

沿岸活構造の存否確認・活動度把握の概略調査手法について

On the screening procedures for verification of the presence or absence and estimation of activity of the coastal active structures

小松原 琢^{1*}
KOMATSUBARA Taku^{1*}

Abstract: There would be still unknown active structures in “blank zone of geological survey” along the shoreline of Japanese archipelago with several kilo-meters in width. The special seismic reflection survey methods such as bay-cable have been already developed for continuously imaging subsurface structure between land and sea floor, and they are practically used for specific sites. However, it is still awaiting for development for economic and efficient method to preliminary detect active coastal structures in wide areas such as whole of coastal area of Japanese archipelago. It needs for 1) unifying tectonic landform interpretation using the integrated topographic information between shallow sea floor and terrestrial areas, and 2) detection of vertical displacement of reference which is distributed from sea to land areas to discover the overview of the distribution of coastal active structures. In this paper, the author described about the latter item. The specific horizons in the marine deposits and marine terrace during the Marine Isotope Stages (MIS) 11, 9, 5e and 1 (the Jomon marine transgression) are especially important for reference. And it is also need for making clear sedimentary environments (especially paleo-depth) of reference horizon for accurate estimation of the amount of displacement. The author described his thinking about concrete procedures for making the survey plan.

Keywords: procedure, coastal active structure, detection, unknown active fault.

要 旨

日本の沿岸域（海岸線から幅数 km の帯状の地域）の「地質調査の空白域」には，未知の活構造が存在する可能性が高い．特定地域の沿岸構造を見出す目的で，ベイケーブルなど海陸で連続イメージング可能な反射法地震探査手法が開発されているが，日本列島全体などといった広範囲を対象として活構造の存否や活動性を概査するには，より経済的・効率的な手法を開発することが期待されている．このためには，①浅海域から陸域に至る統合的地形情報を用いた変位地形判読，②海陸にまたがる一連の基準面の高度分布から上下変位を把握すること，が必要である．後者については特に，MIS 11, 9, 5e 及び 1（縄文海進期）の海成堆積物・海成段丘面とその中の特定ホライズンを変位基準面として追跡すること，及び変位量の正確な推定のために堆積環境（古水深）を把握すること，が重要である．そのための具体的な手順について考えるところを述べた．

1. はじめに

陸域と海洋域の接続する水深 30 ～ 40 m 以浅，海岸から 5 km 以内の沿岸域は，調査手法の制約から地質情

報未整備の「地質図の空白域」となっている．この「地質図（地質調査）の空白」に位置する活構造は，過去 300 年間に日本列島で約 30 cm 以上の地表変位（地震断層や顕著な上下変位）を生じさせたプレート内地震（全 36 例，うち現時点で認定されていない構造及び地形地質学的に認定困難と思われる活構造を起震断層とするものは全部で 17 事例）のうち，11 例の地震を生じさせている可能性が高く，そのうち 6 例は未だに起震構造（本稿では断層起因褶曲を含む起震性の構造全体を対象とすることを意図してこの語を用いる）が特定できていない（小松原，2025）．すなわち，日本列島では海岸から幅数 km の帯状の地域に，地表変位を発生させたプレート内地震の起震構造の約 1/3 が集中している可能性があり，さらにその過半について未だ起震構造が特定できていない可能性がある．このような活構造（以下沿岸活構造と呼ぶ）を検知することを目的として，産業技術総合研究所の「沿岸域の地質・活断層調査」や地震調査研究推進本部の「沿岸海域における活断層調査」が 21 世紀初頭以降進められてきた．この調査を加速させ，効果的に沿岸域の活構造を見出すために必要な手法について，筆者の経験を基に思考実験を試みた．

*Corresponding author: KOMATSUBARA, T., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. E-mail: komatsubara-t@aist.go.jp
1 産業技術総合研究所 地質情報基盤センター (AIST, Geoinformation Service Center)

2. 沿岸構造のスクリーニング調査の重要性とその手法について

以下では、特に地質構造に関する基礎データが不足している沿岸域（大型船による物理探査困難な海域を含む、海岸線から数 km 以内の帯状の地区）において上下変位を伴う活構造の有無と活動性を評価する手法について議論する。

