

西南日本外帯，四国沖ノ島花崗岩類に発達する引張り節理系：新第三紀後期の四万十帯の広域応力場について

茂野，博
地質調査所・地殻熱部

<https://doi.org/10.15017/4495882>

出版情報：九州大学理学部研究報告．地質学．13 (2)，pp.145-153，1980-02-29．九州大学理学部
バージョン：
権利関係：

西南日本外帯，四国沖ノ島花崗岩類に 発達する引張り節理系

—新第三紀後期の四万十帯の広域応力場について—

茂 野 博*

Tension joint system prevailing in the Okinoshima granitic rocks,
Shikoku, Southwest Japan
—On the regional stress field of the
Shimanto belt during the late Neogene—

Hiroshi SHIGENO

Abstract

The granitic rocks of Okinoshima islet in the Shimanto belt, Outer zone of Southwest Japan, are characterized by the prevalence of the two joint sets crossing perpendicularly each other, i.e. one strikes N60°E and the other N30°W both dipping vertically, as SUWA (1967) described. The topography of Okinoshima islet is strongly affected by the joint sets. The detailed form of the joint sets are shown on the plates 9 and 10.

Some published papers appear to show that in the granitic rocks of Minamiosumi and Yakushima distributed in the Shimanto belt as well as in those of Okinoshima, the two sets of vertical joints generally exist, i.e. one is nearly parallel and the other is nearly perpendicular to the Southwest Honshu arc or the Nanseishoto arc. The former set inclines to be slightly more dominant than the latter.

From the distribution and the mode of occurrence of the joint sets, it is concluded that they are not the result of the tensional stress caused by cooling contraction of the granitic rocks, nor by the shear stress caused by regional compressional stress field, but are formed mainly by the regional tensional stress at shallower level of underground in the period of regional uplift and erosion.

Moreover, from the inclination of the dominant joint set, it is inferred that the perpendicular direction to the arcs, to which the axis of the maximum principal compressional stress had been parallel in the period of subsidence, deposition and deformation from Cretaceous to Paleogene, was coincident with the direction of the axis of the minimum principal compressional stress in the period of uplift and erosion during the late Neogene, after the intrusion and solidification of the granitic rocks in the Shimanto belt.

In relation to geothermal resources, the possibility is mentioned that tension joint systems developed in granitic rocks etc., are important as flow paths and/or reservoirs of geothermal fluids.

I. はじめに

最近，地震予知とも関連して，様々な角度から日本

のテクトニクスの研究が精力的に進められている（たとえば，笠原・杉村，1978；中村，1969；衣笠ほか，1969；伊藤ほか，1976）。日本に広く分布する，様々な時代の様々な種類の花崗岩類について，節理系の解析をおこなうことは（たとえば，平林，1965；HIRANO,

1969; 横田, 1974), 過去の広域応力場の変遷を解明するための有力な情報源になる可能性がある。

一方, 地熱エネルギー開発の一環として, 最近アメリカ合衆国を中心に, 地下深部の花崗岩類など“乾燥した”高温岩体に水圧破砕法によって大規模に断裂系を造り, これに注水して人工の熱水系として利用する技術が研究されている(たとえば, SMITH *et al.*, 1975). このような人工的な断裂系と, 天然において最も普遍的な断裂系である節理系との形態および生成条件の差異は, 興味深い問題である。

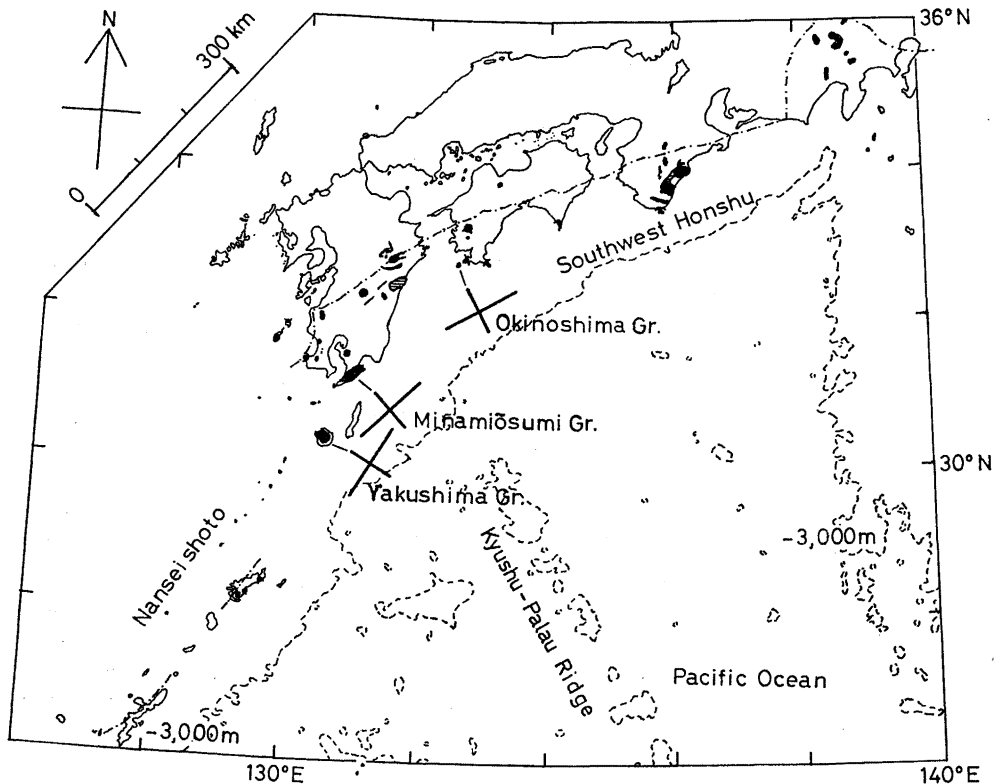
日本の花崗岩類の分布地域に湧出する温泉は, 花崗岩類を熱源としている場合は少ないようであるが(笹田, 1978), 花崗岩類と被貫入岩との境界あるいは花崗岩類, 被貫入岩の節理系などの断裂系が, 地下浅部では熱水の通路となり, 地下深部では熱水の貯留層となっている可能性がある。

