉱物の帯磁は、温度や応力によって変化するので、全磁力の変化は地下の温度、応力状態の変動を示唆する。

## せん断帯（地震のせん断帯）

物体の平行に向き合う面において、逆の向きに力を受け平行に向き合う面の間に滑りを生ずるような変形を受けた領域を指す。

## 素過程

地震現象や火山現象を理解する際に、それらの現象を支配する基本となる岩石の物性や物理現象のプロセスをさす。具体的には、室内実験や野外観測、あるいはシミュレーションを通して、摩擦・破壊現象や噴火現象について、岩石の性質や基本となる物理現象をもとに地震現象や火山現象の理解を深める。

## 塑性流動

高温高压下で結晶質の岩石におこる永久変形。巨視的な破壊を伴わないことが特徴で、流体の流動と見かけ上よく似ているが、メカニズムは流体の流動と異なる。塑性流動は、結晶中の転位の運動、原子の拡散、結晶粒界での滑りなどが原因で起こる。

## 「だいち」

陸域観測技術衛星（ALOS）。地図作成、地域観測、災害状況把握、資源探査等を主目的とし、2006年1月に打ち上げられた国産衛星。地殻変動検出に適するLバンド（波長23.6cm）のSARセンサー及び2種の光学系センサーを搭載する。

## 弾性層（地殻の弾性層）

地殻の上部は弾性的性質（力を加えると変形するが、力を加えることをやめれば元の状態に戻る性質）を持つが、深部になると粘弾性的性質（粘性と弾性の二つの性質を併せ持つこと）や塑性的性質（力を加えて変形させたとき、永久変形を生じる物質の性質）を持つ。地殻の弾性層とは、地殻のうち上部の弾性的性質をもつ領域。

## 脱ガス過程

マグマが地表に近づいた際に、圧力の低下のために、マグマ中に溶解していた水や炭酸ガスなどの成分（揮発性成分）がマグマから火山ガスなどとして分離する過程。揮発成分の分離する割合や仕組みは噴火機構などを左右する重要な要素である。

## 地殻活動

地震のほか、火山活動、断層の滑りや媒質の応力変化などを含めた地殻内での地学現象全般。

## 地殻熱流量

地球内部から単位面積・時間あたりに地表に向けて流れてくる熱量。

## 低周波地震

地震波の低周波成分が卓越し、高周波成分の地震波が相対的に少ない地震のこと。ここでは特に陸域の地殻深部やマントル最上部付近で発生する地震を指す。活火山ではしばしば低周波地震が観測され、マグマなどの火山流体の地下での移動や地表への噴出活動と密接に関連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。

## 二重地震面

沈み込んだ海洋プレートの内部では、プレートの沈み込む方向と平行に微小地震の震源が互いに30～50 km 離れて二重に帯状に並ぶ。この二重の微小地震の帯を指す。

## 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、移動経路などを含むシステム全体のこと。

## 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。

## 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。

## プレスリップ

地震が発生する際に、本震に先駆けて起こるある程度の大きさをもつ滑り現象のことで、地震を伴わない滑り現象の場合もある。前駆滑り、前兆滑りとも言う。

## 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 100km 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。

## 噴火事象系統樹

火山ごとに、可能性のある複数の噴火現象の時間的推移を分岐させて作成した、噴火の推移を示す系統樹。

## 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。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系統樹を指すこともある。

## 噴火様式

マグマが火砕物とガスとの混合物として噴出する場合、噴火の様子はマグマの性質や破碎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。

## ボアホール

地下深部の情報を取得するために掘削される円筒状の穴。直径は 10～20 cm 程度のものが多いが、深いほど大きくするのが普通である。ボアホールは地下深部の岩石のサンプル（コア試料）を取得する目的のほか、地下深部での地震計やひずみ計、傾斜計などの計測機器の設置、地下水・応力測定などに利用される。

## ボーリング

地表からの掘削により柱状試料を採取する手法。トレンチ調査に比べはるかに長い活動時期の地質試料を入手することができる。ただし、掘削に当たっては櫓を組み、大量の水を必要とするなど大掛かりな作業が必要となる。

## マグマ

岩石物質の高温溶融体で地表付近にあるもの。溶岩ともいう。マグマが地下で結晶化したり、地殻物質を溶かしこんだりして、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り発泡する。火道での気泡の離脱（脱ガス）の仕方により噴火の激しさが変化する。

## マグマ供給系

地下深部から火口までマグマが供給されるマグマ溜まりや、火道を含むシステム全体のことを指す。

## 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・破壊構成則

岩石の破壊強度や断層面上の摩擦を滑り変位や滑り速度などの関数として記述したもの。

## 摩擦パラメータ

地震を不安定滑りの一種であると考え、滑り面に働く摩擦の速度依存性や時間依存性の強さを表すパラメータ。

## ミュオン（宇宙線ミュオン）

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ミュ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。

## 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。

## 余効変動

地震の後に震源域あるいはその周囲で発生する地殻変動。断層面やプレート境界でのスロースリップ（ゆっくり滑り）や媒質の粘弾性変形、流体の移動による変形などによって引き起こされる。

## ラドン濃度

放射性元素ラドンの濃度。地震の発生に先行した地下水中等のラドン濃度の変化が報告されている。

## リモートセンシング

遠隔観測手法の総称。様々な波長の電波や光を用いて、対象物の地形、温度、物質などを測定する。人工衛星や航空機から測定することによって広い範囲を速く測定できる。

## AE

アコースティックエミッション(Acoustic Emission)ともいう。岩石や金属などに応力や熱が加えられると、内部に応力が集中し、これによって微小破壊などの急激な運動が引き起こされる。このような急激な運動にともなって放射される高周波の弾性波をアコースティックエミッションまたはAEと呼ぶ。

## CSEP

Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability の略。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。

## GPS

汎地球測位システム(Global Positioning System)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、三次元的な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。

## LIDAR

Light Detection and Ranging、Laser Imaging Detection and Ranging の略。光を用いたリモートセンシング技術の一つで、パルス状に発光するレーザー照射に対する散乱光を測定し、遠距離にある対象までの距離やその対象の性質を分析するもの。

## MT (法)

MT(Magnetotelluric)法は、自然界の電磁場変動(例えば、太陽風や雷放電などによる地球磁場の擾乱)を利用して、地下の電気伝導度構造を探索する方法である。0.001 Hzから1000 Hzまでの周波数帯域を用いるものを、特に広帯域MT法と呼ぶ。また、ネットワークMT法とは、深さ100 km程度までの深部電気伝導度構造を広域的に推定するため、通常自前で電線をはり電場を測定するところを、NTTのメタリック回線を用いて数kmから10 km離れた2地点間を結び、長基線でかつ長期間電位差を測定する観測法。

## SAR

合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar)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。干渉SAR(Interferometric SAR、InSAR)は、2時期の観測データの差をとる(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。

## SLR

人工衛星レーザー測距(Satellite Laser Ranging)の略。人工衛星に搭載した逆反射プリズム(コ

ーナーキューブ) に対して、地上基地局からレーザー・パルスを発射し、そのパルスの往復時間から衛星までの距離を 1cm 程度若しくはそれより良い精度で求める技術。

#### V H F

VHF (Very High Frequency) は超短波を意味し、30~300 MHz までの周波数の電波を指す。

#### V L B I

超長基線電波干渉法 (Very Long Baseline Interferometry)、または超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometer) の略。クエーサー (準恒星状天体) から放射される宇宙電波を数千 km 離れた複数の観測点で同時に受信し、その到達時間差から観測点間の距離や位置関係を測定する。



[ 参考資料 ]

## 目 次

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)	4 1
1 (1)	地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化	4 2
1 (2) (2-1)	地震発生予測システム	5 8
1 (2) (2-2)	火山噴火予測システム	6 5
1 (3)	地震・火山現象に関するデータベースの構築	7 0
2 (1)	日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象	7 3
2 (2) (2-1)	地震準備過程	9 7
2 (2) (2-2)	火山噴火準備過程	1 1 5
2 (3) (3-1)	地震発生先行過程	1 2 2
2 (3) (3-2)	地震破壊過程と強震動	1 3 6
2 (3) (3-3)	火山噴火過程	1 4 8
2 (4)	地震発生・火山噴火の素過程	1 5 3
3	新たな観測技術の開発	1 6 3
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		1 7 4
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		1 8 0

## 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）に示されたの実施内容について、平成 21 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 12 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 21 年度の成果の概要」である。本編の「平成 21 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（名古屋大学大学院環境学研究科）
  - 「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  
藤本博己（東北大学大学院理学研究科）

\*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、12 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、それらの予測精度を向上させるために、これまでに日本列島全域に稠密な地震・地殻変動等の観測網、および全国の火山に地震・地殻変動・重力・全磁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、これらの既存の観測網を着実に維持・更新し、得られたデータを活用して地震活動・地殻変動及び火山活動を的確にモニターしていくことが必要である。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、新たな観測手法・解析手法の導入、観測データの実時間処理システムの開発と整備といったモニタリングシステムの高度化を図ることが必要である。また、本計画では、地殻活動予測シミュレーションに基づく地殻活動の予測、および噴火シナリオに基づく火山現象の予測を指向しており、モニタリングシステムの出力の高度化、すなわち、定期的あるいは準リアルタイムでの各種の観測データのデータベースあるいはシミュレーションシステムへの提供について重点的に検討を行う必要がある。

各種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・火山噴火予知連絡会などに提供されているほか、各機関や関連のホームページで公開されている。特に顕著な地震や火山活動があった場合には集中的な観測が行われる。平成 21 年度には、2009 年 8 月 11 日の駿河湾の地震(M6.3)、2009 年 12 月の伊豆半島東方沖群発地震の際には集中的に観測が行われ、結果が迅速に公開された。

### 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地震観測網を用いて一元的な震源決定処理が気象庁により行われているが、震源決定精度の向上、地震活動異常を定量的に評価するシステムの構築、CMT 解や震源過程解析の高精度化が図られた(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である 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、地震観測データのチャンネル情報管理システム(CIMS; Channel Information Management System)を JDXnet 上で運用する検討を始めた。また、衛星テレメタリングシステムの更新の更新を行い、低消費電力で帯域利用効率の高い新世代の VSAT システムがほぼ完成した。降雨などによる通信障害によって生じるデータ欠落を回復するための付加装置(Uehira, 2009)が開発された。地上通信回線や現地記録方式を有効に利用する機動観測機器が導入された(東京大学[課題番号: 1401])。

長周期波動場のモニタリング、即時的震源情報の提供とそれによる地殻活動・火山現象モニタリングの手法の開発・高度化が行われた。超低周波地震活動モニタリング(浅野, 2009)について、少数の広帯域地震記録から超低周波地震を検出する解析法を開発した(図 1)。十勝沖を対象として試験を行い、既知イベントから約 30 km 離れたイベントも本手法で検知可能であること、2 イベント間の到達時刻差からその相対的な位置の推定が可能であることを確認した。西南日本における深部低周波微動や深部超低周波地震(Obara, 2009, Obara and Sekine, 2009, Maeda and Obara,

2009) については、従来のエンベロープ相関を用いた方法に加え、振幅の空間分布を考慮したハイブリッド法を実装し、カタログの再構築を行った(図2)。短期的スロースリップイベントの自動検出システムを開発した。四国での過去データを用いて試験を行い、手動で検出との整合性を確認するとともに新たな繰り返し発生するスロースリップイベントを検出した。Hi-net 自動処理システムによるイベント・トリガ情報を受けて相似地震を自動判定・抽出するシステムを構築し、高速化させた(防災科学技術研究所[課題番号:3001])。

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 の改良を進めた(Tsuruoka et al., 2009)。2009年8月11日に駿河湾で発生した地震では、地震発生後およそ3分でメカニズム決定、4分後にホームページに自動的に公開された(東京大学[課題番号:1401])。

新しいモニタリング手法として、波形相関を利用した受動的モニタリングについて検討を開始した。文献調査から、常時微動やコーダ波の相互相関や自己相関からグリーン関数を合成し、そのコーダ波部分を解析する Passive Image Interferometry 法が最も有効であると考えられた。この手法を2004年新潟県中越地震(Mj6.8)の震源域における本震発生の前後2カ月間の観測データに適用した(Wegler et al., 2009)。本震発生の直前に変化は見られなかったが、本震発生に伴いフェイズの顕著な遅れを検出し、震源域において地震波速度が最大で0.5%低下したことがわかった。適用限界や信頼性については未だ解明されておらず、引き続き検討を行う(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を実施した(国土地理院[課題番号:6001, 6002, 6003, 6004, 6005, 6006]、気象庁[課題番号:7007]、海上保安庁[課題番号:8002])。潮位連続観測を実施した(気象庁[課題番号:7001]、国土地理院[課題番号:6005]、海上保安庁[課題番号:8001])。

GEONETによる地殻変動連続観測によって、日本列島全域の地殻変動がモニタリングされている。解析ソフトウェアをバージョンアップするとともに、大気遅延勾配の推定やアンテナの絶対位相特性モデルの採用などの新しい解析戦略を適用した。これにより系統的な誤差の大幅な軽減が図られ、地殻変動の検出精度が向上した。なお、GEONETの観測データから得られる水蒸気データを気象庁メソ数値予報モデル(MSM)の初期値を作成するメソ解析に提供し、これによって降水の予報の精度が改善された。また、GEONETの1秒データのリアルタイム解析の試験運用を行い、M7程度の大地震が発生した場合に緊急地震速報を用いて地震時地殻変動の迅速な検出と断層モデル推定を行う手法を開発した。解析精度が極端に悪化する時間帯があるという問題点が明らかになったが、好条件下では地震時地殻変動の迅速な検出が可能であることがわかった(国土地理院[課題番号:6001])。

衛星搭載 SAR(合成開口レーダー)データを使用した干渉解析により、地震による地殻変動の面的分布の把握及び活火山地域における定常的な高精度地盤変動測量を実施した。ハイチ地震(2010年1月12日、M7.0)(図3)を含む国内外で発生した主な地震について緊急解析を実施し、その地殻変動の様相を明らかにし、解析結果を迅速に報告した(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、従来より地震計、空振計、GPS 等により連続的な監視観測を行っているが、平成 21 年度は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（うち 13 火山は従来連続監視を行っていなかった火山）への地震計・傾斜計等の観測施設の整備を開始した。また、地震観測・GPS 繰り返し観測、熱観測、火山ガス放出量の観測等の機動観測を計画的に実施した。12 月に地震活動が一次活発化し、地殻変動も観測された伊豆東部火山群については、GPS を増設し観測強化を図った（気象庁 [課題番号：7006]）。

活動的な火山地域について SAR 干渉解析を実施し、有珠山、吾妻山、三宅島、硫黄島、九重連山（星生山）、霧島山（新燃岳）等の火山性地殻変動や局所的な火口の収縮・膨張を捉えた（国土地理院 [課題番号：6006]）。噴火の危険がある場合や噴火中は地球観測衛星の画像解析を実施する（産総研 [課題番号：5001]）。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、火山活動に伴う変色水等の状況を速やかに火山噴火予知連絡会へ報告した（海上保安庁 [課題番号：8003]）。

なお、火山におけるモニタリングを促進するために、各機関の地震計・傾斜計・空振計等の観測データを共有化・流通させるための検討を進めている。

#### イ. 地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

(宮城県沖及び周辺地域)

プレート境界型大地震が過去繰り返し発生している宮城県沖において、海底地震計による観測を実施した（東京大学 [課題番号：1402]、気象庁 [課題番号：7008]、東北大学 [課題番号：1202]）。各機関のデータを合わせて地震波形の検測と震源計算を実施した。従来の一元化処理データに海域での観測データを加えて堆積層補正や観測点補正値を検討することにより、一元化処理による震源よりも精度の高い震源を得ることができた。また、陸上観測点で捉えられなかった地震が多数観測され、宮城県沖地震の震源域での詳細な地震活動データが得られた（気象庁 [課題番号：7008]）。長期観測型海底地震計を用いた同一の観測点配置による繰り返し観測を 2002 年から 2009 年まで実施した。海底地震計を回収して、記録の整理および震源決定を行って過去の震源とまとめることにより、2002 年度から 2009 年度までの 8 年間における宮城県沖地震の震源域周辺のより正確な微小地震活動の分布が得られた（図 4）（東京大学 [課題番号：1402]）。2005 年宮城県沖地震の余震分布ならびに発震機構解について詳細に調査した結果、本震のすべりによる応力擾乱により励起されたプレート内での地震活動と解釈できるクラスタが見いだされた（Suzuki et al., 2009）。また、プレート境界型地震に先行する非地震性の地殻変動を検出した（東北大学 [課題番号：1202]）。

陸上 GPS 連続観測点のデータを用いて、2005 年宮城県沖地震（M7.2）本震震源域の固着の回復過程について検証した。最大余震発生後のデータに対してプレート境界におけるすべりの時空間発展を推定した結果、2007 年 1 月末以降、本震震源域周辺での準静的すべりがほとんど見られなくなっており、海底地殻変動観測の結果と整合的であった。自動処理により抽出された小繰り返し地震の発生状況およびプレート間の準静的すべり状況のモニタリングを行った（Uchida et al., 2009a）。最近 4 年間では、2008 年に始まる福島県、茨城県のはるか沖合での準静的すべりの加速が顕著であること、このすべりの大部分は 2008 年 5 月の茨城県沖 M7.0 の地震後に発生し

ていること、2009 年末頃においても同領域のすべり速度は以前よりも速い状況が続いていることなどが明らかとなった。2008 年以降の福島県、茨城県のはるか沖合を中心とする海溝近傍でのすべりの加速が、宮城県沖の北緯 38.5 度付近まで達しているように見え、宮城県沖地震の震源域にも応力変化を与えている可能性がある（図 5, 6）（東北大学 [課題番号：1202]、Uchida et al., 2009b）。

宮城県沖地震の前兆捕捉のため、深さ 1000 m 前後の深井戸での水温・水位観測、および温泉施設でのラドン濃度・水温・炭酸ガス濃度観測からなる「深層地下水変動観測システム」を連続稼働させている。2008 年 6 月 14 日の岩手・宮城内陸地震では 3 観測点とも水位・水温の coseismic な変動が明瞭であった。また、同年 7 月 19 日の福島県沖地震 (M6.9)、7 月 24 日の岩手県北部沿岸地震 (M6.8) の coseismic な変動が認められた（東北大学 [課題番号：1202]）。

#### (伊豆)

伊東市周辺地域で延べ 42 キロメートルの災害時緊急水準測量などを実施した。また、2009 年 12 月 17 日から 21 日にかけて活発化した伊豆半島東方沖の群発地震活動においては、GEONET で検出された地殻変動がメカニズム解明に寄与した（図 7）（国土地理院 [課題番号：6001, 6002, 6003]）。

長基線地電位差連続観測においては、過去の群発地震活動時に地電位の高まりが観測されていたが、2009 年 12 月の活動に対しても、2009 年 11 月頃より IKE-YSD-KWN をつなぐラインの北西側の各観測点で地電位が上昇していることが読み取れた。プロトン磁力計を用いた全磁力連続観測では、2009 年 11 月頃より震央域直近の 4 観測点で数 nT 程度の全磁力差の上昇が認められた。ただし、電磁場と地震活動、地殻変動との対応はあまり明瞭ではない（東京大学 [課題番号：1402]）。

伊豆半島東部の産総研大室山北地下水位観測点は、これまでに伊豆半島東方沖群発地震前に水位の低下を何度も生じており、群発地震の原因であるダイク（岩脈）の地下深部からの貫入による体積ひずみ変化を、ダイクが群発地震を引き起こす前に検出していると考えられている。今回の活動でも群発地震に先立つ地下水位の変化を検出した。大室山北では水位の低下（体積膨張）に始まり、震源が浅くなり地震活動が活発化すると水位が上昇する（体積圧縮）傾向が認められている。今回の活動でも同様な地下水位の変化が認められ、気象庁の東伊豆体積歪観測点の挙動と合わせて、観測データを説明するマグマ貫入モデルを提示した（図 8）（産総研 [課題番号：5002]）。

伊豆半島東部の周辺における群発地震の震源を三次元速度構造を利用して再決定を行った結果、一元化震源と比べて明らかにばらつきが小さくなり、シャープな震源分布となった。また、一元化震源では深さが 8~10km に決まっていた震源が三次元速度構造による震源計算では 8km 以浅にまとまった（図 9）（気象庁 [課題番号：7002]）。

#### (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するとともに強化した。樽前山、有珠山、北海道駒ヶ岳、伊豆大島、富士山、伊豆東部、浅間山において、GPS 火山変動観測装置 (REGMOS) による連続観測、および伊豆大島において APS 観測を継続実施した。浅間山および草津白根山において水準測量、重力測量、草津白根山で GPS 測量を実施した（国土地理院

6007)。雌阿寒岳、草津白根山、三宅島、伊豆大島、阿蘇山において地磁気全磁力連続観測を実施した(気象庁[課題番号:7009])。基盤的な火山観測施設の整備のため、有珠山(1カ所)、岩手山(1カ所)、浅間山(2カ所)、阿蘇山(2カ所)、霧島山(2カ所)に観測地点を選定し、観測施設整備工事に着工した。これらの観測施設では、深度200mの観測井の孔底に孔井式地震傾斜観測装置、地表付近に広帯域地震計、GPS観測装置、データを伝送するためのテレメータが設置される(防災科学研究所[課題番号:3002])。

比抵抗モニタリングの予備観測として阿蘇火山及び中岳火口周辺において高密度VLF観測を実施し、火口周辺域における浅部電気伝導度分布の把握と地下水系の推定を試みた。この観測の結果、火口周辺の電気伝導度分布の特徴が明らかになり、火口内浅部に高電導性を示す地下水が存在していること、火口直下の地下水が火口の北側の地下を通りながら流下していることが推察された(Fairley et al., 2010)。中岳火口周辺で行われている地磁気観測の高度化に取り組み、無線LANシステムを利用したリアルタイムモニタリングシステムを構築した(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、全国に展開されている地震観測網、地殻変動観測網が特に密に配置されていることに加え、各機関の定常・臨時の観測網が整備され、重点的に観測が実施されている。また、レーザー式変位計、多成分歪計、体積歪計(気象庁[課題番号:7011])、地下水等総合観測(産総研[課題番号:5002])、海底地殻変動観測(名古屋大学[課題番号:1701])、精密制御震源(弾性波アクロス)(名古屋大学[課題番号:1701]、気象庁[課題番号:7011])、OBS(気象庁[課題番号:7010])、海底地形調査(海上保安庁[課題番号:8004])など多項目の観測が実施されている。

紀伊半島沖に構築した広帯域海底地震計(3台)と長期観測型海底地震計(6台)を用いた海底地震観測網による観測を継続し、南海トラフ沿いで発生していると考えられる超低周波地震を捉えることができた。2009年11月からは広帯域海底地震計(3台)と長期観測型海底地震計(5台)を用いた海底地震観測を紀伊水道沖の海域で開始した(東京大学[課題番号:1403]、望月ほか, 2009)。東海地方に展開している50点を超えるGPS観測点網を用いたGPS観測を継続して実施した。そのうち9観測点において1HzサンプリングによるGPS観測を導入した(東京大学[課題番号:1404])。

新たに地下水等総合観測施設を2地点(安濃、須崎)で整備し運用を開始した。これにより短期的スロースリップ検知能力が向上した(小泉ほか, 2009, 大谷ほか, 2009)。2009年8月の駿河湾地震時には、地下水観測データは東海地震発生可能性の議論の材料として用いられた(産総研[課題番号:5002])。

2004年1月から2006年12月までのGPSデータを用い、東海地域のひずみ解析を行った。東海スロースリップの発生時期には場所によって $-0.4 \sim +0.4 \mu \text{ strain/yr}$ の範囲で変化するのに対し、2005年8月以降は $-0.3 \sim +0.1 \mu \text{ strain/yr}$ と小さな範囲に収まり、スロースリップによってアスペリティ領域の歪の解放があった影響が示唆された。面積ひずみ速度の分布から想定東海地震の断層の領域内のアスペリティの検討を行い、静岡県中西部に3つのアスペリティの存在を示した(東京大学[課題番号:1404])。

既存の電磁気観測点を用いた全磁力観測を継続した。新たに三成分変化計の増設、高サンプリ

ング化を行い、磁場観測の時間・空間分解能を向上させた。御前崎および豊橋において絶対および相対重力観測を実施した。御前崎における絶対重力測定の結果、同地の沈降速度から期待される重力増加の半分以下の重力変化しか生じていないことが再確認された（東京大学〔課題番号：1404〕）。

駿河湾および熊野灘において海底地殻変動計測を実施した。熊野灘では4回の観測を行い、2005年から継続している観測とあわせて海底の動きを明らかにした。駿河湾においては後述するように緊急の観測を行った。また、地震観測による固着すべりのモニタリングを行うため、愛知県新城市に地震計アレイを設置し中期的連続観測を開始した。精密制御震源（弾性波アクロス）によるプレート境界面のモニタリングについては、愛知県豊橋市（名古屋大学）、静岡県森町（気象研究所）、岐阜県土岐市（JAEA）の3箇所に設置されている震源が送信した信号を地震計アレイによって受信し、同じ周波数帯域で送信している3箇所からの信号が分離できること、後続波が認められることを確認した（名古屋大学〔課題番号：1701〕）。精密制御震源（弾性波アクロス）からの信号とノイズレベルの関係から地震波速度の時間変化を調査する上で最適なスタッキング時間を求め、広域の観測点における走時時間変化を求めた。東海臨時稠密地震観測(Kato et al., 2009)のデータを解析し、精密制御震源からの信号と理論走時解析とを比較してプレート境界面からの反射波を判定した（気象庁〔課題番号：7011〕）。

紀伊半島下のフィリピン海プレートの形状とその周辺の上部マントルの三次元構造を推定するために、新たに臨時観測点を設置した。これまでに得られたデータからレシーバ関数イメージングを行い、低速度層である海洋地殻の上面（フィリピン海スラブの上面）、スラブ内の海洋性モホ面、島弧側の大陸性モホ面が明瞭にイメージされた。さらに、深部低周波イベント発生域のスラブ近傍とその陸側のマントルウェッジが強い低速度異常を示すことがわかった（図10）（京都大学〔課題番号：1801〕、澁谷ほか, 2009）。

地球観測衛星による広域の地殻変動検出手法として、干渉性のよい短基線長のペアのみを用いて最小二乗法的に地殻変動の時系列変化を求める短基線長法（Small Baseline 法、SB 法）に基づき、さらにGPSデータをコントロールポイントにして長波長ノイズを除去するInSAR時系列解析手法を開発し、微小な地殻変動の検出に有効であることを示した（図11）（京都大学〔課題番号：1801〕、Hashimoto et al., 2009）。

四国から紀伊半島付近までの観測点での到達時刻とP波極性の検測値データから、1996年1月以降の地震のメカニズム解を決定した。また、比較的精度の高い解が得られている四国付近の地震について、上盤プレート、中間層（深さ20km付近）、沈み込むプレート内の3つの地震発生層の応力逆解析を行い、上部地殻とプレート内の応力軸がほぼ直交していることが確認された。南海地震の発生に関する応力場の時空間分布に着目し、南海地震のサイクルでの変動をモニタリングできる可能性が高いと考えられるプレート境界面に近い上盤プレート内の中間層で発生する地震のメカニズム解と応力場について検討したが、地震数が少ないため今後も検討を要する（高知大学〔課題番号：2101〕）。

#### （駿河湾の地震）

2009年8月11日に駿河湾内で発生したM6.3の地震は沈み込むフィリピン海プレート内部で発生した地震であったと考えられている。GEONETおよび干渉SARのデータ解析によって得られた地殻変動は速やかに公表され、地震の発生メカニズムの解明に寄与した（国土地理院〔課題番

号：6001, 6002] )。リアルタイム験潮データの集中監視により津波を検出した(海上保安庁[課題番号：8001] )。この地震を受けて、御前崎および駿河湾地域で延べ131キロメートルの災害時緊急水準測量を実施した(国土地理院[課題番号：6002] )。駿河湾において緊急の海底地殻変動計測を観測を行い、海底局が南西に移動していることを確認した(図12)。一方、駿河-南海トラフに沿ったひずみ計等にはとくに地震の前兆となるような変動は認められなかった(名古屋大学[課題番号：1701] )。

この地震による想定東海地震断層面上の応力変化を推定した。まず、東海地域のGPS観測点(大学連合+GEONET)のデータ解析から地震時変位を算出し、これに基づいてインバージョン解析を行って断層すべり分布を算出した。さらに、推定した断層すべり分布から想定東海地震断層面上の $\Delta CFF$ 分布を算出した。この結果を先に明らかにした静岡県中西部の3つのアスペリティの分布と比較すると、最も震源に近いアスペリティの付近で数十KPa程度の $\Delta CFF$ 変化があったと考えられる(図13)(東京大学[課題番号：1404] )。

#### まとめ

本年度は、既存の観測網の着実な維持・更新、諸観測網の高密度化および多項目化が図られた。また、2009年8月11日の駿河湾の地震(M6.3)、2009年12月の伊豆半島東方沖群発地震などに関する臨時観測が実施された。観測データの(準)実時間処理システムの開発と整備が着実に進捗した。新たな観測手法・解析手法の導入は着手したばかりのものもあり、次年度以降の進展が期待される。一方で、得られたデータを活用して、様々な地震・地殻変動及び火山活動に関する科学的知見が得られた。モニタリングシステムの出力の高度化については、データベース部会、シミュレーション部会などと意見交換の場を持ち、進めていきたいと考える。

#### 参考文献

- 浅野陽一, 2009, 日本周辺の超低周波地震活動(2008年11月~2009年4月), 地震予知連絡会会報, 82, 5-6.
- Fairley, J. P., M. Utsugi, S. Komoria, and T. Kagiya, 2010, Modeling a Low temperature Hydrothermal System on Mt. Nakadake, Aso Caldera, Kyushu, Japan, J.V.G.R..
- Hashimoto, M., and Y. Fukushima, 2009, An attempt to detect secular deformation associated with the subduction of the Philippine Sea plate with ALOS/PALSAR, AGU 2009 Fall Meeting, サンフランシスコ.
- Kato, A., T. Iidaka, R. Ikuta, Y. Yoshida, A. Katsumata, T. Iwasaki, S. Sakai, K. Yamaoka, T. Watanabe, T. Kunitomo, F. Yamazaki, N. Tsumura, K. Nozaki, M. Okubo, S. Suzuki, N. Hirata, H. Zhang and C. H. Thurber, 2009, Comprehensive understanding of a deep transition zone from an unstable- to stable-slip regime of the megathrust interplate earthquake, Eos Trans. AGU, 90(53), Fall Meet. Suppl., Abstract T11C-1818.
- 小泉尚嗣・高橋誠・松本則夫・佐藤努・大谷竜・北川有一・板場智史・梅田康弘・武田直人, 2009, 地下水等総合観測による東海・東南海・南海地震予測, 地質ニュース, 663, 29-34.
- Maeda, T. and K. Obara, 2009, Spatio-temporal distribution of seismic energy radiation from low-frequency tremor in western Shikoku, Japan, J. Geophys. Res., 114, doi:10.1029/2008JB006043.
- 望月公廣・中東和夫・桑野亜佐子・山田知朗・篠原雅尚・酒井慎一・金沢敏彦・植平賢司・清水洋・田原道崇, 2009, 繰り返し長期海底地震観測による東南海南海地震震源域における地震活動と地

- 震波速度構造, 日本地震学会秋季大会, B32-01, 京都.
- Obara, K., 2009, Inhomogeneous distribution of deep slow earthquake activity along the strike of the subducting Philippine Sea plate, *Gondwana Research*, 16, 512-526.
- Obara, K. and S. Sekine, 2009, Characteristic activity and migration of episodic tremor and slow-slip events in central Japan, *Earth Planets Space*, 61, 853-862.
- 大谷竜・小泉尚嗣・高橋誠・松本則夫・佐藤努・北川有一・板場智史, 2009, 産総研地下水等総合観測網による東南海・南海地震で期待されるプレスリップの検出能力の事前評価, *地質調査研究報告*, 60, 511-525.
- 澁谷拓郎・北脇裕太・中尾節郎・西村和浩・伊藤潔・大見士朗・平原和朗, 2009, 紀伊半島下の地震波速度不連続構造とスラブ形状－稠密リニアアレイ観測データを用いたレシーバ関数解析－, 日本地震学会 2009 年度秋季大会, 京都.
- Suzuki, K., R. Hino, Y. Ito, T. Kanazawa, T. Yamada, M. Shinohara, K. Uehira, Y. Yamamoto, and Y. Kaneda, 2009, Stress change due to the 2005 Miyagi-Oki earthquake and stress field of the Miyagi-Oki region, *Eos Trans. AGU, Fall Meet. Suppl.*, Abstract S51C-1437.
- Tsuruoka, H., H. Kawakatsu and T. Urabe, 2009, GRiD MT (Grid-based Realtime Determination of Moment Tensors) monitoring the long-period seismic wavefield, *Phys. Earth Planet. Int.*, Special issue: Earthquakes in subduction zones: A multidisciplinary approach, 175, 8-16.
- Uchida, N., S. Yui, S. Miura, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, Y. Motoya, and M. Kasahara, 2009a, Quasi-static slip on the plate boundary associated with the 2003 M8.0 Tokachi-oki and 2004 M7.1 off-Kushiro earthquakes, *Japan, Gondwana Research*, 16, 527-533.
- Uchida, N., J. Nakajima, A. Hasegawa, and T. Matsuzawa, 2009b, What controls interplate coupling?: Evidence for abrupt change in coupling across a border between two overlying plates in the NE Japan subduction zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 283, 111-121.
- Uehira, K., 2009, Development of a distributed backup system and a recovery system for telemetric seismic data, *Earth Planets Space*, 61, 285-289.
- Wegler, U., H. Nakahara, C. Sens-Schoenfelder, M. Korn, and K. Shiomi, 2009, Sudden drop of seismic velocity after the 2004 M-w 6.6 mid-Niigata earthquake, Japan, observed with Passive Image Interferometry, *J. Geophys. Res.*, 114, B06305, doi 10.1029/2008jb005869.

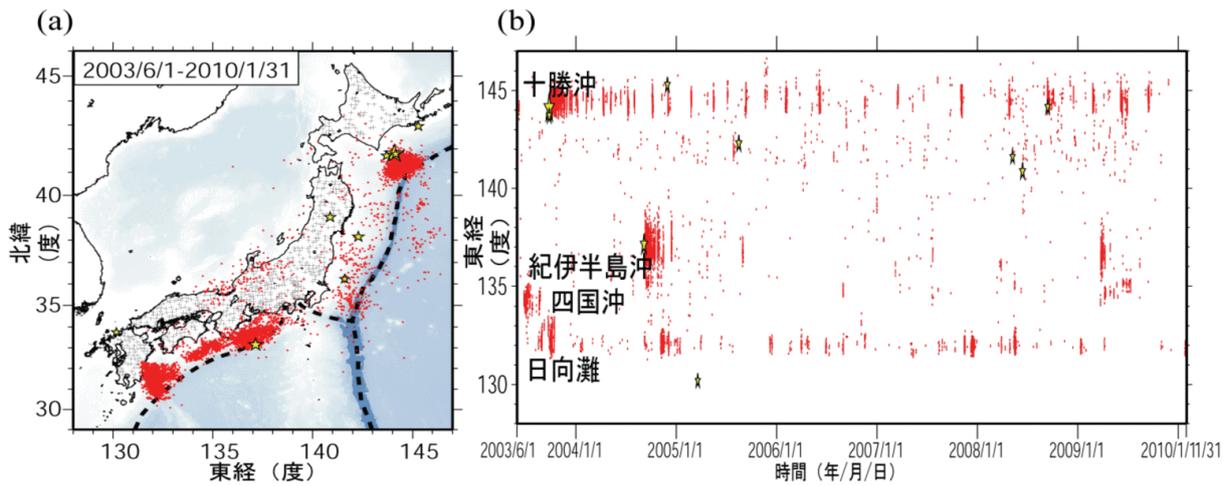


図1 2003年6月から2010年1月までの期間に検出された浅部超低周波地震の (a) 震央分布および (b) 時空間分布。期間内に発生した M7 以上の地震を黄色星印で示す。2009 年度中では、ほぼ定常的な十勝沖の活動のほか、2004 年以来約 4 年ぶりに紀伊半島沖で活動が見られた（防災科学技術研究所 [課題番号：3001]）。

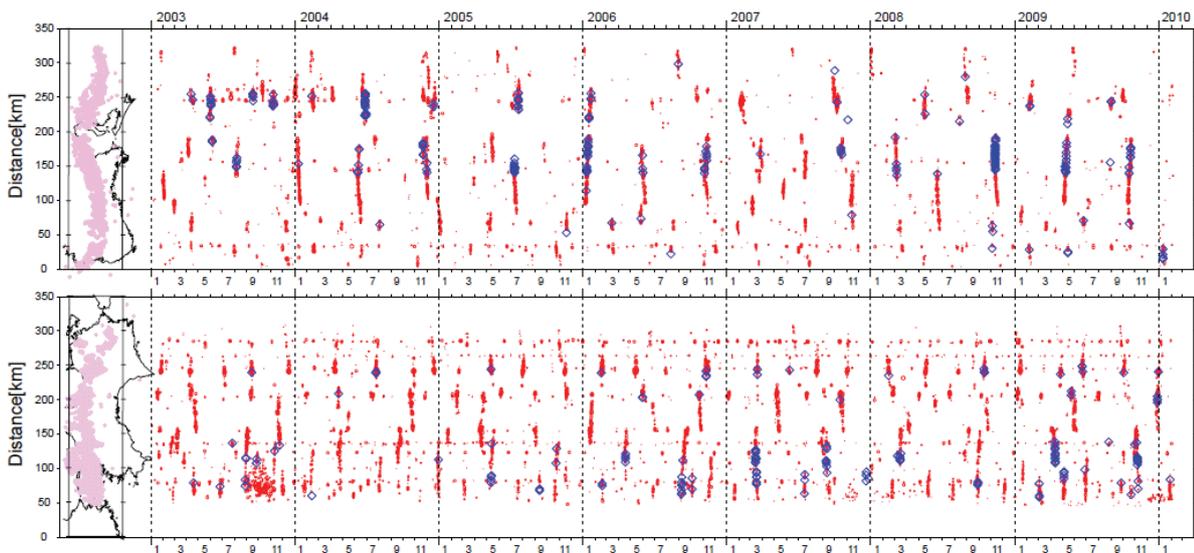


図2 ハイブリッド法により求められた 2003 年 1 月～2010 年 1 月までの深部低周波微動(赤)及び深部超低周波地震(青菱形)の時空間分布。地域によって微動活動の再来間隔が異なることや微動源の移動の様子が明瞭に分かる。また、微動活動には一定のセグメント境界が存在している（防災科学技術研究所 [課題番号：3001]）。

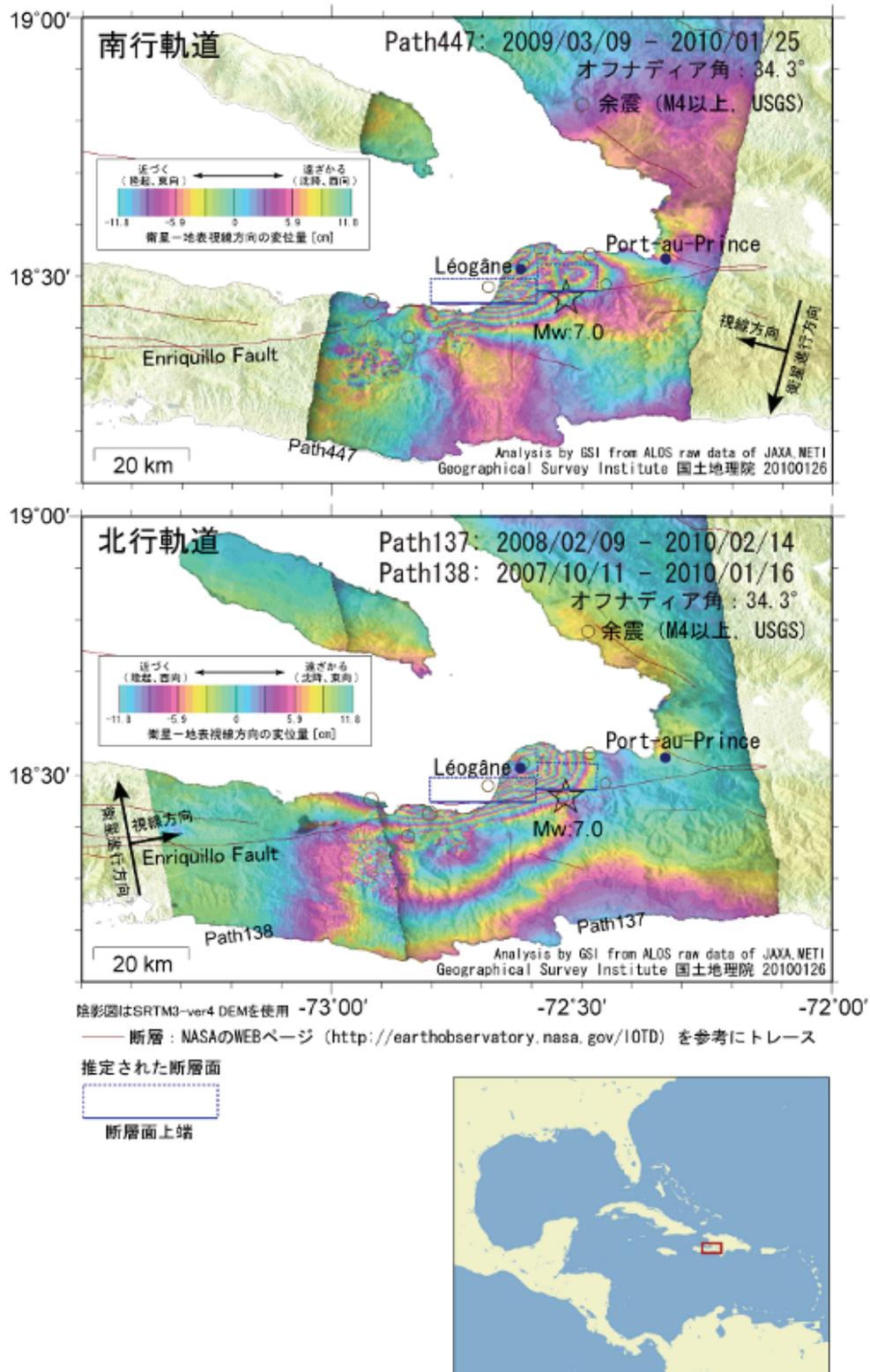


図3 ハイチ地震 (2010/01/12、M7.0) における地殻変動 (国土地理院 [課題番号: 6006])。

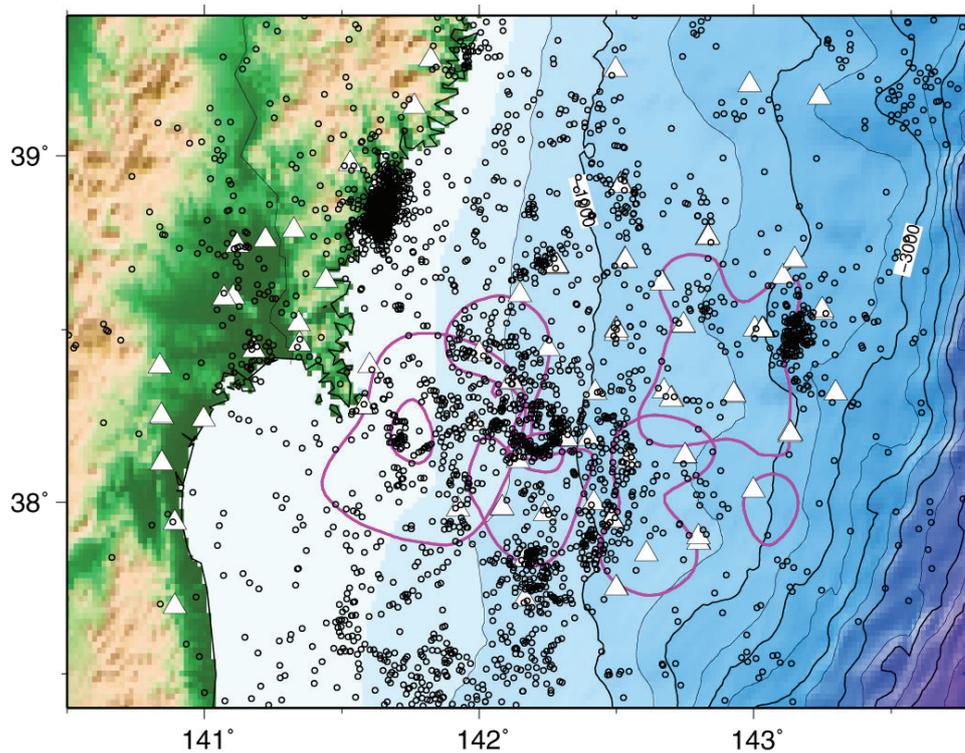


図4 宮城県沖地震の震源域及びその周辺の地震活動。2005年5月19日から2007年10月22日までで決定された3633個の地震の震央(黒丸)。気象庁の震源リストに対応した地震を再決定した。解析には、□でしめす観測点のデータを使用した。ピンクの線で囲まれた領域は、推定された過去の大地震のアスペリティ(東京大学[課題番号:1402])。

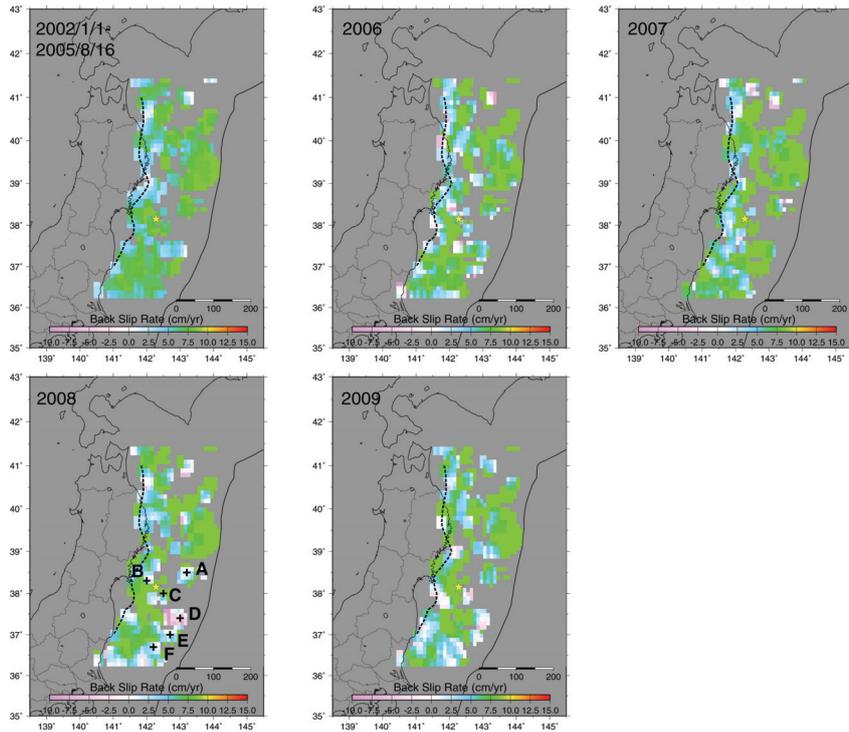


図5 小繰り返し地震データから推定したバックスリップレート。黄色星は2005年8月15日の宮城県沖地震 (M7.2)の震央、破線は Igarashi et al. (2000) による低角逆断層型地震の西縁を示す。2006年にはこの地震の周囲で若干固着が弱くなっている。茨城県沖地震(M7.0) および福島県沖地震 (M6.9) のプレート境界地震が発生した2008年以降は、宮城県ー茨城県の沖合の海溝に沿って固着が弱まっている (東北大学 [課題番号: 1202] )。

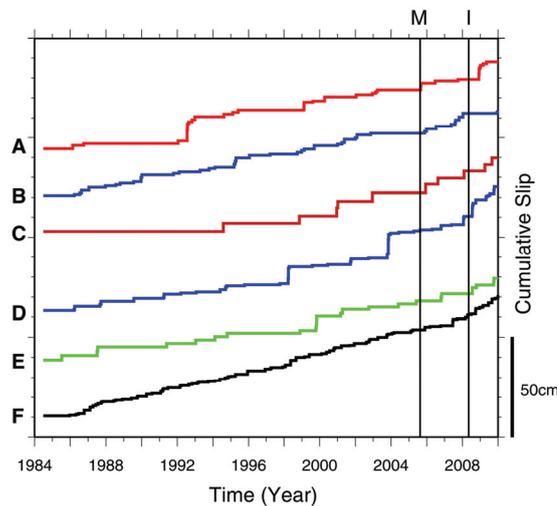


図6 図5のA-Fの場所(緯度、経度方向に $\pm 0.2$ 度の矩形領域)での小繰り返し地震の積算すべり(範囲内に含まれる小繰り返し地震の積算すべりの平均)。MおよびIの縦線はそれぞれ2005年8月15日宮城県沖地震(M7.2)、2008年5月8日茨城県沖地震(M7.0)の発生時を示す。宮城県沖地震後のA, B, Cと、2008年以降のBをのぞく全域ですべり加速が見られる(東北大学 [課題番号: 1202] )。

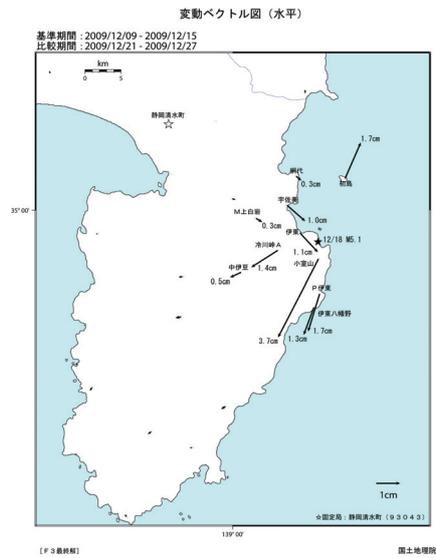


図7 2009年12月伊豆半島東部の地震で検出された地殻変動（水平変動ベクトル図）（国土地理院 [課題番号：6001]）

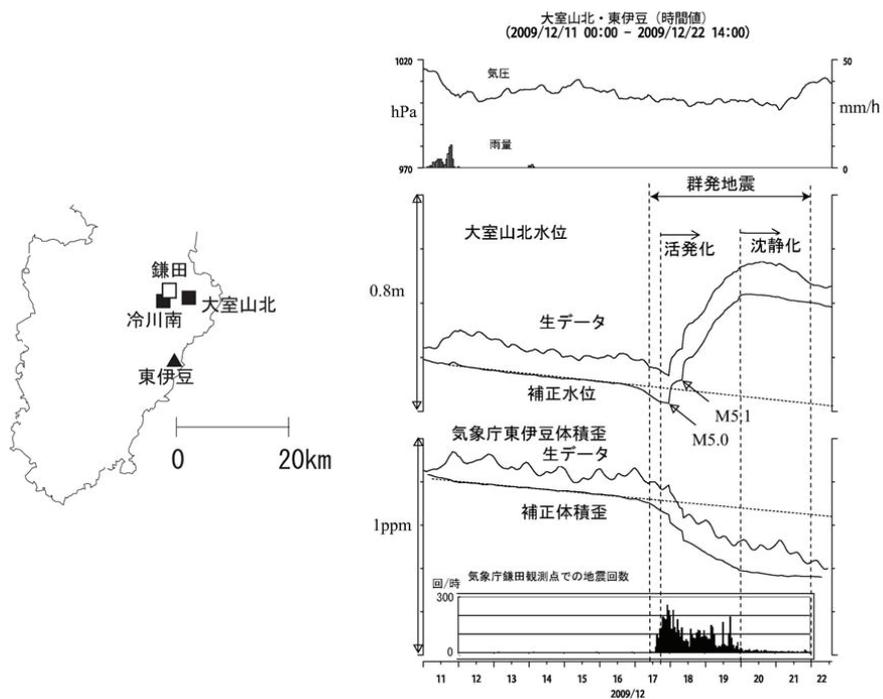


図8 2009年12月の伊豆半島東方沖群発地震前後の伊東市周辺における地下水位変化。伊豆半島東部の産総研大室山北地下水位観測点は、1994年10月の観測開始以来、伊豆半島東方沖群発地震前に水位の低下を何度も生じている。今回の活動でも過去の活動と同じような変化が認められ、地震の活動予測に有効であった（産総研 [課題番号：5002]）。

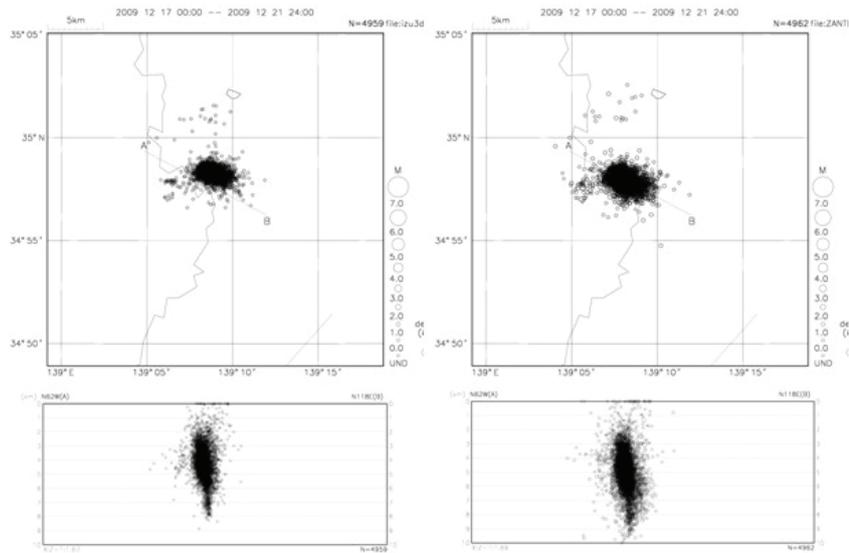


図9 三次元速度構造による震源と一元化震源の比較。2009年12月17日～21日の伊豆半島東方沖の地震（左：三次元速度構造による震源／右：一元化震源）（気象庁 [課題番号：7002]）。

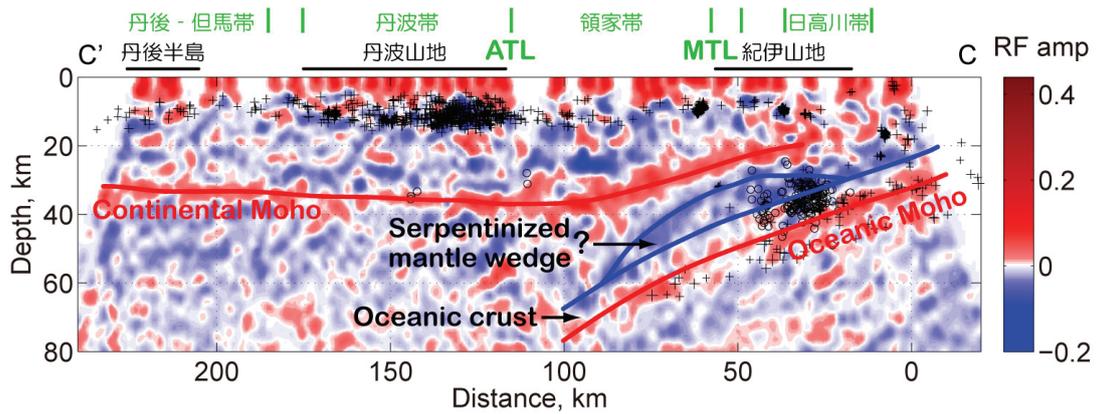


図10 尾鷲－京丹後測線のレイシーバ関数イメージ。レイシーバ関数の正の振幅（赤）は高速度層の上面を、負の振幅（青）は低速度層の上面を表す。○は深部低周波イベントを、+は通常の地震を表す。（京都大学 [課題番号：1801]）。

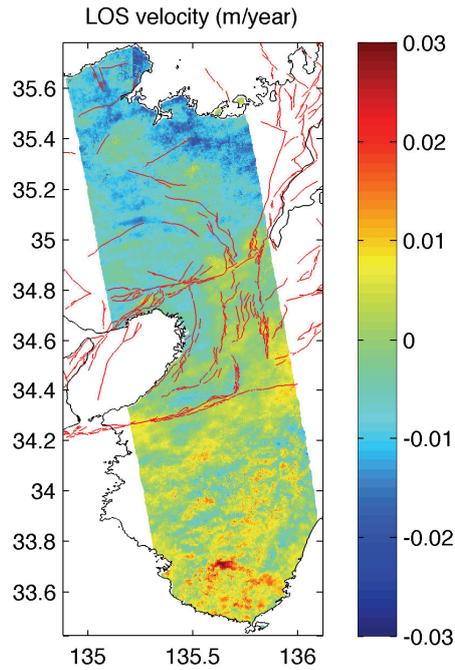


図 11 紀伊半島～丹後半島の変動速度。InSAR 時系列解析から求めた 2006 年 10 月から 2009 年 8 月の平均視線方向変動速度。長波長シグナルは GPS データを用いて補正してある。色は変動速度を表す。赤線は活断層を示す（京都大学 [課題番号：1801]）。

