

レター

天草下島北部の中新世貫入岩体の方向と応力解析

Paleostress analysis of Miocene sheet intrusions in northern Amakusa-Shimoshima, Kyushu, Japan

牛丸健太郎* 山路 敦*

Kentaro Ushimaru* and Atsushi Yamaji*

2020年3月30日受付.

2020年7月11日受理.

* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University,
Kyoto 606-8502, Japan

Corresponding author: K. Ushimaru,
ushimaru.kentaro.73w@st.kyoto-u.ac.jp

Abstract: The orientations of 76 sheet intrusions in northern Amakusa-Shimoshima, western Kyushu, were inverted to understand paleostress condition(s) in the backarc behind the junction of the SW Japan and Ryukyu arcs. The radiometric ages of intrusive rocks in the Amakusa area suggest that the sheet intrusions are 14–17 Ma, contemporaneous with the formation of the Japan Sea. The Eocene host formations are folded about a NNE-trending axis with an interlimb angle of $\sim 140^\circ$, but the relative timing of the folding and magmatism is not constrained. The sheet intrusions have various orientations, but E–W-trending dikes are dominant. The tilt correction did not significantly affect the E–W-trending intrusions, because they meet the fold axis at high angles. Stress inversion using the mixed Bingham distribution yielded two stresses from in-situ and tilt-corrected orientations. The stresses calculated from the in-situ set of orientations appeared to fit better than those from the tilt-corrected set of orientations, because the stresses of the normal faulting and strike-slip faulting regimes from the in-situ set of orientations had nearly vertical stress axes. We thus suggest that magmatism postdated the folding.

Keywords: dike, sill, stress, Ryukyu arc, tectonics, Kumamoto Prefecture

1. はじめに

岩脈や岩床のような板状貫入岩体の方向は、過去の応力を知る鍵である(例えば、中村, 1989; 山路, 2012). 熊本県天草地方の白亜系と始新統分布域には、中新世のそうした岩体が散在することが古くから知られている(長尾, 1922; 納富, 1930) (Fig. 1). 日本列島の中新世以来の応力場変遷を総括した山元(1991)は、天草下島(以下、下島)西部のNNE–SSWトレンドの流紋岩岩脈に注目し、 σ_{Hmax} が琉球弧と平行であることに注意を促した。しかし応力の型(stress re-

gime), すなわち3本の主応力軸のどれが鉛直に近かったかについては言及しなかった。

しかし実際には、天草地方では他の方向の岩脈も知られている。山元(1991)が重視したのは陶石鉱床になっている変質した流紋岩岩脈で、戦前の7万5千分の1地質図(納富, 1930)や尾崎ほか(1975)、5万分の1天草炭田地質図(高井ほか, 1997)に数kmも続く岩体として描かれたものである。しかし表層地質図を見ると、下島北部にはNEトレンドとNWトレンドの安山岩ないし玢岩の岩脈が描かれており(岩崎ほか, 1992)、南部では数少ない流紋岩がNEトレンド、多くの安山岩がNWトレンドで貫入している(岩崎ほか, 1998)。天草上島(以下、上島)では、NEトレンドの流紋岩～安山岩岩脈が描かれている(豊原・長谷, 1991)。また、御所浦島からはE–WからNWトレンドの安山岩岩脈が報告されている(嶋村・塚脇, 1997)。上島の貫入岩の放射年代を検討した濱崎(1997)は、NWとNEの両トレンドの岩脈の存在を認めているが、岩脈よりも岩床のほうが多いと述べている。

天草地方は西南日本弧と琉球弧の会合部にあたり、日本海拡大、沖縄トラフ拡大の両方の影響を受けている可能性があるが、その構造発達史は明らかではない。貫入岩の母岩である始新統は九州の非付加体としては珍しく褶曲しており、褶曲の時期や原因が、広域テクトニクスの重要かつ未解明の問題としてある(松下, 1951; 高橋・三木, 1969; Ishikawa and Tagami, 1991; 酒井, 1993; Mashima, 2009; Miyazaki et al., 2016)。例えば、西南日本弧の回転のオイラー極を挟んで、隣接する日本海と九州西部がそれぞれ伸張状態と短縮状態だったという考えがある(Ishikawa and Tagami, 1991; 酒井, 1993)。その一方で、天草地方の約50km南南西に位置する甕島の始新統では、短縮テクトニクスは見られず、沖縄トラフ拡大に伴う伸張場による正断層運動とブロック回転が構造を支配している(藤内ほか, 2008; Tonai et al., 2011b)。天草地方に始新世と鮮新世の間の年代の地層がないことが、この問題の解決を困難にしている。

天草地方は、日本列島の新生代テクトニクスを解明する鍵となる地域である。そこでわれわれは、下島北部で地質図作成を進めつつ、貫入岩体の方向を記載してきた。その結果、既存研究の主張とは異なる方向の岩体が多いことを見出した。よって下島北部に認められる貫入岩体の方向データを提示し、応力解析を行った結果をここに報告する。なお、本論では貫入面が水平に近かったとしても、層理面と少しでも斜交する岩体は岩脈とする。

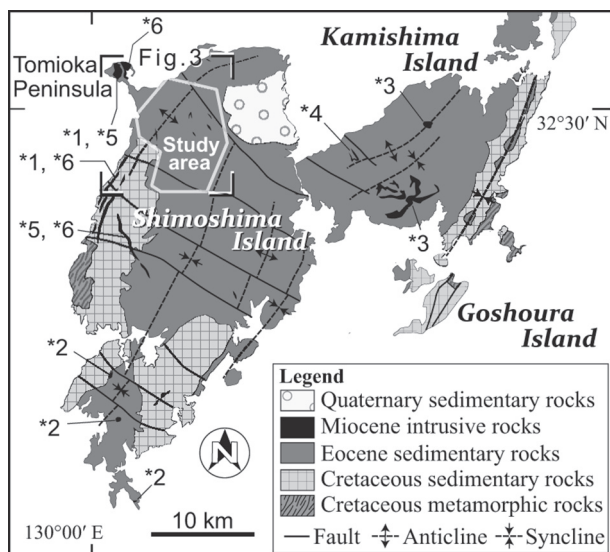


Fig. 1. Geological map of the Amakusa islands simplified from Saito et al. (2010). Numbers refer to radiometric ages of the intrusive bodies in Fig. 2.

