

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05622

研究課題名（和文）異なる測地技術を統合した非地震性地殻変動の検出

研究課題名（英文）Unified geodetic approach towards detectino of aseismic crustal deformation

研究代表者

高田 陽一郎（TAKADA, Youichiro）

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：80466458

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：台湾南西部および東部においてGNSSおよび水準測量データとInSAR画像を併用することにより、非地震性地殻変動を面的に検出することに成功した。さらに、InSAR画像に対する電離層擾乱の影響を軽減するSplit Spectrum法とInSAR時系列解析を適用することで検出精度を向上させることにも成功した。台湾南西部の非地震性地殻変動はこの地域に広く分布するmud diapirの広域圧縮応力に対する応答とみなすことができる。そこで非線形粘性流体のバックリングモデルを構築し、さらに侵食・堆積過程を考慮することで、検出したmud diapirの発達を定量的に説明することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、世界各国がL-band衛星の打ち上げを予定している（NISAR, ALOS-4, ROSE-Lなど）。L-bandレーダーは植生を透過するため低緯度地域では有利な反面、電離層擾乱の影響を強く受ける。本研究はGNSSによる補正やSSM法の適用など電離層擾乱の影響に対処する際の豊富なノウハウを示した。さらに泥火山・断層・堆積という異なる地質現象が非地震性地殻変動を通じて相互作用することも示した。台湾は地震災害の多い国であり、本研究で焦点を当てた南西部は人口も多い。非地震性の断層すべりは断層端への弾性応力の集中を伴い、地震発生と強く関係する。本研究の成果は現地の防災・減災にも資する。

研究成果の概要（英文）：We succeeded in detecting aseismic crustal deformations in southwestern and eastern Taiwan by combining GNSS and leveling data with L-band InSAR imageries. The detection accuracy was further improved by applying the Split Spectrum method (Gomba et al., 2016) and InSAR time series analysis (Berardino et al., 2002) to reduce the effect of ionospheric disturbance on the InSAR images. Part of aseismic crustal deformation in southwestern Taiwan can be regarded as a response of widely distributed mud diapirs in the study areas. We conducted a series of numerical simulations of nonlinear viscous fluid buckling, and furthermore, by considering erosion and sedimentation processes, we succeeded in quantitatively explaining development of the detected mud diapirs.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：非地震性地殻変動 台湾 InSAR 電離層 GNSS 水準測量 テクトニクス

## 1. 研究開始当初の背景

非地震性変位、すなわち地震を伴わずに累積する地表変位の定量化は、地形発達過程における地震の役割を評価する上で非常に重要である。また、地震発生ポテンシャルの評価にも貢献する。人工衛星から異なる時期に撮像した複数の合成開口レーダー (SAR) 画像を干渉させる手法 (InSAR) が 1990 年代に出現して以来 (Massonnet et al., 1993)、主に海外の乾燥地域で非地震性変位が次々と発見されるようになった。SAR の長所は地上に観測装置を設置せずに世界中の変位を検出できる点にある。また、点のデータである GNSS や水準測量と異なり画像なので、地表変位を面的かつ極めて高い解像度で観測することができる。日本は植生を透過する波長 (L-band) の SAR 衛星を運用する唯一の国であり、研究代表者はこれを用いて植生に覆われた日本の非地震性変位を発見・発表してきた (Takada and Furuya, 2010 EPSL; 高田ら 2011 測地学会誌; Takada and Fukushima, 2013 Nature Geoscience など)。しかし、L-band は電離層擾乱の影響を受け易く、長波長かつ非常に振幅の大きなノイズが含まれることが多い。非地震性変位の波長は断層クリープを除けば一般的に長いので、このノイズは大きな問題である。最近、GNSS データを用いて長波長ノイズを軽減する手法が確立され (例えば Fukushima and Hooper, 2011)、研究代表者も当初はこの技術を発展させることに成功したばかりであった (Takada et al., 2018)。GNSS データは水平変位の精度は高いが上下変位の精度は低い。一方、水準測量は上下変位しか求まらないが精度は高い。そこで GNSS データの水平変位と水準測量データの上下変位を同時に用いて InSAR 画像を補正する方法を着想するに至った。また電離層擾乱の影響を原理的に補正する手法が実用化されたばかりであったため (Gomba et al., 2016)、この技術を積極的に活用することに高い価値があった。解析対象として地殻変動が速く、GNSS・水準網が発達し、電離層擾乱も激しい台湾を選んだ。台湾南西部で予察的な InSAR 解析を行い、複数の InSAR 画像に長波長ノイズを伴う極めて明瞭な隆起シグナルを発見した。この隆起域の南端で最近行われた水準測量 (Ching et al. 2016) にも隆起が見られる一方で、この地域では M3 以上の地震は発生しておらず、明らかに非地震性地殻変動である。水準測量では隆起の空間分布が分からず、現状では地質学的な解釈も不明瞭である。

