

(6) 国土地理院

1. はじめに

国土地理院では、国土地理院基本測量長期計画並びに「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」及び「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」に基づき、この 10 年間各種の測量を実施してきた。ここでは、主なものについて簡単に振り返る。

2. GNSS 連続観測システムの発展と成果

GEONET (GNSS Earth Observation Network System) は、全国に設置された電子基準点 (GNSS 連続観測局) と茨城県つくば市に設置された GNSS 中央局からなる。測量と地殻変動監視を本来目的とする GNSS 連続観測システムである。

1994 年 (平成 6) 年度から始まった国土地理院による GNSS 連続観測は、1996 年に 600 点を超える電子基準点を中心とした GEONET となった。その後、2003 年に電子基準点の数は 1200 点となり、国土を約 20km 間隔で覆う観測網ができあがった。こうして GEONET により、時々刻々と進行する我が国の地殻変動を全国ほぼ一様に監視することができるようになった。2009 年以降の 10 年間にみられた GEONET の様々な発展と成果について、以下に述べる。

2.1 GEONET の発展

2009 年 4 月から第 4 世代解析ストラテジによる GEONET 定常解析の運用を開始した。これにより、年周変化や座標値のばらつきが軽減され微少な地殻変動の検出が可能となった。

2010 年、既存の IP-VPN 回線に加え、新たに携帯電話を利用した通信回線を整備し、通信の二重化を図った。

2011 年 3 月 11 日に発生した平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (以下「東北地方太平洋沖地震」とい

う。)に伴い、電子基準点「牡鹿」(宮城県石巻市、牡鹿半島)において、東南東方向へ約 5.4m の変位、上下変動では約 1.1m の沈降を観測した (水藤ほか、2011¹⁾) (図 1)。

本地震により東北地方から関東甲信越地方の広範囲で顕著な地殻変動が観測されたため、5 月 31 日に新たな測量成果 (ITRF2008 準拠、元期 5 月 24 日) を公表した。

2012 年から 2013 年にかけて、電子基準点の防災対応力強化として、停電時にも 72 時間継続して観測できる無停電装置を一部の離島などを除く電子基準点に整備した。さらに、ほぼ全ての電子基準点において、GPS 衛星だけでなく準天頂衛星及び GLONASS 衛星の信号を受信できる GNSS アンテナ及び受信機へ更新した。

2012 年 7 月、東北地方などの 187 点の電子基準点で準天頂衛星及び GLONASS 衛星の観測データの提供を開始し、2013 年 5 月には、全国の電子基準点で提供できるようになった。

2016 年 4 月、電子基準点 786 点において Galileo 及び近代化 GPS の L5 信号のデータ提供を開始した。

以上のように、この 10 年間に GEONET は、第 4 世代解析ストラテジによる定常解析の運用、マルチ GNSS への対応、東北地方太平洋沖地震を教訓とした防災対応力の向上により、安定した高品質のデータの取得と提供ができるようになった。

