

令和 6 年度 島根半島・宍道湖中海ジオパーク学術奨励事業 実施報告書

研究題目：「島根半島・宍道湖中海ジオパークの成り立ちの解明に関する研究」

島根大学総合理工学部地球科学科 市川竣, Lakshmanan Sreehari, 向吉秀樹

1. 研究背景と目的

島根半島宍道湖・中海ジオパークには、松江市と出雲市のエリア全域に約 50 か所のジオサイトが登録されている。しかしながら、これらのジオサイトのうち、大地の変動を示すジオサイトは、加賀の潜戸、唯浦の直立層、大社湾北岸、田儀の食い違い礫の 4 つほどと限定的である(図 1)。また、それら大地の変動を示すジオサイトに関して、具体的な形成応力場や形成時期に関してきちんと評価されていないものが多い。

そこで本研究では、おもに島根半島東部に露出する断層や褶曲などの露頭を対象に地質構造解析を行い、それらの地質構造を形成した古応力場を解明することを目的とする。また、得られた古応力場と先行研究で報告されている山陰地域の古応力場とを比較し、地質構造形成年代の考察を行う。

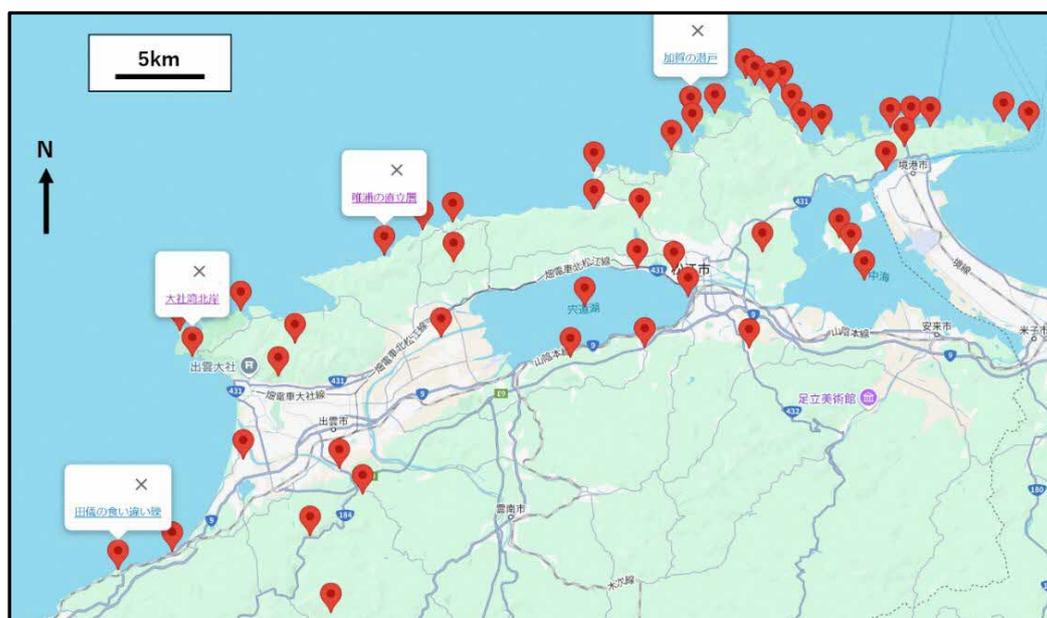


図 1 島根半島・宍道湖中海ジオパークにある約 50 か所(赤マーク)のジオサイト(島根半島・宍道湖中海ジオパーク HP より引用 (<https://www.kunibiki-geopark.jp/>))の図に一部加筆。

2. 研究手法

2.1 現地調査

本研究では、主に島根半島東部、松江市美保関町から松江市鹿島町までを調査範囲とした(図 2)。また、大地の変動示すジオサイトとして紹介されている島根半島西部、唯浦の直立層についても調査対象とした。現地調査で断層露頭が観察できた地点で

は、断層面・条線の姿勢等を測定した。他にも、褶曲構造が見られた地点では、層理面の走向・傾斜を測定した。



図2 島根半島東部の調査位置図。地理院地図（電子国土 web）に加筆。

2.2 応力逆解析

調査した露頭のうち、断層露頭に関しては、断層面および断層条線の姿勢を取得した。また断層岩に記録されている複合面構造等の変形構造から変位方向を判断した。これらの構造データから発震機構解図を作成し、圧縮・引張方向を求めた。褶曲露頭に関しては、褶曲している地層の層理面の走向傾斜を10か所程度測り、ステレオ投影法により褶曲軸面を求め、褶曲軸面に直交する方位が褶曲形成時の圧縮応力軸方向とした。

3. 研究結果

現地調査から、6か所において褶曲及び断層データが得られた。これらのうち、Site 1: 惣津地域の背斜褶曲と右横ずれ断層、Site 2: 沖泊地域の正断層、Site 5: 御津地域の正断層の3地点は、既にジオサイトに登録されているが、大地の変動を示すものとして知られていないものである。Site 3: 桂島南岸の背斜褶曲、Site 4: 御津地域の横ずれ断層は、ジオサイトにも登録されていない、今回新たに確認した大地の変動を示すものである(図2)。Site 6: 唯浦の直立層(図1)については、既に大地の変動を示すジオサイトとして登録されているが、今回新たに断層が確認された。これらの詳細について

以下に示す。

3.1 Site 1: 惣津地域の背斜褶曲と右横ずれ断層

惣津地域には中新世の成相寺層の黒色泥岩・シルト岩及び頁岩（流紋岩凝灰岩を挟む）が分布する（鹿野ほか，1985）。この露頭では，凝灰質砂岩，泥岩層の背斜褶曲とそれを切る断層が確認される（図3）。背斜褶曲は，褶曲軸面を求め応力場を復元するために凝灰質砂岩層で計12か所，走向傾斜を測定した。また断層に関しては明瞭な断層面が確認できなかつたため，ドローンに航空写真から走向を測定し，N-Sと求められた。傾斜は90°と仮定した。条線は確認できなかつたが，断層面を境に褶曲構造が右にずれていることから，剪断センスは右横ずれであると判断される。

構造解析の結果，背斜褶曲の褶曲軸面はN88°W，64°Sと求まり，圧縮方向はN2°E，26°Nであると判断した（図4a）。断層に関しては，得られた断層データから，

