

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 1日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340123

研究課題名（和文）Lバンド合成開口レーダーによる大気と大地のイメージング

研究課題名（英文）Imaging Atmosphere and Earth's Surface with L-Band Synthetic Aperture Radar

研究代表者

橋本 学（HASHIMOTO MANABU）

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：20293962

研究成果の概要（和文）：我が国の陸域観測技術衛星「だいち」搭載の L バンド合成開口レーダー画像を干渉処理し、干渉画像中に見られる地表面変動では説明できない、いろいろな擾乱について、GPS 連続観測データから得られる電離層の全電子量（GPS-TEC）や客観解析データに基づく水蒸気場のシミュレーション結果と比較した。その結果に基づいて、これら擾乱を補正して地表面変動を検出する方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：We performed analyses of images acquired by the L-band synthetic aperture radar onboard the Japan's Advanced Land Observing Satellite, and compared disturbances that cannot be explained by the Earth's surface movements with the total electron content in the ionosphere derived from continuous GPS data and water vapor distribution simulated from numerical weather model. Based on the results of these analyses, we proposed methods to correct these artificial variations and detect ground surface deformation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学

キーワード：合成開口レーダー，地表面変動，電離層，対流圏，宇宙測地

1. 研究開始当初の背景

2006年1月に打ち上げられた我が国の陸域観測技術衛星「だいち」（以下、ALOS）搭載のLバンド合成開口レーダー（以下、PALSAR）は、地球上で発生した数多くの地震・火山噴火・地盤沈下・地すべりなど、顕著な突発的変動に伴う地表面の変動を捉えることに成功し、これらの研究に多大な貢献を

した。Lバンド・レーダーは樹木に対する透過性に優れ、アジアのように植生が豊かな地域においても地表面の変動を高い空間分解能で検出できることが実証されている。しかしながら、干渉画像には地表面変動では解釈困難な種々の縞模様が認められる（図1）。これらの代表は、衛星軌道情報の誤差によるも

のと大気によるマイクロ波の屈折による擾乱によるものである。いずれの擾乱も地表面変動の検出には誤差となる一方で、電離層および対流圏の状態に関する重要な情報を含んでいるが、定量的な評価はまだ試みられていなかった。

2. 研究の目的

大気によるマイクロ波の屈折はGPS 連続観測などにより研究が進められ、一定の成果を挙げている。しかしながら、最も空間的密度が高い我が国の観測網をもってしても、GPS 連続観測で得られる大気による屈折誤差は、数10km 程度の広がりを持った領域の平均的な描像として得られるにすぎない。一方、合成開口レーダーの持つ空間分解能は数10m にも達する。この高い空間分解能を利用して、電離層及び対流圏の状態に関する情報を抽出し、GPS 連続観測結果や客観解析データと比較し、その成因を探りモデル化を図る。

3. 研究の方法

上記の問題を解決することを目的として、合成開口レーダー干渉法時系列解析手法等の適用による擾乱を抽出し、その結果を用いて、(1) GPS 連続観測データに基づく電離層擾乱、(2) 客観解析データに基づく対流圏擾乱との比較検討を行った。さらに、(3) これらを統合し、大気によるマイクロ波屈折の影響を定量的に評価し、低減する手法・プロセスを提案した。

4. 研究成果

(1) GPS 連続観測データに基づく電離層擾乱との比較検討

四国や南九州地域の画像を収集し、干渉処理を行い、図1に示すような擾乱が認められる日を特定した。まず、電離層の影響を評価するために、四国の北行軌道の観測日の

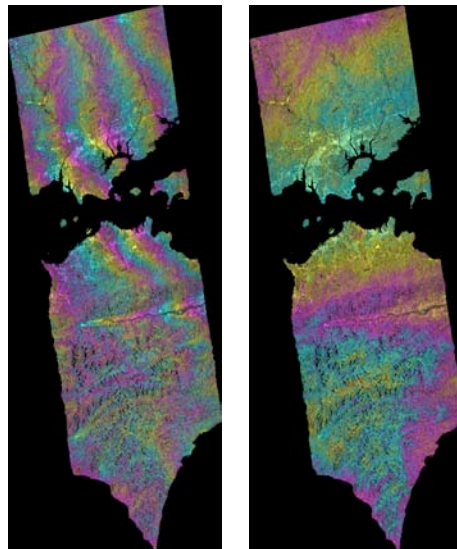


図1. 四国の北行軌道からの干渉画像に見られる大きな擾乱：(左) 2006年8月28日と2009年10月21日のペア。四国内の相対視線距離変化が36cmもある。(右) 2006年10月16日と2008年7月18日のペア。地形に比例したパターンが見られる。

