

2 観測・解析技術の開発

技術開発担当 渡辺俊樹（名古屋大学大学院環境学研究科）

1. 本観測研究計画における観測・解析技術開発研究の位置づけ

平成21年から25年度まで実施した「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」（前計画）では、大項目のひとつとして「新たな観測技術の開発」が掲げられており、これに対応した「新たな観測技術の開発」計画推進部会において技術開発に特化した成果の報告や議論等を行った。平成26年度から実施している「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（現計画）では、「研究を推進するための体制の整備」（大項目：4.）の中で、「研究基盤の開発・整備」（中項目：(2)）の一環として「観測・解析技術の開発」（小項目：ウ.）を引き続き実施している。

開発された技術は研究の場で活用されてこそ意味があり、そのためには、開発された技術を使う側のニーズと開発側のシーズとのマッチングが重要である。このような考え方のもと、現計画では「観測・解析技術の開発」という項目に対応する計画推進部会を設けるのではなく、それぞれの計画推進部会の中で、すなわち“観測研究の場”において、技術開発に関する報告や議論が行われる体制が採られている。

その一方で、観測技術には特定の分野や対象に閉じたものは少なく、ある目的のために開発された技術が他の目的のために活用できる例が多い。さまざまな目的をもって技術開発に携わる専門家が集まれば、他の技術の問題点やその解決方法、および、地震・火山噴火研究における技術開発の方向性等について、特定の研究分野に捉われずに技術開発の立場から深い議論を進めることができる。このように、技術開発の高度な推進を図るためには、研究分野の枠を越えて技術開発に特化した議論や情報交換を行う場も必要であることから、技術開発コミュニティでは、本観測研究計画の推進の一環として技術開発に特化した議論の場を設けて活動を行っている。

2. 技術開発関係の研究課題の概要

現計画で推進する研究課題のうち17課題が「最も関連の深い次期研究計画の項目」として「観測・解析技術の開発」（4. (2) ウ）を掲げている。これは全体の中で最多の課題数を有する項目となっている。さらに、「その他関連する次期研究計画の項目」として「観測・解析技術の開発」を挙げた13課題も含めると、実に30課題が技術開発に関係した研究課題ということになる。この課題数の多さは、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究に観測・解析技術の発展が不可欠であることを示している。

本報告では、技術開発関連の課題を(1)海底における観測技術、(2)宇宙技術等を利用した観測技術、(3)地下および火山モニタリング技術に分類し、平成28年度に得られた主な成果を中心に報告する。

(1) 海底における観測技術

東北地方太平洋沖地震の最大すべり域付近の日本海溝において、2014年から2015年にかけて、海溝軸を跨ぐ形で海底間音響測距観測を行った。2015年からは、(1)ユニバーサルジョイントを廃止して姿勢の安定性を重視した脚形状、(2)音響コマンドで観測頻度の設定変更や計測データの随時吸い上げが可能、(3)高精度な外付け圧力・温度センサー（RBR）搭載、という新設計の機器5台を設置した（図1）。2016年9月にこのうち2台を回収し、往復走時データ、音速補正に使用する温度・圧力データ、装置の姿勢データからなる、ほぼ1年間の連続データを取得した。未回収の機器からも音響モデムによって一部のデータを吸い上げた。最も長い基線（ADM1A-3B間、長さ7240 m）でも、ばらつきで±1-2 cm、1年間の変位速度で±2 cm/yrの精度であることがわかり、その精度で海底局間の距離が計測できる見込みが立った（東北大学〔課題番号：1210〕）。

GPS-音響結合方式海底地殻変動観測では、南海トラフ沿いにおいて、アムールプレートに対する運動として求められた変動速度の測地学的インバージョンを行い、プレート境界のすべり欠損速度の分布を推定した（海上保安庁〔課題番号：8001〕）。南海トラフ軸付近の3観測点で2回の測定を実施し、フィリピン海プレートの運動の実測に成功し、プレート間の固着率を見積もることができた（名古屋大学〔課題番号：1703〕）。

