

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 藤本博己
(東北大学大学院理学研究科)

「新たな観測技術の開発」研究では、地震・火山噴火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同等の品質で、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実施する必要がある。特に、巨大地震の発生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高精度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

複数の研究機関が互いに連携し、観測船やブイを用いた海底地殻変動観測を実施するとともに、観測精度向上に関する研究を進めた。

海上におけるGPS（汎地球衛星測位システム）測位と海中の音響測位を結合して海底の精密測位を繰り返す手法は重要な成果をあげつつあるが、音速が水平方向に変化すると測位誤差が生じるという問題がある。そこで観測船と小型係留ブイの2点において海中音速の差を測定し、ブイから見た船の方位の正弦波で近似できる場合が多いことを見出した。また、キネマティックGPS解析に用いる衛星位置情報等について、数時間後に入手できる超速報暦を用いれば、その誤差は基線長100 kmでも1 mm 程度であることが示された（名古屋大学[課題番号:1706]）。

将来の海底地殻変動の連続観測に向けた技術開発と海中音速の不均質性の特徴を捉えるため、図1に示す係留ブイによるシステムを開発し、従来の曳航ブイ観測と並行して係留ブイによる試験観測を水深1450 mの宮城県沖海域で実施した（東北大学[課題番号:1217]）。海上保安庁では三陸沖から四国沖まで海溝沿いにGPS音響結合方式による精密海底測位用海底局を設置しているが、平成22年度に「福島沖」及び「宮城沖1」海底基準点の海底局を更新した。新旧の海底局を併用した観測を複数回行い、新旧の海底局アレイによる測位結果の違いは1 cm 以下であることを確認した（海上保安庁[課題番号:8006]）。

海底圧力観測は上下変動の連続観測のために重要な手法であるが、海底圧力データから地殻変動成分を抽出するためには、海洋変動の影響を除く必要がある。前年度からの研究により、1/12 弧度の格子のシミュレーションが最も適しており、短周期の海洋変動の影響を除去できることが分かった(東北大学[課題番号：1217])。

海底での傾斜変動を計測するため、次世代型広帯域海底地震計(BBOBS-NX)の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ための試験を実施し、鋸山観測抗の水管傾斜計と同程度の能力があることを確認した(東京大学地震研究所[課題番号：1431])。

海底間音響測距装置については、熊野灘の分岐断層沿いに設置した3台の装置の回収に成功し、960 m と720 m の2基線の208日の連続観測記録を得た。日平均時系列の推移から、1 cm 以上の距離変化が生じれば検出可能であることがわかった(東北大学[課題番号：1217])。

イ．海底地震観測技術

次世代型広帯域海底地震計(BBOBS-NX)のセンサー部をデータ収録部から切り離して海底に設置することにより、約10秒より長周期側では、海底堆積物の上の観測においても陸上地震観測点に匹敵する地震記録を取得できることを実証した。この海底広帯域地震計を無人潜水艇(ROV)による観測航海において2台設置し、長期観測を開始した(図2)。海底強震観測においては、水晶発振式の加速度センサーを用いることにより、ノイズレベルをこれまでの海底強震計の1/10に下げることができる可能性があることを明らかにした(東京大学地震研究所[課題番号：1432])。

ウ．海底実時間システム

東南海地震に備えて、熊野灘における地震・津波観測監視システム(DONET)の開発を進めており、設置された観測点からは良好なデータが得られていることを確認した。またデータ流通の相互交換・利用について関連機関と連携を図った(海洋研究開発機構[課題番号：4005])。昨年度までに開発されたネットワーク技術を導入した次世代ケーブル式海底観測システム(Kanazawa et al, 2010)を、新潟県粟島の南方の日本海に設置した。図3に示すように地震計4台を2次元的な配置に埋設し、観測されたデータは、準リアルタイムで地震研究所に転送されている(東京大学地震研究所[課題番号：1433])。

