

# 海底活断層の認定手法の 転換を迫る能登半島地震

後藤秀昭 ごとう ひであき

広島大学大学院人間社会科学研究所(地理学)

活断層など、地殻変動によって作られる地形の研究を行なっている。兵庫県南部地震、熊本地震などの地震断層のほか、陸上および海底の断層地形を調査研究。数値地形データを用いた3D画像による変動地形研究を先導。

2024年能登半島地震の震源断層は半島北部の地下にあり、その上端は北岸沖の海底面に達する<sup>1</sup>。この断層は地震発生前から津波の被害想定においては検討されていた<sup>2</sup>が、地震の被害想定では対象とされていない<sup>3</sup>。対象となっていなかったのは、時間の不足や沿岸海域の情報の不足だけではなく、海底活断層の認定の方法にも問題があったと考えられる。海底活断層を変動地形学的に認定する方法を紹介し、その導入の必要性を説くとともに、今後の海底活断層調査への提言を行なう。

## 能登半島北部の地形と 地震による隆起

能登半島北部は定高性(一定の高さ)をもつ丘陵から構成されており、前期～中期更新世(約100万年前頃)に浅海底で形成された平坦面が隆起したものと考えられている<sup>4</sup>。丘陵頂部に残された平坦面は、大局的には北岸沿岸で高く、南の七尾湾に向

かって高度を減じる。沿岸部には、それよりも新しい時代に形成されたひな壇状の形態をなす海成段丘と呼ばれる地形が広く分布する。最終間氷期の約12万～13万年前に海岸付近で形成された海成段丘は北岸で約110mあり、日本列島のなかで隆起速度の速い場所として知られる。この段丘面の高度は南に向かって急激に減じており、半島は傾動隆起してきたと考えられる<sup>4</sup>。2024年能登半島地震に伴う隆起量は北岸で大きく、南に向かって減じており<sup>5</sup>、南傾斜の逆断層が示唆される。大局的には過去数十万年間に繰り返されてきた地殻変動と同様の変動が2024年の地震で生じたと考えられる。過去数十万年間の変動地形学的な検討が、地震の発生予測につながることを改めて明確に示したと言えよう。その一方で、海底活断層の認定は探査記録の判読に主軸がおかれ、変動地形学的な検討に乏しく、地震想定に問題があったと考えられる。

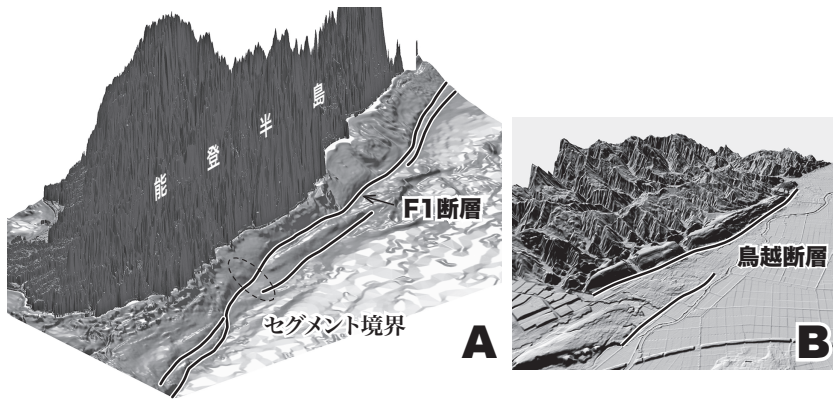


図1—能登半島北岸沿岸の変動地形と活断層(A)および逆断層による変動地形の例(B)  
 Aの断層線は文献7にもとづき、「セグメント境界」は文献6にもとづく。Bは越後平野西縁の鳥越断層で地理院地図より作成した。

## 能登半島沖の活断層の認定

能登半島周辺には大陸棚が広がっており、現在の半島の面積の2倍程度が、氷期には陸上となっていた。2024年の地震は海底活断層の活動と言えるが、氷期であれば陸上活断層が活動したことになる。つまり、2024年の地震を引き起こした活断層を認識するには、陸と海の両方の作用で形成された複雑な地形と地質を読み取る必要があり、探査記録のみで認識することは容易ではない。