海底での機動的地震・地殻変動観測に向けた観測技術の高度化においては、次世代型広帯域海底地震計（BBOBS-NX）の自律展開設置・自己浮上回収方式への機能高度化に向けた具体的機構設計を行い、実海域試験を実施した。海底に貫入させたセンサー部を回収時に引き抜く浮力を確保するための浮力体（ガラス球浮き）を追加した（図2）。ビデオカメラおよび加速度ロガーを装着し、水中降下から着底までの試験機の状態を記録したところ、記録部であるチタン球を投入後、降下中に生じる傾斜変動を大幅に抑制することが確認できた。定常的な海域観測網の高度化においては、新規開発し2015年に設置した海底光ケーブル式地震津波観測システム（OBCSTシステム）について、特に陸上システムの改良を実施した。OBCSTシステムの地震学的なノイズは、2 Hz より高い周波数帯域および10秒よりも長い波長域で十分に低く、海底における典型的なノイズレベルとほぼ同じであること、埋設された観測ノード（YOBI）は、他の観測ノードよりも低い雑微動レベルであること、埋設した観測点の水圧計の感度が、海底面の水圧計に比べて著しく変化していると認められないことがわかった（東京大学地震研究所〔課題番号：1521〕）。

（2）宇宙技術等を利用した観測技術

GNSS観測・解析技術については、GEONETリアルタイム解析システムにおいて使用する衛星系を、これまでのGPSのみからGPS及びGLONASSを用いたマルチGNSSへと拡張した。そのシステムを運用し、2016年4月14日及び15日に発生した熊本地震の前震（M6.5, M6.4）ほかの地震について、地震時変動をリアルタイムで検出した。また、4月16日に発生した熊本地震（M7.3）について、地震後5分程度で矩形断層モデルを自動的に推定することに成功した。さらに、リアルタイムキネマティックGNSS時系列から火山性地殻変動の力源の状態変化を逐次推定するシステムを構築した（国土地理院〔課題番号：6012〕）。

新たな地表変動モニタリング技術として、地上設置型レーダー干渉計（GBRI：Ground-based radar interferometer）の研究を開始した。GBRIは地上に設置したアンテナからレーダー波を照射し、観測対象からの後方散乱波を受信するセンサーであり、得られたレーダー画像の各画素に格納される位相の時間変化から、アンテナと散乱点の間の距離の時間変化を面的に検出することが可能である。合成開口レーダー型と実開口レーダー型の2台のGBRIから構成されるGBRI観測システムを浅間山の山麓に設置した。植生がほとんどない火口周辺では、30日間のデータペアにおいても地殻変動検出が可能ほどの干渉性が得られることを確認した。一方で、樹林帯や悪天候時においては、干渉性が著しく劣化し、地殻変動検出は困難であった。衛星SARの解析においては、陸域観測技術衛星「だいち2号」（ALOS-2）のデータを用いて、熊本地震に伴う地殻変動を検出した。得られた地殻変動は、布田川断層と日奈久断層の北端部、布田川断層の東端から北東に伸びる断層の右横ずれと、西原村付近の低角の断層の正断層成分を伴う右横ずれによっておおよそ説明することができる。この結果に基づき、熊本地震に伴う地殻変動が阿蘇山のマグマだまりに与える影響を見積もった。航空機搭載型光学センサーに関しては、小型単発航空機に搭載可能なセンサー：ARTS-SEの試験観測データを用い、ARTS-SEのカメラ型センサーデータの処理手法を開発し、各観測データよりDSMを作成することが可能となった（防災科学技術研究所〔課題番号：3005〕）。

航空機搭載合成開口レーダ（Pi-SAR2）については、地震・火山災害時の被害判読手法等の技術開発と、Pi-SARおよびPi-SAR2のデータ検索システムの公開・運用を進めた。熊本地震に関して、本震の翌日に被災地の観測を実施し（図3）、観測データの関係機関への配布とWebを通じた一般への公開を速やかに実施した（情報通信研究機構〔課題番号：0101〕）。