最大主応力軸（ σ_1 軸）が北東—南西圧縮，最小主応力軸（ σ_3 軸）が北西—南東引張の横ずれ断層型応力場が検出された（図4b）。



図3 惣津地域の背斜褶曲と右横ずれ断層のドローン画像

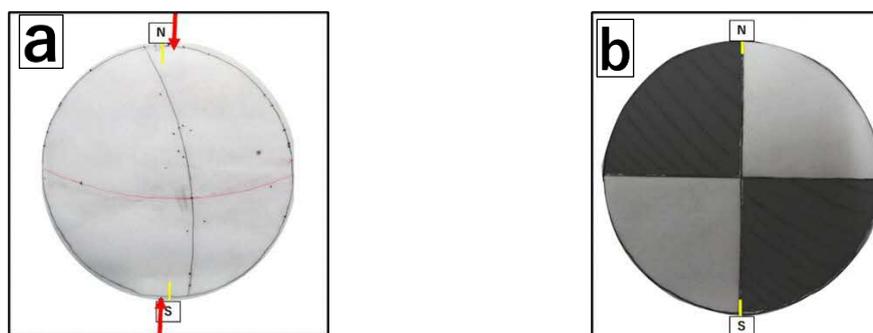


図4 応力解析結果。(a)惣津褶曲の軸面に直交な向きに加わる最大圧縮応力(赤線は褶曲軸面，赤矢印は最大圧縮応力の向きを示す)。(b)惣津断層の発震機構解図

3.2 Site 2: 沖泊地域の正断層

島根町多古の地域には、中新世の高浜山層の玄武岩—安山岩溶岩及び火砕岩が分布する(鹿野ほか, 1985). この地点では、暗灰色と赤褐色の角礫化した火山岩の堺をなす断層の露頭を確認することができる(図5). 上盤下盤どちらも角礫化しており、下盤側は暗灰色玄武岩、上盤側は、下部に暗灰色玄武岩が見られるが、上部で赤褐色の玄武岩に遷移する. 断層の姿勢は、 $N4^{\circ}E, 72^{\circ}W$, 断層条線の姿勢は、アジマス

$N10^{\circ}W$, プランジ 32° であった(図6).

また断層面で複合面構造が見られ、その姿勢は Y

面： $N4^{\circ}E, 78^{\circ}W$, P 面：

$N14^{\circ}W, 56^{\circ}W$ である(図7).

以上から、剪断センスは正断層

成分を持つ右横ずれ断層であると判断される.

構造解析の結果、 σ_1 軸が北東—南西圧縮、 σ_3

軸が北西—南東引張の、正断層

成分をもつ右横ずれ断層型応

力場が検出された(図8).

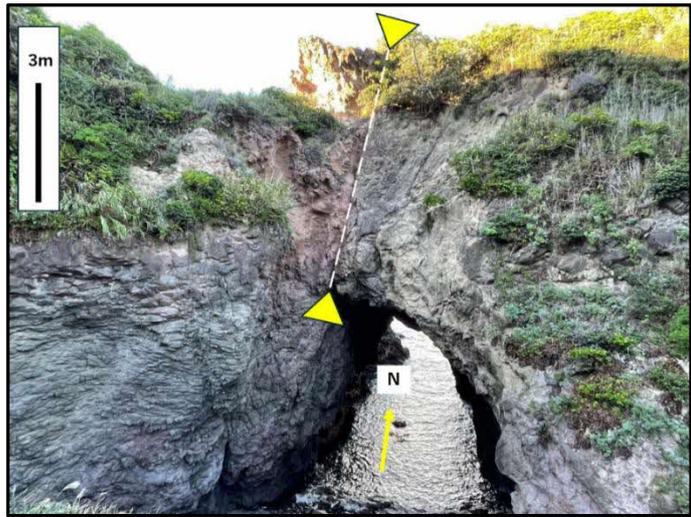


図5 沖泊断層の写真及スケチ(破線は断層面を示す)

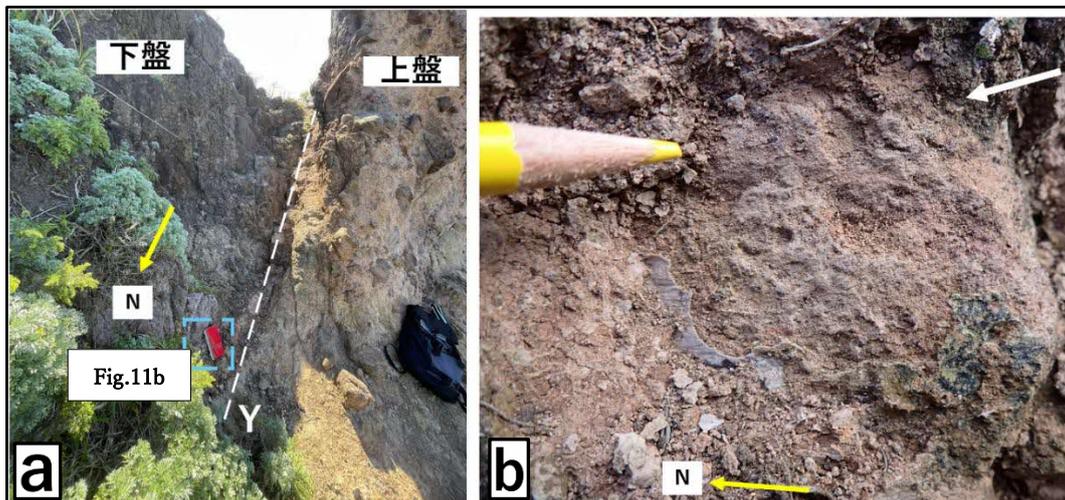


図6 断層面の写真(a), 及び断層条線(b)

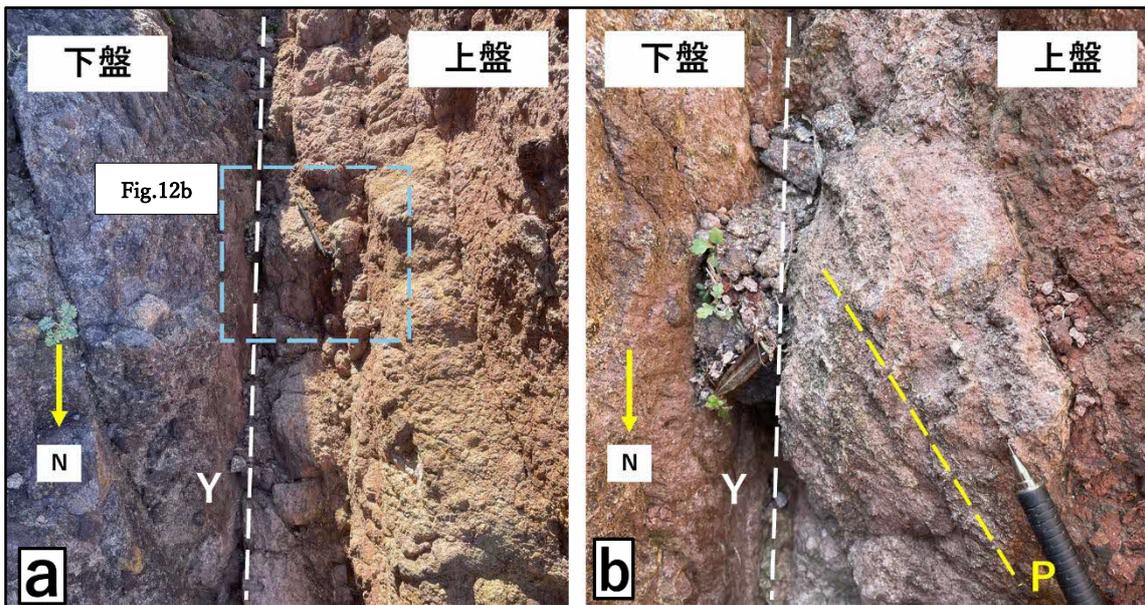


図7 断層面の写真(a), 及び複合面構造(b)

