

3 新たな観測技術の開発

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

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

(1) 海底における観測技術の開発と高度化

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

ア. 海底地殻変動観測技術

海底に設置した機器間での音響測距によって距離の伸縮を捉える観測方式（いわゆる海底-海底間測距方式）の開発について、従来は水深 2000~3000m の海底で 2km 程度までの距離を測定することは可能であったところ、日本海溝等での観測を可能にするため、水深 6000m の海底で 3000m の距離が測定できる大深度・長基線対応型の海底間音響測距装置の開発と動作試験を行った（東北大学 [課題番号: 1222]）。耐圧容器は 9000m 用を用いることとした。測距信号は長距離で波形歪の少ないステップスイープに改め、ミラー応答の増幅率のバグを修正するとともに、返信を自動認識しなくても波形を収録する方式とした。動作試験は、2013年2月11日~21日にかけての「かいいい」による航海（KR13-04）で

実施した。2台の音響測距装置を水深 6000m の海域に基線長 3000m で設置した。自由落下によって海底に設置された装置を海洋研究開発機構の遠隔操作無人探査機「かいこう」で位置を調整し、目標地点に設置した。動作試験の後には、音響測距装置をアンカから切り離し、回収を行った。今回は短期間での動作試験であったが、2013年5月からは半年～1年の連続観測を実施する予定である。

海底圧力計については、東北地方太平洋沖地震で大きなすべりがあった海溝軸付近（JFAST 掘削孔近傍）の水深 6900m の海底で試験観測を行った（東北大学〔課題番号：1222〕）。試験観測の結果、大深度用にセンサーのフルスケールを大きくするとドリフトも大きくなることが判明し、この対策・補正が今後の課題である。

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

機動的な海底地殻変動観測の実現のための開発として、海底絶対圧センサーによる機動的な海底地震・圧力同時観測の技術開発と、海底での傾斜観測を機動的観測として実現するための先端的技術開発を引き続き実施した（東大地震研〔課題番号：1431〕）。前者については、近年開発したOBS専用高機能レコーダーと連携して動作可能な高精度圧力計レコーダーを完成させると共に、広帯域海底地震計（BBOBS）と圧力計を併せもったシステム（BBOBS+AGP）を紀伊水道沖・東北沖・ニュージーランド北東沿岸に展開し実用的観測に供した。後者については、レーザー光源の小型傾斜計を地震研究所内で共同開発しつつあり、オフラインの機動観測に適合する改良を継続し検討している。それに加え、課題番号1432にある次世代型広帯域海底地震計（BBOBS-NX）の広帯域地震センサーのマスポジション出力から傾斜変動を検出するシステム（BBOBST-NX）について、昨年引き続き海域での実地試験を行った。2012年11月に海洋開発研究機構の無人潜水艇「かいこう7000II」

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

イ. 海底地震観測技術

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

ウ. 海底実時間システム

相模湾初島沖観測ステーション、海底地震観測総合システム、豊橋沖ケーブル先端に接続した海底観測ステーションの運用を継続し、平成24年12月7日に発生した三陸沖を震源とするM7.3の地震による微小津波を釧路・十勝沖の海底地震観測総合システムの水圧式津波計で観測することができた。波高に換算すると1cm以下の微小津波であるが、高精度の観測が実施できた（海洋研究開発機構 [課題番号：4005]）。DONETについては、そのデータを用いた緊急地震速報や津波警報の高度化に資する即時解析研究や、プレート境界浅部での低周波微動やゆっくり滑りをはじめとする南海トラフ地震発生帯研究を実施した。また、DONET2について、事前調査航海として、和歌山県西方沖の音響測深機による海底地形調査、曳航体による海底ケーブル敷設予定ルートへのルートサーベイ、及び観測機器設置予定点においてピストンコアによる採泥調査を実施した。これらの調査結果から、海底ケーブル敷

設ルートと観測点構築位置の決定を行った。なお、陸上局設置予定地では海底ケーブルの陸揚げに関する工事を実施している（海洋研究開発機構〔課題番号：4005〕）。

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

(2) 宇宙測地技術等の利用の高度化

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

ア. 宇宙測地技術

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

GEONETによる地殻変動監視において、小スケールの大気擾乱による測位誤差のため地殻変動を速やかに把握できない場合があり、このような大気擾乱の影響を評価するための手

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

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

イ. リモートセンシング

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

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

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

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

(3) 観測技術の継続的高度化

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

ア. 地下状態モニタリング技術

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

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

イ. 地震活動や噴火活動の活発な地域における観測技術

小型絶対重力計については、プロトタイプの性能評価を継続するとともに、実用機の製作および試験を実施した（東大地震研 [課題番号：1439]）。プロトタイプの性能評価は、国立天文台江刺地球潮汐観測施設（岩手県奥州市）において実施した。その結果、 $5 \mu \text{gal}$ 程度以内の系統誤差で測定可能なことが示された。また、東北地方太平洋沖地震時に重力

が低下し、その後に回復するような観測値が得られた（図9）。この重力変動の原因は不明であるが、計測誤差を越える変化があったことは確かである。製作が遅れていた小型絶対重力計が完成した。干渉計入射部分のユニット化と光ファイバーコネクタ接続、および落下装置の小型化により市販の絶対重力計の約半分の高さの装置となった。試験観測の結果、図10のように理論潮汐と整合的なデータが得られ、観測精度は従来の試作絶対重力計と同等と推測された。

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

ウ. 大深度ボアホール計測技術

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

参考文献

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