## 2. 研究の目的

世界中の造山帯で進行する非地震性地殻変動を定量的に検出する上で、干渉合成開口レーダー解析 (InSAR) は非常に強力である。InSAR の短所である長波長ノイズを、より正確な水平速度を測定できる GNSS データと、より正確な鉛直変位速度を測定できる水準測量データを同時に用いて補正する方法を確立する。この際、InSAR 画像に含まれる電離層擾乱に起因する長波長ノイズを、レーダーの分散性を用いて予め除去する。最後に、こうして補正した多数の異なる期間の干渉画像を用いて InSAR 時系列解析を行い、短周期の変位成分 (主に水蒸気擾乱に起因するノイズ) を除去する。以上の徹底したノイズ軽減フローを地殻変動が特に活発な台湾に適用し、非地震性地殻変動を面的に定量化した上で、その駆動メカニズムを明らかにする。

## 3. 研究の方法

台湾南西部の非地震性地殻変動を含む InSAR 画像から長波長誤差を除去する。具体的には、GNSS データから水平速度場を、水準測量データから鉛直速度場を抽出し、それらを空間的に内挿して離散的な 3 次元速度場を得る。この速度場から計算した衛星視線方向速度場と InSAR から得たその差を誤差とみなし、この誤差を空間の関数でモデル化して任意のピクセルでの InSAR 画像の誤差を補正する。さらにレーダーの分散性を用いて電離層擾乱の影響を補正する。補正した大量の InSAR 画像を用いて時系列解析を行い、短周期変動を除去した非地震性地殻変動速度場を得る。この速度場がマッドダイアピルと衝上断層系のどちらで説明できるかを数値モデルで調べる。同様の手法で「だいち 2 号」の ScanSAR モードに含まれる長波長ノイズを除去する手法を確立する。

## 4. 研究成果

(1) まず SAR 衛星 ALOS (2006-2011) の干渉画像の中から、なるべく時間基線長が大きく空間基線長が短いペアを集め、数値標高モデル (DEM) を用いて標高依存性を除去した上で、台湾国立成功大学の Ching 博士を通して入手した GNSS 速度場を用いて長波長誤差を多項式近似し、この長波長誤差を元画像から除去した。さらに、このようにノイズを軽減した複数の画像をスタックすることで一層精度を高めた。その結果、2007 年から 2011 年までの間に台湾南西部で最大 37 mm/yr という非常に大きな速度で隆起する非地震性地殻変動を検出した (図 1)。その値は水準測量データと極めて整合的であった。また、隆起域の側面に非地震性の活断層運動を発見した。

次に同じく日本が打ち上げた SAR 衛星 ALOS2(2014-現在)のデータを用いて 2016 年 2 月の Meinong 地震による地震時変動を解析した結果、ALOS により見つけた活断層が誘発されて大きくクリープしていることも明らかにした。また、地震前と地震時で活断層に対応する同じ場所でコヒーレンスの低下が見られることから、このクリープ運動が地表を切っていることも明らかになった。以上の成果をとりまとめて国際誌上で発表した(Tsukahara and Takada, 2018)。さらに ALOS2 のデータを用いて Meinong 地震後の地殻変動を調べたところ、地震後も隆起運動が継続しており、そのパターンは地震前の ALOS で求めたものに類似していた。このことは、隆起運動の本質的な駆動力がマッドダイアピルの浮力によるものであれば無理なく説明できる(浮力は地震によって変化しない)。ALOS2 が撮像した ScanSAR データに含まれる原因不明の位相縞を GNSS データで補正する際には、多項式ではなくスプライン関数を用いれはうまく行くことが分かった。2018 年 3 月に台湾(成功大学・中央大学・台湾大学)と日本(北海道大学・名古屋大学・京都大学・国土地理院)の研究者が地殻変動について議論するワークショップを主催し、極めて効果的に情報交換を行った。

