

アジア太平洋地域におけるジャワ島・スマトラ島の地殻変動監視 Monitoring of the Crustal Movement Jawa and Sumatra in Asia-Pacific Region

測地部 鈴木 啓・吉川忠男

Geodetic Department Akira SUZUKI, Tadao KIKKAWA

測地観測センター 今給黎哲郎

Geodetic Observation Center Tetsuro IMAKIIRE

地理地殻活動研究センター 西村卓也

Geography and Crustal Dynamics Research Center Takuya NISHIMURA

要 旨

国土地理院は、平成21年から3年間、独立行政法人科学技術振興機構（以下、「JST」という。）と独立行政法人国際協力機構（以下、「JICA」という。）が推進している地球規模課題対応国際科学技術協力事業の「インドネシアにおける地震火山の総合防災策」プロジェクトに加わり、測地観測に基づく地殻変動監視を目的としてジャワ島とスマトラ島（インドネシア共和国）においてGNSS観測点を設置した。本プロジェクトは、平成23年度に終了したが、インドネシア側の関係機関から観測継続に対して強い要望があったため、国土地理院では、平成24年度からアジア太平洋地域地殻変動監視事業においてGNSS観測点を維持し、データを管理・解析することとした。

アジア太平洋地域地殻変動監視事業は、アジア太平洋地域の地殻変動を監視すると共に同地域の基準座標系（Asia-Pacific Reference Frame; 「APREF」）の構築に貢献するため、南太平洋地域に設置したGNSS観測点を維持管理し、GNSS解析を実施している。そこで、ジャワ島・スマトラ島で観測したGNSSデータについて、アジア太平洋地域の地殻変動監視事業で活用しているGNSS解析支援システムでの解析を実施した。また、ジャワ島に設置したGNSS観測点は、断層運動の監視を目的として設置したため、広域かつ面的に地殻変動を監視できるSAR干渉解析も試みた。

1. はじめに

国土地理院は、JSTとJICAが実施している地球規模課題対応国際科学技術協力事業の一つである「インドネシアにおける地震火山の総合防災策」プロジェクトに参加し、平成21年10月にジャワ島西部（4点）とスマトラ島北西部（1点）に合計5点のGNSS観測点をインドネシア側の関係機関の協力の下に設置した。このJST-JICAプロジェクトは、平成21年から3年計画で実施されたため、平成23年度に終了したが、インドネシア側の関係機関であるバンドン工科大学（以下、「ITB」という。）とシアクラ大学津波防災研究センター（Tsunami & Disaster Mitigation

Research Center：以下、「TDMRC」という。）の観測継続に対する強い要望があったため、国土地理院では、観測点に観測機材を設置したまま残し、ITBとTDMRCの両機関が観測を継続することで合意した。これによって、ジャワ島とスマトラ島に設置したGNSS観測点は、平成24年度から測地部の事業であるアジア太平洋地域地殻変動監視事業において、観測データを管理・解析することとなった。

本稿では、当該事業で使用しているGNSS解析支援システムを利用し、ジャワ島・スマトラ島のGNSS観測点（5点）について解析を実施した。また、ジャワ島に設置したGNSS観測点は、断層運動を監視するために設置されたことから、GNSS観測網より空間分解能の高いSAR干渉解析を利用した監視も行ったので、その結果についても報告する。

2. インドネシアにおける地震火山総合防災策の

概要

「インドネシアにおける地震火山の総合防災策」プロジェクトは、日本とインドネシアの両国において、地震・火山災害軽減に貢献するため、6つのグループが設けられ、さらに数チームに役割を分割した体制で取り組まれた（図-1）。

