

参考資料 2－2

科学技術・学術審議会
測地学分科会 地震火山部会
観測研究計画再検討委員会（第1回）
H23. 11. 17

測地学分科会 地震火山部会（第6回）
H23. 10. 25

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の実施状況等の レビュー草案（Ⅲ章、Ⅳ章、Ⅴ章）

目次

III. 「平成 23 年東北地方太平洋沖地震」	
1. 本震	1
2. 余震・誘発地震・余効変動	1
3. 先行した活動	2
4. 過去の巨大地震とテクトニクス	2
5. マグニチュード 9 の地震規模に達した理由	3
6. マグニチュード 9 の地震が想定できなかった理由	3
7. 今後に向けて	4
IV. 近年発生した地震および火山現象に関する重要な観測研究成果	
1. 主な地震	6
(1) 2007 年（平成 19 年）能登半島地震	
(2) 2007 年（平成 19 年）新潟県中越沖地震	
(3) 2008 年中国四川地震	
(4) 2008 年（平成 20 年）岩手・宮城内陸地震	
(5) 2009 年駿河湾の地震	
2. 主な火山噴火	8
(1) 桜島	
(2) 霧島山（新燃岳）	
V. 観測研究計画の実施状況	
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	1 1
(2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築	1 4
(3) 地震・火山現象に関するデータベースの構築	1 9
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	2 1
(2) 地震・火山噴火に至る準備過程	2 7
(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程	3 4
(4) 地震発生・火山噴火素過程	4 2
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	4 5
(2) 宇宙技術等の利用の高度化	4 6
(3) 観測技術の継続的高度化	4 6
4. 計画推進のための体制の強化	4 9

Ⅲ. 2011 年（平成 23 年）東北地方太平洋沖地震

1. 本震

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に、宮城県沖を破壊の開始点として太平洋プレートと陸のプレート境界の南北約 500km、東西約 200km の巨大な領域を約 3 分かけて破壊したマグニチュード (M) 9.0 の地震が発生した。この地震の規模は我が国の観測史上最大であり、また 1900 年以降に世界で発生した地震でも 4 番目に大きな地震であった。最大震度は宮城県の震度 7 であり、宮城、福島、茨城、栃木の 4 県に及ぶ広い範囲で震度 6 強を観測した。この地震は、断層面積が大きく、海溝近くで大きな滑りを生じたことから、非常に波長が長く、高い津波が発生した。津波の最大波高は場所によっては 10m を超えたと推定されており、最大遡上高は約 40m に達し、また海岸から内陸に最大約 6km まで浸水した。

この地震により、東北地方の太平洋岸は最大で約 5m 東に動き、また最大約 1m 沈降したことが GPS 観測により明瞭に捉えられている。また、宮城県沖における海底地殻変動観測では、最大で約 31m 東南東に動き、また約 5m 隆起した観測点もあった。さらに、詳細な海底地形調査により、本震震源近傍の海溝陸側斜面が東南東方向に約 50m、上方に約 7m 移動したと推定されている。

これらの津波観測データや海底観測のデータから、本震の破壊開始点付近から海溝にかけての領域のプレート境界は最大約 50m 程度の滑りを生じたことは間違いないと考えられる。これらのデータは海底の変位そのものを反映するが、地震波の解析は特に上盤の地震波速度構造の不確実性が結果に大きく影響し、また得られるのはモーメント解放量分布であるので、滑り量分布に換算するためには剛性率を仮定しなければならない。また、上盤には正断層地形が発達しており、上盤の先端部は非弾性変形を生じた可能性がある。このため、地震波からの推定結果と海底観測・津波観測から推定された結果とを比較する場合には注意が必要であるが、遠地の波形記録からは基本的に短周期の地震波はプレート境界深部の陸に近いところから多く放出され、海溝軸近傍からは長周期の波が放出されたと推察される。また、大きな滑りを生じた領域は浅部に広がっているが、深部でも 1978 年宮城県沖地震の震源域では同じ深さの別の領域より大きな滑りを生じ、かつ短周期の地震波を放出していたと推定されている。また、さらに近地の強震観測により、福島県沖と茨城県沖の境界付近の領域でも短周期の地震波が放出されたことが確認されている。

2. 余震・誘発地震・余効変動

M7 以上の余震は 2011 年 8 月末までに 6 回発生している。うち、プレート境界型の余震は岩手県沖と茨城県沖に発生した地震（それぞれ M7.4 と M7.7）であり、残りは海溝軸外側で発生した正断層型地震 (M7.5)、スラブ内部で発生した逆断層型地震 (M7.1) と横ずれ断層型地震 (M7.3)、および内陸の福島県南東部で発生した正断層型地震 (M7.0) である。

また、プレート境界型の余震は、すべて震源域の北、西、南の縁辺部に限られており、上盤側も下盤側も正断層型の余震が卓越している。本震前と後の地震の発震機構解のデータを解析したところ、本震を境に応力場が大きく回転したことが明らかになった。本震による応力降下量と応力場の回転量から、本震前の剪断応力は 20MPa 程度と極めて小さな値が見積もられ、しかもその 9 割以上が今回の地震で解放されたことが明らかになった。プレート境界の摩擦係数が通常の岩石と大きく変わらない場合、この結果は、プレート境界の有効法線応力が静岩圧よりも一桁小さいことを意味する。

本震の直後から、日本の広い領域で地震活動が変化し、3 月 12 日の長野県北部の地震 (M6.7)、3 月 15 日の静岡県東部の地震 (M6.4)、4 月 11 日の福島県浜通りの地震 (M7.0) 等の被害地震まで発

生した。東北地方では東西圧縮の応力場が緩和されたことにより、2008 年（平成 20 年）岩手・宮城内陸地震の余震域等、地震活動が活発であった領域の活動が低調になった一方で、これまで活動度が低かった場所で地震活動が活発化した。これらの活発化した領域の地震の発震機構解は通常の東西圧縮の逆断層型となっていないことが多いため、そのほとんどは Δ CFF で説明できる。今回の地震に伴う応力変化は東北地方でも 1MPa 程度以下に過ぎないが、発生する地震のメカニズム解は大きく変化しており、プレート境界と同様に、内陸地震断層の強度もかなり低いと推定される。また、東西圧縮が緩んだことにより、火山活動が活発化する可能性もあり、過去には 869 年の貞観地震の後、871 年に鳥海山、915 年に十和田が噴火している。1896 年の明治三陸地震（M8.2）の 2 ヶ月後に内陸で陸羽地震（M7.2）が発生した事例もあり、今後、内陸の地震活動と火山活動が活発化する可能性がある。

本震の滑り量は主として宮城県沖の海溝軸近傍で大きかったが、余効滑りは岩手県南部から宮城県にかけての海岸線のすぐ沖や千葉県沖で顕著である。ただし、岩手県南部から宮城県にかけての海岸線付近の陸の下余効滑りは、それほど顕著ではなく、現状の変化傾向が継続するのであれば、地震時に沈降した海岸域が地震発生前の状態に戻るまでには長い年月がかかることになる。

今回の震源域の北隣りでは 1994 年三陸はるか沖地震（M7.6）や 1968 年十勝沖地震（M7.9）の震源域があり、南隣りの房総沖では 1677 年に延宝地震（M8.0）が発生したことが知られている。今回の地震とその余効滑りによってこれらの震源域への応力集中が進むと、これらと同程度の地震が生じる可能性がある。また、海溝軸外側においても本震直後の最大余震（M7.5）よりも大きな余震が起こる可能性があり、今後、注意深く見守っていく必要がある。

3. 先行した活動

2005 年の宮城県沖の地震（M7.2）のあと、宮城県沖から茨城県沖にかけて発生した M6.5 以上の地震は大きな余効滑りを伴うことが多い。特に福島県沖で 2008 年 7 月 19 日に発生した M6.9 の地震と 2010 年 3 月 14 日の M6.7 の地震は、本震よりも大きなモーメントの余効滑りを伴っており、M9 の地震の前にプレート境界で「固着のはがれ」が生じていた可能性がある。

本震の破壊開始点の東から北東側では、2011 年 2 月中旬から下旬にかけて M5 級の 4 回の地震を含む群発的活動があり、その後 3 月 9 日の M7.3 の地震に至った。この地震の余震の b 値は極めて小さかったが、この付近で発生する地震は常に b 値が小さいため、3 月 11 日の本震前にこれを前震であると判断することは難しかった。この 3 月 9 日の地震の余震活動の推移と地殻変動観測データから、来るべき本震の破壊開始点に向かって 3 月 9 日の地震の余効滑りが拡大し、本震の破壊を助起した可能性が高いと考えられる。

陸上のひずみ計や傾斜計のデータでは 3 月 9 日の地震の余効滑りは捉えられているものの、最終破壊の前に滑りが加速したことを示すデータは得られておらず、プレスリップが発生していたとしてもモーメントマグニチュード（Mw）は 6.2~6.3 程度と考えられる。ただし、前震の余効すべりは Mw7.0 相当であり、この前震活動域は本震の震源域の中に含まれていることから、この前震活動とその余効滑りを含めて震源核形成過程を見ていたとする考え方もある。

総電子数（TEC）の地震前後の時系列を解析したところ、震源域上空の電離圏で、本震発生の約 40 分前から最大 1 割近くに達する総電子量（TEC）の正の異常が認められ、同じ解析を 2004 年のスマトラアンダマン地震（インドネシア）や 2010 年のチリ地震に適用すると同様の TEC の異常が認められた。TEC の異常の原因と M9 の地震との因果関係はまだ不明であり、今後、さらに事例を積み上げ、物理的メカニズムを明らかにしていく必要がある。

4. 過去の巨大地震とテクトニクス

三陸地域では、1896 年明治三陸地震や 1933 年昭和三陸地震等によって、過去に何度も大きな津

波に襲われてきた。宮城県南部以南でも、869 年貞観地震や 1611 年慶長地震などによって大きな津波が押し寄せたことが知られている。津波堆積物調査により、これらも含めて数百年に一度程度、大きな津波があったことがわかっているが、津波の規模や発生時期については、そのほとんどがよくわかっていない。ただし 869 年貞観地震については、津波堆積物の分布が比較的詳細に調べられている。その結果、宮城県南部の津波の浸水域が今回の地震の浸水域と類似しており、少なくとも宮城県沖から福島県沖にかけては今回の地震と同様の滑りが生じていた可能性が高いことが明らかになった。1611 年慶長地震については三陸で大きな津波があったことは知られているが、津波堆積物の分布はよくわかっておらず、震源域の推定のためには更なる調査が必要である。

東北地方の太平洋岸は数十年間の測地学的観測では沈降を示し、プレート境界型大地震が生じたときも沈降する。一方、地質学・地形学的知見として、東北地方太平洋岸は長期的には隆起ないしほぼ中立的な状況であると考えられている。このため、この沈降を解消するような巨大地震がいつかは生じると考えられていたが、その規模と発生様式はよくわかっていなかった。海域で巨大なプレート境界地震が生じて、海岸部は沈降するだけなので、そのような巨大な地震のあとには、内陸の下でのプレート境界で巨大な余効滑りが生じて海岸が隆起する可能性が高いと考えられていた。しかし、今回の地震については、今のところ深部の余効滑りがそれほど大きくはなく、このままでは海岸が地震前の高さに戻るようには見えない。このため、もし長期的な隆起が継続するのであれば、いつか巨大なゆっくり地震が深部で発生するか、あるいは海岸付近を震源域とする巨大な地震がもう一度起こって、ようやく深部の余効滑りが大規模に生じるという二通りのシナリオが考えられる。

5. マグニチュード 9 の地震規模に達した理由

様々な状況証拠はこの地域のプレート境界の強度が小さいことを示しており、実際、今回の地震の余震活動を利用して推定されたプレート境界の強度は、20MPa 程度と極めて小さいものであった。しかし、実際には M9 の地震が発生し、最大で 50m 程度の滑りを生じたということは、50m の滑り遅れが生じるまでプレート境界が滑らないくらいの強度があったことを意味している。これはどのように考えればよいのであろうか。

今回の震源域の幅は 200km に達し、しかも海溝軸を滑りが突き抜けたと考えられるため、応力降下量はせいぜい 10~20 MPa 程度であったと考えられる。逆に言えば、20MPa 程度の強度であっても、残留剪断応力がゼロになるまで滑れば今回の地震は説明できる。通常は、残留剪断応力がゼロになるまで応力降下するような地震は生じないが、今回の地震では、何らかの理由で、剪断応力がゼロになるくらいまで滑ったために、非常に大きな滑りとなったと考えられる。

このように応力がゼロになるくらいまで滑った理由としては、摩擦発熱による間隙圧上昇や、滑りが海溝軸を突き抜けた等の理由によって滑り過ぎが生じた等のモデルが考え出されている。もし、海溝近くの大きく滑った領域の強度が他より大きいとすれば、局所的な大きな滑りは説明しやすくなる。一方、速度状態依存摩擦構成則で言うところの速度弱化域が広域におよんでいると仮定すれば広大な滑り域は説明しやすくなる。

現時点では、まだどの地震発生モデルがより真実に近いのかは明らかになっておらず、また今後、別のモデルが構築される可能性もあるが、余震活動を見る限り、広域のプレート境界の剪断応力をリセットするような滑りが生じたことは間違いないと思われる。

6. マグニチュード 9 の地震の発生可能性を事前に指摘できなかった理由

東北地方のような古くて冷たいプレートが沈み込んでいるところでは、プレートが重いために沈み込みやすく、プレート境界の有効法線応力が小さくなって剪断強度も小さくなるために、大きな地震は生じにくいとする考え方が 1970 年代に提唱されて、広く受け入れられてきた。一方、1990

年代末から 2000 年代初頭にかけての GPS 観測により、東北地方は毎年 2cm 程度ずつ短縮していることが判明し、これを元にプレート境界の滑り遅れを推定したところ、宮城県沖から福島県沖にかけての広い領域で滑り遅れが生じていることが明らかになった。このため、将来、この領域で巨大な地震が生じる可能性を指摘した研究もあった。

しかしながら、東北地方では（１）普段の地震活動が活発で、とくに小繰り返し地震活動が極めて活発であること、（２）大地震の余効滑りが地震時滑りと同程度以上の規模となることが多いこと、（３）100 年の測地測量の結果では、東北地方の太平洋側では、宮城県北部沖等の大地震があったところを除いて東西方向の短縮がほとんど見られないこと、等は固着が弱いことを示唆していた。一方、1990 年代末から 2000 年代初頭にかけて GPS で大きな滑り遅れが検知されていたが、この固着が強い時期はプレート境界地震の活動も極めて低調な時期であり、（１）から（３）を考慮すると、大きな滑り遅れは一時的なものであり、やがては M6～7 級の地震やその余効滑りで、滑り遅れのかなりの部分が解消されるのだろうと考えられていた。

実際、福島県沖の地震活動の低調な時期は 2000 年代末頃に終わり、同時に大きな余効滑りを伴う地震が続けて発生し、GPS で推定される滑り遅れはかなり解消されたように見えた。前述のとおり、これが巨大地震前の「固着のはがれ」を示していた可能性もあるが、地震活動から見る限り、滑り遅れが大きくなった時期のほうが「異常」と当時は判断していた。

以上のように東北地方太平洋沖では、プレート境界の剪断強度が小さいため、大きな滑り遅れを蓄積することができず、このために、M9 といった巨大な地震は生じえないと考えられていた。また、大きな滑りが生じた場所は、海溝近くで普段の地震活動が低調な領域で、小繰り返し地震も発生しない場所であり、かつ、この領域は陸から遠いため陸域の GPS 観測ではここが固着しているかどうか判断できなかった。このため、この領域では地震を生じずにゆっくりと滑っており、50m もの滑り遅れを蓄積できるとは考えていなかったことも、今回のような地震の発生を予測できなかった理由の一つである。

さらに、モデル化の対象が近代的なデータに偏り、これらが地質学的な時間の中ではごく一部に過ぎないという視点の検討が十分ではなかったことも問題であった。単純なアスペリティモデルでは、貞観地震のような低頻度の巨大地震を説明できなかったが、間隙圧の時間変化にその原因を求めてしまっていた。

7. 今後に向けて

東北地方で M9 の地震が生じたことは、世界中のあらゆる沈み込み帯において M9 の地震が生じる可能性があることを意味する。その M9 の地震発生ポテンシャルを正しく評価し減災に役立てるためには、今回の地震を正しく理解する必要がある。

特に、地震後の余効変動は、今回の地震像を明らかにするうえで重要なだけでなく、地震サイクルの全体像を明らかにするうえでも重要であり、さらにどこで大きな余震や誘発地震、火山噴火が起こるのかを予測するうえで重要な情報となる。特に地震発生直後は、その変化速度が一番大きいと予測されるため、なるべく早い段階で詳細な測地測量・地殻変動観測・地震観測・火山観測を行い、後年のデータと比較するための基礎データの取得を行うことが必要となる。なかでも、地質・地形学的な状況証拠が示唆する東北地方の長期的な隆起と矛盾し、この隆起を説明する仮説と異なり、深部の余効滑りは顕著ではなく、海岸部の隆起が始まらないことをどう理解すればよいのか重要な問題となるため、海域及び陸域における測地測量の充実は極めて重要である。

また、今回、海溝付近で大きな滑りが生じた領域は一部にすぎないが、海溝軸に沿って地震時に大きな滑りを生じる可能性のある他の場所が無いかどうかを調べる必要がある。そのためには、海溝付近でのひずみエネルギーの解消様式について多面的な研究が必要となる。分岐断層の分布や滑り履歴も含め広範な構造調査を行うとともに、このような大きな滑り量の領域が海溝付近で生

1 じた理由を理解するために、海溝軸近傍での深部ボーリング調査が有効と考えられる。また、海溝
2 軸近傍での海底地殻変動観測を多点で行い、滑り遅れの分布を求めるとともに、海溝付近の超低周
3 波地震によるひずみの解消速度の推定も必要である。また、海底水圧計観測による連続監視は、海
4 岸における津波の高精度推定に極めて有効であることが明らかになっており、その展開も重要とな
5 っている。

6 一方、このような巨大な地震の発生はまれなため、その再現性を検証するためには、過去の地震
7 を調べるのが重要となる。そのためには古文書や津波堆積物の調査をこれまで以上に充実させる
8 必要がある。

9 また、これまでのアスペリティ（＝地震性領域）とそれ以外の領域（＝非地震性領域）という二
10 元論的アスペリティモデルに固執することなく、より柔軟なモデルを構築し、空間不均質性の効果
11 や、摩擦発熱などの動的効果を考慮したシミュレーションを発展させ、プレート境界における地震
12 の発生様式についての理解を深めていく必要がある。

13 なお、今回の地震の余効変動は数十年にわたって継続すると予想され、M9 の地震の全貌を把握す
14 るためには、数十年のデータの蓄積が本質的に必要であることを認識して観測を実施しなければな
15 らない。

IV. 近年発生した地震及び火山現象に関する重要な観測研究成果

1. 主な地震

(1) 2007 年（平成 19 年）能登半島地震

2007 年 3 月 25 日に 2007 年能登半島地震(M6.9)が発生し、石川県で最大震度 6 強を観測し、能登半島周辺に大きな被害をもたらした。この地震の余震は陸域のみならず能登半島西方沖にも広がって発生し、震源域は海域から能登半島の内陸にまで広がっている。SAR 干渉解析によってこの地震に伴う陸域地殻変動が面的に高精度に得られ、震源断層面の推定に大きく貢献した。本震の震源断層の走向は東北東－西南西方向で、傾斜角 65 度であり、能登半島西岸の深さ約 10km の地点から破壊が開始し、そこから浅い方に滑りの大きな領域が広がっていることがわかった。また、この地震断層の平均滑り量は 1.1m、地震モーメントは 1.6×10^{19} Nm (M 6.7)、破壊継続時間は約 9 秒であると推定された。

この地震では特徴的な前震活動がふたつあった。ひとつは、本震の約 12 分前に本震破壊開始点のごく近傍で M2.2 の地震が発生したことであり、もうひとつは主要破壊開始 0.6 秒前に、本震の初期破壊過程と思われる M4.4 の地震が発生したことである。地震波トモグラフィーの結果からは震源域近傍は速度が遅い領域であることが、また、電磁気探査からは本震の震源直下に低比抵抗領域が存在していることが明らかにされた。低比抵抗域は余震域の下に広がり、断層北東端の余震活動が低調である領域は高比抵抗領域である。さらに、発震機構解の分布から断層面上においても応力場が変化していること、また、断層面上の浅部では横ずれ型の応力場であるが、深部では逆断層型の応力場へ変化していることが明らかとなった。これらは、これまでの研究から内陸地震の発生域に共通して見られる特徴であり、この地震の発生に、地殻流体が関与している可能性を示唆するものである。

能登半島とその周辺では、これまで 1600 年以降 M7 を超える地震が発生したことは知られていなかったが、能登半島西方沖には、北東－南西方向に延びる長さ 20km の逆断層型の活断層があることが知られていた。精度よく再決定した余震分布と活断層の位置を比較すると、能登半島地震の震源断層とこの海底の活断層の深部延長が一致し、この海底活断層が能登半島地震の震源断層であることが明らかになった。これは地震防災を考える上で非常に重要なことを示唆している。つまり、内陸地震の想定規模を推定する際、陸上の活断層だけでなく沿岸の海底にある活断層についても調査することが必要であり、陸上の断層と海底の断層が同時に滑る可能性も考慮する必要があることを示している。

(2) 2007 年（平成 19 年）新潟県中越沖地震

2007 年 7 月 16 日に新潟県中越沖地震 (M6.8) が発生した。震源は 2004 年新潟県中越地震 (M6.8) から北西に約 30 km 離れた場所に位置する。本震の発震機構解は、西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層であり、地殻変動データ・強震動記録による本震の滑り量分布の推定や、海陸合同の稠密観測による精密な余震分布や地下構造解析等がおこなわれた。

この地震の特徴は、単一の断層面の破壊ではなく、複雑な震源断層の形状をしていることである。多くの余震は南東傾斜の面状に分布しているが、破壊開始点（震源域北東部）の近傍では北西傾斜の分布をしている。地殻変動データの解析から、南東傾斜の断層に加えて北西傾斜の断層も存在するモデルが、データをより良く説明できることがわかった。震源近傍の強震動観測点では、滑り量の大きな領域から放射されたと考えられる明瞭な 2 つのパルス状の地震波（卓越周波数が約 1 Hz）が観測された。これらのパルスの発生源は、破壊開始点付近と断層の南西部に位置し、ディレクティブリティ効果により南側で大きな強震動が観測されたことがわかった。また、海域での構造探査に

よると、震源域北西側には南東傾斜の逆断層運動によって形成された震源断層とほぼ同じ方向に延びる活断層や活褶曲構造が見られた。

本震発生後には、断層の浅部と深部で余効滑りが生じていた。また、SAR 干渉解析により、震央から 15 km 内陸側の西山丘陵西側斜面で、活褶曲の成長を示す地殻変動が地震後に見出された。更に、稠密余震観測により極めて高い空間解像度で推定された地震波速度構造によると、日本海拡大時に形成されたリフト構造が中越地域の分厚い堆積層の下に埋もれていることが明らかとなった。

これらのことから、この地震と 2004 年（平成 16 年）新潟県中越地震は、共に過去の日本海拡大によって造られた正断層が、現在のプレートの沈み込みによる圧縮場により逆断層として再活動した可能性が高いことが示唆される。更に、二つの地震の震源域直下には低速度域が局在し、電磁気探査の結果から低比抵抗領域が広がっていると推測される。また、広域の地震波速度トモグラフィの解析によれば、低速度域は最上部マントルの深さまで延びていることが示され、この地域で採取された地下水のヘリウム同位体比にもマントル起源物質の特徴が見られることから、深部からの流体が上昇し、それが両地震の発生に関与している可能性が高いことが示された。

