

令和6年能登半島地震の震源断層モデル Fault Model of the 2024 Noto Peninsula Earthquake

地理地殻活動研究センター 水藤尚・宗包浩志・桑原將旗
Geography and Crustal Dynamics Research Center
SUITO Hisashi, MUNEKANE Hiroshi and KUWAHARA Masaki

要旨

令和6年能登半島地震の発生に伴って、GNSS連続観測やだいち2号のSAR解析により、能登半島を中心に中日本全域で地殻変動が観測された。これらの地殻変動に基づいて、震源断層モデルの推定を行った。震源断層は震央から南西及び北東方向に100 km 強の長さで、北東-南西走向で南東傾斜し、能登半島北岸に沿った位置に推定された。断層運動は、右横ずれ成分を含む逆断層型で、能登半島北西岸ではすべり分布モデルで最大約10 mのすべりが推定された。矩形断層モデルから計算される地震規模はモーメントマグニチュード7.44であった。震源断層モデルは、地震調査委員会に報告され、能登半島地震の地震活動の評価に活用された。

1. はじめに

令和6年1月1日16時10分に石川県能登地方でM7.6の地震が発生し、最大震度7の揺れを観測した。石川県能登地方では、令和2年12月頃から地震活動が活発な状態が継続しており、同時期から顕著な隆起を伴う非正常地殻変動も観測されていた(地震調査委員会, 2022)。令和5年5月5日には、能登半島沖でM6.5の地震が発生し、最大震度6強の揺れを観測した(地震調査委員会, 2023)。気象庁では、一連の活動について、名称を「令和6年能登半島地震」(以下「能登半島地震」という。)と定めている。能登半島地震の震源域である能登半島北岸沖には活断層の存在が知られており(井上・岡村, 2010)、門前沖、猿山沖、輪島沖、珠洲沖のセグメントに区分されていた。今回の地震でこれらの活断層が活動したのか、どのセグメントが活動したのかを把握することは、地震活動の評価や未活動セグメントへの影響の検討を行う上でも重要である。能登半島地震では、国土地理院が運用するGNSS連続観測システム(以下「GEONET」という。)及び宇宙航空研究開発機構が運用する陸域観測技術衛星2号「だいち2号」によって地殻変動が捉えられた(石本ほか, 2024; 越智ほか, 2024)。国土地理院では、これらの地殻変動に基づいて震源断層モデルの推定を行い、その結果をウェブサイトで公表するとともに、地震調査委員会に報告した。報告した震源断層モデルは、地震活動の評価に活用された。本稿では、地殻変動に基づ

き推定された震源断層モデルについて報告する。

2. データと解析方法

能登半島地震に伴い観測されたGNSS及びSAR解析による地殻変動の詳細は、本特集号の越智ほか(2024)及び石本ほか(2024)をそれぞれ参照されたい。本章では、モデル計算に係るデータ処理について紹介する。