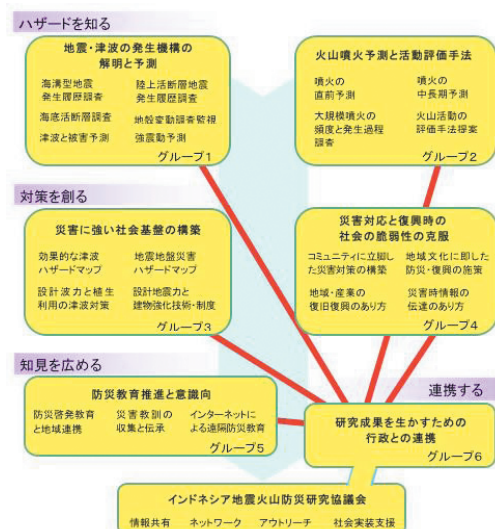


図-1 「インドネシアにおける地震火山の総合防災策」のグループ体制

(<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/indonesia/backnumber.html>より引用)

国土地理院は、6つのグループの内、「地震・津波の発生機構の解明と予測」(グループ1)の中で、さらに6チームに分割された「地殻変動調査監視」チームに属し、ジャワ島・スマトラ島の重要地域で、主にGNSS観測による測地学的な地殻変動調査を担った。当該チームには、国土地理院以外にも東京大学地震研究所や名古屋大学などの機関が日本側のメンバーとして含まれていた。

3. インドネシアに設置したGNSS観測点

平成21年度にJST-JICAプロジェクトにおいて、国土地理院が設置したGNSS観測点を図-2に示す。ジャワ島に設置した4点のGNSS観測点の内、バンドン北部にある2点(TNKP:タンクバンプラフ火山観測所・UPII:インドネシア教育大学)は、バンドン盆地の北縁を東西に走るレンバン断層監視のために設置した。また、バンドンの東側にある観測点(POSC:チェレメ火山観測所)は、レンバン断層の東側延長に位置するバリビス断層の監視を目的とし、バンドン南側にある観測点(PPDY:パパンダヤン火山観測所)は、火山監視のために設置した。一方、スマトラ島においては、2004年スマトラ沖地震で甚大な津波被害があったバンダ・アチュに地震後の地殻変動を監視するため、1点(TDMR)設置した。また、観測機器の管理等を考慮し、現地観測所構内及び大学等建造物の屋上に設置した(写真-1)。なお、観測点設置の際には、ITB・TDMRCスタッフの協力の下に実施された。



図-2 国土地理院がインドネシアに設置したGNSS観測点

JST-JICAプロジェクト期間中、これらの観測点の管理は、ジャワ島の観測点(4点)はITBが実施し、スマトラ島の観測点(1点)については、TDMRCが定期的に機器の点検等を行っていた。また、観測したGNSSデータは、ITB所有のFTPサーバを利用し、ITB・TDMRCスタッフがデータを取得・更新後、国土地理院に提供していた。プロジェクト終了後の平成24年度からは、国土地理院がITBとTDMRCの両機関と観測を継続するための担当者レベルの覚書を交わした(観測継続期間:2014年3月31まで)。なお、観測点の管理等は、プロジェクト期間中と同様の体制とすることを現地スタッフに依頼している。



写真-1 GNSS観測点設置状況(TNKP)

4. ジャワ島・スマトラ島におけるGNSS解析

インドネシアのジャワ島(4点)とスマトラ島(1点)に設置したGNSS観測点から取得したデータを利用し、GNSS基線解析を実施した。解析には、アジア太平洋地域における地殻変動監視事業で、平成22年度に導入したGNSS解析支援システムを使用した。このシステムは、基幹のGNSS解析ソフトウェアにBernese (Ver.5.0)を搭載している。また、解析戦略については、アジア太平洋地域において地殻変動を監視するために構築したストラテジー(鈴木他, 2012)に準拠することとし、観測網の根幹点には、安定して観測が実施されているジャワ島のIGS観測点(BAKO)を採用し、各観測点へ放射状の基線で観測網を構成した。なお、根幹点(BAKO)が欠測した場合は、観測網の形状が変化するため、最寄りの代替点を利用せず、解析処理を行わないこととした。この結果、解析して得られた各観測点の東西・南北・上下成分の座標時系列グラフを図-3に示す。バンドンの市街地に近いTNKPやUPIIの水平成分は、欠測時以外の期間において、比較的安定した推定値が得られている。POSCでは、2011年1月下旬から欠測やノイズの多いデータが取得されていたことから、観測データの品質低下が影響し、推定値も安定していない。

