

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とほぼ同等の観測精度と時空間分解能で、海域においてもデータが取得できることが望ましい。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、広ダイナミックレンジの観測を高密度かつ高時間分解能で実施することが期待されている。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。したがって、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

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、海底地震計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(図1)を完成させた。開発した機器を紀伊水道沖、東北沖、ニュージーランド北東沿岸に展開し、定常的にデータを取得しており、海底絶対圧センサーを用いた海底地震・圧力同時観測はほぼ実用化した。2011年の東北沖地震の余震観測では、M7の余震の震央近傍で地震発生に伴う大振幅の圧力波形と25cm相当程度の沈降を示す静的変位(海底面の沈降にともなって水圧は上昇)の記録に成功した(図2)。後者については、課題番号1432で開発を行った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、引き続き海域での実地試験を行った。その結果、底層流等の外乱があっても0.3マイクロラジアン以上の静的変動は検出可能であることが検証された。

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、海中音速の傾斜構造を考慮するための解析手法の開発を行った(名古屋大学[課題番号:1706])。その結果、0.4~0.8°C程度の海中温度の場所による違いによる海中音速の変化にともなう走時残差を捉えることに成功

し、海底ベンチマーク位置のバイアスが5cm程度低減された。この方法を適用した海底ベンチマーク位置決定結果に基づく熊野海盆における変位速度ベクトル（海底地殻変動観測結果）を図3に示す。

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引き続き実施した（東大地震研〔課題番号：1432〕）。

(a)については、既に関連した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）を2013年4月に房総半島沖の三重会合点（水深9200m）地点にNUDOBSを設置し、1年間の長期観測を実施した。また、従来型の海底地震計の構造を踏襲した超深海型海底地震計（UDOBS）の開発も進め、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（図4）。2013年8月に7000mを超える日本海溝域において設置・回収を行い、制御震源構造探査のデータを取得することに成功した。

(b)については、水晶発振式加速度計3式を用いて、3成分一体型加速度計への成型を行った。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。陸上試験と海中試験結果を踏まえ、さらに改良を施した新たな水晶発振式加速度計を用いて、東京大学地震研究所鋸山地殻変動観測所の観測坑内において試験観測を実施した。その結果、従来のサーボ型加速計に比べ、測器ノイズが約10分の1であることがわかった。

(c)については、実機が完成し、周期20秒以上で陸と同等のノイズレベルであることを確認した。

ウ. 海底実時間システム

紀伊水道沖に展開される海底ケーブル式の地震・津波観測監視システム（DONET2）について、前年度までに製造を終了した観測網構成機器等を用いて紀伊半島西方沖（徳島県側）に敷設予定分の海底ケーブルシステムの総合試験（システムアッセンブリテスト：SAT）を実施し、基幹ケーブルを敷設した（川口ほか，2014）。また、この敷設に併せて徳島県側の陸上設備を整備した（海洋研究開発機構〔課題番号：4005〕）。コストダウン、多数の観測点が接続可能、拡張ポートや計測の変更が可能ということコンセプトにした次世代インライン式ケーブル式海底観測システムについては、粟島南東沖に設置した次世代ケーブルシステムによる観測を継続し、順調に海底地震観測データが蓄積されている（図5）。さらに、粟島沖ケーブルの高度化版である第3世代ケーブル式海底観測システムの開発を引き続き行い、内部ノードの試作器を製作した。このシステムはPoE（Power over Ethernet）インターフェイス、10MbpsのTCP/IPインターフェイスを備え、15W程度の電力が供給できる。この試作器の試験観測を地震研究所鋸山地殻変動観測所観測坑内で行い、正常にデータ収集されることを確認するとともに測器の特性を把握した。旧来の海底ケーブルシステムでは観測点の増設は困難である。次世代インライン式ケーブル式海底観測システムはこの弱点を克服できるシステムであり、海底における地震・津波・地殻変動等の実時間観測の充実に資するシステムが確立したと言える。

（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。GPS、SAR 以外の衛星や、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、以下の研究を実施した。