このような意味から, 花崗岩類などに発達する節理

系について, 今後体系的に研究を進めていく必要があると考えられる。

西南日本外帯の四万十帯には, 中新世に活動した花崗岩類が散点的に, しかしある規則性をもって分布している(野沢, 1975)〔第1図〕. これらの花崗岩類のいくつかには, ほぼ直交する2方向の垂直な節理系が非常によく発達していることが報告されている(諏訪, 1967; 野沢・太田, 1967; 佐藤・長浜, 1979). しかし, これらの節理系の成因については, 現在まで十分に議論されていないように思われる。

著者は, 1974年の8月, ごく短期間ではあるが四万十帯に分布する花崗岩類のうち, 四国の沖ノ島花崗岩類についてその節理系を観察する機会を持った. この報告は, 調査当時の記録と考察をもとに, 沖ノ島花崗岩類に発達する節理系の形態を写真で示し, その成因について述べるものである. また, これに関連して, 四万十帯に分布する花崗岩類のうち南大隅および屋久



第1図 西南日本外帯および南西諸島における新第三紀の花崗岩類および酸性火山岩の分布
 黒色部は花崗岩類, 花崗斑岩およびはんれい岩, 横線部は酸性火山岩の分布. ただし, 奄美大島の花崗岩類は古第三紀前期に活動. 一点鎖線より南側は四万十帯(広川ほか, 1978; 野沢, 1968). 沖ノ島, 南大隅および屋久島花崗岩類につけられた十字は, 垂直な節理系が発達する方位を示す. 十字線の長い方向は, 島弧にほぼ平行な節理系の方向である. 地形は, 国土地理院(1973)による.

島花崗岩類の節理系と、花崗岩類の貫入・固結後の広域応力場との関係について、若干の議論をおこなうものである。

ところで、現在の南大隅および屋久島花崗岩類は南西諸島弧に属しており、西南日本弧に属している沖ノ島花崗岩類との間には、海底地形や地質構造に明らかな折れ曲りが認められ、折れ曲りの部分には特異的なプーグ低重力異常が広がっていて (TOMODA, 1973), そこから南東方向へ九州一パオラ海嶺が伸びている〔第1図〕。このような場をまとめて論じることには問題があるかもしれないが、ここでは一括して四万十帯として議論することをおこわりしておく。

広域応力場の主応力については、この報告を通して、最大圧縮主応力を σ_1 、中間圧縮主応力を σ_2 、最小圧縮主応力を σ_3 と定める。この3主応力の1つがほぼ垂直方向にあると仮定して、垂直方向の圧縮主応力を σ_v 、水平方向の圧縮主応力のうち大きい方を σ_{H1} 、小さい方を σ_{H2} と定義しておく。

この報告をまとめるにあたり、岩石学の初歩と深遠とを著者に教授して下さった恩師である、種子田定勝先生に感謝の意を捧げる。

沖ノ島における現地調査は、今増俊明氏と共同でおこなわれた。調査当時、研究を進めるにあたり中牟田義博、浜本礼子両氏には、問題点について啓発していただいた。地質調査所の野沢保、笹田政克両氏には、草稿について様々な御批判をいただいた。この報告をまとめることをお勧めいただいた山口勝先生には、詳細に問題点を指摘していただくなど様々な御手数をおかけした。以上の方々に感謝いたします。

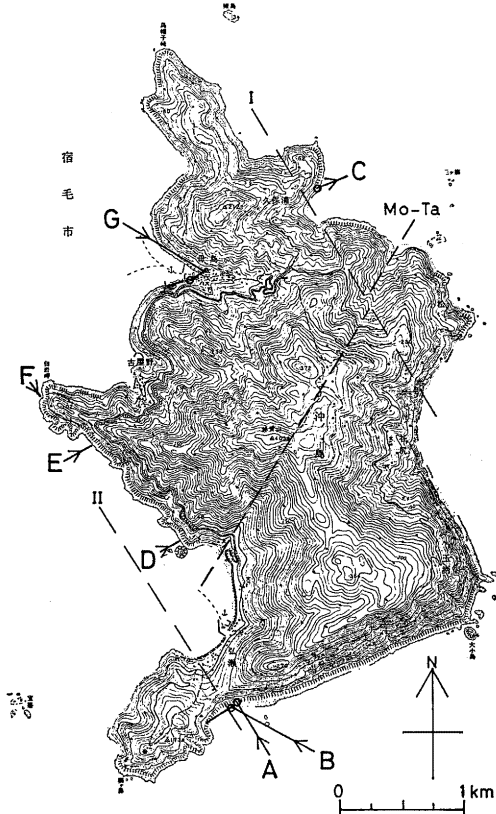
II. 沖ノ島花崗岩類に発達する節理系の特徴

沖ノ島は、四国の最南西端に位置する南北約 6.0 km、東西約 3.5 km の小島で、古くから鈴木醇 (1937)、鈴木達夫 (1938) などによって、いわゆる四万十層群を貫く花崗岩質岩石がほぼ全島に分布していることが明らかにされていた。

諏訪 (1967) は、沖ノ島に分布する花崗岩類を岩石学的にかなり詳細に研究し、次の結論を得た。沖ノ島花崗岩類は細粒・緻密・ほぼ均質な岩相を示し、島の南東部に分布して重晶石と紫蘇輝石とを含有する谷尻型と、島の北西部に分布して電気石を含有する母島型とに分類される。四万十層群は、ルーフペンダント状に妹背山—白岩岬—弘瀬北方の三角形の地域および玉柄西方にわずかに分布するのみである。母島型は四万十層群に非調和的に貫入しているが、その熱変成作用

