

目次

[平成22年度の成果の概要]	1
1. はじめに	2
2. 平成22年度に発生した大地震及び火山噴火に関する成果	4
2-1. 平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震	4
2-2. 平成23年（2011年）霧島山（新燃岳）の噴火	6
3. 平成22年度の成果の概要	8
3-1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進	8
3-2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進	12
3-3. 新たな観測技術の開発	20
4. まとめ	22
用語解説	33
[参考資料]	43
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22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22年度の成果の概要を取りまとめたものである。第2章では当該年度の代表的な成果を報告することとしているが、本報告では第2章を「平成22年度に発生した大地震及び火山噴火に関する成果」とし、東北地方太平洋沖地震と霧島山（新燃岳）噴火を取りまとめた。とくに平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、平成23年度にはいつてからの研究成果も可能な限り収集し、平成23年7月現在の報告として取りまとめた。

なお、本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ツ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、地殻やマンツ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 192 題の実施計画（個別課題）により推進されている。平成 22 年度の個別課題の成果は、「平成 22 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 22 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目的で地震・火山噴火予知研究協議会が設置され、この研究計画に参加し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 22 年度に発生した大地震及び火山噴火に関する成果

2-1. 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震

・何が起こったのか

平成 23 年東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード 9.0、震源断層の大きさが約 500km×200km、最大滑り量は 50m にも達するという推定結果もある超巨大地震であった。宮城県牡鹿半島の東方沖、日本海溝から約 100km 西方の海底下で始まった断層滑りは、約 40 秒間に直径 100km 程度の領域に広がった（図 1）。この時点で断層の広がり、すでに 2003 年十勝沖地震（マグニチュード 8.0）と同程度となっている。十勝沖地震の場合は最大滑り量が 7m 程度であり、地震発生後 20 秒以内に断層の滑りは止まっている。一方、東北地方太平洋沖地震では、その後も断層が滑り続けた。

断層滑り開始から約 40 秒後、東へ広がった滑りの先端は海溝に近づき、急激に滑りが加速し、海溝付近では滑り量が最大となったと思われる。この理由については、断層滑りの領域が海底面に達したことにより断層が動きやすくなって一気に加速したことによる、あるいは、断層運動により発生した熱のため断層が滑りやすくなったためなど、いくつかの可能性が指摘されている。いずれにしても、断層浅部での滑り量が大きかったため、海底面が大きく隆起して、巨大な津波が発生した。さらに、海溝付近の海底では岩盤がやわらかく、大きな滑りが岩盤の局所的変形をもたらし、津波をさらに大きくした可能性も考えられている。

以上が、観測データから推定された東北地方太平洋沖地震開始から約 3 分間に起こったことである。この地震の断層滑り量の分布については、種々の観測データに基づいた推定が行われている。得られた結果は、いずれも破壊開始点付近に大きな滑り量が推定されている点で共通性が見られるものの、詳しく見ると相互に異なっている点もあり（図 3）、今後も東北地方太平洋沖地震の地震像についての詳細な研究が必要である。

・東北地方太平洋沖地震発生までにわかっていたこと

東北地方太平洋沖地震のような超巨大地震が日本海溝沿いに発生することは、これまでほとんど予想されていなかった。沈み込む太平洋プレートは年代が古く、冷たくて重いため、若くて軽いプレートの沈み込むチリ沖やアラスカ沖とは違って断層の固着が弱いという解釈が 1970 年代になされていた。また、1990 年代末頃以降の観測により、大地震後の余効滑りが顕著であることも明らかになっていた。そのため、この地域では地震だけではなく、余効滑りでもひずみエネルギーを解放し、発生しうる地震の規模は最大でもマグニチュード 8 クラスと思われていた。図 3 に 20 世紀に発生したマグニチュード 7 クラスの大地震で破壊された固着領域（アスペリティ）を示している。これらの地震の主なアスペリティは 50km×50km 程度の領域に限られており、そこではプレート境界がしっかり固着しているが、その周辺はずるずると滑っている（固着が弱い）ため、普段は地震を起こさないと考えられていた。図 3 に示すように、宮城県沖では、アスペリティは 1978 年や 1936 年の陸に近い側のものと、1981 年の海溝に近い側の東西 2 か所に分かれて存在している。これらが単独で滑るとマグニチュード 7 クラスの地震となり、まれに連動しても、滑り量はせいぜい倍程度で、マグニチュード 8 クラスの地震になると考えられていた。最近になって 869 年の大津波を起こした貞観地震（図 2）の滑り量は 7m 以上で、マグニチュード 8.4 以上の地震であることが推定されていた。それ以外にも数百年間隔で大津波が発生していることは徐々にわかってきたが、その原因となった地震の実体は十分に解明されていない。

プレート境界の固着の強弱の判断のために有効な地殻変動データは、ほとんどが陸域での観測で得られたものであったため、陸域から遠く離れた海溝付近のプレート境界面の固着状態を推定するには、精度が不足していた。地震前に得られた結果では、宮城県沖の広い範囲で断層が固着していることを示していたが(図6)、精度の不足から固着の強さの推定量がそれほど正確ではないと考えられていた。一方、繰り返し地震から周辺部の滑りを推定し、それからプレートの固着状態を推定する手法も開発され、固着の強い領域があることが分っていた。しかし、滑り量の推定手法に課題があり、確度の高い情報は得られていなかった。つまり、プレートの固着状態を測る2つの物差しを持ち、両者とも震源域で固着が大きいことを示していたが、その推定精度の限界から、固着が強いということは研究者全体の合意となっていなかった。

海溝近くでは、海洋プレートが沈み込んでから十分に時間が経過しておらず、プレート境界の場所も浅くて圧力が低いため、境界面付近が十分に固化していないと考えられていた。このため、境界面の摩擦は小さく、地震を起こすほどは固着していないと思われていた。それを裏付けるように、震源域の海溝付近では定常的に微小地震活動は非常に低い。これらから、海溝近くではプレート境界面の固着が極めて弱く、地震が発生しにくいと考えていた。しかしながら、紀伊半島や四国沖のプレート境界のようにしっかり固着していて、微小地震活動が低い場合もあり、微小地震活動が低いことから、プレート境界の固着の強弱を判定することができなかった。更に、東北地方太平洋沖は伊豆・小笠原～マリアナ海溝沿いのように巨大地震が全く発生しない海域に類似しているという思いこみもあった。以上のように、既知の情報をすべて駆使しても、マグニチュード9の超巨大地震の発生を事前に予想することは、残念ながら困難であった。地震後に解析された海底地殻変動観測データにより、今回の地震の震源域では、海溝近くでもほぼ全域で固着している可能性が高いことが分かってきた。海溝付近では摩擦が小さいと考えられるにもかかわらず、固着している可能性が高い理由については様々な説があるが、いまだ結論が得られていない。

・超巨大地震の発生機構解明に向けて

図3に示すように、東北地方太平洋沖地震の震源付近では、ここ数十年の間にもマグニチュード7~8クラスの地震が何回か発生している。ほぼ同じ領域で、何故少なくとも過去約200年間はマグニチュード7~8クラスの地震(震源断層が50km×50km程度)が繰り返し、何故今回の東北地方太平洋沖地震の場合はマグニチュード9の地震(震源断層500km×200km程度)となったかは、極めて重要な問題である。これを説明する以下のような考えが提案されているが、これらの発生機構のどれが有効に働いたか、あるいは複数が関係したかを解明するには今後の研究を待たなければならない。

もし、東北地方太平洋沖地震の震源域のうち、1981年のアスペリティの東側で数百年もの長期にわたってプレート境界が強く固着していたとすれば、西側のより深部では、マグニチュード7~8クラスの地震が繰り返し発生したとしても滑り遅れが蓄積されていく。長期間固着していた領域が破壊されたことにより、マグニチュード7~8クラスの地震の発生域に蓄積されていた滑り遅れも同時に解放されて大きく滑りマグニチュード9の地震になったと考えられる。長期にわたってプレート境界が固着していた原因は現時点ではわかっていないが、そこでの摩擦強度が非常に高かった可能性がある。

別の考えとして以下のものがある。一般に、地震は滑りの進行とともに断層面にはたらく摩擦力が低下して滑りやすくなるために発生する。東北地方太平洋沖地震では、断層滑りが進行するとと

もに、摩擦力が段階的に低下した。マグニチュード 7~8 クラスの地震では摩擦力は 1 段階しか低下しないのに対して、何らかの原因によりさらにもう 1 段階低下すると、超巨大地震となる。

2 段階目の摩擦力の低下の原因は現時点では不明であるが、1 つの可能性として、断層運動により発生する摩擦熱の効果が挙げられている。また、摩擦力が大きく低下すると超巨大地震後の応力が非常に小さくなるために、次の破壊を起こすまでの時間が非常に長時間になり、長期にわたってプレート境界が固着することになる。

・今後何が起こるのか

東北地方太平洋沖地震の発生後、震源断層の周辺、特に陸に近い断層深部を中心に、余効滑りが発生し、地震時には沈下した海岸沿いで隆起が起こり始めている。余効滑りは数十年間継続して、地震時に起こった沿岸部の沈降が復元する可能性も考えられる。さらに、震源断層の南側と北側でも余効滑りが続いており、これらがそれぞれの地域で、巨大な地震を引き起こす可能性もある。海溝軸外側で発生が懸念される正断層型巨大地震も含めて、今後の地震活動予測に関する研究を一層推進する必要がある。

また、この超巨大地震により、日本列島全域で応力場が変化し、火山地域を含め各地で誘発地震と考えられる地震が頻発している。内陸で発生する直下型地震は、規模が小さくても大きな被害を生じることがある。世界的には巨大地震の発生後、近隣の火山で噴火活動が活発化することも知られている。今後数年から数十年はそのような地震や火山噴火の発生の可能性があり、誘発される内陸地震の研究も重要である。

2-2. 平成 23 年 (2011 年) 霧島山 (新燃岳) の噴火

霧島山新燃岳 (鹿児島県・宮崎県) では、2011 年 1 月 19 日に小規模な噴火が始まり、26 日午後から 27 日 18 時頃までに高い噴煙を連続的に上げる噴火 (準プリニー式噴火) が 3 回発生した。その後、溶岩が火口に蓄積されはじめ、1 月 31 日まで溶岩が火口全体を埋めるまでに成長した。2 月 1 日以降は間欠的に噴石を飛ばす、1 月よりも規模の小さな噴火 (ブルカノ式噴火) を繰り返したが、その後、次第に頻度は減少し、現在に至っている。霧島山 (新燃岳) の本格的なマグマ噴火は 1716~17 年以來、約 300 年ぶりの現象であり、噴火間隔の長い火山の噴火現象発生や推移を理解するうえで、今回の噴火過程の解明は極めて重要である。

霧島山では火山基盤観測網の整備計画により、噴火前に深度 100~200m のボアホール型地震計と傾斜計を併設した 3 観測点の新設を完了していた。これらの観測点に加えて、新燃岳南東約 8km にある高感度地震観測網の観測点も含め、噴火前後の現象を記録した高感度地震計と傾斜計のデータは、この噴火現象を解明するうえで貴重な観測データとなっている。さらに、各機関が、広帯域地震観測網、GPS 観測網、傾斜観測網を整備していたため、火山現象解明に有用な多項目の観測データが取得されている。

今回の霧島山 (新燃岳) 噴火の前兆現象と考えられるものとして、2008 年 8 月 22 日の小規模な水蒸気爆発が最初に挙げられる。この活動の際に噴出した火山灰には、新たなマグマの関与が認められなかった。そのことから、この活動はマグマの直接的な関与はなく、高温の火山ガスが地下深部から供給され、水蒸気爆発を引き起こしたと考えられる。

GPS 観測データによれば、この水蒸気爆発の 1 年余り後の 2009 年 12 月下旬より、新燃岳北西 7

～8km の地下約 10km に、マグマの蓄積によると考えられる山体膨張が始まった。この山体膨張は 2011 年 1 月の準プリニー式噴火の開始まで続き、マグマの蓄積速度はほぼ一定であったと見積もられている。このマグマ蓄積の開始後の 2010 年 3 月から 7 月の間に小規模な水蒸気爆発が 7 回発生した。5 月下旬に放出された火山灰の中に、ごくわずかながらマグマ起源の火山ガスの泡を含む黒色のガラス質成分が確認され、噴出物に極めて少量ではあるが新鮮なマグマ物質が混じり始めたことを示していた。以上のように、マグマ蓄積が進み、火山噴出物に新鮮なマグマ物質が含まれはじめたことから、これらの水蒸気爆発は、2011 年 1 月のマグマ噴火に直接つながる準備過程であったと思われる。

2011 年 1 月 19 日に発生した小規模な噴火では、火山灰の中に含まれる新鮮なマグマ物質の割合が顕著に増加した。これと同時に火山性の連続微動が発生し始めたことから、この噴火が今回のマグマ噴火の活動開始を示すと考えられる。連続微動の振幅は 1 月 26 日 08 時頃から一段階大きくなった。26 日 14 時 49 分に最初の準プリニー式噴火が始まると同時に、更にもう一段階大きくなり、噴火が継続していた約 4 時間程度、大振幅の微動が継続した。準プリニー式噴火は、27 日 01 時頃と 15 時頃にも発生し、26 日 14 時 49 分の噴火と同様に噴火に同期して火山性微動の振幅も大きくなった。噴火時の傾斜計記録から、準プリニー式噴火時にはマグマ溜まりが急激に収縮し、噴火活動の停滞期には収縮が弱まる様子が明瞭に捉えられた。これら 3 回の準プリニー式噴火で放出された軽石と火山灰は新燃岳周辺地域に堆積し、現地調査によるとその量はマグマ換算で約 1,000 万 m³ と見積もられた。さらに、28 日 21 時頃から 31 日 18 時頃にかけて、マグマ溜まりの収縮がゆっくり継続し、この間に山頂火口内に溶岩が蓄積された。火口内に蓄積される溶岩の成長は、悪天候のために航空機からの目視観測はできなかったが、SAR 画像により明瞭に捉えられ、噴火活動推移の把握に大変有効であった。また、噴火の様子はドップラーレーダーでも捉えられ、噴煙高度推定、火山灰の流れの観測に極めて有用であった。2 月 1 日の時点での火口内に蓄積した溶岩の量は、マグマ換算で約 1,400 万 m³ と推定され、1 月 26 日から 2 月 1 日までの噴火で約 2,400 万 m³ のマグマが噴出したと見積もられた。一方、GPS 等の観測データから、この期間のマグマ溜まりの体積減少量を推定すると約 2,400 万 m³ となり、噴出量と一致している。これは、新燃岳北西 7～8km 地下約 10km にあるマグマ溜まりから火口へ、マグマが移動したことを定量的に示す貴重なデータである (図 4)。

2011 年 6 月中旬まで、新燃岳では小規模なブルカノ式噴火が間欠的に発生した。噴火前に山体浅部が膨張し、火山性地震の発生回数が増加する。噴火後は膨張した山体は元に戻り、地震数も減少する (図 5)。これは火口付近の浅部にあるマグマの一部が発泡し、火口を覆う溶岩を吹き飛ばしていた現象であろう。一方、深さ 10km のマグマ溜まりは 1 月 26 日～31 日の噴火により、2009 年 12 月から 1 月 26 日の噴火前までに蓄積したマグマの四分の三の量を放出したが、その後、噴火前とほぼ同じ速度でマグマの蓄積が続いている。噴出物の分析から 2011 年 6 月下旬からは、これまでのブルカノ式噴火からマグマ水蒸気爆発に移行しているように思われる。今後の活動推移については、準プリニー式噴火 (爆発的噴火) が再度発生するのか、溶岩流出 (非爆発的噴火) が起こるのか、マグマ水蒸気爆発が発生するのかなど、いくつかの噴火推移 (噴火シナリオ) が想定される。進行中の噴火活動に直面して、噴火シナリオを準備し、観測・監視することは、噴火事象分岐のメカニズムを理解することにつながるため、火山噴火予知研究の中心課題と言える。この噴火活動の観測研究を一層推進する必要がある。

3. 平成 22 年度の成果の概要

3-1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

地震現象と火山噴火現象の理解を深めるとともに、地震発生および火山噴火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、および全国の主な火山に地震・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。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た地震活動・地殻変動および火山活動のモニターが進められている。さらに、諸観測網の高密度化および多項目化といった整備・強化、新たな観測手法・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研究が進められている。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に向けた、モニタリングシステムの高度化が進められた。

・日本列島域

即時的震源情報の提供とそれによる地震・火山現象モニタリングの手法の開発・高度化が行われた。例えば、新たな解析手法である地震波干渉法に基づき、地震波形の連続データを用いて地下構造のモニタリングを行うシステムを構築し、2000 年三宅島噴火や 2008 年岩手・宮城内陸地震に関連する地震波速度の変化を捉えた。火山におけるモニタリングを促進するために、大学および関係機関の地震計・傾斜計・空振計等の観測データの共有化・流通を開始した。

・地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

東北地方太平洋沖では、GPS 観測で得られる変位分布から、プレートが沈み込む方向（西北西方向）の水平変位速度からのずれの時間変化を求めた（図 6）。定常的なプレートの沈み込み速度からのずれが大きい地域は寒色で示され、その地域は沈み込むプレートと一緒に動いていない（＝固着度が低い）ことを示している。例えば、2003 年十勝沖地震（マグニチュード 8.0）の余効滑りの発生や 2005 年宮城県沖の地震（マグニチュード 7.2）の影響が明瞭に捉えられている。さらに 2008 年頃からは、福島県沖から茨城県沖にかけての地域にも寒色の領域が広がっており、この時期に固着の弱化があったか、もしくはゆっくり滑りが発生していたことが示唆された。茨城県沖の地域では、繰り返し地震の解析からも、この時期には固着の弱化が報告されている。一方、三陸沖から宮城県沖の地域にかけては、暖色の範囲が広がっており、固着が強まっていたとみられる。

・東海・東南海・南海地域

各実施機関の観測網によって、2010 年度に四国～東海地域のプレート境界において発生した深部低周波微動活動のうち、規模の大きなものすべてに対応した地殻変動を検出し、短期的ゆっくり滑りの断層モデルを算出した。ひずみデータと傾斜データの同時解析による短期的ゆっくり滑り検出手法を開発した。検出能力の事前評価を行なったところ、東海地方～四国地方の範囲でマグニチュード 5.5 以上の短期的ゆっくり滑りを検知できることがわかった。

(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

「地震発生予測システム」研究計画では、地震発生とその準備過程の物理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」の定量的な予測を可能にすることを目指している。このために、シミュレーションモデルの開発と高度化、シミュレーションモデルと観測データを結び付けるためのデータ同化手法の開発を行った。さらに、統計モデルを用いて地震活動を予測する手法の開発と検証を進めた。

・地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

南海トラフで観測されてきた短期的及び長期的ゆっくり滑りと巨大地震を単一の3次元地震サイクルシミュレーションにより再現することに成功し、短期的・長期的ゆっくり滑りと巨大地震発生サイクルの相互作用についての理解が進んだ。シミュレーションによれば、短期的・長期的ゆっくり滑りの繰り返し間隔は巨大地震が近づくにつれて短くなる。この結果は、ゆっくり滑りの観測から巨大地震に向けた応力蓄積過程についての知見が得られる可能性があることを示す。

巨大地震発生域を含む大領域を対象とした地殻活動予測シミュレーションを行うためには、従来の計算手法では極めて大きな計算時間とメモリを必要とする。さらに、データ同化では多数回のシミュレーションを行うことが必要であるため、現実的な予測システムを確立するためには、計算負荷の少ない手法を開発することが重要である。そこで、階層型行列法を用いたシミュレーション計算手法の開発を行い、この手法を用いることにより、従来の手法を用いた場合に比べて、計算時間とメモリ使用量を大きく減少させることができることを示した。

シミュレーションとデータ同化を組み合わせた予測システムの有効性を検証するために、シミュレーションモデルに、人工的に作成した模擬データを同化して地震発生を予測する実験を行った。東南海地震発生後に南海地震が発生すると仮定して東南海地震後の海底地殻変動の模擬データを作成し、このデータをモデルに同化することにより、東南海地震と南海地震の発生間隔を推定した。東南海地震発生から時間が経過してデータが増加するにつれ、発生間隔の推定値は正しい値に収束し、推定誤差は減少することが示された。この結果は、適切なシミュレーションモデルに十分な観測データを同化することができれば、的確な地震発生予測を行うことができる可能性があることを示している。

・地殻活動予測シミュレーションの高度化

より現実的な地殻活動予測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滑りによる摩擦発熱や空隙の生成、流体・熱の拡散を考慮したシミュレーションを行った。その結果、空隙生成率が十分に大きい場合に、生成された空隙への流体の流入により流体圧が高まり、ゆっくり滑りに同期して微動が繰り返し発生することを説明できることが分かった。

・地震活動評価に基づく地震発生予測

地震活動を予測するための統計モデルの予測能力を統一的に比較・検証するために、国際研究プロジェクトである CSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability) と連携し、

複数の予測領域・予測期間に対して第1回地震発生予測検証実験を行った。日本全体の陸域部に対する3か月予測実験では、定量的な評価テストを行い、参加した9個の予測モデルのうち3個が統計的に有意な予測性能を持つと判定された。

(2-2) 火山噴火予測システム

火山噴火の時期や場所については、理解が進み、適切な観測体制が整備されている火山であれば、ある程度予測することが可能になっている。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いまだ困難である。そこで、対象火山の過去の噴火頻度や噴火パターンから、噴火現象の変化をもたらす規則性を理解することによって、噴火規模、様式、推移などを考慮した、噴火現象の分岐を網羅的に示す噴火事象系統樹を作成することができる(噴火シナリオの作成)。さらに、この噴火シナリオに過去の噴火時の観測データの再検証や研究成果を取り入れて、噴火現象の分岐の判断を含めることができる(噴火シナリオの高度化)。これらにより、火山活動を評価し、推移予測を試行することを目指している。

・噴火シナリオの作成

平成22年度は桜島火山(鹿児島県)について噴火シナリオの作成を試みた。桜島火山では、現在、小噴火が頻発しており、今後、大正噴火のような規模の大きな噴火に至るのか、それとも現在のような活動がしばらく継続するのか、近い将来の噴火推移が大きな関心事となっている。これまでの噴火記録と観測データに基づいて噴火シナリオを試作し、それをを用いて今後の噴火推移予測を目指した。

桜島火山では、歴史時代に記録の残っている規模の大きな噴火事例が4つある。これらは、噴火に至る推移の記録がすべて揃っていないが、桜島の過去100年間におよぶ観測研究の成果から類推して、噴火規模の予測を試みた。桜島火山では下記のように噴火規模をおおよそ4つに区分できる。

- 巨大噴火：噴出物量が 1km^3 (10億 m^3)を超える噴火。大正噴火(1914年)、安永噴火(1779年)、文明噴火(1471~76年)に相当する。
- 大一中噴火：噴出物量が 0.1km^3 (1億 m^3)程度で、昭和噴火(1946年)に相当する。
- 小噴火：噴出物量が数10万 m^3 程度で、1975年~1993年の南岳噴火(後期南岳噴火)が相当する。
- 微小噴火：噴出物量が10万 m^3 以下の噴火で、高い頻度で起きている。

桜島火山の観測結果に基づくと、以下のような噴火の規則性が考えられる。始良カルデラの地下には、年間約1,000万 m^3 のマグマが深部から供給されていると見積もられている。100年以上にわたりマグマが蓄積し、一挙に噴出すれば、巨大噴火時に噴出されるマグマ量になる。つまり、巨大噴火後にマグマの蓄積が開始してから100年以上経過すると、巨大噴火が発生する可能性が高い。また、巨大噴火後にマグマ蓄積が開始しておよそ30年で、大一中噴火、あるいは小噴火が繰り返される傾向がある。一方、最近のような静穏期においては、微小噴火を繰り返しながら始良カルデラのある地下にマグマ蓄積が進行している(図7)。

これまでの観測事例によると、巨大噴火に先行する現象としては、広域地震活動の活発化(数か月~数年)、広域地盤隆起、桜島島内での二酸化炭素噴出や火山性地震活動の活発化(有感地震を含む)、井戸水の水位異常などが考えられ、多量のマグマの上昇により火山体内部圧力が急激に上昇し、これに伴って発生する現象であると考えられる。大一中噴火に先行する現象は巨大規模噴火

の場合よりも小規模であると予想されるが、検知できる可能性が高いと思われる。

平成 21 年度に作成した三宅島（東京都）の噴火シナリオでは、三宅島火山が数百年にわたって比較的単純な噴火を繰り返す活動様式であったため、噴火の周期性を仮定して、過去の噴火事例から、噴火現象分岐の頻度が推定できた。一方、桜島火山は、規模の異なるブルカノ式噴火を繰り返す火山であり、微小噴火を長期間繰り返す時期がある一方で、プリニー式噴火を伴う大噴火が数百年周期で発生するなど、その噴火現象を整理して、それぞれの発生頻度を推定するのは極めて困難である。つまり、桜島の最近の噴火の発生頻度は三宅島より高いが、噴火規模が多様であるため事象分岐確率の推定は容易ではない。平成 22 年度は噴火に先行する現象の整理までを行った。

・噴火シナリオに基づく噴火予測

観測データと噴火シナリオに基づき、火山活動評価及び推移予測を、2011 年 1 月 26 日から噴火活動が本格化した霧島山（新燃岳）において試行した。噴火の開始直後とその 2 週間後の 2 回、それぞれの時点での火山活動の情報に基づき噴火シナリオを作成した。噴火開始直後に作成した最初の噴火シナリオは、観測データの蓄積が不十分であり、文献に基づく過去の噴火活動事例のみに基づいたために、十分な噴火シナリオとは言えなかった。しかし、噴火開始から 2 週間後に作成した噴火シナリオでは、観測データを考慮し、多くの火山研究者との議論を踏まえ、さらに国内外の類似火山の噴火事例を参考にすることによって、噴火現象の分岐を考慮した噴火事象系統樹を作成することができた。これを現在進行する噴火活動と比較し、噴火シナリオの改善を検討している。このように作成した噴火シナリオと現在進行する火山活動の比較を行い、必要に応じ噴火シナリオを逐次改善してゆくことは、噴火シナリオに基づく噴火予測の可能性を検証するうえで重要である。

（3）地震・火山現象に関するデータベースの構築

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

・地震・火山現象の基礎データベース

ひずみ計・傾斜計データの流通・一元化を継続して行った。2011年1月26日から始まった霧島山（新燃岳）の噴火に際して、機動的な地殻変動観測システムの運用実験を行い、現地に設置した臨時の地殻変動観測システムのデータを含むひずみ計・傾斜計のデータを、リアルタイムで伝送した。これらの観測データを各機関で参照可能にすることにより、火山活動のモニタリングに非常に有効であることが確かめられた。活火山データ整備については、火山噴火予知連絡会火山観測体制等に関する検討会において、日本活火山総覧改訂の基礎資料となる「47火山の観測体制に関する検討結果のとりまとめ」が作成された。また、42火山の47か所で採取したボーリングの地質コア資料を火山噴火予知連絡会コア解析グループにおいて解析し、結果を取りまとめて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

「日本列島の地殻構造データベースのプロトタイプの構築」として、南海トラフや西南日本内陸

等を初め、各地を対象とした地殻活動シミュレーションや強震動予測シミュレーション等に資するための既存研究成果の数値化を行い、日本列島地殻構造データベースとして集約することを試みている。「日本列島下の地震波速度不連続面形状標準モデル」の作成にむけて、西南日本の地殻構造の既往研究のうち、地殻やマン托ルの境界面であるモホ面や、地殻内の地震波速度不連続面であるコンラッド面の形状の研究成果と、フィリピン海プレートの研究成果を組み合わせて数値化する試みがなされた。

3-2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

日本で地震や火山噴火が発生するのは、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 of 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、上部マン托ルにおける水の供給・輸送過程と、島弧の発達過程を規定するマグマの生成・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。このためには、水やマグマ等の地殻流体の分布を含む広域の地殻・上部マン托ル構造を明らかにし、プレートの沈み込みによって生成され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長期的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

GPS や SAR などの宇宙技術を用いた地殻変動観測と、地震の発震機構解を用いた応力場についての観測研究を実施した。ロシア沿海州における観測により、アムールプレートのユーラシアプレートに対する相対運動速度が有意に大きくなく、アムールプレートをユーラシアプレートからあえて独立させる必然性が低いことがわかった。また、四国地方西部から九州地方に至る領域は、南北張力の正断層型の応力場として特徴づけられるとともに、別府-島原地溝帯（九州北部）の東部においてせん断応力の空間変化が大きいことが見出された。

・上部マン托ルとマグマの発生場

北海道、東北及び九州地方において、背弧側深部から火山フロント直下へのマン托ル上昇流が地震波速度の低速度域として明瞭になった。さらに、マグマ供給経路が地震波速度構造のみならず比抵抗構造からも、低比抵抗域として捉えられた。また、伊豆弧沿いの火山フロント直下の深さ 50~100 km の上部マン托ル内では北部と南部に低速度域が存在し、そこでは地震波の散乱強度も高いことが示された。

・広域の地殻構造と地殻流体の分布

地震は低地震波速度・低比抵抗域を避けて、その近傍の高速度・高比抵抗域で発生するという観測事例が増えてきた。また、地殻内で発生した大地震の震源直下には局所的に低速度・低比抵抗域が存在するという観測事例も増えている。低速度・低比抵抗域は流体の存在を示唆しており、地震発生との強い関連が考えられる。また、地震波速度構造と温度構造と地震発生層の下限の深さに良い相関があり、地震の発生は温度に主に依存していることがより明瞭となった（図 8）。例えば、日高山脈（北海道）の南西域や東北地方の太平洋側には低温の領域が分布し、地震発生層の下限が深い。一方、火山フロント及びホットフィンガーに沿って高温域が分布し、地震発生層の下限は浅くなる。四国地方の中央構造線に沿って、スラブ由来の流体により地震発生層の下限が局所的に浅くなる領域も確認された。これらの観測事例を総合的に考えれば、流体があることや温度が高い場所では地殻は塑性変形しやすく、その結果、周囲の脆性的領域では応力集中が引き起こされ、地震が発生すると考えることが妥当であると思われる。

長期的ゆっくり滑りや深部低周波微動が発生するフィリピン海プレート上部の海洋性地殻は、顕著な低速度・高ポアソン比の異常域として特徴づけられ、高压流体もしくは大量の流体の存在が示唆される。これは、ゆっくり滑りの発生に流体が強く関与していることを意味する。また、長期的ゆっくり滑りの多くは、主として前弧側の上盤プレートと海洋性地殻が接する境界で発生する。一方、深部低周波微動は、蛇紋岩化したマントルウェッジと海洋性地殻が接する境界で発生することが明らかとなった。また、紀伊水道下において、フィリピン海プレートは断裂しているか、あるいは傾斜が急変するなど周辺域と構造が大きく異なることが示された。

・地震活動と火山活動の相互作用

伊豆大島（東京都）では、火山周辺の震源分布と地震波速度構造に強い関連が見られる。火山性地震の活動、及び 2～3 年間隔で発生するマグマ貫入は、P 波速度 5.5～6.0 km/s 層に集中している。1986 年の割れ目噴火時の震源も、上記の層に集中していたと推定される。深部からのマグマ貫入は、この層で浮力中立となって滞り、その後のマグマの動きが伊豆大島火山の噴火様式を決めていると考えられる。火山直下の詳細な速度構造が深部まで推定できた例は少なく、火山活動や噴火現象の理解に役立つ基礎データが得られた。また、始良カルデラ（鹿児島県）では、マグマ溜まりと考えられる低速度領域内の地震活動が極めて低調であることが明らかとなった。

・地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

千島海溝沿い、日本海溝沿い、相模トラフ沿い及び南海トラフ沿いにおける津波堆積物調査により、過去の巨大地震の地震像が次第に明らかになってきた。特に日本海溝沿いでは、869 年貞観地震に伴う津波より後に堆積した津波堆積物（13～15 世紀頃の年代）が発見され、広域に堆積物が認められる津波が 450～800 年間隔で発生していたと考えられる（図 2）。また、千島海溝沿いでは過去 3000 年間に巨大津波が 6～8 回発生したことが確認され、千島海溝沿いの巨大地震・巨大津波の発生に関する研究をより一層推進することが重要であることが示された。

（２）地震・火山噴火に至る準備過程

（２－１）地震準備過程

地震発生の準備過程を解明するために、地殻とマントルで応力が特定の領域に集中し地震発生に至る過程を明らかにする。プレート境界地震に関しては、アスペリティ分布の推定精度を向上させるとともに、アスペリティ域の物性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。さらに、プレート境界面上の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。内陸地震に関しては、広域応力場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について定量的にモデル化を行う。地震発生層（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。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。

・アスペリティの実体

自然地震と人工地震探査のデータを合わせた地震波トモグラフィ解析や、地震の発震機構解による応力場の推定を行った結果、宮城県沖におけるプレート間固着の空間変化には、マントルウェッジ内の不均質構造とともに、プレート境界面の形状が影響を及ぼしていることを示唆する結果が得られた。日向灘南部における精度の良い震源分布、発震機構解を求め、プレート境界の等深度線を低角逆断層型の地震の発生位置から推定した結果、九州パラオ海嶺とは別の沈み込んだ海山に対応する境界面の高まりが見つかった。この場所は、1968年日向灘の地震（マグニチュード7.5）のアスペリティの南側に位置しており、同地震ではこの高まりが障壁となり破壊が南側には伝播しなかった可能性が示唆された。

・非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

2003年と2010年に豊後水道で発生した長期的ゆっくり滑りの発生中に、ゆっくり滑りを起こしている領域内で発生する微動と足摺岬沖で発生する浅部超低周波地震とが同期していることが明らかになった（図9）。これらの活動域は1946年南海地震の震源域の西隣に位置し、海溝型巨大地震の破壊過程の評価や準備過程を監視する上で非常に有用である。また、高感度加速度計（傾斜計）データにより検出された短期的ゆっくり滑りとそれに伴って発生する深部低周波微動活動の発生過程について、以下のことが明らかにされた。(1)深部低周波微動は短期的ゆっくり滑りに1-4日先行して活動を開始する。(2)微動活動は短期的ゆっくり滑りの滑り域周辺から開始する。(3)微動の発生域は時間とともに移動して短期的ゆっくり滑り発生域に達すると活発化し、これに同期して短期的ゆっくり滑りが発生する。このような短期的ゆっくり滑り・微動の発生過程は、プレート境界における滑り特性の不均質性を反映している可能性がある。

・ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

GPS連続観測網（GEONET）データによる新潟県から福島県に至る地殻変動速度の空間分布について、2002～2004年と2008～2010年の2期間を比較したところ、太平洋側のひずみ速度は、海溝型地震の発生と余効滑りにより顕著に変化した。ひずみ集中帯でのひずみ速度はほとんど変わっていないことが示された。この結果は、ひずみ集中帯での東西圧縮が太平洋プレートの沈み込みとは直接関係していないことを示唆しており、ひずみ集中帯の成因を考える上で非常に重要な知見である。

・スラブ内地震の発生機構

東北地方中央部～南部の太平洋側、北海道東部太平洋側に面間地震活動が集中していることが明らかとなり、それらの場所は、海山地形の発達する領域のプレート沈み込み方向延長上に位置している。このことから、面間地震の発生に岩石の脱水反応が関係していることが示唆された。紀伊半島沖の東南海・南海地震震源域境界周辺において行われたトモグラフィ解析により、南海トラフ軸周辺から紀伊半島下までの範囲で精度の高い震源を求めた結果、潮岬沖南海トラフ軸から紀伊半島南西部を結ぶ境界を挟んで、スラブ内地震の深さが、境界より西側ではスラブ内の浅い場所で、境界より東側では深い場所で発生していることが明らかになった。

(2-2) 火山噴火準備過程

火山噴火予知研究の進展により、観測網が整備された火山では噴火時期及び噴火場所の予測に目途が立ち、気象庁が全国の29火山を対象に噴火警戒レベルを発表するようになった。火山噴火予知研究の一層の高度化のため、噴火規模、様式及び推移の予測を目指した研究に重点を置いて推進している。そのため、噴火現象を支配する物理・化学法則を明らかにし、それらを組み入れたモデルを構築し、観測データをモデルに当てはめて現象を予測することを目指している。噴火に至るまでの現象を理解するため、マグマ上昇・蓄積過程の解明、地質調査による噴火履歴の解明、及びマグマの発達過程の解明を目指した研究を推進した。

・マグマ上昇・蓄積過程

観測網の整備により、火山直下のマグマ蓄積過程が観測から明瞭にとらえられるようになってきた。マグマ蓄積過程の様態と噴火に至るまでの過程の比較は重要であることがわかってきた。岩手山（岩手県）や伊豆大島（東京都）などの現在静穏な火山では、マグマの貫入による山体の膨張と収縮を繰り返し、それに同期して火山性地震活動の変化が見られる。一方、2011年霧島山（新燃岳）噴火では、約1年前から火口から北西方向に7～8km離れた地下約10kmでマグマ蓄積が始まり、約1年間マグマ蓄積が継続した後にマグマ噴火を発生した。つまり、1回のマグマ蓄積で一連の中規模マグマ噴火を引き起こした。また、桜島（鹿児島県）では2006年以降噴火活動が活発化し、中～小規模の噴火が続発している。それと並行して桜島島内北岳の北東から北山麓に圧力源は膨張・収縮を繰り返す一方で、マグマの供給源であると思われる始良カルデラ内の圧力源は膨張を続けている。つまり、マグマが継続的に深部から供給され、それが長期間蓄積されず噴火に結びついている。以上のようなマグマ蓄積の様態の差異と、噴火様式の違いが明瞭に捉えられてきた。この原因は、マグマ蓄積速度と火道の状態、つまり、火口とマグマ溜まりが繋がっている解放系であるか、火口が閉じている閉鎖系であるかの違いを反映しているのかもしれない。このような観点から、火山噴火準備過程を理解することが重要であると思われる。

・噴火履歴とマグマ発達過程

火山噴火の規模や様式にはマグマの性質が大きくかわるので、マグマの化学組成と噴火規模や噴火様式を比較することが重要である。桜島火山の過去の火山灰層の堆積した順序を調査し、火山噴出物の化学組成の時間変化を検討した。その結果、19世紀以前の噴火噴出物は珪長質マグマと安山岩質マグマが混合してできているのに対して、20世紀以降の噴火ではそれらに玄武岩質マグマが

加わっていることや、玄武岩質マグマの量は最近になるほど増えていることが明らかになった。これは、19世紀以前から始良カルデラ直下に存在した珪長質マグマと安山岩質マグマの溜まりに、20世紀以降は玄武岩質マグマが桜島直下で加わり、そのため噴火の様式が変化したものと解釈される(図10)。すなわち、文明噴火(1471~76年)及び安永噴火(1779年)や、20世紀以降でも玄武岩質マグマの関与が小さい大正噴火(1914年)では、山腹により多量の溶岩が流出するとともに、火山口から多量の火山灰が噴出する大噴火が起こった。一方、昭和噴火(1946年)や1950年以降の噴火は、断続的に火山灰を噴出する中~小規模の噴火活動に変化した。また、20世紀以降では一連の噴火活動の初期に、玄武岩マグマ成分が一時的に増えることも明らかになった。このようなマグマの化学組成が、噴火様式を特徴づけている可能性が高いと思われる。

(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

地震発生時刻の予測精度を高め、短期予測を可能にするためには、地震発生の直前に発生する非可逆的な物理・化学過程(直前過程)を理解して、予測シミュレーションモデルにそれらの知見を反映させ、直前過程に伴う現象を的確に捕捉して活動の推移を予測する必要がある。これまでの研究によって、地震に先行して発生する現象は多種多様であり、地震発生準備過程から直前過程にまたがって発生する現象の理解を進める必要性が認識されてきた。このために、地震に先行する地殻等の諸過程を地震発生先行過程と位置付けて研究し、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

南アフリカ大深度鉱山内で震源に極めて近い場所に設置したひずみ計では、従来から短期的ゆっくり滑りに相当する活動の発生前の前駆滑りが多数検出されていたが、地震の前駆滑りは見つかっていなかった。2010年に、マグニチュード0.3の地震の震源から20m以内にあるひずみ計で、明瞭なひずみ変化が地震発生の6.5時間前から捉えられた(図11)。地震によるひずみ変化の極性と、地震に先行するひずみ変化の極性が一致していることなどから、天然の地質構造の中で発生した地震の前駆滑りが、世界で初めて明瞭に捉えられた例である可能性が非常に高い。ただし、室内実験や数値シミュレーションで示されているような、地震発生の直前に前駆滑りが加速する振る舞いは見られなかった。また、これまで鉱山内の震源の至近距離観測において、より大きな地震の前にひずみ変化が観測されなかった例も多数ある。どのような場合に前駆滑りが起こるのか、今後良質のデータの蓄積を待って検討する必要がある。

規模の大きい地震の数日前に電離層に存在する総電子数(TEC)の日変化の振幅が小さくなることが、海外の大地震について示されている。日本の内陸地震についてその検証を試みた。2007年新潟県中越沖地震では、TEC減少が比較的明確に見られたが、2008年岩手・宮城内陸地震では、異常検出に最も適した太陽活動の最小期であったにもかかわらず、地震と関係ない時にもしばしば起きている程度の異常しか認められなかった。更に他の例を検討する必要がある。また、地震に関連した異常がなぜ電離層に現れるのか物理メカニズムを調べることが重要である。

- ・ 先行現象の発生機構の解明

地震発生サイクルのシミュレーションなどに用いられている従来の摩擦則には、どのような実験によるデータに対しても共通する系統的なずれがあった。最近、室内実験データの詳細な検討し、このずれを解消する新たな摩擦則が提案された。この摩擦則を用いて、地震発生サイクルのシミュレーションを単一バネ・ブロックモデルで行い、従来の摩擦則によるモデルと比較したところ、サイクル後半の固着状態の減少がかなり大きくなることがわかった。もし、この摩擦則が正しいとすれば、地震発生前の前駆滑りは大きくなるので、観測により検出できる可能性が従来考えられていたよりも高いことを示唆している。

(3-2) 地震破壊過程と強震動

大地震の破壊の様子を詳しく調べることによって、大地震発生の際に震源域において破壊が開始した地点や、アスペリティ周辺の応力や強度に関する特徴を知ることができる。それらの知見から、大地震発生による強震動と津波の高精度な予測や評価が正確にできるようになり、災害軽減に結びつく。また、地震発生直後にその破壊過程を正確に理解し、即時的に強震動予測、津波予測を行うための手法開発が必要不可欠である。平成 22 年度は、複数の観測項目のデータを用いた逆解析手法に基づく震源過程解析手法の高度化と、その解析結果を用いた即時的強震動予測、津波予測を目指した手法開発とシステム開発を進めた。

プレート境界型地震の発生メカニズムの理解を深めるために、大地震のアスペリティ領域の高精度なマッピングと、断層周辺の不均質構造の調査やプレート形状との関連の研究が行われた。宮城県沖では、海底地震観測データと陸上観測データの併合処理により、宮城県沖地震の震源域周辺での高分解能の 3 次元地震波速度構造推定が行われた。さらに、これらの微小地震の発震機構解とその周辺の応力場の推定が行なわれ、プレート間の固着度が、プレート形状の変化による応力の空間的な変化やプレート周辺の物性（ポアソン比）の違いによる摩擦特性の変化に依存する仮説が提唱された。

大地震とその破壊過程を迅速に理解するため、リアルタイムの震源解析の手法・システムの開発と高度化をおこなった。強震波形逆解析に基づく震源過程解析の高度化や、曲がった断層面を想定した曲面断層モデルを用いた震源逆解析手法の改良などに大きな進展があった。また、地震計やひずみ計などの多項目の観測データを用いて、巨大地震の断層滑り分布を地震発生直後（10～20 分）に即座に推定する手法の開発が進められた。津波の即時予測の高度化に向けて、震源近傍の潮位記録や沖合にある津波計で時々刻々得られる津波波形データを順次取り込んで、波源推定と沿岸津波の予測を逐次行い、精度を改善する新しい津波予測手法の開発が進められた。

これまでの震源解析では、解析に用いた観測項目によって推定された震源モデルに大きな差異があり、正確な地震像を理解するのに時間を要した。多項目の観測データから統一的な地震像を得ることを目的とし、地震動、水中音波、地殻変動、津波のすべてを同時に評価する新しい計算コードを開発した（図 12）。これにより、大地震発生時の強震動や津波の予測の迅速化や、それらの結果を用いた災害軽減を目指した研究が推進されている。

(3-3) 火山噴火過程

噴火規模や様式、噴火推移を支配する要因を理解するためには、(1) 火道浅部におけるマグマの挙動や (2) 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。特に、火道でおこるマグマの挙動を調べるためには、繰り返し発生する火山を対象として集中的な観測を行い、そこで得られた多量のデータをもとに、噴火機構のモデル化をはかることが重要である。

・噴火機構の解明とモデル化

スメル火山（インドネシア）において、短時間に繰り返して発生する小規模な爆発噴火（ブルカノ式噴火）とガス放出（極めて小規模な爆発噴火）に伴う地震と傾斜の観測を行った。その結果、爆発現象に先行する山体膨張と爆発に伴う地震（爆発地震）の振幅に良い相関があることがわかった。つまり、爆発地震の振幅が大きいほど噴火の規模は大きく、地震の振幅が噴火規模の指標になる。さらに、爆発規模が大きいほど、爆発前における地盤の傾斜速度が大きく、最終的な傾斜量も大きい。このため爆発に先行する傾斜速度を用いて、それに続く爆発規模を予測することが可能であることが明らかになった（図 13）。今後、この解析結果と桜島（鹿児島県）や諏訪之瀬島（鹿児島県）の噴火の解析結果とを合わせてモデル化を進める予定である。

桜島では、地下構造の時間変化を明らかにするために、地震波による構造探査を実施した。この結果を用いて、爆発地震の発生源の位置の推定精度が上がると期待できる。また、浅間山（長野県・群馬県）では 2008 年、2009 年の微噴火に先行して、マグマ溜まりと推定される山体西方地下数 km 付近の地震波速度が約 1.5% 低下したことが捉えられた。

桜島、諏訪之瀬島、浅間山、新燃岳などの噴火に伴う火山ガスの化学成分の測定から、爆発的噴火に先行して二酸化硫黄の放出量が減少することが明らかになった。火山ガスの成分変化が噴火に先行して捉えられることから、火山ガスの常時観測、自動化等の測定手法の改良を進め、噴火発生予測に役立てるべきである。

・噴火の推移と多様性の把握

多様な噴火形態やその推移を支配する要因を理解するため、火山体浅部の熱水系や火道周辺等の地下構造を調査し、上昇してくるマグマと熱水系や火道構造の相互作用について考察し、噴火様式の特徴を明らかにすることは重要である。

2000 年に噴火した有珠山（北海道）では、規模の小さな軽石噴火の後、水蒸気爆発を繰り返した。地下構造とマグマの相互作用に注目し、何故、2000 年噴火が大規模なプリニー式噴火に発展しなかったのか調査する目的で、マグマが貫入した場所を平成 23 年度に掘削調査する予定である。掘削位置を決定するため、平成 22 年度は水準測量、SAR 干渉解析、重力測量、全磁力観測からマグマの貫入位置や形状の推定を行った。これにより、2000 年噴火口近傍の地下約 400～500m に、球状の固結したマグマが存在することが明らかになり、これを目指して掘削することが適当であることがわかった。

2010 年 8 月末から噴火したシナブン火山（インドネシア）で地質調査を行い、この火山では、山体形成後にプリニー式噴火がほとんどなく、水蒸気爆発、溶岩ドーム形成と火砕流発生を繰り返していることを明らかにした。つまり、この火山ではマグマから火山性のガスが抜けやすい条件がそろっていたことを示している。この特徴は有珠山との類似しており、有珠山の掘削による成果と合わせて、マグマ中から脱ガスしやすい条件を作るメカニズムについて研究を進める。

(4) 地震発生・火山噴火の素過程

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、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する。地下深部の岩石の物性及び環境をリモートセンシングにより推定することが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る。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する。また、火山噴火の数値モデル作成のために、マグマの分化・発泡・脱ガス過程について実験・理論的研究を進める。

・岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

ガウジを含んだ断層面の摩擦特性を明らかにするために、多数のガラスビーズからなる模擬ガウジ層を用いて摩擦実験を行った。滑りが高速になると摩擦が滑り速度とともに大きくなる速度強化が見られた。またガウジ層が著しく膨張することもわかった。併せて数値シミュレーションも行い、高速域でせん断速度を変化させた時の摩擦抵抗の変化は、低速域で見られるような特徴的滑り距離ではなく、特徴的時間で規定されることを示した。このことは、自然地震では臨界滑り量が地震の規模とともに大きくなるとする経験則の、科学的な裏付けを与える可能性がある。

断層バルブモデルは内陸地震発生に関する有力なモデルのひとつと考えられている。このモデルは、地震発生層下部(温度約300°Cの深度)で沈殿などにより流れをさまたげるシールが形成され、それより深部で間隙水圧が上昇し、そこから破壊が開始するというものである。このモデルの妥当性を検証するために、地殻内の亀裂を上昇する流体からの鉱物の析出に関する熱力学的シミュレーションを行った。鉱物の析出がもっとも顕著なのは、地殻の温度とは無関係に流体が上昇を開始する所であり、断層バルブモデルで主張されているような深度でシールが形成される必然性がないことを示した。

・地殻・上部マントルの物性の環境依存性

速度構造から地球内部の温度不均質や流体分布を定量的に推定するためには、非弾性の効果を見積ることが重要である。上部マントルに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、弾性定数と減衰の周波数・温度・粒径依存性を調べた。規格化した周波数を使うと、減衰の周波数依存性は、温度や粒径に依存しないひとつの関数で表せることから、多結晶体の非弾性特性は物質によらない普遍性があることを示した。

・マグマの分化・発泡・脱ガス過程

マグマの脆性破壊による亀裂の形成は、火道浅部の脱ガスの素過程として重要である。発泡した流紋岩質マグマの高温封圧下でのせん断変形実験を行い、破壊面に沿って脱ガスが生じることを明らかにした。さらに、マグマ破断面の癒着実験を行い、癒着に要する時間は亀裂が脱ガスの通路として働くのに十分な長さであることを示した。

間欠泉アナログ実験を系統的に行い、噴出様式および噴出量を支配しているプロセスについて検討した。過熱速度及び発泡のしやすさを制御した実験から、噴出様式と噴出量は、マグマ溜まりの過熱速度によって統一的に整理できることを明らかにした。

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

日本列島周辺では、巨大地震はプレートの沈み込みにより発生するため、プレートの固着状態のモニタリングが重要であり、その手段として海域における地殻変動観測は、今後一層強化する必要がある。GPS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測技術の開発では、観測誤差を軽減するため海中音速分布推定法の高度化、GPSによる船位推定精度の向上を目指した技術開発を推進した。また、三陸沖から四国沖に展開されている精密海底測位用海底局の一部更新が行われた。水圧計を利用した海底上下変動観測では、海洋変動による影響を軽減するための補正手法の開発が進められた。

陸上に比べて観測点が少ない海底地震観測の重要性は広く認識されているが、実用化が進むまでは、技術的に解決すべき課題が残されている。次世代型広帯域海底地震計では、センサー部をデータ収録部と切り離して海底に埋設することにより、10秒より長周期側では陸上での地震観測に匹敵する品質の地震記録を取得できることを実証した。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を開発して設置し、良好なデータが得られていることを確認した。平成21年度までに開発したネットワーク技術を導入した次世代ケーブル式海底地震観測システムを、粟島（新潟県）の南方の日本海に設置し、実用化のための試験を開始した（図14）。このシステムでは地震計を小型化し、ノイズの小さい海底に埋設設置できるようにしたため、SN比の高い良質のデータがリアルタイムで取得することを可能にした。

(2) 宇宙技術等の利用の高度化

陸上の地殻変動観測では、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技術が主流となっているが、高精度化のために解決すべき課題は残されている。GPSやSARの観測精度向上のため、大気伝搬遅延の推定に数値気象モデルを利用した研究が進められている。また、GPSのマルチパス誤差の定量的評価に関する研究も進められた。さらに、GPSを用いてリアルタイム変位時系列を検出する手法の開発も進められ、2008年岩手・宮城内陸地震のデータにこの手法を適用し、永久変位量を地震後3分以内に推定することが可能であることを示した。これは巨大地震の即時的規模推定への応用が期待できる。

大地震の震源域付近で地盤の大変形が生じ、通常SAR干渉解析によって地殻変動を推定することが困難な場合に、ピクセルオフセット解析を併用して、断層運動を推定する手法を高度化した。また、SAR干渉解析手法を改良し、三宅島では2008年度まで14cm/年の速度で進行していた沈降が、2010年においては、3cm/年にまで減速したことを明らかにした。

火山噴火の際に火口近傍での各種観測を行えるようにするため、産業用小型無人ヘリコプターを用いた実験観測を行った。ウインチ等の駆動やデータ伝送系を改良し、無人ヘリコプターを用いて遠隔で地震計を設置することに目途がついた。

気象レーダーによる爆発的噴火の観測を試行した。桜島噴火の噴煙の移動を高時間分解能（1分毎）、高空間分解能（250～500m）で捉えることができた。また、レーダー画像から、爆発的噴火の噴煙検出の試みがなされ、走査頻度を増加させれば、小規模な爆発も検出可能であることが判った。このようなレーダーによる噴煙観測技術が向上すれば、降灰予測及び火山灰拡散予測手法の高度化にも応用できると期待される。

(3) 観測技術の継続的高度化

高エネルギー粒子ミュオンを利用した火山体内部透視装置の開発を推進した。ミュオン検出の計数機を従来の2枚から3枚に増やしたシステムを開発し、性能の向上を確認した。ミュオン透視技術より明らかにした桜島の火道形状と、絶対重力連続観測の比較を行うことにより、マグマ頭位と火山活動の対応を見出した。また、ミュオン透視技術による断層破碎帯の観察も行い、表面から破碎帯内に降水がしみこんでいく様子を捉えることに成功した。

可搬性能の高い高精度小型絶対重力計の開発を進めた。装置の運搬中や測定中に起こる問題点の洗い出しを行った。また、開発した装置の誤差を評価したところ、市販の絶対重力計と同等レベルであることが検証できた。

高精度で安定であるレーザー技術を利用した大深度ボアホール内に設置可能な広帯域地震計及び傾斜計の開発を進めた。温度250℃の環境下と見積られる大深度ボアホールでの設置を想定し、熱膨張による光学素子の損傷防止、耐高温光ファイバー・光学部品を用い、熱膨張ひずみの影響を軽減する装置を試作した。

4. まとめ

平成 22 年度には、大きな地震及び火山噴火が発生した。特に、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、2 万人以上の犠牲者と行方不明者を数え、改めて地震、津波、火山を研究する本研究計画の社会的重要性を自覚するとともに、本研究計画を着実に推進し、これらの自然災害の軽減に資する研究成果を積み上げる責任の重さを実感した。

東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード 9.0、震源断層の大きさがおよそ 500km×200km という超巨大地震であった。多くの研究者が、種々の観測データを用いてこの地震の断層滑り量を推定し、最大滑り量が 50m にも及ぶというモデルも提出されている。いずれのモデルでも破壊開始点付近に大きな滑り量があったという共通点があるが、詳しく見ると相互に異なり、今後も東北地方太平洋沖地震の地震像についての研究を推進する必要がある。東北地方太平洋沖地震は、既知のアスペリティの複合破壊では説明できず、これまでの単純なアスペリティモデルの見直しが必要であろう。その際には、地球物理学の知見だけに頼るのではなく、地質学的情報も十分に取り入れた包括的なモデルを構築することが重要である。

2011 年 1 月下旬に、霧島山新燃岳では約 300 年ぶりに本格的なマグマ噴火が発生し、噴石被害や土石流の発生の危険から、周辺住民が一時避難する状況となった。噴火前に、火山周辺に基盤的観測点が新設されていたことから、既設観測網と併せて、有用な観測データが得られた。マグマ蓄積から噴火に至るまでの状況、爆発噴火時の火道・マグマ溜まり系の内部圧の変化、火山噴出物量とマグマ溜まりの収縮量の関係、爆発的噴火後の小規模噴火発生現象等について、火山噴火予知研究に重要な知見が得られている。

本計画から本格的に志向している地殻活動予測システムの開発において、以下のような成果が得られた。地震発生予測では、南海トラフで観測されている短期的及び長期的ゆっくり滑りと巨大地震を単一のシミュレーションにより再現することに成功し、また、データ同化を組み合わせた予測システムを開発するために模擬データによる実験を行った。火山噴火予測では、現在噴火活動が進行している霧島山新燃岳の噴火シナリオを作成し、噴火推移の進行とともに、どのように修正し、改善して行くかについて、実証的な実験を行っている。

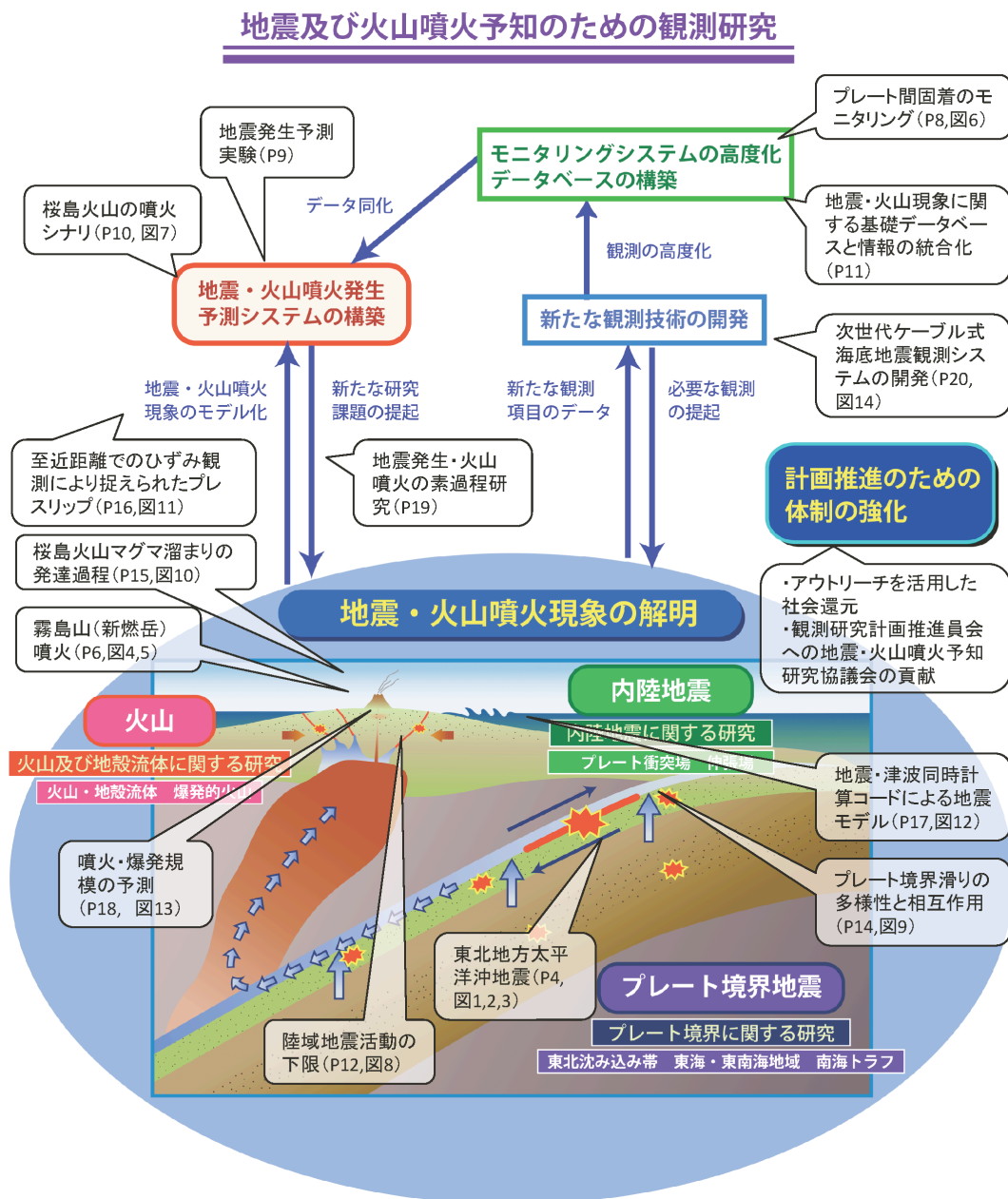
地震発生予測に必要な物理モデルの作成のため、地震現象の解明に関する研究を推進した。地震波速度構造と比抵抗構造の研究が進展し、内陸地震発生に関する地殻内流体や温度の影響の理解が深まった。西南日本の短期的ゆっくり滑りに関して、深部低周波微動活動が短期的ゆっくり滑りに先行すること、微動発生域が微小な応力変化に対して非常に敏感に反応することが示された。南アフリカ大深度鉱山内の震源極近傍に設置したひずみ計で、地震前の明瞭なひずみ変化が捉えられた。また、地震波データ、地殻変動データ、津波データを同時に評価する新しい計算コードが開発された。

火山噴火予測モデル構築のため、噴火頻度の高い火山での地震、地殻変動、火山ガス等の観測研究を行った。スメル火山（インドネシア）では、ブルカノ式噴火の噴火規模とそれに先行する傾斜変動速度に相関があり、傾斜変動速度から噴火規模の予測が可能であることがわかった。今後は、同様の噴火様式の他の火山、特に国内の火山にも適用できるかについて研究を進める必要がある。長期的な噴火様式の変化には、マグマの化学成分の変化が大きく関与している。20 世紀を挟んだ桜島火山の噴火様式の変化は、玄武岩質マグマが関与している可能性が示され、マグマ蓄積系の進化による噴火様式の変化についての知見が得られた。

新たな観測技術の開発により、海底地殻変動観測技術、海底地震観測技術の高度化が行われた。

ネットワーク技術を導入した次世代ケーブル式海底観測システムでは実用化試験が行われ、地震計の埋設設置によるデータ品質の向上等、その長所が明らかになった。また、GPS や SAR の解析技術の高度化も継続して行われた。

平成 22 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、当初から計画された研究については、順調に研究が進められ、5 か年計画の 2 年度目としての所期の成果が得られた。また、平成 22 年度に発生した東北地方太平洋沖地震は、従来の我々の考えを一変させる可能性のある現象である。この地震についての研究をさらに進める一方、得られた研究成果を元に、必要があれば、新しい考え方の枠組みを導入した上で、地震及び火山噴火予知研究をさらに推進する必要がある。



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を参照

東北地方太平洋沖地震の破壊プロセス

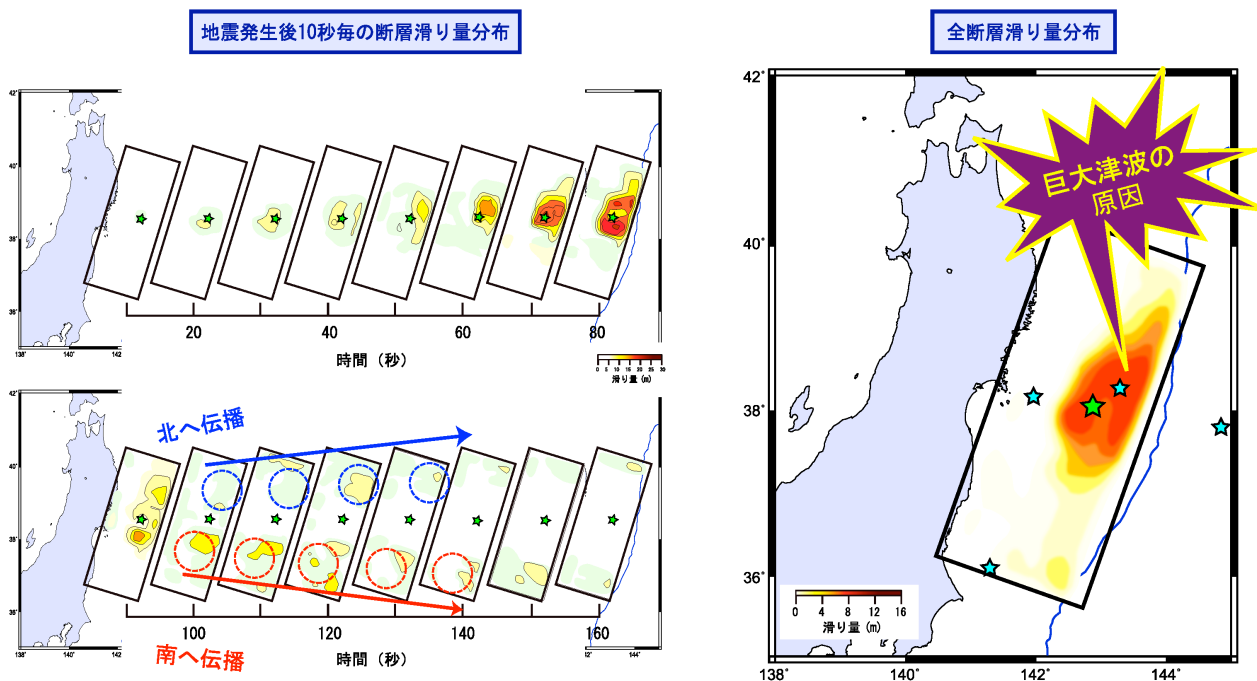


図1. 2011年東北地方太平洋沖地震の破壊プロセス

強震観測網等の地震波形を解析して推定された10秒毎の断層滑り量のスナップショット（左図）と全滑り量の分布（右図）。断層滑りは破壊開始直後、震源（緑星印）から主として東の海溝側へ伝播していき、80秒後からは南北に伝播していった。海溝近傍では30m以上の滑り量が推定されており、それが大津波の原因となったと考えられる。

東日本太平洋沿岸の津波堆積物分布から推定された大地震

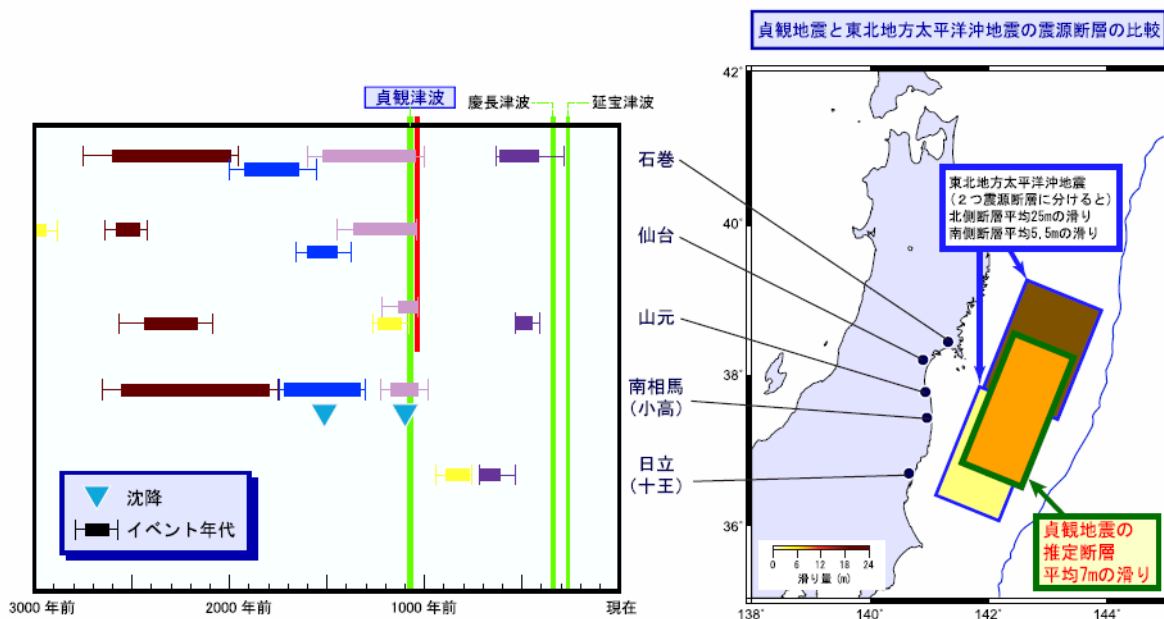
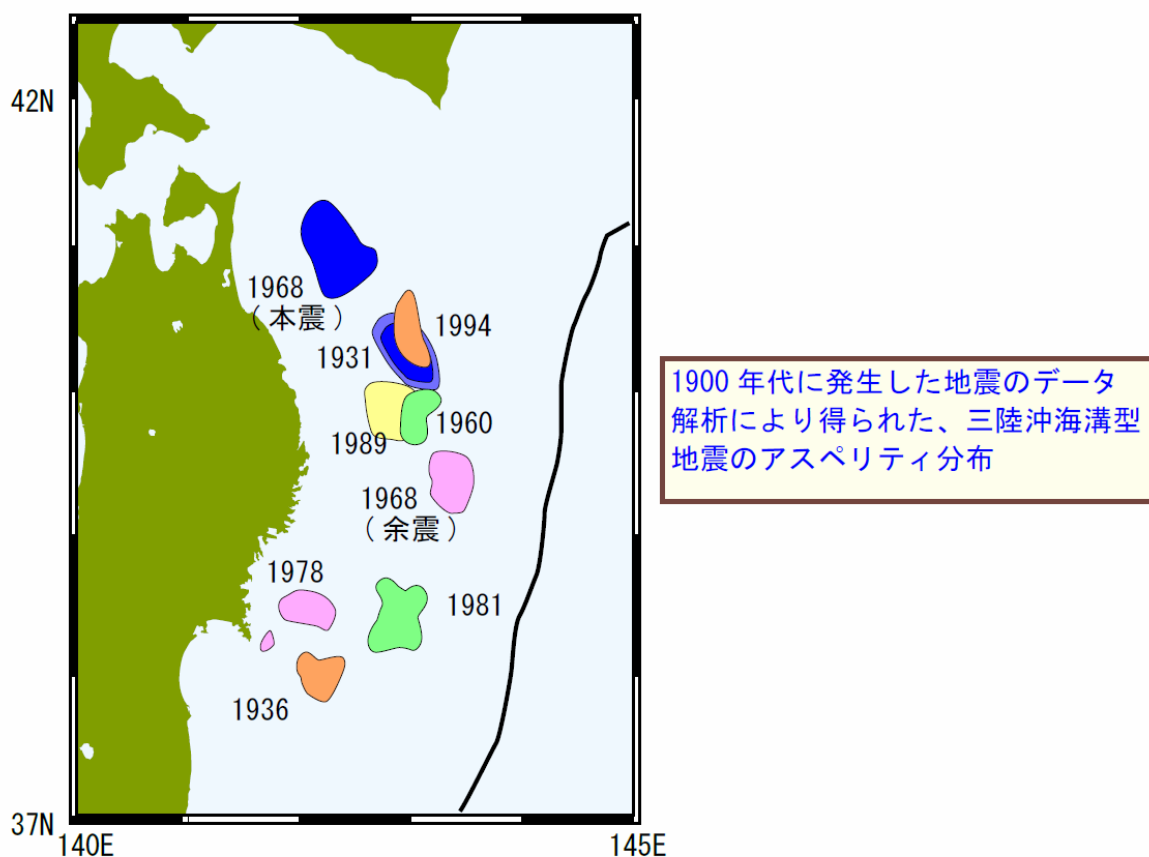


図2. 津波堆積物から推定された東北地方太平洋沿岸で過去に発生した地震

左図：日本海溝沿いの津波堆積物調査結果から推定された大地震発生年代の広域的な対比。右図：東北地方太平洋沖地震の滑り量分布と、津波の浸水域に基づいて推定された869年貞観地震の震源断層モデル（地震断層の長さ200km以上、幅100km以上、平均滑り量7m以上、マグニチュード8.4以上）。

2011年東北地方太平洋沖地震の滑り分布と、 1900年代の地震で破壊したアスペリティ



種々のデータ解析により推定された東北地方太平洋沖地震の滑り分布

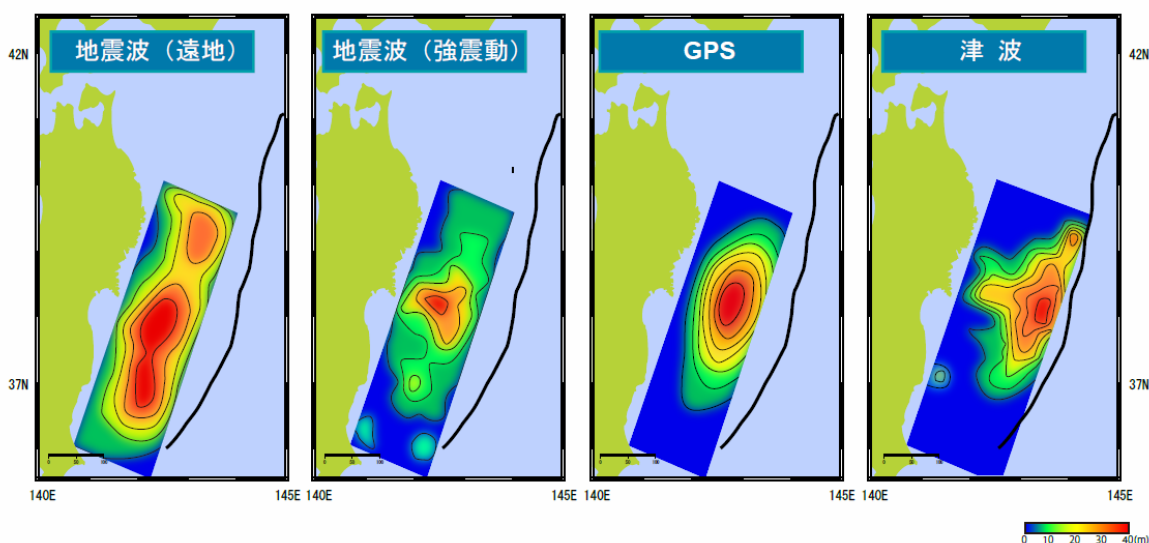


図3. 2011年東北地方太平洋沖地震と三陸沖アスペリティ

上図：20世紀に発生した大地震のアスペリティ分布。下図：遠地震波、強震動、GPS、津波の各種データ解析により推定された東北地方太平洋沖地震の滑り分布。得られた結果は、海溝付近の滑りなど詳しく見ると異なっている点もあるものの、いずれも破壊開始点付近で大きく滑っているなど共通性が見られ、これまでに存在のわかっていたアスペリティの複合破壊では説明できないことを示している。

2011年1月霧島山（新燃岳）噴火時のマグマ移動

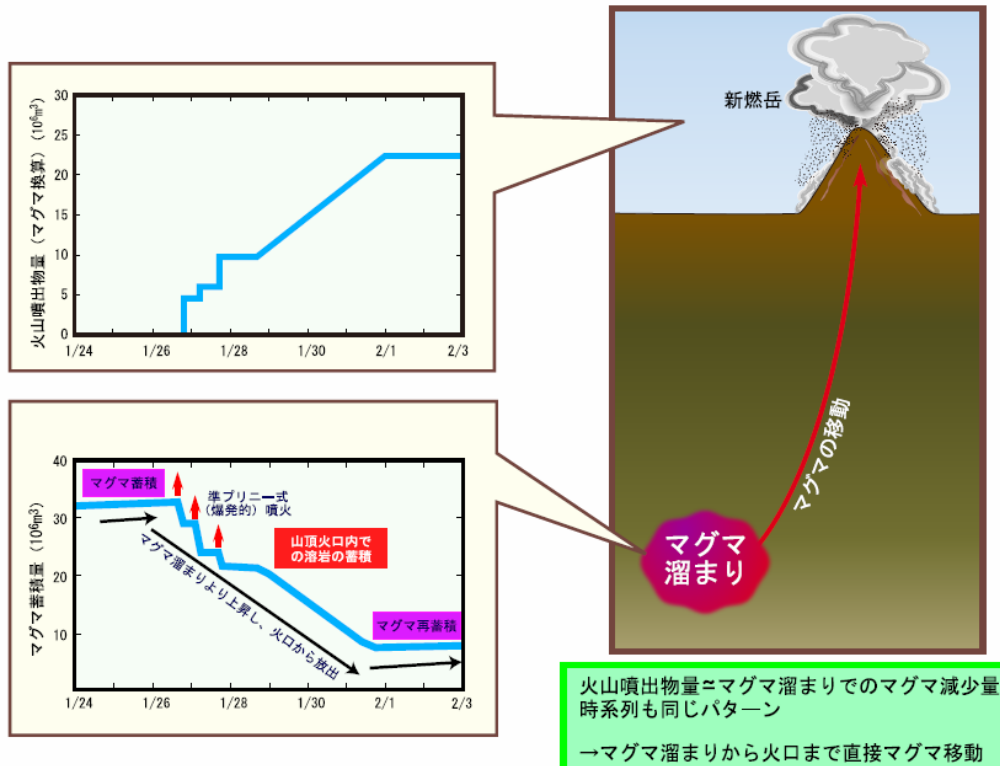


図4. 2011年1月霧島山（新燃岳）噴火時のマグマの移動

2011年1月26日～31日にかけて、霧島山新燃岳で約300年ぶりに本格的なマグマ噴火が発生した。その際に、火口北西7～8km深さ約10kmのマグマ溜まりから、火口へマグマが移動するようすが明瞭に捉えられた。マグマ噴火を理解するうえで、重要な情報である。

霧島山（新燃岳）平成23年2～3月の噴火

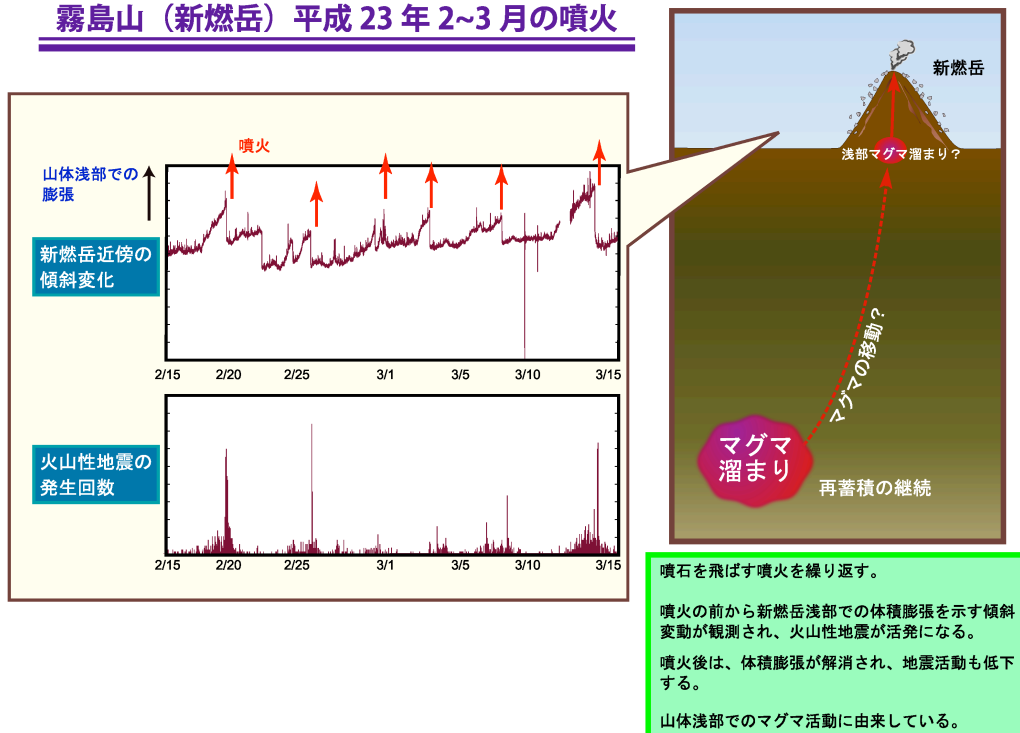
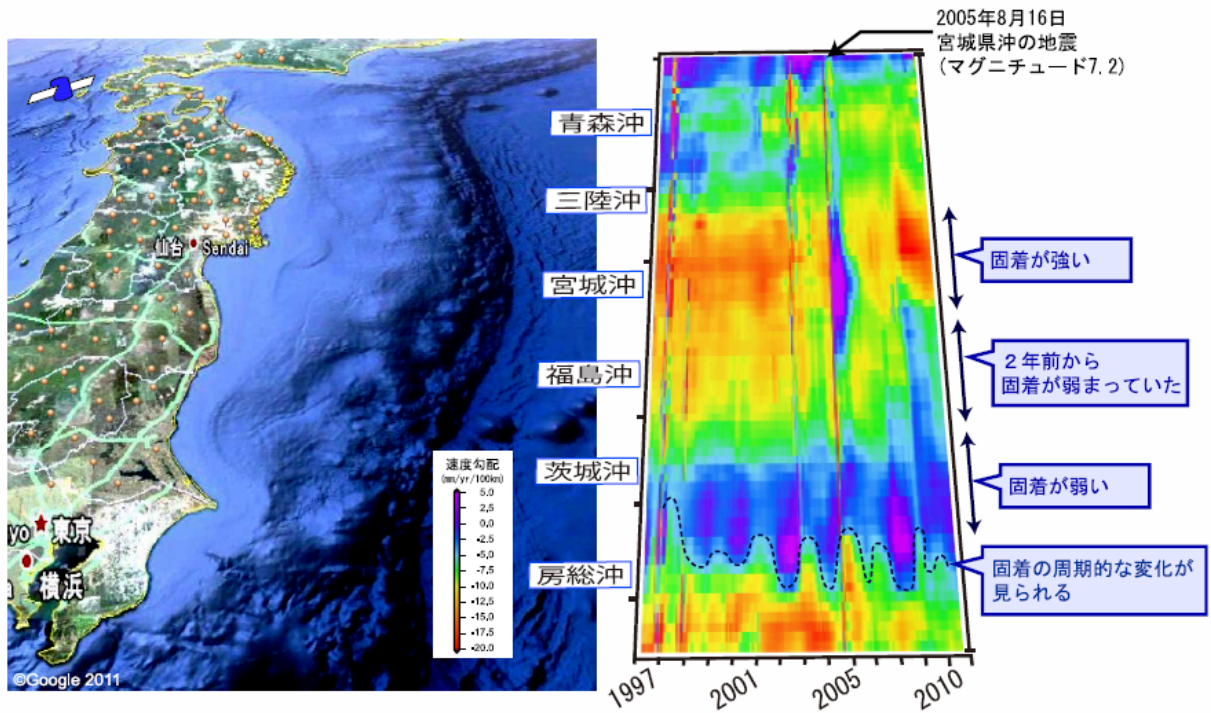