(2) 宇宙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、その解析技術の高度化を一層図ることにより、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になる。その他の衛星や航空機を利用したりリモートセンシング技術の高度化を合わせて、以下のような研究を進めた。

ア．宇宙測地技術

GPSによる測位では、数値気象データから推定される誤差と実データの解析結果との整合度を評価する指標を試作し、高分解能数値気象データ作成システムを構築した。マルチパス誤差の定量的評価も行い、つくばの国際GPS観測点TSKB についてマルチパス誤差をシミュレーションした結果、GPS上下座標時系列に見られる長周期ゆらぎがマルチパス誤差とよく対応することが明らかになった(図4, 国土地理院[課題番号：6017])。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を開発しており、気象庁のメソスケールGPV

気象モデルを用いて、関東地方及び東海・伊豆地域のGEONET 観測点を、1日以内に準リアルタイムで大気伝播遅延補正を行う実験を行い、現在その効果を解析中である(気象庁[課題番号:3019])。リアルタイムGPS 時系列に基づく永久変位検出手法を開発し、2008年岩手・宮城内陸地震の際の1 Hz 時系列に適用し、27観測点のうち20 の観測点において永久変位量の推定に成功した。推定完了までの所要時間は約80秒であり、後処理キネマティック解析による地殻変動場(Ohta et al., 2008)と水平成分で2 cmという実用的な精度で一致した(図5)。リアルタイムGPS時系列の長期安定性およびノイズの基線長依存性を調べ、基線長が150 km 以下では放送暦および予報暦でその精度の差はほぼ無いことが分かった(東北大学[課題番号:1218])。

SARの解析については、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、SAR干渉画像内に含まれる大気遅延誤差の低減処理のための解析環境を整えるとともに、実データに適用し、低減処理の有効性を確認した(国土地理院[課題番号:6018])。通常の干渉SAR 解析によって変動を求めることのできないほどの大変形については、ピクセルオフセット解析と呼ばれる方法が開発されることにより変動場が求められるようになったが(Fukushima et al., 2010; Furuya et al., 2010; Takada and Furuya, 2010)、平成22年度は、ピクセルオフセット法によって求められた変動場と干渉解析によって求められた変動場両方を用いて断層運動をモデル化する手法を開発した(東京大学地震研究所[課題番号:1433])。SAR干渉解析の改良を行うとともに、三宅島における地殻変動解析を進め、2008年度まで14 cm/年の速度で進行していた沈降が、2010 年においては、3 cm/年にまで減速したことを明らかにした(防災科研[課題番号:3017])。

イ．リモートセンシング技術

火山噴火の際には、火口近傍での観測は重要であるが、観測者の安全の確保のため、実施は困難であった。この問題を解決する目的で、産業用小型無人ヘリコプターを用いて観測装置の設置作業を行うシステムの高度化・安定化を図った。ウィンチ等の駆動系やデータ伝送系を改良し、地震計遠隔設置作業については実用化の目途をつけるとともに、活動中の桜島南岳火口周辺において、昨年設置した地震計を回収し、新たに地震計5 台を設置した(東京大学地震研究所[課題番号:1435])。

MODISとMTSAT 用いたリアルタイム観測システムにより、東アジアに分布する活火山の噴火活動のリアルタイム観測を試行しており(金子ほか、2010)、2011年1月19日に始まった新燃岳の噴火では、MTSAT 赤外画像により観測される「熱異常」と「噴煙」の発生状況に基づいて、活動の推移を三つのステージに分けることができることを見出した。MODISの観測により中～長期的な熱異常の時間変化を捉えることが可能であり、噴火の前兆となる熱異常が現れることなく、1 月下旬に突如噴火が始まったことも分かった(東京大学地震研究所[課題番号:1436])。航空機リモートセンシングでは、昨年度に開発したARTS の赤外多波長データを用いた火山ガス濃度分布把握技術を三宅島の観測データに適用し、火口内のSO₂ガス濃度分布を把握でき、本手法の汎用化の目処を得た。また、在来型Xバンド気象レーダによる桜島の爆発的噴火の観測は可能であり、高時間分解能の観測(1分毎)や高空間分解能の観測(250 m~500 m 間隔)ができることが分かった(防災科研[課題番号:3018])。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、桜島の爆発543 例の種子島気象レーダーデータから、爆発噴煙の検知率を調査し、走査頻度を増せば、小規模な爆発も検知可能なことが分かった(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