衛星赤外面像を用いた噴火推移の観測については、ひまわり 8 号 AHI 画像及び GCOM-C SGLI 画像処理システムの正式運用に向けたシステム開発を進めた。GCOM-C の打ち上げが 2016 年 12 月から約 1 年間延期されることになったため、JAXA と共同で calibration/validation の期間に行う予定であった SGLI データ転送ルーチンのチェックは、来年度以降へ持ち越さざるを得なくなった。インドネシア、ラウン火山 2015 年噴火に関する噴火推移解析を進めた。ラウン火山（標高 3320 m）は山頂部に直径約 2 km のカルデラをもつ火山であり、2015 年 6-8 月にストロンボリ式噴泉を伴う規模の大きい噴出的噴火が発生した。この噴火が山頂カルデラ内で起きたため、地上から目視観測できず、詳しい噴火推移はこれまで不明とされてきた。昨年度までには、ひまわり 8 号 AHI の 10 分間隔という超高頻度赤外面像を用い、噴火活動に伴う熱異常の時系列変化を解析し、噴火推移の推定を行っていた。今年度、この結果に高分解能衛星画像、ASTER-DEM の解析を組合せ、噴火の推移を詳細に明らかとすることができた（東京大学地震研究所 [課題番号：1520]）。

(3) 地下および火山モニタリング技術

光ベースの大深度ボアホール用地震地殻変動観測装置の設計を進めた。装置は地震計、傾斜計、温度計、歪計より構成される。地震計と傾斜計は板バネとマスを組み合わせた構造を持ち、高温用バネ材であるインコネルを用いている。マスに取り付けたコーナープリズムの動きを高温用レーザー干渉計ユニットで高精度に計測する。温度計および歪計は光ファイバグレーティング (FBG) を用いて、光ファイバーの微小伸縮をレーザー吸収波長の変化から計測する。すべての装置は通信波長帯 1.55 μm のレーザー光源で動作できる構成としてあり、長距離の伝送や複数のセンサーをつないだネットワーク化に適している。（東京大学地震研究所 [課題番号：1522]）。

小型絶対重力計については、プロトタイプ TAG-1 の系統誤差の評価のため、石岡測地観測局（国土地理院、茨城県石岡市）において絶対重力計 FG5 との比較観測を実施した。両者の結果には 30~50 μGal の差異が認められ、参照マスの自由落下時の反作用など複数の要因について検討している。また、火山の近傍において複数の絶対重力計を設置した観測網を構築することを想定し、長距離伝送の技術が確立している通信波長帯の光源（波長 1.55 μm 帯）を用いた絶対重力計の動作検証を行った。絶対重力測定における変位計測の基準となる波長安定化光源 1 台を、複数の観測点に置かれた絶対重力計の光源として共通に使用し、光ファイバーで分配することで、効率的かつ安定的に計測することができる。TAG-1 の光学素子を通信波長帯のものに交換したユニットを作成し、東北大・電気通信研究所で開発されたアセチレン安定化ファイバーレーザーを光源に用いて重力値を計測した（図 4）。従来の He-Ne レーザーによる計測と比較したところ、計測誤差の範囲内で整合する計測値を得た（東京大学地震研究所 [課題番号：1506]）。

精密制御震源システム（アクロス）については、回転軸を水平にした第 2 世代震源装置（図 5）の性能の検証を行った。震源基礎部分と地盤との間に生じたせん断滑りを抑えるために、基礎周辺地盤の補修作業を行い、その対策の結果を検証する振動測定実験を 2015 年度末に行った。データを解析したところ、補修の効果は認められるものの、十分な強度にまでは復旧しておらず、新たに基礎の補強を行った（名古屋大学 [課題番号：1705]）。

素粒子ミューオンを用いた火山透視技術については、桜島におけるミュオグラフィ長期観測点へカロリメータ方式を導入した（図 6）。ミュオグラフィ観測装置を標高 150 m、昭和火口から南に水平距離でおよそ 2.8 km の地点に設置し、ミュオグラフィ観測装置の有感面を昭和火口方向へ向けた。観測により桜島昭和火口近傍のミュオグラムを得た（図 7）（東京大学地震研究所 [課題番号：1523]）。

火山ガス観測装置の開発においては、簡易型トラバース測定装置の測定プログラムの修正や装置全体のメンテナンスを行い、2014 年 11 月末以降すでに 2 年以上継続して口永良部島火山の二酸化硫黄放出率モニタリング観測を実施している。この間、口永良部島の 2015 年 5 月 29 日の噴火前、噴火後の二酸化硫黄放出率推移を