GPS-TECを調べ、その差とSAR干渉画像から推定されるTECの分布を比較した。顕著な擾乱が認められるペアとして、図1(左)の2006年8月28日と2009年10月21日のペア(北行軌道)を取り上げる。図2は、この2日のPALSAR観測時刻に最も近い時刻の日本列島上空のGPS-TECの差を示している。2006年8月28日に大きな中規模伝播性擾乱(以下、MSTID)が発生したことから、西日本に北北西-南南東方向の縞模様が認められる。図3(左)は、図1左の干渉画像をアンラップ処理し、視線方向の位相変化をTECによる変化の関係式からTECに換算し、さらにリサンプリングして 0.15° グリッドに変換したものである。一方、図3(右)は図2のGPS-TECを電離層ピアースポイント(高さ350kmと仮定)でのTEC分布として、SARの視線方向にマッピングした結果である。いずれも平均値からの偏差で示している。

2枚の図に北北西-南南東方向のパターンの偏差の分布が見られ、また極値の大きさも同程度である。なお、極値のずれは、SAR と GPS の観測時刻が同じでないことが一因と考えられる。

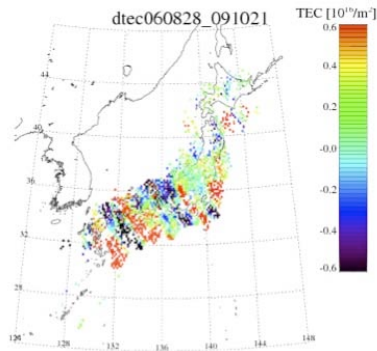


図2. 2006年8月28日と2009年10月21日の日本列島上空のGPS-TECの差.

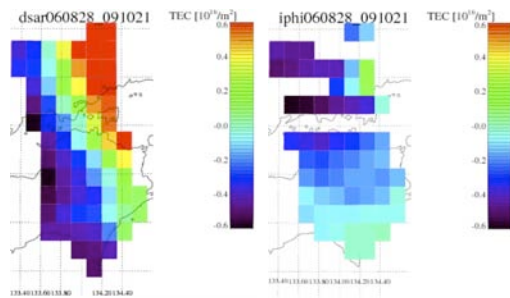


図3. 2006年8月28日と2009年10月21日のペアに対するTECの差の比較. (左)SAR干渉画像から推定されるTECの差の分布. (右)GPS-TECの差から推定される分布.

(2) 客観解析データに基づく対流圏擾乱との比較検討

領域気象モデルWRFを用いて、1 km メッシュの大気変動の数値シミュレーションを行った。本領域モデルの初期値・境界値として気象庁のメソ客観解析値を用いた。大気シミュレーションを行う前提として、メソ客観解析値を高層気象観測値と比較することでその妥当性を検証した。その後、SAR 観測日時の西日本域を対象とした大気シミュレ-

ーションをおこない、SAR 観測時点における水蒸気の3次元空間分布を計算した。大気シミュレーションで得られた水蒸気場をSAR から算出した水蒸気場と比較し、大気シミュレーション結果はSAR 算出値の検証のために利用することができることが分かった。