2018 年 3 月末現在、電子基準点の数は 1318 点であり、日々日本全国の地殻変動を監視している (図 2)。

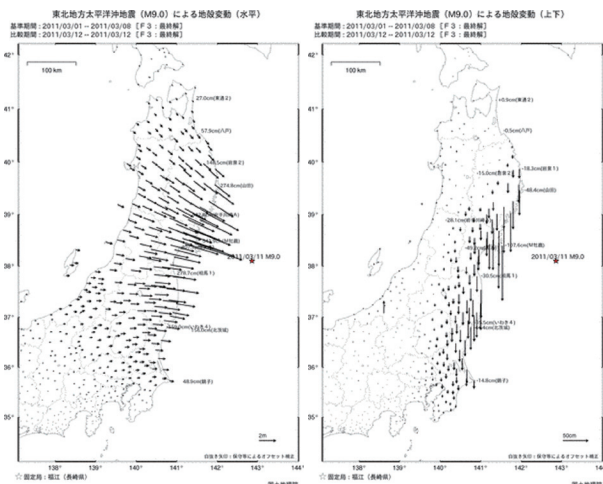


図 1 東北地方太平洋沖地震による地殻変動

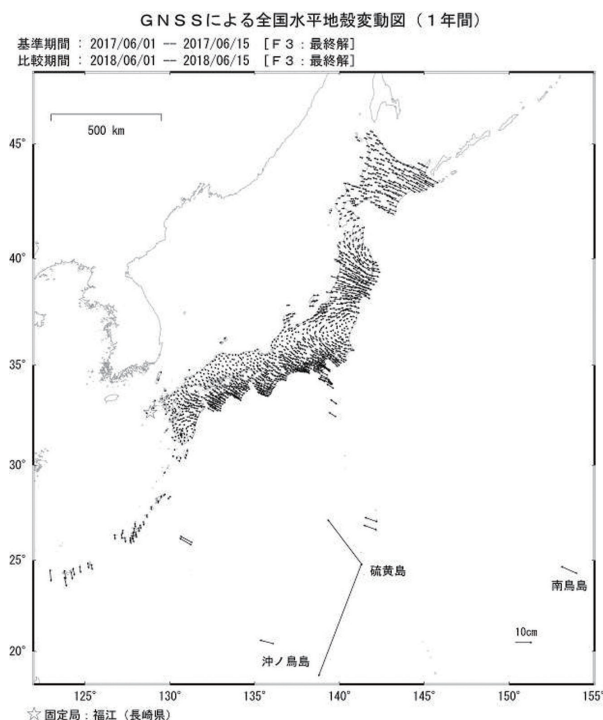


図 2 日本全国の水平地殻変動

2.2 GEONET による主な成果

2009 年に GEONET データから求められた水蒸気量が、気象庁の数値予報に取り込まれ、そのスコアを改善している（気象庁・国土地理院，2009²⁾；小司，2015³⁾）。

2009 年 4 月以降、電子基準点の日々の座標値から作られたセミ・ダイナミック補正パラメータが公開され、精度を要する公共測量に適用されるようになった（田中ほか，2006⁴⁾；檜山ほか，2010⁵⁾）。

東北地方太平洋沖地震では、GEONET によって観測された地殻変動から震源断層モデルの推定、並びに、地震時及び地震後のすべり分布の解析を行い、この地震の全体像を明らかにした（Ozawa et al., 2011⁶⁾）。また、地震の発生直後から東日本全体で東北地方太平洋沖地震の震源域に向かう余効変動が観測されている。上下方向の余効変動は、岩手県三陸沿岸と奥羽脊梁山脈付近で沈降が見られる一方、宮城県から千葉県の太平洋沿岸では隆起傾向が見られる。最大の変動量は、地震発生後から 2019 年 1 月までに水平方向で約 1.5m、上下方向で約 0.6m の隆起である。

熊本地震でも地震に伴う地殻変動が詳細に捉えられ、前震及び本震の震源断層モデルが推定された（矢来ほか，2016）。このほかの地震でも GEONET によって地殻変動が捉えられている（第 2 部第 2 章 1. を参照）。

このほか、東海、紀伊水道、豊後水道、日向灘、房総半島において繰り返し発生している長期的スロー地震を GEONET の観測で検出している。また、ここ 10 年の間に長期的スロー地震だけでなく、短期的スロー地震も検出できるようになってきている（詳細は、第 2 部第 3 章 3.（1）を参照）。

2.3 REGARD（電子基準点リアルタイム解析システム）

東北地方太平洋沖地震では、地震計の特性により巨大な地震について即時に正確なマグニチュードの算出ができなかったため、津波高の予測が過小評価となった。国土地理院には、より信頼度の高い津波予測支援への利用を視野に、GEONET のリアルタイムデータを用いた概略の地殻変動結果から巨大地震の地震規模を即時に推定するシステム開発への期待が寄せられた。このような背景を踏まえ、常時 RTK 測位を行い即時に概略の地殻変動を把握する機能を実装した電子基準点リアルタイム解析システム（REGARD: Real-time GEONET Analysis System For Rapid Deformation monitoring）を開発した（図 3）。

REGARD は、東北大学や気象研究所との共同研究により開発したもので、巨大地震発生時に概略の地殻変動を即時に検出して地震規模を推定し、津波予測支援に役立てることができる。2016 年 4 月 1 日から運用を開始し