ア. 宇宙測地技術

GPSを利用した観測技術については、リアルタイムGPS時系列を用いた地震時変位の自動検知およ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) のアウターライズ地震に対する有効性を評価するために、1933年昭和三陸地震をサンプルとして数値実験による検討を行った(東北大学 [課題番号: 1218])。その結果、断層位置が系統的に陸側にずれて推定される場合が多いことが分かった。一方、推定されたマグニチュードは概ね実際の地震規模を再現できることが分かった。リアルタイムGPS時系列の可視化システムの高度化も実施し、準リアルタイムで時系列表示を可能にする機能の実装を進めた(東北大学 [課題番号: 1218])。開発した可視化システムは、国土地理院におけるリアルタイムGNSS解析システムへの組み込みが決定している(出町ほか, 2013、川元ほか, 2013)。また、GEONET電子基準点に併置されている傾斜計データを用いて、電子基準点の熱変形に伴う誤差を定量的に見積もった(国土地理院 [課題番号: 6017])。その結果、一重管タイプの電子基準点では太陽高度と同期した熱変形が検出され、その大きさが最大で1cm程度であること(図6)が明らかになった(Munekane, 2013)。したがって、一重管タイプが採用されている2003年以前に設置されたGEONET観測点のデータを用いる場合は、この熱変形に注意する必要がある。

SARを活用した新たな地殻変動監視技術については、永続散乱体干渉手法 (PS-inSAR) を越後平野およびその周辺の地盤変動計測に適用し、昨年度と同様に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を検出した(国土地理院 [課題番号: 6018])。年間ミリメートルレベルの極めてゆっくりとした地殻変動が検出できたことによって、永続散乱体干渉手法が、噴火活動がない場合の火山体の地盤変動等の検出にも有効であることが改めて確認された。火山体の監視(防災科学技術研究所 [課題番号: 3017])については、2011年新燃岳噴火時に、噴火前後の山体の膨張と収縮、その後の再膨張といった噴火活動に伴う地殻変動がSAR干渉解析によって捉えられている(宮城ほか, 2013)。このほか、ALOSによるSAR画像によって、火口内に出現した溶岩の変遷を定量的に捉えることにも成功した(Ozawa and Kozono, 2013)。噴火前の2011年1月18日に観測された画像には火口湖を示す散乱強度が弱い領域が火口底に見られていたが、1月27日に取得された画像では、その低散乱強度域が明らかに消失していた代わりに、火口中央部に凸形状を持つような強度分布が見られた。この結果は、1月27日の夜には溶岩ドームが既に出ていた可能性を示唆するものである。次いで1月29日に観測された画像からは、明らかに凸形状の構造が成長していることが分かった。同様の構造はTerraSAR-X (ドイツ)の画像にも見られ、その構造が時間とともに成長しているように見える。

イ. リモートセンシング

活動中の火山等のアクセス困難な場所での諸観測に有効な無人ヘリコプター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等の機器の回収試験を実施した(東大地震研 [課題番号: 1435])。新燃岳では3回目の空中磁気測量を実施した。その結果、帯磁がさらに進んでおり、その速度は経過時間の平方根に比例することを発見した(Koyama et al., 2013)。このことは火口内マグマが対流などの運動システムではなく、熱伝導や熱拡散によって徐々に冷却していったことを示しており、火山活動度やマグマ粘性に大きな情報をもたらした。樽前山においても繰り返

し空中磁気測量を実施し、帯磁傾向にある地磁気変化を検出することに成功した (Hashimoto et al., 2013)。GPSモジュール (新燃岳) や地震計モジュール (桜島) 等の設置・回収にも試験的に無人ヘリコプターが活用されており、火口近傍の地殻変動解明や構造探査において重要なデータをもたらした。活動的火山火口近傍における多項目観測が成功したことにより、今後ますます火山観測の場で無人ヘリコプターが有効活用されることが期待される。

衛星赤外画像を利用した火山研究については、2016年にJAXAから打ち上げられる新衛星GCOM-C1の衛星のSGLI (Second generation GLobal Imager) 画像の観測能力の評価とその利用法について検討を行った (東大地震研 [課題番号: 1436])。GCOM-C1は打ち上げ前であり、実際の画像を用いて検証することはできないため、溶岩流の数値モデルを用いて計算機の中で溶岩流を再現した上で (安田ほか, 2013)、SGLI画像でどのように観測されるかを検証した。その結果、SGLI画像に250mの分解能があれば、溶岩流の噴出点や拡大状況を知ることが可能であることがわかった。また、溶岩流の噴出率を変えたシミュレーションの結果から、 $1.6\mu\text{m}$ 画像上の高温域 (900°C 以上) の面積をインデックスにとることで噴出率の変動をモニターすることが可能であることがわかった。