2. 地質概説

今回対象としたのは、天草下島北部の^{れいほく}苓北町付近の始新統中に分布する貫入岩体である (Fig. 1). 基盤の白亜系姫浦層群中に貫入している岩体は調査対象としていない. この始新統は、下位から下島層群と坂瀬川層群からなる (高井・佐藤, 1982). 堆積年代は、前者の基底が石灰質ナンノ化石帯の CP13a, 後者の最上部が CP15b であって (Okada, 1992), それらは Yamaguchi et al. (2008) によると、それぞれ 46 Ma 頃と 36 Ma 頃に対比される. 始新統は NE~NNE トレンドの褶曲構造をなす (高井ほか, 1997). 本調査の範囲では、NNE トレンドで翼間角が 140° 程度の志岐山背斜がある. また、始新統は様々な方向の地質図規模の断層で切られてもいる. 本研究では同背斜の両翼から貫入岩体の方位データを得た. 背斜の両翼は 15~40° ほど傾いている. ただしデータ取得地点から離れたところでは、60° ほど傾くところもある.

天草地方の始新統中には花崗閃緑岩、流紋岩、石英斑岩、安山岩、斑れい岩、玄武岩と多様な岩質の貫入岩体がある. それらの放射年代は、次のとおりである (Fig. 2). 最も古い年代を示すのは、調査地域の北西側の^{とみおか}富岡半島の花崗閃緑岩で、 19.0 ± 0.9 Ma の黒雲母 K-Ar 年代が得られている (柴田・富樫, 1975). 同岩体のジルコンのフィッション・トラック年代は 13.2 ± 0.5 Ma である (三浦・大平, 2012). 同じ花崗閃緑岩でも上島のものからは 14.6 ± 0.3 Ma という黒雲母 K-Ar 年代が得られている (濱崎, 1996). 上島の石英斑岩と閃緑岩からは、それぞれ 16.7 ± 0.3 Ma および 15.4 ± 0.4 Ma という全岩 K-Ar 年代が報告されている (濱崎, 1996; 山本ほか, 1997). 下島南部の高 Mg 安山岩からは 14.2 ± 0.3 Ma の全岩 K-Ar 年代が得られている (永尾

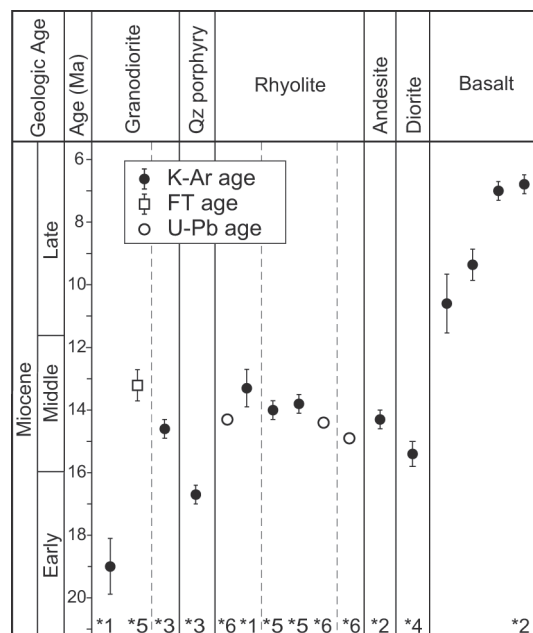


Fig. 2. Radiometric ages of intrusive rocks in the Amakusa islands. *1) Shibata and Togashi (1975); *2) Nagao et al. (1992); *3) Hamasaki (1996); *4) Yamamoto et al. (1997); *5) Miura and Ohira (2012); and *6) Ohira et al. (2012). Error bars indicate $\pm 1\sigma$.

ほか, 1992). また、山元 (1991) が注目した規模の大きい変質流紋岩岩脈からは 14.3 Ma と 14.4 Ma というジルコン U-Pb 年代が得られている (大平ほか, 2012). それに捕獲された砂岩のジルコンのフィッション・トラック年代として、三浦・大平 (2012) は 14.7 ± 0.7 Ma と 15.1 ± 0.9 Ma を報告している. 下島南部の玄武岩からは、この地域としては例外的に若い、約 7~11 Ma の後期中新世を示す 4 つの全岩 K-Ar 年代が得られている (永尾ほか, 1992). 天草地方の貫入岩体からはこのように中新世の放射年代が得られており、今回対象とした岩脈や岩床の年代も同様と考えられる.

3. 貫入岩およびその方向データ

調査地域において 76 枚の板状貫入岩体の方位を測定した (Figs. 3, 4). 測定位置におけるそれらの方向と母岩の方向のリストを Appendix 1 に示す. 母岩は下島層群^{ふくれき}福連木層から坂瀬川層群坂瀬川層までの層準で、どの層もよく成層した砂岩および頁岩からなる. 岩脈・岩床ともに見られるが、岩脈のほうが頻繁に見られる. 岩脈および岩床の地表調査で追跡できる長さは最長で 300 m 程度、幅は 0.5~9 m で 1.5 m 程度のものが最も多かった.