測定し、貴重なデータを供給してきた。それらのデータは、特に気象庁の火山活動解説資料に採用され、口永良部島の火山活動の監視に役立っている。二酸化硫黄可視化モニタリング装置、ポータブルなガス放出率測定装置についても開発を継続している（東京大学 [課題番号：1403]）。

3. 研究集会

先に述べた、技術開発に特化した議論や情報交換を行う場として、技術開発コミュニティでは隔年で研究集会を実施している。本年度は「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画・技術開発に関する研究集会」と題した、オープンな形式の研究集会を下記の通り開催した。12名の参加を得て6件の話題提供があり、これまでの研究成果や今後の開発目標などが紹介された。

日時：2017年3月10日（金） 13:30～17:30

場所：東京大学地震研究所1号館2階 セミナー室

話題提供（発表順）：

- 短スパン伸縮計の開発と初期の地殻変動連続観測記録の活用（加納靖之：京都大学防災研究所）
- 空中マイクロ波送電技術を用いた火山観測・監視装置の開発（松島 健：九州大学）
- 小型絶対重力計と高温地震センサー，KAGRA伸縮計の開発の現状（新谷昌人：東京大学地震研究所）
- 海底地殻変動観測の最近の成果（田所敬一：名古屋大学）
- 海底地震観測の最近の進展（篠原雅尚：東京大学地震研究所）
- 機動的な海底地震・地殻変動観測の高度化（塩原 肇：東京大学地震研究所）

話題提供に続き、自由討論として、下記のような内容について活発な意見交換が行われ、問題意識の共有が図られた。

- 現在の技術開発における課題
- 将来の技術開発の目標や新技術の提案
- ユーザーサイドからの要望・提案
- 次期計画における技術開発課題の進め方

現計画の最終年度にも同様な研究集会を開催することを計画している。

4. これまでの課題と今後の展望

現計画において、技術開発課題は着実に成果を上げている。例えば、海域における地殻変動観測やSARなどの衛星測地観測においては、技術的進展により実用段階に達し、定常的な観測が可能となったことから、観測の成果が科学的な成果や新たな知見に結びついた。こうして、ユーザーのニーズを原動力として、機器開発からデータ取得、解析から科学的成果へとつなげる開発の方向性が明確になった。一方で、技術開発コミュニティの中では、技術開発者間の連携が、以前に比べやや弱くなったという意見もみられた。現計画では技術開発に関する計画推進部会を設けていないことも一因となっていると考えられる。

今後の目標として、これまで観測が十分ではない難観測地域・極限環境、特に深海域と地球深部（ボアホール）、火山における観測やデータの取得・転送の技術開発を進め、観測の空白地域を埋める必要がある。また、観測の高度化やリアルタイム化を進めるため、多種、多点、広域、連続、リアルタイムでのデータの取得とその解析技術の開発が必要である。それらの実現にあたっては、これまで地震火山研究で用いられていなかった新しい技術や発想を導入する必要もあると考えられる。技術開発関連課題においてはこれまでハードウェアの技術開発が主流であったが、今後は、ソフトウェア技術やシステム化技術も重要な課題となる。また、技術開

発の推進体制として、ユーザーと技術開発者が連携できる体制、例えば、技術開発のニーズとシーズをマッチングさせる仕組みや、ユーザーの技術開発を支援する仕組みがあることが望ましい。

