

活動の成果概要

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】 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

活動の名称 小断層解析による三崎層群の変形史の解明

【活動の成果概要】 図表（カラー）使用可

1 背景

高知県南西部に位置する土佐清水ジオパークには、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（図 1）。三崎層群は高々数 100 m 程度の古水深の地層からなるが（例えば、奈良ほか，2017），その層厚は数 km に及び，三崎層群の堆積時には堆積盆地の発達を促した活発なテクトニクスがあったことは間違いない。しかし，三崎層群では堆積構造や生痕などの初生的な構造についての検討は進められているものの，その後の変形を取り扱った構造地質学的な検討例は少なく，変形史は明らかでない。

土佐清水ジオパークの代表的な見どころの竜串海岸や爪白海岸は三崎層群の分布域であり，地層の景観やその内部構造が地学的な観察内容である。両海岸における地層の見事な景観は，三崎層群が大きく傾いていることによるものであるところが多い。また，地層の傾斜角が大きいことによって，水平面で地層の断面を見ることができるよう内部構造の観察が容易になっている側面もある。したがって，土佐清水ジオパークにおいてこの三崎層群の“傾き”は一つの重要な要素であるといえる。以上の通り，三崎層群の変形史は学術的に重要なだけでなく，本ジオパークにおける上記海岸域などの観光資源としての付加価値の創出に繋がる課題である。

報告者は 2021 年度から土佐清水ジオパークに助成を受け，三崎層群の変形史の検討のため小断層を対象に研究を進めてきた。昨年度までの成果として，報告者は 6 地点において合計 369 条の小断層の方位データを取得し，取得した地点ごとに応力解析を行った（羽地，2022，2023）。応力解析の結果，大部分の小断層は層平行引張の応力で説明されることと，一部それと不調和な小断層データがあることを報告した。しかし，断層の切断関係の認識やデータ数・解析地点数が不十分であったことから，変形史や応力史を編むまでには至らなかった。

そこで本年は小断層の切断関係の確認と小断層データを増やすため，現地調査を実施し

た．調査は三崎層群の分布域の海岸部で，地質図規模の断層によって地層の姿勢が大局的な姿勢と異なる地域（以降，ブロック化地域）を除いて行った．本年までの調査で取得した小断層データは9地点で合計1,249条となった．国内の研究で1,000条を越える小断層データが報告されている地域はほとんどなく，三崎層群は国内でも最も小断層データの充実した地質体の1つとなった．本報告では，申請者がこれまでに収集した三崎層群の小断層の産状・方位データ・応力解析結果を報告し，それらの結果から三崎層群の変形史の作業仮説を紹介する．

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．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（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）．

三崎層群はその大部分で北東－南西走向で北西に傾く姿勢を持ち，海岸線沿いでは東部に分布する養老層が約20度程度の傾斜角で，西部に分布する竜串層が最大で80度程度と，西に向かって傾斜量をます同斜構造を持つ（木村，1985）．

3 小断層の産状

本研究では三崎層群の海岸部を踏査し，三崎層群の全体の構造把握を行った．その上で，地層の姿勢が安定している地域を選定して，小断層データの取得を行った．ここでは，三崎層群に見られる小断層の代表的な産状と，その形成時期の制約となる露頭事実を記載する．

本地域において最も良く見られるのは，地層の層理面に中角～高角に斜交する断層面を持つgap断層（みかけ正断層）である（図2a）．この特徴を持つ断層は，養老層から竜串層まで三崎層群全域で最もよく観察される．養老層や浜益野層では，地層の層理を低角に切るoverlap断層（みかけ逆断層）や（図2b），層理面そのものをすべり面として断層変位が認められる層面滑り断層が確認された（図2cのF2）．低角overlap断層は，層面滑り断層に収れんすることもあり．この層面滑り断層や低角overlap断層では，断層面に沿っ

て方解石脈や条線がよく観察された（図 2d）。gap 断層には、このような特徴を持つものは少なかった。また、gap 断層は低角 overlap 断層や層面滑り断層に切られることが多く（図 2c）、gap 断層の形成後に層面滑り断層や overlap 断層の形成があったものと推定された。

このほか養老層や浜益野層では砂岩を含む碎屑岩脈が観察される（図 2e, f）。砂岩岩脈は、上述の gap 断層と相互の切断関係にあった。図 2e の露頭で観察された砂岩岩脈は小断層に明瞭に切られるが、図 2f の露頭では砂岩岩脈が断層を貫いて注入している様子が観察された。本地域における碎屑岩脈は、層理面に直交する方向に撓んだ構造を持つ。これは母岩と砂岩岩脈が圧密を受けて脱水する際に、間隙率の差が原因で生じる構造であり、碎屑岩脈が未固結時のものであることを示す。したがって、gap 断層は三崎層群の堆積と同時期に形成が開始していたと判断される。

竜串層の砂岩層中では、似た姿勢の小規模な gap 断層が集中して認められることがある（図 2g）。このような断層は、断層面 1 つ 1 つが剥離させることができずいわゆる面なし断層と呼ばれる産状を持つ。この特徴は、地層の堆積時に表層滑りなどで形成されたいわゆるノンテクトニック断層であることを示唆する。このような断層は、造構応力を記録している望みが薄いことから、今回は測定対象から除外した。このようなノンテクトニック断層はまれであり、竜串層にもテクトニックな変形と判断される gap センスの小断層が多数存在する。その代表的なものは竜串層に認められる共役的な断層群である（図 2h）。また、竜串層の砂岩中にはノジュールが多数認められるが、それと小断層の切断関係が固結後の変形を示唆している。砂岩中のノジュールのうち、母岩の葉理を変形させていないものは母岩の脱水がある程度進んだ状態で形成されたものと判断できる。竜串層ではそのような産状のノジュールを切る gap センスの小断層が確認された（図 2i）。