調査地域の貫入岩は安山岩質からデイサイト質ないし流紋岩質であるが、多くは強い熱水変質を被り淡緑灰色をなす. 変質した貫入岩は岩脈と岩床のどちらでも非常に細粒で肉眼では斑晶を確認できない. 鏡下では石英や斜長石の斑晶が認められ、石基は微細な斜長石からなる. 安山岩は、2 枚の岩床でのみ見られ、肉眼で長柱状の角閃石の斑晶が目立つ. 鏡下では斑晶として普通角閃石、斜長石がみられ、基質は細粒

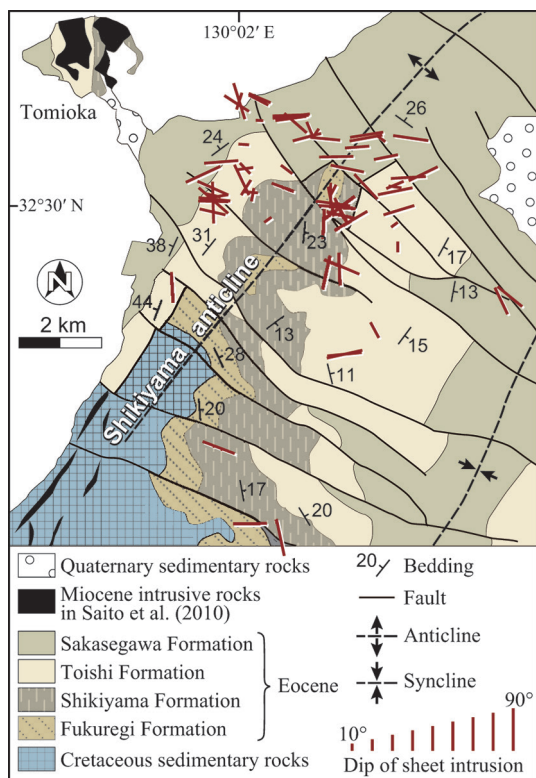


Fig. 3. Outcrops and trends of sheet intrusions in the study area. Bold bars indicate the trends of sheet intrusions and their lengths indicate dip angle. Geological map is simplified from Saito et al. (2010). Bedding data is from this study.

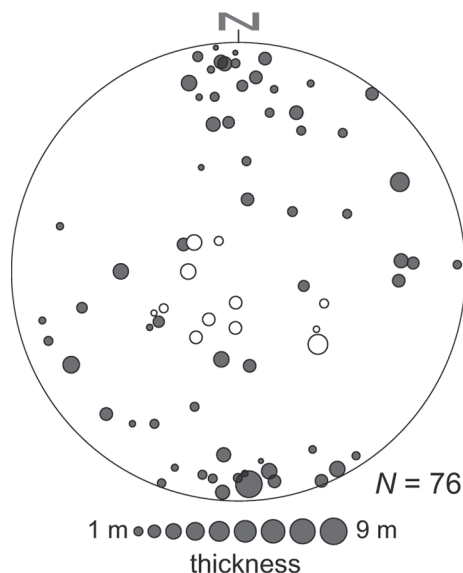


Fig. 4. Lower hemisphere equal-area projection of the poles to felsic sheet intrusions. Open circles indicate poles to sills and solid circles are poles to dikes. Sheet intrusions cutting bedding planes were regarded as dikes, irrespective of the angle between the sheet and the bedding plane. Circle size indicates intrusion thickness.

な斜長石で埋められている。これらのほか、変質が特に強いものは有色鉱物は全く見られず大半が白雲母と炭酸塩鉱物であるため、原岩を判断することが困難であったが、斜長石と石英が部分的に観察できることから、珧長質の岩石であることは判断できた。玄武岩の貫入岩体は、本調査範囲では見られなかった。

姿勢が直立に近い板状貫入岩体は、先行研究の主張とは異なり E-W 系が最も多い(Figs. 3, 4)。それに加えて NNW-SSE から NW-SE 系もまばらに見られた。また、姿勢が水平に近い岩体が多数見られたが、それらの多くは地層面を切って貫入するという意味で岩脈である。地層面に沿って貫入している岩床は 12 枚であった。

4. 古応力解析

4.1 方法

本研究では、64 枚の岩脈と 12 枚の岩床、あわせて 76 枚の岩体について応力解析を行った。応力解析には Yamaji and Sato (2011) の方法を使用した。この方法では、板状貫入岩体の極の分布に混合ビンガム分布をあてはめることで、岩体貫入時の 3 本の主応力軸 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) の方向と応力比 $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ を推定することができる。また岩体が複数の応力を記録しているなら、それらの応力を分離することができる。あてはめるクラスターの数を 1, 2, 3, ... と変えて解析を行い、ベイズ情報量基準(BIC)を最小とするクラスター数を検出すべき応力の数とした。解析には Yamaji (2016) のソフトウェア GArCMB (ver. 1.2) を使用した。

各クラスターは、それを構成する極の数とクラスターの拡がりという属性を持つ。極の数が全データに占める割合を 0~1 の数値で表すことにより α (当該クラスターの混合比) というシンボルをあてる。クラスターの拡がりには、 κ_1 と κ_2 という 2 つの集中度パラメータで表される。1 つの応力状態のもとでできた板状貫入岩体の極は σ_3 軸の方向を中心にクラスターをなすが、絶対値 $|\kappa_1|$ が大きいほど σ_3 軸から σ_1 軸方向にかけてのクラスターの拡がりは小さくなり、 $|\kappa_2|$ が大きいほど σ_3 軸から σ_2 軸方向にかけての拡がりが小さくなる。

マグマ圧が高いほど板状貫入岩体の極のばらつきは大きく、圧力が小さいほど極は σ_3 軸のまわりに集中するようになる。そこで極のばらつき具合から、無次元マグマ圧 $p = (p_f - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ を推定することができる (Jolly and Sanderson, 1995)。ただし p_f はマグマ圧である。 $p \approx 0$ の場合は、マグマの圧力は σ_3 を若干超える程度であり、 $p \approx 1$ の場合は σ_1 近くまで達していたことになる。しかし、一群の貫入岩体がすべて同時に貫入したとは限らず、一般には様々な圧力のマグマが次々に貫入し、一群の貫入岩体を形成したと考えられる (Yamaji et al., 2010)。多数の板状貫入岩体が複数の異なる圧力のマグマから形成されたとすると、それらの代表的な p 値は $3/|\kappa_1|$ (driving pressure index : DPI) という値で表される (Faye et al., 2018)。この値は、正確には多様な圧力値の 95 パーセンタイル点の近似である。DPI ≈ 0 の場合は、多くの貫入イベントでマグマ圧が σ_3 を若干上回る程度だったことを意味し、DPI ≈ 1 の場合はマグ