トモグラフィ解析で得られた速度構造や地質構造を用いて、中越地域を対象とした三次元地質構造・物性値モデルを用いて、摩擦則を想定した断層運動をシミュレーションすると、下部地殻の粘性変形の効果により、2004 年新潟県中越地震が 2007 年新潟県中越沖地震を誘発した可能性があることがわかった。

（３）2008 年中国四川地震

2008 年 5 月 12 日に中国四川省において M7.9 の四川地震が発生し、震源域に甚大な被害をもたらした。地震を発生させた断層は、四川—雲南活動帯のチベットブロックと南中国ブロックの境界である鮮水河—安寧河—小江断層帯から、北東に派生した北東—南西の走向方向を持つ龍門山断層帯に位置する。GPS 観測から、この断層帯を境界とするブロックは数 mm/年の速度で相対運動を行っていると推定されており、四川地震はこれらブロックの相対運動によるひずみの蓄積が原因となって発生したものと考えられる。ブロックの相対運動速度と地震時の滑り量を考慮すると、同等の地震は 1000～3000 年程度の繰り返し間隔で発生する可能性があると考えられる。遠地地震波形と強震動波形を用いた震源過程解析から、震源域の南西部に滑りが大きい領域があり、最大滑り量は 9m であると推定された。

SAR 干渉解析では、数メートルを超える変動を捉えることは困難であるため、四川地震による断層近傍の大きな変位を正確に推定することは難しい。地震前後の SAR 強度画像から地表変位を計測する方法を用いて、四川地震の断層周辺の大きな変位の分布を、高い空間解像度で推定した。この解析から、滑りは断層の北東部では右横ずれ、南西部では右横ずれと逆断層の成分を持ち、北東部では一枚の断層が、南西部では複数の断層が破壊されたことが分かった。さらに、この解析と通常の SAR 干渉解析を組み合わせることにより、四川地震に伴う高解像度の地殻変動を広域的に推定できた。得られた地殻変動は震源断層の形状や断層の滑り分布の推定に利用された。

（４）2008 年（平成 20 年）岩手・宮城内陸地震

2008 年 6 月 14 日に、内陸の岩手県と宮城県の県境付近で 2008 年岩手・宮城内陸地震（M7.2）が発生し、震源域に大きな被害をもたらした。大学と防災科学技術研究所は、本震直後から震源域を含む岩手県南部から宮城県北部の広い領域で緊急の余震観測および GPS 観測を実施し、詳細な余震分布と三次元地震波速度構造を推定した。本震断層に対応すると考えられる西傾斜（傾斜角約 40 度）の余震の分布と、震源域中央から南部にかけて東傾斜の 2 つの傾斜方向の異なる余震分布が明らかになった。また、本震の震源付近では西傾斜の余震の分布に対し上盤側が下盤側に比べて地震波伝播速度が低いことがわかった。この結果は、この地震断層はかつて日本海拡大時に生成された正断層が、1500 万年経過した現在の応力場に支配されて反転運動し、逆断層として動いた可能性を示している。

また、GPS臨時観測から地震時の断層運動の推定を行った結果、地震発生後に出店断層等で余効滑りが発生していたことが明らかになった。長期の観測データから、主要な余効滑りは本震後約1ヶ月で終息し、この変動は地殻の粘性緩和で説明でき、地殻の厚さは約17～31 kmと推定された。また、本震の断層面上での滑り分布から、地震時は震源断層の深い領域、余効滑りは浅い領域で滑り量が大きく、また、それぞれが異なった場所で滑ったことが明らかになった。

広帯域MT観測からは、本震の震源域東部の深さ5 km付近に電気伝導度の顕著な低比抵抗域が見出された。断層面および余震分布域は高比抵抗域にあり、地震波速度の高速度分布域に対応していることが明らかになった。また、広域の地震波速度構造の探査から、震源域直下の下部地殻から最上部マントルに顕著な低速度域が存在していることが明らかになっており、比抵抗構造と地震波速度構造から、地殻流体の分布がこの地震の発生に密接に関与していることが示唆された。これらは2004年中越地震、2007年中越沖地震と共通の特徴であり、日本で発生する内陸地震の発生メカニズムを研究する上で、重要な成果である。

この地震は、事前に活断層の存在が指摘されていない場所で発生したが、地震直後の大学や国土地理院の調査により活断層の証拠が見つけられ、航空写真やSAR干渉解析等によってその活断層と推定地震断層との関係が明らかになった。また、この地震の震源断層近傍で得られた強震波形からは、表層地盤の非線形挙動が見られ、卓越周波数や増幅率の変化等の非線形応答特性に関するデータ収集が進められた。

(5) 2009 年駿河湾の地震

2009年8月11日に、駿河湾の深さ約25 kmのフィリピン海プレート内で、M6.5の地震が発生した。発震機構は、圧力軸が北北東-南南西方向の、横ずれ成分をもつ逆断層型であった。余震は北西側では北東傾斜、南東側では南東傾斜に分布を示し、大局的にはほぼ直角に接する2枚の面上に分布することが明らかになった。これらの2面からなる震源断層を仮定して強震動記録を解析した結果、2つの面が接する場所にまたがって、滑り量の大きな領域が分布していたことが明らかになった。さらに、本震の滑り量を仮定して、想定東海地震の震源断層となるプレート境界面上の静的応力変化を計算した結果、応力が増加した場所でプレート境界面上の地震活動が活発化したという研究結果も示された。

この地域では、巨大なプレート境界地震の発生が危惧されている。プレート境界の応力蓄積や固着強度とこのプレート内地震の発生の関連について、研究を推進する必要がある。

2. 主な火山噴火

(1) 桜島

2006年6月に噴火活動が再開した桜島（鹿児島県）の昭和火口では、2009年7月に爆発回数が増加し始め、2009年9月から2010年5月にかけて地盤の隆起・膨張を伴いながら爆発的噴火活動が活発化した。2010年6月中旬から10月までは活動の様相が変化し、これまで山体膨張が顕著であった地殻変動が山体収縮に転じ、爆発頻度と火山灰の噴出量を減じながらも継続した。桜島直下のマグマ蓄積量と火山灰の噴出量の総和から推定した始良カルデラ直下の深部マグマ溜まりから桜島直下のマグマ溜まりへ供給されるマグマ供給量は、2009年7月頃から増加し始め、2009年12月～2010年3月にピークに達したが、2010年7月からは深部からのマグマ供給が弱まり、2010年10月までは供給がほぼ停止した状態になったと考えられる。

2009年7月に深部からのマグマ供給が急増し、桜島東部の黒神観測井で計測している H_2 及び CO_2 ガス濃度が急増した。これは、深部から桜島直下へマグマが上昇する先行物質として火山ガスが移動し、その一部が地表近くまで達したことを示すものであり、今後の活動推移を予測する上で火山ガスの計測が有用であることを示す重要な成果である。火山ガスの上昇・移動は地下の電気伝導度の比抵抗変化としても捉えられた。桜島の東西2か所で行ったMT連続観測により、見かけ比抵抗で20%、

1 位相で2%の変動が検出され、マグマに含まれる火山ガスの浅部地下水への混入が比抵抗の変動を引き起こしていると考えられた。

3 昭和火口から約 2.4km 離れた地点で、2009 年 7 月初旬及び 10 月の 2 回にそれぞれ $10 \mu\text{gal}$ の重
4 力の急減が観測された。この時期は桜島下へマグマの供給量が増加した結果、爆発活動が段階的に
5 活発化した時期に対応しており、火道中のマグマの頭位の上昇を捉えている可能性がある。

6 桜島周辺の水準測量は、始良カルデラ直下の深部マグマ溜まりは 1974 年～1992 年頃の期間にお
7 いて蓄積がほぼ停止、または放出する状態にあったが、1993 年以降蓄積を再開し、1914 年大正噴火
8 直前の蓄積量に近づいていることを示す。一方、桜島直下にある浅部マグマ溜まりは、深部マグマ
9 溜まりからの供給と噴火によるマグマ物質の放出の間のバッファの役割を持っており、桜島の複
10 雑な活動推移は、深部と浅部の 2 つのマグマ溜まりの状況により変化するという、桜島のマグマ供
11 給系と火山活動の関連が見え始めている。現在の噴火活動を、今後起こると予測される大規模噴火
12 の準備過程であると捉え、現在の活動を多項目観測から明らかにすることにより、桜島だけではなく、
13 他の火山でも見られる複雑な噴火準備過程の推移を説明する知見が得られる可能性が高い。今
14 後も活動の推移を捉え、その背景にある物理・化学過程を解明してゆくことが極めて重要である。

15 (2) 霧島山 (新燃岳)

16 霧島山の新燃岳 (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
17 午後から高い噴煙を連続的に上げる噴火 (準プリニー式噴火) を始め、27 日 18 時頃までに 3 回の
18 準プリニー式噴火があった。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
19 を埋めるまで成長した。2 月 1 日以降は間欠的に噴石を飛ばすより規模の小さな爆発的噴火 (ブル
20 カノ式噴火) を繰り返したが、その後噴火の頻度は次第に減少し、現在に至っている。霧島山新燃
21 岳の本格的なマグマ噴火は 1716～17 年以来、約 300 年ぶりの現象であり、休止期間の長い噴火活動
22 を予測するうえで、今回の噴火準備過程や噴火過程の解明は極めて重要である。

23 霧島山では火山基盤観測網の整備計画等により、噴火前に深度 100～200m のボアホール型地震計
24 と傾斜計を併設した 4 観測点の他、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
25 め、火山現象解明に有用な多種の観測データが取得された。また、火口内の溶岩量の増加を、人工
26 衛星や航空機の SAR 画像などにより正確に計測したことは、傾斜変動や伸縮計の観測結果とあわせ
27 ることによって、マグマ移動の定量的な推定に極めて有用であった。

28 今回の噴火に先行する現象として、霧島山周辺部の地震活動が 2006 年頃からやや活発化し始め、
29 それにほぼ同期して GPS で観測される山体のわずかな膨張が始まったことが挙げられる。2008 年 8
30 月 22 日には小規模な水蒸気爆発が発生したが、この活動の際に噴出した火山灰には、新たなマグマ
31 の関与が認められず、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
32 られる。2009 年 12 月下旬からは山体膨張の速度が急増し、新燃岳北西 7～8km の地下約 10km にマ
33 グマの蓄積が始まったと考えられる。この山体膨張は 2011 年 1 月の準プリニー式噴火の開始直前ま
34 で続き、マグマの蓄積速度はほぼ一定であった。2010 年 3 月から 7 月の間に小規模な水蒸気爆発が
35 6 回発生した。5 月下旬に放出された火山灰の中に、マグマ起源の火山ガスの泡を含む黒色のガラス
36 質成分がわずかに確認され、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可能性を示し
37 ていた。

38 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
39 が顕著に増加した。この約半日前から火山性の連続微動が発生し始め、連続微動の振幅は 1 月 26
40 日 8 時頃から少し大きくなった。14 時 49 分に最初の準プリニー式噴火が始まると同時に振幅が一
41 層大きくなり、4 時間程度、大きな振幅の火山性微動が継続した。準プリニー式噴火は、27 日 1 時
42 頃と 15 時頃にも発生した。噴火時の傾斜計記録から、準プリニー式噴火によりマグマ溜まりが急激
43 に収縮し、噴火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
44 火で放出された軽石と火山灰は霧島山周辺地域に堆積し、現地調査によるとその量はマグマ換算で

約 1,000 万 m^3 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、この間に山頂火口に溶岩が蓄積された。2 月 1 日の時点での火口に蓄積した溶岩量はマグマ換算で約 1,400 万 m^3 と推定され、1 月 26 日から 2 月 1 日までの噴火で火口から約 2,400 万 m^3 のマグマが噴出したと見積もられた。

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。これらの噴火前には山体浅部の膨張を示す傾斜変動が観測され、火山性地震の発生回数が増加した。噴火後は膨張した山体は元に戻り、地震数も減少する現象が多く観測された。これは火口付近の浅部にあるマグマの一部が発泡し、火口を覆う溶岩を噴き飛ばしていた現象であると推定される。一方、深さ 10km のマグマ溜まりでは、1 月 26 日から 31 日の噴火により 2009 年以降蓄積していたマグマの体積が四分の一まで減少したが、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。2011 年 6 月下旬からは、噴出された火山灰の粒子径が細くなり、マグマやその周辺の岩石が噴出前に細かく破碎されている特徴を有している。つまり、この頃にブルカノ式噴火からマグマ水蒸気爆発に移行したものと思われる。

今後の活動推移については、噴火シナリオを作成し、現在進行している噴火活動の予測がどの程度可能であるかを、実時間で検証することを試みている。今後、準プリニー式噴火（爆発的噴火）が再度発生する、爆発的噴火を伴わずに溶岩流出が起こる、さらに大きなマグマ水蒸気爆発が発生するなど、いくつかの噴火様式が想定される。進行中の噴火活動に対して、発現の可能性のある噴火事象とそれらの前兆現象を整理した噴火シナリオを準備し、観測・監視に基づいてそれを検証することは、噴火の準備過程・噴火過程の理解の観点からも火山噴火予知研究の重要な課題と言える。そのため、この噴火活動の観測研究を継続するとともに、他の活動的な火山にも噴火シナリオ導入を図り、噴火予測の実用化を目指した研究を推進する必要がある。

V. 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の実施状況

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

あ. 目的

地震現象と火山現象の予測精度を向上させるためには、日本列島域を対象としたモニタリングシステムに加え、大地震の発生が予想される特定の地域や火山噴火の可能性の高い地域における地震・火山現象モニタリングが重要である。そのため、高密度かつ多項目の諸観測を一層整備するとともに、既存の観測網の着実な維持・更新を行う必要がある。こうした地域では、活動の予測に有用な情報を数多く収集することが必要であり、より詳細かつ定量的な活動の把握と評価を行うことができるよう、モニタリングシステムの高度化を推し進める。

い. 実施状況

ア. 日本列島域

国土地理院は、GPS 連続観測網(GEONET)について、新しい大気遅延勾配推定やアンテナ絶対位相特性モデルに基づく新解析戦略(F3)を適用することにより系統的な測位誤差を大幅に低減し、地殻変動の検知能力を向上させた。GEONET 1 秒データのリアルタイム解析の試験運用を行い、M7 程度の大地震時に緊急地震速報を用いて地震時地殻変動の迅速な検出と断層モデル推定を行う手法を開発した。地殻上下変動の精密監視のため、全国約 20,000km の水準路線において、第 10 回目の全国改測が実施されている。

大学は、地震データ流通システムについて、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。

防災科学技術研究所は、日本列島全域に展開された稠密な基盤的地震観測網の整備を継続的に進めた。気象庁は、一元的に収集した観測データを用いて、震源決定処理を行うとともに、震源決定精度の向上、地震活動異常の定量的評価を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を図った。

気象庁は、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 火山への地震計・傾斜計等の観測施設の整備を行った。国土地理院は、活動的な火山地域について SAR 干渉解析を実施し、有珠山、吾妻山、三宅島、硫黄島、九重山(星生山)、霧島山(新燃岳)等の火山性地殻変動を捉えた。産業技術総合研究所は、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、観測を実施できるようにした。火山におけるモニタリングを促進するために、大学を含めた各機関の地震計・傾斜計・空振計等の観測データの共有化・流通を開始した。

国内外での顕著な地震・火山活動が発生した際、地球観測技術衛星「だいち」(ALOS)の緊急観測により取得された SAR データを用いて、各機関で干渉解析がなされ、詳細な地殻変動分布が得られた。撮像幅を 350km まで拡張できる ScanSAR-ScanSAR 干渉解析技術が開発され、2010 年チリ地震等に適用された。

イ. 地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

大学と気象庁は、宮城県沖における海底地震観測データと一元化処理データとの併合処理において、堆積層補正や観測点補正を実施し、より精度の高い震源データを得ることができた。これにより、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。長期観測型海底地震計を用いて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。大学は、水位・水温観測を行う2井戸とラドン・CO₂濃度観測を行う3井戸からなる深層地下水変動観測網による観測を継続した。

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。大学は、阿蘇山において高精度・高時間分解能の比抵抗連続観測システムを設置し観測を行った。国土地理院は、樽前山、有珠山、北海道駒ヶ岳、伊豆大島、富士山、伊豆東部火山群、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。測量用航空機にSARセンサーを搭載し、新燃岳等で火口の地形測量を開始した。気象庁は、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。防災科学技術研究所は、有珠山、岩手山、浅間山、阿蘇山、霧島山に、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。

ウ. 東海・東南海・南海地域

本地域においては、地震観測網、地殻変動観測網が特に密に配置され、重点的に観測が実施されている。大学、気象庁、国土地理院、海上保安庁は、レーザー式変位計観測、多成分ひずみ計観測、体積ひずみ計観測、地下水等総合観測、海底地殻変動観測、精密制御震源を用いた構造探査、海底地震計観測、地磁気観測、絶対および相対重力観測、海底地形調査など多項目の観測を継続して実施した。産業技術総合研究所は、地下水等総合観測施設（地下水・地殻変動・地震観測施設）を新たに14点構築した。産業技術総合研究所と防災科学技術研究所は、双方のデータを共有し、短期的ゆっくり滑りをより高精度にモニターできるシステムを構築した。

気象庁は、従来のひずみ計観測網に加えて、新たに東海地震の想定震源域及びその西方に多成分ひずみ計を整備するとともに、関係機関の観測データの提供を受け、東海地域の地殻変動の監視体制を充実させた。

う. 成果

ア. 日本列島域

大学は、高速広域ネットワークであるJDXnetによる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、地震データ流通システムを整備した。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。衛星テレメタリングシステムを更新し、低消費電力で帯域利用効率の高い新世代VSATシステムが完成した。防災科学技術研究所は、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。また、深部低周波微動の検出方法を改良しカタログの再構築を行うとともに、短期的ゆっくり滑りイベントの自動検出システムを構築した。

大学は、新しいモニタリング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モニタリングシステムを構築した。この手法により、2000年三宅島噴火や、2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震波速度変化を検出した。

国土地理院は、活動的な火山地域についてSAR干渉解析を実施し、有珠山、吾妻山、三宅島、硫黄島、九重山（星生山）、霧島山（新燃岳）等において火山性地殻変動を捉えた。また、航空機搭載SARによって新燃岳火口内及び周辺の地形変化を観測した。産業技術総合研究所が立案した、ASTER衛星データを用いて、霧島山（新燃岳）等の噴火について詳細な映像が得られた。

イ. 地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

大学は、2005年宮城県沖の地震前後の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が小さいことを明らかにした。2年間の海底圧力連続観測データから、顕著

な年周変化と 0.9 hPa/y の経年的増圧変化を見いだした。この経年変化は、陸上 GPS 観測に基づくプレート間固着モデルから期待される変化量とよい一致を示し、この地域での固着が継続していることを示唆する。また、陸上 GPS 観測データから、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。2005 年宮城県沖の地震 (M7.2)、2003 年十勝沖地震 (M8.0) の余効滑りを捉えるとともに、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滑りが発生していたことを明らかにした。これは、小繰り返し地震の解析に基づく海溝軸周辺での滑りの加速に対応している。

防災科学技術研究所、気象庁は、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を観測し、その結果は同火山の活動評価に活用された。

1978 年以来、マグマの貫入による群発地震を繰り返している伊豆半島東部で、2009 年 12 月に比較的規模の大きな群発地震活動があった。国土地理院は、GEONET で地殻変動を検出し地震のメカニズム解明に寄与した。産総研は群発地震に先立つ地下水位の変化を検出し、気象庁の体積歪観測点の挙動と合わせて、マグマ貫入モデルを提示した。これに基づき、伊豆半島東部で気象庁による群発地震予測プログラムが開始した。この地震予測プログラムは、同東部における火山噴火予測とも連携している。

ウ. 東海・東南海・南海地域

各機関は、プレート境界付近で発生する低周波微動やゆっくり滑りを引き続きモニターし、その規模や時空間分布に関する情報の精度を高めた。産業技術総合研究所は紀伊半島の低周波微動のメカニズムを個々に求め、それらが主に比較的高角な逆断層タイプであること、紀伊半島東部では横ずれ成分が入ってくるを見いだした。GPS 観測に基づくひずみ解析において、使用する観測点を 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った。東海地域の GPS 観測データから短期ゆっくり滑りを検出するための解析方法を開発し、2006 年のデータに適用したところ、1 月と 8 月の 2 回のゆっくり滑りによると考えられる 2~3 mm 程度のステップが検出されたが、インバージョン解析を行って滑り領域を推定した結果と低周波微動発生域とは必ずしも一致しなかった。

GEONET データの解析により、豊後水道付近で 2009 年秋頃から 2010 年秋頃まで長期的ゆっくり滑りが発生し、その滑り域が 1997 年、2003~2004 年のイベントの領域とほぼ同一であること、滑りの中心が西に移動すること、豊後水道南東側の深部低周波微動の活動度と相関があること等が明らかになった。

大学は、駿河湾および熊野灘において海底地殻変動測定を繰り返し行い、紀伊半島東方沖地震と同様に 2009 年の駿河湾の地震発生時の地殻変動を観測した。

プレート境界における固着のモニタリングとして精密制御震源装置が用いられている。大学は、豊橋の発振点から 30 km 圏内にある観測点において、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、東海長期ゆっくり滑りの監視に向けて、Hi-net 観測点 10 点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を明らかにした。気象庁が、森町の発振点と 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、降水量の影響をモデルで説明できることを明らかにした。大学および気象庁は、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。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 月の深部低周波地震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。

大学は、陸域観測技術衛星「だいち」による SAR 干渉画像と GPS データを統合処理し、長波長ノイズを除去することで、広範囲で微小な地殻変動を検出するのに有効であることを明らかにした。この手法を発展させれば、アスペリティ周辺で発生するゆっくり滑りや低周波微動等に伴う微小地殻変動を精度よくモニタリング可能となることを示した。大学はこの地域におけるモニタリングに

必要な海域の地震活動の正確な把握、三次元構造モデルの構築、応力場推定のためのメカニズム解決定を継続して実施した。

気象庁は、東海地域周辺に整備されたひずみ計等の観測データを重ね合わせることで、観測データに含まれるノイズを軽減する手法の開発により、東海地震の前兆滑りの検知能力を向上させた。

え. 今後の展望

前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の研究が行われてきた。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）実時間自動処理システムの開発と整備、さらにプレート境界の固着状態とプレート境界での滑りに関する解析が進められてきた。

○地殻変動の早期把握や津波情報の高度化等のため、現状で一部地域に限られている GPS リアルタイム解析を、全国に広げる努力がなされるべきである。

○複数の観測機関の観測網のデータを交換・共有するとともに、研究機関の連携をさらに進め、モニタリングの検知能力を高めつつ、限られた資源を最大限に活用することが必要である。また、同一地域を対象とした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、さらに研究項目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。一方で、

○海域のように、リアルタイム観測システムがまだ整備されていない領域ではデータ取得が困難であり、予測システムに組み込むためには、さらなる観測網の整備が必要である。

○2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震の発生により、現計画では明確な研究対象になっていなかった M9 クラスの超巨大地震が、太平洋沖の日本海溝沿い以外でも発生しうることを念頭に置いたモニタリングシステムの構築が急務である。そのためには、東北地方太平洋沖地震の実像を明らかにすること、千島海溝沿いや南海トラフ沿いにおける観測を強化してプレート間の固着状況や滑り遅れについて可能な限り情報を収集する必要がある。

○この超巨大地震に先立つ種々の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を実施するとともに、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を行う必要がある。現在でも、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周辺での地震活動の活発化も見られる。次に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。

○一方で、東日本における地震・地殻変動観測点やデータ収集システム等に甚大な被害が発生した。地震時におけるデータ取得の障害により重要なデータを取り逃がすことがないよう、観測点の迅速な復旧や強化、通信・解析システムの冗長化も含めた障害への耐性の向上、緊急観測の実施といった観点からの検討も重要である。