上下変位を主とする未知の活構造を見出し、その活動度（変位速度）を把握するには、①地質構造を把握すると同時に、②初生的に水平ないし緩傾斜で短期間に形成された一連の基準面を見出すこと、が必要である。

前者については、バイケーブルや海域と陸域で連続的に受振器を展開する反射法地震探査手法（楮原ほか、2011；木村ほか、2023）が既に開発されているが、活構造の存否にかかわる基礎情報が欠如した場所や、塊状岩分布地域、及び直立した構造に対してこれを用いることは現実的とは言えない。また活構造の活動度を知らずには物理探査とともに地質調査も不可欠である。

このため、海陸にまたがる連続的な反射法地震探査に先立って、より経済的・広域的に海底地形や地質構造を概査（スクリーニング）することが現実的ではないだろうか。そのためには、①海陸を連続的につなげた統合的地形情報を得ること、②海陸に連続する一連の変位基準（地層・地形面）の分布・年代及び形を把握してその変位の有無を明らかにすること、が最も基本的な作業と筆者は考える。①の海底地形の調査法については、既に実用化されている Kan *et al.* (2015) や山崎 (2018) などの調査手法が有効であろう。一方、海陸に連続する地質体の分布状況や活構造認定に有効な基準面については、これまで系統的に論じられてこなかった。以下に筆者の考えをまとめる。

2.1 沿岸活構造認定に有効な変位基準の要件

沿岸活構造の認定に有効な変位基準に求められる要件として、①海陸にまたがって分布すること、②初生的に一連の緩傾斜（水平）面を形成していたこと、③短期間（同時）に形成されたこと、④初生的な形態（堆積深度・形成環境）と形成年代を精度良く決められること、⑤広域に分布しかつ容易に認識できること、の5点が挙げられる。これらの要件を満たす変位基準としては、1) 現海水準以上の高海面期に形成された地質体・地形面（①・②の要件を満たし、かつ④・⑤の要件に適合する可能性が高い）であり、かつ2) 堆積性の基準面であること（②・④の要件を満たす可能性が高く、③の要件についてもテフラや年代測定などによって検証できる可能性が高い）、が挙げられる。一方、現海岸

線をまたいで分布する堆積物であっても、（氷期の）河川堆積物は、初生的形態を復元することが難しく、かつ沿岸陸域の埋没谷沿いに細長く分布することから上記の②・④・⑤の要件を満たす可能性が低いこと、浸食性の基準面は形成年代が不明なため②・③の要件を満たさないこと、から適当な変位基準とは言いがたい。以下では、高海面期の海成堆積物と堆積性地形面について議論する。

2.2 現海岸線をまたいで連続する高海面期の基準面（海成堆積物と堆積性地形面）の形成期について

ところで、日本列島における活構造（すなわち最近の地質時代に繰り返し活動し、将来も活動する可能性がある構造）の認定基準として、第四紀中期（約 50 万年前）以降の基準面を変位させていること、が広く認められている（たとえば今泉ほか、2018）。このことは、過去数十万年間の基準面の年代と形を把握することが、活構造の認定や活動性把握の上で決定的に重要であることを意味する。