成果リスト

- 新谷昌人, 2016, 光ファイバーネットワークを用いた地震・津波・地殻変動の計測技術に関する研究, 東北大学電気通信研究所研究活動報告, 22, 241-243.
- Furuya, M., K. Fukui, H. Iida, S. Kojima and T. Matsuoka, Experimental observations of two mountain glaciers on the eastern slope of Mt. Tsurugi by Pi-SAR2 airborne SAR, 2017, Bulletin of Glaciological Research, doi: 10.5331/bgr.16R04.
- 長谷川晟也, 佐藤利典, 河野昭博, 寺田麻美, 森大湧, 塩原肇, 八木健夫, 山田知朗, 篠原雅尚, 2016, 房総沖スロースリップ域での海底圧力計を用いた海底上下変動観測, 日本地球惑星科学連合2016年大会, SCG59-P15.
- 香川敬生, 野口竜也, 2016, 自治体震度計によるリアルタイム情報配信の試み—鳥取県の事例—, 日本地球惑星科学連合大会2016年大会, SSS29-P05.
- 川元智司, 檜山洋平, 古屋智秋, 佐藤雄大, 太田雄策, 西村卓也, 等々力賢, 2016, 電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)プロトタイプの開発, 国土地理院時報, 128.
- Kawamoto, S., B. Miyahara, Y. Hiyama, Y. Sato, T. Furuya, Y. Ohta, T. Noshimura, and M. Todoriki, 2016, Real-time GNSS positioning system REGARD for rapid earthquake moment estimates, Proceedings of FIG 2016.
- Kawamoto, S., Y. Hiyama, Y. Ohta, and T. Nishimura, 2016, First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto Earthquakes, Earth, Planets and Space, 68, 190.
- Kawamoto, S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoriki, T. Nishimura, T. Furuya, Y. Sato, T. Yahagi, and K. Miyagawa, 2017, REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, J. Geophys. Res., in press.
- 小林知勝, 2017, 干渉SAR 時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の面的検出に関する研究(第3年次), 国土地理院調査研究年報(平成28年度)
- 久保田実, 浦塚清峰, 児島正一郎, 上本純平, 灘井章嗣, 梅原俊彦, 松岡建志, 小林達治, 三森麻衣子, 2016, 航空機搭載高分解能合成開口レーダー(Pi-SAR2)を用いた熊本地震の被災状況把握, 日本地球惑星科学連合2016年大会.
- 灘井章嗣, 上本純平, 梅原俊彦, 児島正一郎, 松岡建志, 小林達治, 久保田実, 浦塚清峰, 2016, 高分解能SAR Pi-SAR2で見た熊本地震による被災状況, 日本リモートセンシング学会学術講演会.
- Nagorny, V. D., S. Svitlov, and A. Araya, 2016, Improving absolute gravity estimates by the Lp-norm approximation of the ballistic trajectory, Metrologia, 53, 754-761.
- Ohta, K., Y. Ito, R. Hino, Y. Ohta, R. Azuma, M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Sato, and Y. Murai, 2016, Seismic observations using ocean bottom seismometer arrays offshore Miyagi, northeast Japan, JpGU Annual Meeting, SSS02-P04.
- 太田和晃, 伊藤喜宏, 日野亮太, 太田雄策, 東龍介, 篠原雅尚, 望月公廣, 佐藤利典, 村井芳夫, 2016, 宮城県沖における海底地震計アレイ観測, 日本地震学会2016年度秋季大会, S04-01.
- Ozawa, T., E. Fujita, and H. Ueda, 2016, Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano, Earth Planets Space, 68:186, doi:10.1186/s40623-016-0563-5.
- 篠原雅尚, 山田知朗, 望月公廣, 悪原岳, 仲谷幸浩, 村井芳夫, 平塚晋也, 日野亮太, 太田雄策, 東龍介, 佐藤利典, 伊藤喜宏, 中東和夫, 武林仁樹, 寺岡拓也, 八木原寛, 2016, 長期観測型海底地震計を用いた2011年東北沖地震震源域北部における地震観測, 日本地球惑星科学連合2016年大会, SSS02-22.

- Shinohara, M., T. Yamada, S. Sakai, H. Shiobara, and T. Kanazawa, 2016, Development and installation of new seafloor cabled seismic and tsunami observation system using ICT, OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, 1-4, 10.1109/OCEANS.2016.7761350.
- Shinohara, M., T. Yamada, S. Sakai, H. Shiobara, and T. Kanazawa, 2016, Installation of new seafloor cabled seismic and tsunami observation system using ICT to Off-Tohoku region, Japan, SubOptic 2016, WE2B-4.
- 篠原雅尚, 山田知朗, 酒井慎一, 塩原肇, 金沢敏彦, 2016, 新規開発したICT光海底ケーブル式地震津波観測システムの設置, 日本地球惑星科学連合2016年大会, STT51-05.
- 篠原雅尚, 山田知朗, 酒井慎一, 塩原肇, 金沢敏彦, 2016, 三陸沖における新規海底光ケーブル式地震津波観測システムの設置, 日本地震学会2016年度秋季大会, S02-06.
- Shiobara, H., H. Sugioka, A. Ito, and M. Shinohara, 2016, NX-2G : autonomous BBOBS-NX for a highly mobile broadband seismic observation at the seafloor, EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, April 21, 2016, EGU2016-3189.
- 田中愛幸, 2016, 重力ポテンシャル差計としての光格子時計の地球物理応用の可能性, 光学, 45, 259-263.
- Tanaka, H., 2016, Visualization of the internal structure of volcanoes with cosmic-ray muons, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 091016.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro & A. Asada (2016), Nature, doi:10.1038/nature17632