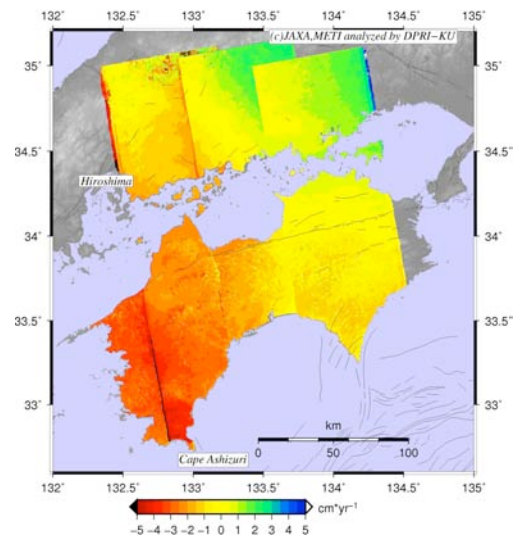


図4. 四国の4つの領域の電離層の影響が小さい干渉画像(北行軌道)のスタッキングで得られた平均視線距離変化率の分布.

(3) 大気によるマイクロ波屈折の影響を定量的に評価し、低減する手法・プロセスの提案 ① 擾乱の大きい画像を除いたスタッキング

GPS-TEC で大きな擾乱が認められる日の画像を含むペアを除いて、四国地方の干渉画像をスタッキングし、平均変動速度の分布を求めた。この処理においては、沈み込みに伴う変動が長波長の変形であることから、軌道補正などの長波長の変動を除去する処理は行っていない。図4と5に、北行軌道の4領域と南行軌道の2領域の解析結果を示す。概ねスムーズな変動パターンが見られるが、GPS の観測結果に比べて大きい変動速度が得られている。特に、図4の四国中央部の領域では、東西方向に変動の勾配が見られ、依然何らかの擾乱の影響が含まれていると考えられる。図5の東側の室戸岬を通る領域で

は GPS の観測結果と調和的な結果となっている。南行軌道からの画像は北行軌道に比較して少ないが、電離層の影響の少ない昼間の観測であることから、良好な結果を得られたものと考えられる。

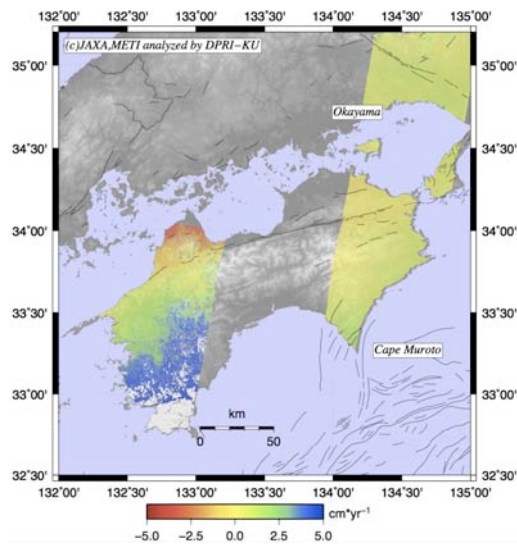
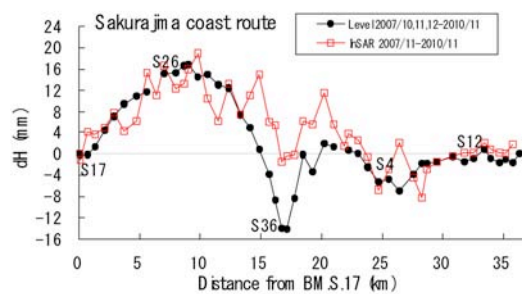
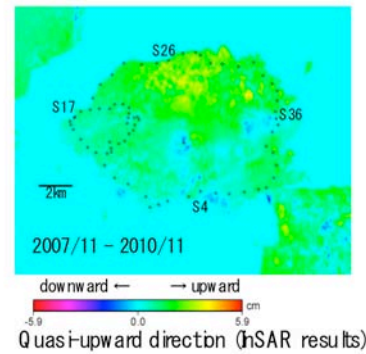