以上の観察事実から、堆積時から層理を中角度～高角度に切る gap センスの小断層が形成され、その後に層理に対して低角な overlap 断層や層面滑り断層という活動の順序が想定された。

4 小断層の方位データと応力解析結果

本年度までの調査で得た小断層の方位データを地域や層準、母岩の姿勢などを基準に以下の 9 つの地域に区分した。すなわち、養老層 3 地域（養老東部・養老南部・落窪東）・浜益野層 4 地域（落窪西・浜益野・千尋岬東部・千尋岬先端部）・竜串層 2 地域（千尋岬西部・竜串海岸）である。各地域で得たデータ数は養老層で 432 条、浜益野層で 528 条、竜串層で 289 条の合計 1,249 条である。小断層データを採取した 9 地点の位置を図 1 に、小断層の方位データおよびその応力解析結果を図 3 に示す。

応力解析には Hough 変換法（Sato, 2006; Yamaji et al., 2006）を利用した。三崎層群では上述の通り産状の異なる小断層が見出されており、得た小断層の方位データは複数時階

の複雑な応力史の下で形成されたものが混在していることが予想された。Hough 変換法はそのような不均一なデータセットから複数の応力を分離検出することを得意とするため、本研究で採用した。

養老層では、養老東部では 102 条、養老南部では 94 条、落窪東部では 236 条の小断層を観察した。断層の姿勢は養老東部では東西ないし東北東－西南西走向で中角度傾斜のものが、養老南部および落窪東部では東西ないし西北西－東南東走向で中角度傾斜のものが多く、方位データは sense-only の gap 断層が多いものの、条線が確認できた断層では正断層だけでなく、逆・横ずれ断層が混在していた。また、落窪東部では低角傾斜の断層が多く認められ、これは前述の層面滑り断層や地層を低角に切る overlap 断層であった。図 3 の落窪東部の小断層データで、投影図の中央やや右上に Line-only data や Full data が集中しているが、これが層面滑り断層や低角 overlap 断層である。

小断層解析の結果、養老東部の方位データは鉛直に近い最大圧縮主応力軸 (σ_1) を持ち、北北西－南南東方向に最小圧縮主応力軸 (σ_3) を持つ応力比が中程度～低めの正断層型応力で説明された。養老南部のデータセットでは σ_1 が鉛直に近く σ_3 が北東－南西方向の正断層型応力が得られた。また、落窪東部のデータセットでは、鉛直～北西方向に傾斜した方向に σ_1 を持つ応力比の低い応力と、南北ないし北北西－南南東方向に σ_3 を持つ応力比の高い応力の 2 つが検出された。層面滑り断層や低角 overlap 断層は、主にこの後者によって説明された。

浜益野層では落窪西部で 114 条、浜益野で 65 条、千尋岬東部で 229 条、千尋岬先端部で 120 条の小断層データを取得した。断層の姿勢は、落窪西部では東西走向で中角度～高角度傾斜のものが多く、浜益野では北西－南東走向のものが多く、姿勢のまとまりは良くない。千尋岬東部では多様な姿勢の小断層が認められたが、北北西－南南東走向を持つ断層データが少ない。また、北東－南西走向で中～高角度に北に傾いたものが多く、これは層面滑り断層や低角 overlap 断層である。千尋岬先端部では北西－南東走向で南に中角度に傾斜したものと、北東－南西走向で北に中角度に傾斜したものの 2 系統が認められた。

落窪西部のデータセットの解析では南東側に中程度に傾いた σ_1 を、南北方向に σ_3 を持つ応力比が低めの応力と、東側に低角に傾いた σ_1 と北東方向に中角度に傾いた σ_3 を持つ応力比が高めの応力が得られた。浜益野の小断層データからは、南北に σ_1 を持つ応力比の低い応力と、北北東方向に低角度に傾いた σ_3 を持つ応力比の高い応力の 2 つの応力が得られた。しかし、落窪西部、浜益野ともに応力クラスターのまとまりは悪く、小断層群を形成した応力としての蓋然性は高くはない。千尋岬東部の小断層データでは、まとまりの良い結果が得られた。 σ_1 が北西－南東方向の応力比の低い逆断層型ないし横ずれ断層型応力と、同方向に σ_1 を持ち鉛直に近い σ_3 を持つ応力比が中程度の逆断層型応力の 2 つの応力が得られた。千尋岬先端部のデータからは、東西方向に σ_1 を持ち、北にやや傾いた σ_3 を持つ応力比が中程度から低めの応力が得られた。

竜串層では千尋岬西部で 91 条、竜串で 198 条の小断層データを取得した。断層の姿勢は、千尋岬西部では中角度に南西側に傾くものが多く、竜串では北西－南東走向のものが

多い。竜串層の断層では条線が観察できたものが少なく、取得した方位データの大部分が sense-only data であった。またそれらは層理を引き離す方向の変位センスを持つ gap 断層が多く、低角の overlap 断層や層面滑り断層はあまり見いだされなかった。