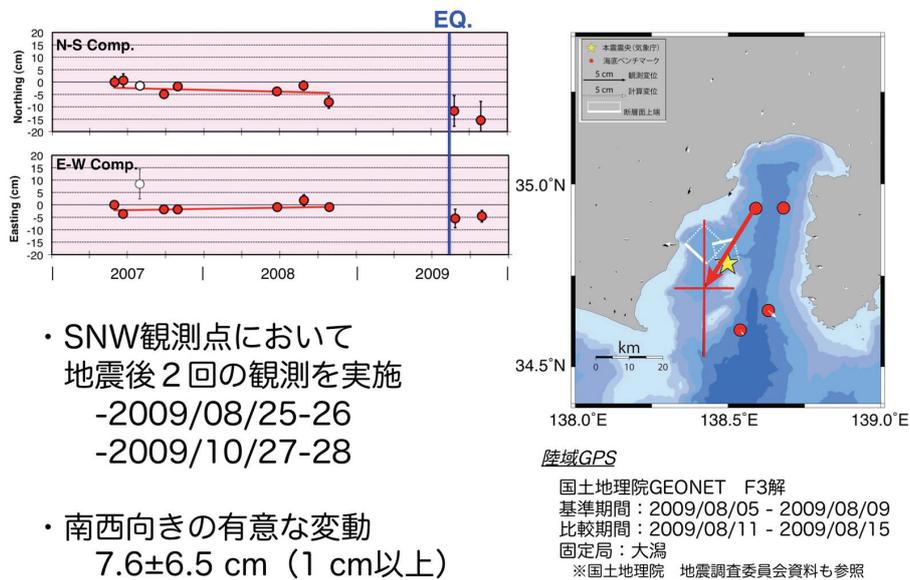


図 12 駿河湾における海底地殻変動観測。2009 年 8 月 11 日駿河湾の地震をはさんだ海底局の移動量を示した。震源に最も近い海底局が南西方向に  $7.6 \pm 6.5 \text{ cm}$  移動していることが明らかになった（名古屋大学 [課題番号：1701]）。

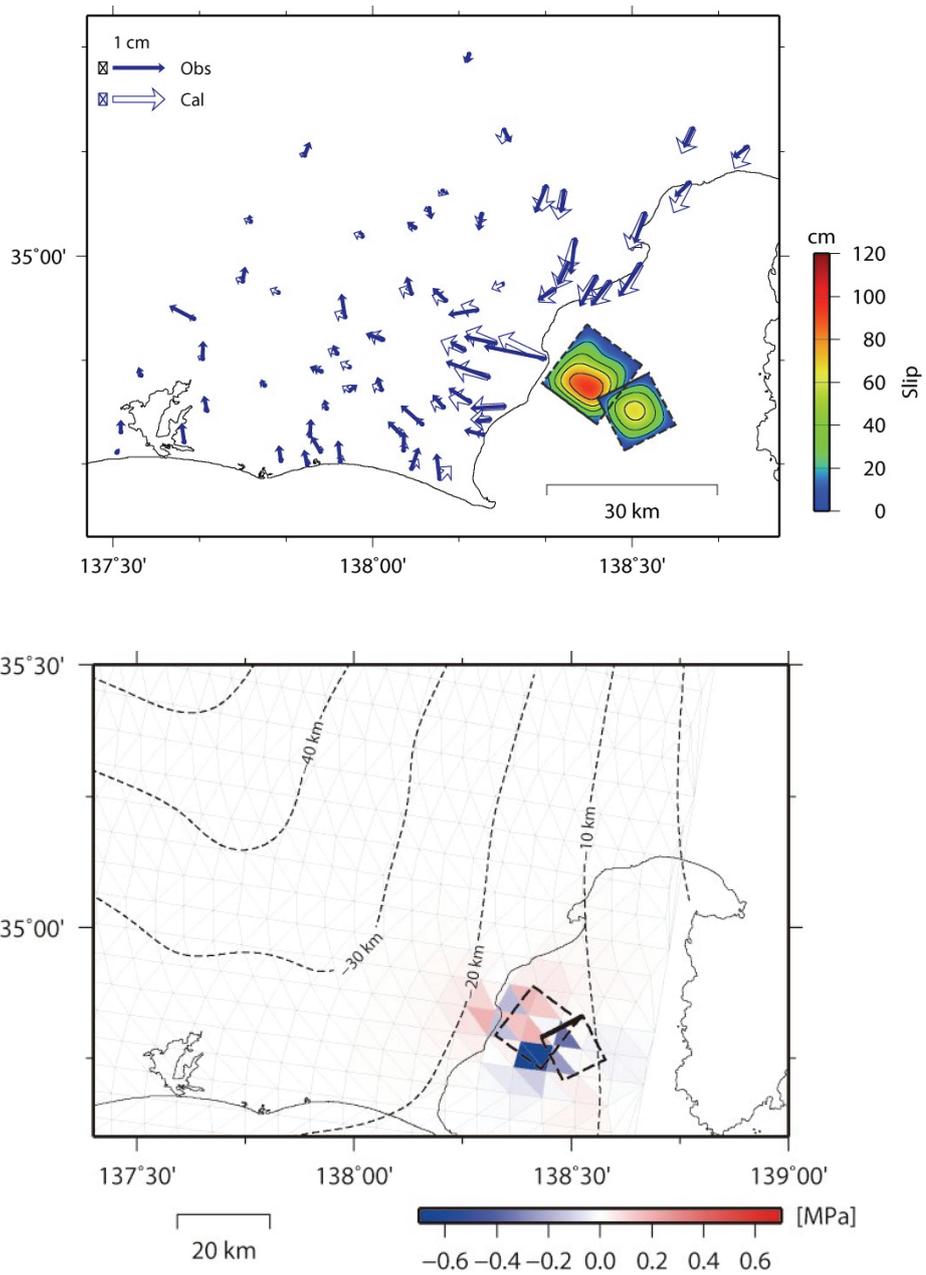


図 13 (上) GPS 観測データに基づく 8 月 11 日駿河湾の地震の推定すべり分布。(下) 推定すべり分布に基づく想定東海地震震源域の  $\Delta CFF$  分布 (東京大学 [課題番号: 1404])。

## 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  
(名古屋大学大学院環境学研究科)

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21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を構築することを目指しており、それは地震予知研究における最重要課題でもある。従来から地震発生予測シミュレーションの開発研究が進められてきたが、これまでのシミュレーションは観測システムと切り離された形で行われていたため、そこで再現できた観測情報は限定的であり、必ずしも現実を反映したシミュレーションになっていなかった。こうした問題を解決するためには、シミュレーションを実際の観測システムと有機的に結合させるデータ同化を行う必要があり、そのための手法やシステムの開発を目的とした研究を実施している。

現時点において、地球内部の力学状態を表す応力や歪みに読み替え可能な観測量は、地殻変動データである。特に、GPSは高精度であることに加え、日本全国に高密度の連続観測網が整備されており、リアルタイムに近い形で情報を得ることができる。このデータをシミュレーションに取り込むための様々な研究を実施した。

まず、西南日本のGPSデータを逆解析することにより、南海・東南海・東海地震の震源域であるユーラシア-フィリピン海プレート境界面のすべり遅れ分布を推定した。その結果、東海から紀伊半島、四国にかけてすべり遅れが次第に大きくなり、また、すべり遅れ域の西端が豊後水道にも及ぶことから、宝永地震のような連動型地震では、従来よりも震源域の想定を広げる必要性のあることが示唆された(図1、名古屋大学[課題番号:1702]、橋本・他, 2009)。また、このすべり遅れ速度分布に基づいて地震時の応力降下量を想定し、地震の動的破壊伝播のシミュレーションにより東南海地震、南海地震の発生を再現するモデルを構築した。摩擦パラメータをわずかに変えると東南海地震と南海地震を連動させることも可能で、摩擦パラメータの推定が予測シミュレーションにとって重要であることが改めて明らかになった(図2、防災科学技術研究所[課題番号:3003]、Hok et al., 2009)。

このようにシミュレーションを行う上で大変重要な摩擦パラメータであるが、その推定は難しい問題であり、観測データに基づいて摩擦パラメータを推定する方法の開発を進めている。大地震の発生後に、震源域周辺で断層がゆっくりとすべる余効すべりという現象が知られており、その様子から運動学的な断層すべりインバージョンに基づき摩擦特性を推定する試みが行われてき

た (Miyazaki et al., 2004)。従来の研究ではモデルに必要な3つの摩擦パラメータ ( $L, a\sigma, (a-b)\sigma$ )のうち $(a-b)\sigma$ しか推定できなかった。これら3つの摩擦パラメータを摩擦構成則に基づく力学的モデルを用いて推定する逆解析手法を開発し、2003年十勝沖地震後の余効変動のデータに適用した。この手法では、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて摩擦パラメータの事後確率分布を評価した (図3)。その結果、推定された摩擦パラメータ $L$ は室内実験から推定された値と桁で違っており、実際の観測データに基づいて摩擦パラメータを推定することの重要性が示された (名古屋大学 [課題番号: 1702]、Fukuda et al., 2009)。

摩擦パラメータを推定するには、可能性のあるパラメータ範囲内で、パラメータの様々な組み合わせについてフォワード解析を行って観測データとの整合性を調べるため、膨大な計算を必要とする。そのため、少ない計算量で摩擦パラメータを推定できる手法の開発が必要不可欠となる。そこで、気象・海洋分野でデータ同化手法に広く用いられているアジョイント法に基づく新たな摩擦パラメータ推定手法を開発した。この手法で数値実験を行い、摩擦パラメータだけでなくすべり速度、応力等の初期値が推定できること、摩擦パラメータを正しく推定するためには、これらの初期値も適切に与える必要があることなどが明らかとなった (名古屋大学 [課題番号: 1702]、加納・他, 2010)。

気象庁では、従来から開発を進めてきた南海トラフのプレート境界の地震サイクルモデルを細密化し、巨大地震とスロースリップの発生を同一のモデルで再現することに成功した (気象庁 [課題番号: 7023]、弘瀬・他, 2009)。

## 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。

断層面における間隙流体の効果は今後考慮すべき重要な内容である。本年度の研究では、摩擦発熱、空隙生成、流体拡散による流体圧変化が断層すべりに与える影響の理論的解析により、断層すべりの挙動が3つの無次元パラメータで決まることを示した。これにより、高速すべりから低速すべりまで断層の挙動を統一的に理解できる可能性を示した (東京大学地震研究所 [課題番号: 1405]、Suzuki and Yamashita, 2010)。また、大地震発生の1サイクル中における間隙流体の変化や摩擦発熱を考慮した数値シミュレーションを行い、これらの影響が地震発生間隔を支配することが明らかとなった (図4、東京大学地震研究所 [課題番号: 1405]、Mitsui and Hirahara, 2009)。

現在の地震発生予測はプレート境界地震に限られており、プレート内地震については地震発生に至る応力集中過程が解明されていない。レオロジー構造を考慮した内陸地震発生サイクルモデル構築を目的として非線形有限要素法によるモデル化を行い、東北地方の断層や地震の分布と整合的な断層の形成や応力集中を再現した (図5、東京大学地震研究所 [課題番号: 1405])。

地震活動は地殻内の応力状態に関する豊富な情報を有しており、将来の地震発生予測システムにおいて重要な役割を果たすと期待される。しかし、微視的な物理モデルが確立していないため、統計的知見を物理的なパラメータに置き換えることができていない。そこで離散要素系力学モデルを用いて剪断変形時のアコースティックエミッションの統計性を調べ、これらが地震の良いモ

デルとなっていること、規模別頻度分布から決まる**b**値が応力の指標となることなどを示した（東京大学地震研究所〔課題番号：1405〕）。

#### 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的に予測する試みが行われており、様々な予測手法が提案されてきた。しかし、従来のこうした研究では、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して、CSEP（Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability）と呼ばれる国際研究プロジェクトが立ち上がった。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る。CSEPの基本ソフトウェアは東京大学地震研究所にインストールされ、合計で80を越えるモデルについて、日本列島周辺の実データに基づく地震発生予測検証実験を開始した（東京大学地震研究所〔課題番号：1406〕、楠城・他, 2009）。本計画の課題からも複数機関が予測対象や手法の異なる複数のモデルを検証実験に提出している（京都大学防災研究所〔課題番号：1802〕、防災科学技術研究所〔課題番号：3005〕、気象庁〔課題番号：7012〕）。

こうした予測実験を行う上でも偏りの無い地震カタログの整理は大変重要である。気象庁一元化震源において取りこぼしの無いマグニチュードの下限（ $M_c$ ）を調査すると、2002年以降、陸域では $M_c$ が1を下回ることが分かった（東京大学地震研究所〔課題番号：1406〕）。

#### 課題と展望

本年度、南海トラフという現実的な対象について、GPSデータに基づく固着域の推定と、推定結果を入力とした断層動的破壊過程のシミュレーションを間接的ながら実施することができた。応力蓄積過程や断層強度回復過程のモデル化を行い、地震サイクルのシミュレーションを行うことが次年度以降の課題となる。予測シミュレーションによる地震発生予測においては、観測データの情報をシミュレーションに取り込むデータ同化システムの開発が本研究の課題であるが、この内容については研究が緒に就いたばかりであり、更に研究を進める必要がある。特に問題となるのは摩擦パラメータの推定である。今年度の研究成果では、摩擦パラメータの推定に関わる問題がいくつか指摘されたが、さらに摩擦構成則の定式化そのものに自由度を持たせるような取り組みが必要にならないとも限らない。観測データを通して現れる大地震を発生させるシステムの挙動を再現することが予測シミュレーションの役割であり、現実のデータを説明できないモデルは、予測を目的としたシステムにおいては用を為さないことを改めて肝に銘じるべきである。これまで、シミュレーションと観測システムの研究者間の議論が活発に行われてきたとは言い難いが、両者を媒介するデータベースの関係者も含め、密接な連携のもとで研究を進める必要がある。

地震活動評価に基づく地震発生予測は、個々の手法を公正な立場で比較検証する点、CSEPという国際的な枠組みと連携して進める点において、日本の地震予知の歴史の中でも画期的な取り組みであり、今後の成果が待たれるところである。

#### 参考文献

Cho, I., T. Tada, and Y. Kuwahara, 2009, Stress triggering of large earthquakes complicated by transient aseismic slip episodes, *J. Geophys. Res.*, 114, B07310, doi:10.1029/2008JB006125.

- Fukuda, J., K. M. Johnson, K. M. Larson, and S. Miyazaki, 2009, Fault friction parameters inferred from the early stages of afterslip following the 2003 Tokachi-oki earthquake, *J. Geophys. Res.*, 114, B04412, doi:10.1029/2008JB006166.
- Fukuyama, E., R. Ando, C. Hashimoto, S. Aoi, and M. Matsu'ura, 2009, A physics-based simulation of the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake to predict strong ground motions, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99, 3150-3171.
- Hashimoto, C., A. Noda, T. Sagiya, and M. Matsu'ura, 2009, Interplate seismogenic zones along the Kuril-Japan trench inferred from GPS data inversion, *Nature Geoscience*, 2, 141-144.
- 橋本千尋・鷲谷威・松浦充宏, 2009, GPSデータインバージョンによる西南日本のプレート間カップリングの推定, 日本地震学会2009年秋季大会, A32-08.
- Hatano, T., 2009, Scaling of the critical slip distance in granular layers, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18304, doi:10.1029/2009GL039665.
- Hatano, T., 2009, Growing length and time scales in a suspension of athermal particles, *Phys. Rev. E*, 79, 050301(R).
- 弘瀬冬樹・前田憲二・高山博之, 2009, 東海地域の長期的スロースリップイベントおよび地震サイクルの再現の試み. *地震*2, 62, 67-84.
- Hok, S. and Fukuyama, E., 2009, Dynamic rupture of shallow 3D dipping fault earthquakes using a new BIEM technique for half-space medium, *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract, S31A-1695.
- Hori, T., S. Miyazaki, N. Mitsui, 2009, A model of earthquake-generation cycle with scale-dependent frictional property - preliminary results and research plan for a project of evaluation for coming Tokai, Tonankai, and Nankai earthquakes, *Journal of Disaster Research*, 4, 111-117.
- 井元政二郎, 2009, 地震活動のモデル検定について, *地震*2, 61, 207-209.
- 加納将行・宮崎真一・伊藤耕介・平原和朗, 2010, 余効すべり人工データを用いたアジョイント法による摩擦パラメータ・初期値の推定, *地震*2, 印刷中.
- Kato, N., 2009, A possible explanation for difference in stress drop between intraplate and interplate earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L23311, doi:10.1029/2009GL040985.
- 光井能麻・堀高峰・宮崎真一・平原和朗・金田義之, 2009, 限られた期間のデータを用いたプレート境界面の摩擦パラメータ範囲の拘束, *地震*2, 61, 149-159.
- Mitsui, N., T. Hori, S. Miyazaki, and K. Nakamura, 2010, Constraining interplate frictional parameters by using limited terms of synthetic observation data for afterslip: A preliminary test of data assimilation, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 58, 113-120.
- Mitsui, Y. and K. Hirahara, 2009, Coseismic thermal pressurization can notably prolong earthquake recurrence intervals on weak rate and state friction faults: Numerical experiments using different constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, 114, B09304, doi:10.1029/2008JB006220.
- 楠城一嘉・鶴岡弘・平田直・地震活動の評価に基づく地震発生予測研究グループ, 2009, 地震発生予測検証実験に関する公募, 日本地震学会ニュースレター, 20, 6, 7-10.
- Suzuki, T. and T. Yamashita, 2010, Nondimensional control parameters governing the behavior of one-dimensional fault slip: Effects of shear heating, inelastic pore creation, and fluid flow, *J. Geophys. Res.*, 115, B02303, doi:10.1029/2009JB006557.

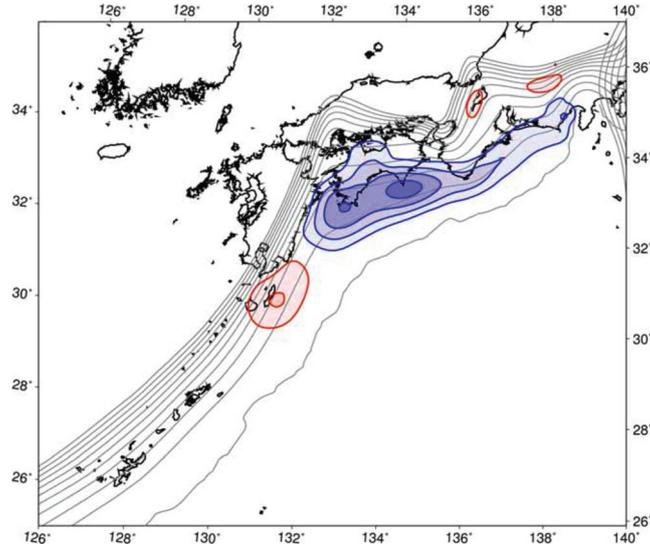


図1. GPS データから推定した南海トラフ-琉球海溝におけるすべり遅れレートの分布。コンター間隔は2cm/年。すべり遅れを青で、すべり過剰を赤で示す（名古屋大学〔課題番号：1702〕、橋本・他, 2009）。

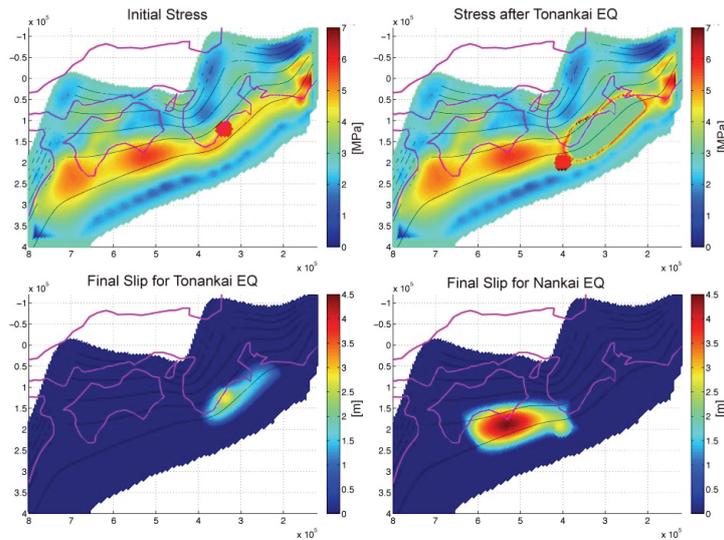


図2. 南海・東南海地震のシミュレーション結果の一例。紀伊半島東南で始まった地震は、東南海地震の発生領域を破壊し(左下図)、その後、紀伊半島南端部で地震が開始し、南海地震の震源域を破壊した(右下図)（防災科学技術研究所〔課題番号：3003〕、Hok et al., 2009）。

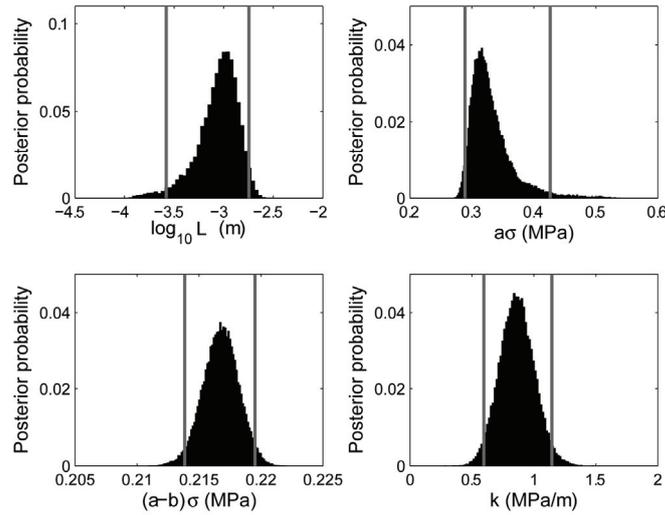


図3. マルコフ連鎖モンテカルロ法で推定した $L$ ,  $a\sigma$ ,  $(a-b)\sigma$ ,  $k$  (バネ定数) の周辺事後確率分布。縦線は95%信頼区間を表わす (名古屋大学 [課題番号: 1702]、Fukuda et al., 2009)。

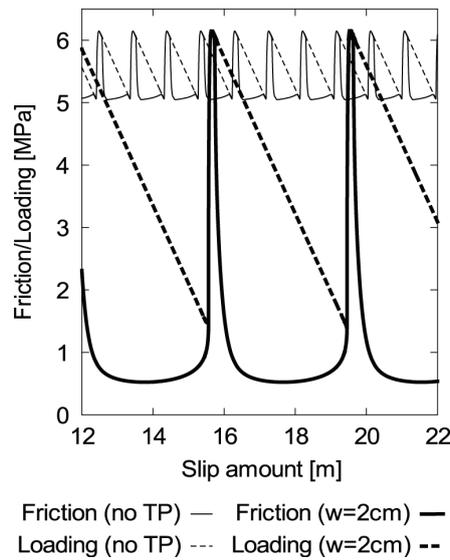


図4. 地震サイクルにおける応力変化。細線：地震時摩擦発熱による間隙流体圧の変化(thermal pressurization; TP) が無い場合、太線：TP がある場合 (断層幅 $w=2\text{cm}$ )。破線：ローディング応力。TP が働く場合、地震時応力降下が大きくなり、地震発生間隔 (すべり量) が長く (大きく) なることが分かる (東京大学地震研究所 [課題番号: 1405]、Mitsui and Hirahara, 2009)。

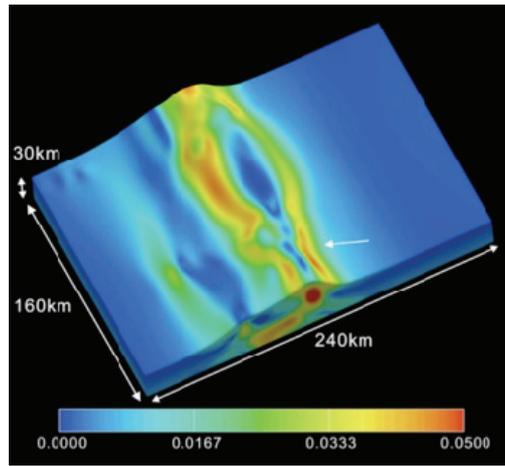


図5. 奥羽脊梁山脈の断層形成・応力集中過程のシミュレーション結果（75 万年後の等価全歪み）  
 粘性、塑性、弾性歪みを含む。白線で示されている断層が、2008 年岩手・宮城内陸大地震の断層に対応する（東京大学地震研究所〔課題番号：1405〕）。

## 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)

### 1. はじめに

火山が、「いつ」、「どこで」、「どのような噴火を」、「どれくらいの規模で」、「どのような時間的推移で行うか」を噴火予知の5要素という。この5要素のうち、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予知技術では困難である。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、対象火山の過去の噴火のパターンやその発現頻度を解読し、噴火事象の分岐が起こる機構を科学的に理解することによって、将来の噴火で起こりうる事象をある程度の確度で示すことができる。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。」また、過去の噴火時の観測データの再検証や類似火山の研究成果を取り入れ、噴火現象の分岐を理解することが必要である。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、この研究の推進によって、火山専門家が他の活火山において噴火シナリオの作成ができる道筋をつけることも重要である。

ここでは、本計画の細目「ア. 噴火シナリオの作成」に基づき、初年度は既存の伊豆大島の噴火シナリオについてその長短所を検討し、噴火様式が伊豆大島に比較的良好に似ている三宅島火山について噴火シナリオの作成を試みた。「イ. 噴火シナリオに基づく噴火予測」は、アの発展段階であるので、今回は取り組まなかったが、防災科学技術研究所が地殻変動等の観測データから火山活動に伴う異常現象を自動的に抽出するシステムを検討している（防災科学技術研究所〔課題番号：3006〕；上田，2010）。

### 2. 本計画で目指す噴火シナリオ

対象とする火山において将来発生する噴火を予測するには、その火山で過去に発生したできるだけ多くの噴火事例（物理観測も含んだ情報）、および地質学的に読み取れる噴火履歴に基づくことが有効である。その際、直近の噴火例だけでなく、その火山で将来起こりうる全ての現象を網羅することが重要である。地質調査が不十分であったり、物理観測の歴史が浅い場合など、噴火履歴に関する情報が不十分な場合には、地質・地形やテクトニクス、マグマの性質、過去の噴火例が類似した他の火山の噴火履歴や観測情報を参照することが期待される。

最近、噴火事象系統樹（volcanic event tree）が噴火のリスクを評価するための基本的なツールとして提案されている（Newhall and Hoblitt, 2002）。これはある事象に引き続いて起こりうる可能性のある全ての事象を小岐として図示したものである。分岐点から異なる現象への枝移動は、過去の噴火履歴、観測データなどに基づいて確度として表現することができる。また、ひとたび開始した噴火においては、それぞれの分岐点において観測データや物理モデルを用いて、次

の枝移動への確度を専門家がさらに評価することになる (Marzocchi et al., 2006 ; 中田, 2007 の解説)。

ここでいう噴火シナリオは、この噴火事象系統樹をさす。日本では、気象庁、内閣府、国交省などが使い始めている。内閣府が作成した富士山の噴火シナリオは、Newhall and Hoblitt

(2002) と同様のイベントツリーを作成している。ここでは、三宅島と火山学的背景が類似した伊豆大島火山について、気象庁が火山噴火予知連絡会の下で作成したもの (図1) (火山噴火予知連絡会伊豆部会, 2008) を参考に、三宅島の噴火シナリオを作成した。伊豆大島火山の噴火シナリオでは、噴火パターンや規模による区別をしているのが特徴である。

### 3. 三宅島火山の噴火シナリオ

作成した三宅島の噴火シナリオを図2に示す(東京大学 [課題番号: 1407])。三宅島における最近300年間の、噴火の前兆となる群発地震の発生時間、噴火の継続時間、噴火後の群発地震の継続期間の記録 (宮崎, 1984 ; 津久井・他, 2005など) からは、ひとつの噴火事象から次の事象が発生するまでの時間スケールや各現象の継続時間の範囲を知ることができる(東京大学 [課題番号: 1426])。図2の系統図の枝に示した数値は、過去の噴火から算出される発生頻度である。なお、群発地震が発生しても噴火に至らないケースの頻度は、過去300年間に約20年間隔で定期的にマグマが上昇したと仮定し、噴火しなかった回数をその頻度と見なしている。また、物理観測が20世紀中頃からしか存在しないことや、2000年のカルデラ形成は約2500年ぶりに発生したことから、系統図の右側にある現象ほど、発生頻度の情報が少ないので注意を要する。

以上のような最近300年間の現象は、約20年毎におこるマグマ上昇で説明されるが、2000年噴火は約2500年ぶりのカルデラを作る現象で、地下のマグマ供給系がこれまでとは大きく変わった可能性もある。そのため、これまでの300年間の規則性がこれからも保証されるかどうかを検討した。図3には2500年前以降の噴出量積算の階段図を示している(東京大学 [課題番号: 1426])。これは現在地上に露出している溶岩から推定されたものである。約2500年前の八丁平カルデラが2000年噴火のカルデラとほぼ同じ大きさ (体積0.6km<sup>3</sup>) と仮定すると、前者は約1300年間で埋め立てられ、その後は溶岩が外に流れ出し始めているので、その間の噴出率はここ300年間より高かったことになる。このことは、2500年前以降、20年周期が維持されたとすれば1イベント当たりの噴出率はより大きかったことを意味し、1イベント当たりの噴出率が最近と同様であったとするならば、より短い間隔で噴火が発生したことを意味する。

最近の地殻変動観測では、2002年以降、島内の基線が短縮から伸びに転じており、1983年から2000年噴火の間に見られた地殻変動の傾向に近づいている。すなわち、地下深部でマグマの蓄積がこれまでと同様に進行していることを示している。一方、産業技術総合研究所や気象庁等の測定結果によると、現在起こっているマグマの脱ガス成分は、2000年噴火時から不変で、未分化マグマの関与が現在も続いていることを示している。そのため、今後も、将来的には2000年以前と似たマグマシステムが発達すると考えられる。

### 4. 伊豆大島火山のシナリオとの相違点

本研究において作成した噴火シナリオは、「噴火シナリオに基づく推移予測の試行」(東京大学 [課題番号: 1408]) において、噴火現象の分岐について定量的な検討を加えている。伊豆大島火山との大きな違いは、噴火ケースを噴火場所や規模によって区分しなかったことである。

三宅島では山腹噴火の頻度が高く、山頂噴火は山腹噴火に伴われて発生することが多いからである。また、山腹噴火においても山頂噴火においても、水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発からマグマ爆発への移行がしばしば観測され、伊豆大島火山のように場所による噴火パターンや規模での区別は明瞭ではない。

両火山とも伊豆・小笠原弧の火山フロント上に位置し、玄武岩を主体とする火山島であるので、テクトニクスの背景やマグマの性質で共通点が多い。また中央火口の噴火と割れ目噴火を繰り返していること、ストロンボリ式噴火を主とするが、周囲を海域に囲まれた島であることからマグマ水蒸気爆発や水蒸気爆発をしばしば伴ったこと、カルデラ噴火では水蒸気爆発を伴ったことが類似点としてあげられる。

さらに、噴火時に提案されたマグマ供給系のモデルは両火山でも類似している。伊豆大島の1986年噴火においては山頂から玄武岩マグマが噴出したのに対して、カルデラ床の割れ目噴火では分化したマグマが噴出した。これは、浅部の分化したマグマ溜まりと深部の玄武岩マグマが存在すると提案され（荒牧・藤井, 1984）、地震波の散乱や地殻変動観測からも浅部と深部にマグマ溜まりがあることが示唆されている（地震研究所のまとめ）。また、三宅島では岩石学的に浅部に分化したマグマの溜まりと深部に未分化のマグマ溜まりがあり、噴火毎にそれらの混合が起こっていると考えられており（Ammu-Miyasaka et al., 2005など）、2000年噴火前後の地殻変動観測でも浅部と深部に2つの圧力源があることが提案されている（防災科学技術研究所のまとめ）。

異なる点として、山腹の火口配列から想定される山腹でのマグマの貫入方向は伊豆大島では北西・南東方向と考えられるのに対して、三宅島ではほぼ放射状である。また、三宅島2000年噴火のように島外へ数十キロもマグマが貫入したイベントは伊豆大島では確認されていない。さらには噴火間隔に関して、三宅島の最近300年間の活動は伊豆大島より規則的であった。

伊豆大島と三宅島では地殻上部で応力状態が微妙に異なっている可能性があり、それによって噴火間隔やマグマ貫入の方向・距離などに違いが出ている可能性がある。

## 5. 今後の課題と展望

本研究で作成するシナリオに、噴火準備過程 (2. (2) (2-2)) や噴火過程 (2. (2) (3-3)) の観測研究とそれに基づく物理モデルを反映することや、逆に、この噴火シナリオの成果を両観測研究にフィードバックすることが重要である。さらには、伊豆大島火山の噴火シナリオで検討されたように、噴火シナリオの分岐の判断を観測結果に基づいて行うために、観測体制の整備を考慮すること (1. (1) の「地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化」へのフィードバック) も必要である。桜島火山は近年活発な噴火活動を続けており、そこにおいて噴火シナリオを作成し、リアルタイムに使用してその精度や問題点を確認することが重要であろう。この計画研究の間に噴火シナリオが作成可能な火山は複数である。そのため、我々研究者レベルが要求する噴火シナリオを作成するためのマニュアル的なものをこの計画研究の間で準備することが重要である。そのようなマニュアルを用いて、本研究の担当者以外の火山専門家が、対象火山について噴火シナリオを作成できる状況を作ることが好ましい。

## 参考文献

今年度該当なし

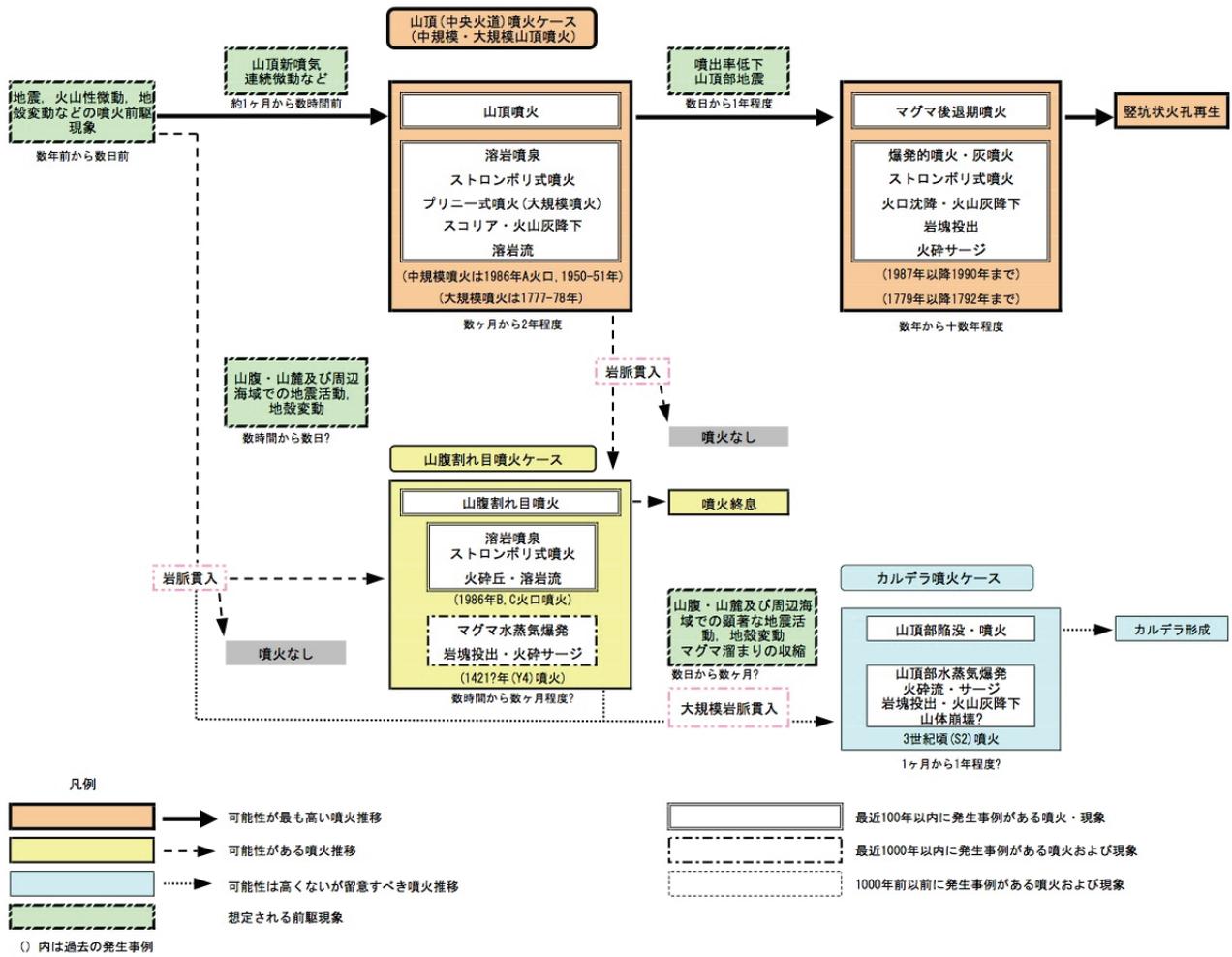


図1. 伊豆大島火山の噴火シナリオ (火山噴火予知連絡会伊豆部会, 2008による)

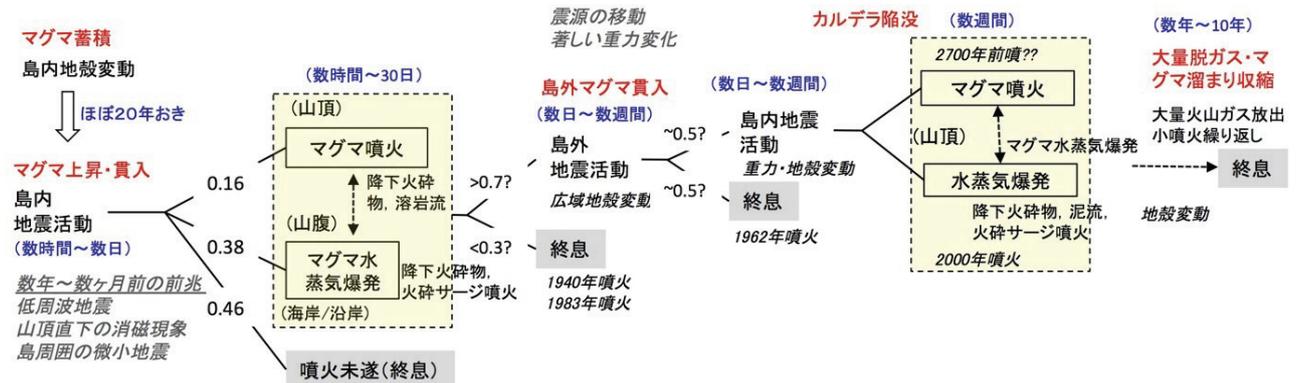


図2. 最近2500年間の噴火履歴に基づいて作成した三宅島火山の噴火シナリオ。分岐に示してある数値は過去の噴火履歴から推定した発生頻度。島外マagma貫入以後の噴火現象については、地震観測が1940年以降に限られている。2500年前の八丁平カルデラの形成に関しては、上の系統樹に乗らない可能性もある。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1407])

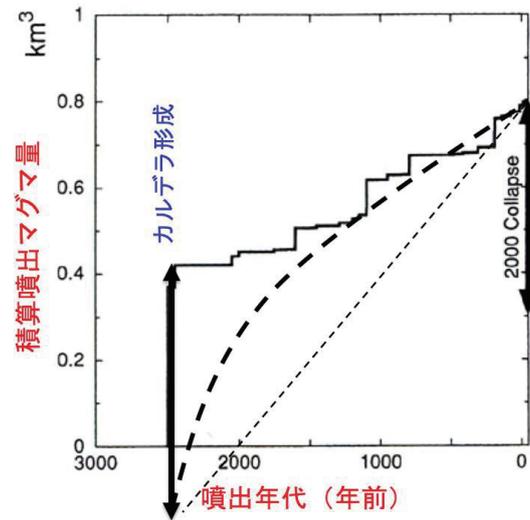


図3. 三宅島火山における2500 年前以降の階段ダイアグラム(東京大学地震研究所 [課題番号 : 1407] ) から引用)。八丁平カルデラの陥没量が2000 年に形成された雄山カルデラと同じ体積であると仮定し、9 世紀までにはほぼ埋め尽くされたことを考慮すると、八丁平カルデラ形成後は噴出率が大きい(太破線)。津久井・他(2001)に加筆。

## 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)

### 1. はじめに

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ことは論を待たない。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）においても、この立場から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。

この反省にたち、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、前計画と同様に、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となった。

### 2. 平成 21 年度成果の概観

#### (ア) 地震・火山現象の基礎データベース

ひずみ計や傾斜計などは、数週間以内の周期帯においてはGPSよりも高感度なセンサーであり、地震発生に至るプレスリップやスロースリップの検出において大きな役割を果たすものである。また、そのセンサーの特性は、津波地震や連動型地震など、広帯域地震計でも計測が困難な超長周期での地震の観測を直接行える唯一のものである。このような特徴を持つデータであるにもかかわらず、地震計データに比べると、ひずみ計・傾斜計データの流通・一元化は格段に遅れており、これを実現することが喫緊の課題であった。北海道大学を中心とするグループは、これに取り組み、今年度、九州大学・名古屋大学・東北大学・北海道大学・地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所、国立天文台水沢VERA 観測所江刺地球潮汐観測施設、東京大学地震研究所の合計 50 観測点、439 チャンネルのデータを試験流通させるに至った。流通しているデータは、ひずみ・傾斜のほか、重力計・水位計・気圧計など多項目にわたっている（北海道大学：[課題番号1001]）。

また、国土地理院においては、前計画に引き続き、GPS観測データや潮位観測データの整備や更新が行われている（国土地理院：[課題番号6009]）。

防災科学技術研究所では、高感度地震観測網、広帯域地震観測網、強震地震観測網による波形データを統合し、日本周辺で発生した地震に対する統合地震波形データベースを構築する作業が行われている。統合地震波形データベースは、観測記録の基礎データベース構築だけではなく、基礎解析データベースや日本列島構造モデルを利用した地震動計算によるシミュレーション記録データベース等、情報の統合化を指向した作業が行われている（防災科学技術研究所 [課題番号：3007]）。また、気象庁においては、全国の地震カタログ作成（気象庁 [課題番号：

7015] ) も着実に行われているほか、過去の地震のデータベースを改良するための作業 ( 気象庁 [ 課題番号 : 7016 ] ) も並行して行われている。

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ことがうかがえる。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いる ( 国土地理院 [ 課題番号 : 6010 ] ) 。

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・構築を行っている ( 気象庁 [ 課題番号 : 7017 ] ) 。

#### (イ) 地震・火山現象に関する情報の統合化

構築したデータベースに基づく情報の統合化に関しても、模索が始まっている。

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 ( 防災科学技術研究所 : [ 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、地震や火山活動に係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 ( 産業技術研究所 [ 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 ( 産業技術研究所 [ 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いる ( 国土地理院 : [ 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。今年度は、地殻の弾性的な厚さ、重力異常、地震発生の上限・下限、GPS によって得られるひずみ速度、地震活動度、活断層、地温勾配、地磁気データ等の日本列島域での空間分布を同様の仕様で可視化した。個別のデータを見るだけでは気づきにくいことでも、同様のフォーマットで比較することで異種物理量間の相関が見えてくることもあり、今後の展開に興味を持たれる ( 名古屋大学 [ 課題番号 : 1703 ] ) 。

京都大学防災研究所では、「地震火山現象に関する統合データベースの構築」として、前計画ならびに本計画で構築される各機関のデータベースへのポータルサイトを構築した。現状では、現業機関、研究所等、それぞれの機関においては、充実した基礎データベースの構築が進められているが、機関の壁を越えた相互参照は実現が困難で、利用者からは不便な一面もあった。本課題では、これらのデータベースへのポイントを一元的に集約して利用者の利便を図った。ただし、現状では、個別データベースを羅列したものとどまっておき、「統合データベース」の体をなしているとは言い難い面もあり、今後の課題となっている ( 京都大学防災研究所 [ 課題番号 : 2902 ] ) 。

### 3. まとめ

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  
行われた。また、今回初めて、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たこ  
とは大変歓迎されるべきことである。今計画で新たに取り入れられた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あったことは興味ある成果である。次年度以降は、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  
スの構築の試みが現れることを期待するものである。

## 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)

「日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象」計画推進部会員 加藤愛太郎  
(東京大学地震研究所)

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21年度(2009年度)の成果の概略について述べる。

### ア. 列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場

本研究項目では、VLBI(国土地理院[課題番号:6013])、SLR(海上保安庁[課題番号:8005])、GPS(東京大学地震研究所[課題番号:1410])といった宇宙技術を用いた広域のプレート運動の実測と、地震のメカニズム解を用いた広域の応力場(高知大学[課題番号:2102])についての観測研究を実施した。

VLBIとGPS観測データと統合処理して東アジアから西太平洋に至る地域の変位速度場を算出した結果を図1に示す(東京大学地震研究所[課題番号:1410])。この際、ユーラシア大陸内の比較的安定と考えられる地域のVLBI、GPS観測点を用いてユーラシアプレートを定義し、この運動を差し引くことでユーラシア安定地塊に対する変位速度場を求めている。しかしながら、こうすることによって、アムールプレート内部の変位速度場は予想とは逆に西向きの変位速度を持ち、日本列島に対する速度場は従来得られてきたものとは一致しない。今後さらに詳細な解析を実施し、より信頼性の高いこの地域の変位速度場、プレート変位速度を得ていく必要がある。

応力場については、四国～山陽地方において 1996 年以降の微小地震の P 波極性の検測データを用いてメカニズム解決定と応力逆解析を行った。その結果を図 2 に示す（高知大学〔課題番号：2102〕）。四国の中央構造線以南（図 2-I）の応力場はほぼ構造線に沿った方向の圧縮であるが、中央構造線付近から瀬戸内海には構造線に斜交する主応力軸をもつ応力場（図 2-II）が見られる。一方、瀬戸内海北部以北には再び東西圧縮の応力場が現れる。これらの結果から、中央構造線付近の応力場は幅数十 km 以内の剪断帯を形成しており、この剪断帯は中央構造線よりも北側に広く分布していると考えられる。燧灘の東部は横ずれ型の応力場が求められたが、燧灘西部や高縄半島では正断層型の伸張場も見られており、応力場も複雑となっている。ただし燧灘付近の地震のメカニズム解は直上の定常地震観測点が少ないため、メカニズム解を十分に精度良く求められていない事が予想される。今後、蓄積されつつある野外観測点のデータを加えて、メカニズム解分布、応力場逆解析の精度を高めていく予定である。

## イ. 上部マントルのマグマの発生場

沈み込み帯の地震・火山活動を理解するためには、島弧の発達過程を明らかにすることが重要となる。特に島弧がどのようにして大陸地殻に成熟していくのか、その問題を解く鍵として、伊豆弧（北緯 30 度～35 度）に噴出する第四紀の流紋岩マグマの成因に関する新しい仮説を提出した。この地域には、地殻起源の二種類の流紋岩マグマが存在していると考えられる。海底カルデラから噴出する流紋岩マグマは伊豆弧の漸新世の古い中部地殻を溶かして生じたものであり、火山島から噴出する流紋岩は中新世以降の新しい地殻起源のマグマである（海洋研究開発機構〔課題番号：4002〕、Tamura et al., 2009、Tamura et al., 2010）。また、伊豆弧本州弧衝突帯における中新世以降の深成岩（丹沢岩体・甲府岩体）は、伊豆弧の古い（始新世・漸新世の）中部地殻が沈み込みにより部分融解してプレートから剥離し、地表に出現したものであると考えられる（海洋研究開発機構〔課題番号：4002〕、Tani et al., 2010）。

一方、東北日本弧では沈み込む太平洋スラブの上側に、スラブとほぼ平行に傾斜した低速度層が存在する。これは、沈み込んだスラブから供給された水によって高温のマントル物質が部分融解して火山フロント直下まで供給されている様子をとらえていると考えられている。しかし、この傾斜した低速度層の下限がどの深さまで到達しているのかは未解決の問題であった。今回、sP 変換波を用いて日本海下の地震を高精度に決定し、これらの地震からの波線を用いてトモグラフィを行うことにより、日本海下の深部構造まで明らかにすることに成功した（東北大学〔課題番号：1203〕、Huang et al., 2010）。その結果（図 3）、傾いた低速度域は日本海の下まで達しており、マグマ発生に関与する高温域あるいは水を含んだ領域が少なくとも深さ 120 km 以深から存在していることが示された。

日本列島全体を覆うスケールでのスラブ由来流体の量、性質の空間変化を追う目的で、岩石学的・地球化学的データに関する文献調査とデータ解析を行った結果、5 つの島弧（千島、東北、中部、伊豆一小笠原、琉球）によってスラブ由来流体の量と組成が異なることが分かった（図 4；東京大学理学系研究科〔課題番号：1501〕、Nakamura and Iwamori, 2009）。この原因は、それぞれの弧におけるスラブの沈み込み角度・速度とスラブの年齢といったテクトニックセッティングの違いに起因すると考えられる。また、弧ごとにマントルウエッジの組成が系統的に異なり、東北日本と琉球弧の下ではインディアン MORB ソース的マントル（Indian-type マントル）が卓越し、ユーラシア大陸下から沈み込みの反流として Indian-type マントルが太平洋側に張り出して

いる可能性が考えられる。

## ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布

地震学的構造が詳しく調べられている関東地方において、温度検層データに基づいて地殻熱流量の空間分布を推定した。その結果、北緯 36 度線付近を境に、北側は  $50 \text{ mW/m}^2$  以上、南側では  $30\sim 40 \text{ mW/m}^2$  と低熱流量であることが明らかになった。この地殻熱流量を入力データとして、一次元熱伝導方程式に基づく温度構造の推定を試みた。具体的には、放射発熱量とその層厚、および熱伝導率を仮定して、それぞれの地点ごとに温度の深さ分布を推定した（図 5；防災科学技術研究所 [課題番号：3009]）。その結果、深さ 30 km においても 350 度以下の領域が関東一円に存在することがわかった。さらに、この深さで 250 度の等温線とフィリピン海プレート（PHS）上面の深さがほぼ一致しており、フィリピン海プレートの沈み込みによって陸側プレートが冷却されていることを強く示唆する。実際、関東では陸のモホ近傍でも地震が発生しているが、これは、フィリピン海プレートによって陸側のプレートが冷却され、モホ近傍でも脆性的性質が失われているためと解釈できる。

地震波速度不均質のスペクトルを推定するインバージョン解析手法に微小地震の S 波データを適用して、東北地方におけるランダムな速度不均質のスペクトルの地域性を明らかにした（東北大学 [課題番号：1204]、Takahashi et al., 2009）。得られた結果は、第四紀火山の下では特に散乱が強いことを示す（図 6）。さらに、不均質構造における多重等方散乱を仮定して直達波のエネルギーとコーダ波部分のエネルギーとの分配比から散乱減衰と内部減衰を定量的に求める方法である MLTWA (Multiple Lapse Time Window Analysis) 法を Hi-net で記録された浅い近地地震の S 波に適用して、日本全国の散乱減衰と内部減衰の分布図を作成した（図 7；東北大学 [課題番号：1204]、Carcole and Sato, 2010）。得られた結果では、糸魚川-静岡構造線を境にして東日本と西日本の構造が大きく異なることが明瞭に示されている。

この大きな構造境界である糸魚川-静岡構造線について、「糸魚川-静岡構造線断層帯における重点的な調査観測」による観測点と既存の観測点の記録による地震波速度構造解析を行い、従来にはない高解像度の速度構造モデルを推定することができた（図 8；防災科学技術研究所 [課題番号：3009]）。大局的には深さ数 km～十数 km における断層帯に沿った低速度異常域が顕著であり、より詳細には低速度異常の程度に地域性が認められ、それらは断層セグメンテーションに関係している可能性がある。下部地殻においては、諏訪湖を中心として南北に広く分布する低速度域がみられ、断層帯北部では断層帯の東側に、南部では西側にそれぞれ位置する。このような低速度域が地殻深部の流体分布に起因するならば、それによる強度の低下を通じてその直上に位置する断層の形成にも影響を及ぼしている可能性がある。

断層周辺の構造を詳しく調べた例として長野県西部地域における高密度の地震観測網による P 波トモグラフィ結果がある（図 9；京都大学防災研究所 [課題番号：1806]）。大局的に見て、地震は高速度域で発生している傾向が見られる。詳細に見ると、図 9 (e)、(i)、(j) のように、震源は高速度域の中の局所的な低速度に沿って分布していることが分かる。例えば図中 C1 で示す地震分布に沿って小さなスケールの低速度異常が見られる。これらのことから、長野県西部地域における地震波速度構造と地震活動との関係は、ひとつの可能性として以下のように解釈される。大規模な低速度域は水の通路となっており、そこでは間隙水圧は高くないが、高速度域の中の局所的に間隙水圧の高くなった場所、あるいはその極近傍で地震が引き起こされていると考えられ

る。

このような水の存在を検出するうえで、地震波速度構造のみならず電気比抵抗構造の推定が重要である。このような観点から秋田県（秋田大学〔課題番号：1301〕）、蔵王火山周辺（東京工業大学〔課題番号：1601〕）、跡津川断層域（東京大学地震研究所〔課題番号：1411〕）、和歌山地域（東京大学地震研究所〔課題番号：1412〕）、鳥取県中西部域（鳥取大学〔課題番号：2001〕）等で広帯域 MT 観測やそのデータ解析が行われた。

跡津川断層域では広帯域 MT 観測による比抵抗推定が行われていた（Yoshimura et al., 2009）が、このデータとネットワーク MT 観測データとのジョイントインバージョンにより、当該地域の表層から上部マントルに至る比抵抗構造が推定された（東京大学地震研究所〔課題番号：1411〕）。その結果、新潟－神戸歪集中帯中軸部の3つの主要な断層（牛首断層、跡津川断層、高山・大原断層帯）深部延長の下部地殻に、上下方向に細長い形状を呈した低比抵抗域の存在が明らかとなった（図 10）。静水平衡状態では間隙水は粒界に孤立して存在しやすいため、新潟－神戸歪集中域の主要3断層下の下部地殻に局在する低比抵抗域を説明するためには、透水性の高い剪断帯が発達していると考えるのが合理的である。また、上部マントルでは、北側（牛首断層－跡津川断層下）でやや高比抵抗、南側（高山・大原断層帯下）で低比抵抗となるコントラストを示す。Nakajima and Hasegawa (2007) による上部マントルの地震波速度構造によると、沈み込むフィリピン海スラブ上部に低速度層が深さ 100 km（南側：高山・大原断層帯下）から 200 km（北側：富山平野下）にかけて検出されている。この低速度層は、上記の上部マントルで見られた比抵抗コントラストの描像と調和的である。

秋田県南部の北緯 39 度 15 分付近で広帯域 MT 観測を実施した。この解析結果に加えて、過去に得られた秋田県内の東西測線の結果もあわせて図 11 に示す（秋田大学〔課題番号：1301〕）。line C、line D、line 09 に見られる高比抵抗ブロックの位置は、重力測定によるブーゲー異常が高い部分と一致しており、これらの地殻中部で見られる高比抵抗ブロックは隙間の少ない比較的固い基盤岩に対応すると考えられる。一方、図 11 のどの断面においてもモホ面の存在する地下 30 km 付近が低比抵抗を示しており、この領域は部分熔融帯に対応する可能性が挙げられる。この地域でも、また蔵王周辺（東京工業大学〔課題番号：1601〕）でも、地震活動は高比抵抗域ないし、高比抵抗と低比抵抗との境界で発生している。鳥取県でもこれまで同様の傾向が見られており、今年度行った東経 133 度 45 分付近の構造の予察的な解析結果（図 12；鳥取大学〔課題番号：2001〕）でも、同様の傾向が見て取れるものの、その傾向は必ずしも明瞭ではないため、今後、より詳細な解析が必要である。

## エ. 地震活動と火山活動の相互作用

伊豆半島や伊豆諸島の位置するフィリピン海プレート北縁において、マグマの貫入が引き起こす地震活動を定量的に評価するためには、マグマ貫入深度を支配する火山体下の地殻構造と詳細な震源分布を知ることが重要である。それに基づきマグマ貫入過程を詳細に解明することにより、地震活動と火山活動を統一的に理解できるようになると期待される。今年度はこの地域で発生している地震活動とマグマ貫入現象を理解するために、図 13 に示したような人工地震を用いた構造探査実験を実施するとともに、2009 年 12 月に発生した伊豆半島東方沖群発地震の活動を、過去の活動と比較することにより、この地域のマグマ蓄積過程の解明を目指した研究に着手した（東京大学地震研究所〔課題番号：1413〕）。