図 5. 四国の 2 つの領域の電離層の影響が小さい干渉画像（南行軌道）のスタッキングで得られた平均視線距離変化率の分布。

桜島火山を含む南九州地域の 2007 年～2010 年の期間における ALOS/PALSAR 画像を用いて InSAR 解析を行った。得られた干渉画像について、電離層や対流圏の擾乱を大きく受けていると認められるものを除いてスタッキングおよび 2.5 次元解析を行い、準上下方向と東西方向の地盤変動を計算した。準上下方向の地盤変動からは、桜島北部で地盤隆起、桜島東部から南部にかけて地盤沈降が検出され、同期間に行われた水準測量結果ともよい一致が見られた（図 6）。桜島北部における地盤隆起は、始良カルデラ地下のマグマ溜りにおける増圧を反映した変動を捉えたものと考えられる。

また、2007 年～2011 年の期間における ALOS/PALSAR データおよび解析ソフトウェア StaMPS を用いた PS-InSAR 時系列解析を

桜島火山に適用した。この結果、スタッキングにより得られた結果とほぼ同様な桜島北部における地盤隆起が、より客観的な解析方法で検出された。



Vertical displacement (hSAR results vs. leveling data)

図 6. 上段：桜島火山における InSAR 解析結果（2007 年 11 月～2010 年 11 月の期間の準上下方向の変動）。下段：各水準点（上段図中の黒丸）における InSAR 解析結果（準上下方向の変動）と水準測量結果の比較。

②多項式近似法による誤差要因の分離

GPS のデータを活用せずに、SAR 画像に含まれる情報のみを用いて InSAR 画像における地殻変動シグナルと対流圏・電離圏・衛星軌道誤差起因の見かけ上のシグナルを分離するための解析手法を開発した。この手法では、対流圏起因の位相変化を標高に比例する成分で、長波長の電離圏の伝播遅延や衛星軌道データ誤差に起因する位相変化を一次または二次多項式で近似し、変動時系列がなめらかになるという拘束条件を課し、変動時系列シグナルと見かけ上のシグナルを分離するというアルゴリズムを用いた。当手法を複

数の事例に適用した結果、スマラン（インドネシア）の地盤沈下、キラウエア火山（ハワイ島）のゆっくりとした変形、レイテ島（フィリピン）の断層クリープの検出などに成功した。また、東北沖地震前後の複数の干渉画像に対して、GPS 変位場から推定される視線距離変化と InSAR 画像の視線距離変化との差を求めた。これを多項式近似し、InSAR 画像から差し引くことにより、複数のパスの InSAR 画像を GPS 変位場と調和的な変位場に変換し、さらに 2.5 次元解析をおこなうことにより、高空間分解能の上下および東西変位場を得ることに成功した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 11 件）

① Rudolph, M. L., M. Shirzaei, M. Manga, and Y. Fukushima, Evolution and future of the Lusi mud eruption inferred from ground deformation, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, Vol.40, 2013, doi:10.1002/grl.50189.

② Hashimoto, M., Crustal Deformation Associated with the 2011 Tohoku-Oki Earthquake: An Overview, *Earthquake Spectra*, 査読有, Vol. 29, 2013, pp. S81-S98, doi:10.1193/1.4000117.

③ Fukushima, Y., Y. Takada, and M. Hashimoto, Complex ruptures of the 11 April 2011 Mw 6.6 Iwaki Earthquake triggered by the 11 March 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake, Japan, *Bull. Seismol. Soc. of Amer.*, 査読有, Vol.103, 2013, 1572-1583, doi:10.1785/0120120140.

④ 有本美加・福島洋・橋本学・高田陽一郎, ALOS/PALSAR データを用いた InSAR 時系列解析によるスマラン（インドネシア）の地盤沈下, *測地学会誌*, 査読有, 59 巻, 2013, 印

刷中.

⑤ Fukushima, Y., Atmospheric phase delay estimation from multiple SAR interferometry measurements, *Proceedings of Fringe 2011 workshop*, 査読無, 2012, pp.232.

⑥ Chen, C. H., A. Saito, C. H. Lin, and J. Y. Liu, Long-term variations of the nighttime electron density enhancement during the ionospheric midlatitude summer, *J. Geophys. Res.*, 査読有, Vol. 117, 2012, A07313, doi:10.1029/2011JA017138.