噴煙観測技術については、気象レーダーを利用した観測技術の開発が進められた。気象レーダーによって定量的な噴煙量推定を行うためには、噴煙粒子の電波散乱特性を明らかにする必要がある。そこで、気象レーダーが検出できる噴煙粒子の最小反射因子 (MDR) を明らかにするとともに、噴煙粒子の偏波パラメタの特徴を明らかにするための研究を実施した。その結果、噴煙の近くに位置するレーダーのMDRは小さいこと、波長によって降雨減衰の影響が異なることを定量的に評価できた。噴煙粒子の偏波パラメタの特徴評価として国交省のXバンドMPレーダーにより取得された桜島の噴火事例を解析し、反射強度 (ZH) と反射因子差 (ZDR) に火砕物のふるい分けを示唆する特徴が認められた (防災科学技術研究所 [課題番号: 3018])。また、2013年8月18日に遠望観測による噴煙高度が火口上5000mに達した桜島昭和火口噴火事例について解析を行ったところ、鹿児島空港レーダーおよび国土交通省XバンドMPレーダネットワーク (XRAIN) の偏波間相関係数を用いて曇天時も噴煙を検出できる可能性があることなどが分かった (気象庁 [課題番号: 7022])。

(3) 観測技術の継続的高度化

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

ア. 地下状態モニタリング技術

宇宙線を利用した地下状態監視技術については、既に開発したカロリメータ検出器の高度化を行い、超低雑音ミュオグラフィ検出器が完成した (東大地震研 [課題番号: 1438])。散乱粒子 (ミューオン) が生成されるときに放出される電子や陽電子の影響を除去することで超低雑音化が実現し、より短時間で高精度なイメージングが可能となった。高度化した検出器を活動中の薩摩硫黄島での観測に使用したところ、噴火活動に伴う火道中のマグマ頭位の変動をとらえることに成功した (図7)。

精密制御信号システム (アクロス) については、桜島に設置したアクロス震源の連続運転を継続し、桜島島内外の地震観測点で信号が順調に記録されていることを確認した。さらに、伝達関数の

変動が観測されており（図8）、火山活動との関連、降雨等の気象条件や潮汐などによる影響について検討を進めている（名古屋大学〔課題番号：1707〕）。

イ. 地震活動や噴火活動の活発な地域における観測技術

小型絶対重力計については、市販機よりも小型（高さ95cm＝市販機の2/3）かつ軽量（60kg）な装置が完成しており、霧島火山観測所において実証試験を実施した（東大地震研〔課題番号：1439〕）。その結果、理論潮汐と整合的なデータが得られた。また、地面振動の補正機構の導入によって、従来の絶対重力計と同等の $1\mu\text{gal}$ 以下の観測精度が得られた（図9）。

GPS 火山変動リモート観測装置（REGMOS）については、これを準天頂衛星および GLONASS にも対応（マルチ GNSS 対応）するための試験観測を実施し、観測データ量が増加しても安定的にデータ通信が可能なが確認された（国土地理院〔課題番号：6019〕）。

新世代通信データ伝送システムの開発については、火山地域などの悪条件下におけるの各種観測データの伝送方式の開発を目指して、(a)携帯電話カードの定額料金プランを用いた常時データ転送、(b)プリペイド式携帯電話端末を用いた GPS データ等の定期的回収、(c)低消費電力小型小電力無線機を用いた無線 LAN 装置の開発、(d)衛星携帯電話を用いたテレメータの開発を行った（九州大学〔課題番号：2207〕）。(a)および(b)については、運用開始からそれぞれ3年あるいは5年の間、大きなトラブルもなく順調に運用中である。(c)については、試験機3対向で試験運用。本通信方式は、数十bps程度の低速でもよいので無線LANで通信を行いたい場合に有効であると考えられる。(d)については、旧来の衛星携帯電話のアナログ通話サービスが廃止されたことに伴う代替方式の開発である。この方式では、定期的に観測点側から衛星携帯電話をかけて接続してきた時に必要な時刻のデータをサーバが観測点に設置したロガーから伝送することに成功した。

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試験を継続した（東大地震研〔課題番号：1440〕）。広帯域地震計について、装置全体の高温試験の準備と地震計の立ち上げおよび調整の自動化、長期試験観測を継続した。傾斜計については、深さ10mの孔内で試験観測を継続した。本課題で開発した広帯域地震計および傾斜計の各構成要素は高温に耐える部材で構成可能であり、300℃程度までの大深度ボアホールに適用できると考えられる。