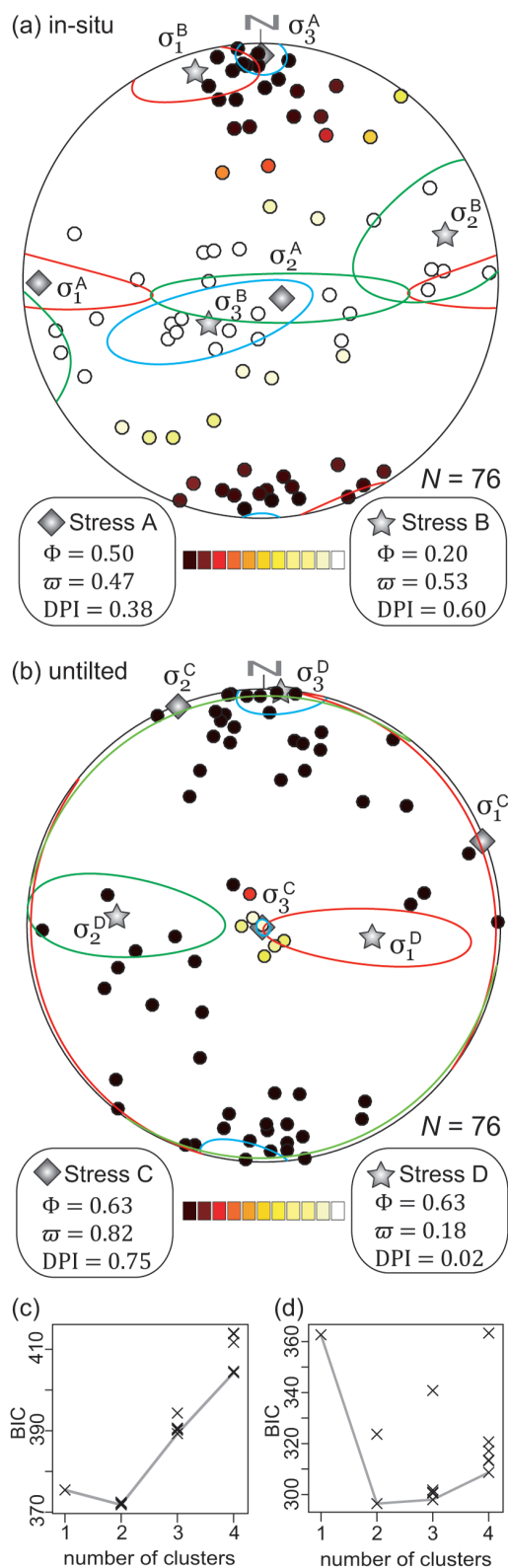


Fig. 5. Results of paleostress analysis of the attitudes of the sheet intrusions in Fig. 3. (a, b). Lower hemisphere equal-area projections of (a) in-situ and (b) untitled data sets with principal axes and their 95% confidence regions of optimal stresses. Data point color indicates the membership of the data. (c, d) Bayesian information criterion (BIC) versus the number of clusters of poles to sheet intrusion data.

マ圧が σ_1 に迫るほど大きかったことを意味する。

天草地方の褶曲形成と火成活動の前後関係は明らかでなく、貫入時に地層がどれほど傾動していたか不明である。そのため、褶曲後の貫入を想定した、貫入岩体の現姿勢での解析結果 (Fig. 5a) と、その逆の想定で傾動補正したデータによる結果 (Fig. 5b) を併記する。補正には貫入岩直近の地層の走向方向を回転軸とし、その地層が水平に戻るよう、貫入岩の極を回転した。応力解析では岩脈と岩床を区別せず、この補正と応力解析を行った。なお、岩床はこの補正により必然的に水平になる。

4.2 傾動補正しない場合

傾動補正を行わない in-situ の場合の結果 (Fig. 5a) は、クラスター数が2つのときに BIC が最小になったので (Fig. 5c), データを2群に分けるのが妥当と判断された。1つ目のデータ群は極が水平で N-S 方向に集中するものである。2つ目のデータ群は大円ガードル状に極が分布するもので、大円の極は水平で NNW-SSE 方向にある。それら2群の混合比はそれぞれ 0.47 と 0.53 であった。それらが示す応力をそれぞれ応力 A と応力 B とする。応力 A の応力比は 0.50 で σ_2 軸がほぼ直立、 σ_3 軸が N-S で水平であった。すなわち、横ずれ断層型応力である。DPI は 0.38 であるから、代表的マグマ圧は σ_1 と σ_3 の中間より少し小さかったことになる。もう一方の、極が大円ガードルをなす群から検出された応力 B は、応力比が 0.20 と軸性圧縮に近い応力で、 σ_1 軸が水平で NNW-SSE 方向、 σ_3 軸が WSW-ESE 方向に高角で傾く。軸性圧縮に近いので、それら2軸の誤差楕円は大きい。しかし σ_3 軸が高角なので、逆断層型に近い応力である。DPI は 0.60 であるから、代表的マグマ圧は差応力の 60% ほどだったことになる。

4.3 傾動補正した場合

傾動補正を施したデータセットでは、当然のことながら岩床および地層を低角で切る岩脈がステレオネット中央に密集したクラスターをなすことになる (Fig. 5b)。応力解析の結果、データは2群に分けられ (Fig. 5d), 全データの 18% がステレオネット中央のクラスターに属し、残りの 82% がもう一つのクラスターに属することになった。それらのクラスターが示す応力を、それぞれ応力 D と応力 C とする (Fig. 5b)。応力 C で説明できる岩体の極が Fig. 5b では濃い色の丸で示されているが、それらは大きなばらつきを持つ。それに応じて DPI が 0.75 と高かった。応力比は 0.63 で、 σ_3 軸が水平で N-S 方向だが、他の2軸は誤差楕円が大きいものの、中間的なプランジ角を示した。応力 D は傾動補正により水平または水平に近くなった岩体を説明するものである。クラスター中心に σ_3 軸が方向付けられるという応力解析の性質により、応力 D の σ_3 軸は鉛直である。他の2軸は誤差楕円が大きいものの、中間的なプランジ角を示していた。応力比は 0.63 と中間的であり、DPI は 0.02 と小さかった。

4.4 解釈

傾動補正をしてもしなくても、板状貫入岩体の極は水平で N-S 方向に集中する (Fig. 5a, b)。これは、この地域の褶曲軸が NNE-SSW 方向であるため、貫入面がそれと直交に