（２）地震・火山現象に関する予測システムの構築

（２－１）地震発生予測システム

あ. 目的

地震発生に至る物理・化学過程の理解に基づいて、プレート境界の応力・ひずみ等の推移を予測するシミュレーションモデルを構築する。常時モニタリングシステムによって得られ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てデータ同化実験を行い、予測を試行する。

同時に、これらのシミュレーションを継続的に高度化していくために、地震発生の物理・化学過程に関する基礎的なシミュレーション研究を推進する。統計モデルや物理モデルに基づいて地震活動を評価し、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に、地震活動予測手法の妥当性を評価・検証する枠組みを構築する。

い. 実施状況

ア. 地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

大学は、準静的な応力蓄積と断層の動的破壊モデルをシステム結合することにより、地殻マンタルの弾性-粘弾性構造、プレート境界の三次元構造、断層摩擦構成則の環境依存性等を考慮した地殻活動シミュレーションモデルのプロトタイプモデル（CAMP モデル）を構築した。さらに、このモデルを用いて、1968 年十勝沖地震の応力蓄積から動的破壊および波動伝播を連成させた解析を実施した。このモデル開発を進めるとともに、準静的な地震発生サイクルシミュレーション計算を高速化するため高速多重極法、階層型行列の適用について検討した。また、不均質粘弾性媒質を扱う目的で有限要素法ソフトウェアの改良を行った。

大学は、測地データインバージョン解析手法を東北日本および西南日本の GPS データに適用し、それぞれ北米プレートと太平洋プレート、ユーラシアプレートとフィリピン海プレートが接するプレート境界の固着・滑り状態を推定した。また、測地データから推定される滑り欠損分布と固着域の分布について定量的な検討を行った。

大学は、アジョイント法およびマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて、地殻変動の時系列データから断層面の摩擦パラメータを推定するデータ同化手法を開発し、余効滑りやスロースリップのデータに適用した。

海洋研究開発機構は、階層的なアスペリティモデルを仮定したシミュレーション研究を実施するとともに、仮想的な東南海地震発生後、南海地震発生に至るまでの海底地殻変動の模擬データを作成し、データ同化の数値実験を実施した。

防災科学技術研究所では、GPS から推定された滑り欠損速度分布を用いた地震の動的破壊伝播のシミュレーション、および、紀伊半島・東海地域を対象としたスロースリップのシミュレーションを実施した。

気象庁は、東海・東南海・南海地震の想定震源域のシミュレーションモデルを開発し、巨大地震と東海および豊後水道で発生する長期的スロースリップの再現を試みた。

大学は、地震学的な観測情報を予測シミュレーションに取り込むため、小繰り返し地震抽出のための手法開発および日本列島域の各地における滑り速度の分布を推定した。また、地震活動カタログを整備するために関東および東海・東南海地域で発生した M3.4 以上の地震およびマグニチュードを均一な手法・観測点分布で再決定した。さらに、地震のメカニズム解から地殻内の流体圧分布を直接推定する地震メカニズムトモグラフィー法を開発し、2009 年イタリア・ラクイラ地震に適用した。

イ. 地殻活動予測シミュレーションの高度化

大学は、地震発生予測シミュレーションの高度化のため、断層面の間隙圧が断層の動的破壊や地震サイクルに及ぼす影響に関する理論的考察および数値シミュレーションを実施した。

大学は、不均質媒質の地震サイクルに対する影響や、陸側プレート内部における断層帯形成過程を理解する目的で、有限要素法のモデル構築やシミュレーション研究を実施した。

大学は、個別要素法によるモデル化を通して岩石の剪断変形時のアコースティックエミッション（AE）の統計性を研究した。

産業技術総合研究所は、日本列島の内陸部に関する物理モデルを構築し、内陸地震発生予測のためのシミュレータを試作した。

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測

1 大学は、地震活動予測アルゴリズムの妥当性を評価・検証する目的で、CSEP (Collaboratory for
2 the Study of Earthquake Predictability) と国際連携を図り、地震発生予測実験を実施した。ま
3 た、地域における地震の発生数を予測するモデル、前震かどうかの確率を与えるモデルを開発した。

4 気象庁および防災科学技術研究所は、地震活動に基づく発生予測モデルを構築・改良し、予測性
5 能の検証を行った。

6 う. 成果

7 ア. 地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

8 従来の地震サイクルシミュレーションモデルは、準静的な応力蓄積から動的破壊までのプロセス
9 までの扱っていたが、破壊後の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い、サ
10 イクルとしての大地震発生過程のモデル化に成功した。2サイクル目では粘性緩和および粘性応力
11 により駆動される余効滑りの影響で1サイクル目よりも急速に応力が蓄積し、地震発生間隔が短縮
12 される。さらに、南海トラフで推定された滑り欠損速度分布に基づいて地震の動的破壊伝播シミュ
13 レーションを実施し、東南海地震や南海地震を再現するモデルを構築した。条件設定を少し変える
14 だけで2つの地震が連動し、摩擦パラメータの設定が重要であることが分かった。

15 速度・状態依存摩擦法則を用いた地震サイクルシミュレーションにより、三陸沖のプレート境界
16 地震の繰り返しを再現するモデルを構築し、摩擦特性の不均一性に関する知見を得た。南海トラフ
17 では、地震サイクルシミュレーションにプレートの三次元形状を導入し、摩擦特性のうち特徴的滑
18 り量に不均一を与えることで、過去に発生した地震履歴を再現可能であることが分かった。階層的
19 なアスペリティモデルを仮定することにより、釜石沖で観測される、同じ場所で規模の異なる地震
20 が起きる複雑な地震発生サイクルのモデル化に成功した。こうしたシミュレーションコードを高速
21 化するため、無限媒質中の問題に高速多重極法を適用し、計算時間やメモリーを自由度に比例する
22 レベルに効率化できることを示したが、半無限媒質への適用には問題のあることが分かった。一方、
23 階層型行列はこうした問題が無く、自由度 N に対して $O(N)$ ないし $O(N \log N)$ に効率化できることが分
24 かった。

25 また、長期スロースリップ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
26 が構築され、東海・紀伊半島・四国地方で発生するスロースリップの再現に成功した。

27 日本列島の内部変形やアセノスフェアの粘性緩和を考慮した測地データインバージョン解析手法
28 を開発し、東北日本のおよび西南日本のGPSデータに適用した。東北日本では、過去の大地震の震
29 源域に対応する滑り欠損分布が推定され、南海トラフでは東海から紀伊半島、四国にかけて西側ほ
30 ど滑り欠損量の大きくなることが分かり、宝永地震のような連動型の地震の震源域が従来の想定よ
31 り西側へ延びる可能性が示唆された。1946年南海地震前後の地殻変動データ解析からは、地震時滑
32 り、余効滑り、豊後水道のスロースリップが違いに相互的な空間分布を持つことが明らかになった。

33 滑り欠損と固着域の定量的な比較から、測地データから推定した滑り欠損分布から想定される地
34 震モーメントの蓄積速度は過大評価となる可能性があること、また、滑り欠損分布の重心は、実際
35 の固着域の重心と一致しないことが示された。

36 地殻変動の時系列データから、アジョイント法で摩擦パラメータを推定する手法を開発して余効
37 変動データに適用し、摩擦パラメータを正しく推定するには、シミュレーション変数の初期値を同
38 時に推定することが必要なことが分かった。また、2003年十勝沖地震の余効変動データにマルコフ
39 連鎖モンテカルロ法を適用して摩擦パラメータ (L 、 $a\sigma$ 、 $(a-b)\sigma$) を推定したところ、観測デー
40 タと適合する摩擦パラメータの値は、室内実験で得られる値と桁で異なることが分かった。粒子フ
41 ィルターを用いた逐次データ同化手法を東南海・南海の連鎖発生時を想定したデータに適用し、デ
42 ータの増加とともに2つの地震の発生間隔の推定誤差が減少することが示され、データ同化によっ
43 て的確な予測を行える可能性が示された。

44 小繰り返し地震からは、データ解析手法を工夫してより効率的に繰り返し地震のクラスターを抽

出できるようになるとともに、日向灘から八重山諸島沖の沈み込み帯においてプレート境界面の滑り速度が推定され、この地域のプレート間固着の弱いことが推定された。また、関東および東海・東南海地域の震源再検定の結果、2000年から2005年7月にかけて東海スロースリップに同期した静穏化を見出した。地震メカニズムトモグラフィ法を2009年ラクイラ地震のデータに適用して震源域周辺の流体圧分布を推定し、この地震が流体によって誘発された可能性を示した。

イ. 地殻活動予測シミュレーションの高度化

断層滑りの多様な挙動が、3つの無次元パラメータによって表されることが分かった。一方、地震時の摩擦発熱による間隙流体圧上昇を考慮すると、考慮しない場合に比べて地震発生間隔が長くなる影響のあることが分かった。また、圧力溶解で生じる沈殿により間隙体積が減少することで、断層の安定化と見かけ滑り速度の増加が生じることが分かった。このメカニズムは、2011年東北地方太平洋沖地震の大きな地震滑りをもたらしたメカニズムの候補としても注目されている。

3次元的な熱構造の不均質を考慮した有限要素法のシミュレーションにより、奥羽脊梁山脈と変形集中帯の形成を再現することに成功した。

離散要素モデルによるAEのモデル化から、ジャミング転移点と呼ばれる臨界密度においてAEの大きさ・頻度分布がべき則に従うことを見出した。

日本列島規模で3次元粘弾性構造を有限要素モデルで作成し、東西短縮を与えることでひずみ集中帯と調和的な計算結果を得た。

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測

CSEPの地震発生予測実験により、日本全体域を対象とする地震予測モデルの検証を実施した結果、陸域部の3ヶ月予測結果では9つのモデル中3つが有意な予測性能を持つと判断されたが、関東地方を対象とする予測ではすべてのモデルが評価をパスできなかった。1年予測結果では、3つの地域カテゴリー合計で31のモデルが試された。その結果、日本列島全域の陸域浅部や関東地方を対象とするモデルに比べ、海域を含む日本全体に関するモデルでCSEPのテストをパスするものが非常に少ないことが分かった。こうした実験を通して地震活動モデル毎の特徴や特性が明らかになった。今後、各モデルの改良すべき点も明らかになってくるものと思われる。

え. 今後の展望

これまでの研究により、プレート境界で準静的に応力が蓄積した結果、断層が動的破壊を起こし、周囲に地震波動が伝播する一連の過程、さらに動的破壊後に次の地震へ向けて応力蓄積が再開する過程がシミュレーションできるようになり、地震発生サイクルの計算が可能になった。このことは、我々が大地震の発生に関わる本質的な現象を計算機内で再現できるようになったことを意味する。

一方、本研究で目指している地震発生予測は、こうしたシミュレーションとは次元の異なるものである。すなわち、計算機内で再現される地震サイクルは、現実の地震サイクルそのものではなく、たとえそれが過去の地震発生履歴を良く再現するモデルだとしても、実際のプレート境界で起きる大地震に対して何ら予測性能を持ち合わせていない。あるシミュレーションモデルが過去の事象を良く説明するとしても、それは同様な能力を持つ無数のモデルの1つに過ぎない。現時点で可能性を有する無数のモデルは、今後取得される観測データとの整合性チェックを通して淘汰され、その過程を生き残ったモデルが将来予測に供される。このデータ同化解析こそが地震発生予測を行う上での最重要となる要素である。

地震発生予測実現へ向けての課題の一つは、実用的なデータ同化解析手法の開発である。本研究で、アジョイント法、マルコフ連鎖モンテカルロ法、粒子フィルター等の方法により摩擦パラメータの最適化が行われ、一定の成果を収めているが、現実的な非常に自由度の高いモデルと大量の観測データをどのように扱うかという点において、最終的な目標地点はまだ見えていない。もう一つの重大な課題は、現在、地震発生サイクルやリソスフェアの応力状態に関して利用可能なモデルが、非常に単純化されたごく少数のモデルに限定されている点である。そうした限界を持った物理モデ

ルだからこそ、候補となるモデルは常に多数存在し、データ同化によって順次淘汰される状況を作る必要がある。そのように考えると、本項目の達成にはいまだ解決すべき課題が数多く、進展の途上とである。今後、研究コミュニティを拡大し、多くの物理モデルやデータ同化手法が競い合う状況を作っていくことが喫緊の課題である。

物理モデルに基づく予測とは別に、地震の統計的な性質に基づく予測は、現状でも一定の予測性を持っており、そうした各種予測手法の検討も重要な課題である。CSEP による予測実験では、多数のモデルで比較検証が行われており、上記の物理モデルに基づく予測システムと比較するとはるかに健全な状態で研究が進んでいる。今後、予測実験の項目を拡充し、国際共同研究で地域毎の比較などを行っていくことにより、一層の研究の進展が見込まれる。

(2-2) 火山噴火予測システム

あ. 目的

わが国の主要な活火山について、噴火シナリオ（予想される火山活動の推移を網羅した噴火事象系統樹）を作成する。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する。また、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。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。

い. 実施状況

ア. 噴火シナリオの作成

大学は、三宅島（東京都）の過去の噴火の履歴と観測データから、明らかになった噴火事象を抽出し、発生確率を付した噴火事象系統樹を作成した。また、桜島の噴火シナリオを検討した。桜島は、日常的に小規模噴火が発生する中で、低頻度の大規模噴火も発生する可能性があり、過去の事例の少ない大規模噴火に至るシナリオをどう組み立てるかが問題である。この問題を整理し、噴火シナリオの枠組みを設定した。また、2011 年 1 月 26 日から本格的な噴火を開始した霧島山新燃岳について、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や、国内外の類似火山の噴火様式を参考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。

気象庁は、秋田駒ヶ岳（秋田県）、新潟焼山、焼岳および伊豆東部火山群の噴火シナリオを作成した。また、青ヶ島（東京都）、秋田焼山（秋田県）、白山（岐阜県）の 3 火山についても、噴火シナリオの作成に取り掛かった。

イ. 噴火シナリオに基づく噴火予測

大学は、(1). (2) (2-2) ア. で作成した三宅島噴火シナリオについて、過去や現在の観測データから、現象分岐の数値的根拠や、低頻度現象の過去の事例を予測に適用することの妥当性を検討した。

防災科学技術研究所は、異常変動を自動で検出し、変動源モデルを自動推定する手法を富士山、伊豆大島、三宅島の火山活動観測網と伊豆半島東部の高感度地震観測網のリアルタイムデータに適用しモニタリングを行い、さらに過去の観測データに適用して信頼性の検証実験を行った。また、平成 21 年度に火山観測施設が整備された有珠山、岩手山、浅間山、阿蘇山、霧島山について、他機関のデータも併せて、同手法によるモニタリングを試験的に開始した。

気象庁は、火山噴火予知連絡会（定例会）を開催し、全国の火山活動の状況についての検討を行った。検討結果は、「全国の火山活動の評価」として取りまとめ、報道機関や気象庁ホームページを通じて公表した。

う. 成果

ア. 噴火シナリオの作成

三宅島（東京都）の噴火シナリオを作成した。これと、過去の噴火事例との対比により、ひとつの噴火事象から次の事象が発生するまでの時間や各現象の継続時間の範囲を知ることができる。また、桜島の低頻度大規模噴火に至るシナリオについて、過去 100 年間におよび観測研究から得られる知見をもとに、検出しうる先行現象の整理や、極大規模噴火と大規模噴火を切り分ける経験式的提案を行った。その結果、桜島についても噴火シナリオの基本的枠組みが作成された。また、気象庁は、関係自治体、および、防災機関と協力、協議することにより、各火山について、噴火シナリオを噴火警戒レベルの導入に役立てた。

イ. 噴火シナリオに基づく噴火予測

霧島山新燃岳 2011 年噴火において、進行中の噴火に対して噴火シナリオを急遽作成し、監視・観測データに基づき、噴火の推移の仕方や考え方に改訂を加えることができたのは本研究課題の大きな成果であると考えられる。まず、新燃岳の過去の噴火の地質学的研究に基づいて第 1 版を作成し、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。次に、今回の新燃岳噴火と同じように、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類似火山の噴火（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第 2 版作成した。これらの作業により、噴火の推移予測のために必要とされる噴火シナリオの高度化の方向性が明らかになった。

防災科学研究所は、異常変動を自動で検出し変動源モデルを自動推定する手法により、2010 年 6 月頃および 12 月頃に始まった伊豆大島のマグマ溜りの膨張・収縮によるものと推定される異常変動を検出し、自動モデル化に成功した。また、霧島山新燃岳噴火活動に関する観測データの蓄積により明らかになったマグマシステムおよび特性を考慮して、同手法を高度化した。傾斜計の地震動によるステップ変動やノイズ除去のためのデータ処理法を改善した。

え. 今後の展望

本研究で作成するシナリオは、噴火準備過程（2.（2）（2-2））や噴火過程（2.（2）（3-3））の観測とそれに基づく物理モデルからの考察や、この噴火シナリオの成果を逆に両課題の研究にフィードバックすることが重要である。さらに噴火の素過程（2.（4））の考え方に基づいて分岐の仕方を整理することが可能であろう。また、噴火シナリオの分岐の判断を観測結果に基づいて、リアルタイムで行うために、観測体制を考慮すること（1. 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。

この予知計画の間に、噴火シナリオが作成可能な火山は複数個である。そのため、要求される噴火シナリオを作成するための指針をこの 5 年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、今回担当した研究者以外のものでも、他の火山について、噴火シナリオを作成できることが好ましい。

（3）地震・火山現象に関するデータベースの構築

あ. 目的

関係機関が長期にわたり蓄積してきたデータや観測研究で新たに得られたデータを集積することにより、地震現象・火山現象の予測に必要な基礎データベースを構築し、データの流通により研究の進展を図る。さらに、基礎データと研究成果を統合して、体系的な地震・火山現象に関する統合データベースを構築する。

い. 実施状況

ア. 地震・火山現象の基礎データベース

防災科学技術研究所は、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地震波形

データを統合し、日本周辺で発生した地震についての統合地震波形データベース構築を行っている。気象庁は、全国の地震カタログを作成するとともに過去の地震のデータベース改良を進めている。国土地理院は、GPS 観測データや潮位観測データの整備・更新を行っている。大学は、古い地震記録を電子化し、データベースの構築を進めている。大学等は、ひずみ計や傾斜計などで得られた地殻変動連続観測のデータベース構築・データ流通を進めている。気象庁は、全国の活火山の過去の活動について資料の再調査を行い、活火山データベースを構築している。国土地理院は、火山基本図や火山土地条件図の整備を行っている。気象庁は、地磁気永年変化データベースを構築している。

イ. 地震・火山現象に関する情報の統合化

大学は、日本列島各地域の地殻構造に関する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のプロトタイプ構築を進めている。大学は、地殻構造や地殻活動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。防災科学技術研究所は、地震波速度構造、減衰構造、地殻熱流量、地質構造等の統合データベース構築を進めている。産業技術総合研究所は、地殻応力場、活断層、地下水、活火山、火山衛星画像等のデータベースを統合し、地震や火山活動に関する地質情報データベースの構築を進めている。国土地理院は、水準測量、GPS、潮位等の地殻変動データによる地殻活動総合解析システムを運用している。

う. 成果

ア. 地震・火山現象の基礎データベース

地震・火山現象を理解し予測するためには、過去から現在にいたるこれらのデータベース化は不可欠である。地震、地殻変動、火山、地磁気等に関して基礎データベースの整備が進んだ。地震サイクル全体のモデル化や低頻度の大規模火山噴火の予測のためには、近年のデータだけではなく、過去のデータの活用は重要である。過去の地震・火山活動に関する基礎データベースの構築が進められていることは重要である。長期間系統的に整備されてこなかった大学等のひずみ計や傾斜計観測のデータベース化、データ流通が開始されたことは有意義である。また、一元化処理による全国地震カタログや高感度地震観測網、広帯域地震観測網、強震地震観測網による観測データは前計画から引き続き広く利用され、地震・火山研究の進展に貢献するだけでなく、地殻活動の監視にも役立っている。

イ. 地震・火山現象に関する情報の統合化

地殻活動シミュレーションや強震動シミュレーションを行うためには、日本列島の地殻構造データは不可欠であり、これに関するデータベース構築が進められていることは重要である。地震・火山活動や地殻変動、および、これらに関連する構造、地質等の情報を含んだ統合データベースが開発されている。複数のデータを総合的に評価することにより、地震・火山活動に関する理解が進むことが期待される。また、地震・火山噴火予知研究計画データベースとして、本研究計画で構築されたデータベースのポータルサイトが開設された。現状は個別のデータベースを羅列したものであるが、各種データベースの閲覧が容易に行えるようになっている。今後の本格的な統合データベース構築に向けた第一歩として重要な試みである。

え. 今後の展望

地震発生予測システム・火山噴火予測システムを構築するためには、その基礎となるデータは必須である。これらに関する基礎データの蓄積およびデータベース化は着実に推進されてきた。とくに、モニタリングシステムで得られている地震や地殻変動のデータは、過去に得られているデータとあわせてデータベース化され、多くの研究に利用されている。しかし、相互のデータベースを有機的に統合し、地震・火山の予測システムの構築に資するデータベースの統合という目標を考えると達成度は十分とはいえない。これは、各機関で統合データベース構築が進められたが、地震発生・火山噴火予測システム構築に資するという考え方が十分に浸透していなかったことが原因であると考えられる。また、統合データベースは、地震発生や火山噴火の現象解明ための研究の高度化への

波及効果も大いに期待されるが、そのような視点で統合データベースの構築が構想されてこなかった。

本計画で構築されるデータベースは、予測システムの構築や、地震火山現象の解明に必要であり、本計画推進のために極めて重要な位置を占めるので、今後も研究を推進する必要がある。その際、データベース構築の研究担当者は、データベースのユーザーである予測システム研究者だけでなく、データベースの素材提供者である現象解明研究者とも連携を取りながらデータベースを構築する必要がある。この時、データベースの研究者だけに責任を負わせるのではなく、予測システム研究者からは予測システムに必要なデータベースは何かというニーズを、地震・火山現象解明を行う研究者からは、それぞれの研究成果を積極的にデータベース構築研究者に伝達し、本計画にかかわる研究者が皆で、統合データベースの構築に貢献する体制を整えることが望ましい。

計画全体で統合データベースをどのように構築するかを再度検討するとともに、現象解明研究を含め本計画の各課題で得られたデータ、研究成果等を容易に閲覧、利用できるようなデータベースの構築も検討すべきであろう。また、本計画におけるデータベースの重要性を考えると、各研究機関が協力して推進するとともに、大学においては共同利用・共同研究拠点の機能を活用する方策も念頭に入れて検討する必要がある。

2. 地震・火山現象解明のための観測研究計画の推進

(1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

あ. 目的

長期的あるいは広域の地震・火山現象を解明するために、日本列島及びその周辺域で、長期的なプレート運動とそれに伴う応力場を明らかにし、上部マントルにおける水の供給・輸送過程とマグマの生成・上昇機構を明らかにする研究と、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。また、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ともに、長期的な内陸の地殻ひずみの時空間分布を解明する。

い. 実施状況

ア. 列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場

日本列島およびその周辺域のプレート運動を理解するために、大学は、モンゴルやロシアで GPS 観測を実施し、また国土地理院は VLBI（超長基線電波干渉計）国際・国内観測及びアジア・太平洋地域での GPS 連続観測を、海上保安庁海洋情報部は SLR（衛星レーザー測距）国際共同観測を実施した。