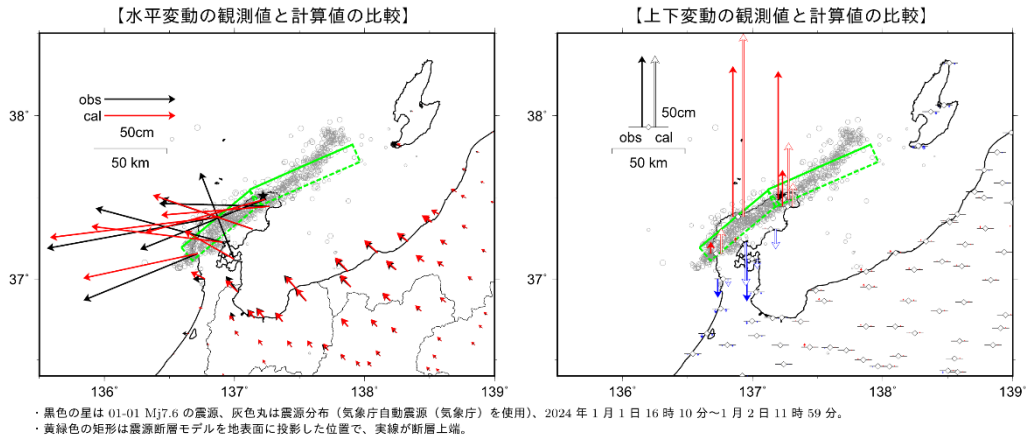
2.1 GEONET 解析

GEONETの定常解析には、最終解(F5解)、速報解(R5解)、迅速解(Q5解)の3種類がある(村松ほか, 2021)。このうち、F5解及びR5解はUTC0時からの24時間の観測データを単位とした解である。Q5解は6時間の観測データを単位として、3時間ごとに1回算出される解であり、精度はF5解やR5解に比べて劣るものの、迅速性や時間分解能に優れている。地震活動の評価を行っている地震調査委員会は、巨大地震の発生時もしくは地震により甚大な被害が生じた場合には、地震活動の評価を行うための臨時の会合を地震発生の当日もしくは翌日に開催している。F5解やR5解は解の算出が間に合わず、初期の震源断層モデルは、Q5解の結果に基づいて推定している。その後、R5解、F5解が算出されたタイミングで震源断層モデルの再推定を行い、モデルの更新を行っている。能登半島地震では、臨時会(1月2日に開催)にはQ5解(図-1)、1月の定例会(1月15日)にはR5解(図-2)、2月の定例会(2月9日)及び3月の定例会(3月11日)にはF5解(図-3)による震源断層モデルを提出した。

甚大な被害が発生した地震や震源が観測点に近い場合には、電子基準点のピラーが傾斜することがあり、算出された座標解に地震による変動以外の変動が含まれることがある。また、停電等により通信が途絶えた場合には、通信の復帰までデータが取得できないため、通信の復帰に目処が立たない場合には現地収録によりデータを取得する必要があるため、座標解の算出が地震後数日以降になることもある。能登半島地震では、現地観測により複数の観測点(電子基準点「輪島、珠洲、能登、富来、能登島、穴水、M珠洲笹波」の7点:越智ほか, 2024)でピラーの傾斜が確認された。そのため、F5解に基づいた最終

令和6年能登半島地震の震源断層モデル（暫定）

基準期間：2023年12月25日0時～2024年1月1日15時（Q5解）JST
 比較期間：2024年1月1日18時～2024年1月2日6時（Q5解）JST



・ 黒色の星は 01-01 Mj7.6 の震源、灰色丸は震源分布（気象庁自動震源（気象庁）を使用）、2024年1月1日16時10分～1月2日11時59分。
 ・ 黄緑色の矩形は震源断層モデルを地表面に投影した位置で、実線が断層上端。

【推定された震源断層パラメータ】

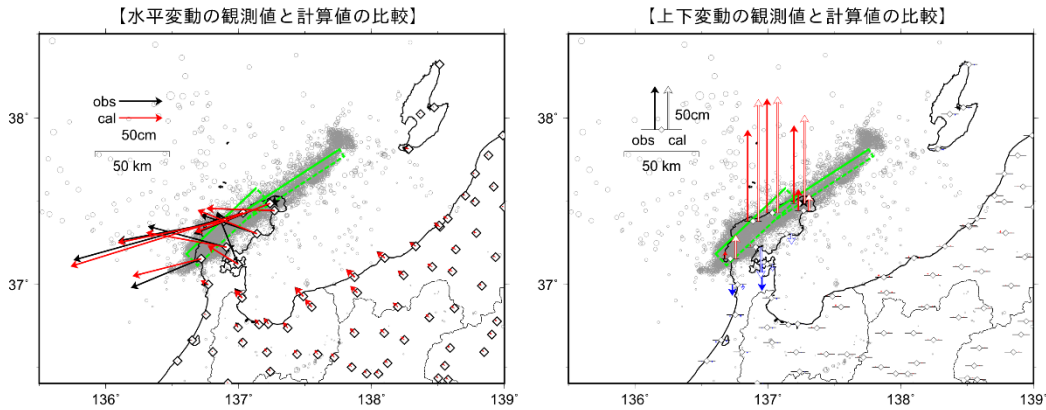
経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	すべり角	すべり量	M_w
		km	km	km			m		
136.592	37.194	1.7	60.7	13.0	50.1	25.4	128.6	3.48	7.21
(0.004)	(0.002)	(0.3)	(0.5)	(0.3)	(0.4)	(1.2)	(0.8)	(0.04)	(0.01)
137.115	37.548	1.7	76.4	21.9	66.1	54.1	105.3	2.22	7.30
(0.004)	(0.004)	(0.3)	(2.6)	(1.4)	(2.1)	(1.0)	(0.5)	(0.11)	(0.02)

・ マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法を用いてモデルパラメータを推定。括弧内は誤差（ 1σ ）を示す。
 ・ M_w と断層面積をスケールリング則（Strasser et al., 2010）に拘束。
 ・ 断層長さ と断層幅の比が 2:1 に近づくように拘束。
 ・ M_w の計算においては、剛性率を 30GPa と仮定。2 枚の断層の合計の M_w は 7.46。

図-1 Q5 解に基づく矩形断層モデル。

令和6年能登半島地震の震源断層モデル（暫定）

基準期間：2023年12月25日～2023年12月31日（R5解）JST
 比較期間：2024年1月2日～2024年1月5日（R5解）JST



・ 黒色の星は 01-01 Mj7.6 の震源、灰色丸は震源分布（気象庁一元化震源（気象庁）を使用）、2024年1月1日16時10分～1月3日23時59分。
 ・ 黄緑色の矩形は震源断層モデルを地表面に投影した位置で、実線が断層上端。

【推定された震源断層パラメータ】

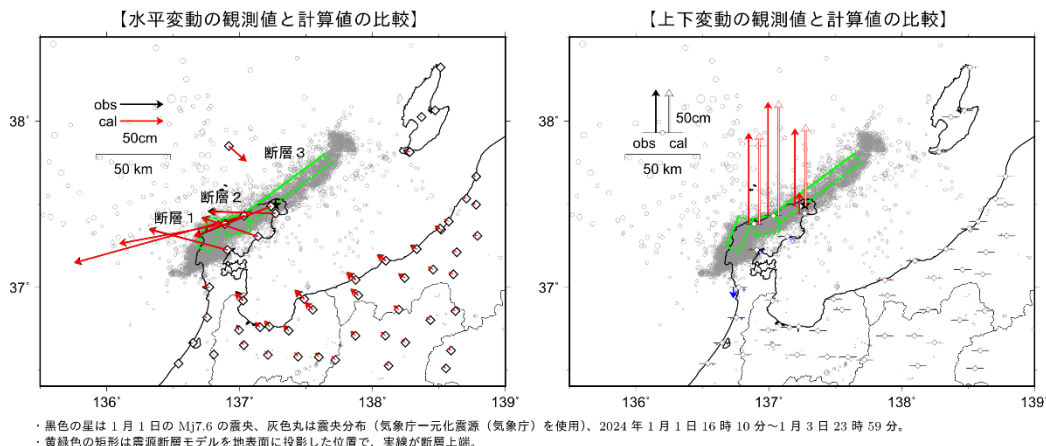
経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	すべり角	すべり量	M_w
		km	km	km			m		
136.608	37.185	1.8	63.8	11.9	46.9	26.0	124.4	3.85	7.23
(0.001)	(0.001)	(0.2)	(0.3)	(0.2)	(0.4)	(1.0)	(0.7)	(0.08)	(0.00)
137.037	37.439	1.2	76.0	10.8	56.9	59.0	99.3	4.31	7.28
(0.002)	(0.010)	(0.1)	(1.1)	(0.5)	(2.2)	(0.6)	(0.6)	(0.06)	(0.01)

・ マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法を用いてモデルパラメータを推定。括弧内は誤差（ 1σ ）を示す。
 ・ M_w と断層面積をスケールリング則（Strasser et al., 2010）に近づくように拘束。
 ・ M_w の計算においては、剛性率を 30GPa と仮定。2 枚の断層の合計の M_w は 7.46。

図-2 R5 解に基づく矩形断層モデル。

令和6年能登半島地震の震源断層モデル

基準期間：2023年12月25日～2023年12月31日 (F5解) JST
 比較期間：2024年1月2日～2024年1月6日 (F5解) JST



・ 黒色の星は1月1日のMj7.6の震央、灰色丸は震央分布（気象庁一元化震源（気象庁）を使用）、2024年1月1日16時10分～1月3日23時59分。
 ・ 黄緑色の矩形は震源断層モデルを地表面に投影した位置で、実線が断層上端。