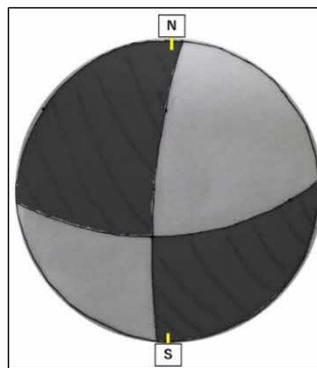


図8 沖泊断層の発震機構解図

3.3 Site 3: 桂島南岸の背斜褶曲

桂島南岸には、中新世の古江層の泥岩及びシルト岩が分布する（鹿野ほか，1985）。桂島の南岸で砂岩泥岩互層の背斜褶曲が観察される（図9）。褶曲軸面を求めるために泥岩層で計10か所，走向傾斜を測定した。褶曲軸付近では，軸面に平行な亀裂が多く認められる（図10）。褶曲軸より北側では，軸方位がほぼ平行な非対称褶曲も観察される。構造解析の結果，褶曲軸面が $N82^{\circ}W 76^{\circ}N$ と求まり，圧縮方向は $N6^{\circ}W, 14^{\circ}S$ と推定された（図11）。



図9 桂島南岸の背斜褶曲の露頭写真



図10 褶曲軸付近で見られた軸に平行な亀裂の例

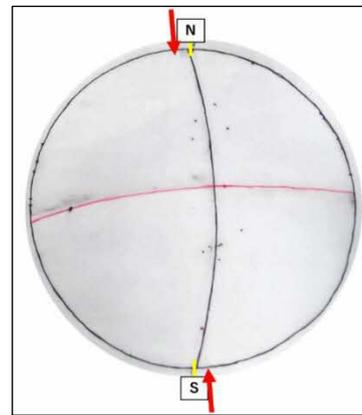


図11 桂島南岸褶曲の軸面に直交方向に加わる最大圧縮応力 (赤線は褶曲軸面, 赤矢印は最大圧縮応力の向きを示す)

3.1.4 Site 4: 御津地域の横ずれ断層

御津地域には中新世の成相寺層の黑色泥岩・シルト岩及び頁岩（流紋岩凝灰岩を挟む）が分布し（鹿野ほか，1985），これらの地層を切る断層が観察される（図12）．断層の走向は概ね $N30^{\circ}\sim 40^{\circ}E$ ，傾斜は $60^{\circ}\sim 80^{\circ}NW$ である．条線の姿勢は，アジマス $N32^{\circ}E$ プランジ 2° である（図13）．剪断センスは，断層条線の姿勢および，断層面を境に砂岩層が左にずれていたことから（図12b），左横ずれ断層であると判断される．構造解析の結果， σ_1 軸が北北西－南南東圧縮， σ_3 軸が東北東－西南西引張の横ずれ断層型応力場が検出された（図14）．

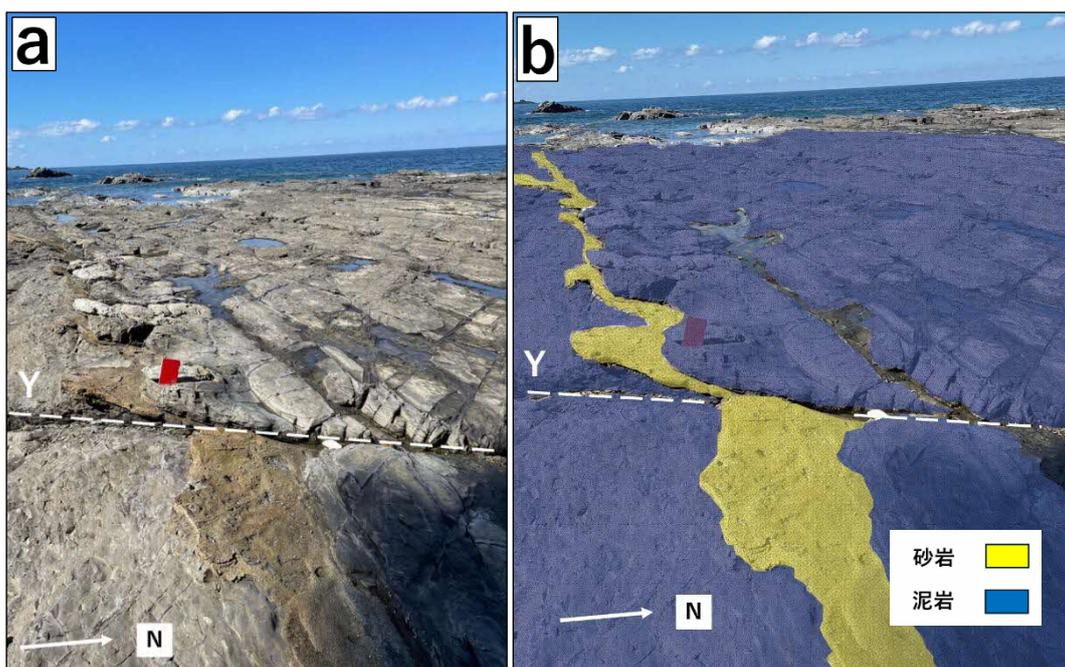


図 12 御津横ずれ断層で見られた砂岩層のずれの写真(a)及びそのスケッチ(b)



図 13 断層面に認められる断層条線

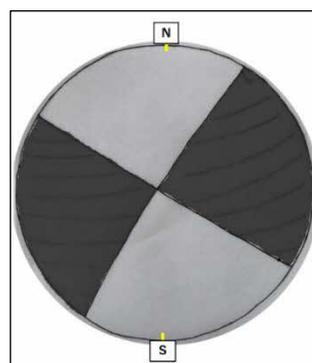


図 14 御津横ずれ断層の発震機構解図

3.1.5 Site 5: 御津地域の正断層

本地点では、成寺層の泥岩層を切る正断層露頭が観察される (図 15)。断層の走向・傾斜は $N6^{\circ}E, 46^{\circ}W$ 、条線の姿勢は、レイク $70^{\circ}S$ であった。断層面を境に砂岩泥岩層が見かけ左に変位しているように見えるが (図 16)、断層面にレイク角 $70^{\circ}S$ の高角な断層条線が認められ (図 17)、東落ちの正断層であると判断される。構造解析の結果、 σ_1 軸が鉛直圧縮、 σ_3 軸が東北東-西南西引張の正断層型応力場が検出された (図 18)。