PPDYでも2011年3月頃から欠測が続く、特に東西・上下成分において、安定した結果を得ることができていない。これらの原因としては、観測点の設置に際し既存の架台を利用した点に建物等が近接してい

ることや植物の成長によって上空視界が十分でないことが考えられる。また、全体的に欠測期間が目立っているが、この欠測の主な原因は、停電等現地の電力事情が挙げられる。

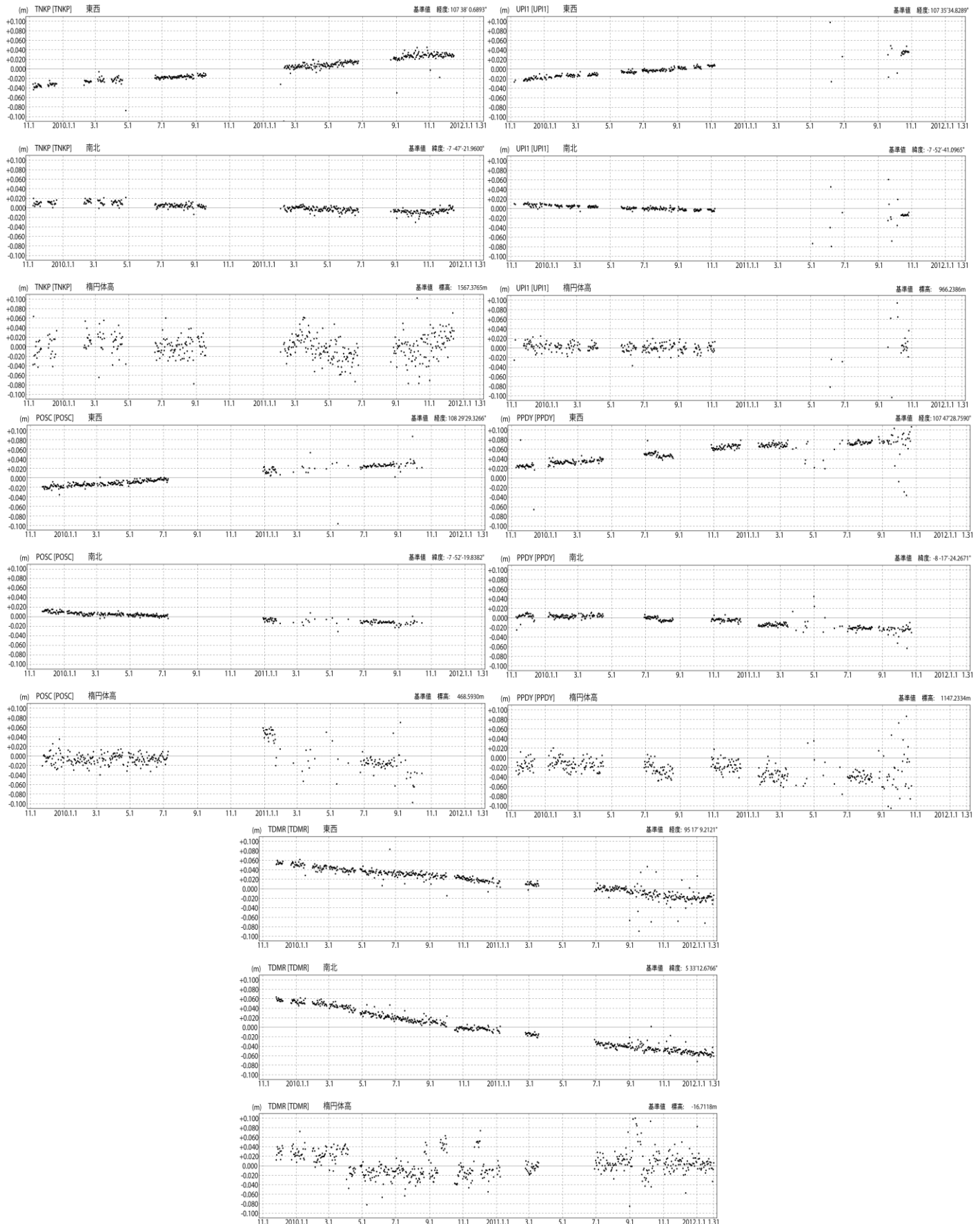


図-3 各観測点の座標時系列グラフ

(左上: TNKP, 右上: UPI1, 左中: POSC, 右中: PPDY, 下: TDMR)

以上の解析結果から根幹点（BAKO）を基準にした変動速度ベクトル図を図-4に示す。ジャワ島のレンバン断層周辺に設置したTNKPやUPIIでは、東方向に約1cm/year程度の変動量、バリビス断層周辺に設置したPOSCやパパンダヤン火山周辺に設置したPPDYについては、南東方向に約1cm/yearの変動量が確認できた。

一方、スマトラ島のバンダ・アチェに設置したTDMRでは、南西方向に約7cm/yearの変動量が検出された。このスンダ海溝側へ向かう変動は、2004年スマトラ沖地震（M9.1）の余効変動成分と一致しているため（太田他，2005），現在でも余効変動が継続していると考えられる。

