

活動の成果概要

2022 年度 土佐清水ジオパーク活動支援事業

【事業対象者】 羽地 俊樹

【所属】 国立研究開発法人産業技術総合研究所

活動の名称 小断層群の記録する古応力から検討する中新統三崎層群の地質構造発達史

【活動の成果概要】

1 背景

土佐清水市の南部には、後期始新世から前期中新世の堆積年代が想定される四万十帯南帯に属する付加体の来栖野層および清水層と、前期中新世から中期中新世にかけての前弧海盆堆積物である三崎層群が分布する。土佐清水ジオパークは、これらの地質およびその地質資源を生かした人々の暮らしを主題としたジオパークであり、これら地質の調査研究は同ジオパークの発展や地質の観光資源活用を促すにあたって重要である。また日本ジオパークネットワークには、本ジオパークと似た地質背景を持つ南紀熊野ジオパークが存在する。南紀熊野ジオパークには、同じく四万十帯南帯とそれを覆う中新世前半の前弧海盆堆積物である熊野層群や田辺層群が分布する。しかし、両ジオパークに分布する前弧海盆堆積物の地質構造は大きく異なっている。熊野地域ではそれら堆積物は基盤の付加体を不整合に多い、比較的緩傾斜かつ分かりやすい地質構造で上位に重なっている。一方で土佐清水ジオパークでは、三崎層群は一部で基盤との不整合が確認されているものの（木村，1985）、その外縁のほとんどを断層で境され、また同層群は急傾斜の姿勢を持つ。このように両層群は似た堆積環境での堆積が想定されているものの、堆積後の地質構造発達史が異なる。したがって、三崎層群の地質構造発達史の研究を進めることは、土佐清水ジオパークの日本ジオパーク内での差別化および価値向上に貢献するものと考えられる。

そこで申請者は昨年度、三崎層群の変形史の制約に小断層や鉞物脈といった小構造が利用できるかどうかを確認するために、同層群で地質調査を行いそれらの小構造が存在するかどうかの予察的調査を行った。その結果、同層群には非常に多数の小断層が分布することを発見した。昨年度、昨年度は三崎層群を構成する3つの地層において各1地点ずつ少量の小断層データを測定して予察的検討を行った。その結果、3地点で異なる応力が検出されたため、三崎層群の小断層は時間的もしくは空間的に異なる応力を記録していることが明らかになった。そこで、本研究では昨年度の調査に引き続き、小断層の調査研究を

行った。本年度の主要な調査目的は、昨年度調査を行った地点においてデータ数を増やして応力解を安定させること、調査地点を増やして応力差の原因を探ることの2点である。

2 地質概説

中新統三崎層群は下位から順に、整合一連に重なる養老層・浜益野層・竜串層からなり、合計の層厚が約 3000m に達する前弧海盆堆積物である。三崎層群は多くの生痕や堆積構造が見られ、それらから堆積環境に関する研究例が多く存在する。それらによれば、泥岩主体の岩相からなる養老層は外側陸棚、砂岩泥岩互層からなる浜益野層は内側陸棚、砂岩主体の竜串層は浅海から潮間帯の堆積物であると考えられている（例えば、奈良ほか、2017）。

三崎層群の堆積年代を示す地質学的証拠は多くはないが、およそ 13~18 Ma の頃の地層であると想定されている。養老層の最下部から、Blow (1969) の N7 に相当する浮遊性有孔虫化石が報告されている（木村、1985）。また、三崎層群は土佐清水ジオパーク南東端の足摺岬花崗岩体（約 13 Ma; Shinjoe et al., 2010）が定置する以前の地層であるとされる（木村、1985）。

三崎層群は堆積後に大きな変形を被っている。三崎層群はその大部分で北東-南西走向で北西に傾く姿勢を持ち、最大で 80 度程度まで傾いている。また、既存の三崎層群の地質図では多数の地質図規模の断層が描かれており、断層を境に地層の姿勢が大きく変わる（木村、1985）

3 小断層データと応力解析結果

昨年度および本年度で小断層の調査を行ったのは、養老層 2 地点・浜益野層 2 地点・竜串層 2 地点の計 6 地点である。各地域において、小断層の産状の観察（例えば、衣笠ほか、1969）と小断層解析に必要な方位データ（小断層の面姿勢・センスおよび線構造・地層の層理面など）の測定を行った。小断層データを採取した 6 地点の位置を図 1 に、小断層データを図 2 に示す。

養老層では養老集落の東部海岸（地点 1）および同集落の南部海岸（地点 2）の 2 地点で小断層の測定を行った。東部海岸地点では 102 条、南部海岸地点では 41 条の小断層を観察した。断層の姿勢は地点 1 では東西ないし北東-南西走向のものが、地点 2 では東西ないし北西-南東走向のものが卓越していた。断層面は見かけ正断層が多いものの、条線が確認できた断層では正・逆・横ずれ断層が混在していた。

浜益野層では落窪集落南部の海岸（地点 3）と千尋岬南西部の海岸（地点 4）の 2 地点で小断層を測定した。地点 3 では 88 条、地点 4 では 74 条の小断層を確認した。地点 3 では東西ないし北西-南東走向の断層が多く、地点 4 ではそれらに加えて北東-南西走向の断層も認められた。

竜串層では竜串海岸東部（地点5）と爪白集落南東方の海岸部（地点6）にて調査を行った。地点5では52条の、地点6では9条の小断層を確認した。地点5では断層面の姿勢のまとまりが良く、北東-南西走向で見かけ正断層のものが卓越していた。地点6では小断層の密度が低く、十分なデータが測定できなかった。