これまでの課題と今後の展望

現行計画では、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するための「道具」を開発することを目指して開発研究を実施してきた。5ヶ年の成果によって、我々は新たな道具（機器だけではなく解析手法も含む）を手にし、モニタリングの幅が広がったと言えよう。つまり、海底や深海、活動中の火山といった欲しい場所での欲しいデータを得る技術が着実に開発・高度化された。海域観測技術については、深海での長期観測となるとともに広帯域化（地震計の広帯域化および地殻変動帯域での観測）が可能となった。火山観測技術では、無人ヘリコプター、人工衛星、宇宙線利用によるリモートセンシング技術の確立とともに、降灰予測や活動パターンのデータベース化といった活動予測の高度化に繋がる研究が推進された。宇宙測地技術利用については、高サンプリング観測および年間数mm程度のゆっくりとした変動の捕捉が実現した。さらに、光干渉技術を利用した高温下での観測が実現に近づき、火山や地下ボアホールでの新たな観測への道が拓けた。開発（動作試験）や高度化研究の中でも現象の解明にとって重要なデータが既

に得られている。さらに、海底ケーブル、海底地殻変動、RAPiD、降灰予測、REGMOS といった開発された技術の一部がモニタリングの場（一部は現業部門）で既に活躍していることは特筆すべき成果である。

今後は、開発した技術の活用機会の拡大と、そのための高度化が課題である。活用機会の拡大には、新たに開発した技術を誰でも利用できるようにすることが肝要であり、低コスト化、仕様標準化、システム簡易化等の方策を考える必要がある。学問レベルの向上にとって技術の進歩は不可欠である。地震・火山研究を進めるうちに既存の技術では取得が困難な新たなデータが必要となるはずである。よって、技術開発が終わりを迎えることはありえない。今後も研究の場において技術開発がますます推進されることを期待したい。

成果リスト

川口勝義・荒木英一郎・星野政之・横引貴史・松本浩幸・西田周平・崔 鎮圭・高橋成実・馬場俊孝・金田 義行, 2013, 地震津波観測監視システムDONET2 の構築, ブルーアースシンポジウム2014.

出町知嗣, 太田雄策, 三浦 哲, 立花憲司, 佐藤俊也, 2013, リアルタイムGPS 解析結果可視化ツールの開発 (序報), 日本測地学会第120回講演会.

川元智司, 宮川康平, 山口和典, 西村卓也, 宮原伐折羅, 古屋智秋, 酒井和紀, 畑中雄樹, 根本 悟, 辻 宏道, 太田雄策, 日野亮太, 木戸元之, 飯沼卓史, 藤本博己, 三浦 哲, 2013, 新しいGEONETリアルタイム解析システムの開発, 日本地球惑星科学連合大会2013.

Munekane, H., 2013, Sub-daily noise in horizontal GPS kinematic time series due to thermal tilt of GPS monuments, *Journal of Geodesy*, 87, 393-401.

宮城洋介, 小澤 拓, 河野裕希, 2013, DInSAR及びGPSによって検出された霧島山・新燃岳2011年噴火に伴う地殻変動, *火山*, 58, 341-351.

Ozawa, T. and T. Kozono, 2013, Temporal variation of the Shinmoe-dake crater in the 2011 eruption revealed by spaceborne SAR observations, *Earth Planets Space*, 65, 527-537.

Koyama, T., T. Kaneko, T. Ohminato, T. Yanagisawa, A. Watanabe, and M. Takeo, 2013, An aeromagnetic survey of Shinmoe-dake volcano, Kirishima, Japan, after the 2011 eruption using an unmanned autonomous helicopter, *Earth Planets Space*, 65, 6, 657-666.

Hashimoto, T., T. Koyama, T. Kaneko, T. Ohminato, T., Yanagisawa, M. Yoshimoto, and E. Suzuki, 2013, Aeromagnetic survey using an unmanned autonomous helicopter over Tarumae Volcano, northern Japan, *Exploration Geophysics*, <http://dx.doi.org/10.1071/EG12087>.

安田 敦, 金子隆之, 新堀賢志, 藤井敏嗣, 2013, インターフェイスを改良した溶岩流シミュレーションシステムとその防災上の意義, *火山*, 58, 379-385.