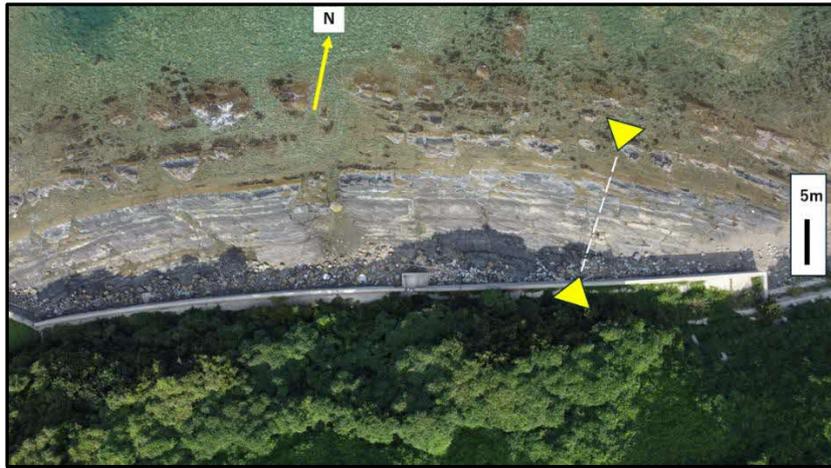


図 15 御津正断層のドローン写真(破線は断層面を示す)

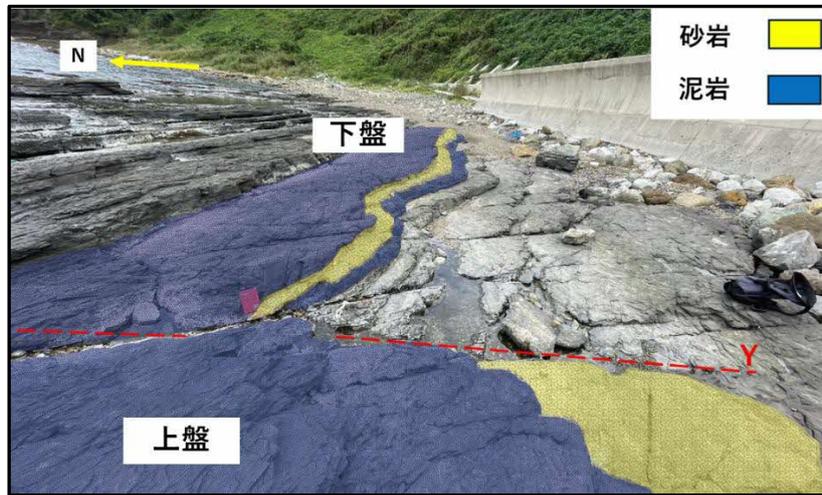


図 16 御津正断層露頭の写及び（一部にスケッチを重ねたもの）



図 17 傾斜滑りを示す高角な断層条線

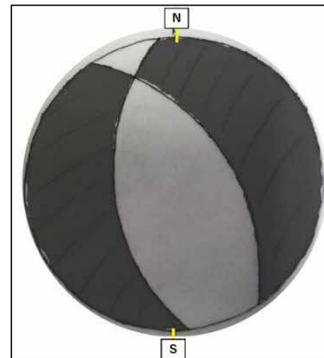


図 18 御津正断層の発震機構解図

3.1.6 Site 6: 唯浦直立層の正断層と左横ずれ断層

唯浦の直立層周辺には、中新世の牛切層の礫岩及び礫岩砂岩互層(泥質岩及び安山岩溶岩・火砕岩を伴う)が分布する(鹿野ほか, 1991)(図 19)。唯浦の直立層(図 20)は、層理面の走向傾斜が概ね E-W, 80°S で、級化構造や火炎状構造等の堆積構造が観察され、鹿野ほか(1991)の地質図の記載と同じく北側の地層が上位、南側の地層が下位と判断される。また、鹿野ほか(1991)の地質図には、牛切層の礫岩及び礫岩砂岩互層と成相寺層の黑色泥岩・シルト岩及び頁岩の地層境界(図 19 左側の赤矢印位置)に断層が記載されているが、今回の調査でその地層境界には断層が見られず(図 21)、直立層中に断層が存在することが明らかとなった(図 20, 22, 23)。直立層中の断層は層理面と平行に発達している。走向傾斜は E-W・80°S である。断層上に認められる条線の姿勢は、1つがレイク 70°E であり(図 22 a)、断層岩の複合面構造から剪断センスは正断層であると判断される(図 23 a)。もう 1つの断層条線の姿勢はアジマス S80°E, プランジ 10°であった(図 22 b)。剪断センスは、複合面構造(図 23 b)から左横ずれ断層であると判断される。構造解析の結果、 σ_1 軸が鉛直圧縮、 σ_3 軸が北北西-南南東引張の正断層型応力場と、 σ_1 軸が北東-南西圧縮、 σ_3 軸が北西-南東引張の、正断層成分をもつ左横ずれ断層型応力場が検出された(図 24)。

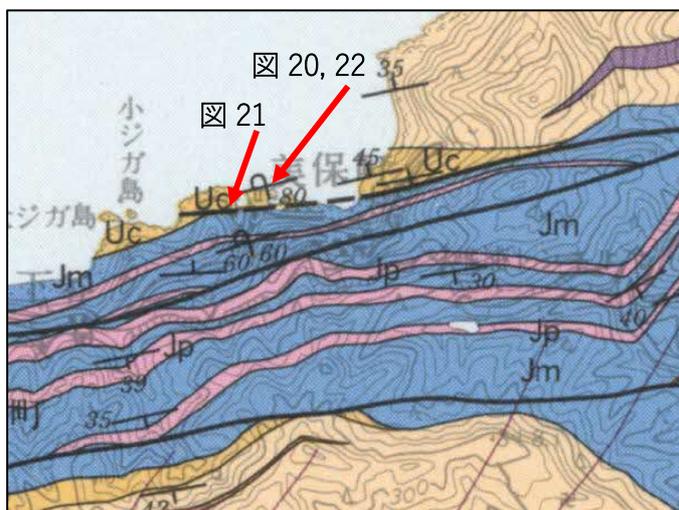


図 19 唯浦の直立層周辺の地質図(鹿野ほか, 1991, 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅 今市 岡山(12) 第 16 号)より一部抜粋, 加筆。赤矢印は礫岩・泥岩境界および断層露頭の位置を示す。