千尋岬西部の小断層解析では、南東方向に中角度に傾いた σ_1 と西南西方向に低角に傾いた応力が得られた。しかし、この応力を示す解析結果の応力クラスターは応力比と主軸の方向が系統的に変化しており、解析結果のまとまりが悪いことを示している。したがって、小断層群を形成した応力としての蓋然性は低い。竜串の解析では、北西-南東方向に σ_1 を持ち北東-南西方向に σ_3 を持つ応力比のやや高い応力と、北西-南東方向に σ_1 を持ち北方に傾いた σ_3 を持つ応力比のやや低めの応力の 2 つの応力が得られた。

解析結果は各地の解析で得られた応力は様々で、複雑な応力史・変形史が想定された。ただし、全 9 地域の解析結果を比較すると、応力比が低めで南北から北東-南西方向に引張軸を持つ応力が見出される傾向があった。これは主に各地域の gap 断層を説明する応力として得られたものである。

5 考察

昨年度までの調査で報告者は、6 地点において合計 369 条の小断層の方位データを取得し、大部分の小断層は層平行引張の応力で説明される可能性が高いことと、一部それと不調和な小断層データがあることを報告した。本年の調査ではこれの検討のため、各地域で断層データを取得した地点周辺の層理面の方位データを収集した。その頻度分布を図 4 に示す。地域ごとに層理面の姿勢はまとまりが良い。各地域における地層の平均方位は 15 度程度の低角なものから 70 度程度の高角なものまで大きな差があった。

層平行引張の仮説の検証のため、各地域の応力解析結果と層理面の平均方位を図 5 に示す。ほとんどの層準で、応力比が低めの応力について σ_1 が層理の法線方向に近く、 σ_3 が層理面の方位を示す大円上に載る傾向が認められた。これは層平行引張を支持する結果であった。ただし、例えば養老東部・養老南部・千尋岬東部では σ_1 軸が応力クラスターからやや外れた位置に示されている。これは先に述べた層平行断層や低角の overlap 断層など時階の異なる小断層をまとめて解析し、それが評価に加わってしまっているために、本来の gap 断層群を形成した真の応力と若干異なる応力が得られたのであろう。

この層平行引張の応力は、三崎層群全域に広く認められる地層を中角度～高角度に切る gap 断層を説明する応力である。この断層群は、その産状から堆積直後から形成を開始していたと推定される。三崎層群は陸棚から潮間帯の碎屑岩類からなる（奈良ほか, 2017）。そこで堆積面の傾斜は高々数度と考えられるため無視すると、層理面に概ね直交する σ_1 を持つ応力は正断層型応力であるといえる。

各地域で得られた正断層型応力の引張方向は、北北東-南南西が卓越している。しかし、養老東部や落窪東部では特徴的に σ_3 が北北西-南南東方向であった。この 2 地域の間に位置

する養老南部では、他の地域と同様に北東-南西方向の σ_3 を持つことから、この差は層準の差ではなく空間的な差であると考えられる。報告者はこれを小断層の形成後に地層の鉛直軸周りの回転が起こったためと考える。養老東部や落窪東部は地層の姿勢も同様に北北西-南南東走向を持つ。すなわち、養老層で比較すれば地層の走向方向と σ_3 の方向が対応しているわけである。この関係は、養老東部や落窪東部で北北東-南南西方向に引っ張る正断層型応力の下で小断層群が形成した後に、反時計回りに20度程度の回転が起こったと考えれば説明可能である。つまり、gap センスを持つ小断層群の形成と地層の走向軸の回転は、前者が先であったという考えである。

三崎層群には gap 断層のほかに層面滑り断層や低角 overlap 断層が認められる。これは gap 断層を切る他に年代制約がない。報告者は調査時の露頭情報から、これらの断層の形成時期が三崎層群の褶曲や傾動と同時期であろうと考える。三崎層群は東側に分布する養老層では低角度の北西傾斜であり、上位の竜串層では高角度の北西傾斜である。したがって、西に行くほど急な同斜構造を持つわけだが、この形成と同時期にこれらの層面滑り断層や低角 overlap 断層ができた公算が大きい。褶曲形成によって地層が屈曲する場合、層ごとに変形量が異なるために、地層の間では層間すべりが起こることがよく知られている。その滑り方向は褶曲軸に直交する方向である（センス方向は褶曲の様式によって異なる）。三崎層群の同斜構造の褶曲軸は地質図から北東-南西走向と判断できるが、今回露頭において確認された層面滑り断層や低角 overlap 断層の多くはこれに直交する北西-南東方向の条線を持つものが多かった（例えば、落窪東部や千尋岬東部）。これは、これらの条線付きの断層が層間滑りによって形成されたことを示唆する。

この考えが正しかった場合、層面滑り断層や低角な overlap 断層の小断層解析での取り扱いには注意を要する。上記の想定通りにこれらの断層が褶曲や傾動と同時期に形成されたのであれば、それらの方位データは褶曲テスト（Tonai et al., 2011）などを実施して扱う必要があるからである。本報告では、層面滑り断層や低角な overlap 断層も応力解析に含めたが、それらから地域をまたいで比較できる特徴的な応力は得られていない。これは褶曲テストが必要であることを示唆しているであろう。

以上の三崎層群における小断層の考察から、本報告は下の変形史のモデルを提案する（図5）。

1. 正断層期：

堆積時から北東-南西方向に引っ張る正断層型応力場に置かれ、三崎層群に広く認められる多数の gap 断層が形成される。この正断層型応力が三崎層群の堆積時に堆積盆地を沈降させ、浅海性の地層を数 km もの厚さ堆積させる堆積空間を生じさせた。