宇宙空間から地上に降りそそぐ高エネルギー粒子のミュオンによる火山体内部の観測を進めている(Taira et al., 2010; Tanaka et al., 2010a, 2010b; Uchida et al., 2010; Yamashina et al., 2010)。今年度は、ミュオン検出カウンターを従来の2枚から3枚に増やしたカロリメータ方式による観測システムを開発し、性能試験を行った。高い仰角から降り注ぐ荷電粒子のシャワーによって生じる偽ミュオントラックを取り除く効果があり、高性能化が期待できる。ミュオン観測によって桜島火道形状が推定されつつあり、その情報と絶対重力連続観測から、平成22年度1年間のマグマ頭位の時間変化を求めたところ、火山活動との対応が明らかになってきた。また、ミュオンによる断層破砕帯の観察も開始し、図6に示すように、表面から破砕帯内に降水がしみこんでいく様子が捉えられた(東京大学地震研究所[課題番号: 1438])。

豊橋市三河地殻変動観測所に設置した2台の弾性波アクロス震源装置を昨年度に引き続き1年間を通じてほぼ連続運転した。また、低周波数送信において回転型震源よりも有利と考えられる直線加振装置を用いた実験を栃木県大谷で行った(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

高精度を保ちつつ、フィールドでの利用を考慮して可搬性にも重点を置いた小型絶対重力計の開発を進めている。実験室外で市販の絶対重力計(FG5)との並行観測を実施し、性能評価を行うとともに、運搬中や観測中の問題点を洗い出した。静穏な実験室で装置の系統誤差の評価を実施したところ、図7に示すように、約2 μgal の再現性が得られ、統計的な誤差は1 μgal 未満であった。これらは市販の絶対重力計と同等の精度といえる(東京大学地震研究所[課題番号: 1439])。

火山地域などの悪条件下においての各種観測データの伝送方式の開発を目指して、平成21年度に引き続き、携帯電話カードの定額料金プランを用いた地震データ転送、プリペイド式携帯電話端末を用いたGPS観測網のテレメータ化、低消費電力の小型小電力無線機を用いた無線LAN装置の開発などのデータ伝送実験を行った。携帯電話データ通信サービスエリア内であれば3ch $\times$ 100 Hzの地震データの他、GPSや傾斜計などの低サンプリングデータを観測拠点に簡便にリアルタイム伝送をすることができるようになり、現在霧島山新燃岳噴火に伴う観測で実際に使用しているが、非常に順調に動作している。消費電力が1W程度と非常に低消費である小型無線機を用いて無線LANは、広指向性の平面パッチアンテナを使用しても、見通し範囲であれば2 kmの距離でも通信が可能である(九州大学[課題番号: 2207])。

ウ．大深度ボアホール計測技術

高精度で安定であるレーザー技術を利用した大深度ボアホール内における広帯域地震計測・傾斜計測法の開発(新谷, 2010)を進めており、今年度は大深度ボアホールを想定して250 mまで温度範囲を拡張した高温試験が実施できるように試験装置開発を行った。具体的には、熱膨張によって光学素子が損傷するのを防ぐため、石英系の光学部品と高温に耐える光ファイバーを選定し、さらに熱膨張ひずみを解放する構造の光学素子ホルダーを考案し、それらを組み合わせた高温試験用の干渉計ユニットを試作した。並行して、前年度に製作した小型レーザー干渉型広帯域地震計に制御