図5. 2011年2月～3月の霧島山（新燃岳）の噴火活動

1月26日～31日のマグマ噴火後は、火山活動は相対的に低下したが、その後も継続している。2011年2月～3月にはブルカノ式噴火が発生した。噴火前に山体浅部での体積膨張があり、徐々に火山性地震の回数が増加する。噴火時に地震活動が極大となり、噴火後は地震活動が低下し、山体浅部も急激に収縮し、元の状態に戻る。このようなサイクルを数日間間隔で繰り返す活動が見られた。

東北地方太平洋沖のプレート間固着のモニタリング



陸上GPS観測データから求めた水平変位勾配の時間変化

過去1年間の平均変位速度場からのずれを示し、暖色ほど変位速度が遅い（固着度が高い）領域を表わしている。

図6. 東北地方太平洋沖のプレート間固着状態の時間変化

陸上のGPSデータから推定したプレートの沈み込み速度と長期的なプレート沈み込みの平均速度の差を推定し、その時間変化を示した。暖色ほど速度差が小さく、プレート間固着が強いことを示す。寒色は固着が弱く、プレートがずるずると滑っていることを示す。2003年十勝沖地震（マグニチュード8.0）の余効滑り、2005年宮城県沖の地震（マグニチュード7.2）の影響が表れている。2008年頃からは、福島県沖から茨城県沖にかけての地域は固着が弱まった。一方、三陸沖から宮城県沖の地域は、固着が強まっていたとみられる。

桜島火山の噴火シナリオ

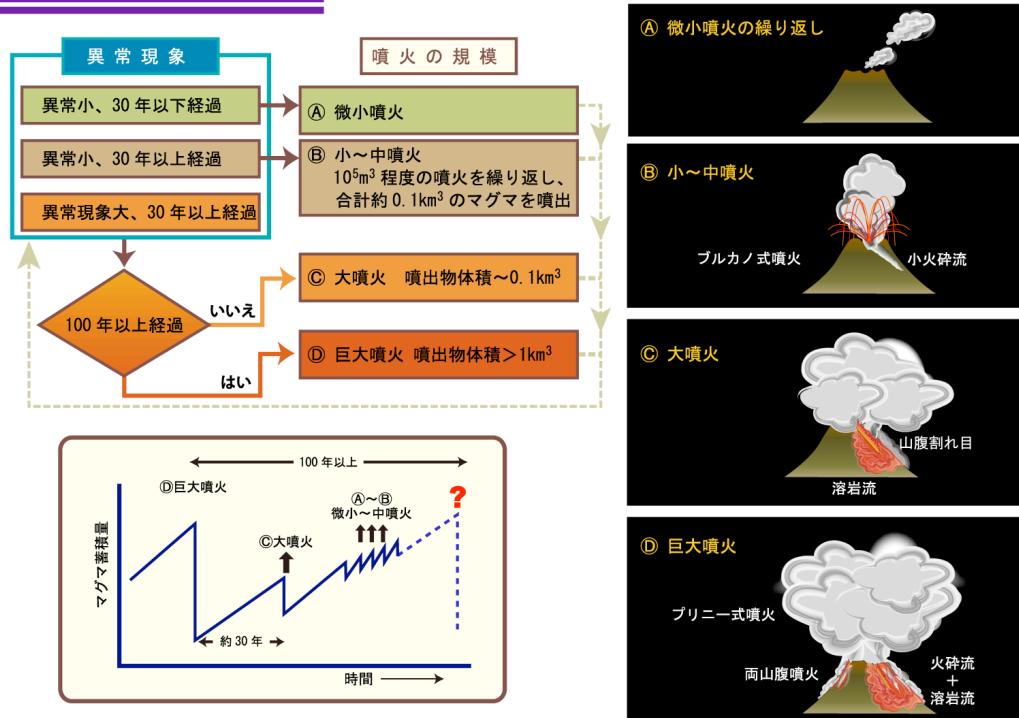


図7. 桜島火山の噴火シナリオ

歴史時代に記録の残っている規模の大きな噴火事例を用いて桜島火山の噴火シナリオを作成した。桜島火山では、前回の規模の大きな噴火からの経過時間によって噴火規模が決まる傾向がある。これは、噴火を引き起こす始良カルデラ直下のマグマ溜まりに深部からマグマが供給され、一定の蓄積速度でマグマが蓄積していることによると考えられる。

陸域の地震活動の下限

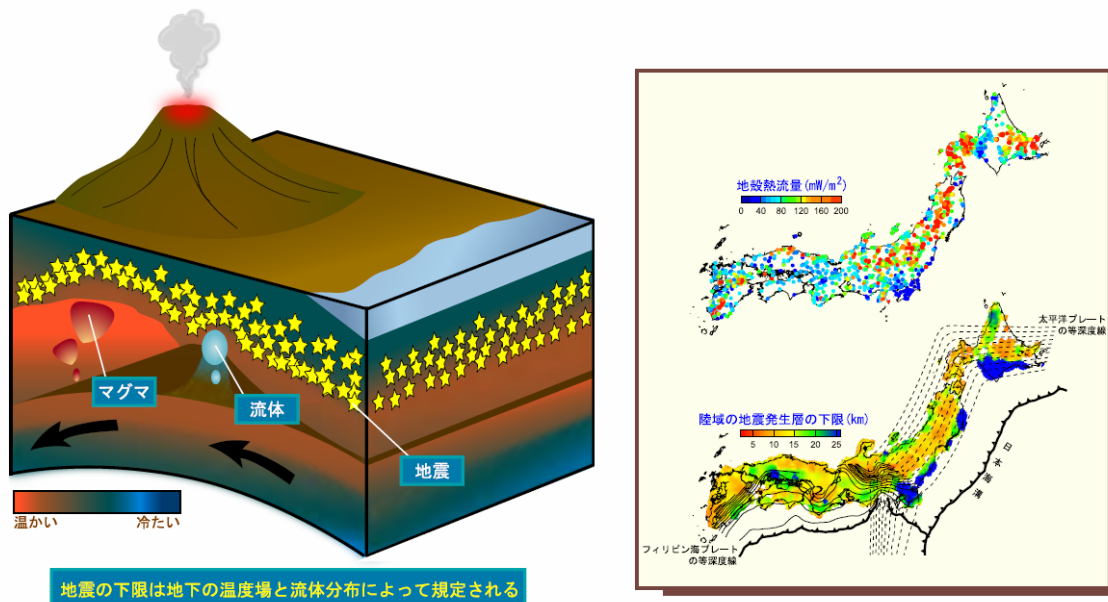


図8. 地殻の温度場と地震発生の関係

地震は、地下の物質が脆性破壊を起こす際に発生する。高温や流体の影響を被る場所は、塑性変形しやすく地震は発生しない。一方、その周囲の領域では応力集中が起こり、地震が発生すると考えられる。左図：震源の分布と温度構造との関係を表す概念図。右図：地殻熱流量と陸域の地震発生層の下限分布。日高山脈の南西域や東北地方の太平洋側には低温領域があり、地震発生層の下限が深い。一方、火山フロントやホットフィンガー直下、および流体上昇域に沿って高温域が分布し、地震発生層の下限は浅くなる。

プレート境界滑りの多様性と相互作用

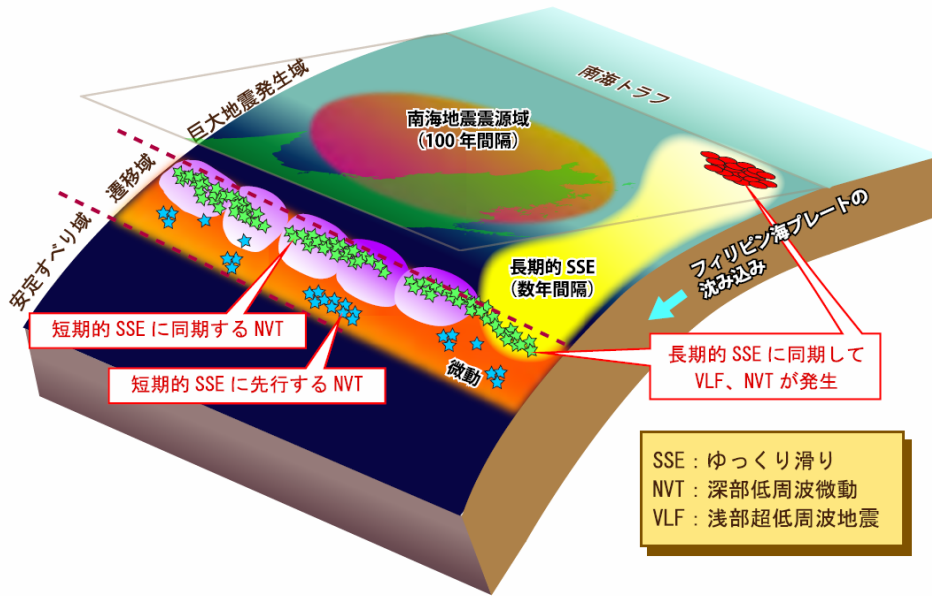


図9. プレート境界滑りの多様性と相互作用

フィリピン海プレートの沈み込みに伴い発生する巨大地震、長期的ゆっくり滑り、短期的ゆっくり滑り、浅部超低周波地震、深部低周波微動の発生位置とそれらの相互作用について示した模式図。豊後水道で発生した長期的ゆっくり滑り発生域内の微動(★)と、足摺岬(高知県)沖の浅部超低周波地震(●)は同期して発生する。また、短期的ゆっくり滑りとそれに伴って発生する深部低周波微動には以下の関連が見つかった。(1) 深部低周波微動(★)は、ゆっくり滑りより1-4日先行して発生する。(2) 微動は短期的ゆっくり滑り域周辺で発生する。(3) 微動の発生場所は時間とともに移動し、短期的ゆっくり滑り域に達すると活発化し(★)、その後短期的ゆっくり滑りが発生する。これらの振る舞いは、プレート境界における滑り特性の不均質性を反映していると考えられる。

桜島火山の火山噴出物と噴火様式の時間変化

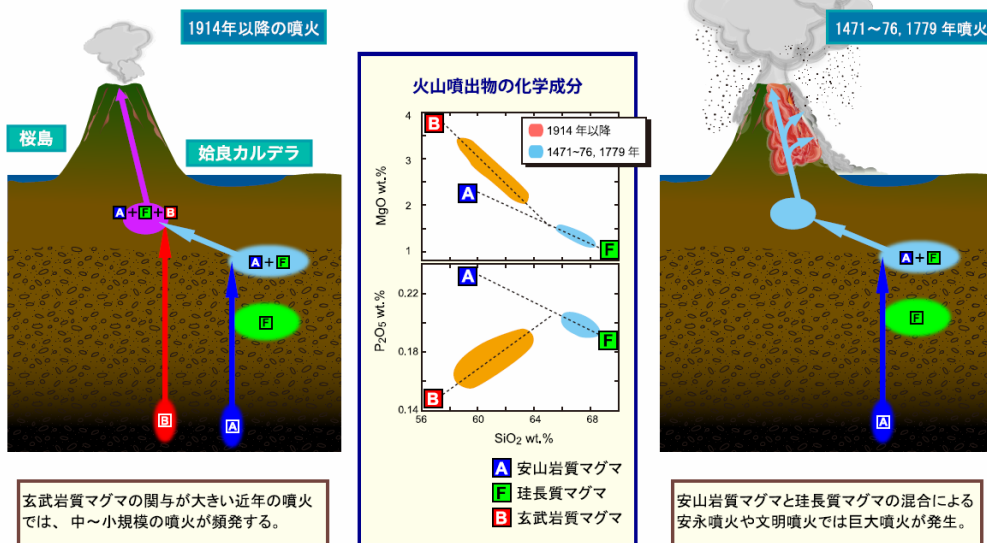


図10. 桜島火山における火山噴出物化学成分の変遷

19世紀以前の噴火では、珪長質マグマと安山岩質マグマの混合したマグマによる噴火であったが、20世紀以降はそれに玄武岩質マグマが加わり、噴火様式が変化したと考えられる。19世紀以前の噴火では、山腹により多量の溶岩が流出するとともに、火口から多量の火山灰が噴出する大噴火が発生したが、20世紀以降、特に昭和噴火(1946年)以降は、玄武岩質マグマの影響で、断続的に火山灰を噴出する中～小規模噴火となった。

至近距離でのひずみ観測により捉えられたプレスリップ

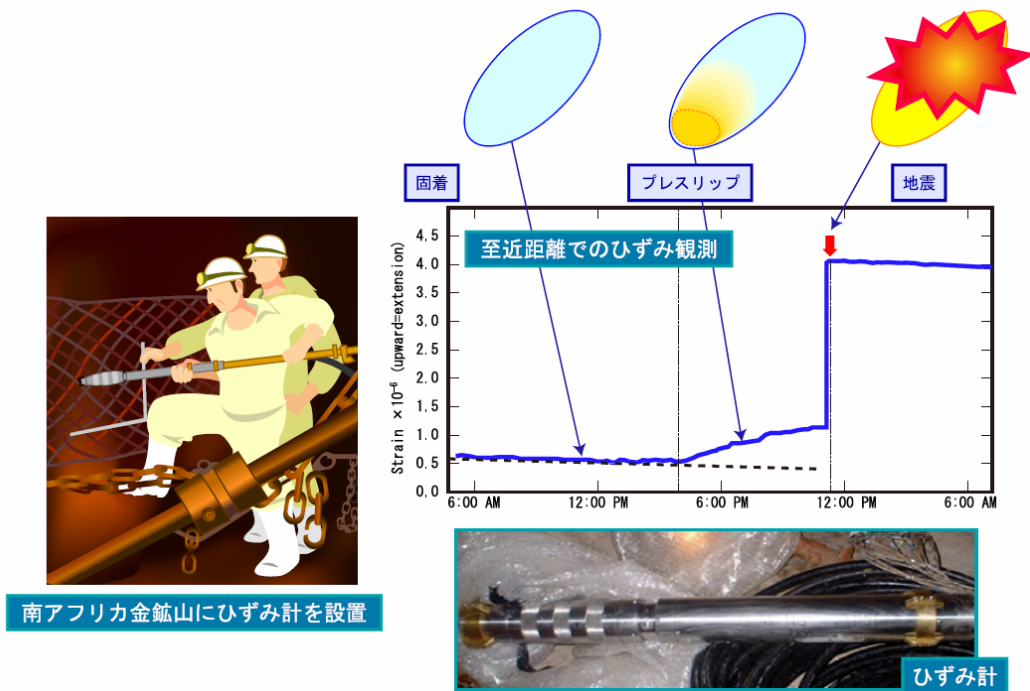


図 11. 南アフリカ大深度鉱山内で震源極近傍で観測されたひずみ記録
震源極近傍に設置したひずみ計で、地震前の明瞭なひずみ変化が捉えられた。ただし、これまで極近傍観測において、より大きな地震に対して先行ひずみが観測されなかった例も多数確認されている。

地震・津波同時計算コードによる地震モデルの構築

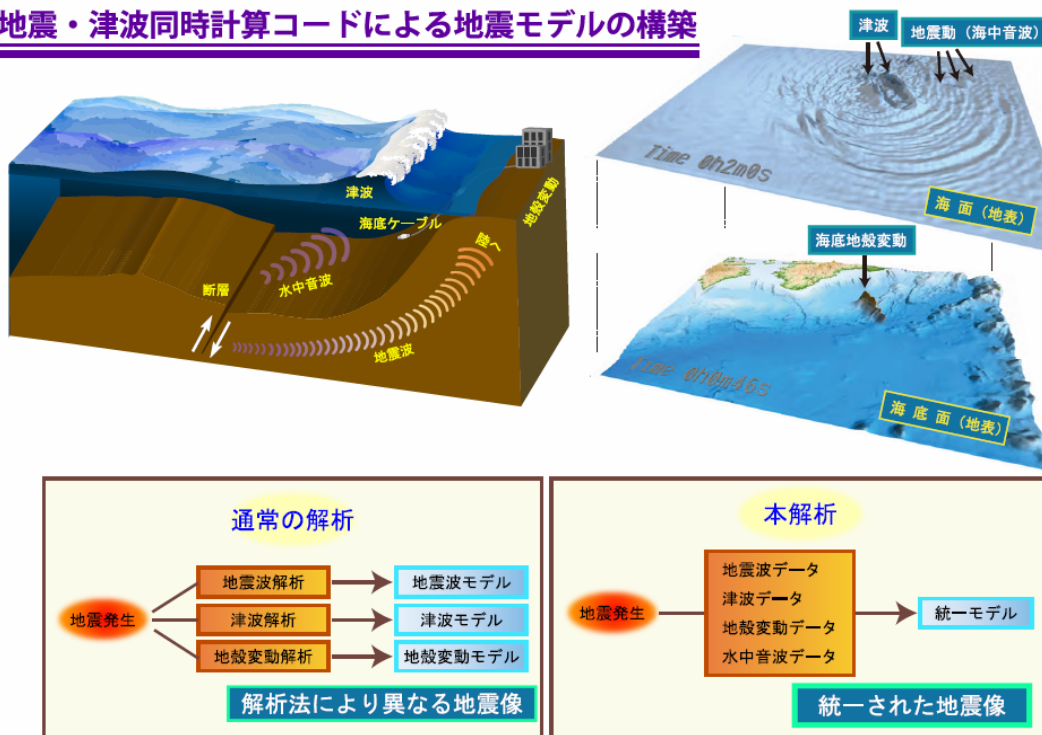
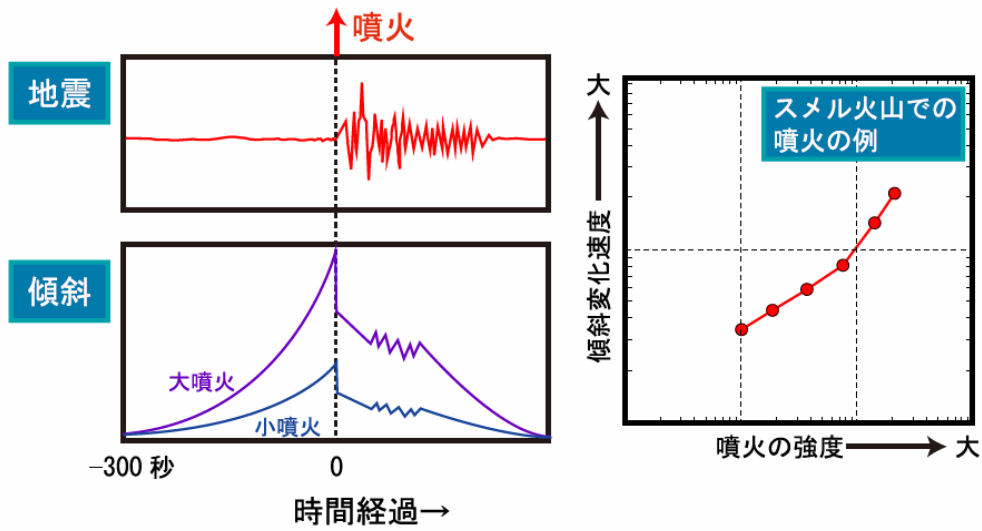


図 12. 地震・津波同時計算コードによる地震モデル構築の概念図

これまでの解析の多くは、地震波データ、地殻変動データ、津波データを別々に解析していた。そのため、解析結果は互いに異なり、推定される震源モデルに大きな差異がみられ、即時的な強震動予測や津波予測に支障があった。そこで、地震動、水中音波、地殻変動、津波を同時に評価する新しい計算コードを開発し、実用化を目指している。

爆発噴火の規模予測



傾斜変動速度がわかれば噴火規模の予測が可能となる

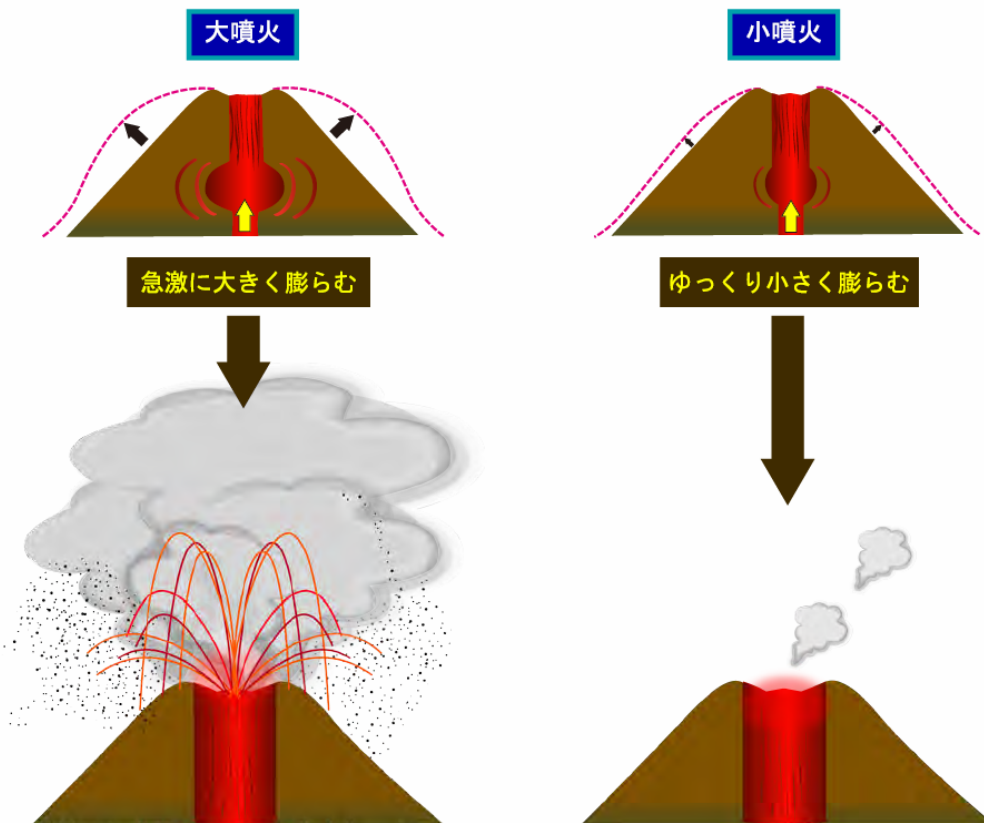
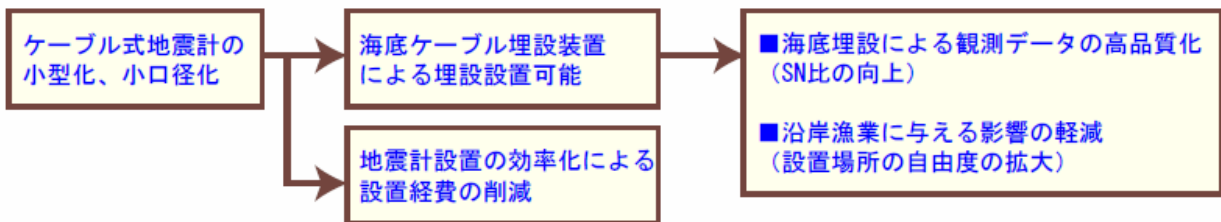
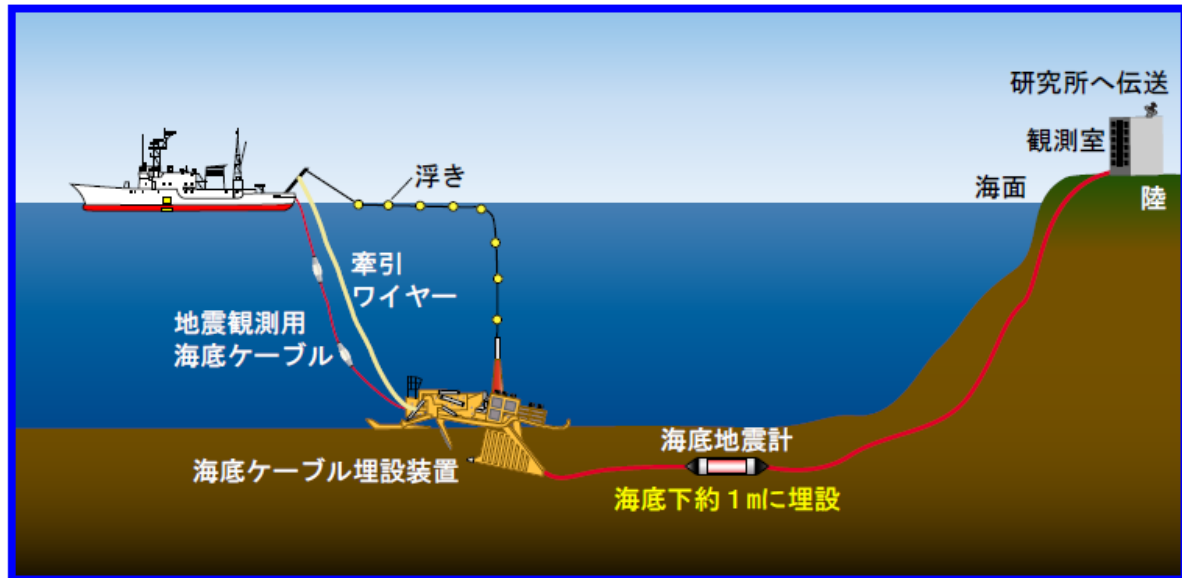


図 13. スメル火山（インドネシア）における噴火規模予測
 スメル火山の爆発噴火に先行する地盤の傾斜速度は、噴火規模と良い相関がある。噴火前の傾斜速度を観測することにより、噴火規模の予測が可能になることが明らかになった。

次世代ケーブル式海底観測システムの開発



次世代ケーブル式海底地震計の実用化に目途

図 14. 次世代ケーブル式海底観測システムの開発

ネットワーク技術を導入した次世代ケーブル式海底観測システムを、粟島（新潟県）の南方の日本海で、実用化のための試験観測を実施した。地震計を小型化し、既存のケーブル埋設装置で、ノイズレベルの低い海底に埋設設置できるのが、このシステムの長所である。これは、設置経費の削減とデータの高品質化（SN比向上）に、大きな効果がある。

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。

安山岩質マグマ

主成分化学組成が安山岩質のマグマ。安山岩は岩石に含まれる二酸化ケイ素（ SiO_2 ）の質量が全体の質量に対して 52～63%を占める火成岩の一種。

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。

ガウジ層

断層運動が激しく起こると、断層面の部分にある岩石が摩擦などによって破壊され粉々になって粘土状になることがあり、このようになった断層境界面に存在する層。

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。

干渉測位法

主に測量に用いられる方法で、2 台以上の受信機を用いて、搬送波位相を物差しとして 2 点間の相対的な位置関係を求める。電波の行路差（衛星から 2 点の受信機までの距離の差）を観測量とする方法。

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。

繰り返し地震

同じ場所で、繰り返し発生する地震のこと。発生の時間間隔はほぼ一定となることが多い。ここでは特に、地震波形が毎回ほぼ同一となることから、同じ場所で繰り返し発生していると推定された小さな繰り返し地震（小繰り返し地震）を指す。

珪長質マグマ

固化すると珪長質の火成岩となるシリカ（ケイ酸）と長石成分に富むマグマ。輝石、角閃石などの苦鉄質鉱物（マフィック鉱物）に乏しく、長石や石英などの珪長質鉱物（フェルシック鉱物）に富む。

玄武岩質マグマ

主成分化学組成が玄武岩質のマグマ。玄武岩は二酸化ケイ素（ SiO_2 ）の質量が全体の質量に対して 45～52%の火山岩。火山岩とは、マグマ由来の岩石のうち、急激にマグマが冷えて固まったもの。

コア試料

掘削により採取した岩石試料。

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。

コンラッド面

コンラッド不連続面とも言い、大陸地殻中に存在する地震波速度が不連続に増大する面を指す。コンラッド不連続面は、大陸地殻上部と下部の地球物理学的な境界である。この不連続面は大陸地域各地で 15・20 km の深さで観測されるが、海洋地域では観測されない。また、モホロビッチ不連続面と比べると明瞭でないし、観察されない大陸地域も存在する。

地震波干渉法

物理探査における信号処理技術の一つであり、2 点間で観測された地震記録の相互相関処理により、一方を震源とし、他方を受振点とする擬似的な合成地震記録を得ることができる手法で、地下構造の推定に用いられる方法。

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。

蛇紋岩

上部マントルを主に構成するカンラン岩が水と反応して生成される岩石で、摩擦強度が低く地震性滑りがおこりにくい特徴をもつ場合がある。浅部で生成された蛇紋岩がプレートの沈み込みに伴い深部に運ばれると、高温のため脱水される。この水がスラブ内地震や深部低周波微動の発生に関係するとする説が提案されている。

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。

準プリニー式噴火

プリニー式噴火とは、数十分から一日程度の間、比較的定常的に火砕物とガスを 100m/s 以上の高速で噴出し、成層圏に達する巨大な噴煙をあげる噴火のタイプ。準プリニー式噴火とは、プリニー式噴火の中で、噴煙が広がった度合いを示す分散度が小さなものを準プリニー式噴火という。

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。

脆性

材料に大きな応力ないしひずみを負荷し、その後、ひずみが元の状態に戻らない性質。固体材料に力を加えると変形し、加える力を大きくしていくとついには破壊する。材料の変形には、力を取り除くと元の形に戻る弾性変形と、力を取り去っても変形したままの形を保つ塑性変形とがある。塑性変形をほとんど生じないで破壊する場合を脆性破壊という。

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。

前弧

島弧－海溝系において、島弧の火山列より海溝側をさす。

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。

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

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のこと。固体材料が力を受けて変形するとき、力がある限度より超えて変形を与えると、力を除去しても元の形に回復しなくなる。この変形を塑性変形という。

大気伝搬遅延

電波は、大気中を伝搬するとき、空気の屈折で遅延する。この大気による遅延を大気伝搬遅延という。伝搬速度は、気温や湿度など気象条件により変動する。

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こと。またはその過程。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。

断層バルブモデル

断層運動において、流体が断層に沿って上昇し、シールされた領域があるとそこで間隙圧が上昇することにより、高角の断層でも強度が低下して滑りを生じることができるというモデル。

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。

電離層

電離層（でんりそう）とは、地球を取り巻く大気の上層部にある分子や原子が、太陽光線やエックス線などの宇宙線により電離した領域である。この領域は電波を反射する性質を持ち、これによって短波帯の電波を用いた遠距離通信が可能である。

同化（データ同化）

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

トモグラフィー

地下の二次元又は三次元構造を求める手法。地震波速度や減衰構造の推定によく用いられる。医学の分野において、X線や超音波で身体の二次元断面を求めるための手法が、地球物理学に応用されたもの。

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。

背弧

島弧－海溝系において、島弧の火山列より海溝と反対の背後側をさす。

発震機構（解）

地震の起こり方。地震波の放射パターンなどから求められる震源断層の走向、傾斜角、滑り角を指す場合が多い。断層に働いていた力の方向を知ることが出来る。

ピクセルオフセット解析

2枚の SAR 振幅画像中の画素の位置のずれ(ピクセルオフセット)から地殻変動分布を抽出する解析。精度は InSAR より劣るが、コヒーレンスがなくても地殻変動計測が可能。InSAR と同様に衛星-地表間の距離（レンジ）変化の他、衛星の進行方向（アジマス方向）の地殻変動成分も得られる。ピクセルオフセットは、矩形窓内の相互相関係数分布を計算しそのピーク位置から求める。

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。

ひずみエネルギー

弾性体を変形させた時に弾性体中に蓄えられるエネルギー。

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。

不均質構造

地球内部の物性定数が、空間的に均質ではない状態（構造）。例えば、組成の違いや空隙の分布状態、流体の含有などによって、物性定数が変化する。応力場も不均一になり、特定の場所に応力集中が生じる可能性がある。

ブルカノ式噴火

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

プレスリップ

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砕の程度などによって異なり、いくつかのタイプに識別される。その異なる噴火の様子を噴火様式という。

ポアソン比

固体の物体を一つの方向に伸ばすと、これと直角の方向には縮む。この縮みのひずみと伸びのひずみの比をポアソン比という。

ポアホール

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。ポ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。

ホットフィンガー

マントル深部から浅部にかけて指のように延びている高温の領域。東北日本において、沈み込み帯にそった火山の分布、低速度層、ブーゲ異常が系統的に変化している現象がみられ、その現象の解釈として、東北下に指状の熱いマントルの存在を仮定し、それをホットフィンガーと呼んだ。

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。マグマが地表に出たものを溶岩ともいう。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。

マントルウェッジ

沈み込んだプレートとその上のモホ面に挟まれたクサビ状の部分。

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。

面間地震

東北地方下においては、沈み込む太平洋プレートに沿って顕著な2つの地震面である二重深発面が観測される。面間地震は、この二重深発地震面の上面および下面の間に発生する地震。

モホ面

地殻とマントルの境界となる地震波速度の不連続面。1909年にクロアチアの地震学者である、アンドリア・モホロビッチによって発見されたためモホロビッチ不連続面ともいわれる。

ゆっくり滑り

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

余効滑り

地震の後に震源域あるいはその周囲で発生するゆっくり滑り。

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。

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の予測を行い、その結果を評価し、統計学的手法による地震発生予測可能性を検証して手法の確立を目指している。

GEONET

国土地理院が全国に展開している GPS 連続観測網。平成 18 年時点での観測点（電子基準点）数は 1,231 点。1 秒ごとの GPS 観測データがほぼすべての観測点からリアルタイムでつくば市にある中央局に送信されている。定常的に 3 時間ごと及び 24 時間ごとの各点の座標値を計算している。

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、三次元的位置と時刻を正確に計測するシステム。地殻変動計測には干渉測位と呼ばれる電波の位相を用いた相対測位法が用いられる。

GPS－音響測距結合方式

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

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。SAR (Interferometric SAR、InSAR) 干渉解析は、同じ場所を撮影した時期の異なる 2 回の画像の差をとる（干渉させる）ことにより地表面の変動を詳細にとらえる手法である。

參考資料

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

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22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22年度の成果の概要」である。本編の「平成22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、および全国の主な火山に地震・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た地震活動・地殻変動および火山活動のモニターが進められている。さらに、諸観測網の高密度化および多項目化といった整備・強化、新たな観測手法・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などのモニタリングシステムの高度化を図る研究が進められている。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に向けた、モニタリングシステムの出力の高度化の検討も開始された。

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、会報にまとめられているほか、各機関や関連のウェブで公開されている。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23年1月からの霧島火山新燃岳の噴火活動の活発化に対応して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基盤的地震観測網の整備が継続的に進められた(防災科学技術研究所[課題番号:3001])。気象庁により一元的な震源決定処理が行われており、震源決定精度、特に地震多発時の自動決定精度の向上、地震活動異常を定量的に評価するシステムの構築、CMT解や遠地実体波を用いた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)の改良、地殻変動連続観測等データの流通試験、公衆パケット通信網と連携した機動的な地殻変動観測システムの構築を行った。WINシステムの64ビット環境対応を進め、近年一般的になってきた高性能・大容量メモリの64ビット環境のコンピュータ上での使用が可能になった。(東京大学[課題番号:1401])。

グリッド・モーメントテンソル解析およびアレイ解析に基づく超低周波地震(VLFE)活動モニタリングを継続して実施し、VLFE自動検知システムの安定稼働を実現した。既知のVLFE記録と過去の連続波形記録との相互相関関数解析から未知イベントを検出し、その相互相関関数の観測点間の位相差から相対的な震央位置を推定する手法を開発し、震央位置の推定精度が約30kmから約10kmに向上した。西南日本で繰り返し発生している短期的ゆっくり滑り自動検出システムの運用を継続するとともに高度化し、より安定した短期的ゆっくり滑りの検出を可能とした準リアルタイムモニタリングシステムの試験運転を開始した(図

1)。気象庁震源カタログを精査し、東海地震、東南海地震想定震源域ともに、昭和東南海地震発生後に地震活動パターンの相関係数が一旦低下し、無相関状態が 20 年程度継続した後、再び相関係数が上昇する傾向を見いだした。(防災科学技術研究所 [課題番号：3001])。

リアルタイムで流通する高感度地震観測連続データの有効活用を図るため、連続あるいはイベント波形データに様々な処理を施し、その結果を随時ウェブで閲覧可能とする地殻活動の現況モニタリングシステムを構築した。地震や火山の長周期波動場のモニタリングのために、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(東京大学 [課題番号：1401])。

新しいモニタリング手法として、地震波干渉法に基づき、地震波形の連続データを用いて地下構造のモニタリングを行うシステムを構築した。この手法により、2000 年三宅島噴火の前後で最大約 2% の地震波速度変化を、2008 年岩手宮城内陸地震の震源域周辺において、本震震央の南側で 0.1~0.3% 程度の地震波速度低下を検出した(図 2)(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])。

電子基準点の次世代 GNSS への対応を考慮し、GPS に加え GLONASS、Galileo、準天頂衛星を受信可能な受信機への更新(80 点)およびファームウェア更新(320 点)を実施した。GEONET による地殻変動連続観測を実施し、日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングを着実にいった。豊後水道周辺で 2009 年秋頃から非定常的な地殻変動が始まり、2010 年秋頃まで継続したことが捉えられた。この非定常地殻変動は 1997 年、2003~2004 年と同様にプレート境界面上でのゆっくり滑りによると考えられ、すべりの時間変化の推定を通じてプレート境界面での滑りの理解の進展に寄与した。(国土地理院 [課題番号：6001])。

霧島山においては、2009 年 12 月頃から 2011 年 1 月の新燃岳の噴火直前までの山体の膨張、1 月 26 日の噴火直後からの急速な収縮が捉えられ(図 3)、噴火の発生過程の解明に寄与した。(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およ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。平成 23 年 2 月 1 日と 7 日に活動が活発化した霧島山(新燃岳)の緊急観測を行い、噴煙下の火口内の詳細な地形を明らかにするとともに、数値標高モデルを作成し、2 月 1 日時点で火口内の新たな溶岩等堆積物の量が約 1,800 万立方メートルであると推定した(図 4)(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、従来から地震計、空振計、GPS 等による連続的な監視観測を行っているが、平成 22 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行った。霧島山（新燃岳）では、地震計、傾斜計、GPS、遠望観測装置、降灰計を設置し観測施設の強化を図った（気象庁 [課題番号：7006]）。

活動的な火山地域について SAR 干渉解析を行い、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]）。噴火の危険がある火山について ASTER を用いた緊急火山観測計画を立案し、観測を依頼した。火山衛星画像データベースの正式運用を再開した（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、地磁気および重力異常を報告した（海上保安庁 [課題番号：8003]）。

火山におけるモニタリングを促進するために、大学、研究機関の地震計・傾斜計・空振計等の観測データの共有化・流通を開始した。

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）

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]）。気象庁と東北大学のデータを併合し、地震波検測と震源計算を実施した。一元化処理データに海域の観測データを加え、海底浅部構造の補正や観測点補正値を検討することにより、より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て 2002 年から 2009 年まで実施した繰り返し観測の記録の整理および震源決定を行い、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（東京大学 [課題番号：1402]）。2005 年宮城県沖地震の発生前後にその震源域の周囲で発生した中小地震の発震機構解から応力場の推定を行い、震源域周辺の応力場の空間変化は小さいことを明らかにした。また、2 年間の海底圧力変動のデータから、顕著な年周変化と 0.9 hPa/y の経年変化（増圧）を見いだした。この経年変化は、陸上 GPS 観測データの逆解析から求められたプレート間固着モデルから期待される海底鉛直変動（沈降）とよい一致を示した（東北大学 [課題番号：1202]）。

GPS 観測で得られる変位速度場から、プレート収束方向に平行な成分の水平変位速度、上下変位速度の空間勾配を算出した（図 5）。2005 年宮城県沖地震（M7.2）、2003 年十勝沖地震（M8.0）の余効すべりの発生を捉えるとともに、福島県沖から茨城県沖にかけて 2008 年末ころから固着の弱化もしくは準静的すべりが沖合で発生していたことが示唆された。これは、小繰り返し地震の解析から報告された同地域での海溝軸周辺でのすべりの加速に対応している（東北大学 [課題番号：1202]）。

水位・水温観測の 2 孔井、ラドン・CO₂ 濃度観測の 3 孔井の体制で「深層地下水変動観測システム」を連続稼働させた。観測の分解能と観測限界を明らかにした。（東北大学 [課題番号：1202]）。

（伊豆）

伊豆半島東部地域において NTT 電話回線を用いた長基線地電位差連続観測とプロトン磁

力計を用いた全磁力連続観測を行った。2009年の群発地震の震央の北のARI(新井)と南のYOB(与望島)の観測点で、地震活動の静穏化に伴って全磁力のそれぞれ5nT程度の急減と漸増の停止とが見られた。熱供給の停止に伴う冷却や応力解放などの終了などの過程が深さ2km程度で生じた結果と想定される(東京大学[課題番号:1402])。

(火山)

活動的な火山において多項目観測によるモニタリングを継続しつつ強化した。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、霧島山において、GPS火山変動観測装置(REGMOS)による連続観測、伊豆大島においてAPS観測を継続実施した。有珠山周辺において水準測量130.3キロメートルを実施した(国土地理院[課題番号:6007])。雌阿寒岳、十勝岳、吾妻山、草津白根山、三宅島、伊豆大島、阿蘇山において全磁力連続観測および繰り返し観測を実施し、火口地下の熱活動の経過を分析した(気象庁[課題番号:7009])。有珠山(観測点数:1)、岩手山(1)、浅間山(2)、阿蘇山(2)、霧島山(2)に、孔井式地震計、傾斜計、広帯域地震計、GPS観測装置を備えた基盤的火山観測施設を整備し、観測を開始した。特に火山活動が活発化した霧島山においては、噴火活動に伴う地殻変動や地震活動が観測され、同火山の活動評価に活用された(防災科学研究所[課題番号:3002])。

阿蘇山において、TDM比抵抗観測システムACTIVEによる比抵抗繰り返し観測を実施した。20時間の連続観測の結果、中岳火口周辺では深夜4時間程度の観測で比較的良好なデータ取得が期待できること、電流送信の影響で火口近傍に設置された地震計にノイズが乗るため、関係機関との調整が必要であることがわかった(京都大学[課題番号:1901])。

ウ. 東海・東南海・南海地域

この地域においては、基盤的な地震観測網、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。レーザ式変位計、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(名古屋大学[課題番号:1701]、気象庁[課題番号:7011])、海底地震計(東京大学[課題番号:1403]、気象庁[課題番号:7010])、地磁気、絶対および相対重力観測(東京大学[課題番号:1404])海底地形調査(海上保安庁[課題番号:8004])など多項目の観測が実施されている。

地下水等総合観測施設による前兆的地下水位変化検出システムを引き続き東海地方で運用した。2010年4月~12月に紀伊半島~東海のプレート境界において規模の大きい深部低周波微動活動が4回発生し、それらすべてに対して歪変化を検出し短期的ゆっくり滑りの断層モデルを推定した。産総研の歪等観測データと防災科研の傾斜等観測データを共有して解析する共同研究を開始し、データ共有システムが完成した。歪データと傾斜データとの同時解析による短期的ゆっくり滑り検出手法を開発し、検出能力の事前評価を行なったところ、東海~四国の広い範囲でM5.5以上の短期的ゆっくり滑りが検知できることがわかった(図6)(産総研[課題番号:5002])。

伊豆諸島の銭州岩礁におけるGPSキャンペーン観測を実施した。周辺の変位速度ベクトルと特にかげ離れた値は得られず、南伊豆との間に顕著な変形は見られなかった。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。移動速度ベクトルの誤差は熊野灘では 0.5～3 cm/年、駿河湾では 0.3～1.1 cm/年程度で、陸から離れると誤差が大きくなる傾向が見られた（名古屋大学 [課題番号：1701]）。御前崎、切山、館山で歪計・水晶管伸縮計・水管傾斜計等の地殻変動連続観測を実施した（国土地理院 [課題番号：6008]）。御前崎における絶対重力測定を実施し、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を再確認した。また、豊橋と菊川における絶対重力測定を実施した。これらの観測結果を説明するためのモデルの改良に着手した（東京大学 [課題番号：1404]）。

GPS 観測データによる東海地域のひずみ解析において、解析に用いる観測点を前年度より 30 点近く増やした結果、スローイベント発生中と終了後でひずみの空間分布が明らかに異なることが明らかになった。逆解析で推定したアスペリティ分布は、想定されているアスペリティ分布とは異なり一様の固着を示した。今後より詳細な検討が必要と考えられる（東京大学 [課題番号：1404]）。

東海地域における電磁気観測点の全磁力差の日別平均値の時間変化を求めた。SHN・FJM（篠坂・富士宮）を含む東部の観測点では 2005 年以降系統的な増加傾向が継続する一方、OKY（奥山）を含む西部の観測点では増加傾向は見られない。また、2010 年には HRN（春野）で、それまで停滞ないし漸減傾向にあった全磁力差変化が顕著な増加傾向を示した。定性的には流体移動による流動電位起源と考えることができるが、質量移動による重力異常の時間変化のモデルとの対比が課題である（東京大学 [課題番号：1404]）。

精密制御震源装置によるモニタリングにおいては、豊橋の震源から 30km 圏内の Hi-net 観測点への P 波および S 波の走時の時間変化を調べた（図 7）。変化量と距離との間に正の相関があり、圧縮応力の増加の効果と推測される P 波と S 波の速度増加を検出した。また、東海長期的ゆっくり滑りの監視に向けて、Hi-net 観測点 10 点を用いると現実的な時間窓のデータでプレート境界面の反射係数変化の監視が可能であることがわかった（名古屋大学 [課題番号：1701]）。森町の震源と Hi-net 森観測点間の伝達関数の走時の時間変化と、気圧・気温・降水量など気象要素との相関を調べ、変動要因分析を行った結果、降水量の影響が最も大きく、4 段のタンクモデルで説明できることがわかった。リアルタイム能動的監視に向けて、自動解析・図示プログラムを開発した（図 8）（気象庁 [課題番号：7011]）。愛知県新城市において地震計アレイを 2008 年 9 月より現在まで継続して実施した。2009 年 2 月の深部低周波イベント（DLFE）のアレイ解析を実施し、到来方向と見かけ速度を安定して推定することができた（名古屋大学 [課題番号：1701]）。

東海地域の GPS 観測データから短期的ゆっくり滑りを検出するための解析方法を検討した。この解析を 2006 年の観測データに適用したところ、ゆっくり滑りによると考えられる 2～3 mm 程度のステップを 1 月と 8 月の 2 回検出した（図 9）。逆解析を行い推定した滑り領域と、低周波微動発生域とは一致しなかった。GPS データから短期的ゆっくり滑りによる 2mm 程度の変位が確認されたことは特筆に値する（東京大学 [課題番号：1404]）。

紀伊半島下のフィリピン海プレートの形状と上部マントルの三次元構造を推定する陸域地震観測を継続した。レーザ関数イメージングの結果、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（図 10）。紀伊半島中部～西部では、DLFE 発生域から陸側のマントルウェッジが広範囲に低速度域であり、DLFE 発生域のやや下方で海洋モホ面のイメージが不明瞭、スラブは上に凸に湾

曲するという特徴が見られた。東部では低速度域は見られず、海洋モホ面およびスラブ上面も深さ 70km まで一様に明瞭で直線的であった。この違いは、脱水分解を経た後の海洋地殻内に残留する「水」の量の違いで説明できる（京都大学 [課題番号：1801]）。

海域においては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、平成 23 年 2 月に地震計を回収して観測を終了した。この観測により南海トラフ沿いで発生していると考えられる低周波地震を記録した。同時に精密絶対圧力計による圧力記録も取得した（東京大学 [課題番号：1403]）。

広域の地殻変動検出手法として SAR 干渉解析を行った。電離層の影響の大きい干渉画像を除いてスタッキングして得られた画像は、GPS 観測変位からの合成干渉画像と四国側において概ね整合したが、岡山側には電離層の影響が残った（図 11）。電離層ノイズを軽減させることができれば、長スパンの干渉画像からプレート沈み込みに伴う変動を検出できると考えられる（京都大学 [課題番号：1801]）。水準測量の記録を用いて豊後水道における長期的ゆっくり滑りについて解析を進め、GPS 観測が開始される以前も、ほぼ一定間隔で同規模の地殻変動が発生していることを明らかにした（気象庁 [課題番号：7011]）。

応力場推定のための基礎的なデータ解析である震源メカニズム解決定を 2009 年 9 月から 2010 年 8 月までの期間の地震に対して行った。これまでに蓄積されたメカニズム解と合わせて深さ 20km までの地殻応力場を推定し、水平最大主軸方位分布を求めた（図 12）。四国周辺の地殻応力場は、島弧の直交方向に圧縮軸方位の曲がりを示す変化が見られ、島弧に沿った方向では、紀伊半島から四国中央部までは圧縮場、四国西部では伸長場を示すという 2 つの特徴があることがわかってきた（高知大学 [課題番号：2101]）。

課題と展望

前計画（第 7 次火山噴火予知計画）から今計画にかけて、地震・火山観測網の着実な維持・更新が図られてきたとともに、予測に用いるためのモニタリング高度化の研究が着実に進められてきた。今計画では、諸観測網の高密度化および多項目化に重点を置くとともに、観測データの（準）実時間処理システムの開発と整備、さらにプレート境界の固着・すべりに関する解析が進められてきた。

産総研 [課題番号：5002] に示されるように、複数の観測機関の観測網のデータを交換・共有することにより、互いに補完あるいは拡充を行い、モニタリングの検知能力を高めることが可能である。今後、研究機関の連携をさらに進めていくことが、限られた資源を最大限に活用するために必要である。また、一部の課題においては、同一地域を対象として複数の観測項目のデータの総合的解析とモデル化を進める段階に到達しつつあり、今後、さらに研究課題間、研究者間で議論を積極的に進めていく必要がある。これにより、モニタリングシステムの出力の高度化、すなわち、データベースあるいは予測シミュレーションシステムへの提供を意識した、定期的あるいは準リアルタイムでの各種の観測データおよび科学的知見の提供が可能になると考えられる。

2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震の発生により、東日本における地震および地殻変動などの観測点やデータ収集システムに被害が発生した。地震時におけるデータ取得の障害の発生は重要なデータを取り逃がすことにつながる。モニタリングシステムを維持するために、観測点の迅速な復旧や強化、障害への耐性の向上、緊急観測の実施といった観点からも検討

していく必要がある。一方で、多くの基盤的観測網は被害に遭いながらもデータを収集・配信し続けることができた。今後、これらのデータも用いて、この巨大地震に先立つ変動から地震後の変動に至るまでの解析を行い、地震の全貌を明らかにするための研究が行われなければならない。アスペリティモデルの再検討、地震先行現象の存在の検証などが行われる必要がある。本稿執筆時点でも、東北地方太平洋沖地震の余震や余効変動が継続しており、誘発地震の発生や火山活動の活発化も見られる。地震や火山噴火の発生が予想される地域において、連続かつ稠密な観測が急務である。特に、東海・東南海・南海地域における南海トラフ巨大地震について、従来のモデルを再検証するためにもモニタリングを強化する必要があると考えられる。

参考文献

- Ando, S and H. Ueno, 2010, The Crustal Deformation and Damage area Caused by the M7.0 Earthquake in Haiti detected by ALOS / PALSAR, 8th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Management.
- Anggono, T., 2011, Spatio-temporal changes in seismic velocity of Miyakejima volcano associated with the 2000 activity as inferred from ambient seismic noise analysis (雑微動解析による 2000 年三宅島火山活動にともなう火山体構造の時間変化), 東北大学博士論文.
- 福居大志・澁谷拓郎・中尾節郎・西村和浩・澤田麻沙代・平原和朗, 2010, 紀伊半島の地震波速度構造, 日本地震学会 2010 年秋季大会.
- 橋本学, 2010, 4 年間の ALOS/PALSAR 観測から見た四国の地殻変動, 日本地震学会 2010 年度秋季大会.
- 橋本学, 2010, 4 年間の ALOS/PALSAR 観測から見た四国の地殻変動, 日本測地学会第 114 回講演会.
- Hashimoto, M., 2010, Secular crustal deformations derived from 4 year long observation of ALOS/PALSAR, The 4th Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program in Tokyo.
- Hirose, H. and K. Obara, 2010, Recurrence behavior of short-term slow slip and correlated nonvolcanic tremor episodes in western Shikoku, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, B00A21, doi:201010.1029/2008JB006050.
- Hirose, H., Y. Asano, K. Obara, T. Kimura, T. Matsuzawa, S. Tanaka, and T. Maeda, 2010, Slow earthquakes linked along dip in the Nankai subduction zone, *Science*, 330 (6010), 1502.
- 飯沼卓史・松澤暢・長谷川昭, 2010, 変位勾配から見た東北日本広域のプレート間カップリングの時空間変化, 日本測地学会第 114 回講演会要旨集, 77-78.
- 伊藤喜宏・稲津大祐・長田幸仁・三浦哲・内田直希・大園真子・木戸元之・太田雄策・三品正明・日野亮太・藤本博己・辻健・芦寿一郎, 2010, 海底観測および陸上観測で捉えた日本海溝のゆっくり地震, 日本測地学会第 114 回講演会要旨集, 95-96.
- 鹿島雄介・南須原美・中村隆志・山内常生・大槻憲四郎, 2011, 宮城県沖大地震の前兆を捉えるための深層地下水変動研究: 2008 年 2 月~2009 年 12 月の観測結果, *地質学雑誌* (査読中).
- Katsumata, A., T. Yamamoto, A. Kobayashi, N. Hamada, and S. Yoshikawa, 2010, Evaluation of detection level of crustal deformation observation in the time domain through power spectrum analysis —Investigation of a long-baseline laser extensometer—, *J. Geodetic Soc. Japan*, 56, 107-116.
- Kimura, T., K. Obara, H. Kimura, and H. Hirose, 2011, Automated detection of slow slip events within the Nankai subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01311, doi:10.1029/2010GL045899.

- 小林昭夫, 2010, 四国西部において 2005 年に発生した小規模な長期的スロースリップ, 地震 2, 63, 97-100.
- 小泉尚嗣, 2010, 地下水位観測による地殻変動の推定-現状と展望-, 地震ジャーナル, 50, 89-94.
- 小泉尚嗣・松本則夫・頼文基, 2011, 台湾国立成功大学と産業技術総合研究所との共同研究「台湾における水文学的・地球化学的手法による地震予知研究」について, 地質調査研究報告, 印刷中.
- 國友孝洋・加藤愛太郎・飯高隆・生田領野・吉田康宏・勝俣啓・岩崎貴哉・酒井慎一・山岡耕春・渡辺俊樹・山崎文人・津村紀子・野崎謙治・高橋福助・大久保慎人・鈴木貞臣・平田直, 2010, 東海臨時測線で観測された土岐送信所からの弾性波アクロス信号, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会.
- Margerin, L., and H. Sato, 2011, Reconstruction of multiply-scattered arrivals from the cross-correlation of waves excited by random noise sources in a heterogeneous dissipative medium, *Wave Motion*, 48, 146-160.
- 松村正三, 2010, 東海および東南海地域における特有な地震活動パタンの再現(東海地域の地震活動変化: その 6), 地震 2, 63, 83-95.
- 宮川和也・山下瑠佳・川邊岩夫・伊藤武男, 2010, 春野観測点に於ける地下水付随ガスの地球化学的観測, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会.
- 宮岡一樹・斉藤誠, 2011, 伊豆東部火山群の地震活動予測情報と噴火警戒レベル, 減災, 5, 77-80.
- Mochizuki, K., K. Nakahigashi, A. Kuwano, T. Yamada, M. Shinohara, S. Sakai, T. Kanazawa, K. Uehira and H. Shimizu, 2010, Seismic characteristics around the fault segment boundary of the historical great earthquakes along the Nankai Trough revealed by repeating long-term OBS observations, *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi:10.1029/2010GL042935.
- Nakagawa, Y., Shibutani, T., Abe, Y., Kawakata, H., Doi, I., 2010, Receiver function images beneath Kii Peninsula, southwest Japan with an improved procedure, AGU Fall meeting.
- Nakahara, H. and L. Margerin, 2010, A test of the equi-partition hypothesis for S-wave coda using borehole records of local earthquakes, Abstract of the Meeting of the Americas, S14A-02, Foz do Iguaçu, Brazil.
- 中東和夫・町田祐弥・一瀬建日・山田知朗・望月公廣・篠原雅尚・塩原肇・金沢敏彦・植平賢司, 2010, 広帯域海底地震計で記録された南海トラフ近傍で発生する超低周波地震, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SSS027-04.
- 中東和夫, 町田祐弥, 一瀬建日, 山田知朗, 望月公廣, 篠原雅尚, 塩原肇, 金沢敏彦, 植平賢司, 2010, 南海トラフ周辺での広帯域海底地震計を用いた低周波地震観測, 日本地震学会秋季大会, P1-60.
- Nakahigashi, K., Y. Machida, T. Isse, T. Yamada, K. Mochizuki, M. Shinohara, H. Shiobara, T. Kanazawa, K. Uehira, 2010, Observation of very low frequency earthquakes near the Nankai Trough by using broadband ocean bottom seismometers, American Geophysical Union Fall Meeting, S23A-2102.
- 南須原美恵・鹿島雄介・中村隆志・山内常生・大槻憲四郎, 2011, 宮城県沖大地震の前兆を捉えるための深層地下水変動研究: 2004 年 6 月~2007 年 12 月の観測結果, 地質学雑誌, 117(2), 63-78.
- Ochi, T., and T. Kato, 2011, The plate coupling in the Tokai district, the Central Japan, inferred from the different data using triangular dislocation elements, *Tectonophysics*, 497, 15-22.
- Sato, H., 2010, Retrieval of Green's function having coda waves from the cross-correlation function in a scattering medium illuminated by a randomly homogeneous distribution of noise sources on the basis of the first order Born approximation, *Geophys. J. Int.*, 180, 759-764, doi:

10.1111/j.1365-246X.2009.04432.x.

- 澁谷拓郎・中尾節郎・西村和浩・澤田麻沙代, 2010, 紀伊半島でのリニアアレイ地震観測とレシーバ関数イメージング, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会.
- 鈴木友理・渡辺俊樹・山岡耕春・國友孝洋・山崎賢志・生田領野, 2010, 東海スロースリップの監視を目指したHi-netによる豊橋ACROSS信号の検出範囲の評価, 日本地震学会 2010 年秋季大会.
- 田所敬一・生田領野・渡部豪・奥田隆・永井悟・江藤周平・藤井昌和, 2010, 熊野海盆における海底地殻変動, 日本地震学会 2010 年秋季大会.
- 高木涼太, 2011, 常時微動の相互相関解析に基づく 2008 年岩手・宮城内陸地震震源域およびその周辺域のレイリー波伝播速度とその時間変化に関する研究, 東北大学修士論文.
- Tanaka, Y., A. Kato, T. Sugano, G. Fu, X., Zhang, M. Furuya, W. Sun, S. Okubo, S. Matsumoto, M. Honda, Y. Sugawara, I. Ueda, M. Kusaka and M. Ishihara, 2011, Gravity changes observed between 2004 and 2009 near the Tokai slow-slip area and prospects for detecting fluid flow during future slow-slip events, *Earth Planets Space*, 62, 965-913.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, J. Nakajima, A. Hasegawa, and N. Umino, 2010, Subduction of a Wedge-shaped Philippine Sea Plate beneath Kanto, Central Japan, and its Effect on Interplate Coupling, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taipei International Convention Center.
- 上野寛・碓井勇二・福満修一郎・迫田浩司・山内崇彦・安藤忍, 2010, 2010 年 1 月 12 日(GMT)にハイチで発生した地震の概要と震源過程, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SSS011-P09.
- 上野寛・瀧山弘明・碓井勇二, 2010, 2010 年 2 月 27 日のチリ中部地震の震源過程等の解析結果について, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, MIS050-P03.
- Umakoshi, K., N. Itasaka, H. Shimizu, 2010, High-frequency earthquake swarm associated with the May 1991 dome extrusion at Unzen Volcano, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (submitted).
- 山口照寛・笠原稔・高橋浩晃・岡山宗夫・高田真秀・一柳昌義, 2010, 地殻変動データベースー2007 年からの改良, 日本測地学会講演予稿集.
- 山口照寛・笠原稔・高橋浩晃・岡山宗夫・高田真秀・一柳昌義, 2010, 地殻変動データベースシステムの開発, 測地学会誌, 56, 47-58.

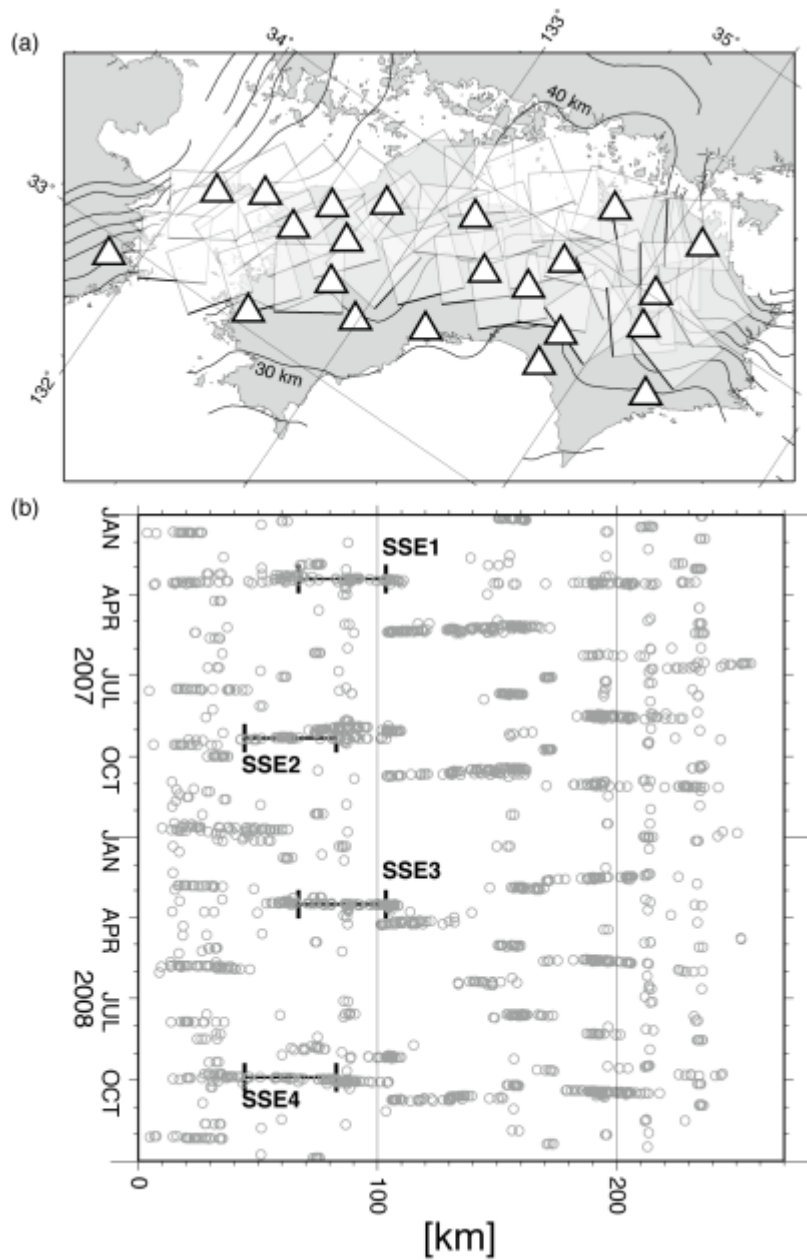


図 1. 短期的スロースリップイベント (SSE) 自動検出システムによって検出された西南日本で繰り返し発生しているSSE。(a) 自動検出に使用したHi-net観測点 (白三角) とSSEの断層モデル (白矩形) の分布。(b) 検出されたSSE (黒線) とObara et al. (2010) による低周波微動活動 (灰丸) の時空間分布 (防災科学技術研究所 [課題番号: 3001])。

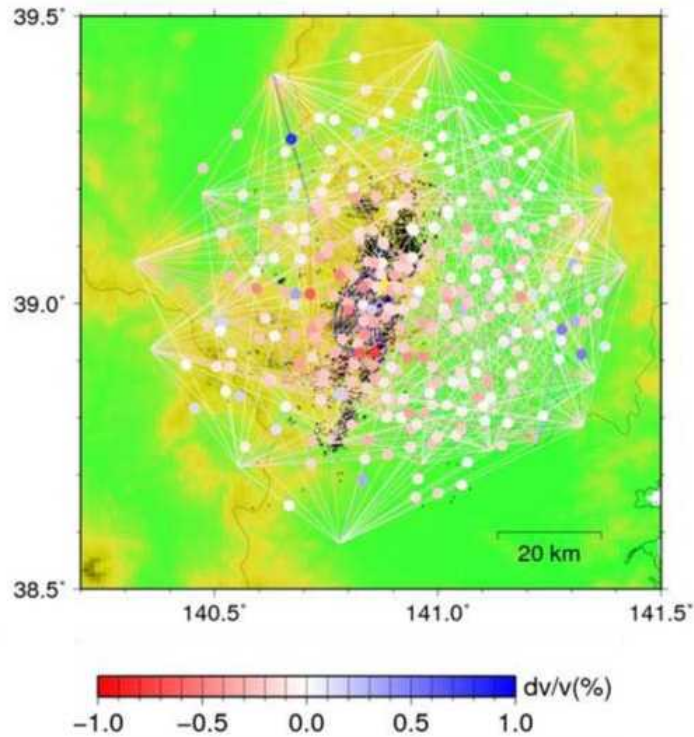


図 2. 2008 年岩手宮城内陸地震に伴う周期 2-4 s の帯域におけるレイリー波速度変化の空間分布 (高木, 2011)。観測点間経路の線とその中点においた丸印の色で地震波変化を示す。赤色が地震波速度低下、青色が地震波速度上昇を示す (東北大学 [課題番号: 1201])。

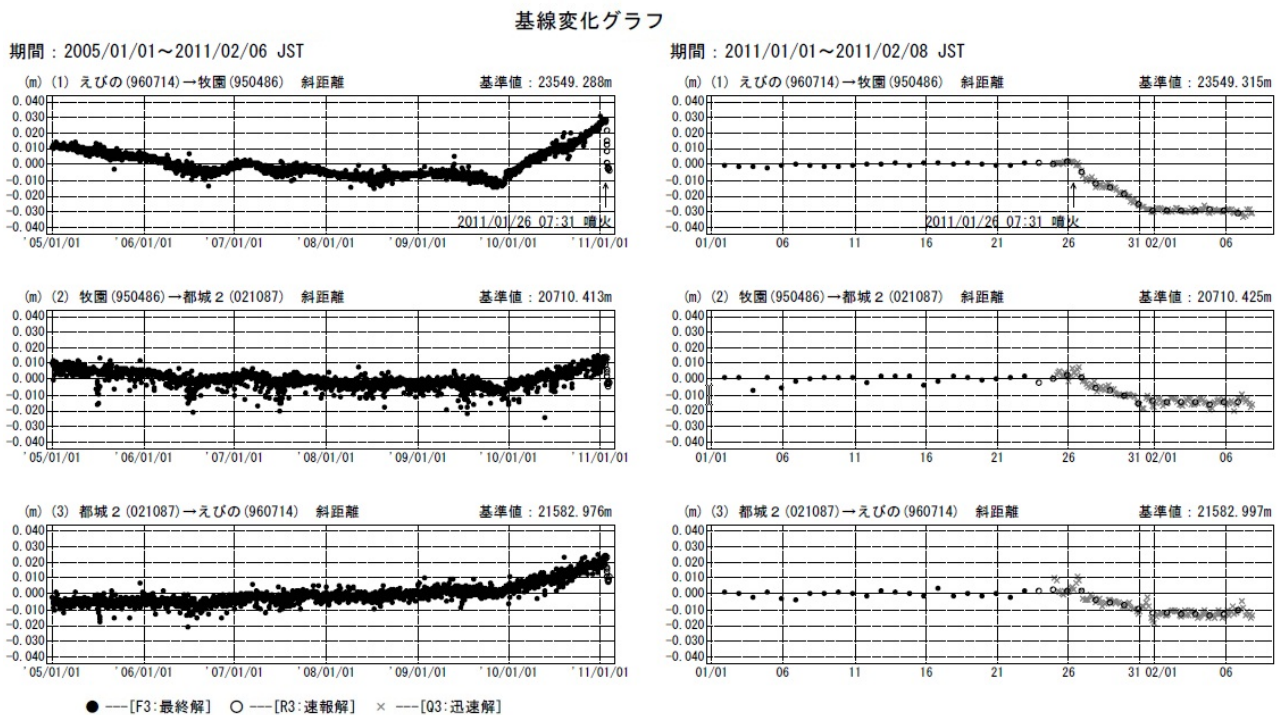


図 3. 霧島山の基線長の変化。(左) 2005/01/01~2011/02/06、(右) 2011/01/01~2011/02/08 (国土地理院 [課題番号: 6001])。

霧島山(新燃岳)火口の断面図

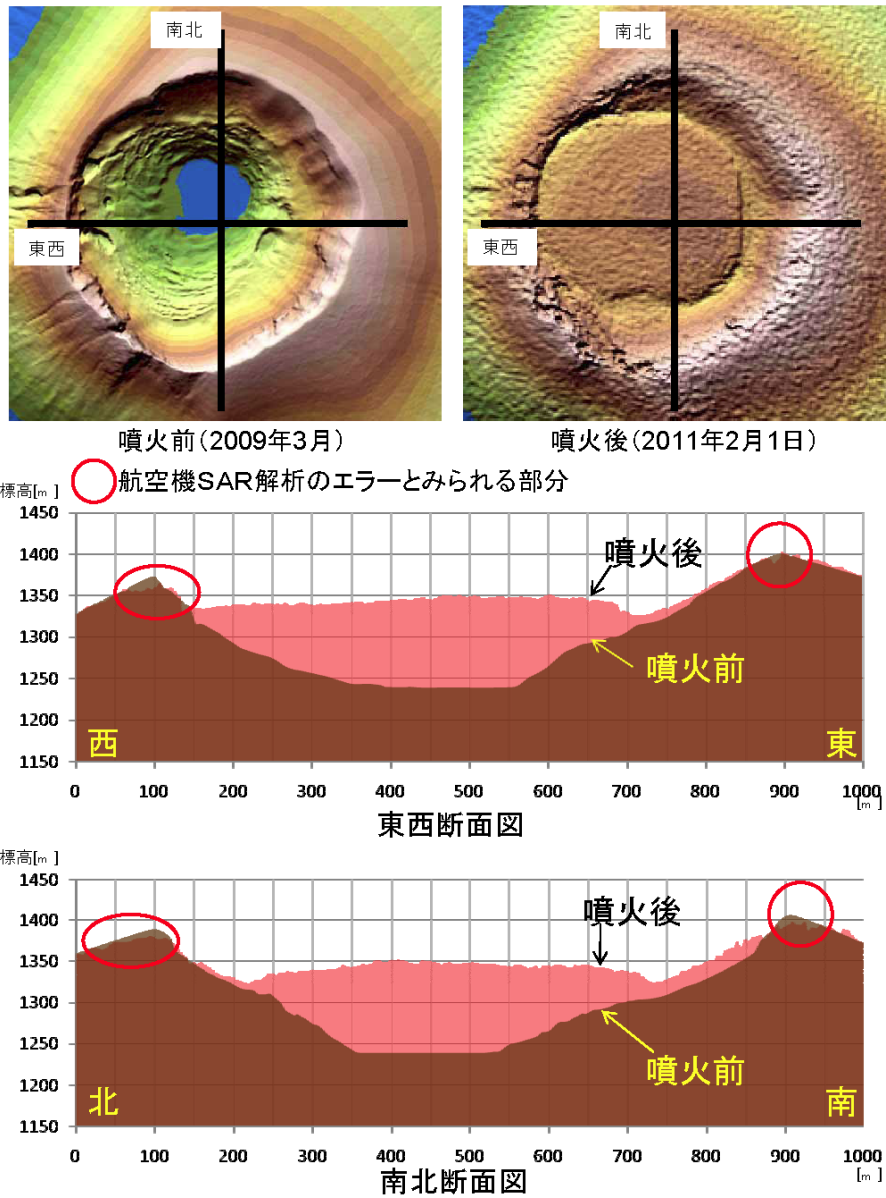


図4. 新燃岳火口の断面図。噴火後の平成23年2月1日の航空機SARから観測された数値標高モデルを使用した(国土地理院[課題番号:6006])。

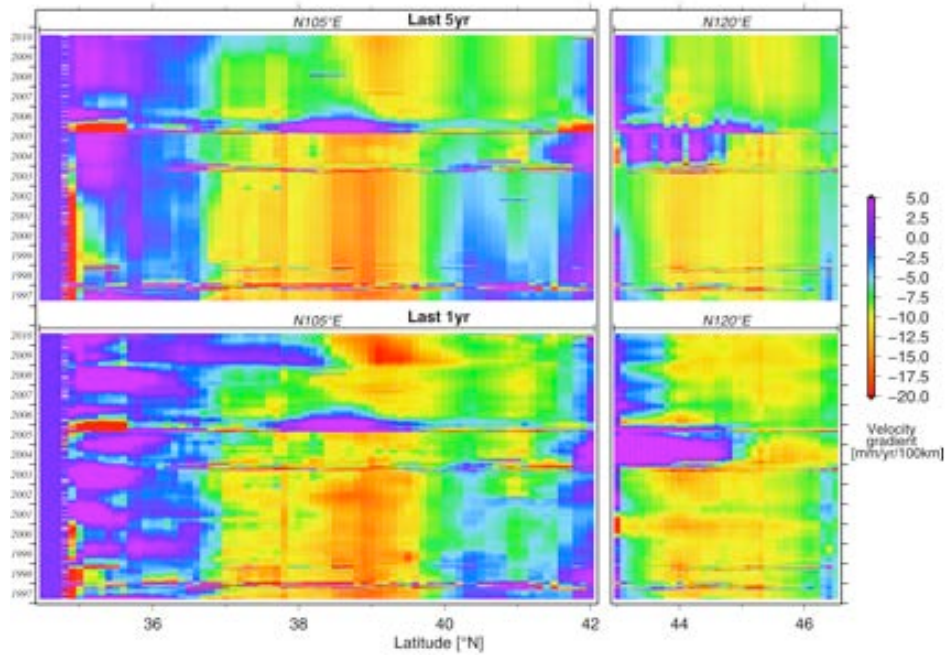


図 5. GEONET観測点における太平洋プレート沈み込み方向の水平変位勾配の時空間変化。横軸は変位勾配を計算するために設定した帯状の各領域（東北日本ではN105° E方向、北海道ではN120° E方向に設定）の中心線と東経 140 度線との交点の緯度、縦軸は時間を示す。上段は過去 5 年間の平均変位速度場から、下段は過去 1 年間の平均変位速度場から、それぞれ変位勾配を計算したもの（東北大学 [課題番号：1202]）。

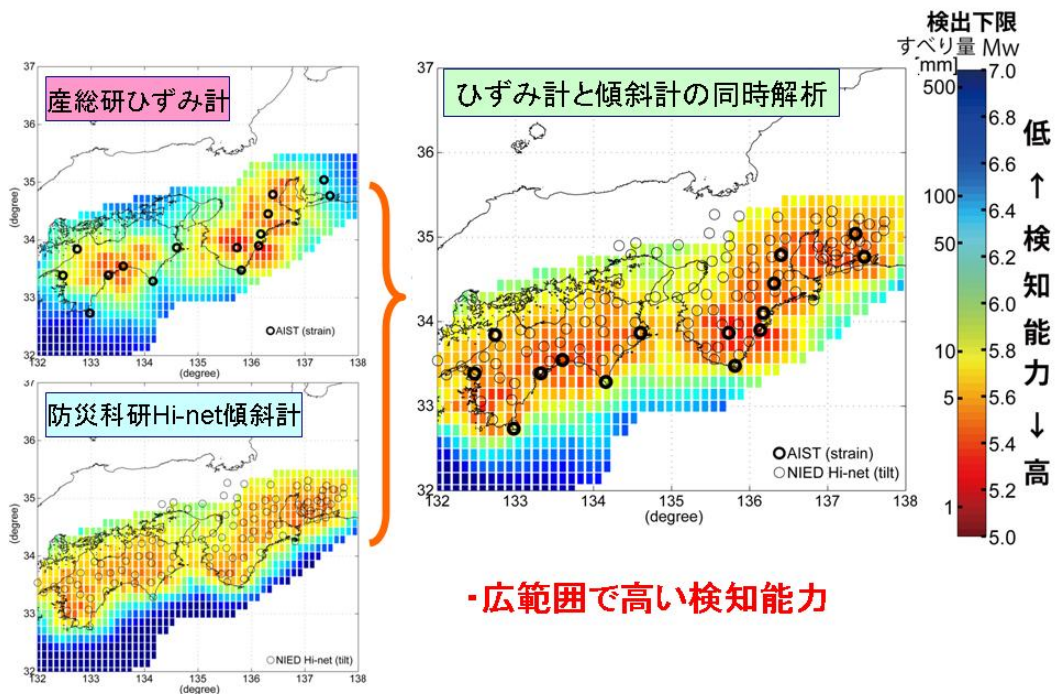


図 6. 産総研のひずみ計と防災科研のHi-net傾斜計を同時解析したときに想定される短期的スロースリップ検知能力（産総研 [課題番号：5002]）。

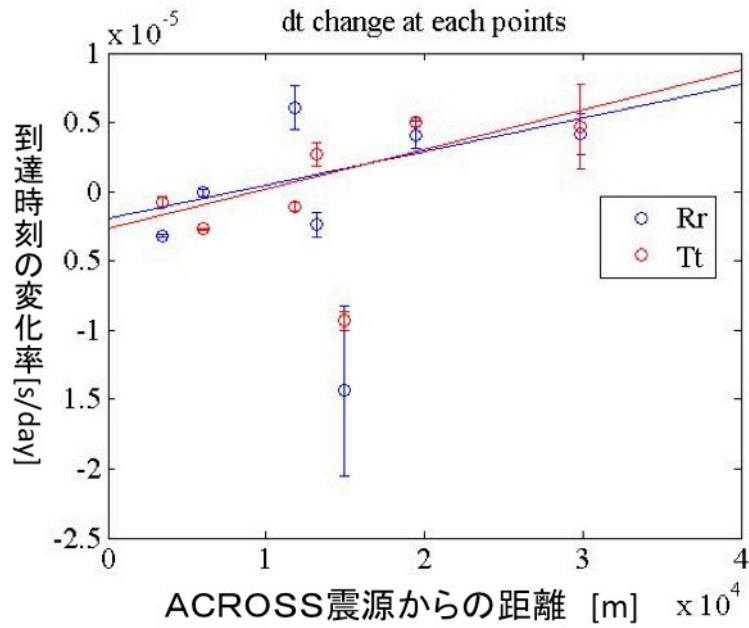


図 7. 豊橋アクロス震源と周辺のHi-net観測点で得られたP波S波の走時変化率の距離依存性。Rrはラジアル加振でラジアル受信（主にP波）、Ttはトランスバース加振でトランスバース受信（主にS波）をあらわす。いずれも震源からの距離に従い、変化率が大きくなっていることがわかる（名古屋大学 [課題番号：1701]）。

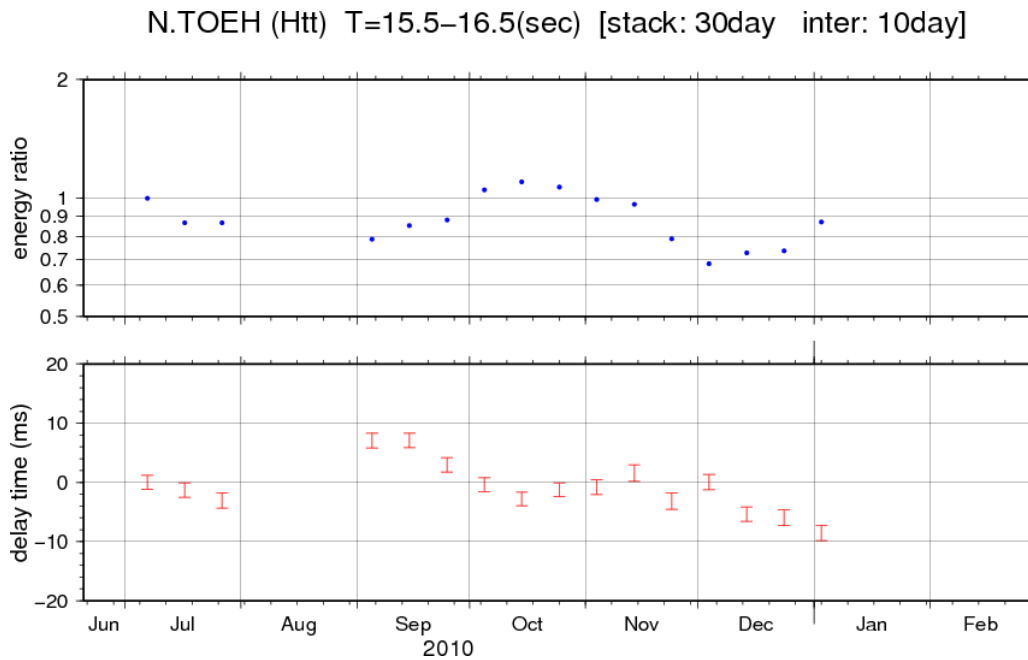


図 8. Hi-net東栄観測点における森町送信点からのアクロス信号の時間変化。フィリピン海プレートからの反射波とみられる波群の振幅変化（上）と走時変化（下）を示している。共に、グラフの最初のデータに対する相対的变化を表している（気象庁 [課題番号：7011]）。