伊豆半島東方沖で発生する群発地震の大部分は貫入するマグマの先端で発生し、震源の移動がマグマの移動を描出していることが明らかにされている。マグマ移動のメカニズムや、マグマ蓄積に関する物理量の推定が定量的に行われ、群発地震活動は、主活動が深さ3~7 kmの浅い活動と、7~10 kmの深い活動に大別でき、それらは異なる密度のマグマがそれぞれの浮力中立で停留したと考えられる。1990年代の群発地震は浅い活動が多かったのに対して、2000年以降は今回を除いて全て深い活動であり、今回は1998年以降11年ぶりの浅い活動であった。今回の活動を除き、これまで全ての群発地震活動の震源は、鉛直から約20度南側へ傾斜した面上に並んでおり、これは周辺応力の作る最小主応力の方向に垂直な面にマグマが貫入してきたことを示している。また、マグマ中立深度とダイク内の過剰圧には系統的な相関が存在しており、これはマグマ先端での破壊条件が、ダイクの広がりを制御していることを示している。

今回の群発地震活動はa) 震源が深さ8 kmから6 kmに上昇する活動、b) 深さ6 kmから浮力中立深度と思われる4.5 kmまで上昇する活動、c) 浮力中立点周りに広がる活動の3つの活動に明瞭に分類できる。これまでの活動ではa)とb)に明瞭な区分はなかった。更に、深さ8 kmから6 kmに上昇する地震活動は、これまでと同様に鉛直から約20度傾斜した面上に分布する。しかし、それより浅い地震活動はほぼ垂直な面上に分布し、これまでの活動とは異なった面上に地震が発生した(図14)。a)とb)との境界は、これまでの活動における深い活動と浅い活動の境界に一致する。今回の群発地震活動は、深いマグマ蓄積領域と浅いマグマ蓄積領域の境界で、これまでと異なり、マグマが浅部で新たな面を形成して、そこに貫入した現象であると推定される。今回のマグマの貫入量は3~5メガ立米と推定され、1998年の活動(約30メガ立米)、2006年4月の活動(約20メガ立米)に比べて貫入量は少ない小規模なマグマ貫入現象であった。しかし、群発地震発生域から十分離れた気象庁鎌田観測点で検知された地震回数は有意に多く、この高い活動度はマグマが新たな面を形成して貫入したためと考えられる。この現象は、マグマ蓄積範囲が拡大してマグマ溜りが拡張を始める過程を示しており、より大きなマグマ溜りへの成長過程のスナップショットを見せているとも考えられる。

一方、フィリピン海プレートは九州地域に沈み込み、日向灘において20~30年間隔で大地震を繰り返し発生させている。隣接する南九州には、桜島などの爆発的火山があり、これらの地震活動と火山活動の間の相互作用は大きいと考えられる。このような観点から日向灘の地震活動と南九州の火山活動に関連する応力伝播・物質移動過程のモデル化を目指した観測研究が実施された(京都大学防災研究所[課題番号:1805])。

桜島火山を含む南九州地域についてInSAR解析を行った結果、桜島北部および始良カルデラ周辺部においては、2006年~2009年の期間、地盤が衛星視線方向に近づく変動パターンが検出された。この期間における水準測量では、始良カルデラ地下のマグマ溜りにおける増圧を反映した地盤変動が捉えられており、InSAR解析により得られた干渉画像は、水準測量結果から推定される圧力源を仮定した理論干渉画像と概ね調和的である。

レーザ関数(RF)のトランスバース成分は傾斜する不連続面の検出に有効であることを利用し、九州へのフィリピン海プレート沈み込みの状況を精度良く推定するために、方位角が118度から178度に位置する遠地地震の波形からRFを計算し、そのトランスバース成分を1次元速度構造により深さに変換し断面に投影した(図15)。その結果、海洋性モホに対応するRFのピークが鮮明に描き出され、地震発生層との対比から、九州中南部の北側では海洋性地殻中で、南側では主にスラブマントル内で地震が発生していると考えられる。ただし、南側の一部の領域では、

海洋性地殻内でも地震が発生していることが示された。

九州中部の別府湾と島原半島には南北伸張場による正断層が発達しており、別府と島原を結び九州中部を東北東 - 西南西に横断する地域は、別府 - 島原地溝帯と呼ばれている。この地溝帯に沿った地域は歪速度も大きく、地震活動も火山活動も活発であり、両者は地溝帯形成という共通のテクトニクスの下で相互に影響を及ぼしあって発生していると考えられる。このような観点から別府-島原地溝帯の実体解明をめざした観測研究が実施された（九州大学〔課題番号：2201〕）。

レーザー関数解析から阿蘇カルデラの西部・北西部の約 15 ~ 21 km の深さに S 波速度が約 2.3 km/s の低速度層が見出された。この低速度層を考慮した解析を行うと別府-島原地溝帯に対応するモホ面の深さの変化は認められなかった。一方、別府-島原地溝帯西部の島原半島や熊本平野を南北に横切る断面では、下部地殻の S 波速度が地溝内外で異なり、地溝内で地殻の薄化が起きている可能性があるものの、レーザー関数解析も含めた包括的な解析が必要である。

一方、既存の地震波形データに対し初動極性の再検測を行って起震応力場を推定した結果、最小主応力軸を精度良く推定できた。この軸は阿蘇火山周辺を取り囲む接線方向に回転している結果が得られた。また、応力比は別府-島原地溝帯において非常に大きく、最大主応力が中間主応力とかなり近い値を持つことが明らかになった（図 16）。ただし、応力比が大きいため最大主応力と中間主応力の分離が困難な場合があるので、この問題を解決するべく、別府-島原地溝帯を横断する方向に 15 点の臨時地震観測点を設置して稠密地震観測を開始した。

さらに、南海トラフ巨大地震による富士山噴火連動の可能性を評価するために、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、地震波などによって誘発されるマグマ溜りの増圧後、マグマがマグマ溜りから地表まで火道内を流れて噴火に至るまでの過程を、混相流モデルを用いて解析を行った。特に、噴火の推移予測に直結する火道内のマグマ発泡度分布の変化を支配するメカニズムを詳細に明らかにした（防災科学技術研究所〔課題番号：3010〕）。

#### オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

沈み込みに伴う山脈形成において、背弧域における地殻水平短縮が重要な役割を果たしていることが最近の研究によって分かってきた。反射法地震探査から得られる地下の地質構造から、東北日本弧の背弧域（羽越褶曲帯～北部フォッサ）における地殻変形量を見積もったところ、当該地域に発達する fault-bend-fold や fault-propagation-fold による水平短縮量は、鮮新世以降に約 10-15 km であることが分かった（東京大学理学系研究科〔課題番号：1501〕）。東北日本背弧域での水平短縮量は前弧域のそれを大きく上回っているが、段丘面高度分布から求めた東北日本弧の隆起量分布は、活断層近傍での短波長の変形を差し引くと、背弧から前弧域までほぼ一様である。これは、東北日本弧の下部地殻が広域にわたってほぼ一様な速度で（地殻水平短縮による）地殻厚化を起こしており、それに伴ってアイソスタティックな隆起が生じていると解釈される。隆起量分布データを基に見積もった地殻水平短縮速度は、反射法地震探査によって求めた背弧域の地殻水平短縮速度とほぼ一致する。このように、東北日本弧における地殻水平短縮は、上部地殻では背弧域に集中し、下部地殻では広い範囲でほぼ一様に分布しているらしい。したがって両者の境界には detachment 断層が存在し、上・下部地殻が力学的に decouple していることが要請され、この detachment 断層は、中新世の日本海拡大時における非対称リフトの形成と密接に関係していると考えられる。

この東北地方南部の長期的地殻歪みの蓄積過程の解明を目指した反射地震探査を平成 22 年度に行うために、地質・地形調査・資料収集を行った結果、東北日本背弧域のうち前弧側に位置する高速変形帯である会津盆地西縁断層帯においては、断層の上下すべり速度は年間約 1 mm と比較的よく求まっているのに対し、その断層構造がこれまでの調査ではよく分かっていないこと、また断層上盤側で内部変形が生じている可能性がある事が明らかになった（東京大学地震研究所〔課題番号：1414〕）。

一方、近年の活断層判読手法・調査方法の高度化や LiDAR および写真測量等による地形計測の技術革新を背景に、従来不明であった活断層をあらたに認定するとともに、地表形状とずれ量分布を詳細に明らかにして、従来の静的な断層モデルや経験式に依存した予測に留まらず、動的な断層モデルの構築に貢献することを最終目標とした調査・研究が実施された（名古屋大学〔課題番号：1704〕）。2008 年岩手・宮城内陸地震は事前に活断層の存在が指摘されていない場所で発生したが、地震直後の調査により、少なくとも巖美町はの木立付近の長さ 1 km 程度の区間に活断層の証拠が存在することが明らかになっている。今年度、地震前後の多時期に撮影された航空写真や LiDAR データを利用して、震源域周辺の活断層と推定活断層および地すべり地形の詳細な分布図を作成し、詳細活断層図として刊行した（図 17；国土地理院，2009）。その結果、餅転から荒砥沢ダムに至る北北東 - 南南西走向の 15 km 程度の範囲に推定活断層が認定されること、地表地震断層と活断層の位置が一致するのは、はの木立と岡山の 2 地点であること等が明らかになった。また、地震前後の LiDAR 計測結果の差分図によれば、はの木立や岡山では地表地震断層から推定された隆起沈降が明瞭にとらえられること、磐井川沿いにおいては矢櫃ダム付近を境に西方が隆起域、東方が沈降域であり、その変化は緩やかであること、差分図によって地震断層と地すべりとは明瞭に区別できること等がわかった。

これらの内陸における活断層はトレンチ等から活動履歴を調べることができるが、海底下で発生するプレート境界型巨大地震の過去の活動については、津波のデータが最も情報量が多いと考えられる。2006 年千島巨大地震の南西で発生した 1963 年千島巨大地震（M8.5）の震源過程をロシア・日本・ハワイなどで観測された津波波形を用いて推定したところ、2006 年千島地震は 1963 年千島巨大地震の震源域のすぐ北東側で発生していたことが明らかになった（図 18；北海道大学〔課題番号：1002〕）。1963 年千島地震は最大余震が津波地震であったことが知られているが、その最大余震の震源過程も津波波形を用いて解析したところ、この地震はやはり海溝近傍のすべり量が大きくライズタイムが長いといった津波地震の特徴を持っていたことが明らかになった。

一方、さらに古い津波堆積物を調べるため、各地でジオスライサーやコア資料調査を行った。三重県志摩市では、採取されたコア試料に関して年代測定を行ったところ、約 4000 年前から約 500 年前までの間の地層中に、津波堆積物が少なくとも 8 層挟まれていることが分かった（図 19；産業技術総合研究所〔課題番号：5006〕）。それらの内 2-3 層は地震・津波の記録がある時代に堆積しており、これらの砂層と津波の歴史記録との対比を可能にするため、より詳細な年代測定と簡易ボーリングによる補足調査を行った。

## 課題と展望

長期・広域の歪の時空間変化を調べる上で、GPS や VLBI、SLR といった宇宙技術を用いた観測が威力を発揮し、日本列島周辺のプレート運動について次第に明らかになってきている。しかし、日本の地震活動を理解するうえで重要な位置を占めるアムールプレートの運動については、まだ

未解明な部分が多く、今後も周辺諸国と協力して観測を進めることが必要不可欠である。一方、近年、InSAR の解析精度が向上して、大地震前後の変化のみならず、ゆっくりとした変動についても解析が進んでおり、地下のマグマの動きや大地震後の粘性緩和について大きな情報をもたらしてくれるものと期待される。

上部マントルのマグマの発生場については、その起源が日本海の深部にまで及んでいる可能性があり、大陸内の火山も沈み込むプレートにその原因があるとする説が有力になりつつある。今後、観測から地震波の速度・異方性・減衰構造を明らかにするとともに、実験から得られる岩石の脱水が生じる温度・圧力条件、地表で見られる岩石の組成、および数値シミュレーションから得られる温度分布とマントルウェッジ内の流れの分布を、相互に比較検討することにより、全体像を明らかにしていく必要がある。

地震学的な広域の地殻構造については、直達波を用いたトモグラフィや人工地震探査のみならず、後続波も用いたトモグラフィや、レシーバー関数、地震波干渉法、散乱波の解析等から詳細が明らかになりつつある。電磁気学的構造についても、広帯域 MT の 3 次元解析が行われるようになり地震波トモグラフィとの比較が容易になりつつある。さらに広帯域 MT とネットワーク MT のジョイントインバージョンが可能となったことにより、浅部から深部まで信頼度の高い比抵抗分布が得られつつある。地震波速度は含水量に敏感であり、散乱波解析からは不均質の特徴的波長や周波数毎の減衰が得られ、さらに比抵抗は間隙水の連結度に敏感であるため、これらを総合的に判断することにより地下の水の分布と状態の両方が得られると期待される。この研究を一層進めるためには、地下の水の存在形態に関する実験も進展させる必要がある。

地震活動と火山活動の相互作用については、大規模な観測が始まったばかりであるが、現時点での予備的解析結果だけを見ても、伊豆半島東方沖や九州中部や南部において興味深い結果が出ており、今後のデータ解析の結果が期待される。火山活動については、過去に似た活動を繰り返していても、その繰り返しの結果、地下の状態が変化して、新たなステージに突入する危険性に常に注意を払う必要がある。

同様のことは巨大地震の発生サイクルについてもあてはまり、現在考えられているアスペリティモデルが正しいとしても、2004 年のスマトラ島沖地震のように、非常に広域のアスペリティを壊す長大な地震が発生する可能性を常に考慮する必要がある。実際、津波堆積物の解析からは、東北日本から北海道にかけても数百年に一度、極めて大きな津波を引き起こす大地震が生じてきたことが明らかになってきており、これらの超巨大地震の発生メカニズムの解明が極めて重要である。また、内陸においても、長期的な地殻歪みが特定の領域に集中してくメカニズムはまだ完全には解明されておらず、今後、歪集中帯とそれ以外の領域の比較観測が重要となっている。また、活断層の活動を調べる上で、LiDAR 計測は極めて強力なツールであり、今後、さらに活用されることが望まれる。

## 参考文献

- Aizawa, K., Y. Ogawa, M. Mishina, K. Takahashi, S. Nagaoka, N. Takagi, S. Sakanaka, and T. Miura, 2009, Structural controls on the 1998 volcanic unrest at Iwate Volcano: relationship between shallow electric resistive body and possible magmatic fluid ascent route, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 131-139.
- Carcole, E. and H. Sato, 2010, Spatial distribution of scattering loss and intrinsic

- absorption of short-period S-waves in the lithosphere of Japan on the basis of the Multiple Lapse Time Window Analysis of Hi-net data, *Geophys. J. Int.* 180, 268-290, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04394.x.
- Fujino, S., H. Naruse, D. Matsumoto, T. Jarupongsakul, A. Sphawajruksakul, and N. Sakakura, 2009, Stratigraphic evidence for pre-2004 tsunamis in southwestern Thailand. *Marine Geology*, 25-28.
- Fujiwara, T., Y. Kido, Y. Tamura, and O. Ishizuka, 2009, Gravity and magnetic constraints on the crustal structure and evolution of the Horeki seamount in the Izu-Ogasawara (Bonin) arc, *Earth Planets Space*, 61, 3, 333-343.
- Hasegawa, A., J. Nakajima, N. Uchida, T. Okada, D. Zhao, T. Matsuzawa, and N. Umino, 2009, Plate subduction, and generation of earthquakes and magmas in Japan as inferred from seismic observations: An overview, *Gondwana Research*, 16, 370-400.
- Honkura, Y., Y. Ogawa, M. Matsushima, S. Nagaoka, N. Ujihara, and T. Yamawaki, 2009, A model for observed circular polarized electric fields coincident with the passage of large seismic waves, *J. Geophys. Res.*, 114, B10103, doi:10.1029/2008JB006117.
- Huang, Z., D. Zhao, N. Umino, L. Wang, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Yoshida, 2010, P-wave tomography, anisotropy and seismotectonics in the eastern margin of Japan Sea, *Tectonophysics*, 489, 1-4, doi:10.1016/j.tecto.2010.04.014.
- Ikeda, Y., T. Iwasaki, K. Kano, T. Ito, H. Sato, M. Tajikara, S. Kikuchi, M. Higashinaka, T. Kozawa, and T. Kawanaka, 2009, Active nappe with a high slip rate: seismic and gravity profiling across the southern part of the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, central Japan, *Tectonophysics*, 472, 72-85, doi:10.1016/j.tecto.2008.04.008.
- Ingham, M.R., H.M. Bibby, W. Heise, K.A. Jones, P. Cairns, S. Dravitzki, S.L. Bennie, T.G. Caldwell, and Y. Ogawa, 2009, A magnetotelluric study of Mount Ruapehu volcano, New Zealand, *Geophys. J. Int.*, 179, 887-904, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04317.x.
- Isse, T., H. Shiobara, Y. Tamura, D. Suetsugu, K. Yoshizawa, H. Sugioka, A. Ito, T. Kanazawa, M. Shinohara, K. Mochizuki, E. Araki, K. Nakahigashi, H. Kawakatsu, A. Shito, Y. Fukao, O. Ishizuka, and J. B. Gill, 2009, Seismic structure of the upper mantle beneath the Philippine Sea from seafloor and land observation: implications for mantle convection and magma genesis in the Izu-Bonin-Mariana subduction zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 278, 1-2, 107-119.
- Ito, T., Y. Kojima, S. Kodaira, H. Sato, Y. Kaneda, T. Iwasaki, E. Kurashimo, N. Tsumura, A. Fujiwara, T. Miyauchi, N. Hirata, S. Harder, K. Miller, A. Murata, S. Yamakita, M. Onishi, S. Abe, T. Sato, and T. Ikawa, 2009, Crustal structure of southwest Japan, revealed by the integrated seismic experiment Southwest Japan 2002, *Tectonophysics*, 472, 1-4, 124-134.
- 国土地理院, 2009, 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震 1:25,000 詳細活断層図 (活断層・地形分類及び地形の変状), 国土地理院技術資料, D1-No. 541.
- Kodaira, S., 2009, Active Source Seismic Studies in Subduction Zones around Japan - Recent Results from Seismic Surveys in Subduction Seismogenic Zones and Intra-Oceanic Arcs

-, *Zishin*, 61, S155-S163.

- Koyaguchi, T., Y. Suzuki, and T. Kozono, 2010, Effects of the crater on eruption column dynamics, *Journal of Geophysical Research*, in press.
- Kozono, T. and T. Koyaguchi, 2010, A simple formula for calculating porosity of magma in volcanic conduits during dome-forming eruptions, *Earth Planets and Space*, in press.
- Lei, J., D., Zhao, and Y. Su, 2009, Insight into the origin of the Tengchong intraplate volcano and seismotectonics in southwest China from local and teleseismic data. *J. Geophys. Res.* 114, B05302, doi:10.1029/2008JB005881.
- Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa, 2009, Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, 114, B08309, doi:10.1029/2008JB006101.
- Nakajima, J. and A. Hasegawa, 2010, Cause of M 7 earthquakes beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Possible evidence for a vertical tear at the easternmost portion of the Philippine Sea slab, *J. Geophys. Res.*, 115, B04301, doi:10.1029/2009JB006863.
- Nakamura, H. and H. Iwamori, 2009, Contribution of slab-fluid in arc magmas beneath the Japan arcs, *Gondwana Res.*, 16, 431-445.
- Nakanishi, A., E. Kurashimo, Y. Tatsumi, H. Yamaguchi, S. Miura, S. Kodaira, K. Obana, N. Takahashi, T. Tsuru, Y. Kaneda, T. Iwasaki, and N. Hirata, 2009, Crustal evolution of the southwestern Kuril Arc, Hokkaido Japan, deduced from seismic velocity and geochemical structure, *Tectonophysics*, 472, 105-123.
- No, T., N. Takahashi, S. Kodaira, K. Obana, and Y. Kaneda, 2009, Characteristics of deformation structure around the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki Earthquake, *Earth, Planets and Space*, 61, 1111-1115.
- Obana, K. and S. Kodaira, 2009, Low-frequency tremors associated with reverse faults in a shallow accretionary prism, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 287, 168-174.
- Obana, K., S. Kodaira, and Y. Kaneda, 2009, Seismicity at the Eastern End of the 1944 Tonankai Earthquake Rupture Area, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 1, 110-122.
- Park, J., G. Fujie, L. Wijerathne, T. Hori, S. Kodaira, Y. Fukao, G. F. Moore, N. L. Bangs, S. Kuramoto, and A. Taira, 2009, Discovery of a low velocity zone along the Nankai subduction zone, *Geology*, 38, 283-286; DOI: 10.1130/G30205.1.
- Sato, H., 2009, Scattering of seismic waves in the heterogeneous Earth, in "Encyclopedia of Complexity and Systems Science (Ed. R. A. Mayers) ", Springer Verlag GmbH, Heidelberg, 7914-7931.
- Sato, T., S. Kodaira, N. Takahashi, Y. Tatsumi, and Y. Kaneda, 2009, Amplitude modeling of the seismic reflectors in the crust-mantle transition layer beneath the volcanic front along the northern Izu-Bonin island arc, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 2, Q02X04, doi:10.1029/2008GC001990.
- Sawai, Y., K. Jankaew, M.E. Martin, M. Choowong, T. Charoentitirat, and A. Prendergast, 2009, Diatom assemblages in tsunami deposits associated with the 2004 Indian Ocean

- tsunami at Phra Thong Island, Thailand. *Marine Micropaleontology*, 73, 70-79.
- 田力正好・池田安隆・野原壮, 2009, 河成段丘の高度分布から推定された岩手・宮城内陸地震の震源断層, *地震*, 第2輯, 62, 1-11.
- Takahashi, N., S. Kodaira, Y. Tatsumi, M. Yamashita, T. Sato, Y. Kaiho, S. Miura, T. No, K. Takizawa, and Y. Kaneda, 2009, Structural variations of arc crusts and rifted margins in the southern Izu-Ogasawara arc-back arc system, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q09X08, doi:10.1029/2008GC002146.
- Takahashi, T., H. Sato, T. Nishimura, and K. Obara, 2009, Tomographic inversion of the peak delay times to reveal random, velocity fluctuations in the lithosphere: method and application to northeastern Japan, *Geophys. J. Int.* 178, 1437-1455, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04227.x
- Tamura, Y., J. B. Gill, D. Tollstrup, H. Kawabata, H. Shukuno, Q. Chang, T. Miyazaki, T. Takahashi, Y. Hirahara, S. Kodaira, O. Ishizuka, T. Suzuki, Y. Kido, R. S. Fiske, and Y. Tatsumi, 2009, Silicic Magmas in the Izu-Bonin Oceanic Arc and Implications for Crustal Evolution, *J. Petrol.*, 50, 4, 685-723; doi:10.1093/petrology/egp017.
- Tamura, Y., O. Ishizuka, K. Aoike, S. Kawate, H. Kawabata, Q. Chang, S. Saito, Y. Tatsumi, M. Arima, M. Takahashi, T. Kanamaru, S. Kodaira, and R. S. Fiske, 2010, Missing Oligocene Crust of the Izu-Bonin Arc: Consumed or Rejuvenated During Collision?, *J. Petrol.*, 51, 4, 823-846, doi:10.1093/petrology/egq002.
- Tani, K., D. J. Dunkley, J. Kimura, R. J. Wysoczanski, K. Yamada, and Y. Tatsumi, 2010, Syncollisional rapid granitic magma formation in an arc-arc collision zone: Evidence from the Tanzawa plutonic complex, Japan, *Geology*, 38, 215-218, doi:10.1130/G30526.1.
- Tsuji, T., J. Park, G. Moore, S. Kodaira, Y. Fukao, S. Kodaira, and N. Bangs, 2009, Intraoceanic Thrusts in the Nankai Trough off the Kii Peninsula: Implications for Intraplate Earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L06303, doi:10.1029/2008GL036974.
- 上嶋誠, 2009, MT法による電気伝導度構造研究の現状, *地震*第2輯, 61, S225-S238.
- Wang, Z., Y. Fukao, D. Zhao, S. Kodaira, O.P. Mishra, and A. Yamada, 2009, Structural Heterogeneities in the crust and upper mantle beneath Taiwan, *Tectonophysics*, 476, 3-4, doi:10.1016/j.tecto.2009.07.018.
- Wannamaker, P.E., T.G. Caldwell, G.R. Jiracek, V. Maris, G.J. Hill, Y. Ogawa, H. M. Bibby, S.B. Bennie, and W. Heise, 2009, The fluid and deformation regime of an advancing subduction system; Marlborough, New Zealand, *Nature*, 460, 733-U90, doi:10.1038/nature08204.
- Yamaguchi, S., M. Uyeshima, H. Murakami, S. Sutoh, D. Tanigawa, T. Ogawa, N. Oshiman, R. Yoshimura, K. Aizawa, I. Shiozaki, and T. Kasaya, 2009, Modification of the Network-MT method and its first application in imaging the deep conductivity structure beneath the Kii Peninsula, southwestern Japan, *Earth Planets Space*, 61, 957-971.
- Yoshimura, R., N. Oshiman, M. Uyeshima, H. Toh, T. Uto, H. Kanezaki, Y. Mochido, K. Aizawa,

Y. Ogawa, T. Nishitani, S. Sakanaka, M. Mishina, H. Satoh, T. Goto, T. Kasaya, S. Yamaguchi, H. Murakami, T. Mogi, Y. Yamaya, M. Harada, I. Shiozaki, Y. Honkura, S. Koyama, S. Nakao, Y. Wada, and Y. Fujita, 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.

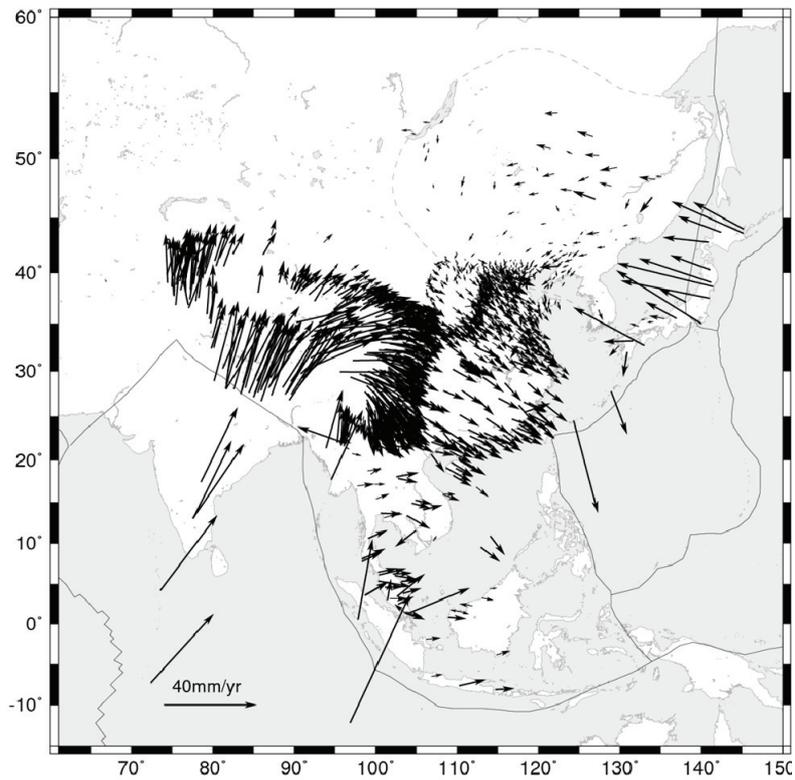


図1. VLBI と GPS を統合した東アジアの変位速度ベクトル場 (GEONET については選択して表示) (東京大学地震研究所 [課題番号: 1410])。

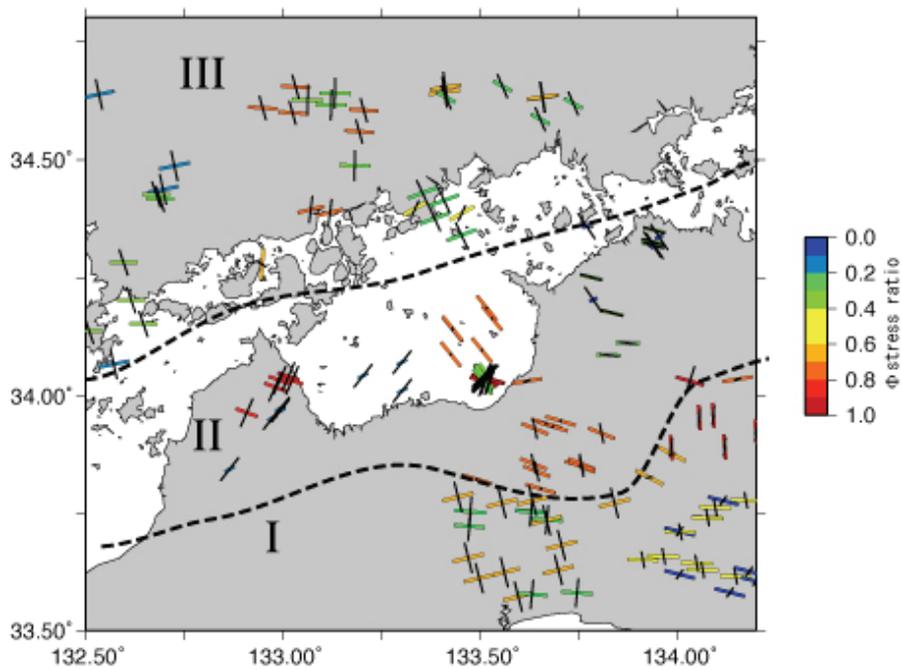


図2. 四国-山陽地方における応力逆解析結果 (高知大学 [課題番号: 2102])。色付きの線分は最大圧縮応力 ( $\sigma_1$ ) の方向を示し、色は応力比  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_2)$  を表す。黒色線分は最小圧縮応力 ( $\sigma_3$ ) の方向を示す。どちらの線分も地表に投影している。

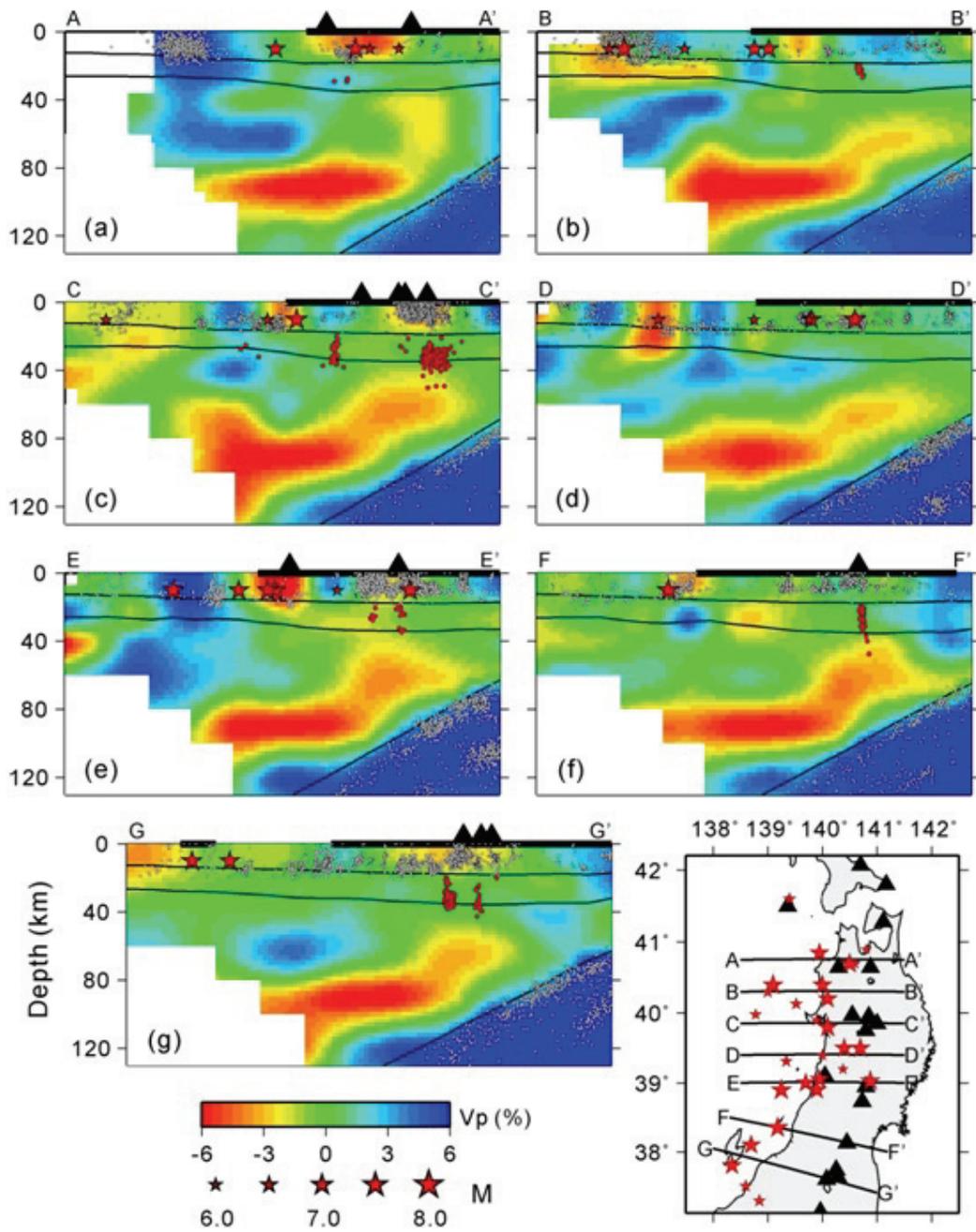


図3. 東北地方のP波速度の鉛直断面図（東北大学 [課題番号：1203]；Huang et al., 2010）。白丸は微小地震、赤丸は低周波地震、赤星印は過去の大地震である。

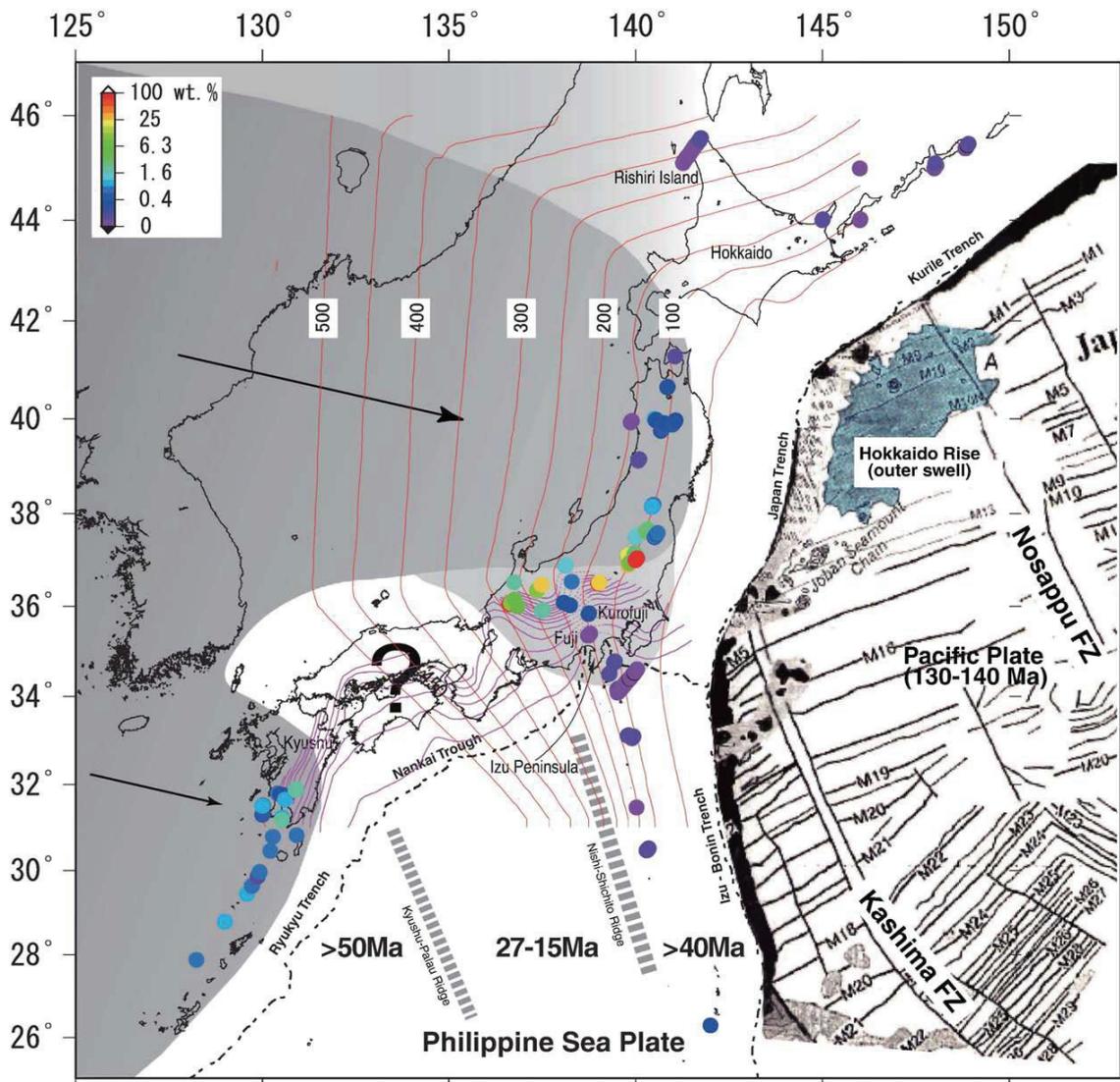


図4. 日本列島に供給されるスラブ由来流体の量とマントルウェッジ組成の広域変化（東京大学理学系研究科 [課題番号：1501]；Nakamura and Iwamori, 2009）。

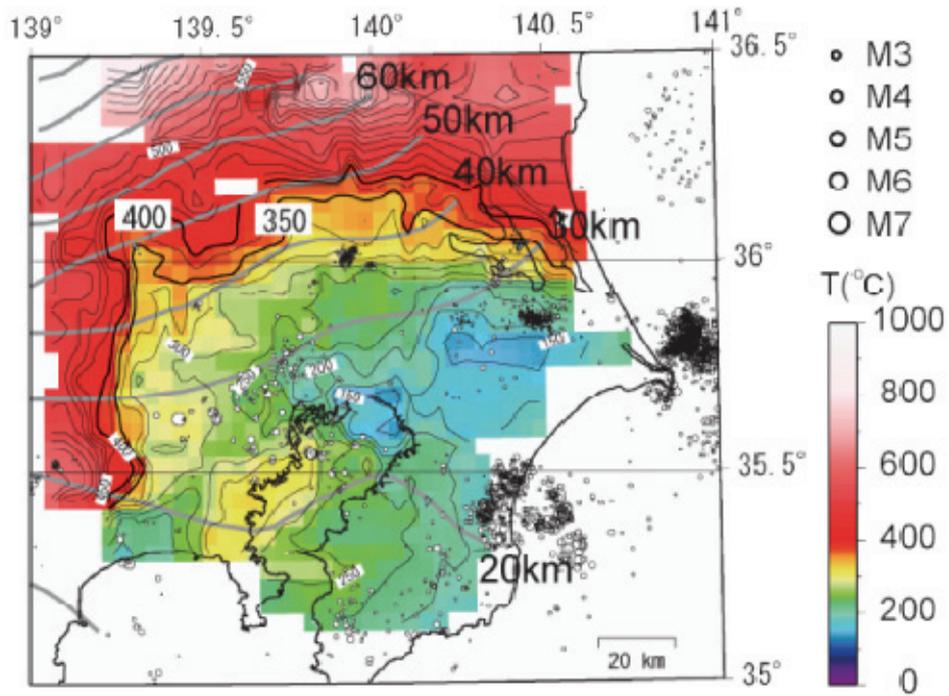


図5. 温度検層データに基づく深さ 30 km における推定温度分布（防災科学技術研究所〔課題番号：3009〕）。カラースケールは温度を表す。Hori (2006) によるフィリピン海プレート上面の等深線を灰色実線で示す。また 2000 年 1 月～2007 年 9 月の期間内に、深さ 27.5～32.5 km で発生した地震の震源を丸印で併せて示す。震源は気象庁一元化处理震源カタログによる。

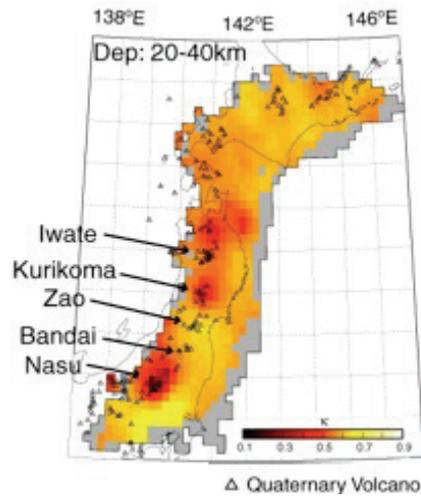


図 6. 微小地震の S 波データから推定されたフォンカルマン型スペクトルの勾配の地域性（東北大学 [課題番号：1204] ; Takahashi et al., 2009）。赤い色ほどスペクトルの勾配が緩く短波長に富む。

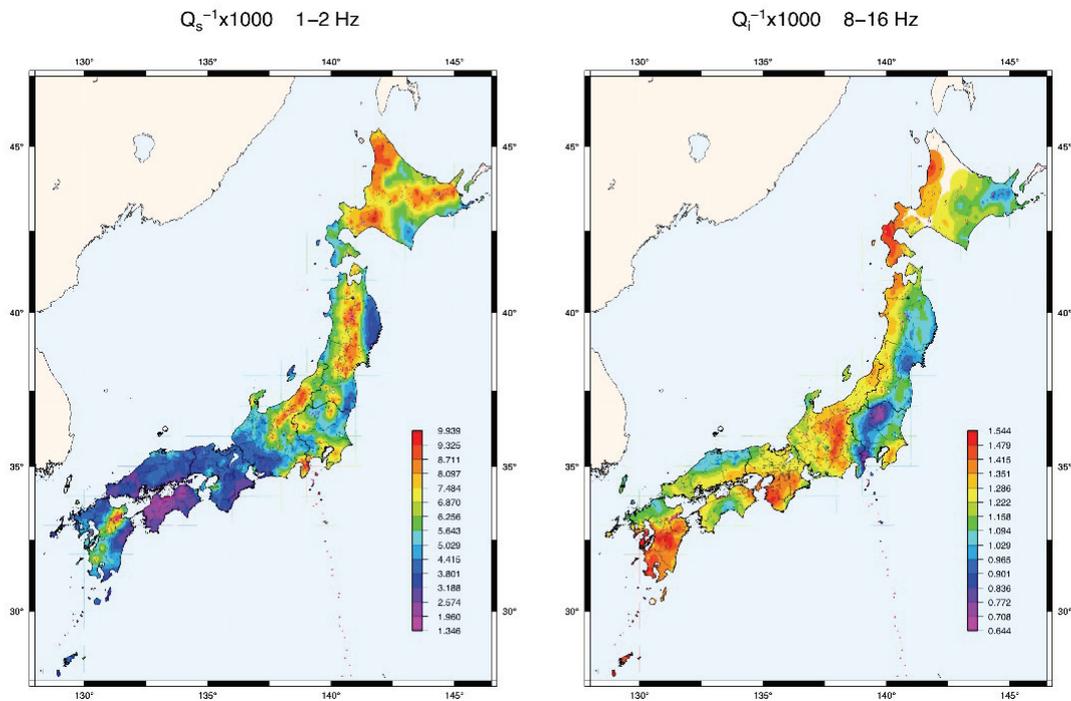


図 7. 1-2Hz の散乱減衰 ( $Q_s^{-1}$ ) と、8-16Hz の内部減衰 ( $Q_i^{-1}$ ) の分布図（東北大学 [課題番号：1204] ; Carcole and Sato, 2010）。暖色系ほど減衰が大きいことを示す。

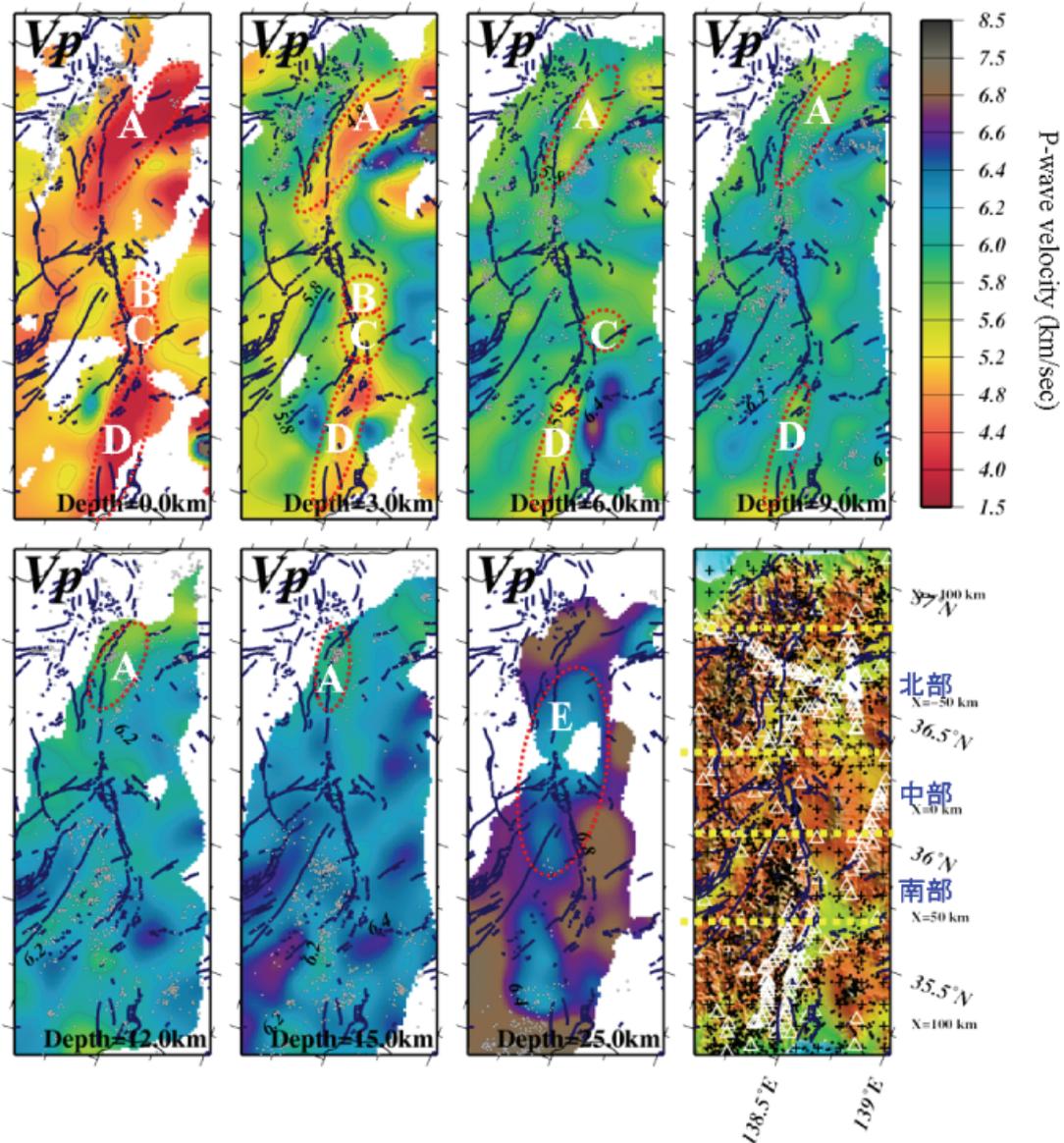


図 8. 糸魚川－静岡構造線断層帯およびその周辺域における P 波速度構造（防災科学技術研究所〔課題番号：3009〕）。深さ毎の P 波速度分布と領域図を示す。領域図中の三角印と黒点は、解析に使用した観測点と震源をそれぞれ表す。A～D は上部地殻の E は下部地殻の低速度異常域を表す。

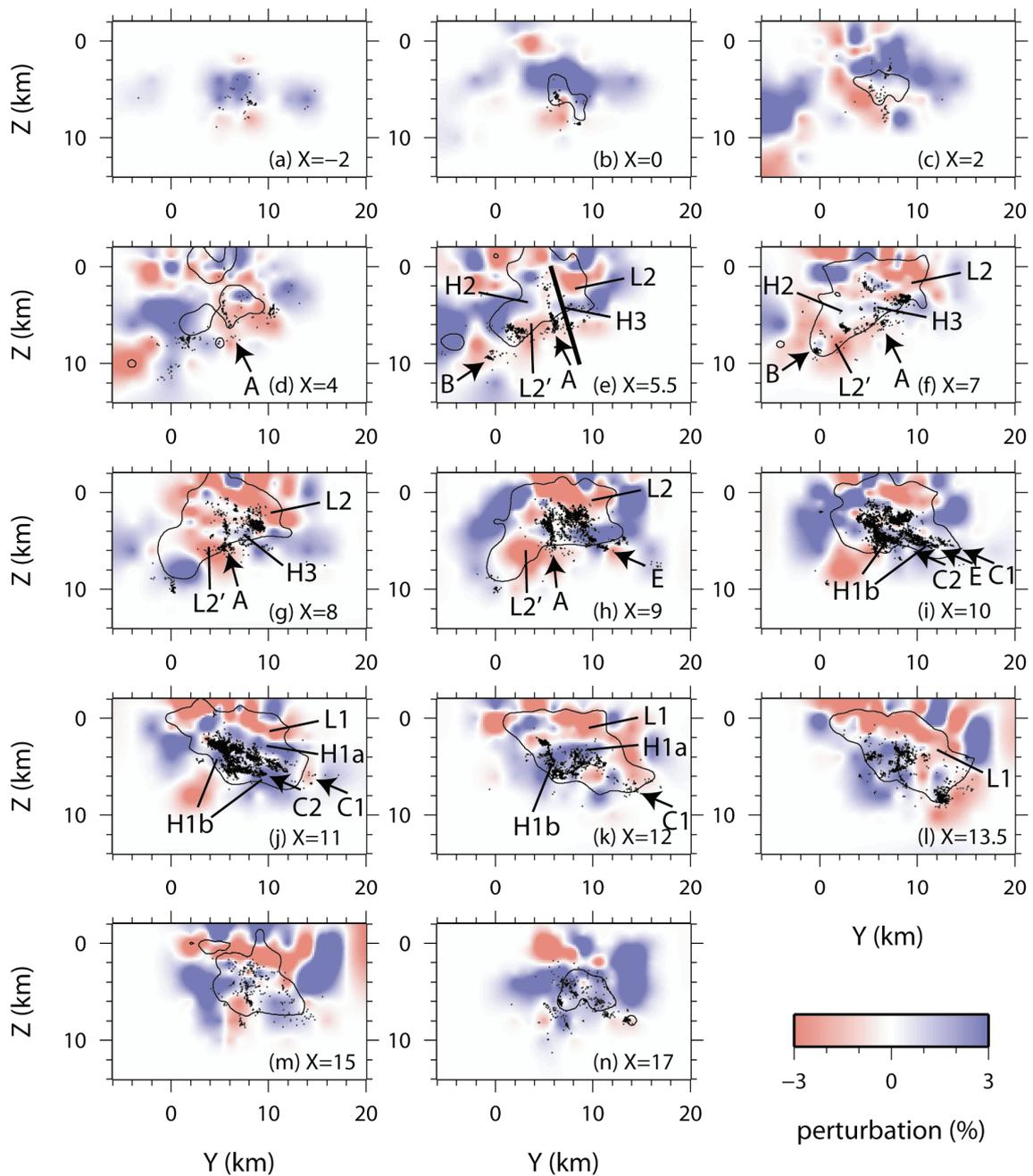


図9. 長野県西部地震の断層に直交する鉛直断面に投影されたP波速度偏差分布（京都大学防災研究所 [課題番号：1806]）。実線は、チェッカボードテストによる復元率が0.3以上の領域を示す。Lは低速度域、Hは高速度域を表す、Aは長野県西部地震の余震と考えられ、矢印の方向に並んでいる。B、C、Eは面状の地震分布であり、矢印の方向に並んでいる。

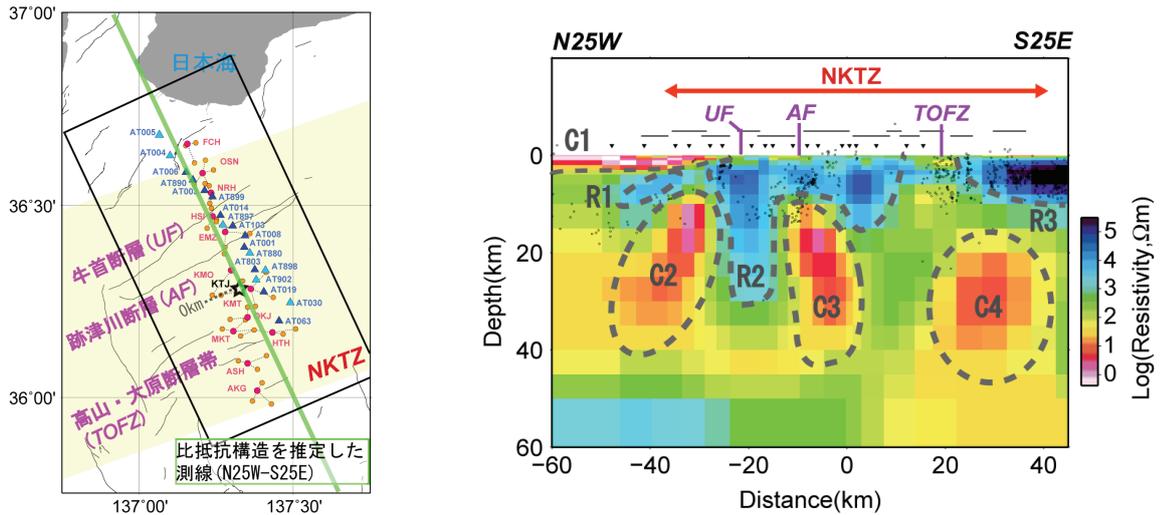


図 10. 跡津川断層域における広帯域 MT 観測とネットワーク MT 観測データを用いたジョイントインバージョンによって推定された比抵抗構造を示す。測線の位置（左）と、推定された比抵抗構造の深さ断面図（右）（東京大学地震研究所 [課題番号：1411]）、深さ断面図の上には、京都大学防災研究所地震予知研究センター上宝観測所によって決定された震源データ(2000年1月～2004年5月)を重ねて表示する。

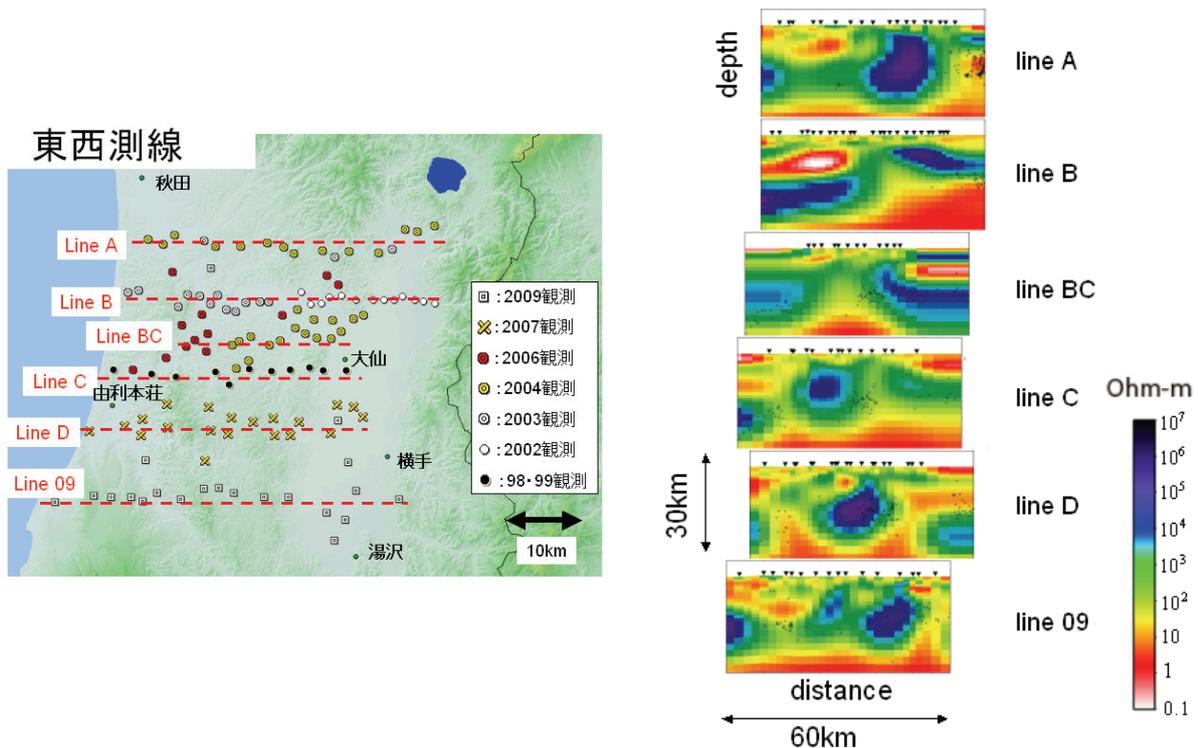


図 11. 秋田県で実施された MT 法による観測点配置（左）と得られた比抵抗構造（右）（秋田大学 [課題番号：1301]）。

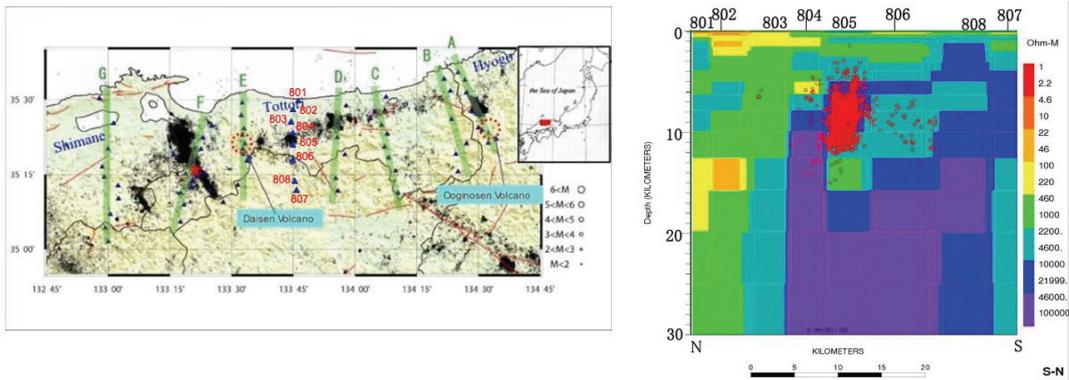


図 12. 鳥取県での広帯域 MT の測線の位置（左）と、今回設置した東経 135 度 45 分付近の測線での一次元比抵抗構造解析の結果（右）（鳥取大学 [課題番号：2001]）。気象庁 1 元化处理震源カタログより 1997 年からの 10 年間に鳥取県中西部地域で発生した震源を南北断面に投影したものを重ねて表示している（表示には SEISPC を使用）。