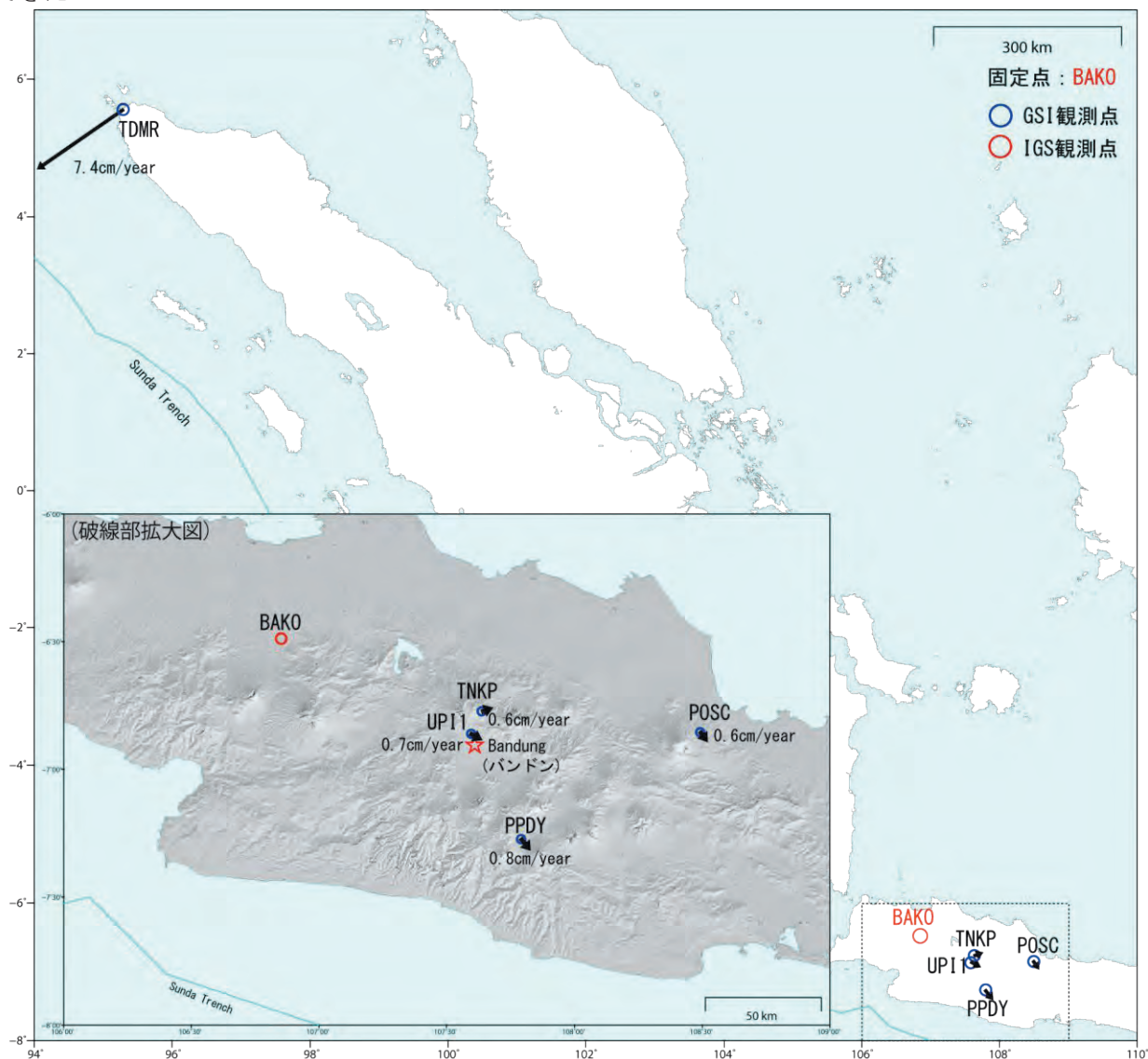


図-4 変動速度ベクトル図

5. バンドン周辺域におけるSAR解析

国土地理院では、これまでALOSに搭載されたPALSARデータを利用したSAR干渉解析により、地震・火山・地盤沈下・地すべりに伴う地殻・地表変動を検出してきた。そこで、TNKPやUPIIを設置したバンドン北部に位置するレンバン断層周辺を面的に監視するため、SAR干渉解析を行った。SAR干渉解析は、マイクロ波レーダー観測を地表の同一地点で2回以上実施し、反射波を干渉させ、位相差を求めることで、地表の変動を面的に捉える技術である。SAR干渉解析における検出精度は、SARデータに大

気や電離層等のノイズが含まれるため、数mmレベルの微小な変動を正確に検出することは困難であり、一般的に数cm程度とされている。そこで、検出精度を向上させるため、2時期に観測されたSARデータを利用したSAR干渉解析を多数実施し、平均化処理（スタッキング）を行った。なお、SAR干渉解析には、国土地理院が開発した新GSISARを使用し、位相アンラップ処理には、特別研究（平成20-22年度）で開発された位相連続化処理ソフトウェアに実装された「位相連続化」機能を用いた。

5.1 SAR干渉解析から平均化処理

2時期に観測されたPALSARデータを利用して、北行・南行軌道においてSAR干渉解析を実施した結果を図-5に示す。これらのSAR干渉画像において、TNKPとUPIIのほぼ中央を東西に走る南側に対して北側が低下する明瞭な地形がレンバン断層に関連する地形である。この地形周辺に変位量の明瞭な不連続はなく、レンバン断層周辺では、大気等によるノイズレベルを超えるような地殻変動は、検出されていないと判断できる。しかし、各SAR干渉画像において、衛星-地表間の距離が、数cm伸長（青～赤～黄）・短縮（青～黄～青）するようなノイズが全体的に見られ、大気等の影響によると考えられる。このようなノイズを軽減させる簡単な手法として平均化処理がある。

