

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~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~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~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で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、上部マント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・上部マント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小さく、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。

・上部マント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ト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 の上部マント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、高圧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 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、通常の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。

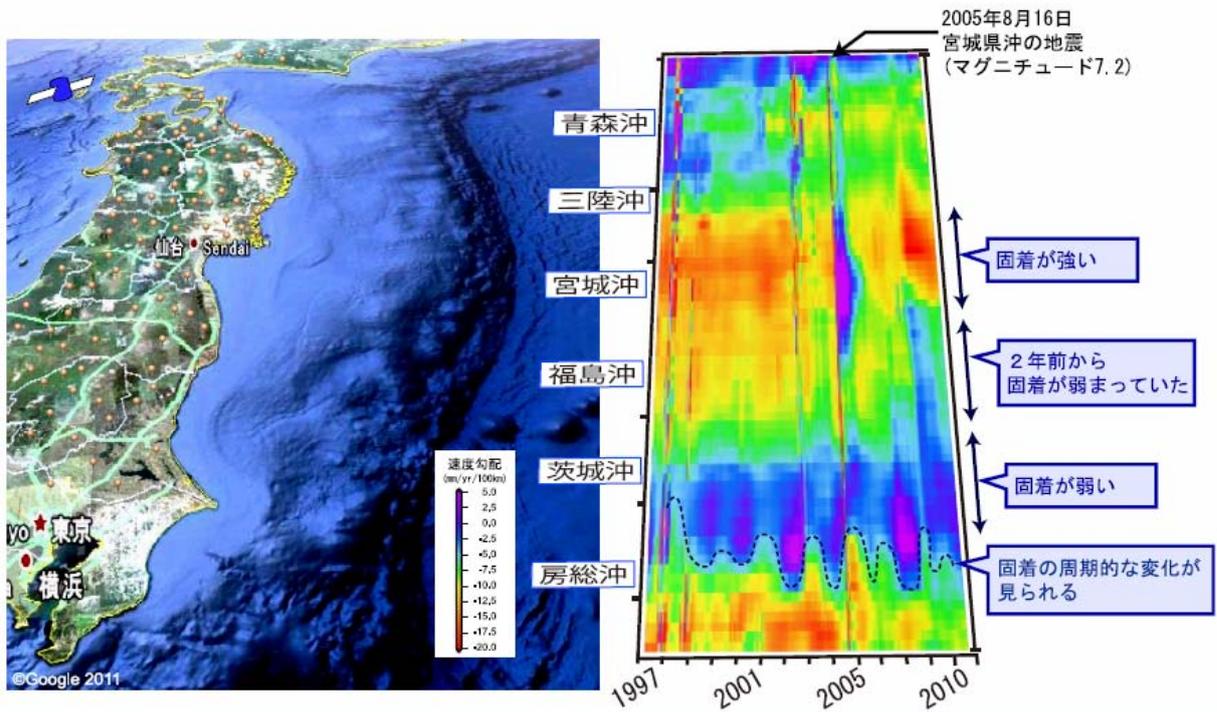
(3) 観測技術の継続的高度化