た REGARD は、およそ 2 週間後の熊本地震においてその機能を発揮し、即時に概略の地殻変動を検出し地震規模を推定できることが確認された（図 4）。

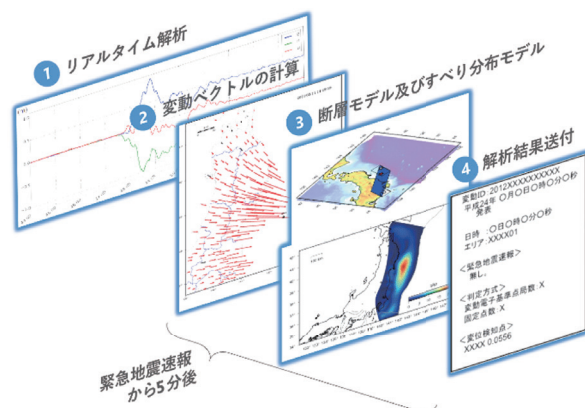


図 3 REGARD の計算フロー

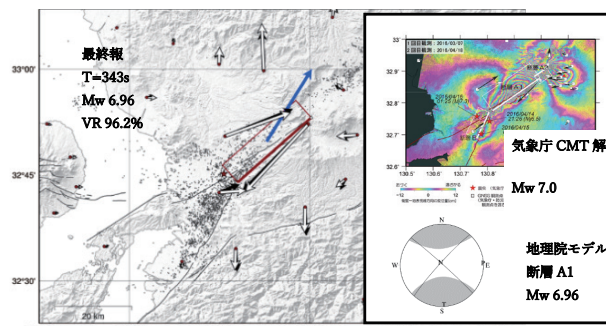


図 4 REGARD によるリアルタイム断層モデル推定結果

3. 観測強化地域等における測量

国土地理院では、東海・南関東の観測強化地域において、周期の短い繰り返し観測や連続観測を行ってきた。近年は「南海トラフ地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」等で指定している地震防災対策推進地域において、観測周期の短い水準測量を実施し、地殻の上下変動を監視している。また、水準測量の際には、水準路線近傍の電子基準点及び験潮場等に水準点からの高さの取り付け観測を実施し、その結果を統合的に解析し、地殻変動の様相を総合的に監視している。その中でも、東海地域の掛川～御前崎においては、プレートの沈み込みに伴う地殻変動を把握する上で重要な路線と位置付け、現在も水準測量を年 2 回行っている。なお、東海地域で実施していた長距離水管傾斜計、ボアホール型の歪計・傾斜計等による地殻変動連続観測は、2017 年（平成 29 年度末）で観測を終了した。

東北地方太平洋沖地震では、電子基準点の観測データにより東北地方から関東・甲信越地方にかけての広い範囲で顕著な地殻変動が明らかになったため、三角点約 44,000 点、水準点約 1,400 点の測量成果の公表を停止した。その後、2011 年 10 月 31 日に三角点約 43,300 点、

2012 年末までに水準点約 2,800 点の新しい測量成果を公表した。しかし、地震後も続く余効変動により 2016 年 3 月時点で成果との乖離が 30cm 以上の地域があることが確認されたため、2016 年から 2017 年まで東北地方を中心に水準点の再測量を行い、2017 年 2 月 28 日に 573 点、2018 年 2 月 28 日に 787 点の水準点成果の改定、公表を行っている。

熊本地震では、三角点等 4,169 点、水準点 296 点の測量成果の公表を停止し、2016 年 9 月 12 日までに新しい測量成果を公表した。

4. SAR (合成開口レーダー)

国土地理院では、火山活動、地盤沈下等に伴う地殻・地盤変動の監視を目的として、陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) 及び陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2) に搭載された L バンド合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR) の観測データを用いて SAR 干渉解析を定常的に実施してきた。また、地震や火山等活动による災害が発生した場合には、その災害状況の把握や復興作業の情報提供を目的として、緊急解析を実施してきた。

このほか、「衛星データを用いた地震・地盤変動データ流通及び解析グループ」(2008 ～ 2013 年度)、及び「地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループ」(2014 年度～) の事務局を務め、地震災害発生時の緊急観測の取りまとめや、地震予知連絡会及び地震調査委員会への解析結果の報告等を行ってきた (地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループの詳細については第 1 部第 2 章 5. を参照)。

ALOS は 2006 年 1 月に打上げられ、2011 年 5 月まで運用された。この 10 年の間、運用終了までに SAR 干渉解析を実施した主な地震・火山活動は、2011 年の霧島山 (新燃岳) の火山活動、東北地方太平洋沖地震などが挙げられる。

東北地方太平洋沖地震では、地殻変動が東北地方から関東及び中部地方まで及んでいたことが捉えられ、牡鹿半島における変動量は GEONET で得られた結果と整合していた。また、内陸で発生した誘発地震に伴う局所的な地殻変動を検出し、GEONET のみでは把握が困難な断層近辺の詳細な変動を明らかにした (図 5)。