の影響は小さい。また、母島型は谷尻型に貫入しているが、両者の貫入時期には大きな差はないと考えられる。谷尻型および母島型は、ともに K_2O および Al_2O_3 に富んでおり、地下深部で再溶融したチャーノクカイトあるいはグラニュライトを起源とするマグマが、地殻上部へ上昇することにより生成したと考えられる。なお、K-Ar 法による沖ノ島の花崗閃緑岩の黒雲母の年令は、 15 ± 2 m. y. を示している (SHIBATA and NOZAWA, 1967)。

沖ノ島花崗岩類に発達する節理系について、諏訪 (1967) は次のように述べている。“両花崗岩体 (谷尻型および母島型) とともに、2方向の顕著な節理、すなわち $N60^\circ E$ で垂直な節理と、 $N30^\circ W$ で垂直な節理と



第2図 沖ノ島の地形および図版写真の撮影位置
地形図は、国土地理院 (1975) を使用した。Mo-Ta は、諏訪 (1967) による、谷尻型と母島型両花崗岩類の境界にほぼ一致する谷地形を示す。I, II は、地形図から走向 $30^\circ W$ 、ほぼ垂直な断層である可能性が強いと考えられる。丸印は、陸上における写真撮影位置、矢印は、撮影方向を示す。撮影位置のアルファベットは、図版写真に一致する。

が発達している。ペグマタイトの貫入方向は、この節理の発達とはほぼ平行なものが多い。”

これらの節理系の発達には、沖ノ島の地形にもよく表れているように思われる。第2図に示すように、沖ノ島の大部分の海岸は、南東方向に高く、北西方向に低い傾向の高さ20~300m程度の高さの海蝕崖状の地形をなしているが、その伸びの方向は、明瞭にN60°E方向とN30°W方向が顕著である。この方向に伸びていない海岸線についても、空中写真の立体視によって詳細に観察すれば、より小規模なN60°E方向とN30°W方向の崖が配列している傾向が強く認められる。また内陸部においても、等高線はこの2方向に伸びている傾向が認められる。ただし、沖ノ島の最南東部など、部分的にはこれらの方向に伸びていない地形が見とめられることは、注意しておく必要がある。

現地調査においては、調査期間、天候および踏査可能地域などの制約により、十分な数の節理の方位を測定していないので、節理の方位の統計処理結果などは報告できない。しかし、沖ノ島花崗岩類の分布地域では、走向がほぼN60°Eで垂直な節理が最も連続よくかつ多数発達しており、それに次いでやや連続が悪くかつやや少数か、あるいはほぼ同じ程度に走向がN30°Wで垂直な節理が発達していることは確実である。船上からの海蝕崖露頭の観察によれば、これらの節理面の1辺の長さは、50m以上に及んでいる場合がある。これに対して、水平に近い節理は小規模で数が少なく、その他の方向のほぼ垂直な節理および傾斜が10~80°の節理の発達は、さらに悪い。しかし、不規則な断裂は、かなり多数認められる場合がある。

各節理系の節理の表面の状態の差異は明らかではないが、少なくとも最も卓越するほぼ直交した2方向の垂直な節理系には、横ずれを示す明らかな証拠は認められない。また、節理系の新旧関係も十分には明らかではないが、水平に近い節理系の伸展は、ほぼ垂直な節理系によって妨げられている場合が多いので、水平な節理系は垂直な節理系よりも後に生成したと考えられる。

沖ノ島にわずかに分布している四万十層群の節理系については、十分な調査をおこなっていない。しかし、船上からの観察によれば、規則性がよく解らない断裂系が存在しているほか、沖ノ島花崗岩類と同様のほぼ垂直な節理系が、場合によっては沖ノ島花崗岩類から連続して明瞭に認められる。

現地調査によって撮影した、沖ノ島花崗岩類に発達する節理系の写真の一部を、図版9~10に示す。これらの写真の撮影は、弘瀬、母島、久保浦および船上からおこなわれた。その概略の位置を第2図に示す。

III. 沖ノ島花崗岩類の節理系の成因

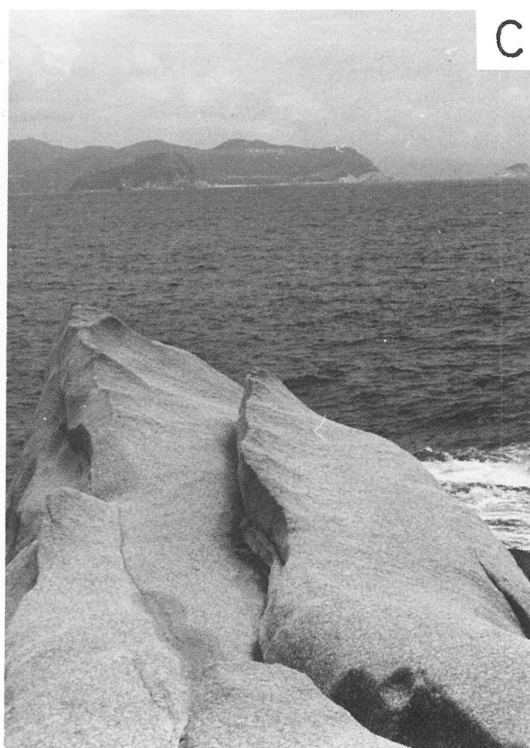
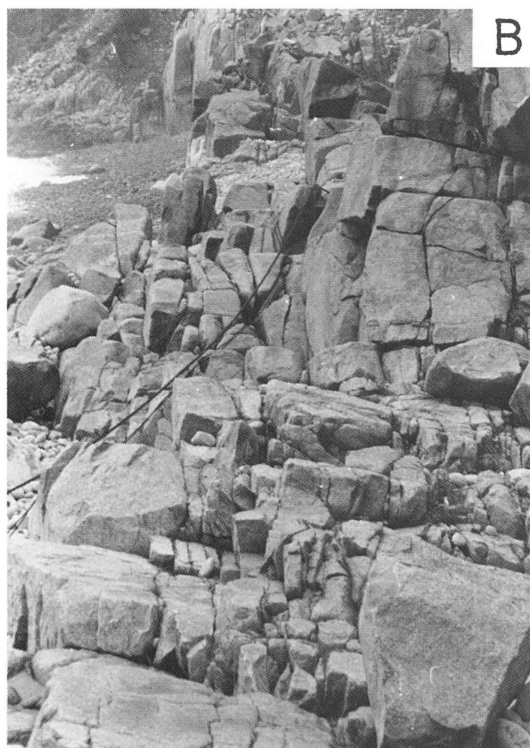
節理の成因については、1830年頃から様々な議論がある(たとえば、HODGSON, 1961)。しかし、節理の成因についての最近の考え方(たとえば、BILLINGS, 1972; 垣見, 1978)は、剪断応力によるかあるいは引張り応力による2種類の脆性破壊にまとめられる。一般に岩石においては、引張り応力による破壊は、剪断応力による破壊よりもずっと小さな力によって生じうる(たとえば、JAEGER (1964)によれば1/20以下)。