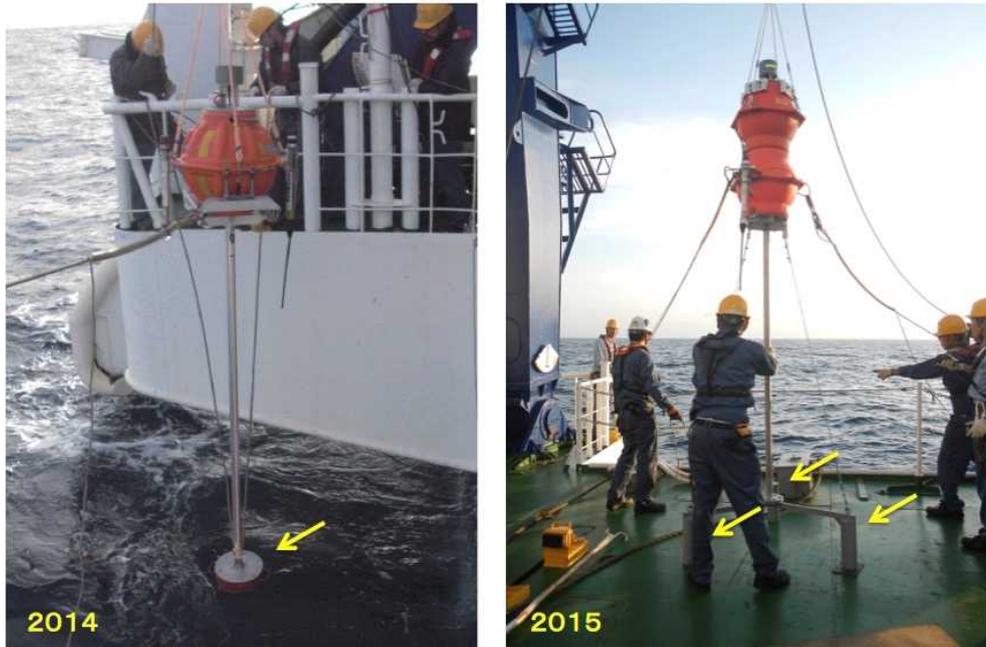


図1. 海底間音響測距装置（東北大学〔課題番号：1210〕）

2014年と2015年以降の観測でそれぞれ使用した機器の外観。2014年では、底層流に逆らわずに自由に傾けるよう一脚の下端に自在継手を装備した。2015年には、底層流に対して不動となるよう、脚の下端を3点支持とした。