得た小断層データに Hough 変換法（Sato, 2006; Yamaji et al., 2006）を利用して小断層解析を行い、断層を形成した古応力の推定を行った。各データセットの応力解析結果を図3に示す。応力解析の結果、データ数が少なかった地点6では応力解がまとまらず不明確な結果となった。地点1～5では、大局的に鉛直から北西-南東方向の圧縮で北東-南西ないし北北東-南南西方向の引張の応力状態が得られた。ただし、地点1では引張方向が南北からやや北北西-南南東方向に振れた結果が、地点4では最小圧縮主応力軸が高角に振れた結果が得られるなど、小さくない地域差が認められた。

4 考察

昨年度の調査では、養老層・浜益野層・竜串層の3つの地層でそれぞれ1つのデータセットを取得し、応力解析を行った。その結果は3つの層準でばらばらであり、それらの差がデータ数の不足によるものか、もしくは年代的・空間的に意味のあるものであるのかの解釈ができなかった。本研究では、それらのうちデータ数が不十分であった浜益野層と竜串層においてデータ数を増やし（地点3および5）、新しい調査地域を加えることでこれらの解釈を試みた。

調査の結果は地域ごとの差が小さくないものの、大局的に北西-南東ないし鉛直圧縮で北東-南西の引張場が見えつつあると報告者は考えている。応力解析の結果では最小圧縮主応力軸を示すクラスターが北東-南西方向に多く認められる（図2）。また、断層面の姿勢も東西ないし北西-南東走向で高角のものが少なくない。特に、地点5では断層面の集中が良く、北東-南西引張が示唆される（図3）。

地点1では引張方向が特徴的に半時計回りに回転しているが、これは小断層の形成後に地層が傾動した可能性を示唆しているものと考えれば解釈可能である。地点2～5では地層の姿勢は北東-南西ないし北北東-南南西走向であるが、地点1では特徴的に走向が北北西-南南東を向いている（図4）。すなわち、地点2～5および地点1のいずれの地点においてもこの応力解析結果はおおよそ層理面に平行の引張方向を示している。この事実は、小断層の形成後に地層の傾動（反時計回り回転）が起こった可能性を示唆している。また、地点4においては引張方向の傾斜角が大きいことから、地点4では層理面に直交方向を軸とした回転も被っているのかもしれない。

本研究では層平行引張を想定したが、この応力だけでは説明できない断層群も見いだされている。特に逆断層センスを持つ断層は方解石脈が充填している場合が多く条線が良く残っている等、露頭での産状からも異なる時階に形成したものである可能性が示唆される。しか

し、データ数が少量であるために応力解析のクラスターとしては認識されない。これらの断層を説明するためには、層平行引張に不調和なデータのみを抽出して再解析を行うことでそれらを形成した別時階の応力を認識できる可能性があるだろう。

ところで、三崎層群では小断層の他に、変位量が数 m を超える露頭規模のせん断構造が少なからず認められる（図 5）。これらのせん断構造は小断層に切られていることが確認できたので、小断層の形成以前もしくは同時にできた構造である公算が高い。したがって、同時階の応力制約になりえると判断して今回、追加の調査対象とした。これらのせん断構造はその傾斜量が不明確であることから断層データとして扱うのは難しい。しかし、その走向方向と横ずれ成分を認識することができる状況であることが多かったため、本研究ではそれらのデータを測定した。本研究では浜益野層分布域において 10 条のせん断構造を確認した。その走向方向と横ずれ変位センスを図 5c に示す。図 5d には北東-南西引張とした場合の右横ずれ・左横ずれ断層の分布範囲を示した。これによれば、本研究で測定した左横ずれ断層の走向は図 5d と調和的である。他方で、右横ずれ断層では不調和な走向を持つものも少なくない。せん断構造を認識した地点周辺の地層の姿勢にもバラツキがあったため、小断層と同様に露頭規模の変形によってせん断構造も回転してしまっており不調和な結果が目立ってしまっている可能性がある。現状では 10 条とデータ数が少ないため十分な検討ができないが、今後データ数を増やしていけば大局的な変形の様相を知る手掛かりとなるものと見込まれる。

以上のように、昨年度までは三崎層群の応力状態は不明確であったが、本研究において三崎層群全域において層平行引張の応力が記録されている公算が大きいことが明らかとなった。また露頭規模のせん断構造も同様の変形を示している可能性がある。今後、以下のような調査研究が実施されれば、この想定の実偽が決着されるものと見込まれる。

1. 走向が回転してるブロック内において層理平行の引張応力が得られるかを検証する
2. 調査範囲を広げ、露頭規模のせん断構造のデータを追加収集する
3. 層理面に直交する方向の回転を示唆する情報を収集する（例えば、古流行の傾斜角等）
4. 小断層やせん断構造と地層の傾動の前後関係を示す露頭の探索する
5. 十分なデータの収集の後に褶曲テストなど構造地質学的手法を適用する

付録

本研究を通して見いだされたジオパークの観光資源としての活用できる可能性のある地質情報について付記する。小断層解析という手法はやや難解なものであるために、本研究を直接的にジオパークにおいて紹介するのは難しい。そのため本研究の今後の発展からジオパークとしての紹介が見込まれるのは、すべてのデータが出揃ったのちにそれらの解釈として報告者が提案する応力状態とその成因というモデル（考察）のみであろうと考えられる。しかしながら、小断層という地質構造はその 1 つ 1 つが変形の証拠といえる。した

がって、小断層が存在する露頭は過去の大地の変形の様子を観察ができるため、ジオサイトとしての価値があると考え。特に、土佐清水ジオパークではアクセスのよいジオサイトで変形の様子を考察できる単純な小断層群が観察可能であるため、ここに紹介する。