花崗岩類に発達する節理系の成因を考える場合には、堆積岩などの場合とは異なった次の2つの点に注目しておく必要がある。第1は、地下深部で発生したマグマが上昇し、貫入・固結した結果生成したと考えられる花崗岩類は、固結後でも温度が高い状態では粘性を強く保持しているため、節理系などの断裂系は、花崗岩類の冷却がある程度進んで、脆性が顕著になって初めて生成したと考えられることである。第2は、四万十帯に分布するような post-kinematic な花崗岩類(大庭, 1966)では、冷却が進んで節理系が形成されるようになるまでは、岩石の物性はほぼ均質等方的であったと考えられることである。この2つの特徴から、花崗岩類に発達する節理系については、観察される節理系が単純であれば、節理系を形成するに至った過去の応力場の復元を、比較的簡明におこなえる可能性がある。

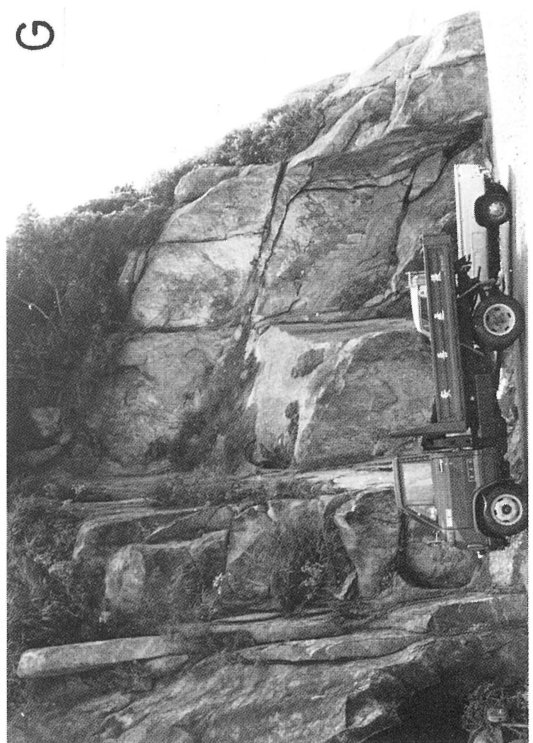
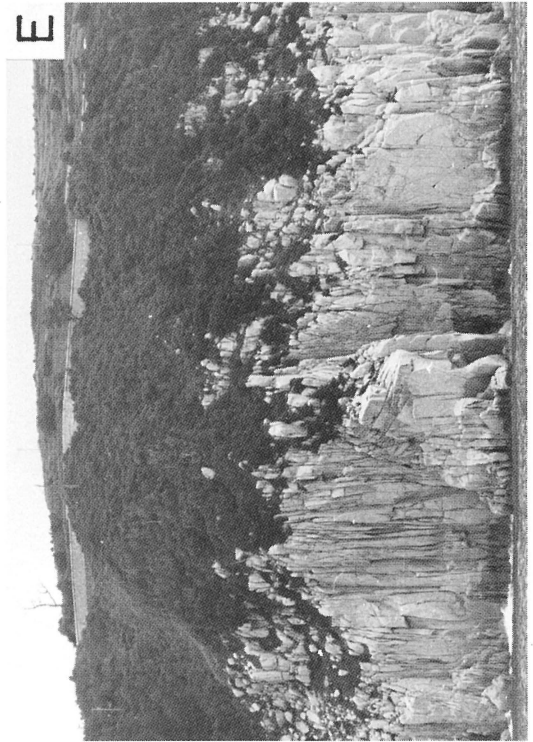
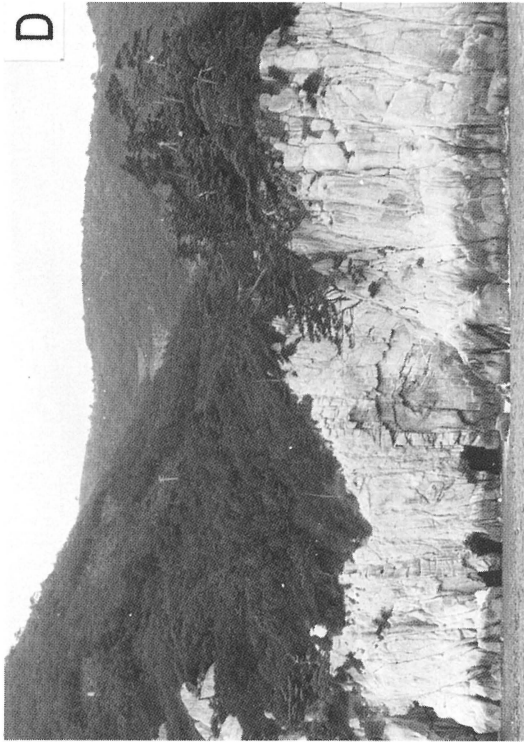
花崗岩類に発達する節理系の成因については、現在

第9図版説明

- A. 弘瀬南方のN65°E方向の花崗岩類の海蝕崖露頭。海岸線に直交する方向より撮影。走向N30°Wほぼ垂直な節理系、ほぼ水平な節理系およびその他の方向の断裂が認められる。ハンマーの柄の長さは、約40cm。
- B. 弘瀬南方のN65°E方向の花崗岩類の海蝕崖に平行に撮影。走向N60°Eほぼ垂直と、走向N30°Wほぼ垂直の2系統の節理系が発達する。
- C. 久保浦北東方の海岸における、花崗岩類の走向N70°Eほぼ垂直の節理系。対岸は柏島。