井上・岡村(2010)は高分解能音波探査および三次元サイドスキャンソナーを用いて活断層図を作成し、30 km程度の4つのセグメント(活断層の活動区間)に分けられるとした<sup>6</sup>。これをふまえれば2024年能登半島地震を想定することは容易ではなかった。一方、(一財)日本水路協会発行のデータから3D画像を作成し、変動地形学的に判読した研究<sup>7</sup>では、輪島沖から珠洲沖の海岸線の一般走向に沿うように北東-南西方向に変動地形が連続して認められ、明瞭な一条の活断層(F1断層)が連続し、一部でさらに北側に分岐・並走するとされた(図1A)。これは、海底面に撓曲崖や細長い凸型斜面が確認でき、逆断層に共通して見られる変動地形(図1B)が観察できたからである。

特に重要なことは、輪島セグメントと珠洲セグメントの境界とされた場所<sup>6</sup>においても、断層変位地形が連続することである(図1A)<sup>7</sup>。ここに活

断層の連続を認めることは、探査記録の資料<sup>6</sup>に見られる地形の起伏や地層の変形構造とも矛盾はない。細かなセグメントに分ける必要がないことを変動地形からは読み解けていたことになる。

## 変動地形学的な地形判読とは何か

次に、変動地形学的な検討とはどのようなものか、陸上の活断層の認定方法を例に説明したい。陸上の活断層は、空中写真が利用できるようになった1960年代から、地形面の変位にもとづいて科学的な手法で認定されるようになった。また、現地での地質調査によって活断層の存否が検証され、断層によって作られた地形の読解にフィードバックされて、変動地形学的手法の技術が発展し、人材が育成された。特に、活断層の過去の活動を解明するために実施されるトレンチ(掘削)調査では、まず変動地形学的な判読が行なわれた上で、調査地点が選定される。このように、変動地形学は活断層調査に重要な役割を果たしている。

1995年兵庫県南部地震や2016年熊本地震はもちろん、これまでに経験してきた内陸直下型地震のほぼすべてにおいて、地面を引き裂いた断層と事前に認定されていた活断層との関係は、繰り返し確認されてきた。内陸直下型地震の発生予測には、変動地形学的に認定される活断層分布図が不可欠となっている。

活断層は地下に広がる面であるが、地上と交差

する場所である断層線付近で、最近の活動について検討が行なわれる。2010年頃以降には、空中写真に加えて数値標高モデル(DEM)が利用されるようになった<sup>8</sup>。DEMを用いた地形判読でも、空中写真と同様に実体視(3D)で地形を観察し、断層地形が特定されている。空中写真判読の技術を受け継ぎながらも、DEMによる画像でしか読み取れない変動地形も抽出されている。

地形判読の資料が空中写真からDEMへ大きく軸足を移したのは、地形計測方法の進化が大きな後押しとなっている。航空機に搭載されたレーザ測量機器(LiDAR)により、地表の地物を除去した地表面の形態が詳細に計測されるようになった。空中写真では判読が難しかった都市部や山地の地形をつぶさに観察できるようになり、重要な発見がもたらされている。また、DEMを3D化するツールが開発されたことにより、局所と広域の判読をシームレスに行なえるようになったことも後押ししている。

変動地形をふまえて、地震探査やボーリング調査などがしばしば行なわれ、地質構造が検討される。こうした地質調査は、地形を読み解いて調査適地を選定することが重要である。調査地では、どのように地形が発達し、地層が堆積してきたか、また、断層で切断されたり、変形させられた場合にどのような地質構造が認識できそうかを予め推定した上で、地質調査が実施される。すなわち、変動地形学的検討とは単に地形の特徴のみを見るのではなく、地形発達を断層活動と関連づけて検討することで地層の切断や変形を推定し、地形と地質の両面の合理的な説明を目指しているのである。