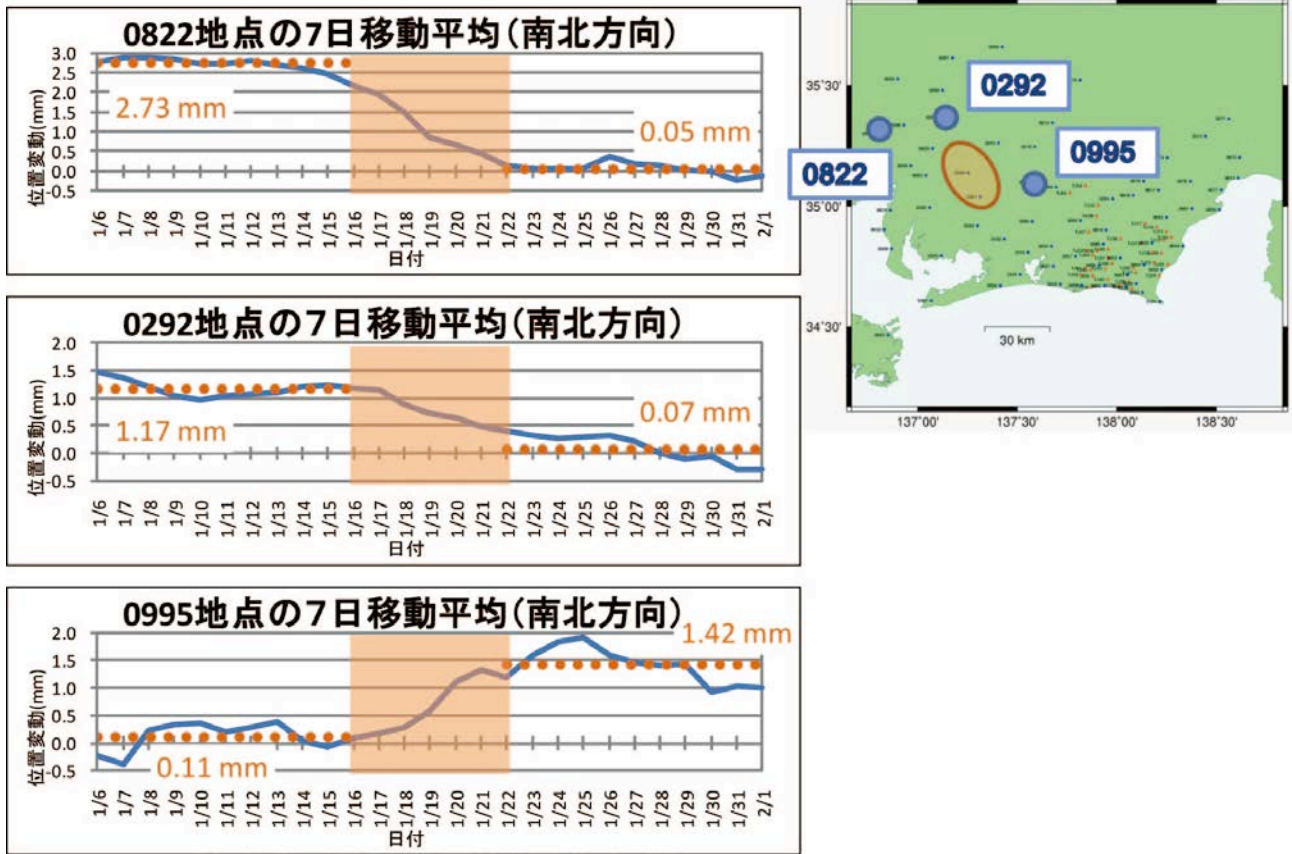


図 9. 2006 年 1 月 16-22 日に発生した短周期スローイベント前後のGPS時系列（7 日移動平均操作後）。オレンジ色で示した部分は低周波微動発生時期。右図は東海地域の地図と GPS観測点分布。時系列で示した観測点を示す。右図オレンジ色の楕円は低周波微動発生領域（東京大学 [課題番号：1404]）。

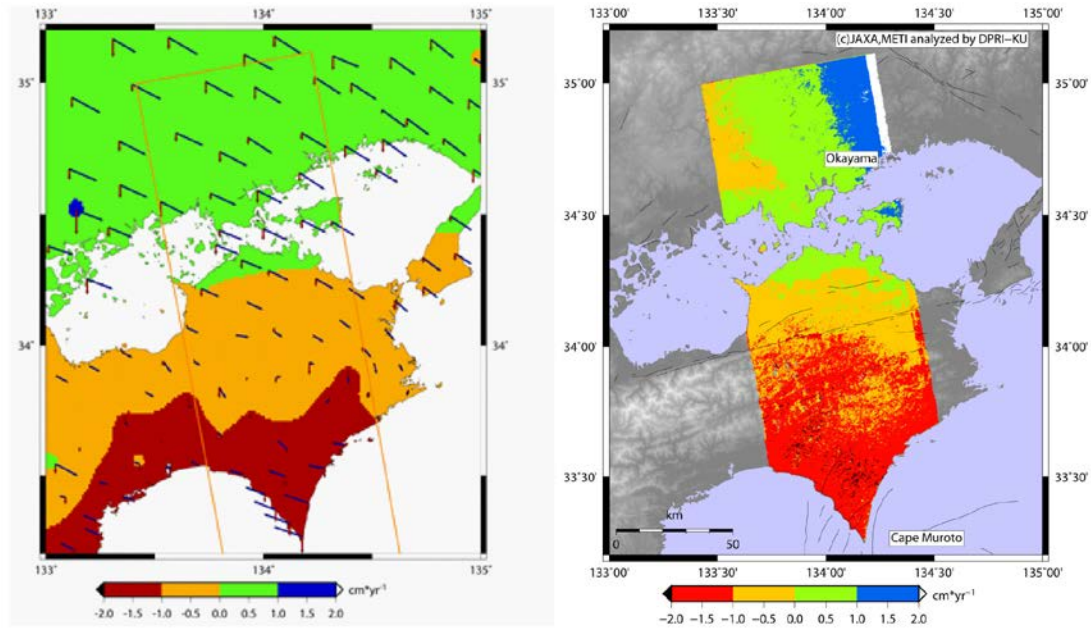


図 11. 四国東部パス 417 の 4 年間のデータから作成した干渉画像のうち、短基線のもの 18 ペアをスタッキングして得られた平均視線距離変化の分布。(左) GEONETデータから合成した平均視線距離変化。(右) PALSAR干渉画像から作成したもの。四国北岸がほぼ 0 cm/yr と成るように調整している（京都大学 [課題番号：1801]）。

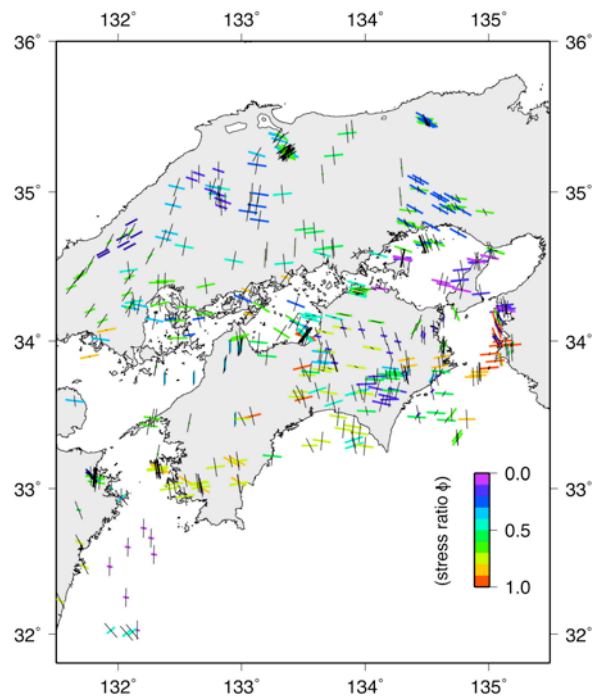


図 12. 応力場のマッピング結果。各領域で数個の応力解を推定し、滑り得る応力場がユニークに決まるケースのみを使って応力場のマッピングを行った。色付きは σ_1 、黒線が σ_3 、色は応力比 (Φ) を表す。

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、プロトタイプシステムの構築、および予測シミュレーション手法の高度化を行う。もう一つのアプローチは、統計的手法に基づく地震活動予測の高度化である。検証に用いるデータベース等の共通基盤を整備し、異なる予測手法の比較実験を実施する。平成22年度の研究により得られた成果の概要を以下に述べる。

ア. 地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

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

まず、地殻活動予測シミュレーションの開発においては、準静的な応力蓄積から破壊核形成を経て動的破壊へと至るプロセスから応力状態を引き継いで2サイクル目のシミュレーションを行うことに成功した。1968年十勝沖地震の震源域を想定したシミュレーションを行った結果、2サイクル目の初期には1サイクル目よりも急速に応力蓄積が生じ、結果的に2サイクル目では地震発生間隔が短縮される。これは、粘性緩和および粘性応力により駆動される余効すべりの影響である(図1、名古屋大学[課題番号:1702]、Hashimoto et al., 2011)。

予測シミュレーションでは、プレート境界面を表現する多数のセルですべりの時空間発展を追跡するために大規模計算が必要となり、その計算量およびメモリ量はセル数の二乗に比例する。また、摩擦パラメータの推定を行うには、異なるパラメータについて繰り返しシミュレーションを行う必要があるため、計算の高速化・省メモリ化が必須である。平成22年度は、階層型行列(Hierarchical matrices: H-matrices)法(Hackbusch, 1999)の地震サイクルシミュレーションへの適用を試み、メモリ量を $O(N)$ 、計算量を $O(N) \sim O(N \log N)$ に省力化できることを示した(図2、名古屋大学[課題番号:1702]、Ohtani et al., 2011)。

シミュレーションによる具体的な観測事例を再現する試みの一つとして、紀伊・東海地域を対象とした3次元断層モデルとカットオフ速度を持つ速度・状態依存摩擦構成則を用いて、この地域で発生するゆっくり滑りのシミュレーションを行った。摩擦遷移領域よりも深部に高間隙圧を仮定し、ゆっくり滑り発生域ではカットオフ速度の効果が顕著になるように設定することで観測された事象が良く再現された(図6、防災科学技術研究所[課題番号:3004]、Matsuzawa et al., 2010)。また、東海地域および豊後水道のゆっくり滑りを含む南海トラフの地震サイクル全体の特徴を再現可能な数値モデルが構築され、安政と昭和のケースのように、東海地震のアスペリティが2回に1回割れ残り、スロースリップの規模が東海地震のアスペ

リティの状態に影響されるという結果が得られた（気象庁〔課題番号：7023〕、弘瀬・前田、2010）。

現実に即したシミュレーションを行うために必要となるのがデータ同化であり、その一つの目的は、観測データに基づいて断層の摩擦パラメータを推定することである。摩擦パラメータの取り得る値を網羅的に調べるのは非効率なため、少ない計算量で摩擦パラメータ推定を行う手法として、アジョイント法の検討を進めている。平成22年度は、1セルの単純なモデルについて、ゆっくり滑りが発生する条件で生成した人工データを用いて摩擦パラメータの推定実験を行った。同化解析に用いるデータ範囲を変えてその影響を調べたところ、最初のゆっくり滑りですべり速度が最大となる付近までのデータを使用することで、その後のすべり履歴が正しく予測されることが分かった。また、相当程度データを間引いて同化解析を行ってもすべり履歴の予測にはあまり大きく影響しない(図3、名古屋大学〔課題番号:1702〕)。これらは、同化解析に使用するデータが現象の特徴を正しく表していれば、データ量を減らせることを表しており、現象の変化が緩やかで、新たな観測データを得たことによる情報利得が必ずしも大きくない固体地球現象の特徴が現れている。

データ同化は、観測データを用いて非線形の数値シミュレーションモデルにおけるパラメータ推定を確率的に行う枠組みであり、従来の逆問題解析の枠組みでは十分な扱いができなかった。平成22年度には、線形パラメータと非線形パラメータを両方含む線形・非線形混合逆問題について効率的に事後確率分布を推定するアルゴリズムを開発し、大自由度の線形・非線形混合モデルに対してパラメータの不確定性の完全な定量化、先験情報の重み付け・複数のデータセット間の重み付けの客観的決定を行うことが可能になった。さらに、様々なモデルに対してこの手法が適用可能であることを示した（名古屋大学〔課題番号：1702〕、Fukuda and Johnson, 2010、Johnson and Fukuda, 2010）。これは、大自由度モデルや複数のデータセットを用いた大規模データ同化の実現につながる成果である。

データ同化のもう一つの役割は、刻々と送られてくるデータを処理して、逐次的な予測を行うことである。こうした観点から、東南海地震発生後に南海地震が発生する場合の海底地殻変動観測データの同化実験を実施した。南海トラフの地震発生サイクルシミュレーション結果を用いて、東南海地震後から南海地震発生に至るまでの海底地殻変動（2点）の模擬データを作成し、解析に使用した。東南海地震と南海地震の発生間隔が5.1日および249.8日の場合の模擬データに対して、粒子フィルターを用いた逐次同化で2つの地震の発生間隔を推定した結果、ノイズの影響による推定誤差が、データの増加にしたがって減っていくことが定量的に示された（図4、海洋研究開発機構〔課題番号：4001〕）。この結果は、十分な観測情報を予測シミュレーションにリアルタイムで提供できれば、的確な地震発生予測を行える可能性を示すものである。

予測シミュレーション実現のためには、実際に同化させるデータの検討も必要不可欠である。これまでGPSを始めとする地殻変動データについての検討は進んでいるが、地震学的なデータの活用手法はまだ確立していない。こうした観点で注目されているのはプレート境界で発生する小繰り返し地震である。日本列島全域のデータを精査して小繰り返し地震を抽出し、琉球海溝沿いおよび千島海溝-日本海溝沿いにおいて、比較的安定した時間間隔で発生する地震群を見出した。小繰り返し地震群から推定されるすべり速度は、琉球弧ではプレート間の相対運動速度にほぼ一致するが、東北日本弧では大地震の余効すべりに伴う時空間変化

が見られた。さらに、震源情報を用いた地震クラスターの自動抽出を行い、波照間島沖合では、ゆっくり滑りに同期した地震クラスターの活動も見出した(名古屋大学[課題番号:1702]、Igarashi, 2010)。

一方、地震観測データに基づいて地殻内の応力を直接推定する方法の開発も進められている。平成22年度には、地震メカニズム解を用いて3次元的な流体圧分布を推定する手法をイタリアで発生したラクイラ地震のデータに適用し、一連の地震活動が流体に駆動された可能性を示した(図5、名古屋大学[課題番号:1702]、Terakawa et al., 2010)。将来的には、モーメントテンソルの逆解析等で推定される応力場(Terakawa and Matsu'ura, 2010)に流体圧分布を加味することで、地震発生条件の判断が可能となる可能性がある。

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。

現在のシミュレーションでは考慮されていない断層帯の間隙の効果についてシミュレーションによる影響評価を行った。熱多孔質弾性体中に断層を仮定し、摩擦発熱やすべりによる空隙の生成、流体・熱の拡散を考慮した計算を行ったところ、空隙生成率が十分に大きい時にゆっくり滑りと同期した微動が起きることが分かった。一方、圧力溶解等の化学変化により沈殿物が生じると間隙体積が減少し流体圧が上昇する。こうした効果は断層を安定化させるとともに、見かけのすべり速度が増加して外部から加えたローディング速度を越えてしまう。ダイラタンシーを考慮して間隙圧を下げることにより、こうした問題が解決できることが明らかになった(東京大学地震研究所[課題番号:1405])。

一方、地震活動解析への応用を視野に、AEの時空統計性の背後にあるメカニズム解明を目的としたシミュレーション研究を行った。AEの大きさ・頻度分布はジャミング転移点と呼ばれるある臨界密度においてのみベキ則になること、また、再来時間の分布関数を表す冪指数が下限マグニチュードに依存することを発見した。これらは、離散モデルにおけるAE活動が自己組織化臨界ではなく、ジャミング転移点という特定の分岐点における揺らぎの増大であることを示している。さらに、AEイベントのダイナミクスに基づいた摩擦構成法則を理論的に導出した(東京大学地震研究所[課題番号:1405])。

現在の計画で目指しているのはプレート境界地震の予測システムであるが、将来的には内陸地震を含めたシステムの検討が求められる。そうした枠組みを作るには日本列島規模で粘性・強度分布をモデル化することが必要となる。温度構造の推定結果等に基づいて、弾性層と単一の粘性係数をもつ粘性層の2層に単純化したモデルを構築して有限要素法解析を行った結果、新潟-神戸歪み集中帯付近に歪速度の大きい領域が現れる等、現実の観測データと調和的な結果が得られた(産業技術総合研究所[課題番号:5003])。

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測

地震活動の特徴や地震発生の統計モデル・物理モデルに基づいて、将来の地震活動を確率論的に予測する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進められている。本研究計画では CSEPへの取り組みを計画の一部と位置づけ、地震発生予測のアルゴリズム開発やモデルの比較を進めている。

平成22年度は、検証実験は3予測領域・4予測期間の計12クラスに合計91の地震予測モデルが参加して第1回地震発生予測検証実験を実施した。そのうち日本全体陸域部の3ヶ月予測結果に基づいて各地震発生予測モデルを評価したところ、9つの予測モデルのうち3つが有意な予測性能を持つものと判断された。一方、関東地方を対象とする予測ではすべての予測モデルが評価テストをパスできなかった(図7、東京大学地震研究所[課題番号:1406])。

日本周辺の地震活動データの解析から、大地震発生前に前震が発生する頻度が、二つの地震がランダムに発生する確率よりもはるかに大きいことが分かった。このことを利用し、ある地震が大地震の前震である確率をリアルタイムで予測するシステムを構築した(京都大学防災研究所[課題番号:1802])。

また、地震波速度構造と地震活動との関係に基づいてグリッド毎の速度構造を地震発生率に変換し、地震の規模別頻度分布に基づく地震発生予測モデルを改良した。その結果、全体的な予測精度向上が見られた(気象庁[課題番号:7012]、Hirose and Maeda, 2011)。

課題と展望

平成22年度までの研究により、準静的な応力蓄積と断層の動的破壊の連成シミュレーションにより地震サイクルの計算を行うことが可能となった。従来から行われてきた速度・状態依存摩擦法則による地震サイクルシミュレーションとは異なる考えに基づく予測シミュレーションが可能となったことで、同一の事象についても2種類のシミュレーションを行って相互の比較検証が行えるようになったことは大変重要である。ただ、現在までに行った計算では、現実的なプレート形状を仮定しているものの、アスペリティの空間分布については十分な空間解像度を持つモデルにはなっていない。より現実的な問題設定の計算を行い、摩擦パラメータの最適化を行うためには大量のモデル計算が必要となるため、シミュレーション計算の高速化が必須の課題であるが、今年度試行に成功した階層型行列を活用するなど計算高速化の取り組みを一層強化する必要がある。

データ同化による摩擦パラメータの推定は、アジョイント法の数値実験によって一定の成果が得られている。今後、大規模問題で検証を進めていくことが必要であるが、膨大な量のデータを処理する際には、計算規模や計算時間の制約が問題となってくる可能性がある。また、観測システムからのデータ入力による逐次同化の実験の取り組みも始まり有望な結果が得られつつあるが、様々な事例について多数の検証を進めていくことが今後の課題となる。

地震学的なデータの利用の観点では、小繰り返し地震の全国的な分布が明らかとなり、そこから推定されるすべり速度とプレート運動速度の対応も見えてきたので、こうした情報をGPSデータと組み合わせたすべりの時空間分布推定を今後進めていく必要がある。一方、CMTデータ解析による応力場や、今年度開発された手法により推定された流体圧に関する情報の活用手法を検討していくことも今後の課題である。

確率モデルによる地震発生予測の面では、CSEPの活動が本格的に開始され、予測モデルの比較検証結果も公開されるなど順調に実験が進んでいる。検証実験を通してそれぞれのモデルに改良が加えられ、予測性能が向上していくことが期待される。

参考文献

- Fukuda, J., and K. M. Johnson, 2010, Mixed linear-non-linear inversion of crustal deformation data: Bayesian inference of model, weighting and regularization parameters, *Geophys. J. Int.*, 181, 1441-1458.
- Hashimoto, C., Fukuyama, E., Terakawa, T., Sagiya, T., Nakajima, K., Sato, T., and Matsu'ura, M., 2010, Development of a predictive simulation system for crustal activities in and around Japan -VII, Annual Report of the Earth Simulator Center, the Earth Simulator Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.
- Hatano, T., 2010, Critical scaling of granular rheology, *Progr. Theoretical Phys. Suppl.*, 184, 143-152.
- Hatano, T., 2010, Constitutive law of dense granular matter, *J. Physics, Conference Series* 258, 012006, doi:10.1088/1742-6596/258/1/012006.
- Hirose, F., and K. Maeda, 2011, Earthquake Forecast Models for Inland Japan Based on the G-R Law and the Modified G-R Law, *Earth Planets Space* (in press).
- 弘瀬冬樹・前田憲二, 2010, 東海地域の割れ残り と長期スローイベントとの関係, *地震予知連絡会会報*, 84, 547-549.
- Hok, S. and E. Fukuyama, 2011, A new BIEM for rupture dynamics in half-space and its application to the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, *Geophys. J. Int.*, 184, 301-324.
- Hori, T. and S. Miyazaki, 2010, Hierarchical asperity model for multiscale characteristic earthquakes: a numerical study for the off-Kamaishi earthquake sequence in the NE Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L10304, doi:10.1029/2010GL042669.
- Igarashi, T., 2010, Spatial changes of inter-plate coupling inferred from sequences of small repeating earthquakes in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L20304, doi:10.1029/2010GL044609.
- Imanishi et al., 2011, Depth - dependent stress field in and around the Atotsugawa fault, central Japan, deduced from microearthquake focal mechanisms: Evidence for localized aseismic deformation in the downward extension of the fault, *J. Geophys. Res.*, 114, doi:10.1029/2010JB007900.
- Imoto, M., 2011, Performance of a seismicity model for earthquakes in Japan ($M > 5.0$) based on P-wave velocity anomalies, *Earth, Planets Space* (in press).
- Johnson, K. M., and J. Fukuda, 2010, New methods for estimating the spatial distribution of locked asperities and stress-driven interseismic creep on faults with application to the San Francisco Bay Area, California, *J. Geophys. Res.*, 115, B12408, doi:10.1029/2010JB007703.
- 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, 62, 57-69.
- Matsuzawa, T., H. Hirose, B. Shibasaki, K. Obara, 2010, Modeling short- and long-term slow slip events in the seismic cycles of large subduction earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 115, B12301, doi:10.1029/2010JB07566.

- 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.
- Nanjo, K. Z., T. Ishibe, H. Tsuruoka, D. Schorlemmer, Y. Ishigaki, and N. Hirata, 2010, Analysis of completeness magnitude and seismic network coverage for Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 6, 3261-3268.
- Nanjo, K. Z., H. Tsuruoka, N. Hirata, and T. H. Jordan, 2011, Overview of the first earthquake forecast testing experiment in Japan, *Earth Planets Space* (in press).
- Ohtani, M., K. Hirahara, Y. Takahashi, T. Hori, M. Hyodo, H. Nakashima and T. Iwashita, 2011, Fast computation of quasi-dynamic earthquake cycle simulation with Hierarchical Matrices, *Procedia Computer Science* (in press).
- Sasaki, 2011, T., Data assimilation for earthquake cycle simulations: estimation of frictional parameters on a plate boundary with geodetic data, Master dissertation, Nagoya University.
- Shibasaki, B., S. Bu, T. Matsuzawa, H. Hirose, 2010, Modeling the activity of short-term slow slip events along deep subduction interfaces beneath Shikoku, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, B00A19, doi:10.1029/2008JB006057.
- Smyth, C. and J. Mori, 2011, Modelling temporal variations of seismicity parameters to forecast seismicity rates in Japan, *Earth Planets Space* (in press).
- Smyth, C., J. Mori, C. Jiang, 2010, Model Ensembles for Prediction of Wenchuan Aftershock Activity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 2532-2538, doi: 10.1785/0120090300.
- Terakawa, T. and M. Matsu 'ura, 2010, 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from CMT data of seismic events, *Tectonics*, 29, TC6008, doi:10.1029/2009TC002626.
- Terakawa, T., A. Zoprowski, B. Galvan, and S. A. Miller, 2010, High pressure fluid at hypo-central depths in the L 'Aquila region inferred from earthquake focal mechanisms, *Geology*, 38, 995-998.
- Yamashina, K. and K. Z. Nanjo, 2011, An improved relative intensity model for earthquake forecast in Japan, *Earth Planets Space* (in press).

1968年十勝沖地震 (M=8.2) の震源域における 応力蓄積—解放過程：第2サイクル

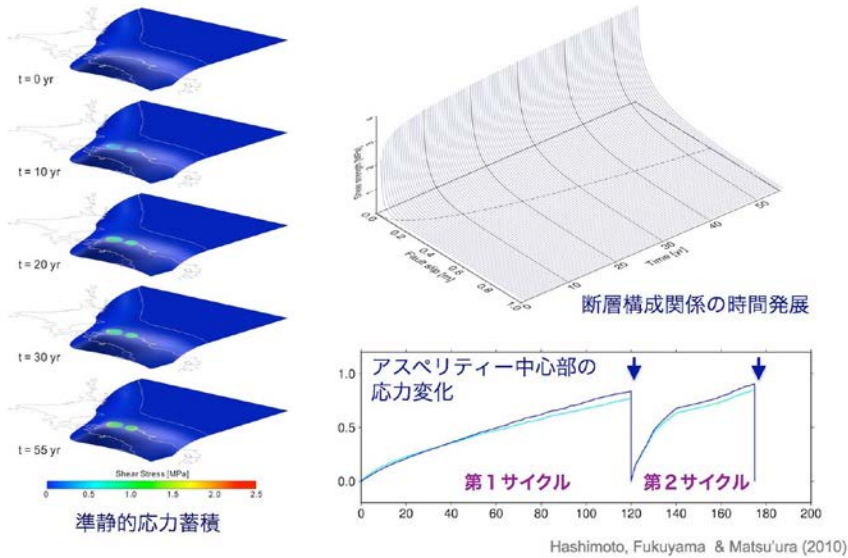


図1. 準静的応力蓄積・破壊核形成と動的破壊の連成シミュレーションによる1968年十勝沖地震震源域の2サイクル目の応力時空間変化(左)、断層摩擦関係の時間発展(右上)、および2サイクル分の応力変化(右下) (名古屋大学 [課題番号: 1702])。

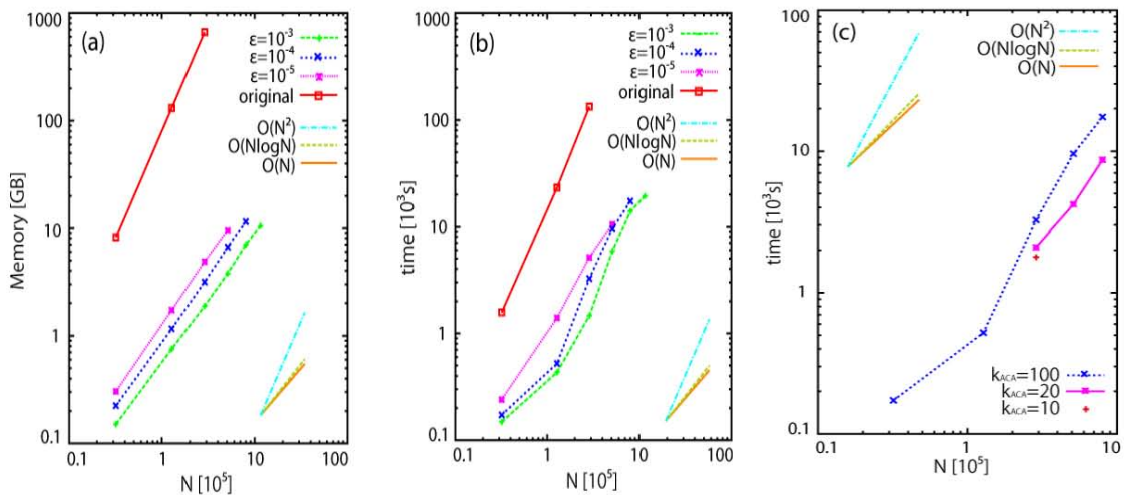


図2. セルサイズ(N) に対するメモリ量(a) および計算時間(b, c) の増大。

H-matrices を適用しない場合 (赤) はメモリ・計算量とも $O(N^2)$)。各行列の近似精度を決める ϵ に対して、H-matricesを用いた場合メモリ量はほぼ $O(N)$ 。計算時間は $N=10^5$ あたりまで $O(N)$ であるが、それ以上で急増する。この時最外側小行列のランクが大きくなっている。近似精度 ϵ はシミュレーションより 10^{-4} を要求されるが、その場合、最外側小行列のランクを決める $k_{ACA}=20$ に設定してもシミュレーション結果は変わらず計算時間を抑えられる ($O(N \log N)$) 程度) (名古屋大学 [課題番号: 1702]、Ohtani et al., 2011)。

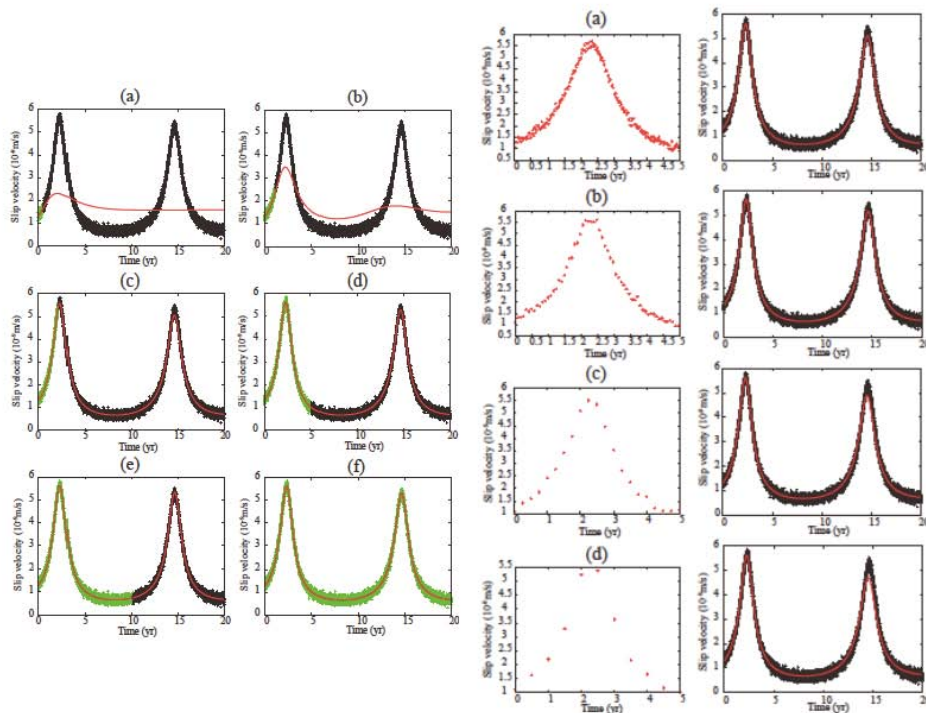


図3. アジョイント法により推定された摩擦パラメータを用いたシミュレーションと解析に用いた模擬データの比較。左は同化解析に用いるデータ量（緑で示すデータ）を変化させた場合、右は解析に使用するデータのサンプリングを変えた場合（名古屋大学 [課題番号：1702]、Sasaki, 2011）。

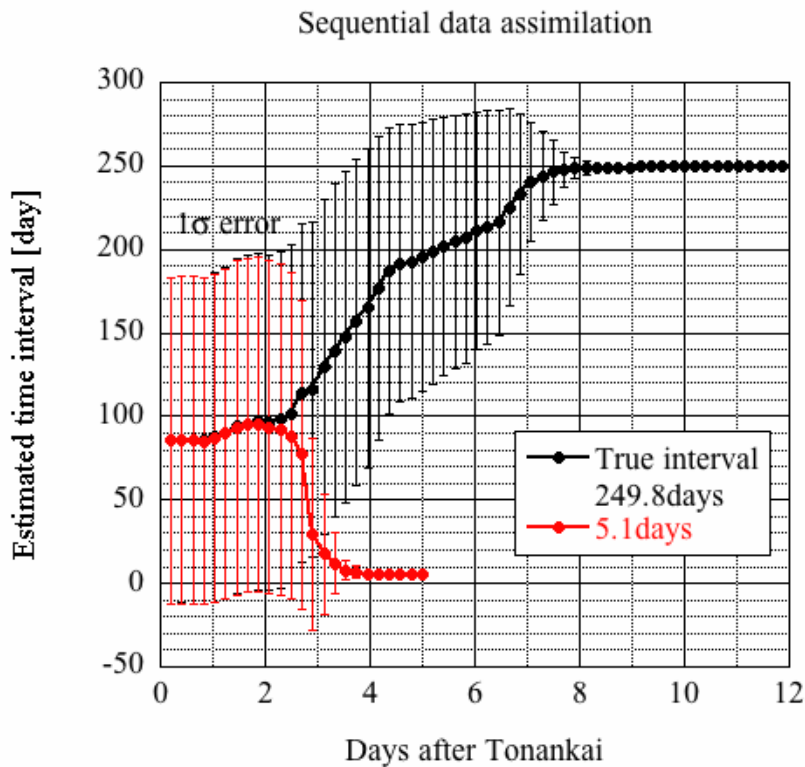


図4. 逐次データ同化実験

逐次データ同化の数値実験によって得られた東南海地震と南海地震の発生間隔の推定結果。平均値と標準偏差を示す（海洋研究開発機構 [課題番号：4001]）。

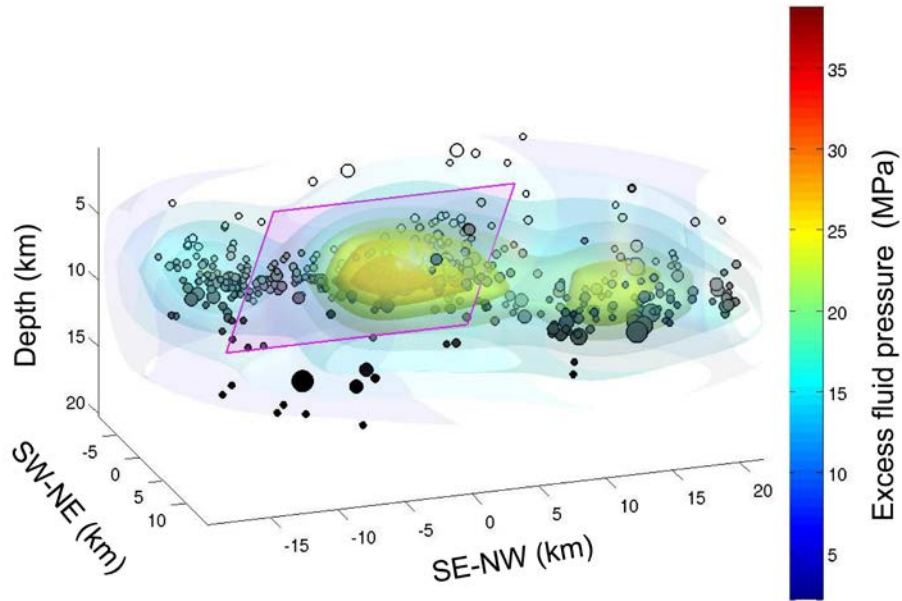


図5. 地震メカニズムトモグラフィー法で求めたラクイラ地震震源域付近の流体圧分布と震源分布（名古屋大学 [課題番号：1702]、Terakawa et al., 2010）。

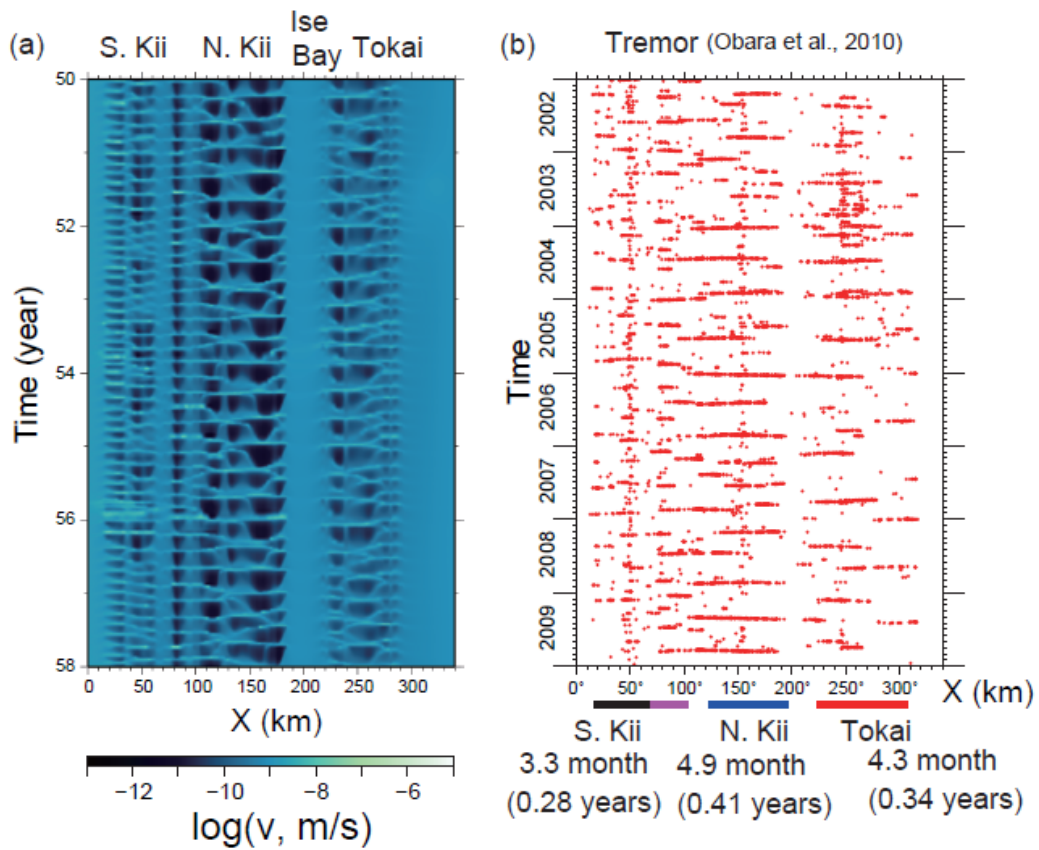


図6. シミュレーションによる深さ30 km でのすべり速度の変化。横方向に線状に明るくなっているところがゆっくり滑り。短期的ゆっくり滑りが、いくつかのセグメントごとに数ヶ月周期で発生している（Matsuzawa et al., 2010）。右はObara et al. (2010) によって得られた紀伊・東海地域における微動活動の時系列図（防災科学技術研究所 [課題番号：3004]）。

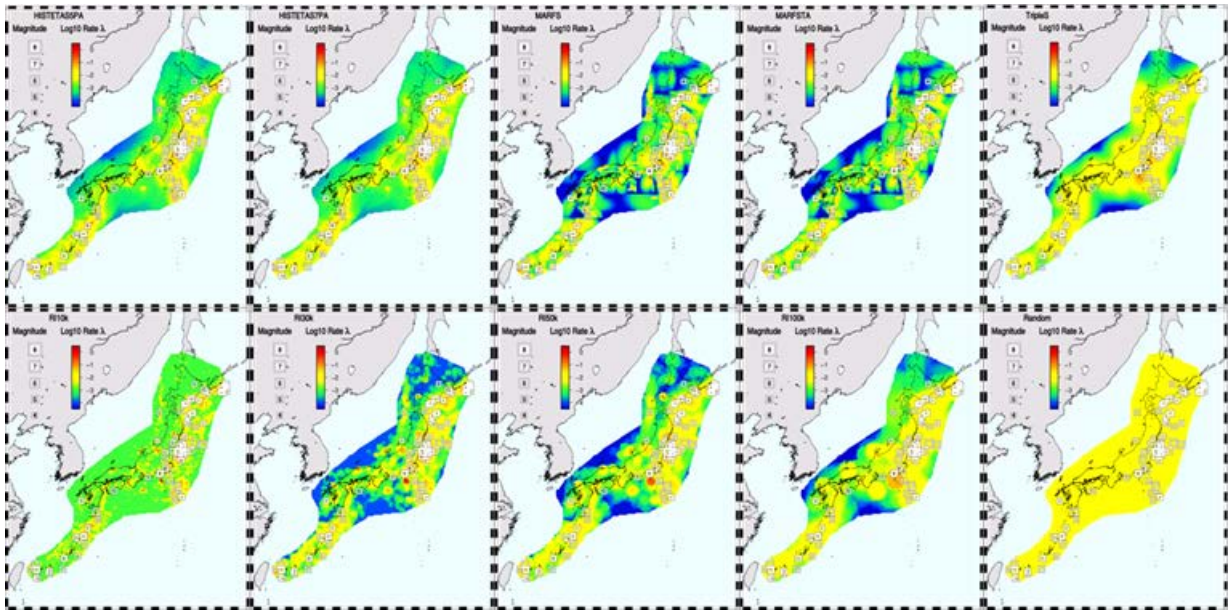


図7. 陸域部だけの日本全体・3 か月予測にエントリーされたモデルの発生予測マップ（東京大学地震研究所〔課題番号：1406〕）

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)
同部会委員 中田節也
(東京大学地震研究所)

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」を火山噴火予知の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知見だけでは困難である。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履歴の発現頻度やパターンを利用し、噴火事象の変化を支配する機構を科学的に理解することで、噴火の規模や様式を含む推移予測をある程度を絞むことを目指している。そのため、「地震・火山現象に関するデータベースを活用するとともに、地質調査・解析によって明らかにされた噴火履歴を参照して、噴火シナリオを我が国の主要な活火山について順次作成すること、噴火現象の分岐に「過去の噴火時の観測データの再検証や研究成果を取り入れて噴火シナリオを高度化する」ことが求められている。さらには「活動的な火山について、観測データと噴火シナリオに基づき、火山活動の現状を評価し推移予測を試行する」ことが本研究計画のゴールのひとつであり、この研究での成果をマニュアル化し、火山専門家が他の活火山に適応できる道筋をつけることが重要である。

平成22年度は、本計画の細目「ア. 噴火シナリオの作成」について、初年度の三宅島火山に続き桜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」については、霧島山新燃岳の噴火災害と防災対策の必要性に対応するため、急遽試作した噴火シナリオと実際の噴火の推移とを比較して問題点を洗い出す作業を行った。

ア. 噴火シナリオの作成

桜島火山シナリオ作成の作業は、噴火履歴に関する資料を収集した後に、11月に噴火履歴に関する認識をグループ全体で共有、課題を明らかにした後、1月にシナリオのたたき台の提案し、議論の後、修正案を作成し、メール等による検討を加えて成案を作成した。

桜島のシナリオは、下記の点で伊豆大島や三宅島と異なっており、シナリオを作成する上で新たに検討すべき課題が明らかとなった。第1に、桜島では日常的に小規模な噴火が発生しており、それぞれの噴火にいたるシナリオは既存の手法で作成可能と思われるが、小規模噴火が発生している中で大規模な噴火が発生する可能性があり、大規模噴火にいたるシナリオをどのように組み立てるかが問題である（図1～3）。第2に、明らかとなっている大規模な噴火の事例は4例しかなく、大規模噴火にいたる推移を十分に記載することが難しい。このような問題点はあったが、過去100年間におよぶ観測研究から得られる知見をもとに、下記のような枠組みを設定した。

・桜島で発生する噴火は以下の4つに分けられる。

極大規模噴火：噴出物量が 1km^3 を超える、大正、安永、文明の噴火に相当する。

大規模噴火：噴出物量が 0.1km^3 程度、昭和の噴火に相当する。

小規模噴火：噴出物量が数 10万m^3 程度、1975年～1993年の南岳噴火（後期南岳噴火期と呼ぶ）。

極小規模噴火：噴出物量が 10万m^3 以下の噴火。

また、既往研究から以下のことがわかっている。

- ・桜島では年間 1000万km^3 のマグマが地下から供給されている。
- ・静穏期、あるいは極小規模噴火を繰り返している状態で始良カルデラ地下においてマグマ蓄積が進行する。
- ・マグマ蓄積が開始しておよそ30年で、大規模噴火、あるいは小規模噴火の繰り返しで同等のマグマを噴出する。
- ・マグマ蓄積が開始しておよそ100年以上経過して極大規模噴火が発生する。噴火後はマグマ蓄積がリセットされる。
- ・極大規模噴火に先行する異常現象としては、広域地震活動の活発化（数か月～数年）、広域地盤隆起、桜島島内での二酸化炭素噴出や火山性地震活動の活発化（有感地震を含む）、井戸水の水位異常などが考えられ、火山体内部圧力の急激な上昇が起きると考えられる。
- ・大規模噴火に先行する異常現象は極大規模噴火の場合よりも小規模だが、異常現象が検知されると思われる。
- ・極大規模噴火と大規模噴火の切り分けは、たとえば下記の式であらわされるかもしれない（図4）。

マグマ蓄積開始後の年数を n 年として、 $Y = (n + 5) / 30$ を定義し、 $Y=1$ になると大規模噴火に移行しうる。 Y が3を超えると大規模噴火に移行する確率が低下し、極大規模噴火に移行する確率が高くなる。

以上示したシナリオでは、噴火事象系統樹の分岐をマグマ蓄積開始からの年数と観測される異常現象の規模によるとしており、確率的な数値を明示的には入れていない。この是非は平成23年度以降に検討する予定である。

イ. 噴火シナリオに基づく噴火予測

霧島（新燃岳）において約300年ぶりの本格的なマグマ噴火が発生し、防災のための推移予測が社会的に重要となった。このような局面で、霧島山新燃岳についても噴火シナリオを急遽作成し、そのシナリオに基づき活動状況の評価と推移予測、シナリオの逐次的な修正作業を行った。その過程は「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、報告されている。

霧島火山群新燃岳は、2011年1月26日から本格的な噴火を開始した。これは新燃岳としては約300年ぶりのマグマ噴火であった。この噴火に先立って、水蒸気爆発が2008年8月に開始し、2010年までに複数回繰り返した。特に、2010年の噴火はコックステール・ジェットを伴う噴火であった。また約1年前の2009年12月末から山体が膨張する現象が起っていたことが国土地理院のGPS観測網で捉えられていた。さらに、2011年1月19日の小噴火で噴出物に約8%の軽石

が含まれているのが認められ、マグマ物質の関与が確実となった。このように、多くの点でマグマ噴火を示唆する前兆現象が認められていた。この噴火の開始直後、リアルタイムで噴火の推移予測を行うために、過去の新燃岳の地質学的研究（主に井村・小林，1991）を基に噴火シナリオを急遽準備し、実際の噴火の推移に合わせて変更を重ねた。第1版は1月27日に作成し、2月2日に改訂を加えた。その後、鹿児島大学の最近の地質学的研究の成果を反映させると同時に、国内外の類似火山の噴火様式を参考に第2版を2月14日作成した。

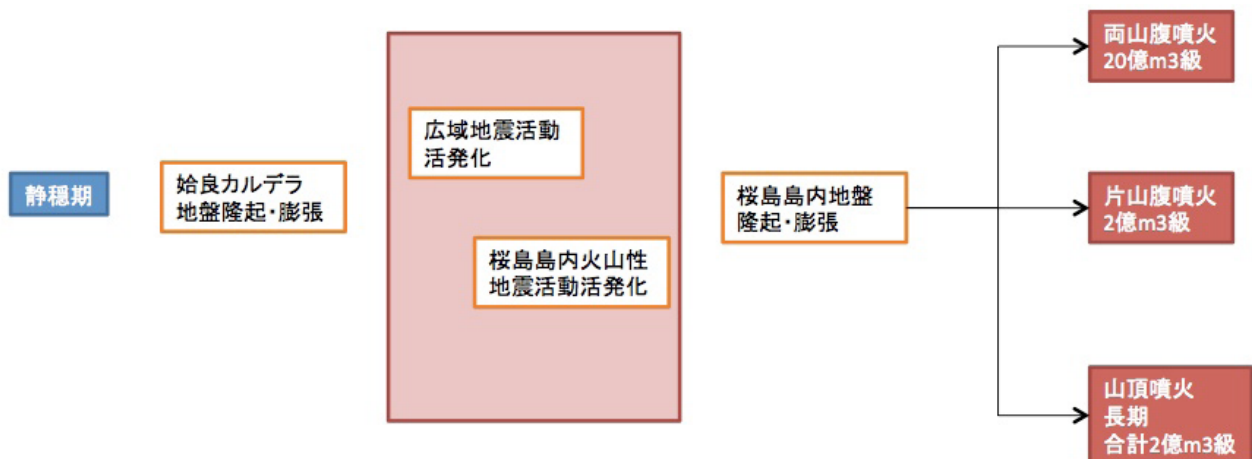
噴火シナリオ第1版は、井村・小林（1991）の新燃岳の過去の噴火に基づき作成し（図5）、地質学的には読み取られていなかった進行中の噴火現象に対応し変更を加えたものである。1716-17年噴火の研究によると、水蒸気爆発の後、数ヶ月の休止期間を挟んで、火砕流噴火を伴う中規模の軽石噴火が約3ヶ月間継続し、その後、再び休止期間を数ヶ月挟んで、より大きなマグマ噴火が最終に起きたとされる。しかし、活動の最後に最大規模の噴火が発生し、そのまま活動が停止することは通常のマグマ噴火の推移では考えにくい。そのため、最後の噴火後に、火口内に溶岩が流出したものとした。これは噴火前に一旦火口を埋めドレインバックした形状を示す溶岩が存在していたことを反映させている。ここでの欠点は、マグマ噴火のイベントを一つのボックスにおさめてしまっているために、この中での噴火推移やマグマ供給との関係が上手く表現できていないことである。これは実績重視型といえるかもしれない。

第2版は、筒井ほか（2005）や小林（2011 私信）を加味し、さらに、火口に溶岩蓄積が起こり、ブルカノ式噴火を繰り返したことのある安山岩火山（類似火山）を考慮しながら作成したものである（図6）。すなわち、浅間山1973年、2004年噴火、コロンビア・ガレラス火山の1991年以降の噴火、および、北マリアナ諸島のアナタハン火山との共通点を抽出して作成した。小林（2011私信）では、約300年前の噴火について、井村・小林（1991）では、古文書と地質学的情報との擦り合わせに一部違いがあり、最後の活動を規模の大きなマグマ噴火としていたが、水蒸気爆発と考えられることを指摘している。この考えは、類似火山等に見られる噴火の推移や、新燃岳が電磁気学的にも帯水層が発達した火山であることから妥当な考え方と思われる。

準プリニー式噴火後の展開はマグマ中の揮発性成分が減少する方向であり、噴火の1輪廻に対応する。報告書作成時点（2月20日）では、噴火状態は図6の赤枠で囲んだ位置にあり、火口溶岩や火道上部に溜まった火山ガスが時折爆発を起こすブルカノ式噴火を繰り返している。地殻変動の解析では噴火に先立って山体が膨張した量の2/3~3/4は噴火によって収縮した。大学の観測研究の結果からは噴出量（溶岩換算量）と収縮量がほぼ一致している。今後このような噴火を数ヶ月程度繰り返して活動が一旦はおさまると考えられる。その後、新たなマグマの上昇があれば次の輪廻の活動に移行する。すなわち図6では上のスイッチャーの場所から「yes」の経路をたどる。アナタハンの場合は1輪廻の活動の末期にマグマ水蒸気~水蒸気爆発が繰り返された。そこでは火口が海水面以下の高さにあったことや、火口と海との距離がわずか1km程度の至近距離であったことが大きな要因かもしれない。新燃岳ではアナタハンほどではないにしても、マグマ供給が途絶えたとしても最後に水蒸気爆発を起こす可能性がありうることは過去の噴火事例からも示される。この噴火事象系統樹の分岐に確率的な数値を入れることができなかった。ここではスプリエールヒルズ火山で噴火中に行った系統樹のように、専門家の投票による数値化も可能であったらう。

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、これまで作成した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、作成した噴火シナリオを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で完成度を高めていくことが重要であろう。霧島新燃岳へのシナリオの試用は、未完成のシナリオであったが、系統樹を目の前において観測された資料を検討することで、現象の分岐を明確に意識した議論が行われ、また不足している情報が何であるか洗い出す効果があった。加えて、防災関係者・報道関係者とも意識を共有する効果があったと思われる。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。



分岐は噴火直前の変動量と変動速度による

図1. 桜島火山の噴火シナリオを考える上での基本的な考え方
(東京大学地震研究所 [課題番号: 1807])

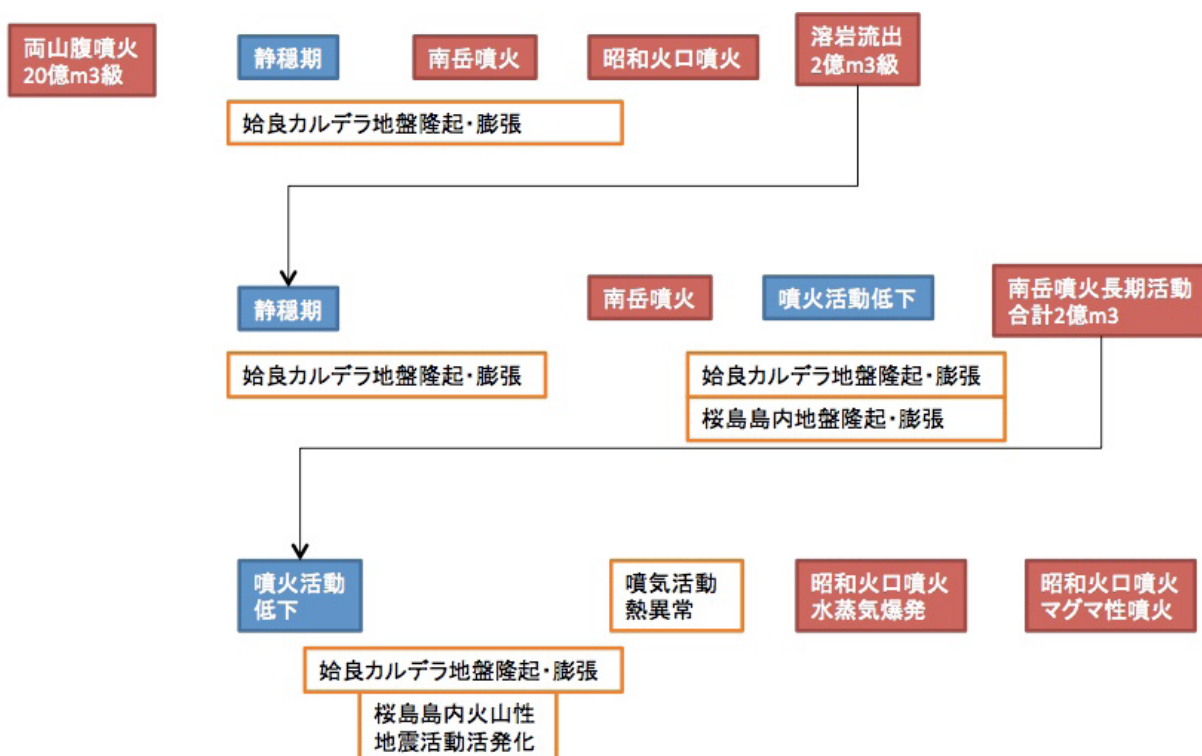


図2. 桜島火山大正噴火以降の噴火活動推移 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1807])

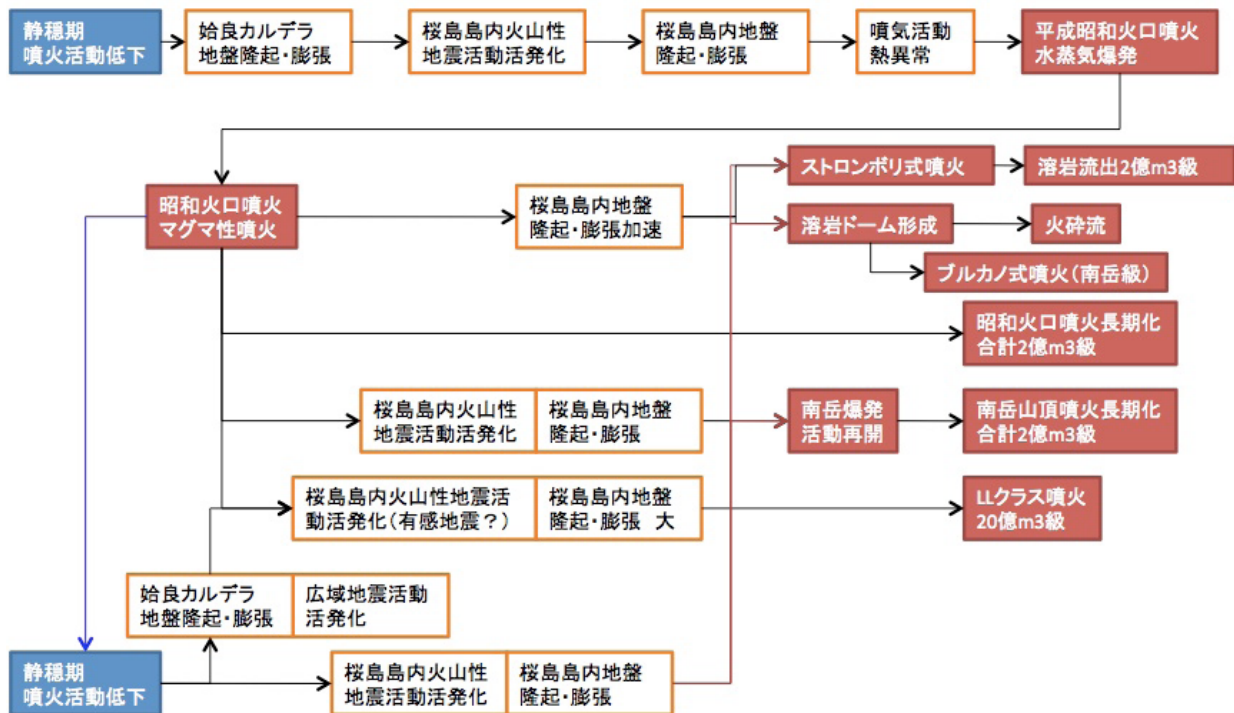


図3. 桜島火山1993年以降の火山活動推移と2011年以降の予測 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1807])

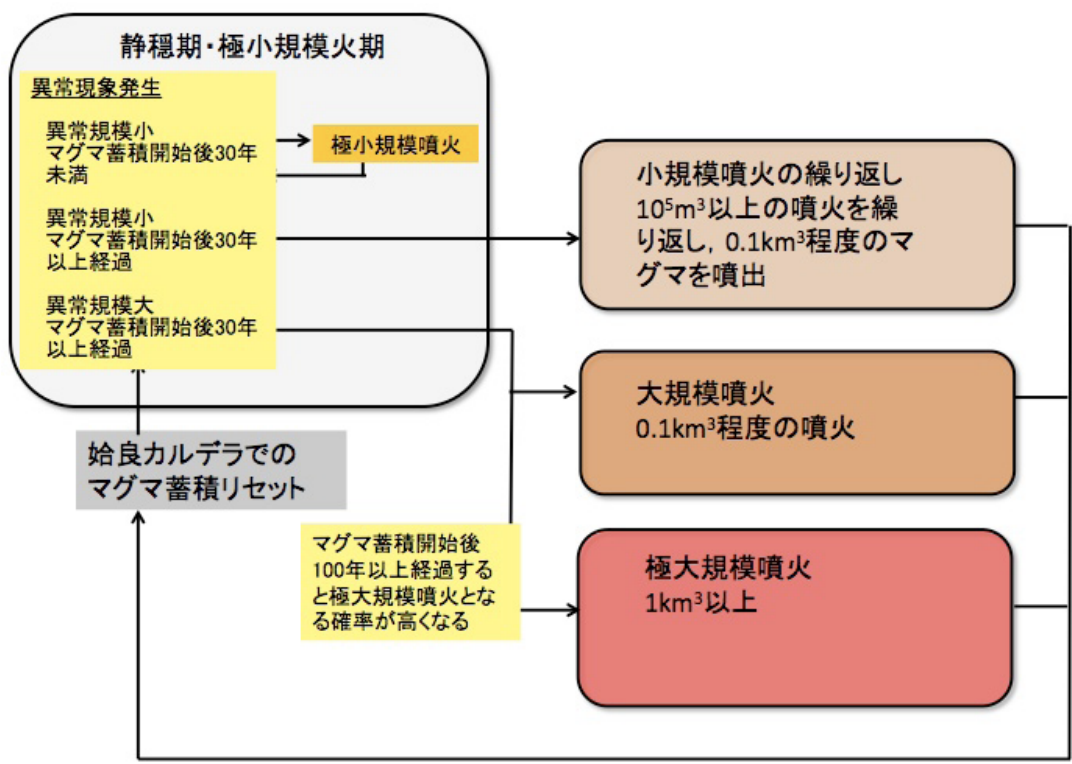


図4. 桜島火山の噴火シナリオ. 極大噴火と大規模噴火の切り分けの考え方 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1807])

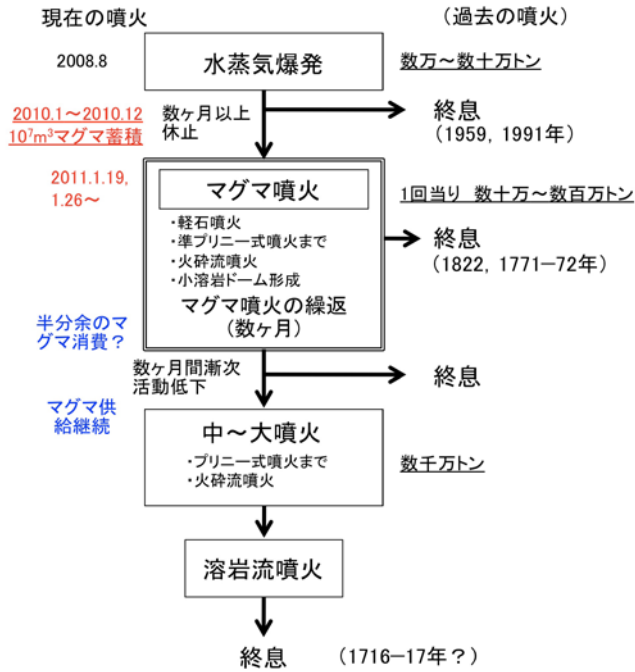


図 5. 霧島火山群新燃岳の噴火シナリオ第 1 版 (2011 年 1 月 27 日作成, 2 月 2 日改訂).
 1716-17 年噴火に関する地質学的研究を重視したもの. (東京大学地震研究所 [課題
 番号 : 1808])

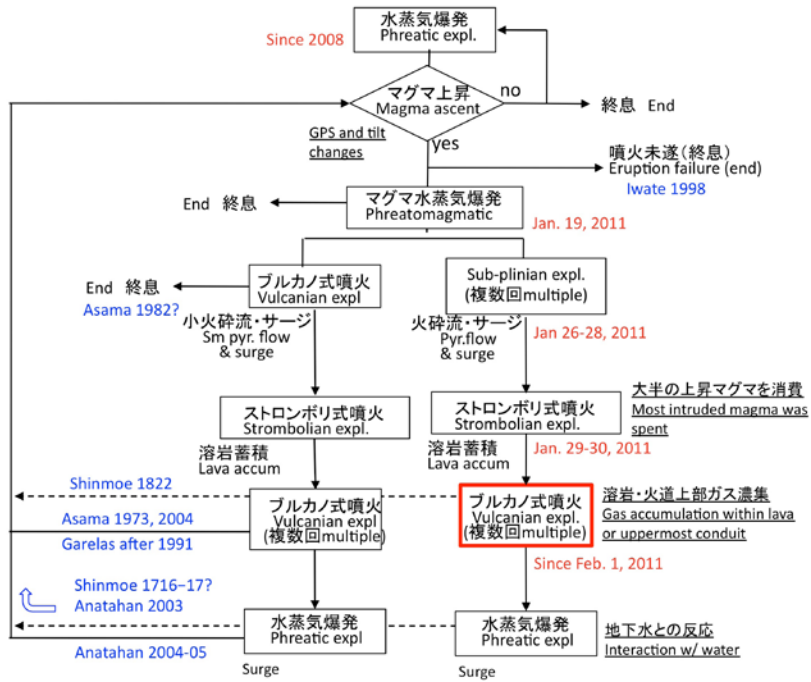


図 6. 霧島火山群新燃岳の噴火シナリオ第 2 版 (2011 年 2 月 14 日作成)
 (東京大学地震研究所 [課題番号 : 1808])

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)

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

ア. 地震・火山現象の基礎データベース

(地殻変動観測に関する基礎データベース)

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と期待される。また、その特性は、広帯域地震計でも計測が困難な津波地震や連動型地も観測できるという長所がある。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、平成21年度に接続・流通を開始した、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7機関に加え、今年度新たに、京都大学防災研究所・鹿児島大学・北海道立総合研究機構地質研究所の3機関のデータの流通を開始した。その結果、現在、合計74観測点、506チャンネルのデータを試験流通させるに至っている。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。また、平成23年1月26日から始まった霧島新燃岳の噴火に際して、機動的な地殻変動観測システムの運用の実験も行い、現地に設置した臨時の地殻変動観測システムのデータを含め、リアルタイムで伝送、各機関で参照可能にすることにより、火山活動のモニタリングに非常に有効であることが確かめられた(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])。

(地震観測に関する基礎データベース)

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の構築が行われている。統合地震波形データベースは、観測記録データベースのみならず、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の情報の統合化を指向した作業が行われている。今年度は、巨大遠地地震の波形記録を周波数領域においてアレイ解析することで表面波の位相速度を測定し、S波速度構造の改定を行う等の研究を進めた(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])も着実に進められているほか、過

去の地震のデータベースを改良するための作業も並行して行われており、今年度は1972年の地震を対象にデータの改訂が試みられた（気象庁[課題番号:7016]）。

（火山に関する基礎データベース）

気象庁では活火山データ整備（気象庁[課題番号:7016, 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。とくに、今年度は、火山噴火予知連絡会火山観測体制等に関する検討会において、日本活火山総覧改訂の基礎資料となる「47火山の観測体制に関する検討結果のとりまとめ」が作成されたほか、42火山の47カ所で採取したボーリングコアを火山噴火予知連絡会コア解析グループにおいて解析した結果を取りまとめ、その報告書が刊行された。また、国土地理院では、火山基本図や火山土地条件図整備などが行われており、今年度は御嶽山の火山土地条件図の数値データの作成のほか、栗駒山の火山土地条件調査を実施するとともに、栗駒山の火山基本図の数値データの作成が行われた（国土地理院[課題番号:6010]）。

（地球電磁気観測に関する基礎データベース）

気象庁地磁気観測所では、数少ない地球電磁気観測関連のデータベースのひとつである、地磁気永年変化のデータベースの整備・構築を行っており、柿岡・女満別・鹿屋・父島の地磁気4成分連続観測データを統一的な形式に整理し、地磁気永年変化データベースに登録する作業が続けられている（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。今年度は、北海道・東北・関東における温度構造データの収集が行われた（防災科学技術研究所[課題番号:3008]）。

産業技術総合研究所においても、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。火山衛星画像データベースに関しては、本年度、仮サーバから本サーバへの移転が終了し、正式運用が開始された（産業技術総合研究所[課題番号:5004]）。これに加え、将来噴火の可能性の高い活動的な火山を数火山選び、火山地質図の整備や、噴火シナリオの作成・高度化等の作業を行っている。今年度は、噴火履歴調査と火山地質図整備のため、諏訪瀬、九重、蔵王等の火山での野外調査が行われたほか、伊豆大島でのボーリング調査が行われた（産業技術総合研究所[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おり、今年度は富良野断層帯及び長井盆地西縁断層帯の2断層帯における活断層図整備が行われた（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関連評価システムの研究」を進め、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。平成22年度は、地殻の弾性的な厚さ分布、重力異常分布、地震発生の上限・下限、GPS によって得られるひずみ速度分布、地震活動度分布、活断層分布、地温勾配、地磁気データ等を同様の仕様で可視化した。また、これらのデータを用いた地殻活動モニタリングのための最適ルールを見出すため、日本列島内陸地域を対象にして、データベース化した地殻変動指標（面積ひずみ速度・最大せん断ひずみ速度）と地震活動指標（地震エネルギー・地震数）との間に成り立つ時間空間関係を統計指標で表現して分類した。その結果、地殻変動指標が減少している時期にM6 以上の内陸地震が発生しやすい等の結果が得られた（名古屋大学[課題番号:1703]）。

京都大学防災研究所では、「日本列島の地殻構造データベースのプロトタイプ構築」を進め、地殻活動シミュレーション、強震動予測シミュレーション、南海トラフや西南日本内陸等を初めとする各地を対象としたシミュレーション等に資するため、既往の研究成果の数値化を行い、日本列島地殻構造データベースとして集約することを試みている。今年度は、データの生産者であるデータベース部会担当とその利用者であるシミュレーション部会担当の合同のワークショップを行い、問題点の洗い出しをおこなった。その結果として、「日本列島下の地震波速度不連続面形状標準モデル」を作成していくことが提案され、これに基づき、西南日本の地殻構造の既往研究のうち、モホ面・コンラッド面の研究成果と、フィリピン海プレートの研究成果を組み合わせる試みがなされた（京都大学防災研究所[課題番号:1804]）。

課題と展望

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ため、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最終目標に至ることが難しかった。これが前計画における反省点であった。この反省に鑑み、平成21年度から始まった「地震予知・火山噴火予知計画」では、地震現象や火山現象に関する予測のために必要な基礎データベースを構築するとともに、それらに関する情報の統合化を図り、「地震・火山現象に関する統合データベース」として体系化することを目指すことになっている。

本計画の最初の2年間の成果をみると、まず、前計画に引き続き、地震観測・地殻変動観測等の基礎データの蓄積とデータベース化が着実に行われていることは心強いことである。

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

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

しかしながら、本部会の最終的な目標である地殻活動予測シミュレーションモデルの構築に資するための体系化されたデータベースの構築に関しては、いまだに模索の状態が続いているように見える。ひとつの理由は、現在は、データベース課題担当者がイニシアティブをとる形で、シミュレーションに資するデータベースの構築を担当することになっているが、データベース課題担当者は、必ずしも、シミュレーション課題の現状に精通していないことが挙げられる。これに加え、データベース構築そのものは、研究の本質を担うものでなく、後方支援を担当するものであることから、昨今の短兵急に成果を求められる研究者には馴染みにくいことも挙げられる。

このような点に鑑み、次期計画での本項に関しては、以下のような検討を求めるものである。すなわち、シミュレーションに資するデータベースの構築は、むしろ、シミュレーション課題の一部として位置付けるべきことを検討すべきと考える。シミュレーションを実行するには、データベース課題の有無にかかわらず、モデルとなる構造が必要であり、構造モデルは研究に必須の産物として生成されるはずである。シミュレーション課題の各担当者に、そのモデルをデータベースとしてフィードバックしていただけるようなシステムを採用することにより、効率的にシミュレーション研究用のデータベース構築に資することができるのではないかと推察するものである。

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)

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、まず何よりも全体の枠組みを明確にしなければならない。日本列島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22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(北海道大学[課題番号:1002];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]、九州大学[課題番号:2201])についての観測研究を実施した。

VLBI 国内観測をほぼ毎月1回、国際観測を毎週1回の割合で実施し、得られたデータを解析することで日本列島及び周辺地域のプレート運動の速さと方向を求めた。その結果を図1に示す(国土地理院[課題番号:6013])。

モンゴルでのGPS観測を前年度に引き続き実施し、さらにキャンペーン観測も実施し、周囲のGPS観測データも取り込んで統合変位速度ベクトル場を推定することにより、アムールプレートのオイラーベクトルを推定した。ユーラシアプレートに対するアムールプレートのオイラー極を推定したところ、Kreemer et al. (2003)に近い値である($60.945 \pm 0.683N$, $-103.617 \pm 1.667E$, $0.282 \pm 0.002 \text{deg/Myr}$)という結果が得られた(東京大学地震研究所[課

題番号：1410])。

また、ロシア沿海州において GPS 観測を実施し、これまでのデータを統合解析し現時点で最良の東北アジア地域の速度場を求めた（北海道大学 [課題番号：1002]；Shestakov et al., 2010）。これによると、アムールプレートの運動は当初予想よりもかなり小さいことが示唆され、シホテリアン断層帯ではほとんどひずみの蓄積が見られないことが明らかになった（図 2）。しかしながら、サハリンや北海道北部と沿海州の間には明瞭な収束運動が見られており、アムールプレート運動以外の要因を考える必要がある。展開している広帯域地震観測網のデータを用いて推定した上部マントル構造の検討を行ったところ、日本海東縁部から北海道北部にかけての地震の帯の最上部マントルで特に低速度異常が強いことが明らかになった。この知見は、日本海東縁部にひずみが集中する機構を考える上で重要な情報である（北海道大学 [課題番号：1002]）。

一方、応力に関しては、四国から九州にかけて、地震のメカニズム解を用いて広域の応力場の推定を行った。四国地方西部（高知大学 [課題番号：2101, 2012]）から九州地方にかけての広い領域で南北張力の正断層型の応力場になっている可能性が高く、これを詳細に調べるために、応力場モデル化の手法を開発した（九州大学 [課題番号：2201]）。図 3 に示しているのは空間的に分布させたグリッドポイントの位置図（左）および推定された広域応力場と各グリッドポイントにおけるモーメントテンソルである。グリッドポイントは火山および断層、別府島原地溝に分布させて、2 次元問題として解いており、その結果、別府島原地溝帯東部においては大きなせん断応力変化を起こすモーメントテンソルが得られた。これはこの領域が非弾性的に変形している状態を反映していると考えられる。国土地理院が展開する GEONET 観測点の F3 座標解を使って九州地域の歪変化を求めた結果でも、別府-島原地溝帯を含む九州中部で南北伸長が卓越するという従来の知見に加え、別府湾から阿蘇カルデラにかけて最大せん断歪が大きい領域が存在することが明らかになった（九州大学 [課題番号：2201]）。

イ. 上部マントルとマグマの発生場

日本列島下の構造はこれまで詳細に推定されてきたが、日本列島のデータのみを用いていると日本列島下の構造はよくわからず、グローバルなデータを用いた場合には全体的に分解能が上がらないという問題があった。本年度、大量の近地・遠地地震データを用いて日本列島下の深さ 700 km までの 3 次元 P 波速度構造を推定した結果、西南日本下のフィリピン海スラブは深さ 300-500 km まで沈み込んでいることが明瞭にイメージングされ、また、東北地方のマントル上昇流は日本海下の深部でも存在することが明らかになった（図 4；東北大学 [課題番号：1203]；築田，2010）。このような背弧側深部から火山フロント直下へのマグマの供給の様子は、地震波速度のみならず電気比抵抗構造からも北海道（東京大学地震研究所 [課題番号：1411]）や、九州（京都大学防災研究所 [課題番号：1805]）でも明らかになってきており、また、長期地震観測データの解析から伊豆弧下火山フロント直下 50-100 km の深さでは北部と南部に低速度域が存在し、そこでは地震波の散乱強度も高いことが明らかになった（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]；Obana et al., 2010；Takahashi et al., 2011）。今後、地震波速度構造や地震波散乱構造と電気比抵抗の分布を相互に比較することにより、マグマの発生場の解明が進むものと期待される。

また、日本海溝から日本海東縁までのP波速度異方性トモグラフィーを推定した結果、速いP波速度方向はマントルウェッジでは東西あるいは北東-南西であり、太平洋スラブの中はほぼ南北方向であることがわかった（東北大学 [課題番号：1203]；Huang et al, 2010；Wang and Zhao, 2010）。さらに、深さの異なる地震（地殻内地震、深部低周波地震、スラブ内地震）の波形を用いて、S波スプリッティング解析を行い、深さ方向の異方性構造の分離に成功した。その結果、南北の異方性があると考えられてきた前弧側のマントルウェッジでは、異方性が非常に弱いことが明らかになった（図5；東北大学[課題番号:1203]；Huang et al., 2011）。その他の領域の結果は、P波方位異方性の結果と非常に調和的である。

第四紀火山岩の研究については、北海道や西南日本の試料について同位体分析を行い、より明確にスラブ由来流体の組成と分布が明らかになりつつある（東京工業大学 [課題番号：1603]；中村・岩森, 2010）。また、海洋玄武岩の同位体を独立成分分析法で統計解析した結果、二つの独立成分が検出され、これらはそれぞれ熔融と水溶液の関与する元素分別作用に対応すると推定される（東京工業大学 [課題番号：1603]；Iwamori et al., 2010）。

ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布

短波長の不均質構造を理解するうえで、散乱波の解析は極めて重要である。強い不均質場におけるモード変換・P/Sエネルギー分配の遷移過程を差分法によりモデル化し、多重等方散乱の輻射伝達理論解との比較を行った結果、浅間火山における強い短波長不均質によって震源からのP波エネルギーがS波エネルギーに変換され多重散乱していることが明らかになった（図6；Yamamoto and Sato, 2010）。さらに、桜島人工地震探査において捉えられたエネルギー分配の時間変化も平均自由行程約1kmの短波長不均質によるP-S変換で定量的に解釈可能であることを明らかにした（東北大学 [課題番号：1204]）。また、北部伊豆小笠原弧において、地下の速度ゆらぎの空間分布を解明した結果、火山フロントの第四紀火山群下では、スペクトルの勾配が緩やかで短波長の速度ゆらぎが大きく、古い島弧が存在すると考えられている火山フロント前弧側のFrontal Arc High付近で比較的長波長の速度ゆらぎが大きかった（図7；東北大学[課題番号:1204]；海洋研究開発機構[課題番号:4002]；Takahashi et al., 2011）。

一方、トモグラフィーにより日本列島の3次元構造を推定し、それに基づき震源を再決定することによって地震発生層の下限の深さ(D90)を詳細に求めた結果を図8に示す（東北大学 [課題番号：1204]；Omuralieva, 2010）。四国の中央構造線に沿って下限が浅くなっているのは、スラブの脱水に伴って水が浅部に供給されたためと考えられ、実際、水と関係すると考えられている低周波地震の分布と下限が浅い領域はよく対応している。それ以外については、この下限の深さは東北日本の太平洋沿岸や関東で深く、火山地域で浅いという特徴があり、前者は太平洋プレートの沈み込みに伴って地殻が冷やされたために深くなり、逆に後者は火山活動によって地殻が熱せられているために浅くなったと考えれば説明可能であり、実際、Tanaka et al. (2004) が求めた地殻熱流量と良い対応がある。

この図で北海道日高山脈の西では、プレート等深線から期待されるよりもさらに下限が深くなっているように見え、そこでは地殻熱流量も低いように見える。この北海道の温度分布について、既存の温度検層データとHi-net坑井の検層データから求めた地殻熱流量から推定した結果を図9に示す（防災科学技術研究所 [課題番号：3009]）。日高山脈の南西側には深

さ 30km における推定温度が約 200°C 程度と極めて低温な領域があることが明確となり、この付近で地震発生層の下限が深くなるのは基本的に温度場が効いていることがわかった。この異常に温度が低い領域は、太平洋スラブ直上に地殻物質が厚く分布している領域（東北大学 [課題番号：1208]；Kita et al., 2010；「地震準備過程」の図 20 参照）と一致しており、この異常構造が温度分布を規定し、この温度分布が地震活動を規定していることが明らかになった。

同様の地殻熱流量の解析を東北地方でも行った結果、大局的には火山フロントおよびホットフィンガーに沿って高温域が分布するのに対して、前弧側には有意に低温の領域が分布することが分かった（防災科学技術研究所 [課題番号：3009]）。この高温の領域では地殻の強度が低下し、図 8 で示したように地震発生層の厚さが薄くなって、大きな地震は起こしにくいと考えられる。実際、1885-2008 年の期間に発生した 164 個の地殻内地震（M5.7-8.0）と、地殻・マントル最上部内の地震波低速度異常域との関係を詳細に調べたところ、大きな地震はこの低速度異常域の内部では発生せず、それを縁取るように分布していることが明らかになった（東北大学 [課題番号：1204]；Zhao et al., 2010）。

さらに詳細に速度構造と地震発生の関係を調べるために、1995-2008 年に日本列島で発生した地殻内大地震の発生域における 3 次元地震波速度構造を詳細に検討したところ、いずれの大地震においても本震の震源域の下の地殻とマントル最上部において明瞭な地震波低速度・高ポアソン比が存在することが明らかになった（東北大学 [課題番号：1204]；Zhao et al., 2010）。このことは、地震発生層の厚い領域の下で局所的に流体の存在によって地殻の強度が低下することによって応力が集中して大地震発生に至ることを示唆している。

このような地下の流体については電気比抵抗が敏感であるため、北海道（東京大学地震研究所 [課題番号：1411]）、宮城県の蔵王・長町利府断層近傍（東京工業大学 [課題番号：1601]）、和歌山地域（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]）、鳥取-島根県境付近（鳥取大学 [課題番号：2001]）、九州（京都大学防災研究所 [課題番号：1805]）等、様々な地域で電気比抵抗の分布が精力的に調べられている。このうち秋田県南部では、測線西部（日本海側）の地下 5km より浅い部分は低比抵抗を示し、上部地殻中部に相当する地下 10km 前後で低比抵抗、下部地殻が高比抵抗、最上部マントルが低比抵抗といった特徴が見られる（図 10；秋田大 [課題番号：1301]）。地震活動はこの上部地殻中部の低比抵抗域の上または下で生じ、低比抵抗域の中心では地震は発生していない。同様の特徴は和歌山地域（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]；Kato et al., 2010a）や鳥取県や島根県東部（鳥取大学 [課題番号：2001]）でも見られる。

このような地殻流体と地震発生の関係をさらに詳細に調べるために、長野県西部地域において、応力場の空間的な不均質性を高分解能でマッピングした（京都大学防災研究所 [課題番号：1806]）。大局的な傾向としては、応力比 $R = (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ は北部で小さく南部で大きい。また、Yukutake et al. (2010) が指摘したように、北部を中心に逆断層型の応力場が卓越するが、震源断層沿いにおいては横ずれ型の応力場が見られ、そこで応力比が大きくなっている。より詳しく見ると、ところどころに応力比の小さな異常点があり、その点においては、最大圧縮応力軸が水平から外れたり、その方位が周囲と大きく異なっていたりする傾向がある。R<0.4 でかつ最大圧縮応力軸の傾斜が 20 度より大きいものについて、周囲の地

震波速度構造（平成 21 年度報告書参照）との関係を調べてみた。昨年度の研究により、大規模な低速度域においては地震活動が低く、非弾性的な変形が起こっていると推定されるのに対して、地震は高速度域内の局所的な低速度域の近傍で発生する傾向にある。応力場の異常点は、低速度異常域の端付近で地震活動が少し存在するところに対応していることから、図 11 に模式的に示すような可能性が考えられる。低速度異常域の中央部では水が豊富に存在し、水の効果により、色々な向きを持った多数の小さな断層面で非地震性すべりが起こり、領域全体として非弾性変形が進行する。大局的な応力場は逆断層型であるので、これは水平方向には短縮し上下方向に伸びる変形であり、そのため、水平に隣接する領域では水平面内応力が緩和、鉛直に隣接する領域では水平面内応力が増加すると考えられる。一方、低速度異常域の端付近では、異常域の中央部に比べて水の量が少ないので、非地震性すべりは限られたところでしか発生しない。断層の一部で発生した非地震性すべりはその延長にある固着した部分に応力集中を起し、そこで小さな地震が発生する。これらの地震を発生する応力場は、異常域中央部の応力緩和により、応力比の小さなものとなっていると考えられる。