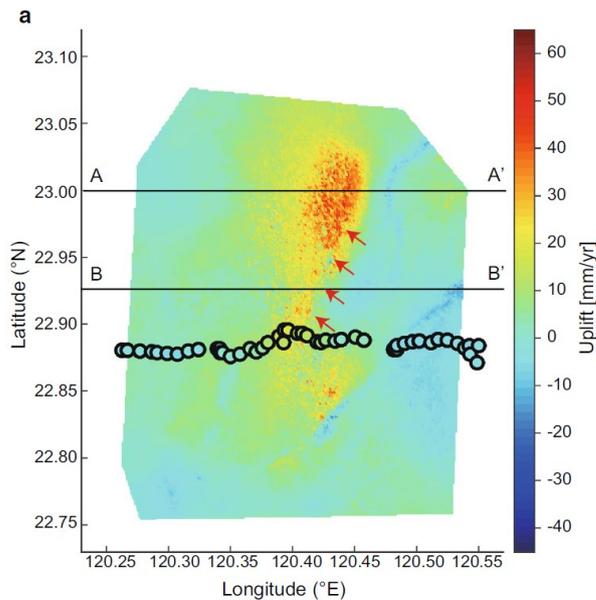
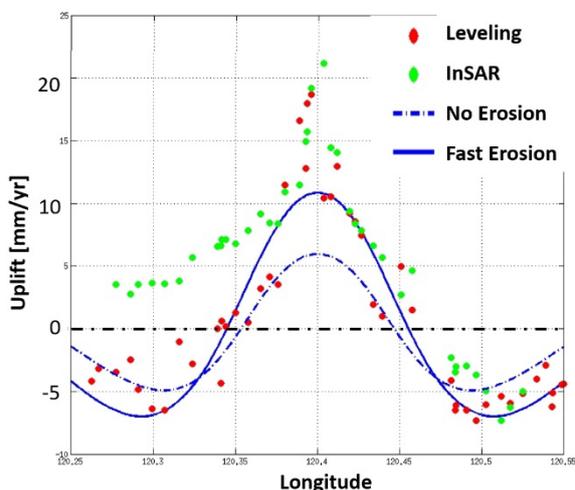


図 1: 台湾南西部の 2007-2011 の隆起速度場。北部で 37 mm/yr に達する。丸印は水準測量の結果。両者は非常によく一致する。赤矢印は新規発見した活断層運動。

(2) さらに ALOS データの InSAR 解析 (および GNSS データによるノイズ除去) を通じて検出した台湾南西部における mud diapir の急激な隆起について、その駆動メカニズムを数値シミュレーションにより定量的に計算・考察した。台湾のような広域圧縮場で成長する mud diapir は褶曲発達の一形態として物理的にモデル化することができる(Bassi and Bonnin, 1988)。媒質を 2 層構造で表現し、表層をべき乗クリープに従い応力指数が極めて大きな粘性流体、泥の層(基盤層)をニュートン流体として褶曲の発達速度を計算した。この地域の褶曲は周期的なものではなく孤立しているため、周期関数の重ね合わせによりガウス分布型の初期擾乱を作り、その発達速度を計算した。泥は表層の岩石よりも密度が高いという報告が近年なされている(例えば Doo et al., 2015)が、それでも一定の条件下において mud diapir は安定的に成長することを明らかにした(図 2)。さらに、より活発に発達することが知られている台湾南西沖の mud diapir にもこの理論を適用した。その際、台湾は極めて侵食・堆積が速い地域であるため、これらの効果を新たに定式化に加えたところ、侵食・堆積作用は mud diapir の発達を大きく促すことや、より長



波長の diapir の発達を可能にすることを明らかにした(図 3)。この成果を Tectonophysics に投稿した(Takei and Takada, in review)。