【推定された震源断層パラメータ】

	経度	緯度	上端深さ km	長さ km	幅 km	走向	傾斜	すべり角	すべり量 m	M_w
断層1	136.680 (0.002)	37.246 (0.002)	0.1 (0.1)	22.0 (0.3)	12.2 (0.2)	22.7 (1.0)	40.6 (0.4)	84.4 (1.3)	6.79 (0.11)	7.09 (0.01)
断層2	136.876 (0.003)	37.414 (0.001)	0.0 (0.0)	16.2 (0.4)	20.4 (0.5)	78.3 (0.6)	54.9 (0.6)	140.2 (0.7)	2.83 (0.05)	6.90 (0.01)
断層3	137.037 (0.001)	37.445 (0.002)	0.1 (0.1)	66.8 (1.1)	11.5 (0.1)	53.3 (0.4)	49.7 (0.3)	114.6 (0.2)	4.42 (0.04)	7.27 (0.00)

・ マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を用いてモデルパラメータを推定。括弧内は誤差 (1 σ) を示す。
 ・ M_w と断層面積をスケールング則 (Strasser et al., 2010) に近づくように拘束。
 ・ M_w の計算においては、剛性率を 30GPa と仮定。3枚の断層の合計の M_w は 7.44。

図-3 F5解と SAR 解析に基づく矩形断層モデル。

版の震源断層モデルの推定の際には、これらの観測点のデータについて、傾斜測定の結果から推定される見かけの変位を補正してモデル計算に使用した。ただし、このうち電子基準点「富来 (960575)」、 「能登島 (960576)」及び「M珠洲狼煙 (229094)」の3観測点は、傾斜補正を行っても周りの電子基準点と明らかに異なる変動を示していたため、モデル計算には使用しなかった。また、電子基準点「柚倉島 (950252)」は、停電により通信が途絶えていたため、Q5解及びR5解を用いた震源断層モデルの推定には使用できなかった。

能登半島地震に伴い電子基準点「輪島 (940053)」が西北西に約2m変位するなど、震央周辺の能登半島北岸の観測点で特に大きな地殻変動が観測された (図-3)。能登半島北岸では西北西方向の変動が卓越しているが、富山県や新潟県などでは北西方向の変動が卓越している。上下変動は、能登半島北岸で1mを超える隆起が観測された。震源域から離れた富山県や新潟県でも若干の隆起が観測された。

2.2 SAR 解析

能登半島地震の発生直後からだいち2号により多数の観測が行われ、ピクセルオフセット法を用いた SAR解析 (小林ほか, 2011) により地震に伴う地殻変動が詳細に捉えられた (石本ほか, 2024)。本稿で

は、震源断層モデル推定のための地殻変動データとして、北行左観測の軌道から撮像した2022年9月26日と2024年1月1日の画像ペア1 (図-4上段)、北行右観測の軌道から撮像した2023年11月3日と2024年1月12日の画像ペア2 (図-4中段)、北行右観測の軌道から撮像した2023年12月6日と2024年1月3日の画像ペア3 (図-4下段) の3つの画像ペアを使用した。本稿ではこれらの地殻変動データをQuadtree Decompositionアルゴリズム (Jonsson et al., 2002) によりリサンプリングすることで、モデル計算に適したデータセットを作成した。

画像ペア1では、能登半島北西岸の輪島市西部で最大3m、北岸の珠洲市北部で最大1mの衛星に近づく変動 (隆起もしくは東向きの変動) が見られる。画像ペア2では、能登半島北岸の珠洲市北部で最大3mの衛星に近づく変動が見られる。画像ペア3では、能登半島北西岸の輪島市西部で最大4mの衛星に近づく変動が検出されている (図-4)。

3. 震源断層モデル

GEONET 及び SAR 解析により得られた地殻変動に基づき、矩形断層モデルと断層面上でのすべりの分布を推定するすべり分布モデルの2種類のモデルの推定を行った。矩形断層モデルの推定は、川畑・宗包 (2021) の MCMC 法によりモデルパラメータを決