2. 褶曲&傾動期：

三崎層群が現在の姿勢に至る褶曲や傾動が起こる。この時期に褶曲の層間ひずみを解消するため層面滑り断層や低角 overlap 断層が形成される。おそらくこの時期に鉛直方向の回転も起こった（褶曲は2次元的なものではなく3次元的なものであった）。

3. 現在：

1, 2 で形成された断層群の褶曲後の姿勢が観察される。褶曲以前に形成された gap 断層群は一樣に地層の姿勢と同じ変形を被ったため、地域ごとの解析でそれぞれの地層に直交する圧縮方向を示す。

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日本原子力研究開発機構の安邊氏に助力いただいた。高知大学の奈良教授には、露頭観察に有用な助言を賜った。本成果の一部は、日本地質学会第 130 年学術大会にて公表した（羽地・安邊，2023）。ここに記して感謝を表する。

引用文献

- Blow, 1969. Internat. Conf. Plankton. Microfos., 1st, Proc., 1, 199–421.
- 羽地, 2022. 2021 年度土佐清水ジオパーク学術研究助成事業 成果概要.
- 羽地, 2023. 2022 年度土佐清水ジオパーク学術研究助成事業 成果概要.
- 羽地・安邊, 2023. 日本地質学会第 130 年学術大会要旨, T5-P-3.
- 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.
- Tonai et al., 2011. J. Struct. Geol., 33, 1158–1168.
- Yamaji et al., 2006. J. Struct. Geol., 28, 980–990.

6 付図

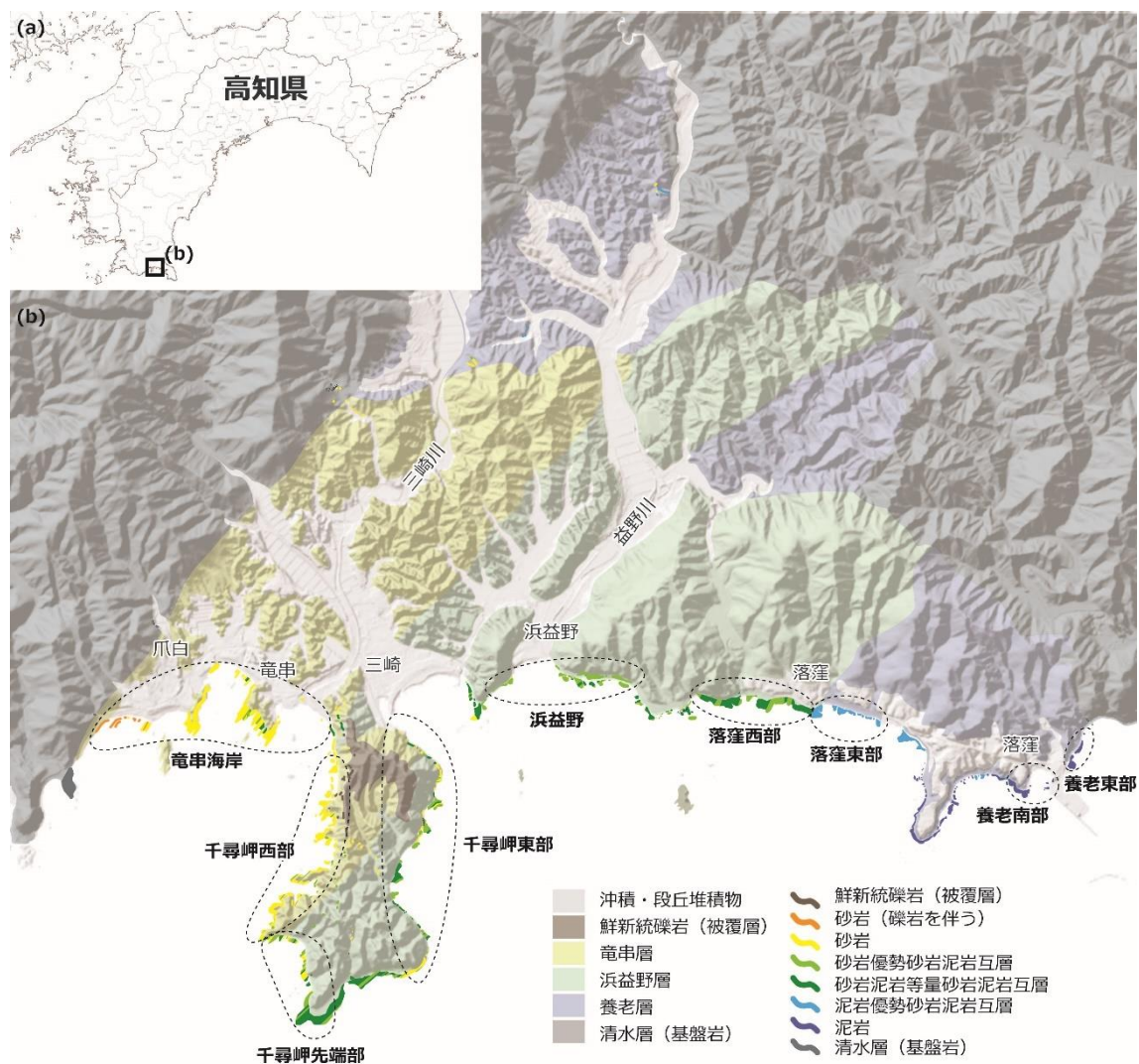


図1. (a) 調査地域位置. 国土地理院の白地図を使用. (b) 三崎層群の地質図と本報告のルートマップおよび小断層データの取得地域. 基図は奈良ほか (2017) の地質図および国土地理院の地形陰影図を使用.