大学はプレート内部の広域応力場を推定するために、地震のメカニズム解の詳細な解析を実施した。

イ. 上部マントルとマグマの発生場

大学はスラブから地表に至る流体の移動経路の解明とマグマ生成・上昇モデルの高度化を行うために、地震波速度構造や減衰構造、異方性構造の推定を行った。さらに大学は沈み込み帯の温度構造、流動・変形、物質循環に関する統合モデルを構築するために、地殻変動とテクトニクスとの関連の推定、火成岩と熱水の調査、高温高压実験等を行った。

海洋研究開発機構は島弧地殻の進化と大陸地殻の形成過程に関する知見を得るために、成熟度の異なる沈み込み帯において、地殻物質・マグマの岩石学的・地球化学的特性の解釈と地震探査データに基づく島弧-背弧システム全体の 3 次元地下構造の推定を行った。

ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布

大学は、日本列島下の地殻について、地震波形を用いた解析により、モホ面などの地震波速度不

連続面の形状や上部・下部地殻の三次元地震波速度構造に加え、短波長不均質構造の詳細な空間分布を高精度で推定した。さらに大学は地殻流体の分布に敏感と考えられる比抵抗の分布の推定を北海道、秋田県、蔵王山周辺、長町利府断層近傍、跡津川断層域、和歌山地域、鳥取県中西部～島根県東部、九州等の様々な地域で行った。

防災科学技術研究所は構造的特徴と地震の起き方の関係の理解とそれに基づいた地殻変形モデリングを行うために、地震波速度・減衰の詳細な構造と温度構造の推定を行った。

エ. 地震活動と火山活動の相互作用

大学は、マグマ移動に伴う火山性地震や群発地震の活動度の高いフィリピン海プレート北縁の伊豆大島、伊豆東部、富士山等の地域の構造を、地震・電磁気・重力探査から推定した。さらに大学は、別府-島原、日向灘、南九州における地震と火山の相互作用を解明するために、地震・電磁気探査と地殻変動観測を行った。

また、防災科学技術研究所は、発生が懸念される東海・東南海・南海地震と連動した富士山の噴火可能性の定量的評価を行った。

オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

大学は、千島海溝沈み込み帯で発生するプレート境界巨大地震の発生過程を調べ、また津波による砂の浸食・運搬・堆積をモデルに取り込んだ津波数値計算手法の開発を行った。また、産業技術総合研究所および大学は、過去の連動型巨大地震についての津波堆積物の調査を行った。

大学は、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うとともに、島弧の長期的な変形過程の検討を行った。さらに大学は、詳細な数値標高モデル等も用いて活断層によると考えられる地形を同定し、さらに詳細な調査に基づく活断層の活動度の推定を行うとともに、将来発生する大地震のモーメントマグニチュードの推定を試みた。

う. 成果

ア. 列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場

VLBI と GPS 観測データを統合処理して東アジアから西太平洋に至る地域の変位速度場を算出した結果でも、またロシア沿海州において GPS 観測を実施して、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結果でも、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た。ただし、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。

一方、応力に関しては、四国地方西部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おり、さらに、別府島原地溝帯東部においては非弾性変形が大きい可能性があることがわかった。

イ. 上部マントルとマグマの発生場

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た。同様の解析と S-P 波の解析から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り、さらに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、電気比抵抗構造からも北海道や九州で明らかになった。

第四紀火山岩の研究については、日本列島全体を覆うスケールでのスラブ由来流体の量、性質の空間変化を追う目的で、岩石学的・地球化学的データに関する調査・データ解析を行った結果、5 つの島弧（千島、東北、中部、伊豆-小笠原、琉球）によってスラブ由来流体の量と組成が異なることが分かった。この原因は、それぞれの弧におけるスラブの沈み込み角度・速度とスラブの年齢といったテクトニックセッティングの違いに起因すると考えられる。

沈み込みの屈曲を示すアウトターライズ（海溝外側の地形的な高まりが生じている領域）に生じる断層は海洋プレート内のモホよりも深部のマントルにまで到達していて、しかもこの領域でモホ面

1 が不明瞭となっていることがわかった。このことは海洋プレートがアウターライズにおいて加水さ
2 れ、かんらん岩が蛇紋岩へと変化していることを示している。マウントルウェッジへの水の供給に
3 堆積物と海洋地殻のみならず海洋マントル内の蛇紋岩も関係していることになり、従来考えられて
4 いたよりも深部まで水が供給されることを意味する。

5 一方、伊豆小笠原マリアナ弧の NW Rota-1 火山では二種類の初生マグマが存在していることが明
6 らかになった。この二種類の初生マグマを生じるためには、大量の水の存在下において沈み込む堆
7 積物を溶かすことが必要となる。このためには沈み込むマントルから水を供給しなければならず、
8 このことも沈み込むマントルによって水が深部まで持ち込まれることを示している。

9 ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布

10 Hi-net で記録された浅い近地地震の S 波を用いて日本全国の散乱減衰と内部減衰の分布を調べ
11 たところ、糸魚川-静岡構造線を境にして東日本と西日本の構造が大きく異なることが明らかになっ
12 た。

13 関東と北海道で温度検層データから推定された地殻熱流量は、関東においてはフィリピン海プレ
14 ートの沈み込みと、北海道においてはスラブ直上に地殻物質が厚く分布している領域とよく対応し
15 ていることがわかった。地震発生層の下限の深さ (D90) を詳細に求めたところ、上記の北海道や関
16 東の低地殻熱流量域でこの下限が深くなっており、これらの特異な構造が温度分布を規定し、この
17 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
18 も行った結果、大局的には火山フロントや背弧側では高温域が分布するのに対して、前弧側には有
19 意に低温の領域が分布することが分かった。

20 一方、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
21 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
22 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。このことは、局所
23 的に流体の存在によって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
24 している。また、2011 年東北地方太平洋沖地震の後、内陸の応力場の主軸方向が回転したことが判
25 明し、このことは内陸の地震発生域の強度がかなり小さいことを意味しており、これも流体の存在
26 が大きく関与していると考えられる。

27 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が、秋田県南部では、測線西部（日本
28 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
29 抗、下部地殻が高比抵抗、最上部マントルが低比抵抗となっていることがわかった。地震活動はこ
30 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。
31 同様の特徴は和歌山地域や鳥取県や島根県東部でも見られた。

32 長野県西部地域において、応力場と地震波速度の空間的な不均質性を高分解能でマッピングして
33 詳細に比較検討した結果、地震波低速度異常域の中央部で水が豊富に存在していると考え、応
34 力場の不均質性をうまく説明できることがわかった。一方、和歌山地域においては、非火山性群発
35 地震の直下に、貫入岩を示唆する顕著な高速度体が存在しており、貫入岩が引き起こす熱水循環に
36 よる流体圧の変化で、非火山性群発地震が誘発されるというモデルが考えられる。推定された比抵
37 抗からも、このような流体の存在が示唆されている。

38 さらに、東海地域で実施した稠密地震アレイ観測のデータ解析の結果、フィリピン海プレートの
39 沈み込みに伴う長期的スロースリップイベント (SSE) によるモーメント解放量の最も大きな領域で
40 は、海洋性地殻内における流体の存在を示唆する顕著な低速度・高ポアソン比の異常域となっ
41 ていることがわかった。この異常域の弾性波速度は、通常の海洋性地殻の速度に比べて有意に低く、
42 流体の存在が示唆される。長期的 SSE と低周波地震・微動によるゆっくり滑り域は、どちらもプレ
43 ート境界面上に位置するものの、上盤物質は前者は地殻、後者は蛇紋岩化したマントルウェッジと
44 なっていて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の形状を

レシーバ関数解析から再検討した結果、紀伊水道付近ではスラブ断裂あるいはスラブ傾斜の急変等、周辺域と大きく異なる構造となっていると考えられる。

エ. 地震活動と火山活動の相互作用

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。この様な地震・火山噴火予知研究で得た成果に基づき、地震調査研究推進本部で「伊豆東部の地震活動の予測手法」が取りまとめられた。

地震活動とマグマ貫入現象を深く理解するために 2009 年に伊豆大島及び周辺海域で実施された構造探査実験により、地震波速度構造が得られた。この速度構造と地震活動とを対比させて詳細に検討した結果、マグマ貫入とそれに伴う地震活動が地下構造によって規定されている可能性が高いことが明らかになった。特に下部地殻と考えられる層が、火山体である伊豆大島直下で浅く盛り上がっていることが明らかになったことは、火山の根が下部地殻まで達していることを構造探査から実証したことになり、極めて重大な意義がある。

南海トラフ巨大地震による富士山噴火連動の可能性を評価するために、地震波などによってマグマ溜りが増圧されて噴火に至るまでの過程について解析を行い、噴火の推移予測に直結する火道内のマグマ発泡度分布の変化を支配するメカニズムを詳細に明らかにした。さらに、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、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。

九州地域で稠密アレイ観測を実施し、3 次元速度構造を推定した結果、深発地震面が折れ曲がる深さ 90km 以深では、海洋モホ面が見られなくなることがわかった。このことは、海洋地殻がもはや低速度でないことを意味し、海洋地殻に含まれていた「水」はこの深さまでにほぼ脱水してしまうことを示唆する。この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。

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、また、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、桜島を含む南九州地域の ALOS/PALSAR 画像から 2007 年～2010 年の期間における SAR 干渉解析を行ったところ、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ており、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

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結果、当該地域には中新世の日本海拡大時に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。

「糸魚川ー静岡構造線断層帯における重点的な調査観測」において、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。得られたデータから、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地震規模を試算した結果、モーメントマグニチュード (M_w) で 7.5～7.6、気象庁マグニチュードに換算すると 8.2～8.3 という値が得られた。

2008 年岩手・宮城内陸地震は事前に活断層の存在が指摘されていない場所で発生したが、地震前

後の多時期に撮影された航空写真やLiDARデータを利用して、震源域周辺の活断層と推定活断層および地すべり地形の詳細な分布図を作成して検討した結果、餅転から荒砥沢ダムに至る北北東-南南西走向の15 km程度の範囲に推定活断層が認定されること等が明らかになった。

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。

1958年択捉沖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推定するために、津波波形解析をおこなった結果、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り、この地震の規模はMw 8.1と推定された。

1963年ウルップ島沖巨大地震(Mw 8.5)の最大余震(Mw 7.2)の津波波形インバージョンを行った結果、海溝よりのプレート境界を300 kmにも渡った長い領域を破壊したことが示され、規模はMw 8.0と推定された。これは地震波から求められたMwよりはるかに大きく、また海溝に沿った破壊であることから、この最大余震はやはり津波地震であったと考えられる。

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、津波遡上高のみならず、その津波による砂移動までもモデル化し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。

千島海溝沿いにおいて、十勝、根室、色丹島の臨海低地において野外調査をおこない、津波堆積物層序を検討した。高精度粒度組成や、構成物を記載することにより、津波堆積物の地点ごとの対比をより確実におこなった結果、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。

日本海溝沿いにおいて、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かっている津波堆積物の年代に近い。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。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。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の断層が滑ったMw8.4以上の地震であると推定した。

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって運ばれた堆積物について、仙台平野や石巻平野において観察した結果、海岸線からおよそ3~4 kmまで達していたことが明らかになった。さらに津波の水自体はそこから1~2 km内陸まで達していた。海岸線の移動も考慮しながら貞観地震における津波堆積物の分布と比べると、海岸線からの到達距離でみれば、両者はほぼ同程度の規模であったことが明らかになった。

駿河湾から四国にかけての南海トラフ沿いで、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。三重県志摩市で得られたコア試料について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。

え. 今後の展望

地球物理学の近代の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。この5

1 年間で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は大きな成果であった。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。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。

2 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ため、M9
3 の地震である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説明することは困難
4 であり、通常のサイクルで発生する地震よりも極めて規模の大きな地震を発生しうるモデルの研究
5 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、内陸の長期のひずみ場も説明できるようなモデルを構築することが重要である。

6 なお、今回の東北地方太平洋沖地震の津波堆積物の観察から明らかになった、堆積物の到達距離
7 に対して水がさらに1~2 km 先まで浸水するという事実は、貞観地震をはじめとする、堆積物から
8 推定された過去の津波の浸水域も、実際にはもっと内陸まで浸水していた可能性が高いことを示唆
9 する。今後、今回の津波浸水データに基づいて、貞観地震等の過去の津波浸水域および震源断層モ
10 デルの再評価を行う必要がある。

11 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
12 トに対する相対運動速度がそれほど大きくないことが示されており、ユーラシアプレートからあ
13 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
14 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
15 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
16 デルについて、近い将来には決着をつける必要がある。

17 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
18 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
19 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
20 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。また、マグマの発生起源が日本海の
21 深部にまで及んでいる可能性があり、大陸内の火山も沈み込むプレートにその原因があるとする説
22 が有力になりつつある。今後、観測から地震波の速度・異方性・減衰構造を明らかにするとともに、
23 実験から得られる岩石の脱水が生じる温度・圧力条件、地表で見られる岩石の組成、および数値シ
24 ミュレーションから得られる温度分布とマントルウェッジ内の流れの分布を、相互に比較検討する
25 ことにより、全体像を明らかにしていく必要がある。

26 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、
27 その近傍の高速・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
28 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
29 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
30 ることがより明瞭となった。これらを併せて考えれば、水や高温の影響で塑性変形している場所の
31 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。今後は、
32 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。

33 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
34 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、
35 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いて地震を起こ
36 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。
37 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
38 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
39 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つ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。

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

あ. 目的

地震発生の準備過程を解明するために、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、アスペリティ分布や、アスペリティ域に固有な構造的特徴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、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、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目指す。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、スラブ内流体の分布と挙動の解明を図る。

い. 実施状況

ア. アスペリティの実体

大学は、海域での構造探査からアスペリティと、プレート形状、プレート境界の反射係数、速度構造等との関連について調査を行った。また、プレート境界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。沈み込んだ海山とアスペリティとの位置関係について詳細に検討した。小繰り返し地震を用いた研究としては、プレート間における準静的滑りの時空間変化を調査した。また、太平洋プレートと、北米及びフィリピン海両プレートが接する各プレート境界面におけるカップリング係数の違いについて調査を実施した。宮城沖の海溝陸側斜面では、海底地震計および圧力計を用いた広帯域地殻変動観測を実施した GPS データを用いた研究では、中部日本についてブロック断層モデルを用いた運動学的な解析を行い、ブロックの剛体運動、ブロック内で一様なひずみ、断層における滑り遅れの3成分に分解したうえで、東海・東南海地域のプレート境界における滑り遅れ分布を推定した。

防災科学技術研究所は、深部低周波微動の検出・微動源決定手法の改良を行った。また、短期的ゆっくり滑りの時間発展解析を実施し、滑り域と微動源の移動について調査した。

海洋研究開発機構は、熊野灘沖南海トラフにおいて、地球深部探査船「ちきゅう」による掘削を実施し、各種の精力的な調査観測を実施した。構造探査データの解析を進め、海洋地殻の微細構造と1944年東南海地震の地震時滑りが大きい領域との位置関係を調べた。

海上保安庁は、海底地殻変動観測により宮城沖から四国沖に至る海域に設置された海底基準点のユーラシアプレート安定域に対する速度ベクトルを求めた。

大学、海洋開発研究機構、気象庁は、東北地方太平洋沖地震発生後4日目から、海底地震計の設置を開始し、本震発生以前から設置されていた海底地震計と併せて、総計121点での観測を実施し、余震分布を正確に求めた。

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

防災科学技術研究所は、ゆっくり滑りの時空間発展逆解析手法および振幅情報を加えたエンベロ

ープインバージョン手法を開発し、深部低周波微動や短期的ゆっくり滑りに同期して発生する深部超低周波地震の震源過程解析を行った。長期的ゆっくり滑りの発生期間内の、深部低周波微動と浅部超低周波地震の活動について調査した。また、傾斜計データにより、短期的ゆっくり滑りを自動検出する手法を新たに開発した。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) 解の推定を行った。

大学は、ボアホールひずみ計により、深部低周波微動に伴う歪変化を検出した。また、宮城県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を実施した。

産業技術総合研究所は、S波の振動方向による発震機構解の解析手法を、深部低周波微動に適用した。

国土地理院は、GEONETによるプレート境界上の滑りの検知能力の検討を行うとともに、日本列島周辺のプレート境界面上の滑り欠損分布を定常的に推定するシステムを構築した。また、2003年十勝沖地震後の余効滑り分布や、2010年の豊後水道ゆっくり滑りの時空間発展を推定した。

気象庁は、火山地域や活断層の下で発生する深部低周波地震周辺の速度構造の特徴について調査した。

ウ. ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

大学は、弟子屈・屈斜路カルデラ地域において高密度・高精度な震源分布・地殻構造・地殻変動・重力構造・地質地形・熱構造の解析を行った。また、2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)後の長期的余効変動から、上部地殻の厚さと下部地殻以深の粘弾性構造を推定した。さらに、多数の余震の卓越周波数を求めて高周波地震と低周波地震の空間分布の違いを調査し、メカニズム解の空間分布と揺らぎを用いて、起震応力場と地殻強度から地下の流体の間隙圧の分布も推定した。長町利府断層(宮城県)地域や1938年釧路地方北部の地震(M6.1)の震源域などで3次元比抵抗構造解析を進めた。東北日本弧において、熱構造や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検討した。濃尾地震震源域や跡津川断層周辺域で総合集中観測を行い、地震活動や発震機構解に関する調査、制御震源構造探査、応力逆解析、地震波トモグラフィー解析、比抵抗構造探査、GPS観測などが実施された。観測で得られた事実をもとに断層の下部延長や両端の不均質構造を考慮した有限要素モデルを作成し、検討が行われた。野島断層周辺では、注水実験に基づき、岩盤の透水係数とその経年変化、自然電位変動を調べた。また、同断層近傍に設置されたアクロス震源の長期連続運転が行われ、P波、S波の走時や振幅の時間変化を調査した。中国地方において、下部地殻の不均質構造を推定するための稠密微小地震観測を実施した。

産業技術総合研究所は、中越地域を対象として三次元地質・物性値構造モデルを構築した。また、海底調査により、中越沖地震の震源断層に関連する活背斜構造を発見した。

国土地理院は、GEONETデータによる新潟県から福島県に至る測線上のひずみ速度の時間変化を調査した。また、新潟県柏崎-長岡間の水準路線において、水準測量を実施した。SAR干渉解析を行い、西山丘陵西側斜面における活褶曲の成長を示す地殻変動を見出した。

エ. スラブ内地震の発生機構

大学は、北海道を含めた東日本において、スラブ内地震の発震機構解データにより、スラブ内における応力の中立面の位置の推定を行った。また、スラブ内の上面・下面間で発生する地震の活動の空間分布等について精査を行った。東北日本前弧域においては、海陸統合データにより、海溝下の地震の震源決定および発震機構解の推定を行った。紀伊半島沖の東南海・南海地震震源域境界周辺においてトモグラフィー解析を行い、広域で精度の高い震源を求めた。また、変換波のデータをもとに、関東地方のフィリピン海プレートの形状の推定を行った。

う. 成果

ア. アスペリティの実体

非アスペリティ域の直上のマントルウェッジでは相対的に低速度で V_p/V_s が大きく、反射波が観

測される場合もあるのに対して、アスペリティ域では V_p/V_s が小さく高速度になっている傾向が見られた。これらのことから、非アスペリティ領域においては、マントルウェッジが蛇紋岩化しているために地震時滑りに対してはバリアとなっていることが示唆されたが、三陸沖では、そもそもアスペリティの定義自体が問題であり、東北地方太平洋沖地震においては、マントルウェッジの V_p/V_s の大きな領域でも地震滑りが発生した。

また、想定宮城県沖地震のアスペリティは、スラブが折れ曲がる領域を避けて分布しており、同時にその領域は、スラブが陸側の地殻に接する部分とマントルに接する部分の境界付近に位置していること、応力インバージョンにより、想定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° 以下となっていることから、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、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ことが推定された。以上のことから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可能性が指摘された。ただし、東北地方太平洋沖地震では、アスペリティ域と非アスペリティ域の両方の領域が地震滑りを起こしたと考えられ、規模の大きな地震においては、断層の摩擦特性は、M7 クラスと異なった様相を呈する可能性が考えられる。

小繰返し地震に関する研究では、日本海溝・千島海溝沿いの領域で、アスペリティとそれ以外での滑り速度の違いや、M6 クラスの地震発生後の余効滑りによる加速が認められた。また、測地学的推定結果と比較したところ、余効滑りを過小評価している可能性が示された。

海底地殻変動観測から得られた東北地方太平洋沖地震前の宮城県沖における変位速度は、陸上観測から期待される変位速度や福島沖の変位速度に比べて有意に大きく、プレート間の固着が強く、ひずみを蓄積していたことが示唆された。

中部日本の陸域 GPS データに基づいた推定では、熊野灘と比較して東海地域では滑り遅れが半分程度と小さくなること、深部低周波微動はプレート間の固着がほぼ無くなる場所で発生していることが分かった。

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

宮城県沖の海底圧力計により観測されたプレート境界地震に先行する非地震性地殻変動は、陸上の体積歪計でも観測されており、ゆっくり滑りモデルで説明できることがわかった。

西南日本では、プレート境界形状に沿って帯状に浅部側及び深部側に 2 列の深部低周波微動活動集中域が存在し、浅部側では約半年毎に発生する短期的ゆっくり滑りを伴うような大規模な微動エピソードとして活動するのに対して、深部側の活動は定常的である。また、豊後水道では 2003 年長期的ゆっくり滑りが発生しているが、その期間中には浅部側のみで活性化し、深部側では活動に変化はなかった。さらに、浅部側の微動列は、1996-7 年に発生した長期的ゆっくり滑りの滑り域の北縁部に一致する。したがって、微動の 2 列分布は短期的ゆっくり滑りの発生域を規定し、その下端部は安定滑り域との境界、上端部は長期的ゆっくり滑りイベント域との境界に対応するものと考えられる。

短期的ゆっくり滑りの各イベントにおいて深部低周波微動が滑り域周辺で 1-4 日先行して活動を開始すること、微動活動域は時間とともに移動し、ゆっくり滑り域に達すると活発化することが明らかにになった。トモグラフィ解析との比較により、低周波地震発生域近傍では P 波速度が小さく V_p/V_s 値が大きくなる傾向が示されたことから、低周波地震の発生にはフィリピン海プレートから脱水した流体が関与しており、その領域でマントルウェッジが蛇紋岩化している可能性が示唆された。

2003 年、2010 年に豊後水道で発生した長期的ゆっくり滑りでは、ゆっくり滑り領域内での微動と、足摺岬（高知県）沖で発生する浅部超低周波地震とが、同時に活動しており、この領域が 1946 年南海地震の震源域の西隣に位置していることを勘案すると、海溝型巨大地震の破壊過程の評価や準備

過程を検討する上で非常に有用であると考えられる。

房総半島沖の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碎屑物・火山岩層(VCR層)の下面に沿って分布することが判明し、現在活動的なプレート境界がVCR層の下面に概ね一致し、海洋プレートの底付け作用が捉えられたと考えられる。一方、相似地震発生域浅部は平均6年間隔で繰り返し発生している房総ゆっくり滑り発生域に対応していることから、底付け作用の進行が間欠的であることが示唆された。

太平洋-北米プレート間、太平洋-フィリピン海プレート間の境界における小繰り返し地震の解析から、フィリピン海プレートの先端を境にしてカップリング率が顕著に変化することが分かった。これは、プレート境界面の上盤側を占める物質の違いが、プレート間の固着状態に大きな影響を及ぼすことを示す重要な結果である。

ウ. ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生準備過程

2008年岩手・宮城内陸地震後の長期的余効変動の解析から、下部地殻以深の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、余震のメカニズム解に基づいて間隙圧の分布を推定した結果、地殻下部に間隙圧が高い領域があることが示された。この流体が本震を引き起こし、さらに本震滑りや余効滑りに伴って周囲に拡散することにより、複雑な余震活動が生じた可能性がある。