本報告で紹介するのは竜串海岸の小断層層群である。竜串海岸はアクセスや景観が良いことから人気のジオサイトとなっている。本ジオサイトには、保存の良い生痕化石や堆積構造、風化構造が露出しており、「考えながら歩く」をテーマとして地質構造とその成因が丁寧に紹介されている。この“考えるもの”の対象に、本露頭に露出する小断層も活用されればと提案する。

竜串海岸には多くの小断層が露出する。特に、見残し行きグラスボートの乗船場のある堤防の南方には姿勢の揃った小断層群が分布する（地域5）。小断層群はNW-SE走向で高角度な姿勢を持つみかけ正断層が卓越する（図2の地点5のデータ、図6）。これら小断層は共役関係であることを仮定すれば、大まかにNE-SW方向の伸長を示すものと理解できる（図7）。また、海食台の南部では生痕化石 *Ophiomorpha* 類を切る小断層が確認できる（図8）。この *Ophiomorpha* を直線状の構造と仮定すれば、この生痕化石のズレから断層の変位が認識できる（図8b, c）。以上のように竜串海岸は小断層を3次元的な変形を示す構造として理解できる良いフィールドである。竜串海岸のようにアクセスが良く変形構造を観察できる露頭は国内に多くはなく、有用な観光資源になりえると考え。

謝辞

本研究は、露頭調査および構造データの解釈において京都大学の安邊啓明氏に助力いただいた。記して感謝を表す。

引用文献

- Agar et al., 1989. J. Geol. Soc. London, 146, 893–986.
Blow, 1969. Internat. Conf. Plankton. Microfos., 1st, Proc., 1, 199–421.
木村, 1985. 地質雑, 91, 815–831.
奈良ほか, 2017. 地質雑, 123, 471–489.
Sato, 2006. Tectonophys, 421, 319–330
Shinjoe et al., 2010. Geochem. J., 44, 275–283.
Yamaji et al., 2006. J. Struct. Geol., 28, 980–990.

5 付図

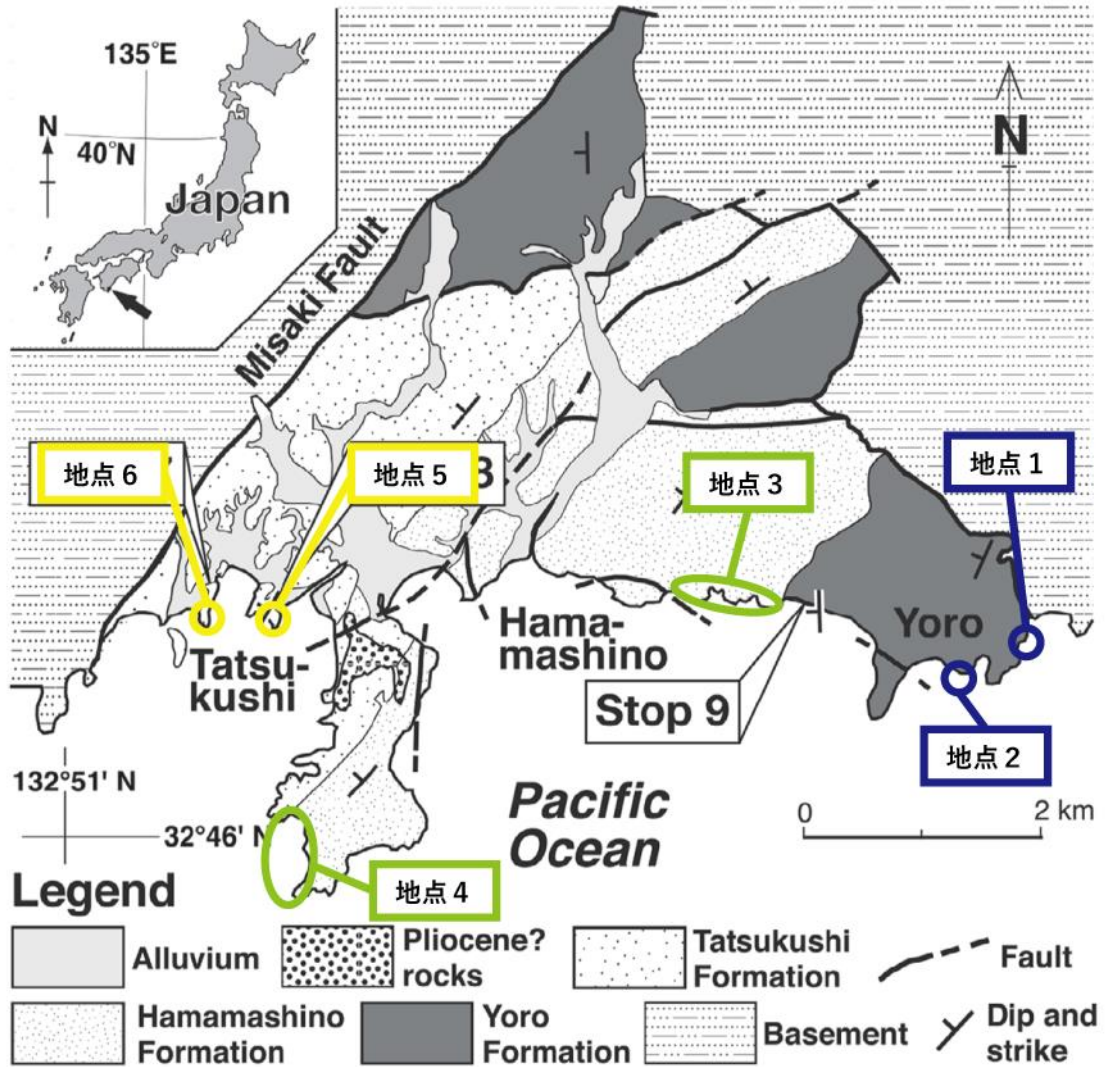


図 1. 調査対象地点. 基図は奈良ほか (2017) を使用.