図 2: 褶曲の隆起速度と数値モデル。侵食・堆積が大きいモデルの方が InSAR および水準測量を良く説明する。

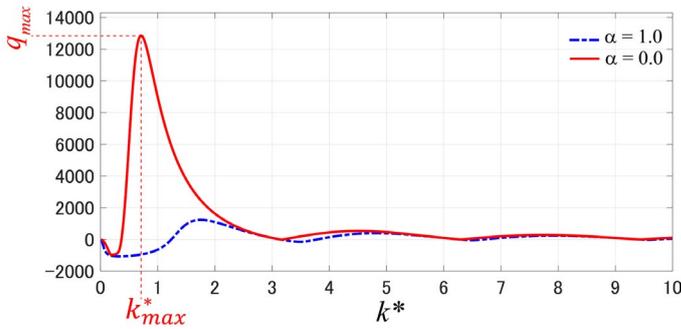


図 3: 褶曲の発達を規定するパラメーターと初期波数。侵食・堆積が極めて速い場合(赤)の方がそれらが無い場合(青)よりも発達速度が大きく波数が小さい。

(3) さらに台湾南西部に的をしぼり、ALOS-2 の ScanSAR モードで高頻度に撮像された SAR データから干渉画像を作り、台湾側から提供された最新の GNSS データを用いて InSAR 画像を補正し、それらを用いて SBAS 法に基づく InSAR 時系列解析を行った。これにより Meinong 地震前・地震時・地震後 5 年間の地殻変動をそれぞれ検出して互いに比較することができた。地震後の余効変動 (図 4) に見られる電光型の地殻変動は地震を伴わない非地震性の断層すべりによるものであり、長期間に渡って累積することが明らかになった。また、地震後の変動は地震前に比べて総じて速度が小さく、波長が大きい。このことの一つの解釈として、地震前の隆起運動には泥火山やそこから派生した間隙水の影響が大きく寄与しており、Meinong 地震によってその状況が変化して間隙水圧が減少し、断層強度が増加したと考えた。そこで干渉画像に見られる細かな位相変化から小規模な断層を抽出し、Meinong 地震に伴うそれらの断層面上でのクーロン応力変化を計算した。その結果、予想に反してクーロン応力は極めて小さな正の変化、あるいは負の変化をしていた。これは Meinong 地震の断層運動に伴う応力変化だけでは地殻変動の時間変化を説明できないことを示す。この地域の断層運動と泥火山の相互作用について、より深く調べる必要がある。

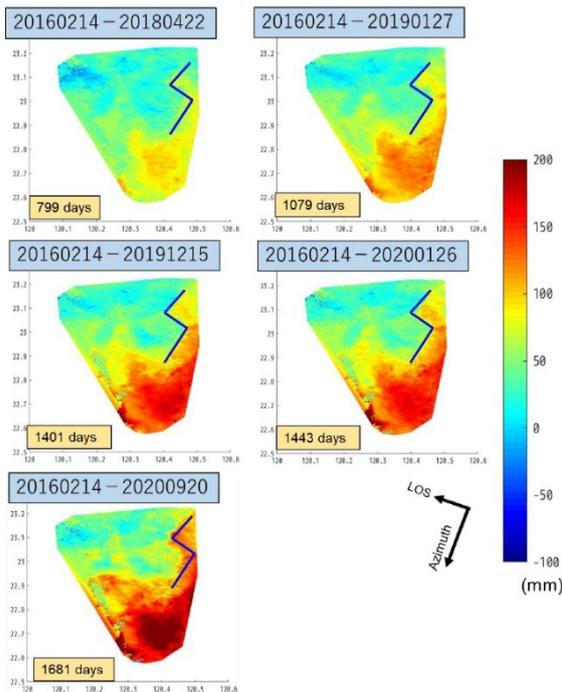


図 4: ScanSAR(下降軌道)を用いた時系列解析の結果。電光型の断層運動が地震を伴わずに進行する様子が分かる。

(4) 次に、台湾東部衝突境界付近において ALOS および ALOS-2 の SAR データを用いて InSAR 解析を行った。その解析結果から DEM を用いて標高依存成分を除去し、GNSS 速度場を用いてさらに長波長のノイズを除去した。その結果、台東縦谷のクリープ運動と海岸山脈の定常的な内部変形の双方について変形の空間的な不均質性を見出した。

(5) 台湾東部についても南西部についても Ching 博士から水準測量データを入力し、InSAR 画像の補正を試みた。しかし、GNSS データほど密度が無いことから精度向上は限定的であることが分かった。この問題は特に中軸部の山地において顕著であった。そこで、新しく発達してきた技術である Split Spectrum 法 (SSM, Gomba et al., 2016) を適用・改良して電離層擾乱の影響を軽減しつつ、GNSS データによる補正も併用し、地震間地殻変動を検出するように研究方向を修正した。GNSS や水準測量による補正は概ね良好だが図 5 に示すように限界もあり、物理的な原理に立ち戻る SSM の必要性を強く感じた。この判断は最終的に良い結果に繋がった。