和歌山地域においても、地殻流体と地震の関係を解明するための観測研究が続けられている（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]）。平成 22 年度は、和歌山地域を横断する長さ約 90km の南北測線上に、計 86 点からなる稠密地震計アレイを 11 月下旬に展開した。このデータ解析はこれからであるが、先行研究として実施された和歌山地域における 2006 年小規模・稠密地震観測データの統合解析が完了し（Kato et al., 2010a）、その結果によれば、非火山性群発地震の多くは、ポアッソン比が 1.66 と低い領域で発生しており、また群発地震の直下には、貫入岩を示唆する顕著な高速度体が存在している（図 12c）。このため、貫入岩が引き起こす熱水循環による流体圧の変化が、広域応力場に調和的な断層面を滑らせることで、非火山性地震が誘発されるというモデルを提案した。平成 21 年度に実施した比抵抗構造探査から得られた比抵抗分布（図 12b）も、このような流体の存在を示唆している。

さらに、2008 年に東海地域で実施した稠密地震アレイ観測のデータ解析が完了し、沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻内や上盤内の流体分布の推定に成功した（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]）；Kato et al., 2010b)。長期的ゆっくり滑りによるモーメント解放量の最も大きな領域は、海洋性地殻内に顕著な低速度・高ポアッソン比の異常域と一致する（図 13）。この異常域の弾性波速度は、通常海洋性地殻の速度に比べて有意に低く、高圧流体、もしくは大量の流体の存在が示唆される。長期的ゆっくり滑りの多くは、前弧側の上盤プレートと沈み込む海洋性地殻が接する境界で発生する。一方、低周波地震・微動は、蛇紋岩化したマントルウェッジと海洋性地殻が接する境界で発生する。このように、長期的ゆっくり滑りと低周波地震・微動の発生域は、同じプレート境界面上に位置するものの、上盤物質の構成岩石種が大きく異なることが明らかとなった。

このフィリピン海プレートは紀伊水道周辺でその沈み込み方向が急変することが知られており、紀伊水道下でスラブが不連続となるようなモデル（Ide et al., 2010）を許容できるかどうかをレーバ関数解析から検討した（防災科学技術研究所 [課題番号：3009]）。その結果、従来のモデルにおいて大陸モホ面に分類した変換面の一部を海洋モホ面であると解釈することにより、新たなスラブ内海洋モホ面形状が提案可能であることが明らかになった（図 14）。一方、兵庫県南部周辺では、海洋モホ面深度に相当する明瞭な変換波は確認出来なかった。このことは、当該地域付近でスラブ断裂、スラブウィンドウの存在、あるいはスラブ傾

斜の急変等の周辺域と大きく異なる構造的特徴を有していることを意味する。

また、房総半島沖ではフィリピン海プレートの火山性砕屑物・火山岩層（VCR 層）が上盤側プレートに底付けされていることが明らかになっている（Kimura et al., 2010）。この VCR 層を詳しく調べるために、房総半島下で発生する地震の中感度地震観測網（MeSO-net）による記録波形を解析した結果、プレート上面の地震では P 波と S 波の間に 1 つ（ x_1 ）、これより深い地震で 2 つの明瞭な位相（ x_2 , x_1 ）が上下動成分の記録に見られることが分かった（図 15）。前者は堆積層基盤（ x_1 ）、後者は堆積層基盤（ x_1 ）およびプレート境界からの S P 変換波（ x_2 ）として説明可能である。さらに、よく見ると x_2 は 2 つのパルスを含み（ x_2 , x_2' ）、火山性砕屑物・火山岩層の上面と下面での変換波にそれぞれ対応すると考えられる。変換波走時の予備的な解析の結果、火山性砕屑物・火山岩層下面からの S P 変換波とみられる位相の走時を説明するには、西に傾斜する変換面が適当であることが明らかとなった。

エ. 地震活動と火山活動の相互作用

地震活動と火山活動の相互作用を理解するためには、地震と火山の両方の活動が活発な地域で観測研究を行う必要がある。このような観点から、この相互作用の研究については、主としてフィリピン海プレート北端部と九州周辺フィールドとして実施されている。

2009 年に実施した伊豆大島及び周辺海域の構造探査実験の解析を進め、現在のところ図 16 のような構造が得られている（東京大学地震研究所 [課題番号：1413]）。火山の基盤を形成している第 4 層の地震波速度は 5.8–6.2 km/s と推定され、伊豆大島の西南西側に基盤の張り出しが顕著に見え、一方、島の東北東側では急激に深くなる。2004 年以降、伊豆大島ではマグマ貫入によるとみられる間欠的山体膨張が 3 回観測されており、この時期にカルデラ内と周辺部で地震活動が高まる。しかしながら、地震活動のパターンが異なっており、カルデラ内の活動は漸増漸減するのに対し、周辺部の活動はバースト的である。このときの圧力源の位置は第 4 層内で深さ 5~7 km に位置しており、周辺部の地震活動はこの圧力源の西南西の第 4 層内で生じているのに対して、カルデラ内地震は圧力源直上の第 3 層以浅で発生している。このことは、第 4 層の非対称な形状も含めて、地震発生が地下構造によって規定されていることを強く示唆する。つまり、第 3 層以浅が基盤層（第 4 層）に比べて破壊強度が低いと考ええると、カルデラ内地震は (1) バースト的な活動をせず、(2) 周辺部の地震活動度の高まりに先行して、山体膨張に同期して発生する、という地震活動パターンを説明できる。カルデラ直下の基盤層内で地震が発生しないのは、マグマ貫入により高温域が広がっているためと考えられる。

伊豆半島東方沖で発生する群発地震については、これまでの系統的な解析により、マグマの貫入した先端で地震が発生しており、マグマの貫入量と群発地震の活動度が比例することが明らかにされていた。この様な火山噴火予知研究で得た成果に基づき、地震調査本部で「伊豆東部の地震活動の予測手法」を取りまとめ、気象庁では「地震活動予測情報」を発表する準備をしている。これは、伊豆東部での地震活動と火山活動の相互作用についての理解が進み、火山噴火予知研究の成果が群発地震活動の予測に応用されたことを示している。更に、静岡県危機管理部では、伊豆東部火山群噴火警戒レベル導入に際して、地域防災計画を策定しているが、その中でこれまでの研究成果を取り入れて、伊豆火山群の噴火シナリオ（噴火事象系統樹；図 17a）を作成し、行政機関に提供した。この打ち合わせの中で、噴火シナリ

オの考え方が浸透していない現状では、群発地震発生時に想定される今後の火山活動の発生頻度の目安を示す図 17bの方が実用的であるとの示唆に富んだ指摘も得られ、今後、地震と火山の相互作用の研究を進めることにより、この確率評価がさらに信頼度の高いものになり、また行政担当者との意見交換により、防災に一層役立てやすい情報発信ができるようになると期待される（東京大学地震研究所 [課題番号：1413]）。

また現在、地下水の回復が著しい三宅島でハイブリッド重力測定を実施した（東京大学地震研究所 [課題番号：1413]）。このような地下水の回復現象は終息期の火山活動を理解する上で重要である。測定の結果、2006年～2010年の4年間の間に、火口を中心として20～40マイクロガルに及ぶ同心円状の重力増加を見出した。この変動は海水準付近の地下水層の回復としてモデル化でき、SO₂放出量の漸減とも整合した結果が得られた。

東海地震と連動した富士山の噴火可能性評価のため、東海地震によるフィリピン海プレートの運動に伴う富士山地下周辺の静的応力変化を定量的に評価する有限要素法コードの開発も進めた（防災科学技術研究所 [課題番号：3010]）。これをもとに、フィリピン海プレートの運動に伴う富士山のマグマ溜りにかかる応力変化・分布を求め、また、火道内における気液二相マグマの上昇過程の数値的・解析的研究を実施した。特に非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移過程を再現する時間発展モデルを開発し、地球物理学的観測データとの比較が可能な、火道内圧力変動プロセスなどの数値シミュレーションに成功した。また、間欠泉のアナログ実験、および過冷却炭酸水の振動→発泡実験を行い、数値シミュレーションの基礎となるデータを取得した。

九州地域では、霧島(新燃岳)火山が2011年1月26日に噴火活動が活発になり、その北西約18kmの伊佐観測点において、噴火活動の推移に対応した地殻変動が捉えられた（図18；京都大学防災研究所 [課題番号：1805]）。このような九州中南部地域下における火山活動の駆動力となるマグマの生成に関するモデルを構築するためには、フィリピン海プレートからの脱水やマントルウェッジ内の流体の挙動を解明する必要がある。そのような観点から、稠密アレイ観測を実施し、レシーバ関数解析から3次元速度構造を推定した（京都大学防災研究所 [課題番号：1805]）。南九州ではフィリピン海スラブの傾斜と深さが大きいいため、単純な水平成層構造モデルではスラブの位置を正しくイメージできない。そこで、傾斜層を有する速度構造モデルに対して波面法を用いた波線追跡 (de Kool et al., 2006) を行い、傾斜境界に対してスネルの法則が成り立つようなPs変換点にレシーバ関数の振幅を投影するように手法を改良した。具体的には図19に示すように、まず(a)水平成層構造を仮定してレシーバ関数をマッピングし、(b)ここで推定された海洋モホ面を組み込んだモデルでマッピングをなおし、(c)さらにこの作業をもう一度行った。図19dは、稍深発地震の深さ分布形状をもとに推定した海洋モホ面を組み込んだモデルを用いたイメージングの結果である。図19cと図19dで共通してみられる特徴は、深発地震面が折れ曲がる深さ90km以深では、海洋モホ面に対応する赤いイメージがみられなくなるという点である。このことは、海洋地殻が周辺部に比べて低速度ではないことを意味し、海洋地殻に含まれていた「水」が脱水作用により解放されたことを示唆する。さらに、九州地域でのネットワークMT観測データの再解析によって大規模比抵抗構造の推定を行った結果、上記の深発地震面が折れ曲がる個所以西の深部から活動的火山の直下につながる低比抵抗領域が存在することがほぼ確認できた（京都大学防災研究所 [課題番号：1805]）。今後、これらの地震波速度構造と比抵抗構造を

さらに詳細に解析することにより、九州におけるマグマ生成・供給過程の解明に繋がるものと期待される。

別府-島原地溝帯の地殻構造についてもレシーバ関数解析を実施して、当該地域のモホ面を推定した(九州大学[課題番号:2201])。別府-島原地溝帯がリフトバレーであるとする研究(多田, 1993)では、この地溝帯がその西側に存在する沖縄トラフの延長であると推測されているため、今年度は沖縄トラフに近い地溝帯西部の地殻構造を推定した。レシーバ関数から遺伝的アルゴリズム(GA)インバージョンを用いて観測点直下のS波速度構造を推定した結果を図20に示す。この結果からは、昨年度の別府-島原地溝帯中部(阿蘇周辺)における結果と同様、別府-島原地溝帯に対応するモホ面の上昇は見いだせず、この領域がリフトバレーであるという証拠は得られなかった。しかし、解析領域の西端でモホ面がそれよりも浅くなっており、沖縄トラフの拡大の影響が別府-島原地溝帯の西縁部にのみ及んでいる可能性を示唆する。

また、始良カルデラ周辺で17点の臨時地震観測点を設置し、2008年桜島火山構造探査で得られたP波初動到達時刻データを加えて、始良カルデラ周辺の3次元P波速度構造の解析を行った(京都大学防災研究所[課題番号:1805])。その結果、深さ8km断面の始良カルデラ中心部において低速度領域、その東側に高速度領域が見られた。この低速度領域は始良カルデラ下のマグマ溜りと考えられている位置と調和的である。また、始良カルデラで発生する地震の多くは高速度領域内およびその周辺部で発生していることが明らかになった。

さらに、桜島火山を含む南九州地域のALOS/PALSAR画像の収集を継続しSAR干渉解析を行った(京都大学防災研究所[課題番号:1805])。2007年~2010年の期間における干渉性のよい画像についてスタッキングと2.5次元解析を行い、準上下方向の地盤変動を計算したところ、桜島北部で地盤隆起、桜島東部から南部にかけては地盤沈降が検出された。これらの変動は、同期間に行われた水準測量結果ともよい一致が見られた。桜島北部の地盤隆起は、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変動を捉えたものと考えられる。

オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

近代の地球物理観測でわかっている地震は最近100年程度にすぎず、それよりも長いサイクルの地震活動については地球物理学的研究では限界があり、地質学的情報が重要となる。特に過去の津波堆積物の研究は重要であり、その津波を再現するうえで、地球物理学的研究が有効となる。このように長期の地震発生過程においては、地質学と地球物理学の共同作業が重要となる。

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いる。このような観点から昨年度に引き続き、反射法地震探査から得られる地下の地質構造をもとに、東北日本弧の背弧域(羽越褶曲帯~北部フォッサマグナ)における地殻変形過程を検討した。昨年度の研究により、当該地域には中新世の日本海拡大時において非対称リフトが形成され、その構造が鮮新世~現在に至るこの地域の変形様式を強く支配していることが分かった。鮮新世以降の圧縮変形を引き戻す事によってこの非対称リフトの形状を復元した結果、この構造は羽越~北部フォッサマグナ堆積盆西縁から盆地下へ西傾斜で延びるリストラク断層とその深部延長に存在すると推定される水平な detachment 断層上でのすべりによって生じたと解釈された。屈折法地震探査

のデータによれば東北日本背弧側では広範囲に下部地殻の薄化が起こっているため、上記 detachment 断層を介して上部地殻と下部地殻とで全く異なる様式の変形が生じていると推定される（東京工業大学 [課題番号：1603]）。

このような長期地殻ひずみ蓄積過程を解明するためには、島弧スケールでの広域の地下構造を明らかにする必要がある。このような観点から、奥羽山脈から太平洋側の活断層帯までの調査を行う一環として、会津盆地西縁の活断層帯において、高精度浅層反射法地震探査を行った。共通反射点重合法による反射法解析の結果、会津盆地および同西縁断層帯の上盤側に発達する非対称背斜構造の、往復走時 1.5-2.0 秒までのイメージが取得できた。会津盆地の地下にはほぼ水平な高周波の連続的な反射面群が往復走時約 1.5 秒まで分布しており、盆地を埋積する鮮新・更新統に対応するとみられる。一方、断層の上盤側では更新統に対比される反射面群が東側に傾斜している。両者の間に存在する西傾斜の向斜軸の地表延長は、完新世段丘の分布位置におおよそ対応している。今後は、地下構造断面を作成し、地表地質・ボーリングとの対比を行い、会津盆地西縁断層帯により形成された褶曲構造の詳細を明らかにすると共に、断層関連褶曲の構造形態と地層の堆積年代から断層帯の長期的なひずみ速度を明らかにする予定である（東京大学地震研究所 [課題番号：1414]）。

地理空間情報活用推進基本法（2007 年）の制定以降、航空レーザー測量や空中写真測量によって得られた情報をもとにした詳細な数値標高モデル（DEM）が急速に整備・公開されるようになった。国土院が整備している 5 m および 2 m メッシュのすべての数値標高モデルデータを用いて、ステレオペア画像を作成し、地理情報システム（GIS）上で活断層地形判読を行い、断層線を書き入れることで直ちに正確な地理情報データとして管理できるようにした。都市の立地する平野では、市街化による土地改変や建物等の人工構造物が多いため、空中写真による地形判読が困難な場合が多い。また、平野の地形は数千年前に形成されたものが多いために断層変位の累積性に乏しく、変位地形を見いだすことは容易でない。そのため、建物等を取り除いた地形のみの情報（DEM）から、空中写真以上に過高感が大きくなるステレオ画像を作成して、これまで見落とされてきた可能性のある活断層を探し出す試みを行った結果、京都盆地、濃尾平野、富山平野、新潟平野などで、活断層による地形を新たに見いだすことができた（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

石狩低地東縁断層帯の変動地形学的知見は最近蓄積されつつあり、従来指摘されていた西上がりの逆向き低断層崖が、主として海成段丘からなる地形面を西へ撓み下げ沖積面に没せさせる東傾斜の低角断層のバックスラストであることが指摘されている（例えば池田・他編，2002）。断層帯北部末端、岩見沢市周辺の断層変位地形に注目し、断層帯末端での地表形状とずれ量分布の詳細の解明を試みた結果、最北部、美唄川以南の山麓線付近（美唄駐屯地～専修大学短大）の高位段丘面上に、北東～南西走向で延長 4 km の西向き・比高約 3～5 m の撓曲崖を認定するなど新たな知見が得られた（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

横手盆地東縁断層帯は奥羽山脈西縁を限る東傾斜の逆断層であり、1896 年陸羽地震の際には、横手盆地東縁部北部において延長約 35 km に地震断層が現れた。池田・他編（2002）などの従来の研究においては、横手盆地東縁断層帯は角館から横手に至る約 60 km を活断層として認定してきたが、最近の研究では、横手盆地南部において、北北西－南南東走向の活断層トレースが新たに見いだされている。この活断層の存在を地質学的に裏付け、その活動度を確認するために、横手市赤川において、5 本の群列ボーリングを実施した。地層は上位か

ら I 層、II 層、III 層に大別され、年代は I 層が約 5,000 年前以降、II 層（扇状地面構成層）は約 20,000 年前以降、III 層は 3 万数千年前より古い。III 層上面の高度は撓曲崖 (No. 3) を挟んで東上がり約 4 m の高度差を示し、II 層上面では東上がり約 1 m である。このことから、最近の数万年間に断層変位が累積していることが確認された（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

都市域周辺にあたる群馬県太田市龍舞において撓曲崖を横切るトレンチ掘削調査を行った結果、壁面からは、傾斜する地層とそれらをアバットする地層が認められた。断層面は確認できなかったものの、地層の変形と傾斜不整合から西傾斜の低角な逆断層が想定される。最新イベントは、緩く傾斜した腐植層 (C 層) の堆積後、水平層 (B 層) 堆積以前であると考えられ、現在、サンプルについて放射性炭素年代測定を依頼中である。また、C 層上面が当初水平であったと考え、最新活動において、少なくとも 1.4 m の垂直変位が生じたことが明らかになった（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

1847 年善光寺地震を引き起こしたことで知られる長野盆地西縁断層帯では、最近 4 回の活動時期が推定されており、平均的な活動間隔は 800~1000 年程度とされているが、1847 年に先立つ地震のうち、2 回前の活動は 2000~2150 cal BP に限定されているものの、1 回前の活動時期には約 500 年の推定年代幅がある。地震時変位量の繰り返し方や活動間隔の再現性を厳密に検討するためには、この推定年代幅をより狭くする必要があるため、断層帯中部の中野市草間において、ハンディジオスライサーとパーカッション式コアサンプラーを用いた群列ボーリング調査を実施した。その結果、ジオスライサーのコアにおいて、1 回前の活動に対応する可能性が高い傾斜不整合を観察することができた。傾斜不整合の下位は腐植質砂礫混じりシルト層であり、これを覆って腐植質シルト層・泥炭層が堆積している。現在、放射性炭素年代測定を実施中であり、今後、最近 3 回程度の活動について、地震時変位量と活動間隔を詳しく議論できる可能性がある（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

「糸魚川-静岡構造線断層帯における重点的な調査観測」においては、航測システムや LiDAR 計測を導入し、活断層分布や変位量等に関する高密度・高精度の情報を網羅的に取得するとともに、地形面編年等の現地調査を実施し、平均変位速度・地震時変位量を見積もった。得られたデータセットは、地震規模やアスペリティの予測、地震発生の一連の繰り返しパターンの検討を可能にするものである。今回、断層帯北部について、 $M_0 = \mu \cdot D \cdot L \cdot W$ 、 $\text{Log } M_0 = 1.5M_w + 9.1$ の関係式を用い、他の手法によるデータも参照しつつ地下構造を仮定して M_w を試算した (図 21)。その結果、横ずれがないと仮定した場合 (Case 1) には M_w は 7.46、最大せん断応力の方向にすべると仮定した場合 (Case 2) には M_w は 7.55、という結果が得られた。気象庁マグニチュードに換算すると 8.2~8.3 となる。今後、平均変位速度分布と地震時変位量分布、地表変位量と地下のすべり量の相関の程度を解明し、地下のすべり量分布や破壊領域の予測精度をさらに向上させる必要がある（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

以上の変動地形学的研究は内陸の地震を理解するうえで重要であるが、海底下で発生する地震については、過去の津波の解析が極めて重要である。

最近スラブ内地震であったとされている 1958 年択捉沖地震について津波波形解析を実施した。1958 年択捉島沖地震により発生した津波は太平洋を伝播しハワイやグアムでも観測され、津波の最大波高は色丹島で 4-5 m であった。本研究では太平洋沿岸の検潮所で観測された 13 の津波波形を用いて、この地震がプレート境界型地震であるかスラブ内地震であるかの

推定を試みた。破壊域は3日以内の余震分布より150 km×80 kmと仮定した。傾斜と断層の深さを変化させたプレート境界型地震とスラブ内地震のモデルを用いて津波数値計算をおこなった結果、 $dip = 40^\circ$ 、 $depth = 37.5 \text{ km}$ とするスラブ内地震モデルから計算された津波波形が観測波形をより良く説明することがわかった。剛性率を $6.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ と仮定すると、このモデルから求められる地震モーメントは $1.5 \times 10^{21} \text{ Nm}$ ($M_w 8.1$)となる(北海道大学[課題番号:1002])。

次に昨年度津波波形インバージョン解析による震源過程解析を実施した1963年ウルップ島沖巨大地震($M_w 8.5$, $M_t 8.1$)の最大余震($M_w 7.2$, $M_t 7.9$)の津波波形解析を実施した。この最大余震は本震の破壊域の南西側で発生したプレート境界型地震で、地震の規模のわりに大きな津波を発生させた津波地震と言われている。津波の高さはウルップ島で10~15 m、択捉島で7~8 m、津波の高さは大局的に本震の高さの約0.4倍であった。太平洋沿岸の7つの観測点における津波の観測波形と計算波形を比較し、インバージョンによりすべり量分布を求めた結果、千島海溝付近の海溝よりのプレート境界で、最大すべりが推定された。剛性率を $4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ と仮定すると地震モーメントは $1.0 \times 10^{21} \text{ Nm}$ ($M_w 7.9$)と地震学的に求めた値より大きくなるため、1963年千島沖巨大地震の最大余震は、やはり津波地震と考えられる(北海道大学[課題番号:1002])。

津波堆積物分布から巨大津波を発生させた地震の震源過程を評価するためには、津波遡上数値計算だけでなく、その津波による砂移動をモデル化する必要がある。本年度は昨年度開発した1次元の津波の砂移動の数値計算を用いて、単純な地形に対する砂の浸食・堆積過程の解析を実施した(Gusman, 2010; 北海道大学[課題番号:1002])。さらに上記の砂移動のモデルを2次元に拡張し、実際のデータとの比較を行った。既存の断層モデルから津波遡上数値計算を実施し、調査地域での津波遡上高が再現できることを確認してから、この津波遡上数値計算結果を用いて、砂の移動を2次元的に数値計算した。津波の堆積物分布は調査結果が計算結果に比べると滑らかではあるが、厚さはほぼ同程度であり、ある程度再現できているのが分かった。さらに単純な1枚の断層モデルを固定し、すべり量を変化させて津波堆積物分布を計算し、実際のデータと比較したところ、津波堆積物分布データからある程度すべり量を推定できることが示された(図22)。今後は、さらに砂移動の数値計算手法の改善を行うと同時に、他の津波堆積物データの再現を行う必要がある(北海道大学[課題番号:1002])。

千島海溝沿いにおいては、十勝、根室、色丹島の臨海低地(昨年度)において野外調査をおこない、過去約3000年の津波堆積物層序を検討した。浦幌では20m間隔で15地点、根室では同様に14地点において、ハンディジオスライサー(全長100cmおよび150cm)により掘削した。色丹島ではピートサンプラーを用いた。従来の研究では、層厚や粒径、堆積構造などにより、津波堆積物が対比されているが、これらの諸特性は、微地形の影響が大きいため、距離数十m以上にわたる津波堆積物の対比には利用できない。そこで本研究では、津波堆積物の地点ごとの対比をより確実にこなうために、1/16φ精度の高精度粒度組成や、構成物(鉱物組成、微化石組成、含有する火山ガラスおよび鉱物の化学組成)を記載することで、津波堆積物の対比を試みた。浦幌では樽前bテフラ(1667年:Ta-b)と樽前cテフラ(約2700年前:Ta-c)の間に最大で8層の津波砂層が認められた。Ta-bの直下に1層、白頭山苦小牧テフラ(約1000年前:B-Tm)の上位に1層、B-TmとTa-cの間に6層である。根室において

は、地表面と樽前 a テフラ（西暦 1739 年：Ta-a）の間に 1 層、駒ヶ岳 c2 テフラ（1694 年：Ko-c2）と Ta-c の間に 7 層の津波砂層が認められた。色丹島イネモシリでは、Ta-c より上位に、6 枚の砂層を確認した。最上位の砂層は 1994 年北海道東方沖地震津波による堆積物の可能性がある。以上の調査結果から、津波堆積物調査により確認された過去 3000 年間の津波発生回数は、浦幌で 8 回、根室で 7 回、色丹島で 6 回であったことが分かった（図 23；北海道大学 [課題番号：1002]）。

日本海溝沿いでは、貞観型津波の浸水範囲を広域で解明するため、茨城県日立市においてハンディジオスライサーやハンドコアラーを用いた津波堆積物調査を行った。採取した柱状試料から 869 年貞観津波より後に堆積した津波堆積物を少なくとも 2 層検出した。そのうちの下位の層は 13-15 世紀頃の年代を示し、宮城県石巻市や山元町で見ついている津波堆積物の年代に近いため、広域に影響を及ぼす津波がこの時期に発生していた可能性がある（図 24）。この地域では貞観津波のように広域に影響する津波が 450~800 年間隔で発生していたと考えられる（産業技術総合研究所 [課題番号：5006]）。またこれまでの津波堆積物調査で解明された貞観津波の浸水域に基づいて断層モデルの改良を行い、宮城県沖から福島県沖にかけてのプレート境界で少なくとも長さ 200km、幅 100km の断層が 7m 滑ったとするモデルが最適であると推定した（図 25；産業技術総合研究所 [課題番号：5006]；行谷・他，2010）。

相模トラフ沿いでは三浦半島で離水海岸地形の調査を行い、標高 4m 付近に 4200 年前頃の年代を示す隆起ノッチを発見した（産業技術総合研究所 [課題番号：5006]）。

駿河湾から四国にかけての南海トラフ沿いでは、各地で津波と地殻変動の履歴を解明するため、掘削調査やコア試料の解析、隆起海岸の調査等を行った。まず静岡県富士市では、沈降の痕跡を検出して発生履歴の詳細な検討を行うため、ボーリング調査を行った。三重県志摩市で昨年度までに得られたコア試料についてはより詳細な年代の分析を行い、過去 4500 年間に 9 層の津波堆積物を検出した。特に上位 3 層は 1498 年、1196 年、684 年の歴史地震にそれぞれ対応する可能性が指摘された。和歌山県串本町では津波石と隆起海岸の調査を行い、1707 年宝永地震と 12-14 世紀頃の年代を示す津波と隆起の痕跡が見つかった。徳島県伊島では、ハンドコアラーによる掘削調査で新たに複数枚の津波堆積物を発見した（産業技術総合研究所 [課題番号：5006]）。

インドネシアではスマトラ島北部、アチェ州において津波浸水履歴を明らかにするための堆積物調査を継続して行った（産業技術総合研究所 [課題番号：5006]）。

課題と展望

列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場については、アムールプレートのユーラシアプレートに対する相対運動速度がそれほど大きくないことが本年度の成果として示されており、ユーラシアプレートからあえて独立させて取り扱う必要は無くなるかもしれない。この問題は、日本海東縁のテクトニクスのみならず、日本の内陸の地震活動のモデル化においても重要であり、東北日本弧と千島弧の帰属先がオホーツクプレートなのか北米プレートなのかという問題もあわせて、日本列島周辺のプレートモデルについて、近い将来には決着をつける必要がある。

上部マントルとマグマの発生場の問題については、スラブの上の低地震波速度・低電気比抵抗域が日本列島全域で明らかになりつつある。今後、この低地震波速度・低電気比抵抗域

を定量的に説明するモデルの構築が重要であり、そのためには、スラブの脱水モデルの信頼度をあげ、また、海洋性プレートへの加水過程についても明確にする必要がある。

広域の地殻構造と地殻流体の分布に関しては、地震は低地震波速度・低電気比抵抗域を避けて、その近傍の高速度・高比抵抗域中で発生している、という事例が増えてきている。また、大地震の震源の直下には局所的に低速度・低比抵抗域が存在すること事例も増えている。また、地震波速度構造と温度構造と地震発生域の下限の深さに良い相関があり、地震の発生は温度に強く依存していることがより明瞭となった。これらをあわせて考えれば、水や高温の影響で塑性変形している場所の周囲の脆性的領域で応力集中を起こして地震発生に至る、というモデルが最も考えやすい。ただし、たとえば V_p/V_s が大きい場合も小さい場合も流体に結び付けられており、今後は、散乱や異方性といった別の情報も利用して流体の分布と形態について明確にしていく必要がある。

また、流体の与える影響の整理も必要である。一般に、間隙水圧が増加すれば、有効法線応力が減少して ΔCFF が上昇し、地震活動が活発化すると考えられるが、摩擦構成則の立場から言えば、有効法線応力があまりに減少すれば、不安定領域が条件付き安定領域になってしまって地震を起こしにくくなる。また、水の存在は塑性変形を加速するはずで、これもまた地震を起こしにくくする。ただし、塑性変形が加速している領域の近傍に脆性領域があれば、そこでは応力集中を起こして地震を発生しやすくなる。今後、流体と地震発生の関係を明確にするためには、低速度・低比抵抗域と地震活動域との相対位置関係についてより高精度に推定する必要がある。

地震活動と火山活動の相互作用については、テクトニックな応力とマグマ貫入の両方の影響で火山周辺の起震応力場が作られ、地震の起こしやすさや活動の特徴は構造に規定されることが明らかになってきた。逆にこれを利用して、群発活動に基づく火山活動予測が実用の域に達してきたことは極めて重要な成果である。また、火山浅部のマグマ近傍の地震活動は、高温・低圧の条件下で生じている。フィリピン海プレートの低周波微動が生じているあたりは、通常の地震を起こしにくいくらい温度も高く、また高間隙水圧となって有効法線応力が低くなっていると推定されている。つまり、火山で生じる群発的な活動や浅部の微動活動の理解が、プレート境界深部の低周波微動の理解に役立ち、その逆もありうることになる。今後、そのような観点から、両方の研究者の交流を進めることも有意義であると考えられる。

地震発生サイクルと長期地殻ひずみの問題については、津波堆積物の調査により、過去の巨大地震の地震像が次第に明らかになってきたことが大きな成果である。貞観の津波についての調査結果を、これから東北地方の防災に役立てようとしていた矢先に今回の東北地方太平洋沖地震が発生してしまったのは、極めて残念である。地震が起こるのが 10 年後であれば、状況はかなり違っていたらと思う。ともあれ、過去の履歴でわかったことは必ず起こることが明らかになった以上、今後、同じく発生が危惧されている北海道の巨大地震について、十分な研究を推進し、防災に一刻も早く生かしていくことが必要となっている。また、日本海溝中央部から南部にかけては M8 相当のアスペリティの存在は知られていなかったもので、東北地方太平洋沖地震を単純な M8 のアスペリティの複合破壊では説明することは困難である。巨大なアスペリティを仮定するか、階層構造を持ったアスペリティといった、いずれにしてもこれまでのアスペリティモデルの拡張が必要とされており、今後、この方面の研究を推進する必要がある。その際には、地球物理学の知見だけに頼るのではなく、地質学的

情報も十分に考慮し、内陸の長期ひずみ場もすべて説明できるような包括的なモデルを構築することが重要である。

参考文献

- de Kool, M., N. Rawlinson, and M. Sambridge, 2006, A practical grid based method for tracking multiple refraction and reflection phases in 3D heterogeneous media, *Geophys. J. Int.*, 167, 253–270, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03078.x.
- Gusman, A, 2010, Source process determinations of recent and historical tsunamigenic earthquakes using tsunami waveforms, tsunami inundation data, tsunami deposits, and InSAR data., PhD dissertation, Graduate School of Science Hokkaido University.
- 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, 177-188.
- Huang, Z., D. Zhao, and L. Wang, 2011, Shear wave anisotropy in the crust, mantle wedge, and subducting Pacific slab under northeast Japan. *Geochem. Geophys. Geostst.* 12, doi:10.1029/2010GC003343.
- Ide, S., K. Shiomi, K. Mochizuki, T. Tonegawa, and G. Kimura, 2010, Split Philippine Sea plate beneath Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi:10.1029/2010GL044585.
- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志編, 2002, 第四紀逆断層アトラス, 東京大学出版会, 254pp.
- Iwamori, H., F. Albarede, and H. Nakamura, 2010, Global structure of mantle isotopic heterogeneity and its implications for mantle differentiation and convection, *Earth Planet. Sci. Lett.*, doi:10.1016/j.epsl.2010.09.014.
- Kato, A., S. Sakai, T. Iidaka, T. Iwasaki, and N. Hirata, 2010a, Non-volcanic seismic swarms triggered by circulating fluids and pressure fluctuations above a solidified diorite intrusion, *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi:10.1029/2010GL043887.
- Kato, A., T. Iidaka, R. Ikuta, Y. Yoshida, K. Katsumata, T. Iwasaki, S. Sakai, C. Thurber, N. Tsumura, K. Yamaoka, T. Watanabe, T. Kunitomo, F. Yamazaki, M. Okubo, S. Suzuki, N. Hirata, 2010b, Variations of fluid pressure within the subducting oceanic crust and slow earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi:10.1029/2010GL043723.
- Kimura, H., T. Takeda, K. Obara, and K. Kasahara, 2010, Seismic Evidence for Active Underplating Below the Megathrust Earthquake Zone in Japan, *Science*, 329, 210-212, doi:10.1126/science.1187115.
- 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, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 290, 415-426.
- Kreemer, C., W. E. Holt and A. J. Haines, 2003, An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation, *Geophys. J. Int.*, 154, 8-34.
- 中村仁美・岩森光, 2010, スラブ起源流体と沈み込み帯でのマグマ生成, *地学雑誌*, 119, 1054-1062.
- 行谷佑一・佐竹健治・山木滋, 2010, 石巻・仙台平野および福島県請戸川河口低地における 869 年貞観津波の数値シミュレーション, *活断層・古地震研究報告*, 10, 1-21.

- Obana, K., S. Kamiya, S. Kodaira, D. Suetsugu, N. Takahashi, T. Takahashi, and Y. Tamura, 2010, Along-arc variation in seismic velocity structure related to variable growth of arc crust in northern Izu-Bonin intraoceanic arc, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, doi:10.1029/2010GC003146.
- Omuralieva, A. M., 2010, Lateral variation of the cutoff depth of shallow inland seismicity beneath the Japanese Islands and its implications for seismogenesis, Doctoral thesis, Graduate School of Science, Tohoku University, .
- Shestakov, N. V., M. D. Gerasimenko, H. Takahashi, M. Kasahara, V. A. Bormotov, V. G. Bykov, A. G. Kolomiets, G. N. Gerasimov, N. F. Vasilenko, A. S. Prytkov, V. Yu. Timofeev, D. G. Ardyukov and T. Kato, 2010, Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS Observations, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04871.x.
- 鈴木康弘・杉戸信彦・隈元崇・澤祥・渡辺満久・松多信尚・廣内大助・谷口薫・田力正好・石黒聡士・佐藤善輝, 2010, 平均変位速度分布に基づく糸魚川－静岡構造線断層帯北部の地震発生予測, *活断層研究*, 33, 1-14.
- 多田堯, 1993, 九州中部地方の地殻変動とテクトニクスー別府－島原地溝の分裂拡大ー, *地質学論集*, 41, 1-12.
- Takahashi T., K. Obana, S. Kodaira, D. Suetsugu, N. Takahashi, S. Kamiya, Y. Tamura, 2011, Random inhomogeneities in the northern Izu-Bonin arc estimated by tomographic inversion of peak delay times of S-wave seismograms, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2010JB007691,
- Tanaka, A., M. Yamano, Y. Yano, and M. Sasada, 2004, Geothermal gradient and heat flow data in and around Japan (I): Appraisal of heat flow from geothermal gradient data, *Earth Planets Space*, 56, 1191-1194.
- Wang, J., and D. Zhao, 2010, Mapping P-wave anisotropy of the Honshu arc from Japan Trench to the back-arc. *J. Asian Earth Sci.* 39, 396-407.
- Yamamoto, M., and H. Sato, 2010, Multiple scattering and mode conversion revealed by an active seismic experiment at Asama volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2009JB007109.
- 築田高広, 2010, 遠地地震トモグラフィーによる日本列島下のマントル構造, 東北大学大学院理学研究科修士論文.
- 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.*, 115, doi:10.1029/2008JB006111.
- Zhao, D., M. Santosh, A. Yamada, 2010, Dissecting large earthquakes in Japan: Role of arc magma and fluids. *Island Arc* 19, 4-16.

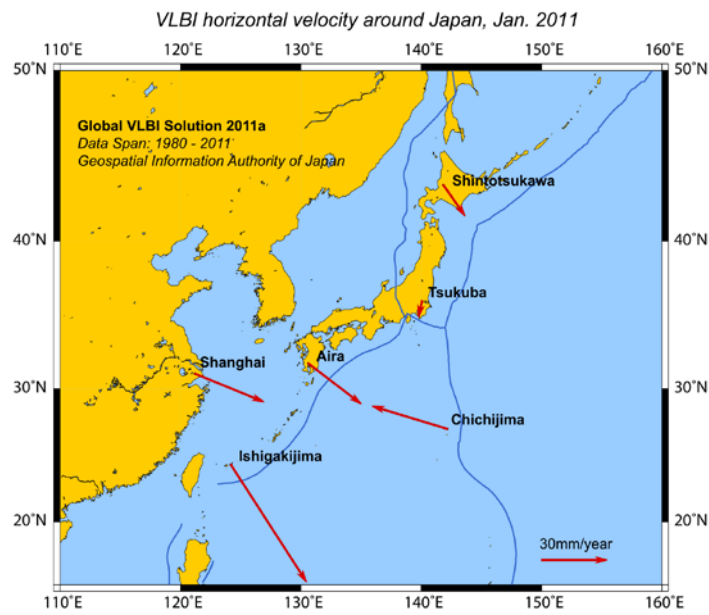


図 1. VLBI によって推定された日本列島及び周辺地域のプレート運動（国土地理院 [課題番号：6013]）。

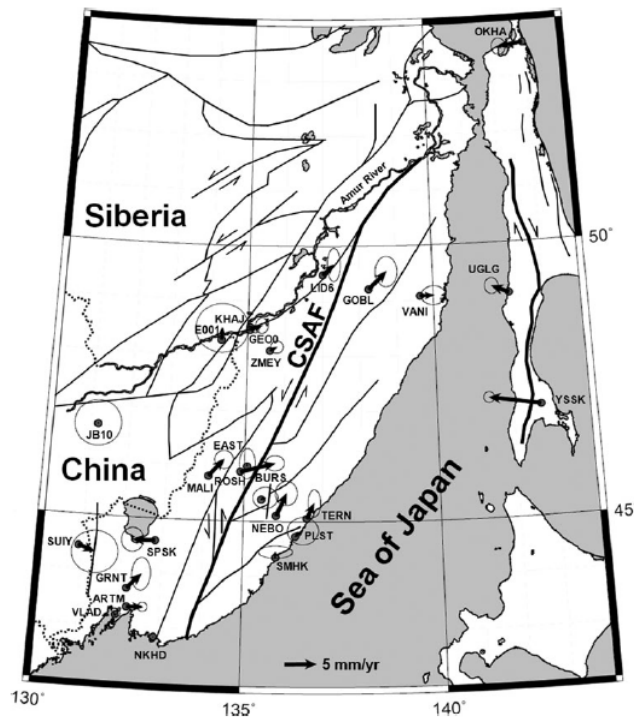


図 2. ユーラシアプレートを固定した沿海州およびサハリンの速度場（Shestakov et al., 2010; 北海道大学 [課題番号：1002]）。年間変位量は 5mm/yr 以下となっており、当初予想よりも小さい。

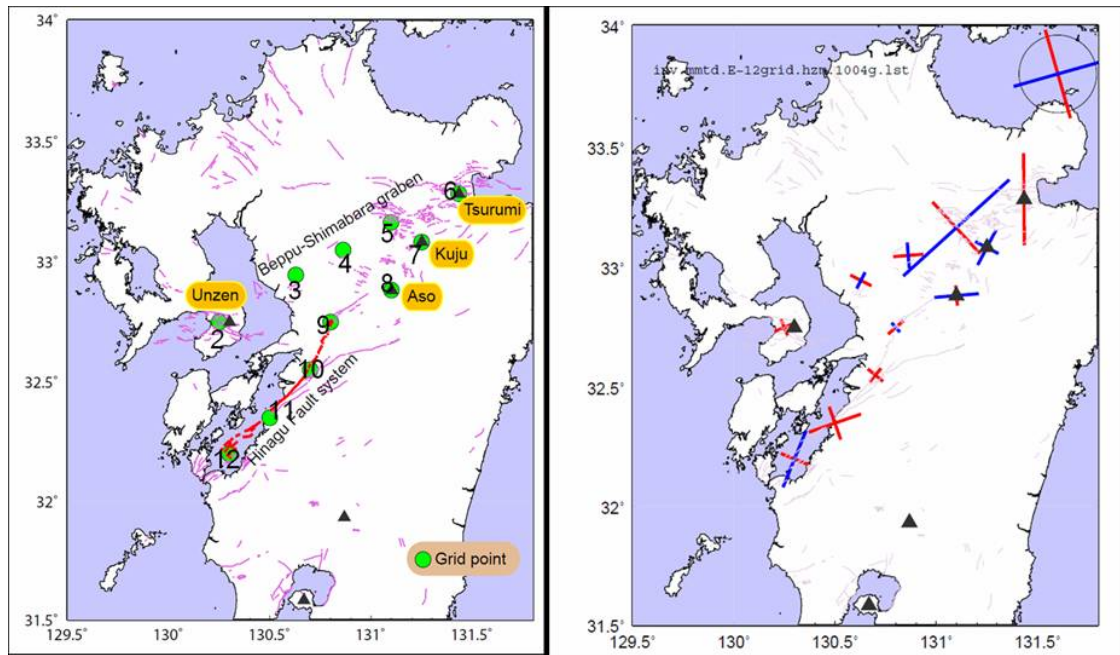


図 3. 九州における応力場のモデル化の結果（九州大学 [課題番号：2201]）。空間的に分布させたグリッドポイント（左図）におけるモーメントテンソルと広域応力場（右図）を示す。実線は主軸を表し、青が圧縮、赤が引張を意味する。

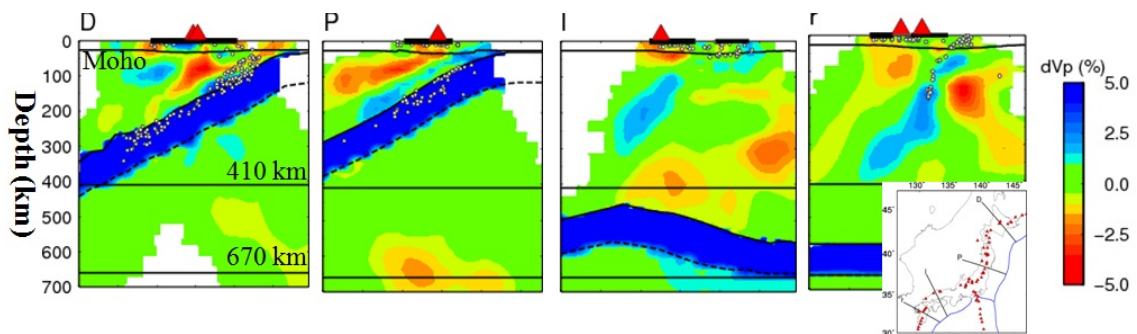


図 4. 遠地地震のデータも用いて推定された P 波速度構造と島弧横断面（東北大学 [課題番号：1203]；築田，2010）。

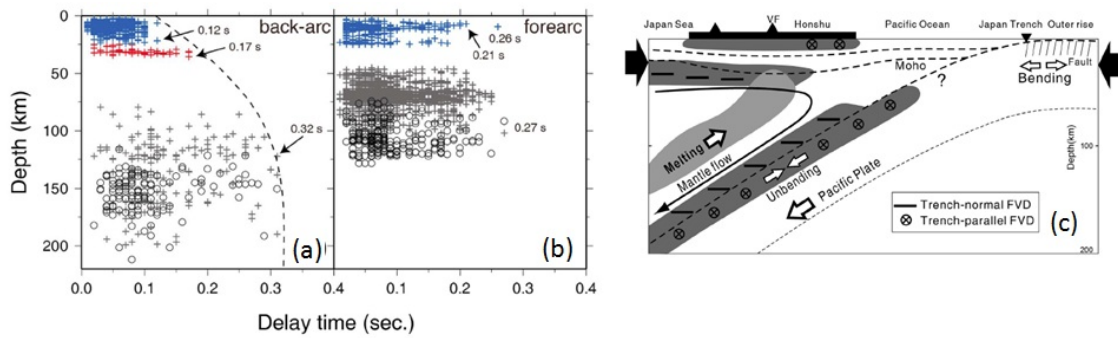


図 5. 東北地方の S 波スプリッティングの解析結果（東北大学 [課題番号：1203] ; Huang et al., 2011）。(a) 東北地方の背弧側、および (b) 前弧側を通過する波線から得られた時間差と深さの関係。 (c) 東北地方のマントルウェッジの異方性の模式図。

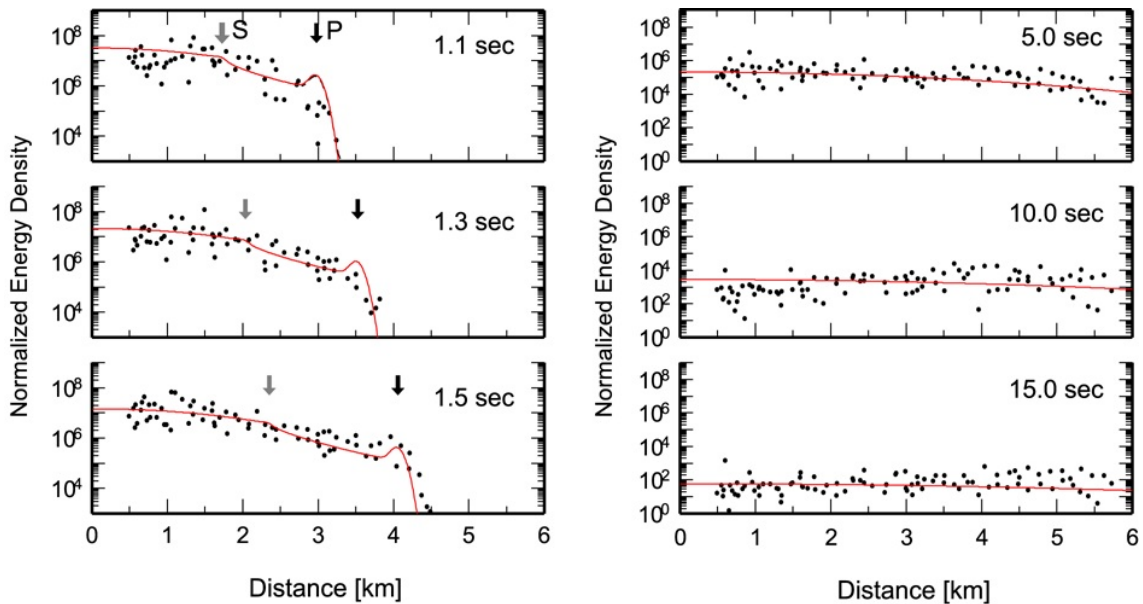
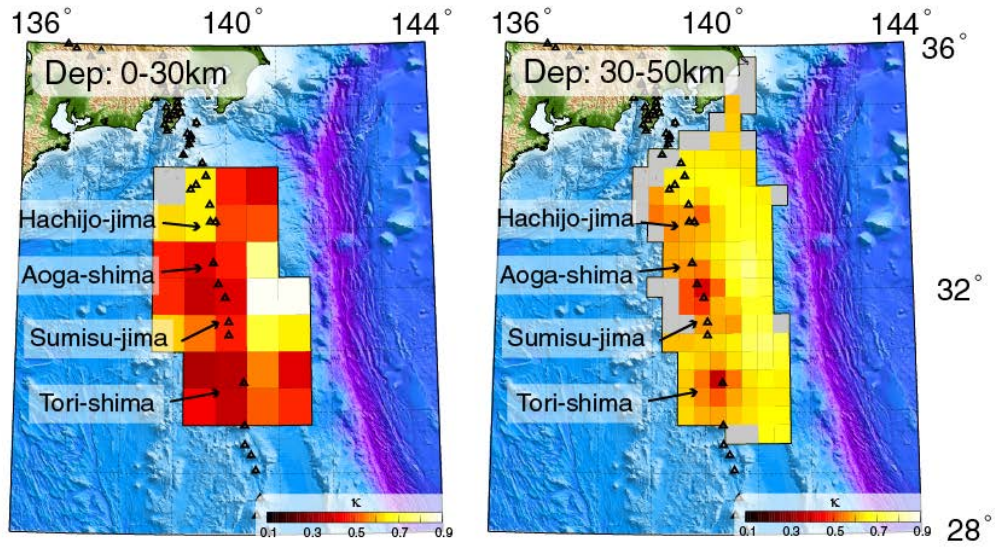


図 6. 浅間火山人工地震探査において観測されたエネルギー密度空間分布のスナップショットと多重等方散乱モデルにより得られた空間分布の比較（東北大学 [課題番号：1204] ; Yamamoto and Sato, 2010）。震源からの P 波エネルギーが火山浅部の短波長不均質により S 波エネルギーに変換され多重散乱していることを示している。

(1) κ



(2) $\varepsilon^{2/(p(\kappa)-1)} a^{-1}$

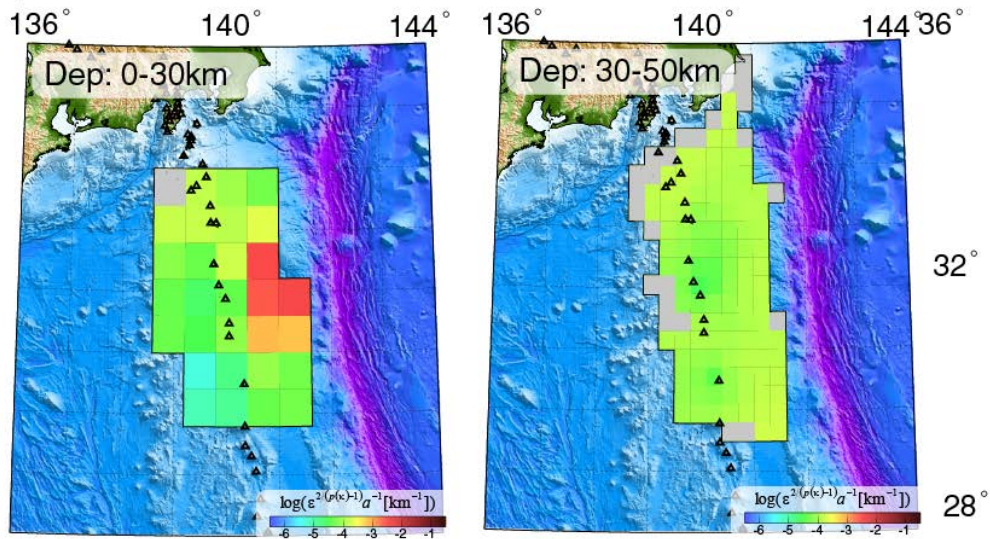


図 7. 北部伊豆小笠原弧における深さ 0-30km および深さ 30-50km における速度ゆらぎのパワースペクトル密度関数の空間分布（東北大学 [課題番号：1204]；海洋研究開発機構 [課題番号：4002]；Takahashi et al., 2011）。（1）短波長域におけるスペクトルの勾配を決めるパラメータの分布。赤いところほどスペクトルの勾配が緩い。（2）パワースペクトル密度関数の平均的な振幅を決めるパラメータの分布。赤いところほど振幅が大きい。

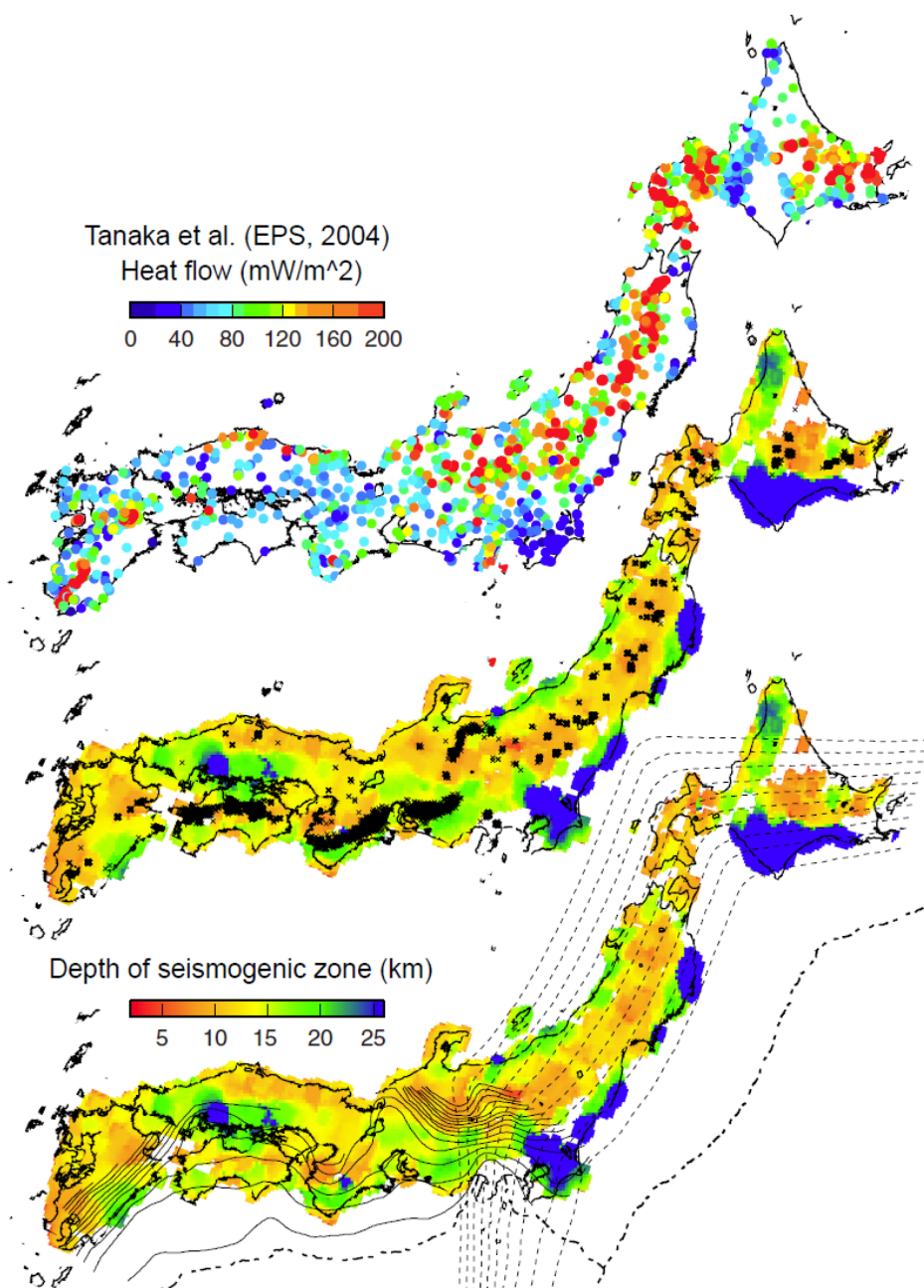


図 8. 地震発生層下限の深さ (D90) の分布 (東北大学 [課題番号: 1204]; Omuralieva, 2010)。
 (上図) Tanaka et al. (2004) による地殻熱流量の分布。(中図) D90 と低周波地震 (×印) との関係。(下図) D90 と沈み込んだ海洋性プレートの深さ (コンター) との関係。

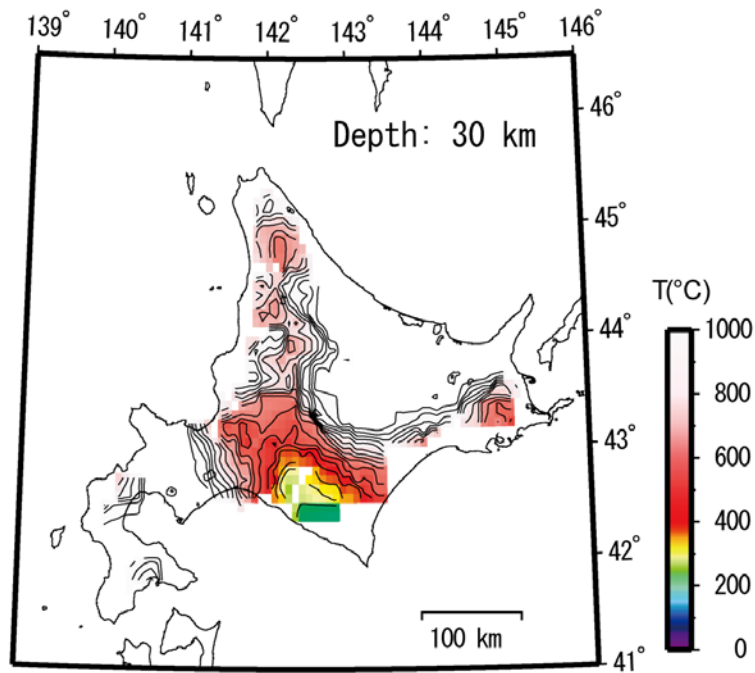


図 9. 地殻熱流量測定から推定された北海道の深さ 30 km における温度分布（防災科学技術研究所 [課題番号：3009]）。既存の温度検層データと Hi-net 坑井の検層データから地殻熱流量の空間分布を推定し、この地殻熱流量から一次元熱伝導モデルの仮定のもとで求めた温度分布を示す。

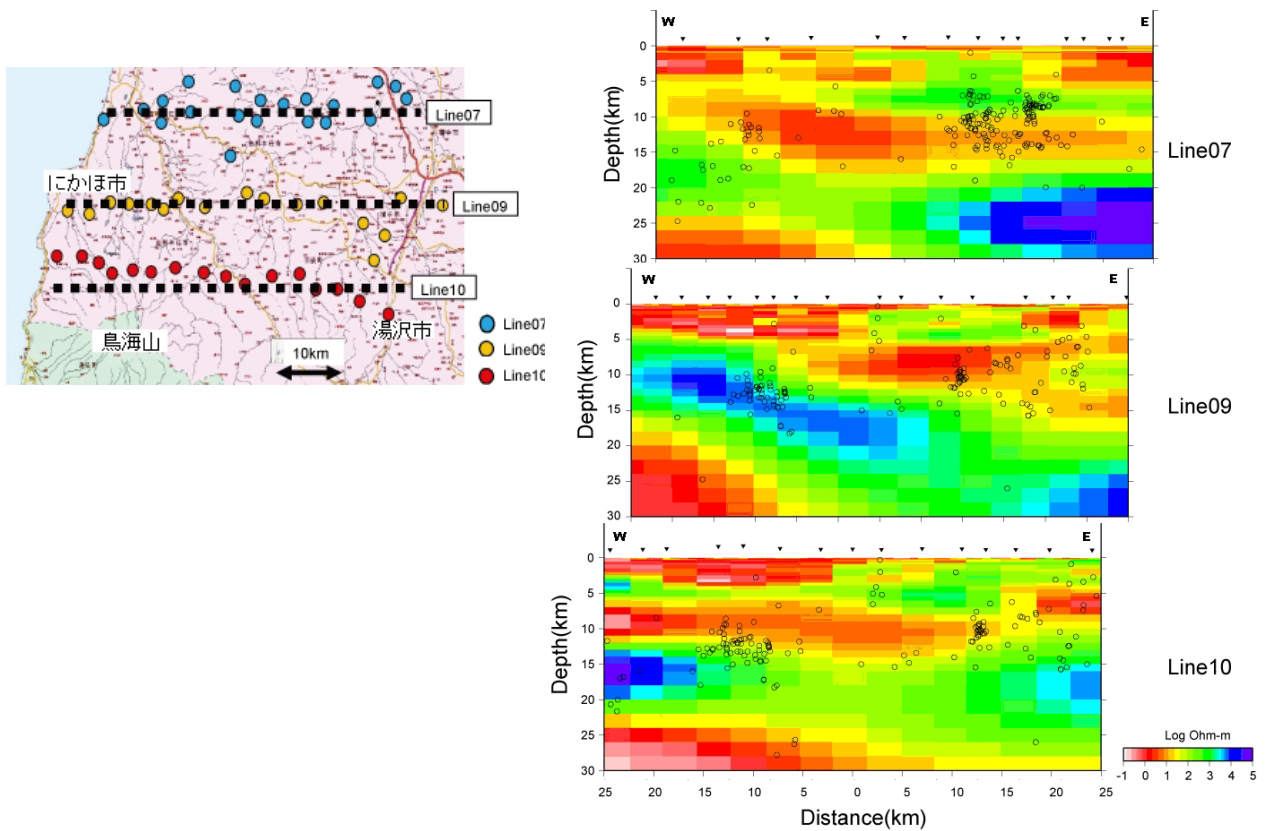


図 10. 秋田県南部における 3 本の東西測線（左図）での 2 次元比抵抗構造断面と地震活動（右図）。

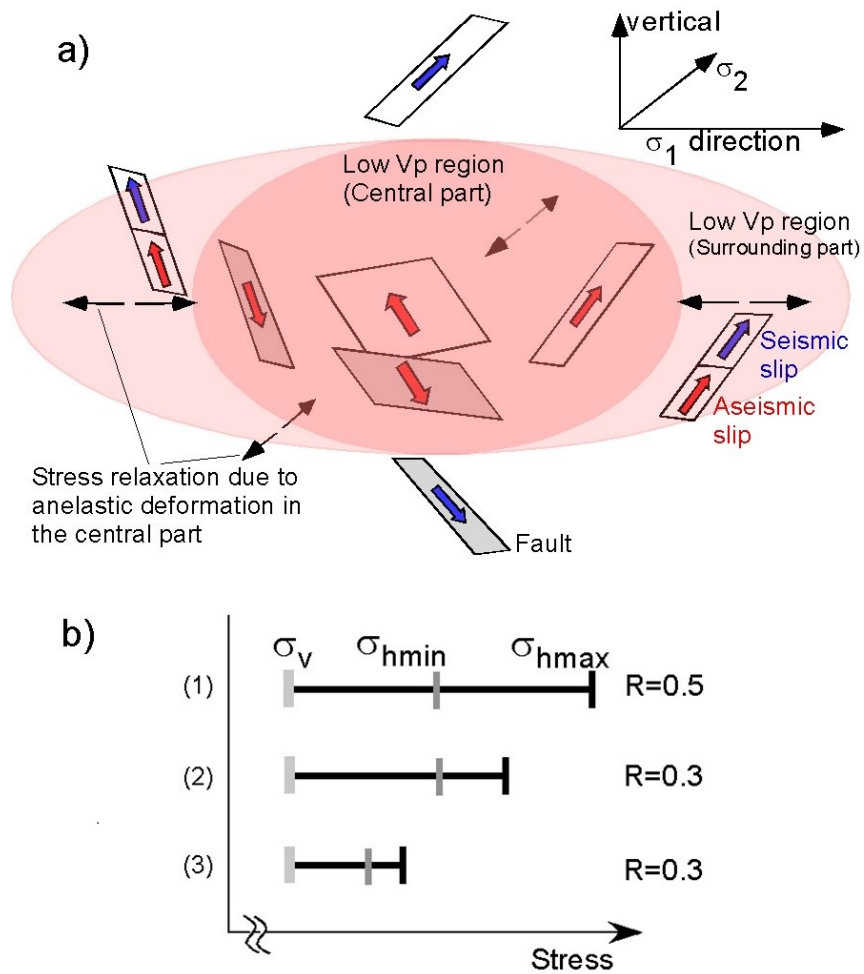


図 11. a) 長野県西部地域における低速度異常域とその周辺で生起している現象の解釈の模式図（京都大学防災研究所〔課題番号：1806〕）。ピンク色が低速度異常域。四角は小さな地震の断層面、赤矢印は非地震性すべり、青矢印は地震すべり、ペアになった矢印は低速度異常域における非弾性変形による応力緩和。b) 推定される応力状態。(1) 通常の領域。(2) および (3) 低速度異常域の端付近。

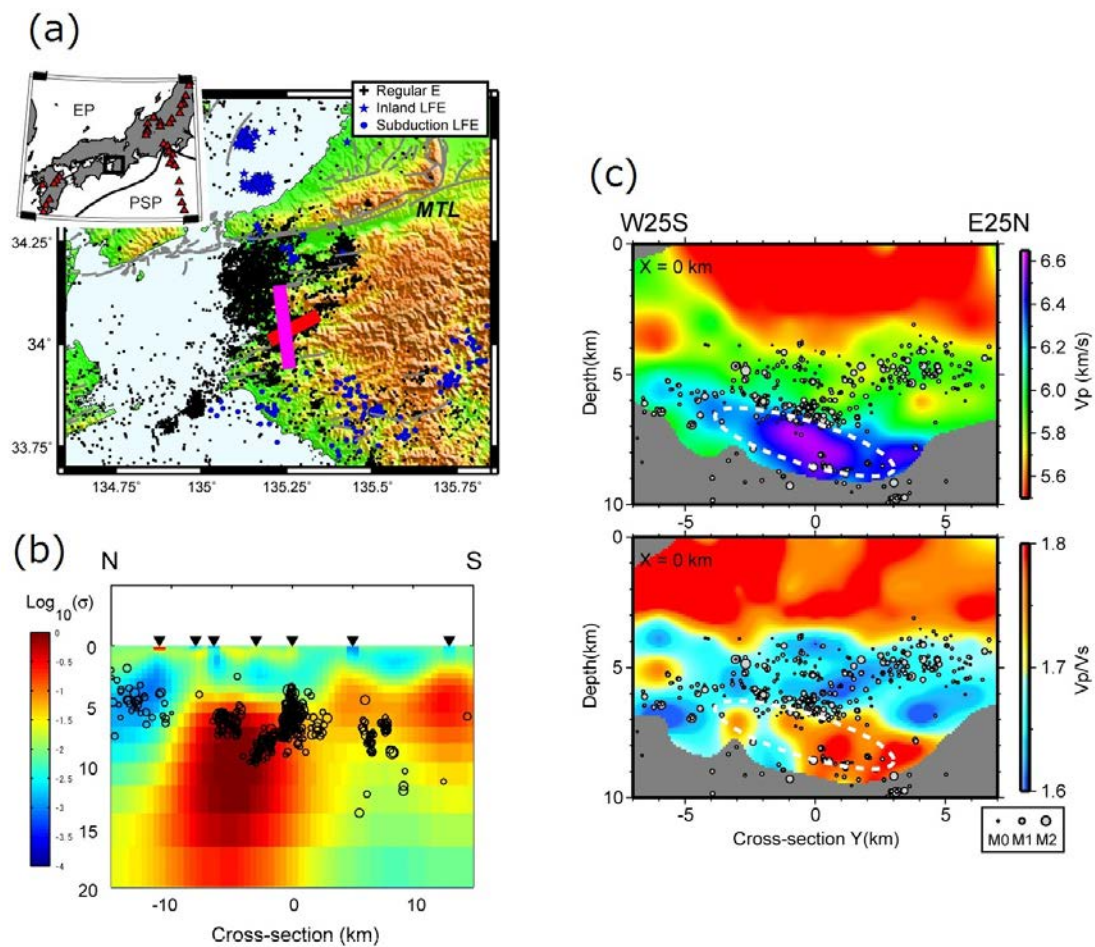


図 12. 和歌山地域における構造探査の結果（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]）。
 (a) 2009 年比抵抗構造探査（紫色太線）と 2006 年稠密地震観測の測線（赤色太線）。
 (b) 比抵抗構造の深度断面図（NS 走向）。○は気象庁一元化処理震源を表す。(c) 地震波速度構造（ V_p , V_p/V_s 比）の深度断面（W25S-E25N 走向）。灰色○は再決定震源を表す（Kato et al., 2010a）。

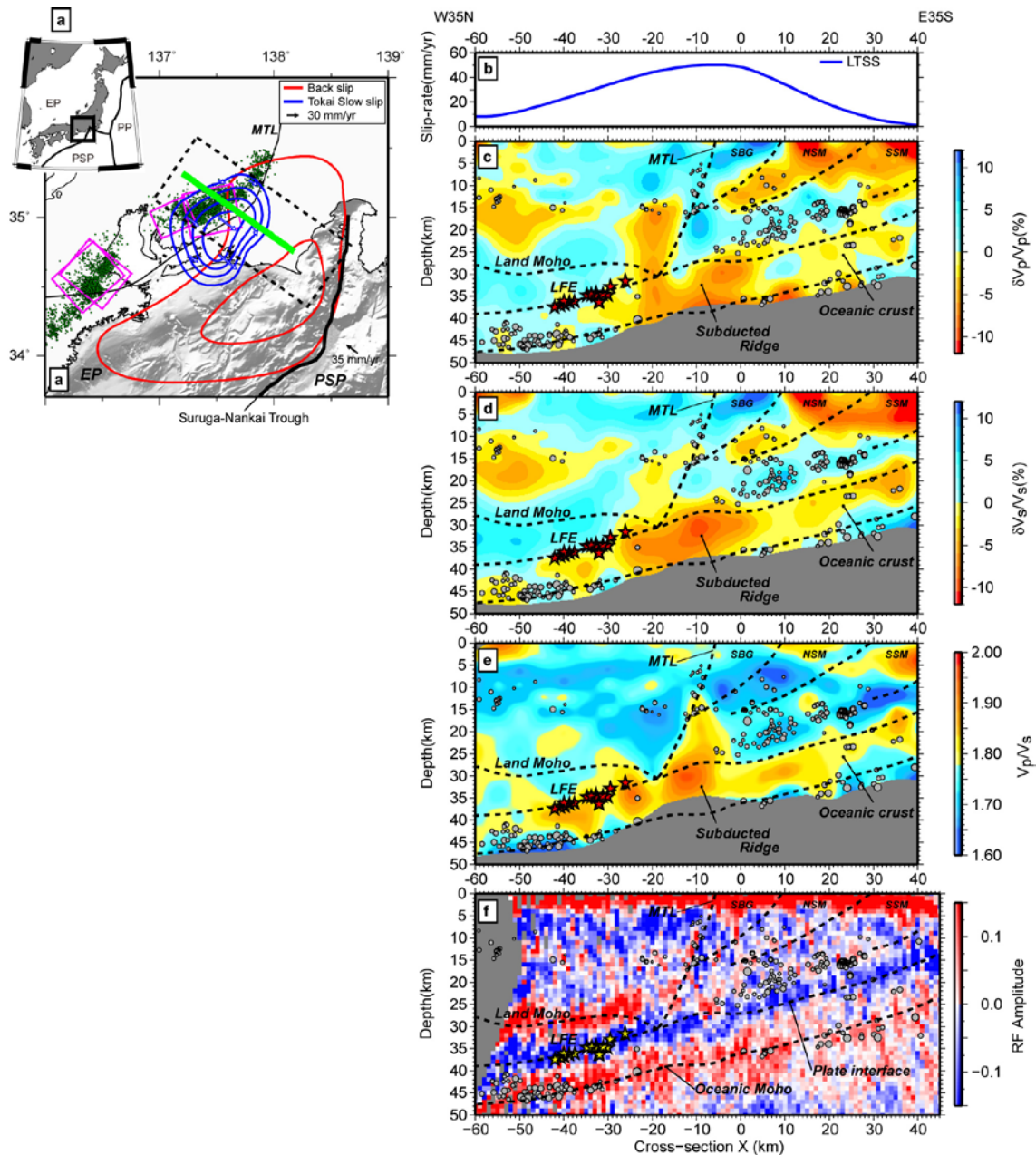


図 13. 東海地方における構造探査結果（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]；Kato et al., 2010b）。(a)アレイ地震観測点の分布（緑色太線）、すべり欠損速度分布（赤実線）、長期的 SSE のすべり速度分布（青実線）、気象庁一元化処理震源による深部低周波地震の震央分布（点）、および短期的 SSE の震源断層（紫色）。(b) 測線に沿った長期的 SSE のすべり速度分布。(c)-(f) 地震波速度構造とレシーバ関数の深度断面。灰色の丸印は、再決定された通常地震の震源、赤色の星印は、高精度に推定された低周波地震の震源を表す。

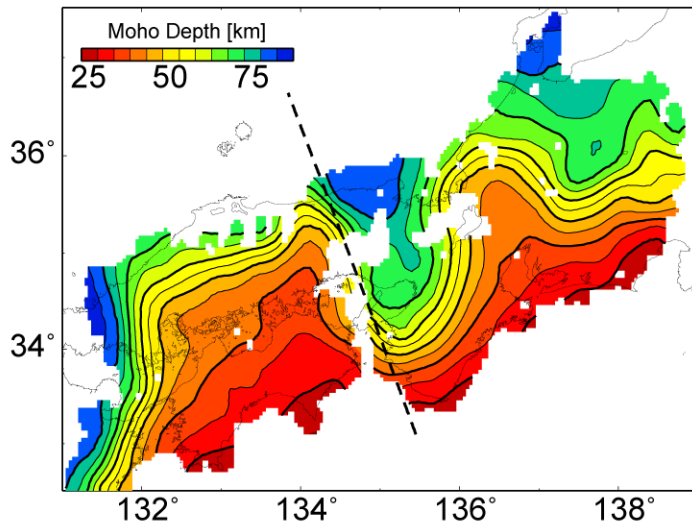


図 14. レシーバ関数から推定された海洋モホ面深度分布（防災科学技術研究所 [課題番号：3009]）。カラスケールおよびコンターは海洋モホ面の深さを表す。点線は想定されるスラブ断裂線の位置を表す。

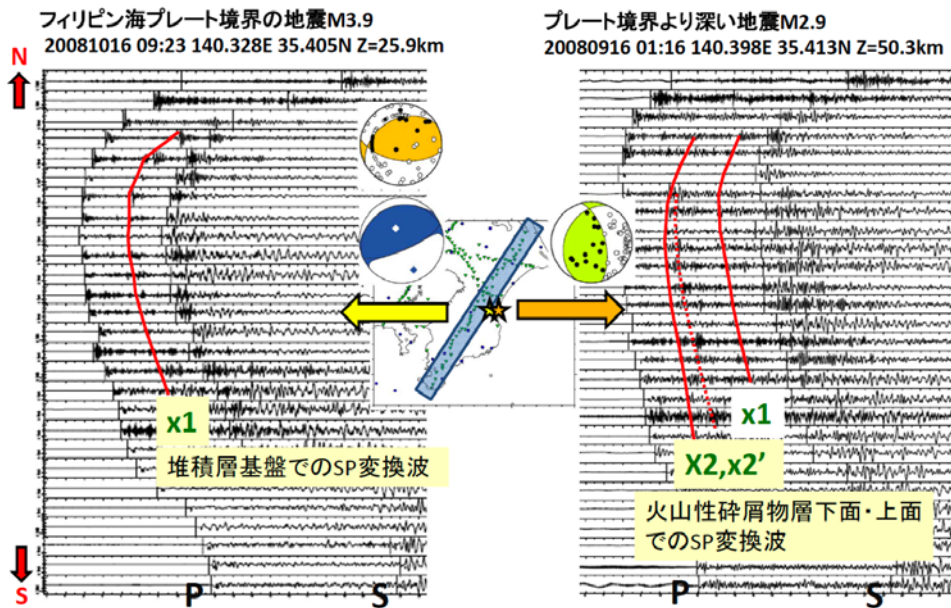


図 15. 房総半島下で発生した地震の MeSO-net による記録波形の例（防災科学技術研究所 [課題番号：3009]）。挿入図中の矩形領域内に位置する観測点の記録波形を 2 つの地震についてそれぞれ示す。地震の震央位置と発震機構解と挿入図中に併せて示す。赤線は顕著な後続位相の到達を表す。

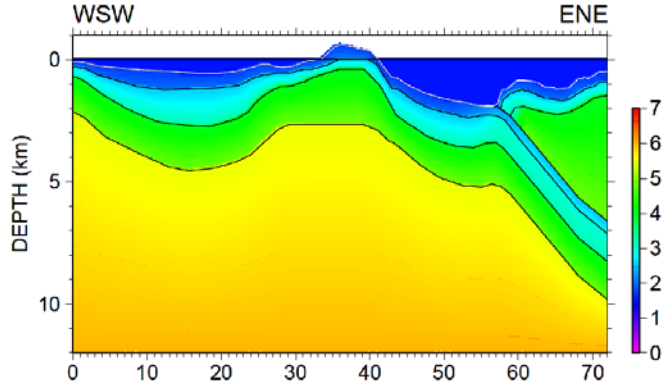


図 16. 2009 年に実施した伊豆大島及びその周辺で実施した人工地震構造探査実験より得られた速度構造（暫定解；東京大学地震研究所〔課題番号：1413〕）。カラスケールの単位は km/s。

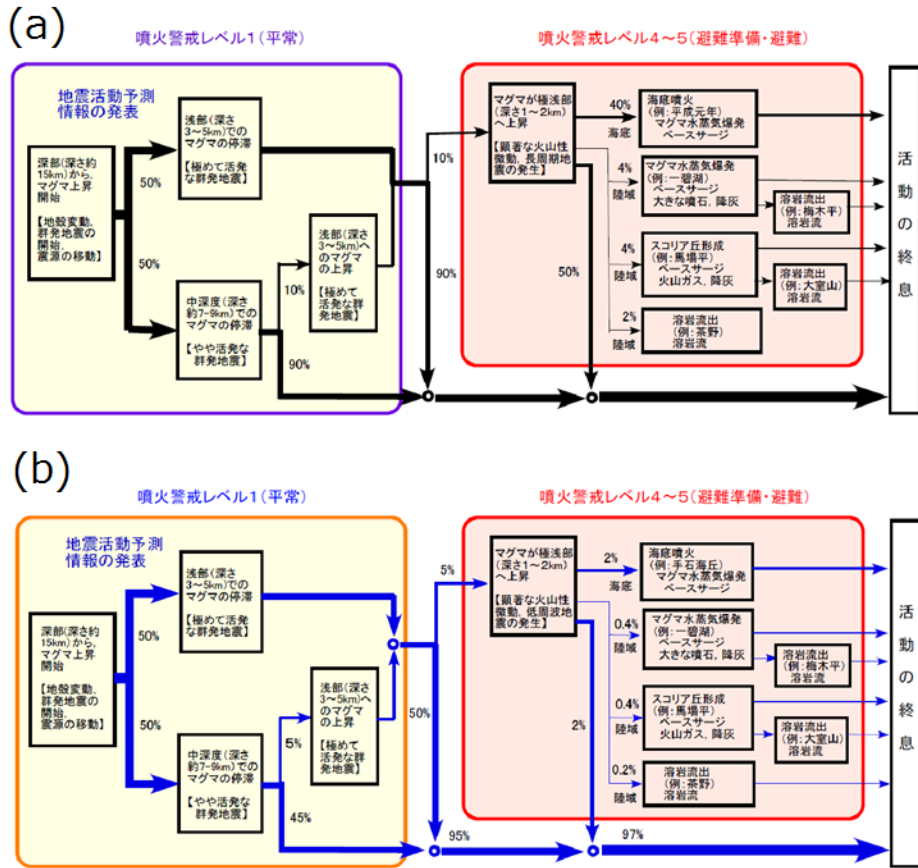


図 17. 伊豆東部火山群の噴火シナリオと確率。(a) 伊豆東部火山群の噴火事象系統樹。(b) 群発地震発生時の噴火事象分岐確率の推定値（東京大学地震研究所〔課題番号：1413〕）。

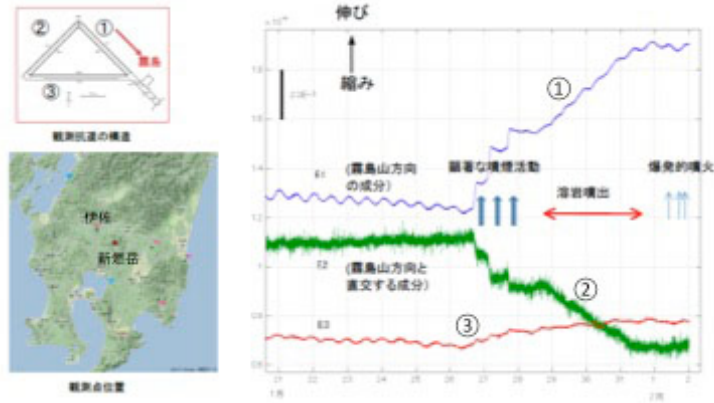


図 18. 伊佐（吉松）観測点における 2011 年 1 月 21 日から 2 月 2 日までのひずみ変化。（左上）ひずみ計の配置図。①が E1、②が E2、③が E3。1 月 26 日の噴火活動開始以降、霧島山方向（観測点から見て南東方向）に伸び、これに直交する北東-南西方向に縮みが観測された。顕著な噴煙活動に伴ってステップ状の変化が見られる。