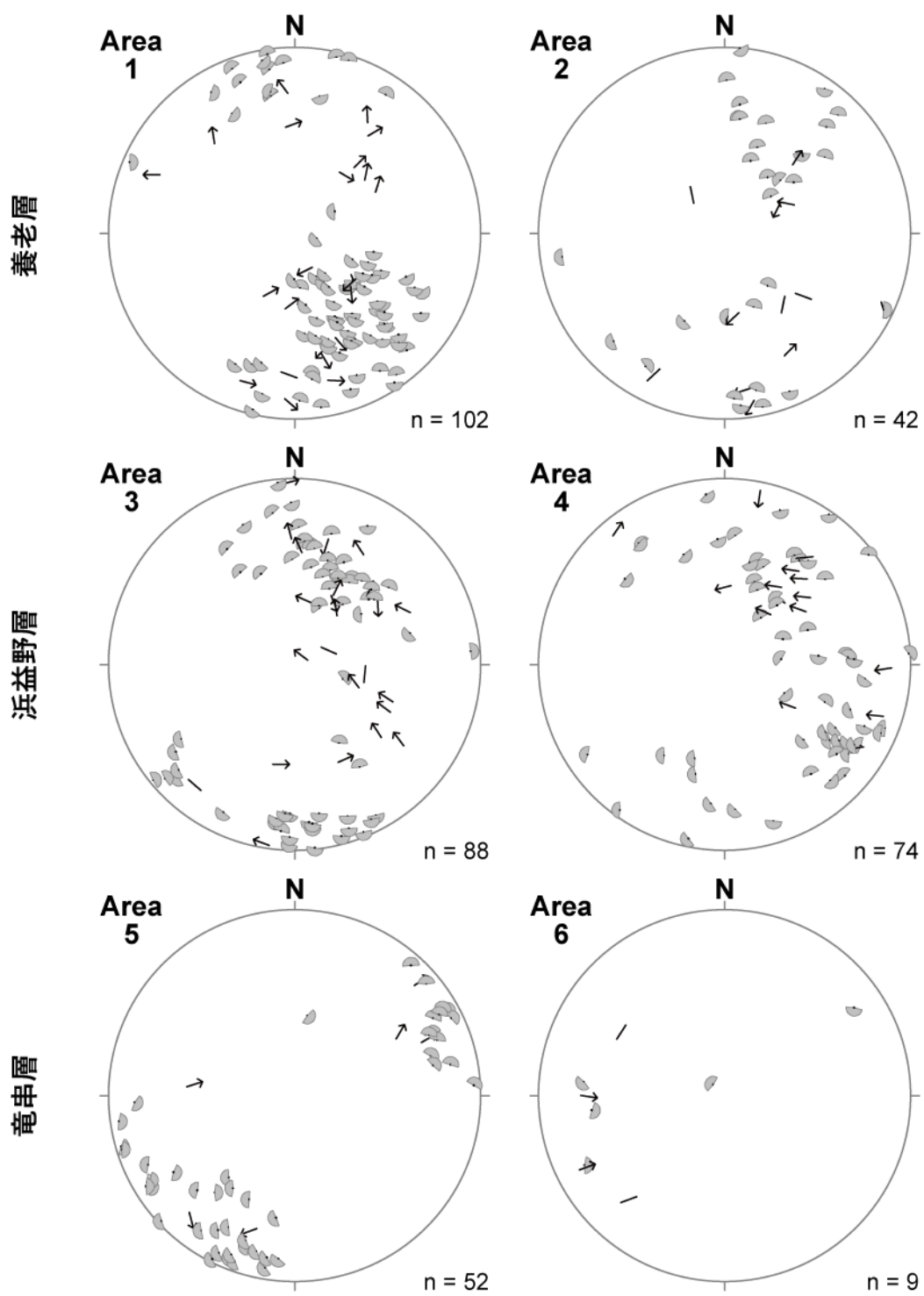


図2. 小断層データの Tangent-lineation diagram.