周知のように第四紀中期以降、氷河性海面変動によって海岸線の位置が大きく移り変わってきた。現在は間氷期にあたり、過去数十万年間において海水準が現在を上回る時代は、MIS 11（約 40 万年前）、MIS 9（約 30 万年前：ただしこの間氷期の海面高度が現海水準を上回っていたか否かについては議論が続いている）、MIS 5e（約 12.5 万年前）及び MIS 1 極相期（縄文海進期：約 7,000 年前）の3ないし4回の間氷期に限られ（たとえば Spratt and Lisiecki, 2016）、これらの最大海氾濫期には現海岸よりも内陸まで浅海域が広がっていたと考えられている。これらの高海面期に形成された海成段丘堆積物・段丘面は、上記の③（初生的な形態と年代の決めやすさ）及び④（分布の広域性・認識の容易さ）の点から、沿岸活構造の変位基準の要件を満たしている可能性が高い。さらに、海成堆積物中のテフラのような同時間面や短期間で形成された堆積面は、堆積（形成）時の古水深を明らかにすることができれば、沿岸活構造の変位基準として有効性が高いと期待される。また、高海面期に臨海平野の沖積面に連続して河川下流部に形成された堆積段丘（サラソステイック段丘）は、海成段丘面・堆積物と比較して初生形態（標高）について大きな誤差を含むものの、海成層の堆積面に準ずる基準面として扱うことができると考えられる。たとえば本情報集の桑名断層や四日市断層のように断層隆起側まで間氷期の海成堆積物・地形面を追跡しがたい構造については、誤差があることを認識したうえで、サラソステイック段丘を第四紀中期以降の隆起指標として採用することは、平均変位速度が精度よく求められていない構造が少なくないという活構造

評価の現状からみて積極的な意味があると言えるだろう。

2.3 高海面期の海成堆積物の分布状況

高海面期の堆積物であっても、それが分布する（堆積しかつ保存されている）範囲は限られる。堆積基準面の変位を明らかにするためには、その分布を考慮した上で調査することが求められる。

ところで第四紀後期においては、例外はあるものの、水系や堆積盆地の概形は基本的に現在と大きく異ならないと考えられる。したがって、陸源碎屑物の供給範囲（すなわち後背流域）と供給量（速度）及び堆積場は、現在と大きく変わらない、ないしは地形・地質的にその変遷を推定することが可能、という仮定が成り立つ。このため、沿岸域において高海面期の海成堆積物が厚く堆積し、それが保存されている場所＝すなわち陸源碎屑物を母材とする浅海成堆積物が厚く堆積し、それが沿岸流などにより除去されずに保存されている場所＝は、岩石海岸発達地域であれば河川の河口付近であったり、堆積平野の周辺ならば堆積時の湾頭部周辺であったり、というように古地理を復元することによって推定できる可能性が高い。古地理の復元にあたっては、露頭データ・既往ボーリングデータのほか現世デルタの形態（たとえば Galloway, 1975）や現河道形態及び現河床堆積物の粒径、ダム堆砂量などのデータも、参考資料として有用であろう。経験的には、既往のデータから古地理を想定する作業仮説図を作成することが、地質時代の間氷期の堆積物の堆積域を推定する上で参考になる可能性が高いと考えられる。

3. 調査計画について

反射法地震探査や郡列ボーリングといった詳細調査の前段階として、沿岸活構造の存否を確認し、その活動性を概略評価するにあたっては、変位地形を抽出すること、及び海陸両域に分布する一連の基準面を見出してその高度分布を明らかにすること、の2点が最も重要な調査項目であろう。

前者の重要性については既に後藤（2024）などに記載されている。本稿では後者に関連する調査計画上の留意点について述べる。

陸域においては既往ボーリングデータ解析や露頭調査等によって基準面候補となる地層や段丘面を可能な限り多くの地点で見出し、その標高分布を明らかにするとともに、その初生的形態や側方連続性を検討するために形成環境を明らかにすることが求められる。

一方、海域調査にあたっては、①変位地形分布域を含む、可能な限り海岸に近接した海域を含む浅海底の

地質構造を解明すること、及び②変位基準候補（すなわち高海面期の海成堆積物等）が連続的に堆積・保存されている可能性が高い場所において層序関係を明らかにすること、の2項目を含めた探査目標を設定することが必要であろう。この2目標を満たすためには、単に機械的・等間隔格子状に測線を設定するのではなく、想定される構造と直交方向の多数の測線とともに海岸に平行方向に2以上の測線の探査が必要ではないだろうか。特に海底ボーリングなど既往調査がなされている海域では、既往調査地点近傍を通る測線を設定することにより、効率的な調査が可能となる。また、海岸直近の浅海域まで探査するには、探査に用いる船や機器が限定されることを考慮して仕様を決めることが肝要である。さらに探査測線や探査仕様を決めるにあたって、海域・陸域の調査担当者間で密接な連携が必要であることは言うまでもない。