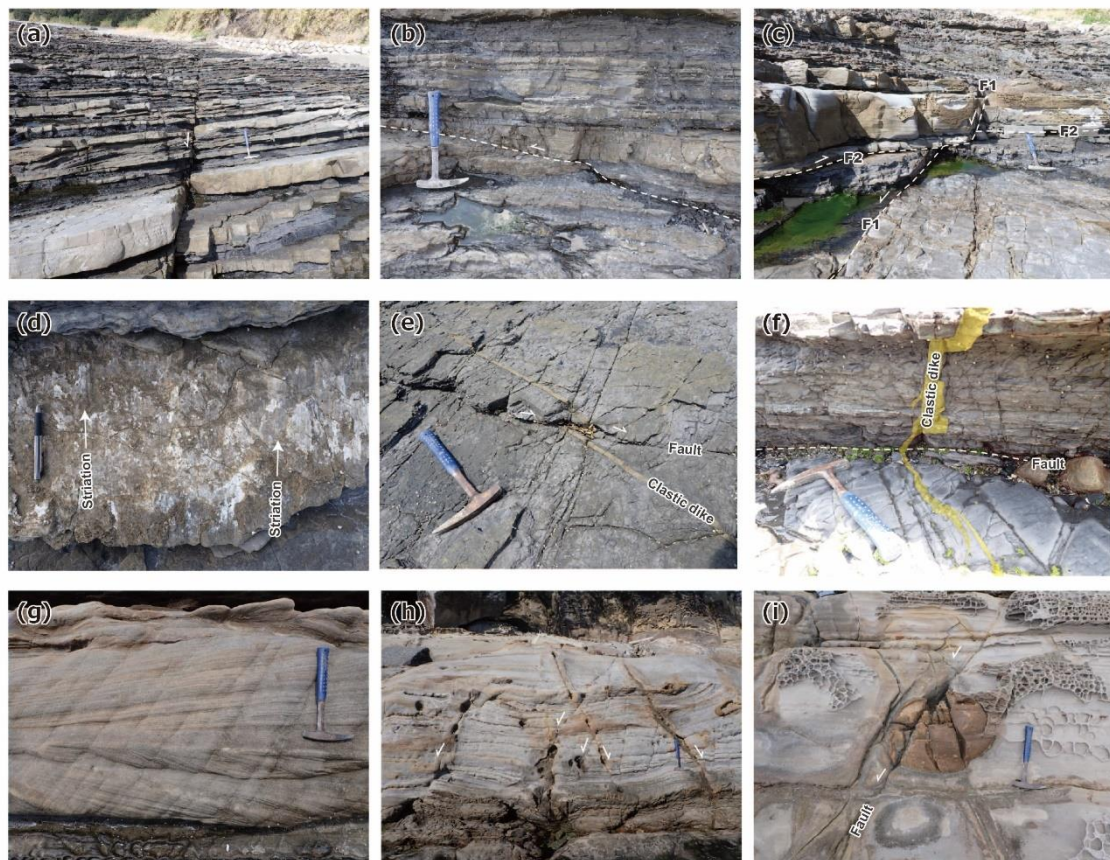
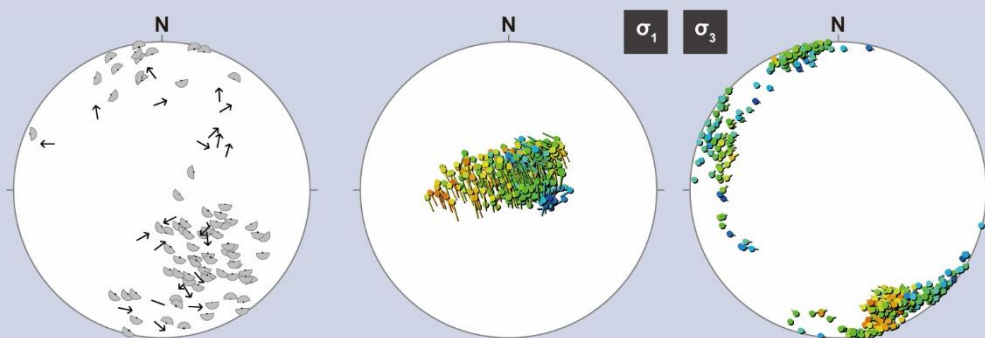
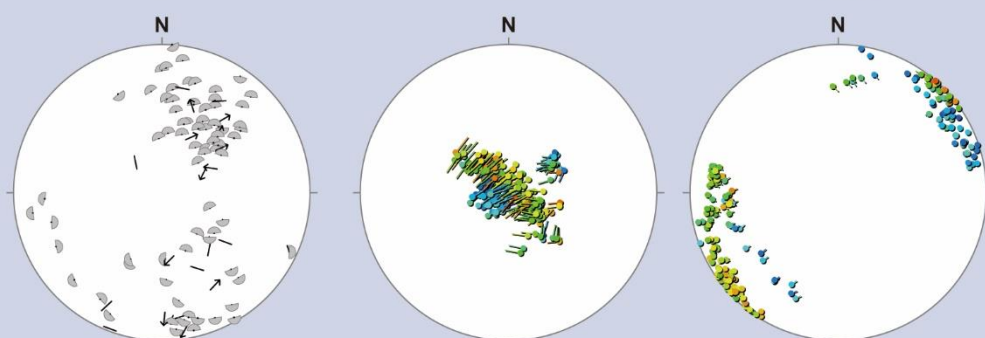


図 2. 代表的な小断層の産状の露頭写真. a: 層理面を高角に切る gap 断層. b: 地層に低角に斜交する overlap 断層. c: gap 断層 (F1) を切る層面滑り断層 (F2). d: 層面滑り断層の断層面上に見られる方解石脈と条線. e: 小断層に切られる碎屑岩脈. f: 小断層を貫く碎屑岩脈. g: ノンテクトニック断層と考えられる平行性の良い面なし断層. h: 共役断層群. i: ノジュールを切る断層. ノジュールは周辺の葉理を変形させていないことから、地層の脱水後に形成されたもの.