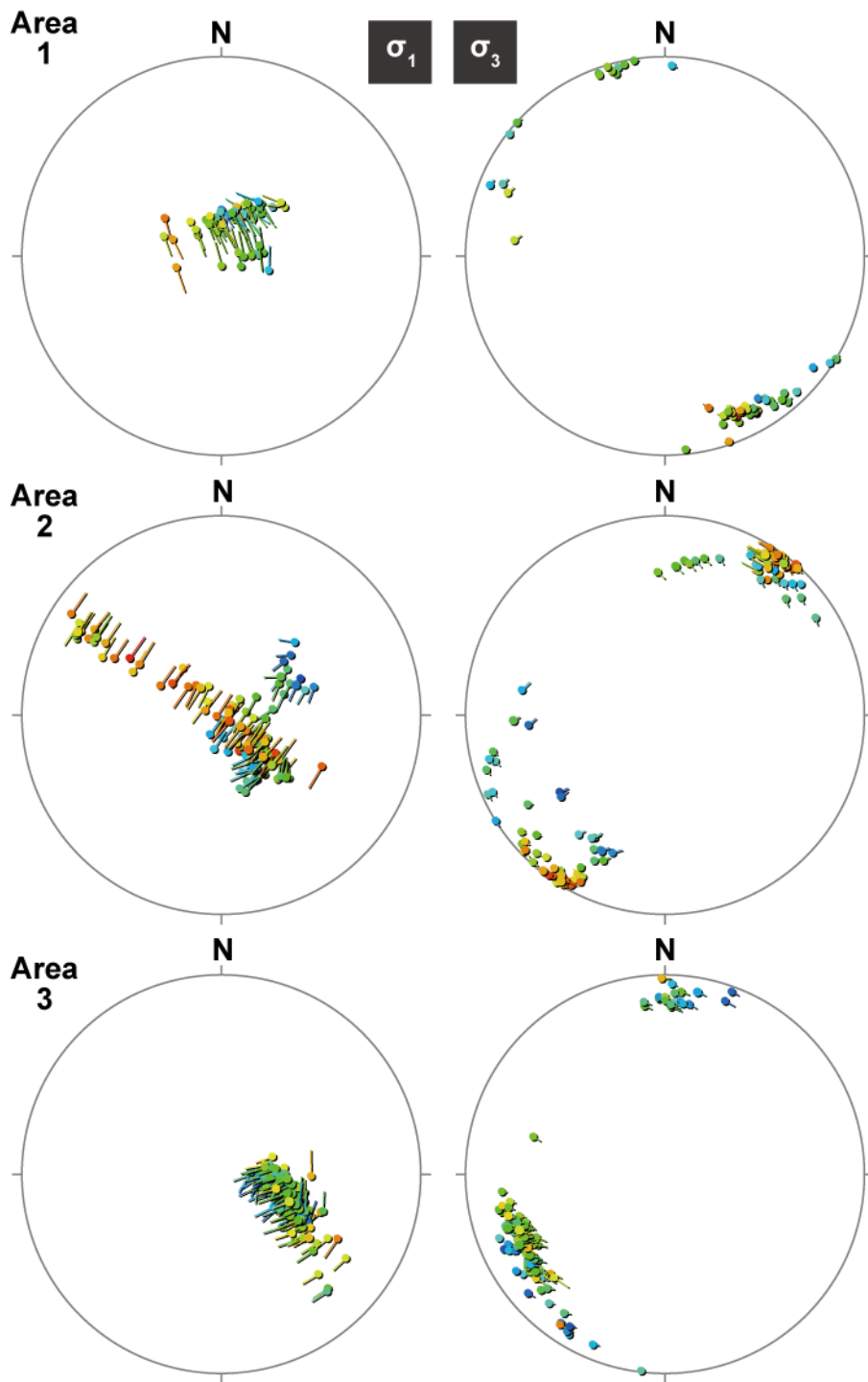


図3. Hough法による小断層データの応力解析結果。左半球が最大圧縮主応力軸，右半球が最小圧縮主応力軸を示す。

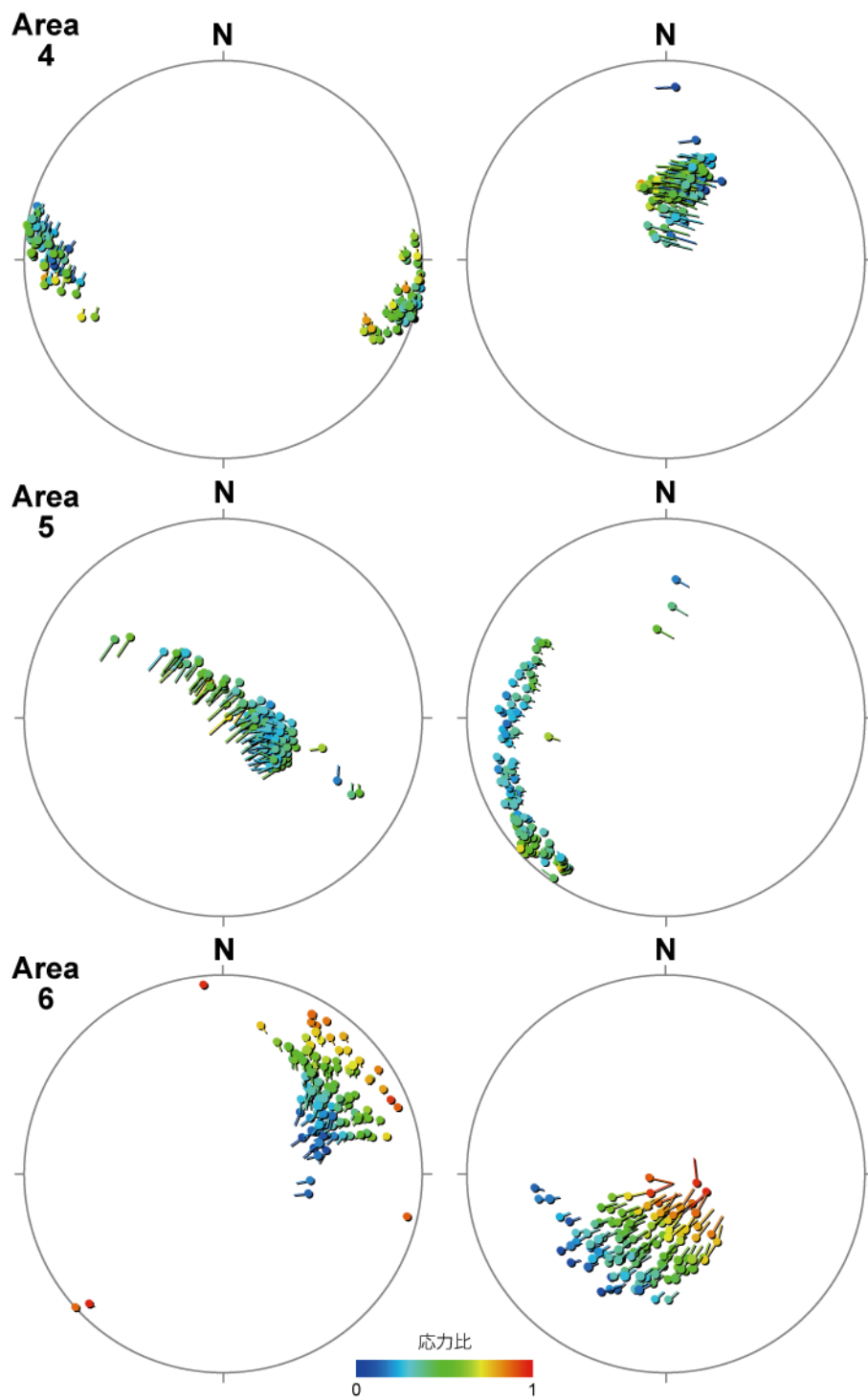


図3 続き.