新潟県から福島県に至る測線上でのひずみ速度を調べたところ、太平洋側では海溝型地震の発生と余効滑りにより顕著に変化したが、ひずみ集中帯ではほとんど変わっていないことが示された。すなわち、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。

濃尾地震震源域における断層近傍の地震波精密トモグラフィー解析によると、破壊開始点(震源域北西部)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。その直上には顕著な高速度体が存在し、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示唆された。

跡津川断層帯直下の下部地殻は周囲に比べ低速度になっており、流体の存在によってこの速度低下が説明可能である。制御震源構造探索からは、顕著なReflective Zoneが見出され、その位置はトモグラフィー解析と調和的であった。比抵抗構造探索からは、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おり、Reflective Zoneや低速度構造と対応していることから、下部地殻における流体の存在と強く関係していることが明らかになった。GPS解析からは、跡津川断層両端に剪断ひずみの集中が見られること、同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。また、周辺の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機構を持っていると考えられるが、これは、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り、応力逆解析により推定された断層周辺の応力場を再現する簡単な有限要素モデルも構築された。

エ. スラブ内地震の発生機構

北海道を含む東日本陸域下では、スラブ内の上面・下面間の地震活動が明瞭に示され、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可能性が示唆された。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深さが、異なっていることが明らかとなり、スラブ内大地震の余震域は中立面を越えておらず、その破壊域の広がり、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。

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、プレート上面から約15kmを境に浅部側に正断層型、深部側に逆断層型が分布していることから、海溝近傍プレート内の二重浅発地震面が、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。

2011年4月7日のM7.1の宮城県沖スラブ内地震は、東北地方太平洋沖地震時の大滑り領域の直下に位置しており、トモグラフィーの結果からは、破壊の開始点や余震の並びに沿う領域は低速度域である。この地震は二重深発地震面の上面に属するが、破壊は海洋性地殻ではなく、スラブマントル内で生じており、海溝海側の正断層運動によって含水化した断層が再活動したことを示唆している。

え. 今後の展望

本研究計画では、プレート境界地震に関しては、「アスペリティモデル」に基づいて中・長期的な地震発生予測が可能になるとの見通しのもとに研究が進められてきた。「アスペリティモデル」においては、三陸沖では、プレート境界は非地震的に滑る領域と地震時にのみ滑る領域の両極端に分かれており、アスペリティとそれ以外の領域での強度のコントラストが極めて大きいと考えられていた。つまり、アスペリティと非地震性滑りの領域は基本的に別物であり、アスペリティの空間分布を構造探査等で明らかにするとともに、非地震性滑りの時空間変化を小繰り返し地震等の解析で高精度に把握することにより、「アスペリティモデル」の高度化を図ろうとした。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震においては、M7クラスの地震の余効滑り域でも地震滑りが起き、従来固着が弱く安定滑り域となっていて滑り遅れの蓄積は小さいと考えられてきたプレート境界浅部域において、50 mにもおよぶ地震滑りが発生した。以上のことから、少なくとも東北地方太平洋沖ではアスペリティとそれ以外という2元論では片づけられないことが明らかになった。断層の摩擦特性は時間変化する可能性があること、および、アスペリティの強度は必ずしも大きくないことなどの可能性を念頭において、従来の「アスペリティモデル」を根本的に見直すことが重要である。そのためには、まず、この地震の実像を明らかにする研究が必要不可欠である。今後は、より正確な地震時滑りの時空間分布やプレート境界浅部の固着状況、プレート境界浅部の構造的な特徴等を明らかにして、50mもの滑りを起こした原因を解明し、摩擦特性に関わる情報を得ることが決定的に重要である。また、本震の2日前にM7.3の前震が発生し、その地震後に余効滑り現象や余震の伝播現象が報告されている。また、約3年前に大滑り域内でゆっくり地震が起こっていた可能性や、本震の数年前からM7クラスの地震の余効滑りが大規模化した可能性も指摘されている。これらはいずれも本震発生前の非地震性滑りの時空間変化を示唆しており、本震発生との関連について究明することも重要である。その際、海底地殻変動観測とともに、海域のプレート境界における滑り現象のモニタリングに欠かせない小繰り返し地震については、周辺の滑り量の推定精度の向上を図ることが重要である。そして、応力集中が発生していると考えられる東北地方太平洋沖地震の周辺地域に加えて、同様の超巨大地震発生の可能性がある千島海溝沿いや、南海トラフ～琉球海溝沿いの地震準備過程について理解を深めることが急務である。

西南日本では、深部低周波微動や短期的・長期的ゆっくり滑り、浅部超低周波地震などの多様なプレート境界滑り現象が捉えられており、これらの相互作用についても次第に明らかになりつつある。さらに詳細な解析を進めて、巨大地震発生との関連について検討をすすめる必要がある。

跡津川断層や濃尾地震断層周辺といったひずみ集中帯において実施された総合観測や、近年発生した内陸地震の震源域周辺等における観測により、内陸地震のアスペリティに対応する高速度域や、断層深部延長の下部地殻に局在する低速度域などの不均質構造が系統的に捉えられた。内陸地震の断層への応力集中とその発生はこれらの不均質構造によって規定されていると考えられ、単純な物理モデルも構築された。今後は、不均質構造の広がりや形状等をさらに精度良く把握し、ひずみ場や応力場を再現できるより詳細な物理モデルの構築が必要である。

東北地方太平洋沖地震発生やその後の大規模余効変動によって、列島規模の応力状態の変化が進行しており全国各地で誘発地震現象が多発している。内陸における総合観測を強化し、本研究計画で実施されてきた内陸地震に関する研究で得られた知見等を総動員して、これら誘発地震の発生機構を解明し、今後の地震活動の予測に結びつけることは新たな課題であると考えられる。

スラブ内地震の発生機構については、高精度震源決定や発震機構解、高分解能トモグラフィーな

どによって大幅に理解が進んだ。今後も新たな解析手法を取り込みながら、スラブ内地震の発生機構の解明に努め、最大規模の予測やプレート境界地震との相互作用の解明といった視点から研究を継続する必要がある。

(2-2) 火山噴火準備過程

あ. 目的

観測に基づき火山活動の現状を評価し、噴火の時期と規模の予測を目指して、マグマの上昇過程や蓄積過程の多様性の理解とモデル化に関する研究を推進する。また、マグマの上昇過程や蓄積過程を支配する火山体直下の構造や、水蒸気爆発の準備過程の理解に不可欠な浅部の地下水構造を解明する。噴火間隔、規模、様式の規則性や時間変化を理解するため、地質調査・岩石学的研究からマグマ溜まりの発達過程の解明を目指す。噴火間隔、規模、様式の規則性や時間的変化を理解するため、全国の活火山で地質調査・岩石学的研究を実施し、噴火履歴の解明に努めとともに、マグマの分化や混合などのマグマの発達過程の解明を目指す。

い. 実施状況

ア. マグマ上昇・蓄積過程

大学では、桜島、阿蘇山（熊本県）、伊豆大島（東京都）、雲仙岳（長崎県）、浅間山（群馬県・長野県）、草津白根山（群馬県）を対象に多項目観測によるマグマ蓄積過程の解明と人工地震や電磁気学的手法を用いた火山構造の解明を行った。噴火活動を継続しながらも今後想定される大規模噴火に向けてマグマ蓄積期にある桜島において、地震、GPS 及び水準測量の地殻変動、重力、火山ガス等の多項目観測と人工地震及び地球電磁気構造の探査を実施し、これらの観測からマグマ蓄積過程と噴火活動の関係を調査した。また、地熱活動が継続している阿蘇山において、水準測量、GPS、重力、広帯域MT 観測、熱活動調査を行い、現在の火山活動評価を行った。更に、レシーバ関数による火山深部の構造を推定した。伊豆大島においては、地震、地殻変動、比抵抗の時間変化を捉えて現在の活動状況を把握するとともに、人工地震による構造探査を行い、マグマ蓄積深度、地震活動域と火山の構造の関係を明らかにした。1990～1995 年に活動した雲仙岳の地殻変動、地震観測データを再解析し、マグマ移動の把握を試みるとともに、マグマ蓄積による応力変化の検出を試みた。岩手山では、噴火と噴火未遂を分ける要因を解明するために、1998 年活動初期のひずみ記録を再解析した。草津白根山の噴気活動と火山性微動の活動、地殻変動の関連を調査した。また、比抵抗構造を高精度で決定し、震源分布との関連を調査した。浅間山では、地震波干渉法による速度構造の推定が行われ、深部マグマ溜まりに相当すると考えられる低速度域がつけられた。地震波トモグラフィ手法を用いた世界のホットスポット火山の深部構造や、マグマ生成域であるプレート沈み込み帯のマントルウェッジの速度構造を明らかにした。

気象庁では、マグマ蓄積過程を明らかにするため、伊豆大島、霧島山新燃岳、浅間山（長野県、群馬県）で GPS、傾斜計、光波測量、重力による地殻変動観測を行い、マグマ蓄積による圧力源の位置を明らかにした。また、全国 92 火山について SAR 干渉解析を行い、火山性地殻変動の検出に努めた。

防災科学技術研究所では、エクアドル、フィリピン、インドネシアの研究機関と協力し、これらの国の火山観測データの解析を行った。

国土地理院では、全国の火山の地殻変動を GPS データから解析し、マグマ蓄積量を推定した。

イ. 噴火履歴とマグマの発達過程

大学は、活動的な火山の噴火履歴を解明するため、桜島でボーリング調査、トレンチ調査を行い、主要なテフラ層の層序を推定するとともに、火山噴出物の全岩化学組成、鉱物化学組成の測定を行い、その組成の変遷を調査し、マグマ溜まりの発達過程を推定した。伊豆大島の20 世紀の噴出物の詳細な試料採取を行い、全岩化学組成の測定・鉱物化学組成の測定を行った。有珠山（北海道）、

羊蹄山（北海道）、大雪山（北海道）、蔵王山（宮城県）、大雪山（北海道）、雌阿寒岳（北海道）等において地質調査を行い、過去の噴火活動について検討した。また、岩木山の噴火史を解明するため、地形判読により4つの溶岩ドームの生成の順序を推定するとともに炭素年代測定により噴火時期の推定を行った。近年小規模な水蒸気爆発を繰り返している雌阿寒岳において地質調査を行い、噴火履歴を調査した。

う. 成果

ア. マグマ上昇・蓄積過程

マグマ性噴火が発生する火山では地震観測・地殻変動観測に火山体の構造調査を組み合わせることによりマグマ供給系の理解が進んだ。昭和火口で爆発的噴火が頻発するなど火山活動の活発化が見られる桜島（噴火活動に関する成果はIV章を参照）では人工地震による構造探査を行い、始良カルデラおよび桜島直下の基盤深度とその特徴を明らかにするとともに、始良カルデラのマグマ溜まりと桜島直下のマグマ溜まりを結ぶ場所にマグマの通路に対応する可能性がある地震波の低速度領域が見つけた。低速度領域は地震波トモグラフィから示されるようにされるように、桜島直下のマントルまで鉛直に広がっている。また、水準・GPS 観測により、桜島の主マグマ溜まりが位置する始良カルデラ地下ではマグマの蓄積がその速度を変化させながら依然として進行していることが示された。さらに、桜島島内における南北と東西方向の基線での膨張時期の相違は移動・上昇するマグマの位置と火道の閉塞状態の相違による可能性がある。伊豆大島において約3年周期で間欠的に発現する山体の膨張・収縮はカルデラ内地下数kmの深さで深部からのマグマ上昇・蓄積とマグマの深部への還流が繰り返されていることを示している。また、マグマ上昇・蓄積に伴ってカルデラ内の極浅部と伊豆大島の沿岸部の深さ数kmで地震が発生するが、その起震応力場は周辺の広域応力場とマグマ貫入により生じた応力場に強く影響を受けている。マグマ蓄積と沿岸部の地震活動は盛り上がった深さ8kmのコンラッド面上の地震波速度5.5~6.0km/s層に限られ、マグマ蓄積が密度分布に大きく支配されていることが示された。雲仙普賢岳ではA型地震の起震応力場に基づく応力テンソル解析により、千々石湾下の深部マグマ溜まりから島原半島内のマグマ溜まりへマグマが上昇を開始した時期に千々石湾の応力場が変化したことがわかったが、これは地震発生がマグマ溜まりの圧力変化と関係があることを示すものである。岩手山では、噴火未遂に終わった1998年の活動について、活動初期のひずみ記録を再解析し、理論研究との比較から、マグマ上昇の途中で気泡の成長がなく十分な浮力が獲得できなかったことが噴火未遂に終わった原因であると解釈した。

一方、熱水活動が卓越している火山では比抵抗分布と熱活動や地震活動等の関係から浅部熱水系の構造が明らかにされつつある。噴気活動の活発化がみられる草津白根山では、湯釜東壁において水素の割合が大きいガスが検出され、マグマから直接放出された火山ガスである可能性が指摘された。また、3次元比抵抗構造と火山性地震の震源分布の対比から火山の熱水系と地震活動、噴気活動の空間的関連が明瞭に示された。阿蘇山では浅部熱的活動度の相違に対応する中央火口丘群西部と東部の電磁気学的構造断面の違いが明らかとなった。また山頂火口の湯だまりの熱収支に基づく定量的解析の試みは、熱に注目した活動推移の把握が重要であることを示す。熱的活動以外は比較的静穏な活動状況は、地殻変動観測から示された圧力源の収縮の継続に対応している。この位置は地震波の低速度領域に一致する。

桜島、霧島山、三瓶山（島根県）、大山（鳥取県）の下では、下部地殻から最上部マントルに至る大規模な低速度域が存在し、深部のマグマ供給系描像が得られた。特に、霧島山では低速度・高ポアソン比の異常域が下部地殻に広く分布し、クラックの密度が高く、しかもクラック内での地殻流体の飽和度が高いと推定される。

エクアドルのコトパキシ火山とトゥングラワ火山の観測網のデータから、少ない観測点でも火山性地震の震源、火山性微動の発生源を推定する方法を開発し、火山活動の監視の自動化に貢献した。

SAR干渉解析の手法を用いて、全国の火山の活動状況を把握するシステムを作った。これを用いて、

十勝岳（北海道）、有珠山（北海道）、吾妻山、伊豆大島、三宅島（北海道）、硫黄島（北海道）、九重山（北海道）、阿蘇山、雲仙岳、霧島山、桜島、口永良部島（鹿児島県）、諏訪之瀬島（鹿児島県）において火山性地殻変動を捉え、マグマ蓄積の多様性に関する知見が得られた。

イ. 噴火履歴とマグマの発達過程

噴火履歴の調査と岩石学的分析・年代測定はマグマの発達過程を明らかにしつつある。例えば、桜島の南岳山頂活動期以降の噴出物については大正噴火と同様に玄武岩質マグマの関与が認められ、玄武岩質マグマの関与の度合いが噴火規模を支配している可能性が高いことが示され、伊豆大島の20世紀の噴出物については2種類の SiO_2 量の異なるマグマ混合により形成されたこと、斜長石斑晶は、より CaO や MgO に富んだマグマから晶出したことが明らかになった。雌阿寒岳、岩木山については、得られた噴火履歴がマグマ供給システムについてのモデル化や噴火活動の推移を予測するための基礎資料として重要であることが示された。

え. 今後の展望

これまでの研究により、静穏期にある火山でも、地下にマグマが貫入したと推定される地殻変動の観測事例がいくつか明らかとなった。これをマグマ蓄積過程の観点から分類すると、(1) 伊豆大島のように地震活動や地殻変動以外の噴火の兆候を示す現象が観測されていない静穏期にある火山で山体膨張と収縮が繰り返す活動、(2) 霧島山新燃岳のように山体膨張の開始がそのまま噴火に直結する活動、(3) 桜島のように山体直下のマグマの蓄積と噴火によるマグマの放出が同時に起こりマグマ蓄積はその収支バランスの上にあられる活動、の3種に大別できる。これらのマグマ蓄積過程の相違は、桜島、霧島山新燃岳や伊豆大島の研究から火道の発達の度合いやマグマ蓄積が起こる地殻深度の環境が大きく関与していると考えられる。

したがって、これまで「火山噴火準備過程」としてひとまとめにして扱われてきたプロセスを火道が形成されていない閉塞系については、火道ができるまでのマグマ蓄積系の形成過程、マグマ上昇による火道形成過程、噴火直前過程に分けて考える必要がある。また、桜島のようにすでに頻繁に先行噴火が発生している火山では開口型火道での取り扱いをする必要があり、さらに両方の特徴を表すために火道の開口率や既存火道系に対するマグマの貫入量の比を示すパラメータなどを概念として導入する必要がある。初期段階であるマグマ蓄積系の形成過程においては山体直下の密度構造が大きく関与するので、地下構造の精査とその時間発展を調査するための火山体の構造探査を行う必要がある。

一方、現状では新たなマグマ蓄積は確認できていないが、熱水系の存在により水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発が懸念される火山も存在し、既存熱水系の発達過程に着目した研究や熱水系の発達を新たなマグマ貫入の先行過程とみなす研究もあわせて推進する必要がある。

また、マグマ溜まりでのマグマの発達過程が噴火様式に与える影響の大きさについては、桜島における火山のマグマ成分の変遷より明らかになったが、今後も同様の研究を他の火山について推進し、噴火様式の変遷と関連づける研究を推進する必要がある。さらに活動的な火山における噴火履歴の研究は、噴火予測のための噴火シナリオを作成する際に極めて重要な情報であるので、マグマ発達と噴火履歴が連携した研究を一層推進する必要がある。

(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

あ. 目的

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いる。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に資するために、地震発生先行過程に関する研究では、上記の1)と2)を実施する。

い. 実施状況

ア. 観測データによる先行現象の評価

大学は鉾山において、震源域の至近距離で地震・地殻変動を観測し、鉾山の地震やゆっくり滑りの先行過程について調べた。巨大地震前に電離層総電子数(TEC)の異常が現れるか検証した。地震発生に先行してVHF帯の電波が見通し外に伝播する異常現象(地震エコー)を検出するために、観測手法の高度化と連続観測を実施した。

大学は、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、カタログ化した。

大学は、大気ラドン濃度連続データから、変動の気象由来成分を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。地下水溶存ガスの連続観測を継続するとともに、観測装置の改造を行った。

地殻構造の時間的変化を監視する新しい手法として、地震計の雑微動記録を用いる地震波干渉法について、実体波の反射波を雑微動の観測点間の相互相関関数で検出する試みを行った。

イ. 先行現象の発生機構の解明

地震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、どのようなタイプの実験にも共通する系統的なずれがあったが、最近、室内実験データの詳細な検討により、このずれが解消される新たな摩擦則が提案された。この新しい摩擦法則を用いて、地震活動の消長から応力情報を取りだすための理論モデルの構築、地震サイクルのシミュレーションが行われた。

1995年(平成7年)兵庫県南部地震などの前後に微小地震活動度が大きく変化したことが指摘されている北近畿の丹波山地において、高密度の多項目観測を実施した。また、西南日本における深部低周波微動と、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滑りとの関係を明らかにするために、プレート境界深部の準静的滑り域の中に、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った。

大学は、電磁気現象と地震発生との関連を明らかにするために、変動機構の理論的・実験的研究を進めた。

う. 成果

ア. 観測データによる先行現象の評価

南アフリカ大深度鉾山内で震源極近傍に設置したひずみ計では、従来からゆっくり地震に相当するイベントについてはプレスリップが多数例検出されている。マグニチュード0.3の普通の地震について、震源から20m以内にあるひずみ計で、明瞭なひずみ変化が6.5時間前から開始したケースがみつかった。地震によるひずみ変化の極性と先行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プレスリップが世界で初めて捉えられた例である可能性が高い。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、地震が近づくにつれプレスリップが加速する振る舞いは見られなかった。また、これまで鉾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ひずみが観測されなかった例が多数確認されており、どのような場合にプレスリップが起こるのか、今後良質のデータを増やして十分検討する必要がある。

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)に際し、地震約40分前から震源域上空の電離圏で最大10%程度の総電子数(TEC)の正の異常があったという報告がなされた。これは、GPS衛星が発射するマイ

クロ波の解析から推定されたものである。2004年スマトラ沖地震 (M9.1) や2010年チリ地震 (M8.8) でも、同様の解析を行うと異常が見られると報告されている。一方で、東北地方太平洋地震の約10分後に大気音波が電離層に到達し、その後数10分続くTEC減少も観測されている。地震前のTECの正の異常と地震後の負の異常が連続して発現しているため、観測データの解釈には注意が必要であり、更に精査する必要がある。大気音波が電離層に到達して生ずる地震時電離圏変動のうち、周期数百秒の振動成分についてはモデルが提案されているが、数10分続くTEC減少のメカニズムはわかっていない。地震前にTECに正の異常が生じるメカニズムを解明するとともに、大気音波によるTECの変動の定量的モデルの構築を行い、地震前後のTECの異常現象を再検証することが必要であろう。

地震エコーとして、M4以上の地震に対し、50以上の事例が収集できた。さらに、地震エコーの時間総和と地震発生マグニチュードとに一定の関係があることがわかった。

新たにカタログ化したメカニズム解を用いると、静的クーロン応力変化と地震活動変化の相関性がより明らかになることがわかり、応力場解析に有効であることが示された。また、地震波干渉法によりモホ面や地殻内反射面からの反射波信号が認められ、地殻構造の時間的变化検出の可能性が示された。

イ. 先行現象の発生機構の解明

最近提案された改訂版の摩擦法則を用いて、地震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、従来の摩擦法則によるものよりも、サイクル後半の固着状態の減少の程度がかなり大きくなることを示した。さらに、この低下はサイクルの後半約1/3の期間にわたって著しい加速をともなって進行するので、なんらかの方法で固着度をモニターできれば、地震サイクルにおけるステージを、かなりの確信をもって判別できることが期待される。

西南日本における深部低周波微動に関するシミュレーションにより、深部低周波微動の活動域が移動する現象を再現するとともに、巨大地震発生前になると、発生間隔が短くなる可能性を示した。

微小破壊をともなわない条件で岩石試料を加圧する室内実験を行い、起電力が正孔電荷キャリアの拡散により発生する可能性を示した。また、伊豆諸島の電位観測では、地震の発生場所により地電位異常の極性が決まることがわかった。また、2011年東北地方太平洋沖地震が発生した際、地震波の到来に伴う顕著な地電位の変化を検出した。

え. 今後の展望

「地震発生先行過程」は平成21年度からの本予知研究計画により始まった。上述した他にも、多くの課題で予察的な結果が得られはじめている。

実験や数値シミュレーションにより、限られた条件下であっても地震発生前に発現することが見つけられており、その物理メカニズムがある程度わかっている現象については、様々な条件を考慮しなければならない自然界でどのように観測されるかを突き止めることは極めて重要である。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。南ア鉱山の誘発地震で固着域のプレスリップの明瞭な例がみつかった。しかし、顕著なプレスリップを伴わない地震が発生した例も多く、より現象を検出する機会が多いと思われる事例を増やして、様々なテクトニック環境下で、大地震のプレスリップが検出可能な例がどの程度の割合であるか、自然界でプレスリップを伴わない地震があるのは何故か、狭義の前震との関連などについて、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、プレスリップよりもずっと検出しやすいと期待できるので、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実験観測を開始することが望ましい。また、巨大地震アスペリティ下のクリープのモニタ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。

更に、現在はその発生メカニズムが判っていない事象であっても、自然界で地震に先行すると思われる例が多数観測される場合についても、研究を推進する必要がある。その際には、観測デー