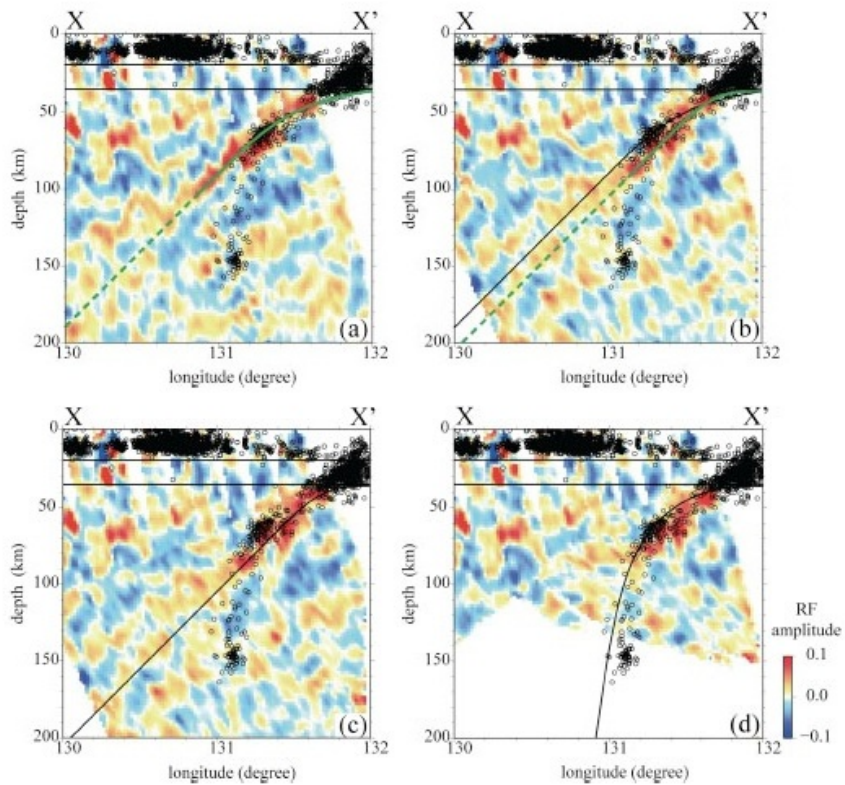


図 19. 定常観測網のデータを用いた九州中部の東南東-西北西の断面におけるレーザー関数イメージ。暖色はレーザー関数の正の振幅、寒色は負の振幅を表す。黒の実線は仮定した不連続面を、緑の実線と破線は推定された不連続面を示す。丸は地震の深さ分布を表す。(a)水平成層モデルに対する結果。(b)と(c)それぞれ(a)と(b)で推定された海洋モホ面を組み込んだモデルに対する結果。(d)稍深発地震の深さ分布から推定された海洋モホ面を組み込んだモデルに対する結果。

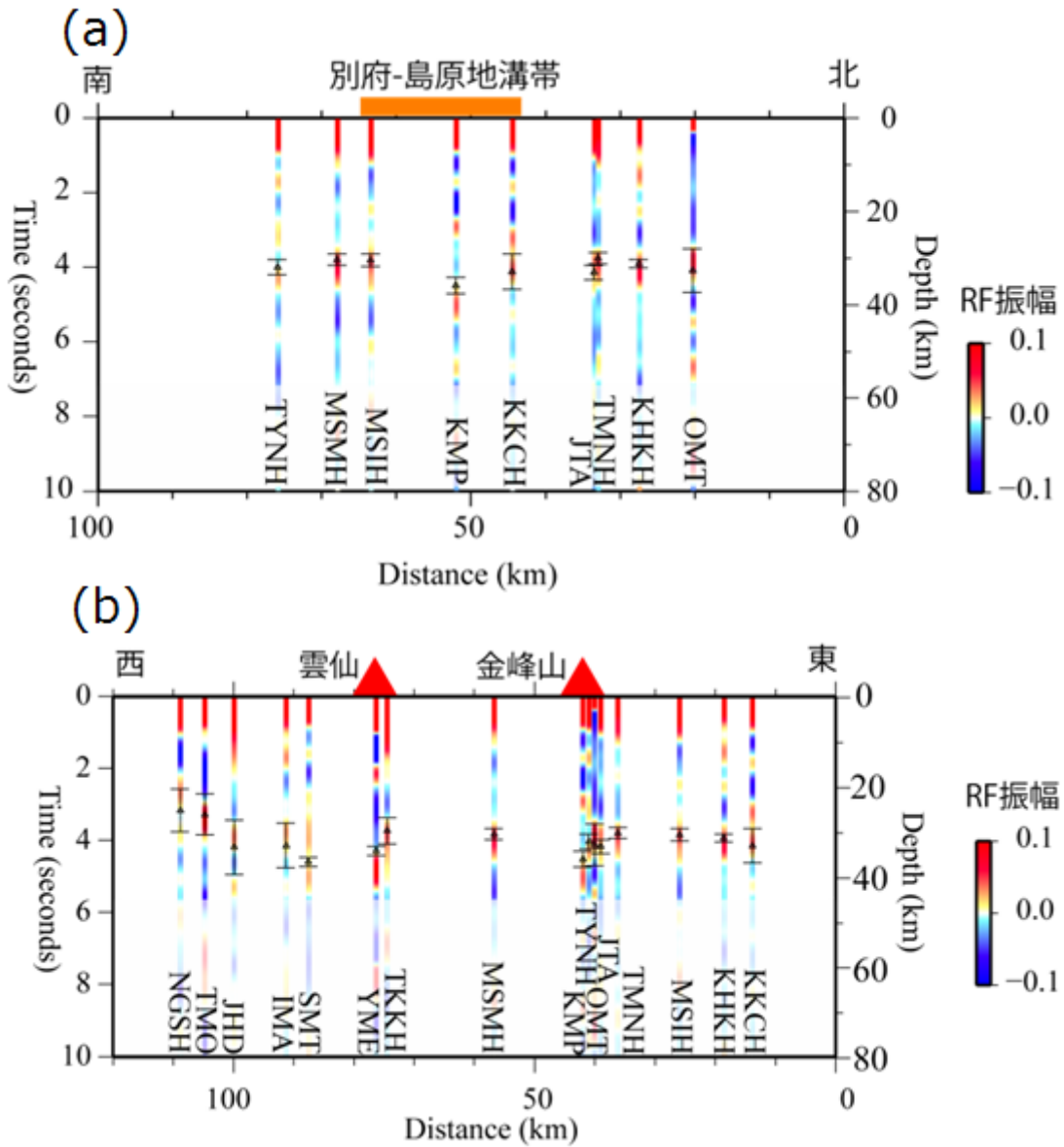


図 20. 島原地溝帯周辺のレーザー関数 (RF) によるイメージング。(a) 別府-島原地溝帯を横切る断面への投影図。(b) 別府-島原地溝帯に沿う断面への投影図。三角形とバーは遺伝子アルゴリズム (GA) インバージョンにより推定された、モホ面深度とその推定精度を示す。左側の縦軸はレーザー関数の時間、右側の縦軸はモホ面深度にそれぞれ対応する。

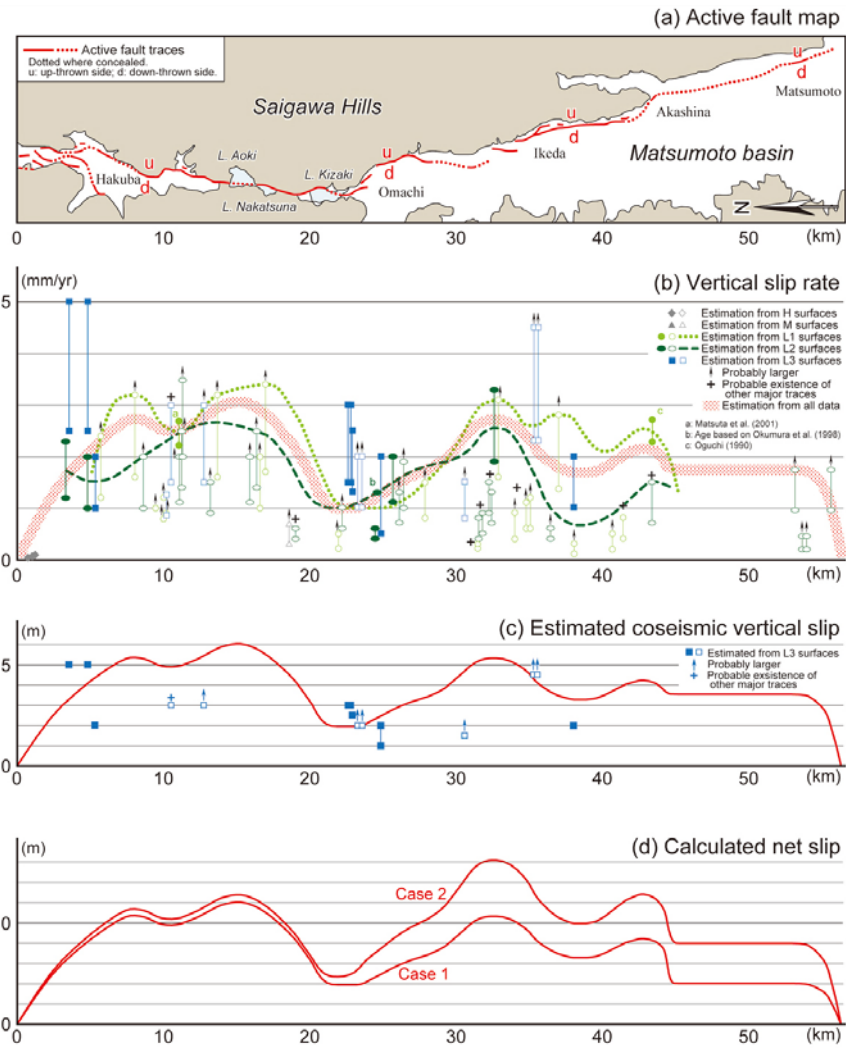


図 21. 糸静線断層帯北部の平均鉛直変位速度・地震時鉛直変位量・地震時ネットスリップの分布（鈴木・他，2010）。

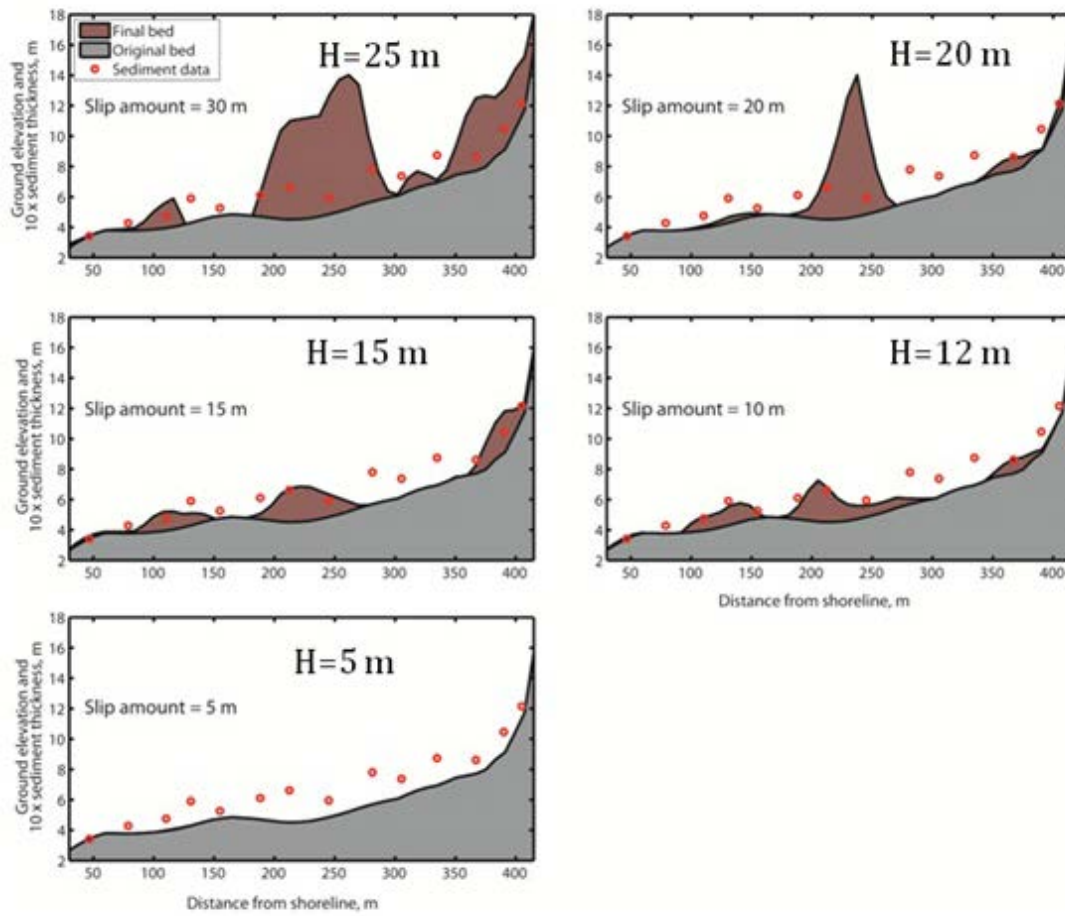


図 22. 2004 年スマトラ地震の調査により得られた津波堆積物の部分（赤点）と、断層モデルを固定してすべり量（ H ）を変化させたときに数値計算により推定された津波堆積物の分布（茶色部）との比較（Gusman, 2010; 北海道大学 [課題番号: 1002]）。津波堆積物の分布からすべり量を推定する可能性が示された。

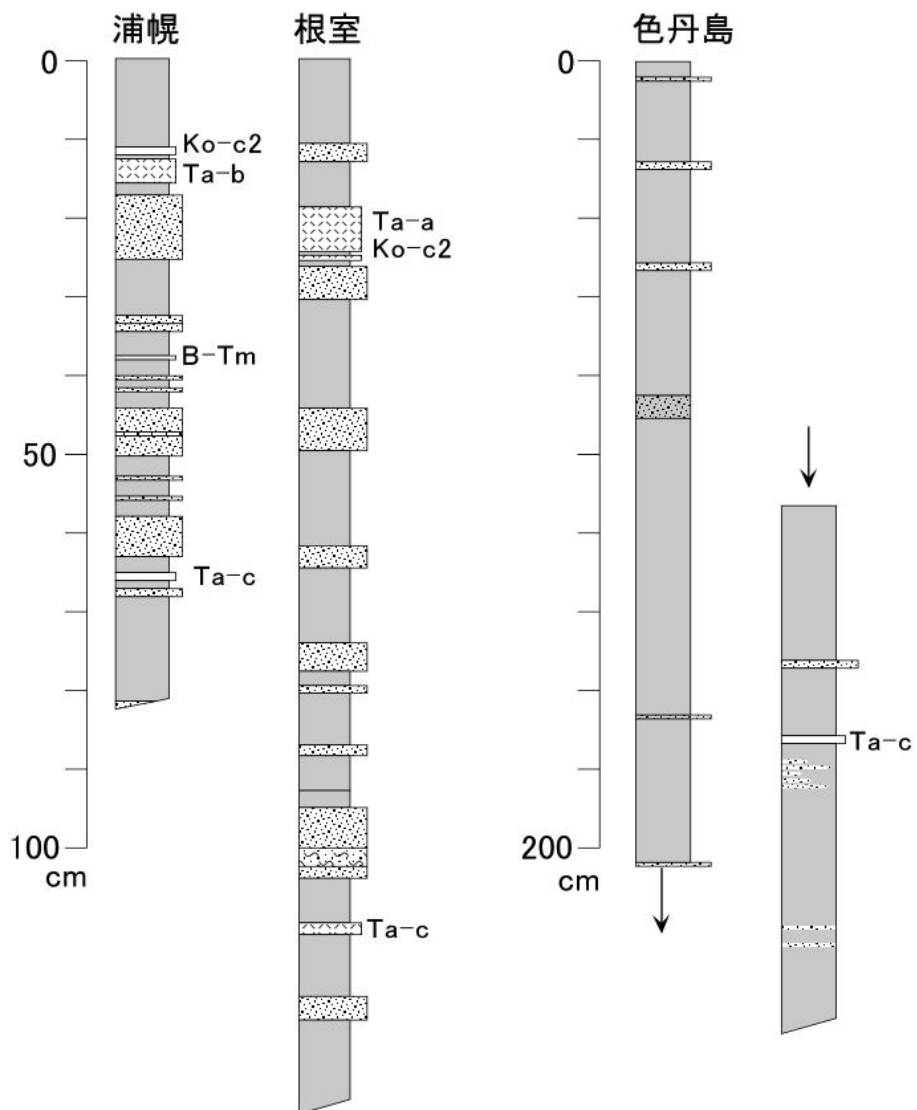
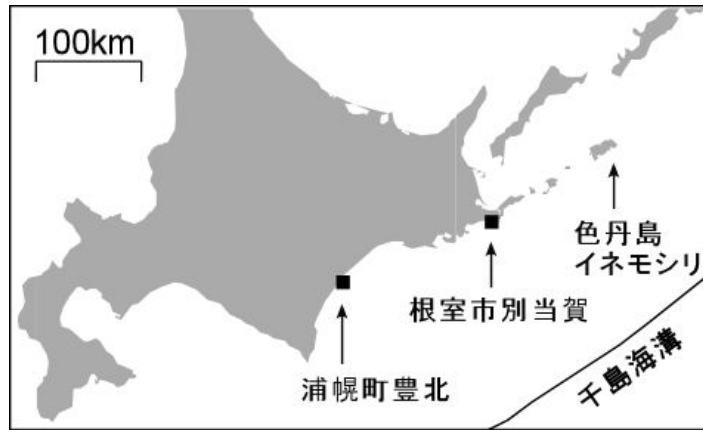


図 23. 浦幌・根室・色丹島の調査地点での津波堆積物とテフラの層序（北海道大学〔課題番号：1002〕）。

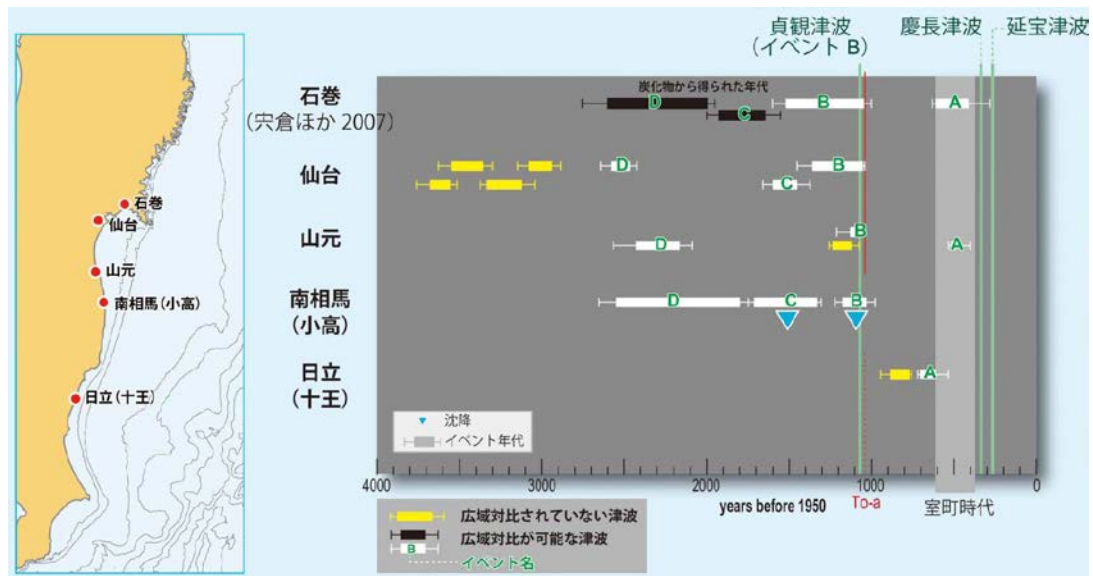


図 24. 東北才地方南部における津波堆積物の広域対比（産業技術総合研究所〔課題番号：5006〕）。

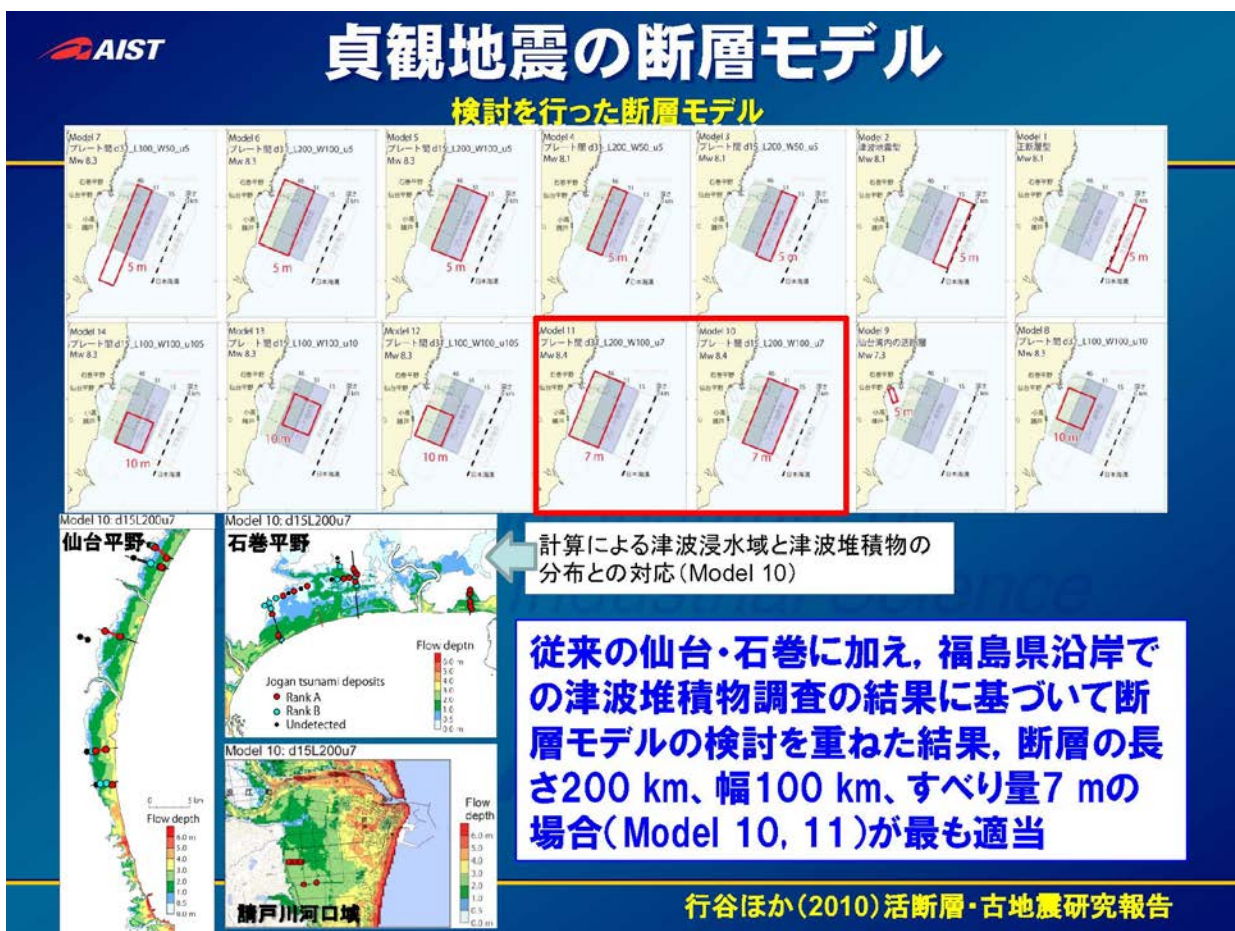


図 25. 福島県沿岸のデータも加えて検討した貞観地震の断層モデル（産業技術総合研究所〔課題番号：5006〕；行谷・他，2010）。

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、地殻及びマントルにおいて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、その下層の下部地殻・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関して、これまでに、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領域と非アスペリティ領域を分けていること、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報告されている(平成21年度項目別報告書)。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たため、平成22年度においても、精力的な観測研究が行われた。

1978年宮城県沖地震(以下、「宮城県沖地震」と称す)の震源域とその周辺において、海底と陸上の地震観測のデータを併合し、自然地震と人工地震探査のデータを合わせた地震波トモグラフィー解析を行い、プレート境界上盤側の V_p/V_s の空間変化がより高解像度で推定された。その結果、宮城県沖地震のアスペリティ領域では V_p/V_s が小さいが、その浅部(海溝側)では大きいことが明瞭になった。この結果は、マントルウェッジ内の部分的な含水化が、その直下のプレート境界における地震すべりを抑制していることを示唆している(図1)。さらに、2005年宮城県沖地震の発生後に震源域周囲で発生した中小地震の発震機構解から応力場の推定を行った結果、最大主応力軸の方向は、太平洋プレートが沈み込む方向とほぼ平行で、陸側にわずかに傾斜するが、応力場の空間変化は小さいことが明らかになった。宮城県沖地震の震源域ではプレート境界面の傾斜角が 30° 以上の高角であるが、それより東側においては 20° 以下の低角となっており大きく異なることが知られている。その結果、震源域内では、最大主応力軸がプレート境界面に対してなす角度がその東側より大きくなり(図2)、震源域内での法線応力が相対的に高いため強度が大きいと推定された。宮城県沖におけるプ

プレート間固着の空間変化には、マントルウェッジ内の不均質構造とともに、プレート境界面の形状が影響を及ぼしていると考えられる（東北大学[課題番号：1205]）。

日向灘南部における海底地震観測のデータによるDDトモグラフィ法を用いて、日向灘南部における精度の良い震源分布、発震機構解を求め、プレート境界の等深度線を低角逆断層型の地震の発生位置から推定した。その結果、九州パラオ海嶺とは別の沈み込んだ海山に対応する境界面の高まりが推定されたが、この場所は、1968年日向灘地震（Mw7.5）のアスペリティの南側に位置しており、1968年の地震ではこの高まりがバリアとなり破壊が南側には伝播しなかった可能性が示唆された（九州大学[課題番号：2202]）。

日向灘～トカラ列島東方沖～奄美大島域に発生する相似地震群を、その活動様式から、比較的定常的に繰り返して活動するタイプ(R)、クラスターの活動するタイプ(C)、いずれにも判別できないもの(O)の3つに分類し、タイプ別の分布の特徴から当該領域を6つの小領域に分け、大地震の活動と比較した(図3)。日向灘中部、都井岬沖、奄美大島域(図の小領域B、D、F)ではRタイプは見られず、Oタイプが卓越しているのに対して、都井岬沖とトカラ列島東方沖(小領域CとE)ではRタイプの活動も見られた。さらに、日向灘北部(小領域A)では相似地震群の活動が極端に低調であった。1923年以降に発生したM7.0以上の地震は、Rタイプが発生していない小領域BまたはDで起こっており、Fでも、1911年に奄美大島近海でマグニチュード8.0の地震が発生した。一方、相似地震群の活動度が低い小領域Aは、マグニチュード7.0以上の地震が起こっていないだけでなく、時々ゆっくり滑りが発生する特徴を持っている。以上のような小領域ごとの相似地震活動の違いは、プレート間のカップリングの状況の違いを反映していると考えられる(鹿児島大学[課題番号：2301])。

海域においてはアスペリティの実体等の解明のために、上記以外にも各種の精力的な観測研究が行われている。平成22年11月までに実施された海底地殻変動観測により得られたユーラシアプレート安定域に対する既設の海底基準点の速度ベクトルを 図4に示す(海上保安庁, 2010;2011; Sato et al., 2011)。宮城沖では約5~6cm/年の速度で西北西へ、福島沖では約2cm/年の速度で西へ移動している。「宮城沖2」及び「宮城沖1」海底基準点における移動速度は、陸上GPSの移動速度(3~4cm/年)や「福島沖」海底基準点の移動速度と比べて有意に大きく、両海底基準点の周辺では固着が強く、ひずみを蓄積していることが示唆された。相模湾では約4cm/年の速度で北西へ移動しているという結果が得られた。この結果は、「相模湾」海底基準点の北西に位置する真鶴GPS観測局や南西に位置する伊豆大島GPS局と、方向は調和的であり、大きさは両GPS観測局の中間にあたる。南海トラフ沿いに設置している6箇所の海底基準点では、約2~5cm/年の速度で西~北西へ移動しているという結果が得られた(海上保安庁[課題番号：8006])。

熊野灘沖南海トラフの5地点において、地球深部探査船「ちきゅう」による掘削が実施され、各種の精力的な調査観測が行われた(海洋研究開発機構[課題番号：4003])。また、房総沖においては40台の長期観測型海底地震計で得られたデータを取得するとともに、茨城沖海域に、約7kmと従来のほぼ1/3の間隔で長期観測型海底地震計34台が設置された。さらに、同海域において短期観測型海底地震計およびハイドロホン・ストリーマーを用いて、エアガンを人工震源とした海域構造調査が実施された(東京大学[課題番号：1416])。

イ. 非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用、およびそれらのメカニズムに関して、これまで、三陸沖や南海トラフにおいて重要な知見が得られてきたが、本年度においても多数の重要な結果が得られた。

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により、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ていたが、同時期に陸上のボアホールに設置された体積歪計でも膨張変化が観測されていた。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ことから、非地震性のものであると考えられる。そこで、この変動をプレート境界におけるゆっくり地震によるものと仮定して、断層の位置、大きさおよびすべり量を推定したところ、海溝軸近く50km×43kmの断層における14cmのすべり量が得られた(図4)。ゆっくり地震の終了から約一週間後に震源断層の深部延長部においてマグニチュード6.1の地震が発生した。Matsuzawa et al. (2004)のモデルのように、海溝付近から始まった非地震性すべりがプレート境界型地震を誘発した可能性を示唆している(東北大学[課題番号:1206])。

2003年と2010年に豊後水道で発生した長期的ゆっくり滑り(SSE)の期間に、SSE領域と重なる場所での微動と、それらから100km以上南に離れた足摺岬沖で発生する浅部超低周波地震とが、同時に活動していることが明らかになった(Hirose and Obara, 2010; Hirose et al., 2010, Sekine et al., 2010)。これらのスロー地震は1946年南海地震の震源域の西隣に位置し、海溝型巨大地震の破壊過程の評価や準備過程を監視する上で非常に有用であると考えられる(図6, 防災科学技術研究所[課題番号:3011])。

防災科研Hi-netに併設されている高感度加速度計(傾斜計)データを用いて、短期的ゆっくり滑りを自動検出する手法が新たに開発された(Kimura et al., 2011)。この手法を2007年から2008年までの四国周辺の傾斜データに適用した結果、検出された短期的ゆっくり滑りとそれに伴って発生する深部低周波微動活動の発生過程について、以下のことが明らかにされた(図7)。(1) 各エピソードで微動活動の開始は短期的ゆっくり滑りの発生に1-4日先行する。(2) 先行する微動活動は短期的ゆっくり滑りのすべり域周辺で発生する。(3) 微動活動の発生域は時間とともに移動して短期的ゆっくり滑り発生域に達すると活発化する。またこの時に短期的ゆっくり滑りが検出される。このような短期的ゆっくり滑り・微動の発生過程の変化は、プレート境界におけるすべり特性の不均質性を反映している可能性がある(防災科学技術研究所[課題番号:3011])。

Hi-net連続波形記録の精査により、遠地大地震から近地微小地震まで様々な規模の地震によって誘発された微動活動を抽出し、その特徴を調査したところ、誘発された微動活動の位置は帯状の微動発生域に一様に分布するのではなく局在化しており、そのほとんどが1時間以内に終息すること、誘発要因となる地震のマグニチュードには震央距離に応じて下限が存在し、その値は通常の地震の誘発現象で報告されているものより1から3程度小さいことが明らかにされた。このことから微動発生域が微小な応力変化に対して非常に敏感に反応することが示唆された(防災科学技術研究所[課題番号:3011])。

西南日本の微動については、上記以外にも、精力的な観測研究が行われている。紀伊半島南部で実施した稠密自然地震観測(約60km区間、観測点間隔:約1km)と定常観測データからトモグラフィ解析を実施し、測線下のマントルウェッジに対応する深さ30-35kmのP波速度は水平方向に大きく変化し、クラスター状に存在している低周波地震発生域近傍でP波速度

が小さく V_p/V_s 値が大きくなる傾向が指摘された。これらの結果から低周波地震の発生には流体の関与が示唆され、フィリピン海プレートから脱水した流体が存在すると思われる領域のみでマンタルウェッジが蛇紋岩化している可能性が示唆された(東京大学[課題番号:1415])。S波の振動方向を活用したメカニズムの解析手法を、2010年5月24日~28日に紀伊半島で発生した微動活動に適用した結果では、全体として逆断層型が多く、微動は主にプレート境界で発生していることが示唆されるが、メカニズム解の傾斜角に着目すると、この地域のプレート境界の傾斜角(20°前後)に比べて若干高角である可能性が指摘された(産業技術総合研究所[課題番号:5007])。

三陸沖や西南日本以外の領域でも、非地震性すべりの時空間変化に関係する重要な知見が多数得られた。

十勝沖における超低周波地震を波形相関解析によって効率良く検出し、それらのセントロイド・モーメントテンソル(CMT)解を推定したところ、推定された超低周波地震の発震機構解は低角逆断層型のものが多く、セントロイドの深さも周囲で発生する通常のプレート境界型地震と矛盾しないことから、十勝沖の超低周波地震はプレート境界型であることが明らかにされた(図8, 防災科学技術研究所[課題番号:3011])。

海洋プレートは陸の下に潜り込むときにその最上部がはがれ、上盤側プレートの底に付加されることが知られており、この現象は『底付け作用』と呼ばれるが、深さ10kmを越える深部での底付けについては詳細な振る舞いは明らかでなかった。房総半島沖の深部反射法構造探査の結果と相似地震を、相対比較を積み重ね詳細に比較したところ、相似地震がフィリピン海プレート最上部に分布する火山性砕屑物・火山岩層(VCR層)の下面に沿って分布することが明らかとなった(Kimura et al., 2010)。これは、現在活動的なプレート境界がVCR層の下面に位置することを示しており、深部底付け作用に相当すると考えられる。一方、相似地震発生域の浅い側は房総スロースリップイベント発生域に対応し、巨大地震発生域の深部延長に相当する。房総スロースリップイベントは平均6年間隔で繰り返すことから、底付け作用の進行が間欠的であることが示唆された(防災科学技術研究所[課題番号:3011])。

新たに開発した防災科研の震源カタログのすべてのイベントとの処理を行う相似地震モニタリングシステムにて、山梨県東部・神奈川県西部の地震密集域にて解析を行った結果、新たに平均繰り返し間隔1年以上の定常型でスラスト型の発震機構解を持つものが見出され、深さ方向に約10kmの幅をもつ震源分布を示すことが明らかとなった。関東地方東部ではフィリピン海プレートが沈みこみ、相似地震はプレートの境界に沿って分布し、ほぼすべて定常的に繰り返し発生するのに対し、関東地方西部では伊豆・小笠原島弧が衝突し、相似地震は伊豆・小笠原島弧より剥離し衝突付加する上部地殻と中・下部地殻の間で発生する。このような発生場の違いが岩石組成、物理的状態の違いを伴い、相似地震活動の違いを引き起こしている可能性が示唆された(防災科学技術研究所[課題番号:3011])。

GOENETによる断層すべりの検知能力の検討が行われるとともに、日本列島周辺のプレート境界面上のすべり欠損分布を小領域6箇所および中領域3箇所の2つの空間スケールで定常的に推定するシステムの構築が行われた。2003年十勝沖地震の余効変動のモニタリングに関しては、時間依存インバージョンを用いて、地震発生以後現在まで余効すべり分布を推定された(図9)。地震発生後7年強が経過しているが、現在も余効すべりは継続しているものと考えられる。2009年末に発生した豊後水道ゆっくりすべりについても、時空間変化を時間発

展のインバージョンで推定し、2009年末から2010年3月くらいまで四国の南西部でゆっくりすべりが発生していたが、時間と共に豊後水道の九州側にすべり領域が拡大していった結果が示された(国土地理院[課題番号:6014])。インドネシア広帯域地震観測網のデータを、インターネットを用いて収集し、インドネシアとその周辺で発生したマグニチュードが概ね5以上の地震についてCMT解を決定してホームページ上で公開した。2010年10月25日にインドネシア・スマトラ沖で発生したマグニチュード7.6の地震の震源解析の結果、約100秒の震源時間が見積られたが、この震源時間は、同規模の地震に比べて明らかに長く、この地震が津波地震だったことが推定された(防災科学技術研究所[課題番号:3012])。

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22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るとともに、ひずみ集中帯の成因に深く関係する重要な知見が得られた。

北海道東部の活動的火山の間には、東北地方と違って脊梁山脈や火山をつなぐような活断層が存在せず、内陸地震はカルデラ内部にのみに集中して発生するという特徴があるが、このような特徴を生み出すメカニズムを明らかにするために、弟子屈・屈斜路カルデラ地域をテストフィールドとして高密度・高精度な震源分布・地殻構造・地殻変動・重力構造・地質地形・熱構造の解析が行われ、1938年の断層はリトリックな形態で東に傾斜し次第に低角化し水平に近づくがこの形態は地下に連続しているとは考えづらいこと、1938年の断層域はカルデラ内でも非常に大きな重力勾配を持ち広域的な基盤構造の構造境界をなしていること、高比抵抗域の中に低比抵抗領域が存在し、その低比抵抗帯の深さはSAR干渉解析で推定された変動源の深さとほぼ同じであり、地震の震源は低比抵抗域の直上域に多く分布していることなどが明らかにされた(北海道大学[課題番号:1003])。

2008年岩手・宮城内陸地震後の長期的余効変動の時空間的変動パターンの特徴から、それが下部地殻以深の粘性的応答によるものであると仮定し、最表層を弾性層その下層を粘弾性層として、弾性層の厚さと粘弾性層の粘性係数をグリッドサーチによって推定し、それぞれ16-24km、 $2.6-4.0 \times 10^{18} \text{Pa} \cdot \text{s}$ の範囲内に推定された(図10)。本震発生後1.5年間と2.2年間の二つの期間に分けて推定された粘性係数を比較したところ、後者のほうが前者よりも約40%大きくなり、粘性層の構成則が非線形である可能性が示唆された。また、震源域深部に反射法地震探査により報告されている反射波を確認するとともに、活火山直下や震源域深部に高減衰域が確認された(東北大学[課題番号:1207])。

合同余震観測グループによる多数の地震のメカニズム解の空間分布と揺らぎを利用して、起震応力場と地殻強度から地下の流体の間隙圧の分布を求め、岩手・宮城内陸地震の震源域において、地殻下部の地震波速度低速域(Okada et al., 2010)の上部に間隙圧が高い領域があることが推定された(図11)。地下の高圧の流体が、本震を引き起こし、さらに本震すべりや余効すべりに伴って周囲に拡散した流体により、複雑な余震活動が生じた可能性が示された(東北大学[課題番号:1207])。

同じく合同余震観測グループのデータにより、2008年6月15日～9月30日の期間に発生した3000個以上の地震から低周波地震を抽出した結果、高周波地震と低周波地震の分布には明瞭

な棲み分けが見られ、低周波地震は、震源の深さ方向への広がりの中では相対的に浅い部分に分布することが示された(図12、小菅, 2011)。一方、余震域北端部に分布する低周波地震は、余効変動から推定された非地震性すべり域の西側深部延長に分布していることが明らかにされた。この領域においては、地震時すべりを生じた断層とその浅部延長にかけて、高周波地震の発生域、低周波地震の発生域、非地震性すべり域へと系統的に移り変わり、上載圧の減少と間隙水圧の増加によって準静的すべりが促進されたことが示唆された(弘前大学[課題番号: 1101])。

東北日本全域における変形と断層形成過程を解明するために、熱構造を考慮して非線形粘弾塑性を考慮した有限要素法によるモデル化を行い、東北日本全域において、実際の地形とある程度調和的な脊梁山脈の形成や脊梁山脈の両側に沿って断層が形成される様子が再現された(東北大学[課題番号: 1207])。

地殻流体に関して、長町利府断層地域の3次元比抵抗構造解析をさらに進め、脊梁の西側では下部地殻がほぼ一様に低比抵抗を示すのに対して、長町利府断層深部延長に相当する1998年の仙台近郊の地震(マグニチュード5.0)の震源付近の深度10kmには、低比抵抗異常が存在することが示された。このことは、高角逆断層が破壊するために必要な流体が震源域に実際に存在していることを示し、またその横方向の空間的な広がりが限られていることが示唆された(東京工業大学[課題番号: 2903])。

新潟-神戸歪集中帯の成因に関して重要な知見がいくつか得られた。

GEONETデータによる新潟県から福島県に至る地殻変動速度プロファイルから、2002-2004年と2008-2010年の2期間において太平洋側のひずみ速度は、海溝型地震の発生と余効すべりにより顕著に変化したが、ひずみ集中帯でのひずみ速度はほとんど変わっていないことが示された(図13)。この結果は、ひずみ集中帯での東西圧縮が太平洋プレートの沈み込みとは直接関係していないことを示唆しており、ひずみ集中帯の成因を考える上で非常に重要な知見である(国土地理院[課題番号: 6015])。

新潟県柏崎-長岡間の水準路線において、平成19年新潟県中越沖地震後初めてとなる水準測量が実施され、中越沖地震時に成長した小木ノ城背斜周辺では、顕著な地殻変動は見られなかったが、西山丘陵東部の複数の背斜軸周辺の水準点においてわずかな隆起が観測されており、活褶曲の成長に伴う地殻変動の可能性が指摘された(国土地理院[課題番号: 6015])。

糸魚川-静岡構造線北部周辺のGPS連続観測点のデータ(1997年~2010年)の統一的な再解析を実施し、従来の解析では不明瞭であった糸静線北部周辺の上下変動分布が明瞭に求められた(図14)。飛驒山脈は最大4-5mm/年程度で隆起し隆起域の東縁は飛驒山脈と松本盆地の境界付近であること、松本盆地は東下がり傾動し松本盆地東縁断層の西側では1-2mm/年程度で沈降すること、松本盆地東縁断層と小谷-中山断層に挟まれた大峰帯では顕著な上下変動は見られないこと、小谷-中山断層の東側の褶曲帯では1-2mm/年程度の隆起が見られること、中央隆起帯では顕著な上下変動は見られないことが明らかになった。こうした地殻変動の特徴は地形・地質構造と整合的であり、飛驒山脈や松本盆地、犀川沿いの褶曲帯などを形成したテクトニックな運動が現在も継続していることが示唆された。松本盆地東縁断層を境として上下変動に差異が見られること、断層周辺に集中した水平短縮が見られることなどを勘案すると、松本盆地東縁断層においては、西北西-東南東方向の短縮運動が深部クリープなどの非弾性的なプロセスで賄われているように見えるが、松本盆地の沈降は堆積層の圧密によ

り生じている可能性も考えられる（名古屋大学[課題番号：1705]）。

長野県西部地震の震源断層近傍においても、非弾性的なプロセスに関する知見が得られた。地震メカニズム解を用いた応力逆解析により、0.5km刻みのグリッドでの応力場の3次元的空间分布を求め、Yukutake et al. (2010) が示したように、長野県西部地域の広い範囲では逆断層型だが震源断層沿いにおいては横ずれ型の応力場が卓越すること、断層に沿った鉛直断面における応力場とP波速度偏差の分布の比較から、地震すべりが起こったと推定される領域では低速度で横ずれ型であるのに対して、その東側では高速度で逆断層型であることが推定された(図15)。これらのデータから、長野県西部地域の平均的な応力場はR(応力比)が0.5程度の逆断層型であるが、大すべり域では、低速度異常の原因となった水の効果による非弾性変形が進んで水平面内の応力が減少する応力緩和が起こっていたところに、深部すべりによる効果が加わって横ずれ型の応力場が形成されたこと、その東側の高速度領域では応力緩和が起こっておらず、水平面内最小圧縮応力の大きさが鉛直応力を下まわらなかったため逆断層型の応力場であることが推定された（京都大学防災研究所[課題番号：1808]）。

変形が非弾性的なプロセスかどうかの決め手は応力変化である。阿寺断層周辺で採取されたコア試料を用いた応力測定結果の再解析を行った結果得られた応力場は、改良された水圧破砕法により測定された応力場と量的に一致することが示された（Yabe et al., 2010）。このことは、コア試料を用いた応力測定法の信頼性は、改良された水圧破砕法と同程度であることが示唆された(東北大学[課題番号：1207])。

内陸地震の断層への応力集中過程に関する定量的なモデルの構築のために、濃尾地震震源域で総合集中観測が行われている。広域地震観測網と定常観測網のデータから、断層周辺の震源分布の全体的な特徴として、震源域北部から南部にかけて地震発生層の下限が徐々に深くなるとともに活動度が活発化すること、主要断層セグメントに対応して下に凸型の震源分布を示すことが明らかにされた。断層近傍に設置された稠密アレー観測を加えて断層近傍の精密トモグラフィー解析を行い、破壊開始点と考えられる震源域北西部（温見断層）の地震発生層深部には低速度体が存在し、地殻内流体の存在を示唆する結果が得られた(図16)。この低速度体の直上には顕著な高速度体が存在（ $X=-22\sim 0$ km）し、その中では地震活動度が低調であること、地表変位量が最大値を示す根尾谷断層の中央部でも地震活動度が相対的に低く、高速度体は深さ10km以深に存在することなどから、これらの高速度体が、アスペリティに相当する可能性が高いことが推定された(東京大学[課題番号：1417])。

定常観測網及び本計画の広域及び稠密地震観測網データを用いたレーザー関数解析により、震源域の南東部の深さ約40 km付近に沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻上面と海洋性モホ面に対応する低速度・高速度の不連続面が明瞭に示された(図17)。東海地域において、海洋性地殻は傾斜角約15度で北西方向に沈み込んでいるが、濃尾地域ではほぼ水平に沈み込んでいることが分かった。南東部では深さ約30 kmに島弧側モホ面が存在するが、震源域北西部に向かってモホ面が約25 kmと浅くなり、この浅くなったモホ面の浅部には、トモグラフィー解析で見つかった低速度体が存在することから、濃尾地震の発生には、沈み込むフィリピン海プレートと島弧側地殻・上部マントルの間の強い相互作用が働いている可能性が高いことが示唆された。また、メカニズム解の解析により、濃尾地震断層周辺では横ずれ型と逆断層型の解が支配的で、ほとんどの地震のP軸の方位は、広域応力場と調和的な西北西～東南東、東～西、西南西～東北東を向くこと、応力降下量は1.5-30 MPa であることが明

らかにされた(東京大学[課題番号:1417])。

前計画で実施した跡津川断層域における総合集中観測については、トモグラフィ解析により、10 km程度の分解能で不均質構造が推定され、跡津川断層帯直下の下部地殻は周囲(NKTZ内)に比べさらに3-6%ほど低速度になっていること、跡津川直下の下部地殻は2-3 vol%、その周囲のNKTZ下では0.8 vol%程度の流体があればこの速度低下を説明可能であること、NKTZの外、NKTZ内、跡津川断層下と、階層構造になっていることなどが示された(東京大学[課題番号:1417])。

制御震源構造探査から、跡津川断層直下では基盤層の深さが浅く、深さ15 km程度から厚さ5-10 kmの顕著なReflective Zoneが見られること、Reflective Zoneの位置は自然地震トモグラフィ解析によって得られたS波の低速度域と調和的であることが示された。また、比抵抗構造探査から、下部地殻から牛首断層、跡津川断層、高山-大原断層帯へと伸びる3つの低比抵抗域が得られている。構造探査の反射法解析によって得られた顕著なReflective Zoneが、低速度構造や低比抵抗構造であることから、下部地殻における流体の存在と大きく関係していることが明らかになった。しかし、流体分布がどの程度局在化しているかどうかは、各々の観測の解像度を含めて更なる検討が必要である(東京大学[課題番号:1417])。

GPSによる詳細な地殻変動分布からは、断層の応力蓄積過程を反映した地殻変動分布に加えて、跡津川断層両端に剪断ひずみの集中が見られること、跡津川断層の南側では西半分だけに剪断ひずみの集中が見られることが明らかにされた(Ohzono et al., 2011)。前者は、火山活動に関係して上部地殻内で非弾性変形が進行していると考えられる。後者は、跡津川断層の南側に位置する高山-大原断層帯の断層トレースが跡津川断層の西半分の南側に分布していることに対応している可能性がある。地殻変動の分布は各断層の地表トレースに対応したひずみ速度分布を示すことから、各断層には独立した応力蓄積の仕組みを持っていると考えられ、下部地殻内における各断層の深部延長で変形集中が生じているとするモデルと整合的である。また、この速度分布に基づいて各断層で区切られた弾性ブロックの相対運動速度として各断層の平均変位速度を推定したところ、跡津川断層で7-9 mm/年、牛首断層で2-3 mm/年、高山-大原断層帯で2-3 mm/年という値が得られた。これらの値は地質学的に推定された値と比較して系統的に2-3倍大きい。このことは、地殻で生じる変形のうち長期的に主要活断層で解消される分は1/2~1/3程度で、残りは他の小断層や地殻全体の非弾性的な変形によって賄われていることを示すと考えられる。こうした傾向はプレート境界域の特徴と異なる日本列島内陸部の変形の特徴と考えられるが、他地域のデータとも比較した検討が今後必要である(東京大学[課題番号:1417])。

これまでの観測で得られた知見を元に、内陸地震の応力集中メカニズム解明のため、断層の下部延長だけでなく断層の両端の不均質構造も考慮できる有限要素モデルが作成された。Katsumata et al. (2010)によれば、跡津川断層周辺では横ずれ型、断層から離れると逆断層型の応力場となるが、このような特徴は、逆断層型の応力場を与えることにより、断層周辺の横ずれ型応力場を含めて再現できることが分かった。更に、下部延長の粘性の小さな領域の幅を変えて計算を行ったが、応力場の推定結果の空間分解能が十分ではなく、下部延長の幅を拘束するには至っていない(東京大学[課題番号:1417])。

濃尾地震震源域の総合集中観測の一貫として、濃尾地震断層から約20km離れた中竜鉦山坑道内において、地震計アレイ観測により100 Hzを超えてもなお十分なS/N比をもった記録が得

られた(図18)。アレイ近傍で発生した2つの地震の記録から散乱体のイメージングを行い、濃尾断層と空間的位置が対応する散乱体が深さ10 km程度に見られること、アレイ直下深さ22 km、35 kmにも強い散乱が見られること、これらの比較的深部の散乱体は低周波数帯で顕著であるがすべての周波数でイメージされることなどから、かなり広い周波数帯域にわたって下部地殻が強い不均質をもつことが示された(九州大学[課題番号:2203])。

兵庫県南部地震で変位した野島断層の注水実験において、注水に伴い注水孔周辺で観測される自然電位変動について、注水時に逆センスに変動する電極位置はローカルな自然電位異常の位置に相当することが示された。このローカルな異常が過去にも存在したのか、あるいは2004年以降に出現したのか、注水時の変動とどう結びつくのか等について検討により、今後の自然電位変動のモデリングの改善につながることを期待される。野島断層近傍の地表岩盤に設置されたアクロス震源の長期連続運転により、P波、S波走時ともに2000年～2011年にかけて約0.4%速くなったこと、振幅については単調な増加・減少のトレンドは見いだせないこと、2000年～2010年にかけて偏向異方性には有意な変化は見られなかったこと、後続波部分における走時変化に関して2000年～2011年にかけて約0.1%速くなったことなどが推定された。後続波(散乱波)部分は直達波経路よりも数km広がった領域の速度変化を反映すると考えられるので、以上の結果は、野島断層の破碎帯近傍ではその周辺領域よりも速度変化(強度回復)が大きいことが示唆された(京都大学防災研究所[課題番号:1807])。

エ. スラブ内地震の発生機構

北海道を含めた東日本陸域下では、スラブ内大地震の余震域を除いた場合でも、面間地震活動が明瞭に存在することが示された(図19)。特に東北地方中央部～南部の前弧側、北海道東部前弧域に集中しており、それらの場所は、海山地形の発達する領域のプレート沈み込み方向延長上に位置していることから、面間地震の発生に岩石の脱水反応が関係していることが示唆された。東北地方・北海道両地域でのスラブ内における応力の中立面の位置が、誤差を考慮しても東北地方と北海道では中立面の深さが異なることが明らかとなった(Kita et al., 2010)。大地震の余震域は中立面を越えておらず、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が示唆された(東北大学[課題番号:1208])。

東北日本前弧域における海底地震観測データに陸域地震観測によるデータを統合し、海溝下の地震の震源決定および発震機構解の推定を行い、海溝下の正断層型のプレート内大地震である1933年三陸沖地震の震源域において、上面と下面の間にも地震が発生しており、プレート境界から約15 kmを境に浅部側に正断層型、深部側に逆断層型が分布することが分かった。この観測事実は、海溝近傍のプレート内に形成される二重浅発地震面が、アンベンディングモデルによって説明可能であることを示している(東北大学[課題番号:1208])。

北海道島弧会合部下で陸域定常観測網のデータのほかに合同観測データを加え、地震波速度構造を求め、スラブ直上に存在する地殻物質の東縁は日高衝上断層に対応していること、日高衝上断層を西縁とする日高変成岩帯下では、橄欖岩と考えられる地震波速度を持つ物質が通常の内陸地殻領域まで深部から西に向かって斜めに貫入していること、特異に沈み込む地殻物質の構造を詳しく見ると、高速度層と低速度層の互層になっていること、その互層の境界は陸上の地質構造線または活断層の空間分布と対応していることなどが明らかにされた(図20、東北大学[課題番号:1208])。

紀伊半島沖東南海・南海地震震源域境界周辺において行われた海域地震観測データを用いたトモグラフィー解析により、南海トラフ軸周辺から紀伊半島下までにわたる範囲で精度の高い震源を求め、潮岬沖南海トラフ軸から紀伊半島南西部を結ぶ直線を境界として、震源の主応力軸がおよそ30度回転していることが分かった。この境界を挟んで沈み込むフィリピン海プレートのスラブ内で発生している地震の深さが、境界より西側ではスラブ内の浅い場所で、境界より東側では深い場所で発生していることが明らかにされた（東京大学[課題番号：1418]）。

課題と展望

前年度に引き続き、平成22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・状態の違いについて、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た。今年度においては、断層の上盤の物性に関して、より高分解能の速度構造により、1978年の宮城県沖地震のアスペリティ領域では V_p/V_s が小さいが、その浅部では大きいことが明瞭になった。断層面のマクロな形状に関して、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ことが報告されていたが、日向灘においても、プレート境界の高まりがバリアとなり1968年の地震の破壊が南側には伝播しなかった可能性が示唆された。アスペリティ周辺の応力状態の空間変化に関して、宮城県沖において、1978年宮城県沖地震のアスペリティでは法線応力が相対的に高いため強度が大きくなっていたことが推定された。

このように、これまで発生した大地震のアスペリティについて、プレート境界の上盤側が蛇紋岩化していると推定される領域はアスペリティにはなっていないこと、プレート境界のマクロな形状がアスペリティの拡がりを限ること、アスペリティでは法線応力が相対的に高いため強度が大きくなっていたことが指摘された。

プレート境界における非地震性すべりの時空間変化について、日向灘から奄美大島において、相似地震群が定常的に繰り返しているかほとんど起こっていない領域では、これまで大地震の発生は知られていないことが指摘された。また、西南日本の短期的ゆっくり滑りに関して、深部低周波微動活動がそれに先行することが示された。また、微動発生域が微小な応力変化に対して非常に敏感に反応することが示唆された。これらの知見は、短期的ゆっくり滑りの発生機構を解明する上で非常に重要な知見であると考えられる。

ゆっくり滑りとアスペリティの相互作用に関して、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ったシナリオが提出されている。宮城県沖の海底水圧観測等により、海溝軸近くのプレート境界断層における数日間のゆっくりすべりで説明可能な変化が観測され、その断層の深部延長部で約1週間後にマグニチュード6.1の地震が発生した。これは、上記シナリオを支持する重要な知見であると考えられる。

内陸の不均質構造に関して、前計画で実施された跡津川断層断層域に加えて、岩手・宮城

内陸地震、濃尾地震震源域においても、系統的に深部の低速度域が見出された。跡津川断層断層域では、比抵抗構造探査の結果から、下部地殻から牛首断層、跡津川断層、高山-大原断層帯へと伸びる低比抵抗域が推定された。低速度域は低比抵抗域や顕著なReflective Zoneと調和的であり、また地殻変動の分布はこれら各断層に対応したひずみ速度分布を示すことから、各断層は独立した応力蓄積の仕組みを持っており、下部地殻内における各断層の深部延長で変形集中が生じているとするモデルと整合的である。また、岩手・宮城内陸地震の余効変動の解析から、下部地殻の変形特性も推定された。さらに、有限要素法により、メカニズム解の逆解析から推定された応力場を再現するモデルも提出された。

ひずみ集中帯の成因について、新潟県から福島県に至る地殻変動速度プロファイルから、太平洋側のひずみ速度は海溝型地震の発生と余効すべりにより顕著に変化した。ひずみ集中帯でのひずみ速度はほとんど変わっていないことが示された。この結果は、ひずみ集中帯での東西圧縮が太平洋プレートの沈み込みとは直接関係していないことを示唆しており、ひずみ集中帯のモデル化を行う上で、重要な拘束条件を与えるものである。

このように、ひずみ集中帯と内陸地震の発生の準備過程に関しては、下部地殻の不均質構造の変形による上部地殻の断層への応力集中というシナリオに調和的な結果が系統的に得られ、定量的なモデルの構築も開始されている。不均質構造の形状や物性について、さらに空間分解能を上げて推定するとともに、より定量的なモデルの構築を行うことが重要である。

北海道島弧会合部下で、橄欖岩と考えられる地震波速度を持つ物質が通常の内陸地殻領域まで深部から西に向かって斜めに貫入していることや特異に沈み込む地殻物質の構造を詳しく見ると、高速度層と低速度層の互層になっていること、その互層の境界は陸上の地質構造線または活断層の空間分布と対応していることなどが明らかにされた。これらは、当地域でこれまで言われていたモデルとは異なる結果であり島弧の衝突を考える上で重要な知見である。今後の進展を期待したい。

スラブ内地震については、東北日本・北海道両地域での面間地震の発生に岩石の脱水反応が関係している一方、スラブ内における応力の中立面の位置が、誤差を考慮しても東北地方と北海道では中立面の深さが異なることが明らかとなった。大地震の余震域は中立面を越えておらず、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が示唆された。三陸沖の海溝近傍のプレート内に形成される二重浅発地震面が、アンペンディングモデルによって説明可能であることも示された。スラブ内地震の発生ポテンシャル評価へ向けて今後の成果が期待される。

参考文献

- 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.
- Hirose, H., Y. Asano, K. Obara, T. Kimura, T. Matsuzawa, S. Tanaka, and T. Maeda, 2010, Slow Earthquakes Linked Along Dip in the Nankai Subduction Zone, *Science*, 330, 1502.
- 海上保安庁, 2010, 宮城沖・福島沖における海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 84, 98-102.
- 海上保安庁, 2011, 海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 85, 95-102.
- Katsumata, K., M. Kosuga, H. Katao et al., 2010, Focal mechanisms and stress field in the Atotsugawa fault

- area, central Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, 62, 367 – 380.
- Kimura, H., T. Takeda, K. Obara, and K. Kasahara, 2010, Seismic Evidence for Active Underplating Below the Megathrust Earthquake Zone in Japan, *Science*, 329, 210-212.
- Kimura, T., K. Obara, H. Kimura, and H. Hirose, 2011, Automated detection of slow slip events within the Nankai subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01311, doi:10.1029/2010GL045899.
- Kita, K., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima, T. Matsuzawa, 2010, Existence of interplane earthquakes and neutral stress boundary between the upper and lower planes of the double seismic zone beneath Tohoku and Hokkaido, northeastern Japan, *Tectonophysics*, 496, 68-82.
- 小菅正裕・2008年岩手・宮城内陸地震合同余震観測グループ, 2011, 2008年岩手・宮城内陸地震の低周波余震, *東北地域災害科学研究*, 47, (印刷中) .
- Matsuzawa, T., N. Uchida, T. Igarashi, T. Okada, & A. Hasegawa, Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan, *Earth Planet Space*, 56, 803-811, 2004.
- Okada, T., N. Umino and A. Hasegawa, 2010, Deep structure of the Ou mountain range strain concentration zone and the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, NE Japan - Seismogenesis related with magma and crustal fluid, *Earth, Planets and Space*, 62, 347-352.
- Ohzono, M., T. Sagiya, K. Hirahara, M. Hashimoto, A. Takeuchi, Y. Hosono, Y. Wada, K. Omoue, F. Ohya, and R. Doke, Strain accumulation process around the Atotsugawa fault system in the Niigata-Kobe Tectonic Zone, central Japan, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04876.x, 2011.
- Sato, M., H. Saito, T. Ishikawa, Y. Matsumoto, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada, 2011, Restoration of interplate locking after the 2005 Off-Miyagi Prefecture earthquake, detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01312, doi:10.1029/2010GL045689.
- 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.*, 115, B00A27, doi:10.1029/2008JB006059.
- Yabe, Y., K. Yamamoto, N. Sato, and K. Omura, 2010, Comparison of stress state around the Atera fault, central Japan, estimated using boring core samples and by improved hydraulic fracture tests, *Earth Planets Space*, 62, 257-268.
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, 109, B07307, doi:10.1029/2003JB002683, 2004.
- 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.*, 115, B06305, doi:10.1029/2008JB006111.

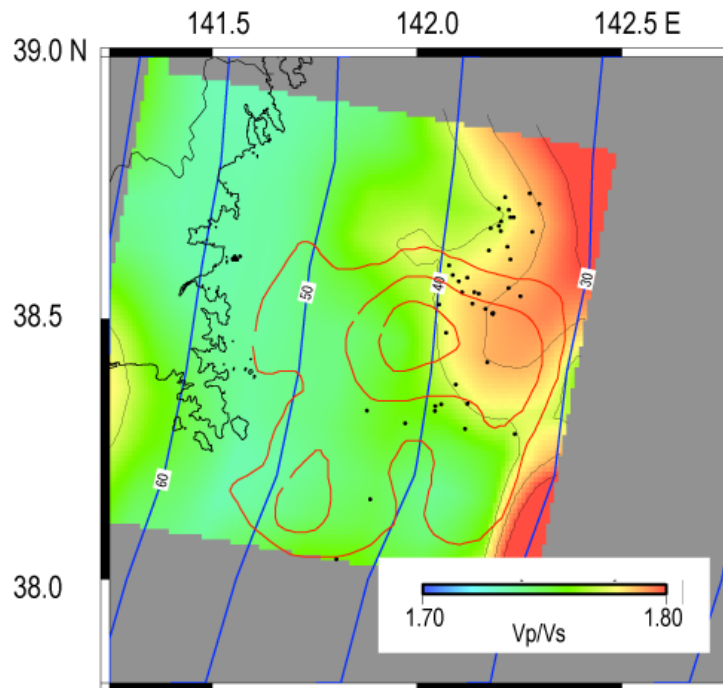


図1. a) 宮城県沖地震震源域周辺におけるマンテルウェッジ内の V_p/V_s 分布。プレート境界から5 km 以上浅部に震源を持つ地震の震央を黒点で示す。赤色コンターはYamanaka and Kikuchi (2004) による1978年宮城県沖地震のすべり量分布（東北大学[課題番号：1205]）。

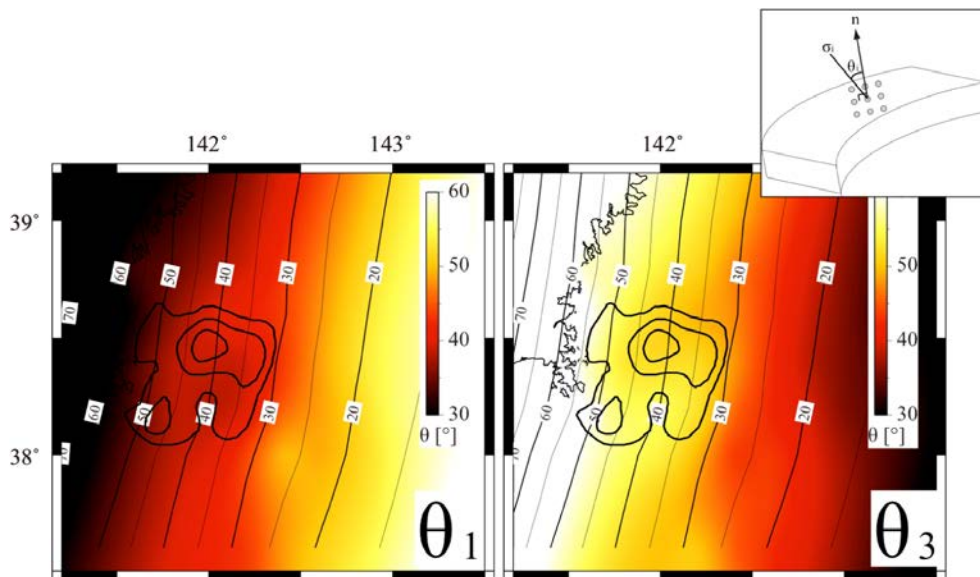


図2. 宮城県沖における最大主応力軸 (σ_1) と最小主応力軸 (σ_3) がプレート境界面となす角度 θ_1 および θ_3 の空間分布。Yamanaka and Kikuchi (2004) による1978年宮城県沖地震のすべり分布とプレート境界面の等深線をあわせて示す。右上に角度の測り方を示す（東北大学[課題番号：1205]）。

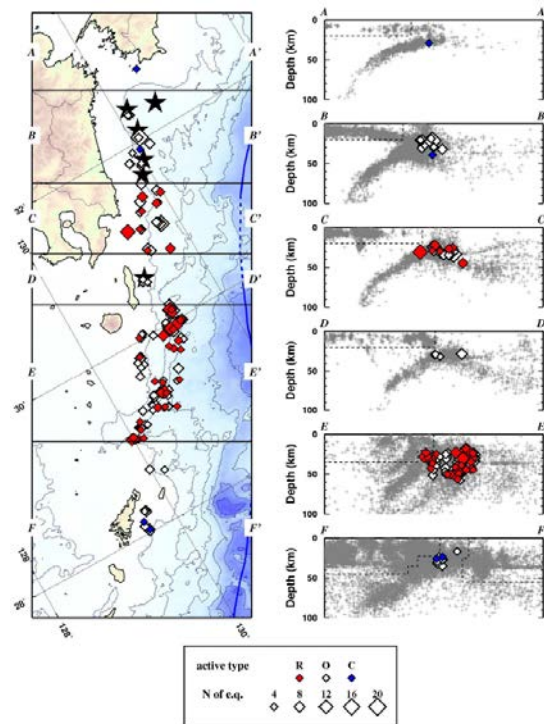


図3. 活動様式で色分けした相似地震群の震央分布（左図）と震央分布図で示されている6つの小領域ごとの震源断面分布（右図）。◇印は相似地震群の震源で、赤色は繰り返し型(R)、青色はクラスター型(C)、白色はその他(0)である。震央分布図の★印は1923年以降に発生したM7.0以上の地震の震央（気象庁データ）である。また、断面分布図の灰色は鹿児島大学で決定された微小地震の震源、点線枠はプレート境界外とした領域（鹿児島大学[課題番号：2301]）。

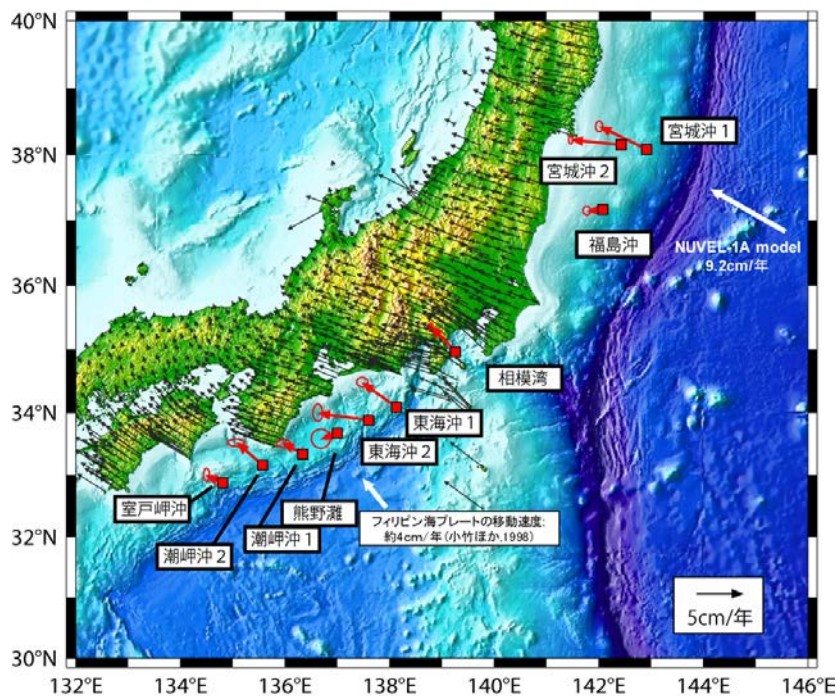


図4. ユーラシアプレート安定域に対する速度ベクトル（陸上の黒い矢印は、国土地理院の電子基準点の速度ベクトル）（海上保安庁[課題番号：8006]）。

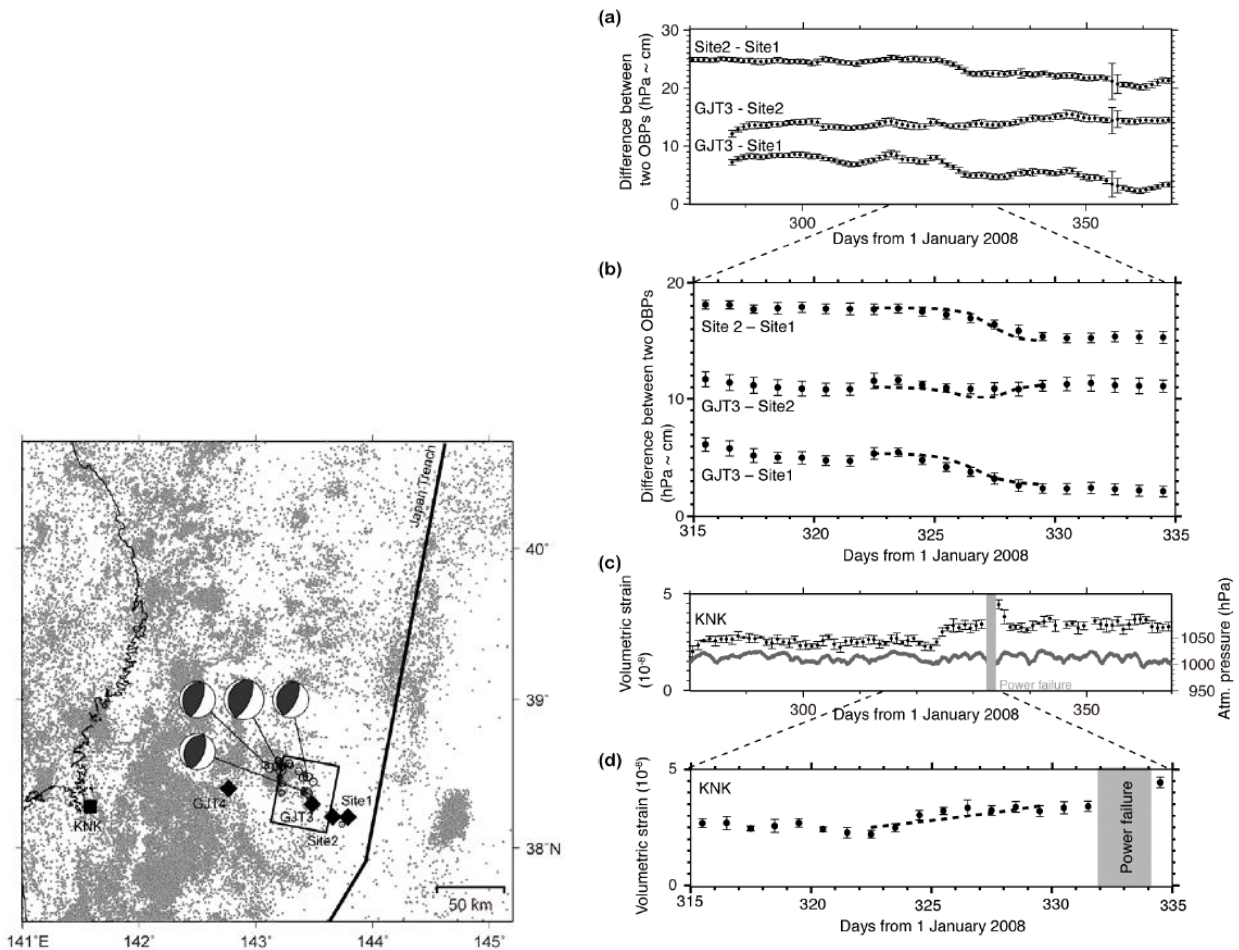


図5. (左) 海底地殻変動観測点 (菱形), 体積歪観測点 (四角) および推定された断層モデルの分布図。観測対象領域周辺の地震活動として気象庁一元化震源による震央を灰色の点で示す。海底および陸上で観測された地殻変動後1ヶ月以内に海底観測点周辺で発生した地震の震央を丸で示す。特にM5.5 を超える4つの地震については防災科学技術研究所F-netにより得られたモーメントテンソル解を併せて示す。2観測点間の相対水深変化と観測点周辺の地震活動。(右) 2観測点間の相対水深変化[(a)と(b)]と体積歪変化[(c)と(d)]。それぞれ1日間の平均と標準偏差を示す。圧力計および体積歪計については機器のドリフトに伴う見かけの変動を取り除いて示す。(c)については同一地点で観測された気圧変化(灰色の線)を併せて示す。(a)と(c)に示す期間について地殻変動が観測されている期間を拡大して(b)と(d)にそれぞれ示す。推定した断層モデルから予測される圧力差変化および体積歪変化を破線で示す(東北大学[課題番号:1206])。

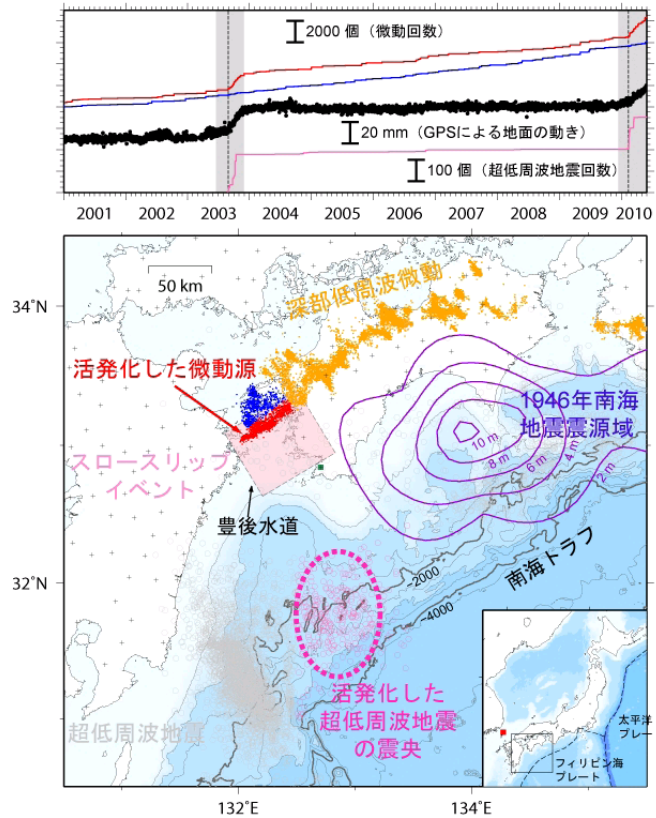


図6. (上)：2001年から2010年はじめまでのスロー地震の活動の推移。(下)：南海地震とスロー地震群の位置図。(上)黒の点はGEONET大月観測点(位置は下図に表示)の位置の東方向への動き、赤と青の線は、それぞれ下図の赤と青の点で示した位置の深部低周波微動の積算発生回数、ピンクの線は下図のピンク色の円で示した場所の浅部超低周波地震の積算発生回数。灰色の影をつけた期間が、長期的スロースリップイベントの期間を示す。(下)南海地震とスロー地震群の位置図。紫のコンターは、1946年南海地震の食い違い量分布。深部低周波微動の震央を橙・赤・青点で示す。豊後水道付近の微動(赤および青点)の活動度を上図に示した。ピンク色の四角の領域は豊後水道スロースリップイベントのすべり領域。浅部超低周波地震の発生領域を灰色およびピンク色の円で示す。そのうちピンク色の円で示した領域の活動度を上図に示した(防災科学技術研究所[課題番号：3011])。

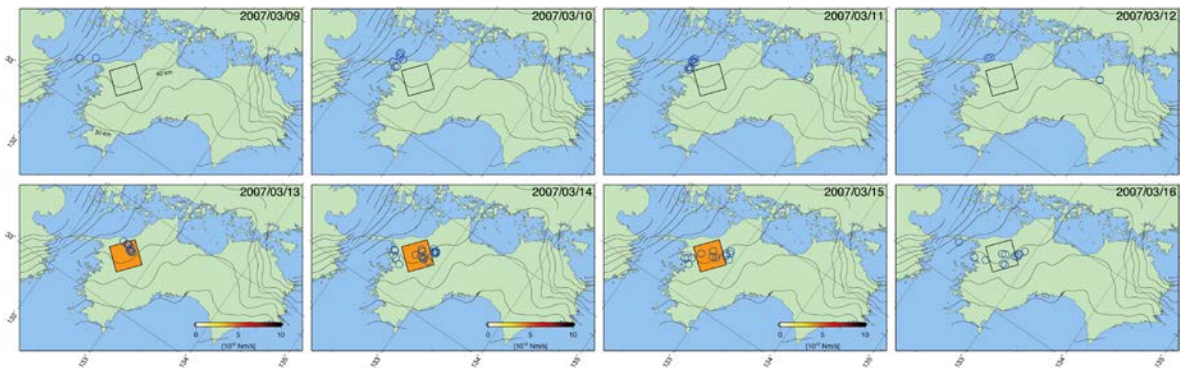


図7. 短期的スロースリップイベントの自動検出例。2007年3月のイベント時の1日毎の結果。色のついた四角が検出されたSSE断層の位置で、色はモーメント解放レートを示す。青丸は深部低周波微動の震央(防災科学技術研究所[課題番号：3011])。

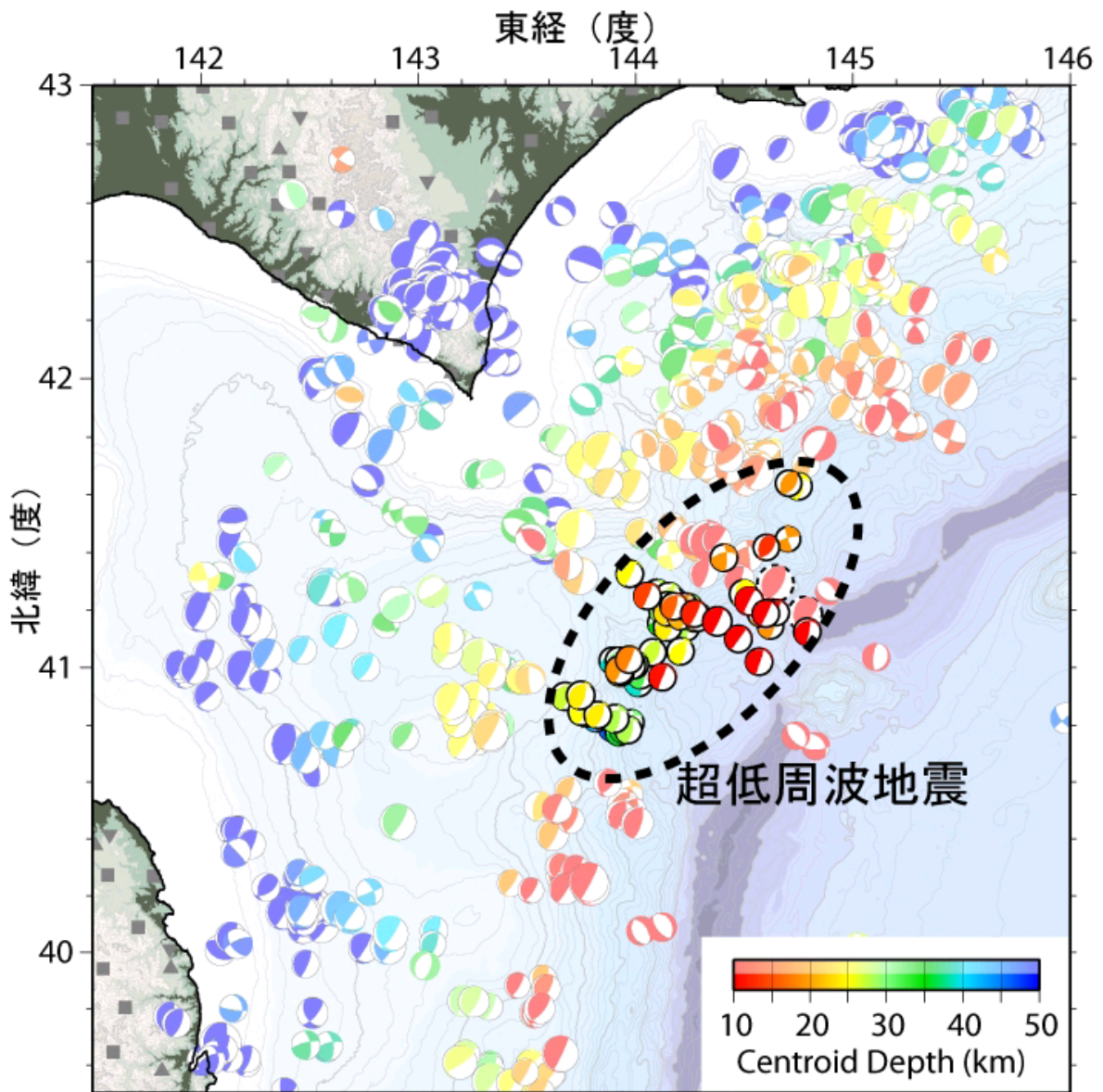


図8. 推定された発震機構解の分布。超低周波地震および通常の地震について、CMT解析によって推定された発震機構解（最適なダブルカップル解）をセントロイド位置に示す。カラースケールはセントロイド深さを表し、超低周波地震は濃い色で通常の地震は淡い色でそれぞれ示す（防災科学技術研究所[課題番号：3011]）。