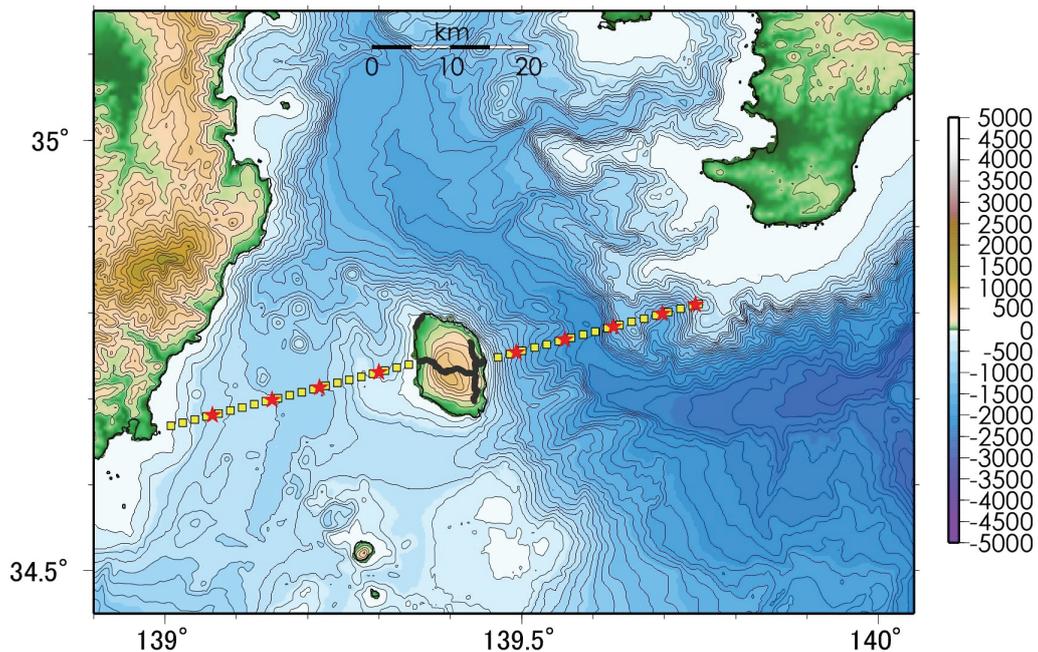


図 13. フィリピン海プレート北縁での構造探査実験の測線（東京大学地震研究所 [課題番号：1413]）。赤星印は海中発破、黄色四角は海底地震計の設置箇所を示す。伊豆大島内の●は約 300 点の稠密地震観測点を示す。

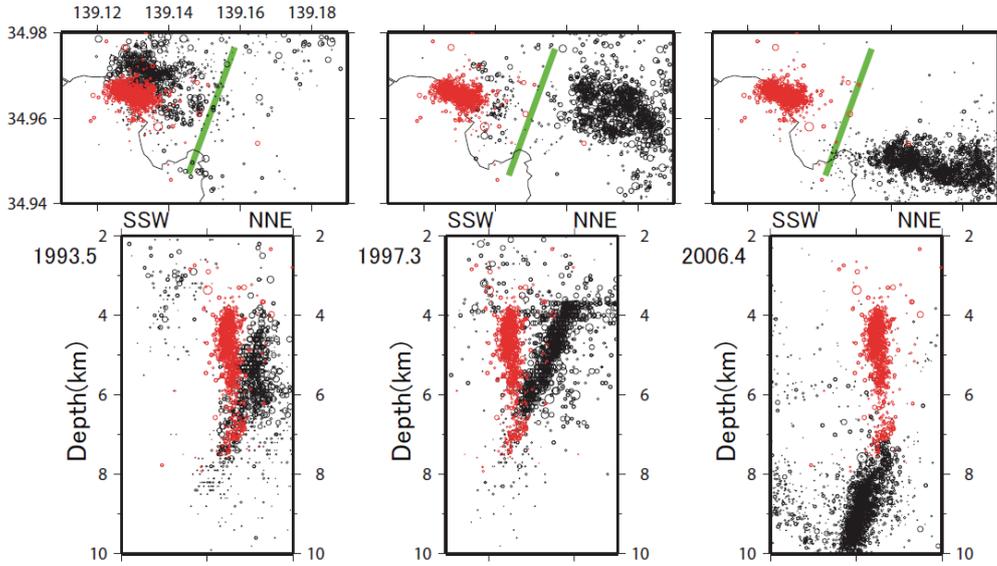


図 14. 2009 年 12 月の伊豆半島東方沖群発地震の活動と過去の活動との比較（東京大学地震研究所 [課題番号：1413]）。上図が震央分布で、下図は上図の緑線に投影した断面図を示す。赤丸は 2009 年 12 月の活動（酒井，私信）であり、1993 年、1997 年、2006 年の活動との比較をそれぞれ左、中、右の図に示す。

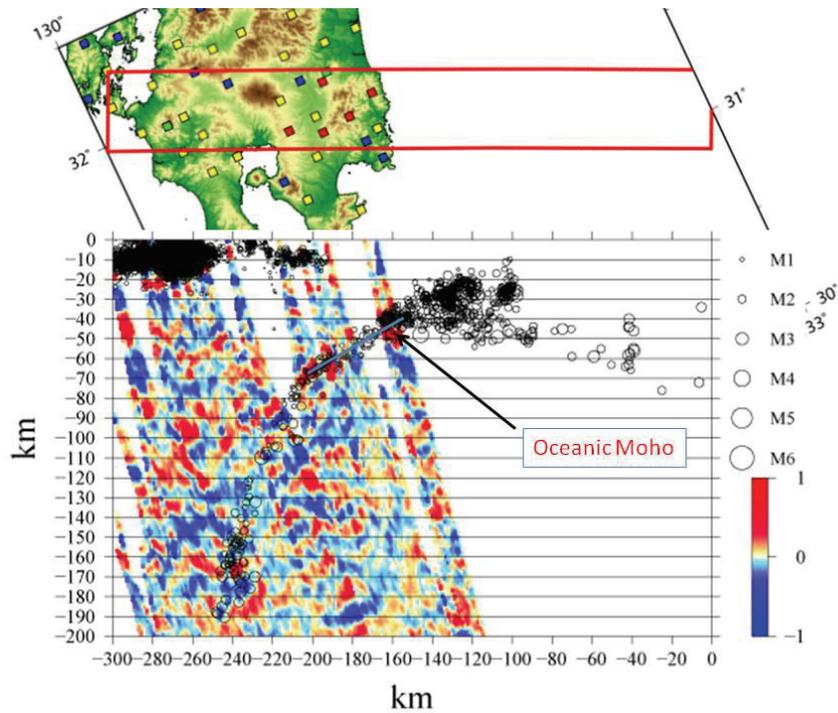


図 15. レシーバー関数のトランスバース成分を用いた九州南部のイメージングの結果（京都大学防災研究所 [課題番号：1805]）。赤四角は新たに展開した観測点を示す。

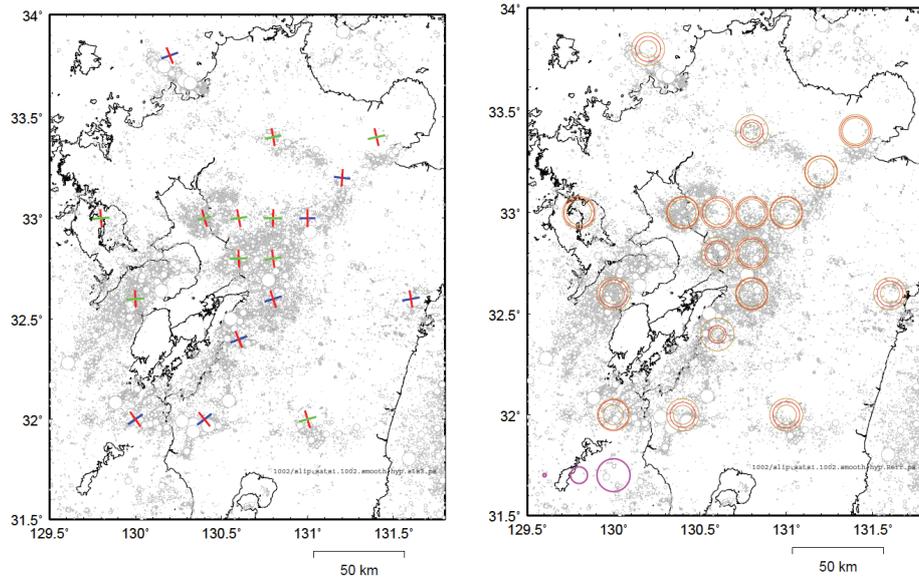


図 16. 九州における主応力軸（左）と応力比（右）の分布（九州大学 [課題番号：2201]）。左図で、青線が最大、緑線が中間、赤線が最小主圧縮軸方向を示す。3 軸のうち水平面に近い 2 軸を表示した。右図では円の半径が応力比を示す。最大と中間主応力が近くなると値は 1 に近づく。反対に中間、最小主応力が同じ場合は 0 となる。円の外側、内側の細い円は 95%信頼区間を示す。

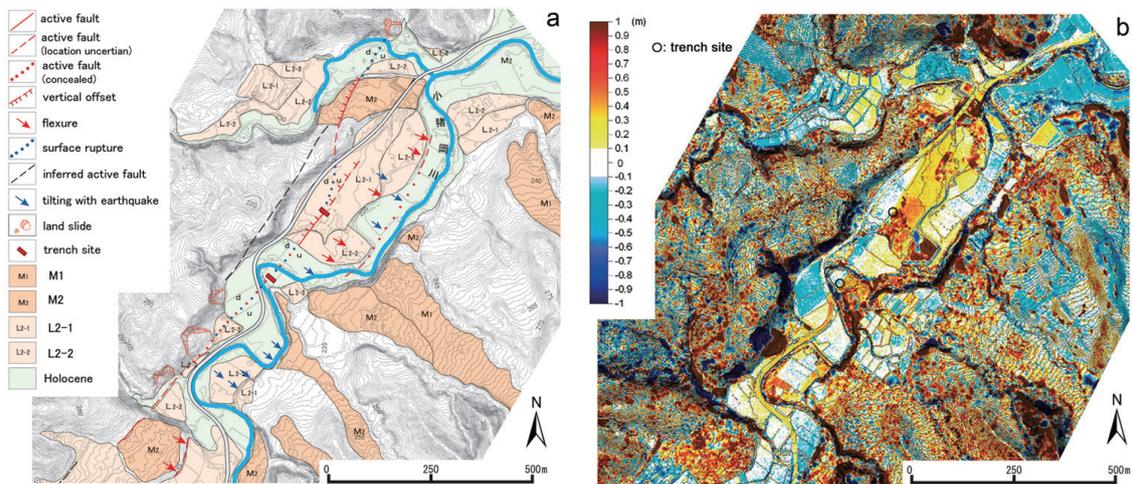


図 17. 2008 年岩手・宮城内陸地震における、はの木立付近の変動地形学図 (a) と地震前後の LiDAR 計測結果の差分図 (b) との比較（名古屋大学 [課題番号：1704]；国土地理院，2009）。

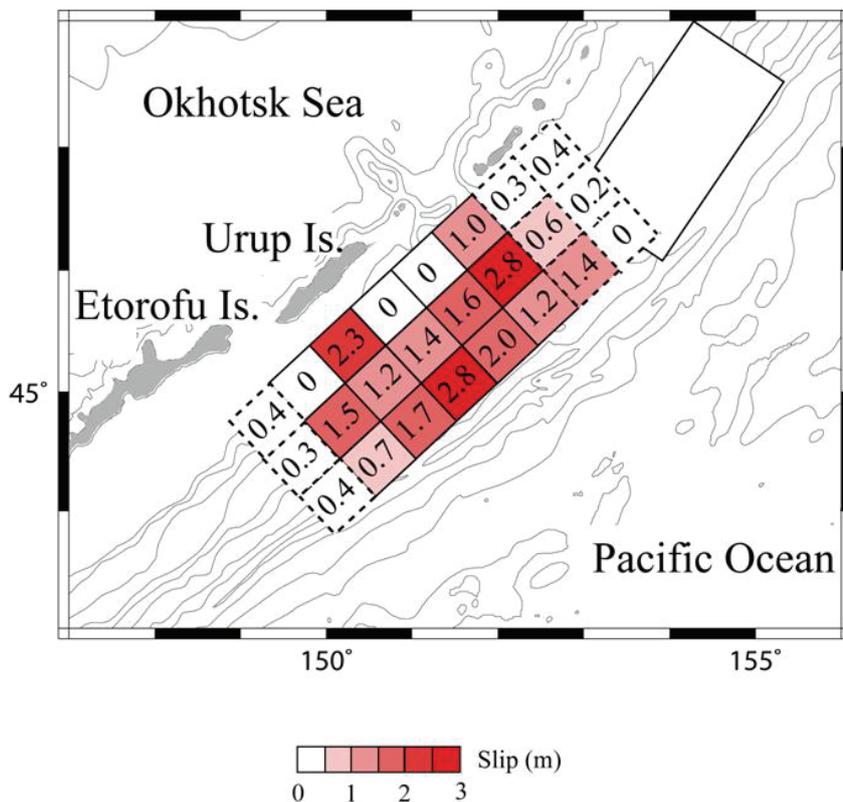


図 18. 津波波形インバージョンにより推定された 1963 年千島地震のすべり量分布と 2006 年千島地震の震源域（矩形領域）との比較（北海道大学 [課題番号：1002]）。

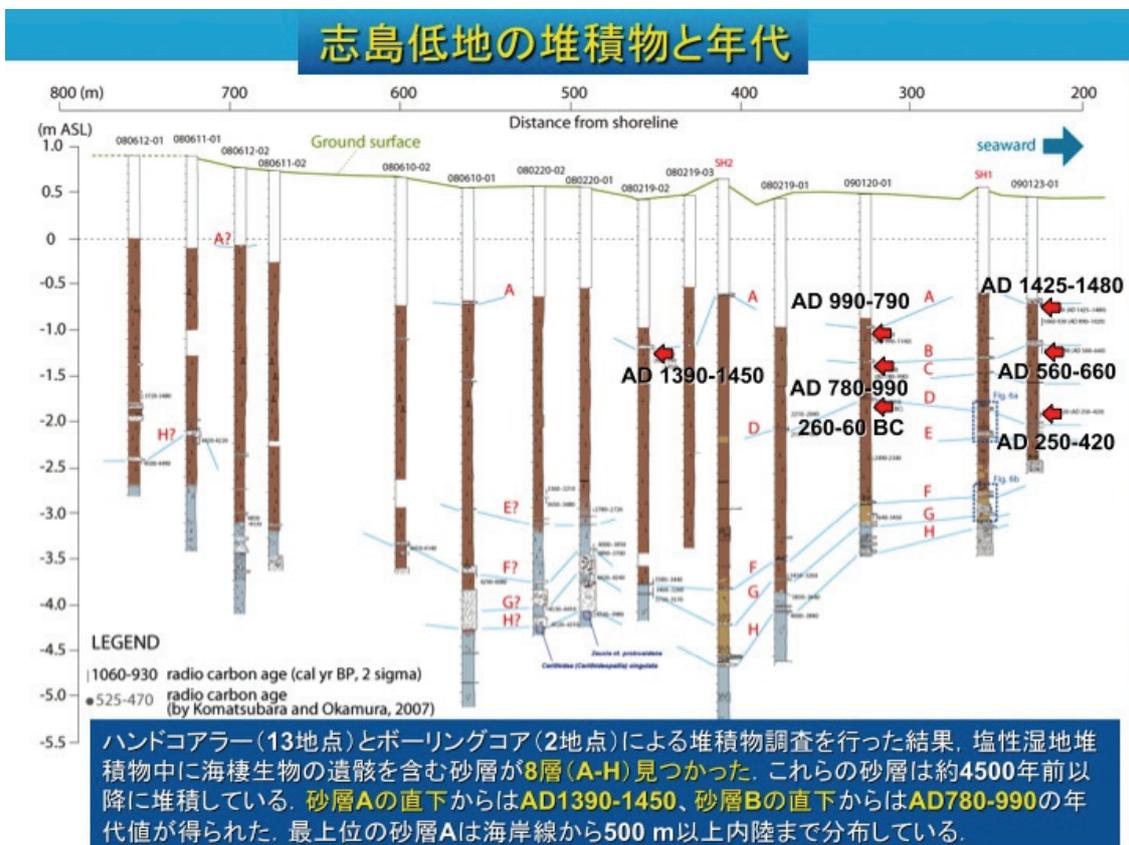


図 19. 志摩半島志島低地で得られた堆積物の柱状図（産業技術総合研究所 [課題番号：5006]）。

## 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観測研究を実施する。プレート境界地震に関しては、アスペリティ分布の推定精度を向上させるとともに、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進めることにより、アスペリティモデルの高度化を図ることが重要である。さらに、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するとともに、アスペリティ間の相互作用について理解を進める必要がある。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定量的にモデル化することが必要不可欠である。地震発生層である上部地殻と下部地殻・最上部マントルの不均質とその変形の空間分布を把握し、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の構築を行うことが重要である。また、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地下深部における分布と挙動の解明を図ることが重要である。

### ア. アスペリティの実体

沈み込むプレート境界におけるアスペリティの実体については、これまで、断層の反射係数(間隙水圧等プレート境界の物理特性を反映しているものと考えられる)、断層面の形状、上盤側の物質の特性などに関して、色々な考えが出されている。非地震性すべりをおこしている領域では反射係数が大きく間隙水圧が高いと推定されること、断層面の折れ曲がりアスペリティを分けていること、非アスペリティ領域の上盤側のマントルウェッジが高  $V_p/V_s$  であり蛇紋岩化していると推定されることなどの注目すべき結果が多数得られている。しかしながら、それらと必ずしも調和的でない結果も得られているため、最初にこれまでに得られた結果を整理する。

断層の反射係数に関して、根室半島沖～釧路沖の海域での調査によって、2003年(平成15年)十勝沖地震(マグニチュード8.0)の余効滑りの大きかった領域で反射係数が大きくなっていることが報告された(北海道大学[前計画 課題番号:1004]、東, 2007)。また、その付近では、プレート境界に沿って大きな  $V_p/V_s$  が分布するという報告もある(Machida et al., 2009)。

断層面の形状については、宮城県沖における構造探査実験より、推定された太平洋プレートの形状とこれまでに知られているアスペリティの分布とを比較したところ、プレートが折れ曲がる領域を避けてアスペリティが分布していることが示された(東京大学地震研究所[前計画 課題番号:1403])。ちなみに、この折れ曲がり付近は、海洋性プレートが陸の地殻に接する部分とマントルに接する部分の境界に位置していると考えられている。一方、1944年(昭和19年)東南海地震(M7.9)時の滑りが大きいと推定される領域では、海洋地殻の凸構造を示唆するイメージが得られているが(海洋研究開発機構[前計画 課題番号:4001]、Nakanishi et al., 2008)、逆に、根室半島沖地震の震源域周辺では、海域での構造探査からプレート形状がなめらかであると言われている(北海道大学[課題番号:1004])。また、茨城県沖のM7級地震が繰り返し発生している場所付近では、海山とアスペリティの位置が一致しないことが分かり、海山ではプレー

ト間の摩擦がむしろ小さいと考えられると報告されている (Mochizuki et al., 2008) (東京大学地震研究所 [前計画 課題番号: 1403])。

上盤側の物質の特性については、青森県沖から福島県沖にかけて、アスペリティでは直上のマントルウェッジが高速になること、三陸沖では海洋性地殻と島弧下部地殻が接している部分がアスペリティに対応することが推定された (東北大学 [前計画 課題番号: 1201])。また、日向灘北部の海岸線の下、深さ 25~35 キロメートル程度に高ポアソン比の領域が推定されたが、これは、Yagi and Kikuchi (2003) が求めた非地震性滑り領域と対応している (九州大学 [前計画 課題番号: 2101]、Tahara et al., 2008)。釧路沖~十勝沖~えりも岬沖で実施してきた地殻構造探査の結果では、2003 年十勝沖地震のアスペリティ直上の島弧地殻に P 波速度と S 波速度の比 ( $V_p/V_s$ ) が大きい場所があることが報告された (北海道大学 [前計画 課題番号: 1004]、Machida et al., 2009)。

平成 21 年度においては、以下に述べるような成果が得られた。これまでに北海道・東北日本の前弧域において実施された海底地震観測データをコンパイルし、東北日本-千島弧会合部周辺の海陸プレート境界域の地震波速度構造の推定を行い巨大地震発生域と発生しない領域において明瞭な違いを見出すことができた。過去にプレート境界型巨大地震の発生したことが知られていない島弧会合部のプレート境界上盤側は、深さ約 60 km に至るまで  $V_p$  が 7 km/s 程度の低速度物質で占められているのに対して、隣接する 2003 年あるいは 1968 年の十勝沖地震の震源域の上盤側は  $V_p$  が 8 km/s を超える物質で占められており、ほぼ無水のかんらん岩で構成されたマントルと解釈される (図 1)。ただし、図 1 を見ると、2003 年の十勝沖地震の震源域の西北側は低速度に見える。島弧会合部にみられるこの低速度物質は、日高衝突帯から剥落した千島前弧の地殻下部に相当すると考えられ、プレート境界上盤側を構成する物質の変化が、プレート境界におけるカップリング強度に影響を与えていることを示唆するものである (東北大学 [課題番号: 1205]、Kita et al., 2010)。

宮城県沖地震の震源域においては、自然地震観測と人工地震探査のデータを併合した地震波トモグラフィを行うことにより、プレート境界上盤側の高  $V_p/V_s$  領域と宮城県沖地震アスペリティとの空間的な相補性がより明瞭に示され、マントルウェッジ内の部分的な含水化が、その直下でのプレート境界における地震性すべりを抑制していることを示唆している (東北大学 [課題番号: 1205])。

フィリピン海プレートが太平洋プレートと北米プレートとの間に入り込むように沈み込んでいる東北日本弧の最南部にあたる房総三重会合点周辺において、太平洋プレートが北米プレートと接する境界面と、太平洋プレートがフィリピン海プレートと接する境界面とでは、カップリング状態が異なることが示された (図 2)。太平洋プレート-北米プレート間および太平洋プレート-フィリピン海プレート間の相対運動の方向は異なるため、太平洋プレートの上面に沿って発生する地震の発震機構の違いに着目することにより沈み込んだフィリピン海プレートの先端の位置が推定された。相似地震活動からこの領域におけるカップリング率 (プレート間すべりレートとプレート間相対速度の比) の空間変化を推定すると、フィリピン海プレートの先端を境にしてカップリング率が顕著に変化することが分かった。これは、プレート境界面の上盤側を占める物質の違いが、プレート間の固着状態に大きな影響を及ぼすことを示す重要な結果である (東北大学 [課題番号: 1205])。

深部低周波微動の検出・微動源決定手法として、振幅の空間分布を考慮したハイブリッド法

(Maeda and Obara, 2009) とクラスタリング処理により、四国西部や紀伊半島北東部などの地域では、プレート形状に沿った帯状分布の浅部側及び深部側に 2 列の微動活動集中域が存在することが明らかになった (Obara et al., 2010) (図 5)。このうち、浅部側は半年毎に発生する短期的スロースリップイベントを伴うような大規模な微動エピソードの際に活動するのに対して、深部側の活動は定常的であり、短い間隔で小規模な微動が頻繁に発生する。また、豊後水道では 2003 年後半に Mw6.8 の長期的スロースリップイベント (Hirose and Obara, 2005) が発生しているが、その期間中に 2 列分布の浅部側のみで微動が活性化し、その深部側では微動活動は一定レートのまま変化は無いことが見出された (図 5)。さらに、浅部側の微動列は、1996-7 年に発生した長期的スロースリップイベントのすべり域 (Yagi and Kikuchi, 2003) の北縁部に一致する。これらの観測結果は、深部低周波微動 2 列分布は短期的スロースリップイベントの発生域を規定し、その下端部は安定すべり域との境界、上端部は長期的スロースリップイベント域との境界を反映するものと考えられた。

四国西部における短期的スロースリップイベントのすべり時間発展解析により、すべり域の移動は微動の移動と極めてよく一致し、またすべり速度が大きくなるところで、微動が特に活発化することが見出された (Hirose and Obara, 2010)。

プレート境界面上のすべり特性と地下構造との関連を明らかにするため東海地域で人工地震探査を行い、浜名湖から北に延びる測線では、深さ 30-40km のフィリピン海プレート最上部からと推定される明瞭な反射波を観測した。反射波の反射効率は、短期的スロースリップイベント・深部低周波微動発生域では、長期的スロースリップイベント域や東海地震想定震源域に比べて大きいことから、反射効率の違いがプレート境界面に発生するすべり現象を規定している可能性が指摘された。

さらに、四国西部を南北に縦断する測線での広帯域 MT 法探査により、地下約 10km の深さは低比抵抗であるが、深部低周波微動の発生領域は必ずしも比抵抗値が低くないことが推定された。地震波トモグラフィーの結果では顕著な高  $V_p/V_s$  となっていることから、流体が連結せずに孤立的に多数存在する可能性が指摘された。

宮城沖の海溝陸側斜面で海底地震計および圧力計を用いた広帯域地殻変動観測が行われ、回収した地震計および圧力計の記録から、プレート境界型地震に先行する非地震性の地殻変動と考えられる相対水深変化が検出された (東北大学[課題番号: 1206]、図 6)。近接する 2 観測点の差を調べることで潮汐等の影響を除去した結果、11 月中頃に約 5 日間かけて約 2 cm の変動が観測された。この変動に伴う地震動は、同一地点に設置された短周期および広帯域地震計では、ほとんど観測されていない。観測された相対水深変化は、観測点直下のプレート境界上で生じた約 8 cm の非地震性のすべりとして説明可能である。地殻変動が観測された後、陸側のプレート境界でマグニチュード 6 程度の地震が発生したことから、観測された相対水深変化は、プレート境界型地震を誘発する非地震性のすべりが震源域よりも浅部で発生していた可能性を示唆している。

#### ウ. ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

これまで、内陸地震の断層直下等に存在する不均質構造や、その変形に起因すると考えられるひずみ速度の集中や応力集中が見出されてきたが、平成 21 年度においても、これまで発生した内陸大地震の震源域において、いくつかの重要な成果が得られた。

2008 年岩手・宮城内陸地震 (M7.2) の本震後約 1 年間にわたる長期的な GPS 観測点により、長

期的な余効変動が検出された（東北大学[課題番号：1207]、図7）。Iinuma et al. (2009)により、主要な余効すべりは本震後1ヶ月以内に終息していることが指摘されている。このことから、本震後1ヶ月以降のデータのみを対象とすることで、粘性緩和が支配的であると仮定し、最表層を弾性層、その下を粘弾性層と仮定し、Pollitz (1997) の手法を用いて弾性層の厚さと粘性係数をグリッドサーチで推定した結果、前者は17~31 km、後者が $0.7\sim 0.8E+18$  Pa secと推定された。粘性係数については、既往研究と比較して1桁程度小さい値に求められているが、解析期間が短いことが原因となっている可能性もあり、より長期のデータを用いて信頼性を向上させる必要がある(Ohzono et al., 2009)。また、稠密余震観測データによるトモグラフィにより、流体の存在を示唆すると考えられる低速度域を震源域直下および火山(栗駒山・焼石岳鳴子・鬼首)周辺に確認した(岡田・他, 2009; 東北大学[課題番号：1207]、図8)。

長野県西部地震の断層近傍で得られた10kHz サンプリングの地震観測データを用いてメカニズム解を多数決定し、精度が良い約6000個のメカニズム解と推定断層面との関係を調べ、推定断層面の極近傍でも断層面と調和的な断層面を持つ微小地震は非常に少ないが、応力場には局所的な異常が見られることが見出された(京都大学防災研究所[課題番号：1808])。さらに、Horiuchi et al. (1995)の方法による応力インバージョンにより、推定断層面近傍のみで、最小圧縮応力軸が水平に近いことが推定された(Yukutake et al, 2010, 図9)。推定された応力場は、断層の深部延長のすべりによると考えられる。断層面近傍のみにおいて応力場の局所的な異常が見出されたことから、応力場の空間変化を明らかにすることにより地震の観測データから断層を検出出来る可能性が示された。差応力の絶対値を推定することができれば、地震の長期的な発生予測にも役立つことが期待される。

前計画で実施してきた跡津川断層周辺のGPS観測データを整理して、跡津川断層周辺の詳細な地殻変動分布を得た(名古屋大学[課題番号：1705]、図10)。断層帯の中央部では互いに右横ずれ運動するブロック境界断層の上部10-15km程度が固着した時に生じる逆正接関数型の分布が見られる一方で、断層端付近では断層に直交方向成分の変位が顕著に見られるなど、断層端では特徴的な変形が生じていることが見出された。地震発生域の下限より深部で非弾性的な変形によって広域変形が解消されているのと同様に、断層端においても非弾性変形が進行し、将来の地震発生域だけに応力蓄積が進行していると考えられた。また、比抵抗構造の詳細な解析から断層と地殻内流体の関係がより明確になりつつある(Yoshimura et al., 2009)。

福岡県西方沖地震の稠密余震観測のデータを用いて、Lin and Shearer(2007)の方法により、余震域の $V_p/V_s$ を直接推定した(九州大学[課題番号：2203])。得られた値は1.6-2.0程度を示し、Asano and Iwata (2006)の滑り分布と比較すると、浅部にみられる滑りの大きな領域で $V_p/V_s$ 値が顕著に小さいことが見て取れる(図11)。これはアスペリティが破壊強度の大きい領域であった可能性を示しているが、プレート境界地震との比較が重要であろう。また、断層端部で $V_p/V_s$ が大きい傾向も見られ、断層の両端部における非弾性変形を解明する上で重要な知見である。

#### エ. スラブ内地震の発生機構

スラブ内地震の発生には、沈み込む海洋性プレートとともに深部へ持ち込まれる水が深く関与していることが明らかになってきたが、スラブ内の岩石の脱水が地震発生に及ぼす影響は二通り考えられる(東北大学[課題番号：1208])。一つは間隙水圧を上げる(有効法線応力を下げる)ことによりクーロン破壊応力を増加させる効果、もう一つは蛇紋岩が脱水しても脆性破壊が生じ

ずクリープが生じ、それが周囲の岩石への応力集中をもたらすという可能性である。スラブの構造および、スラブ内地震の詳細な震源分布・震源過程を調べ、地震時すべり分布と余震活動・先駆的地震活動との関係や地震波速度構造との関係から、スラブ内地震の発生に至る過程をモデル化し、さらにスラブ内大地震が発生する可能性の高い領域の同定を行うことが重要である。

太平洋スラブ内の起震応力場は、上面が DC (Down-dip Compression) 型、下面が DE (Down-dip Extension) 型 (海野・長谷川, 1975; Hasegawa et al., 1978) であることが示されている。そうであれば、その間に応力の中立面が存在するはずであるので、スラブ内地震の発震機構解データに応力テンソルインバージョン法を適用し、スラブ内における応力の中立面の位置の推定を行った (東北大学[課題番号:1208]、図 1 2)。東北日本ではプレート表面より約 23km、北海道では 11km を境に応力場が DC 型から DE 型に変化していることが分かった。得られた中立面の位置 (プレート表面からの距離) と、過去に発生したスラブ内大地震の震源断層とを比較すると、東北日本では DC 型のメカニズム解をもつ 2003 年宮城沖地震の余震域が中立面を乗り越えて DE 型の領域まで広がらずに DC 領域に留まるように分布していた。北海道東部では、DE 型のメカニズム解をもつ 1993 年の釧路沖地震の震源断層は、DC 型の傾向を持つ混合型領域まで広がらず、DE 型領域に留まるように分布している。これらの結果は、スラブ内地震の破壊域の広がり、スラブ内の応力場により規定されていることを示唆している。

スラブ内の地震活動を理解するためには、スラブの位置・形状の情報が極めて重要であるので、変換波のデータをもとに、関東地方のフィリピン海プレートの形状の推定を行った (東北大学[課題番号:1208])。プレート境界の位置を示すフィリピン海プレート上面、下面の小繰り返し地震 (約 200 個) に加え、下面の小繰り返し地震からの変換波 (約 1000 個) を見出したことにより、フィリピン海プレートの上面深度のみならず、厚さを精度よく求めることができた (Uchida et al., 2010) (図 1 3)。フィリピン海プレートの厚さは東京の下で約 50km で北東限に向かって薄くなるくさび形をしていること、関東地方の東部ではフィリピン海プレートの沈み込み角度がゆるく、北東限の近くでは上向きの変形があることが分かった。

## 課題と展望

前計画に引き続き、平成 21 年度においても、重要な成果が数多く得られた。それらをまとめるとともに、今後の展望を述べる。

### ・プレート境界のアスペリティと非アスペリティ領域の構造・状態の違い

沈み込むプレート境界において、断層の反射係数、断層面のマクロな形状、および断層の上盤の物性という 3 つの要因がこの問題に関係していることを示唆する観測結果が得られている。

断層の反射係数が大きいほど、固着の程度が弱くなり、より定常的な非地震性すべりとなる傾向が見られる。岩石摩擦実験における固着の程度と透過波の振幅変化の関係から見ても十分にあり得ることであると考えられるが、これまでに得られたデータは限られており、断層の反射係数の違いが何を反映しているのか? そもそも観測データが断層の反射係数の違い反映しているのか? などの課題がある。さらに精度の高い知見を増やすことが重要であろう。

断層面のマクロな形状については、興味深い知見が多数得られているが、これまで得られた観測結果の解釈には、互いに矛盾するものがある。アスペリティ=突起というイメージから、断層面の凸部において固着が強く、そこがアスペリティになると直感的には思えるが、四国沖以外で

は、根室半島沖のアスペリティでは断層面はなめらかであるという報告があるし、茨城沖では沈み込んだ海山は、その地域でこれまで発生した大地震のアスペリティにはなっていないという結果が得られている。アスペリティが断層の折れ曲がりにより分けられることは力学的にも良く理解できるが、これも凸部において固着が強いということとは必ずしも調和的でないように思える。岩石摩擦実験では、断層面が粗いほど定常的なすべりになる傾向が知られており、固着が強いからといって地震すべり量が大きいとは限らないのかも知れない。断層面の形状とアスペリティの関係について、南海トラフの巨大地震から海山まで色々な空間的なスケールにおける結果が得られつつあるが、さらに知見を増やすとともに、空間スケールの違いや最初に挙げた3つの要因以外の要因に注意しながら整理する必要がある。

断層の上盤の物性に関しては、蛇紋岩化していると推定されるマントルウエッジでは固着が弱いことが系統的に見つかっており、今後の調査結果が期待される。

#### ・プレート境界のアスペリティ周辺の応力状態の空間変化

日向灘における応力インバージョンや相似地震の解析により、アスペリティでは固着が強いことを示唆する結果が得られているが、他地域においても解析を進める必要がある。アスペリティと非アスペリティ領域の構造・状態の違いについての解釈を整理するためにも、アスペリティで本当に固着が強いかどうかを明らかにすることは大変重要である。

#### ・プレート境界における非地震性すべりの時空間変化

プレート境界における滑り速度分布の推定精度及び分解能の向上が計られ、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は順調に進んでいる。さらに、電磁気学的観測等により、ゆっくり地震の発生過程に関する知見も得られ始めている。今後の進展が大いに期待される。

#### ・ゆっくり滑りとアスペリティの相互作用

三陸沖において、海溝近くから始まった非地震性すべりが加速して、アスペリティ破壊と相互作用しながら大地震発生に至るというシナリオが提出されているが、海底観測により、相似地震解析とは独立に、そのシナリオと調和的な知見が得られた。観測をさらに強化することを含めて、今後の進展が期待される。

#### ・内陸の不均質構造

内陸地震の断層周辺の不均質構造に関しては、前計画において系統的な知見が得られていたが、岩手・宮城内陸地震に関して、深部の低速度異常が見出された。さらに、長期にわたる余効変動の解析により、地殻・マントルの粘弾性構造の推定が試みられた。これは内陸地震の発生過程の定量的なモデル化のために重要な試みである。

長野県西部地域では、応力インバージョン解析により、高精度・高分解能で応力場の空間分布が推定され、深部延長のすべりによると考えられる応力集中が検出された。跡津川断層周辺では、GPS 稠密観測により、深部の不均質構造による変形、および断層の両端部における非弾性変形と考えられる変形が捉えられた。福岡県西方沖地震の余震域において、断層両端で  $V_p/V_s$  が大きいことが推定された。これらの地域において、深部および両端部の不均質構造の非弾性変形に関する定量的なモデリングを行うことが今後の課題である。

## ・スラブ内地震

スラブ内地震の発生には、沈み込む海洋性プレートとともに深部へ持ち込まれる水が深く関与していることが明らかになってきたが、スラブ内の応力場の解析により、大地震の断層の範囲を特定できる可能性が示された。詳細な構造の把握と合わせて、スラブ内地震の発生予測に役立つ知見であると考えられる。今後の進展が大いに期待される。

## 参考文献

- Aochi, H., and A. Kato, 2010, Dynamic rupture of cross-cutting faults: Possible rupture process of the 2007, Mw6.6 Niigata-Ken Chuetsu-Oki earthquake, *J. Geophys. Res.*, in press.
- 東龍介, 2007, 2003年十勝沖地震震源域から1973年根室半島沖地震震源域にかけての千島海溝における地殻構造, 平成18年度北海道大学大学院理学研究科修士論文, 74.
- Byrne, T.B., Lin W., Tsutsumi A., Yamamoto Y., et. al., 2009, Anelastic strain recovery reveals extension across SW Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 36/L23310, 1-6, 10.1029/2009GL040749.
- Hino, R., R. Azuma, Y. Ito, Y. Yamamoto, K. Suzuki, H. Tsushima, S. Suzuki, M. Miyashita, T. Tomori, A. Arizono, and G. Tange, 2009, Insight into complex rupturing of the immature bending normal fault in the outer slope of the Japan Trench from aftershocks of the 2005 Sanriku earthquake (Mw = 7.0) located by ocean bottom seismometry, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q07018, doi:10.1029/2009GC002415.
- Hirose, H., and K. Obara, 2010, Recurrence behavior of short-term slow slip and correlated non-volcanic tremor episodes in western Shikoku, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, B00A21, doi: 10.1029/2008JB006050.
- Ichihara, H, and T. Mogi, 2009, A realistic 3-D resistivity model explaining anomalous large magnetotelluric phases: the L-shaped conductor model, *Geophysical Journal International*, 179, 14-17.
- Ichihara, H., T. Mogi, H. Hase, T. Watanabe and Y. Yamaya, 2009, Resistivity and density modelling in the 1938 Kutcharo earthquake source area along a large caldera boundary, *Earth Planets Space*, 61, 345-356.
- Iidaka, T., A. Kato, E. Kurashimo, T. Iwasaki, N. Hirata, H. Katao, I. Hirose and H. Miyamachi, 2009, Fine structure of P-wave velocity distribution along the Atotsugawa fault, central Japan. *Tectonophys.*, 472, 1, 95-104.
- Iidaka, T., Y. Hiramatsu, Y., and The Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, 2009, Shear-wave splitting analysis of the upper mantle at the Niigata-Kobe Tectonic Zone with the data of the Joint Seismic Observations at NKTZ. *Earth Planets Space*, 61, 227-235.
- Iidaka, T., T. Igarashi, and T. Iwasaki, 2009, Configuration of the subducting Philippine Sea slab in the eastern part of southwestern Japan with seismic array and Hi-net data, *Gondwana Research*, 16, 504-511.

- Iinuma, T., M. Ohzono, Y. Ohta, and S. Miura, M. Kasahara, H. Takahashi, T. Sagiya, T. Matsushima, S. Nakao, S. Ueki, K. Tachibana, T. Sato, H. Tsushima, K. Takatsuka, T. Yamaguchi, M. Ichiyanagi, M. Takada, K. Ozawa, M. Fukuda, Y. Asahi, M. Nakamoto, Y. Yamashita, and N. Umino, 2009, Aseismic slow slip on an inland active fault triggered by a nearby shallow event, the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake (Mw6.8), *Geophys. Res. Lett.*, 36, L20308, doi:10.1029/2009GL040063.
- Ikari, M., D.M. Saffer and C. Marone, 2009, Frictional and hydrologic properties of a major splay fault system, nankai subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 36/L20313, 1-5, 10.1029/2009GL040009.
- Ito, T., M. Okubo, and T. Sagiya, 2009, High resolution mapping of Earth tide response based on GPS data in Japan, *J. Geodynamics*, 48, 253-259.
- Ito, Y., Y. Asano, and K. Obara, 2009, Very - low - frequency earthquakes indicate a transpressional stress regime in the Nankai accretionary prism, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L20309, doi:10.1029/2009GL039332.
- Ito, Y., K. Obara, T. Matsuzawa, and T. Maeda, 2009, Very low frequency earthquakes related to small asperities on the plate boundary interface at the locked to aseismic transition, *J. Geophys. Res.*, 114, B00A13, doi:10.1029/2008JB006036.
- Kato, A., E. Kurashimo, T. Igarashi, S. Sakai, T. Iidaka, M. Shinohara, T. Kanazawa, T. Yamada, N. Hirata, T. Iwasaki, and Group for the aftershock observations of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake, 2009, Reactivation of ancient rift systems triggers devastating intraplate earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L05301, doi:10.1029/2008GL036450.
- Kato, A., T. Iidaka, T. Iwasaki, N. Hirata, and S. Nakagawa, 2010, Reactivations of boundary faults within a buried ancient rift system by ductile creeping of weak shear zones in the overpressured lower crust: the 2004 mid-Niigata Prefecture Earthquake, *Tectonophysics*, 486, 101-107.
- Kato, A., T. Miyatake, and N. Hirata, 2010, Asperity and Barriers of the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake Revealed by Highly Dense Seismic Observations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 1, 298-306.
- Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima and T. Matsuzawa, 2010, Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *EPSL*, 290, 415-426, doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.038.
- Kumagai, H., M. Nakano, T. Maeda, H. Yepes, P. Palacios, M. Ruiz, S. Arrais, M. Vaca, I. Molina, and T. Yamashina, 2010, Broadband seismic monitoring of active volcanoes using deterministic and stochastic approaches, *J. Geophys. Res.*, in press.
- Kumagai, H., P. Palacios, T. Maeda, D. Barba Castillo, and M. Nakano, 2009, Seismic tracking of lahars using tremor signals, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 183, 112-121.
- Machida, Y., M. Shinohara, T. Takanami, Y. Murai, T. Yamada, N. Hirata, K. Suyehiro, T. Kanazawa, Y. Kaneda, H. Mikada, S. Sakai, T. Watanabe, K. Uehira, N. Takahashi, M.

- Nishino, K. Mochizuki, T. Sato, E. Araki, R. Hino, K. Uhira, H. Shiobara, and H. Shimizu, 2009, Heterogeneous structure around the rupture area of the 2003 Tokachi - oki earthquake (Mw=8.0) , Japan, as revealed by aftershock observations using Ocean Bottom Seismometers, *Tectonophys.*, 465, 164 - 176.
- Maeda, T., and K. Obara, 2009, Spatio-temporal distribution of seismic energy radiation from lowfrequency tremor in western Shikoku, Japan, *J. Geophys. Res.*, 114, doi:10.1029/2008JB006043.
- Matsuzawa, T., K. Obara, and T. Maeda, 2009, Source duration of deep very-low-frequency earthquakes in western Shikoku, Japan, *J. Geophys. Res.*, 114, doi:10.1029/2008JB006044.
- Mochizuki, K., T. Yamada, M. Shinohara, Y. Yamanaka, and T. Kanazawa, 2008, Weak Interplate Coupling by Seamounts and Repeating M<sup>7</sup> Earthquakes, *Science*, 321, 5839, 1194 - 1197.
- Nakajima, J. and A. Hasegawa, 2010, Cause of M 7 intraslab earthquakes beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Possible evidence for a vertical tear at the easternmost portion of the Philippine Sea slab, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JB006863, in press.
- Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa, 2009, Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, 114, B08309, doi:10.1029/2008JB006101.
- Nakajima, J., Y. Tsuji and A. Hasegawa, 2009, Seismic evidence for thermally-controlled dehydration reaction in subducting oceanic crust, *Geophys. Res. Lett.*, 36, 10.1029/2008GL036865.
- Nakajima, J., Y. Tsuji, A. Hasegawa, S. Kita, T. Okada, and T. Matsuzawa, 2009, Tomographic imaging of hydrated crust and mantle in the subducting, Pacific slab beneath Hokkaido, Japan: Evidence for dehydration embrittlement as a cause of intraslab earthquakes, *Gondwana Research*, 16, 470-481.
- Nakanishi, A., S. Kodaira, S. Miura, A. Ito, T. Sato, J.-O. Park, Y. Kido, and Y. Kaneda, 2008, Detailed structural image around splay fault branching in the Nankai subduction seismogenic zone: Results from a high-density ocean-bottom seismic survey, *J. Geophys. Res.*, 113, B03105, doi:10.1029/2007JB004974.
- Nakano, M., H. Kumagai, S. Toda, R. Ando, T. Yamashina, H. Inoue, and Snarjo, 2010, Source model of an earthquake doublet that occurred in a pull-apart basin along the Sumatran fault, Indonesia, *Geophys. J. Int.*, 183, 141-153.
- Obara, K., 2009, Inhomogeneous distribution of deep slow earthquake activity along the strike of the subducting Philippine Sea plate, *Gondwana Research*, 16, 512-526.
- Obara, K., 2010, Phenomenology of deep slow earthquake family in southwest Japan: Spatiotemporal characteristics and segmentation, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JB006048, in press.
- Obara, K., and S. Sekine, 2009, Characteristic activity and migration of episodic tremor and slow-slip events in central Japan, *Earth Planets Space.*, 61, 853-862.
- Obara, K., S. Tanaka, T. Maeda, and T. Matsuzawa, 2010, Depth-dependent activity of non-volcanic tremor in southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2010GL043679, in

- press. Omori, S., S. Kita, S. Maruyama, and M. Santosh, 2009, Pressure-temperature conditions of ongoing regional metamorphism beneath the Japanese Islands, *Gondwana Research*, 16, 458-469, doi:10.1016/j.gr.2009.07.003.
- Ohzono, M., R. McCaffrey, Y. Ohta, S. Miura, T. Iinuma, K. Tachibana, and T. Sato, 2009, Spatiotemporal model for crustal deformation around the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake, northeastern Japan, estimated by GPS and InSAR, *Eos Trans. AGU, Fall Meet. Suppl.*, Abstract G33A-0620.
- 岡田知己・中島淳一・海野徳仁・松澤暢・長谷川昭, 2009, 2008年岩手・宮城内陸地震合同余震観測グループ, 地殻流体の上昇経路の地震波トモグラフィによる推定: 2008年岩手・宮城内陸地震およびその周辺域, *日本地震学会2009年度秋季大会講演予稿集*, P2-38.
- Panayotopoulos, Y., N. Hirata, H. Sato, T. Iwasaki, A. Kato, K. Imanishi, Y. Kuwahara, and I. Cho, 2010, Seismicity and crustal structure in the vicinity of the southern Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line., *Earth Planets Space*, 62, 3, 223-235.
- Screaton E., G. Kimura, D. Curewitz, G. Moore, et. al., 2009, Interactions between deformation and fluids in the frontal thrust region of the NanTroSEIZE transect offshore the Kii Peninsula, Japan: Results from IODP Expedition 316 Sites C0006 and C0007, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 1-14, 10.1029/2009GC002713.
- Sekine, S., H. Hirose, and K. Obara, 2010, Short-term slow slip events correlated with non-volcanic tremor episodes in southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JB006059, in press.
- Strasser, M., G.F. Moore, G. Kimura, Y. Kitamura, A.J. Kopf, et. al., 2009, Origin and evolution of a splay fault in the Nankai accretionary wedge, *Nature Geoscience*, 2, 648-652, 10.1038/NGE0609
- Tahara, M., K. Uehira, H. Shimizu, M. Nakada, T. Yamada, K. Mochizuki, M. Shinohara, M. Nishino, R. Hino, H. Yakiwara, H. Miyamachi, K. Umakoshi, M. Goda, N. Matsuwo and T. Kanazawa, 2008, Seismic velocity structure around the Hyuganada region, Southwest Japan derived from seismic tomography using land and OBS data and its implications for interplate coupling and vertical crustal uplift, *PEPI*, Vol.167, 19-33.
- Tajima, R., F. Tajima, and A. Kato, 2009, Seismic structure in and around the source area of the 2004 Mid Niigata, Japan, earthquake: 3-D waveform modeling based on local tomography images, *Geophys. J. Int.*, 177, 145-160.
- Tanaka, Y. V. Klemann, K. Fleming, and Z. Martinec, 2009, Spectral finite element approach to postseismic deformation in a viscoelastic self-gravitating spherical Earth, *Geophys. J. Int.*, 176, 3, 715-739.
- Tudge, J., Lovell, M.A., Davies, S.J., Harvey, P.K., Saito, S., and Expedition 314 Scientists, 2009, Petrophysically determined lithofacies at the Nankai Trough Accretionary Prism: NanTroSEIZE, IODP Expedition 314, *J. Geol. Soc. (London)*, 166/5, 961-968, 10.1144/0016-76492008-136.
- Uchida, N., J. Nakajima, A. Hasegawa, and T. Matsuzawa, 2009, What controls interplate coupling?: Evi-dence for abrupt change in coupling across a border between two overlying

- plates in the NE Japan subduction zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 283, 111-121.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, J. Nakajima, and A. Hasegawa, 2010, Subduction of a wedge-shaped Philippine Sea plate beneath Kanto, central Japan, estimated from converted waves and small repeating earthquakes, *J. Geophys. Res.*, in press.
- Wannamaker, P.E., T.G. Caldwell, G. R. Jiracek, V. Maris, G.J. Hill, Y. Ogawa, H. M. Bibby, S. B. Bennie, and W. Heise, 2009, The fluid and deformation regime of an advancing subduction system; Marlborough, New Zealand, *Nature*, 460, 733-U90, doi:10.1038/nature08204.
- Xu PL, 2009, Iterative generalized cross-validation for fusing heteroscedastic data of inverse ill-posed problems, *Geophys. J. Int.*, 179, 182-200.
- Yoshimura, R., N. Oshiman, M. Uyeshima, H. Toh, T. Uto, H. Kanazaki, Y. Mochido, K. Aizawa, Y. Ogawa, T. Nishitani, S. Sakanaka, M. Mishina, H. Satoh, T. Goto, T. Kasaya, S. Yamaguchi, H. Murakami, T. Mogi, Y. Yamaya, M. Harada, I. Shiozaki, Y. Honkura, S. Koyama, S. Nakao, Y. Wada, and Y. Fujita, 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.
- Yukutake, Y., Y. Iio, and S. Horiuchi, 2010, Detailed spatial changes in the stress field of the 1984 Western Nagano Earthquake Region, *J. Geophys. Res.*, in press.