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。

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

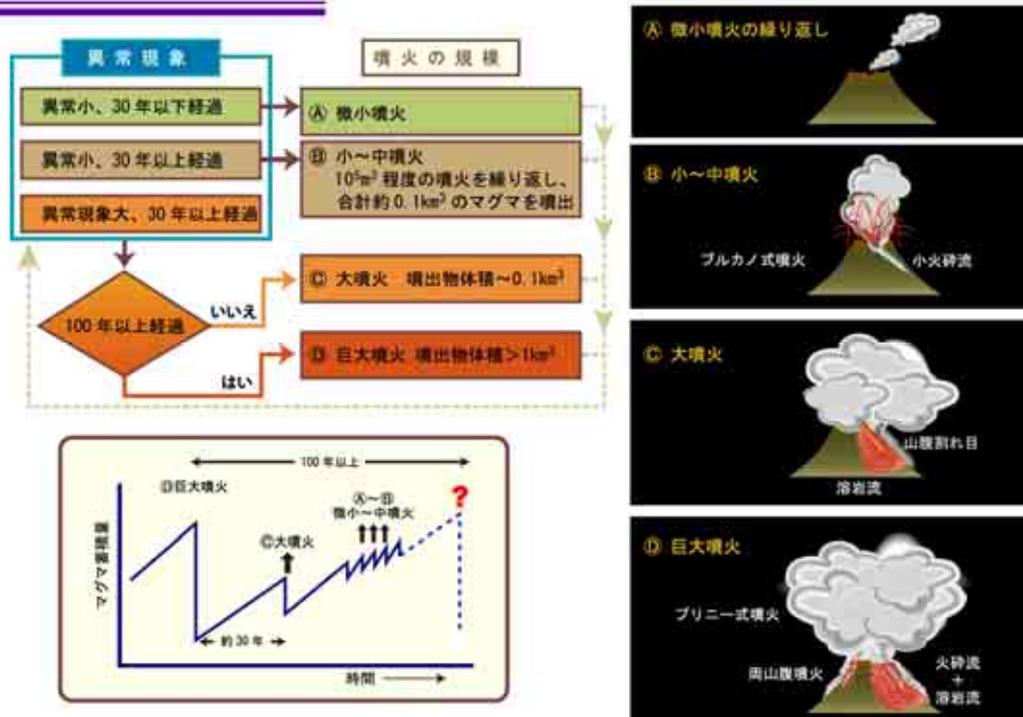


図7．桜島火山の噴火シナリオ

歴史時代に記録が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

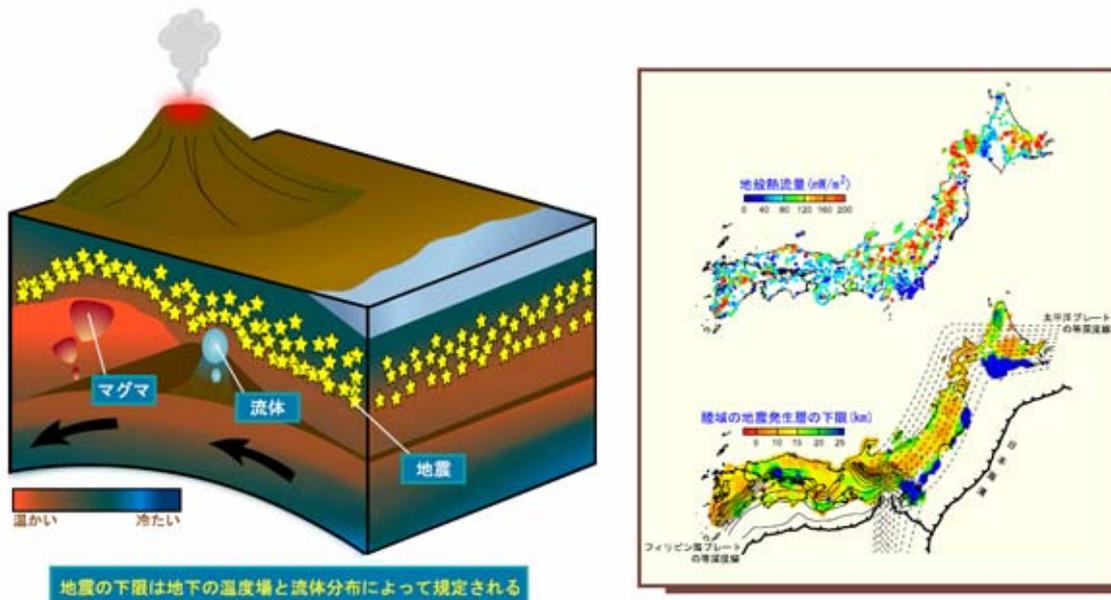


図8．地殻の温度場と地震発生の関係

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

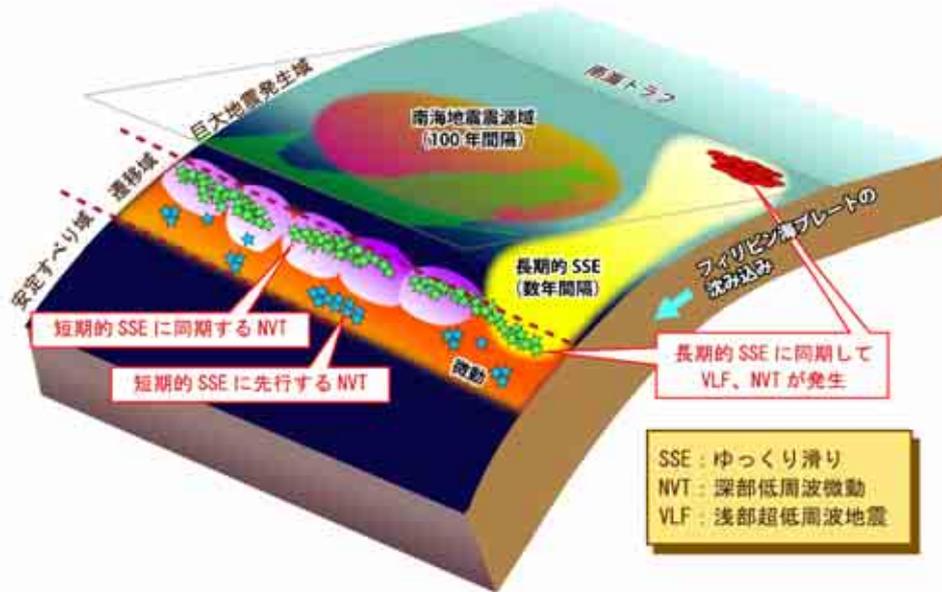


図9．プレート境界滑りの多様性と相互作用

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