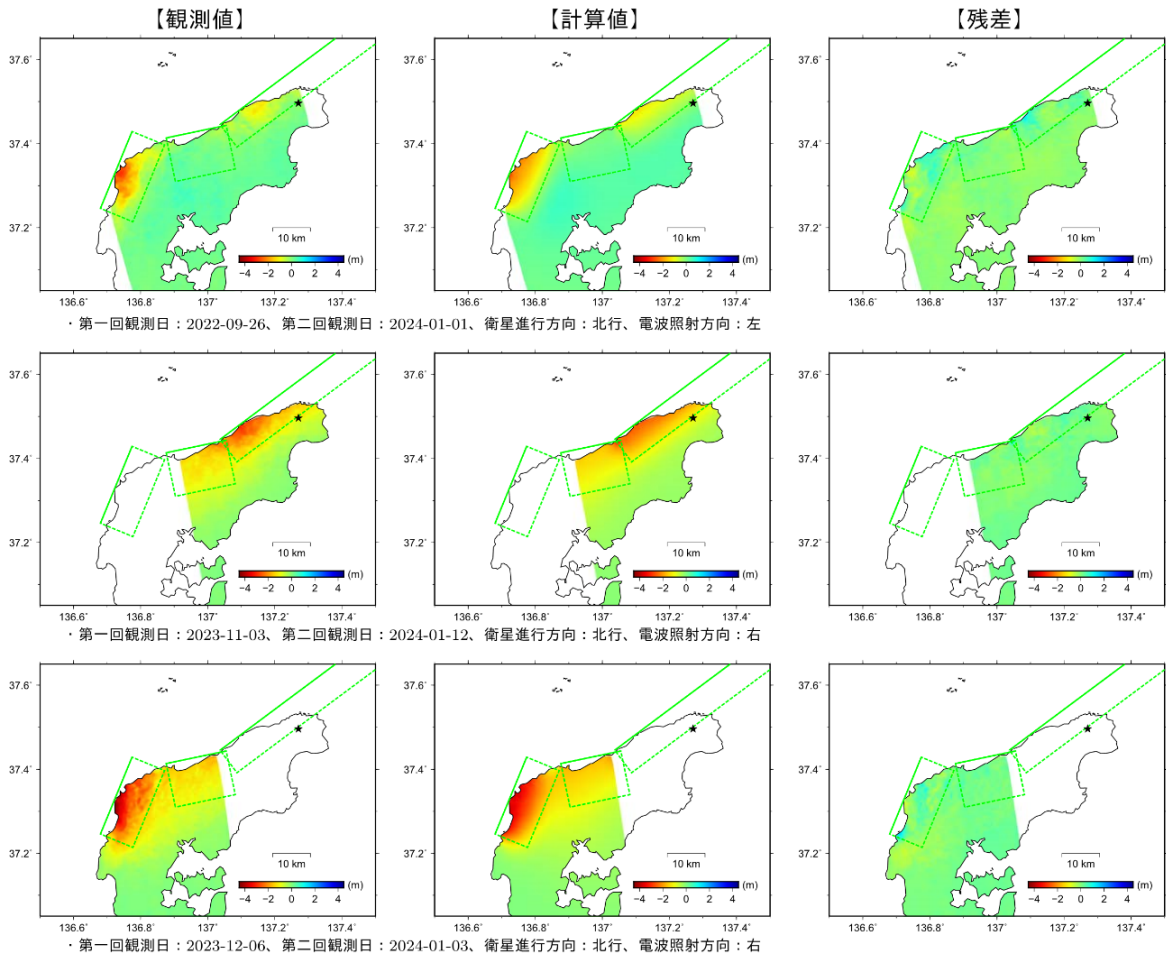


図-4 SAR 解析による地殻変動。左から観測値、計算値、残差（観測値と計算値の差）。上段は画像ペア 1、中段は画像ペア 2、下段は画像ペア 3。

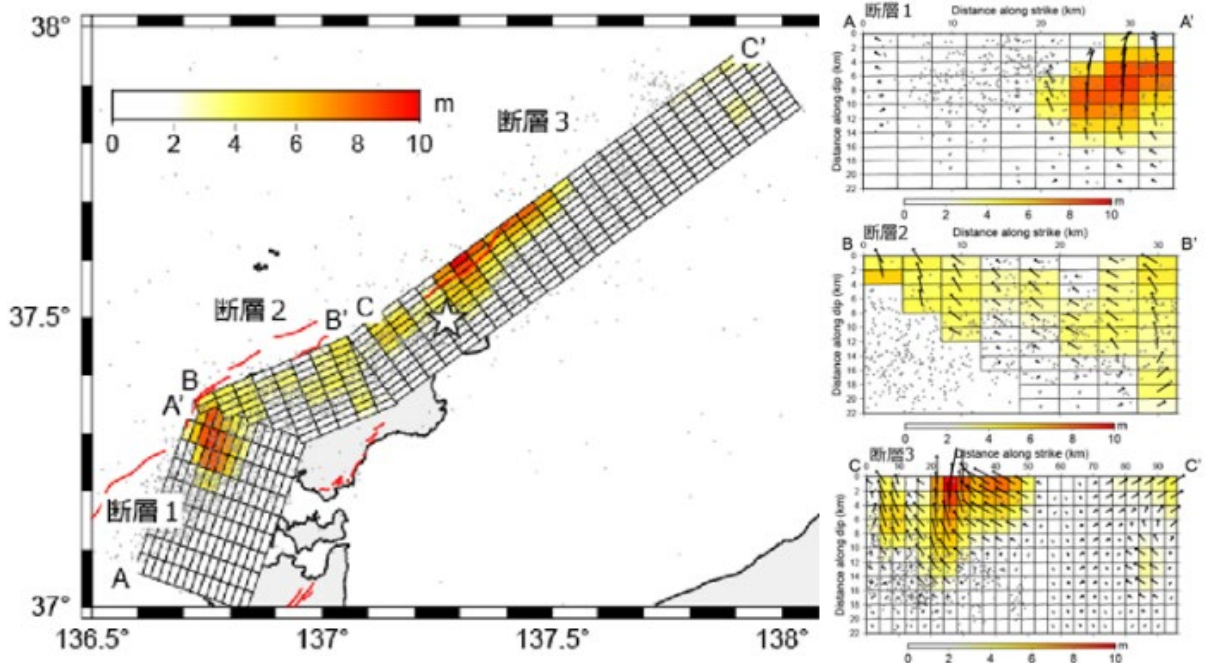


図-5 F5 解と SAR 解析に基づくすべり分布モデル。

定した。すべり分布モデルの推定では、非負拘束・平滑化制約つき最小二乗法（例えばBarbot et al., 2013）を用いた。

3.1 矩形断層モデル

矩形断層モデルは、詳細な断層すべりの分布を表せないが、推定結果であるモデルパラメータがシンプルで利用しやすいという特徴がある。断層運動を1枚の断層面で近似することが多いが、地震規模が大きい場合や複雑な断層形状をしている場合には、複数の断層面で近似することがある。能登半島地震の場合には、1枚の断層面では能登半島における水平変動の変動方向の再現が難しいことから、当初は2枚の断層面を仮定した。しかし、SAR解析の結果から能登半島北西岸で4 mを超える大きな隆起が検出されたことから、最終的には3枚の断層面を仮定した。そのため、GNSSのみから推定したQ5解（図-1）及びR5解（図-2）に基づいた震源断層モデルは、断層面が2枚となっている。以下は、F5解とSAR解析に基づいた震源断層モデル（図-3）の詳細である。