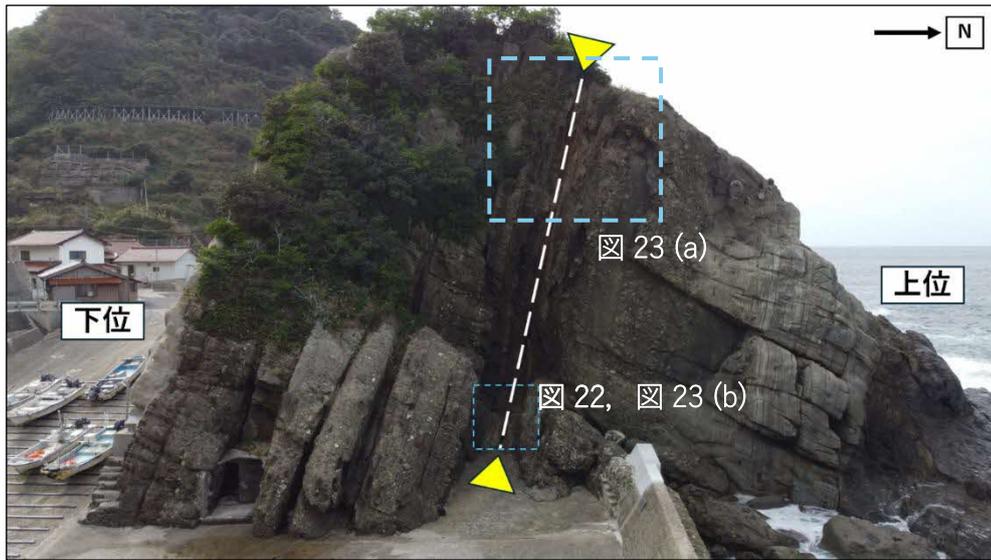


図 20 唯浦の直立層のドローン写真（破線は断層面を示す）

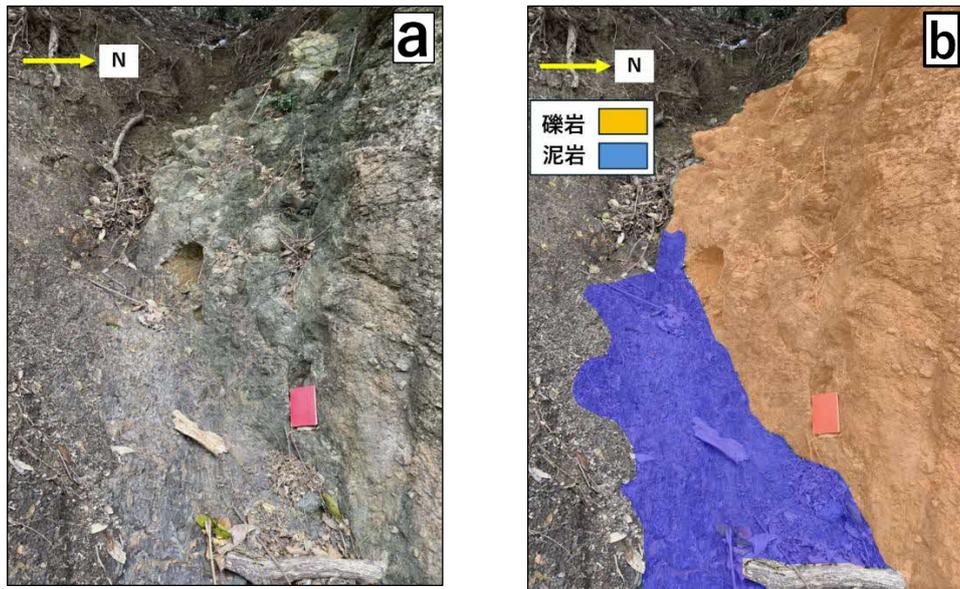


図 21 礫岩と泥岩の境界の露頭写真(a), 及びそのスケッチ(b)

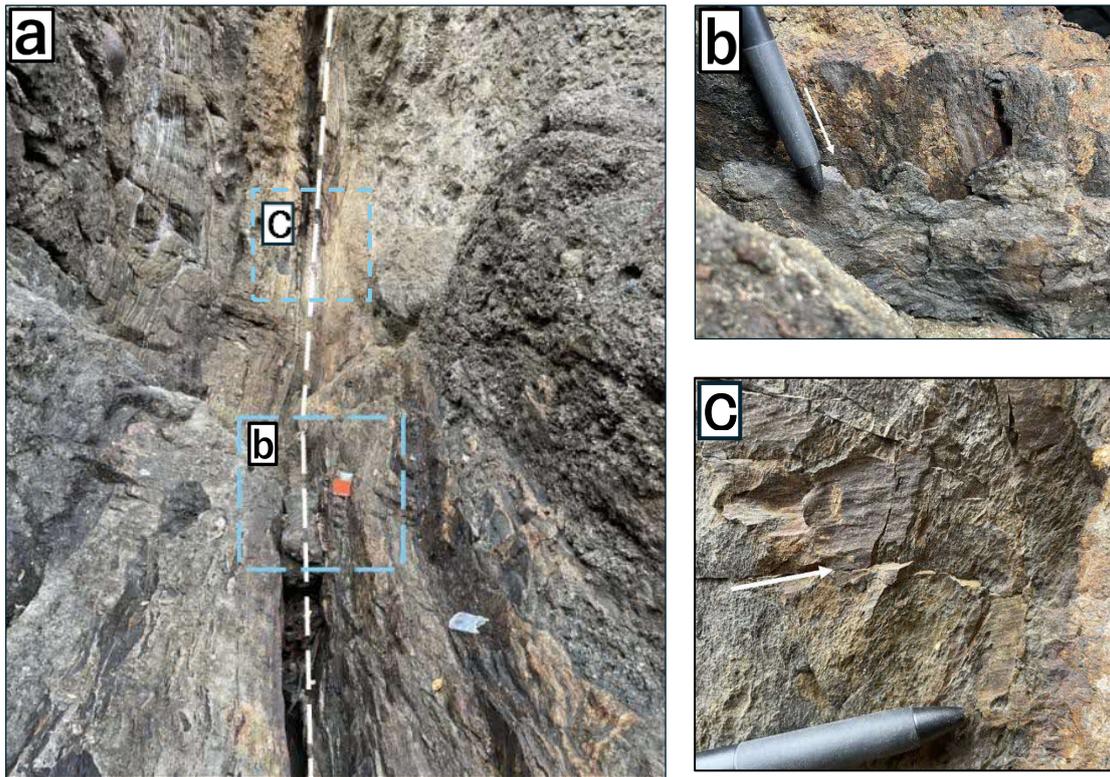


図 22 断層露頭全景 (a), 縦ずれを示す条線 (b), 横ずれを示す条線 (c).