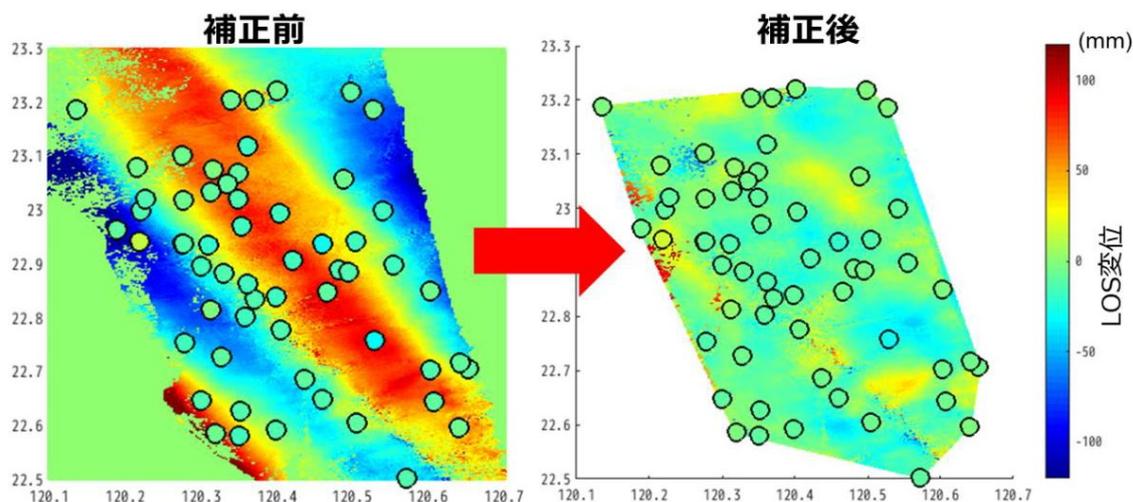


図 5: 激しい電離層擾乱の影響を GNSS で補正しきれない事例。

上述のとおり、台湾の InSAR 画像は総じて電離層擾乱の影響を強く受ける傾向にあり、時として GNSS 速度場で補正しても除去しきれない事例があった。そこで、SSM 法 (Gomba et al., 2016) を用いて原理的に電離層擾乱の影響を除去することを試みた。SSM を用いるとレーダーの帯域幅が狭くなるために干渉性や空間分解能も低下する。特に ScanSAR は通常の画像 (strip map) よりも帯域が狭いために、SSM を適用することで S/N 比が悪化し、位相アンラップに失敗する事例が多数見られた。そこでまず位相アンラップ前に適用するアダプティブフィルターを強めに設定し、さらにより多くのピクセルを用いてマルチルックを行った。本研究課題のターゲットである非地震性の地殻変動は波長が長いので多少強めに平滑化しても問題はない。最後に Minimum Cost Flow (MCF) 法 (Costantini, 1998) を用いて位相アンラッピングを行う際の三角網の組み方を変更することで ScanSAR モードをより安定的にアンラップが出来るようになった。さらに ScanSAR の隣接するバースト同士を結合する手法を改良し、シーンの継ぎ目で発生する変位の不連続を軽減することにも成功した。ScanSAR への SSM 法の適用とその改良のために、台湾を一時離れ、ネパールヒマラヤ・北アナトリア断層において ALOS-2 が撮像した ScanSAR (バンド幅 14 MHz) の InSAR 解析を行い、電離層擾乱を除去するノウハウを確立した。この改良とノウハウについて学会で発表し、国際論文に執筆中である (Nagaoka, Takada, Morishita, in prep)。

(6) 2022 年 3 月と 9 月に台湾東部で内陸地震が発生したため、Ching 博士から GNSS データと水準測量データを提供して貰い、これらを ScanSAR の補正に用いつつ、SSM 法を適用して地震性地殻変動を検出した。さらにそれらを良く説明する断層モデルを構築した結果、断層モデルのモーメントマグニチュードは 6.7 と求まるのに対し、地震波から決めたモーメントマグニチュードは 6.44 であり、非地震性地殻変動が発生している可能性が示唆された。以上、本研究課題の遂行によって台湾において非地震性地殻変動を多く検出し、その物理モデルを構築した。また、検出精度を高めるために補正手法の改良に成功した。この断層モデルについても国際誌に投稿準備を進めている (Ishimaru, Takada, Ching, Chang, in prep)。