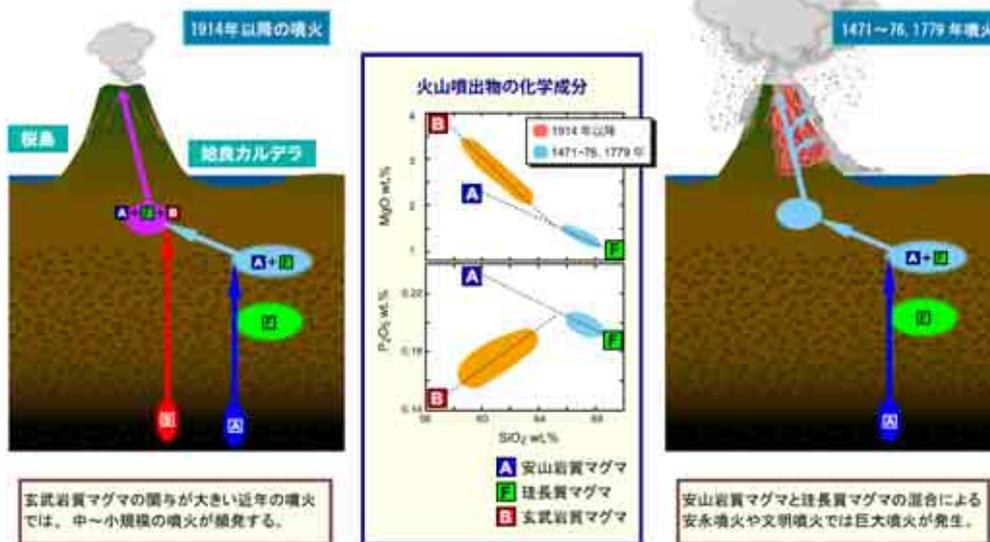


図10．桜島火山における火山噴出物化学成分の変遷

19世紀以前の噴火では、珧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

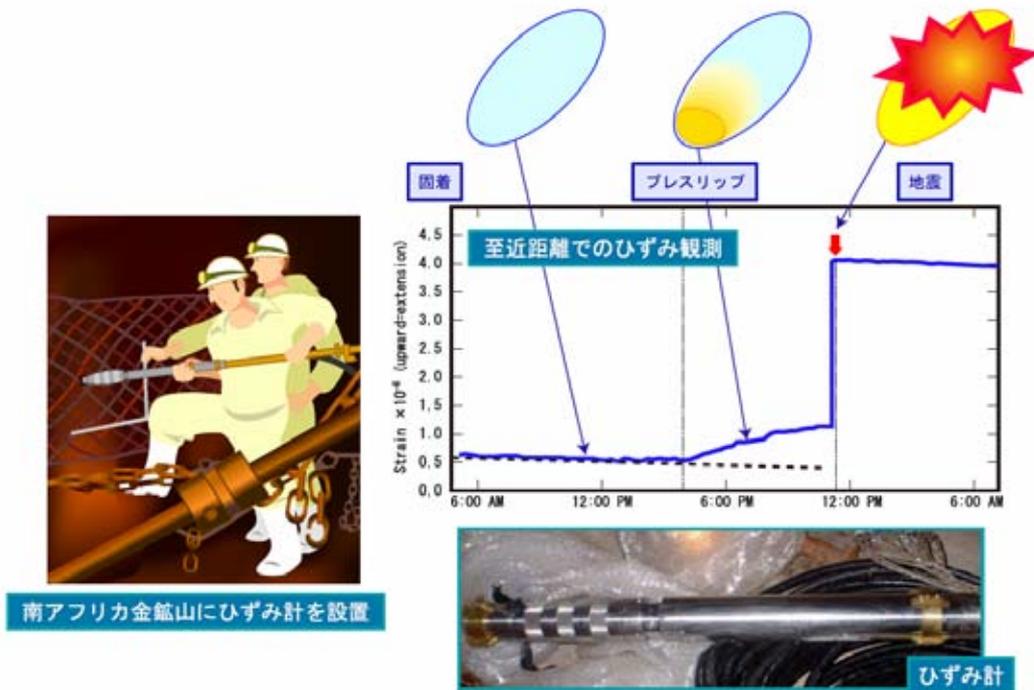


図 11. 南アフリカ大深度鉱山内で震源極近傍で観測されたひずみ記録
震源極近傍に設置したひずみ計で、地震前の明瞭なひずみ変化が捉えられた。ただし、これまで極近傍観測において、より大きな地震に対して先行ひずみが観測されなかった例も多数確認されている。

地震・津波同時計算コードによる地震モデルの構築

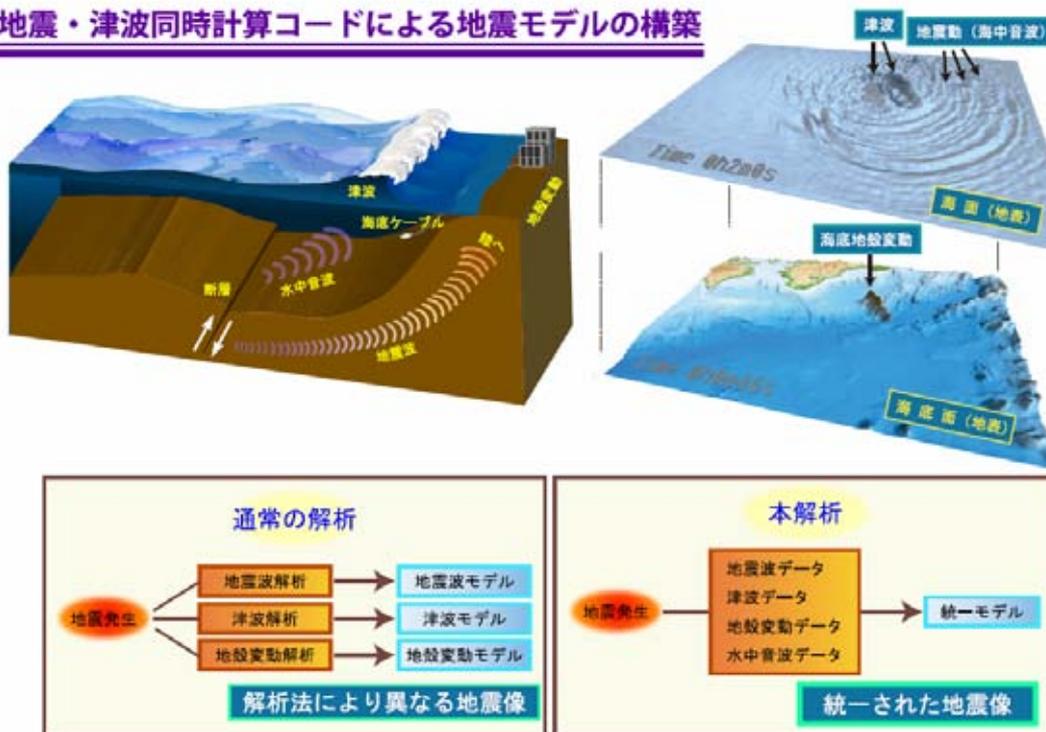
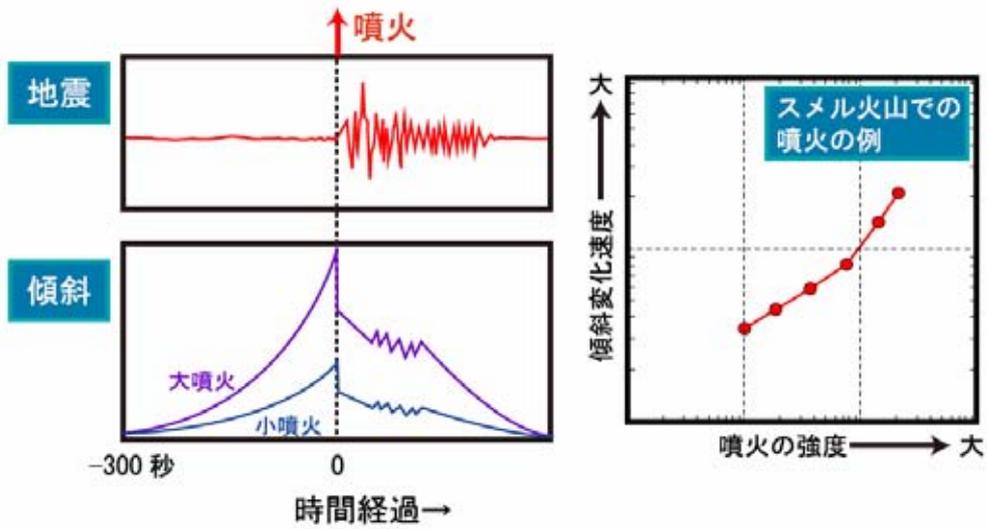