茂野 博：四国沖ノ島花崗岩類に発達する引張り節理系



茂野 博：四国沖ノ島花崗岩類に発達する引張り節理系

概略次に示す4種類のものが考えられる。まず第1は、地下ごく浅所において引張り応力によって生成する節理系で、その例としては、機械的風化による場合、氷河などの荷重の除去による場合などがあげられる。第2に、花崗岩類の冷却時には、比較的地下深部でも岩石の熱収縮によって引張り応力が生じ、これによって節理系が生成するという考え方がある(横田, 1974)。この2つの場合には、節理系が示す方位は、節理系生成時の広域応力場とはほとんど無関係であると考えられている。一方第3は、地下ある程度以上の深度においては封圧が高くなるため、生成する可能性がある節理系は、剪断応力によるもので、これによって生成する節理系が示す方位は広域応力場と密接に関係していると考えられる(たとえば, HIRANO, 1969)。これに対して第4は、節理系は本質的に後造構運動で地殻が広域的に隆起し削剝される時期に、地下比較的浅所(2~3 kmより浅)に生じる広域的な引張り応力によって生成する構造で、節理系が示す方位は、広域応力場と何らかの関係があるとする考え方である(PRICE, 1959, 1966; 垣見, 1978)。

沖ノ島花崗岩類に卓越する、走向 N60°E で垂直および N30°W で垂直のほぼ直交する2方向の節理系については、上に述べた4種類の成因のどれによって生成したかを判定する確実な証拠は発見できなかった。しかし、次に述べる理由によって、沖の島花崗岩類に発達する節理系については、PRICE (1959) などが述べている第4の考え方が、最も無理なく現象を説明できると判断される。

第1の成因によって生成する節理系は、一般に地表面ないし露岩表面にはほぼ平行に生成するものであり、沖ノ島花崗岩に卓越する垂直な節理系とはまったく異なっている。

次に第2の成因であるが、たしかに花崗岩類は、その固結後は冷却によって体積が減少するため(CLARK,

1966)、粘性流動が小さければ、花崗岩類の周辺および内部は引張り応力が卓越する場となる可能性が高いと考えられる。ところで、沖ノ島花崗岩類の貫入・固結時の岩体の形は、現在地表で認められる沖ノ島花崗岩類の分布および均質な岩相からみて、岩株状に近い形態であったと考えると問題がないと思われる。したがって、冷却によって沖ノ島花崗岩類に引張りによる節理系が生成したとすれば、広域応力場が $\sigma_v \approx \sigma_{H_1} \approx \sigma_{H_2}$ の静岩圧状態に近い場合には、節理系は冷却速度が大きくて最も早く延性物質から脆性物質に変化し、かつ熱勾配が最も急激な花崗岩類と被貫入岩との境界付近から発生し、この境界に直交する放射状および境界に平行なほぼ同心円状の節理系が卓越する傾向にあるはずである。しかし、前述したように現在沖ノ島花崗岩類に観察される節理系は、これとはまったく異なっており、冷却のみによってその生成を説明することは困難である。

第3の成因である広域応力場に関係した剪断応力によっても、沖ノ島花崗岩類の節理系の生成を説明できる可能性は低い。この理由は、沖ノ島花崗岩類に発達するほぼ直交する2方向のほぼ垂直で、非常に連続がよくしかも横ずれがほとんど観察できない節理系を形成するような、圧縮性の広域応力場を考えることがほとんど不可能に近いことである。この判断は、後述するように、新第三紀後期の四万十帯は広域的に圧縮応力が卓越する場ではなかったという報告とも一致している。

最後に第4の成因について考える。PRICE (1959) は、節理系を形成するに至った岩石は、地下深部の条件でほぼ理想的なビンガム物体としてとりあつかえるとして、次のように議論している。沈降・堆積過程で地下深部にもたらされた岩石は、 σ_v が大きくなるにしたがってポアソン比が2に近づくとともに、構造運動によって水平方向に弾性ひずみが残留する。ここで

第 10 図 版 説 明

- D. 弘瀬北西方の N30°W 方向の花崗岩類の海蝕崖。走向 N60°E ほぼ垂直と、ほぼ水平の2系統の節理系が発達し、洞穴を生じている。船上より撮影。
- E. 白岩岬南東方の N45°W 方向の花崗岩類の海蝕崖。走向 N60°E ほぼ垂直と、走向 N30°W ほぼ垂直の2系統の節理系が発達しているほか、垂直に近い不規則な断裂も認められる。船上より撮影。
- F. 船上、北西方向より見た白岩岬付近。四万十層群に上方と左右を囲まれた、花崗岩類の海蝕崖。走向 N30°W に近いほぼ垂直な節理系が発達する。
- G. 母島西方の道路沿いの花崗岩類の露頭。およそ N60°E 方向から撮影。走向 N70°E ほぼ垂直と、ほぼ水平の2系統の節理系が発達するほか、玉ねぎ状の風化が認められる。