回路を接続し動作可能な状態に組み上げ、観測坑内（鋸山観測所）で周波数特性の測定や自己雑音等の評価を実施した（東京大学地震研究所[課題番号：1441]）。また、地下深部の高温環境下で安定動作する、地震計、傾斜計、強震計の開発を進め、平成22年度から高温対応型強震計の試験観測を開始し、データ伝送装置等を行う試験観測施設の整備を行った（防災科研 [課題番号:3020]）。

参考文献

新谷昌人, 2010, レーザー干渉法の精密測地観測への応用, 測地学会誌56, 1-12.

Fukushima, Y., V. Cayol, P. Durand, and D. Massonnet, 2010, Evolution of magma conduits during the 1998?2000 eruptions of Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island, J. Geophys. Res., 115, B10204, doi:10.1029/2009JB007023.

Furuya, M., T. Kobayashi, Y. Takada, and M. Murakami, 2010, Fault source modeling of the 2008 Wenchuan earthquake based on ALOS/PALSAR data, Bull. Seismol. Soc. Am., 100, 2750-2766, doi:10.1785/0120090242.

Kanazawa, T., M. Shinohara, S. Sakai, O. Sano, H. Utada, H. Shiobara, Y. Morita, T. Yamada, K. Mochizuki, and K. Yamazaki, 2010, New compact ocean bottom cabled system for seismic observation in the Japan Sea, OCEANS 2010 - MTS/IEEE Seattle, 1-6.

金子隆之・田寛之・高崎健二・安田 敦・前野 深・小山悦郎・中田節也, 2010, MTSAT で捉えた浅間山2009年2月2日噴火に伴う噴煙, 火山, 55, 119-128.

Ohta et al., EPS, 60, 1197-1201, 2008.

Taira, H. and H.K.M. Tanaka, 2010, Possible space and power effective muon sensor module for imaging a volcano, Earth Planets Space, 62, 2, 179-186.

Takada, Y., and M. Furuya, 2010, Aseismic slip during the 1996 earthquake swarm in and around the Onikobe geothermal area, NE Japan, 2010, Earth Planet. Sci. Lett., 290, 302-310.

Tanaka, H.K.M., H. Taira, T. Uchida, M. Tanaka, M. Takeo, T. Ohiminato, Y. Aoki, R. Nishiyama, S. Daigo and H. Tsuji, 2010a, Three-dimensional computational axial tomography scan of a volcano with cosmic ray muon radiograph, J. Geophys. Res., 115, B12, 332.

Tanaka, H.K.M., T. Uchida, M. Tanaka, H. Shinohara and H. Taira, 2010b, Development of a portable assembly type cosmic-ray muon module for measuring the density structure of a column of magma, Earth Planets Space, 62, 2, 119-130.

Uchida, T., H.K.M. Tanaka, and M. Tanaka, 2010, Development of a muon radiographic imaging electronic board system towards a stable solar power operation, Earth Planets Space, 62, 2, 167-172.

Yamashina, Y., T. Yamashina, H. Taira, and H.K.M. Tanaka, 2010, Development of a cost effective plastic scintillator for cosmic-ray muon radiography of a volcano, Earth Planets Space, 62, 2, 173-178.