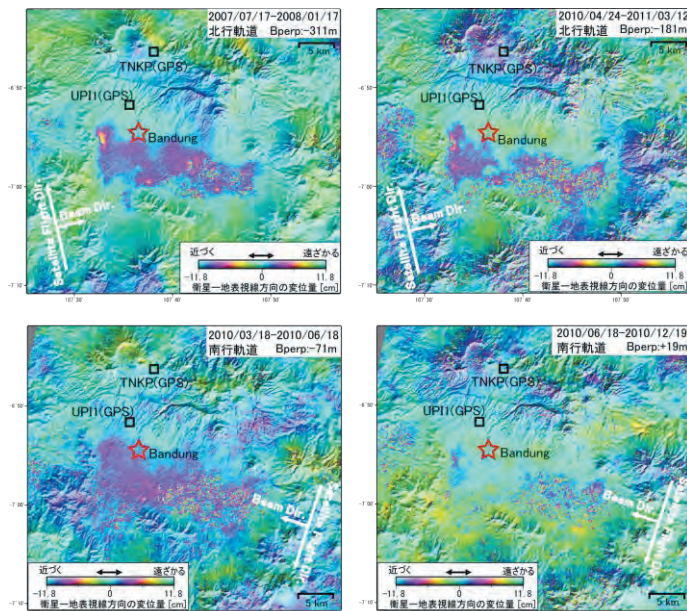


図-5 SAR 干渉画像

(上 2 画像：北行軌道 下 2 画像：南行軌道)

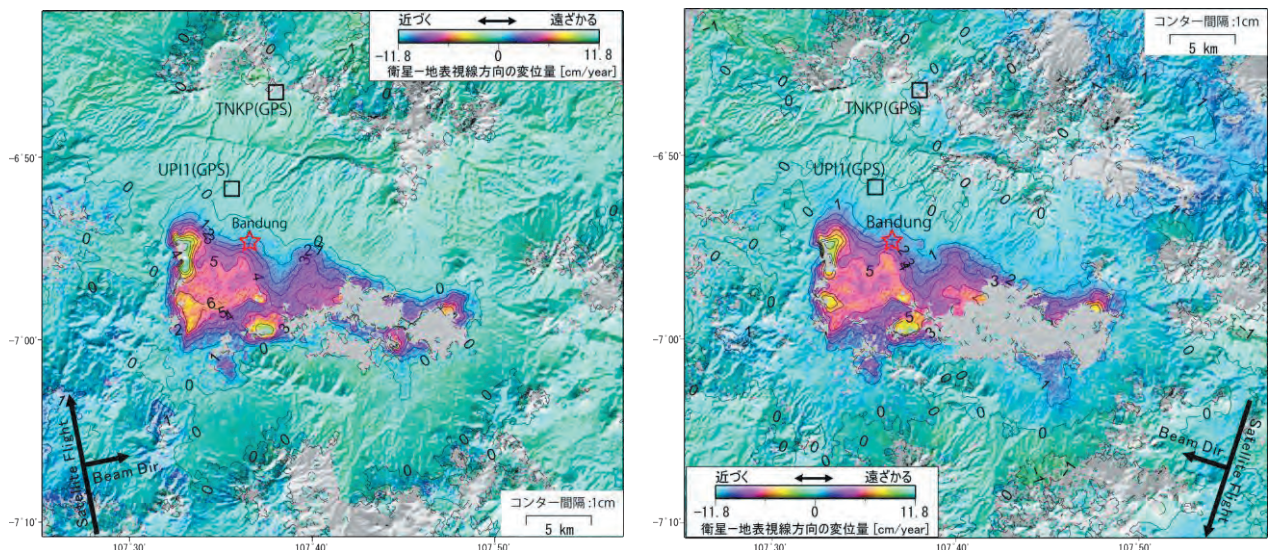


図-6 平均化処理後の変動速度 (cm/year)

(左：北行軌道 右：南行軌道)

※灰色：データなし

平均化処理後の検出精度は、水準測量と比較した結果、1cm以下の精度が得られている(森下他, 2010)。そこで、複数のSAR解析結果を平均化処理し、時間的に不規則に生じる誤差を軽減させ、変動速度を求めた。なお、平均化処理に使用した解析ペアは、表-1のとおりである

