9-8 中国・四国地方の地殻変動

Crustal Movements in the Chugoku and Shikoku Districts

国土地理院 Geospatial Information Authority of Japan

[GNSS 豊後水道のゆっくり滑り]

第1~2図は、豊後水道の長期的SSEに関する資料である.

第1図上段の三隅観測点を固定局とした求めた非定常地殻変動水平ベクトル図に示される ように、足摺岬付近を中心として、豊後水道周辺において南~南東向きの非定常地殻変動が 検出されている.なお、この地域全体が2016年熊本地震に伴う地殻変動の影響を受けている ため、地震時の変動を除去して資料を作成している.

第1図下段及び第2図は、四国南西部の豊後水道周辺の電子基準点について、基線ベクトル3 成分の時系列グラフを並べたものである.2015年12月頃から南東向きの非定常地殻変動が始 まっている.なお、2016年4月16日以降は熊本地震の余効変動の影響を受けているため判断が 難しいが、余効変動の影響が小さい南北及び上下成分を見ると、非定常的な地殻変動が9月頃 から鈍化しているように見える.

[豊後水道周辺の過去の非定常地殻変動]

第3~5図は,豊後水道周辺でこれまでに発生したゆっくり滑りによる非定常的な地殻変動 に関する資料である.

第3~4図は,過去に発生した非定常的な地殻変動を比較したものである.1997~1998年, 2003~2004年,2009~2010年については,初期の数ヶ月のベクトル図(上段)とその後の主 要な変動時期のベクトル図(下段)をそれぞれ示している.また,2014~2015年と今回観測 された非定常的な地殻変動のベクトル図も示している.

過去のゆっくり滑りでは、初期には足摺岬付近で非定常的な地殻変動が見られ、その後主 要な滑りが開始し、豊後水道全体で非定常的な地殻変動が見られるようになるという経過を たどっていた.ただし、2014年と2016年の非定常地殻変動については、2014年はやや北側で 見られ、推定される滑りの位置も過去のイベントとは異なっている.2016年は足摺岬付近で 見られていたが、その後、豊後水道全体に拡大するような様子は見られていない.

第5図は,非定常的な地殻変動から推定されたプレート境界面上の滑り分布を比較したものである.過去の3回(1997~1998年,2003~2004年,2009~2010年)は豊後水道のほぼ同じ場所で滑りが推定されている.2014年の滑り領域は,過去の3回の滑り領域よりも北側のやや深い側に推定されている.また,2015~2016年のイベントでの滑り領域は,過去3回や2014年のイベントに比べて南東側に推定されている.

[四国・九州地方の非定常地殻変動]

第6~13図では,対象を豊後水道周辺から九州地方まで広げ,非定常的な地殻変動を調べた 結果を示している.

第6図は、2015年12月頃から開始したと見られる豊後水道SSEについて、前回の2014年のイ

ベントと比較するため、非定常的な地殻変動の分布を比較した資料である.上段が2015年6 月~2016年4月、下段が2013年1月~2014年10月の非定常地殻変動ベクトル図である.豊後水 道周辺に加え、九州でも非定常的な地殻変動が見られる. なお、2013年12月~2014年4月に 日向灘SSEと宮崎北部SSEが同時に発生していたことを矢来・宗包(2015)が指摘している.

第7~12図は、上記の2時期について、プレート間滑りを時間依存インバージョンにより推 定した資料である.

第7~9図は2013年1月~2014年10月の非定常地殻変動からプレート間滑りを推定した結果である.

第7図上段は、2013年1月~2014年10月の期間で推定された滑り分布である.豊後水道で約3cmの滑りが推定されているが、九州の海岸線付近に最大10cmの滑りが推定された.滑りの目玉が宮崎県北部と南部に別れて2つ分布しているが、これらは矢来・宗包(2015)による日向灘SSEと宮崎北部SSEの滑り域に該当する.豊後水道SSEを含めた全体のモーメント解放量はMw6.8程度と推定された.

第8図は,推定結果を4つの時期に分けて示したものである.九州での滑りが2013年10月以降から始まり,2014年5月頃に終息した後,豊後水道での滑りが開始している.

第9図は、観測値と計算値のフィッティングを示した資料である.