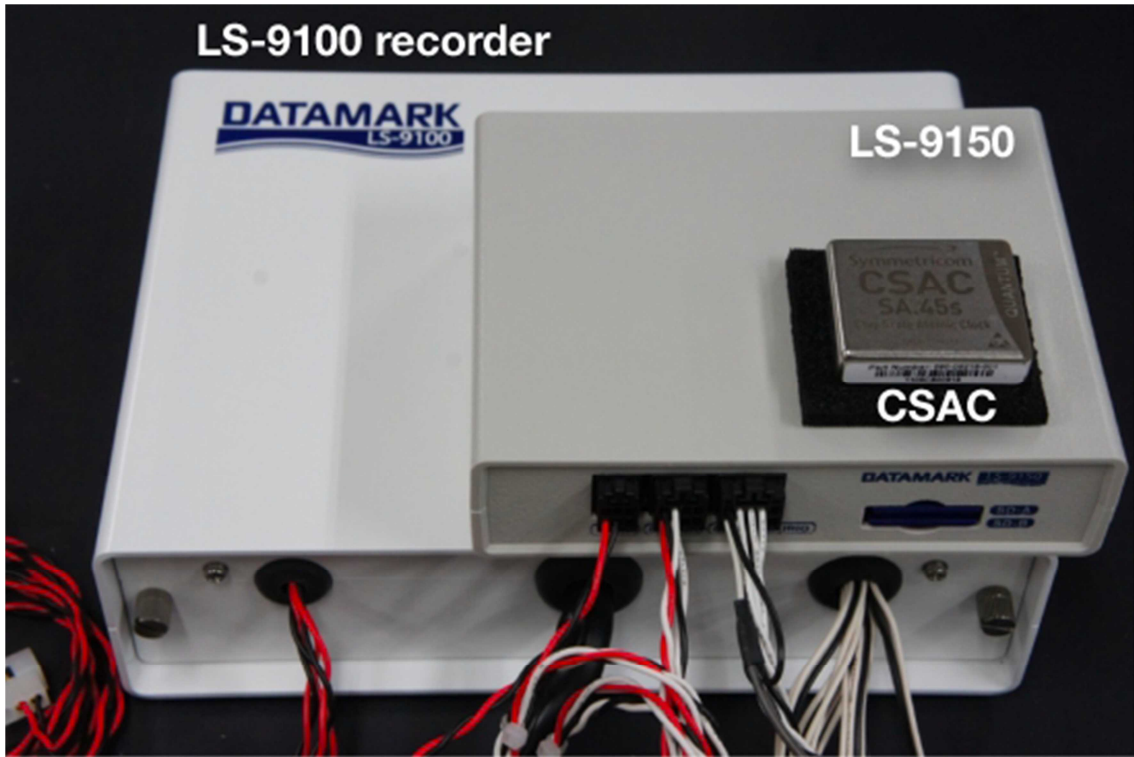


図1. 海底地震計専用高機能レコーダー (LS-9100) と連携して動作可能な高精度圧力計レコーダー絶対圧力ゲージ用データロガーLS-9150。CSAC は超小型原子時計 (東大地震研 [課題番号: 1431])。

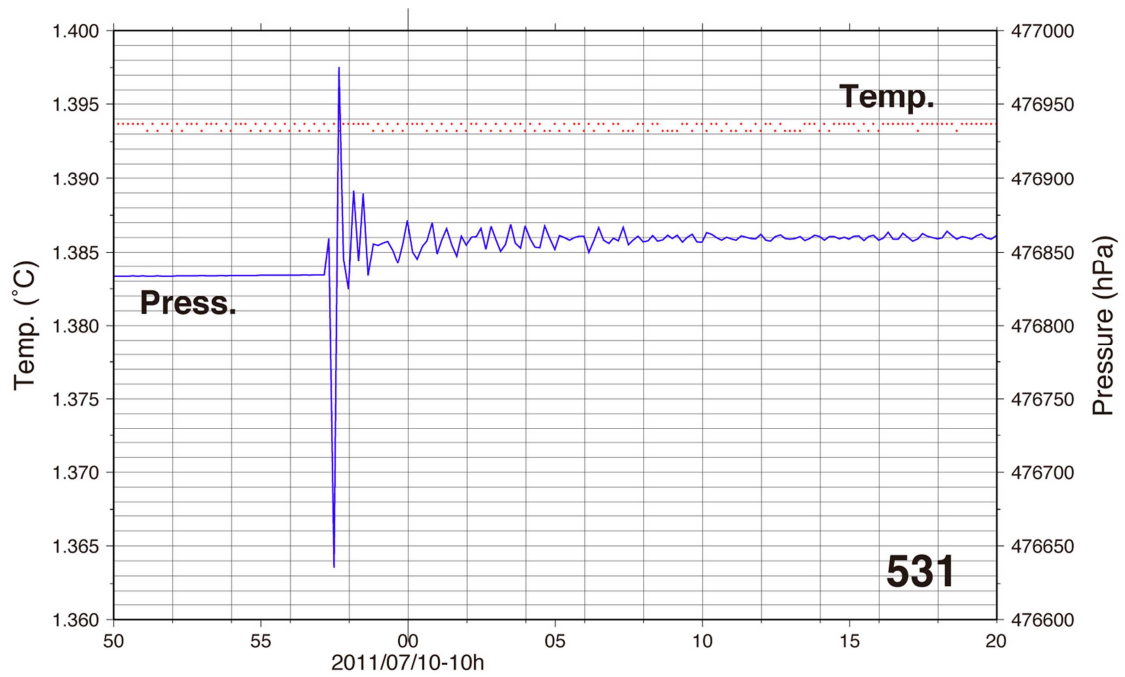


図2. 震央近傍で記録された M7 の余震 (2011 年 7 月 10 日) 発生時前後での圧力 (青) と温度 (赤) データ。約+25hPa の静的圧力変化が見られ、圧力センサー部が約 25cm 沈降したことを示す (東大地震研 [課題番号: 1431])。