#### 国内外へのインパクト:

現在、世界各国が L-band 衛星の打ち上げを予定している (NISAR, ALOS-4, ROSE-L など)。L-band は植生を透過するため低緯度地域では圧倒的に有利な反面、電離層擾乱の影響を強く受ける。本研究は世界に先駆けて電離層擾乱の影響に対して多くのノウハウを示した。また、台湾は極めて変動が速く地震災害の多い国であり、本研究で焦点を当てた南西部は人口も多い。非地震性のすべりは断層端への弾性応力の集中を伴い、地震発生と強く関係する。本研究の成果は現地の防災・減災に大きく資するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tsukahara Kotaro, Takada Youichiro	4. 巻 70:52
2. 論文標題 Aseismic fold growth in southwestern Taiwan detected by InSAR and GNSS	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-018-0816-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takada Youichiro, Sagiya Takeshi, Nishimura Takuya	4. 巻 70:32
2. 論文標題 Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, central Japan, detected by InSAR and GNSS	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-018-0801-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件／うち国際学会 10件）

1. 発表者名 高田陽一郎, 竹井義貴
2. 発表標題 台湾南西沖における褶曲の発達メカニズム: パラメータ依存性について
3. 学会等名 日本測地学会第136回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹井義貴, 高田陽一郎
2. 発表標題 褶曲の発達に伴う台湾南西部の急速な上下変動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹井義貴, 高田陽一郎
2. 発表標題 台湾南西沖における褶曲の発達メカニズム: 侵食・堆積の影響
3. 学会等名 日本測地学会第132回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹井義貴, 高田陽一郎
2. 発表標題 台湾南西部陸上における非周期的な褶曲の発達メカニズム
3. 学会等名 日本測地学会第132回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiki Takei, Youichiro Takada
2. 発表標題 Rapid uplift in SW Taiwan caused by fold growth: Numerical approach
3. 学会等名 2019 Taiwan-Japan Workshop on Crustal Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mina Kataoka, Youichiro Takada, Kuo-En Ching
2. 発表標題 Detailed crustal deformation along the collision boundary in Eastern Taiwan detected by multiple geodetic technique
3. 学会等名 2019 Taiwan-Japan Workshop on Crustal Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚原弘太郎, 高田陽一郎
2. 発表標題 Aseismic crustal deformation in southwestern Taiwan: Insights into the driving mechanisms
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塚原弘太郎, 高田陽一郎
2. 発表標題 InSAR 解析により検出された台湾南西部における水平変動の時間変化
3. 学会等名 日本測地学会第130回講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kotaro Tsukahara, Youichiro Takada
2. 発表標題 Aseismic fold growth in Southwestern Taiwan detected by InSAR and GNSS
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Youichiro Takada, Tomomi Inamatsu, Kotaro Tsukahara, Takeshi Sagiya, Takuya Nishimura
2. 発表標題 Lessons from crustal responses to co- and inter-seismic stress disturbances
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kotaro Tsukahara, Youichiro Takada
2. 発表標題 Observation of aseismic crustal deformation in Taiwan by analysis of InSAR and GPS data
3. 学会等名 IAG- IASPEI General Assembly ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kotaro Tsukahara, Youichiro Takada
2. 発表標題 Aseismic crustal deformation in southwestern Taiwan: Insight into the driving mechanisms
3. 学会等名 The 4th Japan-Taiwan Workshop on Crustal Dynamics ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塚原弘太郎, 高田陽一郎
2. 発表標題 InSARとGPSデータの解析による台湾の非地震性地殻変動の観測
3. 学会等名 日本測地学会第128回講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 塚原弘太郎, 高田陽一郎
2. 発表標題 InSARとGPSデータの解析による台湾の非地震性地殻変動の観測
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

高田陽一郎のページ  
<https://www.sci.hokudai.ac.jp/~takaday/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	古屋 正人  (FURUYA Masato)  (60313045)	北海道大学・大学院理学研究院・教授    (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
その他の国・地域	台湾国立成功大学	台湾中央大学	