近い岩脈では傾動補正による姿勢の変化が小さいからである。言い換えると、傾動補正すべきかどうかに関わりなく、この地域の少なくとも半分程度の貫入岩体は、 σ_3 軸が N-S 方向の状況で貫入したと言える。

褶曲後の応力 A, B のうち、どちらのもとで形成された貫入岩体であるかが、Fig. 5a では色のグラデーションで示されている。この図で黒丸と白丸は、それぞれ応力 A と Bのもとで貫入した可能性が極めて高い岩体であることを示す。中間的な色の丸印は、どちらのもとで貫入したをはっきりと結論できないことを示す。黒丸と白丸に対応する岩体のあいだで切断関係がみられれば、応力 A と B の時間的前後関係を制約できるが、現段階ではそうした関係は観察できていない。

5. 議 論

5.1 貫入年代

今回対象とした岩脈や岩床から放射年代は得られていないが、天草地方の貫入岩体の年代データからは、それらの形成年代が以下の理由から大雑把に 14~17 Ma と推定される。天草地方の流紋岩や安山岩から報告されている放射年代は 14~15 Ma に収まり、また石英斑岩の K-Ar 年代は 16.7 Ma である (Fig. 2)。ただし、富岡半島の花崗閃緑岩は K-Ar 年代で 19 Ma と例外的に古い値をしめす。これについては、1970 年代の古い K-Ar 年代値であり、さらに試料採取地点がやや風化したカッティングとされていることから (柴田・富樫, 1975)、再検討を要するものである。したがって貫入したのは、古くても石英斑岩の示す 17 Ma 頃だと考えられる。

5.2 貫入岩体の卓越方向

本研究の調査範囲において岩脈の卓越方向は E-W であった (Figs. 3, 4)。これはどの先行研究の結果とも異なる。新第三紀の岩脈のトレンドの研究といえば、日本列島の広域でそれを総括した山元 (1991) が挙げられる。山元 (1991) が天草地域で注目した NNEトレンドの陶石化した流紋岩岩脈は、高井ほか (1997) の炭田地質図によると、本調査範囲の南南西約 5 km の下島西岸に沿って 6 枚程度分布する。しかし、本調査の範囲ではそうした方向の岩脈はほとんど見られなかった。同様に陶石化した流紋岩岩脈として、既存研究では NW~NNWトレンドのものが同じくらいの数、下島中央部に報告されている (例えば、高井ほか, 1997)。また高井ほか (1997) によると、陶石化した流紋岩脈の厚さは 4~15 m で平均が 7~8 m とされるが、本調査地域の岩脈にも同程度の厚さで東西走行の岩脈が存在する (Fig. 4)。つまり、天草地域の岩脈群の代表的トレンドが NNE 方向という説を支持することはできない。

山元 (1991) が注目した下島西部の流紋岩脈は厚いだけでなく、数 km も追跡できる点で目立った存在である。本調査地域では、厚い岩体でもそれほどの連続性が見られない。応力を考える際、この違いは次の理由で無視できる。一般に、岩脈の形成で母岩は岩脈と直交方向に伸張する。そしてその歪み量は、岩脈の幅と面積に比例する (例えば、山路,

2016)。応力と歪みは異なるカテゴリーに属するので、応力と歪みの主軸の平行性が常に成り立つわけではない。また、厚さに関しては、本調査地域にも異なるトレンドで同等の厚さの岩脈が多数存在し、薄いものでも数が多ければ歪みへの寄与は無視できなくなる。したがって、厚くて連続性が良いことが、必ずしも地域を代表する岩脈の資格にはならないわけである。この理由のため、既存の地質図から岩脈のトレンドを読み取り、当該地域の岩脈の代表的トレンドとすることには危険性がある。薄くて地質図には描かれない規模の岩脈でも、数が多ければテクトニックに意味がある。したがって、岩脈形成時の応力や歪みを考えるには、本研究のように、小規模な岩体まで網羅するような調査が必要である。既存の天草地域の地質図には多数の板状貫入岩体が描かれているが、本研究のように高い精度で板状貫入岩体の調査をした先行研究はない。そのため、それらの岩体がどのような応力を意味するのかについては議論することができない。

上述の意味で天草の各地域での代表的な岩脈のトレンドは、本調査地域以外では不明である。しかし天草地方全体でみると、それらの岩脈群は富岡半島の花崗閃緑岩体 (Fig. 3) を中心として放射状をなす可能性が今のところ否定できない。調査地域の貫入岩の代表的方向は E-W であり、天草下島西岸では NNEトレンドの流紋岩脈がある。それぞれの延長部に花崗閃緑岩体が位置しており (Fig. 3)、これらを放射状岩脈と捉えることもできるからである。また、下島中央部に NWトレンドの流紋岩脈があることも、放射状岩脈の様相を呈することと調和的である。そうした放射状岩脈であれば、前節で紹介した、 σ_3 軸が南北という応力解析の結果はローカルな応力ということになる。そうであるかどうかは、天草の他地域の研究の進展を待って判断する必要がある。

5.3 天草地方のテクトニクス

調査地域の貫入岩体は流紋岩から安山岩質であり、その貫入年代は前述したように 14~17 Ma と推定される。褶曲時期については制約がさらに緩く、始新統の最上位層の堆積年代 (約 36 Ma) から下島南部の鮮新統牛深溶結凝灰岩の堆積年代 (約 3 Ma) までとしか言えない。高井・佐藤 (1982) によると、褶曲に参加し傾いた始新統を同凝灰岩が水平に被覆するという。同凝灰岩は、天草下島南東にある長島に分布する鳴瀬鼻溶結凝灰岩と対比されており、そこからは 3.2 ± 0.3 Ma のジルコンのフィッシュン・トラック年代が得られている (長谷ほか, 1984)。このことから、同凝灰岩の堆積年代は 3 Ma 頃と考えられる。