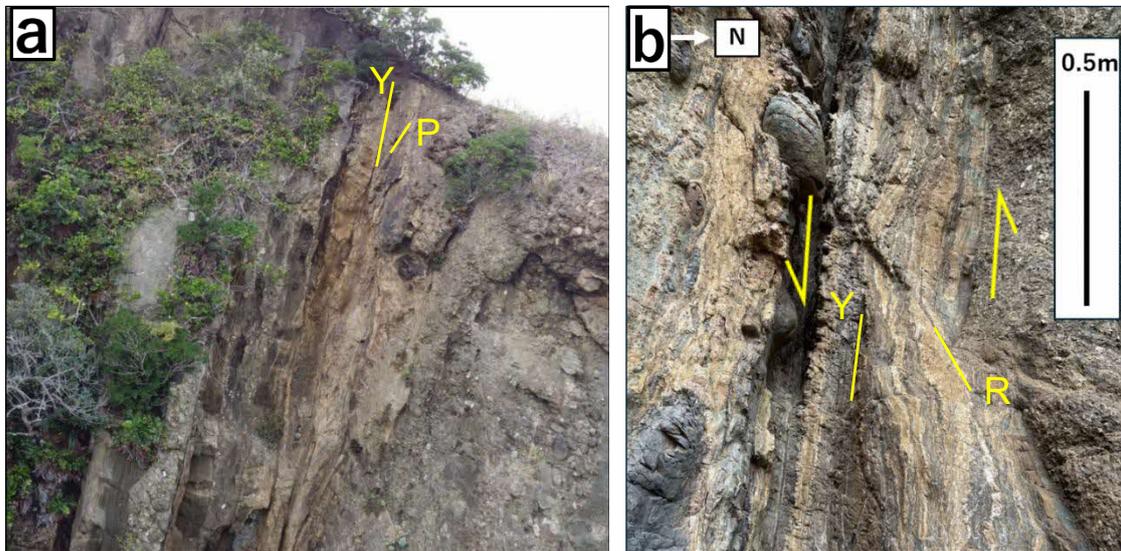


図 23 断層岩に認められる複合面構造. 正断層センスを示す複合面構造 (a). P:P 面, Y:Y 面. 左横ずれを示す複合面構造 (b). R リーデル剪断面, Y:Y 面.

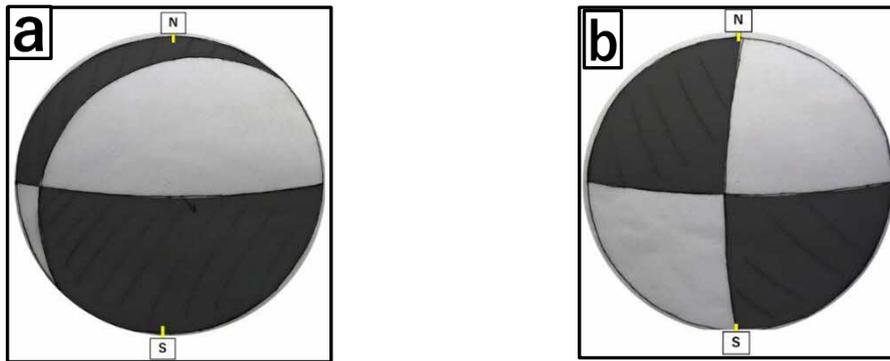


図 24 直立層の発震機構解図(aは正断層センス, bは左横ずれセンス)

4. 議論

4.1 褶曲の成因

褶曲には広域的な応力場で形成されるものだけではなく、重力性の座屈褶曲やスランプ褶曲などノンテクトニックな褶曲も存在する。広域応力場のもとで形成される褶曲や断層は、通常、広域応力場を反映した顕著な指向性を持つ（宮坂ほか，2022），一方，スランプ褶曲は堆積物が未固結時の流動変形で形成されるものであり，褶曲軸や軸面自体の褶曲，褶曲の波長や形状が不規則といった特徴を有する。今回調査対象とした Site 1 の惣津地域の背斜褶曲および Site 3 の桂島南岸の背斜褶曲は，どちらも成層状態は比較的良好であり，褶曲している地層周辺に明瞭な未固結変形も認められない。また，褶曲軸付近で剪断応力が集中した結果生じたものであると考えられる軸と平行な向きの亀裂が多く観察される（図 10）。これらの特徴から，惣津，桂島南岸の褶曲ともに広域的な応力場で形成された褶曲の可能性が高いと考えられる。ただし，本研究では，褶曲露頭周辺に範囲を広げた調査は行えておらず，局所的な露頭のみからの推察であり，広域応力場で形成されたと断定できるデータの取得には至っていない。本報告では，上記 2 カ所の褶曲が広域応力場で形成されたという推察の下で次項の形成応力場について考察する。

4.2 変動時期の推定

今回 6 か所の地点から得られた応力場は，主応力方位から 3 つのステージにグループ分けすることができると考えた。具体的には Site 5: 御津地域の正断層の「東北東－西南西引張」の時代（図 25）と，Site 1: 惣津褶曲，Site 3: 桂島南岸の背斜褶曲，Site 4: 御津地域の横ずれ断層の「南北圧縮」の時代（図 26），Site 1: 惣津の横ずれ断層，Site

2:沖泊の横ずれ断層の「北東－南西圧縮」の時代（図 27）の 3 つである。先行研究を参考にこれらがいつの時代にできたものなのかについて考察する（唯浦正断層は逆断層として動いた可能性が高いことから変動時期の推定には用いていない）。

4.2.1 「東北東－西南西引張の時代」

鹿野（2018）によると、成相寺層の堆積年代は 18~15.3Ma とされており、御津の正断層が見られる地質は成相寺層上部に属するため、この断層の形成時期は概ね 15.3Ma 以降と考えられる。また、中期中新世初期に終わるとされた引張応力状態が、最近の研究によって東北・西南日本両弧の中期中新世末期の岩脈群からも見つかりつつあることから、引張場の終了時期が中期中新世末期ごろまで若返る可能性が指摘されている（羽地ほか，2019）。以上のことを踏まえ、東北東－西南西引張の応力場で形成された御津の正断層は、15.3Ma～中期中新世末期ごろの中期中新世の時期に形成されたと推定される（図 25）。羽地ほか（2023）は、兵庫県御火浦地域の約 19Ma ごろの岩脈群から鉛直圧縮，NNE－SSW 引張の応力比が低い正断層型応力場が報告されている。

Haji and Yamaji (2021)でも北但層群の分布域南縁に分布する前期・中期中新世の岩脈と小断層から、NE-SW 方向に最小主応力軸を持ち、応力比が低い応力を得ており、中新世前半の山陰東部が応力比の低い NE-SW 引張応力場にあったとしている。そして、羽地ほか（2023）によると応力比が極めて低いことは水平面内の差応力が小さかったことを意味しており、山陰地方で、中新世前半に多様な方向の正断層が形成された可能性を指摘している。今回得られた ENE－WNW の引張方向はこれらの先行研究とも類似していることから、中期中新世の時期に形成されたと考えられる可能性が高いと考えられる。