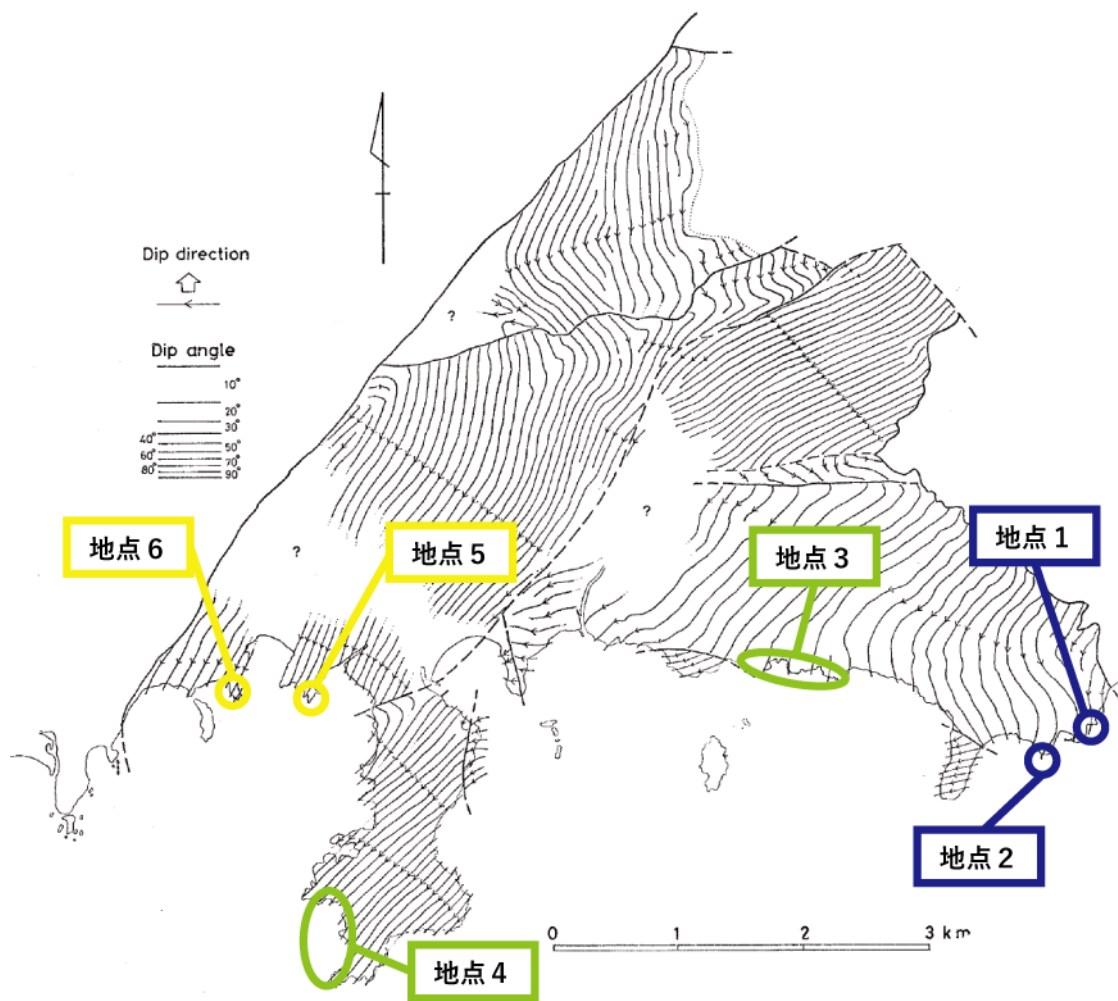


図4. 三崎層群の地質構造と調査対象地域の地層の姿勢（基図は木村，1985）。地点1のみ特徴的に走向が北北西－南南東方向である。

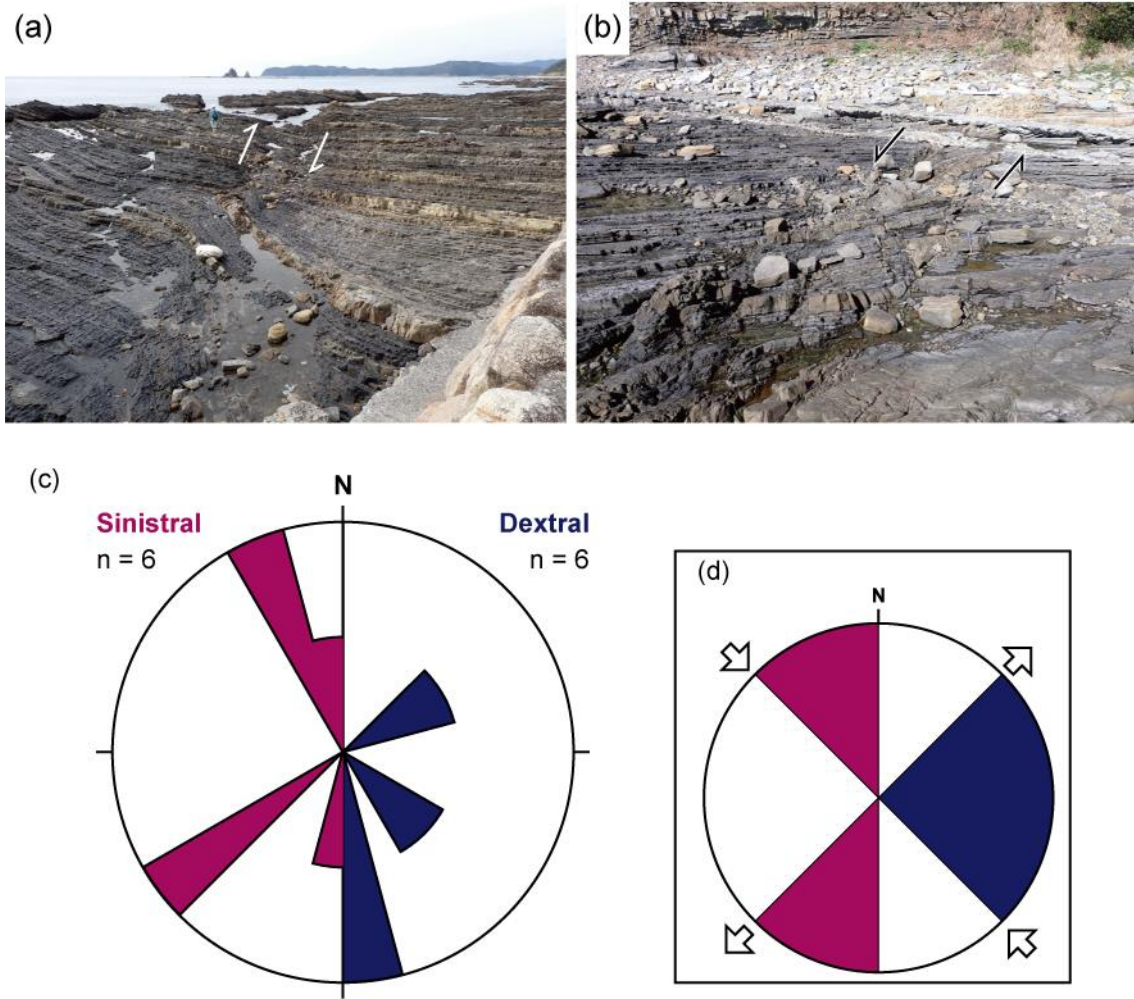


図5. (a, b) 露頭規模のせん断帯の露頭写真 (a, 右横ずれせん断; b, 左横ずれせん断帯). (c) 本研究において浜益野層で測定したせん断帯のセンスと走向の関係を示すローズダイアグラム. 左半円と右半円がそれぞれ左横ずれ断層と右横ずれ断層の走向のローズダイアグラム. (d) 北西-南東方向圧縮, 北東-南西方向伸長場における理想的なせん断センスと走向の関係.