第10~12図は2015年6月~2016年4月の非定常地殻変動からプレート間滑りを推定した結果 である. 熊本地震以降は地震時及び余効変動の影響のために非定常地殻変動の把握が困難で あるため, 熊本地震の発生直前までの期間で推定を行っている.

第10図上段は、2015年6月~2016年4月の期間で推定された滑り分布である.足摺岬近辺で約4cmの滑り、宮崎県南部で約5cmの滑りが推定された.足摺岬の滑りは豊後水道SSE、宮崎県南部の滑りは日向灘SSEにあたる.全体のモーメント解放量はMw6.7程度である.

第11図は,推定結果を3つの時期に分けて示したものである.2015年6月以降,宮崎県南部 での滑りが始まり,2015年11月以降は足摺岬近辺で滑りが始まっている.2016年2月以降には 滑り量はわずかなものの宮崎県北部まで滑り域が広がったように見える.

第12図は、観測値と計算値のフィッティングを示した資料である.

第13図は、2時期の滑り分布を比較した資料である.豊後水道に着目すると、2014年のイベントは、プレート境界のやや深い側、2016年のイベントはそれよりも浅い場所で滑りが生じている.また、九州での滑りは、2013年~2014年のイベントでは宮崎北部SSEと日向灘SSEが同時に、また2015~2016年のイベントでは日向灘SSEが単独で発生している.ただし、宮崎北部での滑りも規模は小さいものの発生している可能性がある.

[鳥取県中部の地震 地震に伴う地殻変動 GNSS]

第14~15図は, GNSS連続観測により得られた鳥取県中部の地震に伴う地殻変動に関する資料である.

第14図は、地震に伴う地殻変動を示すベクトル図で、上段に水平変動、下段に上下変動ベクトルが示されている.固定局は、三隅観測点(島根県)である.この地震に伴い、羽合観測点で北北東方向へ約7cm変位し約2cm隆起、東伯A観測点で東南東方向へ約4cm変位するなど、震央周辺の観測点で地殻変動が観測された.

第15図は,顕著な地殻変動が観測された4観測点の3成分時系列グラフである.地震時に各成

分でステップ的な変化が見られる.

[鳥取中部の地震 地震に伴う地殻変動 SAR]

第16~20図は、「だいち2号」(ALOS-2) PALSAR-2データの干渉解析結果に関する資料である.

第16図は,鳥取県中部の地震前後のデータを解析して得られたSAR干渉画像である.今回の 地震に関しては,北行,南行のそれぞれの軌道から右方向及び左方向の観測が行われ,合計4 方向からの干渉画像が得られた.各ペアの諸元を第17図に掲載している.4ペアとも視線方向 が異なるために位相変化の分布は異なるが,いずれも北北西-南南東走向でほぼ垂直な断層で の左横ずれ断層運動と調和的な地殻変動が捉えられている.

第18図は、第16図の4方向からの干渉SAR結果を用いて推定された、地殻変動の3次元成分の 分布である. 色は上下成分、矢印は水平成分を示している. 本震震央の北東側と南西側では隆 起、北西側と南東側では沈降となっており、上下成分は震央を中心としてほぼ4象限型の分布と なっている. この特徴は、鉛直の断層が横ずれ運動した際の理論的な変動分布と調和的である. 水平成分は、北東側で北東方向、北西側で南東方向、南西側で南西方向、南東側で北西方向へ の変位を示していることから、北北西-南南東走向のほぼ鉛直の断層が左横ずれ運動したと考 えられる.

[鳥取県中部の地震 震源断層モデル]

第19~20図は, GNSS連続観測により得られた地殻変動と, だいち2号のSAR干渉解析で得ら れた地殻変動に基づき推定した震源断層モデルに関する資料である.

第19図は、一様滑りの矩形断層を仮定して推定した震源断層モデルである.北北西-南南東 走向のほぼ鉛直の断層が左横ずれ運動したと推定された.長さ約8km,幅約7kmの断層が約1.3m 滑ったと推定され、計算されるモーメントマグニチュードは約6.2である.