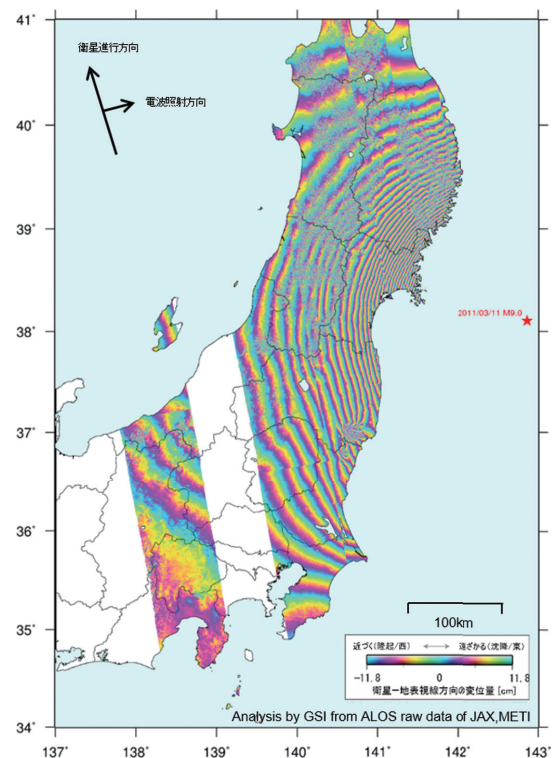


図 5 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動を表した SAR 干渉画像 (★星印は震央を示す)

ALOS-2 の運用開始以降、SAR 干渉解析を実施した国内の主な地震・火山活動としては、2014 年の御嶽山の火山活動、2015 年の箱根山の火山活動、2015 年の口永良部島の火山活動、平成 28 年 (2016 年) 熊本地震、2018 年の霧島山 (えびの高原 (硫黄山)) の火山活動、平成 30 年北海道胆振東部地震、西之島の火山活動などが挙げられる。

2015 年の箱根山の火山活動では、火山活動の活発化を受けて高頻度な緊急観測が実施された。国土地理院では緊急解析を実施し、他の地上観測機器では捉えることの難しい、直径 200m 程度の範囲における局所的な変動を高頻度に捉えた。得られた地殻変動情報は火山噴火予知連絡会等の関係機関に提出され、噴火警戒レベル及び立入規制範囲の検討に活用された。

平成 28 年 (2016 年) 熊本地震では、布田川断層帯及び日奈久断層帯に沿って顕著な変動が見られたほか、MAI (Multiple Aperture Interferometry) 法を適用することで、標準的な SAR 干渉解析では捉えられなかった断層近傍の変動が明らかになった。得られた地殻変動情報は地震調査委員会による地震活動の評価、基準点の測量成果停止及び改定範囲の決定、小変位の地表断層群の抽出に活用された。

このほか、海外の地震・火山災害では、2017 年のイラン・イラク国境付近の地震、2018 年のインドネシア・ロンボク島の地震、2018 年のインドネシア・スラウェシ島の地

震などにおいて、発災後の災害対応に役立ててもらうことを目的に、現地の関係機関に解析結果を提供した。

国土地理院では、SAR 干渉解析手法の高度化にも継続的に取り組んでいる。この 10 年間では、とりわけ SAR 干渉解析における主な誤差要因である水蒸気及び電離層の影響について、それぞれ軽減する手法を新たに取り入れ、干渉画像の判読性向上が図られた。また、ALOS-2 による観測データが蓄積してきたことにより、多数枚の SAR 干渉画像を用いることで変動の検出精度を向上させる、干渉 SAR 時系列解析が可能となっており、国土地理院においても現在試行しているところである。今後上げられる予定の「先進レーダ衛星 (ALOS-4)」の運用が開始され、定常的に高頻度な観測が行われることで、干渉 SAR 時系列解析のさらなる高精度化及び実運用化が期待される。

5. VLBI

国土地理院では、国内測地網の規正及びプレート運動の把握のため、国内に設置している VLBI 観測局において観測を実施してきた。また、1999 年に国際 VLBI 事業 (IVS) が設立されて以来、国土地理院はその構成機関として国際観測に参加するとともに、相関局、解析局としても活動し、国際的な測地基準系の構築や地球の自転変化の監視に貢献している。地殻変動の把握のために実施していた国内観測は 2013 年で終了し、新十津川、始良、父島の観測局は順次運用を停止した。その一方で、2014 年に IVS のサブグループとして設立されたアジア・オセアニア VLBI グループ (AOV) において積極的な役割を担い、アジア・オセアニア地域の測地基準系の構築や地殻変動の把握に努めている。

東北地方太平洋沖地震では、東日本を中心に大規模な地殻変動が生じたため、測量成果の改定が行われ、新成果の算出の際は地震後に計測したつくば局の座標値が重要な役割を果たした。その後、次世代の VLBI 観測装置の仕様 (VGOS) に基づいて新たに石岡測地観測局を設置し、2015 年より運用を開始した。これに伴い、つくば局は 2016 年に運用を停止した。現在は、石岡測地観測局で IVS や AOV による国際 VLBI 観測に参加している。