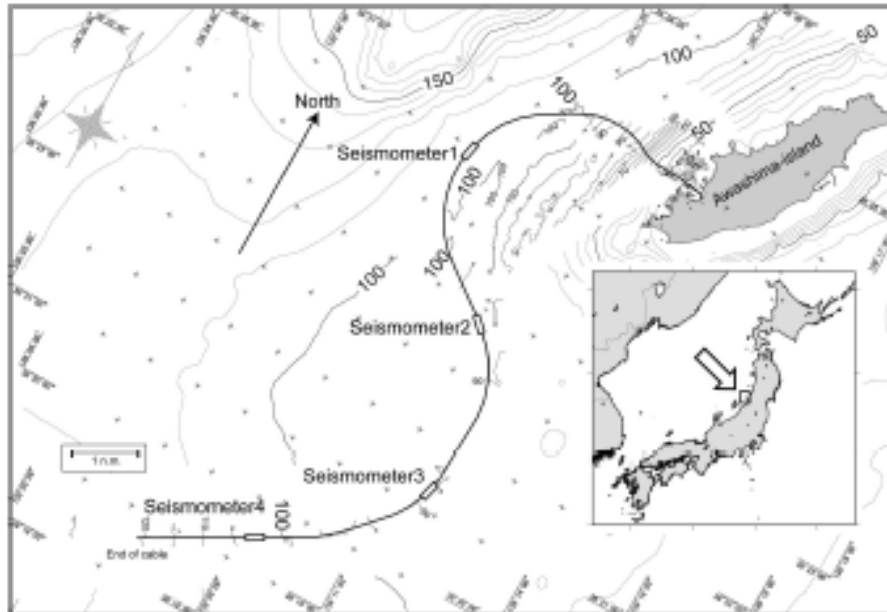


図3. 設置したケーブルルート。地震観測システムのケーブル全長は、25 km であり、4台の地震計が5 km 間隔に取り付けてある(東京大学地震研究所[課題番号：1433])。

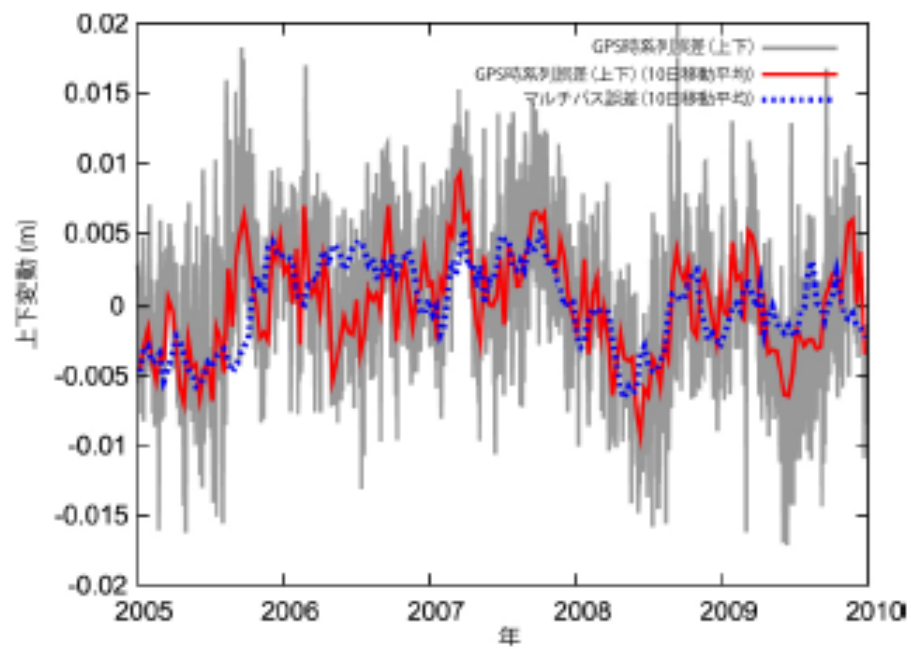


図4. GPS 受信機SNR を用いてシミュレーションしたマルチパス誤差と実際に観測されたGPS 時系列誤差の比較(上下成分)(国土地理院[課題番号：6017])。