## 音波探査記録に偏った 海底活断層の認定

地形判読によって海底活断層を認定することは、かつては容易ではなかった。詳細な地形情報を取得することが困難であったことや、情報を取得できても、データを処理できるのが一部の専門家に限られていたためである。

しかし、2000年頃からナローマルチビーム測深機によって海底地形の情報は革新的に詳細になった。この測深機は海底を面的にスキャンするように詳細な地形情報を収集するものであり、航空機からレーザ測量機器(LiDAR)で陸上地形を計測するのと同じように、船舶から海底地形の情報を収集するものである。とはいえ、船舶は航空機より移動が低速なうえ、調査できる条件や機関が限られること、沿岸海域では海面利用がなされていることなどから、列島周辺すべての地形がマルチビームによって計測されてはいない。詳細な海底地形の情報は依然としてかなり不足している状態にある。

一方で、詳細な海底地形の情報が得られた場合の処理については、陸上でのDEMの分析方法の深化と普及に呼応するように、陸上と同じような画像が作成されるようになった<sup>9</sup>。また、実体視可能な画像を用いることで、陸上の変動地形学的判読を海底地形に応用することについて検討が進み、海底活断層の認定に重要な手法であることが確認された<sup>10,11</sup>。

しかし、これまで日本では海底活断層の認定には、音波探査記録の読解に重点がおかれてきた。海底活断層の位置・形状の把握は、探査で読み取れた言わば「点」の情報を結んで「断層線」として認定している状況にある(測線を増やしても地形全体を捉えるのに比べれば密度は低くならざるを得ない)。「断層」という地質の状況の把握には、条件が揃えば、海底下の地層の探査記録は重要な情報をもたらすが、活断層かどうかを判定するために不可欠な最近十数万年間の地層がどこでも堆積しているわけでもなく、常にそれらの地層や変位が読み取れるわけでもない。また、活断層は一般に断続的に分布し、さらにそれらのなかでも地形や地質、断層構造は数百mかそれ以下程度で小刻みに変化する。したがって、探査記録のみで断層線を認定することには、限界があると言わざるを得ない。

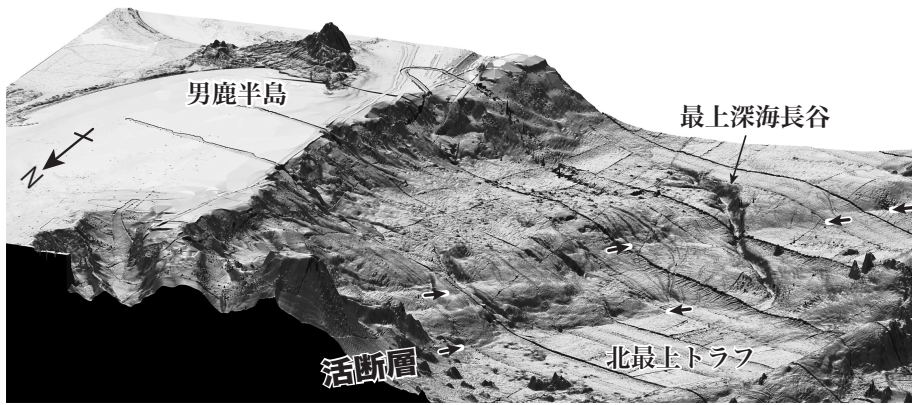


図2—男鹿半島沖の変動地形<sup>1)</sup>

## 変動地形の判読なくして 読み取れない海底活断層

東北地方日本海沖では、変動地形学的な判読によって詳細な海底活断層図が作成された<sup>1)</sup>。このとき初めて認識できた活断層がある<sup>1)</sup>(図2)。逆断層特有の地形が海底地形の発達のかなかで形成されたことが読み取れた。深海の平滑な海盆に生じる新期の小規模な撓曲崖は、3Dの地形画像では容易に認識できる。しかし、それを横切って探査が行なわれていない場合や、海盆浅部の地質構造が高い解像度で探査されていない場合には、探査記録では活断層として認識することは難しい。探査記録の判読のみからは認定が難しいが、地形の発達と特徴をふまえれば、探査記録とも矛盾しないことが確認できる。