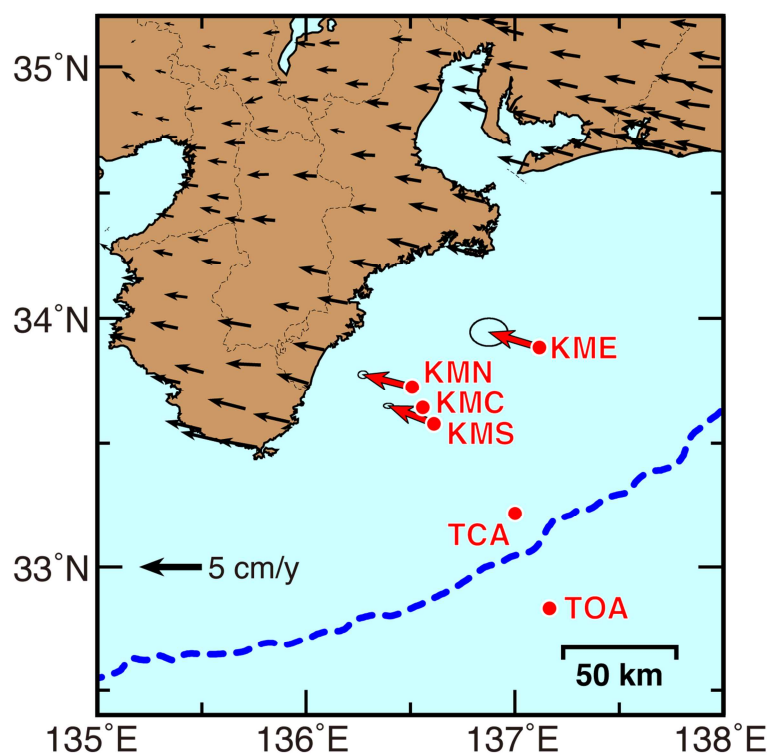


図 3. 熊野海盆におけるアムールプレートに対する変位速度ベクトル。2013 年までのデータの解析による（名古屋大学 [課題番号：1706]）。



図 4. 現在広く用いられている海底地震計と機構及び外寸・重量の互換性を維持した超深海型海底地震計 (UDObs)。設置する前の船上で固定されている状態である。ガラス球を耐圧容器に用いた従来の海底地震計と同じ設置及び回収手順で観測運用可能である（東大地震研 [課題番号：1432]）。

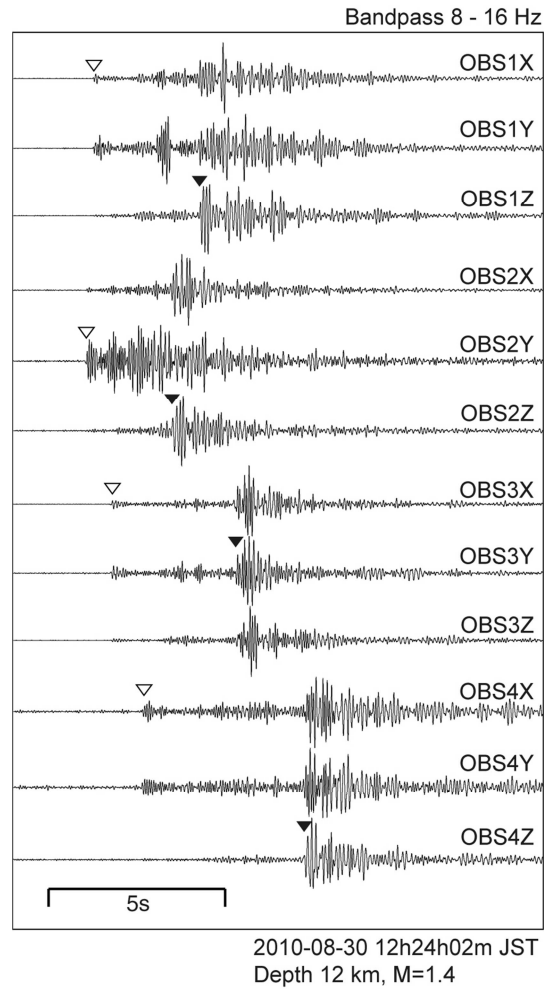


図5. 設置したケーブル式地震観測システムにより観測された微小地震の波形。この地震は、栗島近海を震央とし、マグニチュードは1.4である（東大地震研 [課題番号：1433]）。