まず、地殻の隆起・削剝が開始する直前には、広域応力場は $\sigma_v \approx \sigma_{H_1} \approx \sigma_{H_2}$ の静岩圧状態に近く、残留したひずみによってわずかに σ_{H_1} が σ_{H_2} より大きい場合を考える。地殻が隆起・削剝の場に転じると、地球の中心から遠ざかることにより、一定立体角を占める面積が広がるにしたがって、広域的に水平方向に均一な引張り応力 (σ_U) が働き始める。この σ_U は、地殻が隆起するにしたがって次第に大きくなり、その他の要因によって広域応力場に変化がない限り、 σ_{H_1} および σ_{H_2} を圧縮から引張り応力に変換してしまう結果、引張り破壊が起こり、節理を生じる。この場合、まず最初に生成するのは、地下深部での残留ひずみが最も小さかった方向、つまり地下深部からこの深度まで σ_{H_2} となっている方向に対して垂直な節理のはずである。この方向の節理が生成してしまうと、 σ_{H_2} 方向の引張り応力は解放されるのに対し、 σ_{H_2} に直交するこれまで σ_{H_1} であった方向の引張り応力は残留するので、主応力軸の変換が起こり、これまでの σ_{H_2} 方向の主応力は σ_{H_1} に、 σ_{H_1} 方向の主応力は σ_{H_2} になる。さらに地殻の隆起・削剝が進んで新しい引張り破壊の条件に達すると、 σ_{H_2} に垂直な節理、すなわち先に生成した垂直な節理に直交する垂直な節理が生成し、主応力軸の変換が起こって、新しい σ_{H_2} の方向は最初の σ_{H_2} の方向にふたたび一致することとなる (PRICE, 1959, Fig. 3)。地殻の隆起・削剝過程が続いている限り、この直交する2方向の垂直な節理系は次々に形成されていくと考えられる。

これに対して、地下深部の初期条件で完全に $\sigma_2 = \sigma_{H_1} = \sigma_{H_2} = \sigma_3$ の場合には、地殻の隆起・削剝によって、広域的に水平方向の均一な引張り応力 (σ_U) が次第に大きくなるにしたがって、 $\sigma_1 = \sigma_v$ に平行なあらゆる方向の垂直な節理が生成することになる。一方、地下深部の初期条件で、構造運動によって残留した弾性ひずみにより、広域的に水平圧縮応力が卓越する場合には、地殻の隆起・削剝にしたがってまず最初に剪断破壊を生じることがあるが、その後は前述した場合と同様の、引張り応力による直交する2方向の垂直な節理系が生成すると考えられる (PRICE, 1959, Fig. 4)。

上述した PRICE (1959) などの考え方は、節理系を形成するに至った岩石を、地下深部の条件でもほぼ理想的なビンガム物体としてとりあつかっていることに、問題を含んでいるように思われる。特に沖ノ島花崗岩類の場合には、マグマから固結した後でもまだ温度が高い状態では、粘性がかなり顕著で、地殻の隆起・削

剝がかなり急激であったとしても、地下深部での構造運動による弾性ひずみを保持し続けていた可能性は低いと考えられる。

この PRICE (1959) などの議論の欠点を補うためには、四万十帯の隆起・削剝によって地表に近づけたがって、沖ノ島花崗岩類はほぼ理想的なビンガム物体としての性質が顕著になったとする考え方をとるのがよい。ただしこの場合には、四万十帯の隆起・削剝の時期の少なくとも後期には、何らかの要因によって、水平方向の一方向には微弱な広域応力 (σ_Y) が、長期に渡って存在しており、地殻の隆起・削剝によって生じる水平方向の均一な引張り応力 (σ_U) に加算されて、 σ_{H_1} が σ_{H_2} と等しくない広域的な引張り応力場が発生し、これによって沖ノ島花崗岩類にほぼ直交する2方向の垂直な節理系が生成したと考えなければならない。この考え方は、次の議論から PRICE (1959) などの考え方よりも事実に近いと判断される。

地殻の隆起・削剝過程によって、均質等方的な物性を示す岩石に漸次生成していく、直交する2方向の垂直な引張り節理系については、岩石の引張り破壊強度が解っており、各方向の節理系の密度および節理系の生成の開始から終結までの時間が解れば、節理系を形成するに至った時間平均的な引張り応力の強さを計算することができると考えられる。この計算の結論のみを述べれば、最も卓越する節理系に垂直な方向は、最も引張り応力が強い σ_3 の方向であったと考えられる。

沖ノ島花崗岩類に発達している節理系については、今後より詳細な検討を必要とするが、前述したように走向 N60°E 垂直の節理系の方が、走向 N30°W 垂直の節理系より卓越している傾向が強い。このことは、四万十帯の隆起・削剝の時期に、 σ_3 が N30°W 水平方向を向いていたことを示していると考えられる。ところで、この方向は、沖ノ島付近での西南日本弧に直交する方向とほぼ一致しており、後述するように、沖ノ島周辺の四万十帯の沈降・堆積の時期に σ_1 となっていた方向に近い。つまりこのことは、四万十帯の隆起・削剝の開始時期頃に、広域応力場の主応力軸の変換があったことを示している。これは、PRICE (1959) が述べた、構造運動によって残留した弾性ひずみが、節理系の卓越する方向を決定したとする考え方では説明できない現象である。

沖ノ島花崗岩類に発達する直交する2方向の垂直な節理系は、このような四万十帯の隆起・削剝による広域的な引張り応力場、および何らかの要因による広

域的な微弱な応力場のみならず，前述した花崗岩類の節理系の第2の成因である冷却に伴う熱収縮による引張り応力場によって，その生成がある程度助長された可能性がある。沖ノ島花崗岩類において，節理系の方向に平行に貫入しているペグマタイトが存在していること（諏訪，1967）は，沖ノ島花崗岩類がまだ比較的高温であった時期に，節理系の生成時と同じ方位をとる広域応力場が存在していた可能性を示している。なお，沖ノ島花崗岩類に存在するほぼ水平方向の節理系については，前述した第1の成因によって生成した可能性が指摘できる。

IV. 花崗岩類の節理系からみた，新第三紀後期四万十帯の広域応力場

四万十帯は，白亜紀初期以降堆積の場を次第に南方へ移動させながら，フレッシュ的な堆積作用をおこなない，かつ島弧にほぼ平行な方向を軸とする圧縮性の構造を形成していたが，古第三紀の終りないし新第三紀の始め頃，明瞭に上昇の場に転じ，地殻物質に富んだ浅所貫入型の post-kinematic な花崗岩類および酸性火山岩の活動（大庭，1966）をみた（市川ほか，1970）。これらの花崗岩類および酸性火山岩などの現在の分布は，島弧に平行な方向および直交する方向に配列する傾向が強い，広域的ではあるが散点的なもので，これらに伴うホルンフェルスの伸長方向や小岩体の配列方向も，島弧に平行な方向あるいは直交する方向に一致する傾向にある（野沢，1975）。K-Ar法によって黒雲母あるいは全岩などによって測定されたこれらの花崗岩類および酸性火山岩などの年令は，すべて 14 ± 1 m. y. を示し，非常によく一致している（野沢，1968；柴田，1978）。