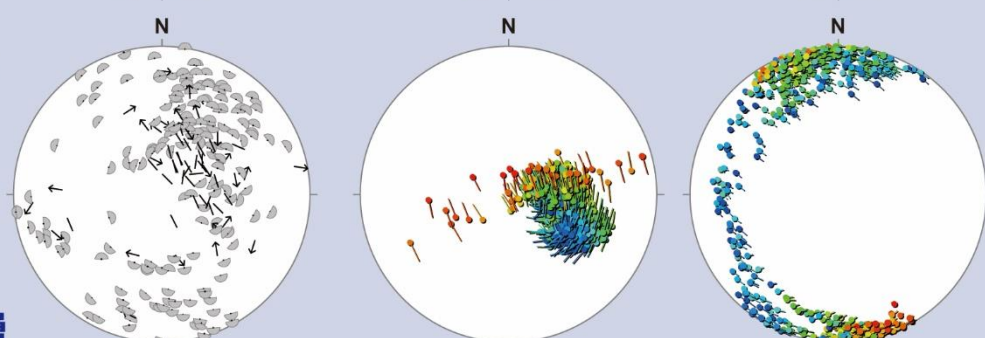
養老東部
n = 102



養老南部
n = 94

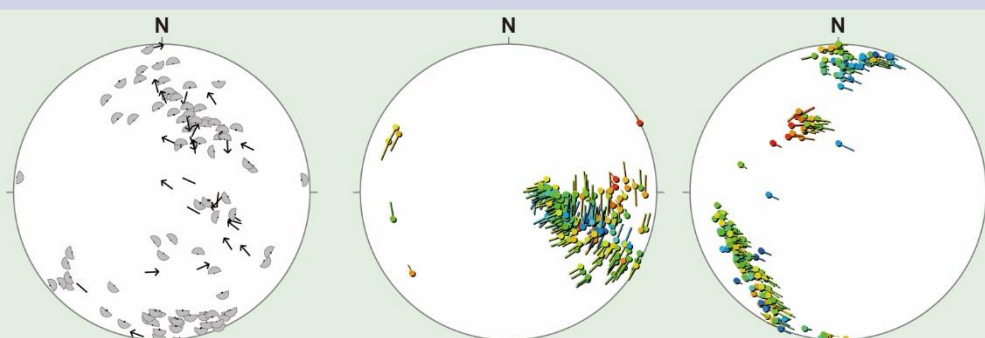


落窪東部
n = 236

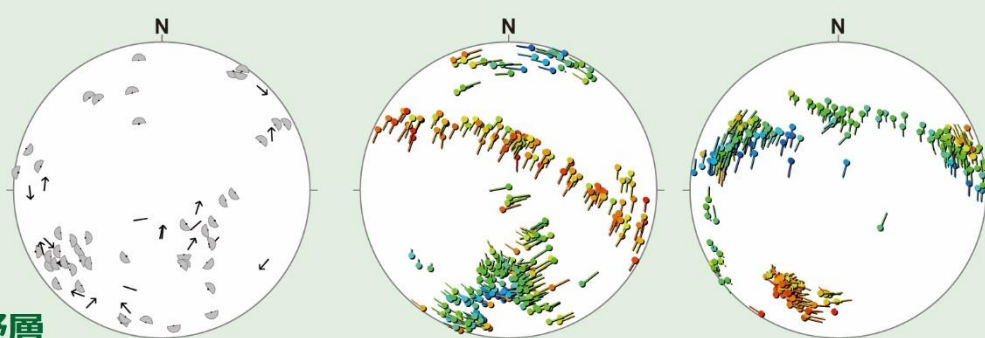


養老層

落窪西部
n = 114



浜益野
n = 65



浜益野層

図 3. 小断層データの Tangent-lineation diagram と Hough 法による小断層データの応力解析結果. 小断層の方位データは Tangent-lineation diagram を用いて表示した (Twiss and Moores, 1992). 中央の図が応力解析結果の最大圧縮主応力軸 (σ_1), 右図が最小圧縮主応力軸 (σ_3) の方向を示した下半球等積投影図.