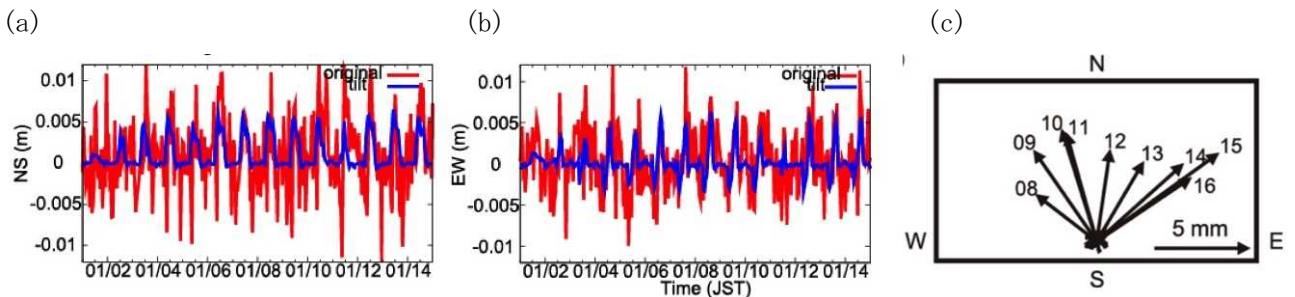


図6. 電子基準点の熱変形による誤差の例。電子基準点つくば1における2012年1月1日～14日の (a) 南北成分、(b) 東西成分の時系列。赤線がキネマティックGNSS座標時系列、青線が傾斜計により推定された電子基準点の熱変形による誤差。(c) 2012年1月8日における熱変形の1時間毎の方向と大きさ。矢印の数値は観測時（日本標準時）。太陽位置と逆側に変位する熱変形の特徴がよく現われている（国土地理院 [課題番号：6017]）。