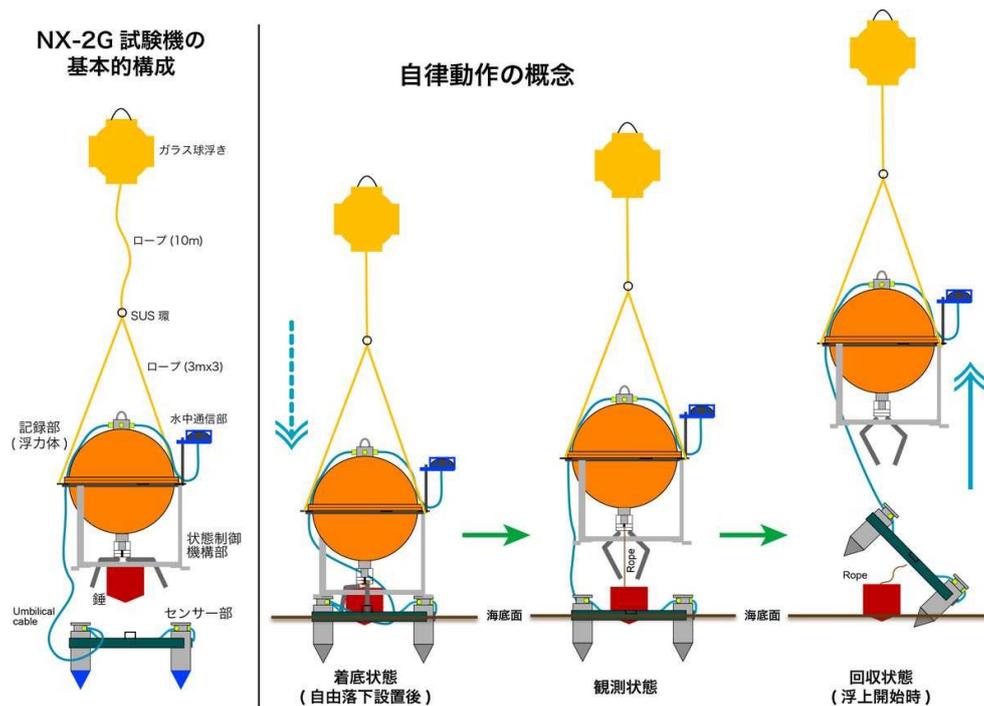


図2. 自律動作方式のBBOBS-NXの次期モデルの動作概念（東京大学地震研究所 [課題番号：1521]）
 自律動作方式には着底・観測・回収の3つの状態を制御する2段階の遷移動作を必要とする。NX-2G試験機ではセンサー部を海底から引き抜く浮力を得るため、ガラス球浮きを追加したところ、引き抜き時に重要な効果があるだけでなく、降下時の姿勢傾斜を抑制する効果も認められた。

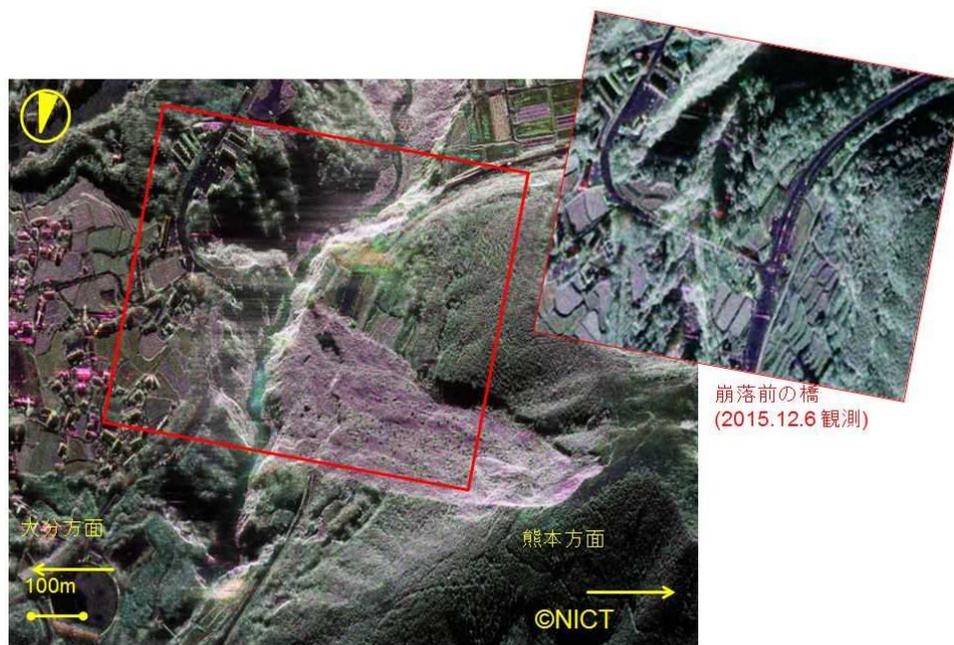


図3. 航空機SAR (Pi-SAR2) で2016年4月17日に観測した阿蘇大橋付近の画像（情報通信研究機構 [課題番号：0101]）。
 パラリメトリによる疑似カラー化が施されており、植生部分(緑色)と非植生(マゼンタ)の識別により土砂崩れ部分が抽出される。



図4. 通信波長帯光源（波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯）を用いた絶対重力測定（東京大学地震研究所〔課題番号：1506〕）