表-1 平均化処理に用いた PALSAR データ

	マスター観測日	スレーブ観測日	期間(日)
北行	2007/03/01	2007/07/17	138
	2007/07/17	2008/01/17	184
	2007/09/01	2008/01/17	138
	2008/01/17	2008/07/19	184
	2008/01/17	2009/01/19	368
	2008/03/03	2008/06/03	92
	2008/04/18	2010/04/24	736
	2008/07/19	2009/07/22	368
	2010/04/24	2011/03/12	322
	2010/09/09	2011/03/12	184
南行	2007/09/10	2007/12/11	92
	2007/09/10	2007/01/26	138
	2007/09/10	2008/04/27	230
	2008/01/26	2008/03/12	46
	2008/04/27	2011/03/21	1,058
	2008/07/28	2009/01/28	184
	2008/10/28	2009/01/28	92
	2009/01/28	2010/06/18	506
	2009/07/31	2009/12/16	138
	2010/03/18	2010/06/18	92
	2010/03/18	2010/11/03	230

また、平均化処理から変動速度を求めた結果を図-6に示す。図-5に見られた大気等のノイズによる見かけ上の位相変化が北行・南行軌道ともに軽減されていることがわかる。TNKPやUPI1付近では、GNSS解析の結果と調和的であり、レンバン断層周辺においても、一部低干渉領域があるが、断層運動に伴うような特段の変動を確認できなかった。しかし、SAR干渉解析によって面的に広範囲を監視した結果、バンドン南方において、衛星―地表間の距離が伸張する位相変化（青～赤～黄）が、北行・南行軌道の共通する地域で確認できる。変動量は、バンドンの西方において最大約10cm/yearを超えている。

5.2 2.5次元解析

SAR干渉解析から得られた変動量は、衛星―地表間の距離変化である。そこで、衛星視線方向から上下方向の変動量を抽出するための解析手法である2.5次元解析（Fujiwara et al., 2000）を行ったので、その結果を図-7に示す。なお、この手法で算出される上下成分は、厳密には水平面から約83°南側へ傾く方向となる。

TNKPとUPI1の間に位置するレンバン断層では、1cm/year以下の変動量であった。平均化処理後に見られたバンドン南方に広がる変動域は、上下方向に最大約10cm/yearを超える沈下量が見られ、地盤沈下域を明瞭に捉えた結果となった。この地域における地盤沈下の原因は、地下水の汲み上げによる影響であることが確認されている（Abidin et al., 2008）。

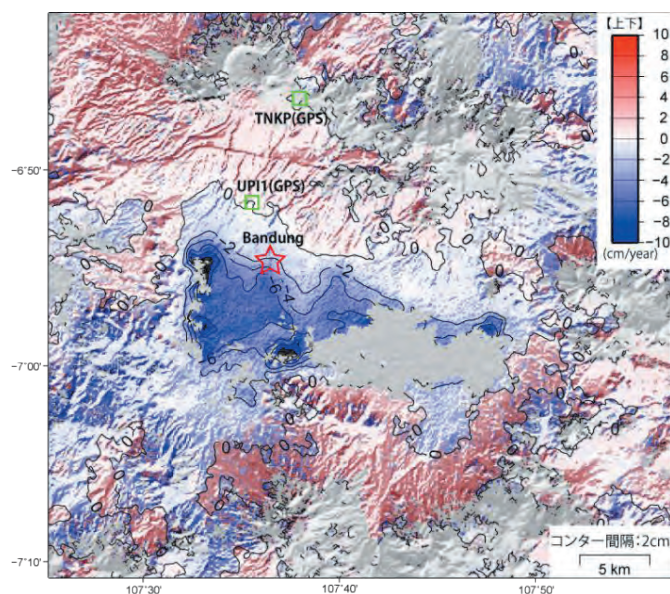


図-7 2.5次元解析から得られた上下成分の変動速度

※灰色はデータなし

6. まとめと今後の展望

国土地理院は、平成21年から3年間で実施されたJST-JICAプロジェクトに参加し、ジャワ島・スマトラ島にGNSS観測点を5点設置した。JST-JICAプロジェクト終了後もインドネシア側（ITB・TDMRC）からの観測継続の要望があったため、国土地理院は、ITB、TDMRCと2年間（平成24年度～平成25年度まで）の観測期間延長について合意し、アジア太平洋地域地殻変動監視事業として観測を継続することとなった。