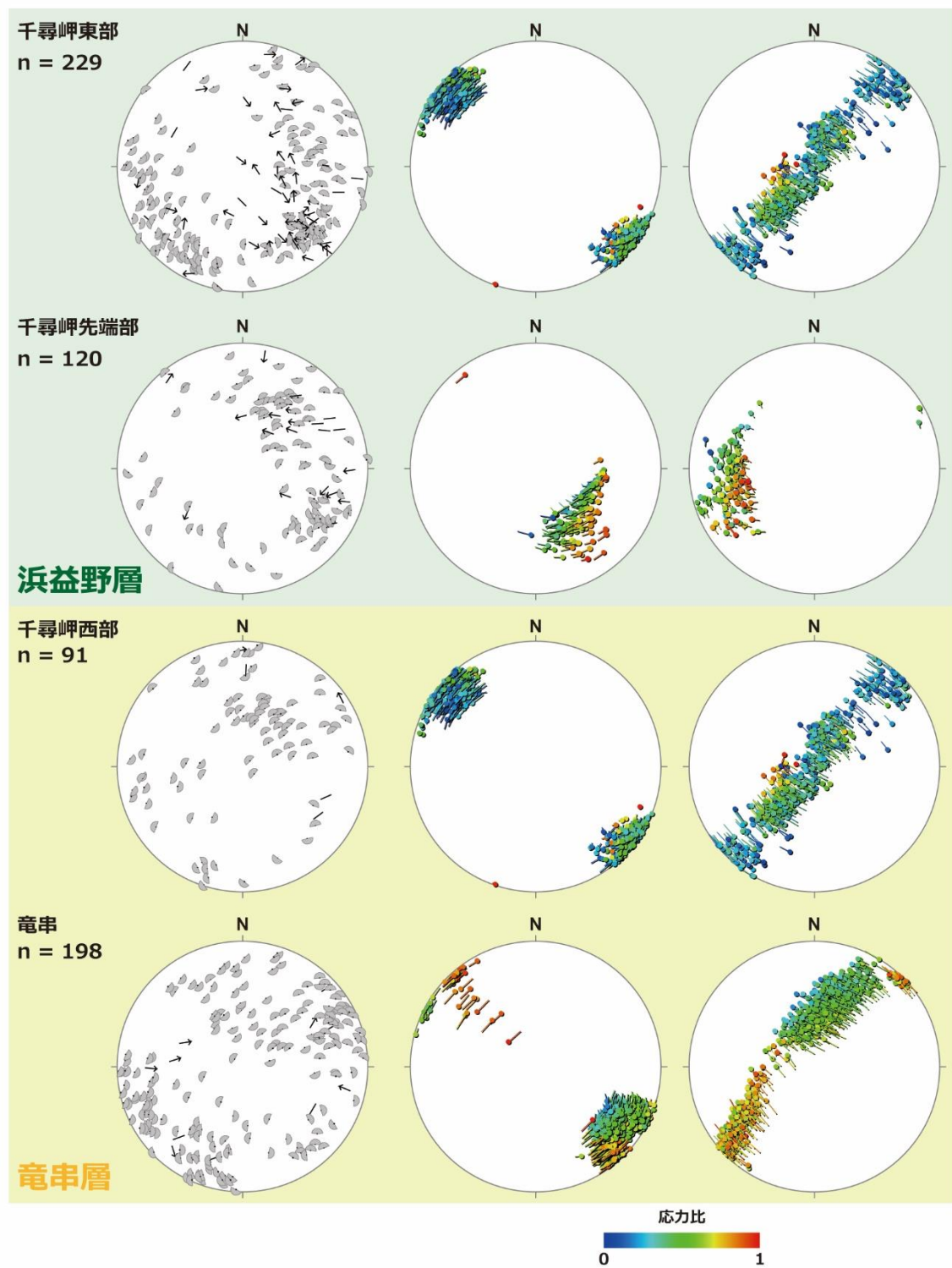


図3. 続き.