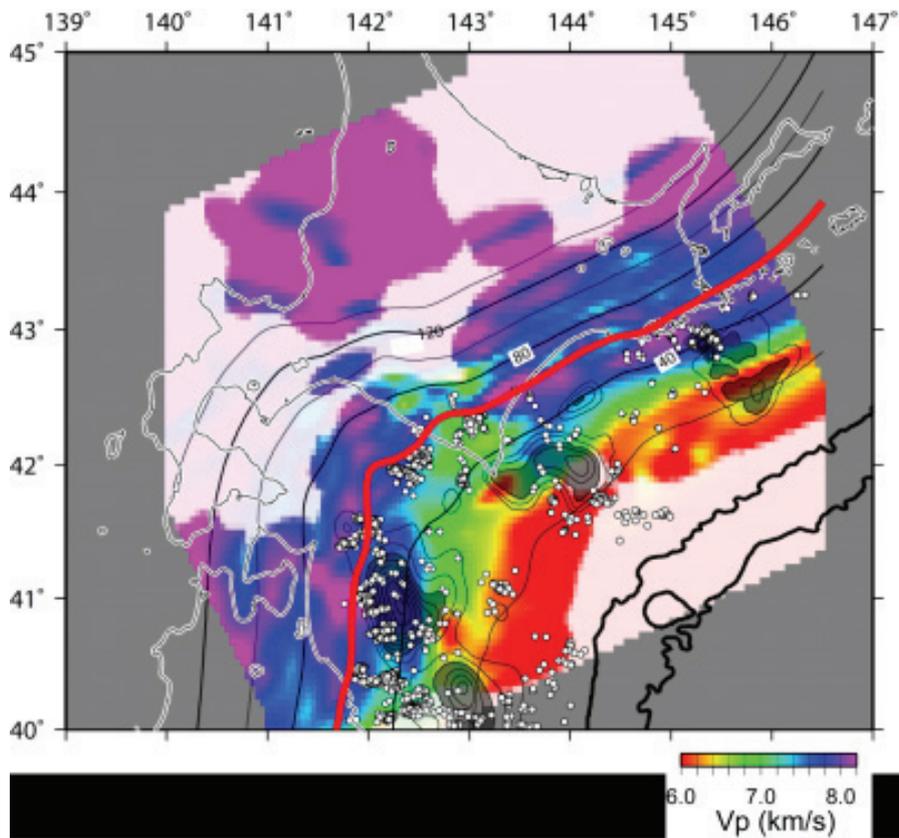


図1. プレート境界面直上 5 km における  $V_p$  の分布 (東北大学[課題番号: 1205])。山中・菊池 (2002)、Yamanaka and Kikuchi (2004)によるプレート境界型大地震の破壊域をコンターで示し、相似地震の震央を白丸で示した。赤線はプレート境界面の 60 km の等深線。

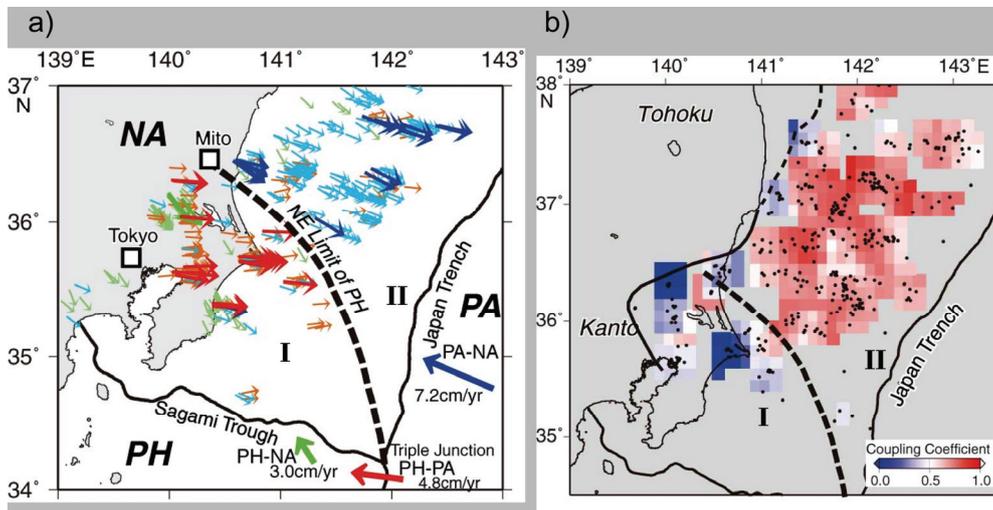


図2. 房総三重会合点周辺で発生するプレート境界地震のスリップベクトル(a)と相似地震から推定したカップリング率(b) (東北大学[課題番号: 1205])。

すべりベクトルは、方位角によって 3 種類に分類し、異なる色で示した。赤/橙: 方位角  $75 \sim 100^\circ$ 、青/水色:  $100 \sim 130^\circ$ 、緑:  $130 \sim 160^\circ$ 。フィリピン海プレート-太平洋プレート (PH-PA)、フィリピン海プレート-北米プレート (PH-NA)、太平洋プレート-北米プレート (PA-NA) それぞれの間の相対運動の方向と速さを、緑、赤、青の矢印で示した。領域 I ではプレート境界を境にフィリピン海プレートと太平洋プレートが接し、領域 II ではプレート境界を境に北米と太平洋プレートが接する。

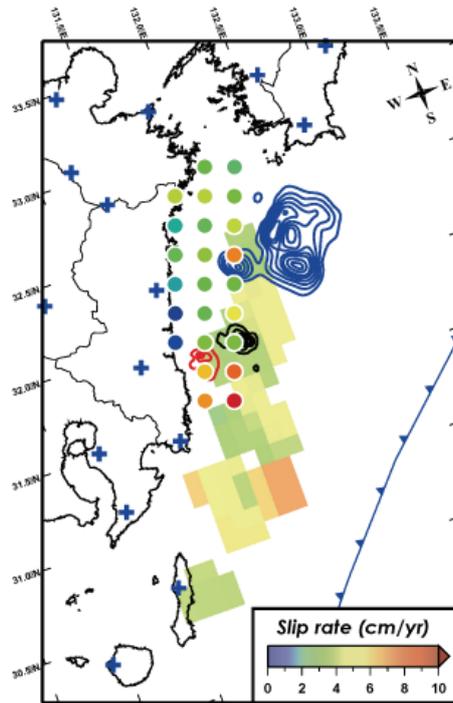


図3.  $\sigma_1$  軸の方向とプレート境界面の法線ベクトルのなす角  $\theta$  の値[植平(2007)]と準静的すべりレート分布の比較 (九州大学[課題番号: 2202])。

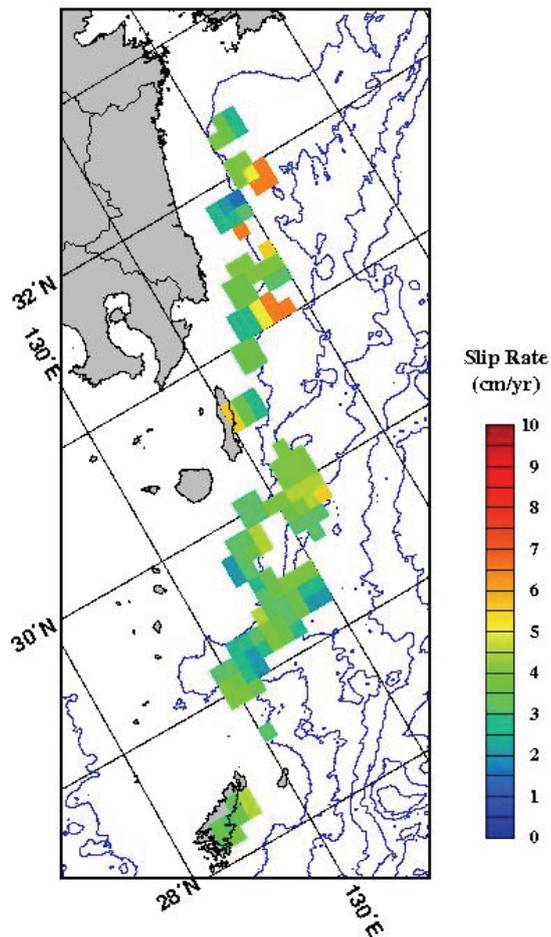


図4. 相似地震活動から推定された準静的すべり速度の分布 (鹿児島大学[課題番号: 2301])。

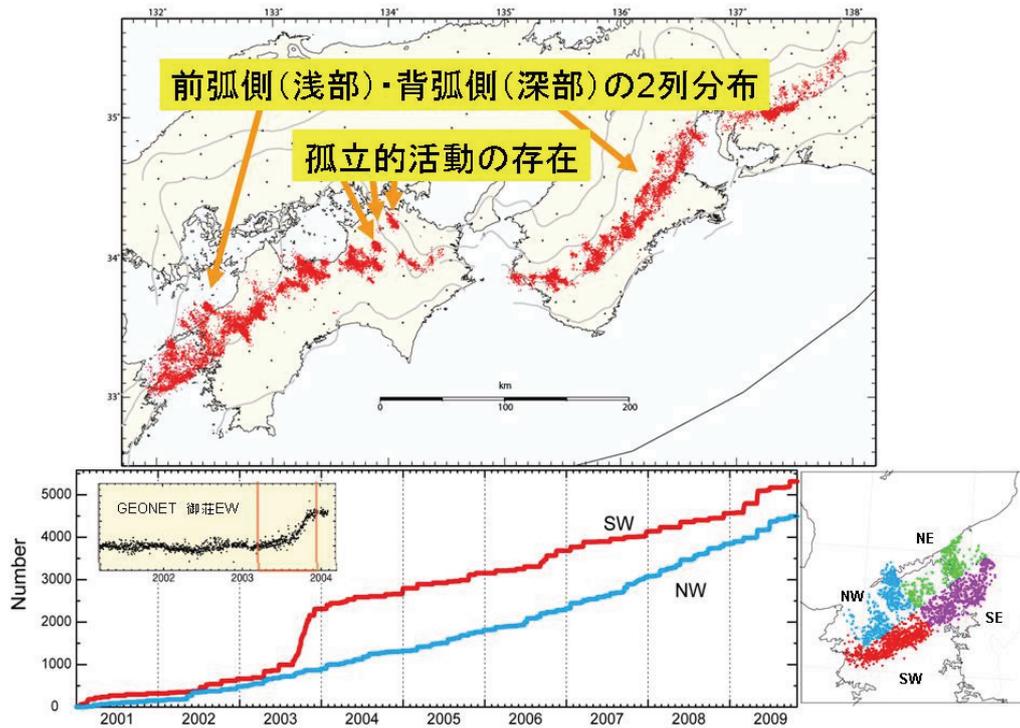


図5. ハイブリッド法・クラスタリング処理に基づく深部低周波微動分布（上段）と豊後水道域における領域毎微動活動積算頻度分布（下段）（防災科学技術研究所[課題番号：3011]）。

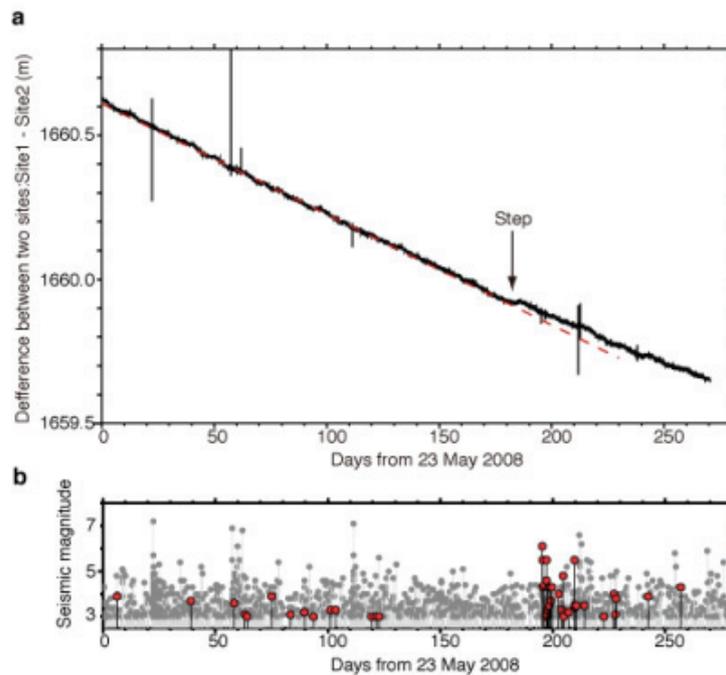


図6. 2観測点間の相対水深変化と観測点周辺の地震活動（東北大学[課題番号：1206]）。

a. 2観測点間の相対水深変化。矢印で示す180日から190日の期間で相対水深が変化している。赤線は180日以前のデータから求めた圧力計の機器ドリフトによるみかけの水深変化を示す。b. Site 2 から半径500 km 以内の地震（灰色）と半径75 km 以内の地震（黒）を示す。観測された顕著な水深変化のあとに、観測点よりも陸側の地震活動が活発化した。

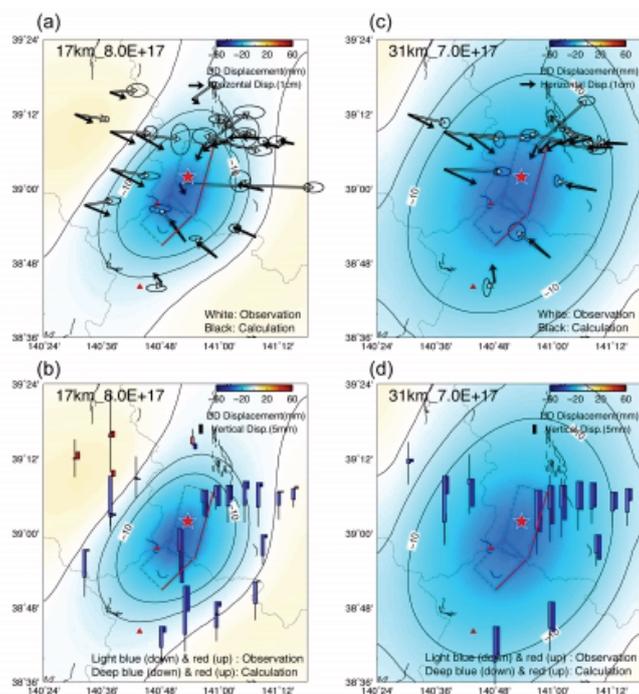


図7. 観測された長期余効変動と推定された粘弾性構造モデルによる計算結果との比較（東北大学[課題番号：1207]）。

(a)本震発生後1ヶ月後から半年間に観測された変位の水平成分（黒矢印）と計算値（白矢印）と、(b)上下成分の観測値（薄青色）と計算値（濃青色）。カラーコンターは計算された上下変動分布を示す。計算に用いた弾性層の厚さとその直下の粘性係数はグリッドサーチにより求められた最適値で、それぞれ、17 km、 $8.0E+18$  Pa secである。(c)、(d) 本震発生後1ヶ月後から1年間の場合。計算に用いた弾性層の厚さとその直下の粘性係数の最適値は、それぞれ、31 km、 $7.0E+17$  Pa secである。

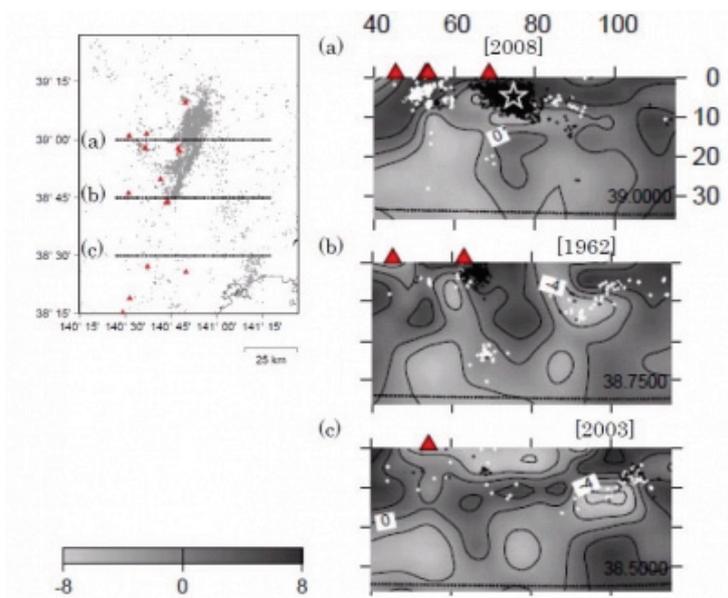


図8. 2008年岩手・宮城内陸地震およびその周辺域におけるS波速度偏差分布の東西鉛直断面図（東北大学[課題番号：1207]）。

白丸は岩手宮城内陸地震（☆）発生前の地震、黒丸は岩手宮城内陸地震発生後の地震を示す。▲は第四紀火山、破線はモホ面を示す。

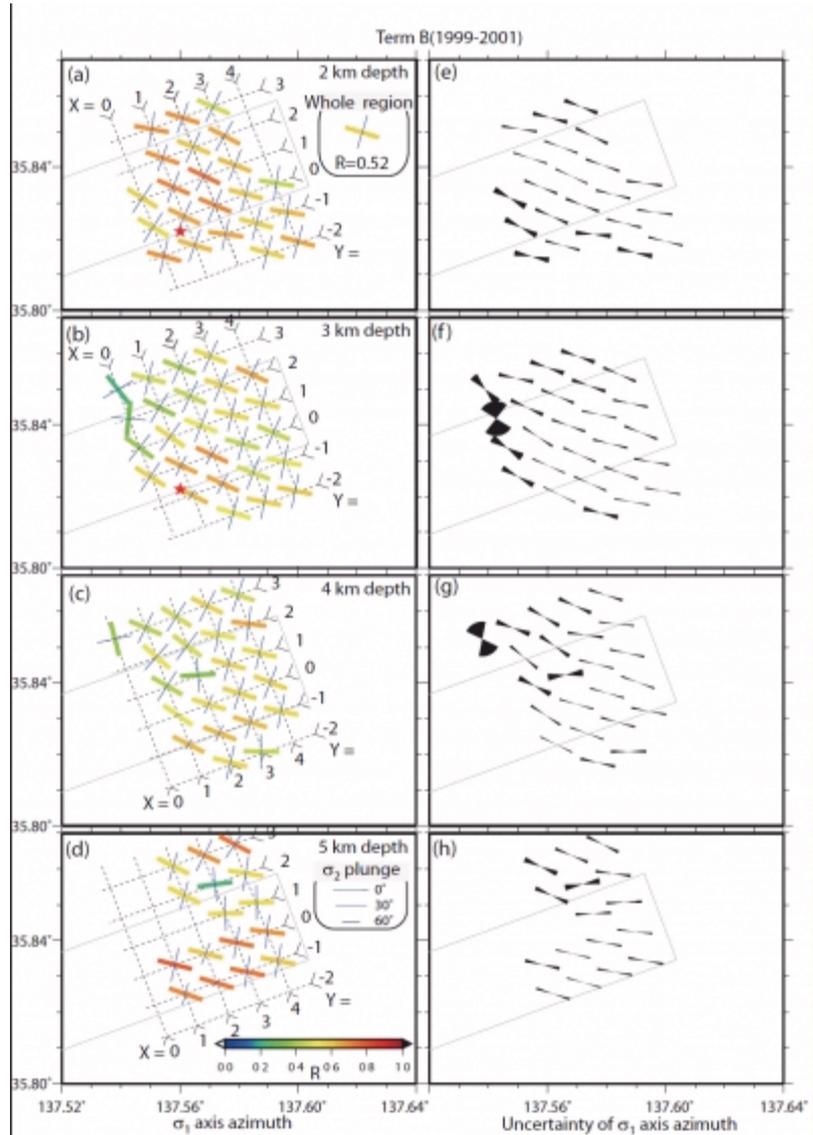


図9. 応力インバージョンにより推定された応力場 (Yukutake et al., 2010 ; 京都大学防災研究所 [課題番号 : 1808]) 。

左側 : 応力比  $R$  で色分けした線分で最大圧縮応力軸の方位を、青色の線分で中間主応力軸の方位と傾斜角 (鉛直に近い場合は短い) を示す。右側はブートストラップ法による最大圧縮応力軸の方位の誤差。

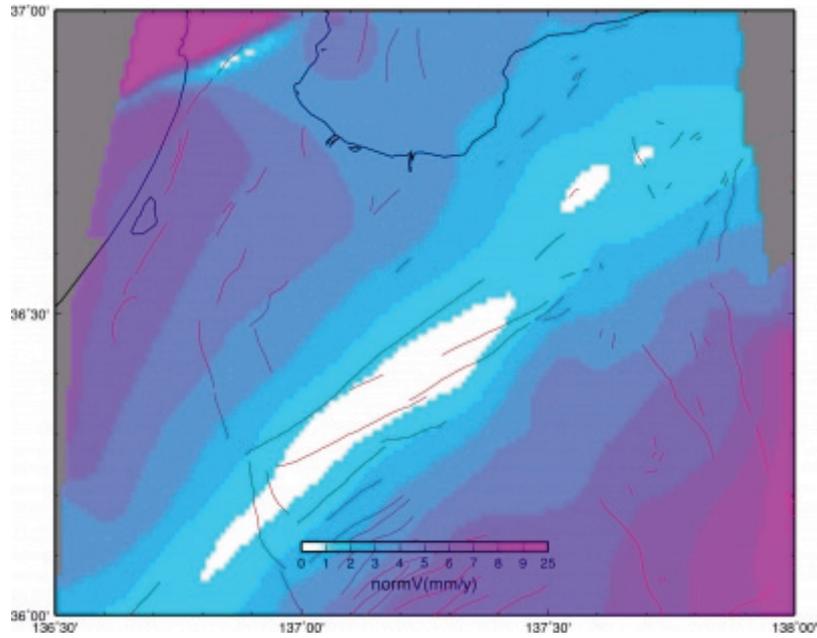


図 1 0 . 跡津川断層に対する相対速度の分布 (名古屋大学[課題番号 : 1705]) 。  
 跡津川断層上の牧(MAKI)観測点に対する地殻変動速度の大きさの分布。相対速度が 1mm/年以下の場所の広がり は跡津川断層の範囲とほぼ一致している。

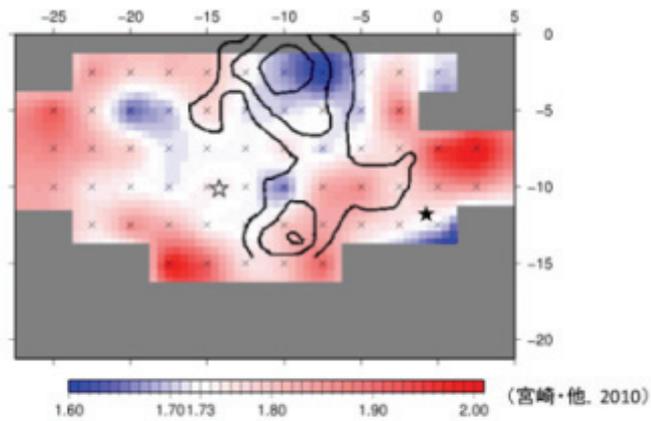


図 5 . 推定された  $V_p/V_s$  空間分布  
 標準誤差が  $\pm 0.1$  以上のグリッドは灰色でマスクをしている。Xはグリッドの位置。☆は本震の震源を、★は最大余震(4月20日、 $M_{max}$  5.8)の震源を、等高線はすべり量の分布(0.8m 間隔)を表す(Asano and Iwata(2005)による)

図 1 1 . 福岡県西方沖地震の余震域における  $V_p/V_s$  の分布 (九州大学[課題番号 : 2203]) 。  
 ☆は本震、★は最大余震の震源を、コンターは Asano and Iwata (2006) によるすべり量分布(0.8m 間隔)。

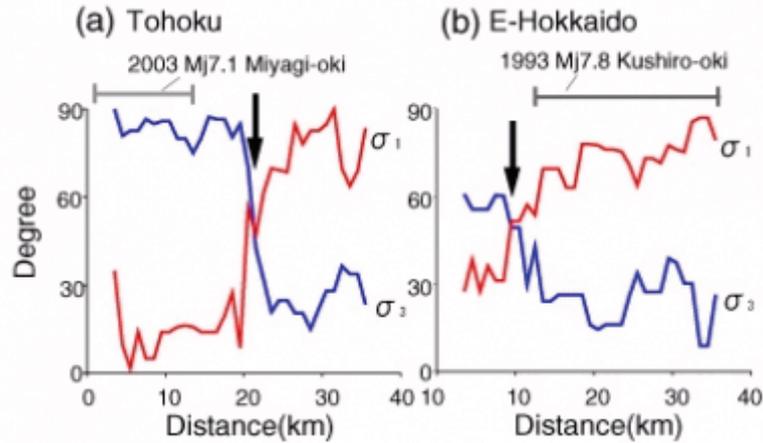


図 1 2. スラブ内の主応力軸の向きの分布（東北大学[課題番号：1208]）。  
 横軸はプレート表面からの距離、縦軸は最大主応力軸、最小主応力軸方向とその地域でのプレート表面の最大傾斜方向がそれぞれなす角を示す。水平方向に取った範囲は、その地域で過去に発生した大地震の余震域を表す。矢印は、推定された各地域の中立面の位置を示す。

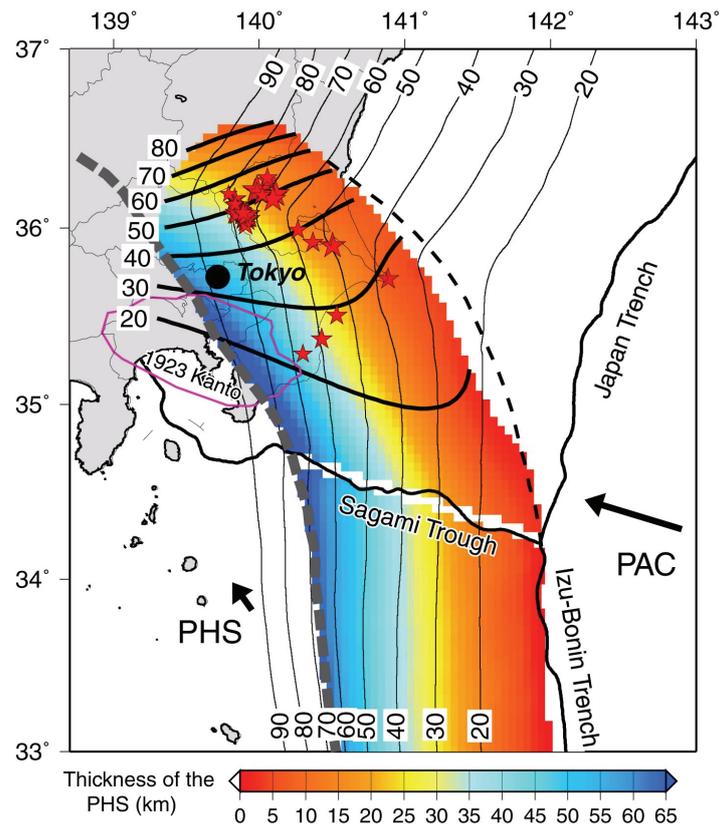


図 1 3. 変換波データより推定したフィリピン海プレートの厚さ分布（カラー）と上面形状（太線）（Uchida et al., 2010）（東北大学[課題番号：1208]）。  
 黒と灰色の破線は PHS-PAC 接触領域の北東（Uchida et al., 2009）および南西限（Nakajima et al., 2009）を示す。ピンクの線で囲まれた領域は、Wald and Somerville (1995) による 1923 年関東地震の震源域。赤星はフィリピン海プレート上の小繰り返し地震、細いコンターは、太平洋プレート上面深度（Nakajima and Hasegawa (2006) を小繰り返し地震の深度をもとに修正）。

## 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、現時点では、活動的でこれまでに数多くの噴火履歴の研究成果があり、多項目観測や各種調査が実施されているいくつかの火山においてさえも、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、火山噴火予知の最終目標である「現象を支配する物理法則が明らかにされており、観測結果を当てはめて、将来の予測ができる」段階にまで引き上げるためには、マグマ供給系を含む地下の構造や状態の時間変化を把握することにより、マグマ上昇・蓄積過程の理解と地質学的調査研究に基づく噴火履歴とマグマの発達過程を解明し、火山噴火現象をモデル化する必要がある。火山噴火準備過程研究では、「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、噴火規模、様式、推移を予測するための噴火事象系統樹の作成に利用できるモデルの構築に役立つ知見を得ることを目的としている。

### ア. マグマ上昇・蓄積過程

マグマ上昇過程やその蓄積過程については、いくつかの火山で研究が進められてきた。しかしながら、マグマ蓄積過程と噴火規模、様式、推移との関連については、火山噴火予知研究の極めて重要な課題であるにもかかわらず、未解明である。マグマ蓄積の状況が顕著であり、本格的な噴火活動が近づいていると思われる桜島火山で、総合的な観測研究を行った。また、他の火山についても、研究を推進した。

2006年6月に昭和火口における噴火活動が再開した桜島火山では、2009年には580回の爆発が発生し、320万トンの火山灰が放出されるなど活発化の傾向にある。マグマ蓄積の物理過程を明らかにすることを目的として、地殻変動、地震、電磁気、火山ガスなどの多項目観測とマグマ供給系を含む火山体の構造や状態及びそれらの時間的変化を把握するための探査を実施した(京都大学[課題番号:1809])。昭和火口からの火山灰放出量と傾斜計の変動量から見積もられる桜島山頂下へのマグマの供給量は、7月に20万 $\text{m}^3$ /月、10月に30万 $\text{m}^3$ /月と段階的に増加した(図1)。特に、2009年10月からのマグマ供給量の増加は顕著であり、地盤の隆起と膨張が複数の傾斜計、伸縮計で捕捉された。この時期以降に放出された噴出物には新鮮な安山岩片が含まれるようになり、深部から供給された新たなマグマ物質の放出が始まったものと考えられる(北海道大学[課題番号:1004])。これと同時に、昭和火口から噴出した火山灰に付着している水溶性成分である塩素の量が $\text{SO}_4$ に比べ相対的に増加した(図2)。塩素が地下水に吸着されやすいことを考慮すると、高温の火山ガスが昭和火口直下に供給されたことにより、地下水が周辺部に後退したことを示唆していると思われる。2009年7月及び10月のマグマ供給量の増加に先行し、火口近傍の地下水の二酸化炭素や水素ガスの濃度が増加した。これは山頂下へのマグマの供給量の増加に先行して、火山ガスが上昇してきたと解釈できる。また、火山ガスの移動を反映したと考えられる地下の見かけ比抵抗変化が検出された。更に、時期は異なるが、噴火活動の活発化に伴って重力値の減少が検出されており、火道内におけるマグマ頭位の上昇したことによると考えられる。

桜島火山のような高頻度に噴火する火山に比べて噴火発生頻度の低い火山である岩手火山について、東北大学[課題番号:1209]は、1996年～2009年のGPS連続観測データの基線再解析を実施した。この地域の地殻変動は、プレートの沈み込みに伴う広域的な変動と火山活動によるものが同時に観測され、それらを区別することが重要である。1998年のマグマ貫入現象に伴う変動が終息した2001年以降の長期トレンドと1997年以前の変動傾向が異なっていることから、1998年活動に先行する変動が、確実に存在したことが示唆された。

また、地下の熱水系が関与する水蒸気爆発の噴火準備過程は、桜島火山のようなマグマ性噴火とは異なる噴火準備過程の様式を示す可能性がある。東京工業大学[課題番号:1602]は、熱活動が定常的に継続している草津白根火山山頂北側斜面では放熱量が10年前に比べて数倍に達していることを見出した。更に、この温度異常領域は帯状に分布し、火山体直下の低比抵抗体との分布に対応関係があることを明らかにした。湯釜火口内の高温噴気と火山ガス組成からも、地下の熱水系から火山ガスによる熱の供給が、最近増加傾向にあることを示唆している。

これら3火山における研究成果からマグマ上昇・蓄積過程における共通性が指摘できる。1つは、マグマ上昇過程の初期段階においては熱水活動の異常が卓越することである。例えば、桜島火山の2006年6月の昭和火口噴火再開直前は火口周辺の地温が上昇していたことが確認されている。更に、火山灰付着成分の水溶性成分のC1/Sモル比の増加は山頂下へのマグマ供給量の増加に伴い、既存の噴出物や帯水層の排除が進行したと解釈できる。

もう1つは、噴火発生頻度にかかわらず噴火発生前には中・長期的にマグマの蓄積が進行しているということである。気象庁[課題番号:7019]によってとりまとめられた近年国内の火山で観測された火山地殻変動と同時に発生する地震活動との関係には両者の相関関係がみられる(図3)。これは、マグマ蓄積に伴い山体膨張すると同時に、マグマの貫入により歪が蓄積されて地震が発生することを示している。しかしながら、岩手火山の1998年の活動に伴う地震活動と地盤変動に比べると、桜島火山の地震活動は地盤変動の大きさに比べてはるかに低い。桜島昭和火口ではすでに噴火は始まっており、開放型マグマ供給路に沿って徐々にマグマ供給量が増加しているため、歪が蓄積しにくい状態にあるのであろう。このように、噴火前にマグマ蓄積が見られることは共通であるが、マグマ供給路が閉鎖しているか開放されているかにより、地震活動の時間変化は大きく異なることが示唆される。

## イ. 噴火履歴とマグマの発達過程

噴火履歴とマグマの発達過程研究は、伊豆大島、桜島、有珠山などを対象に集中的な地質調査、浅部のボーリング・トレンチ調査、噴出物の化学分析及び年代測定を実施して、噴出量階段図を作成し、噴火の規則性を理解するとともに、噴出物の分析からマグマ混合や分化過程などを明らかにし、長期的な火山噴火予知に資することを目的として実施されている。

活動的な火山のうち桜島火山、伊豆大島火山について、北海道大学[課題番号:1004]は地質学・物質科学的検討を行った。桜島火山については、15世紀から新しいマグマ系の噴火が始まったこと、1914年の噴火からは新たに玄武岩質マグマがマグマ系に加わったことが明らかになった。また、764年と1471年噴火の間の西暦1000年頃に新たに溶岩流出があったことが明らかになった。伊豆大島火山については、江戸時代の噴火履歴を取りまとめるとともに、歴史時代の代表的噴出物について岩石学的記載・XRFを用いた全岩主成分元素濃度測定、EPMAを用いた鉱物組成の測定を行い、各時代の噴出物の岩石学的特徴をおおまかに理解した。

やや活動的な火山では、蔵王火山、十勝岳、阿寒および屈斜路火山について噴火履歴の精密化と物質科学的検討が行われた北海道大学[課題番号:1004]。雌阿寒岳については、過去13000年間の総合柱状図及び積算噴出量の時間変化図を作成された。13000年前の中マチネシリ火砕噴火期では、発泡度が高まっていき、プリニー式噴火と火砕流噴火の同時発生が推定されるなど特徴的な推移がわかった(北海道教育大学[課題番号:2904])。また、岩木火山においては約5万年以降に繰り返された溶岩ドーム群の形成の歴史が明らかとなった(山形大学[課題番号:2905])。

## 課題と展望

諸観測の結果から桜島火山の中央火口丘下へのマグマの供給量が段階的に増加してきていることは明らかである。そこで最も解明すべき問題は、マグマの蓄積が進行している始良カルデラから中央火口丘下へのマグマの供給経路の位置と経路上のマグマ移動量の時間変化である。このため、第7次火山噴火予知計画の最終年度に実施した人工地震探査から最も有力なマグマ供給路として推定されている桜島北東部において、反射法探査を反復して行い、マグマ供給量増加に伴う桜島北東部地下の構造の時間変化の検出を試みたところ、観測された波形にある程度の相違は見出すことができた。しかし、2回の調査結果の相違が、マグマ供給量の変化に起因するものか否かについては、更に精査する必要がある。このため、22年度以降も人工地震探査を繰り返して、明らかにする必要がある。マグマ供給路があると考えられる桜島北東部における地盤変動や重力変化に注目していく必要がある。

始良カルデラの地下10kmに推定されているマグマ溜まりでは依然として蓄積が進行しているが、ここでの蓄積速度も一様ではない。昭和火口の噴火開始以降はむしろ低下傾向にあったが、2010年に入り、加速しているようにみえる。始良カルデラへのマグマの供給に直接関連する事象はさらに深部の構造により支配されているであろう。東北大学[課題番号:1209]は火山体深部での流体の動きに着目し、西南日本の火山について高精度トモグラフィ解析を実施し、三瓶火山と大山火山下に下部地殻から最上部マントルに至る大規模な低速度域を見出し、深部低周波地震も存在することから潜在的活動度の高さを指摘している。桜島においては始良カルデラおよび南九州域に臨時観測点を設置したばかりであり、今後データが蓄積されていけば深部構造が明らかになる。

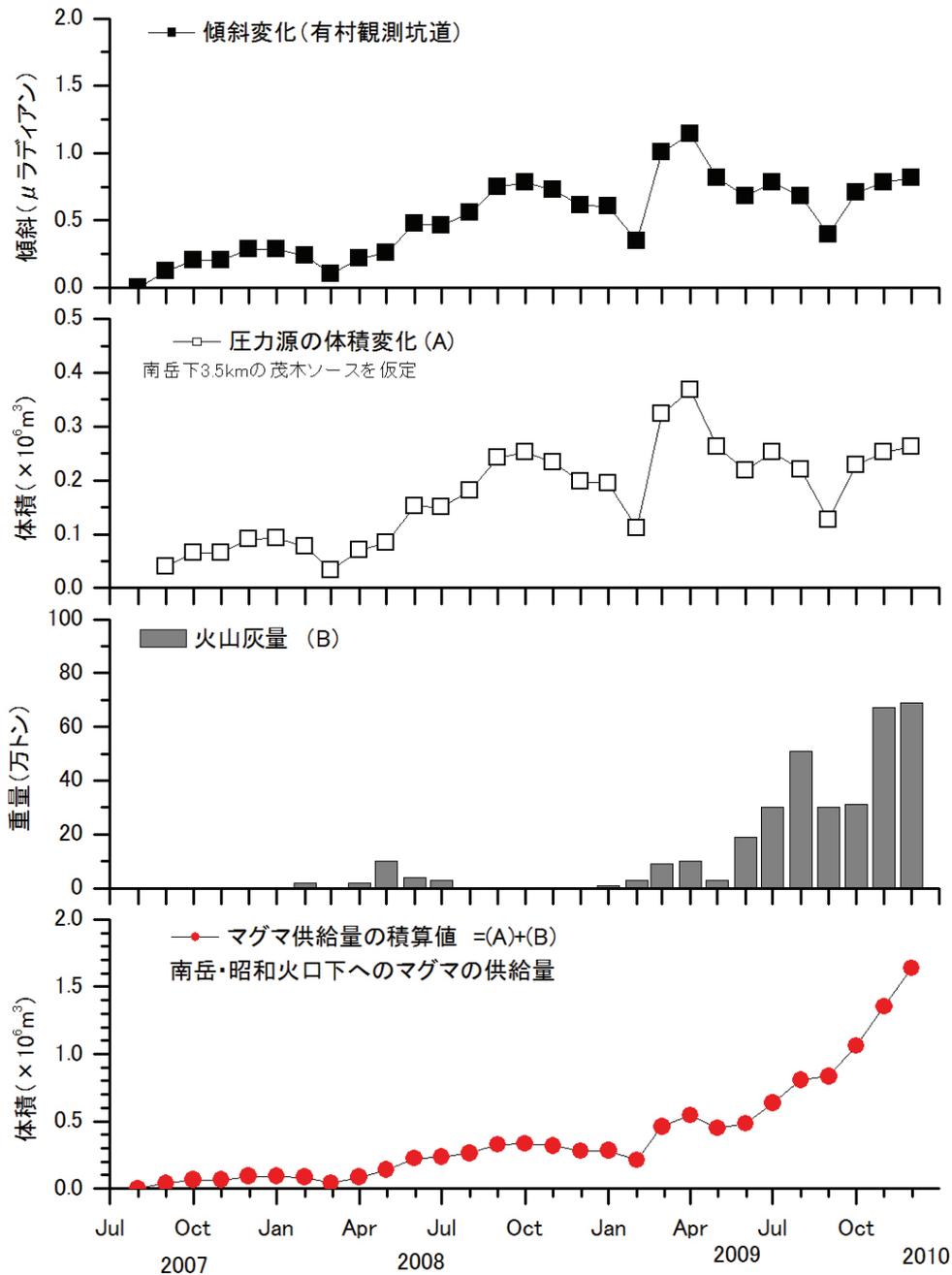
また、桜島火山では15世紀から新しいマグマ系の噴火が始まったこと、1914年の噴火からは新たに玄武岩質マグマがマグマ系に加わったことが明らかになっている。始良カルデラ下には、最近15年間で1億立方メートルのマグマが蓄積されたことから、桜島では近い将来噴火活動の活発化が予想される。今後の噴火活動により、すでに蓄積されていると考えられる珪長質マグマ溜まりや、移動を開始している安山岩質マグマに、新たに貫入してきた玄武岩質マグマがどのようにかかわっていくのかは、噴火規模、噴火様式、噴火推移の予測には重要な情報になるであろう。そのため、桜島火山における噴出物の火山化学的および岩石学的特徴の時間変化にも注目していく必要がある。

## 参考文献

Aizawa K., Kanda, W., Ogawa, Y., Yokoo, A. and Iguchi, M., 2009, Shallow resistivity changes of Sakurajima volcano from magnetotelluric continuous observation, CA 研究会 2009 年論文集, 79.

- Ban M., Iai Y., Hirotani S., et al., 2009, Temporal change of magma feeding system beneath the Gassan volcano, NE Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, A83.
- Ban M., Hirotani S., Nakagawa M., 2009, Origin of the low-K basalts in Shirataka volcano, rear arc side of NE Japan arc. 2009 Annual Meeting of Japan Association of Mineralogical Sciences, abstract. 33.
- 藤原伸也・石塚吉浩・山崎俊嗣・中川光弘, 2009, 十勝岳北西麓で新たに発見された4700年前の火砕流堆積物と十勝岳の完新世の活動の再検討. *火山*, 54, 253-262.
- 長谷川健・岸本博志・中川光弘・伊藤順一・山元孝広, 2009, 北海道東部, 根釧原野および斜里平野における約3万5千~1万2千年前のテフラ層序と後屈斜路カルデラ火山の噴火史. *地質学雑誌*, 115, 369-390.
- Hirotani S., Ban M., Nakagawa M., 2009, Petrogenesis of mafic and associated silicic end-member magmas for calc-alkaline mixed rocks in the Shirataka volcano, NE Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157, 709-734.
- 井口正人・他82名, 2009, 2008年桜島人工地震探査の目的と実施, 京都大学防災研究所年報, 52B, 293-308.
- 井上剛・伴雅雄・廣谷志穂, 2009, 蔵王火山, 約300~100 kaの噴出物の岩石学的特徴. 日本火山学会2009年度秋季大会講演予稿集, 136.
- 岸本博志・長谷川健・中川光弘・和田恵治, 2009, 最近約1万4千年間の摩周火山のテフラ層序と噴火様式. *火山*, 54, 15-36.
- 気象研究所, 2009, だいち/PALSARの干渉SARでみた雲仙岳溶岩ドームの変形. 火山噴火予知連絡学会報第99号, 97-98.
- 小林哲夫, 2009, 桜島火山, 安永噴火(1779-1782年)で生じた新島(安永諸島)の成因. *火山*, 54, 1-13.
- 中村勇吾・西村裕一・中川光弘・Kaistrenko, V.M.・Iliev, A.Y., 2009, 国後島南部および色丹島における北海道起源の完新世広域テフラの同定. *火山*, 54, 263-274.
- Notsu, K. and Mori, T., 2010, Chemical monitoring of volcanic gas using remote FT-IR spectroscopy at several active volcanoes in Japan, *Applied Geochemistry* (in press).
- Okubo, A., Kanda, W., Tanaka, Y., Ishihara, K., Miki, D., Utsugi, M., Takayama, T., Fukushima, M., 2009, Apparent Magnetization intensity map on Sakurajima volcano, Kyushu, Japan, inferred from low-altitude, high-density helicopter-borne aeromagnetic surveys, *Tectonophysics*, 478, 34-42.
- 佐々木実・山本七代・鎌田慎也, 2009, 岩木火山、最新期活動噴出物の岩石学的研究, 日本火山学会講演予稿集, 36.
- 高木朗充・福井敬一・小司禎教, 2010, 火山周辺でのGPS観測における数値気象モデルを用いた対流圏補正. *火山*, 55, 1-12.
- 高木朗充・福井敬一・新堀敏基・飯島聖, 2010, 光波測距の数値気象モデルに基づく大気補正—浅間山への適用—. *火山*, 55, 41-51.
- 武部義宜・佐藤佳子・熊谷英憲・伴雅雄, 2009, 蔵王火山、最新期噴出物のK-Ar年代測定. 日本地質学会第116年学術大会講演要旨集, 42.
- 玉田純一・中川光弘, 2009, 北海道東部, 雄阿寒火山の形成史. *火山*, 54, 147-162.

- 立尾有騎・井口正人, 2009, 桜島におけるBL型地震群発活動に伴う地盤変動, 火山, 53, 175-186.
- 津久井雅志・段木一行・佐藤正三郎・林幸一, 2009, 伊豆大島火山: 史料に基づく最近3回の大規模噴火の推移と防災対応. 火山, 54, 93-112
- 津久井雅志, 2009, 史料による桜島安永噴火の降灰分布の復元. 日本火山学会2009年度秋季大会講演予稿集, 12. (2009年10月10日於小田原)
- Yokoo, A., 2009, Continuous thermal monitoring of the 2008 eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan, Earth, Planets and Space, 61, 1345-1350.



京都大学防災研究所

図1. 桜島山頂へのマグマ供給量の増加(京都大学防災研究所[課題番号:1809])

- 1 段目: 昭和火口から2.1km離れた有村観測坑道における傾斜量の月平均値
- 2 段目: 山頂直下の深さ3.5kmに茂木ソースを仮定したときの月別体積変化量
- 3 段目: 火山灰放出量(鹿児島県の降下火山灰量による)
- 4 段目: 桜島山頂への月別マグマ供給量の積算値

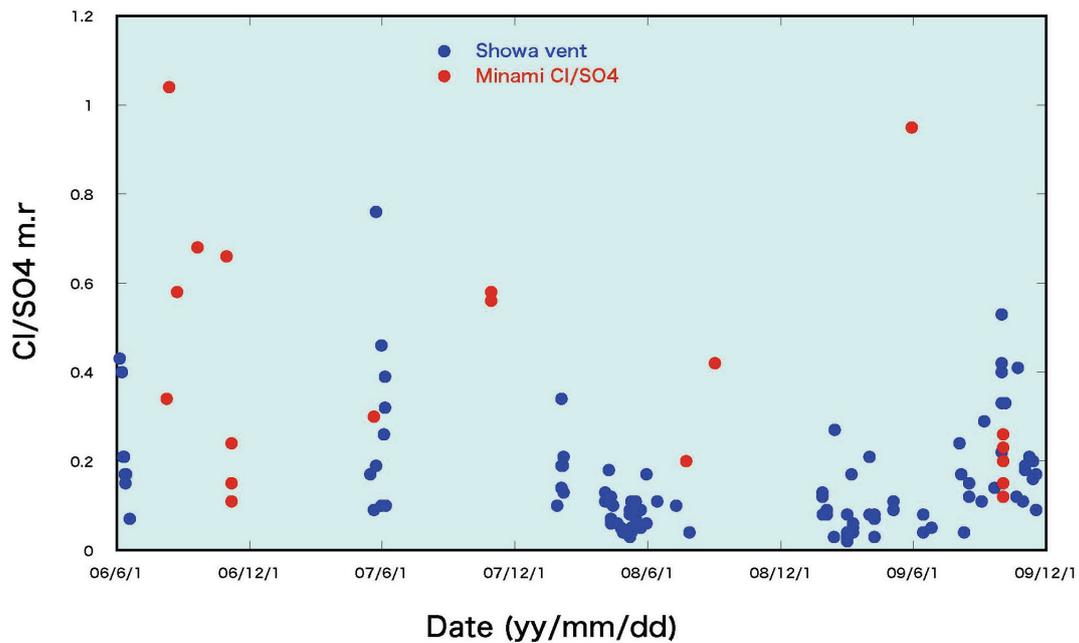


図2. 火山灰付着成分の水溶性成分のCl/S モル比の時間変化（京都大学防災研究所 [課題番号：1809]）

2008年までは南岳山頂火口起源の火山灰のCl/S モル比が高かったが、2009年10月以降は昭和火口起源の火山灰のCl/S モル比の方が高くなっている。また、2008年2月～6月、2009年2月～6月の噴火活動では、Cl/S モル比が徐々に減少する傾向がみられたが、2009年10月以降は減少傾向がみられない。

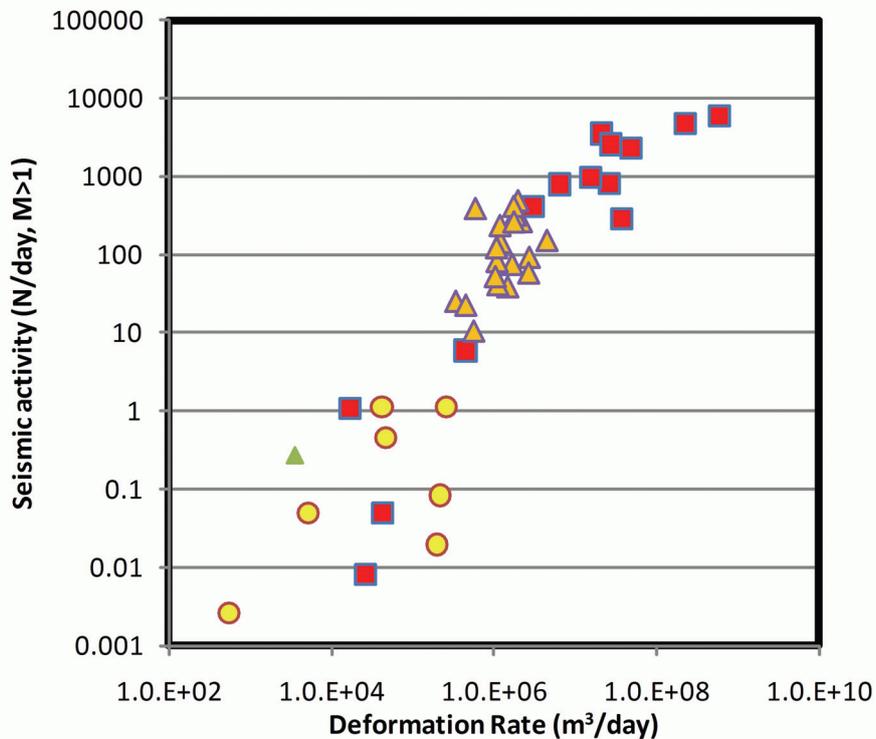


図3. 火山地殻変動と地震活動との関係（気象庁[課題番号:7019]）

近年国内の火山で観測された火山地殻変動と同時に発生する地震活動との関係。圧力源の膨張レートとM1以上の地震回数/日に換算したもので示してある。

## 2 (3) (3-1) 地震発生先行過程

「地震発生先行過程」計画推進部会長 中谷正生  
(東京大学地震研究所)

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

### ア. 観測データによる先行現象の評価

#### (電磁気学的現象)

地震の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)が観測されることが国内外で報告されている。北海道大学の 2002 年からの観測では、地震エコーの継続時間が発生する地震の規模を反映することが示唆されている。この現象を理解し、地震発生予測の高度化を行うため、本年度は観測点を増設し 1 つの異常伝播イベントを複数の観測点で捉えることを行った(図 1)。例えば、2009 年の 2 月から 4 月にかけての 5 つの M5 クラス地震の前には、これらの地震の前に震央に近い FM 放送局や地震観測用発信点(64MHz)からの地震エコーが、ほとんど同時に広域的に観測された。また、2 月 1 日から弟子屈で観測された足寄、帯広、広尾 FM 放送局からの地震エコーについては、対応する地震が発生しなかったが、雌阿寒岳から阿寒温泉にかけて直径 6-7 km に及ぶ広域的に 3-4 cm 隆起する地殻変動が認められた。さらに、現象の詳細を探る新しい試みとして、観測点を高密度で配置したエリアを作った。えりも付近に FM 広尾局を主な目標局とした観測点 3 か所を約 5km 間隔で設置し、日高山脈南部で頻繁に起こる深さ 50km の地震に伴うエコーを複数の観測点でほぼ同時に観測している。また、電磁気学的観測では、ノイズの弁別が重要であるが、この面で改善の手段として、ウェーブレット変換の有効性を検討したところ、ローカルなノイズである高周波成分を落とすと地震エコーの検出精度が上がることがわかった(北海道大学[課題番号:1005]、Moriya et al., 2010、山下・他, 2010)。

DC-ULF、VLF 帯における電磁気観測においては、東海大学を中心とした観測で、神津島・新島において地電位差異常が統計的に有意な地震先行現象であることが示唆されている。今年度は、新島・神津島において、地電位差観測点を再構築し、さらに、IP 接続によるテレメータを導入した。これらの地域は、地震活動が活発で、過去の観測で統計的に有意な地震先行現象が観測されていることに加えて、人工ノイズレベルが非常に低いので、DC-ULF、VLF 帯地電位観測を中心とした、電磁氣的地震先行現象のフィールドとして高い価値をもつと考えている。図 2 に示すよう

に、これらの地電位差観測点では、電極間の距離、方位を複数組み合わせることによって、人工ノイズや地磁気誘導成分と、それ以外(その多くは地震の短期的先行現象とおもわれる)のものが明確に識別できる(東海大学 [課題番号: 2501]、 Orihara et al., 2009)。また、気象庁は伊豆半島東部地域において地磁気全磁力および伏角測定を継続的に実施しているが、今年度は、御石ヶ沢付近の自然電位観測において環境ノイズの大きさは数 mV しかないことが分かり、ほぼ補正の必要がないことが示唆された(気象庁 [課題番号: 7020])。

地震エコーは、電離圏の乱れであるし、また、DC-ULF、 VLF 帯での地震に関連した電磁氣的異常に関して提案されているいくつかの物理メカニズムも、電離圏への擾乱を伴う。フランス CNRS では、全地球的観測が行える人工衛星によってこれらの問題の検証をするために、電離圏パラメータを測定するために複数のセンサーを搭載した衛星 DEMETER を運用している。東京学芸大では、センサー開発と解析を担当しているグループ(フランス LATMOS)と協力して、計測された電圧値等の生データの段階から、測定品質の評価を行った(図 3)。イオン密度に関しては、わずかであるが太陽光と連動するようなノイズ的变化が見受けられており、同レベルの微小強度を解析対象とする場合には十分注意が必要であることが分かった。現在はノイズ除去の方法を検討中である。電子密度および温度は計測されたデータにおいて絶対値が大きいため電極汚染による誤測定も考えられるが、相対変動に着目し複数の他の衛星(FORMOSAT3/COSMIC 等)のデータと比較したところある強度以上の相対値変動ならばおおむねデータとして利用可能な品質であることが分かった(東京学芸大学[課題番号: 2908])。

#### (地球化学的現象)

地球化学的な先行現象研究では地下水を井戸から採取して分析することが多いが、個々の井戸には強い個性があることが知られている。そのため、多数の井戸のデータを観測することが一つの方策であると考えられる。東京大学理学系研究科では、観測の省力化・機動化にも資するような、地下水溶存ガスの連続観測装置の改良を行った。ガス精製ラインを簡素化し、4つのラインに分けることで、効率よい除湿に成功した。また、全てのバルブを自動で開閉させるための制御プログラムを開発することで、最適なステップで分析を実施できるようになった。これらの結果、ガス組成の分析精度が向上したと同時に、装置の体積を 1/3 に減らすことができたため、機動観測にも適用できるようになった(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502]、 Tsunomori, 2009)。

地下水溶存ガス濃度の変動は帯水層の物理パラメータを反映するため、同時並行で観測することが望ましいが技術的に困難であった。そこで、地上と帯水層の間で地下水を循環させ、瞬間的な地下水のサンプリングを定期的に行う方式にすることで、水位の回復から観測井のごく近傍の透水係数と、サンプリング時の地下水溶存ガス組成を、同時に取得できることができるようになった(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502]、 Tsunomori, 2009)。

また、ラドン濃度については大気中での濃度変動にも、地震や地殻歪みに関連する変化がみられることがあり、東北大学理学系研究科においては、兵庫県南部地震前後の観測データの再解釈を行うとともに、牡鹿半島のデータを使って気象要素等の影響を調べはじめた(東北大学理[課題番号: 2906]、 Omori et al., 2009a, b, Yasuoka et al., 2009)。

#### (載荷と地震活動)

東北大学では、プレート境界での滑りモニタリングの自動化への入力データとして利用可能な、GPS によるリアルタイムに地殻変動を検出するためのシステム開発を行った。また GEONET と東北大学の GPS データを自動的に併合処理するシステム開発も併せて行った。小繰り返し地震によるすべりモニタリングでは、これを継続し、茨城・福島県沖の海溝近くのすべり速度が 2009 年も 2008 年の M7.0 の地震以前よりも速い状態にあることを確認した。また、過去のデータの比較の結果、2003 年宮城県沖の地震 (M7.2) の後の小規模な余効すべりが、GPS と小繰り返し地震の両方のデータで確認された。これらは、準静的滑りの時空間変化に基づく地震発生切迫度評価のための要素技術の高度化と位置付けられる (東北大学 [課題番号: 1210]、太田・他, 2009、Matsuzawa et al., 2009、Uchida et al., 2009、Ito et al., 2009a、b、Uchida et al., 2009)。

南アフリカの大深度鉱山では、大規模な採掘により短期間で大きな載荷変化が期待でき、また、あきらかにその載荷に関連した激しい地震活動がおこる。立命館大学では、そのような採掘部の近くに歪計を埋設して、載荷とそれに対する岩盤・断層系の反応を観察する研究を行っている。過去の記録を精査した結果、2 台の歪計から 25m 以内で発生した Mw0.3 の地震の 6.5 時間前から顕著な非地震性の変化が見出された。変化が最大のものは約  $4 \times 10^{-7}$  におよび、それは Mw0.3 の最大の coseismic 変化 ( $3.6 \times 10^{-6}$ ) が見られた成分で観測された。過去に、1 台の歪計だけで観測されたときにくらべれば、このようなイベントの大きさと位置が少しでも拘束できるようになったわけだが、現在は、広帯域地震計、加速度計、AE センサーなどとともに、8~9 台の歪計からなる総合観測網を、既存の断層の周囲に 3 次元配置で展開する準備を始めている (立命館大学 [課題番号: 2401]、Ogasawara et al., 2009、桂・他, 2009、直井, 2010、小笠原・他, 2009、Yabe et al., 2009、Durrheim et al., 2009)。

#### (地殻構造)

かねてから、地震発生に先行して、地殻の弾性・非弾性構造が変化したのではないかという例が報告されている。最近、雑微動信号を利用して、地殻構造をモニターする地震波干渉法がさまざまな方面で注目されているが、京大防災研 [課題番号: 1810] では、このなかでも、データが豊富に得られ、将来の実用展開での利便性が高い単独微小地震観測点の雑微動の自己相関関数 (ACF) を用いる方法を研究している。今年度は、これまでに、地震イベントとの関連がみつかった個別フェイズのラグタイムに加えて、ACF の減衰定数を求め (図 4)、それぞれが大地震の発生に関して同様の情報をもっているかさぐっている。

#### イ. 先行現象の発生機構の解明

#### (電磁気学的現象)

地震エコー現象は、大気中に電波の散乱体があらわれたことを観測していることは間違いなくともわれるが、その発生機構についてそれ以上具体的なことはわかっておらず、地震との関係も、統計的な議論にとどまっている。北海道大学は、このような段階においては、観測エンド側から、どういった物理過程をみているのかを順次追っていくことが有効であると考え、フィールドミルを用いた大気電場計測を 2009 年 1 月 23 日から、VHF 帯電波伝播異常も観測しているえりも地域冬島観測点において開始した (図 5)。通常の大気電場強度は数 100V/m であるのに対し、

用いているフィールドミルのダイナミックレンジは $-20\text{ kV/m}$ から $+20\text{ kV/m}$ までと広い。16bitのA/D変換器を内蔵したデータロガーを用いているため、分解能は $0.6\text{ V/m}$ であり十分といえる。2009年3月24日の13:30頃から地震に先行すると考えられるVHF帯電波異常が冬島観測点とえりも観測点において共に観測された。継続時間は冬島観測点において約1.5時間であった。このときフィールドミルデータは、24日13:30ごろから22:00頃まで電場強度が非常に強い擾乱を受けていることを示している。前後の23日と25日は比較的静穏な電場強度波形を示しているが、この期間に限り特異な擾乱を受けていたことが判明した。このときの気象データから、降雨や風による影響でフィールドミルの擾乱が引き起こされた可能性は低いといえる。しかし、24日の天候は曇りであったため、フィールドミル上空を通過する雲の雲内電荷が擾乱を引き起こした可能性、また、大気中のイオン濃度の変化により引き起こされた可能性も考えられ、このような擾乱が地震に関連していたことをはっきりさせるためには、冬島よりやや離れた場所でフィールドミルの同時観測を行うとともに、天気監視カメラ・イオン計測装置を用いた観測を並行して実施する必要がある(北海道大学[課題番号:1005])。

DC-ULF、VLF帯における地電位差異異常においては、先行現象の発生場所が震央(震源)であるような電磁氣的現象の候補はいくつも提案されており(東北大学理[課題番号:2906]、川田・他, 2009、武藤・他, 印刷中、東海大学[課題番号:2501]、京大防災研[課題番号:2907])、電磁氣的現象のなかでも、先行現象と発生した地震との物理的関連が理解しやすいのではないかと期待される。そのためには、仮定した電磁氣現象ソースによって地表近くの各観測点で期待される観測値(東北大学理[課題番号:2906]、Takahara et al., 2010)を定量的に計算できる必要があるが、地殻の電磁氣的物性は、不均質性・非等方性が強いためにグリーン関数は非常に複雑であることが一般的である。過去に神津島で観測された人工ノイズ等も含むデータについての詳細な解析の結果、神津島の電氣的構造に大きな異方性が存在している事が示唆され(Orihara et al., 2009)、その確認のためにVLF-MT探査を実施した(図6)(東海大学[課題番号:2501])。