⑦ Hashimoto, M., Y. Fukushima, and Y. Takada, Surface Movements During the 2011 Great Tohoku-Oki Earthquake Detected by ALOS/PALSAR, *Technical Report of IEICE*, 査読無, SANE2012-79(2012-10), 2012, pp.129-134.

⑧ Nomura, S., and T. Takemi, Environmental stability for afternoon rain events in the Kanto plain in summer. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 査読有, Vol. 7, 2011, pp. 9-12, doi:10.2151/sola.2011-003.

⑨ Hashimoto, M., Y. Fukushima, Y. Takada, T. Ozawa, S. Okuyama, T. Abe, M. Furuya, M. Tobita, and M. Shimada, Images from ALOS of the March 2011 Tohoku Earthquake, *Space Research Today*, 査読無, Vol. 181, 2011, pp.17-19.

⑩ 福島洋・HOOPER Andrew, PS 干渉解析による 2004 年新潟県中越地震後の地殻変動, *測地学会誌*, 査読有, 57 巻, 2011, pp.197-214.

⑪ 福島洋, StaMPS パッケージを用いた PS 干渉 SAR 解析, *測地学会誌*, 査読有, 57 巻, 2011, pp.41-48.

[学会発表] (計 12 件)

①橋本学, PALSAR データを利用した西南日本変動マップの作成, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 22 日, 千葉市美浜区幕張メッセ国際会議場.

②福島洋・堤浩之, レイテ島北部におけるフィリピン断層のクリープ変位, 日本測地学会第 118 回講演会, 2012 年 11 月 2 日, 宮城県仙台市福祉プラザ.

③山本圭吾, 干渉 SAR による桜島および口永良部島火山の地盤変動, 日本火山学会 2012 年度秋季大会, 2012 年 10 月 15 日, 長野県御代田町エコールみよた.

④ Hashimoto, M., Observations of the 2011 Tohoku-Oki earthquake with ALOS/PALSAR, IGARSS2012, 2012 年 7 月 27 日, ドイツ・ミュンヘン市国際会議センター.

⑤ Hashimoto, M., A. Saito, and D. Mineyama, Imaging of Interseismic Deformation With ALOS/PALSAR And the Effect of Traveling Ionospheric Disturbance, IUGG2011, 2011 年 6 月 30 日, オーストラリア・メルボルン市・メルボルン会議展示センター.

⑥竹見哲也・野村昇平, 客観解析値を利用した局地豪雨の発生環境場の解析. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 27 日, 千葉市美浜区幕張メッセ国際会議場.

⑦福島洋, InSAR による経年的な微小変動検出のための電離層ノイズ除去の試み, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 24 日, 千葉市美浜区幕張メッセ国際会議場.

⑧齊藤昭則・峰山大・橋本学, 衛星搭載合成開口レーダー観測に与える伝搬性電離圏擾乱の影響, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 24 日, 千葉市美浜区幕張メッ

セ国際会議場.

⑨山本圭吾, ALOS/PALSAR データによる桜島火山周辺域の地盤変動, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 24 日, 千葉市美浜区幕張メッセ国際会議.

⑩福島洋, キラウエア火山の定常的な変形とマグマ溜まりシステム, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 23 日, 千葉市美浜区幕張メッセ国際会議場.

⑪ Hashimoto, M., Secular crustal deformations derived from 4 year long observation of ALOS/PALSAR, 第 4 回 ALOS データノード共同 PI シンポジウム, 2010 年 11 月 17 日, 東京都千代田区大手町サンケイプラザ.

⑫ Fukushima, Y., Vertical displacements at Kilauea volcano measured by small-baseline InSAR time-series analysis using PALSAR data, 4th joint ALOS PI symposium, 2010 年 11 月 17 日, 東京都千代田区大手町サンケイプラザ.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 学 (HASHIMOTO MANABU)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 20293962

(2) 研究分担者

齊藤 昭則 (SAITO AKINORI)
京都大学・大学院・理学研究科・准教授
研究者番号: 10311739

竹見 哲也 (TAKEMI TETSUYA)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 10314361

山本 圭吾 (YAMAMOTO KEIGO)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号: 40283676

福島 洋 (FUKUSHIMA YO)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号: 80432417