第20図は、断層面上の滑り分布を推定した結果である。断層面の走向は干渉画像の位相変化 分布を参考に調整し、165°とした。断層面の傾斜は90°と設定し、断層面上の滑り分布を推定 した。推定された滑りは左横ずれで、本震震源より北側のやや浅い側で主要な滑りが見られ、 滑りの中心域は深さ約5kmに位置している。推定されたモーメントマグニチュードは約6.2であ る.

[鳥取県中部の地震 地震前の地殻変動]

第21~25図は、鳥取県中部の地震前の地殻変動に関する資料である.

第21図は, GNSS連続観測による鳥取県中部の地震前の5年間のベクトル図で, 固定局は三隅 観測点(島根県)である.上段が水平変動,下段が上下変動である.日本海側に見られる東向 きの変動は,その大部分が東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響と考えられる.

第22図は,第21図と同様に三隅観測点を固定局とした東北地方太平洋沖地震前の5年間のベクトル図である.日本海の海岸線付近で東向きの変動が見られる.

第23図は,第21~22図のベクトル図と同じ期間で作成したひずみ図で,上段が鳥取県中部の 地震前の5年間,下段が東北地方太平洋沖地震前の5年間のものである.2時期ともほぼ同様の ひずみ分布を示し,今回の地震の震源域付近では北西-南東方向のわずかな縮みが見られる. 第24図上段は,明治以来の三角(三辺)測量の結果から求められた約100年間の水平ひずみ 分布である.鳥取市付近に見られるひずみは,1943年に発生した鳥取地震(M7.2)に伴う地 殻変動を示していると考えられる.

第24図下段は、参考としてSato(1973)による1943年の鳥取地震に伴う水平変動ベクトル図と 水平ひずみ分布を示した.地震前後の三角点での測量結果を比較することで求めたものである. 東西に走る断層で右横ずれ運動したことが分かる.

第25図は、2000年鳥取県西部地震(M7.3)に伴う地殻変動を示すベクトル図である.上段 が水平変動、下段が上下変動である.今回の地震と同様、概ね北北西-南南東走向の左横ずれ 断層運動による地殻変動を示している.

参考文献

- 1) T. Yabuki and M. Matsu'ura, 1992, Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip, Geophysical Journal International, 109, 363-375.
- 2) S. Ozawa, H. Yarai, T. Imakiire, and M. Tobita, 2013, Spatial and temporal evolution of the long-term slow slip in the Bungo Channel, Japan, Earth Planets Space, 65, 67-73.
- 3) 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川昭, 2007, Double-Difference Tomography法による西南日本の3次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, 地震2, 60, 1-20.
- Sato(1973): A study of horizontal movement of the earth crust associated with destructive earthquake in japan, Bulletin of the GSI, Vol.19

豊後水道周辺の非定常的な地殻変動(1)

豊後水道周辺で2015年12月頃から観測されている非定常的な地殻変動は、現在は鈍化している。



第1図a 豊後水道周辺の非定常的な地殻変動(1)(水平)(一次トレンド除去) Fig.1a Transient horizontal deformation in the Bungo channel area (1) (horizontal) (removing liner trend).

一次トレンド除去後グラフ



※全観測局に2016年4月の熊本地震に伴う地殻変動の補正を行った.

第1図b 一次トレンド除去後グラフ

Fig.1b Time series of horizontal and vertical components of transient deformation in the Bungo channel area (removing liner trend) (1/2).

豊後水道周辺の非定常的な地殻変動(2)

一次トレンド除去後グラフ





※全観測局に2016年4月の熊本地震に伴う地殻変動の補正を行った.

= 88 (950388)

●---[F3:最終解] ●----[R3:速報解]

- 第2図 豊後水道周辺の非定常的な地殻変動(2) (一次トレンド除去後グラフ)
- Fig.2 Time series of horizontal and vertical components of transient deformation in the Bungo channel area (removing liner trend) (2/2).

1997年から1998年に観測された非定常的な地殻変動

2003年から2004年に観測された非定常的な地殻変動



第3図 過去に観測された豊後水道周辺の非定常的な地殻変動(1)(1997~1998、2003~2004)

Fig.3 Transient horizontal deformation in the Bungo channel area of past events (1) (removing liner trend) (1997~1998, 2003~2004).