断層は、震央から南西及び北東方向に100 km強の長さで、能登半島北岸に沿った位置に推定された。3つの断層はそれぞれ、断層1：能登半島北西岸の北東-南西走向で傾斜角が41度で南東に傾斜する逆断層型、断層2：能登半島北岸の東北東-西南西走向で傾斜角が55度で南南東に傾斜する逆断層成分を含む右横ずれ断層型、断層3：能登半島北岸から佐渡島方向に延びる北東-南西走向で傾斜角が50度で南東に傾斜する右横ずれ成分を含む逆断層型が推定された。断層の上端深さは0 kmであり、断層のすべりは地表まで達しているものと思われるが、断層の上端は海域にあり、地表断層を見いだすことは難しい。すべり量は、断層1が最も大きく6.8 m、断層2は2.8 m、断層3は4.4 mと推定された。断層パラメータから計算される地震規模はモーメントマグニチュード（以下「 M_w 」という。）7.44となった（剛性率は30 GPaを仮定）。これは、気象庁や防災科学技術研究所等の各機関で地震波形から推定されたマグニチュード（ M_w 7.4~7.6）と調和的である。

3.2 すべり分布モデル

矩形断層モデルで得られた知見を基に、3枚の断層面を設定した。各断層の走向及び傾斜は震源分布や矩形断層モデルを参考に決定した。すべり分布の推定にあたっては、すべりが正断層成分を持たないという拘束を加えた。また、ラプラシアンにより与えられるすべりの滑らかさについて制約をあたえ、赤池ベイズ情報量基準（ABIC）により対応するハイパーパラメータを最適化した（深畑，2009）。