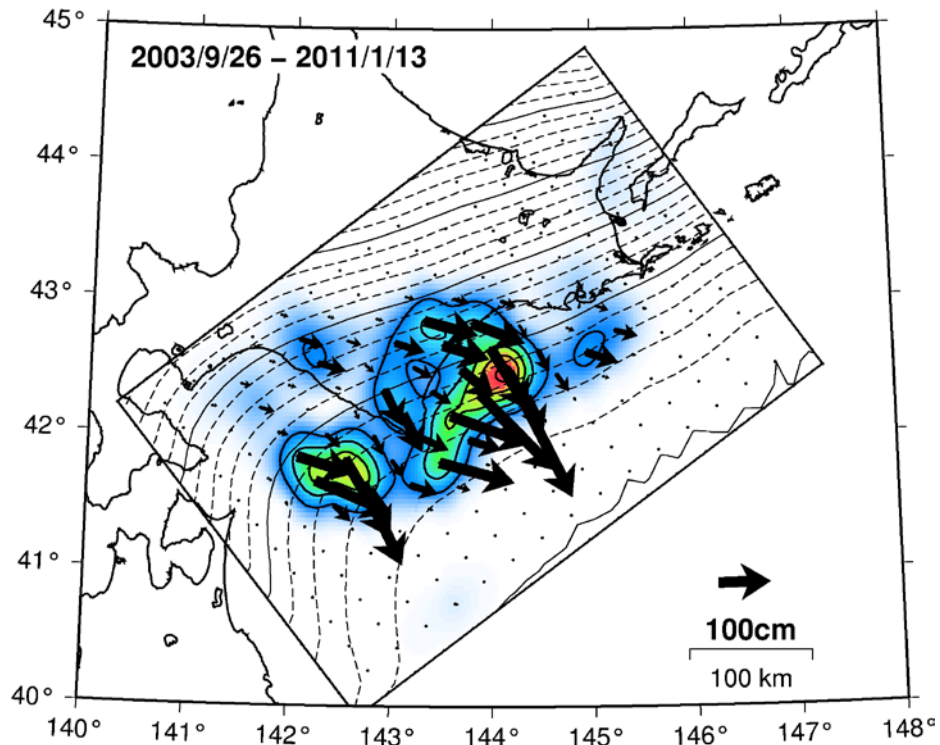


図9. 2003年十勝沖地震以後の余効すべり分布(国土地理院[課題番号：3012])。

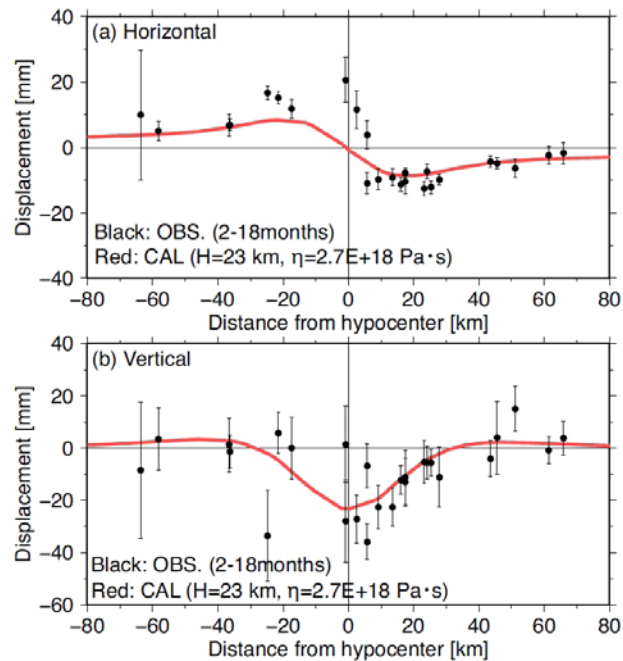


図10. 岩手・宮城内陸地震の震源域とその周辺におけるN107° E 方向のプロファイル上にプロットされた水平・上下変動成分。期間は本震後60日から547日まで。水平変動成分はN107° E 方向の成分を示している。赤の曲線は、推定された最表層の弾性層の厚さとその下層の粘性係数によって計算された値を示す(東北大学[課題番号：1207])。

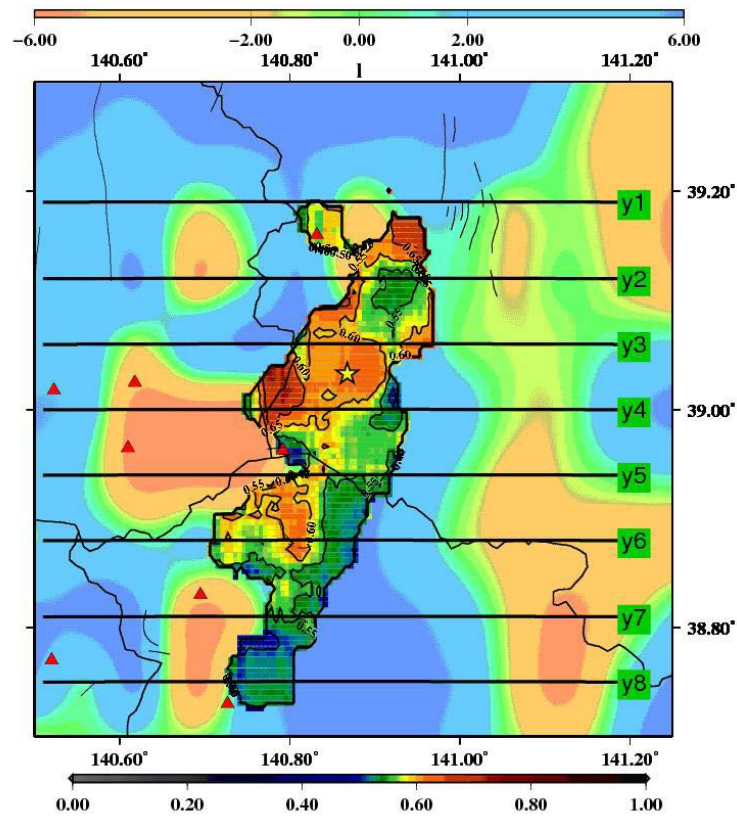


図11. 岩手・宮城内陸地震の震源域とその周辺における深さ10 km におけるS 波速度偏差と λ ($= \sigma_p / \sigma_n$) の分布。S 波速度偏差 (Okada et al., 2010) をカラースケールで示す。色のついた四角は、 λ の平均値を求めたグリッドを表わし、カラースケールで λ の平均値を示す。ここでは S ($= \sigma_3 / (\sigma_1 - \sigma_3)$) を1.0 と仮定した場合を示す。本震震央と火山の位置を、黄色の星と赤色の三角で示す。黒色の太実線・細実線はそれぞれ県境と活断層を示す(東北大学[課題番号: 1207])。

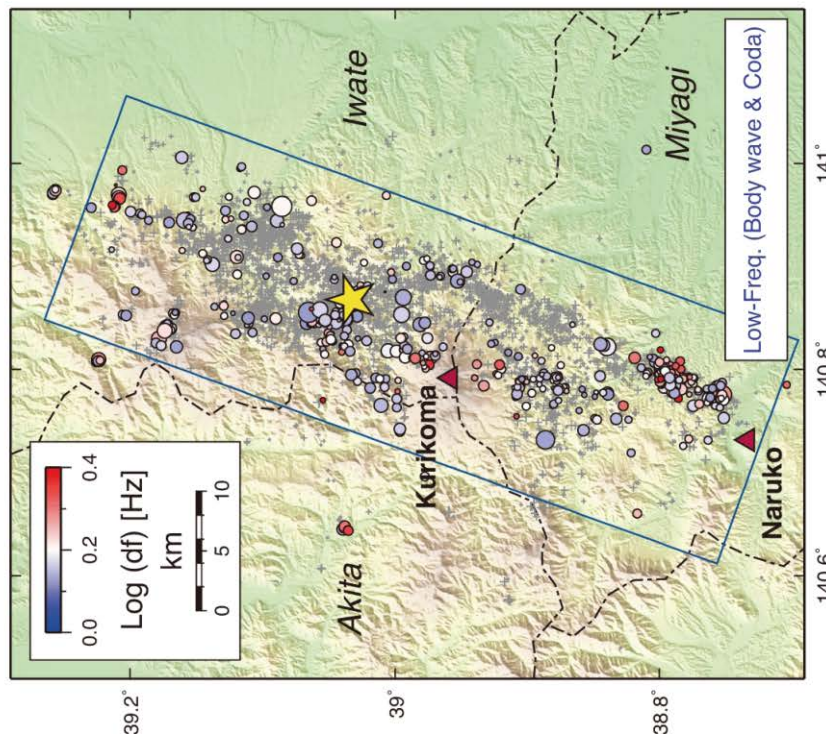
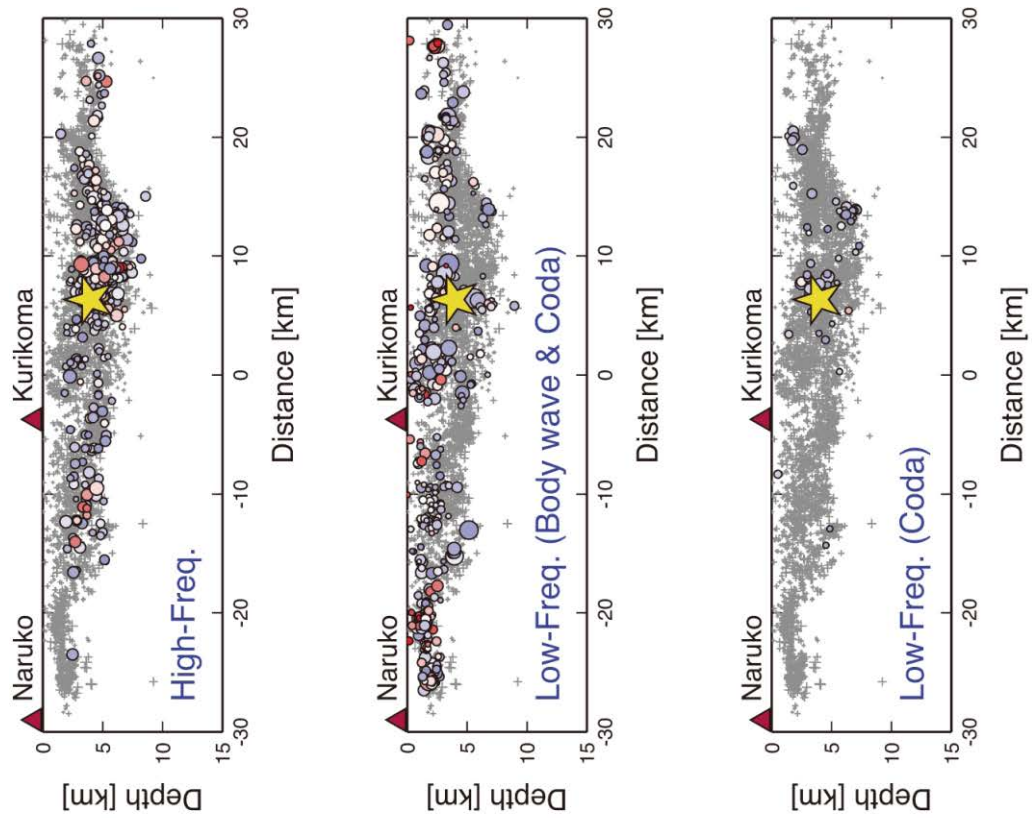
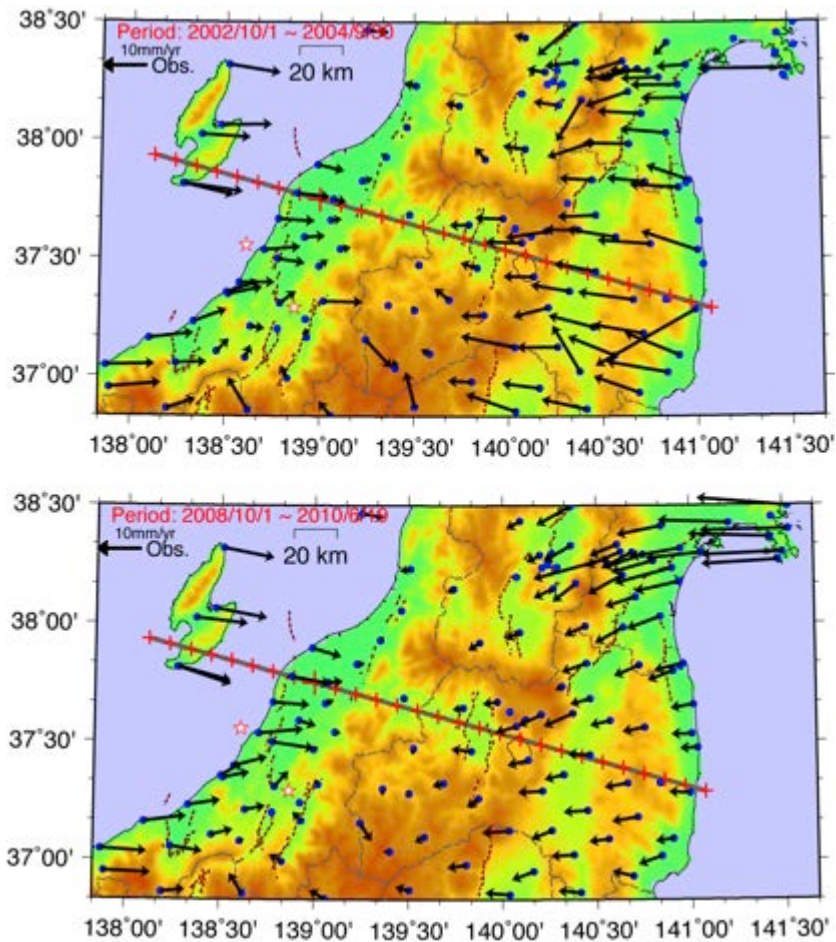


図12. 岩手・宮城内陸地震の余震分布。平面図において丸印は低周波地震の震央を表す。断面図は平面図の青枠内の地震を東南東から投影したもので、上から順に、高周波の地震、実体波・コーダ波ともに低周波の地震、及びコーダ波部分が低周波の地震の深さ分布を示す。灰色の十字は通常地震、星印は本震の震源を表す。丸の色は周波数偏差を示す（弘前大学[課題番号：1101]）。



速度プロファイル比較

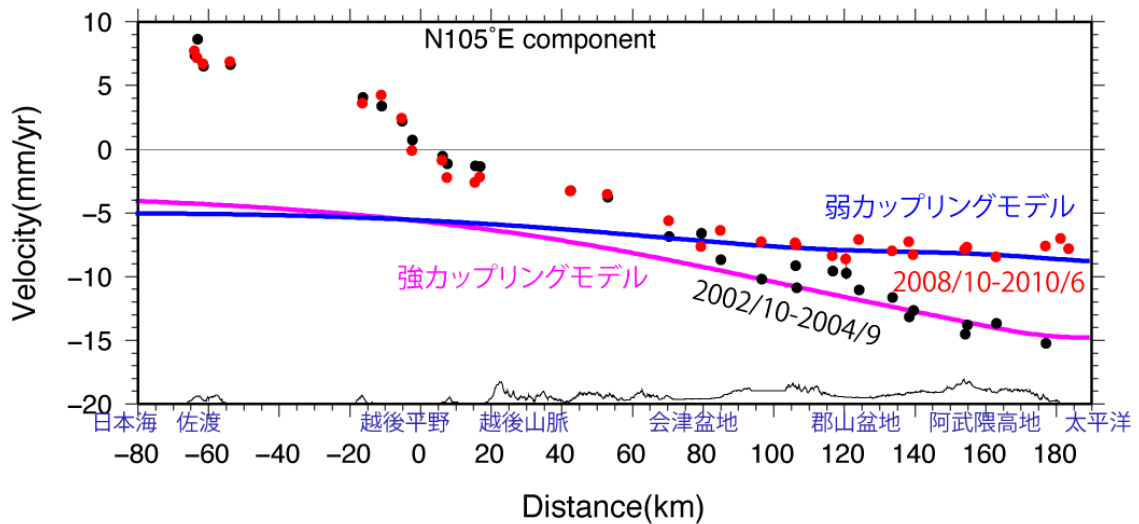


図13. GEONETデータによる新潟県から福島県に至る地殻変動速度プロファイル(国土地理院[課題番号: 6015])。

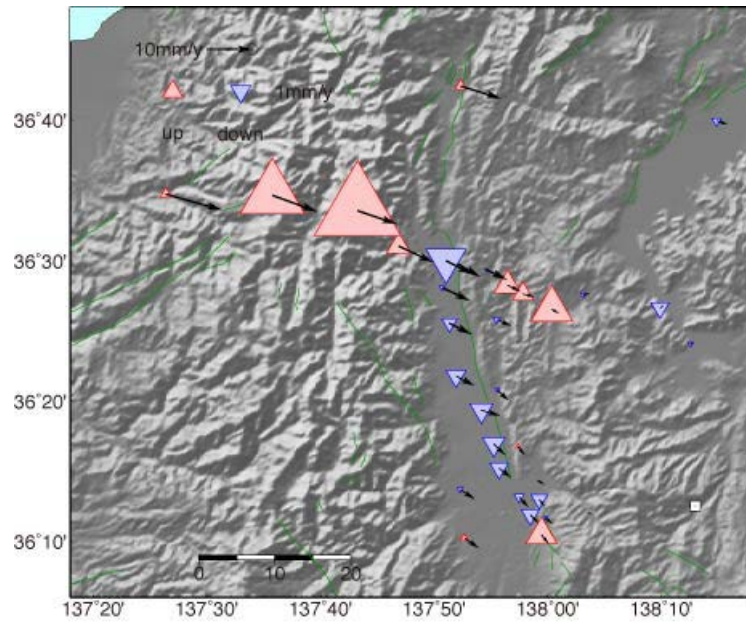


図14. 糸静線北部周辺の地殻変動速度分布。赤三角は隆起を，青三角は沈降を表す（名古屋大学[課題番号：1705]）。

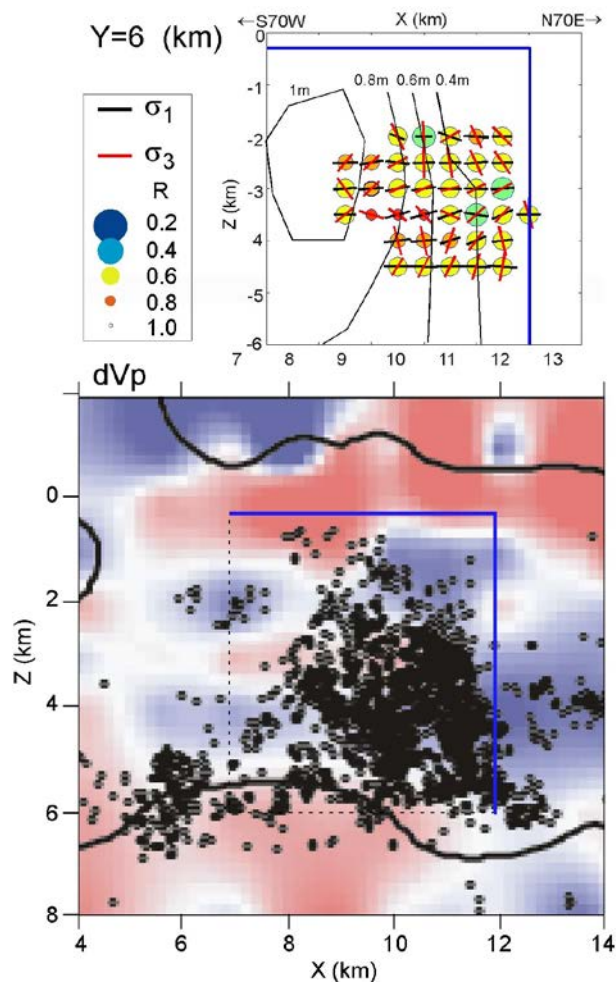


図15. 1984年長野県西部地震の断層に沿った鉛直断面における応力場と速度構造。上：応力場に重ねたコンターはYoshida & Koketsu (1990) によるすべり量分布。下：P波速度偏差。赤が低速度，

青が高速度，黒線は精度のある範囲（京都大学防災研究所[課題番号：1808]）。

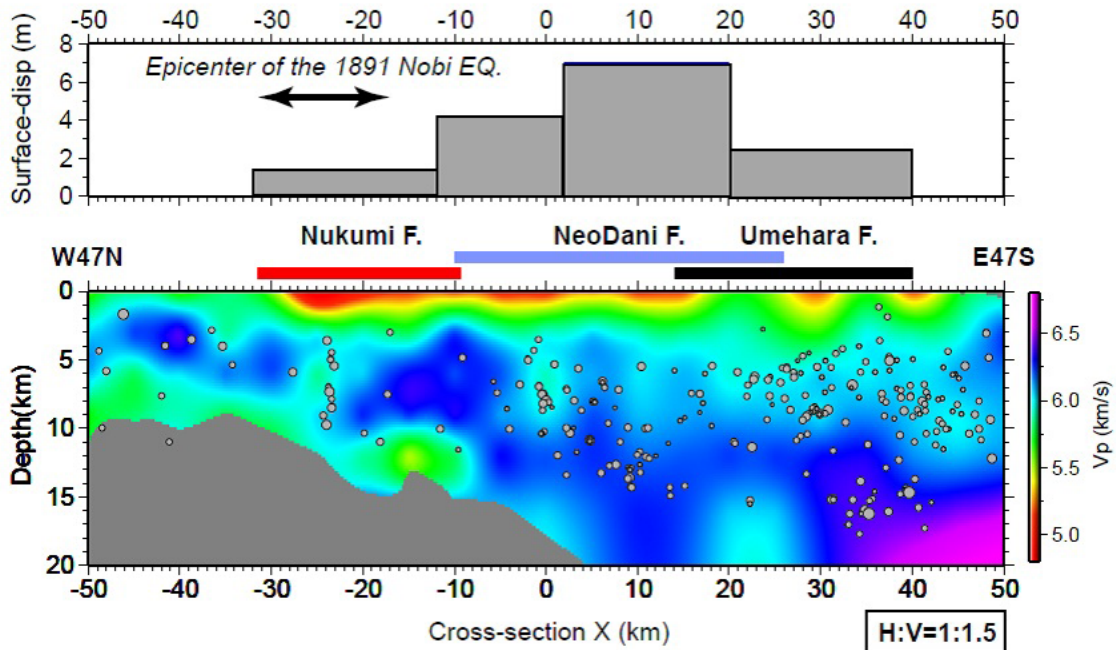


図16. 濃尾地震震源断層沿いのP波速度構造の深さ断面図。濃尾地震に関連した主要活断層の位置と地表変位量を参考のために上図に示す(東京大学[課題番号：1417])。

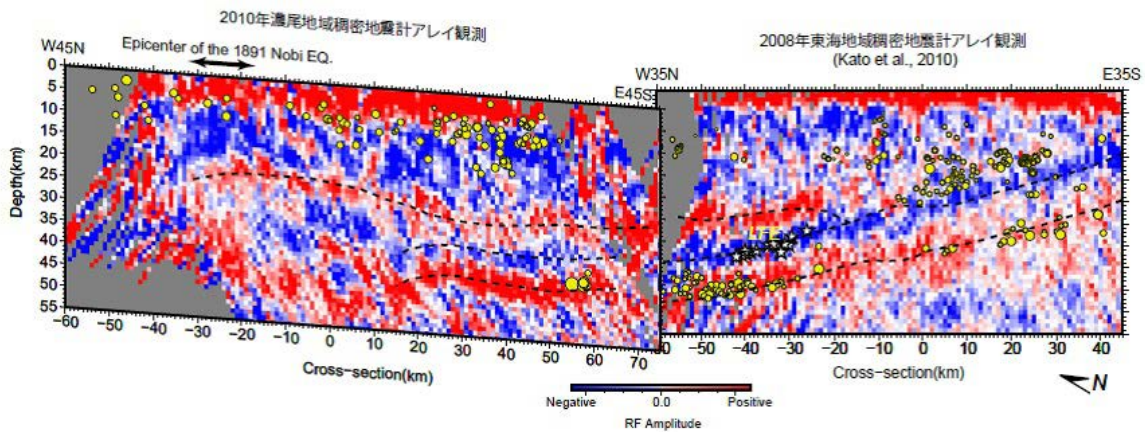


図17. 濃尾地域と東海地域で得られたレイラー関数の深さ断面図。黄色の○印は微小地震の震源，白い☆印は深部低周波地震（LFE）の震源を表す(東京大学[課題番号：1417])。

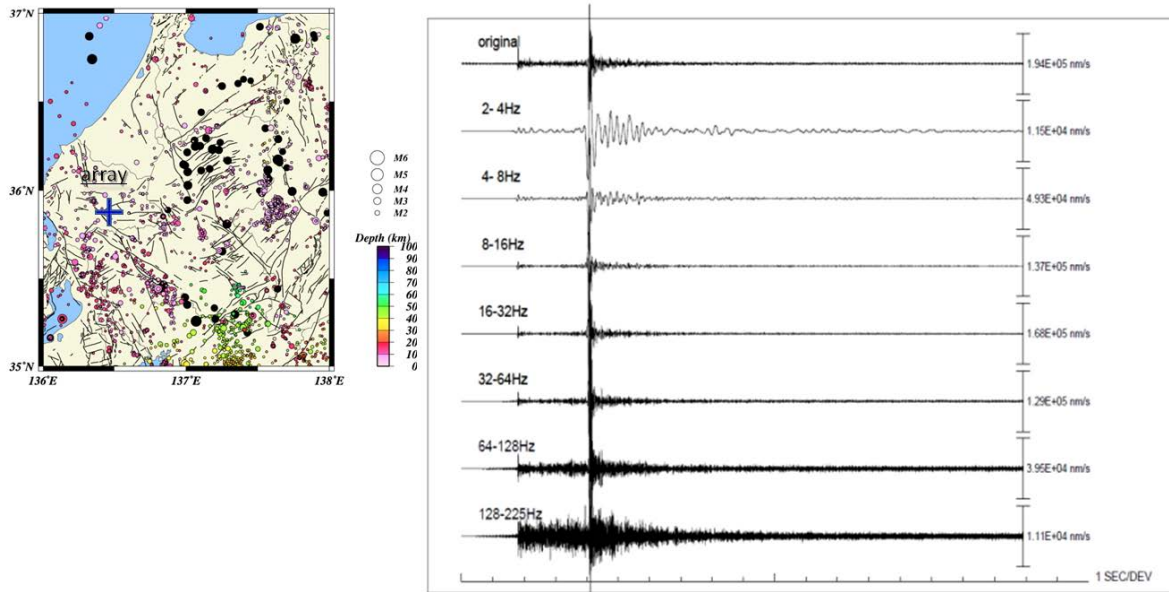


図18. 濃尾地震断層から約20 km離れた中竜鉦山坑道内における地震計アレイ観測による波形。100 Hzを超えてもなお十分なS/Nをもった記録が得られた (九州大学[課題番号: 2203])。

2 (2) (2-2) 火山噴火準備過程

「火山噴火準備過程」計画推進部会長 井口正人
(京都大学防災研究所)

火山噴火予知研究の目標は、噴火の時期、場所、規模、様式及び推移を予測することであるが、活動的で数多くの噴火履歴があり、多項目観測や各種調査が実施されている幾つかの火山であっても、観測と経験則により異常の原因が推定できる段階にとどまっている。これを、「現象を支配する物理法則が明らかにし、観測結果を当てはめて、将来の予測ができる段階」に引き上げるためには、マグマ供給系を含む地下の構造や状態の時間変化の把握によりマグマ上昇・蓄積過程と、地質学的調査研究に基づく噴火履歴の解明とマグマの発達過程を解明し、モデル化する必要がある。火山噴火準備過程研究計画では、「ア. マグマ上昇・蓄積過程」と「イ. 噴火履歴とマグマの発達過程」の研究を2つの柱とし、両者をあわせて考察することにより噴火現象をモデル化し、それを導入した噴火シナリオの作成に資することを目的としている。

ア. マグマ上昇・蓄積過程

日本の多くの火山では火山性地殻変動を捕捉できる段階にある。例えば、気象庁[課題番号:7019]は陸域観測技術衛星だいちのSARデータを干渉画像解析し、十勝岳、有珠山など全国の13火山について火山性地殻変動をとらえた。

2011年1月26日に準プリニー式噴火が発生した霧島の新燃岳については、噴火前の2009年12月からの約1年間に新燃岳の北東数kmにある球状のマグマ溜まりが約1500万 m^3 の膨張し、1月26日以降の約1週間の噴火により約1200万 m^3 の体積減少した(図1)と推定している。噴火前に蓄積されたマグマが一連の噴火イベントでおおよそ解消された形である(国土地理院[課題番号:6016])。

静穏期にある火山においても特徴的な膨張・収縮が繰り返されており、国土地理院[課題番号:6016]はGPSデータの解析により伊豆大島が膨張・収縮を繰り返しながら、2004年から2010年までに約1600万 m^3 の体積膨張したことを示した。また、東北大学[課題番号:1209]は、岩手山で地盤変動イベント(2009年10月～2010年4月)が発生し、その変動源は1998年活動初期の震源域の直下に位置することから1998年と同様に浅部へのマグマの供給が繰り返されていると推定している(図2)。

桜島においては地盤変動の様式がより複雑となっている。2006年6月に昭和火口における噴火活動が再開した桜島では2010年には1033回の爆発が発生し、670万トンの火山灰が放出されるなど活発化の傾向にあり、地盤変動様式の複雑は、噴火活動が長期にわたり同時進行していることによる。2009年10月から2010年5月まで地盤の隆起・膨張から推定されるマグマ供給量の増加(20万 m^3 /月→50万 m^3 /月)とともに爆発活動が活発化したが、2010年6月から10月までは小規模な爆発は発生したが、地盤は急激に沈降・収縮し、マグマ供給はほぼ停止した(図3、京都大学[課題番号:1809])。膨張・収縮が繰り返されたことは伊豆大島と類似しており、現在の桜島はさらに激しい噴火活動の準備期であることが示唆される。また、準備期といっても新燃岳のように顕著な噴火なしにマグマを蓄積し、それを一連の噴火により

一挙に開放したものとも異なる。注目すべきは始良カルデラ内の深さ10kmの膨張圧力源に加え、桜島島内北岳の北東から北山麓に圧力源が推定されたことである。始良カルデラ内の圧力源は膨張を続けているが、北岳の圧力源が膨張・収縮を繰り返している。

一連の活動の推移の中で本格噴火に先行すると考えられる先行物質の変化が捉えられた。2009年10月から新鮮なマグマ物質が放出され、活動期においてはSiO₂の組成比が減少し、活動低下期においては増加することが明らかとなり、噴火活動度が上昇するとマグマ組成（火山ガラス）が玄武岩質に近づく（図4）（北海道大学[課題番号:1004]）。また、一連の活動期をとおして、火山灰付着成分の水溶性成分のC1/Sモル比は増加を続けている。特に、次の新たな膨張が検出され始めた2011年12月には、0.5以下で増加していたC1/Sモル比が1以上に急増した。南岳起源の火山灰よりも高くなっており、火山ガスの高温化とより揮発性成分に富むマグマが上昇していることが示唆される（図5）。このような塩素の増加は、FTIR分光放射計を用いた噴煙中の火山ガスHCl/SO₂比の測定によっても確認されている。

このような先行噴出物解析の重要性は山頂北側斜面の噴気帯が拡大し、湯釜東壁において2011年秋から噴気活動が顕在化している草津白根山でも指摘できる。東京工業大学[課題番号:1602]は、この異常領域で噴気ガスを繰り返し観測した結果、北側噴気帯から放出されるガスとは組成が大きく異なり、特に水素の割合が高く、マグマから直達していると考えている。

イ. 噴火履歴とマグマの発達過程

本研究の目的は、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である。

重点火山のうち桜島について、北海道大学[課題番号:1004]は火山噴火履歴を高精度に復元するためトレンチ調査を行い、鍵層として1987年噴出物が認識した。また、ボーリング調査を行い、南岳成長期（～3000年前頃）のテフラ層序を明らかにしつつある。また、桜島の大正噴火以降の噴出物を分析し、南岳山頂活動期以降についても大正噴火と同様に玄武岩質マグマの関与が認められ、それが大きいと噴火規模が大きくなることを示すことにより玄武岩質マグマの動向を把握することが重要であることを指摘した。伊豆大島について20世紀の噴出物について組成分析を行い、詳細な試料採取を行い、全岩化学組成の測定・鉍物化学組成の測定を行った。その結果、1986年のA火口を除く噴出物は、SiO₂量が53 wt.%程度のマグマと57 wt.%程度のマグマとの混合によって形成されたこと、また1986年や1951年の噴出物に含まれる斜長石斑晶は、噴出物よりもCaO量やMgO量が高いマグマから晶出したことなどが明らかになった。

重点火山以外では、雌阿寒岳、岩木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。雌阿寒岳については、過去13000年間の噴火履歴を引き続き検討することにより、マグマ噴火が頻繁に発生する活動期と静穏期が4回繰り返され、現在は静穏期にあることが分かった。また、ポンマチネシリ火山形成期の初期に活動した単成火山である西山と阿寒富士火山形成期のマグマ供給系について考察がなされた（公募研究[課題番号:2904]）。また、岩木山においては前年度に推定した形成年代を詳細な調査により補強するとともに、各溶岩ドー

ム及び付随する噴出物の規模を求めて噴出量積算図を作成した(公募研究[課題番号:2905])。

課題と展望

これまでの研究により多くの火山において火山性と考えられる地盤変動が検出された。それをいくつかに分類できる。1) 1つは膨張と収縮を繰り返している火山であり、噴火活動の静穏期にある火山が多い。静穏期においてもマグマの貫入が繰り返されていることが指摘できる。2) 1回のマグマ貫入によって蓄積されたマグマが一回(一連の)の噴火で消費される場合もある。2011年新燃岳の噴火については約1年かけて貫入・蓄積されたマグマが一連の噴火でほぼ放出された。少なくとも最近10年間の地盤変動をみる限り膨張・収縮が繰り返されることなく、1回のマグマ貫入により噴火に至ったように見える。桜島の個々の爆発についてはこのパターンが多い。3) マグマ貫入と並行して噴火し、かつマグマを蓄積し続ける場合で、2006年以降の桜島の昭和火口噴火活動がこのパターンである。前計画(第7次火山噴火予知計画)では、全国の大学は協力して総合集中観測と火山体構造探査を、毎年対象とする火山を変えて実施してきたが、このようなマグマ貫入様式の多様性を把握するためには多数の火山での比較研究を行うことが重要である。

1)の場合、膨張と同期して火山性地震活動が活発化することが多い。伊豆大島ではよく知られた事実となっている。問題は、2)と3)の場合であり、顕著な地震活動の変化がみられず、火山性地震発生による応力の時空間分布を把握することが困難である。いずれも主噴火の前に先行する噴火活動があり、火道が既に開放している、あるいは完全に閉塞した状態ではないと考えられる。このような火山に対処するためには、1つは地盤変動観測の高感度、高精度化またそれに加えて広域化が必要である。桜島昭和火口の1回の爆発に伴う体積変化量は 10^3m^3 のオーダーであるが、この程度でも伸縮計により捉えられているし、近接観測であれば 10^2m^3 のオーダーを捉えることもできる。2つ目は地下の構造変化である。準静的に地下の圧力が変化していくにしてもマグマが貫入してきていけば地下の構造は変化するはずであり、構造の時間変化を抑えていくことが重要である。また、東北大学[課題番号:1209]の高分解能トモグラフィ解析によって桜島直下にマントルウェッジから地殻を貫いて地表へ続く低速域の存在が示されているが(図6)、その時間変化も追跡していく必要がある。3つ目は火道が既に開放している、あるいは完全に閉じた状態でなければ、先行物質としてのマグマ物質とその量と組成の変化を捉える好機である。従来物質科学では、噴火イベントごとの限られた資料の分析に力がそそがれてきたが、高頻度サンプリングが可能な状況では、多量の資料の物質科学的解析の迅速化、あるいは準リアルタイム化に向けた開発、体制づくりが重要である。4つ目は現在の桜島や諏訪之瀬島に特に言えることである。現在の事業計画の部会の構成は火山噴火準備過程と火山噴火過程に分けられている。過去に発生した噴火したいくつかの火山では火山噴火に前駆する過程と噴火中の過程を分けることが可能であるが、上記の2つをはっきり分けることが難しい。従来は、初期噴火発生後の噴火活動推移の複雑さが強調されてきたが、火山活動は噴火に先行する時期でも複雑なふるまいをする。両方を統合した研究体制が望ましいと考える。

参考文献

Aizawa, K., A. Yokoo, W. Kanda, Y. Ogawa, Y. and M. Iguchi, 2010, Magnetotelluric Pulses

Generated by Volcanic Lightning at Sakurajima Volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, VOL. 37, L17301, doi:10.1029/2010GL044208.

Aizawa, K., W. Kanda, Y. Ogawa, M. Iguchi, A. Yokoo, H. Yakiwara and T. Sugano, 2011, Temporal changes in electrical resistivity at Sakurajima volcano from continuous magnetotelluric observations, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 199, 165-175.

相澤広記・神田径・小川康雄・井口正人・横尾亮彦・八木原寛・菅野貴之, 2010, MT連続観測による桜島地下浅部の比抵抗変化, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 73-80.

Asamori, K., K. Umeda, Y. Ogawa and T. Oikawa, 2010, Electrical resistivity structure and helium isotopes around Naruko Volcano, northeastern Japan and its implication for the distribution of crustal magma, *Int. J. Geophys.*, 738139, doi:10.1155/2010/738139.

伴雅雄, 2011, 活火山のマグマ供給系進化に関する岩石学的研究の進展—噴出物の高分解時間変化からの知見—. *地質学雑誌* (印刷中).

伴雅雄, 2010, 岩石組織・化学組成から見た、東北日本・蔵王山・Z-To-5 テフラ (約5,800年前) のマグマ溜り, *日本鉱物科学会2010年度秋季大会講演要旨集*. 21.

Ban M. and S. Hirotsu, 2010, Origin of Quaternary low-K basalts in rear arc side of NE Japan. *Western Pacific Geophysics Meeting 2010, Abstract*. T53A-054.

長谷川健・中川光弘・伊藤順一・山元孝広, 2011, 北海道東部, 釧路地域に分布する第四系の年代: 高分解能テフラ層序に基づく対比と編年, *地質学雑誌* (印刷中).

廣谷志穂・伴雅雄・石塚治, 2010, 東北日本, 白鷹火山の爆発的噴火期の珪長質マグマの生成機構—副成分鉱物の熔融の証拠—, *日本地質学会第117年学術大会講演要旨集*, 126.

井口正人・横尾亮彦・為栗 健, 2010, 桜島昭和火口噴火の規模について, *京都大学防災研究所年報*, 第53号B, 233-240.

井口正人, 2010, 桜島火山の噴火活動—2009年2月～2010年5月—, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 1-8.

井口正人・植木貞人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鉄朗・市川信夫, 2010, 桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 47-53.

井口正人・平林順一, 2010, 桜島・黒神における温泉ガス濃度, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 81-85.

Kanda, W., M. Utsugi, Y. Tanaka, T. Hashimoto, I. Fujii, T. Hasenaka and N. Shigeno, 2010, A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 189, 158-171.

気象研究所, 2010, だいち/PALSARを使った桜島噴火前後における地殻変動および火砕流の検出, *火山噴火予知連絡会会報*第100号, 95-98.

気象研究所, 2010, 2006年2月1日07時44分霧島山新燃岳で発生した火山性微動に対応した傾斜変動, *火山噴火予知連絡会会報*第100号, 122-125.

気象研究所, 2010, だいち/PALSARの干渉SARによる十勝岳62-2火口の地殻変動, *火山噴火予知連絡会会報*第101号, 25-27.

気象研究所, 2010, だいち/PALSARの干渉SARでみた吾妻山の地殻変動, *火山噴火予知連絡会会報*第

101号, 33-35.

Kiyosugi, K., C. Connor, D. Zhao, L. Connor, and K. Tanaka, 2010, Relationships between volcano distribution, crustal structure, and P-wave tomography: An example from the Abu monogenetic volcano group, SW Japan, *Bull. Volcanol.* 72, 331-340.

国土地理院資料, 2011, 伊豆大島の体積変化, 第181回噴火予知連絡会 (印刷中) .

Matsumoto, A. and M. Nakagawa, 2010, Formation and evolution of silicic magma system: Petrology of the volcanic rocks of Usu volcano, Hokkaido, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 196, 185-207.

森 俊哉, 2010, 遠隔FT-IR測定による昭和火口と南岳火口の火山ガスHCl/SO₂比, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 87-92.

Nishimura, T. and S. Ueki, 2011, Seismicity and magma supply rate of the 1998 failed eruption at Iwate volcano, Japan, *Bull. Volcanol.*, 73, 133-142.

野上健治・井口正人・味喜大介・為栗 健・山本圭吾・園田忠臣, 2010, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 97-100.

Ohba, T., T. Sawa, N. Taira, T. F. Yang, H. F. Lee, T. F. Lan, M. Ohwada, N. Morikawa and K. Kazahaya, 2010, Magmatic fluids at Tatun volcanic group, Taiwan, *Appl. Geochem.*, 25, 513-523.

大泉涼・伴雅雄, 2010, 東北日本、月山火山新期噴出物の岩石学的特徴の変遷. 日本火山学会2009年度秋季大会講演予稿集. 106.

大久保修平・菅野貴之・風間卓仁・山本圭吾・井口正人・田中愛幸・孫文科・高山鐵朗・坂守・松本滋夫, 2010, 桜島火山における絶対重力観測, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 65-71.

Okubo, A. and W. Kanda, 2010, Numerical simulation of piezomagnetic changes associated with hydrothermal pressurization, *Gephys. J. Int.*, 181, 1343-1361, 2010.

太田雄策・三浦 哲・松村信介・森 俊行, 2010, 低価格2周波GPS受信機とデータロガーを用いたGPS観測システムの構築, 測地学会誌, 56, 101-106.

太田雄策・植木貞人井口正人, 2010, 桜島火山山腹におけるGPS連続観測点の増設(2009年度), 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 55-58.

小沢 慎三郎, 2011, 伊豆大島の体積変化, 国土地理院調査研究年報 (印刷中) .

佐藤鋭一・和田恵治, 2010, 大雪火山噴出物の露頭紹介1-大函の御鉢平カルデラ噴出物-. 北海道教育大学大雪山自然教育研究施設研究報告, 44, 1-5.

嶋野岳人・横尾亮彦・井口正人・味喜大介, 2010, 粒径に着目した桜島昭和火口噴出物による活動評価指標の検討, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 93-96.

高木朗充・福井敬一・山里平・藤原健治・加治屋秋実, 2010, 噴火準備期における伊豆大島の相対精密重力測定, 気象研究所研究報告, 61, 1-11.

武部義宜・伴雅雄, 2010, 蔵王火山、熊野岳アグルチネートの岩石学的特徴. 地球惑星科学連合2010年大会講演要旨. SVC062-P09.

為栗 健・井口正人・寺石 眞弘・大倉敬宏・園田忠臣, 2010, 桜島火山における震源再決定と自然地

- 震観測, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 29-33.
- 寺田暁彦, 2010, 火山における熱観測, 火山, 55, 155-163.
- 筒井智樹・他35名, 2010, 桜島火山における反復地震探査(一回目), 京都大学防災研究所年報 第53号B, 241-259.
- 筒井智樹・他35名, 2010, 桜島火山における反復地震探査(2009年観測), 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 9-28.
- Wang, J. and D. Zhao, 2010, Mapping P-wave anisotropy of the Honshu arc from Japan Trench to the back-arc, *J. Asian Earth Sci.* 39, 396-407.
- Wei, W., D. Zhao, and Y. Shi, 2010, Three-dimensional P-wave tomography of the volcanic areas in southwest Japan, *Earth Sci. Frontiers* 17(3), 149-157.
- 八木原 寛・平野舟一郎・宮町宏樹・高山鐵朗・市川信夫・為栗 健・井口正人, 2010, 鹿児島湾の桜島火山周辺海域における海底地震観測, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 35-39.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・吉川慎・井上寛之・松島健・内田和也, 2010, 桜島火山周辺における水準測量(2009年11月および2010年4月), 京都大学防災研究所年報, 第53号B, 227-232.
- 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・吉川 慎・井上寛之・松島 健・内田和也, 2010, 桜島火山周辺における水準測量(2009年11月および2010年4月), 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 41-46.
- 山本圭吾・他11名, 2010, 桜島および鹿児島湾周辺における精密重力測定(2009年10月), 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成21年度分報告書, 59-63.
- Yoshida Y., Issa, M. Kusakabe, H. Satake and T. Ohba, 2010, An efficient method for measuring CO₂ concentration in gassy lakes: Application to Lakes Nyos and Monoun, Cameroon. *Geochem. J.*, 44, 441-448.
- Yoshimoto, M., T. Fujii, T. Kaneko, A. Yasuda, N. Nakada, A. Matsumoto, 2010, Evolution of Mount Fuji, Japan: Inference from drilling into the subaerial oldest volcano, pre-Komitake, Island Arc, 19, 470-488.
- Zhao, D. and L. Liu, 2010, Deep structure and origin of active volcanoes in China, *Geoscience Frontiers* 1, 31-44.
- Zhao, D., S. Ueki, Y. Nishizono, and A. Yamada, 2010, New seismic evidence for the origin of arc and back-arc magmas, In J. Ray, G. Sen, B. Ghosh (Eds.) *Topics in Igneous Petrology*, 117-132, Springer Press.
- Zhao, D., S. Yu, and E. Ohtani, 2011, East Asia: Seismotectonics, magmatism and mantle dynamics. *J. Asian Earth Sci.* 40, 689-709.

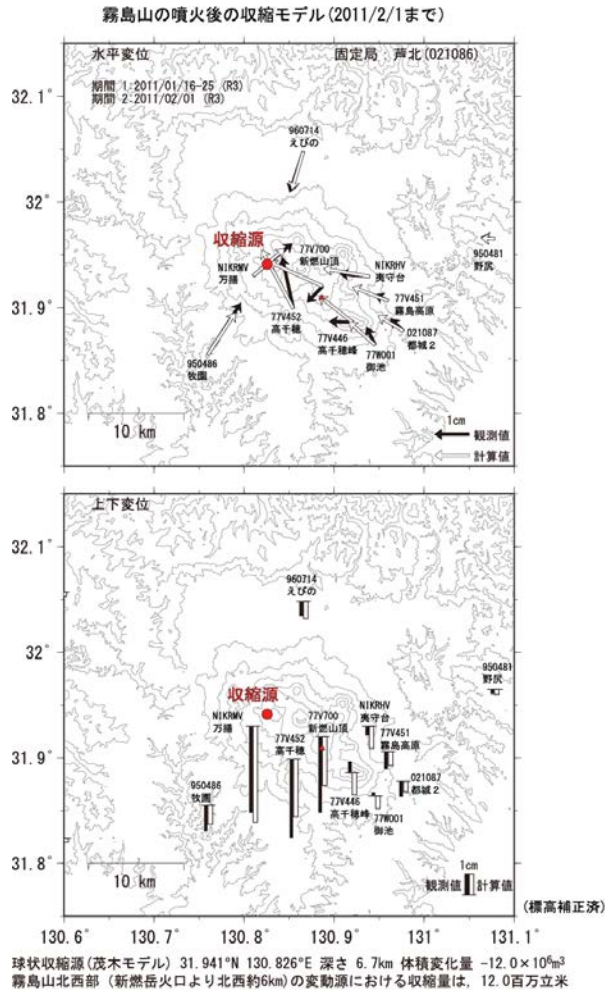


図1. 霧島山2011年噴火に伴う地殻変動と力源モデル (国土地理院[課題番号:6016])

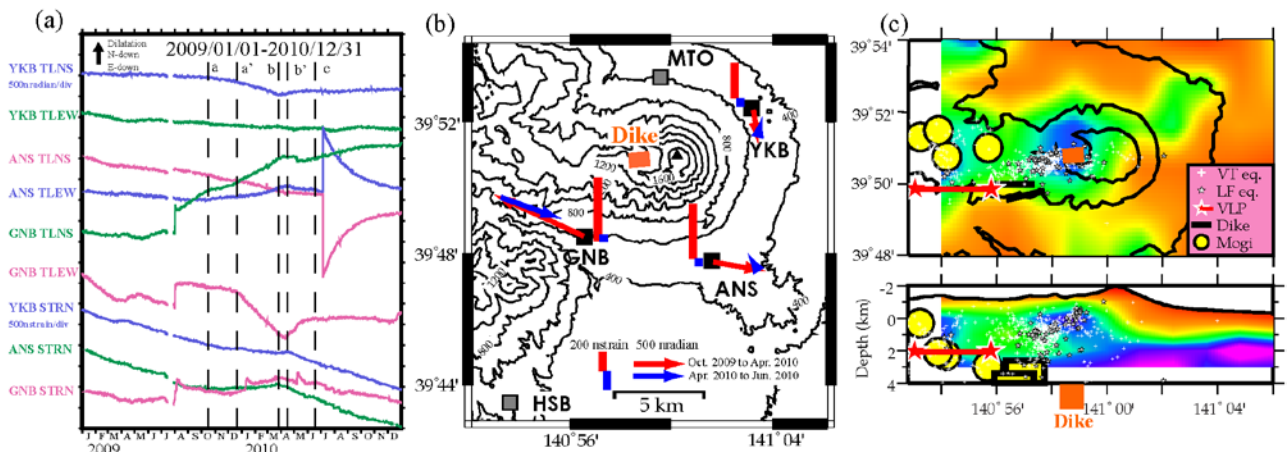


図2. 岩手火山で観測された短期地盤変動(a, b)と変動源モデル(b, c). (東北大学[課題番号:1209])

(a)傾斜・歪連続記録、(b)赤と青のシンボルが2009年10月～2010年4月と4月～6月の変動量。橙色長方形は前期の変動源モデル。(c)岩手火山周辺のP波速度偏差分布、1998年の活動(Tanaka et al., 2002)と変動源モデル。

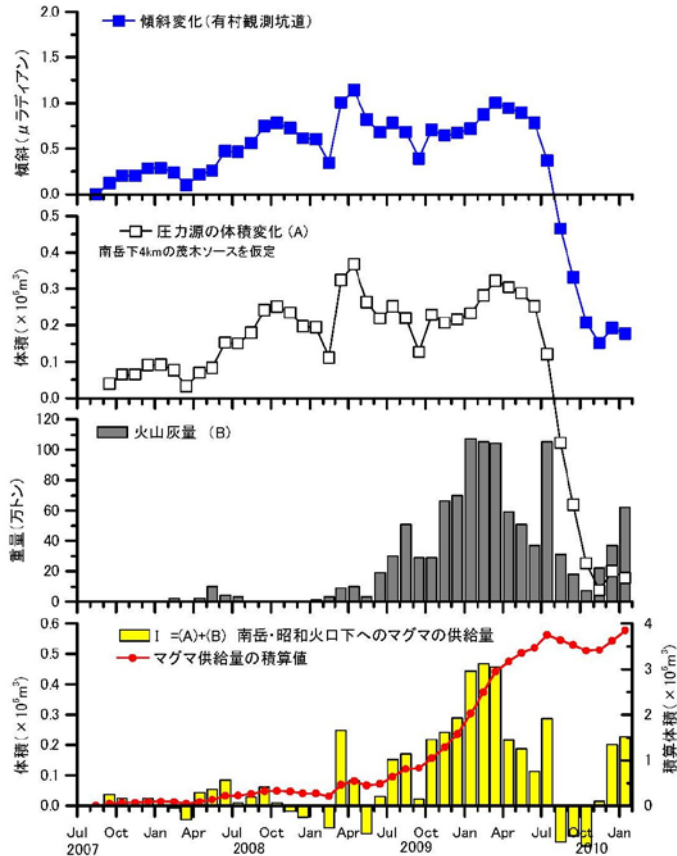


図3. 桜島山頂へのマグマ供給量の増加（京都大学防災研究所 [課題番号：1809]）

- 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

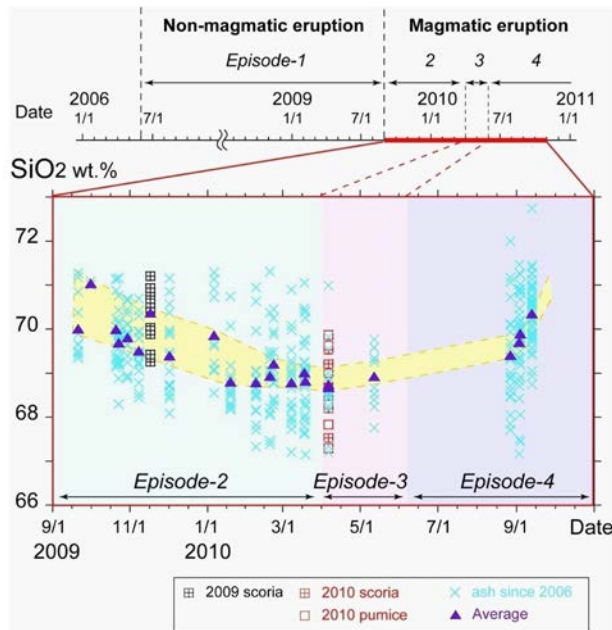


図4. 桜島火山2006年からの噴出物のガラス組成（北海道大学 [課題番号：1004]）

Cl/S molar ratio

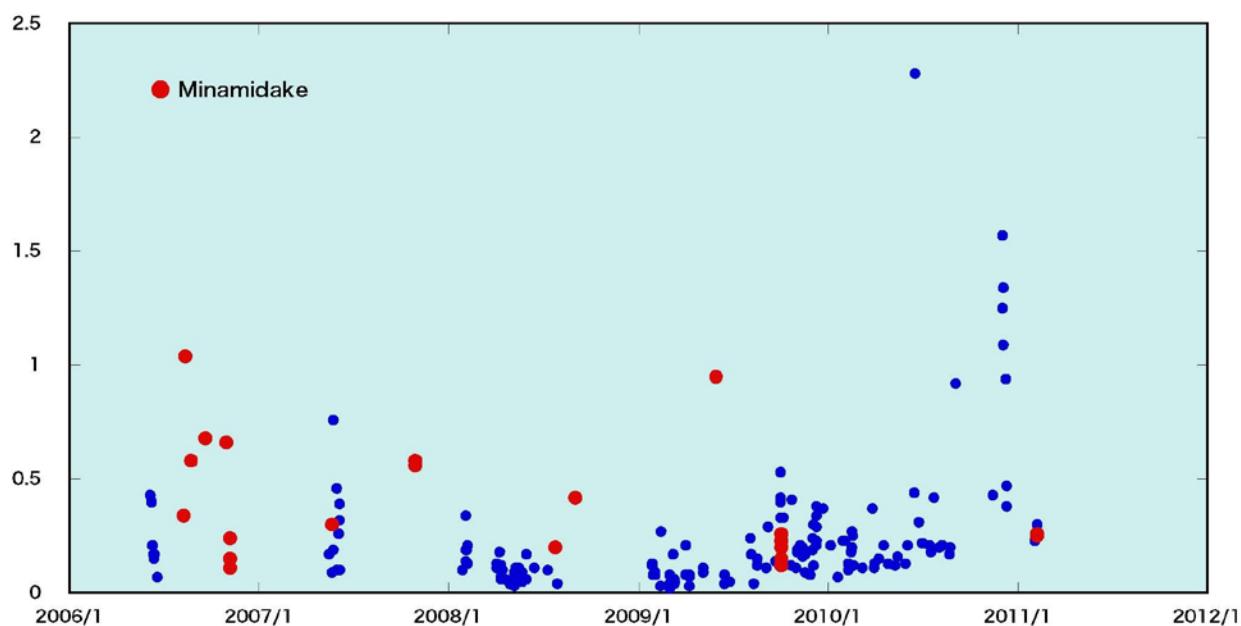


図5. 火山灰付着水溶性Cl/Sモル比の時間変化（京都大学防災研究所 [課題番号：1809]）
青：昭和火口から放出された火山灰，赤：昭和火口

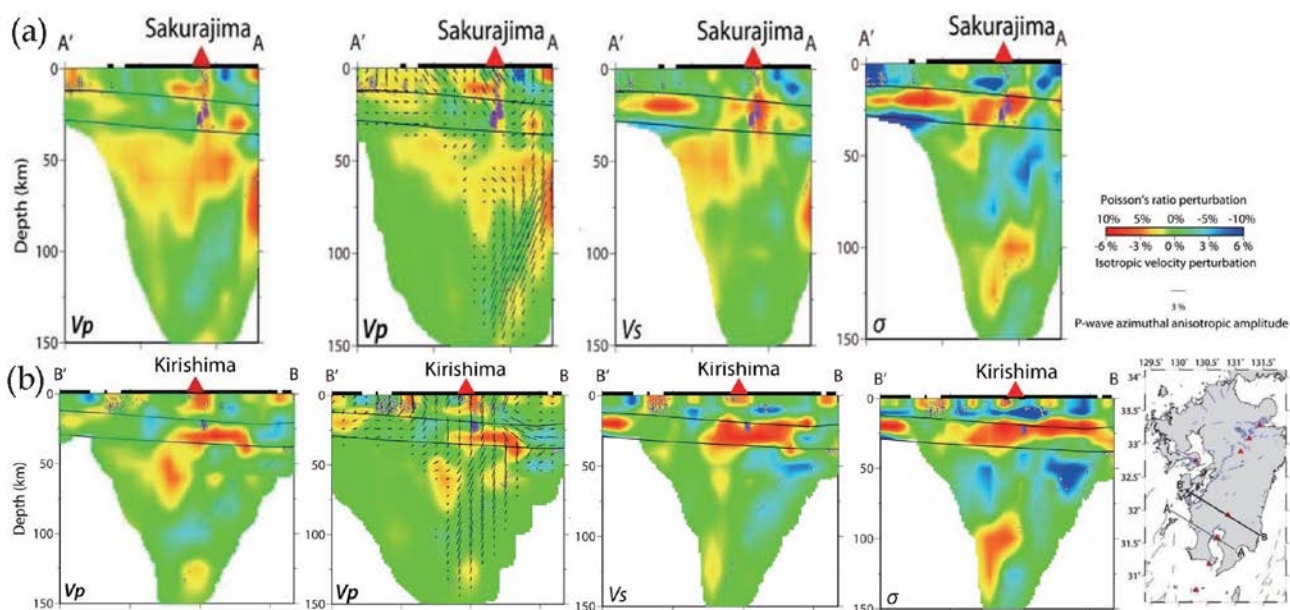


図6. 南九州火山地域の速度断面。（東北大学[課題番号：1209]）
桜島火山(a)ならびに霧島火山(b)下の北西－南東断面における、左から順に、P波速度偏差，P波速度異方性，S波速度偏差，ポアソン比偏差の深さ分布。

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)の研究に資する目的で、地震発生先行過程に関する研究では、上記のうち1)と2)を実施している。

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。2004年から行ってきた、日高山脈を挟んで反対側にある広尾放送局のFM放送波を北大えりも観測所構内で受信する観測では、日高山脈周辺で起こる概ねマグニチュード4以上の地震50例以上についてこの伝播異常が観測され、発生する地震のマグニチュードとの関係について、1)断続的に観測される伝播異常の出現時間の総和が、その後発生する地震のマグニチュードの指標になる。2)伝播異常が観測されなくなってからある時間の経過後(1日から10日位の範囲)に地震が起きるが、その時間とマグニチュードの間には相関は見られないことの2点が示された(北海道大学[課題番号:1005])。さらに、この現象の観測を効率的に行うために、擾乱発生位置の特定もできる安価な電波干渉計を開発し、北海道等に設置してテストしている。予察的な解析ではあるが、散乱波の偏波について着目したところ地震に先行している可能性がある擾乱の場合、受信偏波が送信偏波と異なっていることが分った(岡山理科大学[課題番号:2913])。

地震の数日前に電離層総電子数(TEC)の日変化の振幅が小さくなることが、海外の大地震について示されているが、それらはいずれも低緯度地域でおこった地震である。近年日本でも観測条件のよい内陸浅部で比較的大きな地震がおこっているため、その検証を試みた。2007年中越沖地震では、中国等で報告されたようなTEC減少が比較的明確に見られたが、2008年岩手宮城内陸地震は、異常検出に最も適した太陽活動の最小期に発生したにもかかわらず、地震と関係ない時にもしばしば起きている程度の異常しか認められなかった。もう少し他の例を検討する必要があるが、この現象は、低緯度地域でなければ大きなシグナルを出さないとする理論的モデルも提出されており、日本では利用できない現象である可能性もある(北海道大学[課題番号:1005])。

衛星による観測は、電離圏の擾乱の時空間分布を効率よく取得できる。フランスのDEMETER衛星の2004年から6年間にわたる電離圏観測データについて、昨年度、技術的な問題がないことを明らかにしたが、今年度は、四川地震前の電離圏変動擾乱が震央より南でおこったことをつきとめた。一方で、同衛星のデータと日本のひのとり衛星のデータを併せて解析したところ、これまでにしられていなかったタイプの大気圏・電離圏相互作用に起因する電離圏擾乱で、地震先行電離圏擾乱の変動と類似するものものがみつけた。地震と関連する擾乱を同定するためには、このような他の原因による変動を順次取り除いていかななくてはならない。そのような作業のfeasibility studyとして、磁気嵐および赤道ジェット電流が発生していたときにおこった皆既日食時のデータを解析し、複雑な変動を起源別に分解することに成功した（東京学芸大学 [課題番号：2908]）。

伊豆諸島では地震に先行するDC-ULF帯の地電位差変動が多数観測されており、異常の性状によって地震先行異常と、雷・人工ノイズの経験的判別基準が確立している。昨年度に神津島・新島の観測点を再構築し順調にデータを取得している。本年度は、先行的な地電位差変動は出現せず、また、経験的にそれが期待されるような大きさ・位置の地震も発生しなかった。人工ノイズが少なく観測条件のよいフィールドでこのようなブランクテストができたことは、この手法のポテンシャルに対して積極的な意味合いをもつ。（東海大学 [課題番号：2501]）。

VLF帯の地中電磁波観測では、3成分磁場と鉛直成分電場センサーをボアホール孔底と地表に設置した和歌山県白浜の新観測点で得られたデータの解析を行った。現在までのところ、この観測点で確実に地中起源の電磁波と確認された事例はないが、垂直入射モードと表面伝搬モードの2種類の電磁波伝搬モードがある事がわかった。（東海大学 [課題番号：2501]）

（地球化学的現象）

本計画で開発・運用をしている地下水溶存ガスの連続観測装置における「観測開始からの経過時間の増加に対応した大気ガスの混入割合の増加」の原因が、揚水に使用していたペリススタポンプのガスバリア性能の経時低下であることを特定し、この部分の改造をおこなった。この結果、揚水の技術的条件が困難である跡津川断層直上に断層を貫くように掘削された観測井での連続観測において、これまで $S/N=1$ 程度であった地下水溶存ヘリウムのシグナルが $S/N=10$ 程度に改善した。また、地下水溶存メタンのピーク解析精度も向上した。地下水流通経路の亀裂総量のダイレクトな指標である 4He と 36Ar の絶対濃度まで自動連続観測できる本装置の性能は、地下水の化学モニタリングの歴史において画期的といえる。また、この連続観測装置は、将来の多数展開を意識しており、そのための一つの困難が、生スペクトルの解析を必要とする質量分析計データ解析の自動化であったが、上記の装置改造でデータの安定性が向上したため、1時間前の結果を初期値にして自動解析ができるようになった。これにより、1時間ごとの溶存ガスの主要成分を計算できるようになり、Webに自動表示できるようになった（東京大学理学系研究科 [課題番号：1502]）。

ラドン濃度については、地下水の観測だけでなく、大気中での濃度変動にも地震や地殻歪みに関連するらしき変化がみられることがあり、地下の不均一構造の影響を受けにくいため、地下水より効率のよい手段であるとも考えられる。兵庫県南部地震の先行現象として観測された大気ラドン濃度上昇をその他の地殻変動データと詳細に比較検討し、観測された数回の

顕著なピークは、地殻歪変動・地下水中ラドン濃度変動・地下水湧水量変動のピークとほぼ一致しているが、地殻歪変動に最も対応している前駆現象は大気中ラドン濃度変動であることを見いだした。しかし、大気ラドンは確実に気象要素の影響をうけるのでその弁別が不可欠である。牡鹿半島における大気ラドン濃度連続データを題材に、物理的な要因を考慮して、変動の気象由来成分を気温および顕熱の観測値から評価することによって、地殻応力による変動を推定するモデルをつくった（東北大学 [課題番号：2906]）。

（地震活動）

先行現象として物理的に期待されるもので、微小地震からしかえられない重要な情報の一つとして、地震発生層の深度での応力場の方位が挙げられる。その推定のためには、多数の微小地震の断層面解を精度よくもとめることが欠かせない。観測地域中央部における観測点間隔はほぼ2-3 kmの臨時観測を展開している丹波山地では、M0.5クラスの非常に小さな地震でもルーチン的に断層面解を決定できるようになった(図1)。定常観測網のデータでは、M2以上のものしか断層面解をきめられないので、GR則から考えると、応力場推定に使えるデータの密度が一挙に30倍増えたことになり、応力場モニターの時空間分解能が30倍改善されることになる（京都大学防災研究所 [課題番号：1811]）。一方、日本全域をカバーした応力推定を行うために、国立大学観測網地震カタログ(JUNEC)のP波初動を用いて、1985年7月から1998年12月までに日本で発生した約14,000個の地震のメカニズム解を推定し(図2)、カタログ化した。同様のカタログとして、F-netのデータを用いたものが存在するが、これはM4程度以上の地震についてだけであり、今回は、M2からの微小地震を含んでいるため、応力場解析に有利であると考えられる。検証のために、1995年兵庫県南部地震に伴う静的クーロン応力変化(ΔCFF)と地震活動変化の相関性を、推定されたメカニズム解を用いて計算された ΔCFF の確率分布の時間変化から検討を行った。本震後に発生した地震の確率分布は本震前に比べて明らかに ΔCFF が正の方向へ移動しており、 ΔCFF 増加域において活発化、あるいは ΔCFF 減少域において静穏化したことが示された（東京大学地震研究所 [課題番号：1419]）。

南アフリカ大深度金鉱山の誘発地震を対象に行なっている震源のごく近傍で、25kHzの高周波帯域までのカバーする地震観測では、至近距離(<150 m)で発生したマグニチュード-3~0の極微小地震について、応力指標パラメータのひとつである静的応力降下を求めることに成功した。これまでは、観測周波数帯域の制約から、マグニチュード-1以下の地震についてはコーナー周波数が求められず関係がわからなかったが、今回の観測により、中大規模地震で知られている応力降下一定則が、マグニチュード-3まで成り立っていることが明らかになった(図3)。鉱山で大量に観測できる極微小地震が基本的に中大規模地震と相似な剪断滑りであることを示唆している。さらに、南ア鉱山では大きな地震の直前期に応力降下の低い地震が多発するようになるといわれているが、より信頼性の高い高周波観測のデータでこの現象を検証できるはずである（東京大学地震研究所 [課題番号：1420]）。

2005年宮城県沖地震の震源域の周囲で発生した中小規模地震のメカニズム解を用いて応力場の推定を行った結果、宮城県沖の応力場の空間不均質は小さいことが明らかとなった。宮城県沖では震源域の東端を境にプレート境界の沈み込み角度が 10° 程度から 25° 程度に変化しており、推定された宮城県沖の応力場は震源域内ではプレート境界に対する法線応力とその東側よりも大きくなる（東北大学 [課題番号：1210]）。

広域地震活動の時間的推移から、大地震の中期的先行過程の進行がとらえるのではないかと、この考えが臨界現象の立場から提出され、カリフォルニア等で肯定的な解析例もでていいる。最近提唱された、イベントが起こるたびに時間が進むナチュラルタイムという新概念を用いて、1995年以降のM7以上の日本の大地震である1995年阪神淡路地震、2000鳥取県西部地震、2003十勝沖地震、2004紀伊半島沖地震、2005年福岡県西部地震、2008岩手宮城内陸地震について臨界点検知を行った。十勝沖、岩手・宮城内陸を除く大地震については従来の研究と同様な臨界点と思われる変化が見られた。さらに、地震カタログの一般的統計的性質を検討し、通常の物理的時間よりも、ナチュラルタイムのほうが、臨界点の検知に有効であるとの知見をえた（東京大学地震研究所 [課題番号：2912]）。

(測地学的現象)

GEONETと東北大学のGPS データを統合処理して日々の座標値がルーチン的に算出するシステムを開発し、GPS精密暦公表までの14日間をまたずにプレート境界の準静的滑りモニタリングを准リアルタイムで運用する目処がたつた。また、小繰り返し地震を用いたプレート境界でのすべりモニタリングにおいては、2010年に東北日本の日本海溝沿いで 249 個の新たな小繰り返し地震が抽出され、それらの活動から、福島県沖から宮城県沖の海溝に近い場所において2008年に滑り速度が加速した後、滑り速度がしだいに減速していることが分かった（東北大学 [課題番号：1210]）。

南アフリカ大深度鉱山内で震源極近傍に設置したひずみ計では、従来から地震波放射効率の低いゆっくり地震に相当するイベントについては前駆滑りが多数例検出されている。昨年度マグニチュード (Mw) 0.3の普通の地震について、震源から20m以内にある2台の歪み計で、本震時の歪み変化の10分の1~数分の1の明瞭な歪変化が6.5時間前から開始したケースがみつかった(図4)。本年度は、この観測の信頼性を吟味した。まず、この6.5時間の最中にマグニチュード (Mw) 0.2の地震が近隣で発生しているが、これは先行歪みのトレンドには影響をあたえなかった。また、採掘発破がない週末に2台の歪計で記録された潮汐変化が互いに類似するなど、歪計の動作や岩盤とのカップリングが安定していることもよく確認され、観測データ自体には問題がないことが確認されている。さらに本震による歪み変化の極性と前駆歪み変化の極性が一致しており、天然の地質構造の中で発生した地震の前駆すべりが世界で初めて明瞭に捉えられた例である可能性が非常に高い。(立命館大学 [課題番号：2401]) 一方で、これまで鉱山内の至近距離観測において、より大きな地震に対して先行歪みが観測されなかった例が多数確認されており、どのような場合に先行歪みがおこるのか、今後良質のデータを増やして十分検討する必要がある。また、このイベントの発生時期には同じサイトでおこなわれていた超微小地震観測(立命館大学 [課題番号：2402])が欠測していたが、同観測でそれ以前の時期に10mX10mくらいの平面的活動の集中があり、この部分がマグニチュード (Mw) 0.3の震源になったとすると、coseismicな歪み変化が定量的に説明できることが確認された。これは、今回の事象の解明には間接的な役割しか果たしていないが、震源極近傍での超高感度複合観測の有効性を示すものである。現在は、大規模な天然断層を囲む鉱山地下のサイトに、歪み計、超微小地震ネットワークを含む新たな観測網を構築している。

(地殻構造)

地殻構造の時間的変化を監視する新しい手法として注目されている、地震計の雑微動記録を用いる地震波干渉法で、従来の主流であるRayleigh波の位相速度ではなく、実体波の反射波を雑微動の観測点間の相互相関関数(CCF)で検出する試みを行った。使用する観測点の1つを大深度ボアホール観測点として15 カ月以上のデータをスタックするとRayleigh 波の基本モード以外の信号が認められるようになり、既知の構造情報に照らして、これらがモホ面や地殻内反射面からの信号として解釈可能であることがわかった。(京都大学防災研究所 [課題番号: 1810])

イ. 先行現象の発生機構の解明

(電磁気学的現象)

地震の先行現象について、その発生機構が理解されていることは稀であり、このような段階では、観測データから現象を愚直に遡っていくアプローチが必要とされる。ア. で述べた地震エコー現象について、8km 間隔で3 点の受信局を展開した。複数の地震について、地震エコーがこの3つの観測点全てで観測され、さらに、エコーの開始時刻が西から東へ15分ずつ遅れていることがわかった。エコーの直接の原因である上空の散乱帯の移動速度と整合する値であり、さらにこのような実験を継続して順次可能性を絞りこむことが望まれる(北海道大学 [課題番号: 1005])。

一方で、例は多くないが、大地震に先行する地磁気異常がみられた例が過去に報告された例もあり、応力の変化により地殻構成鉱物の磁化が変化するピエゾ磁気のひとつの可能なメカニズムとして指摘されている。海溝型の巨大地震が想定される道東地域の南岸域には、強い磁気異常があり、さらにその経年変化には、コア起源の永年変化ではありえない小スケールの地域性があり、プレート運動による巨大地震スケールの応力蓄積過程がピエゾ磁気効果を通してモニターできる可能性があることが、1990年代の観測データとモデル計算から指摘されている。その検証のため、気象庁地磁気観測所と協力して各磁気観測点における地磁気三成分の絶対測定を行い、1990年代の観測データでみられた強い地域性が再確認されたとともに、当時とはパターンがかなり異なってきたことがわかった(図5)。今後は、海溝型の巨大地震に伴うコサイスマミックな変化が捉えられるかどうか ピエゾ磁気効果モデルを検証する上で本質的に重要となる(北海道大学 [課題番号: 1005])。一方で、気象庁が伊東市御石ヶ沢付近でおこなっている地磁気の連続観測については、昨年度の周辺調査データからローカルな磁気異常の影響が示唆され、シミュレーション等による影響の除去を試みたが、地殻変動起因の変動を、信頼性をもって抽出することは困難と結論し、伊東市玖須美元和田に観測点を移動した(気象庁 [課題番号: 7020])。

ア. で述べたDC-ULF帯の地電位差変動をもたらさうるメカニズムはいくつも提案されているが、その多くは、先行的な微小破壊を仮定するものであり、一方でそれに対応する微小地震は観測されていない(小さすぎて観測できないだけかもしれない)。室内実験で、微小破壊をともしない条件で岩石試料を不均一に静的加圧すると、圧縮部から非圧縮部に電流を流す起電力が発生することが観察された(図6)。この現象は、火成岩(花崗岩、ハンレイ岩)の場合にのみおこり、非火成岩(大理石)ではおこらないこと、および、試料内の電位分布から、火成岩鉱物に広くみられる過酸化架橋とよばれる格子欠陥の圧縮で生じた正孔電荷キャリアが圧縮部から非圧縮部へ拡散することによるのだとみられ、高い一般性が期待される。

このメカニズムによれば、DC-ULF帯の地電位差変動は、断層の準静的な局所滑りによる歪みの再配分自体から直接生じることになる（東海大学 [課題番号：2501]）。

断層ガウジ層内に内部構造として発達する剪断集中帯が、震源核形成から本震にいたる一連の仮定で果たす役割に注目して、内部構造の発達と摩擦電気の発生を同時にとらえる一連の室内実験を、圧電効果をもたないはんれい岩の模擬ガウジを用いておこなってきた。実験結果を総合すると、断層に斜交する剪断帯でのゆっくり滑りが震源核の発達をにない、断層に平行な剪断帯の形成にいたって本震の高速破壊がおこることになるが、このときの電位変化は、すべり速度および接触面積(すべり面積)に依存し、本震では、震源核形成段階より1桁近く大きいシグナルが観測された（東北大学 [課題番号：2906]）。

また、ギリシャの観測例では、DC-ULF帯の地電位差変動の出現する観測点と、それに関連するとおもわれる地震の発生場所には、非常に複雑な関係がある。さらに東海大学の伊豆諸島の観測では、地震の発生場所によって異常の極性がきまっていることがみついている。電磁気シグナルの伝播は非常に難しい問題であるが、地震予知への利用のためには、その具体的な理解が強くのぞまれる。神津島の詳細な浅部電気伝導度探査と地質調査を並行実施し、比抵抗は2-3桁の範囲で空間的に異なり、かなりの部分が溶岩の分布に支配されていることがわかった（東海大学 [課題番号：2501]）。一方、地殻内での電磁波透過距離と地殻内物質のフラクタル構造との関係を理論的に導出し、石英板pin-on-disk実験での岩石摩擦にともなう発光放電現象研究結果とあわせて、震源が浅所ならば、 10^{-1} - 10^{-8} Hz の電磁波が地表に到達可能であるとの結論を得た（東北大学 [課題番号：1502]）。

一方で、地震に先行したといわれる電磁気現象に関して、提案されている多くのメカニズムはでコサイスミックに大きな異常が観測されるべきであるのに、多くの場合それが観測されないことが、基本的な不審点として指摘されている。最も代表的なメカニズムである圧電効果が実際の岩石中でどのように働くか詳細に調べるために、京都大学防災研究所では、室内実験で磁場と電場を多チャンネルで同時測定するシステムを開発した。検証のために、大型岩石試料中に地震波を伝播させたところ、それにとともなう局所電磁場の時空間分布が検出できた。（京都大学防災研究所 [課題番号：2907]）。

(地震活動)

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の相互作用を調べるために、とくに精度のよいデータがあるマグニチュード4.9の繰り返し地震4つについて、近傍で発生したの微小地震の解析を行い、繰り返し地震のすべり域内に全ての微小地震の震源があること、それらの微小地震の発生時期が、繰り返し地震のサイクルの後半に多いことが分かった。これらの微小規模地震の活動は、繰り返し地震のアスペリティへの応力集中を表していることが考えられ、アスペリティの応力レベルを微小規模地震の活動から推定できる可能性を示している（東北大学 [課題番号：1210]）。

西南日本における深部低周波微動については、その浅部延長にあるプレート境界巨大地震のアスペリティを載荷する深部の準静的すべりの詳細のモニター手段として注目されている。プレート境界深部の準静的すべり部の中に、多数の微小なアスペリティを仮定したシミュレーションを行い、深部低周波微動の活動域が10 km/day程度で移動する現象を再現した(図7)。

シミュレーションでは、巨大地震発生前になると、発生間隔が短く、伝播速度が速く、解放モーメント率が増加する傾向がみられた（東北大学 [課題番号：1210]）。

一方で、非クリープ域での大小地震の応力相互作用はスケール間相互作用が大きく、大地震の予測に本質的な困難をもたらすと考えられている。大規模な離散要素モデルを用いて、大小の断層が自発的に形成・再活動をする数値モデルを作成し、応力場の時空間発展を広いスケールレンジにわたって観察した。断層運動があると、断層運動周辺の差応力は確実に減少するが、その断層を含むより広い領域での差応力の変化量を見る場合、この限りではない。つまり、広い領域で見ると全体に平均して増加する場合と減少する場合があることが確認された。局所的な応力減少が広域な応力増加となることがより大規模な断層運動につながる。このことを局所的な観測の時系列だけから推定することは不可能だが、応力増加を多点で観測できれば、地震サイクルより十分短い期間のデータからでも大規模地震の中期的な予測に資する可能性がある（東京大学地震研究所 [課題番号：1421]）。

（測地学的現象）

地震発生サイクルのシミュレーションなどに用いられている従来の摩擦則は、どのような実験によるデータに対しても共通する系統的なずれがあった。最近、室内実験データの詳細に検討し、このずれを解消する新たな摩擦則が提案された。この摩擦則を用いて、この摩擦則を用いて、地震発生サイクルのシミュレーションを単一バネ-ブロックモデルで行い、従来の摩擦則によるモデルと比較したところ、サイクル後半の固着状態の減少がかなり大きくなることがわかった。もし、この摩擦則が正しいとすれば、地震発生前の前駆滑りは大きくなるので、観測により検出できる可能性が従来考えられていたよりも高いことを示唆している（東京大学地震研究所 [課題番号：1421]）。

（地殻構造）

地殻流体の挙動が地震発生やその先行過程に果たす役割は、理論的に考えて大きいはずであり、様々な手段で地殻の電氣的・力学的構造をモニターすることで、地震に先行する現象が見つかる可能性がある。下部地殻に流体の可能性が高いS波反射面がみつかっており、また微小地震活動が異様に高い丹波山地周辺域において行っている、82点の臨時観測点による超稠密な地震観測で得られた反射波の解析によって、北摂地域で知られていた下部地殻のS波反射面は同地域に限定的なもので、丹波山地周辺全域に存在するものではないことがわかった。また、レーザー関数解析によってモホ面やプレート形状のローカルなスケールでの詳細が解明された。沈み込む海洋プレートから下部地殻への地殻流体の供給は、内陸大地震が多発する新潟-神戸歪み集中帯（丹波山地域もその一部）の成因であるとも考えられており、このような構造の具体的な解明は重要である。また、歪み集中帯の鍵である断層の強度の推測や、化学的・水文学的な先行現象の評価に重要な断層破碎帯等の透水率を計測する新しい手法として、密閉ポアホールを用いた間隙水圧測定データの自然擾乱（大気圧や地球潮汐）に対する応答の解析を行った。（京都大学防災研究所 [課題番号：1811]）

課題と展望

本年度は、多くの課題で予察的な結果が得られはじめた。電磁気現象に関しては、VHF帯

伝播異常で望まれていた観測データから現象を遡る研究で成果が出始めた。この手法は都市部でも観測できるので、他地域へ展開して様々なタイプの地震に対するケースを収集することが比較的容易である。メカニズムに関しては当分解決が困難であろうが、研究を継続することが重要と考える。大気ラドンに関しては気象要素由来の変動の問題がクローズアップされ、それを補正する方法が提案されたのは大きな進歩であるが、強い地域性が期待される観測項目であるので、様々な場所でのデータを入手して解析することが望まれる。個々の地震がなぜその大きさとなったか、すなわち大地震発生のための要件はなにかという、地震予知のための地震発生の物理学が解明されていないので、中期的、短期的にある大きさ以上の地震に先行することが多いと言われる事象を徹底的に調べあげることは、地震発生の物理的理解を進めるためにも大きな貢献となるはずである。そのためには、少なくとも観測データの特性はきっちりと把握し、データの意味するところを明確にさせておく必要があり、現計画での電磁気現象や地球化学的現象を扱う課題では、その部分が非常にまじめに実行されている。しかし、1つの地域での大地震の頻度は低いので、今後、可能なものについては、短時間でケースを増やす方策をとるべきだろう。物理メカニズムがわかるまで待つのではなく、多数のケースを研究することで先行過程と地震停止のメカニズムを同時に明らかにすることをめざすべきである。その意味で、南ア鉱山での誘発地震を用いた研究は、先駆的なアプローチである。

小地震の断層面解を用いた応力場のモニターは、(固有)地震サイクルの概念に基く地震発生予測においては欠かせない要素であるが、まだ未成熟な段階にある。しかし、今年度の成果でみられるように、相当小さな地震のデータをこれに用いることが十分現実的になっており、積極的に推進すべき項目である。マグニチュードで1小さい地震まで使えば時空間モニタリングの分解能が10倍改善され、先行過程を検出できる可能性が高くなる。

一方、地震発生数の消長が、応力の少なくともステップ的变化を鋭敏に反映することは明らかな観測事実であるが、それだけでは説明できない非常に不思議な変化が昔から種々報告されている。この問題は、多体系のスケール間相互作用を含む本質的に困難な問題である可能性が高くメカニズムは全く理解されていないが、本年度は、断層の力学的相互作用の本質的な部分を含む大規模な多体系モデルによるシミュレーションが登場した。計算技術と微小地震観測データ品質の大幅な向上によって、この分野でブレークスルーが得られる蓋然性は増している。

地震カップリングの低いクリープ性の領域での先行現象の研究は、非常に急速に進展している。繰り返し地震自体は、大地震とは大きく異なる力学的状況下でおこっているが、そのアスペリティ内部は、大地震のアスペリティのモデルとして十分参考になりうる。繰り返し地震のアスペリティ内部で多数の小規模繰り返し地震があること、その発生頻度が繰り返し地震のサイクルの前半と後半で明瞭に異なることは重要な発見である。一方、巨大地震アスペリティ下のクリープは、巨大地震発生確率を確実に変化させるはずのものであり、そのモニター指標となる微動活動を表現できるシミュレーションが登場したことは重要な進歩であり、この方向での一層の研究の深化を目指すべきである。

ロック部の前駆滑りについては、ついに南ア鉱山の誘発地震で明瞭な例がみつかった。しかし、南ア鉱山でも、他の地域でも、顕著な前駆滑りを伴わないで地震が発生した例も多く、検出限界のよい事例を増やして、様々なテクトニック環境下で、大地震の前駆滑りが検出可

能な例がどの程度の割合であるか、狭義の前震との関連はどうか、戦略的な調査を検討すべきである。また、実験室でなされたような固着度自体をモニターできれば、前駆滑りよりもずっと検出されやすいことが期待できるので、自然地震、人工震源を用いたフィールドでの固着度変化測定の feasibility study を開始することが望ましい。

参考文献

- 青木裕晃・片尾浩・飯尾能久ほか,2010,稠密地震観測による近畿地方北部におけるメカニズム解と応力場,日本地震学会秋季大会、P1-56.
- Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, J-P. Ampuero, R. Nakata, T. Hori, Y. Kaneda, R. Hino, and A. Hasegawa, 2010, Migration process of very low-frequency events based on a chain-reaction model and its application to the detection of preseismic slip for megathrust earthquakes, *Earth, Planets and Space*, 62, 1-10, doi:10.5047/eps.2010.09.003, in press.
- Ariyoshi, K., T. Hori, Y. Kaneda, J-P. Ampuero, T. Matsuzawa, R. Hino, and A. Hasegawa, 2010, EFFECTS OF SMALL ASPERITIES ON MIGRATION OF SLOW-EARTHQUAKES ALONG TRENCH DIRECTION OF SUBDUCTION PLATE BOUNDARY: INVESTIGATION THROUGH A 3-D NUMERICAL SIMULATION, *Advances in Geosciences (Proceedings of AOGS 6th Annual Meeting 2009)*, in press.
- Durrheim, R. J., A. M. Milev, H. Ogasawara, H. Kawakata, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Cichowicz, H. Moriya, and the SATREPS research group, 2010, Observational study to mitigate seismic risks in mines: a new Japanese - South African collaborative project, *The proceedings of the fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining*, 6-8 October, Santiago, Chile, Australian Centre for Geomechanics,215-226.
- 藤田哲史・亀伸樹・中谷正生, 2010, Seismic cycle simulation by modified RSF law added stress dependent term,地球惑星科学連合大会.
- 藤田哲史・亀伸樹・中谷正生, 2010,修正されたRSF 則による余震発生レートのモデリング, 2010, 日本地震学会秋季大会.
- 堀高峰・阪口秀, 2010, 大きな破壊への準備過程:数値実験にもとづく考察,日本地震学会秋季大会, B3209.
- 堀高峰・阪口秀, 2010, 付加体発達過程で作り出される応力場で自発的に形成されるデコルマ断層,地球惑星科学連合連合大会, SCG087-02.
- 飯沼卓史・松澤暢・長谷川昭,2010,変位勾配から見た東北日本広域のプレート間カップリングの時空間変化,日本測地学会第114回講演会.
- 加納靖之・伊藤久男・木下正高, 2010,神岡鉱山内南東部断層での水理試験,日本地球惑星科学連合大会, MIS007-10.
- 片尾浩,2010,四半世紀にわたる近畿地方北部の応力空間分布と時間変化、日本地震学会秋季大会,P1-57.
- 桂泰史・小笠原宏・川方裕則・中谷正生・直井誠・矢部康男・安武剛太・山本覚仁・石井紘・E.Pinder・G. Morema・JAGUARS, 2010, 2台の歪計から約100mで続発したMw~2の震源メカニズムと周辺領域の長期的な応力変化-南アフリカMponeng 金鉱山, 日本地震学会秋季大会, P3-33.
- Katsumata, K., M. Kosuga, H. Katao and the Japanese Group of the Joint Seismic Observation at NKTZ,

2010, Focal mechanisms and stress field in the Atotsugawa fault area, central Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, 62, 367-380.