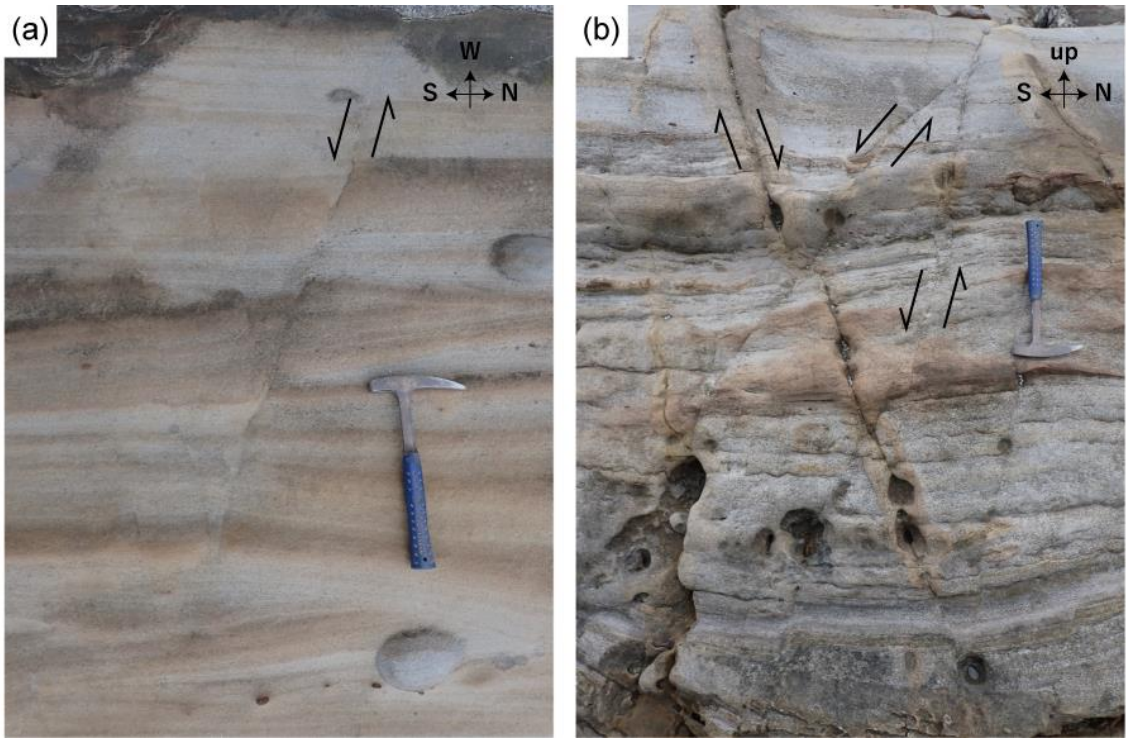


図6. 竜串層の小断層の露頭写真. (a)波食台上の水平断面に露出した小断層. (b) 浪食崖の鉛直断面に露出した共役断層の疑いのある見かけ正断層の小断層群.

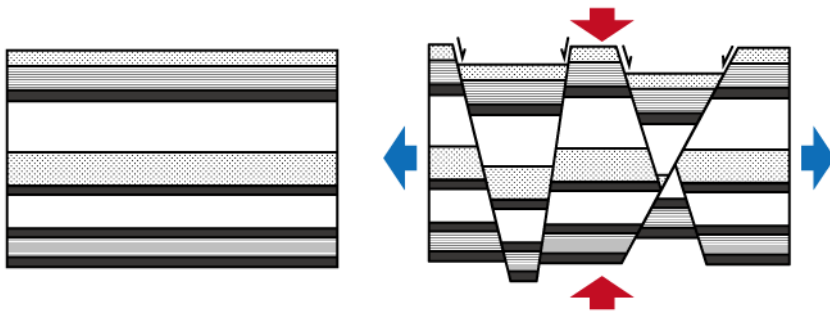


図7. 断層の変位と圧縮・伸張方向の模式図.

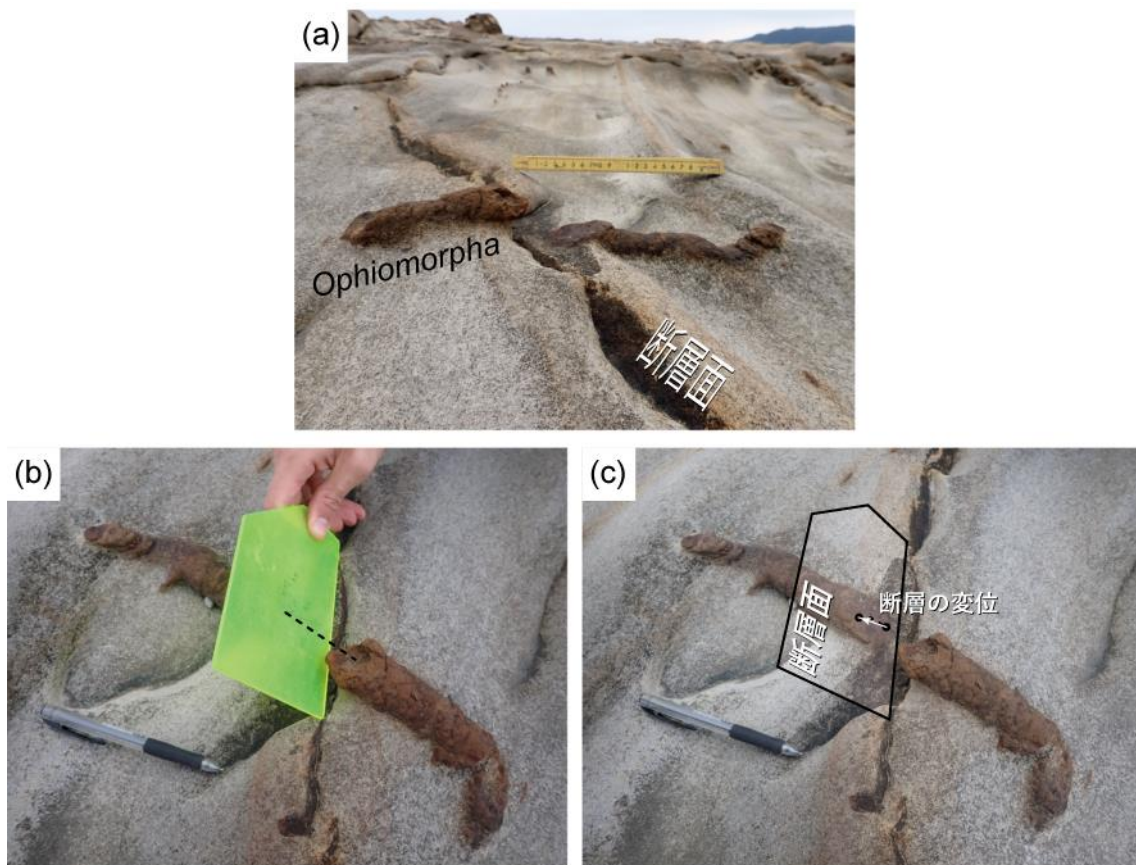


図8. 竜串層の生痕化石 *Ophiomorpha* を切る小断層の露頭写真. (a)断層面を境に *Ophiomorpha* が鉛直方向にズレている. (b, c) 断層の変位の決定方法. 断層の上盤と下盤のそれぞれにおいて, 断層面と *Ophiomorpha* の延長線が交わる位置を求める. それらを結ぶ線が断層の変位となる. この露頭ではわずかに右横ずれ成分を持つ逆断層であると解釈される.