能登半島北西岸の断層1の北端に最大10 mの大きなすべりが推定された（図-5）。断層1では逆断層型、断層2では右横ずれ成分を含む逆断層型、断層3では能登半島付近では右横ずれ成分、佐渡島付近では左横ずれ成分を含む逆断層型となっている。いずれの断層も深さ10 km以浅の浅部に大きなすべりが集中している。震央から北東付近の海域で大きなすべりが推定されているが、その北東延長上ではすべりが小さくなり、断層北東端で再度若干のすべりが推定されている。すべり分布モデルから計算される地震規模は M_w 7.48で矩形断層モデルとほぼ同規模の結果である。

4. まとめ

令和6年1月1日に発生した令和6年能登半島地震に伴い、GEONET及びSAR解析によって能登半島を中心に中日本で大きな地殻変動が観測された。これらの地殻変動に基づき、震源断層モデルの推定を行った。断層は震央から南西及び北東に100 km強の長さで、北東-南西走向で南東傾斜し、能登半島北岸に沿った位置に推定された。断層運動は、右横ずれ成分を含む逆断層型で、能登半島北西岸ではすべり分布モデルで最大約10 mのすべりが推定された。矩形断層モデルから計算される地震規模は M_w 7.44であった。

謝辞

本稿で使用しただいち2号の原初データの所有権はJAXAにあります。これらのデータはだいち2号に関する国土地理院とJAXAの間の協定及び地震SAR解析WGの活動に基づき提供されたものです。

（公開日：令和6年12月27日）

参考文献

- Barbot, S., Agram, P. and De Michele, M. (2013) : Change of apparent segmentation of the San Andreas fault around Parkfield from space geodetic observations across multiple periods, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 6311–6327. doi:10.1002/2013JB010442
- 深畑幸俊 (2009) : 地震学における ABIC を用いたインバージョン解析研究の進展, *地震*, 61, S103–S113. doi:10.4294/zisin.61.103

- 井上卓彦, 岡村行信 (2010) : 能登半島北部周辺 20 万分の 1 海域地質図説明書, 海陸シームレス地質情報集, 能登半島北部, 数値地質図 S-1.
- 石本正芳, 服部晃久, 三木原香乃, 小門研亮, 小林知勝 (2024) : だいち 2 号で捉えた令和 6 年能登半島地震に伴う地殻変動, 国土地理院時報, 138, 17-24. doi: 10.57499/JOURNAL_138_03
- 地震調査委員会 (2022) : 石川県能登地方の地震活動の評価 (令和 4 年 7 月 11 日公表), https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2022/2022_ishikawa_1.pdf, (accessed 10 Sep. 2024) .
- 地震調査委員会 (2023) : 石川県能登地方の地震活動の評価 (令和 5 年 5 月 12 日公表), https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2023/2023_ishikawa_1.pdf, (accessed 10 Sep. 2024) .
- Jonsson, S., Zebker, H., Segall, P. and Amelung, F. (2002) : Fault slip distribution of the 1999 Mw7.1 Hector Mine, California earthquake, estimated from satellite radar and GNSS measurements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 1377-1389. doi:10.1785/0120000922
- 川畑亮二, 宗包浩志 (2021) : MCMC法を用いた震源断層及びすべり分布モデル推定のためのプロトタイププログラムの開発, 国土地理院時報, 134, 1-12. doi:10.57499/JOURNAL_134_01
- 小林知勝, 飛田幹男, 村上亮 (2011) : 局所的大変位を伴う地殻変動計測のためのピクセルオフセット解析, 測地学会誌, 57, 71-81. doi:10.11366/sokuchi.57.71
- 村松弘規, 高松直史, 阿部聡, 古屋智秋, 加藤知瑛, 大野圭太郎, 畑中雄樹, 攪上泰亮, 大橋和幸 (2021) : 新しい GEONET 解析ストラテジによる電子基準点日々の座標値 (F5 解・R5 解) の公開, 国土地理院時報, 134, 19-32. doi:10.57499/JOURNAL_134_03
- 越智久巳一, 若杉貴浩, 山田晋也, 宗包晃子, 高松直史, 齋田宏明, 畔柳将人, 宮崎隆幸, 宮本純一, 大森秀一, 小門研亮, 田村孝 (2024) : GEONETにより捉えられた令和 6 年能登半島地震の際に生じた地殻変動及び測地観測センターの対応, 国土地理院時報, 138, 9-15. doi: 10.57499/JOURNAL_138_02