#### (地球化学的現象)

地震に先行して観測されてきた地下水中のラドン濃度異常の約20%は濃度の減少であり、帯水層中で亀裂が生成することでラドン放出量が増加する、というシナリオだけでは説明がつかない。そこで、東京大学理学系研究科では、帯水層中に生成する新たな亀裂の量、帯水層中の空隙率と飽和度、ラドンガスの気液平衡を考慮することにより、ラドン濃度の減少を定量的に説明することに成功した(東京大学理学系研究科[課題番号:1502]、Tsunomori and Kuo, 2009、2010)。先行現象は、観測される異常の振幅が単純な物理的モデルからの考察に比して「大きすぎる」ことがしばしば問題とされるが、その点についてしっかりと物理的な定量的考察がなされたことは重要な進歩である。

#### (载荷と地震活動)

東北日本沈み込み帯においては、地震活動をおこせるはずの温度範囲にあっても、プレート境界の地震カップリングが有意に1を下回っている領域があり、そこでは、プレート境界で発生するスローイベントや余効すべりが地震や低周波微動の発生を促していることがアスペリティモデルで定性的に説明されている。さらに、同地域では、小繰り返し地震やGPSデータによってプレート境界でのすべりモニタリングができることが示されている。東北大学では、そのような手

法によるモニタリングの高度化と、アスペリティモデルの定量化による、地震の切迫度評価への取りくみを始めた。

理論的な側面から、巨大地震サイクルに伴って、その周辺でのプレート収束速度の揺らぎが小繰り返し地震に及ぼす影響を調べるために、 $10^{-5}$  の計算誤差で地震性すべり量の定量的議論をすることが可能な、極めて高い時間分解能を有する数値シミュレーションに着手した。その結果、小繰り返し地震の発生間隔は、プレート収束速度が速いほど短くなることに加えて、Time-Predictable 的な傾向がみられることが示された。今後様々なケースを検討しなくてはならないが、このような研究によって、切迫度の情報をどこから得るのがより信頼度が高いのかを検討していくことは有効であるとおもわれる(東北大学 [課題番号: 1210]、Ariyoshi et al., 2009a、b、Ito et al., 2009a、b、Uchida et al., 2009)。また、東京大学地震研究所では、地震サイクルのモデリングにおいて根本的な役割を担う摩擦法則の最新の知見をとりこんだ、1次元バネブロックモデルの計算コードを開発した。摩擦法則の微妙な差が、震源核の形成等の予測に重要な影響を与えることがかねてから指摘されており、これまで知られていた摩擦法則と実験の不一致が解消された新しい摩擦法則でのシミュレーションを行なうことは、地震発生の数値モデルの基礎付けとして不可欠な作業である(東京大学地震研究所 [課題番号: 1210]、永田他、2009a、b、Nakatani et al., 2009、Nagata et al., 2009)。さらに、地震活動からの地震サイクル中の現位置情報をとりだすための新たなアプローチとして、JAMSTEC は、離散要素法で表現した、付加体中での大小の断層形成・活動モデルを応用する試みをはじめている(東京大学地震研究所 [課題番号: 1210]、阪口・堀、2009、堀・阪口、2009a、b)。

また、陸上および海底地震観測網で精度よく求めた地震のメカニズム解を用いて、宮城沖の2003年M7.2の地震の余震データの解析を行った。本年度は特に、応力テンソルインバージョンにより応力場の推定を行った。その結果、本震すべり域の東端附近に、広域応力場からのずれが大きく、本震のすべりによる応力変化の影響を受けているとみられる地震クラスターがあることが分かった(図7)。このことは、プレート境界地震が、その周辺のプレート内地震の起こり方に与える影響に関しても、DCFFによる考え方が有効であることを示唆している(東北大学[課題番号: 1210]、鈴木・他、2009a、b)。

さらに、大地震と小地震の間にどのような相互作用があるかは、地震予知の根幹にかかわる問題であるが、東北日本の沈み込み帯では、プレート境界での大小地震が入り混じった地震クラスターがあることが最近わかってきており、これは、スケール間の相互作用の検証にふさわしいデータであると考えられる。そこで、岩手県釜石沖のM4.8の繰り返し地震を含む地震クラスターにおいて正確に推定したイベント間距離、断層サイズデータを用い、比較的大きな地震にも適用できる繰り返し地震抽出方法の検討を行った。その結果、2つの地震のうち小さい方の地震のコーナー周波数付近のコヒーレンスを用いると、地震の規模によらず繰り返し地震とそうでないものの区別が明瞭にできること分かった。さらにイベント間の距離(重なり具合)やサイズの違いと波形のコヒーレンスの関係を調べ(図8)、新たな繰り返し地震抽出基準の策定準備に取り掛かった(東北大学 [課題番号: 1210])。

北近畿の丹波山地では、これまで兵庫県南部地震や昭和南海地震の前後に微小地震活動度が大きく変化した例が指摘されている。この地域はそもそも、定常的に微小地震活動度が異常に高く、所々の観測データで示唆される丹波山地下の地下流体の存在が地震活動に大きな影響を与えていると考えられている。京大防災研では、この地域での非常に高密度な多項目観測を開始し、順次

観測点を展開している。高感度であるため、小さな地震まで初動メカニズム解が決定でき、絶対応力場の情報がえられる。一方、高密度の面的な測線で比抵抗構造探査(図 9)を行うことで、3 次元的に地殻流体の分布がおさえられることが期待され、さらに、新型の密閉ボアホール式測定での広帯域・高 SN 比の間隙圧モニター(図 10)などのデータも得られるので、地下流体の挙動と、微小地震活動、地震サイクルとの関連の総合的な理解が、これまでとは全く違うレベルで進展すると期待される(京都大学防災研究所 [課題番号: 1811]、藤野・片尾, 2009、Yoshimura et al., 2009)。また、東京大学地震研究所では、南アフリカ金鉱山内において、より発生頻度の高い地震を、至近距離・高周波観測をおこない、地震波形情報から得るさまざまな応力パラメータと、既知の採掘応力を比較する試みをおこなってきた。本年度は、2008 年度に完成した、25 kHz 加速度計ネットワークの維持とデータの品質チェックをするとともに、これから採掘応力の上昇期を迎える他の鉱山での観測網構築の準備を行った(東京大学地震研究所[課題番号: 1420]、和田・他, 2009、小笠原・他, 2009、Durrheim et al., 2009、Ogasawara et al., 2009)。

## 展望と課題

直前予知にも関連する「先行過程」に焦点をあてた研究は、「前兆さがし」を繰り返すべきでないとする、旧地震予知計画への反省から、新地震予知研究計画ではそれほど行われなかった。しかし、今回、課題を募集して、実際にはじまった研究の内容をみると、90 年代以降急速に一般化した地震発生の力学的物理モデルに準拠することで、やみくもな経験主義ではないアプローチによって先行過程を研究する機運が熟していたことがみてとれよう。

## 参考文献

- Ariyoshi, K., T. Hori, J. Ampuero, Y. Kaneda, T. Matsuzawa, R. Hino, and A. Hasegawa, 2009a, Influence of interaction between small asperities on various types of slow earthquakes in a 3-D simulation for a subduction plate boundary, *Gondwana Research*, 166, 534-544.
- Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, Y. Yabe, N. Kato, R. Hino, and A. Hasegawa, 2009b, Character of slip and stress due to interaction between fault segments along the dip direction of a subduction zone, *Journal of Geodynamics*, 48, 55-67.
- Durrheim, R. J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya and the JST-JICA SA research group, 2009, Observational study to mitigate seismic risks in mines: a new Japanese - South African collaborative project, in "Proceedings of South African Geophysical Association Biennial Technical Meeting and Exhibition", 73-79.
- 藤野宏興・片尾浩, 2009, 琵琶湖西岸地域における微小地震のメカニズムと応力場, 京都大学防災研究所年報, 52, B, 275-284.
- 堀高峰・阪口秀, 2009a, 付加体発達条件に依存するデコルマ面の形成メカニズム, 地球惑星科学連合大会.
- 堀高峰・阪口秀, 2009b, 地殻ダイナミクス理解のための課題—付加体形成を例として, 日本地震学会秋季大会.
- Ito, Y., K. Obara, T. Matsuzawa, and T. Maeda, 2009a, Very-low-frequency earthquakes related to small asperities on the plate boundary interface at the locked to aseismic

- transition, *J. Geophys. Res.*, 114, doi:/10.1029/2008JB006036.
- Ito, Y., Y. Asano, and K. Obara, 2009b, Very-low-frequency earthquakes indicate a transpressional stress regime in the Nankai accretionary prism, *Geophys. Res. Lett.*, 36, doi:10.1029/2009GL039332.
- 桂 泰史・小笠原宏・安武剛太・川方裕則・山本覚仁・中谷正生・直井 誠・矢部康男・石井 紘・E. Pinder・G. Morema, JAGUARS, 2009, 歪計から 20m で発生した M2 の断層滑り方向延長部で続発した M<sup>2</sup> 地震に関連する歪変化 -南アフリカ Mponeng 金鉱山, 日本地震学会秋季大会予稿集, P1-66.
- 川田祐介・長濱裕幸・内田 直希・松澤 暢, 2009, プレート境界地震に伴う余効すべりと岩石の粘弾性挙動、地質学雑誌、特集号「プレート沈み込み帯と地震」, 115(9), 448-456.
- Matsuzawa, T., K. Shimamura, N. Uchida, T. Okada, Y. Ito, T. Kono, and A. Hasegawa, 2009, Repeating Earthquake Activity off Kamaishi, Iwate Prefecture, Japan, GCOE International Symposium Circum-Pacific Subduction Zones, Sendai, Katahira Sakura Hall, Tohoku University, February.
- Moriya, T. Mogi and M. Takada, 2010, Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes, *Geophysical J. International*, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04461.x, 180, 858-870.
- 武藤 潤、長濱裕幸、三浦崇、荒川一郎、岩石のすべり摩擦による放電発光と地震前兆電磁気現象について、月刊地球 (印刷中).
- 永田広平, 中谷正生, 吉田真吾, 2009, 接触状態の観察に基づく速度・状態依存摩擦則の修正, 摩擦の科学 2009.
- Nagata, K., M. Nakatani, and S. Yoshida, 2009, Stress-weakening effect on friction and a major revision of evolution law for contact state, AGU Fall Meeting.
- 永田広平, 中谷正生, 吉田真吾, 2009, Revised evolution law in rate- and state-dependent friction incorporating a stress-weakening effect, 地球惑星科学連合大会.
- 中谷正生, 永田広平, 吉田真吾, 2009, Direct effect coefficient  $\alpha$  for granite is not about 0.01; it is never less than 0.04, most likely about 0.05, 地球惑星科学連合大会.
- Nakatani, M., K. Nagata, S. Yoshida and O. Kuwano, 2009, A major revision of rate and state friction law based on semi-direct analysis of interface state, French-Japanese International Workshop on Earthquake Source.
- 直井 誠, 2010, 南アフリカ大深度金鉱山で発生した M2 地震震源近傍でのアコースティック・エミッション観測, 東京大学博士論文.
- 小笠原宏・川方裕則・石井 紘・中谷正生・矢部康男・飯尾能久, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 2009, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験-至近距離観測による地震発生過程の解明に向けて-, 地震 2, 61, 日本地震学会 60 周年記念特集号, S563-S573.
- Ogasawara, H., R.J. Durrheim, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, JST-JICA SA research group, 2009, A Japanese - South African collaboration to mitigate seismic risks in deep gold mines, in "Proceedings of 1st Hard Rock Safe

- Safety Conference ” , South African Institute of Mining and Metallurgy, 115-134.
- Omori, Y., Nagahama, H., Kawada, Y., Yasuoka, Y., Ishikawa, T., Tokonami, S. and M. Shinogi, 2009a, Preseismic alteration of atmospheric electric conditions due to anomalous radon emanation. *Phys. Chem. Earth*, 34, 435-440.
- Omori, Y., Tohbo, I., Nagahama, H., Ishikawa, Y., Takahashi, M., Sato, H. and T. Sekine, 2009b, Variation of atmospheric radon concentration with bimodal seasonality. *Radiat. Meas.*, 44, 1045-1050.
- Orihara, Y., Kamogawa, M., Nagao, T. and Uyeda, S., 2009, Heterogeneous electrical structure of Kozu-shima volcanic island, Japan, *Proc. Japan Acad. Ser. B* 85, 476-484.
- 太田雄策・大園真子・三浦哲, 2009, Ambizap による PPP 測位解高精度化とその精度評価, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 千葉, 幕張メッセ, 2009 年 5 月.
- 阪口秀, 堀高峰, 付加体の発達と大地震発生の関係, 2009, 地球惑星科学連合大会.
- 鈴木健介・日野亮太・伊藤喜宏・金沢敏彦・山田知朗・篠原雅尚・植平賢司・山本揚二郎・金田義行, 2009a, 海底地震観測による宮城県沖地震震源域周囲の応力場の推定, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2009 年 5 月.
- 鈴木健介・日野亮太・伊藤喜宏・金沢敏彦・山田知朗・篠原雅尚・植平賢司・山本揚二郎・金田義行, 2009b, 2005 年宮城県沖の地震(M7.2)による応力変化と宮城県沖の応力場の推定, 日本地震学会 2009 年 秋期大会, 京都, 京都大学.
- Takahara, K., Muto, J. and H. Nagahama, 2010, Skin Depth of Electromagnetic Wave through Fractal Crustal Rocks. *IEE Trans. FM (Elect. Eng. Jpn.)*, 130, No.3, 258-264.
- Tsunomori, F., 2009, Semi-continuous groundwater gas monitoring system at Kashima observatory. 8th Taiwan - Japan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, Taiwan.
- Tsunomori, F. and T. Kuo, 2009, A mechanism of radon anomaly before big earthquakes: In the case of 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake, Singapore.
- Tsunomori, F. and T. Kuo, 2010, A mechanism for radon decline prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake in Japan. *Radiation Measurements*, 45(1), 139-142.
- Uchida, N., J. Nakajima, A. Hasegawa, and T. Matsuzawa, 2009a, What controls interplate coupling?: Evidence for abrupt change in coupling across a border between two overlying plates in the NE Japan subduction zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 283, 111-121.
- Uchida, N., S. Yui, S. Miura, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, Y. Motoya, and M. Kasahara, 2009b, Quasi-static slip on the plate boundary associated with the 2003 M8.0 Tokachi-oki and 2004 M7.1 off-Kushiro earthquakes, Japan, *Gondwana Research*, 16, 527-533.
- 和田直也・中谷正生・矢部康男・直井誠・宮川幸治・小笠原宏・川方裕則・安武剛太・吉光奈奈・三宅弘恵・井出哲・五十嵐俊博・G. Morema・E. Pinder, 2009, 南アフリカ金鉱山 M2 震源域における高周波 数サンプリングでの至近距離 3D アレー観測, 日本地震学会講演予稿集 2009 年秋季大会, P3-45, 京都.
- 山下晴之・渡邊朋典・森谷武男・茂木透, 2010, ウェーブレット変換の地震エコー記録への適用とその効果, 北海道大学地球物理研究報告, 第 73 号, 印刷中.

- Yasuoka, Y., Kawada, Y., Nagahama, H., Omori, Y., Ishikawa, T., Tokonami, S. and M. Shinogi, 2009, Preseismic changes in atmospheric radon concentration and crustal strain. *Phys. Chem. Earth*, 34, 431-434.
- Yoshimura, R. et al., 2009, Magnetotelluric transect across the Niigata-Kobe tectonic zone, central Japan: A clear correlation between strain accumulation and resistivity structure, 36, L2031, doi:1029/2009GL040016.

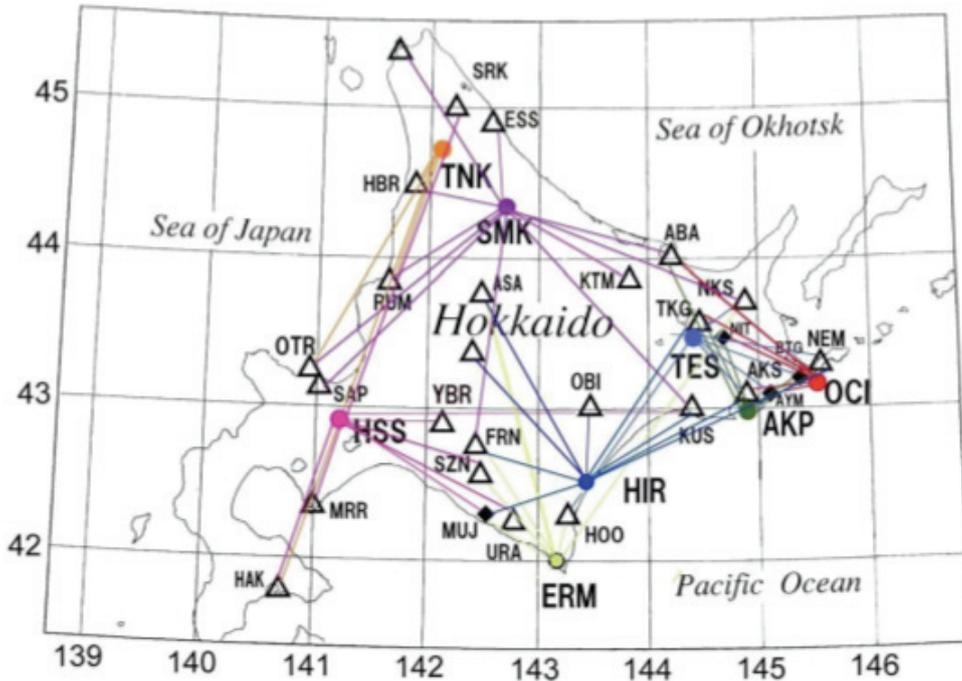


図 1. 2009 年 11 月現在での地震エコー観測点(丸)と目標局(三角：FM 放送局、 菱形：64 MHz 発信局) (北海道大学 [課題番号：1005])。

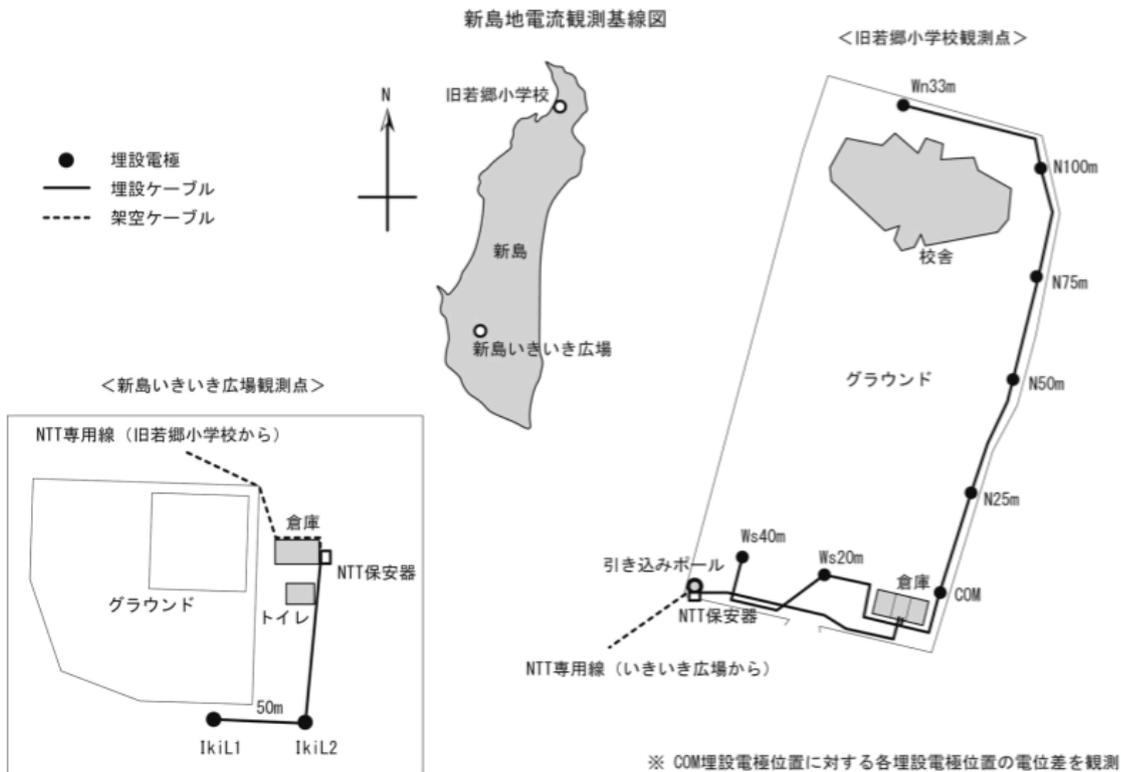


図 2. 新島の新規地電位差観測点。旧若郷小学校といきいき広場間はNTTの専用回線で接続。地電位差観測は1Hzで実施している(東海大学 [課題番号：2501])。

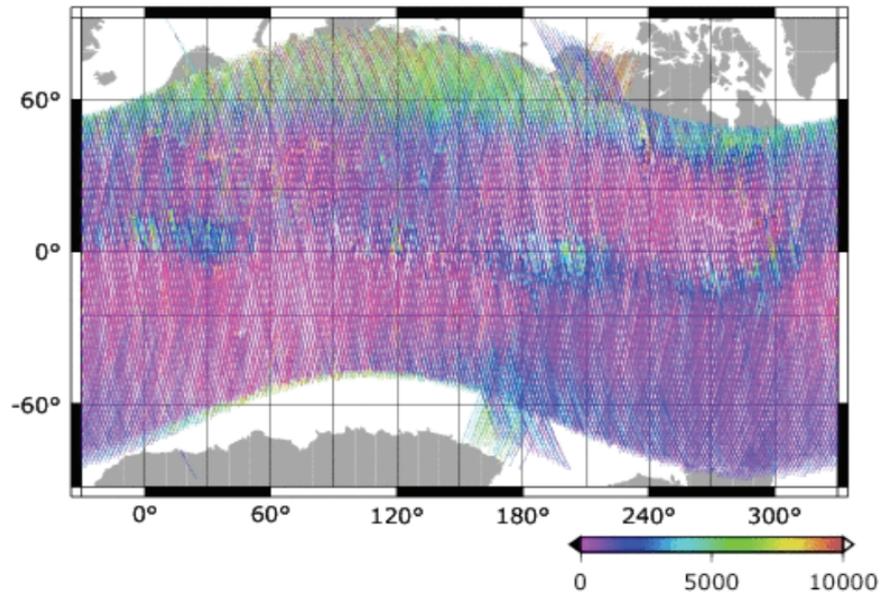


図 3. Demeter 衛星でえられた 2008 年 8~9 月におけるイオン密度空間分布。代表的な例として  $0+$  密度 ( $\text{cm}^{-3}$ ) をプロットした。電離圏研究で知られている 4 波構造が見られる(東京学芸大学 [課題番号 : 2908])。

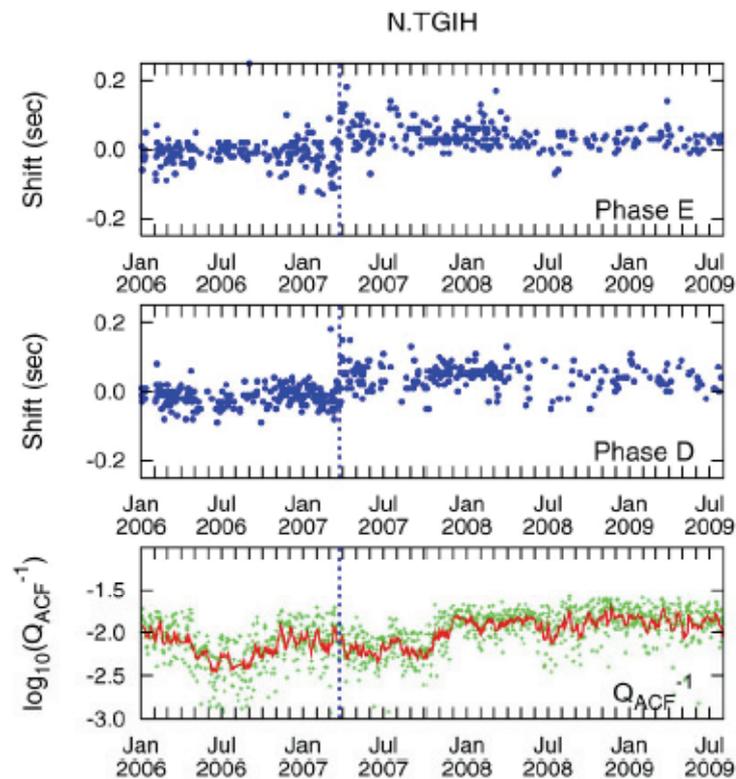


図 4. DP.NNJ 観測点での、2006 年 1 月から 2009 年 7 月までの期間の ACF の特定のフェイズのラグタイムと ACF-Q の時間変化。点線は 2007 年能登半島地震の発生時を示す。上 2 枚が、特定のふたつのフェイズのラグタイムの時間変化を、最下段の図が ACF-Q の時間変化を示す。ACF-Q の図において、緑の点は日々の値を、赤い線はそれらの 10 日間の移動平均を示す(京大防災研 [課題番号 : 1810])。

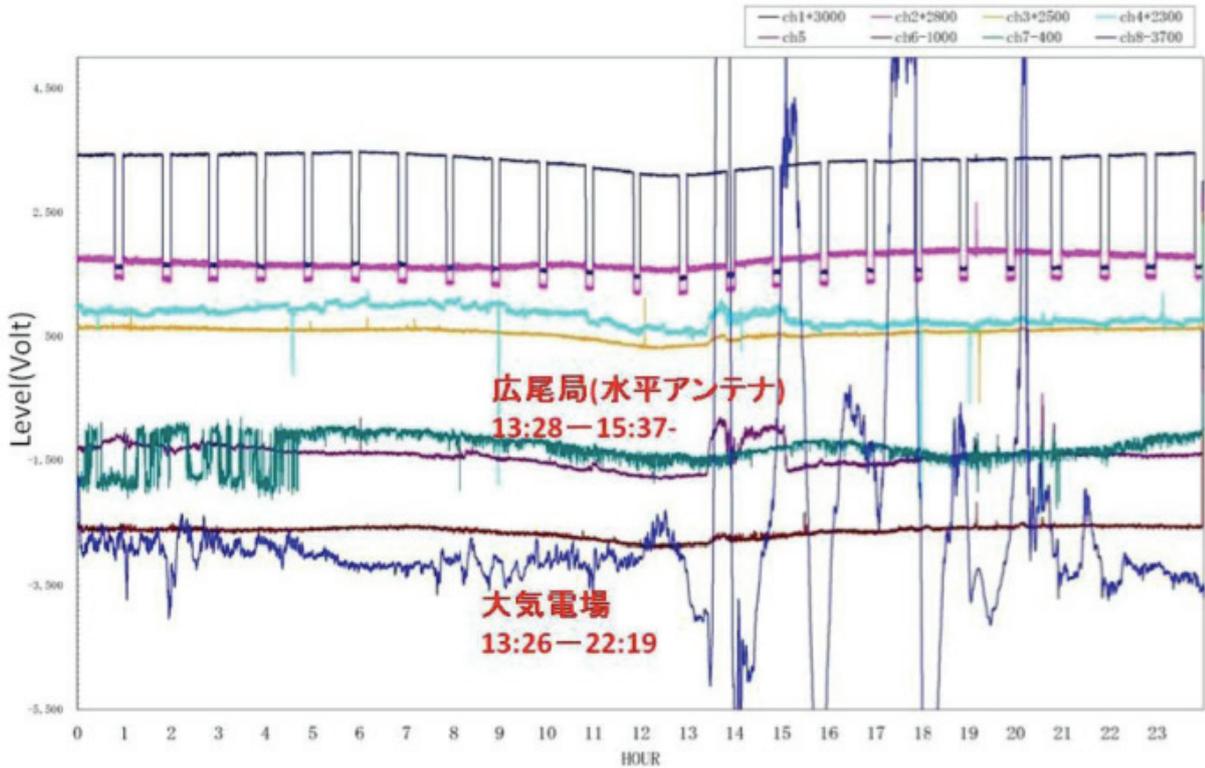


図5. 2009年3月24日のえりも地域冬島観測点での地震エコーと大気電場変動記録(北海道大学[課題番号:1005])。

### 神津島におけるVLF-MT探査結果および地形

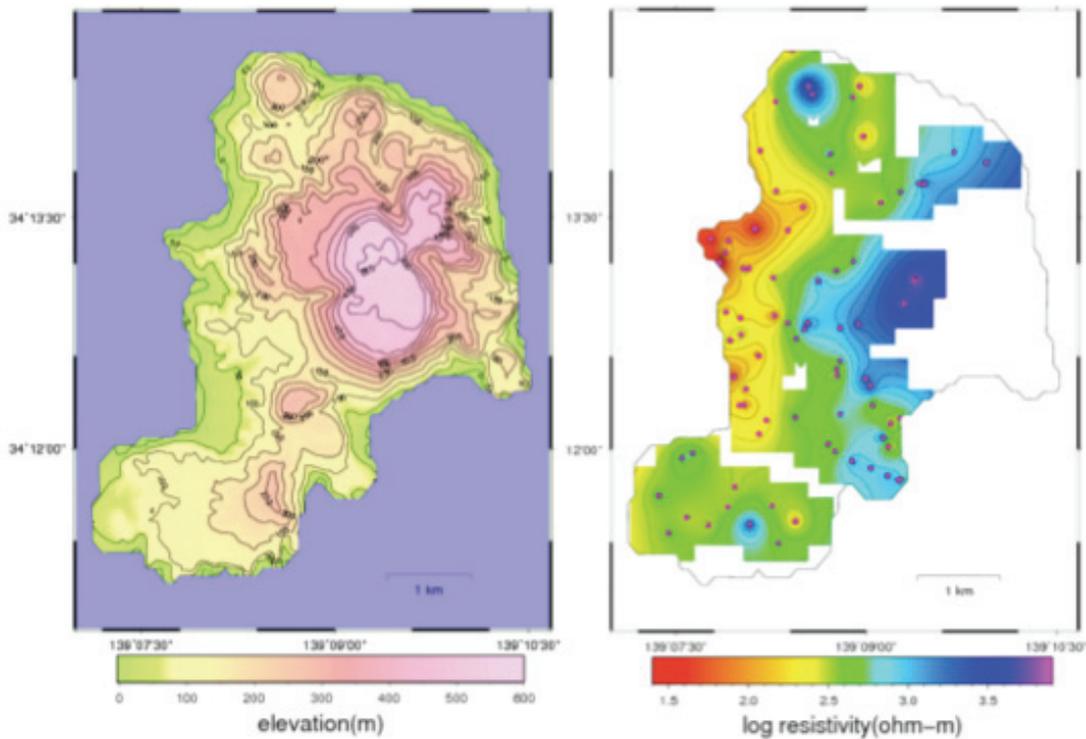


図6. 神津島におけるVLF-MT探査の結果。左図は地形。右図が測定された見掛け比抵抗分布。海岸付近の $10 \Omega \text{m}$ から神津島で最も標高の高い天上山では $10 \text{k} \Omega \text{m}$ に達する値となった(東海大学[課題番号:2501])。

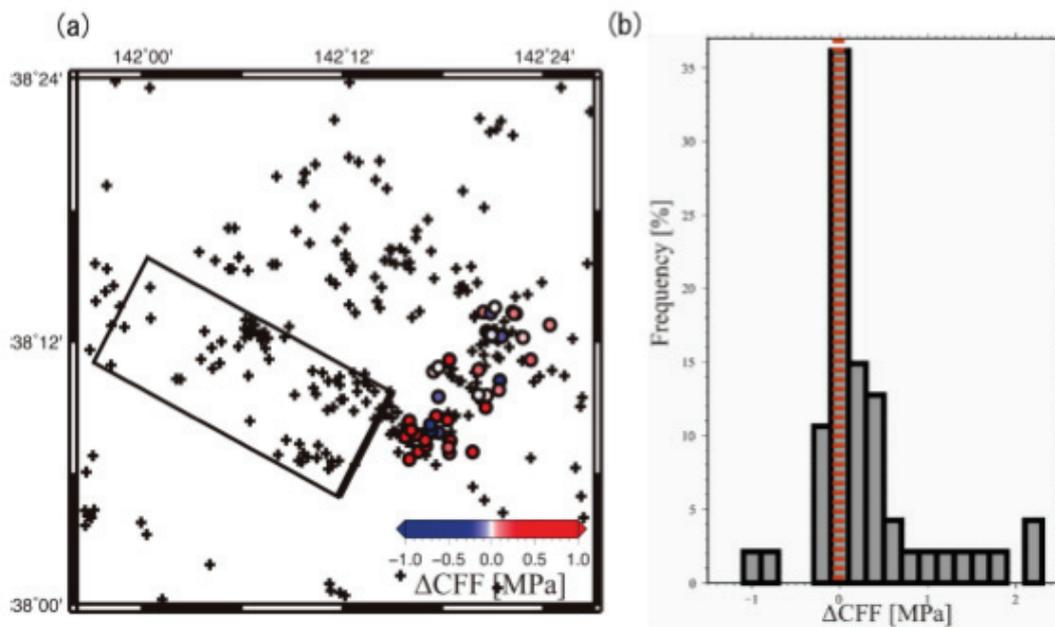


図7. 本震のすべりによる  $\Delta$  CFF 分布。応力変化の影響を受けていると考えられる地震クラスター内の地震において計算された  $\Delta$  CFF を示す。(a)  $\Delta$  CFF の空間分布。ドットで  $\Delta$  CFF の計算を行った地震を、カラースケールでその  $\Delta$  CFF の値を示す。十字は震源が推定された地震を表す。矩形は  $\Delta$  CFF の計算を行う際に仮定した本震断層を示す。(b) 左図中のドットで示された地震における  $\Delta$  CFF の頻度分布。多くの地震は  $\Delta$  CFF が正となる断層で地震が発生しており、本震のすべりによる応力変化の影響を受けたと考えられる(東北大学[課題番号: 1210])。

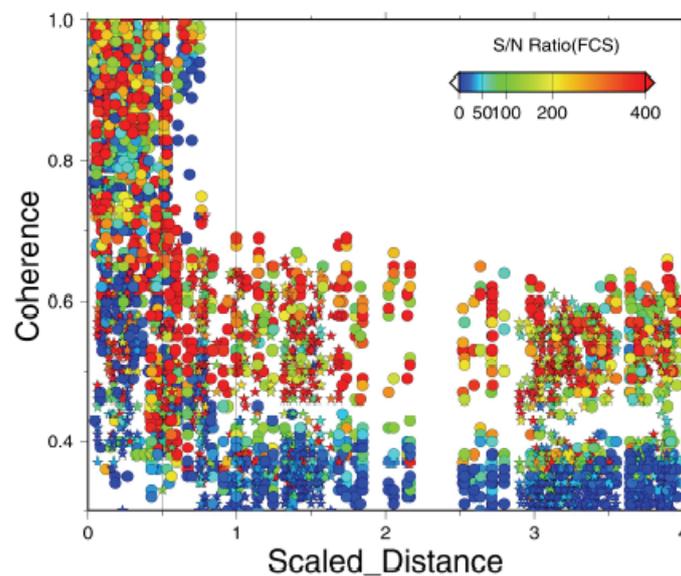


図8. 釜石沖地震クラスターにおける規格化距離（イベント間距離 / 2つのイベントの半径の和、0は完全に重なり、1は2つのイベントが接する）と2つのイベントのうち小さい方の地震のコヒーレンス周波数の1/2~2倍の周波数領域でのコヒーレンスの関係。すべての地震の組み合わせについて、20個の観測点での値をそれぞれシンボルで示す。色はS/N比を示し、星は半径の大きさが2倍以上異なるものを示す。重なる場所が存在する規格化距離が1以下でのみコヒーレンスが高い組み合わせがある(東北大学[課題番号: 1210])。

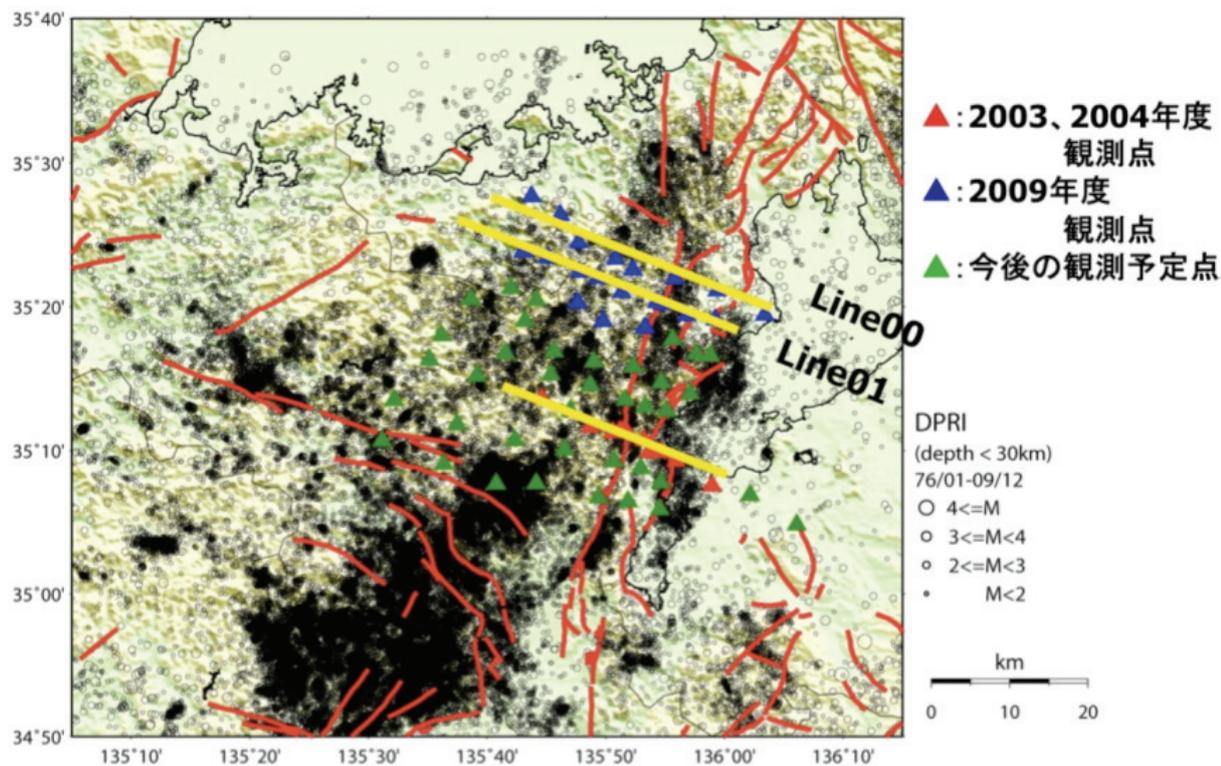


図9. 比抵抗構造探査の観測点(京都大学防災研究所 [課題番号: 1811])。

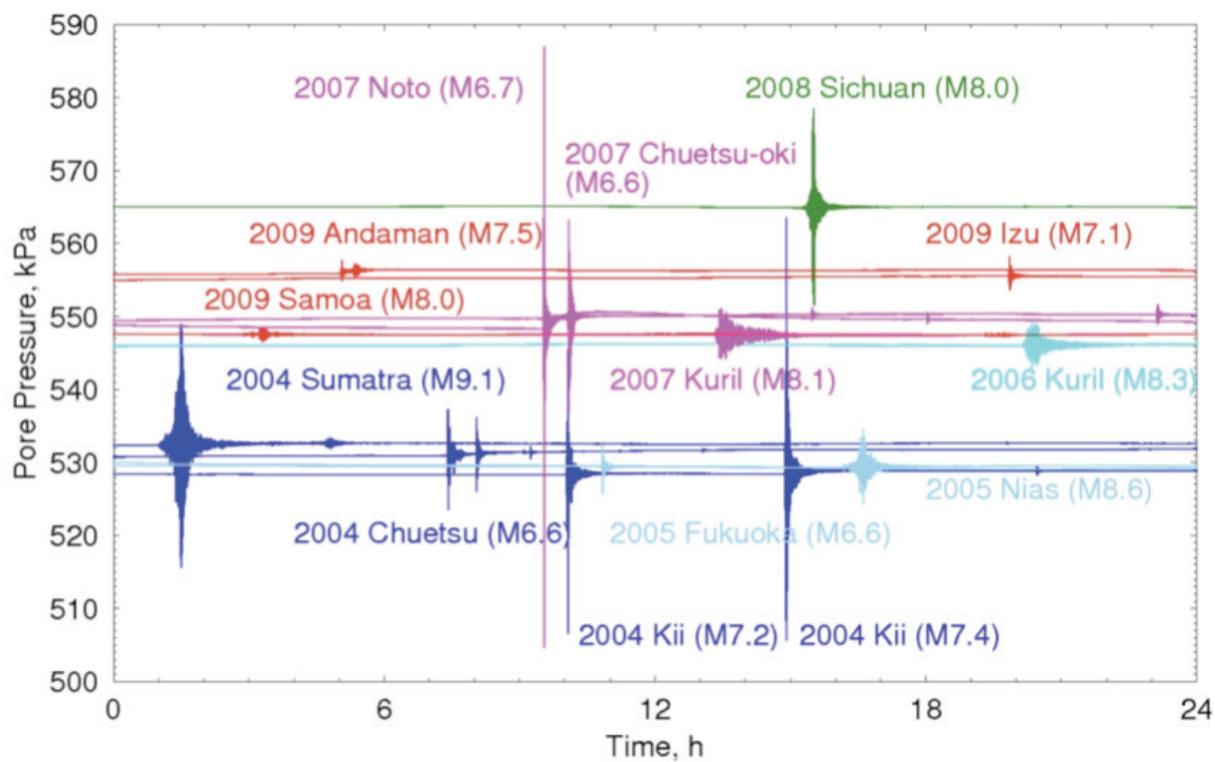


図10. 間隙水圧観測で得られた地震波形(京都大学防災研究所 [課題番号: 1811])。

## 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  
(東京大学地震研究所)

大地震の破壊過程を詳しく調べることによって、断層面上のアスペリティやその周辺の不均質な応力降下の分布が得られる。このような情報を蓄積することにより、大地震発生に先立って震源域における破壊開始点やアスペリティ周辺の応力及び強度に関する特徴を知ることができ、地震発生場の理解と強震動予測の高度化が大きく進むことが期待される。こうして、アスペリティの分布やその破壊の繰り返し及び地震の連動発生条件の理解が進めば、単に地震規模の予測だけでなく、強震動のレベルとそのバラツキの定量的評価が可能になる。このような強震動生成原因に関する知見は、大地震発生による強震動と津波を高精度に予測・評価し、災害軽減に資するための基礎データとなる。これらの知見を実用的な災害情報に昇華させるためには、大地震発生後速やかに震源域の広がり把握し、そして刻々と得られる観測データを取り込んで津波予測をリアルタイムで進める手法開発も求められる。

複雑な震源過程により生まれる強震動と津波の予測、そして観測データの逆解析に基づく震源破壊過程の詳細かつ迅速な推定には、地震波伝播や津波発生伝播に強く影響を与える地盤・地殻・マントル構造と海底地形モデルの整備や、強震動、津波観測点の拡充と観測継続など地道な努力が欠かせない。そして観測データ解析とシミュレーションの協調により両者の高度化を進めていかなければならない。

このような観点から、「地震破壊過程と強震動」部会では、三次元地下構造の考慮や、近地強震記録、遠地実体波波形記録、GPS測地データ、津波波形記録など、複数の地球観測データを用いた逆解析に基づいた震源過程解析の高度化手法を開発し、国内外の地震への適用を進めて有効性の検証を行った。こうして得られたアスペリティの微細構造や、地震のスケール依存性は、断層面の強度や摩擦特性を知るための重大な手がかりとなる。また、微小地震分布やトモグラフィ、反射法構造探査結果等の測定・観測データとの比較によりアスペリティの実体解明と事前推定の可能性が明らかになることも期待される。研究の進捗とともにアスペリティ破壊の規則性のいっぽうで階層構造や複合破壊とその多様性など、従来のアスペリティ仮説の次の段階の課題も見えてきた。こうした仮説の実証のために、高精度の観測データ解析に基づく事例解析が着実に増えてきている。

### (2009年駿河湾の地震の震源破壊過程と津波)

2009年8月11日に発生した駿河湾の地震(M6.5)により、高速道路の法面崩壊や台地での土砂崩れや屋根瓦の被害などが、短周期強震動に起因すると考えられる被害が目立った。このような強震被害とスラブ内地震による短周期地震動の放射との関連を明らかにする目的で詳細な震源過程解析が進められた。

防災科学技術研究所及び東京大学地震研究所では、K-NET、KiK-net、近地強震観測波形データを用いた逆解析から、この地震の南東傾斜と北東傾斜の二枚の断層面とその上の二つのアスペリティが検出された。また、GEONETの1HzサンプリングGPSデータを用いた解析により、静的な断層

滑りのみならず動的な破壊進展の解析にも高サンプリングGPSデータが有効に活用できることが示された（東京大学地震研究所〔課題番号：1422〕、横田・他，2009）。

また、P波波形を用いて断層面の地震波の放射強度分布をマッピングする「ソースイメージング法」の開発と高度化を行って、駿河湾の地震の破壊初期過程の詳しい調査が行われた。その結果、まず南東傾斜の断層面から破壊が開始し、次に北東傾斜の断層面上が破壊を起こして強い強震動が放射されるという一連の地震破壊過程が示された（九州大学〔課題番号：2204〕）。

経験的グリーン関数法を用いた震源解析からは、断層面上の強震動生成域（アスペリティ）のサイズと応力降下量が詳しく求められ、南東傾斜断層面ではそれぞれ13 km<sup>2</sup>と 35.7 MPa、また北東傾斜の断層面ではそれぞれ23 km<sup>2</sup>と 27.5 MPaという値が求められた。この応力降下量は、内陸地殻内地震のものよりはやや大きく、震源が深い一般的なスラブ内地震のものよりは小さかったことが確認された（京都大学防災研究所〔課題番号：1812〕）。

本地震は、深さ20kmで発生した逆断層型の地震であり、これによる地殻変動により駿河湾の海面が全体的に数センチメートル程度上昇すると考えられた。ところが実際には焼津や御前崎観測点では、20～40cmを超える引き波が初動として観測された。このことを説明するために、津波波形記録を用いた震源および津波波源の逆解析が行われ、引き波の原因として検潮所のある陸上で地面の隆起が起きたために、津波の初動が引き波として記録されたという一つの可能性が示された（図1）（北海道大学〔課題番号：1006〕）。しかしながら、この地殻変動モデルと地震波形解析から求められた震源モデルとの対応や、強震動による海底地滑りなど二次的要因により津波が発生した可能性など、津波の発生原因についての継続検討が必要である。

## ア. 断層面の不均質性と動的破壊特性

（震源の繰り返し破壊とその多様性に関する研究）

プレート境界地震の繰り返し発生メカニズムの理解を探るために高精度震源決定法や地震波形インバージョンなどの最新の震源解析手法を用いてアスペリティ領域の高精度マッピングの研究が多数行われた。

まず、岩手県種市沖で発見された二つのM6クラスの繰り返し地震クラスターを対象に繰り返しの規則性と周囲の大地震との相互作用・連動発生の条件について検討が行われた。この地震クラスターの南西側で1944年三陸はるか沖地震（M7.6）の最大余震（M7.2）が発生したが、二つの地震クラスターは影響を受けることなく発生の規則性が崩されることはなかった。その原因が最大余震の破壊進行方向が地震クラスターの逆方向に向かったためである可能性が示された。これより、アスペリティの複合破壊や大地震の連動発生には、震源・アスペリティ間の距離に加えて、破壊伝播方向が重要な鍵を握っておける可能性が示された（東北大学〔課題番号：1211〕）。

いっぽう、茨城県沖では20年に一度の割合でM7クラスの地震が規則的に発生しており、2008年と1982年の発生した二つのM7.0の地震に対して、近地強震波形を用いた経験的グリーン関数法による詳細な震源破壊解析が行なわれた。その結果、二つの地震の強震動生成域は10 km程度以内の精度で重なり、そのサイズやライズタイムそして破壊伝播速度といった震源破壊様式が良く一致し、プレート境界地震の再現性が確認された。一方、応力降下量は1982年の地震は2008年の地震より1.5倍大きいこともわかった（京都大学防災研究所〔課題番号：1812〕）。応力降下量は、短周期地震動と加速度レベルに大きく影響するため、強震動予測の不確定性（バラツキ）を考える上で重要であり、他の地震や地域を含めて解析事例を増やすことが重要である。

(断層面の不均質性と動的破壊特性に関する研究)

地震断層破壊の不均質性とそのスケール依存性の確認は、中小地震の知見に基づいて大地震の破壊過程の予測の可能性を探るための重要課題である。そして、スケール依存性は、断層の摩擦や強度、破壊の素過程を理解するための重要な基礎的資料となる。

本年度は、これまで行った日本および世界の震源解析結果に対してパークフィールド地域の地震解析例を増やすことによりM2～M6地震の地震破壊過程のスケーリングの再評価を行った。その結果、地震破壊過程は自己相似的な破壊成長モデルで説明できること、そして断層の動的破壊の特性は地震の規模によらないことなど、これまでの地震のスケーリング則の仮説を強化することができた(東京大学理学部[課題番号:1503]、井出, 2009) )。

また、震源至近距離の強震観測から震源破壊過程を詳細に捉え、震源破壊の理論と地震波形解析、そして室内実験により得られた仮説を検証する目的で、南アフリカ大深度金鉱山に新たな観測網の整備が行われた。今年度は、地下トンネルでの断層露頭・試掘調査によって大規模な地質断層の位置を把握し、ボアホール式動的応力・変位センサーを断層の主すべり面ごく近傍に配置できるサイトを確認した。(東京大学地震研究所[課題番号:1423]、小笠原・他, 2009) )。

(リアルタイム震源過程解析)

強震観測データがリアルタイム配信されるようになったことから、大地震の発生直後に震源解析を進めることが可能になった。大地震発生後、速やかに強震波形データを取得し、解析から作図まで一括して実行するツールが整備され、2009年駿河湾の地震の震源過程解析において効果を発揮した。また、断層面の広がり拘束するために、Hi-netによる震源情報を自動的に取得し、余震分布図を取り込んで自動的に作成・更新する機能もシステムに追加され、震源過程の自動逆解析を進める上で有益な工夫が検討された(防災科学技術研究所[課題番号:3013]、鈴木・青井, 2010) )。

(震源過程解析の高度化のための地下構造モデルの高度化)

大地震は不均質性の強い地下構造のもとで発生するため、震源過程解析の高度化には、水平不均質構造を考慮したグリーン関数を用いた震源逆解析が不可欠である。

今年度は、2004年新潟県中越地震を例に、周期数秒以下の短周期地震波形モデリングを目指して、全国の地下構造モデルと震源近傍のローカルトモグラフィ解析を結合した統合地下構造モデルを構築し、これを用いて3次元差分法によりグリーン関数を評価して観測波形と比較を行ない、不均質地下構造モデルの検証と改良に向けた数値実験が進められた(図2)(東京大学地震研究所[課題番号:1422]、Tajima et al., 2009))。また、地下構造と断層面の不均質特性をモデリングすることを目的として、反射法地震探査のデータに地震波干渉法を新たに適用して地下構造探査の分解能を高めるための基礎研究が進められた。今年度は、2003年宮城県北部地震の震源域周辺の探査データに対して地震波干渉法を適用し、従来の反射法データ処理により得られた反射断面と比較して手法の確からしさを確認する予備的踏査が行われた(産業総合技術研究所[課題番号:5008]、伊藤・他, 2009) )。

## イ. 強震動・津波の生成過程

(津波予測の高度化・リアルタイム化に向けた研究)

津波の即時予測の高度化に向けて、沖合津波計による津波波源解析の高度化と津波予測手法の各種検討が進められた。時間経過とともに刻々と得られる津波波形を取り込んで、逐次的に波源推定の精度を改善していく新しい津波予測手法の開発が行なわれ、2007年スマトラ巨大地震

(Vengkulu地震; Mw8.5) を対象に有効性の検証が行われた(北海道大学 [課題番号: 1006])。

津波警報のリアルタイム性の向上を目指し、早期に取得可能な陸上のGPS観測データと海底津波計データを統合的に用いて逆解析を繰り返し進める津波波源の統合解析のアルゴリズム開発が進められ、2003年十勝沖地震の観測データを用いた検証が行われた(図3) (東北大学 [課題番号: 1212]、Tsushima et al., 2009)。

また、近地巨大地震による大津波発生と津波予測の高度化に向けて、2009年9月29日に発生したサモア沖巨大地震(M8.1)の津波調査を米領サモアTutuila島の50地点で実施し、Niuatoputapu島での16.9mの津波遡上高など、巨大津波の全貌を明らかにするための基礎資料を収集した(北海道大学 [課題番号: 1006])。

更に、海岸の潮位観測施設と全国港湾海洋波浪観測網(NOWPHAS)の沖合波浪観測施設との両方で津波の記録が得られた観測例を収集し、沖合で観測された津波第一波振幅と最大振幅から海岸のそれぞれの振幅を予測する関係式を導いた(気象庁 [課題番号: 7021]、Hayashi, Y., 2010)。

(沖合津波計記録に基づく震源過程の理解)

沖合に設置された津波計の記録は検潮所記録のように湾や海岸線の地形の影響を受けないため、震源解析を行う目的に適している。そこで、室戸沖に設置された海底ケーブル津波計記録を用いて2004年紀伊半島南東沖の地震の震源過程解析が行われた。この記録を特徴付ける津波の分散波形に着目し、津波の線形分散波モデルに基づきグリーン関数を計算して震源の逆解析を行ない、北西-南東方向を持つ断層面を規定することができた(図4) (東京大学地震研究所 [課題番号: 1424]、Saito et al., 2010)。従来の近地・遠地地震波形による解析では断層の走向・傾斜の決定が困難であったこともあり、地震と津波波形を用いた統合解析の有効性が示された。

(強震動予測のための地下構造モデルの構築)

震源解析の高度化に不可欠となる、3次元不均質地下構造のグリーン関数の評価と、大地震の強震動予測に必要な地下構造モデルの評価と、構造推定手法の開発が進められた。

たとえば、F-net広帯域地震計連続記録を用いた地震波干渉法により2観測点間のグリーン関数を求める手法を開発し、西南日本の地殻と地盤モデルを修正が進められた(京都大学防災研究所 [課題番号: 1813]、山下・他, 2009)。また、大地震時の強い加速度により表層地盤が非線形挙動を示して卓越周波数の変化や増幅率の低下が起きることを考慮して、2007年新潟県中越地震や2008年岩手・宮城内陸地震による震源近傍の強震波形を用いて地盤の非線形応答特性に関する基礎データの収集が進められた(京都大学防災研究所 [課題番号: 1813]、木村・他, 2009)。

周期1秒以下の短周期地震動の伝播と散乱に強く影響を与える、波長が数十~数百メートル以下の短波長不均質構造を、地震観測データから推定する試みが行われた。今年度は、散乱によりP波エネルギーの一部がTransverse成分に染み出す影響に着目し、Hi-netの地震記録を用いた解析と地震波伝播のコンピュータシミュレーションによるモデルの検証が行われた(東京大学地震研究所 [課題番号: 1424])。

(強震動と津波の大規模並列計算)

不均質な地下構造における地震波伝播と複雑な海底構造の影響を受ける津波の高精度評価と、震源過程解析のためのグリーン関数の高精度計算には、近年のスーパーコンピュータを用いた大規模並列シミュレーションが欠かせない。

今年度、地球シミュレータが新機種に更新され、CPUの内部構造やデータ通信方式シが変更されたことに伴い、従来の地震動シミュレーションコードの最適化と大規模並列計算のベンチマークテストを実施した。新型シミュレータの性能を引き出すためのメモリアクセスや通信方式の変更を行なったことにより、従来の地球シミュレータに比べ7倍の性能を引き出すことができた(図5)(東京大学地震研究所[課題番号:1424])。また、従来の強震動シミュレーションでは、計算の安定化と簡便化のために海水層をモデルから除外することが多いが、複雑な海底地形と海水を組み込んでも安定な新しい差分法コードの開発も進められた(九州大学[課題番号:2205]、Takenaka et al., 2009)。

## 課題と展望

「地震破壊過程と強震動」研究計画の最終目標は、大地震の破壊過程を詳しく理解し、アスペリティ破壊の繰り返し性と連動発生条件を知り、将来の大地震の発生様式と強震動、そして津波を正確に予測することである。

この目標に向けて、近年および過去に発生した大地震の震源過程を地震、津波、及び地殻変動データを駆使して逆解析により詳しく評価する解析事例の積み重ねが着実に進行中である。今後、過去の地震についても、二重時間差トモグラフィ法等の最新の震源決定技術や、3次元不均質構造に対応したグリーン関数を用いた震源モデルの逆解析法を利用した再解釈を進める必要もあろう。釜石沖の地震や種市沖の相似地震、そして茨城県沖で繰り返し発生するM7地震を対象とした詳しい震源解析により、アスペリティ破壊の規則性や、他の地震の影響を受けない自律的な地震繰り返し性が確認された一方で、同様のアスペリティが破壊しても応力降下量は1.5倍程度異なるという地震パラメータの多様性も浮き彫りとなった。このことは強震動予測の不確定性とバラツキを考える上で重要な示唆であり、今後他の地域を含めて震源解析事例を増やすことが急務である。

近年の観測技術とデータ通信技術の進歩により、震源過程解析手法も大きく変わろうとしている。まず、海底ケーブルを用いた沖合津波計の設置により、湾や海底地形の影響を受けない生の津波記録が得られるようになった。これはサイト増幅の小さい岩盤観測点に設置された広帯域強震計のようなものであり、津波記録から震源過程を理解し、そして沿岸の津波予測を行う上で重要な武器となる。津波波形記録と近地強震記録を併合処理することにより、震源過程解析の精度の強化も期待される。また、海底ケーブル津波計と陸のGPS観測データ、強震計データを併合したリアルタイム津波予測のアルゴリズム開発への期待は大きい。強震観測データもリアルタイムで入手できるようになった現在では、大地震発生の直後に自動的に震源破壊過程の逆解析を進めるシステムの実用化も近い。

2009年8月11日に発生した駿河湾の地震(M6.5)は、東海地震の想定震源域で発生したスラブ内地震であった。短周期地震動の強い放射が原因と考えられる土砂災害や住宅被害のほか、最大数十センチメートルの津波が発生したことを受けて、震源過程の詳細な解析と津波発生メカニズ

ムの検討が行われた。将来の想定東海地震に向けて、本地震観測データを生かした強震動と津波の生成プロセスの検証は次年度以降も継続して進める必要がある。これまでは、プレート境界で発生する巨大地震を主な研究対象としてきたが、スラブ内地震は規模が小さくとも都市直下で発生することや、高い応力降下量により短周期地震動が強く励起する可能性が高いことから、スラブ内地震についても震源過程解析を詳しく進め、事例を集めてアスペリティの存在と破壊の繰り返し性やプレート境界型地震との関連性について検討を進める必要がある。

このほか、強震動予測の面では特に、周期1～2秒以下の短周期地震動の高精度評価のために、日本列島の地下構造モデルとローカルトモグラフィの解析結果を融合した不均質地下構造モデルや、地震波散乱解析に基づき推定した短波長不均質構造を地盤・地殻・マントル構造に付加した広帯域地震動シミュレーションを今後一層進める必要がある。短周期地震動は震源近傍の大加速度を作り出し、またプレートに沿って遠地まで良く伝わり異常震域を作り出すなど特異な波動伝播を示す。地球シミュレータや次世代スパコン等の高速計算機の性能は着実に進展しており、震源破壊過程の詳しい理解と不均質地下構造モデルの整備、そして大規模シミュレーションの実現により短周期から長周期地震動を含めた広帯域の強震動予測の実用化は遠い未来ではない。強震及び津波観測と解析、そしてシミュレーションは表裏一体の関係にあり、これらの協調研究を今後も進展させることが重要である。

## 参考文献

- Furumura, T. and T. Saito, 2009, An integrated simulation of ground motion and tsunami for the 1944 Tonankai earthquake using high-performance super computers, *Journal of Disaster Research*, 4, 2, 118-126.
- Hayashi, Y., 2010, Empirical relationship of tsunami height between offshore and coastal stations, *Earth, Planets and Space*, 62, 269-275.
- Hirata, K., 2009, Tsunami amplification along the eastern coast of India and Sri Lanka due to propagating tsunami sources, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 3, 67-75.
- Hirata, K., K. Satake, Y. Tanioka, and Y. Hasegawa, 2009, Variable tsunami sources and seismic gap in the southernmost Kuril Trench : review, *Pure and Applied Geophysics*, 166, 77-96.
- 井出哲, 2009, 地震発生過程のスケール依存性, *地震*, 61, S329-338.
- Imai, K., K. Satake, and T. Furumura, 2010, Amplification of tsunami heights by delayed rupture of great earthquakes along the Nankai trough, *Earth Planets Space*, 62, 427-432.
- 伊藤忍, 山口和雄, 横倉隆伸, 加野直巳, 大滝壽樹, 住田達哉, 2009, 2003年宮城県北部の地震の震源域北西部における反射法地震探査, 平成20年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 地質調査総合センター, 63-70.
- 小笠原宏, 川方裕則, 石井紘, 中谷正生, 矢部康男, 飯尾能久, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 2009, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験ー至近距離観測による地震発生過程の解明に向けてー, *地震*, 61, S563-S573.
- 木村美帆・浅野公之・岩田知孝, 2009, 鉛直地震計アレイデータを用いた強震動と弱震動の地盤震動特性の比較-柏崎刈羽原子力発電所構内における2007年新潟県中越沖地震とその前後の地震の記録を対象として-, *地震*, 62, 61-65.