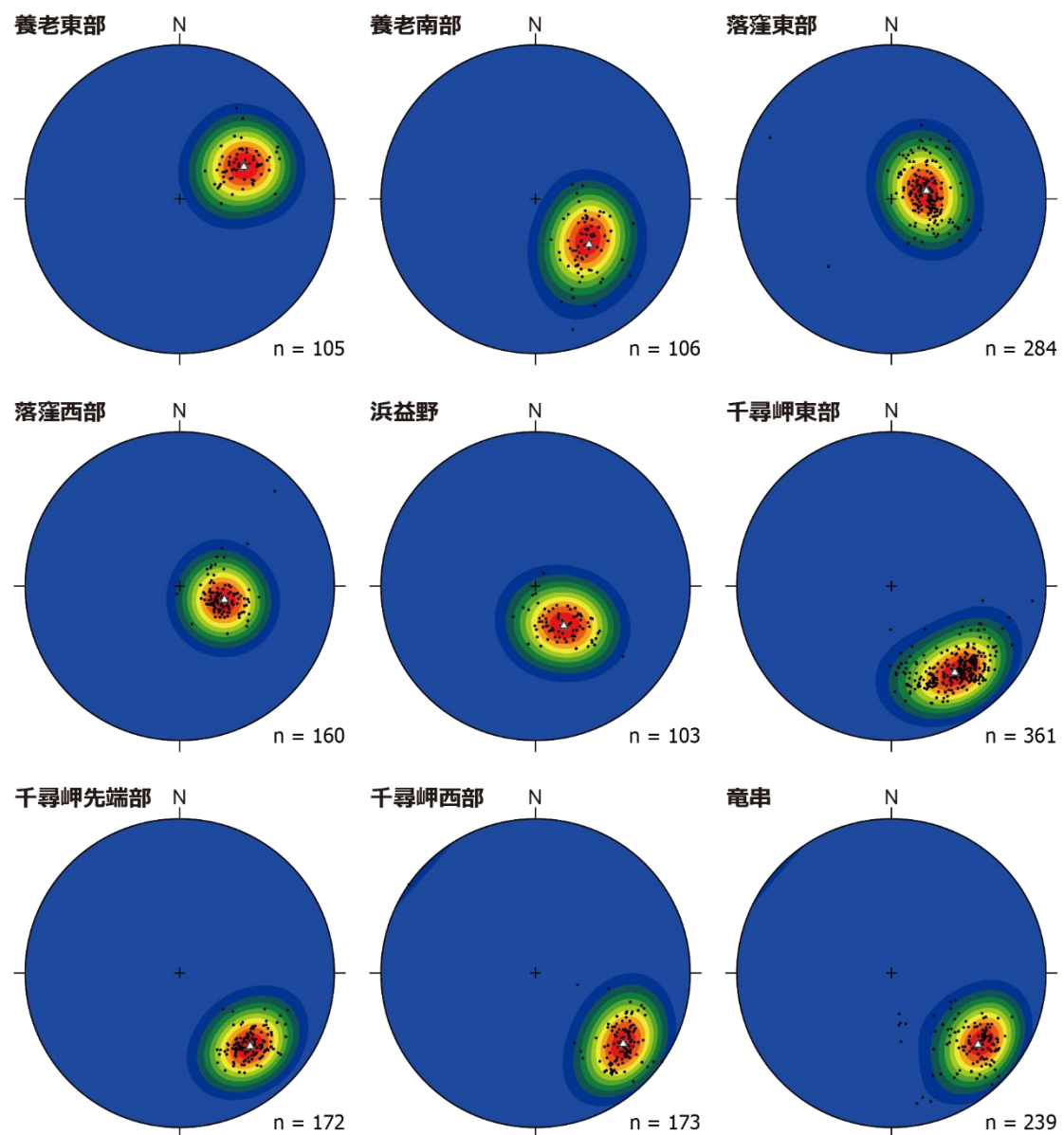
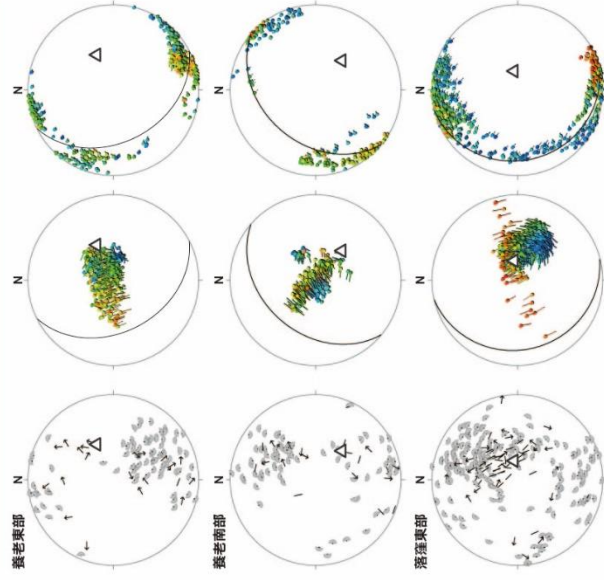
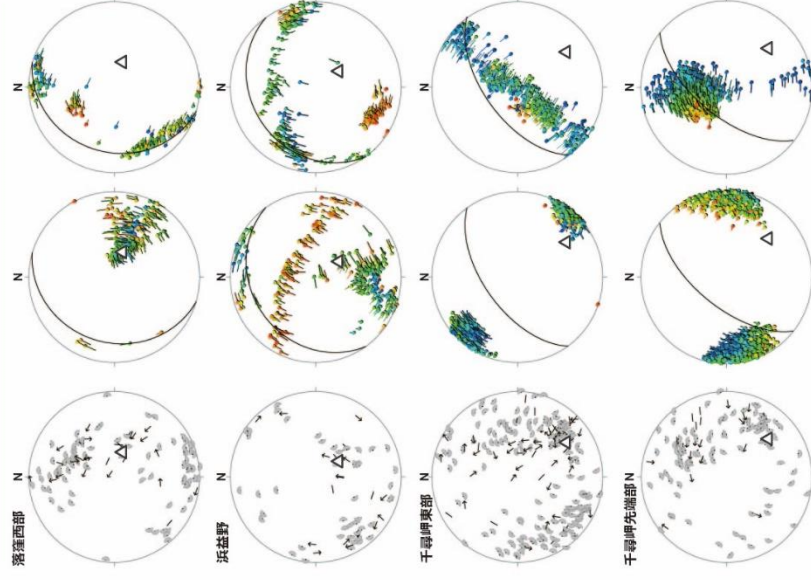


図4. 各小断層データ取得地域における層理面の方位. ●: 測定した層理面の極の方位. △: 各地域における層理面の平均方位. 下半球等積投影.

養老層



浜益野層



竜串層

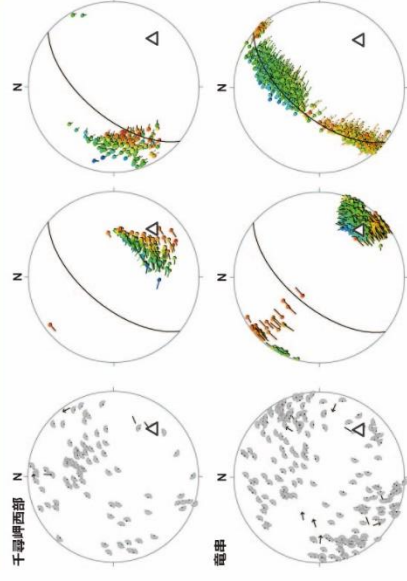


図5. 各地域の小断層の方位データおよび応力解析結果と地層の姿勢の平均方位の比較.
小断層の方位データと応力解析結果に、各地域の地層の平均方位（大円）とその法線方向（△）とを重ねて示す.



図6. 本報告で提案する三崎層群の堆積時から現在までの変形史のモデル.