貫入と褶曲の前後関係を積極的に示す証拠はこれまでのところないが、本研究の解析結果は、どちらかといえば褶曲後の貫入を支持する。その 3 つの理由を以下に述べる。まず、地殻浅部では 3 本の主応力軸のうち 1 本は鉛直と仮定できる (Anderson, 1905, 1951)。この条件を、傾動補正しない場合に検出された 2 つの応力 A, B はともに満たしている。一方で傾動補正した場合、応力 C では σ_1 軸の 95% 誤差楕円の端がころうじて鉛直方向にかかるに過ぎない。応力 D の σ_3 軸が鉛直になるのは傾動補正の必然的結果であって、主応力軸の 1 本が鉛直であることを示すわけではない。す

なわち、この応力は人為的な操作の結果である。第二の理由は極の分布の対称性である。均一な岩体に貫入した岩脈の極の方位分布は、最大集中方向を主軸とする直方対称になるべきである (Baer et al., 1994; Jolly and Sanderson, 1995)。応力 A, B で説明される極の分布 (Fig. 5a の黒丸と白丸の分布) は直方対称であるが、応力 C で説明される極の分布 (Fig. 5b の黒丸の分布) はそうではなく、最大集中方向が分布の端に偏っている。ゆえに、傾動補正後の結果はやはり人為的な操作の結果を示しているにすぎないと考えられる。第三に、本調査地域の東方の天草上島北部で小断層解析を行った Tonai et al. (2011a) は、褶曲前に NE-SW 方向の σ_3 軸をもつ正断層応力が働いていたとした。しかし、本研究の傾動補正して褶曲前の状態に戻したデータセットから、そのような応力は検出されなかった (Fig. 5b)。このことも、褶曲後に火成岩体の貫入が生じたことを弱いながら支持する。

天草の褶曲構造は、NW トレンドの多数の断層で切られている (高井・佐藤, 1982; 高井ほか, 1997)。そうした断層の存在は、われわれも本調査地域で確認している。それらの断層の多くは横ずれ断層とされているが、根拠は示されていない (高井・佐藤, 1982; 高井ほか, 1997)。今回検出された応力 A は、これら多数の断層を左横ずれさせる応力である。応力 C も同様の変位を生じさせる。この点で、応力 A と応力 C は、NW トレンドの断層を横ずれ断層とする考えと調和的である。しかし、筆者らが知る限りこれまでに NW-SE 系について断層条線の方向などの記載はない。同じ NW トレンドでも傾斜の向きや度合いによりスリップ方向は変わりうるので、断層条線などでそれを実際に確認し、どの応力で NW トレンドの断層群が動いた可能性が高いか、今後の検証が必要である。

5.3 広域テクトニクス

天草地方の褶曲は、日本海拡大に伴ってできたという説がある (Ishikawa and Tagami, 1991; 酒井, 1993)。本研究の板状貫入岩体は、まさにこの日本海拡大期に形成されたものである。しかし、今回見出された 4 種類の応力は、どれも NE~NNE トレンドの褶曲形成とは不調和である。つまり、褶曲と貫入の時期が異なることを示唆している。前節で触れたように、応力解析の結果は、どちらかという褶曲後の貫入を示唆する。すなわち、褶曲は中新世初期以前にできた可能性が指摘できる。

天草と鹿児島県甑島に分布する白亜系と始新統は互いに対比できるとされるが、甑島の岩脈と小断層から報告されている応力はともに NE 方向と WNW 方向の引っ張りであって (藤内ほか, 2008; Tonai et al., 2011b)、本研究で得られた σ_3 軸が N-S 方向の応力とは違いがある。両地域で白亜系と始新統が同じテクトニクスのもとで堆積したにせよ、約 36 Ma 以後は異なるテクトニクスを経験した可能性がある。

謝 辞

現地では天草ゲストハウス Spring および九州大学天草臨海実験所の方々に大変お世話になった。天草市立御所浦白亜紀資料館の鶴飼宏明氏には、地質調査に際して様々な便宜を

図っていただいた。京都大学理学研究科の河上哲生先生には貫入岩体の薄片を観察していただいた。また、匿名査読者の指摘により原稿を改善することができた。本研究には、2019 年度深田野外調査助成および JSPS 科研費 15H02141 を使用した。記して感謝の意を表する。

文 献

- Anderson, E. M., 1905, The dynamics of faulting. *Trans. Edinburgh Geol. Soc.*, **8**, 387-402.
- Anderson, E. M., 1951, *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain*, 2nd ed. Oliver and Boyd, London, 206p.
- Baer, G., Beyth, M. and Reches, Z., 1994, Dikes emplaced into fractured basement, Timna Igneous complex, Israel. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth* **99**, 24039-24051.
- Faye, G. D., Yamaji, A., Yonezu, K., Tindell, T. and Watanabe, K., 2018, Paleostress and fluid-pressure regimes inferred from the orientations of Hishikari low sulfidation epithermal gold veins in southern Japan. *J. Struct. Geol.*, **110**, 131-141.
- 濱崎聡志, 1996, 熊本県天草地域の火成活動とセリサイト化熱水変質作用の K-Ar 年代。地調月報, **47**, 201-207. [Hamasaki, S., 1996, K-Ar ages of igneous and sericitic alteration in the Amakusa area, Kumamoto prefecture, southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **47**, 201-207.]
- 濱崎聡志, 1997, 熊本県天草地域の火成活動の K-Ar 年代と九州内帯・外帯における中新世マグマ活動のレンジの比較。資源地質, **47**, 121-129. [Hamasaki, S., 1997, K-Ar ages of igneous activity in the Amakusa area, Kumamoto prefecture: an investigation of Miocene magmatic activity in the inner and outer zone of Kyushu, southwest Japan. *Shigen-Chishitsu*, **47**, 121-129.]
- 長谷義隆・長峰 智・永尾隆志・山元正継・藤林紀枝・阪口和之・半田正敏, 1984, 南部九州長島火山岩類の層序と放射年代。地質学論集, **24**, 109-120. [Hase, Y., Nagamine, S., Nagao, T., Yamamoto, M., Fujibayashi, N., Sakaguchi, K. and Handa, M., 1984, Stratigraphy and radiometric ages of Nagashima volcanic rocks in southern Kyushu. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **24**, 109-120.]
- Ishikawa, N. and Tagami, T., 1991, Paleomagnetism and fission-track geochronology on the Goto and Tsushima Islands in the Tsushima strait area: Implications for the opening mode of the Japan Sea. *J. Geomagn. Geoelec.*, **43**, 229-253.
- 岩崎泰頼・豊原富士夫・長谷義隆, 1992, 本渡・口之津・高浜 (5 万分の 1 表層地質図)。熊本県。[Iwasaki, Y., Toyohara, F. and Hase, Y., 1992, *Subsurface Geological Map, Hondo, Kuchinotsu and Takahama*. Kumamoto Prefecture.]
- 岩崎泰頼・豊原富士夫・長谷義隆, 1998, 牛深・魚貫崎・阿久根 (5 万分の 1 表層地質図)。熊本県。[Iwasaki, Y., Toyohara, F. and Hase, Y., 1998, *Subsurface Geological Map, Ushibuka, Onikizaki and Akune*. Kumamoto Prefecture.]
- Jolly, R. J. H. and Sanderson, D. J., 1995, Variation in the form and distribution of dykes in the Mull swarm, Scotland. *J. Struct. Geol.*, **17**, 1543-1557.
- Mashima, H., 2009, A melting anomaly in northwest Kyushu, southwest Japan: A consequence of the tectonic evolution of NW Kyushu and the origin of a pseudo hot spot in a convergent zone. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **186**, 195-209.
- 松下久道, 1951, 九州北部炭田の地質構造。九大理研報 (地質学之部), **3**, 49-54. [Matsushita, H., 1951, On the geological structure of the northern Kyushu coal-fields. *Sci. Rep. Fac. Sci. Kyushu Univ. Geol.*, **3**, 49-54.]
- 三浦千佳・大平寛人, 2012, 熊本県天草地域の陶石脈の変質作用とフィッション・トラック年代。フィッション・トラックニュースレター, **25**, 46-49. [Miura, C. and Ohira, H., 2012, Alter-