小笠原宏・ R. Durrheim・中谷正生・矢部康男・ A. Milev・ A. Cichowicz・川方裕則・森谷祐一・佐藤隆司・ S. Murphy・ A. Ward・ G. Morema・ M. Kataka・ R. Vermeulen・ G. van Aswegen・ Research Group of SATREPS, 2010, 鉱山での地震被害低減のための観測研究-日本と南アフリカの共同研究, 日本地球惑星科学連合大会, SSS020-13.

Ohmi, S., Detecting subsurface reflectors in southwestern Japan using ambient seismic noise, *Geophysical Research Abstracts*, Vol.12, EGU2010-8179, 2010, EGU General Assembly.

大見士朗・平原和朗, 2010, 雑微動の相互相関関数による西南日本の地殻下反射面の検出, 日本地震学会秋季大会.

Ohmi, S. and Hirahara, K., 2010, Detecting Subsurface Reflectors in the Shikoku District, Southwestern Japan, Using Ambient Seismic Noise, AGU Fall Meeting.

太田雄策・三浦哲・松村信介・森俊行, 2010, 低価格2周波GPS受信機とデータロガーを用いたGPS観測システムの構築, *測地学会誌*, 56(3), 101-106.

太田雄策・三浦哲・松村信介・森俊行, 2010, 低価格2周波GPS受信機とデータロガーを用いたGPS観測システムの構築, 日本地球惑星科学連合大会, SGD001-P01, 2010.

太田雄策・小林竜也・三浦哲・高須知二, 2010, 中・長基線RTK-GPS時系列の長期安定性とそのノイズ特性評価, 日本地球惑星科学連合大会SGD001-P02.

Onishi, T., J.-J. Berthelier, and M. Kamogawa, 2011, Critical analysis of the electrostatic turbulence enhancements observed by DEMETER over the Sichuan region during the earthquake preparation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1-10, doi:10.5194/nhess-11-1-2011

Onuma, K., Muto, J., Nagahama, H. and Otsuki, K. 2010 (accepted), Electric potential changes associated with nucleation of stick-slip of simulated gouges. *Tectonophysics*.

Orihara, Y., M. Kamogawa, A. Takeuchi, H. Fukase and T. Nagao, Subterranean electrical structure of Kozu-shima volcanic island, Japan, *Proc. Japan Acad., Ser. B*, 914-919.

三浦勉・飯尾能久・片尾浩ほか, 2010, 近畿地方中北部における臨時地震観測, 京都大学防災研究所年報, 53, B, 203-212.

森谷武男・茂木透, 2010, 浦河沖えりも沖の地震活動とVHF伝播異常との関係, 日本地球惑星科学連合大会.

森谷武男・茂木透, 2010, えりも沖の起こる地震の前に札幌観測点(HSS)で観測される特徴的なVHFの地震エコー, 日本地球惑星科学連合大会.

森谷武男・茂木透・山下晴之・佐々木智彦, 2010, 定常的55-70MHz帯電波の地震エコー観測のための調査とその利用, 日本地震学会秋季大会.

Moriya, T., 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.

村上雅紀・杉本雅明・角森史昭・田中秀実, 2010, 化学的地震先行現象の検出を目的とした質量観測計の開発, 日本地球惑星科学連合大会.

武藤潤・長濱裕幸・三浦崇・荒川一郎, 2010, 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*, 通巻371, vol.32, No.8, 484-490.

- 佐々木裕樹,2011,近畿地方北部の微小地震活動域直下の地殻構造の推定 - S 波反射法とレシーバ関数解析による -, 京都大学理学研究科修士論文.
- 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, 2010, 宮城県沖における応力場とプレート間固着強度の関係,日本地震学会秋期大会.
- Takahara, K., Muto, J. and Nagahama, H.,2010, Skin depth of electromagnetic wave through fractal crustal rocks. IEEJ Trans. FM (Elect. Eng. Jpn.), 130, No.3, 258-264.
- 竹内昭洋・藍檀オメル・佐柳敬造・長尾年恭, 2011, 火成岩の不均一圧縮に伴う起電力の発生とそのメカニズム, 東海大学海洋研究所研究報告, 32, 45-52.
- Teisseyre, R., Nagahama, H. and Majewski, E., 2010, Physics of Asymmetric Continuum: Extreme and Fracture Processes: Earthquake Rotation and Soliton Waves (Paperback, 14 Oct 2010), Springer-Verlag,293pp. The 1st Edition. Edition (14 Oct 2010), ISBN-10: 3642087957, ISBN-13: 978-3642087950.
- 角森史昭, 2010, 地下水溶存ガス濃度を透水係数と同時に観測するシステムの構築について, 日本地球惑星科学連合大会.
- 内田直希・松澤暢・長谷川昭, 2010, 東北日本の中規模繰り返し地震の分布とそのアスペリティでの特徴的地震活動, 日本地震学会秋季大会.
- Uyeda, S., and M. Kamogawa, 2010, Reply to Comment on “ The Prediction of Two Large Earthquakes in Greece ” , Eos Trans. AGU, 91(18), doi:10.1029/2010EO180004.
- Varotsos, P. A., N. V. Sarlis, E. S. Skordas, S. Uyeda and M. Kamogawa, 2010, Natural time analysis of critical phenomena. The case of Seismicity, Europhys. Lett., 92, 29002.
- 和田直也・小笠原宏・川方裕則・中谷正生・矢部康男・直井誠・宮川幸治・安武剛太・吉光奈奈・三宅弘恵・井出哲・五十嵐俊博・G. Morema・E. Pinder, 2010a, 48kHz サンプリング距離 200m 以内で観測された $-3 < M < 0$ の地震の応力降下量, 日本地球惑星科学連合大会, SSS011-P05.
- 和田直也・川方裕則・村上理・小笠原宏・土井一生・吉光奈奈・中谷正生・矢部康男・直井誠・宮川幸治・三宅弘恵・井出哲・五十嵐俊博・G. Morema・E. Pinder, 2010b, コーダスペクトル比法による極微小地震 ($-3 < M < -1$) のコーナー周波数の推定, 日本地震学会秋季大会, P3-34.
- Yajima, T. and Nagahama, H.,2010, Differential geometry of viscoelastic models with fractional-order derivatives. Jour. Phys. A: Math. Theor. 43, 385207 (9pp) doi:10.1088/1751-8113/43/38/385207(<http://iopscience.iop.org/1751-8113/43/38/385207>)
- Yamashita, H., T. Mogi, T. Moriya, M. Takada and M. Morisada, 2010, Simultaneous observation of VHF radiowave transmission anomaly propagated beyond line of site prior to earthquakes in multiple sites, AGU Fall meeting.
- 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 VHF 地震エコー記録への適用と効果, 日本地球惑星科学連合大会.
- Yasuoka, Y., Nagahama, H. and Ishikawa, T., 2010, Anomalous Radon Concentration Prior to an Earth-quake: A Case Study on the 1995 Kobe Earthquake, Japan. Collected Papers. LAP Lambert Academic Publishing, ISBN 978-3-8433-8451-3, paperback, 148pp.
- 吉村令慧・大志万直人・藤田安良,2010, 近畿北部における比抵抗構造調査の目的と現状, CA 研究会.

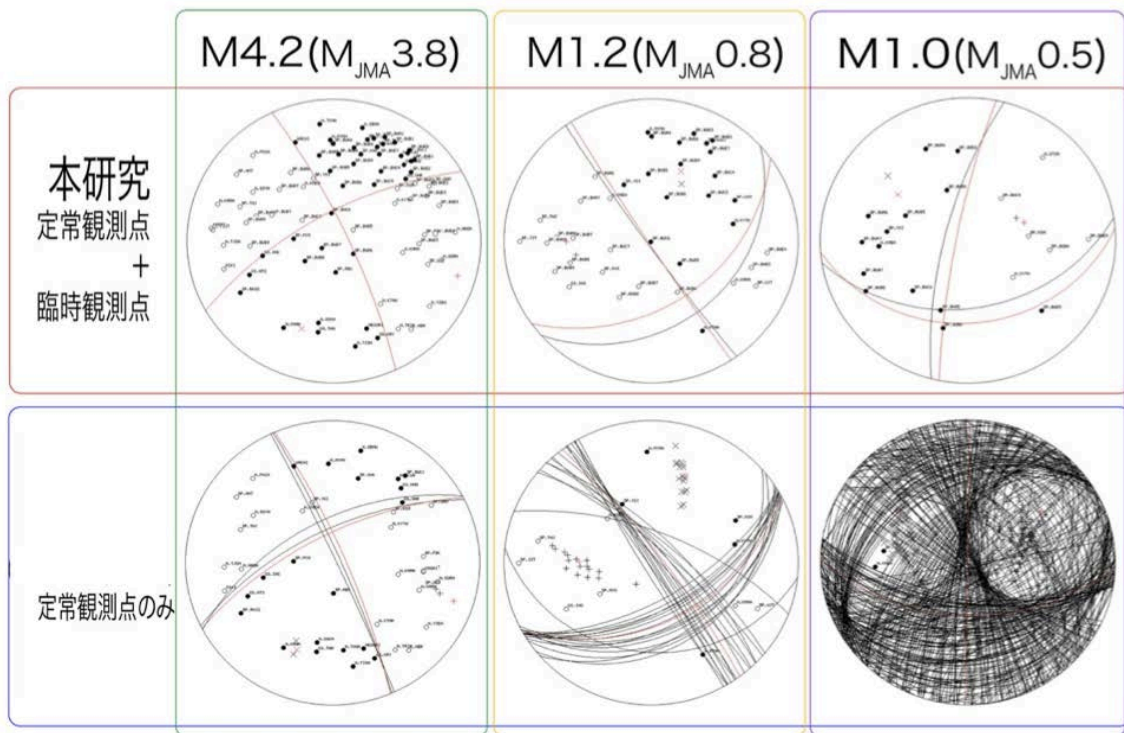


図1. 発震機構決定に及ぼす稠密観測の効果（京都大学防災研究所 [課題番号：18119]）
 上段が本研究の稠密観測による決定。下段は同じ地震を定常観測点のみで決定した結果。押し引きを説明可能な節面のペアをすべてプロットしたもの。（青木、2010）

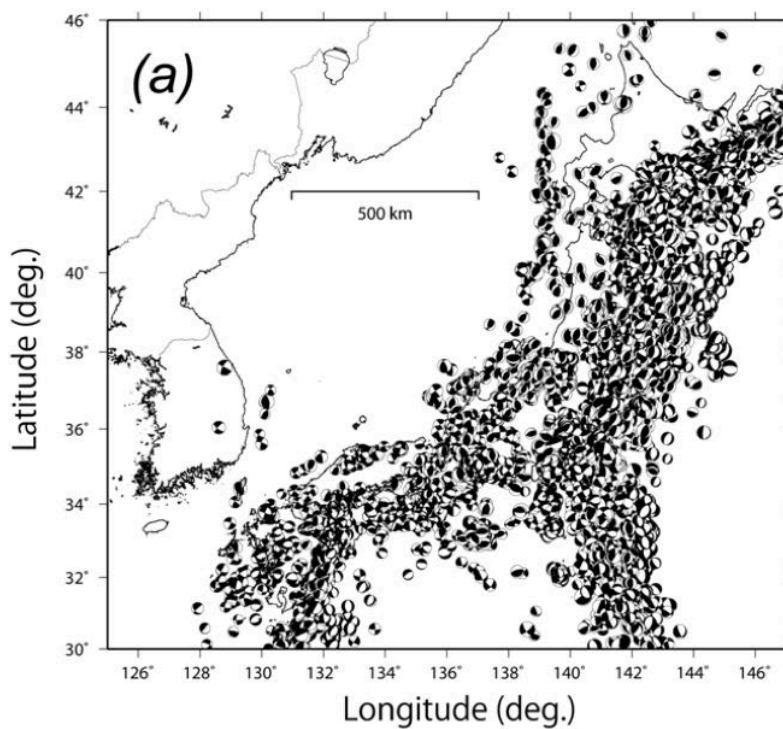


図2. JUNEK の初動より決定されたメカニズム解分布（東京大学地震研究所 [課題番号：1419]）

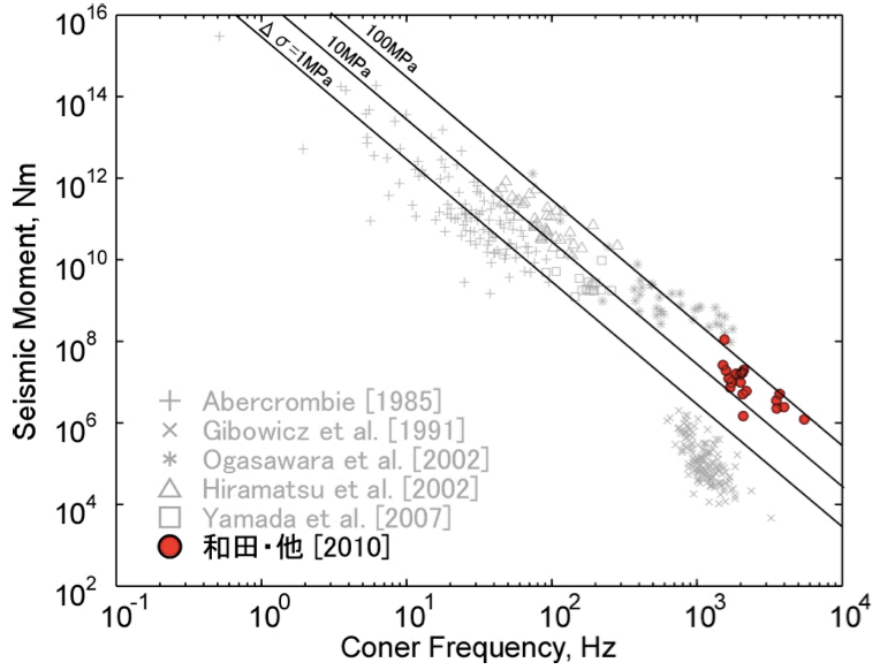


図3. 南アフリカ大深度金鉱山での高周波数至近距離観測波形から求めたM-3にいたる極微小地震コーナー周波数と地震モーメントの関係（東京大学地震研究所 [課題番号：1420]）

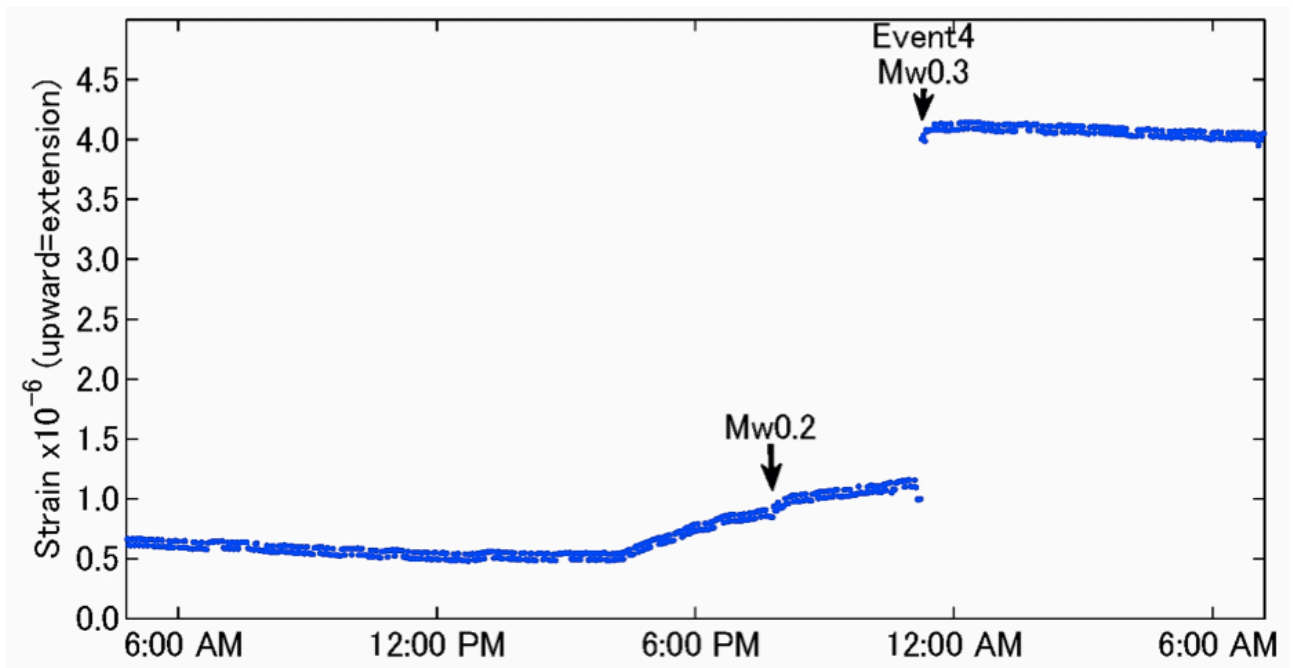


図4. 南アフリカ大深度金鉱山での至近距離歪み観測でとらえられた、Mw0.3の地震の6.5時間前からはじまった先行歪み（立命館大学 [課題番号：1420]）。近隣でおこったMw0.2の地震によるデータへの影響はほとんどない。

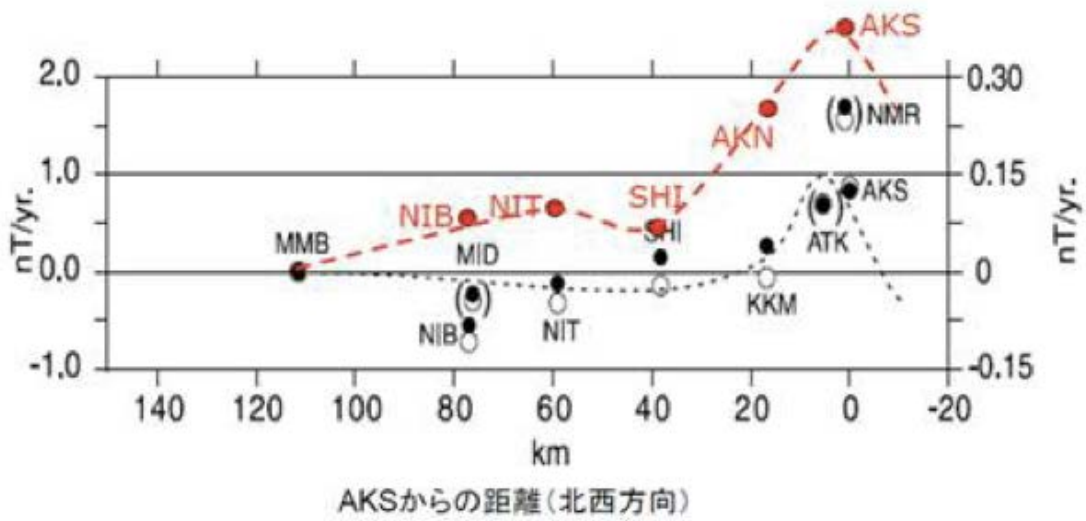


図5. 道東での地磁気観測点での全磁力永年変化率の空間分布 (Nishida et al., 2004 に加筆)。横軸は厚岸から北西方向にとった距離。黒丸は Nishida et al. (2004) による 1990 年代の変化率、赤丸は本研究課題によって求めた 2004~2010 年の変化率(DI 補正後の値)。(北海道大学 [課題番号: 1005])

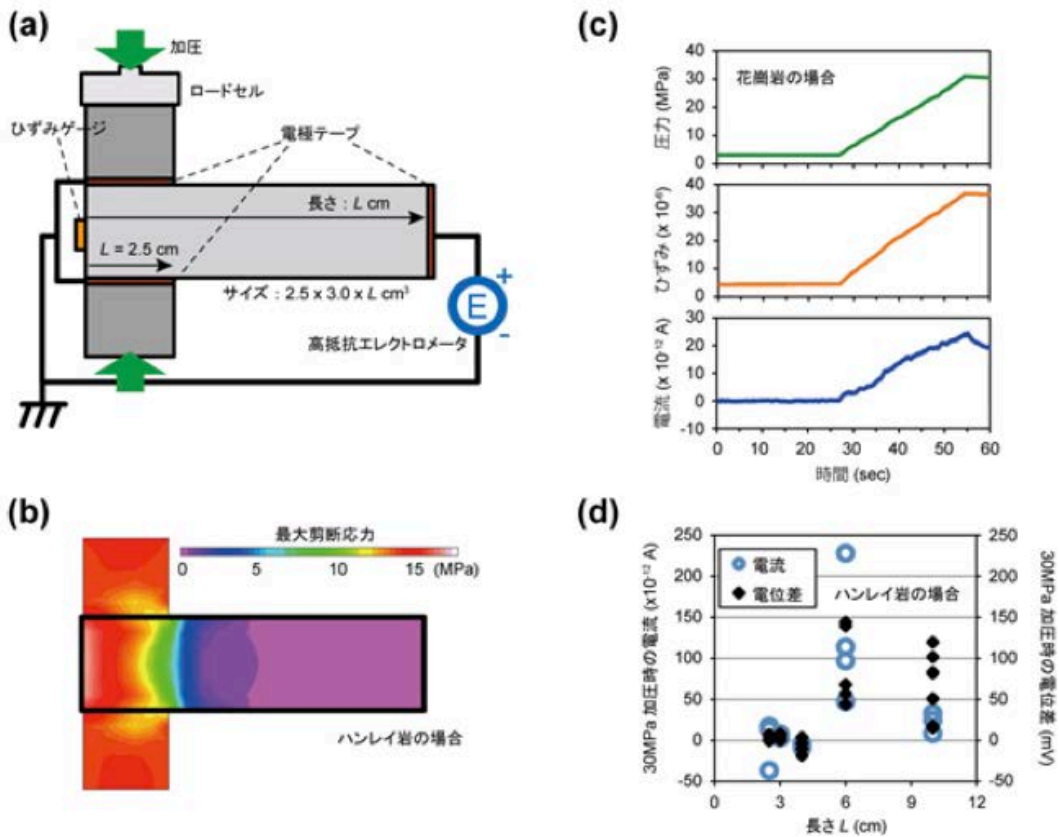


図6. 破壊強度よりずっと低いレベルの不均一载荷で火成岩に発生した起電力。(b)の内部応力分布は計算値。圧電鉱物に拘わらず、同程度の起電力が発生した。(東海大学 [課題番号: 2501])

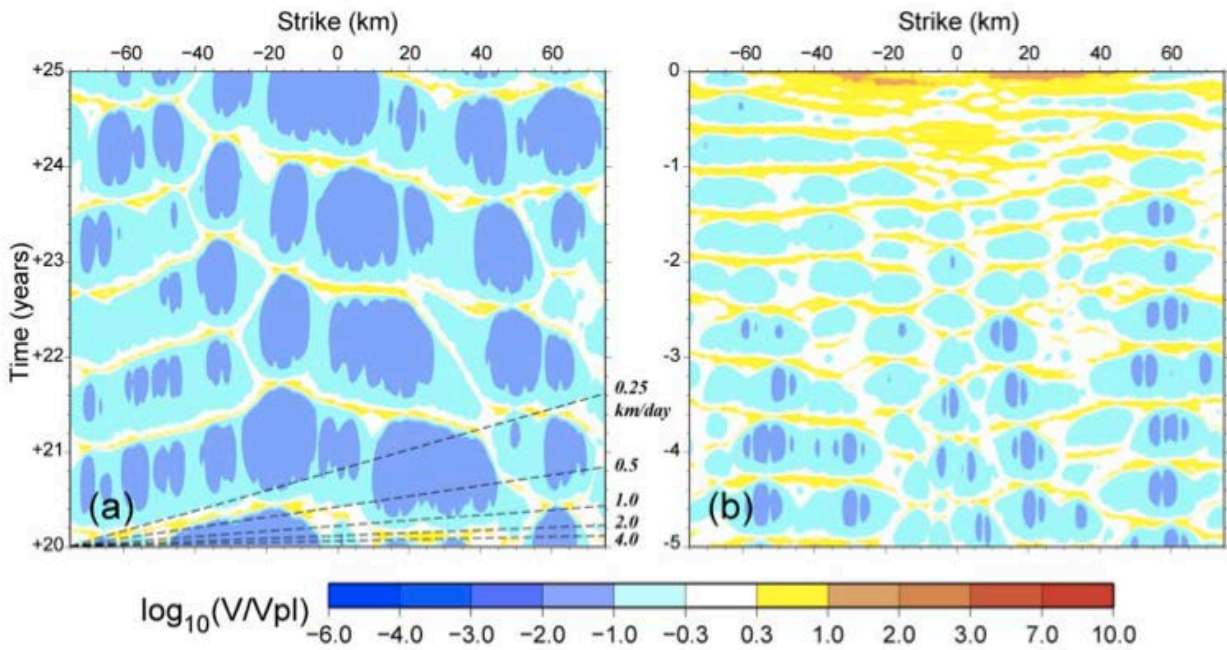
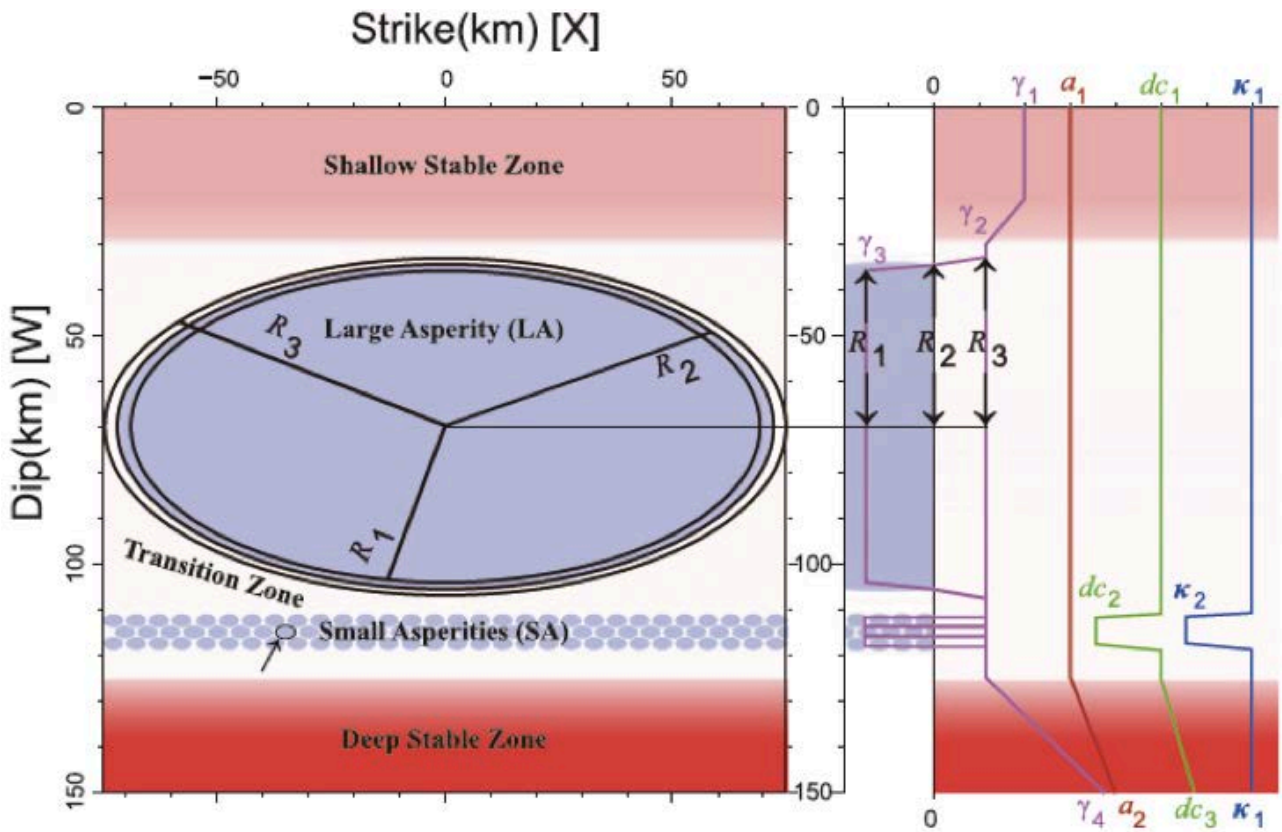


図7. 南海トラフの深部低周波微動の摩擦シミュレーションによる再現（東北大学 [課題番号：1210]）

上段：モデルのセットアップ。

下段：Dipが115km(図1でSAが分布する領域)でのインターサイスミック (a) および大きなアスペリティの破壊直前 (b) のすべり速度の時間変化. 大地震発生前になると、発生間隔が短く、伝播速度が速く、解放モーメント率が増加する様子が分かる。

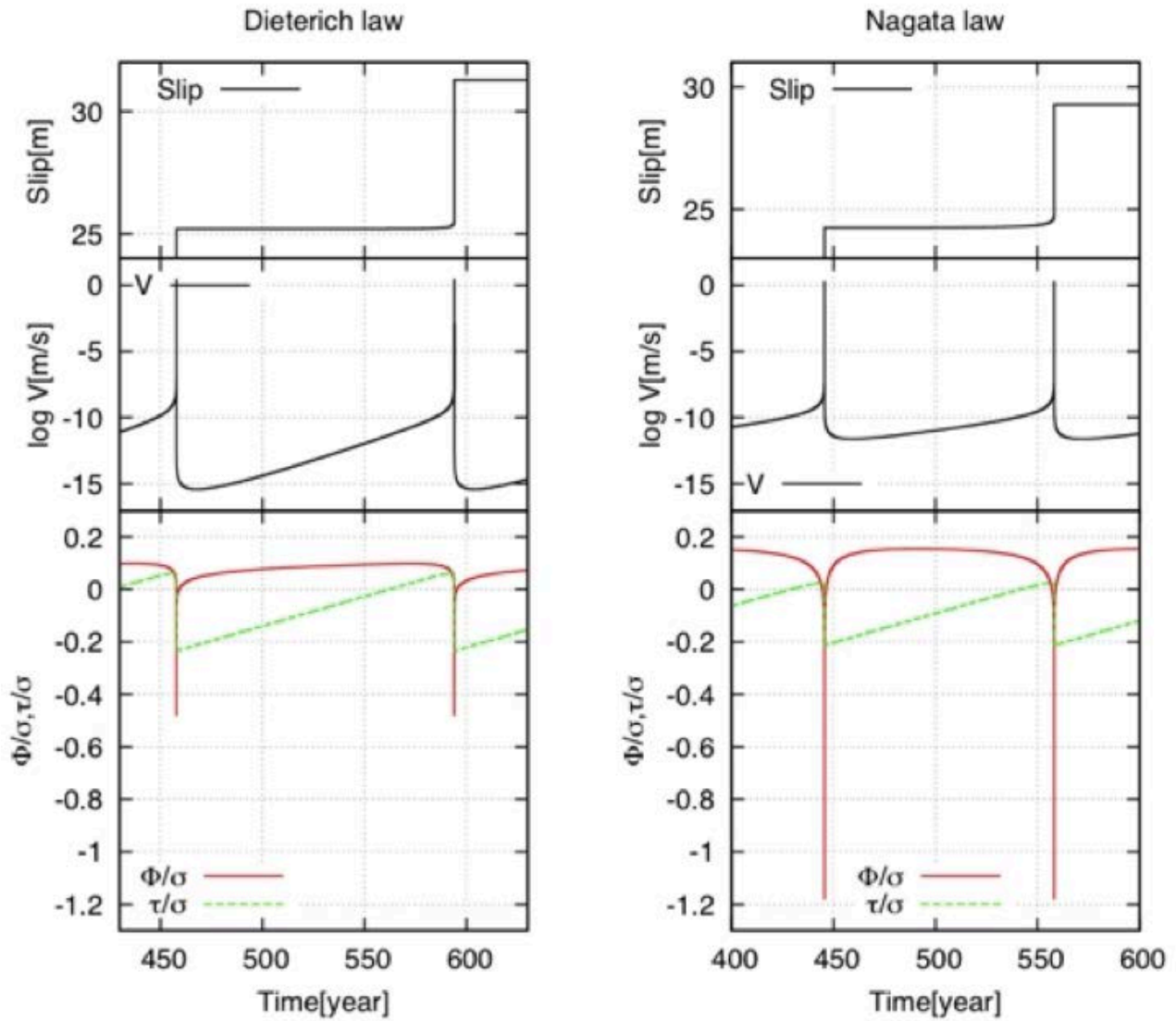


図8. バネブロックモデルによる地震サイクルシミュレーションにおける摩擦則修正の効果。 Φ は任意にさだめた基準滑り速度をおこすのに必要な剪断応力として定義された断層の固着度。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1421])

左列: 従来の摩擦則によるもの。

右列: 修正された摩擦則によるもの。

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も可能となり、大地震発生による強震動と津波の高精度予測・評価と、災害軽減に結びつく。これらの知見に基づき、災害軽減に資するためには、大地震発生後速やかに震源域の広がり把握して、そして時間経過とともに次々と得られる新しい観測データを取り込んだ津波予測のリアルタイム化のための手法開発が必要である。

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の上に成り立っている。このように観測データ解析とシミュレーション技術の高度化に向けた協調的発展が欠かせない。

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これまで開発し、国内外の地震への適用を進めて有効性の検証を行ってきた。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だけでなく、微小地震分布やトモグラフィー、反射法構造探査結果等の測定・観測データを用いた他の研究成果とあわせて、アスペリティの実体解明と事前推定の可能性が見えてくる。

こうした震源破壊過程研究の進捗とともに、アスペリティ破壊の多様性・不規則性と、これを作り出す階層構造や複合破壊など、ポスト・アスペリティ仮説の必要性など次の課題も見えてきている。

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周期性及び多様性に関する研究)

プレート境界型地震の発生メカニズムとその繰り返し特性、および震源過程の多様性の理解の深化をめざし、高精度震源決定法や地震波形および測地データを統合的に用いた高精度震源過程インバージョンなどの解析手法に基づき、大地震のアスペリティ領域の高精度マッピングと、断層周辺の不均質構造、およびプレート形状との関連の議論が行われた。また、繰り返し地震の周期性とその多様性に関する観測研究が実施された。

昨年度に引き続き、岩手県種市沖で発見された中規模 (M6程度) のクラスター地震を対象に、1994年三陸はるか沖地震の最大余震 (1995年1月7日M7.2) と、1995年の繰り返し地震

(M6.2) との関係についてより詳細な検討が行われた。三陸はるか沖地震の発生にかかわらず、地震クラスターの発生間隔が崩されなかった原因は、M7.2最大余震の破壊進行方向が、M6.2地震クラスターの逆方向に進行したこと（東北大学〔課題番号：1211〕H21年度成果）に加えて、M7.2最大余震の大きな滑り域はM6.2地震クラスターと重ならないことが明らかになった（東北大学〔課題番号：1211〕）。今後、アスペリティの複合破壊や大地震の連動発生条件を考えるためには、アスペリティの位置だけでなく、その強度やプレート境界の間隙水圧の時間変化と地震後の回復過程の理解が重要である。

宮城県沖では、海底地震観測と陸上観測データの併合処理により、宮城県沖地震の震源域周辺での高分解能の3次元地震波速度構造推定が行われた。これらの微小地震のP波初動の極性と、S波とP波の震幅比を用いて地震のメカニズム解とその周辺の応力場の詳細推定が行われた。二つをあわせて、プレート間の固着度は、プレート形状の変化による応力の局所的な空間変化と、プレート周辺の物性（VP/VS比）の違いによる摩擦特性の空間変動で規定されている可能性が議論された（東北大学〔課題番号：1211〕）。

茨城県沖ではおよそ10年程度の短い間隔でM7級の地震が繰り返し発生しており、地震の繰り返し性とその多様性の調査のためのデータの蓄積がある。この地震を対象として、昨年度に引き続き1982年の地震（M7.0）と2008年5月の地震の前震（M6.2）、および本震（M6.8）の3地震を対象として、経験的グリーン関数法に基づく広帯域強震波形モデリングから3地震の震源パラメータのバラツキの調査がおこなわれた。強震波形インバージョンにより求められたアスペリティモデルと強震動生成域の関係についての詳しい調査の結果、1982年の地震と2008年の地震の本震の強震動生成域はほぼ等しく（11 km×11 km程度）、かつ2つの領域は半分点度重なるなど、地震の繰り返しが確認できた。一方、1982年の地震（64MPa）は2008年の地震の本震（39MPa）より応力降下量が1.5倍大きく、また滑り量も大きかった。加えて、強震波形は1982年の地震に波初期破壊があったことを示唆し、さらに2008年の地震は前震の43分後に主破壊（すなわち本震）が起きるなど、二つの地震の破壊過程の多様性とその原因を今後検討する必要がある（京都大学防災研究所〔課題番号：1812〕、瀧口・他, 2011）。

（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中小地震のスケール依存性の理解を深めることは、断層の摩擦や強度、破壊の素過程の物理的理解を深め、そして大地震の破壊過程の予測の高度化に繋がる。

平成22年度には（本研究成果のとりまとめが行われた2011年3月上旬までには）、大地震が発生しなかったことから、主として国外の大地震の震源解析に精力をつぎ込み、地震断層破壊の不均質性に関する知見を集めた。今年度解析を行った国内外の地震は、2010年中国・玉樹地震（M6.9）、2010年インドネシア・ムタワイ諸島の地震（M7.8）、2010年小笠原諸島の地震（M7.4）、2010年ニュージーランド・カンタベリー地震（M7.0）、2010年チリ中部地震（M8.8）、及び2010年ハイチ地震（M7.0）である（東京大学理学部〔課題番号：1422〕、Pioiata et al., 2010; Yokota et al., 2010; 尹・ほか, 2010）。

パークフィールド地域の微小地震を対象とした地震破壊過程スケージングの研究に基づく、M2～M6地震の統一的な地震破壊の成長モデルも完成した（東京大学理学部〔課題番号：1503〕、Uchida and Ide, 2010）。こうした震源過程の解析事例を増やすことにより、中小地震から

巨大地震のスケーリングのみならず、断層破壊におけるsuper-share、あるいはnear-shareの伝播速度を持ち大加速度を生み出すような地震から、津波地震のように震害を伴わずに大津波を発生させる、ゆっくり破壊を起こす地震まで、断層破壊現象の多様性とその原因が解き明かされることが期待される。

2009年駿河湾地震の初期破壊過程についても再解析が行われ、今年度新たに自治体震度計ネットワーク（SK-net）の強震波形データを加えた震源解析により、北東傾斜の断層面の破壊開始から1.3秒後に、もう一つの南東傾斜の断層面の上方側に破壊が乗り移ったことが明確となった（九州大学[課題番号：2204]）。震源の詳細解析によりこのような、初期破壊が主破壊から分離して見えるようになってきており、今後、大地震の初期破壊の成因とその成長の理解に繋がるような知見が多く得られることが期待される。

震源至近距離の強震観測により震源破壊過程を詳細に捉え、そして震源破壊理論、地震波形解析、及び室内実験から導かれた仮説を検証する目的で、南アフリカ大深度金鉱山での強震観測もようやく軌道に乗ってきた。今年度は、過去にM7以上の地震を引き起こしたと考えられる断層面上に強震観測網を整備し、ここにダイナミックレンジが500 Gにもなる3成分の強震計（加速度計）を9台新規開発・設置して、25 KHzの高サンプルレートで記録を開始した（東京大学地震研究所[課題番号：1423]、小笠原・他，2010；Watanabe et al., 2010）。

（リアルタイム震源過程解析）

大地震の震源域の広がり調べ、そして強震動の分布や今後の余震の推移を予測して地震防災に生かすために地震発生直後の震源過程解析が求められている。リアルタイムに収集・配信される高度地震観測データを震源過程解析に即座に取り込んだ震源解析の自動化による、リアルタイム震源過程解析に向けた解析システムの整備が昨年度に継続して進められた。

今年度は、防災科研の広帯域観測網（F-net）により即座に求められたモーメントテンソル解を取り込んで、これを初期条件として強震波形インバージョンに基づく震源過程解析を進めるシステムや、曲面断層モデルを用いた震源インバージョン手法の改良などに大きな進展があった。こうした手法に基づき2008年岩手沿岸北部の地震や2009年駿河湾の地震の再解析が行われ、その有効性が確認された（防災科学技術研究所[課題番号：3013]、Aoi et al., 2010；鈴木・他，2011）。

地震計やひずみ計などの多様な観測データを用いた巨大地震の断層滑り分布を地震発生直後（10～20分）に即座に推定する手法開発が進められた。たとえば、断層破壊過程を即時的にイメージするための手法として、短周期地震波形エンベロープを用いた震動源の探索手法が新たに開発され、1994年三陸はるか沖地震や2003年十勝沖地震の震源過程解析からその有効性が示された（気象庁[課題番号]：7024）。また、日本付近で起きるM7以上の地震に対して、歪み計を用いて破壊方向を推定する手法が検討された（気象庁[課題番号]：7024）。

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、震源近傍の検潮記録や沖合津波計で刻々得られる津波波形を取り込んで、波源推定の精度を逐次改善する新しい津波予測手法の開発が進められた。釜石沖の2台の海底ケーブル津波計で記録された2005年宮城県沖地震の津波データを用いて、

地震発生から20分、25分、…、35分後までに得られる観測記録を用いた津波源（海面変動）のインバージョン解析と沿岸津波予測の精度改善を確認した（北海道大学[課題番号:1006]）。また、東北地方太平洋沿岸の5カ所のGPS波浪計（全国港湾海洋波浪観測網：NOWPHAS）データを震源解析に加えた場合についての初期波高の推定精度の向上と沿岸津波の予測精度の向上について、日本海溝のプレート境界地震を想定した数値実験から確認が行われた（図3、東北大学[課題番号：1212]、対馬・他、2010）。このほか、同様の目的で南海トラフの巨大地震の津波予測のリアルタイム化に向けた予備研究も始まった（気象研究所[課題番号：7021]）。

沖合のNOWPHASで観測した津波震幅から海岸の津波を予測する目的で、近年の津波についてNOWPHASと沿岸の潮位観測記録を用いて、津波第1波の震幅比と到着時間差が行われ、今後の沿岸津波警報の高度化に向けた基礎研究が開始された（気象研究所[課題番号：7021]、林, 2010）。また、津波警報の適切な解除に必要となる、津波の減衰過程の研究が進められた。津波の潮位観測記録を用いて津波の時間減衰の近似関数が検討され、これを用いた津波警報解除の可能性が検討された（気象研究所[課題番号：7021]、林, 2010）。

（強震動予測のための地下構造モデルの構築）

南海トラフの巨大地震による長周期地震動の予測精度の向上を目指して、広帯域地震観測網（F-net）で記録された長時間（1年間）の脈動データを用いて地震波干渉法に基づく観測点間のグリーン関数の高精度推定が行われた。屈折・反射法等の物理探査データをもとに構築された既存の3次元地下構造モデルを用いて差分法により地震波伝播計算が行われ、求められたグリーン関数との比較から既存の地下構造モデルの有効性が検証された（京都大学防災研究所[課題番号：1813]、山下・他、2010）。現在の地下構造モデルを初期値として、脈動データの継続解析によりモデルの高精度化が進むことが期待される。

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、スケールが数十～数百メートル以下の短波長不均質構造の分布を調べるために、Hi-netの3成分地震波形記録を用いて、P波エネルギーのTransverse成分への染み出し（EP）の距離依存性と周波数依存性の調査が昨年度に引き続き行われた。特に今年度は、震源距離150 km以遠でEPが急激に増大する性質を用いて、150 km以遠で初動となるマントル屈折波（Pn波）が伝わる下部地殻の不均質性強度が、直達P波が伝わる上部地殻のものより大きいという新たなモデルを提唱し、これを短周期地震波伝播の3次元差分法シミュレーションから検証した（東京大学地震研究所[課題番号：1424]）。

また、地下数～数十メートルの表層地盤で強く増幅される周期1秒以下の強震動の予測精度の向上を目指し、全国のK-NET/KiK-net強震観測点で記録された地震波のS波コーダ部分を用いた解析が行われた。各観測点でのコーダ波の振幅の違いは表層地盤の増幅特性の違いを表すという特徴（コーダ規格化法）を用いて、全国の各観測点地点における周波数毎のサイト増幅係数が詳しく求められた。観測データからサイト増幅特性の補正により同心円状の震度距離減衰が求まることから、従来の手法と比較した有効性の検討が行われた（図4、東京大学地震研究所[課題番号：1424]、竹本・他、2011）。

（強震動と津波の大規模並列計算）

海溝型地震による強震動と地震地殻変動、そして津波の高精度予測と、強震波形と津波波形を統合的に用いた詳細な震源過程解析の実現に向けて、重力項を持つ運動方程式の3次元差分法計算に基づき、地震動、水中音波、地殻変動、そして津波を同時に評価することのできる新しい計算コードを開発した。複雑な沈み込み帯構造において、周波数帯域の大きく異なる波動現象を高精度に評価するために、空気（気体）／海水（流体）／海底（固体）の境界条件の高精度化や、広帯域の波動場に有効なPML吸収境界条件の導入など計算手法の改良を進めた。2004年紀伊半島南東沖の地震における室戸沖海底ケーブル津波計記録を、地球シミュレータを用いた計算により再現して、観測との一致から本モデルの有効性を確認した（図5, 東京大学地震研究所 [課題番号: 1424]、Maeda and Furumura, 2011）。このほか、重力は軟弱な表層地盤における強震動の挙動にも寄与する可能性もあり、強震動予測の高度化に向けて重力を含む弾性体の方程式の計算コードの開発も平行して進められた（九州大学 [課題番号: 2205]）。

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、大地震の破壊過程の詳しい理解を通じて、アスペリティ破壊の繰り返し性とその階層性・連動発生条件を知り、将来の大地震の発生シナリオとこれによる強震動・津波の予測に生かすことである。

近年の高密度強震観測データとGPS高サンプリング観測データによる広帯域地震動と地殻変動、そして海底ケーブル津波計データを併合した広帯域地震動解析により、大地震の震源破壊過程を詳しく評価して、高周波地震動を放射する場所、そして大きな滑りと地殻変動、そして津波を放射する場所の共通性／棲み分けに関する議論が開始された。こうしてアスペリティの実体を理解し、地震の繰り返し性と不規則性を考えた大地震発生のシナリオの明確化への道筋ができてきた。こうした震源解析の成果は本研究課題に止めることなく、たとえば詳細な反射法探査や地震波トモグラフィーに基づく地下構造調査の最新の研究成果や、微小地震活動と震源メカニズム解析から推定された地下の応力状態との比較、そして地震発生予測シミュレーションとの連携など、他の研究部会で現在進められている最新の研究成果との照らし合わせと互いのフィードバックの仕組みを作って本地震予研究全体の連携強化が必要である。

研究成果の中には、すぐに地震防災に活用できるものも出てきている。たとえば、高密度観測データ解析から求められた表層地盤の増幅特性は、大地震による強震動予測や緊急地震速報による各地の震度予測の精度向上に直接活用できる。解析技術の実用的活用に向けた技術移転支援の仕組みも必要であろう。環境アセスメントを目的として、地震活動や震源メカニズム解の分布を用いた地下の応力状態の推定技術や、資源探査を目的とする地震波形を用いた高分解能の地下構造探査など、地震予知研究以外にも技術移転できるものが多数あるに違いない。

また、沖合津波データの逐次解析によるリアルタイム津波予測の研究は、現在進行中の海底ケーブル津波計のデータを使うことにより実現の目処が得られている。高度津波予測の実用化に向け高度機器開発と観測点展開の研究グループと解析研究グループの一層の密な連携が必要である。

地震動予測の高度化には、地下構造モデルと震源モデル、そしてこれらを適切に組み込ん

だ高分解能シミュレーション技術の3つの協調的発展にかかっている。特に大規模シミュレーション技術に関しては、現存の地球シミュレータに加えて、2012年の本格運用に向けて調整中の「京コンピュータ」の実現により、いっそうの加速が期待できる。これに向けて、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を進め、短周期から長周期地震動を含めた広帯域強震動予測の実現に向けた一層の努力が必要である。

参考文献

- Aoi, S., B. Enescu, W. Suzuki, Y. Asano, K. Obara, T. Kunugi, and K. Shiomi, Stress transfer in the Tokai subduction zone from the 2009 Suruga Bay earthquake in Japan, *Nature Geoscience*, 3, 496-500, 2010.
- 青木重樹・岡田正実, 三角ダイヤグラムを用いたメカニズムタイプの変化の統計的検出, *地震*2, 63, 101-105, 2010.
- 浅野公之・岩田知孝・山下佳穂里, 地震動予測用速度構造モデル検証のためのF_{net} 広帯域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(2), *日本地震学会秋季大会*, P1-18, 2010.
- 古村孝志, 地球シミュレータによる地震波伝播と強震動シミュレーション, *計算工学*, 16, 1, 16-19, 2010.
- 古村孝志, 津波発生伝播の大規模3次元シミュレーション, *スーパーコンピューティングニュース*, 12, 1, 43-57, 2010.
- Guaman, A. R., Y. Tanioka, T. Kobayashi, H. Latief, and W. Pandoe, Slip distribution of the 2007 Bengkulu earthquake inferred from tsunami waveforms and InSAR data, *J. Geophys. Res.*, 115, B12316, doi:10.1029/2010JB007565, 2010.
- 林 豊・今村文彦・越村俊一, 津波減衰過程のトレンドとばらつきの性質の遠地津波予測への活用可能性, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, B2-66(1), 211-215, 2010.
- 林 豊, GPS 波浪計の長周期波形観測値による沿岸津波換算値を活用した津波即時情報, *自然災害科学*, 29(3), 381-391, 2010.
- 岩田知孝・浅野公之・鈴木 亘・三宅弘恵, 震源における短周期地震動生成のモデル化, 第38回地盤震動シンポジウム論文集, 51-57, 2010.
- Maeda, T., and T. Furumura, An integrated numerical simulation of seismic waves, ocean acoustics, and tsunamis, *Pure and Applied Geophysics*, submitted, 2011.
- Milev, A. M., Y. Yabe, M. Naoi, M. Nakatani, R. J. Durrheim, H. Ogasawara, and C. H. Scholz, 2010, Coseismic and aseismic deformations of the rock mass around deep level mining in South Africa - Joint South African and Japanese study, Abstracts S34B-05 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, California, 13-17 Dec. AGU Fall Meeting, 2010.
- 小笠原宏・R. Durrheim・中谷正生・矢部康男・A. Milev・A. Cichowicz・川方裕則・森谷祐一・佐藤隆司・S. Murphy・A. Ward・G. Morema・M. Kataka・R. Vermeulen・G. van Aswegen・Research Group of SATREPS, 2010, 鉱山での地震被害低減のための観測研究—日本と南アフリカの共同研究, *日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集*, SSS020-13, 2010.
- Ohta, K., and S. Ide, Precise hypocenter distribution of deep low - frequency earthquakes and its relationship to the local geometry of the subducting plate in the Nankai subduction zone, Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, B01308, doi:10.1029/2010JB007857, 2011.

- 瀧口正治・浅野公之・岩田知孝,近地強震記録を用いた海溝型繰り返し地震の震源過程の推定と比較-茨城県沖で 1982 年と 2008 年に発生した M7 の地震を対象として-, 地震第 2 輯, 63, 掲載決定, 2011.
- 竹本帝人・古村孝志・前田拓人・野口科子、コーダ規格化法によるサイト増幅特性の推定(4) 全国強震観測網における増幅特性の統一的推定と地表と地中の比較、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、発表予定, 2011.
- Takiguchi, M., K. Asano, and T. Iwata, To what extent the repeating earthquakes repeated? - Analyses of 1982 and 2008 Ibaraki-ken-oki M7 class earthquakes using strong motion records -, AGU Fall meeting, S43A-2038, 2010.
- 対馬弘晃・平田賢治・林豊・前田憲二・日野亮太・藤本博己・今村文彦・谷岡勇市郎, 海底圧力・GPS 波浪計データによる近地津波予測, 日本地震学会講演予稿集, P3-50, 2010.
- Uchide, T., and S. Ide, Scaling of earthquake rupture growth in the Parkfield area: Self - similar growth and suppression by the finite seismogenic layer, *J. Geophys. Res.*, 115, B11302, doi:10.1029/2009JB007122, 2010.
- Watanabe, T., Y. Yabe, H. Moriya, M. Nakatani, H. Kawakata, and H. Ogasawara, Development of a measurement system of dynamic stress change associated with a 100-m scale faulting in a South African deep gold mine, *G-COE Symposium 2010 Dynamic Earth and Heterogeneous Structure* 2010.
- 山下佳穂里・浅野公之・岩田知孝, 地震波干渉法による西日本の地殻速度構造(1)-表面波群速度の推定-, 京都大学防災研究所年報, 53B, 175-180, 2010.

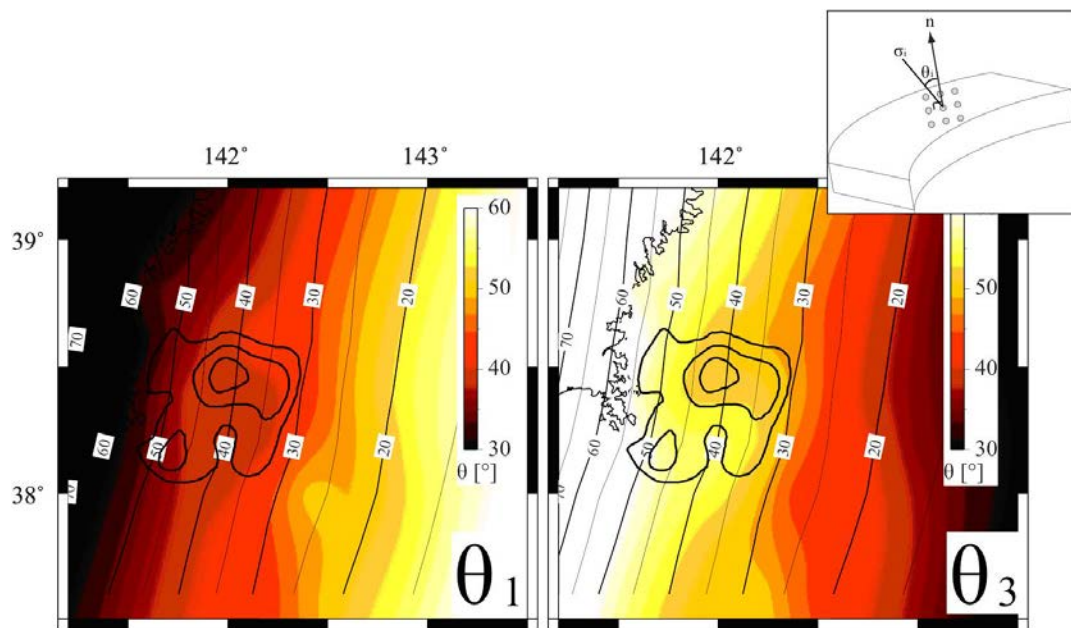


図 1a. 主応力軸とプレート境界のなす角度 (θ_i) . θ_i の分布をカラー, プレート境界の深さを細い実線, アスペリティを太い実線で示す. (左) 最大主応力軸 (θ_1) . (右) 最小主応力軸 (θ_3) . (東北大学[課題番号: 1211]) .

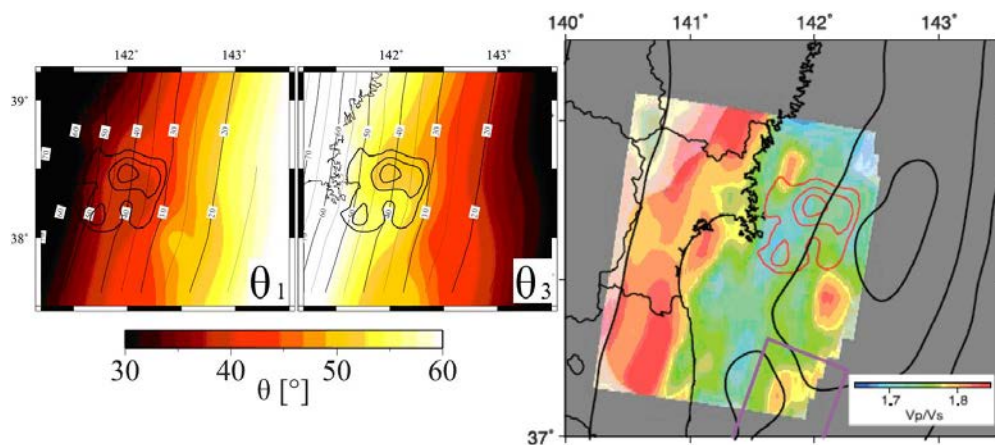


図 1b. θ_i とマントルウェッジ内の V_p/V_s 構造の比較. (左) θ_1 分布. (中) θ_3 分布 (右) マントルウェッジ内の V_p/V_s 構造 (Yamamoto et al., 2008) (東北大学[課題番号: 1211]) .

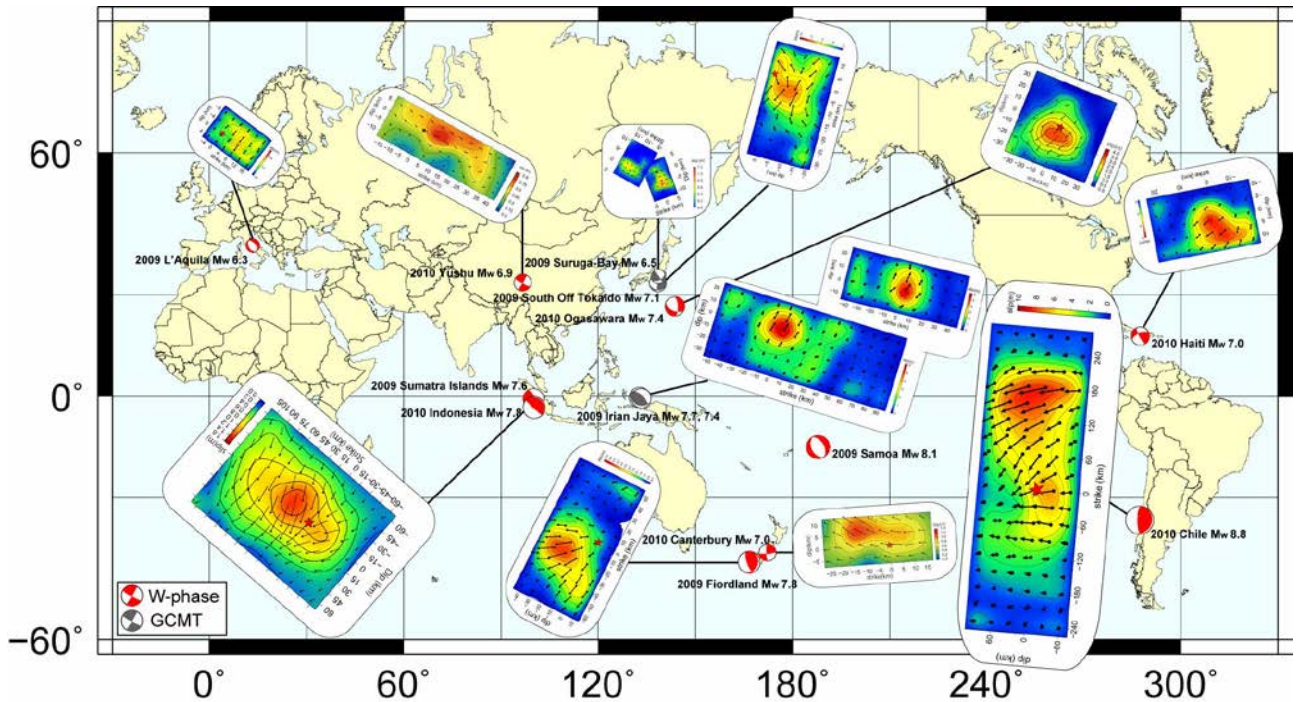


図 2. 被害地震の準リアルタイム震源インバージョン結果 (e.g., Yokota et al., 2010; Poiata et al., 2010)。東から西に向かって、2009 年イタリア・ラクイラ地震 (Mw 6.3)、2010 年中国・玉樹地震 (Mw 6.9)、2009 年インドネシア・スマトラ島北部の地震 (Mw 7.6)、2010 年インドネシア・ムンタワイ諸島の地震 (Mw 7.8)、2009 年インドネシア・Irian Jaya の双子地震 (Mw 7.7, Mw 7.4)、2009 年駿河湾の地震 (Mw 6.5)、2009 年東海道南方沖の地震 (Mw 7.1)、2010 年小笠原諸島の地震 (Mw 7.4)、2009 年ニュージーランド・Fiordland 地震 (Mw 7.8)、2010 年ニュージーランド・カンタベリー地震 (Mw 7.0)、2009 年サモア諸島沖の地震 (Mw 8.1)、2010 年チリ中部地震 (Mw 8.8)、2010 年ハイチ地震 (Mw 7.0)。Mw は Global CMT Project による。(東京大学地震研究所[課題番号: 1422])

32 min after the earthquake

Data: 4 OBPGs + 5 GPS buoys

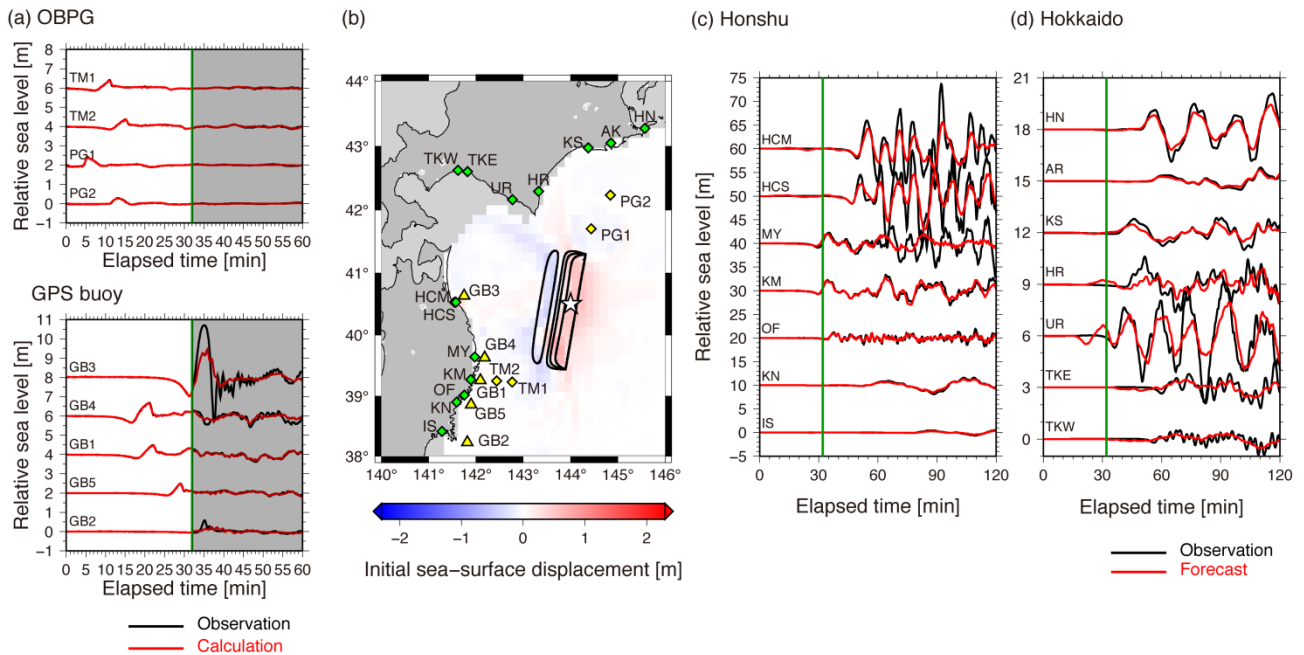


図 3. 津波マグニチュード 8.6 のプレート境界地震に伴う津波を、現在稼働中の 4 点の海底水圧計の波形データを用いて予測することを想定した数値実験における、地震発生後 20 分の予測結果. (a) 逆解析で用いた水圧計での観測波形(黒線)と計算波形(赤線)の比較. (b) 逆解析により推定された初期波高分布. 推定量をカラースケールで示した. 黒線は仮想観測データ生成時に与えた初期波高分布を示す. (c), (d) (b)に示した推定波源モデルから計算した予測津波波形(赤線)と観測津波波形(黒線)の比較. (c)が本州, (d)が北海道の沿岸津波観測点での比較. (a), (c), (d)の緑線は予測を行う時刻を示す. (b)の星印は震央位置を示し, 逆解析における空間ダンピング拘束の基準位置として用いた. 1 と同様の地震津波を、現在稼働中の 4 点の海底水圧計と 5 点の GPS 波浪計の波形データを用いて予測することを想定した, 地震発生後 32 分の予測結果. (東北大学 [課題番号: 1212]).

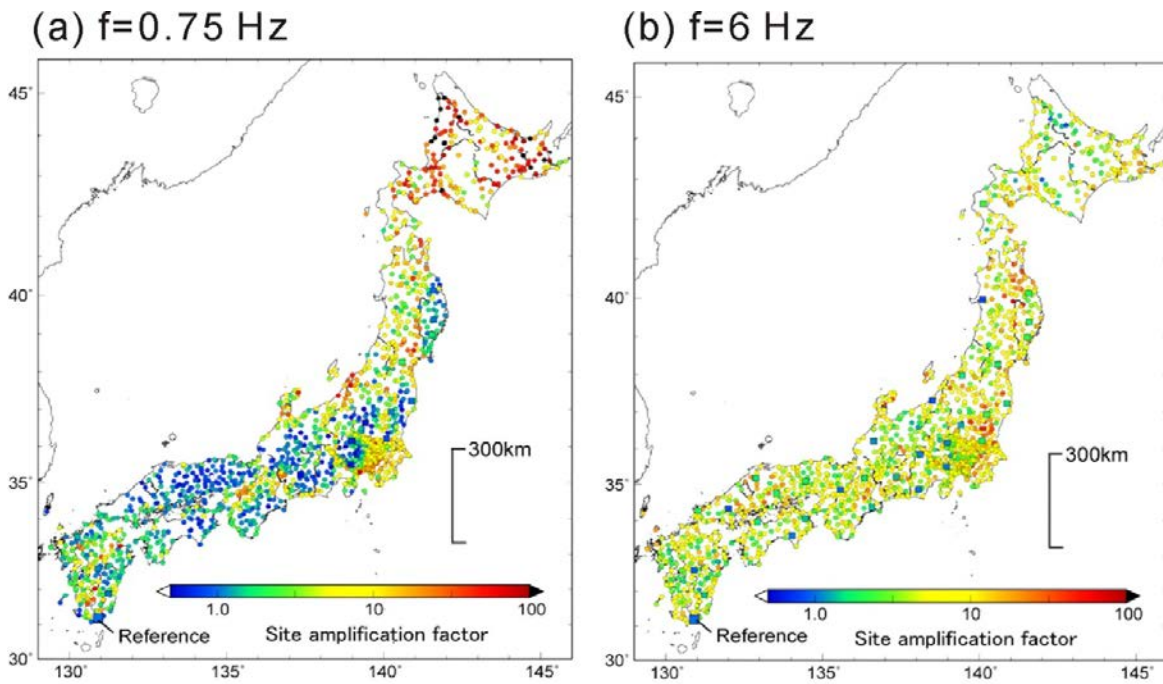


図4. コーダ規格化法により求められた全国の表層地盤（サイト）増幅特性
 (a)周波数 0.75 Hz, (b)周波数 6 Hz における、K-NET, KiK-net 強震観測点毎のサイト増幅係数。（東京大学地震研究所[課題番号：1424]）。

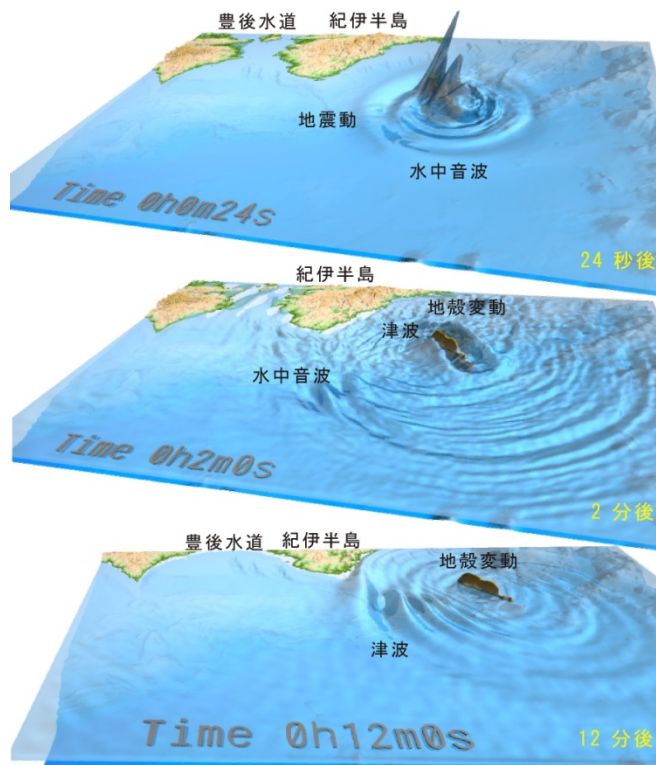


図5. 2004年紀伊半島南東沖地震の地震動—津波同時シミュレーション
 地震—津波同時シミュレーションにより求められた2004年紀伊半島南東沖地震の地震動、水中音波、地殻変動、津波の伝播の様子（地震発生後24秒後、2分後、12分後）。地球シミュレータにより計算。（東京大学地震研究所[課題番号：1424]）。

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、火山体浅部の熱水系や火道周辺構造との相互作用を調べる。さらに、多様な噴火形態やその推移を支配する要因を理解するために、過去の履歴を地質学的情報に基づき記載し、その特徴を明らかにする。

ア. 噴火機構の解明とモデル化

平成11年度の成果として、特筆すべきは噴火の規模や様式に関する予測に関するひとつの経験則を得ることができたことである。平成24年度から観測を開始する予定であったスメル山において地震・傾斜観測を先行して実施し、短時間に繰り返し発生したガス噴出現象のデータを数百個以上系統的に解析し、その平均像を明らかにした。その結果、それぞれのガス噴出の20-30秒前から山体膨脹が始まること、また、噴火規模の指標としてしばしば使われる噴出時の地震の振幅と比較すると、山体膨脹が大きいほど地震の規模が大きくなることが明らかとなった。さらに、2007年に記録されたブルカノ式噴火のデータに同様の解析を行った。その結果、爆発的噴火発生の200-300秒前から山体膨脹が加速的に進行し、膨脹量が大きいほど爆発地震の振幅が大きくなることが明らかとなった(図1)。これらの結果は、噴火前の山体膨脹の大きさや時間スケール、時間的な変化から、スメル山の噴火の様式や規模を予測できることを示している(東北大学[課題番号:1213])。

噴火に伴う火山ガスの放出現象を明らかにするために、昨年度の浅間山と桜島での実施に引き続き、諏訪之瀬島、霧島新燃岳において観測を実施し、噴火前のガス挙動を定量化した。その結果、いずれの噴火も、その発生直前に二酸化硫黄の放出率が減少することが明らかとなった。また、このようなガス放出挙動の測定事例を増やすことが重要であるので、自動観測化に向けて、パニング装置や制御プログラム装置の改良を進めた(東京大学[課題番号:1504])。

浅間山では、山腹東と北側に整備した宇宙線ミュオン観測点の解析で得られた密度構造と長周期パルス機構のメカニズムや発生場所、火道内部の地震活動を比較する事により、火道浅部での様相を明らかにした(東京大学[課題番号:1425])。

以上の成果の他、諏訪之瀬島火山においては、地震・傾斜観測の拡充および維持、データの初期解析、火山灰データの分析を進めるとともに、構造探査により得られた三次元P波構造をもとに爆発地震の震源再決定を行った。また、2011年2月には、最近数十年間ないほどのA型地震活動の活発化、比較的規模の大きい爆発的噴火に関連した規模の大きい山体膨脹現象を捉えた。霧島山では、2011年1月26日の新燃岳噴火発生直後から地震計アレー観測を開始し

た（東北大学〔課題番号：1213〕）。浅間山では、地震波干渉法を利用し、2008年～2009年の微噴火活動に先行する地震波速度の変化、池の平付近の地下5～10kmの深さにマグマ溜りの存在を明らかにした（東京大学〔課題番号：1504〕）。また、携帯型マルチセンサーシステム(Multi-GAS)の改良したH₂O、CO₂、H₂S、SO₂、H₂濃度変動の測定を毎日繰り返す連続観測システムを、浅間山山頂に2点設置し、ネットワーク経由によるデータのダウンロードを可能とした。三宅島2000年噴火について、噴出物中のオリビン中のメルト包有物分析に基づき、2000年噴火およびその後の脱ガス過程のマグマ供給モデルを構築した。口永良部島、吾妻山において、火山ガス組成の繰り返し観測を実施し、地下の熱水系の高温化の傾向を把握した。口永良部島、富士山におけGPS観測を継続し変動の把握を行った。（産業技術総合研究所〔課題番号：5009〕）。個別要素法による3次元応力場下でのマグマ移動シミュレーションを実施した。SPH法を用いて粒子の属性として気体成分を組み込み、その拡散と浸透流による移動のシミュレーションを行い、静的・動的な応力制御による効果を見積もった。また、汎用インターフェースによる溶岩流シミュレーションを実施するとともに、火砕流シミュレーションについても同じインターフェースで実施するための整備を行った。（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

有珠山において、有珠2000年新山域におけるボーリング探査を基軸として、貫入マグマを示唆する構造や変動源、水蒸気爆発の発生場や噴火活動後に発達した熱水系の実体を明らかにするため、本年度は、低高度稠密空中磁気測量、地上全磁力観測、地盤変動観測（水準測量、精密重力測量、In-SAR解析）を行い、2000年新山直下の貫入マグマと考えられる帯磁源や圧力源の位置を解析した。2010年9月の有人ヘリコプターによる低高度稠密空中磁気測量と2000年6月の測量の比較から、2000年新山領域に冷却帯磁を示唆する磁場変化を捉えた（図2）。「だいち」搭載のPALSAR画像を用いた干渉SAR解析結果が示すこの領域の沈降は、NB火口付近の深度400～500mに中心をもつ球状収縮源で説明できることが明かとなった。さらに、空中赤外熱映像観測による噴気地からの熱放出率は5.6MWと見積もられ、KB火口内の湯沼活動をあわせて考えると、総放熱率は2010年9月では5.6MWと2006年9月からの4年間で1/4となったことがわかった。このような急速な熱放出率の減少は1977年噴火後の山頂部における熱活動の推移と大きく異なることが明らかになり、貫入マグマの量の違いがあると推察された。（北海道大学〔課題研究：1007〕）。歴史噴火がほとんどない火山を対象に、地質学的な情報だけからどれだけ噴火事象を数値的に扱えるかを検討するために、有史以来、初めての水蒸気爆発が発生したインドネシア・シナブン火山を対象にし、インドネシア国火山地質災害対策局と共同で10月下旬に地質調査を実施したデータに基づいて、噴火系統樹（イベントツリー）の作成を試みた。プリニー式噴火を示す堆積物が調査中に確認できなかったことなどの地質情報をもとに、分岐の確率を評価した。ただ、噴火記録のない火山の地質ユニットが示す噴火種の頻度に基づく確率評価には不確定さがあり、問題点として残った（東京大学〔課題番号：1426〕）。

課題と展望

スメル山で繰り返し発生するブルカノ式噴火やガス噴出の直前に発現する山体膨脹から、

噴火の様式や規模を予測できる可能性があるデータが示されたことは重要である。諏訪之瀬島火山で実施している傾斜・地震観測データについても、限られたデータ数ではあるが、山体膨脹と地震規模に相関がある傾向がみえる。浅間山、霧島山新燃岳、桜島などでも、類似の噴火現象が起きている。今後、諏訪之瀬島をはじめとしてデータを蓄積し、多量のデータを系統的に解析することが重要である。前年度の成果報告書の課題と展望にも多量のデータの系統的解析の必要性を述べたが、噴火規模・様式予測にたたき台となる方法がみえてきたことにより、ひとつの具体的な解析手順ができた。今後、山体膨脹現象と噴火地震の規模の関係の有無を調べ、スメル山で見つかった経験則の成立する範囲を観測データから明らかにすることが、規模・様式の予測方法の構築に欠かせないだろう。

一方、多項目の観測データにもとづき、火山噴火現象の多様性を定量的に記述することも不可欠である。これまで進めてきた地震・山体膨脹・収縮、空振などを対象とした地球物理学的観測とともに、火山ガスモニタリングや火山灰分析などの物質化学的分析を継続して行い、よりダイナミックレンジの広い噴火のデータを取得することは言うまでもない。前述した山体膨脹現象は噴火規模や様式予測のひとつの指標であるが、爆発的噴火直前に発現する火山ガス放出率の低下なども、別な予測指標となるかデータを調べられるよう、モニタリング技術を高め、データ蓄積を進めることが重要であろう。

観測データの蓄積による予測方法の構築だけではなく、それを広く一般化するために、火道浅部のマグマ上昇過程の物理的・化学的な理解が必要である。そのためには、マグマが蓄積・上昇する、マグマ溜まりや火道など、噴火を引き起こす舞台の特性を把握することが重要である。有珠山で平成21、22年度に進められた、地磁気観測、地殻変動、熱観測に加えて、23年度から始まる試錘探査は、水蒸気爆発や溶岩ドーム、あるいはプリニー式噴火という異なる噴火様式と発生場の関係を調べる第一歩であり、次年度以降の成果が期待される。

参考文献

- 八木原 寛・井口正人・為栗 健・筒井智樹・及川 純・大倉敬宏・宮町宏樹, 2010, 諏訪之瀬島の火山体浅部3次元P波速度構造と爆発発生場, 火山, 55, 75-87.
- Nishimura, T. and Ueki, S., 2011, Seismicity and magma supply rate of the 1998 failed eruption at Iwate volcano, Japan, Bull. Volcanol., doi: 10.1007/s00445-010-0438-8.
- 喜多村陽, 2010, 有限要素法を用いた開口型火道内圧力源による山体変形の研究, 東北大学修士論文, 80pp.
- 寺田暁彦, 2010, 火山における熱観測, 火山, 55, 155-163.
- 大島弘光, 2010, 有珠山の1910年と2000年の噴火活動, 日本火山学会2010年秋季大会予稿集.
- 橋本武志・宇津木充・中塚 正・大熊茂雄・小山崇夫・神田 径・鈴木敦生, 2010, 繰り返し空中磁気測量で検出された有珠山の全磁力変化, Conductivity Anomaly 研究会論文集, 投稿中.
- 大熊茂雄・中塚 正・駒澤正夫, 2011, 産総研における空中物理探査の10年間(2000~2009) —有珠から有珠へ—, 地質ニュース, 677, 9-15.
- 宇津木充, 2011, 京都大学における空中磁場観測への取り組み, 地質ニュース, 677, 34-39.
- Maeda, Y, M. Takeo, and T. Ohminato, A waveform inversion including tilt: method and simple tests, Geophys. J. Int., doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04892.x, 2011.
- Maeda, Y., and M. Takeo, Very-Long-Period pulses at Asama volcano, central Japan, inferred from dense

seismic observation, *Geophys. J. Int.*, in press, 2011.