過去に観測された豊後水道周辺の非定常的な地殻変動(2)

2009年から2010年に観測された非定常的な地殻変動

2014年から2015年に観測された非定常的な地殻変動



第4図 過去に観測された豊後水道周辺の非定常的な地殻変動(2) (2009~2010、2014~2015)

Fig.4 Transient horizontal deformation in the Bungo channel area of past events (2) (removing liner trend) (2009~2010, 2014~2015).



豊後水道ゆっくり滑りによるプレート境界面上の滑り分布(2)

非定常地殻変動から推定されるプレート境界面上の滑り分布(2015年)

フィリピン海プレートと陸側プレートの境界で最大約2cmの滑りが推定された.



○○SQLAR (100) 165030 赤矢印は陸側ブレートのフィリピン海ブレートに対する動きを示す. ・推定される滑り量を等値線(赤実線)で示している(等値線開隔:2cm). 黒破線は、沈み込むフィリピン海ブレート上面の等深線(弘瀬・他,2007,地震2) ・非定常地殻変動とは2013/2/1-2014/2/1の地殻変動速度からのずれを意味する

第287回 地震調査委員会 国土地理院資料 P 16 に掲載

第5図 過去に観測された豊後水道周辺の非定常的な地殻変動(3)(1997 2003 2009)(2014)(2015)

Fig.5 Estimated slip distribution on the plate interface of the Bungo channel of the past events (3) (1997 2003 2009) (2014) (2015).



第6図 四国・九州地方の非定常的な地殻変動(水平) (一次トレンド・年周・半年周成分除去) Fig.6 Transient horizontal deformation in the Shikoku and Kyushu districts (horizontal) (removeing linear trend, annual and semiannual components).

四国・九州地方の非定常的な地殻変動(2)

四国・九州地域の非定常地殻変動(2013-2015)(1)

日向灘,宮崎北部及び豊後水道のプレート境界ですべりが推定された.



第7図 非定常地殻変動から推定されるプレート境界面上の滑り分布 (2013~2015) Fig.7 Estimated slip distribution on the plate interface of the Shikoku and Kyushu districts from the transient horizontal deformation (2013-2015). Estimated slip distribution on the plate interface (top), comparison of horizontal displacements between GNSS observation and model calculation (left), estimated moment (right).

四国・九州地方の非定常的な地殻変動(3)

四国・九州地域の非定常地殻変動(2013-2015)(2)

非定常地殻変動から推定されるプレート境界面上の滑り分布と観測値と計算値の比較



- 第8図 非定常地殻変動から推定されるプレート境界面上の滑り分布の時間変化 (2013~2015)
- Fig.8 Variation of estimated slip distribution on the plate interface from the transient horizontal deformation(2013-2015). Estimated slip distribution (left), GNSS observation and model calculation (right).

四国・九州地方の非定常的な地殻変動(4)

四国・九州地域の非定常地殻変動(2013-2015)(3) 観測値(黒)と計算値(赤)の比較



60712 100 km

四国・九州地方の非定常的な地殻変動(5)

四国・九州地域の非定常地殻変動(2015-2016)(1)

日向灘及び四国西部のプレート境界でプレート境界ですべりが推定された.



・時間依存のインバージョンによる.

- 赤矢印は陸側ブレートのフィリピン海ブレートに対する動きを示す。
 推定される滑り量を等値線(黒実線)で示している(等値線間隔:20m)
- ・黒破線は、沈み込むフィリピン海プレート上面の等深線(弘瀬・他, 2007, 地震2) 非定常地殻変動とは2012/1/1-2013/3/1の地殻変動速度からのずれを意味する.

3日平均のデータを作成し3日毎にサンプリングして解析している.





- 非定常地殻変動から推定されるプレート境界面の滑り分布(2015~2016) 第10図
- Fig.10 Estimated slip distribution on the plate interface of the Shikoku and Kyushu districts from the transient horizontal deformation (2015-2016). Estimated slip distribution on the plate interface (top), comparison of horizontal displacements between GNSS observation and model calculation (left), estimated moment (right).

- 第9図 観測値(黒)と計算値(赤)の比較(2013~2015)
- Fig.9 Comparison between GNSS observation (black spots) and model calculation (red line) (2013-2015).