- nation and zircon fission track ages of pottery stone deposits in the Amakusa area, Kumamoto prefecture. *Fission Track Newsl.* **25**, 46–49.]
- Miyazaki, K., Ozawa, M., Saito, M. and Toshimitsu, S., 2016, The Kyushu-Ryukyu arc. In Moreno, T., Wallis, S. R., Kojima, T. and Gibbons, W., eds., *The Geology of Japan*. *Geol. Soc. London*, 139–174.
- 長尾 巧, 1922, 天草の地質略報(二). 地質雑, **29**, 90–100. [Nagao, T., 1922, Outline of the geology of Amakusa, II. *J. Geol. Soc. Japan*, **29**, 90–100.] *
- 永尾隆志・沢井長雄・板谷徹丸・角縁 進, 1992, 熊本県, 天草下島のソレライト質玄武岩と高マグネシア安山岩の K–Ar 年代. 岩鉱, **87**, 283–290. [Nagao, T., Sawai, O., Itaya, T. and Kakubuchi, S., 1992, K–Ar ages and petrologic characteristics of the tholeiitic basalts and high-magnesian andesite from Amakusa-Shimoshima, Kumamoto Prefecture, SW Japan. *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **87**, 283–290.]
- 中村一明, 1989, 火山とプレートテクトニクス. 東京大学出版会, 323p. [Nakamura, K., 1989, *Volcanoes and Plate Tectonics*. Univ. Tokyo Press, 323p.]
- 納富重雄, 1930, 7 万 5 千分の 1 地質図幅「天草」. 地質調査所. [Nōtomi, S., 1930, *Geological Map of Japan, 1: 75,000*, Amakusa. *Geol. Surv. Japan*.]
- 大平寛人・三浦千佳・田村明弘・荒井章司・竹内浩一・田口幸洋, 2012, 天草陶石鉱床の熱水変質作用とジルコンの放射年代. 日本地質学会第 119 年学術大会講演要旨, 196. [Ohira, H., Miura, C., Tamura, A., Arai, S., Takeuchi, K. and Taguchi, Y., 1980, Hydrothermal alteration and radiometric age of zircon from the Amakusa pottery stone deposit. *119th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 196.]
- Okada, H., 1992, Calcareous nannofossils and biostratigraphy of the Paleogene sequences of the northern Kyushu, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **98**, 509–528.
- 尾崎正陽・渡辺 隆・福成治賀子, 1975, 天草下島萱の木付近の変質流紋岩(陶石)脈および周辺変質母岩中にみられる粘土鉱物. 岩鉱, **70**, 33–46. [Ozaki, M., Watanabe, T. and Fukunari, C., 1975, Clay mineral in the altered rhyolite dikes and their country rocks in the Kayanoki area, Amakusa County, Kumamoto Prefecture. *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **70**, 33–46.]
- 斎藤 眞・宝田晋治・利光誠一・水野清秀・宮崎一博・星住英夫……村田泰章, 2010, 20 万分の 1 地質図幅「八代および野母崎の一部」. 地質調査総合センター. [Saito, M., Takarada, S., Toshimitsu, S., Mizuno, K., Miyazaki, K., Hosizumi, H., Murata, Y., 2010, *Geological Map of Japan, 1: 200,000, Yatsushiro and a Part of Nomozaki*. *Geol. Surv. Japan*.]
- 酒井治孝, 1993, 北部九州の第三紀堆積盆地のテクトニクスと堆積作用. 地質学論集, **42**, 183–201. [Sakai, H., 1993, Tectonics and sedimentation of the Tertiary sedimentary basins in the northern Kyushu. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **42**, 183–201.]
- 柴田 賢・富樫幸雄, 1975, 熊本県天草下島西部に分布する酸性火山岩類の K–Ar 年代. 地調月報, **26**, 187–191. [Shibata, K. and Togashi, Y., 1980, K–Ar ages of some acidic igneous rocks from the western part of Amakusa-Shimoshima Island, Kumamoto Prefecture, southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **26**, 187–191.]
- 嶋村 清・塚脇真二, 1997, 御所浦町を歩く: 御所浦町地質ガイド. 御所浦の地質, 御所浦町全島博物館構想推進協議会刊, 56p. [Shimamura, K. and Tsukawaki, S., 1997, *Geological Guide to Goshoura. Geology of Goshoura*, Goshoura-Cho Zento Mus. Promotion Council, Kumamoto, 56p.] *
- 高橋良平・三木 孝, 1969, 天草炭田の造構造運動と石炭化作用. 燃料協会誌, **48**, 861–868. [Takahashi, R. and Miki, T., 1969, Structural movements and coalification of the Amakusa coal. *J. Fuel Soc. Japan*, **48**, 861–868.]
- 高井保明・佐藤博之, 1982, 魚貫崎及び牛深地域の地質(阿久根地域の一部を含む). 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 87p. [Takai, Y. and Satoh, H., 1982, *Geology of the Onikizaki and Ushibuka District(Including a Part of the Akune District)*. Quadrangle Series, 1: 50,000, *Geol. Surv. Japan*, 87p.]
- 高井保明・坊城俊厚・原田種成, 1997, 熊本県天草炭田の地質及び石炭鉱床. 日本炭田図 14 天草炭田地質図説明書, 地質調査所, 77p. [Takai, Y., Bojo, T. and Harada, T., 1997, *Geology and Coal Deposits in the Amakusa Coal Field. Geological Map of the Coal Field in Japan 14, Explanatory Text on the Geology of the Amakusa Coal Field*, *Geol. Surv. Japan*, 77p.]
- 藤内智士・大岩根 尚・清川昌一, 2008, 鹿児島県甕島列島北部の地質構造と古応力解析. 地質雑, **114**, 547–559. [Tonai, S., Oiwan, H. and Kiyokawa, S., 2008, Geologic structure and paleostress analysis in the Northern part of Koshikijima Islands, West Kyushu, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **114**, 547–559.]
- Tonai, S., Sato, K. and Ashi, J., 2011a, Incremental fold test for paleostress analysis using the Hough transform inverse method. *J. Struct. Geol.*, **33**, 1158–1168.
- Tonai, S., Suganuma, Y., Ashi, J., Itaya, T., Oiwan, H. and Kiyokawa, S., 2011b, Differential timing of vertical-axis block rotations in the northern Ryukyu Arc: Paleomagnetic evidence from the Koshikijima Islands, Japan. *Tectonophysics*, **497**, 71–84.
- 豊原富士夫・長谷義隆, 1991, 三角・教良木・水俣(5 万分の 1 表層地質図). 熊本県. [Toyohara, F. and Hase, Y., 1997, *Subsurface Geological Map, Misumi, Kyoragi and Minamata*. Kumamoto Prefecture.]
- Yamaguchi, T., Tanaka, Y. and Nishi, H., 2008, Calcareous nannofossil and planktonic foraminiferal biostratigraphy of the Paleogene Iojima Group in the Takashima coalfield, Nagasaki Prefecture, southwest Japan. *Paleontolog. Res.*, **12**, 223–236.
- 山路 敦, 2012, 岩脈法発展史. 地質雑, **118**, 302–311. [Yamaji, A., 2012, A historical review of the methods for inferring paleostress from dike orientations. *J. Geol. Soc. Japan*, **118**, 302–311.]
- 山路 敦, 2016, 歪み解析と変形解析の数理: 2. 微小変形とその地質学的計測. 地質雑, **122**, 551–562. [Yamaji, A., 2016, Lecture note on the theories of strain and deformation analyses: 2. Infinitesimal deformations and their geological measurements. *J. Geol. Soc. Japan*, **122**, 551–562.]
- Yamaji, A., 2016, Genetic algorithm for fitting a mixed Bingham distribution to 3D orientations: a tool for the statistical and paleostress analyses of fracture orientations. *Isl. Arc*, **25**, 72–83.
- Yamaji, A. and Sato, K., 2011, Clustering of fracture orientations using a mixed Bingham distribution and its application to paleostress analysis from dike or vein orientations. *J. Struct. Geol.*, **33**, 1148–1157.
- Yamaji, A., Sato, K. and Tonai, S., 2010, Stochastic modeling for the stress inversion of vein orientations: paleostress analysis of epithermal veins in southwestern Kyushu, Japan. *J. Struct. Geol.*, **32**, 1137–1146.
- 山元孝広, 1991, 日本列島の後期新生代岩脈群と造構造力場. 地調月報, **42**, 131–148. [Yamamoto, T., 1991, Late Cenozoic dike swarms and tectonic stress field in Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **42**, 131–148.]
- 山本温彦・新田和也・西戸裕嗣, 1997, 熊本県天草上島の新第三紀貫入岩類の化学的特徴. 日本地質学会第 104 年学術大会講演要旨, 262. [Yamamoto, M., Nitta, K. and Nishido, H., 1997, Chemical characteristics of the Neogene intrusive rocks in the Amakusa-Kami-shima Island, Kumamoto prefecture. *104th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 232.]