Nagaoka, Y., K. Nishida, Y. Aoki, and M. Takeo, Temporal change of phase velocity beneath Mt. Asama, Japan, inferred from coda wave interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L22311, doi:10.1029/2010GL045289, 2010.

Saito, G., Morishita, Y., and Shinohara, H. (2010) Magma plumbing system of the 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan, deduced from volatile and major component contents of olivine-hosted melt inclusions. *J. Geophys. Res.*, 115, B11202, doi:10.1029/2010JB007433.

下司信夫・篠原宏志(2010) 三宅島火山の連続脱ガスに伴う小噴火噴出物に含まれる玄武岩質本質物から推測する火道内マグマプロセス. *火山*, 55, 241-250.

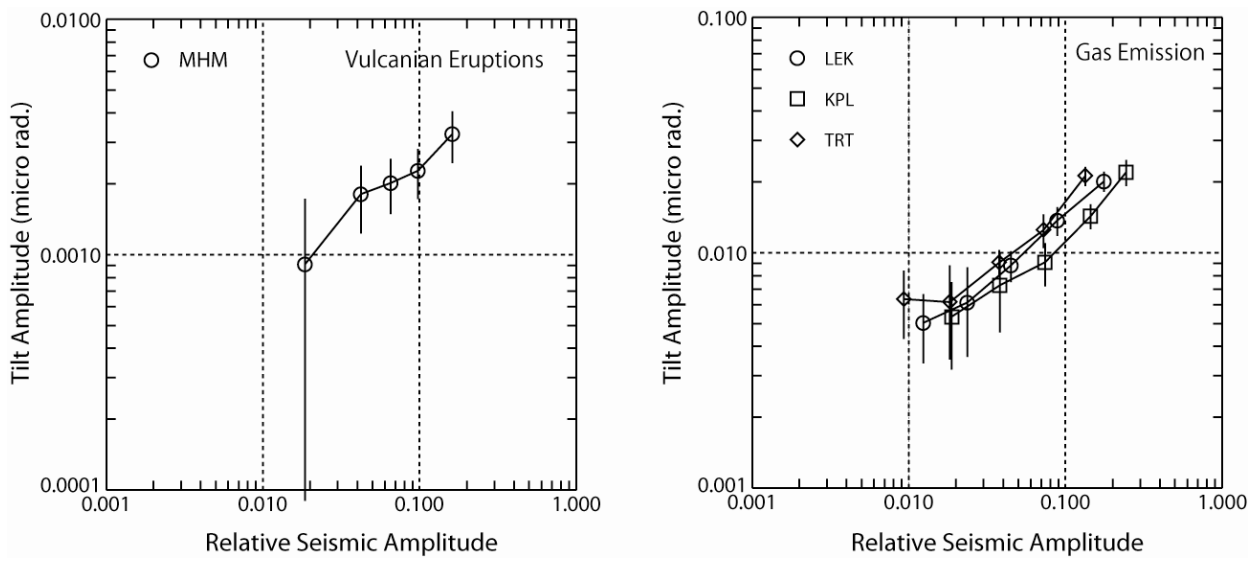


図 1 . スメル山で求められた噴火に先行する山体膨脹の振幅（傾斜値）と噴火に伴う地震の最大振幅の関係．（左）2007年ブルカノ式噴火，（右）2010年ガス噴出のデータ解析結果．

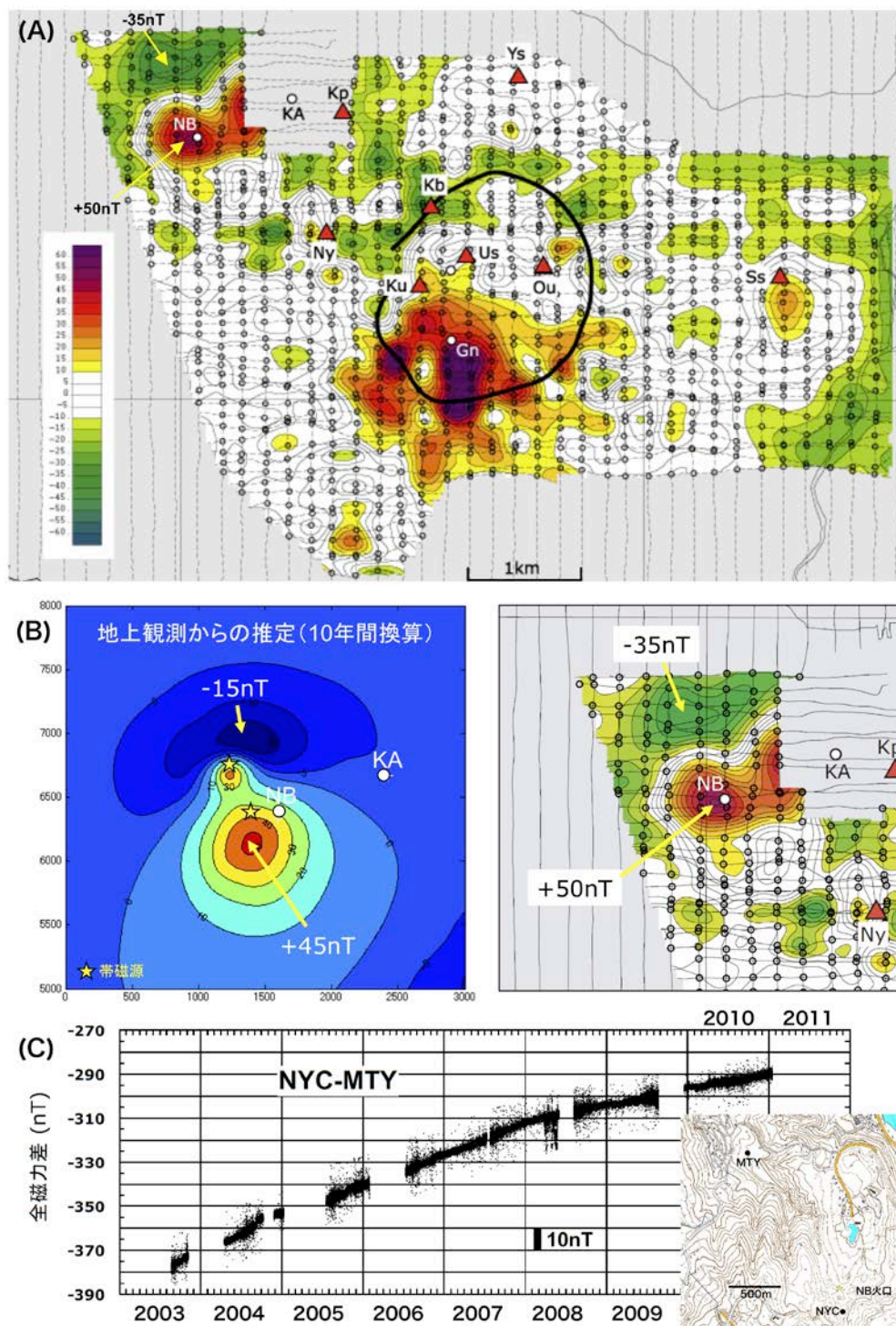


図2. 対地高度約200mのリダクション面における2000年6月から2010年9月の間の空中全磁力変化(A), 2000年山地域で地上観測から推定されている球状帯磁源が作るリダクション面での全磁力変化(B左)と測量結果の比較(B右), およびNB火口南側の磁気点NYCにおけるMTYを参照点とした毎5分単純差の経年変化(C). (B) および(C)において黄色星は推定されている球状帯磁源の位置を示す.

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)
同計画推進部会委員 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、地震発生各過程を支配する破壊・摩擦構成則の素過程を理解するための実験的・理論的研究を行った。観測可能量から地震発生場の環境を精度よく推定するために、岩石物性の環境依存性を明らかにすることを目指した実験・計測をおこなった。時空間的スケールが数桁以上異なる自然地震へ室内実験の知見を適用することの妥当性を検討するために、摩擦・破壊現象の規模依存性を明らかにするための実験・観測を行った。火山噴火過程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。

火山噴火素過程研究は、今後の予知研究から新たに始まった課題であり、予知研究の中での位置づけや役割について共通認識があるわけではない。そのことを踏まえて、この報告では、個々の研究課題の素過程との関わり方に視点を置いて、予知研究の中での各研究課題の成果を整理してみたい。

ア. 岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

(ガウジの挙動)

ガウジ層を有する模擬断層の三軸圧縮試験をより系統的に行い、固着-すべりの核形成時にガウジ層が数%膨張することを確かめた。このことは、固着-すべりの核形成が、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るとする仮説を裏付ける(東北大学[課題番号: 1215])。

ガウジ粒子同士の衝突によるエネルギー散逸が摩擦強度に及ぼす影響を明らかにするため、化学反応を起こしにくいガラスビーズを用いたリング剪断試験を行った。低速域では、ビーズ表面の凝着力のため、伝統的な摩擦則に従う振る舞いが見られたが、運動エネルギーが表面エネルギーよりも優勢となる高速摩擦では、多体系数値シミュレーション(Hatano, 2010a)と整合する、強烈な速度強化が見られた。粒径や垂直応力に対する摩擦強度の依存性もシミュレーションの予測とよく一致していた。また、高速域でのみ、ガウジ層の著しい膨張が観察された。これは、高速域での強烈な速度強化が、粒子の集団ダイナミクスの結果であるというシミュレーションの考察を強く支持する。さらに、シミュレーションでは、高速域で剪断速度を変化させた時の摩擦抵抗の変化は、低速域で見られるような特徴的すべり距離ではなく、特徴的時間で規定されることが示された(Hatano, 2010b)。このことは、自然地震で推定される D_c が、地震の規模とともに大きくなることに対して、ひとつの説明を与える可能性がある(東京大学地震研究所[課題番号: 1427])。

(中速・高速摩擦特性)

アラスカのコーディアックメランジで採取した付加体泥岩を用いた中・高速摩擦実験を行っ

た。垂直応力 1 MPa では、泥岩ガウジの摩擦強度が増加するのに伴って、ガウジ層の膨張が認められた。垂直応力を低下させると、摩擦強度の増加やガウジ層の膨張の程度も小さくなり、垂直応力 0.4MPa では、いずれも認められなくなった（京都大学防災研究所 [課題番号：1814]）。

南海掘削の深さ約 270m でえられた 2 つの粘土質断層試料を用いた摩擦実験を行った。低速では、一方の試料は速度強化の摩擦特性を示し、他方は速度弱化を示した。しかし、中速摩擦実験では両者の挙動は、互いに、きわめて類似していた。これらのことから、低速すべりでは、粒径や組成、組織といった試料の個性が摩擦特性に影響を与えるが、中速ではその影響が消失することがわかった。その具体的なメカニズムはまだ不明だが、前述した粒子の集団ダイナミクスと関係しているのかも知れない（京都大学防災研究所 [課題番号：1814]）。

室温から 1000℃までの背景温度で中速すべり実験を行った。400℃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℃では、温度上昇にともない摩擦強度が増加した。さらに 1000℃まで温度を上げると摩擦強度は再び低下した（Kanagawa et al., 2010）。摩耗により生成されたガウジの X 線回折分析から、温度 800℃までの摩擦強度は、ガウジ中の非晶質物質の含有量と負の相関があることがわかった。一方、800℃から 1000℃への温度上昇に伴う強度の低下は、軌跡の酸化分解反応生成物の粒状流動に起因していることが、実験後の断層面付着物の微細構造観察と結晶方位解析から明らかになった。摩擦強度の背景温度依存性は大きく、従来観察されている、すべり速度の増加に伴う摩擦強度の著しい低下に対しても、摩擦発熱による温度の上昇が寄与している可能性がある（東京大学地震研究所・千葉大学 [課題番号：1427]）。

回転式高速摩擦試験機の回転側サンプルにつけた 10 個のセンサーから信号が取り出せるよう、試験機を改造した。これにより、実験中も、断層をまたいだ測定データを得られるようになった。改造によって試験機の特徴が変化していないことを確かめた後、高速すべり中の断層の弾性波透過率や電気伝導度の法線応力依存性を調べた。暫定的な解析では、低速摩擦で強度が増すと弾性波透過率も増えるのとは逆に、高速摩擦では、強度が増すと透過率が減少することが明らかになった。このこと、低速摩擦と高速摩擦では、摩擦の素過程が異なることを示唆する（防災科学技術研究所 [課題番号 3015]）。

（透過弾性波試験）

断層面透過波振幅から推定した断層面接触状態の物理的意味づけを明らかにするため、アクリル樹脂を用いたすべり実験を行い、光学的に計測された真実接触面積と音波透過率の比較を行った。その結果、両者の関係は、すべり速度ごとに異なる線形関係に従い、音波透過率から真実接触面積を一意に推定できるわけではないことが明らかとなった（東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。

静的接触時間の増加に伴う断層面強度回復の不均質性を明らかにするために、受信子を面的に配置して音波透過率の時間変化を計測した。接触開始直後の初期音波透過率は、断層面形状の凸部同士が接触している場所で大きい傾向があった。音波透過率は接触時間の対数に比例して増加するが、初期透過率が大きいほどその増加率が大きいことが明らかとなった（京都大学防災研究所 [課題番号：1814]）。

三軸圧縮試験での断層面形成に伴う弾性波透過率の変化を定量的に評価するため、計測に

用いた広帯域圧電センサーの検定を行った。検定結果に基づいて、200kHz~1MHzの帯域での減衰係数Q値を求めたところ、ダイラタンシーが起きるまではQ~23で一定であるが、ダイラタンシー開始とともに減少し、試料の降伏時ではQ~17.5であった。降伏荷重以降は、それ以前に比べて、初動振幅の減少率が増加したが、Q値にはそのような急激な変化は見られなかった (Yoshimitsu and Kawakata, 2011)。試験後に回収された試料のX線CT解析によりえられた断層等の構造が、弾性波速度不均質としてどのように見えるのかを明らかにするため、弾性波速度トモグラフィ解析を行った。観測できる周波数帯の制約により、弾性波速度トモグラフィの分解能は10mm程度と粗いものの、推定された低速度域の分布は、X線CTで捉えた断層の分布と概ね一致していた (立命館大学 [課題番号: 2909])。

(岩石-水相互作用)

断層バルブモデル (例えば、Sibson *et al.*, 1988) の妥当性を検証するために、地殻内の亀裂を上昇する流体からの鉱物の析出に関する熱力学的シミュレーションを行った。鉱物の析出がもっとも顕著なのは、地殻の温度とは無関係に初期モデルに与えた圧力勾配が最大の所であり、断層バルブモデルで主張されているように、地震発生層最下部 (温度~300°Cの深度) でバルブが形成される必然性がないことが明らかになった。今回行ったシミュレーションでは、溶媒として純水を仮定したが、昨年度の成果で、より一般的な地殻流体であるH₂O-NaCl系の流体では、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ている。断層バルブモデルの妥当性をさらに検証するためには、今後、塩水溶媒の物理化学特性を明らかにする必要がある (東北大学 [課題番号: 1214])。

断層バルブモデルの理論的検証と平行して、実験的検証も行った。シリカに過飽和な超臨界水をステンレス管中に流してシリカ鉱物を析出させ、流路を閉塞させた。析出するシリカ鉱物は、シリカの過飽和度と溶液中の不純分 (今年度はAlについて実験) の濃度に依存していることが明らかとなり、その析出速度式を策定することが出来た (Saisyu *et al.*, 2010)。これは、Rimstid and Barnes (1980)によるシリカ鉱物の析出速度式を30年ぶりに改訂する成果である。実験中、シリカ鉱物の析出等による流路の閉塞に伴う流体圧の上昇と、流路が再開に伴う流体圧の減少が観察された。流体圧の上昇-下降のサイクルには、特徴的時間が数時間のものや数分間のものがあった。前者は、シリカ鉱物の析出による流路の閉塞、後者は破碎したシリカ鉱物が引っかかることによる流路の閉塞によって引き起こされたと考えられる。化学的過程による流路閉塞と物理的過程による流路閉塞で、圧力変動の特徴的時間が著しく異なることは興味深い (東北大学 [課題番号: 1214])。

(下部地殻のレオロジー)

地殻流体との物理化学的相互作用により岩石の強度が低下し、塑性変形が促進されると考えられている。しかし、どの程度の水の存在が存在すれば下部地殻岩石の軟化が生じるのかは未だ明らかではない。そこで、下部地殻の代表的構成岩石である斜長岩のレオロジーにおける水の影響を調べるため、下部地殻の温度圧力条件 (封圧 1.2GPa、900°C) で変形実験を行った。含水量が0.2wt%の実験では、乾燥状態にくらべて顕著な軟化は見られなかったが、鏡下においては、試料表面部分に局在した著しい塑性変形が認められた。この部分が強い格

子定向配列 (LP0) を持つことから、表面に拡散した水が局所的な塑性変形を促し、塑性歪が表面に集中したと考えられる。一方、約 1wt%の実験では、強度が著しく低下した。回収した試料には強い LP0 の発達に加え、多数のクラックが認められた。このことは、下部地殻の温度圧力条件下では 1wt%の水が、斜長岩の水圧破壊を引き起こす可能性を示している (東北大学 [課題番号: 1214])。

フィリピン海プレートの地殻下部物質が露出しているフィリピン海パレスベラ海盆のゴジラメガムリオンから採取した塩基性岩と超塩基性岩の構造岩石学的な特徴を明らかにした (Harigane *et al.*, 2010)。塩基性岩の大部分は無水ハンレイ岩ではなく、角閃石ハンレイ岩ないし角閃岩であった。角閃岩は、強く剪断変形したマイロナイトを含む岩石であり、含水鉱物である角閃石に強い結晶方位異方性を発達させたことがわかった。また、海洋底風化作用によって著しく風化した蛇紋岩化したカンラン岩の微細構造解析から、フィリピン海プレートマントル最上部の構造と変形の局在かを明らかにした。来年度、これらを含む岩石の変形実験と音速測定を同時に行うための装置の改造・調整を行い、その再現性を確かめるため、今年度は、メノウとフリントを用いた基礎実験を行った (植田・道林, 2010) (東京大学地震研究所・静岡大学 [課題番号: 1427])。

比較的低温でも脆性-塑性遷移領域が現れる蛇紋岩を用いて、高温高压下でのレオロジーを明らかにし、蛇紋岩の摩擦構成則パラメーターのマッピングを完成させた (産業技術総合研究所 [課題番号: 5010])。

極細粒高緻密多結晶体の超塑性変形により、最大 500%の伸び変形をした試料の微細構造解析を行ったところ、多結晶体の粒径が、試料の変形 (歪量) とともに増加することが明らかになった。実験によりえられた粒径-歪の関係から、断層深部延長でせん断歪が約 15 より大きくなると、もはや超塑性は発現せず、変形のメカニズムが転位クリープに遷移することが予想される (Hiraga *et al.*, 2010) (東京大学地震研究所 [課題番号: 1427])。

(地震発生に伴う電位変化)

模擬断層にガウジをはさんだ三軸圧縮試験では、断層が先駆的にゆっくりと滑る際に、摩擦静電気によると思われる電位が発生することを明らかにした (Onuma *et al.*, 2011) (東北大学 [課題番号: 1215])。

石英等の圧電効果により、岩石破壊に先行して電位変化が生じることが、これまでに室内実験で観察されている。石英の結晶軸の方位がそろっていない時には、このような電位変動の振幅が、破壊の規模によってどのようにスケールされるのかを明らかにするため、南アフリカ大深度金鉱山のひとつである Ezluwini 鉱山の地下約 1000m で、高感度のボアホールアンテナを用いた観測を開始した。これまでに、断層破壊そのものに起因する電位変動は捉えられていないが、地震波の伝播により励起されたと見られる信号を計測することに成功した。アンテナから 90m 程度離れた地震計で観測した波形と比べると、アンテナで観測された電位信号波形は、地震波の速度波形と類似していた (東京大学地震研究所 [課題番号: 1427])。

(摩擦の微視的過程)

地震サイクルにおいて大部分の期間をしめる低速すべりが、脆性的な性質と流動的な性質をあわせもつという重要な特徴は、鉱物硬度オーダーの局所的高圧下における真実接触部分

での固体流動現象が基礎になっている。そこで、点接触変形に関する基本的な知見を得るため、モース硬度が 1-9 の各鉱物の点接触変形試験を行った。点接触変形の加重-圧痕深さ-変形エネルギーの間には系統的な関係が認められた。岩石摩擦の時間的性質はこれまで、主として花崗岩を用いて調べられてきたが、今回発見した加重-圧痕深さ-変形エネルギーの関係を用いれば、特定の岩種で調べられた摩擦則を他の岩種に拡張することが出来るであろう(静岡大学 [課題番号: 2910])。

イ. 地殻・上部マントルの物性の環境依存性

(巨視的弾性定数の予測モデル)

複合媒質の巨視的弾性定数の計算には、一般に、Voigt 平均や Reuss 平均が用いられる。これらの手法は、鉱物粒子の形状や配列を考慮していないので、それぞれ、巨視的弾性定数の上限と下限を与えるに過ぎない。カンラン岩のように、構成鉱物の異方性や鉱物種間の物性コントラストも小さい場合には予測される上限と下限の差が小さく、推定の不確かさは小さい。しかし、構成鉱物の異方性が強く、また、鉱物種間の物性コントラストが大きい蛇紋岩では、上限と下限の差が大きいため、蛇紋岩の弾性定数を正確に予測するための計算手法をあらたに開発する必要がある。その準備として今年度は、蛇紋岩試料中のオリビンやアンチゴライトの結晶方位分布とこれらの単結晶の弾性定数を用いて推定した弾性波速度と実測の弾性波速度を比較した。実測値は、予測範囲の下限を与える Reuss 平均の予測とよい一致を示した。この傾向は、蛇紋岩の面構造に垂直に伝播する波において顕著である。さらに、固体圧変形試験機内でせん断変形させた蛇紋岩試料内の鉱物粒子の結晶方位を測定して、弾性波速度異方性に対して変形が及ぼす効果を調べた。鉱物粒子の方位測定には SEM-EBSD 法を用い、試料表面の処理法を工夫することで、アンチゴライトの結晶方位解析法を確立した。蛇紋岩は、わずかな歪により地震波異方性が著しく強くなった。この結果を沈み込み帯に適用すると、沈み込むスラブの角度によって、蛇紋岩の異方性が地上での地震波速度観測に影響することが予想される(東京大学地震研究所、富山大学 [課題番号: 1428])。

15km 以深の地殻の地震波速度は、岩石を、鉱物の単結晶の組み合わせとして考えた時の速度で説明可能である。一方、深さ 15km から地表にかけては、一般に、浅くなるにつれて地震波速度は緩やかに減少する。これは、15km 以浅の速度構造と理想的な岩石の弾性波速度からのずれが、浅くなるにつれて顕著になることを意味している。この原因が、岩石で普遍的に観察される鉱物粒間のクラックの発達にあるとする仮説を立て、その検証のための実験・計算を行った。地殻の主要構成鉱物である石英の高緻密多結晶体を合成することが出来なかったため、実験には、クラックをほとんど含まない天然のメタチャートを使用した。メタチャートを加熱すると、温度の上昇とともにクラックが増加し、最終的にはほぼ 100% の粒界にクラックが生じた。クラックの平均長さは、粒界クラックの生成が、温度や圧力の変化に伴う異方的な鉱物粒子の変形ミスフィットによるものであるとしたモデル計算とよく一致した。天然岩石の弾性波速度とクラック密度の関係を調べたところ、両者の関係は Hudson's model によって記述できることがわかった。適当な温度・圧力の深さ分布を仮定して、実験結果を適用したところ、地殻の弾性波速度分布が、粒界クラックの発達度の深さ分布で説明できた(東京大学地震研究所 [課題番号: 1428])。

(多結晶体の非弾性特性)

昨年度に開発した、非弾性特性をきわめて広い帯域 (0.1mHz-100Hz) で測定可能な実験装置を用いて、有機物多結晶体 (上部マントルにあるオリビンのアナログ物質) のヤング率と減衰の周波数・温度・粒径依存性を調べた。周波数を、物質のマックスウェル周波数で規格化すると、減衰の周波数依存性 (緩和スペクトル) は、温度や粒径に依存しないひとつの関数で表せることがわかった。同様に規格化されたオリビン多結晶体の緩和スペクトルも同一の関数で表せる。このことから、多結晶体の非弾性特性は物質によらない普遍性があると考えられる。しかし、これまでに明らかになっている多結晶体の緩和スペクトルの帯域は、規格化された地震波帯域よりも数桁低周波であるため、実験結果を自然地震観測に適用するためには、非弾性の適切なモデル化が必要である (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 級地震の余震解析)

南アフリカ大深度金鉱山のひとつであるムポネン金鉱山の地下約 3.3km において発生した地震 (Mw1.9) の余震群のマグニチュードを推定した。観測に用いた AE センサーは、高周波まで感度が高いものの、複雑な周波数特性を持っているので、これまで、電圧出力を物理量に変換することが出来なかった。観測に用いた AE 観測網には、周波数特性が明らかな三成分加速度計も埋設されていた。そこで本年度は、加速度計でも明瞭な信号が記録されている帯域に絞って AE センサーと加速度計の記録を比較して、AE センサーの電圧感度較正を行い、余震のマグニチュードを決定することに成功した。余震の規模別頻度分布は Gutenberg-Richter の関係にしたがっており、観測網の中心から 100m 以内では Mw=-4 までの地震がもれなく検知できていたようである。余震群は 5 つの明瞭な空間的クラスターに分類できる。それぞれのクラスターに対して b 値を推定したところ、本震破壊面に沿って 2 次元的に分布するクラスターのみが高い b 値 (1.41) を示した。同時に、より大規模な AE 観測網をイズルウィニ金鉱山やモアプ・コツオン金鉱山に展開中である (立命館大学 [課題番号: 2402])。

(実験室での AE 観測)

花崗岩試料と砂岩試料を用いて、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、三軸伸張 (軸圧が封圧よりも小さい) 試験を行った。試験開始から終了までにわたって、試料の微小破壊に伴って放射される弾性波 (AE) を連続で観測した。三軸伸張試験でも、初動が全て押しの微小破壊 (開口型) だけではなく、押し引きが混在したものも観測され、せん断型の微小破壊も発生していることが示唆された。一軸圧縮試験では、これまでに例のない、広帯域センサーを用いた長時間連続収録に成功した (立命館大学 [課題番号: 2402])。

(高周波波動生成過程)

天然の断層の破壊に伴って放射される高周波強震動の生成過程を直接観測するために、25kHz までフラットな周波数特性を持ち、最大 500G まで観測可能な三成分加速度計を、イズルウィニ金鉱山の地下約 1km に埋設した。これまで鉱山地震観測に用いられてきた加速度計の容量は 50G であり、今回埋設したものより 1 桁小さい。また、従来の加速度計の孔軸方向

と孔径方向の成分の周波数特性には、防水・耐圧容器の形状の縦横比が大きいことに由来する異方性があった。今回、この問題を解決するために、縦横比を1に近づけるように設計した防水・耐圧容器を新たに作成した。室内実験での検定により、両者の周波数特性が一致することを確認した（東北大学 [課題番号：1215]）。

（断層面外亀裂の再現実験）

地震時破壊エネルギーの規模依存性は、地質学的ずれ変位の大部分をまかなう成熟した断層のコア部分から分岐した多数の副次断層の形成によっている可能性がある。そこで、既存弱面を持つアガロースゲルの破壊実験により、副次断層の形成を再現する実験を行った（Kuwano, 2010）。種々の模索の結果、弱面の固着度をコントロールする手法を確立し、様々な程度の副次断層（面外亀裂）を発生させることに成功した。副次断層は、主断層の破壊先端近傍の引張場側だけに発生した。また、副次断層の生成中は主破壊の伝播速度が低下した。破壊伝播に伴うエネルギー解放率と副次断層を含めた破壊表面エネルギーとの関係はグリフィスの破壊基準をほぼ満たしており、アガロースゲルの破壊は、地震時の動的破壊と同じ力学的枠組みに沿ったものであるといえる（東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。

エ. マグマの分化・発泡・脱ガス過程

（素過程に関係づけた観測量解釈の高度化）

観測データからマグマ本体の情報を引き出すには高度なモデル化が必要である。火道内マグマおよび火山性ガスの上昇・下降を反映している山体膨脹・収縮現象に対する山体地形の影響を評価することはその一例である。2次元の有限要素法を用いて評価した結果、山体の傾斜角が大きくなるに従い、変位・傾斜量の最大値が現れる位置は火口中心に近くなり、最大の変位量や傾斜量は平坦な地形の場合に比べて2～5倍大きくなり、測地データから火道内マグマの実態を推測する際には、地形を適切に考慮しなければならないことが分かった（東北大学理学系研究科 [課題番号：1216]）。また、前兆現象としての火山性微動データから流体亀裂の振動を読み解くには、矩形・扁平楕円体など亀裂形状の影響を評価することが必要である。亀裂の形状を考慮して流体亀裂振動・火道振動からの弾性波放射特性の検討を行った結果、高次の振動モードにおいては、亀裂先端での変換・放射が顕著になることが分かり、亀裂と地表面との相互作用による表面波励起などの効果をさらに検討する必要性が示された（東北大学理学系研究科 [課題番号：1216]）。

（噴火現象における素過程の役割と評価）

マグマという、力学的に複雑な性質を示す物質において、噴火の爆発性を左右している脱ガスの機構を明らかにすることは素過程研究の大きな目標の一つである。その視点に立って、マグマの脆性破壊と火道浅部での脱ガスの関係を明らかにするために、発泡した流紋岩質マグマの高温封圧下での剪断変形実験を世界で初めて行った。その結果、(a)気泡を含まないマグマに比べ、脆性破壊がより低粘性（高温あるいは高含水量＝火道深部）から開始し、(b)破壊面近傍での圧密とそれに伴う脱ガスが生じることを明らかにした。さらに、マグマ破断面の癒着（ヒーリング）実験を世界で初めて行い（図1）、癒着の速度がメルトの粘性変形によって律速されることを突き止めた。その結果、癒着に要する時間スケールは亀裂が脱ガ

スの通路として働くのに十分であり、典型的な浅部火山性地震の発生間隔と一致することから、火山性地震と脱ガス、メルトの脆性破壊と癒着、の関係についての示唆を得た。また、二酸化炭素に富んだ流体とマグマとの相互作用 (CO₂ fluxing) によって気泡の成長が促進され、噴火がトリガーされる可能性を実験的に示した(東北大学理学系研究科[課題番号:1216])。

噴出様式および噴出量を支配しているプロセスについて、間欠泉アナログ実験によって長期予測と短期予測の観点から検討した(九州大学大学院理学研究院[課題番号:2206])。噴出量の長期的振る舞いについては、爆発的噴出(Jet)としての噴出量の平均値に注目すると、過熱速度(superheating rate, マグマの場合の過飽和増加速度に対応)が大きくなるほどその値は減少することが分かった(図2左)。噴出様式の長期的統計的振る舞いについては、過熱速度が小さいときは、Jet がいつも起こるが、ある値よりも大きくなると確率的に非爆発的噴出(Flow)が起こることが分かった(図2右)。このことは、過熱速度と熱輸送モード(核沸騰輸送と対流輸送の相対的寄与)との関係、さらに熱水だまり内での過熱度の時間的空間的不均一性の関係を仮定すると、整合的に解釈できる。また、噴出様式・噴出量の短期予測の原理を模索するために、噴出前の湯だまり内で起こっている温度・圧力変動を測定し、同期させた高速カメラ映像でその気泡発生との関係を観察した結果、その励起源(圧力パルス)が1つの気泡の核沸騰であることを明らかにした。核沸騰と過熱速度の関係を考慮すると、前駆圧力振動あるいは微動とその励起源の確率的振る舞いが、それに続く噴出様式と噴出量に関係している可能性が明らかになった。

(複雑現象における素過程の整理とメカニズムの解明)

爆発現象に伴う音波の放射は複数の要素の複雑な組み合わせからなる。そうした複雑現象の本質的側面である気泡の振動と容器の共鳴の相互作用を調べるために、実験室に置いて管の中の液面の高さを連続的に時間変化させ、空気中で計測される音波のスペクトルの時間変化を見た。その時間変化の特徴を詳細に検討し素過程を整理して有限要素法によりシミュレーションした結果、実験結果を再現することに成功した。また、乱流ジェットによる発生音波と容器の共鳴の相互作用を調べるために、実験装置を工夫し、連続噴煙のスペクトルを計測した。1月に始まった霧島火山群新燃岳噴火において、これまで得られた室内実験の結果を応用するために空振観測の強化と観測データの解析、地震波形との相互関係の解析を行った(東京大学地震研究所[課題番号:1429])。

(素過程データ抽出のための技術開発)

噴火前のマグマに溶解している揮発性成分量についてデータを蓄積することは噴火の爆発性の潜在能力を統計的に知るために重要である。そのための一つの拠り所として、噴出物に含まれる斑晶のガラス包有物中の揮発成分量がある。顕微赤外分光計(FT-IR)を用いて、ガラス包有物を分析する際にはその周辺の斑晶そのもの分析値への寄与を適切に評価する必要がある。この研究では、そのガラス包有物分析のための「斑晶量補正方法」をかんらん石について開発し、揮発性成分量のデータ蓄積のための基礎技術を確立した(東京大学地震研究所[課題番号:1430])。

(素過程に注目した支配要因の特定)

噴火様式推移の支配要因を特定するためには、素過程研究の結果を利用した方法論を用いて、過去の噴出物からマグマの運動やマグマの状態を定量的に推定する必要がある。プリニー式噴火から溶岩流へと噴火様式が変化した桜島大正噴火、およびプリニー式噴火から噴煙柱崩壊による火砕流へと移行した始良カルデラ噴火（大隅降下軽石および垂水火砕流・入戸火砕流）のサンプリングを行い分析した結果、一回の噴火における噴火様式の遷移は、噴火直前での温度・結晶度・揮発性成分の過飽和度のマグマだまり空間構造にあることを示唆する予察的な結果を得た（九州大学大学院理学研究院〔課題番号：2206〕）。

課題と展望

地震発生の素過程については、アナログ物質を使った実験が興味深い成果をあげている。適切なアナログ物質を使えば、岩石では大がかりな装置が必要になる温度や圧力等の条件下でのレオロジーを、比較的簡便な装置で測定することが出来る。今後、実験に用いるアナログ物質の種類を増やすことで、より多様な条件下での岩石レオロジーに関する知見が得られるものと期待される。一方で、アナログ物質を用いた実験で得られる知見の妥当性を検証するため、岩石を用いた実験で実現可能な条件範囲を広げていく努力も欠かせない。

断層面の弾性波透過率や電気伝導度の計測、光学的手法による断層面の直接観察などにより、これまで概念的にしか理解されていなかった断層の固着度に対して物理的解釈を与える試みが進んでいる。これまでの成果では、固着度の物理的実体は予想以上に複雑であることが示された。一方で、高速摩擦実験では、断層の摩擦特性が雰囲気依存することが示唆された。固着度の物理的実体解明の困難さはこのようなことにも起因しているのかも知れない。今後、高速摩擦だけではなく低速摩擦実験においても制御された雰囲気のもとで実験を行い、このことを検証していく必要がある。このような研究により、断層固着の物理的実体を明らかに出来れば、地震波干渉法などによって検出されると期待される地震断層を透過する実体波から、断層の強度をリアルタイムで連続的にモニタリングするための基本原理を提示できるであろう。

天然の断層は、室内実験で用いられる人工断層面とは異なる不均質をもつと考えられている。天然の断層における摩擦構成則を直接明らかにするため、鉾山地震の断層直近観測を行っている。一方で、断層摩擦のもっとも基本的な素過程の一つである岩石の微視的接触変形の一般的な性質を明らかにするため、様々な鉾物を用いた微視的接触変形実験が行われた。今後、この成果を、断層面接触の数値モデル（例えば、Yoshioka and Iwasa, 1996）に導入すれば、任意の不均質をもつ断層面の摩擦挙動を予測することが出来るようになるであろう。

岩石-水相互作用の理論的研究からは、断層帯内に高圧間隙水をもたらす有力なメカニズムと考えられている断層バルブモデルの成立には、地殻流体の化学組成が重要な鍵を握っている可能性が示された。また、実験的研究からは、バルブの形成には、特徴的時間が大きく異なる複数のメカニズムがあることが示された。このような研究は、断層強度の時間変化について、摩擦構成則とは異なる観点から手がかりを与えるものである。岩石の摩擦特性を、岩石の接触だけではなく、より多角的に捉える努力を続けていくことが重要である。

断層破壊やその準備過程における電位変化のメカニズムが実験的に明らかになってきた。また、実験室でえられた知見の地質断層への適用可能性の検証も始まった。地震発生先行過程部会と協力してこれらの研究を進めることにより、地震発生の直前予知の実現可能性を検

討することは、予知研究の成果の実用性の観点から重要であろう。

火山噴火の素過程に関する個々の研究課題の展望と課題は、各課題の年度末報告書の中で述べた通りである。ここでは、火山噴火素過程研究全体を通じての取り組みの現状と今後の展望について述べる。各課題の背後にはもちろん特定の火山噴火なり火山現象があるわけだが、素過程研究の特徴と利点は、むしろそうした特定の火山噴火にとらわれない、あるいはそれを題材として、共通に働いている素過程を抽出しその基本的な仕組みと役割を理解することにある。それによって噴火の予知と推移予測のための基礎が提供されるからである。こうした視点から、それぞれの課題を素過程との関わり方で整理すると、1)素過程に関係づけた観測量解釈の高度化、2)素過程の評価と役割、3)複雑現象における素過程の整理とメカニズムの解明、4)素過程データ抽出のための技術開発、5)素過程に注目した支配要因の特定、ということになる。このように、これまでの研究は素過程研究の特徴を生かした成果を出してきていると評価できるが、素過程の仕組みそのものを理解するための研究がもう少し多くてもよい。研究の手法としては、観測のみならず実際のマグマやアナログ物質を用いた室内実験を行うことも素過程研究の特徴である。再現することが難しい複雑な天然現象を、そこから素過程を抽出し、マグマや類似物質を用いて実験室で再現することは素過程研究の利点であり、これまでの研究課題はこの方向性に沿った研究を行ってきた。今後は、この点をさらに推し進めて、地質学的・地球物理学的観測量の解釈と実験室での素過程の理解を橋渡しする試みが必要になってくるであろう。特に、1万年に一度の超巨大カルデラ噴火を視野に入れた研究が必要であろう。1万年に一度の噴火であっても、マグマだまりや火道の中で起こっている過程は、マグマの結晶化・発泡や脱ガスといった共通して起こる素過程であり、時間空間スケールと物性をうまくスケールリングすることによって、こうしたまれにしか起こらない超巨大噴火の予知と推移予測に素過程研究の成果を少なからず応用できるはずである。

参考文献

- Fukuyama, E and K. Mizoguchi, 2010, Constitutive parameters for earthquake rupture dynamics based on high-velocity friction tests with variable sliprate, *Int. J. Fracture*, 163, 15-26.
- Gu, X., X. Xie, X. Wu, J. Lai, K. Hoshino, and G. Zhu, 2010, Ferrosepiolite, IMA2010-061, CNMCN Newsletter, in press.
- Hatano, T., 2010a, Constitutive law of dense granular matter, *J. Phys. Conf. Ser.*, 258, 012006.
- Hatano, T., 2010b, Critical scaling of granular rheology, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 184, 143.
- Hirauchi, K., K. Michibayashi, H. Ueda, and I. Katayama, 2010, Spatial variation in antigorite fabric across a serpentine subduction channel: Insight from the Ohmachi Seamount, Izu-Bonin frontal arc, *EPSL*, 299, 196-206.
- Harigane, Y., K. Michibayashi, and Y. Ohara, 2011, Relicts of deformed lithospheric mantle within serpentinites and weathered peridotites from the Godzilla Megamullion Parece Vela Back-Arc Basin, Philippine Sea, Island Arc, in press.
- Harigane, Y., K. Michibayashi, and Y. Ohara, 2010, Amphibolitization within the lower crust in the termination area of the Godzilla Megamullion, an oceanic core complex in the Parece Vela Basin, Island Arc, 19, 719-730.

- Hiraga, T., Y. Miyazaki, M. Tasaka, and H. Yoshida, 2010, Mantle superplasticity and its self-made demise, *Nature*, 468, 1091-1094.
- Hirano, N., K. Yamamoto, A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2010, Observation of quartz fracturing under the hydrothermal condition using visible type autoclave, *Water-Rock interaction*, 13, 653-656.
- Hayashi, N and A. Tsutsumi, 2010, Deformation textures and mechanical behavior of a hydrated amorphous silica formed along an experimentally produced fault in chert, *Geophys. Res. Lett.*, accepted, doi:10.1029/2010GL042943.
- 市原美恵・ヴィダル・バレリー, 泡のぶくぶく現象における音源と容器の共鳴の相互作用, 日本火山学会秋季大会, 2-A13.
- 市原美恵・ヴィダル・バレリー, 泡のぶくぶく音の発生メカニズムとそのパターン, 九州大学応用力学研究所研究集会「地形のダイナミクスとパターンとその境界領域」.
- Ichihara, M. and Rubin, M.B., 2010, Brittleness of fracture in flowing magma, *J. Geophys. Res.* 15, B12202, doi:10.1029/2010JB007820.
- 井元恒・道林克禎, 2010, 1GPa, 800°Cにおけるメノウ中の石英多結晶体の結晶成長実験, 静岡大学地球科学研究報告, 37, 13-19.
- 金川久一・岩邊香苗・東修平・中谷正生・望月裕峰, 2010, IODP Exp.315 で採取された南海トラフ付加体浅部泥岩試料の摩擦挙動, 日本地質学会第 117 年学術大会講演要旨, 226.
- Kanagawa, K., H. Noda, T. Hirose, and A. Inoue, 2010, Effect of background temperature of the frictional strength of dolerite at an intermediate slip rate, *Abstracts of the Workshop on Physico-chemical Processes in Seismic Faults*, 43, Padova, Italy.
- 金川久一・野田博之・廣瀬丈洋・井上厚行・海野知子, 2010, ドレライトの中速域における摩擦強度の背景温度依存性, 地球惑星科学連合 2010 年度連合大会予稿集, SSS020-02.
- Kitamura, K., M. Takahashi, M. Mizoguchi, K. Masuda, H. Ito, and S-R. Song, 2010, Effects of pressure on pre characteristics and permeability of porous rocks as estimated from seismic-wave velocities in cores from TCDP Hole-A, *Geophys. J. Int.*, 182-1148-1160.
- 喜多村 陽, 2010, 有限要素法を用いた開口型火道内圧力源による山体変形の研究, 東北大学修士論文.
- 児浪 愛・寅丸敦志, 間欠泉実験における噴出の前駆振動現象について, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SVC063-P25.
- Kuwano, O., 2010, Dynamic rupture propagation in agarose-gel, *The international conference on science of friction 2010 satellite meeting "Contact and stick-slip dynamics in sliding friction"*, Tokyo.
- Kwiatek, G., K. Plenkers, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen, and JAGUARS-Group, 2010, Frequency-magnitude characteristics down to magnitude -4.4 for induced seismicity recorded at Mponeng gold mine, South Africa, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 1165-1173.
- Lin, W. and 33 others, 2010, Present-day principal horizontal stress orientations in the Kumano forearc basin of the southwest Japan subduction zone determined from IODP NanTroSEIZE drilling Site C0009, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L13303, doi:10.1029/2010GL043158.
- 前田一樹・寅丸敦志, アナログ実験による間欠泉の噴出量の予測可能性, 日本火山学会 2010 年秋季大会, 2-A11.
- 前田 一樹・寅丸 敦志, アナログ実験による間欠泉の噴出量予測可能性, 日本地球惑星科学連合 2010

年大会, SVC063-P26.

- Masuda, T., T. Miyake, and M. Enami, 2011, Ultra-high residual compressive stress (>2GPa) in a very small volume (<1 μm^3) of indented quartz, *Am. Mineralogist*, in press.
- 三輪 学央・寅丸 敦志, 発泡マグマの底付けと衝撃波管: 桜島ブルカノ式噴火モデル, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SVC063-12.
- Mizoguchi, K. and E. Fukuyama, 2010, Laboratory measurements of rock friction at subseismic slip velocities, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 47, 1363-1371.
- 溝口一生・福山英一・廣瀬丈洋, 2010, 高速すべり時の断層から放射される振動波の広帯域解析, 日本地球惑星科学連合 2010 年度連合大会予稿集, SSS020-P01.
- Okumura, S., M. Nakamura, T. Nakano, K. Uesugi, and A. Tsuchiyama, 2010, Shear deformation experiments on vesicular rhyolite: Implications for brittle fracturing, degassing, and compaction of magmas in volcanic conduits, *J. Geophys. Res.*, 115, B06201, doi:10.1029/2009JB006904.
- 奥野喬也・川方裕則・土井一生, 2010, 破壊途上の岩石試料を用いた弾性波速度トモグラフィーによる断層検出の試み, 日本地震学会 2010 年秋季大会, P1-31.
- Onuma, K., J. Muto, H. Nagahama, and K. Otsuki, 2011, Electric potential changes associated with nucleation of stick-slip of simulated gouges, *Tectonophysics*, in press.
- Park, J.-O., G. Fujie, L. Wijerathne, T. Hori, S. Kodaira, Y. Fukao, G.F. Moore, N.L. Bangs, S. Kuramoto, and A. Taira, 2010, A low-velocity zone with weak reflectivity along the Nankai subduction zone, *Geology*, 38, 283-286.
- Plenker, K., G. Kwiatak, M. Nakatani, G. Dresen, and the JAGUARS Group, 2010, Observation of seismic events with frequencies $f > 25\text{kHz}$ at Mponeng deep gold mine, South Africa, *Seism. Res. Lett.* 81, 467-479, doi:10.1785/gssrl.81.3.467.
- Rubin, M.B. and M. Ichihara, 2010, Rheological models for large deformations of elastic-viscoplastic materials, *Int. J. Eng. Sci.*, 48, 1534-1543, doi:10.1016/j.ijengsci.2010.06.029.
- Saisyu, H., A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2010, Precipitation of silica minerals in hydrothermal Flow-through experiments, *Water-Rock Interaction*, 13, 669-672.
- Sakaguchi, A. and 11 others, 2010, Seismic slip propagation to the up-dip end of plate boundary subduction interface fault: Vitrinite reflectance geothermometry on IODP NanTroSEIZE cores, *Geology*, in press.
- 新海優里・渡辺了・道林克禎・針金由美子・小原泰彦, 2010, 深海底から採取した蛇紋岩の弾性波速度測定: 予察, 静岡大学地球科学研究報告, 37, 27-34.
- 寅丸敦志・前田一樹・市原美恵, 微動方程式を用いた間欠泉実験の前駆振動の解釈, 日本火山学会 2010 年秋季大会, 2-A12.
- 植田直彦・道林克禎, 2010, 1GPa, 800°Cにおけるプリント中の石英多結晶体の結晶成長実験, 静岡大学地球科学研究報告, 37, 21-26.
- Ujii, K. and A. Tsutsumi, 2010, High-velocity frictional properties of clay-rich fault gouge in a megasplay fault zone, Nankai subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2010GL046002.
- Ujii, K., M. Kameyama, and A. Yamaguchi, 2010, Geological record of thermal pressurization and earthquake instability of subduction thrusts, *Tectonophysics*, 485, 260-268, doi:10.1016/j.tecto.2010.01.002.
- Watanabe, N., T. Ishibashi, Y. Ohsaki, Y. Tsuchiya, T. Tamagawa, N. Hirano, H. Okabe, and N. Tsuchiya,

2011, Precise three-dimensional numerical modeling of fracture flow coupled with x-ray computed tomography for reservoir core sample, 2011, SPE J., in press.

山下太・福山英一・溝口一生・柳谷俊, 2010, 岩石の接触状態をモニターするための比抵抗測定システムの構築, 日本地震学会講演予稿集, P1-33.

安田 敦, 2010, 顕微 FT-IR 反射法による斑晶ガラス包有物の含水量定量, 火山, 印刷中.

吉開裕亮・寅丸敦志, マグマ溜りの脱ガスに関するアナログ実験, 日本火山学会 2010 年秋季大会, P-03.

Yoshimitsu, N. and H. Kawakata, 2011, Temporal changes in the Q of broadband P waves transmitting through a fracturing Westerly granite sample under triaxial compressive conditions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **101**, 421-426.

Yoshimura, S. and M. Nakamura, 2010, Fracture healing in a magma: An experimental approach and implications for volcanic seismicity and degassing, *J. Geophys. Res.*, 115, B09209, doi:10.1029/2009JB000834.

Yoshimura, S. and M. Nakamura, 2010, Chemically driven growth and resorption of bubbles in a multivolatile magmatic system, *Chem. Geol.*, 276, 18-28.

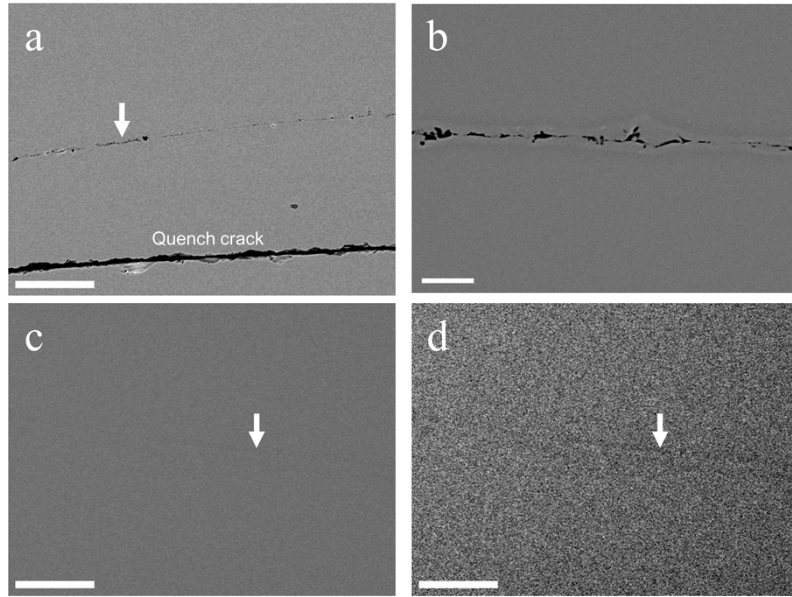


図 1. 900°Cにおけるマグマ破断面の癒着実験の反射電子像

(a) 未癒着の亀裂（矢印、圧着 4 時間後）。左下の割れ目は試料冷却時のもの。スケールバーは 100 μm 。(b) (a)の拡大。亀裂付近は脱水により輝度が上がっている。スケールバーは 20 μm 。(c) 亀裂部をまたいだ水の拡散プロファイルから、完全に癒着したことがわかる部分(8 時間後)。界面は消失している。スケールバーは 100 μm 。(d) (c)の高コントラスト像。癒着した亀裂部がわずかに視認可能。

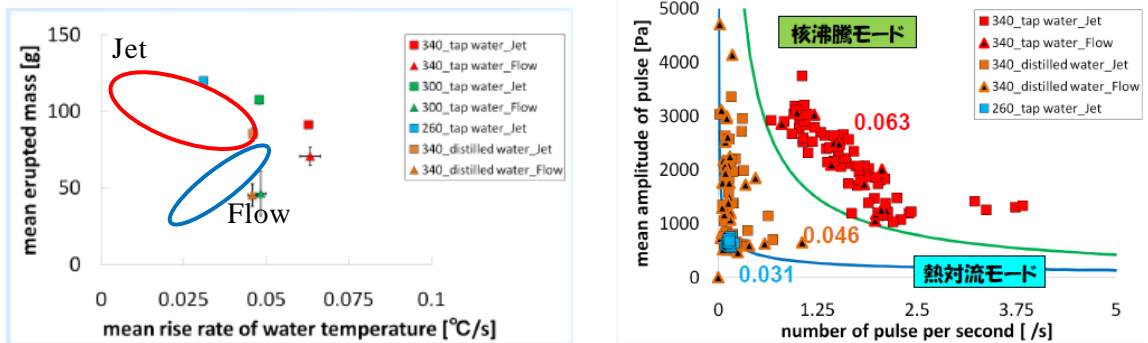


図 2. (左) 間欠泉実験における平均過熱速度と平均噴出量の関係。爆発的噴出 Jet では負の相関があり、非爆発的噴出では正の相関がある。(右) 圧力パルスの発生率と振幅の関係。この二つの量の積は核沸騰による熱供給率の寄与の目安であり、平均過熱速度（グラフ内の数字）が大きいほど核沸騰モードが卓越し噴出様式が混在するが、極端に小さい場合（青：熱対流モードが卓越）は Jet のみ起こる。

3 新たな観測技術の開発

「新たな観測技術の開発」計画推進部会長 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見るための「道具」を開発することを目指している。観測・実験技術の開発研究は、地震や火山噴火の現象解明の研究や予測のための研究と共同で実施されることが多く、この部会と関連の深いものであっても、他の研究計画の中で実施されている技術開発は別に報告されている。ここでは、他部会で報告されない研究課題の成果を中心にまとめる。

(1) 海底における観測技術の開発と高度化

日本列島は海に囲まれており、プレートの沈み込みに伴う巨大地震は海域で発生する。また、プレートの沈み込みに伴い、伊豆諸島をはじめ多くの島嶼部にも活動的な火山が存在する。そのため、既に高密度・高精度な観測が行われている陸域の観測網と同等の品質で、海域においてもデータを取得する必要がある。つまり、陸域と同様に地殻変動の低周波数から地震動の高周波数までの広い周波数帯域で、高ダイナミックレンジの観測を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高精度で知ることが重要であり、そのためには、海域における地震活動及び地殻変動の実時間観測が不可欠である。

上記のような研究上の需要があるにもかかわらず、海域の観測に必要な測器は、陸上の測器のように商業ベースでは開発されていない。地震及び火山噴火予知研究の推進のためには、海域での観測機器の開発から始める必要がある。

ア. 海底地殻変動観測技術

複数の研究機関が互いに連携し、観測船やブイを用いた海底地殻変動観測を実施するとともに、観測精度向上に関する研究を進めた。

海上におけるGPS（汎地球衛星測位システム）測位と海中の音響測位を結合して海底の精密測位を繰り返す手法は重要な成果をあげつつあるが、音速が水平方向に変化すると測位誤差が生じるという問題がある。そこで観測船と小型係留ブイの2点において海中音速の差を測定し、ブイから見た船の方位の正弦波で近似できる場合が多いことを見出した。また、キネマティックGPS解析に用いる衛星位置情報等について、数時間後に入手できる超速報暦を用いても、その誤差は基線長100 kmでも1mm程度であることが示された（名古屋大学[課題番号:1706]）。将来の海底地殻変動の連続観測に向けた技術開発と海中音速の不均質性の特徴を捉えるため、図1に示す係留ブイによるシステムを開発し、従来の曳航ブイ観測と並行して係留ブイによる試験観測を水深1450 mの宮城県沖海域で実施した（東北大学[課題番号:1217]）。海上保安庁では三陸沖から四国沖まで海溝沿いにGPS音響結合方式による精密海底測位用海底局を設置しているが、平成22年度に「福島沖」及び「宮城沖1」海底基準点の海底局を更新した。新旧の海底局を併用した観測を複数回行い、新旧の海底局アレイによる測位結果の

違いは1 cm 以下であることを確認した（海上保安庁[課題番号:8006]）。

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が、海底圧力データから地殻変動成分を抽出するためには、海洋変動の影響を除く必要がある。前年度からの研究により、1/12 弧度の格子のシミュレーションが最も適しており、短周期の海洋変動の影響を除去できることが分かった（東北大学[課題番号：1217]）。

海底での傾斜変動を計測するため、次世代型広帯域海底地震計(BBOBS-NX) の地震センサーのマスポジション出力から傾斜変動を検出するための試験を実施し、鋸山観測抗の水管傾斜計と同程度の能力があることを確認した（東京大学地震研究所[課題番号：1431]）。

海底間音響測距装置については、熊野灘の分岐断層沿いに設置した3台の装置の回収に成功し、960m と720m の2基線の208 日の連続観測記録を得た。日平均時系列の推移から、1cm 以上の距離変化が生じれば検出可能であることがわかった（東北大学[課題番号：1217]）。

イ. 海底地震観測技術

次世代型広帯域海底地震計(BBOBS-NX)のセンサー部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、約10 秒より長周期側では、海底堆積物の上の観測においても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。この海底広帯域地震計を無人潜水艇(ROV) による観測航海において2 台設置し、長期観測を開始した（図2）。海底強震観測においては、水晶発振式の加速度センサーを用いることにより、ノイズレベルをこれまでの海底強震計の1/10 に下げることができるとの可能性があることを明らかにした（東京大学地震研究所[課題番号：1432]）。

ウ. 海底実時間システム

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) の開発を進めており、設置された観測点からは良好なデータが得られていることを確認した。またデータ流通の相互交換・利用について関連機関と連携を図った(海洋研究開発機構[課題番号:4005])。昨年度までに開発されたネットワーク技術を導入した次世代ケーブル式海底観測システム(Kanazawa et al, 2010)を、新潟県粟島の南方の日本海に設置した。図3に示すように地震計4 台を2 次元的な配置に埋設し、観測されたデータは、準リアルタイムで地震研究所に転送されている(東京大学地震研究所[課題番号：1433])。

(2) 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を合わせて、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、数値気象データから推定される誤差と実データの解析結果との整合度を評価する指標を試作し、高分解能数値気象データ作成システムを構築した。マルチパス誤

差の定量的評価も行い、つくばの国際GPS 観測点TSKB についてマルチパス誤差をシミュレーションした結果、GPS 上下座標時系列に見られる長周期ゆらぎがマルチパス誤差とよく対応することが明らかになった(図4, 国土地理院[課題番号: 6017])。最新の気象数値モデル等を用いて、1日以内の準リアルタイムの大気伝播遅延補正を可能にするための手法を開発しており、気象庁のメソスケールGPV 気象モデルを用いて、関東地方及び東海・伊豆地域のGEONET 観測点を、1日以内に準リアルタイムで大気伝播遅延補正を行う実験を行い、現在その効果を解析中である(気象庁[課題番号: 3019])。リアルタイムGPS 時系列に基づく永久変位検出手法を開発し、2008年岩手・宮城内陸地震の際の1Hz 時系列に適用し、27観測点のうち20の観測点において永久変位量の推定に成功した。推定完了までの所要時間は約80秒であり、後処理キネマティック解析による地殻変動場(Ohta et al., 2008)と水平成分で2cmという実用的な精度で一致した(図5)。リアルタイムGPS 時系列の長期安定性およびノイズの基線長依存性を調べ、基線長が150km以下では放送暦および予報暦でその精度の差はほぼ無いことが分かった(東北大学[課題番号: 1218])。

SARの解析については、数値気象モデルを用いて大気起因の位相遅延量を計算する手法を開発し、SAR 干渉画像内に含まれる大気遅延誤差の低減処理のための解析環境を整えるとともに、実データに適用し、低減処理の有効性を確認した(国土地理院[課題番号: 6018])。通常の干渉SAR 解析によって変動を求めることのできないほどの大変形については、ピクセルオフセット解析と呼ばれる方法が開発されることにより変動場が求められるようになったが(Fukushima et al., 2010; Furuya et al., 2010; Takada and Furuya, 2010)、平成22年度は、ピクセルオフセット法によって求められた変動場と干渉解析によって求められた変動場両方を用いて断層運動をモデル化する手法を開発した(東京大学地震研究所[課題番号: 1433])。SAR干渉解析の改良を行うとともに、三宅島における地殻変動解析を進め、2008年度まで14cm/年の速度で進行していた沈降が、2010年においては、3cm/年にまで減速したことを明らかにした(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観測装置の設置作業を行うシステムの高度化・安定化を図った。ウィンチ等の駆動系やデータ伝送系を改良し、地震計遠隔設置作業については実用化の目途をつけるとともに、活動中の桜島南岳火口周辺において、昨年設置した地震計を回収するとともに、新たに地震計5台を設置した(東京大学地震研究所[課題番号: 1435])。

MODISとMTSAT 用いたリアルタイム観測システムにより、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おり(金子ほか、2010)、2011年1月19日に始まった新燃岳の噴火では、MTSAT 赤外面像により観測される「熱異常」と「噴煙」の発生状況に基づいて、活動の推移を3つのステージに分けることができることを見出した。MODISの観測により中～長期的な熱異常の時間変化を捉えることが可能であり、噴火の前兆となる熱異常が現れることなく、1月下旬に突如噴火が始まったことも分かった(東京大学地震研究所[課題番号: 1436])。航空機リモートセンシングでは、昨年度に開発したARTS の赤外多波長データを用いた火山ガス濃度分布把握技術を三宅島の観測データに適用し、火口内のSO₂ガス濃度分

布を把握でき、本手法の汎用化の目処を得た。また、在来型 Xバンド気象レーダによる桜島の爆発的噴火の観測は可能であり、高時間分解能の観測(1分毎)や高空間分解能の観測(250m~500m 間隔)ができることが分かった(防災科学技術研究所[課題番号:3018])。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、桜島の爆発543例の種子島気象レーダーデータから、爆発噴煙の検知率を調査し、走査頻度を増せば、小規模な爆発も検知可能なことが分かった(気象庁[課題番号:7022])。

(3) 観測技術の継続的高度化

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

ア. 地下状態モニタリング技術

宇宙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進めている(Taira et al., 2010; Tanaka et al., 2010a, 2010b; Uchida et al., 2010; Yamashina et al., 2010)。今年度は、ミュオン検出カウンターを従来の2枚から3枚に増やしたカロリメータ方式による観測システムを開発し、性能試験を行った。高い仰角から降り注ぐ荷電粒子のシャワーによって生じる偽ミュオントラックを取り除く効果があり、高性能化が期待できる。ミュオン観測によって桜島火道形状が推定されつつあり、その情報と絶対重力連続観測から、平成22年度1年間のマグマ頭位の時間変化を求めたところ、火山活動との対応が明らかになってきた。また、ミュオンによる断層破碎帯の観察も開始し、図6に示すように、表面から破碎帯内に降水がしみこんでいく様子が捉えられた(東京大学地震研究所[課題番号:1438])。

豊橋市三河地殻変動観測所に設置した2台の弾性波アクロス震源装置を昨年度に引き続き1年間を通じてほぼ連続運転した。また、低周波数送信において回転型震源よりも有利と考えられる直線加振加振装置を用いた実験を栃木県大谷で行った(名古屋大学[課題番号:1707])。

イ. 地震活動や噴火活動の活発な地域における観測技術

高精度を保ちつつ、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の開発を進めている。実験室外で市販の絶対重力計(FG5)との並行観測を実施し、性能評価を行うとともに、運搬中や観測中の問題点を洗い出した。静穏な実験室で装置の系統誤差の評価を実施したところ、図7に示すように、約2 μ galの再現性が得られ、統計的な誤差は1 μ gal未満であった。これらは市販の絶対重力計と同等の精度といえる(東京大学地震研究所[課題番号:1439])。

火山地域などの悪条件下においての各種観測データの伝送方式の開発を目指して、平成21年度に引き続き、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。携帯電話データ通信サービスエリア内であれば3ch100Hz の地震データの他、GPS や傾斜計などの低サンプリングデータを観測拠点に簡便にリアルタイム伝送をすることができるようになり、現在霧島新燃岳噴火に伴う観測で実際に使用しているが、非常に順調に動作している。消費電力が1W 程度と非常に低消費である小型無線機を用いて無線LANは、広指向性の平面パッチアンテナを使用しても、見通し範囲であれば2 kmの距離でも通信が可能である（九州大学[課題番号：2207]）。

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技術を利用した大深度ボアホール内における広帯域地震計測・傾斜計測法の開発（新谷、2010）を進めており、今年度は大深度ボアホールを想定して250℃まで温度範囲を拡張した高温試験が実施できるように試験装置開発を行った。具体的には、熱膨張によって光学素子が損傷するのを防ぐため、石英系の光学部品と高温に耐える光ファイバーを選定し、さらに熱膨張ひずみを解放する構造の光学素子ホルダーを考案し、それらを組み合わせた高温試験用の干渉計ユニットを試作した。並行して、前年度に製作した小型レーザー干渉型広帯域地震計に制御回路を接続し動作可能な状態に組み上げ、観測坑内（鋸山観測所）で周波数特性の測定や自己雑音等の評価を実施した（東京大学地震研究所[課題番号：1441]）。また、地下深部の高温環境下で安定動作する、地震計、傾斜計、強震計の開発を進め、平成22年度から高温対応型強震計の試験観測を開始し、データ伝送装置等を行う試験観測施設の整備を行った（防災科学技術研究所 [課題番号：3020]）。

参考文献

- 新谷昌人, 2010, レーザー干渉法の精密測地観測への応用, 測地学会誌56, 1-12.
- Fukushima, Y., V. Cayol, P. Durand, and D. Massonnet, 2010, Evolution of magma conduits during the 1998?2000 eruptions of Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island, *J. Geophys. Res.*, 115, B10204, doi:10.1029/2009JB007023.
- Furuya, M., T. Kobayashi, Y. Takada, and M. Murakami, 2010, Fault source modeling of the 2008 Wenchuan earthquake based on ALOS/PALSAR data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 2750-2766, doi:10.1785/0120090242.
- Kanazawa, T., M. Shinohara, S. Sakai, O. Sano, H. Utada, H. Shiobara, Y. Morita, T. Yamada, K. Mochizuki, and K. Yamazaki, 2010, New compact ocean bottom cabled system for seismic observation in the Japan Sea, *OCEANS 2010 - MTS/IEEE Seattle*, 1-6.
- 金子隆之・田寛之・高崎健二・安田 敦・前野 深・小山悦郎・中田節也, 2010, MTSAT で捉えた浅間山2009年2月2日噴火に伴う噴煙, *火山*, 55, 119-128.
- Ohta et al., *EPS*, 60, 1197-1201, 2008.
- Taira, H. and H.K.M. Tanaka, 2010, Possible space and power effective muon sensor module for imaging a volcano, *Earth Planets Space*, 62, 2, 179-186.
- Takada, Y., and M. Furuya, 2010, Aseismic slip during the 1996 earthquake swarm in and around the Onikobe geothermal area, NE Japan, 2010, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 290, 302-310.
- Tanaka, H.K.M., H. Taira, T. Uchida, M. Tanaka, M. Takeo, T. Ohiminato, Y. Aoki, R. Nishiyama, S. Daigo and H. Tsuji, 2010a, Three-dimensional computational axial tomography scan of a volcano with cosmic

ray muon radiograph, *J. Geophys. Res.*, 115, B12, 332.

Tanaka, H.K.M., T. Uchida, M. Tanaka, H. Shinohara and H. Taira, 2010b, Development of a portable assembly type cosmic-ray muon module for measuring the density structure of a column of magma, *Earth Planets Space*, 62, 2, 119-130.

Uchida, T., H.K.M. Tanaka, and M. Tanaka, 2010, Development of a muon radiographic imaging electronic board system towards a stable solar power operation, *Earth Planets Space*, 62, 2, 167-172.

Yamashina, Y., T. Yamashina, H. Taira, and H.K.M. Tanaka, 2010, Development of a cost effective plastic scintillator for cosmic-ray muon radiography of a volcano, *Earth Planets Space*, 62, 2, 173-178.

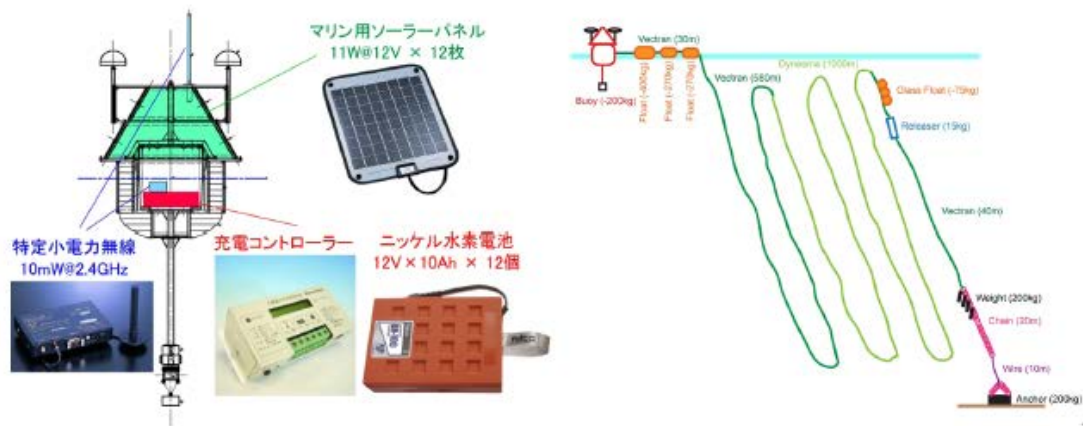


図1. 開発した係留ブイの外形と内部に搭載した電子機器（左）および係留系の模式図（東北大学[課題番号:1217]）。



図2. BBOBS-NX の観測時の状態。2010 年6 月に北西太平洋のシャツキー海台西方にて、自由落下方式で投入・ROV で展開したBBOBS-NX の海底（水深5700m）での様子。初の本格的運用であり、2011 年6 月に回収予定(東京大学地震研究所[課題番号:1432])。

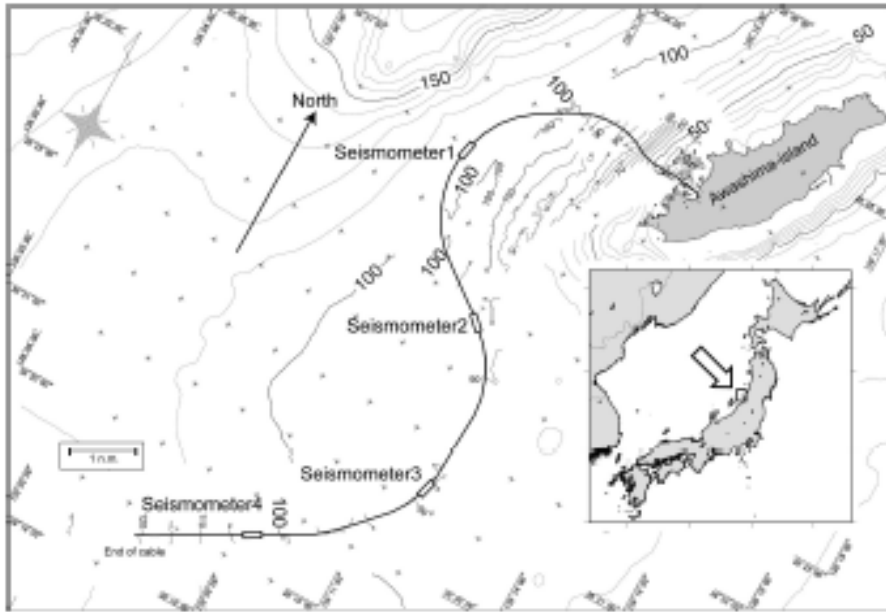


図3. 設置したケーブルルート。地震観測システムのケーブル全長は、25 km であり、4台の地震計が5 km 間隔に取り付けてある（東京大学地震研究所[課題番号：1433]）。

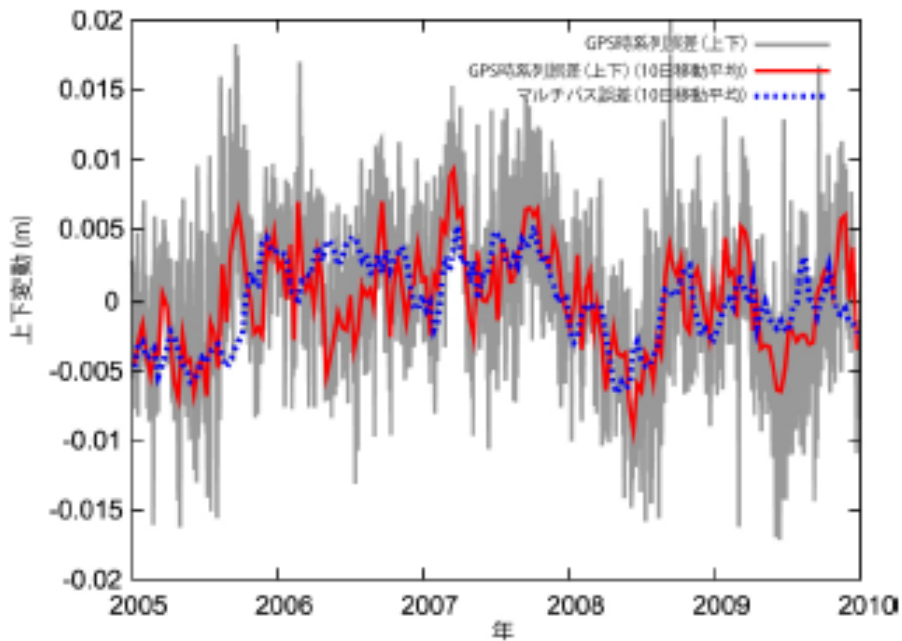


図4. GPS 受信機SNR を用いてシミュレーションしたマルチパス誤差と実際に観測されたGPS 時系列誤差の比較（上下成分）（国土地理院[課題番号：6017]）。

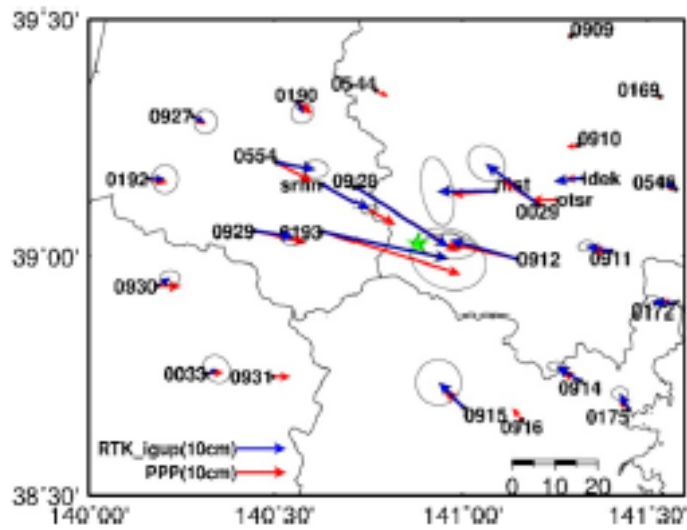


図5. 2008年岩手・宮城内陸地震による地震時地殻変動の後処理キネマティック解析による水平変位量 (Ohta et al., 2008) (赤色) と本研究で開発した変位量自動検出アルゴリズムによって推定された水平変位量の比較 (青色) (東北大学[課題番号: 1218])。

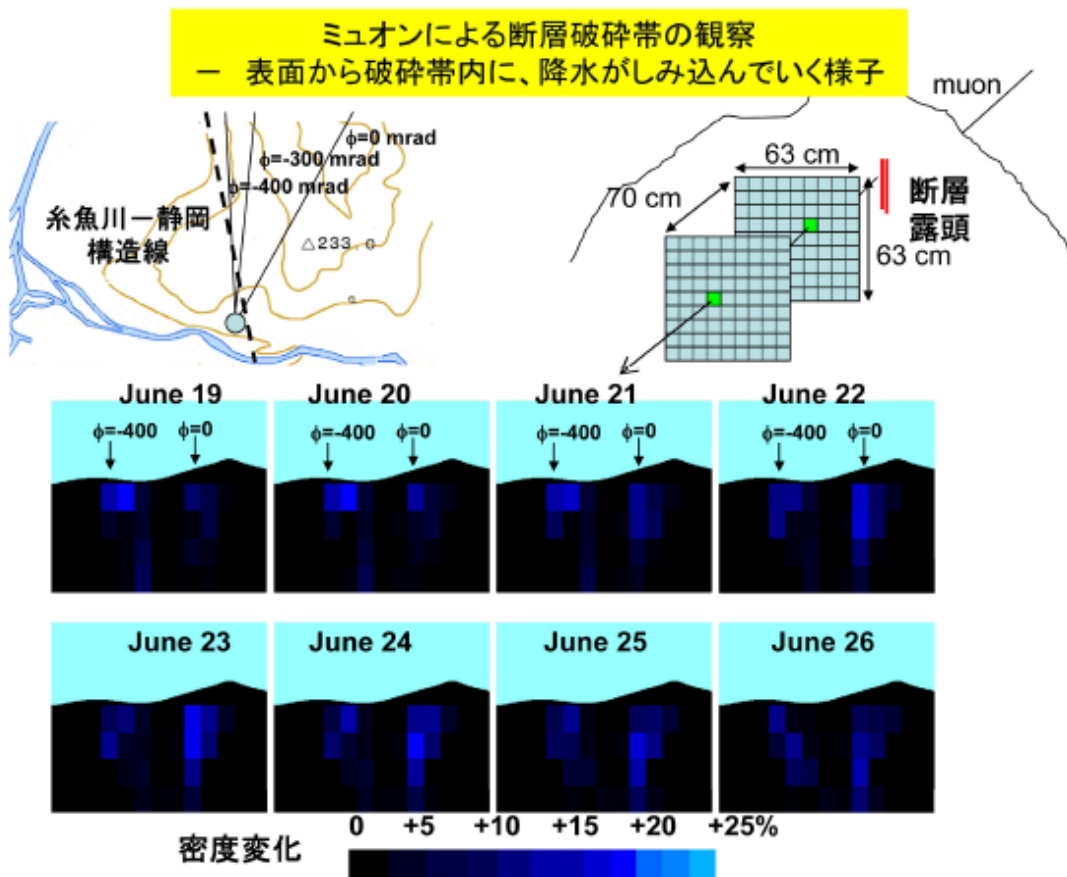


図6. ミュオンによる糸魚川市の断層破碎帯の観察において、表面から破碎帯内に降水がしみこんでいく様子が、毎日の透視画像 (密度変化画像) からとらえられている。

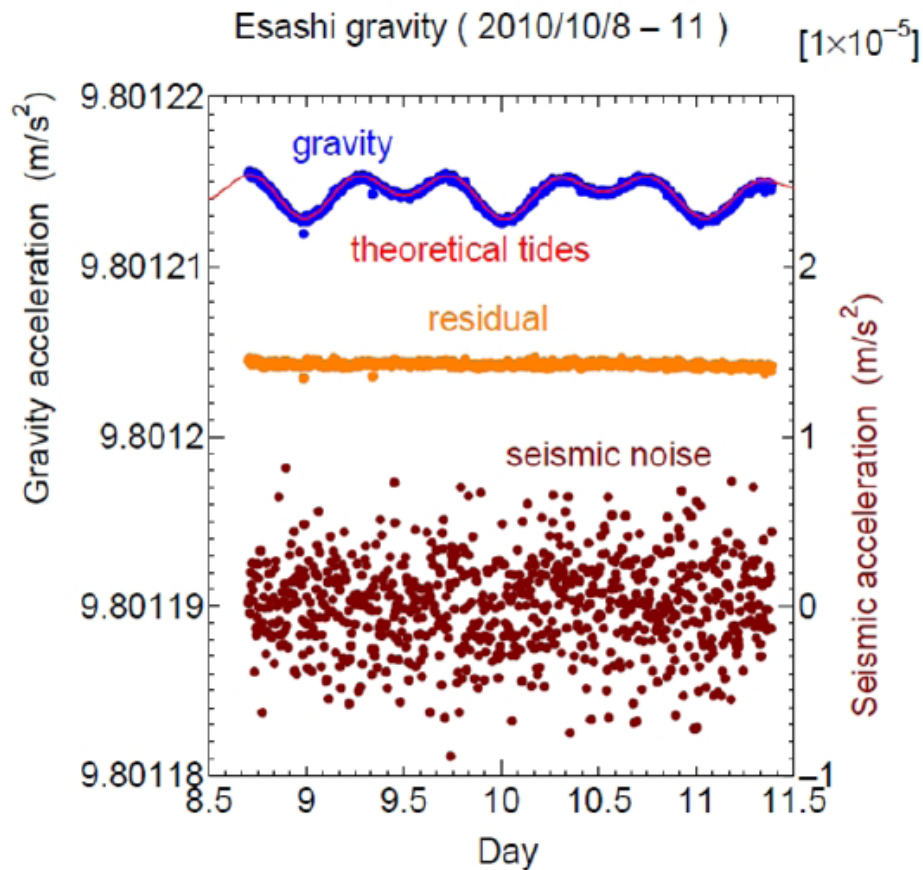


図7. 静穏な実験室における小型絶対重力計の精度評価。2010年5月および10月に試作絶対重力計の性能評価を実施した。再現性や統計的なばらつきの値から、市販の絶対重力計と同等の性能と評価された。青は絶対重力値であり、理論潮汐（赤線）とよく一致している（橙はその残差）。なお、このときの地面振動を茶色で示す（装置の振動検知機構により測定値から除去される）（東京大学地震研究所[課題番号：1439]）。



図8. 小型レーザー干渉型広帯域地震計に制御回路を接続し、観測坑内（鋸山観測所）で周波数特性の測定や自己雑音等の評価を実施した。

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・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ツ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ツ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・上部マンツル構成物質の変形・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，特に萌芽的な研究や基礎基盤的な研究等に対する予算的配慮を期待

《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

以上