四万十帯に分布するこれらの花崗岩類のいくつかにも，沖ノ島と同様に，ほぼ直交する2方向の垂直な節理系が発達している。

佐藤・長浜（1979）によれば，屋久島花崗岩類では，屋久島南西地域において走向 NNE および WNW のほぼ直交する2方向の垂直な節理系が非常によく発達している。この2方向の節理系が屋久島花崗岩類全体に発達していることは，花崗岩類が分布している屋久島の全域で，河川など地形の伸びの方向が $N30 \sim 45^\circ E$ および $N45 \sim 60^\circ W$ 方向に顕著なことから予想される。なお，屋久島南西部では，花崗岩類が貫入した四万十層群の砂岩，泥岩にも，花崗岩類の節理が示す方位に近い走向 $N50^\circ E$ ，傾斜 70° 程度の節理や剪開が発達しており，多くの場合石英脈によって充てんされている

（佐藤・長浜，1979）。

野沢・太田（1967）によれば，内之浦地域における南大隅花崗岩類の節理系の方位には，断層などに関係した局所的な変化が存在するほか，広域的にもかなりの変化が認められるが，走向 $N30^\circ W$ で垂直なものが最も顕著である。これに対して，南大隅花崗岩類の南東縁辺部では， $N30^\circ E$ 方向の節理系が著しく，アプライト脈の貫入もこの方向が多い（野沢，1975）。

一方，小畑（1961）は，航空写真を用いて南大隅花崗岩類の分布地域全域で，大部分は節理系から，一部は断層から発達したと考えられる多数の線状の地形を選び出しているが（小畑，1961，Fig. 3），その方向は主に $N30 \sim 60^\circ E$ である。内之浦地域の $N30^\circ W$ 方向の節理系が，この $N30 \sim 60^\circ E$ 方向の節理系に直交していると判断するには今後の検討が必要であるが，南大隅花崗岩類全体にほぼ直交する2方向の垂直な節理系が発達している可能性は高いと思われる。

四万十帯の花崗岩類に発達するこのようなほぼ直交する2方向の垂直に近い節理系は，前述した沖ノ島花崗岩類の場合と同様に，花崗岩類が貫入・固結し，さらに冷却が進んで花崗岩類に脆性が明らかとなった後，四万十帯の隆起・削割によって比較的地下浅所に生じた広域的な引張り応力場によって生成した可能性が高いと考えられるが，これらの節理系の示す方位は注目に値すると思われる。すなわち，卓越する直交した2方向の垂直な節理系は，沖ノ島から南大隅，屋久島へと南西に行くに従って，1方向は西南日本弧および南西諸島弧の方向にほぼ平行な ENE から NE，NNE へと反時計回りに変化し，もう1方向は島弧にほぼ直交する NNW から (NW)，WNW へと同様に変化している。また，少なくとも沖ノ島および南大隅花崗岩類では，島弧に平行な方向の節理系の方がより卓越する傾向にある。このことは，第III章で沖ノ島花崗岩類について述べた，四万十帯において花崗岩類が貫入・固結した後の，新第三紀後期の四万十帯の隆起・削割の時期には，島弧に直交する方向および平行な方向に，広域的な最小圧縮主応力 (σ_3) と中間圧縮主応力 (σ_2) の方向がそれぞれ一致していたという考え方を支持している。

最近，白亜紀から現在までの四万十帯の運動を，プレートテクトニクスの立場から理解しようとする試みが，数多くおこなわれている。たとえば，堀越（1972，1976）は，四万十帯の花崗岩類および酸性火山岩は，プレートの沈み込みに伴って発生する前線型のマグマの活動によってではなく，プレートの沈み込みが静止した後の深成型のマグマの活動によって生じ，その

時期には四万十帯は静岩圧状態の広域応力場にあったと述べている。同様に、松田 (1977) は、地殻内の水平方向の圧縮主応力が垂直方向の圧縮主応力よりも大きい応力状態で生じたテクトニクスを短縮テクトニクスとし、その逆を伸長テクトニクスと定義して、四万十帯は古第三紀には南北方向の強～弱短縮テクトニクスであったが、中新世以降には南北方向の微弱テクトニクスとなり、第四紀になって北西—南東方向の強い短縮テクトニクスに転じたとしている。

この報告で述べた、四万十帯の花崗岩類に卓越する節理系からの、新第三紀後期四万十帯の広域応力場の考察は、これらの議論とかなり整合的であるが、地下比較的浅所では、島弧の伸びに直交する方向に最大の引張り応力が働いていたと指摘する点で異なっている。

残念ながら、このような広域応力場を形成した地質学的要因、第III章で述べたところの地殻の隆起・削剝以外の何らかの他の広域的な要因が何であるかは、現在の知識では明らかではない。今後、四万十帯における花崗岩質マグマの発生・上昇・貫入・固結・冷却、岩脈の生成の問題とも関連して、さらに検討を進める必要があると思われる。

V. ま と め

西南日本外帯、四万十帯に分布する四国の沖ノ島花崗岩類には、すでに諏訪 (1967) が記載し、地形にもよく表れているように、走向 $N60^{\circ}E$ ほぼ垂直および走向 $N30^{\circ}W$ ほぼ垂直の直交する2方向の節理系が非常によく発達している。これらの節理系の写真を、図版9, 10に示した。

沖ノ島花崗岩類に発達するこれらの節理系は、その分布および産状の特性から、花崗岩類の貫入・固結・冷却に伴う熱収縮による引張り応力、あるいは広域的な圧縮応力場による剪断応力によって生成したのではなく、PRICE (1959) などが述べているように、地殻の広域的な隆起・削剝の時期に地下比較的浅部に広域的に生じる、引張り応力場によって生成したと結論される。