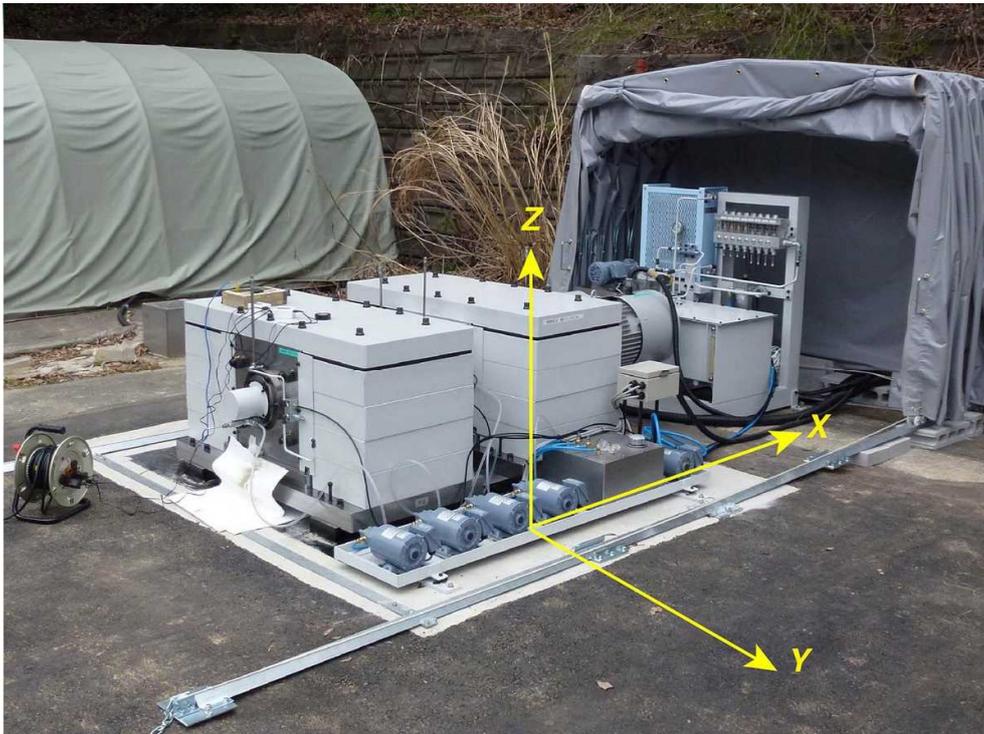


図5. 第2世代アクロス震源装置（名古屋大学〔課題番号：1705〕）
振動測定実験の座標軸を合わせて示した。



図6. 桜島に導入したカロリメータ方式ミュオグラフィ観測装置（東京大学地震研究所〔課題番号：1523〕）

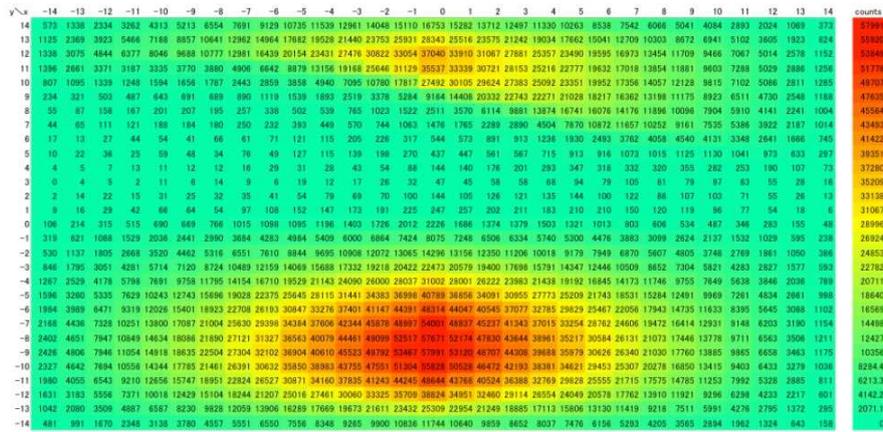


図7. 桜島に導入したカロリメータ方式ミュオグラフィ観測で得られたミュオグラム（東京大学地震研究所〔課題番号：1523〕）