タの正当性を担保するため、現計画で実施されているように、観測システムの特徴を正確に把握し、得られたデータの限界も明確にしながら、研究を推進する必要がある。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震前に見られた電離層の電子数異常や地震エコー等の電磁気現象については、様々な解釈が可能な段階である。多面的な研究や事象を増やすことにより、地震に先行する現象であったかどうかの検証を進めていくべきである。また、この地震の2日前に発生したM7.3の地震のあと、多くの小地震が本震の震源に近づくように発生したことが報告されている。結果的にM7.3の地震は前震であったかもしれない。このような活動が、本震が起こる前に前震だと判断できるかどうかについても視野に入れ、大地震前の地震活動の特徴を明らかにし、実時間で前震活動を判別する研究も進めていくべきであろう。地震発生数の消長が何を反映しているのか、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などによって、今後理解が深まる可能性もあるので、地震活動の変化に着目した研究を一層推進すべきである。

ある程度以上の規模の地震に先行することが多いといわれる地震先行事象を徹底的に調べるためには、精度の高い観測データを多数の事例について集積し、その有意性を統計的に検証し、そのうえで先行現象であるか否かを判断する必要がある。規模の大きな地震の頻度は高くないので、可能なものについては発生頻度の高い現象を中心として研究を推進すべきであろう。

(3-2) 地震破壊過程と強震動

あ. 目的

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に、震源解析及び震源物理に基づく破壊過程の研究を推進する。プレート境界のアスペリティ分布及び内陸活断層やスラブ内地震の強震動生成域を事前に推定するために、強震動生成域と地震活動や地殻不均質構造等との関連性を調査する。短周期強震動の生成に関わる、断層滑りの動的特性とアスペリティ内の微細構造との関連を重点的に調査する。不均質な地下構造や詳細な海底地形及び断層破壊の動的特性を正しく評価した震源モデルを用いて、強震動及び津波の大規模数値シミュレーションを行い、M8クラスの海溝型地震からM6クラスの内陸地震まで、幅広い規模の地震に用いることができる強震動・津波の予測手法の開発を目指す。

い. 実施状況

ア. 断層面の不均質性と動的破壊特性

大学は、プレート境界のアスペリティ及び内陸活断層やスラブ内地震の強震動生成域の事前推定を目指し、高精度震源決定法や地震波形インバージョンなどの最新の震源過程解析手法を用いてアスペリティ領域の高精度マッピングを行い、過去の大地震の解析事例を増やした。また、断層面上の強震動生成域と地殻不均質構造及び微小地震活動との関係を解明するため、不均質二重時間差トモグラフィ法を用いて、近年発生した大地震の震源断層周辺の詳細な地震波速度構造を求めた。

大学は、震源断層パラメータの高精度な推定をめざして、三次元地下構造を仮定したグリーン関数（地震波伝達関数）を用いた震源過程の解析手法の開発を行うとともに、これまでに発生したプレート境界や内陸地震の震源モデルの推定に適用した。

産業技術総合研究所は、断層面における反射強度の分布と強震動生成域及び破壊過程との関係の解明を目指して、断層面の不均質性を、反射法人工地震探査の手法を用いて検出する実験をおこなった。

防災科学技術研究所は、地震波形データをリアルタイムに取得し、即時に解析システムに取り入れ、震源過程解析の高速化を行った。

気象庁は巨大地震の発生から数分以内に地震像を把握する手法の高度化を行った。

イ. 強震動・津波の生成過程

大学は、強震動・津波の生成過程解明に大きく寄与する地下構造と震源のシミュレーションモデ

1 ルの整備を目指し、津波の即時予測の高度化に向けて、沖合津波計による津波波源解析の高度化と
2 津波予測手法の各種検討を進め、時間経過とともに刻々と得られる津波波形を取り込んで、逐次的
3 に波源推定の精度を改善していく新しい津波予測手法の開発をおこなった。また、津波予測のリア
4 ルタイム性の向上を目指し、早期に取得可能な陸上の GPS 観測データと海底津波計データを統合的
5 に用いて逆解析を繰り返す、津波波源の統合解析のアルゴリズム開発を進めた。また、大学は、強
6 震動、地震時の地殻変動、津波の高精度予測にむけて、地震動、水中音波、地殻変動、津波を単一
7 の方程式を用いて計算することのできる新しい計算手法の開発をおこなった。

8 大学は、短周期波動伝播に寄与する不均質揺らぎを考慮した地殻・マントル構造のモデル化をお
9 こなうため、深発地震に見られる震度分布の異常（異常震域）と、大加速度の成因となる周期 1 秒
10 以下の短周期地震動の伝播を、強震観測網のデータ解析から詳しく評価した。

11 大学は、平野部など伝播経路にともなう長周期地震動の生成機構の解明を目指し、シミュレーシ
12 ョンモデルの妥当性の検証をおこなった。

13 気象庁は現地調査や津波観測データから発生メカニズムや津波伝播の減衰過程についての計算手
14 法を開発し、その妥当性を検討した。

15 う. 成果

16 ア. 断層面の不均質性と動的破壊特性

17 1995 年兵庫県南部地震、1997 年（平成 9 年）鹿児島県薩摩地方の地震（M6.6）、2000 年（平成
18 12 年）鳥取県西部地震、2001 年（平成 13 年）芸予地震、2003 年宮城県北部の地震、2004 年（平
19 成 16 年）新潟県中越地震等の解析の結果、これまで知られていた他の内陸地震やスラブ内の地震と
20 同様に、地震の滑り量の大きな領域は地震波速度の低速度域を避けて、比較的高速度な領域に分布
21 していることが分かった。一方、破壊開始点は、低速度域内か、あるいはその境界に位置している
22 ことが分かった。また、2003 年の福島沖の地震の解析では、滑り域と海底地形の比較から、沈み込
23 んだ海山がこの地震を起こしたアスペリティの原因である可能性が示唆された。茨城県沖で約 20
24 年に一度の割合で規則的に発生している M7 クラスの地震について、2008 年と 1982 年に発生した地
25 震に対して、詳細な震源破壊解析が行なわれ、2つの地震の強震動生成域は 10 km 程度以内の精度
26 で重なり、その震源の大きさ、滑りの立ち上がり時間、破壊伝播速度といった震源破壊過程が2つ
27 地震で良く一致し、プレート境界地震の再現性が確認された。

28 新たな手法の開発により、三次元の不均質地下構造の効果だけでなく、曲率を持つ面での断層滑
29 りによる地震波形の計算方法の定式化が行なわれ、この手法を用いた 2003 年宮城県北部の地震の
30 解析では、一次元速度構造で平面の震源断層を仮定した従来の解析に比べて、前震・本震・最大
31 余震の棲み分けが明確になったほか、地殻変動の解析結果との矛盾点も解消されるなど大きな進展
32 があった。

33 2003 年宮城県北部の地震の震源域での反射法人工地震探査の手法を用いた断層面の不均質性の
34 検出の試みでは、地殻深部の断層面と考えられる明瞭な反射波が検出され、断層面上の不均質性の
35 検出の可能性が示された。

36 震源過程解析システムに F-net によるモーメントテンソル解を自動取得する機能を追加するとと
37 もに、3 次元波動伝播可視化ソフトに断層面を表示する機能を追加し、断層形状モデルの構築に要
38 する時間の短縮を図った。また曲面断層モデルを用いた震源インバージョン手法を開発し、複雑な
39 断層面形状が示唆されている 2008 年 7 月 24 日岩手県沿岸北部の地震および 2009 年 8 月 11 日駿河
40 湾の地震について曲面断層上での震源過程を推定した。

41 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、規格化短周期波形エンベロープを用い
42 た震動源探索手法（改良 SSA 法）を開発し、数値シミュレーションでその有効性を示すとともに、
43 1994 年三陸はるか沖地震や 2003 年十勝沖地震などの実際の地震に適用した。

イ. 強震動・津波の生成過程

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、逐次的に得られる観測記録を用いた津波源（海面変動）の逆解析により、沿岸津波の逐次推定の見通しを得た。2004年紀伊半島南東沖の地震に対して、室戸沖海底ケーブル津波計記録の観測波形と計算波形が一致から、地震波形のみからは区別できなかった、二つの共役断層面の一方を震源断層と結論づけた。こうした、地震動と津波データを有効に活用した、詳細な震源過程の解析のために、地震動、水中音波、地殻変動、津波を同時に計算できる新たな計算コードを開発した。

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表層地盤の増幅特性（サイト増幅特性）の解析が行われた。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性質を利用し、全国の観測点における周波数毎のサイト増幅係数を、多数の地震波形を用いて精度よく推定した。深発地震に見られる異常震域の特性を高密度地震観測データとコンピュータシミュレーションにより詳しく調査した。そして、異常震域の成因としてこれまで考えられてきたプレートが低減衰・高速度であることに加え、さらに短周期の地震波がプレート内の横長の散乱体（不均質性）の中を伝播することにより、広角多重散乱を起こして遠方まで良く導かれる「散乱トラップ」効果の重要性を明らかにした。

2004年紀伊半島南東沖の地震の長周期地震動のシミュレーションをおこない、全国の強震観測データと計算波形の一致を高めるように地下構造モデルを修正を進めた。こうして高度化された地下構造モデルを用いて、1944年東南海地震の長周期地震動を再現し、また東京大手町や千葉県東金市に設置されていた機械式強震計記録との良い一致を確認した。南海トラフ地震において関東平野で長周期地震動を強く励起する原因となる、伝播経路の特性や、平野での増幅特性などの理解が大きく進み、これらを他の地域にも適用することにより、関東平野に限らずたとえば濃尾平野や大阪平野など日本各地の広帯域の強震動の予測精度が向上し、建築・土木工学における耐震工学研究との連携を一層進めた、構造物の被害予測と災害軽減に向けた研究が加速した。

沖合津波波形の逆解析に基づく津波予測手法を、1944年東南海地震を想定した仮想沖合津波記録に適用し、津波波源域から離れた沿岸地域に対する津波予測には極めて有効であること、波源近傍の沿岸地域に対しては、測地データとの併合処理が将来的には必要になりそうであることが判明した。

え. 今後の展望

大地震の破壊過程の詳しい理解を通じて、強震動発生域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を強震動・津波の予測に生かすことが重要である。近年、高密度強震観測データだけでなく、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、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手法の開発により、大地震の震源破壊過程が詳しく判るようになり、高周波地震動を放射する場所、大きな滑りの場所、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。このように強震動発生域の実体を理解し、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解明への道筋ができつつある。今後は詳細な反射法探査や地震波トモグラフィによる地下構造調査、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、地震発生予測シミュレーションとの連携など、本計画の他の項目で進められている最新の研究成果との連携による研究の強化が必要である。これまでの研究により得られた詳細な地下構造モデル、震源モデル、観測点サイト特性、それらを考慮した地震動の計算手法を利用し、過去に発生した地震の地震動から過去の地震の震源過程を再評価して、地震動予測の高度化を行っていく必要がある。

2011年東北地方太平洋沖地震では、解析に用いるデータの周波数帯域、構造モデルや解析手法などの違いによって震源断層面での滑り分布の様相が異なるという問題が生じた。これはデータ処理

や計算手法によるモデル解像度の違いに加え、断層面上での地殻変動（津波）、長周期地震動、短周期地震動の生成領域が、それぞれ異なるという震源過程の本質を示している可能性がある。こうした震源破壊過程の複雑さは、強震動予測の高度化を目指す際の重要な課題となるので、この地震の震源過程の研究成果を、強震動予測の高度化に活用する研究の推進が求められる。

また、この地震において、人的被害軽減の為に、より精度の高い津波の予測が極めて重要であることが改めて示された。本研究で再確認された沖合津波計データの有効性と、リアルタイム観測データの逐次解析による高精度津波予測の可能性など、津波予測精度の向上に向けた取り組みと、早期実用化に向けた技術移転が重要である。また、近年進歩のめざましい超大規模コンピュータシミュレーション技術を利用することにより、短周期から長周期地震動を含めた広帯域の強震動予測の実現にある程度目途が付きつつある。複雑な震源破壊過程の理解と表層地盤を含む詳細な地下構造モデルの高度化をはかり、シミュレーションの更なる精度の向上と、リアルタイム津波予測を目指した観測－計算融合研究の一層の努力が必要である。

（３－３）火山噴火過程

あ. 目的

「火山噴火過程」については、火山噴火の爆発性を支配する要因を理解するため、火山浅部でのマグマの上昇と火山爆発現象のモデル化を行うことを目指す。そのために、繰り返し発生する噴火を対象として集中的な地球物理・物質科学的観測を行い、火道浅部におけるマグマの上昇・移動に伴う諸現象と噴火現象を高時空間分解能で定量化することにより、先行現象と噴火現象の関係を明らかにする。また、マグマ上昇と爆発現象のモデルと実際の観測データとを比較し、発泡・脱ガス過程などに伴うマグマの物性変化との関連性を明らかにし、噴火の推移を支配する物理・化学的要因を理解する。また、新たに噴火した火山において、地球物理学・地球化学・物質科学的観測を実施する。噴火推移を予測するため、噴火シナリオの高度化を目指した研究を行う。

い. 実施状況

ア. 噴火機構の解明とモデル化

大学は、ブルカノ式噴火が頻発する桜島、諏訪之瀬島、スメル火山（インドネシア）を対象にして地震、測地、電磁気及び地球化学などの観測を行った。これらの多項目の観測データを解析し、噴火に先行するマグマ上昇過程や火山ガス活動の時間的変化、爆発的噴火やガス噴出のメカニズムを明らかにするとともに、噴火規模と先行現象の関係を調べた。また、2004年浅間山噴火の際の観測データを解析し、噴火の際に発生する長周期振動の励起過程のモデル化に成功した。2011年1月に噴火した霧島山新燃岳においては、地震、地殻変動、重力、電磁気、火山ガス等の多項目観測を行い、噴火機構の解明と推移予測を目指した研究を推進した。そのほか、水蒸気噴火とそれに伴って発生するブラスト現象や山体崩壊についての理解を深めるため、1888年磐梯山噴火の再調査を行った。

防災科学技術研究所は、ダイク貫入やマグマ発泡等のマグマの挙動を理解するため、マグマ移動シミュレーションの手法開発を行った。

イ. 噴火の推移と多様性の把握

大学は、噴火後の火山性流体の移動を把握するため、2000年に噴火した有珠山において空中磁気測量を行った。また、貫入マグマによる変動源、水蒸気爆発の発生源を明らかにするため、水準測量、重力測量、SAR干渉解析を行うとともに、温泉井のデータなどをもとに浅部火山構造を調べた。

産総研は、火山ガスの起源、ガス成分の変動の原因の研究の目的で、火山ガスを連続測定するシステムを構築し、浅間山、雌阿寒岳、口永良部島、阿蘇山に設置し、観測した。また、火山ガス組成の変化と地殻変動の関係についても調査した。

大学、産総研、気象庁、防災科技研は、伊豆大島、三宅島、伊豆東部火山群、シナブン火山（インドネシア）の噴火シナリオを作成するとともに、その事象分岐の確率推定の方法について検討し

た。

う. 成果

ア. 噴火機構の解明とモデル化

ガス噴出が短時間で繰り返し発生するスメル火山で、地震及び傾斜観測を実施し、その活動の概要を解明した。それぞれのガス噴出の20-30秒前から山体膨張が始まり、山体膨張量が大きいほど地震の規模が大きくなる。一方、ブルカノ式噴火を繰り返していた2007年には、噴火の200-300秒前から山体膨張が加速的に進行し、膨張量が大きいほど爆発規模が大きいことが明らかになった。これらの観測事実は、噴火前の山体膨張の大きさや時間発展から、噴火の様式や規模が予測できる可能性を示している。

小規模なブルカノ式噴火や火山灰噴出を頻繁に引き起こす諏訪之瀬島で、マグマ上昇過程と噴火現象の関連性の解明を目指し、火口近傍で傾斜観測、地震観測、GPS観測を行った。その結果、小爆発の約1分前に、灰噴出に伴う微動が停止し、同時に山体膨張することを明らかにした。このような噴火前に起こる現象を捉えることにより、噴火の発生予測が可能になることがわかった。

浅間山では、火口近傍に設置した14台の広帯域地震計で記録された長周期パルス (VLP) の発生メカニズムを、モーメント・テンソル・インバージョン手法を用いて解明した。VLPは深さ100~200mにおいて、深部からの火山ガスの流入によって火道浅部の割れ目や通路が膨張し、それに続いて火山ガスが空隙率の高い媒質中を通過して収縮したものと推定された。VLP発生後に SO_2 の濃度が増加することが観測され、また、ミュオンラジオグラフィーによる火道透視結果はVLPの発生源は低密度領域にあることを示していることから、モデルの妥当性が検証された。

噴火に伴う火山ガスの放出現象を明らかにするため、浅間山、桜島、諏訪之瀬島、霧島山新燃岳において噴火前のガス挙動を定量化した。噴火の発生直前に SO_2 の放出率が減少し、噴火後には増大することが明らかになった。

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（静岡県、山梨県）におけGPS観測を継続し変動の把握を行った。

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。気体粒子の属性を組み込み、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し、火砕流シミュレーションの実用化に目途をつけた。

規模の小さな噴火の検出は容易でないが、記録された空振と地震の相互相関をとることにより、微噴火活動を正確に検知することがわかった。また、桜島や諏訪之瀬島では、映像記録や地震記録の解析から爆発的噴火発生約1秒前の火口底隆起により空気振動が励起されることを見出し、その生成理由を明らかにした。

イ. 噴火の推移と多様性の把握

有珠山において水蒸気・マグマ水蒸気爆発の発生環境を明らかにするために、既存資料や温泉井のデータから帯水層と不透水層の分布と、水蒸気爆発からマグマ水蒸気爆発に推移した1943~1945年の噴火活動について考察した。その結果、深部から上昇してきたマグマが深さ120m以浅の帯水層を通過する際に水蒸気爆発が発生し、その後、深さ50m以浅の不透水層である溶結凝灰岩層に達した頃からマグマ水蒸気爆発が発生したと推察できた。2000年噴火域である新山周辺で、空中磁気測量、地上全磁力観測、地殻変動観測（水準測量、精密重力測量、SAR干渉解析）を行い、貫入マグマによる帯磁源や圧力源の位置を求めた結果、マグマはNB火口付近の深さ400~500mまで貫入したと推定された。平成23年度からは、この貫入マグマを目指してボーリング掘削を行い、マグマ貫入による構造変化、応力場変化、熱水系の実体の解明を行う計画である。

国内の代表的な活火山において過去の火山活動の推移や噴火履歴を精査し、噴火シナリオの事象分岐の確率推定の方法について検討した。例えば、2000年にカルデラ形成を伴う噴火を約2500年ぶりに引き起こした三宅島について、噴出年代と噴出量積算の階段図から、約2500年前の噴火で形成されたカルデラはその後約1300年間で埋め立てられたことが明らかになった。このことから、今後発生する噴火は、噴出量の多い噴火か、より短い時間間隔で噴火になる可能性が高いと推測できた。伊豆東部火山群（静岡県）について、1978年から約50回発生した群発地震と1989年の海底噴火時の観測事実から、噴火シナリオを作成し、おおよその事象分岐の確率を推定した。この結果は、静岡県伊豆東部火山群火山災害対策計画に活用されている。

え. 今後の展望

多様な火山噴火の予測する方法を実用化するためには、火道の状態やマグマが貫入する火道浅部構造の特性、上昇するマグマの物性と噴火様式・規模との関連性を普遍的に理解し、それに基づいた噴火現象のモデル構築を行うとともに、活動的火山における調査・観測により実際のマグマ上昇や噴火現象を測定し、モデルとの対比を通じて観測データを理解することが必要である。このことを念頭に研究を推進し、現在の噴火過程の理解や予測技術の水準を着実にあげていく必要がある。

本計画により、規模の小さな爆発的噴火や火山ガス噴出においても火口近傍に傾斜計や歪み計、広帯域地震計を適切に設置すれば噴火に先行して山体膨張が捉えられること、火山ガスモニタリングによりブルカノ式噴火直前に火口からのSO₂放出量が低下することなどが明かとなった。噴火直前の先行現象を、複数の異なる観測手法で高精度・高分解能で捉えられることを実証した。さらに、いくつかの火山では、噴火に先行する山体膨張量と噴火規模との関係も明らかになった。これらの観測事実は、爆発的噴火の発生時期の直前予測や規模予測が実現できる可能性を示しており、今後も観測事例を増やし、より広範囲に噴火規模・様式との関係を明らかにするとともに、噴火様式を支配する揮発性物質の挙動、マグマの貫入や火道内上昇過程の多様な現象についての理解を深め、噴火過程のモデルを目指す必要がある。

また、まだ少ない事例ではあるが、火山浅部の地下水環境が、水蒸気爆発からマグマ水蒸気爆発への変化など、噴火様式の推移を大きく関与している可能性が示された。これは、噴火様式や推移の予測にはマグマが上昇する“場”の理解が不可欠であることを示唆している。今後、多くの活動的火山において帯水層・不透水層などの空間分布や熱水系の時空間変化といった火山体浅部構造を、地震学的、電磁気学的、測地学的な探査手法や孔井検層データにより調べ、異なる“場”のもとで噴火様式や推移の多様性を明らかにする必要がある。

現実の噴火の発生頻度を考えると、限られた観測データからモデルを普遍化するには限界がある。そのため、過去の噴火事例から多様な噴火事象の発生パターンを系統的に整理し、火山学的知見をもとに噴火の物理・化学過程を類推することや、多数の火山での噴火現象の比較から噴火現象を系統的に理解することが重要であろう。そのほか、マグマの物理・化学的特性、火山体構造の特性を加味したモデルに基づく、数値シミュレーションによるマグマ貫入や噴火現象の再現は、多様な噴火現象を支配する要素を考えるうえで有効であり、今後力を入れるべき研究の方向である。

（４）地震発生・火山噴火素過程

あ. 目的

地球構成物質の変形・破壊の特性を、広い条件範囲にわたって実験的に明らかにする。地下深部の岩石の変形・破壊特性を推定するために、地震波速度や比抵抗等の地球物理学的観測による推定が可能な物理量と変形・破壊特性との定量的関係を室内実験により解明する。地震発生モデルで利用するために、変形・破壊の物理・化学的素過程を理解して、実験結果の実験条件範囲外での適用可能性について検討する。様々な規模の地震破壊を至近距離で観察できる鉱山の誘発地震等を用い

て、変形・破壊現象の規模依存性を明らかにするための実験・観測研究を行う。さらに、火山噴火においては、変形・破壊以外に、マグマの性質と挙動を理解することが不可欠であるので、噴出物の分析・解析や室内実験を行うとともに、それらの結果を考慮した噴火過程の検討を行う。

い. 実施状況

ア. 岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

大学、防災科学技術研究所及び産業技術総合研究所は、地殻から上部マントルでの温度・圧力等の環境下で幅広い変形速度等の条件における岩石及びマグマの破壊・変形特性を明らかにするために室内実験を行った。その物理・化学的素過程を物性理論により理解するために、摩擦溶融や粉体等の挙動も考慮して、数値実験、試料の分析を行った。

大学及び産業技術総合研究所は、岩石の変形に伴う微小破壊活動や化学反応、物性、岩石組織の変化等についての室内実験及び試験観測を行った。また、種々の物理・化学過程の地学的現象に対する寄与を理論的に評価する研究を進めた。

イ. 地殻・上部マントルの物性の環境依存性

大学、防災科学技術研究所、海洋研究開発機構及び産業技術総合研究所は、弾性波速度・減衰、透水性などの物性の温度・圧力・構成鉱物・内部構造・含有流体などへの依存性を定量的に明らかにするために理論・実験的研究を進めた。

ウ. 摩擦・破壊現象の規模依存性

大学は、岩石破壊過程の規模依存性について理解を得るために、鉱山の採掘で誘発される地震に伴う地震波やひずみ変化を震源の至近距離で観測し、岩石の巨視的破壊に伴う応力変化や微小破壊活動についての室内実験結果と比較した。