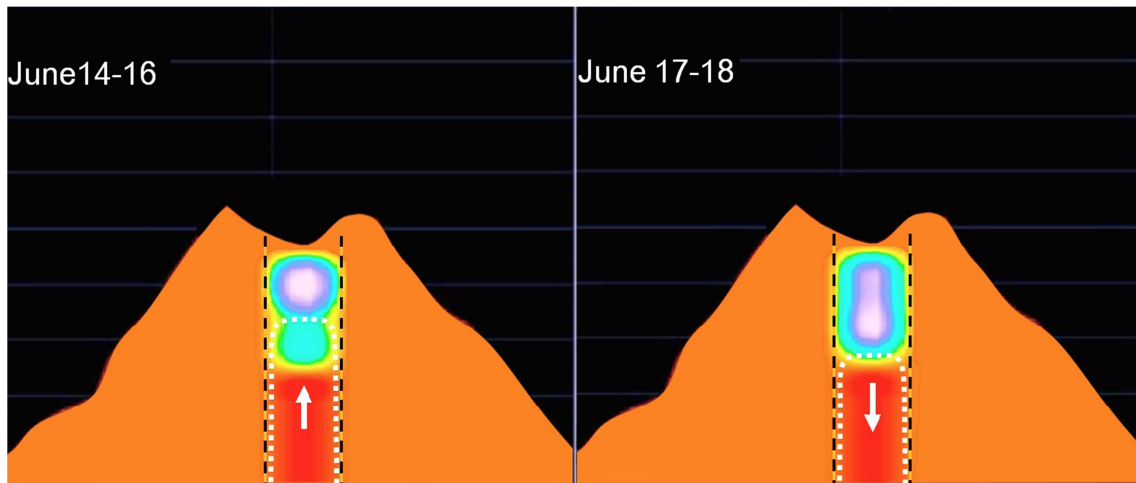


図7. 超低雑音ミュオグラフィ検出器を用いた薩摩硫黄島の観測結果。噴火活動にともなうマグマ頭位の変動が検出された（東大地震研 [課題番号：1438]）。

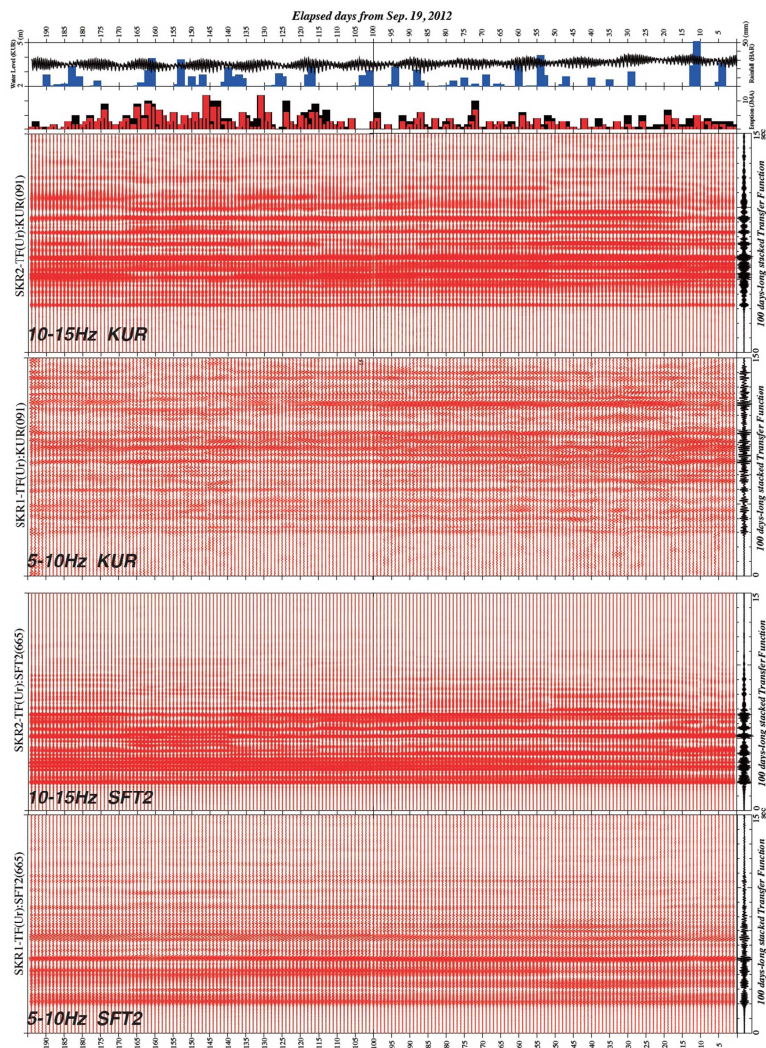


図8. 桜島島内の観測点における伝達関数の変化（名古屋大学 [課題番号：1707]）。

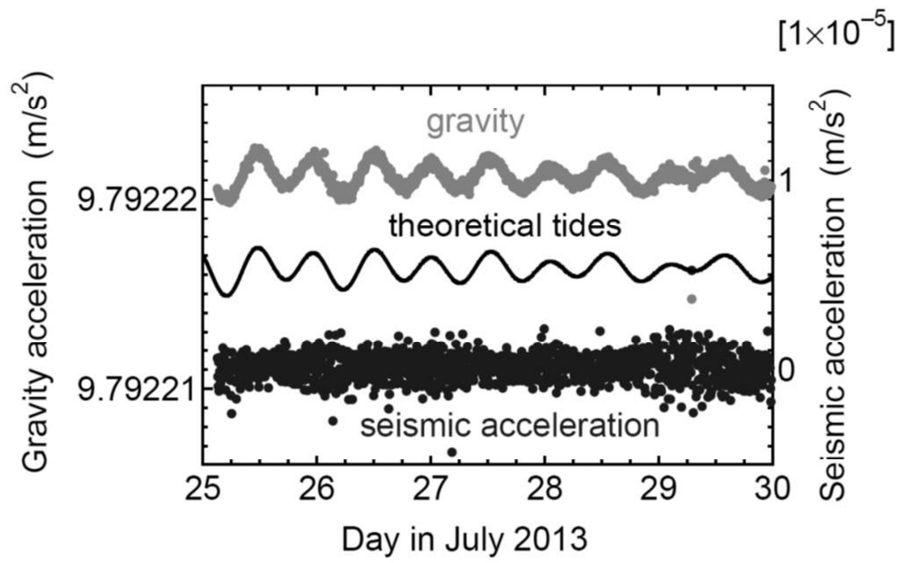


図9. 霧島火山観測所で取得された絶対重力値。理論潮汐とほぼ同じ重力変動が観測されている。2013年7月25～26日の平均値は $979222163.6 \mu \text{gal}$ であり、精度は $0.8 \mu \text{gal}$ と見積もられた（東大地震研 [課題番号：1439]）。