- Namegaya, Y., Y. Tanioka, K. Abe, K. Satake, K. Hirata, M. Okada, and A. R. Gusman, 2009, In situ measurements of tide gauge response along the southwestern coast of the northern Honshu, Japan - Corrections of tsunami waveforms of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki earthquake tsunami -, *Pure and Applied Geophysics*, 66, 97-116.
- Saito, T. and T. Furumura, 2009, Three-dimensional simulation of tsunami generation and propagation: application to intraplate events, *J. Geophys. Res.*, 114, B02407, doi:10.1029/2007JB005523.
- Saito, T. and T. Furumura, 2009, Scattering of linear long-wave tsunamis due to randomly fluctuating sea-bottom topography: coda excitation and scattering attenuation, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04206.x.
- Saito, S., K. Satake, and T. Furumura, 2010, Tsunami waveform inversion including dispersive waves: the 2004 off Kii Peninsula earthquake, *J. Geophys. Res.*, 115, B06303, doi:10.1029/2009JB006884.
- 鈴木亘・青井真, 2010, 2009年8月11日駿河湾の地震: 近地強震記録による震源過程, *地震予知連絡学会報*, 83.
- Suzuki, W., S. Aoi, and H. Sekiguchi, 2010, Rupture Process of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake Derived from Near-Source Strong-Motion Records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 256-266.
- Tajima, R., K. Koketsu, F. C. Tajima, K. Hikima, and H. Miyake, 2009, 3-D velocity structure in and around the source area of the 2004 mid Niigata, Japan, earthquake: Improvement using seismic waveform modeling, *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S43D-06.
- Takemura, S., T. Furumura, and T. Saito, 2009, Distortion of the apparent radiation pattern in the High-frequency wavefield: Tottori-ken Seibu, Japan, Earthquake of 2000. *Geophys. J. Int.*, 178, 950-961.
- Takenaka, H., T. Nakamura, T. Okamoto, and Y. Kaneda, 2009, A unified approach implementing land and ocean-bottom topographies in the staggered-grid finite-difference method for seismic wave modeling, *Proceedings of the 9th SEGJ International Symposium*, CDROM Paper No. 37 (4 pages).
- Tsushima, H., R. Hino, H. Fujimoto, Y. Tanioka, and F. Imamura, 2009, Near-field tsunami forecasting from cabled ocean bottom pressure data, *J. Geophys. Res.*, 114, B06309, doi:10.1029/2008JB005988.
- Uchida, N., S. Yui, S. Miura, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, Y. Motoya, and M. Kasahara, 2009, Quasistatic slip on the plate boundary associated with the 2003 M8.0 Tokachi-oki and 2004 M7.1 off-Kushiro earthquakes, Japan, *Gondwana Research*, 16, 527-533, doi:10.1016/j.gr.2009.04.002.
- Yabe, Y., J. Phillip, M. Nakatani, G. Morema, M. Naoi, H. Kawakata, T. Igarashi, G. Dresen, H. Ogasawara, and JAGUARS, 2009, Observation of numerous aftershocks of an Mw 1.9 earthquake with and AE network installed in a deep gold mine in South Africa, *Earth Planets Space*, 61, e49-e52.

- 山下佳穂里・浅野公之・岩田知孝, 2009, F-net 広帯域地震観測網連続記録を用いた地震波干渉法による西南日本の地殻速度構造の推定(1), 日本地震学会2009年秋季大会, P1-37.
- 横田裕輔・瀧澤一起・三宅弘恵・塚越大・石瀬素子・坂上実, 2009, 駿河湾の地震の強震動と震源過程, 日本地震学会講演予稿集2009年秋季大会, A11-08.
- Yokota, Y., K. Koketsu, K. Hikima, and S. Miyazaki, 2009, Ability of 1-Hz GPS data to infer the source process of a medium-sized earthquake: The case of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L12301, doi:10.1029/2009GL037799.

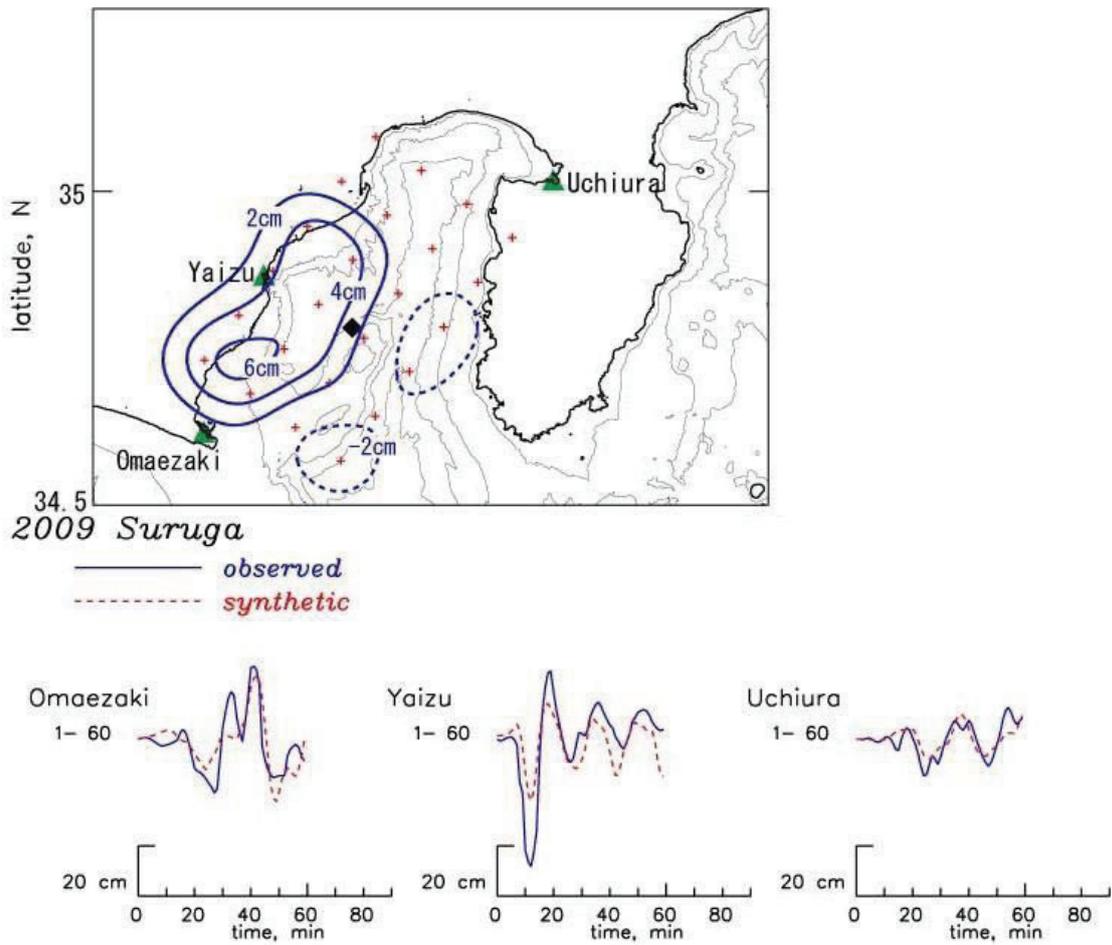
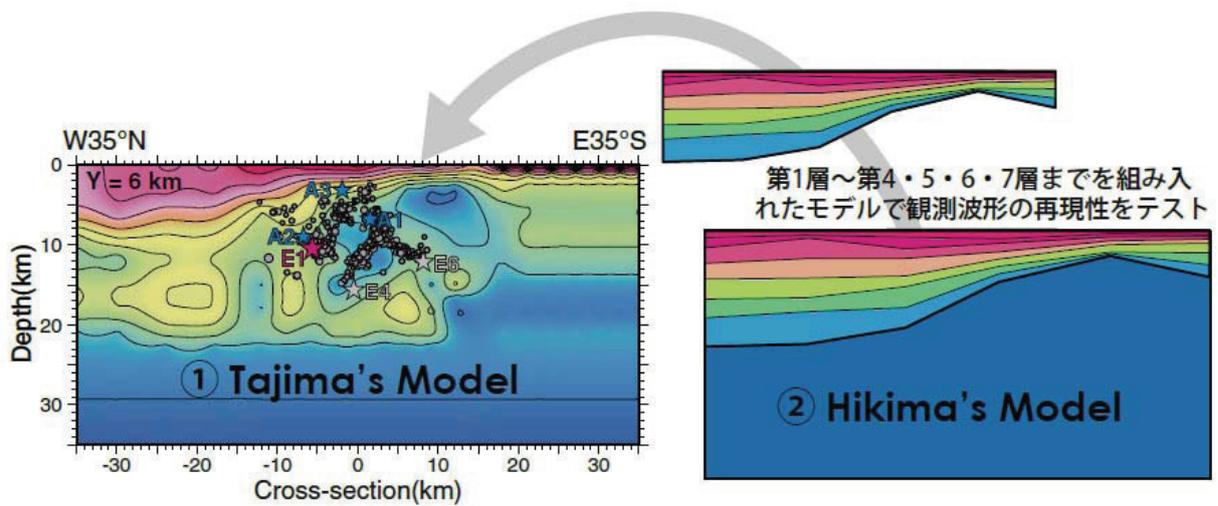


図1. (上) 2009年駿河湾の地震の津波波形解析から推定された海面変動、(下) 観測津波波形(青)と計算津波波形(赤)の比較(北海道大学[課題番号:1006])。



### NIG019 ( $\Delta=10\text{km}$ ; Transverse)

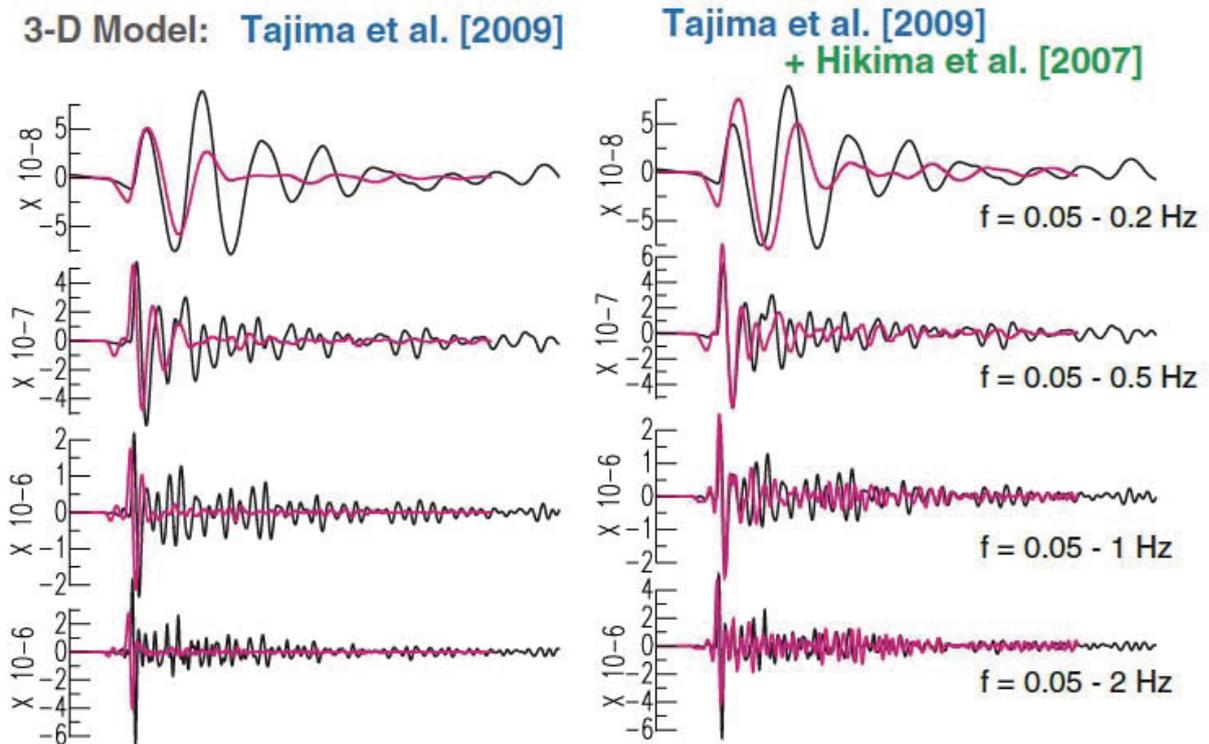


図2. 3次元地下構造モデルの高度化

Tajima et al. (2009) のトモグラフィモデルに基づく不均質構造に、表層地盤の3次元層構造を組み合わせた統合モデルの概念図(上)と、統合地下構造モデルによる波形シミュレーション(下)。新潟県中越地震の余震に対するK-NET観測点NIG019(震央距離10 km)の観測速度波形(黒線)と合成速度波形(桃色線)の比較(東京大学地震研究所[課題番号:1422]、Tajima et al., 2009)。

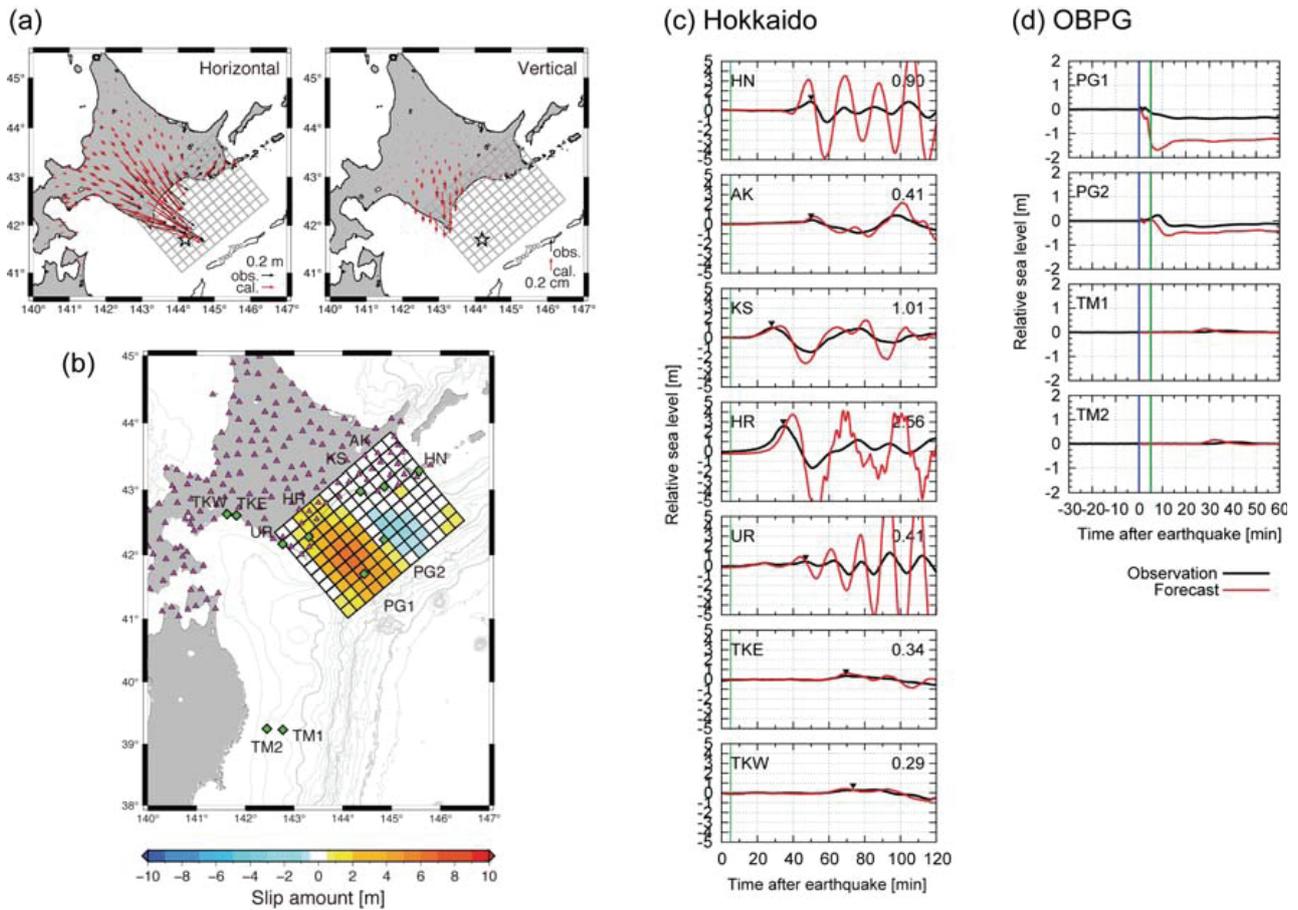


図3. 陸上GPS 観測データを用いた2003年十勝沖地震津波に対する津波予測の結果  
 (a) 陸上GPS 観測点における観測変位ベクトル(黒矢印)と計算変位ベクトル(赤矢印)の比較。白星印は震央、白四角は相対変位ベクトルの基準観測点を示す。(b) 逆解析によって推定された地震時すべり分布。紫三角は逆解析で用いたGPS 観測点、緑ひし形は津波観測点をそれぞれ示す。(c) (d) 逆解析で推定されたすべり分布から計算された津波波形(赤線)と観測津波波形(黒線)の比較。(c) 北海道の太平洋沿岸の津波観測点、(d) 海底水圧計においての比較(東北大学[課題番号:1212]、Tsushima et al., 2009)。

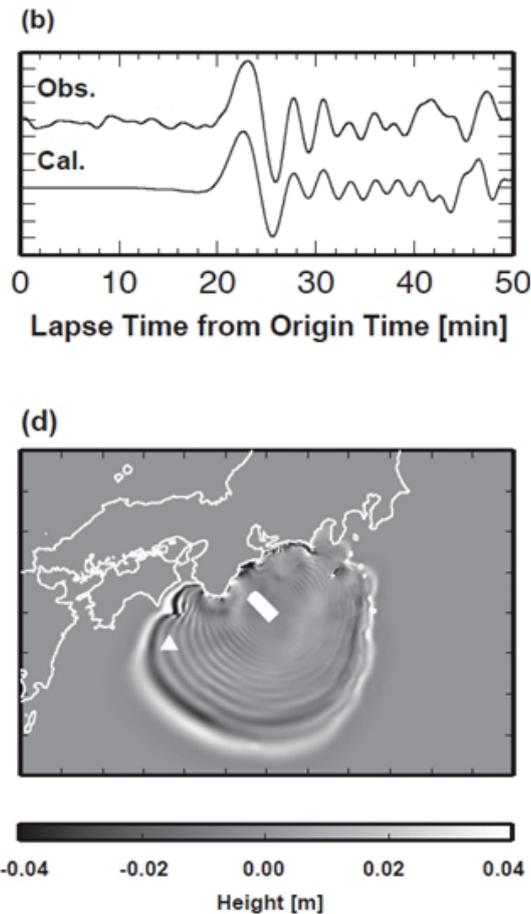


図4. 2004年紀伊半島南東沖の地震の波源解析

海底ケーブル津波計記録の逆解析により求めた波源モデル（図下、白い長方形）と、海底ケーブル津波計記録の例（図下、白三角印）と非線形長波方程式に基づく津波シミュレーションの計算波形の一致度の比較。津波の初動だけでなく、後続する津波の分散波を含めて正しく再現されることがわかる（東京大学地震研究所 [課題番号:1424]、Saito et al., 2010）。

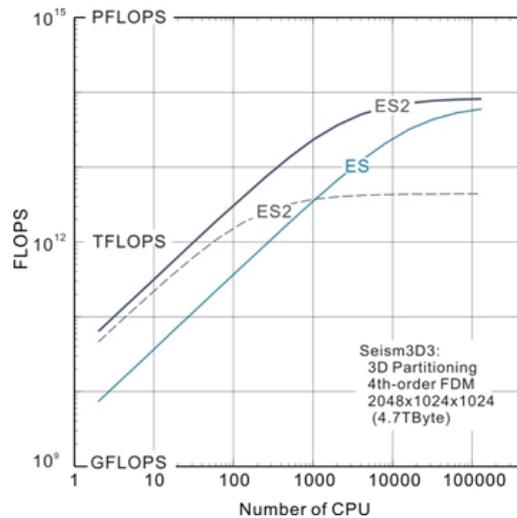


図5. 地球シミュレータによる大規模並列地震波伝播シミュレーションの性能テスト

新型地球シミュレータ(ES2)と地球シミュレータ(ES)を用いた地震動計算コード(Seism3D3)の並列計算性能(FLOPS)の測定。実線はES2とESでのチューニングコードの並列計算性能の比較。点線はES2のチューニング前の性能を表す(東京大学地震研究所 [課題番号:1424])。

## 2 (3) (3-3) 火山噴火過程

「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、噴火の推移と多様性を理解するために、噴火環境を支配する火山体浅部の熱水系や火道周辺構造を調べる。また、いくつかの火山を対象に、過去の噴火履歴に基づき、噴火の規模・様式などの発生頻度や推移を整理する。

### ア. 噴火機構の解明とモデル化

諏訪之瀬島火山は小規模なブルカノ式噴火や火山灰噴出を頻繁に引き起こす。これらの小爆発や火山灰噴出と地下のマグマ上昇過程の関係を明らかにするため、火口から1 km以内の距離に掘削した、深さ約4 mの3孔井に高精度傾斜計を設置し、平成21年9月末より観測を開始した。これらの傾斜計のデータと京大防災研の既存地震観測のデータから、小爆発の約1分前から、灰噴出に伴う微動の停止にあわせて山体が膨脹することを明らかにした。この膨脹に伴う傾斜量は火口から約350、750、1000mの地点においてそれぞれ12、8、数nano radianであった。また、中・長期的な、より広域の山体変動を捉えるために同時に設置したGPSのデータ、および、InSARデータの解析結果は、観測開始から約半年を過ぎても顕著な地殻変動を示しておらず、この間の諏訪之瀬島の噴火活動が開口型火道で発生していたことを明らかにした(東北大学 [課題番号: 1213])。

浅間山では特異な波形的特徴をもつ長周期パルス (VLP) が観測された。このVLPの活動と噴火様式との違いを調べる目的で、火口近傍に広帯域地震計を14台設置した。得られた地震データを用いて、傾斜変化も考慮したグリーン関数でモーメント・テンソル・インバージョン解析を行った。また、2点によるミュオン観測で火山体上部の密度測定を行った。その結果、VLPは深さ100~200mにおいて、急激な発泡(火山ガスの発生)によって火道浅部の割れ目や通路が膨脹し、それに続いて火山ガスが空隙率の高い媒質中を通過して収縮したものと推定された(図1)(東京大学 [課題番号: 1425])。また、新たに開発した、可搬型の噴煙中の二酸化硫黄可視化装置を用いた測定では、VLP発生の数十秒後に火山ガス(二酸化硫黄)が噴出し、その放出量と先行するVLPの規模とが正の相関関係にあることを明らかにした(東京大学 [課題番号: 1504])。

これらの2火山における研究成果は、火口近傍に傾斜計や広帯域地震計を適切に設置すれば、規模の小さな噴火や火山ガス噴出の先行現象を捉えられることを示している。さらに浅間山では膨脹と火山ガスの噴出量に正の相関があることが認められており、先行する膨脹現象と噴火現象を定量化することにより、噴火規模や爆発性を予測する上で重要な経験則が得られる可能性がある。

以上のほか、桜島や諏訪之瀬島では、爆発的噴火が発生する約1秒前に火口底の隆起によって

励起される空気振動を見つけ、噴火の映像記録や地震記録の解析結果と合わせて解読した結果、火口底下での膨張現象が火口底の隆起を誘引したことを明らかにした（東北大学〔課題番号：1213〕）。浅間山では、記録された空振と地震の相互相関をとることにより、これまで難しかった微噴火活動を検知することに成功した（東京大学〔課題番号：1425〕）。脱ガス過程のモデル化を図るため、改良した携帯型マルチセンサーシステム（Multi-GAS）を用いて、雌阿寒岳・口永良部島・吾妻山で噴煙観測及び噴気採取分析を行い、火山ガス組成の分布や時間変動を検討した。三宅島では2000年8月噴火の玄武岩質マグマのメルト包有物中の水・二酸化炭素濃度比と火山ガスのその濃度比から、現在多量に放出されている火山ガスは未分化の玄武岩質マグマから供給されていることを明らかにした（産業技術総合研究所〔課題番号：5009〕）。噴火直前に先行して起きる地殻浅部のマグマ上昇過程を理解するために、3次元応力場や物性値がマグマ貫入現象へ与える影響を、個別要素法を用いた数値計算で検討を行った（防災科学技術研究所〔課題番号：3014〕）。

### イ. 噴火の推移と多様性の把握

水蒸気・マグマ-水蒸気爆発の発生環境を明らかにするために、有珠山周辺の地層および水環境を既存資料や温泉井のデータを検討した。特に、昭和新山南東麓の火山観測井の資料（図2）から、以下の興味深い知見を得た。この地域では、海面下約120m深に新第三系の地層が現れ、その上には帯水層となっている柳原層が約50m深まで分布している。さらにその上から地表付近までは高空隙率・難透水性の溶結凝灰岩が分布する。1943～1945年の噴火活動は泥流を伴う水蒸気爆発に始まり、引き続いて火砕流・火砕サージを伴うマグマ水蒸気爆発が発生した。今回明らかになった孔井地質を考慮すると、帯水層をマグマが上昇する際に水蒸気爆発が発生し、その後、不透水層である溶結凝灰岩層に達した頃からマグマ水蒸気爆発が発生したと推察できる（図2）。有珠山では、そのほかにも、2000年新山において実施した噴気観測から放熱量が2005年以降一定の割合で減少していることや、水準測量から新山の比高変化の沈降率の空間分布を明らかにした（北海道大学〔課題研究：1007〕）。

噴火シナリオの確率的検討をするために、国内の代表的な活火山において過去の火山活動の推移や噴火履歴を精査することが必要である。本年度は、2000年にカルデラ形成を伴う噴火を約2500年ぶりに引き起こした三宅島火山を対象とし、噴火前後の地震の発生時間、噴火継続時間などをもとに次の噴火事象が発生するまでのタイムスケールや継続時間をまとめ、噴出年代と噴出量積算の階段図を作成した（図3）。約2500年前の噴火で形成されたカルデラはその後約1300年間で埋め立てられたことを考慮すると、今後は一噴火あたりの噴出量が多いか、より短い時間間隔で噴火が発生する可能性が高いと推察した（東京大学〔課題番号：1426〕）。

### 課題と展望

多様な火山噴火を予測するためには、多数のデータをもとに、マグマが上昇する経路の媒質特性や噴火に先行する現象と、噴火規模や様式の関係を定量的、統計的に記述することが必要である。本年度の観測により、諏訪之瀬島や浅間山において規模の小さな噴火や火山ガス噴出でも山体膨張現象を検知することができた。観測を今後も継続し規模のより大きな噴火のデータを取得するとともに、桜島などで頻発している爆発的噴火のデータとも比較することにより、噴火規模や様式によるマグマ上昇過程の違いを調べるのが重要であろう。また、諏訪之瀬島火山の小爆

発直前に同期して発現する微動停止と山体膨脹は、桜島火山における爆発直前の山体膨脹の加速や二酸化硫黄量の減少、赤熱現象の低温化など（東北大学〔課題番号：1213〕）と類似している。今後も継続して山体変形、微動、空振や火山ガス噴出、映像などの多項目観測を実施し、次年度以降、これらの個々の火山について、得られた多量のデータを噴火の規模や様式ごとに整理し、噴火機構を支配する要因を調べていくことが必要である。その際、これらの火山で類似の先行現象が発現しているので比較研究を精力的に進めることが必要である。

火山爆発機構の共通的な特徴および相違点を把握することにより、より一般的なモデル化を図ることができる。その際、火山噴火素過程研究計画推進部会と連携し、マグマの物性や上昇・貫入過程の物理化学的な理解をもとに予測手法を構築する必要がある。

有珠山で指摘された1944～1945年にかけておきた水蒸気爆発からマグマ-水蒸気爆発への推移と、帯水層と不透水層の位置関係は示唆に富む。次年度以降進められる2000年新山の浅部構造探査と熱水系の活動把握（北海道大学〔課題番号：1007〕）、伊豆大島で行われている自然電位測定による熱水系活動の把握などをもとに、火山体浅部構造と噴火様式と推移の関係を明らかにすることが必要である。これらの研究は開始されたばかりなので、解析する火山や噴火事象に限りがある。従って、帯水層・不透水層などの空間分布、あるいは、熱水系の時間変化に対して、それぞれ予見される噴火様式や推移との関係を、マグマ貫入や火山ガス供給に対する応答の熱水系シミュレーション（産業総合技術研究所〔課題番号：5009〕）などをもとにした知見と比較することが重要である。

中長期的な噴火の規模や推移の予測は、過去の噴火履歴や地質情報を整理した上で系統的な特徴を見出すことが必要である。浅部構造探査に基づく観測研究の場合と同じく、本研究計画中に解析できる火山には限りがある。三宅島の解析例があることから、まずは玄武岩火山を対象にすることが妥当であろう。また、噴火分岐の観点から規則性をまとめる際には、マグマ貫入のシミュレーション（防災科学技術研究所〔課題研究：3014〕）との連携が求められる。

## 参考文献

- Aoyama, H., Onizawa, S., Kobayashi, T., Tameguri, T., Hashimoto, T., Oshima, T., and Mori, H., 2009, Inter-eruptive volcanism at Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 203-217, 2009.
- Maeda, Y., 2010, Very-Long-Period pulses at Asama Volcano inferred from dense seismic observation, Ph.D Thesis, pp. 64, University of Tokyo, March 26, 2010.
- Mori, T. and Burton, M. 2009, Quantification of the gas mass emitted during single explosions on Stromboli with the SO<sub>2</sub> imaging camera, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 188, 395-400.
- Nishimura, T., Volcano deformation caused by magma ascent in an open conduit, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 178-192, 2009.
- Nakamichi, H., Kumagai, H., Nakano, M., Okubo, M., Kimata, F., Ito, Y. and Obara, K. 2009, Source mechanism of a very-long-period event at Mt Ontake, central Japan: Response of a hydrothermal system to magma intrusion beneath the summit. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 167-177, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.09.006.
- Onizawa, S., Matsushima, N., Ishido, T., Hase, H., Takakura, S. and Nishi, Y. 2009, Self-potential distribution on active volcano controlled by three-dimensional resistivity structure in Izu-Oshima, Japan, *Geophys. J. Int.*,

178, 1164-1181.

Yokoo, A. and Iguchi, M. 2010, Swelling of crater bottom as a part of eruption processes at Suwanosejima volcano, Japan: Using an alternative signal of infrasound wave recorded on eruption movie, submitted to J. Volcanol. Geotherm. Res., in press.

Yokoo, A., Tameguri, T. and Iguchi, M. 2009, Swelling of a lava plug associated with a Vulcanian eruption at Sakurajima volcano, Japan, as revealed by infrasound record: case study of the eruption on January 2, 2007, Bull. Volcanol., 71, 619-630, doi 10.1007/s00445-008-0247-5, 2009.

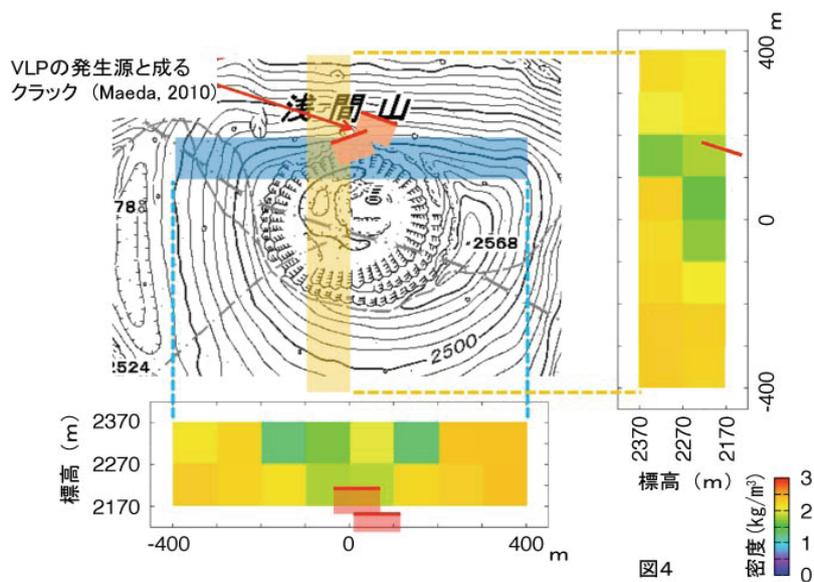


図1. 浅間山山麓2カ所に設置したミュオン観測点のデータから推定された火道浅部の密度分布と、VLP発生源と考えられるクラックの位置を示した図。低密度領域が火口直下の北よりに位置する。VLPは低密度領域の中で発生しており、その上部にも低密度領域が広がっている。（東京大学 [課題番号：1425]）

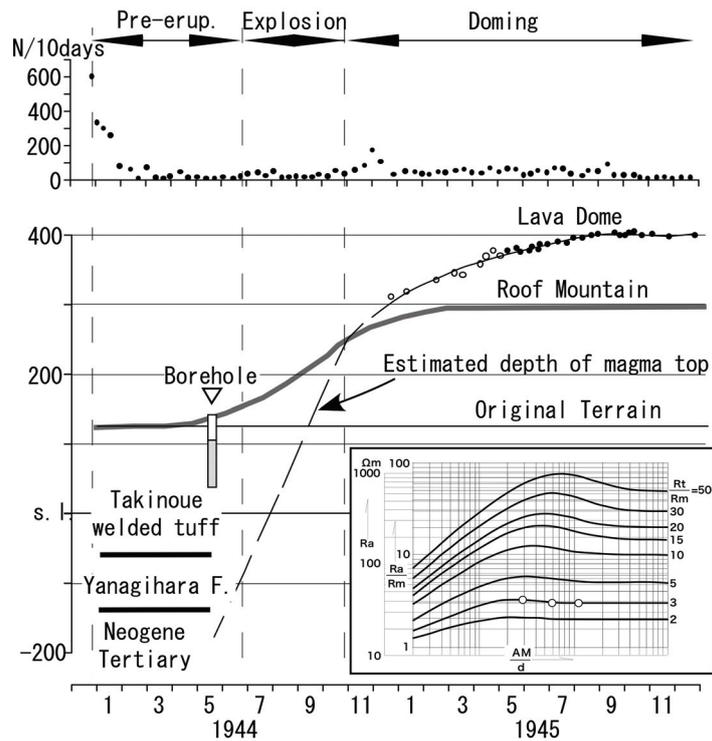


図2. 1943～1945 年の噴火活動における水蒸気爆発の発生深度および推定される地質と観測井の孔井地質との比較。縦軸は深さを表す。孔井下部の灰色部分は凝灰岩角礫岩であることを示す。右下の枠内の図は、この観測井で得られたノーマル電極配置による電気検層で得られた見かけ比抵抗と偏差曲線との照合結果。横軸は電極間隔(AM) と掘削孔径(d) の比、グラフの縦軸は見かけ比抵抗。この照合結果から泥水比抵抗は11 Ω m 程度と推定される。(北海道大学 [課題研究 : 1007] )

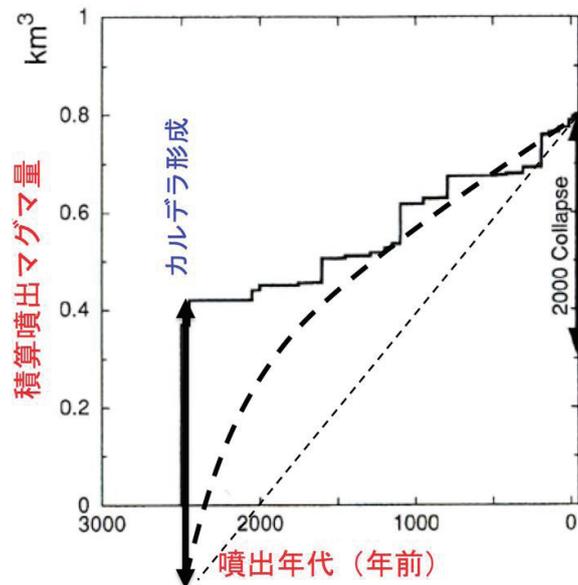


図3. 三宅島火山における2500 年前以降の階段ダイアグラム。2500年前にできた八丁平カルデラの陥没量が2000 年に形成された雄山カルデラと同じ体積であると仮定し、それが9 世紀までにはほぼ埋め尽くされたことを考慮すると、八丁平カルデラ形成後は噴出率が大きい(太破線)。津久井・他(2001) に加筆。(東京大学 [課題番号 : 1426] )

## 2 (4) 地震発生・火山噴火の素過程

「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)

「地震発生・火山噴火の素過程」計画推進部会委員 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・摩擦構成則の物理を理解するための実験的・理論的研究を行った。地震波速度や減衰(Q値)、比抵抗等の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。火山噴火過程の多様性を支配する要因を明らかにし、噴火の推移を正確に予測することを目指した実験的・理論的研究を行った。

### ア. 岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

(破壊核形成時のガウジの挙動)

ガウジ層を有する模擬断層を三軸圧縮すると、固着-すべりの核形成時にガウジ層が膨張することを明らかにした。実験後に観察されたYシアに沿う溶融層の分布や高速すべりの開始点の位置から、固着-すべりの核形成時のガウジ層の膨張は、ガウジ層内のリーデルシアに沿ったすべりによって引き起こされたと考えられる(東北大学[課題番号:1215])。

比較的等粒のガウジを有する断層をせん断すると、固着状態のガウジ層内に応力鎖が形成されることが光弾性実験や個別要素法を用いた数値実験により明らかになった。そして、すべりの開始直前に応力鎖が回転し、ガウジ層は膨張する(東京大学地震研究所、海洋研究開発機構[課題番号:1427])。

これらの結果は、固着-すべりの破壊核形成過程にガウジの力学的挙動が重要な役割を果たしていることを示している。リーデルシアに沿ったすべりと応力鎖の回転は同一の現象の異なる表現であるといえるが、三軸試験で用いたような幅広い粒径分布を持つガウジでは応力鎖が形成されないという指摘もあるので、上記の実験結果を統一的に解釈できるかどうかはさらに検討が必要である。

(高速摩擦特性)

ロータリ式摩擦試験機を用いて、これまであまり調べられていなかった中速での摩擦すべり特性を調べた。付加体である丹波帯I型地層群から採取したチャートを用いて、およそ1-100mm/sの速度範囲で速度ステップ実験をおこなったところ、特徴的すべり距離が1-10mの速度弱化を示した。特徴的すべり距離がきわめて大きいことや速度を増加させたときと減少させたときの非対称性が強いこと、この速度弱化は、速度・状態依存摩擦構成則で記述される現象とは異なると考えられる。摩耗により生じたガウジは非晶質であったが、実験中に摩擦溶融は見られなかったため、この非晶質ガウジは、大変位によるガウジの細粒化と水和により生じたと考えられる(京都大学防災研究所[課題番号:1814])。

摩擦強度に対する温度の効果を見るために、1000°Cまでの背景温度で中速すべり実験を行った。400°Cまでは温度の上昇にともない摩擦強度が低下したが、400-800°Cでは、温度上昇にともない摩擦強度が増加した。さらに1000°Cまで温度を上げると摩擦強度は再び低下した。この実験でも、背景温度800°Cまでは非晶質ガウジが生成された。一方、背景温度が1000°Cの時にはガウジは結晶質であった。このことから、非晶質ガウジは熔融ではなく水和化によって生じたと考えられる（千葉大学〔課題番号：1427〕）。

#### （透過弾性波試験）

三軸圧縮試験による断層面形成過程を明らかにするために、広帯域圧電センサを用いた透過波試験を行った。広帯域圧電センサを用いた計測はこれまでに、一軸圧縮試験や二軸せん断摩擦試験ではおこなわれたことはあるが、三軸条件下では初めての試みである。図1に示すように、ダイラタンシーの開始後は、載荷の増加にともない、載荷軸と平行な透過波のP波速度と初動振幅は減少した。降伏荷重以降は、初動振幅の減少率が増加した（立命館大学〔課題番号：2909〕）。

#### （岩石-水相互作用）

岩石-水相互作用は、断層強度の時間変化に大きな役割を果たしていると考えられる。H<sub>2</sub>O-NaCl系の流体に対する花崗岩の溶解度を予測するアルゴリズムを開発し、溶解度の温度依存性を計算したところ、300-400°Cで石英や白雲母が急激に沈殿する可能性があることが分かった。今後、この予測の妥当性を実験により検証する（東北大学〔課題番号：1214〕）。

#### （断層深部すべり）

内陸地震は、断層深部延長の下部地殻での超塑性流動による上部地殻への応力集中が原動力となって発生すると考えられているが、下部地殻の岩石が塑性流動するメカニズムはよく分かっていない。天然の岩石は、地表に運ばれてくる過程で生じた微小亀裂を含むため、超塑性変形させるのは困難である。そこで、極細粒緻密な人工岩石をもちいて超塑性実験を行った。400%の伸び変形をした試料では、伸び方向と直交した方向に粒子が配列しているのが見いだされた(図2)。このことは、粒界すべりによる粒子の再配列によって超塑性変形がまかなわれていることを示唆する（東京大学地震研究所〔課題番号：1427〕）。

かつての断層深部が地表に露出している三重県中央構造線で、震源相当震度において破壊核となった可能性のある場所とそれ以外の場所で、応力履歴にどのような違いがあるかを検討した。いずれの場所でも、北北東-南南西の横ずれ場を経験したあと、150-200°Cの環境下で南北圧縮を受け、さらに鉛直圧縮を受けるといように応力場が大きく変化した時期があったことが明らかになった（産業技術総合研究所〔課題番号：5010〕）。

### イ. 地殻・上部マントルの物性の環境依存性

#### （アンチゴライトの物性測定）

沈み込み帯のマントルウェッジと沈み込んだスラブの境界付近の主要構成鉱物は、温度・圧力・化学組成・含水条件から、アンチゴライトであると考えられる。地震学的観測からアンチゴライトの存在を確認するためには、アンチゴライトの弾性波速度を知る必要がある。アンチゴライト岩は多くの場合、結晶方位の選択配向性を持つので、地震波トモグラフィーなどで得られた

地震波速度を、室内実験の測定結果と比較するためには、測定でえられた速度と選択配向した結晶方位の関係を知っている必要がある。そこで、静岡大学において SEM-EBSD 法により、アンチゴライト岩の結晶方位測定をおこない、弾性波速度の異方性を岩石組織と対応づけた(図 3)。また、比抵抗探査から、アンチゴライトの存在を確認するためには、アンチゴライト岩の電気伝導度を知る必要がある。このため、現有の高温電気伝導度測定システムに酸素濃度測定器を組み込み、測定条件をより明確に規定できるようにした(東京大学地震研究所、富山大学 [課題番号: 1428])。

#### (多結晶体の非弾性特性)

観測からえられる地震波の減衰パラメタ (Q 値) から、温度や流体の存在を推定するためには、多結晶体の非弾性特性をあらかじめ知っておく必要がある。岩石のアナログ物質として有機物多結晶体を用いて、非弾性特性をきわめて広い帯域 (0.1mHz-100Hz) で測定することが可能な実験装置を開発した。使用したアナログ物質の室温 (26°C、融点規格化温度 0.6) での非弾性特性は、オリビン結晶体の 1100°C (融点規格化温度 0.6) での非弾性特性とよく似ていた。このアナログ物質を用いた測定により、鉱物粒径やメルトの存在が非弾性特性に与える影響を調べることができる(東京大学地震研究所 [課題番号: 1428])。

### ウ. 摩擦・破壊現象の規模依存性

#### (M2 級地震の震源直近観測)

南アフリカ大深度金鉱山の地下 3.3km において発生した Mw1.9 の地震を、震源から 30m に展開した観測網で観測し、2 万個以上の余震の震源を精密に決定した。本震前の震源域での歪変化と本震後におこなった断層貫通掘削から、震源域にはほぼ鉛直方向の最大圧縮が作用していることが推定された。余震のならばと本震のモーメントテンソル解から、この地震の震源断層は最大圧縮方向と 30 度の角をなしているので、室内実験に比べて数桁大きい、差し渡し 100m の断層破壊も、室内実験と同様にモール・クーロンの破壊として表現できることが明らかになった(立命館大学 [課題番号: 2402])。

#### (高周波波動生成過程)

断層面での高周波波動生成のメカニズムを明らかにするために、ロータリ式せん断試験機を用いた高速すべり実験をおこなった。波動を観測するために、固定軸側の試料直下に加速度計と AE センサーを設置した。実験開始直後のすべり強化のステージでは波動は観測されなかった。ピーク強度に達したあと、すべり弱化的開始とともに波動が観測されるようになる。断層強度の弱化的率が大きい、すべり弱化的開始直後に波動の強度は最も大きく、弱化的率の低下とともに波動の強度も低下した。摩擦溶融の開始とともに高周波波動の強度は著しく低下するが、低周波波動の強度にはあまり変化は見られない。摩擦溶融層が発達すると低周波波動の強度も顕著に低下した(防災科技研 [課題番号: 3015])。

### エ. マグマの分化・発泡・脱ガス過程

#### (マグマの発泡過程に注目した噴火履歴・多様性・推移の定量的把握と支配要因の特定)

噴火の長期予測と短期予測の観点から、間欠泉の室内実験を行い、次の結果を得た(図 4)。時間

予測型モデルに従って噴出が起こり、噴出様式としては、爆発的噴火に対応する Jet と非爆発的噴火に対応する Flow がある。加熱率が大きいほど Jet が卓越し、その前駆圧力変動は Flow が卓越する場合に比べて単一的である。一つの噴出終了から次の噴出に至るまでのフラスコ内圧力変動の特徴的周波数は、時間とともに単調に小さくなり、1 Hz 付近に達すると噴出に至る。これらの実験結果は、火山噴火への応用も含め、噴出予測に対して次のような示唆を与える。微動の特徴的周波数の減少から短期予測が可能である。また、噴出量と噴出様式は、前駆期の圧力変動から確率予想できる可能性がある。長期予測に関しては、噴出までの時間は直前の噴出の噴出量から予測可能であるが、噴出量と噴出様式に関しては、その予測可能性はいまだ不明である。今後は、フラスコから供給側への逆流や、温度および圧力不均一を含むより精度の高い測定を行い、噴出様式と噴出量を支配している要因を探ることが課題である（九州大学、名古屋大学〔課題番号：2206〕）。

#### （浅部火山性流体挙動の理論的・実験的研究）

発泡した流紋岩マグマの変形実験を行い、マグマの浸透率獲得に対する変形の効果を評価した。変形実験は、和田峠産の黒曜石を 975°C で加熱発泡させた後に、その試料を上下からピストンで挟み込み上側のピストンを回転させることで行った。回収試料に対して、SPring-8 の X 線 CT による気泡組織の観察・解析、及び独自に開発した測定装置によるガス浸透率の測定、を行った。その結果、歪量の増加に伴って気泡ネットワークが形成され気泡連結度が増加し、ガス浸透率も、歪量のある閾値を超えたところから急に大きく増加することが分かった。これらの結果は、火道内を上昇するマグマの開放系脱ガスが、マグマの変形の増加にともない開始する可能性を示唆する。今後は、系外流体との相互作用を含めた実験的研究に発展させ、噴火の前駆現象に関わる素過程の解明を目指す（東北大学〔課題番号：1216〕）。

マグマ中での気泡成長と脱ガスを考慮した 2 相流モデルを定式化し、それを数値的に解くことによって、繰り返し噴火する火道内マグマの上昇膨張過程とそれによって引き起こされる地殻変動を評価した。その結果、地殻変動の振る舞いは、火道径や噴火直後のマグマヘッドの深さに依存するだけでなく、マグマに含まれる水の量や観測点の火口からの距離によって違いがあることがわかった。今後は、測地学的データから火道内マグマの物性や挙動を推定することが課題である（東北大学〔課題番号：1216〕）。

#### （爆発的噴火におけるマグマの波動の放出素過程に関する研究）

噴火の爆発性を支配しているマグマの破砕過程について、マグマのレオロジーに注目し、弾性的な破壊と流動的な破壊のいずれにも適応できるものさしを開発した。マグマの変形流動と破砕では、固体力学の脆性破壊が立脚する「歪」が定義できない。そこで、流体を意識しつつ、流動破壊の脆性度、すなわち、破壊過程の変形の弾性度を、全歪エネルギー率に対する弾性的歪エネルギー率の比として、パラメータ  $\beta$  を定義した。この量を用いて、Kameda et al. (2008) の破砕実験の結果を再検討した。この実験では、緩和時間 > 減圧時間で脆性破砕、緩和時間 << 減圧時間で流動膨張、その間に遷移的な挙動の見られることが報告されているが、計算で求めた  $\beta$  の値と、破砕・膨張の挙動の遷移がよく対応していることがわかった。今後は、この  $\beta$  を用いて、火山の火道流モデルにおける破砕条件や、rate- and state-variable friction law に基づく地震発生素過程を再検討することが課題である（東京大学地震研究所〔課題番号：1429〕）。

(噴火に伴うマグマ中の揮発性成分変化に関する研究)

簡便に斑晶に含まれるメルトインクルージョン中の水の濃度を測定する技術開発を行った。噴火の爆発性を最も支配しているマグマ中の水の含有量は、噴出物の斑晶に含まれるメルトインクルージョン中の水の濃度を測定することで、ある程度推定できる。しかし、その測定は、サンプルを測定に供するまでの準備が一般に効率が悪く多数のデータを収集するための技術開発が課題であった。本研究では、顕微 FT-IR 装置全体を真空引きするなど分析条件を整えることによってノイズの低減と光源輝度の向上を実現し、従来の研究ではおこなわれなかった斑晶ガラス包有物の反射法分析を実現した(図 5)。今後は多くの斑晶ガラス包有物を測定して、マグマだまりから噴火に到るまでの揮発性成分の挙動をさぐる基礎データを集めることが課題である(東京大学地震研究所[課題番号:1430])。

## 展望と課題

いくつかの研究課題では実験装置の立ち上げや改良、解析手法の確立、観測準備に多くの時間を費やした。これは、今年度が「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の初年度であるので、やむをえないと思われる。来年度以降、実験や解析が本格化して、具体的な成果が出始めると期待される。以前の予知研究計画から引き続き実施している研究課題では、実験結果・測定結果の理解が深化した。同時に、これらの課題でも実験・測定条件の幅を広げる準備が進んでいる。

## 参考文献

- Bangs, N.L.B., G.F. Moore, S.P.S. Gulick, E.M. Pangborn, H.J. Tobin, S. Kuramoto, A. Taira, Broad, 2009, Weak regions of the Nankai Megathrust and implications for shallow coseismic slip, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 284, 1-2, 44-49, doi:10.1016/j.epsl.2009.04.026.
- Fujisawa, K., Takei, Y., 2009, A new experimental method to estimate viscoelastic properties from ultra-sonic wave transmission measurements, *Journal of Sound and Vibration*, 323, 609-625.
- Fukuyama, E. and Mizoguchi, K., 2010, Constitutive parameters for earthquake rupture dynamics based on high-velocity friction tests with variable sliprate, *Int. J. Fracture*, 10.1007/s10704-009-9417-5.
- Hara, J. and N. TSUCHIYA, 2009, Chemical modification of pyroclastic rock by hot water: an experimental investigation of mass transport at the fluid solid interface. [*Geofuids*, 9, 24-38]
- Hatano, T., 2009, Growing length and time scales in a suspension of athermal particles, *Phys. Rev. E*, 79, 050301(R).
- Hatano, T., 2009, Scaling of the critical slip distance in granular layers, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18304.
- Hatano, T., in press, Critical Scaling of granular rheology, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*
- Hiraga, T., Tachibana, C., Ohashi, N., Sano, S., 2010, Grain growth systematics for forsterite ± enstatite, *Earth and Planetary Science Letters*, 291, 10-20.
- Hirono, Tetsuro, Kohtaro Ujiie, Tsuyoshi Ishikawa, Toshiaki Mishima, Yohei Hamada, Masaharu Tanimizu, Wonn Soh, Masataka Kinoshita, 2009, Estimation of temperature rise in a shallow slip zone of the megasplay fault in the Nankai Trough, *Tectonophysics*, 478, 3-4, 215-220.