エ. マグマの分化・発泡・脱ガス過程

地球物理学的観測量からマグマの性質と挙動を推定するため、以下の研究を実施した。繰り返し噴火を行う開口型火道内のマグマ上昇過程のモデル化と数値計算を行い、火口近傍での測地学的観測量との対応関係を調べた。また、火道内や亀裂内の流体移動から生じた地震波動場の解析・解釈のための固体と液体の相互作用を考慮した数値計算、及び噴火に伴う空振の発生メカニズムを理解するための室内実験を行った。一方、噴火の推移や多様性の支配要因として、マグマの発泡・脱ガスと流動・脆性破壊の遷移が考えられているが、その素過程を理解するため、発泡したマグマの剪断変形実験、噴火前のマグマ中に溶け込んでいる揮発性成分の量を推定する新しい分析方法の開発、および、流体の破壊に関する理論的研究を行った。また、噴火様式の多様性は、マグマの過飽和度の空間不均質にあるという新しい考え方を検証するため、噴出物の構造解析と室内モデル実験を行った。

う. 成果

ア. 岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

南海トラフの深さ約 270m の掘削で得られた粘土質断層試料、アラスカのコディアック島のメランジ（海洋と陸域の多様な種類や起源の細粒岩石からなる混合構造をもった地質体）で採取した付加体泥岩、多数のガラスビーズからなる模擬ガウジ層などを用いて幅広い速度範囲で摩擦実験を行った。摩擦の滑り速度依存性、粒径や組成などが摩擦特性に及ぼす影響の速度依存性、垂直応力とガウジ層の膨張の関係、摩擦発熱の摩擦強度への寄与、摩擦溶融時における垂直応力変動が摩擦強度に及ぼす影響など詳細な摩擦特性が明らかになった。

断層面を透過した弾性波により時々刻々変化する摩擦面の固着状態を定量的にモニターする室内実験により、載荷せん断応力がピーク値に達するより前に物理的な固着のはがれはほぼ完了することが分かった。透過した弾性波によるモニターは、ガウジ層（断層帯内の細粒破砕物）をはさむ模擬断層を使った研究に発展し、ガウジ層の応力場評価に関する理解が深まった。

地震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、どのようなタイプの

実験にも共通する系統的なずれがあったが、室内実験データの詳細な検討によりこのずれを解消した新たな摩擦則が提案された。

イ. 地殻・上部マントルの物性の環境依存性

高温型蛇紋岩の弾性波速度を、地震発生場と同様の高温・高圧条件で計測した。トモグラフィーで求められた沈み込み帯等における低い弾性波速度は、高温型蛇紋岩自体の弾性波速度だけでは説明できず、間隙水が存在していることが必要であるとの結論を得た。

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、地震波の減衰に対する流体（メルト）や温度の影響やヤング率の周波数・温度・粒径依存性などを明らかにし、また、多結晶体の非弾性特性は物質によらない普遍性がある可能性を示した。

地殻内の流体からの鉱物析出に関するシミュレーションを行い、断層内で流れを妨げるシールが形成される深度を求めた。

ウ. 摩擦・破壊現象の規模依存性

室内実験と自然地震の間には、時空間的に規模が数桁異なっているため、スケーリング則が成り立つかを検討するために、南アフリカ大深度金鉱山において、断層直近での地震観測を行った。観測できたAEの最小震源サイズは約15mmである。このように小さなAEを野外観測でとらえたのは世界初である。また、長さ100mに及ぶM2.2の地震の断層面の傾きが、室内実験で見いだされた破壊則で説明できることを明らかにした。更に、その地震の余震群のb値を求め、本震破壊面に沿って2次的に分布するクラスターのみが高いb値であることを示した。

数値シミュレーションにより、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、自然地震で推定される臨界滑り量が、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。

エ. マグマの分化・発泡・脱ガス過程

地震・地殻変動・空振など、地球物理学的な観測データから、マグマや火山性ガスの挙動を読み取るための重要な知見が得られた。火道内のマグマ上昇と地殻変動を結びつけるモデルを高度化し、マグマの流動様式の違いや地形の効果を取り入れた計算を行った。また、亀裂内や火道内での流体振動による弾性波放射についても、数値計算法を改良し、様々な形状、火道壁や地表面の影響、流体粘性の影響を取り入れることができるようになった。その結果、これらの効果を考慮することは、地殻変動や地震波から流体挙動を推測する際に不可欠であることが示された。また、2011年1月に始まった霧島山新燃岳の噴火で見られた、調和振動的な地震・空振波形の特徴を再現するモデル実験を行い、火口を満たした溶岩を通してガスが抜けるときに発生した可能性を指摘した。

噴火の多様性を支配する要因についても、理解が進んだ。流動するマグマが脆性的に破碎する遷移現象は、爆発的噴火の重要な素過程である。固体力学の枠組みで定式化されていた脆性破壊を流体力学に拡張した。その結果、限られた条件で行われる噴火モデル実験の結果を爆発的噴火の数値モデルに反映させる道筋ができた。また、噴火の爆発性を変化させる要因として、マグマの流動変形と脆性破壊によって、ガスの抜けやすさが変化することが考えられている。この考え方は、現在、世界で最も受け入れられているものであるが、発泡マグマの流動―破壊を高温高圧下で実際に観察する実験を世界で初めて実現し、その実態を明らかにした。一方、過去の大噴火について、噴火様式の遷移と噴出物の変化の対応関係を調べ、噴火様式の遷移が、マグマ溜まりにおける揮発性成分の過飽和度の不均質の有無にあるという、新しい考えを提案した。その考え方に基づいて間欠泉実験を系統的に行い、噴出様式と噴出量が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。熱水だまりの過飽和度の均質性は、加熱速度に依存しているはずであるので、この結果は、上記の仮説を支持している。

え. 今後の展望

1 従来より広範囲の条件下での摩擦特性が明らかになってきた。また、断層面の弾性波透過率の計
2 測などにより、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
3 えられるようになりつつある。近年、構造探査等で詳細にわかってきている弾性波速度についても、
4 物質科学的な解釈を与えられるようになってきた。アナログ物質を使った実験も興味深い成果をあ
5 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
6 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できる。天然の断層は、室内実験で用
7 いられる人工断層面とは異なる不均質をもつので、天然の断層における摩擦構成則を直接明らかに
8 するために、鉱山地震の断層直近観測が有効である。

9 今後の課題としては、さらに広範囲の条件でのデータの取得と、物性の基礎的理解の深化により、
10 天然の条件への知識の適用の妥当性を、様々な項目において適切に判断していくことがあげられる。
11 また、2011 年（平成 23 年）東北地方太平洋沖地震の解析から、プレート境界浅部の強い固着域が
12 示唆されているが、そのような固着域が生成されるメカニズムについて、実験的・理論的研究を進
13 めるべきであろう。

14 火山噴火素過程は、地震予知研究と火山噴火予知研究の連携に際して、新たに始まった研究項目
15 であり、現在 3 年目となる。研究内容は、長年にわたって純粋な科学的興味から行われていた研究
16 成果の積み重ねの上に立つものであるが、観測データへの関連づけや、火山活動推移予測への活用
17 が着実に進められている。本計画では、地震発生素過程と火山噴火の素過程の観測研究は同一の
18 項目で進められている。科学的興味としては共通の問題も確かに存在するが、素過程研究を実現象
19 へ有効に結びつけるためには、むしろ、火山噴火準備過程・火山噴火過程等の研究分野との連携が
20 重要である。すでに、いくつかの連携研究は行われており、今後、さらに推進する必要がある。

23 3. 新たな観測技術の開発

24 あ. 目的

25 日本列島周辺の海域では多くのプレート境界地震が発生し、活動的な火山島も存在するため、海
26 底地殻変動等の各種観測データを安定して取得するための技術開発が重要である。海底地殻変動観
27 測技術及び地震観測技術の高度化と、海底諸観測のデータを実時間で利用できるシステムの開発を
28 図る。宇宙技術等の利用の高度化については、GPS や衛星搭載合成開口レーダー（SAR）等の解析技
29 術の高度化を図る。地震や火山活動をより高い精度で面的に把握する人工衛星や航空機を用いたり
30 モートセンシング手法の実現を目指す。種々の地殻・火山活動現象のモニタリングのために、地下
31 の状態をモニタリングする技術、センサー技術、観測ネットワーク技術、精密制御弾性波震源、宇
32 宙線等を用いた技術の高度化を図る。電源・通信事情の不十分な場所において効率的にデータを取
33 得するためのセンサー技術やネットワーク技術の高度化を図る。また、気象擾乱や人工的な雑音か
34 ら離れ、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の開発が必要である。

35 い. 実施状況

36 （1）海底における観測技術の開発と高度化

37 ア. 海底地殻変動観測技術

38 大学は、GPS—音響測距結合方式による海底地殻変動観測（GPS-A）の高精度化を目指して、水中
39 音速構造の影響を軽減するための新しい解析アルゴリズムの開発や、海底局の最適配置、海中音速
40 の実測に基づく補正方法などを検討した。また、将来の海底地殻変動連続観測に向けて係留ブイに
41 よるシステムを新たに開発し、従来の曳航ブイ観測との比較観測を実施した。

42 大学は、海底圧力計による上下変動連続観測手法の開発をすすめた。主なノイズ源である海洋変
43 動の影響を除くため、数値シミュレーションによる海洋変動予測モデルを構築した。また、次世代
44 型広帯域海底地震計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た。海底間

音響測距観測を実施し、変動検出限界を調べた。

海上保安庁は、音響送受波器を測量船の船底に設置する方式に変更したことにより、測線の最適化や効率的な観測データ取得ができるようになった。また、海底基準点の更新を実施した。

イ. 海底地震観測技術

大学は、現有の広帯域海底地震計(BBOBS)内部の高精度基準周波数源を利用して地震動と圧力変化を同時に観測できる地震計を開発した。また、地震計センサー部とデータ収録部を分離して海底に設置する次世代型広帯域海底地震計(BBOBS-NX)を開発した。

ウ. 海底実時間システム

海洋研究開発機構は、熊野灘(三重県)における地震・津波観測監視システム(DONET)の開発を進め、観測機器の作成・試験を実施した。

大学は、センサー部を小型容器に収納できる次世代ケーブル式海底観測システムを開発し、新潟県粟島の近海に設置した。

(2) 宇宙技術等の利用の高度化

ア. 宇宙測地技術

国土地理院は、GPS測位の上下成分の高精度化のため、大気荷重効果や水蒸気密度の時間変化による大気伝搬遅延、マルチパス誤差の影響を補正する手法を開発した。SAR干渉解析においても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、大気遅延誤差の低減化に成功した。

気象庁は、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の開発を行っている。

大学は、1~10秒サンプリングのGPS観測データを用いて、変位を推定するキネマティック解析手法の開発を進めた。精密単独測位法において波数不確定性の補正法を取り入れることにより測定精度の向上を図った結果、年周・半年周変動成分の振幅が大幅に小さくなり、この手法の有効性が確認した。また、擬似リアルタイムGPS時系列に基づく地震時変位検出手法を開発し、2008年岩手・宮城内陸地震に適用した。

SAR干渉解析においては、通常の解析法が適用できないような大変形について、ピクセルオフセット解析法により地殻変動場を求めた。また、SAR干渉解析を併用して断層運動をモデル化する手法を開発した。

防災科学技術研究所は、SAR干渉解析により三宅島における地殻変動解析を進めた。2007年新潟県中越沖地震、2007年ソロモン諸島地震に伴う地殻変動なども検出した。

イ. リモートセンシング技術

大学は、産業用小型無人ヘリコプターを用い、活動中の桜島南岳火口周辺や、2011年霧島山(新燃岳)噴火時に地震計等の設置回収に応用した。また、MODISとMTSATなどの衛星を用いたリアルタイム赤外面像観測システムの開発を行った。

防災科学技術研究所は、航空機による赤外多波長観測データの解析手法を開発し、桜島や三宅島において火口内の温度分布や二酸化硫黄ガスの分布を推定した。

気象庁は、桜島の爆発や霧島山(新燃岳)噴火に対応して、火山噴煙の解析、噴煙の力学的予測モデルのプロトタイプの開発、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た。

(3) 観測技術の継続的高度化

ア. 地下状態モニタリング技術

大学は、ミュオン粒子による火山体内部の観測を開始した。低消費電力化を進めるとともに通信機能も加えて火山体に設置できる可搬型システムを構築した。

防災科学技術研究所は、GPSデータのリアルタイム処理を目指して、準リアルタイムで大気遅延補

正を推定するシステムを開発した。

大学は、東海地域で稼働している3ヶ所（土岐、森町、豊橋）のアクロス震源からの信号の解析を継続して進めた。また、低周波数の信号を効率的に送信できると考えられる直線加振方式の実用化に向けて、加振装置の実験を行った。

イ. 地震活動や噴火活動の活発な地域における観測技術

大学は、高精度で可搬性にも優れた小型絶対重力計を開発し、市販の絶対重力計との並行観測により、性能評価を行った。また、携帯電話のサービスエリア内において地震観測データや、GPS や傾斜計などの低サンプリングデータのための伝送システムを開発した。また、低消費電力の地震観測用VSAT衛星テレメータシステムを開発を行った。

国土地理院は、機動型GPS火山変動リモート観測装置の発電効率の向上を図るとともに、GPS以外のデータを含めた複合的な観測に向けて改良に努めた。

ウ. 大深度ボアホール計測技術

大学は、レーザー干渉型広帯域地震計や傾斜計の開発を行った。また、3km 以深でも地殻応力測定が可能な装置を開発し、試験観測に成功した。神岡鉱山（岐阜県）や野島断層（兵庫県）のボアホールで間隙水圧の連続観測を継続し、その大気圧応答、理論地球潮汐や地震波に対する応答を詳しく解析した。

防災科学技術研究所は、地下深部の高温環境下で安定動作する地震計、傾斜計、強震計の開発と試験観測を進めた。

う. 成果

（１）海底における観測技術の開発と高度化

ア. 海底地殻変動観測技術

海底測位や上下変動連続観測において、海洋変動や水中音速の影響を除くための数値シミュレーションや海底局の最適配置、音響送受波器の取付位置の改良を取り入れることが有用であることを示した。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による海底地殻変動を計測するため、7観測点で緊急観測を行い、最大31m にも及ぶ大規模な変位を捉え、滑り分布の推定に重要な貢献をした。

イ. 海底地震観測技術

加速度計を含む多項目センサーを備える海底地震計を茨城沖に展開して観測中に、平成 20 年 5 月にその直下で M7.0 の地震が発生し、前震－本震－余震に至る一連の地震活動を、広帯域で観測することに成功した。また、広帯域海底地震計に搭載した高精度水圧計のデータにより、2010 年 2 月 27 日のチリ地震（M8.8）の津波波形を捉えた。

ウ. 海底実時間システム

地震・津波観測監視システム（DONET）の実用化に目途がたった。次世代ケーブル式海底観測システムを新潟県栗島の近海に設置し、データを準リアルタイムで転送できるようになった。

（２）宇宙技術等の利用の高度化

ア. 宇宙測地技術

2008 年岩手・宮城内陸地震に適用した GPS 時系列データから地震時永久変位を自動的に検出する手法を、2011 年東北地方太平洋沖地震時の 1 秒サンプリング GPS データに対して適用した結果、地震発生から約 240 秒後に地震の規模が M8.7 という推定が可能であったとの結果を得ており、津波警報システムなどへの応用が期待される。また、精密単独測位法では波数不確定性の補正法が取り入れられ、測定精度が向上できることを示した。

ピクセルオフセット解析や InSAR 時系列解析、ScanSAR データによる解析により、2008 年四川地震、2008 年岩手・宮城内陸地震、2011 年東北地方太平洋沖地震などの多くの大地震による広域な地殻変動や火山性地殻変動をとらえた。

イ. リモートセンシング技術

火山地域などにおいて産業用小型無人ヘリコプターが計測器の設置や回収に有用であることを示した。また、衛星や航空機による赤外面像により熱異常や噴煙、火山ガス濃度の時空間分布の観測が可能になり、火山活動の評価に役立った。

(3) 観測技術の継続的高度化

ア. 地下状態モニタリング技術

ミュオン観測によって火山の火道形状が推定されつつあり、絶対重力連続観測等との並行観測が火山のモニタリングに有用であることが示された。

マントル起源の揮発性物質であるヘリウムガスの浸出量を四国地方の中央構造線やトルコ・アナトリア断層において調査した結果、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ が構造線上で高いことがわかった。

イ. 地震活動や噴火活動の活発な地域における観測技術

本計画で開発された小型絶対重力計では、約 $2\ \mu\text{gal}$ の再現性が得られた。携帯電話や衛星テレメータシステムを使った観測ネットワーク技術の開発をおこなった。

ウ. 大深度ボアホール計測技術

レーザー干渉型広帯域地震計を既存の広帯域地震計 (STS 1 型) と比較した結果、二つの地震計は 4mHz 以上の帯域では同等の性能を有することがわかった。

え. 今後の展望

2011 年東北地方太平洋沖地震では、日本海溝近傍のプレート境界浅部で数十 m に達する非常に大きな滑りがあったことが、多項目のデータから示唆されている。このような海域で発生する地震時滑りや地震間の定常的な地殻変動などの諸現象を陸域の観測網から高精度で捉えることは限界があり、海底観測技術の重要性を改めて示唆するとともに、その高度化は今後も進展させる必要がある。GPS-A では、データ取得率を高めるために、複数の機関で音響信号の互換性を持たせる改良が求められる。

一方、2011 年霧島山 (新燃岳) 噴火に対しては、SAR データ解析等による火口内の溶岩蓄積過程や気象レーダを用いた噴煙・火山ガスの検知や予測システム、無人ヘリを用いた観測方法の確立など新たな観測技術が結実した一面もあるが、より詳細な火山活動状態を把握するためのセンサーやモニタリング技術などの高度化に加え、危険地帯における安全な観測方法とネットワーク技術の確立が期待される。

(1) 海底における観測技術の開発と高度化

海底観測技術の高度化を今後も進展させるためには、ノイズ除去等による観測精度の向上に加えて、オフライン海底多点観測によるコスト効率化や、詳細な時間変化を捉えるためのオンライン連続観測技術の開発も引き続き重要である。

自己浮上式海底地震計や海底圧力計、GPS-A に用いるオフライン海底局については、重要なデータを喪失しないために、観測機器の頑強性を高めなければならない。例えば、GPS-A 海底局により海溝近傍での観測を実施するためには、 $6,000\ \text{m}$ 以深の高圧下において長期間安定して観測できるシステムの構築が必要となる。海底局は内蔵電池消耗のため 7-8 年おきに交換作業が必要となるが、データの継続性をどのように維持するかが重要となる。また、今回のような超巨大地震による海底局近傍の局所的な変動の影響を確認できるようにして、信頼性の向上に努める必要がある。海底圧力計による海底上下変動観測については、センサーの長期的ドリフトを低減させ、より高精度化をはかる必要がある。

海底実時間システムについては、広帯域地震計を組み込むこと、長期間安定して稼働することや、可能な限り高密度にセンサーを配置することを考慮したシステムの開発を今後も継続することが重要である。

(2) 宇宙技術等の利用の高度化

ア. 宇宙測地技術

宇宙技術は、地震や火山活動にともなう諸現象をモニターするのに極めて有効であることが実証されており、今後も解析技術の高度化が必要である。GPS のリアルタイム解析に基づく地震断層モデルの推定について基礎的研究が進み、今後は地震時永久変位を自動的に検出する手法を高度化させ、津波予測システムの実用化へ向けた努力が必要である。併せてデータ解析の高精度化を図り、予測精度向上を目指すことが重要である。

GPS や SAR 等のマイクロ波に基づく宇宙測地技術においては、大気中の水蒸気による電波伝搬遅延の影響を低減する必要がある。数値気象モデルに基づく補正法などの高度化が引き続き望まれる。SAR においては数百 km の空間スケールにおける経年的な地殻変動やその時系列変化等を捉える解析手法の高度化や開発が期待される。

我が国の陸域観測技術衛星「だいち」は、国内外の多くの地震や火山活動に伴う地殻変動現象を捉え、多大な貢献をしてきたが、現在は運用期間を終えており、次の陸域観測技術衛星が運用を開始した暁には、引き続き同様の解析を継続するとともに、さらなる高精度化に向けて研究を継続できるように準備しておかなければならない。

(3) 観測技術の継続的高度化

能動的精密制御震源を用いた研究については、長期間の運用などについて実績を積んでいるが、今後も解析手法の高度化などを通じて有用な情報の抽出に努める。

ミュオン透過撮像による地下構造探査については、地震波トモグラフィーなどの結果との比較を行うなどにより信頼性の評価を行うと共に、時間変化の把握も目指して手法の開発などをすすめることが重要である。

開発が進められている小型絶対重力計については、既存の絶対重力計と同等の高い精度を有することが確認され、今後は実用化に向けた取り組みが求められる。

光技術を用いた広帯域地震計や傾斜計については、レーザー技術を応用することにより、高精度・高安定性を目指した取り組みが重要である。また、大深度ボアホールや火山地域での応用を実現するため、高温下でも高い信頼性を有する計測手法の確立が引き続き重要である。

4. 計画推進のための体制の強化

4. 1. 実施状況及び成果

(1) 計画を推進する体制の強化

(観測研究計画推進委員会の充実及び関係機関の役割の明確化)

地震災害と火山災害は、共に海洋プレートが日本列島下に沈み込む我が国の地学的な立地による、地下での力学的・化学的不安定がもたらす災禍であり、共通の科学的理解のもとに両者の防災・減災を目指した研究を推進することが合理的である。そのため、平成 21 年度にこれまで別々に推進されてきた地震予知研究計画と火山噴火予知研究計画を統合し、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」とした。この研究計画の策定に伴い、科学技術学術審議会測地分科会に設置されていた地震部会と火山部会を、平成 21 年に統合して地震火山部会とした。測地分科会地震部会観測研究計画推進委員会は、「地震予知のための新たな観測研究計画（第 1 次）」を関係各機関が協力して推進するために、平成 16 年度に設置されていた。その役割を引き継ぐとともに、地震予知研究だけでなく火山噴火予知研究についても推進するため、測地分科会地震火山部会の下に観測研究計画推進委員会を設置し、その機能を強化した。観測研究計画推進委員会では、関係各機関が実施した地震及び火山噴火予知のため観測研究の成果を把握し、評価するため、年度ごとに報告書「年次報告（機関別）」を取りまとめている。また、各年度の研究成果の概要を、専門家以外にも理解しやすくまとめた「年次報告（成果の概要）」を作成している。更に、毎年度末には関係各機関が参加する成果報

告シンポジウムを公開で開催し、各機関の研究成果に関する情報交換や研究協力体制について議論し、成果を広く公開している。

地震・火山現象を理解し予測するためには、長期にわたり高品位の観測データを継続して取得することが不可欠である。そのため、基盤的な地震観測網、測地観測網を管理する防災科学技術研究所及び国土地理院においては、それぞれの観測網を安定的に運用し、観測データを確実に長期間にわたって保管するとともに、全国の研究者に広くデータを公開するシステムを維持している。また、海上保安庁では、海底地殻変動、潮位等の観測を継続的に実施し、海域火山の目視調査及び航空磁気測量等の監視を定期的に行い、測量船による海域火山基礎情報図整備のための調査を実施した。更に、気象庁においては、地震・火山等に関する防災情報を発表するために整備した観測施設のデータを大学や研究機関と共有するとともに、震源等の処理結果を研究にも利用できるような情報の公開を進めた。また、大学等の研究機関で得られた研究成果を防災情報に生かす努力を継続して行った。

地震予知連絡会については、地震活動・地殻変動等に関するモニタリング結果を中心とした情報交換を3ヶ月毎に行ない、日々変化する地殻活動について、関係各機関の情報の共有を行っている。に、特に注目すべき地震や、モニタリング手法の高度化など地震予知研究にとって重要な現象や問題等を「重点検討課題」として選定し、集中的な検討を行なうよう議事運営を変更した。最近は、プレート境界地震に関する課題を中心に検討を行っている。