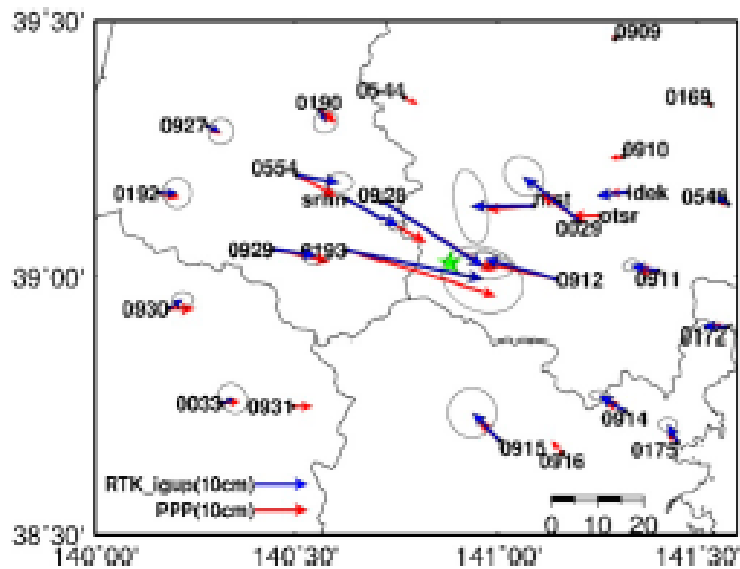


図5. 2008 年岩手・宮城内陸地震による地震時地殻変動の後処理キネマティック解析による水平変位量 (Ohta et al., 2008) (赤色) と本研究で開発した変位量自動検出アルゴリズムによって推定された水平変位量の比較 (青色) (東北大学[課題番号: 1218])。