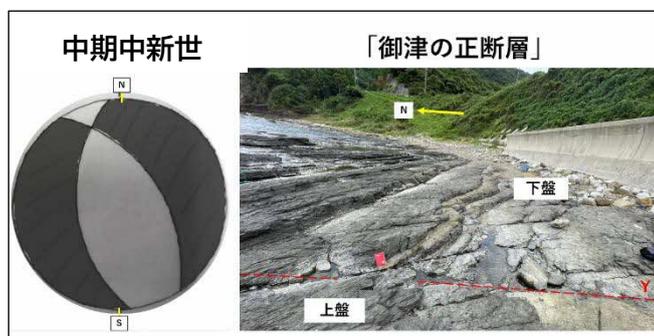


図 25 中期中新世に鉛直圧縮，東北東－西南西引張の応力場で形成されたと考えられるジオサイト

4.2.2 「南北圧縮の時代」

御津の横ずれ断層，桂島南岸の褶曲，惣津の褶曲から南北圧縮応力場の時代があったと想定される（図 26）。

島根半島北部では、中新世中期末の牛切累層中に貫入した後期中新世の岩脈群が N－S

方向に卓越することから、中新世後期の島根半島には水平最大圧縮応力軸がN-S方向であるテクトニック応力場が推定されている(小林 1979)。これらの広域的なテクトニック応力場の存在の可能性を支持するデータとしてほぼ同時代に形成された断層や褶曲が認められており、その一例として「宍道褶曲帯(多井 1973)」における地質構造がある。E-W方向に軸をもつ褶曲構造が発達し、かつE-W方向の逆断層が推定されている。これらの地質構造から推定されるテクトニック応力場は、N-Sかつ水平最大圧縮応力軸を持つ応力である。さらに多井(1973)によると、褶曲構造や断層が形成された時期は成相寺累層上部(約11~12Ma)に始まり和久羅安山岩(6.3Ma)の活動期にはほぼ完了していたとされている。また、竹内(1978)では、能登半島中央部において小断層解析結果などから中新世後期・鮮新世の時期、能登半島はN~S方向に最大主圧力軸をもつテクトニック応力場が存在したことを明らかにしている。以上のことから小林(1979)では、中新世後期・鮮新世の時期、西南日本内帯はN~S方向に最大主圧力軸をもつ広域的な応力場が存在したことが確かとされている。また、5.2-1で紹介したように、羽地・山路(2019)の最近の研究で、引張応力場の終了時期が中期中新世末期ごろまで若返る可能性が指摘されているが、小林(1979)で述べられている南北圧縮の時期は、このような最近の研究とも調和的であると言える。以上のことから、今回の調査で、先行研究のようなN-S圧縮の結果を得られた御津横ずれ、桂島南岸の褶曲、惣津褶曲は、中新世後期・鮮新世の時期に形成されたものであると推定した。

4.2.3 「北東—南西圧縮の時代」

惣津の横ずれ、沖泊の横ずれ、直立層の横ずれから北東—南西圧縮の時代があったと想定される(図27)。

4.2.2で議論した南北圧縮の時代との前後関係だが、惣津の断層が褶曲構造を切っていることから、中新世後期・鮮新世の南北圧縮の後に北東—南西圧縮に転換したと考えられる。そして現行テクトニクスである東西圧縮に転換した時期であるが、伊藤・荒戸(1999)、鎌田(1999)によると、フィリピン海プレートの沈み込み方向が2~1.5 Ma頃に北北西から西北西方向へ変化し、この頃に西南日本におけるテクトニクスの大きな転換があったとされている。他にも、フィリピン海プレートの沈み込み方向の転換期は1~1.5 Ma頃(Nakamura et al., 1987; Yamazaki and Okamura, 1989; I, 1998; Yamaji, 2000b, 2003; Yamaji et al., 2003)とする見解が報告されている。以上のことを踏まえると、今回得られた北東—南西圧縮の応力場は、南北圧縮の中新世後期・鮮新世以降か

ら，東西圧縮に転換する 1.5Ma ごろの間に存在した可能性が高く，その時代に惣津の横ずれ，沖泊りの横ずれ，直立層の横ずれ断層が形成されたと推定される。

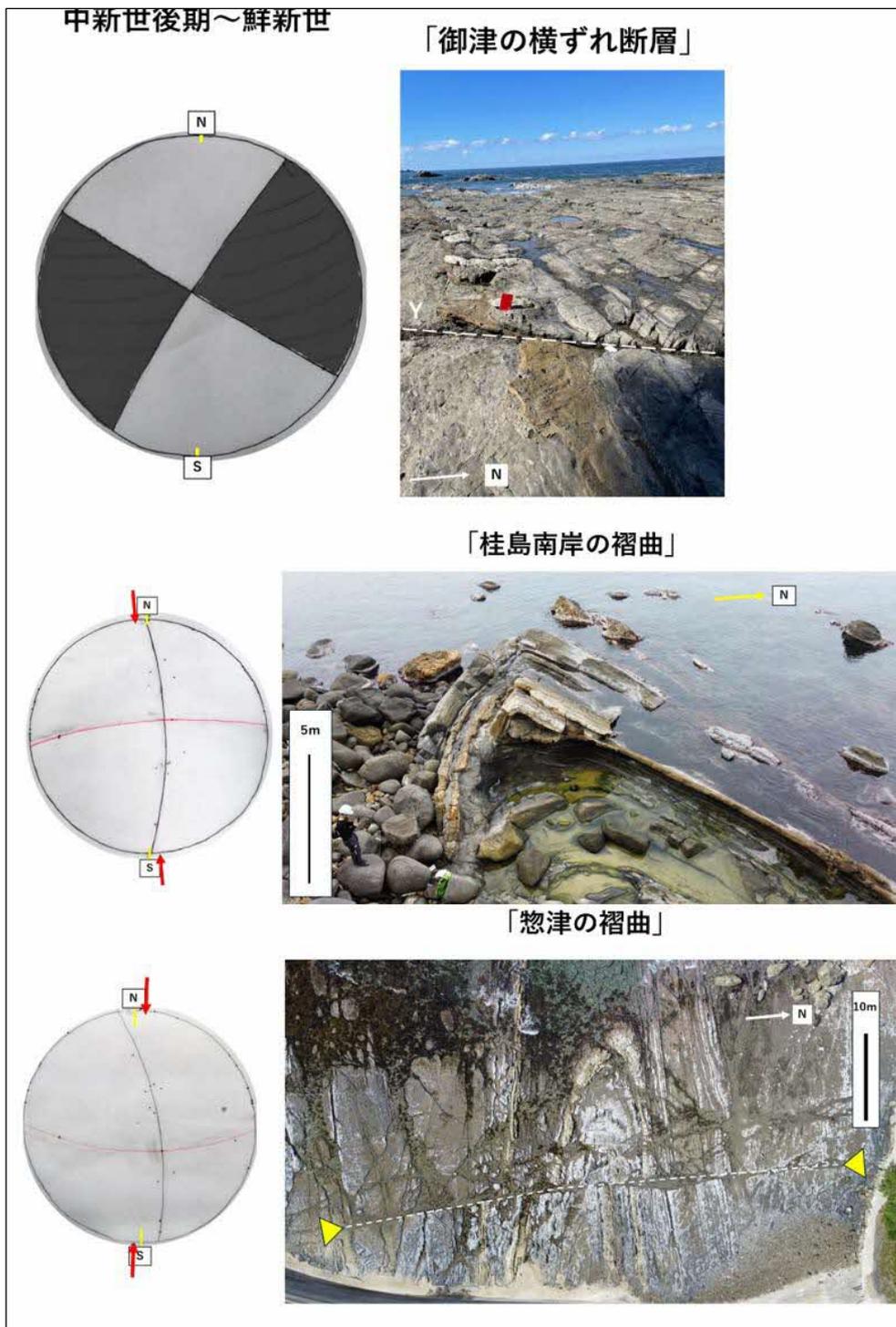
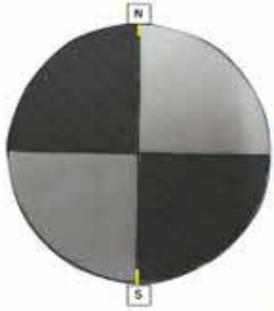