四国・九州地方の非定常的な地殻変動(6)

四国・九州地域の非定常地殻変動(2015-2016)(2)

非定常地殻変動から推定されるプレート境界面上の滑り分布と観測値と計算値の比較



- 第11図 非定常地殻変動から推定されるプレート境界上の推定滑り分布の時間変化 (2015~2016)
- Fig.11 Variation of estimated slip distribution on the plate interface from the transient horizontal deformation (2015-2016). Estimated slip distribution (left), GNSS observation and model calculation (right).

四国・九州地方の非定常的な地殻変動(7)

四国・九州地域の非定常地殻変動(2015-2016)(3)



- 第12図 観測値(黒)と計算値(赤)の比較(2015~2016)
- Fig.12 Comparison between GNSS observation (black spots) and model calculation (red line) (2015-2016).

四国・九州地域の非定常地殻変動(8)



プレート境界面の滑り分布の比較



第13図 プレート境界上の推定滑り分布の比較

Fig.13 Comparison of estimated slip distribution on the plate interface.

鳥取県中部の地震(10月21日 M6.6)に伴う地殻変動(1)

この地震に伴い地殻変動が観測された...





☆ 固定局:三隅(950388)

鳥取県中部の地震(10月21日 M6.6)に伴う地殻変動(2)

成分変化グラフ



●---[F3:最終解] O---[R3:速報解]

- 第15図 2016年10月21日鳥取県中部の地震(M6.6)に伴う地殻変動: 3成分
- Fig.15 Crustal deformation associated with the M6.6 central Tottori Prefecture earthquake on October 21, 2016 (3 components time series).

鳥取県中部の地震 「だいち2号」によるSAR干渉解析結果(1)

北北西一南南東方向に延びる左横ずれ断層運動から予想される地殻変動と調和的である。



第16図 鳥取県中部の地震 合成開口レーダー解析結果(1)

Fig.16 Synthetic Aperture Radar (SAR) interferograms using ALOS-2 of the central Tottori Prefecture earthquake (1).

鳥取県中部の地震 「だいち2号」によるSAR干渉解析結果(2)

	(a)	(b)	(c)	(d)	
衛星名	ALOS-2	ALOS-2	ALOS-2	ALOS-2	
観測日時 (JST)	2015/01/17	2014/12/07	2016/05/23	2016/08/03	
	2016/10/22	2016/10/23	2016/10/24	2016/10/26	
	23:17 頃	12:45 頃	23:58 頃	12:10 頃	
取得間隔	(644日間)	(686日間)	(154日間)	(84日間)	
衛星進行方向	北行	南行	北行	南行	
電波照射方向	左 (西)	左 (東)	右 (東)	右 (西)	
観測モード*	U-U	U-U	U-U	U-U	
入射角(中心)	43°	36°	33°	33°	
偏波	偏波 HH		HH	HH	
垂直基線長 +172m		+10m	+54m	+1m	

*U: 高分解能(3m)モード

本成果は、地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループの活動を通して得られたものである。

- 第17図 鳥取県中部の地震 合成開口レーダー解析結果(2) 解析ペア諸元
- Fig.17 Synthetic Aperture Radar (SAR) interferograms using ALOS-2 of the central Tottori Prefecture earthquake (2).

干渉 SAR 3 次元解析によって求められた鳥取県中部の地震の地殻変動分布



北北西一南南東方向に延びる左横ずれ断層運動を示唆する地殻変動が見られる.

干渉 SAR 3次元解析の原理図



第18図 鳥取県中部の地震 合成開口レーダーによる地殻変動分布図:3次元解析

Fig.18 Coseismic displacement of the central Tottori Prefecture earthquake captured by SAR interferometry using ALOS-2 data: results of 3-D analysis.