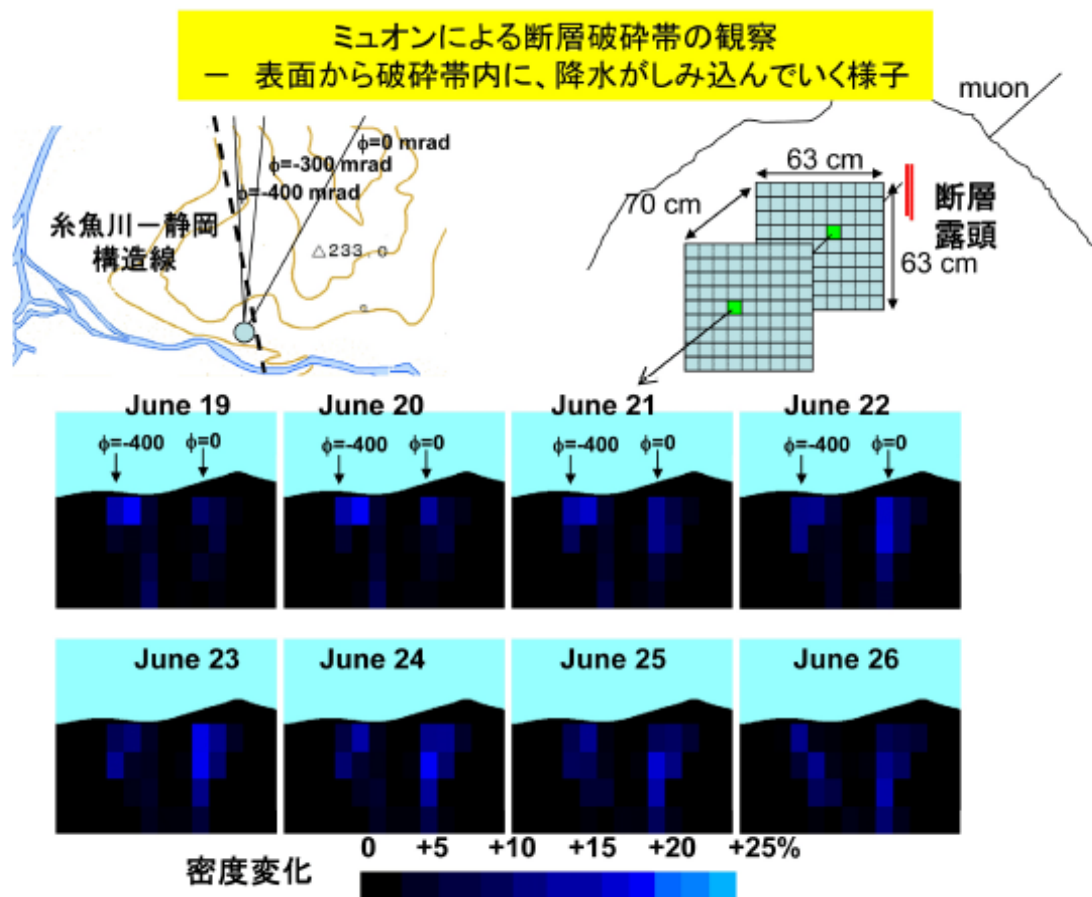


図6. ミュオンによる糸魚川市の断層破砕帯の観察において、表面から破砕帯内に降水がしみこんでいく様子が、毎日の透視画像 (密度変化画像) からとらえられている (東京大学地震研究所 [課題番号: 1438])。

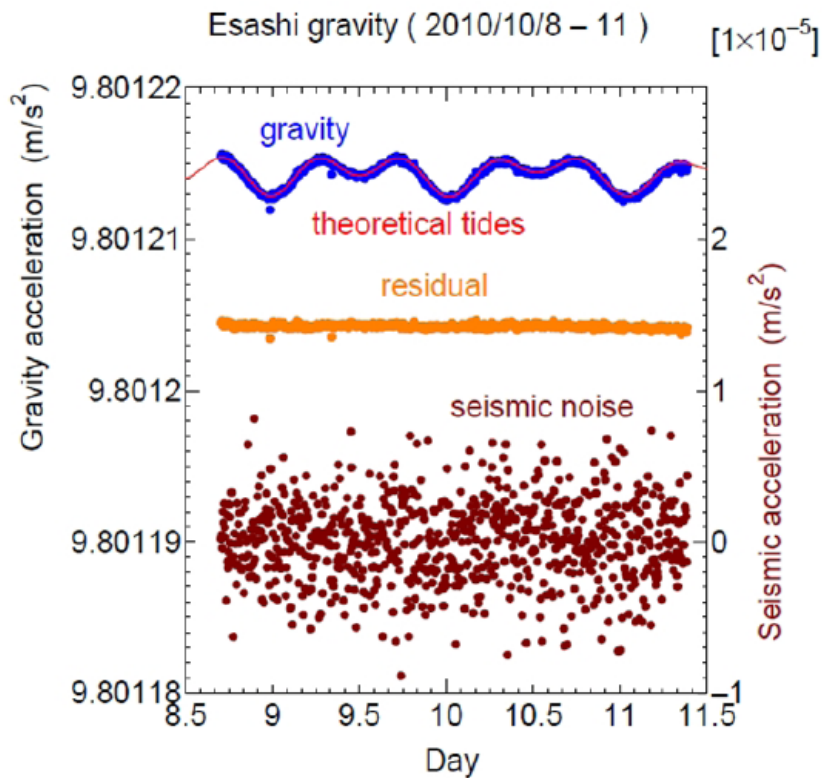


図7. 静穏な実験室における小型絶対重力計の精度評価。2010 年5 月および10 月に試作絶対重力計の性能評価を実施した。再現性や統計的なばらつきの値から、市販の絶対重力計と同等の性能と評価された。青は絶対重力値であり、理論潮汐（赤線）とよく一致している（橙はその残差）。なお、このときの地面振動を茶色で示す（装置の振動検知機構により測定値から除去される）（東京大学地震研究所[課題番号：1439]）。



図8. 小型レーザー干渉型広帯域地震計に制御回路を接続し、観測坑内（鋸山観測所）で周波数特性の測定や自己雑音等の評価を実施した（東京大学地震研究所[課題番号：1441]）。