* English translation from the original written in Japanese.

以下の Appendix は、オープンファイルとして学会ホームページ上で公開しています。 <<http://www.geosociety.jp/publication/content0006.html>>

Appendix 1. Locations and orientation data (dip direction and dip) for sheet intrusions and bedding.

(著者プロフィール)

牛丸健太郎 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士課程。19 年 京都大学理学部卒。研究内容：新生代堆積盆テクトニクス。本研究では、地質調査・応力解析・原稿執筆を担当。E-mail : ushimaru.kentaro.73w@st.kyoto-u.ac.jp.

山路 敦 京都大学大学院理学研究科教授。88 年 東北大学大学院理学研究科博士課程修了(理学博士)、10 年から現職。研究内容：構造地質学・テクトニクス。本研究では、企画立案・議論および作文指導を担当。E-mail : yamaji@kueps.kyoto-u.ac.jp, URL : www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-bs/yamaji/index.htm.

科学論文では、学説の検証可能性を保証することが重要です。そのため、地質学雑誌掲載論文には、重要な証拠となった試料がどこで得られたかを示しているものがあります。言うまでもないことですが、見学や採取を行う場合、各自の責任において地権者や関係官庁への連絡と許可の取得の必要があることにご注意下さい。詳しくは、以下のサイトをご覧ください。

<http://www.geosociety.jp/publication/content0073.html>

一般社団法人日本地質学会