- Ichihara, M., M. Ripepe, A. Goto, H. Oshima, H. Aoyama, M. Iguchi, K. Tanaka, and H. Taniguchi, 2009, Airwaves generated by an underwater explosion; Implications to volcanic infrasound, *J. Geophys. Res.*, 114, B03210, doi:10.1029/2008JB005792.
- 鏡味芳宏, 渡辺 了, 2009, 弾性波速度測定に基づく跡津川断層周辺浅部地殻物質の推定, *地震* 2, 61, 99-111.
- 川口亮平, 2009, 開口型火道の1次元マグマ二相流モデルに基づく火山体膨張に関する研究, 東北大学修士論文, 80pp.
- Kawamura, K., T. Kanamatsu, M. Kinoshita, S. Saito, T. Shibata, K. Fujino, A. Misawa, K.C. Burmeister, 2009, Redistribution of sediments by submarine landslides on the eastern Nankai Accretionary Prism, *Submarine Mass Movements and Their Consequences, IV* (Springer).
- Kawamura, K., Y. Ogawa, R. Anma, S. Yokoyama, S. Kawakami, Y. Dilek, G.F. Moore, S. Hirano, A. Yamaguchi, T. Sasaki, 2009, YK05-08 Leg 2 and YK06-02 Shipboard Scientific Parties, Structural architecture and active deformation of the Nankai Accretionary Prism, Japan: submersible survey results from the Tenryu Submarine Canyon, *Geol. Soc. Am. Bull.*, (in press).
- Kitamura, Yujin, Toshiya Kanamatsu, Xixi Zhao, 2010, Structural evolution in accretionary prism toe revealed by magnetic fabric analysis from IODP NanTroSEIZE Expedition 316, *Earth Planet. Sci. Lett.*, (in press).
- Koizumi, S., Hiraga, T., Tachibana, C., Tasaka, M., Miyazaki, T., Kobayashi, T., Takamasa, A., Ohashi, N., Sano, S., 2010, Synthesis of highly dense and fine-grained aggregates of mantle composites by vacuum sintering of mineral nano-powders, *Physics and Chemistry of Minerals*, DOI: 10.1007/s00269-009-0350-y
- Moore, G.F., J.-O. Park, N.L. Bangs, S.P. Gulick, H.J. Tobin, Y. Nakamura, S. Sato, T. Tsuji, T. Yoro, H. Tanaka, S. Uraki, Y. Kido, Y. Sanada, S. Kuramoto, A. Taira, 2009, Structural and seismic stratigraphic framework of the NanTroSEIZE Stage 1 transect, *Proc. IODP, 314315316: College Station, TX* (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.), doi:10.2204/iodp.proc.314315316.102.2009.
- Mori, Jim, Yasuyuki Kano, 2009, The 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake (Mw=7.6) and Fault Zone Temperature Measurements to Determine Fault Friction, *J. Japan Soc. Natural Disaster Sci.*, 28, 2, 151-159.
- Mukoyoshi, Hideki, Tetsuro Hirono, Hidetoshi Hara, Kotaro Sekine, Noriyoshi Tsuchiya, Arito Sakaguchi, and Wonn Soh, 2009, Style of fluid flow and deformation in and around an ancient out-of-sequence thrust: An example from the Nobeoka Tectonic Line in the Shimanto accretionary complex, Southwest Japan. [*Island Arc*, 18, 333-351]
- Nagata, K., M. Nakatani, and S. Yoshida, 2009, Experimental study of frictional behaviors using acoustic in-situ monitoring of frictional interface, *INTERNATIONAL SCHOOL ON COMPLEXITY, 11th Course: GRAINS, FRICTION, AND FAULTS*.
- 中谷正生, 永田広平, 2009, 速度状態依存摩擦とその物理, *地震* 2, 61, S563-S573.
- Nakatani, M., M. Naoi, Y. Yabe, and JAGUARS, 2009, Acoustic emission (AE) events before and after a Mw1.9 mine earthquake captured by 200 kHz monitoring system, ISS international seminar.
- Nakatani, M., M. Naoi, Y. Yabe, H. Ogasawara and JAGUARS, 2009, Acoustic Emission Measurements in the Vicinity of a M2 Earthquake Rupture in a Deep Gold Mine in South Africa, French-Japanese International Workshop on Earthquake Source, Paris, France, 5 October 2009

- Nemoto, Katsumi, Noriaki Watanabe, Nobuo Hirano and Noriyoshi Tsuchiya, 2009, Direct measurement of contact area and stress dependence of anisotropic flow through rock fracture with heterogeneous aperture distribution. [Earth and Planetary Science Letters, 281, 81-87]
- Nishimura, Takeshi, 2009, Volcano deformation caused by magma ascent in an open conduit, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 178-192.
- Okumura, Satoshi, Michihiko Nakamura, Shingo Takeuchi, Akira Tsuchiyama, Tsukasa Nakano, Kentaro Uesugi, 2009, Magma deformation may induce non-explosive volcanism via degassing through connected bubbles, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 281, 267-274.
- Otsuki, K., Hirano, T., Omori, M., Sakaguchi, M., Tanigawa, W., Lin, W., Soh, W., and Rong, S., 2009, Analyses of pseudotachylyte from Hole-B of Taiwan Chelungpu Fault Drilling Project (TCDP); their implications for seismic slip behaviors during 1999 Chi-Chi earthquake. *Tectonophysics*. 469, 13-24, doi:10.1016/J.tecto.2009.01.008.
- Park, Jin-Oh, Gou Fujie, Lalith Wijerathne, Takane Hori, Shuichi Kodaira, Yoshio Fukao, Gregory F. Moore, Nathan L. Bangs, Shin'ichi Kuramoto, Asahiko Taira, 2010, A low-velocity zone with weak reflectivity along the Nankai subduction zone, *Geology*, 38, 3, 283-286; DOI: 10.1130/G30205.1.
- Saito, Saneatsu, Ayumu Miyakawa, Yasuhiro Yamada, Masataka Kinoshita, 2010, Methane Hydrate Occurrence Estimated from Downhole Logging at IODP Site C0002, Kumano Basin, *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, 75, 1.
- 佐藤隆司・雷 興林, 2009, アコースティック・エミッションー地震発生過程解明のための実験的研究一, *地震2 特集号*, 61, S535-S540.
- Screaton, E., G. Kimura, D. Curewitz, G. Moore, F. Chester, O. Fabbri, C. Fergusson, F. Girault, D. Goldsby, R. Harris, F. Inagaki, T. Jiang, Y. Kitamura, M. Knuth, C.-F. Li, L. C. Liljedahl, L. Louis, K. Milliken, U. Nicholson, N. Riedinger, A. Sakaguchi, E. Solomon, M. Strasser, X. Su, A. Tsutsumi, A. Yamaguchi, K. Ujiie, X. Zhao, 2009, Interactions between deformation and fluids in the frontal thrust region of the NanTroSEIZE transect offshore the Kii Peninsula, Japan: Results from IODP Expedition 316 Sites C0006 and C0007, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q0AD01, doi:10.1029/2009GC002713.
- Shigematsu, N., K. Fujimoto, T. Ohtani, B. Shibasaki, T. Tomita, H. Tanaka, Y. Miyashita, 2009, Localisation of plastic flow in the mid-crust along a crustal-scale fault: insight from the Hatagawa Fault Zone, NE Japan, *J. Struct. Geol.*, 31, 601-614.
- Strasser, Michael, Gregory F. Moore, Gaku Kimura, Yujin Kitamura, Achim J. Kopf, Siegfried Lallemand, Jin-Oh Park, Elizabeth J. Screaton, Xin Su, Michael B. Underwood, Xixi Zhao, 2009, Origin and evolution of a splay fault in the Nankai accretionary wedge, *Nature Geoscience*, 2, 648-652, doi:10.1038/NGE0609.
- Takei, Y., Hier-Majumder, S., 2009, A generalized formulation of interfacial tension driven fluid migration with dissolution/precipitation, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 288, 138-148.
- Takei, Y., Holtzman, B.K., 2009a, Viscous constitutive relations of solid-liquid composites in terms of grain boundary contiguity: 1. Grain boundary diffusion control model, *J. Geophys. Res.*, 114, B06205, doi:10.1029/2008JB005850.
- Takei, Y., Holtzman, B.K., 2009b, Viscous constitutive relations of solid-liquid composites in terms of grain boundary contiguity: 2. Compositional model for small melt fractions, *J. Geophys. Res.*, 114, B06206, doi:10.1029/2008JB005851.

- Takei, Y., Holtzman, B.K., 2009c, Viscous constitutive relations of solid-liquid composites in terms of grain boundary contiguity: 3. Causes and consequences of viscous anisotropy, *J. Geophys. Res.*, 114, B06207, doi:10.1029/2008JB005852.
- Timothy, B. Byrne, Weiren Lin, Akito Tsutsumi, Yuhji Yamamoto, Jonathan C. Lewis, Kyuichi Kanagawa, Yujin Kitamura, Asuka Yamaguchi, Gaku Kimura, 2009. Anelastic strain recovery reveals extension across SW Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L23310, doi:10.1029/2009GL040749.
- Tsuji, Takeshi, Jin-Oh Park, Gregory Moore, Shuichi Kodaira, Yoshio Fukao, Shinichi Kodaira, Nathan Bangs, 2009, Intraoceanic Thrusts in the Nankai Trough off the Kii Peninsula: Implications for Intraplate Earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L06303, doi:10.1029/2008GL036974.
- 堤 昭人・林 奈央・井上結貴, 2009, プレート沈み込み帯における付加体物質の摩擦特性, *トライボロジー*, 54(11), 738-743.
- 堤 昭人, 2009, 高速すべり時における岩石の摩擦強度弱化的機構 - 摩擦熔融を伴わない場合について -, *地震*, 第61 巻, S527-S533
- Tudge, J., M.A. Lovell, S.J. Davies, P.K. Harvey, S. Saito, 2009, Expedition 314 Scientists, Petrophysically determined lithofacies at the Nankai Trough Accretionary Prism: NanTroSEIZE, IODP Expedition 314, *Journal of the Geological Society*, 166, 5, 961-968, doi:10.1144/0016-76492008-136.
- Ujiie, K., Tsutsumi, A., Fialko, Y. and Yamaguchi, H., 2009, Experimental investigation of frictional melting of argillite at high slip rates: Implications for seismic slip in subduction-accretion complexes. *Journal of Geophysical Research*, 114, doi:10.1029/2008JB006165.
- Uraki, S., Y. Kido, Y. Sanada, S. Kuramoto, T. Okano, H. Saga, J.-O. Park, G.F. Moore, A. Taira, 2009, Kumano-nada 3D seismic data acquisition and processing, 62, 277-288.
- Vidal, V., M. Ichihara, M. Ripepe, and K. Kurita, 2009. Acoustic waveform of continuous bubbling in a non-Newtonian fluid. *Physical Review E*, 80, doi:10.1103/PhysRevE.80.066314.
- 渡辺 了, 2009, 地殻・マントル物質の地震波速度と電気伝導度: 沈み込み帯の水を探る, *地震* 2, 61, S541-S562.
- Watanabe, Noriaki, Nobuo Hirano, and Noriyoshi Tsuchiya, 2009, Diversity of channeling flow in heterogeneous aperture distribution inferred from integrated experimental-numerical analysis on flow through shear fracture in granite, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 114 (B04208), 1-17.
- Watanabe, T., 2010, Geometry of intercrystalline brine in plastically deforming Halite rocks: inference from electrical resistivity, *Advances in Interpretation of Geological Processes*, SPALLA, M. I., MAROTTA, A. M. & GOSSO, G. (eds), Geological Society, London, Special Publications, 332, 69-78.
- Yabe, Y., J. Phillip, M. Nakatani, G. Morema, M. Naoi, H. Kawakata, T. Igarashi, G. Dresen, H. Ogasawara, and JAGUARS, 2009, Observation of numerous aftershocks of an Mw 1.9 earthquake with and AE network installed in a deep gold mine in South Africa, *Earth Planets Space*, 61, e49-e52.
- Yoshimitsu, Nana, Hironori Kawakata, and Naoki Takahashi, 2009, Broadband P waves transmitting through fracturing Westerly granite before and after the peak stress under a triaxial compressive condition, *Earth Planets Space*, 61, e21-e24.

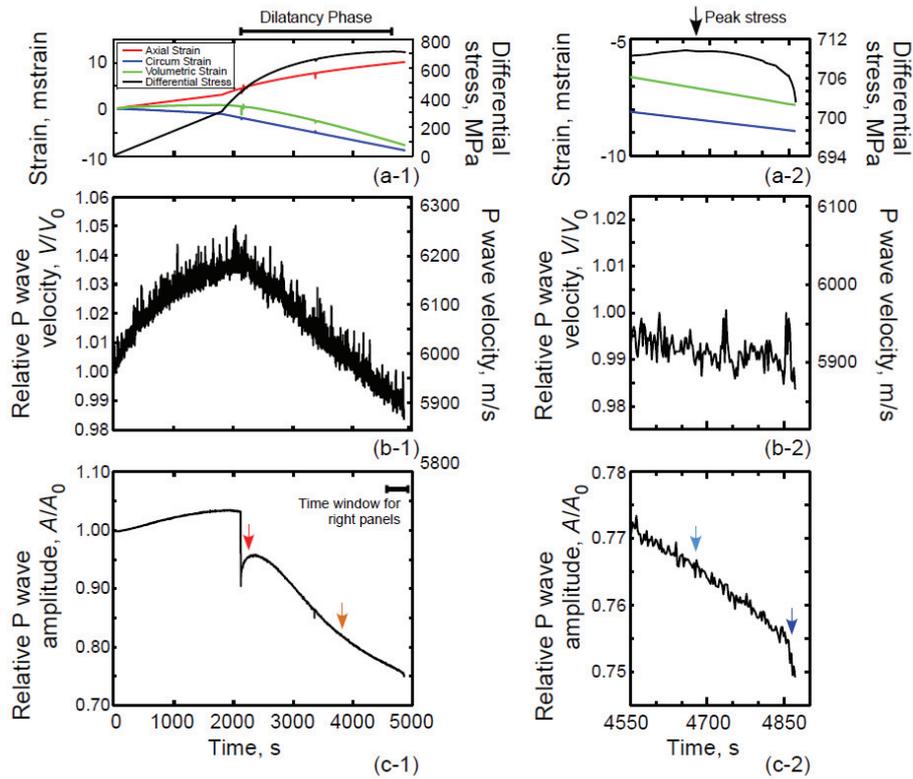


図 1. 三軸圧縮試験時の花崗岩試料に関する差応力と軸および周ひずみ。(a)、P 波速度 (b)、初動振幅 (c)の時間変化。左は載荷開始から終了まで、右は降伏応力付近の拡大を示す (立命館大[課題番号:2909]、Yoshimitsu et al., 2009)。

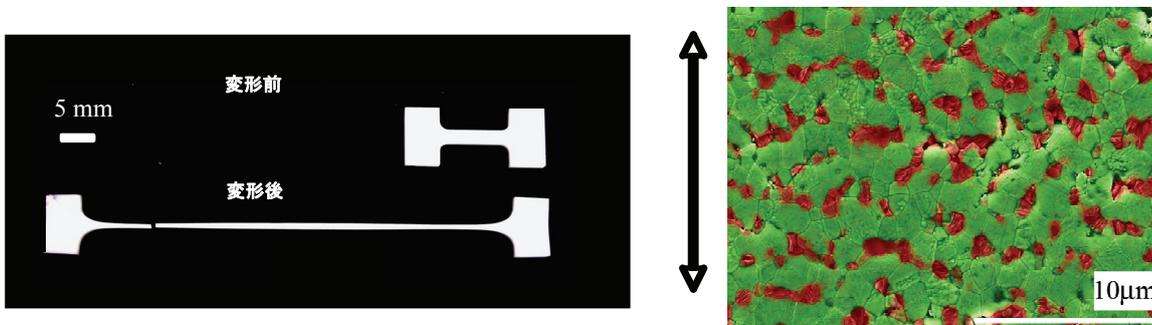


図 2. 左図：1450 度、約 10 時間かけて引っ張ったフォルステライト+ペリクレース合成試料。右図：400%引張試料の微細構造。矢印は引っ張り方向。緑がフォルステライト、赤がペリクレース粒子 (東京大学地震研究所 [課題番号:1427])。

HKB-B (Atg: 0.802, Ol: 0.120, Mgt: 0.078)

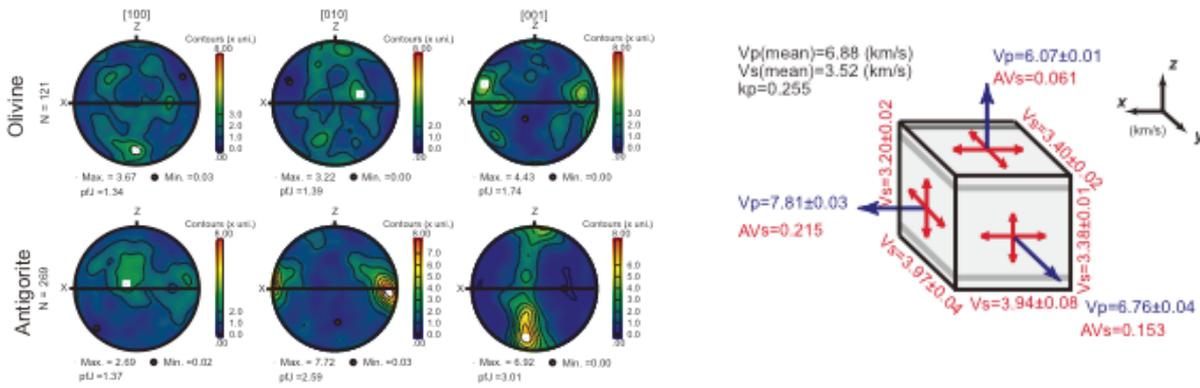


図3. 八方岩体から採取した蛇紋岩マイロナイト(HKB-B)。左図：オリビンとアンチゴライトの結晶方位分布。アンチゴライトのc軸（層構造に垂直）がマイロナイトの面構造に垂直に、b軸が線構造（流動方向）に並んでいる。右図：封圧200MPa、室温で測定した弾性波速度。縦波は線構造に平行な方向で速く、面構造に垂直な方向で遅い。横波は面構造に垂直に振動する波が、平行に振動する波よりも遅い(富山大学 [課題番号: 1428])。

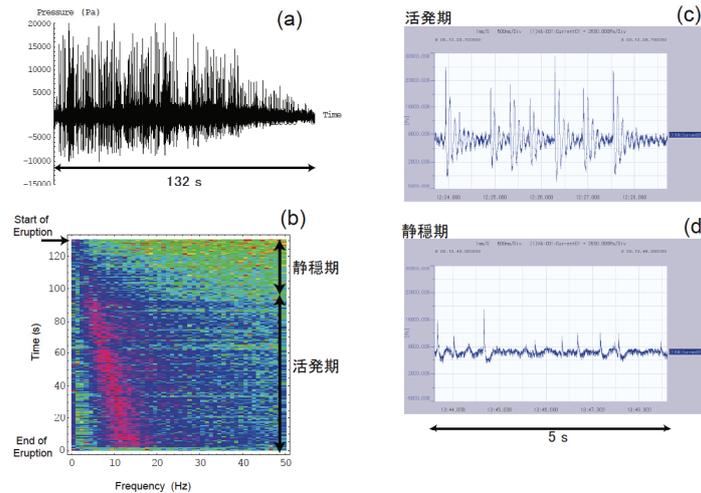


図4. (a)噴出の終わりから次の噴出までの間のフラスコ内圧力変動。(b)図(a)の圧力変動のランニングスペクトル。(c)活発期の圧力変動の拡大図。(d)静穏期の圧力変動の拡大図(九州大学、名古屋大学 [課題番号: 2206])。

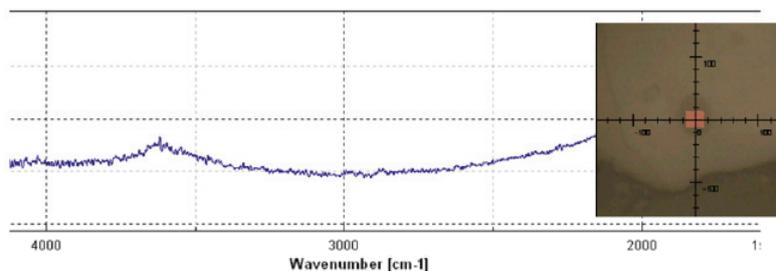


図5. かんらん石中のガラス包有物測定で得られたスペクトル。含水量が $3.0\pm 0.3\text{wt}\%$ と求められた。右側は試料と分析領域(赤)の写真(東京大学地震研究所 [課題番号: 1430])。

### 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 藤本博己  
(東北大学大学院理学研究科)

「新たな観測技術の開発」研究では、地震・火山噴火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捉えるための「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もあるが、それらについては別に報告されている。ここでは、他部会で報告されなかった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起こる。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・高精度観測が行われている陸域と同等の観測点密度と精度で、海域においてもデータを取得する必要がある。更に、陸域と同様に地殻変動帯域から地震波帯域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実施する必要がある。特に、巨大地震の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精度良く知ることが重要で、そのためには、海域における地殻変動及び地震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、現在の海域の観測測器は陸上の測器のように商業ベースで開発されておらず、地震及び火山噴火予知研究の推進のためには、海域での観測機器は開発から始める必要がある。そのために、以下のような研究を進めた。

#### ア. 海底地殻変動観測技術

複数の研究機関が互いに連携し、宮城県沖、駿河湾、南海トラフ沿い等において観測船や曳航ブイを用いたGPS音響結合方式の精密海底測位の繰り返し観測を実施するとともに、測位精度向上に関する研究を継続した。

精密海底測位では、音響送受波器を測量船の船尾に支柱を立てて行うこれまでの観測方式では、航走によるノイズの発生や支柱への負荷軽減のため、漂流しながら観測しなければならず、音響発信する場所を理想的に配置することができなかった。しかし、音響送受波器を測量船の船底に設置することで、航走しながらの観測が可能となり、計画された測線に沿って理想的な配置で観測データを取得できるようになった。その結果、従来よりも安定した測位結果が得られることが確認された。さらに、航走観測の実現により、観測の効率が向上し、1回の観測に要する観測時間を2日間から約16時間に短縮することができた(図1、海上保安庁[課題番号:8006])。

GPS音響結合方式による精密海底測位の困難な点は、水中音速構造の影響を強く受け、それにより観測精度が低下することである。特に、音速が水平方向に変化する場合には、この影響が著しい。これを改善するために、三角形に海底局を配置し、全観測データを用いて海底局の相対位置を決定した後に、海中音速構造を推定しながら海底局の絶対測位を行うという新たな解析アルゴリズムを開発し、推定精度が向上することが確認された(図2、名古屋大学[課題番号:1706])。

また、宮城県沖では、変位が予想される方向に4点の海中局を1列に並べて設置して測位観測の結果を検証した。その結果、音速の不均質場に、第一次近似である傾斜では表現しきれない変動が見られることを見出し(図3)、より高度な観測形態が必要であることを示した(東北大学[課題番号:1217])。

海底圧力観測は上下変動の連続観測のために重要な手法である。短周期圧力変動も観測できる海底圧力計を開発(Hino et al., 2009)するとともに、海底圧力データから地殻変動成分を抽出するために、海洋変動予測モデルによる海底圧力変動予測を数値シミュレーションにより行った。計算の格子間隔を細かくすることにより、圧力変動予測精度が劇的に向上することが示された(東北大学[課題番号:1217])。

#### イ. 海底地震観測技術

既存の広帯域海底地震計(BBOBS)のレコーダーが備える高精度基準周波数源を利用して機動的に海底で地震と圧力を同時に観測できる試験機を作成した。2009年12月にその試験機3台を紀伊半島沖に設置し観測中である。また、地震計センサーをデータ収録部から切り離して海底に設置することにより、機動的な観測においても、約10秒より長い周期で陸上地震観測点に匹敵する地震記録を取得できることを実証した(東京大学地震研究所[課題番号:1431、1431])。

#### ウ. 海底実時間観測システム

東南海地震に備えて、熊野灘における地震・津波観測監視システム(DONET)の開発を進め、観測機器の作成・試験を実施するとともに、三重県尾鷲沖に基幹ケーブルを敷設し、平成21年度末の一部運用開始を目指して作業を開始した(海洋研究開発機構[課題番号:4005])。また、最新の電子技術を導入し、センサー部を小型容器に収納できる次世代ケーブル式海底観測システムを開発し、その性能を確認した(図4、東京大学地震研究所[課題番号:1433]、Kanazawa and Shinohara, 2009)。

### (2) 宇宙技術等の利用の高度化

汎地球衛星測位システム(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、その解析技術の高度化を一層図ることにより、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になる。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と併せて、以下のような研究を進めた。

#### ア. 宇宙測地技術

GPSによる測位では、これまで課題となっていた地殻変動計測の上下成分の高精度化のため、以下のような研究を行った。GEONET観測点における上下成分について、大気荷重による変形効果を補正する手法を開発し、それにより積雪による荷重変形を明瞭に見出すことに成功した。また、大気中の水蒸気密度の時間変化による影響を軽減することを目指して、天気予報に用いる気象庁メソ客観解析モデルを用いることにより、既存の水蒸気密度の鉛直分布関数だけでは補正しきれない大気伝搬遅延の影響が軽減できることを明らかにした(国土地理院[課題番号:6017])。GPSによる高い時間分解能での地殻変動の推定は極めて重要な技術であり、精密単独測位(PPP)法が広く利用されている。しかし、この方法は、搬送波位相波数不確定性という技術的な問題のため、従来の方法に比べ、時間分解能が高いが、測位精度が低かった。精密単独測位法に、従来の手法による波数不確定性の補正法を取り入れる手法を開発し、測定精度の向上を図った。その結果、

年周・半年周の誤差が大幅に小さくなり、この手法の有効性が確認できた（東北大学[課題番号：1218]）。

SARの解析ではマイクロ波の干渉位相差を利用するため、巨大地震発生域のような狭い領域で1波長を越える大きな地殻変動を正確に推定することは一般的に困難であった。オフセットトラック法を利用して、SAR強度画像から2枚の画像間の変動を計測する手法で、2008年岩手宮城内陸地震および2008年四川地震の震源付近における大変形の空間分布を観測することに成功し、本手法の有用性を示した（東京大学地震研究所[課題番号：1434]、Takada et al., 2009、Kobayashi et al., 2009）。また、SARの干渉解析結果を用いて地殻変動の時系列を求める解析手法を適用して三宅島の地殻変動を検出した。その他、世界各地の地震に伴う地殻変動を陸域観測技術衛星「だいち」のPALSAR データを用いて検出した（防災科学技術研究所[課題番号：3017]）。

#### イ. リモートセンシング技術

火山噴火の際には、火口近傍での観測は重要であるが、観測者の安全の確保のため、実施は困難であった。この問題を解決する目的で、産業用小型無人ヘリコプターを用いて、遠隔操作により地磁気観測（Kaneko et al., 2009）等を進めるとともに、観測装置の設置作業を行うシステムを開発し、桜島火山において試験観測に成功した。桜島は火口から2km以内は原則立ち入り禁止であり、火口近傍に観測点は存在しなかったが、この領域内の3箇所に地震計を設置し、噴火に伴う地震波形を複数の点で観測し、データを回収することができた（東京大学地震研究所[課題番号：1435]）。

また、人工衛星や航空機による火山噴火活動のモニタリング手法開発では、MTSAT等の衛星画像解析から2009年2月に噴火した浅間山の噴煙が東京一勝浦方向に直線状に移動し、その移動速度が変化したことや、千島諸島中部にあるサリチェフ火山の2009年6月の噴火では、直径数10～100kmに近い傘型領域をもつ巨大な噴煙が日に2回程度のペースで発生したことなどを明らかにし、東アジアに分布する活火山の噴火活動のリアルタイム観測を試行している（東京大学地震研究所[課題番号：1436]）。航空機による赤外多波長観測データの解析手法を開発し、桜島のA火口及び昭和火口付近において、数ppmv～数十ppmvの濃度の二酸化硫黄ガスの分布を推定した（防災科学技術研究所[課題番号：3018]）。

更に、降灰予測及び火山灰拡散予測手法に用いる噴煙、移流拡散モデルの改善を進め、そのために、既存の気象レーダー等で捉えられた火山噴煙の解析、噴煙の力学的予測モデルのプロトタイプの開発、空振アレイ観測に向けた異なる機種空振計の比較観測を実施した（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

宇宙空間から地上に降りそそぐ高エネルギー粒子のミュオンによる火山体内部の観測を開始した。ユーザーが設計した回路を自由に実装することができるFPGAを用いて、従来型のもの比べて消費電力を1/1000以下にした観測モジュールを開発し、商用電力の確保しにくい火山体に設置

できるシステムを構築した。また、通信機能も加えて、火山から遠く離れた研究室内のPCで解析を行うミュオンのオンライン観測システム（図5）を開発した（Uchida et al., 2009、Tanaka et al., 2009a、2009b、田中, 2009）。そのシステムを用いて、桜島におけるミュオン観測を開始し、桜島浅部火道における配管系の視覚化に成功した。ミュオン透過強度を方位角-仰角空間内にプロットした結果を図6に示す。図中の山体のミュオンの影上部で相対的にミュオン強度が大きくなっているところが、桜島北岳（A、B）、昭和火口（S）に相当する。ミュオンの観測結果を検証するために、長期の絶対重力観測も進めており、安定的な長期連続観測のためのノウハウを習得した（東京大学地震研究所[課題番号：1438]）。

東海地域で稼働している3ヶ所（土岐、森町、豊橋）の人工震動源であるアクロス震源からの信号の解析を継続して進めた。また、火山におけるマグマ蓄積などの噴火準備過程を人工震動源によりモニタリングする手法を確立する目的で、火山地域での観測に有利な低周波数の信号を効率的に送信できると考えられる直線加振方式の実用化に向けて、加振装置の実験を行った（名古屋大学[課題番号：1707]）。

GPS観測データのリアルタイム処理を目指して、GEONETの観測データと気象庁の天気予報に用いるメソスケールモデルを自動的にダウンロードするプログラムを開発し、大気伝播遅延量を補正するプログラムを利用して、準リアルタイムで大気遅延補正を推定するシステムを開発した。これにより、準リアルタイムでのGPSによる地殻変動の推定に目処を付けた（防災科学技術研究所[課題番号：3019]、Hobiger et al., 2010）。

#### イ. 地震活動や噴火活動の活発な地域における観測技術

精度とともにフィールドでの利用を考慮して可搬性にも重点を置いた小型絶対重力計（図7）を開発し、静穏な観測所（国立天文台江刺観測所、岩手県）で約2日間の測定を行った（図8）。レーザー干渉計から得られた落体の加速度に対して、併設した長周期加速度計で計測した地面の振動（茶）を補正した結果（青）、理論地球潮汐（赤）とほぼ一致する値が得られた。両者の残差から見積もると、2日間（601回）の測定による重力値の測定精度は $0.8 \mu\text{gal}$ であり、本装置よりもやや大型の商業ベースで流通している絶対重力計と遜色のない性能が示された（東京大学地震研究所[課題番号：1439]）。

近年、社会基盤として携帯電話網の整備が著しい。これを利用した観測データの伝送方法が検討された。携帯電話カードの定額料金プランを用いた地震データ転送、プリペイド式携帯電話端末を用いたGPS観測網のテレメータ化、低消費電力の小型小電力無線機を用いた無線LAN装置の開発などのデータ伝送実験を行った（九州大学[課題番号：2207]）。北海道駒ヶ岳に設置している機動型GPS火山変動リモート観測装置（REGMOS）を更新し、発電効率の向上を図るとともに、GPS以外のデータを含めた複合的な観測に向けて、GPS観測データの圧縮比を高め、大容量データが転送可能なデータ通信システムを開発した（国土地理院[課題番号：6019]）。

#### ウ. 大深度ボアホール計測技術

高精度で安定であるレーザー計測の特長を生かした広帯域地震計の実用化を目指して、周波数帯域が $1\text{mHz} \sim 50\text{Hz}$ のレーザー干渉型広帯域地震計を開発し、鋸山観測所（地震研究所、千葉県富津市）において、既存の広帯域地震計（STS 1型）と同じ基台の上で並行観測を行い、両者のスペクトルから雑音レベルを見積もった（図9）。二つの地震計は $4\text{mHz}$ 以上の帯域では、ほぼ一致したスペクトルを示し、この観測点程度の地動雑音レベルの観測点では、少なくとも既存の広帯域地震計と同等の性能を有することがわかった（東京大学地震研究所[課題番号：1440]、Takamori

et al., 2009)。また、大深度における強震観測では、高温環境下で利用できる加速度計が必要となる。そのため、恒温槽内で、開発した加速度計センサーの動作実験を行い、200 °C環境下にて自然地震の加速度記録が正常に得られることを検証した（防災科学技術研究所[課題番号：3020]）。地殻応力測定に向けた昨年までの研究により、ボアホールジャッキ式乾式破碎法や高剛性水圧破碎法が開発されたが、通常、3km 以深では掘削に伴うボアホール孔壁破壊が生じ、いずれの手法も適用不能となる。そこで、ボアホール壁面にセンサーを押し付けて歪を計測する装置を開発し、試験観測に成功した（東京大学地震研究所[課題番号：1441]）。

## 参考文献

- 藤本博己, 海底地殻変動観測, 2009, 地震2, 61S, S69-S74.
- Hino, R., S. Ii, T. Iinuma, and H. Fujimoto, 2009, Continuous long-term seafloor pressure observation for detecting slow-slip interplate events in Miyagi-Oki on the landward Japan Trench slope. *J. Disast. Res.*, 4, 72-82.
- Hobiger, T., S. Shimada, S. Shimizu, R. Ichikawa, Y. Koyama, and T. Kondo, 2010, Improving GPS positioning estimates during extreme weather situations by the help of fine-mesh numerical weather models, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 72, 262-270.
- Kanazawa, T., and M. Shinohara, 2009, A new, compact ocean bottom cabled seismometer system - Development of compact cabled seismometers for seafloor observation and a description of first installation plan, *Sea Technol.*, 37-40.
- Kaneko, T., T. Koyama, A. Yasuda, M. Takeo, T. Yanagisawa, K. Kajiwara, and Y. Honda, 2010, Low altitude remote sensing of volcanoes using an unmanned autonomous helicopter: an example of aeromagnetic observation at Izu-Oshima volcano, Japan, *Int. J. Remot. Sens.*, (in press).
- Kobayashi, T., Y. Takada, M. Furuya, and M. Murakami, 2009, Locations and types of faultings involved in the 2008 Sichuan Earthquake, inferred from a SAR image matching, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07302.
- Takada, Y., T. Kobayashi, M. Furuya, and M. Murakami, 2009, Coseismic displacement due to the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake detected by ALOS/PALSAR: Preliminary results, *Earth Planet. Space*, 61, e9-e12.
- Takamori, A., A. Araya, Y. Otake, K. Ishidoshiro and M. Ando, 2009, Research and development status of a new rotational seismometer based on the flux pinning effect of a superconductor, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 1174-1180.
- 田中宏幸, 2009, 宇宙線で地球・火山を透視する, *科学*, 79, 5, 507-512.
- Tanaka, H.K.M., T. Uchida, M. Tanaka, H. Shinohara, 2009a, Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 36 L01304.
- Tanaka, H.K.M., T. Uchida, M. Tanaka, M. Takeo, J. Oikawa, T. Ohminato, Y. Aoki, E. Koyama and H. Tsuji, 2009b, Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): First results from measurements at Asama volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17302.

Uchida, T., H.K.M. Tanaka and M. Tanaka, 2009, Space Saving and Power Efficient Readout System for Cosmic-Ray Muon Radiography, IEEE Transactions on Nuclear Science, 56, 448-452.

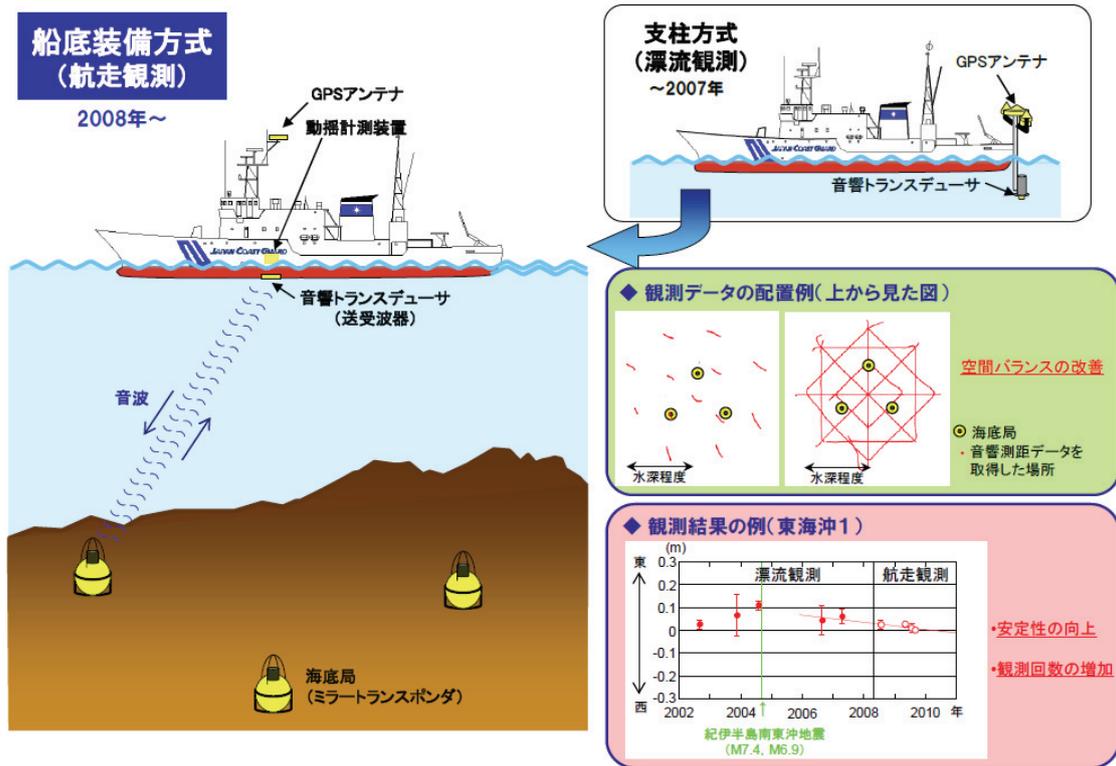


図1. 海底地殻変動観測システムの改良。船底に音響トランスデューサーを装着する方式により、これまでの漂流観測から航走観測に進化した(海上保安庁[課題番号:8006])。これにより、観測精度の向上、観測効率の向上が達成できた。

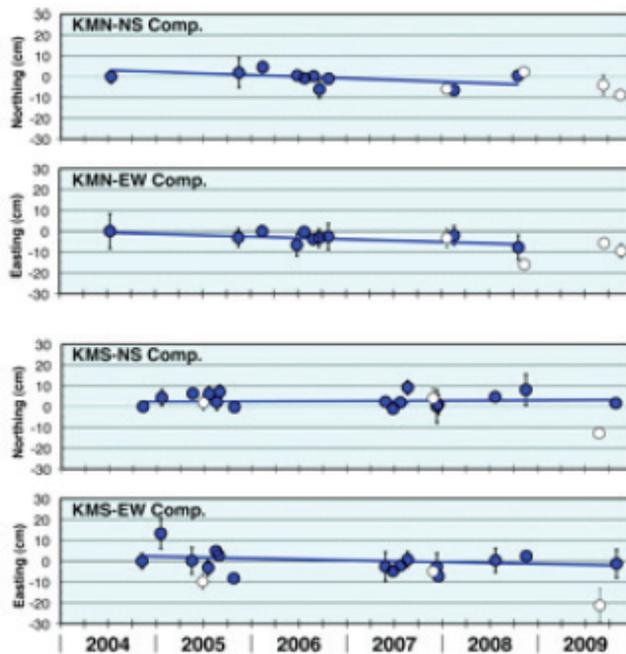


図2. 新たなアルゴリズムで解析した局地直交座標系での熊野灘のKMN(上)およびKMS(下)ベンチマーク座標の時系列(名古屋大学[課題番号:1706])。白丸はデータ数が著しく少ないため、トレンド推定には用いていない。

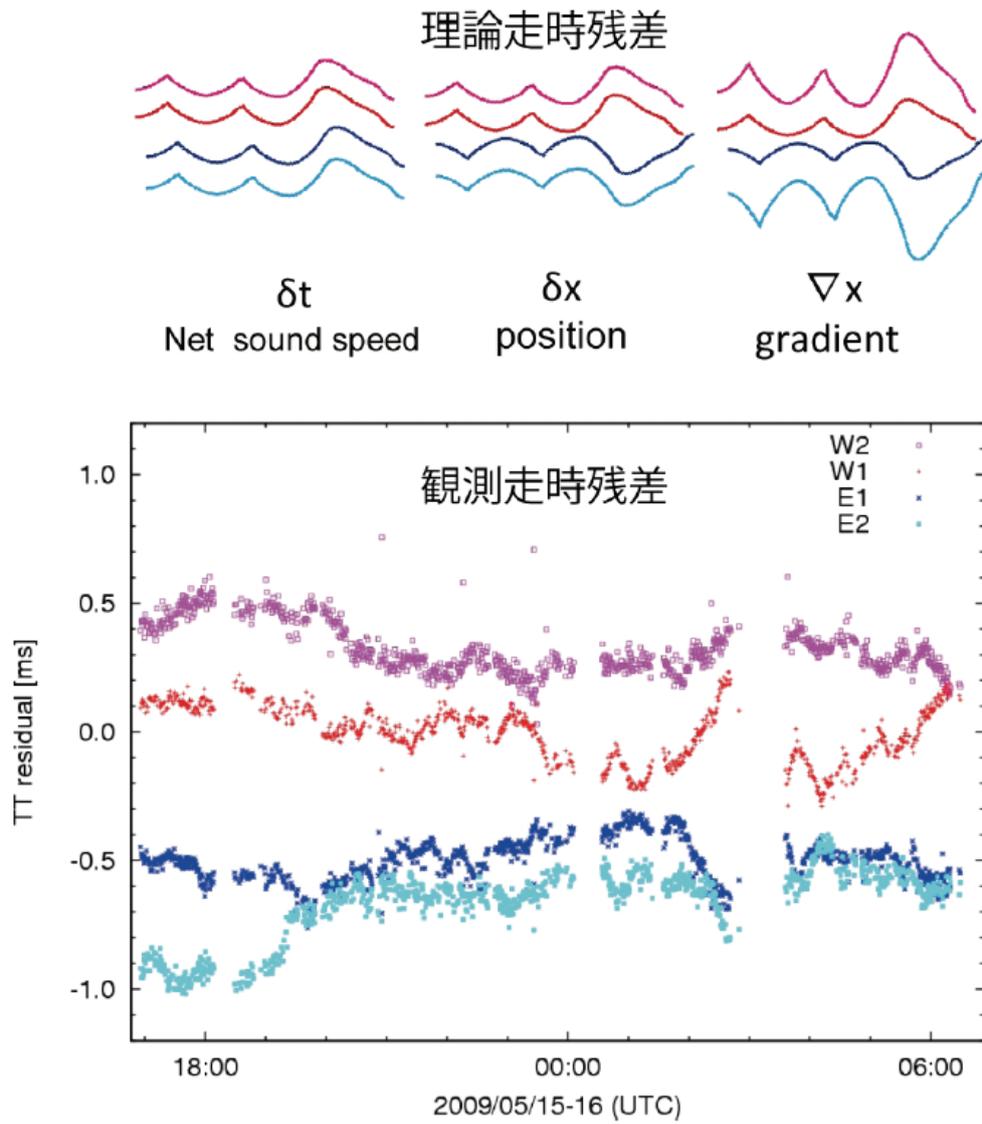


図3. 宮城県沖にほぼ東西方向に設置した4台の海底局を用いて得られた観測走時残差（下）と音速不均質が傾斜で近似できる場合の理論走時残差（上）（東北大学[課題番号:1217]）

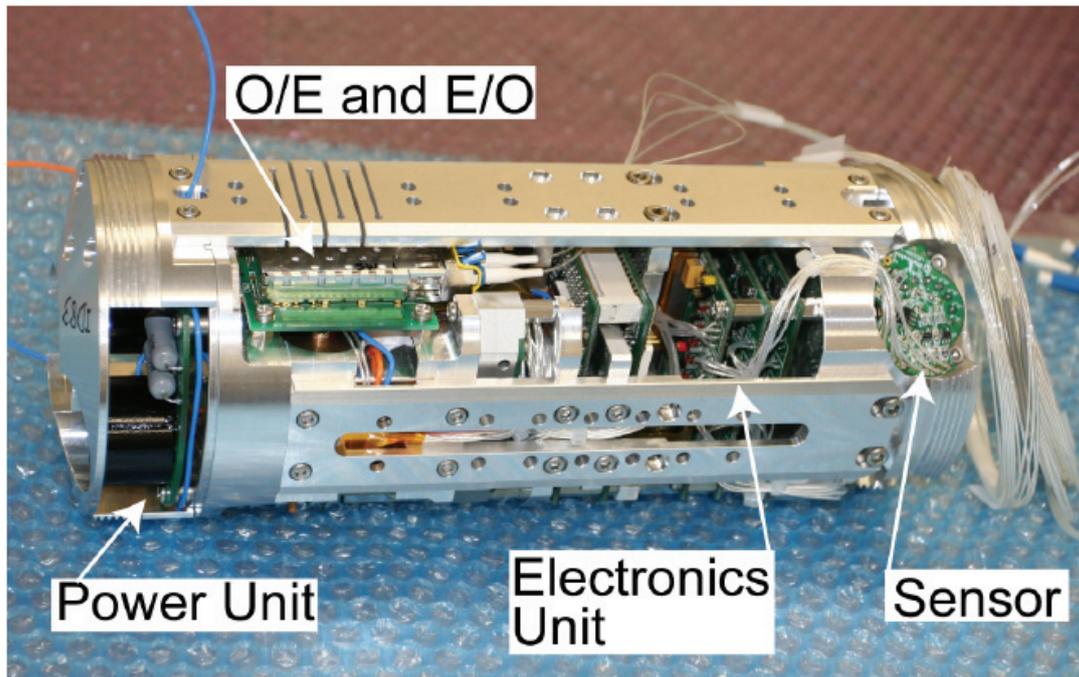


図4. 開発したケーブル式海底地震計システムの観測ノードのエレクトロニクス（東京大学地震研究所[課題番号：1433]）。3個の直交する高精度加速度計を搭載し、光ファイバーを使って、イーサネットを構築する。電源には、従来の通信用海底ケーブル中継器の技術を用いた。

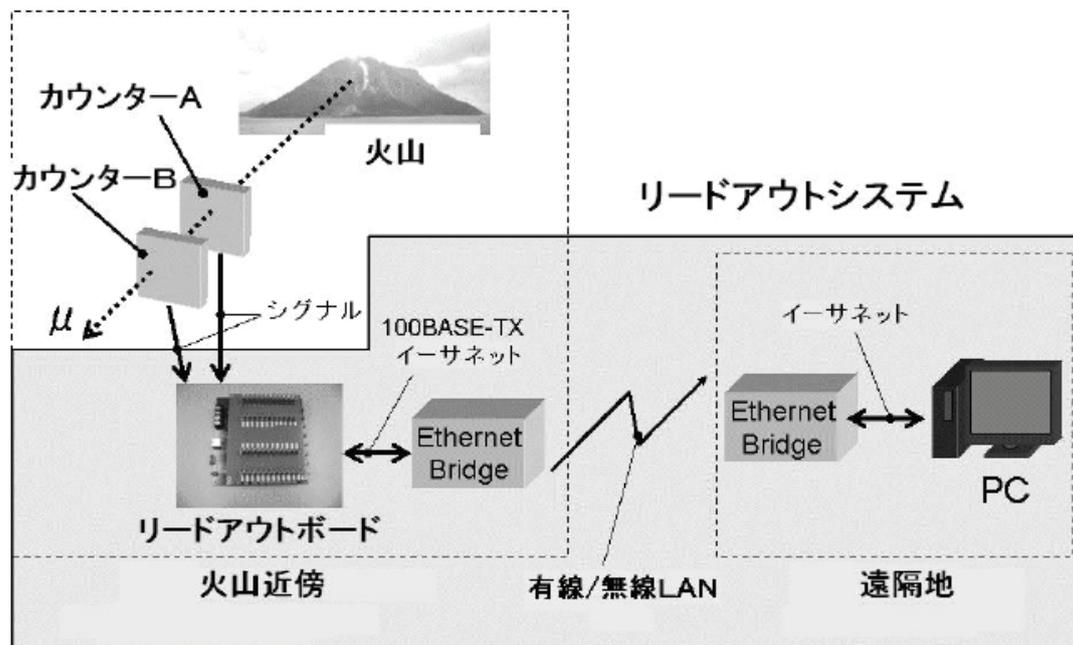


図5. FPGA を用いて開発した小型のミュオン オンラインデータ取得システム（東京大学地震研究所[課題番号：1438]）

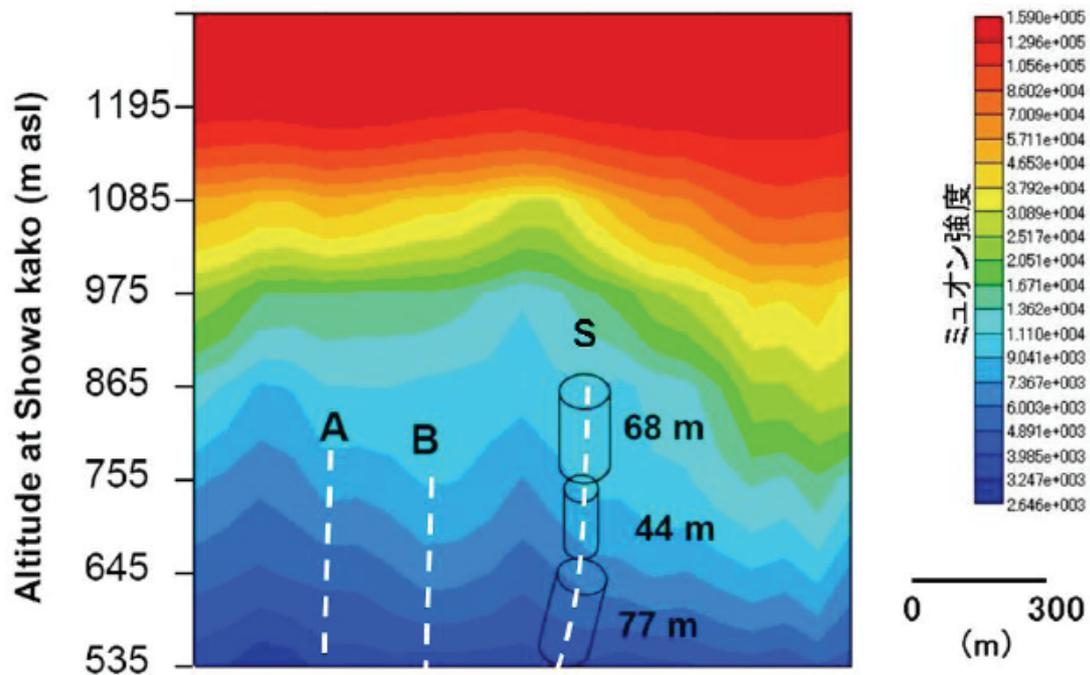


図6. 桜島火山を透過するミュオン強度の方位角－仰角空間内プロット（東京大学地震研究所[課題番号：1438]）。山体のミュオンの影上部で相対的にミュオン強度が大きくなっているところが、A、B、昭和火口（S）。点線それぞれの火口の下において局所的にミュオン透過強度が多くなっている最大値を線でつないだもの。数字は密度減少部分が火口軸上に局所化していると仮定したときの昭和火口の火道の直径。



図7. 小型絶対重力計の試作機（東京大学地震研究所[課題番号：1433]）。小型絶対重力計の精度、可搬性等の問題点の洗い出しを行うために、高さ110cm、重さ95kg の試作機を製作した。

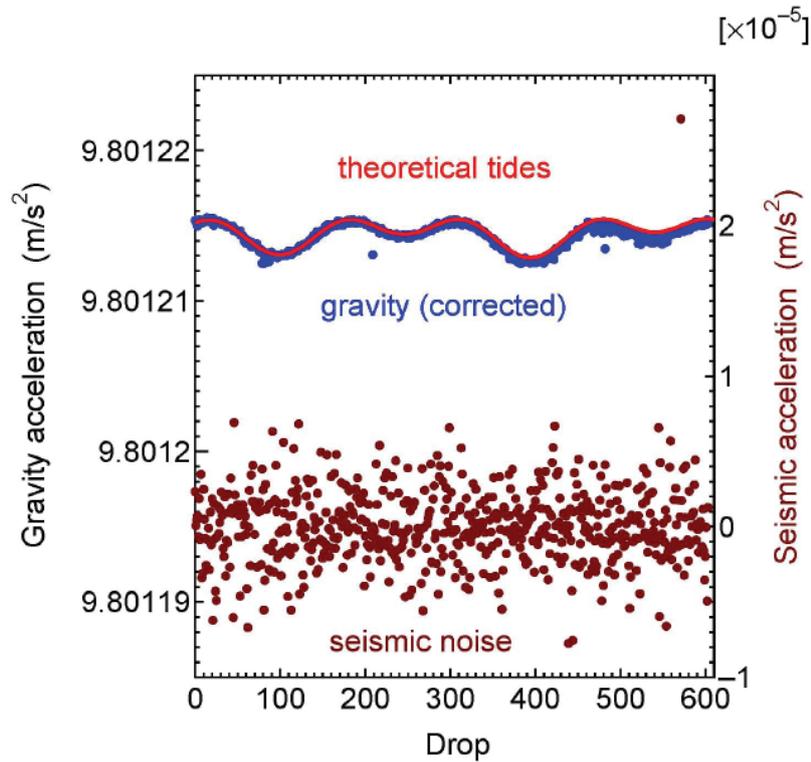


図8. 小型絶対重力計で測定された重力値および地面振動（東京大学地震研究所[課題番号：1433]）。静穏な観測所（国立天文台江刺観測所、岩手県）で試作機を約2日間動作させ、精度を評価した。レーザー干渉信号を地面振動（茶）で補正した結果、重力値（青）が得られ、潮汐予想値（赤）と良く一致した。このデータから測定精度は $0.8 \mu\text{gal}$  と見積もられた。

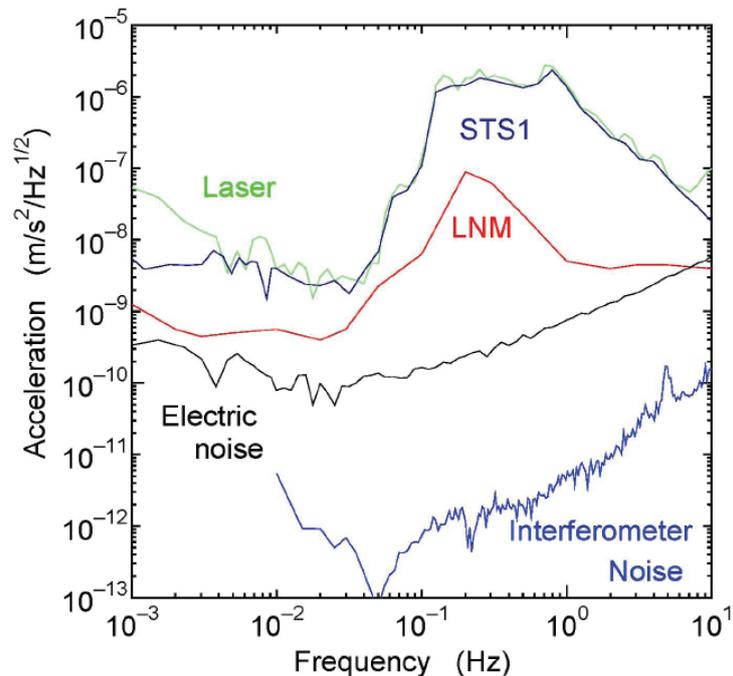


図9. レーザー地震計とSTS1地震計とのスペクトルの比較（東京大学地震研究所[課題番号：1440]）。レーザー地震計（Laser）とSTS1地震計（STS1）は4mHz以上の帯域ではほぼ一致したスペクトルを示し、両者は正しく地動を記録しているといえる。4mHz以下の帯域ではレーザー地震計は磁場などの外来ノイズを感受しているものと推測される。

## 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 －

#### I. 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

##### I. 1. 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

##### I. 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

##### I. 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・マンツルの不均質な粘弾性・<sup>そせい</sup>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

##### I. 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

##### I. 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・上部マンツ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

## II. 本計画策定の方針と実施内容

### II. 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な地震・地殻変動の観測網などの研究資源を地震現象と火山現象の観測研究に有効活用することにより、効率的で効果的な研究を実施
- 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、「予測システムの開発」をより明瞭に志向した研究に重点を置くこととし、以下の 4 項目を柱として推進
  - (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」

## II. 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に基づき、以下の基本方針に沿って実施

### II. 2. (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

## II. 2. (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

## **II. 2. (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<sup>じょうらん</sup>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

## **II. 2. (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、特に萌芽的<sup>ほうが</sup>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

平成22年9月15日

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