図 12. 地震・津波同時計算コードによる地震モデル構築の概念図

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

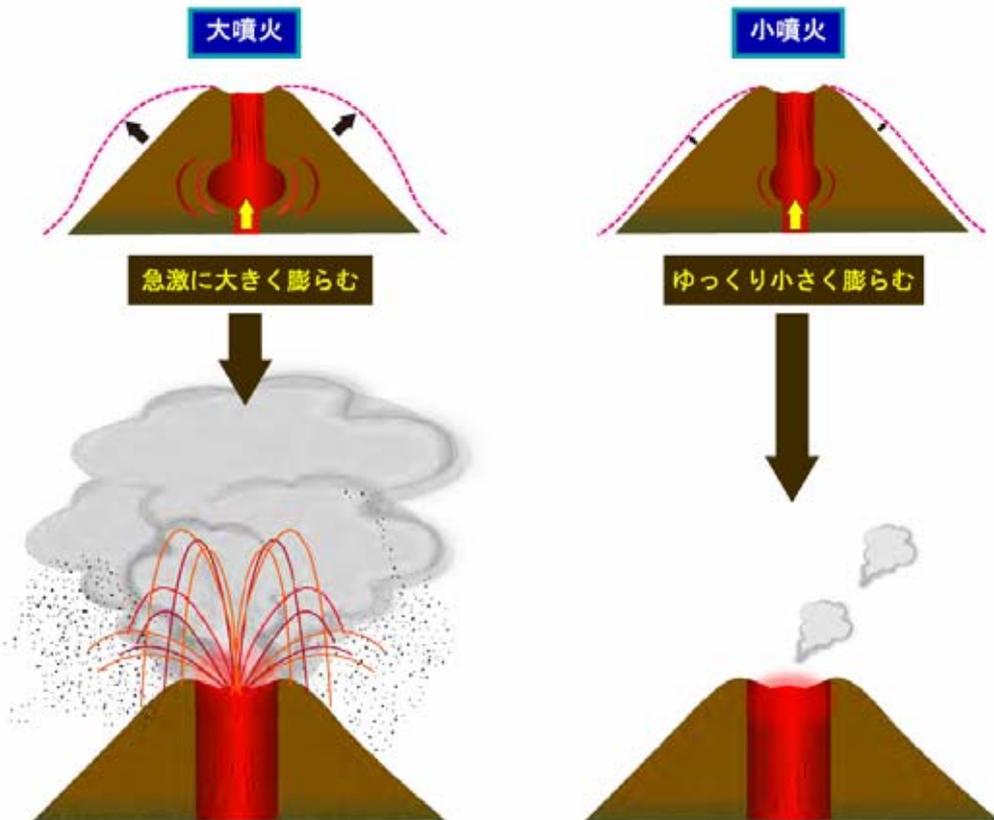
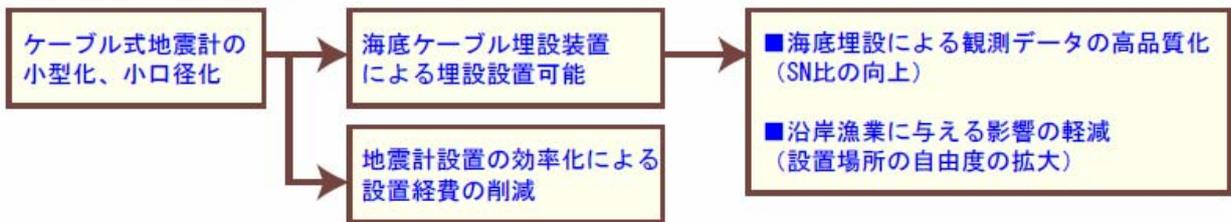