沖ノ島花崗岩類と同様に、四万十帯に分布する南大隅および屋久島花崗岩類にも、西南日本弧あるいは南西諸島弧に平行な方向と直交する方向の、広域的な引張り応力場によって生成したと考えられる互いに直交する2方向の垂直な節理系が発達しているようである。

さらに今後の検討を必要とするが、2方向の節理系のうち島弧に平行な節理系は、より卓越する傾向が認められる。このことは、四万十帯において、白亜紀～

古第三紀の沈降・堆積・変形の時期に、広域応力場の最大圧縮主応力 (σ_1) 軸に一致していた島弧に直交する方向が、花崗岩類の貫入・固結後の新第三紀後期の隆起・削剝の時期には、広域応力場の最小圧縮主応力 (σ_3) 軸に一致する変化が存在したことを示していると考えられる。

花崗岩類などに発達するこのような引張り節理系は、剪断節理系と同様に過去の広域応力場の推定に利用できるほか、地熱資源にも関係して、熱水の通路あるいは貯留層としても重要である可能性があり、今後多方面からの研究が必要であると思われる。

文 献

- BILLINGS, M. P. (1972): *Structural geology, third ed.*, 606p., Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- CLARK, S. P., JR. (1966): *Handbook of physical constants, revised ed.*, 587p., Geol. Soc. Amer. Inc., Memoir 97, New York.
- 平林照雄 (1965): 松本盆地西側の花崗岩の節理系と断層系. 地質雑, 71, 18-31.
- HIRANO, M. (1969): Joint system of the Rokko mountain range, —Tectonics of uplifted massif in the Kinki district, Japan(1)—. *Jour. Geosci. Osaka City Univ.*, 12, 25-44.
- 広川 治・吉田 尚・今井 功・山田直利ほか編 (1978): 100万分の1日本地質図, 第2版. 地質調査所.
- HODGSON, R. A. (1961): Regional study of jointing in Comb Ridge-Navajo Mountain area, Arizona and Utah. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 45, 1-38.
- 垣越 毅 (1972): 日本列島の造山帯とプレート. 科学, 42, 665-673.
- (1976): 花崗岩生成のテクトニクスと鉄床. 鉱山地質持別号, 7, 1-14.
- 市川浩一郎・藤田至則・島津光夫 (1970): 日本列島地質構造発達史. 232p., 築地書館, 東京.
- 伊藤英文・岡 行俊・藤田和夫 (1976): 縮みゆく日本列島, 一実験と実測とフィールドからみた岩の力学一. 科学, 46, 745-754.
- JAEGGER, J. G. (1964) (飯田汲事訳, 1968): 弾性・破壊・流動論, 一工学および地球科学への応用— 220p., 共立出版, 東京.
- 垣見俊弘 (1978): 地質構造の解析, 地学双書 22. 240p., 地学団体研究会, 東京.
- 笠原慶一・杉村 新編 (1978): 変動する地球 I, 一現在および第四紀—, 岩波講座地球科学 10. 296p., 岩波書店, 東京.
- 衣笠善博・垣見俊弘・平山次郎 (1969): 房総半島東海岸の小断層. 地調月報, 20, 13-38.
- 国土地理院 (1973): 日本とその周辺. 縮尺300万分の1.
- 国土地理院 (1975): 2万5千分の1地形図, 母島.
- 松田時彦 (1977): プレート・テクトニクスからみた新第三紀・第四紀の変動. 地団研専報, (20), 213-225.
- 中村一明 (1969): 広域応力場を反映した火山体の構造, 一側火山の配列方向—, 火山, 第2集, 14, 8-20.
- 野沢 保 (1968): 西南日本外帯およびその延長地域における花崗岩質岩石の同位元素年令, 1968年における総括と火成作用北上説. 地質雑, 74, 485-489.

- (1975)：紀伊四国九州における西南日本外帯花崗岩の分布についての予察．地団研専報，(19)，209-212.
- ・太田良平(1967)：内之浦地域の地質，地域地質研究報告(5万分の1図幅)．37p.，地質調査所.
- 小畑 浩(1961)：大隅半島地形誌．資源科学研究所彙報，54，151-160.
- 大庭 昇(1966)：四万十累帯西部における花崗岩質岩類の地質学的意義．鹿児島大学理学報告，(15)，13-24.
- PRICE, N. J. (1959)：Mechanics of jointing in rocks. *Geol. Mag.*, 96, 149-167.
- (1966)：Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock. 176p., Pergamon Press Ltd., Oxford.
- 笹田政克(1978)：地熱とカコウ岩．地質ニュース，(284)，18-24.
- 佐藤岱生・長浜春夫(1979)：屋久島西南部地域の地質，地域地質研究報告(5万分の1図幅)．47p.，地質調査所.
- 柴田 賢(1978)：西南日本外帯における第三紀花崗岩貫入の同時性．地調月報，29，51-54.
- SHIBATA, K. and NOZAWA, T. (1967)：K-Ar ages of granitic rocks from Outer Zone of Southwest Japan. *Geochem. Jour.*, 1, 131-137.
- SMITH, M. C., AAMODT, R. L., POTTER, R. M. and BROWN, D. W. (1975)：Man-made geothermal reservoirs. *Proc. 2nd. U. N. Symp. Development and Use of Geothermal Resources*, 1781-1787.
- 諏訪兼位(1967)：四国西南端沖ノ島花崗岩類．柴田秀賢教授退官記念論文集，86-93.
- 鈴木 醇(1937)：西南日本外帯及び琉球列島に発達せる花崗岩質岩石に就いて．地質雑，44，625-660.
- 鈴木達夫(1938)：7万5千分の1地質図幅「宿毛」および同説明書．31p.，地質調査所.
- TOMODA, T. (1973)：Maps of free air and Bouguer gravity anomalies in and around Japan. Univ. Tokyo Press.
- 横田修一郎(1974)：滋賀県“湖南アルプス”における花崗岩中の節理系．地質雑，80，205-214.