陸上では、山地と盆地を分ける活断層が山麓に広く認められているが、最近の地質時代に活動したかどうかは、谷口や山麓のごく一部でしか認識できないことが多い。この状況は海底の地形や地層でも同様である。もちろん、探査記録の情報による検討も重要であるが、第一に変動地形学的な判読を広く行なうことが不可欠と言える。すなわち、陸上と同様の手順で海底活断層の認定作業は行なわれる必要があると言える。

## 今後の海底活断層調査への提言

能登半島の北岸沖は、地震前から詳細な調査がなされた例外的な地域であったが、能登半島地震

を経て活断層の認定に問題が少なくなかったことが示された。それをふまえ、今後、充実させるべき海底活断層調査の手法について、以下のとおり提言を記す。

(1)海底活断層調査の際には、まず最初にマルチビーム測深機による海底地形調査を行ない、詳細な地形情報を取得する。深海では20 m以下、沿岸では5 m以下の間隔の空間解像度が望ましい。特に、沿岸については、海成段丘の高さなど、陸上の変動地形情報から、活断層の存在が推定される地域を優先調査地域として選定する必要がある。

(2)海底地形情報をもとに、陸上と同様の変動地形学的な判読を行なう。等深線図や陰影図だけでなく、自然界で3次元をなす地形を3Dで実体視し、海底地形の発達を読み取るなかで、活断層によって形成される地形を抽出する。

(3)上記の地形判読の結果と、既往の音波探査記録を照合して検討を行なうとともに、探査記録の不足がある場所を対象にさらに探査を行なう。海底の地形と地質を合理的に説明できるものを活断層と認定し、海底活断層図とする。

(4)さらに可能であれば、海底ボーリング調査とコアの解析を行ない、活動履歴を明らかにして、過去の変位量や活動間隔から将来の地震発生について検討する。

上記を通して海底活断層図を適切に作成できる人材を育成することも重要な課題である。学問分

野や携わる手法の枠組みを越えて、地震国の防災対策の基礎情報として確度と精度の高い海底活断層図を作成することが、海に囲まれた島国の研究者と政府の責任と考える。

謝辞：鈴木康弘氏，杉戸信彦氏，山中螢氏から貴重な助言を賜った。

---

#### 文献

1—国土地理院: 2024年1月1日令和6年能登半島地震の震源断層モデル(暫定)(2024), <https://www.gsi.go.jp/cais/topic20240101Noto.html>

2—国土交通省日本海における大規模地震に関する調査検討会: 日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書(2014), [https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/daikibojishinchousa/houkoku/Report.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/houkoku/Report.pdf)

3—地震調査研究推進本部: 海域活断層の長期評価(2022), [https://www.jishin.go.jp/evaluation/long\\_term\\_evaluation/offshore\\_active\\_faults/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/offshore_active_faults/)

4—太田陽子・平川一臣: 地理学評論, **52**, 169(1979)

5—令和6年能登半島地震変動地形調査グループ(日本地理学会): 令和6年能登半島地震による海岸地形変化の検討結果(第三報)(2024), [http://disaster.ajg.or.jp/files/202401\\_Noto008.pdf](http://disaster.ajg.or.jp/files/202401_Noto008.pdf)

6—井上卓彦・岡村行信: 『能登半島北部周辺20万分の1海域地質図及び説明書. 海陸シームレス地質情報集, 「能登半島北部沿岸域」』数値地質図S-1, 地質調査総合センター(2010)

7—後藤秀昭: 広島大学大学院文学研究科論集特輯号, **72**(2012)

8—後藤秀昭・杉戸信彦: e-journal GEO, **7**, 197(2012)

9—中田高・後藤秀昭: 科学, **80**, 852(2010)

10—T. Nakata et al.: in Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, 254(2012)

11—H. Goto et al.: Geomorphology, **418**, 108465(2020)