アジア太平洋地域地殻変動監視事業では、JST-JICAプロジェクト期間中に観測したGNSSデータを解析するため、平成23年度に構築した解析戦略を利用し、GNSS解析を行った。その結果、ジャワ島に設置した4点のGNSS観測点から0.5～1cm/yearの変動が確認できた。また、スマトラ島のバンダ・アチェに設置したGNSS観測点では、南西方向に約1cm/yearの変動が確認できた。この変動は、2004年に発生したスマトラ沖地震の余効変動が継続していることを示している。しかし、各観測点における上下方向については、推定精度にバラツキがあったため、安定した推定値を算出することが今後の課題となる。

次に、バンドン北部に位置するレンバン断層を面的に監視するため、ALOS/PALSARを利用したSAR干渉解析を実施した。SAR干渉解析結果からは、GNSS解析と同様にレンバン断層周辺において、断層運動に伴うような変動は確認できなかった。しかし、バンドン南方に地盤沈下域を捉え、最大約10cm/yearを超える沈下量を検出した。SARの利用は、断層全体を面的に監視できることや、GNSS解析の上下方向の推定精度が不安定なことからGNSSによる監視体制を補強できる有効な手段のひとつであるといえる。

最後に、アジア太平洋地域地殻変動監視事業として、ジャワ島とスマトラ島の観測点をJST-JICAプロジェクトから引き継いだことから、機器更新（マルチGNSS対応）や観測データのオンライン化を必要に応じて実施することを検討していくことが重要である。

謝 辞

GNSS 基線解析に必要なデータは、IGS の ftp サイト (cddis.gsfc.nasa.gov) より取得しました。データの公開について感謝いたします。

また、ここで使用した「だいち」の PALSAR データの所有権は、(独) 宇宙航空研究開発機構及び経済

産業省にあります。データについては、(独) 宇宙航空研究開発機構と「陸域観測技術衛星を用いた地理空間情報の整備及び高度利用に関する協定」の共同研究協定に基づいて提供を受けています。この場を借りて、御礼申し上げます。

(公開日：平成 25 年 3 月 26 日)

参 考 文 献

- Abidin, H.Z., H.Andreas, M.Gamal, A.D.Wirakusumah, D.Darmawan, T.Deguchi and Y.Maruyama (2008) : Land subsidence characteristics of the Bandung Basin, Indonesia, as estimated from GPS and InSAR, Journal of Applied Geodesy, 2, 167-177.
- Fujiwara, S, T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa and M. Tobita (2000) : 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, Geophysical Research Letters, 27, 2049-2052.
- JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力事業 インドネシアにおける地震火山の総合防災策 (accessed Jan.2012) : <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/indonesia/backnumber.html>
- 森下遊, 鈴木啓, 雨貝知美, 唐沢正夫, 藤原みどり (2010) : 干渉 SAR を活用した効率的な水準測量の実施へ向けた取り組み, 国土地理院時報, 120, 17-22.
- 太田雄策・Meilano Irwan・伊藤武男・木股文明・田部井隆雄・Didik Sugiyant (2005) : GPS データに基づくスマトラ沖地震の余効変動, 地震学ニューズレター7月号, 1-2.
- 鈴木啓, 宮原伐折羅 (2011) : アジア太平洋における GPS 解析戦略の構築, 国土地理院時報, 123, 1-8.