4. 変位量・変位速度の把握について

沿岸に変位地形が存在する、ないしその可能性がある場所では、基準面の標高・年代及び形成環境を解明することを目的として、海陸両方で露頭調査やボーリングによって基準面を把握し、活動度に関する資料を得て、変位速度を解明することが重要な課題となる。この場合特に浅海堆積物は、特徴的な堆積構造、生痕化石や底棲生物化石などの古水深指標をしばしば含んでおり、丹念な調査によって古水深を復元することが求められる。特に、①広域的な変動（褶曲、傾動など）の量・速度に関する定量的なデータ取得や、②陸上では海成段丘の旧汀線や汀線指標生物化石を、海底では海成堆積物を、それぞれ変位基準とするような、異なるホライズンの変位を合算して変位量を求める場合（特に岩石海岸に面した沿岸活構造ではこうした例は多いと想定される）、には古水深の補正は変位量・速度の推定に不可欠であろう。古水深推定にあたり、貝形虫は小径コア試料からも得られる高精度の指標として最も有効と考えられるが、地域ごとに優占種が異なる（池谷・塩崎, 1993）ため、これを示相化石として用いるには、現世堆積物や現在の生息状況に関する系統的な調査を同時に行うことが望ましい。また、海底ボーリングコアの観察にあたっては、陸域の堆積物と同じ視点で観察することが必要という点から、周辺陸域の地質の調査経験を有する人が参加することが望ましい。

5. 浅海堆積物中の基準面認定に関連する注意事項

伊勢湾や東京湾のように陸源碎屑物供給速度が大きな閉鎖海域における間氷期海成堆積物は、内湾底のデ

ルタ底置層の泥質堆積物とそれを整合に覆うデルタ前置層の砂質堆積物からなり、両堆積物の境界は短期間に一連の堆積面として形成された可能性が高い。したがって、これは長期間の平均変位速度を求める上で、テフラに次いで最も重要な基準面となりうる。

特に河口部の現河床に砂ないしシルトが堆積しているような河川に面した内湾域では、多くの場合この地層境界は地盤調査や水井戸掘削を目的とするボーリングデータから容易に側方に追跡でき、最も有力な基準面となりうる。しかし、この基準面は粒径だけでなく密度と弾性波速度も漸移する境界であるため、反射法地震探査（音波探査）ではしばしばミラージュ層をなしており、明確な反射面のみを追跡する解析では見落とされやすい。このため、海域探査測線の近傍でコアリング・ボーリングを行うことが求められる。

一方、河川による礫質砕屑物の供給が多く河口部の現河床に礫が分布する河川や沖積層中部泥層中にしばしばレンズ状の粗粒堆積物が挟在する地域や、逆に粗粒砕屑物の供給が少なく、細粒泥質干潟が河口から沖合まで広く分布する地域や沖積層の中部泥層と上部砂層の境界が明確でない地域においては、最終間氷期以前の高海面期堆積物においてデルタ底置層堆積物とデルタ前置層堆積物の境界を地盤調査ボーリングのみで追跡することは困難なことが多いと考えられ、層序ボーリングによる確認が必要であろう。

さらに、最終間氷期の内湾底のデルタ底置層の泥質堆積物（海成泥層）上面を変位基準面とする場合、最終間氷期には3回の亜間氷期（高海面期）があり、特に陸源砕屑物の供給が少ない場所や地殻変動量の小さな場所では複数の亜間氷期の海成泥層が癒着している可能性があることを考慮する必要がある。すなわち、陸源砕屑物供給量の多い河川河口部近傍では亜間氷期ごとの海成層を識別することは可能であるが、河川から離れて砕屑物供給量が少なく、かつテフラなど有効な年代指標が検出できない場合、一連の泥層中に複数の亜間氷期海成泥層が含まれている可能性がある。この場合には、「最終間氷期の海成泥層」として認識される地層をすべて一括して年代幅の大きな（活動度等の議論においては大きな誤差要因をもつ）変位基準として扱うか、ないしは徹底的に堆積物を解析して複数の亜間氷期を識別するか、という判断が求められる。