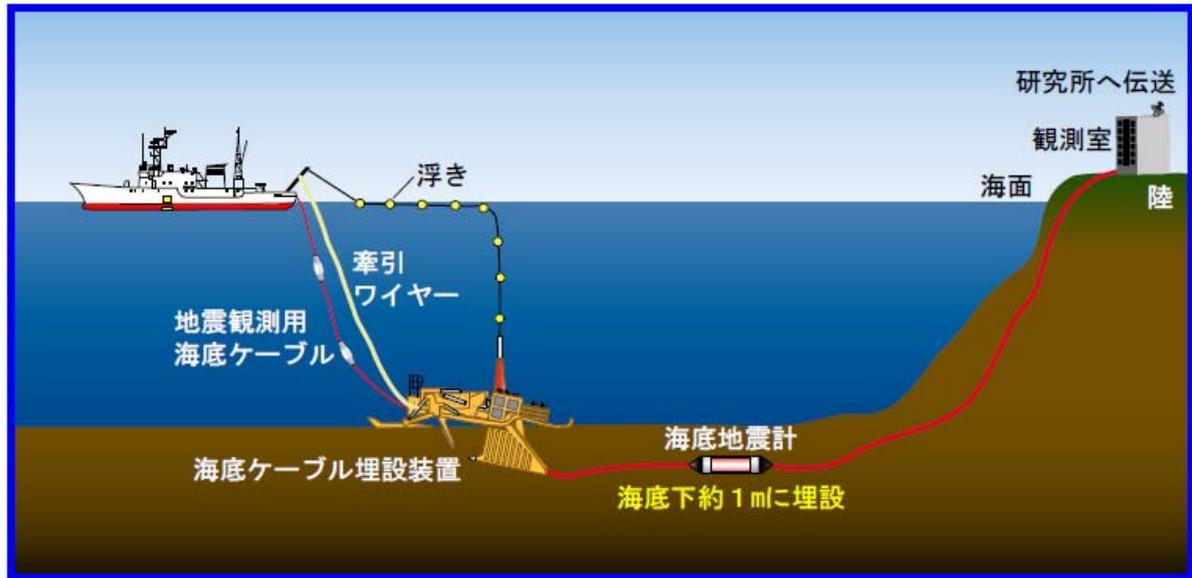


図 13 . スメル火山（インドネシア）における噴火規模予測
 スメル火山の爆発噴火に先行する地盤の傾斜速度は、噴火規模と良い相関がある。噴火前の傾斜速度を観測することにより、噴火規模の予測が可能になることが明らかになった。

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。