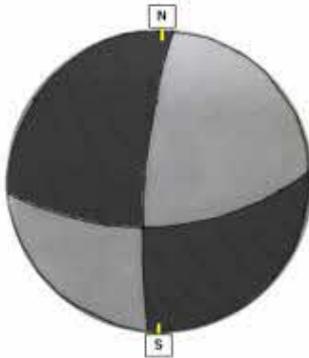
図 26 中新世後期～鮮新世に水平南北圧縮応力場で形成されたと考えられるジオサイト

鮮新世～1.5Ma頃

「惣津の断層」



「沖泊断層」



「直立層の横ずれ断層」

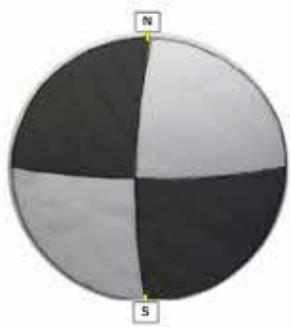


図 27 鮮新世～1.5Ma 頃に北東南西圧縮，北西南東引張の応力場で形成されたと考えられるジオサイト

5. まとめ

今研究では、島根半島宍道湖・中海ジオパーク内の6つの地点において、大地の変動を示すと考えられる露頭を抽出し、それらの背景応力場および形成時期を推定した。具体的には、中期中新世に鉛直圧縮、東北東-西南西引張の応力場で形成された御津の正断層（図25）、後期中新世～鮮新世に水平南北圧縮応力場で形成された御津の横ずれ断層、桂島南岸の褶曲、惣津の褶曲（図26）、鮮新世～1.5Ma頃に北東南西圧縮、北西南東引張の応力場で形成された沖泊断層、惣津の横ずれ断層、直立層の横ずれ断（図27）である。このように、今回の調査から得られたジオサイトは、日本海拡大の時代から日本列島の時代に転換した後の、圧縮応力場で形成された地質構造を示しているジオサイトであると考えられる。中でも Site 3: 桂島南岸の背斜褶曲、Site 4: 御津地域の横ずれ断層はこれまでジオサイトとして認定されていないものであり、新たなジオサイトとして推薦したい。また、Site 6: 唯浦直立層の正断層と左横ずれ断層に関しては、これまでに報告のない場所に断層が形成されていることが明らかとなった。この断層は直立層としてジオサイトに認定されている場所であり、道路からのアクセスも良く、断層を直接観察できる新たな露頭として推薦したい。

引用文献

羽地俊樹, 佐藤大介, 仁木創太, 平田岳史, 2023, 兵庫県北西部, 但馬御火浦の下部中新統八鹿層の盆地構造・堆積年代・古応力地質学雑誌, 129, 223-238.

Haji, T. and Yamaji, A., 2021, Post-rift stress history of Southwest Japan inferred from early to middle Miocene intrusions and meso-scale faults in the Tajima-Myokensan area. *Island Arc*, 30, e12412.

羽地俊樹・山路敦・細井淳・佐藤大介, 2019, 東北・西南日本弧の中新世岩脈群と造構応力場, 日本地質学会 126 年学術大会講演要旨.

伊藤康人・荒戸祐之, 1999, 九州西方-山陰・北陸海域日本海南部における鮮新世以降の応力場変遷, 地質ニュース, 541, 25-31.

鎌田浩毅, 1999, 西南日本弧と琉球弧の会合部に見られる 6 Ma と 2 Ma の広域テクトニクス転換の重要性, 月刊地球, 21 (10), 630-636.

鹿野和彦, 2018, グリーンタフの層序学的枠組みと地質学的事象, 地質学雑誌, 124, 781-803.

- 鹿野和彦・竹内圭史・松浦浩久, 1991, 今市地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の地質図幅), 地質調査所, 79p.
- 鹿野和彦・吉田史郎, 1985, 境港地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 57p.
- 小林洋二, 1979, 西南日本内帯における新第三紀後半の岩脈群と広域応力場 火山第 2 集第 24 巻第 3 号 153-168.
- 宮坂晃・狩野謙一, 2022, 北部フォッサマグナ, 中央隆起帯南部に分布する中部中新統内村累層の重複変形 —中央隆起帯は“無褶曲地区”か?—, 静岡大学地球科学研究報告, 49, 1-31.
- Nakamura, K., Renard, V., Angelier, J., Azema, J., Bourgois, J., Deplus, C.,... Vignerresse, J.-L., 1987, Oblique and near collision subduction, Sagami and Suruga Troughs – Preliminary results of the French-Japanes 1984 Kaiko cruise, Leg 2. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 83, 229–242.
- 島根半島・宍道湖中海ジオパーク Shimane Peninsula and Shinjiko Nakaumi Estuary Geopark (<https://www.kunibiki-geopark.jp/>) (閲覧日: 2025 年 1 月 28 日).
- 多井義郎 1973, いわゆる宍道褶曲帯について, 地質学論集, 9, 137-146.
- Yamazaki, T. and Okamura, Y., 1989, Subducting seamounts and deformation of overriding forearc wedges around Japan. *Tectonophysics*, 160, 207–229.
- Yamaji A., 2000, Multiple inverse method applied to mesoscale faults in mid Quaternary sediments near triple plate junction off central Japan. *Jour. Struct. Geol.*, 22, 429–440.
- Yamaji, A., 2003, Slab rollback suggested by latest Miocene to Pliocene forearc stress and migration of volcanic front in southern Kyushu, northern Ryukyu Arc. *Tectonophysics*, 364, 9–24.
- Yamaji, A., Sakai, T., Arai, K. and Okamura, Y., 2003, Unstable forearc stress in the eastern Nankai subduction zone for the last 2 million years. *Tectonophysics*, 369, 103–120.