鳥取県中部の地震の震源断層モデル(矩形断層一様滑りモデル)

SAR (だいち2号) 及び GNSS で観測された地殻変動から、北北西-南南東走向の高角の断層が 左横ずれ的に動いたと推定される。



(a) GNSS データの観測値と計算値。
 (左)水平成分、(右)上下成分。実線は断層の上端位置。★印は震源。
 灰色点は余震(気象庁ー元化震源: 2016/10/21~2016/10/27)。

震源断層パラメータ											
経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	滑り角	滑り量	Mw		
[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]	[m]			
133.838	35.435	2.4	8.1	6.9	160	88	-2	1.3	6.15		
(0.007)	(0.004)	(0.6)	(1.2)	(4.0)	(2.0)	(2.6)	(4.2)	(0.2)			

- 第19図a 鳥取県中部の地震の震源断層モデル(矩形断層一様滑りモデル)
- Fig.19a Earthquake source fault model of the central Tottori Prefecture earthquake (rectangular fault model). (Upper left) Horizontal displacement, (Upper right) vertical displacement, (Lower) Parameter of the earthquake source fault model.



(b) 干渉 SAR 画像の(左)観測値、(中)計算値、(右)残差。実線は断層位置。★印は震源。

本研究で用いた ALOS-2 データは、地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループを通じて、(国研)宇宙航空研究開発機構 (JAXA) から提供を受けました。原初データの所有権は JAXA にあります。

- 第19図b 鳥取県中部の地震の震源断層モデル(矩形断層一様滑りモデル)合成開口 レーダー解析結果との比較
- Fig.19b Comparison of observed and calculated SAR interferograms. (left) observation (center) calculation (right) residual.

鳥取県中部の地震の震源断層モデル(滑り分布モデル)

SAR (だいち2号) 及び GNSS で観測された地殻変動を基に推定された滑り分布モデルの特徴 は以下の通りである。

- 1)北北西-南南東走向の垂直な断層面上における左横ずれ運動が推定される。
- 2) 滑りの中心域は、震源よりやや北側の深さ約5kmに位置する。
- 3)推定された地震モーメントは2.64×10¹⁸ Nm(モーメントマグニチュード: 6.21)である。





(c) 干渉 SAR 画像の(左)観測値、(中)計算値、(右)残差。実線は断層の上端位置。★印は震源。



- 第20図 鳥取県中部の地震の震源断層モデル(滑り分布モデル)
- Fig.20 Earthquake source fault model of the central Tottori Prefecture earthquake (slip distribution model).
 - (a) Slip distribution on the fault plane. (b) Comparison of observed and calculated displacement. (c) Comparison of observed and calculated interferograms.

鳥取県中部の地震前の地殻変動(1) -変動ベクトル図 (2011 年~ 2016 年)-

鳥取県中部の地震前の地殻変動(2)

-変動ベクトル図 (2005年~2010年)-地殻変動(水平)

基準期間:2005/04/01~2005/04/30[F3:最終解] 比較期間:2010/04/01~2010/04/30[F3:最終解]



Fig.21 Crustal deformation before the central Tottori Prefecture earthquake (1) (2011-2016). Horizontal displacement (top), vertical displacement (bottom).

- 133° ☆ 固定局:三隅(950388) 地殻変動(上下) 基準期間:2005/04/01~2005/04/30[F3:最終解] 比較期間:2010/04/01~2010/04/30[F3:最終解]
- 鳥取県中部の地震前の地殻変動(2)(2005~2010) 第22図

133°

☆ 固定局:三隅(950388)

Fig.22 Crustal deformation before the central Tottori Prefecture earthquake (2) (2005-2010). Horizontal displacement (top), vertical displacement (bottom).

鳥取県中部の地震前の地殻変動(3) -GNSS 連続観測による水平ひずみ分布-

- 第23図 GNSS連続観測による水平ひずみ分布
- Fig.23 Horizontal strain before the central Tottori Prefecture earthquake derived from continuous GNSS measurements.

約100年間(1883年~1994年)の測地観測による水平ひずみ分布 第24図

Horizontal strain around the central Tottori Prefecture derived from conventional geodetic Fig.24 observations for about 100 years (1883-1994).

平成12年(2000年)鳥取県西部地震に伴う地殻変動

地 設変動 (水平)

平成12年(2000年)鳥取県西部地震に伴う地殻変動 第25図

Crustal deformation associated with the western Tottori Prefecture earthquake in 2000. Fig.25 Horizontal displacement (top), vertical displacement (bottom).