6. まとめ 効率的に沿岸活構造を認識するために

これまで筆者は産総研の「沿岸域の地質・活断層調査」のうち石狩低地帯沿岸域と伊勢湾沿岸域の調査に加わって陸域の地質を調査してきた。このほか、若狭湾東部・三方断層延長海域の調査に参加した。これら

筆者の経験は上下変位成分を伴う構造に限られるが、調査を通じて沿岸活構造周辺の地形・地質場には、多様な「個性」があること、それを明確に理解した上で調査計画を立案することが、地質調査の空白域に潜在する活構造を検知する上で成否を分ける要であることを痛感してきた。また、地形・地質場の「個性」を理解するにあたっては、特に地形発達史的解釈と作業仮説的な古地理図の作成が有効であることも、同時に痛感してきた。

一方、筆者が参加した調査においては海陸を統合した地形情報の取得やベイケーブルのような海陸をまたぐ構造探査は行っていない。これらの新しい技術は、より効率的な調査と確実なデータ取得を可能としている。特に浅海底の詳細地形は、活構造を検知するにあたって最も重要な基本情報であり（後藤, 2024）、今後は海陸を統合した地形情報の取得と変動地形学的調査による活構造の認定が、本稿で述べた地質調査とともに、沿岸活構造のスクリーニングに重要な役割を果たすことが期待される。この沿岸活構造調査にあたっては、特殊な専門技能・知識ではなく、むしろ地形学や第四紀地質学、堆積学の基本原則に立脚した基本的な調査が求められる。沿岸活構造の調査法を確立することは、わが国の地震防災上重要な課題と筆者は考える。関心ある人々の批判と議論を乞う次第である。

文 献

- Galloway, W. E. (1975) Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltatic depositional systems. In: Broussard, M. L. eds., *Deltas: Models for Exploration*, Houston Geological Society, Texas, 555p.
- 後藤秀昭 (2024) 海底活構造の認定手法の転換を迫る 能登半島地震. 科学, **94**, 626–630.
- 池谷仙之・塩崎正道 (1993) 日本海沿岸内湾性介形虫類の特性-古環境解析の指標として-地質学論集 no.39, 15–32.
- 今泉俊文・宮内崇裕・堤 浩之・中田 高 (2018) 活断層詳細デジタルマップ [新編]. 東京大学出版会, 141p+USB メモリ.
- 楮原京子・加野直巳・山口和雄・横田俊之 (2011) 反射法地震探査からみた新潟海陸境界部の地質構造. 物理探査, **64**, 345–357.
- Kan, H., Urata, K., Nagao, M., Hori, N., Fujita, K., Yokoyama, Y., Nakashima, Y., Ohashi, T., Goto, K. and Suzuki, A. (2015) Submerged karst landforms observed by multibeam bathymetric survey in Nagura Bay, Ishigaki Island, southwestern Japan. *Geomorphology*,

229, 112–124.

木村治夫・青柳恭平・高橋秀暢・秋永康彦・山田浩二・
今吉隆・末廣匡基 (2023) : P 波反射法地震探査か
らみた糸魚川-静岡構造線活断層系神城断層南部の
地下構造. 日本地質学会第 130 年学術大会講演要
旨集.

小松原琢 (2025) 地震断層・地表変位を生み出した未知・
未認定の活構造に伴う歴史地震. 総特集“歴史地
震学×地震地質学 III-史料地震学と地形地質学の接
点からさぐる古地震学のフロンティア” 月刊地球,
544, 103–115.

Spratt, R. M. and Lisiecki, L. E. (2016) A Late Pleistocene
Sea level stack. *Climate of the Past*, 12, 1079–1092. doi:
10.5194/cp-12-1079-2016.

山崎新太郎 (2018) 音響技術を用いた小水域・浅水域
の地形・地質調査. 日本地質学会第 125 年学術大
会講演要旨, 147–147.

(受付 : 2025 年 1 月 10 日 ; 受理 : 2025 年 2 月 10 日)