（地震調査研究推進本部が策定する新しい総合的かつ基本的な施策への反映）

地震調査研究推進本部は「新たな地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策―」（平成21年4月21日）を策定し、その『第2章 基本理念と「新たな地震調査研究の推進について」の位置づけ』の『2.「新たな地震調査研究の推進について」の位置づけ』の中で、『(2)「地震及び火山噴火予知のための観測研究について」（建議）との関係』という節を設け、本計画と地震調査研究推進本部の行う施策との関連を明記している。それによると、本研究は「研究者の自由な発想に基づいた議論の上で策定された学術的な観測研究計画である。」とし、地震調査推進本部が行う「新総合基本施策は、地震防災・減災の実現に資するため、政府として推進すべき地震調査研究の基本を定めた戦略的な計画であり、ここで示す基本目標の達成に向けては、建議に基づく基礎的研究の成果を取り入れて推進していくことが必要である。」としている。これは本研究計画と新総合基本施策は、国民の地震防災・減災のため、互いに補完するもので、共に推進すべきものであるとしている。これは本計画の目的、内容および方向とも合致している。

（火山観測網の整備と火山観測研究の充実、火山噴火予知連絡会の機能強化）

国民の火山災害リスクを軽減するため、火山噴火予知連絡会では定期的に全国の火山活動に関する評価を行っている。また、火山噴火予知連絡会の下に伊豆部会、火山活動評価検討会、火山地域における噴気等調査検討会、火山観測体制等に関する検討会を設置し、それぞれの課題について検討を進めている。火山活動評価検討会、火山観測体制等に関する検討会では、中長期的な観点から火山活動の監視を強化すべき火山として47火山を選定し、気象庁は火山活動の監視を、大学および研究機関は火山噴火予知研究を推進するという役割分担を明確にし、互いに協力して火山観測体制を充実することについて平成21年2月に基本的な考え方を取りまとめた。更に、衛星解析グループ、コア解析グループを設置して、衛星データの火山監視への活用や火山地域におけるボーリングコアの解析を実施した。

気象庁は、火山噴火予知連絡会の提言を受け、平成21年度補正予算等により、火山観測体制の充実が必要な47火山に、ボアホール式地震計・傾斜計、及びGPS、空振計、遠望観測装置等の火山観測施設を整備した。地震計等の観測データについては、大学等への提供をおこなっている。また、平成21～22年度に火山監視・情報センターのシステム、観測機器を強化した。

科学技術・学術審議会測地学分科会火山部会では、平成 20 年、今後の大学等における火山観測研究の当面の進め方について取りまとめた。これを踏まえ、防災科学技術研究所では、火山研究と火山防災のため、有珠山や岩手山、浅間山、阿蘇山、霧島山の活動的な 5 火山を対象とした基盤的火山観測施設を整備し、収集したデータを火山活動の監視を行う気象庁と火山噴火予知研究を行う全国の研究者に提供し始め、そのデータの保管および公開を行っている。

(2) 基礎的な観測研究体制の強化

気象庁は、東海地域の地殻活動の状況について、地震防災対策強化地域判定会を毎月開催して検討を行った。その調査結果については、平成 23 年 4 月から東海地震に関連する調査情報として発表、広く社会に周知した。また、本計画で得られた最新の知見を地震予知業務に取り入れるべく、平成 22 年度に東海地震の予知手法に関する勉強会を開催した。また、平成 21 年 8 月の駿河湾の地震 (M6.5) が発生した際に気象庁は、「東海地震観測情報」を発表したが、住民等に情報について誤解があることが判明したため、アンケート調査結果等をもとに、より理解されやすいように東海地震に関する情報の名称等の修正を行った。

気象庁では、地震・津波・火山に関する警報・情報等の迅速な発表を行うとともに、詳細な解析結果などについても報道発表やホームページへの掲載などによる公表を行っている。

本計画で現象が解明されたマグマの貫入により発生する伊豆東部の群発地震活動について、地震調査研究推進本部地震調査委員会では、その規模、継続期間などをマグマの貫入に伴う地殻変動の観測データをもとに予測する手法を取りまとめた。気象庁は、この成果をもとにこの地域における地震活動に関する予測情報の運用を開始した。また、群発地震がマグマの貫入により火山活動と連動することから、この地域における噴火警戒レベルの運用も同時に開始した。

東京大学地震研究所は、平成 21 年度に文部科学大臣から「地震・火山科学の共同利用・研究拠点」と認定された。これにより、関係各機関、全国の大学が連携して本計画を推進する上で極めて効果的に機能している。例えば、東京大学地震研究所は、全国の 12 国立大学と 2 私立大学の 15 部局と「地震及び火山噴火予知に関する共同研究」の協定書を締結して共同研究契約を結び、それに基づき他大学への研究経費の配分を行っている。また、本計画を一層推進することを念頭に入れて、東京大学地震研究所は平成 22 年度に組織の一部を改変した。本計画の企画・立案を担う地震火山噴火予知研究推進センター、全国の大学が連携して実施する観測基盤を担う観測開発基盤センター、全国の大学の観測データやデータベースを管理する地震火山情報センターの 3 センターのサイエンスマネジメントセンターとして設置・改変した。また、地震予知研究、火山噴火予知研究を行う地震予知研究センター、火山噴火予知研究センターを含め、5 センターで本計画を推進している。

京都大学防災研究所は、平成 21 年度に文部科学大臣から「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」として認定を受け、同研究所の共同利用制度を活用して、全国の大学や研究機関と連携を強化した自然災害及び防災に関連する全国の大学・研究機関が連携した共同研究を推進している。この中で、地震及び火山研究に関する共同研究を推進している。

地震及び火山の防災・減災研究の推進のための他分野との連携の取り組みも行われた。東京大学では、文理融合型の総合的な防災研究機関と流動的教員ポストを利用した人事交流を行った。また、名古屋大学では、地震・火山研究分野と地震工学、構造工学、海岸工学、津波工学、医学の研究分野が連携し、減災研究に取り組むセンターの設置が行われた。

(3) 計画を推進するための予算的措置

全国の大学が実施する地震及び火山噴火予知のための観測研究を推進するための経費は、これまで個々の大学が個別に要求していたが、平成 21 年度より、共同利用・共同研究拠点である東京大学地震研究所がまとめて文部科学省から配分を受けている。大学が実施する本計画の共同研究の運営は、地震・火山噴火予知研究協議会（以下、「予知協議会」）の場で審議され、研究計画、研究費の配分について決定している。この決定と共同研究契約に基づき、本計画にかかる研究経費は、地

震研究所から各大学に再配分される。このような仕組みにより、大学の運営費交付金が毎年削減されるという極めて厳しい環境の下にあっても、年度ごとに強化する研究分野や研究課題を計画的に調整し、本研究計画を効率的に推進する努力を最大限行っている。

(4) 人材確保、特に若手研究者の育成

各大学は、地震及び火山研究分野の学部学生、大学院生の教育に力を入れるとともに、大学院生の研究環境の問題について組織的な検討を始めた。全国地震・火山分野の大学院生数の推移や、学位取得後の若手研究者（ポスドク）のキャリアパスを全国的な視点から検討するため、予知協議会に人材育成ワーキンググループを設置し、現状の把握、制度の問題点、その解決の方策等について報告書にまとめ、ホームページで公開している。

各大学、研究機関では、グローバルCOE制度、各省庁からの委託研究等の経費から、研究員の雇用を行い、若手研究者のポストの確保に努力した。また、各大学では、総長裁量の定員再配分制度等を積極的に利用し、人材の確保に努めている。

(5) 国際共同研究・国際協力の推進

大学では、外国の研究機関と地震及び火山に関する共同研究を実施し、地震・火山研究の推進を行った。東京大学地震研究所では、国際地震・火山研究推進室で毎年10～20名の外国人研究者を招聘している。招聘した研究者数は2007年度12名、2008年度20名、2009年度11名、2010年度15名であり、研究活動の国際化に役立てている。また、長期にわたって地震・火山・地球科学の国際共同研究を行うため、米国南カルフォルニア地震センターとの地震発生予測に関する共同研究をはじめとする海外7研究機関との研究協定を結んでいる。北海道大学では、極東ロシアの複数の研究機関との共同研究を進めている。東京大学理学研究科ではフランクフルト大学、ストラスブール大学との共同研究、京都大学防災研究所では台湾・中国との大地震発生に関する共同研究、ニュージーランドとの地震研究の共同研究、協定に基づくインドネシアと火山研究などの共同研究が進められている。

また、JICAと建築研究所が実施する国際地震学研修、JICAと砂防地滑りセンターが実施する火山砂防研修へ講師派遣、研修生の受け入れを行うと同時に、名古屋大学ではJICAと「地震・津波・火山観測システム」を実施し、開発途上国からの研修生の研修を行っている。平成21年度からは地球規模課題対応国際共同研究「インドネシアにおける地震火山の防災策」や「フィリピン地震火山監視能力強化と防災情報の利活用推進」は、本研究との連携で推進されている。

防災科学技術研究所では、国際的な共同研究や開発途上国への研究支援や国際ワークショップを開催した。また、アジアおよび太平洋における地震観測網を整備するとともに、エクアドルとの火山観測研究に関する国際協力を実施した。

海洋開発機構では、台湾気象庁やイタリア地球物理学・火山学研究所と海底ケーブル観測システムに関する国際協力を実施した。また、国際共同研究である統合国際深海掘削計画（IODP）については、日本国内において「南海トラフ地震発生帯掘削計画」等を主導的に実施した。

産業技術総合研究所は、環太平洋地域・国の地震・火山噴火リスクの周知と被害軽減のために、平成23年度末に約10カ国から20名の研究者を招待して第1回アジア太平洋大規模地震・火山噴火リスク対策ワークショップを日本で開催する。米国地質調査所、中国地質調査局、韓国地質資源研究所、ニュージーランド地質・核科学研究所、トルコ鉱物資源調査開発総局、台湾成功大学等との共同研究契約の締結または締結準備中である。

気象庁は、国際地震センター（ISC）、米国地質調査所（USGS）、包括的核実験禁止条約機構（CTBT）、米国大学間地震学研究連合（IRIS）及び韓国との地震観測データの交換を継続した。また、北西太平洋津波情報センター及びインド洋津波監視情報関連の業務を引き続き行なった。更に、東京航空路火山灰情報センターでは、諸外国に担当地域（日本国内および北西太平洋、カムチャッカ半島）の火山で噴火が発生した際などに、航空路火山灰情報を発表するなどの国際的な責務を果たしてい

る。

国土地理院は、国際 GNSS 事業（IGS）に参加し、IGS 観測局を運用し、データを IGS データセンターへ提供することにより、プレート運動や地殻変動の高精度の観測に必要な GPS 衛星の精密軌道の決定に貢献した。また、国際 VLBI 事業に参加し、VLBI 国際共同観測を実施し、地殻変動やプレート運動の基準となる ITRF 座標系の構築に貢献した。また、次世代 VLBI 観測システム（VLBI2010）整備に向けた調査を実施した。

海上保安庁では、国際レーザー測距事業（ILRS）に引き続き参加し、レーザー測距データの情報共有を行った。

（6）研究成果の社会への還元

気象庁は、東海地域の地殻活動の状況について、地震防災対策強化地域判定会を毎月開催して検討を行った。その調査結果については、平成 23 年 4 月から東海地震に関連する調査情報として発表、広く社会に周知した。また、本計画で得られた最新の知見を地震予知業務に取り入れるべく、平成 22 年度に東海地震の予知手法に関する勉強会を開催した。また、平成 21 年 8 月の駿河湾の地震（M6.5）が発生した際に気象庁は、「東海地震観測情報」を発表したが、住民等に情報について誤解があることが判明したため、アンケート調査結果等をもとにより理解されやすいように東海地震に関する情報の名称等の修正を行った。

気象庁は噴火警戒レベルの発表を平成 19 年度から順次開始し、平成 22 年度末現在では全国 29 火山に導入している。これは、これまでの火山噴火活動の情報発表から一歩前進し、地元自治体等の防災対応に結びついた情報であり、より火山防災に役立つ内容となっている。噴火警戒レベルの導入にあたっては、本計画で解明された火山噴火現象に関する知見や本計画の成果である噴火シナリオも参考にしている。また、本計画の成果を活用して作成される火山活動解説資料、週間火山概況等で、平常時から定期的に火山の状況について、観測・監視の結果を公表し、関係自治体等へ火山に関する解説を実施している。さらに、火山活動が活発化した場合は、随時、噴火警報や火山の状況に関する解説情報等を発表し、防災のための情報提供を行っている。

本計画で現象が解明されたマグマの貫入により発生する伊豆東部の群発地震活動について、地震調査研究推進本部地震調査委員会では、その規模、継続期間などをマグマの貫入に伴う地殻変動の観測データをもとに予測する手法をとりまとめた。気象庁は、この成果をもとにこの地域における地震活動に関する予測情報の運用を開始した。また、群発地震がマグマの貫入により火山活動と連動することから、この地域における噴火警戒レベルの運用も同時に開始した。さらに、静岡県危機管理部では、本計画で作成された伊豆東部火山群の噴火シナリオを参考にして、この地域の火山防災計画を立案している。

研究成果の社会還元は、どのような研究分野においても重要であるため、大学及び各研究機関は、それぞれの研究成果を、講演会、公開講義、ホームページで積極的に公開している。また、観測施設を持つ大学では、観測施設の立地する地域の中学校や高校への出前授業や、スーパーサイエンススクール事業への協力を行い、地球の動きと地震・火山活動という科学的な知識だけでなく、地震防災・火山防災に関する知識の普及も行っている。国民の安心安全に資する研究を目指している本計画では、研究成果の社会還元への重要性は高く、国、地方自治体の防災対策委員会へ委員を派遣し防災対策の策定に協力する他、講演会活動等で地元住民への研究成果の還元を積極的に行っている。北海道大学では地域防災情報支援室を設置し、研究成果を積極的に地元へ還元することを目指している。東京大学地震研究所では、広報アウトリーチ室を設置して専任教員を配置し、一般向けの広報活動のほかに報道関係者向けの広報活動も実施している。名古屋大学では、理学・工学・人文・社会科学の研究者が連携して、地域の地震等の災害軽減に貢献する組織として減災連携研究センターを設置した。防災科学技術研究所では、ホームページを通して全国民に対して地震基盤観測網の解析結果を迅速に公開している。産業技術総合研究所では、地元自治体からの研修生の受け入

れ等を行っている。国土地理院は、GEONET等の地殻変動データや津波浸水範囲概況図等の観測結果
の他、震源断層モデル等の解析結果を、ホームページを通して社会へ発信している。気象庁では、
地震・津波・火山に関する警報・情報等の迅速な発表を行うとともに、詳細な解析結果などについ
ても報道発表やホームページへの掲載などによる公表を行っている。

4. 2. 今後の展望

(1) 計画を推進する体制の整備

(地震調査研究推進本部が策定する新しい総合的かつ基本的な施策への反映)

今後とも、本計画と地震調査研究推進本部及び地震予知連絡会の相互の役割分担及び連携を強め
る必要がある。地震調査研究推進本部の新たな基本施策の中で、本計画の位置づけ、地震調査研究
推進本部と本計画の役割分担は、本計画の主旨に合致した内容で明確に規定されている。地震調査
研究推進本部の基盤的調査観測計画によるデータは、これからも本計画を推進する上で必要不可欠
なものであり、特に、今後は海域における充実を切に期待する。また、本計画の成果が、推進本部
が行う施策等の立案に際して積極的に活用されることを期待する。

(火山観測網の整備と火山観測研究の充実、火山噴火予知連絡会の機能強化)

気象庁は平成21年度補正予算等により、47火山に火山観測施設を整備したが、このうち44火山
については、新たに設置した高精度観測点は1点しか配置されていない。火山防災の高度化と火山
噴火予知研究の推進のためには、ひとつの火山に高精度な観測点が数点程度必要であり、今後の火
山噴火予知連絡会の火山活動評価検討会等の意見を参考に、大学や研究機関と連携して一層の観測
体制の整備を期待する。防災科学技術研究所では、火山研究と火山防災のため5火山に基盤的火山
観測施設を整備したが、火山噴火予知研究と火山防災の高度化のためには一層の観測体制の充実が
必要である。国立大学の法人化以降、予算面や人員面で厳しい状態が続き、大学の観測設備は老朽
化が進んでいる。大学の観測点の一部は火口近傍等に設置され、研究と防災の両面で極めて重要な
役割を果たしており、観測設備の維持・更新、及び充実が急務である。更に、噴火時の臨時的・機
動的な観測を実施できる設備や人員の配置も望まれる。関係機関が連携して火山観測体制の整備を
進めることを期待する。

火山噴火予知連絡会は火山噴火予知研究に対して関連機関の役割分担の調整や、関連機関の協力
体制の構築の役割を果たしている。これは、地震調査研究推進本部が地震予知研究に果たしている
役割に匹敵する極めて重要な機能である。また、関連機関の研究者が観測データを持ち寄り、火山
活動に関する評価を検討する場として社会的意義が大きい。当面、機能強化し、火山噴火予知研究
と火山防災対策を一層推進することを期待するが、気象庁長官の私的諮問機関であり、予算機能も
有しない現状はあまりにも位置づけが脆弱である。早急に、国として責任の持てる機関として組み
替えるなどの抜本的対応が必要である。

(2) 基礎的な研究体制の強化

本研究計画のうち、全国の大学が連携して行う研究については、共同利用・共同研究拠点である
東京大学地震研究所に設置された予知協議会が主導して実施している。東京大学地震研究所が3つ
のサイエンスマネジメントセンターを設置したことにより、全国の大学間の連携を一層緊密にし
て、研究活力の向上を目指している。地震火山噴火予知研究推進センターは、予知協議会企画部を
担い、大学の地震・火山噴火予知研究の企画・立案、及び研究成果の把握に大きく貢献している。
今後は、全国連携の観測研究の推進を観測開発基盤センターが、全国のデータ処理システムの統合
やデータ流通・データベースの構築を地震火山情報センターが担うことが期待される。また各大学
における部局附属の研究センター等においても、それぞれ特色を持った研究組織として、連携して
研究を進めることが期待される。

1 (3) 計画を実施するための予算措置

2 防災科学技術研究所が運営する Hi-net、F-net、K-net、KIK-net の地震基盤観測網、国土地理院
3 が運用する GEONET は、本計画の推進に極めて重要であるので、機器の維持、更新が遅滞なく行われ
4 るよう予算措置がはかられるよう期待する。

5 また、東北地方太平洋沖地震の発生でこの計画の中で不足していたことが明らかになったプレー
6 ト沈み込み機構の解明や、周辺を海に囲まれた火山島にある火山の研究を推し進めるためには海域
7 における地震・地殻変動の観測が不可欠である。海域における地震・地殻変動観測施設を整備・維
8 持するための予算の確保も極めて重要である。

9 2006 年に運用を開始した陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) は耐用年限が経過し、2011 年にそ
10 の機能を停止した。これまで、この衛星によって得られたデータは、地震・火山防災及び地震・火
11 山噴火予知研究に大いに活用されてきた。早急に新たな地球観測衛星の運用が開始され、今後も衛
12 星が継続して打ち上げられるよう予算措置がはかられることを期待する。

13 これまで個々の大学で要求していた地震・火山噴火予知研究経費を、共同利用・共同研究拠点で
14 ある東京大学地震研究所で一本化して予算要求することになったことにより、年度ごとに研究費を
15 重点配分する研究課題を調整することができ、これまでは単独の大学・機関では実施が困難であっ
16 た大型研究が実施できるようになった。例えば、平成 21 年度に海陸合同で実施した伊豆大島近海の
17 構造探査、平成 22 年度に跡津川断層(岐阜県)近傍での集中総合観測と海底観測を主体とした沈み
18 込み帯におけるアスペリティ実態解明研究、平成 23 年度に別府一島原地溝帯(九州北部)構造探査
19 を実施するなど、単独の大学の研究経費、人材で実施することは不可能であり、全国連携で研究を
20 推進する体制が取れるようになった利点が表れている。更に、東北地方太平洋沖地震の発生後、地
21 震・火山噴火予知経費の一部を充てて、科学研究費補助金(特別研究促進費)だけでは実施できな
22 かった内陸で誘発された地震に関する緊急研究を開始することができた。このように、柔軟かつ臨
23 機応変に研究計画に対応できる予算システムは、本研究を推進する上で極めて有効であり、今後も
24 継続すべきである。

25 一方、規模の小さな大学の部局附置の観測センターでは、観測機器の老朽化の対応に苦慮してい
26 る。これは、地震・火山噴火予知研究経費に設備費が含まれていないため、これを各大学の設備更
27 新には使えないことによる。また、規模の小さな大学では、大学全体の設備費の総額が少ないため、
28 その大学の経費で本研究の推進に必要な設備の導入に困難であるからである。これらの大学組織で
29 あっても、老朽化した観測機器の更新が可能な予算措置を期待する。

30 (4) 人材の確保、特に若手研究者の養成

31 大学においては、大学院生の教育など人材育成が積極的に行われているが、地震・火山研究分野
32 の大学院生の数は長期的に減少する傾向にある。また、大学院を修了した若い研究者が、なかなか
33 パーマネント職に就けないと言う問題もある。予知協議会では、このような若手研究者の養成に関
34 する問題を検討するワーキンググループを設立し、現状の把握と問題点の分析を行った。その結果、
35 大学院生の減少は、若手研究者の就職が難しいことを身近で見ている学生が、進学することに躊躇
36 することに起因し、若手研究者の就職問題と密接に関係している。また、若手研究者が就職する際
37 に、研究者になることに強く望むのに対して、研究者のポストが増えないということが問題の根源
38 にあることが示された。これは他の研究分野でも共通の問題である。問題の解決には、研究者のポ
39 ストを増やす努力をすることは勿論であるが、一方で社会のより広い分野へ積極的に人材を送り出
40 す努力と、大学院修了者を有期雇用研究者として雇う場合にも人材育成の観点から職務専念義務を
41 弾力的に運用し、若手研究者に自由な研究の機会を与え、研究活動を支援することを推し進める必
42 要がある。

43 (5) 国際共同研究・国際協力の推進

44 個々の研究機関で地震及び火山研究に関する共同研究、国際協力は進んでいるが、研究機関を越

1 えて日本の地震及び火山研究コミュニティーとしての組織的な連携・協力という観点では、より積
2 極的な取り組みが求められる。特に、大学等で行われている国際共同研究の多くは、研究者間の個
3 人的なつながりで行われており、その研究者が異動するか退職すると、共同研究も途絶えることが
4 多い。協力関係の構築に長年の努力に費やされてきたことを考えると、国家的な損失であると言え
5 る。研究コミュニティー全体が協力し、長期的な国際共同研究や国際協力を推進する仕組みと、そ
6 れを支援する仕組みの確立が急がれる。

7 (6) 研究成果の社会への還元

8 大学や研究機関では、ホームページや、一般向け講演会、中学生や高校生への出前授業等により、
9 研究成果の発信を積極的に行っている。また、気象庁も地震や火山の防災情報について、広く国民
10 に周知させる努力を行っている。火山防災情報に関して、気象庁は噴火警戒レベルの導入など、情
11 報の質的向上に努力している。これにより、地元自治体の対応が明確に示されるため、実用的な情
12 報となった。しかしながら、東北地方太平洋沖地震で大きな被害を生じた要因として、地震・津波
13 予測の限界を社会に周知できていなかった事を考慮すると、各関係機関は防災に関する専門家と連
14 携し、住民や行政機関と向き合い、一層のアウトリーチ活動を推進する必要がある。さらに、日本
15 の地震及び火山研究集団として、地震・火山防災対策への提言も含めた活動を行なっていくことも
16 重要であろう。