6. 重力

国土地理院は、高精度で安定した重力値を提供するとともに国際的に合意された基準に基づく日本の重力基準網の構築を目的として、全国で重力測量を実施している。2002 年から 2016 年までに国土地理院が実施した重力測定結果を用いて、国内の重力値の基準を 40 年ぶりに更新し、2016 年度に「日本重力基準網 (JGSN2016)」を

公表した。また、東海地震の発生が懸念されている東海地域の重力変化の監視を目的として、東京大学地震研究所と共同で、1996 年から御前崎市における絶対重力測定を実施している。2018 年度には、これまで観測を継続してきた施設の取り壊しに伴い、同市内の別の場所に観測点を移転した。このほか、東北地方太平洋沖地震及び熊本地震発生後に、地震による地殻変動に伴う重力変化の検出を目的とした重力測量を実施した。

7. ジオイド

国土地理院では、衛星測位を用いた測量業務の効率化の一環として、GNSS 測量により 3 級水準測量に相当する標高の決定を可能とするため、高精度なジオイド・モデルの構築を進めてきた。2013 年度に四国、中国及び九州地方のジオイド・モデルを改定して「日本のジオイド 2011+2000」を公開した。2014 年度には、北海道から近畿地方及び沖縄本島のジオイド・モデルを改定して「日本のジオイド 2011」(Ver.1) を公開し、さらに、2016 年度に全国の離島部のジオイド・モデルを改定して「日本のジオイド 2011」(Ver.2) を公開した。

8. 驗潮

国土地理院では、土地の高さの基準を決めるために、全国 25 か所の驗潮場において潮位の連続観測を行っている。その内 14 か所では、災害時を想定し、専用の IP-VPN 回線に加えて携帯電話回線を利用した通信の二重化が図られている。これらの回線を使用して、潮位データは国土地理院に送信され、リアルタイムで監視されるとともに、気象庁にリアルタイムで転送されている。

東北地方太平洋沖地震では、津波により相馬驗潮場が倒壊したため、2011 年 6 月から 2015 年 9 月までは福島県相馬港検潮所での潮位観測を行い、その後は新たに設置した相馬驗潮場で潮位観測を継続した。

伊豆半島東部の地殻変動の監視のために設置された真鶴 (神奈川県真鶴町)、初島 (静岡県熱海市) の潮位観測は地殻上下変動の監視を近傍の電子基準点で代替可能なため、2013 年 3 月末で観測を終了した。

参考文献

- 1) 水藤尚, 西村卓也, 小沢慎三郎, 小林知勝, 飛田幹男, 今給黎哲郎, 原慎一郎, 矢来博司, 矢萩智裕, 木村久夫, 川元智司 (2011). GEONET による平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地震時の地殻変動と震源断層モデル. 国土地理院時報, **122**, 29-37.
- 2) 気象庁, 国土地理院 (2009). 国土地理院電子基準点

- 観測データ (GPS データ) の活用による気象庁メソ
数値予報の改善について～水蒸気データをとりこむ
ことにより、予報精度が向上します～、報道発表資料。
[http://www.jma.go.jp/jma/press/0910/27a/MSM_](http://www.jma.go.jp/jma/press/0910/27a/MSM_GPS.pdf)
[GPS.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/press/0910/27a/MSM_GPS.pdf) (accessed May 26, 2017).
- 3) 小司禎教 (2015). GNSS 地上観測網による水蒸気
量推定と気象学への応用に関する研究－ 2015 年
度日本気象学会賞受賞記念講演－, 天気, **62**(12),
3-19.
 - 4) 田中愛幸, 岩田和美, 豊田友夫, 平井英明, 川口保,
松坂茂, 畑中雄樹, 飛田幹男, 黒石裕樹, 今給黎哲
郎 (2006). セミ・ダイナミックな測地系の構築に向
けた取り組みについて. 国土地理院時報, **110**, 1-9.
 - 5) 檜山洋平, 森下遊, 山尾裕美, 湯通堂亨, 越智久巳一,
岩田昭雄 (2010). セミ・ダイナミック補正の導入に
ついて. 国土地理院時報, **120**, 55-61.
 - 6) Ozawa, S., Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T.,
Tobita, M. and Imakiire, T. (2011). Coseismic and
postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki
earthquake. *Nature*, **475**, 373-376,
doi:10.1038/nature10227.